

중대사고 현안해결 로드맵 개발

-핵분열생성물 거동 분과-

2022. 5. 18. (수)

제주 국제컨벤션센터, 201호

분과장: 윤종일 (한국과학기술원)
간사: 김성일 (한국원자력연구원)

KNS 2022 Spring 춘계학술발표회 Workshop

CONTENTS



□ 배경

□ 추진 경과 및 전략

□ 핵분열생성물 방출 수목 개발

□ 핵분열생성물 거동 관련 현안

□ 향후 연구내용 제안

배경

후쿠시마 사고 발생 (2011. 3.)

후쿠시마 1, 2, 3호기에서 노심이 용융되는
중대사고 발생

- 원전 중대사고 안전 연구에 대한 관심 급부상
- 중대사고시 노심 거동 및 핵분열생성물 방출에 대한 연구

비엔나 선언 (2015. 2.)

IAEA "Vienna Declaration on Nuclear Safety" 공포

- 신규 원전: 사고 발생시 소외 장기오염을 초래할 수 있는 방사성물질 방출 저감, 조기방출 및 방사성물질 대량방출 배제
- 가동 원전: 안전성 향상을 위한 포괄적, 체계적 주기적 안전평가
- IAEA의 한국 규제체제 검토결과, 중대사고에 의한 소외주민의 피폭선량 제한치 설정 등의 권고사항 이행 필요

원자력안전법 개정·공포 (2015. 6.)

중대사고 포함 사고관리계획서 제출 (2019)

- 중대사고시 방사성물질 방출에 관한 현상 규명 및 저감방안 개발 시급
- 원자력 분야에서 부족한 부분에 대한 연구 필요성 제기

중대사고 로드맵 개발 (2016)

원자력학회에서 "중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서" 를 발간함

- 일차계통, 격납건물, 핵분열생성물 거동
- 국내 가동원전에 대한 중대사고시 PIRT 개발
- 향후 연구 내용에 대한 제안

2022년 현재 시점에서 변화된 연구 환경과
최신 연구개발 결과를 바탕으로 보고서
개정 필요성

분과위원 구성

- ▣ [핵분열생성물 거동]분과의 전문위원
- 총 13인의 산·학·연 전문가로 구성

구분	소속	이름	인원
학계	한국과학기술원	윤종일*	3
	순천향대학교	박병기	
	부산대학교	이준엽	
산업계	한국수력원자력	서미로	3
	(주)미래와 도전	이두용	
	한전 원자력연료	조창석	
연구기관	한국원자력연구원	김성일, 김태형, 송용만, 연제원, 하광순	5
규제기관	한국원자력안전기술원	김한철, 이윤희	2

추진 경과

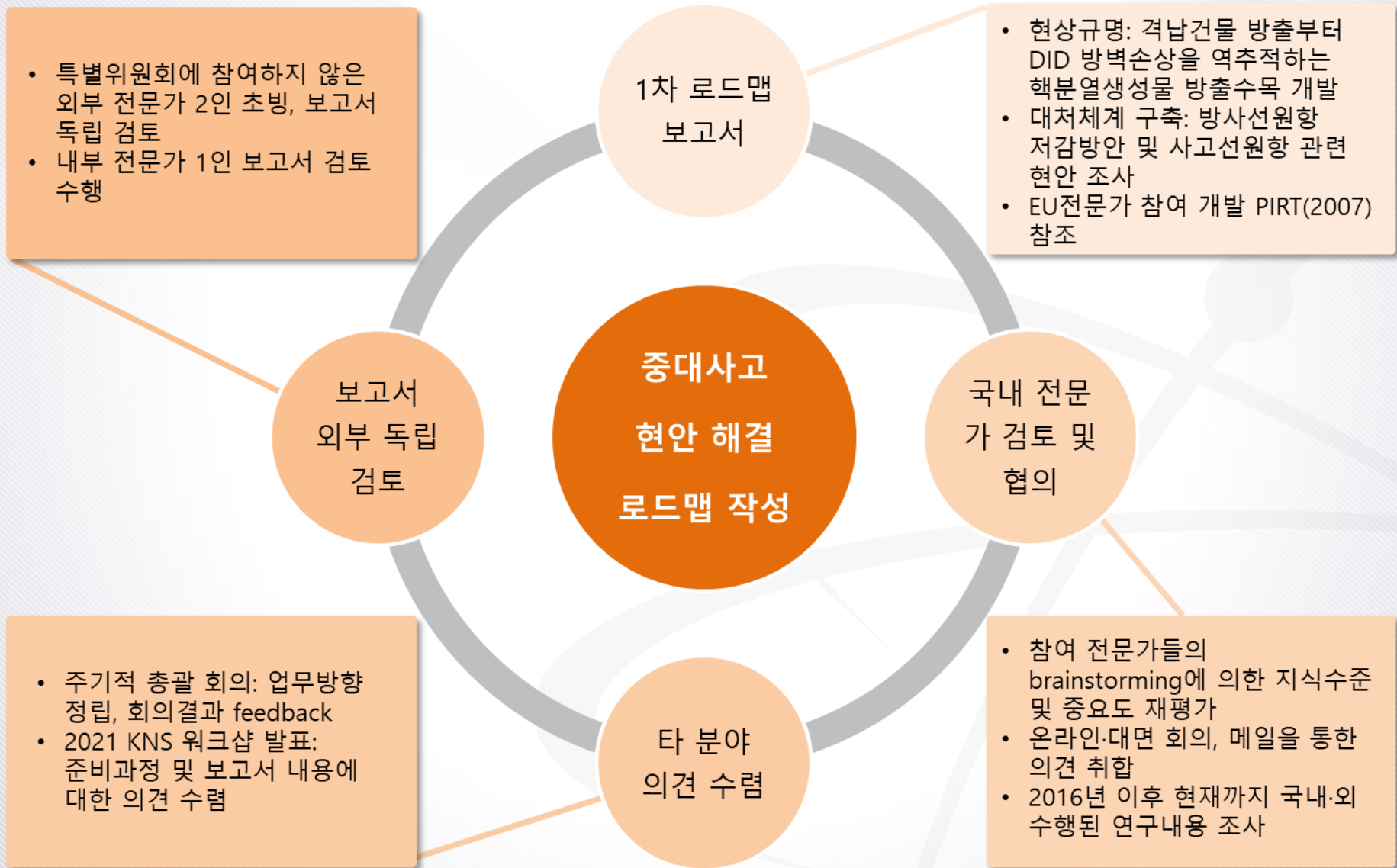
<총괄 회의>



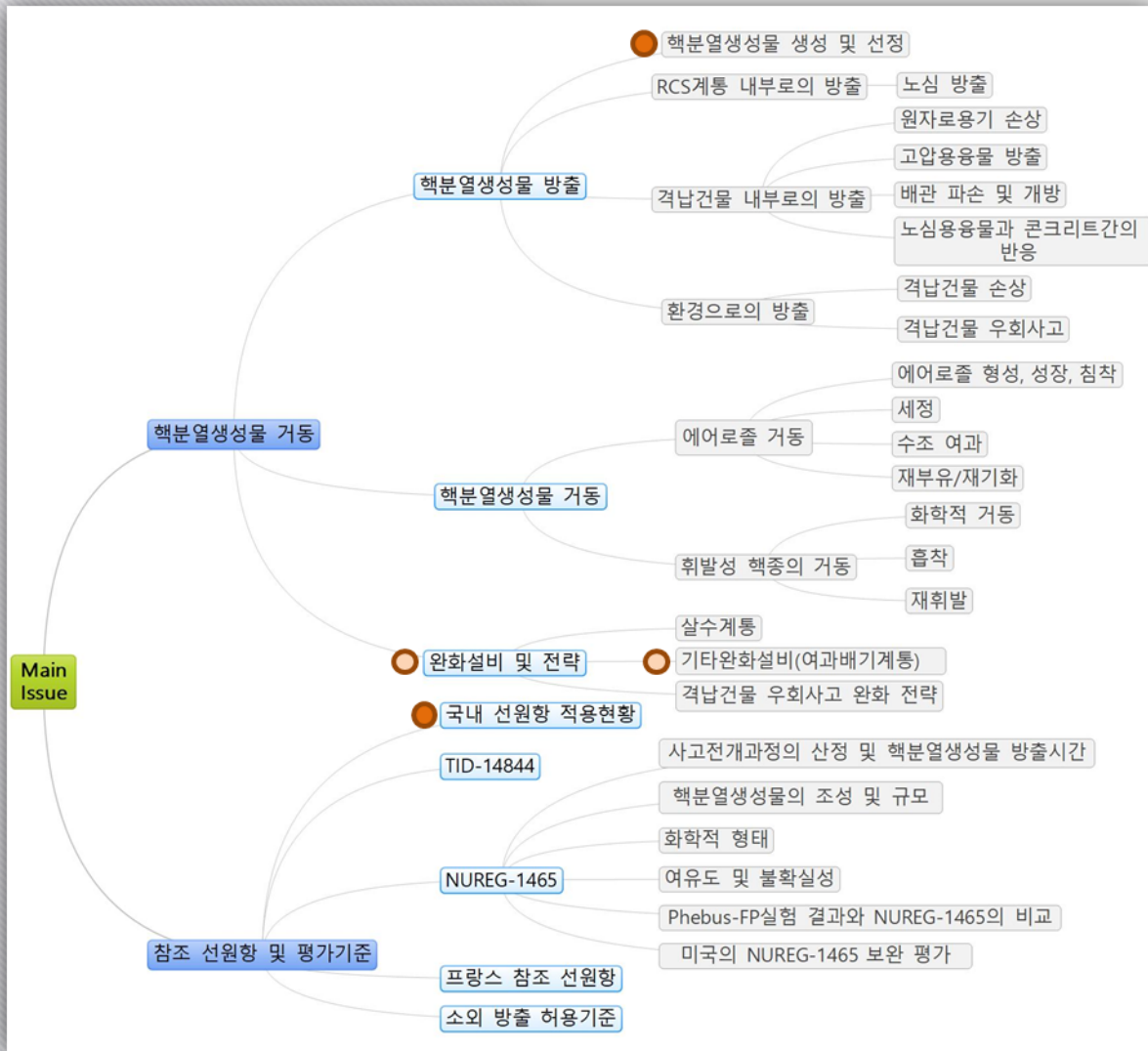
<핵분열생성물 거동 분과 회의>



추진 전략



핵분열생성물 방출수목 개발



- 2016년 한국원자력학회에서 발간된 [중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서]의 핵분열생성물 방출수목 도입 및 일부 항목 수정

- 주요 추가 사항
 - "핵분열생성물 생성 및 선정" 항목 추가
 - "국내 선원항 적용현황" 항목 추가

- 주요 변동 사항
 - "완화설비 및 전략" 항목의 핵분열생성물 거동 분야로 이동
 - "여과배기계통" 항목 이름을 기타완화설비(여과배기계통)로 변경

- 기타 수정 사항
 - 영문 국문 혼용을 국문으로 통일
 - 중복된 내용을 삭제

핵분열생성물 방출수목 개발

Phenomena	Items	Related subject	2016		2022		Further Research Needs
			Knowledge level	Significance	Knowledge level	Significance	
FP release	FP release in RCS	Core heat up	M	H	M	H	Cs, I release models FP release from fuel type and burnup FP release fraction (phenomenon) in high burn-up fuel
	FP release in Containment	RPV failure	M	H	M	H	Modeling and Experiments on the ICI tube failure mechanism ICI tube failure
		HPME	L	L	L	L	N/A
		Pipe rupture & Opening	H	L	H	L	N/A
		MCCI	L	H	M	H	Concrete properties at high temperature Layer formation of molten mixture with corium and concrete Water ingress and melt eruption
	FP release in Environment	Containment failure					
		Containment bypass	L	H	M	H	Evaluation of the environmental hazards due to the bypass scenario Failure mechanism of the SG tube Aerosol retention in the SG

핵분열생성물 방출수목 개발

Phenomena	Items	Related subject	2016		2022		Further Research Needs
			Knowledge level	Significance	Knowledge level	Significance	
FP transfer	Aerosol transfer	Aerosol behavior					
		Washout (Spray)					
		Pool scrubbing	M	H	L	H	Pool scrubbing experiments at the high temperature(pool and gas) condition Iodine retention in pool under pH variation Research trend has been changed to request "Best estimated results"
		Resuspension	L	H	L	H	Model improvement on re-suspension of aerosol Experimental data on the re-suspension of aerosol under severe accident condition
	Gas transfer	Chemistry					
		Adsorption					Effect of degraded paint on volatility of Iodine and FP Radioactivity stability of IOx adsorbed to dry wall in containment
		Re-vaporization	L	H	L	H	Ruthenium behavior with various temperature, gas composition in RCS surface sample Fraction of revaporized Ruthenium The deposition effect of other radionuclide except for Ruthenium· Surface analysis of deposited material according to the oxidation degree

핵분열생성물 방출수목 개발

Subject	Items	Related phenomenon in containment	Related phenomenon in RCS	Significance		SAMG action
				2016	2022	
Mitigation measures	CFVS	Spray MCCI		H	L	Containment depressurization
	ECSBS	Spray MCCI	FP generation in RCS due to RPV protection via Ex-Vessel cooling	H	H	Containment depressurization
	Mitigation for bypass scenario		SG tube rupture Scrubbing in SG		M	SG coolant injection Turbine bypass steam dump in SGTR
Reference source term	TID 14844	N/A	N/A			N/A
	NUREG-1465	N/A	N/A			N/A
	French RST	N/A	N/A			N/A
	Off site criteria	N/A	N/A			N/A

H-high, M-medium, L-low

핵분열생성물 거동 관련 현안

에어로졸 방출
W-world, D-domestic

거동 특성		기술 현안	비 고	지식수준				중요도 (시급성)	
				1차		2차		1차	2차
				W	D	W	D		
에어로졸 방출	노심방출	핵연료로부터 방출 모델: 핵연료 유형과 연소도에 따른 FP 방출		H	H	H	M	M	M
		노심 구조물(주로 제어봉) 손상 및 에어로졸 등 물질방출모델 개선		M	L	M	L	H	H
		High burnup(연소도 ≥ 60 MWd/kgU)/MOX 핵연료의 재관수 및 수소 생성의 영향	VERDON,ESTER SANDIA2011-0128	H	L	M	L	L	M
	원자로 냉각재계 통 방출	RCS 내 에어로졸 재부유(Mechanical resuspension)	NEA/CSNI/R(2009)5 ESTER	H	L	H	L	M	M
		RCS 내 복합구조물로의 침적		M	L	M	L	L	L
		강한 난류 유동시 입자 파쇄		M	L	M	L	L	M
		화학적 영향		M	L	M	L	M	M
	격납건물 거동	에어로졸의 형성, 성장 및 침착에 관한 현상(응결과 응축에 의한 성장, 격납건물 표면에서의 응축에 의한 에어로졸의 거동 포함)		H	M	H	H	H	H
		전하 효과		M	L	M	L	L	M
		응축성 대기 조건에서의 혼합 에어로졸		M	L	M	M	M	M
		Pool로부터의 재유입 (집수조와 같은 Pool에서 세정시 재부유 포함)		M	L	M	L	H	H
		PAR의 영향	OECD/NEA THEMIS	M	L	M	L	M	M
		수소연소가 부유 에어로졸에 미치는 영향	OECD/NEA THEMIS	M	L	M	L	M	M
		MCCI pool에서의 방출		H	L	H	M	H	H
		화재 에어로졸		M	L	M	L	M	M
		냉각수로의 방출 (FP (Sr, Cs, Ba, Sb, Ce/Pr, Eu and actinides)	OECD BSAF Phase 2	L	L	L	L	M	M

핵분열생성물 거동 관련 현안

에어로졸 방출

거동 특성		기술 현안	비 고	지식수준				중요도 (시급성)	
				1차		2차		1차	2차
				W	D	W	D		
에어로졸 방출	재부유	격납건물 내 에어로졸 재부유(Mechanical resuspension) 모델의 개선 및 추가적인 검증		H	L	H	L	M	M
		노심 용융물 분출: 난류 효과에 의한 에어로졸의 이동 및 침착		M	L	M	L	M	M
	Washout	살수에 의한 에어로졸 제거 모델의 개선(ECSBS 포함)		M	L	M	L	H	H
	Leaching ²	핵분열생성물의 Leak path를 통한 이동: 모델 개발 및 검증을 위한 시나리오와 현상에 대한 실험적 연구(Separate, Integral)		M	L	M	L	M	M
		노심 용융물과 Basemat 아래 지하수와 반응: 가용한 모델이 충분한지 확인이 필요하며 실험적 연구가 필요함		M	L	M	L	M	M
	Pool scrubbing	기존 실험보다 더 높은 기체 온도와 증기유량, 이송가스 내 수소를 포함시킨 실험		M	L	M	M	H	H
		포화상태까지 확장된 수조 실험 및 과냉각상태 수조의 제염능력과 비교		M	L	M	M	H	H
		수조 표면위 고압 조건이 에어로졸 및 아이오딘 기체 억류에 미치는 영향 조사 필요		H	L	H	M	H	H
		잘 정의된 중대사고 환경조건에서 재부유 현상을 규명하기 위해 대표적인 에어로졸 물질을 사용하는 종합효과시험		M	L	M	M	H	M
		Stand-alone 또는 integral code model의 검증을 위한 체계적 실험 데이터베이스 구축		M	L	M	L	H	H
	MCCI	MCCI 관련 기존 실험결과에 대한 재평가 및 코드 추가검증, 콘크리트 기반의 에어로졸 특성 정량화		M	L	M	L	M	M
		노심-콘크리트 상호작용 결과 생성물 기체에 의해 이송되는 핵분열생성물과 비방사성 에어로졸의 양		M	L	M	L	M	M
	격납건물 우회사고	증기발생기 내 에어로졸의 억류		H	L	H	M	H	H
		ISLOCA나 SGTR 시 방사능영향 완화수단 및 전략 개발		M	M	M	M	M	M

핵분열생성물 거동 관련 현안

기체상 방출

거동 특성		기술 현안	비 고	지식수준				중요도 (시급성)	
				1차		2차		1차	2차
				W	D	W	D		
기체상 방출	노심방출	기존 실험결과를 바탕으로 발전소 조건을 고려한 분석 및 평가		H	M	H	M	H	H
		노심 및 RCS에서 기체상으로 생성되는 핵종에 대한 실험적 연구		H	L	H	L	H	H
		핵심 핵종 및 반응에 대한 모델링		H	L	H	L	H	H
	격납경계 누출	격납건물 Crack 형성 관통부에서의 누설 및 격납건물 동적 거동을 바탕으로 환경으로 누설되는 핵분열생성물의 정량화		M	L	M	L	M	M
	Washout	기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가, 실험과 모델링 연구		M	L	M	L	M	M
CFVS		2013년부터 연구개발을 통해 2017년 국산화 개발을 완료하고 2018년부터 선행 해외설비와 경쟁을 통해 국산화 설비의 원전 공급을 추진하였음. 그러나 중대사고 법제화 등 사고관리 여건 변화에 따라 CFVS가 설치된 월성1호기를 제외한 국내 가동원전에는 CFVS의 설치가 취소된 상황임.		H	M	H	H	H	L
ECSBS		감압효과, 가동시점, 가동시간		M	M	M	M	M	M

핵분열생성물 거동 관련 현안

중대사고 대처체계

항 목	기술 현안	비 고	지식수준				중요도 (시급성)	
			1차		2차		1	2
			W	D	W	D	차	차
AST	실제적으로 고려해야 할 사고경위들을 포괄하는 선원항을 결정하기 위한 산학연의 종합적인 연구		H	M	H	H	H	H
ST methodology	방사선원항 종합 모델링 개선		H	L	H	M	H	H
	방사선원항 평가시 불확실성을 확인하고 해결할 수 있는 분석 방법: 격납건물에서 부유화된 아이오딘의 화학적 형태, 중대사고시 살수 및 자연 침적 등 제거 메커니즘		M	L	M	M	H	H
	FP 거동 불확실성을 파악하기 위한 Fukushima 상세자료 분석	OECD BSAF2, ARC-F, FACE	M	L	M	M	H	H

핵분열생성물 거동 관련 현안

아이오딘 및 루테튬 거동

거동 특성		기술 현안	비 고	지식수준				중요도 (시급성)	
				1차		2차		1차	2차
				W	D	W	D		
RCS 방출		Cs 및 I 방출모델		H	M	H	M	H	H
		노심 및 RCS에서 기체상 아이오딘 생성 및 방출		H	L	H	L	M	H
		전형적인 다성분 에어로졸에서의 아이오딘 흡착 반응속도와 방사선 조사시 안정성		M	L	M	L	M	M
		B ₄ C 제어봉의 손상시 발생하는 CO에 의한 IOx의 분해		M	L	M	L	M	M
		RCS 내 아이오딘의 이동에 미치는 제어봉 물질의 영향		H	L	M	L	H	H
		RCS를 따라 부착된 금속성 아이오딘화물의 재증발 가능성		H	L	H	L	M	M
CNT. 방출	아이오딘 거동 (기체상)	벽면 및 기기의 금속 또는 페인트 표면이나 에어로졸 입자에 흡·탈착되는 아이오딘 화학종의 이동		H	L	H	L	H	H
		기체상에서 흡착 아이오딘과 페인트의 반응에 의한 유기 아이오딘의 비균질 생성/페인트 열화가 아이오딘 휘발성 및 방사선원향에 미치는 영향	Bosland, Ca ntrel, 2015	M	L	H	M	H	H
		기체상에서 방사능에 의한 유기 아이오딘의 분해		M	L	M	L	M	M
		증기응축에 의한 휘발성 아이오딘의 흡착		H	L	H	L	M	M
		IOx의 크기, 조성 및 격납건물 표면에 흡착된 IOx의 방사선하에서의 안정성		M	L	H	M	H	H
	아이오딘 거동 (액체상)	수조 내부에서 휘발성 아이오딘의 생성 및 소멸(방사선 환경의 영향)		H	L	H	M	M	M
		아이오딘의 분리(partitioning): 액체상으로부터 휘발성 아이오딘의 생성률 / Pool 수면에서의 아이오딘 화학종간 질량전달률 / Pool이 고갈되면서 휘발성 아이오딘을 방출하는 메커니즘		H	L	H	M	H	H
	아이오딘 거동(환경)	대기 환경에서의 이동 중 아이오딘 화학종(기체-입자)의 변화		M	L	M	L	L	L
Leaching		방출경로상에서 분자 및 유기 아이오딘의 제거율(흡착율)에 대한 분석모델 개발		M	L	M	L	M	M
에어로 졸방출	노심방출	핵연료로부터 방출 : 산화조건에서 Ru 에어로졸 거동에 대한 실험 데이터 확보	STEM-2	M	L	H	M	H	H
	원자로냉각 재계통방출	Ru (Ru-103, Ru-106) 침적물의 RCS 내에서 재휘발 (다른 핵종 또는 산화상태의 영향)	Bosland, Ca ntrel, 2015	H	L	H	L	H	H

로드맵 보고서 구성 목차

중대사고 현안해결을 위한 로드맵 작성

보고서번호: #

중대사고 현안해결을 위한 로드맵 (핵분열생성물 거동) 작성보고서

2022. 4.

작성자 : 윤종일(한국과학기술원)
 김태형(한국원자력연구원)
 박병기(순천향대학교)
 서미로(한국수력원자력주식회사)
 송용만(한국원자력연구원)
 연제원(한국원자력연구원)
 이두용(주식회사미래와도전)
 이윤희(한국원자력안전기술원)
 이준엽(부산대학교)
 조창석(한전원자력연료주식회사)
 하광순(한국원자력연구원)
 간 사 : 김성일(한국원자력연구원)
 검 토 : 김한철(前한국원자력안전기술원)

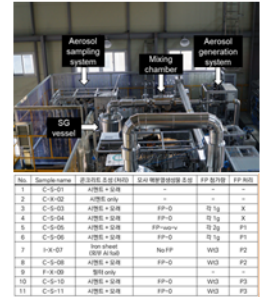
요약	3
제1장 서론	8
제1절 배경 및 필요성	8
제2절 연구 환경 변화	9
제3절 목적 및 내용	10
제2장 중대사고시 핵분열생성물 거동	13
제1절 핵분열생성물 방출	13
1. 원자로심 내 핵분열생성물의 생성 및 중요 핵분열생성물의 선정	13
2. 원자로냉각재계통 내부로의 방출	14
3. 격납건물 내부로의 방출	17
4. 환경으로의 방출	26
제2절 핵분열생성물 거동	33
1. 에어로졸 거동	33
2. 휘발성 핵종의 거동	53
제3절 완화설비 및 전략	64
1. 살수계통	64
2. 격납건물 우회사고 완화 전략	67
3. 기타완화설비(여과배기계통)	69
제3장 참조 선원항 및 평가기준	72
제1절 국내 선원항 적용현황	72
제2절 TID-14844	73
제3절 NUREG-1465	74
1. 사고전개과정의 산정 및 핵분열생성물 방출시간	75
2. 핵분열생성물의 조성 및 규모	75
3. 화학적 형태	76
4. 여유도 및 불확실성	76
5. PHBBUS-FP 실험 결과와 NUREG-1465의 비교	77
6. 미국의 NUREG-1465 보완 평가	78
제4절 프랑스 참조 선원항	79
제5절 소의 방출 허용기준	81
제4장 향후 연구를 위한 제언	84
제5장 결론	97
제6장 참고문헌	98

분과 활동 및 핵심 요약

01 » 핵분열생성물의 거동 및 방출 완화 방안에 대한 PIRT 재평가

2016년에 제시한 PIRT표와 비교했을 때, 국내외 핵분열생성물 관련 연구가 지난 5년간 활발히 진행됨

지식 수준 상향	MCCI시 에어로졸 거동, 격납건물 우회사고
지식 수준 하향	수조 제염
중요도 하향	CFVS



02 » 기술 현안 별 지식수준, 중요도 및 국제수준에 도달하는데 소요 연구기간 재평가

에어로졸 거동, 기체상 거동, 중대사고 대처체계, 아이오딘 및 루테튬 거동에 관련된 각 기술현안별로 평가 수행

- 핵분열생성물 거동 관련 국내 기술 수준은 전반적으로 국제 수준에 못미침
- 일부 항목에 대해서는 지난 5년간 상당히 많은 진전이 있었음
 - 수조 제염, SGTR사고시 증기발생기 내 제염, CFVS
 - 격납건물 내 에어로졸 거동(형성, 성장, 제거, MCCI)
 - Source Term methodology: 방사선원항 종합 모델링 개선, 불확실성 감소
 - 격납건물 내 아이오딘 거동(국제공동연구, 페인트 및 Ru와 반응)
- 일부 항목에 대해서는 더 많은 지식 수준이 요구됨
 - RCS내 아이오딘의 거동에 미치는 제어봉 물질의 영향
 - 핵연료 유형과 연소도에 따른 FP 방출 모델
 - Best estimate 된 모델의 필요성: 수조제염 등
- 중요도 변화

상향

- 핵연료 연소도에 따른 방출량 평가
- 에어로졸 거동(입자 파쇄, 전하 효과)
- 기체상 아이오딘의 방출 및 생성

하향

- CFVS
- 수조제염시 재부유

향후 연구내용 제안

가장 중요하고 시급한 8가지 현안

1) 노심 구조물(주로 제어봉) 손상 및 에어로졸 등 물질 방출 모델 개선

2) 산화조건에서 핵연료로부터 Ru 에어로졸의 방출 등 거동에 대한 실험데이터 확보

3) 살수에 의한 에어로졸 제거 모델의 개선

4) 노심 및 RCS에서 기체상으로 생성되는 핵종에 대한 실험적 연구, 핵심 핵종 및 반응에 대한 모델링

5) 다음 현상에 대한 기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가, 실험과 모델링: (1) 벽면 및 기기의 표면에 흡탈착되는 아이오딘 핵종의 이동 (2) 기체상에서 침착 아이오딘과 페인트의 반응에 의한 유기아이오딘 형성

6) MCCI pool로부터 에어로졸 방출

7) 수조 여과

8) 실제적으로 고려해야 할 사고경위들을 포괄하는 선원항 결정

위의 8가지 현안 중 대부분은 중·장기간의(3~10년) 연구가 필요할 것으로 판단됨

2-3년간의 단기적인 연구로 국제 수준에 도달할 수 있을 것으로 예상한 사항은 2), 7), 8) 항목임

향후 연구내용 제안

비교적 중요하고 시급한 3가지 현안

- 1) 기존 실험결과를 바탕으로 발전소 조건을 고려한 노심으로부터의 핵분열생성물 기체의 방출 분석 및 평가
- 2) 아이오딘 분리: 액체성으로부터 휘발성 아이오딘의 생성률, pool 수면에서의 아이오딘 핵종간 물질 전달률, pool이 고갈되면서 유기 아이오딘을 방출하는 메커니즘
- 3) 침적물 재증발, 노심으로부터 방출되는 루테튬(Ru-103, Ru-106)의 재휘발 및 분포, RCS 온도 및 기체 조성에 따른 루테튬 핵종의 재휘발 거동 및 재휘발 분율, 루테튬 이외의 다른 핵종이 침착되었을 때의 영향, 침착된 물질의 산화상태에 대한 표면상태 분석

환경 방출 이후 핵분열생성물의 거동 등을 다루지 못하였지만, 향후 연구 결과를 반영하여 본 보고서를 지속적으로 최신화하는 과정을 통해 보완해 나가는 노력이 필요함

향후 중대사고 방사선원향 관련 연구 방향의 체계적 정립, 사고관리계획 상세 규제 요건 설정 등에 활용 기대됨

산·학·연 분야에 중장기적 연구과제 도출에 활용될 것으로 기대됨



THANK YOU