

한국원자력학회 2021 추계학술발표회
워크숍 (D) 중대사고 현안해결 로드맵 개발 현황
2021년 10월 20일(수), 창원컨벤션센터, 6층

중대사고 현안해결 로드맵 작성 현황

격납건물거동 분과

분과장: 김성중 (한양대학교)

간사: 나영수 (한국원자력연구원)

1. 연구수행현황조사(2016~2021)

1-1. 수소 연구과제(7개)

PAR, 격납건물 대기 거동, 수소 성층화, 위험도 등

1-2. 증기폭발 연구과제(2개)

증기폭발 전파 모델

1-3. 노심용융물 냉각 연구과제(4개)

공동 용융물 제트, 노심 파편층, 다공성 냉각 등

1-4. MCCI 연구과제(3개)

MCCI 현상 평가, 대처능력 등

1-5. 기타 연구(3개)

해석코드개발, 사고관리전략, 책임제

2. PIRT 재평가*(지식 수준/중요도)

2-1. 격납건물 고온과압

*전문가 6명 의견 취합

내압능력, 수소연소, 관통부, 여과배기 등

2-2. HPME/DCH

노심용융물 분출, 열전달, 충수, 사고관리전략 등

2-3. 가연성 기체 연소 및 폭발

수소생성, 연소, 화염가속, 사고관리전략 등

2-4. 노심용융물 냉각수 반응

용융물 제트, 파편화, 침적층 형성, 대처설비 등

2-5. MCCI/노심용융물 냉각성

가연성기체 생성, 용융물 침적, 대처설비 등

2016~2021 중대사고 격납건물거동 관련 연구수행현황조사 결과

1.1 수소 위험도 연구 과제

과제 제목	수행기관	수행 기간	주요 연구내용	추가 연구 주제
중대사고 시 수소폭발에 대한 건물 안전성평가 및 개선사항	한수원	2016.11-2020.06	<ul style="list-style-type: none"> 수소위험평가 대상원전 선정 중대사고 시 격납건물 및 인접건물 수소연소 전산해석 중대사고 시 격납건물 및 인접건물 수소연소 실험 	
중대사고 현안 평가 모델 규제검증연구	KINS	2021.02-2023.12	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 시 격납건물 내 수소 위험도 평가 방법론 개발 모델 평가, 개선/개발 3차원 수소분포 독립 모듈 개발 	
격납건물 수소제어 사고관리전략 평가기술 개발	KAERI	2017.03-2021.12	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 모의 격납건물 내 수소 거동/제어 실험 다차원 수소거동 상세해석 코드 개발 및 검증 다차원/종합해석 코드 연계 격납건물 수소제어 사고 관리 평가 	<ul style="list-style-type: none"> MCCI 현상 반영한 가연성 기체 거동 실험과 상세 해석 기술 개발 국산 PAR의 자연발화, CO 제거 특성 실험 및 모델 개발 국내 가동 원전의 PAR에 의한 자연발화 시 부정적 영향 평가 해석
중대사고 시 격납건물 내부 다원기체 분포 및 응축열전달 실험 연구	제주대	2019.04-2021.12	<ul style="list-style-type: none"> 응축 환경에서 증기-공기-헬륨 혼합기체의 분포 측정 및 성층화 평가 공기-헬륨 혼합물 존재 시 증기응축 열전달 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 가벼운 비응축성 기체(수소)의 영향을 반영하는 응축 열전달 모델의 적용을 통한 격납건물 과도 거동 해석 연구
중대사고 시 격납건물 내 수소거동 평가를 위한 차원해석방법론 개발	KAERI	2018.04-2020.12	<ul style="list-style-type: none"> 수소 성층화 깨짐 관련 국내/외 실험 데이터베이스 구축 및 계측 오차 분석 차원해석을 통하여 수소 성층화 거동에 영향을 미치는 주요 변수의 무차원화 실험 DB로부터 무차원수 그룹의 함수적 상관관계 도출 및 수소분포 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 수소 성층화 깨짐 모델을 해석 코드에 반영하여 격납건물 수소 분포 거동 평가
중대사고 코드 연계 격납건물 수소 위험도 예측 프로그램 개발	한양대	2018.02-2020.01	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 수소 혼합물 가연성 평가방법론 개발 MELCOR 코드 연계 격납건물 수소 위험도 예측 프로그램 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 개발된 수소 혼합물 가연성 평가방법론을 통한 희석제 개발
수소 위험도 평가 프로그램 활용 체계 구축	한양대	2018.04-2020.12	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고 종합해석코드 수소 혼합물 가연성 평가방법론 비교 검증 중대사고 종합해석코드 FA/DDT 평가방법론 검증 	<ul style="list-style-type: none"> H2/CO 혼합물 가연성 평가방법론 개발

1-2. 증기폭발 연구과제

과제 제목	수행기관	수행 기간	주요 연구내용	추가 연구 주제
증기폭발 리스크 평가를 위한 열수력 및 구조해석 선진 모델 개발	한국해양대	2018.04-2020.12	<ul style="list-style-type: none"> ● TRACER-II 증기폭발 해석 코드 선진화 ● 노외 증기폭발에 의한 원자로공동 및 주배관 동적거동 해석 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ● 3차원 증기폭발 코드 개발
3차원 증기폭발 해석코드 개발	한국해양대	2021.04-2023.12	<ul style="list-style-type: none"> ● 3차원 증기폭발 해석 코드 개발 ● 3차원 해석모델 검증용 실험 	

1-3. 노심용융물 냉각 연구과제

과제 제목	수행기관	수행 기간	주요 연구내용	추가 연구 주제
중대사고시 노심용융물 노외 냉각 성능, 재임계 가능성 및 격납건물 내 핵분열생성물 거동평가·규제기술 개발	KINS	2021.01-2022.12	<ul style="list-style-type: none"> ● 노외 노심용융물 냉각 성능 평가방법론(안) 개발 및 적용성 평가 	
노외 노심용융물 냉각 및 안정화기술 개발	KAERI	2017.03-2021.12	<ul style="list-style-type: none"> ● 노외 방출 노심용융물 냉각평가 실험장치 구축 및 실험 ● 노외 방출 노심용융물 냉각모델 개발 및 냉각성능 종합평가 ● 노외 방출 노심용융물 냉각관련 사고관리전략 평가 및 개선안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> ● 고온 노심용융물 제트 분열 특성 및 파편층 형상 모델 개발 ● 고온 비정형 다분산 파편입자층 냉각성 모델 개발 및 검증실험 ● 노외 노심용융물 냉각 및 MCCI 연계 해석 체계 구축
선침수 원자로 공동에서 노심용융물 냉각성 해석모델 개발	한국해양대	2017.03-2019.12	<ul style="list-style-type: none"> ● 용융물 파편 생성 및 형상 모델 개발 ● 용융물 파편층 형성 변수 상관식 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ● 현실적 용융물 분출 형상에 대한 해석모델 개발 필요
중대사고 시 노심용융물 노외 냉각 성능, 재임계 가능성 및 격납건물 내 핵분열생성물 거동평가·규제기술 개발	KINS	2021.01-2022.12	<ul style="list-style-type: none"> ● 노외 노심용융물 냉각 성능 평가방법론(안) 개발 및 적용성 평가 	

1-4. MCCI 연구과제

과제 제목	수행기관	수행 기간	주요 연구내용	추가 연구 주제
중대사고동안 노심용융물과 콘크리트 반응영향 평가기술 개발	EN2T (KAERI, 세종대)	2019.10-2023.09	<ul style="list-style-type: none"> 중대사고동안 노심용융물의 원자로공동 내 방출시 노심용융물의 냉각과 노심용융물-콘크리트 반응거동을 평가하는 독립적인 원자로공동 내 중대사고 최적 해석코드 개발 국내외 원자로공동 내 노심용융물 냉각, 노심용융물 냉각설비 및 노심용융물-콘크리트 반응 실험 Database Platform 구축 노심용융물 냉각설비 및 Pre-Flooding 냉각 성능평가 3차원 CFD 수치해석 방법론 개발 및 적용성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 사전충수 조건에서 노심용융물 냉각 및 노심용융물-콘크리트 반응 실증 시험 및 CASTLE 코드 검증
실제적 시나리오기반 중대사고 진행 및 상세현상 분석	한수원	2016.10-2020.11	<ul style="list-style-type: none"> OPR1000/CANDU형 MCCI 현상 상세분석 OPR1000형 대상 MAAP5/MELCOR 분석 비교 CANDU형 대상 MAAP4-ISAAC/MAAP5-CANDU 비교 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 WH형 및 FR형 MCCI 상세 분석 및 대처능력 평가
국내원전 MCCI 대응을 위한 냉각수단 개념설계 기술개발	한수원 (포항공대)	2019.06-2021.05	<ul style="list-style-type: none"> 제트 파쇄 입자화 기술개념 개발, 검증 실험 수행 및 분석 파편입자 분산화 기술개념 개발, 검증 실험 수행 및 분석 고온 파편잔해충 피동 냉각기술 개념 개발, 검증용 데모 실험 수행 신개념 피동 냉각 기술의 효율 정량화 및 기존 냉각방식과의 비교를 통한 국내 원전 적용 가능성 평가 	

1-5. 기타 연구과제

과제 제목	수행기관	수행 기간	주요 연구내용	추가 연구 주제
중대사고 관리역량 강화를 위한 고 유 전산코드 인증 및 표준화	한수원 (KAERI, FNC, 한국전력기술(주), KAIST)	2019.5- 2023.4	<ul style="list-style-type: none"> ● CINEMA 모델개선 및 표준화 <ul style="list-style-type: none"> - 노내현상 모듈 개선 : 원자로용기 파손 해석모듈 개선, 용융물 방출 및 방출부 ablation 모델 적용 등 - 노외현상 모듈 개선 : Particulate Bed 모델 추가, Corium 및 Particle 퍼짐 해석 모델 추가, MCCI 해석모듈 개선 등 - 핵분열생성물 해석모듈 개선 : 에어로졸 입자 크기 추적, 분포 변화 관련 사항 개선, 간극방출 모델 개선 등 - ASME NQA-1-2008/2009a 기반 전산코드 형상관리 시스템 구축, 운영 ● OPR1000 원전에 대한 중대사고 종합해석 및 인허가용 보고서(TR, 특정기술주 제보고서) 작성 	● 중대사고 해석코드 인허가
기계학습법을 적용한 중대사고 관 리전략 안전규제요소 도출 및 평가 방법론 개발	한양대	2020.04- 2022.12	<ul style="list-style-type: none"> ● 잠재적 안전규제요소에 따른 중대사고 관리전략 데이터베이스 구축 및 딥러닝 방법론 검토 ● 딥러닝 학습데이터 확보를 위한 대안모델 개발 및 기초 학습모델을 이용한 성능 최적화 ● 핵심 딥러닝 모델 개발 및 중대사고 관리전략 최적운영 조합 탐색을 통한 안전 규제요소 도출 	● 발전소정전사고 외 다양한 초기 사건 및 해당 특성을 고려할 수 있는 기계학습법 모델 개발
중대사고 현안 평가 모델 규제검증 연구	KINS	2021.02- 2023.12	<ul style="list-style-type: none"> ● 재임계 발생 시 반응도 변화에 의한 격납건물 내 열수력 거동 예측 모델 구축 	

중대사고 격납건물거동 관련 PIRT 전문가 재평가 결과

2-1. 격납건물 고온과압 PIRT 재평가

주요 현상*	중요 현안, 불확실성	2016 지식 수준/중요도	2021 지식 수준/중요도	재평가 결과
격납건물 고온과압, 격납건물 내압능력, 재가열, 국부고온, 누설 및 여과배기 설비	격납건물 내압능력분석(구조손상거동)	중/상	상 ⁽¹⁾ /상, 상/중 ⁽²⁾ , 상/중 ⁽³⁾	지식수준 상향, 중요도 하향
	핵분열생성물 이송침적에 따른 주요기기 재가열	중/중	중/하 ⁽⁴⁾ , 하 ⁽⁵⁾ /하 ⁽⁶⁾ , 중/하 ⁽⁷⁾	중요도 하향
	수소연소/폭발 등에 따른 국부고온영향	중/상	중/상(2명)	변화 없음
	관통부의 이음새, 밸브 패킹 등의 누설	중/상	중/상(2명), 중/중 ⁽⁸⁾	큰 변화 없음
	여과배기계통을 통한 사고관리 전략	하/상	하/하 ⁽⁹⁾ , 상 ⁽¹⁰⁾ /하 ⁽¹¹⁾ , 중 ⁽¹²⁾ /상, 상 ⁽¹³⁾ /하 ⁽¹⁴⁾	지식수준 상향, 중요도 하향
	여과배기설비의 감압능력	중/상	중/하 ⁽¹⁵⁾ , 상 ⁽¹⁶⁾ /하 ⁽¹⁷⁾ , 상 ⁽¹³⁾ /하 ⁽¹⁴⁾	지식수준 상향, 중요도 하향

*사고관리전략: 격납건물 감압, **Regulatory significance**: 격납건물 손상(구조물, 관통부 관련 배관 등)에 미치는 영향

- (1) 사고관리계획서 법제화 후 가동원전 포함 전 원전에 대한 격납건물 내압능력분석을 수행함에 따라 지식수준 상향
- (2) 격납건물 내압 능력을 통한 건전성 확인은 ASME FLC를 기준으로 수행하고 있어 별도의 내압능력분석은 필요성이 적음
- (3) 격납건물의 구조적 손상은 일반적으로 FEM 모델에 의해 광범위하게 분석되어 왔음. 중요도를 '상'으로 고려하려면 중요하게 연구되어야 할 구조적 손상 유형을 특정할 필요가 있음
- (4) 대부분의 주요 기기는 기기 검증 요건에 따라 고방사선 조건 하에서 성능 검증을 수행하므로 핵분열생성물 침적에 따른 주요 기기 재가열에 의한 영향은 제한적일것으로 판단됨
- (5) FP에 의한 격납건물 내 기기 재가열 현상 자체를 중요한 현안으로 인식되지 않았고 관련 연구도 충분치 않다고 판단. 현재의 중대사고 해석 코드에도 관련 모델이 존재하지 않음
- (6) 현재까지는 중요도가 높지 않았고 중요도 상향에 대한 근거가 현재까지는 충분히 제시되지 못했다고 판단됨.
- (7) 주요 기기 재가열로 인한 격납건물 과압에 미치는 영향은 제한적일 것으로 판단됨
- (8) 국부고온의 영향에 의한 격납건물 건전성 위험 여부는 격납건물 고온/과압 평가를 통해 갈음할 수 있을 것으로 판단됨
- (9) 사고관리계획서 법제화에 따라 고려하고 있는 EAB에서의 소외선량 '250 mSV' 요건은 여과배기계통을 이용한 격납건물 배기전략을 적용할 경우 불활성기체군 핵분열생성물의 방출을 고려할 때 만족이 어려움. 이에 따라 중대사고 관리전략에서의 중요도 하락
- (10) 여과배기계통 국산화로 국제수준의 기술역량 보유, (11) 국내 사고관리전략에 적용하지 않음
- (12) 여과배기계통을 이용한 사고관리전략은 이미 유럽, 캐나다 등에서 채택하고 있고 국내 월성1호기에서도 채택되었던 바, 기술적으로 사고관리전략 측면에서의 기술 배경은 어느 정도 수립되었다고 판단됨. 여과배기의 근본 목적은 배기를 위한 격납건물 건전성 유지이므로 전략관점에서는 크게 난해한 것이 없음.
- (13) 여과배기계통 실효성에 대한 결론이 도출되었음, (14) 여과배기계통 설치 필요성이 없는 것으로 도출되었음
- (15) 사고관리계획서 법제화에 따라 고려하고 있는 EAB에서의 소외선량 '250 mSV' 요건은 여과배기계통을 이용한 격납건물 배기전략을 적용할 경우 불활성기체군 핵분열생성물의 방출을 고려할 때 만족이 어려움. 이에 따라 중대사고 관리전략에서의 중요도 하락
- (16) 여과배기계통 국산화로 국제수준의 기술역량 보유
- (17) 감압능력은 공급사(제작사) 담당부분임

2-2. HPME/DCH PIRT 재평가

주요 현상*	중요한 현안, 불확실성	2016 지식 수준/중요도	2021 지식 수준/중요도	재평가 결과
노심용융물 분출, 확산, 이송 및 방출저감, 제어 감압계통	노심용융물 분출 모델	중/하	중/하(2명)	변화 없음
	격납건물 공동 내 용융물 확산 모델	중/하	중/하(2명)	변화 없음
	격납건물 상부로의 용융물의 이송모델	중/하	중/하(2명)	변화 없음
	격납건물 공동 내 충수 모형에 따른 용융물 방출 특성 및 저감설계	중/하	중/하(1명), 중/중 ⁽¹⁾	중요도 일부 상향
	격납건물 대기와의 열전달 및 연소모델	상/하	상/하(1명), 중 ⁽²⁾ /중 ⁽³⁾	지식수준 하향, 중요도 상향
	격납건물 내부 구조물로의 열전달 모델	상/하	상/하(1명), 상/중 ⁽⁴⁾	중요도 상향
	격납건물 공동 내 충수냉각수의 영향(상호작용, 냉각 및 산화반응)	상/하	상/하(1명), 상/중 ⁽⁵⁾	중요도 상향
	감압계통의 설계 및 사고관리 전략의 개발	상/상	상/상(2명), 상/중 ⁽⁶⁾	중요도 하향
	감압사고 경위에 대한 Low Cut-off Pressure	상/상	상/상(2명), 상/하 ⁽⁷⁾ , 상/중 ⁽⁸⁾	중요도 하향

***사고관리전략:** RCS 감압, 냉각수 주입, SG 주입, ERVC, **Regulatory significance:** 상부 대기로 이송되는 고온의 노심용융물의 양 및 그에 의한 온도 및 압력 증가량, 다른 현상과 중복하여 발생하는 경우의 압력 증가량 평가(수소연소 등), 감압사고 경위에 대한 Low Cut-off Pressure

- (1) 충수모형에 따른 용융물 방출이 격납건물 핵분열생성물 거동 및 과압에 미치는 영향이 존재
- (2) 연소모델 개선여지가 있음
- (3) 열전달 및 연소로 인한 격납건물 핵분열생성물 거동 및 과압에 미치는 영향이 존재함
- (4) 열전달로 인한 격납건물 과압에 미치는 영향이 존재함
- (5) 충수냉각성에 따른 격납건물 핵분열생성물 거동 및 과압에 미치는 영향이 존재함
- (6) 국내 가동원전은 중대사고로의 진행 후 적절한 사고관리 및 대응을 위해 관련 감압계통/설비를 보유하고 있으며, 중대사고진입 후 일정기준에 따라 RCS 압력을 낮추는 급속감압전략을 사고관리전략으로 채택하고 있음
- (7) 국내 가동원전에 대한 사고관리를 위해 해당현상의 격납건물 건전성 위협여부 확인을 위한 사건경위 선정 및 전략 적용 중
- (8) HPME/DCH cut-off 압력에 대한 정량적인 기준이 제시될 만큼 어느정도 충분한 연구가 되었고 HPME/DCH 현상 발생 자체를 충분히 방지할 수 있는만큼 연구의 중요성이 '상'에 해당한다고 보기 어려움. 다만, 특정 (신규) 노형에서 중요하게 고려되어야 한다면 해당 노형을 특정할 필요가 있음.

2-3. 가연성 기체 연소 및 폭발 PIRT 재평가

주요 현상*	중요한 현안, 불확실성	2016 지식 수준/중요도	2021 지식 수준/중요도	재평가 결과
수소 연소 생성 방출, 확산 및 가속, 수 소제어	수소생성모델(노내금속과 고온 수증기와의 산화반응)	중/중	중/중(2명), 상 ⁽¹⁾ /중	중요도 일부 상향
	수소방출모델(RCS 파단부, 감압장치)	상/중	상/중(3명)	변화 없음
	수소확산분포모델(방출수소의 혼합기체 형태로 격실이동 및 확산, 수소성층화)	중/상	중/상(3명)	변화 없음
	수소연소모델(국소적인 수소농도에서 가연조건하에 열원과 접촉한 수소연소)	중/중	중/중(2명), 중/상 ⁽²⁾	중요도 상향
	수소화염가속모델(수소 화염의 난류가속)	중/중	중/중(1명), 상 ⁽³⁾ /중, 중/상 ⁽⁴⁾	중요도 상향
	DDT(압력파와 화염면의 중첩에 따른 Detonation, 강한 연소 충격파의 전파모델)	하/중	하/중(1명), 상 ⁽⁵⁾ /중, 하/상 ⁽⁶⁾	지식수준 상향, 중요도 상향
	법제화에 따른 수소연소 제어를 위한 중대사고 관리전략유효성	중/상	중/상(2명), 상 ⁽⁷⁾ /상, 중/중 ⁽⁸⁾	지식수준 일부 상향, 중요도 일 부 하향
	피동촉매결합기(PAR)를 포함한 수소제어 계통의 성능평가 실험 및 해석검증	하/상	하/상(2명), 상 ⁽⁹⁾ /중 ⁽¹⁰⁾ , 중 ⁽¹¹⁾ /상	지식수준 상향

*사고관리전략: 격납건물 감압, 수소 제어, **Regulatory significance**: 중대사고 조건하에서의 수소 제거 능력, FA, DDT 가능성 평가 및 폭발 시 격납건물 손상 가능성

- (1) 사고관리계획서 법제화 후 가동원전 포함 전원전에 대한 수소 생성, 방출 및 분포 해석을 수행함에 따라 지식수준 상향
- (2) 격납건물 과압 및 건전성에 미치는 영향이 매우 큼
- (3) 사고관리계획서 법제화 후 가동원전 포함 전원전에 대한 수소 연소에 따른 화염가속 평가를 수행함에 따라 지식수준 상향
- (4) 수소화염 가속이 격납건물 과압 및 건전성에 미치는 영향이 매우 큼
- (5) 사고관리계획서 법제화 후 가동원전 포함 전원전에 대한 수소 연소에 따른 DDT 평가를 수행함에 따라 지식수준 상향
- (6) DDT가 격납건물 과압 및 건전성에 미치는 영향이 매우 큼
- (7) 사고관리계획서 법제화 후 가동원전 포함 전원전에 대한 가연성 기체 제어 평가를 수행함에 따라 지식수준 상향
- (8) 국내 가동원전에 대한 가연성기체 제어는 사고관리계획서에 따라 수소제어설비의 설치 및 SAMG 적용을 통해 관리되고 있음
- (9) 다년간의 국제공동연구 참여를 통해 기술역량 보유
- (10) 국제공동연구 및 국내 대형실증실험 설비에서의 실험연구를 통한 기술역량 보유
- (11) 국내외 실험/해석 진행 중

2-4. 노심용융물 냉각수 반응 PIRT 재평가

주요 현상*	중요한 현안, 불확실성	2016 지식 수준/중요도	2021 지식 수준/중요도	재평가 결과
FCI에 의한 급격한 증기의 발생, 노심 용융물의 파편화, 증기폭발 및 압력파의 전파 및 주변 구조물과의 상호작용, 노심용융물 파편화 및 침적에 따른 냉각성	용융물 제트 냉각수 유입특성(제트 파쇄, 냉각수 유입속도, 제트 유입직경 등)에 따른 영향	상/중	상/중(2명), 상/상 ⁽¹⁾ , 중 ⁽²⁾ /중	큰 변화 없음
	용융물 제트의 파쇄에 따른 용융물 평균입자, 입자분포 및 증기분율분포(비등열전달) 모델	중/중	중/중(2명), 중/상 ⁽³⁾	큰 변화 없음
	혼합과정에서의 증기분포가 폭발과정에 미치는 영향	중/중	중/중(3명)	변화 없음
	혼합과정에서의 냉각수의 화학적 특성이 폭발과정에 미치는 영향(해수, 보론수, 핵분열생성물 등)	중/중	중/중(3명)	변화 없음
	혼합과정에서의 용융물 고화, 산화, 수소생성 거동 및 영향	중/중	중/중(3명)	변화 없음
	복합현상 체계에서의 증기폭발 전파 모델(벽/바닥의 영향, 복합구조)	하/중	하/중(3명)	변화 없음
	용융물 재료의 영향(금속성분의 열유체역학적 영향, 산화반응)	중/중	중/중(3명)	변화 없음
	용융물 재료에 따라 산화반응이 발생할 경우의 냉각성 영향	하/상	하/상(3명)	변화 없음
	장기 냉각으로 연계 시 용융물 파편화	하/상	하/상(2명), 상 ⁽⁴⁾ /상	지식수준 일부 상향
	파쇄입자 침적에 따른 침적층 형성과정(입자층, Cake) 및 열전달 모델	하/상	하/상(2명), 상 ⁽⁴⁾ /상, 중 ⁽⁵⁾ /상	지식수준 일부 상향
	사고조건(용융물온도, 충수깊이 등)을 고려한 원전스케일의 불확실성 분석을 통한 평가 방법	중/상	중/상(3명)	변화 없음
	증기폭발방지를 위한 대처설비 기술개발	하/상	하/상(3명), 하/중 ⁽⁶⁾ , 하/중 ⁽⁷⁾	중요도 일부 하향

*사고관리전략: 원자로 공동 냉각수 주입, 격납건물 감압, **Regulatory significance**: 증기폭발 시 충격량에 의한 격납건물 손상가능성, 격납건물 Dynamic Fragility Curve

- (1) 입자 장기 냉각에 중요
- (2) 용융물 제트 냉각수 유입 특성은 초기 용융물 제트 방출 특성 및 원자로 공동 침수 조건에 따라 변화하는데, 이는 사고조건별 RCS 압력, 원자로용기 파손 크기 및 위치, 격납건물 충수 깊이 등의 조건에 따라 매우 다양하게 나타나므로 여전히 불확실성이 크다고 판단됨.
- (3) 사고관리계획서 법제화에 따른 인허가 과정에서 용융물 제트의 파쇄에 따른 용융물 입자 크기, 분포 및 냉각특성과 관련된 사항이 주요 인허가 현안으로 대두됨에 따라 중요도 상승
- (4) 국내외 입자 장기 냉각 연구 집중
- (5) 깊은 선침수 원자로공동에서의 용융물 제트 완전 분열 조건에 한하여 파쇄입자층 형성과정에 대한 종합적인 모의실험을 통해 대표적인 입자층 형상모델을 제시할 예정이므로 지식수준이 다소 향상되었다고 판단됨.
- (6) 노외 증기폭발에 따른 격납건물 공동에서의 구조건전성에 대한 영향 적음
- (7) 증기폭발 대처기술의 가장 효과적인 방법은 원자로용기의 파손을 방지하는 것이며 초기 냉각수 주입 등 노심 냉각의 신뢰도를 높이는 방안이 가장 효과적이라고 판단됨. 원자로용기 파손 이후 증기폭발을 방지할 수 있는 대처 설비가 안전성 향상 관점에서는 충분히 유효할 수 있지만 risk 대비 cost 관점에서는 중요도를 '상'으로 고려하는 것은 조정할 필요가 있다고 판단됨.

2-5. MCCI/노심용융물 냉각성 PIRT 재평가

주요 현상*	중요한 현안, 불확실성 등 설명	2016 지식 수준/중요도	2021 지식 수준/중요도	재평가 결과
MCCI에 의한 지속적 기체 생성, 휘발성 핵분열생성물 방출에 따른 격납건물 가압, 공동 콘크리트의 침식 및 용발, 노심용융물 냉각	다차원 용발현상, 용융물 퍼짐, 용융물 분출	중/상	중/상(2명)	변화 없음
	비응축기체 및 가연성기체 생성(콘크리트 유형의 영향)	중/상	중/상(1명), 상 ⁽¹⁾ /상, 중/중 ⁽²⁾	지식수준 일부 상향 중요도 일부 하향
	핵분열생성물 방출	중/상	중/상(2명)	변화 없음
	사후 상부 충수 시 냉각거동(파편층 냉각, 상부 금속층 효과, 냉각수 주입모드 영향)	중/상	중/상(2명), 중/중 ⁽³⁾ , 하 ⁽⁴⁾ /상	지식수준 일부 하향 중요도 일부 하향
	사전습식공동에서 용융물 및 냉각수 조건에 따른 용융물 거동(파편화 정도, 입자크기분포)	하/상	하/상(2명), 중/상 ⁽⁵⁾	지식수준 일부 상향
	습식공동에서의 노심용융물 침적 및 퍼짐현상(충수 깊이에 따른 연구 포함)	중/상	중/상(2명), 중/중 ⁽⁶⁾	중요도 일부 하향
	충수공동에서의 다공용융물 냉각성(파편층 형상, 열전달 모드, 물유입, 충수 깊이/용융물 냉각성)	중/상	중/상(2명)	변화 없음
	충수 후 방출된 용융물의 냉각 현상의 다양한 불확실성으로 인해 냉각가능성 및 격납건물 과압	하/상	하/상(2명), 하/중 ⁽⁷⁾	중요도 일부 하향
	국내 가동원전에 대한 MCCI 대처능력 평가 및 결말 분석을 통한 사고관리방안	하/상	중 ⁽⁸⁾ /상, 하/중 ⁽⁹⁾ , 중 ⁽¹⁰⁾ /상	지식수준 상향 중요도 일부 하향
	용융물 냉각을 유도할 수 있는 전용 설비(코어캐처) 개발	중/상	중/상(2명), 중/중 ⁽¹¹⁾	중요도 일부 하향

***사고관리전략:** 원자로 공동 냉각수 주입, 격납건물 감압(살수, 여과배기), 수소 제어, Core catcher

Regulatory significance: 원자로 공동에서의 노심용융물 냉각 가능성, MCCI 정지 임계온도 평가에 의한 MCCI 중지 시점 결정

(1) 신고리 3,4호기 및 UAE 원전 사업을 통하여 콘크리트 유형에 따른 MCCI 현상에 의한 비응축성 기체 및 가연성기체 생성 평가가 수행된 바 있으므로 지식수준 상향

(2) 가동원전의 경우 콘크리트 유형에 따른 영향과 관련한 추가분석 필요성은 부족(충분한 냉각능력 확보됨)

(3) 국제공동연구를 통한 기술역량 확보, (4) 냉각 기재의 규명 수준 및 연구계의 공감대 수준이 충분하지 않다고 판단됨. 연구자들 마다 의견이 크게 다른 부분이기도 하며 발전소 규모의 MCCI pool에서의 사후 냉각성에 대해서는 확신을 가질 정도의 충분한 연구가 이루어지지 못했다고 판단됨.

(5) 기존 TROI, FARO 등 원형 노심용융물 및 고온 상사물을 이용한 노심용융물-냉각수 반응 실험에서 발생한 파편입자의 크기 분포에 대한 종합적인 분석이 추가적으로 수행되어 대략적인 입자크기 분포 범위를 추정할 수 있다고 판단됨. (6) 국내 가동원전의 최대 충수 깊이는 침수위를 초과할 수 없으며, 사전충수되는 물의 양은 인위적으로 제어할 수 없음(RCS 파손부에서의 냉각재 방출량, 살수계통 및 외부주입계통 운전에 따른 공동으로의 유입량 등으로 결정됨)

(7) 사전충수 후 방출된 노심용융물에 의한 격납건물 과압영향은 있을 수 있으나, 사고관리측면에서 고려해야하는 격납건물 건전성을 위협할 수준은 아님

(8) 사고관리계획서 법제화 후 가동원전 포함 전원전에 대한 MCCI 대처능력 평가를 수행함에 따라 지식수준 상향

(9) 국내 가동원전은 공동충수(사전충수)전략 적용에 따라 MCCI 대처능력을 평가하고 있으며, 살수계통 등의 적용에 따라 결말분석에의 영향은 크지 않음

(10) 한수원 사고관리계획서에 해당 지식수준이 향상되었을 것으로 판단됨, (11) 국내 가동원전의 경우는 원자로 공동에의 건설성 측면을 고려할때 적용성 희박

- 기술적 관점
 - 노심용융물 및 MCCI에 상당한 연구적 투자 집중
 - 격납건물 배기 여과계통의 경우 기술적/정책적 변화에 따라 그 중요성이 크게 격하됨
 - 증기폭발 연구의 경우 여전히 중요도가 존재함에도 불구하고 연구적 투자는 미비
 - 수소 리스크 관련 연구의 경우 국내 기술 수준 확립 필요 (PAR 관련 불확실성 및 인허가 이슈)
- 특별위원회 활동 관점
 - PIRT 재평가 보완 필요: 제한된 수의 전문가 참여로 인한 consensus 확보 부족
 - PIRT 재평가 결과를 통한 중점적 투자 필요한 연구 주제 파악
 - 기존 중대사고 연구 프레임에 맞춘 분석을 수행함에 따라 미래 수요가 필요한 중장기 연구 투자 전략 수립 필요 (예: 기존 Eulerian 해석 방식 중심에 따른 중대사고 현상 모사의 기술적 난이도 저감을 위한 노력 필요)

감사합니다!

김성중: sungjkim@hanyang.ac.kr

나영수: ysna@kaeri.re.kr