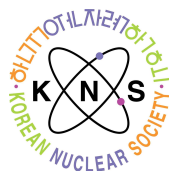


원자력 안전연구 기술수목 보고서

2018. 12

원자력 안전연구 기술수목 보고서 작성 특별위원회



한 국 원 자 력 학 회

발 간 문

본 보고서는 한국원자력학회 산하에 2018년 5월 1일부터 2018년 11월 30일까지 한시적인 활동을 목적으로 설치된 '원자력 안전연구 기술수목 보고서 작성 특별위원회' 활동의 결과물로 발간되었습니다.

본 특별위원회 활동 및 동 보고서의 발간에 자발적으로 참여한 회원들은 다음과 같습니다:

- 총괄 운영
 - 위 원 장: 김용균
 - 추진위원: 김홍표, 김경두, 제무성, 김봉환, 나만균, 유종성, 양준언, 황원태, 정연섭
 - 총괄간사: 강경호
- 원자력 열수력 분과
 - 분과장: 설광원
 - 간 사: 배성원
 - 위 원: 정해용, 정용훈, 조형규, 김경두, 윤한영, 최기용, 오덕연, 허병길, 하상준, 이정익, 이상원, 최재돈, 이규천
- 원자력 안전 분과
 - 분과장: 임호곤
 - 간 사: 이승준
 - 위 원: 제무성, 김만철, 임학규, 하광순, 김균태, 김도형, 나장환, 석호
- 원자력 재료 분과
 - 분과장: 장창희
 - 간 사: 김현길
 - 위 원: 김지현, 류호진, 김진원, 김홍표, 이봉상, 양재호, 김원주, 강성식, 이주석, 유완, 유종성, 김홍덕
- 원자력 I&C 분과
 - 분과장: 김창희
 - 간 사: 정경민
 - 위 원: 나만균, 허균영, 이현철, 성승환, 김영미, 정연섭, 윤재희
- 방사선 방호 분과
 - 분과장: 김봉환
 - 간 사: 이정일
 - 위 원: 황원태, 김찬형, 김광표, 이희석, 권정안, 김정인, 김순영, 김경민
- 자문 및 검토위원
 - 노희천, 박홍준, 백원필, 성풍현, 손동성, 양지원, 염학기, 정재준, 한승재(가나다 순)

목 차

요약문	7
-----------	---

제1장 기술수목 작성 개요

1. 보고서 작성 배경	11
2. 원자력 안전 기술 확보 현황	15
3. 국내외 환경 분석	24

제2장 기술수목

1. 원전 안전성 향상 기술	33
2. 중소형 원자로 안전 기술	153
3. 방사선 안전 관리 기술	235
4. 공통기반 기술	311

제3장 우선 확보 기술

1. 우선 확보 기술	451
2. 결론 및 정책 건의사항	487

【부록-1】 특별위원회 구성 및 활동경과	491
------------------------------	-----

요 약 문

- 원자력 안전 분야의 기술수목보고서를 작성하고 창조적인 중장기 발전전략을 수립하고자 한국원자력학회 산하에 ‘원자력 안전연구 기술수목보고서 작성 특별위원회’를 운영함.
- 다양한 세대를 포함하는 산학연 전문가들로 특별위원회를 구성함.
 - 한시적 활동 조직으로서, 학회 산하의 유관 연구부회(핵연료 및 원자력재료, 원자력 열수력, 원자력 안전, 방사선 방호, 원자력계측제어, 인간공학 및 자동원격 연구부회)의 긴밀한 연계 하에 운영
- 원자력 안전 분야의 핵심기술을 분류·정리하여 기술수목도를 작성하고 창조적·융합적인 미래지향형 연구개발 전략을 수립하되, 다음의 4가지 기술을 최상위 기술로 선정한 후 하위 5개 단계까지의 기술수목을 정리함.
 - 원전 안전성 향상 기술; 중소형 원자로 안전기술; 방사선 안전 관리 기술; 공통기반 기술
- 핵심 기술의 분류 및 정리, 국내외 기술개발 수준 및 현황 분석, 미래수요 기술의 발굴, 핵심기술 확보를 위한 연구개발 수행체계 도출 등을 수행함.
- 기술수목 중에서 기술적인 중요성과 안전성 향상에 효과가 크고 국민 안심에 기여할 수 있는 기술을 ‘우선 확보 기술’로 명명하고 총 24개를 선정하여 제시함.
- 24개의 ‘우선 확보 기술’ 중에 기술 개발의 파급효과와 시급성 및 안전성 향상 효과가 뚜렷한 기술을 ‘대표 우선 확보 기술’로 명명하고 총 8개를 선정하여 제시함. 8개의 ‘대표 우선 확보 기술’은 다음과 같음.
 - 사고저항성 핵연료 개발
 - 재료 및 기기 열화손상 제어기술
 - 가상 원자로 해석 기술
 - 수출형 신형 원자로 피동 핵심 기술 개발 및 검증
 - 첨단 리스크 평가기술 개발
 - 중대사고 현상규명 및 평가 기술
 - 방사선비상대응 기술 향상
 - 중대사고 환경 계측/제어 및 무인대응 기술

○ 8개의 ‘대표 우선 확보 기술’ 을 제외한 ‘우선 확보 기술’ 은 다음과 같음.

- 폐로원전 해체 재료를 활용한 경년열화 실증시험
- 원전 기기/부품 건전성 향상 소재 기술
- 대형냉각재 상실사고(LBLOCA) 원천적 배제
- 다중고장사고 대비 중대사고 예방 기술
- 다중고장사고 해석 방법론 및 검증
- 혁신형 시스템 설계코드 및 방법론 개발
- 구조물 및 기기 내진성능평가 기술
- 사고대응 인적수행도 평가 및 향상 기술
- 화재위험도 저감 기술
- 신개념 중대사고 대처설비
- 핵의학영상 품질관리 및 정확도 향상 기술
- 가속기 방사선안전 평가 및 규제 표준 기술
- 비정상 시 피폭 방사선량 복원체계 및 위해도 평가 기술
- 기기 및 계측제어 계통 안전성 향상 기술
- 사이버보안 대응 기술
- 사고예방 인적수행도 향상

□ 특별위원회 활동의 결론 및 정책 건의사항을 다음과 같이 정리하였음.

- 원자력안전연구 기술수목보고서는 기술적으로 도달 가능한 안전 확보의 수준을 ‘사고가 발생하더라도 주민 대피가 불필요한 정도’ 로 설정하였으며, 이 수준을 확보하기 위하여 필요한 요소 기술을 체계적으로 정리하였음.
- 특별위원회 활동을 통해 원자력 안전을 확보하기 위한 기술적 해결방안을 제시하였으며 적절한 투자와 인력양성을 통하여 선도적인 기술개발이 이루어지면, 우리나라가 세계적으로 원자력 안전의 First Mover로서의 위치를 선점할 수 있는 기회가 될 것으로 기대됨.
- 24개의 우선 확보 기술들은 안전 현안의 해소와 국민 안심을 위하여 신속히 국가 정책에 반영하고 개발에 착수하여야 할 것임. 원자력 안전은 해당 전문가들만의 문제가 아니라 국가와 국민에게 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 공공성을 가지므로 필요기술 확보와 인력양성을 위하여 민관이 공조하고 산학연이 협조하는 체계를 공고히 유지하여야 함.

원자력 안전연구 기술수목보고서 작성 특별위원회 활동 개요

비전	국민이 안심할 수 있는 원자력 안전 기술 확보		
목표	원자력 사고에도 주민 대피가 필요 없는 안전 수준을 달성할 수 있는 발전 전략 수립		
성과 목표	<ul style="list-style-type: none"> 원자력 안전연구 분야의 핵심 기술 분류 및 정리를 통한 기술수목보고서 작성 중장기 기술개발 확보 체계 및 연구 프로그램 도출: 기술 수요조사 기반 핵심 기술 확보를 위한 추진전략 수립 및 기술 확보 우선순위 선정 국가적 원자력 정책 및 연구개발 전략 수립 등에 활용 가능한 정책적 제언 도출 		
추진 전략	<ol style="list-style-type: none"> 국내외 기술개발 계획 및 주요 연구개발 로드맵의 분석 국내외 환경 변화 및 주요 연구 성과의 분석을 통한 시사점 도출 산학연 전문가들의 기술개발 수요요청서 분석을 통한 계층적 기술개발 체계 수립 특위 활동 비전에 부합하는 기술개발 확보 체계 및 연구 프로그램 도출 5개 연구부회 별 분과위원회를 운영하여 기술수목도 작성 		
분야별 핵심 기술 도출	원전 안전성 향상 기술	F4 운전성능 및 시스템 건전성 향상 기술 F5 설계기준사고 대처능력 향상 기술 F6 원전 중대사고 예방 기술 F7 원자로건물 건전성 유지 기술	
	중소형 원자로 안전기술	F4 일체형 가압경수로 안전 기술 F5 연구로 안전성 향상 기술 F6 소듐냉각고속로 안전 기술 F7 고온가스로 안전 기술	
	방사선 안전 관리 기술	F4 사용후 핵연료 안전 관리 기술 F5 방사성 폐기물 관리 시설 안전성 향상 기술 F6 의료 방사선 안전 기술 F7 가속기 방사선 안전 기술 F8 생활주변 방사선 관리 기술	
	공통 기반 기술	F4 외부재해 대비 기술 F5 종합 원자력 해석/평가 기술 F6 환경 및 개인 방사선 방호/방재 기술 F7 안전성 향상 혁신 기술	

제1장 기술수목 작성 개요

1

보고서 작성 배경

1.1 추진 필요성

○ 추진 배경

- 원자력 에너지 이용의 지속가능성 유지에 필수적인 원자력 시설의 안전성 확보를 위해서는 원자력 안전 분야의 핵심 기술의 유지 및 발전, 그리고 미래수요에 부합하는 원천기술의 확보가 매우 중요하며, 이를 위한 중장기적 발전전략 수립이 필요함.
- * 원자력 안전연구 분야의 주요 기술을 분류, 정리하여 기술수목도를 작성한 후 원자력 안전성 향상에 필수적인 핵심 기술을 도출하고자 함.
- 미래의 환경 변화 및 대내외 현안에 적절히 대응하기 위해서는 산·학·연 전문가들에 의해 미래지향적 관점에서 체계적인 기술개발 전략을 수립하고, 이를 국가적 정책에 반영하려는 노력이 매우 중요함.
- * 가동 원전의 안전성 증진과 안전성이 대폭 향상된 수출형 원전의 경쟁력 강화에 필요한 원자력 안전 분야의 핵심기술 확보 전략을 수립함.

○ 환경 분석

- 후쿠시마 원전 사고 이후 원자력 시설의 안전성 확보에 대한 대중의 우려를 불식시키고, 원전 운영 비리로 인해 추락한 대국민 신뢰 회복을 위한 적극적인 노력이 더욱 요구되고 있음.
- 꾸준히 증가하는 원자력 발전 수요 및 세계 시장 요구에 적극 대응하기 위해서는 미래수요 기술의 선도적 확보 및 이의 실현에 필요한 기술개발 전략을 수립하는 것이 필요함.
- * 원자력 선진국(미국, 프랑스, 일본 등)을 따라잡는 추격자형 접근에서 벗어날 필요가 있음.
- * 상용 원전기술 후발국(중국 등)의 급속한 성장도 미래의 위험요소임.

○ (추진 방법) 유관 기관 전문가들의 유기적 소통창구 역할을 할 수 있는 협의체 활동을 통해 원자력 안전 분야의 기술수목을 정리하고 창조적인 중장기 발전전략을 수립하고자 함.

- 이를 위해 한국원자력학회 산하에 '원자력 안전연구 기술수목보고서 작성 특별위원회'(이하 '특별위원회'라 칭함)를 설치, 운영하며, 5개 안전 관련 연구부회의 다양한 세대를 아우르는 산학연 전문가들로 특별위원회를 구성함.

1.2 특별위원회 운영

- 원자력 안전 분야의 기술수목보고서를 작성하고 중장기 발전전략을 수립하기 위해 산학연 전문가들로 구성되는 특별위원회를 운영함.
 - (운영 목적) 원자력 안전 분야의 기술수목보고서를 작성하고 이를 기반으로 창조적인 중장기 발전전략을 수립하기 위해 관련 전문가들 간의 유기적인 소통창구를 확보함.
 - * 원자력 안전 분야의 주요 기술을 분류, 정리하여 기술수목도를 작성하며 이를 기반으로 원자력 안전연구의 장기 비전 설정, 핵심 요소기술의 정의, 핵심기술 확보를 위한 연구개발 추진전략 수립 등을 수행함.
 - (구성 및 운영) 핵연료 및 원자력재료, 원자력 열수력, 원자력 안전, 방사선 방호, 원자력계측제어, 인간공학 및 자동원격 연구 분야의 산·학·연 전문성이 모두 포함되도록 위원회를 구성하여 안전연구 분야의 기술수목을 종합적으로 작성하고 창조적·융합적 발전전략을 수립하기 위해 학회 산하에 특별위원회를 설치, 운영함.
 - * 특별위원회의 구성 및 활동 경과는 부록-1을 참고
 - (성과 목표) 원자력 안전 분야의 주요 기술을 분류, 정리하여 기술수목보고서를 작성하고 이를 기반으로 안전연구의 장기 비전의 설정, 핵심기술 수요의 발굴 및 연구개발 전략의 수립을 통해 국가적 원자력 정책으로 승화될 수 있는 제언을 도출함.
 - * 가동중 원전의 안전성 증진 및 안전성이 향상된 신형 및 수출형 원전의 구현에 필요한 새로운 원자력 기술의 개발 및 인허가와 관련된 안전연구의 전략적 추진을 위한 국가 차원의 중장기적 기술 확보 전략을 제시하고, 이의 달성을 위한 체계적인 연구 수행계획을 수립함.
- 특별위원회 활동을 위한 기본적인 전략은 다음과 같음:
 - (활동 범위) 원자력 안전 분야의 핵심기술을 분류·정리하여 기술수목도를 작성하고 창조적·융합적인 미래지향형 연구개발 전략을 수립하되, 다음의 4가지 기술을 최상위 기술로 선정한 후 하위 5개 단계까지의 기술수목을 정리함.
 - * 원전 안전성 향상 기술, 중소형 원자로 안전 기술, 방사선 안전 관리 기술, 공통기반 기술
 - (활동 방침) 주요기술의 분류 및 정리, 장기 비전의 설정, 핵심기술 수요의 발굴, 우선순위 핵심기술 확보를 위한 연구개발 프로그램의 개발 및 추진전략 수립 등을 집중적으로 수행할 한시적 조직(활동 기간: 2018. 05. 01. – 2018. 11. 30.)의 성격으로 운영함.
 - * 학회 산하의 5개 유관 연구부회의 긴밀한 연계 하에 특별위원회를 운영함.

1.3 특별위원회 활동 개요

☐ 활동 비전의 설정

- ‘국민이 안심할 수 있는 원자력 안전 기술 확보’

☐ 활동 목표의 설정

- ‘원자력 사고에도 주민 대피가 필요 없는 안전 수준을 달성할 수 있는 발전 전략 수립’

☐ 핵심 성과목표의 설정

- 안전 연구 분야의 주요 기술의 분류 및 정리를 통한 기술수목보고서 작성
- 안전성 향상에 기여할 수 있는 핵심 기술의 구성 및 내용 정의
- 국내외 기술개발 현황 및 미래동향 예측
- 산학연 및 규제기관이 공동 참여할 수 있는 연구개발 수행체계 도출
- 국가적 원자력 정책 및 연구개발 전략으로 승화될 수 있는 제언을 도출

☐ 활동 전략 및 방법

- 원자력 안전 분야의 핵심 기술을 분류, 정리하여 기술수목보고서를 작성하고 원자력 안전연구의 중장기 발전전략의 수립을 위하여 국내외 주요 연구개발 로드맵 및 기술개발 계획, 그리고 환경 변화 및 기술개발 수요 등을 분석함.
- (운영) 추진위원회 및 자문단을 구성하며 5개의 기술 분과로 구분하여 활동을 수행함.
 - 추진위원회: 특별위원회의 주요 활동 방향 및 지침을 설정하고, 각 기술 분과별 활동 결과를 취합하고 종합 조정함.
 - 5개 연구부회 별 학계, 연구계, 규제계 및 산업계의 전문가가 참여하는 분과위원회를 구성하여 각 분야의 기술수목보고서를 작성함.

☐ 주요 활동 내용

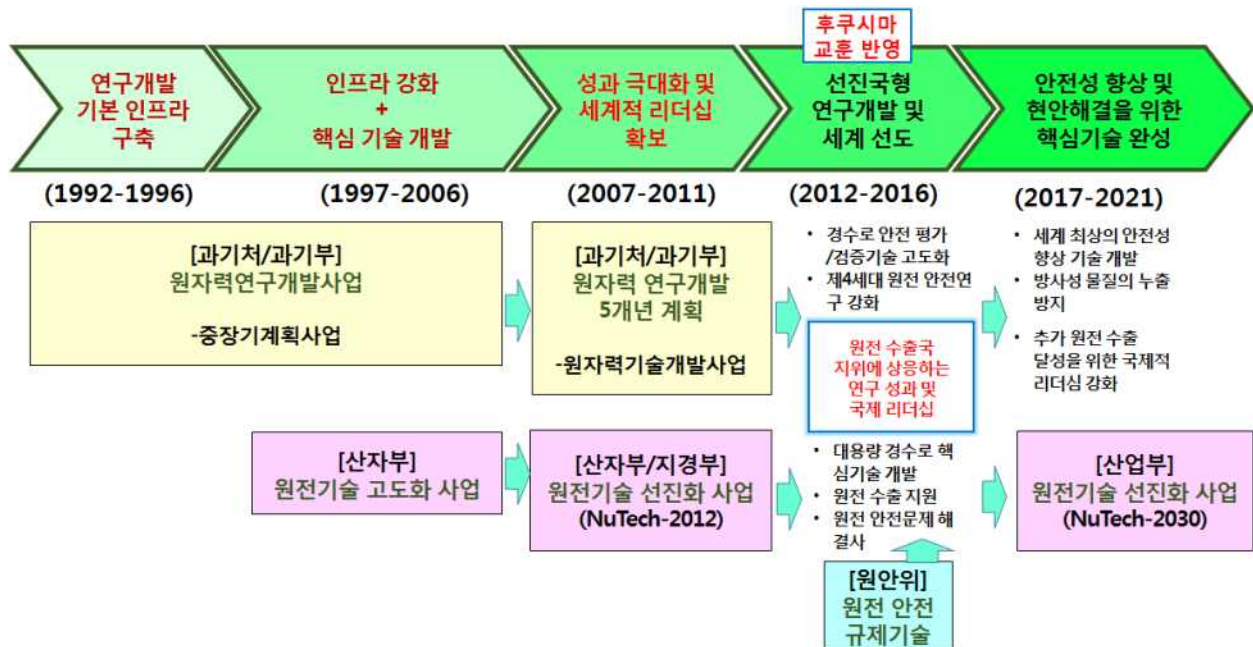
- (조사 및 분석) 주요 연구개발 로드맵 및 이슈, 주요 국가/기관별 연구개발 계획, 그리고 국내외 환경 변화 및 중장기적 기술수요 등을 심층 분석
- (기술 분류) 기술수요요청서의 취합·분석을 통해 기술 분류 체계를 수립
 - 5개 부회의 특별위원회 구성원 및 유관 전문가들로부터 기술수요요청서를 제시

받아 취합함.

- 취합된 '기술수요요청서'를 분석하여 기술수목도를 완성하고 기술수목보고서를 작성함.
- (기술의 정의) 각 기술 별로 해당 기술을 정의하고 핵심 내용을 도출함.
 - 국내외 관련 기술개발 동향의 분석 및 미래 동향의 예측을 수행함.
 - 중장기적 기술개발 수행체계를 제시함.
- (기술 확보 전략) 기술 분류·정의를 바탕으로 중장기적 기술 확보 전략을 도출함.
 - 작성된 기술수요요청서 및 기술수목도를 기반으로 기술 확보를 위한 연구개발 수행체계 및 핵심요소기술의 구성과 주요 내용을 제시함.

2.1 원자력 안전연구 추진 경과

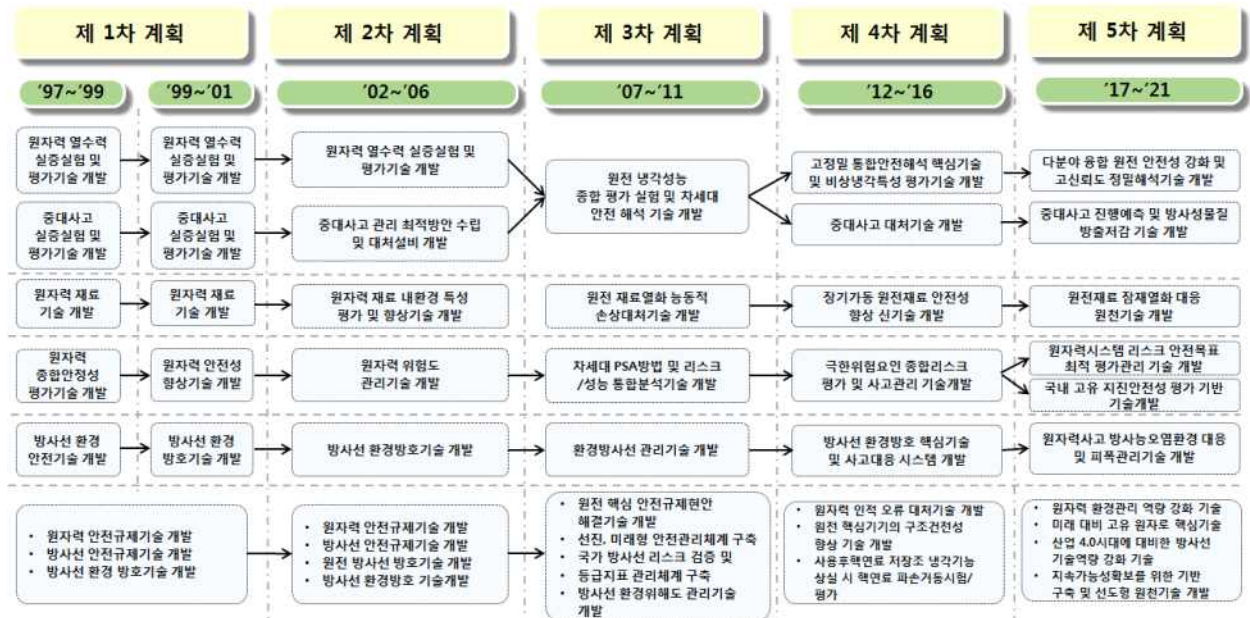
- 원자력 안전분야의 연구개발은 과기정통부 주관의 원자력기술개발 사업 및 산업부 주관의 원자력핵심기술개발 사업을 통해 주로 수행되어 옴.



<그림 2.1> 정부 주도의 원자력 안전분야 기술개발 계획 [1.1]

- 과기정통부의 '원자력기술개발' 사업에서는 원자력진흥종합계획[1.2]에 따른 5단계의 5개년 계획을 통해 1997년도부터 지속되어 왔음(그림 2.2 참고).
- 주로 원자력 시설의 안전성 확보 및 향상을 위한 기반·원천 기술들이 중장기적 목표 설정 아래 진행되어 오고 있음.
 - 제2차 원자력진흥종합계획에 따라 2002년부터 방사선 기술의 활용 및 안전성 향상을 위한 방사선이용기술개발사업이 추진되었음.
- 산업부의 '원자력핵심기술' 개발 사업에서는 중기적 기술개발 계획에 따라 주로 가동원전 응용기술 및 상용 신기술 개발에 초점을 두고 수행되어 옴(그림 2.3 참고).
- 주로 가동 원전 안전성 확보 및 신형 원전 안전성 향상을 위한 응용기술들이 중기적인 목표 설정 하에 개발되어 오고 있음.

- 원자력안전위원회의 원자력안전종합계획[1.3]에 따라 가동 원전의 안전성 확인 및 안전규제 기술을 중심으로 주로 중단기적 목표에 역점을 두고 착수된 바 있음(그림 2.4 참고).



<그림 2.2> 과기정통부 원자력연구개발 사업(안전분야) 추진경과



<그림 2.3> 산업부 원자력핵심기술개발 사업 추진경과

원자력 안전규제기술	① 가동중 설비 및 핵연료 건전성 평가·규제 기술 개발 ② 신안전설비 및 미래형원자로 안전규제기술 개발 ③ 대형 복합 재난재해 안전성 평가·규제 기술 개발 ④ 원자력시설의 해체 및 제염 안전규제기술 개발
방사선 안전규제기술	① 방사능 및 피폭선량 평가 기반기술 개발 ② 방사선 치료 및 핵의학 응용 분야 안전규제기술 개발 ③ 생활주변 방사선 안전관리기술 개발 ④ 방사성폐기물 저장, 운반, 처분 안전규제기술 개발
방사능 방재 및 비상대응 기술	① 방사능 재난발생 시 비상대응 및 구난용 장비기술 개발 ② 국가차원의 원자력 비상대응 최적화 관련 규제기술 개발 ③ 방사능 방재 및 비상대응 지휘체계 개선 기술 개발 ④ 한반도 인접국 중대사고 분석 및 대응 기술 개발

<그림 2.4> 원안위 원자력안전연구개발 사업 핵심 과제[2.1]

2.2 안전연구 핵심 성과

□ 세계 최고 수준의 경수로 안전성 실증실험 체계 구축 및 활용

- 경수로(APR1400, APR+, EU-APR 및 SMART 등)의 설계 및 안전성 평가에 활용
 - 표준설계 인가, 건설·운영 허가, UAE 수출, NRC 인가 지원 등에 활용
 - SPACE 코드 개발·검증, RCP 성능검증 등
- 아틀라스(ATLAS) 열수력 종합효과 실험을 통한 안전성 평가능력 확보
 - 안전해석 방법론 검증, 신고리 3&4호기 건설 및 운영, 국내 원전의 수출 기반 등에 활용
 - APR+ 신개념 안전계통(PAFS)의 성능 및 안전성 향상 효과를 실증적으로 평가
 - 아틀라스 실험결과를 바탕으로 국내표준문제(DSP)의 운영을 통해 국내 원자력안전성 평가 기반의 고도화를 선도하였으며, 또한 OECD/NEA의 국제표준문제(ISP-50) 및 국제공동연구(OECD-ATLAS) 주관 등을 통해 안전연구의 국제적 리더십을 강화함.
- 원자로물질을 이용한 안전성 실증 체계 구축
 - 실제 원자로물질을 이용한 노심용융물과 냉각수 반응 실험장치(TROI) 구축 및 실험 DB 생산
 - 노외노심용융물 냉각설비 개발을 위한 실험장치(VESTA) 구축 및 실험 DB 생산
- 안전관심사 해소에 필요한 핵심 열수력 현상의 고정밀 실증능력 확보

- 핵심 열수력 현상 모의 개별효과 실험을 통해 신안전개념의 기술적 타당성 평가용 기술 기반을 제공하고, 관련 물리모델의 개발에 기여함.
- 노심의 안전여유도 제고에 기여하고, 안전현안 해결을 위한 기술적 토대를 제공
- 사고 발생 시 변형된 노심의 비상냉각 특성을 실증적으로 평가하여 중대사고 진입 방지를 위한 적극적 노력 착수

□ 국내 가동원전의 재료열화 및 수명관리 대형 현안 해결 기술 제공

- 고리1호기 계속운전 인허가를 위한 원자로용기 안전성 평가 및 데이터베이스
- 한울4호기 증기발생기의 결함발생 추세 예측을 통한 안전한 조기교체 결정
- 신고리 1호기 및 KEDO 원전용 증기발생기 사용 전 건전성 정밀 검사
- 신고리 1/2호기 이후 가압기 밀림관 재료규격 LBB 특별사양 확립

□ 재료열화 진단/보수 혁신기술 개발을 통한 국제적 위상 제고

- 전열관 검사용 신형 탐촉자 D-Probe 개발 및 미국 원전 시범적용 성공
- 국내 최초로 ASME Code에 국산 고유기술 표준등재(코드케이스 N-840)
- 보온재 비해체식 고온배관 검사 신기술(국내외 기술이전 준비 중)

□ 세계 최고 수준의 경수로 핵연료 기술 개발 및 활용

- 고성능 핵연료 소재 개발 및 기술 이전
 - 지르코늄 피복관 (HANA), 큰 결정립 UO₂ 소결체 산업체 기술 이전 및 실용화
 - 핵연료 소재 제품 및 성능 자료 해외 수출 등
 - 3D 레이저 프린팅 산화물 분산강화 합금 기술, 소결체 제조 기술 등을 비원자력 산업체 이전하여 중소기업 기술력 확대에 기여
- 핵연료 안전 성능 해석 기술 개발 및 대형 시험 시설 구축
 - 핵연료 성능 해석 모듈 개발, 연소도 효과 반영 안전해석 체계 개발 등
 - 집합체 단위 지진, 구조, 열수력 시험을 위한 대형 시설(FAMPEX 등) 구축 및 활용
- 원전 안전 강화 핵연료 안전 연구 착수
 - 정상 운전 및 사고 환경에서의 안전성을 크게 강화하여 중대사고로의 진입을 지연하는 사고저항성 핵연료 핵심 기술 개발
 - 계산과학 기반의 전 노심의 핵연료 거동을 시스템과 연계하여 해석하는 통합 해석 체계 구축 착수

□ 국제적 수준의 안전해석 기술 개발 및 안전성 평가 체계 구축

- 원전 설계용 고유 노심 설계 및 안전해석 코드와 활용방법론 개발
 - SPACE를 활용한 안전 해석 체계 개발
 - 노심설계코드를 활용한 원자로 노심 성능 해석 체계 개발
- 다차원 통합안전해석 전산코드(MARS) 개발 및 원전 안전성 평가에 활용
 - MARS가 KINS 규제검증코드 체계(RETAS)의 핵심 코드(MARS-KS)로 채택됨
 - 안전해석 기술의 고도화, 미래형 원전의 규제검증기술 개발 기반으로 활용
- 기기스케일 고정밀 열수력 해석코드(CUPID)의 개발 및 활용
 - 다차원 2상유동의 고정밀 해석기술을 확보하여 원전 안전성 및 성능 해석의 정밀도 향상 및 이에 따른 원전의 안전성 및 경제성에 제고에 기여
- 중대사고 종합해석코드(CINEMA) 개발
 - 원전 중대사고 평가, 사고관리계획서 작성 및 평가를 위한 중대사고 종합해석코드 개발
- 세계 최고의 확률론적안전성평가(PSA) 정량화 코드인 FTREX 개발 및 수출
 - 국내 산업체 및 규제 검증용 PSA 모델의 정량화에 활용
 - 2006년부터 미국 전력연구원(EPRI)를 통해 해외에 수출하여, 2018년 현재 미국 원자력규제위원회(NRC) 및 미국 원전의 70% 이상에서 사용되고 있으며, 그 외 캐나다, 스위스, 스페인, 일본, 중국, 멕시코 등의 원전과 미항공우주국(NASA)에서도 리스크 평가에 활용
- PSA 종합 전산체계(AIMS-PSA) 개발 및 기술 이전
 - PSA 종합 전산체계인 AIMS-PSA를 개발하여 국내외 다수 기관에 기술 이전: 국내 규제 검증용 PSA 모델(KINS) 개발 및 다수기 PSA 모델(원안위, 한수원)을 위한 전산체제로 활용

□ 세계 최고 수준의 다수기 리스크 평가 방법론 개발 및 활용

- 다수기(부지) 리스크 평가 방법론 및 전산체계 개발
 - 다수기 부지에 대한 Level 1/2/3 PSA 수행을 위한 방법론 및 전산체계 개발
 - 6기 원전 부지에 대한 리스크 시범 평가를 통해 방법론 및 전산체계 검증
 - 국제공동연구(IAEA, OECD/NEA), 정보교류회의(캐나다) 등을 통해 우수성 인정
- 규제기관(원안위) 및 산업체(한수원)의 다수기 리스크 평가 과제에 활용

- 개발된 방법론과 전산체계가 규제 검증용 다수기 PSA 모델 개발(원안위)과 고리/한울 부지 다수기 PSA 모델 개발(한수원)에 활용 중

□ 원전 3대 미자립 기술 중 국내 최초 MMIS 국산화 성공 및 적용

- 안전등급 제어기기 및 안전계통기반 국산화 MMIS 제품을 APR1400형 상용원전 신한울 1, 2호기 및 신고리 5, 6호기에 성공적 적용
- 디지털 인허가 확보 기술기반 상용원전 신한울 1, 2호기 및 신고리 5, 6호기 건설허가 인허가 대응
- 안전등급 제어기기기반 수출형 중소형 원자로 SMART MMIS 설계 국산화 및 예비안전성분석보고서(PSAR) 작성

□ 중대사고 대응을 위한 계측제어 원천기술 개발 및 시작품 제작

- 중대사고로 인해 기존의 계측제어 장비들이 작동 불능일 경우 발전소 내부 상황변화를 감시하기 위해 극한환경에서 동작하는 계측제어기기를 개발함.
- 극한 환경에서 동작하는 계측제어 기기에서 취득한 발전소 정보를 원거리에서 감시할 수 있는 모바일 원격제어실 및 무선통신장치를 개발함.
- 중대사고 시 사고 완화를 위해 노심냉각 유로를 자율적으로 검색하여 실시간으로 운전원에게 제공하는 사고완화기술 개발

□ 원자력 인적오류 대처기술 개발

- 시뮬레이터 기반 인적오류 분석체계 개발
 - 인적오류확률 분석 핸드북 및 시범분석 보고서/지침서 발간
- 종사자/조직/작업환경에 대한 인적오류 대처지침 개발
- 원자력 시설에 맞는 종사자지원 프로그램 개발
- 운전조의 의사결정 및 팀 상황인식을 지원하는 도구 개발

□ 국가 원자력시설 사이버공격 대응체계 구축

- 한국형원전(APR1400) I&C의 Scale-down 된 TEST-BED 구축
- 원자력 I&C 사이버침해 모의사고 분석
- 원자력 I&C 기기별 사이버침해 취약성 분석기술 개발

□ 디지털 주제어실 내 전산화절차서 설계 및 적용

- 세계 최고 수준의 흐름논리도 형식의 전산화절차서를 설계하고 신고리 3, 4 호기에서부터 모든 건설원전에 도입하기로 함.
- UAE BNPP에도 전산화절차서를 32억 원에 수출함.

□ 고품질의 의료방사선 이용 확대를 위한 새로운 기술 확보

- 난치성 질환의 치료에 필요한 치료용 방사성의약품 및 안전평가 기술 개발
- 치료방사선의 안전이용을 위한 방사선량 측정 및 교정/품질보증/정도관리 체계 구축
- 의료방사선의 이용확대에 따라 핵의학 및 치료방사선 분야의 안전관리 및 규제 기술 개발 시스템 구축

□ 가속기 안전연구의 국제적 수준에 접근

- 고출력 가속기인 경주양성자가속기, IBS 중이온 가속기의 건설과 함께 최고수 준차폐해석코드에 대한 검증을 성공적으로 수행하여 안전평가 등에 활용됨.
- 주요 가속기 안전연구 모임인 SATIF/RadSynch/ARIA에서 주도적인 위치를 확보하고 국내 생산 핵자료 및 규제기준도 제공하고 있음.

□ 국외 선진기술과 국내 환경적 특성을 접목한 국내고유의 방사선 환경/방재 및 개인 방사선 방호연구 수행

- ‘02년부터 국제원자력기구 (IAEA) 주관 국제공동비교프로그램인 EMRAS와 후속프로그램 MODARIA에서 방사성물질의 환경내 거동을 모사하는 시나리오에 국내에서 개발된 코드의 계산 참여를 통해 국내 평가능력의 우수성 확보
- 방사선환경영향평가 필수자료를 실험을 통해 지속적으로 생산하여 국제기구에 제공함으로써 국제 표준화에 기여
- 국가재난대응시스템 AtomCARE의 광역화를 통한 국내외 원자력사고에 대비한 방사선재난대응 강화
- 방사선작업종사자 개인선량계 신물질 LiF:Mg,Cu,Si 개발 및 국내 적용
- 개인 내부피폭선량 평가 프로그램 BiDAS 개발 및 국내 유관 기관에 기술 이전
- 유럽방사선량평가그룹 (EURADOS) 주관 사후방사선량평가 국제상호비교 프로그램에 참가하여 국내 개발 기술의 신뢰성 확보

□ 중대사고 시 원자로건물 과압방지를 위한 여과배기 설비 개발

- 중대사고 시 원자로건물 과압방지를 위한 여과배기 설비 개발
- 여과배기 설비의 방사성물질(에어로졸, 아이오딘)의 제염성능을 실증하기 위한 실험장치(AREIL) 구축 및 실증 실험자료 생산
- 국내 원전 12호기에 대한 상용화 완료

□ 원자력 안전연구의 국제적 리더십 확보

- 아틀라스 실험을 기반으로 국내 최초로 수행한 OECD 50번째 국제표준문제 (ISP-50) 평가 프로그램의 성공적 주관: 11개국 16개 기관의 안전해석코드를 검증
- 고정밀 열수력 실험을 기반으로 OECD 국제 CFD벤치마크 문제(IBE-2)를 성공적으로 주관 운영함: 12개국 20개 기관 참여
- 한국 최초의 OECD 국제공동연구(OECD-ATLAS) 단독 주관 운영
 - ATLAS 열수력종합효과실험을 활용한 OECD 국제공동연구의 국내 최초 단독 주관 (2014. 4-)
 - 후쿠시마 원전사고 이후 관심을 갖게 된 설계기준초과사고 및 복합사고 등을 모의
- OECD 국제공동연구(SERENA-II) 공동 주관 운영
 - 실제 원자로물질을 이용한 증기폭발 안전성 현안 해결을 위한 OECD 국제공동연구의 공동 주관

□ 수출형 대형원전 및 중소형원전 표준설계 개발로 국제경쟁력 지속 확보

- APR+ 원전에 대한 표준설계개발 및 원안위 표준설계인가(SDA) 취득
- 유럽수출형원전(EU-APR)에 대한 유럽사업자요건(EUR) 인증 취득
- 주요안전계통에 대한 피동설계개발로 안전성 증진 및 국제기술경쟁력 확보
 - 피동보조급수계통(PAFS), 피동안전주입계통(PECCS), 피동격납건물냉각계통(PCCS)

2.3 연구 성과 분석 및 시사점

□ 원자력안전 분야의 주요 연구 성과는 다음과 같이 요약될 수 있음:

- 세계 최고 수준의 실증실험 체계 및 선진국 수준의 안전해석 체계를 구축함.
 - 세계적 수준의 안전성 실증실험 체계 확보: ATLAS, SMART-ITL, TROI, VESTA 등
 - 고부가 가치 고유의 실험 데이터 및 해석기술 등을 바탕으로 선진형의 안전성 평가기술 및 향상기술 개발에 필요한 기반을 확보함

- 연구개발 성과의 확산을 통한 원전 기술자립을 선도함.
 - 개발한 안전해석코드의 규제코드 활용 및 산업체 기술이전
 - 열수력 실험 DB를 활용한 국내 원전 안전해석 기술 고도화
 - PSA 방법론 및 모델을 활용한 국내 원전 안전진단
 - FADAS 개발 기술을 국가방사능방재시스템 AtomCARE에 이전
 - 다수의 원전 현안문제 해결 지원: 증기발생기 세관검사 기술, 구조건전성 감시·진단 기술, 정지·저출력 PSA 해석 등
 - 연구개발 결과의 활용성 제고를 통해 국내 원전 안전성 향상에 기여
 - 신안전개념 개발·검증을 통해 국내 원전 설계기술 자립에 기여하고, 가동 원전의 안전현안 해결에도 직접 활용함.
 - 선진형 연구기반의 구축 및 연구 성과의 국제적 활용을 통한 국내 안전연구의 국제적 리더십 강화
 - 다수의 OECD 국제협력 프로그램 주관 및 성공적 수행: SERENA 및 ATLAS 국제 공동연구, ISP-50 국제표준문제, IBE-2 국제벤치마크문제 등을 주관 운영함.
 - 과거의 수혜적 위치에서 벗어나 점차 시혜적 위상을 확보해 나아가고 있음.
- 연구 성과 분석을 통해 도출된 취약점을 정리하면 다음과 같음.
- 안전해석 기술개발 역량의 유지 및 선진화 노력 지속 필요
 - 고유 열수력 모델과 고정밀 해석코드 개발 및 이를 위한 핵심 열수력안전 현상의 규명 실험
 - 선진 모델링 및 해석 기술 개발
 - 안전연구 분야 내부의 부문 간 연계기술 개발 노력을 통한 연구 성과의 적용성 강화:
 - (예) 다중스케일 해석기술, 열수력-노물리 연계해석, 열수력-재료-수화학 연계 기술 등
 - 미래수요 원자력 안전기술의 선도적 개발 및 이를 통한 국제적 리더십 강화
 - 규제기관 및 산업체 등 안전연구 성과 수요자의 중단기적 기대에 부응하는 안전연구의 병행 수행도 중요

3.1 후쿠시마 사고 교훈

- 후쿠시마 원전 사고로부터 얻는 교훈은 다음과 같이 요약될 수 있음:
 - 원자력 에너지 이용에 있어 안전성 확보가 최우선적 요건임을 재인식
 - '안전성 중시'로의 패러다임 변화: 심층방어 개념의 강화 필요
 - * 비상냉각 능력 강화를 통한 중대사고 진입 방지, 중대사고 완화 및 환경보호 강화
 - 종합적인 안전성 평가의 필요성 인식: 체계적인 안전성 개선 목적
 - 위험도정보활용 기반의 안전성 평가 및 극한재해 기인 리스크 평가 필요성 인식
 - 제도적, 기술적, 문화적 측면 등의 원전 안전성 개선책 강구 필요
 - 극한재해 상황에서의 체계적 의사결정 조직의 중요성
 - 사회심리 영향 및 보건영향 측면에서 실효성 우선과 부작용 최소화 방안의 반영
- 원자력 안전 분야에서 중요시 다루어야 하는 기술적 측면의 교훈을 살펴보면 다음과 같음:
 - 안전철학의 재고찰 및 안전성 평가 체계의 재정립 필요성 인식
 - 중대사고의 예방조치 강화
 - 중대사고로의 진입을 지연하는 사고저항성 핵연료 개발
 - 설계기준초과사건(bDBA)을 포함하는 확대설계조건(EDC)에 대한 중대사고 진입 방지용 대응방안 확보
 - 중대사고 대처능력 향상을 통한 사고 완화방안 강구 필요
 - 종합적인 안전성 평가의 필요성 인식: 체계적인 안전성 개선 목적
 - 저빈도 사건에 대한 리스크 평가 및 대처 방안의 구축 필요성 인식
 - 종합적인 안전성 평가 결과에 따른 가동·신규 원전의 체계적 안전성 향상 노력 필요성 인식
 - 중대사고 발생 시 환경영향 평가 정밀 평가기술 확보 및 보호대책 강구
 - 비상대응 체계의 강화: 불확실한 극한재해 상황에서의 체계적 의사결정 조직의 핵심 요소인 의사결정 및 정보 분석 시스템 확보
 - 사용후핵연료의 안전한 관리를 위한 운반/저장용기 설계, 제작, 관리

3.2 국외 연구동향

□ (개요) 원자력 안전과 관련된 최근의 국제적 동향을 살펴보면 다음과 같음:

- 후쿠시마 원전 사고의 교훈을 반영한 원자력 시설의 안전성 강화 노력 및 이를 위한 기반기술 개발 필요성을 인식함.
- 원자력 발전의 지속가능성(sustainability) 보장을 위한 가동 중 및 신형 원전의 안전성 확보 및 강화 노력
 - (미국) 가동 원전의 경제성 향상을 통한 원전 이용의 지속가능성 보장에 역점
 - * 가동 원전의 핵심 이슈 해결에 적용 가능한 다분야 융합형 기술 개발 및 이를 위한 선진 모델링·해석 기법의 개발 및 적용 등에 역점을 두고 기술개발을 추진 중에 있음.
 - (유럽) 고정밀 예측능력 확보를 통한 선진형 고정밀 해석체계의 구축 및 가동 원전의 안전성 강화에 역점
 - (미국/유럽/중국) 원전사고 시 수소폭발을 방지하기 위한 사고저항성 핵연료(ATF: Accident Tolerant Fuel)을 개발하여 원전의 안전성 향상
 - (독일) 중간(건식) 저장시설에 대한 10년 주기의 주기적 안전성 평가 검토지침 제시

□ 후쿠시마 원전 사고 교훈을 반영한 원자력 시설의 안전성 강화와 관련된 일반적인 동향 변화를 살펴보면 다음과 같음:

- 극한재해에 따른 리스크 평가 및 대처 기술 개발에 많은 관심을 갖게 됨:
 - 지진, 쓰나미, 태풍 등의 자연재해 및 항공기 충돌 등의 인공재해와 같은 극한적 재해를 고려한 리스크 평가의 필요성 인식
 - '저빈도-고위험' 리스크의 정밀 평가 필요성 인식
 - 중대사고 진입 방지를 위한 적극적 조치 필요성 인식: 완전 전원상실사고 및 복합 사고에 대처가 가능한 피동형 안전계통의 개발 등
- 설계초과 지진에 대한 원전의 지진 안전성 확보에 많은 노력을 기울이고 있음:
 - (미국) 미국 INL (Idaho National Lab.)에서는 Seismic Research Program을 통해 지반구조물상호작용, 면진, 지진 PSA 등 다양한 연구를 진행하고 있음.
 - (IAEA) EESS (External Event Safety Section) 주관으로 지진 뿐 아니라 극한 자연재해에 대한 원전의 안전성 확보를 위한 다양한 EBP (Extra Budgetary Program)를 진행하고 있음.
 - (OECD/NEA) OECD/NEA의 WGIAGE에서는 전단벽 구조물의 내진성능 평가를 위한

CAPS (CSNI Activity Proposal Sheet)인 CASH (seismic CAPacity of reinforced concrete SHear walls) 등 다양한 지진 및 내진관련 국제공동연구를 진행하고 있음.

○ 다수기 리스크 평가의 중요성 인식 및 연구 확대

- (IAEA) 다수기 Level 1 PSA 방법론에 대한 기술문서(TECDOC) 발행을 위한 프로젝트(2016~2019)와 다수기 PSA 요소기술 별 best practice 지침 개발을 위한 프로젝트(2018~2022)를 진행 중
- (OECD/NEA) 부지 또는 다수기 PSA 분야의 국가별 현황을 조사하기 위한 프로젝트(2016~2018)가 진행 중이며, 국제 워크숍도 개최(2018. 7)
- (캐나다) 규제기관(CNSC) 요청에 따라 사업자 그룹(CANDU Owners Group)에서 다수기 PSA 방법론을 개발하고 Pickering 원전 부지에 시범 적용 완료, 현재 타 원전 부지에도 적용 연구 중
- (영국) Wylfa 원전 부지에 ABWR (advanced boiling water reactor) 2기 건설 계획과 관련해 GE-Hitachi에서 해당 부지 고유의 다수기 PSA 수행 중

○ 국제적 안전철학의 변화, 그리고 국제기구 및 국가별 안전규제요건의 변화

- 극한사건에 따른 중대사고의 예방 및 완화를 위한 균형적 노력이 필요함을 인식
 - * 외부사건 및 자연재해 등의 극한재해, 다수호기 동시사고, 광역 재해 등을 추가적으로 고려
- 가동 원전의 안전성 재평가 단계를 수행한 이후 확대설계조건(Extended Design Condition: EDC) 개념 채택으로 설계 안전성을 강화토록 요구:
 - * IAEA, OECD/NEA, WENRA 등을 중심으로 원전 설계의 기본원칙인 심층방어(DiD, Defense-in-Depth) 개념을 보완
- 사고 당사국인 일본 및 미국, 그리고 유럽 규제기관을 중심으로 규제요건을 강화

○ 원전 안전성에 대한 심층적인 예측 능력 확보 노력

- (미국) CASL 프로젝트의 성공적 추진으로 다차원·다물리 해석 기술의 개발 및 활용에서 선도적 지위 확보
- (유럽) EUROSAFE 활동으로 고정밀 예측능력 확보를 통한 선진형 고정밀 해석체계의 구축과 안전성 강화에 역점

□ 원전의 안전한 장기가동을 위한 재료열화 수명관리 능력 강화

- 미국 DOE는 LWRS (Light Water Reactor Sustainability) R&D 프로그램을 착수하였으며, “재료열화 및 손상 (MAaD)” 분야에서 내부구조물, 원자로용기 등 원자로 재료의 장시간 사용에 의한 열화문제를 첫 번째 이슈로 다루고 있고, 연간 3000만\$의 연구비를 지원하고 있음.
- 미국 EPRI는 2012년부터 장기가동, 수화학, 재료 신뢰성, 증기발생기 관리

프로그램 등 가동원전의 안전성 향상을 위한 다수의 재료관련 R&D 프로그램을 지속적으로 수행중(연간 4000만\$ 이상 연구비 지원)

- EU에서는 2015년부터 Horizon 2020 프로그램의 SOTERIA(Safe long term operation of LWR based on improved understanding of radiation effects in nuclear structural materials) 프로젝트에서 원자로용기 조사취화 및 IASCC 등 원자로재료의 열화문제를 다루고 있음.
- OECD는 가동원전 1차계통, 내부구조물 등 금속기기의 열화 파손에 대한 DB구축을 위해 2014년부터 CODAP (Component Operational Experience, Degradation and Ageing Programme)을 수행하고 있음.

□ 원전 계측제어와 인간공학 분야에 대한 일반적인 동향 변화를 살펴보면 다음과 같음:

- IoT, 운전 빅데이터, 원자력 Digital Twin을 융합한 인적오류 원천 배제 지능형 자율운전 적용 노력
 - (미국) GSE Systems 등 Nuclear Digital Twin을 통한 원자력 이상상태 및 운전 빅데이터 확보를 위한 노력
- 중대사고 환경 생존 계측기 및 계측기술 개발 노력
 - (미국) 중대사고 시의 초극한 환경에 적용할 수 있는 방사선/중성자속 계측기 개발, 주요 안전 기기의 동작성을 실시간 진단할 수 있는 내장형 마이크로 센서 등을 개발 중에 있음.
 - (일본) SA-KEISOU R&D 프로그램을 통해 중대사고 환경에서 생존할 수 있도록 공정 계측기의 내환경/내방사선 성능 향상연구와 노심용융물 분출 시의 FCI 현상 감시 및 사용후 핵연료 저장조 실시간 감시용 계측기 등의 중대사고 전용 계측기를 개발하고 있음.
- 사이버침해 대응기술 개발 노력
 - (IAEA/NRC) IAEA, NRC 및 세계 각국의 규제기관은 원자력시설에 대한 사이버보안 대책기술을 강구하여 적용하도록 요구하고 있음.

□ 방사선 위해로부터 환경과 인간을 보호하기 위한 일반적인 동향 변화를 살펴보면 다음과 같음:

- 진단 및 치료용 방사선의 이용확대에 따라 전문가 집단의 협력을 통한 안전성 및 위해도 관리를 위한 시스템 운영
 - (유럽) 의료분야 종사자의 방사선방호 최적화를 위한 선량평가 연구 프로젝트

(ORAMED) 진행

- 가속기 건설과 해체와 관련된 안전관리기술을 확보하기 위한 노력
 - (미국) 대형 가속기 시설의 해체에 따른 폐기물의 평가 및 폐기 기준에 대한 DOE 주관의 연구가 수행되어 최근 표준안을 확립함.
 - (일본) 140기 이상 운영되고 있는 의료용 가속기의 해체, 폐기에 관련된 연구가 장기간 수행되어 표준안을 확립하는 단계에 근접함.
- 방사선환경 안전/방재 및 개인방사선 방호 능력 향상을 위한 지속적 국제방사선방호위원회(ICRP)의 권고 반영 및 관련연구 수행

□ 국제기구의 원자력 안전 관련 동향은 다음과 같음:

- IAEA는 안전성 강화 노력의 일환으로 원전 설계요건을 개정[3.1]:
 - 원전 사고조건의 분류 방법을 변경(2012. 1): 변경된 설계요건(SSR-2/1)에서는 사고조건을 설계기준사고(DBA)와 확대설계조건(EDC)의 2가지로 구분함.
 - EDC 사건에 대한 적극적인 고려를 통해 노심 손상사고 방지와 원자로건물 건전성 유지에 필요한 추가적인 안전설비 또는 안전계통의 기능 확장을 요구하게 됨.
- OECD/NEA는 후쿠시마 후속 활동으로 공동조사위원회 가동 및 후쿠시마 보고서 발행 등의 노력을 기울이고 있음:
 - 산하 Tri-Bureau(CNRA, CSNI, CRPPH) 공동으로 후쿠시마 사고의 조사 및 대응 활동을 수행함: 23개국 규제기관, 3개 국제기구에서 참여
 - 전 세계 원전의 안전성 재평가를 바탕으로 후쿠시마 보고서를 발행함(2013).
- 서유럽 규제기관 협의회(WENRA)의 신규 원전 안전요건 제시
 - WENRA는 후쿠시마 사고 이전부터 신규 원전의 설계 안전성 향상 방안을 수립해 옴
 - 후쿠시마 사고 교훈을 반영한 신규 원전의 안전요건을 제시함(2013. 3).

□ 주요 국가의 원자력 안전 규제요건 변화

- (미국) 규제요건 개선 및 Rule making
 - TMI-2 사고, 9/11 사건 등을 거치면서 세계 최고수준의 규제기술 유지 노력: '사건조사-교훈도출-규제개혁-안전성 향상'의 단계적 접근방법을 채택함.
 - 후쿠시마 사고 이후 기존 규제요건 개선 및 미래형 규제정책 제시: 후쿠시마 사건은 충분한 사전 대응으로 방어할 수 있는 사고(Preventable)라는 인식에 의거
 - 고연소도 핵연료의 취성 변화와 열전도도 변화를 DBA 핵연료 거동 예측에 포함하는 규제요건 개선을 예고함.

- (일본) 신안전요건의 개발 및 법제화 (2013. 7)
 - 후쿠시마 원전 사고 이후 폐쇄적이고 왜곡되었던 원자력 규제 체계를 크게 개혁
 - 미국 규제기준을 참고로 하여 국제적 수준의 새로운 안전요건을 개발, 법제화
- (유럽) 각국은 WENRA 안전목표 (신규 원전), Post-Fukushima Action Plan (가동 원전)을 자국의 규제환경에 맞도록 안전규제 요건 및 기준을 개발 또는 개정
 - 프랑스와 독일은 현실적 가능성이 없는 대형냉각재상실사고를 배제하고 실질적 파단 크기에 기초한 DBA 규제 체계를 확립함.

□ 가동중 및 신형 원전의 안전성 확보 노력은 다음과 같이 정리할 수 있음.

- 가동 원전의 핵심 이슈 해결에 필요한 다분야 융합형 기술의 개발·적용
- 고정밀 안전해석 기술의 개발을 통한 안전여유도 정밀 평가 및 안전성 향상
- 신형 원전의 설계기준초과사고 대응을 위한 혁신적 안전개념의 개발 및 적용

3.3 국내 고유 환경

□ 국내 고유의 연구개발 환경을 원자력안전 분야에 한정하여 살펴보면 다음과 같음:

- 3개 부처 참여 형태의 안전연구 추진체계: 부처 별로 연구개발 목표 및 범위에 차이가 존재함.
- 심층방어(DiD) 개념의 강화 필요성 인식: 가동 중 및 건설 원전을 대상으로 후쿠시마 원전 사고 교훈을 반영할 필요가 있음.
 - 심층방어 개념의 강화를 통한 중대사고의 예방조치 확대 및 대처능력 향상
 - 위험도의 '종합적 평가' 필요성 인식: 리스크정보를 이용
 - 극한재해 상황에서의 체계적 의사결정 중요성
- 가동 원전 안전현안 및 신규 인허가 현안의 해소 대책이 필요함.
 - 가동 원전의 노령화 및 계속운전 등과 관련된 안전관심사의 해소 연계
 - 사고관리 계획서 제출의 법제화에 따른 안전해석 체계 확립과 검증
 - 다수기 안전성 평가 및 안전성 향상방안 도출
 - 부지 차원의 안전 목표 및 다수기 PSA 규제 요건 개발
 - 국내 지진환경 특성을 반영한 국내 원전의 지진 안전성 평가 및 향상

- 화재유발 다중오동작 분석 수행 및 운전원 수동조치 실효성 입증
- 연소도 효과와 RIA 반영 요구 대응
- 원전 안전성 향상을 위한 사고저항성 핵연료 개발 및 적용
- 운전 데이터를 활용한 지능형 비정상 운전지원 및 운전자동화 노력
- 중대사고 환경 생존 계측기 및 계측제어 기술 개발
- 국내 원전의 디지털 계측제어계통에 대한 사이버침해 대응 기술
- 수출형 원전 기술 개발 추구: 안전성 향상기술 개발 및 평가 능력 강화
 - 수출형 원자력 시스템 개발: 안전성 강화 (피동개념 채택 등)
 - 선진 모델링·해석(AM&S) 기술 개발: 고정밀 예측형의 해석도구 확보
- 국내 고유의 안전철학 및 안전기준 정립이 필요함.
 - 다양한 시장 요건 및 국내 원자력시설 환경을 고려하고, 국제 안전기준 변화에 능동적으로 대응하기 위한 고유의 안전철학 설정이 필요함.
 - 원전 기술의 공급자 지위에 부합하는 분명한 안전철학의 제시를 통한 국제사회의 신뢰도 제고
- 핵심 안전기술 개발 역량의 유지 및 지속적인 발전을 위한 대책이 필요함.
 - 핵연료 및 노심과 연계된 계통 안전해석, 중대사고 및 환경방사선 해석 관련 핵심 역량의 유지 및 관련 기술의 고도화
 - 사고 시 핵연료의 안전성이 강화되어 수소폭발과 노심용융을 억제하는 사고저항성 핵연료 개발로 가동원전의 안전성 증진
 - 원전 안전성이 향상된 원자력 재료 혁신 소재기술 개발로 안전 능력 강화
 - 사용후 핵연료 습식저장 포화상황에 대응하기 위한 사용후핵연료 운반/저장 용기 개발 및 관련 기술의 확보가 필요
- 대국민 수용성 확보: 실효적 방재 대응 능력 확보, 동아시아 공동 대응 등

□ 국내 원자력안전 분야 규제환경의 변화

- 정부의 탈원전 정책 및 시민단체의 기존 원전에 대한 안전성 강화 요구 증대
 - 가동원전 공통 안전현안 해결을 위한 규제 강화와 일관성 유지
 - 규제요건의 엄격한 적용 및 명확한 근거 제시 요구
- 국내 가압경수로형 원전의 핵연료 연소도 증가에 따른 핵연료 안전기준의 강화 필요

- 비상노심냉각계통 허용기준에 대한 고시 개정 추진
- 연소도 효과를 고려한 핵연료/열수력 통합코드 개발
- 설계기준사고에 대한 독립적인 규제 검증 체계 수립 (방법론 및 지침서 등)
- 수출형 및 미래형 원전에 대한 신규 규제요건 수요 증대
 - 피동계통 등 신규 설비에 대한 선제적 규제요건 개발
 - 신규 설비 성능해석 및 안전해석을 위한 코드 및 방법론 검증 체계 확보
- 원자력이용에 따른 방사선환경 및 개인 방사선 안전에 대한 대국민 수용성 확보 필요
 - 후쿠시마 원전사고 이후 시민단체의 활발한 반핵활동
 - 인접국 원전 운영에 대한 일반인의 불안감 점증
 - 방사선 뿐 아니라 경제적, 사회적, 심리적 피해를 최소화하기 위한 방사선재난대응 강화 필요
 - 동북아 공동대응 협력 체제를 확보하여 국민의 인접 원전의 운영에 대한 불안감 해소
 - 사람과 환경을 방사선으로부터 보호하기 위한 최상의 기술 확보를 통해 원자력활동에 대한 막연한 불안감을 최소화

3.4 안전연구 핵심 이슈

- 안전연구 추진방향의 재고찰
 - 원자력 에너지 이용의 지속성 보장을 위한 ‘심층방어’ 개념의 적용 강화
 - 비상냉각 성능 제고 및 리스크정보 기반의 안전성 종합 평가 기반 확보
 - 기 보유 해석기술 및 실증체계의 고도화
 - 대규모 극한재해 대응 안전성 평가 능력 및 관련 핵심기술의 확보
 - 다분야 융합형의 실효성 있는 원자력 안전연구 추구
 - 기술 분야 간 상호 연계한 종합적 안전성 평가 능력 강화 필요
 - 가동 원전 안전성 향상에 필요한 기반기술의 개발 및 적용
 - 사고 경험, 새로운 안전기술, 고정밀 평가기술 등의 지속적 반영
 - 신규 원전 (미래형 포함)의 고유 안전성 확보 기술 개발

- 신형 경수로의 피동설비 개발 및 종합 평가·검증
- 미래형 원전 대상의 혁신적 안전설비 개발 및 평가·검증
- 국제적 보편성과 국내 고유 환경을 반영한 안전성 확보

□ 안전연구 추진전략

- ‘장기적’ 연구개발 프로그램의 개발 및 제시
 - 다부처 공동 관심사의 적극 반영: 원천기술 개발 및 성과 확산
- 연구개발의 패러다임 변화: 기능 강화 및 전략 전환
 - 다분야 ‘융합형’ 안전기술 개발 강화: 연구 성과의 실질적 활용성 극대화 추구
 - ‘예측형’ 안전기술 개발로 전환 추구: 선도형 원천기술 및 범용 안전기술의 개발
 - 기 보유 우수 기술의 고도화 지속: (예) 안전해석 기술, 열수력 실증기술, 리스크 평가기술 등
 - 수행 체제의 선진화: 선택-집중, 핵심 연구역량의 강화 등
- 연구개발 재원의 확대 및 다양화 노력: 정부출연금 신규 확보 및 민간부문 연구개발 투자 확대 등
 - 기관고유 사업비 신규 확보(안전연구 부문 대상): 융합형 연구 촉진 및 신규 기술 개발 항목 발굴 등, PBS 한계 극복 기대 효과
 - 대형 신규 사업의 적극적 발굴 및 조기 착수: (예) 완전피동 원자로 개발, 선진형 안전해석 기술(AM&S) 기반의 가상원자로 개발 기술

제2장 기술수목

1

원전 안전성 향상 기술

◆ 배경

- 원전 안전성 향상기술은 원전 안전성의 체계적인 향상을 위하여 IAEA의 심층방어 개념을 이용하여 기술수목을 분류하였음. 가동 원전의 균형화된 안전성 향상을 위해서 각 심층방어 단계를 강화할 필요가 있으며, 이러한 강화된 각각의 심층방어 단계는 가동원전의 리스크를 효과적으로 감소시킬 수 있음. 각 심층방어 단계는 아래와 같음.
- 운전성능 및 시스템 건전성 향상 기술은 재료, 핵연료, ICT, 인적오류, 및 화재와 같이 정상운전에서 사건을 감소시켜 리스크를 유발하는 초기사건을 감소시킬 수 있는 기술로 구성됨.
- 설계기준사고 대처능력 향상 기술은 기존의 설계기준사고로 분류된 기술에 대한 안전성을 더욱 향상시킴으로서 설계기준사고의 대응성능을 강화하는 기술로 구성함.
- 원전중대사고 예방기술은 리스크 유발 초기사건에 대해 핵연료, 기기생존성, 다중고장사고 대처 및 인적성능을 향상함으로써 이 단계의 심층방어 능력을 향상시킬 수 있는 기술로 구성함.
- 원자로 건물 건전성 유지 기술은 노심손상 이후, 원자로건물의 건전성을 강화하기 위한 기술로 환경/계측 중대사고 현상 규명 및 평가, 중대사고 관리 최적화 기술을 포함함.
- 기존의 공학적 안전기준 범위를 넘어 국민이 안심할 수 있는 수준의 원자력 핵연료 및 재료의 가동 안전성 확보를 목표로 국가 원자력 연구개발 정책에 반영하고자, 「핵연료·재료분과」에서는 중장기 발전전략을 수립하고 연구개발 로드맵을 제시함.

◇ 기술분류 총괄표

대분류 (1단계)	중분류 (2단계)	소분류 (3단계)
원전 안전성 향상 기술	운전성능 및 시스템 건전성 향상 기술	재료 및 기기 건전성 향상
		핵연료 안전성 향상
		기기 및 계측/제어 계통 성능 향상
		원전 상태 종합 감시
		사이버보안 대응
		운전성능해석 및 향상 기술
		화재 방호
		원자로냉각계통 방사선원향 해석코드 개발
	설계기준사고 대처능력 향상기술	사고저항성 핵연료 개발
		원자로건물 구조적 건전성 평가
		사고대응 자동화 기술
		원전 설계기준사고 혁신대처 기술
	원전 중대사고 예방 기술	다중고장사고 환경 기기 생존성 평가기술
		다중고장사고 해석 및 실증 실험
		중대사고 예방을 위한 냉각능력 강화 기술
	원자로건물 건전성 유지 기술	중대사고 환경 계측/제어
		중대사고 현상 규명 및 평가기술
		중대사고관리 최적화

◆ 세부 기술 내용

1.1 운전 성능 및 시스템 건전성 향상 기술

1.1.1 개요

- 「운전 성능 및 시스템 건전성 향상 기술」은 다음 8개의 중분류 단위로 구분함.
- 재료 및 기기 건전성 향상
- 핵연료 안전성 향상
- 기기 및 계측/제어 계통 성능향상
- 원전 상태 종합 감시
- 사이버보안 대응
- 운전성능해석 및 향상 기술
- 화재 방호
- 원자로냉각계통 방사선원향 해석코드 개발

1.1.2 재료 및 기기 건전성 향상

가. 기술 개요

- 이슈 및 문제점
- 1978년부터 2017년까지 국내 가동원전에서는 총 731건의 비계획 정지사건이 보고된 바 있으며, 이 중 기계결함이 정지 건수의 27 %를 차지하며, 정지 일수의 측면에서는 50%를 넘고 있음. 원전 불시정지 사건으로 인해 원전의 경제성 뿐 아니라 사회적 수용성에 매우 나쁜 영향을 미치고 있음. 원전 재료 및 기기 안전성 확보는 원전의 가동 안전성에 대한 국민적 우려를 해소하는데 매우 중요한 선결 과제임.
- 국내 가동원전의 증기발생기는 슬러지 부착 및 틈새 부식환경 조성으로 전 열관에 부식 및 균열이 발생하여 대부분 설계수명 이전에 교체되고 있음.
- 해외 원전에서 가혹한 중성자 조사환경에서 원자로 내부 재료의 열화와 응력부식균열의 발생이 보고되고 있으며, 국내 원전에서도 40년 운전된 고리1호기의 원자로 내 부품에서 균열로 의심되는 검사신호가 발견되어, 이에 대

한 본격적인 연구 필요성이 운영자 및 규제기관에서 강하게 제기되고 있음.

- 해외 해체원전 (Zorita, Zion 등) 장기운전 재료 경년열화에 대한 실증시험 진행 중에 있음. 국내에서도 폐로원전의 재료를 활용하여 안전에 대한 우려를 확인하고, 제거할 수 있는 기회로 활용할 수 있음.
- 한편 비조사재를 취급할 수 있는 기술에 비해 중성자 조사된 고방사화 시편을 취급할 수 있는 여건은 미진한 편임. 따라서 향후 국내가동원전의 안전성을 높이기 위해서 해체원전 경년열화 실증을 할 수 있는 인프라 마련과 이를 통한 가동원전 전 범위 부품열화 안전도 정밀진단체계를 구축할 필요가 있음.

□ 기술개발 필요성

- 높은 중성자 조사환경에서 원자로 내부 구조재료의 응력부식균열 및 재료 열화 현상에 대한 규명, 수명예측 및 방지기술을 개발하고, 가동원전에 적용할 수 있는 기술개발이 필요.
- 증기발생기 슬러지 및 피복관 크러드의 열적, 물리적 특성 평가를 기반으로, 가동환경의 변화에 따른 예측 모델링 기술을 확보하여 증기발생기의 설계수명과 원자로 출력안정성 및 안전여유도를 확보할 필요가 있음.
- 1차계통 LiOH를 대체하는 KOH 수화학 전환에 대비한 선제적 대응기술을 확보하고, 배관부식, 전열관 응력부식균열, 슬러지 거동을 통합적으로 고려한 2차계통 수화학 조건 최적화를 통하여 국내 고유 수화학 지침서 제정 및 인허가를 위한 기술근거로 활용할 필요가 있음.
- 전열관 및 핵심부품의 용접부에서 지속적으로 발생하고 있는 응력부식균열의 장기가동에 따른 손상을 사전에 예측하고 대응하기 위해서는 이에 대한 체계적인 기술개발이 필요함.
- 장시간, 피폭 위험성을 동반하는 중성자 조사시험을 침단분석법과 전산모사 기법을 이용하여 효과적으로 보완하고, 고선량 조사재의 손상 거동에 대한 정량적 예측 필요성이 증대되고 있음.
- 수십년간 발전소 운전환경에 노출되어온 폐로원전 구조재료는 직접적인 경년열화를 확인할 수 있어 그 가치가 매우 큼. 폐로원전 구조재료를 활용하여 국내가동원전의 안전성을 위협할 수 있는 열화를 확인/검증하고, 대응기술을 마련하므로써 원전의 안전성을 향상시킬 수 있음.
- 고리1호기는 최장의 가동시간을 경험한 해체원전으로서 재료열화 평가에 활용 가치가 매우 크며, EPRI 등은 고리1호기를 활용한 공동연구를 제안한바 있음.

나. 세부기술 내용

1) 재료 및 기기 열화손상 제어기술

□ 기술의 정의

- 원자로 내부구조물의 중성자 조사에 의한 열화 거동과 응력부식균열 손상에 대한 실험적 평가 및 전산모사와 파괴역학 해석기법을 통해 건전성을 예측하는 기술 및 열화를 방지하는 기술
- 원전 가동 모사조건에서 니켈합금 및 핵심부품 용접부의 응력부식균열에 대한 장기간 손상을 예측하는 기술 및 이를 방지하는 기술
- 증기발생기 슬러지 및 피복관 크러드의 열적, 물리적 특성을 측정하고, 이를 기반으로 열물성을 예측하는 모델링 기술을 개발함으로써, 중대사고 시 핵연료 피복관 용융 시간을 예측하는데 활용 가능한 기술
- 1차계통 LiOH를 대체하는 KOH 수화학 기술과, 2차계통 수화학 조건 최적화 기술을 개발함으로써, 국내 고유 수화학 지침서 제정 및 인허가를 위한 기술근거로 활용할 수 있는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원자로용기 조사취화, 니켈합금의 응력부식균열에 대한 연구를 통해 국내 원전의 대형 현안을 조기에 수습하고 사건빈도를 줄여가고 있으나, 여전히 새로운 유형의 재료열화 손상이 발견되고 있음.
- 중성자 조사 환경에서 원자로 내부 부품의 응력부식균열 손상 가능성이 제기되고, 이에 대한 대응기술 개발이 요구되고 있으나, 이 분야의 국내 기술 및 연구시설 기반이 매우 취약한 상태임.
- 증기발생기 슬러지 및 피복관 크러드에 대한 물성 측정 및 모델링 기술은 국가 연구개발사업으로 처음 제시된 내용으로서, 시급히 확보해야 할 안전 현안 해결 기술임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 DOE는 Idaho 국립연구소 주관으로 LWRS (Light Water Reactor Sustainability) R&D 프로그램을 착수하였으며, “재료열화 및 손상 (MAaD)” 분야에서 내부구조물, 원자로용기, 용접부 등 원자로 재료의 장시간 사용에 의한 조사취화, 응력부식균열과 같은 열화문제를 첫 번째 이슈로

다루고 있고, 연간 3000만\$의 연구비를 지원하고 있음.

- 미국 EPRI는 2012년부터 장기가동, 수화학, 재료 신뢰성, 증기발생기 관리 프로그램 등 가동원전의 안전성 향상을 위한 다수의 재료관련 R&D 프로그램을 지속적으로 수행중임. 연간 4000만\$ 이상 연구비가 투입되어, 가동원전에서 나타나는 재료열화 문제에 효율적으로 대응하기 위한 연구가 진행되고 있음. 특히 KOH 수화학 전환을 위한 연구를 2015년부터 중점적으로 수행 중임.
- 원전 재가동을 추진하고 있는 일본에서는 가동원전의 1/3 이상이 30년 이상 운전되고 있어서 JAEA 재료·구조안전연구부의 구조건전성평가 연구그룹과 재료·수화학 연구그룹에서 장기가동 원자로부품의 재료열화와 구조건전성 및 원자로 냉각수의 수화학 관련 연구를 수행하고 있음.
- 독일은 자국의 원전들이 2022년에 폐쇄될 계획임에도 불구하고, 원자력안전 연구에 대한 투자를 계속하며, 국제 공동연구에 참여하고 있음. 일례로, 독일 Federal Ministry of Economics and Technology를 통한 연구비 지원으로 기기재료의 열화관리 연구를 계속 수행하고 있으며, 프랑스 EDF 주관으로 진행 중인 원자로건물 축소모델을 이용한 열화평가 및 누설을 평가 국제공동연구인 VeRCoRs에도 참여하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 미국을 중심으로 80년까지의 장기 운전 전략을 고려함에 따라 재료 및 기기의 안전성 및 수명관리의 중요성이 강조되고 있으므로, 이에 대비한 손상 예측 및 방지기술에 연구 투자가 필요할 것으로 전망됨.
- 국내의 경우 설계수명 이후의 장기 운전이 불가하고, 원전에 대한 국민의 인식이 악화된 상황에서, 원전 정지 사건 빈도 및 정지 기간을 최소화 할 수 있는 재료 및 기기 건전성 향상 기술과 대응 기술의 중요성이 증대될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 재료 및 기기 열화손상 제어는 부식, 파괴역학, 수화학, 재료과학, 전산모사 모델링 등 다분야의 통합 연구가 필요한 분야로서, 각 기술 분야의 전문가 그룹의 효율적인 연계 수행 체계가 중요함.
- 수명예측 및 모델링을 위해서는 원전의 가동 이력자료 및 열화손상 사례가 필요하므로 한수원 전문가 그룹 및 학계 전문가로 자문단을 구성하여 정기적인 피드백을 하는 협력 체계를 운용함.

- 대학 및 산업계와의 협력연구를 통하여 기술적 진보와 학술적 진보를 동시에 성취하고자 함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 중성자 조사유기 재료열화특성 정밀시험설비 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 내부구조물 부품 모사 평가 기술 개발 및 구축 • 중성자 환경 부식균열 평가 실험 체계 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 내부구조물 부품 모사 평가 시스템 • Leak free 원격 고방사선 재료열화 평가 시스템
<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 내부구조물 건전성 평가 및 열화 방지 	<ul style="list-style-type: none"> • 중성자 조사재 부식결함 개시평가 기술 개발 • 중성자유기 재료열화 인자에 따른 특성평가 실험 (중성자 조사, 잔류응력, 용존수소) 	<ul style="list-style-type: none"> • 중성자 조사재 부식결함 개시평가 기술 확보 • 중성자 조사시편의 부식균열 DB 및 예측모델
<ul style="list-style-type: none"> • 니켈합금 균열발생 방지 및 내구성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 미세조직, 잔류응력, 환경인자에 따른 균열 거동평가 실험 • Alloy 600 대비 성능 개선 지수식 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 부식균열 영향인자 평가자료 • Alloy 690의 장기운전 수명 예측식
<ul style="list-style-type: none"> • 슬러지 및 크러드 물성 평가 및 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> • 슬러지 및 크러드 열적, 물리적 특성 측정 • 크러드의 열물성 변화 예측 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> • 슬러지 및 크러드 열적 물리적 특성 측정 자료 • 크러드 열물성 예측모델
<ul style="list-style-type: none"> • 1차 및 2차계통 수화학 개량 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 LiOH 대체 KOH 수화학 적용을 위한 재료거동 평가 및 조건 정립 • 2차계통 냉각수 수화학 조건 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> • KOH 수화학 재료 양립성 평가 자료 • 2차계통 최적 아민 및 pH 범위
<ul style="list-style-type: none"> • 핵심부품 용접부의 장기 손상예측 	<ul style="list-style-type: none"> • 내부식재 용접부 부식균열 평가 • 용접부 부식균열 예측모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 용접부 부식균열 평가자료 • 국내 고유원전 용접부의 부식균열 수명예측모델

2) 기기 미세손상 정밀진단 및 수명 평가

□ 기술의 정의

- 원전재료의 조사손상을 최신 미세구조 분석기법 및 마이크로 역학기반 평가방법을 적용하여 해석하고, 원자거동 기반 전산모사를 이용하여 조사 손상량을 정량적으로 예측하는 기술
- 머신러닝 등 인공지능 기술을 원전 재료 손상예측에 활용하여 인적 오류 배제와 정확도 향상을 통한 주요기기 손상 정밀 예측과 실시간으로 재료의 건전성을 감시하는 기술

- 원전 가동 환경에 따른 주요 부품소재의 열화손상 평가 및 손상예측모델 개발과 누적하중, 사고조건 등 복합적인 응력조건하에서의 소재의 파손거동 예측모델 개발을 통해 압력기기재료의 파손확률을 평가하는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 경수로 구조재료 중 원자로압력용기 및 내부구조물의 조사손상에 대한 실험실 수준의 분석평가 및 전산모사에 대한 기초적인 연구를 수행하였음.
- 고압기기 검사에 피폭의 위험과 안전규제 증가에 따라 기존 RT 검사 방법을 초음파 검사로 대체하는 추세이나 아직 검사 정확도가 떨어짐.
- 원자로용기의 파손확률 평가를 위한 PROFAX-RV 평가 프로그램을 한국원자력연구원에서 자체 개발함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국에서는 CASL과 같은 대형 프로젝트를 통하여 재료 내 조사손상에 대한 평가 및 프레임워크 개발 등이 수행되어 왔고, 유럽에서는 학계/산업계 등의 공동 연구를 통하여 다양한 컴포넌트에서 전산모사를 적용하여 손상량을 분석하고 예측하려는 연구가 꾸준히 지속되고 있음.
- 비파괴 검사 기술 향상을 위한 초음파 및 와전류 검사 신뢰도 향상과 결합 평가를 위한 시뮬레이션 해석 기술을 중심으로 미국과 프랑스에서 연구를 수행하고 있음.
- 미국은 VISA, FAVOR, 일본은 PASCAL 등의 원자로용기 확률론적 파괴역학 평가 프로그램을 자체 보유하고 있으며, NRC에서는 Large Break LOCA, MERIT, PARTRIDGE 프로그램을 통해 배관 확률론적 건전성 평가 코드를 개발함.

□ 미래동향 예측

- 컴퓨터 성능과 분석기법의 향상으로, 장시간/고비용의 조사손상 관련 실험을 보완 또는 대체할 수 있는 전산모사 방법과 첨단분석법을 활용한 재료의 조사취화 정량평가가 가능해 질 것임.
- 재료 검사 자료의 빅데이터 분석과 머신러닝을 적용한 자동평가기술은 원전 가동의 무인화와 안전 시스템 강화의 필수 요건이 될 것이며, 사물 인터넷 등 연관 분야에 파급 효과가 클 것으로 예상됨.
- 원전 주요기기의 건전성 평가에 주요변수를 확률분포로 산정하고 기기의

안전여유도를 파손확률로 정량화하여 평가함으로써 효율적으로 수명을 관리하는 방향으로 변화할 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 열화된 부품소재에 대한 특성 시험을 통한 기초 자료를 생산하여 기본적인 분석 및 예측 모델을 개발하고 이를 산업계와 협력하여 현장 데이터로 검증을 수행함.
- 국내 연구계/학계/산업계와 연계하여 협력연구를 통해 최신 평가/분석 기법을 연구개발에 적용하여 원전 부품소재의 손상평가 및 예측모델 개발
- 국제공동연구 프로그램에 적극 참여하여 해외 최신 연구동향/기술 확보와 더불어 개발된 예측모델, 평가기술 및 평가코드에 대한 검증을 수행함으로써 국제적 수준의 기술을 확보함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 조사손상 첨단분석 및 원자거동 전산모사 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 조사손상 정량평가 첨단분석기법 도입 전산모사 기법 이용 고선량 조사재 조사손상량 예측 	<ul style="list-style-type: none"> 고선량 조사재 대상 첨단분석 및 평가 기술 고선량 조사재 손상평가용 전산코드
<ul style="list-style-type: none"> 머신러닝 기반 원자로계통 핵심기기 손상예측 	<ul style="list-style-type: none"> 구조재료 물성평가 및 증기발생기 결함진단 자동평가 재료손상 자동평가 머신러닝 기술 개발 실시간 재료열화 정밀진단 시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 구조재료 파괴/비파괴 특성 DB 딥러닝 신경망 적용 손상예측 모델 빅데이터 분석 기술
<ul style="list-style-type: none"> 잔류응력 평가 및 시험, 해석, 예측 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 이종금속 용접부 잔류응력 정밀 측정 및 손상부위 예측 잔류응력을 고려한 균열거동 해석기술 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> 잔류응력 평가기술 및 미세손상 민감부위 해석기술 균열거동 예측모델
<ul style="list-style-type: none"> 구조재료 환경/열피로 수명평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 환경에 따른 취화기구 영향도 평가 수화학적/열적 피로환경을 고려한 피로손상 예측모델 개발 원전기기의 실시간 손상 monitoring system 및 검사/평가 절차 확립 	<ul style="list-style-type: none"> 취화기구별 영향평가 기술 환경을 고려한 피로손상 예측모델 피로손상 실시간 모니터링 기술
<ul style="list-style-type: none"> 압력기기 파손확률 파괴역학 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 압력기기 주요 손상기구 우선도 선정 및 기반 해석 기술 개발 복합하중 대응 파손거동 시험 및 수명 예측 모델 개발 압력기기 파손확률 파괴역학적 종합 평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 주요기기 손상기구별 중요도 평가 DB 복합하중 파손거동 평가모델 파손확률 평가기술

3) 폐로원전 해체 재료를 활용한 경년열화 실증시험

□ 기술의 정의

- 국내 폐로원전 구조재료를 활용한 경년열화 실증
- 가동원전 구조재료 열화도 예측

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 고리 1호기는 최장의 가동시간을 경험한 해체원전으로서 재료열화 평가에 활용가치가 매우 큼.
- 비조사 재료 경년열화 평가기술은 일부 선진국 수준에 진입함.
- 고방사화 부품을 이용한 시험편 가공 및 정밀 평가기술은 제한적으로 확보되어 있음.
- 8개의 배플포머볼트에 대해 결함의심 신호가 검출된 바 있으며, 중성자조사 유기 부식현상에 대한 분석과 발전소 1차 냉각수 환경에서 실증이 요구됨. 그러나 발전소 환경 실증을 위한 인프라는 부족한 실정임.
- 다수 호기에서 원자로 출력 불균형 현상이 발생하여 출력감소 운전이 시행된 바 있음.
- 증기발생기 전열관 (Alloy 690) 대해 실험실적으로 열화에 취약한 환경이 드러났으며, 고리1호기에서 약 20년간 사용된 전열관 파괴분석은 전 세계적으로 이루어진 바 없음. 전열관 결함의 비파괴 검사 신뢰도 개선이 요구됨.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해외 해체원전 (Zorita, Zion 등) 장기운전 재료 경년열화에 대한 실증시험 진행 중이며, EPRI 등은 고리1호기 활용 공동연구를 제안해옴.
- 원자로용기 노즐부의 저선량 조사취화에 의한 안전여유도 감소 등 장기가동 원자로용기의 안전성 현안이 국제적으로 제기되고 있음.
- 가동연수 증가에 따라 원자로 내부구조물의 중성자 조사 열화현상에 대한 국제적인 관심이 매우 높음. 그러나 정확한 열화기구는 밝혀지지 않음.
- 내부식성이 매우 강한 Alloy 690 에 대해서도 재료조직, 응력, 환경에 따라 다양한 형태의 취약성을 나타내고 있어 전 세계의 선도 기관에서 활발한 연구를 수행 중임.

- 크러드에 의한 원자로 출력 불균형 현상이 점증함에 따라, 실제 크러드의 화학적, 물리적, 열적 특성자료가 요구됨.

□ 미래동향 예측

- 국내 가동원전의 가동연수가 증가함에 따라 구조재료의 열화는 불가피함. 따라서 재료열화에 대한 실증을 통한 정확한 예측은 점차 중요해 질 것으로 예상됨. 실험실적인 간접적인 경년열화가 아닌 수십 년 간 발전소 운전환경에 노출되어온 폐로원전 구조재료는 직접적인 경년열화를 확인할 수 있어 그 가치가 매우 큼.
- 원자로 내부에서 높은 수준의 중성자 조사가 된 재료와 실증연구를 위해 확보된 인프라는 가동원전의 재료열화예측 연구를 위해 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 현재 가동원전의 안전성을 향상시키는 데 직접 활용할 수 있는 핵심기기를 선정하여, 해체원전 기기에서 해당 재료를 인출 및 분석하고자 함.
- 원자로, 원자로내부구조물, 핵연료 크러드, 증기발생기가 대상 부품임.
- 해체재료 경년열화 실증을 통해 실험실적으로 생산된 DB, 모델을 검증할 수 있으며, 열화모델을 개선안을 도출할 수 있음.
- 산·학·연 공동연구체계
 - 1단계(2년) : 해체원전 기기를 활용한 경년열화 실증평가 기반 구축
 - 2단계(5년) : 가동원전 경년열화도 예측코드 검증 및 감시진단 개선안 도출

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 원자로부품 정밀가공 및 조사영향 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 해체재료 특성평가 시험편 정밀가공기술 및 평가체계 구축 • 해체기기 활용 시험편 가공 및 조사취화 특성평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로용기, 내부구조물 조사취화 특성 DB구축 및 취화예측모델 검증/개선
<ul style="list-style-type: none"> • 증기발생기 및 배관 열화손상 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 중준위급 방사성재료 평가시설 구축 • 고리1호기 증기발생기 및 배관 인출 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 해체 원전 증기발생기/배관 열화특성 모델검증/개선
<ul style="list-style-type: none"> • 결함 샘플 파괴/비파괴 검사 	<ul style="list-style-type: none"> • 해체 증기발생기 결함발생 이력신호 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 빅데이터 분석 기반 열화예측 모델 개발

빅데이터 분석기술	<ul style="list-style-type: none"> • 결함 샘플 평가자료 빅데이터 분석 기술 개발 	
<ul style="list-style-type: none"> • 실제 계통 슬러지 및 크러드 분석기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 고준위 크러드 채취 및 평가기술 개발 • 전열관 및 피복관 위치별 슬러지/크러드 물성 측정 	<ul style="list-style-type: none"> • 실제 슬러지 및 크러드의 화학적 물리적 열적 특성자료 확보

4) 원전 기기/부품 건전성 향상 소재기술

□ 기술의 정의

- 3D 프린팅 등의 혁신제조기술을 이용한 원전 노내외 구조부품의 성능 및 건전성 향상 기술
- 원자로 기기/배관 연결부 이중금속용접부의 배제를 통한 원전배관 용접부 손상 방지기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 3D 프린팅을 이용한 원전 밸브부품, 핵연료 집합체 부품 제조를 위한 연구가 수행되고 있으나 산발적인 연구개발 지원으로 기술수준은 낮은 편임.
- 이중금속용접부의 파손예방 및 보수를 위해 오버레이 용접 등의 방법을 적용하고 있으나 열화 방지를 위한 근본적 재료 개선기술에는 접근하지 못하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국, 유럽, 러시아, 중국 등 원전운영 국가에서는 3D 프린팅 기반 소재를 노내외 구조물 및 부품, 핵연료 집합체 부품 등에 적용하기 위해 소재성능 향상, 원전환경 적합성 평가, 표준화, 코드개발 등을 위한 연구가 수행되고 있음.
- 또한 3D 프린팅을 이용한 이중금속용접 연구와 연구로 및 중소형 원전용 부품으로 적용하기 위한 연구도 이루어지고 있음.

□ 미래동향 예측

- 3D 프린팅 기술을 이용한 원전 노외부품의 일부 상용화가 이루어진 바 있으나 노내 부품 활용을 위해서는 물성자료의 축적과 소재성능 개선이 요구됨.
- 향후 3D 프린팅 기반 소재의 성능 최적화와 표준화 진전에 따라 원전 부품에 다양하게 활용될 것으로 전망됨.

□ 기술개발 수행체계

- 적층제조를 위한 설계기법 적용, 3D 프린팅용 고유분말 제조기술 개발, 원전부품의 특성향상을 위한 공정 최적화 기술들을 통합적으로 개발하여 원전 노내 구조물 부품 및 용접부 제조 신기술을 개발함.
- 3D 프린팅 혁신 제조기술을 적용한 원전 안전부품 제조기술 확립을 통해 기존 제조기술의 한계로 인한 노심부품 및 접합부 건전성 문제를 해결할 수 있는 한계 돌파형 기술을 개발함.
- 산·학·연 공동연구체계
 - 1단계(5년) : 3D 프린팅 기반 소재 및 접합부 제조 및 최적화
 - 2단계(5년) : 3D 프린팅 제조부품, 접합부 성능검증 및 표준화

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 3D 프린팅 기반 원전 노내 구조부품 건전성 향상 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 3D 프린팅을 이용한 노내부품 성능 향상 기술 개발 3D 프린팅 제조소재 노내외 특성 평가 및 물성자료 DB 구축 3D 프린팅 부품 코드 제정, 표준화 및 인증 	<ul style="list-style-type: none"> 3D 프린팅용 분말 제조 기술 3D 프린팅 부품 설계 및 공정 최적화 기술 3D 프린팅 부품 성능평가 및 검사 기술
<ul style="list-style-type: none"> 냉각재 계통 접합부 파손 저항성 향상 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 이종금속용접부 대체 3D 프린팅 다층금속 재료 최적공정 확립 3D 프린팅 다층금속 재료 사용 환경 성능 검증 실 규모 제작 특성 평가 및 인허가 연계 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 다층금속 경사기능재료 제조기술 다층금속재료 잔류응력 완화 및 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> 원전 노심부품 내환경 코팅 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 내환경 코팅소재 설계 및 제조공정 개발 내환경 코팅소재 조성 및 제조공정 최적화 수화학환경 및 모재와의 양립성 평가 가동, 사고환경 건전성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 코팅층 설계 및 제조기술 모재와의 양립성 향상기술 내환경 코팅층 건전성 평가기술

1.1.3 핵연료 안전성 향상

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 연소도를 반영한 핵연료 안전 규제 기준의 강화로 핵연료-시스템 연계 해석 필요성 증대
- 국내 원자력 정책 변화에 따라 원전의 고부하 및 부하추종운전에 대비한 핵연료 안전 향상 기술 개발 요구 확대
- 빈도가 높아지는 국내 지진 특성에 맞는 핵연료-노내 구조물 지진 특성 평가와 고내진 핵연료 개발 필요성 증대

☐ 기술개발 필요성

- 핵연료 안전 평가의 불확실성을 줄여 운영 여유도를 확장하고, 새로 개발되는 사고저항성 핵연료를 활용한 설계 기준 변경으로 안전 여유도를 확보하기 위해 전 노심의 핵연료 거동을 시스템과 연계 해석하는 핵연료 전 주기 안전성 해석 체계 개발과 이의 검증을 위한 고정밀 시험 기술의 개발이 필요함.
- 부하 추종 운전이나 지진 안전성 향상을 위한 고부하 운전 대비 핵연료 성능 평가 및 안전성 향상 기술의 개발이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 핵연료 안전성 통합 해석/실험

☐ 기술의 정의

- 연소 환경별 핵연료 안전 성능 고정밀 시험
- 연소도 반영 안전성능 통합 모델 개발 및 검증
- 핵연료-시스템 연계 핵연료 안전성능 종합 평가 체계

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 핵연료 봉단위 해석 모델이 개발되었고, 핵연료-열수력 연계 다물리 코드 개발이 진행 중임.
- 다물리, 다차원 핵연료 성능 해석 및 전 노심 핵연료에 대한 통합 해석 체계

개발 연구는 수행되지 않음.

- 해석 체계의 검증을 위한 시험 기술과 실험 자료가 매우 부족함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 원전 선진국의 경우 전 노심의 핵연료를 대상으로 하는 다 물리 다차원 통합 해석 체계 개발을 진행 중임.

□ 미래동향 예측

- 발전된 계산 과학 기술을 기반으로 통합 해석 체계를 개발하고 이를 활용하여 실험적 검증이 어려운 극한 환경의 거동을 정밀하게 해석하고, 원전의 안전성을 정밀 평가하고 혁신적인 안전 향상 기술을 개발하는 데 활용될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 핵연료 전 주기 통합 안전 성능 해석 기술은 해석 체계의 개발과 실험적 검증으로 구성됨.
- 산·학·연 공동연구체계
 - 1단계(3년) : 연소 환경 별 (정상, 과도, 사고, 저장) 핵연료 안전 성능 고정밀 실험
 - 2단계(3년) : 연소도 반영 안전 성능 통합 모델 개발 및 검증
 - 2단계(4년) : 핵연료-시스템 연계 핵연료 안전성능 종합 평가 체계

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 연소 환경별 핵연료 안전 성능 고정밀 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 노외 검증 실험 기술 개발 및 실험 DB구축 • 연소도를 고려한 노내 검증 실험 기술 개발 및 실험 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료-열수력 연계 실험 기술 및 측정 기술 • 핫셀 실험 기술
• 연소도 반영 안전성능 통합 모델 개발 및 검증	<ul style="list-style-type: none"> • 통합해석체계에 필요한 신규 모델 개발 및 적용 • 다차원 핵연료 코드 통합 해석 체계 개발 / 평가 / 검증 • 실험 데이터베이스를 이용한 통합 모델 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료재배치 및 변형유로연계 모델 • 다차원모델 • 실험 데이터베이스
• 핵연료-시스템 연계 핵연료 안전성능 종합 평가 체계	<ul style="list-style-type: none"> • 통합 해석 기술을 이용한 최적 해석 체계 방법론 개발 • 전 노심 핵연료 통합 해석 체계 구축 • 멀티스케일 재료 모델에 대한 평가(안전 여유도 등)를 위해 통합 연계 해석 체계 활용 	<ul style="list-style-type: none"> • 방법론 설정 및 불확도 평가 기술 • 전 노심 핵연료 해석 기술 • 멀티스케일기반 재료 모델

2) 고부하 운전 대비 핵연료 성능 평가 및 안전성 향상

☐ 기술의 정의

- 원전 고부하(출력증가, 장주기운전, 부하추종운전) 운전 요구를 충족시킬 수 있는 핵연료 성능 평가 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 24개월 장주기운전 수용을 위한 핵연료 인허가연소도 증가를 위한 기술개발 수행 중임.
- 부하추종운전 및 출력감발 조건에서 소결체-피복관 상호작용(PCI) 평가를 위한 유한요소기반 연료봉 해석코드 개발 중임.
- 해석 체계의 검증을 위한 시험 기술과 실험 자료가 부족함.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 원전 선진국의 경우 고부하운전 요구를 충족하는 핵연료 성능 평가기술 확보 및 상용 적용 중임.

☐ 미래동향 예측

- 에너지전환 시대에 원전의 운전조건 변화 요구에 대응하기 위한 기술로 활용될 것임.

☐ 기술개발 수행체계

- 핵연료 설계기술을 보유하고 있는 산업계 주도로 추진함.
 - 1단계(5년) : 고부하 운전에 따른 핵연료 성능평가 기술 개발 및 검증자료 확보
 - 2단계(3년) : 고부하 운전에 따른 핵연료 성능평가 기술 인허가

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 출력증강/장주기운전 핵연료 성능평가 	<ul style="list-style-type: none"> • High Duty 핵연료 성능평가 기술 • 핵연료 인허가연소도 증가 영향 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • High Duty 운전에 의한 피복관 부식/수소화/크러드 영향 평가기술 • 고연소도 핵연료 정상상태/과도/사고 해석코드/방법론/검증 DB

<ul style="list-style-type: none"> • 부하추종운전 핵연료 성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 연료봉 PCMI 해석기술 개발 • 제어봉 기계적/건전성 평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 연료봉 PCMI 해석코드/방법론/설계기준/ 검증 DB • 제어봉 마모/피로 시험 및 평가
--	---	--

1.1.4 기기 및 계측/제어 계통 성능 향상

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 원전의 기기/전자/구조물 계통 및 계측제어 계통의 안전성 혁신을 위하여서는 기존에 적용되고 있는 안전진단 기술의 고신뢰화 및 스마트 센싱 등을 이용한 빅데이터 구축, 인공지능 적용 등 ICT기술의 접목을 통한 지속적인 연구개발이 이루어져야 함.
- 가동원전의 경우, 원전의 일차계통이 안전하게 운영되더라도 이차계통에서 예기치 않은 고장 또는 결함이 발생할 경우 기기류들의 연속적인 손상으로 원전의 안전성에 심각한 영향을 초래 할 수 있음.
- 국내의 원전 및 수화력 플랜트의 경우 감시/진단 계통의 기기상태 감시용 센서류 및 측정 시스템은 전량 수입에 의존하고 있으므로, 최근 주목받고 있는 제4차 산업혁명 기술을 접목한 IoT 및 진단용 빅데이터 구축 등을 위하여서는 우선적으로 감시/진단용 센싱 시스템에 대한 원천기술(신소재 및 신개념 적용 등) 확보가 되어야 함.
- 가동원전 압력경계 기기/전자부품/기계시스템 및 제어계통의 안전성 혁신화를 위해서는, 기존의 고전적인 감시범위를 확대하는 스마트 복합센싱 기술을 적용하여, 계통의 결함과 고장을 조기에 정확하게 예측하기 위한 지능화 진단 기술의 개발 및 적극적인 활용이 요구됨.
- 계측/제어 계통의 성능 향상은 원자력의 시스템의 운전 성능 및 건전성 향상에 직결되는 하드웨어 부분으로 지속적인 연구개발로 그 효과를 직접적으로 체감하고 수치화 할 수 있는 분야임.
- 최근 국내 경주, 울산 지역 지진으로 인한 국민적 불안감이 확대되고 있고, 향후 강진으로 인한 중대사고 발생 가능성이 있으므로 계측/제어 계통 기술의 성능 향상을 통한 안전성 확보가 시급함.

- 수 십여 년간 운전되는 원전에서 계측/제어 계통의 성능 개선과 안전성 증대로 유지보수 비용을 크게 절감할 수 있고 고통고장 원인 분석 및 대처 등 계통의 안전성 향상이 필요함.
- 가동원전 또는 수출형 원전의 계측/제어 계통의 성능향상을 위해서 첨단 4차 산업혁명 기술을 접목한 안전성 혁신이 현안으로 대두됨.
- 컴퓨터의 발전과 인공지능 기술의 진보로 인해 운전 빅데이터의 활용성이 필요성이 대두되고 있으며, 특히 Smart IoT Sensing을 통해 다양한 실시간 데이터가 수집됨으로 인해 해석, 운전, 운영, 실시간 측정 데이터 등 다양한 발전소 운영 빅데이터를 저장 처리, 분석하기 위한 빅데이터 병렬 처리 기술의 개발이 필수적임.
- 기존의 안전진단 및 예측 기술은 해석적인 방법과 물리적 모델을 이용하였으나, 컴퓨터의 발전과 인공지능 기술의 진보로 인해 안전진단 및 예측 기술은 축적된 안전 진단 해석 빅데이터 및 운영 빅데이터를 이용한 빅데이터 활용 인공지능 기반 공정계측제어기기 고장진단예측 기술의 개발이 필요함.
- 원전의 전 모드 자율운전을 위해서는 축적된 안전 진단 해석 빅데이터 및 운영 빅데이터를 이용한 사고상태를 자율 극복할 수 있는 운전 빅데이터 및 인공지능알고리즘을 적용한 사고상태 진단예측 기술의 개발이 필요함.
- 4차 산업 도래에 따른 AI S/W에 대한 신뢰성 문제가 새롭게 제기되고 있으며 인공지능 소프트웨어 대하여 설명 가능한 신뢰성 평가가 필요하고 신뢰성, 성숙성, 등 신뢰성 평가 기술을 향상시켜 신뢰성 평가 수준을 국제 수준으로 운용할 필요성이 있음.

□ 기술개발 필요성

- 원전의 가동 중에 압력경계 기기/구조물의 사고한 고장이나 결함이 사고로 확대되는 가능성을 사전에 차단하기 위해서는 ICT 기반 지능화된 감시/진단/예측 플랫폼의 구축이 필요함.
- 국내 가동원전 및 수출원전의 운영 안전성 혁신 및 사고의 예방을 위하여서는 잠재적인 고장징후를 포함한 지능화된 안전진단 기술의 개발이 필요함.
- 현재 노후화 및 이상상태 감시용 센서망은 주로 고가의 주요설비를 제외하고는 설치되어 있지 않으며, 원전 내에 감시사각 지대가 존재함. 경제적인 비용으로 기존의 감시사각 지대를 해소할 수 있는 스마트센싱 기법을 개발하여 가동원전에 적용할 필요가 있음.

- 가동원전의 압력경계 구조물 내부 금속성 파편 및 이물질이 종종 발생하며, 이물질 발생 시 압력경계 내부 기기의 충격 및 마모 등 가동원전의 안전성 저하를 초래함. 원전 압력경계의 금속파편 및 이물질에 대한 실시간 감시기술의 지속적인 고도화 개발로, 가동원전 1차 및 2차 계통 전반에 걸친 기기의 건전성 저하 조기차단 필요함.
- 가동원전의 경우 예기치 않은 밸브의 막힘, 누설, 이물질 발생, 지지조건 변화 등으로 인하여 배관계, 회전체 및 밸브 등의 고진동 현상이 발생하여 주요 고장 및 사고로 진행할 가능성이 있음. 기기의 고진동 현상의 규명 및 고진동의 지속으로 인한 피로수명 단축 등에 대한 정확한 평가를 통한 가동원전의 안전성 혁신이 필요함.
- 원전의 안전운영에 대한 중요성이 부각되고 있으며, 특히 누설에 대한 사전 탐지 및 예방 필요성에 대한 관심이 높아지고 있음. 현재 누설감시 및 진단 기술은 미세한 누설이 발생한 후에 나타나는 특징(가스, 누설진동, 누설음 등)을 감지하여, 사후에 누설을 탐지하는 방식임. 누설을 사전에 예방하기 위해서는 복합센싱기술을 활용하여 누설 취약부에 대한 건전성 감시/진단/예측 기술 개발이 필요함.
- 기존의 원자로계통 구조건전성 감시/진단 시스템에서 균열감시 기능이 미흡함. 원전의 가동연수 증가에 따른 사고를 조기에 차단하기 위하여 균열감시에 대한 핵심 신기술 개발 및 규제 요건화가 필요함.
- 원전 계통 기기의 안전을 상시적으로 감시하고 진단하기 위한 센서 기술은 고온/고압/방사선 환경에서 신뢰적으로 동작해야 하는 전략기술로서 전량 해외 선진 기술에 의존하고 있음. 특히, 후쿠시마와 같은 중대사고 발생의 경우 훨씬 가혹한 환경(초고온/고방사선/폭발)에서 원전 주요기기의 상태감시를 통해 효과적으로 초기 대응이 가능하도록 하는 것이 매우 중요하나, 아직까지 관련기술이 개발되지 않음.
- 최신 ICT 기술의 원자력 관련분야 도입 및 활용 최신설비에 스마트 센서망 도입에 의한 빅데이터 확보가능성 증대하므로, 누적되고 있는 데이터를 적극적으로 활용한 정확한 현상 진단과 이의 지능적인 자동화가 요구됨.
- 스마트 안전진단을 위해서는 무선센서 네트워크 구축이 필수적임. 이를 위해서는 많은 센서를 분포시키는 것이 필요하나, 전력공급이 어려운 문제점이 있음. 자가발전을 통한 전력공급 기술이 필요하며, 가혹환경에서 동작이 가능하고, 원전 기기/설비에서 직접 에너지를 수확할 수 있는 자가발전용 소재/부품 기술이 필요함.

- 고정센서 사용으로 인한 감시사각 지대 발생의 한계점을 극복 할 수 있는 센서 고밀도 융합센서의 중요성이 확대됨. 따라서 광역의 변위, 온도, 진동에 대한 분포정보를 무전원 상태에서 상시 원격 모니터링 할 수 있는 고밀도 원격 측정시스템의 필요성이 증대함.
- 원전의 계측제어 장비들은 전자시스템 대체로 기능은 개선된 반면 반도체 소자의 방사선 열화로 인해 전자장비의 치명적 고장 가능성이 증대되고 있음. 고방사선 환경에서의 방사선 열화를 전자장비 내부를 통하여 진단하고 운영환경에서의 정밀한 수명예측 진단기술의 개발이 필요함.
- 계측/제어 계통 성능 향상을 통해 기존의 처리 범위보다 넓은 범위를 커버 할 수 있어 발전소 상태를 지속적이고, 더욱 정확하게 감시할 수 있음.
- 계측/제어 계통은 그 기능과 성능을 확인하기 위해서는 다양한 (고온, 고압, 고방사선, 고습도) 시험 시설을 통해 실증해야 함. 원자력연구원은 고방사선 시험시설, 열수력시험시설, 중대사고시험시설, 다목적 연구로 시설을 보유하고 있어 개발된 차세대 계측기의 실증시험이 원활하게 수행될 수 있음.
- 기본적인 계측/제어 계통은 KNICS 사업을 통해 국산화가 완료되었지만 IoT 등 새로운 기술 개발을 접목하여 차세대 고성능/고안전 원천기술을 확보할 필요가 있고, SMART와 같은 소형 모듈 원전 (SMR) 등의 미래원전 기술 개발을 위해서는 반드시 최신 기술의 계측제어 계통 설계 기술이 필요함.
- 현재 디지털 안전 계측제어계통 평가관리 국가 표준 및 안전규제가 단순화, 표준화 및 일관성이 결여되어 있으며, IoT, 인공지능 및 빅데이터에 대한 평가관리 국가 표준 및 안전규제 기술 개발이 시급히 필요함.
- 최근 다양한 신기술들이 숨 가쁘게 발전하면서 디지털 계측제어 전반에 걸쳐 변화의 물결이 몰려오고 있음. 변화의 핵심은 초연결화, 초자동화, 초융합화로 요약할 수 있으며 이들의 새로운 디지털 계측제어 인프라의 패러다임 전환에 따른 안전성을 확보할 수 인프라의 구축이 필요함.
- 빅데이터 병렬 처리 기술은 Smart IoT Sensing을 통해 다양한 실시간 데이터, 해석, 운전, 운영, 실시간 측정 데이터 등 다양한 발전소 운영 빅데이터를 저장 처리, 분석을 가능하게 하여 데이터 기반 고장진단 및 예측기술, 자율운전 기술 등 다양한 분야에 활용될 수 있음.
- 빅데이터 활용 인공지능 기반 공정계측제어기기 고장진단예측기술은 Smart IoT 기술, 고속의 병렬처리 기술 및 고장 및 운영 빅데이터를 융합하여 기기 및 공정 이상상태를 신속하고, 조기에 진단 예측 가능하고 나아가 이를 통해 자율운전을 달성할 수 있음.

나. 세부기술 내용

1) 기기/구조물 계통 실시간 안전진단

□ 기술의 정의

- 원자로계통 주요설비를 포함하여, 배관 계에 발생하는 누설을 조기에 탐지하여 대형사고 발생을 예방하기 위한 기술
- 원자로계통의 구조건전성 저하 및 중대형 사고를 유발할 수 있는 균열을 탐지하는 기술
- 원전의 안정적인 운영을 위해 필요한 냉각수/급수용 펌프 및 밸브의 고장감시 및 체계적인 정비계획수립을 위한 상태진단 및 예측 기술
- 가동 원전의 손상 및 안전성 저하를 초래할 수 있는 금속파편에 대한 감시/진단 신뢰도 향상을 위한 고도화 기술
- 노내외 중성자 신호 및 원자로계통 계측신호를 통합 감시하여 원자로계통 내부구조물의 이상상태 및 결함을 진단하기 위한 기술
- 손상이 발생할 경우, 심각한 누설사고를 유발할 수 있는 증기발생기 전열관의 누설 예방 및 조기탐지를 위한 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 한국원자력연구원, 표준과학연구원 등을 중심으로, 누설 탐지 및 진단에 대한 연구를 진행하고 있으며, 최근 한국원자력연구원에서는 발전소와 같이 기계운전소음이 존재하는 환경에서 매설배관에 대한 누설진단 연구를 수행하고 있음.
- 최근 다양한 산업분야에서 경쟁력 향상을 위한 방안으로 인공지능 기술의 도입 노력이 한창 중이며, 이와 더불어 플랜트 이상상태 진단 분야에서도 머신러닝/딥러닝 기술 도입을 통해, 실시간 모니터링 데이터를 기반으로 이상상태 특징추출 및 학습을 통해 진단신뢰도를 향상시키는 연구가 시작되고 있음.
- 원자로계통 금속파편 및 내부구조물 진단기술 등을 한국원자력연구원서 개발하여 산업체에 기술 이전한 바 있으며, 산업체(우리기술)에서도 원전에 음향누설감시시스템 및 금속파편감시시스템을 납품한 바 있음.
- 최근 원자력연구원 및 대학에서는 원전 안전진단의 신뢰도를 향상시키기

위해서 다양한 실험, 시뮬레이션 데이터 확보 및 기계학습 등의 최신기술을 접목하는 방향으로 원전 안전진단 연구·개발이 이루어지고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국, 프랑스, 독일에서는 원자로계통 구조건전성감시시스템을 개발하여 상용화한 바 있으며, 감시 및 진단 성능을 향상시키기 위한 연구·개발을 지속적으로 수행하고 있음.
- 영국, 프랑스, 일본 등의 선진국에서는 매설배관을 포함하여, 배관의 누설을 탐지/감시하는 시스템을 개발하여 판매하고 있으나, 아직 복합센싱 및 감시/진단에 대한 연구는 선진국에서도 활발히 이루어지지 않고 있음.
- 미국 등 선진국을 중심으로 GE사의 Predix와 같은 산업설비관리 플랫폼에 대한 연구개발이 지속적으로 이루어지고 있으며, 현재까지 플랜트에 대해서는 터빈, 펌프, 전동기 등 플랜트 운영효율과 직접적인 관계가 있는 주요능동설비에 대한 효율적인 자산관리에 초점을 맞추어 연구개발을 중점적으로 수행하였으며, 안전관리 강화 추세에 따라 향후 Predix 등의 관리대상이 점차 확대될 것으로 예상됨.

□ 미래동향 예측

- 최근 IoT, 무선통신 기술을 이용한 산업설비 감시, 진단기술이 개발되고 있으며, 미국의 경우 원전에도 무선통신을 이용한 감시/진단 기술이 일부 적용되고 있음. 향후에는 국내 원전 및 발전소에도 IoT, 무선통신을 활용한 기술이 적용될 것으로 예상되며, 이러한 환경에서 사용가능한 원격 감시기반 기기/구조물 계통 실시간 안전진단 기술을 개발할 필요가 있을 것으로 판단됨.
- 미국 GE사의 Predix를 비롯하여, 대량의 데이터와 기계학습기술을 활용하여 이상진단 신뢰도 향상 및 상태예측을 수행하는 플랫폼에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있으며, 향후 기기/구조물 계통 실시간 안전진단분야에도 기계학습기술을 접목한 연구가 활성화 될 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

- 기기/구조물계통 실시간 안전진단기술을 연구하기 위해서는 누설, 균열, 펌프/밸브 결함상태, 금속파편 충격 등의 이상상태를 구현할 수 있는 테스트베드 구축이 필수적이므로, 실험인프라를 확보하고 있는 연구기관을 중심으로 첨단알고리즘을 개발할 능력이 있는 대학, 개발된 기술을 상용화 할 수 있는 산업체가 함께 산·학·연 협력체계를 구성하여 연구를 수행하는 것이 바

람직함.

- 원전 및 발전소 현장에서 실질적으로 활용할 수 있는 기술을 개발하기 위해서는 현장 상황 및 현장의 요구사항을 반영할 수 있어야 하므로, 현장 실무자와의 기술교류를 적극적으로 실시할 필요가 있음.
- 최근 이상상태 진단의 신뢰도를 향상시키기 위한 방법으로 기계학습/딥러닝 등의 기술이 도입되고 있으며, 이러한 4차 산업혁명관련 기술을 적극적으로 도입하여 개발기술의 진단 신뢰도를 향상시킬 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 배관누설 복합센싱 및 감시/진단 기술	<ul style="list-style-type: none"> 배관누설 특징추출 기술 개발 및 누설진단시스템 개발 배관누설 사전예방을 위한 복합센싱기법 및 하드웨어 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 배관누설 특징추출 기술 누설진위판별 기술 복합센싱기반 배관누설 예방시스템 기술
• 압력경계구조물 균열 복합센싱 및 진단 기술	<ul style="list-style-type: none"> 가동원전 압력경계 균열 조기탐지용 복합센싱 및 진단 원천기술 개발 복합 센싱기술 검증, 진단용 DB 구축, 온라인 감시용 시제품 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 균열 센싱용 신호처리기술 균열특징 추출 기술 균열발생 진위판별 기술
• 펌프 및 밸브 성능 감시	<ul style="list-style-type: none"> 펌프 상시 진단 감시 및 밸브 이상상태/외부누설 진단기술 개발 가동중 펌프 고장예측 및 밸브 내부 누설 진단기술 개발 펌프 기계요소 고장예측 및 밸브 내부 누설 진단시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 펌프 이상상태 진단기술 밸브 결함상태 진단용 신호처리 알고리즘 기술 기계학습기반 결함상태 판별기술
• 금속 파편 감시/진단 고도화 기술	<ul style="list-style-type: none"> 금속파편 및 이물질 실시간 감시 및 진단 기술 고도화 기존시스템 개선 및 현장 적용 (1차 및 2차 계통 적용 확대) 	<ul style="list-style-type: none"> 기계학습기반 금속파편 발생 진위판별 기술 금속파편 진단용 동특성해석 시뮬레이션 기술
• 노내외 중성자 잡음 이용 원자로내부구조물 및 노심의 구조건전성 통합 감시 기술	<ul style="list-style-type: none"> 노내외중성자 잡음 및 온도센서 잡음을 융합한 노심 및 내부구조물 구조건전성 온라인 감시기술 개발 온라인 융합감시 시스템 시제품 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 노내중성자신호 분석용 신호처리기술 노내 구조물 이상상태진단기술 노내구조물 건전성 평가기술
• 증기발생기 전열관 누설감시 기술	<ul style="list-style-type: none"> 전열관 누설 예방 및 조기탐지용 신기술 개발 전열관 누설 예방시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 전열관 누설상태 감시용 센싱 기술 전열관 누설진단용 신호처리기술 및 기계학습/판별 기술
• 기계계통 설비 및 구조물의 진동해석, 시험평가 및	<ul style="list-style-type: none"> 원전 기계계통 설비 및 구조물의 진동해석, 시험평가 및 피로해석 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> 진동해석, 시험평가 및 피로해석 기술개발

피로해석	• 검증 및 현장적용을 위한 평가체계 구축	
------	-------------------------	--

2) 통합 안전진단 및 스마트 고장예측

□ 기술의 정의

- 스마트 센싱 기반 지능형 기계/구조물 통합 안전진단 및 예측 기술
- 전기기기 온라인 열화진단기술
- 분포형 고온 내방사선 온도/변위/진동 융합센싱 기술
- 극한환경 스마트센싱용 소재/부품 기술
- 원전설비의 이상상태를 조기감지하기 위한 상태기반 정비 시스템 기술
- 안전 진단 해석 데이터 및 운영 데이터에 등의 빅데이터를 저장 처리, 분석하기 위한 통합 진단용 빅데이터 플랫폼 및 병렬 처리 기술
- 빅데이터를 활용한 정확한 현상 진단 기술 및 진단 기술을 기반으로 하는 지능적 자동화 기술
- 진동, 열, 방사선 등 원전 내에 손실되는 에너지를 이용한 자가 발전 소재 및 부품 기술
- 빅데이터 활용 인공지능 기반 공정계측제어기기 고장진단예측기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 스마트 센서 이용 원전압력경계 고신뢰 구조건전성 진단 기반기술을 개발 중임.
- 국내에서는 원전의 전기전자 부품/장비의 열화 진단 기술개발이 거의 이루어지지 않은 실정임.
- 상태기반정비를 위한 표준 플랫폼 기술은 기 개발함.
- 극한환경용 분포형 광섬유 센서 연구를 수행 중임.
- 극한환경에 적용 가능한 상태진단용 센서 소재 및 소자를 전량 수입에 의존하고 있음.
- 원전기기 진단감시용 스마트 센서로서 누출감시용 시작품을 KAERI에서 연구 중임.

- 빅데이터는 기존의 관계형 DB로는 처리에 한계가 있어 고속의 통합 진단용 빅데이터 처리 환경 플랫폼 및 병렬 데이터 처리 기술의 개발이 시도됨.
- 인공지능 기술은 학문적인 단계에서 많은 연구는 있으나, 아직 원전 분야에 대한 실제 적용 예가 드물며, 선진국관의 기술 격차가 큼.
- 자가발전(Energy Harvesting) 기술은 저전력 소형화가 필요한 통신 산업에서 적극 개발되고 있음, 기기 상태진단용 센서망 구축을 위한 에너지 자가발전 확보 기술의 경우, 주로 하계에서 실험실 수준의 연구 진행 중임.
- 4차 산업과 융합하여 빅데이터 활용 인공지능 기반 공정계측제어기기 고장진단예측기술의 개발은 시작 단계임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 인공지능 및 빅데이터 기반 지능형 진단 및 예측 플랫폼 기술개발을 선도하고 있음.
- 미국, 유럽에서는 전기전자 부품/장비 열화 진단 관련 평가 기술을 확보함.
- 상태기반정비 기술을 상용화하여 발전소에 적용하고 있음.
- 광섬유 센서를 활용하여 핵연료 저장조에 대한 복합 분포형 모니터링(온도, 수위)하는 연구를 수행하고 있음.
- 극한환경 상태진단용 센서 소재는 1970년대부터 미국과 유럽에서 개발하여 원전기술을 보유한 소수의 글로벌 기업이 전 세계시장을 독점하고 있음.
- 일반산업용 스마트 센서는 다양하게 개발되어 있으나, 원전기기의 구조상태 진단/감시용 스마트 센서의 연구개발은 활발하나 아직 적용은 미미함.
- 빅데이터 처리 기술관련 시계열 데이터 처리 기술 개발은 시작단계에 있음.
- 인공지능 분야에서 실제+모의 빅데이터 기반 지능적인 자율진단 방법의 적용이 학계를 중심으로 시도되고 있으며, 원전에서의 적용은 미미한 상황임.
- 자가발전 센싱 소재 부품 기술의 다양한 응용연구가 진행 중이며, 원전과 같은 극한환경에서는 아직 적용이 되지 않고 있음.
- Smart IoT 기술, 고장 및 운영 빅데이터 및 인공지능 기술을 융합한 공정계측제어기기 고장진단예측기술의 개발은 시작 단계임.

□ 미래동향 예측

- 원전 압력경계 기기에 대한 고신뢰 고장진단 기술개발이 진행 중이며, 빅데

이터 및 인공지능 기술을 적용하여 기계/전자/구조물의 통합 안전진단 지능화 기술로 발전을 예상함.

- 원전과 인공위성에 사용되는 전기전자장비의 방사선 손상진단 및 예측 기술의 개발이 확대될 것으로 예측함.
- 상태기반 정비기술의 국외 기술 개발수준은 이미 상용화 되어 있으므로 국내 기반기술을 기반으로 상용화가 필요할 것으로 예상됨.
- 분포형 융합 센싱은 내열/내방사선 원격 측정장치 및 다기능 측정시스템으로 활용될 것으로 예상함.
- 극한환경 상태진단용 센서 소재는 가동원전의 고온/방사선 환경 설비의 상시 안전 진단 및 재난/재해 사고환경에서의 기기 상태진단용 센서에 적용되기를 기대함.
- 가동원전 감시사각지대 해소를 위한 스마트센서망의 개발 및 적용 가능성이 높음.
- 4차 산업혁명에 힘입어 빅데이터와 인공지능 기술을 기반으로 하는 ICT기술이 폭발적으로 증가할 것으로 예상되며, 이에 따라 빅데이터 저장 처리 기술 및 관련 플랫폼, 인공지능 자동화기술, 인공지능 기반 고장진단예측 기술 등의 다양한 연구가 진행될 것으로 예상됨.
- 인공지능 분야에서 실제 대규모 센서망과 연동되어 자율진단을 수행하는 인공지능 플랫폼 구축이 진행될 예정임.
- 스마트 안전진단용 자가발전 소재 및 부품 기술은, 원전운영 대책의 하나인 스마트 플랜트 구현을 위한 원전 내 유무선 통합 통신환경 구축을 위한 원천기술로 활용이 가능함.

□ 기술개발 수행체계

- 원천기술, 응용기술, 성능검증 분야별로 산·학·연 협력체계 수립
- 기 개발된 상태기반정비를 위한 플랫폼을 기반으로 현장용 DB를 구축하고 상태기반 솔루션을 개발해 현장에 적용함.
- 원전 현장의 의견 및 요구사항 적극 반영한 기술개발
- 한국원자력연구원의 기존 실규모 시험시설 및 인프라를 적극 활용
- 빅데이터 기반 인공지능 고장진단 및 자율진단 기술은 서로 유기적으로 연계하여 진행될 필요가 있으며, 거시적 관점에서는 통합진단용 빅데이터 구

측, 결합/고장예측, 인공지능 기반 공정계측제어기기 고장진단, 인공지능 자율진단의 순으로 개발 체계의 구축이 가능함.

- 원전기기 안전진단 자가발전 센싱 소재 및 부품 기술은 외부전원이 상실된 후 최소한 계측정보를 수집하기 위한 기술로서 통합진단용 빅데이터 구축 기술과 연계하여 수행함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 스마트 센싱 기반 지능형 기계/구조물 통합 안전진단 및 예측 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 지능형 통합 안전진단 기반 기술 개발 원전 기계설비/구조물의 지능형 통합 안전진단 및 예측 플랫폼 개발 및 성능검증 	<ul style="list-style-type: none"> 통합진단 지능화 기술 예측진단 플랫폼
<ul style="list-style-type: none"> 전기기기 온라인 열화진단기술 	<ul style="list-style-type: none"> 한국형 원전 전기전자장비(부품) 방사선 열화진단 기술개발 고방사선 구역 전자계통 열화 저감화 및 고장예방 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> 시열화 손상 및 진단 기술 열화 예측 기술
<ul style="list-style-type: none"> 분포형 고온 내방사선 온도/변위/진동 융합센싱 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 고온/고방사선 환경용 융합센싱기술 개발 R원전 통합 안전진단용 복합 센서그리드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 광 센싱 진단/분석 기술 내열/내방사선 원격 측정장치
<ul style="list-style-type: none"> 극한환경 스마트센싱용 소재/부품 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 극한환경 동작형 상태진단 센서 부품/소재 기술 개발 센싱 시스템 최적화 및 성능 검증 극한환경 원전 핵심기기 안전감시를 위한 스마트센싱 소재 및 부품 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 극한환경 동작형 상태진단 센서 부품/소재 기술 성능검증 및 소재구조 최적화 기술 네트워크형 스마트 센서 소재/부품 기술
<ul style="list-style-type: none"> 상태기반정비 시스템 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 상태기반정비 실용화 기술 개발 상태기반정비 솔루션 개발 및 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 플랫폼 구축 기술 상태기반정비 솔루션 기술
<ul style="list-style-type: none"> 스마트센싱 	<ul style="list-style-type: none"> 스마트센싱용 하드웨어 및 이상상태/노화 진단용 신호처리알고리즘 개발 스마트센서 운영 플랫폼 개발 및 현장성능 시험 	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 센싱용 신호처리 및 진단 알고리즘 원전기기 사각지대 감시용 스마트 센서망 기술
<ul style="list-style-type: none"> 사이버물리 모델링 및 해석 	<ul style="list-style-type: none"> 펌프 등 일부 기기에 대한 모델 기반 사이버 물리 모델링 기술 개발 주요 원전 기기에 대한 데이터 기반 사이버 물리 모델링 기술 개발 물리기반 및 데이터기반 사이버물리 모델링 기술 통합 및 대상 기기 확장 	<ul style="list-style-type: none"> 주요 기기 사이버 물리 해석 체계

• 통합진단용 빅데이터 구축	<ul style="list-style-type: none"> • Smart IoT 기술, 고속의 병렬처리, 빅데이터 처리 및 Platform 개발 • Smart IoT, 고속의 병렬처리, 빅데이터 처리를 위한 통합 진단 예측 빅데이터 수집 및 통합 진단예측 환경 구축 	• Smart IoT 기반 통합 진단 예측 빅데이터 처리 환경 구축
• 인공지능 자율진단	<ul style="list-style-type: none"> • 기계학습 기반의 실시간 상태 모니터링 및 자율진단 기술 • 자율진단 플랫폼 실제 구축 및 대상 적용 	• 기계학습 기반의 실시간 상태 모니터링 및 자율진단 기술
• 결함/고장 예측	<ul style="list-style-type: none"> • 발전소 고장 진단을 위한 필수 계측신호 정립 • 빅데이터 기반 발전소 고장진단 운전지원시스템 개발 	• 발전소 고장진단 운전지원 기술
• 원전기기 안전진단 자가발전 센싱 소재 및 부품 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 극한환경 동작형 에너지 변환/저장 구조설계 및 효율 최적화 • 극한환경 동작형 자가발전 소재/부품 기반 무선 센서노드 구현 및 성능 검증 	• 극한환경 동작형 고효율 에너지 변환/저장 소재 및 부품 기술
• 빅데이터 활용 인공지능 기반 공정계측제어기기 고장진단예측	<ul style="list-style-type: none"> • 공정계측제어기기 고장 및 계측기 진단 해석 빅데이터 및 운영 빅데이터 수집, 저장 해석 기술 개발 • 고장 및 계측기 진단 해석 빅데이터 및 운영 빅데이터 융합 공정계측제어기기 고장진단예측 기술개발 	• 인공지능 기반 공정계측제어기기 고장진단예측기술

3) 계측 제어 요소 원천기술

□ 기술의 정의

- 센서 자체의 원천 기술 개발을 통해 성능을 증대 시키고 필수적인 정보를 더욱 정확하게 전달할 수 있는 새로운 형태의 차세대 기술
- I&C 기기의 집적 및 소형화를 통하여 잡음 대비 성능을 증대 시키고 필수적인 정보를 더욱 정확하게 전달할 수 있는 새로운 형태의 차세대 기술
- 센서의 신호를 처리하기 위한 전자회로 설계의 원천 기술 개발을 통해 성능을 증대 시키고 필수적인 정보를 더욱 정확하게 전달할 수 있는 새로운 형태의 차세대 기술
- 원전의 안전성 향상뿐만 아니라 중대사고 시에도 활용 가능한 원천 기술
- SMR 등 소형 원자로 및 차세대 원자로에도 적용 가능한 기술

□ 국내외 기술개발 수준 및 현황

- KAERI 에서 광섬유를 활용한 센서 기술 연구를 시작하였지만 시제품을 구입하여 적용하는 수준으로 광섬유 자체를 Grating 하거나 수광부 소자 및 회로 자체에 대한 원천연구는 부족한 실정임.
- INL, UTK 등 미국 내셔널 연구소와 대학들은 센서 원천 기술 개발을 위해 심도 깊은 연구를 지속적으로 해오고 있음. 특히 INL 의 Instrumentation 연구팀은 10여 년간 초소형 중성자 센서를 개발해 오는 등 차세대 원천기술 확보에 주력하고 있음.
- 중국 등을 중심으로 풍부한 컴퓨터 전공 인력들을 활용하여 원자력 분야에 적용하며 계측 신호 분석 연구도 최근 시작한 바 있어 국내 기술이 뒤쳐질 우려가 있음.
- 버클리, 미시간 대학교 등 원전에 적용 가능한 극한 환경 동작 방사선 회로 기술들을 연구하고 있으나 시작 단계로 원천 기술의 선점이 필요함.
- 독일 대학, 스페인 연구소, 미국 스탠퍼드 등 의료용 방사선 계측용 집적회로 설계기술은 활발히 연구되고 대형 의료기기 회사인 지멘스, GE, 필립스 등에서 제품화 되고 있으나 원자력 적용에 가능한 기술개발은 아직 미비한 상태임.
- 미국 NASA 및 유럽 항공우주국 등을 중심으로 대형 연구비 투자를 통해 우주 방사선에 강한 전자회로 기술은 많이 연구되었으나 원자력 환경에 적합한 기술은 그 요구수준이 10배에서 100배 높아 기술 개발이 필요함.
- 미국, 중국 등을 중심으로 풍부한 전자/컴퓨터 전공 인력들을 활용하여 원자력 분야에 적용 가능한 계측회로 연구가 수행 중으로 있어 국내 기술이 뒤쳐질 우려가 있음.

□ 미래동향 예측

- 원전 기술 중 계측기 (센서 및 시스템) 의 원천 기술은 자립이 전혀 이루어지지 않은 상태로 해외 선진 연구/산업 기관과 기술 격차가 벌어질 수 있음. 특히 근래 IoT 기술의 발전으로 새로운 센서 패러다임이 나오는 현시점에 집중 연구를 통해 기술을 선점할 필요가 있음.
- 계측 제어 요소 원천 기술은 원자력 발전 뿐만 아니라 의료, 자동차, 우주, 국방 관련으로 쉽게 응용될 수 있고 경제적 파급 효과도 클 것으로 예상됨으로 기술을 선제적으로 선점하여 시장을 주도하여야 함.

□ 기술개발 수행체계

- 계측 제어 요소 원천 기술은 각종 재료, 물리적 분석, 신호 처리 회로 설계 기술, 계측 신호 분석 알고리즘 기술 등 다분야의 통합 연구가 필요한 분야로서 각 기술을 보유 또는 개발 그룹의 효율적인 연계 수행 체계가 중요함.
- 산·학·연 공동연구체계를 구축할 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 고온 광섬유 온도/방사선 계측 센서 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 광섬유 Grating 기법을 이용한 온도 및 방사선 센싱 기법 광섬유 코팅 및 반사율(투과율) 소자를 이용한 원천 기술 확보 특정 광섬유에 적합한 발광 및 수광부 반도체 설계 기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 광섬유 내방사선/내환경 능력 검출 출력 회로 설계 기술 확보 광기반 신호 전송 선로 개발
<ul style="list-style-type: none"> 무전원 초음파 온도/방사선 센서 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 무전원 센서 기술을 확보를 통하여 전원 상실 사고나 유선을 설치하기 어려운 위치에 센서 배치 초음파를 이용하여 센서 신호를 외부로 전송하여 무선 센싱의 원천 기술 확보 온도, 방사선 등 필수 정보를 계측할 수 있는 센서 원천기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 무전원/초음파 센서 핵심 기술 개발 잡음 간섭 최소화를 통한 초음파 신호 센싱 기술 온도/방사선 센싱으로 원자로 상태 감시 기술
<ul style="list-style-type: none"> Neural Network 를 이용한 계측 스펙트럼 획득 	<ul style="list-style-type: none"> 현존 단일 계측 기술로는 중성자, 감마선 등의 구분이 원활하지 않음. 핵종 판별을 위해서는 수분의 최소 계측 시간이 필요함. Neural Network 알고리즘 적용으로 실시간 핵종 판별 및 계측 스펙트럼 분석 기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 계측 데이터 분석 기술 방사선 신호 분석과 Neural Network 알고리즘 융합
<ul style="list-style-type: none"> 반도체 기반 방사선 센서 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 초소형 반도체 센서를 통해 방사선 직접 측정에 활용 소자(SiC) 개발이 아닌 기존 사용 반도체 공정을 이용하여 방사선 센서 (SiPM) 설계 출력 회로까지 통합된 on-chip 형태의 집적 센서 기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 상용 반도체 기술 기반 방사선 센서 설계 능력 센서 및 출력 회로의 on-chip 설계 기술 대면적 센서 설계 기술

<ul style="list-style-type: none"> I&C 기기 ASIC 및 SoC로 소형 집적화를 통한 성능 향상 	<ul style="list-style-type: none"> Application-Specific Integrated Circuit (ASIC) 기술을 활용한 Analog-to-Digital Converter (ADC), Programmable Logic Controllers (PLC) 의 집적화 설계 기술 System on chip (SoC) 을 통한 대형 I&C 캐비닛의 칩화 기술 계측 신호 Multiplexing 을 통해 입력 신호를 줄이고 효율적으로 전달하는 프로토콜 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> I&C 의 SoC 초소형 디지털 캐비닛 센서 신호 처리 기술 Diverse & Diversity 설계 기술
<ul style="list-style-type: none"> 방사선 에너지 Harvesting 을 통한 최소 비상전원 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 방사선 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있는 계측 센서 회로 설계. 변환된 전기에너지를 축적할 수 있는 회로부 설계 기술 개발 축적된 에너지를 필수 계측기에 전달할 수 있는 전압 컨버팅 회로 설계 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 방사선 에너지 하베스팅 소자 설계 방사선 에너지 축적 회로 설계 기술 확보 DC-DC Converter 회로 설계 기술 개발
<ul style="list-style-type: none"> 계측회로 요소 부품 내환경/내방사선화 	<ul style="list-style-type: none"> 방사선에 강한 회로 설계 기술. 아날로그 및 디지털 요소 블럭 내환경/내방사선화 이미지 센서 및 통신 모듈 내환경/내방사선화 	<ul style="list-style-type: none"> 트랜지스터 기반 방사선 영향 분석 모델링 기술 개발 Op-amp, Band-gap reference, ADC, Diode, 이미지센서 셀 등 아날로그 필수 요소 회로 설계 기술 확보 로직 게이트, 메모리 셀, 클럭 제너레이터 등 디지털 필수 요소 회로 설계 기술 확보

4) Digital I&C 성능 향상

□ 기술의 정의

- Drift 및 설정치 평가 기술
- 디지털 안전 계측제어시스템 평가/관리를 위한 국가 표준 및 안전규제 기술
- 디지털 계측제어 안전성 확보를 위한 infra-structure 구축 기술
- 원전 디지털 안전 소프트웨어 신뢰성 확보를 위한 소프트웨어 개발 및 검증 기술
- 공통유형고장(CCF) 진단 및 대처 기술
- 디지털 계측제어 설계최적화 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- NRC GL 91-04(24개월 장주기 운전의 이행 사항)에 따른 운전이력자료를 활용한 계측기 드리프트 평가방법론의 개발 필요성을 제기함.
- 안전등급 디지털 I&C 계통의 설정치 방법론이 규제기관의 주요 심사 항목이 됨에 따라 인허가 현안이 증가하고 있음.
- KAERI는 KNICS 과제의 일환으로 원전용 디지털 안전등급 제어기기 및 계통의 소프트웨어 확인 및 검증을 위한 방법론을 수립하였음.
- FPGA기반 제어기기에 대한 인허가 확보를 위한 확인 및 검증 방법론을 수립하여 인허가가 진행 중임.
- AI S/W에 대한 안전, 적합성 등에 관한 조사/분석/평가/연구 등을 준비하고 있는 단계임.
- 기존의 재래식 핵심기술 등이 많이 개발되었으나 4차 산업분야인 IoT, 인공지능, 및 빅데이터 등의 안전 인프라 구축은 시작단계에 머물고 있음.
- 현재 발전소의 고통원인 고장 때문에 다양성 계통이 확대되므로 최적화시키려는 노력이 있고 I&C 계통의 단순화를 추구하나 제어경로의 다양성을 요구하는 추세임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 NASA, 일본 경제산업성 등 선진국에서는 AI S/W 안전, 적합성 규제에 대한 연구를 활발히 진행하고 있음.
- 해외 선진국의 경우 주로 기능안전성(Functional Safety) 분야에 주력하여 고도화하고 있는 상태임.
- 디지털 계측제어 최적화 설계 및 인허가를 위한 EdF 주도의 CONNEXION 프로젝트를 수행 중임.

□ 미래동향 예측

- 4차 산업의 새로운 소프트웨어에 대한 새로운 신뢰성 평가 방법 개발이 필요한 시점으로 다양한 분야에서 안전성 확보를 위한 개발 및 검증 방법론에 대한 연구가 시작될 것으로 예상함.
- 선진 외국도 필요성을 느끼고 있는 분야로서 이제 막 시작단계임. 외국과 어깨를 나란히 경쟁할 수 있는 분야임.

- 디지털 계측제어계통에 대한 최적화 설계 및 인허가 기술은 가동원전의 안전성 향상 및 수출형 중소형 원전의 경제성 향상에 이바지할 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 기 개발된 디지털기반 소프트웨어 안전성 및 인허가 확보 기술을 응용하여 적용함.
- 다양한 분야에서 적용이 시도되고 있는 ICT기반 기술을 융합하여 시너지 창출을 시도함.
- AI, 빅데이터 등 4차 산업혁명 기술의 도입과 함께 인허가 가능성을 확보할 수 있는 국내외 표준 또는 산업기준 수립을 함께 병행함.
- 산·학·연 공동으로 경험을 공유하여 계측제어 성능향상 기술 개발을 체계적으로 완성함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• Drift 및 설정치 평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 드리프트 평가를 위한 통계 처리 기술 • 설정치 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 계측기 드리프트 분석 기술 • 계측계통 설정치 분석 및 평가 기술
• 디지털 안전 계측제어계통 평가관리 국가 표준 및 안전규제	<ul style="list-style-type: none"> • 4차 산업기술 접목에 따른 신규 평가관리 국가 표준 및 안전규제 기술 개발 • 인공지능 관련 소프트웨어의 평가관리 국가 표준 및 안전규제체계 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 표준 수립 • 안전규제체계 개발
• 디지털 계측 제어 안전 infra-structure 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 안전설계 임베디드 인프라 융합환경 구축 • 제어기용 Safety-kernel 미들웨어 소프트웨어 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 임베디드 설계검증 인프라
• 전 안전 소프트웨어 안전성 평가 핵심	<ul style="list-style-type: none"> • 안전보증 방법론 및 프로세스 개발 • 완전 자동화된 평가 솔루션 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 안전보증 방법론 • 평가 자동화 솔루션
• 디지털 안전 소프트웨어 신뢰성 향상	<ul style="list-style-type: none"> • 머신러닝 신뢰성분석, 빅데이터 신뢰성분석 • IoT 및 인공지능(딥러닝) 연계 신뢰성분석 	<ul style="list-style-type: none"> • IoT 및 인공지능 분석 기술
• 공통유형고장(CCF) 진단 및 대처 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 공통유형고장 감지 기술 • 공통유형고장 분석 및 대처 기술 • 안전/비안전/다양성 I&C계통 통합설계 	<ul style="list-style-type: none"> • 계측제어계통 공통유형고장 분석 기술 • I&C계통 통합설계 기술
• 디지털 계측제어 설계최적화	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 계측제어 최적화 설계 및 검증 통합환경 기술 • 디지털 계측제어 최적화 설계 및 검증 방법론 개발 및 인허가 	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 계측제어 설계 및 검증기반 기술 • 디지털 계측제어 인허가 확보기술

5) 지능형 자가회복 자율운전 기술

□ 기술의 정의

- IoT, 빅데이터 처리 및 인공지능 기술의 적용을 통해 발전소나 플랜트 공정의 기기고장이나 이상상태 발생 시 고장이나 이상상태를 우회하거나, 대안공정을 추적하여 제공하거나, Embedded 계측제어시스템 기반 기기고장 자기회복 Smart Sensor, Smart Equipment를 적용한 이상상태 자기회복(Self-healing) 기능을 적용하여 원전 자율운전을 수행하는 기술
- 원전 산업에도 IoT, 빅데이터 처리 및 인공지능 기술의 적용을 통해 발전소나 플랜트 공정의 기기고장이나 이상상태 발생시 고장이나 이상상태를 우회하거나, 대안공정을 추적하여 제공하거나, Embedded 계측제어시스템 기반 기기고장 자기회복 Smart Sensor, Smart Equipment를 적용한 이상상태 자기회복(Self-healing) 기능을 적용하여 원전의 전 운전 모드의 자율운전을 달성함.
- 이를 위해 IoT 기술의 적용, 모든 운전 Data를 저장, 분석을 통해 원전 모든 운전 상태를 판단하고, 스스로 회복하는 기술을 개발함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내의 많은 자동화 업체에서 IoT 기술을 적용하여 공장 운영을 자동화 자율화하고 있으며, 특히 LG 산전이나, 포항제철에서는 많은 Sensor를 Network 연결하거나, IoT Sensor Network을 적용하여 자동화 및 자율운전을 수행하고 있음.
- 현재 한원(연)에서 APR1400 원전의 기동/정지 운전을 축적된 운전 Data를 학습하여 수동으로 운전하던 주요 운전 요소 즉 RCS 가열률, RCS 온도 압력, 가압기 수위, 증기발생기 압력, 수위 조절 등을 자동화하는 인공지능 기반 기동/정지 운전 자동화 기술을 개발 중에 있으며, 이를 기반으로 원전 전 모드 운전을 자동화하고, 나아가 원전 전 모드 자율운전 기술의 개발을 계획하고 있음.
- 학계에서는 KAIST와 조선대와 협력하여 SMR 설계에 적용하기 위한 자율운전 개념을 개발 중임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국의 경우 원전의 물리적 거동을 해석하고, 원전의 상태 해석 및 이상상태에서 운전을 최적하기 위한 실시간한 원전 Digital Twin을 개발하여 최적 운전 자동화 및 원전 자율운전에 활용하고자 함.
- 미국의 경우 SMR 설계에서 인공지능 알고리즘을 활용한 SMR 감독자제어(Supervisory) 자율운전 개념을 개발하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 전 세계적으로 IoT, 빅데이터 처리 및 인공지능 기술 등 ICT 기술의 발전으로 인해 끈임 없는 공장 자동화 및 자율운전 기술의 혁신이 이루어질 것으로 예상됨.
- 원전 산업에도 IoT, 빅데이터 처리 및 인공지능 기술의 적용을 통해 비정상 상태를 예측하고, 비정상 상태를 극복하여 원전 기동정지 및 전 운전 모드 of 자율운전을 달성될 것으로 예상됨.
- 특히 원전 산업에서는 IoT, 빅데이터 처리 및 인공지능 기술의 적용을 통해 발전소나 플랜트 공정의 기기고장이나 이상상태 발생 시 고장이나 이상상태를 우회하거나, 대안공정을 추적하여 제공하거나, Embedded 계측제어시스템 기반 기기고장 자기회복 Smart Sensor, Smart Equipment를 적용한 이상상태 자기회복(Self-healing) 기능의 적용과 원전 Digital Twin의 개발을 통해 원전 이상상태 대응 능력을 향상하는 SMR 원전이나, 신규 원전에 원전 자동화 및 자율운전 기술 개발이 활발해질 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 원전 기동/정지 운전 자동화 및 자율운전 기술은 IoT, 빅데이터 처리 및 인공지능 기술, Embedded 계측제어시스템 기반 기기고장 자기회복 Smart Sensor, Smart Equipment 기술의 융합으로 이루어짐.
- 따라서 원전 운전 빅데이터를 처리, 저장 분석하고, 이들 운전 빅데이터를 고속으로 실시간 처리하기 위한 병렬 신호처리 기술, IoT 및 센서 Network 기술, 운전 빅데이터를 학습하여 인공지능 알고리즘을 적용하는 인공지능 기술 개발과 함께 Embedded 계측제어시스템 기반 기기고장 자기회복 Smart Sensor, Smart Equipment의 개발이 복합적으로 이루어져야 함.
- 산·학·연 공동연구체계 수행
 - 1단계(3년) : IoT 기반 운전 data 확보 및 이상상태 자기회복(Self-healing) 요소기술 개발

- 2단계(3년) : 운전 빅데이터 학습을 통한 기기고장이나 이상상태 발생시 고장이나 이상상태를 우회하거나, 대안공정을 추적하여 제공하는 이상상태 자기회복(Self-healing) 인공지능 알고리즘 개발
- 3단계(4년) : IoT 및 운전 빅데이터 학습을 통한 이상상태 자기회복(Self-healing) 기술 시작품 개발 및 검증

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> IoT 및 자기회복(Self-healing) 요소 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> IoT, 빅데이터 처리 및 인공지능 기술, Embedded 계측제어 자기회복 Smart Sensor, Smart Equipment 요소 기술 IoT 및 Network 신호 고속 병렬처리 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> IoT, 빅데이터 처리 및 인공지능 기술, Embedded 계측제어 기술 고속 실시간 신호 병렬처리 기술 기기 고장 자기회복(Self-healing) 기술
<ul style="list-style-type: none"> 원전 자율운전을 위한 이상상태 자기회복(Self-healing) 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> 고장 및 이상상태 Data 이용 자기회복(Self-healing) 기술 개발 IoT, 빅데이터 처리 및 인공지능 기술, Embedded 계측제어 자기회복 Smart Sensor, Smart Equipment 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 고장 및 이상상태 Data 이용 자기회복(Self-healing) 기술 IoT, Embedded 계측제어 기반 자기회복 Smart Sensor, Smart Equipment 기술 자기회복 인공지능 알고리즘
<ul style="list-style-type: none"> 원전 자율운전을 위한 이상상태 자기회복(Self-healing) 기술 시작품 성능검증 	<ul style="list-style-type: none"> 원전 자율운전을 위한 이상상태 자기회복(Self-healing) 기술 시작품 원전 자율운전을 위한 이상상태 자기회복(Self-healing) 기술 시작품 성능검증 	<ul style="list-style-type: none"> IoT, Embedded 계측제어 기반 자기회복 Smart Sensor, Smart Equipment 개발 고장 및 이상상태 Data 이용 자기회복(Self-healing) 개발 성능검증 평가 기술

1.1.5 원전 상태 종합 감시

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- Big Data와 인공지능 기술의 발달로 GE의 Digital Twin 같은 기기/시스템 감시 시스템이 유망한 분야로 대두됨.

- 원전 노후화 및 지진에 의한 불시정지 가능성이 증가할 것으로 예상됨.
- 기존의 리스크 모니터는 원전 한 unit 용으로만 개발되어 부지 전체의 리스크 감시 및 관리에는 한계가 있음.

□ 기술개발 필요성

- Digital Twin 같은 개념을 원전에 적용하기 위해서는 더욱 정교한 원전 상태 종합 감시 연구가 필요함.
- 원전 불시 정지 예방을 위하여 원전 불시 정지 시스템이 필요함.
- 리스크 모니터 기술의 발달로 보다 유연한 허용정지시간 및 시험주기가 필요함.
- 부지 전체의 리스크를 감시하고 관리하는 부지 리스크 모니터가 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 리스크 감시 기술

□ 기술의 정의

- 다수기 리스크를 감시할 수 있고, 노후화로 인한 오작동을 예방하고,
- 단일기기 고장뿐만 아니라 여러 기기 배열에 따라 불시정지나 50% 이상의 출력감발을 예방할 수 있는 기술 (Trip Monitor)
- 원전의 모든 모드(운전중, 재장전중 등) 및 모든 재해 리스크를 감시할 수 있는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 단일호기 및 내부사건용 리스크 모니터는 개발한적 있음.
- 단일기기 고장으로 원자로나 터빈정지 또는 50% 이상의 출력감발을 유발하여 발전소 안전운전에 직접적인 영향을 주는 발전정지유발기기 (SPV: Single Point Vulnerability)나 잠재적 유발기기를 도출한 바 있음.
- Deep Learning 방법을 조금씩 구현하기 시작함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 최근에 Deep Learning 방법을 Condition Monitoring 에 응용하는 논문이 발표되는 상황임.

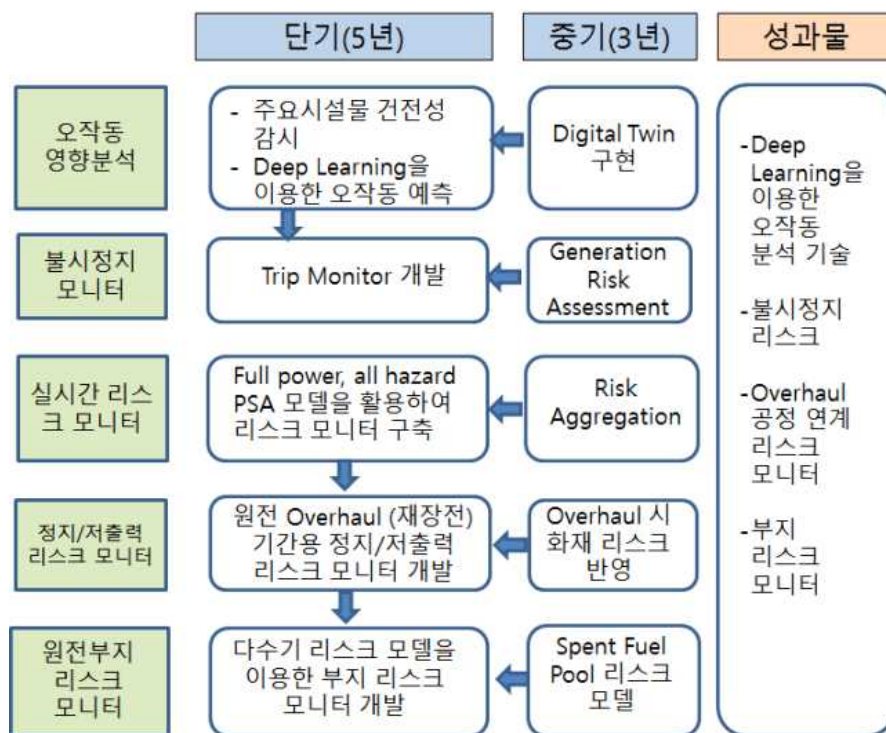
- Trip Monitor 및 GRA 활용 수준임.
- 실시간 운전 리스크 모니터 활용 중임.

□ 미래동향 예측

- GE의 Digital Twin 같은 개념을 원전 주요시설물에 구현하여, 주요시설물의 오동작을 원천 배제함.
- 다수기 리스크가 정확히 반영된 부지 리스크 모니터가 활용될 것임.
- Overhaul 공정 및 작업 종류와 연계한 리스크 모니터 기술 구현
- 불시정지 사전 예방 구현
- All mode, all hazard PSA 모델을 활용하여 리스크 모니터 구축

□ 기술개발 수행체계

- 노후화로 인한 오작동을 Deep Learning으로 예측하고 Trip Monitor를 개발하여 불시정지를 방지함.
- 정지/저출력 리스크 모델로 원전 Overhaul 공정과 연계된 리스크모니터를 구현하고, 다수기 리스크 모델을 이용하여 부지 리스크 모니터를 구현함.



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 주요 시설물 오작동 영향 평가 및 방지 	<ul style="list-style-type: none"> 오작동 영향이 큰 주요시설물 도출 노후화 반영 ageing PSA Condition based Maintenance 주요시설물 예측진단으로 예방정비 	<ul style="list-style-type: none"> 노후화 반영 Ageing PSA Deep Learning을 이용한 Condition Monitoring
<ul style="list-style-type: none"> 불지정지 모니터(SPV) 	<ul style="list-style-type: none"> Trip Monitor 개발 Generation Risk Assessment (GRA) 이용 효율적 불시 정지 방지 대책 수립 	<ul style="list-style-type: none"> Trip Monitor Generation Risk Assessment (GRA)
<ul style="list-style-type: none"> 실시간 운전 리스크 모니터 	<ul style="list-style-type: none"> Full power, all hazard PSA 모델을 활용하여 리스크 모니터 구축 기기배열에 따른 리스크 계산 	<ul style="list-style-type: none"> Risk Aggregation 기술
<ul style="list-style-type: none"> 원전 정지/저출력 기간 리스크 모니터 	<ul style="list-style-type: none"> 원전 Overhaul (재장전) 기간용 정지/저출력 리스크 모니터 개발 Overhaul 시의 화재 리스크 모델 반영 	<ul style="list-style-type: none"> Overhaul 공정 및 작업 종류와 연계한 리스크 모니터 기술
<ul style="list-style-type: none"> 원전 부지 리스크 모니터 	<ul style="list-style-type: none"> 다수기 리스크 모델을 이용한 부지 리스크 모니터 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 부지 리스크 모니터 기술

1.1.6 사이버보안 대응

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 주요기반시설을 목적으로 하는 고급 사이버 공격기술이 급진적으로 발전하고 있음(예, 이란 원자력시설 스텍스넷, 우크라이나 정전 사태 등).
- 원자력 시설은 폐쇄망으로 운영됨에도 불구하고 스텍스넷 사건을 계기로 사이버테러의 가능성이 현실화됨.
- 원자력 시설에는 컴퓨터 및 통신망, 센싱 및 진단시스템, 나아가 무선통신 기기에 이르기까지 디지털기술 기반의 시스템이 일반화되고 있어 악의에 의한 사이버공격과 운전원 실수에 의한 사이버사건으로부터 자유롭지 못함. 또한 국가 주요기반시설 중에서도 최우선을 점하는 원자력시설은 어떠한 형태나 수준으로 사이버공격을 당했을 때 사회경제적 큰 혼란이 예상됨.
- 국내 원자력 시설에는 사이버공격에 대한 문제가 현실화되기 전에 개발된

시스템이 적용되고 있는 실정이어서 사이버공격에 대한 저항성이 약하고, 원자력 시설의 특성상 IT 분야의 기술을 그대로 적용하는 것은 불가능함.

□ 기술개발 필요성

- 원자력 시설의 사이버공격에 대한 저항성을 높이기 위해서는 예방, 탐지, 대응 및 복구와 같은 사이버보안 연구를 수행해야 함.
- 사이버보안의 특성상 외국의 기술을 적용하는 것은 힘들며, 국내에서 자체적으로 연구를 수행해야 함.
- 사이버보안 연구는 원자력 선진국에서도 일부만 진행되고 있는 선도 기술에 해당하며, 기술선점을 통해 국가 원자력 기술의 우위 및 수출경쟁력을 확보할 수 있음.

나. 세부기술 내용

1) 계측제어시스템 보안기술

□ 기술의 정의

- 보안 감시정보 수집 및 분석 기술 연구
- 원전 무선 통신 보안 기술 연구
- Sensor 및 Field Device 사이버보안 기술연구

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원전의 사이버보안은 규제현안으로 부각되어 있으며, 국내 규제기관은 RS-015를 제정하여 원전에 대한 디지털 제어기에 대해 요구되는 기술적 보안조치를 제시하고 있으나 원전 적용이 가능한 사이버보안 기술이 부족한 상황임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- IAEA, NRC 및 세계 각국의 규제기관은 원자력시설에 대한 사이버보안 대책 기술을 강구하여 적용하도록 사업자에게 요구하고 있음.
- UAE 원전 등 비안전 계통을 중심으로 보안기술을 제한적으로 적용 중에 있음.
- 원전 계측제어시스템 개발 업체를 중심으로 사이버보안 전문 업체와 협력하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 원전 등 주요기반시설에 대한 사이버보안 공격의 지속적인 증가로 사이버보안에 대한 규제 및 사회적 요구가 지속될 것임.
- 원전 계측제어시스템 개발 업체를 중심으로 보안기능 적용이 가능한 시스템 개발 및 공급 기관이 원전 계측제어 기술 우위를 선점할 것으로 예상됨. 이에 국내 기술개발을 통해 원전 사이버보안 기술을 독자적으로 확보할 필요가 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 기술 개발 성공을 위해서는 기기 및 계통 수준의 사이버보안 기술, 가동원전 현장 정보, 보안 전문기관의 기술지원, 보안 전문 개발 업체의 개발 노하우 등이 요구됨. 이에 기기 제작사/운영사/원전 및 보안 전문 연구기관의 공동 연구 수행이 요구됨.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 계측제어시스템 보안기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 보안 감시정보 수집 및 분석 기술 • 원전 무선통신 보안 기술 • 계측기 및 현장기기 사이버보안 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 감시정보의 Whitelist 개발 기술 • 무선통신 암호화 및 블록체인 기술 • 유무선 센서 취약성 분석 기술

2) 원전 사이버보안 평가기술

□ 기술의 정의

- 가동 원전 주기적 사이버보안성 평가 기술 연구
- 폐로 사이버보안성 평가 기술 연구

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 새로운 인허가 현안인 사이버보안 요건을 만족하기 위하여 신규원전 뿐만 아니라 가동중 원전의 계측제어계통도 형상관리와 함께 사이버보안성 평가 및 감사가 주기적으로 수행되어야 함. 이에 한국원자력연구원은 건설 및 가동원전 사이버보안성 평가도구를 개발하여 현 보안성 상황 분석을 지원하기 위한 도구를 개발하여 지원한 사례가 있음. 하지만 가동원전에 대해 지

속적으로 변하는 내부 및 외부 사이버 위협 환경 변화에 따라 예방 및 대응이 가능하도록 가동 원전의 주기적 사이버보안성 평가를 지원할 수 있는 평가 기술연구가 요구됨.

- 국내 원전 사이버보안 규제 기관인 KINAC은 사이버보안 이행 평가를 정기적으로 규제할 계획을 가지고 있음. 이에 구체적 이행 방안 개발을 위한 연구가 요구됨.
- 페로 사이버보안성 평가를 위한 연구를 수행한 사례가 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 ICS-CERT는 규제기준 준수 여부를 판단하기 위해 CSET 평가도구를 개발하였음. INL은 CSET 유지를 위해 전담 연구원 4명을 유지하여 지속적 기능 개선 연구를 수행 중에 있으며, 지속적으로 기반시설 평가에 활용 중에 있음.
- 미 NRC는 페로 사이버보안성 평가가 수행되어야 함을 명시하고 이에 대한 조치를 위해 기존 법규 개정을 진행 중에 있음. 법규 개정을 통해 NRC는 가동 원전 뿐만 아니라 페로 원전에 대해서도 미 원자력 사이버보안 규제 기준인 RG 5.71을 준수를 요구함으로써 보안성 평가 및 보안 기능 적용을 규제할 예정임.

□ 미래동향 예측

- 급 변화하는 사이버공격 기술에 대응하기 위해 정기적인 보안성 평가 기술 및 전담 조직이 요구될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 원전 운영기관을 중심으로 원자력 및 보안 전문 기관 그리고 규제기관과의 협업을 통해 국내 원전 사이버보안 유지를 위한 평가 및 검증 방안에 대한 공동연구 수행이 요구됨.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 원전 사이버보안 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> • 가동원전 주기적 사이버보안성 평가기술 • 페로 사이버보안 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 자산 분석기술 • 사이버보안 위험도 분석기술 • 사이버보안성 평가 지침 및 절차 개발

3) 원전 시설 사이버침해 대처 기술

□ 기술의 정의

- 사이버공격 이상징후 탐지기술 연구
- 사이버보안 관제기술 연구
- 원전 사이버보안 포렌직 기술 연구

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원전 사업망에는 일반 IT 기술 및 일반 PC가 사용되고 있어서, IT 분야에서
의 사이버보안 기술을 적용하고 있으나, 제어망은 원전 고유의 산업제어시
스템을 사용하고 있어서, 원전의 특성에 맞는 사이버보안 탐지 및 관제 기
술이 개발되어야 함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해외 주요 원전 계측제어 개발 업체의 경우, 주요 보안 업체와 협력을 통해
원전 시스템 내에 보안 제품을 활용하기 위한 연구를 진행하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 원전 사이버보안공격 탐지 및 관제 기술 그리고 사고 분석 기술을 확보하기 위
한 연구의 중요성이 대두될 것으로 예측됨. 이는 미국을 포함한 주요 선진국 들
이 기반시설에 대한 사이버보안 대응 조직을 신설하고 사이버보안 강화연구 활
성화를 위한 투입되는 예산을 통해 확인 가능함(예, 영국 정부는 '16년부터 19억
파운드(약 2조원 상당)을 투입하여 주요시설에 대한 사이버보안 강화 연구를 활
성화함).

□ 기술개발 수행체계

- 국내 원전 설계, 제조, 운영사를 포함하여 주요 원자력 및 국가 기반시설 사
이버보안 연구기관, 보안 기술 개발 업체의 노하우를 통해 사이버침해 대처
기술 및 체계의 확보가 요구됨.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 원전 사이버침해 대처기술	<ul style="list-style-type: none"> • 사이버공격 이상징후 탐지기술 • 사이버보안 관제기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 진단정보 취득 및 분석

	<ul style="list-style-type: none"> • 포렌직 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 인공지능기술을 활용한 이상징후 탐지 모델 개발 • 탐지정보 시각화 기술 • 디지털 자산에 대한 정적/동적 데이터 취득 및 분석 기술
--	--	---

1.1.7 운전 성능 해석 및 향상 기술

가. 기술개요

□ 이슈 및 문제점

- 안정적인 정상운전, 이상상태 완화, 기기 건전성 확보, 불시정지를 방지하여 발전소 이용률 향상에 관련되며 수출원전의 기술경쟁력에도 핵심적인 요소
 - 성능해석 방법론 개선
 - 제어계통 성능 향상
- 현재 국내 대부분의 원전 운영기술지침서는 초기 원전 도입국의 표준 운영 기술지침서를 따르고 있으나 현재 국내에서는 다양한 노형 및 수출형 원전을 개발하고 있으므로 새로운 노형에 대한 특화된 LCO 설정 최적화 및 기술근거가 필요함.
 - 운영기술지침서 향상기술
 - 시운전 종합기술
 - 원자로 열수력자료 신뢰도 향상

□ 기술개발 필요성

- 성능해석의 특성상 안전해석에서 경계조건으로 사용되는 2차계통 및 제어계통 등을 구체적으로 모델링할 필요가 있음.
- 현재 PWR 타입의 상용로는 대부분 포화증기를 사용함. 그러나 노형이 다양화 되면서 과열증기생산 증기발생기에 대한 구체적인 기술개발의 필요성이 대두됨.
- 다양한 노형 및 수출형 원전 등을 고려한 새로운 노형에 대해 특화된 LCO 설정 최적화 및 기술근거가 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 성능해석 방법론 개선

☐ 기술의 정의

- 발전소 정상운전 및 과도상태를 최적으로 모사할 수 있는 해석도구로, 핵증기공급계통의 제어 알고리즘 생산 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 표준형원전 설계를 위하여 미국 CE형 원전의 성능해석전산코드를 도입하여 많은 부분에 대해 개선 작업을 수행하였으나 기본 틀은 도입된 코드의 형태를 벗어나고 있지 못함.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 원전 공급자는 자체적으로 성능해석코드를 보유함. 안전해석 코드와 동일한 기본 틀을 사용하는 경우도 있고, 독립적인 코드를 사용하는 경우도 있음. 성능해석의 특성상 안전해석에서 경계조건으로 사용되는 2차계통 및 제어계통 등을 구체적으로 모델링할 수 있도록 되어 있음.

☐ 미래동향 예측

- 해석 기술 및 컴퓨터 성능이 발달하여 높은 해상도를 갖는 성능해석 기술이 개발될 것으로 예상됨.

☐ 기술개발 수행체계

- 성능해석을 위한 SPACE 코드 확장
- 제어계통 및 제어기기 모델링
- 발전소 운전 및 시험자료를 이용한 전산코드 성능 검증
 - 1단계(3년) : SPACE 코드 확장 및 제어기기 모델링
 - 2단계(2년) : 실험 자료를 활용한 검증

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 성능해석 전산코드 개발	• SPACE 코드 기반 성능해석 전산코드 개발	• 확장된 성능해석 SPACE 코드

	<ul style="list-style-type: none"> 발전소 운전 및 시험자료를 이용한 전산코드 성능 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 제어계통 및 제어기기 모델링
<ul style="list-style-type: none"> 기기설계를 위한 열수력 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 기기설계를 위한 설계기준사건 분류 및 발생빈도 조사 열수력 분석 자료 생산 방법의 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> 발생빈도 모델 기기설계 관점 검증

2) 제어계통 성능향상

☐ 기술의 정의

- 과열증기생산 증기발생기에 대한 급수제어계통 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 SMART 설계에서 급수제어계통을 개발하고 있으나 실용화 단계를 위한 응용기술 개발과 검증이 필요함.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 대부분의 상용 SMR의 경우 건설단계에 이르지 못하여 구체적인 정보가 나타나 있지 않음. 군용에서는 과열증기생산 증기발생기도 사용하는 것으로 파악되나 구체적인 정보를 얻을 수 없음.

☐ 미래동향 예측

- SMART 건설을 위한 급수제어계통 설계 완성
- 소형로의 요소기술 향상

☐ 기술개발 수행체계

- 연구기관 기술자문 수행
- 산업체에서 수행
 - 1단계(3년) : 제어논리 생산
 - 2단계(2년) : 증기발생기 제어논리 검증

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 과열증기생산 급수제어 	<ul style="list-style-type: none"> 구체적 제어논리 생산 계통분석을 통한 제어논리 평가 과열증기생산 증기발생기 제어 논리 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 과열증기생산 증기발생기 제어 논리

3) 시운전 종합 기술

☐ 기술의 정의

- 신형로 발전소 시운전 시험항목 선정 및 방법의 최적화 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 표준형원전의 발전소 시운전 시험은 다수 호기의 축적된 시험경험 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국, 프랑스 등 원전 선진국들의 개량형 원전의 시운전 시험항목 및 방법 있음.

☐ 미래동향 예측

- 시운전 시험 시험항목 및 방법 최적화로 발전소 경제성 향상 및 안전성 검증 제고

☐ 기술개발 수행체계

- 산업체 독자 수행
 - 1단계(3년) : 해외 개량형 원전의 시험항목 및 방법의 국내 표준원전과의 비교
 - 2단계(2년) : 신형로 발전소 시운전 시험항목 선정 및 방법의 최적화 방안 도출

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 시운전 시험항목 선정 및 방법 	<ul style="list-style-type: none"> 신형로 발전소 시운전 시험항목 선정 및 방법의 최적화 방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 시운전 시험항목 선정 방법론 개발

4) 운영기술지침서 향상기술

☐ 기술의 정의

- 운전제한조건(LCO), 허용정지시간(AOT) 및 점검시험주기(STI) 선정항목 도출 및 설정 최적화 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 일부를 제외하고는 기술전수를 통해 취득한 정보를 고려한 LCO를 그대로 적용하고 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- US-EPR, US-APWR의 경우 핵연료 장전주기마다 특화된 제한치(Core Operating Limits Report, COLR)를 고려하여 LCO를 적용함.

☐ 미래동향 예측

- LCO, AOT, STI 설정 최적화 및 기술적 근거를 보유함.

☐ 기술개발 수행체계

- 산업체 독자 수행
 - 1단계(3년) : 국내 운전경험 및 해외 유사원전의 LCO 설정 방법론 파악
 - 2단계(2년) : 정량적평가가 요구되는 LCO 선정항목 도출 및 평가를 통한 LCO 설정 최적화 적용

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• LCO 최적화 및 기술근거	• 정성적/정량적 평가를 통한 LCO 설정 최적화 방안 수립 및 적용	• LCO설정 방법론 개발
• AOT, STI 설정 기술	• 정량적 평가를 위한 PSA 모델 및 DB 구축	• AOT, STI 설정 기술

5) 원자로 열수력자료 신뢰도 향상

□ 기술의 정의

- 원자로 내부 유동현상 규명 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 현재는 미국에서 수행한 시험결과를 설계입력으로 사용하고 있으므로 APR1400 원전 해외 수출 시 미국 기술사용에 따른 수출 장애 요인의 발생 가능성이 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 유동시험을 통해 자료를 생산함.

□ 미래동향 예측

- 유동시험을 통해 자료를 생산하지 않으면 수출 경쟁력 저하

□ 기술개발 수행체계

- 연구기관 실험 수행
- 산업체 응용 수행
 - 1단계(3년) : 유동 상사성이 유지되는 원자로 축소모형 제작 기술
 - 2단계(2년) : Scaled Model Test (SMT) 측정 자료를 실물의 설계 자료로 변환

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 노심입구유량분포 시험	• 유동상사성 유지되는 원자로 축소모형 제작 기술 • 원자로 유동모델 시험 (유동혼합률 측정)	• SLB 해석 방법론 개발
• CVAP SMT	• 유동상사성 유지되는 원자로 축소모형 제작 기술 • SMT 측정자료를 실물의 설계자료로 변환	• CVAP

1.1.8 화재 방호

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 국내 화재방호 기술은 선진국 대비 기술 격차가 있으며 국내 화재방호 전문 인력이 절대적으로 부족함. 화재 PSA를 포함한 최신 화재방호 기술의 국내 적용이나 수출원전 적용은 외국 전문 기관이 직접 수행하거나 자문 용역 등으로 수행하고 있음.
- 노형별 적용되는 화재방호 기술 기준 등이 동일하지 않아 화재 위험도분석(FHA) 내용과 양식 등이 상이함. 국내 원전에 새롭게 시행되고 있는 다중오동작 분석과 운전원 수행조치, 광역화재(Extensive Large Area Fire) 등에 대처방안이 필요함. 국내 원전 중 일부는 다중오동작에 취약한 것으로 예상됨. 유럽의 일부 국가에서는 구조물의 화재로 인한 영향을 고려한 구조물 건전성 평가를 요구하고 있음.
- 해체원전 및 폐기물 시설과 비원전시설의 화재 안전성 확보의 일환으로 화재 위험도분석을 확대 적용하고자 하는 요구가 증대되고 있음. 또한 극한재해 대비시설(부지공유 사용기기 저장시설 등)에 대한 화재방호 설비가 요구됨.

□ 기술개발 필요성

- 화재위험도 저감을 위해 화재위험 요인인 고에너지아크 발생에 대한 방지 및 해석에 대한 연구가 필요함.
- 다중오동작에 취약한 국내 원전의 대응 기술개발과 국내 원전의 화재 리스크 저감을 위해 결정론적 관점에서 개발된 화재 비정상 절차서의 최적화 연구가 요구됨.
- 부지차원에서 광역화재에 대한 영향평가와 더불어 대응기술 개발이 필요함.
- 화재사건 데이터가 충분치 않기에 화재사건의 수집·분석에 대한 연구가 계속되어야 하고 국내 원전 화재사건 시 이에 대한 정량적 평가 노력이 요구됨.
- 국내 원전의 화재 고유 물성치 데이터 확보 노력과 화재 생성물인 연기 등에 의한 기기 손상에 대한 연구가 필요함.
- 화재 PSA 관련 기술은 “4.2.3 원전 리스크 종합 평가” 내에 기술함.

나. 세부 기술 내용

1) 화재위험도 저감 기술

□ 기술의 정의

- 원전의 결정론적 화재위험도분석(FHA: Fire Hazard Analysis)과 연관된 기술로 화재 위험도평가와 안전정지분석 기술로 구성됨.
- 화재 위험도평가는 세부적으로 점화원 및 가연성 물질을 평가하는 화재위험 요소평가, 방호시설 등을 평가하는 화재방호설비 평가, 화재시나리오 및 방사성 누출 가능성을 평가하는 화재위험성 평가로 구성됨.
- 화재 안전정지분석은 다중오동작이 고려된 전기회로분석, 화재 비정상운전 절차서 평가, 안전정지 운전원 수동조치 평가 등으로 구성됨.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 설계 중이거나 가동 중인 원전 모두에 대해 화재 위험도분석이 시행되고 있지만 서로 다른 노형의 원전과 도입국의 화재방호 규정 적용하고 있음.
- 국내 원전의 화재위험도분석 표준화와 전산화에 대한 연구가 수행중이며 새롭게 시행되고 있는 다중오동작 분석과 운전원 수행조치 등에 대한 연구도 산업계를 중심으로 수행 중임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 캐나다와 프랑스도 국내와 마찬가지로 화재위험도분석이 시행되고 있고 화재위험도 분석 시 다중오동작분석이 포함되어 있음. 화재 위험도 분석 및 다중오동작 분석에 전산화도구를 사용하고 있음.
- 미국은 다중오동작 및 운전원 수동조치 현안 해결이 어려운 원전은 화재 PSA를 활용하여 현안을 해결하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 가동 및 설계 원전의 화재위험도분석 사항은 가동 및 설계 원전뿐만 아니라 폐로 원전 및 비원전 시설, 극한재해 방지 관련 시설에도 확대 적용될 것임.
- 향후 국내 가동 원전 중 일부는 다중오동작 대처에 어려움이 있을 것으로 예상됨.
- 국내 이산화탄소 소화 설비를 대체하는 화재진압설비에 관한 연구와 노후

소방배관 등의 화재진압설비 건전성 평가를 위한 연구가 필요할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 화재위험도 저감 기술은 결정론적 분야이기에 국내 산업계 및 규제기관 중심으로 기술 개발하는 것이 바람직함.
- 다중오동작 대응방안과 화재 비정상절차개발은 미국의 사례를 참고하여 화재 리스크 저감도 고려할 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 화재 위험도 평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 화재위험 요소평가 • 화재방호설비 평가 • 화재위험성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 화재위험 요소 방지 설계 및 개선 기술 • 화재방호 설비 설계 및 개선 기술 • 화재 위험성 분석 표준화 및 전산화
• 화재 안전정지분석 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 화재 안전정지 영향 평가 • 전기회로분석 기술 • 화재 비정상 절차서 	<ul style="list-style-type: none"> • 화재 안전정지 대응 설계 및 개선 • 화재 다중오동작 방지 기술 • 화재 비정상 운전절차서 개발 • 화재 안전정지분석 전산화

2) 화재사건 분석

□ 기술의 정의

- 원전의 화재사건에 대한 분석으로 원전 화재사건을 예방하고 화재발생 시 신속히 진압하기 위해 화재사건을 조사 및 관리하는 기술
- 원자력시설 내에 발생하는 화재 및 화재로 의심되는 모든 사건에 대해 이를 평가하고 재발방지 대책을 세워 이행하는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 원전 화재사건에 대한 분석 수행 및 체계적 대응체계를 수립하기 위하여 원전 화재 사건 DB(Database)를 구축 중임.
- 화재사건에 대해 화재 발생원인과 화재 영향 등을 분석하여 OECD/NEA FIRE 프로젝트에 보고함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- OECD/NEA에서 원전의 화재사건에 대한 데이터를 수집하고 분석함.
- 미국은 모든 화재사건에 대한 데이터 수집 및 정성적 평가와 더불어 PSA 기법을 활용하여 원전에 대한 화재사건 영향을 정량적으로 평가함.

□ 미래동향 예측

- 국내 원전의 화재사건 발생 시 화재사건이 원전의 안전성에 대한 미치는 영향은 정성적으로 평가하지 않지만 향후에는 이에 대한 정량적 평가가 요구될 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

- 화재사건 분석은 산업계와 규제기관 중심으로 수행하는 것이 바람직함.
- 화재사건에 대한 원전 영향의 정량적 평가 연구는 화재 리스크 평가와 결합하여 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 화재 사건분석	• 국내 화재사건분석	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 화재사건분석 DB 구축 • 국내 화재사건 영향 정량적 평가

3) 화재 모델링

□ 기술의 정의

- 화재모델링은 역학적 보존법칙과 경험적 자료에 근거한 화재의 성장, 환경 조건 등을 모사(Simulation)하여 구조물, 계통 및 기기 또는 인명안전에 미치는 화재영향을 정량적으로 예측하는 기술
- 결정론적 화재 위험도분석에서 화재모델링은 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기가 가상화재로부터 손상을 받지 않고 안전한지 여부를 분석하고 평가하기 위해 사용됨.
- 화재 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA)에서 사용되는 화재모델링은 화재로 인한 영향을 특성화(정량화를 위한 관계 변수 값을 제공)하여 모든 구조물, 계통 및 기기의 손상 가능성 등 전반적인 화재시나리오 평가에 적용함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서 사용되고 있는 화재모델링 도구는 주로 미국에서 개발된 FDT (Fire Dynamic Tool), Zone 모델링 도구인 CFAST, CFD 기반의 FDS 등임. 화재 모델링에 사용하고 있는 절차와 입력 데이터 역시 미국 NRC 등에서 개발한 절차와 데이터를 사용하고 있음.
- 국내 소방학계는 주로 FDS 검증에 대한 연구를 수행함.
- 국내 산업계는 화재 모델링의 편의성 증대와 일관성 유지를 위한 연구를 수행함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 화재모델링 관련 연구는 미국이 모델링 도구 개발과 검증, 모델링 시 사용하는 입력 데이터 생산에 대한 연구를 활발히 수행하고 있음. 미국 원전들은 화재 리스크가 원전 전체 리스크에 차지하는 비중이 높고, 화재모델링 결과가 화재 리스크에 영향을 크게 주어 화재 모델링에 관한 연구를 화재 실험과 결부하여 활발히 수행하고 있음.
- 프랑스는 Zone Model 기반 뿐 아니라 CFD 기반의 화재 시뮬레이션 코드를 자체적으로 개발하여 활용하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 국내에서 산업계는 화재모델링 표준화 관련연구와 수출원전의 구조물 해석을 위한 화재모델링 연구가 수행되고 있으나 화재모델링이 많이 사용되고 있는 분야는 화재 PSA 분야임. 화재 PSA 분야에서는 화재모델링 대상이 많아 화재모델링을 편하게 하거나 적게 할 수 있는 기술과 화재모델링의 보수성을 저감시킬 수 있는 기술개발이 요구됨. 또한 방화지역내의 고온 점화원에 대해 벽체 내에 포설되어 있는 케이블의 영향평가를 위해서는 손쉽게 화재모델링과 열전달이 결합된 분석기술이 필요함.
- 화재모델링의 검증과 불확실성 분석은 점차 확대 예상. 화재모델링 검증을 위해서는 화재 물성치 실험과 더불어 화재거동 등에 대한 실험이 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단. 또한 불확실성 분석 기술 발전을 위해서는 화재 거동에 대한 물리적 현상에 대해 적용되는 화재 모델링 도구의 모델 (유동 또는 연소 지배방정식 등)과 실험결과에서 얻어진 결과, 입력데이터 등을 고려한 불확실성 정량화 연구가 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 화재모델링 기술은 화재 PSA를 포함한 화재관련 전 분야에서 공통적으로 중요하게 사용하기에 그 성격상 국내 산업계나 학계, 연구계 등이 계속 기술발전을 위한 노력이 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 화재 모델링	<ul style="list-style-type: none">• 구조물 화재 영향평가• 화재모델링 방법 및 절차• 화재모델링 활용	<ul style="list-style-type: none">• 구조물 화재 손상 기준 데이터• 화재모델링 방법론개발• 화재모델링 통합해석

4) 화재실험

□ 기술의 정의

- 화재실험은 화재의 관찰을 통한 물리적 이해와 화재해석을 위한 점화원 방출열 물성치, 성장과 전파, 화재 손상 데이터 등을 측정하여 화재해석 코드와 화재시나리오의 검증을 위한 실증데이터 확보를 위하여 수행됨.
- 화재실험은 대상의 특성과 주요 인자의 변화범위에 따라 다양한 결과를 보여줄 수 있으므로 화재모델링 도구의 검증용으로 실험데이터를 활용하기 위해서는 통계적 의미가 있는 반복실험에 대한 데이터베이스의 구축이 필요함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 산업계는 인허가 문제를 해결하기 위해 주제어실 청정 소화제 방출 실험을 수행함.
- 국내 규제기관은 케이블의 난연성능 및 화재독성실험을 제한적으로 수행하고 있음. 연구계는 케이블의 연소에 대한 소규모의 기초 실험을 수행하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국에서는 가동원전의 점화원에 대한 열방출율 실험과 케이블과 케이블 트레이 해석을 위한 실험 등을 수행했거나 수행 중이며, 전기회로의 특성

파악을 위한 실험을 수행하고 있음.

- OECD/NEA에서는 고에너지아크(HEAF) 실험과 실물 화재거동 실험인 PRISME을 수행하고 있음. 국내 원자력 유관기관들은 이들 국제공동연구에 참여하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 화재 물성치와 화재거동에 대한 실험은 화재 리스크 저감을 위해 국내외적으로 계속 수행될 것으로 예상됨.
- 최근 원전에서도 디지털기기의 사용이 확대됨에 따라 디지털 기기 및 케이블 등에 대한 실험 요구가 증대되고 있음.
- 화재 생성물인 연기 등으로 인한 기기 손상 및 모델링과 연계된 실험이 증대될 것으로 예상됨.
- 국내 화재방호 현안 해결을 위한 실험이 수행될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 화재실험은 많은 비용과 시간이 소요되므로 국제적으로 수행되고 있는 화재실험에 국내 원전기관이 합동으로 적극 참여할 필요성이 있음.
- 국내 원전의 화재 물성치가 미국 원전의 화재 물성치와 대등함을 확인할 필요가 있으며 특히 디지털 기기에 대한 화재 물성치 확보에 대한 연구가 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 화재 실험	<ul style="list-style-type: none">• 국내 고유 화재물성치 실험• 화재 생성물 기기 손상	<ul style="list-style-type: none">• 국내 원전 고유 화재물성치 실험• 화재 생성물 기기 손상 실험 (기준/해석기술)

5) 광역화재 예방

□ 기술의 정의

- 광역 화재라는 용어는 별도로 정의된 바가 없으며 2001년 9월 미국에서 발생한 911 테러사건의 항공기 충돌 등 사회(인적)재난에 대응하기 위해 만들

어진 원전 규제요건, 10CFR50.54 (hh)(2)항에 명시된 폭발 또는 화재로 인한 광역손상(loss of large areas of the plant due to explosions or fire)에서 그 의미를 찾을 수 있음. 인위적 재해(항공기 충돌이나 테러) 또는 자연적 재해(지진 등)로 인해 설계기준을 초과하는 단일호기 또는 다수호기에 광범위하게 영향을 주는 화재를 일컬음.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 산업계는 10CFR50.54(hh)(2) 관련된 광역화재 대응과 후쿠시마 원전사고 대응조치 관련한 연구를 수행하고 있음.
- 국내 규제기관은 항공기충돌과 후쿠시마 이행조치 관한 규제를 수행 중임.
- 원전 스트레스 테스트 시 설계기준 초과 화재를 고려하고 있으나 항공기 충돌 시 가압화재 평가 등은 해외 기술에 의존하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 내 원전은 자연재해 또는 사회재난에서 발생한 직접적인 광역 화재의 대응, 진압, 통제는 10CFR50.54(hh)(2)의 규제요건과 광역재해완화지침(EDMG; extensive damage mitigation guidelines)을 적용함. 후쿠시마 원전사고처럼 설계기준을 초과하는 극한재해가 발생할 경우 FLEX (Diverse and Flexible Coping Strategies) 전략을 사용함.
- 서유럽규제자 협의회 (WENRA; Western European Nuclear Regulators Association)에서 원전 안전 목표에 항공기 충돌에 대한 방호설계 명시하고 있음. 유럽 국가들은 광역 화재 또는 폭발에 대한 대응 전략을 별도로 개발하지 않았으며 스트레스 테스트에 지진영향 평가 시 화재영향을 고려함.

□ 미래동향 예측

- 항공기 충돌 영향 평가를 위해 수행하는 가압화재 및 방폭 능력 평가 분석에 대한 국내 기술이 부족하므로 이에 대한 기술개발이 필요함.
- 광역화재가 단일호기 또는 2~3개호기에 대해 적용되어 부지차원의 광역화재에 대한 연구가 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 부지차원의 광역화재 평가기술은 개별 원전에 대한 광역화재 평가 기술 확보와 부지차원의 지진영향 평가기술의 확보 후 수행함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 광역 화재 대응	<ul style="list-style-type: none"> • 광역화재 안전정지 다중계열 영향분석 및 대응전략 • 광역화재 진압 전략 및 지휘통제 • 광역화재 리스크평가 및 대응능력 분석 • 광역화재 대응 설계 및 개선 	<ul style="list-style-type: none"> • 화재진압 대응전략 • 핵연료손상 완화조치 • 부지 광역화재 진압전략 및 지휘통제 • 설계초과 지진유발 광역화재 리스크 평가 • 부지 광역화재 대응 설계 및 개선

1.1.9 원자로 냉각계통 방사선 원항 해석코드 개발

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 원자로냉각계통 방사선원항 해석코드 국산화가 필요함.
- 기존 전산코드를 대체하여 규제요건을 만족하는 원자로냉각재 방사선원항 해석 전산코드 개발이 필요함.

□ 기술개발 필요성

- 원자로냉각계통 방사선원항 해석 코드 국산화 및 수출 원전에 적용 가능

나. 세부 기술 내용

1) 원자로냉각계통 방사선원항 해석코드 개발

□ 기술의 정의

- 원자로냉각계통 방사선원항을 해석할 수 있는 해석도구 개발

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 원전 방사선원항 평가 시 ORIGEN 전산코드 계산 결과에 근거하여 원자로냉각계통 핵분열생성물에 대한 방사선원을 평가하도록 (USNRC RG 1.206) 규정하고 있으나 기존 전산코드(DAMSAM)는 이를 만족하지 못함.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 외국은 각 나라의 환경에 맞는 전산코드를 개발하고 있음.

☐ 미래동향 예측

- 원자로냉각계통 방사선원항 해석코드 국산화 및 수출 원전에 적용

☐ 기술개발 수행체계

- 산업체 주관 코드 개발
- 핵자료 기술 구축이 필요할 경우는 연구계나 학계와 연계하여 개발
 - 1단계(3년) : 원자로냉각재 방사선원항 해석방법론 개발

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 원자로냉각계통 방사선원항 해석코드 개발	• ORIGIN 전산코드 계산결과를 이용한 원자로냉각재 방사선원항 해석방법론 개발 • 정지운전중 방사선원항 계산방법론 개발	• 방사선원항 해석기술

1.2 설계기준사고 대처능력 향상 기술

1.2.1 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 설계기준사고에 대한 대처능력을 향상시키기 위해 핵연료 기술, 원전 건물의 구조적 건전성, 인적 성능 측면의 기술적 향상에 관련한 사항을 정리하였음.
- 설계기준사고를 다루는 원전 설계 측면의 중요 문제는 지난 기간의 원자력 연구개발로 대부분 해소되었으나, 새로운 핵연료를 개발하여 안전성을 강화하기 위한 연구와 원전을 이루는 구조물의 안전성, 인적 오류를 저감하기 위한 기술 등이 여전히 국제 수준과 비교하여 미진한 상태로 평가되었음.
- 특히, 설계기준사고 영역에서 중요하게 평가되던 대형냉각재 상실사고에 대

한 배제 기술은 프랑스와 독일 등 유럽의 원전 선진국은 이미 도입되어 시행되고 있으므로 이에 대한 전반적인 이해와 함께 국내 도입에 대한 평가가 함께 이루어져야 할 것으로 판단됨.

☐ 기술개발 필요성

- 설계 기술 자체에 머무르는 연구 개발을 벗어나 원전 안전을 구성하는 주요 구성 요소에 대한 연구 지원이 중요함.
- 건설 과정과 운영 도중에 야기되는 각종 원전 구조물의 결함을 파악하고 구조물의 건전성에 미치는 영향을 평가하는 기술은 시급히 개발되어야 함. 현재 울진 1호 원전에서는 격납건물 콘크리트의 공극 문제가 심각하게 대두됨.
- 원전 설계 기준 사고에서 다루는 주요 안전 문제는 핵연료의 잔열 제거가 핵심이며 잔열 부하의 경감을 위해 사고저항성 핵연료 개발은 시급함.
- 유럽의 원전 선진국에서 도입된 대형 냉각재 상실사고 배제의 기술적 배경을 파악하고 국내 도입 가능성과 도입 후 예상되는 장단점을 파악하는 것은 장기적인 원전 안전 확보에 필수적임.

1.2.2 사고저항성 핵연료 개발

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 수소 폭발과 노심 용융 사고를 방지하여 방사능 물질 누출 사고를 배제하는 사고저항성 핵연료 개발 필요성 증대

☐ 기술개발 필요성

- 정상운전 및 과도 시 핵연료 안전 여유도와 성능 향상
- 사고 시 사고 전개를 지연하여, 대처 시간을 확보함으로써 노심용융 및 수소폭발 사고 방지

나. 세부기술 내용

1) 사고저항성 강화 혁신 기술

☐ 기술의 정의

- 노심용융 사고저항성이 강화된 혁신 핵연료 소재 (다중기지형 소결체, 다중

기능 복합구조 피복관) 기술

- 용융 및 재임계 위험도 저감 사고저항성 고융점 제어봉 기술
- 고 내진성능 핵연료 혁신 구조 설계 및 시험 평가 기술
- 사고저항성 핵연료 정밀 시험 및 고신뢰도 성능 예측 기술
- 미래 기술용 ATF 활용 원천 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 다양한 설계 개념의 사고저항성 핵연료 기술들이 제안되고 있으며, 가동원 전과의 양립성과 기술 완성에 필요한 자원 등을 고려하여 현 기술의 한계를 돌파하여 실용화 단계에 이르도록 하는 기술 혁신이 필요함
- 노심용융 사고 방지를 위한 사고저항성 강화 혁신 소재, 고융점 제어봉, 내진 구조 설계 기술의 확보가 필요함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 원전 선진국에서 사고저항성 핵연료 개발 중

□ 미래동향 예측

- 핵연료는 원전 방사능의 95%를 포집하고 있는 원자력 안전의 핵심으로, 사고저항성 핵연료 혁신 기술의 개발이 지속될 것임.
- 사고저항성 핵연료 기술은 가동원전에 적용되어 원자력 안전을 크게 증진하고, 수출용 원전이나 미래 기술 원자력의 핵심 기술로 활용될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 기술 수준 별 산·학·연 협력 연구 체계를 구성하여 개발 수행

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 다중기능 지지형 소결체	• 고밀도, 고융점 복합소재 설계를 통한 노심용융 저항성 강화	• 소결체 미세구조 설계 • 설계 구현 제조 기술
• 다중기능 복합구조 피복관	• 다중기능 탑재 소결체로 전주기 안전성 향상 • 피복관 전주기 열화 억제로 사고저항성 강화	• 피복관 소재/구조 설계 • 3D 프린팅 등 설계 구현 첨단 제조 기술
• 혁신연료봉	• 연소 시험, 정밀시험, 성능 모델,	• 성능 모델, 안전성 평가

성능시험, 해석, 안전성 평가	안전성 평가	체계
<ul style="list-style-type: none"> • 용융 및 재임계 위험도 저감 제어봉 	<ul style="list-style-type: none"> • 고융점 제어봉 소재 설계, 설계구현 제조기술, 시제품 	<ul style="list-style-type: none"> • 산화물 기반 고융점 중성자 흡수 소결체 소재 • 금속 기반 고강도 피복재 • 신 제어봉 적용 노심 설계
<ul style="list-style-type: none"> • 고 내진성능 핵연료 혁신 구조 설계 	<ul style="list-style-type: none"> • 충격 시 전 노심 핵연료 거동 해석, 고 내진 성능 혁신 구조설계 	<ul style="list-style-type: none"> • 전 노심 거동 해석 코드, 고 강성 집합체 설계
<ul style="list-style-type: none"> • 다중복합사고 대처능력 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 리스크 정보 기반 다중 복합 사고에서의 안전 기여도 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 다중복합사고 성능평가 • 핵연료-노심연계 안전 해석 • 리스크 정보 기반 ATF 안전 기여도 평가
<ul style="list-style-type: none"> • 미래 기술 활용 원천기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 미래 기술(우주, 극지, 해양)용 원자력에 활용하는 원천 기술 개발 • 초소형 모듈 제작을 위한 3D레이저 프린팅 등 첨단 제조 원천 기술과 에너지 신소재 탐사 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 중소형 원자로 적용 혁신 설계 • 일체형 핵연료 모듈 제조 • 핵연료 신소재 탐사 • 열 및 염수부식 차단 3차원 표면 처리

2) 사고저항성 핵연료봉 소재 최적화 및 연소 성능 검증

□ 기술의 정의

- 단기 적용 사고저항성 핵연료 소결체 및 피복관 소재 기술 최적화
- 가동원전 환경에서의 핵연료 성능 검증, 해석 코드 개발 및 안전성 평가 체계 구축

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 세계 최고 수준의 단기 적용 사고저항성 핵연료 소재 핵심 기술이 개발되어 성능 시험이 진행 중이며, 가동원전 운전 환경 및 사고 환경에서의 성능 자료 확보를 위한 노내외 시험이 필요

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 단기 적용 기술의 가동원전 상용화 계획 수립

□ 미래동향 예측

- 단기 적용 기술의 가동 원전 적용과 획기적이고 지속적인 원전 안전 향상을 위한 사고 저항성 핵연료 혁신 기술의 개발이 지속될 것임

□ 기술개발 수행체계

- 기술 수준 별 산·학·연 공동연구체계

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사고저항성 핵연료 소결체 소재 • 사고저항성 핵연료 피복관 소재 	<ul style="list-style-type: none"> • 소재 및 성능 최적화, 제조 공정 최적화, 실크기 연료봉 제조 	<ul style="list-style-type: none"> • 소재 개선, 제조 기술, 물성 평가
<ul style="list-style-type: none"> • 사고저항성 핵연료봉 연소 성능 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 가동원전 환경 연소 성능 시험 및 성능 자료 수집 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 연소시험, 시범연료봉 설계, 노형별 최적 노심 설계
<ul style="list-style-type: none"> • 사고저항성 핵연료봉 성능 해석 및 안전성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 성능 모델 개발, 코드 개선, 안전성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 노심설계/핵연료/안전해석 모델/코드 개발 및 검증

1.2.3 원자로건물 구조적 건전성 평가

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 최근 한빛 원전을 비롯한 많은 원자로건물에서 CLP (Containment Liner Plate)의 부식 및 콘크리트 공극이 발견됨으로 인해 원자로건물의 건전성에 대한 우려가 크게 증폭되고 있음.
- 일부 언론에서는 원전 중대사고 발생 시 원자로건물이 후쿠시마 사고 당시 보다 훨씬 빨리 폭발하여 건물이 붕괴될 수 있다는 터무니없는 사실을 보도하고 있어 국민적 우려를 증폭시키고 있음.
- 국내 원전 대부분의 원자로건물은 프리스트레스 콘크리트 구조로 건설되어 있으며 운영기간이 증가함에 따라 콘크리트의 장기변형으로 인해 프리스트레스가 손실될 가능성이 있어 프리스트레싱 효과가 감소할 수 있으며 이는 원자로건물의 내압성능을 저하시킬 수 있음.
- 원자로건물의 반구형 상부 돔은 작업자 접근이 어려워 기존 CLP 검사장비로 검사가 불가능한 지역으로 상부 돔의 CLP 배면 부식 검사 장비와 부식

발생 시에 보수를 위한 장비가 필요한 실정임.

□ 기술개발 필요성

- 원자로건물의 건설 당시의 시공불량이나 가동기간의 증가에 따른 부식과 프리스트레스 손실 등의 열화요인을 고려한 원자로건물의 건전성 및 사고 시 내부 방사성물질의 외부누출 가능성을 평가하고 방지하기 위한 기술의 개발이 필요함.
- 작업자의 접근이 어려운 원자로건물의 반구형 상부 돔에 있는 CLP 배면 부식 검사와 부식 발생 시에 보수에 필요한 장비 개발이 필요함. 작업자의 안전과 CLP 전수 검사를 위해서는 발전하고 있는 로봇기술을 활용하여 새로운 검사 장치를 개발할 필요가 있음.

나. 세부 기술 내용

1) 원자로건물 손상예측

□ 기술의 정의

- 원자로건물의 건전성을 평가하기 위한 지진발생 후 중대사고 시의 건전성을 평가할 수 있는 기술
- 원자로건물은 사고 시 방사성 물질의 방출을 차단하는 마지막 보루로서 파손의 유형과 파손 시점에 따라 방사성물질의 방출량과 주변 환경 및 주민에 미치는 영향을 평가할 수 있는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 지진 발생 후 원자로건물의 내압성능에 대한 연구를 수행한 바 없으며 내압 작용 시 원자로건물의 거동을 평가하는 결정론적 해석방법을 활용하고 있음.
- 원자로건물 누설을 평가는 원자로건물을 통한 방사성물질 누출의 안전성을 확률적으로 평가하는 Level 2 PSA의 주요한 입력 자료로 사용되는 반면, 정량적인 평가가 어려워서 그 중요성이 강조되고 있음.
- 국내에서는 관련연구가 수행된 바 없으며 기반기술도 매우 취약한 상황임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 NRC에서는 성능기반 원자로건물의 내압성능 평가 연구를 수행한 바

있으며 일본에서도 지진으로 인해 손상된 상태에서의 원자로건물의 내압성능 평가를 위한 연구를 수행한 바 있음.

- 미국에서는 과거 EPRI를 중심으로 확률론적 누설율 평가를 위한 실험과 해석 연구를 수행한 바 있음.
- 미국 SNL과 일본의 NUPEC이 협력하여 1/4 규모 원자로건물의 내압성능 실험을 미국에서 수행한 바 있으며 당시 축소모델의 거동 예측을 위한 국제공동연구를 수행하였음.
- 최근 프랑스에서는 축소모델 원자로건물을 건설하고 장기적인 열화에 따른 누설 정도를 주기적으로 실험적 평가를 수행하기 위한 연구를 착수하였으며 해당 연구를 장기적으로 수행할 예정임.

□ 미래동향 예측

- 원자로건물의 부식 등으로 인해 원자로건물의 건전성을 확보하기 위한 요구가 증가할 것으로 판단되어 원자로건물의 건전성 뿐 아니라 확률론적 내압성능 평가를 위한 취약도 평가기술의 개발 등이 필요함.
- 원전의 가동기간이 증가함에 따라 열화에 의한 누설확률이 증가하게 되며 이에 따라 중대사고 대책법에 따른 방사성물질의 누설량을 정량적으로 평가할 것을 요구할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 원자로건물의 CLP 부식이나 공극의 현황 및 이들의 보수에 따른 영향을 반영하여 평가할 수 있는 체계가 필요함.
- 원자로건물의 CLP 부식이나 공극의 현황 및 이들의 보수에 따른 영향을 반영하여 평가할 수 있는 체계가 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 원자로건물 손상도 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로건물 손상모드 분석 • 원자로건물 손상도의 정량적 기준 분석 • 원자로건물 손상도의 정량적 평가기준 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로건물 손상모드 분석 및 정량적 평가기술
• 지진 후 원자로건물 내압성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 지진에 의한 원자로건물 손상도 평가 • 지진에 의한 원자로건물 손상도 반영 모델 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 지진에 의해 손상된 원자로 건물의 손상도 반영 및 내압평가 기술

	<ul style="list-style-type: none"> 손상된 원자로건물의 내압성능 평가 	
<ul style="list-style-type: none"> 지진 후 원자로건물 내압취약도 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 손상된 원자로건물의 내압 파괴모드 분석 손상된 원자로건물의 내압 파괴기준 분석 지진 후 손상된 원자로건물의 내압 취약도 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 지진으로 손상된 원자로건물의 정량적 내압취약도 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 콘크리트 미세균열 해석 	<ul style="list-style-type: none"> 콘크리트 미세균열 모델링 콘크리트 미세균열 해석 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 건물 콘크리트 미세균열 해석 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> 균열부/관통부 누설량 분석 및 실증 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 관통부 정밀 모델링 원자로건물 관통부 정밀 해석 	<ul style="list-style-type: none"> 균열 및 관통부에서의 누설율 분석 기술
<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 누설율 한계상태 및 취약도 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 누설율 한계상태 분석 원자로건물 누설율 취약도 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 누설율 취약도 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> CLP 결함에 의한 원자로건물 극한내압취약도 분석 	<ul style="list-style-type: none"> CLP 결함 탐지 및 크기 분석 CLP 결함을 고려한 극한내압 취약도 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> CLP 결함을 고려한 원자로건물의 내압취약도 평가기술

2) 원자로건물 손상 보수

□ 기술의 정의

- 원전 운영기간중 원자로건물의 열화손상에 따른 손상 보수기술을 확보하여 원자로건물의 기밀성 확보
- CLP 배면 결함(두께, 공극, 균열)을 정밀하고 정확하게 측정하는 측정 기술과 작업자가 접근하지 못하는 영역(격납건물의 반구형 상부 돔)까지 측정할 수 있는 원격 스캐닝 시스템
- 작업자 접근이 어려운 원자로건물 CLP 배면 결함이 발생 시에 복잡하고 정교한 보수작업을 원격에서 수행할 수 있는 기술
- 원자력시설 및 대형 시설 내부의 콘크리트 공극 등이 발생 시에 원격에서 외벽 누설을 보수할 수 있는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서 최근 CLP 부식이나 콘크리트 공극문제 등이 안전 현안이 되고 있음. 이러한 중요성에 반해 열화의 탐지와 측정 등의 기술에 대해 많은 문제점이 제기되고 있으며 보수에 따른 건전성 영향 등의 평가에 어려움을 겪고 있음.

- 기존의 CLP 검사방법은 격납건물 내부에 비계를 설치하고 작업자가 비계 위에 올라가 수동으로 초음파 검사를 하고 있음.
- 수동으로 초음파 검사하는 방법은 작업속도가 매우 느리고 작업자의 추락 위험이 존재함.
- 특히 현재 작업자의 접근이 불가능한 원자로건물의 상부 돔 부위는 측정할 수 없음.
- 원자로건물 상부 돔 부위와 같이 작업자의 접근이 불가능한 곳에서 CLP 배면 결함이 발생 시에는 보수방법이 현재로서는 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해외 CLP 부식 사례의 경우에도 작업자 접근이 가능한 부위에 대해서만 검사 및 보수작업을 수행하고 있음.
- 초음파 센서가 부착된 벽면부착 로봇이 제품으로 출시되고 있으나, 이 제품은 초음파 검사를 위하여 대량의 물을 뿌리기 때문에 원자로건물 내에 적용할 수 없음.
- 무인으로 원자로건물 외벽누설을 보수할 수 있는 기술을 현재 개발하고 있지 않음.

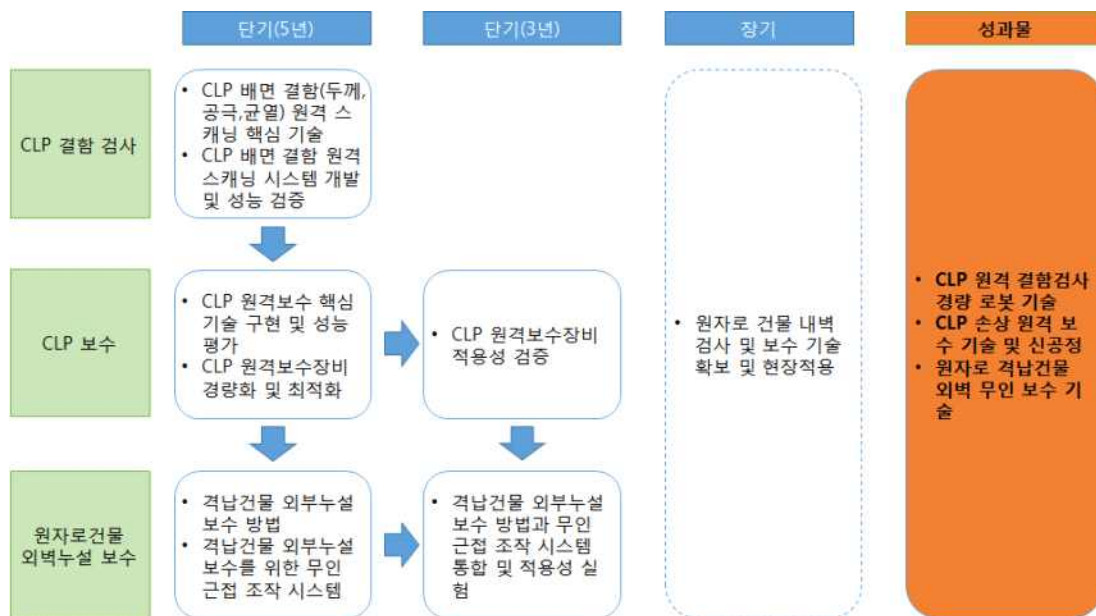
□ 미래동향 예측

- 원전의 가동기간이 증가함에 따라 유사한 문제가 지속적으로 나타날 것으로 예상되므로 종합적인 평가체계 및 보수/보강 조치 방안을 확립할 필요가 있음.
- 원자로건물 안전성 확보를 위한 CLP 전수 검사가 필요하고, 특히 작업자 접근이 어려운 상부 돔에 대한 검사를 수행할 것으로 예상됨.
- 작업자 접근이 어려운 부위에 결함이 발생하는 경우에는 이를 보수할 수 있는 기술과 장치가 요구될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 원격으로 CLP 배면 결함을 측정하고, 결함 위치를 정확히 파악할 수 있는 기술이 중요함.
- 로봇과 경량화 기술을 활용하여 복잡한 결함 부위 보수작업을 정교하고 신속하게 원격으로 수행할 수 있는 무인 보수 기술을 개발할 필요가 있음.

- CLP 검사 및 보수 기술을 활용하여 무인으로 근접하여 원자로건물 외벽누설 발생을 탐지하고 보수할 수 있는 기술을 보유할 필요가 있음.
- 손상부위의 탐지, 측정 기술과 보강 기술을 보유하고 있는 전문가와 산업체 등과의 협력연구가 필요함.
- 산·학·연 공동연구체계
 - 1단계(5년) : CLP 결함 검사 및 보수 기술 개발
 - 2단계(3년) : CLP 원격 보수 장비 적용성 검증 및 무인 근접 조작 시스템 통합



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• CLP 결함검사	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 CLP 배면 결함(두께, 공극, 균열) 원격 스캐닝 핵심 기술 개발 CLP 배면 결함 원격 스캐닝 시스템 개발 및 성능 검증 원격검사장비 적용성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> CLP 배면 결함 원격 스캐닝 기술
• CLP 보수	<ul style="list-style-type: none"> CLP 원격보수 핵심기술 구현 및 성능평가 CLP 원격보수장비 경량화 및 최적화 CLP 원격보수장비 적용성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> CLP 배면 결함 원격 보수 기술
• 원자로건물 외벽누설 보수	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 외벽누설 평가 원자로건물 외부누설 보수 방법 및 무인 근접 조작기술 개발 원자로건물 외부누설 보수 방법 및 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 외부누설 보수 방법 및 무인 근접 조작 시스템

	무인 근접 조작 시스템 개발 • 원자로건물 외부누설 보수 방법과 무인 근접 조작 시스템 통합 및 적용성 실험	
--	---	--

1.2.4 원전 설계기준 사고 혁신대처 기술

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 현재의 대형 냉각재 상실사고는 원자로 계통을 둘러싼 환경적 요인을 함께 고려할 때 발생 가능성이 없음.
- 현실적 가능성이 없음에도 불구하고 대형냉각재상실사고는 가혹한 조건을 상정한 안전 해석의 요구조건에 부합하는 보수적인 조건으로 오랫동안 인식되어 왔음.
- 보수적인 가정의 중첩 조건이 가장 보수적이지 않을 수 있다는 관점이 대두되어 현재는 최적안전해석이 더욱 중요한 안전 해석 기법으로 평가됨.

☐ 기술개발 필요성

- 유럽의 원전 선진국에서 도입된 대형 냉각재 상실사고 배제의 기술적 배경을 파악하고 국내 도입 가능성과 도입 후 예상되는 장단점을 파악하는 것은 장기적인 원전 안전 확보에 필수적임.

나. 세부기술 내용

1) 대형냉각재상실사고(LBLOCA) 원천적 배제

☐ 기술의 정의

- 대형 냉각재 상실사고가 가장 보수적인 사고가 아닐 수 있음을 기본 전제로 함.
- 실제적으로 발생 가능한 최대의 파단 크기를 실증적으로 밝혀내고 그 범위 내의 파단 크기에 대한 사고 스펙트럼을 분석하여 현실적 범주의 파단 사고에 대한 완벽한 해석 능력 확보를 목표로 함.
- 발생가능 범주의 최대 파단 크기를 결정하는 기술, 파단 스펙트럼에 대한 실증 실험과 해석 검증 기술, 그리고 핵연료 연소도 효과를 포함한 파단 스

펙트럼에 대한 안전성 민감도 분석 기술 등으로 구성됨.

- 파단 크기에 대한 실증 고찰을 통해 중-소형 냉각재 파단사고에 대한 연구를 강화하고 대형냉각재 상실사고를 설계기준초과사고로 분류하는 기술

□ 기술개발 필요성

- 원전에 설치되어 있는 anti-whip 시스템과 원자로 건물의 기하학적 구조는 주요 냉각유로의 발생 가능한 파단 크기를 제한함. 그러나 현 안전규제는 발생 가능성이 없는 대형냉각재상실사고를 설계기준사고로 분류하고 있음.
- 이는 원전의 실제적 안전성 향상에 도움이 되지 않음에도 불구하고 최대 파단 크기의 사고해석이 가장 보수적인 결과를 초래할 것이라는 가정 하에 안전연구의 많은 예산과 인력이 대형냉각재상실사고의 안전연구에 소비되고 있음.
- 최대 파단 크기의 냉각재 상실사고가 가장 보수적일 것임을 가정한 종래의 냉각재 상실사고 해석을 벗어나 실질적인 발생 가능성 범위 하의 전체 파단 스펙트럼을 분석하는 냉각재 상실사고 해석 방법을 정립함으로써 안전해석 자원과 노력을 실효적으로 활용하도록 함.

□ 국내외 동향

- 프랑스 EdF는 이미 설치되어 있는 anti-whip 시스템 및 원자로건물의 구조분석을 통해 양단파단사고 발생이 불가능함을 입증하고 설계기준사고에서 제외하였으며 최대 파단사이즈를 기구학적 해석을 통해 결정하여 적용 중임.
- 국내에서도 동적해석에 파단전누설(LBB: Leak Before Break)개념을 적용하고 있으나 사고해석에서는 아직 순간 양단파단사고 가정을 유지함. 동적해석을 통해 기반기술은 일정 수준을 갖추고 있음.

□ 기술 개발 수행 체계

- 산학연 공동 개발
- 1단계 기구학적 최대 파단 크기 결정 기술 단계에서는 학연 공동 개발
- 2단계 검증과 가동 원전에 대한 시범 최대 파단크기 결정 과정에서는 산업체 참여 필요
 - 1단계(3년) : 기구학적 최대 파단 크기 결정 기술 개발
 - 2단계(2년) : 최대 파단크기 내 스펙트럼 분석과 핵연료 연소도 효과를 포함한 불확실성 정량화 방법론 개발

□ 세부 기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• LBLOCA 발생배제를 위한 Anti-whip system 선행분석	<ul style="list-style-type: none"> 국내 원전의 anti-whip 기구학적 특성 파악 및 설비 개선 동적해석 기술 확립 최대 파단사이즈 계산을 위한 기반 기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 최대 파단크기 결정 방법론
• 기구학적으로 발생가능한 최대 파단사이즈 결정 기술	<ul style="list-style-type: none"> 원전 상황에서 발생 가능한 최대 파단크기 도출 기구학적으로 모든 원자로 부분의 최대 파단크기 결정 	<ul style="list-style-type: none"> 파단 크기 스펙트럼의 사고 중요도 분포
• IBLOCA 파단 스펙트럼 실증 실험	<ul style="list-style-type: none"> 최대 파단크기 내 스펙트럼 분석 파단 크기별 기본 실험 조건 및 민감도 평가실험 항목 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 중요인자에 대한 민감도 평가 DB
• IBLOCA 검증계산 및 핵연료 연소도를 포함한 민감도 분석 기술	<ul style="list-style-type: none"> 중요인자에 대한 민감도 평가 핵연료 연소이력 효과 반영 방안 도출 주요현상에 대한 현상파악 및 스케일링 효과 검토를 위한 개별 효과 실험계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 연소 이력 효과 반영 방법론 도출
• IBLOCA 최적해석을 위한 불확실도 정량화 방법론	<ul style="list-style-type: none"> 개별효과 실험 수행 핵연료 연소도 효과가 고려된 IBLOCA 불확실도 정량화 방법론 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 연소도 효과가 고려된 IBLOCA 불확실도 정량화 방법론 수립

2) 장기냉각 성능 향상 기술

□ 기술의 정의

- 사고 조건에서 원자로건물 내 잔열을 외부로 효과적으로 제거하여 발전소 안전을 확보하는 기술
- 응축 열전달 특성이 우수한 PCCS 열교환기와 우수한 자연순환 특성을 가지는 원자로건물 피동 냉각계통을 확보하기 위한 기술
- CFVS를 통한 증기 방출량을 최소화하여 IRWST 내 수원을 장기간 확보하고, 필요 시 외부로부터 냉각수를 보충하는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 개발 iPOWER 등 개량형 경수로도 확장설계조건에서도 최대 7일간 원자로건물 내 잔열을 원자로건물 외부로 배출하는 PCCS를 구비하고 있음.
- PCCS 응축수를 IRWST로 수거하여 장기간 잔열제거가 가능한 기능을 구비

하고 있음.

- 다양한 형태의 핀을 구비한 열교환기에 대한 실험 및 해석 연구가 수행됨.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 러시아의 VVER1200, 중국의 HPR1000 등 iPOWER 경쟁 노형들도 유사한 PCCS 설계를 채택하여 중대사고 조건에서 장기 잔열제거 기능을 확보함.
- 열교환기 표면의 응축막 형태와 표면 상태에 따른 응축수 제거 성능에 대한 연구를 수행함.

□ 미래동향 예측

- PCCS 성능 평가 및 설계에 필수적인 응축 모델의 불확실도가 상당히 존재하므로 관련 연구가 활발히 수행되고 있음.
- PCCS는 미래형 경수로의 핵심 안전 계통으로 냉각 성능이 우수하고 응축수를 회수하는 기능이 향상될 경우 장기간 냉각성능 확보가 가능함.
- CFVS 등의 동작에 따라 응축수 용량이 감소하는 경우 이를 외부에서 보충할 수 있는 설계 개념의 도입이 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- PCCS 열전달 특성을 확인하는 기초 실험 및 열전달 성능 향상을 위한 기반 연구가 필요하며, 설계 반영을 위한 산학연 연계 수행 체계가 필요함.
- 사고 조건 확인 및 CFVS 동작 영향 등을 고려하기 위해 열수력 모델링 및 사고 해석 기술과의 연계가 필요함.
- 산·학·연 공동연구체계
 - 1단계(2년) : 표면 응축 열전달 향상 기술 개발 및 정량적 분석
 - 2단계(3년) : 열교환기 설계에 따른 응축수 회수율 향상 및 냉각 성능 정량적 분석

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• PCCS 성능 향상 기술	• 표면 응축 열전달 향상 기술 개발 • PCCS 열교환기 설계 기술 개발 • PCCS 자연순환 향상 및 특성 평가	• 응축 열전달 상세 실험 및 모델링 • PCCS 설계 최적화
• 장기냉각 실패 실질적 배제 설계	• 원자로 공동 냉각과 원자로건물 대기 냉각 향상을 위한 설계 개념 연구	• 피동안전냉각계통 개념 개발

	<ul style="list-style-type: none"> • 보조 냉각수 계통 설계 및 평가 • 설계기준사고 및 다중고장사고 관리 전략 타당성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 피동냉각, 피동 안전주입, 원자로건물 여과배기 동작에 대한 시나리오 별 안전해석
--	---	--

1.3 원전 중대사고 예방 기술

1.3.1 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 원전의 중대사고를 예방하기 위한 핵심 기술로써, 핵연료와 관련된 기술, 원전의 안전 체계를 이루는 기기의 생존성을 보장하기 위한 기술, 다중고장 사고 범주의 해석 및 실증 실험, 그리고 사고 대응의 인적 수행도 향상과 함께 혁신 개념의 안전 기술을 포함하였음.

☐ 기술개발 필요성

- 후쿠시마 사고 이후 설계확장조건 시 비상노심냉각 특성에 대한 관심은 고조되고 있으나 이를 종합효과실험에서 모의하여 안전성을 입증한 바는 없음.
- 설계확장조건에 대한 실증실험을 통한 안전해석기술의 고도화 및 중대사고 진입방지 원천 기술을 확보함.

1.3.2 다중고장사고 환경 기기 생존성 평가 기술

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 후쿠시마 원전 사고 이후 원전의 안전에 대한 패러다임 크게 변화됨에 따라 설계기준뿐 아니라 설계기준초과사고 조건에서 원전 기기와 설비에 대한 건전성 확보 및 건전성 보장을 위한 평가가 요구됨.
 - 원전의 안전정지, 정지상태 유지, 그리고 사고 완화에 필수적인 안전 관련 핵심 기기와 설비에 대해서는 설계기준사고뿐 아니라 설계기준초과사고 조건에서도 고유의 기능과 성능 유지 필요
 - IAEA는 설계기준의 범위를 벗어나는 설계확장조건(DEC) 개념을 도입하여 설계기준을 초과하는 극한사고 조건에서 원전의 안전관리 방안 수립 요구

- 최근 10여년 사이에 일본 등의 일부 원전에서 설계기준을 초과하는 지진을 경험함에 따라 설계기준초과지진 조건에서 원전의 지진 안전성 재평가 및 내진성능 상향에 대한 요구가 증가함.
- 특히 국내에서는 경주 및 포항지진 이후 원전의 지진 안전성에 대한 관심이 증폭됨에 따라 신규 설계 원전뿐 아니라 가동 중인 원전에 대해서 지진 안전성 재평가 요구하고, 설계기준을 초과하는 지진 조건에 대한 내진성능 평가를 요구함.
- 정상운전과 설계기준사고 조건뿐 아니라 설계기준을 초과하는 극한사고 조건에서 안전관련 주요 기기와 설비에 대한 구조건전성 및 생존성 확보가 필요함.
- 현재 설계기준초과사고 조건에서 원전 주요 기기와 설비에 대한 구조건전성과 생존성 평가를 위한 평가 방법 및 절차, 기술기준, 규제요건 등이 확립되어 있지 않음.

□ 기술개발 필요성

- 원전의 안전에 대한 패러다임 변화에 따른 안전성 확보 및 강화, 그리고 중대사고의 예방과 대처를 강화하기 위해서 설계기준초과사고 조건에서 안전관련 주요 기기와 설비에 대한 구조건전성 평가와 생존성 평가 방법, 절차, 기술기준, 규제요건 등의 개발이 필요함.
- 설계기준초과사고 조건에서 안전관련 핵심 기기와 설비에 대한 구조건전성 평가와 생존성 평가를 위한 방법, 절차, 기술기준, 규제요건 등의 개발을 위해서는 여러 분야의 기술개발이 필요하지만 특히 아래의 기술 개발이 필요함.
 - 설계기준초과사고 하중 조건에서 기기 및 설비의 구조건전성 평가기술 확립
 - 설계기준초과사고 환경에서 기기 및 설비의 생존성 평가기술 확립
- 설계기준초과사고 조건에서 원전 기기 및 설비의 신뢰성 있는 구조건전성 평가를 위해서는 원전 기기 및 설비에 미치는 설계기준초과사고 하중의 특성이 적절히 반영된 평가 방법과 절차 개발이 필요함.
- 설계기준초과사고 조건에서 기기 및 설비의 기능/성능 확보 여부를 평가하기 위해서는 설계기준초과사고 환경에서 기기 및 설비의 재료물성과 손상 거동이 적절히 반영된 생존성 평가 방법과 절차를 개발할 필요가 있음.

나. 세부기술내용

1) 다중고장사고 하중조건 기기 건전성 평가 기술

□ 기술의 정의

- 설계기준초과지진 하중 조건에서 재료의 변형거동과 손상거동, 경년열화 영향 파악과 기기 및 설비의 구조건전성 검증을 위한 재료물성 시험과 구조건전성 시험 및 검증 기술
- 반복/동적하중 조건에서 재료거동을 모델링하고 이를 반영한 최적화된 비선형 동적해석 방법을 개발함으로써 설계기준초과지진 하중 조건에서 기기 및 설비의 거동을 신뢰성 있게 평가하기 위한 기술
- 설계기준초과지진 하중 조건에서 기기 및 설비의 구조건전성 평가를 위한 기술기준 및 절차를 확립하기 위한 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 가동 원전의 Stress Test에서 설계기준초과지진을 고려한 내진성능 평가 시 기기 및 설비의 취약도 평가를 수행함. 그러나 설계기준초과지진 하중의 특성을 고려한 변형거동과 손상거동이 반영된 기기 단위의 구조건전성 평가는 수행된 바 없으며, 평가 방법과 절차, 그리고 허용기준 확립되어 있지 않음.
- 대학을 중심으로 설계기준초과지진 조건에서 배관 재료의 물성에 미치는 동적/반복하중의 영향을 시편 시험을 통해 평가하고 지진하중 조건에서 균열 거동 예측을 위한 기초 연구를 수행함.
- 국내에서는 설계기준초과지진의 하중 특성을 고려한 구조물 단위의 시험과 검증이 수행된 바 없으며, 설계기준초과지진 하에서 기기와 설비의 구조건전성 평가를 위한 기술기준 및 절차가 수립되어 있지 않음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 설계기준초과지진 수준의 대형 지진에 대한 기기의 거동을 이해하기 위해 다양한 시험을 수행하여 기존 응력기반 평가의 과다한 보수성을 입증하고 새로운 기법의 필요성이 제기됨. 그러나 아직까지 설계기준초과지진 하중 조건에서 기기의 구조건전성 평가를 위한 기술기준과 절차가 확립되어 있지 않음.
- OECD/NEA는 지진 조건에서 배관의 건전성 평가와 관련한 국제공동연구를 진행 중이며 설계기준초과지진 조건에 적합한 새로운 평가 절차와 허용기

준을 개발하고 있음.

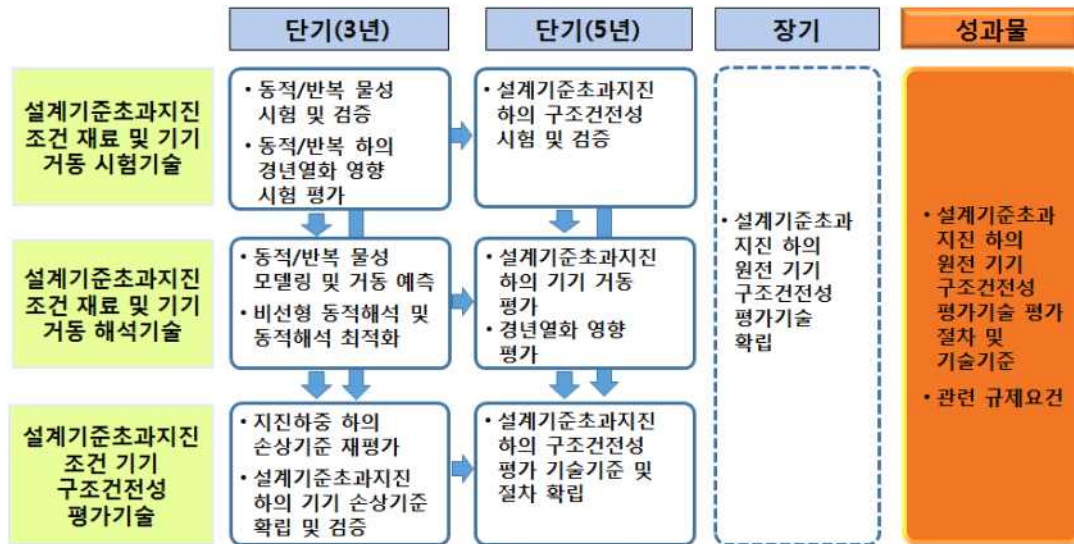
- 설계기준초과지진 조건의 기기 건전성 평가를 요구하고 있으나, 평가 방법 및 절차는 아직까지 확립되지 않음. 미국기계학회 보일러 및 압력용기 기술 기준 위원회(ASME Code Committee) Working Group에서는 설계기준초과지진 이후 재가동 결정을 위한 평가 절차를 Code Case로 개발하고 있음.
- 일본은 설계기준초과지진 하의 기기 건전성 평가 절차 및 허용기준 개발을 위해 많은 연구를 진행하고 있음. 일본기계학회(JSME)는 설계기준초과지진 조건에서 배관의 건전성 평가 절차 및 허용기준을 개발 중이며, 개발 결과를 JSME Code Case로 발간할 예정임.

□ 미래동향 예측

- DEC 개념의 적용과 원전의 안전성 향상 및 강화에 대한 요구가 증가됨에 따라 설계기준초과사고 하중 조건에서 기기 및 설비의 구조건전성 평가 수요 증가가 예측됨.
- 최근 지진에 대한 관심 증가로 인해 설계기준초과지진 조건에서 장기 가동 원전의 안전관련 핵심 기기에 대한 구조건전성 확보와 정량적 건전성 평가 요구가 증가할 것으로 예측됨.
- 이를 위한 평가 방법과 절차의 개발, 그리고 관련 기술기준 및 규제기준의 확립이 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 설계기준초과사고 하중의 특성이 반영된 재료 및 기기 거동의 시험적 평가, 해석적 평가, 그리고 이를 바탕으로 산업계가 적용할 수 있는 수준의 평가 절차의 개발과 기술기준화가 필요함.
- 기초물성 및 검증 시험, 해석기법 및 최적모델 개발, 손상기준 개발 등이 함께 진행되어야 하며, 평가 방법 및 절차의 기술기준화를 위해서는 기술개발 과정에 산·학·연 뿐 아니라 규제기관의 참여가 필요함.
- 산·학·연 공동연구체계
 - 1단계(3년) : 시험을 통한 재료물성 및 거동 파악과 모델링 및 해석기법 개발
 - 2단계(5년) : 실증 시험과 검증을 통한 평가 절차 및 기술기준 확립



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 설계기준초과지진 조건 재료 및 기기 거동 시험기술	<ul style="list-style-type: none"> • 동적/반복하중 하의 재료물성 시험 및 검증 • 동적/반복하중 하의 경년열화 영향 시험 평가 • 설계기준초과지진 하중 하의 구조건전성 시험 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 지진하중 조건 재료물성 시험 및 평가 기술 • 대형 지진하중 조건의 기기 구조건전성 시험 기술
• 설계기준초과지진 조건 재료 및 기기 거동 해석기술	<ul style="list-style-type: none"> • 동적/반복하중 하의 재료물성 모델링 및 거동 예측 • 비선형 동적해석 및 해석방법 최적화 • 설계기준초과지진 하의 기기 거동 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 동적/반복 재료거동 모델링 기술 • 탄소성 동적해석 기술 • 설계기준초과지진 하중 하의 기기 거동 해석 기술
• 설계기준초과지진 조건 기기 구조건전성 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> • 지진하중 하의 기기 손상기준 재평가 • 설계기준초과지진 하의 기기 손상기준 확립 및 검증 • 설계기준초과지진 하의 구조건전성 평가 기술기준 및 절차 확립 	<ul style="list-style-type: none"> • 대형 지진하중 하의 기기 손상 평가기술 • 대형 지진하중 하의 구조건전성 평가기술

2) 다중고장사고 환경 재료 및 기기 건전성 평가 기술

□ 기술의 정의

- 설계기준을 초과하는 극한사고 환경에서 기기 및 설비의 재료 물성 및 손상 기구와 기기 및 설비의 손상 허용기준 파악하고 검증하기 위한 시험기술

- 극한사고 환경에서 기기 및 설비의 재료 물성과 손상 거동을 예측하기 위한 모델링 기법과 설계기준초과사고 환경에서 기기 및 설비의 거동을 평가하기 위한 열-구조 해석기술
- 설계기준을 초과하는 극한사고 환경에서 기기 및 설비의 생존성 평가를 위한 운전허용 기준 수립, 기기 성능평가, 그리고 생존성 평가 방법 및 절차 확립에 관한 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 설계기준을 초과하는 극한사고 환경에서 기기 및 설비의 건전성 평가를 위한 재료물성 시험, 기기 거동 평가, 그리고 손상 허용기준에 대한 국내 연구는 거의 진행된 바 없으며 관련 방법 및 절차가 확립되지 않음.
- 다만, 최근 극한사고 환경에서 증기발생기 전열관의 재료물성과 손상거동을 파악하고 건전성을 평가하기 위한 연구가 한원(연)을 중심으로 일부 진행된 바 있으며, 중대사고 조건에서 원자로압력용기의 구조건전성 평가를 위한 해석적 연구가 일부 진행됨.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 설계기준을 초과하는 극한사고 환경에서 기기 및 설비의 건전성 평가를 위한 평가 방법과 절차가 확립되지 않음.
- 일본은 후쿠시마 사고 이후 동경대와 동경전력 등을 중심으로 극한사고 환경에서 기기 및 설비의 손상거동 파악을 위한 실험적·해석적 연구를 진행하여 극한사고 환경에서 기기 및 설비의 손상모드를 정의하고 손상모드 별 새로운 허용기준을 개발하고 있음.
- 일본의 경우에도 아직까지 극한사고 환경에서 기기와 설비의 생존성 평가에 적용하기 위한 허용기준과 안전여유도를 개념적으로 제시하는 수준임.

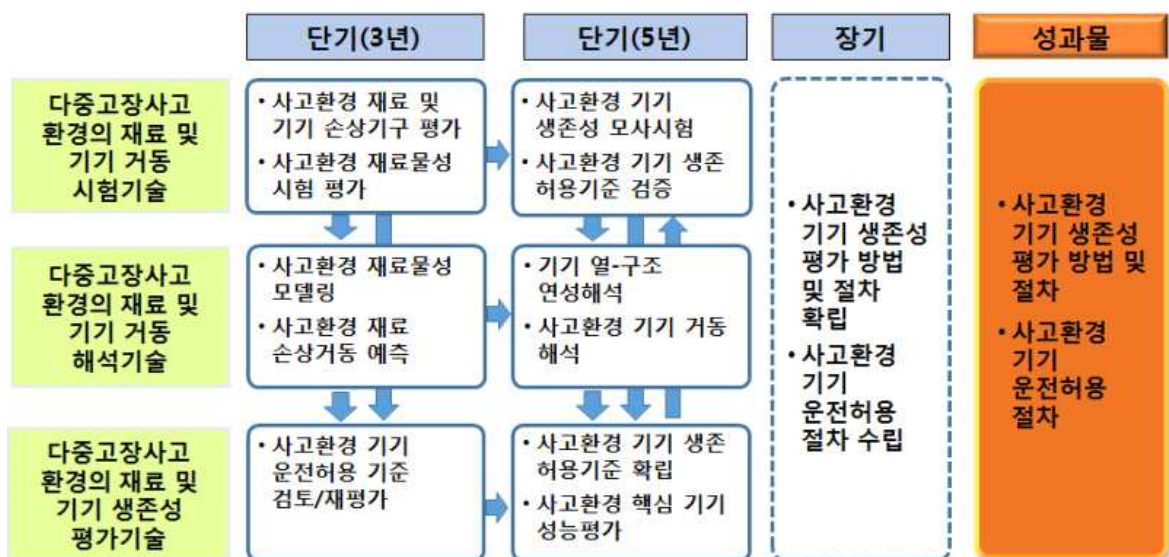
□ 미래동향 예측

- 원전 안전에 대한 패러다임 변화에 따라 설계기준초과사고 환경에서도 안전관련 핵심 기기와 설비에 대해서는 고유의 기능과 성능 확보를 요구하고 있기 때문에 극한사고 환경에서 기기 및 설비의 생존성 평가 필요성이 증가할 것으로 예상됨.
- DEC 개념의 적용에 따른 신규건설 원전뿐 아니라 가동 원전의 사고환경 안전관리 방안 마련을 위해 극한사고 환경에서 기기 및 설비의 생존성 평가

필요성 더욱 증가 및 관련 규제기준의 확립이 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 극한사고 환경 하에서 기기 및 설비의 생존성 평가 방법 및 절차 확립을 위해서는 극한사고 환경 하에서 재료물성과 손상거동 파악 및 검증을 위한 을 위한 시험, 극한사고 환경 하에서 재료물성과 손상거동을 모델링하고 예측하기 위한 해석기법, 생존성을 평가하기 위한 허용기준 및 평가절차 확립 등의 크게 3부분에 대한 기술개발이 진행되어야 하며, 기술개발에는 산·학·연 뿐 아니라 규제기관의 참여가 필요함.
- 다양한 극한사고 환경을 가정할 수 있으므로 극한사고 발생 가능성과 사고에 따른 결과의 심각성 등을 고려하여 극한사고 종류와 환경을 결정할 필요가 있음.
- 극한사고 환경 하에서 재료물성 및 손상거동 파악, 그리고 검증 시험을 위해서는 극한사고 환경을 모사할 수 있는 시험 설비의 구축이 필요하며, 시험 설비의 구축을 위한 체계적인 투자 계획이 필요함.
- 산·학·연 공동연구체계.
 - 1단계(3년) : 극한사고 환경 하의 재료물성 및 손상 거동 시험 평가 및 모델링 기술 개발
 - 2단계(5년) : 극한사고 환경 하의 기기 및 설비 거동 평가기술 개발 및 생존 허용기준 확립



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 다중고장사고 환경의 재료 및 기기 거동 시험기술 	<ul style="list-style-type: none"> 사고환경 재료 및 기기 손상기구 평가 사고환경 재료물성 시험평가 사고환경 기기 생존성 모사시험 및 생존 허용기준 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 사고환경 재료물성 평가 기술 사고환경 기기 생존성 모사시험 기술
<ul style="list-style-type: none"> 다중고장사고 환경의 재료 및 기기 거동 해석기술 	<ul style="list-style-type: none"> 사고환경 재료물성 모델링 사고환경 재료 손상거동 예측 기기 열-구조 연성해석 사고환경 기기 거동 해석 	<ul style="list-style-type: none"> 사고환경 재료물성 모델링 및 손상예측 기술 기기 열-구조 연성해석 기술 사고환경 기기 거동 해석 기술
<ul style="list-style-type: none"> 다중고장사고 환경의 재료 및 기기 생존성 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> 사고환경 기기 운전허용 기준 재평가 사고환경 주요 기기 운전허용 기준 수립 사고환경 핵심 기기 성능평가 사고환경 기기 생존성 평가 방법 및 절차 확립 	<ul style="list-style-type: none"> 사고환경 핵심 기기 성능평가 기술 사고환경 기기 생존성 평가기술

1.3.4 다중고장사고 해석 및 실증 실험

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 다중고장사고 시나리오에 대한 종합 실증 실험 자료가 절대 부족한 상황임.
- 다중고장 사고에서 발생하는 현상에 대한 해석적 관점의 접근이 전무한 상황에서 사고관리계획서 제출이 법제화 되었으므로 현 상황에서는 안전해석 코드의 다중고장사고 적용을 위한 방법론 개발이 시급한 상황임.

□ 기술개발 필요성

- 다중고장사고를 포함한 사고관리 프로그램을 통하여 사고 시 방사성물질이 발전소 내 또는 소외로 방출하는 것을 최소화 하고 발전소를 안전한 상태로 회복시킬 것을 요구하는 사고관리계획서 관련 법령 및 규제기준 및 지침을 제정함.
- 다중고장사고를 유발하는 초기 사건의 도출부터 사고 전개를 예측하는 해석적 접근, 사고관리의 목표 등 시급히 해결되어야 할 현안이 집중되어 있음.

나. 세부기술내용

1) 다중고장사고 안전성 검증

☐ 기술의 정의

- 중대사고 진입방지 원천기술 확보
- 다중고장 사고에 대한 개별효과 및 종합효과실험 DB 구축
- 국내 고유 안전해석코드의 다중고장 사고 예측 성능 개선 및 검증

☐ 국내 기술 수준 및 현황

- 한원(연)은 열수력 종합효과실험장치인 ATLAS를 활용하여 대표적인 설계기준사고와 설계확장조건에 대한 모의실험을 수행하고 있음.

☐ 국외 기술 수준 및 현황

- 독일(PKL), 일본(LSTF), 중국(ACME)은 열수력 종합효과실험 장치를 운영하고 있으며, 이를 토대로 활발한 국내외 협력 프로그램을 수행하고 있음.
- 후쿠시마 사고 이후 설계확장조건 시 비상노심냉각 특성에 대한 관심은 고조되고 있으나 이를 종합효과실험에서 모의하여 안전성을 입증한 바는 없음.

☐ 추진 전략

- 검증 실험과 코드 체계 개발 병행 전략
 - 1단계(5년)목표: 설계확장조건에 대한 개별효과 및 종합효과실험을 통한 국내 고유 개발 안전해석코드의 예측 성능 검증·개선
 - 2단계(5년)목표: 설계확장조건에 대한 실증실험을 통한 중대사고 진입방지 원천 기술 확보
- 최종목표: 설계확장조건에 대한 실증실험을 통한 안전해석기술의 고도화 및 중대사고 진입방지 원천 기술 확보

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• DSA/PSA 관점의 국내 원전 다중고장사고 도출	• 결정론적 및 확률론적 안전성 분석 결과를 종합하여 국내 원전 노형별 주요한 다중고장사고 목록 도출	• DSA와 PSA 결과를 통합한 다중고장사고 도출 방법

• 다중고장사고 실증실험	• 다중고장 사고 조건에 대한 개별효과 및 종합효과실험	• 다중고장 사고 대처 기술 효과 검증
• 다중고장사고 검증 계산	• 다중고장 사고 조건에 대한 개별효과 및 종합효과실험을 통한 국내 고유 개발 안전해석코드의 예측 성능 검증·개선	• 다중고장 사고 예측 체계 검증
• 사고해석범위 확장을 위한 안전해석 코드 개발 기술	• 다중고장 사고 조건 실증실험을 반영하여 사고해석범위 확장을 통한 안전해석기술의 고도화 달성	• 다중고장사고 범위의 원전 안전해석 체계
• 통합코드 불확실도 평가 방법	• 다중고장사고 범위의 원전 안전해석 방법론 수립	• 다중고장사고 범위의 원전 안전해석 방법론

2) 다중고장사고 안전해석방법론

☐ 기술의 정의

- 가동 및 신규 건설원전의 심층방어 능력 향상
- 중대사고 예방을 위한 운전원 조치 평가

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 다중고장사고를 포함한 사고관리 프로그램을 통하여 사고 시 방사성물질이 발전소 내 또는 소외로 방출하는 것을 최소화 하고 발전소를 안전한 상태로 회복시킬 것을 요구하는 사고관리계획서 관련 법령 및 규제 기준 및 지침을 제정하였음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- IAEA는 SSR-2/1 요건을 개정하여 DEC 개념을 도입하였으며, IAEA-TECDOC-1791을 통하여 결정론적 방법 및 확률론적 방법을 통해 선정된 설계확장조건 목록을 제시하였음. EUR 및 WENRA의 경우에도 각각 DEC 선정 방법 및 해석 시 고려사항을 제시하고 있음.

☐ 미래동향 예측

- 다중고장사고 안전해석방법론 개발

☐ 기술개발 수행체계

- 다중고장사고 전산코드 개발
- 사고 별 방법론 개발
 - 1단계(3년) : 다중고장사고 선정 방법론 개발 및 사고완화절차 개발
 - 2단계(2년) : 다중고장사고별 안전해석방법론 개발

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 다중고장사고 선정방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 다중고장사고 별 안전해석방법론 개발 • 극한재해로 인한 발전소 안전기능 상실 시나리오 평가방법론 개발 • ISLOCA 평가방법론 개발 	• 다중고장사고 선정방법론 개발
• 운전원조치 해석방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 극한재해 사고완화절차 개발 • 비상운전지침서 및 극한재해 사고완화절차 연계 기술 개발 	• 비상운전지침서 및 극한재해 사고완화절차 연계 기술 개발
• DI&C CCF 해석방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 원자로 보호계통 해석방법론 개발 • CCF 수반 설계기준사고 해석 방법론 개발 	• 디지털 I&C 해석방법론 개발

3) 다중고장사고 대응 방안

□ 기술의 정의

- 국내 가동 및 건설원전을 대상으로 다중고장사고 별 피폭선량 기준치의 만족 여부를 평가하기 위한 최적 방사선 해석방법론 개발
- 다중고장사고 대처설비 평가 방법론 개발을 통해 국내 가동 및 건설 원전의 다중고장사고 대처능력을 평가하고, 대처설비 및 사고완화 절차 개선사항 도출에 활용

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 2016년에 다중고장사고를 포함한 사고관리 프로그램을 통하여 사고 시 방사성물질이 발전소 내 또는 소외로 방출하는 것을 최소화 하고 발전소를 안전한 상태로 회복시킬 것을 요구하는 사고관리계획서 관련 법령 및 규제기준 및 지침을 개정하였음.

- 사고 시 사고영향 평가를 통해 피폭선량 기준치의 만족 여부를 확인할 것을 요구함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- USNRC, IAEA 및 유럽 규제기관은 다수호기 복합사고에 대해 종합적이고 체계적인 연구개발을 수행함.
- IAEA 는 SSR-2/1 요건을 개정하여 DEC 개념을 도입하였으며, EUR 및 WENRA의 경우에도 각각 DEC 선정 및 평가 해석 시 고려사항을 제시하고 있음.

□ 추진 전략

- 산학연 공동 개발 전략
 - 1단계(3년) : 극한재해 분석, 기존 절차서 평가 및 사고관리계획서 작성
 - 2단계(2년) : 극한재해 대응전략 최적화 및 규제현안 대응
 - 3단계(3년) : 전산화 절차서, 인공지능을 이용한 운전원 지원 시스템 개발

□ 기술의 구성

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 심층방어능력 강화 전략 수립	• 결정론적 방법, PSA 방법, 전문가 의견 등을 종합하여 심층방어 강화 전략 수립	• 종합적/체계적/효과적인 심층방어 강화 전략 개발
• 다중고장사고 사고관리기술	• 다중고장사고 분석, 기존 절차서 평가 및 사고관리계획서 작성 • 다중고장사고 대응전략 최적화 및 규제현안 대응	• 전산화 절차서, 인공지능을 이용한 운전원 지원 시스템 개발
• 극한재해 관리기술	• 극한재해 분석, 기존 절차서 평가 및 사고관리계획서 작성 • 극한재해 대응전략 최적화 및 규제현안 대응	• 전산화 절차서, 인공지능을 이용한 운전원 지원 시스템 개발
• DEC 대처설비평가방법론	• DEC 대처설비 평가방법론 개발 • ELAP 및 LUHS 시 격실냉방 해석 방법론 개발 • 운전 노형 DEC 대처설비 평가 해석	• DEC 대처설비평가방법론
• DEC 방사선해석방법론	• 노심 방사선원항에 대한 노형별 최적 평가 방법론 개발 • DEC 사고별 방사선 결말 분석 방법론 개발 • 운전 노형 방사선 결말 해석	• 다중고장사고 방사선 해석 방법론

1.3.5 중대사고 예방을 위한 냉각능력 강화 기술

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 모든 사고 영역에서 중대사고로 사고 확대를 예방하는 핵심은 원전의 냉각 기술임.
- 충분한 냉각 능력 확보를 위한 혁신적 개념의 설비 기술과 냉각능력의 효율적 배치를 통한 심층방어 능력 강화 전략을 구사하여야 함.

☐ 기술개발 필요성

- 직류 전원 상실 상태에서 냉각 능력을 보장하는 터빈 구동 보조 급수 계통에 대해서는 비상시 증기 유입 밸브를 개방하는 단순한 작동 밸브 이외에는 장시간 작동을 보장할 전원 장치나 계측 장치가 전무하여 장시간 가동을 담보할 수 없음.
- 가압기 안전밸브를 개방해야 할 필요가 있을 때 가압기 상부에 습분 분리기를 설치하여 증기만 배출함으로써 압력 낮춤은 극대화하고 액체상태의 냉각재는 가압기내부로 걸러내 액체 상태의 냉각재를 최대한 보존하여 냉각능력을 극대화 함.

나. 세부 기술 내용

1) 가동원전 보조급수불능 원천 배제 기술

☐ 기술의 정의

- 전원의 공급 없이 계속하여 장시간 운전되는 터빈 구동 보조 급수 계통을 구현하여 원전 안전성을 획기적으로 향상시키는 기술
- 터빈 구동 보조 급수 계통의 지속적인 작동을 위해 기본적인 증기 발생기 수위 계측 기기와 터빈 유입 증기 배관 밸브의 개폐를 보장하는 독립된 전원 장치를 구현하는 기술

☐ 국내외 기술 현황

- 현재 국내를 포함하여 대부분 국가의 가압 경수로의 보조급수 계통 구성은 거의 동일함.

- 터빈 구동 보조 급수 계통에 대해서는 비상시 증기 유입 밸브를 개방하는 단순한 작동 밸브 이외에는 장시간 작동을 담보할 전원 장치나 계측 장치가 전무함.
- 국외에서 개발한 노형도 터빈 구동 보조 급수 계통은 단순한 증기 유입 개폐 밸브만 구비되어 있음.

□ 추진 전략

- 산학연 공동 연구
- 계측 제어 시스템과 전원발생 등의 다분야 기술 접목
 - 1단계(2년)목표: 터빈 구동 보조 급수 계통의 수위 계측과 밸브 개폐용 독립 전원 시스템 개념 정립
 - 2단계(3년)목표: 독립 전원 시스템의 활용성 검증 계산 및 실험
 - 최종목표: 터빈 구동 보조 급수 시스템의 장기 활용성 검증

□ 기술의 구성

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 가동원전 보조급수불능 원천 배제 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 독립전원 시스템 개념 정립 독립 검증 시스템 활용성 검증 및 실증 실험 터빈 구동 보조 급수 시스템의 장기 활용성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 장기냉각 성능이 보장되는 터빈 구동 보조급수 계통

2) 가압기 습분분리기 설치 기술

□ 기술의 정의

- 가압기 상부에 습분분리기를 설치하여 고압 해소를 위한 밸브 개방 상황에도 액체 상태 냉각재를 최대한 보존하는 기술
- 고압 상태가 지속되는 사고에서는 가압기의 안전밸브를 개방하여 일차계통의 압력을 해소하는 방안이 자주 활용됨. 이때 증기와 액체의 혼합물 상태의 냉각재가 안전밸브를 통해 다량 방출되어 냉각재가 유실되는 부작용이 발생함.
- 가압기 상부에 습분 분리기를 설치하여 안전밸브를 통해 증기만 배출함으로써 압력 낮춤은 극대화하고 액체상태의 냉각재는 가압기내부로 걸러내 액체 상태의 냉각재를 최대한 보존함.

□ 추진 전략

○ 산학연 공동 추진

- 1단계(2년)목표: 가압기 습분 분리 개념 정립
- 2단계(3년)목표: 가압기 습분분리 개념의 실증 및 계통 적용성 분석
- 최종목표: 가압기 습분 분리기 설치를 통한 안전성 향상 검증

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 가압기 습분분리기 설치 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 개념 정립 • 실증 실험 및 계통 적용성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 고압해소 상황에도 냉각재 누출을 최소화하는 가압기 기술

3) 원자로 건물 우회사고 탐지/격리

□ 기술의 정의

- 원자로건물 벽 내외 부를 관통하는 계통의 설계/운전압력이 다른 부분의 사고 평가 기술
- SCS 펌프 전단 파단 등과 같은 Inter System (IS) LOCA가 발생하여 SIT 등 안전주입수의 완전 유실이 발생하여 원전의 중대사고까지 진행되는 상황을 방지하는 기술
- 사고 시 작동되는 계통의 설계압력 변경이 발생하는 배관의 취약부 및 ISLOCA 파단 특성 규명과 이의 조기감지 기술

□ 국내외 동향

- 국내에서는 SG Primary-to-Secondary 확인 누설 및 RCP Seal LOCA 등의 연구는 진행되었으나 사고 시 작동하는 안전계통 중 원자로건물 전후단의 ISLOCA 관련 실험은 수행되지 않음.
- 최근 SCS 계통 펌프 전단 등 원자로건물 전후단의 ISLOCA 연구가 착수되었음.
- 국외에서는 파단사고 시 비상노심주입계통 및 SCS 등 주입대기 계통의 상향 U-곡관부 배관 내 비응축성 가스의 축적에 의한 Pump Suction Failure 등의 방지기술은 연구하였으나 원자로건물 전후단의 ISLOCA 관련 실험은

아직까지 수행되지 않음.

☐ 추진 체계

○ 산학연 공동 추진

- 1단계(5년)목표: ISLOCA 취약부위 평가 및 누설감지기술개발
- 2단계(5년)목표: ISLOCA 누설감지기술 검증
- 최종목표: 격납건물전후단의 중대사고 방지 ISLOCA 누설감지기술개발

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• ISLOCA 파단 전 예측 기술	• ISLOCA 취약부위 평가 및 누설감지기술개발 • 누설감지기술 검증 분석	• ISLOCA 발생 취약부 및 위험도 평가 기술 • ISLOCA 조기 누설감지 및 중대사고화 방지기술개발

4) 다중고장사고 대비 심층방어 능력 강화

☐ 기술의 정의

- 원전에서 발생할 수 있는 모든 사고(다중사고 및 극한재해 포함)를 도출하고, 이들에 대해 체계적/종합적으로 심층방어 능력을 강화함으로써, 대량 방사성 물질을 누출을 원천적으로 방지

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 다중고장사고 대처기술 개발 과제에서 결정론적/확률론적(DSA/PSA) 기법을 이용하여 국내 원전의 다중고장사고 경위를 도출하고, 이에 대해 심층방어 능력을 강화하는 연구를 시범적으로 수행함.
- EU-APR1400 설계에서 핀란드 규제요건의 DEC 대처 방안을 검토한 바 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 최근 IAEA에서 DEC 개념이 도입되었음. 핀란드에서 DEC가 법제화되어, 신규원전에 대해 DEC가 적용되고 있음.
- 세계적으로 DEC가 도입되는 단계에 있으나, 아직까지는 개념 도입단계라고 할 수 있음.

□ 미래동향 예측

- 방사성 물질의 대량 누출 사고를 방지하기 위하여 신규원전에 대해 다중고장사고의 적용이 당연시되고 있으며, 운영 중인 원전으로도 확장될 것으로 예상됨.
- 기존원전의 경우에는 노형별 설계에 따라 심층방어 전략이 다르기 때문에, 노형별로 다중고장사고 대비 심층방어의 최적화 연구가 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 종합적, 체계적으로 다중고장사고 대비 심층방어 능력 강화 전략의 도출이 필요함.
 - 특정 사건에 대한 대처 전략을 수립하는 것보다는 모든 사건에 대해 종합적으로 대처 전략을 수립하는 것이 비용 측면에서 효과적임.
 - 심층방어 능력 강화는 설비 개선 방안, 절차서를 개선하는 소프트웨어적 방법, 또는 피동안전계통을 이용한 방법 등을 종합적으로 검토할 필요가 있음.
- 대량 방사성 물질을 누출을 실질적으로 방지하기 위해서는 많은 비용이 수반될 수 있으므로, 심층방어를 효과적으로 개선하기 위해 단계적으로 연구를 수행하는 것이 필요함.
 - 1단계(5년) 시범 원전 대상으로, 모든 노형에 적용될 수 있는 공통 기술 개발
 - 2단계(5년) 노형별 심층방어 최적화 기술 개발
 - 3단계(5년) 노형별 개선 방안

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 중대사고 방지 취약점 도출을 위한 PSA 종합 평가	• 모든 사건에 대해 PSA 분석을 수행하여, 종합적으로 취약점을 도출	• Level 1 PSA 및 Level 2 PSA 통합 분석, 외부 재해 PSA 통합 분석을 통한 종합적인 취약점 도출
• DSA/PSA 종합적 국내원전 DEC 사건 도출	• 결정론적 및 PSA 분석 결과를 종합하여 노형별 DEC 사건 도출	• 기존 DEC 연구의 노형별 적용
• 심층방어 취약점 도출	• 결정론적 방법, PSA 방법, 전문가 의견 등을 종합하여 DEC 대비 심층방어 취약점을 도출	• 종합적으로 심층방어 강화를 위한 핵심 인자 도출
• 심층방어 능력강화 전략 수립	• 결정론적 방법, PSA 방법, 전문가 의견 등을 종합하여 심층방어 강화 전략 수립	• 종합적/체계적/효과적인 심층방어 강화 전략 개발

• 설비 개선 방안	• 노형별 심층방어 강화를 위한 설비 개선 방안	• 특정 설비별 실질적/비용 효과적 개선 방안 평가
• 절차서 개선 방안	• 노형별 심층방어 강화를 위한 절차서 개선 방안	• 종합적/체계적인 EOP/SAMG/EDMG 개선 방안 연구
• Inherent Safety 향상 방안	<ul style="list-style-type: none"> • 신규 원전의 경우, 기존 안전 기능을 완전 대체할 수 있는 새로운 피동계통을 연구 • 기존 원전의 경우에는 기존 안전 기능을 보완할 수 있는 피동 기능의 도입을 통해, 심층방어 지속 시간을 연장하는 방법이 효과적임 	• 기존 안전 기능을 보완할 수 있는 효과적인 피동 기능 개발

1.3.6 사고대응 인적 수행도 향상

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 원전 안전성 측면에서, 인적요인은 전체 노심손상빈도 (CDF; Core Damage Frequency)에 가장 큰 영향을 주는 항목임.
 - 원전 안전성 향상 기술 NEA (Nuclear Energy Agency) 분석에 따르면, 인적오류로 인한 노심손상빈도의 영향이 많게는 약 80%까지 차지하는 것으로 밝혀짐.
- 고장·정비를 위한 예방정비 뿐 아니라 예상하지 못한 원인으로 인해 원전 정지가 발생할 경우 주제어실 운전원은 비상운전절차서 (EOP, Emergency Operating Procedure)를 따라 원전을 안전정지상태로 진입시켜야 함.
- 특히 후쿠시마 사고 이후, 보다 효과적인 사고 대응을 통한 원전 안전성 향상을 위해 다양한 종류의 이동형 펌프나 발전기를 설치하고 있음.

□ 기술개발 필요성

- 최근 개정된 원자력안전법에 따르면, 모든 가동 및 건설 원전은 다양한 사고 발생 시 충분한 사고관리 전략 및 관리능력이 있음을 보이기 위한 사고관리 계획서를 의무적으로 제출해야함.
- 이를 위해, PSA 기법 등을 활용한 상세 리스크 평가를 통해 사고관리 전략 및 관리능력의 효용성을 객관적으로 보일 것을 요구함. 이러한 측면에서, 사고 대응을 위한 비상운전절차서의 개발 및 효과적 수행을 지원하기 위한 기술을 개발할 필요가 있음.

- 또한 최근 건설되는 원전에 설치되는 디지털 주제어실은 기존 주제실과 다른 특성을 가지고 있기 때문에, 디지털 주제어실에 근무하는 운전원의 효과적인 사고 대응을 지원하기 위한 기술과 새롭게 도입된 이동형 기기를 포함한 최적 사고 대응전략을 지원할 수 있는 기술 개발이 필요함.

나. 세부기술내용

1) 비상운전절차(EOP) 개선

☐ 기술의 정의

- 동적인 발전소 상황의 효과적 대처를 위한 최적 비상운전절차서 개발

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국원자력연구원에서는 3차 원자력연구개발사업을 통해 SDT (Sequential Diagnosis Technique) 및 운전원의 인을 근간으로 OPR1000 원전의 비상운전절차서 중 진단절차서를 개선한 경험이 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 스페인 규제기관인 SNSC에서는 비상운전절차서 기반 안전여유도 평가 시스템인 ISA (Integrated Safety Analysis) 시스템을 개발하였고, Westinghouse 4-loop PWR에 대해 시범적용을 하였음.
- 스위스 PSI에서는 독일 규제기관인 GRS에서 개발한 MCDET (Monte Carlo simulation with discrete Dynamic Event Tree)을 근간으로 LOCA 성공기준을 상세 분석한 후 비상운전절차서 개선전략을 제시하였음.

☐ 미래동향 예측

- 가동 중 원전의 안전성 향상을 강조하는 현재 추세에서, 비상 상황 대응에 필수적인 비상운전절차서를 최적화시키는 것은 우선적으로 고려해야할 현안 중 하나임.
- 특히 최신 인공지능 기법 도입 및 계산능력 향상에 따라 기존에는 수행할 수 없었던 계산을 매우 빠르고 정확히 할 수 있게 됨에 따라, 발전소의 동적인 특성을 반영한 실질적인 리스크 평가 결과를 고려한 비상운전절차서 개선 노력은 점차 증가할 것으로 예상됨.

☐ 기술개발 수행체계

- 인공지능 기술 개발이 최근 급격히 진행되는 추세이므로 연·학 협력체계 구축을 통한 문제해결 노력 필요함.
- 인공지능 기술 활용을 위한 광범위한 현장자료가 필요하므로, 산업체를 연구개발 초기단계부터 포함시켜 지속적인 의견 수렴 및 필요 기능 도출을 병행할 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 비상최적대응을 위한 EOP 운전전략 평가	• 운전노형별로 비상운전절차서의 운전전략 분석 및 최적의 운전대응을 위한 운전전략 평가	• 국내외 원전의 절차서 활용전략 조사 • 전문가 검토와 설문을 통한 기존 운전전략들의 비교분석 • 최적의 운전전략 도출 및 개선 사항 도출
• 절차서 PSA 영향 종합평가	• 원전 사고시 발생가능한 다양한 사고전개와 그에 따른 기기 신뢰도를 고려한 비상운전절차서 최적화 기술	• PSA 사고전개 시나리오 및 각 기기/운전행위 신뢰도 재평가 • 주요 운전행위 신뢰도에 대한 성공기준 분석 • 텍스트마이닝 기법을 통한 리스크 정보 기반 절차서 평가모델 구축
• 운전절차서 최적화	• 리스크 정보 기반 비상운전절차서 개선기술	• 리스크 정보 기반 주요 운전조치 도출 • 운전조치 variation 인자 도출 • 다양한 운전조치에 따른 시뮬레이션 결과 분석 및 개선 방향 도출 • 개선 절차서의 리스크 영향 재평가
• 운전절차서 자동화	• 리스크 정보 및 운전전략기반 비상운전절차서 주요 직무 자동화 기술	• 주요 직무 특성별 자동화 수준 결정 • 자동화에 따른 리스크 및 운전전략 영향 평가

2) 인적수행도 향상 신기술 개발

□ 기술의 정의

- 인지공학과 인공지능 기법을 활용한 인적수행도 개선 및 향상 기술
 - 인공지능을 활용한 핵심안전기능의 자동 복구/유지 시스템
 - 디지털 데이터의 시각화/추적/예측 기술을 활용한 의사결정 지원 시스템
 - 인지공학과 리스크정보를 활용한 이동형 기기의 인지적 의사결정 및 운영 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 최근 인공지능 기법들의 발전에 따라 원전 운영에 대한 인공지능 기법들이 여러 대학, 한수원 중앙연구원, 원자력연구원 등 다양한 기관에서 원전 안전을 향상시키기 위한 방안을 모색 중임.
- 디지털 주제어실의 운영에 따라 다양한 운전원 지원 기능이 전산화절차서에 적용되어 있으나, 운전변수 경향성 판단이나 상황 진단/예측 등 다양한 인적수행도 이슈들에 대한 지원 또한 필요한 상황임.
- 이동형기기 활용 절차와 기법들이 개발/적용 중에 있으며, 최적 활용방안을 지속적으로 논의 중임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- NRC는 최근 Regulatory Information Conference 등을 통해 원전의 인공지능 활용을 강조하고 있으며 INL에서는 인공지능에 따른 자동화 전략에 대한 연구를 오향이오 주립대와 함께 연구 중임. HRP은 자동화 시스템과 인간과의 상호작용에 대한 수많은 실험을 수행중임.
- BNL은 adaptive procedure 개념을 제안하고, 이를 통한 운전원-자동절차기능을 통합하는 시스템을 개발할 필요성을 강조함.
- 미국의 각 발전소들은 이동형 기기 활용방안을 개발하고 있으며, NRC는 이러한 경향을 반영하여, 인적 신뢰도를 평가하고 개선하는 방안을 개발 중임.

□ 미래동향 예측

- 정보의 디지털화, 발전소 데이터의 수집, 인공지능의 원전분야 적용은 시간에 따라 점점 가속화될 것이라 예상됨. 이에 따라, 인간의 인지적 부담을 최소화하고 인간-기계 시스템의 통합적 성능 향상을 위한 연구가 활발하게 이뤄질 것이라 예상함. 효과적인 운전원 지원 기술의 선점이 매우 요하는 상황임.

□ 기술개발 수행체계

- 인적수행도 향상 기술은 학제적 분야로 기존에도 다양한 분야에서 시도되었으나, 최근에는 추가적으로 디지털 정보의 합성, 빅데이터의 수집, 인공지능 등의 새로운 분야와의 연결이 매우 중요히 여겨지고 있음. 이에 따라 다양한 분야 전문가들간의 상호 협력이 크게 요구되고 있음.
- 시스템 환경에 대한 정보 및 데이터 제공, 실증실험을 위한 운영기업의 협

력, 시스템 개발과 적용/실험 운영에 대한 연구기관의 협력, 새로운 기법 및 다양한 기술 모색을 위한 대학 연구소의 협력이 매우 긴밀하게 이뤄질 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 핵심안전기능 (자동)복구/유지 시스템 	<ul style="list-style-type: none"> 인공지능에 기반한 원전 핵심 안전기능 자동 관리 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 비상/비정상 상황의 핵심안전변수의 데이터 수집 자동복구/유지 알고리즘 개발 운전원 협력 지원 시스템 개발
<ul style="list-style-type: none"> 디지털 주제어실 비상운전 인간신뢰도 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 디지털 정보 합성, 변환 및 시각화를 통한 시스템 진단 및 예측 지원 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 디지털 주제어실 운전원 행동/인지 이슈 도출 원전 시스템의 추적/진단/예측 알고리즘 개발 디지털 데이터의 추상화, 시각화 기법 개발 실증실험을 통한 시스템 개선 효과 검증
<ul style="list-style-type: none"> 이동형기기 운영조직 신뢰도 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크정보와 인지공학에 기반한 의사결정 및 조직운영, 기기사용 최적화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크정보활용을 통한 최적 운용 전략 도출 인지공학에 기반한 운전원 의사결정 및 인력운영의 최적화 인적오류 최소화를 위한 지침서/절차서 체계

1.4 원자로건물 건전성 유지 기술

1.4.1 개요

□ 후쿠시마 원전 사고 이후, 중대사고에 대한 원전 안전성 확보는 세계 각국의 최우선 공익 과제가 되었음. 다수기 부지가 인구 밀집지역에 가까이 있는 국내 원전 특성을 고려하면, 중대사고 시 대량 방사성 물질 방출을 배제하는 수준의 중대사고 관리 및 대처 능력을 확보하는 것이 원자력 안전의 최우선 과제가 되었음.

□ 2015년 IAEA의 비엔나 선언을 이행하기 위해 중대사고 관리 및 대처능력 향상을 위한 노력을 기울이고 있음. 2016년 원자력안전법의 개정으로 「사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정(원자력안전위원회 고시 제2017-34호, 2017.12.26.)」에 따라 중대사고 완화

능력 평가(제7조)를 통해 중대사고 시 방사성물질의 대량방출을 방지하기 위한 원자로격납건물의 건전성을 확인하여야 함. 또한 동 고시 제9조에 의하면 부지 인근 주민의 발전용원자로시설 사고로 인한 초기사망 위험도 및 암사망 위험도가 각각의 전체 위험도의 0.1% 이하이거나 또는 그에 상응하는 성능목표치를 만족하며, 방사성핵종 Cs-137의 방출량이 100TBq을 초과하는 사고 발생 빈도의 합이 1.0×10^{-6} /년 미만인 되도록 중대사고 예방 및 완화능력을 확보하여야 함.

- 중대사고 관리 및 대처를 위해서는 우선적으로 중대사고 현상을 실시간으로 계측/모니터링하는 것이 가장 중요함. 현재 설치된 대부분의 원전 계측기는 중대사고 환경에서 생존성 보장이 되지 않으므로 중대사고 환경에서 생존하여 주요 중대사고 현상을 감시할 수 있는 센서/계측기술이 원천적으로 요구됨.
- 중대사고 시 대량 방사성 물질 방출을 배제하는 수준의 중대사고 관리 및 대처 능력을 확보하기 위해서는 불확실한 중대사고 현상을 규명하고, 이를 평가하기 위한 코드를 개발해야 함. 또한 중대사고 완화를 위한 관리전략을 최적화하고, 대처능력을 보강하여야 함. 중대사고 완화를 위한 관리능력 향상을 위해서 현 중대사고 관리 전략의 검증 및 개선, 주요 쟁점 현안 해결을 위한 최신기술개발이 필요함. 즉, 중대사고 시 방사선 위해 저감을 위해서 사고관리 절차의 개선(소프트웨어)과 대처 설비 및 구현 방안(하드웨어)이 필요함.
- 본 절에서는 위에서 언급한 원자로건물 건전성 유지를 위한 기술을 아래와 같이 3개로 분류하고, 분류된 기술의 세부기술을 기준으로 기술개요, 개발의 필요성, 국내외 기술수준, 기술개발수행체계, 세부기술의 구성 및 주요 내용을 정리함.
 - 중대사고 환경 계측/제어
 - 중대사고 관리 최적화
 - 중대사고 현상 규명 및 평가 기술

1.4.2 중대사고 환경 계측/제어 및 무인대응 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 후쿠시마 사고 이후 중대사고 대응조치 법제화로 인해 고온 고방사선에서 생존할 수 있는 계측기/감시설비기술개발 등 후쿠시마 사고 후 후속조치에 따른 기술개발의 시급성이 요구됨.
- 최근 국내 경주, 울산 지역 지진으로 인한 국민적 불안감이 확대되고 있고, 향후 강진으로 인한 중대사고 발생 가능성이 있으므로 계측기/감시설비기술 개발이 시급함.
- 노심, 원자로, 원자로건물 내부의 상황을 파악하기 위해서는 중대사고에 따른 고 방사선, 고온, 고습 등과 같은 극한환경에서도 계측기의 생존 지속성과 유효성을 확보하는 것이 핵심적인 문제임.
- 후쿠시마 원전사고 발생 시에 신속 조치를 위한 장비들이 부족하여, 작업자에 의존하였고 작업자 접근이 어려워 신속대응을 못 하였음. 결국, 수소 폭발 및 방사성물질 누출까지 발생함.
- 후쿠시마 원전사고 이후에 가동 원전에 대한 다양한 안전대책이 수립되고 있으며 예측된 사고에 대하여 피동형 및 사고대응 설비/시설들이 원전에 반영되고 있지만, 예측하지 못한 원전사고 시에 작업자의 안전을 확보하고 사고를 완화하는 무인 기술을 준비할 필요가 있음.

□ 기술개발 필요성

- 후쿠시마 원전 사고를 통해 어떠한 사고환경(극한환경)에서도 발전소 상태를 지속적이고, 정확하게 감시할 수 있는 계측설비가 반드시 필요하다는 공감대가 원자력규제기관을 중심으로 형성됨.
- 중대사고 계측기의 기능과 성능을 확인하기 위해서는 중대사고 환경(고온, 고압, 고방사선, 고습도) 시험 시설을 통해 실증해야 함. 원자력연구원은 고방사선 시험시설, 열수력시험시설, 중대사고시험시설, 다목적 연구로 시설을 보유하고 있어 개발된 계측기의 실증시험이 원활하게 수행될 수 있음.
- 원자로건물 등 주요 원전 시설에 적용되고 있는 계측기들은 대부분 외국제품을 사용하고 있어 시급히 이에 대한 원천기술을 확보할 필요가 있고, SMART 등의 미래원전 기술 개발을 위해서는 반드시 국산화된 계측기 및 감시설비 기술이 필요함.
- 사고 현장의 구조물의 손상 상태를 3차원으로 사각지대 없이 신속 정확하게 측정하기 위해서는 현재 급격하게 발전하고 있는 ICT와 로봇 기술을 활용

한 기술이 필요함.

- 사고 완화를 위해 원전 내의 중요한 밸브를 수동으로 비상 조작할 필요가 있음. 특히 사고 시에는 작업자의 접근이 쉽지 않고 작업자의 안전을 위협하는 경우가 존재함.
- 냉각재 누설로 인한 고온/다습, 고방사선 환경으로 운전원의 접근이 극히 제한되므로, 이동로봇 기술과 조작기술을 적용하여 신속하게 작업자를 대신하여 누설을 차단할 수 있는 로봇시스템이 필요함.
- 원자력 비상상황에서 운전원의 접근이 어려운 경우, 비상전원을 제공할 수 있는 이동형 전원 차의 확보 및 전원을 긴급 복구할 수 있는 이동로봇 기술과 조작기술을 적용하여 신속하게 작업자를 대행할 수 있는 로봇시스템이 필요함.
- 원자로 및 사용후연료저장조에 냉각재가 공급되지 않는 비상상황에서 외부 냉각수를 비상 공급할 수 있는 살수차는 준비가 되고 있으나, 위험지역에서 냉각계통에 직결하여 냉각수를 공급하기 위한 무인 비상공급 기술이 필요함.

나. 세부 기술 내용

1) 중대사고 실시간 감시 계측

□ 기술의 정의

- 중대사고 상태를 실시간 감시하고 대응하기 위한 극한환경 생존 계측기 및 감시 기술
 - 광섬유 기반 중대사고 진행 모니터링
 - 온도/방사선 계측이용 중대사고 노심냉각 계측
 - 원전 사고 감시 블랙박스 및 원격대응 기술
 - 수소농도 3차원분포측정
- 노심손상/원자로손상 감시용 대안계측/계측기 설계 기술
- 극한환경 생존형 중대사고 정보 수집 및 감시 장치 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 고온 (200도 이상), 고방사선 (10 kGy) 이상의 환경에서 생존할 수 있는 계측기용 회로 설계 기술이 전무한 상황임.
- 주식회사 우진은 CET (Core Exit Temperature), RSPT (Reed Switch Position

Transmitter), 노내 핵계측기 (Rodium Detector) 등을 국산화 하여 국내 원전에 적용하였음.

- 최근 신한울 1, 2호기 적용하기 위한 RMS (Radiation Monitoring System) 장비를 국산화한 경험이 있음.
- 국내 계측기 산업체에서는 BOP에 적용 가능한 압력전송기, 수위전송기, 유량계, 온도계 등을 개발하여 일부 원전에 적용하고 있음.
- 원자로건물 내부에 설치 가능한 내방사선 압력전송기는 사고 시를 가정하여 1MGy 기준을 만족해야 하지만 국내에서 개발한 계측기는 1 kGy 수준임. 따라서 내방사화된 모든 계측기는 Rosemount 사 등의 해외 제품에 의존하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 NRC, IAEA 등에서 대형사고 시 수위, 온도, 압력 등 주요변수 감시 요구 및 비상대응 설비를 마련하여 발전소 비상상황 파악을 요구함. 또한 중대사고 단계 별 필수 계측정보 및 대안계측 변수를 권고함.
- 미국 INL, EPRI 등에서는 원전의 PAM 용 계측기의 생존성 평가를 통해 중대사고 환경에서의 계측기의 개선요구 사항과 간접 계측 방안을 일부 제시하였음.
- 미국 NASA 및 유럽 항공우주국의 방사선 생존 계측 기술을 발전시켜 원전 중대사고 환경에서도 동작이 가능한 계측기술에 관한 연구가 시작되었음.

□ 미래동향 예측

- 중대사고 법제화에 따라 중대사고시 지속적 계측, 감시수단을 개발하여 중대사고와 관련한 추가적 규제요건을 만족해야함.
- 국내 원전 사고 감시용 계측기는 전량 수입하여 사용하며, 외국의 경우 중대사고용 계측기, 사고정보 수집처리기술 및 실시간 조치지원기술의 개발 단계에 있으므로 시장을 선제적으로 선점하여 시장을 주도하여야 함.

□ 기술개발 수행체계

- 중대사고 생존 계측 기술은 각종 센서 기술, 센서 신호 처리 회로 설계 기술, 계측 신호 분석 알고리즘 기술 등 다분야의 통합 연구가 필요한 분야로서 각 기술을 보유 또는 개발 그룹의 효율적인 연계 수행 체계가 중요함.
- 온도, 수위, 압력, 방사선 등 계측기 자체의 중대사고 환경 생존력을 높이기

위한 기반 기술 개발을 위해 산·학·연 공동연구체계를 구축할 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 광섬유기반 중대사고 진행 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> 광섬유 센서 및 신호전송기는 고방사선 환경 (2MGy)에서 생존 우수한 고온 내성으로 장거리 신호전송능력 확보 기존 온도 및 압력 등의 대체 중대사고 현상을 직접적으로 탐지 	<ul style="list-style-type: none"> 광섬유 내방사선/내환경 능력 검출 출력 회로 설계 기술 확보 광기반 신호 전송 선로 개발
<ul style="list-style-type: none"> 온도/방사선 계측이용 중대사고 노심냉각 계측 	<ul style="list-style-type: none"> 현 원자로 내 설치 계측기로는 중대 사고 시 노심냉각여부/용융/원자로 파손 현상을 계측 못하므로 대체 계측기기 개발 외벽온도 분포, 외부 방사선 분포 측정 기술을 개발하여 노심냉각수 상태, 용융상태, 원자로파손 등 원자로 건전성 상태 실시간 제공 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> 계측 핵심 소자 개발 외벽 온도 분포 측정 기술 방사선 이용 원자로 상태 감시 기술
<ul style="list-style-type: none"> 수소농도 3차원분포측정 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 피복재의 산화과정에서 다량의 수소가스가 발생하는데 원자로건물 내부 전체의 수소가스의 분포와 농도를 신속히 측정 레이저 라만 라이다 등을 사용할 경우 원거리에서 실시간 측정 	<ul style="list-style-type: none"> 수소가스 원격측정을 위한 소형 이동형 라만라이다 기술개발 이동로봇 탑재형 소형 라만라이다 장치개발 및 성능실험실증 수소가스 농도의 원거리 3차원 분포 측정

2) 사고대응 무인조치 시스템 개발

□ 기술의 정의

- 사고대응 무인조치를 위하여 사고 현장 구조물의 손상 상태를 3차원으로 측정하는 기술
- 사고 완화를 위해 원전의 중요 밸브를 현장에서 조작하는 기술
- 신속 사고 완화를 위하여 원전 냉각재 누설 부위를 무인으로 차단하는 기술
- 작업자 접근이 어려운 환경에서 외부에서 원전 전원을 무인으로 긴급 복구할 수 있는 기술
- 중대사고 시에 원자로 및 사용후연료저장조에 냉각재를 공급하기 위한 무인 냉각재 공급 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국도로공사에서는 레이저스캐닝과 영상매핑을 이용하여 구조물의 이상이나 변형을 측정하여 안전성평가에 활용하고 있음.
- 밸브 비상조작 기술은 원연사 과제로 “원자력사고 초기 신속대응 로봇시스템 개발” 과제에서 기초연구가 진행되고 있음.
- 현재 냉각계통 기기 및 배관의 균열/파단 시에 작업자가 직접 조치해야 하는 상황임.
- 발전소에 비상전원을 제공할 수 있는 이동형 전원 차를 확보하고 있으나, 사고 시에 방사능이 누출 또는 누출될 수 있는 환경에서 작업자가 비상전원을 연결해야 하는 상황임.
- 국내에서는 후쿠시마 원전사고 후속 조치로 냉각계통 작동 불능을 대비하여, 소방차 등을 이용한 냉각수 보충방안을 마련하고 연결부위를 설치하였음. 위험현장에 접근하여 작업자가 직접 냉각 호스를 연결해야 하는 상황임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 일본 JAEA에서는 후쿠시마원전에서 3차원 센서를 장착한 이동로봇을 투입하여 건물내부를 탐사하여 3차원 지도를 작성하고 VR로 구축함. 이를 바탕으로 사용후연료 잔해제거 및 구조물 해체를 위한 계획을 수립함.
- 후쿠시마 원자력 사고 이후에 재난대응 로봇 경진대회인 DARPA 로보틱스 챌린지가 개최되었고, 사고 시에 로봇 적용 방안에 관한 연구들이 진행되고 있지만, 실제 현장에 적용하기에는 한계가 있음.
- 냉각재 누설부를 무인으로 차단하는 기술 관련 연구는 없음.
- 후쿠시마 원전에서는 콘크리트 펌프카를 개조한 원격조정 로봇을 이용하여 사용후연료저장조에 냉각수를 공급한 바 있음.

□ 미래동향 예측

- 동북아시아 원전 고 밀집화로 인접국 사고 시에 국내 피해 확산방지를 위해 사고대응 기술이 필요할 것으로 예상함.
- 자연재해로부터 예측하지 못한 원전사고에 대하여 작업자의 안전 확보와 사고 피해 축소를 위하여 무인 대응 기술이 요구될 것으로 예상함.

□ 기술개발 수행체계

- 사고 발생 시에 사고 현장의 피해 정도를 신속하게 판단할 수 있는 구조물 3차원 측정 기술과 사고 현장에서 자유롭게 움직일 수 있는 이동 플랫폼 기술이 필요함.
- 발생한 사고에 따른 신속 사고 완화를 위해 중요 밸브 비상 조작 기술, 냉각재 누설부 무인 차단 기술, 전원부 무인 긴급 복구 기술과 냉각재 무인 공급 기술들이 동시 개발이 필요함.
- 개발되는 기술들은 현장 적용성 검토가 필요함.
- 산·학·연 공동연구체계
 - 1단계(5년) : 사고대응 무인 조치 기술 개발
 - 2단계(3년) : 시제품 생산 및 현장 적용성 평가



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 구조물 3차원손상 측정	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 사고 현장의 구조물의 3차원 형상 측정 기술 개발 • 구조물 3차원 현상 측정을 위한 이동 플랫폼 개발 • 구조물 3차원 손상 부위 측정과 이동형 플랫폼 통합 및 시험 	• 구조물 3차원 형상 측정 기술
• 밸브 비상조작	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 내 밸브 비상 조작용 로봇 시스템 및 원격 조작 기술 개발 	• 비상 조작용 로봇 시스템

		• 원격 조작 기술
• 냉각재누설부 무인차단	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 냉각재 누설 차단을 위한 무인 조작시스템 개발 • 원전 냉각재 누설 차단을 위한 무인 조작시스템 통합 및 실증시험 • 원전 냉각재 누설차단을 위한 무인 조작시스템 보완 및 적용 	• 냉각재 누설 차단 무인 조작시스템
• 전원부 무인 긴급복구	<ul style="list-style-type: none"> • 중대사고 비상복구를 위한 전원 무인공급 핵심기술개발 무인공급 핵심기술개발 • 중대사고 비상복구를 위한 전원 무인공급 시스템 개발 및 성능평가 • 중대사고 비상복구를 위한 전원 무인공급 시스템 적용성 시험 	• 전원부 무인공급 시스템
• 냉각재 무인 비상공급	<ul style="list-style-type: none"> • 중대사고 비상복구를 위한 냉각 무인공급 핵심기술개발 • 중대사고 비상복구를 위한 냉각 무인공급 시스템 개발 및 성능평가 • 중대사고 비상복구를 위한 냉각 무인공급 시스템 적용성 시험 	• 냉각재 무인 비상공급 시스템

1.4.3 중대사고 현상규명 및 평가기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 2015년 IAEA의 비엔나 선언을 이행하기 위해 중대사고 관리 및 대처능력 향상을 위한 노력을 기울이고 있음. 특히 다수기 부지가 인구 밀집지역에 가까이 있는 국내 원전 특성을 고려하면, 중대사고 시 대량 방사성 물질 방출을 배제하는 수준의 중대사고 관리 및 대처 능력을 확보하는 것이 원자력 안전의 최우선 과제가 되었음.
- 2016년 원자력안전법의 개정으로 「사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정(원자력안전위원회 고시 제2017-34호, 2017.12.26.)」에 따라 중대사고 완화능력 평가(제7조)를 통해 중대사고 시 방사성물질의 대량방출을 방지하기 위한 원자로격납건물의 건전성을 확인하도록 법제화함. 또한 동 고시 제9조를 통해 부지 인근 주민의 발전용원자로시설 사고로 인한 초기사망 위험도 및 암사망 위험도가 각각의 전체 위험도의 0.1% 이하 이거나 또는 그에 상응하는 성능목표치를 만족하며, 방사성핵종 Cs-137의

방출량이 100TBq을 초과하는 사고 발생 빈도의 합이 1.0×10^{-6} /년 미만인 되도록 중대사고 예방 및 완화능력을 확보할 것을 사업자에게 요구함.

- 이에 따라 한수원은 전 원전을 대상으로 「사고관리계획서 작성방법에 관한 규정(원자력안전위원회 고시 제2017-35호, 2017.12.26.)」에 의거하여 극한재해 완화지침서(제11조), 중대사고 관리지침서(제12조)를 포함하는 사고관리계획서를 작성 중에 있음.
- 후쿠시마 원전 사고에 대한 진행과정과 방사성물질 방출거동을 평가하기 위해 세계 각국이 공동으로 OECD/NEA 주관으로 BASF (Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station) 프로그램을 진행한 바 있음. 2단계로 나누어 2012년부터 2017년까지 6년 동안 수행한 BASF 국제공동연구에서 각국은 MELCOR, MAAP, SAMSON 등 중대사고 종합해석 코드를 이용하여 후쿠시마 원전사고에 대한 해석을 수행하였음. 하지만 각 코드마다 결과의 차이를 보였으며, 특히 노심용융물과 콘크리트의 반응 현상, 방사성물질의 거동에 관한 불확실성은 여전히 큰 것으로 나타남. 따라서 중대사고 현상규명 및 평가기술에 관한 지속적인 개선이 필요함.

☐ 기술개발 필요성

- 중대사고 시 대량 방사성 물질 방출을 배제하는 수준의 중대사고 관리 및 대처 능력을 확보하기 위해서는 불확실한 중대사고 현상을 규명하고, 이를 평가하기 위한 코드를 개발해야 함.
- 특히 후기 노심용융 거동 및 원자로용기, RCS 경계파손 평가 기술, 노외 노심용융물 거동 및 콘크리트 반응 특성 기술, 원자로건물 내 가연성 기체 거동 및 제어 기술, 방사성 물질의 소외 방출량 평가를 위한 핵분열생성물 거동 모델 및 원자로건물 누설 등과 같은 기술은 여전히 불확실한 부분으로 남아있음.
- 위와 같은 중대사고 현상규명을 위한 실험을 바탕으로 한 중대사고 종합평가 전산코드의 개선은 중대사고 시 원자로건물 내 방사성물질의 양을 평가하기 위해 필수적으로 수행해야 함.

나. 세부기술 내용

1) 중대사고 시 방사성물질 방출 평가기술

☐ 기술의 정의

- 중대사고 시 방사성물질의 거동과 관련한 미해결 쟁점을 규명하고 관련 모델을 개발하기 위한 기술
 - 후기 노심용융 거동 및 원자로용기, RCS 경계파손 평가 기술
 - 노외 노심용융물 거동 및 콘크리트 반응 특성 기술
 - 원자로건물 내 가연성 기체 거동 및 제어 기술
 - 방사성 물질의 소외 방출량 평가를 위한 핵분열생성물 거동 모델

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한원(연)을 중심으로 노내외 노심용융물 거동 평가, 격납건물 내의 수소 거동, 원자로건물 우회사고 시 방사성물질 방출 평가 및 감소를 위한 설비 등을 개발하고 있음. 더불어 KAERI, KINS를 중심으로 OECD/NEA, NUGENIA 국제공동연구(THAI, BSAF, PreADES, TICOFF, STEM, BIP, IVMR, IPRESA 등)에 참여하여 국제 사회와 적극적으로 중대사고 연구에 대해 교류하고 있으며, 일부 분야(증기폭발, 수소, 노심용융물 생성 및 냉각, 핵분열생성물의 수소제염 등)에서는 국제적인 결과를 생산하여 선도하고 있음.
- 과기정통부와 산업부 공동기획으로 원자로건물 우회사고 시 방사성물질 거동 규명과 대처기술 개발을 위한 연구를 한원(연) 주도로 수행하고 있음. 원자로건물 내 방사성물질 거동 평가를 위한 에어로졸 발생, 이송, 제거 거동 및 방사화 분위기에서 아이오딘 화학거동 모델의 검증데이터가 필요함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 원전 선진국은 중대사고 현상규명, 방사성 물질의 대량 방출 방지를 위해 사고관리계획의 최적화를 위해 방사성 물질 거동 규명에 관한 국제공동연구 (OECD/NEA STEM, BIP, NUGENIA/IPRESA 등)가 진행되고 있음.
- 후쿠시마 원전사고에 대한 예측 능력 향상을 위해 OECD/NEA 주관으로 PreADES, TCOFF (TBA)가 수행되고 있으며, BSAF 후속으로 ARC-F를 착수할 예정임. 중대사고 시 노외 노심용융물 거동 및 콘크리트 반응 특성에 관한 10 여 년 전의 국제공동연구에도 불구하고, 남아있는 미해결 쟁점해결을 위해 OECD/NEA/ROSAU 프로그램을 기획하여 내년에 착수할 예정임.

□ 미래동향 예측

- 한수원이 준비하고 있는 중대사고 관리지침서(제12조)를 포함하는 사고관리

계획서의 인허가 심사와 보완을 위해서는 중대사고 현상의 불확실성 해소를 위한 검증데이터가 필요할 것으로 예측됨.

- 원전 안전성의 강화요구에 따라 중대사고 시 방사성물질 방출 억제를 위한 중대사고 대처설비의 추가설치가 필요할 수 있음. 이를 위해 중대사고 종합 평가 코드 개선을 위한 검증데이터 구축 및 개별 모델 개발이 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 중대사고 시 방사성물질 방출 평가기술 개발을 위해서 KAERI에서 보유하고 있는 원자로물질을 이용한 실험설비(VESTA, TROD)를 개선하여 후기 노심용융물 거동, 노외 노심용융물 거동 및 콘크리트 반응 특성 기술에 관한 실증 실험설비를 구축함.
- 한원(연)에서 보유하고 있는 원자로건물 내 수소거동 실험장치(SPARC)를 개선하여 원자로건물 내 가연성 기체 및 방사성물질(에어로졸, 아이오딘) 간 상호 작용을 규명하기 위한 실험설비를 구축함.
- 구축한 실험시설을 이용하여 실험데이터 생산 및 관련 모델 개발
- 산·학·연 공동연구체계

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 후기 노심용융 거동 및 원자로용기, RCS 경계파손 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로물질을 이용한 실험시설 구축 후기 노심용융거동, 냉각특성, 방사성물질 방출거동 실험 원자로용기, RCS 경계파손 메커니즘 규명 실험 관련 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 방사성물질 방출 거동 실험자료 확보 RCS 경계파손 메커니즘 및 방사성물질 이송거동
<ul style="list-style-type: none"> 노외 노심용융물 거동 및 콘크리트 반응 특성 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로물질을 이용한 노외 노심용융물과 콘크리트 반응 특성 실험시설 구축 및 반응 실험 관련 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 노심용융물과 콘크리트 반응 특성 실험자료 및 모델
<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 내 가연성 기체 거동 및 제어 	<ul style="list-style-type: none"> 가연성 기체와 방사성물질(에어로졸, 아이오딘) 반응 실험시설 구축 가연성 기체와 방사성물질(에어로졸, 아이오딘) 반응 실험시설 구축 관련 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 가연성기체와 방사성물질 반응 실험자료 및 모델
<ul style="list-style-type: none"> 방사성 물질의 소외 방출량 평가를 위한 핵분열생성물 거동 모델 	<ul style="list-style-type: none"> 위 3가지 실험결과 및 모델 종합 중대사고 종합해석 코드 적용 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 내 방사성물질 방출거동 모델

2) 중대사고 종합평가 전산코드 해석 기술

□ 기술의 정의

- 중대사고 시 원자로건물 내로 방출되는 방사성물질의 양을 평가할 수 있는 중대사고 종합평가 전산코드 및 해석 기술
 - 원자로건물 가연성기체/방사성물질 연계 3차원 해석 기술
 - 중대사고 종합해석 코드 고도화 기술
 - 가상원전 내 중대사고 해석 모듈로 적용하기 위한 전산 기반 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한원(연)은 원자로건물 내 수소 거동을 평가하기 위한 3차원 코드를 OpenFOAM 기반으로 개발하고 있음.
- 한수원, 한원(연), (주)미래와도전, 한국전력기술(주)는 2011년부터 2017년까지 중대사고 진행과정의 예측을 위해 국산 중대사고 종합해석 코드(CINEMA)를 개발하였음. 하지만 중대사고 관리계획서의 작성에 직접적으로 이용하기 위해서는 추가적인 개선 및 검증 연구가 필요함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 중대사고 시 방사선원향 평가를 위해 미국 NRC는 중대사고 해석 불확실도 감소를 목표로 중대사고 종합해석 코드인 MELCOR 전산프로그램의 모델을 개선하는 노력을 꾸준히 기울이고 있음.
- 일본에서는 후쿠시마 사고 해석을 목적으로 JAEA, IAE 등 주요 기관을 중심으로 OECD/NEA/BSAF 국제공동연구에서는 주관하였음. BSAF 연구에서는 후쿠시마 사고 진행과정을 예측하고, 방사성물질의 방출 정도를 평가하였으며, 이를 통해 노심용융물 및 방사성물질 거동 해석 기술의 개선이 더 필요함을 확인함. 따라서 후속국제공동연구(ARC-F)를 OECD/NEA에 제안하였음.

□ 미래동향 예측

- 원전 안전성의 강화요구에 따라 중대사고 시 방사성물질 방출 억제를 위한 중대사고 대처설비의 추가설치가 필요할 수 있음. 이를 위해 중대사고 종합평가 코드의 개선 및 3차원 해석 코드의 개발이 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 기존 개발하고 있는 원자로건물 내 수소거동 3차원 코드를 바탕으로 가연성 기체와 방사성물질(에어로졸, 아이오딘) 반응현상을 모의할 수 있는 코드를 개발하고 관련 실험결과를 이용하여 검증함.
- 중대사고 현상규명을 위한 일련의 실험결과 및 개별모델을 바탕으로 CINEMA 코드를 개선함. 또한 CINEMA 코드를 바탕으로 경수로, 중수로, SMART 및 사용후 핵연료저장조(SFP) 등 다양한 노형 해석능력을 가진 중대 사고 종합해석 플랫폼을 구축함.
- 가상원전 내 중대사고 모듈로 활용하기 위한 전산해석 기술을 개발함.
- 산·학·연 공동연구체계

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 가연성기체/방사성 물질 연계 3차원 해석기술 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 내 수소, CO 등 가연성 기체 거동, 연소 모델 개선 에어로졸 생성, 이송, 부착, 아이오딘 화학반응 모델 개발 가연성 기체 연소 시 에어로졸, 아이오딘 거동 변화 예측 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 3차원 가연성기체/방사성물질 거동 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 종합해석 코드 고도화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 경수로, 중수로, SMART 및 사용후핵연료저장조(SFP) 등 다양한 노형 해석능력을 확보하기 위한 중대사고 종합해석 플랫폼 구축 중대사고 종합해석 코드 고도화 기술 중대사고 종합해석 코드 검증 및 인허가 획득 	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 종합해석 플랫폼 구축
<ul style="list-style-type: none"> 가상원전 기반기술 	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 종합해석 코드의 가상원전 모듈화 계산속도, 사용자 편의성 향상을 위한 계산과학기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 가상원전 내 중대사고 모듈 개발

3) 방사선원향 저감 기술

□ 기술의 정의

- 중대사고 시 방사성물질의 거동과 관련한 미해결 쟁점을 규명하고 관련 모델을 개발하기 위한 기술

- 국내 원전 선원항 평가 기술
- 선원항 저감을 위한 대처기술
- 중수로 방사성물질 누출 방지 및 정밀평가 기술
- 수소 및 방사성물질 감지 및 대처설비

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 현재 국내원전의 설계기준사고 및 중대사고 대처설계를 위한 목표기준으로 원자로건물 내 방사선원항은 TID-14844를 사용하고 있음. 최근 KINS에서는 한편 KINS는 최근 NUREG-1465에 의한 표준방사선원항에 의거한 사고관리 계획서 안전심사지침을 수립 중임. EU-APR1400의 EUR 인증과정에서 고유 방사선원항을 개발한 경험이 있음.
- 국내 원전에는 원자로건물 내 중대사고 관리를 위한 전용 수소 및 방사성 물질 계측기가 설치되어 있지 않음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 설계기준사고 및 중대사고 대처설계를 위한 목표기준으로 미국은 NUREG-1465를 적용하고, 유럽은 고유방사선원항을 제시하도록 함.

□ 미래동향 예측

- 원전 안전성의 강화요구에 따라 원자로건물 내 원전 별 고유 방사선원항 (Realistic source term)을 개발하여, 원전 특성에 따른 안전성을 평가하고, 안전 개선방안을 도출하는 일이 필요함.
- 중대사고 관리최적화를 위한 원자로건물 내 계측기 및 관련 대처설비의 작동 자동화가 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- DBA, 중대사고 대응을 위한 방사성물질 방출 기준인 원자로건물 내 고유 방사선원항(realistic source term) 도출 방법론을 개발하고, 이를 바탕으로 경수로, 중수로 등 국내 가동 중 원전 내 고유 안전설비를 반영한 사고 해석 및 원자로건물 내 방사선원항을 평가함. 이를 바탕으로 가동 중 원전의 안전성 향상 방안을 도출함.
- 원전 원자로건물 내 방사선원항 저감을 위해 핵연료 내 핵분열생성물 방출 억제기술, 피복재 산화방지를 통한 수소발생 억제기술, 원자로용기, 원자로

건물 방호를 위한 대처설비를 개발하고 이를 검증함.

- 중대사고 시 노심용융물과 콘크리트 반응 과정(MCCI) 시 가연성 기체 및 핵분열생성물 방출 억제를 위한 대처기술, 우회사고(SGTR, ISLOCA)시 방사성물질 방출 저감을 위한 대처기술을 개발함.
- 중수로 사용후 연료 습건식 저장시설 내 선원항 평가체계를 구축하고 방사성물질 누출 배제기술을 개발함.
- 중대사고 시 원자로건물 내 수소 및 방사성물질 감지 센서와 이와 연동하는 수소제어기, 중대사고 대처설비 연동 시스템을 개발함.
- 산·학·연 공동연구체계

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 국내 원전 선원항 평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> • DBA, 중대사고 대응을 위한 방사성물질 방출 기준인 원자로건물 내 고유 방사선원항(realistic source term) 도출 방법론 개발 • 경수로, 중수로 등 국내 가동 중 원전 내 고유 안전설비를 반영한 사고 해석 및 원자로건물 내 방사선원항 평가 • 가동 중 원전의 안전성 향상방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 원전별 원자로건물 내 고유방사선원항 개발 • 가동 중 원전 선원항 저감 방안 도출
• 선원항 저감을 위한 대처기술	<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료 내 핵분열생성물 방출 억제기술 개발 • 피복재 산화방지를 통한 수소발생 억제기술 개발 • 원자로용기, 원자로건물 방호를 위한 대처설비 개발 및 검증 • 중대사고 시 노심용융물과 콘크리트 반응 과정(MCCI) 시 가연성 기체 및 핵분열생성물 방출 억제를 위한 대처기술 개발 • 우회사고(SGTR, ISLOCA)시 방사성물질 방출저감을 위한 대처기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 방사성물질 방출원에 따른 대처기술 개발 • 원자로용기, 원자로건물 방호를 위한 대처설비 개발
• 중수로 방사성물질 누출 방지 및 정밀평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 중수로 사용후연료 습건식 저장시설 중대사고 요소 모델 개발 • 중수로 사용후연료 방사성물질 누출 정밀해석 기술 • 중수로 사용후연료 선원항 평가체계 구축 및 성능 검증 • 중수로 부지내 사용후연료 저장시설 방사성물질 누출 배제기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 중수로 사용후 연료저장 시설에 대한 방사선원항 평가 및 대처기술 개발
• 수소 및	<ul style="list-style-type: none"> • 중대사고 시 원자로건물 내 수소 및 	<ul style="list-style-type: none"> • 수소 및 방사성물질 감지

방사성물질 감지 및 대처설비	방사성물질 감지 센서 개발 • 수소감지 센서와 수소제어기 연동 시스템 개발 • 방사성물질 감지를 통한 중대사고 대처설비 작동 연동 체계 개발	계측기 개발 및 연동 시스템 개발
-----------------	--	--------------------

4) 원자로건물 손상에 따른 누설률 평가 기술

□ 기술의 정의

- 중대사고 시 원자로건물 손상에 따른 방사성물질의 누설률을 평가할 수 있는 해석 및 실증 기술
 - 원자로건물 콘크리트 미세균열 해석 기술
 - 균열부/관통부 누설량 분석 및 실증 기술
 - 원자로건물 누설률 한계상태 및 취약도 평가 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 우리나라에서는 최근 원자로건물의 CLP부식 및 콘크리트 공극 등이 발견됨에 따라 원자로건물의 사고 시 기능에 대한 우려가 증폭되고 있으나 현재 기술수준은 이들 부식이나 공극 등의 영향을 반영한 누설률의 평가가 어려운 실정임.
- 원자로건물 누설률 평가는 격납건물을 통한 방사성물질 누출의 안전성을 확률적으로 평가하는 Level 2 PSA의 주요한 입력 자료로 사용되는 반면, 정량적인 평가의 어려움으로 그 중요성이 강조되고 있음.
- 국내에서는 관련연구가 수행된 바 없으며 기반기술도 매우 취약한 상황임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국에서는 과거 EPRI를 중심으로 확률론적 누설율 평가를 위한 실험적/해석적 연구를 수행한 바 있음.
- 또한 미국 SNL과 일본의 NUPEC이 협력하여 1/4 규모 원자로건물의 내압성능 실험을 미국에서 수행한 바 있으며 당시 축소모델의 거동 예측을 위한 국제공동연구를 수행하였음.
- 최근 프랑스에서는 축소모델 원자로건물을 건설하고 장기적인 열화에 따른

누설 정도를 주기적으로 실험적 평가를 수행하기 위한 연구체 착수하였으며 장기적으로 수행 예정임.

□ 미래동향 예측

- 원전의 가동기간이 증가함에 따라 열화에 의한 누설확률이 증가하게 되며 이에따라 중대사고대책법에 따른 방사성물질의 누설량을 정량적으로 평가할 것을 요구할 것으로 예상됨.
- 원자로건물의 건설 당시의 시공불량이나 가동기간의 증가에 따른 부식, 프리스트레스 손실 등의 열화요인이 지속적으로 발생할 것으로 예측되고 있는 바 현재 상태를 고려한 원자로건물의 건전성 및 사고시 내부 방사성물질의 외부누출 가능성을 평가하고 방지하기 위한 기술의 개발이 반드시 필요할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 원자로건물의 CLP 부식이나 공극의 현황 및 이들의 보수에 따른 영향을 반영하여 평가할 수 있는 체계 필요.
- 해체 원자로를 활용한 장기가동 원전 콘크리트의 재료특성을 실험적으로 평가하여 열화에 의한 콘크리트 재료특성 변화를 반영한 원자로건물의 구조적 건전성 평가
- 현재 프랑스에서 진행되고 있는 격납건물 장기 거동특성 시험 등에 적극 참여하여 축소규모 원자로건물에서의 운영기간 증가에 따른 누설률 등의 실측자료를 확보하여 연구에 활용
- 산·학·연 공동연구체계 구축을 통한 효율적 연구수행을 도모하고 국제공동연구 등을 통한 신기술의 획득 및 전파

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 원자로건물 콘크리트 미세균열 해석 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 원전 콘크리트 구조물의 열화요인 및 열화현황 분석 • 장기가동에 따른 콘크리트 구조물의 재료특성 평가 • 원자로건물 콘크리트 미세균열 모델링 및 누설 해석 • 관통부 정밀 모델링 및 해석 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 열화콘크리트 재료특성 평가기술 • 미세균열 수치해석 기술 • 누설 취약부 상세 모델링 기법 및 해석기술
• 균열부/관통부 누설량 분석 및	<ul style="list-style-type: none"> • 균열부/관통부 누설률 해석평가 및 실증 	<ul style="list-style-type: none"> • 누설 취약부위 성능평가 실험기술

실증 기술	<ul style="list-style-type: none"> • CLP부식 및 공극 누설률 영향 평가 및 실증 • 격납건물 누설률 한계상태 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 균열부위 누설률 지수 정량화 • 콘크리트 구조물의 한계상태 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> • 원자로건물 누설률 한계상태 및 취약도 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 중대사고 발생시 극한 내압에 따른 원자로건물의 누설률 정량적 평가 • 열화특성을 반영한 원자로건물의 극한 내압 취약도 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 3차원 원자로건물 누설률 평가 모델 개발 • 중대사고 원자로건물 누설률 한계상태 정의 • 중대사고 원자로건물 취약도 평가체계 구축

1.4.4 중대사고관리 최적화

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 2015년 IAEA의 비엔나 선언을 이행하기 위해 중대사고 관리 및 대처능력 향상을 위한 노력을 기울이고 있음. 특히 다수기 부지가 인구 밀집지역에 가까이 있는 국내 원전 특성을 고려하면, 중대사고 시 대량 방사성 물질 방출을 배제하는 수준의 중대사고 관리 및 대처 능력을 확보하는 것이 원자력 안전의 최우선 과제가 되었음.
- 2016년 원자력안전법의 개정으로 「사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정(원자력안전위원회 고시 제2017-34호, 2017.12.26.)」에 따라 중대사고 완화능력 평가(제7조)를 통해 중대사고 시 방사성물질의 대량방출을 방지하기 위한 원자로건물의 건전성을 확인하도록 법제화 함. 또한 동 고시 제9조를 통해 부지 인근 주민의 발전용원자로시설 사고로 인한 초기사망 위험도 및 암 사망 위험도가 각각의 전체 위험도의 0.1% 이하 이거나 또는 그에 상응하는 성능목표치를 만족하며, 방사성핵종 Cs-137의 방출량이 100 TBq을 초과하는 사고 발생 빈도의 합이 1.0×10^{-6} /년 미만 되도록 중대사고 예방 및 완화능력을 확보할 것을 사업자에게 요구함.
- 이에 따라 한수원은 전 원전을 대상으로 「사고관리계획서 작성방법에 관한 규정(원자력안전위원회 고시 제2017-35호, 2017.12.26.)」에 의거하여 극한재해 완화지침서(제11조), 중대사고 관리지침서(제12조)를 포함하는 사고관리계획서를 작성 중에 있음.
- 핵테러, 자연재해 등 다양한 원인으로 중대사고 발생 시에 원전 시설 외부로

방사성물질 누출 시에 작업자의 접근이 쉽지 않고, 정확한 누출 부위를 파악한 후 신속한 조치를 수행하기가 어려움. 이로 인해 2차 피해 및 경제적 손실이 발생할 수 있음.

- 원전 시설 외부로 방사성물질이 누출하는 경우에는 신속하게 대처할 방안들이 현재로선 없어서 사고 발생 시에 피해 확산의 우려가 있음.

□ 기술개발 필요성

- KINS는 최근 NUREG-1465에 의한 표준방사선원항에 의거한 사고관리계획서 안전심사지침을 수립 중이나, 향후 미국 등 국제적인 추세에 따라 국내 경/중수로 원전에서 고유한 사고 방사선원항 (Accident ST)을 갖추는 것이 바람직함. 이를 바탕으로 원전별 사고 방사선원항을 저감하기 위한 중대사고 대처설비 개발이 필요함.
- 중수로원전 내 다량의 사용후 연료저장고에 대한 선원항을 평가하고 사고시 방사성물질 누출 방지를 위한 대처기술 개발이 필요함.
- 중대사고 관리 최적화 및 인적오류 방지를 위해 중대사고 시 수소 및 방사성물질을 감지할 수 있는 계측기를 개발하고, 관련 대처설비의 작동과 연동하는 시스템을 개발할 필요가 있음.
- 중대사고로 원전 시설 외부로 방사성물질 누출에 대응할 방안이 현재로선 없어서 개발이 필요함.
- 중대사고시 환경을 보호하기 위한 마지막 방호벽인 원자로건물 외부로 방출되는 방사성물질의 탐지를 위한 장치가 필요함.
- 첨단 센싱 기술과 로봇 기술을 활용하여 방사성물질 누출 부위를 신속히 탐지하고 완화할 수 있는 기술이 요구됨.
- 중대사고시 환경을 보호하기 위한 마지막 방호벽인 격납건물 외부로 방출되는 방사성 물질의 확산을 막기 위한 외벽누설차단장치가 필요함.
- 첨단 센싱 기술과 로봇 기술을 활용하여 방사능 누출 부위를 신속히 탐지하고 완화할 수 있는 기술이 요구됨.

나. 세부 기술 내용

1) 신개념 중대사고 대처설비

□ 기술의 정의

- 중대사고 시 방사성물질 방출 저감을 위한 중대사고 대처설비 개발
 - 원자로건물여과배기
 - 가동원전 중대사고 대처설비
 - 극한재해 생존성 향상을 위한 핵심 SSC 보호
 - SBO대비비상전원다중화(태양광, 첨단배터리, cross-tie, turbine-driven 발전기)
 - 내진성능 보유 냉각수 공급용 인공 pool 설계
 - 냉각수 공급용 역삼투압 방식 담수화 장치
 - 원자로건물 외부 사고대응 시스템 (ex. 흡기/포집 장치)
 - 초극한재해의 생존성 향상

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 신고리 3, 4, 5, 6호기와 같은 APR1400형 원전은 중대사고 관리전략으로 원자로용기 외벽냉각을 통한 노내 노심용융물 억류(IVR-ERVC) 전략을 채택하고 있음. 이에 따라 원자로공동 내 충수설비를 마련하고, 원자로용기 외벽 단열체 구조를 개선하여 냉각성능을 극대화하는 연구를 수행한 바 있음.
- 유럽 수출형 원전인 EU-APR1400 원전의 경우 중대사고 대처설비로 노외 노심용융물 냉각 설비인 PECS를 채택함. PECS는 원자로용기 파손으로 방출된 노심용융물을 가두고, 냉각유로에 냉각수를 공급하여 냉각하는 개념으로 관련 설계 및 검증실험이 이루어졌음.
- 후쿠시마 원전사고에 대한 후속조치로 국내 원전에 대해 중대사고 시 수소 제어 설비인 PAR가 추가로 설치됨. 또한 원자로건물 과압을 방지하기 위한 여과배기 설비를 중수로 4호기 및 국내 원전 12호기에 설치하고 있음. 특히 국내 원전 12호기에는 국내에서 개발한 여과배기 설비를 적용함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 중대사고 대처설비로 수소제어기, IVR-ERVC(미국), 노외노심용융물 냉각설비(유럽) 등을 각국의 신형원전에 설치하고 있음.
- 후쿠시마 원전사고 이후 노후 노형에 대해 원자로건물 과압 방지를 위한 여과배기 설비, 수소제어 설비 등을 보강하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 원전 안전성의 강화요구에 따라 중대사고 시 방사성물질 방출 기준의 강화

가 예상되며, 이에 대비하여 원전 특성 별 중대사고 대처설비를 개발할 필요가 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 가동 중 원전의 맞춤형 중대사고 대처설비를 개발함. IVR-ERVC, core catcher, 원자로건물 내 중대사고 전용살수 계통, 원자로건물 피동 냉각설비 등에 대한 적용가능성을 검토하고, 관련 설비의 설치에 따른 중대사고 대처 유용성을 평가함.

- 산·학·연 공동연구체계

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 가동원전 중대사고 대처설비	<ul style="list-style-type: none"> • 가동중 원전의 IVR 구현 • 원자로건물 중대사고 전용살수 • 원자로건물 피동 냉각설비 • 노외 노심냉각 설비(Core catcher) 	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 맞춤형 중대사고 대처설비 개발
• 극한재해 생존성 향상을 위한 핵심 SSC 보호	<ul style="list-style-type: none"> • 극한재해에 대한 주요 SSC 취약도 평가 • SSC 취약도 평가 기반 필수 안전 기능 SSC에 대한 생존성 확보 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 SSC 취약도 평가 • SSC에 대한 생존성 확보 기술 개발
• SBO대비비상전원다중화(태양광, 첨단배터리, cross-tie, turbine-driven 발전기)	<ul style="list-style-type: none"> • SBO 대비 비상전원 다중화 가능 설비의 적용성 평가 • 발전소 부지별 전원 다중화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 비상전원 다중화 설비 적용성 평가 • 발전소 부지 전원 다중화 기술
• 내진성능 보유 냉각수 공급용 인공 pool 설계	<ul style="list-style-type: none"> • 부지 공용 피동 급수 타당성 분석 • 피동 급수 개념 설계 	<ul style="list-style-type: none"> • 부지 공용 피동급수 타당성 분석 • 부지 공용 피동 급수 개면 설계
• 냉각수 공급용 역삼투압 방식 담수화 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 장기 냉각성능 보유를 위한 역삼투압 방식을 이용한 냉각수 공급 타당성 분석 • 역삼투압 방식의 냉각수 공급장치 개념 설계 	<ul style="list-style-type: none"> • 역삼투압 방식 냉각수 공급 장치의 원전 적용성 평가
• 원자로건물 외부 사고대응 시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 건물 외부 사고대응 시스템 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 건물 외부 사고대응 시스템
• 초극한재해의 생존성 향상	<ul style="list-style-type: none"> • 화산 폭발 및 강진에 대비한 원전의 피해 평가 • 핵심 SSC 생존성 확보 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 초극한 재해 원전 피해 평가 기술 • 핵심 SSC 생존성 확보 기술

2) 누출완화 무인화

□ 기술의 정의

- 중대사고 시 원전 시설 외부로 누설되는 방사성물질 탐지기술
- 중대사고 시 원전 시설 외부누설 부위를 차단하는 기술
- 중대사고 시 원자로건물 외부에서 사고에 대응하는 시스템

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원전 내 외벽 누설 여부를 확인할 수 있는 센서들이 부착되어 있지만, 누설 부위의 정확한 위치를 파악할 수 있는 장비가 없음.
- 현재 원전 내 외벽 누설 부위를 작업자들이 직접 차단하고 있고, 중대사고 발생 시에 해결 방안이 현재로선 없음.
- KAIST에서는 원전 비상사태 대응 이동식 방사성물질 확산 방지 시스템 개발 개념연구를 수행하여 원자로건물 외부로 누출되는 방사성물질을 텐트를 이용해 덮는 방법, 살수를 이용해 확산을 방지하고 포집하는 방법 등의 개념연구를 수행하였음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 중대사고시에 외벽 누설 위치를 파악과 차단하는 연구는 아직 없음.
- 일본에서는 후쿠시마 원전사고 이후에, 원자로건물 외부로 방출되는 방사성물질의 확산을 막기 위해 고소살수차를 구비하고 있음. 그러나 원자로건물 외부 사고대응 시스템과 관련한 연구는 수행하고 있지 않음.

□ 미래동향 예측

- 핵테러, 자연재해 등 예측하지 못한 원인으로 중대사고가 발생하는 경우 원전의 원자로건물 외부로 방사성물질이 누출 시 이를 대응하는 기술이 필요할 것으로 예상함.
- 동북아시아의 원전 고 밀집화로 인해 인접국 사고 시에 국내 피해 확산방지를 위해 방사성물질 누출 대응 기술이 필요할 것으로 예상함.

□ 기술개발 수행체계

- 원자로건물 외부 방사성물질의 누출 위치를 파악하는 무인 시스템과 차단

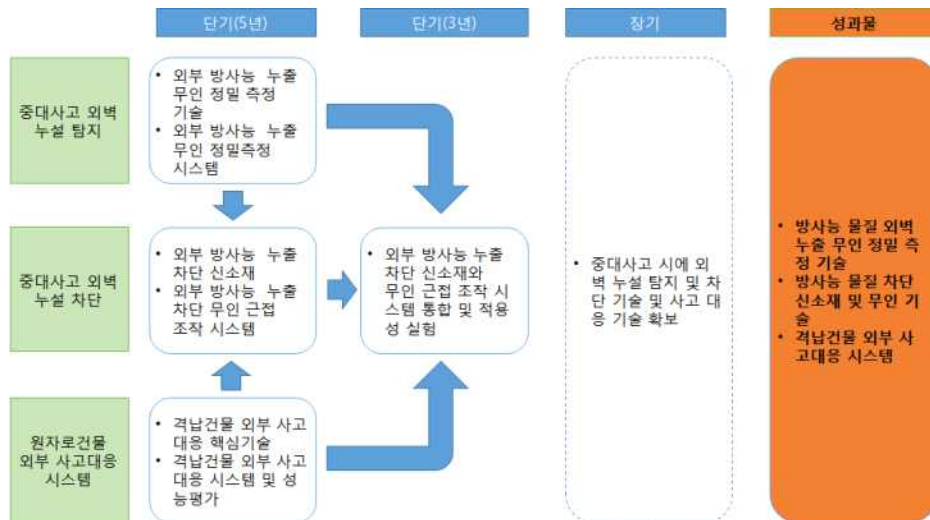
할 수 있는 조작 시스템기술은 병행해서 개발할 필요가 있음.

○ 원자로건물 외부 사고 대응 시스템에 대한 성능평가가 요구됨.

○ 산·학·연 공동연구체계

- 1단계(5년) : 중대사고시 외부 방사능 누출 측정과 차단 기술 요소 기술 개발

- 2단계(3년) : 중대사고시 외부 방사능 누출 차단 기술 및 적용성 실험



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 외벽누설탐지 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 외부 방사능 누출 무인 정밀측정 기술 개발 원자로건물 외부 방사능 누출 무인 정밀측정 시스템 개발/시험 	<ul style="list-style-type: none"> 외벽 방사능 누출 무인 정밀 측정 시스템
<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 외벽구설 차단 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 외부 방사능 누출차단 신소재 및 무인 근접 조작기술 개발 원자로건물 외부 방사능 누출차단 신소재 및 무인 근접 조작 시스템 개발 원자로건물 외부 방사능 누출차단 신소재와 무인 근접 조작 시스템 통합 및 적용성 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 외부 방사능 누출 차단 신소재와 차단 기술
<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 외부 사고대응 시스템 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 외부 사고대응 핵심기술 구현 원자로건물 외부 사고대응 시스템 개발 및 성능평가 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 외부 사고대응 시스템

3) 중대사고 관리 조직 및 운영 개선

☐ 기술의 정의

- 중대사고 및 극한재해/부지재해 사고 발생 시 장기적인 사고전개 방지 및 완화 전략을 효과적으로 수행할 중대사고 및 (부지차원의) 극한재해 사고관리 조직 구성 및 운영에 관한 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 4차 원연사에서 극한재해 사고관리체계(iROCS: Integrated-Robust Coping Strategy) 기반 다수기 조직 운용 체계(안)을 제시함.
- 한수원의 MACST (Multi-barrier Accident Coping Strategy) 지침서 및 SAMG (Severe Accident Management Guideline)를 운용할 인력 확보 방안 개발 및 다수기 비상발령 시 조직구성을 수립함.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 여러 나라에서 중대사고 및 극한재해 시 발전소 비상조직 인력 보호 및 확보, Command and Control 체계 수립, 소외지원인력 체계 수립 등에 관한 체계가 수립되고 관련 연구가 진행 중임.

☐ 미래동향 예측

- 부지 내 비상대응조직에 대한 장기 거주성 확보 및 극한재해 부지 사고관리를 위한 부지 비상조직 확보 및 운영 전략에 대한 연구가 필요함. 부지 내 다수기의 사고 진행 상황 및 사고관리 현황을 파악하고, 부지 내 제한된 인력 및 설비 자원을 효과적이고 효율적으로 투입하기 위한 부지 사고관리 의사결정 전략 및 조직대응 연구가 주요 현안이 될 것으로 예상함.

☐ 기술개발 수행체계

- 중대사고 및 부지 극한재해 대응 조직 연구는 중대사고 현상 및 예측, 사고관리 지침서 체계 및 구현 전략, 다수기(부지) 사고관리 의사결정 및 구현 조직에 대한 연구, 소외 비상대응 전략 연구 등 다제 간 연구가 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 중대사고 및 극한재해 사고관리 조직 최적화 연구	• 단일호기 중대사고 및 극한재해 사고 시 효과적인 조직 의사결정 및 구현 지원을 위한 최적 전략 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 중대사고 및 극한재해 사고대응을 위한 인력분석 기술 • 중대사고 및 극한재해 완화전략 관련 의사결정 과정 및 영향요소 분석 • 중대사고 및 극한재해 완화전략 구현을 위한 인력적절성 평가 기술 및 운용 전략 기술
• 부지 사고관리 조직 최적화 연구	• 다수호기 중대사고 및 극한재해 사고 시 효과적인 조직 의사결정 및 구현 지원을 위한 최적 전략 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 다수기 사고진단 및 사고대응 조직체계 및 운용 모델 개발 • 다수기 사고관리 전략 지원을 위한 조직 최적 의사결정 전략 개발 • 다수기 사고완화 전략 구현을 위한 인력적절성 평가 기술 및 운용 전략 기술

4) PSA 정보기반 중대사고 관리 능력 향상

□ 기술의 정의

- 중대사고 시에 가용한 기기, 계통, 및 조직을 최적으로 활용하는 중대사고 관리 기술을 개발하여 중대사고의 심각도를 완화시키고 방사성물질들의 원자로건물 외부 방출을 억제함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 중대사고 관리 전략으로서 중대사고완화전략 (SAMG)이 개발되어 있으나, 각 전략들의 구체성이 떨어져서 운전원 및 중대사고 대비 기술지원센터 (TSC)의 판단에 불확실성이 많음.
- MCR 운전원들에 대하여 발전소 시뮬레이터를 활용하여 주기적인 훈련을 통하여 사고 상황에 대하여 대비하고 있으나, 운전원 및 TSC의 중대사고 대비 훈련은 미흡함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국내 기술개발 수준과 유사함.

□ 미래동향 예측

- 후쿠시마 사고 후속 조치로써 중대사고에 대한 각종 완화 전략 및 기기들이 발전소에 설치 및 도입되면서, 원전의 중대사고 관리 능력에 대한 평가 및 향상 방안에 대해서 체계적인 연구가 진행될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 본 기술은 중대사고 관리 체계와 중대사고 현상을 함께 접목시켜야 하는 분야이므로 중대사고 관리기술의 실 사용자인 한국수력원자력과 중대사고 현상에 많은 연구 경험을 가진 원자력연구원이 함께 기술을 개발해야 함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 국내원전의 유형별 중대사고 경위 해석	• 중대사고 관리전략의 유효성을 평가하기 위하여 국내원전에 대한 다양한 중대사고 경위들의 해석이 필요함.	• 국내원전 중대사고 코드용 입력자료 기술 • 중대사고 경위 도출 기술
• 중수로 사고 위험도 평가 및 감소 방안 도출	• 중수로에 대하여 사고 위험도 평가 및 감소 방안을 도출하는 것이 필요함.	• 중수로 중대사고 현상 확률론적 및 결정론적 모델링 기술 • 리스크 저감 대책 방안 도출 기술
• 중대사고 분석 데이터 베이스 구축	• 다양한 중대사고 분석을 통하여 중대사고 관리전략에 대한 타당성을 확보할 수 있음.	• 중대사고 분석 기술 • 분석 결과 빅데이터 구축 기술
• 딥러닝 기반 SAMG 전략 유효성 평가	• SAMG 전략은 다양한 시나리오로 전개되므로 유효성 평가를 위하여 딥러닝을 통하여 다량분석을 수행하면 효과적으로 결과를 도출할 수 있음.	• SAMG 전략 모델링 기술 • SAMG 전략 모델링 딥러닝 적용 기술
• 중대사고 완화 취약점 도출을 위한 PSA 종합 평가	• 중대사고 완화전략의 취약점들을 도출하기 위해서는 확률론적으로 원자로건물의 건전성을 평가하는 것이 필요함.	• PSA 종합평가 기술 • 2단계 PSA SAMG 모델링 기술
• 중대사고 완화 전략 수립	• 기존 중대사고전략의 모호성 및 합리성을 개정하여 신 중대사고 완화전략을 수립해야 함.	• 중대사고 완화전략 유효성 및 장단점 파악 • 확률론적 및 결정론적 종합 완화전략 수립
• 사고 관리를 위한 기기 생존성	• 중대사고 발생 시 기기들의 생존성에 대한 연구가 필요함.	• 극한환경 기기 생존성 평가 기술
• 단일호기/다수기 중대사고 대응전략 유효성 평가/최적화	• 중대사고 대응전략에 따른 리스크저감효과를 파악하고, 이를 다수기 평가에 반영함.	• 2단계 PSA 기술 SAMG 모델링 기술 • 단일호기/다수기 2단계 PSA 평가기술
• 중대사고관리 종합 지원시스템	• 중대사고관리를 위한 종합지원 시스템을 개발함.	• 중대사고관리전략 도출 • 종합지원시스템 구축
• 중대사고 훈련도구	• 운전원 및 조직들의 중대사고 대응을 위한 훈련도구를 개발함.	• 중대사고 시뮬레이터 개발

◆ 배경

- 세계적인 원자로 시장은 대형 발전 원자로 시장에서 점차 중소형 다목적 원자로 시장으로 변화되는 추세임.
- 세계 최초로 표준설계 인허가를 획득한 SMART 원자로는 안전성 강화 추세에 따라 현재에도 피동형 안전 설비를 강화하는 등의 설계 경쟁력 제고 노력을 수행 중이며 향후에도 안전성을 강화하는 노력을 통해 세계 최고의 중소형 원자로의 위상을 유지할 필요가 있음.

◆ 기술분류 총괄표

대분류 (1단계)	중분류 (2단계)	중분류 (3단계)
중소형 원자로 안전 기술	일체형 가압경수로 안전 기술	일체형 원자로 안전성 향상
		해양원자로플랜트 안전해석 기술 개발 및 검증
		소형원전
	연구로 안전성 향상 기술	연구로 기기 및 계통 성능 향상 기술
		연구로 미확보 안전해석 기술
		연구로 설계코드 개발 및 검증
		연구로 열수력 검증 실험
		연구로 및 시험시설 안전성 향상
	소듐냉각고속로 안전 기술	금속연료 안전성 시험 및 검증 기술
		안전성 및 성능 향상 기술
		소듐 원전 및 응용기술 실증
	고온가스로 안전 기술	고온가스로 안전 설계기술
		고온가스로 안전 요소기술

◆ 세부 기술 내용

2.1 일체형 가압 경수로 안전 기술

2.1.1 개요

□ 이슈 및 문제점

- 대형 발전용 경수로와 다른 피동형 안전 기기의 다수 도입으로 해석 모델과

실험 자료 축적의 노력이 절대적으로 필요함.

- SMART 원자로에 최적화된 비상운전지침(EOG)의 개발로 안전 기술을 정립해야 함.

☐ 기술 개발 필요성

- 안전 설비를 이루는 기기에 대한 실증 실험은 국내 보유한 실증 실험 시설로 수행되고 있으나 일체형 가압경수로에 대한 사고관리 실증실험은 현재까지 보고된 바 없음.

2.1.2 일체형 원자로 안전성 향상

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- SMART 원자로는 기존 가압경수로나 중수로와는 완전히 다른 설계 개념으로 개발된 원자로이며 기존 원자로가 갖고 있지 않은 새로운 피동 기기를 다수 도입했기 때문에 해당 기기의 성능을 검증하기 위한 열수력 모델 정립이 필요함. SMART 고유 열수력 모델을 개발하고 국내 고유 안전해석 코드인 SPACE 코드에 이식하여 종합적인 코드 성능을 검증하여 향후 수출에 대비할 필요가 있음.

☐ 기술개발 필요성

- SMART의 안전성 및 경제성 확보를 위해 SMART 고유 기기 열수력 모델을 개발하고 이를 SPACE 코드에 도입하여 SMART 설계 및 안전해석 기술을 향상시켜서 조만간 예상되는 SMART 수출에 대비해야 함.

나. 세부기술 내용

1) 일체형 원자로 종합 실증실험

☐ 기술의 정의

- SMART 비상운전지침(EOG) 작성을 위한 일체형 원자로 종합 실증실험 및 분석 기술
- SMART 고유 설계확장조건(DEC)에서 비상운전 진입의 판단 기준 마련 및 중대사고 진입방지관련 원천 기술 확보를 위한 일체형 원자로 종합 실증실험 및 분석 기술

- 일체형 가압경수로에서 발생할 수 있는 설계기준초과사고, 다중고장사고 등에 의한 중대사고 진입을 방지하기 위한 효과적인 사고관리 전략 수립을 위한 일체형 원자로 종합 실증실험 및 분석 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국형표준원전(KSNP)형 발전소에 적용할 EOG 개발 사례가 있고, 일체형 가압경수로의 비상운전지침이 개발 중이며, SMART-ITL을 이용한 이차열제거완전상실사고(TLOSHR) 모의시험을 수행하여 중대사고 진입 여부를 확인하는 시도가 있었음.
- 국내에서는 일체형 가압경수로 열수력 종합효과실험장치인 SMART-ITL를 이용하여 대표적인 설계기준사고와 설계기준초과사고에 대한 모의실험을 수행하고 있음.
- 대형 가압경수로 열수력 종합효과시험장치인 ATLAS를 이용하여 대표적인 설계기준사고와 설계기준초과사고 모의실험을 수행하고 있으며, 일체형 가압경수로의 열수력 종합효과실험장치인 SMART-ITL을 이용하여 사고관리 대상 사고에 대한 모의시험을 수행할 예정임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 일본은 열수력 종합효과 실험장치인 LSTF를 이용하여 증기발생기 세관파단 사고 시 비상운전절차 개선을 위한 실험연구를 수행하였고, 독일에서도 열수력 종합효과 실험장치인 PKL을 이용하여 유사한 시험을 수행하였음.
- 독일(PKL), 일본(LSTF), 중국(ACME)은 열수력 종합효과 실험장치를 운영하고 있으며, 이를 토대로 활발한 국내외 협력 프로그램을 수행하고 있으며, 후쿠시마 사고 이후 설계확장조건 시 비상노심냉각 특성에 대한 관심은 고조되고 있으나, 이를 종합효과실험에서 모의하여 안전성을 입증한 바는 없음.
- 대형 루프형 가압경수로의 경우, 독일(PKL), 일본(LSTF), 중국(ACME)에서 열수력 종합효과 실험장치를 운영하고 있으며, 이를 토대로 활발한 국내외 협력 프로그램을 수행하고 있으나 일체형 가압경수로에 대한 사고관리 실증실험은 현재까지 보고된 바 없음.

□ 미래동향 예측

- SMART의 고유 비상운전지침(EOG), 고유 설계확장조건(DEC), 그리고 고유 사고관리(AM) 특성시험 결과를 향후 일체형 가압경수로 피동안전계통 설계에 적용하여 안전성 향상에 기여할 수 있고, 동시에 국내 미 보유 기술로서

개발 성공 시 일체형 가압경수로의 수출경쟁력 향상을 기대할 수 있음.

□ 기술개발 수행체계

- SMART 고유 비상운전지침(EOG) 특성시험
 - 1단계(3년)목표: 비상운전지침(EOG) 유효성 확인을 위한 특성 검증시험
 - 2단계(2년)목표: 실증실험 결과를 활용한 비상운전지침(EOG)의 타당성 확립
- SMART 고유 설계확장조건(DEC) 특성시험
 - 1단계(3년)목표: 설계확장조건에 대한 개별효과 및 종합효과실험을 통한 일체형 가압경수로의 안전성 확인
 - 2단계(2년)목표: 설계확장조건에 대한 실증실험을 통한 중대사고 진입방지 원천 기술 확보
- SMART 고유 사고관리(AM) 특성시험
 - 1단계(5년)목표: 사고관리 대상 사고에 대한 개별효과실험
 - 2단계(5년)목표: 사고관리 대상 사고에 대한 종합효과실험



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> SMART 고유비상운전지침(EOG) 특성시험 	<ul style="list-style-type: none"> 비상운전지침(EOG) 유효성 확인을 위한 특성 검증시험 실증실험 결과를 활용한 비상운전지침(EOG)의 타당성 확립 	<ul style="list-style-type: none"> 비상운전지침 특성시험을 통해 비상운전지침 전략 수립 최적화
<ul style="list-style-type: none"> SMART 고유 설계확장조건(DEC) 특성시험 	<ul style="list-style-type: none"> 설계확장조건에 대한 개별효과 및 종합효과실험을 통한 일체형 가압경수로의 안전성 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 설계확장조건에 대한 실증실험을 통한 안전성 고도화 및 중대사고

	<ul style="list-style-type: none"> 설계확장조건에 대한 실증실험을 통한 중대사고 진입방지 원천 기술 확보 	진입방지 원천 기술 확보
<ul style="list-style-type: none"> SMART 고유 사고관리(AM) 특성시험 	<ul style="list-style-type: none"> 사고관리 대상 사고에 대한 개별효과실험 사고관리 대상 사고에 대한 종합효과실험 	<ul style="list-style-type: none"> 실증실험을 통해 일체형 가압경수로의 사고관리 적락 확립

2) SPACE 코드 일체형 원자로 모사능력 평가

☐ 기술의 정의

- SPACE 코드의 SMART 모의 능력을 평가하고 안전해석에 필요한 기기/열수력 모델을 개발하여 SPACE 코드에 해당 모델을 이식함으로써 SPACE 코드의 모의 능력을 향상시킴.
- 기기/열수력 모델 개발을 위해 필요한 요소 실험을 수행하고 최종적으로 SMART-ITL을 이용하여 SPACE 코드의 성능을 검증함.

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에는 2017년에 인허가를 취득한 국내 고유 안전해석 코드인 SPACE 코드가 있으나 SPACE 코드는 가압경수로형 안전해석을 위해 개발된 코드이므로 SMART와 같은 일체형 원자로 해석에는 부적합함.
- SMART 설계 및 안전해석용으로 개발한 TASS 코드가 있으나 혼합유체 유동 모델을 사용하여 심각한 이상 유동 현상 해석에는 부적합함.
- SMART의 종합적인 성능 검증을 위해 종합효과실험장치인 SMART-ITL을 구축하여 다양한 검증실험을 수행하고 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 원전 선진국의 경우에는 일체형 원전 안전해석이 가능한 코드를 개발했거나 개발 중에 있음.
- 미국은 TRACE 코드에 일체형 원전 해석 모델을 추가하고자 노력하고 있음.
- 프랑스에서 개발한 CATHARE 코드는 경수로뿐만 아니라 고속가스냉각로, SFR 및 일체형 원전 해석 기능이 있음.

☐ 미래동향 예측

- 일체형 원전을 포함한 중소형 원전은 그동안 경제성 문제로 인해 크게 주목받지 못했으나 대형냉각재상실사고를 원천 배제할 수 있고 특수 목적을 위한 요구 때문에 최근 각광받는 추세이며 산유국인 사우디에서도 일체형 원전에 매우 큰 관심을 보이고 있음. 가까운 시일 내에 일체형 원전을 포함한 중소형 원전에 대한 수요가 있을 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

- SPACE 코드를 이용한 SMART 안전해석을 위해 먼저 기존 SPACE 코드의 SMART 모의성능을 평가할 필요가 있으며 이를 위해 SMART 검증에 적합한 개별효과실험(SET)과 종합효과실험장치인 SMART-ITL의 검증 실험에 대한 SPACE 해석 능력을 평가함.
- 이를 바탕으로 SPACE 코드의 개선점을 도출하고 SMART에서 채택하고 있는 각종 피동계통 특수기기와 헬리칼 증기발생기 해석 모델, 응축열교환기 해석 모델에 대한 개발 및 검증을 수행함.
- 헬리칼 증기발생기 해석 모델의 경우, MARS 코드에 장착된 헬리칼 증기발생기 모델을 그대로 SMART 중대사고 해석용 코드인 CSPACE에 이식한 바 있으나 헬리칼 증기발생기 실험자료 부족으로 인해 충분한 검증 시험은 수행되지 않고 확인 수준의 시험만 수행된 바 있음.
- 개별효과실험을 통해 피동계통 특수기기 및 응축열교환기의 해석 모델을 개발하고 SPACE 코드에 이식한 후, SMART-ITL을 이용한 종합 검증 시험을 수행하여 SPACE 코드의 성능을 평가함.
- 연구추진체계
 - 1단계(3년): SMART 안전해석을 위한 SPACE 예측성능 검증 및 해석모델 개발
 - 2단계(2년): SPACE 코드개선 및 해석모델 검증

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• SPACE 코드의 SMART 예측성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> • SMART 검증용 SET 모의능력 평가 • SMART-ITL 모의능력 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • SMART 관련 실험 DB 구축 및 코드 해석능력 평가
• SMART 피동계통 특수기기 해석모델 개발 및 검증	<ul style="list-style-type: none"> • 노심보충수탱크 해석모델 개발 • 안전주입탱크 해석모델 개발 • 격납용기 완전피동 냉각계통 해석모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 압력 균형관 및 격납용기 증기응축 모델
• 헬리칼 증기발생기	<ul style="list-style-type: none"> • 헬리칼 증기발생기 모델 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 헬리칼 증기발생기 모델

해석모델 개발 및 검증		검증을 위한 실험 DB 구축
<ul style="list-style-type: none"> • 응축열교환기 해석 모델 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 피동잔열제거계통 실험장치 구축 및 응축모델 개발 • SPACE 코드 개선 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • PRHR 응축해석 모델

3) 중대사고 대처능력 향상 기술

□ 기술의 정의

- SMART 중대사고 경위인 전원상실사고, 급수완전상실사고, 소형과단냉각재 상실사고 분석 기술과 중대사고 쟁점인 원자로용기 외벽냉각, 노내외 증기 폭발, 원자로용기 감압 및 격납건물 직접가열(DCH: Direct Containment Heating), 노심용융물과 콘크리트 반응(MCCI: Molten Core Concrete Interaction), 원자로건물 내 수소 분포 및 연소 등의 분석 기술
- SMART 중대사고 대처설비인 원자로용기 외벽냉각과 원자로건물 내 수소제어 검증실험과 상세 분석 기술 및 중대사고시 원자로건물 압력, 온도, 핵분열생성물 제어방안 개발 및 검증 기술
- 국내개발 SMART 중대사고 해석 코드인 CINEMA-SMART 개선과 확인 및 검증 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 가동 원전에 대한 중대사고 경위해석과 쟁점해석 및 중대사고 대처설비에 대한 해석이 수행되었음.
- SMART-PPE 사업에서 CINEMA-SMART의 초기 version을 개발하였고 이를 이용하여 SMART 중대사고 경위에 대한 예비해석을 수행하였음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국은 개발 중인 일체형 원자로에 대한 중대사고 쟁점해석을 수행하였음.
- 미국과 유럽 등 원전 선진국은 일체형 원전의 중대사고 경위해석을 수행할 수 있는 중대사고 해석코드를 개발하고 있음.

□ 미래동향 예측

- SMART 중대사고 분석기술 결과는 향후 일체형 가압경수로 국내외 인허가

에 기여할 수 있고, 국내 개발 일체형 가압경수로인 SMART의 수출경쟁력 향상을 기대할 수 있음.

- 일체형 원전을 포함한 중소형 원전은 세계시장에서 많은 수요가 있을 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

- SMART 중대사고 경위 및 쟁점해석
 - 단기(5년)목표: SMART 중대사고 경위 및 쟁점 해석
 - 중기(5년)목표: SMART 중대사고 완화방안 상세평가
- SMART 중대사고 대처설비(외벽냉각, 수소제어, 원자로건물 상태제어 등) 검증 실험 및 상세 분석
 - 단기(5년)목표: SMART 원자로용기 외벽냉각 검증실험, SMART 격납건물 내에서의 수소거동 및 상태제어 검증실험
 - 중기(5년)목표: SMART 중대사고 대처설비 성능 보완 실험 및 상세분석
- 국내개발 CINEMA-SMART코드 개선 및 확인과 검증
 - 단기(5년)목표: CINEMA-SMART 개선 및 확인과 검증
 - 중기(5년)목표: CINEMA-SMART를 이용한 SMART 중대사고 해석으로 코드의 세계화



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• SMART 중대사고 경위 및 쟁점해석	<ul style="list-style-type: none"> • 중대사고 진행과정 및 완화방안 상세 평가 • SMART 중대사고 현상(외벽냉각, 증기폭발, DCH, MCCI, 수소연소 등) 상세 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • SMART 중대사고 완화 방안: 원자로용기 감압, 외벽냉각, 수소제어 • SMART 중대사고 현상: 외벽냉각, 증기폭발, DCH, MCCI, 수소분포 및 연소
• SMART 중대사고 대처설비 검증실험 및 상세 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로용기 외벽냉각 검증실험 및 상세 분석 • 격납건물내 수소제어 설비 검증시험 및 상세 분석 • 격납건물내 온도, 압력, 핵분열생성물 제어 설비 검증실험 및 상세 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 자연순환, 임계열속 • 수소거동 및 연소, 수소제어 설비 • 증기응축 열전달, 핵분열생성물 거동, 격납건물 여과배기
• SMART 중대사고 해석코드 CINEMA-SMART 개선 및 확인과 검증	<ul style="list-style-type: none"> • CINEMA-SMART 모델 개선 • CINEMA-SMART 확인 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • SMART 모델: 헬리컬증기발생기, 격납건물 냉각계통 • 중대사고 전개과정: 원자로용기 감압, 외벽냉각, 수소제어

4) 혁신형 시스템 개념 검증 실험

□ 기술의 정의

- 소형원자로시스템의 해외수출 경쟁력 강화를 위한 고도화 핵심기술
 - 직접접촉응축 현상 가시화를 통한 피동격납건물냉각계통 성능검증 기술
 - 증기발생기의 크기 감소를 위한 인쇄기판형 증기발생기 소형화 기술
 - 냉각재상실사고 발생 시, 압력차 또는 사고 시 발생신호 등을 활용하여 격리밸브를 닫히게 하여 파단유량을 차단하는 기술
- 안전성과 경제성을 동시에 고려한 피동안전계통 설계 최적화 기술
 - 압력평형배관에서의 응축현상에 의한 피동안전주입계통 주입성능 제한 극복 기술
 - 피동잔열제거계통 분기관/열교환기 열전달 특성 정량화 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국수력원자력 주도로 iPOWER 개발과 관련하여 피동격납용기냉각계통(PCCS), 혼합형 안전주입탱크(H-SIT), 피동보조급수계통(PAFS) 등의 피동안

전계통 등이 개발 중이며, 검증시험은 한원(연)에서 수행 중임.

- 한원(연) 주도로 SMART 개발과 관련하여 원자로건물 압력 및 방사능 저감 계통(CPRSS), 피동안전주입계통(P SIS), 피동잔열제거계통(P RHRS) 등의 피동안전계통이 개발 중이며, 다양한 검증시험을 수행 중임.
- 인쇄기관형 증기발생기를 활용한 소형화 기술은 세계 최초로 한원(연)에서 개념을 검증하고 관련 지식재산권들을 확보함(2014년). 또한, 국내 중소기업은 소형 인쇄기관형 증기발생기 모듈을 제작 및 납품하고 개념 검증시험을 수행함.
- 냉각재상실사고를 해소하는 원자로용기 장착 이중격리밸브 및 과류방지밸브를 포함하는 기술은 원자력연구원에서 핵심 지식재산권을 확보하고 있음(2011~2014년).

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국외에서는 AP1000, CAP1400, ESBWR 개발과 관련하여 PACTEL, LSTF, PUMA, APEX 등을 이용한 종합효과시험과 다양한 개별효과시험이 이루어짐.
- 일체형원자로 개발과 관련하여 NuScale (미국), CGNPC (중국), NPIC (중국) 등에서 다양한 피동안전계통에 대한 검증시험을 수행하고 있음.
- 미국, 인도, 중국, 프랑스에서 초고온가스로, ITER, 초임계 질소 발전, SFR 분야에 인쇄기관형 증기발생기 적용을 고려하고 있음.
- 원자로용기 장착 이중격리밸브와 관련하여 BWXT mPower는 2013~14년에 일체형 격리밸브에 대한 특허를 출원하였음.

□ 미래동향 예측

- 소형원자로시스템의 해외수출시장은 2050년까지 최대 500~1,000여기의 시장이 형성될 것으로 예상되며, 미국, 프랑스, 중국, 아르헨티나 등의 경쟁국과의 비교우위를 확보하기 위한 피동안전계통의 고도화 및 주요기기 소형화 핵심기술의 선점이 중요함.
- 소형원자로시스템 대상으로 피동안전계통에 대한 양질의 검증실험데이터는 아직도 부족하며, 검증실험 데이터 확보는 향후 열수력코드 검증 등과의 연계를 통하여 지속적으로 요구될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 피동격납건물(CPRSS) 냉각계통성능검증 시험

- 1단계(2년)목표: 국소현상 측정 요소 기술 개발
- 2단계(3년)목표: 피동격납건물냉각계통 검증 실험장치 구축 및 검증실험 수행
- 피동안전주입계통 성능향상 특성시험
 - 1단계(2년)목표: 주입성능 향상을 위한 실험장치 구축
 - 2단계(3년)목표: 피동안전주입계통 주입성능 향상 검증실험
- 피동잔열제거계통 성능향상 특성시험
 - 1단계(2년)목표: 열교환기와 상하부 분기관 열전달특성 실험장치 구축
 - 2단계(3년)목표: 피동잔열제거계통 열전달비율 정량화 실험
- 인쇄기관형 증기발생기 특성시험
 - 1단계(3년)목표: 인쇄기관형 증기발생기 요소기술에 대한 특성 검증실험
 - 2단계(2년)목표: 인쇄기관형 증기발생기 운전전략 및 인허가 대응 특성 검증실험
- LOCA 저항성 원자로용기 장착형 격리밸브 특성시험
 - 1단계(3년)목표: 원자로용기 장착밸브(이중격리밸브, 체크밸브)에 대한 검증실험
 - 2단계(2년)목표: 원자로 파단유량 차단 피동형 밸브에 대한 검증실험
- 검증실험 데이터를 활용한 다양한 코드 해석과제 연계 가능성.



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 피동격납건물 냉각계통(CPRSS) 성능 검증시험	<ul style="list-style-type: none"> 국소현상 측정 요소 기술 개발 CPRSS 성능검증 실험장치 설계/구축 CPRSS 성능검증 실험 데이터 확보 	• 직접접촉응축 기포크기 측정 기술
• 피동안전주입계통 (PSIS) 성능향상 특성시험	<ul style="list-style-type: none"> 압력평형배관 응축현상 특성화 실험 PSIS 주입성능 향상 시험장치 설계/구축 PSIS 주입성능 향상 특성실험 	• 고온고압 수평배관 응축시 배관막힘 현상 해소 기술
• 피동잔열제거계통 (PRHRS) 성능향상 특성시험	<ul style="list-style-type: none"> PRHRS 분기관/열교환기 특성화 실험장치 설계/구축 PRHRS 열전달 비율 정량화 실험 	• 상하부 분기관 열전달량 측정 기술
• 인쇄기판형 증기발생기(PCSG) 특성시험	<ul style="list-style-type: none"> PCSG 열수력 실험장치 설계/구축 PCSG 개념검증 실험 PCSG 성능검증 실험 	• PCSG 소형화 기술
• LOCA 저항성 원자로용기 장착형 격리밸브 특성시험	<ul style="list-style-type: none"> 원자로용기 장착형 격리밸브 실험 장치 설계/구축 원자로용기 장착형 격리밸브 성능검증 실험 	• 이중격리밸브, 체크밸브 개발 기술

5) 혁신형 시스템 설계코드 및 방법론 개발

□ 기술의 정의

- 혁신형 시스템의 노심 특성을 적절히 반영하기 위한 노심 열수력 설계코드 의 개선과 검증 기술
- 혁신형 시스템의 고유 특성을 적절히 모사하기 위한 안전해석/중대사고해석 모델의 개발과 해석체계의 구축 기술
- 혁신형 시스템의 성능/안전을 검증하기 위한 고유 검증 DB의 구축과 고유 모델에 대한 체계적인 검증 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- SMART-PPE 사업을 통해 일체형 원자로의 개발에 사용할 수 있는 설계코드 의 개발 및 해석 체계의 구축을 완료하였음.
- 하지만, 혁신형 시스템의 고유 특성이 반영된 모델에 대한 개발 및 검증이 수행되지 않음.

- 특정 목적을 위한 검증 DB를 구축한 사례가 있으나, 혁신형 시스템의 고유 특성에 대한 검증 자료는 극히 부족함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 신형 원자로를 개발 중인 대부분의 기관/기업들은 고유의 특성을 반영할 수 있는 설계코드에 대한 개발/개선을 수행하고 있음.
- 국제기구를 중심으로 범용성과 다양성에 기반을 둔 검증 자료 DB를 구축하기 위한 노력이 진행 중이지만, 검증 자료에 대한 접근이 지극히 제한적임.

□ 미래동향 예측

- 일체형 원전을 포함한 중소형 원전 시장에 대한 기대가 높아지고 있는 현 시점에서 혁신형 시스템에 대한 설계 코드 개발은 미래의 시장을 선점하는 효과가 있음.
- 혁신형 시스템에 대한 해석체계가 구축되고, 이를 바탕으로 고유의 안전성이 검증되면, 혁신형 시스템의 수출경쟁력을 효과적으로 확보할 수 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 혁신형 시스템 노심 열수력 설계코드 개선 및 검증
 - 단기(5년)목표: 혁신형 시스템의 고유 특성을 반영하기 위한 설계코드의 개선
 - 중기(5년)목표: 노심 열수력 설계코드에 대한 검증 및 개선
- 혁신형 시스템 안전해석/중대사고해석 모델 개발 및 해석체계 구축
 - 단기(5년)목표: 혁신형 시스템의 고유 특성을 반영하기 위한 안전해석/중대사고해석 모델의 개발
 - 중기(5년)목표: 혁신형 시스템의 안전해석/중대사고해석을 수행하기 위한 해석체계의 구축
- 혁신형 시스템 고유 검증 DB 구축 및 모델 검증
 - 단기(5년)목표: 혁신형 시스템을 위한 검증 자료 수집 및 DB 구축
 - 중기(5년)목표: 혁신형 시스템 관련 모델 검증 및 개선



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 노심 열수력 설계코드 개선 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 혁신형 시스템의 노심 열수력 설계를 위한 코드의 개선 개선된 노심 열수력 설계 코드에 대한 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 노심 열수력 설계 코드
<ul style="list-style-type: none"> 안전해석/중대사고 해석 모델 개발 및 해석체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 혁신형 시스템의 안전해석/중대사고해석을 위한 관련 모델의 개발 개발된 안전해석/중대사고 해석 모델에 대한 검증 혁신형 시스템에 대한 안전해석/중대사고 해석을 위한 해석체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 안전해석 모델 중대사고해석 모델
<ul style="list-style-type: none"> 고유 검증 DB 구축 및 모델 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 혁신형 시스템 검증을 위한 검증 자료 수집 혁신형 시스템 검증을 위한 고유 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 고유 검증 DB

2.1.3 해양원자로플랜트 안전해석 기술 개발 및 검증

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 해양플랜트용 원자로를 보유하고 있는 국가에서는 원자로 관련 정보를 공개하고 있지 않아서 관련 자료의 확보에 어려움이 있음.
- 국내 환경은 해양플랜트용 원자로에 대한 설계요건 및 규제를 위한 법령체계가 정비되어 있지 않아서 안전해석을 위한 허용기준을 설정하기가 어려움.
- 해양플랜트용 원자로는 가압경수로로 분류되지만, 상용 가압경수로와는 목적부터 기본 설계 개념까지 많은 부분에서 차이가 있음. 이로 인해, 해양플랜트용 원자로의 안전성을 평가하기 위한 안전해석은 원자로 고유의 특성이 반영될 수 있도록 개발되어야 함. 또한, 개발된 안전해석 기반 기술은 체계적인 검증을 통해 그 유효성을 확인해야 함.

☐ 기술개발 필요성

- 해양플랜트용 원자로의 안전성을 확인하기에 앞서 원자로를 설치하는 해양플랜트의 설계요건 개발 및 필요 요소기술 파악이 선행되어야 하며 관련 규제요건의 정비가 필요함.
- 해양플랜트용 원자로의 안전성을 확인하기 위해서는 고유의 안전해석 기술 개발이 필요하며, 개발된 안전해석 기술은 검증을 통해 확인되어야 함.

나. 세부기술 내용

1) 해양환경에서의 원자로 안전성 평가기술

☐ 기술의 정의

- 해양원자로플랜트의 안전성관련 일반설계요건 개발 및 필요 요소기술 개발 및 검증
- 해양원자로플랜트의 안전성관련 규제요건(안)의 개발 및 법제화 지원

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 원자로의 안전성 평가기술은 육상에 설치되는 육상형 원전을 중심으로 개발되었음.

- 대학을 중심으로 해상환경을 고려한 기초 실험들이 수행되었으나, 국부적인 열수력 현상에 대한 연구에 그침.
- 해양환경에서의 원자로에 대한 일부 관련 연구가 수행되었으나 주변여건이 성숙되지 못하여 체계적인 개발이 이루어지지 못함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국, 독일, 일본, 러시아, 중국 등은 이미 해양원자로를 보유하고 있으며, 그와 관련된 기술 개발이 완료되었음.
- 특히, 프랑스의 Naval Group社は FlexBlue 라는 수송형 해저 착저 원자로의 개념설계를 제시하였음.
- 러시아는 현재 원자력쇄빙선 7척을 운용 중이며, 향후 55,000톤급 초대형 원자력 쇄빙선 개발 계획을 가지고 있음. 원자력해상플랜트 Akademik Lomonosov를 완성함(KLT-40S 원자로 2기 설치, 전기용량 70 MWe).

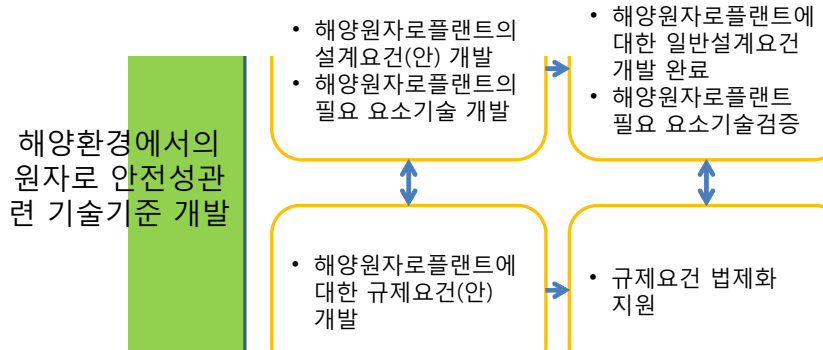
□ 미래동향 예측

- 다수의 해외 국가들은 이미 추진형 해양원자로를 보유하고 있으며, 그와 관련된 기술 개발이 완료되었음.
- 개발이 완료된 기술을 바탕으로 다양한 해상환경에 적합한 해양원자로의 개념을 제시하고 있으며, 그와 관련된 해양원자로 시장을 선도하고 있음.
- 북극의 빙하가 감소함에 따라 북극항로의 관심이 높아지고 있으며 이에 따라 북극항로 운행 시 필요한 쇄빙선의 건조 필요성이 커지고 있음.
- 부유식 해양 도시의 전력원 및 자연재해로 인한 위기상황을 대비한 부유식 원자로 플랜트에 관심이 높아지고 있음.
- 미래의 해양원자로 시장에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 다양한 해상환경을 고려한 안전해석 및 안전성 평가 방법론의 개발이 서둘러 진행되어야 함.

□ 기술개발 수행체계

- 해양원자로플랜트의 특수성을 반영한 산-학-연 공동 연구 방식
 - 연구원 : 해양플랜트용 원자로를 해양플랜트에 적용하기 위한 설계요건(안) 개발 및 필요 요소기술 개발
 - 산업체 : 원자로를 설치하는 해양플랜트에 대한 설계요건(안) 개발 및 필요 요소기술 개발

- 대학 : 해양원자로 및 원자로플랜트에 대한 규제요건(안) 개발



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트의 안전성관련 일반설계요건 개발 및 필요 요소기술 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트의 안전성관련 일반설계요건 개발 해양원자로플랜트에 필요한 요소기술 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트 일반설계요건 해양원자로플랜트 제작에 필요한 필수요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트의 안전성관련 규제요건(안)의 개발 및 법제화 지원 	<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트의 안전성관련 규제요건(안) 개발 해양원자로플랜트의 규제요건 법제화 지원 	<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트의 규제요건(안)

2) 추진식 해양원자로플랜트 고유 설계 검증실험

□ 기술의 정의

- 해양원자로플랜트용 능동/피동 복합 안전계통 검증실험시설 구축 및 검증실험 기술
 - 해양원자로플랜트와 같은 소형원자로시스템은 공간제약 등의 여러 특성상 기존 가압경수로와는 달리 능동과 피동이 복합된 계통의 설계가 필요함.

- 능동형과 피동형의 각각의 성능 특성이 아닌 이들이 조합된 복합 안전계통의 성능 검증실험이 필요함.
- 해양원자로플랜트용 고유 원자로건물 건전성 확보를 위한 피동원자로건물 해석코드 기술 향상과 연계 가능한 피동원자로건물 건전성 검증실험 기술
 - 가압경수로 및 SMART 피동원자로건물냉각계통의 성능검증을 위한 다양한 시험이 수행될 예정이나, 해양원자로플랜트 고유의 원자로건물 설계에 대한 건전성 검증시험이 독자적으로 필요함.
- 해양원자로플랜트용 노심 건전성 및 열전달 특성 실험시설 구축 및 성능평가 기술
 - 일반적으로 해양원자로플랜트(원자력상선 등)의 특수목적 소형 원자로에는 고열 유속을 갖는 핵연료를 사용하며, 이러한 특수목적 원자로에 대한 연구결과는 대외비로서 엄격하게 관리되고 있음.
 - 선진국의 경우에는 많은 연구결과가 누적되어 있는 것으로 추정되지만, 국내 연구는 전무한 수준으로 국내에서 고려되고 있는 해양원자로플랜트에 대한 기초 연구 및 인허가를 위한 실험 기반 시설 구축 및 데이터 생산이 필요함.
- 특수 열수력 조건에서 안전계통 및 노심 CHF 개별효과 검증실험시설 구축 및 검증 실험 기술
 - 해양원자로플랜트는 그 활용분야에 따라 요동조건에서도 운전되어야 하고, 안전계통의 성능 및 노심 열전달 특성은 이런 요동조건이 고려된 상황에서 안전성이 반드시 검증되어야 함.
 - 따라서 안전주입계통 성능시험, 잔열제거계통 성능시험, 노심 CHF 특성 시험과 같은 개별효과 검증실험을 요동조건이 구현가능토록 검증실험 장치를 구축하고, 성능 실험을 통해 안전성 평가를 위한 실험 자료가 필요함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한수원 주도로 iPOWER 개발과 관련하여 PAFS 등의 피동잔열제거계통, H-SIT 등의 피동안전주입계통, PCCS 등의 피동원자로건물냉각계통이 개발 중이며 검증시험은 한원(연)에서 수행 중임.
- 한원연 주도로 SMART 개발과 관련하여 PRHRS 등의 피동잔열제거계통, PSIS 등의 피동안전주입계통, CPRSS 등의 피동원자로건물냉각계통이 개발 중이며, 다양한 검증시험을 수행하고 있음.
- 능동/피동 복합형 안전계통과 해양원자로플랜트 특성을 고려한 원자로건물에 대한 성능검증 및 안전성 관련 연구는 수행된 바 없음.

- 해양원자로플랜트와 같은 특수목적 원자로에 대한 관심이 고조되고 있으나, 특수목적 원자로의 노심 열전달 평가 및 인허가를 위한 시험시설 구축 및 관련 연구는 없음.
- 단순한 기하학적 형상에서의 요동을 고려한 열수력 특성시험에 대해서는 서울대에서 일부 수행하였지만, 요동을 고려한 안전계통 및 노심 CHF 시험 등의 개별효과 검증실험은 국내에서 찾아볼 수 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- AP1000, CAP1400, ESBWR 개발과 관련하여 PACTEL, LSTF, PUMA 등을 이용한 종합효과시험과 다양한 개별효과시험이 이루어짐.
- 일체형원자로 개발과 관련하여 NuScale (미국), CGNPC (중국), NPIC (중국) 등에서 다양한 피동안전계통에 대한 검증시험을 수행 중임.
- 해양원자로플랜트에 관한 연구는 러시아, 중국, 프랑스, 일본, 노르웨이, 영국 등을 중심으로 연구가 진행 중에 있으나, 관련 안전계통 검증시험에 관한 구체적인 연구결과들을 공개하지 않음.
- 가압경수로를 대상으로 하는 노심 열전달 관련 연구들은 웨스팅하우스, AREVA 등을 중심으로 다양한 시험시설을 활용하여 진행되고 있으며, 해양원자로플랜트와 같은 특수목적 원자로에 대한 연구도 1970년대부터 수많은 실험들이 수행되어 왔으나, 관련 연구결과는 외부에 공개되지 않고 있음.
- 해외에서 다양한 경사/요동 조건을 포함한 실험이 이루어졌으나, 공개된 자료는 확보하기 어려움.

□ 미래동향 예측

- 능동/피동 복합형 안전계통 설계검증실험, 해양원자로플랜트 고유 원자로건물 건전성 검증실험, 노심 건전성 및 열전달 특성 실험, 특수 열수력조건 개별효과 검증실험을 통해 인허가를 위한 실험 기반 시설을 구축하고 다양한 검증 데이터를 생산함으로써 이를 해양원자로플랜트 고유 설계에 적용하여 해양원자로플랜트의 안전성 및 경제성 향상에 기여할 수 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 능동/피동 복합형 안전계통 설계검증실험
 - 1단계(5년)목표: 능동/피동 복합 안전계통 검증실험시설 구축 및 기초 실험
 - 2단계(5년)목표: 능동/피동 복합 안전계통 검증실험

- 최종목표: 해양원자로플랜트용 능동/피동 복합 안전계통 검증실험시설 구축 및 검증실험

○ 해양원자로플랜트 고유 원자로건물 건전성 검증실험

- 1단계(5년)목표: 피동격납건물용기 검증 시험장치 상세설계 및 구축
- 2단계(5년)목표: 피동격납건물용기 검증 시험장치 시운전 및 성능검증시험
- 최종목표: 피동격납용기 해석코드 기술 향상과 연계 가능한 피동격납용기 건전성 검증 시험 데이터 확보

○ 노심 건전성 및 열전달 특성 실험

- 1단계(5년)목표: 해양원자로플랜트 노심 건전성 및 열전달 특성 실험시설 구축 및 기초실험
- 2단계(5년)목표: 해양원자로플랜트 노심 건전성 및 열전달 특성 성능평가
- 최종목표: 해양원자로플랜트 노심 인허가를 위한 실험시설 구축 및 성능평가

○ 특수 열수력조건 개별효과 검증실험

- 1단계(5년)목표: 특수 열수력조건 개별효과 검증실험시설(잔열제거계통, 안전주입 계통, 노심 CHF) 구축 및 기초실험 수행
- 2단계(5년)목표: 특수 열수력조건 개발효과 검증실험
- 최종목표: 요동을 고려한 안전계통 및 노심 CHF 개발효과 검증실험시설 구축 및 검증 실험



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 능동/피동 복합형 안전계통 설계검증실험	<ul style="list-style-type: none"> 능동/피동 복합 안전계통 검증실험시설 구축 및 기초 실험 능동/피동 복합 안전계통 검증실험 	• 능동/피동 복합 안전계통 검증실험시설 상세설계
• 해양원자로플랜트 고유 원자로건물 건전성 검증실험	<ul style="list-style-type: none"> 피동격납건물용기 검증실험시설 구축 피동격납건물용기 검증 시험장치 시운전 및 성능검증시험 	• 해양원자로플랜트용 피동격납건물용기 검증실험시설 상세 설계
• 노심 건전성 및 열전달 특성 실험	<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트 노심 건전성 및 열전달 특성 실험시설 구축 및 기초실험 해양원자로플랜트 노심 건전성 및 열전달 특성 성능평가 	• 해양원자로플랜트용 노심 건전성 및 열전달 특성 실험시설 상세설계
• 특수 열수력조건 개별효과 검증실험	<ul style="list-style-type: none"> 특수 열수력조건 개별효과 검증실험시설(잔열제거계통, 안전주입계통, 노심 CHF) 구축 및 기초실험 수행 특수 열수력조건 개발효과 검증 실험 	• 요동 등 특수 열수력 조건 구현 검증실험시설 상세설계

3) 추진식 해양원자로플랜트 설계 종합 검증실험

□ 기술의 정의

- 본 기술은 해양원자로플랜트의 성능을 검증하고, 사고 시 발생하는 여러 열수력적 현상들을 분석하기 위하여 해양원자로플랜트의 고유한 특성인 경사 및 요동현상 등을 고려한 체계적인 종합 열수력 검증시험을 수행하는 것임.
- 본 기술은 해양원자로플랜트플랜트용 안전해석 코드의 예측능력을 검증하고, 생산된 데이터를 해양원자로플랜트 고유 설계에 적용하여 원전의 안전성 및 경제성 향상에 기여할 수 있다는 점에서 의의가 있음.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내기술은 관련분야의 타당성 및 경제성 분석을 위한 조사 및 연구에 국한되어 있음.
- 원자력연구원과 해양연구원은 2009년에 원자력의 해양활용 타당성 공동 연구를 수행하였으며, 대우조선해양과 STX 조선은 2013 ~ 2014년에 원자력추

진선박의 경제성 분석 논문을 발표함.

- 한국원자력학회와 대한조선학회는 2012 ~ 2014년에 해양원자로플랜트 공동 위원회를 운영함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 러시아는 현재 원자력쇄빙선 7척을 운용 중이며, 향후 55,000톤급 초대형 원자력 쇄빙선 개발 계획을 가지고 있음. 원자력해상플랜트 Akademik Lomonosov를 완성함(KLT-40S 원자로 2기 설치, 전기용량 70 MWe).
- 중국은 2019년 남중국해 난사군도에 원자력해상플랜트를 설치할 예정임. 최근 5년간 중국의 해양원자로플랜트 연구가 집중적으로 발표되었으며, 관련 연구기관으로는 시안교통대, 조선대, 충칭대, 하얼빈 공대가 있음(압력강하, 열전달, 임계열유속에 대한 실험 결과를 상당 수 발표).
- 프랑스는 잠수식 원자력플랜트인 FLEXBULE (150MWe)를 개발 중임.
- 일본은 선박 추진용 원자로 DRX, MRX 개발을 완료함. Ishida (1990)가 선박의 움직임을 고려하여 RETRAN 코드연구를 수행하였으며, 이 코드는 해양원자로플랜트와 해저탐사선 성능해석에 사용됨.
- 노르웨이는 2011년에 DnV 선급, 원자력 선박 타당성 조사 연구를 수행하였음.
- 영국은 2011 ~ 2014년에 Lloyds 선급, Hyperion 원자로를 선박에 탑재하는 방안을 연구함.

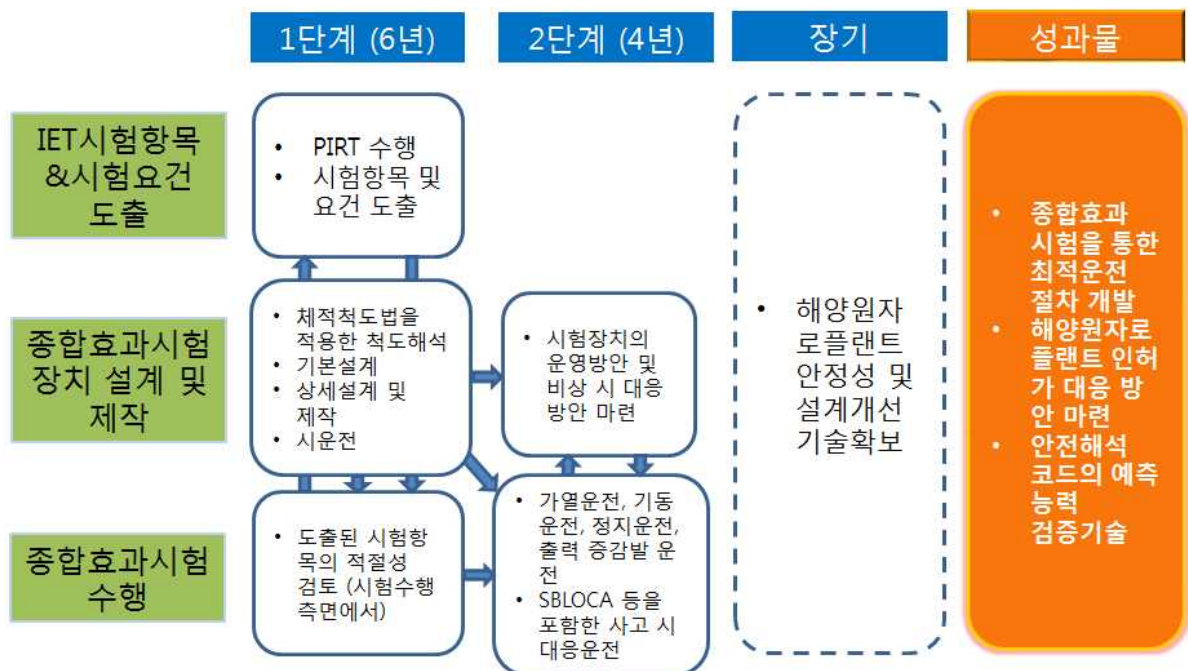
□ 미래동향 예측

- IAEA, OECD/NEA, WNA 등과 같은 원자력 관련 국제기구에서는 2020년부터 2030년 사이에 발전부문의 소형모듈원자로(SMR) 시장규모가 최소 4.5 GWe (100MWe급 45기에 해당)에 이를 것으로 전망하고 있으며 비 발전부문에서도 동 기간 동안 최소 9.7 GWe (100MWe급 97기에 해당) 규모가 형성될 것으로 전망하고 있음.
- 화석연료에 기반 한 부유식 해양플랜트 (barge mounted power plant, BMPP)나 이동식 전력공급선(Mobile Power Ship)과 같은 해양플랜트 시장이 연간 6.4% 규모로 증가하고 있는 상황이며, 기후변화 완화를 위한 국가 간 규제가 강화되면 원자력 및 신재생에너지와 같이 온실가스 무배출, 청정에너지에 대한 수요가 크게 증가할 것으로 예상됨.
- 발전부문 및 비발전부문의 SMR 시장과 화석연료 기반의 해양플랜트 시장을 융복합하는 부유식 해양원자로플랜트 (Floating Nuclear Power Plant,

FNPP) 시장의 규모는 크게 성장할 것으로 기대됨.

□ 기술개발 수행체계

- 종합효과시험의 시험항목 및 시험조건 도출을 위한 PIRT (Phenomena Identification & Ranking Table) 수행
- 수정된 3단계 체적척도법(Integral Scaling, Boundary Flow와 Inventory Scaling, Local Phenomena Scaling)을 적용한 척도해석 수행, 종합효과시험 장치 개념설계 및 상세설계
- 종합효과시험장치 제작 및 시운전, 운전방안 구축
- 다양한 조건(가열운전, 기동운전, 정지운전, 출력 증감발 운전, SBLOCA 등을 포함한 사고 시 대응운전)에 대한 최적운전절차 개발 및 원전 안전성 향상을 위한 종합효과시험 수행
- 기술개발 일정
 - 최종목표 : 종합효과시험을 통한 참조원전의 성능 파악 및 안전성 향상
 - 1단계(6년) : PIRT 수행, 종합효과시험 항목도출, 종합효과시험 시험조건 결정, 적절한 축척방법론을 적용한 시험장치 상세설계, 종합효과시험장치 제작 및 시운전
 - 2단계(4년) : 열수력 현상 중요도 상위 항목 종합효과시험 (예상 시험항목: SBLOCA, CLOF, FLB 등; 경사 및 요동 고려가능)



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 종합효과시험 시험항목 및 시험조건 도출	• PIRT (Phenomena Identification & Ranking Table) 수행	• PIRT 활용 시험항목 및 시험조건 도출
• 종합효과시험장치 설계 및 제작	<ul style="list-style-type: none"> • 수정된 3단계 체적척도법(Integral Scaling, Boundary Flow와 Inventory Scaling, Local Phenomena Scaling)을 적용한 척도해석 • 기본개념 설계 및 상세설계 • 종합효과시험에서 경사 및 요동현상을 모의할 수 있는 방법론 확보 • 종합효과시험장치 제작 • 시운전을 통한 시험장치의 운영방안 및 비상 시 대응방안 마련 	<ul style="list-style-type: none"> • 척도해석을 위한 3단계 체적척도법 • 해양원자로플랜트 고유특성인 경사 및 요동 현상을 모의할 수 있는 방법론 • Core, SG, RV, MCP 등을 포함한 시험장치 구성요소 설계기술 • 종합효과시험장치 운영기술
• 종합효과시험 수행	<ul style="list-style-type: none"> • 해양원자로플랜트 종합 열수력 성능 및 안전성 검증 시험 • 해양원자로플랜트 운전절차 개발 종합효과시험 • 가열운전, 기동운전, 정지운전, 출력 증감발 운전 • SBLOCA 등을 포함한 사고 시 대응운전 	<ul style="list-style-type: none"> • 해양원자로플랜트의 열수력 성능 및 안전성 검증 • 종합효과시험을 통한 최적운전절차 개발 • 시험데이터를 이용한 해양원자로플랜트 인허가 대응 방안 마련 • 안전해석 코드의 예측능력 검증

4) 추진식 해양원자로플랜트 안전해석 체계

□ 기술의 정의

- 추진식 해양원자로플랜트의 요동과 관련된 해석을 수행할 수 있는 해석 모델 기술
- 추진식 해양원자로플랜트의 노심 고온수로에 대한 열수력 해석을 수행할 수 있는 노심 열수력 해석코드의 개발 기술
- 추진식 해양원자로플랜트의 해양환경을 고려한 안전해석 코드의 모델 및 상관식 개발과 그에 대한 검증 기술
- 추진식 해양원자로플랜트의 원자로건물 해석을 위한 통합 모델 및 방법론의 개발 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 원전의 안전성 평가기술은 육상에 설치되는 육상형 원전을 중심으로 개발되었음.
- 대학을 중심으로 추진식 해양원자로플랜트의 해상환경을 고려한 기초 실험들이 수행되었으나, 국부적인 열수력 현상에 대하여 제한적인 연구에 집중함.
- SMART원자로의 경우 TASS/SMR-S 코드를 사용하여 표준설계인허가를 획득하였음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

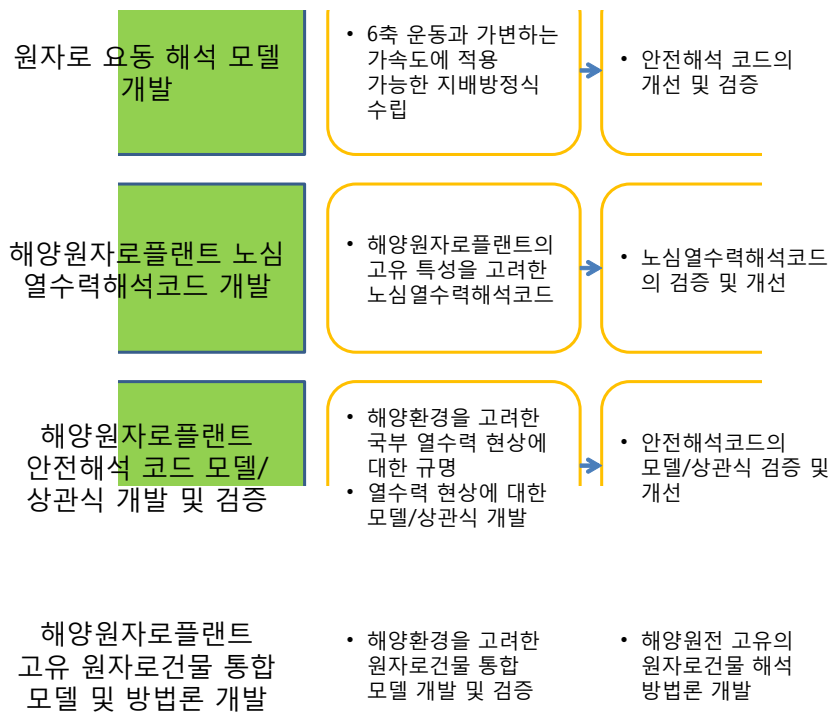
- 미국, 독일, 일본, 러시아, 중국 등은 이미 추진식 해양원자로플랜트를 보유하고 있으며, 그와 관련된 기술 개발이 완료되었음.

□ 미래동향 예측

- 다수의 해외 국가들은 이미 추진식 해양원자로플랜트를 보유하고 있으며, 다양한 해상상황을 고려한 안전해석 체계도 완성하였음.
- 이를 이용하여, 자국이 보유한 추진식 해양원자로플랜트에 대한 안전성을 확인하였음.
- 미래의 추진식 해양원자로플랜트 시장에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 다양한 해상환경을 고려한 안전해석 체계가 서둘러 구성되어야 함.

□ 기술개발 수행체계

- 해양원자로플랜트의 특수성을 반영한 학-연 공동 연구 방식
 - 연구원 : SMART원자로 인허가에 사용된 TASS/SMR-S 코드를 기반으로 고유의 설계와 해상상황에 기반한 안전해석 체계 구축
 - 대학 : 해상환경에 기반한 국부적인 열수력 현상에 대한 연구



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 원자로 요동 해석 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 6축 운동에 적용 가능한 코드 모델 개발 가변하는 가속도에 적용 가능한 코드 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 안전해석 코드의 지배방정식
<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트 노심열수력해석코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트의 해양환경에 적용 가능한 고온수로 핵연료 열수력 해석코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 노심열수력해석코드
<ul style="list-style-type: none"> 해양 환경에서의 안전해석 코드 모델/상관식 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 해양환경을 고려한 열수력 현상에 대한 모델 개발 해양환경을 고려한 국부 열수력 현상에 대한 상관식 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 안전해석 코드 모델 안전해석 코드 상관식
<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트 고유 원자로건물 통합 모델 및 방법론 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 해양환경을 고려한 원자로건물 통합 모델 개발 해양환경을 고려한 원자로건물 해석 방법론 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 해석 모델 원자로건물 해석 방법론

5) 해양원자로플랜트 훈련용 시뮬레이터

□ 기술의 정의

- 해양원자로플랜트의 운용과 관련하여 해양플랜트에서 나타날 수 있는 현상을 예측하고 훈련을 수행할 수 있는 시뮬레이터의 개발 기술
- 해양원자로플랜트의 설계, 제작 및 시운전 시간을 단축하기 위한 시뮬레이터 개발 환경 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 원전과 관련한 훈련을 수행할 수 있는 시뮬레이터는 육상에 설치된 상용 원전을 중심으로 개발되었음.
- 건설이 완료된 국내 해양원자로플랜트는 없으며, 운용할 해양원자로플랜트가 없으므로 훈련용 시뮬레이터의 개발이 진행된 바도 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국, 독일, 러시아, 중국 등은 이미 추진식 해양원자로플랜트를 보유하고 있으며, 운용과 관련한 훈련이 수행되고 있음.

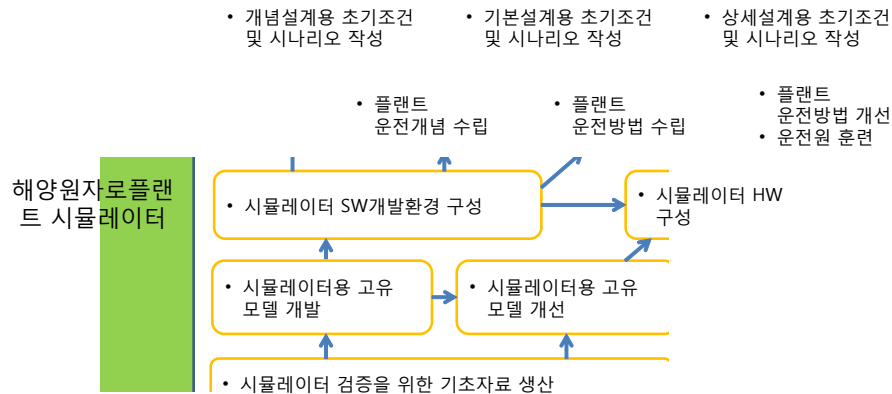
□ 미래동향 예측

- 추진식 해양원자로플랜트를 운용하기 위해서는 운용 중에 나타날 수 있는 현상들에 대하여 설계에서 대비가 필요하며, 운용요원들에 대한 훈련이 반드시 수행되어야 함.
- 운용요원의 적절한 훈련을 위해 해양원자로플랜트의 현상을 이해하고 실제 운전에 필요한 지식을 습득하기 위한 시뮬레이터는 시급히 개발되어야 함.
- 해양원자로플랜트 개발 시 설계, 제작 및 시운전 시간을 단축하기 위하여 설계단계부터 시뮬레이터를 운용하여 설계데이터를 종합하고 연계관계를 확인할 필요가 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 해양원자로플랜트의 특수성을 반영한 산-학-연 공동 연구 방식
 - 연구원 : 해양원자로플랜트용 시뮬레이터에 적용 가능한 고유 모델 개발/ 설계데이터를 종합할 수 있는 소프트웨어적인 시뮬레이터 제작 환경 구성/ 개념설계 및 기본설계데이터 입력/ 시뮬레이터용 초기조건 및 시나리오 작성

- 산업체 : 해양원자로플랜트용 시뮬레이터에 필요한 기초설계자료 제공/ 플랜트 설비용 설계데이터 입력/ 상세설계데이터 입력/ 시뮬레이터 하드웨어 제작/ 플랜트 운전방법 수립/시운전 및 운전원 훈련용 시나리오 작성/ 운전원 훈련
- 대학 : 시뮬레이터의 검증을 위한 고유의 모델 개발 및 기초자료 생산



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트 시뮬레이터 	<ul style="list-style-type: none"> 시뮬레이터용 고유 모델 개발 시뮬레이터 검증용 기초자료 생산 시뮬레이터의 SW 개발환경 구성 시뮬레이터용 초기조건 및 시나리오 작성 시뮬레이터 HW 구성 시뮬레이터용 플랜트 운전방법 수립 및 운전원 훈련 	<ul style="list-style-type: none"> 해양원자로플랜트 시뮬레이터 소프트웨어 개발환경 해양원자로플랜트 시뮬레이터용 모델 시뮬레이터 검증용 자료 시뮬레이터용 초기조건 및 시나리오

2.1.4 소형 원전

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 기존의 육상에 건설된 대형 원전들은 대규모의 전력 수요 및 우수한 전력망

을 바탕으로 설계되었다. 따라서 효율을 높이기 위하여 높은 출력밀도가 요구되며, 안전성 확보를 위해 외부 동력에 의존하는 능동안전계통이 주류를 이루고 있음.

- 소형 원전은 대형 원자로에 비해 경제성은 떨어질 것으로 예상되나, 전력망 구축이 어려운 극지형, 우주용, 해저 또는 해상용 등에 적용이 가능하므로 대용량의 보조용으로 다양한 활용성이 기대됨.
- 소형 원전은 전력생산 규모가 작아서 우수한 안전성 확보의 장점이 있으나 세계 각국에서는 아직 소형 원전에 대해 기초 연구 또는 기본적인 설계수준에 있음.

□ 기술개발 필요성

- 저출력 밀도의 설계를 통해 핵연료 재장전 없이 10년 또는 30년의 장주기 운전이 가능한 원전이 필요함.
- 매우 우수한 안전성 확보를 위해 어떠한 경우도 외부 전원이 필요 없는 완전 피동계통에 의한 안전성 확보가 필요함.
- 이를 위해 계통의 단순성, 소규모 전력망 적용 가능성, 피동 안전성, 고 신뢰도의 설계 달성과 이들을 해석할 전산프로그램 개발이 등이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 마이크로 모듈형 원전 안전성 평가 기술

□ 기술의 정의

- 마이크로 모듈원전에 대한 관심이 증가하고 이에 대한 연구개발이 행되고 있음에 따라 기존의 대형경수로에서 발견되지 않았던 열수력 현상들이 안전에 지배적으로 영향을 미칠 수도 있으며, 이를 종합적으로 해결하기 위해 수치해석적 접근과 실험적 접근을 통한 안전성 평가기술 개발이 요구됨.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 산업체, 대학, 연구소에서 개별적으로 국부적 현상 위주의 연구 진행되고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

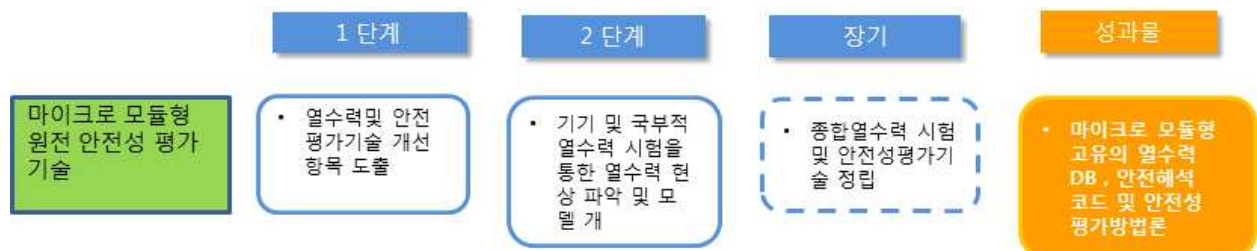
- 해양에 적용되는 소형원전에 대한 여러 가지 경험에서 초소형 원전이 가지는 특성에 대한 평가기술들을 일부 확보하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 국외 국가들은 해양 소형원전에 대한 경험으로부터 초소형 원전이 가지는 특성에 대한 평가기술을 확보하고 있는 상황이나 아직 핵심 기술을 공개하고 있지 않으며 소형원자로에 대한 관심이 세계적으로 증가하는 추세이므로 안전성 평가기술을 개발할 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

- 마이크로 모듈형 원전 열수력 특성과 안전성 평가 시 기존 대형경수로와 다른 다양한 불확실성이 존재함에 따라 이를 해결하기 위한 대안이 필요함.
- 단계별로 초기에는 학 연이 · 주도하고, 사업화가 진행됨에 따라 사업자 주관 형태로 기술개발 추진
 - 1단계(2년)목표: 마이크로 모듈형 원전 열수력및 안전평가기술 개선항목 도출
 - 2단계(3년)목표: 기기 및 국부적 열수력 시험을 통한 열수력 현상 파악 및 모델 개선
 - 3단계(장기)목표: 마이크로 모듈형 원전 종합열수력 시험 및 안전성평가기술 정립



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

- 컴팩트 증기발생기 열수력 특성 및 안전성 평가기술 개발
- 자연순환 운전 시 혼합대류 영향 평가기술 개발
- 저유량 장주기 노심의 연료채널별 유동 분배 평가기술 개발
- 마이크로 모듈형 원전의 종합열수력 시험 및 이를 이용한 코드 개발

2.2 연구로 안전성 향상 기술

2.2.1 개요

□ 이슈 및 문제점

- 연구로는 운전 중 실험자 및 운영요원이 항상 원자로 가까이 있을 가능성이 크고, 이용자의 편의를 위해 대도시 근교에 위치하는 경우가 많으므로 원자로 및 이용시설의 다양한 사고 가능성에 대해 안전성을 확보하고 있어야 함.
- 상대적 안전성으로 인해 발전로에 비해 관심이 적었으나, 최근에는 발전로 수준에서 연구로 안전성을 바라보고 있으며, 규제기준 및 인허가 심사 또한 매우 엄격해짐.

□ 기술개발 필요성

- 과학기술의 발전으로 점차 고성능의 연구로를 선호함에 따라 높은 중성자속을 위해 같은 출력에서도 출력밀도가 높도록 설계하고 있는 추세임. 또한, 원자력 규제 강화에 따라 신규 연구로의 인허가, 기존 연구로의 운영 및 주기적 안전성 평가 등에도 강화된 규제 기준을 적용하는 경향임.
- 이에 따라 안전성이 향상된 연구로 핵심 요소기술을 개발 및 검증하여 기존 연구로에 적용하거나 신규 연구로 설계에 적용할 필요가 있음. 동시에 세계 연구로 시장에서 경쟁력 강화도 기대할 수 있음.

2.2.2 연구로 기기 및 계통 성능 향상 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 연구로는 중성자를 이용하여 기초 및 응용과학 분야의 활용에 목적이 있으며, 방사선원향이 작고 상대적으로 안전성이 높은 특성으로 인해 발전로에 비해 안전성에 대한 관심과 자원 투입이 적었음.
- 후쿠시마 사고 이후 발전로 뿐만 아니라 연구로에 있어서도 안전성 관련하여 관심이 집중되고 있으며, 기존에 운영되고 있는 연구로 및 신규 연구로의 인허가에 있어서도 안전성 관련 이슈가 중요하게 부각되고 있음.

□ 기술개발 필요성

- 강화된 안전 및 규제기준에 따라 안전성이 강화된 연구로 핵심 요소 기술을

개발하고 검증하는 것이 필요함. 연구로 안전성 향상과 인허가 대비를 위해 연구로 해석 및 설계에 적합한 전산코드의 개발과 코드 검증을 위한 실험과 실험 자료가 필요함(기존에는 발전로 전산코드를 연구로에 알맞게 수정하여 사용하는 경우가 많음).

- 그리고 연구로의 안전 설계, 이용 편의성, 경제성 등의 향상을 위해 국내 미 확보 연구로 핵심기술을 개발하고, 이용/시험시설 설계 기술의 고도화를 통해 수출 경쟁력 제고를 기대할 수 있음.

나. 세부기술 내용

1) 연구로 기기 및 계통 성능 향상 기술

□ 기술의 정의

- (가연성 독물질 적용) 연구로 핵연료 설계 및 검증
 - 연구로 핵연료에 가연성 독물질을 적절히 적용하여 노심의 초과반응도를 효과적으로 제어함으로써 요구되는 주기길이를 확보하고, 노심 침투출력인자를 감소시킬 수 있는 기술
 - 노심 침투출력인자의 감소를 통하여 원자로 안전성을 제고할 수 있으며, 주기길이 확보를 통하여 원자로 성능 및 경제성을 향상시킬 수 있음.
- 연구로 계통 및 장치 핵심기술 개발
 - 국내 미 확보 연구로 핵심기술 및 연구로에 적용 가능한 최신 요소 기술을 개발하여 적용함으로써 연구로의 안전성과 성능을 향상시킬 수 있는 기술임.
 - 대형 연구로에서 반사체로 베릴륨 또는 중수가 많이 사용됨. 중수 사용 연구로에서 반사체 중수를 배수하는 계통을 2차 정지계통으로 설치하여 1차 정지계통과 독립성과 다양성을 보장함으로써 원자로의 안전성을 향상할 수 있음.
 - 냉각수가 노심 상부에서 하부로 흐르는 하향유동의 연구로에서는 특별한 핵연료 고정장치가 필요하지 않으나, 상향유동 연구로에서는 핵연료의 노심 이탈을 방지하기 위한 고정 방안이 필요함. 안전성 측면에서 유리한 상향유동 연구로 설계를 위해 필요한 기술임.
 - 반응도 제어장치는 노심 반응도를 제어하는 설비로써 원자로 안전에 핵심적임. 연구로의 규모에 따라 중,대형 연구로에는 노심에 급속히 삽입되는 제어봉 구동장치가, 그리고 소형연구로에는 경량화 제어봉 구동장치가 요구됨.
 - 수조형 연구로에서 냉각재 및 수조수는 핵연료의 최종적인 열제거에 매우 중요함. 연구로의 안전성과 경제성을 위해 냉각재 상실사고를 설계적으로 배제하거나 완화할 수 있는 기술 확보 필요함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 하나로에 사용되는 봉형 핵연료에 가연성 독물질을 적용하기 위하여 조사 시험 및 조사후 시험이 이루어졌으나 상용화에 이르지 못하는 못하였음. 대부분의 고성능 연구로에 많이 사용되는 판형 핵연료의 경우, 네덜란드 PALLAS 사업 입찰 시 가연성 독물질이 적용된 핵연료를 적용하여 노심설계를 수행하였으나 실제로 사용을 위해서는 제작 및 검증이 필요함.
- 국내 건설 및 운영 연구로는 정지봉을 이용하여 정지계통을 구현하고 있음. 이와는 작동 방법이 다른 중수배수 계통을 이용한 정지계통 기술은 미확보 상태임.
- HANARO를 통하여 봉형 핵연료의 하단 고정장치 기술은 확보하고 있으나, 상향유동 노심에서 판형 핵연료의 하단 고정방식은 국내 미보유 기술임.
- 요르단 연구로(JRTR) 및 기장로에 자유낙하 방식의 반응도제어장치를 개발하고 활용하였으나, 안전성 및 성능 향상을 위해 공기압을 이용한 긴급 삽입 제어봉구동장치 개발이 필요함.
- JRTR 및 기장로 등 중형연구로에 적합한 제어봉구동장치를 개발한 사례가 있음. 이를 기반으로 소형연구로 크기에 최적화된 경량 제어봉구동장치 개발이 필요함.
- 기존 연구로의 개념과 원천적으로 다른 개념의 냉각재상실 완화 및 배제 설계기술 개발은 연구로 안전성 및 경쟁력을 강화할 수 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국, 프랑스, 일본, 아르헨티나 등에서는 오래전부터 가연성 독물질이 적용된 핵연료를 이용하여 연구로를 설계/건설하여 오고 있음.
- 미국, 일본, 러시아, 중국 등의 성숙된 원자력 기술 보유국은 2차 정지 중수 배수 등 개발한 연구로 핵심기술에 대한 연구결과를 공개하지 않음.
- 미국, 프랑스, 아르헨티나 등은 상향류의 노심에서 핵연료 고정 장치 기술을 확보하여 적용하고 있음.
- 수출경쟁국인 아르헨티나 INVAP은 상향유동 노심에서 빠르게 제어봉을 삽입하는 급속 삽입 반응도제어장치를 개발하여 적용하고 있음.
- 중국 및 캐나다의 MNSR, SLOWPOKE의 소형연구로에 폴리 구동 및 전자석-영구자석 클러치 기능의 경량 제어봉구동장치가 적용됨.

□ 미래동향 예측

- 연구로의 성능 향상을 위해 같은 출력에서 더 높은 중성자속을 얻기 위해 노심을 더욱 조밀하게 설계를 하는 경향임. 또한, 핵연료 밀도를 2배 가까이 증가시킨 차세대 연구로용 핵연료인 U-Mo 핵연료를 개발 중임. 따라서 가연성 독물질, 핵연료 밀도 변화 등의 방법을 사용하여 침투 출력을 가능한 낮게 설계를 하여야 핵연료의 경제성과 원자로 안전성을 제고할 수 있음.
- 국내외적으로 연구로에 대해서도 발전로에 준하도록 안전규제를 강화하는 추세임. 또한, 과학 기술이 발전함에 따라 연구로도 점차 대형화 및 고성능을 요구하고 있음.
- 이에 따라 강화된 안전기준과 고성능 요건에 맞는 연구로 설계/운영을 위해서는 기존 연구로 핵심기술 및 개선된 설비의 제작 기술의 확보하고, 동시에 연구로의 해외수출 경쟁력 강화도 기대됨.

□ 기술개발 수행체계

- 핵심기술의 개념 개발 및 검증실험은 연구계에서 수행하고 일부 부분 실험은 학계의 지원을 받음. 제작은 산업체가 연구계와 협의하여 수행함.
- 가연성 독물질 적용 연구로 핵연료 설계 및 검증
 - 1단계(3년)목표: 가연성 독물질 적용 성능검증 시험용 연구로 핵연료 설계/제작, 조사/조사후 시험계획 수립
 - 2단계(2년)목표: 노내 조사시험/ 노외 조사후 시험 수행 및 결과분석
- 원자로 2차정지 중수배수 계통 개발
 - 1단계(3년)목표: 연구로 2차정지 중수 배수 계통 설계 및 실험 계획
 - 2단계(2년)목표: 연구로 2차정지 중수배수 성능 검증 실험
- 하부 장착형 핵연료 고정장치 개발
 - 1단계(3년)목표: 연계요건 및 유지보수성을 고려한 핵연료 고정장치 기본설계
 - 2단계(2년)목표: 해석적 및 실험적 방법에 의한 핵연료 고정장치 설계검증
- 급속 삽입 반응도제어장치 개발
 - 1단계(3년)목표: 반응도제어장치 구조/성능해석 및 기본설계
 - 2단계(2년)목표: 반응도제어장치 개발품 제작, 시험시설 구축 및 성능시험
- 경량 제어봉구동장치 개발

- 1단계(3년)목표: 경량 제어봉구동장치 구조/성능해석 및 기본설계
- 2단계(2년)목표: 경량 제어봉구동장치 개발품 제작, 시험시설 구축 및 성능시험

○ 냉각재 상실 완화 및 배제 설계기술 개발

- 1단계(3년)목표: 냉각재상실 완화 및 배제 설계기술 개발 및 기본설계
- 2단계(2년)목표: 냉각재상실 완화 및 배제 설계를 위한 요소기술 검증



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 가연성 독물질 적용 핵연료 설계 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 가연성 독물질 적용 시험용핵연료 상세 설계/제작 조사/조사후 시험 계획 수립 조사후 가연성 독물질 및 핵연료 성능 시험 결과 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 가연성 독물질 적용 핵연료 설계/제작 기술
<ul style="list-style-type: none"> 원자로 2차 정지 중수배수 계통 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 연구로 2차 정지 중수 배수 계통 설계 및 실험 요건 개발 연구로 2차 정지 중수배수 성능 검증 실험장치 구축 및 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 인허가 요건을 만족하는 중수배수 계통 설계기술 및 설계자료
<ul style="list-style-type: none"> 하부 장착형 핵연료 고정장치 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 연계요건 및 유지보수성을 고려한 핵연료 고정장치 기본 설계 해석적 방법에 의한 핵연료 고정장치 설계검증 고정장치 부품 시제작/종합 검증시험 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 하부 고정 장치 설계/제작 기술

<ul style="list-style-type: none"> • 급속 삽입 반응도 제어장치 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 급속 삽입 반응도제어장치 개념개발 • 반응도제어장치 구조/성능해석 • 시제품 제작 및 성능시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 반응도제어장치의 급속 삽입을 위한 설계 및 제작 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 경량 제어봉 구동장치 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 제어봉구동장치 기본설계 및 구조/성능해석 • 개발품 제작 • 시험시설 구축 및 성능시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 경량 제어봉구동장치 설계 및 제작 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 냉각재 상실 완화 및 배제 설계기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각재상실 완화 및 배제 설계기술 개발 및 기본설계 • 냉각재상실 완화 및 배제 설계를 위한 요소기술 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 배관 및 냉각수 방출 방지 관련 기기 설계 기술

2) 연구로 미확보 안전해석 기술 개발

□ 기술의 정의

○ 연구로 확률론적 안전성 평가기술 개발

- 연구로는 발전로에 비해 방사선원이 작고 상대적으로 안전하여 최근까지 확률론적 안전성평가는 인허가의 의무 사항이 아닌 권고 사항이었음. 그러나 규제 강화 추세에 따라 개괄적으로 수행하던 연구로의 확률론적 안전성 평가를 발전로 수준에 근접하는 정도의 기술 및 체계 개발이 요구됨.

○ 연구로 핵연료 손상사고 방사선 영향 평가기술 개발

- 연구로에서 핵연료의 손상 시 핵분열 생성물의 방출량과 수조를 포함한 각 계통에서의 확산 및 거동을 해석 평가하는 기술
- 연구로는 사고 시 방사선원향 평가의 주요인자인 핵연료 및 기기/계통의 설계특성이 발전로와 상이함. 연구로 설계특성을 고려한 핵분열생성물의 방출량과 계통에서의 확산 및 거동 해석기술 확보를 통해 방사선 영향평가의 정확성과 신뢰성을 높일 수 있음.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- HANARO와 JRTR의 경우, 주요 안전계통 및 공정계통에 대해 Level 1 PSA만 수행함. 기장로 및 HANARO 주기적 안전성 평가 시 강화된 PSA 결과를 규제기관에서 요구할 것으로 예상됨.
- 연구로의 사고 시 방사선원향 평가 관련 연구개발은 전무한 상태임. 연구로의 설계특성은 발전로와 상이함에도 불구하고, 1962년 미국에서 개발한 발전로 핵연료용 방사선원향(TID-14844)과 평가방법론을 연구로 인허가 및 관련

연구에 적용하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 원자력 선진국들은 연구로에 대해 전과정(Level 1,2,3)의 확률론적 안전성 평가를 수행, 특히, 인구가 밀집한 유럽의 경우 연구로 건설시 Level 3 PSA 결과까지 요구함.
- 미국, 프랑스, 일본, 러시아 등 원자력 선진국들은 사고 시 방사선원향에 대한 실험을 바탕으로 연구로 핵연료 용융 시 핵분열생성물의 방출량과 계통에서의 확산 및 거동 해석 기술을 개발하여 연구로 설계 및 안전성 평가에 사용하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 연구로의 성능 향상과 대형화, 그리고 안전에 대한 규제 강화에 따라 국내외 규제기관에서 연구로의 인허가 및 주기적 안전성 평가 시에도 확률론적 안전성 평가 결과를 거의 필수로 요구하는 경향임.
- 연구로의 성능과 경제성 향상을 위해 U-Mo 등 새로운 핵연료가 개발되고 있고, 안전 규제도 점차 강화되는 추세임. 연구로 안전성 평가의 최종 기준인 방사선영향 평가의 신뢰도 향상과 인허가의 기본 자료인 방사선원 평가 자료와 기술을 확보해야 연구로 공급국으로써 위상 강화를 기대함.

□ 기술개발 수행체계

- PSA 해석 코드 체계 수립 및 평가 모델 개발은 연구계 자체 수행
- 방사선원향 관련 실험계획 및 검증실험, DB 구축, 통합코드 개발은 연구계에서 실험관련 제작은 산업체가 수행함.
- 연구로 확률론적 안전성 평가 기술 개발
 - 1단계(3년)목표: 연구로의 확률론적 안전성 평가 자료 수집 및 DB화, 연구로 LEVEL 1 PSA 체계 확립, 하나로 LEVEL 1 PSA 재수행으로 확인
 - 2단계(2년)목표: 연구로 LEVEL 2 & LEVEL 3 PSA DB 구축 및 평가체계 확립
- 연구로 방사선 영향평가 통합시스템 개발
 - 1단계(3년)목표: 국·내외 연구로 사고 방사선원향 자료 수집 및 평가 기술 개발
 - 2단계(2년)목표: 연구로 방사선 결말 통합코드 개발



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 연구로 확률론적 안전성 평가 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 연구로의 확률론적 안전성 평가 자료 수집 및 DB화 연구로 LEVEL 1 PSA 체계 확립 연구로 LEVEL 2 & LEVEL 3 PSA DB 구축 및 평가체계 확립 	<ul style="list-style-type: none"> 연구로 PSA 코드 체계 구축 및 평가 DB
<ul style="list-style-type: none"> 연구로 방사선 영향 평가 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> U-Mo 핵연료 방사선원향 방출/거동 실험 계획 및 실험 실험자료 이용 핵분열생성물 방출/확산 해석 모델 개발 정상 및 사고 시 방사선원향 평가 모듈, 대기확산 및 기상자료 평가 모듈, 피폭선량 평가 모듈 개발 GUI 기반 통합 해석코드 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 연구로 핵연료 핵분열 생성물의 방출 및 거동 실험자료 및 평가 기술 방사선 영향평가 통합 평가 코드

3) 연구로 설계코드 개발 및 검증

□ 기술의 정의

○ 노심 핵설계코드 개선 및 검증

- 연구로 노심 설계 시 최적 설계 및 효율적인 설계변경에 대응하기 위하여 결정론적 노심 핵설계 코드체계를 수립하여 연구로 노심설계의 유연성을 확보하는 것이 필요함.

○ 노심 열수력 설계코드 개선 및 검증

- 지금까지는 단일채널 열수력 해석이 가능한 제한적인 성능과 간단한 구조의 코드를 개발하여 사용하고 있으나, 사용자 친화적이면서 범용성, 확장성을 갖춘 고유의 노심 열수력 해석코드의 개발이 필요함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- JRTR 노심설계에는 국내에서 개발된 몬테칼로법 코드를 사용하였으나, 설계 변경이나 시운전시험의 분석에 매우 긴 계산시간이 소요되어 효율성이 낮았음.
- HANARO 노심설계 시에는 해외에서 개발된 결정론적 코드체계를 활용하였으나 해외 수출을 위해서는 국내 개발 코드가 필요하나, 연구로 노심설계에 적합한 결정론적 코드체계 개발은 이루어지지 않고 있음. 또한, 한원(연)이 개발한 노심 설계코드가 있으나 연구로 설계에 적용하기 위해서는 연구로 특성을 해석할 수 있는 추가적인 모듈 개발이 필요함.
- 미국, 일본 등에서 개발한 노심열수력 코드를 도입 사용하여 왔으나, 해외 수출시 지적재산권 문제가 발생함. 이에 따라 단순한 단일채널 열수력 해석 코드를 개발하여 사용하였으나, 범용성 확장 및 코드 성능 개선이 필요함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 최근 연구로 노심 해석에는 확률론적 방법에 의한 몬테칼로 방법을 많이 적용하고 있으나, 노심설계의 신속성 및 유연성을 고려하여 결정론적 핵설계 코드를 지속적으로 사용하게 될 것임.
- 국제 수준의 성능을 갖춘 우리 고유의 핵설계, 노심열수력 해석코드, 그리고 안전해석 코드를 보유함으로써 세계 연구로 시장 경쟁력 강화를 기대함.

□ 미래동향 예측

- 최근 연구로 노심 해석에는 확률론적 방법에 의한 몬테칼로 방법을 많이 적용하고 있으나, 결정론적 핵설계 코드에 의한 노심설계의 신속성 및 유연성을 확보하는 것이 필요함.
- 우리나라 위상에 걸맞는 국제적 수준의 성능을 갖춘 고유의 핵설계, 노심열수력 해석코드, 그리고 안전해석 코드를 보유함으로써 국제 연구로 시장 경쟁력 강화를 기대함.

□ 기술개발 수행체계

- 코드 개발 및 검증은 모두 연구계에서 자체적으로 수행.

- 안전해석 코드는 발전로 해석을 위해 개발한 SPACE 코드를 연구로 적합하도록 개선하는 과제가 기 수행중임.
- 노심 핵설계코드 개선 및 검증
 - 1단계(2년)목표: SRAC 코드 확보 및 JRTR 설계자료와 비교 검증
 - 2단계(3년)목표: 국내 고유 설계코드 개발
- 노심 열수력설계코드 개선 및 검증
 - 1단계(3년)목표: 범용 연구로 노심 열수력 설계 코드 개발
 - 2단계(2년)목표: 코드 검증 및 성능 개선/보완



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 노심 핵설계 코드 개선 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 결정론적 코드인 SRAC 확보 및 JRTR 등 연구로 설계자료와 비교 검증 국내 고유 설계코드 개발 (기존 코드 체계 개선 또는 신규 개발) 	<ul style="list-style-type: none"> 전산코드 검증 자료 연구로 특성 모델
<ul style="list-style-type: none"> 노심 열수력 설계 코드 개선 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 봉형 및 판형핵연료에 적용 가능한 범용 연구로 노심 열수력 설계 코드 개발 열수력 상관식 및 검증 실험자료 조사 검토 개발된 코드의 검증 및 성능 개선 및 보완 	<ul style="list-style-type: none"> 봉형 및 판형 연구로 노심의 열수력 해석에 사용 가능한 범용성 다양한 열수력 상관식 및 계산 모델 적용이 용이한 확장성

4) 연구로 열수력 검증 시험

□ 기술의 정의

○ 판형 핵연료 열수력 설계 검증실험

- 대부분의 연구로에서 사용하는 판형핵연료 채택 연구로의 설계 및 인허가를 위해 판형 핵연료관련 다양한 열수력 실험을 수행하여 고유의 열수력 설계자료를 획득하고 DB를 구축함.

○ 운전 및 과도조건 노심 안전성 향상 검증실험(부압배관 파손 검증실험)

- 연구로의 운전조건에서 부압배관 파손 시 발생하는 이상유동 관련 모사실험을 수행하여 연구로의 안전성 향상과 인허가에 기여할 실험 자료를 확보함.

○ 사고 조건 노심 안전성 향상 검증실험

- 연구로에 발생 가능한 사고조건에서 실험과 실험결과의 분석적 방법을 통해 핵연료 건전성을 정량적으로 보장함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 판형핵연료 모사 사각유로에서 CHF 실험이 일부 수행되기도 하였으나, 특정한 조건에서 매우 제한적인 실험이었고, 실험결과도 매우 적어서 열수력 설계에 적용하기에는 턱없이 부족한 상태임.
- JRTR 및 기장로 설계를 위해 사이펀 현상 등 일부 연구로 이상유동과 관련 실험을 수행하였으나 필요한 자료는 많이 부족한 상황임.
- 연구로 설계 및 인허가에 필요한 관련 자료를 해외 문서를 통하거나 해석적 방법을 통하여 확보하였음. 그러나 연구로의 규제 강화와 설계자로서 실험 자료를 규제기관에서 강력히 요구하는 추세임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 연구로 선진국들은 판형핵연료 사용 연구로심과 관련한 다양한 열수력 현상들에 대해 많은 실험 수행을 통해 실험 자료를 확보하여 연구로 설계에 적용하고 있음.
- 연구로 선진국들은 연구로의 설계 및 건설시 정상 및 사고 조건에서 관련 열수력 실험을 수행하고 자체 설계 자료를 확보하고 있음.

□ 미래동향 예측

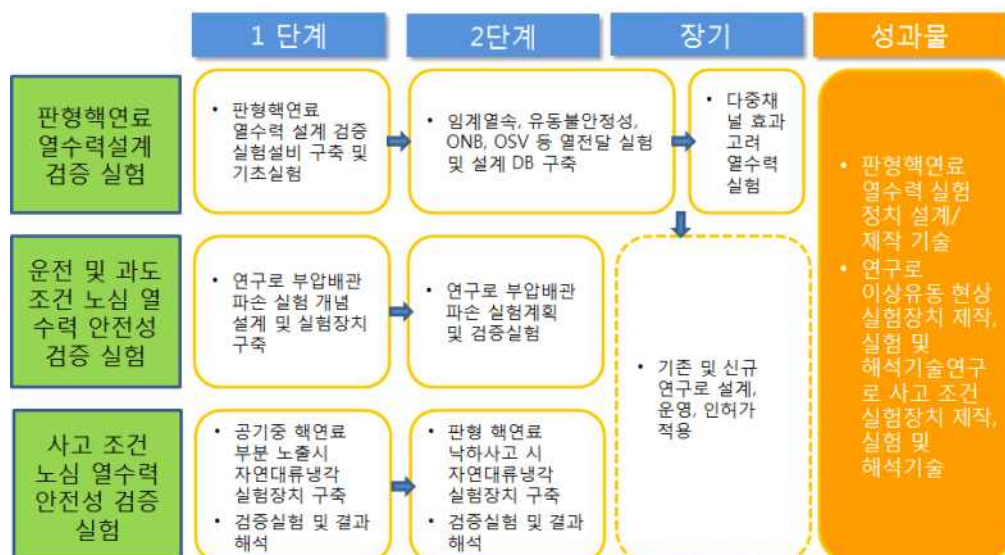
- 점차 강화되고 있는 기존 및 신규 연구로 인허가 과정에 대응하고, 연구로

의 해외 수출을 위해서는 국내 실험자료 확보가 필수적임.

- 국내뿐만 아니라 국외에 새롭게 건설될 연구로에 관련하여 운전 및 과도조건에서 안전성 확보를 보장하기 유체계통에서 이상유동 실험을 기반으로 한 설계 자료가 필요함.
- 사고조건에서 핵연료의 건전성을 정량적으로 입증하기 위한 실험 자료가 인허가를 위해 반드시 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 실험계획 및 요건 수립, 검증실험은 연구계 및 학계에서 제작은 산업체가 수행함.
- 판형 핵연료 열수력 설계 검증실험
 - 1단계(3년)목표: 판형핵연료 열수력설계 검증실험 설비 구축 및 기초실험
 - 2단계(5년)목표: 임계열속, 유동불안정성, ONB, OSV 실험 수행 및 실험자료 획득
 - 3단계(2년)목표: 다중채널 효과를 고려한 열수력실험 및 실험자료 획득
- 운전 및 과도 조건 노심 안전성 향상 검증실험(연구로 부압배관 파손 검증 실험)
 - 1단계(3년)목표: 연구로 부압배관 파손 실험 개념 설계 및 실험장치 구축
 - 2단계(2년)목표: 연구로 부압배관 파손 실험 계획 및 검증실험
- 사고 조건 노심 안전성 향상 검증실험
 - 1단계(3년)목표: 공기중 핵연료 부분 노출시 자연대류냉각 검증실험
 - 2단계(2년)목표: 판형핵연료 낙하사고 시 자연대류냉각 검증실험



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 판형 핵연료 열수력 설계 검증시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 판형핵연료 열수력 설계 검증 실험설비 구축 및 기초실험 • 임계열속, 유동불안정성, ONB, OSV 등 열전달 실험 및 설계 DB 구축 • 다중채널 효과를 고려한 열수력실험 및 실험자료 획득 	<ul style="list-style-type: none"> • 판형핵연료 열수력 실험 장치 설계/제작 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 운전 및 과도 조건 노심 안전성 향상 검증시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로 부압배관 파손 실험 개념설계 및 실험장치 구축 • 연구로 부압배관 파손실험 계획 및 검증 실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로 부압배관 파손 검증 실험장치 제작, 실험 및 해석 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사고 조건 노심 안전성 향상 검증시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 판형핵연료의 공기 중 부분 노출 시 자연대류냉각 실험장치 구축 및 자연대류 냉각 실험 • 판형핵연료 수조 낙하 시 사고조건 모사 실험시설 구축 및 낙하 상황별 자연대류 냉각 실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로 사고조건 실험장치 제작, 실험 및 해석기술

5) 연구로 및 시험시설 안전성 향상 기술 개발

□ 기술의 정의

○ 연구로 운전 안전성 향상 기술

- 원자로 운전 중 인적오류에 의한 원자로 불시 정지 및 사고가 다수 발생함. 이에 따라 이용성 향상 및 사고율 저감을 위해 자동화 로직이 원자로를 대신 운전하고 인간 운전원은 사고감시에 더욱 집중케 하는 기술
- 연구로 계측기의 열화 및 노화에 따른 건전성을 진단하여 적절한 시기에 유지 보수하여 정확한 계측신호에 의해 연구로 안전운전을 향상하는 기술
- 인적 수행도를 향상시켜 원자로 운전원의 오류를 저감시킬 수 있는 HSI (Human System Interface) 기술
- 원자로의 안전 운영을 위해서는 정확한 제어봉가 측정은 필수임. 동적 제어봉가 측정 기술은 기존의 방법에 비해 실험시간과 정확성을 많이 향상시킬 수 있는 기술

○ 연구로 이용/시험 시설 안전성 향상 기술

- 전기 생산이 주목적인 발전로와 달리 연구로는 의료 및 산업용 동위원소 생산과 중성자 빔 이용 연구 등을 위해 많은 이용 및 운영설비와 실험장치를 함께 설치

함. 연구로 이용/시험시설 사고는 시설 운영요원과 연구자들의 안전과 직결되기 때문에 안전성 향상은 반드시 필요한 기술임.

- 이를 위해서는 동위원소 및 핵물질 취급 시 발생할 수 있는 인적오류와 같은 안전성 문제를 최소화하면서 편의성을 증대할 수 있는 설비 개발이 필요함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 발전로를 대상으로 자동기동 운전 기술에 대한 연구가 일부 수행되고 있으나 연구로/발전로 공히 실제 적용한 사례가 없음.
- 연구로의 계측기 상태진단 연구개발은 전무한 상태임. 발전로에서도 계측기 상태진단 기술이 충분히 확보되어 있다고 볼 수 없음.
- 연구로의 인적 수행도 관련 HSI 기술 적용 및 검증은 JRTR 사업을 통하여 매우 제한적으로 개발 및 적용된 바 있음. 발전로의 경우도 터치스크린 등 기본적인 HSI 기술이 적용된 사례는 있으나, 현장에서 검증 및 적용된 사례는 전무함.
- 연구로의 경우, 정적 제어봉가 측정법을 기반으로 초과반응도와 제어봉가를 측정하고 있음. 발전로는 적합한 동적 제어봉가 측정법을 개발하여 설계 신뢰도를 확보하기 위한 실험을 수행하고 있음.
- 1990년대 건조한 연구로인 HANARO를 기반으로 한 일부 이용/시험시설의 설계/이용 기술을 보유함. HANARO의 안전성 향상을 위해 기 설치된 시험설비의 안전성 강화 및 연구로 수출을 위해 HANARO 미설치 시험설비의 개발이 필요함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 연구로에서 자동운전의 정도와 기술이 적용된 결과는 공개되지 않음.
- IAEA NP-T-1.2 보고서에서 온라인 계측기 진단기술이 제시되고 있으나, 현실적인 적용성 측면에서 확인되었다고 볼 수 없음.
- 연구로의 경우 인적 수행도 관련 HSI 기술 적용 및 검증한 사례를 찾아보기 어려운 현황임.
- 프랑스는 재가동이 승인된 CABRI 연구로의 영출력 노물리 실험에서 자체 개발한 동적제어봉가 측정법을 적용하였음. 미국은 발전로에서 동적 제어봉가 측정법의 정확도를 확보하기 위한 실험 자료를 구축하고 있음.
- 연구로 선진국들은 각자 자국의 연구로에 사용되는 이용/시험시설에 대해 안전성과 이용편의성이 향상된 설계 기술을 확보하고 또한 지속적 개선을

통해 기술을 개발하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 연구로의 고성능 추세에 따라 안전성이 향상된 연구로 개발을 위해 자동 기동/운전 기술의 개발, 평가, 인허가 및 실제적용을 위한 연구 수행이 필요함. 건설규모와 규제요건 등을 고려, 연구로에 우선 적용 검토가 필요함.
- TMI 및 체르노빌 사고, 그리고 후쿠시마 사고는 부적절한 HSI 설계와 인적 오류가 야기한 사고로 평가되고 있음. 이에 따라 인적수행도를 향상시켜 운전원의 오류를 저감시킬 수 있는 HSI 기술의 개발 및 검증 요구가 점차 증대되고 있음.
- 연구로는 운전중 작업자가 원자로 건물에 수시로 출입하므로 정확한 신호를 제공하는 핵계측기가 설치되어 연구로 운전 및 작업자의 안전을 향상시켜야 함.
- 국내외적으로 연구로에 대한 안전규제 강화로 이용/시험시설 사고에 대해서도 연구로 사고해석과 관련된 초기사건으로 분류하여 강력히 규제하는 추세임. 연구로에서 이용/시험시설 사고는 시설 운영요원과 연구자들의 안전과 직결되기 때문에 시험시설의 안전성 향상 설계/이용 기술개발은 연구로를 운영하는 한 계속될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 핵심기술의 개념 개발 및 검증실험은 연구계에서 제작은 산업체가 수행함.
- 연구로 자동운전 기술 개발
 - 1단계(3년)목표: 연구로용 자동기동운전 기법 개발 및 검증시스템 구축
 - 2단계(2년)목표: 개발 기술 검증 및 연구로 설계 적용
- 계측기 상태진단 기술 개발
 - 1단계(3년)목표: 대상 계측기 선정 및 적용 상태진단 기술 확인 프로토타입 구축
 - 2단계(2년)목표: 계측기 상태진단 기술 적용성 확인
- 인적수행도 향상 기술 개발
 - 1단계(3년)목표: 연구로에 적용할 HSI 기술 개발 및 검증 환경 구축
 - 2단계(2년)목표: 검증시험 수행 및 개선된 HSI 기술 확립
- 동적 제어봉가 측정기술 개발

- 1단계(3년)목표: 동적 제어붕가 측정 방법론 및 3D 동특성 노심해석 전산코드 개발
- 2단계(2년)목표: 동적 제어붕가 측정시스템 구축 및 검증

○ 연구로 이용/시험시설 안전성 향상 요소기술 개발

- 1단계(3년)목표: 안전성이 향상된 동위원소 및 핵물질 등 취급 및 운영 설비 설계
- 2단계(2년)목표: 운영설비 시제작 및 성능 검증 시험



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 연구로 자동운전 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로용 자동 기동/운전 기법 개발 및 검증 시스템 구축 • 개발 기술 검증 및 연구로 설계 적용 방안 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 인공지능에 기반한 최적 운전 파라미터 계산 기술
• 연구로 계측기 상태진단 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 대상 계측기 선정 및 적용 기술 조사 • 계측기 상태진단 기술 확인 프로토 타입 구축 • 계측기 상태진단 기술 적용성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로 계측기 상태진단 기술
• 인적 수행도 향상 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로에 적용할 대상 HSI 기술 개발 • 검증 환경 구축 • 검증 시험 수행 및 개선된 HSI 기술 체계 확립 	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로 인적수행도 기술 및 검증 기술
• 동적 제어붕가 측정기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로 동적 제어붕가 측정 방법론 개발 • 3D 동특성 노심해석 전산코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로에 적합한 3D 동특성 코드와 제어붕가 해석 모델

	<ul style="list-style-type: none"> • 동적 제어붕가 측정시스템 구축 및 검증 	
<ul style="list-style-type: none"> • 연구로 이용/시험 시설 안전성 향상 요소기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 동위원소 및 핵물질 등 안전성 및 이용성이 향상된 운영설비 개념 개발 • 운영설비 상세설계 • 설비의 시제작 및 성능 검증 시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 운영설비 설계 및 제작 최적화 기술

2.3 소듐냉각고속로 안전 기술

2.3.1 개요

- 소듐냉각고속로 안전성 향상 프로그램은 다음과 같이 3개 분야의 3단계 기술로 구분
 - 금속연료 안전성 검증을 위한 핵연료 성능평가 기술, 노내시험 기술 및 혁신적인 금속연료 제조기술
 - 소듐유동 정밀해석, 안전해석, 중대사고 대응 및 운전성능 해석 기술 개발을 통한 소듐냉각고속로 안전성 및 성능향상 기술
 - 소듐 종합효과시험, 소듐-물 반응 배제 기술, 사고 대응 기술 및 소듐기기 원천 기술

2.3.2 금속연료 안전성 시험 및 검증 기술

가. 기술 개요

- 이슈 및 문제점
 - 금속연료의 노내 연소거동을 정확히 분석 및 예측하기 위해서는 고정밀의 핵연료 성능분석 코드 개발이 필요함.
 - 금속연료의 조사시험 자료는 금속연료 거동 및 성능 모델링에 사용되는 핵심 자료로서 핵연료 인허가를 위한 필수 자료임.
 - 금속연료 안전성 검증을 위해서는 노내 및 노외 과도 안전성 시험 필요함.
- 기술개발 필요성
 - 금속연료 노내 연소과정 중에 발생하는 여러 물리적 현상을 종합적으로 고려하여 핵연료 거동을 정확히 분석하기 위해서는 고정밀의 다물리/다차원

핵연료 성능분석 코드 개발이 필요함.

- U-Zr 금속연료의 고연소도 조사시험 자료를 확보하고 TRU 함유 금속연료의 소각성능과 노내 건전성을 검증할 수 있는 다양한 고속로 조사 시험이 필요함.
- 고연소도 금속연료 및 TRU 함유 금속연료의 노내 및 노외 과도 안전성 시험을 통하여 검증시험 DB의 확충이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) TRU 핵연료 성능평가 및 노내시험 기술

□ 기술의 정의

- 고정밀 다물리/다차원 핵연료 성능분석코드 개발을 통한 고연소도 금속연료 및 TRU 함유 금속연료 성능분석 기술
- 고연소도 금속연료 및 TRU 함유 금속연료의 소각성능 종합 시험(BOR-60, VTR)을 통한 DB 확보
- 노내(TREAT) 및 노외 과도 안전성 시험을 통한 고연소도 금속연료 및 TRU 함유 금속연료의 과도현상 규명, 모델 검증 및 DB 확충

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 금속연료의 정상 및 과도상태 성능분석 인허가용 코드로 LIFE-METAL을 선정하고 ANL과 공동개발을 진행하였으나, LIFE-METAL 코드는 축 방향 열전달을 무시하고 일차원 열해석을, 일반화 평면 변형률 가정 하에 핵연료의 기계적 해석을 수행하며, 열해석 및 기계적 해석 모두 비연성 방법으로 이루어짐.
- BOR-60 고속 실험로에서 국내에서 제작한 금속연료봉 및 피복관 조사시험을 수행 중이며, TRU 함유 금속연료가 장전된 고속로를 개발하고 있지만 연소 및 소각 성능 검증 자료가 매우 부족함.
- 국내 금속연료의 과도상태 성능 검증을 위해 1차 하나로 조사시험을 통해 조사후시험 자료를 확보하고 이를 이용하여 저연소도 금속연료봉의 노외 과도 안전성 시험을 수행하였으나, 고연소도 금속연료봉의 노내 및 노외 과도 안전성 시험을 통한 DB 확충이 필요한 상황임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 INL은 최근에 경수로 산화물연료에 대한 연성해석 방법을 적용한 다물리/다차원 핵연료 성능분석코드인 BISON을 개발하였으며, 소듐냉각고속로의 금속연료에 대하여 확장하고 있음.
- 러시아는 BOR-60 원자로를 이용하여 다양한 조성의 핵연료와 피복관 조사 시험을 진행 중이며, 일본은 TRU 핵연료의 연소 성능 검증을 위하여 METAPHIX 조사시험을 수행하였고 조사후시험 중임. 미국은 EBR-II, FFTF에서 많은 금속연료 시험을 수행하였고, ATR에서 TRU 핵연료를 시험 중임.
- 미국은 1980년대 중반에 조사된 U-Zr, U-Pu-Zr 금속연료에 대하여 TREAT 시설을 이용한 노내 과도 안전성 시험 및 과거 EBR-II 와 FFTF 조사 금속연료봉으로 노외 과도 안전성 시험을 수행하였음. 최근에는 ATR 조사 금속연료로 노외 과도시험을 수행하였음.

□ 미래동향 예측

- 각국은 다양한 조성의 핵연료 조사거동을 정확히 예측하기 위해 고정밀의 다물리/다차원 핵연료 성능분석코드를 지속적으로 개발 및 검증할 것으로 예상됨.
- 미국은 핵연료와 재료 조사 시험을 위한 신형 고속 연구로인 VTR을 2025년 건설하는 목표로 연구를 진행 중이며, 건설 완료 시 이를 활용한 다양한 조사시험을 통해 DB를 지속적으로 구축할 것으로 예상됨.
- 미국은 TREAT 운전 재개에 따라 TRU 함유 금속연료에 대한 노내 과도 안전성 시험 및 VTR에서 조사된 금속연료를 활용한 노외 과도 안전성 시험 수행이 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 고정밀 다물리/다차원 핵연료 성능분석 코드
 - 1단계(5년) : TRU 함유 금속연료봉 개별 성능모델 및 코드 모듈 개발
 - 2단계(5년) : 완전연성해석 방법을 적용한 고정밀 다물리/다차원 핵연료 성능분석 코드 개발 및 TRU 금속연료 조사시험 자료를 활용한 검증
- 핵연료봉 고연소도 및 소각성능 종합시험 (BOR-60, VTR)
 - 1단계(5년) : BOR-60 금속 연료봉 10 at.% 연소 자료 및 조사후시험 자료 확보, VTR TRU 금속연료봉 조사시험 리그 개발
 - 2단계(5년) : VTR TRU 금속연료봉 조사시험 준비 및 소각 성능 자료 확보

○ 핵연료봉 과도 안전성 시험 (TREAT)

- 1단계(5년) : TRU 함유 금속연료봉 과도특성 예비분석, 노내 과도 안전성 시험 요건 설정, 리그 설계
- 2단계(5년): 노내 과도 안전성 시험 및 DB 구축

○ 조사연료봉 노외 과도 안전성 시험

- 1단계(5년) : 2차 하나로 및 BOR-60 조사시험을 통한 조사연료 및 조사후시험 자료 확보
- 2단계(5년): 2차 하나로 및 BOR-60 조사연료 과도 안전성 시험 결과 확보

고정밀 다물리/다차원 핵연료 성능분석코드	<ul style="list-style-type: none"> • TRU 함유 금속연료봉 개별 성능모델 및 코드 모듈 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 완전연성해석 방법을 적용한 고정밀 다물리/다차원 핵연료 성능분석코드 개발 • TRU 금속연료 조사시험 자료를 활용한 검증
핵연료봉 고연소도 및 소각성능 종합 시험 (BOR-60, VTR)	<ul style="list-style-type: none"> • BOR-60 금속 연료봉 10 at.% 연소 자료 및 조사후시험 자료 확보 • VTR TRU 금속연료봉 조사시험 리그 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • VTR TRU 금속연료봉 조사시험 준비 및 소각 성능 자료 확보
핵연료봉 과도 안전성 시험 (TREAT)	<ul style="list-style-type: none"> • TRU 함유 금속연료봉 과도특성 예비분석 • 노내 과도 안전성 시험 요건 설정 • 리그 설계 	<ul style="list-style-type: none"> • 노내 과도 안전성 시험 및 DB 구축
조사연료봉 노외 과도 안전성 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 2차 하나로 및 BOR-60 조사시험을 통한 조사연료 및 조사후시험 자료 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 2차 하나로 및 BOR-60 조사연료 과도 안전성 시험 결과 확보

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 고정밀 다물리/다차원 핵연료 성능분석코드 	<ul style="list-style-type: none"> • TRU 함유 금속연료봉 개별 성능모델 및 코드 모듈 개발 • 완전연성해석 방법을 적용한 고정밀 다물리/다차원 핵연료 성능분석코드 개발 및 TRU 금속연료 조사시험 자료를 활용한 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 완전연성해석 방법을 적용한 고정밀 다물리/다차원 핵연료 성능분석코드 개발
<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료봉 고연소도 및 소각성능 종합 시험 (BOR60, VTR) 	<ul style="list-style-type: none"> • BOR-60 금속 연료봉 10 at.% 연소 자료 및 조사후시험 자료 확보, VTR TRU 금속연료봉 조사시험 리그 개발 • VTR TRU 금속연료봉 조사시험 준비 및 소각 성능 자료 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 금속핵연료봉의 고연소 조사시험 자료 및 TRU 금속 연료봉의 소각 성능 자료 확보
<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료봉 노내 과도 안전성 시험 	<ul style="list-style-type: none"> • TRU 함유 금속연료봉 과도특성 예비분석, 노내 과도 안전성 시험 	<ul style="list-style-type: none"> • TRU 함유 연료봉에 대한 과도상태에서의 전반적인

(TREAT)	요건 설정, 리그 설계 • 노내 과도 안전성 시험 및 DB 구축	노내 거동 규명 및 모델검증을 통한 안전성 향상 기술
• 조사연료봉 노외 과도 안전성 시험	• 2차 하나로 및 BOR-60 조사시험을 통한 조사연료 및 조사후시험 자료 확보 • 2차 하나로 및 BOR-60 조사연료 과도 안전성 시험 결과 확보	• 고연소 조사 연료봉의 노외 과도 안전성 시험 결과 확보

2) 안전성 강화 금속연료 혁신 제조기술

□ 기술의 정의

- 기존 금속연료 대비 연소성능 및 안전성이 향상된 신개념 금속연료 혁신 제조 기술
- 재활용 제조공정 기술을 개발하고 핵물질 손실을 제어하여 재순환 핵연료 기술의 안전성과 경제성을 확보하고 방사성폐기물을 저감하는 기술
- 고안전성 요건으로 설계/제조된 핵연료를 목표 온도/연소도까지 성능 검증 및 성능 평가 기술
- TRU 함유 핵연료의 안전성 확보를 위한 혁신 피복관 및 부품 제조 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원심분무 기술을 이용한 입자형 핵연료 제조 및 연속 구조장치를 활용한 핵연료 제조기술에 대한 기초연구를 수행한 바 있음.
- 환형 핵연료 제조기술의 경우 유압식 프레스 장비를 활용하여 모의 환형 금속연료심 압출제조를 수행하였음.
- 금속연료 재활용 제조공정을 정립하기 위한 후보기술을 도출하고, 사용후핵연료 재순환의 당위성 확보를 위한 핵물질 손실을 목표치를 만족할 수 있는 기술을 개발 중임.
- 희토류 함유 금속연료 관련 하나로 1차 조사시험 완료, 노외 상호반응 시험 DB 구축 및 성능모델을 개발 중이며, 민감 물질 함유 금속연료는 한미 공동 연구를 통하여 미국 ATR에서 조사시험 수행 중임.
- 기존 금속연료 피복관 (HT9) 보다 크리프 강도가 우수한 피복관을 개발하였으며, TRU 함유 (~30 wt.%) 핵연료에 사용할 배리어 피복관 개발 및 노내

실증시험(ATR)을 수행 중임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 입자형 핵연료 제조기술은 미국, 러시아 등에서 개발되었으며, BOR-60용 핵연료 제조 및 조사시험까지 수행한 이력이 있음.
- 미국 INL은 재순환 공정과 연계한 압출형 환형 금속연료(U-10Zr) 제조 기술을 실험실 차원에서 개발하고 있음.
- 미국은 TRU 물질을 활용한 금속연료 시제품을 제작하였으며, 핵물질 관리 및 손실을 제어할 위한 기술은 개발 중임.
- 일본은 U-10Zr 금속연료의 재활용 주조기술을 확보하였으나, TRU 핵연료를 활용한 실험 및 손실을 제어 기술은 확보하지 못함.
- 미국은 실험로인 EBR-II를 통하여 금속연료에 풍부한 경험을 축적하였으며, 민감물질 함유 금속 연료의 고연소도, 고안전성 평가를 위하여 ATR 연구로 등에서 지속적인 조사시험을 수행 중임.
- 원자력 선진국(미국, 일본, 인도 등)은 재순환 공정과 연계한 금속연료 기술 개발과 금속연료-피복관 상호반응을 억제할 내면 처리 피복관을 실험실 차원에서 개발하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 금속연료의 미래 개발 방향은 소듐 공정이 생략 가능한 신개념 핵연료를 도입하는 것에 초점이 맞춰지고 있으며, 이에 따른 입자형 연료 및 환형 핵연료 제조기술에 대한 수요가 증가할 것으로 예상됨.
- 입자형 및 압출형 핵연료 제조 기술은 기존 주조 공정에서 발생하는 폐기물 절감 및 추가적인 핵물질 손실제어가 가능한 혁신 제조기술이며, 금속연료 뿐만 아니라 다양한 핵연료 제조기술 분야에 응용이 가능한 기술임.
- 사용후핵연료의 독성, 부피 저감을 위한 필수요소인 핵물질 손실을 제어기술은 사용후핵연료 안전관리 기술임과 동시에 고온재료 주조 반응방지기술로 확장성이 매우 큰 기술임.
- 고안전성, 고연소도 혁신 금속연료 기술개발 및 성능 검증으로 핵연료 활용도 및 신뢰도를 획기적으로 향상시켜 미래 에너지원 확보 및 세계 기술을 선도할 필요성이 있음.
- 혁신 피복관 및 부품제조 기술은 미래형 원자로 외에 가동원전의 안전성 향

상 및 타 산업체 (내열, 내화학 plant)에의 응용이 가능하며, 국내 철강 산업체의 인프라 창출이 가능한 기술임.

□ 기술개발 수행체계



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 신개념 금속연료 혁신 제조기술 	<ul style="list-style-type: none"> 안전성 향상 신개념 금속연료 혁신 제조기술 개발 신개념 금속연료 혁신 기반기술 및 응용기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 신개념 입자형 금속연료 분말제조 및 충전기술 신개념 환형 금속연료 압출 제조공정 기술
<ul style="list-style-type: none"> 핵물질 재활용 및 손실제어 혁신공정 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 핵물질 손실율 0.1% 이하 반응방지 혁신기술 개발 재활용 주조공정 품질관리 기술개발 핵물질 안전제어 및 관리기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 손실율 0.1% 이하의 반응방지 혁신 공정기술 재활용 주조공정의 품질관리 기술 핵물질 안전제어 및 관리기술
<ul style="list-style-type: none"> 신개념 금속연료 안전성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 고안전성 요건 신개념 금속연료 노내 연소성능 검증 (ATR, 하나로) 희토류 및 민감물질 함유 신개념 금속연료 노외 안전성 검증 금속연료 고안전성 평가 모델 검증 및 기술성 입증 	<ul style="list-style-type: none"> 고안전성 금속연료 노내 조사시험 및 연소 DB 구축 신개념 금속연료/피복관 노외 상호반응시험 및 평가 신개념 금속연료 성능 모델 및 평가체제 구축
<ul style="list-style-type: none"> 안전성 강화 피복관 및 부품 혁신 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 안전성 향상 피복관 및 부품 기술 개발 안전성 향상 혁신 피복관 및 확장 가능 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 크리프 성능 향상 금속연료 피복관 기술, 덕트 제조기술 피복관 혁신 내면 코팅 기술, 상용급 라이너 피복관 제조기술

2.3.3 안전성 및 성능 향상 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 풀형 소듐냉각고속로는 소듐냉각재와 소듐냉각재 상부의 불활성 가스가 원자로용기에 충전되어 있는 구조이며 고온, 대기압에서 운전됨.
- 불활성 가스와 액체 소듐 사이 계면에서 기포가 발생하여 노심까지 유입될 경우 원자로 안전성에 문제가 발생할 수 있음.
- 매우 작은 Prandtl 수를 갖는 액체 소듐냉각재의 특성상 풀 내부에서는 다양한 열유동 현상이 발생할 수 있음. 이러한 열유동 현상으로 인하여 내부 구조물의 열적 손상 및 건전성 문제가 발생할 수 있음.
- 중대사고 초기단계 및 천이단계 전과정 해석기술 개발을 통한 중대사고 정량적 분석 기술이 부재함.
- 중대사고의 다양한 조건 및 새로운 에어로졸 입자 주입 시에 오차를 야기하는 현재 중대사고 선원항 분석 전산코드의 고도화를 통해 정확성 및 신뢰성 향상이 주요한 규제 이슈 중 하나임.
- SFR 개발국들에서 소듐 누설과 같은 사고가 발생하여 장기간 원자로가 정지하거나 폐로되는 사례가 발생하였음.
- 최근 계속되는 한반도 지진발생 빈도 증가에 따라 설계초과지진 이상의 강진에 대한 원자로 구조 안전성에 대한 우려가 고조됨.
 - '16. 9. 12. 경주지진 발생 (규모 5.8), '17. 11. 15. 포항지진 발생 (규모 5.4)
- 이러한 다양한 경우의 소듐 누설 사례들로부터 이를 원천적으로 방지할 수 있는 기술개발과 이에 적극적으로 대처할 수 있는 진단 및 대응기술의 확보, 및 지진에 대한 원자로의 안전성과 성능 향상을 위한 요소기술 개발을 통해 현안 해결과 성능 개선으로 대국민 수용성을 획기적으로 높일 필요가 있음. 이를 위하여 다음과 같은 핵심 연구기술 개발이 필요함.
 - 운전 과도 성능 모사 기술 개발
 - 고온 비탄성 해석 기술 개발
 - 고온 구조물 내진 및 면진 기술 개발
 - 고온 구조 건전성 감시 및 진단 기술 개발

□ 기술개발 필요성

- 기포의 노심유입에 의한 소듐냉각고속로의 안전성 저해를 방지하기 위해서 원자로용기 내부의 자유표면 거동 예측 및 분석 기술과 가스혼입 방지 기술이 필요함.
- 풀형 소듐냉각고속로는 박막 원자로용기 특성으로 슬로싱, 열성충화, 열스트라이핑 등에 의한 내부구조물 영향분석, 기기성능 및 안전성 분석, 지진 발생 시 소듐냉각재-노심집합체 상호작용을 고려한 노심의 진동응답 거동 등의 분석이 필요함. 따라서 소듐냉각재 특성을 고려한 열유동 현상에 대한 다중스케일 열유체 통합 정밀해석기술 및 소듐냉각고속로의 운전특성에 기인하여 나타나는 유체와 구조가 연계된 다양한 설계문제를 해결하기 위한 고온 환경에서 열유동해석과 구조해석을 통합한 해석기술이 요구됨.
- 중대사고 거동 해석기술 개발을 통한 금속연료 SFR 고유안전특성 및 중대사고 조기 종료 가능성을 정량적으로 분석함.
- 소듐냉각고속로 중대사고 선원항 분석 전산코드 수입이 어려운 상황에서 독자적 기술확보 및 수입대체가 요구되며, 중대사고 선원항 분석 핵심기술 자립을 통한 SFR 설계의 안정성 및 경제성 확보가 필요함.
- 크립, 라체팅, 탄성추종, 크립피로 등의 고온 비탄성 거동을 보이는 구조물은 일반적인 탄성해석이 불가능하므로 비탄성 거동을 정확하게 모사할 수 있는 모델 개발이 필요함.
- 풀형 원자로인 지진에 취약한 구조로 내진 및 면진기술 적용이 필수적이며, 특히 SFR 원자로용기와 같은 고온박막구조물의 경우 지진 슬로싱에 대한 건전성확보는 필수 요소이므로 이를 위한 상세평가기술 개발이 필요함.
- 고온 구조 건전성 감시 및 진단 기술은 구조물의 수명 예측 및 유지보수 전략 수립에 중요 기술로 개발 선도국들은 상용화 미실시는 물론 기술유출을 꺼리고 있기 때문에 독자기술 개발이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 고온 소듐유동 정밀해석 기술

□ 기술의 정의

- 풀형 소듐냉각고속로의 자유액면 가스혼입 해석 모델 및 방지 기술
- 고온의 유체와 구조물의 상호작용을 연계하여 해석할 수 있는 유체-구조 통

합 해석 기술

- 소듐냉각고속로에 특정된 기기 및 열유동의 다중스케일 현상을 조직화하고, 요소 현상 및 종합적인 계통 거동에 대한 다중스케일 정밀해석 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한원(연)은 풀형 소듐냉각고속로의 자유액면 가스혼입의 해석 및 예측을 위한 기초연구를 수행하였음.
- 한원(연)은 열성층화, 열스트라이핑 현상에 대한 RANS, LES 열유동 해석기술, 고온구조물 건전성 평가 및 해석기술을 보유하고 있으나 고온 유체-구조 연계 해석기술은 보유하고 있지 않음. 노심집합체를 단일열의 노심집합체로 단순화하여 유체 부가질량을 고려한 노심지진응답 해석 기술은 보유함.
- 한원(연)은 소듐냉각고속로 원형로를 설계수준 2 (Design Level 2) 수준으로 개발하였으며, 주요 기기의 안전성 및 성능 평가를 위해 특정 현상에 다중스케일을 반영한 해석을 수행하였음. 기존 경수로에서는 플랜트의 안전성 및 성능을 극대화하기 위해 계통, 기기 및 유동의 다양한 스케일을 반영한 정밀해석 기술을 구축하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 프랑스는 기체혼입 및 와류 발생과 관련된 기준을 제시하고 관련된 주요 문제 및 기체의 발생원에 대한 연구를 수행하였음. 일본은 실험을 통해 다양한 스케일에서 자유표면 유동과 기체혼입에 대한 연구를 수행하였으며, 소듐 자유표면의 와류로 인한 기체혼입의 임계 기준을 찾기 위한 연구를 수행하였음. 인도는 실험을 통해 기체혼입을 피할 수 있는 방법을 연구하였으며, 수치해석을 통해 기체혼입의 기구를 분석하는 연구를 수행하였음.
- 미국은 CASL, MOOSE, Nek5000 등의 노심, 유체, 구조해석을 통합한 다물리 해석 툴을 개발하여 유체-구조 연계 문제를 해석함. 프랑스는 유체-구조 연계 해석을 통해 풀형 소듐냉각고속로에서의 슬로싱 현상을 평가함. 인도는 유체-구조 상호작용을 고려한 노심지진응답 해석 코드 개발 및 검증을 수행함.
- 소듐냉각고속로에 특정된 기기 및 유동의 다중스케일 현상을 조직화하고, 요소 현상의 다중스케일 정밀해석을 수행함.

□ 미래동향 예측

- 해석 기술 및 컴퓨터 성능의 발달로 높은 수준의 자유액면 가스혼입 해석

및 방지 기술이 개발될 것으로 예상됨.

- 소듐냉각고속로는 고온 환경에서 유체 및 기계계통을 설계함으로 인해 경수로에서는 나타나지 않는 다양한 설계 문제들이 발생할 수 있음. 시행착오를 줄이고 설계의 신뢰성을 높이기 위해서 소듐냉각고속로 설계특성에 기인해서 발생 가능한 구조건전성 문제들을 높은 신뢰도로 예측하고 발견된 문제를 해결할 수 있는 통합해석기술의 개발이 이루어 질 것임.
- 고온 소듐의 다중스케일 정밀해석을 통해 설계의 불확실성 및 과도한 설계여유도를 감소시킬 수 있음. 따라서 상용로 기술수준에 접근하고 있는 소듐냉각고속로 개발에서 경제성 향상 및 안전성 확보를 위해 계속적으로 수요가 예상되는 기술임.

□ 기술개발 수행체계



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 자유액면 가스혼입 평가 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 풀형 소듐냉각고속로 자유액면 가스혼입 해석 모델 개발 풀형 소듐냉각고속로 자유액면 가스혼입 검증시험 풀형 소듐냉각고속로 자유액면 가스혼입 방지 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 가스혼입 해석 모델 및 검증기술 가스혼입 방지 기술
<ul style="list-style-type: none"> 고온 유체-구조 연계 통합해석 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 오픈소스 기반 격자생성 프로그램, 고온 열유동 해석 프로그램, 고온구조 해석 프로그램 개발 및 통합 	<ul style="list-style-type: none"> 고온 열유동 해석 기술 고온 구조 해석 기술 고온 열유동-구조 연계

	<ul style="list-style-type: none"> • 노심지진 유체-구조 연계 해석기법 개발 • 유체-구조 통합 프로그램을 이용하여 슬로싱, 열성층화, 열스트라이핑, 유체기인진동 해석 및 프로그램 검증 • 노심지진 시험 및 방법론 검증 	<p>해석 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> • 노심지진 해석 방법론
<ul style="list-style-type: none"> • 다중스케일 열유체통합 정밀해석 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 소듐냉각고속로에 특정된 기기 및 유동의 다중스케일 현상의 조직화 • 열유동 요소 현상의 다중스케일 정밀해석 모델 • 종합적인 원자로계통 열유체 현상을 분석하기 위해 요소 다중스케일 통합평가체제 	<ul style="list-style-type: none"> • 각 다중스케일에 최적화된 열유동 해석 모델 및 평가기술 • 다중스케일 모델 연계를 위한 통합평가체제 구현

2) 안전성 대응 및 해석 기술

□ 기술의 정의

- 소듐냉각고속로 노심 해석을 위해 다차원 노물리 특성을 반영한 고신뢰도 핵반응 단면적 생산 기술
- 소듐냉각고속로 노심 주요 반응도에 대한 핵반응 단면적의 공분산 기반 불확도 계산 및 보정인자 생산 기술
- 소듐냉각고속로 계통과도안전해석 코드 비등모델 개발 및 검증
- 소듐냉각고속로 다차원 유로 막힘 해석코드 개발 및 검증

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한원(연)은 가압경수로 해석을 위한 다차원 핵반응 단면적 생산 전산코드를 개발하여 보유하고 있으나, ~keV 이상의 에너지에서의 공명 처리 방법 및 기능 부재로 소듐냉각고속로 같은 고속로 대상으로 적용이 불가함. 서울대학교 및 UNIST 등에서 고속로 대상 핵반응 단면적 생산 연구를 수행하고 있지만, 아직 실제 설계 업무에 적용할 수준에 이르지 못함. 한원(연)은 미국 Argonne National Laboratory의 MC²-3 전산코드를 도입하여 노심설계에 활용하고 있음.
- 한원(연)은 공분산 기반 불확도 계산을 위해 자체적으로 DeCART-MUSAD 전산 코드 체제를 개발하여 가압경수로 및 VHTR 해석에 활용하고 있으나, 열중성자 에너지 기반의 전산코드 체제를 소듐냉각고속로에 바로 적용할

수는 없음.

- 한원(연)은 MARS-LMR 코드를 사용하여 설계기준사고 및 설계확장사고 해석을 수행 중이나, 본 코드는 냉각재 비등 현상에 대한 해석이 불가능하여 설계확장사고에 활용이 제한적임.
- 한원(연)은 축 방향 유량이 지배적인 소형 유로 막힘 사고범위 내에서만 부수로해석코드(MATRA-LMR-FB)를 이용해 집합체 내 유로 막힘 사고를 해석함. MATRA-LMR-FB 전산코드에 점근사 방식의 노심 반응도모델이나 다차원 노심 계산 모델을 결합하여 온도제한 효과를 반영할 수 있는 열유체 해석코드 개발은 시도된 적이 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 Argonne National Laboratory에서는 MC²-3를 자체 개발하여 고속로용 다균 핵반응 단면적을 생산하고 있으며 최근 MOC(Method of Characteristics) 기반 다차원 계산 모듈을 개발하였음. 프랑스 및 일본은 각각 ERANOS 및 SLAROM 전산코드를 사용하여 다균 핵반응 단면적을 생산하고 있음.
- 미국은 일반섭동이론(Generalized Perturbation Theory) 기반 PERSENT 전산코드를 자체 개발, 보유하고 있으며, 이를 활용하여 핵반응 단면적 기반 불확도 해석을 수행함. 프랑스의 경우 자체적으로 불확도를 평가 및 보정인자를 생산하여 노심 설계에 활용하고 있음.
- 미국 Argonne National Laboratory 국립연구소는 SAS4A/SASSYS-1 전산코드를 개발, 검증하였고, 현재 이 코드를 이용하여 냉각재 비등 현상이 발생하는 설계확장사고 전산해석을 수행 중임.
- 미국, 일본, 프랑스 등은 유로입구 완전 폐쇄 사고에 대해 Neutronics와 결합한 다차원 열유체 해석 코드를 개발, 검증하여 사용하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 소듐냉각고속로 해석에 있어서 계산의 신뢰도를 높이고, 계산된 결과에 대한 불확도를 정밀하게 추정하는 일은 설계 여유도를 확보할 수 있을뿐더러 검증 실험에 대한 수요를 줄여주는 효과를 기대할 수 있으므로, 이러한 연구에 대한 수요는 전 세계적으로 늘어날 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

다차원 수송계산 기반
다균 핵반응단면적 생산
전산코드 개발

- 다차원 수송계산 모듈 개발
- 공명영역 처리 방법론 개발

- 공명영역 처리 방법론 구현 및 모듈 통합
- 코드 확인 및 검증

공분산 기반 반응도계수
불확도 평가 및 보정인자
생산 기술

- GPT 기반 민감도 분석 방법론 개발
- 주요 핵종 민감도 분석 수행

- 핵반응 단면적 기반 불확도 분석 모듈 개발
- 보정인자 생산 및 검증

안전해석 코드 비등모델
개발 및 검증

- 냉각재 비등 해석 모델 개발
- MARS-LMR 전산코드와 통합 개발 수행

- 국내 및 해외 실험자료 활용을 통한 비등 모델 검증

다차원 유로막힘 해석코드
개발 및 검증

- 집합체 내 다차원 유로해석 모듈 개발
- 노심 설계 코드와 연계, 다차원 안전해석 코드 개발

- 다차원 유로막힘 해석 코드 검증

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 다차원 수송계산 기반 다균 핵반응단면적 생산 전산코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 3차원 수송계산 모듈 개발 • 공명영역에서의 중성자 감속 계산 모듈 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 3차원 임의 기하구조 중성자 수송 방법론 • 공명영역 처리 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 공분산 기반 반응도계수 불확도 평가 및 보정인자 생산 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 공분산 기반 민감도 분석 모듈 개발 • 불확도 및 보정인자 생산 모듈 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • Generalized Perturbation Theory 기반 민감도 및 불확도 분석 기술 • 핵반응 단면적 보정인자 생산 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 안전해석 코드 비등모델 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각재 비등 해석 모델 개발 • MARS-LMR 코드와 통합 개발 수행 • 국내/외 실험자료 활용을 통한 비등 모델 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각재 비등 실험 자료 분석을 통한 수치해석적 비등 해석 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 다차원 유로막힘 해석코드 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 집합체 내 다차원 유로해석 코드 확보 • 노심 설계 코드와 연계, 다차원 해석코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 다차원 열유동 해석 기술

3) 중대사고 대응 및 해석 기술

□ 기술의 정의

- 소듐냉각고속로의 안전성 향상을 위해 물리적, 화학적 물성특성을 활용하여 운전원 조치 없이 급격한 운전조건(온도 또는 압력)의 변화에 대응하여 완

전 피동으로 원자로를 정지할 수 있는 기술을 의미함.

- 소듐냉각고속로 중대사고 초기단계 및 천이단계에 대해 기계적 방법을 사용하여 해석하는 전산코드
- 소듐냉각고속로 중대사고 선원항 분석이 가능한 전산코드의 독자적 개발을 통한 안전성 분석 기술 신뢰성 향상 및 중대사고 결말분석 기반기술 확보

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한원(연)은 소듐냉각고속로의 중대사고 완화 목적으로 재료의 물리적 열팽창 차이를 이용하는 피동 원자로정지 개념을 채택하여 개념개발이 이루어졌으며 완성도를 향상시킬 필요가 있음.
- 한원(연)은 중대사고 초기단계 해석 전산코드인 SAS4A를 2014년부터 미국 아르곤 국립연구소와 공동개발 연구를 수행하여 1단계 개발을 완료하였고, 2단계 연구를 수행 중임.
- 소듐냉각고속로 중대사고 선원항 해석을 위하여, 한원(연)은 미국 FAI사와 협력을 통해 Level-2 확률론적 안전성 분석(PSA)용 소듐냉각고속로 중대사고 선원항 해석코드 ISFRA (Integrated Sodium Fast Reactor Analysis Program)를 2016년에 개발하였고, 관련 노심 열수력 모델 해석 성능 향상을 위해 SAS4A 전산코드와 연계시킨 START (SFR Transient And Radionuclide Transport Code Package) 코드를 ANL 위탁 연구를 통해 2017년에 개발하였음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 세계적으로 고속로에는 피동 원자로정지 개념으로 물리적, 화학적 물성특성을 활용하는 여러 방식이 제안되고 있고 현재 신뢰도를 향상시키는 단계에 있음.
- 미국 아르곤 국립연구소는 중대사고 초기단계 해석 전산코드인 SAS4A를 개발 검증하였고, 현재 본 코드를 이용하여 중대사고 천이단계까지 해석이 가능하도록 연구개발을 수행 중임.
- 소듐냉각고속로 중대사고 선원항 해석을 위하여, 미국 SNL은 USNRC 소유의 MELCOR-LMR 및 CONTAIN-LMR 코드를 개발 중에 있으나 국내에 도입이 이루어지지 않고 있음.

□ 미래동향 예측

- 신형 원전의 안전성 향상 및 국제 경쟁력 강화를 위해 원자력 선진국들은

고유의 신뢰성 있는 피동정지개념을 개발하고 기술의 완성도를 높이기 위한 노력을 기울일 것으로 예상된다.

- 미국, 일본, 프랑스 등은 현재 연구개발을 진행 중이고 이와 병행하여 실험 결과를 활용한 검증 연구를 수행 중임.
- 소듐냉각고속로 중대사고 선원항 해석에 있어서, 기존의 보수적 집중모델(lumped model)을 지양하고 다물리 현상을 고려한 기계론적(mechanistic) 모델을 적용한 평가 방법론이 중요해 질 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 신개념 피동정지계통 기술
 - 1단계(3년) : 중력, 열팽창, 압력 차를 이용하는 다양한 신개념 피동작동계통 제안 및 타당성 평가
 - 2단계(2년) : 신개념 피동정지계통 후보안에 대한 실물 제작 및 실증시험
 - 3단계(5년) : 신개념 피동정지계통 보완 설계 및 실제 환경 실증시험
- 중대사고 전과정 해석 기술
 - 1단계(3년) : 용융핵연료 분출 거동 해석모델 개발을 통한 중대사고 발생 시 이의 거동에 의한 사고 현상에 대한 정량적 분석
 - 2단계(5년) : 용융핵연료 거동 해석모델 개발 및 실험 결과를 사용한 검증을 통해 전산코드 해석 신뢰성 향상
 - 3단계(2년) : 중대사고 전과정 해석 전산코드 개발을 통한 금속핵연료 SFR 고유안전성 및 중대사고 조기종료 특성 정량적 분석
- 중대사고 선원항 해석모델 개발 및 검증
 - 1단계(6년) : 에어로졸 관련 전산코드 신뢰성 향상 기술개발
 - 2단계(4년) : 복합적 물리현상을 동반하는 에어로졸 관련 전산코드 개발



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 신개념 피동정지계통 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 중력장, 재료 물리적 특성, 수력하중 등을 이용한 원자로 정지 개념 수립 제어봉 삽입 확인 방안 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 열팽창 특성을 이용한 피동정지계통 설계기술 큐리포인트 특성을 이용한 피동정지계통 설계기술 수력하중 특성을 이용한 피동정지계통 설계기술 기계식 및 전자식 제어봉 삽입 확인 시스템 설계기술
<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 전과정 해석 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 용융핵연료 분출 거동 해석모델 개발 및 실험데이터 활용 모델 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 용융핵연료 유동, 분산, 응고 거동 기계적 해석모델
<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 선원향 해석모델 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 선원향 해석 전산코드 신뢰성 향상 및 전산코드 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 선원향 평가기술

4) 성능 향상 기술 및 검증

□ 기술의 정의

- 소듐냉각고속로 운전 중 예상되는 원자로 주요 과도 운전조건을 모사하고

평가할 수 있는 기술

- 고온기기 설계에 적용하고 있는 탄성해석법의 과도한 보수성을 줄이기 위해 크립/크립피로/라체팅/탄성추종과 같은 고도의 비탄성 거동에 대한 상세 비탄성 해석기술과 모델을 개발함으로써 고온구조물의 설계여유도를 높여서 심층적 안전성을 확보하고, 설계 경제성을 증진시킬 수 있는 기술
- 고온 원자로 박막구조물의 지진 안전성 향상을 위해 지진하중을 저감할 수 있는 면진기술개발과 지진 하중 및 지진 슬로싱 하중에 대하여 구조 건전성을 확보 할 수 있는 내진평가 기술
- 고온 구조물의 온도와 압력 데이터로부터 구조물에 발생하는 크립-피로 손상을 실시간으로 평가하는 기술과 고온 구조물 내부의 감육이나 균열과 같은 결함을 정밀하게 탐지할 수 있는 진단 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국표준형 원전의 경우 성능해석 코드인 KISPAC 코드에 의해 성능관련 설계기준사고 해석, 제어계통 제어논리 개발, 설정치 분석, 시운전 지원 등의 업무를 수행 중이나 소듐냉각고속로를 위한 성능해석 목적의 코드는 전무하여 개발이 필요한 상황임.
- 화력발전소나 화학플랜트의 고온구조에 대한 평가는 원자력에 적용할 수 없는 하위 수준의 기술이고, 고온 원자로 316SS 재료에 대하여 점소성해석 모델을 제안한 사례는 있지만 고온기기 전반에 대한 비탄성해석체제의 구축이나 이를 이용한 구조건전성 평가 사례가 없음.
- 액체금속로 KALIMER의 슬로싱 거동 분석 연구를 통해 내부구조물을 포함한 구조물의 단순 모델에 대한 슬로싱 해석 절차를 보유하고 있으나 상세 슬로싱 해석 기술은 미보유 상태임.
- 불투명한 소듐내부를 원격으로 가시화할 수 있는 웨이브가이드 초음파 센서에 대한 원천기술을 확보하고 적용 가능성을 평가한 바 있음. 국내 가동 원전에 적용하는 피로감시시스템(NuFMS)은 고온의 소듐냉각고속로에는 적용할 수 없고 이를 위한 고온 조건과 크립에 의한 손상을 평가하는 기초기술의 개발이 시도되었음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국의 경우 RELAP, SASSYS 코드 등 경수로 및 소듐냉각고속로의 안전해석 코드가 존재하지만 소듐냉각고속로 설계 및 성능해석에 적용하기에는

해석시간이 과도하게 소요되어 무리가 있음. 이에 미국 ANL(Argonne National Laboratory)에서는 Helium Closed-Loop Brayton Cycle 동적거동 해석목적으로 개발된 운전과도 성능해석 코드(GPASS 코드)를 개발하였고, 소듐냉각고속로의 운전과도 성능해석을 위한 코드는 기초적인 수준임. IAEA에서는 가압수형 및 비등수형 경수로, 가압중수형 원자로에 대한 시뮬레이터를 운전원 교육 및 훈련목적으로 개발하였지만 소듐냉각고속로에 대한 시뮬레이터는 현재 개발 중임.

- 프랑스는 RCC-MRx 코드의 부록에서 고온기기의 비탄성해석방법의 기초적 지침을 제시하고 있고, 미국 ASME 코드 위원회에서도 비탄성해석방법을 수록하기 위한 논의가 진행되고 있음. 일본도 고온원자로 설계평가에 비탄성 해석방법을 적용하기 위한 코드 제정과 방법론 개발을 위한 연구노력을 하고 있지만 공개하고 있지는 않은 실정이고, 인도는 최근 완공한 PFBR의 일부 고온기기 설계평가에 샤보시 비탄성해석모델을 적용한 평가를 수행한 사례가 있음.
- 일본(CRIEPI), 미국(ANL) 등은 공동연구를 통해 지진 슬로싱현상에 대한 축소모델 시험을 수행하였고, 해석적으로 지진슬로싱을 예측할 수 있도록 자체 코드 개발 및 검증을 수행한 바 있음.
- 프랑스(CEA), 일본(JAEA), 미국(ANL), 인도(IGCAR)는 고온 소듐 유량 측정, 고온 구조물 체적검사 및 소듐내부 가시화를 위한 센서 개발과 성능향상에 대한 연구를 활발히 수행하고 있음. 미국과 인도는 고온 화력발전소의 크립-피로 손상을 감시하기 위하여 Creep-FatiguePro, Fatigue-Creep Monitoring System을 개발하였으나 고온 원자로에 적용하기 위한 기술 개발과 적용사례는 없음.

□ 미래동향 예측

- 소듐냉각고속로의 운전 안전성 향상을 위한 설계와 운전 안전성 평가와 검증 등의 대국민 수용성 증진을 위한 연구가 중요해 질 것임. 소듐냉각고속로의 제어계통 설계 및 성능 해석 기술 개발을 통해 4세대 원전 설계 요소 기술 확보가 가능함. 또한 성능해석 코드 체제가 구축 완료될 경우 계통 운전조건 변화에 의한 열수력 거동 정보를 구조물의 과도 해석을 위한 입력등으로 활용할 수 있을 것으로 판단됨.
- 고온 비탄성해석기술은 전세계적으로 학술적인 시도가 많이 이루어지고 있고 ANSYS, ABAQUS와 같은 범용유한요소해석코드에도 지속적으로 반영되고 있음. 또한 세계적으로 대표적인 설계코드인 프랑스 RCC-MRx에서 기초

적인 지침이 수록되어 갱신되고 있고 미국과 일본도 곧 자국의 설계코드에 수록될 것으로 예상됨. 향후 고온 원자로 설계는 설계여유도 증진과 설계 경제성 제고를 위해 보수적인 탄성해석방법보다는 상세비탄성해석방법의 적용이 확대될 것으로 예측되므로 우리도 이에 대비하여 기반기술을 확보 함으로써 기술 경쟁력을 높이면 충분히 대처할 수 있을 것임.

- 미국, 일본과 같은 기술 선도국들에서는 고온 원자로의 3차원 면진시스템 개발을 추진하고 있는데 현재 걸림돌인 수직면진에 대한 기술개발이 활발히 이루어질 것으로 예상됨. 고온 박막구조물의 지진슬로싱 현상에 대한 상세해석기술이 개발되고 실험을 통하여 실증되면 지진 구조건전성이 획기적으로 향상될 것으로 예측되며 우리나라도 해석기술개발은 물론 검증실험을 통하여 면진 및 지진구조건전성 평가기술 분야에서 선도국들과 기술경쟁력을 확보 할 수 있다고 판단됨.
- 고온 소듐냉각고속로의 구조건전성을 진단하기 위한 센서 측정기술과 고온 크립-피로손상감시기술은 아직까지 상용화되지는 않았지만 기술 선도국들을 중심으로 꾸준히 개선되고 있고 우리도 국제협력과 자체기술 확보 노력을 통하여 지속적인 투자를 하고 있는 상태임. 하드웨어가 동반된 기술 분야이기 때문에 보다 적극적인 예산 투입이 이루어지면 수년 내로 고온구조건전성 감시 및 진단 원천기술을 확보하여 기술수출 경쟁력 제고와 대국민 수용성을 증진하는데 기여할 수 있을 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

	단기(5년)	중기(5년)	장기	성과물
운전 과도 성능 모사 기술	<ul style="list-style-type: none"> 플랜트 운전 안전성 향상 제어계통 및 운전 성능해석 코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 플랜트 운전 성능해석 코드 검증 및 안전성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐냉각 고속로 성능향상 기술 및 검증 완료 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐냉각고속로 제어계통 설계 및 운전 성능평가 요소 기술 확보 고온기기 바탄성해석체제 및 고온설계 평가기술 확립 고온박막구조물 지진슬로싱에 대한 지진안전성 향상기술 확보 고도화된 고온구조물 건전성 감시 및 진단기술 확보
고온기기 및 구조 건전성 향상기술	<ul style="list-style-type: none"> 고온기기 비탄성 전산해석체제 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 고온기기 상세비탄성 전산해석체제 고도화 		
고온박막구조물 지진안전성 향상 기술	<ul style="list-style-type: none"> 원자로용기 및 내부기기의 유연성 고려 유체-구조물 상호작용 해석기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 지진슬로싱 응답 최소화 시스템 개발 및 검증 		
고온구조 건전성 감시 및 진단기술	<ul style="list-style-type: none"> 고온구조물 건전성 감시 및 진단을 위한 핵심 요소기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 고온구조물 건전성 감시 및 진단기술 고도화 및 성능검증 		

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 운전 과도 성능 모사 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐냉각고속로 운전 성능 해석 코드 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐냉각고속로 제어계통 설계 및 운전 성능평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> 고온 기기 및 구조 건전성 향상 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ANSYS, ABQUS 범용유한요소해석코드를 활용한 고온 상세비탄성 전산해석체제 구축 및 고도화 크립/크리피로/라체팅/탄성추종 등의 고도와 고온비탄성거동 평가 및 분석기술 구축 고온구조 설계기술의 고도화 고온재료 및 구조물 손상시험, DB구축 및 검증기술 확립 	<ul style="list-style-type: none"> 고온 크립피로손상 평가기술 고온 라체팅거동 평가기술 고온불연속구조 탄성추종거동 평가기술 고온 상세비탄성 전산해석기술 고도화 고온재료(316SS, G91) 비탄성특성시험 및 DB구축 고온구조 크립피로 손상시험
<ul style="list-style-type: none"> 고온 박막 구조물 지진 안전성 향상 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 고온박막구조물을 사용하는 소듐냉각고속로의 면진설계 및 면진장치 적용성연구 및 최적화기술 면진장치와 고온박막 원자로 구조물의 상호작용(슬로싱) 해석기술 구축 및 고도화 면진시스템 성능검증시험 고온구조물 지진진동해석, 시험 및 진동저감기술 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 풀형원자로 슬로싱과 면진시스템 상호작용 평가기술 수직지진 대응방안 연구 면진장치 최적화 기술 구조물-냉각재 상호작용해석(슬로싱) 기술
<ul style="list-style-type: none"> 고온 구조 건전성 감시 및 진단 기술 	<ul style="list-style-type: none"> SFR 고온배관에 적용할 고온 크립-피로손상 감시시스템 개발 및 검증 고온 크립-피로손상 감시시스템의 고도화 및 실용화기술 구축(지적재산권 등록) 소듐내부 가시화기술 고도화 고온구조물 체적검사기술 고도화 증기발생기 튜브검사장비 자동화 	<ul style="list-style-type: none"> 고온 크립-피로 감시시스템 고도화, 검증 및 실용화 기술 기기/구조물 실시간 진단기술 고온구조물 체적검사기술 SFR 가동중검사 장비 자동화 및 검증기술

2.3.4 소듐 원천 및 응용기술 실증

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 제4세대 소듐냉각고속로의 혁신적 안전계통 설계개념은 인허가 시 실험적 검증이 필수적이므로 한국원자력연구원에서는 요소기술 검증의 일환으로 2009년부터 소듐 열유동 종합효과시험을 위한 단계별 프로그램을 추진하고 있음.
- 소듐냉각고속로 냉각재로 사용되는 소듐은 열전달특성이 매우 우수하지만 소듐 누설이 발생할 경우 사고로 이어질 수 있으므로 소듐 누설에 대한 위험성 및 소듐 기기 건전성이 주요 이슈 중 하나임.
- 원자로 및 소듐 시험시설에서 소듐 누설이 발생할 경우 누설 감지 및 이에 대한 대처 방안 등이 소듐냉각고속로 주요 현안으로 제기되고 있음.
- 소듐을 작동 유체로 사용하는 계통은 물을 이용하는 계통과 달리 고온 환경을 포함하여 넓은 온도 범위에서 운용되고, 소듐의 화학적 특성으로 인해 외부와 격리 유지되어야 하는 특징이 있음.
- 특히, 증기발생기 전열관 누설에 의해 발생 가능한 소듐-물 반응은 대처 계통(소듐-물반응압력완화계통) 및 사고 대응 절차가 마련되어 있음에도 불구하고, 여전히 소듐냉각고속로 주요 안전현안 중 하나임.

□ 기술개발 필요성

- 소듐냉각고속로의 주요 계통을 축소 모의한 소듐 열유동 종합효과시험장치를 이용하여 계통설계가 완료된 원자로에 대해 잔열제거계통의 성능검증, 잔열제거계통과 일차열전달계통과의 상호영향에 의한 잔열제거성능 등의 안전성을 종합적으로 검증할 필요가 있음.
- 소듐냉각고속로의 대중 수용성 개선 및 구조 신뢰성 향상을 위해서는 주요 소듐 기기에 대해 결함 또는 균열이 발생하기 이전부터 연속 감시가 가능한 온라인 건전성 감시시스템의 개발이 필요함.
- 소듐냉각고속로에서는 소듐 누설 가능성이 매우 낮도록 설계 및 제작이 이루어지며 누설이 발생한 경우에도 ASME Section XI의 관련 규정에 따라 초기에 누설을 다양한 방법으로 신속하게 감지하고 대처할 수 있도록 다중 누설 감지 및 방호 시스템의 개발이 필요함.
- 소듐을 이용하는 계통의 운영에는 모니터링이 필수적이고 이를 위해서는 다양한 형태의 계측기술이 요구됨.
- 국내의 각종 소듐 계측기술 현황은 충분히 성숙되지 않았으며 향후 소듐을 포함하는 액체금속을 이용하는 산업 전반에 활용이 가능하므로 원천 및 응

용기술 개발이 필요함.

- 소듐냉각고속로에서의 소듐-물 반응 사고를 원천적으로 방지하여 소듐-물 반응 관련 현안을 해결할 기술 개발이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 중합효과시험

☐ 기술의 정의

- 소듐냉각고속로의 주요 계통을 축소 모의한 소듐 열유동 중합효과시험장치를 이용하여 계통설계가 완료된 원자로의 안전성을 종합적으로 검증하기 위한 시험

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국원자력연구원에서는 제4세대 소듐냉각고속로의 요소기술 검증의 일환으로 2009년부터 2단계에 걸쳐 소듐 열유동 중합효과시험을 위한 단계별 프로그램을 추진함.
- 2단계에서 구축되는 소듐 열유동 중합효과시험장치는 잔열제거계통의 성능 검증, 잔열제거계통과 일차열전달계통과의 상호영향에 의한 잔열제거성능의 중합효과시험 수행을 주목적으로 함. 이를 위하여 2015년부터 소듐냉각고속로 원형로를 대상으로 잔열제거계통 작동 시 주요 계통 간 상호작용 및 각 기기의 국부 열수력 현상이 잘 보존될 수 있도록 신뢰성 높은 척도해석을 바탕으로 시험장치의 기본 및 상세설계를 완료함.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 일본은 PLANDTL 시험시설을 이용한 Monju의 열유동 특성실험과 잔열제거 중합효과시험을 수행하였으며, JSFR 주요기기 안전운전과 계측 및 중대사고 대처기술 개발을 위한 AtheNa 시험시설 일부를 구축하였음.
- 인도는 SADHANA 시험시설을 이용한 PFBR 잔열제거계통 열유동 특성시험과 중합효과시험을 수행함.
- 프랑스의 경우 ASTRID에 적용할 혁신 설계개념의 기술적 검증을 위한 대형 복합 소듐 시험시설인 CHEOPS를 구축하여 운영함.

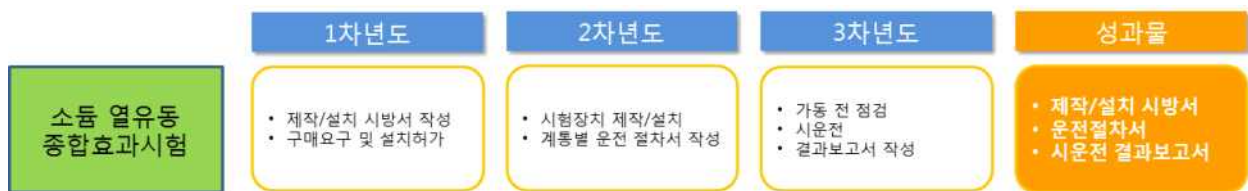
☐ 미래동향 예측

- 구축될 소듐 열유동 종합효과시험장치는 소듐냉각고속로 설계에서 고려되는 주요 가상사고 시나리오가 상세히 모의되며, 이를 통해 얻어진 시험결과 DB는 실제 원자로 계통의 안전성 입증과 관련된 TR 승인에 효과적으로 활용될 수 있음.
- 소듐 열유동 종합효과시험시설의 경우 제4세대 원자력시스템 국제포럼의 CD&BOP(Component Design and Balance-Of-Plant) Project를 통해 관련 정보를 공유하고, 미국의 다목적연구로(VTR) 개발사업과 같은 국제협력 연구의 기반시설로 활용될 가능성이 있음.

□ 기술개발 수행체계

○ 종합효과시험

- 1차년도 : 시험장치 제작/설치를 위한 시방서 작성 및 구매요구
- 2차년도 : 시험장치 제작/설치 및 계통별 운전절차서 작성
- 3차년도 : 시험장치 가동 전 점검 및 시운전



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 소듐 열유동 종합효과시험 	<ul style="list-style-type: none"> 제작/설치 시방서 작성 시험장치 제작/설치 계통별 운전 절차서 작성 시험장치 가동 전 점검 및 시운전 시운전 결과보고서 작성 	<ul style="list-style-type: none"> 계통설계를 마친 원자로의 성능과 안전성 종합 검증 특정주제기술보고서 인증을 위한 시험자료 생산

2) 소듐 열유동 사고 분석 및 대응 기술 향상 연구

□ 기술의 정의

- 소듐 누설 위험성 감시 및 최소화 기술 : 소듐 기기 및 배관계통의 온라인 건전성 감시를 통한 소듐 누설 예방 기술

- 다중 누설 감지 및 방호 시스템 개발 : 다중 누설감지 방법을 활용한 조기누설 감지 및 대처 기술
- 소듐 열유동 과도특성 규명 응용 실험 : 소듐 열유동 과도 특성의 규명을 위한 자연순환 유동특성 분석 기술
- 소듐 계측 원천 및 응용 기술 : 온도, 유량, 압력, 액위, 순도 등 소듐 시스템 물리량 계측 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 상대적으로 저온(~320℃)인 가압경수로에 대해서는 온라인 피로감시 시스템을 개발하여 실제 적용해오고 있으나 고온(>500 ℃) 구조용 및 소듐 시설에 대한 건전성 감시시스템의 개발 사례는 없음.
- 소듐누설감지 관련 wire-type 센서의 적용 경험은 있으나 광섬유, 영상 감지 그리고 ICT/IoT 융합 누설감지 시스템의 연구개발 경험은 없음.
- 한국원자력연구원에서는 제4세대 소듐냉각고속로의 안전성 입증 및 핵심 설계기술 현안 해결을 목적으로 2009년부터 소듐 열유동 시험 프로그램을 진행 중에 있음.
- 소듐 열유동 시험 프로그램의 1단계(2009-2014) 시험장치인 소듐 열유동 개별효과시험장치를 이용하여 2014년에는 주요 소듐 기기에 대한 개별효과시험을 통해 소듐-소듐 열교환기(DHX) 및 나선형 소듐-공기 열교환기(AHX)를 대상으로 하는 성능시험 DB 구축 및 설계/해석 전산코드 검증을 완료함.
- 2015년에는 소듐 열유동 개별효과시험장치를 이용하여 열원(Heat source) 및 열침원(Heat sink)을 갖는 단일유로 배관에서의 소듐냉각재 자연순환 유동발달 특성을 정량적으로 평가하는 실험을 수행함.
- 2단계 소듐 열유동 시험 프로그램으로 2019년까지 설치가 완료될 예정인 소듐 열유동 종합효과시험시설은 기존의 개별효과시험을 통해 확보한 실험 노하우 및 검증 완료된 설계방법론 등을 종합적으로 활용하여 안전계통의 성능입증, 잔열제거계통과 일차열전달계통과의 상호영향 파악 등을 수행할 예정임.
- 국내에서는 수요가 낮아 소듐 계측과 관련된 기술을 보유하고 있는 곳이 매우 제한적이며 대부분 고가의 외국제품을 수입함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국, 독일, 인도 등은 고온 화력(USC) 용도로 온라인 구조건전성 감시 시스템(Creep-Fatigue Pro, Siemens FMS, FCMS)을 개발한 사례가 있으나 실제 플랜트 적용 경험은 제한적이거나 전무하며, 특히 원전 적용 경험은 없음.
- 소듐냉각고속로의 설계, 건설 및 가동 경험이 있는 프랑스, 일본, 미국, 인도 등은 다양한 소듐 및 에어로졸 누설감지 시스템의 연구개발을 수행한 바 있거나(미국) 현재도 진행 중(프랑스, 일본, 인도)에 있음.
- 일본은 PLANDTL 시험시설을 이용한 Monju의 열유동 특성 실험과 잔열제거 종합효과시험을 수행하였으며, JSFR 주요기기 안전운전과 계측 및 중대 사고 대처기술 개발을 위한 AtheNa 시험시설 일부를 구축하였음.
- 인도는 SADHANA 시험시설을 이용한 PFBR 잔열제거계통 열유동 특성시험과 종합효과시험을 수행함.
- 프랑스의 경우 ASTRID에 적용할 혁신 설계개념의 기술적 검증을 위한 대형 복합 소듐 시험시설인 CHEOPS를 구축하여 운영함.
- 소듐관련 선진국인 프랑스, 일본, 러시아는 자국 내 소듐 계측 산업체를 보유하고 있고 소듐 계측관련 상용제품을 판매하고 있음.
- 중국과 인도에서는 소듐 계측관련 산업을 육성하고 있으며 빠른 시일 내 성장할 것으로 기대됨.

□ 미래동향 예측

- 최근 원전 안전성의 중요도에 대한 인식 제고에 따라 누설 발생 이전에 원전 주요 구조(건전재)의 결함 및 누설 예방기술의 연구개발이 향후 활발하게 이루어질 것으로 예상됨.
- 소듐 또는 납 등의 냉각재를 사용하는 제4세대 원전 개발에서 다중 누설감지시스템의 수요는 향후 증가할 것으로 보이며, 원전 선진국 위주로 특히 ICT/IoT 융합 누설감지 시스템의 개발이 활발히 이루어질 것으로 전망됨.
- 소듐 열유동 특성에 대한 가장 핵심적인 성능을 실험적으로 입증하고 제반 실험 데이터베이스를 구축함으로써, 향후 사용후핵연료 관리 문제 해결을 위한 기술옵션인 파이로-고속로 연계 재순환처분기술의 본격적인 연구개발 시 한국형 소듐냉각고속로 개발에 직접 활용 가능한 핵심 기반시설 및 요소 기술로 활용할 수 있음.
- 소듐 계측기술은 향후 소듐 외 다른 액체금속을 이용하는 산업 전반에 적용 가능성이 크고 이러한 액체금속 산업은 지속적으로 성장하고 있는 추세임.

□ 기술개발 수행체계

○ 소듐 누설 위험성 감시 및 최소화 기술

- 1단계(5년) : 소듐 시설 취역 구조의 건전성 감시 시험루프 구축 (건전재), 다양한 모의 하중조건 시험 DB 구축
- 2단계(5년) : 누설 예방 기술 및 실시간 수명예측 기술 개발, 실시간 수명예측 시험 루프 및 시험 DB 구축

○ 다중 누설 감지 및 방호 시스템 개발

- 1단계(5년) : 다중 소듐 누설감지 시험루프 구축, ICT 기반 누설감지 시험 및 시험 DB 구축
- 2단계(5년) : 소듐 시설 누설 방호 시험루프 구축, AI 기반 누설감지·방호 시스템 및 DB 구축

○ 소듐 열유동 과도특성 규명 응용 실험

- 1단계(5년) : 열유동 과도특성 모의용 소듐루프 구축 및 자연순환 유동특성 규명 실험 데이터베이스 구축
- 2단계(5년) : 풀 다차원 자연순환 열유동 특성 규명 소듐 장치 구축 및 과도기 열 유동 데이터베이스 구축

○ 소듐 계측 원천 및 응용 기술

- 1단계(5년) : 소듐 계측기술 확립 및 국산화
- 2단계(5년) : 소듐 계측 응용기술 개발 및 계측기 개선

소듐 누설 위험성 감시 및 최소화 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 소듐 시설 취역 구조의 건전성 감시 시험루프 구축 (건전재) • 다양한 모의 하중조건 시험 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 누설 예방기술 및 실시간 수명예측 기술 개발 • 실시간 수명예측 시험 루프 및 시험 DB 구축
다중 누설 감지 및 방호 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 다중 소듐 누설감지 시험루프 구축 • ICT 기반 누설감지 시험 및 시험 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 소듐 시설 누설 방호 시험루프 구축 • AI 기반 누설감지·방호 시스템 및 DB 구축
소듐 열유동 과도특성 규명 응용 실험	<ul style="list-style-type: none"> • 열유동 과도특성 모의용 소듐루프 구축 • 자연순환 유동특성 규명 실험 데이터베이스 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 풀 다차원 자연순환 열유동 특성 규명 소듐 장치 구축 • 과도기 열유동 데이터베이스 구축
소듐 계측 원천 및 응용 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 소듐 계측기술 확립 및 국산화 	<ul style="list-style-type: none"> • 소듐 계측 응용기술 개발 및 계측기 개선

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 소듐 누설 위험성 감시 및 최소화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐 시설 취약 구조의 건전성 감시 시험루프 구축 및 시험 DB 구축 실시간 수명예측 시험 루프 및 시험 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 고온 구조해석·평가 기술 운전데이터 수집·처리 및 프로그래밍 기술
<ul style="list-style-type: none"> 다중 누설 감지 및 방호 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 다중 소듐 누설감지 시험루프 구축 및 시험 DB 구축 AI 기반 누설감지·방호 시스템 및 시험 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 누설 진단, 감지 및 측정 기술 ICT 기반 센싱 시스템 구축 및 DB 처리 기술
<ul style="list-style-type: none"> 소듐 열유동 과도특성 규명 응용 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 열유동 과도특성 모의용 소듐루프 구축 및 자연순환 유동특성 규명 실험 데이터베이스 구축 풀 다차원 자연순환 열유동 특성 규명 소듐 장치 구축 및 과도기 열유동 데이터베이스 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐 열유동 과도특성 규명 실험 데이터베이스 구축
<ul style="list-style-type: none"> 소듐 계측 원천 및 응용 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐 계측기술 확립 및 국산화 소듐 계측 응용기술 개발 및 계측기 개선 	<ul style="list-style-type: none"> 각종 계측기 개발 계측 성능/효율/안전 개선 및 비용절감

3) 소듐-물반응 배제 기술

□ 기술의 정의

- 소듐냉각고속로의 증기발생기 전열관 누설 사고로 인한 소듐-물 반응을 극소화하거나 배제할 수 있는 신개념 열교환기 기술 및 실효성 검증 기술
- 소듐냉각고속로의 동력변환계통에 물을 작동유체로 사용하는 Rankine 사이클 대신 초임계 CO₂ 또는 N₂를 작동유체로 사용하는 가스 터빈 Brayton 사이클을 채택하여 소듐-물 반응을 원천적으로 배제시킴으로써 차세대 원자로의 안전성을 획기적으로 높일 수 있는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한원(연)은 소듐-물 반응 배제 기술로서 이중벽관 증기발생기, 다중 전열유로 증기발생기, 인쇄기관 증기발생기에 관한 개념설계 수준의 기초연구를 수행하였음.
- 한원(연)은 소듐냉각고속로에 적용할 신개념 동력변환계통으로서 초임계

CO₂ Brayton 사이클에 관한 개념설계 수준의 기초연구를 수행하였음.

- KAIST에서는 CO₂ Brayton 사이클 시험 장치를 구성하여 계통과 주요 기기들의 성능을 검증하는 기초 연구를 수행하였음.

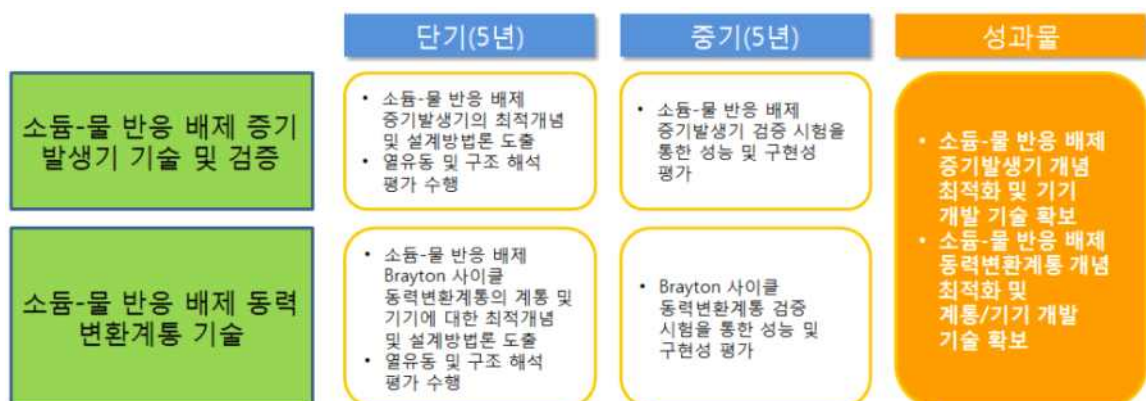
□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 일본은 JSFR 증기발생기에 이중벽관 증기발생기를 채택하였으며, 관련하여 열유동 및 구조 평가를 수행하고 여러 검증 실험도 수행함.
- 영국은 물 전열관과 소듐 전열관 사이에 구리 매트릭스 방어벽을 추가한 구리밀봉 증기발생기 개념을 제안하여 열유동 성능 및 구조적 건전성에 대한 해석 및 실험연구를 수행함.
- 프랑스의 소듐냉각고속로 ASTRID 프로젝트에서는 동력변환계통으로 Brayton 사이클을 채택하였으며, 작동유체는 N₂와 초임계 CO₂를 함께 설계 옵션으로 고려하여 연구를 수행함.

□ 미래동향 예측

- 차세대 원자로의 안전성/신뢰성/경제성을 높이기 위해서는 소듐냉각고속로의 중대한 안전 현안 중의 하나인 증기발생기 전열관 누설 사고로 인한 소듐-물 반응을 배제할 수 있는 기술 연구가 국내외에서 활발히 진행될 것으로 예상됨.
- 소듐-물 반응 배제 증기발생기 및 동력변환계통 기술 개발을 통하여 소듐냉각고속로의 안전성/경제성 향상 및 국민 수용성 증대를 기대할 수 있음.

□ 기술개발 수행체계



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 소듐-물 반응 배제 증기발생기 기술 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐-물 반응 배제 증기발생기 후보개념 도출 전열 성능 및 파손확률 비교 등 후보개념 평가를 통한 최적개념 및 설계방법론 도출 최적개념에 대한 열교환기 사이징 코드 개발 열교환기 상세 열유동 및 구조해석 평가 열교환기 검증시험을 통한 성능 및 구현성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐-물 반응 배제 증기발생기 후보개념 자료 확보 신개념 열교환기 사이징 기술 최적개념 증기발생기 제작 공정 열교환기 열유동 성능 및 구조 해석 기술 열교환기 성능 검증시험 기술
<ul style="list-style-type: none"> 소듐-물 반응 배제 동력변환계통 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐-물 반응 배제를 위한 Brayton 사이클 등의 동력변환계통 기술 동력변환계통 열유동 및 구조 해석 동력변환계통 주요기기 및 계통에 대한 검증시험을 통한 성능 및 구현성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 소듐과 반응하지 않는 초임계 CO₂ 또는 N₂를 작동유체로 사용하는 동력변환계통 설계 기술 Brayton 사이클의 열수력 거동 및 구조 해석 기술 동력변환계통 주요기기 성능 검증시험 기술 동력변환계통 계통운전특성 검증시험 기술

2.4 고온가스로 안전 기술

2.4.1 개요

- ☐ 고온가스로 안전 기술은 고온가스로 안전 설계기술과 고온가스로 안전 요소기술로 분류함.
- ☐ 고온가스로 안전 설계기술은 고온가스로 설계에 필요한 소프트웨어적 기술로서 고온가스로 안전 관련 전산해석코드 개발 및 검증이 핵심 기술임.
- ☐ 고온가스로 안전 요소기술은 고온가스로를 설계/건설/운전 하는데 필요한 하드웨어 기술로서 실험장치의 설계/건설/운전과 실험자료의 획득/분석을 포함하는 기술임.

2.4.2 고온가스로 안전 설계 기술

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 고온가스로 안전 설계기술중 ‘안전해석 코드 GAMMA+ 개발 및 검증’ 기술과 ‘고온가스로 노심 설계코드 개발 및 검증’ 기술은 현재 진행 중인 원자력중장기 연구를 통해 2021년까지 개발이 완료될 예정이지만 ‘역학적 방사선원항 해석 코드 체계 개발’은 아직 미개척분야로 남아있음.
- 고온가스로 안전의 최상위 설계 요건은 방사선학적 관점에서 작업자 및 인근 주민의 피폭 선량기준을 충분히 만족하는 것이지만 기존에 개발한 고온가스로 안전해석 코드(GAMMA+)는 사고 시 열유체적 변수(핵연료 온도 등)에만 초점을 두므로 고온가스로 최상위 설계 요건인 방사선학적 선량기준을 정량적으로 평가할 수 없음.

☐ 기술개발 필요성

- 고온가스로 사고의 전 과정을 방사선학적 관점에서 최적 해석하기 위해서는 역학적 방사선원항 해석 코드 체계 개발이 필수적임.

나. 세부기술 내용

1) 역학적 방사선원항 해석 코드 체계 개발

☐ 기술의 정의

- 역학적 방사선원항 해석 코드 체계는 고온가스로 사고의 전 과정을 방사선학적 관점에서 최적 해석할 수 있는 전산코드 체계임.

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 역학적 방사선원항 해석 체계 연구 경험이 거의 없어 현재 미개척분야로 남아 있음.
- 경계코드로 사용할 수 있는 COPA, POSCA, GAMMA+, RCAP 코드가 KAERI에서 원자력중장기 연구를 통해 2021년까지 국산화 개발 (TRL 5 이상)을 완료할 예정임.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 1970~80년대 FSV 고온가스로를 개발했던 미국 GA사는 역학적 방사선원항 해석할 수 있는 체계를 개발한 바 있음.
- GA사가 개발한 역학적 방사선원항 해석 체계는 MHTGR-350 설계 사업에도 적용되었지만 전 세계적으로 고온가스로 개발이 진행되지 않으면서 약 20~30년간 유지·보수 되지 않아 유명무실한 상태로 남아 있음.

□ 미래동향 예측

- 향후 고온가스로 개발 사업이 본격화 된다면 역학적 방사선원항 해석 코드 체계가 고온가스로 개발에 있어 취약 기술 중 하나로 부상할 것이 자명함.
- 본 기술이 개발될 경우 역학적 방사선원항 규제를 도입하고자 하는 다른 미래형 원자로 개발을 선도할 수 있음.

□ 기술개발 수행체계

- KAERI에서 개발 중인 COPA, POSCA, GAMMA+, RCAP 코드를 역학적 방사선원항 해석 코드 체계의 경계코드로서 활용함. 각 코드들 간 연계해석을 위하여 인터페이스 모듈 개발이 필요함.
- 역학적 방사선원항 해석 코드 체계 개발
 - 1단계(5년)목표: 역학적 방사선원항 해석용 체계 원형 개발
 - 2단계(5년)목표: 역학적 방사선원항 해석용 체계 개선 및 검증

역학적 방사선원항 해석 코드 체계 개발

• 역학적 방사선원항 해석용 체계 원형 개발

• 역학적 방사선원항 해석용 체계 개선 및 검증

2.4.3 고온가스로 안전 요소 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 국내 고온가스로 설계 코드 체계는 NGNP 예비설계 참여 등 국제적으로 인

정반을 정도로 우수하나, 관련 코드 검증 시험자료는 대부분 해외에 의존하고 있음.

- 현재 진행 중인 원자력 중장기 과제를 통해 KAERI에서 UO_2 피복입자핵연료 제조 공정을 개발하였으나 아직 scale-up 단계에 이르지 못하는 못함. 고온안전성과 연소 성능이 우수하다고 알려진 UCO 피복입자핵연료의 경우 국내 제조 경험이 전혀 없음.

□ 기술개발 필요성

- 고온가스로를 설계/건설/운전하기 위해서는 관련 하드웨어 기술과 노하우, 시험자료 축적이 반드시 필요함.
- 현재 진행 중인 원자력 중장기 과제를 통해 고온가스로 설계기술에 대한 원천기술은 국제적 수준에까지 도달하였으나 국내의 고온가스로 요소기술 수준은 원자력 선진국에 비해 상대적으로 뒤쳐져 있음.

나. 세부기술 내용

□ 기술의 정의

- 고온가스로 종합안전성 실증 시험은 고온가스로 원자로 및 RCCS에 대한 축소모형을 설계/제작하여 고온가스로 사고 시나리오를 열유체적으로 종합 실증하는 시험을 수행하고 시험자료를 설계코드 검증에 활용하는 기술임.
- 고온가스로 계통 및 기기 안전성 검증/향상 시험은 제어핵연료블록, 원자로 압력용기 냉각계통, 신개념 PCHE 등의 계통 및 기기 개념을 검증하고 순환기 작동온도를 향상시키기 위한 기술임.
- 고온가스로 핵연료 안전 성능 평가 및 조사 실험은 국내 고유 기술로 개발한 UO_2 피복입자핵연료 제조 공정의 scale-up 기술 개발과 UCO 피복입자핵연료 제조 기술 및 안전 성능을 검증하는 기술임.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 고온가스로 종합안전성 실증시험 연구가 현재까지 전무함.
- 원자력 중장기과제에서 노심열유체해석, 원자로용기 냉각계통 개념 개발, 플레넘 열혼합 등 관련 해석연구가 진행되었거나 현재 진행 중에 있음. KAERI와 국내 대학교는 일반적인 PCHE 열유체 시험과 표준핵연료블록 설계 모델 검증 시험을 수행해왔음.

- KAERI는 실험실 규모(20g/batch)의 피복입자핵연료 (0.5mm UO₂ 연료핵, TRISO 코팅, 연료체) 제조 공정과 피복입자 고유의 특성분석 기술을 확보하고, 1차 조사(4% FIMA) 및 조사후 시험을 완료하였음. 또한 피복입자핵연료의 성능분석 코드 (COPA)을 자체 개발함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 독일, 일본 및 중국은 실험용 원자로를 활용하여 고온가스로 안전성 실험을 수행하였음. 독일과 중국은 폐블형 고온가스로이고, 일본의 핵연료블록은 국내에서 관심 있는 블록형 설계와 다름. 실험용원자로가 없는 미국은 오레건주립대학교에서 건조하여 운영 중인 종합안전성실험장치(HTTF)를 활용하여 각종 고온가스로 사고 모사 시험을 수행하고 있음.
- 750℃ 이하 고온가스로의 경우 실증이 완료되었고, 그 이상인 경우 일본과 중국에서 개별효과 시험 및 실험로 운전 자료가 있음. 중국은 폐블형 고온가스로이고, 일본의 핵연료블록은 형태가 달라 관련 자료를 국내 고온가스로 설계에 활용할 수 없음. 고온가스로 PCHE는 용량 대비 중간열교환기 전체 부피 감소를 위해 다양한 개념들이 연구되고 있음.
- 일본은 연구로 HTTR 가동을 위해 UO₂ 핵연료를 자체 개발하여 공급하고 있으며 중국은 연구로 HTR-10용 UO₂ 핵연료 개발에 이어 최근 HTR-PM용 핵연료 개발을 완료하였음. 미국은 UCO 핵연료 제조 기술을 유일하게 확보하고 있으며 AGR program을 통해 UO₂ 및 UCO 핵연료의 성능 평가를 위해 8차례의 조사시험을 진행 중에 있음.

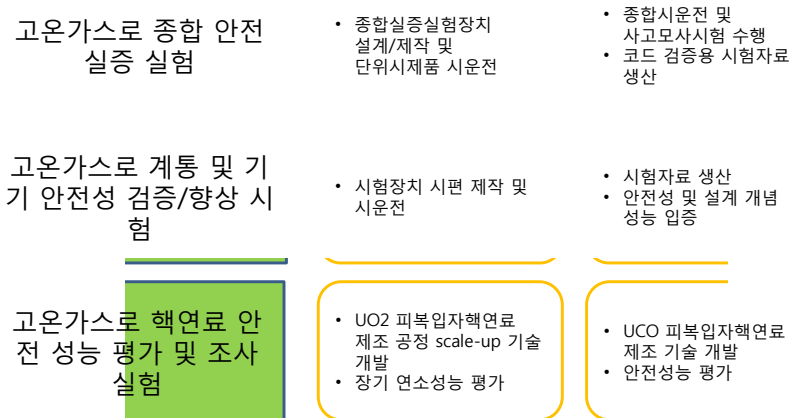
□ 미래동향 예측

- 국내 기술을 이용하여 고온가스로를 건설하고자 하는 경우 꼭 필요한 기술임이 자명함.
- 고온가스로 설계에 필요한 핵심 기술들을 2021년까지 상당부분 완료할 예정이므로 2021년 이후에는 상대적으로 취약한 요소기술에 집중할 필요가 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 고온가스로 종합 안전 실증 실험
 - 1단계(5년): 종합실증실험장치 설계/제작 및 단위시제품 시운전
 - 2단계(5년): 종합시운전 및 사고시험 수행/코드 검증 시험자료 생산

- 고온가스로 계통 및 기기 안전성 검증/향상 시험
 - 1단계(5년): 시험장치 시편 제작 및 시운전
 - 2단계(5년): 시험자료 생산을 통한 안전성 및 설계 개념 성능 입증
- 고온가스로 핵연료 안전 성능 평가 및 조사 실험
 - 1단계(5년): UO₂ 피복입자핵연료 제조 공정 scale-up 기술 개발 및 장기 연소성능 평가
 - 2단계(5년): UCO 피복입자핵연료 제조 기술 개발 및 안전성능 평가



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 고온가스로 종합 안전 실증 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 종합실증실험장치 설계 및 실험건물 건설 실증시험장치 제작 및 단위시제품 시운전 종합시운전 및 사고시험 수행/코드 검증 시험자료 생산 	<ul style="list-style-type: none"> 종합실증실험장치 및 시험자료
<ul style="list-style-type: none"> 고온가스로 계통 및 기기 안전 성능 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 시험장치 시편 제작 및 시운전 시험자료 생산을 통한 안전성 및 설계 개념 성능 입증 	<ul style="list-style-type: none"> 계통기기 시험장치 및 시험자료
<ul style="list-style-type: none"> 고온가스로 핵연료 안전 성능 평가 및 조사 실험 	<ul style="list-style-type: none"> UO₂ 피복입자핵연료 제조 공정 scale-up 기술 개발 및 장기 연소성능 평가 UCO 피복입자핵연료 제조 기술 개발 및 안전성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> UO₂ scale-up 기술 및 UCO 제조기술

◆ 배경

- 국민 생활 및 건강과 관련되는 원자력과 방사선 이용시설 방사선안전관리 분야의 필수 기술과 안전관리 전략을 수립하여 국가정책에 반영하고자, 중장기 연구개발 로드맵을 제시함.
- 원전의 사용후핵연료 임시, 중간 저장 관련 방사선안전성의 확보 및 확인을 통하여 처분, 처리 등 향후 추진 될 후행핵주기 완성기술에 대비함.
- 의료방사선과 생활주변 방사선은 이제 일상생활 속에서 그 사용이 날로 증가하고 생활환경에 늘 존재하기에 국민 건강보호 차원에서 적극 관리
 - 방사선 의료영상, 치료 관련 선량최적화 기술기반 확보
 - 라돈 등 자연방사선 확인, 영향평가 및 실용적 감시기술 확보
- 과학기술수준의 한 척도가 되는 입자가속기시설은 국내외 첨단 연구수요 대응 및 신규 산업기술개발 뿐만 아니라 의료기술 분야에서도 그 이용이 광범위하고 양적으로 증가일로에 있기에, 이에 대응하기 위한 고에너지 입자방사선 관련 안전관리기술을 구축함.
 - 고에너지 입자 방사선량 평가, 차폐 및 영향평가 기술
 - 가속기 시설 건설, 운영, 해체를 위한 기술기준, 잔류방사능 측정 및 평가 관련 기술

◆ 기술분류 총괄표

대분류 (1단계)	중분류 (2단계)	중분류 (3단계)
방사선 안전 관리 기술	사용후 핵연료 안전 관리 기술	운송, 저장용기 소재 및 제작기술
		사용후핵연료 안전성 평가
		원자로건물 및 사용후핵연료저장조(SFP) 해석 기술
		사용후핵연료 저장시설의 리스크 평가
	방사성 폐기물 관리 시설 안전성 향상 기술	처분용기의 경년열화 안전성
	의료 방사선 안전 기술	방사선치료 안전 및 방호 기술
		ICT 기반 반도체형 선량계 제작기술
		의료방사선량 저감화 기술
	가속기 방사선 안전 기술	가속기 방사선 안전 설계 및 해석 기술
		가속기 운영 및 해체 관련 방사선 안전 기술
	생활주변 방사선 관리 기술	생활주변 방사선 안전관리 기술
		생활주변 방사선에 의한 피폭선량 평가

◆ 세부 기술 내용

3.1 사용후 핵연료 안전 관리 기술

3.1.1 개요

□ 이슈 및 문제점

- 국내에는 오래된 원자력 발전 역사에 따라 발생한 사용후핵연료는 대부분 각 원전의 수조에서 장기간 저장 중에 있음.
- 국가 정책에 따라 최종 처분 전까지 원전 부지 내 혹은 특정 지역의 중간 혹은 임시 건식저장 시설에서 보관할 것으로 예상됨.
- 건식 중간저장 시설 건설이 지연될 경우, 원전 내 습식저장조 내에서 저장해야 하나 원전 수조의 포화가 예상되므로 사용후핵연료의 안전한 관리를 위한 연구와 기술 개발이 시급함.
- 따라서 사용후핵연료의 운반과 저장이 가능한 대용량 운반/저장 겸용용기의 개발 및 국산화가 대처방안의 하나로 제안되고 있는 상황임.

□ 기술개발 필요성

- 사용후핵연료의 장기 저장 중 안전관리는 원전의 안전을 위한 국가 현안이며 국민 수용성 측면에서 중요한 국가 과제임.
- 원전 운전 이력과 연계한 사용후핵연료 초기 특성 평가, 장기 저장 중 사용후핵연료 건전성 평가, 취급·운반 중 사용후핵연료 특성 변화 평가 등의 연구 업무를 통해 사용후핵연료의 장기 건전성을 평가하고, 저장 취급 중 안전성을 예측하는 시스템을 구축하는 업무가 필요함.
- 이와 함께, 사용후핵연료의 운반과 저장을 위한 용기 및 시스템 개발 연구가 요구됨.

3.1.2 운송, 저장용기 소재 및 제작 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 국내 원전의 사용후핵연료는 경수로 원전의 경우 소내 습식저장시설에 사용후핵연료를 보관중이며 중수로의 경우 자체 저장능력을 늘리기 위해 부지 내에 건식저장시설을 운용하고 있으나 경수로의 경우 2024년경 포화가 예상되며, 중수로의 경우 2019년 포화가 예상되고 있음.
- 따라서 사용후핵연료의 운반과 저장이 가능한 대용량 운반/저장 겸용용기의 개발 및 국산화가 대처방안의 하나로 제안되고 있는 상황임.

□ 기술개발 필요성

- 사용후핵연료의 소내 저장시설이 부족함에 따라 근시일내에 사용후핵연료의 소내 운반 뿐만 아니라 타원전 혹은 추후 건설될 중간저장시설로의 활발한 소외 운반이 예상되므로 대용량의 사용후핵연료를 빠르고 안전하게 운반하는 기술이 요구되고 있음.
- 이와 함께 저장시설의 부족과 빠른 운반 필요성에 대한 대처방안의 하나로 사용후핵연료의 운반과 저장이 동시에 가능한 대용량 운반/저장 겸용용기의 개발이 제안되고 있음.
- 따라서 대용량 운송/저장용기의 개발과 안정적인 운용 및 관리방안에 대한 제반기술이 확보되어야 하나 현재 확보한 기술의 수준은 선진국 수준의 70% 정도로서 추가적인 노력이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 운송, 저장용기 소재 및 제작기술

□ 기술의 정의

- 운송, 저장용기 핵심소재인 중성자 흡수재, 중성자/감마 차폐재, 밀봉재, 충격완충재 관련 재료개발 및 재료 DB (열적, 기계적, 동적 물성 등) 구축에 대한 기술
- 저장용기의 경년열화를 평가하고 관리하는 기술
- 운송, 저장용기의 제작검사 및 사용 재료의 성능을 검증하는 기술
- 사용후핵연료의 운송 및 저장 중 용기의 상시감시를 통해 용기의 건전성을 확보할 수 있는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 운반/저장용기용 일체형 Basket 구조의 침단 중성자 흡수재에 대해 2018년 시제품 성능 테스트를 목표로 연구가 진행되고 있으며 중성자 흡수재, 차폐재 개발을 KETEP 과제로 수행(TRL 7 목표)함. 기타 감마 차폐재, 밀봉재, 충격완충재, 재료 (열적, 기계적, 동적 물성 등) DB에 대한 연구가 수행된 바 없거나 기초연구 수준임.
- 저장용기의 경년열화를 평가하고 관리하는 기술은 기초연구 수준으로 독자적인 기술을 확보하고 있지 못하고 있는 것으로 사료됨.
- 제작검사 및 사용검사 기술은 관련 국내 법규, 원안위 고시 2014-61 (방사성 물질 운반용기의 제작검사 및 사용검사)가 존재함. 또한 KN-12 및 KN-18의 상용제품 등에 대한 제작검사 및 사용검사를 수행한 바 있으며 최근의 KORAD-21의 시제품 제작 국내경험이 있으므로 관련 기술은 대부분 확보된 것으로 사료됨. 다만 국내법규의 각 요건에 따른 구체적인 방법론을 확립할 필요가 있는 것으로 판단됨.
- 운송, 저장용기 상시감시기술은 건식저장시스템의 설계수명 동안 계측장치가 기능을 유지할 수 있도록 내열성, 내부식성, 내방사선성에 대한 평가 연구가 필요하나 부족하며 한국원자력환경공단에서 이에 대한 기초연구가 수행된 것으로 판단됨.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 운반/저장용기 핵심소재는 개발되어 상용화 단계임.
- 저장용기 소재 경년열화 평가 및 관리기술은 독일의 경우 핵폐기물관리위원회(ESK)가 2010년부터 사용후핵연료와 열을 발생하는 방사성폐기물을 저장하는 중간(건식)저장시설에 대한 10년 주기의 주기적 안전성 평가의 검토 지침을 제시하였으며 주요평가항목으로서 ‘경년열화현상의 기술적인 관리와 관련한 검토’를 요청하고 있으므로 독자적인 평가 및 관리 기술을 갖추고 있는 것으로 판단됨.
- 운송, 저장용기 제작검사 및 재료성능 검증 기술은 오랜 상용화로 관련 기술은 확보된 것으로 판단함.
- 국외에서 운영 중인 건식저장 시스템 중 금속 검용용기의 감시는 압력센서를 설치하여 실시간 압력변화를 감시하는 방법을 적용하고 있으며 콘크리트 저장용기는 공기 입구 및 출구에 대한 온도변화를 감시하는 방법을 개발하여 적용하고 있음. 압력감시 장치는 헬륨누설검출기(He leak detector), 압력센서 등을 사용하고 온도감시 장치는 열전대 및 직독식 온도계를 사용 중임. RFID(Radio Frequency Identification), 열화상(thermal imaging), 방사선 준위 측정 소형 센서 등과 같은 기술의 적용은 연구 중인 것으로 판단됨.

□ 미래동향 예측

- 운송, 저장용기의 대형화 및 검용화에 따라 침단용기의 개발이 필요하므로 이에 필요한 중성자 흡수재, 중성자/감마 차폐재, 밀봉재, 충격완충재, 재료 DB(열적, 기계적, 동적 물성 등)에 대한 기술은 더욱 중요해질 것으로 전망됨. 국내의 경우 이들 기술의 수준이 낮은 것으로 평가되므로 운송, 저장용기의 완전한 국산화를 위해서는 확보해야하는 기술로 사료됨.
- 저장용기를 통한 저장과 관련하여 건전성/ 안전성에 대해 민간의 관심이 높아질 것으로 사료되므로 사용후핵연료 관리에 대한 민간의 저항을 경감시킬 수 있는 저장용기 소재 경년열화 평가 및 관리 기술과 관련한 연구가 더욱 중요하게 될 것으로 판단됨. 국내의 경우 이들 기술의 수준이 낮은 것으로 평가되므로 저장용기의 개선/ 침단용기의 개발을 위해서는 확보해야하는 기술로 사료됨.
- 대용량 운반/저장 검용 용기의 개발과 같은 침단 용기의 개발이 단시일 내 요구될 것으로 예상되며 또한 사용후핵연료 관리에 대한 주민/ 국민수용성을 고려할 때, 개발될 침단 운반/저장용기 및 용기에 사용할 재료의 성능 검증을 위한 체계적인 방법론과 이들 용기의 사용 중 건전성 확보를 위한 상시감시의 필요성이 증대할 것으로 사료됨.

□ 기술개발 수행체계

- 산·학·연 협력연구를 통해 기술목표를 달성함
- 이를 위한 산·학·연 공동연구체계가 다음과 같이 필요함.
 - 수명예측을 위해서는 운용중인 운반/ 저장용기의 운전이력자료 및 손상사례가 필요하므로 산업계의 협조 필요
 - 열화기구를 포함한 소재 및 개발 소형 센서의 물성/특성 연구를 위해서는 학계/연구계의 협조 필요
 - 필요 재료물성의 선정 및 DB 설계, 관리프로그램, 시제품 평가, 시험장치 개발을 위해서는 산업계 협조 필요

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 운송, 저장용기 구조 및 부품용 신소재 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 모재료/ 1차 재료 개발 • 개량 재료 개발 • 재료 성형/용접기술 • 재료물성/특성 • 시제품 제작 • 성능테스트 • 품질인증 • 재료 DB 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 현 상용재료 유사 재료 모사 기술 • 개량/보완 항목 선정 및 개량 재료 개발 기술 • 제품 제작 기술 (소성/ 용접 등) • 제작기술의 개량 재료와의 합치성 평가 • 시제품 특성/성능 확인 기술
• 저장용기 소재 경년열화 평가 및 관리기술	<ul style="list-style-type: none"> • 저장용기의 소재 및 열화기구 DB 구축 • 경년열화 관리 대상 선별 및 분류 • 경년열화 기구 관리 방안 수립 • 경년열화 기구 관리 기술 개발 • 경년열화 관리 대상 모니터링을 위한 관리 프로그램 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 경년열화 기구 DB • 경년열화 관리 기술 • 경년열화관리 프로그램 개발
• 운송, 저장용기 제작검사 및 재료성능 검증 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 국내법규 검토 • 법규 요건별 제작검사, 사용검사 방법/기술 확립 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내법규 요건별 제작검사, 사용검사 기술
• 운송, 저장용기 상시감시기술	<ul style="list-style-type: none"> • 해외 적용기술의 국내 개발용기에의 적용 가능하도록 사업화 • RFID, 열화상, 방사선 준위 측정 소형 센서 개발 • RFID, 열화상, 방사선 준위 측정 소형 센서 사업화 	<ul style="list-style-type: none"> • 현 상용기술 평가 • 소형 센서 개발 기술 • 시제품 특성/ 성능 확인 기술

2) 운송, 저장용기 설계, 해석 및 모델 개발 기술

□ 기술의 정의

- 다량 (120 다발 이상)의 중수로 사용후핵연료를 운송할 수 있는 능력을 갖춘 운반용기 개발 관련 기술
- 대용량 (32개 다발 이상)의 경수로 사용후핵연료를 운송/저장할 수 있는 다목적 금속용기개발 관련 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서 운용중인 중수로 사용후핵연료 운반용기는 HI-STAR63으로 중수로 사용후핵연료 120다발을 운송할 수 있으나 HOLTEC에서 개발한 것임. 대용량 중수로형 운반용기 개발 기술은 산업부 방폐물관리 연구의 일환으로 기초연구 수준의 연구가 수행된 바 있음.
- 경수로의 경우는 습식저장조에 사용후핵연료를 저장 중에 있으며 건식저장시설을 갖추고 있지 않음. 국내에서는 한국원자력환경공단에서 운반/저장 가능한 사용후핵연료 다발이 21개인 금속 운반/저장 겸용용기인 KORAD-21을 개발하여 인허가 중에 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해외에서 사용중인 중수로 사용후핵연료 운반용기는 캐나다의 OPG (Ontario Power Generation)에서 개발·운용 중인 IFTC (192 다발 운송)과 DSCTP (364 다발 운송)이 있음.
- 사용후핵연료 건식저장방식의 저장용량은 PWR 사용후핵연료 24다발이 주류를 이루고 있으나, 현재 PWR 및 BWR 사용후핵연료의 최대 저장용량을 37다발 및 87다발로 증대하는 추세임.

□ 미래동향 예측

- 사용후핵연료의 소내 저장시설이 부족함에 따라 근시일내에 사용후핵연료의 소내 운송뿐만 아니라 타 원전 혹은 추후 건설될 중간저장시설로의 활발한 소외 운송이 예상됨. 그러므로 사용후핵연료 관리에 대한 주민/ 국민 수용성을 고려하여 대용량의 사용후핵연료를 빠르고 안전하게 운반하는 기술이 요구가 증대될 것으로 예상됨.
- 현재 중수로의 경우 건식저장방식을 도입하여 사용후핵연료를 소내 저장을

하고 있고 120 다발을 운송할 수 있는 운반용기를 확보하고 있으나 운반용기는 HOLTEC의 기술로 개발된 것임. 따라서 다량의 사용후핵연료 다발을 운송할 수 있는 능력을 갖춘 운반용기에 대해 국내 개발을 통한 기술력 완전 확보가 필요할 것으로 판단됨.

- 최대 저장용량을 증대 시키는 것이 세계적인 추세이고 국내 경수로 원전의 사용후핵연료 소내 습식저장시설이 2024년경 포화될 것으로 예상되므로 이에 대한 해결방안으로써 세계적인 추세에 발맞추어 대용량 (32개 다발 이상)의 경수로 사용후핵연료 다발을 운송/저장할 수 있는 다목적 금속용기개발이 필요할 것으로 예상함.

□ 기술개발 수행체계

- 용기의 재료선정, 기기설계, 핵임계 평가, 안정성 시험 등의 주요업무를 산업계가 주도적으로 수행함.
- 학계 및 연구계는 검증 시험 등에 참여함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 대용량 중수로형운반용기 개발기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 소재선정, 용기형상설정기술 • 방사선 차폐평가 • 핵임계 평가 • 열전달 평가 • 구조해석 응력 평가 • 모델설계 및 제작 • 안정성 시험 (사고조건 시험, 차폐능/누설시험) • 해석검증 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 대용량 중수로형 운반용기의 재료 및 기기설계 기술 • 대용량 중수로형 운반용기의 제작기술 • 대용량 중수로형 운반용기의 성능 검증 시험 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 대용량 경수로형 운반/저장용기 개발기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 소재선정, 용기형상설정기술 • 방사선 차폐평가 • 핵임계 평가 • 열전달 평가 • 구조해석 응력 평가 • 모델설계 및 제작 • 안정성 시험 (사고조건 시험, 차폐능/누설시험) • 해석검증 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 대용량 경수로형 운반용기의 재료 및 기기설계 기술 • 대용량 경수로형 운반용기의 제작기술 • 대용량 경수로형 운반용기의 성능 검증 시험 기술

3) 수송 및 저장 캐스크 개발 기술

☐ 기술의 정의

- 사용후 핵연료의 수송 및 저장용 캐스크 개발에 필수적인 임계, 방사선원항 및 차폐해석 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 원자력발전소의 소내 사용후 핵연료 습식 저장 시설이 곧 한계에 도달하게 되며, 이에 따라 발전소 내 또는 건식 중간 저장시설에 사용후핵연료를 임시 저장하는 것이 필수적임.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해외의 경우 이미 상용화된 사용후핵연료 수송 저장용 건식 캐스크를 설계, 제작되어 운영되고 있으나 국내의 기술 수준은 연구 개발 차원의 기술 개발 수준임.

☐ 미래동향 예측

- 사용후 핵연료 수송 및 저장 캐스크 설계기술 자립

☐ 기술개발 수행체계

- 캐스크 재료 개발
- 캐스크 설계 및 제작 검증기술개발
- 임계 및 차폐기술
- 산·학·연 공동연구체계.
 - 1단계(3년) : 캐스크 장전 사용후 핵연료에 대한 임계 및 방사선원항 분석 및 캐스크 차폐해석 기술 확립

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 캐스크 임계, 방사선원, 차폐 해석 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 증기발생기 3차원 2상 유동 모델 개발 • CAD를 연계한 전처리 프로세서 개발 • CFD 스케일 국소해석 모델 • 3차원 열수력 모델 개발 및 검증을 위한 실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 3차원 2상 유동 해석 기술 • CFD 스케일 2상 유동 해석 기술 • 증기발생기 3차원 실험 자료 확보

3.1.3 사용후 핵연료 안전성 평가

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 국내에는 오래된 원자력 발전역사에 따라 각 원전 수조에서 수십 년의 장기 간 사용후핵연료가 저장 중에 있음.
- 또한 사용후핵연료 건식 중간저장 시설 건설이 지연될 경우, 사용후핵연료를 습식 저장조 내에서 장기 저장해야 함.
- 이러한 장기저장 중 사용후핵연료에 대한 상태의 확인 및 건전성 평가가 안전관리 및 국민 수용성과 결부됨.

☐ 기술개발 필요성

- 사용후핵연료 건식저장 등 일련의 안전관리 측면에서 최초 저장환경인 원전 저장조에서 사용후핵연료 특성정의 및 관련 건전성평가가 기술개발이 필요함.
- 특히, 사용후핵연료 물성 등 특성 정의를 위해서는 수소 침투량 등을 비파괴적으로 검사할 수 있는 기술과 측정된 자료를 모델링 및 코드화하여 건식저장에 이르는 장기 거동 특성 예측 및 건전성 평가할 수 있는 기술이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 습식 저장조 내 사용후핵연료 장기 건전성 평가 및 사고 대응

☐ 기술의 정의

- 장기 습식저장 중 사용후핵연료 상태/특성을 정의하여 건식저장환경 대비 건전성 및 습식저장 내 지진, 기타 중대사고시 안전성을 평가하는 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 사용후핵연료 저장조 내 핵연료 손상, 부식, 치수변화 등을 측정하는 기술은 확보되었으나, 피복관 내 수소량 측정 등은 미 확보된 상태임.
- 건식저장을 위한 저연소도 사용후핵연료 건전성 평가기술은 개발 중에 있으나, 평가에 필요한 모델 및 코드 등은 해외자료에 의존적임.

- 특히, 사용후핵연료 저장조 내 사고조건에서 사용후핵연료 안전성/건전성 평가 기술은 추진된 바 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 원전 선진국의 경우 독자적인 사용후핵연료 안전성/건전성 평가기술을 개발하여 인허가 획득 등의 상용 업무에 활용하고 있음.
- 사용후핵연료 저장조에서부터 건식저장을 위한 운반용기 장전에 이르기까지 건전성/안전성을 평가할 수 있는 평가 코드 확보 및 지속적인 고도화 추이에 있음.

□ 미래동향 예측

- 최근 정부 에너지 정책관리사항을 고려 시, 사용후핵연료 건식저장 및 관련 안전관리 강화기술이 지속적으로 소요될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 기존 핵연료관련 기술을 확대, 응용, 고도화하여 습식저장조 내 사용후핵연료의 상태를 비파괴 검사 기술개발을 통한 자료 확보, 동 자료기반으로 모델링, 평가 코드 개발 수행
- 산·학·연 공동으로 추진하되, 상용화 관점 및 핵연료기술정보 활용을 위해 산업계주도로 추진
 - 1단계(5년) : 사용후핵연료 평가를 위한 측정, 모델링, 코드 등 요소기술개발
 - 2단계(3년) : 평가기술 검증 및 중대사고 대응기술개발

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 사용후핵연료 상태 비파괴 측정기술	• 사용후핵연료 건전성평가 핵심자료 측정 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료피복관 수소량 측정 • 사용후핵연료 연소도 측정기술
• 사용후핵연료 특성 모델링/코드 개발	• 사용후핵연료 특성자료를 활용한 모델링/코드 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 국내외 DB 수집, 분석 • 모델링 및 코드
• 중대사고 대응기술	• 지진 등 중대사고 평가 및 대응기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 사고시나리오 및 핵연료평가를 위한 평가 조건 • 중대사고 조건 사용후핵연료 평가 모델링

		<ul style="list-style-type: none"> • 중대사고에 따른 사용후핵연료 손상정도 예측 및 계측 기술 • 중대사고에 따른 사용후핵연료 대응기술
--	--	---

2) 손상 사용후핵연료 안전성 평가

☐ 기술의 정의

- 국내 원전에 저장중인 다양한 형태의 손상 사용후핵연료 특성을 정의하고 사용후핵연료 관리(건식저장)관점에서 솔루션을 제시하는 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 정상 사용후핵연료 평가기술은 개발 중에 있으나, 손상 사용후핵연료 대한 평가 기술개발 사례는 전무함.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 원전 선진국의 경우 사용후핵연료 손상유형별 분류 및 분류에 따른 맞춤형으로 안전성/건전성 유지되도록 솔루션 기술을 보유하고 있음.

☐ 미래동향 예측

- 최근 정부 에너지 정책관리사항을 고려 시, 사용후핵연료 건식저장 및 관련 안전관리 강화기술이 지속적으로 소요될 것으로 예상되며, 손상 사용후핵연료의 안전관리 사항이 무엇보다 중요 이슈사항으로 대두될 것으로 전망됨.

☐ 기술개발 수행체계

- 기존 정상 사용후핵연료 건전성 평가기술을 확대/응용하여 손상 유형별 건전성평가 및 맞춤형 솔루션 제시 필요
- 사용후핵연료 손상현황 정보 및 정상연료 평가 기술을 보유한 산업계 주도로 추진
 - 1단계(5년) : 손상 사용후핵연료 평가 기술개발
 - 2단계(5년) : 고연소도 손상 안전성 평가 기술개발

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 손상 사용후핵연료 특성 평가	<ul style="list-style-type: none"> 국내 손상 사용후핵연료 현황 분석 손상 사용후핵연료의 건전성을 위한 취급성/운반성/장기저장 회수성 평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 손상유형별 사용후핵연료 정의 및 재분류 평가 기술
• 고연소도 손상 사용후핵연료 평가	<ul style="list-style-type: none"> 고연소도 손상 사용후핵연료 건식저장 취급성/운반성/장기저장 회수성 평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 고연소도 사용후핵연료 건전성 및 물성변화 예측모델 기반 손상연료 취급성/운반성/회수성 평가기술

3) 사용후핵연료 건전성 및 물성 변화 예측 모델 및 검증

□ 기술의 정의

- 사용후핵연료 안전관리(습식/건식저장, 처분 등)를 위한 해당 환경에서 재료 거동특성과 열화특성을 정의하는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 정상 사용후핵연료(저연소도)에 대한 열화특성을 정의하는 기술을 개발하고 있음.
- 신뢰할만한 DB 기반 재료거동 및 열화특성에 대한 정의 모델이 없음.
- 신뢰성 있는 모델/코드개발을 통한 상용화 활용이 필요한 시점임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 등의 해외에서는 저연소도 사용후핵연료 재료 및 열화특성 모델 완료 후 고연소도 사용후핵연료 기술개발에 매진하고 있음.
- 사용후핵연료 습식/건식 저장의 재료거동 및 열화 특성 모델은 대부분 해외 자료에 의존적인 실정임.

□ 미래동향 예측

- 사용후핵연료 안전관리를 위한 관련 법령이 재정비되고 인허가 요건이 강화되고 있으며, 실증 자료 및 평가 기술 등이 요구되고 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 기존 원자로 내 핵연료 건전성/안전성 평가 기술 및 기 보유 국내외 열화특성 자료 활용
- 핵연료 및 사용후핵연료 관련 기술정보 및 평가 기술을 보유한 산업계 주도로 추진
 - 1단계(5년) : 사용후핵연료 종합 재료 및 열화특성 예측 코드 개발
 - 2단계(5년) : 코드 검증 및 고연소 특성자료 반영 (필요시 인허가 추진)

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 종합 재료 및 열화특성 예측 코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 연소도 별 사용후핵연료 물성/열화특성 예측 모델링 및 코드 개발/검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 연소도별 사용후핵연료 물성/열화특성 시험 및 평가모델 • 종합 열화특성 예측 코드

4) 사용후핵연료 저장/운반 시스템 연계 안전성/건전성 평가

□ 기술의 정의

- 원자로와 핵연료의 유기적인 평가체계와 유사한 사용후핵연료의 저장/운반 시스템과 연계한 안전성/건전성을 평가하는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 사용후핵연료 운반/저장 시스템 기반의 사용후핵연료에 대한 건전성/안전성 평가가 수행되지 않아 관련 규제요건을 완벽히 충족하기 어려운 상태임.
- 최근 강화되는 인허가 추이를 고려하여 유기적 사용후핵연료와 저장/운반 시스템 연계 안전성/건전성 평가 기술의 개발이 필요함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해외 운반/저장 시스템(용기)은 사용후핵연료 건전성/안전성 평가 기반 설계/개발이 수행되어 왔음.

- 특히, 관련 안전성 평가보고서에 사용후핵연료 건전성 관련사항이 정량적으로 평가되어 수록되어 있으며, 관련 인허가를 획득하였음.

□ 미래동향 예측

- 사용후핵연료 안전관리를 위한 관련 법령이 재정비 및 인허가 요건이 강화되는 추이에 있으며, 핵연료-원자로와 동일하게 사용후핵연료-운반/저장 시스템도 유기적인 평가 체계를 구축할 필요가 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 운반용기 설계기술 보유기관과 사용후핵연료 평가기술 보유기관과 협업체제로 수행
 - 1단계(3년) : 사용후핵연료 종합 재료 및 열화특성 예측 코드 개발
 - 2단계(5년) : 코드 검증 및 고연소 특성자료 반영 (필요시 인허가 추진)

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 운반/저장 시스템 연계 사용후핵연료 안전성/건전성 평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 운반/저장 시스템 특성 반영 사용후핵연료 안전성/건전성 평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 운반/저장 평가 요건 정립 • 사용후핵연료 건전성/안전성 평가를 위한 운반/저장 시스템 설계정보 및 경계조건 정의 • 벤더프리 운반시스템 보수적/일반적 건전성/안전성 평가 방법론
<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료-운반/저장 시스템 표준 평가 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 기반 운반/저장 시스템 안전성 평가 및 표준 평가기술 체계 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 운반/저장 시스템 표준화 모델링 • 벤더프리 운반시스템 보수적/일반적 건전성평가 기술(충격완충기 대체 등) • 사용후핵연료 안전성(임계, 격납, 열성능) 평가기술 • 사용후핵연료 건식저장 시스템 지진안전성 평가기술

3.1.4 원자로건물 및 사용후핵연료저장조(SFP) 해석 기술

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 후쿠시마 원전사고 이후 사용후 핵연료 저장시설 내 냉각능력 상실에 따른 수소발생, 방사성물질의 누출 현상과 이에 따른 원자로건물의 안전성 평가에 대한 불확실성이 제기됨.
- 원자로 용기 내 노심에서 발생한 중대사고와 사용후 핵연료 저장시설 내 사고가 연계될 경우 원자로건물 내 가압 및 방사선원향의 증가가 예상되며, 이에 따른 대처방안이 필요함.

☐ 기술개발 필요성

- 습식 사용후 핵연료 저장시설 내 냉각능력 상실에 따른 사고진행 과정에서 발생하는 냉각수 자연순환, 피복재 산화, 용융물 형성 및 냉각 현상은 원자로용기 내 현상과는 다른 양상을 보임. 따라서 이와같은 모델을 개발하고 평가하기 위한 연구가 필요함.
- 중대사고 종합해석 코드의 개선으로 원자로용기 내 중대사고와 연동하여 사용후 핵연료 저장시설의 사고를 평가하고, 이에 따른 원자로건물 거동을 해석하기 위한 통합해석 방법론이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 원자로건물 통합해석 방법론 개발

☐ 기술의 정의

- 사용후 핵연료 저장시설 내 사고와 원자로건물 내 현상을 연계하는 통합 해석 방법론 개발

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 산업부과제를 통해 개발한 중대사고 종합해석 코드인 CINEMA 코드에 사용후 핵연료 저장시설 내 중대사고 현상 해석을 위한 모듈이 있음.
- 하지만 냉각수 자연순환, 피복재 산화, 용융물 형성 및 냉각 현상과 같은 일부 모델의 개선이 필요함.

- 기존 원자로용기 내 노심용융에 따른 중대사고와 연계하여 사용후 핵연료 저장시설 내 사고를 해석은 불가능한 상황임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- MELCOR, MAAP에는 사용후 핵연료 저장시설의 중대사고 현상을 해석할 수 있는 모듈이 있으나 통합 해석은 불가능 함.

□ 미래동향 예측

- 원자로건물 내에 위치한 사용후 핵연료 저장시설의 사고는 그 자체의 안전성 평가도 중요하지만 원자로용기 내 노심사고와 연계하여 그 안정성을 평가하는 일이 원전 전체의 안전성 증진을 위해 필요할 것으로 판단됨.

□ 기술개발 수행체계

- 습식 사용후 핵연료저장조 내 사고진행 과정에서 발생하는 냉각수 자연순환, 피복재 산화, 용융물 형성 및 냉각 현상 등에 대한 모델 개선 및 검증
- 중대사고 종합해석 코드의 개선으로 원자로용기 내 중대사고와 연동하여 사용후 핵연료저장조의 사고를 평가하기 위한 중대사고 종합해석 코드 개선

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사용후 핵연료 저장시설 사고해석 요소 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로건물 내 사용후 핵연료 저장시설 사고 시나리오 분석 • 사용후 핵연료 저장시설 사고해석 요소모델 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후 핵연료 저장시설 내 사고 현상 규명 및 해석 모델 개발
<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 저장시설 사고 통합해석 방법론 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로건물과 연계한 사용후 핵연료 저장시설 통합해석 코드개발 • 원자로 노심용융 사고와 연계한 사용후 핵연료 저장시설 사고발생 가능 시나리오 개발 • 사용후 핵연료 저장시설 사고 통합해석 방법론 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후 핵연료 저장시설 사고에 따른 원자로건물 내 압력 및 방사성물질량 정량화 기술

2) 사용후핵연료(SFP) 안전성 향상 기술

□ 기술의 정의

- 사용후 핵연료 저장시설 내 사고 방지 및 완화 방안 개발

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 사용후 핵연료 저장시설의 사고 방지를 위해 냉각수 공급 및 펌프 개선을 위한 노력은 수행되었으나, 사고발생에 따른 완화방안에 대한 구체적인 기술 개발은 진행되고 있지 못함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 사용후 핵연료 저장시설의 독립적인 중대사고 완화설비는 적용되고 있지 않음.

□ 미래동향 예측

- 후쿠시마 사고의 교훈을 바탕으로 원자로용기 내 노심사고와 연계하여 사용후 핵연료 저장시설의 안정성 향상을 위한 대처기술개발이 필요할 것으로 판단됨.

□ 기술개발 수행체계

- 사용후 핵연료 저장시설 내 중대사고 시 방사성물질 방출 저감을 위한 대처설비 개발
- 원자로용기 내 중대사고와 연동한 사용후 핵연료 저장시설 사고관리 방안 수립

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사용후 핵연료 저장시설 내 중대사고 대처설비 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후 핵연료저장시설 내 중대사고 시나리오 분석 및 대처방안 수립 • 중대사고 대처설비 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후 핵연료저장조 내 중대사고 시 방사성물질 방출저감 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사용후 핵연료 저장시설 사고 관리방법론 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 노심용융 사고와 연계한 사용후 핵연료 저장시설 사고관리 방안 수립 • 사용후 핵연료 저장시설 사고관리 유효성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 방사성물질 방출 저감을 위한 사용후 핵연료 저장시설 사고관리 방안

3.1.7 사용후핵연료 저장시설의 리스크 평가

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 국내 원전의 가동기간이 증가함에 따라 소내 저장시설에 저장할 수 있는 용량이 한계에 다다르고 있으며 또한 노후 원전의 폐로에 따라 사용후핵연료의 장기적 저장에 대한 안전성 확보가 매우 중요함.
- 소내 또는 소외 중간저장시설의 장기적 건전성을 확보하기 위해서는 저장시설의 구조적 건전성, 저장된 사용후핵연료의 장기건전성 뿐 아니라 저장시설의 지진 등 자연재해에 대한 안전성을 반드시 확보하여야 함.
- 경주지진 이후 원전의 안전성 뿐 아니라 중저준위 방사성폐기물 처분장의 지진 안전성을 높은 수준으로 요구하고 있어 사용후 핵연료 저장시설에 대한 지진 등 자연재해에 대한 안전성 요구수준은 더욱 높을 것으로 판단됨.

☐ 기술개발 필요성

- 사용후핵연료 저장시설은 소내 또는 소외에 위치할 경우 위치한 환경이나 구조 특성 등이 원자력발전소와는 다른 특성을 가지고 있음.
- 사용후핵연료 저장시설의 경우 현재에도 습식 및 건식 두 가지 형태가 운영되고 있어 이들 시설을 특성을 고려한 안전성 확보방안이 필요함.
- 사용후핵연료 저장시설의 자연재해에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 원자력발전소와 동일한 수준의 안전성을 확보할 수 있는 필수 기술의 확보가 매우 중요함.

나. 세부기술 내용

1) 핵연료 저장시설 주요 리스크 평가

☐ 기술의 정의

- 사용후핵연료 저장시설의 확률론적 지진 리스크 평가에 필요한 기반기술
- 사용후핵연료 저장시설의 지진을 제외한 극한자연재해 및 인위적 재해에 대한 안전성을 확보하기 위한 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 사용후핵연료 저장시설의 확률론적 지진 리스크 평가에 대한 연구는 수행된 바 없으며 원자력발전소의 지진 리스크 평가기술 개발이 수행되고 있어 일부 기술의 활용이 가능함.
- 국내에서는 극한자연재해 및 인위적 재해에 대한 사용후핵연료 저장시설의 리스크 평가 관련 연구를 수행한 바 없으며 원전에 대해 일부 연구를 수행하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 EPRI에서는 20여 년 전부터 사용후 저장시설에 대한 확률론적 지진 안전성 평가에 필요한 사고시나리오 개발 등 다양한 연구를 수행한 바 있음.
- 또한 후쿠시마 사고 이후에는 원자력발전소 뿐 아니라 사용후핵연료 저장시설에 대해서도 지진 안전성 평가를 수행하고 있음.
- 미국에서는 9·11 사태 이후 사용후핵연료 중간저장시설의 항공기 충돌 사고에 대한 리스크 평가를 수행한 바 있음.
- 미국에서는 사용후핵연료 저장시설의 건전성을 확보하기 위한 다양한 연구가 진행하고 있으며 일본에서도 장기적 건전성 평가를 위한 실험 등이 진행되고 있음.

□ 미래동향 예측

- 국내에도 폐로가 진행됨에 따라 소내 사용후핵연료 저장시설이 단독으로 운영되는 경우와 장기 운영에 따른 소내 저장시설의 용량 한계로 인해 소외 저장시설의 건설이 불가피한 관계로 이들 시설의 지진 안전성을 확보하는 것이 반드시 필요함.
- 극한 자연재해의 강도 및 발생수가 증가함에 따라 사용후핵연료 저장시설의 안전성 확보는 필수적임.

□ 기술개발 수행체계

- 원전부지의 확률론적 지진재해도 결과 등을 활용하고 원전의 확률론적 지진 안전성 평가기술을 활용하여 효과적으로 수행할 필요가 있음.
- 사용후핵연료 지진 안전성 평가기술 개발과 마찬가지로 원전의 자연재해 및 인위적 재해 리스크 평가기술을 적극 활용할 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 저장시설의 확률론적 지진리스크 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 소내/소외 저장시설의 저장방식에 따른 특성분석 및 사고시나리오 개발 • 사용후핵연료 저장시설의 지진취약도 평가기술 개발 • 사용후핵연료 저장방식에 따른 리스크 정량화 모델 개발 및 리스크 정량화 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후 핵연료 저장시설의 지진리스크 평가를 위한 취약도 및 정량화 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 저장시설의 기타 자연재해 및 인공재해 리스크 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저장시설 안전성에 고려해야 할 재해의 선별 • 사용후핵연료 저장시설의 저장방식 및 위치별 자연재해 리스크의 정성적 평가 • 자연재해 및 인공재해에 의한 사고시나리오 선정 • 재해에 대한 구조적 건전성 평가기술 • 저장시설의 자연재해 리스크 정량적 평가기술 확보 • 저장시설의 안전성 향상방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 기타 재해에 의한 사용후핵연료 저장시설의 리스크 평가기술

3.2 방사성 폐기물 관리 시설 안전성 향상 기술

3.2.1 개요

- ☐ 「방사성 폐기물 관리 시설 안전성 향상 기술」은 다음 1개의 중분류 단위로 구분함.

- 처분용기의 경년열화 안전성

3.2.2 처분용기의 경년열화 안전성

가. 기술 개요

- ☐ 이슈 및 문제점

- 원전 부지의 사용후 핵연료 임시저장 능력이 포화상태에 근접함에 따라, 국민들의 우려가 증폭되고 있음.

- ☐ 기술개발 필요성

- 2028년 고준위 폐기물 영구처분장 부지 선정 및 2053년 운영 개시 계획에 대

비한 영구처분용기 재료기술의 확보가 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 고준위 폐기물 영구처분용기 재료 기술

☐ 기술의 정의

- 고준위 폐기물 영구처분용기 후보재료 및 신탐금 개발과 성능 평가기술을 개발하고, 영구처분에 대비한 주기적 건전성 평가기술 및 상시 감시기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원전 부지에서의 이송 및 건식저장용기에 관한 연구가 진행되고 있으나, 영구처분용기에 대한 연구는 전무함.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해외에서도 사용후 핵연료에 대한 사회적 우려가 높아짐에 따라, 고준위 폐기물 영구처분용기 재료개발 연구를 활발하게 진행 중임.
- 핀란드는 세계최초로 2015년 영구처분장 건설을 승인하여 건설에 착수하였으며, 2022년부터 운영에 들어갈 예정임.

☐ 미래동향 예측

- 사용후핵연료 건식재처리에 대한 국내외적 부정적 인식과 탈원전 정책이 지속될 경우, 사용후핵연료의 조기 영구처분에 대한 강압 요인이 될 것으로 예상됨.

☐ 기술개발 수행체계

- 재료개발, 건전성 평가, 비파괴진단, 심층처분 등 다분야의 통합 연구가 필요한 분야로서, 각 기술 분야의 전문가 그룹의 효율적인 연계 수행 체계가 중요함.

☐ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 처분방식 환경에 따른 후보재료의 성능평가	• 기존 후보재료 성능평가 • 신소재 제조 및 성능평가	• 사용후핵연료 특성을 고려한 성능평가 기술 • 처분환경을 고려한 성능평가 기술

<ul style="list-style-type: none"> • 국내 환경 최적의 처분용기 신소재 개발 및 특성평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 개량합금 제조기술 확립 • 개량합금 성능 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> • 주단조 조건 및 열처리 조건 확보 • 초장기 열화 예측식
<ul style="list-style-type: none"> • 영구처분용기 건전성 검사 및 상시 감시 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 주기적 안전성 평가기술 개발 • 상시 감시기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 평가방법 및 평가주기 설정 방법 • 무인 감시 및 이상 징후 자동 경보기술

3.3 의료 방사선 안전 기술

3.3.1 개요

- 「의료방사선 안전사용기술」은 다음 3개의 중분류 단위로 구분
 - 방사선치료 안전 및 방호기술
 - ICT기반 반도체형 선량계 제작기술
 - 의료방사선 저감화 기술

3.3.2 방사선치료 안전 및 방호기술

가. 기술 개요

- 이슈 및 문제점
 - 인구 노령화에 따라 암 발생률이 지속적으로 증가하고 있고, 방사선 치료의 수요 역시 증가하고 있으며, 환자 맞춤형의 새로운 방사선 치료기술이 개발되고 있음.
 - 환자 맞춤형의 고정밀 방사선치료는 첨단 의료기술이 적용된 기술집약적 치료방식으로 매우 복잡하고 다단계의 프로세스와 다양한 직종의 구성원이 치료에 관여되므로 다양한 사고가 발생할 확률이 높음.
 - 최근 급속한 고령화 등에 따른 암 환자수의 증가와 국민소득 증대로 변화된 삶의 질을 우선으로 선택함에 따라 양질의 방사선 치료에 대한 요구가 급증하고 있음. 이에 따라 수술과 항암치료를 대신할 수 있고, 암 치료효과 면에서 우수한 방사선 및 입자선치료가 그 대안으로 떠오르고 있음.
 - 방사선 치료에 기인하는 2차 암 발생의 위해도 평가와 최소화 연구는 암 환

자의 치료 후 연명기간 증가에 따라 그 관심과 필요성이 증대하고 있음.

□ 기술개발 필요성

- 방사선치료기별, 치료기술별로 치료 위해도가 상이하고 프로세스가 복잡하므로 이를 종합적으로 분석하고 관리하여 방사선치료에서 의료방사선 사고를 미리 방지할 수 있는 통합시스템이 필요함.
- 의료방사선의 안전하고 정확한 사용을 위해 점차 사용량이 증가할 의료방사선의 1회 및 누적 피폭선량의 산출을 위한 표준 임상지침이 필요함.
- 방사선치료기술별 생물학적 효과비(RBE) 산출이 필요하며, 실험방법 및 대상에 따라 다양한 RBE가 산출되므로 이에 대한 표준 평가가 시급함.

나. 세부기술 내용

1) 방사선치료 위해도 평가 기술

□ 기술의 정의

- 방사선치료 2차 암 발생 위해도 평가를 위한 표준 품질검사 기술
- 방사선치료 위해도의 분석관리 통합적으로 수행하기 위한 치료기술별 및 치료부위별 검증 기술
- 방사선치료에서 생물학적 피폭선량 측정하고 방사선치료 관련 종사자들의 위해도 평가 기술
- 의료용 입자방사선의 생물학적 선량평가에 필요한 상대적 생물학 효과비 예측 및 선량평가 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 유방암과 전립선암에 대한 방사선 치료에 따른 위해도에 대한 연구가 진행된 바 있으나, 평가기술에 대한 연구는 아직 수행된 바가 없음.
- 주기적 품질관리에 관한 연구는 활발히 진행되고 있지만, 환자 중심의 프로세스 기반의 위해도 분석관리 체계구축 관련 연구는 초보 단계임.
- 방사선치료 위해도 관리의 중요성에 대한 인식이 형성되고 있지만, 아직 실질적으로 적용할 수 있는 분석관리 시스템이 개발된 적은 없음.
- 방사선 작업종사자나 방사능 유출 사고에 대비한 피폭선량 측정법이나 대응책 마련은 꾸준히 진행되고 있으나, 방사선치료 환자의 피폭이나 관련 중

사자의 인체 위해도에 대한 생물학적 평가가 수행된 바가 없음.

- 탄소입자선의 상대적 생물학적 효과를 예측하는 기초적인 연구가 진행된바 있으며, 다른 입자선에 대한 연구 결과가 발표 된 바가 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 일본의 원폭 피해자에 대한 연구 결과를 토대로 방사선치료에 따른 위해도 평가 기술 연구가 진행 되어 왔으나, 전체적인 오차가 최대 50%에 이르는 등 아직까지 정밀도 향상에 대한 연구가 더 필요하며, 특히 두정부 부위 방사선치료 위해도 대한 연구는 전무함.
- 미국은 미국의학물리학회와 방사선종양학회에서 전문가 그룹을 결성하고 시스템을 개발하여 방사선치료 위해도의 분석 및 관리 시스템을 구축함.
- 유럽방사선종양학회와 IAEA에서는 방사선치료 사고 보고시스템을 구축하였고, 프랑스와 네덜란드는 국가 주도로 시스템을 구축하여 운영하고 있음.
- 방사선의 의학적 활용 이후 RBE 평가는 다양한 방법으로 구축되어 있으며, 현재 운영 중인 외국산 방사선 치료기기들에 대해 생산된 자료는 많음.
- 미국, 독일, 이탈리아, 독일 등에서 입자선치료를 위한 물리적 선량 및 생물학적 선량에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며 입자선치료계획 시스템 등에 상용화 된 사례가 있음. 또한 ISO는 방사선의 생물학적 평가법에 대한 국제표준화 추진함(기술위원회 85(방사사방호 분과)).

□ 미래동향 예측

- 고성능 방사선 치료기술의 발전에 따라 방사선치료에서 2차 암 발생을 억제 하고, 치료피해 최소화 및 위해도 관리 기술이 더욱 고도화 될 것임.
- 고성능 방사선 치료기술이 보급 확대됨에 따라 기존의 방사선치료 위해도 평가 및 관리가 환자 중심 대상에서 관련 분야 종사자들도 함께 포함하는 방향으로 확대될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 방사선치료 위해도 평가기술은 방사선치료기, 치료프로토콜 및 치료부위별 치료기술과 함께 생물학적 영향평가가 함께 수행되는 다학제 분야로서 연구의 계획과 수행과정에서 단계별 상호 검증에 필요한 협력을 위해 산·학·연·병원 공동 연구체계를 추진함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 방사선치료 이차암 위해도 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> 방사선 치료 기인 이차암 위해도 평가 및 최소화 기술 기반 구축 이차암 위해도 평가기술 평가 및 고도화 이차암 위해도 평가기술 및 최소화 기술 확립 	<ul style="list-style-type: none"> 품질검사 표준 기술 품질검사 제반 요소기술 품질검사 항목 이행 기술
• 방사선치료 위해도 분석관리 통합시스템 기술	<ul style="list-style-type: none"> 블록체인 기반 방사선치료 사고 관리 시스템 개발 방사선치료 위해도 평가 기술 개발 및 임상적용 	<ul style="list-style-type: none"> 치료기기 및 기술별 치료검증 기술 치료부위별 인체팬텀 모델
• 방사선치료 생물학적 피폭선량 측정 및 인체 위해도 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> 방사선원별 RBE 평가 및 표준측정법 정립 방사선치료시 노출 가능한 선량대의 생물학적 효과 평가법 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 생물학적 피폭선량 표준 측정법 방사선치료 관련 종사자 위해도 평가 기술
• 의료용 입자방사선 생물학적 선량 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> 의료입자방사선의 선량 측정기술 및 생물학적 평가법 정립 의료입자방사선 평가기술 표준화 의료용 입자방사선 생물학적 선량 평가기술 확립 	<ul style="list-style-type: none"> 의료입자방사선의 상대적 생물학적 효과비 예측기술 개발 의료입자방사선의 생물학적 선량평가 기술 개발 의료입자방사선의 생물학적 선량평가 방법론 정립

2) 방사선치료 품질해석 및 영향평가 기술

□ 기술의 정의

- 방사선치료 검증 표준절차 개발 및 측정 소급성 확보를 위한 방사선치료기기 품질검사 및 관련 시스템 구축 기술
- 의료방사선에 의한 특이 반응 진단을 위한 표지자 발굴과 이를 활용한 선량 진단 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원자력안전위원회 고시 제2015-005호(“의료분야의 방사선안전관리에 관한 기술 기준”)에 따라 의료기관은 외부기관에 의해 품질검사를 받고 있으나

방사선치료기의 품질검사 항목과 그 내용은 매우 제한적임.

- 국내는 국가 측정표준을 기반으로 품질검사를 이행할 수 있는 기관이 아직 없어 국내 유관기관 및 연구센터에서 일부 병원에 대한 외부감사 프로그램을 진행하고 있음. 하지만, 이는 한시적이고 소급성도 확보되지 않아 안전성과 신뢰성이 부족함.
- 국내 의료계는 다양한 최신 방사선 치료기를 도입하여 정교하고 복잡한 치료기술을 이용하여 환자를 치료하고 있으나 치료기술의 발전에 비해 표준 치료선량검증 장치 및 기술이 뒷받침 되고 있지 않음.
- 의료기관에서는 각 기관의 절차에 따라 치료평가를 위해 자체적으로 다양한 시도를 하고 있으나, 표준화된 절차 및 평가기술이 아직 없어 정확하고 객관적인 검증이 안 되고 있음.
- 2010년 중반 정형외과 의사의 방사선에 의한 손가락 괴사 보고 이후 의료종사자들의 방사선노출에 대한 경각심 고조됨.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국제원자력기구와 미국의 2차 표준기관(IROC)은 TLD, 유리선량계, OSLD를 이용한 방사선치료기 선량검사 서비스를 제공함.
- 독일에서는 법규로 원격 또는 현장 검사를 통해 출력선량 검사를 시행함.
- 미국의 IROC에서는 환자치료 검증 및 임상연구의 지원에 필요한 환자치료 부위별 팬텀 개발 및 평가방법 등을 마련함.
- IAEA, ESTRO 등 유럽의 방사선 유관 협회 및 기관들은 환자치료 검증을 위한 다양한 기술 개발에 선도적으로 진행함.
- IAEA는 환자와 의료인을 위한 방사선 사용지침을 발간하고 있으며 영국, 유럽연합, 프랑스, 대만 등은 의료방사선의 발암위험 연구를 수행하고 있음.
- 영국은 2017년 이온화 방사선 의료피폭 규제(IRMER17)를 새롭게 규정하고 2018년 1월부터 시행하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 안전하고 신뢰성이 있는 고품질, 고정밀 방사선 치료기술의 활용을 위해 치료기술의 품질 검증을 위한 표준화가 이루어져서, 국가 표준 시스템이 확립되고 현장에 적용될 것임.
- 환자 및 의료인들의 의료방사선에 의한 영향 및 위해도를 정확하고 객관적

으로 평가할 수 있는 생물학적 평가에 대한 수요가 증가하여, 이와 관련된 생명공학 기술과 표준절차에 대한 연구가 확대될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 방사선치료 품질해석 및 영향평가 기술은 방사선치료기, 치료프로토콜, 치료기술과 생물학적 영향평가 및 생명공학기술 개발이 함께 수행되는 다학제 분야로서 연구의 계획과 수행과정에서 단계별 상호 검증에 필요한 협력체계가 중요하며, 학·연·병원 공동연구를 추진함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 방사선치료기 품질검사기술 및 체계기술	<ul style="list-style-type: none"> • 방사선치료기 품질관리 항목에 대한 표준 소급성 확립과 품질검사 시스템 및 제반요소 개발 • 융복합 첨단 방사선치료기 표준 소급성 확립을 통한 품질검사 시스템 및 이행기술 개발 • 국가 표준기관/공인기관 협력을 기초로 소급성, 공인성, 신뢰성 및 독립성을 갖춘 방사선치료 품질검사 기술 및 제반요소 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 품질검사 표준 기술 • 품질검사 제반 요소기술 • 품질검사 항목 이행 기술
• 방사선치료검증 표준절차 및 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> • 치료기별/치료방법별/부위별 환자치료 검증 원격/현장품질인증 시스템 개발 • 부위별 인체팬텀을 이용한 국가표준 기반 치료방사선 품질보증 기술 개발 • 환자치료검증 독립적 품질인증 시스템 개발 및 임상 적용 	<ul style="list-style-type: none"> • 방사선치료기 및 치료기술별 치료검증 기술 • 치료부위별 인체팬텀 모델
• 의료방사선영향 진단을 위한 표지자 활용기술	<ul style="list-style-type: none"> • 의료방사선 특이 반응 지표 발굴 및 검증 • 표지자 기반 의료방사선 노출진단기술 개발 • 의료방사선 반응 특이 표지자 개발을 통한 노출선량 진단기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 의료방사선 반응지표 발굴 • 특이 지표기반 진단기술 • 노출 선량 측정기술

3) 의료입자방사선 선량계량 및 안전평가 기술

□ 기술의 정의

- 의료입자 방사선치료 3차원 선량분포 실시간 측정 및 선량평가 기술
- 의료입자 방사선치료 생체 내 치료범의 비정의 측정 및 검증 기술

- 의료용 입자방사선의 물 흡수선량 측정 및 표준 절차 작성 기술
- 의료입자 방사선치료기기 품질인증 시스템 구축 인증모델 개발 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 섬광 또는 형광작용을 이용한 실시간 2차원 선량분포 측정기술을 개발하고 있음.
- 생체 내 치료빔의 비정 검증을 위한 영상 장치 개발과 이를 치료용 양성자 빔에 대하여 성능 평가는 일부 이루어지고 있으나, 임상에 적용하여 영상 장치의 성능을 검증하기엔 미흡함.
- 전리함을 이용한 X선 치료를 위한 물 흡수선량 측정법은 확립되어 있음.
- 국내는 의료입자방사선 치료기기 인증시스템이 아직 없어, 신규 장비 도입 시 제작회사의 기술지원에 의존하고 있으며, 국내 연구로 개발이 되어도 의료시장에 진입할 수 있는 기술적인 제도가 마련되어 있지 않음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 초소형 이온 챔버 또는 다이오드 배열을 사용한 실시간 2차원 선량측정기술은 이미 개발되어 다양한 제품으로 판매되고 있음.
- 현재 젤 선량계를 이용한 3차원 선량분포 측정기술이 개발되어 있지만, 선량측정이 완료된 이후 판독과정을 거쳐야만 선량분포를 알 수 있고 선량계의 재사용 할 수 없음.
- 국외에서도 실시간 3차원 선량분포 측정기술은 아직 개발되지 않았음.
- 양성자 치료 시설이 지속적으로 증가하고 있으며, 1차원 즉발감마선 분포를 측정하는 나이프엣지 슬릿 카메라가 개발되어 임상 적용을 위한 성능검증이 진행되고 있음.
- 의료용 입자방사선의 물 흡수선량 측정을 위한 IAEA 기술문서에는 탄소선의 물 흡수선량 측정법이 기술되어 있으나, 유럽과 일본의 오차가 2% 이상 되어 이에 대한 연구가 진행되고 있음. 하지만 원자번호 2 이상의 이온빔에 대한 교정법은 아직 정립되어 있지 않음.
- 입자선치료기의 국제표준은 IEC 60601-2-64에서 규정하고 있으며, 입자방사선 치료기의 성능특성 관련 국제인증시스템 및 표준이 운영되고 있음.
- 해외 거대의료기기 기업이 주도하는 방사선치료기 시장의 특성을 반영하여, 방사선치료기의 표준은 미국이 주도하고 있으며, 미국 의학물리학회(AAPM)

에서 주도적으로 참여를 하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 고효율의 방사선치료에 대한 수요증가로 양성자 빔 및 탄소 빔을 이용한 방사선 치료시설의 증가할 것이며, 의료입자방사선 치료를 위한 선량평가법의 정밀도 및 객관적 평가의 중요성이 증가할 것임.
- 새로운 입자방사선치료기의 개발과 구축의 추진이 확대됨에 따라 치료시설 및 장치의 품질을 검증하기 위한 표준과 관련 절차 확립에 대한 수요가 증가할 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 의료입자방사선 선량계측 및 안전평가 기술은 국내 도입 초기단계의 방사선 치료 장치로, 다학제 분야이며 상호 연관성이 매우 높은 기술분야이며, 특히 초기 개발단계로 향후 기술적 표준 확립 및 국내 입자치료기의 도입 구축에 필요한 기술로서 관련 연구 그룹 간 협력체계를 구축함.
- 연구의 계획과 수행과정에서 단계별 상호 검증에 필요한 협력체계가 중요하며, 산·학·연·병원 공동 연구체계를 통한 연구를 추진함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 의료입자방사선 측정 및 선량평가기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 의료입자방사선 1,2차원 선량분포 실시간 측정기술 개발 • 의료입자방사선 3차원 선량분포 실시간 측정기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 의료입자방사선 측정기술 • 다차원(1,2,3차원) 선량분포 계측 기술
• 생체내 빔 비정 검증기술	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-head 기반의 3차원 양성자 선량 분포 측정 장치를 위한 검출기 및 신호 처리/획득 시스템 개발 • 치료용 양성자 빔에 대한 측정 장치의 성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 즉발감마선 검출기술 • 방사선 검출시스템 성능평가 기술 • 양성자 선량 측정 기술
• 의료용 입자방사선 물흡수선량 측정기술	<ul style="list-style-type: none"> • 의료입자방사선의 물 흡수선량 측정법 정립 • 의료입자방사선 물 흡수선량 측정법 표준화 	<ul style="list-style-type: none"> • 의료입자방사선의 물 흡수선량 보정인자 계산 • 의료입자방사선 물 흡수선량 측정 절차의 표준화 • 붕소중성자치료의 물흡수선량 측정기술 개발
• 의료입자방사선 치료기기 품질인증 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 국내외 현황파악, 기술적 토대 마련 및 인증관련 제도적 장치 기반 구축 • 기술적 기반 마련과 의료기기 및 의료방사선 기술 인증시스템 완성 	<ul style="list-style-type: none"> • 치료기 인증 모델 • 의료입자방사선 의료기기 품질인증기술

	<ul style="list-style-type: none"> • 의료기기 및 관련 진단·치료기술 인증 시스템 구축 	
--	---	--

3.3.3 ICT 기반 반도체형 선량계 제작 기술

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 기존의 방사선 작업 종사자용 선량측정계는 사용 기한의 한도가 있고 사용 후 매년 선량을 확인하고 교정을 해야 하는 번거로움이 있음. 더불어 실시간 계측이 어려워 작업 안정성이 떨어질 수 있고 장시간 사용이 어려움.
- 방사선조사를 이용한 암치료 시 기존에는 조사된 방사선량에 비해 실질적으로 목표지점에 도달하고 흡수되는 방사선량을 정확히 측정하는 방법이 아직 없음. 산란되거나 상태 천이에 따른 전자기파 등을 측정하는 간접 측정 방식이 있었지만 사용 효율과 정확성이 많이 떨어짐.

☐ 기술개발 필요성

- 방사선량을 직접적으로 측정할 수 있는 트랜지스터 기반 초소형 방사선 센서 기술로 인체에 침습하여 치료 혹은 진단 환부에 도달하는 방사선을 측정하는 기술이 필요함.
- 암치료 기기의 전자기파 간섭을 배제하고, 회로의 집적화를 통한 초소형/일체형 스마트 선량측기기를 환자에 실제 적용할 수 있어야 함.
- 스마트 선량계가 개발되면 수많은 데이터를 수집하여 감시하고 정보 및 진단을 위한 관제 시스템이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 센서 네트워크 스마트 선량계 기술

☐ 기술의 정의

- 의료방사선 작업 종사자들에게 적용할 수 있는 초소형 무선통신 선량측정기기 개발에 필요한 Chip모듈 및 신호처리와 선량측정 기술
- 초소형 스마트 선량계를 이용한 신호 취합 및 감시, 정보와 분석을 위한 한

데이터 처리 및 예측 시스템 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 비방사선 분야에서 IoT 기반 초소형 무선 통신 회로는 많이 연구되고 있으나, 의료방사선 분야에서 이용 가능한 트랜지스터 기반 선량계 관련한 연구는 수행된 바 없음.
- 트랜지스터의 특성 변화를 이용한 방사선 선량 측정 기술은 사용시간을 비약적으로 늘릴 수 있고 통신 회로와의 집적화를 통해 초소형/일체형 스마트 선량측정기로 개발이 가능함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국의 대학 등에서 트랜지스터 기반 실리콘 방사선 선량계를 핵심기술로 하는 선량 모니터링 연구가 진행되고 있음.

□ 미래동향 예측

- 의료방사선분야 작업 종사자들의 안전성 확보 및 향상을 위한 실시간 방사선 모니터링 기술개발의 수요가 증가할 것임.

□ 기술개발 수행체계

- ICT기반 기술 및 방사선량 계측 관련 국내 기초 및 원천기술이 많이 확보되어 있어 연구계획 수립단계에서 목표 설정에 부합하는 협력 체계 구축
- 산·학·연 공동 연구체계를 통한 기초 원천 기술 확보와 실증 기술의 동반 확보 추진

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 방사선 작업 종사자용 초소형 무선통신 선량측정 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 트랜지스터 기반 방사선 선량계 설계 기술 개발 • 선량계의 신호전달을 위한 무선 통신용 on-chip 모듈 개발 • 선량계 시스템 결함을 통해 방사선 데이터 처리를 위한 신호처리 하드웨어 및 알고리즘 개발 • 방사선 작업 종사자용 초소형 무선통신 선량측정 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 무선통신용 On-Chip모듈기술 • 선량계와 Chip모듈 결합기술 • 선량측정기술
• 스마트 선량계	<ul style="list-style-type: none"> • 스마트 방사선 선량계 데이터 확보 및 	<ul style="list-style-type: none"> • 무선통신 기반 선량데이터

신호 취합, 감시, 경보를 위한 데이터 처리 시스템 기술	분석 <ul style="list-style-type: none"> 스마트 방사선 선량계의 진단, 감시, 예측 시스템 개발 선량계 시스템 결합을 통해 통합 관제 시스템의 신호처리 하드웨어 및 알고리즘 개발 	획득 및 분석 기술 <ul style="list-style-type: none"> 무선통신 데이터 처리 및 운용 시스템 기술
--	--	--

2) 방사선 암 치료용 인체 침습 선량계

□ 기술의 정의

- 인체 침습 용 트랜지스터 기반 초소형 저전력 선량 측정을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 기술 및 검증 기술
- 방사선암치료에서 치료선량 측정장비의 안전성 확보를 위한 방사선 간섭 회피 초소형 무선 통신 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- IoT 기반 초소형 무선 통신 회로는 많이 연구되고 있으나 방사선 암 치료 환경에 적용이 가능한 방사선센서 기술개발은 아직 진행된 적 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국의 대학 등에서 트랜지스터 기반 실리콘 방사선 선량계가 활발히 개발되고 있음.

□ 미래동향 예측

- 방사선을 이용한 암치료에서 환자의 건강과 치료의 효율성을 높이기 위한 방사선량 측정기술의 고도화가 지속적으로 진행될 것이며, 최근 스마트기기를 이용한 방사선측정기술이 점차 확대 적용될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- ICT기반 기술 및 방사선량 계측 관련 기초 및 원천기술이 많이 확보되어 있어 연구계획 수립단계에서 전략적 목표 설정에 부합하는 협력 체계 구축
- 산·학·연·병원 공동연구체계를 통한 기초 원천 기술 확보와 실증 기술의 동반 확보 추진

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 인체 침습 용 트랜지스터 기반 초소형 저전력 선량 측정기술 	<ul style="list-style-type: none"> 초소형 암치료 기반 방사선 센서 설계 기술 개발 암치료 침습 센서의 신호전달을 위한 무선 통신용 on-chip 모듈 통합 암치료 침습 센서와 암치료 기기와의 시스템 결합을 통한 시험 검증 및 방사선 데이터 처리를 위한 신호처리 하드웨어 및 알고리즘 개발 최종목표: 인체 침습 용 트랜지스터 기반 초소형 저전력 선량 측정기술 	<ul style="list-style-type: none"> 무선통신용 On-Chip모듈기술 선량계와 Chip모듈 결합기술 선량측정기술
<ul style="list-style-type: none"> 방사선 간섭 회피 초소형 무선 통신 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 초소형 암치료 기기 주파수 분석 및 무선 통신 기기와의 간섭 영향 진단 기술 개발 암치료 기기를 위한 전용 무선 통신 모듈 개발 암치료 침습 센서와 전용 무선 통신 모듈의 시스템 결합을 통한 시험 검증 및 방사선 데이터 처리를 위한 신호처리 하드웨어 및 알고리즘 개발 방사선 간섭 회피 초소형 무선 통신 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 방사선기기 주파수 간섭 영상 진단 및 회피 기술 의료용 기각 전용 무선 통신모듈 기술 무선통신 데이터 처리 및 운용 시스템 하드웨어 및 소프트웨어 기술

3.3.4 의료방사선량 저감화 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 진단 방사선검사에서는 방사선에 의한 결정적 영향이 바로 나타나지 않아 그동안 방사선 검사 선량에 무감각하였으나, 최근 의료방사선에 의해 있을 수도 있는 과잉 피폭에 대하여 국민적 관심이 증가됨.
- 건강증진의 목적이 있으나 불필요한 피폭을 사전에 방지하고 피폭선량의 저감화를 위해서는 진단방사선량을 정확하고 신뢰성 있게 측정해야 함.
- 중재적 방사선 시술 검사는 의료방사선을 이용한 환자 질환의 진단을 넘어서 환자의 질환을 시술하는 의료 기술이며, 다른 의료 방사선 검사에 비해 장시간의 방사선이 시술자에게 노출되고 있어 과대 피폭의 위험이 있음.

- 방사성동위원소 및 방사성의약품을 체내에 투여하여 진단 및 치료를 수행하는 핵의학영상에서 정확한 방사능량의 측정은 검사의 정확도와 안전성 확보에 중요함.
- 고령화 사회 진입 및 난치성 질환 증가에 따라 핵의학영상의 수요가 증가하고 있어, 핵의학영상을 이용한 체내 방사능의 정확한 평가가 진단에 중요함. PET과 달리 대부분의 감마카메라와 SPECT 영상들은 방사성의약품 분포의 정성적 평가에만 의존하고 있음.
- 치료용 방사성의약품을 이용한 난치성 질환의 극복방안이 새로운 의료기술로 기대되고 있으나, 치료용 방사성의약품은 진단용에 비해 투여량이 많고 고에너지 방사선 방출이 많아 정확한 치료계획 및 경과과정 평가가 중요함.
- 일반적으로 종사자 내부피폭 감시에 사용되는 고정식 내부피폭 측정 장비는 정교한 측정이 가능하지만 고가이면서 유지관리에 어려움이 있음.
- 핵의학 종사자 내부피폭감시방법은 취급되는 핵종에 따라 다름.
- 핵의학 종사자는 일반적으로 방사성의약품을 손으로 직접 취급하기 때문에 국소 부위에 대한 방사선피폭을 유발함.
- 일반적으로 핵의학 진단 및 치료를 받는 소아 및 아동에 대해서는 인체 특성(신체 크기, 체내 거동, 대사율 등)을 반영한 피폭선량평가가 필요하지만, 아직 실제 임상에서 소아용 지침이 표준화되지 않았음.
- 핵의학분야 환자의 경우 보호자나 간병인 등 주변인에게도 방사선피폭을 줌.

□ 기술개발 필요성

- 국내외적으로 의료방사선량도 저감화 해야 한다는 요구에 따라 장비 및 이용기술 측면에서 선량저감화 기술이 필요함.
- 중재적 방사선 시술은 다른 검사에 비해 장시간 방사선이 환자 및 시술자에게 노출되는 시술로 환자뿐만 아니라 시술자의 삶의 질과 관련 되어 많은 시간 노출되는 경우에 결정적 영향(탈모 및 피부홍반 등)이 나타나므로, 관련 종사자의 건강을 위해 시술자 및 시술환경에 따른 피폭선량을 정확하고 신뢰성 있게 측정할 수 있는 기술이 필요함.
- 최근 PET 장비 사용 증가에 따라 단반감기 방사성동위원소 이용이 증가하고 있으며, 핵의학치료의 연구개발 및 임상적용 확대에 따라 중/장반감기의 방사성동위원소의 이용이 예상되고 있어, 핵의학검사의 1차 단계에서 안전관리가 필요함.

- 최근 다기관 및 다중 영상기반 핵의학영상 진료의 수요 증가로 핵의학영상 표준 품질 관리와 향상을 필요성이 증가하였고, 이에 맞춰 핵의학영상의 객관적인 품질해석 및 평가를 통한 영상기반의 핵의학장비 관리 및 진료의 정확도 향상이 필요함.
- 최근 핵의학치료에서 핵의학영상을 이용한 진단 및 치료용 방사성의약품의 체내 분포와 양의 정확한 측정은 핵의학진단에서 방사선량의 저감화와 진료의 효율성 향상을 함께 달성할 수 있음.
- 장비 구축 및 운영비용의 비용부담이 낮고 손쉽게 운영 및 적용이 가능한 휴대용 계측장비를 사용하는 종사자 내부피폭 신속 감시기술 개발이 필요함.
- 취급 핵종(I-131, Tc-99m, F-18 등)의 종류를 고려한 핵의학분야 종사자 내부피폭 모니터링 표준체계 개발이 필요함. 방사성의약품의 경우 핵종의 특성을 고려하여 종사자에 대한 말단선량 평가기술 개발이 필요함.
- 핵의학 진단 및 치료 시 소아의 인체 특성을 반영한 내부피폭선량평가 기술 개발이 방사선에 민감한 소아환자의 건강에 중요하며, 동시에 보호자 및 간병인의 피폭 시나리오를 고려한 피폭선량 예측 및 평가 기술개발이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 진단 및 중재시술 방사선 선량저감화 기술

□ 기술의 정의

- 진단영상 및 중재시술 방사선량의 저감화를 위한 물리적 차폐체 및 필터의 설계 및 영상획득과 관련된 기술
- 능동형/수동형 선량계 기반의 중재시술자의 피폭선량 측정기술과 시술자의 안전성 확보에 필요한 말단 및 수정체 선량평가 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 물리적 차폐체를 이용한 진단 방사선 검사의 선량 저감화 기술 개발연구가 활발하게 수행되고 있으며, 진단영상획득 시 선량감소에 필요한 직접 및 간접방식의 진단영상 획득장치 개발 연구가 수행되고 있음.
- 국내에서는 의료방사선 분야에서는 진단용 저에너지 방사선 선량측정 기술이 미비하며, 대부분 방사선치료와 관련된 고에너지 방사선량측정 기술이 발달함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해외에서는 진단 방사선 검사과정에서 다양한 차폐체 및 복합필터를 이용한 피폭선량 저감화 기술을 개발함.
- 영상진단용 방사선의 피폭선량 저감화를 위한 직접/간접 방식의 의료영상 획득장치가 개발되고 있으며, 검출기 소자의 효율성을 위한 다변화 연구를 수행하고 있음.
- 국외에서는 다양한 에너지 범위의 선량 측정 기술 및 가이드라인을 제시함 (TRS-457 프로토콜, TG-61 프로토콜 등).

□ 미래동향 예측

- 방사선진단에서 진단 효율과 정확도의 손실이 없이 환자의 선량을 줄이기 위한 장비시스템 및 보조 장치의 개발과 이용검증 연구가 꾸준히 추진될 것이며, 이를 통하여 진단 참조준위를 지속적으로 낮추기 위한 방안이 나올 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 임상에서 활용되는 방사선 진단영상 및 중재기술에 대한 이해 및 방사선 차폐 및 필터 등의 공학적 원천기술, 영상신호의 처리 및 평가 등과 같은 전문 분야들의 유기적 협력이 필요하며, 이를 위해 산·학·연·병원 공동연구체계를 구축하여 연구를 수행함.
- 연구개발의 목표기준 설정 및 수행과정에서 성과의 객관적 평가를 위해 유관 기관 및 학회와의 협력체계를 구축함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 물리적 차폐체 및 필터를 이용한 선량 저감화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 물리적 차폐체 및 필터 재료에 관한 모의 시뮬레이션 연구 물리적 차폐체 및 필터의 공학적 설계 인체 팬텀 대상의 임상 진단방사선 검사 모사 및 선량 저감화 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 물리적 차폐체의 방사선차폐 해석 기술 필터에 따른 방사선질 변화 스펙트럼 해석 임상 진단방사선 검사의 피부선량 및 유효선량 평가 기술 물리적 차폐체 및 필터의 공학적 설계 기술
<ul style="list-style-type: none"> 의료영상획득장치 	<ul style="list-style-type: none"> 기존의 의료영상 획득장치 분석 및 	<ul style="list-style-type: none"> 기존의 의료영상획득장치

의 효율성 향상을 이용한 저 선량 영상 획득 기술 개발	효율성 방안 결정 <ul style="list-style-type: none"> • 의료영상 획득 장치의 하드웨어/소프트웨어 향상 기술 • 기존의 의료영상 획득장치와 동일한 영상획득 선량 저감화 검증 	기술 자료 확보 <ul style="list-style-type: none"> • 의료영상 평가 기술 • 임상 진단방사선 검사 시 선량 평가 기술 • keV 저에너지의 선량 평가 기술
• 중재시술자 말단 및 수정체 선량평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 중재적 방사선시술의 발생하는 방사선 몬테칼로 시뮬레이션 측정 • 시술자의 말단 수정체 선량을 위한 측정 시스템 신뢰성 향상 • 인체팬텀을 이용한 중재적 방사선 시술 모사 시 발생하는 방사선량 측정 및 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 임상의 중재적 방사선 시술 상황의 전산모사기술 • 저에너지 방사선량 측정시스템 현황 파악 및 측정기술 확보 • 중재적 방사선 시술 시 3차원 공간선량 분포 측정 및 평가기술
• 능동형/수동형 선량계 기반 중재시술자 피폭선량 측정기술	<ul style="list-style-type: none"> • 저에너지 방사선 측정시스템 및 기술 분석 • 다양한 측정시스템이 가지는 정확도 및 신뢰성 분석 • 인체 팬텀 대상의 임상모사 진단 방사선 조사 시 피폭선량 측정 및 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 기존의 능동형/ 수동형 선량계 현황 분석 측정기술 확보 • 저에너지 방사선 측정 시 발생하는 측정 불확도 평가 기술 • 팬텀 대상의 표면선량 측정 기술 • 중재적 방사선시술시 피폭선량 모니터링 기술

2) 핵의학 영상품질 관리 및 정확도 향상 기술

□ 기술의 정의

- 핵의학분야에서 사용되는 단/중/장 반감기의 진단용 및 치료용 방사성동위원소 방사능 정밀측정 기술
- 다양한 핵의학 진료 영상의 객관적인 품질 평가 및 향상을 위한 전산모사 기반 평가기술 및 영상재구성 기술
- 핵의학영상에 기반 한 진단 및 치료용 방사성의약품의 체내 방사능의 정밀한 측정을 위한 소프트웨어 및 보조 장치 기술
- 핵의학 영상에 기반 한 진단 및 치료용 방사성의약품의 체내 동력학적 거동 및 내부흡수선량 평가의 정밀도 향상을 위한 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 2010년 이전까지 임상용 dose calibrator에 대한 측정 정확도 평가가 수행된 바가 있으나, 측정향상 및 표준 관리기술에 대한 연구는 아직 없으며, 신규 개발된 임상용 방사성 핵종에 대한 후속연구가 없음.
- 국내 임상에서는 10 여 년 전에 개발된 오래된 기술들이 영상장비에 도입되어 영상 정량화에 활용되고 있어 방사능의 측정정밀도에 한계가 있음.
- 임상 PET 뇌영상의 표준화를 위한 연구가 최근 추진되었으나, 조기 종료됨.
- 다양한 핵의학영상의 재구성 기술개발에 관련된 연구들이 수행되었지만, 주로 장치개발과 관련된 연구들로 PET 장비가 대부분이며, 실제 임상영상을 대상으로 하거나 다기관 영상에 적용이 가능한 연구들은 수행된 적 없음.
- 진단용 방사성의약품에 대해서는 생체거동 및 선량평가 연구들이 수행되고 있으나, 치료분야에서는 임상 I-131 영상을 이용한 정성평가 외에는 아직 비 임상연구 수준임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 임상용 dose calibrator의 표준관리 및 성능평가 절차에 대한 연구와 지침서들이 있으나, 측정기술 및 신개발 방사성 핵종에 대한 체계적 연구는 없음.
- 영상장비 개발 또는 알고리즘 개발 측면에서 영상품질평가 연구가 수행된 바가 있으며, PET영상 표준섭취계수 측정의 정확도 평가가 제한적으로 미국의 핵의학회(SNM)와 방사선학회(ACR)에서 수행되고 있음.
- 국외에서는 치료용 방사성의약품의 제품화에 임상 핵의학적 유용성 및 안전성 평가기술개발이 활발하며 신기술 개발을 선도하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 고품질 방사선영상 기반 의료기술로 방사성동위원소를 이용한 진단과 치료가 계속 확대될 것이며, 이를 위해 새로운 고기능의 방사성동위원소 및 방사성의약품의 개발이 계속되고, 방사성의약품의 투여 전후 및 체내 방사능의 농도를 정확하게 측정하여 환자 맞춤형 방사성동위원소 사용기술의 고도화에 필요한 연구가 활성화될 것으로 예상됨.
- 환자 맞춤형 진단 및 치료기술에 기반을 둔 핵의학 진료와 이를 위한 영상의 이용이 확산될 것임.

- 핵의학영상의 이용 확산과 낮아지는 진단참조준위에 따라 영상획득 장치의 효율성 향상을 통해 기존의 검사 조건에 비해 적은 요구환경에서도 동등한 영상을 획득하여 진단 성능의 저하 없이 환자의 선량을 감소시키기 위한 기술개발의 수요가 증가함.

□ 기술개발 수행체계

- 임상 핵의학 영상품질의 평가를 위해서는 물리·공학적 기술과 함께 화학, 임상 등의 다학제 분야의 협력이 필요하며, 선량계 측정 및 내부선량의 표준 방안 등의 기술개발 및 검증을 위한 유관 기관 및 학회와의 협력 연구
- 다학제 연구기술을 반영 및 연계체계 구축을 위한 산·학·연·병원 공동연구체계를 통한 추진
- 연구개발의 목표기준 설정 및 수행과정에서 성과의 객관적 평가를 위해 유관 기관 및 학회와의 협력체계 수립

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 단/중/장반감기 방사능 정밀측정 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • PET 및 감마카메라용 단반감기 방사성 핵종 및 다중 방사선 방출 중/장반감기 방사성핵종 측정 최적화 기술 개발 및 표준측정선원 개발 • 임상현장용 방사성핵종 표준측정기술 개발 • 진단 및 치료용 방사성핵종 방사능측정 다기관 평가 및 보급 • 핵의학 진단 및 치료용 방사성핵종 방사능 정밀측정 표준기술 및 절차 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 방사성핵종 전산모사 기술 • 방사선계측 및 검증 기술 • 방사선 계측 표준절차 검증 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 핵의학영상 품질해석 및 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵의학영상(PET, SPECT, 감마카메라)의 영상품질평가 및 최적화/표준화 기술 개발 • 다중 방사선방출 핵종의 핵의학영상 품질평가 및 최적화/표준화 기술 개발 • 핵의학영상 품질평가 및 최적화 표준절차 기수 개발 및 검증 • 장비 성능 평가 및 진단 정확도 향상을 위한 진단 및 치료용 핵의학영상의 품질평가 및 최적화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵의학영상 정도관리 기술 • 전산기반 의료영상 품질평가 기술 • 핵의학영상 정량재구성 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 핵의학영상 기반 방사능 정밀측정 	<ul style="list-style-type: none"> • PET, SPECT 및 감마카메라 영상기반 진단용 방사성핵종 정밀측정 향상 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵의학영상 물리적 보정 기술

기술	기술 개발 • SPECT 및 감마카메라 영상기반 치료용 방사성핵종 정밀측정 기술 개발 • 진단 및 치료용 방사성핵종의 정량평가 기술 보급 및 임상검증 • 핵의학영상을 이용한 진단 및 치료용 방사성핵종의 정량평가 기술개발 및 임상보급/검증	• 정량적 핵의학 영상재구성 기술 • 융합 핵의학 정합 및 분할처리 기술
• 영상기반 치료용 방사성의약품 생체내 거동 및 선량평가 향상기술	• 치료용 방사성의약품의 Surrogate영상평가법(PET, SPECT) 개발/환자별 영상기반 선량평가기술 개발 • 후향적 선량평가 기술 평가 및 고숙화 기술 개발 • 영상기반 선량평가 임상적용 • 국내 임상적용 치료용 방사성의약품들에 대한 영상기반 선량평가 플랫폼 기술 확보	• 영상기반 추적자 동력학 분석 기술 • 영상 기반 내부흡수선량평가 기술 • 대용량 데이터 획득 및 분석 기술

3) 핵의학종사자/환자보호자 피폭선량 평가 및 예측 기술

☐ 기술의 정의

- 휴대용 계측장비를 이용한 핵의학분야 종사자의 내부피폭 스크리닝 및 검증에 필요한 기술과 방사성 핵종별 내부피폭 모니터링 표준체계 구축 기술
- 방사성의약품을 취급하는 핵의학종사자의 말단선량 평가를 위한 전산모사 및 실측 평가 기술
- 방사선 민감 소아들의 내부피폭선량평가 방법론 및 최적화 기술
- 핵의학 진단 및 치료에서 환자보호자들에 대한 다양한 피폭시나리오 및 피폭선량 평가를 위한 전산예측 평가 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서 핵의학 종사자 내부피폭 모니터링이 시범적으로 진행한 바 있으나, 종사자들의 내부피폭 스크리닝과 관련된 연구가 수행된 바가 없고, 관련 표준절차 및 체계 개발에 대한 연구도 수행된 바 없음.
- 국내에서 핵의학 종사자 말단선량 평가에 대한 연구를 진행한 바 없음.

- 한국인 및 아시아인 대상으로 핵의학 진단 및 치료를 받는 환자 중 소아를 대상으로 별도의 선량평가 관련 연구가 수행된 바 없음.
- 국내에서는 TLD 등의 개인별 선량측정 장비를 이용하여 핵의학종사자 및 보호자에 대한 피폭선량 평가연구를 진행한 바 있으나 다양한 피폭시나리오에 대한 전산모사 기반의 선량예측평가 기술에 대한 연구는 미미함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 유럽에서는 ORAMED (Optimization of Radiation Protection of Medical Staff) 프로젝트를 통해 핵의학 종사자 피폭선량평가 및 최적화 연구를 수행함.
- 스위스 공중보건부에서는 휴대용 계측장비를 이용하여 핵의학 분야 종사자의 내부피폭을 신속히 감시하는 절차를 개발하여 도입함.
- 미국과 유럽에서는 핵의학 종사자 내부피폭 평가 및 관리를 위한 표준절차 및 지침 개발에 대한 연구를 진행함.
- ICRP에서는 방사성의약품에 투여 환자에 대하여 대표 연령군 별 선량환산인자를 제공하고 있음, 미국 Harvard, Johns Hopkins 대학 등에서는 공동으로 소아 핵의학 절차에서 받는 선량을 다양한 소아전산팬텀을 이용하여 평가함.
- 유럽 핵의학회(EANM)에서는 유럽방사선량연구회(EURADOS)와 공동으로 핵의학종사자 보호자/간병인에 대한 전산모사 기반 피폭시나리오별 선량평가 연구를 진행함.
- 미국 NIH에서는 인체전산팬텀을 활용한 핵의학환자로부터의 주변인 피폭선량평가 기술을 연구한 바 있음.

□ 미래동향 예측

- 핵의학 진료기술을 이용한 진단 및 치료가 확대됨에 따라 핵의학 종사자와 환자 보호자들의 방사선 환경노출이 증가하고, 이에 따른 종사자 및 보호자들에 대한 방사선량 감시와 환경 최적화 수요가 증가함.
- 국내외적으로 핵의학 치료의 안전성 확보 필요성 증가에 따라 성인뿐만 아니라 방사선에 상대적으로 민감한 성장기의 소아들에 대한 진단 및 치료 지침의 개선에 필요한 연구필요성이 지속적으로 제기될 것임.
- 의료기술의 확대 및 국제화에 따라 미국 및 유럽 주도의 핵의학 선량 안전성과 관련된 연구개발 필요성이 아시아 및 국내로도 확산될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 임상 핵의학현장에서 종사자 및 보호자들의 선량안전성 평가를 위해서는 연구자뿐만 아니라 종사자 및 안전관리 유관기관과의 협력체계 구축: 학·연·병원 공동연구체계를 통해 추진함.
- 연구개발의 목표기준 설정 및 수행과정에서 성과의 객관적 평가를 위해 유관 기관 및 학회와의 협력체계를 수립함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 휴대용 계측장비 기반 종사자 내부피폭 스크리닝 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 휴대용 계측장비 모델별 성능평가 및 주요 핵종에 대한 내부피폭 스크리닝 적용 테스트실험 • 고정식 내부피폭 측정장비와 성능비교/검증 및 표준절차 개발 • 최종목표: 휴대용 계측장비 이용 내부피폭 신속 감시 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 휴대용 방사선계측장비 성능테스트 기술 • 내부피폭 스크리닝 기술 및 표준절차
<ul style="list-style-type: none"> • 핵의학분야 핵종별 종사자 내부피폭 모니터링 표준체계 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 핵의학 분야 주요 취급핵종 및 종사자 직무유형별 내부피폭 현황 조사 • 취급핵종별 내부피폭 모니터링 표준절차 및 체계 개발 • 취급핵종에 따른 핵의학종사자 내부피폭 표준감시체계 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵의학분야 핵종별 종사자 내부피폭 감시기술 • 핵의학분야 종사자 내부피폭 표준감시체계
<ul style="list-style-type: none"> • 방사성의약품 취급 핵의학종사자 말단선량 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 핵의학 분야 주요 취급 방사성의약품 조사 및 말단선량 평가 기반 구축 • 말단선량계 측정 및 전산모사 평가 결과에 대한 상호비교 및 검증 연구 • 방사성의약품에 대한 핵의학종사자 말단선량 측정 및 평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵의학종사자 말단선량 평가 전산모델 • 말단선량 측정 및 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> • 소아 내부피폭선량평가 최적화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 핵의학 분야 소아 내부피폭현황 조사 및 소아 연령별 내부피폭선량 평가방법론 개발 • 소아 연령별 전산팬텀을 적용한 내부피폭평가 기술 개발 • 소아 내부피폭선량평가 최적화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 소아 연령별 전산팬텀 모델 • 핵의학 소아환자 내부피폭선량 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> • 보호자 피폭시나리오 및 피폭선량 예측평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵의학 분야 보호자 피폭시나리오 조사 및 전산모사를 위한 환자 및 보호자의 전산팬텀 체형/자세 변형 연구 • 주요 피폭시나리오에 대한 보호자/간병인의 피폭선량 	<ul style="list-style-type: none"> • 일반인 보호자 체형/자세변형 전산팬텀 모델 • 핵의학분야 보호자 피폭선량 예측평가기술

	전산모사기반 예측평가기술 개발 • 보호자 피폭시나리오 개발 및 피폭선량 예측평가기술 개발	
--	---	--

3.4 가속기 방사선 안전 기술

3.4.1 개요

- 다양한 가속기 시설의 가동과 관련하여 시설특성별 적용가능한 방사선 안전 기술이 필요하며 크게 두 가지로 구분할 수 있음.
- 가속기 방사선 안전 설계 및 해석 기술
- 가속기 운영 및 해체 관련 방사선안전 기술

3.4.2 가속기 방사선 안전 설계 및 해석 기술

가. 기술 개요

- 이슈 및 문제점
 - 방사선 안전 분야에서 새로운 영역의 연구용, 의료용, 산업용 가속기 시설이 건설되면서, 새로운 방사선안전 관련 이슈가 제기되고 있으나 안전 설계나 해석, 평가에 필요한 데이터나 기술은 아직 부족한 수준이고, 안전규제를 위한 법체계도 전문적 지식에 근거한 개선이 이루어지지 못하고 있음.
 - 방사선안전 설계 및 해석에 요구되는 전산모사프로그램은 모두 선진국의 것을 그대로 사용하고 있으나 현 시점까지도 정확도 검증을 위한 실험데이터들이 부족하기 때문에 국내에서도 틈새 분야로서 국제 경쟁력을 갖춘 기술력을 확보할 수 있음. 이용 가능한 국내 시설을 활용하고 적절한 인프라를 구축하면 타 분야의 방사선 응용 연구에도 활용이 가능함.
 - 새로운 전산모사프로그램의 개발을 통해 세계적인 수준에 진입을 쉽지 않지만 일본은 2000년경부터 PHITS라는 중이온가속기에 특화된 코드를, 중국은 2010년 이후 SuperMC라는 코드를 성공적으로 개발하여 이용분야를 확장하고 있음. 국내 연구진이 선도적 역할을 하는 분야는 매우 미약함.
 - 핵융합기기나 새로운 형태의 가속기 시설의 경우에는 전반적으로 방사선안전에 대한 이슈들이 잘 정리되지 못하고 현재 규제범위에서만 임시방편처럼 안전평가방법이 검토되는 수준이라 기술의 사각지대가 존재함. 또한 전

문적인 기초 자료의 부족으로 과도한 규제가 시행되고 있는 현실임.

- 원자력안전법에서 원자로 등을 대상으로 만들어진 요구기준들이 가속기 시설에 그대로 적용되면서 시설 설계와 운영에 많은 문제를 유발하고 있음. 적절한 규제요건 특히 환경에 미치는 영향 등이 명확히 분석되어야 규제의 혼란과 인프라의 낭비를 예방할 수 있음.

□ 기술개발 필요성

- 방사선에 의한 물질이나 기기의 손상은 특정 분야에서 많이 연구되어 졌으나 가속기 발생 방사선과 같이 다양하고 높은 에너지를 갖는 방사선에 의한 손상 연구결과는 매우 제한적이다. 가속기 운전의 핵심이 되는 설비를 중심으로 방사선 손상 정도에 대한 정보를 획득하는 것이 중요하다. 가속기의 성능 유지 및 안전성 확보차원에서 관련 자료의 축적이 요구된다. 특히 체계적인 연구 결과와 데이터 축적이 요구되며 측정을 통한 실증이 상대적으로 중요함.
- 방사화 평가에 사용되는 국내에서 개발된 Inventory 코드나 라이브러리가 존재하지 않다. 국제적으로 활용되는 FISPACT, ORIGIN, DCHAIN 등의 코드는 제한된 데이터만 제공하고 있어 가속기에서 발생하는 방사화 평가를 위한 충분한 기초자료를 제공하지 못하고 있음.
- 가속기 설계 단계에서는 주요 빔 손실 지점과 그 근방의 가속기 부품에 대한 방사화 평가를 통해서 방사화 생성물의 양과 터널 내 작업자의 피폭방사선량 등을 예측하여야 함.
- 고준위 방사화 기기의 경우에는 재활용, 가공, 보관관리 등의 과정중 내/외부 피폭의 가능성이 상존한다. 따라서 공정별 피폭 경로를 분석하고 피폭량을 정확히 평가하는 기술과 기준지침이 필요함.
- 가속기 시운전 및 운영단계에서 방사화 실증실험을 통하여 전산모사 기법에 대한 검증 가능. 가속 입자와 직접 충돌하는 표적이나 덤프를 제외한 대부분의 방사화 생성물은 2차 중성자에 의한 것이므로, 2차 중성자를 직접 측정하거나 주요 빔 손실 지점 주위에 방사화 시편을 배치하고 분석하는 기술의 확립이 필요함.
- 공기 중 생성 방사성 물질의 경우에는 다양한 반감기의 핵종의 혼재로 인하여 관리기준의 적용에 혼란이 있음. 중성자 생성용 가속기의 경우에는 수은 표적과 같은 특정 물질에 대한 폐기물 처리 기준이 마련되어 있지 않아 공기 중 생성물과 특정 폐기물에 대한 관리기준과 표준안이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 차폐해석 고도 기술

□ 기술의 정의

- Benchmarking용 중성자 선원 구축을 포함한 가속기 방사선 평가방법을 검증하는 기술
- 중이온입자를 포함한 고에너지 방사선 수송/차폐 해석용 계산코드 개발
- 국제적 경쟁력이 있는 고에너지 방사선 핵자료 축적 및 중이온 반응 평가기술
- 운전형태 및 가속특성을 고려한 대형 가속기 시설의 차폐설계용 표준 기술
- 가속기 구조물의 방사선 손상 평가기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 2 GeV 이상의 전자빔을 이용한 중성자 선장이 포항가속기연구소에 있었으나 현재는 사용 불가. 경주 양성자 사업단의 100 MeV 양성자빔을 이용하여 제한적인 에너지 범위의 중성자 선장은 제작 가능함.
- 차폐해석 등에 활용 가능한 코드가 국내에는 개발되어 있지 않음.
- 원자력연구원 핵자료팀을 중심으로 광핵반응 단면적 라이브러리의 개발이나 일부 가속기 시설에서 실험 핵자료가 도출되고 있음.
- 포항방사광가속기, 경주양성자가속기, 중이온가속기의 건설과정을 통해 이미 일정부분의 전문 기술이 축적되어 있음.
- 방사광가속기의 성능을 좌우하는 삽입장치용 영구자석에 대한 방사선 손상 연구가 수행됨.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 유럽의 CERN, 일본의 JAEA등 주요 선진국이 서로 다른 에너지 범위의 중성자 선장을 보유하고 있으며 미국은 우주 방사선 모사를 위한 표준 중성자 선장의 설치가 검토되고 있음.
- Monte Carlo 코드로서 MCNP, FLUKA, MARS 외에 최근 일본의 PHITS, 중국의 SuperMC가 개발되어 이용자가 증가하고 있음.
- 미국, 유럽, 일본의 연구진은 단독 또는 공동으로 자국에서 운영 중인 고에

너지 입자가속기를 이용하여 기초자료를 생산하고 있으며, 이를 통해 고에너지 핵자료 데이터베이스를 지속적으로 보완하고 있음.

- 가속기 방사선의 다양성과 범위를 고려하여 부분적으로 표준지침들이 DOE, NCRP, IAEA 및 주요 가속기 시설 등에서 작성되고 있음.
- 유럽 CERN을 중심으로 관련 데이터들이 일부 확보되어 있으며 전자기기와 영구자석 등에 대한 연구가 계속되고 있음. DPA 평가 방법에 대한 새로운 해석이 도입되는 반면 측정된 결과에 대한 신뢰는 높음.

□ 미래동향 예측

- 고에너지 방사선, 특히 고에너지 중성자의 의한 차폐효과 및 피폭선량 평가의 정확성을 높이고, 방사선량 평가를 위한 계산용 신규 코드의 개발에 필요한 검증 표준으로 활용될 것임.
- 한국형 계산 코드의 확보와 핵자료의 개발은 선진국 진입 및 선진국 개발 기술의 상호 공유를 가능하게 함.
- 인력 양성 및 국내 가속기 방사선안전 관련 인프라를 확장에 기여함.
- 가속기 효율적 운영과 안전에 요구되는 기초 자료 및 기술의 확보됨 방사선 손상 데이터는 공개를 제한하고 있어서 국제적 기술력 자립이 가능함.

□ 기술개발 수행체계

- 검증 시설과 같은 인프라의 구축은 대형가속기를 필요로 함으로 단기적으로는 기존의 시설들을 활용하여 틈새분야에 맞는 데이터와 기술을 개발하고 장기적으로는 선도적인 전용 가속기 시설을 구축함.
- 가속기 방사선 분야는 선진국의 연구가 앞서 있으므로 국제 공동연구를 통해 현재 연구 현황을 정확히 판단하고 국제적 경쟁력을 확보할 수 있는 틈새 분야를 도출. 현재 주도적으로 참여하고 있는 국제학술모임인 SATIF/ARIA/Radsynh의 참여그룹과 공동 연구를 추진함.
- 국내 거대 가속기 시설 안전모임인 ARSF를 기반으로 각 시설의 운영 경험을 활용하여 계획되는 연구의 방향을 검증하면 도움이 될 것임.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 가속기 방사선 평가 검증기술	• 운영중인 가속기를 이용한 Benchmarking용 고에너지 중성자 선장 구축 및	• 표준 중성자 선원 개발

	Benchmarking 데이터 확장 - 수 100 MeV 급 - 단일에너지 및 연속에너지 • 전용 표준 중성자 선장 구축 (필요성 검증후) • 고에너지의 방사선 측정기술의 확보	• TOF를 포함한 고에너지 중성자선장 분석 기술
• 고에너지 방사선 수송/차폐 해석 코드 개발	• 국제적 동향과 요구 조건 분석을 통해 개념 설계 실시 • Monte Carlo 코드 방식의 계산용 프로그램 1차판 완성 • 선진국 코드와 동일 수준의 프로그램 개발 • 전자, 양성자, 중성자 가속기에 적용 가능한 프로그램 개발	• Monte Carlo 방식의 고에너지, 중이온 입자의 전산모사 계산 코드 개발
• 고에너지 방사선 핵자료 축적 및 중이온 반응 평가기술	• 선진국 시설을 이용한 국제공동연구를 통한 핵자료 생성 • 핵자료 틈새분야를 검토 후, 우선적 데이터 축적을 통한 한국형 데이터베이스 구축을 통해 국제 경쟁력 확보 • 고에너지 방사선의 핵자료 생성 • 주요 핵반응 연구의 인력양성 등 인프라	• 10 MeV이상 에너지 영역의 핵자료 개발 • 전문가 양산용 인력양성 사업
• 가속기 차폐시설 설계 기술	• 가속기 유형별 방사선안전요소 분석 • 가속기 운영 경험에 기반한 안전 요소 위험도 평가 • 가속기 차폐설계를 위한 표준 지침서 작성	• 가속기유형별 안전요소분석 기술 • 차폐설계 표준기술
• 가속기 구조물의 방사선 손상 평가기술	• 가속기 부품별 방사선 손상의 유형과 증상에 대한 연구 • 방사성 손상 예측, 평가 기술을 확보 • 국제 협력을 통한 방사선 손상 정도 평가 • 국내 실증 시설의 구축 및 평가, 한국형 방사선 손상 데이터베이스 구축	• 방사선 손상 원인파 정도 평가 기술 • 가속기 시설 재료별 방사선 손상 데이터베이스 구축

2) 방사화 평가 기술

□ 기술의 정의

- 방사화 평가 Inventory 코드 및 라이브러리 개발
- 가속기 부품별 방사화 평가 및 검증
- 방사화부품의 재활용 중 피폭선량 평가 및 저감화 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 가속기 시설에 적용된 방사화 평가는 전적으로 외국의 코드와 라이브러리를 활용하는 수준이었고, 가속기 부품에 대한 방사화 평가는 inventory 코드 등을 통해 실시하고 있으나, 한정적인 코드를 사용하는 경향이 있음.
- 국내 각 대형가속기에서 이에 대한 기술적 요구가 제시되고 있음.
- 검출기를 활용한 중성자 측정, 방사화 시편을 이용한 측정법 등이 국내에서도 활용되고 있으나, 대형가속기와 관련한 수십 ~ 수백 MeV 이상의 고에너지 중성자에 대한 측정 경험은 부족한 편임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국제 협력을 통해 기존의 코드와 라이브러리에 대한 비교 연구 등이 계속 수행되고 있으며, 가속기 발생 방사선에 적합하게 에너지 범위나 입자의 종류와 같이 데이터 영역을 확장하는 노력을 하고 있음.
- MCNP, PHITS, FLUKA, MARS 등 다양한 MC 전산모사 코드, FISPACT, DCHAIN-SP 등 inventory 코드가 지속적으로 개발되고 있으며, benchmarking을 위한 실험 자료를 생산하고 있음.
- 기준이 방사화 부품에 대한 처리 기준이 수립되어 있음.
- 검출기를 이용하거나, 방사화 시편을 이용한 중성자 스펙트럼 측정 등 다양한 방법으로 고에너지 방사선에 대한 검증 시험을 실시함.

□ 미래동향 예측

- 본 기술의 확보를 통해 가속기 방사화 평가의 신뢰성을 향상시키고, 국제적인 기술 경쟁력을 확보할 수 있음. 해체/폐기 단계에서의 잔류 방사능 예측의 정확성이 향상됨.
- 안전한 가속기 설계가 가능하고 표준화된 지침에 따라 과도한 방사선피폭을 예방할 수 있으며, 핵융합로 및 원자로의 운영/해체/폐기 공정에 활용할 수 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 국내 핵자료 그룹, 전산모사 전문그룹과 연계해서 선진국의 분석용 몬테카를로 코드에 연동하여 적용 가능한 Inventory 코드를 개발하고, 동시에 국내외 가속기 시설을 이용하여 방사화 분석 실험을 수행하고 이를 기반으로 한

국 핵자료 데이터베이스를 확장함.

- 방사화를 주로 유발하는 주요 가속기 부품에 대한 표준 물성표를 구축하고 방사화 특성 조사하고, 재활용을 위한 가공 공정을 분석하여 피폭을 최소화 하는 작업구조를 개발함.
- 개발된 인프라 시설 및 측정기술을 이용하여 방사화 생성을 검증하는 체계를 구축함으로써 선순환해서 평가기술의 정확도가 향상되도록 함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 방사화 평가 Inventory 코드 및 라이브러리 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 선진국의 코드 등에 대한 실증 평가 및 고에너지 확장성 검토 한국형 코드와 라이브러리 개발 (선진국 코드에도 활용 가능함) 핵자료 등 라이브러리 보강 Benchmarking용 실험결과 라이브러리 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 고에너지 중성자에 의한 핵반응 모사기술 핵반응 라이브러리 구축
<ul style="list-style-type: none"> 가속기 부품별 방사화 평가 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 주요 가속기별 검증 가능한 시설의 정성 및 정량 분석 전산모사 기법에 대한 방사화 benchmarking을 실시, 정확도를 평가 가속기 유형별, 가속입자별 주요 방사화 대상 부품에 대한 분류 및 물성 평가 가속기 유형별 방사화 특성 평가 가속기 부품에 사용되는 재료에 대한 방사화 실험 수행, 방사화 데이터베이스 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 실증실험 기술 부품 방사화의 특성 분석 및 표준 데이터화
<ul style="list-style-type: none"> 방사화 부품의 재활용중 피폭량 평가 및 저감화 	<ul style="list-style-type: none"> 주요 부품의 재활용 현황 분석 부품별 재활용 공정 정리 공정별 내외부 피폭량 평가 저감화 재활용 공정 개발 물성별 재활용 기준 지침의 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 부품 재활용 공정 분석 기술 내외부 피폭경로 분석 및 피폭량 평가

3) 환경영향 평가 기술

□ 기술의 정의

- 방사화로 인한 가속기 외부로의 방사선 영향 평가기술
- 구조부지 환경(화재, 침수, 지진)의 방사선 안전 영향 정도 평가

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 중이온가속기의 환경영향평가 및 우라늄표적에 대한 관리 방안이 검토되고 있는 정도임. 음용수에 대한 방사능 관리기준은 아직 국내에 적용되지 않고 있음.
- 원안위의 연구개발과제에 일부 포함되어 포항가속기연구소의 연구진에 의해 연구된 바 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 선진 가속기 시설을 중심으로 기 확보된 환경영향평가 방법에 대한 실증 노력이 진행되고 있음 예를 들어 CERN은 신규 시설의 건설에 앞서 Leaching factor에 대한 시험 측정을 직접 수행하였으며, SNS와 JPARC은 고방사능 폐기물로서 빔표적의 처리 경험을 통해 표준안을 준비하고 있음.
- 정확한 규제 기준을 가지고 있지 않고 각각의 환경 재난에 대한 일반적인 규제 기준을 적용하고 있음. 그러나 원자로 시설의 사고를 모사하여 케이블 트레이의 화재 전파 특성 등이 연구되어 있음.

□ 미래동향 예측

- 가속기 건설로 인한 주변 일반인과 환경에 대한 안전을 확보함. 핵융합로 및 원자로 환경 평가에 기술을 그대로 활용함.
- 규제 간소화 및 정당성 확보에 기여하고 확보된 기술은 방사선 시설 분야에 활용될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 환경영향에 대한 연구는 타 원자력분야와도 공통점을 가지고 있으므로 공동 연구체계를 구성하는 것이 효과적임. 환경화재의 영향 검토는 해당 분야 전문과와 공동연구를 통해 검증 조건을 확립해야 함.
- 화재, 침수, 지진에 대한 영향 정도 해석은 실증 실험을 통해서 가속기 시설의 방사화 특성이 외부에 직접적으로 영향을 주는지 확인함. 즉 방사화 가능성이 있는 가속기 부품, 구조물을 선정하고 실제 가능한 화재조건이나 침수 재연 시설에서 오염 확산 여부를 실증함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 가속기 외부로의	• 전산모사 기법과 실증 실험을 통해	• 공기중 방사성 기체의

방사선 영향 평가기술	환경으로의 방사선 누설량을 평가함. • 공기중 방사성 폐기물과 특정 폐기물에 대한 관리 표준안 개발 • 환경 및 주변인으로 전파 경로에 대한 연구와 각 경로의 전파 특성 조사	확산 정도 평가 • Leaching factor의 검증 실험 • 기상 환경에 따른 Skyshine 영향 평가기술
• 구조부지 환경의 방사선안전 영향 정도 평가	• 화재, 침수, 지진의 사고 모사 조건을 정립 • 각 재난 요인별 안전영향 인자에 대한 연구 • 실증 연구를 통한 안전 영향 정도에 대한 평가 • 구조부지 환경 요건에 의한 방사선 안전 규제 기준 및 기초 자료 확보	• 가속기 구조에 대한 화재 확산 실증 실험 • 구조물별 침수시 오염 확산 평가

4) 특수시설의 방사선 안전성 향상

□ 기술의 정의

- 핵융합시설의 중성자 생성량 및 방사능 발생분포 평가 기술
- 미래형 가속기 시설의 방사선 안전성 평가 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- KSTAR 건설을 계기로 방사선 차폐해석 및 방사능 평가 등이 수행되었으나 실증은 명확하게 이루어지지 않고 있음.
- 광주과기원에 plasma wake field를 이용한 전자빔 가속시설이 사용허가를 받아 운영되고 있으나 방사선량 발생의 상관관계에 대한 정확한 규명 없이 보수적인 가정으로 안전성을 평가함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 선진국에서도 중성자 생성량에 대한 정량적 검증이 명확하지 않고 가정을 통해 방사선 차폐해석 등을 하고 있음.
- Plasma wake field를 이용한 입자가속에 대한 연구가 여러 선진국 시설에서 수행되고 있으며 방사선 안전성평가에는 보수적인 가정이 적용됨. 최근 해롭게 소개되는 방사선원은 PW급 Laser에 의한 X-선 발생으로 X-선의 에너지가 충분히 높아 중성자도 확인되고 있어 일부 국가에서 이에 대한 안전성

평가연구가 수행 중임.

□ 미래동향 예측

- 개발 중이거나 향후 개발될 시설을 대비한 안전성 평가 기술 확립, 건설의 효율성과 안정성 확보할 수 있으며 국제적인 경쟁력 확보할 수 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 안전규제를 위한 평가의 전문성을 높임으로 기술 수요를 증가시킴.
- ITER에서 요구되는 기초 자료 및 평가해석 기법이 국내의 시설에도 그대로 적용 가능함으로 ITER 평가 그룹과 공동 연구체계를 구축함.
- 레이저 안전에 대한 연구 그룹을 구성하고 관련 인력을 양성함.
- 미래 수요에 대한 주기적인 학술적 모임을 정례화 함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 핵융합시설의 중성자 생성량 및 방사능 발생분포 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 실증 실험을 통한 중성자 생성률 평가 • ITER 등 외부 시설을 이용한 중성자 생성률 평가 및 계산 효율 향상 • 핵융합기기의 정밀 차폐해석을 위한 기초자료 확보 및 해석기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵융합 반응률 평가기술 • 복잡한 구조에 대한 효율적 전산모사 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 미래형 가속기 시설의 방사선 안전성 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 방사선 발생량의 상관관계에 대한 기초연구 • 운영시설에서의 실증연구를 통해 안전성 평가기술을 수립 • 이론적 분석과 실증 연구를 통한 미래형가속기 시설의 방사선 안전성 평가기술 정립 	<ul style="list-style-type: none"> • Wake-field 가속의 방사선 생성률 평가기술 • 고출력레이저의 방사선 안전관리 기준 수립

3.4.3 가속기 운영 및 해체 관련 방사선안전 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 연구용 및 치료용으로 건설되어 운영되는 대형 가속기 시설의 수가 증가하고 다수의 동위원소 생산용 가속기가 운영되면서 운영, 해체, 폐기 분야에

서 고려해야 하는 방사선안전 문제가 점차 증가하고 있음.

- 대형가속기시설에서 방출되는 방사선은 기존의 원자로나 일반 X-선발생장치 등에서 고려되는 것과는 다른 에너지 영역의 특성을 가지므로 정확히 정량화 하는 기술이 필요함. 우주 방사선에 의한 항공기 승무원 등에 대한 피폭 방사선량 평가도 중요한 이슈로 제기되지만 이를 해결하기 위한 인프라와 기술을 확보되어 있지 않음. 이 인프라와 기술은 가속기 방사선에 기반한 것임.
- 국내에 공식적인 방사성폐기물 시설은 경주의 중저준위 폐기물 처분장이 유일한데 다수의 동위원소 생산용 가속기를 포함한 가속기 시설에서는 매우 낮은 준위의 다량의 방사선폐기물을 발생시키고 있음. 따라서 한정된 자원의 제약을 극복하기 위해 방사선 폐기물의 양을 줄일 수 있는 새로운 규제/관리안과 평가방법이 전문적인 지식을 기반으로 도출되어야 함.
- 가속기 시설의 폐기물은 대형의 저준위 폐기물이 대부분이라서 측정과 평가의 어려움이 있으나 법적인 요건은 엄격한 편이라서 표준화된 평가 방법이 제시되는 것이 바람직함.

□ 기술개발 필요성

- 방사선측정 및 개인피폭선량 평가용 기기들에 대한 정확도 확보를 위해 표준 방사선장에 대한 재검토가 필요함. 중성자의 경우, 국내에서도 미국에서와 같이 기존의 중수감속 Cf 선원 외에 비감속 Cf 선원을 국가 개인피폭선량 평가 체계에 도입하려고 하고 있음. 더하여 고에너지 가속기 주변의 중성자 에너지 분포나 우주방사선의 에너지특성을 고려한 높은 에너지의 표준 중성자 선장을 이용한 연구와 검출기의 교정이 필요함.
- 가속기 운영 중의 안전성 확보를 위해서는 정확한 방사선의 측정, 위험도의 평가가 수반되어야 함. 이를 위한 검출기술의 개발 및 사고시나리오를 포함한 안전시스템의 설계 능력이 확보되어야 함.
- 가속기 방사선 안전 기술의 시작은 가속기 운영 중 발생하는 빔손실에 대한 이해와 그 손실의 크기를 정량화 하는 기술이 필요함.
- 원자로와 달리 가속기는 부속기기의 손상이 치명적인 문제를 유발하는 경우는 매우 적으나 JPARC에서 발생했던 사건과 같이 표적물질이 용융되어 방사성물질이 기체로 누설되는 경우도 존재함. 따라서 가속기 부속기기의 손상이 위험을 증가시키는 요인인지를 평가하여 안전설계에 반영하는 것이 중요함. 과도한 규제와 부족한 규제의 논란을 예방하고 작업자들의 안전을

확보하기 위해 반드시 필요함.

- 방사성폐기물 생성량을 평가하고 해체관리를 위해서는 콘크리트 등 재료에 대한 정확한 정보와 저감화 기술을 확보해야 함.
- 현행 원자력안전법은 규제해제(자체처분)를 위해서는 폐기 대상 가속기, 부대설비 및 콘크리트 터널 구조물에 대해 방사성 핵종별 방사능에 대한 분석 결과를 요구하고 있으나 가속기에 발생하는 폐기물 형태를 고려한 분석 기술이 정립되어 있지 않음.
- 최근 증가하고 있는 고에너지 입자방사선 치료기의 운용에 따라 작업 종사자들의 방사선피폭 실용량을 평가하는 기술이 정립되고 법적 요건도 마련되어야 함.

나. 세부기술 내용

1) 고에너지 가속기 방사선 정량화 기술

□ 기술의 정의

- 교정용 고에너지 방사선 표준 선장 구축
- 가속기 발생 특수방사선 환경의 정밀 측정기술
- 액체/기체형 유도방사능 감시 기술
- 가속 입자의 빔손실 측정 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에 고에너지 중성자를 이용한 교정 시설이 부재함. 포항방사광 가속기에서는 에너지 환경을 고려하여 국가표준에 더해 AmBe 선원을 이용한 비교교정을 하고 있음.
- 국내 산업은 범용 방사선검출기 제작의 초기 단계에 있으며 이에 따른 성능 인증용 교정시설이 국가주도로 건설되고 있지만 대형가속기시설의 특수 방사선에 대한 측정 경험이 부족하고 연구 또한 제한적임.
- 기존 가속기 시설에서는 일반적인 방사선 감시 시스템을 운영하고 있으나, 초전도 기술을 적용한 대전 중이온 가속기의 경우, Projectile fragment와 냉각재인 액체 헬륨의 방사화 수준을 감시해야 함. 고출력 빔 사용에 따른 덤프 주변 토양 및 지하수에 대한 감시 기술 및 방사능 기준의 확립이 필요함.
- 가속기 시설에서 빔손실량은 방사선량 평가뿐 아니라 차폐설계에서도 매우

중요한 인자이지만 정량적으로 분석이 잘 되어 있지 못함. 소형 감마 검출기를 터널 내에 설치하여 국한된 영역에서 빔손실을 감시해 왔으며, 최근 포항 4세대 방사광가속기에서는 fiber를 이용한 빔손실 감시 시스템이 개발되려 설치되어 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 유럽의 CERN은 대형 가속기 시설을 이용하여 표준 방사선장을 (CERF) 개발하였고 유럽의 각 기관과 검출기 회사들이 이 시설을 활용하고 있음. 미국에서는 동일한 고에너지 방사선 시설의 구축요구가 증가하고 있음.
- 선진국은 다양한 원리의 검출기를 개발하고 산업화하여 판매시장의 대부분을 차지하고 있으며 고에너지 방사선에 대한 측정 및 검증 기술도 보유하고 있음.
- 국가별로 조금씩 차이는 있으나, 지하수(음용수)에 대한 방사능 관리 기준이 확립되어 있고, 유도방사능을 감시하고 평가하는 방법에 대한 Guideline이 수립되어 있기도 함(미국).
- 이온함, 섬광체, PIN diode, fiber 등 다양한 종류의 검출기를 사용한 빔손실 측정 기술이 대형가속기 시설에 사용되고 있음.

□ 미래동향 예측

- 가속기 시설과 우주 방사선 환경에 근무하는 작업자 등에 대한 정확한 피폭 선량의 평가가 가능하며, 향후 우주개발 사업의 활용가능성이 높음.
- 검출기 개발 기술을 확보하고, 산업화를 통해 국가 경쟁력을 키울 수 있음.
- 가속기 주변 환경에 대한 안전 확보, 가속기에 공통으로 적용할 수 있는 Guideline 수립으로 사업자 및 원안위의 업무 효율성이 증대됨.

□ 기술개발 수행체계

- 1 단계로 국내에 가동 중인 가속기 시설을 이용하여 고에너지 방사선 표준 선장을 구축하고, 동시에 선진국 시설을 이용하여 표준선장의 검증능력 배양한다. 2 단계로 국내 가속기 환경 및 우주방사선 환경을 모사하는 표준 선장을 구축함.
- 가속기 시설의 특수 방사선장의 요건을 도출 후, 현재 상용 검출기의 활용을 위한 표준 인자와 측정계통을 개발하며 동시에 신규 검출기를 개발함.
- 가속기 빔 손실 검출기의 신뢰도 등 구비요건을 정립하고, 실험을 통해 성

능을 검증함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 교정용 고에너지 방사선 표준 선장 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 요구되는 방사선장에 대한 정의 확립 국내 시설을 이용한 제한적 표준 방사선장 구축 표준 방사선장을 이용한 고에너지 중성자, 방사선 교정기술 확보 고에너지 중성자 기반의 교정용 방사선 표준 선장 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 고에너지 방사선장 해석 및 측정기술 표준 방사선장의 안정성 및 정밀도 확보기술
<ul style="list-style-type: none"> 가속기 발생 특수 방사선 환경의 정밀측정기술 	<ul style="list-style-type: none"> 가속기 방사선의 검출 요건 검토 및 측정 기술 정립 고에너지 방사선의 측정기술 정립 광대역, 펄스형 등 특수조건용 검출기 제작기술 및 측정기술의 상용화 	<ul style="list-style-type: none"> 고에너지 중성자 측정기술 usec이하 펄스형 방사선 측정 기술
<ul style="list-style-type: none"> 액체/기체형 유도 방사능 감시 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 가속기 시설에 요구되는 감시 시스템 개발 및 요건 도출 - 주요 기체중 방사성 동위원소 및 액체중 방사성 동위원소 특성 활용 기체/액체/지하수 감시 및 정량화 방법에 대한 지침 개발 가속기 시설에 적합한 액체/기체형 유도방사능 감시 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 다중 방사선원 대상용 액체/기체 검출기의 실시간 방사능 분석기술
<ul style="list-style-type: none"> 가속기입자의 빔손실 측정기술 	<ul style="list-style-type: none"> 고에너지 가속 입자 빔손실 측정 시스템 개발 및 요건 도출 고에너지 가속 입자 빔손실 측정 기술 검증 고에너지 가속입자의 빔손실 측정 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 빔손실 검출기의 신뢰도 및 적용모델 개발 미래형 빔손실 검출기 개발

2) 가속기 안전 운영 및 규제 고도화 기술

□ 기술의 정의

- 사고해석 및 위험도 평가를 통한 가속기 시설 운영의 안정성을 확보하고 합리적인 규제를 위한 전문적 지식을 확보함.
- 위험의 정도 평가를 위한 기기 손상과 같은 위험증가 요인의 분석 기술 및

안전시스템 설계 기술을 포함함.

- 안전성 검증, QA 표준 확보 및 비상대응을 위한 절차 개발

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 현재 운영 중이거나 건설 중인 가속기 시설에서 매우 제한적인 사고해석이 수행된 적이 있고, 방사선시설에 대한 사고 데이터베이스 구축 연구가 진행된바 있음.
- 국내 가속기 운영의 경험이 축적되고 있으므로 상관관계를 밝히는 기반이 완성되어 있다고 판단됨.
- 포항방사광가속기의 오랜 운영경험이 중요한 연구자산임.
- 원자로를 중심으로 사전 연구된 것이 있으므로 이를 기반으로 가속기 분야에 적합한 표준안을 도출이 가능함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 가속기 시설에 대한 사고해석은 구체적인 수준으로 제시되지 못하고 있으며 원자로에 비해 상대적인 위험성이 작음으로 고위험, 중간 등의 단계로만 위험도를 구분, 적용하고 있음.
- 사건별 대응이나 기기의 손상 연구에만 관심이 집중되고 있고 방사선 안전과의 상관관계를 검토한 체계적인 연구는 수립되어 있지 않음.
- IEC를 기준으로 연동시스템의 표준 설계안에 대한 지침이 제시되고 있으나 활용되는 현장에서는 담당자의 판단기준에 따라 적용결과가 크게 좌우됨.
- 체계적인 표준 시스템을 제시되지는 못하고 있으며, CERN이나 SNS와 같이 대형가속기 시설을 중심으로 자체 관리방안과 절차를 마련하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 실제적인 사고시나리오의 개발과 위험도 평가를 통해 사고를 미연에 예방하는 효과와 함께 과도하거나 부족한 규제 지침의 근거로 활용됨.
- 과도하거나 부족한 규제를 예방하는 효율적이고 안전한 가속기 건설과 운영, 가속기 기술개발 역량 강화에 기여함.
- 합리적이고 전문 지식에 근거한 규제지침 마련을 통해 IAEA, ICRP 등에 기초 자료로 활용되는 국제적으로 경쟁력이 있는 연구결과를 도출함.

□ 기술개발 수행체계

- 가속기 건설 및 운영 경험이 있는 가속기 전문연구진과 연계해서 사고시나리오 개발 및 기기 손상의 유형과 특성을 분석하도록 함. 방사선안전 연구진은 안전설계기술의 요건과 소요기술의 표준을 정립하며, 방사선 사고의 확산성과 상관관계를 구명하는 체계를 구축함.
- 원자로 등 시설의 Q/A 요건 등을 참고하여 해당 연구진과 공동으로 가속기 시설에 적합한 요건, 지침 개발을 도모함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사고해석 및 위험도 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 기반의 사고 시나리오 개발 • 가속기 기반의 사고 데이터베이스 구축 및 위험도 평가 • 사고해석 기준을 정립 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 사고 시나리오 모델 및 해석 기술 • 사고 데이터베이스
<ul style="list-style-type: none"> • 기기 손상에 의한 위험도 증가요소 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 기기손상에 대한 형태 분류 • 치명적 부속기기 손상에 따른 방사선 누출 확대의 물리적 관계 분석 • 규제안 마련 	<ul style="list-style-type: none"> • 기기의 손상과 방사선 위험 증가의 상관관계 규명기술
<ul style="list-style-type: none"> • 개인안전연동시스템 설계기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 기술별 신뢰도에 대한 검증을 통해 안전설계를 위한 표준기술을 도출 • 가속기 운영의 안전성을 확보하는 설계기준 및 규제요건 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 개인안전연동시스템의 표준설계기술
<ul style="list-style-type: none"> • 안전성 평가와 검증, QA 표준안 및 비상대응절차 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 환경에서 방사선 사고 예방에 적합한 표준 작업절차 도출 • QA/QC의 실제적 적용 기준(지침) 개발 • 인허가 체계 개선안 (법안) 제시 • 비상대응 체제의 요구기준 및 실행방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 작업 안전 표준절차 • 비상대응을 위한 위험도 결정 기술

3) 해체/폐기용 방사선 안전 기반 기술

□ 기술의 정의

- 콘크리트 불순물 분석 및 성분 데이터 축적, 표준데이터 작성
- 규제해제를 위한 표면 및 부피 내 방사능 평가 표준화

- 콘크리트 등 구조물내의 잔류방사능 측정 및 핵종 분석 기술 (비파괴 방식)
- 가속기 기반 폐기물 관리 및 자체처분 표준안: 해체구조물의 잔류방사선원항 평가기술
- 해체 공정별 피폭선량 평가 및 방사성폐기물 발생량 저감화 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원자로 건설 과정에서 그리고 포항가속기연구소의 연구결과에서 일정량의 분석 결과들이 생산되었으며 이를 기반으로 체계적인 차폐용 콘크리트의 표준데이터를 도출이 가능함.
- 대형가속기는 물론 소형 사이클로트론과 같은 가속기의 완전 해체/폐기 경험과 기술이 축적되어 있지 못하며, 비방사능 평가 방안에 대한 연구 수행도 미미함.
- 감마선 검출기를 이용하여 구조물 내 잔류방사능의 깊이 분포는 측정할 수 있으나, 비파괴 방식의 삼차원적인 분포를 얻기에는 기술적 한계가 있음.
- 40기 이상이 운영중인 소형 사이클로트론 시설에 대한 대규모 해체/폐기가 곧 예상됨에 따라 자체처분을 위한 표준안과 같은 기술지침 개발의 필요성이 대두됨.
- 방사성동위원소 생성용 가속기의 경우와 대용량 강입자 가속기에서 일부 사전 연구가 진행된 바 있으나 해체구조물에 대한 대부분 평가기술은 원자로 등에 기반 함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- ANSI나 유럽 표준데이터에 병행하여 수년전부터 일본에서는 일본에서 생산되는 콘크리트를 기준으로 표준 성분비를 작성하는 연구가 진행 중임.
- (미국) 방사능 평가에 대한 절차 등에 대해 많은 연구를 수행하였고, 규제 해제를 위한 표면 및 부피 내 방사능 평가 표준안(ANSI N13.12-2013)을 정립함.
- 감마선 영상장치를 통해 획득한 잔류방사능의 이차원 분포 정보와 단일 검출기를 통해 획득한 잔류방사능의 깊이 정보를 결합하여 구조물 내 방사성 물질의 삼차원 분포를 획득하였으나, 검출기의 크기가 작아 효율이 낮으며, 방사능의 세기를 산출할 수 없음.
- (미국) DOE 산하 가속기 시설에 적용될 수 있는 금속 부품의 해체/폐기를

위한 표준안이 2016년부터 정립되어 적용되고 있음.

- 해체 경험이 있는 선진국 시설을 중심으로 개별 절차들이 개발되어 있음.

□ 미래동향 예측

- 건설이전에 추진되는 차폐설계과정에서 표준화된 보다 정확한 정보를 설계에 사용함으로써 안전성을 확보하면서 효율적인 설계가 가능해질이며 해체/폐기를 추정하는 것의 정확성이 향상됨.
- 핫스팟 형태 방사성 오염물질의 삼차원적 분포를 영상화하고 정량 분석이 가능한 대면적 영상장치를 최초 개발함으로써 국제 원전 해체 시장에서의 국내 경쟁력 확보 및 국내 상용화 영상장치 수출 증대, 수입 대체 효과를 달성할 것임, 감마선 영상화를 위한 원전기술을 체계적으로 확립하여 국내 기업체의 성장에도 긍정적인 영향을 미칠 것임.
- 향후 예상되는 가속기 시설의 해체/폐기에 직접 적용하고 미래 수요에 대한 예측이 가능해짐, 가속기 외의 원자력시설에도 활용 가능한 기술임.

□ 기술개발 수행체계

- 국내 제작 콘크리트에 대한 분류 기준 확립하고 주요 불순물 함량 분석을 통해 데이터베이스 함. 국제공조를 통해 비교검증 실시 후 표준 성분비를 도출함.
- 개발된 3차원 측정기를 국내외 가속기 시설과 공동으로 성능평가를 실시하며, 저준위, 대형 방사성 폐기물에 대한 해석 기법 및 비파괴 방식의 측정 기술을 사업화함.
- 가속기 연구진과 공동으로 가속기 해체 공정을 개발하고 Monte Carlo 코드 등 전산기법을 활용하여 폐기물에 대한 평가, 관리 표준안, 폐기물에 의한 개인 및 환경 방사선 영향도 분석하고, 면제 및 해제 기준을 재정립 함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 불순물 분석 및 성분 데이터 축적, 표준 데이터 작성 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 콘크리트 생산 공정 및 원료물질에 대한 조사분석 • 다중분석방법을 이용한 표준 조성비와 불순물 함유비를 도출 • 국내 생산되는 콘크리트에 대한 표준 데이터 작성 	<ul style="list-style-type: none"> • 방사화 정도에 따른 콘크리트 분류기준 • 저순도 불순물 분석기술
<ul style="list-style-type: none"> • 규제해제를 위한 	<ul style="list-style-type: none"> • 국외 표준안 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 저준위, 대형 폐기물의

표면 및 체적내 방사능 평가 표준화	<ul style="list-style-type: none"> • Monte Carlo 코드 등을 이용한 폐기물 표면 및 체적 내 방사능 평가 • 단순 서베이미터를 적용한 표면 및 체적내의 방사능 평가 기술 개발 및 MC 결과와 정확도 검증 	방사능 분포 분석 기술 <ul style="list-style-type: none"> • 단순 검출기를 이용한 대형 폐기물 방사능 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 등 구조물 내의 잔류 방사능 측정 및 핵종 분석기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트내 3차원 오염측정용 영상 장치 설계 및 방사능 정량화 • 영상장치 장치 제작 및 표준 시설 및 현장 검증을 통한 성능 평가 • 콘크리트 등 구조물내의 핫스팟의 위치를 삼차원적으로 영상화하는 대면적 컴프턴 영상장치 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 비파괴 방식의 콘크리트내 방사능의 3차원분포 측정기술
<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 기반 폐기물 관리 및 자체처분 표준안 	<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 폐기물의 유형분류 • 전산모사 기법 및 실증실험을 통한 가속입자 및 가속 에너지별 주요 폐기물 내 방사성 핵종 분포 분석 • 폐기물 유형별 관리기준 도출 • 인체 및 환경에 대한 영향 평가를 통한 자체처분 표준안 마련 	<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 폐기물에 의한 인체 및 환경의 방사선 영향 평가기술 • 면제/해제 기준
<ul style="list-style-type: none"> • 해체 공정별 피폭선량 평가 및 폐기물량 저감화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 유형별 안전 해체 공정 개발 • 전산모사기법을 이용한 해체 공정별 방사선 피폭선량 평가 및 실증 • 폐기물 발생량 저감화를 위한 가속기 운전 방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 표준 해체 공정안 • 해체 공정별 피폭 저감화 기술

4) 방사화 저감 기술

☐ 기술의 정의

- 콘크리트 구조물 및 가속기모듈 구조재의 방사화 저감 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 콘크리트 폐기물의 발생량을 줄이기 위한 감용 연구 등은 진행된 바 있으나 저준위 방사화를 위한 특정 콘크리트의 개발은 축적된 연구 결과 또는 뚜렷한 연구 사례가 없음.
- 다량의 중성자 속에 의한 방사화 등을 저감시키기 위해 핵융합기기의 구조재를 선택할 때 이에 대한 검토 연구가 수행된 바 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- (일본) 10여 년 전부터 폐기물량을 줄이기 위한 콘크리트 개발에 투자를 하

고 있으나 아직 가성비 조건을 만족시키지 못하고 있어 국내의 연구 참여 여지가 충분함.

- 열중성자에 의한 방사화를 저감시키기 위한 보론 함유 콘크리트 등의 연구는 있지만 콘크리트 자체 개발 사례는 구체화된 연구가 적음.

□ 미래동향 예측

- 극저준위 및 저준위 콘크리트 폐기물 등의 발생을 최소화하여 폐기물 처분량을 줄이고 국내 폐기물처분장의 부담을 경감시킬 수 있음. 구조 안정성의 특성이 충분히 확보되면 원자로 건설에도 적용될 수 있음.
- 잔류 방사선에 의한 작업자의 피폭량을 감소시키는 중요한 안전 강화 방안이 될 것임.

□ 기술개발 수행체계

- 국내 제작되는 콘크리트의 특성을 분류하고 방사화 단면적이 작은 콘크리트 성분을 검토하여 방사화저감용 콘크리트 조성비 개발함, 외국의 사례를 기초 자료로 활용함.
- 저감화 콘크리트의 기계적 특성 검증하고 경제성을 검토함.
- 가속기 시설 및 미래 시설을 대비한 구성 물질별 방사화 정도 평가하고 재료 선정기준을 정립함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 구조물 방사화 저감 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 저준위 방사화 조건 연구 • 방사화 저감용 콘크리트 건축기술 개발 • 기계적 특성을 확보하면서 가격 경쟁력이 있는 저준위 방사화 콘크리트 개발 • 차폐구조 형태 연구를 통한 방사화 저감 능력을 확보함 	<ul style="list-style-type: none"> • 고에너지 및 저에너지 방사선의 콘크리트 방사화 평가기술 • 저방사화 콘크리트 조성비 개발 • 방사화 저감용 가속기 차폐구조 설계기술
<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 재료의 방사화 저감 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 현황조사를 통해 가속기 유형별 주요 방사화 대상기기의 분류 • 특정 재료를 활용한 방사화 비교 연구 및 데이터베이스 구축 • 가속기 부속기기의 방화사를 저감하는 재료 선정 	<ul style="list-style-type: none"> • 가속기 재료 물성별 방사화 정도 평가 기술

5) 치료용 가속기 운영 중의 피폭방사선량 평가 기술

□ 기술의 정의

- 종사자의 동선에 따른 피폭선량 변화를 감시하는 입자방사선 치료실내의 2차 선량측정 기술
- 치료 및 영상진단 환자의 의료피폭외 방사선 피폭의 평가 및 저감화 기술
- 치료용가속기에 대한 개인감시용 실용량의 유효성 검증

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국립암센터에서 CR-39 및 bubble detector를 이용한 중성자 선량 분포를 측정하는 바 있으나 정교한 선량 및 에너지 분포의 측정은 미흡한 상태임.
- 선형가속기 170대, 토모치료기 25, 감마나이프 20, 사이버나이프 10, 양성자 치료기(사이클로트론) 2대 운영, 중입자치료기 2대 도입예정 및 BNCT 도입 예정으로 다양한 가속기를 활용한 방사선 치료가 이루어짐. 이들 가속기의 운영 중 피폭방사선량 평가기술의 개발이 필요함.
- 현재 국내 의료용 가속기의 유지 보수는 장비사와 운영기관의 기술진이 참여하여 실시하고 있으나 피폭에 대한 전문적인 평가가 이루어지고 있지 않고 있음.
- 방사선 노출 환경의 고려 없이 감마선 및 중성자선의 측정용 개인선량계 기반의 선량평가 기술이 개발 되어 있으나 의료용 가속기의 유지보수에서처럼 신체의 특정부위의 노출 위험을 반영 할 수 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- CR-39를 이용한 중성자 선량 측정 및 전산모사를 통한 공간 선량 분포에 대한 연구가 진행되고 있음.
- 전 세계적으로도 가속기 기반 치료가 증가함으로 환자와 운영자들에 대한 피폭방사선량 평가기술의 표준화가 필요하지만 국가별 기관별로 일반 방사선 작업자의 자체 운영규칙에 따라 개인선량계를 이용한 일반적인 선량 평가방법으로 관리하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 작업종사자의 치료실내의 작업 위치에 따른 방사선량 피폭관리가 가능하면

입자선치료실내의 작업환경 개선과 효과적인 피폭관리가 가능하고 국내 입자 방사선치료기 개발 시 치료실 설계에 사용가능한 데이터를 축적할 수 있음.

- 치료중 방사선 피폭에 대한 정확한 정보를 통해 방사선안전문화의 정착 가능, 치료과정에서 환자의 피폭과 의료진의 피폭에 대한 안전성이 증가함.
- 의료기의 특수성에 따른 긴급수리 및 유지보수 작업자의 방사선 노출의 위험성을 평가하고 제한함으로써 관련 작업자의 방사선 노출 사고를 예방하고 개발된 관련 기술은 우주개발등과 같은 관련 방사선 노출환경 연구에도 기여할 수 있을 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 국내 의학계의 의학물리 그룹과 연계하여 가속기 유형별 공간 선량분포를 평가함. 전산모사기법과 측정기술을 병행하여 선량평가의 정확도를 높임.
- 작업자의 피폭 유형을 분류하고 현재의 개인 선량 평가 방법의 실효성을 비교분석하여 개인피폭선량 평가방법의 개선안을 도출함.
- 환자 등 피폭을 저감화 할 수 있는 차폐구조 또는 공정을 개발함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 입자 방사선 치료실내의 2차 선량측정 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 위치 감응형 방사선검출기 설계 및 초기모델 제작 과 성능검사 • 위치 감응형 방사선검출기 소형화 제작 및 임상활용 • 입자방사선 치료실 내의 2차원 공간 선량측정을 위한 검출기 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 소형 위치 감응형 검출기법 개발
<ul style="list-style-type: none"> • 환자의 의료피폭외 피폭의 평가 및 저감화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 치료용 가속기 현황(갯수, 사용연수, 가동하중 등) 파악 • 현재 각 가속기별 방사선안전보고서 작성 기준, 측정 방법 등 피폭방사선량 평가기술 확보 • 대표적인 가속기(선형가속기, 토모치료기, 양성자치료기 등)의 운영 중 피폭방사선량 평가기술 개발 (측정장소, 측정기, 측정 방법 등) • 동위원소 사용하는 방사선치료의 치료중 피폭 방사선량 평가기술 개발 • 최종목표: • 암환자의 방사선치료에 사용되는 가속기의 운영중 피폭방사선량 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 전산모사를 이용한 치료기기의 방사선량 분포 도출 • 치료기기의 정보 데이터 베이스 구축 • 인체의 산란 및 이차 반응도 평가 기술

<ul style="list-style-type: none"> • 치료용 가속기에 대한 개인감시용 실용량의 유효성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 의료용 가속기 별 작업자 노출 환경 분석(발생 방사선의 종류 및 작업환경에 따른 노출평가)및 의료용 가속기의 방사화 시뮬레이션 연구. • 의료용 가속기 작업자에 적합한 개인감시용 프로그램 개발 및 치료빔의 가속기 종류에 따른 작업자의 실용량의 유효성 평가 및 작업자에 대한 가이드라인 개발. • 의료용 가속기의 작업자에 대한 개인 피폭평가 프로그램 개발 및 가이드 라인 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 치료 절차의 표준 및 절차별 피폭방사선량 전산모사 • 실용량 측정을 통한 피폭량 검증기술
---	---	--

3.5 생활주변 방사선 관리 기술

3.5.1 개요

- 「생활주변방사선 관리 기술」은 다음 2개의 중분류 단위로 구분
 - 생활주변방사선 안전관리 기술
 - 생활주변방사선에 의한 피폭선량 평가

3.5.2 생활주변 방사선 안전관리 기술

가. 기술 개요

- 이슈 및 문제점
 - 2012년 생방법 이행 이후 생활주변방사선 안전관리가 수행되었으나, 아직 원료물질 및 공정부산물 취급자 중 생방법에 따른 취급자 등록을 수행하지 않은 업체가 존재하는 것으로 판단됨.
 - 방사선감시기를 설치·운영하고 있으며, 이에 대한 인프라 구축이 지속적으로 수행되고 있음. 단, 이를 운영하는 운영자 및 유의물질 발생 시 대응인력에 대한 교육 및 정보제공의 고도화가 필요함.
 - 현재까지도 생활주변방사선 및 생활주변방사선에 대한 대국민 홍보가 충분히 이루어지지 않은 상황임.
 - 특히, 모나자이트 사용침대(라돈침대) 사태로 인하여 대국민의 관심과 우려가 높으나, 이에 대한 안전기준 및 대응방안은 아직 완전하지 않은 실정임.

□ 기술개발 필요성

- 제2차 생활주변방사선방호 종합계획 수립에 따른 원료물질, 공정부산물 취급자 및 가공제품 제조업자가 참조할 만한 기술요건의 확충이 필요함.
- 공항·항만 및 재활용 고철 감시기 구축 및 운영에 참조할 만한 기술요건 확립 및 대응요원이 참조할 수 있는 기술요건의 확충이 필요함.
- 생활주변방사선방호의 정당화, 최적화를 위한 교육 및 안전문화 정착을 위한 홍보기술을 마련할 필요가 있음.

나. 세부기술 내용

1) 천연방사성핵종 함유물질 및 제품 안전관리

□ 기술의 정의

- 생활주변방사선 안전관리법에 명시된 천연방사성핵종 함유 물질(원료물질, 공정부산물)을 수출입, 운반, 저장, 사용, 처리, 처분하거나, 천연방사성핵종 함유제품(가공제품)을 제작, 사용 및 폐기할 때의 방사선학적 안전관리

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 2012년 생방법 시행 이후 약 60개 업체가 법에 따라 등록이 되었으며, 약 100개의 원료물질 및 공정부산물 취급 업체에 대한 생활주변방사선 안전관리 실태조사가 수행됨.
- KINS 및 원자력안전재단, 생활주변방사선 안전관리센터에서 생활주변방사선 관련 연구를 수행하여, 원료물질, 공정부산물 및 가공제품에 대한 연구가 활발히 수행됨.
- 원안재단에서는 매년 100개 정도의 가공제품에 대한 실태조사를 수행하고 있으며, 방사능 농도 분석 및 피폭선량 평가를 통하여 개개의 가공제품이 생방법 상 안전기준을 만족하는지를 평가함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- ICRP에서는 원료물질 및 공정부산물을 NORM (Naturally Occurring Radioactive Material)이라고 정의하고, 기존피폭상황(Existing exposure situation)으로 간주, 참조준위로 방사선 안전관리를 수행하도록 권고함.
- IAEA에서는 NORM 산업을 기존피폭상황이나, 경우에 따라서는 계획피폭상

황(Planned exposure situation)으로 관리할 수 있다고 명시함.

- NORM 안전관리에 대한 상황은 각국마다 산업분야 및 종사자 근무형태 등 상황이 다르므로, 통일된 권고는 현재까지 없는 상황이며, 각 산업분야별로 야기하는 NORM의 종류, 방사능량, 종사자 피폭선량, 주변 환경영향 등의 연구 및 기술개발은 지속적으로 수행 중임.
- 가공제품에 대한 법적 규제는 현재 대한민국이 유일하며, 이에 대한 기술개발 및 연구도 국내에서만 수행 중임.

□ 미래동향 예측

- 우리 생활주변에서의 방사선피폭에 관한 관심과 우려가 지속적으로 증가하고 있으므로, 원료물질, 공정부산물 및 가공제품에 대한 안전관리에 대한 기술개발 및 연구에 대한 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상됨.
- 특히, '18.5부터 불거진 모나자이트 사용 침대사태로 인하여 가공제품에서 방출되는 토론으로 인한 내부피폭이 세계 최초로 문제시됨에 따라, 가공제품 안전관리를 위한 기술개발 및 연구가 계속 필요할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 원료물질, 공정부산물 및 가공제품의 종류, 취급수량, 취급(사용) 형태 등을 파악하고, 분류체계를 정립한 후, 취급에 따른 피폭선량 및 주변환경영향 평가방법론을 수립
- 또한, 더 이상 사용하지 않는 원료물질 및 공정부산물과, 폐기되는 가공제품에 대한 폐기 방법론을 수립하여 방사선 방호 및 국민 수용성을 동시에 고려할 수 있는 합리적인 처리, 처분 및 재활용 방안을 마련함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 원료물질 취급 산업에 대한 방사선학적 안전관리 	<ul style="list-style-type: none"> 원료물질 취급 산업 안전관리 최적화 원료물질 폐기방안 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 원료물질 취급산업 분류체계 정립 국내 원료물질 취급산업에 대한 방사선학적 안전 관리 실태 평가 국내 원료물질 취급 산업에 대한 차등적 관리방안 수립 원료물질 폐기 및 관리방안 마련
<ul style="list-style-type: none"> 공정부산물 발생 시설에 대한 방사선학적 	<ul style="list-style-type: none"> 공정부산물 발생시설 운영 시 안전관리 최적화 해체 시 발생 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 공정부산물 취급산업 분류체계 정립 국내 공정부산물 취급산업에 대한 방사선학적 안전 관리 실태 평가 및 차등적 관리방안 수립

안전관리	공정부산물 발생시설 안전관리 방안 수립	<ul style="list-style-type: none"> • 공정부산물 처리, 처분 및 재활용 방법론 정립 • 해체 시 공정부산물 발생 가능 산업 규명 • 해체 시 발생 공정부산물 및 기타 폐기물 관리방안 마련
<ul style="list-style-type: none"> • 가공제품 사용 시 방사선학적 안전관리 	<ul style="list-style-type: none"> • 가공제품 사용 시 피폭평가 방법론 및 기준 확립 • 안전기준 부적합 가공제품 대응 • 건축자재에 대한 안전관리 	<ul style="list-style-type: none"> • 가공제품 분류체계 정립 • 가공제품 피폭 시나리오 및 피폭선량 평가 방법론 고도화 • 가공제품 내 천연방사성핵종의 농도와 수량 기준 마련 • 안전기준 부적합 가공제품 처리, 처분방안 • 가공제품 처리, 처분 시 천연방사성핵종 별 거동특성 파악 • 안전기준 부적합 가공제품 사례집 발간 • 주거형태 별 건축자재로 인한 피폭환경 정립 • 건축자재 별 방사능 농도지수 개발 • 건축자재 별 라돈 방출률 평가 방법론 정립 • 국내 토석 골재 등에 포함된 천연방사성핵종 정보 분석(지역별, 종류별)

2) 방사선감시기 운영 고도화

□ 기술의 정의

- 국내 공항·항만 설치 방사선감시기의 화물검출기술을 고도화하여 경보발생화물의 종류 및 함유핵종 등에 대한 정보의 신속 확인 기술
- 국내 재활용고철 방사선감시기의 재활용고철, 비철의 감시기술 고도화
- 경보발생화물(유의물질) 대응체계 고도화

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 생방법 시행 이후 전국 공항·항만에 100개 이상의 방사선 감시기가 설치·운영되어, 국내에 수입되는 화물을 감시 중임.
- 일교차가 크고 습도가 높은 환경에서 다양한 종류의 화물을 감시하고 있으며, PVT의 특성 상 NaI에 비해 떨어지는 핵종분석능력을 보완하고자 KINS는 2012년 공항·항만 방사선감시기 설치 이후 지속적으로 연구를 수행함.
- 재활용고철 방사선감시기의 유의물질 검출 및 대응 효율화를 위하여 원안재단에서는 실태조사 및 관련 연구를 수행 중임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국외에서는 방사선감시기를 주로 보안(security) 측면에서 운영함.
- 방사선감시기의 운영에 대한 사항은 주로 국가기밀로 취급되어, 공개된 자료가 별로 없어 파악이 어려움.

□ 미래동향 예측

- 방사선감시기는 현재 국내 불법적으로 유입되는 방사성물질 및 자원재활용시 재활용품에 유입될 수 있는 방사성물질을 차단하는 역할을 수행할 수 있는 효과적인 방법 중 하나이므로, 이에 대한 수요는 지속적으로 존재할 것으로 판단됨.
- 또한, 정부에서는 공항·항만에 방사선감시기를 확충할 계획이고, 기기특성상 성능개선이 지속적으로 필요하므로, 방사선감시기 관련 기술 및 연구 수요는 지속적으로 존재할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 공항·항만 및 재활용고철 방사선감시기의 감시기능체계 개선
- 감시기 경보발생 유의물질에 대한 추적관리 인프라 강화

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 공항·항만 감시기 운영 고도화	<ul style="list-style-type: none"> • 수입화물 감시기술 고도화 • 경보발생화물(유의물질) 대응체계 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> • 감마선 측정을 통한 수입화물 내 방사성핵종판별 기술 고도화 • 중성자 측정을 통한 수입화물 내 방사성핵종판별 기술 개발 • 유의물질 관련 정보(화주 화물 등) 신속 확인체계 구축 • 방사선이상준위 발생 화물 반송기준 마련 • 유의물질 감시 인력 역량강화 방안 마련
• 재활용고철 감시기 운영 고도화	<ul style="list-style-type: none"> • 재활용고철 감시기술 고도화 • 방사선감시기 경보발생물질(고철) 대응체계 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> • 재활용 고철, 비철에서 발생한 유의물질 정량분석 기술 개발 및 실용화 • 재활용고철 유통 추적시스템 구축 • 공정부산물 취급시설 해체 시 발생 폐고철 관리기준 마련 • 유의물질 감시 인력 역량강화 방안 마련

3) 생활주변방사선 교육, 홍보 및 대응체계 강화

☐ 기술의 정의

- 생활주변방사선 관련 정보(종류, 발생원, 피폭선량, 방호대책 등)을 종합적으로 제공할 수 있는 정보제공창구를 개설하고, 일반인의 관련 지식 함양을 위한 교육 및 홍보 진행
- 기타 생활주변방사선 관련 사회적 이슈에 대한 대응체계 구축

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 생방법 시행 이후 일반 국민에 대한 교육 및 홍보를 지속적으로 수행 중이나, 아직 국민 일상생활에서 생활주변방사선 관련 안전문화가 정착되었다고 보기는 어려움.
- 제2차 생활주변방사선방호 종합계획이 수립됨에 따라 생활주변방사선 교육 및 홍보를 강화하여 안전문화 정착을 수행하고자 관련 업무가 진행 중임.
- 최근 라돈침대 사태를 통하여 생활주변방사선 관련 사회적 이슈에 대한 대응체계 구축의 필요성이 대두됨.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국외 생활주변방사선 교육, 홍보는 실내라돈 및 건축자재에 집중됨.
- 국외에서도 생활주변방사선 관련 안전문화가 정착되었다고 보기 어려움.

☐ 미래동향 예측

- IAEA, ICRP에서도 방사선 안전문화 정착 및 방사선 관련 이해당사자에 대한 교육 및 홍보를 점차 중요하게 다루고 있으므로, 생활주변방사선에 대한 방사선 방호도 그 중요성이 점차 증가할 것으로 예상됨.
- 특히, 생활주변방사선은 과거 의식하지 않고 계속 방사선 피폭이 발생한 경우가 태반이므로, 이에 대한 일반 국민의 우려를 종식하고 올바른 생활주변방사선 안전관리 체계 수립을 위해서는 교육과 홍보가 필요함.
- 생활주변방사선에 대한 이슈대응체계를 수립하지 않으면 향후 제2, 제3의 라돈침대 사건이 발생할 수 있으므로, 생활주변방사선 관련 사회적 이슈에 대한 대응체계 구축이 필요함.

☐ 기술개발 수행체계

- 교육 및 홍보 대상자(종사자, 일반인)의 니즈 및 수용성을 고려한 교육프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 교육 및 홍보를 진행하며, 신속하고 투명하게 관련 정보를 제공할 수 있는 홈페이지 등의 창구를 개발·운영

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 생활주변방사선 관련 사업자, 종사자를 위한 교육프로그램 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> • 원료물질 취급 산업에 대한 교육프로그램 고도화 • 공정부산물 발생 산업에 대한 교육프로그램 고도화 • 가공제품 제조업자에 대한 교육프로그램 고도화 • 항공승무원에 대한 교육프로그램 고도화 • 방사선감시기 운영자에 대한 교육프로그램 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> • 생활주변방사선 종류 별 취급형태를 고려한 피폭 시나리오 수립 • 사업자, 종사자 및 감시기 운영자의 니즈를 고려한 교육 프로그램 개발
<ul style="list-style-type: none"> • 생활주변방사선 관련 정보제공 프로그램 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 가공제품 사용자에게 대한 정보제공 프로그램 개발 • 항공승객에 대한 정보제공 프로그램 개발 • 지각방사선에 대한 정보제공 프로그램 개발 • 라돈에 대한 정보제공 프로그램 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 일상생활에서의 생활주변방사선 피폭 시나리오 수립 • 일반인들의 니즈를 고려한 교육 프로그램 개발
<ul style="list-style-type: none"> • 국민 수용성 기반 생활주변방사선 측정/평가 방법론 정립 및 공개 	<ul style="list-style-type: none"> • 가공제품 사용자에게 대한 정보제공 프로그램 개발 • 항공승객에 대한 정보제공 프로그램 개발 • 지각방사선에 대한 정보제공 프로그램 개발 • 라돈 정보제공 프로그램 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 국민 니즈 및 수용성을 고려한 생활주변방사선 정보제공 프로그램 개발
<ul style="list-style-type: none"> • 생활주변방사선 이슈대응체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 생활주변방사선 이슈를 고려한 국민 소통 방안 확립 	<ul style="list-style-type: none"> • 생활주변방사선 이슈 및 민원대응 사례집 발간 및 배포 • 생활주변방사선 이슈 관련 신속정확 정보 제공 창구 마련

3.5.3 생활주변 방사선에 의한 피폭선량 평가

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- IAEA는 2014년 IRRS(통합규제검토서비스)를 통해 국가 라돈 정책 수립을 권

고한 바 있으며, 기존피폭상황에 대해 방사선 방호 및 안전에 대한 국가 관리 규정을 만들 것을 권고하고 있음.

- 생활주변방사선에 대한 국민들의 관심과 이해가 증가하면서 자신이 일상적으로 받고 있는 피폭 수준에 대한 궁금증이 지속적으로 증가하고 있으며, 자발적인 방호 유도를 위한 신뢰도 높은 정보제공이 요구됨.

☐ 기술개발 필요성

- 국민들의 자발적인 방호 최적화를 달성할 수 있도록 국가 차원의 정보제공이 필요하며, 이를 위해 신뢰할 수 있는 조사 자료를 확보하고 피폭 및 위험도 평가 방법론에 대한 기술개발이 필요함.
- 기존피폭에 대한 국가정책의 우선순위 설정과 이에 따른 선택과 집중을 위해 다양한 연구와 기술개발이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 지각방사선 및 실내라돈 방호

☐ 기술의 정의

- 전국토 지각방사선 분포 및 실내라돈 현황 조사
- 실내 라돈으로 인한 건강상 영향평가 및 국가차원의 라돈 방호 정책 개발

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 우리나라 연간 자연방사선에 의한 피폭은 연간 평균 약 3.1 mSv 수준이며, 피폭원 중 지각방사선 및 라돈에 의한 기여분이 가장 높음.
- 환경부 및 한국원자력안전기술원 등에서는 지각방사선 및 라돈에 의한 국민 피폭 수준 파악 및 국가 차원의 관리방안 도출을 위해 전국 단위의 조사를 지속적으로 수행함.
- 상기 조사로는 전국 지각방사선 분포 조사, 토양환경 중 자연방사성물질 분포 조사를 포함하여, 매년 전국 주택에 대한 라돈 조사 및 시군구 단위의 라돈 정밀표본조사가 있으며, 궁극적으로는 기존피폭에 의한 잠재적인 위험도 평가를 목적으로 하고 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국가별 다양한 자료와 방법론을 적용하여 지각방사선 및 라돈 위험도 지도

를 작성해왔으며, 특히 유럽에서는 표준화된 형식을 결정하여 유럽 전체지도를 제작 및 각 국가기관에 제공함.

- IAEA 및 ICRP에서는 라돈 참조준위 및 유의지역을 설정하고 최적화할 것을 권고하고 있으며, 또한 정부가 기존피폭에 대한 방사선방호 및 안전에 대한 국가 관리정책을 수립 이행할 것을 권고함.

□ 미래동향 예측

- 생활주변방사선 및 자연방사선에 대한 국민들의 관심과 이해가 높아지면서 기존피폭에 대한 관리 필요성이 지속적으로 제기될 것으로 예상됨.
- 기존피폭에 대한 방호는 궁극적으로는 자발적으로 수행되어야 하므로, 이를 위한 정확하고 신뢰도 높은 정보 제공에 대한 수요가 증가할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 전국 단위의 지각방사선 및 라돈 조사를 지속적으로 수행하고, 신뢰도 높은 정보 제공을 위한 측정 및 분석 품질관리 방안 마련
- 기존피폭에 대한 위험도 관계 규명을 위한 역학연구를 수행하고, 국가 차원의 방호 및 관리 정책 개발

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 전국 지각방사선 분포 조사	<ul style="list-style-type: none"> • 전국 배경지각방사선 측정 분포도 개발 • 전국 휴폐광산 인근지역 환경방사선 실태조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 천연방사성핵종별 분포도 개발
• 실내 라돈 측정 및 품질관리	<ul style="list-style-type: none"> • 실내 라돈 측정 및 분석 방법론 정립 • 실내 라돈 측정 및 분석 품질관리 	<ul style="list-style-type: none"> • 검출 목적/형태에 따른 측정 방법론 마련 • 라돈 조사 기관 간 교차분석 프로그램 개발 • 검·교정용 라돈/토론 표준 챔버개발 • 기타 라돈/토론 측정평가를 위한 간이 표준챔버 개발
• 전국 라돈 관심지역 설정 및 정밀조사	<ul style="list-style-type: none"> • 실내 작업장 라돈 실태조사 • 주거공간에 대한 실내 라돈현황 파악 • 국내 라돈 관심지역 설정 • 국내 라돈 관심지역 정밀조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 라돈 관심지역 내 실내 작업장 라돈 실태조사 • 전국단위 실내 라돈 잠재위험분포도 개발 • 시군구 단위 라돈 관심지역 정밀표본조사
• 실내 라돈에	<ul style="list-style-type: none"> • 라돈에 의한 건강상 	<ul style="list-style-type: none"> • 라돈에 대한 암발생 관련 역학연구

대한 건강상 영향평가	영향평가 방법론 정립	<ul style="list-style-type: none"> • 환경위해요소(미세먼지 등)에 의한 위해도 비교 평가
<ul style="list-style-type: none"> • 국가라돈관리정책(RAP) 고도화 및 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> • 국가라돈관리정책(RAP) 고도화 • 국가라돈관리정책(RAP) 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> • 실내 작업장 라돈 관리기준 설정 • 라돈측정 지원 프로그램 마련 • 라돈 자료 검증평가 프로그램 개발 • 라돈 저감 및 예방 관리 사업자 등록체계 구축 • 기존/신축 건물에 대한 라돈농도 저감 방호조치 기술 마련

2) 항공승무원 및 승객에 대한 우주방사선 피폭관리

☐ 기술의 정의

- 항공기에서 근무하는 조종사, 승무원 및 탑승객들이 활용할 수 있는 우주방사선 피폭선량 평가 및 정보공개 창구 구축·운영

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 생방법에 따라 국내 항공사에서는 항공승무원에 대한 우주방사선 피폭기록을 관리하고 있으며, 연간 피폭기록을 정부에 보고함.
- 전파연구원, 한국천문연구원 등의 연구기관에서 우주방사선 피폭선량 평가 프로그램을 개발함.
- ‘18년 현재 선량평가 프로그램에서 태양활동의 변화에 따른 피폭선량의 변화를 반영하였는지 여부에 대한 논쟁이 지속되고 있으며, 태양활동을 반영한 우주방사선 평가 프로그램을 개발하고 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 우주방사선으로 인한 피폭선량은 각 국가마다 관리기준이 다름. 방사선작업 종사자에 준하여 관리하는 국가도 있으나, 무시하는 국가도 존재함.
- ICRP에서는 ‘16년 우주방사선에 대한 방사선 방호 보고서를 발간함.
- 통상적으로 우주방사선으로 인한 피폭선량 평가는 미국 연방항공국(FAA)이 인준한 CARI-6, CARI-6M이 사용되나, 해당 프로그램 개발이 수십 년 전이고, 태양활동을 반영하지 못하여 실제 선량에 비해 낮은 피폭선량을 계산한다는 문제제기가 존재함.

- 각 국가에서는 우주방사선 평가 프로그램을 독자적으로 개발함.

□ 미래동향 예측

- 시대가 발전하면서 국외 항공여행이 빈번해짐에 따라 우주방사선 피폭이 지속적으로 증가할 것으로 예상됨.
- 기술 발전으로 인하여 항공기의 경량화가 더욱 진행되고, 현재 항공 노선의 일반적인 고도인 8,000~12,000 m 상공이 거의 포화됨에 따라 12,000 m 이상 고도에서의 항공기 운항이 더욱 빈번해질 것으로 예상. 이에 따라 항공여행에 따른 우주방사선 피폭선량은 증가할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- ICRP 신권고 및 고에너지 핵물리, 천문학 정보를 이용한 피폭선량 평가
- 평가한 피폭선량 정보의 효율적 관리 및 정보공개창구 구축·운영

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 승무원 우주방사선 피폭관리 	<ul style="list-style-type: none"> 항공승무원 피폭평가 프로그램 정립 항공승무원 피폭정보 종합관리 	<ul style="list-style-type: none"> ICRP 신권고 및 고에너지 우주선, 태양활동 등의 변수를 고려한 연간 우주방사선 피폭선량 평가 기술 항공승무원이 믿고 신뢰할 수 있는 피폭선량 관리 및 정보공개창구 구축
<ul style="list-style-type: none"> 항공기 탑승객에 대한 우주방사선 피폭관리 	<ul style="list-style-type: none"> 항공기 탑승객 우주방사선 근사계산 프로그램 개발 항공기 탑승객에 대한 우주방사선 정보 제공 	<ul style="list-style-type: none"> ICRP 신권고 및 고에너지 우주선, 태양활동 등의 변수를 고려한 실시간 우주방사선 피폭평가 기술 항공기 탑승 전후로 탑승객이 확인할 수 있는 피폭선량 정보공개창구 구축
<ul style="list-style-type: none"> 우주방사선 측정 및 피폭선량 평가프로그램 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 우주방사선 실측 체계 구축 고에너지 입자로 인한 2차 이후 발생 방사선 특성평가 국내외 항공로별 우주방사선 피폭선량 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 우주방사선 실측 기술 태양활동 예측 기술 고에너지 입자선 대기권 입사 시 고도 별 방사선 종류, 에너지 분포에 대한 평가 기술 기타 우주방사선 피폭선량 평가프로그램 Benchmarking

◆ 배경

- 가동 원전과 중소형 원자로를 포함한 모든 원자력 체계의 안전성을 향상시키기 위해 공통적으로 요구되는 기술을 정리하였음. 특히 피동 안전 개념의 혁신적 확대와 적용을 통해 국제적인 원전 시장 변화에 능동적으로 대비하기 위한 실증적 노력을 제시하였음.
- PSA, 방사선 방호/방재, 핵연료의 개발 등 안전성 향상에 필수적인 향후의 종합 원자력 기반 기술을 제시함.
- 원자로 냉각의 핵심 영역인 노심영역에서 발생하는 핵연료의 주요 현상에 대한 이해와 이를 바탕으로 안전성을 향상시키기 위한 노력이 제시되었음.

◆ 기술분류 총괄표

대분류 (1단계)	중분류 (2단계)	중분류 (3단계)
공통기반 기술	외부재해 대비 기술	지진 안전성 향상
		기타 자연 재해/복합 재해 대비
		인적 재해 대비 안전성 평가
	종합 원자력 해석/평가 기술	종합원자력열수력 해석 기술
		원전 리스크 종합 평가
		기타 원자력 시스템 리스크 평가
		리스크정보활용
	인적수행도 향상 기술	사고예방 인적수행도 향상
		사고대응 인적수행도 향상
	환경 및 개인 방사선 방호/방재 기술	원자력시설 방사선 환경 방호
		정상 및 비정상 시 개인 방사선 방호
		방사선 비상 및 오염대응
	안전성 향상 혁신기술	원전 안전성 향상 혁신소재 기술
		원전 안전성 향상 열수력 기술
		ICT 융합 열수력-안전
		수출형 신형원자로 핵심 기술 개발 및 검증

◆ 세부 기술 내용

4.1 외부재해 대비 기술

4.1.1 개요

- 「외부재해 대비기술」은 다음 3개의 중분류 단위로 구분함.
 - 지진안전성 향상
 - 기타 자연재해/복합재해 대비
 - 인적재해 대비 안전성 평가

4.1.2 지진안전성 향상

가. 기술 개요

- 이슈 및 문제점
 - 2016년 9월 경주에서 국내 지진관측 이래 최대지진인 규모 5.8의 지진이 발생하여 진앙 부근에 위치한 월성원전 4기가 수동 정지하였으며 2017년 11월 포항지진이 발생하여 원전에는 영향이 없었으나 아파트 등 건축물에 큰 피해를 발생시키면서 원전의 지진 안전성에 대한 우려가 급격히 증대됨.
 - 국내 원전의 경우 설계지진 0.2g 또는 0.3g로 설계되어 있으나 설계지진을 초과하는 지진의 발생에 대한 우려가 커지고 이에 대한 안전성확보 필요성이 대두됨.
- 기술개발 필요성
 - 국내 원전부지에서 발생할 가능성이 있는 지진의 크기나 진동수 성분, 부지 효과 등을 합리적으로 예측하고 판단하여 이에 대비할 필요가 있음.
 - 특히 경주지진이나 포항지진에서 보여준 우리나라의 지진 특성은 우리나라 원전의 설계 시 사용한 지진의 특성과 큰 차이를 보여주고 있어 이를 고려한 합리적인 평가 및 대비가 필요함.
 - 또한 지진 발생에 따른 피해의 최소화를 위한 감시, 계측, 보강 등과 함께 지진 후 효과적인 보수, 보강 및 재가동을 위한 안전성 평가 등의 기반기술을 확보할 필요가 있음.

나. 세부기술 내용

1) 지진 감시 및 계측 기술

□ 기술의 정의

- 지진 발생 시 자유장 및 주요 구조물에서의 지진동을 신속히 계측하고 평가하여 효과적으로 대응하기 위해 필요한 감시 및 계측 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 2016년 경주지진 시 일부 원전의 자유장 및 구조물에서 계측된 지진기록의 신뢰성에 문제가 있는 것이 발견되었으며 이를 분석하고 대책을 수립하는데 많은 시간이 소요됨.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 일본 등 강진발생 국가에서는 지진의 감시 및 계측을 매우 중요하게 생각하며 관련 설비의 확보 및 관리에 매우 많은 노력을 기울이고 있으며 특히 설계지진 초과 시 자동정지 시스템을 운영하고 있어 이를 효과적으로 활용하기 위한 정지 기준 등에 대한 연구를 수행하여 왔음.
- 2007년 니가타 지진 시 일본 가시와자키 가리와 원전에서 계측된 지진의 경우 동일 부지에서 입력된 지진가속도의 차이가 크게 발생하였으며 이에 따라 호기별 피해정도가 달라 지진의 공간적 상관성 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음.

□ 미래동향 예측

- 경주지진과 포항지진의 지진동 계측 데이터 활용 경험이 축적되면서 보다 향상된 계측데이터 기반 대응 및 분석이 요구됨.
- 동일 부지에 수기의 원전을 보유하고 있는 국내의 환경에서는 지진동의 정확한 계측과 이를 활용한 지진의 공간적 분포 등의 연구를 통하여 효과적으로 지진에 대비할 필요가 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 지진감시 및 계측기술과 계측된 데이터의 활용 등이 효과적으로 이루어질 수 있도록 수행되어야 함.
- 특히 감시 및 계측을 위한 하드웨어의 특성을 파악하고 효과적으로 활용하기 위해서는 관련 기술을 확보하고 있는 산업체와의 협력이 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 최적 지진/진동감시 계측위치 선정 	<ul style="list-style-type: none"> 부지조건 및 기반암조건을 고려한 지진/진동감시 계측위치 선정 자유장 및 발전소 지진/진동 계측결과의 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 최적의 지진/진동 계측위치 선정기술
<ul style="list-style-type: none"> 계측 데이터 기반 기기/구조물 최적 대응 	<ul style="list-style-type: none"> 실시간 계측 데이터 신호처리 및 활용 기법 실시간 계측 데이터의 분석기법 	<ul style="list-style-type: none"> 계측 데이터의 신호처리 및 분석기술
<ul style="list-style-type: none"> 계측 데이터 기반 건전성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 원전 구조물별 지진동에 의한 충응답스펙트럼 데이터 베이스 구축 계측 지진동에 의한 충응답 분석 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 지진/진동에 의한 충응답스펙트럼 분석기술
<ul style="list-style-type: none"> 계측 데이터 기반 공간적 상관성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 계측 데이터 기반 원전 부지 내 지진동의 공간적 상관성 분석 계측 데이터 기반 원전 기초 입력지진의 비상관성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 부지 내 지진동의 공간적 상관성 분석 기술

2) 구조물 및 기기 내진설계 개선

□ 기술의 정의

- 국내에서 발생가능한 지진의 특성을 반영하고 부지의 지반특성을 반영하여 안전관련 주요 구조물 및 기기의 응답을 평가하고 설계기술을 개발함으로써 원전의 지진 안전성 향상

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 기존 원전의 경우 암반 위에 구조물이 위치한 것으로 가정하고, 지반-구조물 상호작용효과(SSD)를 고려하지 않았지만, 최근 국내원전에서도 설계 시 SSI 효과를 고려하도록 규정이 상향 조정되었음.
- 국내의 경우 미국 NRC에서 제시하고 있는 표준응답스펙트럼을 사용함으로써 지진 안전성에 대한 신뢰성이 저하됨.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국에서는 NRC를 비롯하여 많은 기관에서 내진해석 및 설계기술에 대한 연구를 진행하고 있으며 이미 2007년에 원전이 위치한 부지에서의 확률론적 지진 재해도에 기반 한 설계지진을 산정하여 사용하도록 규정하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 부지 고유의 지진동 특성과 설계 초과 리스크를 반영한 성능기반 설계가 세계적인 추세이며 국내에서도 규제기관에서 관련 규정의 도입을 검토하고 있음.
- 최근 원전 구조물의 지진응답 분석기술은 하중기반에서 변위기반으로 수행되고 있으며, 이는 구조물/기기에서 탄성영역 이상의 지진응답을 요구하고 있음을 의미함.

□ 기술개발 수행체계

- 합리적인 확률론적 지진재해도 분석을 위해서는 관련 기술 및 프로그램 등의 확보가 필수적이며 특히 확률론적 지진재해도의 입력자료 확보를 위해서는 지진학 전문가와의 협조가 필수적임.
- 확률론적 지진재해도 결과에 대한 전문가들의 동의를 받기 위해서는 전문가 그룹의 구성 및 전문가들과의 주기적인 정보교환이 반드시 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 입력지진특성 및 성능기반 설계지진 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 부지별 지진재해도 평가 결과를 반영한 성능기반 설계지진 평가 기술 개발 • 최대 설계지진하중 산정 	• 부지별 설계용 입력지진동 산정 기술
• 구조물 지진응답해석 고도화	<ul style="list-style-type: none"> • 지반-구조물 상호작용 및 구조물-지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 지진응답분석기술 개발 • 구조물 비선형 거동을 고려한 지진응답해석 기술 개발 	• 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 구조물의 지진응답해석 기술

3) 구조물 및 기기 내진검증

□ 기술의 정의

- 원전의 지진 안전성을 확보하기 위해서는 관련 설비의 내진검증이 반드시 이루어져야 하며 이를 위해 효과적인 내진검증방법 및 세부절차를 개발함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 가동원전의 경우 모든 안전관련 설비는 내진검증이 수행되어 왔으나

효과적인 내진검증을 위한 절차나 방법에 대한 연구는 이루어진 바가 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국에서는 안전관련 설비의 내진검증 방법을 IEEE-344의 기준으로 제시하고 있으며 관련 기술개발을 통하여 주기적으로 개정하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 지금까지는 설계지진에 대한 안전성 검증이 주를 이루고 있으며 대부분 설계지진 수준까지만 검증하여 왔으나 설계지진을 초과하는 지진이 원전부지에서 발생하고 있어 이에 대한 대비책으로 취약도수준의 평가 등이 요구될 것으로 보임.

□ 기술개발 수행체계

- 원전에는 매우 다양한 기계기기 및 전기기기 등이 사용되고 있으므로 관련 전문가들이 참여하는 연구체계를 구성할 필요가 있음.
- 효과적인 검증체계 구축을 위해서는 관련 설비에 대한 시험적 검증을 위한 시설구축과 설비구매를 위한 예산 등이 요구됨.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 내진검증시험절차서	<ul style="list-style-type: none"> • 기기내진검증을 위한 입력지진동 선정방법 • 기기내진검증 시험을 위한 시험모델 선정 및 제작, 시험체 조립, 시험체 설치방법 • 기기내진검증 시험을 위한 계측 기법 • 기기내진검증 시험을 위한 절차서 개발 	• 기기 및 구조물에 대한 내진검증시험절차서
• 내진검증 진동대 구축 및 보완	<ul style="list-style-type: none"> • 내진검증 시험용 진동대 시설 현황 분석 • 내진검증 대상 시험체의 특성(규모, 고유진동수 등)에 맞는 진동대 시설 구축 	• 내진검증용 진동대 구축
• 내진 및 진동열화 시험방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 내진 및 진동열화 특성 분석 • 시험에 의한 내진 및 진동열화 방법 절차서 개발 	• 내진 및 진동열화 시험기술
• 내진 및 진동열화 해석방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 내진 및 진동열화 검증을 위한 해석적 방법론 개발 • 내진 및 진동열화 시험방법론을 근거로 한 해석적 방법론 검증 	• 내진 및 진동열화 해석기술
• 시험에 의한 검증	<ul style="list-style-type: none"> • 주요기기에 대한 내진검증 시험 수행 • 내진검증 시험 DB 개발 	• 주요기기에 대한 내진검증시험

• 해석에 의한 검증	• 시험이 불가능한 대형기기 및 구조물에 대한 해석에 의한 내진검증 수행 • 기기 및 구조물 내진검증결과 DB 개발	• 주요기기에 대한 내진검증해석
• 경험자료에 의한 검증	• 지진에 의한 원전 피해사례 조사 및 분석 • 지진규모별 손상지수 산정 • 경험자료에 의한 내진검증 기술 개발	• 경험자료를 이용한 내진검증기술
• 검증결과 평가방법 및 설계보완	• 내진검증 평가 결과의 신뢰성 평가기술 개발 • 내진검증 결과를 반영한 설계반영 기술개발	• 내진검증결과 검증기술
• 기계계통 및 부품 내진해석 및 검증시험	• 기계 요소 및 부품에 대한 내진해석 및 검증시험방법 정립 • 기계계통 및 부품에 대한 검증 시험 수행	• 기계계통 및 부품에 대한 내진검증
• 기계계통 및 부품 내진성능 향상방안	• 기계계통 및 부품에 대한 내진성능 향상방안 도출 • 기계계통 및 부품에 대한 내진성능 향상방안 검증	• 기계계통 및 부품에 대한 내진성능 향상기술

4) 구조물 및 기기의 내진성능 평가

□ 기술의 정의

- 내진 설계된 구조물 및 기기의 한계성능 평가를 통해 설계지진을 초과하는 지진에 대한 내진 여유도를 평가하고 이들 결과가 최종적으로 원전의 공공에 대한 리스크 산정에 반영될 수 있도록 함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 경주지진 이후 지진취약도 평가기술 및 지진재해도 평가에 필요한 기반기술 확보를 위한 연구를 착수함.
- 기존 국내의 가동원전에 대한 확률론적 지진 안전성 평가는 과거 미국의 기술을 답습하여 왔으며 관련 기술의 개발은 매우 미미한 실정에 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국에서는 EPRI를 중심으로 원전의 지진 안전성 평가에 필수적인 지진재해도, 지진취약도 및 리스크 정량화 관련 기술개발을 지속적으로 수행하고 있음.
- 일본에서는 확률론적 지진 안전성 평가 절차를 개발하여 적용하고 있으며 최근에는 후쿠시마 원전사고의 교훈을 반영하여 관련기준의 개정을 추진하

고 있음.

□ 미래동향 예측

- 미국에서는 최근 ASME/ANS 기준으로 확률론적 지진 리스크 평가 절차 및 기준을 제시하고 있어 국내에서도 관련 기준을 적용하여 수행할 필요가 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 역사지진 재평가는 국문학자, 지진학자 및 구조공학자의 협업이 필수적이면 필요에 따라서는 강진기록에 대한 실험적 평가가 동반되어야 함.
- 실험규모 또는 대규모 내진성능 실험을 위해서는 실험설비 및 관련 기기의 확보가 요구됨.
- 가동기간 증가에 따른 열화기기의 내진성능을 효과적으로 평가하기 위해서는 연구기간 중 폐로원전 또는 교체기기 등을 활용하여 평가할 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 지진재해도 평가 및 내진성능 평가용 입력지진 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 지진환경 변화를 고려한 재해도 평가 입력변수 도출 • 국내 고유 감쇄식 개발 • 원전부지별 지진재해도 재평가 • 국내 원전부지별 평가용 입력지진동 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 지진재해도 평가기술 • 입력지진동 개발 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 지진재해도 평가를 위한 역사지진 재평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 기존의 역사지진 평가자료 분석 • 역사지진 평가를 위한 기존의 실험연구 결과 분석 • 정성적인 역사문헌 기술내용의 정량적 변환 기준 도출 • 역사지진 재평가를 위한 진동대 실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 역사지진 재평가 기술 및 목록 작성
<ul style="list-style-type: none"> • 설계초과 지진에 대한 내진여유도 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계초과 지진동 특성 평가 • 평가용 설계초과 지진동 도출 • 안전관련 설비 및 기기들의 극한성능 평가방법론 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계초과 지진방생시 내진여유도 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> • 가동원전 기기의 내진성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 가동원전 기기의 내진성능 평가기술 현황 분석 • 국내 적용가능 기술 분류 및 예비타당성 시험 수행 • 가동원전 기기 내진성능 평가를 위한 수치모델 개발 • 가동원전 기기 내진성능 평가 기술 제안 및 실증시험 수행 	<ul style="list-style-type: none"> • 가동원전 기기에 대한 내진성능 평가 및 검증기술

	<ul style="list-style-type: none"> • 실험적/수치해석적 내진성능 평가기술 제시 	
<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 내부구조물의 내진성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 내부구조물 상세 수치모형 구축 • 축소모형 실험에 의한 거동 평가 • 원자로 내부구조물 내진성능 평가를 위한 실증시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 내부구조물의 내진성능 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> • 지중구조물의 내진성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 지진에 의한 지중구조물의 파괴모드/파괴기준 분석 • 예비시험모델 구축 및 시험 수행 • 실험과 수치해석에 의한 지중구조물의 내진성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 지중구조물의 내진성능 평가를 위한 실험적 해석적 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> • 구조물 및 기기 실규모 내진성능 실증시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 시험대상 구조물 및 기기 선정 • 소형기기 및 대형구조물에 대한 실규모 실증시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 실규모 실증시험 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 구조물 및 기기의 한계성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 대상 재료별 한계성능 평가방법 분석 • 구조물 및 기기의 파괴모드 분석 • 파괴모드에 따른 한계성능 평가기술 정립 • 주요 구조물 및 기기의 한계성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 구조물 및 기기의 한계성능 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> • 고진동수 지진동 특성에 따른 영향 	<ul style="list-style-type: none"> • 고진동수 영향기기 선정 • 고진동수 영향평가를 위한 국내 지진동 특성 분석 • 고진동수 지진에 의한 기기 구조물 영향분석 • 고진동수 지진에 의한 기기 구조물 영향 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 고진동수 지진동에 의한 기기 구조물 영향 분석 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 내진성능 불확실성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 불확실성을 유발하는 변수 분석 • 불확실성 변수에 따른 민감도 평가 • 기기 및 구조물별 불확실성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 내진성능의 불확실성 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 구조물 및 기기의 동시손상 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 동일호기 내 동시손상 확률에 따른 민감도 분석 수행 • 구조물 및 기기 동시손상 평가기술 개발 • 다수기 내 동시손상에 따른 다수기 리스크 민감도 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 단일호기 및 다수기 구조물 및 기기의 동시손상 평가기술
<ul style="list-style-type: none"> • 가동기간에 따른 구조물 및 기기의 내진성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 가동기간 증가에 따른 구조물 및 기기의 열화현상 분석 및 DB 수집 • 열화에 따른 구조적 재료적 성능변화 분석 • 열화를 고려한 구조물 및 기기의 구조적/기능적 거동변화 평가 • 가동기간에 따른 구조물 및 기기의 내진성능 평가 기술 개발 및 예비평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용수명 증가에 따른 열화를 반영한 구조물 및 기기의 내진성능 평가기술

5) 설계초과 지진에 대한 구조물/기기의 구조적 건전성 평가 및 대응기술

□ 기술의 정의

- 현재 수행하고 있는 기기/구조물의 건전성 평가는 설계수준의 하중을 대상으로 평가하고 있으나 설계수준을 초과하는 지진하중 하에서는 구조적 거동이 달라질 수 있으므로 이에 대한 신뢰성 있는 평가가 요구됨.
- 국내 가동원전의 특성이 반영된 지진대응 절차의 개발

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 원전의 설계는 기본적으로 선형탄성 거동을 하도록 설계하고 있어 설계지진을 초과하는 강진 시 구조물의 비선형 거동에 대한 연구가 매우 미미한 실정임.
- 후쿠시마 사고 및 경주지진 후 국내 원전의 지진 안전성 평가에서 원자로 내부구조물 등의 지진 PSA의 대상이 아님으로 인해 내진성능 평가 등이 수행되지 않았음.
- 2016년 경주지진발생으로 월성원전 1-4호기가 모두 수동정지 하였으나 당시 실제적인 지진대응 체계가 부족한 것으로 평가되었음.
- 강진 발생 경험이 없어 관련 기술개발 경험은 전무하며 미국 EPRI에서 개발한 절차서를 준용하여 사용하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 일본에서는 원자력발전소 구조물의 비선형 거동을 허용함에 따라 비선형 내진해석 기술이 매우 발전되어 있으며 최근 미국, 프랑스 등에서도 비선형 거동 해석을 활용한 변형율 기반 내진설계 기술 개발에 주력하고 있음.
- 미국에서는 EPRI에서 강진 발생 시 장단기 대비 방안에 대한 기술기준을 개발한 바 있으며 이를 국내에서 규제기준에 준용하여 사용하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 지진관련 정보의 발달로 부지에서 요구되는 설계지진의 수준이 지속적으로 증가하고 있어 강진 발생 시 구조물 및 기기의 비선형 거동에 대한 평가가 반드시 요구될 것으로 예측됨.
- 원자로 내부 구조물 등 주기기 계통에 대한 내진성능 향상을 위한 연구가 지속적으로 진행되어야 하며 특히 강진지역에 국내 원전을 수출할 경우 관

련기술의 확보가 반드시 필요함.

- 원전의 노형이나 위치 등이 다름에 따라 발전소 고유의 지진대응 절차가 개발되어 강진 시에도 효과적인 대처가 가능해야 함.
- 또한 강진에 따른 가동 정지 후 재가동을 위한 명확한 기준이 없어 경제적이고 안전한 원전의 활용을 위해서는 반드시 필요한 기술임.

□ 기술개발 수행체계

- 탄성한계를 벗어나는 비선형 거동을 정확히 평가하기 위해서는 관련 재료 및 구조에 대한 실험적 평가가 병행되어야 함.
- 대응절차 기술은 지진감시 및 계측기술과 연계하여 수행하는 것이 효과적임.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 구조물 및 기기의 건전성 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> 강재의 비선형 거동을 고려한 기기 건전성 평가 콘크리트 재료 거동특성을 고려한 구조물 건전성 평가 구조물 및 기기 건전성 평가 시험 	<ul style="list-style-type: none"> 극한거동을 고려한 구조물 및 기기의 건전성 평가기술
• 구조물 및 기기 내진보강 기술	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 기여도 분석을 통한 대상 설비 선정 기존의 내진보강 기술 분석 및 선별 내진보강기술 검증을 위한 시험 기기면진 적용성 평가를 위한 진동대 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 기기면진을 포함한 내진보강기술
• 원자로 내부구조물 내진성능 향상방안	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 내부구조물의 상세 구조해석을 통한 지진시의 거동 분석 원자로 내부구조물의 내진성능 향상 기술 분석 및 예비시험 실증시험을 통한 원자로 내부구조물의 내진성능 향상방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 내부구조물의 내진성능 평가 및 향상기술
• 강진 발생시 지진대응 절차서	<ul style="list-style-type: none"> 국내외 지진대응체계 분석 경주 및 포항지진에 의한 대응 분석 설계초과지진 시 대응 지침안 	<ul style="list-style-type: none"> 강진 발생시의 지진대응 기술
• 지진 발생 후 재가동 기준	<ul style="list-style-type: none"> 수동정지 및 재가동 평가항목 도출 지진후 발전소 상태별 리스크 평가방법 수동정지 기준 개발 수동정지를 위한 리스크 기준 재가동을 위한 리스크 기준 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 지진발생 이후 원전의 재가동 기준 평가 기술

6) 원자력시설의 면진적용 기술

□ 기술의 정의

- 강진에 대한 원전의 지진 안전성을 확보하기 위해 내진설계의 대안으로 제시되고 있는 면진설계 기술 개발

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 APR 1400을 강진 지역인 터키에 수출하기 위해 면진설계기술 개발을 수행한 바 있으나 수출이 무산되면서 관련 기술의 개발이 지속되지 못하고 있는 실정임.
- 국내에서는 가동원전 각 사이트별 비상대응거점시설에 면진장치를 적용하여 건설을 추진하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국에서는 아이다호 국립연구소 등을 비롯해서 NRC에서도 면진장치를 원전에 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며 특히 중소형 원전에 적용하기 위한 연구가 집중적으로 이루어지고 있음.
- 일본에서는 ABWR 등에 면진장치를 적용하기 위한 연구가 진행되고 있으며 비상대응시설에 면진장치를 적용하여 건설 운영하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 세계적으로 강진지역에서도 원전의 도입이 활성화 될 것으로 예상되고 있으며 지진의 강도가 증가하고 있어 신규원전이나 가동원전의 지진 안전성 향상을 위한 내진보강의 대안으로 점차 활용될 것으로 예상됨.
- 가동원전의 내진보강에 의한 내진성능 향상기술의 한계를 극복하기 위해서는 본 기술의 활용이 반드시 필요할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 기존 국내에서 산업부 지원으로 이루어진 연구결과를 활용하여 추진하는 것이 바람직함.
- 원전에 면진장치를 적용하기 위해서는 면진장치의 개발과 관련 기술 적용을 위한 설계기술 등이 요구되므로 산업체와의 협력이 필수적임.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 면진설계기술	<ul style="list-style-type: none"> • 면진장치 비선형 해석 기술 • 면진원전의 충응답 평가기술 • 면진장치 비선형 거동 예측 기술 • 관통배관 비선형 해석기술 • 면진원전 설계기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 면진장치 및 면진원전의 설계기술
• 원전 적용을 위한 면진장치	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 적용을 위한 면진장치 개발 • 실규모 성능시험 • 면진장치 극한 성능 평가 • 실규모 면진장치에 대한 실증시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 적용 가능한 대형 면진장치 개발 및 검증기술
• 면진취약설비 보강	<ul style="list-style-type: none"> • 면진에 의한 취약설비 분류 및 분석 • 면진 취약설비의 보강방법 개발 및 타당성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 면진 적용으로 인하여 취약성이 증가되는 설비의 보강기술
• 총면진 및 개별기기 면진	<ul style="list-style-type: none"> • 총면진 및 개별기기 면진 대상 설비 분류 • 총면진/개별기기면진 기술 분석 • 시험용 총면진 장치 개발 및 예비실험 • 시험용 기기면진 장치 개발 및 예비 실험 • 총면진 및 개별기기 면진을 위한 수치해석적 검증 • 실규모 실험을 통한 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 총면진 및 개별기기의 면진기술
• 면진원전 리스크 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 면진원전 리스크 영향설비 분석 • 면진원전 충응답 평가 • 면진원전 주요기기 취약도 평가 • 면진원전 사고시나리오 도출 • 면진원전 리스크 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 면진원전의 주요기기 취약도 평가를 통한 리스크 평가기술

4.1.3 기타 자연재해/복합재해 대비

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 2011년 후쿠시마 원전사고의 가장 큰 원인은 대규모 지진의 발생에 따른 초 대형 쓰나미에 의해 비상전원공급계통이 상실이었으므로 지진 이외에 쓰나미에 대한 대비가 필요함.
- 최근 들어 태풍을 비롯한 집중호우 등 지구온난화 등의 영향으로 인해 자연 재해의 강도 및 빈도가 크게 증가하고 있으며 이로 인해 원전의 안전성이

위험받고 있는 상황임.

☐ 기술개발 필요성

- 최근 지진 뿐 아니라 기타 극한 자연재해에 대한 원전의 안전성을 확보하기 위해 이들 자연재해에 대한 스트레스 테스트를 전 원전에 대해 수행을 계획하고 있으며 일부 대표 원전에 대해 시범 적용하고 있음.
- 원전의 설계에서는 수십 년 또는 수백 년 빈도의 자연재해를 고려하였으나 스트레스 테스트 등에서는 10,000년 빈도의 자연재해에 대해 안정성을 확인하도록 하고 있어 이들 자연재해에 대한 강도예측 및 이로 인한 안전성 확보가 요구되고 있음에 따라 관련 기술의 확보가 반드시 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 확률론적 쓰나미 리스크 평가

☐ 기술의 정의

- 국내원전 부지에 발생 가능한 쓰나미를 예측하고 이로 인한 원전의 위험요인을 평가하고 대비하기 위한 기술로 확률론적 안전성 평가방법을 적용하여 확률론적 쓰나미 리스크 평가방법을 개발함.

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 후쿠시마 사고가 발생하기 전인 2007년부터 확률론적 쓰나미 리스크 평가기술 개발을 위한 기초연구가 원자력연구원에서 이루어진 바 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국에서는 NRC를 중심으로 확률론적 쓰나미 리스크 평가기술 개발을 위한 연구를 수행하고 평가 가이드라인을 보고서로 발간한 바 있음.
- 일본에서는 일본 토목학회 주관으로 확률론적 쓰나미 재해도 평가기술을 개발하고 이를 적용하여 전 원전에 대한 쓰나미 재해도를 재평가한 경험을 가지고 있음.

☐ 미래동향 예측

- 일본 등 강진지역에서의 지진 강도가 증가하고 있으며 일본 서해안에서 발생한 지진의 영향으로 인해 국내 원전부지가 쓰나미의 영향권에 들 수 있어

이에 대한 철저한 대비가 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 우리나라 원전부지에서 발생 가능한 쓰나미의 진원은 대부분 일본 서해안 해역이므로 이들 쓰나미 유발 단층으로부터의 영향 등을 합리적으로 예측하기 위해서는 일보 관련 전문가와의 협력연구가 매우 중요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 쓰나미 전파 시뮬레이션	<ul style="list-style-type: none"> • 쓰나미 지진원을 고려할 수 있는 모델 구성 • 원전부지별 상세격자 구성 • 원전부지별 쓰나미 전파해석 모델 구축 및 해석 수행 	<ul style="list-style-type: none"> • 쓰나미 전파 시뮬레이션 모델 구축 및 해석기술
• 쓰나미 재해도 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 역사 쓰나미 기록에 대한 정량적 평가 • 쓰나미 재해도 평가를 위한 입력변수 도출 • 논리수목을 이용한 쓰나미 재해도 평가 • 원전 부지별 쓰나미 재해도 평가 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 논리수목을 이용한 쓰나미 재해도 평가 기술
• 쓰나미에 의한 구조물 및 기기의 취약도 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 기기 및 구조물에 대한 상세 수치모형 작성 • 수치해석에 의한 기기 및 구조물의 쓰나미 취약도 평가 • 부유물 및 퇴적물에 의한 구조물 및 기기의 취약도 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 구조적 기능적 파괴모드를 고려한 쓰나미 취약도 평가기술
• 쓰나미에 의한 원전부지 침수해석	<ul style="list-style-type: none"> • 침수해석을 위한 원전부지 상세모델 구축 • 쓰나미 범람모델 구축 • 쓰나미에 의한 원전부지 침수해석 수행 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 쓰나미에 의한 원전부지 침수해석 기술
• 확률론적 쓰나미 리스크 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 쓰나미 파고에 따른 사고시나리오 도출 • 쓰나미 정량화 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 쓰나미에 의한 사고시나리오 구성 및 리스크 평가기술

2) 기타자연재해에 대한 리스크 평가

□ 기술의 정의

- 국내에서 발생 가능한 기타자연재해 (태풍/홍수, 폭설, 외부화재 등)를 예측

하고 이에 대한 리스크 평가를 통해 원전의 안전성 확보하기 위한 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 태풍이나 홍수 등에 대한 원전의 리스크 관점에서 연구가 수행된 경우는 원자력연구원에서 기타 자연재해의 영향을 평가하기 위한 기초 연구를 일부 수행한 바 있음.
- 국내에는 폭설에 의한 원전의 리스크 관련 연구는 없음.
- 국내외적으로 화재 사건에 대한 확률론적 안전성 평가 기법을 개선하기 위한 연구개발은 활발히 진행 중에 있으나, 외부화재에 대한 리스크를 평가하고 안전성을 향상시키기 위한 연구는 국제적으로도 도전적인 연구 주제로 남아 있는 상황임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국제적으로 태풍, 홍수 등에 의한 강풍, 비산물, 외부침수 재해에 대하여 원전의 리스크를 정량적으로 평가하고 안전성을 효과적으로 향상시키기 위한 연구가 시작 단계에 있음.
- 미국의 경우에는 허리케인이나 토네이도에 대한 영향을 중심으로 다양한 연구가 이루어지고 있음.
- 국외에서도 폭설이 원전에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 없으며 일반 구조물에 대한 영향을 평가하기 위한 연구는 활발히 수행되고 있음.
- 외부화재에 대한 기술개발은 해외의 경우도 국내의 수준과 유사함.

□ 미래동향 예측

- 최근 일본에서 발생한 제비에 의해 큰 피해가 발생한 경험으로 보아 향후 태풍의 강도 및 빈도는 더욱 증가할 것으로 판단되며 원전의 안전성 확보 측면에서 태풍이나 홍수에 대한 안전성확보가 큰 비중을 차지할 것으로 예상됨.
- 폭설에 의한 원전의 안전성에 미치는 영향은 대부분 외부전원 상실과 같은 이차적인 영향이 주를 이룰 것으로 판단되나 기반기술이나 기본 자료의 확보 측면에서 매우 중요할 것으로 판단됨.
- 최근 들어 하절기 최고기온의 상승 등으로 인해 산불 및 기타 외부 화재의 발생가능성이 증가하고 있어 이에 대한 대비가 필요할 것으로 판단됨.

□ 기술개발 수행체계

- 태풍, 홍수 등에 과거의 관측기록은 수십 년에 불과하여 이를 활용한 장기적 예측은 불가능하므로 기후변화 모델 등을 적용하여 수치적인 해석을 통해 장기 예측이 가능할 것으로 판단되며 이에 따라 기후학이나 기상학 등 관련 분야 전문가와의 협업이 요구됨.
- 폭설만으로 인해 발생하는 원전의 리스크는 매우 작을 것으로 판단되나 기타 재해와 동시 또는 순차적으로 발생될 경우 리스크를 증가시키는 역할을 할 가능성이 크므로 복합재해와 함께 연구하는 것이 바람직함.
- 화재 PSA기술과의 연계개발이 필요하며, 외부화재로 인한 화재의 전파해석 및 실험 등이 동시에 수행되어야 함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 기타자연재해 선별기술	• 검토대상 기타자연재해 분류 • 기타자연재해에 대한 리스크 기여도 분석	• 기타자연재해 선별기술
• 태풍/홍수 재해도 평가	• 원전 부지별 태풍/홍수 발생 빈도 및 강도 평가/분석 기술 • 원전 부지별 태풍/홍수 재현주기 평가 기술	• 태풍/홍수 재현주기 평가기술
• 태풍/홍수에 대한 구조물 및 기기의 건전성 평가	• 원전 부지별, 노형별 태풍/홍수 대비 취약 구조물/기기 선별 기술 • 대상 구조물/기기의 태풍/홍수에 대한 재료적/구조적 영향 분석 및 실험적 성능 평가 기술 • 대상 구조물/기기의 태풍/홍수에 대한 응답 평가, 분석 및 검증 기술	• 태풍/홍수에 의한 구조물/기기 파손확률평가 기술
• 태풍/홍수에 대한 확률론적 리스크 정량화	• 원전 부지별, 노형별 태풍/홍수 유발 초기사건 도출 • 원전 부지별, 노형별 태풍/홍수에 대한 고장/사건 수목 모델링 및 리스크 정량화 방법론 개발	• 태풍/홍수에 의한 리스크 정량화 기술
• 폭설 재해도 평가	• 원전 부지별 폭설 발생 빈도 및 강도 평가/분석 기술 • 원전 부지별 폭설 재현주기 평가 기술	• 폭설 재현주기 평가기술
• 폭설에 대한 구조물 및 기기의 건전성 평가	• 원전 부지별, 노형별 폭설 대비 취약 구조물/기기 선별 기술 • 대상 구조물/기기의 폭설에 대한 재료적/구조적 영향 분석 및 실험적 성능 평가 기술 • 대상 구조물/기기의 폭설에 대한 응답 평가, 분석 및 검증 기술	• 폭설에 의한 구조물/기기 손상평가기술
• 폭설에 대한 확률론적 리스크 정량화	• 원전 부지별, 노형별 폭설 유발 초기사건 도출 및 폭설에 대한 고장/사건 수목 모델링 • 폭설 리스크 정량화 방법론 개발	• 폭설에 의한 리스크 정량화 기술
• 외부화재	• 원전 부지별 외부화재 발생 빈도 및 강도 평가/분석	• 외부화재의

재해도 평가	기술 • 원전 부지별 외부화재 영향 분석 기술	재현주기 평가기술
• 외부화재에 대한 구조물 및 기기의 건전성 평가	• 원전 부지별, 노형별 외부화재 대비 취약 구조물/기기 선별 기술 • 대상 구조물/기기의 외부화재에 대한 재료적/구조적 영향 분석 및 실험적 성능 평가 • 대상 구조물/기기의 외부화재에 대한 영향 평가, 분석 및 검증 기술	• 외부화재에 의한 구조물/기기 손상평가기술
• 외부화재에 대한 확률론적 리스크 정량화	• 원전 부지별, 노형별 외부화재 유발 초기사건 도출 및 외부화재에 대한 고장/사건 수목 모델링 • 외부화재 리스크 정량화 방법론 개발	• 외부화재에 의한 리스크 정량화 기술

3) 복합자연재해 리스크 평가

□ 기술의 정의

- 지진-쓰나미, 강풍-폭우 등 복합적으로 발생 가능한 대규모 자연재해는 단일 재해에 비하여 원전의 안전성에 미치는 영향이 현저히 크기 때문에 원전 부지별 발생 가능한 복합자연재해에 대하여 원전의 리스크를 정량적으로 평가함으로써 원전의 자연재해 대비 안전성을 정확히 평가하고 리스크 정보에 기반 하여 효과적으로 안전성을 향상시켜야 할 필요가 있음.
- 또한, 각 재해로 인해 유발되는 2차재해(지진-쓰나미/내부침수/화재/사면붕괴/여진 등, 태풍-비산물/폭우 등)로 인해 원전에 추가적인 손상을 유발할 수 있으므로, 원전 부지별 발생 가능한 2차적 영향에 대하여 원전의 안전성을 정확히 평가 및 확보하여야 할 필요가 있음.
- 자연재해 발생 시 원전의 사고발생 방지/완화/복구를 위하여 필수적으로 요구되는 도로, 전력망, 상하수도 등 원전 내외부 사회기반 시설물에도 치명적인 피해를 줄 수 있으므로, 자연재해에 대한 원전 내외부 도로시설의 리스크 평가를 통해 안전성을 정확히 평가하고 리스크 기반 안전성 향상 대책을 마련할 필요가 있음.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 후쿠시마 원전 사고 이후 국내외적으로 자연재해에 대한 원전의 확률론적 안전성 평가 기법을 개발/개선하기 위한 연구개발은 활발히 진행 중에 있으나, 복합자연재해 발생 시 원전의 리스크를 정량적으로 평가하고 리스크 평가에 기반 하여 안전성을 향상시키기 위한 연구는 국제적으로 태동기에 있는 상황이라 할 수 있음.

- 우리나라에서는 원자력연구원에서 확률론적 안전성 평가의 한 분야로 복합 재해에 대한 리스크 평가에 필요한 기초기술을 개발하고 있음.
- 현재 개발 중인 기술은 국내 발생 가능한 복합자연재해를 분류/선별하고, 복합자연재해의 분류에 따른 원전 리스크 평가 방법론을 개발하기 위한 기술이며, 본 기술은 복합재해 발생 시 국내 원전 부지별 영향을 예측/평가하고 리스크의 정량적 평가를 실시함으로써 리스크 기반의 최적 대응기술 및 안전성 향상 대책을 제시하기 위한 연구임.
- 대규모 자연재해 발생 시 유발되는 2차적 영향에 대해 원전의 안전성을 정확하게 평가하고 확보하기 위한 연구는 도전적 과제로 남아있는 상황이며, 국내에서는 자연재해에 의한 2차적 영향평가를 위한 기초연구를 원자력연구원에서 수행하고 있음.
- 자연재해 발생 시 원전 내외부의 도로, 전력망 등 사회기반 시설물의 리스크를 정량적으로 평가하고 리스크 평가에 기반 하여 안전성을 향상시키기 위한 연구는 국제적으로도 도전적 연구 주제로 남아 있는 상황임.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 복합재해에 대한 원전 시설의 리스크 평가 관련 연구는 확인된 사항이 없음.
- 자연재해에 의한 2차적 영향은 지진 후 사면붕괴에 의한 영향에 대한 연구를 일본에서 수행한 바 있음.

☐ 미래동향 예측

- 자연재해의 동시발생 또는 순차적 발생은 지진 발생 후 쓰나미의 발생으로 큰 피해를 입은 후쿠시마의 사고에서 입증된 바와 같이 원전의 안전성에 큰 위협요소가 될 수 있으므로 이에 대한 대비의 중요성은 매우 커질 것으로 예측됨.
- 국내 원전의 상당수가 배후에 높은 사면을 가지고 있어 이들 재해에 의한 영향을 평가하고 안전성을 확보하는 것이 매우 중요함.
- 도로시설의 자연재해 리스크 평가기술은 자연재해로부터 원전의 안전성을 확보하기 위해서는 반드시 필요한 기술로 판단됨.

☐ 기술개발 수행체계

- 복합자연재해의 동시발생과 순차적 발생에 따른 영향을 구분하여 수행할 필요가 있으며 기타 자연재해 리스크 평가기술 개발의 결과를 충분히 활용

할 필요가 있음.

- 자연재해에 의한 2차적 영향의 경우는 현재 개발 중인 기술의 결과를 적극 활용하고 관련 분야의 경험이 풍부한 일본 등의 외국 전문가와의 긴밀한 협력이 필요함.
- 도로시설의 자연재해 리스크 평가는 시설물의 내진성능 평가가 동시에 이루어져야 하므로 관련 자료의 확보 등이 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 복합자연재해 리스크 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 복합자연재해로 인한 국내 원전 부지별 손상 예측 및 평가 방법론 • 국내 원전 부지별 복합자연재해에 대한 원전의 영향 분석 기술 • 복합자연재해 리스크 정량화 기술 • 국내 원전 부지별 복합자연재해 리스크 평가 기반 최적 대응 기술 및 안전성 향상 기술 	• 복합자연재해 리스크 평가기술
• 자연재해에 의한 2차적 영향 (지진유발 화재 및 홍수 등) 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 부지별 발생 가능한 자연재해 2차적 영향 예비 분석 및 선별제거 기술 • 국내 원전 부지별 2차적 영향에 대한 원전의 손상 예측 및 평가 • 자연재해의 2차적 영향에 대한 원전의 안전성 평가 및 향상 기술 	• 자연재해에 의한 2차적 영향 평가기술
• 원전 내외부 도로시설 자연재해 리스크 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 도로시설의 침수유발 손상 예측 및 평가 • 도로시설의 지진유발 손상 예측 및 평가 • 도로시설 손상의 원전 영향 분석 • 도로시설의 안전성 향상 	• 자연재해에 의한 도로시설의 리스크 평가기술

4) 특수 자연재해 예방 기술

□ 기술의 정의

- 특수 자연재해는 거의 발생하기 어려운 자연재해이나 그렇다고 발생하지 않는다고 배제하기는 어려운 자연재해로서 대표적인 예는 다음과 같음.
- 과도한 해양부유물질(해파리 떼 등)이 취수구의 이동 스크린에 달라붙으면, 기기냉각해수계통이 해수를 취수하기 어려워 기기냉각이 곤란하여 원전이 불시정지가 됨.
- 태양 흑점 활동에 따른 태양풍은 지구 자기장을 교란시켜, 전자기기의 오작

동 및 제어불능 상황을 초래할 수 있음. 이는 1,000Km 이상 떨어진 대기권에서 EMP (Electromagnetic Pulse) 폭발이 일어나도, 모든 전자기기가 먹통이 되는 것과 같은 이치임.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 해파리 떼에 의한 취수 곤란을 경험한 적이 있음.
- EMP 공격을 방어하는 기술이 일부 개발되었으나, 이의 원전 활용은 없음. 이를 활용하여 태양풍에 의한 초기사건의 발생을 방지할 수 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해양부유물질 감시 시스템 활용은 미흡
- EMP 공격을 방어하는 기술이 개발됨

□ 미래동향 예측

- 해양부유물질 감시 시스템 활용 예상
- EMP 공격을 방어하는 기술을 원전에 활용하여 태양풍에 의한 초기사건 발생 방지 가능
- 지구 자기장 교란으로 인해 길을 잃은 해양생물의 이동경로 조절 가능

□ 기술개발 수행체계

- EMP 공격 방어 기술 확보 필요
- 효과적인 수중 감시 시스템 개발 필요

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 해양 부유 물체/생물 감지 시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 수중 감시 시스템 개발 • 해양부유물질 유인 이동 방법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 해양부유물질 유인 이동 방법
• 태양풍에 의한 초기사건 방지	<ul style="list-style-type: none"> • EMP 공격을 방어하는 기술의 원전 적용 	<ul style="list-style-type: none"> • EMP 공격 방어 기술의 원전 적용

4.1.4 인적재해 대비 안전성 평가

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 9·11 미국 무역센터에 대한 항공기 테러 이후 인적 재해에 의한 원전의 안전성 확보의 필요성이 대두되고 있음.
- 국내에서는 최근 계획 중인 스트레스 테스트에서도 항공기충돌과 같은 인적 재해에 대한 원전의 리스크를 정량화하고 이에 대비할 것을 요구하고 있는 실정임.
- 산업이 발달하고 국민의 소득 수준이 높아짐에 따라 항공기의 운항횟수가 증가함에 따라 항공기충돌 재해나 산업시설의 폭발 등에 의한 재해 가능성이 증가하고 있어 이에 대한 대비가 요구됨.

☐ 기술개발 필요성

- 원전의 안전성에 영향을 미치는 인적재해는 매우 다양하며 이로 인한 원전의 리스크는 매우 크므로 체계적인 대책이 반드시 필요함.
- 특히 항공기충돌과 같이 충돌로 인한 구조물의 손상, 충격진동으로 인한 내주 설비의 손상, 항공유의 확산으로 인한 화재영향 등 충돌로 인한 위협요인이 다양하게 나타나고 있어 이들의 영향을 합리적으로 평가하고 대비할 수 있는 기술의 개발이 반드시 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 충돌 및 폭발사고 안전성 평가

☐ 기술의 정의

- 항공기 충돌 및 테러 등으로 인해 발생 가능한 외적 재해에 대한 안전성 평가를 기반으로 안전성 확보방안을 구축하는 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 항공기 충돌에 의한 콘크리트 구조물의 관입, 관통 등의 영향에 대한 연구가 주로 이루어져 왔으며 최근 항공유의 확산에 따른 광역화재영향 등에 대한 연구가 진행되고 있음.

- 또한 원자력연구원에서는 항공기충돌에 의한 리스크를 확률론적으로 평가하기 위한 기반기술 개발을 수행한 바 있음.
- 폭발 등 인위적 사고의 경우 국내에서는 물리적 방호 관점에서 관련분야 연구가 일부 진행된 바 있으나 구조적인 영향이나 리스크의 정량적 평가 등은 이루어지지 않았음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- IAEA에서는 항공기 충돌에 의한 리스크를 확률론적 또는 결정론적으로 평가를 위한 가이드라인을 작성 중에 있음.
- 폭발 등 인위적 사고의 경우 미국에서는 국립연구소인 샌디아 연구소를 중심으로 물리적방호 관점에서의 연구가 진행된 바 있으며 국내에서 이 기술을 도입한 사례가 있음.

□ 미래동향 예측

- 산업발달과 복지수준의 향상 등으로 인해 항공기 운항 횟수가 증가함에 따라 테러가 아닌 항공사고의 영향도 원전의 안전성에 대한 위협요인이 될 것으로 예상되므로 이에 대한 대비가 필요함.
- 테러, 사보타지 등 인적요인에 의한 원전의 안전성을 위협하는 요인이 점차 증대될 것으로 판단되며 이에 대한 종합적인 대비책이 필요할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 기존 항공기 충돌에 대한 충돌해석이나 화재확산해석 등 개발된 기술을 최대한 활용하고 의도적 사고와 비의도적인 사고로 구분하여 리스크를 평가할 수 있는 방법의 개발이 필요함.
- 테러나 사보타지 등에 의해 발생 가능한 물리적/화학적 리스크나 이로 인한 운전원의 안전성 확보 방안에 대한 고려도 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 항공기충돌 대비 안전성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 항공기 충돌로 인한 구조물의 손상 및 2차적 영향 요인 평가 • 항공기 충돌에 의한 영향의 정량적 평가기술 개발 • 항공기 충돌에 대한 결정론적/확률론적 안전성 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 항공기 충돌 리스크 평가기술

<ul style="list-style-type: none"> • 폭발 등의 인위적 사고에 대한 안전성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 테러 등에 의한 폭발 등의 사고 시나리오 개발 • 폭발 등에 의한 구조물 및 기기의 건전성 평가기술 • 폭발 하중 등에 대한 리스크의 정량적 평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 폭발 등에 의한 구조적 건전성 평가기술
---	--	---

4.2 종합 원자력 해석/평가 기술

4.2.1 개요

□ 「종합 원자력 해석/평가 기술」은 원전 리스크 분석과 열수력 분야를 포함하며 다음 4개의 중분류 단위로 구분함.

- 종합 원자력 열수력 해석 기술
- 원전 리스크 종합 평가
- 기타 원자력 시스템 리스크 평가
- 리스크 정보 활용

4.2.2 종합 원자력 열수력 해석 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 후쿠시마 사고 이후 국내외 규제 환경은 기존 설계기준사고 위주에서 다중 사고를 포함한 설계확장조건(DEC)에 집중하는 방향으로 변화하고 있음. 특히 비상노심냉각계통 설계 기준 요건을 핵연료의 연소도 조건을 반영하여 설계하도록 개정될 것으로 예상되고 있음.

□ 기술개발 필요성

- 사고관리 계획서 법제화, 다중사고 및 핵연료 연소도 효과 고려 요구 등의 국내외 규제 환경 변화에 대응하기 위해 중대사고 해석 능력 강화뿐만 아니라 다중사고를 포함한 설계확장조건을 해석할 수 있도록 시스템 스케일의 안전해석 코드의 해석 능력을 향상시킬 필요가 있음.

나. 세부 기술 내용

1) 원전 시스템 스케일 해석 기술

□ 기술의 정의

- 원전 안전해석에서 가장 널리 사용되는 시스템 스케일의 해석 기술의 성능을 향상시켜 다양한 사고 조건을 모의하고 경수로 이외의 타 노형을 해석할 수 있도록 모의 기능을 확장시킴.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 그동안 국내에서는 해외 코드(RELAP5, CENTS 등)에 기반을 둔 시스템 스케일 코드인 MARS, TASS 등의 코드를 개발한 경험이 있음.
- SMART 설계 및 안전해석용으로 개발한 TASS 코드가 있으나 혼합유체 유동 모델을 사용했기 때문에 심각한 이상유동 현상 해석에는 부적합함.
- NRC 코드인 RELAP5를 근간으로 하는 MARS 코드는 연구 목적의 코드 사용에는 제한이 없으나 상업적 이용은 제한되고 있음.
- 국내 고유 안전해석 코드로는 2017년에 인허가를 취득한 SPACE 코드가 있으나 SPACE 코드는 가압경수로형 안전해석에만 적합하며 연구로, 일체형 / 중소형 원전 해석을 위해서는 추가 기능이 필요함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 원전 선진국의 경우에는 각 나라 별로 시스템 스케일의 코드를 개발했거나 개발 중에 있음.
- 미국은 TRACE 코드를 개발하여 RELAP5를 대신하여 규제용 도구로 사용하고 있으며, 출력증강과 수명 연장을 위한 장기 거동 해석을 위한 RELAP7 코드를 개발하고 있음.
- 프랑스에서 개발한 CATHARE 코드는 경수로뿐만 아니라 고속가스냉각로, SFR 및 일체형 원전 해석 기능을 확보하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 현재 기기 스케일 코드가 전 세계적으로 각광받고 있으나 근 미래에 규제 및 설계 용도로 사용하기는 어려운 상황이며 일부 해석에서만 기기 스케일 코드와 시스템 스케일 코드를 연계하는 방식으로 사용하고 있음.
- 시스템 스케일 코드의 수요는 최소 20년 이상 지속적으로 발생할 것으로 예상

되므로 시스템 스케일 코드의 성능 향상 및 기술적 뒷받침이 필요한 상황임.

□ 기술개발 수행체계

- 원전 시스템 스케일 해석 기술은 어느 정도 성숙된 기술이므로 현재까지 개발된 기술을 바탕으로 다양한 분야의 기술들을 개선 및 통합하는데 중점을 두고 있음.
- 일부 개발이 부진한 분야에 대해서는 연구 초반에 해당 분야 기술을 제고하여 타 분야와 동등한 수준에 이를 수 있도록 충분한 연구 기간을 확보하는 것이 중요함.
- 연구추진체계
 - 기술 성격 상 단계 별 개발보다는 기술 별로 병행 개발하는 것이 효율적임.
 - 따라서 각 기술 별로 2~3단계의 기술 개발 과정을 거쳐 각 분야의 고유 기술을 확보하는 방향으로 구성됨.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 노형공동 안전해석 코드 개발	<ul style="list-style-type: none"> SPACE 기반 연구로/해양원자로플랜트 안전해석 코드 개발 SPACE 기반 연구로/해양원자로플랜트 안전해석 코드 검증 SPACE 기반 중소형 및 미래형 원자로 안전해석 코드 개발 	• 노형 별 안전해석 해석기술
• 최적 열수력 안전성 평가 전산체계 및 검증	<ul style="list-style-type: none"> 다물리 코드 연계기술 및 불확실성 정량화 프로그램 개선 다물리 연계해석 통합 플랫폼 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 다물리 코드 연계 기술 불확실도 정량화 기법
• AI 기법을 활용한 사고예측 및 복구기술	<ul style="list-style-type: none"> AI 기법을 활용한 원전 과도상태 예측 기술 안전해석코드를 이용한 AI 학습 데이터 생산 및 DB 구축 AI 기법을 이용한 사고 시나리오 예측 기술 검증 	<ul style="list-style-type: none"> AI 기반 원전 과도상태 예측 기술 시나리오별 학습데이터 생산을 위한 DB 구축
• 전 범위 냉각재상실사고 최적평가모델 개발	<ul style="list-style-type: none"> 중소형 냉각재상실사고 파단 스펙트럼 분석 및 주요 열수력 현상 규명 중소형 냉각재상실사고 해석에 적합한 최적열수력모델 개발 및 모델 불확실도 정량화 최적평가모델의 원전 적용성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 중소형 LOCA 해석에 적합한 최적 열수력 모델 개발 불확실도 정량화를 포함한 최적평가모델
• 3차원 노심동특성, 노심열수력, 연료봉	<ul style="list-style-type: none"> 다분야 통합 해석체계 개발 통합 해석체계 검증 및 통합 해석체계 	• 다분야 연계해석 기술

성능해석 및 계통열수력 통합 해석 체계 개발	활용	
<ul style="list-style-type: none"> 계통코드 해석범위 확장을 위한 설계기준초과사고 모의 기능 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 기존 일부 설계확장조건에 관한 계통 코드 개발 확장범위의 설계확장조건에 관한 계통 코드 개발 전 범위의 설계확장조건에 관한 계통 코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 설계확장조건 해석모델
<ul style="list-style-type: none"> 계통/중대사고 통합 해석 체계 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 계통/중대사고 통합 해석체계 개발 계통/중대사고 통합 해석체계 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 코드 간 연계해석 기술

2) 원전 다중 스케일 해석 기술

□ 기술의 정의

- 원전 열수력 해석 기술은 해석 스케일에 따라서 계통스케일(~100 m), 기기 스케일(~10⁻¹ m), CFD스케일(~10⁻² m)로 구분 할 수 있는데, 다중스케일 해석 기술은 해석 문제의 특성을 고려하여 서로 다른 해석 스케일의 코드를 연계한 통합해석을 수행함으로써 안전 및 성능 해석의 정밀도를 높일 수 있는 기술임.

□ 국내외 기술 개발 현황

- 국내의 계통스케일 해석 기술은 MARS 및 SPACE 코드 개발을 통하여 원전 선진국과 대등한 기술수준에 도달하였음.
- 기기 및 CFD 스케일 해석 기술은 원자력연구개발사업으로 2007년부터 시작한 CUPID 개발을 성공적으로 수행함으로써 원전 열수력 해석 분야에서 선진국보다 앞서는 기술을 확보하였음.
- 특히 MARS 코드와 CUPID 코드를 연계한 다중스케일 코드를 개발함으로써 다중스케일 해석 분야에서 외국 보다 한 단계 앞선 통합 코드를 보유함.

□ 기술 개발 전략

- CFD 스케일 해석 기술은 계산 시간 등의 제약으로 원전 열수력 해석의 본격적인 적용은 현실적으로 어려우며, 단상 해석 및 국소 열수력 해석 등의 부분적 적용에 중점을 두어서 추진함이 합리적임.
- 기기스케일 해석은 CUPID코드의 성공적인 개발로 원전 다차원 열수력 적용

성이 입증되었으며, 이에 따라서 기기스케일 해석 기반의 원전 안전해석 기술 개발을 위한 본격적인 연구를 수행하여 기존의 안전해석 기술 대비 혁신적인 기술을 확보하기 위한 노력이 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 기기스케일 안전해석 코드 검증	• 원자로 기기스케일 열수력 안전해석 모델 검증	• 기기스케일 원자로 열수력 안전해석 기술의 적용성 확보 • 기존 계통스케일 안전해석의 예측 불확실도 개선
• 기기스케일 격납건물 안전해석 코드	• 격납건물 내 다차원 수소 거동 해석 모델 개발 • 격납건물 내 수소 연소 및 저감 장치 해석 모델 개발 • 격납건물 내 수소 관련 안전 현안 해석을 위한 다차원 해석 코드 개발 • 격납건물 내 수소 관련 안전 현안 해석을 위한 다차원 해석 코드 개발	• 격납건물 수소 안전 현안 해결 적용 • 원전 선진국에 앞선 격납건물 해석 기술 확보
• 기기스케일 격납건물 안전해석 코드 검증	• 격납건물 벽면 응축 및 수소 거동 모델 검증 • 격납 건물 수소 연소 모델 검증 • 기기스케일 격납건물 해석 코드의 물리 모델 검증을 통한 안전해석 적용성 확보	• 격납건물 내 수소관련 주요 현상 규명 • 기기스케일 격납건물 해석코드 예측 불확실도 평가
• 기기스케일 안전해석 방법론	• 기기스케일 DBA 안전해석 방법론 개발 • 기기스케일 DEC 안전해석 방법론 개발 • 기기스케일 해석 코드 기반의 안전해석 기술 개발	• 기존 원전 안전해석 기술의 한 단계 격상 • 선진국 대비 앞선 원전 안전해석 기술 확보
• 기기스케일 안전해석 불확실도 평가 기술 개발	• 기기스케일 해석코드 수치해법 불확실도 평가 방법 개발 • 기기스케일 해석 물리 모델 불확실도 평가 방법 개발 • 기기스케일 해석 솔버 및 모델의 예측 불확실도 평가 기술 확보	• 기기스케일 안전해석 코드의 예측 불확실도 정량화 • 기존 원전 안전해석의 보수성 개선
• 기기스케일 다분야 통합 안전해석 기술	• 열수력/노물리/핵연료/격납건물 연계해석기술 개발 • 열수력/노물리/핵연료/격납건물/구조/수 화학 연계해석기술 개발 • 원전 통합해석을 위한 다분야 연계해석 플랫폼 개발	• 개별 분야별 해석 코드의 기술 수준을 향상시킴 • 가상원자로 개발을 위한 통합 플랫폼 확보

3) 가상원자로 해석 기술

□ 기술의 정의

- 가상원자로는 모델 및 시뮬레이션 기술 기반의 원자로 다물리 현상 상세 모사를 위한 통합 소프트웨어로서 다중스케일 해석 기술을 포함하고 있으며, 원전 안전성 및 성능 개선 기술 개발을 위한 초정밀 해석 기술로서 활용함.
- 가상원자로 기반 사고진행 예측 시스템 구축, 최적의 원자로 자율운전 조건 계산, 실시간사고 대응 로봇 시스템 개발 및 원전해체 시 설비 오염 평가에 활용되며, 최종적으로 방사성물질 누출의 실질적 배제 방안을 도출하여 원전 안전성 향상에 기여함.

□ 국내외 기술 개발 현황

- 국내에서는 가상원자로 개발과 관련한 본격적인 연구 수행에 앞서 국내 연구개발 환경에 적합한 “한국형 가상원자로(K-VR, Korean Virtual Reactor) 개발 전략 수립”을 위한 사전 연구가 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음 (2017.07~2018.06).
- 모델 및 시뮬레이션 기술 기반의 원전 통합 소프트웨어는 미국 및 프랑스 주도의 유럽연합과 같은 원전 선진국을 중심으로 연구개발이 진행되고 있음. 이들 국외 연구개발 프로젝트의 현황은 아래와 같음.

	국가 (주관)	개발 목적	수행기간	예산	해석분야	주요실적	참여기관
CASL ¹⁾	미국 (DOE)	원전 출력 증강 및 수명연장을 위한 성능 해석을 위한 가상원자로 개발	1단계:2010~15 2단계:2016~20	400억원/년 (미국내 원자력 연구인프라 재건 지원 목적 포함)	노물리, 열수력, 핵연료, 수화학	핵연료봉 CRUD 침적에 의한 노심 출력 저하 예측	ORNL을 비롯한 미국내 20여개 연구기관
NEAMS ²⁾	미국 (DOE)	신형원자로 및 신형핵연료 개발을 위한 해석 소프트웨어 개발	1단계:2012~18	220억원/년 (약 8개 정부 출연 연구소의 전문인력 유지 비용 포함)	노물리, 열수력, 핵연료, 구조	SFR 및 가스로의 노심 및 핵연료 해석	INL을 비롯한 미국내 10여개 연구기관
NURESIM ³⁾	EU (EURATOM)	경수로 안전해석을 위한 최신 (State Of Art) 소프트웨어 공급	1단계:2005~08 2단계:2009~11 3단계:2013~15	40억원/년	노물리, 열수력	원자로 압력용기의 가압 열 충격 (PTS) 현상 예측	CEA를 비롯한 EU내 22개 연구기관
K-VR ⁴⁾	한국 (과기정통부)	가동원전 안전성 향상	1단계:2019~23		노물리, 열수력, 핵연료, 구조, 중대사고	원전 규제기준 강화 대비 안전 여유도 향상	산학연 협력 연구

- 1) CASL: Consortium for the Advanced Simulation of Light Water Reactors
 2) NEAMS: The Nuclear Energy Advanced Modeling and Simulation Program
 3) NURESIM: Nuclear Reactor European Simulation Platform
 4) K-VR: 추진 계획

- 국내외적으로 원전계측제어계통 대상으로 회로분야 해석기술은 일부 존재하나 상위 계통단위 수준의 해석체계는 현재까지 개발된 바 없음.

□ 기술 개발 전략

- 가상원자로의 기술수목을 평가하여 분야별 기술 수준을 고려한 한국형 가상원자로의 단계별 연구개발 전략은 아래에 나타난 바와 같음.

가상원자로 기술 분야 파이모델

(개발기간: ■3년, ■5년, ■10년, ■10년 이상)

(개발기관: 연구소, 공동(산,학,연), 공동(학,연), 공동(연,산), 공동(연,규))

구성 분야	핵심/기반 기술		세부 기술		안전기술 고도화/ 원전 안전성 향상	단계별 목표	
		현재수준	요구수준				
원전 모델 및 시뮬레이션 기술	<input type="checkbox"/> 원자로 노물리 해석 기술	3차원 해상도: 10 ⁴	3차원 해상도: 10 ⁶	<input type="checkbox"/> 노달스케일 중성자 확산 모델 <input type="checkbox"/> 봉스케일 정상상태 중성자 수송 모델 <input type="checkbox"/> 봉스케일 과도상태 중성자 수송 모델 <input type="checkbox"/> 몬테칼로 중성자 해석 모델	가동원전 안전 여유도 향상	<input type="checkbox"/> 1단계(~2021년) - K-VR 기반구축 - 핵연료 봉단위 안전해석 - 가동원전 안전 여유도 향상	
	<input type="checkbox"/> 핵연료 해석 기술	2차원 해상도: 10 ³	2~3차원 해상도: 10 ⁷				
	<input type="checkbox"/> 원자로 냉각계통 해석 기술	1차원 해상도: 10 ³	3차원 해상도: 10 ^{7~9}	<input type="checkbox"/> 계통스케일 열수력 모델 <input type="checkbox"/> 기기스케일 열수력 모델			<input type="checkbox"/> 수소 거동 모델 <input type="checkbox"/> 원자로 건물 응축 현상 모델 <input type="checkbox"/> 핵분열 물질 생성 및 거동 모델 <input type="checkbox"/> 노내 중대사고 현상 모델 <input type="checkbox"/> 노외 중대사고 현상 모델 <input type="checkbox"/> CAD 연계 전처리 모델
	<input type="checkbox"/> 원자로 건물 해석 기술	3차원 해상도: 10 ⁵	3차원 해상도: 10 ^{7~9}	<input type="checkbox"/> CFD 해석 모델 <input type="checkbox"/> DNS 해석 모델 <input type="checkbox"/> 다중스케일 연계 모델			
	<input type="checkbox"/> 중대사고 해석 기술	1차원 해상도: 10 ³	1~3차원 해상도: 10 ^{4~6}				
원전 모델 및 시뮬레이션 공동 기술	<input type="checkbox"/> 구조 해석 기술	3차원 해상도: 10 ⁵	3차원 해상도: 10 ⁷	<input type="checkbox"/> 원자로 구조 해석 모델 <input type="checkbox"/> 원자로 건물 구조 해석 모델 <input type="checkbox"/> 기기건전성 평가 모델 <input type="checkbox"/> 내진 해석 모델	원전 장기 운전 안전성 향상	<input type="checkbox"/> 2단계(~2023년) - 1세대 K-VR - 원자로건물 안전현안 해석 - 원전 가상사고 통합해석 - 세계 최고 수준 안전해석 기술	
	<input type="checkbox"/> 수화학 해석 기술	NA	3차원 해상도: 10 ^{7~9}	<input type="checkbox"/> 붕소 거동 모델 <input type="checkbox"/> 원자로 냉각재 내 핵분열 물질 거동 모델 <input type="checkbox"/> 크러드(CRUD) 거동 및 침적 모델			
가상원자로 시뮬레이션 플랫폼 기술	<input type="checkbox"/> 통합해석 플랫폼 구축 기술	NA	다중 SW 통합	<input type="checkbox"/> 개별 시뮬레이션 SW 핵심 솔버 병렬계산 기술 <input type="checkbox"/> 다물리 연계 모델 <input type="checkbox"/> 통합 플랫폼 SW 및 전후 처리 프로세서	원전 시뮬레이션 기술 고도화	<input type="checkbox"/> 3단계(~2028년) - 2세대 K-VR - 가상원자로 기반 원전 안전해석 체계 구축 - 자연재해, 환경 영향 원전 위험도 평가	
	<input type="checkbox"/> 가상원자로 계산 클러스터 구축 기술		<input type="checkbox"/> 계산 클러스터 구축 및 운영 기술 <input type="checkbox"/> 개별 시뮬레이션 SW 최적화 기술 <input type="checkbox"/> 통합 플랫폼 SW 최적화 기술	<input type="checkbox"/> 시뮬레이션 결과 병렬 후처리 기술 <input type="checkbox"/> 3차원 가시화 기술 <input type="checkbox"/> 원전계통 가상현실 구현 기술 <input type="checkbox"/> 가상현실 시스템 입출력 구현 기술			
	<input type="checkbox"/> 가상현실 가시화 시스템 구축 기술						
가상원자로 활용 기술	<input type="checkbox"/> 가동원전 안전성 향상 기술 <input type="checkbox"/> 안전해석 방법론 <input type="checkbox"/> 예측 불확실도 정량화 기술 <input type="checkbox"/> 특수목적 원전 설계 실증 실험 대체 기술 <input type="checkbox"/> 가동원전 실증 실험 대체 기술		<input type="checkbox"/> 안전기준 강화 대비 원전 안전 여유도 개선 기술 <input type="checkbox"/> 다차원 현상 관련 안전현안 적용 기술 <input type="checkbox"/> 원전 가상사고 통합 시뮬레이션 기술 <input type="checkbox"/> 설계기준사고(DBA) 안전해석 방법론 <input type="checkbox"/> 설계확장조건사고(DEC) 안전해석 방법론 <input type="checkbox"/> 중대사고(SA) 해석 방법론 <input type="checkbox"/> 개별 시뮬레이션 SW 불확실도 평가 기술 <input type="checkbox"/> 통합 시뮬레이션 불확실도 평가 기술	<input type="checkbox"/> 연구용 원자로 시뮬레이션 기술 <input type="checkbox"/> 중소형 원전 시뮬레이션 기술 <input type="checkbox"/> 액체 금속로 시뮬레이션 기술 <input type="checkbox"/> 신안전계통 검증 실험 대체 해석 기술 <input type="checkbox"/> 원전 성능 검증 실험 대체 해석 기술 <input type="checkbox"/> 다물리 복합 실험 대체 해석 기술 <input type="checkbox"/> 위험물질 사용 실험 대체 해석 기술	최적 안전해석/ 원전 검증실험 의존도 최소화		

□ 가상원자로 구성 기술 분야

- 가상원자로는 원전 다물리 해석 및 계산과학 기술 분야 등 다양한 전문분야의 기술로 구성되어 있는데 이를 요약하여 정리하면 아래와 같음.

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 원전 모델 및 시뮬레이션 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 노물리 해석 기술 핵연료 해석 기술 원자로 냉각계통 해석 기술 원자로 건물 해석 기술 중대사고 해석 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 노달스케일 중성자 확산 모델 봉스케일 정상상태 중성자 수송 모델 봉스케일 과도상태 중성자 수송 모델 몬테칼로 중성자 해석 모델 정상상태 핵연료 물성 모델 과도상태 핵연료 물성 모델 사고조건 핵연료 파손 모델 계통스케일 열수력 모델 기기스케일 열수력 모델 CFD 해석 모델 DNS 해석 모델 다중스케일 연계 모델 CAD 연계 전처리 모델 수소 거동 모델 원자로 건물 응축 현상 모델 핵분열 물질 생성 및 거동 모델 CAD 연계 전처리 모델 노내 중대사고 현상 모델 노외 중대사고 현상 모델
<ul style="list-style-type: none"> 원전 모델 및 시뮬레이션 공통기술 	<ul style="list-style-type: none"> 구조 해석 기술 수화학 해석 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 구조 해석 모델 원자로 건물 구조 해석 모델 기기건전성 평가 모델 내진 해석 모델 봉소 거동 모델 냉각재 내 핵분열 물질 거동 모델 크러드(CRUD) 거동 및 침적 모델
<ul style="list-style-type: none"> 가상원자로 시뮬레이션 플랫폼 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 통합해석 플랫폼 구축 기술 계산 클러스터 구축 기술 가상현실 가시화 시스템 구축 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 통합 플랫폼 SW 및 전후 처리 프로세서 다물리 연계 모델 개별 시뮬레이션 SW 핵심 솔버 병렬계산 기술 계산 클러스터 구축 및 운영 기술 개별 시뮬레이션 SW 최적화 기술 통합 플랫폼 SW 최적화 기술 시뮬레이션 결과 병렬 후처리 기술 3차원 가시화 기술 원전계통 가상현실 구현 기술 가상현실 시스템 입출력 구현 기술
<ul style="list-style-type: none"> 가상원자로 활용 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 가동원전 안전성 향상 기술 안전해석 방법론 개선 예측 불확실도 정량화 기술 특수목적 원전 검증 실험 대체 기술 가동원전 실증 실험 대체 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 원전 안전 여유도 개선 기술 다차원 현상 관련 안전현안 적용 기술 원전 가상사고 통합 시뮬레이션 기술 DBA 안전해석 방법론 DEC 안전해석 방법론 중대사고(SA) 해석 방법론 개별 시뮬레이션 SW 불확실도 평가 기술 통합 시뮬레이션 불확실도 평가 기술 연구용 원자로 시뮬레이션 기술 중소형 원전 시뮬레이션 기술 액체 금속로 시뮬레이션 기술 신안전계통 검증 실험 대체 해석 기술

		<ul style="list-style-type: none"> • 원전 성능 검증 실험 대체 해석 기술 • 다물리 복합 실험 대체 해석 기술 • 위험물질 사용 실험 대체 해석 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 계측제어계통 모델링 및 시뮬레이션 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 계측제어계통 모사 및 성능해석 기술 • 가상원자로기반 원전 과도현상 빅데이터 구축 • Cyber 원전 VR 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 회로 해석 기술을 확장한 디지털 기기 동작 모의 방법론 및 디지털 기기 모의 체제 • 디지털 기기 모의 방법론을 기반으로 디지털 기기의 실시간 성능을 모의할 수 있는 성능 해석 방법론 및 실시간 성능 해석 체제 • 계통 내 디지털 기기의 불확실도 전파 유형 및 경로 분석을 통한 불확실도 평가 모델 및 체제 • 계측제어계통 해석 모델과 가상원자로 해석체계 내의 타 해석 모듈과의 연계 기술 • 다양한 해석 모듈(핵연료, 노심, 열수력, 안전해석, 중대사고해석 등)과 계측제어계통 성능해석 모델과의 실시간 연계 및 정보교환 알고리즘 • 가상원자로 해석 입력 및 결과 연계를 위한 가상현실 모델 • 가상원자로 입력 처리 및 출력 표시 알고리즘 • 가상현실 기술을 활용한 데이터 처리 알고리즘

4.2.3 원전 리스크 종합 평가

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 원전에 대한 리스크를 종합적으로 평가하기 위한 기술은 1970년대부터 미국을 중심으로 개발되기 시작했으나, 전 세계적으로 원전 설계 및 운영에 리스크 정보를 활용하려는 노력이 커짐에 따라 리스크 평가 범위의 확대와 평가 품질의 지속적인 개선이 요구되고 있음.
- 후쿠시마 원전사고 이후로 원전 리스크 평가의 중요성이 더 커졌으며, 다수기 리스크, 극한재해 리스크 등 국내외적으로 이전에는 제대로 고려하지 않았던 요인들이 현안으로 부각됨.

□ 기술개발 필요성

- 원전 리스크 평가를 위한 기본 기술은 이미 성숙 단계에 있으나, 분야별로 불확실성 저감 및 평가 품질의 개선을 위해 미해결된 기술들이 존재해 이에 대한 기술 개발이 필요함.

- 후쿠시마 원전사고 이후 중요한 이슈로 부각된 다수기 리스크, 극한재해 리스크 등에 대한 평가 기술은 본격적인 연구개발이 시작된 지 얼마 되지 않아 중장기적인 후속 연구개발이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 내부사건 PSA

☐ 기술의 정의

- 원자력발전소 내부의 요인으로 인해 발생 가능한 사건들에 대한 리스크를 확률론적으로 평가하는 기술로, 여기서는 단일호기에 대한 전출력 내부사건 1단계 PSA 기술로 정의
 - 정지/저출력 PSA, 2단계 PSA, 3단계 PSA는 별도의 세부기술로 구분되어 있으며, 다수기 PSA는 “첨단 리스크 평가기술 개발” 항목에 포함되어 있음.

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 1980년대 후반부터 국내 표준형 원전에 대한 PSA를 수행하면서 내부사건 PSA 수행에 대한 기술 자립이 이루어졌으며, 이후 후속 원전들에 대한 PSA를 다수 수행하면서 선진국 대비 80% 수준 이상의 기술을 확보함.
- 최근 신고리 5, 6호기부터 미국의 PSA 표준인 ASME/ANS Standard의 II 등급 이상의 품질 확보가 요구됨에 따라 초기사건 분석, 사고경위 분석 등 내부사건 PSA의 요소 기술 별로 추가적인 기술개발이 필요해짐.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국은 규제기관(NRC)에서 이미 리스크 정보활용 의사결정 체계를 적용하고 있어, 원전별로 PSA 품질을 확보하기 위해 ASME/ANS Standard의 II 등급을 기준으로 한 Peer Review 제도를 운영 중이며, 이에 따라 내부사건 PSA의 요소 기술별로 품질 확보를 위한 기술개발이 상당 부분 이루어짐.
- 일본에서도 후쿠시마 사고 이후, 미국과 같이 리스크 정보활용 의사결정 체계를 도입하기로 결정하고, PSA 품질 확보를 위한 기술개발을 수행 중임.
- 프랑스, 독일 등 원자력 선진국에서도 내부사건 PSA 기술개발이 상당 수준 이루어졌으며, 요소 기술 별로 품질 개선을 위한 노력을 지속하고 있음.

☐ 미래동향 예측

- 국내외적으로 원전 설계 및 운영에 PSA를 통한 리스크 정보의 활용 범위가 더욱 확대될 것으로 예상되며, 이에 따라 다른 PSA (정지/저출력, 외부사건, 2단계 PSA 등)의 출발점이 되는 내부사건 PSA의 품질 향상에 대한 요구가 더 커질 것으로 판단됨.
- 후쿠시마 사고 이후 다수기 리스크가 이슈화됨에 따라 향후 단일호기 PSA에서도 동일 부지 내 타 호기와의 종속성을 고려하도록 하는 요구가 많아질 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 내부사건 PSA의 요소 기술별 품질 확보를 위한 기술개발과 PSA 정보를 활용한 원전 설계 및 운영 측면의 안전성 개선이 함께 수행되어야 함.
- 산업체, 연구기관 및 규제기관 공동연구체계
 - 1단계(3년) : 요소 기술별 품질 개선 필요항목 파악 및 우선순위 결정
 - 2단계(5년) : PSA 품질 개선을 위한 기술개발 및 설계/운영 안전성 개선

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사고시나리오 최적 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 발전소 고유의 특성과 운영절차서를 반영한 초기사건별 사건수목 모델 정밀화 • 사고시나리오별 성공기준 최적 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 사건수목 정밀 모델링 기술 • 성공기준 최적분석 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 계통 논리수목 개선기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 시간 특성을 고려한 계통간 기능 종속성 반영 • 대형 또는 복잡한 고장수목의 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> • 계통간 기능 종속성 반영 기술 • 고장수목 최적화 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 인간신뢰도분석 (HRA) 방법론 개선 	<ul style="list-style-type: none"> • 최신 인지모델 및 인적오류 분류체계에 따른 HRA 방법 개선 • 개선된 방법에 따른 인간오류확률 및 수행영향인자(PSF) 조정값에 대한 기술적 근거 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 최신 인지모델/분류체계 반영한 HRA 방법 • 인간오류확률 및 PSF 조정값에 대한 기술적 근거

2) 정지/저출력 PSA

□ 기술의 정의

- 국내 원전 정지저출력 운전 모드에 대한 내부/외부사건 대상 확률론적 안전

성 평가 및 안전성 향상 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 90년도 중반 건설원전(한울 5, 6 호기) 대상 정지저출력 내부사건 PSA를 최초로 수행하여 정지저출력 PSA 기술을 도입함.
- 90년도에 최초 도입된 방법론(내부사건 PSA)을 확보하고 있으며 외부사건에 대한 분석을 포함하지 않고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국의 경우 신규 원전 및 설계인가 대상 원전의 인허가 문서로 정지 저출력 운전 중 PSA 수행을 요구하고 있음.
- 유럽의 경우 후쿠시마 이후 정지저출력 운전 중 리스크 평가를 수행하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 국내 원전은 다수기 부지로 각 부지 내 연중 정지저출력 운전모드에 있는 발전소는 항시 존재할 수 있으므로 지진과 같은 외부사건에 취약한 정지저출력 운전 중 안전성을 강화할 필요가 있음.
- 2016년 원자력안전법의 개정으로 사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정(원자력안전위원회 고시 제2017-34호, 2017.12.26.)」에 따라 중대사고 완화능력 평가(제7조)에 따른 정지저출력 운전 중 사고에 대한 조치가 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 정지저출력 운전 중 외부사건이 발생 시 사고완화 방안에 대한 종합적인 분석이 필요함.
- 최근 경주/포항 지진과 같은 외부사건으로 인해 유발될 수 있는 정지저출력 운전 중 중대사고 발생 저감 및 사고완화를 위한 대안이 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 정지/저출력 외부사건 모델링	• 정지/저출력 운전중 외부사건 도출 • 외부사건 완화를 위한 사고완화 평가	• 정지/저출력 외부사건 도출 및 빈도 분석
• 정지/저출력	• 정지/저출력 운전중 외부사건	• 정지/저출력 고유

고유사고 시나리오 분석(성공기준, Unknown/missing 시나리오)	사고완화 시나리오 분석 • 핵연료저장조/원자로 연결시 사고완화 시나리오와 같은 정지/저출력 특성사고 시나리오 분석	사고시나리오 분석
• 정지/저출력 중대사고 모델링	• 정지/저출력 운전시 중대사고 축성 분석 및 사고완화 방안 수립	• 정지/저출력 중대사고 특성 분석

3) 지진 PSA 분석

☐ 기술의 정의

- 국내에서 발생 할 수 있는 지진에 대한 재해도 분석 및 강진 발생 시 원전의 안전성 확보 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 원전의 지진재해도 분석은 각 원전별 건설 시에 분석된 지진 재해도를 사용하고 있으며 최근 국내 경주/포항 지진과 같은 국내 경험이나 최신 외국 경험을 반영하지 않고 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국에서는 후쿠시마 사고 이후 미국 내 모든 원전에 대한 지진 안전성 점검을 수행하고 지진 리스크 저감을 위한 각 발전소 별 이행조치를 요구하여 현재 각 발전소별로 이행 중임.
- 일본의 경우 후쿠시마 이후 재가동을 위한 발전소 별 지진 안전성 향상을 위해 많은 자원을 투자하고 있음.

☐ 미래동향 예측

- 최근 경주/포항 지진과 국내 다수기 부지에 대한 지진 안전성에 대한 우려가 급격히 증대됨에 따라 선제적인 원전의 지진 안전성 향상이 필요함.
- 국내 원전의 경우 설계지진 0.2 g 또는 0.3 g로 설계되어 있으나 설계지진을 초과하는 지진의 발생에 대한 우려가 커지고 있으므로 이에 대한 안전성 확보가 필요함.

☐ 기술개발 수행체계

- 국내 원전 부지에서 발생할 수 강진의 재해도 및 원전 중대사고 방지/완화 설비에 대한 지진 취약도 평가가 수행되어야 함.
- 국내고유 지진 리스크 평가를 수행하고 취약한 부분에 대한 보완 대책과 중대사고 사고관리 대책이 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 강진 재해도 평가	• 국내 원전부지별 지진재해도 재평가	• 지진 재해도 평가
• 취약도 평가	• 원전별 사고완화 계통 및 시설 취약도 정밀 평가 • 후쿠시마 후속설비 및 사고관리 장비/시설에 대한 취약도 평가	• 주요 기기 및 설비 취약도 평가
• 정량화	• 지진 PSA 정량화 방법 개선	• 지진 정량화 방법론 개발
• 시스템 모델링	• 국내 지진 PSA 방법론 개선	• 최신 지진 PSA 방법론 개발
• 지진 HRA	• 지진 대응 절차서 및 중대사고 권리 절차서 운전원 수행능력 재평가	• 지진 HRA 재평가

4) 화재 PSA 분석

□ 기술의 정의

- 화재 PSA 분석 기술은 원전에 발생한 화재로 인해 원자로 내 핵연료가 손상되는 노심손상과 방사성 물질이 원자로건물 외부 환경으로 누출되는 사고 시나리오를 파악하고 그 발생 빈도를 정량적으로 평가하는 기술로서 화재 PSA 모델 구축에 필요한 입력 변수의 개발을 포함함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 중대사고 정책(2001.8)에 따라 가동 중 전 원전에 대해 화재 PSA를 수행하였음. 이후 원자력안전법 시행령이 개정되어 주기적 안전성평가(2014.11.19)에 PSA가 포함되었고, 다시 원자력 안전법에 사고관리 계획(2015.6.22.)이 포함되도록 변경되어 화재 PSA가 수행 중임.
- 지금까지 국내에서 수행한 대부분의 화재 PSA는 EPRI의 FPRAIG(Fire PRA Implementation Guide)를 기반으로 함. NUREG/CR-6850 기반 화재 PSA는

제한적으로 수행된 바 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 내 가동 원전 중 46기가 성능기반 화재방호 규제 요건을 채택하고 NUREG/CR-6850 기반 화재 PSA를 수행하여 화재방호 현안을 해결 중이며, NRC 역시 NUREG/CR-6850 기반으로 SPAR 모델을 개발하여 규제업무에 활용 중임.
- NUREG/CR-6850 이후에도 전산도구개발, 화재 모델링, 회로분석, 인간신뢰도 분석, 동적 화재 리스크(dynamic fire risk) 평가 등을 포함한 다양한 측면에서 화재 PSA 방법론 및 데이터를 개정하기 위한 연구가 NRC와 EPRI를 중심으로 활발히 수행되고 있음. NUREG/CR-6850 기반 화재 PSA를 수행한 원전의 일부는 이를 반영하기 위한 화재 PSA를 수행 중임.
- 미국 외에도 다양한 나라에서 NUREG/CR-6850 기반 화재 PSA를 수행 중이며 자국에서 개발한 화재 PSA 전산도구를 활용 중임.

□ 미래동향 예측

- 현실적인 화재 리스크 평가를 위해 국내 전 원전에 대한 화재 PSA는 NUREG/CR-6850 기반 화재 PSA가 수행될 것으로 예상됨. 미국에서 NUREG/CR-6850 이후에도 화재 PSA 관련 연구가 많이 수행되어 이를 국내 원전에 적용하기 위한 연구가 필요할 것으로 예측됨.
- 화재 PSA 수행에 필수적인 국내 고유 화재 PSA 전산도구, 화재 인간 신뢰도분석, 국내 고유 화재 물성치, 국내 화재방호 설비 신뢰도 분석 등에 대한 연구가 필요할 것으로 예측됨.
- 미국 원전의 화재 PSA 관련 연구결과와 동향을 고려할 때 국내에서도 화재 PSA를 활용한 성능기반 화재방호, 화재 리스크 저감, 동적 화재 리스크 평가 등의 연구가 필요할 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

- 산학연 공동연구체계
 - 1단계(3년): 화재 PSA 분석 주요 기술 개발
 - 2단계(2년): 화재 PSA 분석 기술 적용

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 국내 원전 화재빈도 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 현재 국내 원전에 대한 관련 데이터 부족으로 인해 미국 일반 데이터를 사용 중임. • 국내 원전 고유 데이터를 활용한 보다 현실적인 화재발생빈도 분석이 필요함. 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 고유 화재발생빈도 분석 기술
• 국내 원전 화재 방호 설비 신뢰도 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 현재 국내 원전에 대한 관련 데이터 부족으로 인해 미국 일반 데이터를 사용 중임. • 국내 원전 고유 데이터를 활용한 보다 현실적인 화재 탐지 및 진압 설비 신뢰도 분석 필요함. 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 고유 화재 탐지 및 진압 설비 신뢰도 분석 기술
• 화재 인간신뢰도 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 현재 국내 원전에 대해 내부사건 PSA 수행 시 K-HRA 방법을 활용 중임. • 미국은 MCR 피난 시나리오 등의 화재 고유 특성을 고려한 화재 인간신뢰도분석 절차를 개발 중임. 	<ul style="list-style-type: none"> • K-HRA 기반 화재 고유 특성을 고려한 인간신뢰도 분석 기술 • 동적 화재 리스크 평가에 필요한 화재 인간신뢰도분석 기술
• 정성적 분석 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 현재 격실 단위로 기본 시나리오를 설정하여 화재 PSA를 수행 중이며 격실의 특성이 정성적분석에 중요한 영향을 미침. • 비방화지역으로 설정된 격실의 내화특성을 고려한 보다 현실적인 정성적 분석이 필요함. 	<ul style="list-style-type: none"> • 비방화지역 내화특성을 고려한 화재 PSA 정성적 분석 기술
• 화재 PSA 표준화	<ul style="list-style-type: none"> • NUREG/CR-6850 화재 PSA 방법론이 개발된 이후 많은 나라에서 이를 활용하여 화재 PSA를 수행 중임. • 국내에서도 NUREG/CR-6850 기반 방법론을 활용하여 화재 PSA를 수행한 바 있으나 특정 원전에 대해 제한적으로 수행하였음. • 국내 모든 원전에 대해 NUREG/CR-6850 기반 방법론을 활용하여 화재 PSA를 수행하기 위한 표준화 기술이 필요함. 	<ul style="list-style-type: none"> • NUREG/CR-6850 기반 방법론 활용 화재 PSA 표준화 기술
• 화재 PSA 정량화 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 고유 화재 PSA 전산화 도구가 필요함. • 화재 PSA에서의 화재모델링은 보수적이며 고정된 입력 자료를 사용하여 분석함. • 기존 정적(Static) 화재 PSA 방법이 가지는 한계를 극복하기 위한 방법개발이 필요함. 	<ul style="list-style-type: none"> • 전산도구 개발을 포함한 화재 PSA 정량화 기술 • 최적 화재 모델링 기술 • 동적 화재 리스크 평가 기술
• 화재 PSA 활용	<ul style="list-style-type: none"> • 결정론적 화재방호 현안을 해결할 수 있는 기술 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 화재 PSA 활용 성능기반 화재방호 연계 기술

	<ul style="list-style-type: none"> • 화재방호설비(감지 및 진압) 설계 및 활용 개선, 화재방호자원(화재모델링, 운전원 수동조치 등) 개선을 통한 리스크 저감기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 화재 리스크 저감 적용연구
--	---	--

5) 기타 외부사건 PSA 분석

☐ 기술의 정의

- 내부화재, 내부침수 및 지진 등 관련 분야의 PSA 외에 원전 주변의 위험시설로 인한 리스크, 원전의 최종 열제거 수원인 해수 문제로 인한 리스크, 원전 주변의 외부화재로 인한 리스크 등 기타 외부사건으로 인해 원전에 미치는 리스크를 정량적으로 분석/평가하는 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 현 기술수준 약 20%
- 현재까지 기타 외부사건의 리스크에 대한 구체적인 분석 및 평가가 이루어지지 않음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국외 현 기술수준 약 30%
- 국외 기술개발 수준 역시 국내와 큰 차이 없음.

☐ 미래동향 예측

- 일본 후쿠시마 원전사고와 같이 기타 외부사건으로 인한 리스크는 매우 큼.
- 현재 PSA에서 상세하게 고려하고 있지 않은 기타 외부사건 분야의 리스크 분석 및 평가의 필요성이 대두됨.
- 기타 외부사건으로 인한 원전 리스크 저감 및 안전성 향상 목적으로 활발하게 수행될 가능성이 존재함.

☐ 기술개발 수행체계

- 국내 전출력 운전 중 기타 외부사건 발생으로 인한 FMEA 분석 (~3년)
- 시범원전을 대상으로 기타 외부사건 PSA 수행 (~5년)

○ 전 가동원전 확대 수행 (~10년)

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 외부사건 선별기준 (재해도/취약도 포함) 	<ul style="list-style-type: none"> 1.0E-07/yr 보다 낮은 초기사건 발생빈도를 갖는 외부사건에 대해서 정량적 선별 제거 가능 (NUREG-1407) 일원화되어 있는 선별제거 기준을 외부사건별로 분리 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 외부사건 정량적 선별 기준 설정
<ul style="list-style-type: none"> 주변 위험시설 리스크 (화학공장, 군사시설, 댐) 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 화학공장 등을 대상으로 PSM (Process Safety Management)과 같은 정성적인 리스크 평가는 일부 수행된 바 있으나, 그 분석의 정도가 매우 미흡함 국내 외부사건 PSA 분석은 원전에만 국한되어 있으며, 국내 화학고장, 군사시설 및 댐 등의 리스크 평가는 전무한 실정임 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> 해양생물, 해양오염, 해수온도 상승 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 모든 원전의 최종열제거 수원은 해양이므로, 해양 생물, 해양 오염 및 해수온도 상승 등의 해양 변화 요인이 국내 원전에 미치는 영향 분석 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> 외부화재 	<ul style="list-style-type: none"> 현재까지 외부화재의 발생 경험 및 발생 요인에 대한 구체적인 조사가 이루어지지 않음 외부화재가 원전 안전성에 미치는 영향에 대한 정성적인 평가가 구체적이지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> 외부화재에 의한 2차 플랜트 응답해석 	<ul style="list-style-type: none"> 외부화재가 원전의 안전성에 미치는 영향에 대해서는 정성적으로만 매우 일부 평가가 이루어지고 있음 대형 산불과 같은 외부화재 리스크에 대한 정량적인 분석은 거의 전무한 상태임 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> 외부사건 HRA 	<ul style="list-style-type: none"> 체계적이고 구체적인 HRA 분석은 내부사건 등에만 국한되어 있음 외부사건 발생시 운전원이 수행해야 할 추가적인 역무 발생 및 현장 회복조치의 불가능한 경로 발생 등을 고려한 현장 상황에 기반한 분석 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 평가 기술

6) 2단계(Level 2) PSA

□ 기술의 정의

- 2단계 PSA는 원자로의 노심이 심각하게 손상된 이후에 진행되는 중대사고 현상의 진행 순서 및 확률을 논리적이고 체계적으로 분석하는 과정임. 본 기술은 현재 2단계 PSA에서 모델링 하지 못하는 현상들에 대한 연구 및 불확실성과 보수성을 저감하는 연구를 포함함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서는 국내 발전소들에 대하여 2단계 PSA를 수행하여 원자로건물 손상확률 및 선원항들을 도출하였음.
- 현 2단계 PSA는 중대사고 완화전략을 모델링하지 못하며, 중대사고 발생확률 값이 기존 지식에 머물러있는 경우가 있으며, 선원항 분석에서 최적평가를 수행하고 있지 못함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국내 기술개발 수준 및 현황과 유사함.

□ 미래동향 예측

- 2015년 원자력안전법 개정에 따라 Cs-137의 방출량 및 빈도를 고려해야 하므로 원자로건물의 현실적인 파손빈도 및 선원항 방출량에 대한 연구 수요가 증가하고 있음. 이를 위하여 2단계 PSA의 많은 개선점들에 대한 연구가 진행될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 중대사고 관리전략 및 발전소 정보를 지닌 한국수력원자력의 지원을 받아, 중대사고에 대한 경험 및 연구 역량을 가진 한원(연)에서 기술을 개발하는 것이 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 중대사고 완화전략 모델링	<ul style="list-style-type: none"> • 2단계 PSA에 중대사고 완화전략을 모델링하여 각 완화전략의 유효성 및 효과성을 평가할 필요가 있음 • 중대사고관리지침서 완화전략들에 대한 효과성을 	• 중대사고 완화전략 모델링 기술

	평가하여 리스크를 감소시키는 완화전략들을 제안할 수 있으며, 원전의 안전성을 향상시킬 수 있음.	
• 중대사고 시나리오 최적평가	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 진행에 대한 예측은 중대사고 현상의 불확실성 및 완화전략의 고려등으로 인하여 무수히 많은 시나리오가 가능하며 이를 현재 2단계 PSA 기술을 이용하여 표현하기에는 한계점이 많음. AI 기법을 이용하면 적은 수의 시나리오 및 원칙을 학습시켜 무수히 많은 시나리오를 예측하는 것이 가능함. 	<ul style="list-style-type: none"> AI기반 원전 사고 추정 기술 중대사고 시나리오 특성에 따른 학습 원칙
• 중대사고 현상발생확률 분포 추정 기술 (해석+전문가 의견)	<ul style="list-style-type: none"> 2단계 PSA에서 도출되는 주요 결과는 중대사고 현상들의 발생 확률에 의하여 결정되며, 발생 확률을 추정하기 위한 방법은 전산코드를 이용한 해석과 전문가 의견 도출이 가능함. 중대사고 연구를 통해 얻어진 많은 최신 지식을 이용하면 기존 결과에 비해 불확실성이 저감된 발생 확률 추정이 가능할 것으로 예상됨. 	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 현상 발생확률 전문가 의견 추출 기술 중대사고 현상 발생확률 도출을 위한 전산해석 기술
• 중대사고 시 원자로건물 구조 건전성 평가 (관통부 포함)	<ul style="list-style-type: none"> 2단계 PSA에서 도출되는 원자로건물 실패 확률은 원자로건물의 구조 건전성 평가에 크게 영향을 받음. 원자로건물 구조의 건전성 평가를 토대로 다양한 원자로건물 조건에서 원자로건물 실패확률을 추정하는 것이 중요함. 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 구조 건전성 평가 기술
• 중대사고 선원향 최적평가	<ul style="list-style-type: none"> 선원향의 특성 (방출 시점, 방출량 등) 을 분석하기 위하여 빈도가 가장 높은 시나리오를 선정하여 분석하고 있으나, 대표성을 띤다고 보기에 어려움이 있으며 경우에 따라 보수적이지 않음. 선원향 방출군 별 선원향 특성을 보다 정확하게 도출함으로써 원전 리스크를 더 정확하게 예측할 수 있음. 	<ul style="list-style-type: none"> 딥러닝 기반 선원향 최적평가 방법론 기술
• L2 HRA 방법	<ul style="list-style-type: none"> 후쿠시마 사고 이후 중대사고관리전략 및 신규대처설비가 추가적으로 확보됨에 따라 이를 운영하는 인간 및 조직 활동 및 직무에 대한 리스크 영향 평가 방법이 필요함. 	<ul style="list-style-type: none"> SAMG 의사결정 모델 기술 극한상황 대비 인간 및 조직 신뢰도 분석 체계

7) 3단계(Level 3) PSA

□ 기술의 정의

- 3단계 PSA는 원전 리스크 평가의 두 요소인 사고발생가능성과 사고로 인한 영향 평가 중에서 사고로 인한 영향을 평가하는 기술
- 3단계 PSA는 방사선누출로 인한 환경에 미치는 영향 즉, 방사선사고영향을 평가하는 기술

- 방사선사고영향은 주변지역 주민에 미치는 방사선피폭과 제염, 이로 인한 건강영향(급성질환 및 암질환), 경제적 손실 등을 계측하는 기술
- 환경방사선영향을 평가하기 위해서는 방사선누출에 대한 선원향평가 기술, 누출방사선의 환경확산(대기 및 해양 확산) 평가 기술, 방사선피폭량 평가 기술, 비상 대응 평가 기술, 방사선보건영향 평가 기술, 경제적 손실 평가 기술 등을 포괄함.
- 리스크 평가의 핵심인 확률적 평가를 위한 확률모델 기술을 기반기술로 포함함.

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 1980년대 국내에 PSA가 도입되기 시작하면서 학계와 연구계를 중심으로 기초 연구 및 개발 연구를 시작함.
- 규제분야에는 적용이 제한되어 산업계로 확산되지 못하고, 기초 연구 위주로 기술 개발이 진행되었음.
- 2000년대 APR-1400 등의 신형원전의 개발과 원전 수출, 중소형 원전 개발, 4세대 원전 개발 연구 등에 따라 기술 개발의 요구가 증대되었음.
- 산업체에서는 격납건물누설시험(IRLT) 주기의 변경 등의 리스크 활용의 목적으로 부분적인 적용이 있었음.
- 2010년대에 산업계의 요구와 사회적 관심의 증대에 따라 평가기술의 개발 요구가 증대되었으며, 이에 따라 국내 고유 기술로 3단계 PSA 전산프로그램 개발을 수행하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 3단계 PSA 기술은 PSA 기술을 확립한 미국 중심으로 개발 및 적용이 진행되었음.
- 미국의 경우 3단계 PSA를 수행하기 위한 기술과 도구로 MACCS2 코드를 개발하였음.
- 1990년대 3단계 PSA의 기술의 필요성에 따라 미국 외에도 유럽(COSYMA 코드) 및 일본(OSCAAR 코드)에서 3단계 PSA 전산프로그램을 개발하였음.
- 그러나 이후로는 산업계의 3단계 PSA의 적용의 제한으로 3단계 PSA의 기술이 활발하게 개발되지 않았음.
- 기반기술인 방사선누출에 대한 선원향 평가 기술, 누출방사선의 환경확산

(대기 및 해양 확산) 평가 기술, 방사선 피폭량 평가 기술 등에서는 상당한 연구개발이 이루어지고 있으나, 3단계 PSA 기술에 적용되지는 못하고 있는 실정임.

- 후쿠시마사고이후 3단계 PSA 필요성이 증대함에 따라 신기술에 기반 한 3 단계 PSA 기술에 대한 연구개발이 진행되고 있음.
- 미국의 경우 NRC의 지원 하에 MACCS2 코드를 최근 컴퓨터환경에 맞춰 WinMACCS 코드로 개정한바 있으며, 최신 대기확산 모델인 HYSPLIT 코드를 도입하고 있음. 또한 SOARCA (state-of-the-art reactor consequence analysis)와 전범위 PSA 수행을 통해 신기술 개발 및 적용을 추진하고 있음.
- 유럽의 경우 원전 도입국(영국, 핀란드 등)을 중심으로 새로운 독자적인 3단계 PSA 코드를 개발하고 있음.
- 일본의 경우 후쿠시마 사고 대책의 일환으로 OSCAAR 코드의 현대화를 추진하고 있으며 3단계 PSA를 규제 분야에 도입하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 3단계 PSA 기술은 최근 원전의 안전성 강화 노력과 사회적 요구의 증대로 중요성이 점차 부각되고 있음.
- 이에 반해서 기존의 기술들이 개발이 오래전에 이루어져서 최신 기반기술에 비해 매우 뒤쳐져있는 실정임.
- 향후 3단계 PSA 기술은 시대적 요구와 맞물려 동적특성을 반영한 사실적 모델 기술의 개발이 요구되며, 이는 최신 컴퓨터 기술을 적용한 다중병렬처리 기반 2D, 3D 동특성 모델 기술, 최신 인공지능기술인 Neural Network 기술의 적용, 최신 선량평가체계인 ICRP-103의 도입, 국내 고유 특성을 반영하기 위한 방사선 압 영향 평가 모델의 적용, 확률평가 기술인 마코프 모델 및 몬테카르로 모델 등의 적용 등이 필요함.
- 이러한 기술의 적용은 미국 및 유럽, 일본 등에서 적용하기 시작하여, 이미 상당한 성과를 내고 있는 실정임.

□ 기술개발 수행체계

- 3단계 PSA는 다양한 기반기술을 필요로 하며, 각 기반기술을 통합하여 3단계 PSA 기술화하기 위해서는 각 기술을 보유 또는 개발 그룹 간의 상호 연계와 효율적인 수행 체계의 확보가 중요함.
- 이를 위해서 Level 3 PSA의 기반/요소 기술의 중장기적 개발 체계의 도입이

필요하며, 이를 통합하여 수행한 핵심 주체적 선정이 필요함. 이를 위한 핵심 체계로는 현재 개발 중인 국내 고유 3단계 PSA 코드를 개발 기술의 통합 주체로 활용함.

- 또한 3단계 PSA 수행뿐만 아니라 현재 문제 제기되거나 향후 제기될 가능성이 있는 응용 분야를 다음과 같이 조기 선정하고 해당 기술에 대한 병행 개발할 수 있는 수행체계가 요구됨.

- 다중선원(다수기) 적용 기술
- 최신 3D 확산 모델 적용 기술
- 100km 이상의 장거리 확산 영향 평가 기술
- 최신 선량평가체계(ICRP-103) 적용
- 확률론 기반 비상대응 평가기술
- 최신 선량평가체계 기반 암영향 평가 모델 기술
- 확률론 기반 경제적 손실 평가 모델 기술

- 산·학·연 공동연구체계

- 1단계(5년) : 국내 개발 3단계 PSA 코드 기반 최신 기반기술의 확충과 적용
- 2단계(5년) : 3단계 PSA 고유 응용 기술의 개발 및 수행체계 확립

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 3단계 PSA 코드 기반 최신기술 확충 및 적용	<ul style="list-style-type: none"> 최신요소기술기반 3단계 PSA 코드 개선 확률론 기반 모델 기술 적용 동특성 모델 기술 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 다중병렬처리기반 2D, 3D 동특성 모델 기술 마코프 및 몬테카르로 기반 확률 평가 기술
• 다중선원(다수기) 적용 기술	<ul style="list-style-type: none"> 다수기 선원향 특성 분석 동특성 선원향 평가 및 적용 기술 2D, 3D 확산 모델 기반 다중선원 적용 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 2D, 3D 확산 모델 기반 동특성 평가 기술
• 최신 3D 확산 모델 적용 기술	<ul style="list-style-type: none"> 라그랑지안 확산모델의 검토 및 선정 3D 확산 모델의 3단계 PSA 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 라그랑지안 확산모델의 3단계 PSA 적용 기술
• 100km 이상의 장거리 확산의 영향을 평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> 메소(Meso) 스케일 분석 데이터 확보 장거리 분석 경위 선정 및 장거리 확산 영향 평가 3단계 PSA 결과와의 비교 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 장거리 확산 영향 평가 및 3단계 PSA 코드와 비교 검증 기술
• 최신 선량평가체계(ICRP-	<ul style="list-style-type: none"> ICRP-103 선량평가체계 검토 및 적용 데이터 생산 	<ul style="list-style-type: none"> ICRP-103 모델 기반 3단계 PSA 적용 기술

103) 적용	<ul style="list-style-type: none"> ICRP-103 모델 기반 3단계 PSA 적용 기술 	
<ul style="list-style-type: none"> 확률론 기반 비상대응 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> 비상대응 특성 분석 및 적용 모델 동특성 기반 비상대응 모델 개발 확률모델 개발 및 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 비상대응 동특성 모델 기술 및 확률모델 기술
<ul style="list-style-type: none"> 최신 선량평가체계 기반 암영향 평가 모델 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ICRP-103 인체모형 검토 및 건강영향 모델의 적용성 도출 ICRP-103 기반 건강영향 모델의 3단계 PSA 적용 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ICRP-103 기반 건강영향 모델의 3단계 PSA 적용 기술
<ul style="list-style-type: none"> 확률론 기반 경제적 손실 평가 모델 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 경제 손실 모델의 검토 및 적용 모델 도출 확률모델 개발 및 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 확률모델 기반 경제손실 모델 기술

8) 사용후연료저장조(SFP) PSA

☐ 기술의 정의

- 사용후연료저장조(SFP)에 대한 내부 및 외부사건 대상 확률론적안전성평가 및 안전성 향상 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 정부주도 4차 원연사 사업을 통하여 SFP 냉각재상실 및 냉각기능 상실(내부 사건)시 외부 주입유로를 통한 냉각복구 성능에 대한 분석을 수행하였음.
- 산업체 주도의 정지저출력 PSA 수행의 일환으로 SFP의 냉각 상실에 대한 열수력 분석만을 수행한 경험은 있으나 지진이나 해일과 같은 외부사건에 대한 분석은 수행 되지 않았음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국의 경우 200년도 중반부터 BWR-SFP Fuel Assembly 에 대한 실제 모형 실험을 수행한 바 있으며, 911 사고 및 후쿠시마 이후 주요 안전현안으로 SFP 대상 외부/내부 사건에 대하여 핵연료 거동 및 사고 대처 방안에 대한 연구가 수행 중임.
- OECD/NEA에서는 국제공동연구(2009-2012)를 통하여 PWR-SFP Fuel Assembly에 대한 실험과 MELCOR 전산프로그램을 이용한 SFP 모델을 개발하고 Status Report(Status Report on Spent Fuel Pools under Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accident Conditions, Nuclear Safety

NEA/CSNI/R(2015)2, May 2015)를 제출한 바 있음.

- 일본의 경우 SFP의 중대사고 예방 및 건전성 연구를 수행 한 바 있으며, 사고 발생시 SFP의 냉각을 위한 신 규제 기준을 수립하였음.

□ 미래동향 예측

- SFP의 안전성분석은 내부사건으로 인한 냉각상실 사고발생시 SFP내의 거동에 대한 분석만을 수행하였으며 외부사건에 대한 고려는 수행되지 않았음.
- 국내 원전 SFP는 노심의 경우와는 달리 다중방어 개념의 미적용으로 후쿠시마와 같은 복합 외부재해로 인한 중대사고 발생 시 동일부지에 다수의 SFP로 부터의 방사성물질의 누설이 발생하면 천문학적인 경제적 피해 및 복구비용이 발생할 수 있으므로 이에 대한 대비가 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 국내 원전 부지 내 SFP 중대사고 발생에 따른 방사선 결말 분석
- SFP 냉각 상실 및 시설 파손을 야기할 수 있는 내/외부 사건 재해도 분석 및 시설물의 취약도 분석

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 선원향 계산	<ul style="list-style-type: none"> • 내부사건 영향 선원향 분석 • 외부사건 영향 선원향 분석 	• SFP 사고로 인한 방사선 선원향 분석
• 지진 취약도 분석	<ul style="list-style-type: none"> • SFP 냉각상실 및 파손을 야기할 수 있는 내부/외부 재해도 분석 • SFP 시설물의 취약도 분석 	• SFP 대상 재해도 및 취약도 평가
• 외부사건 (항공기 충돌, 사보타지)	<ul style="list-style-type: none"> • 기타 외부 재해 분석 	• 기타 외부사건 영향 분석

9) PSA 공통 기반 기술

□ 기술의 정의

- 전출력 및 정지/저출력 PSA, 내부사건 및 외부사건(지진, 화재 등) PSA, 1/2/3단계 PSA, 사용후연료저장조 PSA 등 전 분야의 PSA에 공통적으로 활용되는 기반 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- PSA 전산프로그램, 디지털 안전계통 신뢰도 평가기술은 세계 최고 수준인 반면, PSA 지식베이스 구축, 국내 고유의 신뢰도데이터 구축/관리, 피동계통 신뢰도 평가기술 등 일부 분야는 선진국 대비 기술개발이 미흡한 수준임.
- 신형 원자력시스템의 개발, 후쿠시마 후속조치에 따른 신규 설비 도입, PSA 품질 향상에 대한 요구 증대 등 여러 가지 환경 변화에 따라 분야별로 기존에 개발된 기술의 개선 또는 새로운 기술의 개발이 요구되고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국은 1970년대부터 PSA를 시작하여 전반적으로 세계 최고 수준의 PSA 기반 기술을 확보하고 있으며, 규제기관(NRC)에서 PSA를 위한 신뢰도 데이터를 주기적으로 업데이트하고 있음. 또한, 피동안전계통, 디지털 계통 및 주 제어실 등 신형 원자력시스템과 관련된 기술개발도 계속해서 수행 중임.

□ 미래동향 예측

- 전 분야의 PSA 수행에 필수적인 기반 기술들(PSA 프로그램, 신뢰도데이터, PSA 품질 확보 기술 등)의 경우, 국내·외적으로 기존 기술의 지속적인 개선이 이루어질 것으로 예상됨.
- 신형 원자력시스템, 신규 설비의 도입과 관련된 기술들(피동계통 및 디지털 안전계통 신뢰도 평가기술, 이동형 기기 신뢰도 평가기술 등)의 경우, 어느 정도 성숙 단계에 도달할 때까지 국내·외적으로 활발한 기술개발이 수행될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 산업체, 연구기관 및 규제기관 공동연구체계

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• PSA 지식베이스 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 지식베이스 DB화를 위한 기초 연구 및 프레임 구축 • PSA 주요 정보 지식베이스 구축 및 활용기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • PSA 주요 정보 지식베이스 • PSA 지식베이스 활용기술
• 희귀사건 신뢰도 자료 추정 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 전문가 의견도출 및 해석 기법을 결합하는 방법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 전문가 의견도출 및 해석 기법의 결합 기술

• 논리수목 구성	<ul style="list-style-type: none"> PSA 모델(논리수목) 개발의 자동화 기술 개발 PSA 모델 간 자동 연계 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> PSA 모델 개발의 자동화 기술 PSA 모델 간 연계 기술
• 피동계통 신뢰도 평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> 피동계통 신뢰도 평가방법 개발 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 피동계통 신뢰도 평가기술
• 디지털 안전계통 신뢰도 평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> 디지털 계측제어 계통 구성요소들의 안전 특성 및 상호 연계성 분석 디지털 특성의 종합적 연계를 고려한 계통 신뢰도 평가방법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 디지털 계통 구성요소들의 상호 연계성 분석 기술 디지털 특성 종합 연계를 고려한 신뢰도 평가 기술
• 디지털 환경 HRA 방법	<ul style="list-style-type: none"> 디지털 주제어실 환경 및 운전원 행위에 미치는 영향 분석 디지털 환경 특성을 반영한 인간신뢰도분석(HRA) 방법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 디지털 주제어실 환경 및 영향 분석 기술 디지털 특성을 반영한 HRA 기술
• 전산프로그램 개발	<ul style="list-style-type: none"> 1/2/3단계 PSA 통합 분석 기술 개발 1/2/3단계 통합 전산프로그램 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 1/2/3단계 통합 전산 프로그램
• 이동형 기기 신뢰도 평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> 이동형 기기 신뢰도 분석 및 데이터 수집체계 개발 이동형 기기의 리스크 영향 모델링 방법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 이동형 기기 신뢰도 분석 및 데이터 수집 기술 리스크 영향 모델링 기술
• 신뢰도 자료	<ul style="list-style-type: none"> PSA를 위한 국내 고유 신뢰도데이터 (초기사건, 기기고장, 공통원인고장 등) 구축 신뢰도데이터 관리체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 고유 신뢰도데이터 수집 및 분석 기술 신뢰도데이터 관리 기술
• PSA 품질 확보 기술	<ul style="list-style-type: none"> 국내외 전문가 Pool 구축 및 Peer Review 수행 절차/방법 개발 Peer Review 운영체계 구축 및 관리 	<ul style="list-style-type: none"> Peer Review 운영 기술

10) PSA 신뢰도 데이터베이스 구축

□ 기술의 정의

- 국내 원전의 내부사건 및 외부사건의 확률론적 안전성 평가, 위험도 정보 활용 등에 국내 원전의 고유 특성을 반영한 기기 신뢰도 자료 및 인적 오류 자료를 활용하기 위한 기술
- 국내 원전 운전원의 일상직무 및 비상직무 관련 인적오류 저감을 위한 기본 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한수원은 PRinS (Plant Reliability Data Information System)을 이용하여 국내 고유 기기 신뢰도 자료의 수집 및 분석을 수행하고 있음.

- 미국 NRC의 최신 기기 신뢰도 보수 추정방법인 NUREG/CR-6928 방법론을 적용한 베이지안 분석 결과를 국내 원전 정지저출력 PSA에 적용하였음.
- 한국원자력연구원에서는 HuREX (human reliability data extraction)를 이용하여, 비정상/비상 상황의 국내 고유 인적오류 자료를 수집한 바 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 NRC의 경우, 5년 주기로 NUREG/CR-6928 방법론을 적용한 기기 신뢰도 자료를 갱신하여 Web으로 제공하고 있고 PSA 및 SDP 등에 활용하고 있음.
- 또한 SACADA (Scenario Authoring, Characterization, and Debriefing Application) 체계를 개발하여, 미국 및 타이완의 인적오류 데이터를 수집하고 있음.
- 미국 INL의 경우, Microworld라는 시뮬레이션 환경과 데이터 수집 체계를 구축하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 후쿠시마 사고 이후, 이동형 설비 관련 기기 신뢰도 자료 생성을 위한 연구가 진행 중임.
- 인적오류 데이터는 최근 다수의 연구기관에서 수집 중에 있으나, 수집 대상의 데이터 수가 매우 많이 요구되고, 수집 방법이 매우 까다로워 양질의 데이터 확보에 어려움을 겪고 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 다수기 PSA 수행을 위한 기기신뢰도 데이터 및 이동형 설비 등의 신뢰도 자료 수집/분석 등이 요구됨.
- 규제기관의 기기 신뢰도 데이터 검증 체제 구현이 요구되며 주기적인 데이터 갱신을 위한 산업체, 규제기관, 연구기관의 협력체제 구축이 요구됨.
- 인적오류 데이터베이스의 경우, 인간의 인지적 특성을 반영하면서, 적은 노력으로 다량의 데이터를 확보하는 기술이 요구됨.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 기기 신뢰도 데이터베이스 구축	• 기기 신뢰도 데이터 검증 기술 • 이동형 설비의 신뢰도 평가 기술	• 기기 신뢰도 데이터 검증 방법 도출

	<ul style="list-style-type: none"> 다수기 PSA 관련 기기 신뢰도 데이터 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 이동형 살비의 신뢰도 데이터 및 신뢰도 추정 방안 확보 다수기에 공유되는 기기 신뢰도 자료 확보
<ul style="list-style-type: none"> 인적 오류 데이터베이스 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 데이터 수집 체계 및 평가 체계 구축 시뮬레이터 모의실험 및 DB 구축 데이터 충실도 자동 개선 및 장기 데이터 자동/반자동 수집 프레임워크 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 인적오류 데이터 요소 도출 자동/반자동 수집 방안 확보

11) 첨단 리스크 평가기술 개발

□ 기술의 정의

- 기존 기술의 한계를 극복하여 보다 다양하고 복잡한 문제들의 리스크를 체계적이고 종합적으로 분석하기 위한 종합적인 리스크 평가 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 최근 들어 연구가 진행되고 있는 부지 리스크 평가 기술에 대해, 한국원자력연구원에서는 4차 원자력연구개발사업을 통해 동일 부지(Site) 내 다수기(Multi-unit)에 대한 부지 리스크 평가 방법론 개발 및 부지 리스크 프로파일 시범 평가를 수행한 경험이 있음. 국내의 기술 수준은 다수기 리스크 기본 평가방법론 개발, 다수기 리스크 분석용 전산코드 체계 개발, 및 적용연구 부분에서 세계적이나, 최적 평가를 위한 세부 모델링 기술은 국내는 물론 국외의 기술이 전무한 상황임. 현재, 한수원 및 원안위에서는 한국원자력연구원이 개발한 방법을 기반으로 각각 고리 부지에 대한 부지 리스크 평가 모델을 개발하고 있음.
- 국가 전반에 막대한 영향을 미칠 수 있는 리스크 요인들에 대한 특정 산업계 및 기관의 경계를 넘어 범국가적 차원에서 모든 리스크를 종합적으로 관리하는 기술은 아직 국내에서 연구된 바 없는 것으로 판단됨.
- 대형 재난 시의 원전 취약성 및 비상 상황을 고려한 리스크 평가 기술 개발을 위해 한국원자력연구원에서는 4차 원자력연구개발사업의 일환으로 설계 초과 지진, 쓰나미와 항공기 충돌 등 극한 재해에 의한 영향을 평가하기 위한 기술을 개발한 경험이 있음.

- 한국원자력연구원에서는 3차 원자력연구개발사업 및 산업부 과제를 통해 물리적 방호를 위한 PSA 기반 핵심구역 설정 기술을 개발한 경험이 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 전 세계적으로 부지 차원의 안전성 평가에 대한 관심이 커져가고 있음. 이런 움직임과 관련하여 다수기 PSA에 대한 연구가 OECD/NEA와 IAEA의 국제협력 프로그램의 일환으로 캐나다 등을 중심으로 진행이 되고 있음. 그러나 아직 공인된 분석 방법은 없는 상태임.
- 미국은 후쿠시마 원전 사고를 계기로 NRC 주도하에 모든 PSA 범위(전출력/정지저출력, 내부사건/외부사건, 핵연료저장조 및 다수기 리스크 평가 등)를 포함하는 연구 과제를 진행 중에 있음. 아울러 신 화재 PSA 방법에 따른 화재 PSA 수행, 지진 유발 화재/침수 PSA 수행 등 외부 사건과 복합 사건에 대한 리스크 평가 관련 연구를 수행하고 있음. 일본은 쓰나미 등 주요 외부 사건에 대하여 독자적인 일본 PSA 표준을 작성하고 있음. IAEA에서는 2009년 ISSC를 설립하여 지진과 쓰나미를 비롯한 자연 재해와 인적재난에 대한 국제공동연구를 수행하고 있으며, 쓰나미 재해도 평가 및 리스크 평가 기법, 인위적 재해에 대한 확률론적/결정론적 리스크 평가방법에 연구를 수행하고 있음. OECD/NEA도 후쿠시마 원전 사고 이후 새로운 Task Group인 TGNEV를 구성하여 각국의 원전에 대한 자연재해 관련 연구에 대한 의견 교환 후 TGNEV를 발전시켜 2015년부터 WGEV라는 Working Group으로 확대하고 자연 재해와 관련된 공동연구를 진행하고 있음.
- 물리적 방호 핵심구역 평가 기술은 미국 SNL(Sandia National Lab.)이 선두 주자이고, SNL의 주도 하에 IAEA에서 2016년 평가 절차를 발간함. 현재, 사보타주와 관련된 미국, 독일 등의 외국 연구 동향은 사용 후 연료 운반과 관련된 분야가 주를 이루고 있음.

□ 미래동향 예측

- 보다 다양하고 복잡한 상황을 현실적으로 분석하기 위해 기존의 리스크 평가체계를 개선/보완할 필요성이 대두되고 있으나 기존 리스크 평가체계에는 시간종속성을 반영하지 못하거나 다양한 조건들을 종합적으로 고려하기 어려운 한계가 있음.
- 후쿠시마 사고는 해안방벽의 높이를 높일 필요성이 제기되었음에도 쓰나미의 발생 가능성이 낮다고 판단하여 적절한 대비책을 강구하지 않았기 때문에 발생함. 기존에 간과되고 있는 리스크 요소들을 도출하고 영향평가를 통해 필

요에 따라 적절한 대비책을 구비하기 위한 연구가 필요할 것으로 예상됨.

- 부지 리스크 평가는 다수의 원전이 한 부지 내에 건설된 국가를 중심으로 관심의 대상이 되고 있으나, 새로운 부지를 확보하기 어려운 현실을 감안하면 다수기 부지들이 확대될 것으로 판단됨. 그러므로 부지 리스크 평가 기술에 대한 수요는 점차 확대될 것으로 판단됨.
- 자연재해 (태풍, 지진, 홍수 등) 및 사회문제 (저출산, 고실업률 등)로 인한 리스크 평가/관리는 대부분 한시적으로 이루어지며, 최종 의사결정에도 정치적 이해관계로 인한 영향이 지배적임. 보다 체계적인 리스크 평가/상시관리가 필요하며 이의 결과를 기반으로 보다 객관적인 의사결정 위해 국가 차원의 리스크 관리 체계가 필요할 것으로 예상됨.
- 최근 기후 변화로 인하여 지진, 쓰나미, 슈퍼태풍, 화산, 폭우, 강풍 등 대규모 자연재해의 발생 빈도가 증가하고 강도 또한 대형화 되고 있는 추세임. 후쿠시마 사고 이후 발생 빈도가 낮다는 이유로 선별 제거된 사건이 발생할 경우 피해가 얼마나 큰 지를 경험하였으므로, 국내외적으로 원전의 자연재해 대응 안전성 향상 필요성에 대한 인식 증대함. 이에 따라, 과거 경험해 보지 못한 자연 재해 발생 시 원전 안전성 영향 분석 및 대처 능력을 향상하기 위한 연구가 필요할 것으로 예상됨.
- 세계적으로 과격 단체들이 증가하고 있는 상황에서 외부 공격에 의한 원전의 리스크 평가 및 방호 체계 구축을 강화해야 하는 요구는 더욱 증가할 것으로 보임. 뿐만 아니라 최근에는 내부자 가담에 의한 공격에 대한 대비도 해야 할 것으로 판단됨. 최근 들어서는 발전소의 디지털화가 가속됨에 따라, 물리적 공격 뿐만 아니라 사이버 공격에 의해 발전소가 제어 불능 상태에 빠지지 않도록 사이버 보안에 대한 필요성이 증대되고 있음.
- 다양하고 복잡한 분석대상의 체계적이고 종합적인 리스크 평가방안이 필요할 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

- 기존 리스크 평가 체계의 한계점 확인 및 첨단 리스크 평가 기술의 요건 정립
- 첨단 리스크 평가 요소기술 개발
- 첨단 리스크 평가방법 활용을 통한 현실적 리스크 평가 수행

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 부지리스크 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 다수기 원전이 존재하는 부지에서 1개 이상의 원전에서 사고가 발생하는 경우 부지에 대한 리스크 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 부지 공유자원 활용 부지 리스크 저감 기술 Dynamic PSA 기술기반 부지 리스크 평가 기술 부지 리스크 안전 목표 설정 기술
<ul style="list-style-type: none"> 국가단위 리스크 평가기술 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 국가 전반에 막대한 영향을 미칠 수 있는 리스크 요인들에 대한 특정 산업계 및 기관의 경계를 넘어 범국가적 차원에서 관리 필요한 리스크 상시 평가 관리 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 국가 단위 리스크 요소 도출 및 주요 대상 선정 리스크 평가/관리 주체 확립 및 관련 기술 개발 리스크 평가/관리 결과 기반 객관적 의사결정 방안 개발
<ul style="list-style-type: none"> 극한 재해 리스크 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 대형 재난 시의 원전 취약성 및 비상 상황을 고려한 리스크 평가 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 고유 극한 재해 도출 국내 고유 극한 재해에 대한 평가 기술 복합 자연재해 리스크 평가 기술 국내 전출력 운전 중 극한재해 발생으로 인한 FMEA 분석 시범원전에 극한재해 평가 기술 적용
<ul style="list-style-type: none"> 차세대 인적오류 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 동적 인적오류 평가 방법에 대한 평가 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 동적 인적오류 평가 방법에 대한 개념적 체계 수립 동적 이적오류 평가 방법 개발 및 사고 시나리오 시범 적용 동적 인적오류 평가 방법에 따른 동적 PSA 체계 개발
<ul style="list-style-type: none"> 다이나믹 PSA 수행 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 운전원 행위, 계측 제어 장비 기능, 피동계통 기능 등의 시간종속성을 반영하여 동적인 발전소 상황을 고려한 평가 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 안전성 분석관련 시간 종속적 리스크 요소 도출/ 분석 다이나믹 PSA 요소 기술 개발 다이나믹 PSA 수행 기술 확립
<ul style="list-style-type: none"> 물리적방호/테러/전쟁 리스크 평가 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 의도적인 외부 공격에 의한 리스크 평가 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크/물리적방호 통합 기술 핵심구역 모니터링 기술 내부자 가담 테러 리스크 평가 기술 광역 폭발에 대한 안전성 평가 기술 시범원전을 대상으로 개발된 평가 시범 적용

4.2.4 기타 원자력 시스템 리스크 평가

가. 기술 개요

- 현재 가동 중 또는 건설 중인 상용 원전 외에도 연구용 원자로, 해양 원전, 제4세대 원전(고온가스로, 소듐냉각고속로 등), 방사성폐기물 처분장 등 다양한 형태의 비발전 원자력 시설 및 신형 원자력시스템이 계획 또는 건설됨에 따라 각 시스템에 대한 리스크 평가가 필요해짐.
- 연구용 원자로 등의 해외 수출, 국내 환경단체 및 대중의 원자력 안전에 대한 관심 증대로 인해 각 원자력시스템 고유의 특성을 반영한 리스크 평가의 중요성이 더 커지고 있으며, 상용 원전에 대한 리스크 평가와 마찬가지로 요구되는 평가 범위도 점점 확대되고 있음.

☐ 기술개발 필요성

- 기본적으로 상용 원전에 대한 리스크 평가 기술을 활용할 수 있으나, 각 원자력시스템이 가진 고유의 특성들을 반영해야 하므로 일부 요소 기술들은 각 시스템에 특화된 기술로 개발되어야 함.

나. 세부기술 내용

1) 비발전 원자력 시설 리스크 평가

☐ 기술의 정의

- 상용로가 아닌 연구시설, 연구로 및 방폐물 처분장과 같은 비발전 원자력 시설의 리스크 평가 및 관리 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 비발전 및 연구용 원자력 시설(예, 연구용원자로, 핵연료가공시설, RI 폐기물 처리 시설, 조사후 시험시설 등)에 대해서도 1995년부터 안전성분석보고서와 방사선환경영향평가보고서 등 결정론적 방법에 따라 설계사고에 대한 리스크 평가 수행해 오고 있으나, 연구용 원자로를 제외한 시설에 대해서 중대사고에 대한 확률론적 리스크 평가 및 관리 체계는 갖추고 있지 않은 실정임.
- 경주에 건설/운영 중인 중저준위 방폐물 처분장에 대한 안전성 평가는 인허가를 위해 수행된 바 있으나, 고준위 방폐물 처분장에 대한 리스크 평가 연구는 수행된 바 없음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국의 경우 NRC의 기술중립적 리스크 평가 체계에 대한 기술적 내용은 리스크 활용/성능기반 규제(RIPBR; risk-informed and performance-based regulation)의 일환으로 1990년대 후반부터 2000년대 초반까지 집중적으로 검토되어 왔고, 현재 모든 원전은 RIPBR 체계 하에 운영 중에 있음.
- 미국 산업계에서는 고온개스냉각로, 액금로, 소형모듈형원자로 등 차세대 비경수로에 대해 적용 가능한 PSA 수행기술지침서 (ASME/ANS RA-S-1.4-2013)까지도 마련되어 활용하고 있음.
- 국외에서 가동 중인 연구로의 대부분이 고연령에 해당, 따라서 해당 연구로의 안전성 평가 역시 상당히 오래전에 수행된 상황임.
- 미국의 경우 Yucca Mountain 처분장에 대한 안전성 평가 보고서가 2000년대 후반 수행된 바 있고, 2010년대 초반 이를 근거로 NRC는 고준위 방폐물 처분을 승인한 바 있음.

□ 미래동향 예측

- 국내 연구 시설의 리스크 평가 및 관리는 시간이 갈수록 시민단체 등을 포함한 이해관계자들 관심이 증대되고 있음에 따라 기술중립적 리스크 평가 플랫폼 개발 및 해당 시설의 체계적이고 구체적인 리스크 평가가 필요함.
- 발전소 내 임시저장시설이 포화 상태에 이르면 따라 고준위 방폐물 처분장 건설/운영의 필요성이 끊임없이 제기되고 있으므로, 이에 대한 중장기적 계획 수립이 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 원자로 기술중립 기반의 해당 시설 고유의 리스크 평가 방법론 개발
- 개발된 방법론에 따라 연구시설, 연구로 및 방폐물 처분장 등에 대한 리스크 평가

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 연구시설 종합 리스크 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 연구시설 고유의 잠재적 리스크 확인 • 연구시설의 중대사고에 대한 확률론적 리스크 평가 및 관리 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 기술중립 기반 연구시설 고유의 리스크 평가 방법론 개발
• 연구로 리스크	<ul style="list-style-type: none"> • 연구로의 중대사고에 대한 확률론적 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 기술중립 기반

평가	리스크 평가 및 관리 • 연구로 고품질 PSA 수행을 위한 불확실성 요소 확인 및 해결	연구로 고유의 리스크 평가 방법론 개발
• 방폐물 처분장 종합 리스크 평가	• 처분방식에 따른 예비 평가 타당성 연구 • 방폐물 처분장의 처분시설에 대한 확률론적 리스크 평가 및 관리	• 원자로 기술중립 기반 방폐물 처분장 고유의 리스크 평가 방법론 개발

2) 신형 원자력시스템 리스크 평가

☐ 기술의 정의

- 신형 원자로 노형별 PSA(확률론적안전성평가) 평가 기술
- PSA를 이용한 원전 설계의 최적화 지원 기술
- 신형 원자로 PSA 규제 요건 개발

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 경수로 원전에 대해 구축한 PSA 기술을 PGSFR에 대해 시범 적용하여, 내부 사건/화재/지진 Level 1 PSA 등에 대해 PSA 기술의 적용성을 검증하고, 부족한 PSA 기술을 도출함.
- VHTR 개념 설계에 대하여, 사고 시나리오 및 사고 결말 단계를 하나의 단계로 단순화하는 PSA 방법을 수립함(VHTR 개념 설계의 경우 사고 시나리오가 단순하여 경수로형 원전에 비해 단순화된 PSA 방법 적용).

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- Gas cooled reactor에 대해 종합적인 PSA 수행 및 다양한 PSA 기술 연구가 존재함(Level 1/2 PSA 수행 및 방법론 개발, VHTR 피동안전 계통의 신뢰도 연구, Level 1 PSA를 이용한 설계 지원 등).
- Level 2 PSA 수행에 필수적인 중대사고의 종합 분석 능력이 부족함.
- 운전 경험이 부족하여 관련 신뢰도 자료가 부족함.
- 신형원자로에 대한 규제 요건 검토한 바 있음. 차세대 원전에 요구되는 규제 요건의 수준을 만족하는 PSA는 수행된 바 없음.

☐ 미래동향 예측

- 모든 설계/운영 중 원전에 대해 전 범위 PSA 분석(외부재해를 포함한 모든 사건, Level 1/2/3 PSA, 정지저출력 PSA 등)이 요구됨에 따라 신형 원자로에 대해서도 동등한 수준의 PSA 기술 개발이 필요함.
- 물리적 방호, 리스크, DEC 등을 다양한 분야를 종합하여 평가할 수 있는 PSA 기술이 개발될 것으로 예상됨.
- 차세대 원전에 대한 규제 요건 개발 필요. 또한 규제 요건의 수준이 높아짐에 따라 높은 수준의 PSA 수행이 요구될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 전체적인 PSA는 실제 원전 설계에 대해 수행하는 것이 효과적임. 따라서 신형 원자로 개발과 함께 PSA 기술 개발을 병행하는 것이 필요함.
- 다만, 미래에 개발이 예상되는 신형원자로 노형에 대해서는 안전 해석, 중대사고 현상, 방사성 물질의 누출을 종합적으로 모의할 수 있는 방법론 및 전산코드가 필요함.
- 신형 원자로에 대해 인허가 규제 체계 및 기준을 개발하는 것이 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 해양원자로플랜트 리스크 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 신형원자로 PSA 규제 요건 개발 • 규제 요건에 맞는 PSA 수행 기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 신형 원자로 PSA 규제 요건 • 안전해석, 중대사고, 방사성 물질의 누출을 종합적으로 모의하는 전산체계
• 고온가스로 리스크 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 신형 원자로 개발시 PSA 평가를 통한 안전성 수준 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 리스크 정보 활용 설계 최적화 기술
• SFR 리스크 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 신형 원자로 개발시 설계 최적화 • 안전 해석, 중대사고 현상, 방사성 물질의 누출을 종합적으로 모의할 수 있는 방법론 및 전산코드 • 물리적 방호, 리스크, DEC/DID를 종합하여 평가할 수 있는 PSA 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 외부 재해에 대한 PSA 평가 기술 • 피동 계통 특성 별 피동 안전계통 모의 및 신뢰도 평가 기술 • 신뢰도 데이터 확보 • 중소형 원전 특성에 따른 다수기 리스크 평가 기술

4.2.5 리스크정보활용

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 리스크 정보 활용 기술 분야는 국외(미국)의 경우 모든 규제심사에 리스크 정보활용 및 성능기반 규제(RIPBR; Risk-informed and Performance-Based Regulatory)체계를 확립하고, 그에 상응하는 각종 리스크 정보 활용 분야별 규제 지침(RG-174, 175, 176, 177, 178)도 갖추고 있음.
- 반면, 국내에서는 리스크 정보 활용의 근거로 국내 규제지침 16.9 (NRC RG-174에 해당)에 제공되어 있으나, 세부 분야의 규제지침으로 리스크 정보 활용 운영기술지침서 개선(규제지침 16.10)에 대한 것만 제정/공포되어 있는 실정임. 국내 규제지침 현황에서 보듯이, 국내 원자력 산업계에서는 리스크 정보 활용 기술의 적용에 많은 연구 투자가 있었으나, 국내 원자력계 전반에 걸쳐 리스크 정보 활용 체계로의 패러다임 전환을 위한 동력이 미비하여 제한적인 기술 적용에 머무르고 있는 상황임.
- 리스크 정보 활용의 기반이 되는 PSA 기술 및 모델의 품질 확보를 위해 노력하여 왔었고, 산업계에서는 리스크 정보 활용 기술을 적극 활용한 결과 원자력 산업계의 안전성 향상 및 경쟁력 강화로 이어짐.

□ 기술개발 필요성

- 국내 원자력 산업계에서는 리스크 정보 활용의 기반이 되는 PSA 기술 및 모델의 품질 확보를 위해 많은 노력을 기울여 왔음. 하지만, 원자력 산업계의 안전성 향상 및 경쟁력 강화를 위해 PSA를 기반으로 리스크 정보 활용 기술은 제한적으로 적용되어 왔음.
- 리스크 정보 활용 기술의 활성화를 위해 국내 실정에 맞는 RIPBR 체계로의 패러다임 전환을 위한 연구가 필요하며, 이를 위해 우선 RIPBR을 위한 환경 조성(예를 들어, 규제기관과 산업체간의 신뢰 회복)과 함께 국내 환경에 맞는 리스크 정보 활용에 대한 응용 및 규제 기술의 개발이 시급함.

나. 세부기술 내용

1) 가동원전 리스크 정보활용

□ 기술의 정의

- 리스크 정보를 활용한 인허가 사항 변경의 신청 및 승인시 기본적으로 적용되는 규제 의사결정 원칙 및 규칙(RG 1.174)에 따라 특히 다음의 4가지 분야의 리스크 정보 활용 기술 분야가 적용 가능함.
- 리스크 정보 활용 가동중 시험(RI-IST; Risk-Informed In-Service Testing) 분

야로 ASME 코드 섹션 XI의 펌프와 밸브에 대한 적용되고 있는 현행 IST(In-service testing) 프로그램을 리스크 정보를 활용하여 최적화하는 PSA 응용 기술

- 차등 품질보증(GQA; Graded Quality Assurance) 분야로 발전소의 구조, 계통 및 기기(SSC)에 대해 결정론적 방법에 의해 안전 또는 비안전 관련으로 분류하던 기존 방식에서 리스크 정보를 활용하여 안전에 대한 중요성에 따라 SSC 등급을 재분류하고 품질보증 프로그램을 차등화 하는 기술
- 리스크 정보 활용 운영기술지침서 개선(RITS; Risk-Informed Technical Specification) 분야로 원자력 발전소의 안전한 운영을 보장하기 위해 안전 계통을 비롯한 각종 기기/설비들의 건전성을 확인하는 운영기술지침서(허용 정지시간, 점검주기 등) 내용들을 리스크 정보를 활용하여 개선하는 기술
- 리스크 정보 활용 가동중 검사(RI-ISI; Risk-Informed In-Service Inspection)로 명명되는 분야로 주로 배관 부위별 조건부 리스크 평가 결과를 이용하여 배관 검사 물량을 최적화 하는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 리스크 정보 활용 규제 의사결정 원칙 및 규칙은 규제 지침 10.9 (NRC의 RG 1.174와 동일)에 의해 이미 제정되어 있으나, 상기에 정의된 4 가지 기술 적용분야 가운데 RI-TS 분야에 대해서만 규제 지침 10.10을 통하여 제시되어 있음.
- 국내 원자력 산업계에서는 PSA 기술 및 모델의 품질 확보 등 리스크 정보 활용 기술의 전반적인 적용을 위해 많은 연구 투자가 있었으나, 리스크 정보 활용 체계로의 패러다임 전환을 위한 동력이 미비하여 제한적인 분야의 기술 적용(RI-ISI 및 RI-TS 기술의 일부 적용)에 머무르고 있는 상황임.
- RI-IST는 1995부터 1998년에 걸쳐 ASME, EPRI 및 NEI에서 개발된 RI-IST 수행 지침서를 기초로 국내 원전 적용 연구를 한 바 있으나 산업계에서는 RI-IST의 경제적 실익이 적다는 판단에 따라 자체 중단됨. 또한, RI-IST로의 변경에는 정비규정과 같은 성능 감시 프로그램이 필수적이나 현재 산업체의 조직에서는 해당 기술 조직이 거의 없는 실정임.
- GQA는 산업체의 기술 확보를 위한 연구 투자는 있었으나 인허가 변경의 어려움이 예상되어 본격적인 원전 적용 연구는 수행되고 있지 않은 상황임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 상기 기술정의에서 보듯이 미국의 경우 RG 1.174, 1.175, 1.176, 1.177, 1.178에 의해 규제 지침은 확보되어 있고, 1990년대 후반 STP(South Texas Project) 등을 시작으로 많은 원전 사업자들이 리스크 정보를 활용한 기술을 적용하여 원전의 안전성과 경제성을 동시에 향상하고 있음.

□ 미래동향 예측

- NUREG-1024 (1983)에 기술되어 있듯이 현행 운영기술지침서는 공학적 판단에 의해 결정론적 방법으로 정해져 내려온 것으로 많은 문제점을 내포하고 있어 리스크 정보를 활용한 운영기술지침서로의 개선 필요성을 강조하고 있음. 국내에서도 운영기술지침서의 여러 가지 개선 항목에 대한 연구가 완료(일부는 진행 중)되었고, 최종적으로는 현행 기술지침서는 리스크 정보를 활용한 한 장짜리(one-page) 기술지침서로 대체될 것으로 예측됨.
- RI-ISI 기술과 관련하여 국내 산업체는 필요에 따라 이미 자체적으로 해결한 분야로 향후 산업체의 추가적인 기술 개발의 필요성이 있을 경우 자체 해결 가능할 것으로 예측됨.
- 국내 산업체의 RI-IST 투자 여건(RI-IST의 경제적 효과에 대한 산업체의 판단 변화 내지 산업계 환경 변화)의 변화가 없는 한 기술 활용은 어려울 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

- RITS 분야
 - 해외 RMTS(Risk Management Tech Spec) 관련 상세 연구 현황 자료 수집 및 기술 추적
 - RMTS 개선항목들에 관한 해외 연구 결과들의 국내 적용 연구(특히, Initiative 4b 및 5b)
 - 국내 원전별 적용
- RI-ISI 분야
 - RI-ISI 규제지침 개발
 - RI-ISI 규제지침 적용에 따른 효용성(effectiveness) 분석 보고서 작성
- RI-IST 분야
 - RI-IST 수행 기술 동향 파악
 - RI-IST 규제 기술 지침 개발

○ GQA 분야

- SSC 분류 기술 개발 및 원전 적용
- GQA 규제 기술 지침 개발

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 기술지침서 최적화	<ul style="list-style-type: none"> • 해외 RMTS 기술동향 파악 • RMTS Initiative 항목별 해결 기술 연구 (특히, 4b & 5b) • 국내 원전별 적용 연구 	• RMTS 국내 원전 적용 연구
• ISI 최적화	<ul style="list-style-type: none"> • RI-ISI 규제지침 개발 • RI-ISI 규제적용에 따른 효과분석 	• RI-ISI 규제지침 개발
• IST 최적화	<ul style="list-style-type: none"> • RI-IST 규제지침 개발 • RI-IST 기술 동향 파악 	• RI-IST 규제지침 개발
• Grade Q/A	<ul style="list-style-type: none"> • SSC 분류 및 원전 적용 기술 개발 • GQA 규제기술 지침 개발 	• GQA 규제 지침 개발
• 리스크 정보활용 통합 해석체계 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 전 범위의 PSA 통합 평가 및 리스크 정보활용 전산체계 개발 • PSA 및 가상원전 기반 사고진행 예측 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 전 범위 PSA 통합 평가 • PSA/가상원전 기반 사고진행 예측

4.3 인적수행도 향상 기술

4.3.1 개요

□ 「인적수행도 향상 기술」은 다음 2개의 중분류 단위로 구분함.

- 사고예방 인적수행도 향상
- 사고대응 인적수행도 향상

4.3.2 사고예방 인적수행도 향상

□ 이슈 및 문제점

- 지금까지 많은 사건·사고 경험을 통해 원전에서 발생하는 사건이나 사고의 결정적인 원인들 중 하나가 인적오류라는 사실이 밝혀졌음.
- 최근 10년 동안 (2009년부터 2018년) 국내 원전에서 발생된 121건의 불시정지

사건들 중, 19건 (약 16%)이 인적요인에 의해 발생하였다고 알려졌다. 특히 2018년 들어 인적오류와 관련된 불시정지 사건 비율은 30%로 증가하였음.

- 인공지능 및 자동화기술, IoT 기반 초연결시스템 등 신기술의 급격한 발전으로 인적기능의 할당 및 설계에 급격한 변화가 예상되며, 안전성 확보에도 불확실성 요인으로 부각되고 있음.
- 디지털기반 제어실 및 HSI의 도입 및 적용에 따라 새로운 형태의 인적오류가 예상되고 있으며, 디지털 제어실 특성에 적합한 인간공학 평가기술의 필요성이 지속적으로 요구되고 있음.
- 인적오류의 관점이 기존의 개인 측면에서 팀이나 조직측면으로 확대되어 인식되고 있으며, 개인, 팀, 조직의 상호관계에 따른 인적수행도 연구의 필요성이 제기되고 있음.

□ 기술개발 필요성

- 최근 개정된 원자력안전법에 따르면, 모든 가동 및 건설 원전은 다양한 사고 발생 시 충분한 사고관리 전략 및 관리능력이 있음을 보이기 위한 사고관리 계획서를 의무적으로 제출해야하고, PSA 기법 등을 활용한 상세 리스크 평가를 통해 사고관리 전략 및 관리능력의 효용성을 객관적으로 보일 것을 요구함. 이에 따라 PSA 품질과 신뢰성을 높이는 것은 시급한 당면 과제임.
- PSA 품질과 신뢰성 향상 측면에서, 원전의 안전에 가장 큰 영향을 미치면서 상대적으로 불확실성이 높은 인적요인에 대한 체계적인 평가가 가장 중요한 연구 항목이라고 보고됨.
- 따라서 원전의 불시정지 횟수를 줄이고 궁극적으로 원전의 안전성을 높이기 위해서는 원전 운영의 주체인 운전원이나 작업자의 인적행위 향상 및 오류감소를 위한 연구가 필요함.
- 인간과 기계의 기능할당에 적용되는 기준은 원전에 적용될 수 있는 자동화 혹은 자율화 수준과 밀접한 관련이 있으며, 설계변경 과정에서도 변화될 수 있음. 따라서 인적기능과 직무의 초기 할당에서부터 운영과정의 변화까지 지속적으로 추적 관리할 수 있는 체계가 개발되어야 함.
- 디지털기반 제어실의 인적수행도 평가 기준 및 방법론의 정립뿐만 아니라 후쿠시마 원전사고와 같은 자연재해 상황 및 중대사고 상황에 대한 인적수행도 평가체계의 구축이 필요함.
- 원전 운영조직의 조직문화 및 안전문화를 비롯하여, 직무공정의 특성 등을 체계적으로 분석하여 인적수행도 및 인적오류에 미치는 영향을 파악하기

위한 방법론 및 조직적 관리체계의 최적화가 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 인적원인에 의한 원전 불시정지 저감화

☐ 기술의 정의

- 원전 보수 및 정비 관련 인적오류로 인한 불시정지 예방기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국원자력연구원에서는 3차 원자력연구개발사업을 통해 원전 불시정지 저감 측면에서 정기 및 주기시험과 관련된 일상직무 수행 중 인적오류 발생 가능성이 높은 ‘고위험 직무’ 분석방법을 개발한 바 있음.
- 한수원에서는 기기 단일고장으로 인한 원전 불시정지 방지를 위해 SPV (Single Point Vulnerability) 모델을 개발하였음. 이를 통해 불시정지 관련 주요 기기 목록을 도출한 후, 일상직무 수행 중 해당 기기 오동작 가능성을 최소화하기 위한 노력을 시도하였음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- EPRI는 출력운전 중 2차계통의 기기로 인해 발생하는 불시정지를 저감화 하기 위해 GRA (generation risk analysis) 모델을 개발하였으나, 인적오류 모델링은 상대적으로 미약한 편임.

☐ 미래동향 예측

- 원전 가동률 향상 및 국민 안심측면에서 가동 중 원전의 불시정지 발생회수는 최대한 낮게 유지할 필요가 있음. 특히 가동 중 원전의 안전성 향상을 강조하는 현재 추세에서, DID의 첫 번째 혹은 두 번째 단계에 해당하는 일상 직무 관련 인적오류 저감화 연구는 그 중요성이 앞으로 더 강조될 것으로 예상됨.

☐ 기술개발 수행체계

- 국내 보수/정비 관련 인적오류 예측을 위한 인적수행도 확보를 위해 산·학 연계 연구가 필요함.
- 미국 EPRI 및 프랑스 EdF의 연구경험을 적극 활용하여 국내 특성을 반영한 고유 모델을 개발할 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 리스크정보기반 보수/정비 인적오류 예측 	<ul style="list-style-type: none"> 정비 및 운영에 관한 인적 수행도 데이터 확보 및 예측 기술 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 보수/정비 인간 신뢰도 데이터 구축 리스크 기반 보수/정비 인적오류 예측 인적오류 예측 활용 방안 도출
<ul style="list-style-type: none"> 리스크정보기반 최적 보수/정비 전략 선택 	<ul style="list-style-type: none"> 정비 및 운영 전략 도출 인적 행위 개선을 위한 지원 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 기반 보수/정비 인적오류 영향인자 도출 불시정지 방지를 위한 보수/정비 요구사항 도출 인적 행위 개선을 위한 지원 시스템 개발

2) 운전지원 시스템

□ 기술의 정의

- 원전 정상운전 및 비정상/비상 대응관련 인적오류 최소화를 위한 자동화/지능화된 정보시스템 개발

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한수원에서는 울산과기대와 공동으로 기동/정지 운전지원 및 비정상 상태 판단을 위한 연구를 진행 중임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 노르웨이 IFE에서는 OECD/NEA Haden Project의 일환으로 디지털 주제어실 환경에서 운전원의 절차서 수행 지원 시스템 prototype을 개발하였음.
- 미국 INL에서는 HSSL을 활용하여 운전원의 절차서 수행과 관련된 정보를 자동으로 제공하는 시스템을 설계한 후, 터빈제어계통 운전에 대해 실증 실험을 수행하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 원전 안전성 향상 측면에서 인적수행도 역할이 매우 크기 때문에 세계적으로 유사한 목적의 연구가 활발히 진행되고 있음. 이러한 추세에 따라 국내에서도 관련 연구를 선제적으로 시작할 필요가 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 비정상 대응 형태를 정상, 단순비정상, 복합비정상 및 비상 단계로 세분한 후 각각의 특성에 따른 기능분석을 통해 운전지원을 위한 필수 기능을 도출할 필요가 있음.
- 도출된 필수 기능을 지원하기 위한 시스템 요건을 파악하고, 최신 인지공학 및 인간공학 기술을 활용하여 상황별 운전지원 시스템을 개발함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 발전소 운전 및 안전정보 지원 시스템	• 운전원 상황인식 개선을 통한 인적오류 발생 가능성 저감화 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 발전소의 운영 데이터의 실시간 관리 분석을 위한 데이터 체계 구축 • 발전소 운영정보의 직관화 요소 • 발전소 이상 탐지 기술 • 운전원 상황판단 지원을 위한 시각화 시스템
• 경보감시 및 최적화	• 운전원 경보인식 능력 향상 지원 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 발전소 경보 상황의 긴급성, 중요성 정보 분석 • 경보 상황에 대한 시뮬레이터 자료 수집 • 경보 우선순위 판단 알고리즘 • 경보 최적 시각화 기술
• 고장 및 사고 진단 통합 시스템	• 운전원의 신속한 고장 및 사고 원인 파악 지원 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 발전소 고장 및 사고진단 시의 발전소 변수 데이터 수집 • 발전소 변수 데이터의 분석을 통한 진단분류 체계 • 진단 정보 전달을 위한 운전원 지원 시스템
• 운전원 의사결정 지원 및 사고관리 예측	• 운전원의 의사결정 관련 오진단 가능성 감소를 위한 지원 시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 발전소 고장 및 사고 진단 시의 발전소 변수 데이터 수집 • 운전원 행위 따른 발전소 변수 변화 데이터 수집 • 발전소 변수 데이터의 분석을 통한 발전소 상태 예지 체계 • 예지 정보 전달을 위한 운전원 지원 시스템
• 지침서/절차서 지원시스템	• 동적인 원전 상황에 따른 운전절차서의 효과적 수행 지원 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 발전소 고장 및 운전원 행위 따른 운전변수 수집 • 발전소 운전변수 분석을 통한 상태 예지 체계 개발 • 발전소 상태 예지에 따른 발전소 대응 생성 모델 구축
• 자동화시스템 운전전환 안전성 확보기술	• 운전원과 자동화 시스템간의 협업운전 시스템을 구축을 통한 다중성(redundancy) 확보 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 운전변수 분석을 통한 발전소 상태 예지 및 대응 모델 구축 • 자동화시스템과 운전원간의 상호작용 인터페이스 개발 • 적응형 자동화수준결정 알고리즘 및 활용 인터페이스 개발

<ul style="list-style-type: none"> • 운전정보 가시화 및 최적화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 비정상/비상 상황에 대한 key information extraction 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 사고 시나리오 분석을 통한 주요 특성 분석 • 동적 상황을 반영한 상황별 key information 도출 알고리즘 개발 • 인지심리학 기반 key information 가시화 interface 설계
---	---	---

3) 첨단 제어실 인간공학 평가 및 검증

□ 기술의 정의

- 소프트웨어, 대형 정보 표시, 터치스크린 등의 첨단 인터페이스 기술을 도입한 디지털기반 HSI 및 제어실의 인간공학 확인 및 검증 기술
- 인간공학 설계와 계측제어설계의 프로세스 통합을 통한 인간중심의 계측제어시스템 설계 기술
- 원전 제어실 및 현장의 화재나 지진 등으로 인한 물리적 환경을 모사하여 운전원 실감기반의 훈련 및 운전성 평가기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 디지털기반 제어실에 대한 통합계통검증은 시나리오, 적용 HSI, 운전조, 성능평가 기준 등에서 디지털 제어실 특성을 고려하여야 하나, 기존 채래식 제어실에 적용한 방식과 동일한 방식과 내용을 준용하고 있어, 기술적으로 미흡한 실정임.
- 계측제어 설계와 인간공학 설계는 인간-기계연계체계 설계 관점에서 절차적 통합이 필수적이거나 이를 위한 설계표준이나 지침이 부족하여 적용하지 못하고 있는 상황임.
- 중대사고 시뮬레이터의 부분적 적용을 통해 대표 시나리오에 대한 원전 중대사고 상황을 적절하게 모사하고 이에 따른 인간공학 유효성 평가를 실시하고 있으나, 자연재해로 인한 물리적 주변 환경, 혹은 이로 인한 심리적 충격 등을 평가에 반영하지는 못하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국, 프랑스 등 일부 국가에서는 기존방식을 이용한 디지털 원전 주제어실에 대한 통합계통검증을 수행해 오고 있음.
- 캐나다, 프랑스, 스페인, 러시아 등의 원전 설계기관에서는 계측제어 설계통

합 관점의 인간공학 설계에 대한 필요성을 인지하고 자체적인 통합방안을 각 나라별로 차별적으로 적용하고 있음.

- 미국 INL에서는 원전 제어실 내 지진발생에 대한 환경모사를 부분적으로 실시하여 지진발생 시나리오에 적용하고 있으며, 이로 인한 훈련 및 평가 설비로 활용하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 디지털 기반 제어실의 인간공학 확인 및 검증을 위한 단계적 접근방법을 개발하여 적용할 것으로 예상되나, 국제표준화 작업을 선행할 것으로 예상됨.
- IAEA를 중심으로 계측제어 설계와 인간공학 설계의 통합방안을 지침화 할 것으로 예상됨.
- 후쿠시마 원전사고, 체로노빌 원전사고, TMI 원전 사고 등의 물리적 환경을 가상현실, 증강현실, 혼합현실 등의 최첨단 기술을 활용하여 모사하고 이를 통한 훈련 및 평가체계를 점차 구축할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 디지털 기술은 그 생명주기가 짧고 기술의 발전 속도가 빠르므로 원전에 적용 가능한 디지털 기술을 단계적으로 접근하여 인간공학 확인 및 검증을 위한 차별적 방법론을 개발할 필요가 있음.
- 화재나 지진 등의 외부사건에 대한 물리적 환경의 모사는 가상현실, 증강현실, 혼합현실 기술들을 적시에 효과적으로 활용하며, 운전원의 실감도를 극대화하기 위한 인지심리학적 접근을 병행해야 함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
디지털 기반 HSI의 인간공학 V&V 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 기기/계통수준 디지털 HSI 가용성/적합성 평가기술 개발 • 국내 가동원전 디지털 HSI의 평가기술 표준화 	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 HSI의 인간공학 적합성 평가 방법론
디지털 기반 제어실 통합시스템검증 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 제어실 운전특성 분석 및 검증방안 개발 • 디지털 제어실 인간공학 검증기술 실증 	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 제어실 운전특성 분석 방법론 • 디지털 제어실 인간공학 검증 방법론
I&C 설계통합 인간공학 설계표준 및 지침	<ul style="list-style-type: none"> • I&C 설계통합 인간공학 설계공정 수립 • I&C 설계통합 인간공학 설계표준 개발 • I&C 설계통합 인간공학 설계지침 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • I&C 설계통합 인간공학 설계 공정

첨단 제어실 인간공학 평가척도 및 기술기준	<ul style="list-style-type: none"> • 생체신호기반 인간공학 평가척도 개발 • 행위기반 평가척도 개발 • 기술기준 확립 및 성능평가 표준화 	<ul style="list-style-type: none"> • 생체신호기반 인간공학 평가 기술기준 • 행위기반 평가 기술기준
범용 원전 시뮬레이터 구축 및 운영기술	<ul style="list-style-type: none"> • 충실도 확보기술 및 이상 조기탐지 기술개발 • 시뮬레이터 훈련프로그램 고도화 • 시뮬레이터 구축 및 운영기술 실증시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 시뮬레이터 충실도 확보 기술 • 시뮬레이터 기반 훈련프로그램 개발기술
실감형 인터페이스 기반 훈련체계 구축 및 운전성 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> • 실감기반 인간공학 훈련 및 평가 요소기술 개발 • 실감기반 인간공학 훈련 및 평가체계 구축 • 실감기반 인간공학 시범훈련 및 시범평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 실감기반 모사의 충실도 확보기술 • 실감기반 인간공학 훈련 및 평가 프로그램 개발 기술

4) 절차서 전산화 및 자동화 기술

□ 기술의 정의

- 전산화절차서 자동화 및 성능 수준 향상 기술
- 작업계획서 작성지원시스템 개발 기술
- 모바일 전산화절차서 개발 기술
- 정주기 절차서의 수기기록 자동 데이터베이스화 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 신고리 3, 4호기를 시작으로 모든 건설원전에서는 비상운전절차서, 경보운전절차서, 비정상절차서, 종합운전절차서는 전산화절차서로 전환되고 있음.
- 전산화절차서는 가독성, 휴대성, 문맥 민감성, 발전소 정보 통합 측면에서 우수하므로 4차 산업혁명 시대와 부합하며 인적오류를 저감할 수 있는 기술임.

□ 미래동향 예측

- 전산화절차서는 다양한 방향으로 진화될 예정이며 4차 산업혁명 기술을 활용하여 지능화될 예정임.
- 절차서는 판단하고 조치하는 지시문으로 이뤄져 있는데, 현재의 판단 논리는 수식에 따른 판단위주로 자동화되어 있지만 미래에는 ‘증가 중’ 과 같은 Fuzzy한 판단도 강화될 예정임.

□ 기술개발 수행체계

- 원전에는 1000 개의 절차서가 구축되어 있으며 사용 중 또는 주기적으로 절차서의 무결점을 확인하고 있으나 그러나 절차서는 자연언어를 서술되기 때문에 완벽한 무결점성을 확보하기 어려움. 그렇지만 4차 산업혁명 기술에 따라 자연어 처리, 정보의 통합이 이루어지면 절차서 작성 시부터 결함 없는 절차서 작성이 가능하고 이를 위한 기술개발을 수행함.
- 절차서 작성, 작업 계획서를 완벽하게 작성하는 방식은 현장을 사전에 답사하는 활동임. 그러나 사전 답사는 사전에 많은 시간을 소요되므로 사무실에서도 현장을 확인할 수 있고, 설치된 기기의 설계, 제작, 점검, 시험까지 확보할 수 있는 절차서 작성 지원시스템 개발도 병행하여 수행함.
- 절차서를 수행 후에는 발전소의 방대한 정보들이 취합됨. 그렇지만 이들 자료들은 절차서에 수기로 기록되어 향후 발전소 운영을 예측하는데 제한적으로 사용됨. 따라서 절차서 수행 후에 자동적으로 취득 자료를 데이터베이스에 입력할 수 있는 기술도 함께 개발함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
전산화절차서 자동화 수준 및 확인검증 수준 향상	<ul style="list-style-type: none"> 전산화절차서 자동화 수준을 향상하여 인적오류 원천 배제 전산화절차서 개정 및 확인검증 수준을 향상하여 전산화절차서 품질 및 성능 제고 	<ul style="list-style-type: none"> 전산화절차서 설계/구현/검증 기술
작업계획서 작성 지원시스템 및 정주기 절차서 수기기록 자동 database화 기술	<ul style="list-style-type: none"> 작업 중 실수를 최소화하기 위한 작업계획서 작성 지원시스템 개발 정주기 절차서 수기기록 방식을 자동화로 변경하여 운전성 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 작업계획서 작성 및 절차서 기록 및 구현 기술
모바일 전산화절차서	<ul style="list-style-type: none"> PC 기반 전산화절차서를 모바일용으로 변환 모바일 전산화절차서로 수행할 업무 선별 	<ul style="list-style-type: none"> 모바일 전산화절차서 설계/구현/검증 기술

4.3.3 사고대응 인적수행도 향상

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 원전 안전성 측면에서, 인적요인은 전체 노심손상빈도 (CDF; Core Damage Frequency)에 가장 큰 영향을 주는 항목임.
 - 원전 안전성 향상 기술 NEA (Nuclear Energy Agency) 분석에 따르면, 인적오류로 인한 노심손상빈도의 영향이 많게는 약 80%까지 차지하는 것으로 밝혀짐.
- 고장·정비를 위한 예방정비 뿐 아니라 예상하지 못한 원인으로 인해 원전 정지가 발생할 경우 주제어실 운전원은 비상운전절차서 (EOP, Emergency Operating Procedure)를 따라 원전을 안전정지 상태로 진입시켜야 함.
- 특히 후쿠시마 사고 이후, 보다 효과적인 사고 대응을 통한 원전 안전성 향상을 위해 다양한 종류의 이동형 펌프나 발전기를 설치하고 있음.

□ 기술개발 필요성

- 최근 개정된 원자력안전법에 따르면, 모든 가동 및 건설 원전은 다양한 사고 발생 시 충분한 사고관리 전략 및 관리능력이 있음을 보이기 위한 사고관리 계획서를 의무적으로 제출해야함.
- 이를 위해, PSA 기법 등을 활용한 상세 리스크 평가를 통해 사고관리 전략 및 관리능력의 효용성을 객관적으로 보일 것을 요구함. 이러한 측면에서, 사고 대응을 위한 비상운전절차서의 개발 및 효과적 수행을 지원하기 위한 기술을 개발할 필요가 있음.
- 또한 최근 건설되는 원전에 설치되는 디지털 주제어실은 기존 주제실과 다른 특성을 가지고 있기 때문에, 디지털 주제어실에 근무하는 운전원의 효과적인 사고 대응을 지원하기 위한 기술과 새롭게 도입된 이동형 기기를 포함한 최적 사고 대응전략을 지원할 수 있는 기술 개발이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 국내 원전의 인적오류 분석, 인적수행도 DB 구축 및 활용

□ 기술의 정의

- 원전 정상운전 및 비정상/비상 대응관련 인적오류 최소화를 위한 인적수행도 DB 및 인적오류 분석기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국원자력연구원에서는 4차 원자력연구개발사업을 통해 가동 중 원전의 아날로그 주제어실의 비정상/비상 대응관련 인적수행도 자료를 수집하였고, 5차 원자력연구개발사업을 통해 디지털 주제어실 환경에서의 인적오류 분석기술을 연구하고 있음.
- 한수원에서는 디지털 주제어실 환경에서의 비정상/비상 대응관련 인적수행도 자료를 수집 및 분석하는 연구를 수행하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 프랑스 EdF에서 운영 중인 원전에 대해 비정상/비상 대응관련 인적수행도 자료를 수집하고 있으나, 대외 공개는 철저히 지양하는 대신 자국 원전 및 수출형 원전에 대해 적용하고 있음.
- 미국 EPRI에서는 AP1000 원전의 디지털 주제어실 환경에서의 비정상/비상 대응관련 인적수행도 자료를 수집하기 위해 한수원과 논의 중에 있음.
- 미국 INL에서는 HSSL (Human System Simulation Laboratory)을 구축한 후, 비정상/비상 대응관련 인적수행도 자료를 수집하는 과제를 시작한 상황임.
- 미국 NRC에서는 STP와 협약을 통해 비정상/비상 대응관련 인적수행도 자료 수집을 위한 SACADA (Scenario Authoring, Characterization, and Debriefing Application) 데이터베이스를 개발하고 있음.
- 영국 EdF 에너지에서는 건설 중 원전에 설치될 디지털 주제어실 관련 인적수행도 자료 수집 프로젝트를 최근 시작함.

□ 미래동향 예측

- 원전 가동을 향상 측면에서 비정상 상황 발생 시 효과적으로 대응하는 것이 필수적임. 특히 비정상/비상 대응은 DID의 두 번째 및 세 번째 단계에 해당할 뿐 아니라 국민 안심측면에서 직접적인 영향을 줄 수 있는 민감한 사안이기 때문에 세계적으로 많은 연구가 진행될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 4차 원연사 및 5차 원연사를 통해 확보된 기술을 활용하여 국외 자료를 확보할 필요가 있음. 이를 위해 국외 유관기관 (INL, NRC 및 EdF 등)과 연구협력 체계의 구성 및 비정상 상황 인적수행도 자료 수집 표준체계를 개발이 병행되어야 함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 국내 불시정지에 연관된 인적요인 분석 및 원인 DB 	<ul style="list-style-type: none"> 단순 사건 발생에 기초한 데이터베이스가 아닌 운전특성에 따라 예측 가능한 직무 성공 가능성의 기초 데이터 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 기존 불시정지 인적요인 분석 DB 검토 보수/정비/운영의 직무 및 환경특성 인자 도출 불시정지 관련 인간 수행도 및 인적오류 DB 구축
<ul style="list-style-type: none"> 비상직무에 대한 시뮬레이터 모의실험 및 자료 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 운전원 동적 특성 요소 인자의 데이터 수집 데이터 충실도 자동 개선 및 장기 자동/반자동 수집 프레임워크 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 운전원 수행도 영향인자를 파악 및 데이터 수집체계 구축 시뮬레이터 모의실험 및 DB 구축 데이터 충실도 자동 개선 및 장기 데이터 자동/반자동 수집 프레임워크 구축
<ul style="list-style-type: none"> 인적오류 분석 및 평가 방법 	<ul style="list-style-type: none"> 인적오류 관련 인자의 평가 방안 도출 인간 신뢰도 영향수준 역치 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 인간 수행도 DB의 인적오류인자 도출 인적오류 관련 인자의 평가체계 구축 관련 변수 도출 방안 정립 평가체계에 따른 관련 인자들의 인간 신뢰도 영향수준 평가
<ul style="list-style-type: none"> 인적수행도 향상 및 오류 저감 방법 연구 	<ul style="list-style-type: none"> 실증 데이터를 기반으로 인적오류 저감에 관한 의사결정 전략 수립 지원 	<ul style="list-style-type: none"> Bayesian casual model 및 fuzzy logic을 통한 정량 모델 개발 인적오류 개선 방안 도출을 위한 지원시스템 구축

2) 비정상절차서 (AOP) 개선

☐ 기술의 정의

- 최신 인공지능 기법을 활용한 비정상 상황 정밀진단 및 개선방안 도출

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국원자력연구원에서는 4차 원자력연구개발사업의 일환으로 OPR1000 (Optimized Power Reactor 1000 MWe) 원전 SPV 모델의 분석결과를 활용하여 비정상절차서의 coverage를 분석하였음.
- 한수원에서는 원전 운전원의 운전능력제고 측면에서 비정상절차서 관련 경보내용 및 발생 양상을 분류한 후 비정상 상황 진단을 위한 의사결정 지원 flowchart를 개발한 경험이 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 노르웨이 IFE에서는 OECD/NEA Haden Project의 일환으로 경보발생에 따른 대응조치를 AOP에서 자동으로 추출하여 제공하는 시스템을 개발하고 있음.
- 미국 INL에서는 경보 발생 시 관련 AOP를 자동으로 제공하는 시스템의 prototype을 개발한 후 HSSL에 설치하여 해당 시스템의 운전원 수행도 향상 역할을 실험적으로 평가하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 원전 가동률 향상 측면에서 비정상 상황 발생 시 효과적으로 대응하는 것이 필수적임. 특히 비정상 대응은 DID의 두 번째 수준에 해당할 뿐 아니라 인공지능 기술의 급격한 발전으로 이전 연구에서 해결하지 못한 현안의 극복이 가능하게 되었기 때문에 세계적으로 관련 연구가 활발히 추진될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 지금까지 AOP 개발은 대부분 운전경험을 반영하는 수준으로 이루어 졌기 때문에 특정 원전에 대한 AOP coverage를 명확히 평가할 수 없었음. 따라서 최신 리스크 정보를 기반으로 원전 안전성에 영향을 주는 비정상 상황 정보 도출이 선행되어야 함.
- 이를 위해 연·산·학 협력체계를 구축하고, 빅데이터 기반 최신 인공지능 기법의 적용을 통해 AOP coverage 평가체계를 개발함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 비정상절차서 coverage 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 최신 인공지능 기법 기반 예상 비정상 시나리오 예측 및 coverage 개선 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 정보기반 주요 비정상 상황 시나리오 도출 비정상절차서의 사고 흐름 및 리스크 기반 비정상 시나리오 비교 및 coverage 평가 체계 개발
<ul style="list-style-type: none"> 빅데이터 기반 비정상 상황 최적대응 방법 	<ul style="list-style-type: none"> 비정상절차서 coverage 밖의 사건 발생 시 최적대응 지원 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 비정상 상황에서의 운전변수 수집 텍스트 마이닝을 통한 비정상절차서 주요 조치 추출 및 데이터베이스 구축 비정상절차서 내 운전원 대응 행위의 우선순위 평가 및 추천 모델 개발 복합 비정상 상황 대응을 위한 절차서 조합 및 대응 추천 시스템 개발

3) 비상운전절차(EOP) 개선

□ 기술의 정의

- 동적인 발전소 상황의 효과적 대처를 위한 최적 비상운전절차서 개발

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국원자력연구원에서는 3차 원자력연구개발사업을 통해 SDT (Sequential Diagnosis Technique) 및 운전원의 인을 근간으로 OPR1000 원전의 비상운전절차서 중 진단 절차서를 개선한 경험이 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 스페인 규제기관인 SNSC에서는 비상운전절차서 기반 안전여유도 평가 시스템인 ISA (Integrated Safety Analysis) 시스템을 개발하였고, Westinghouse 4-loop PWR에 대해 시범적용을 하였음.
- 스위스 PSI에서는 독일 규제기관인 GRS에서 개발한 MCDET (Monte Carlo simulation with discrete Dynamic Event Tree)을 근간으로 LOCA 성공기준을 상세 분석한 후 비상운전절차서 개선전략을 제시하였음.

□ 미래동향 예측

- 가동 중 원전의 안전성 향상을 강조하는 현재 추세에서, 비상 상황 대응에 필수적인 비상운전절차서를 최적화시키는 것은 우선적으로 고려해야할 현안 중 하나임.
- 특히 최신 인공지능 기법 도입 및 계산능력 향상에 따라 기존에는 수행할 수 없었던 계산을 매우 빠르고 정확히 할 수 있게 됨에 따라, 발전소의 동적인 특성을 반영한 실질적인 리스크 평가 결과를 고려한 비상운전절차서 개선 노력은 점차 증가할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 인공지능 기술 개발이 최근 급격히 진행되는 추세이므로 연·학 협력체계 구축을 통한 문제해결 노력 필요함.
- 인공지능 기술 활용을 위한 광범위한 현장자료가 필요하므로, 산업체를 연구개발 초기단계부터 포함시켜 지속적인 의견 수렴 및 필요 기능 도출을 병행할 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 비상최적대응을 위한 EOP 운전전략 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 운전노형별로 비상운전절차서의 운전전략 분석 및 최적의 운전대응을 위한 운전전략 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 국내외 원전의 절차서 활용전략 조사 전문가 검토와 설문을 통한 기존 운전전략들의 비교분석 최적의 운전전략 도출 및 개선 사항 도출
<ul style="list-style-type: none"> 절차서 PSA 영향 종합평가 	<ul style="list-style-type: none"> 원전 사고시 발생가능한 다양한 사고전개와 그에 따른 기기 신뢰도를 고려한 비상운전절차서 최적화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> PSA 사고전개 시나리오 및 각 기기/운전행위 신뢰도 재평가 주요 운전행위 신뢰도에 대한 성공기준 분석 텍스트마이닝 기법을 통한 리스크 정보 기반 절차서 평가모델 구축
<ul style="list-style-type: none"> 운전절차서 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 정보 기반 비상운전절차서 개선기술 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 정보 기반 주요 운전조치 도출 운전조치 variation 인자 도출 다양한 운전조치에 따른 시뮬레이션 결과 분석 및 개선 방향 도출 개선 절차서의 리스크 영향 재평가
<ul style="list-style-type: none"> 운전절차서 자동화 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 정보 및 운전전략기반 비상운전절차서 주요 직무 자동화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 주요 직무 특성별 자동화 수준 결정 자동화에 따른 리스크 및 운전전략 영향 평가

4) 운전 조직 및 관리체계 개선

□ 기술의 정의

- 최신 리질리언스 (resilience) 공학 기반 운전문화진단 및 정량적/실증적 데이터 기반 관리 기술
- 원자력 시설별 조직 및 관리적 요인 도출 및 안전성 분석 기술
- 원전 운전 유형 및 상황별 그룹 의사결정 모델링 및 시뮬레이션 기술
- 원자력 체계의 역할 및 책임 분석 및 최적화 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원자력 분야의 조직/관리적 요인에 대한 체계적 평가는 안전문화 현안을 위한 설문/면담 기반의 평가 및 일부 가동원전에 대한 주기적 안전성 평가에

그친 상태임.

- KINS에서는 IAEA, 미국 및 일본의 경험을 바탕으로 안전문화 평가 및 감시 프로그램을 규제측면에서 도입하려는 노력을 추진 중임.
- 팀 단위 운전 교육훈련을 실시하고 전문가 평가를 통해 적정 수준의 팀 수행도의 적합성을 주관적으로 판단하고 있는 상태임.
- 자동화, 무선화 등의 기술발전 경향은 물론 중대사고 등에 대비하여 원자력 분야에서도 역할 및 책임의 동적 변동에 대한 대처가 필요하나, 일부 시범 적용에 그치거나 사후정리에만 적용되는 실정임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- IAEA를 중심으로 후쿠시마 사고 분석결과의 일환으로 그동안 운영과 관련하여 품질관리의 대상으로 취급되었던 조직/관리적 요인에 대해 새로운 관점 또는 보다 확대된 안전성 평가의 필요성이 부각되고 있음.
- 미국 NRC에서는 Davis-Besse 사건 이후 안전문화 감시 프로그램을 규제차원에서 운영하고 있음.
- 일본은 JANSI를 중심으로 안전문화 교육, 평가 및 향상 프로그램을 개발하여 운영 중이고, 전력회사 역시 자체적인 안전문화 교육 및 평가 프로그램을 개발하여 운영 중임.
- 원전 운영조직의 문화적 차이에 따른 그룹 의사결정 과정의 차이를 보이거나 별도의 그룹 의사결정 체계를 개발 및 적용하지는 못하고 있는 실정임.

□ 미래동향 예측

- 후쿠시마 사고 이후 운전/안전문화에 대한 관심이 점차 높아지는 상황이므로 관련 연구가 지속적으로 증가할 것으로 예상됨.
- 인적오류 과점이 개인에서 조직적 관점으로 확대되어 인적오류 저감 및 대처방법에도 새로운 패러다임, 즉, Safety II 개념을 적용할 것으로 예상됨.
- 조직 및 관리적 측면은 IAEA를 중심으로 안전기준 및 지침을 전파하고 있으나 아직 실무적 접근을 위한 구체적인 가이드라인이 부족한 상태이므로, 전무가 워킹그룹을 통한 가이드라인 개발 활동이 선행될 것으로 보임.
- 조직 및 관리적 측면은 동적이고 지속적 변화가 수반되는 특성이 있으므로, 지속적인 조직 모델링 및 시뮬레이션을 통해 주기적인 최적화 방안을 개발하고 이에 따른 대처방안을 강구해야 할 것으로 판단됨.

□ 기술개발 수행체계

- 인적오류의 조직 및 관리적 측면은 인간공학, 인지심리학, 조직론, 행동과학 등 여러 학문을 융합하는 통섭적 접근이 필요함.
- 팀 및 조직의 수행도는 하향식 접근을 통해 최상위 조직 미션부터 최하위 운전원 및 작업자의 세부 행위까지 동적 연결고리를 모델링 및 시뮬레이션 하여 최적의 대안을 발굴하고 현장적용 및 피드백 과정을 반복 수행해야 함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
사건 및 오류 사례분석을 통한 조직/관리적 요인분석 기술	<ul style="list-style-type: none"> 조직/관리적 요인의 분석기술 및 효과적 대책도출 기법 구축 조직/관리적 요인기법의 실무적용 및 고유성 관련 보완 조직/관리적 요인 분석과 결과정보의 연계활용체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 운전 조직 및 관리에 관한 사건 및 오류 사례 분석 운전 조직 개선 성공/실패 사례 조사 조직/관리적 요인분석 기술
조직/관리 요인의 안전성 영향 평가	<ul style="list-style-type: none"> 원자력 시설별 조직/관리적 요인의 안전성 분석체계 개발 조직/관리적 요인의 안전성 분석체계 적용 및 공식화/확산 조직/관리적 요인의 안전성 영향분석 및 대처관리 체계구축 	<ul style="list-style-type: none"> 전문가 설문에 의한 영향 평가 모형 구축 정성 시뮬레이션에 기반을 둔 영향 평가 모형 구축 조직/관리적 요인의 안전성 분석기술
조직/관리체계의 역할 및 최적화 기술	<ul style="list-style-type: none"> 원자력 체계의 역할 및 책임 분석/최적화 기법 개발 및 기존 원자력 체계의 역할/책임 명세 현황 분석 원자력 체계의 역할 및 책임 최적화 적용 역할 및 책임 변동 대처를 위한 동적 최적화 적용 국내 원전 운영의 현실에 맞는 조직 구조 및 체계 연구 	<ul style="list-style-type: none"> 원자력 체계의 역할 및 책임 분석기술 역할 및 책임변동 대처를 위한 동적 최적화 기술 인지 시스템 분석 기법을 통한 조직 의사결정 모델링 원전 주요 조직의 개선방향 도출 및 최적화 방안 개발
그룹 의사결정 모델링 및 분석 기술	<ul style="list-style-type: none"> 원전 운전 유형/상황별 그룹 의사결정 모형개발 안전한 원전 운전을 위한 그룹 의사결정 모형 시뮬레이션 안전한 원전 운전을 위한 최적 그룹 의사결정 모형 개발 원전 내 그룹 의사결정의 모델링 및 의사결정 조직의 신뢰도/성능 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> 그룹 의사결정 모형 및 시뮬레이션 기술 조직/관리 요인들의 분석 체계에 대한 활용성 검토 원전 운영 차원에서의 조직 요인 분석을 위한 체계 도출 인지 시스템 분석 기법을 통한 조직 의사결정 모델링
운전원 팀 수행도	<ul style="list-style-type: none"> 원전 운전원 팀 수행도 (team 	<ul style="list-style-type: none"> 운전원 팀 운전문화

향상 기술	performance) 및 평가 모델 개발 • 팀 수행도 향상을 위한 원전 운전원 교육훈련 프로그램 개발 • 팀 수행도 향상을 위한 원전 운전원 교육훈련 시범적용 • 시범적용을 통한 수요분석 및 교육훈련 프로그램 최적화	평가방법 개발 • 운전원 팀 수행도 모델 기술 개발 • 운전문화 특성에 따른 팀 수행도 향상방안 도출 • 팀수행도 향상을 위한 운전원 교육훈련 프로그램 개발 기술
-------	---	---

5) 사고대응 인적수행도 향상 신기술 개발

□ 기술의 정의

- 인지공학과 인공지능 기법을 활용한 인적수행도 개선 및 향상 기술
 - 인공지능을 활용한 핵심안전기능의 자동 복구/유지 시스템
 - 디지털 데이터의 시각화/추적/예측 기술을 활용한 의사결정 지원 시스템
 - 인지공학과 리스크정보를 활용한 이동형 기기의 인지적 의사결정 및 운영 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 최근 인공지능 기법들의 발전에 따라 원전 운영에 대한 인공지능 기법들이 여러 대학, 한수원 중앙연구원, 원자력연구원 등 다양한 기관에서 원전 안전을 향상시키기 위한 방도를 모색 중임.
- 디지털 주제어실의 운영에 따라 다양한 운전원 지원 기능이 전산화절차서에 적용되어 있으나, 운전변수 경향성 판단이나 상황 진단/예측 등 다양한 인적수행도 이슈들에 대한 지원 또한 필요한 상황임.
- 이동형기기 활용 절차와 기법들이 개발/적용 중에 있으며, 최적 활용방안을 지속적으로 논의 중임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- NRC는 최근 Regulatory Information Conference 등을 통해 원전의 인공지능 활용을 강조하고 있으며 INL에서는 인공지능에 따른 자동화 전략에 대한 연구를 오하이오 주립대와 함께 연구 중임. HRP은 자동화 시스템과 인간과의 상호작용에 대한 수많은 실험을 수행중임.

- BNL은 adaptive procedure 개념을 제안하고, 이를 통한 운전원-자동절차기능을 통합하는 시스템을 개발할 필요성을 강조함.
- 미국의 각 발전소들은 이동형 기기 활용방안을 개발하고 있으며, NRC는 이러한 경향을 반영하여, 인적 신뢰도를 평가하고 개선하는 방안을 개발 중임.

□ 미래동향 예측

- 정보의 디지털화, 발전소 데이터의 수집, 인공지능의 원전분야 적용은 시간에 따라 점점 가속화될 것이라 예상됨. 이에 따라, 인간의 인지적 부담을 최소화하고 인간-기계 시스템의 통합적 성능 향상을 위한 연구가 활발하게 이뤄질 것이라 예상함. 효과적인 운전원 지원 기술의 선점이 매우 요하는 상황임.

□ 기술개발 수행체계

- 인적수행도 향상 기술은 학제적 분야로 기존에도 다양한 분야에서 시도되었으나, 최근에는 추가적으로 디지털 정보의 합성, 빅데이터의 수집, 인공지능 등의 새로운 분야와의 연결이 매우 중요히 여겨지고 있음. 이에 따라 다양한 분야 전문가들 간의 상호 협력이 크게 요구되고 있음.
- 시스템 환경에 대한 정보 및 데이터 제공, 실증실험을 위한 운영기업의 협력, 시스템 개발과 적용/실험 운영에 대한 연구기관의 협력, 새로운 기법 및 다양한 기술 모색을 위한 대학 연구소의 협력이 매우 긴밀하게 이뤄질 필요가 있음.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 핵심안전기능 (자동)복구/유지 시스템 	<ul style="list-style-type: none"> • 인공지능에 기반한 원전 핵심 안전기능 자동 관리 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 비상/비정상 상황의 핵심안전변수의 데이터 수집 • 자동복구/유지 알고리즘 개발 • 운전원 협력 지원 시스템 개발
<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 주제어실 비상운전 인간신뢰도 향상 	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 정보 합성, 변환 및 시각화를 통한 시스템 진단 및 예측 지원 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 주제어실 운전원 행동/인지 이슈 도출 • 원전 시스템의 추적/진단/예측 알고리즘 개발 • 디지털 데이터의 추상화, 시각화 기법 개발 • 실증실험을 통한 시스템 개선 효과 검증
<ul style="list-style-type: none"> • 이동형기기 	<ul style="list-style-type: none"> • 리스크정보와 인지공학에 	<ul style="list-style-type: none"> • 리스크정보활용을 통한 최적 운용

운영조직 신뢰도 향상	기반한 의사결정 및 조직운영, 기기사용 최적화 기술	<p>전략 도출</p> <ul style="list-style-type: none"> • 인지공학에 기반한 운전원 의사결정 및 인력운영의 최적화 • 인적오류 최소화를 위한 지침서/절차서 체계
<ul style="list-style-type: none"> • 주제어실 운전팀 상황인식 실시간 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 상황인식 정보의 실시간 객관적/정량적 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 상황인식 평가를 위한 척도 및 시뮬레이터 변수 도출 • 상황인식 수준 평가정보와 시뮬레이터 변수간의 연계 빅데이터 수집 • 상황인식 실시간 평가 시스템
<ul style="list-style-type: none"> • 빅데이터기반 인적오류 예측방법 	<ul style="list-style-type: none"> • 인적수행도 영향인자들간의 인과관계에 대한 실증데이터 기반 결과도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 성능영향인자와 인적오류확률간의 인과관계 규명을 위한 빅데이터 분석 • 오류복구행위에 대한 빅데이터 분석 • 운전원 행위간 종속성에 대한 빅데이터 분석

4.4 환경 및 개인 방사선 방호/방재 기술

4.4.1 개요

□ 「환경 및 개인 방사선 방호/방재 기술」은 다음 5개의 중분류 단위로 구분

- 원자력시설 방사선 환경 방호
- 정상 및 비정상 시 개인 방사선 방호
- 방사선 비상 및 오염대응

4.4.2 원자력시설 방사선 환경 방호

□ 이슈 및 문제점

- 국내 방사선방호체계는 1990년 국제방사선방호위원회의 권고 (ICRP Publication 60, 1991)에 기반하여 법제화되어 있으나 2007년 국제방사선방호위원회의 신권고 (ICRP Publication 103, 2007)가 새롭게 발간됨. 그동안 국제원자력기구 (IAEA) 등에서는 회원국에 방사선환경영향평가를 위해 지속적으로 신모델과 신자료를 제공하고 있음.

- 국제방사선방호위원회 신권고의 국내이행으로 국제사회와의 조화 필요
- 원자력기술 수출시 기술도입국의 방사선방호체계에 적합한 관련 코드를 포함한 평가도구의 적시적소 제공 필요
- 국내의 지정학적 특수성으로 한 부지 내에 여러 원자력시설이 운영 중에 있어 시설의 운영 측면의 어려움 뿐 아니라 사회단체 (NGO 등)의 반핵에 대한 발미제공으로 일반인의 막연한 불안감이 가중되고 있음.
 - 후쿠시마 원전 사고 이후 시민단체의 반핵활동 점증
 - 기술기준에 대한 여유도 감소로 신규시설 건설 및 기존시설 운영의 어려움
- 고리1호기가 2022년 중반에 해체될 예정에 있으며, 부적절한 해체방법과 부적절한 예측은 과도한 국가 재원의 낭비를 초래하여 미래세대에 경제적 비용부담을 전가할 수 있음.
 - 2022년 고리1호기 해체시작 예정
 - 노후 원전 및 원자력시설 순차적 해체 예정

□ 기술개발 필요성

- 국내에서는 야외 대기확산실험 및 다양한 국내 대표 작물에 대한 전이 인자 실험 등 방사선환경영향평가를 위한 많은 사회·환경자료 축적 및 기술경험을 보유하고 있음.
- 국제원자력기구 (IAEA)의 신모델과 신자료에 축적된 기술경험을 융합하여 2007년 국제방사선방호위원회의 신권고 (ICRP Publication 103, 2007)에 부합한 모델개발을 통해 국제사회가 요구하는 기술기준에 부응하고 더불어 원자력기술 수출시 원자력기술도입국의 방사선방호기준에 적합한 도구를 적시적소에 제공함으로써 능동적으로 대처할 필요가 있음.
- 국내의 지정학적 특수성으로 한 부지에 여러 원자력시설의 운영되고 있고, 이로 인해 방사선환경안전에 대한 기술기준의 여유도가 점점 줄어들고 있는 실정이기 때문에 국내고유 특성을 고려한 상세 평가방법론 개발과 함께 방사선환경감시구축에 대한 종합적 재정립이 필요함.
- 원자력시설로부터 환경으로 방출되는 방사능은 극히 낮아 자연방사선준위와 구별하기 힘들며, 환경매질에서 측정도 쉽지 않음. 이에 따라 모델에 의한 예측결과를 입증하고 원자력이용에 대한 대국민 투명성을 확보하기 위해 극미량의 핵종측정기술과 아울러 자연방사능준위에 대한 자료구축이 필요함.
- 국내에서는 처음으로 원전1호기가 해체될 예정에 있으며, 해체에 따른 비용

뿐만 아니라 방사선적 환경영향의 조화로운 고려는 자연유산의 지속보존과 함께 국가 재원의 합리적 사용과 미래세대에 경제적 부담을 최소화하는데 공헌하므로 이에 관련한 연구개발이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 원자력시설 운영중 방사선환경영향평가 기술 향상

□ 기술의 정의

- 국제방사선방호위원회 신권고의 국내적용 해석기술
- 국내 원자력시설의 환경적 특수성을 반영한 방사선환경영향평가 모델개발 및 국내고유의 변수값 선정기술
- 환경 내 극미량의 극저준위 난분석 핵종에 대한 분석 및 해석기술
- 자연/인공 방사선준위 식별 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원자력시설의 운영 중 방사성유출물에 의한 환경영향평가기술 기반체계는 잘 정립되어 있으나, 국제사회의 새로운 자료의 축적과 과학적 현상의 재발견에 따른 방사선방호평가체계의 변화에 능동적으로 대처하지는 못하고 있음.
- 국내 방사선환경영향평가 모델 및 관련자료는 국외기술에 대부분 의존하고 있으며, 국내고유의 사회·환경적 특성이 반영된 자체 평가·해석·검증 기술은 부족한 실정임.
- 특히 국내 원자력시설은 복잡한 지형에 위치하고 있지만 평탄한 이상적인 지형에 적합한 단순 모델을 적용하고 있어 일반인의 이해부족과 함께 시민 단체의 왜곡된 해석으로 원자력 이용의 부정적 인식을 안겨줌.
- 1978년 국내 첫 상용원전인 고리1호기가 운영되었으며, 그동안 국내 방사선 환경감시기술의 발전으로 일정수준 미량의 핵종까지 분석, 측정할 역량을 보유하고 있으나, 사회적으로는 극미량, 난분석 핵종까지 요구하고 있음. 또한 그동안 축적된 자료를 종합적으로 해석하여 현상을 규명할 수 있는 능력 배양이 필요함.
- 국내의 지형학적 특성으로 동일부지에 다수의 원자력시설이 운영되고 있으며, 국민의 삶의 질 향상과 더불어 방사선환경안전에 대한 우려가 고조되고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 및 유럽 등 원전 선진국의 경우 원천기술을 확보하고 있으며, 방사선 환경방호에 대한 정부의 적극적인 투자 지원으로 세계적 조류에 능동적으로 대처하고 있음.
- 특히 유럽을 중심으로 사람 뿐 아니라 미래 세대에 훼손없는 자연유산을 물려주기 위해 야생 동식물에 대한 방사선방호까지 확장하여 활발한 연구를 진행 중임.
- 우리나라와 인접한 일본만하더라도 NIRS를 중심으로 사람에 대한 방호연구는 물론 야생동식물 방호를 연구를 한창 진행 중임.
- 방사성유출물의 환경 내 확산으로 인한 희석으로 극미량의 방사성물질에 대한 측정 및 분석은 매우 어렵지만 이를 극복하기 위한 측정·분석기술이 지속적으로 연구·개발이 되어 오고 있음.

□ 미래동향 예측

- 원자력/방사선 이용의 전제조건은 사람 (Public)과 환경 (Environment)의 방사선으로부터 보호임.
- 국내의 지형학적 특수성으로 한 부지에 여러 원자력시설이 운영되고 있거나 선설을 계획하고 있으며 방사성유출물에 대한 기술기준의 여유도 확보와 한 부지내 다수 시설의 운영에 대한 대국민의 수용성을 위해 정부의 적극적인 투자가 필요함.
- 우리나라는 명실상부하게 원전수출국으로서, 향후 원자력관련기술의 수출이 원활히 이루어지기 위해서는 기술수입국의 방사선방호 요건에 부합하는 기술의 확보가 필수적이므로 정부차원의 투자가 반드시 필요함.

□ 기술개발 수행체계

- 방사선환경방호는 기상·대기, 방사선방호, 방사능측정·분석, 농학 등 다 분야간에 유기적 수행체계가 중요함.
- 방사성유출물에 의한 환경영향의 예측, 이러한 예측결과를 입증하는 측정·분석, 방사선인체영향에 대해 전문적 지식이 부족한 일반인과의 의사소통 등 체계적이고 연계적인 수행체계의 구축이 필요함.
- 규제기관을 포함한 산·학·연 공동연구체계 구축

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 난분석/극저준위 핵종 측정	<ul style="list-style-type: none"> • 난분석/극저준위 방사성핵종 분리 및 측정장치 개발 • 난분석/극저준위 방사성핵종 분석기술 및 절차 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 난분석/극저준위 핵종 측정장치개발기술 • 난분석/극저준위 핵종 분석기술
• 환경방사선 빅데이터구축 및 핵종축적경향 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 환경방사선 측정 및 통합기술 개발을 통한 빅데이터 구축 • 예측 알고리즘 개발을 통한 핵종축적 경향 분석 체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 빅데이터 구축기술 • 핵종축적경향파악 알고리즘개발기술
• 국제기구 신권고 기반 주민선량평가 신모델	<ul style="list-style-type: none"> • 국제방사선방호위원회의 신권고에 기반한 국내 환경에 적합한 대표인 설정 및 최적 신모델 선정 • 규제이행을 위한 결정론적 및 일반인 이해를 위한 확률론적 신평가모델개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 대표인선정기술 • 결정론적 및 확률론적 주민선량평가기술
• 정상시 대기확산 모델 개선 및 검증	<ul style="list-style-type: none"> • 복잡지형 야외추적자 확산실험 및 풍동실험 수행 • 지형별 확산특이성 해석 및 국내고유 모델 변수의 모수화 	<ul style="list-style-type: none"> • 대기확산실험기술 • 국내대기확산특성 모수화기술
• 국제기구 신권고 이행 생물종 방사선영향평가모델 개선 및 전이계수실험	<ul style="list-style-type: none"> • 국내생태 특성에 적합한 환경방호기술 개발 • 주민 및 생물종 통합방호기술 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내특성적 생물종 방사선영향평가기술 • 전이계수실험기술
• 사회소통을 위한 산업시설 인체위해도 및 경제성 비교평가	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 주요 산업의 분류 및 인체위해도와 경제성 평가 • 각 산업별 특성을 반영한 객관적 위해도 및 경제성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 산업위해도 평가기술 • 위해도의 정량적평가기술

2) 원자력시설 해체 방사선환경영향평가 기술 확보

☐ 기술의 정의

- 원자력시설 해체 중 및 해체 후 방사선환경영향평가 모델개발
- 해체관련 특이 핵종 측정·분석 및 최적 측정 네트워크 구축
- 해체로 인한 사건/사고 시나리오 구성
- 의사결정지원을 위한 방사선환경영향의 정량화

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 22년 고리1호기를 시작으로 순차적으로 노후화된 원자력시설이 해체될 예정이다.
- 원자력시설의 해체의 물리적 기술은 일부 실용화단계 수준까지 도달하고 있지만, 해체 중 및 해체 후 방사선환경영향평가기술은 정부 정책결정권자 등의 시급성에 대한 이해 부족으로 아직 확보되어 있지 못한 실정임.
- 해체시에는 단순 해체비용 뿐 해당 해체기술의 적용으로 인한 주변의 환경적 영향까지 고려하여 최적의 해체방안을 결정하여야 하며, 이에 대한 정부 정책결정권자의 이해가 부족으로 관련 도구는 개발되고 있지 못한 실정임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 해체관련 선진국에서는 해체시 단순 해체비용 뿐 아니라 주변 환경에 미치는 영향을 반영하여 의사결정권자가 종합적으로 최적의 해체방안을 판단하여 선정할 수 있도록 지원해 주는 도구를 개발하여 활용해 오고 있음.
- 해체로 기인한 방사선안전성 확보는 물론 혹시 발생할지 모를 최악의 사건/사고 시나리오를 통해 국민에게 올바른 과학적 정보를 제공함으로써 방사선에 대한 대국민 수용성에 노력하고 있음.
- 미래세대에 경제적 부담을 최소화시키고 자연유산을 그대로 물려주는 것이 책임이자 의무라는 구호아래 해체 후 방사성핵종의 환경 내 장기 거동을 해석하고 이로부터 부지재활용 방안을 마련하기 위한 노력에 매진하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 국내 원전 1호인 고리1호기의 퇴역으로 ‘22년에 본격적인 해체가 시작될 예정이며, 이를 위해 국내에서는 관련한 다양한 필수기술 확보에 노력 중임.
- 일반 국민은 해체 행위 자체보다는 이로 인한 방사선환경영향에 관심을 집중하며, 대중의 수용성 측면에서 관련 기술의 확보는 시급함.
- 국내 원자력시설 해체산업이 점점 활성화되고 있는 시점이며, 해체로 인한 환경적 영향 및 의사결정지원에 활용될 수 있는 관련 도구의 개발이 시급하므로 정부 뿐 아니라 해당 산업체의 투자가 이루어 질 것으로 판단함.

□ 기술개발 수행체계

- 해체 중 및 해체 후 방사선환경영향평가 기술은 앞서 기술한 원자력시설의 운영 중 방사선환경영향평가 기술과 마찬가지로 해체로 인한 방사성유출물에 의한 환경영향의 예측, 이러한 예측결과를 입증하는 측정·분석 등의 연

계적인 수행체계를 구축함.

- 단순히 평가·측정 뿐 아니라 의사결정을 위한 이해당사자의 다양한 의견을 반영할 수 있는 체계구축이 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 해체중 방사선환경 감시 최적 네트워크 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 이동형 환경방사선감시포스트 구축 및 이를 활용한 최적 감시 기술 개발 • 해체부지 및 작업환경에 따른 최적 방사선환경 감시망 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 이동형 환경방사선감시 포스트 구축 기술 • 최적 방사선환경 감시망 구축기술
• 원자력시설 해체 중 사건/사고 시나리오 개발 및 방사선환경영향 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 국외 사건/사고 시나리오,영향 분석, 국내 원전별 특성 파악 • 사건/사고 시나리오 도출, 주변 방사선 영향 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 해체 사건/사고 시나리오 선정기술 • 사고/사고로 인한 방사선영향평가 기술
• 최적 해체방안 의사결정지원 방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 해체로 인한 방사선환경영향평가 모델개발 • 해체비용과 해체방법에 따른 선량저감 등을 고려한 최적 해체방안 의사결정방법론 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 해체로 인한 방사선환경영향평가모델개발기술 • 최적 해체방안 의사결정 지원 방법론개발기술
• 해체 후 생태계 핵종 장기거동 예측 및 방사선영향평가 모델	<ul style="list-style-type: none"> • 해체 후 부지 생태계 핵종장기거동 예측모델 • 해체 후 장기 인체선량평가 및 생태계 건전성평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 생태계내 핵종장기거동모델링기술 • 생태계건정성평가기술
• 부지 재활용방안 의사결정지원 방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 해체 후 부지재활용 방안 특성 연구 • 최적 부지재활용 결정지원 방법론 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 부지재활용방안도출기술 • 부지재활용 의사결정지원 방법론 개발기술

4.4.3 정상 및 비정상 시 개인 방사선 방호

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 최근 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 수정체 선량의 선량한도를 하향 권고하는 등 지속적으로 신권고를 발행하고 있으나 현재 국내 개인방사선 방호체계는 1990년에 발행된 ICRP 권고에 기반하고 있음.
- 원자력 및 방사선 이용 시설의 방사선 누출 사고, 방사성 물질을 이용한 테

러 우려 등 방사선 비상사태의 발생 위험이 증가하고 있음. 이와 같은 대규모 비상 시 즉각적 치료가 필요한 피해자를 신속히 구분하여야 하나 피폭 여부를 신속히 판단할 기술이 미비함. 유럽연합에서는 체르노빌 사고 이후 관련 기술을 지속적으로 개발 중임.

- 증기발생기 등 원자력시설 내 고준위 방사선구역에 위치한 원자력설비를 유지하고 보수하는 작업에서 작업자의 피폭량이 상당히 높으나 이러한 고 피폭 작업 시 전체 작업과정에서의 선량을 실시간으로 계산할 수 있는 기술이 없어 초과 피폭의 우려가 상존하며 이에 따른 작업 능력의 저하가 발생할 수 있음.
- 방사선의 의료적 이용기술의 발전으로 의료방사선 피폭이 증가함에 따라 보다 정확한 피폭선량 관리의 필요성이 증대됨.
- 비약적으로 발전하고 있는 정보통신기술(ICT)을 방사선 방호에 접목하여 보다 신뢰도 높은 개인방사선량 방호 전략 구축이 필요함.
- 최근 사회적 이슈가 되고 있는 라돈을 포함한 다양한 방사성 핵종에 대해 한국인의 생체역동학적 모델 및 자료를 확보하고 이를 활용한 입자크기, 형태, 연령별 대사 차이에 의한 내부피폭 선량평가 기술 개발이 필요함.
- 현재 방사선방호 장비에 대한 규격화된 성능시험 방법이 존재하지 않으며 방호장비의 사용이 확대되고 종류와 재질이 다양해짐에 따라 방호장비의 성능을 평가하기 위한 체계적인 기준을 마련할 필요가 있음.

□ 기술개발 필요성

- 국제적 조화성 확보와 방사선 방호의 합리성 유지를 위해 최신 ICRP 권고를 바탕으로 한 국내 개인방사선 방호체계 구축을 위한 연구가 시급히 필요함.
- 방사선 피폭의 합리적 최소화(ALARA) 원칙을 추구하고 방사선안전관리의 효율성을 극대화하기 위해 최근 비약적으로 발전하고 있는 정보통신기술(ICT)을 방사선 방호에 접목하는 연구를 시급히 수행하여야 함.
- 국내에서는 인체 내에서의 방사성핵종에 대한 생체역동학적 실험 데이터가 구축되지 않아 한국인의 연령별 생체역동학적 모델 및 자료가 부재하여 ICRP 표준인의 생체역동학적 모델 및 자료에 의존해야 하는 실정이므로 이를 확보하기 위한 기술 개발이 시급함.
- 증기발생기 등 원자력시설 내 고준위 방사선구역에 위치한 원자력설비를 유지하고 보수하는 작업 등 고 피폭 작업을 위한 사전 mockup training 과정에서 작업자의 움직임을 반영한 4D 몬테카를로 전산모사를 수행함으로써

전체 작업과정에서의 선량을 실시간으로 계산하고 이를 기반으로 방사선작업을 최적화하여 선량을 최대한 낮출 수 있는 기술 개발이 필요함.

나. 세부기술 내용

1) 개인 피폭 방사선량 평가체계 고도화

□ 기술의 정의

- 최신 ICRP 권고에서 선량한도가 낮아진 수정체 선량을 평가 관리할 수 있는 기술
- 증기발생기 내 작업 등 고선량 피폭 우려가 매우 높은 작업 시 전체 작업과정에서의 선량을 실시간으로 계산할 수 있는 기술
- 원자력 시설, 가속기 시설, 중성자의 의료적 이용(BNCT)시설에서 중성자에 의한 피폭선량을 보다 정확하고 신속하게 평가하기 위한 보너구 자동변환 시스템
- 방사선량의 공간적 시간적 분포를 시각화하여 작업자에게 실시간으로 전달하는 기술
- 한국인의 연령별 생체역동학적 특성이 고려된 내부피폭 선량평가 기술
- 한국인 소아 및 임산부 신개념 메시(mesh)형 인체팬텀모사 및 선량환산인자 생산 기술
- 최신 ICT 기반 방사선/능 능동 측정 자율 AI 로봇으로 원자력시설의 작업장 환경 감시를 자동화하여 통합 제어하는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 원자력안전법에서는 수정체 선량한도에 대한 규정이 있으나 실질적으로는 보고 및 관리 감독 체계가 없는 상황이며 이를 측정 및 평가할 수 있는 기술이 미비한 실정임.
- 한국인 및 국제표준 인체팬텀을 개발한 바 있으나, 피폭자의 자세나 움직임이 고려된 인체팬텀은 아직까지 개발된 바 없어 작업과정에 대한 실시간 선량계산이 불가능함.
- 중성자 정량화를 위해 필요한 스펙트로스코피 기술로서 보너구 측정시스템이 주로 이용되고 있으나 그 크기와 개수가 제한적이므로 측정 불확도가 상당히 높은 수준임.

- 국내에서도 방사선작업종사자에 대해서 최근 발표된 ICRP 신권고에 따른 내부선량평가 체계를 구축하기 위해 노력하고 있으나, 한국인의 연령별 내부피폭선량 평가 관련 연구는 이루어지지 않고 있음.
- 한국인에 대한 해부학적 특징을 반영하여 한국인 성인 남녀에 대한 신개념 메시형 인체팬텀을 개발한 바 있으나, 한국인 소아 및 임신부에 대한 인체팬텀은 아직까지 개발된 바 없음.
- 다양한 목적으로 ICT 기반 자율 AI 로봇 기술개발이 활발히 이루어지고 있으나 방사선 작업장에 대한 방사선/능 환경감시 업무는 인력에 의해 수동으로 수행되고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- ICRP 신권고에서 수정체 선량한도가 대폭 낮아짐에 따라 각 국가에서는 이를 반영하기 위한 연구가 활발히 수행 중이며 두부 머리 밴드형, 안경테 부착형 등 다양한 형태의 수정체 선량계를 개발함.
- 오크리지 국립 연구소(ORNL) 및 런셀러 폴리테크닉 대학교(RPI) 연구팀이 인체팬텀의 관절 부위를 분리하여 팔과 다리를 움직이는 연구를 수행한 바 있음.
- 보너구를 사용한 스펙트로스코피 기술은 널리 활용되고 있으며 제한적 크기와 개수의 보너구를 대체할 자동시스템의 개발 연구가 수행 중임.
- OIR(Occupational Intakes of Radionuclides) 보고서에 방사선작업종사자 내부선량평가와 관련된 핵종별 데이터가 발표되었으며, 세계 각국에서는 이와 같은 신모델 및 신권고에 따른 내부선량평가 체계를 구축하기 위해 노력하고 있음.
- ICRP에서는 미국 플로리다 대학교(UF) 연구팀과 미국 국립암연구소(NCI)에서 공동으로 개발한 소아 및 임신부 인체팬텀을 기준 인체팬텀으로 지정하고, 이를 이용하여 다양한 선량환산인자를 산출할 계획임.

□ 미래동향 예측

- 현 국내 원자력안전법에는 수정체 선량한도가 규정되어 있으나 심부선량한도와 동일한 수치로써 심부선량한도가 관리될 경우 수정체 선량한도 또한 만족하는 것으로 추정하고 있음. 그러나 ICRP의 신권고에서 수정체 선량한도가 대폭 낮아졌으므로 이를 국내법에 반영할 경우 수정체 선량 측정 및 평가를 위한 하드웨어와 평가 알고리즘이 반영된 소프트웨어의 준비가 필

수적이 될 것임.

- 비약적으로 발전하는 ICT 기술을 접목하여 인체팬텀의 자세를 사실적으로 변형하여 작업자의 움직임을 고려한 선량계산을 통해 전체 작업과정에서 시간별로 선량을 계산할 수 있는 연구가 진행될 것으로 예상됨.
- 증강현실 기술이 접목된 방사선량의 공간적 시간적 시각화를 위한 기술이 개발될 것으로 예상됨.
- 다양한 형태의 AI기반 로봇이 피폭 최소화를 위한 방사선 작업장 환경 감시 업무를 수행할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 다양한 상황 및 목적의 개인 피폭 방사선량 평가 기술을 개발하기 위해서는 하드웨어와 소프트웨어뿐만 아니라 생체학적 연구가 동반되어야 가능하므로 다분야의 협동연구 수행 체계가 필수적임.
- 수정체 선량평가 기술 개발을 위해 기존 개인선량계 물질 제조 기술을 활용하고 실제 작업환경에 대한 분석을 통하여 하드웨어를 개발한 후 선량평가 알고리즘으로 최적화 함.
- 한국인 임신부 및 소아의 의료영상 데이터를 기반으로 한국인 임신부 및 소아 인체팬텀을 ICRP 기준 인체팬텀과 같은 수준으로 제작하고 이를 바탕으로 선량환산인자를 생산함.
- 로봇 개발 기술 분야, 작업장 방사선 방호 최적화 기술 분야와 인공지능 분야의 동시적 협업관계 구축을 통한 작업장 방사선/능 능동 관리 AI 로봇 및 통합제어 시스템을 개발함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • ICRP 신권고 반영 수정체 및 말단선량 평가체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 수정체 및 말단선량 측정용 선량계 • ICRP 신권고 반영 수정체 및 말단선량 평가 절차 	<ul style="list-style-type: none"> • 수정체 선량 측정용 선량계 및 평가 절차
<ul style="list-style-type: none"> • 중성자장 정량화를 위한 보너구 자동변환 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 보너구 자동변환 장치 • 보너구 자동변환 시스템을 이용한 중성자장 정량화 검증 절차 	<ul style="list-style-type: none"> • 보너구 자동변환 장치 • 중성자장 정량화 알고리즘
<ul style="list-style-type: none"> • 증강현실 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 컴프턴 카메라를 이용한 방사선량 	<ul style="list-style-type: none"> • 대면전 멀티 컴프턴

기반 작업현장 방사선량 시각화 기술 개발	측정기술 • 대면적 멀티 컴프턴 카메라 개발 및 3D 영상 기술	카메라 • 컴프턴 카메라 연계 3D 영상기술
• 소아 및 임산부 신개념 메시(mesh)형 인체팬텀모사 및 선량환산인자 생산	• 한국인 의료영상 데이터를 기반으로 한 한국인 소아(신생아 및 1, 5, 10, 15세) 인체팬텀 제작 및 선량환산인자 생산 • 한국인 임산부 의료영상 데이터를 기반으로 한 한국인 임산부(임신 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 38주) 인체팬텀 제작 및 선량환산인자 생산	• 한국인 소아 및 임산부 의료영상 데이터 기반 인체팬텀 제작 기술
• 모션캡처 기반 4D Monte Carlo 선량계산 및 고방사선 작업 최적화 기술	• 모션캡처 데이터에 따라 메시형 인체팬텀의 자세를 자동으로 변형시킬 수 있는 기술 • 4D 몬테칼로 전산모사를 통해 전체 작업과정에서 시간별로 작업자의 선량 계산	• 국내특성적 생물종 방사선영향평가기술 • 모션캡처 기반 메시형 인체팬텀의 자세 자동 변형 기술
• 미시적(micro-nano) 수준의 방사선 인체 전산 모사기술 개발	• MICRO 수준의 인체(주요 대상장기별) 전산모델 개발 • 방사선 표적 염색체-DNA 배치모델 개발	• 인체 주요 장기별 MICRO 수준 전산모델
• AI 기반 신개념 개인선량평가 알고리즘 기술	• 국내 방사선 사용환경에 대한 특수성 분석 • AI 기반 개인선량평가 알고리즘	• AI 기반 개인선량평가 알고리즘
• 4D 영상 기반의 내부피폭 선량평가 기술 개발	• 체내 방사선 방출 4D 영상 적용가능 내부오염 방사성핵종 결정 • 체내 거동변화 추적을 위한 방사성핵종별 실험모델 수립	• 체내 방사선 방출 4D 영상 기반 내부오염 평가기술
• 신 방사선방호제 개발 및 효과 적용 내부선량평가 모델 개발	• 신규 방사선방호제 적용 내부선량평가 실험모델 수립 • 방사선방호제 종류별 체내 주요장기 전이함수 평가	• 신규 방사선방호제 개발
• 한국인의 신체 특성이 고려된 내부피폭선량평가 기술	• 신 국제권고에 따른 연령군별 예탁유효선량 환산계수 확보 • 한국인 연령군별 방사성핵종 섭취잔류배설분율 평가 자료 확보	• 한국인 연령군별 방사성핵종 섭취잔류배설분율 평가
• WBC 등 체내 방사능 측정시스템에 대한 가상교정(virtual calibration) 기술 개발	• 전산모사 기반의 다양한 수검자 체형 및 자세를 반영한 체내 방사능 측정시스템 가상교정 기술 설계 • 실측을 통한 체내 방사능 측정시스템 교정결과를 이용한 가상교정 기술 검증 및 프로그램	• 체내 방사능 측정시스템 교정결과를 이용한 가상교정 기술
• ICT 기반 방사선/능 능동 측정 자율 AI로봇 및 통합제어 시스템 개발	• 방사선 안전 관리용 능동 측정 자율 AI로봇 개발 • 로봇기반 방사선 안전 관리 기법 및 통합제어시스템 개발	• 방사선 안전 관리용 능동 측정 자율 AI로봇
• 개인방사선방호	• 개인방사선/능 방호장비 분류체계 및	• 개인방사선/능 방호장비

장비 성능시험 평가시스템 구축	방호 성능 평가 기술기준 • 방호장비 성능평가 체계 및 선택기준안 제시	성능평가 체계
• 원전 주변주민 (내/외부) 방사선량 주기적 모니터링 기술 개발	• 원전 주변주민 조사를 위한 대표군 설정 • 주기적 방사선량평가 모니터링 프로토콜 개발	• 방사선량평가 모니터링 프로토콜
• 방사선량 추적평가용 신규 생물지표 및 인체 바이오센서 시스템 개발	• 방사선량 추적 평가용 생물지표/바이오 센서 평가대상 설정 • 생물지표/바이오센서 성능평가 실험모델 수립	• 방사선량 추적 평가용 생물지표/바이오 센서

2) 비정상 시 피폭 방사선량 복원체계 및 위해도 평가 기술

□ 기술의 정의

- 방사선사고 시 선량계가 없는 경우에도 관련자의 방사선 피폭 여부를 신속하게 측정 판독할 수 있는 물리적/생물학적 선량평가 융합기술
- 신개념 메시(mesh)형 인체팬텀 기반 전산모사 이용 피폭 시나리오별 선량평가 기술
- 방사선사고 또는 테러 상황 시 다수 피폭자 선량평가를 위한 국내 가용자원 가동 네트워크 구축
- 한국인의 고유 특성이 반영된 방사선 피폭량에 따른 암 발생의 인과확률 평가 모델 수립 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 물리적 선량평가 기법으로써 피폭자의 휴대전화 등 소지품을 이용한 기법이 개발되고 있으나 이는 인체가 피폭된 선량에 직접 대응되지 않는다는 한계가 있음.
- 염색체 이상을 이용한 생물학적 선량평가 기법이 정립되어 있으나 현 수준에서는 약 1주일의 긴 판독시간을 필요로 하므로 사고 시 피폭자 신속 구분에 적용하기에는 어려움이 있음.
- 생체 시료인 치아에 물리적 선량평가 기법 중 하나인 전자상자성공명(EPR)법을 적용한 연구는 일부 수행된 바 있으나 최저검출선량이 매우 높음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 독일 Helmholtz 연구소, 프랑스 IRSN, 영국 Public Health England, 덴마크 Denmark Technical University, 미국 Oklahoma State University 등 선진 각국에서는 체르노빌 사고 이후 방사선사고 및 테러 상황 등 비상 시 피폭자를 신속히 구분하기 위한 연구를 수행해 오고 있으며, 유럽연합 차원에서 유럽방사선량평가그룹(EURADOS)을 결성하여 효율적 협업체계를 구축하고 있음.
- RENEB (Running the European Network for Biodosimetry) : 유럽 생물학적 선량평가 연구그룹으로 Multibiodose project 등을 거쳐 2017년 독일에 법인을 설립하여 유럽지역 방사선사고 대비 생물학적 선량평가 기술의 발전, 교육 및 표준화를 추진하고 있음.
- 혈액 임파구의 Raman 분광을 이용한 선량복원 연구가 보고된 바 있으나, 치아, 손발톱 등의 시료에 대해 Raman 분광법을 적용한 선량복원 사례는 없음.

□ 미래동향 예측

- 생체 시료에 물리적 선량평가 기법을 적용하고, 염색체 이상 이외의 신규 방사선 표지자를 개발함으로써 선량복원 하한이 확대되고 보다 신속한 기법이 개발될 것으로 예상되며, 이를 바탕으로 사고 대응 정책 결정자에게 필요 정보를 신속히 제공할 수 있을 것으로 예상됨.
- 인공지능, 딥러닝 기법을 활용하여 선량복원 시료의 이미지 분석 자동화 시스템이 개발되어 사고 시 선량평가 소요 시간이 획기적으로 단축될 것으로 예상됨.
- 원자력발전소 밀집지역인 동아시아(한국, 일본, 중국) 지역에서의 대규모 방사선 누출 사고 시 협동 대응 네트워크가 수립될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 생물학적 선량평가 기법과 물리적 선량평가 기법을 융합할 수 있는 기술 개발을 위하여 기존 양 분야 전문가 집단이 협동하여 요소기술을 개발 및 융합하고 이를 검증함.
- 비상 시 선량복원에 활용할 수 있는 장비 보유 기관 간 상호비교 연구를 지속적으로 실시하여 각 기관의 선량복원 신뢰도를 일정 수준 이상으로 유지함으로써 실제 상황 시 즉각 가동이 가능한 네트워크를 구축함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 물리적 선량평가 기술체계 구축(TL/OSL, EPR, Raman 분광) 	<ul style="list-style-type: none"> 생체시료의 물리적 선량측정기법에 대한 선량계적 특성 자료 획득 생체시료 Raman 분광, TL/OSL 측정용 장치 개발 및 표준 프로토콜 확립 	<ul style="list-style-type: none"> 생체시료를 이용한 피폭 방사선량 측정 기법
<ul style="list-style-type: none"> 생물학적 선량평가 기술체계 구축(염색체 변형이상, 방사선 반응 단백질, 측정자동화) 	<ul style="list-style-type: none"> 방사선 사고 시 활용 가능한 바이오마커의 선별 바이오마커를 활용한 기술 표준화 및 자동화 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 신규 바이오 마커 발굴 및 측정 자동화 시스템
<ul style="list-style-type: none"> 메시(mesh)형 인체팬텀 기반 전산모사 이용 피폭 시나리오별 선량평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> 메시형 인체팬텀을 이용한 사후선량전산모사기법 개발 피폭 시나리오별 선량평가기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 메시형 인체팬텀을 이용한 사후선량전산모사기법
<ul style="list-style-type: none"> 다수 피폭자 선량평가를 위한 국내 가용자원 가동 네트워크 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 사후방사선량 각 기법별 상호비교시험 실시 및 조화성 확보 대규모 방사선 사고 대비 사후방사선량평가 네트워크 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 사후방사선량평가 네트워크 구축
<ul style="list-style-type: none"> 방사선실용량 기반 복합방사선장 인체 장기선량(organ dose) 재구성 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> 고 피폭 복합방사선장 선량재구성 평가대상 및 시나리오 선정 선량재구성을 위한 주요 장기별 선량환산 지침 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 선량재구성을 위한 주요 장기별 선량환산기술
<ul style="list-style-type: none"> 한국인 고유 특성 반영 방사선-암 위험 평가 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 종사자 피폭특성반영 그룹별 코호트 구축 한국인 고유 특성 반영 방사선-암 위험 평가 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 한국인 고유 특성 반영 방사선-암 위험 평가 모델

4.4.4 방사선 비상 및 오염대응

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 2011년 일본의 후쿠시마 원전사고의 교훈으로 국제기구에서는 방사선 비상대응 강화의 중요성을 인식하고 있음.
- 비상대응을 효과적으로 수행하기 위해서는 계획을 적절히 수립해야하

고, 수립된 계획을 실질적으로 이행할 수 있는 다양한 연구·개발이 이루어져야 함.

- 후쿠시마 사고 시 예기치 못한 전기의 미공급으로 일본의 국가방사능재난대응시스템 SPEEDI가 제대로 활용되지 못함.

- 일본의 문화적 특성으로 안전체계에서 많은 허점을 노출함.

○ 또한 불가피하게 환경이 방사성물질로 오염되었을 경우 이에 따른 방사선 영향 뿐 아니라 경제적·사회적 피해를 최소화할 수 있는 연구가 이루어져야 함.

- 일본은 사고 후 초기 비상대응을 위해서는 많은 연구개발비를 투자 (SPEEDI 개발에 1,000억 이상 투자)하였으나, 방사능 오염 후 중장기 오염관리를 투자는 소홀히 하였음.

- 후쿠시마 사고로 주변지역 피해에 대한 중·장기 대응책이 마련되지 않아 많은 경제적·사회적 혼란이 가중되었음.

□ 기술개발 필요성

○ 일상생활에서는 예상치 못한 다양한 사건/사고가 발생할 수 있으며, 후쿠시마 원전사고도 마찬가지로 철저하게 예방체제가 구축되어 있었지만 복합 자연재해로 인한 전기의 미공급으로 인한 방사선원 자료가 제대로 제공되지 않아 방사선에 의한 영향 뿐 아니라 경제적·사회적으로 막대한 피해를 초래함.

○ 후쿠시마 사고는 국가방사능재난대응시스템이 처음으로 실질적으로 적용된 사례이며, 앞서 언급한 바와 같이 신뢰성 있는 방사선원 자료가 제대로 제공되지 않아 결과에 있어 많은 오차를 초래함.

○ 그럼에도 불구하고 교훈을 통해 약점을 도출하고 보완함으로써 보다 실질적 활용이 가능하도록 비상대응시스템을 보완하는 노력이 필요하다는데 국제사회는 인식을 공감하고 있음.

○ 또한 후쿠시마 사고로부터 실질적 비상계획 수립의 교훈과 방사성물질의 환경오염 이후 피해 저감을 위한 중·장기적 방사능오염대책 수립을 위한 요소기술개발의 필요성이 도출되었음.

○ 국내의 지형학적 특수성으로 비록 후쿠시마 원전과 같은 대형사고 발생 가능성은 극히 희박하다고 하더라도 사전에 계획을 수립하고 가상 사고 시나리오를 구성하여 훈련하고 이로부터 약점을 발견하고 보완함으로써

써 항시 만반의 준비를 갖추는 것은 중요함.

- 한편 국내는 원전이외의 다양한 원자력/방사선 관련시설이 운영 중에 있으며, 이에 대한 사고 발생적 특성과 위해도를 면밀히 분석하여 원자력/방사선 시설별 맞춤형 비상계획을 수립할 필요가 있음.

나. 세부기술 내용

1) 방사선비상계획 향상

☐ 기술의 정의

- 국가방사능방재체계 재정립
- 원자력/방사선사건/사고 시나리오 구성
- 방사선비상계획 수립을 위한 핵심 요소모델 개발

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 후쿠시마 원전 사고 이후 국내 방사선비상계획은 국가차원의 연구투자로 선진국 수준으로 많이 개선되었으나, 실효성에 대해서는 여전히 의문이 있음. 특히 인구밀도가 높은 국내 현실상황 하에서 방사선비상계획구역의 광역화로 주민보호조치 실효적 이행성에 대해서는 충분한 검토가 필요함.
- 국내는 다양한 원자력시설이 운영 중에 있으나, 대부분의 경우 원전의 비상 대응체계에 준하여 실시하고 있어 과도한 비효율적 재원의 낭비도 상존함.
- 한반도 주변으로 인접국의 원자력시설이 위치하며, 국내는 물론 국외 원자력사고에 대비한 비상계획수립이 필요함.
- 우리나라는 지정학적 위치로 다른 국가 간 전문가 의사소통이 원활하지 못하며, 대부분 국내 전문가 간 의사소통에 한정되어 있어 다양성에 있어 불리한 여건임.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국제기구에서 후쿠시마 원전사고의 교훈을 바탕으로 새로운 방사능방재체제수립을 회원국에 권고하고 있으며, 이와 관련하여 미국 및 유럽 등 원전 선진국에서는 자국의 지정학적 및 환경적 특성을 고려하여 보다 실효적 방사선 비상계획체계를 재수립하였고 약점에 대해서는 지속적으로 보완하고 있음.

- 원전 선진국은 원전기술의 확보로 결과자료 해석능력의 우수성과 함께 지정학적 조건으로 국가 간 전문가 소통이 이루어지고 있음.

□ 미래동향 예측

- 후쿠시마 사고이후 국내에서는 원자력이용에 대한 막연한 불안감이 한층 고조되어 있음.
- 그동안 국내는 지형학적 조건으로 자연재해의 위험으로부터는 비교적 자유로웠으나 기후변화 (미세하지만 지진대 변화 등 포함) 등으로 자연재해가 빈번히 발생하고 있으며, 선제적 예방이 중요하다는 정부의 정책에 국민적 공감대를 형성하고 있음.
- 후쿠시마 원전사고와 같은 대형사고가 국내에서 발생할 가능성은 극히 낮지만 투자대비 효용성 관점의 근시안적 접근보다는 미래의 위험성에 선제적으로 대비하는 국가적 차원의 지속적 지원이 이루어 질 것으로 예상함.
- 원자력사고에 대한 비상계획은 단지 원자력산업에만 국한하지 않고 관련 원전기술을 일반산업시설에 적용할 수 있기 때문에 부가가치는 매우 높음.

□ 기술개발 수행체계

- 후쿠시마 사고 경험으로 얻은 국제기구의 권고를 교훈을 바탕으로 국내 지형학적·환경적 특성에 적합한 방사선비상계획 수립을 강화하기 위해서는 원자력분야 뿐 아니라 자연재해 대응수립 관련 전문가와 전문기관(행안부, 기상연구소, 해양연구소 등) 간의 유기적 연구협력 및 협조체계가 필요함.
- 자연재해는 국내 뿐 아니라 전 세계적으로 다양한 경험이 있었으며, 이에 따른 교훈의 반영은 원자력분야에 있어서 매우 중요한 자산이 될 것임.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 방사능방재훈련 향상 가상 시뮬레이터 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 방사선비상계획구역내 인프라/인구구조 등 기반자료 수집, 복합재난, 동시사고, 원전중대사고, 원자력사고 등 각종 사고시나리오 개발 자료수집/개발정보, 각 기관별 업무분장, 매뉴얼/절차 등을 반영한 반응형 방재훈련 가상시뮬레이터 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 사고정보 수집 및 분석기술 가상시뮬레이터 개발기술
<ul style="list-style-type: none"> 국제기구 신권고 기반 	<ul style="list-style-type: none"> 신권고 기반 선량개념 등 기술기준 개선방안 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 신권고 기술기준 분석 및 적용기술

국가방사능방재 체계 수립	• 신권고 기반 국가방사능방재체계 개선방안 개발	• 국가방재체계 개선기술
• 원자력시설 차등적 방사선비상발령 기준 및 대응설비요건 수립	• 차등적 방사선비상발령기준 설정 기술기준 개발 • 차등적 비상대응설비요건 개발	• 방사선비상발령 기술기준 개발기술 • 비상설비요건개발기술
• 원자력시설 실효적 사고시나리오 개발	• 원자로시설의 실효적 사고시나리오 개발 • 비원자로시설의 실효적 사고시나리오 개발	• 원전 사고시나리오 개발기술 • 비원전 사고시나리오 개발기술
• 비상계획구역 유효성 평가 방법론	• 비상계획구역 설정을 위한 사고평가 방법론 개발 • 국내 원자력시설 부지의 지형학 및 사회적 특성을 반영한 비상계획구역 설정의 타당성 입증 및 개선방향 도출	• 사고평가방법론 개발기술 • 국내 비상계획구역 설정의 타당성 입증기술
• 방사선사고/방사능 테러 시나리오 및 대응지침 개발	• 방사선사고/테러 시나리오 도출, 국제기구 및 선진국 최신 대응 지침 현황 파악 • 시나리오별 예상 피해(방사선학적, 경제적) 평가 • 방사선 사고/테러 초동대응(경찰, 소방 등) 지침 및 수습복구대응(정부, 지자체, 전문기관) 지침 개발	• 원전이외의 방사선사고 시나리오 개발기술 • 사고영향평가기술
• 주변국 원자력 사고시나리오 및 대응지침 개발	• 국내에 영향을 미치는 주변국 원전 정보 획득 및 선원항 평가 • 광역 기상자료 분석 및 국내에 미치는 방사선 영향 평가 • 국내 기상 및 농경 환경을 고려한 사고시나리오에 따른 대응지침 개발	• 주변국 원전 사고시나리오 개발기술 • 광역 방사선영향평가기술

2) 방사선비상대응 기술 향상

□ 기술의 정의

- 광역 상세 방사성물질의 이동 및 확산 예측기술
- 긴박한 상황에서의 심리적 행동모사와 최신 ICT 기술을 융합한 방사선비상 대응 결정지원 요소모델
- 비상대응 의사결정 오류를 최소화하는 신속·정확한 방사능환경탐사 및 가시화

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국가원자력재난관리시스템 AtomCARE가 2000년 초에 한국원자력안전기술

원 (KINS)에 구축되어 지속적으로 개선되고 있으며, 특히 H/W에 있어서는 선진국 수준임.

- 후쿠시마 사고 이후 광역에 대해서 평가할 수 있는 모델체계는 구축되어 있으나, 신뢰도 향상을 위한 모델의 개선 및 검증 등의 연구개발을 준비 중임.
- 국내는 예측능력은 우수하나, 예측결과를 해석하고 최상의 판단을 위한 전문능력은 선진국에 비해 부족한 실정임.
- 후쿠시마 사고와 같이 전력이 미 공급되어 방사선원을 알지 못하는 경우에도 신속히 예측할 수 있는 다양한 방안에 대해 전문가의 고민이 필요함.
- 원전 이외의 다양한 원자력시설 (방사능테러 포함)에 대한 비상대응관련 연구개발에 대해서는 다소 미진함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 사고 대응을 위한 수집된 자료 (방사선원, 예측 및 실측결과 등)에 기반하여 종합적으로 해석하고 판단할 수 있는 인재 양성에 과감한 지원을 하고 있음.
- 국내와 비교하여 결과의 해석 및 판단 능력의 우수성은 원천기술 확보를 위한 국가의 장기적 투자의 결과임.

□ 미래동향 예측

- 후쿠시마 사고이후 국내의 빈번한 자연재해 (지진, 해일, 홍수 등)로 원자력 이용에 대한 막연한 불안감이 한층 고조되어 있음.
- 재해로부터 국민 안전의 보장은 정부의 최우선 정책으로 많은 지원이 있었지만 재해의 다양성으로 예상치 못한 한계에 봉착하는 것도 사실임.
- 후쿠시마 원전사고와 같은 대형사고가 국내 원전의 특성 및 지형학적 조건 등으로 발생할 가능성은 극히 낮지만 다양한 원인으로부터 발생될 수 있는 만일에 대비한 준비와 대응 체계를 통해 그 한계를 극복하는 것이 중요함.
- 국내의 강점인 ICT 기술의 접목과 자연재해의 경험을 반영한다면 원자력/방사선 비상대응기술은 한층 진일보할 것임.
- 원자력사고에 대한 대응기술은 단지 원자력산업에만 국한하지 않고 관련 원천기술을 일반산업시설의 사고대응에 적용할 수 있기 때문에 부가가치는 매우 높음.

□ 기술개발 수행체계

- 원자력사고시 피해를 최소화하기 위해서는 최상의 과학적 지식과 경험의 바탕 하에 실효적인 대응기술의 선제적 개발이 필요함.
- 방사능방재는 기상·대기, 방사선방호, 방사선/능측정·분석, 농학, 경제학, 심리학, ICT 등 다분야의 전문지식과 유기적 연계가 필요함.
- 원자력관련 산·학·연(규제기관 포함) 뿐 아니라 정부의 재난관련기관(행안부, 기상연구소, 해양연구소, 소방방재청, 식품의약품 등)간의 다양한 경험의 교환과 유기적 협조체계가 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 국가 가용자원 활용 신속 방사선비상대응 네트워크 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 가용자원을 활용한 신속 방사선비상대응 최적화 기술개발 • 국가 가용자원의 비상대응체계 편입절차 확립 및 국가 방사선비상대응 인프라 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 측정자료기반 비상대응최적화기술 • 방사선비상대응 국가인프라구축기술
• 국가재난대응시스템 실효적 운영체계 개선	<ul style="list-style-type: none"> • SIDS-POMS 통합 시스템 개발 • 사회지리정보기반 주민보호 지리정보시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 사고정보분석기술 • GIS 활용 주민보호조치 결정지원기술
• 무인 방사선탐사시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 무인 탐사시스템기반 방사선비상대응 기술개발 • 무인 방사선탐사시스템을 이용한 비상대응체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 무인방사선탐사시스템개발기술 • 비상대응 현장적용기술
• 광역에너지 방사능오염환경 삼차원 영상화	<ul style="list-style-type: none"> • 대면적 하이브리드 감마선 영상장치 설계 및 제반 기술, 운용 기술 확보 • 대면적 하이브리드 감마선 영상장치 제작 및 성능 평가, 현장 적용성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 환경오염 영상장치개발기술 • 환경오염 영상화기술
• 환경탐사자료 기반 방사선원 신속예측 방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 환경모니터링자료 연계 선원항 평가기술개발 • 선원항 평가모델 검증 및 신속예측기법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 사고선원항 평가기술 • 고신뢰성 신속예측 기술
• 원자력사고시 3차원 대기확산모델 개선 및 검증	<ul style="list-style-type: none"> • 원전부지 주변 야외확산실험 결과를 이용한 확산예측 검증 • 다중기상·확산모델 기반 확률론적 대기확산 예측기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 야외확산실험기술 • 확률론적 평가기술
• 원자력사고시 3차원 해양확산모델 개선 및 검증	<ul style="list-style-type: none"> • 우리나라 고유 환경 해양확산모델 개발 • 해양확산모델 검증 및 해양 생태계 영향평가 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 해양확산모델 개발기술 • 해양확산모델 검증기술
• 긴급상황 교통흐름모사 및 최적 통제 방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 사고해석을 통한 주민소개지 설정 및 소개 집결지 검토를 통한 분석대상지 환경분석 • 환경분석결과를 근거 주민소개 수단 적용 및 원자력시설 주변지역 교통상황예측 모델개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 급박한 심리적 상황을 반영한 교통흐름모사기술 • 최적 교통통제 제시 기술
• 신속 주민보호조치 의사결정지원 방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 평가/진단 기반 주민보호조치 의사결정지원 방법론 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 정보 분석 및 해석 기술 • 신속 주민보호조치

	<ul style="list-style-type: none"> • 측정/현황 기반 주민보호조치 의사결정지원 방법론 개발 	결정지원기술
<ul style="list-style-type: none"> • 원자력사고 방출원 추적방법론 	<ul style="list-style-type: none"> • 인접국 원전 사고 사례 분석 및 방출원 추적모델 개발 • 방출원 추적모델 검증 및 모델 개선 	<ul style="list-style-type: none"> • 방출원 추적모델개발기술 • 모델검증기술
<ul style="list-style-type: none"> • 방사능분산장치 폭발 대기확산 및 방사선영향평가모델 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내외 방사성물질 확산, 방사선영향 평가 모델, 코드 개발 및 활용 현황 파악을 통한 개발 방향 및 계획 수립 • 방사성물질 도심 확산 평가 코드 개발 수행 및 입력인자 획득, 추적자 실험, 해외 코드와의 교차 분석 등을 통한 코드의 검증 운용 방안 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 확산모델링 및 영향평가기술 • 코드검증기술
<ul style="list-style-type: none"> • 사회·환경 빅데이터 연계 지능형 비상대응 의사결정지원 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 사회·환경 빅데이터 구성 • 의사결정지원 활용방법개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 빅데이터의 비상대응 활용기술 • 의사결정지원 연계기술

3) 방사능환경오염 중장기 대응기술 확보

□ 기술의 정의

- 원자력 사고 후 방사성물질의 중·장기 환경거동 예측
- 환경 내 방사성물질의 오염제어
- 방사능오염으로 인한 피해 최소화
- 방사능오염복구를 위한 최적 의사결정 지원

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 그동안 원자력 사고와 관련한 연구개발은 주로 초기대응 (대피, 소개 등)에 집중하여 왔으나 중·장기 방사능오염대응에 관심과 관련 연구에 대한 투자와 노력은 상대적으로 부족한 실정임.
- 방사능오염대응은 여러 정부 관련기관 간 뿐 아니라 이해당사자의 참여로 과학적이면서 투명하게 이루어져야 함.
- 방사능오염대응 관련기술의 시급성에 대한 인식 부족으로 5차 원연사 과제 (‘17~’ 21)에서 처음으로 정부 지원 하에 한국원자력연구원의 주도하에 수행하고 있음.
- 방사능비상대응 관련기술과 비교해서 방사능오염대응 국내기술은 상대적으로 낮은 단계의 수준임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- '86년 체르노빌 사고 이후 여러 원자력선진국에서는 초기대응보다 오히려 중·장기 피해 복구를 위한 노력에 집중하고 있음.
- 일본은 국내와 유사하게 초기 방사선비상대응에 연구개발을 집중적으로 투자한 관계로, 후쿠시마 사고 이후 주변 지역의 오염 복구를 위한 의사결정에 있어 많은 논란을 초래하였음.
- 이후 일본 정부의 지원 하에 광범위하게 오염된 지역에 대해 비용을 반영한 최적의 환경복구를 위한 다양한 연구개발을 뒤늦게나마 수행하고 있음. 또한 예측이 힘든 Hot spot 발생기원을 규명하고 이를 관리하고자 하는 노력도 있음.

□ 미래동향 예측

- 체르노빌 뿐 아니라 후쿠시마 원전사고는 광범위한 지역을 방사능으로 오염시키며, 중·장기적 국가적 피해는 막대하다는 사실을 인식시키는 계기가 되었음.
- 이러한 교훈으로부터 방사선 사고에 대해 초기 대응 뿐 아니라 중·장기 대응 수립을 위한 다양한 노력이 필요하다는 인식을 공감하고 있음.
- 원자력사고에 대한 방사능오염대응기술은 단지 원자력산업에만 국한하지 않고 관련 원천기술을 일반산업시설의 사고에 따른 유해한 환경오염물질의 제염 및 자연방사능준위가 높은 지역의 국가차원의 대책수립 등에 적용할 수 있기 때문에 부가가치는 매우 높음.

□ 기술개발 수행체계

- 방사능환경오염대응은 방사선방호, 기상 및 기후, 생물·화학, 경제학, 심리학 등 다분야의 전문지식 뿐 아니라 다양한 경험의 필요함.
- 원자력관련 산·학·연(규제기관포함) 뿐 아니라 정부의 관련 전문가 및 기관(행안부, 보건복지부, 식품의약품 등)간의 유기적 연구수행체계가 필요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 생물학적 통합 방사능제어	• 방사능 제염을 위한 생물자원 2종 확보 및 Cs-free 미생물 유전자원	• 생물농축억제 기술 • 생물학적 통합 방사능제어

	<ul style="list-style-type: none"> 개발 방사능 오염환경 내 생물학적 통합 방사능제어 시나리오 구축 및 평가 	기술
<ul style="list-style-type: none"> 농경지 동적 핵종거동예측모델 및 식품오염 저감 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 농경지 방사능 거동 해석 경작 방식이 농작물의 방사능에 미치는 효과 규명 	<ul style="list-style-type: none"> 농경지 방사능거동모델링기술 식품오염 저감 기술
<ul style="list-style-type: none"> 도시환경 동적 핵종거동예측모델 및 피해최소화 의사결정지원방법론 	<ul style="list-style-type: none"> 도시환경 동적 핵종거동예측모델 개발 방사능오염 피해최소화 의사결정지원 방법론 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 도시환경 핵종거동예측모델링기술 의사결정지원기술
<ul style="list-style-type: none"> 수문환경 동적 핵종거동예측모델 및 피해최소화방법론 	<ul style="list-style-type: none"> 원전 사고 시 지표수 환경내 핵종거동 해석 및 선량평가 코드 개발 지표수계를 통한 연안역 유입 핵종거동 평가 및 선량평가 코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 지표수 핵종거동 모델링 기술 선량평가 모델링 기술
<ul style="list-style-type: none"> 방사능 오염 Hot spot 평가 및 관리 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 장기 수치예보자료 분석 및 hot spot 평가기술 개발 Hot spot 평가기술 검증 및 모델 개선 	<ul style="list-style-type: none"> Hot spot 발생 예측 기술 고농도지역 최적관리 기술
<ul style="list-style-type: none"> 생태계 핵종 거동 예측 모델 개발을 통한 전 국민 리스크 최소화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 환경 생태계 방사능 핵종 거동의 구조화 사고 시 환경변화 및 기후변화를 반영한 중장기 피폭선량 정량화 	<ul style="list-style-type: none"> 환경생태계 동적변화 모델링 기술 환경생태계변화의 영향 정량화 기술

4.5 안전성 향상 혁신 기술

4.5.1 개요

□ 「안전성 향상 혁신 기술」은 다음 2개의 중분류 단위로 구분함.

- 원전 안전성 향상 혁신소재 기술
- 원전 안전성 향상 열수력 기술
- ICT 융합 열수력 안전기술
- 수출형 신형원자로 핵심 기술 개발 및 검증
- 다물리 안전해석 도구 개발

4.5.2 원전 안전성 향상 혁신 소재 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 국내외의 원자력 안전에 대한 관심 증대로 극한재해 환경에서도 방사성 물질의 누출을 차단할 수 있는 신개념 소재기술 개발이 요구되고 있음.
- 또한 중소형 원전기술 고도화, 해양, 우주용 원자로 등 원자력 에너지 시스템 다변화에 대응할 수 있는 고성능 원자력 소재에 대한 개발 필요성이 증대되고 있음.
- 원자력 신소재는 이와 같이 가동원전의 안전성 향상뿐만 아니라 다양한 원자력 시스템에 활용 가능한 공통기반기술로서 국내 기술역량을 유지, 강화해나갈 필요가 있음.

□ 기술개발 필요성

- 미국, 프랑스, 일본 등에서는 오래전부터 국가 주도하에 가동원전 및 다양한 원자력시스템 적용을 위한 핵심기술로서 신소재 개발연구를 진행하여 왔으나 국내의 경우 원자력 신소재 개발 역사는 미진한 상황으로 실재 적용을 위한 중장기적인 후속 연구개발이 필요함.
- 고위험, 고수익 연구개발 분야로 기술파급 효과가 매우 크나 세계적으로 아직 실용화되지 못한 창조적이고 혁신적인 소재기술을 적기에 확보하여 원자력 안전성의 획기적 향상에 기여할 수 있음.
- 원자력 소재기술은 국방, 고효율 에너지, 우주항공 등 국가 전략산업용 핵심소재로 활용될 수 있는 기술로 에너지 시장 다변화에 대응한 융합소재 개발을 강화해 나갈 필요가 있음.

나. 세부기술 내용

1) 극한환경 저항성 원자력 소재 기술

□ 기술의 정의

- 정상가동 환경뿐만 아니라 중대사고 시의 극한환경 조건에서도 핵연료 및 원전 주요부품의 건전성을 확보하여 원자로의 안전성을 향상시킬 수 있는 내조사 산화물분산강화 소재 및 초고온 내환경 복합체 소재기술

- 설계기준을 초과하는 사고환경에서 장기간 건전성이 유지되며, 가동환경에서도 기존 소재 대비 우수한 성능을 갖는 신개념 핵연료 피복관 소재기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 한국원자력연구원에서는 미래 원자력시스템인 소듐냉각고속로의 핵연료피복관 소재로 적용이 가능한 고강도 ODS 신소재 (ARROS, Advanced Radiation Resistant ODS Steel)를 개발하였으며 ODS 신소재 개발 기술력은 세계 수준에 도달하고 있음.
- 그러나 소듐냉각고속로에 비하여 냉각재나 가동조건이 전혀 다른 경수로의 핵연료피복관이나 노심 부품/구조부품용 ODS 소재 적용을 위해서는 합금조성의 최적화, 경수로 환경에서의 성능검증이 요구됨.
- 중성자 조사저항성 및 사고저항성이 탁월한 원자력급 SiC 복합체의 개발은 국내에서 KAERI를 중심으로 이루어지고 있음. 제조된 복합체의 물성은 원전 선진국과 대등한 수준임.
- 원자력급 SiC 복합체 대형화를 위한 기반 기술 및 시설이 부족하며, 대량 생산을 위한 산업 기반은 미미한 수준임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 일본, 미국, 유럽, 러시아, 중국, 인도 등 원자력 가동국가에서는 철계 ODS 신합금을 개발하여 자국이 운영하고 있는 원자로의 노심 부품으로 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 상당한 기술력을 확보하고 있는 것으로 파악됨.
- 특히 일본에서는 철계 ODS 신합금을 개발하여 자국이 운영하고 있는 비등수형 경수로의 핵연료피복관이나 제어봉 소재로 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있음. 일부는 중성자 조사시험까지 진행하는 등 철계 산화물 분산강화 소재개발 기술을 선도하고 있음.
- 최근 EU, 미국, 일본, 중국 등에서는 사고저항성 피복관 후보소재 중 하나로 SiC 기반 복합체를 선정하였으며, 조사건전성 확보, 접합기술, 제조기술 등의 기술적 문제들이 상당히 해소가 되고 있음.
- 미국에서는 full length 복합체 피복관 제조기술 및 시설을 개발하고 있으며, 2026년까지 Lead Test Assembly (LTA) 시험을 수행하여 적용 가능성을 확인할 계획임.

□ 미래동향 예측

- 대부분의 원자력 가동 국가에서는 자국 고유의 극한환경 저항성 원자력 소재를 개발하여 실제 가동 중인 원자로에 적용함으로써 원자로의 안전성을 더욱 향상시킬 것으로 예측됨.
- SiC 기반 복합체는 우주/항공/국방 분야에서 수요가 크게 증가함에 따라 대량 생산이 이루어지기 시작하였으며, 복합체 제조 단가는 지속적으로 낮아지고 있음. 향후 기존 피복관 소재 대비 상당한 가격 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 판단됨.
- 단기적으로 현재 사용하고 있는 금속 핵연료 피복관의 표면 개량된 사고저항성 핵연료 피복관이 사용될 수 있을 것으로 보이나, 향후 원전 시스템의 안전성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 SiC 복합체 피복관이 크게 각광받을 것으로 보임.

□ 기술개발 수행체계

- 극한환경 저항성 내조사 산화물분산강화 신소재를 개발하는 것은 연구계가 주도적으로 수행하고, 개발된 신소재의 특성 평가는 학계에서 수행
- 원천기술이 확보된 독자 조성으로 실험상 산화물분산강화 신소재 부품 제조 및 사업화는 산업계가 수행
- 기업 및 공공 연구기관 등과의 기술협력을 통한 대형 복합체 제조기술을 확보하고, 미국/일본 등 원전 선진국과의 국제공동연구 추진을 통한 중성자 환경 건전성을 평가함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 내조사 산화물분산강화 합금 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 내조사 산화물분산강화 신합금 설계 • 신합금 시험용 시편 제조 • 신합금 미세조직 관찰 • 기계적 특성 (인장, 크립) 평가 • 고온 부식 저항성 평가 • 물리적 성질 측정 • 실험상 노심 부품 (튜브) 제조기술 • 이온 조사저항성 평가 • 중성자 조사시험 및 조사후시험 • 중성자 조사특성 DB 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 내조사 산화물분산강화 신합금 설계 기술 • 실험상 신합금 튜브 제조기술 • 정상 운전 및 사고 가정 조건에서 기계적 특성 평가기술 • 부식저항성 평가 기술 • 이온/중성자 조사성능 평가기술

<ul style="list-style-type: none"> • 사고안전성 향상 초고온 복합소재 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 내환경코팅 적용 가스기밀성 복합체 제조 원천기술 개발 • SiC 복합체 피복관 scale-up 제조기술 (1m 급) • PWR 환경 장기건전성 및 중대사고 조건 건전성 평가 • 노내 성능 검증 및 상용화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 내환경코팅 제조 공정 • 대형 복합체 제조 및 고밀화 기술 • PWR 운전 및 사고환경 건전성 검증기술 • 중성자 환경 건전성 평가 기술 및 DB
--	--	--

2) 혁신 제조공정 기반 원자력 소재 기술

□ 기술의 정의

- 극한환경용 고온 구조소재의 유력 핵심소재인 산화물분산강화합금강을 단시간 내에 대용량으로 제조할 수 있는 초고속 고에너지 분말제조 공정 기술
- 산화물분산강화합금강의 용접 시 접합부에서의 나노미세입자 제어가 가능한 신뢰성 있는 고상접합에 대한 기술
- 3D 프린팅을 비롯한 융합제조공정을 활용함으로써 일괄 공정으로 한 가지 부품 소재 내에 여러 가지 기능을 갖는 복합 소재의 제조기술
- 상용 원자력 소재에 고유의 치유물질을 첨가하여 자가치유 능력을 갖게 할 경우 부식이나 중성자 조사에 의한 손상이 발생되더라도 자가 치유가 가능하므로 원자력 소재의 건전성을 향상시킬 수 있는 자가치유/지능형 소재기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 산화물분산강화합금강을 제조할 수 있는 업체가 전무하며 한국원자력연구원에서 고에너지 분말제조공정 연구를 수행하고 있으나, 시험편 수준의 기초 연구를 수행한 바 있음.
- 한국원자력연구원에서 마찰교반접합 및 전자기펄스접합 등에 대한 고상접합 기초연구가 수행된 바 있으나, 적용기술 개발은 이루어지지 않고 있음.
- 3D 프린팅 기술을 활용한 다중 특성 소재 개발은 대부분 폴리머와 금속재료, 혹은 금속재료와 세라믹재료 등의 융합 소재 개발에 치중되어 있음.
- 일부 대학을 중심으로 금속재료(철강, 알루미늄, 마그네슘 등)의 표면에 부식손상을 자가치유할 수 있는 표면 코팅층 개발 연구가 일부 진행되고 있지

만 기초적인 수준에 머물고 있음. 자가치유/지능형 원자력 소재기술에 대한 연구는 전무한 실정임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 대부분의 연구가 새로운 조성의 산화물분산강화합금강 신탄금 소재 연구개발에 집중되고 공정 연구는 수행되지 않음.
- 기존의 용융접합을 대체할 수 있는 고상접합 기초연구가 진행되고 있으나 현재까지 접합부내 미세 산화물의 분포를 제어할 수 있는 방안이 없는 실정임.
- 최근 미국 DOE의 NEET 프로그램을 통해서 경수로 장기가동과 미래형 원전 적용을 위한 혁신 구조재료 개발이 일부 수행되고 있으나 실험실 수준의 초기 연구 단계에 머물러 있음.
- 외국에서도 자가치유/지능형 원자력 소재기술은 아직 개념이 도입되지 않아 기초 연구 단계에 머물러 있는 실정임.

□ 미래동향 예측

- 극한환경 소재인 산화물분산강화합금강은 고온 특성 및 조사안정성이 현재까지 개발된 어떤 소재보다 우수하다고 알려져 있기 때문에, 원자력 뿐 아니라 발전, 군수 산업 등에 광범위하게 적용 가능한 소재로써 이에 대한 소재 제조 및 접합 공정 기술은 더욱 중요해질 것으로 전망됨.
- 3D 프린팅은 4차 산업혁명을 선도하는 기술 중 하나로서 산업체의 관련기술이 눈부시게 발전하고 있음. 가까운 장래에 3D 프린팅 기술로 제조한 원자력 부품의 품질도 현저하게 좋아질 것이 분명하며 원자력 주요 부품으로 사용 가능성도 매우 높음.
- 경사기능재료 활용, 접합부 안전성 향상기술은 원자로 외 타산업 플랜트의 구조물에도 적용이 가능함으로 산업계 전반에 파급효과가 클 것으로 예상됨.
- 표면코팅법의 한계를 극복하여 국부적인 손상을 스스로 치유하는 자가치유능(Self Healing Ability)을 가진 피막을 형성시키기 위한 원자력 소재 기술이 완성될 경우 원자력 부품으로 직접 적용이 가능할 것으로 기대됨.

□ 기술개발 수행체계

- 연구계에서 기초 연구를 수행한 후 소재 제조 및 가공 등의 상용화 연구를 산업계에서 수행 필요
- 재료 및 공정설계를 학연 협력을 통해 수행하고 공정최적화를 위한 산업계

협력체계 구축

- 데이터베이스 구축, 인허가 연계를 위해 국내외 조사시험 시설을 활용하고 인허가 기관과의 협력체계 구축

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 분말공정 혁신제조 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 양산용 고에너지 분말 공정 장비 설계/제작 • 소재 제조 및 특성 평가 • 공정 최적화 • 소재 노내외 성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 고에너지 분말장비 기술 • 최적화 공정 기술 • 재료 물성 DB
• 원자력 구조부품 접합 신기술	<ul style="list-style-type: none"> • 대용량 전자기필스 접합 장비 설계/제작 • 접합부 제작 • 접합부 평가 (누설, 파열 시험) • 공정 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> • 고상접합 장비 기술 • 접합부 제작 기술 • 접합부 평가 기술 • 최적화 공정 기술
• 고기능성 하이브리드 소재 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 3D 프린팅 다중 특성 재료 개발 • 분말공정 다중 기능 재료 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D 프린팅 다중 특성 소재 개발 제조공정 최적화 기술 • 분말공정 다중 기능 특성 소재 기술 • 다중 특성 소재 노내 성능 검증 기술 • 실제 구조물 규모 제작 특성 평가 기술
• 자가치유/지능형 원자력 소재기술	<ul style="list-style-type: none"> • 자가치유/지능형 원자력 소재 개념 설계 • 자가치유 합금 시편 제조 • 미세조직 관찰 • 부식/크랙/조사 손상에 대한 자가치유 성능 평가 • 물리적 성질 측정 • 실형상 부품 제조기술 • 이온/중성자 조사시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 자가치유/지능형 원자력 소재 신개념 개발 기술 • 부식/크랙/조사 손상에 대한 자가치유 성능 평가 기술 • 실형상 자가치유/지능형 소재 부품 제조기술 • 중성자 조사성능 평가기술

3) 신개념 설계기법 기반 원자력 소재 기술

□ 기술의 정의

- 4종 이상의 원소를 서로 비슷한 원자 분율로 첨가시켜 원자의 배열 엔트로피 (configurational entropy)를 높여 합금계 전체의 자유 에너지를 낮추는 방향으로 금속재료를 설계하는 기술과 이를 통한 고성능 원자력 구조재 개발 기술

- 기존에 구축된 중성자 조사재의 기계적 특성과, 중성자 산란 단면적과 같은 이미 구축된 데이터베이스를 활용해 조사저항성을 포함한 성능이 향상된 소재 개발을 위한 전산재료과학 기반 소재 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내 고엔트로피 합금에 대한 연구는 주로 대학을 중심으로 기초연구가 진행되고 있는 실정임. 대표적으로는 극저온용 소재개발을 목표로 열역학계산을 활용한 고엔트로피 합금설계 기술 개발 및 실제 모델합금의 제조, 평가, 및 분석을 통한 검증에 관한 연구가 포항공대를 중심으로 진행하고 있음.
- 자동차용 또는 항공기용 구조재의 경량화를 위한 경량 고엔트로피 합금개발에 대한 기초적 연구가 재료연구소를 중심으로 진행되고 있으며, 또한 핵융합로용 디버터와 같은 구조/기능재에 고엔트로피 합금설계 개념을 적용한 기초 연구가 KAIST 및 서울대 등에서 진행되고 있음.
- 한원(연)은 MD-Portal과 같은 조사재의 중성자 조사 특성에 관한 데이터베이스를 구축해오고 있음.
- 미래형 원전에 도입될 여러 소재들에 대해서 현재 원자력연구사업과 한국 원자력연구원 주요사업 등으로 오랜 기간 발전이 이루어져 왔으며, 극한환경 소재 개발에 대한 노하우가 축적되어 있는 상태임.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국외에서는 지난 10 여 년간 고엔트로피 합금설계 개념을 최적화하기 위한 제반 기술들과 이를 통해 개발된 다양한 종류의 고엔트로피 합금들이 개발된 바 있으며, 이러한 합금들이 나타내는 새로운 특성에 대한 메커니즘 규명에 대한 연구도 상당 수준으로 진행되고 있음.
- 원자력 분야에서는 미국의 ORNL 및 테네시 주립대를 중심으로 고엔트로피 개념을 이용한 원자력 구조재 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직 주목할 만한 혁신적 성능을 갖는 소재를 개발하지는 못한 실정임.
- 미국의 Brookhaven national lab은 1952년부터 꾸준히 중성자 조사 단면적에 관한 데이터베이스를 추가, 확장 관리 해오고 있음. 현재 이 데이터베이스의 상당 영역이 접근 가능한 상태임.

□ 미래동향 예측

- 새로운 성능을 갖는 고엔트로피 합금의 출현은 기존의 구조재로 실현이 불

가능했던 다양한 구조설계 개념을 가능케 할 것으로 예상되며, 이를 통해 새로운 산업분야의 창출에 기여할 수 있을 것으로 기대됨.

- 원자력 분야의 경우도, 원자력 안정성 및 효율의 제고를 위한 고온 및 고중성자 조사 환경에서 가동되어야 할 다양한 원자로 시스템이 제시되고 있으며, 이러한 설계 개념을 실현하는데 있어서 원자력용 고엔트로피 합금이 기여할 것으로 예상됨.
- 원자력 신소재 개발의 효율성을 크게 향상시킬 수 있고, 데이터 기반의 소재 개발 과정에서 더 방대하고 신뢰성 높은 데이터베이스를 확보할 수 있을 것으로 기대됨.

□ 기술개발 수행체계

- 합금 설계기술, 머신러닝기술 활용 및 실제 모델합금의 평가, 핵적 특성 계산, 소재특성 분석, 기구 규명 등은 학연 협력을 통해 수행
- 연구원 MD-Portal을 활용한 재료 DB 확장
- 소재의 대용량 제조 및 공정기술 개발은 산업계 중심으로 수

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 고엔트로피 개념을 이용한 고성능 원자력 구조소재 합금설계 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력 적용을 위한 고엔트로피 기반 합금설계 • 고엔트로피 모델합금의 제조 공정변수 최적화 및 기초물성 평가 • 고엔트로피 합금의 핵적 특성 계산 • 고엔트로피 합금의 성능 향상 메커니즘 규명 • 대용량 고엔트로피 합금 제조 및 공정기술 개발 • 고엔트로피 합금의 물성자료 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 열역학계산 기반 고엔트로피 합금의 열역학 안정성 예측기술 • 열역학계산 결과에 대한 실험적 검증기술 및 실험/모델링 피드백 • 청정 고엔트로피 제조 및 공정기술 개발 • 원자력 환경 기반 재료물성 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> • 데이터 통합 전산재료과학 기반 원자력 신소재 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • MD-Portal의 데이터 베이스 유지/확장 • Tensorflow나 GPGPU와 같은 머신러닝 기반 기술 확보 • 머신러닝 기반의 신소재 탐색 및 신소재 기반의 새로운 랩단위 소재 합성 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 환경 재료물성 평가 기술 • 머신러닝 기반 합금 설계 기술 • 신소재, 신공정 제작 기술 • 재료특성 전산모사 기술

4.5.3 원전 안전성 향상 열수력 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 원자력 시설에 대한 안전 규제 및 인허가 기준의 강화
- 원전 과도기 및 사고조건에서의 2상유동에 대한 고정밀 신뢰도 확보 및 불확도 최소화 요구
- 핵연료 인허가 및 사고노심 안전성 평가를 위한 대형시험시설의 부재(국내)
- LOCA 및 RIA의 신규 안전현안 도출 및 인허가 기준의 개정에 따른 실증실험의 필요성
- 설계기준사고와 설계확장조건(DEC)에 대한 사고관리 전략의 최적화
- 원전 안전계통의 유효성 및 운전원 조치의 실효성 입증
- 다분야 통합연계 해석에 의한 안전해석 기술의 고도화와 범위 확장

□ 기술개발 필요성

- 세계적으로 원자력 시설에 대한 안전 규제 및 인허가 기준이 더욱 강화되는 추세로 국내 원전도 국제적 규제기준 변화를 적극적으로 수용하여 국내 원전의 안전성을 추가 검증하여 국내 원전의 안전성을 더욱 향상시킬 필요가 있음. 국제적 안전 규제 및 인허가 기준 변화에 능동적으로 대처함으로써 선진국 수준의 기술 수준과 안전성 확보가 가능해짐.
- 원전의 운전조건뿐만 아니라 과도기 및 사고조건에 대한 비상냉각성능 향상을 통해 노심의 열수력 안전성 강화 기술의 확보를 통해 원전의 중대사고 진입을 방지하는 필수 안전기술을 확보하고, 중대사고 진입 시 다각적 완화능력 확보를 위한 열수력 핵심 기술을 개발하는 것이 중요함. 후쿠시마 원전 사고 교훈을 반영한 대처 실증 평가, 신개념 고압 노심냉각계통의 실증은 국내 원전의 안전성 향상, 대국민 원자력 사회적 수용성 제고, 해외수출 경쟁력 확보에 필수적임.
- 기기스케일 안전해석코드 및 수치해석코드의 액적거동의 예측성능 향상을 위해서는 2상유동 상간의 운동량이 전달되는 계면 비전인력에 대한 상세 모델이 필요함.
- 노심 다차원 2상유동 정밀해석 코드를 이용한 원전 안전여유도 향상과 관련

하여 2상유동 기포 양력모델의 검증 및 개선을 위한 고정밀 실험 DB 생산과 독자적인 양력모델의 개발이 필요함.

- 비등현상은 원자로 노심의 안전성 평가를 위한 열전달 현상 및 열적여유도 평가를 위한 핵심현상임. 기존의 경험적인 상관식에 기초한 모델의 부정확성을 개선하기 위해 상세 비등구조 및 동적거동 현상에 기반을 둔 기구학적 물리적 모델 개발이 필요함.
- 국내에는 MW급 핵연료 CHF 및 사고노심 안전성 평가 시험시설이 부재하여 국외 시험시설을 이용하여 핵연료 인허가에 필요한 CHF 실험을 수행함. 그동안 국내에서 이용하던 프랑스 OMEGA 시험시설이 해체됨에 따라 국내에서는 현실적으로 이용 가능한 국외 핵연료 CHF 시험시설이 없음. 따라서 향후 신규 핵연료 개발 등에 저해요소로 작용할 수 있음.
- 현재의 노심 다차원 열전달 모델은 1차원 실험을 기반으로 개발된 모델을 사용하고 있으며, 횡방향 유동의 영향 등을 고려하지 않고 있음. 따라서 3차원 유동 분포를 고려한 3차원 열전달에 관한 실험을 통해 비등방성을 고려하여 3차원 열전달 모델을 개발하는 것이 필요함.
- RIA(반응도기인사고) 시 고연소도 핵연료의 경우 기존 허용기준보다 낮은 엔탈피에서 핵연료 손상이 발생할 수 있으며, 이에 따라 RIA 안전기준이 강화될 예정임. 새로운 안전기준의 적용은 기존의 안전여유도를 감소시키므로 최적화된 RIA 평가방법론이 요구됨. 특히 RIA 시 열수력현상에 대한 이해가 부족하여 매우 보수적이고 불확도가 큰 평가방법이 사용되고 있는 실정임.
- FFRD(Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal)거동과 관련된 주요 열수력 현상은 핵연료재배치로 인한 국부적인 출력증가와 피복관 파열로 핵연료가 분산되면서 나타나는 분산된 핵연료에 의한 유로 막힘, 증기폭발, 충격파에 의한 주변 핵연료 구조물 충격 등이 있음. 핵연료재배치에 의한 국부적인 출력증가와 노심 냉각성능에 대한 연구는 KAERI에서 수행되었으나, 핵연료 분산과 관련된 연구는 진행되지 않았음. FFRD 거동과 관련하여 핵연료 분산과 관련된 거동에 대한 연구가 필요함.
- 현재의 LOCA 허용기준은 Whole burnup full spectrum LOCA 해석으로 전환되는 추세이며, 중소형 파단 LOCA에서 나타나는 중고압 사고노심의 비상냉각성능은 고려되지 않고 있는 최대 미해결 열수력 현안 중의 하나임. 기존에 주로 연구된 대형파단 LOCA 안전성 평가 실험 DB에 중소형 파단 LOCA 안전성 평가 실험 DB를 완성하면 LOCA 전영역을 포함하는 안전성 평가 연구 DB를 구축할 수 있음. 중소형 파단 LOCA 관점에서는 비교적 중압, 고압 조건에서 사고노심의 비상냉각성능에 대한 연구가 필요함.

- 설계기준사고와 설계확장조건(DEC)에 대한 사고관리 전략의 최적화를 통한 원전의 사고대응 능력 향상과 확률론적 안전성 평가 결과를 활용한 안전계통의 유효성 및 운전원 조치의 실효성 입증에 요구됨.
- ATLAS 원자로냉각재계통(RCS)과 원자로건물을 통합 연계하여 열수력 안전성 평가를 수행함으로써 안전해석 기술의 고도화와 범위 확장이 요구되며, 국내 고유 개발 원자로건물 해석 코드의 성능 개선과 원자로건물 신안전계통의 설계 최적화를 위한 실험 DB 구축이 요구됨.

나. 세부 기술 내용

1) 운전 및 과도조건 노심 열수력 안전성 강화

□ 기술의 정의

- 침단 2상유동 고정밀 모델 개발 및 불확도 정량화를 위한 3차원 토모그래피, 부수로 기포율 측정, 액체 및 기포 거동 동시 측정, 고온고압 2상유동 측정기술
- 정상상태 조건에서 액적의 생성, 이탈, 점착 거동과 과도기 사고조건에서 액적의 생성, 분쇄 등을 예측하기 위한 실험 및 해석기술
- 원전 조건과 유사한 고압조건에서 2상유동 모델 개발을 위한 대형 가압용기를 이용한 고압 2상유동 가시화 기술
- 핵연료 임계열유속(CHF: Critical Heat Flux) 인허가 시험 및 원전사고 조건 노심 성능시험을 위한 대용량 전원을 이용한 대용량 시험설비 구축 및 운영기술
- 원자로노심에서 발생하는 물리적 현상의 예측 신뢰도 확장을 위한 노심 다차원 비등방성 난류 및 열혼합 예측 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 고압 환경의 2상유동 고정밀 실험 자료는 매우 부족함. 고압조건 정밀 측정 기술과 실험기법은 대체로 국외 선진국 대비 유사 수준이나, 일부 기술은 미확보 상태임.
- 단일 기포를 이용한 액적거동과 관련된 연구 자료는 충분하지만 기포류 또는 분산류에서의 액적거동 및 각 상의 다차원 속도장 정보에 관한 실험은 전무함. 또한 관련 침단 측정기법은 선진국 대비 유사 수준임.
- 고압모의환경에 대한 비등유동 고정밀 실험 자료는 매우 부족함. 더구나 주로 저압 상태의 연구가 수행되고 있으며 고온고압 원자로 조건에 대응하는

연구 결과는 거의 전무함.

- 국내에서는 MW급 핵연료 CHF 및 사고노심 안전성 평가시설이 부재하여, 국외 시험시설에 전적으로 의존하고 있음.
- 국내에서는 노심 다차원을 고려한 비등방성 열전달 실험은 수행되지 않음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 국외에서는 사고 모의 조건에서 2상류 계측을 위한 침단 3차원 고속 X-ray 토모그래피 및 SCVS(Sub-channel Void Sensor) 측정기법 등을 개발한 것으로 파악됨.
- 국외에서는 기포류 및 분산류에 대한 액체 혹은 액적 및 공기의 3차원 속도장 정보를 이용하여 액적거동 실험 DB를 구축하고 독자적인 모델을 개발한 것으로 파악됨.
- 독일에서는 50 bar 가시화가 가능한 TOPFLOW 실험장치를 운영하고 있으며, 실제 원전에서 발생하는 다양한 고압 사고를 직접 가시화하여 양질의 새로운 실험 결과를 도출하고 있음.
- 가압조건 국소비등 현상에 대한 고정밀 해석코드의 개발을 위한 실험 DB가 구축되어, CFD 수준의 다양한 코드의 평가, 검증에 활용되고 있음. 실제 사고 조건에서의 국소 비등변수에 대한 이해의 증진 및 안전해석코드의 예측능력의 향상을 위해서는 고압모의환경에서의 고정밀 실험 DB의 필요성을 인식하고 있음.
- 웨스팅하우스, AREVA 등은 자체적으로 10 MW급 이상을 갖는 대형 임계열유속 시험시설을 확보하고 있지만, 타 기관의 시험은 정책적으로 배제하고 있음. 중국과 러시아에서도 대형 임계열유속 시험시설을 보유하고 있으며, 상대적으로 부족한 실험기술과 품질보증을 향상시키기 위한 노력을 경주하고 있음.
- 최근 노심 다차원을 고려한 물-공기 2상유동 실험을 계획 중에 있지만, 노심 다차원을 고려한 비등방성 열전달 실험은 수행되지 않고 있음. 최근 기존 1차원 코드가 3차원으로 확장되었지만, 1차원 모델을 3차원으로 단순 확장한 것으로 3차원 모델에 대한 실험연구는 아직까지 수행되지 않음.

□ 미래동향 예측

- 원전의 과도기 및 사고조건에 대한 전산유체해석 적용 등이 활발하게 수행되고 있어, 이러한 해석 체계 검증을 위해 고신뢰도의 다양한 침단 2상유동

측정 방법이 개발될 것으로 예상함. 이를 바탕으로 국부 현상을 더욱 고정밀도로 예측할 수 있는 모델의 개발이 이루어질 것임.

- 원전에서의 발생하는 다양한 물리적 현상의 예측 신뢰도를 더욱 증진시키고, 불확도를 최소화하기 위하여 핵연료-열수력-수화학-노물리 등 다분야를 연계하는 통합해석체계들이 활발하게 개발될 것임.
- 세계 각국은 자국에서 개발되는 원자로의 인허가 성능 시험을 위하여 대용량의 핵연료 임계열유속 시험 및 사고조건 안전성 시험을 위한 대형 시험설비의 구축, 운영 기술 확보 및 유지를 위해 노력하고 있음.

□ 기술개발 수행체계

- 첨단 2상유동 계측 및 고압 가시화 기술을 공통으로 개발하여, 고온고압 2상유동 고정밀 실험에 공동으로 적용하는 협력 체계가 중요함.
- 첨단 계측 기술, 실증 실험 기술, 모델 개발 기술, 코드 해석 기술 그룹의 연계를 통한 효율적이고 체계적인 연구 수행이 요구됨.
- 산·학·연 공동연구체계
 - 1단계(5년): 노심 열수력 안전성 강화를 위한 기반 구축
 - 2단계(3년): 노심 열수력 현상에 대한 고정밀 실험 및 해석 체계 구축



□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 첨단 2상유동 계측, 현상 규명 및 예측기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 첨단 고온고압 2상유동 측정방법론 개발 및 Mock-Up 실험 • 원자로 고압환경 다차원 2상유동 상세 실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 첨단 3차원 토모그래피 측정기술 • 부수로 기포율 측정기법 • 고온고압 2상유동 측정기술
<ul style="list-style-type: none"> • 봉다발 액적거동 규명 및 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 액적거동 측정방법론 개발 • 단열 및 가열조건 정상상태 환상류 액적거동 규명 • 과도기 사고조건 봉다발 액적거동 실험 DB 구축 및 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 액적거동 측정기술 • 액적거동 모델 개발
<ul style="list-style-type: none"> • 대형 가압 용기를 이용한 고압 2상유동 가시화 	<ul style="list-style-type: none"> • 고압모의환경에서 다차원 2상유동 가시화 및 정밀계측을 통한 모델 개발 • 독일 TOPFLOW 실험장치와 유사한 고압조건 직접 가시화 실험장치 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 고압조건 밀봉 및 압력 제어기술 • 고압조건 가시화기술
<ul style="list-style-type: none"> • 특수조건 핵연료 CHF 및 대형노심 다차원 효과 실증실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 특수목적 원자로의 고열유속 CHF/post-CHF 성능 평가 • 지진환경 조건의 열전달 특성 실험 및 모델 개발 • 10 MW 이상 대형 CHF 및 사고노심 안전성 평가시험 • 대형노심 사고조건 다차원 효과 실증실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 인허가를 대비한 10 MW 이상 대용량 시험설비 구축 및 운영기술 • 고온고압 조건 2상유동 고정밀 계측기술
<ul style="list-style-type: none"> • 노심 다차원 비등방성 봉다발 난류 및 열혼합 특성 실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 노심 다차원 비등방성 난류 특성 실험 • 노심 다차원 비등방성 열혼합 특성 실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 다차원 비등방성 3차원 정밀 계측기술

2) 다중고장사고 대비 중대사고 예방 기술

□ 기술의 정의

- 국부적으로 반응도가 짧은 시간 동안 매우 급격하게 증가하는 반응도기인 사고 조건에서 핵연료의 안전성을 평가 예측하는 기술
- FFRD(Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal)은 핵연료가 분쇄되어 피복재가 팽창된 부분에 재배치되고, 피복재가 파손되면 피복재 밖으로 분산되는 현상을 나타내며, 이러한 핵연료 분쇄, 재배치, 파손 및 분산에 관한 예측 기술
- LB LOCA 재정의 및 배제 등으로 LOCA 핵연료 인허가 및 안전기준 패러다임이 기존 LB LOCA에서 IB LOCA로 변화되고 있으며, 이에 따라 IB LOCA 조건에서 새로운 핵연료 인허가 및 안전기준을 평가하는 기술

- 설계기준사고와 설계확장조건에 대한 원전 사고관리 전략의 최적화를 통한 원전의 사고 대응 능력 확장과 확률론적 안전성 평가를 활용한 원전 안전계통의 유효성 및 운전원 조치의 실효성 입증 기술
- 원자로냉각재계통(RCS)과 원자로건물을 통합 연계하여 열수력 안전성을 평가하고, 안전해석 기술의 고도화와 범위를 확장하는 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 반응도기인사고 조건에서는 주로 핵연료 피복관의 산화 및 수소화에 따른 물성치 변화에 대한 연구와 수소함량에 따른 피복관 팽윤 및 파손경향에 대한 연구가 수행된 바 있으나 기계적 특성만을 평가함.
- 가압경수로 피복관을 대상으로 정상상태 임계열유속 관련 연구들은 많이 수행되었으나, 피복관 온도가 급격하게 변화하는 RIA 과도조건에서의 열수력 연구는 전무한 실정임.
- 국내에서는 대형 파단 LOCA에서 사고노심의 안전성 평가 연구가 많이 수행되었음. 국내에서는 중소형 파단 LOCA에서 사고노심의 안전성 평가 연구가 제한된 조건에서 수행되었음.
- 한원(연)은 열수력 종합효과실험장치인 ATLAS를 2007년부터 운영하여 원전의 안전현안 해결 및 안전성 평가와 안전해석코드의 성능 검증·개선을 위한 실험 DB를 구축하고 있음. ATLAS 원자로냉각재계통과 원자로건물 모의 압력용기를 연계하여 M/E 방법론 검증 및 P/T 분석 자료를 생산하기 위한 실험연구를 진행하고 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 반응도기인사고를 모의하기 위하여 ·프랑스 CEA에서는 PATRICIA 시험루프를 구축하고 가압경수로 및 비등경수로 RIA 과도조건에 대한 피복관-냉각재 열전달 실험을 수행하였음. PATRICIA 실험결과를 다물리 핵연료 계산코드인 SCANAIR에 적용하여 RIA 시 핵연료 거동을 평가하였으나 실험범위가 제한적이어서 다양한 조건에서의 해석은 어려움. 최근에는 많은 노력과 비용을 사용하여 CABRI water loop을 개조하고 반응도기인사고를 in-pile test로 모의하는 시험을 시작함.
- Halden reactor project, STUDSVIK, SILOE, MIR 등에서 FFRD와 관련된 실험을 수행한바 있음. 실험이 제한적인 조건에서 수행되었고, 현상의 인과관계를 분석하기에는 실험 연구가 부족함.

- 국외에서도 중소형 파단 LOCA에서 사고노심의 안전성 평가 실험은 제한된 조건에서 이루어졌으나, 최근 프랑스 등은 중소형 파단 LOCA에 대한 안전성 평가를 위해 노심에서의 다차원 열혼합 실험 등의 프로그램을 착수함.
- 독일(PKL), 일본(LSTF), 중국(ACME)은 열수력 종합효과실험 장치를 운영하고 있으며, 이를 토대로 활발한 국내외 협력 프로그램을 수행하고 있음. 일본은 열수력종합효과실험 장치인 LSTF를 이용하여 증기발생기 세관파단사고 시 비상운전절차 개선을 위한 실험연구를 수행하였음.
- 독일(PKL), 일본(LSTF), 중국(ACME)은 열수력 종합효과실험 장치를 운영하고 있으며, 이를 토대로 활발한 국내외 협력 프로그램을 수행하고 있음. 스위스(PANDA), 독일(THAI), 일본(CINEMA)은 원자로건물 모의 용기를 이용한 실험연구를 수행하고 있으나 원자로냉각재계통과 원자로건물을 통합 연계한 안전연구를 수행한 바는 없음.

□ 미래동향 예측

- 원자력 안전 규제 및 인허가 기준이 더욱 강화되면서 이를 뒷받침하고 추가적인 안전여유도 확보를 위한 다양한 연구들이 활발하게 전개될 예정임.
- 다분야 현상들이 상호 복합적으로 발생하는 물리적 현상을 최적으로 예측하고, 불확도를 정량화 혹은 개선하기 위한 연구들이 진행 되고 있음.
- 다분야 현상들을 모의할 수 있는 종합적인 통합안전해석체계의 구축이 활발하게 진행되고 있으며, 이를 검증하는 노력이 경주되고 있음.
- 향후 원자로계통 3차원 2상유동 해석 기술 및 컴퓨터 성능의 발달로 높은 해상도를 갖는 해석 기반의 열수력 안전성 평가 기술이 개발될 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 핵연료, 열수력, 수화학 등 다분야를 연계하여 원전에서 발생하는 사고를 통합실증실험하고 통합연계해석 체계를 구축하는 것이 중요함.
- 리스크 등의 정보를 활용한 원전 안전계통 기능의 유효성을 확보하고, 안전계통을 최적화하는 것이 필요함.
- 산·학·연 공동연구체계
 - 1단계(5년): 실험장치 구축 및 기초 평가 실험
 - 2단계(3년): 심화 평가 실험 및 안전해석 체계 검증

	단기(5년)	중기(5년)	성과물
핵연료-열수력 연계 RIA 안전성 실증 실험 및 통합해석	<ul style="list-style-type: none"> RIA 모의 실험시설 및 인프라 구축 RIA 모의 피복관-냉각재 열전달 실험 	<ul style="list-style-type: none"> RIA 핵연료 분산에 따른 핵연료-구조물 영향 평가 RIA 모의 통합해석 체계 구축 및 검증 	<p>다중고장 사고 대비 중대사고 예방 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> 다분야 연계 RIA/LOCA 평가기술 IB LOCA 핵연료-열수력 통합해석체계 리스트 정보활용 원전 사고전략 최적화 RCS-원자로건물 연계 안전성 평가기술 안전계통 최적화
규제기준 변화 반영 LOCA 안전현안 실증 및 해석기술	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 분쇄, 재배치 및 분산 거동(FFRD) 실증실험 핵연료 분산에 따른 핵연료-구조물 영향 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 분산에 의한 노심 부분막힘 FFRD 해석코드 모델 검증 및 개선 	
IBLOCA 조건 중고압 핵연료 변형-열수력 연계 안전성 검증	<ul style="list-style-type: none"> IBLOCA 핵연료-열수력 연계검증 실험 	<ul style="list-style-type: none"> IBLOCA 핵연료-열수력 통합안전해석체계 구축 및 검증 	
ITL 활용 원전 안전계통 유효성 검증 및 사고관리 최적화	<ul style="list-style-type: none"> 확률론적 안전성평가 결과를 활용한 원전 안전계통 기능의 유효성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 운전원 조치에 따른 원전 안전여유도 평가를 통한 사고관리전략 최적화 	
RCS-원자로건물 연계 안전성 검증	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 내 다차원 유동 정밀 해석을 통한 RCS-원자로건물 연계 해석 체계 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 안전계통 설계 최적화를 통한 RCS-원자로건물 연계 해석 체계 고도화 	

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 핵연료-열수력 연계 RIA 안전성 실증 실험 및 통합해석 	<ul style="list-style-type: none"> RIA 모의 실험시설 및 인프라 구축 RIA 모의 피복관-냉각재 열전달 실험 RIA 핵연료 분산에 따른 핵연료-구조물 영향 평가 RIA 모의 통합해석 체계 구축 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 다분야 연계 RIA 실증실험기술 다분야 연계 RIA 고정밀 통합해석기술 RIA 모의 3차원 고정밀 모델 및 과도해석기술
<ul style="list-style-type: none"> 규제기준 변화 반영 LOCA 안전현안 실증 및 해석기술 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 분쇄, 재배치 및 분산 거동(FFRD) 실증실험 핵연료 분산에 따른 핵연료-구조물 영향 평가 핵연료 분산에 의한 노심 부분막힘 FFRD 해석코드 모델 검증 및 개선 	<ul style="list-style-type: none"> 다분야 연계 LOCA 실증실험기술 다분야 연계 LOCA 고정밀 통합해석기술 FFRD 모의 모델
<ul style="list-style-type: none"> IBLOCA 조건 중고압 핵연료 변형-열수력 연계 안전성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> IBLOCA 핵연료-열수력 연계검증 실험 IBLOCA 핵연료-열수력 통합안전해석체계 구축 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 중고압조건 핵연료-열수력 연계검증 실험기술 IBLOCA 핵연료-열수력 통합안전해석 기술
<ul style="list-style-type: none"> ITL 활용 원전 안전계통 유효성 검증 및 사고관리 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> 확률론적 안전성평가 결과를 활용한 원전 안전계통 기능의 유효성 검증 운전원 조치에 따른 원전 안전여유도 평가를 통한 사고관리전략 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 정보활용 원전 비상냉각능력 강화 기술 리스크 정보활용 원전 사고관리전략 최적화 기술
<ul style="list-style-type: none"> RCS-원자로건물 연계 안전성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 내 다차원 유동 정밀 해석을 통한 RCS-원자로건물 연계 해석 체계 검증 원자로건물 안전계통 설계 최적화를 통한 RCS-원자로건물 연계 해석 체계 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> RCS-원자로건물 연계 안전성 평가기술 RCS-원자로건물 연계 신뢰도 향상 및 안전계통 최적화 기술

3) 기기/ 계통 성능 향상 및 검증

□ 기술의 정의

- 원자로 유동-구조물 간섭 실증기술 개발(열충격/성층화)
- 수출용 RCP 50 Hz 시험용 전력기반 구축
- 피동안전계통 실증 및 신뢰도 평가 기술
- RCS 유량측정 및 순간적인 유량감소 측정
- 피동계통과 기존의 능동계통을 최적화 미래형 안전계통으로 최적화 개발

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 배관 및 용기의 열충격(PTS) 및 성층화는 배관 및 재료의 피로파괴 증가 및 충격파에 의한 배관 및 기기의 손상을 유발하는 중요 현상임. 현재의 배관 및 용기모델은 1차원 실험을 기반으로 개발된 모델을 사용중. 밀림관, SIT 등의 성층화와 CMT 등의 피동계통/피동충수계통 자연순환 성층화 다차원적 특성의 검증/실험이 필요함. 국내의 PTS 및 성층화 실험과 해당 평가모델의 개발이 부족함.
- 한원(연)은 APR1400 용 RCP의 성능검증을 위한 설비 및 검증기술을 확보하였고 이를 바탕으로 국산 시제품 RCP에 대한 500 시간 시험, 신한울1,2호기 용 본 RCP 8대에 대한 50시간 성능검증시험, 장기 SBO 조건 시 RCP Seal LOCA 종합시험 등을 성공적으로 완료하여 세계최고의 RCP 성능검증 및 평가기술을 보유하고 있음.
- 피동안전계통에 대한 신뢰도는 다양한 신안전 개념을 도입하는 신형원자로의 설계 및 운영을 위해 필수적임.
- 피동잔열제거계통(PRHRS), 피동안전주입계통(P SIS), 피동격납용기냉각계통(PCCS) 등 피동안전계통의 신뢰도 평가는 전 세계적으로 많은 자료가 확보되지 않음.
- 국내 APR1400 발전소의 RCS 저유량 정지신호 발생 로직의 입력으로 사용되는 증기발생기 차압 신호는 요동폭이 커서 불필요한 정지신호가 발생할 가능성이 있음. 순간적인 RCS 유량감소를 감지하여 효율적/안정적인 원자로 정지신호 발생을 위한 입력신호로 사용이 필요함.
- APR+ 원전에 피동보조급수계통(PAFS)의 개발로 최초의 피동 안전계통이 적용되었으나, 피동계통과 기존의 능동계통을 최적화하여 안전성의 향상 및

냉각 제어 성능을 최적화한 본격적인 연구는 미흡함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 독일 등에서 고압조건의 고온고압배관 열충격 등의 실험이 진행되었으나 국내 DVI 시스템등과 같이 국내 원전설계 상황과 유사한 실험은 부족한 상황임.
- 국내의 PTS 및 성층화 실험과 해당 평가모델의 개발이 부족함. 운전 중 장기 대기 충수계통이나 안전계통의 RCS 시스템 간 연결부의 성층화 및 피동계통의 성층화에 대한 평가 모델 검증에 위한 기술개발 및 검증실험이 필요함.
- 유럽 및 중동의 원전 수입국은 주로 50 Hz의 전력을 사용하고 있으므로 RCP의 수출 시 50 Hz 전력을 사용한 성능시험이 필요한 실정임. RCP 성능 시험기술을 보유한 그룹은 유럽(AREVA), 미국(구 Westinghouse), 중국(상하이 모터) 등에 국한되어 있으며 그 또한 기술전략화의 일환으로 보호 기술로 분류되어 있으므로 후발국의 기술 진입을 막고 있는 실정임.
- 국내에서는 SMART 개발과 관련하여 도입되는 피동안전계통에 대한 신뢰도 평가 요구가 있으나 제한된 데이터만 존재함.
- 국내 APR+ 및 IPOWER 개발과 관련하여 도입되는 피동안전계통에 대한 신뢰도 평가 요구가 있으나 제한된 데이터만 존재함.
- 국내 상용로에서 현재 사용하고 있는 SGDP 신호는 신호 불안정이 발생하여 불필요한 원자로 정지신호를 발생할 가능성이 있음. 발전소의 안정적인 운전을 위해 원자로 정지신호 발생을 위한 새로운 입력 개발 필요성 대두됨.
- 기존 경수로설계기술은 능동형기반으로 구축되었으며 피동안전계통의 부분적 도입되어 있음. 완전피동화 적용 원전은 아직 구축되지 않았으며, 피동-능동안전계통의 복합화 및 최적화 연구는 진척되지 않았음.

□ 미래동향 예측

- 유럽의 원전 건설 확대로 50Hz RCP의 수요가 증대될 것으로 예상됨.
- 원전의 피동안전계통화가 강화 될 것으로 예상되며, 이를 위한 광범위한 실증/검증 데이터가 필요할 것으로 예측됨.
- 피동안전계통 및 능동안전계통의 접목에 따른 안전계통 최적화 연구가 필요할 것으로 예측됨.

□ 기술개발 수행체계

- 원자로 유동-구조물 간섭 실증기술 개발(열충격/성층화)
 - 1단계(5년) : 용기 및 배관 PTS 및 성층화 실험요건 및 실험장치 구축
 - 2단계(5년) : 용기 및 배관 PTS 및 성층화 평가모델 및 코드 검증
- 수출용 RCP 50 Hz 시험용 전력기반 구축 개발
 - 1단계(3년) : 50 Hz 대용량 인버터 설계 및
 - 2단계(2년) : 50 Hz 대용량 인버터 현장설치 및 성능검증시험
- 피동안전계통 신뢰도 평가 및 확장 실험
 - 1단계(5년) : 피동안전계통 신뢰도 평가를 위한 기본 실험
 - 2단계(5년) : 피동안전계통 신뢰도 평가 확장 실험 및 신뢰도 평가
- RCS 유량측정 및 순간적인 유량감소 측정
 - 1단계(5년) : 순간적인 RCS 유량변화를 안정적 원자로 보호계통작동 기술개발
- 미래형 안전계통 최적화 개발
 - 1단계(5년) : 고냉각유속을 갖는 혁신적 신형 냉각 계통 개발
 - 2단계(5년) : 미래형 최적 안전계통 개발 및 성능 평가

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 원자로 열충격/성층화) 유동-구조물 간섭 실증기술	<ul style="list-style-type: none"> • 용기 및 배관 PTS 및 성층화 실험 • 용기 및 배관 PTS 및 성층화 평가모델 및 코드 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 용기 및 배관 열충격 실험 및 코드 검증
• 수출용 RCP 50 Hz 시험용 전력기반 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 50 Hz 대용량 인버터 설계 및 기존 설비 상호성 검증개발 • 50 Hz 대용량 인버터 현장설치 및 성능검증시험개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 50 Hz 대용량 인버터 설계/성능검증시험
• 피동안전계통 신뢰도 평가 및 확장 실험	<ul style="list-style-type: none"> • 피동안전계통 신뢰도 평가 실험 • 피동안전계통 신뢰도 평가 확장 실험 및 신뢰도 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 피동안전계통 검증실험 및 신뢰도 평가 기술
• RCS 유량측정 및 순간적인 유량감소 측정	<ul style="list-style-type: none"> • 순간적인 RCS 유량변화를 안정적으로 감지 • 감지된 신호를 이용하여 원자로 보호계통 작동 	<ul style="list-style-type: none"> • 순간적인 RCS 유량변화 감지기술
• 미래형 안전계통 최적화 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 고 냉각유속을 갖는 혁신적 신형 냉각 계통 개발 • 미래형 최적 안전계통 개발 및 성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 고 냉각유속을 갖는 혁신적 신형 냉각 계통 개발

4) 안전현안 대응 및 안전여유도 평가 기술

□ 기술의 정의

- 안전 연소도 이력에 따른 핵연료 피복관 표면부식 및 산화도에 따른 열전달 영향 등 안전 기준 환경 변화 대응 검증실험 및 해석코드 평가모델의 개발과 종합검증
- 1차원적 또는 계통 스케일 규모의 원전안전해석코드의 적용에 따른 과도한 보수성 부여를 개선한 안전여유도 평가 및 개선 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 핵연료연소도 이력에 따른 산화피막이 열전달 특성에 미치는 영향 등의 평가모델 및 이의 검증연구는 수행되지 못하였음.
- 노심 국소 막힘 및 연소이력에 따른 Gap 변형, 열전달 특성 변화 등의 검증 종합연구는 수행되지 못하였음.
- 국내 원전 설계기준안전성 평가는 기기 및 계통스케일 규모이며, 1차원적 및 제한적 2 차원 해석에 따른 보수성을 부여하여 안전성을 평가하고 있음.
- 최근 국내에서 기기스케일(CUPID)과 계통스케일(MARS, SPACE)를 연계한 다중스케일 CUPID/MARS를 개발하였고 기기스케일 해석을 보다 정교하게 해석하기 위한 기술개발을 추진 중에 있음.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 연소도의 영향에 따른 산화피복 막의 특성 및 열전달 특성 변화, 재료물성치의 변화 열전달 특성 변화, 연소도에 따른 Gap변화 및 노심다차원 특성 변화 등의 연구가 진행되었음.
- 계통열수력 코드와 상용 CFD 코드의 연계 방법을 개발하여 주로 정상상태 해석에 활용함.

□ 미래동향 예측

- 원전 운전이력증가 및 안전성 강화에 따라서 운전이력에 따른 물성치 변화 등의 영향을 반영한 안전성 평가가 중요해 질 것임.
- CFD 스케일/기기스케일/계통스케일 통합 열수력 해석 기술과 다물리 및 CFD 급 해석기술의 개발이 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

○ 안전 기준 환경 변화 대응 실험 및 평가기술

- 1단계(5년) : 안전 기준 환경 변화 대응 및 수화학 연소도변환 영향 평가실험
- 2단계(5년) : 안전 기준 환경 변화 대응 종합평가모델 및 코드 검증

○ 다차원 예측기술 적용 원전 안전여유도 평가 및 개선 기술 개발

- 1단계(3년) : 기기스케일/계통스케일의 다차원 화 해석 기술 개발
- 2단계(3년) : CFD 스케일 급 해석 기술 및 기기/계통 스케일 해석 접목기술개발

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 안전 기준 환경 변화 대응 실험 및 평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> 안전 기준 환경 변화 대응 실험 안전 기준 환경 변화 대응 종합평가모델 및 코드 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 연소도 이력에 따른 열전달 특성 평가 기술
<ul style="list-style-type: none"> 다차원 예측기술 적용 원전 안전여유도 평가 및 개선 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 다차원화 해석 기술 개발 CFD스케일급 해석 기술 및 기기/계통 스케일 해석 접목기술 	<ul style="list-style-type: none"> 다차원 해석기술 적용 원전 안전여유도 평가기술

5) 특수목적용 열유동 실험

□ 기술의 정의

- 임계점 근처에서 안정적으로 작동할 수 있는 초임계 CO₂ 발전계통 및 핵심 기계 설계 기술
- 신개념 열교환기의 최적설계로 유로형상에 대한 유체해석, 제작성, 경제성 확보
- 작동 유체에 따른 안전계통 성능 평가로 기존 경수로 원전뿐만 아니라 신형 원전의 안전계통 적용 가능
- 냉각재가 노내에 직접 삼입되므로 기존의 냉각재 비상 주입식 피동 냉각 계통 및 2차측을 이용한 냉각개념과 차별화된 새로운 구동 개념

□ 국내 개발 수준 및 현황

- 원자력, 연료전지 및 선박을 포함한 플랜트의 폐열 등 다양한 열원에 적용할 수 있는 초임계 CO₂ 설계가 제안되었음.
- 비교적 저온 환경(< 300 °C) 조건에서 zigzag형 고집적 열교환기에서 물, 기체, 혼합물 등의 열전달 특성을 실험적으로 평가하는 수준임.
- Lab-scale의 열교환기 설계 및 유로구조 해석을 위한 전산코드 개발
- 기존 zigzag형 채널에 비해 압력강하를 효과적으로 줄일 수 있는 airfoil fin형 채널에 대한 설계 제안 및 기초 실험 수행
- 노심으로 삽입되는 제어봉과 피동형 열전달 장치인 히트파이프의 기능을 결합한 하이브리드 제어봉 설계를 제안
- 하이브리드 제어봉의 히트파이프 열전달 성능에 대한 중성자 흡수체 효과 실험
- 수출형 원전에 피동형 보조 급수 계통 (PAFS)과 비슷한 개념의 열 사이펀 냉각 시스템 개념 제시

□ 해외 개발 수준 및 현황

- 미국에서는 다양한 용량의 초임계 CO₂ 실험장치를 통해 성능 검증 및 과도 상태 및 제어논리 검증에 대한 연구가 진행되고 있으며 핵심부품에 대한 다양한 설계방법이 활발히 개발되고 있음.
- 중국에서는 4세대 원자력 발전소에 적용시킬 목적으로 초임계 CO₂ 사이클 연구가 시작되었으며 MWe급 실험장치 구축을 목표로 기술 개발이 진행되고 있음.
- 일본에서는 화력발전소에 적용할 수 있는 초임계 CO₂ 사이클을 개발하고 있으며 이를 위한 연소기, 터빈, 발전기에 대한 연구가 진행 중임.
- 미국은 고온환경(> 800 °C) zigzag 형 고집적 열교환기 실험을 다양한 유체 환경에서 실험 및 기존 열전달 상관식 비교 평가
- 중국은 CO₂ 환경에서 wavy형 채널의 열전달, 압력강하 특성 평가
- 히트파이프를 이용한 격납용기 냉각시스템이 제안되었으며 타당성 검증 실험이 수행됨.
- 사용후 핵연료 저장수조의 냉각을 위한 히트파이프 설계 및 열전달 실험이

수행됨.

- 여러 유체의 다양한 geometry 환경에서의 히트파이프 기초 실험이 수행됨. 이를 통해 열저항 및 열전달계수 등이 측정되었음.
- 후쿠시마 사고 후 피동냉각 계통의 중요성이 대두됨에 따라 히트파이프를 이용한 피동 냉각 계통에 대한 연구가 꾸준히 증가하는 추세임.

□ 추진 전략

- 산학연 공동 개발
- 플랜트급 SCO₂ 발전 종합실험루프 구축
 - 1단계(2년) 목표: 초임계 CO₂ 발전계통 설계 및 핵심기계 구현을 위한 실험장치 구축
 - 2단계(3년) 목표: 초임계 CO₂ 사이클의 제어를 위한 천이상태 실험 및 해석 코드 개발
 - 최종 목표: 대형 초임계 CO₂ 사이클 해석에 적용할 수 있는 핵심기계 설계 기술 개발 및 해석 코드 검증
- 신개념 PCHE 열유동 해석 및 검증 실험
 - 1단계(2년) 목표: 신개념 유로형상 고집적 열교환기 설계 및 열유동 특성 평가
 - 2단계(3년) 목표: Lab scale 장치구축 및 실험데이터를 통한 설계 코드 검증
 - 최종 목표: 실험데이터에 기반한 신개념 유로형상의 최적설계 도출
- 히트파이프 적용 최적 냉각 성능 검증 실험
 - 1단계(2년) 목표: 신개념 피동 안전계통을 제안함.
 - 2단계(3년) 목표: 기초 실험 수행 및 코드 시뮬레이션을 통한 원전 안전성 평가
 - 최종 목표: 신개념 피동 안전계통의 설계 및 안전성 평가 결과 제시
- 하이브리드 제어봉 노내피동냉각 기술
 - 1단계(2년) 목표: CRDM의 변경을 통한 노내피동직접냉각 기술의 열침원 설계
 - 2단계(3년) 목표: 노내피동직접냉각 시스템 제작 및 Scale-down Mock-up을 이용한 열적 성능 평가 실험 장치구축과 실험 수행
 - 3단계(5년) 목표: 신개념 노내피동직접냉각 시스템과 제어봉 삽입 시 원자로 거동 분석을 위한 실증 시설 건설 및 실증 실험
 - 최종 목표: 혁신적 노내 피동 직접 냉각기술 개발

□ 기술의 구성

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 플랜트급 SCO₂ 발전 종합실험루프 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 초임계 CO₂ 사이클의 제어를 위한 천이상태 실험 및 해석 코드 개발. 	<ul style="list-style-type: none"> 초임계 CO₂ 발전계통 및 핵심기계 설계 기술
<ul style="list-style-type: none"> 신개념 PCHE 열유동 해석 및 검증 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 신개념 유로 형상의 고집적 열교환기 설계 및 열유동 특성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 실증 데이터에 기반한 신개념 PCHE 개발
<ul style="list-style-type: none"> 히트파이프 적용 최적 냉각 성능 검증 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 신개념 피동 안전계통의 설계 및 안전성 평가 결과 제시 	<ul style="list-style-type: none"> 히트파이프를 적용한 신개념 피동 안전계통
<ul style="list-style-type: none"> 하이브리드 제어봉 노내피동냉각 기술 	<ul style="list-style-type: none"> CRDM의 변경을 통한 노내 피동 냉각 기술의 열침원 설계 신개념 노내 피동 냉각 시스템을 위한 실증 시설 건설 및 실증 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 하이브리드 제어봉을 적용한 피동 냉각 기술 원전 수출 시장에서의 경쟁력 확보와 원자로 안전성 증진

4.5.4 ICT 융합 열수력 안전 기술

가. 기술 개요

□ 이슈 및 문제점

- 고신뢰성 및 고안전성이 요구되는 원전 열수력 계통의 안전성 혁신을 위하여 인공지능 등 ICT 기술의 접목이 필수적이나, 기존의 열수력 공정제어용 상태 변수만을 이용한 감시 체계로는 혁신화가 어려움.
- 현재의 노심상태 감시(예, COLSS)는 열수력 및 핵적 파라미터의 분포에 기반하여 이루어지고 있으나, 노심 내부의 상세한 열수력 상태 및 핵연료집합체의 구조 상태를 포함한 종합적인 안전성 감시는 수행되지 않고 있음.
- 기존의 RCP에서는 열수력적인 이상상태 및 진동상태 감시를 각각 독립적으로 수행하고 있으므로 고장의 조기 탐지에 한계가 있음.
- 가동원전의 경우, 증기발생기의 일차계통 또는 이차계통에서 예기치 않은 이물질이 발생할 경우 전열관 손상 가능성이 높으며, 이 경우 원전의 안전성에 심각한 영향을 초래 할 수 있음(국내 원전에서도 수차례 발생하였음).
- 국내의 원전 및 수화력 플랜트의 경우 열수력 공정제어 및 기기의 구조상태 감시용 센싱 시스템은 전량 수입에 의존하고 있음. 최근 제4차 산업혁명 기

술을 접목하여, 열수력적 인자 및 구조상태 인자를 융합적으로 센싱 할 수 있는 신기술의 개발이 선진국을 중심으로 진행되고 있음.

- 국내에서는 유일하게 한국원자력연구원에서 열수력 안전 실증 설비 및 RCP 성능검증용 고온고압 유체계통 루프 시설을 보유하고 있으나, 고온고압용 센서류/밸브/유량계 등의 국산화 개발 시 또는 검교정 및 성능 시험 등이 필요한 경우에는 대부분 실 규모 성능검증 시설을 갖추고 있는 해외 선진국에 의존하고 있음.
- 원자로계통의 핵심 기기인 RCP의 건전성 감시는 현재 RCPVMS가 운용되고 있으나, 단순한 이상상태 탐지 위주의 감시가 유일함. 한국원자력연구원에서는 RCP 성능검증용 시설을 보유하고 있으므로, 이 시설을 활용하면 실제 원전에서 구축하기 어려운 열수력 성능 감시 및 구조결합 조기 탐지를 위한 진단용 빅데이터 구축이 용이함.

□ 기술개발 필요성

- 원전 열수력 계통의 정확한 성능 및 상태 감시를 위하여 열수력적인 상태 데이터뿐만 아니라 압력경계의 동적거동 관련 이중 데이터를 함께 이용함으로써 열수력적/구조적 통합 건전성 감시/진단이 가능함.
- 노내외 중성자 및 열수력 센서류의 잡음신호를 이용하면 노심의 구조상태도 동시에 모니터링 할 수 있으므로, 노심의 안전진단 신뢰도를 대폭 향상시킬 수 있음.
- 또한, 열수력 및 구조상태 신호를 동시에 측정하여, IT 기술을 접목한 융합 분석을 적용할 경우, RCP의 안전성 진단신뢰도를 대폭 향상시킬 수 있음.
- 증기발생기 전열관에서 유동기인진동 및 이물질 발생의 복합적인 작용으로 인한 사고 초래(덴팅, 마모, 균열, 누출 등)를 미연에 방지하기 위하여, 원전의 전열관 건전성에 대한 감시 및 영향 판단을 위한 시험/평가 기술이 필요함.
- 가동원전의 안전성 혁신을 위해서는 다양한 종류의 융복합 센싱 기술의 적용이 필수적이며, 이에 기반 한 인공지능 기술을 효과적으로 적용하기 위해서는 IoT를 적용한 빅데이터 구축 등을 위하여 자체적인 센싱 기술의 확보가 시급하며 더 이상 수입에만 의존할 수 없음.
- 국내에서 보유하고 있는 실 규모 시설을 보완하여 이용하면 고온고압용 센서류/밸브/유량계 등에 대한 검교정 및 성능 검증 기술의 자립이 가능함.
- 국내유일의 RCP 실 규모 실증시설을 이용하면, RCP의 열수력/구조상태 융합진단용 빅데이터 구축이 가능하므로 선진국에서도 확보하기 어려운 인공

지능을 적용한 예측진단용 데이터베이스를 선도적으로 구축할 수 있음.

나. 세부 기술 내용

1) 압력계통 열수력/구조 상태 융합 감시

☐ 기술의 정의

- 노내외 중성자, 열수력, 외부진동 신호 노이즈 통합분석 기반 노심 열수력/기기구조 건전성 융합감시 기술
- RCP 열수력/구조 상태 실시간 통합모니터링 기술
- 유동기인진동 및 이물질충격에 의한 전열관 건전성 감시, 영향평가 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 노심의 통합모니터링 기술은 이론적인 배경은 확보되어 있으나, 국내에서는 아직 기술이 개발되어 있지 않음.
- RCP의 열수력/구조 상태 실시간 통합모니터링 기술은 국내에서 기반기술은 확보되어 있으나, 실제 적용은 되지 않은 상황임.
- 증기발생기 전열관의 유동기인 진동 및 이물질의 충격영향 평가를 위한 기초적인 시험기술만 확보되어 있음.

☐ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 노심의 통합 모니터링 기술은 유럽을 중심으로 실제 발전소에 적용하여 성능을 검증하였음.
- RCP의 열수력/구조 상태 실시간 통합모니터링 기술은 기반기술은 확보되어 있으나, 실제 적용은 되지 않은 상황임.
- 증기발생기 전열관 및 원자로내부구조물에 대한 유동기인 진동에 의한 영향 평가용 소프트웨어 및 가이드는 확립되어 있음. 이물질에 의한 충격영향 평가는 실험실 규모의 시험 DB가 확보되어 있음.

☐ 미래동향 예측

- 노심의 통합모니터링 분야는 원전의 노심 안전성 강화 및 중소형, 수출 원전 등에 적용 가능하므로 미래에 적극적인 적용이 예측됨.
- RCP 열수력/구조 상태 실시간 통합모니터링은 원전 및 일반 플랜트 등의

안전성 혁신을 위하여 적합한 기술로 판단됨.

- 원전의 안전성 강화를 위해서는 증기발생기 전열관의 유동기인진동 및 금속성 이물질에 의한 충격 및 마모 등에 대한 영향평가 기술의 개발 및 적용이 국내외적으로 필수적으로 요구되는 사항임.

□ 기술개발 수행체계

- 노심의 건전성 통합 모니터링 기술개발을 위하여 중성자 노이즈 신호 분석, 열수력적 파라미터 분석 및 구조상태 해석 분야, 그리고 실제 현장 전문가의 협력체계 구축
- RCP 열수력/구조 상태 실시간 통합모니터링 분야는 한국원자력연구원의 실규모 시설을 적극 활용하여 다양한 현상에 대한 시험 데이터베이스 구축
- 증기발생기 전열관의 해석적 모델링 및 시험모델 구축, 유동기인진동 해석/시험, 이물질 충격 영향 해석/시험 등을 위한 산·학·연 협력 체계 수립

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 노심 열수력/구조 건전성 융합감시 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 노내외 중성자, 열수력, 외부진동 신호 노이즈 통합분석 기술 • 노심 융합감시용 시제품 개발 및 성능 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 노이즈 신호 융합 분석 기술 • 노심 융합감시용 시제품 • 성능평가 자료
• RCP 열수력/구조 상태 실시간 통합모니터링 기술	<ul style="list-style-type: none"> • RCP 열수력/구조 상태 융합감시 핵심기술 개발 • 열수력/구조 상태 융합감시용 시제품 개발 및 성능검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 융합감시 분석 알고리즘 • 시제품 및 성능검증 자료
• 유동기인진동 및 이물질충격에 의한 전열관 건전성 영향평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 시험용 테스트베드 구축 및 영향평가 기반기술 • 영향평가 데이터베이스 구축 및 AI 기반 평가 기술 • 전열관 건전성 감시, 영향평가 지침서 및 솔루션 	<ul style="list-style-type: none"> • 유동/구조 해석 모델 • 테스트베드 구축 및 DB • 영향평가용 지침서

2) ICT 기반 융합 센싱 및 성능진단

□ 기술의 정의

- 유체계통 열수력 및 구조 상태 융복합 센싱 시스템 기술개발 및 성능 평가.

- 고온고압용 유량계/밸브/센서류 교정 및 성능시험 기술개발 및 검인증 체계.
- RCP 및 요소기기의 열수력/구조상태 예측진단 기술
- 딥러닝을 활용한 열유체 모델 현대화 및 열수력 검증시험의 상사해석 기술

□ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 융복합 센싱 분야의 경우, 구조상태 센싱 소자 분야 원천기술이 진행 중임.
- 고온고압 유체계통 설비는 있으나, 플랜트용 유량계/밸브/센서류 등에 대한 성능검증, 검교정 기술 및 자체시설 없음.
- RCP 및 요소기기의 열수력/구조상태 통합 예측진단 기술 개발 경험 없음.
- 딥러닝을 활용한 현대적 기법을 기반으로 하고 있는 과학기술 연구가 활발히 진행되고 있고, 원자력분야에서는 원자로의 안전 신뢰도를 평가하고 개선하는 분야에 연구가 시작됨.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 구조상태 및 열수력 센싱 분야는 상용화되었으며, 융복합 센싱 분야의 연구가 지속적으로 활발히 진행되고 있음.
- 다양한 유체계통 설비를 이용하여 유량계/차압계 등 센서류에 대한 자체적인 검교정 및 성능검증 체계가 확립됨.
- RCP 및 대형펌프류의 열수력적 성능 및 구조상태 진단용 DB 구축으로 통합 예측진단 기반을 구축함.

□ 미래동향 예측

- 융합 센싱 분야의 경우, 원전뿐만 아니라 일반 플랜트 신재생에너지 시설, 국방, 우주, 해양플랜트, 고층건물, 교량 및 스마트팩토리 등에 폭넓게 적용이 가능함.
- 고온고압용 유량계/밸브/센서류 교정 및 성능시험 기술개발 및 검인증 체계는 국산화 개발 요소기기의 검교정 및 성능검증에 활용함으로써 해외의존도 탈피 및 국내에서 검인증 획득이 가능하게 됨.
- RCP의 상태감시 및 진단 신뢰도의 획기적인 개선은 가동원전의 안전성 강화에 크게 기여할 수 있으며, 상태기반정비 기술의 접목으로 유지보수 최적화에 기여할 수 있음.

- 데이터 개방을 통한 Data Science 참여의 전 국민 기호를 이끌어내어 원자력기술의 소통과 참여를 획기적으로 증대함.

□ 기술개발 수행체계

- 융복합 센싱 분야의 경우, 1)물질개발 및 소자화, 2)센서 구조설계 및 제작, 3) 성능 평가 및 검교정 부문으로 나누어 산·연 협력체계를 수립함.
- 고온고압용 유량계/밸브/센서류 교정 및 성능시험은 관련 기술개발 중소기업 및 발전소 현장의 적극적인 참여 유도함.
- RCP 예측진단 분야의 경우, 한국원자력연구원의 실 규모 RCP 루프를 적극 활용하며, 한수원 및 발전소와 협력하여 직접 현장적용이 가능하도록 추진함.
- 딥러닝 분야의 경우 ICT, 열유체 다분야의 통합 연구가 필요한 분야로서 각 기술을 보유 또는 개발 그룹의 효율적인 연계 수행 체계가 중요함.

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> • 유체계통 열수력 및 구조 상태 융복합 센싱 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 열수력/구조 상태 융복합 센싱 요소기술 개발 및 검증 • 센싱 시스템 시제품 개발, 성능 평가 및 검교정 체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 융복합 센서소자 및 센싱 시스템 요소기술, 절차서 • 센서구조 최적화 설계 • 성능평가 및 검교정 체계
<ul style="list-style-type: none"> • 고온고압용 유량계/밸브/센서류 교정 및 성능시험 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 중소형 능동기기 성능 검증용 시험루프 설계 및 시운전 • 성능 평가 및 검인정 체계 구축 및 표준화 	<ul style="list-style-type: none"> • 시험루프, 시운전 절차서 • 검인증 체계 및 표준화
<ul style="list-style-type: none"> • RCP 열수력 성능 및 기기건전성 예측진단 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • RCP 및 요소기기의 열수력/구조상태 융합진단용 빅데이터 구축 및 예측진단 기법 • RCP 및 요소기기의 열수력/구조상태 예측진단 시제품 개발 및 성능 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 빅데이터 및 예측진단 기술 • 시제품 및 성능평가
<ul style="list-style-type: none"> • 딥러닝을 활용한 물리모델 및 상사해석기술의 현대화 	<ul style="list-style-type: none"> • 인공지능 기반의 물리 모델 개발 • 상사성 평가 기초실험 • 다유체 (예: 소듐 & 물) 상사성 모델개발 • 척도 왜곡의 체계적 이론 정립 	<ul style="list-style-type: none"> • 열전달, 유동장 해석 기술 • 다유체 상사해석기술

4.5.5 수출형 신형 원자로 핵심 기술 개발 및 검증

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 해외 1000 MWe급 원전시장에서 기술성과 안전성의 우위 확보를 위해서 기존 국내개발 피동안전계통 이외에도 혁신적 피동안전계통의 추가 적용과 최적화 등이 불가피하며, 이에 따라 핵심 설계 성능 및 안전성 종합실증이 필요함.
- 최근에 국내에는 1000 MWe 원전의 건설 수요가 없었으므로, 1000 MWe급 중형원전의 신규 설계 및 신안전계통 추가와 종합실증을 통한 원전의 안전성 실증 체계 확립이 필요함.
- 중형원전 표준설계인허가 획득용 설계/안전성 실증 데이터의 확보가 필요함.
- 대형 파단사고 원천적 배제와 같은 유럽 원전 공급자의 기술 개발 동향에 주의할 필요가 있음.

☐ 기술개발 필요성

- 후쿠시마원전 후속조치, 규제요건 강화 및 해외원전시장의 요구를 반영할 필요가 있음.
- 사고조건을 모의한 안전해석을 통한 안전성을 확인한 후 설계를 확정하며, 이때, 사고 진행과정 및 각 계통들 간의 상호 영향을 파악하기 위해서는 주요 안전계통을 모두 모사한 종합실증실험설비 구축하여 이를 통한 검증이 필요함.
- 국내의 경우 한국원자력연구원이 보유하고 있는 APR1400 설계검증 실험장치인 ATLAS의 운영경험을 바탕으로 최적화된 성능검증이 가능함.
- 또한 노형개발 측면에서는 발전소 정전사고 시 안전기능 확보를 위해 완전 피동형 안전계통을 채택한 혁신적 안전 경수로 개념 개발이 진행되고 있음.
- 다양한 피동형 및 능동형 안전계통이 채택된 원전에서, 개별 계통의 성능을 검증하는 개별효과실험(SET)로 계통성능을 검증할 필요가 있음.

나. 세부 기술 내용

- ☐ 수출형 신형원자로는 도입국의 산업인프라 및 기술선호도에 따라 다양

한 노형의 포트폴리오를 전략적으로 확보하는 것이 필수적임.

- 최근 안전성에 대한 일반대중의 우려가 증대됨에 따라 중대사고 원천방지 등 심층방어 능력에 대한 요구가 커지고 있음.
- 이에 따라 국제적으로 능동과 피동을 결합한 형태인 혼합형(hybrid) 원전 또는 완전피동형 원전(full passive) 기술개발이 활발히 진행 중에 있음.
- 피동 핵심기술은 외부의 구동력이 없이도 중력 또는 자연순환 등 자연력에 의해 안전기능을 수행하여 사고를 예방하는 기술임. 반면, 피동기술은 낮은 구동력(driving force)에 따라 시스템 구성 및 이에 대한 성능검증이 필수적임.

□ 추진 전략

- 산학연 공동 추진
 - 1단계(5년) 목표 : 1000 MWe 급 수출형 원전 핵심안전계통 안전성 실증평가
 - 1단계(2년) 목표 : 표준설계 핵심계통성능 및 신안전계통 개별/종합 실증평가
 - 최종 목표 : 1000 MWe 급 수출형 원전 계통 설계성능 및 안전성 종합 실증

□ 기술 구성 및 활용 분야

- 수출 노형 포트폴리오 다양화를 통한 경쟁력 제고
- 완전피동원전의 핵심 요소 기술을 확보를 통한 대국민 원전 수용성 증진
- 피동안전계통의 성능 및 배치 최적화를 통해 신형원전의 안전성 향상 및 수출 경쟁력 제고
- 고유기술을 통해 확보된 혁신적 안전 경수로 검증시험 자료 확보
- PCCS 설계 최적화 및 실 규모 성능검증으로 수출 전략형 노형 안전성 향상

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 1000 MWe 급 수출형 원전 설계기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 피동보조급수계통 냉각성능 검증 및 축소설계 (downsizing)최적화 기술 • 실규모 실증실험 및 검증기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 노형에 따른 설계최적화 방법론 • 계통설계 최적화 방법론
• 계통설계 및 안전성능 종합실증기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 피동계통 기본설계 • 피동계통 개별효과 검증기술 • 장기냉각 설계검증기술 • 성능향상을 위한 성능개선안 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 피동원전 성능평가 기술 • 장기냉각 검증기술
• 혁신적안전경수로 종합설계 검증실험	<ul style="list-style-type: none"> • 종합실증실험시설 구축 및 검증실험 • 입증기술(Proven Technology) 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 종합효과 검증기술

4.5.6 다물리 안전해석 도구 개발

가. 기술 개요

☐ 이슈 및 문제점

- 최근 원자력발전소 인허가 연소도의 증가는 정상상태 핵연료의 연소 특성, 즉 피복재 및 소결체의 취성을 유발하였으며 이는 정상상태뿐만 아니라 냉각재상실사고(LOCA) 및 반응도사고(RIA) 등 설계기준사고 시의 연료봉 파손과 노심냉각성능유지를 위한 핵연료 안전기준의 강화를 요구하였음.
- 국내·외에서 고연소도 안전기준 강화에 따른 ECCS 허용기준 개정을 추진 중에 있음.

☐ 기술개발 필요성

- 2016년 2월, 미국 원자력규제위원회는 비상노심냉각계통(ECCS) 허용기준(10CFR50.46) 최종 개정(안)을 마련하여 최종승인단계에 있으며, KINS에서도 본 ECCS 허용기준 개정을 위한 연구개발을 진행하고 있으므로 이에 대한 다물리 안전해석 도구 개발이 선제적으로 요구됨.
- ECCS 허용기준 강화에 대응하는 규제검증기술의 개선 및 개발이 요구되고, 이를 위해 핵연료의 인허가 연소도를 포괄하는 범위에서 원자력발전소의 계통 거동과 핵연료의 거동을 결합하고 사고 시의 핵연료의 기계적 변형과 열전달에 영향을 미치는 열수력학적 특성을 정밀하게 분석할 수 있는 핵연료/열수력 통합전산코드의 필요성이 대두되었음.

나. 세부 기술 내용

1) 통합 안전해석 검증 방법론 개발

☐ 기술의 정의

- 핵연료/계통열수력 통합 전산코드를 위한 핵연료 모델 개발, 평가 및 검증을 위한 기술
- 노심 냉각유로 변형 평가 모델 개발 및 적용을 위한 기술
- 통합코드를 활용한 검증 방법론 개발 및 적용을 위한 기술

☐ 국내 기술개발 수준 및 현황

- 국내에서 사업자가 개발 중인 FRAPTRAN/SPACE 통합코드와 KINS의 FRAPCON/MARS-KS 연계 계산 방법론은 핵연료 재배치와 크러드 모델 및 피복재의 대규모 변형을 유발하는 상황을 해석하기에는 기술적 한계가 존재함.

□ 국외 기술개발 수준 및 현황

- 미국 NRC는 연소도를 고려하기 위해 TRACE와 FRAPCON/FRAPTRAN 코드를 연계하여 계산하는 방법론을 개발하고 있으며, 연료봉 파손 및 분산에 따른 전 노심의 냉각성능평가도 단순 단방향 계산방법에 기반한 초기단계의 평가 방법론을 개발하였음.
- 프랑스의 IRSN은 핵연료 규제검증코드로서 DRACCAR 및 SCANAIR를 개발하였으며, 이들 전산코드는 사고 시에 발생할 수 있는 다양한 현상을 모델링 할 수 있는 기능을 갖추고 있는 것으로 알려져 있음. 또한 핵연료재배치 및 피복재 변형에 따른 열수력모델 등을 평가하기 위해 PERFROI 연구 프로그램 등을 국제공동연구로 수행하고 있음.

□ 미래동향 예측

- 원전 운영자는 고연소도 핵연료의 안전기준 강화에 따른 핵연료/열수력 안전해석 통합코드 개발을 추진하여 관련 ECCS 허용기준 강화에 대응할 것으로 예상됨.
- 산업체의 코드 및 방법론 인허가 신청의 증가로 인해 규제기관의 독립검증에 대한 수요가 급증할 것으로 예상됨.

□ 기술개발 수행체계

- 핵연료/계통열수력 통합코드의 검증과 특수모델 개발 등을 위해서는 검증자료 확보를 위한 국제공동연구와 외부 전문가 및 관련 유관기관과의 연계 수행 체계가 중요함.
- 개발 과정은 2가지 분야에 대해 수행되며, 핵연료/계통열수력 통합코드용 핵연료 특수 모델개발이 수행된 후에 관련 규제검증방법론 개발과 새로운 안전기준 및 지침서 등의 개발이 병행하여 수행될 것임.
- 수행 체계.
 - 1단계(3년) : 핵연료/계통열수력 통합코드용 핵연료 모델 개발 및 평가
 - 2단계(5년) : 핵연료/계통열수력 통합코드 규제검증 방법론 및 신안전기준 개발

□ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 핵연료/계통열수력 통합코드용 핵연료 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 재배치, 크러드 열저항 등 핵연료 모델 개발 냉각형상을 고려한 열전달 모델 개발 핵연료 파손분율 및 분산량 평가를 통한 노심냉각성능 해석 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 재배치 및 변형에 대한 실험 자료 확보 핵연료 변형에 따른 열전달 모델 핵연료 파손 및 분산 모델
<ul style="list-style-type: none"> 핵연료/계통열수력 통합코드 규제검증 방법론 및 신안전기준 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료/계통열수력 통합코드를 활용한 통합 계산 및 관련 모델 검증 통합코드를 활용한 LOCA 최적평가방법론 개발 반응도사고 및 노심 비대칭 사고에 대한 신안전기준 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 최적평가방법론 개발 반응도사고에 대한 핵설계/핵연료/노심열수력 연계계산 방법

제3장 우선 확보 기술

1

우선 확보 기술

◆ 우선 확보 기술 선정 기준 및 과정

- ☐ 원자력 안전 분야의 핵심기술을 분류·정리하여 '원전 안전성 향상 기술', '중소형 원자로 안전기술', '방사선 안전 관리 기술', '공통기반 기술'의 4가지 기술을 최상위 기술로 선정한 후 하위 5개 단계까지의 기술수목을 정리하였음.
- ☐ 각 분야 별 제시된 기술수목 중에서 기술적인 중요성과 안전성 향상에 효과가 크고 국민 안심에 기여할 수 있는 기술을 '우선 확보 기술'로 명명하고 총 24개를 선정하여 제시함. 24개의 '우선 확보 기술' 중에 기술개발의 파급효과와 시급성 및 안전성 향상 효과가 뚜렷한 기술을 '대표 우선 확보 기술'로 명명하고 총 8개를 선정하여 제시함.
- ☐ 학회 산하의 5개 연구부회의 산·학·연 전문가들을 분과위원으로 위촉하여 부회 별 수차례의 대면 및 서면 회의를 거쳐 기술수목도를 작성하고 '우선 확보 기술' 및 '대표 우선 확보 기술'을 선정하여 제시함. '우선 확보 기술'의 선정 시 주요 고려 사항은 다음과 같음.
 - 기술개발의 파급효과 및 시급성
 - 기술의 중요도 및 국내 필요성
 - 가동원전 및 미래원전의 안전성 향상 기여도
 - 기술의 현장 적용 가능성
 - 기술개발에 의한 인력 양성 효과

◆ 대표 우선 확보 기술

□ 사고저항성 핵연료 개발

○ 기술개발 필요성

- 가동원전의 방사능 물질 누출 사고 방지를 위한 핵연료 핵심 기술과도 시 핵연료 안전 여유도와 성능 향상
- 정상운전 및 과도 시 운전 여유도와 성능을 향상하고, 사고 시 사고 전개를 지연하여, 대처 시간을 확보함으로써 노심용융 및 수소폭발 사고 방지

○ 기술 정의

- 수소폭발과 노심용융 사고 방지를 위한 사고저항성 핵연료 혁신 소재(다중기지형 소결체, 다중기능 복합구조 피복관), 고융점 제어봉, 내진 구조 설계 기술
- 단기적용 핵연료 봉 소재(소결체, 피복관)의 가동원전 환경 안전 성능 검증 및 인허가 자료 생산
- 사고저항성 핵연료 안전 성능 정밀 시험 및 고신뢰도 성능 예측 기술 및 고신뢰도 안전성 종합 평가 체계 구축

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 사고저항성 핵연료는 연료봉 소재, 제어봉 소재, 사고저항성 집합체 구조 설계, 안전성능 해석 코드, 고정밀 시험기술 등으로 구성됨.
- 수소 폭발과 노심 용융 사고를 예방하는 가동원전 핵연료와 수출형 원전 핵연료로 활용함.



□ 재료 및 기기 열화손상 제어기술

○ 기술개발 필요성

- 원자로용기 조사취화, 니켈합금의 ODS/PCSCC 균열에 대한 연구를 통해 국내 원전의 대형 현안을 조기에 수습하고 사건빈도를 줄여가고 있으나, 여전히 새로운 유형의 재료열화 손상이 발견되고 있음.
- 40년 운전된 고리1호기의 원자로내 부품에서 IASCC 균열로 의심되는 검사신호가 발견되어, 이에 대한 본격적인 연구의 필요성이 운영자 및 규제기관에서 강하게 제기되고 있으나, 이 분야의 국내 기술기반이 부족한 상태임.
- 국내 일부 가동원전에서는 핵연료 피복관에 부식생성물(크러드)이 부착되어 원자로 상부와 하부의 출력 분포가 불균일한 현상이 발생하고 있으며, 원자로 안전성을 확보하기 위하여 출력을 감소하여 운전을 시행한 바 있음. 크러드의 열저항은 사고해석에도 영향을 끼치므로, 크러드의 완화대책과 더불어 열적, 물리적 특성 등에 대한 심도 깊은 연구가 필요함.
- 1차계통 LiOH를 대체하는 KOH 수화학 전환에 대비한 선제적 대응기술을 확보하고, 배관부식, 전열관 응력부식균열, 슬러지 거동을 통합적으로 고려한 2차계통 수화학 조건 최적화를 통하여 국내 고유 수화학 지침서 제정 및 인허가를 위한 기술근거로 활용할 필요가 있음.

○ 기술 정의

- 원자로 내부구조물의 중성자 조사에 의한 열화 거동과 응력부식균열 손상에 대한 전산모사, 파괴역학, 실험적 평가를 통하여, 건전성을 예측하는 기술 및 열화를 방지하는 기술
- 원전 가동 모사조건에서 니켈합금 및 핵심부품 용접부의 응력부식균열 손상에 대한 장시간 손상을 예측하는 기술 및 이를 방지하는 기술
- 증기발생기 슬러지 및 피복관 크러드의 열적, 물리적 특성을 측정하고, 이를 기반으로 열물성을 예측하는 모델링 기술을 개발함으로써, 중대사고 시 핵연료 피복관 용융 시간을 예측하는데 활용 가능한 기술
- 1차계통 LiOH를 대체하는 KOH 수화학 기술과, 2차계통 수화학 조건 최적화 기술을 개발함으로써, 국내 고유 수화학 지침서 제정 및 인허가를 위한 기술근거로 활용할 수 있는 기술.

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 재료 및 기기 열화손상 제어는 부식평가, 파괴역학, 수화학, 재료과학, 손상방지, 전산모사 모델링 등 다분야의 기술로 구성됨.
- 원자로 내부구조물, 니켈합금, 용접부 등 재료 및 기기의 열화 및 손상 예측과 방

지기술로 활용됨.

- 1차계통 및 2차계통의 응력부식균열, 부식용출, 슬러지 및 크러드 이동과 부착 저감을 위한 수화학 기술로 활용됨.

□ 가상 원자로 해석 기술

○ 기술개발 필요성

- 원전 가상사고 전개과정에 대한 정확한 예측 및 이를 활용한 원전 사고 방지/완화 기술은 국민이 안심할 수 있는 수준의 원전 안전성 달성을 위한 핵심 기술임.
- 최근 계산과학 및 슈퍼컴퓨터를 활용한 원전 시뮬레이션 소프트웨어 개발 연구가 활발히 진행 중이며, 향후 이러한 기술은 원전 안전성 평가에 실질적으로 적용될 것으로 예상되므로 이를 위한 핵심기술 확보는 매우 시급함.
- 현재 원전 안전성 평가체계는 1980년도 초중반에 완성된 기술로서 최근의 하드웨어 성능 개선을 반영한 해석 기술 개선 연구가 수행되지 않음.

○ 기술 정의

- 모델 및 시뮬레이션 기술을 기반으로 한 원전 다물리 현상의 상세 모사를 위한 통합소프트웨어 체계
- 계산과학 기술을 접목한 원전 해석 분야별 소프트웨어의 개발 및 이들을 연계한 통합 해석 플랫폼 개발
- 기술 특성 상 열수력 분야 이외의 다양한 전문 분야와의 밀접한 연계성을 지님.

○ 기술 구성 및 활용 분야

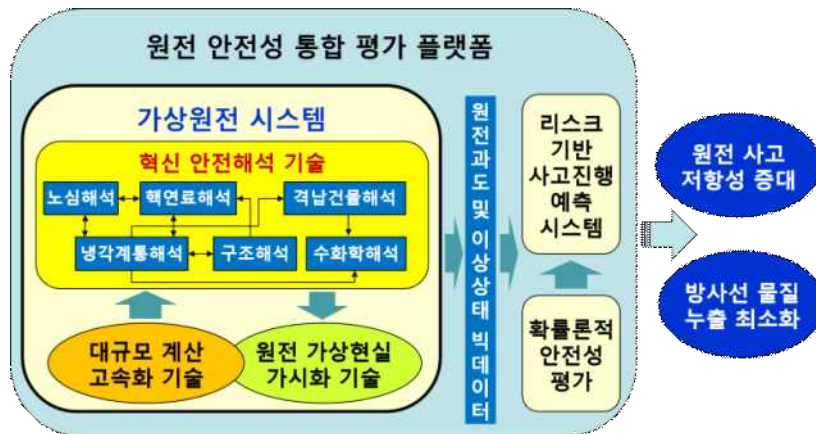
- 가상원전은 원전 다물리 해석 코드 (노물리해석, 핵연료해석, 냉각계통해석, 격납건물해석, 구조해석, 수화학해석), 대규모계산 고속화 기술, 가상현실 가시화 기술 등으로 구성됨.

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 원전 모델 및 시뮬레이션 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 노물리 해석 기술 • 핵연료 해석 기술 • 원자로 냉각계통 해석 기술 • 원자로 건물 해석 기술 • 중대사고 해석 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 노달스케일 중성자 확산 모델 • 봉스케일 정상상태 중성자 수송 모델 • 봉스케일 과도상태 중성자 수송 모델 • 몬테칼로 중성자 해석 모델 • 정상상태 핵연료 물성 모델 • 과도상태 핵연료 물성 모델 • 사고조건 핵연료 파손 모델 • 계통스케일 열수력 모델 • 기기스케일 열수력 모델 • CFD 해석 모델 • DNS 해석 모델 • 다중스케일 연계 모델

		<ul style="list-style-type: none"> CAD 연계 전처리 모델 수소 거동 모델 원자로 건물 응축 현상 모델 핵분열 물질 생성 및 거동 모델 CAD 연계 전처리 모델 노내 중대사고 현상 모델 노외 중대사고 현상 모델
<ul style="list-style-type: none"> 원전 모델 및 시뮬레이션 공통기술 	<ul style="list-style-type: none"> 구조 해석 기술 수화학 해석 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 구조 해석 모델 원자로 건물 구조 해석 모델 기기건전성 평가 모델 내진 해석 모델 붕소 거동 모델 냉각재 내 핵분열 물질 거동 모델 크러드(CRUD) 거동 및 침적 모델
<ul style="list-style-type: none"> 가상 원자로 시뮬레이션 플랫폼 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 통합해석 플랫폼 구축 기술 계산 클러스터 구축 기술 가상현실 가시화 시스템 구축 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 통합 플랫폼 SW 및 전후 처리 프로세서 다물리 연계 모델 개별 시뮬레이션 SW 핵심 솔버 병렬계산 기술 계산 클러스터 구축 및 운영 기술 개별 시뮬레이션 SW 최적화 기술 통합 플랫폼 SW 최적화 기술 시뮬레이션 결과 병렬 후처리 기술 3차원 가시화 기술 원전계통 가상현실 구현 기술 가상현실 시스템 입출력 구현 기술
<ul style="list-style-type: none"> 가상 원자로 활용 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 가동원전 안전성 향상 기술 안전해석 방법론 개선 예측 불확실도 정량화 기술 특수목적 원전 검증 실험 대체 기술 가동원전 실증 실험 대체 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 원전 안전 여유도 개선 기술 다차원 현상 관련 안전현안 적용 기술 원전 가상사고 통합 시뮬레이션 기술 DBA 안전해석 방법론 DEC 안전해석 방법론 중대사고(SA) 해석 방법론 개별 시뮬레이션 SW 불확실도 평가 기술 통합 시뮬레이션 불확실도 평가 기술 연구용 원자로 시뮬레이션 기술 중소형 원전 시뮬레이션 기술 액체 금속로 시뮬레이션 기술 신안전계통 검증 실험 대체 해석 기술 원전 성능 검증 실험 대체 해석 기술 다물리 복합 실험 대체 해석 기술 위험물질 사용 실험 대체 해석 기술
<ul style="list-style-type: none"> 계측 제어 계통 모델 및 시뮬레이션 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 계측제어계통 모사 및 성능해석 기술 가상원자로기반 원전 과도현상 빅데이터 구축 Cyber 원전 VR 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 디지털 회로 해석 기술을 확장한 디지털 기기 동작 모의 방법론 및 디지털 기기 모의 체제 디지털 기기 모의 방법론을 기반으로 디지털 기기의 실시간 성능을 모의할 수 있는 성능 해석 방법론 및 실시간 성능 해석 체제 계통 내 디지털 기기의 불확실도 전파 유형 및 경로 분석을 통한 불확실도 평가 모델 및 체제 계측제어계통 해석 모델과 가상원자로 해석체계 내의 타 해석 모듈과의 연계 기술 다양한 해석 모듈(핵연료, 노심, 열수력, 안전해석, 중대사고해석 등)과 계측제어계통 성능해석 모델과의 실시간 연계 및 정보교환 알고리즘 가상원자로 해석 입력 및 결과 연계를 위한

		가상현실 모델 <ul style="list-style-type: none"> 가상원자로 입력 처리 및 출력 표시 알고리즘 가상현실 기술을 활용한 데이터 처리 알고리즘
--	--	--

- 가상원자로(원전) 시스템은 확률론적 리스크 평가 기술과 연계하여 원전 안전성 통합 평가를 위한 플랫폼으로 활용됨.
- 이러한 원전 안전성 통합 평가 위한 플랫폼은 원전의 사고 저항성 증대와 방사선 물질 최소화 연구의 기반 기술로 활용됨.



□ 수출형 신형 원자로 피동 핵심 기술 개발 및 검증

○ 기술의 정의

- 수출형 신형원자로는 도입국의 산업인프라 및 기술선호도에 따라 다양한 노형의 포트폴리오를 전략적으로 확보하는 것이 필수적임.
- 최근 안전성에 대한 일반대중의 우려가 증대됨에 따라 중대사고 원천방지 등 심층방어 능력에 대한 요구가 커지고 있음.
- 이에 따라 국제적으로 능동과 피동을 결합한 형태인 혼합형(hybrid) 원전 또는 완전피동형 원전(full passive) 기술개발이 활발히 진행 중에 있음.
- 이중, 피동 핵심기술은 외부의 구동력이 없이도 중력 또는 자연순환 등 자연력에 의해 안전기능을 수행하여 사고를 예방하는 기술임. 반면, 피동기술은 낮은 구동력(driving force)에 따라 시스템 구성 및 이에 대한 성능검증이 필수적임.
- 유럽의 대형 냉각재 상실사고 재해석 동향에 대비한 LBLOCA 원천 배제 기술

○ 기술개발 필요성

- 국내의 경우 한국원자력연구원이 보유하고 있는 APR1400 설계검증 실험장치인 ATLAS의 운영경험을 바탕으로 최적화된 성능검증이 가능함.

- 또한 노형개발 측면에서는 발전소 정전사고 시 안전기능 확보를 위해 완전피동형 안전계통을 채택한 혁신적 안전 경수로 개념 개발이 진행되고 있음.
- 다양한 피동형 및 능동형 안전계통이 채택된 원전에서, 개별 계통의 성능을 검증하는 개별효과실험(SET)로 계통성능을 검증할 필요가 있음.
- 또한 사고조건을 모의한 안전해석을 통한 안전성을 확인한 후 설계를 확정하며, 이때, 사고 진행과정 및 각 계통들 간의 상호 영향을 파악하기 위해서는 주요 안전계통을 모두 모사한 종합실증실험설비 구축하여 이를 통한 검증이 필요함.
- 유럽의 LBLOCA 원천 배제 기술에 대비한 국내 대응 기술 개발 필요

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 수출 노형 포트폴리오 다양화를 통한 경쟁력 제고
- 완전피동원전의 핵심 요소 기술을 확보를 통한 대국민 원전 수용성 증진
- 피동안전계통의 성능 및 배치 최적화를 통해 신형원전의 안전성 향상 및 수출 경쟁력 제고
- 고유기술을 통해 확보된 혁신적 안전 경수로 검증시험 자료 확보
- PCCS 설계 최적화 및 실 규모 성능검증으로 수출 전략형 노형 안전성 향상

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
• 1000 MWe 급 수출형 원전 설계기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 피동보조급수계통 냉각성능 검증 및 축소설계 (downsizing)최적화 기술 • 실규모 실증실험 및 검증기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 노형에 따른 설계최적화 방법론 • 계통설계 최적화 방법론
• 계통설계 및 안전성능 종합실증기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 피동계통 기본설계 • 피동계통 개별효과 검증기술 • 장기냉각 설계검증기술 • 성능향상을 위한 성능개선안 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 피동원전 성능평가 기술 • 장기냉각 검증기술
• 혁신적안전경수로 종합설계 검증실험	<ul style="list-style-type: none"> • 종합실증실험시설 구축 및 검증실험 • 입증기술(Proven Technology) 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 종합효과 검증기술
• LBLOCA 재해석 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • LBLOCA를 DEC 영역으로 재해석하기 위한 원천 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 전파단 영역 스펙트럼 해석 기술 • LBLOCA DEC

□ 첨단 리스크 평가기술 개발

○ 기술개발 필요성

- 전 세계적으로 원전 설계 및 운영 경험이 증가하면서 원자력시스템과 리스크에 대한 지식의 상태(state of knowledge)가 지속적으로 달라지고 있음.

- 또한 후쿠시마 원전사고 이후 리스크 평가 대상 및 범위가 확대되어 이전에는 중요하게 다뤄지지 않았던 이슈들(다수기 리스크, 극한 재해 등)이 중요하게 인식되고 있으며, 이전보다 더 정밀한 평가가 요구되고 있음.
- 이에 따라 기존의 리스크 평가기술이 가진 한계점을 극복할 수 있는 첨단 리스크 평가기술의 개발이 필요함.

○ 기술 정의

- 다수기(2기 이상) 원전이 운영되는 부지에 대한 부지 차원의 리스크 평가 기술 및 모든 원전 부지를 포함한 국가 단위의 리스크 평가 기술
- 지진, 쓰나미, 슈퍼태풍 등 대규모의 극한 재해들에 대한 리스크 평가 기술
- 사고 전개 시간에 따른 원전 상태의 변화 및 운전원 행위를 반영한 동적 PSA 수행 기술
- 원전에 대한 물리적 방호, 테러 및 전쟁 상황을 고려한 리스크 평가 기술

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 부지 리스크 및 국가 단위 리스크 평가기술은 호기별 리스크 평가모델을 통합하는 기술, 부지 또는 국가 단위의 공유 자원 활용을 모델에 반영하는 기술, 호기 간 또는 부지 간 사고의 전파 및 영향을 모델에 반영하는 기술 등으로 구성되며, 부지 차원 또는 국가 단위의 리스크 평가 및 관리에 활용됨.
- 극한 재해 리스크 평가기술은 중요한 극한 재해의 선별 및 재해도 분석 기술, 극한 재해별로 원전 구조물 및 기기들의 취약도 분석 기술, 재해 상황을 반영한 인간신뢰도분석 기술 등으로 구성됨.
- 동적 PSA 수행 기술은 시간 종속성 반영이 필요한 요소들을 선별하는 기술, 선별된 요소별 시간 종속성 반영 기술, 이를 종합하여 리스크를 정량화하는 기술 등으로 구성됨.
- 물리적 방호/테러/전쟁 리스크 평가 기술은 물리적 방호와 리스크를 통합적으로 고려하는 기술, 테러 및 전쟁 상황 시 발생 가능한 주요 사고 시나리오 개발 기술 등으로 구성됨.

□ 중대사고 현상규명 및 평가 기술

○ 기술개발 필요성

- 중대사고 시 대량 방사성 물질 방출을 배제하는 수준의 중대사고 관리 및 대처 능력을 확보하기 위해서는 불확실한 중대사고 현상을 규명하고, 이를 평가하기 위한 코드를 개발해야 함.

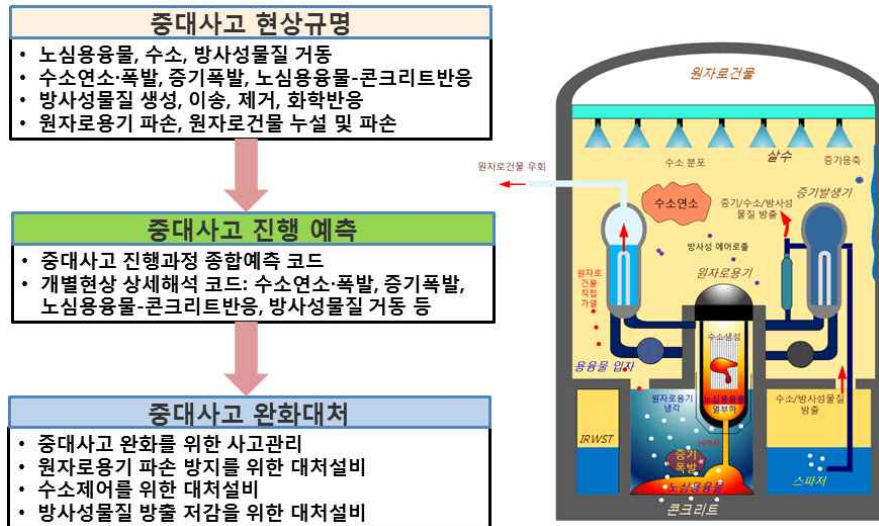
- 특히 후기 노심용융 거동 및 원자로용기, RCS 경계파손 평가 기술, 노외 노심용융물 거동 및 콘크리트 반응 특성 기술, 원자로건물 내 가연성 기체 거동 및 제어 기술, 방사성 물질의 소외 방출량 평가를 위한 핵분열생성물 거동 모델 및 원자로건물 누설 등과 같은 기술은 여전히 불확실한 부분으로 남아있음.
- 위와 같은 중대사고 현상규명을 위한 실험을 바탕으로 한 중대사고 종합평가 전산코드의 개선은 중대사고 시 원자로건물 내 방사성물질의 양을 평가하기 위해 필수적으로 수행해야 함.
- 중대사고 시 원자로건물 내 방사성물질에 대한 선원항 평가기술을 정립하고, 이를 바탕으로 방사선원항 저감 방안을 수립함.

○ 기술 정의

- 중대사고 시 방사성물질 방출 평가기술: 후기 노심용융 거동 및 원자로용기, RCS 경계파손 평가 기술; 노외 노심용융물 거동 및 콘크리트 반응 특성 기술; 원자로건물 내 가연성 기체 거동 및 제어 기술; 방사성 물질의 소외 방출량 평가를 위한 핵분열생성물 거동 모델
- 중대사고 종합평가 전산코드 해석기술: 원자로건물 가연성기체/방사성물질 연계 3차원 해석기술; 중대사고 종합해석 코드 고도화 기술; 가상원전 기반기술
- 방사선원항 저감 기술: 국내 원전 선원항 평가 기술; 선원항 저감을 위한 대처 기술; 중수로 방사성물질 누출 방지 및 정밀평가 기술; 수소 및 방사성물질 감지 및 대처설비
- 원자로건물 손상에 따른 누설률 평가 기술: 원자로건물 콘크리트 미세균열 해석 기술; 균열부/관통부 누설량 분석 및 실증 기술

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 중대사고 쟁점(용융물 냉각/수소/방사성물질/원자로건물 누설률) 평가 실험 DB를 구축하여 중대사고 종합해석 코드 및 원자로건물 가연성기체/방사성물질 연계 3차원 해석 코드를 검증함.
- 국내 원전 원자로건물 내 고유방사선원항 평가, 방사선원항 저감 기술을 이용하여 신개념 중대사고 대처설비 설계 및 평가에 활용
- 가상원전의 중대사고 해석 모듈로 활용
- 중대사고 관리 능력 향상 및 최적 중대사고 대처방안 수립을 위한 평가 도구로 활용



□ 방사선비상 대응 기술향상

○ 기술개발 필요성

- 원자력 사고 시 환경으로 누출된 방사성물질에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 방사선원을 포함하여 다양한 기상/환경 및 개인피폭선량 정보가 기본적 선결요건이며, 이들 가용한 정보를 최대한 활용하여 방사선학적 피해를 신속하고 신뢰성 있게 예측하여 사고대응 의사결정권자가(decision-maker) 최상의 주민보호조치를 취할 수 있도록 지원하는 기술이 필요
- 일본은 국가원자력재난관리시스템 SPEEDI를 자체 개발하여 운영하고 있었으나, 후쿠시마 원전사고에서는 전기공급계통 손상으로 방사성물질의 환경방출량 등 필수 안전정보들이 제대로 수집되지 않아 예측결과와 실측결과 간에 많은 차이를 나타냈음.
- 국내에서는 한국원자력안전기술원(KINS)에서 국가원자력재난관리시스템 AtomCARE를 구축하여 실시간으로 다양한 원자력안전정보를 수집하고 있으나 후쿠시마 원전사고의 경험을 반영한 운영체계를 확보하는 것이 필요함.
- 유럽에서는 유럽방사선량평가그룹(EURADOS)을 기반으로 원자력시설사고, 방사선테러 등 대규모 방사선 비상 시 개인선량계가 없는 일반인에 대한 개인피폭선량을 평가하는 연구를 지속적으로 광범위하게 수행 중이며, 현재 국가별 연합대응을 위한 네트워크 강화 연구를 수행 중임.
- 다분야 기술(방사선방호, 대기 및 해양, 자연재해대응, 사회·심리학, ICT 등)을 융합하여 예측결과의 신뢰도를 높이고 실용적인 운영체계 개선을 통해 방사능 피해 뿐 아니라 사회적 혼란 등을 최소화 할 수 있는 대정부 차원의 지원이 필요함.

○ 기술 정의

- 최신 지식기반 모델, 정보통신기술(ICT) 기반 시뮬레이션 기술, 긴박한 상황에서의 교통흐름 모사 등을 융합한 방사선비상대응 결정지원 요소모델 개발 및 체계 구축
- 비상대응 의사결정과 방사선영향 예측결과의 불확실성을 최소화하는 방사능환경 탐사기술 개발
- 방사선비상 시 신속하게 방사선 피폭 피해자를 선별·분류하는 위한 개인피폭선량 측정기술 개발
- 방사선비상대응의 실효성을 극대화하는 원자력/방사선분야의 고유 기술 뿐 아니라 정보통신, 기상, 인문사회 등 다양한 전문분야 또는 전문기관 간의 밀접한 연계성구축

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 원자력시설의 사고 혹은 방사선테러 시 피해를 최소화하기 위해서는 모델을 통한 신속한 예측 기술 (확산평가, 방사선원의 자료가 유용하지 않는 경우 추정 등), 예측결과 활용 시간·공간, 시각적 방사능 정보를 제공하기 위한 방사능환경탐사 기술, 사고 관련 집단 및 개인에 대한 피폭선량 신속 평가기술, 결과 종합, 분석 및 의사결정지원 기술 등으로 구성
- 과학적 지식, 현장자료 등과 ICT 기술을 융합하여 고도의 국가방사능재난 플랫폼으로 활용



□ 중대사고 환경 계측/제어 및 무인대응 기술

○ 기술개발 필요성

- 현재 설치된 원전 계측기 중 일부는 중대사고 시에 발생하는 고방사선, 고온

환경에서 생존성이 보장되지 않음.

- 후쿠시마와 같은 중대사고 발생의 경우 훨씬 가혹한 환경(초고온/고방사선/폭발)에서 원전의 주요기기의 상태감시를 통해 효과적으로 초기 대응이 가능하도록 하는 것이 매우 중요하나, 아직까지 관련기술이 개발되지 않음.
- 온도 및 압력 등의 대체 공정센서 뿐만 아니라 중대사고 현상을 직접적/간접적으로 탐지할 수 있는 방사선량 검출, 원자로 용기 및 격납용기 건전성 모니터링 등의 연구가 필요함.
- 후쿠시마 원전사고 발생 시 신속 조치를 위한 무인 장비들이 부족하여, 작업자에 의존하였고, 고방사선에 의하여 작업자 접근이 어려워 신속대응을 못 하였음.
- 후쿠시마 원전사고 이후에 가동 원전에 대한 다양한 안전대책이 수립되고 있으며 예측된 사고에 대하여 피동형 및 사고대응 설비/시설들이 원전에 반영되고 있지만, 예측하지 못한 원전사고 시에 작업자의 안전을 확보하고 사고를 완화하는 무인 기술이 필요함.
- 사고 현장의 구조물의 손상 상태를 3차원으로 사각지대 없이 신속 정확하게 측정하기 위해서는 ICT과 로봇 기술을 활용한 기술이 필요함. 사고 완화를 위해 원전 내의 주요 밸브를 수동으로 비상 조작할 필요가 있음. 또한 냉각재 누설로 인한 고온/다습, 고방사선 환경에서 작업자를 대신하여 신속하게 누설을 차단할 수 있는 로봇시스템이 필요함. 위험지역에서 비상전원의 제공 및 외부 냉각수를 비상 공급할 수 있는 무인 비상공급 기술이 필요함.

○ 기술 정의

- 중대사고 환경 실시간 원자로 건물 방사선/온도/압력/수소 검출용 광섬유 센서/전송선로 개발
- 중대사고 환경 생존 내방사선 핵심부품 개발
- 원자로 외부에 대체계측기를 개발하여 노심냉각수 상태, 용융상태, 원자로파손에 따른 외벽온도 분포 및 방사선 분포를 이용 노심내부의 상태를 파악할 수 있는 기술 개발
- 중대사고 환경 생존 블랙박스, 모바일 원격감시제어실, 고신뢰도 무선통신 기술 개발
- 사고 현장 구조물 손상 상태의 정밀 3차원 측정 기술
- 안전계통 주요 밸브의 현장 무인조작 기술
- 원전 냉각재 누설 부위의 현장 무인 차단 기술
- 전원상실시 전력계통 기기의 현장 무인 복구 기술

- 냉각수 상실시 냉각재 무인 공급 기술

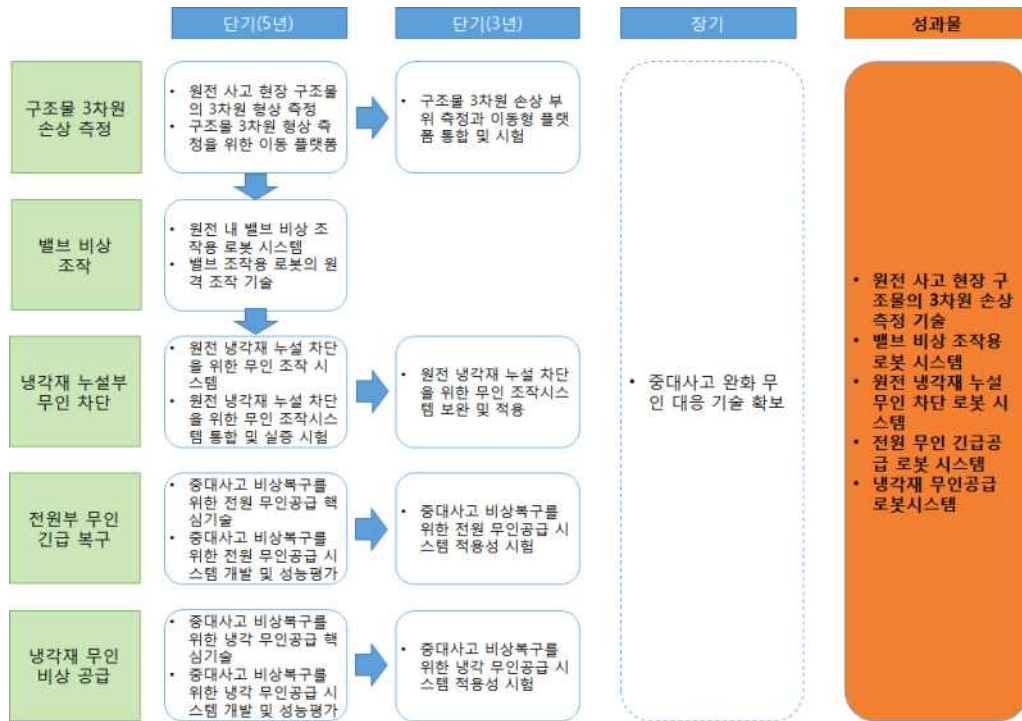
○ 기술 구성 및 활용 분야

- 세계 최초 중대사고 대처 계측제어 기술 확보를 통해 향후 국내원전 뿐만 아니라 해외원전으로 기술수출 효과 선점함.
- 내방사선/내환경 계측기 및 광기반 방사선 센서 기술은 원자력뿐만 아니라 국방, 우주, 의료 등 산업에도 응용 가능함.
- 상기 기술 확보를 통해 중대사고 관련 규제 요건 만족 및 원전의 안전성과 대국민 수용성 증대함.
- 사고대응 무인 조치 시스템 기술은 사고 발생 시에 사고 현장의 피해 정도를 신속하게 판단할 수 있는 구조물 3차원 측정 기술과 사고 현장에서 자유롭게 움직일 수 있는 이동 플랫폼 기술, 다중 팔과 다중로봇의 협업에 기반한 무인 현장 조치 기술 등으로 구성됨.
- 인접국 사고 때 사고대응 무인 조치 시스템을 이용한 기술 지원을 통해 방사능 누출사고를 방지/완화하여 국내 영향을 최소화하는데 활용할 수 있음.
- 원자력 사고에 대비한 방사능 방재훈련에 활용하여 원자력안전에 대한 불안감을 불식시킬 수 있음.
- 핵테러 발생 시 사고 현장 탐사 및 대응을 신속하게 수행함으로써 사고피해를 최소화하는데 활용할 수 있음.
- 일반 재난사고 시 무인 조치 시스템을 이용하여 사고를 조기 수습하는데 활용할 수 있음.

<중대사고 실시간 감시 계측>



<사고대응 무인조치 시스템 개발>



◆ 우선 확보 기술

□ 폐로원전 해체 재료를 활용한 경년열화 실증시험

○ 기술개발 필요성

- 가동원전의 가동연수 증가를 고려한 재료열화 실증과 정확한 예측은 원전의 안전성 향상을 위해 점차 중요해 지고 있음. 수십 년 간 발전소 운전환경에 노출되어 온 폐로원전 구조재료는 직접적인 경년열화를 확인할 수 있어 그 가치가 매우 큼.
- 원자로, 원자로내부구조물, 핵연료 크러드, 증기발생기 등 원전 핵심부품을 이용해 높은 수준의 중성자 조사가 된 재료와 실증연구 및 확보된 인프라는 가동원전의 재료열화 예측 및 대응을 위해 유용하게 활용될 수 있음.
- 해외 해체원전 (Zorita, Zion 등) 장기운전 재료 경년열화에 대한 실증시험을 활발하게 진행 중이며, 고리 1호기는 최장의 가동시간을 갖는 폐로원전으로서 그 가치가 매우 큼. EPRI 등 고리1호기 활용연구에 큰 관심을 보이고 있음.

○ 기술 정의

- 국내 발전소 환경 실증을 위한 인프라 구축

- 폐로원전 구조재료를 활용한 경년열화 실증
- 가동원전 구조재료 열화도 정밀예측과 이를 통한 가동원전 안전성 제고

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 원자로, 원자로내부구조물, 핵연료 크러드, 증기발생기 등의 원전 핵심기기에 대해 해체원전 기기에서 해당 재료를 인출 및 분석
- 가동원전 전범위 부품 열화 안전도 정밀진단체계 구축
- 해체재료 경년열화 실증을 통해 실험실적으로 생산된 DB, 모델 검증 및 열화모델 개선안 도출
- 현재 가동원전의 안전성을 향상시키는 데 직접 활용가능

□ 원전 기기/부품 건전성 향상 소재기술

○ 기술개발 필요성

- 3D 프린팅은 일체형 디자인 적용 및 신기능 부여를 통해 부품의 신뢰성, 안전성 향상을 이룰 수 있음. 맞춤형 신속 제조시스템을 구축하여 부품수급 개선을 이룰 수 있는 혁신적인 제조 방법임.
- 이러한 장점들은 극한 환경에 적용되는 원전용 부품 제작에 매우 탁월하게 적용될 수 있으며 부품 건전성 향상에 크게 기여할 것으로 기대됨.
- 원전 냉각재 계통에는 RPV 노즐/주배관 연결부를 비롯하여 다양한 이종금속용접부가 존재하며 이러한 이종금속용접부에서 PWSCC 등 파손사례가 다수 보고됨. 3D 프린팅 재료를 활용한 이종금속용접부의 원천배제를 통해 원전배관 용접부 손상 방지.

○ 기술 정의

- 3D 프린팅 등의 혁신제조기술을 이용한 원전 노내외 구조부품의 성능 및 건전성 향상 기술
- 원자로 기기/배관 연결부 이종금속용접부의 배제를 통한 원전배관 용접부 손상 방지기술

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 3D 프린팅 기술을 이용한 원전 구조부품 제조기술, 부품소재 표면 개량기술과 이종금속용접부 건전성 향상기술 및 성능검증, 표준화, 인허가용 물성자료 구축 등으로 구성됨.
- 원전 노내구조물 부품의 내부식, 내조사, 조사유기 응력부식균열 등 성능향상을

통한 원전 안전성 향상

- 가동 원전, 중소형 원자로, 수출형 원자로 등의 노내외 부품 및 1차 계통 용접부의 파손 예방 기술로 활용

□ 대형냉각재 상실사고(LBLOCA) 원천적 배제

○ 기술개발 필요성

- 원전에 설치되어 있는 anti-whip 시스템과 원자로 건물의 기하학적 구조는 주요 냉각유로의 발생 가능한 파단사이즈를 제한함. 그러나 현 안전규제는 발생 가능성이 없는 대형냉각재상실사고를 설계기준사고로 분류하고 있음.
- 이는 원전의 실제적 안전성 향상에 도움이 되지 않음에도 불구하고 최대 파단 크기의 사고해석이 가장 보수적인 결과를 초래할 것이라는 가정 하에 안전연구의 많은 예산과 인력이 대형냉각재상실사고의 안전연구에 소비되고 있음.
- 최대 파단 크기의 냉각재 상실사고가 가장 보수적일 것임을 가정한 종래의 냉각재 상실사고 해석을 벗어나 실질적인 발생 가능성 범위하의 전체 파단 스펙트럼을 분석하는 냉각재 상실사고 해석 방법을 정착함으로써 안전해석 자원과 노력을 실효적으로 활용하도록 함

○ 국내외 동향

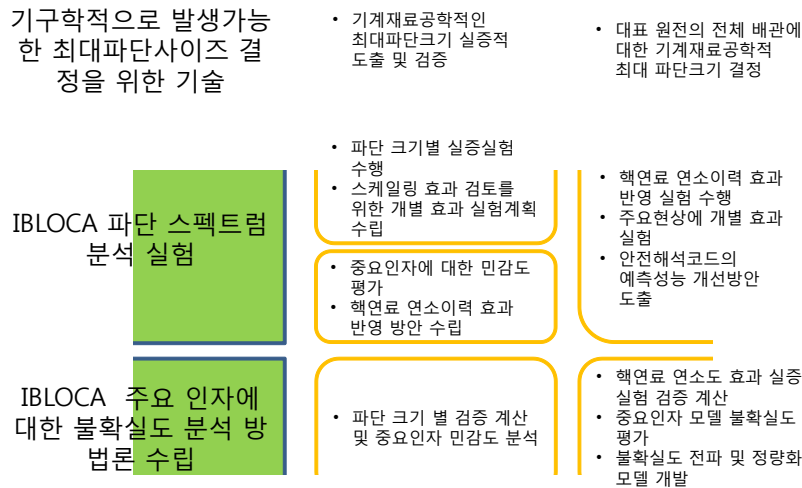
- 프랑스 EdF는 이미 설치되어 있는 anti-whip 시스템 및 원자로건물의 구조분석을 통해 양단파단사고 발생이 불가능함을 입증하고 설계기준사고에서 제외하였으며 최대 파단사이즈를 기구학적 해석을 통해 결정하여 적용 중임
- 국내에서도 동적해석에 파단전누설(LBB)개념을 적용하고 있으나 사고해석에서는 아직 순간 양단파단사고 가정을 유지함. 동적해석을 통해 기반기술은 일정 수준 갖추고 있음.

○ 기술의 정의

- 대형 냉각재 상실사고가 가장 보수적인 사고가 아닐 수 있음을 기본 전제로 함.
- 실제로 발생 가능한 최대의 파단크기를 실증적으로 밝혀내고 그 범위내의 파단 크기에 대한 사고 스펙트럼을 분석하여 현실적 범주의 파단 사고에 대한 완벽한 해석 능력 확보를 목표로 함.
- 발생가능 범주의 최대 파단 크기를 결정하는 기술, 파단 스펙트럼에 대한 실증 실험과 해석 검증 기술, 그리고 핵연료 연소도 효과를 포함한 파단 스펙트럼에 대한 안전성 민감도 분석 기술 등으로 구성됨.
- 파단 크기에 대한 실증 고찰을 통해 중-소형 냉각재 파단사고에 대한 연구를 강화하고 대형냉각재 상실사고를 설계기준초과사고로 분류함.

○ 활용 분야

- 실제적 원전의 안전성 향상으로 수출 경쟁력 확보
- 핵연료 연소이력 접목을 통한 실제적 안전해석 기술 확보
- 중형냉각재 상실사고 스펙트럼과 핵연료 연소이력 효과를 반영한 해석 기술 확보



○ 추진 전략

- 국내외 안전현안을 해결하기 위한 기술기반을 제공하고, 인허가 기준 개정 배경 실증 데이터 제공 및 원전 안전계통의 안전성을 강화할 수 있도록 그 활용 범위가 명확한 연구를 추진함.
- 세계적 수준의 기술 개발을 선도할 수 있는 실험을 수행하고, 다분야 및 다계통 연계성을 통해 통합안전해석 기술의 선진화에 기여하도록 함.
- 산학연 협력체계 강화를 통해 국내 안전해석 기술의 선진화 및 실험결과의 활용성을 제고함.
- 원자력 안전현안을 실질적으로 해소할 수 있는 연구를 수행하고, 규제기관과 산업체와의 긴밀한 협력을 통해 연구결과의 활용성을 제고함.

○ 기술의 구성

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> LBLOCA 발생배제를 위한 Anti-whip system 선행분석 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 원전의 Anti-whip 기구학적 특성 파악 및 설비 개선 동적해석 기술 확립 최대 파단크기 계산을 위한 기반 기술 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 최대 파단크기 결정 방법론

<ul style="list-style-type: none"> • 기구학적으로 발생 가능한 최대 파단사이즈 결정 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 상황에서 발생 가능한 최대 파단크기 도출 • 기구학적으로 모든 원자로 부분의 최대 파단크기 결정 	<ul style="list-style-type: none"> • 파단 크기 스펙트럼의 사고 중요도 분포
<ul style="list-style-type: none"> • IBLOCA 파단 스펙트럼 실증 실험 	<ul style="list-style-type: none"> • 최대 파단 크기 내 스펙트럼 분석 • 파단 크기별 기본 실험 조건 및 민감도 평가실험 항목 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 중요인자에 대한 민감도 평가 DB
<ul style="list-style-type: none"> • IBLOCA 검증계산 및 핵연료 연소도를 포함한 민감도 분석 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 중요인자에 대한 민감도 평가 • 핵연료 연소이력 효과 반영 방안 도출 • 주요현상에 대한 현상파악 및 스케일링 효과 검토를 위한 개별 효과 실험계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료 연소 이력 효과 반영 방법론 도출
<ul style="list-style-type: none"> • IBLOCA 최적해석을 위한 불확실도 정량화 방법론 	<ul style="list-style-type: none"> • 개별효과 실험 수행 • 핵연료 연소도 효과가 고려된 IBLOCA 불확실도 정량화 방법론 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료 연소도 효과가 고려된 IBLOCA 불확실도 정량화 방법론 수립

□ 다중고장사고 대비 중대사고 예방기술

○ 기술개발 필요성

- 원전의 사고 전개에 대한 정확한 예측 및 이를 활용한 원전의 중대사고 방지 및 완화 기술은 국민이 안심할 수 있는 수준의 원전 안전성 달성을 위한 핵심 기술임.
- 세계적으로 LOCA 및 RIA 등 핵연료 및 안전계통에 대한 안전기준이 크게 강화되고, 설계확장조건이 적용됨에 따라 기존의 안전해석범위가 중대사고 진입 전까지 더욱 확대되고 있음.
- 개정 강화되는 안전기준을 만족하기 위해서는 다분야의 서로 다른 현상이 밀접하게 상호작용하는 사고노심에 대해 실질적이고 최적화되며 그 불확도가 최소화되도록 다분야를 연계한 통합안전해석 체계의 구축이 요구됨.
- 사고관리 계획서 법제화에 대응하여 다중고장사고를 포함하는 설계확장조건에 대한 안전성 평가는 국내 원전의 안전성 입증 및 향상을 위해 필수적임. 후쿠시마 원전 사고의 교훈을 반영하고 강화된 안전기준을 충족시키기 위해서는 확률론적 안전성평가 결과를 반영하여 중요성이 인정된 사고 항목에 대한 실험을 수행하여 안전성 평가 범위를 확대하는 노력이 필요함.

○ 기술 정의

- 안전기준의 변화에 따라 LOCA 및 RIA 현상을 다분야를 연계하여 통합해석하는 체계로 잔여 안전현안 등을 해결하는 기술
- 국부적으로 반응도가 짧은 시간 동안 매우 급격하게 증가하는 반응도기인사고 조

건에서 핵연료의 안전성을 평가 예측하는 기술

- FFRD(Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal)은 핵연료가 분쇄되어 피복재가 팽창된 부분에 재배치되고, 피복재가 파손되면 피복재 밖으로 분산되는 현상을 나타내며, 이러한 핵연료 분쇄, 재배치, 파손 및 분산에 관한 예측 기술
- LB LOCA 재정의 및 배제 등으로 LOCA 핵연료 인허가 및 안전기준 패러다임이 기존 LB LOCA에서 IB LOCA로 변화되고 있으며, 이에 따라 IB LOCA 조건에서 새로운 핵연료 인허가 및 안전기준을 평가하는 기술
- 설계기준사고와 설계확장조건에 대한 원전 사고관리 전략의 최적화를 통한 원전의 사고 대응 능력 확장과 확률론적 안전성 평가를 활용한 원전 안전계통의 유효성 및 운전원 조치의 실효성 입증 기술
- 원자로냉각재계통(RCS)과 원자로건물을 통합 연계하여 열수력 안전성을 평가하고, 안전해석 기술의 고도화와 범위를 확장하는 기술

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 다중고장사고 대비 중대사고 예방기술은 개별효과실험과 종합효과실험으로 크게 구성
- 개별효과실험에서는 노심과 핵연료를 대상으로 LOCA 및 RIA 현상에 대한 잔여 안전현안을 해결하고, 관련 모델 개선을 통해 통합안전해석 체계를 검증
- 종합효과실험을 통해 사고관리 계획서 법제화에 정의된 다중고장에 의한 필수 및 추가 고려 사고에 대한 원전의 중대사고 예방능력 평가 및 강화
- 원자로냉각재계통과 원자로건물을 연계하여 원전 안전계통의 유효성을 검증하고 인적 오류 리스크를 평가

	단기(5년)	중기(5년)	성과물
핵연료-열수력 연계 RIA 안전성 실증 실험 및 통합해석	<ul style="list-style-type: none"> RIA 모의 실험시설 및 인프라 구축 RIA 모의 피복관-냉각재 열전달 실험 	<ul style="list-style-type: none"> RIA 핵연료 분산에 따른 핵연료-구조물 영향 평가 RIA 모의 통합해석 체계 구축 및 검증 	<p>다중고장사고 대비 중대사고 예방 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> 다분야 연계 RIA/LOCA 평가기술 IB LOCA 핵연료-열수력 통합해석체계 리스트 정보활용 원전 사고전략 최적화 RCS-원자로건물 연계 안전성 평가기술 안전계통 최적화
규제기준 변화 반영 LOCA 안전현안 실증 및 해석기술	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 분쇄, 재배치 및 분산 거동(FFRD) 실증실험 핵연료 분산에 따른 핵연료-구조물 영향 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 분산에 의한 노심 부분막힘 FFRD 해석코드 모델 검증 및 개선 	
IBLOCA 조건 증고압 핵연료 변형-열수력 연계 안전성 검증	<ul style="list-style-type: none"> IBLOCA 핵연료-열수력 연계검증 실험 	<ul style="list-style-type: none"> IBLOCA 핵연료-열수력 통합안전해석체계 구축 및 검증 	
ITL 활용 원전 안전계통 유효성 검증 및 사고관리 최적화	<ul style="list-style-type: none"> 확률론적 안전성평가 결과를 활용한 원전 안전계통 기능의 유효성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 운전원 조치에 따른 원전 안전여유도 평가를 통한 사고관리전략 최적화 	
RCS-원자로건물 연계 안전성 검증	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 내 다차원 유동 정밀 해석을 통한 RCS-원자로건물 연계 해석 체계 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 안전계통 설계 최적화를 통한 RCS-원자로건물 연계 해석 체계 고도화 	

○ 추진 주체 및 소요 예산

- 추진 주체: 산학연 공동

- 소요예산 및 인력

* 규제기준 반영 LOCA/RIA 안전현안 해결 및 중대사고 실효적 방지 평가: 총 200억/10년, 총 40 MY/10년

* 중대사고 실효적 방지를 위한 안전계통 실증 및 성능 최적화: 총 300억/10년, 총 60 MY/10년

○ 추진 전략

- 국내외 안전현안을 해결하기 위한 기술기반을 제공하고, 인허가 기준 개정 배경 실증 데이터 제공 및 원전 안전계통의 안전성을 강화할 수 있도록 그 활용 범위가 명확한 연구를 추진함.

- 세계적 수준의 기술 개발을 선도할 수 있는 실험을 수행하고, 다분야 및 다계통 연계를 통해 통합안전해석 기술의 선진화에 기여하도록 함.

- 산학연 협력체계 강화를 통해 국내 안전해석 기술의 선진화 및 실험결과의 활용성을 제고함.

- 원자력 안전현안을 실질적으로 해소할 수 있는 연구를 수행하고, 규제기관과 산업체와의 긴밀한 협력을 통해 연구결과의 활용성을 제고함.

○ 세부기술의 구성 및 주요 내용

항목	주요 내용	개발대상 핵심 요소기술
<ul style="list-style-type: none"> 핵연료-열수력 연계 RIA 안전성 실증 실험 및 통합해석 	<ul style="list-style-type: none"> RIA 모의 실험시설 및 인프라 구축 RIA 모의 피복관-냉각재 열전달 실험 RIA 핵연료 분산에 따른 핵연료-구조물 영향 평가 RIA 모의 통합해석 체계 구축 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 다분야 연계 RIA 실증실험기술 다분야 연계 RIA 고정밀 통합해석기술 RIA 모의 3차원 고정밀 모델 및 과도해석기술
<ul style="list-style-type: none"> 규제기준 변화 반영 LOCA 안전현안 실증 및 해석기술 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 분쇄, 재배치 및 분산 거동(FFRD) 실증실험 핵연료 분산에 따른 핵연료-구조물 영향 평가 핵연료 분산에 의한 노심 부분막힘 FFRD 해석코드 모델 검증 및 개선 	<ul style="list-style-type: none"> 다분야 연계 LOCA 실증실험기술 다분야 연계 LOCA 고정밀 통합해석기술 FFRD 모의 모델
<ul style="list-style-type: none"> IBLOCA 조건 중고압 핵연료 변형-열수력 연계 안전성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> IBLOCA 핵연료-열수력 연계검증 실험 IBLOCA 핵연료-열수력 통합안전해석체계 구축 및 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 중고압조건 핵연료-열수력 연계검증 실험기술 IBLOCA 핵연료-열수력 통합안전해석 기술
<ul style="list-style-type: none"> ITL 활용 원전 	<ul style="list-style-type: none"> 확률론적 안전성평가 결과를 활용한 	<ul style="list-style-type: none"> 리스크 정보활용 원전

안전계통 유효성 검증 및 사고관리 최적화	<ul style="list-style-type: none"> 원전 안전계통 기능의 유효성 검증 운전원 조치에 따른 원전 안전여유도 평가를 통한 사고관리전략 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> 비상냉각능력 강화 기술 리스크 정보활용 원전 사고관리전략 최적화 기술
<ul style="list-style-type: none"> RCS-원자로건물 연계 안전성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로건물 내 다차원 유동 정밀 해석을 통한 RCS-원자로건물 연계 해석 체계 검증 원자로건물 안전계통 설계 최적화를 통한 RCS-원자로건물 연계 해석 체계 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> RCS-원자로건물 연계 안전성 평가기술 RCS-원자로건물 연계 신뢰도 향상 및 안전계통 최적화 기술

□ 다중고장사고 해석 방법론 및 검증

○ 기술개발 정의

- 가동 및 건설원전의 심층방어 능력 강화를 위해서 추가로 고려되어야 할 확대설계조건을 도출
- 설계확장조건에 대한 안전해석기술, 중대사고 예방기술 개발

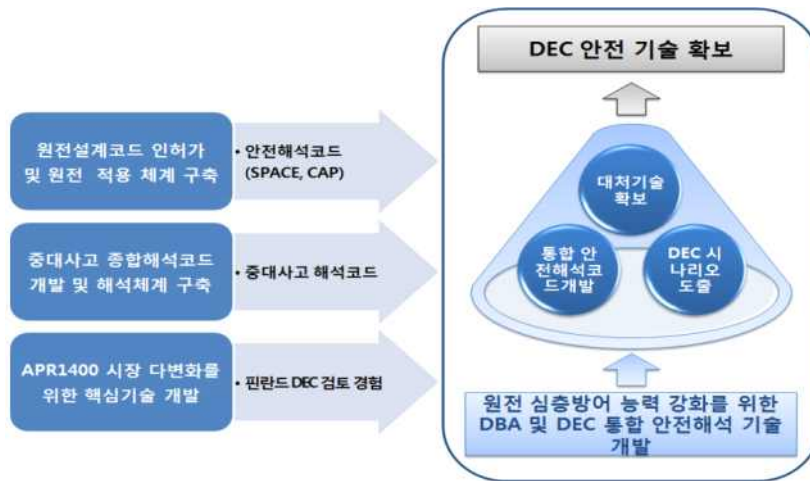
○ 기술개발 필요성

- 후쿠시마 원전 사고 이후 각국의 규제기관은 원전의 심층방어 능력 강화를 위해 원전 설계단계에서 설계확장조건을 반영하도록 요구하고 있음.
- 설계확장조건을 원전 설계에 반영하기 위해서는 설계확장조건에서 사고 진행과정을 분석하고, 대처설비의 성능을 평가할 수 있는 안전해석코드 기술이 필요함.
- 설계확장조건에 대한 적절하고 신속한 운전원 대응을 통해 노심손상을 방지하고, 일반 대중에 방사능 누출이 제한되도록 최적화된 절차서, 지침서 개발 등 연계 핵심기술 확보는 매우 시급함.

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 설계확장조건 사건 분류 및 설계 목표 개발, 통합 안전해석코드 개발, 안전해석방법론 개발, 대처 설계방안 개발 등으로 구성됨.
- 설계확장조건 초기사건 도출 및 설계목표 개발은 결정론적인 방법 및 확률론적인 방법들을 이용하여 확대설계조건 초기사건과 사고별 설계목표(설계요건)를 도출하는 것임.
- 통합 안전해석코드 및 방법론 개발은 설계기준사고 및 확대설계조건을 단일 코드 체계로 분석할 수 있는 통합 안전해석코드 체계를 구축하고 그 방법론을 개발하여 가동원전 안전성 제고에 활용하고 해외 원전수출에 활용하고자 함.

- 가동원전에 대해서는 기존 설비에 대한 설비개선 방안을 도출하고, 확대설계조건에 대한 적절하고 신속한 운전원 대응을 통해 노심손상을 방지하고, 일반 대중에게 방사능 누출이 제한되도록 최적화된 절차서, 지침서를 개발하여 활용코자 함.



□ 혁신형 시스템 설계코드 및 방법론 개발

○ 기술개발 필요성

- 대형 발전용 경수로와 다른 피동형 안전 기기의 다수 도입으로 해석 모델과 실험 자료 축적의 노력이 절대적으로 필요함.
- SMART의 안전성 및 경제성 확보를 위해 SMART의 기술을 바탕으로 혁신적인 시스템을 개발하고 이들 고유 기기 열수력 모델 및 안전성 평가 체계 방법론 확립이 필요함.

○ 기술 정의

- SMART를 근간으로 한 혁신형 시스템의 노심 특성을 반영한 노심 열수력 설계코드의 개선과 검증 기술
- 혁신형 시스템의 고유 특성을 적절히 모사하기 위한 안전해석/다중사고/중대사고 해석 모델의 개발과 해석체계 구축 기술
- 혁신형 시스템의 성능과 안전을 검증하기 위한 고유 검증 DB의 구축과 고유 모델에 대한 체계적인 검증 기술

○ 기술 구성 및 활용 분야

- SMART 개발의 경험을 바탕으로 혁신형 시스템 설계코드의 개발 및 개선, 안전해석/다중사고해석/중대사고해석 모델 개발 및 해석체계 구축, 혁신형 시스템 고유

의 검증 DB 구축 및 모델 검증분야로 구성

- 중소형 원전 시장에 대한 기대가 높아지고 있는 현 시점에서 혁신형 시스템에 대하여 국내 독자 기술로 개발된 설계 코드 사용 및 안전성 평가에 활용
- 혁신형 시스템에 대한 해석체계가 구축되고, 이를 바탕으로 고유의 안전성이 검증되면, 혁신형 시스템의 수출 경쟁력 확보하여 세계시장을 선점

□ 구조물 및 기기 내진성능평가 기술

○ 기술개발 필요성

- 2016년 9월 경주에서 국내 지진관측 이래 최대지진인 규모 5.8의 지진이 발생하여 진앙 부근에 위치한 월성원전 4기가 수동 정지하였으며, 2017년 11월 포항지진이 발생하여 원전에는 영향이 없었으나 아파트 등 건축물에 큰 피해를 발생시키면서 원전의 지진 안전성에 대한 우려가 급격히 증대됨.
- 국내 원전의 경우 설계지진 0.2g 또는 0.3g로 설계되어 있으나 설계지진을 초과하는 지진의 발생에 대한 우려가 커지고 이에 대한 안전성확보 필요성이 대두됨.
- 국내 원전부지에서 발생할 가능성이 있는 지진의 크기나 진동수 성분, 부지효과 등을 합리적으로 예측하고 판단하여 이에 대비할 필요가 있음.
- 특히 경주지진이나 포항지진에서 보여준 우리나라의 지진 특성은 우리나라 원전의 설계 시 사용한 지진의 특성과 큰 차이를 보여주고 있어 이를 고려한 합리적인 평가 및 대비가 필요함.
- 또한 지진 발생에 따른 피해의 최소화를 위한 감시, 계측, 보강 등과 함께 지진 후 효과적인 보수, 보강 및 재가동을 위한 안전성 평가 등의 기반기술을 확보할 필요가 있음.

○ 기술 정의

- 국내 가동원전의 지진안전성을 확보하기 위해서는 국내 원전부지에 발생할 수 있는 지진의 재해도 평가, 지진동 특성의 평가, 지진 발생 시 구조물 및 기기의 응답 평가를 수행하고 이를 기반으로 충분한 여유도를 확보할 수 있는 기술을 확립해야함.
- 내진 설계된 구조물 및 기기의 한계성능 평가를 통해 설계지진을 초과하는 지진에 대한 내진 여유도를 평가하고 이들 결과가 최종적으로 원전의 공공에 대한 리스크 산정에 반영될 수 있도록 함.
- 설계초과 지진에 대한 신뢰성 있는 내진여유도 평가를 수행하여 발전소 수준에서의 지진안전성을 확보할 수 있게 하며 지진안전성의 향상이 효율적인 방향으로 이루어질 수 있도록 함.

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 원전의 지진안전성을 확보하고 안전성을 효과적으로 향상시키며 설계초과 지진에 대한 합리적인 여유도를 확보하기 위해 필요한 다음과 같은 기술로 구성됨
 - 역사지진 재평가 등을 통한 원전 부지 지진재해도의 불확실성 저감 및 평가용 입력지진의 개발
 - 구조물 및 기기의 실규모 또는 대규모 내진성능 실험을 통한 내진성능 자료의 확보 및 이를 이용한 내진여유도 평가를 통해 신뢰성 향상
 - 국내 지진동특성을 반영한 구조물 및 기기의 설계초과 지진에 대한 내진여유도 재평가
 - 설계초과지진에 대한 내진여유도 평가의 불확실성 저감 및 신뢰도 향상을 통한 효율적인 지진안전성 향상 도모
- 가동원전의 지진안전성 확보 및 효과적인 내진성능 향상을 통한 대국민 신뢰성 증대
- 현재 진행중인 경주지진 유발 단층 등의 단층조사와 전 국토에 대한 단층조사 결과 등을 반영하여 원전의 지진안전성을 효과적으로 확보가능
- 스트레스테스트, 주기적안전성 평가 등에 활용할 수 있으며 단층 발견 등의 지진환경변화에 능동적으로 대처가능

□ 사고대응 인적수행도 평가 및 향상기술

○ 기술개발 필요성

- 최근 개정된 원자력안전법에 따르면, 모든 가동 및 건설 원전은 다양한 사고 발생 시 충분한 사고관리 전략 및 관리능력이 있음을 보이기 위한 사고관리계획서를 의무적으로 제출해야함.
- 따라서, PSA 기법 등을 활용한 상세 리스크 결과 등을 적극적으로 활용하여 전략 및 관리능력의 효용성을 객관적으로 보일 필요가 있음.
- 이러한 측면에서, 최신 기법을 활용하여 사고 대응 인적수행도를 적절히 평가하고 효과적으로 향상시킬 수 있는 기술을 선제적으로 개발할 필요가 있음.

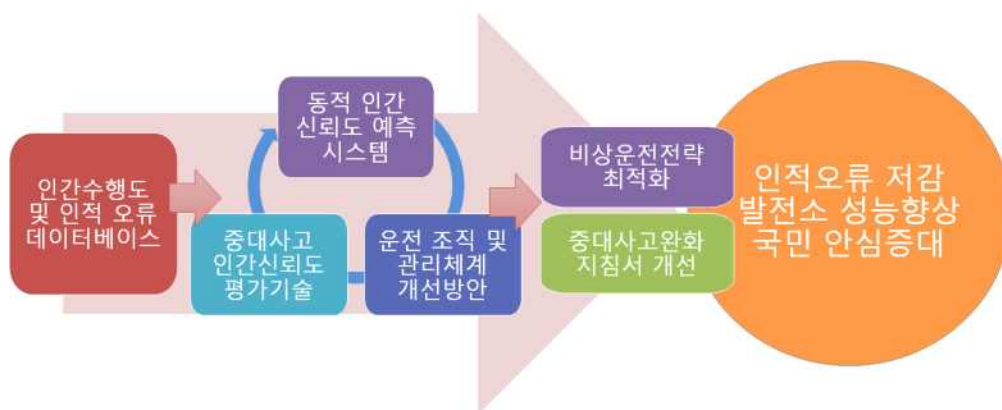
○ 기술 정의

- 원전 정상운전 및 비정상/비상 대응관련 인적수행도 분석기술
- 최신 기계학습 및 딥러닝 기법을 활용한 비정상 상황 정밀진단 기술
- 다양한 원전 비정상 상황의 효과적 대처를 위한 최적 비상운전절차서 개발 기술

- 다양한 원전 비정상 상황에 대한 운영조직의 그룹의사결정 모델링 및 시뮬레이션 기술
- 중대사고 상황의 최적 대응을 지원하기 위한 사고진행 고속 예측 기술

○ 기술 구성 및 활용

- 원전 실증데이터를 기반으로 정상, 비정상 및 비상 대응관련 인적수행도 분석을 수행할 경우 경보감시 및 최적화, 발전소 운전 및 안전정보 지원 시스템, 고장 및 사고진단 통합 시스템, 사고관리 예측 및 절차서 수행지원시스템 등의 기술로 연계되어 운전원을 지원할 수 있음.
- 인적수행도 분석을 통해 비상상황 및 중대사고 상황의 시스템 전반의 신뢰도를 예측하고 평가하는 기술이 확보됨. 이 과정에서 원전 운영조직의 그룹의사결정 특성을 모델링하고 평가할 수 있는 기술을 확보할 수 있음.
- 상기 결과들을 통해 비상운전 및 중대사고 대응전략의 최적화를 수행할 수 있음 (아래 그림 참고). 이 과정을 통해 최적 비상운전절차서 및 중대사고대응 지침서를 개발할 수 있음. 아래 그림에서는 논리상 직렬적 관계를 가지고 있으나, 실제로는 많은 반복적 분석/개선과정을 통해 최적화 솔루션을 찾게 됨.
- 개발된 기술들은 사고대응 인적수행도 향상 뿐 아니라 원전의 리스크 대응능력 향상을 통해 궁극적으로 국민 안심증대를 위한 목적으로 활용될 수 있음.



□ 화재위험도 저감 기술

○ 기술개발 필요성

- 화재는 원전 안전성을 위협하는 대표적인 위험 요인 중의 하나로서 그동안 전세계적으로 화재 위험도를 저감하기 위한 많은 연구가 있었음. 그럼에도 불구하고 최근 미국 원전에 대해 NUREG/CR-6850 기반 최신 화재 PSA 기술 적용

결과, 화재 위험도가 기존 평가 기술 대비 오히려 높게 평가되는 등 꾸준한 기술개발 노력이 필요한 분야로 고려되고 있음.

- 국내에서도 화재위험도를 저감하기 위한 다양한 화재방호 기술 분야에 대해 연구를 수행하고 있지만, 여전히 국내 화재방호 기술은 선진국 대비 기술 격차가 있으며, NUREG/CR-6850 기반 화재 PSA 기술을 포함한 최신 화재방호 기술을 상당히 제한적으로 적용하거나 외국 전문 기관을 통해 수행하는 등 국내 화재방호 기술 확보가 필요한 상황임.

○ 기술 정의

- 높은 수준의 화재 위험도 평가 기술 품질 확보 및 (2) 보다 현실적인 화재 위험도 평가 기술 개발
- 국내 전 원전에 대한 NUREG/CR-6850 기반 화재 PSA 수행 및 NUREG/CR-6850 이후 수행된 다양한 화재 PSA 관련 연구 내용 적용 기술 개발
- 현실적 화재 위험도 파악을 위한 화재 위험도 평가 플랫폼 기술 개발, 화재방호 자원을 활용한 화재 위험도 저감 기술 및 화재 생성물 영향 평가기술 개발

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 화재 위험도 저감 기술은 결정론적 및 확률론적 화재 위험도 평가 기술을 중심으로 이에 중요한 입력을 제공하는 화재사건분석 기술, 화재모델링 기술, 화재실험 기술, 광역화재 평가 기술 등으로 구성됨.
- 구성 기술 각각에 대해 높은 수준의 품질을 확보함으로써 기존 기술이 가진 보수성에 의해 부풀려진 화재 위험도를 저감하여 이에 가려졌던 하지만 보다 더 현실적인 화재 위험도를 식별하는데 활용 가능 할 것으로 예측함.
- 보다 더 현실적인 화재 리스크에 집중함으로써 화재방호 측면에서 여러 종류의 제한된 자원들(인적, 물적, 시간적)을 효율적으로 활용하는 등 산업체와 규제기관이 화재 위험도 저감을 위한 최적 판단을 하는데 활용 가능 할 것으로 예측함.

□ 신개념 중대사고 대처설비

○ 기술개발 필요성

- 2016년 원자력안전법의 개정으로 「사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부 기준에 관한 규정(원자력안전위원회 고시 제2017-34호, 2017.12.26.)」에 따라 중대사고 완화능력 평가(제7조)를 통해 중대사고 시 방사성물질의 대량방출을 방지하기 위한 원자로격납건물의 건전성을 확인하도록 법제화 함. 또한 동 고시 제9조를 통해 부지 인근 주민의 발전용원자로시설 사고로 인한 초기사망 위험도 및

암사망 위험도가 각각의 전체 위험도의 0.1% 이하이거나 또는 그에 상응하는 성능목표치를 만족하며, 방사성핵종 Cs-137의 방출량이 100TBq을 초과하는 사고 발생 빈도의 합이 1.0×10^{-6} /년 미만이 되도록 중대사고 예방 및 완화능력을 확보할 것을 사업자에게 요구함.

- 이와 같은 원전 안전목표에 대한 만족여유도 증가를 통해 국민안심을 달성하기 위해 원자로건물 내 방사선원향 저감을 위한 신개념 중대사고 대처설비의 개발이 필요함.
- 원전 안전성의 강화요구에 따라 중대사고 시 방사성물질 방출 기준의 강화가 예상되며, 이에 대비하여 원전 특성 별 중대사고 대처설비를 개발할 필요가 있음.

○ 기술 정의

- 중대사고 시 방사성물질 방출 저감을 위한 중대사고 대처설비 개발
 - * 가동원전 중대사고 대처설비
 - * 수소 및 방사성물질 감지 및 대처설비
 - * 극한재해 생존성 향상을 위한 핵심 SSC 보호
 - * SBO대비비상전원다중화(태양광, 충전배터리, cross-tie, turbine-driven 발전기)
 - * 내진성능 보유 냉각수 공급용 인공 pool 설계
 - * 냉각수 공급용 역삼투압 방식 담수화 장치
 - * 원자로건물 외부 사고대응 시스템 (ex. 흡기/포집 장치)
 - * 초극한재해의 생존성 향상

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 가동원전 중대사고 대처설비: 원전 맞춤형 중대사고 대처설비 개발
 - * 가동중 원전의 IVR 구현, 원자로건물 중대사고 전용살수, 원자로건물 피동 냉각설비, 노외 노심냉각 설비(Core catcher) 등
- 수소 및 방사성물질 감지 및 대처설비: 수소 및 방사성물질 감지계측기 개발 및 연동 시스템 개발
 - * 중대사고 시 원자로건물 내 수소 및 방사성물질 감지 센서 개발, 수소감지 센서와 수소제거기 연동 시스템 개발, 방사성물질 감지를 통한 중대사고 대처설비 작동 연동 체계 개발
- 극한재해 생존성 향상을 위한 핵심 SSC 보호
 - * 극한재해에 대한 주요 SSC 취약도 평가
 - * SSC 취약도 평가 기반 필수 안전 기능 SSC에 대한 생존성 확보 기술 개발
- SBO대비비상전원다중화(태양광, 충전배터리, cross-tie, turbine-driven 발전기)
 - * SBO 대비 비상전원 다중화 가능 설비의 적용성 평가

- * 발전소 부지별 전원 다중화 기술 개발
- 냉각수 성능 보유 냉각수 공급용 인공 pool 설계
 - * 부지 공용 피동 급수 타당성 분석
 - * 피동 급수 개념 설계
- 냉각수 공급용 역삼투압 방식 담수화 장치
 - * 장기 냉각수 성능 보유를 위한 역삼투압 방식을 이용한 냉각수 공급 타당성 분석
 - * 역삼투압 방식의 냉각수 공급장치 개념 설계
- 원자로건물 외부 사고대응 시스템 (ex. 흡기/포집 장치)
 - * 원자로 건물 외부 사고대응 시스템
- 초극한재해의 생존성 향상
 - * 화산 폭발 및 강진에 대비한 원전의 피해 평가
 - * 핵심 SSC 생존성 확보 기술 개발
- 원전 맞춤형 중대사고 대처설비 개발 및 적용을 통해 원전 안전목표 달성 및 만족 여유도 개선에 활용

□ 핵의학영상 품질관리 및 정확도 향상기술

○ 기술개발 필요성

- 고령화 사회 진입 및 난치성 질환 증가에 따라 의료용 방사성동위원소(RI)를 이용한 핵의학영상 진단과 치료의 수요가 크게 증가하고 있음.
- 인체 내 RI의 양과 분포는 핵의학영상으로 가장 정확하게 측정할 수 있고, 고품질의 핵의학영상과 투여량 정확도는 환자 진료결과의 정밀도와 안전성 확보에 매우 중요함.
- 최근 영상화가 가능한 치료용 RI의 개발 및 실용화가 빠르게 추진되고 있으며, 이러한 치료용 RI는 진단에 비해 체내 투여량이 많아 피폭선량이 높기 때문에 치료의 질과 안전을 동시에 확보하는 핵심기술이 필요함.
- 의료용 RI를 이용한 난치성 질환 조기진단 확대에 필요한 방사선량 저감화와 핵의학영상의 품질 개선 및 관리를 위한 핵심기술개발이 필수적임.

○ 기술 정의

- 진단 및 치료용 RI의 양을 정밀 측정하기 위한 핵의학영상 보정 및 재구성 기술과 계통 관련 통합 관리체계

- 의료영상 품질과 정확도 평가를 위한 수리 알고리즘 및 현장이식 소프트웨어 시스템
- 영상을 이용한 RI의 인체 내 거동 및 분포와 방사선량의 계산모델 및 전산모사기술

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 핵의학영상 품질향상은 방사선계측, 방사선영상처리, 영상인식, 인공지능망 기술, 추적자동력학, 내부선량측정, 대용량 고속 계산 등으로 구성
- 핵의학영상 품질향상 기술은 핵의학임상의 영상품질 관리 및 핵의학진단 선량 저감화를 위한 기반기술 시스템으로 활용
- 신개발 의료용 RI의 임상적용을 위한 예비평가기술로 활용



□ 가속기 방사선안전 평가 및 규제 표준 기술

○ 기술개발 필요성

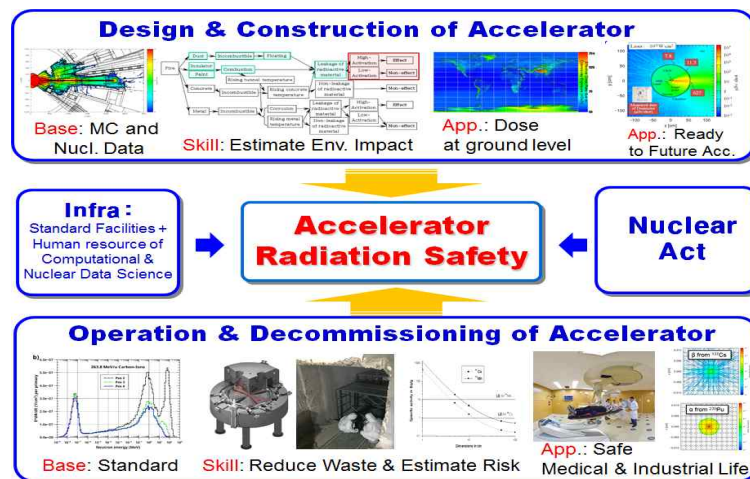
- 가속기 시설의 건설, 해체 등 각 운영단계에서 정확한 안전평가를 위한 표준 기술과 규제 절차가 확립되어 있지 못함.
- 계산 과학의 발달로 가속기 방사선안전 평가 방법의 기술적 향상이 있었으나 높은 가속입자 에너지 영역에서처럼 차폐해석용 기초자료가 현재도 현저히 부족하며, 평가결과에서 2~3배이상의 불확도를 수용하는 수준임. 선진국은 평가방법의 정확도를 높이기 위한 연구를 지속적으로 수행 중임.
- 가속기 부품 및 건물의 해체, 폐기의 경우, 심각한 오염을 유발하는 원자로 등에 적용되는 규제가 그대로 적용되어 인적, 경제적 손실이 큼. 전문적 연구결과에 근거한 표준 절차를 개발하면, 낮은 수준의 저준위 폐기물 발생량을 감소시켜 국가 인프라(폐기물처분장)의 활용도를 높일 수 있음.

○ 기술 정의

- 수 MeV 에서 수 GeV에 이르는 가속 입자에 의한 핵반응 기초자료 확보, 전산모사기술 및 검증을 위한 인프라 구축
- 건설 등 각 운영 단계별 방사선 안전평가 기술 및 위험도를 기반으로 한 안전규제 기준 및 절차 개발
- 자체처분기준 및 해제기준에 대한 합리적인 표준안 도출
- 해체/폐기물을 평가하고 폐기물 발생량을 저감시키는 기술

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 가속기 방사선안전 평가 및 규제 표준기술은 해석 평가 Tool 개발, 분석 및 측정 기술, 규제(안) 도출기술로 구성됨.
- Monte Carlo 기반의 해석 평가 Tool 은 원자력 안전 타 분야와 공동 연구를 통해 개발할 수 있으며, 가속기시설외의 활용이 가능함.
- 가속기 시설에서 발생하는 방사성폐기물의 특성에 기반 한 분석 및 폐기물 평가를 위한 측정기술은 기타 검출기 개발에도 활용됨.
- 원자력안전법 개정을 포함한 가속기 방사선안전 규제 체계의 개선에 활용됨.
- 국내에서 새롭게 설치되는 가속기 시설이나 미래형 가속기의 방사선안전 평가를 대비한 기술력 확보에 기여할 것임.



□ 비정상 시 피폭 방사선량 복원체계 및 위해도 평가 기술

○ 기술개발 필요성

- 대규모 방사선 비상 시 즉각적 치료가 필요한 피해자를 신속히 구분하여 의료적

지원을 하고 이를 통해 과도한 사회적 혼란을 막아야 하나 피폭 여부를 신속히 판단할 기술이 미비함.

- 유럽연합에서는 체르노빌 사고 이후 유럽방사선량평가그룹(EURADOS)를 바탕으로 관련 기술을 국가 간 상호 협력하여 지속적으로 개발 중임.

○ 기술 정의

- 방사선사고 시 선량계가 없는 경우에도 관련자의 방사선 피폭 여부를 신속하게 측정 판독할 수 있는 물리적/생물학적 선량평가 융합기술
- 방사선사고 또는 테러상황 시 다수 피폭자 선량평가 목적 국내 가용자원 가동 네트워크 구축

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 사고 관련 집단 및 개인에 대한 피폭선량 평가를 통한 피폭자 신속분류 기술, 사고 규모 예측을 통한 의사결정 지원기술
- 방사선사고 또는 테러 상황 시 대응 시스템에 탑재하여 신속 의료 지원 체계에 활용



□ 기기 및 계측제어 계통 안전성 향상 기술

○ 기술개발 필요성

- 가동원전 기기의 안전성 혁신화를 위해서는, 기존의 고전적인 감시범위를 확

대하는 스마트 복합센싱 기술을 적용하여, 압력경계 기기 및 기계시스템의 결함과 고장을 조기에 정확하게 예측하기 위한 지능화 진단 기술의 개발 및 적극적인 활용이 필요함.

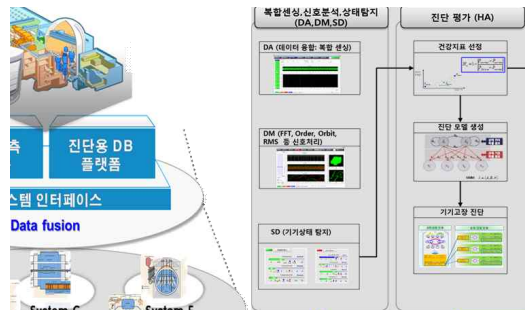
- 인간의 인지 및 판단 오류, 오작동 등 인적오류를 원천적으로 배제하여 원전의 사고를 예방할 수 있도록 AI, IoT 등 첨단 기술을 접목하여 시스템의 혁신이 필요함.
- 원전 가동으로 축적된 빅데이터를 활용하여 원전의 이상탐지 및 사고 방지를 위한 운전제어가 가능하도록 지능형 자가회복 자율운전 기술의 개발이 필요함.

○ 기술 정의

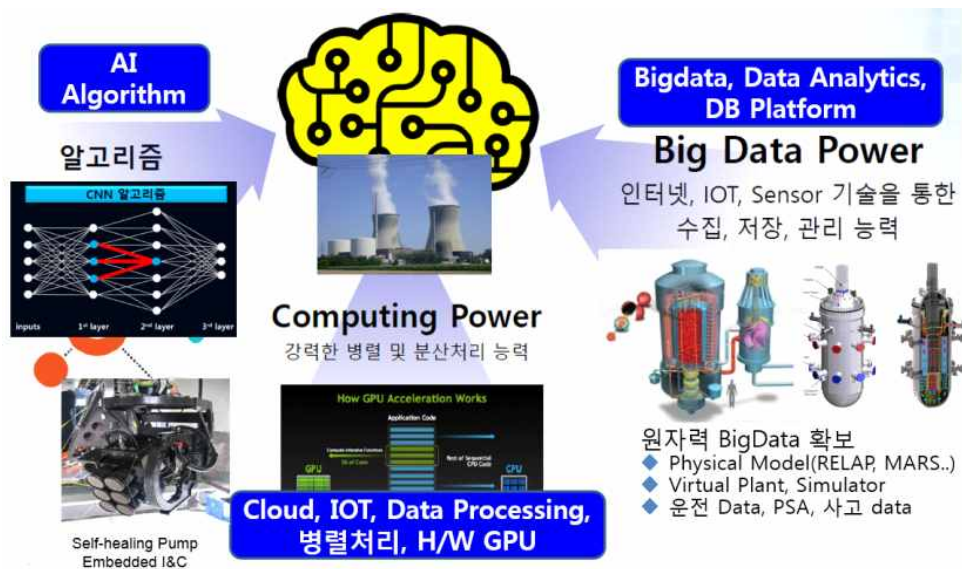
- 스마트 복합센싱 및 인공지능을 기반으로 하여, 기계요소.전자부품.기계구조물(능동 및 수동 기기)의 지능형 구조안전성 상태감시, 고장.결함 진단, 성능저하 예측진단 기술 및 플랫폼 개발
- 원전 시뮬레이션, 실험 및 원전 운영 과정을 통해 생산된 데이터 및 이상, 사고 상태의 기기 및 시스템 정보 등 지능형 운전 이상상태 감시진단예측 빅데이터 병렬처리 및 분석 기술 개발
- 데이터 기반으로 원전의 이상 상태 탐지 및 시스템 분석을 통해 원전의 비정상 상태 진입 전 정상으로 회복하기 위한 자율안전운전 기술 개발
- 지능형 원전 자가회복 운전시스템 시제품 성능검증 및 원전 적용성 확인을 통한 인적오류 원천 배제 확인

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 기계요소.전자부품열화.기기시스템 통합 진단.예측 용 복합센싱, 빅데이터 및 지능화 플랫폼 기술은 가동원전의 안전성에 대한 획기적인 개선뿐만 아니라, 상태진단용 센서류의 국산화, 상태기반정비의 실현, 그리고 중소형원전, 수출 원전, 일반 플랜트 및 우주항공 분야 등에도 활용이 가능함.
- 빅데이터 병렬처리기반 예지보전 기능을 이용한 원전의 비정상 상태 발생 가능성 저감에 기여함.
- 인적오류 극소화를 통한 원전 안전성 및 경제성 향상에 기여함.
- 최종적으로 완전한 지능형 원전 자율운전을 위한 초기 이상 상태 대응 기술 초안으로 활용함.



<지능형 자가회복 자율운전 개념도>



□ 사이버보안 대응 기술

○ 기술개발 필요성

- 사이버공격은 인간에 의한 악의적 행위로 고려해야 하는 수단과 방법에 한계가 없고 그 기술이 나날이 발전하고 있음
- 원자력 시설의 사이버공격에 대한 저항성을 높이기 위해서는 식별, 예방, 탐지, 대응 및 복구와 같은 사이버보안 연구 주기를 반복순환적으로 수행해야 함.

- 사이버보안의 특성상 외국의 기술을 적용하는 것은 힘들며, 국내에서 자체적으로 연구를 수행해야 함
- 사이버공격은 안전성 및 가동성 위해뿐 아니라 중요 기기의 물리적 손상까지 발생시킬 수 있으므로 철저한 대비가 필요함

○ 기술 정의

- 계측제어 시스템 보안을 위한 보안감시정보 수집 및 분석 기술, 무선 통신 사이버보안 기술, 센서 및 기기 사이버보안 강화 기술 개발
- 가동원전 및 폐로 사이버보안성 평가 기술 개발
- 원전 시설 사이버침해 대처를 위한 이상징후 탐지, 관제, 포렌직 기술 개발
- 원전 시설 사이버공격 위협에 대응·조치를 위한 대응 및 복구 기술 개발
- 인공지능/블록체인 기술 적용을 통한 원전 시설 사이버 대응책 선진화 개발

○ 기술 구성 및 활용 분야

- 증대되고 있는 사이버 위협에 대한 사이버보안 대응 기술 선점확보를 통해 국내 원전 건전성 확보뿐만 아니라 해외 원전 기술수출 효과 기대
- 상기 기술 확보를 통해 국내외 규제기관 규제 요건 및 국제기구 지침 만족으로 인한 원전의 건전성 및 안전에 대한 대국민 우려 및 불안 해소
- 지능적이고 급진적으로 발전하는 사이버 공격 기술에 대비 선제적 대응 체계 마련을 통한 원전 시설 사이버 위험 방지



□ 사고예방 인적수행도 향상

○ 기술개발 필요성

- 원전의 불시정지 횟수를 줄이고 궁극적으로 원전의 안전성을 높이기 위해서는 원전 운영의 주체인 운전원이나 작업자의 인적행위 향상 및 오류감소를 위한 연구가 필요함.
- 인간과 기계의 기능할당에 적용되는 기준은 원전에 적용될 수 있는 자동화 혹은 자율화 수준과 밀접한 관련이 있으며, 설계변경 과정에서도 변화될 수 있음. 따라서 인적기능과 직무의 초기 할당에서부터 운영과정의 변화까지 지속적으로 추적 관리할 수 있는 체계가 개발되어야 함.
- 디지털기반 제어실의 인적수행도 평가 기준 및 방법론의 정립뿐만 아니라 후쿠시마 원전사고와 같은 자연재해 상황 및 중대사고 상황에 대한 인적수행도 평가체계의 구축이 필요함.
- 원전 운영조직의 조직문화 및 안전문화를 비롯하여, 직무공정의 특성 등을 체계적으로 분석하여 인적수행도 및 인적오류에 미치는 영향을 파악하기 위한 방법론 및 조직적 관리체계의 최적화가 필요함.

○ 기술 정의

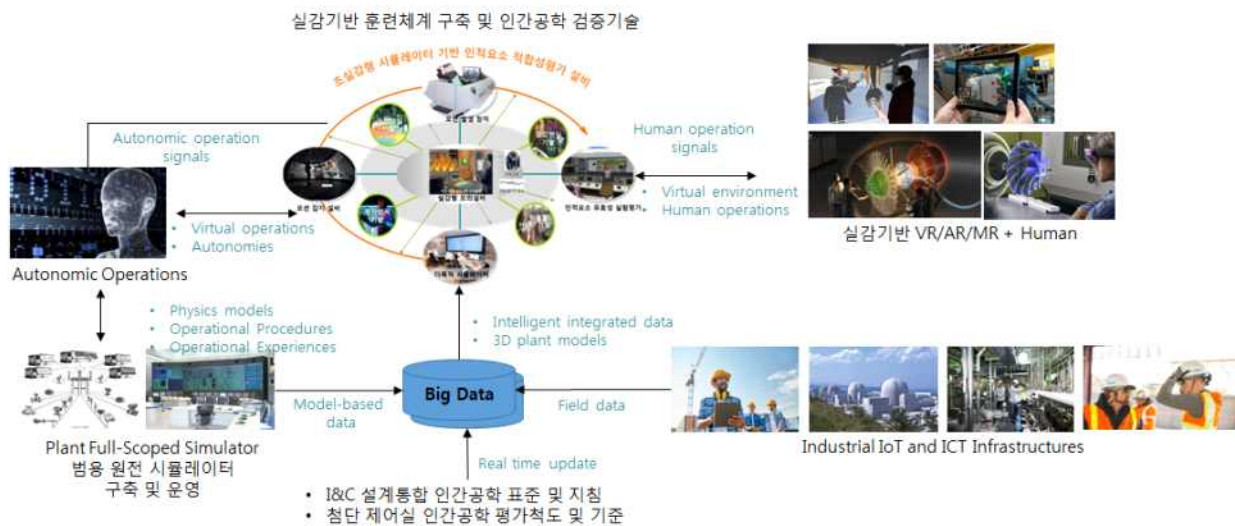
- 원전 보수 및 정비 관련 인적오류로 인한 불시정지 예방기술
- 원전 정상운전 및 비정상/비상 대응관련 인적오류 최소화를 위한 자동화/지능화된 정보시스템 개발
- 소프트웨어, 대형 정보 표시, 터치스크린 등의 첨단 인터페이스 기술을 도입한 디지털기반 HSI 및 제어실의 인간공학 확인 및 검증 기술
- 전산화 절차서 자동화 및 자동화 수준 향상 기술 / 종이 절차서 수기기록 자동 DB화 기술 (모바일 절차서 활용기술)

○ 기술 구성 및 활용

- 리스크 정보기반 보수/정비 인적오류 예측 기술을 통한 정비 및 운영에 관한 인적수행도 데이터 확보 가능 및 확보된 데이터를 기반으로 인적 수행도 예측 기술 향상 가능
- 리스크 정보기반으로 최적 정비 및 운영 전략 도출 가능
- 운전지원 시스템에 의한 운전원 상황인식 개선 및 인적오류 발생 가능성 저감화 가능
- 운전 지원 시스템에 의한 운전원의 오진단 감소 및 의사결정 지원 가능, 또한 진단데이터를 통한 발전소 거동 예지가능

- 첨단 제어실 인간공학 평가 및 검증기술은 ICT 기술기반 실시간 현장 데이터, 전범위 범용 시뮬레이터 운전 데이터 등을 통한 운전원 가상 운전 데이터 등에 기반을 두어 보다 객관적이고 효율적인 인간공학 평가 및 검증을 가능하게 할 수 있음.
- 전산화절차서 자동화 수준 향상을 통한 인적오류 원천 배제 가능
- 전산화절차서 개정 및 확인검증 수준을 향상하여 전산화절차서 품질 및 성능 제고
- 정주기 절차서 수기기록 방식을 자동화로 변경하여 운전성 향상 가능

<첨단 제어실 인간공학 평가 및 검증>



□ 결론

○ 원자력안전연구 기술수목보고서의 의의

- 본 보고서는 원자력 에너지의 사용에 반드시 담보하여야 하는 안전 확보를 위하여 필요한 기술적 요소들을 각 분야의 전문가들이 종합하여 기술수목도의 형태로 정리한 것임.
- 현재 운영 중인 원자력시설들도 이미 기준치 이상으로 안전도를 확보하고 있는 것으로 평가되나, 원자력의 안전 기준은 계속하여 강화되어 왔으며 앞으로도 지속될 것이므로 선제적인 기술 확보로 이에 대응하고자 하는 것임.
- 최근까지의 국내외 기술동향을 파악하고 분석하였고 미래 동향을 예측하여 반영하고자 하였으며, 현재 개발 중인 기술들과 개발이 필요한 기술들도 포함하여 완결성을 가지도록 작성함.
- 기술적으로 도달 가능한 안전 확보의 수준을 '사고가 발생하더라도 주민 대피가 불필요한 정도'로 설정하였으며, 이 수준을 확보하기 위하여 필요한 요소 기술을 체계적으로 정리하였음.
- 원자력 안전 분야의 기술은 개발, 검증, 인허가, 현장적용 등 여러 단계를 거치게 되므로 장기간에 걸쳐 많은 노력을 기울여야 얻을 수 있는 특징을 지니고 있음. 전체 기술을 한꺼번에 모두 개발하는 것은 불가능하므로 시급히 필요한 기술들을 우선확보기술로 제시함.

○ 국민 안심에 기여할 수 있는 원자력 안전기술

- 원자력 사고는 방사능 누출로 이어질 수 있어 안전이 특히 강조되어 왔음. 본 보고서를 작성하면서 국민이 안심하고 신뢰를 줄 수 있는 원자력 시설을 만들기 위하여 기술적으로 할 수 있는 최선의 조치를 갖출 수 있도록 하는 것을 목표로 함. 따라서 원자력 시설을 안전하게 만들고, 안전하게 운영하며, 최우선적으로 사고를 예방하되, 사고가 발생했을 때 적절하게 대처하도록 강화된 안전 기술을 확보하는데 중점을 두었음.
- 원자력 시설을 안전하게 만드는 기술은 시설의 설계와 제작에 적용하여 안전성을 개선하고 고장을 줄이며 대형사고로 확대되지 않도록 하는 기술임. 대형 냉각재상 실사고 원천적 배제, 수출형 신형 원자로 피동 핵심 기술, 사고저항성 핵연료 개발, 재료 및 기기 열화손상 제어기술, 원전 기기/부품 건전성 향상 소재기술, 폐로 원전 해체 재료를 활용한 경년열화 실증시험 등을 시급히 확보하도록 제안하였음.

- 원자력 시설을 안전하게 운영하는 기술로는, 가상 원자로 해석 기술, 첨단 리스크 평가기술, 기기 및 계측제어 계통 안전성 향상 기술, 핵의학영상 품질관리 및 정확도 향상기술, 가속기 방사선안전 평가 및 규제 표준 기술, 사이버보안 대응 기술 등을 우선적으로 확보하도록 제안하였음. 시설의 운전, 제어, 관리를 더욱 향상된 안전도로 수행할 수 있도록 하는 기술들이 여기에 포함됨.
- 원자력 시설의 사고를 예방하는 기술도 정리하였음. 최근까지의 경험에 기초하여, 다중고장사고 대비 중대사고 예방기술, 다중고장사고 해석 방법론 및 검증, 구조물 및 기기 내진성능 평가 기술, 화재위험도 저감기술, 사고예방 인적수행도 향상 기술, 첨단 리스크 평가 기술 등을 포함하였음.
- 이러한 조치에도 불구하고 원자력 사고가 발생했을 경우 대형사고로 확대되지 않도록 대처하는 기술도 중요함. 사고대응 인적수행도 평가 및 향상기술, 중대사고 현상 규명 및 평가기술, 신개념 중대사고 대처설비 기술, 비정상 시 피폭 방사선량 복원체계 및 위해도 평가 기술, 방사선비상대응 기술향상, 중대사고환경 계측/제어 및 무인대응 기술 등을 시급히 필요한 기술로 제안함

○ 원자력 안전을 확보하기 위한 기술적 해결방안을 제시

- 원자력 시설의 설계, 제작, 설치, 운영 등 전 과정에서 일어날 수 있는 안전 현안들을 검토하여 원자력안전 기술의 패러다임을 혁신적으로 업그레이드할 수 있는 기술적 해결 방안을 제시한 것임.
- 기술 확보를 위한 적절한 투자와 인력양성을 통하여 선도적인 기술개발이 이루어지면, 우리나라가 세계적으로 원자력 안전의 First Mover로서의 위치를 선점할 수 있는 기회가 될 것으로 기대됨.

□ 정책 건의사항

○ 원자력안전기술 확보를 위한 국가 정책적 지원

- 본 보고서에 담겨진 기술들은 이미 확보하고 있는 것들도 있지만, 상당수의 기술들은 현재 개발 중이거나 향후 개발이 필요한 것들로 구성되어 있음. 특히 24개의 우선확보기술들은 전문가의 입장에서 시급히 개발되어야 할 기술들을 제시한 것으로서 안전 현안의 해소와 국민 안심을 위하여 신속히 국가 정책에 반영하고 개발에 착수하여야 할 것임.
- 국가연구개발계획인 제5차 원자력진흥종합계획이 2017년부터 착수되어 시행 중이며, 현재 보완계획이 진행 중에 있으므로 본 보고서의 내용을 반영하여 추진할 것을 건의함.
- 우선확보기술들이 개발 완료되면 현재의 원자력안전 현안들을 기술적으로 해결할 수 있을 것으로 예상되나, 기술 외적인 부분에 대한 정책적 추진도 반드시 병

행되어야 함.

- 원자력 안전을 위한 첨단기술이 개발되고 현장에 적용하려면, 이와 독립적으로 인허가와 규제가 이루어져야 하므로 관련된 조치들이 시기적절하게 수반되어야 함. 따라서 본 보고서에서는 원자력 안전 규제에 대한 내용을 별도로 다루지 않았으므로 원자력안전종합계획에서도 해당되는 사항을 담을 수 있는 조치가 필요할 것임.

○ 원자력안전을 위한 제언

- 현 정부 들어 추진하고 있는 에너지전환정책의 여파로 원자력 연구개발에 대한 정부 투자 방침이 변화함에 따라 원자력 안전도 영향을 받을 수 있으므로 이 분야에 대한 특별한 관심이 필요함.
- 원자력 안전은 해당 전문가들만의 문제가 아니라 국가와 국민에게 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 공공성을 가지므로 필요기술 확보와 인력양성을 위하여 민관이 공조하고 산학연이 협조하는 체계를 공고히 유지하여야 함.

□ 특별위원회 구성

- 위원장: 김용균(학회 부회장)
- 추진위원: 김홍표, 김경두, 제무성, 김봉환, 나만균, 유종성, 양준언, 황원태, 정연섭
- 총괄간사: 강경호
- 자문단: 정재준, 박홍준, 염학기, 양지원, 백원필, 양준언, 노희천, 김군태, 손동성, 한승재, 성풍연
- 분과위원회: 5개 연구부회의 학계, 연구계, 규제계, 산업계 전문가를 운영 위원으로 구성

□ 특별위원회 활동경과

- 활동 기간: 2018. 05. 01. ~ 2018. 11. 30.
- 출범 시기: 2018. 05. 17. (춘계 KNS 학술발표회와 연계)
- 특별위원회 1차 추진회의 개최
 - 일시: 2018. 04. 02.
 - 장소: 서울역 회의실
 - 주요 결과
 - ✓ 특별위원회 추진 계획 소개 및 운영 방법 논의
 - ✓ 특별위원회 구성(안) 논의 및 각 분과 별 자문위원 확정
 - ✓ 특별위원회 착수회의 개최 방안 논의 및 확정
- 특별위원회 착수회의 개최
 - 일시: 2018. 05. 17.
 - 장소: 제주국제컨벤션센터
 - 주요 결과
 - ✓ 특별위원회 추진 계획 소개 및 운영 방법 논의
 - ✓ 특별위원회 임명 동의안 처리: 위원장, 분과장, 총괄간사
 - ✓ KAERI 작성 안전연구 기술수목에 대한 설명 및 토의

- ✓ 학회 주관 '원자력 열수력안전 미래전략 특별위원회' 결과 소개
- 특별위원회 2차 추진회의 개최
 - 일시: 2018. 06. 14.
 - 장소: 서울역 청사 내 '명가의 뜰'
 - 주요 결과
 - ✓ 특별위원회 비전과 목표 논의: 비전, 목표, 성과목표 제시
 - ✓ 기술수목 상위 단계 및 총 작성 단계 논의: 상위 2단계 확정
 - ✓ 보고서 목차 논의 및 확정
- 특별위원회 3차 추진회의 개최
 - 일시: 2018. 07. 31.
 - 장소: 학회 대회의실
 - 주요 결과
 - ✓ 기술수목도 취합본 초안 검토: 구성 및 작성 세부 지침 확정
 - ✓ 보고서 작성 방안 논의
 - ✓ 향후 일정 논의 및 확정
- 특별위원회 1차 총괄위원회 회의 개최
 - 일시: 2018. 10. 05.
 - 장소: 학회 대회의실
 - 주요 결과
 - ✓ 기술수목도 취합본 초안 검토: 미 작성 부분 업무 분장
 - ✓ 우선 확보 기술 선정 방안 논의
 - ✓ 향후 일정 논의 및 확정
- 2018년도 KNS 추계 학술발표회 워크숍 개최
 - 워크숍 제목: 안전성 강화를 위한 원자력 안전연구 발전전략 워크숍
 - 일시: 2018. 10. 25.
 - 장소: 여수 엑스포컨벤션센터 세미나 6실
 - 주요 결과
 - ✓ KNS 안전연구 분야 기술수목보고서 작성 특별위원회의 활동 개요와 성과 발표
 - ✓ 5개 연구부회가 주관하여 분류·정리한 안전연구 기술수목과 우선순위 기술에 대한 발표와 토의

✓ 패널 토의 및 청중 포함 참석자 전체 토론

○ 특별위원회 2차 총괄위원회 회의 개최

- 일시: 2018. 11. 02.

- 장소: 학회 대회의실

- 주요 결과

✓ 추계 KNS 학술대회 워크숍 패널 토론 내용 반영 논의

✓ 우선 확보 기술 선정 방안 논의

✓ 향후 일정 논의 및 확정

○ KNS 안전연구 기술수복보고서 작성 특별위원회의 추진 일정을 정리하면 다음 표와 같음.

항목	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	비고
KNS 이사회 상정 및 의결	◆										
특별위원회 추진회의		◆		◆	◆			◆			
특별위원회 착수회의			◆								KNS 추계 학술발표회
제1차 총괄위원회								◆			
제2차 총괄위원회									◆		
최종 결과 보고회의								◆			KNS 추계 학술발표회
기술수복도 보완 및 완성									◆		
KNS 이사회 보고										◆	