

가상원자로 (Virtual Nuclear Reactor, VNR) 개발 전략 수립

조진영, 김효찬, 윤한영*, 김상백, 박래준, 이재룡

2018년 5월 16일 (수)

목 차

- I. 가상원자로 개발 전략 수립 개요**
- II. 가상원자로 기술 수목**
- III. 가상원자로 적용 분야**
- IV. 기술 분야별 국내 연구 개발 현황**
- V. 가상원자로 개발 전략**



I. 가상원자로 개발 전략 수립 개요

II. 가상원자로 기술 수목

III. 가상원자로 적용 분야

IV. 기술 분야별 국내 연구 개발 현황

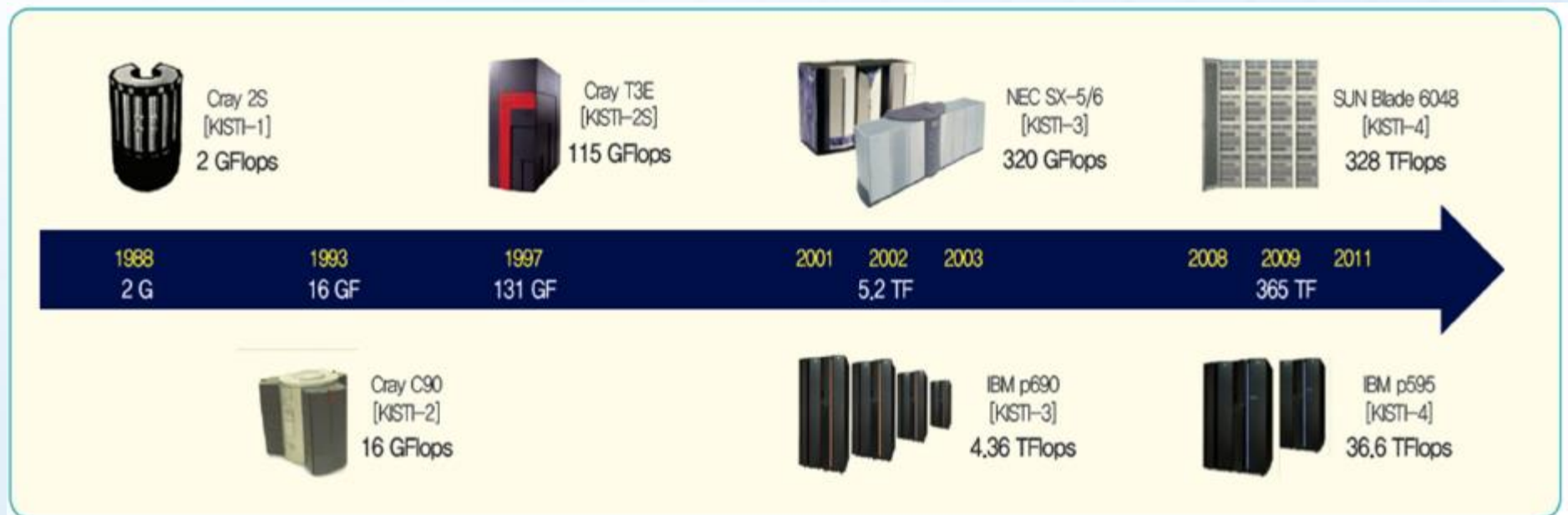
V. 가상원자로 개발 전략



개발 전략 수립 배경 (1/3)

□ 슈퍼컴퓨터 기반 계산과학기술의 지속적인 발전

- 슈퍼컴퓨터 세계1위 → 500위: ~6년
- 최근 **AI 등의 성과는 사실상 컴퓨터 성능향상의 결과임**
 - 예: 알파고 성공은 세계 10위권의 슈퍼컴을 사용하여 가능
- 2018년 도입된 KISTI 5호기는(25 PF) 4호기(2008년) 대비 70배 속도 향상
- 원자력분야 SW 기술수준은 사회적인 기대수준에 못 미침



Priority Issues tackled by using the post-K computer

Category	Priority issues	Organization
Achievement of a society that provides health and longevity	Innovative drug discovery infrastructure through functional control of bio-molecular systems	RIKEN Quantitative Biology Center and 6 other institutions
	Integrated computational life science to support personalized and preventive medicine	The Institute of Medical Science, the University of Tokyo and 4 other institutions
Disaster prevention and global climate problems	Development of integrated simulation systems for hazards and disasters induced by earthquakes and Tsunamis	Earthquake Research Institute, the University of Tokyo and 4 other institutions
	Advancement of meteorological and global environmental predictions utilizing observational “Big Data”	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology(JAMSTEC) and other 5 Institutions
Energy problems	Development of new fundamental technologies for high efficiency energy creation, conversion/storage and use	Institute for Molecular Science , National Institute of Natural Sciences and 8 other institutions
	Accelerated development of innovative clean energy Systems	School of Engineering, the University of Tokyo and 11 other institutions
Enhancement of industrial competitiveness	Creation of new functional devices and high performance materials to support next-generation industries (CDMSI)	The Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo and 9 other institutions
	Development of innovative design and production processes that lead the way for the manufacturing industry in the near future	Institute of Industrial Science, the University of Tokyo and 7 other institutions

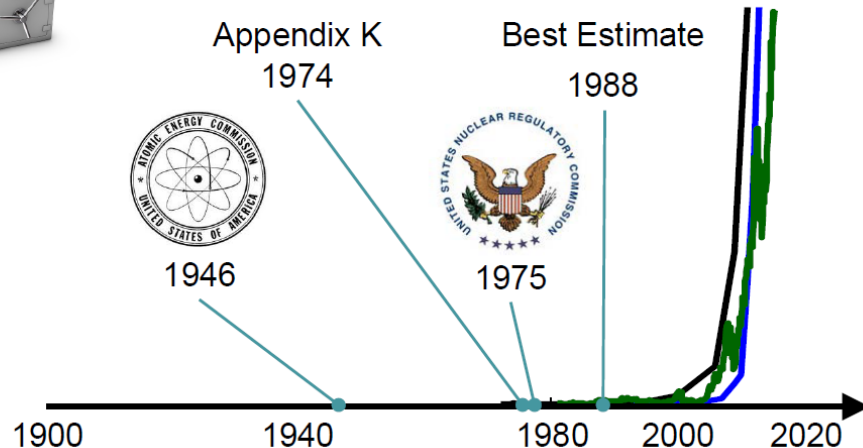
개발 전략 수립 배경 (1/3)

□ 원전 안전해석 기술 개발 현황

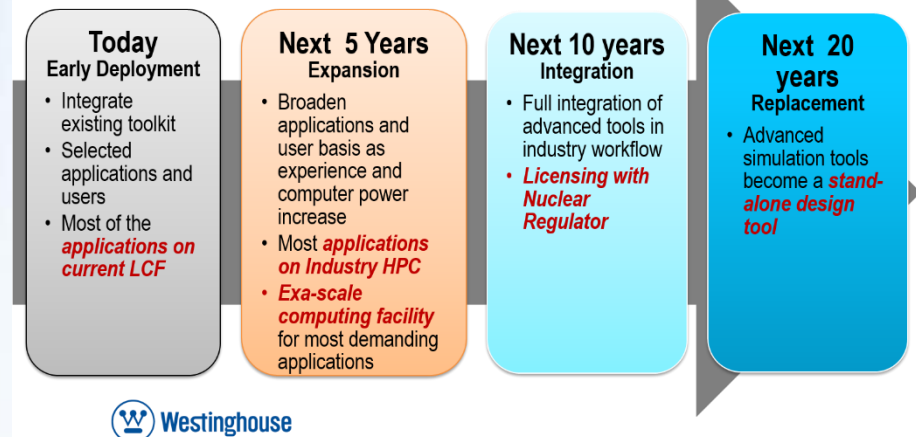
- 원자력 분야는 1980년대 완성된 안전해석 기술 사용
 - 미국 주도의 원전기술 연구개발 부진
 - 데스크톱 PC 수준의 HW로 충분한 SW 사양
- 원전 물리현상의 복잡성에 비하여 해석기술수준은 타 분야 대비 낮은 수준
- 미국 CASL 과제를 중심으로 안전해석 기술 고도화 연구개발 로드맵 제시



History of Simulation Regulation



원전 안전해석 기술 개발 현황

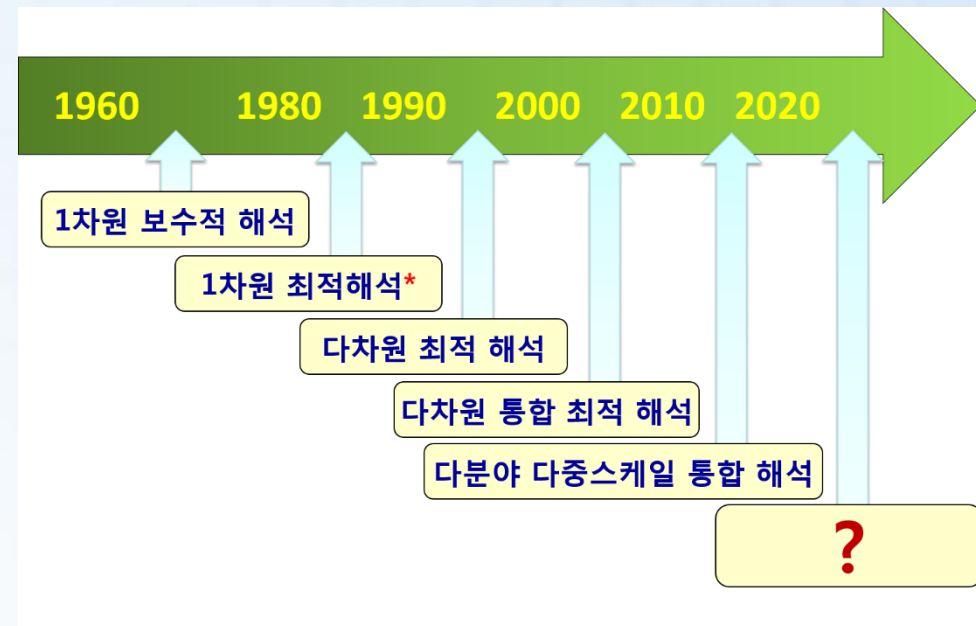


CASL 과제 연구개발 로드맵

개발 전략 수립 배경 (3/3)

□ 원전 안전해석 기술 개선 수요

- 최근 원전 규제 기준 강화로 기존 보수적 안전해석의 결과는 허용기준을 만족하기 어려운 상황이 예상됨.
- 개정된 인허가 규정에서는 열수력-핵연료 연계해석 등과 같은 다물리 통합해석이 필수적으로 요구됨.
- 노후 원전의 안전 여유도 감소
- 안전해석의 보수성 가정이 항상 보수적인 결과와 일치하지 않을 수 있음.
- 원전 안전해석 소프트웨어의 기술 수준은 사실상 원전 기술 경쟁력의 핵심

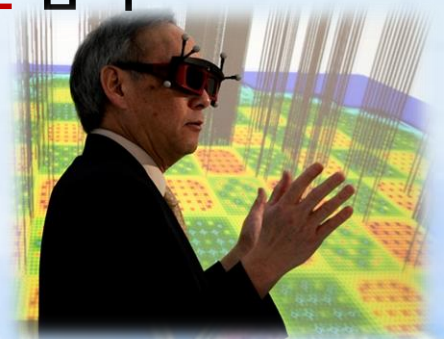


국외 개발 현황-CASL (1/2)

□ CASL (US DOE)

- CASL (*Consortium for the Advanced Simulation of Light Water Reactors*)

- 비전: 원자로 성능 및 안전성의 신뢰도 향상을 위하여 계산과학에 기반한 모델/시뮬레이션 기술 개발 및 산업계 적용
- 목표: 가상원자로 개발, 원자로 운전 여유도 개선, 원자로 출력 증강, 원전 수명 연장
- US DOE의 Energy Innovation Hub 사업
- ORNL(Oak Ridge Nat. Lab.) 주도로 약 20여개 산학연 기관 참여
- 제2의 Manhattan Project로 불리는 대형 사업
 - ✓ 1 단계: 2010-2015 (예산: 약 1400 억원)
 - ✓ 2 단계: 2016-2020 (예산: 약 1400 억원)
- 1단계 개발 목표 성공적 완수 및 2단계 진행 중

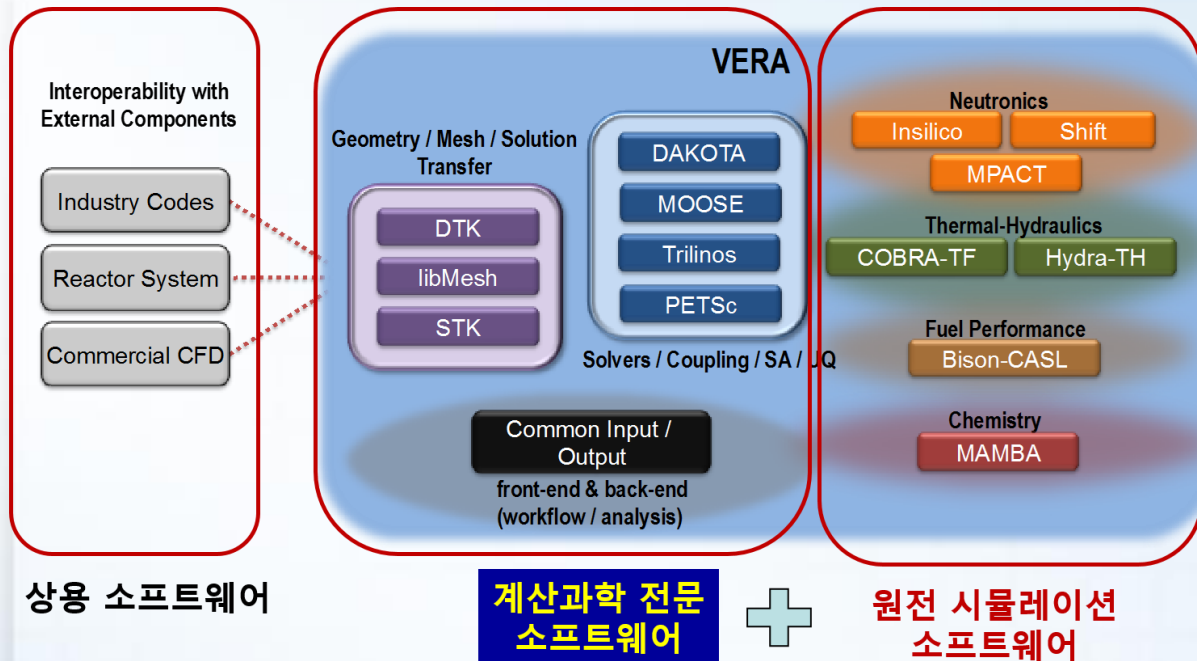


“Multi-disciplinary, highly collaborative teams ideally **working under one roof** to solve priority technology challenges”

– Steven Chu (Secretary of Energy)

국외 개발 현황-CASL (2/2)

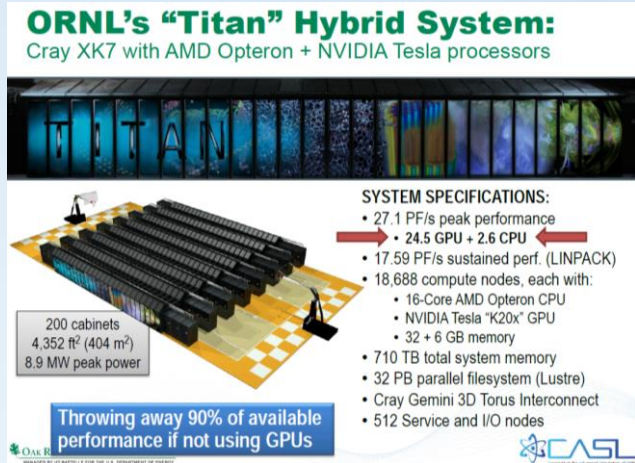
□ CASL 가상원자로 (VERA)



가상원자로(VERA) 소프트웨어 구성 (Virtual Environment for Reactor Application)

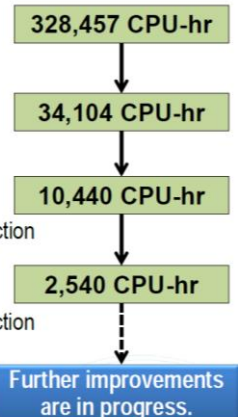
계산과학기술 적용 VERA
계산속도 약 130 배 개선

ORNL Titan 슈퍼컴퓨터 활용



VERA-CS performance improvement over last 15 months.

- Dec 2013
 - Insilico/CTF – 56/8 energy groups
 - 18,769 cores, 17.5 hours wall time
- Apr 2014
 - MPACT/CTF – 56 energy groups, P2 scattering
 - 2,784 cores, 12.25 hours wall time
- Aug 2014
 - MPACT/CTF – 56 energy groups, transport correction
 - 2,784 cores, 3.75 hours wall time
- March 2015
 - MPACT/CTF – 47 energy groups, transport correction
 - Direct Coupling
 - 4,234 cores, 36 minutes wall time



OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY
MANAGED BY UT-BATTELLE FOR THE U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

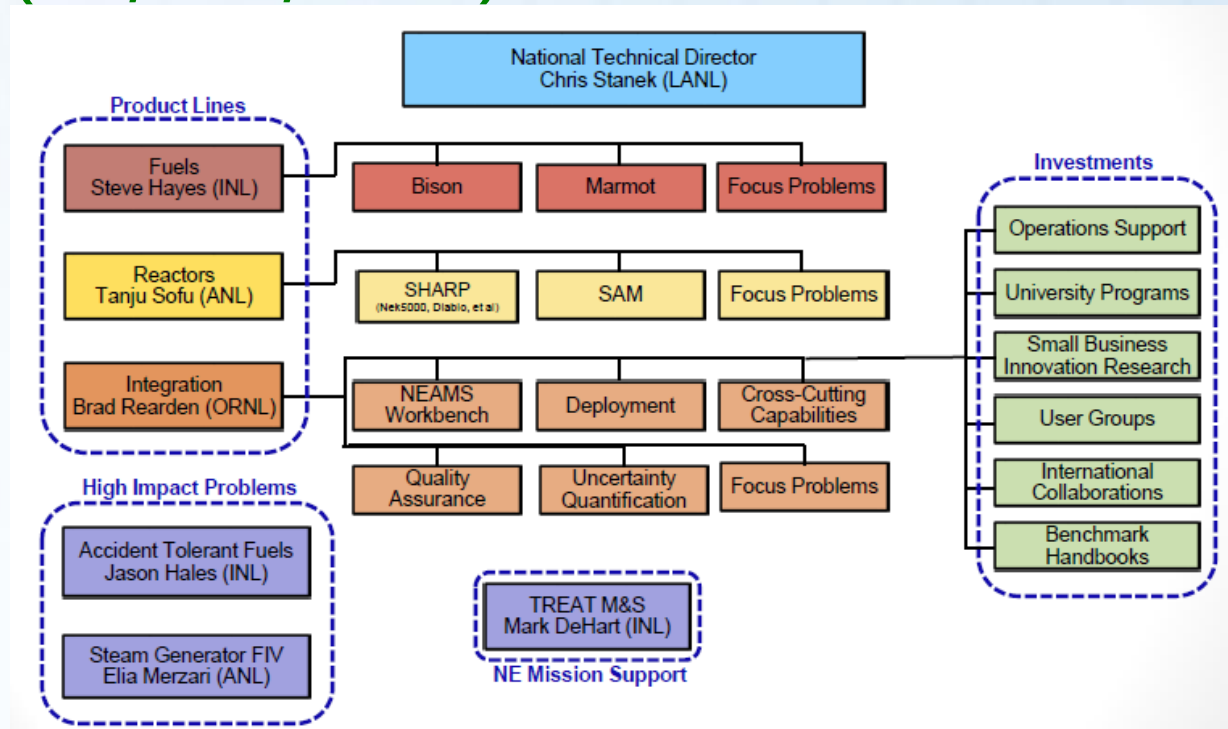
CASL
Center for Advanced Simulation and Analysis

국외 개발 현황-NEAMS

□ NEAMS (US DOE)

- Nuclear Energy Advanced Modeling and Simulation
- 비전: 최신 해석 기법을 활용한 원자력 연구 개발 체계 선진화
- 목표: 신형원자로 및 핵연료 설계/평가를 위한 고신뢰도 SW 개발
- MOOSE (*Multi—physics Object-Oriented Simulation Environment*)
- 국가연구소 협력 연구 (INL, ANL, ORNL)

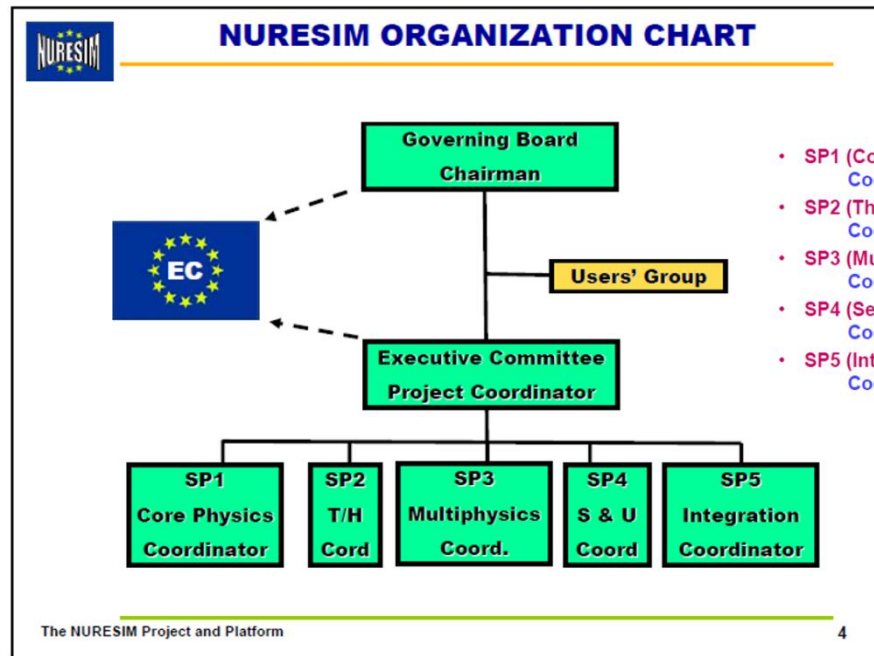
Product Lines	주관
핵연료 해석 플랫폼 (Fuel Product Line, FPL)	INL
원자로 해석 플랫폼 (Reactors Product Line, RPL)	ANL
통합해석 워크벤치 플랫폼 (Integration Product Line, IPL)	ORNL



국외 개발 현황-NURESIM

□ NURESIM (EU)

- **N**Uclear **R**eactor **E**uropean **S**IMulation
- 비전: 원전 안전해석을 위한 **최신**의(State Of Art, SOA) SW 기술 개발
- 목표: 상용원전 안전해석을 위한 **다중스케일 다물리 통합 플랫폼** 개발
- 유럽내의 약 20여개 기관 참여

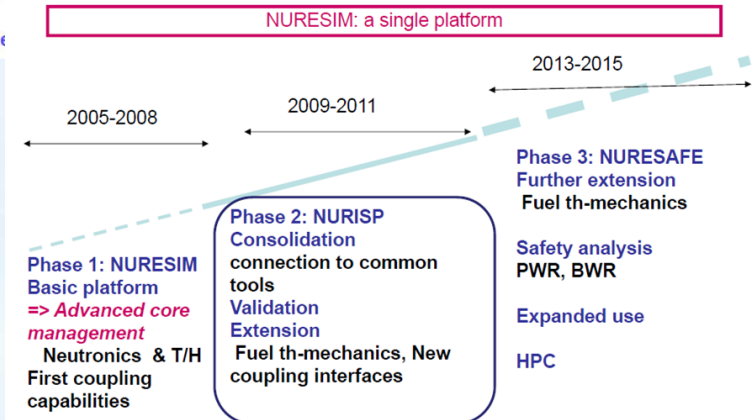


18 partners

- SP1 (Core Physics) 40% of manpower
Coord. UPM (JM Aragonés) 10 Partners
- SP2 (Thermalhydraulics) 40%
Coord. CEA (D. Bestion) 14 Partners
- SP3 (Multi-Physics) 5%
Coord. PSI (P. Coddington) 3 Partners
- SP4 (Sensitivity & Uncertainty) 9%
Coord. UniKa (D. Cacuci) 3 Partners
- SP5 (Integration) 6%
Coord. CEA (L. Dada) 1 Partner



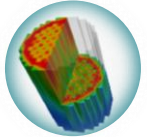
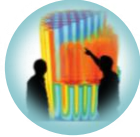






The NURESIM roadmap



국내 개발 현황

- 가상원자로와 개발과 관련한 본격적인 연구는 수행되지 않음.
- 개별 분야별 핵심 소프트웨어 개발 위주의 연구 수행
 - 노물리 해석: 중성자 확산 및 수송 해석 코드 개발
 - 열수력 해석: 계통 및 기기스케일 열수력 코드 개발
 - 핵연료 해석: FEM 기반의 핵연료 해석 코드 개발 중
 - 분야별 연계 기술 개발은 제한적 수준
- 가상원자로 개발 전략 수립 과제 수행 중
 - 2017.07.14. ~ 2018.07.13
 - 국내 원전 안전해석 수요 및 해석 기술 개발 현황을 고려한 효율적인 가상원자로 개발 전략 수립

연구개발 추진 체계

비전	국민 안심 원자력 안전 확보			
미션	가동 원전 안전해석 정밀도 향상 및 검증 실험 대체 시뮬레이션 기술 확보			
목표	슈퍼컴퓨터 기반 가상원자로(VNR, Virtual Nuclear Reactor) 개발			
전략	 VNR 핵심 기술 개발	 가동 원전 VNR 개발	 원전 안전성 정밀 진단	 사이버원전 구축
사업 구조	개별 소프트웨어 개발 <ul style="list-style-type: none"> • 노물리 해석 기술 • 냉각계통 해석 기술 • 핵연료 해석 기술 • 구조 해석 기술 • 중대사고 해석 기술 	통합 소프트웨어 개발 <ul style="list-style-type: none"> • 구성 소프트웨어 검증 • 구성 소프트웨어 병렬 기능 최적화 • 전후처리 프로세서 통합 • 통합 해석 플랫폼 개발 	VNR 적용 통합 해석 <ul style="list-style-type: none"> • 안전 규제 강화 대비 안전해석 여유도 개선 • 원전 가상사고 전 과정 통합 해석 • 차세대 안전해석 기술 	사이버원전 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> • 자연재해 해석 기술 • 핵분열 물질 대기 확산 해석 기술 • 확률론적 위험도(Risk) 평가 기술
	VNR 인프라 구축 <ul style="list-style-type: none"> • VNR 슈퍼컴퓨터 구축 • VNR 시뮬레이션 가상현실 시스템 구축 • VNR 검증 데이터베이스 구축 			
파급 효과	 원전 가상사고의 정밀 예측을 통한 안전성 향상	 원전 사회 수용성 개선		
	 원전 시뮬레이션 가상현실 구현으로 원전 과도 현상 이해도 증진	 고비용 대형 실험 대체		

국내외 가상원자로 연구개발 현황 비교

	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 노 심 출력 저하 예 측	ORNL을 비롯한 미국내 20여개 연구기관
NEAMS ²⁾	미국 (DOE)	신형원자로 및 신 형핵연료 개발을 위한 해석 소프트 웨어 개발	1단계:2012~18	220억원/년 (약 8개 정부 출 연 연구소의 전 문인력 유지 비 용 포함)	노물리, 열수력, 핵연료, 구조	SFR 및 가스로 의 노심 및 핵연 료 해석	INL을 비롯한 미국내 10여개 연구기관
NURESIM ³⁾	EU (EURAT OM)	경수로 안전해석 을 위한 최신 (State Of Art) 소 프트웨어 공급	1단계:2005~08 2단계:2009~11 3단계:2013~15	40억원/년	노물리, 열수력	원자로 압력용 기의 가압 열 충 격 (PTS) 현상 예측	CEA를 비롯한 EU내 22개 연구 기관
가상 원자로 ⁴⁾	한국 (과기정 통부)	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) 가상원자로: 추진 계획

가상원자로 전략 수립 전문가 회의

분야	성명*	소속
원자로 노물리 해석	박동규	미래와도전 (FNC)
	신호철	한수원 중앙연구원 (KHNP-CRI)
	심형진	서울대학교
	윤주일	한전원자력연료 (KEPCO-NF)
	이덕중	울산과학기술대학교 (UNIST)
	이은기	한수원 중앙연구원 (KHNP-CRI)
원자로 냉각계통 열수력 해석	김한곤	한수원 중앙연구원 (KHNP-CRI)
	설광원	한국원자력안전기술원 (KINS)
	이규천	한국전력기술 (KEPCO-ENC)
	조형규	서울대학교
	최재돈	한전원자력연료 (KEPCO-NF)
	진봉용	STAR-CCM
	박창제	세종대학교
원자로 핵연료 해석	신안동	한국원자력안전기술원 (KINS)
	신호철	한수원 중앙연구원 (KHNP-CRI)
	안상준	울산과학기술대학교 (UNIST)
	이주석	한국원자력안전기술원 (KINS)
	최재명	한전원자력연료 (KEPCO-NF)

원전 중대사고 해석	김균태	한국원자력안전기술원 (KINS)
	김동하	한국원자력연구원 (KAERI)
	박현선	포항공과대학교 (POSTECH)
	박창환	미래와도전 (FNC)
	정동욱	중앙대학교
	홍순준	미래와도전 (FNC)
슈퍼컴퓨터/ 가상현실	김민아	한국과학기술정보연구원 (KISTI)
	김정우	서울과학기술대학교
	김정한	한국형 수치예보모델 개발사업단
	류훈	한국과학기술정보연구원 (KISTI)
	조금원	한국과학기술정보연구원 (KISTI)
	조영철	미래와도전 (FNC)

*성명: 분야별 가나다 순

분야별 전문가 회의 개최

전문 분야	1차		2차		3차	
	참석자	장소 (일시)	참석자	장소 (일시)	참석자	장소 (일시)
노물리	박동규, 심형진, 윤주일, 이은기, 조진영, 윤한영, 이재룡	대전무역센터 (11/21)	이은기, 이덕중, 윤주일, 박동규, 조진영, 윤한영, 이재룡	대전무역센터 (12/11)	조진영, 심형진, 윤주일, 이덕중, 이은기, 이재룡	대전무역센터 (01/25)
핵연료	박창제, 이주석, 신안동, 신호철, 최재명, 김효찬, 양용식, 윤한영, 이재룡	대전무역센터 (11/20)	박창제, 최재명, 이주석, 신안동, 김효찬, 윤한영, 이재룡	대전무역센터 (12/11)	박창제, 안상준, 이주석, 신안동, 최재명, 김효찬, 윤한영, 이재룡	대전인터시티 (01/19)
열수력	김경두, 김한곤, 설광원, 윤한영, 정법동, 조형규, 최재돈, 이재룡	대전무역센터 (11/13)	정법동, 김경두, 윤한영, 이재룡, 설광원, 조형규, 이재일, 진봉용	대전무역센터 (12/08)	설광원, 이규천, 이재일, 조형규, 김경두, 윤한영, 이재룡	대전인터시티 (01/19)
중대 사고	김균태, 박현선, 정동욱, 홍순준, 김상백, 박래준, 윤한영, 이재룡	대전무역센터 (11/21)	정동욱, 김균태, 박현선, 홍순준, 박창환, 김동하, 김상백, 윤한영, 이재룡	서울역 (12/15)	박현선, 정동욱, 박창환, 홍순준, 김동하, 박래준, 김상백, 윤한영, 이재룡	인텍소 회의실 (01/11)
계산 과학	김민아, 김정우, 김정한, 류훈, 조금원, 조영철, 윤한영, 이재룡	대전무역센터 (11/22)	김민아, 김정우, 김정한, 류훈, 조금원, 조영철, 윤한영, 이재룡	대전무역센터 (11/21)	김민아, 김정우, 김정한, 조금원, 조영철, 윤한영, 이재룡	대전무역센터 (01/23)

분야별 전문가 회의 주요 의견

- 설계개선, 신형원자로 적용 주제는 단기적으로 어려움.
- DBA, DEC, 중대사고 영역을 모두 포함하는 전략 필요
- 현장 작업자(사업자) 대상으로 원전 안전해석 DB 제공
- 방재 측면에서 대응시간 확보를 위한 DB 제공
- 기술수목도 및 기술개발 로드맵 작성
- BISON (3D FEM) 등의 고정밀 핵연료 해석 코드 예측도는 아직 검증되지 못함.
- 중대사고시 노심 용융에 이르는 천이과정에 대한 핵연료 모델 부재
- 핵연료 모델 검증을 위한 노내외 검증 데이터 확보는 매우 중요
- 핵융합 분야와 연계하여 원자력분야 전용 슈퍼컴퓨터 도입 필요
- 해당 SW들에 대한 병렬성능 및 슈퍼컴 성능에 맞는 최적화 매우 중요
- 노심->RCS->격납용기->방재를 one-through 로 해석 가능한 장기 목표 설정
- 불확실성 정량화 분야 추가 필요
- 원자로건물 건전성 해석을 위한 구조해석 분야 필요



I. 가상원자로 개발 전략 수립 개요

II. 가상원자로 기술 수목

III. 가상원자로 적용 분야

IV. 기술 분야별 국내 연구 개발 현황

V. 가상원자로 개발 전략



가상원자로(VNR) 기술 수목 (1/10)

대분류	중분류	소분류	
원전 모델 및 시뮬레이션 기술	원자로 노물리 해석 기술	노달스케일 중성자 확산 모델 봉스케일 과도상태 중성자 수송 모델	봉스케일 정상상태 중성자 수송 모델 몬테칼로 중성자 해석 모델
	핵연료 해석 기술	정상상태 핵연료 물성 모델 사고조건 핵연료 파손 모델	과도상태 핵연료 물성 모델
	원자로 냉각계통 해석 기술	계통스케일 열수력 모델 CFD 해석 모델 다중스케일 연계 모델	기기스케일 열수력 모델 DNS 해석 모델 CAD 연계 전처리 모델
	원자로 건물 해석 기술	수소 거동 모델 핵분열 물질 생성 및 거동 모델	원자로 건물 응축 현상 모델 CAD 연계 전처리 모델
	중대사고 해석 기술	노내 중대사고 현상 모델	노외 중대사고 현상 모델
원전 모델 및 시뮬레이션 공통기술	구조 해석 기술	원자로 구조 해석 모델 기기건전성 평가 모델	원자로 건물 구조 해석 모델 내진 해석 모델
	수화학 해석 기술	봉소 거동 모델 크러드(CRUD) 거동 및 침적 모델	냉각재 내 핵분열 물질 거동 모델
VNR 시뮬레이션 플랫폼 개발	통합해석 플랫폼 구축 기술	통합 플랫폼 SW 및 전후 처리 프로세서 개별 시뮬레이션 SW 핵심 솔버 병렬계산 기술	다물리 연계 모델
	VNR 계산 클러스터 구축 기술	계산 클러스터 구축 및 운영 기술 통합 플랫폼 SW 최적화 기술	개별 시뮬레이션 SW 최적화 기술
	가상현실 가시화 시스템 구축 기술	시뮬레이션 결과 병렬 후처리 기술 원전계통 가상현실 구현 기술	3차원 가시화 기술 가상현실 시스템 입출력 구현 기술
VNR 활용 기술	가동원전 안전성 향상 기술	원전 안전 여유도 개선 기술 원전 가상사고 통합 시뮬레이션 기술	다차원 현상 관련 안전현안 적용 기술
	안전해석 방법론 개선	DBA 안전해석 방법론 중대사고(SA) 해석 방법론	DEC 안전해석 방법론
	예측 불확실도 정량화 기술	개별 시뮬레이션 SW 불확실도 평가 기술	통합 시뮬레이션 불확실도 평가 기술
	특수목적 원전 검증 실험 대체 기술	연구용 원자로 시뮬레이션 기술 액체 금속로 시뮬레이션 기술	중소형 원전 시뮬레이션 기술
	가동원전 실증 실험 대체 기술	신안전계통 검증 실험 대체 해석 기술 다물리 복합 실험 대체 해석 기술	원전 성능 검증 실험 대체 해석 기술 위험물질 사용 실험 대체 해석 기술

가상원자로 기술 수목 (2/10)

□노물리 해석 분야

대분류	소분류	기술수준(%)		VNR 적용기술 개발기간(년)
		국내	해외	
노달 스케일 해석 기술	중성자 확산 방정식 해석 모델	95	95	3
	봉 출력 분포 합성 모델	90	95	3
	핵연료 연소 모델	90	95	3
	동특성 인자 생성 모델	90	95	3
	동특성 해석 모델	90	95	3
	노내 계측기 해석 모델	90	95	3
봉 스케일 해석 기술 (정상상태)	중성자 수송방정식 해석 모델	85	90	5
	노내 구조물 해석 모델	85	90	5
	제어봉 해석 모델	80	80	5
	감마선 해석 모델	85	95	5
	핵연료 연소 모델	90	95	5
봉 스케일 해석 기술 (과도상태)	동특성 인자 생성 모델	80	90	5
	동특성 해석 모델	80	90	5
	병렬 계산 모델	80	90	5
몬테칼로 중성자 해석 기술	몬테칼로 수치해석 모델	60	70	20
	전노심 입자 계산 모델	60	70	20

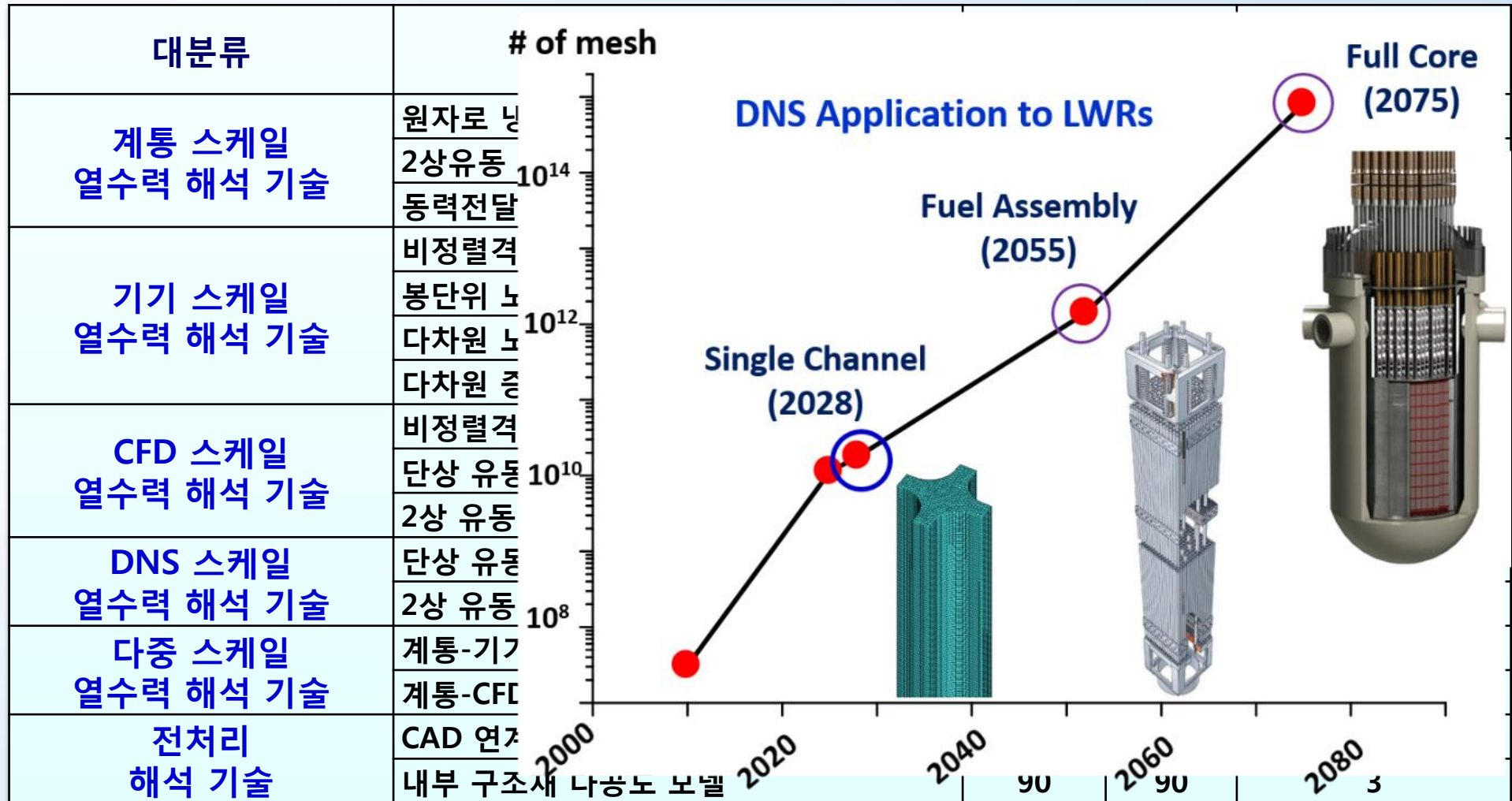
가상원자로 기술 수목 (3/10)

□핵연료 해석 분야

대분류	소분류	기술수준(%)		VNR 적용기술 개발기간(년)
		국내	해외	
정상 상태 해석 기술	정상상태 FGR 거동 모델	90	95	3
	핵연료 물성 모델	90	95	3
과도 상태 해석 기술	다차원 PCMI 해석 모델	80	90	5
	고온 펄릿 점탄성 거동 모델	70	80	5
사고 상태 해석 기술	다차원 핵연료 열-기계 거동 모델	80	90	5
	사고시 FGR 거동 모델	80	90	5
	핵연료 파손 및 파손 기준 모델	80	90	5
	고연소도 핵연료 FFRD 거동 모델	70	80	10
	붕다발 핵연료 거동 해석 모델	80	90	5
	고온시 핵연료 내부 FP 방출 모델	70	80	5
	전노심 핵연료봉 해석 기술	70	80	10

가상원자로 기술 수목 (4/10)

□ 냉각계통 해석 분야



가상원자로 기술 수목 (5/10)

□원자로 건물 해석 분야

대분류	소분류	기술수준(%)		VNR 적용기술 개발기간(년)
		국내	해외	
수소 거동 해석 기술	수소 수송 및 제어설비 해석 모델	90	90	5
	기체 난류 해석 모델	80	80	5
	수소 연소 해석 모델	70	80	10
응축 거동 해석 기술	벽면 응축 해석 모델	90	90	3
	살수 응축 해석 모델	90	90	3
핵분열 생성물 거동 해석 기술	핵분열 생성물 수송 해석 모델	70	80	5
	핵분열 생성물 원천항 해석 모델	70	80	10
	원자로건물 여과배기 해석 모델	70	80	5
전처리 해석 기술	CAD 연계 격자 생성 기술	80	90	3
	내부 구조재 다공도 모델	80	90	3

가상원자로 기술 수목 (6/10)

□구조 해석 분야

대분류	소분류	기술수준(%)		VNR 적용기술 개발기간(년)
		국내	해외	
원자로 구조해석 기술	사고 조건별 원자로 계통 열수력 하중 모델	90	95	3
	대규모 유체-구조물 연성 모델 (full scale fluid- structure interaction model)	85	90	5
	주요 계통별 대규모 구조해석 모델	90	90	3
	원자로 용기 하반구 파손 해석 기술	90	90	5
	고압사고 시 RCS 경계 파손 해석 기술	85	85	5
기기 건전성 평가 기술	조사 취화 성능 평가 모델	90	95	5
	열화 평가 및 실시간 감시 통합 모델	85	90	5
내진해석 기술	원자로 및 원자로 건물 통합 3차원 모델	90	95	3
	토양-건물 3차원 통합 모델	90	95	5
	주요기기 내진성능 및 성능 향상 평가 기술	85	90	5
원자로건물 구조해석 기술	항공기 충돌 해석을 위한 원자로 건물 및 원자로 연성 모델	85	90	5
	자연재해 해석을 위한 원자로 건물 및 원자로 연성 모델	85	90	5
	원자로건물 파손 해석 기술	85	90	5

□수화학 해석 분야

대분류	소분류	기술수준(%)		VNR 적용기술 개발기간(년)
		국내	해외	
봉소 거동 해석 기술	다차원 봉소 수송 모델	90	95	3
	봉소희석 사고 해석 모델	80	90	5
핵분열 물질 거동 해석 기술	원자로냉각재내 핵분열 생성물 수송해석 모델	80	85	5
	아이오딘의 화학적 거동 해석 모델	80	85	5
크러드(CRUD) 거동 해석 기술	크러드 화학적 거동 해석 모델	80	90	5
	크러드 침적 두께 예측 모델	80	90	5

가상원자로 기술 수목 (8/10)

□중대사고 해석 분야

대분류	소분류	기술수준(%)		VNR 적용기술 개발기간(년)
		국내	해외	
노내 현상 해석 기술	핵연료 피복재 산화 및 수소생성 해석 기술	90	90	10
	핵연료 손상 및 용융 해석 기술	75	80	10
	용융 핵연료 재배치 해석 기술	75	80	10
	노심 용융물 층 형성 및 냉각 해석 기술	65	70	10
	원자로용기 하반구 용융물 거동 해석 기술	70	70	10
	원자로용기 내 증기폭발 해석 기술	85	90	10
	원자로용기 외벽냉각 해석 기술	85	85	10
노외 현상 해석 기술	원자로공동에서 증기 폭발 해석 기술	70	80	10
	노심용융물 고압분출 해석 기술	70	80	10
	용융물과 콘크리트 반응 해석 기술	75	80	10
	원자로공동 내 코어캐처 해석 기술	90	80	10
	원자로 건물 우회사고 해석 기술	80	90	10

가상원자로 기술 수목 (9/10)

□VNR 시뮬레이션 플랫폼 기술

대분류	소분류	기술수준(%)		VNR 적용기술 개발기간(년)
		국내	해외	
통합해석 플랫폼 기술	개발 해석 분야 핵심 솔버 최적화 및 최적화 기술	70	90	10
	다물리 연계 해석 기술	85	95	3
	통합해석 플랫폼 소프트웨어 기술	80	95	5
	통합해석 전후처리 프로세서 기술	85	95	3
가상원자로 계산클러스터 기술	해석 분야별 계산 클러스터 기능 요건 모델	90	95	10
	개별 소프트웨어 최적화 기술	80	90	5
	통합 해석 소프트웨어 최적화 기술통합 해석 소프트웨어 최적화 기술	80	90	5
가상현실 가시화 기술	해석 분야별 병렬 후처리 기술	90	95	3
	병렬 3차원 가시화 기술	90	95	3
	원전 계통 및 시뮬레이션 결과 가상현실 구현 기술	80	95	5
	병렬 후처리 전용 계산 클러스터 구축 기술	90	95	3
	가상 현실 시스템 입력장치 구현 기술	90	95	3
	가상 현실 시스템 출력장치 구현 기술	90	95	3

가상원자로 기술 수목 (10/10)

□VNR 활용 기술

대분류	소분류	기술수준(%)		VNR 적용기술 개발기간(년)
		국내	해외	
가상원자로 적용 가동원전 안전성 향상 기술	안전규제 강화 대비 안전해석 여유도 개선 기술	80	85	10
	다차원 현상 관련 안전해석 현안 적용 기술	80	85	10
	원전 가상사고 통합 시뮬레이션 기술	70	70	10
가상원자로 안전해석 방법론	설계기준사고(DBA) 안전해석 방법론	70	70	5
	설계확장조건(DEC) 안전해석 방법론	70	70	5
	중대사고 해석 방법론	70	70	5
가상원자로 예측 불확실도 정량화 기술	개별 해석 모델 예측 불확실도 평가 기술	70	80	5
	통합 해석 예측 불확실도 평가 기술	70	80	5
특수목적 원전 설계 실증실험 대체 기술	중소형 원전 과도현상 해석 기술	70	70	5
	액체 금속로 과도현상 해석 기술	80	85	5
가동원전 실증실험 대체 기술	신 안전계통 설계 검증 실험 대체 해석 기술	80	80	5
	원전 성능 검증 실험 대체 해석 기술	70	70	5
	노물리 연계 실험 대체 해석 기술	80	80	5
	다물리 복합 실험 대체 해석 기술	80	80	5
	위험 물질 사용 실험 해석 기술	70	70	5



I. 가상원자로 개발 전략 수립 개요

II. 가상원자로 기술 수목

III. 가상원자로 적용 분야

IV. 기술 분야별 국내 연구 개발 현황

V. 가상원자로 개발 전략



가상원자로 적용 분야

	가상원자로 적용 분야	고정밀 해석 기술 수요
원전 안전여유도 규명	설계기준사고(DBA) 안전해석	증기관 파단사고 해석 반응도 기인사고 해석 냉각재상실사고 해석
	설계확장조건(DEC)사고 안전해석	전원상실사고(SBO) 해석 원자로정지불능예상사고 (ATWS) 해석 다중 전열관 파단사고 해석
원전 사고 통합 정밀 평가	핵분열물질 거동 해석	에어로졸 수송 및 누출 해석 대기확산 연계 원전 내부 통합 해석 대기확산 연계 원전 외부 통합 해석 (EAB 선량 평가)
	설계기준사고(DBA) 및 설계확장조건 (DEC)사고 통합 안전해석	인적오류 사고 해석 다중고장기인사고 (CMA) 해석 냉각재상실사고 (LOCA) 해석
	중대사고(SA) 해석	원자로 건물 우회사고 (SGTR, ISLOCA) 해석 원자로 용기 하부 건전성 평가 원자로 건물 건전성 (cavity, dome) 평가 (수소 분포 및 연소 등) RCS 압력 경계 건전성 평가
	사고 관리 전략 평가 및 지원	DBA, DEC 사고관리 전략 중대사고 관리 전략
	사용 후 핵연료 저감 및 핵연료 연소도 최적화	핵연료 파편화, 재배치 및 분산 (FFRD) 해석 산화 및 수소 취화 해석
가동원전 운전 안전성 향상	출력 증감발 및 부하추종 운전	Pellet Cladding Interaction (PCI) 해석 축방향 출력분포 이상(AOA) 해석 CRUD 거동평가를 위한 수화학 해석
	실험 대체 해석	CFVS 등 안전 계통 설계 검증 대용량 용융물 실험 대체 노심 유동 분포 실험 실험 계측 불가능 변수 정보 제공
고비용 실험 대체 및 특수목적 원전 수치 실험	실험 불가능 현상 해석	노물리 연계 실험 다물리 복합 실험 위험 물질 사용 실험
	특수목적 원전 설계 수치 실험	중소형 원전 성능 및 안전해석 액체 금속로 성능 및 안전해석
가상원전 운영 및 원전 사회 수용성 증진	원전 가상현실 시스템 개발	
	원전 안전 전문 인력 교육	
	원전정보 대중화 프로그램 운영	

원전 안전 여유도 규명 (1/2)

□DBA 고정밀 안전해석 적용

요구기술수준
현재기술수준

	기술 현안	해석분야 기술			
		노물리	핵연료	냉각계통	기타
증기관 파단사고 안전해석	<ul style="list-style-type: none"> • 노심 냉각재 온도분포 • 노심 붕소 농도 예측 • 노심 재임계 도달 여부 • 노심 붕단위 출력분포 예측 • 증기발생기 2차계통 상세 거동 예측 	붕단위 (3D 노달)	붕단위 (2D)	계통스케일(1D) 기기스케일(3D)	NA
		점동특성 (0D)	LPM (1D)	계통스케일(1D)	NA
제어봉 이탈사고 안전해석	<ul style="list-style-type: none"> • 3차원 반응도 궤환 효과 • 붕단위 출력분포 및 DNB 예측 • 핵연료봉 PCMI 예측 • 고연소도 핵연료 과도 FGR 거동 모델 • 핵연료 저온 파손 모델 및 Criteria • 핵연료 파손시 압력파에 의한 인접 핵연료 영향 평가 모델 	붕단위 (3D 노달)	붕단위 (3D)	기기스케일(3D) CFD스케일(3D)	NA
		점동특성 (0D)	LPM (1D)	계통스케일(1D)	NA
냉각재 상실사고 안전해석	<ul style="list-style-type: none"> • 신규 규제 요건에 따른 해석 해상도, 계산 횟수 증가 • 핵연료 파편화 모델 (FFRD) • CRUD 두께 고려 해석 • 핵연료 과도상태 연계 해석 • 다중 핵연료봉 변형 모델 • 핵연료 고온 파손 모델 및 Criteria • 핵연료 피복재 고온산화에 의한 수소 영향 평가 	붕단위 (3D 노달)	붕단위 (2D)	계통스케일(1D) 기기스케일(3D)	수화학 (3D)
		점동특성 (0D)	변형모델 (1D)	계통스케일(1D)	NA

원전 안전 여유도 규명 (2/2)

□DEC 고정밀 안전해석 적용

요구기술수준
현재기술수준

	기술 현안	해석분야 기술			
		노물리	핵연료	냉각계통	원자로 건물
전원 상실 (ESBO) 사고 안전해석	<ul style="list-style-type: none"> • 2상유동 자연순환 • 중력 충수 성능 예측 • 고온관 Creep-rupture 조건 형성에 대한 상세 해석 • 실제적 제어봉 낙하 시간에 따른 SG Dry-out 시간 평가 • SG-dryout 이후 실제적 열침원에 의한 RCS 냉각 수준 평가 	봉단위 (3D 노달)	봉단위 (2D)	계통스케일(1D) 기기스케일(3D) CFD스케일(3D)	NA
		점동특성 (0D)	LPM (1D)	계통스케일(1D)	NA
원자로 정지불능 (ATWS) 사고 안전해석	<ul style="list-style-type: none"> • 봉단위 감속재 반응도 궤환 	봉단위 (3D 노달)	봉단위 (2D)	기기스케일(3D)	NA
		점동특성 (0D)	LPM (1D)	계통스케일(1D)	NA
다중 전열관 파단사고 안전해석	<ul style="list-style-type: none"> • 증기발생기 2차 냉각계통 상세 예측 • 핵분열물질 수송 	봉단위 (3D 노달)	봉단위 (2D)	기기스케일(3D)	CFD스케일 (3D)
		점동특성 (0D)	변형모델 (1D)	계통스케일(1D)	NA

원전 사고 통합 정밀 평가 (1/2)

□핵분열 물질 거동 적용 해석

요구기술수준
현재기술수준

	기술 현안	해석분야 기술					
		노물리	핵연료	냉각계통	원자로건물	구조	기타
에어로졸 수송 및 누출 해석	<ul style="list-style-type: none"> • 노심 에어로졸 화학 종 별 생성 메커니즘 • 계통 영역별 에어로졸 성장 및 제거 상세 메커니즘 • Iodine Chemistry에 의한 기체 요오드 및 유기요오드 생성 메커니즘 • 실제적 원자로건물 누설 부위 및 누설율 평가 	봉단위 (3D 노달)	봉단위 (2D)	계통스케일 (1D) 기기스케일 (3D)	CFD스케일 (3D) 에어로졸 모델	FEM (3D)	수화학 (PH)
		NA	NA	NA	NA	NA	NA
대기확산 연계 원전 내 외부 통합 해석	<ul style="list-style-type: none"> • 3D 대기유동을 적용한 소내 대기확산 유형 규명 • 장단기 기상 변화 고려 실측 정보 활용 소외 대기확산 평가 	봉단위 (3D 노달)	봉단위 (2D)	기기스케일 (3D)	CFD스케일 (3D) 에어로졸 모델	FEM (3D)	수화학 (PH)
		NA	NA	NA	NA	NA	NA

원전 사고 통합 정밀 평가 (2/2)

□중대사고 적용 해석

요구기술수준
현재기술수준

	기술 현안	해석분야 기술					
		노물리	핵연료	냉각계통	원자로건물	구조	기타
원자로건물 우회사고 해석	<ul style="list-style-type: none"> SGTR 파단 위치 및 파단 크기 현실적 규명 증기발생기 제염 메커니즘 상세 평가 ISLOCA 누설 경로 및 누설율 상세 규명 	봉단위 (3D 노달)	봉단위 (2D)	계통스케일(1D) 기기스케일(3D) CFD스케일(3D)	CFD스케일 (3D) 에어로졸모델	FEM(3D)	수화학 (PH)
		점동특성 (0D)	LPM (1D)	계통스케일(1D)	NA	NA	NA
원자로용기 하부 건전성 평가	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 용융 및 재배치 과도상태 상세해석 Corium Pool 형성 3D-과도상태 상세 해석 ICI 관통부 열화 및 파손 메커니즘 상세 해석 원자로용기 열속 및 온도 분포 상세 해석 	봉단위 (3D 노달) 임계도계산 (용융 후)	봉단위 (2D)	계통스케일(1D) 기기스케일(3D)	NA	FEM(3D) Corium Pool(3D)	수화학 (PH)
		점동특성 (0D)	LPM (1D)	계통스케일(1D)	NA	NA	NA
원자로 건물 건전성 평가	<ul style="list-style-type: none"> 다차원 증기폭발 현상 해석 및 폭발하중 동적해석 Cavity 구조물 동적 영향 상세 평가 	봉단위 (3D 노달) 임계도계산 (용융 후)	봉단위 (2D)	기기스케일(3D)	CFD스케일 (3D) 에어로졸모델	FEM(3D) Corium Pool(3D)	증기 폭발 (3D)
		점동특성(0D)	LPM(1D)	계통스케일(1D)	NA	NA	NA
RCS 압력 경계 건전성 평가	<ul style="list-style-type: none"> 현실적 FRS에 대한 RCS 취약부 규명 및 구조적 열화 유형 평가 	봉단위 (3D 노달)	봉단위 (2D)	계통스케일(1D) 기기스케일(3D)	NA	FEM(3D)	NA
		점동특성(0D)	LPM(1D)	계통스케일(1D)	NA	NA	NA

가동원전 운전 안전성 향상

요구기술수준
현재기술수준

□ 원전 성능 해석 적용

	기술 현안	해석분야 기술			
		노물리	핵연료	냉각계통	기타
핵연료 파편화, 재배치 및 분산 (FFRD) 해석	•고연소도 핵연료 •핵폐기물 저감 기술	봉단위 (3D 수송)	봉단위 (2D)	CFD스케일 (3D)	NA
		NA	NA	NA	NA
산화 및 수소 취화 해석		봉단위 (3D 수송)	봉단위 (2D)	CFD스케일 (3D)	수화학(3D)
NA		NA	NA	NA	
Pellet Cladding Interaction (PCI) 해석	•Frictional 접촉 문제 •펠릿 점탄성 거동 해석 •수렴 속도 향상	봉단위 (3D 수송)	봉단위 (2D)	CFD스케일 (3D)	NA
		점동특성 (0D)	단일봉 (2D)	계통스케일 (1D)	NA
축방향 출력 분포 이상(AOA) 해석	•PCI 해석	봉단위 (3D 수송)	봉단위 (2D)	CFD스케일 (3D)	수화학(3D)
		점동특성 (0D)	LPM (1D)	계통스케일 (1D)	NA
CRUD 거동평가를 위한 수화학 해석	•CRUD 생성 모델 부재 •CRUD 물성 데이터 부재	봉단위 (3D 수송)	봉단위 (2D)	CFD스케일 (3D)	수화학(3D)
		점동특성 (0D)	LPM (1D)	계통스케일 (1D)	NA

I. 가상원자로 개발 전략 수립 개요

II. 가상원자로 기술 수목

III. 가상원자로 적용 분야

IV. 기술 분야별 국내 연구 개발 현황

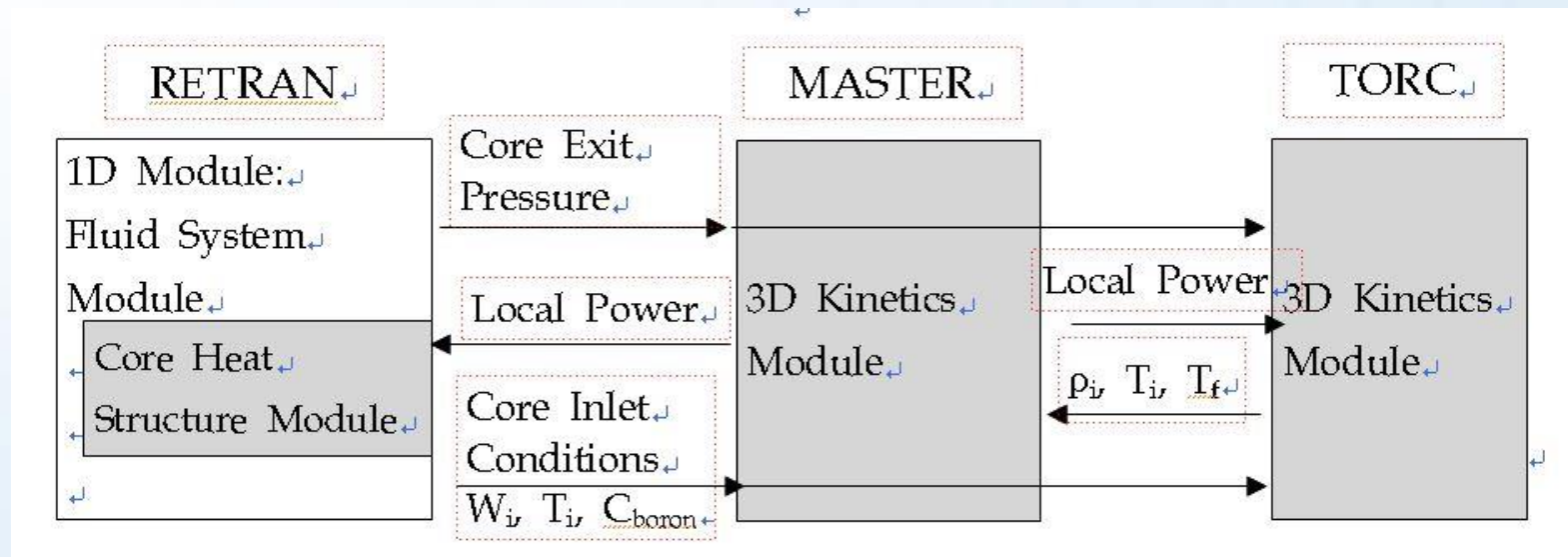
V. 가상원자로 개발 전략



노물리 해석 기술 개발 현황 (1/2)

□ 노달스케일 코드 개발

- 핵설계 코드체계 개발 및 KINS 인허가 획득(CASMO-3/MASTER, 2000년)
- KAERI 고유 핵설계 코드체계 개발 및 SMART 적용(DeCART2D/MASTER4)
- KEPCO-NF 한국형 경수로용 핵설계 코드체계 개발 및 KINS 인허가 획득(KARMA/ASTRA, 2000년대 중반)
- KAERI VHTR 용 고유 핵설계 코드체계 개발 (DeCART2D/CAPP)
- 다물리 연계해석 (MARS-MASTER, RETRAN-MASTER-TORC)

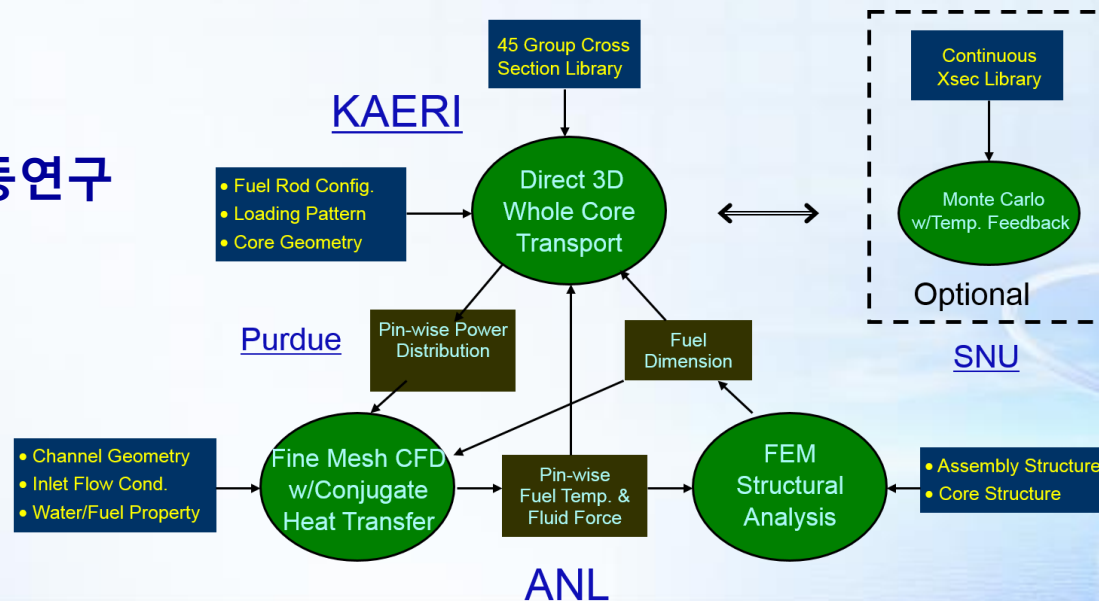


노물리 해석 기술 개발 현황 (2/2)

□ 봉스케일 코드 개발

- 세계 최초 전 노심 중성자 수송해석코드 **DeCART** 개발 (KAERI)
 - US-ROK I-NERI Project, 2001-2004년
 - 한국측 KAERI/SNU, 미국측 ANL/PURDUE 참여
 - 중성자해석코드 - CFD 코드 - 연료/재료해석코드 연계 모의 성공
 - CASL 과제 MPACT 코드의 기본 모델
- 서울대학교 정방형 노심용 **nTRACER** 개발 (2009년)
- UNIST 정방형 노심용 **STREAM** 개발 (2015년)

INERI 국제공동연구
과제 구성

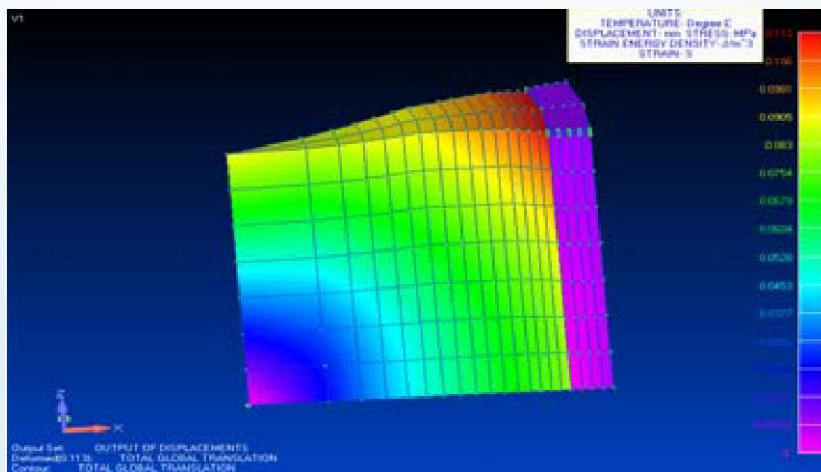


핵연료 해석 기술 개발 현황 (1/2)

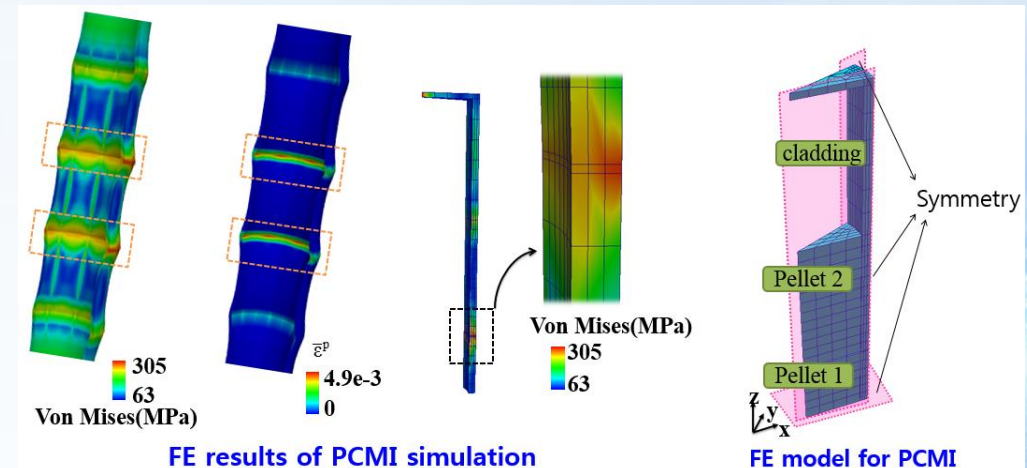
□ 핵연료 성능 해석 코드 개발

- 핵연료 정상 상태 성능 코드 개발: ROPER(KNFC),
INFRA/COSMOS(KAERI)
- 핵연료 과도 해석 기술 개발: OPERA3D(KNFC), NUFORM3D(KAERI)
- 사고 조건 핵연료 해석 기술 개발 착수 (KAERI, 2017~)
 - 열수력 연계 해석을 고려한 핵연료 모듈
 - 유한요소 기반 핵연료 다차원 해석 모듈

OPERA3D(KNFC)



NUFORM3D module with FRAPCON (KAERI)



핵연료 해석 기술 개발 현황 (2/2)

□ 핵연료/열수력 연계 안전해석 체계 개발

- 핵연료연소도 증가에 따라 사고조건에서 핵연료의 다양한 거동에 대한 모델링 수요 증가
- LBLOCA관련 안전해석 규정이 핵연료 모델을 적용하는 방향으로 개정 예고됨에 따라 핵연료/열수력 연계 해석 체계 수요 증가
- 연소도 이력을 반영하기 위한 MARS-KS/SFRAPTRAN 연계 해석 체계 개발

통합코드체계

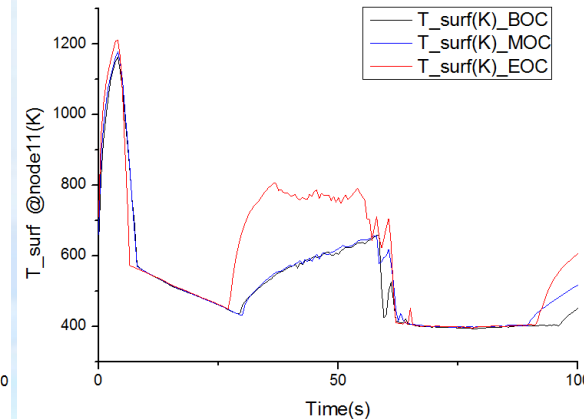
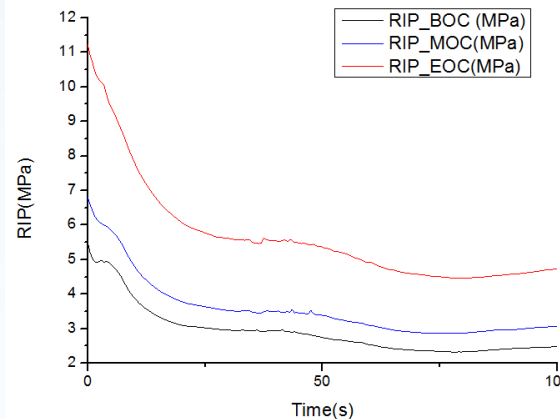
핵연료 성능코드
(FRAPCON)

정상 상태
계산 결과
활용

시스템 안전해석
(MARS-KS)

사고조건 핵연료 성능
모듈
(SFRAPTRAN)

통합코드 계산결과



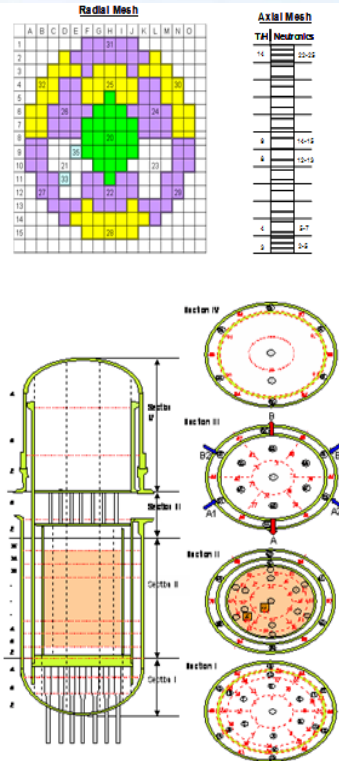
- 연소도에 따라 핵연료 거동 달라짐
- 통합 코드 검증 및 평가 필요

열수력 해석 기술 개발 현황 (1/2)

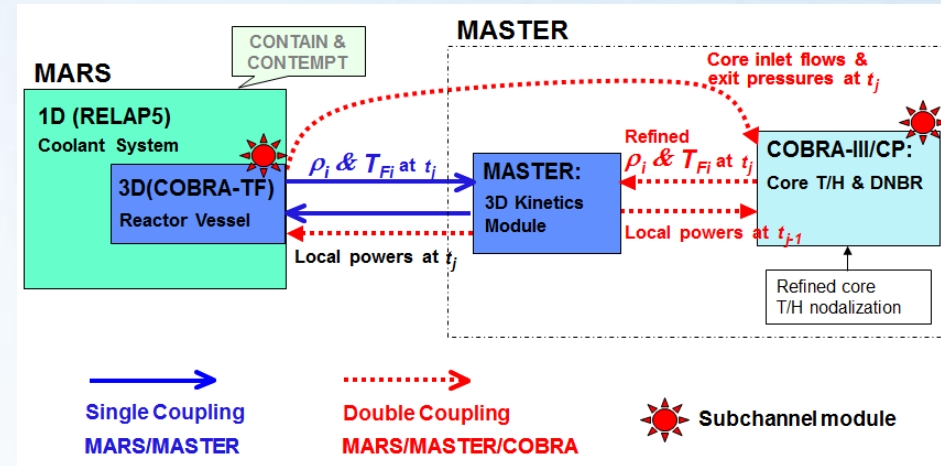
□ 계통열수력해석

- 계통열수력 해석 코드 **MARS** 개발 (KAERI)
- 계통열수력 해석 코드 **SPACE** 개발 (KHNP, KAERI, KEPCO-ENC)
- 다중스케일 및 다물리 연계기술 개발

계통열수력/노심열수력 /노심동특성 연계 해석



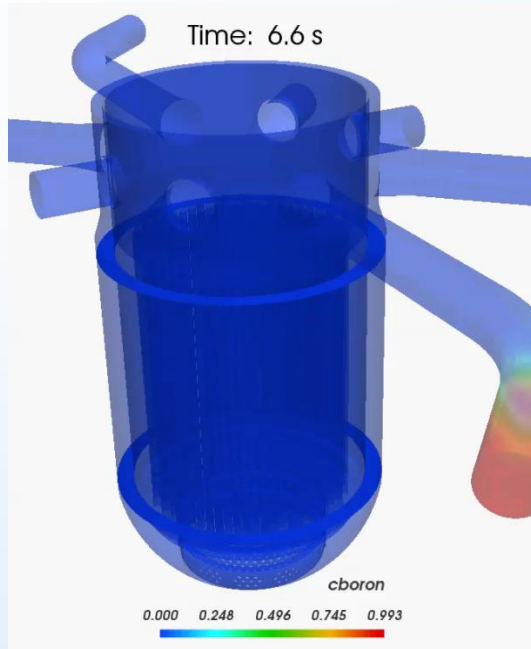
다중스케일/다물리 연계 기술



열수력 해석 기술 개발 현황 (2/2)

□ CFD/기기스케일 열수력해석

- 원전 2상유동 고정밀 열수력 코드 **CUPID** 개발 (**KAERI**, 2007년~)
- **CFD** 및 기기 스케일 해석 가능
- 원전 안전현안 고신뢰도 열수력 해석 적용
- **HPC (High Performance Computing)** 기술 적용
 - 고해상도 해석 (~1억개 계산 격자)
 - 병렬 계산 및 벡터 프로세싱



Boron Dilution Benchmark

Overall ranking of contributions

Number of best predictions

1.	KAERI	5
2.	VNIIAES	3
=2.	BARC	3
4.	HZDR	2

Using a scoring system (3, 2, 1)

1.	KAERI	23
2.	VNIIAES	20
3.	BARC	18
4.	HZDR	17

Accumulated RMS of errors

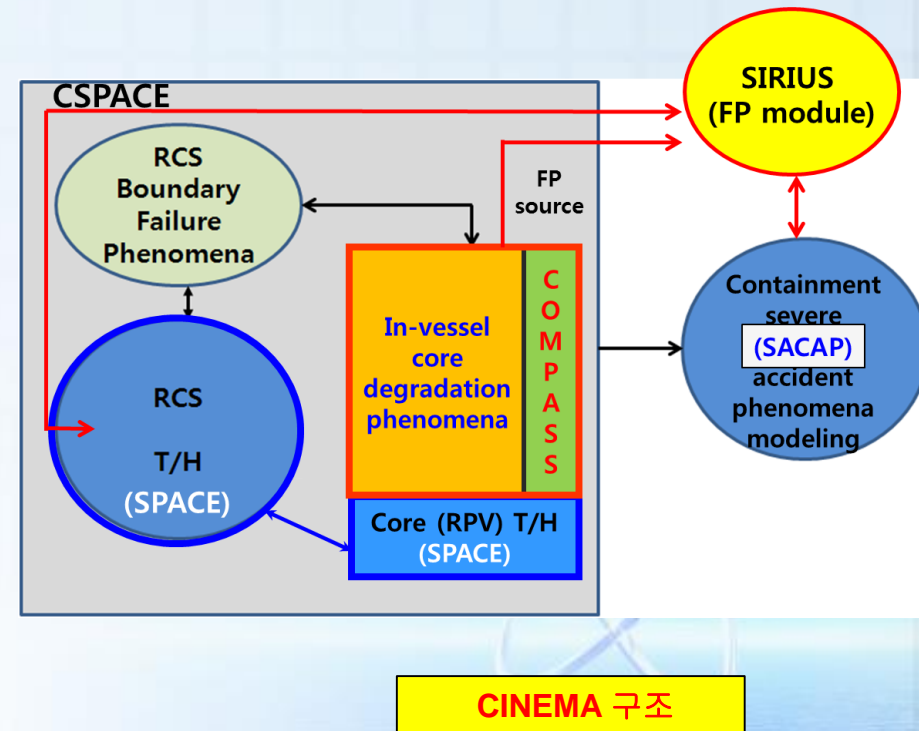
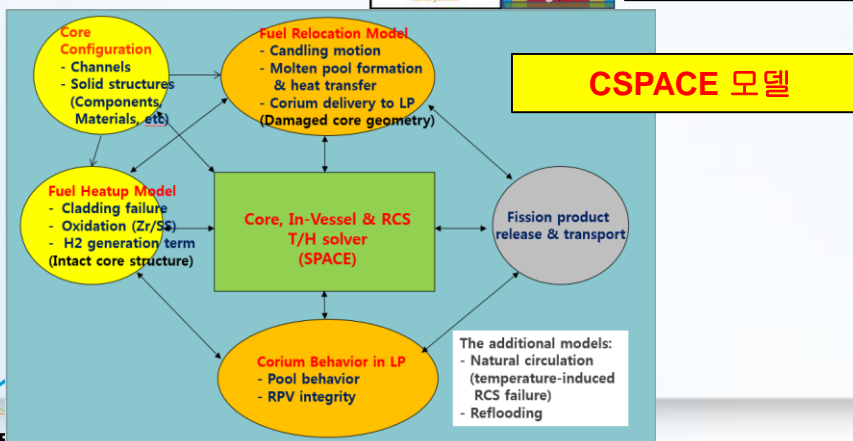
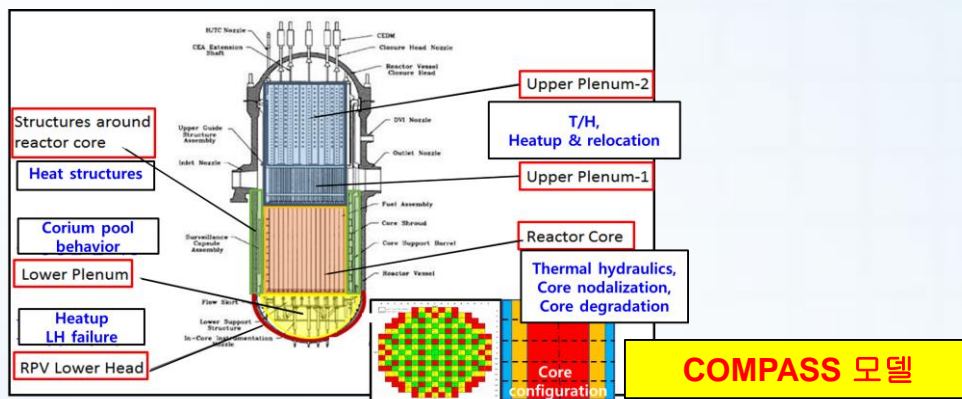
1.	KAERI	1.12
2.	HZDR	1.13
3.	BARC	1.14
4.	VNIIAES	1.53

**IAEA CRP CFD Benchmark
CUPID Ranking**

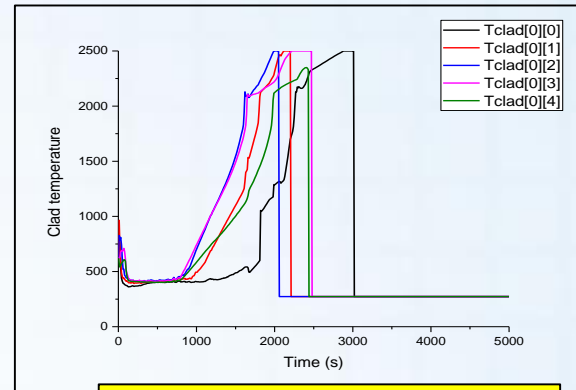
중대사고 해석 기술 개발 현황 (1/2)

□ 중대사고 해석 코드 개발 (2011-2017, 산업부 과제)

- 원자로 압력용기 중대사고 계산모듈 **COMPASS** 개발 (KAERI)
- 원자로 계통 중대사고 계산코드 **CSPACE**(SPACE+COMPASS) 개발 (KAERI)
- 핵분열 생성물 생성 및 거동 추적 모듈 **SIRIUS** 개발 (KAERI)
- 통합계산 플랫폼 **CINEMA** 개발 (KHNP, KAERI, FNC)



-





- I. 가상원자로 개발 전략 수립 개요
- II. 가상원자로 기술 수목
- III. 가상원자로 적용 분야
- IV. 기술 분야별 국내 연구 개발 현황
- V. 가상원자로 개발 전략**



가상원자로 기술 분야 파이 모델

개발기간: ■3년, ■5년, ■10년, ■10년 이상

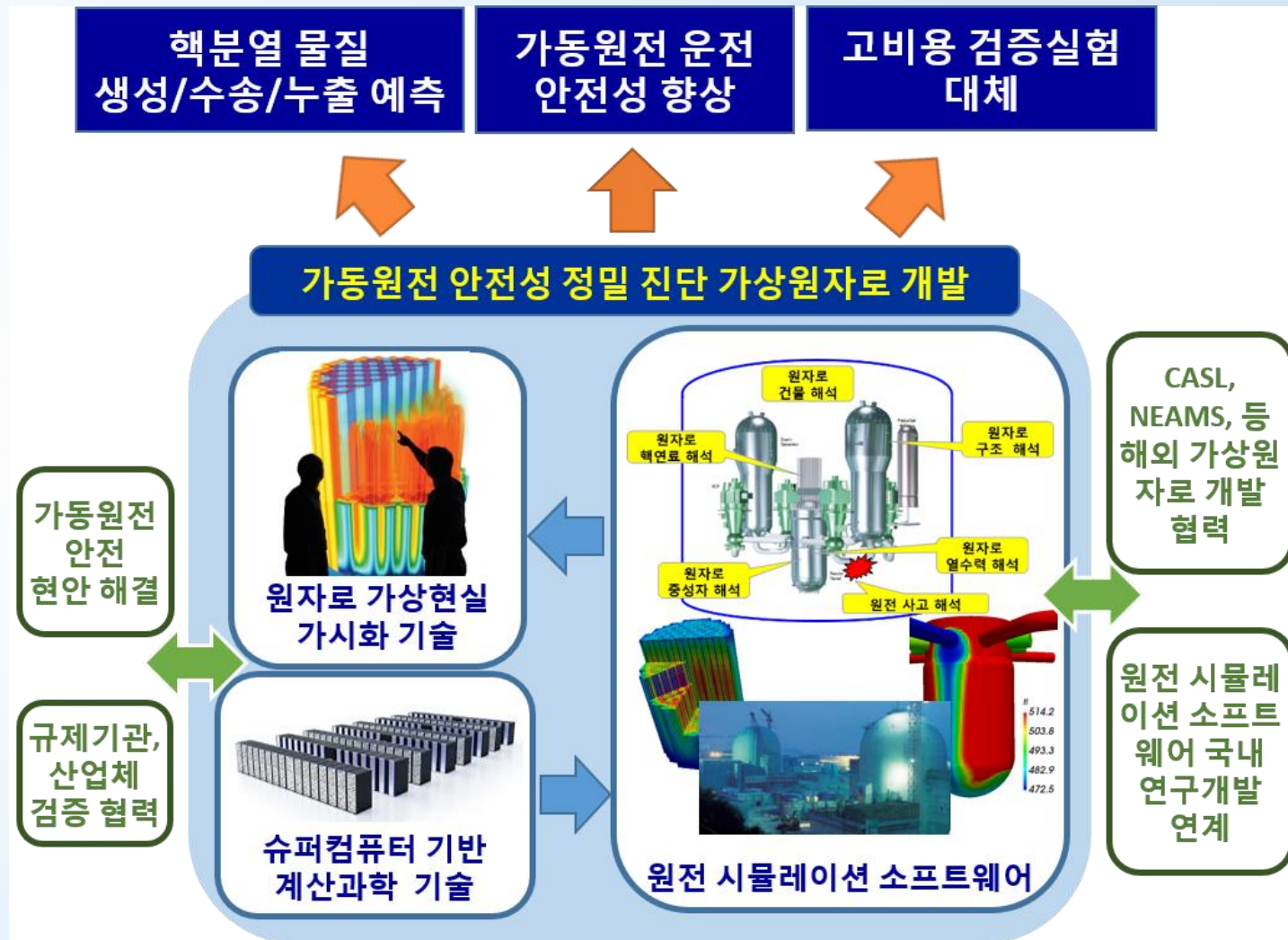
(개발기관: 연구소, 공동(산,학,연), 공동(학,연), 공동(연,산), 공동(연,국))

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	■ 노달스케일 중성자 확산 모델 ■ 봉스케일 정상상태 중성자 수송 모델 ■ 봉스케일 과도상태 중성자 수송 모델 ■ 몬테칼로 중성자 해석 모델	■ 정상상태 핵연료 물성 모델 ■ 과도상태 핵연료 변형 모델 ■ 사고조건 핵연료 파손 모델	가동원전 안전 여유도 향상	■ 1단계(~2021년) - 가상원자로 원형 구축 - 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}	■ 계통스케일 열수력 모델 ■ 기기스케일 열수력 모델	■ 수소 거동 모델 ■ 원자로 건물 응축 현상 모델 ■ 핵분열 물질 생성 및 거동 모델 ■ 노내 중대사고 현상 모델 ■ 노외 중대사고 현상 모델 ■ CAD 연계 전처리 모델		
	<input type="checkbox"/> 원자로 건물 해석 기술	3차원 해상도: 10 ⁵	3차원 해상도: 10 ^{7~9}	■ CFD 해석 모델 ■ DNS 해석 모델			
	<input type="checkbox"/> 중대사고 해석 기술	1차원 해상도: 10 ³	1~3차원 해상도: 10 ^{4~6}	■ 다중스케일 연계 모델			
원전 모델 및 시뮬레이션 공통 기술	<input type="checkbox"/> 구조 해석 기술	3차원 해상도: 10 ⁵	3차원 해상도: 10 ⁷	■ 원자로 구조 해석 모델 ■ 원자로 건물 구조 해석 모델 ■ 기기건전성 평가 모델 ■ 내진 해석 모델	■ 봉소 거동 모델 ■ 원자로 냉각재 내 핵분열 물질 거동 모델 ■ 크러드(CRUD) 거동 및 침적 모델	원전 장기 운전 안전성 향상	■ 2단계(~2023년) - 원자로건물 안전현안 해석 - 원전 가상사고 통합해석 - 세계 최고 수준 안전해석 기술
	<input type="checkbox"/> 수화학 해석 기술	NA	3차원 해상도: 10 ^{7~9}				
가상원자로 시뮬레이션 플랫폼 기술	<input type="checkbox"/> 통합해석 플랫폼 구축 기술	NA	다중 SW 통합	■ 개별 시뮬레이션 SW 핵심 솔버 병렬계산 기술 ■ 다물리 연계 모델 ■ 통합 플랫폼 SW 및 전후 처리 프로세서		원전 시뮬레이션 기술 고도화	■ 3단계(~2028년) - 가상원자로 기반 원전 안전해석 체계 구축 - 자연재해, 환경 영향 원전 위험도 평가
	<input type="checkbox"/> 가상원자로 계산 클러스터 구축 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		
	<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			■ 안전기준 강화 대비 원전 안전 여유도 개선 기술 ■ 다차원 현상 관련 안전현안 적용 기술 ■ 원전 가상사고 통합 시뮬레이션 기술	■ 연구용 원자로 시뮬레이션 기술 ■ 중소형 원전 시뮬레이션 기술 ■ 액체 금속로 시뮬레이션 기술	최적 안전해석/ 원전 검증실험 의존도 최소화	
				■ 설계기준사고(DBA) 안전해석 방법론 ■ 설계확장조건사고(DEC) 안전해석 방법론 ■ 중대사고(SA) 해석 방법론	■ 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		
				■ 개별 시뮬레이션 SW 불확실도 평가 기술 ■ 통합 시뮬레이션 불확실도 평가 기술			

가상원자로 개발 로드맵

분야	핵심 분야 기술	세부 기술	1단계(3년)	2단계(2년)	3단계(5년)	비고
원전 모델 및 시뮬레이션 기술	□ 원자로 노물리 해석 기술	• 노달스케일 해석 기술				3단계 해석 정밀도 향상
		• 정상상태 붕스케일 해석 기술				
		• 과도상태 붕스케일 해석 기술				
	□ 핵연료 해석 기술	• 정상 상태 해석 기술				
		• 과도 상태 해석 기술				
		• 사고 상태 해석 기술				
	□ 원자로 냉각계통 해석 기술	• 계통스케일 열수력 해석 기술				
		• 기기스케일 열수력 해석 기술				
		• CFD스케일 열수력 해석 기술				
		• DNS스케일 열수력 해석 기술				
		• 다중스케일 열수력 해석 기술				
		• 전처리 해석 기술				
	□ 원자로 건물 해석 기술	• 수소 거동 해석 기술				3단계 원자로 건물 수소 연소 모델 개발
		• 응축 거동 해석 기술				
		• 핵분열 생성물 거동 해석 기술				
		• 전처리 해석 기술				
	□ 구조 해석 기술	• 원자로 구조해석 기술				3단계 자연재해 관련 구조해석
		• 기기 건전성 평가 기술				
		• 내진해석 기술				
	□ 수화학 해석 기술	• 원자로 건물 구조해석 기술				
		• 붕소 거동 해석 기술				3단계 원전 성능 해석 적용
		• 핵분열물질 거동 해석 기술				
	□ 중대사고 해석 기술	• 크러드(CRUD) 거동 해석 기술				
		• 노내현상 해석기술				3단계 중대사고 해석 모델 개선
		• 노외현상 해석기술				
가상원자로 시뮬레이션 플랫폼 기술	□ 통합해석 플랫폼 기술					3단계 컴퓨터 계산 성능 개선 반영
	□ 가상원자로 계산 클러스터 기술					
	□ 가상현실 가시화 기술					
가상원자로 활용 기술	□ 가상원자로 적용 가동원전 안전성 향상 기술					3단계 자연재해, 환경영향, 확률론적 위험도 평가 모델 연계 사이버원전 구축
	□ 가상원자로 안전해석 방법론					
	□ 가상원자로 예측 불확실도 정량화 기술					
	□ 특수목적 원전 설계 실증 실험 대체 기술					
	□ 가동원전 실증 실험 대체 기술					
대표 성과			가상원자로 개발 및 가동원전 안전성 향상 적용	원전 가상사고 고신뢰도 통합 안전해석	가상원자로 기반 사이버원전 구축	

가상원자로 개발 전략 (1/2)



가상원자로 개발 전략 (2/2)

□ 가동원전 안전성 향상 적용 목표

□ 기존 개발 완료 및 수행 중인 소프트웨어 활용

- 분야별 소프트웨어 연구 개발 과제와 독립적으로 수행하되 기술적 협력 유지 (CASL: 가상원자로, NEAMS: 소프트웨어 개발)
- 가상원자로 과제 내에서 개별 소프트웨어 개발을 수행할 경우 분야별 개발 기간 등의 차이로 비효율적임.

□ 분야별 기술 수준을 고려한 단계별 개발

- 현재 가용한 컴퓨터 성능을 고려하여 실용적인 관점에서 실현 가능한 분야별 소프트웨어 성능 목표 설정
- 분야별 소프트웨어의 연구 개발 순환 구조 확립

□ 계산과학 등 타 연구 분야와의 협력연구