

중대사고 현안해결 로드맵 개발 현황

-핵분열생성물 거동 분과-

2021. 10. 20. (수)

창원컨벤션센터, 6층(606, 607호)

윤종일*, 김성일, 김태형, 김한철, 박병기, 서미로, 송용만,
연제원, 이두용, 이윤희, 이준엽, 조창석, 하광순

KNS 2021 Autumn 추계학술발표회 Workshop

CONTENTS



□ 배경

□ 추진 경과 및 전략

□ 초기 로드맵 소개

□ **PIRT** 재평가 및 연구수행내용

□ 향후 일정

배경

- IAEA “Vienna Declaration on Nuclear Safety” 공포(2015.2.9)
 - 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 한국의 규제체제 검토 결과, 중대사고에 의한 소외주민의 피폭선량 제한치 설정 등의 권고사항 이행 필요
- 원자력안전법 개정·공포(2015.6.22): 사고관리계획서(중대사고관리계획 포함)를 제출 (2019.6.)
 - 중대사고시 방사성물질 방출에 관한 현상 규명 및 저감방안 개발 시급
- 중대사고 전문가들이 “중대사고 현안 해결을 위한 로드맵” 작성 논의(원자력학회 추계학회 워크숍, 2014.10.)
 - 원자력학회 특별위원회로 활동 추진, 핵분열생성물 거동 분과 설립
 - 원자력 분야에서 부족한 부분에 대한 연구 필요성 제기

배경

- 2016년 한국원자력학회에서 “중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서”를 발간함
 - 2021년 현재 시점에서 업데이트된 연구개발 결과를 바탕으로 보고서를 개정할 필요성
 - 기존 보고서에 포함되지 않은 SMR 설계에서 중대사고 이슈에 대한 분석 및 평가 수행
- 2016년도 로드맵 작성과 동일하게 3개의 분과로 나누어 운영
 - 일차계통 거동, 격납건물 거동, **핵분열생성물 거동**

추진 경과

□ 중대사고 현안해결 로드맵 작성 특별위원회 착수회의 (2021.8.3.)

- 산학연의 중대사고 현안 해결을 위한 로드맵 작성 추진 방안
- 특별위원회 운영 방안 및 향후 수행 방안

□ 특별위원회 2차 회의 (2021.9.3.)

- 기관별 연구 현황 조사 취합
- 로드맵 보고서 작성 관련 협의
- KNS 추계학술대회 워크샵 관련 논의

□ 특별위원회 3차 회의 (2021.10.1.)

- 분과별 PIRT 재평가 취합
 - 기존 로드맵 보고서 리뷰 및 개정 방안 협의
-

추진 전략

□ [핵분열생성물 거동]분과의 중대사고 현안해결 로드맵 개발 전략

- 2016년 한국원자력학회에서 발간한 “중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서 ” 를 토대로 현황을 평가하고 국내외 동향을 반영
- 기존 보고서에 포함되지 않은 SMR 설계에서의 중대사고 고려 방안 등 신규 이슈에 대한 분석 및 평가를 수행
 - 중대사고 배제 가능 여부 명확한 확인 필요
- 각 분과 참여 전문가들의 의견에 의한 PIRT 재작성
- 로드맵 보고서 작성
 - 산업부 및 과기부의 안전예타 부분에 반영 희망
 - 차세대 원전 등에 대한 연구방향 도출 및 차기 기획에 활용 가능성
 - 2021 추계학술대회 워크숍을 통해 연구방향에 대한 의견 수렴이 필요

분과위원

□ [핵분열생성물 거동]분과의 전문위원

- 산학연 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

[중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 작성 특별위원회]

- 후쿠시마 원전 사고 이후 국가 차원의 “중대사고 현상규명 및 대처체계 구축을 위한 연구 로드맵” 구축 필요성이 요구됨에 따라 원자력 학회 차원의 특별 위원회 구성 및 활동을 의결
- 기간: 2015.3.1.~2016.2.29. (12개월) + 2016.3.1.~2016.8.31. (6개월)
- 목적: 중대사고 현상에 대한 PIRT 작성 및 산학연 분야의 장단기 연구 과제(안) 도출
- 구성:

구분	구성	위원성명(소속)
위원장	1명	유용호 (한국원자력안전기술원)
부위원장	1명	송진호 (KAERI)
분과 및 위원	30명 내외 *분과장	일차계통 방호 분과
		김동하 (KAERI), 박래준(KAERI), 김환열(KAERI), 정법동(KAERI), 임국희(KINS), 조용진(KINS), 정용훈 (KAIST), 박종운(동국대), 김신환 (KEPCO E&C), 이걸우 (KNF)
		격납건물 방호 분과
		박현선*(포항공대), 김형택 (KHNP), 김종태(KAERI), 문영태(KEPCO E&C), 방광현 (해양대), 홍성완(KAERI), 김병조(KEPCO E&C), 조용진(KINS), 서미로(KHNP), 김균태(KINS)
		핵분열생성물 거동 분과
		김한철*(KINS) 연제원(KAERI), 하광순(KAERI), 강상호 (KEPCO E&C), 송용만 (KAERI), 김성중(한양대), 윤종일(KAIST), 조창석(KNF)

[중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 작성 특별위원회]

- 중대사고 현상 규명을 위하여 격납건물 방출부터 Defence-in-Depth 방벽 손상을 역추적하는 핵분열생성물방출수목 (FP Release Tree) 개발
- 대처체계 구축: 방사선원향 저감설비 및 사고선원향 관련 현안 조사
- EU 전문가들이 현안 항목별로 개발한 PIRT(2007) 참조
- 참여자들의 brainstorming에 의한 방출수목 작성, 보완



중대사고 현안해결을 위한 로드맵 작성
보고서번호 #

중대사고 현안해결을 위한 로드맵
(핵분열생성물 기동) 작성보고서

2016. 3.

작성자 : 김한철(한국원자력안전기술원)
강상 호(한국전력기술주식회사)
김성 중(한양대학교)
서미 로(한국수력원자력주식회사)
송홍만(한국원자력연구원)
연세원(한국원자력연구원)
이두용(주식회사미래와도전)
이종성(한국원자력안전기술원)
임희정(한국원자력연구원)
조창석(한국원자력연구주식회사)
하광 순(한국원자력연구원)

간 사 : 김성일(한국원자력연구원)

자 문 : 조성원

검 토 : 윤종일(한국과학기술원)
진영 호(한국원자력연구원)

Nuclear Engineering and Technology
journal homepage: www.elsevier.com/locate/nucengtech

Review Article
Development of a Korean roadmap for technical issue resolution for fission product behavior during severe accidents

Han-Chul Kim ^{a,*}, Kwang Soon Ha ^b, Sung Joong Kim ^c, Miro Seo ^d, Sang-Ho Kang ^e,
Doo Yong Lee ^f, Yong-Mann Song ^g, Jongseong Lee ^h, Hee-Jung Im ⁱ, Chang-Sok Cho ^j,
Jei-Won Yeon ^k, Sung Il Kim ^l, Song-Won Cho ^m, Jinho Song ⁿ, Yong-Ho Ryu ^o

^a Korea Institute of Nuclear Safety, 42 Chonbuk-ro, Seongju-gu, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea
^b Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^c Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongbuk-gu, Seoul 04763, Republic of Korea
^d Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^e Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^f Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^g Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^h Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
ⁱ Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^j Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^k Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^l Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^m Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
ⁿ Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea
^o Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Bevatron-ro 359, Boryong-gu, Gyeongju, Republic of Korea

ABSTRACT

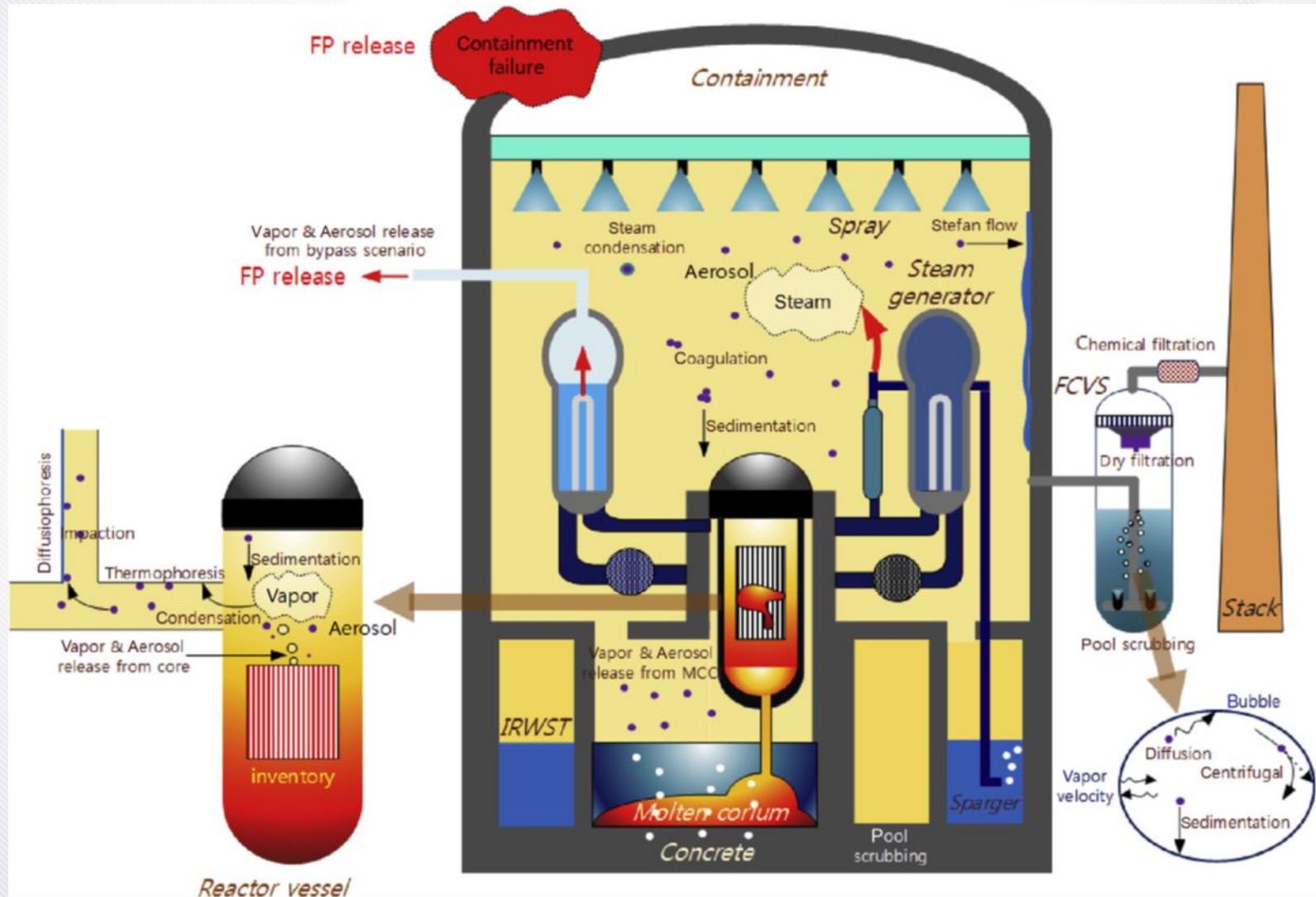
In order to develop a domestic research roadmap for severe accidents, a special committee was established by the Korean Nuclear Society. One of the subcommittees discussed the characteristics and the relevant technical issues in the stages of fission product release and physical forms of radioactive release and transport. The group members developed a core to identify fission product release phenomena by tracing behavior of individual fission product in-depth barrier and added possible countermeasures against failure. For each elemental issue, they searched for technical problems by examining the phenomena, accident management actions, and regulatory aspects relevant to the mitigation strategies for containment, including mitigation strategies against containment bypass accidents. Regulatory criteria, including the source term and the acceptance criteria for radioactive release, were also considered. They identified further research needs regarding important technical issues based on the status of the current knowledge level in Korea and in foreign countries, looking at the significance and urgency of issues and the expected research period required to reach an advanced level of knowledge. As a result, the group identified the 12 most important and urgent issues, most of which were expected to require mid-term and long-term research periods.

© 2017 Korean Nuclear Society. Published by Elsevier Korea LLC. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

Since the Fukushima accident, many countries have been carrying out efforts to secure countermeasures against severe accidents to that protection of public health and environment from radiation hazards can be assured [1]. In Korea, a special safety inspection was conducted in March of 2011 by experts from regulatory organizations, industry, university, and research institutes. Based on the results, 56 items, including six measures taken by the operator itself, were identified as countermeasures against postulated severe accidents triggered by natural disasters. Many of these countermeasures, including installation of passive autocatalytic recombiners in the operating plants, have already been implemented for all domestic nuclear power plants (NPPs) [2,3]. Meanwhile, international efforts are underway to limit the release of radioactive material from severe accidents at NPPs by strengthening international convention. The International Atomic Energy Agency (IAEA) issued the Vienna Declaration on Nuclear Safety in February 2015, calling for dedicated efforts to limit off-site releases that could result in long-term contamination, as well as early or large releases. In addition, the IAEA conducted an Integrated Regulatory Review Service mission for the Korean regulatory body in July 2011 and provided follow-up actions in December of 2014. As a result, it was recommended that off-site dose criteria for severe accidents be established. Subsequently, reforming for severe accident requirements was finalized in June 2016. Severe

핵분열생성물 관련 주요 쟁점



Issues relevant to FP behavior: Aerosol behavior issues

Table 1
Knowledge level, significance, and research period for aerosol behavior issues.

Technical issues			Knowledge level			Significance (urgency)			Research period			
			High	Mid	Low	High	Mid	Low	Short (2–3 yr)	Mid (3–5 y)	Long (5–10 y)	N/A
Aerosols	FP release in accordance with fuel type and burnup	W,D						O			O	
Release from core	Improvement of the model for degradation of core structure (mainly control rods) and release of material including aerosols			W	D	O				O		
	Effect of reflooding and hydrogen generation at high burnup (≥ 60 MWd/kgU)/MOX fuel	W			D			O				O
Release from RCS	Aerosol resuspension in the RCS (mechanical resuspension)	W			D			O		O		
	Aerosol deposition in singularities and complex structures			W	D			O		O		
	Particle break-up in highly turbulent flows			W	D			O		O		
Containment issue	Influence of chemistry on aerosol release			W	D			O		O		
	Phenomena related to formation, growth, and deposition of aerosols including growth through coagulation and condensation, condensation on the containment surface	W			D	O				O		
	Charge effects			W	D			O	O			
	Mixed aerosols in condensing atmospheric conditions			W	D			O		O		
	Re-entrainment from pools (including resuspension with pool scrubbing in the sump)			W	D	O			O			
	Influence of recombiners			W	D			O		O		
	Hydrogen-burn effects on suspended aerosols			W	D			O		O		
Resuspension	Release from MCCI pool	W			D	O				O		
	Fire aerosols			W	D			O		O		
	FP (Sr, Cs, Ba, Sb, Ce/Pr, Eu and actinides) releases to cooling water				W,D			O		O		
	Model improvement and additional validation for aerosol resuspension in the containment (mechanical resuspension)	W			D			O		O		
	Transport and deposition of aerosols through turbulence effect when corium is ejected			W	D			O		O		
Washout	Model improvement for the aerosol removal by spray			W	D	O				O		
	Experiments with higher gas temperature, steam flow rate and hydrogen concentration in the carrier gas than those of the current tests			W	D	O				O		
Pool scrubbing	Pool tests enlarged to the saturated condition and comparison of the decontamination capability with that of the subcooled pool			W	D	O				O		
	Effect of the high pressure condition on the pool surface, and the effect of water pH on the retention of aerosols and gaseous iodine	W			D	O				O		
	Integrated effect tests using the representative aerosol materials with well-defined severe accident conditions to examine the resuspension phenomena			W	D	O				O		
	Establishment of the systematic experimental database to validate stand-alone or integral code models			W	D	O				O		
MCCI	Re-evaluation of the current experimental results and additional validation of the codes related to MCCI characterization of aerosols in terms of the concrete type			W	D			O		O		

Technical issues		Knowledge level			Significance (urgency)			Research period			N/A
		High	Mid	Low	High	Mid	Low	Short (2–3 y)	Mid (3–5 y)	Long (5–10 y)	
Containment bypass accident	Quantity of FPs and non-radioactive aerosols carried by the gas products from MCC1		W	D		O			O		
	Aerosol retention in the SG	W		D	O				O		
Leaching	Development of the measures and strategies for mitigation of the radiological consequences from ISLOCAs and SGRs		W,D			O			O		
	Experimental study (separate, integral) on the scenarios and phenomena for the development and validation of models concerning the FP transport along the leak paths		W	D		O			O		
	Confirmation of available models and experimental study on the reaction between corium and water beneath the basemat		W	D		O			O		

Issues relevant to FP behavior: Gaseous release behavior

Table 2

Knowledge level, significance, and research period for gaseous release behavior.

Technical issues			Knowledge level			Significance (urgency)			Research period			
			High	Mid	Low	High	Mid	Low	Short (2–3 yr)	Mid (3–5 yr)	Long (5–10 yr)	N/A
Gaseous release	Release from core	Analysis and evaluation with consideration for the plant conditions based on the existing experimental results	W	D		O			O			
		Experimental study of the gaseous nuclides produced in the core and RCS	W		D	O					O	
		Modeling of critical nuclides and relevant reactions	W		D	O				O		
	Release from RCS											
	Release from containment											
	Leak from containment boundary	Quantification of FPs leaked through the containment penetrations with cracks formed and released into the environment, based on the dynamic behavior of the containment		W	D		O			O		
	Washout	Review and evaluation of the existing experimental and theoretical research results, and further study using experiments and modeling		W	D		O			O		

"O" means an indication of the corresponding column for the issue.

D, domestic; FP, fission product; N/A, not applicable; RCS, reactor coolant system; W, worldwide.

Table 3
Knowledge level, significance, and research period for iodine and ruthenium behavior issues.

	Technical issues	Knowledge level			Significance (urgency)			Research period			N/A
		High	Mid.	Low	High	Mid.	Low	Short (2–3 yr)	Mid (3–5 yr)	Long (5–10 yr)	
Release from RCS	Cs, I release models	W	D		O				O		
	Gaseous iodine formation and release from the core and RCS	W		D		O				O	
	Iodine adsorption kinetics on representative multicomponent aerosols and their radiolytic stability		W	D		O				O	
	Degradation of I ₂ O ₅ by CO that is produced from B4C control rod degradation		W	D		O				O	
	Effect of control rod materials on the transport of iodine in the RCS	W		D	O					O	
	Possibility of reevaporation of the metallic iodide deposited along the RCS	W		D		O				O	
Release into containment	Transport of iodine species adsorbed onto or desorbed from the metallic or painted surface, or aerosol particles in gaseous phase	W		D	O				O		
	RI heterogeneous formation from the reaction between iodine and paint in gaseous phase/effect of the paint aging on the iodine volatility and the ST		W	D		O			O		
	RI radiolytic destruction in gaseous phase		W	D		O			O		
	Volatile iodine adsorption due to steam condensation	W		D		O			O		
	I ₂ O ₅ size and composition, and radiolytic stability of deposited I ₂ O ₅ on the containment surface		W	D	O				O		
	Formation and destruction of volatile iodine inside the pool: effect of the boundary conditions such as thermal-hydraulics, oxidation, pH, concentration of chemical additives, mass transfer, radiolytic condition / formation of organic iodides in the aqueous phase due to radiolytic decomposition of organics such as paint/oxidation and reduction of iodine species (I ⁻ , I ₂ , IO ₃ ⁻) / iodine retention in pool under pH variation	W		D		O			O		
	Iodine partitioning: production rate of volatile iodine from the aqueous phase / mass transfer rate among the iodine species at the water surface of pool / mechanism for releasing volatile iodine as the pool dries out	W		D	O				O		
	modifications of iodine speciation (gas-particle) in the environment during its transport in the atmosphere		W	D			O			O	
	Analytical model for the removal (adsorption) rate along the release path		W	D		O			O		
	Acquisition of experimental data on the Ru aerosol release from fuel under oxidic condition		W	D	O			O			
Leaching Aerosol behavior	Revolatilization of Ru (¹⁰³ Ru, ¹⁰⁶ Ru) deposits in the RCS / revolatilization of Ru species in accordance with RCS temperature and gas composition, and their distribution: revolatilization fraction, effect of deposition of nuclides other than Ru, surface examination of the oxidation state of the deposits	W		D	O				O		

Issues relevant to FP behavior: Severe accident countermeasure issues

Table 4

Knowledge level, significance, and research period for severe accident countermeasure issues.

Technical issues			Knowledge level			Significance (urgency)			Research period			
			High	Mid.	Low	High	Mid.	Low	Short (2–3 yr)	Mid (3–5 yr)	Long (5–10 yr)	N/A
Mitigation feat	FCVS	Review and evaluation of the existing experimental and theoretical research results, and further study using experiments and modeling: FCVS actuation time or actuation pressure; FCVS operation in the SAMG range (continued open or repetitive open/close); capability of containment pressure reduction; DFs for aerosols and gaseous iodine; duration for passive operation; on- and off-site doses	W	D		O				O		
	ECSBS	Effectiveness of containment pressure reduction, actuation timing, operation duration		W,D			O			O		
Mitigation strategies and regulatory measures	AST	Integrated study by the industry, universities, and research institutes to determine the STs enveloping all realistic accident sequences	W	D		O				O		
	ST methodology	ST modelling improvement	W		D	O					O	
		Analytical methods to identify and resolve uncertainties in source term assessments: chemical forms of suspended iodine in the containment, mechanisms of FP removal such as spray and natural deposition, etc.		W	D	O					O	
		Analysis of Fukushima specific data to identify the uncertainties in FP behavior		W	D	O				O		

“O” means the corresponding column for the issue.

AST, accident source term; D, domestic; DF, decontamination factor; ECSBS, emergency containment spray backup system; FCVS, filtered containment venting system; FP, fission product; N/A, not applicable; ST, source term; W, worldwide.

중대사고 현안해결을 위한 로드맵 작성 보고서 목차 (2016)

중대사고 현안해결을 위한 로드맵(핵분열생성물) 작성 보고서(보고서 번호##), Rev.00 쪽번호: 5/94

목 차

요 약	3
제1장 서론	9
제1절 배경 및 필요성	9
제2절 목적 및 내용	10
제2장 중대사고시 핵분열생성물 거동	13
제1절 핵분열생성물 방출	13
1. 원자로냉각재계통 내부로의 방출	13
가. 노심방출	13
2. 격납건물 내부로의 방출	14
가. 원자로용기 손상	14
나. 고압용융물 방출	16
다. 배관 파손 및 개방	19
라. 노심용융물과 콘크리트간의 반응	20
3. 환경으로의 방출	23
가. 격납건물 손상	23
나. 격납건물 우회사고	26
제2절 핵분열생성물 거동	30
1. 에어로졸 거동	30
가. 에어로졸 형성, 성장, 그리고 침착	30
나. 세정	37
다. 수조 여과	39
라. 재부유	47
2. 기체 거동	49
가. 화학적 거동	49
나. 흡착	55
다. 재취발	57
제3장 대처체계	58
제1절 완화설비 및 전략	58
1. 여과배기계통	58
2. 살수계통	60
3. 격납건물 우회사고 완화 전략	64
제2절 참조 선원항 및 평가기준	67
1. TID 14844	67
2. NUREG-1465	67
가. 사고전개과정의 선정 및 핵분열생성물 방출시간	68

중대사고 현안해결을 위한 로드맵(핵분열생성물) 작성 보고서(보고서 번호##), Rev.00 쪽번호: 6/94

나. 핵분열생성물의 조성 및 규모	69
다. 화학적 형태	69
라. 여유도 및 불확실성	69
마. Phebus-FP 실험결과와 NUREG-1465의 비교	70
바. 미국의 NUREG-1465 보완 평가	71
3. 프랑스 참조 선원항	72
4. 소외 방출 허용기준	74
5. 선원항 관련 향후 연구 제안사항	76
제4장 향후 연구를 위한 제언	78
제5장 결론	91
제6장 참고문헌	92
부록 1: 자문의견	96

PIRT 재평가 초안 (1/4)

핵분열생성물 방출/이동 단계	거동 특성	주요 현상	지식 수준/중요도	Issue description	재평가			
					지식수준	지식수준 변경사유	중요도	중요도 변경사유
노심손상 방출	노심 가열	핵분열생성물의 간극 방출	상/중	핵연료로부터 방출: 핵연료 유형과 연소도에 따른 FP 방출	중	노심 가열로 (ATF: 농축도/연 소도 증가) 등장 으로 사고 발생		
			중/상	Cs 및 I 방출모델				
			하/하	High burnup(연소도 ≥ 60 MWd/kgU)/MOX 핵연료의 재관수 및 수소 생성의 영향				
	노심 용융	핵연료 및 노심 구조물의 손상, 핵분열생성물의 용융 방출	하/상	노심 구조물(주로 제어봉) 손상 및 에어로졸 등 물질 방출 모델 개선				
			중/상	기존 실험결과를 바탕으로 발전소 조건을 고려한 분석 및 평가	중상	국내 연구기관 AMP 수행으로, 발전소 평가자 확대		
			하/상	핵연료 산화조건에서 Ru 에어로졸 거동에 대한 실험 데이터 확보	중	5(UO ₂ 핵연료, 산소 유입 조건, RCS 내 거동) 관련 연구하여, 제어봉 영향을 평가한 실험 결과		
원자로냉각재계통 내 거동	증기/에어로졸의 이동	에어로졸 생성/성장/침착/재취발, 수증기 또는 수소 환경에서 Mo, B, (Cd, Ag, In), Cs, I, O, H 간 화학반응	하/상	RCS 내 아이오딘의 이동에 미치는 제어봉 물질의 영향	중	5(UO ₂ 핵연료, 산소 유입 조건, RCS 내 거동) 관련 연구하여, 제어봉 영향을 평가한 실험 결과		
			하/중	B ₄ C 제어봉의 손상시 발생하는 CO에 의한 IxOy의 분해	중	램 (2016-2019, IOx demonstration 램 (2016-2019, Radiolytic oxidation of		
			하/중	전형적인 다성분 에어로졸에서의 아이오딘 흡착 반응 속도와 방사선 조사시 안정성	중			
			하/중	특이성(Singularities) 및 복합구조물로의 침적				
			하/중	강한 난류 유동시 입자 파쇄				
			하/중	RCS를 따라 부착된 금속성 아이오드화물의 재증발 가능성	중	VERDON- 5(UO ₂ 핵연료, 산소 유입 조건, Thermal		
			하/중	증기발생기냉각운전, 냉각수주입				
		기체상 아이오딘 등의 화	하/중	RCS 내 기체상 아이오딘 생성 및 방출	중	VERDON- 5(UO ₂ 핵연료, (STEM2 발부로서) START2 프	상	PHEBUS-FPT3 실험에서 에어
원자로냉각재계통 손상 방출	원자로용기 손상	RPV 크립파열, ICI 관통	하/상	Ru (Ru-103, Ru-106) 침적물의 RCS 내에서 재취발 (다른 핵종 또는 산화상태의 영향)	중			
	배관 파열 / 개방	핵분열생성물 기체상 및			중			
	HPME	용융물 중 UO ₂ 미세입자의 격납건물 내 산포 및 산화(발열반응), 휘발성 핵분열생성물 방출						

PIRT 재평가 초안 (2/4)

격납건물 내 거동	에어로졸 거동	에어로졸 생성/성장/침착/재부유	중/상	에어로졸의 형성, 성장 및 침착에 관한 현상(응결과				
			하/하	전하 효과				
			하/중	응축성 대기 조건에서의 혼합 에어로졸				
			하/상	Pool로부터의 재유입 (집수조와 같은 Pool에서 세정				
			하/중	수소재결합기의 영향				
			하/중	수소연소가 부유 에어로졸에 미치는 영향	중	NaIO ₃ 고온 분해실험 등으로		
			하/중	화재 에어로졸				
			하/중	격납건물 내 에어로졸 재부유(Mechanical resuspension) 모델의 개선 및 추가적인 검증				
			하/중	노심 용융물 분출: 난류 효과에 의한 에어로졸의 이동 및 침착				
	오딘 등의 화학적	아이오딘 화학종의 반응, 흡·탈착	하/상	벽면 및 기기의 금속 또는 페인트 표면이나 에어로졸 입자에 흡·탈착되는 아이오딘 화학종의 이동	중	STEM2 프로그램 (2016-2019, IOx particles		
			하/상	기체상에서 흡착 아이오딘과 페인트의 반응에 의한 유기 아이오다이드의 비균질 생성/페인트 열화가 아이오딘 휘발성 및 방사선원향에 미치는 영향	중, 중	STEM2 프로그램 (2016-2019, paint ageing and its impact on gaseous		
			하/중	기체상에서 방사능에 의한 유기 아이오딘의 분해				
			하/중	증기응축에 의한 휘발성 아이오딘의 흡착				
			하/중	수조 내부에서 휘발성 아이오딘의 생성 및 소멸(방사선 환경의 영향)	중상, 중	그동안 오직 실험 등으로 이해도 증가		
			하/상	아이오딘의 분리(partitioning): 액체상으로부터 휘발성 아이오딘의 생성률 / Pool 수면에서의 아이오딘 화학종간 질량전달률 / Pool이 고갈되면서 휘발성 아이오딘을 방출하는 메커니즘	중	그동안 관련연구 등으로 부분적(생성률 등)이지만 이해도 증가		
			하/상	IxOy의 크기, 조성 및 격납건물 표면에 흡착된 IxOy의 방사선하에서의 안정				
	MCCI	지속적 기체 생성 및 휘발성 핵분열생성물 방출	하/중	MCCI 관련 기존 실험결과에 대한 재평가 및 코드 추가검증, 콘크리트 기반의 에어로졸 특성 정량화				
			하/중	노심-콘크리트 상호작용 결과 생성물 기체에 의해 이송되는 핵분열생성물과 비방사성 에어로졸의 양	중	MCCI 실험 등으로 비휘발성 핵종의 휘발현상 관한 정보		

PIRT 재평가 초안 (3/4)

	세정(Washout)	살수에 의한 대기중 핵분열생성물 제거	하/상	살수에 의한 에어로졸 제거 모델의 개선				
			하/중	기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가, 실험과 모델링 연구				
	여과(Pool scrubbing)	수조에서의 핵분열생성물 제거	하/상	기존 실험보다 더 높은 기체 온도와 증기유량, 이송가스 내 수소를 포함시킨 실험	중	증기발생기 내 수조제염 관련 과제 수행을 통한 지식 획득		
			하/상	포화상태까지 확장된 수조 실험 및 과냉각상태 수조의 제염능력과 비교	중	증기발생기 내 수조제염 관련 과제 수행을 통한 지식 획득		
			하/상	수조 표면위 고압 조건, 물의 pH가 에어로졸 및 아이오딘 기체 역류에 미치는 영향 조사 필요	중, 중	증기발생기 내 수조제염 관련 과제 수행을 통한 지식 획득		
			하/상	잘 정의된 중대사고 환경조건에서 재부유 현상을 규명하기 위해 대표적인 에어로졸 물질을 사용하는 종합효과시험	중	증기발생기 내 수조제염 관련 과제 수행을 통한 지식 획득 (KAERI)		
			하/상	Stand-alone 또는 integral code model의 검증을 위한 체계적 실험 데이터Stand-alone 또는 integral code model의 검증을 위한 체계적 실험 데이터베이스 구축	중, 중, 중	증기발생기 내 수조제염 관련 과제 수행을 통한 지식 획득 (KAERI) Pool scrubbing 조건에 따른 실험		
	FCVS	핵분열생성물 방출 저감	중/상	기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가, 실험과 모델링 연구: - CFVS 가동시점 또는 CFVS 개방압력, - SAMG 범주에서 CFVS 운전 (개방지속 또는 개폐반복), - 격납건물 감압성능, - 에어로졸과 기체상 아이오딘에 대한 제거효율(DF), - 피동 운전시간, - 소내 및 소외선량	상	여과배기 국산화 과제 수행후 관련 시험 및 해석을 통하여 지식수준이 높아짐.	중, 하, 하	국내 여과배기 설치 계획이 취소됨. 국내 가동원전 FCVS 설치 취소. 국내 원전에서 FCVS 추가 설치 중단 및 AMP 목표치 단축에 FCVS 미활용 결정에 따른 FCVS DF는
	ECSBS	대기중 핵분열생성물 저감	중/중	감압효과, 가동시점, 가동시간			상	
	원자로공동충수	MCCI 완화, 노심파편물 냉각						

PIRT 재평가 초안 (4/4)

격납건물 손상 방출	Containment failure	격납건물 관통부 등 경계 손상	하/중	격납건물 Crack 형성 관통부에서의 누설 및 격납건물 동적 거동을 바탕으로 환경으로 누설되는 핵분열생성물의 정량화			상	AMP 목표치 (100 TBq) 및 월성SFP 누출 (국민적 관심사) 관련하여 중요도
	Leaching	핵분열생성물의 침출	하/중	냉각수로의 에어로졸 방출 (FP (Sr, Cs, Ba, Sb, Ce/Pr, Eu and actinides)				
			하/중	방출경로상에서 분자 및 유기 아이오딘의 제거율(흡착율)에 대한 분석모델 개발				
			하/중	핵분열생성물의 Leak path를 통한 이동: 모델 개발 및 검증에 위한 시나리오와 현상에 대한 실험적 연구 (Separate, Integral)				
			하/중	노심 용융물과 Basemat 아래 지하수와 반응: 가용한 모델이 충분한지 확인 및 실험적 연구 필요				
격납건물 우회 방출		증기발생기 전열관 손상 또는 ISLOCA	하/상	증기발생기 내 에어로졸의 역류	중, 중	증기발생기 제관판단사고 관련 연구 지식 고려	상	AMP 목표치 (100 TBq) 미달의 주요원인으로, 중요도
			중/중	ISLOCA나 SGTR 시 방사선영향 완화수단 및 전략 개발	중상, 상	과거부, 산업부 관련 사항, MPPON P 코드에서 유기요오드 모델		
대기환경에서의 거동		대기중 핵분열생성물의 확산, 침착 등	하/하	대기 환경에서의 이동 중 아이오딘 화학종(기체-입자)의 변화	중상	중상	중	AMP 목표치 (100 TBq) 관련하여, (대부분 에어로졸의 침
선원형 평가	사고선원형		중/상	실제적으로 고려해야 할 사고경위들을 포괄하는 선원				
	평가방법론		하/상	방사선원형 종합 모델링 개선	중	KAERI 격납건물 내 선원형 평가		
			하/상	방사선원형 평가시 불확실성을 확인하고 해결할 수 있는 분석 방법: 격납건물에서 부유화된 아이오딘의 화학적 형태, 중대사고시 살수 및 자연 침적 등 제거 메커니즘				
			하/상	FP 거동 불확실성을 파악하기 위한 Fukushima 상세 자료 분석				

연구수행 현황 조사 (진행중)

수행기관	과제기간	예산(천원)	주요 연구내용
한국원자력연구원	2017.12.01 - 2022.11.30	10,737,000	<ul style="list-style-type: none"> Pool Scrubbing 효과/격납건물 우회방출-ISLOCA나 SGTR 시 방사선 영향 완화수단 및 전략개발
	2017.03.01 - 2021.12.31	5,200,000	<ul style="list-style-type: none"> 증기발생기 세관파단사고시 핵분열생성물 소외 방출량 분석 핵분열생성물거동 - Pool Scrubbing 효과 및 dry 증기발생기 내 제염 효과 증기발생기 세관파단사고관리전략 평가
	2017.03.01 - 2021.12.31	2,620,000	<ul style="list-style-type: none"> 노심용융물-콘크리트 고온반응 시 휘발성 핵종 거동 규명 감마선 조사 조건에서 아이오딘 화학거동 규명 아이오딘 화학종 측정기술 구축
(주)미래와 도전	2018.11. - 2021.10.	-	<ul style="list-style-type: none"> 배관 외부 Pool에서의 에어로졸 제염 효과 배관 내부에서의 에어로졸 제염 효과

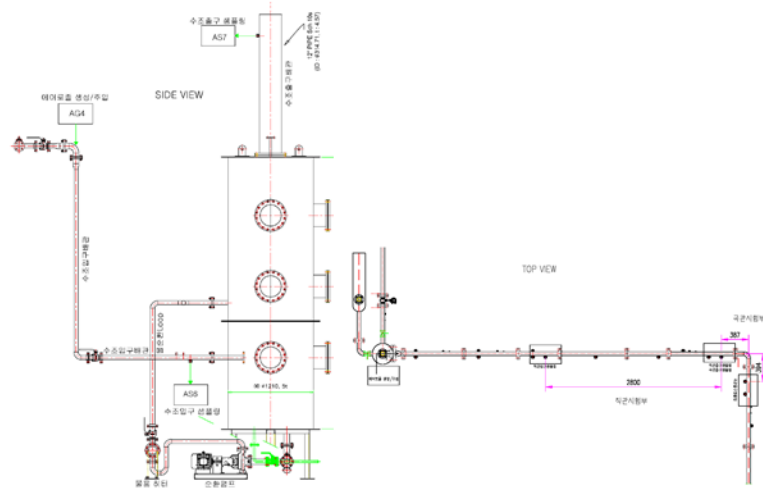
번호1

연구수행 현황 요약서

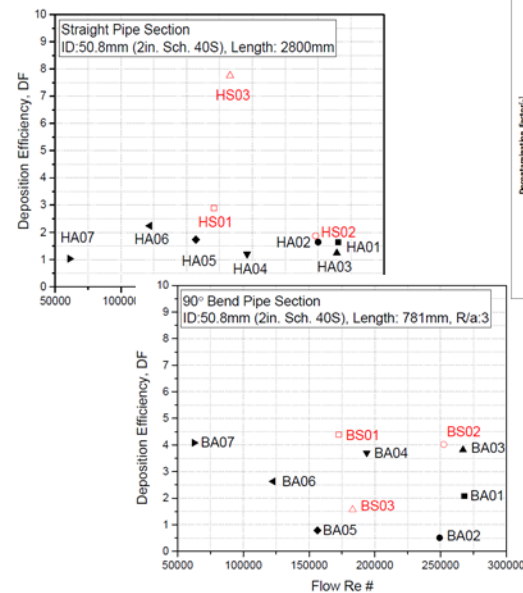
1. 과제 개요			
과제명			
수행기관		과제책임자	
과제기간		과제예산	
과제정보	•		
연구분야	•		
2. 최종연구목표		TRL 수준	
		적용노형	
•			
3. 주요연구 내용			
•			
4. 주요연구 성과			
5. 추가연구 주제			
•			

주요 연구수행 내용 (1)

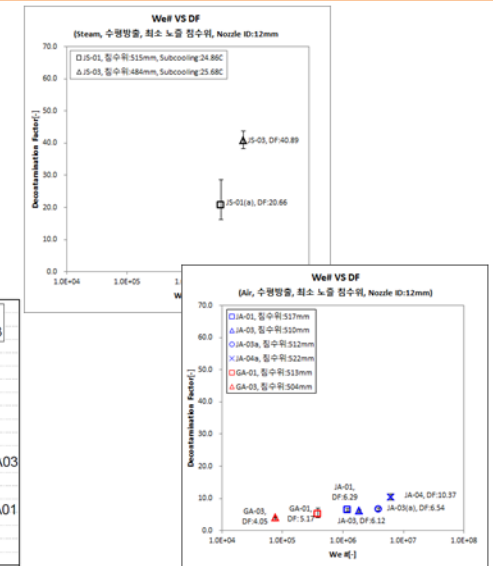
과제명	ISLOCA 배관 내외부 에어로졸 제염성능 시험		
수행기관	(주)미래와도전	과제책임자	이두용
최종연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ISLOCA 대처전략 개발을 위한 핵심 변수별 배관 외부(Pool scrubbing) / 배관 내부 에어로졸 제염 실험 데이터 확보 		
주요 연구내용	<ul style="list-style-type: none"> ISLOCA시 배관 내외부 에어로졸 제염계수 시험 Matrix 도출 ISLOCA시 에어로졸 제염계수 시험설비 설계 및 구축 ISLCOA시 배관 내외부 에어로졸 제염계수 시험 		
지식수준 변화	<ul style="list-style-type: none"> 수조여과(코드 검증을 위한 실험 데이터베이스 구축): 하 → 중 격납건물 우회방출(SGTR/ISLOCA)시 에어로졸 제거: 하 → 중 		



〈배관 내/외부 시험 설비〉



〈직관과 곡관에서 에어로졸 제염계수〉



<We수 별 수조제염계수: steam/air>

주요 연구수행 내용 (2)

과제명

노심 용융물 핵분열생성물 화학특성 평가기술 개발

수행기관

한국원자력연구원

과제책임자

연제원

최종연구목표

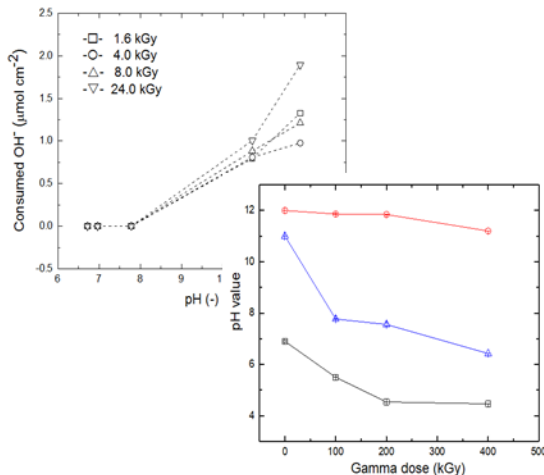
- 노심용융물 및 콘크리트 화학반응 특성 평가
- 노심용융 사고 시 방사성물질 휘발거동 규명 및 안정화 조건 결정

주요 연구내용

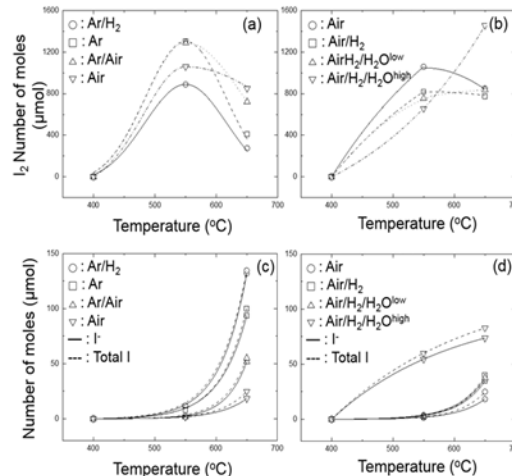
- 노심용융물-콘크리트 고온반응 시 휘발성 핵종 거동 규명
- 감마선 조사 조건에서 아이오딘 화학거동 규명
- 아이오딘 화학종 측정기술 구축

지식수준 변화

- 아이오딘 화학종의 반응 흡,탈착(페인트 반응, 방사선 환경, partitioning) 연구를 통한 이해도 증가: 하 → 중
- MCCI시 에어로졸 발생: 하 → 중
- 수소제염 데이터 확보(제염계수 측정, pH영향): 하 → 중



<감마 조사 조건에서 수용액의 pH에 따른 OH⁻이온 소모량 및 pH 변화>



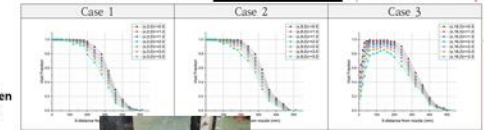
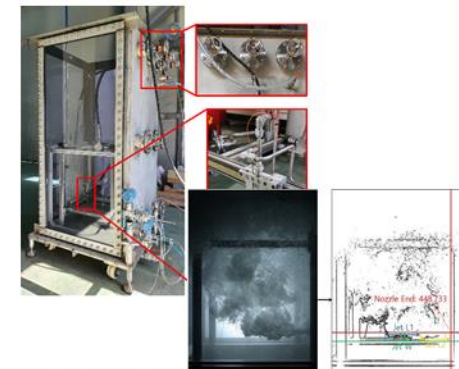
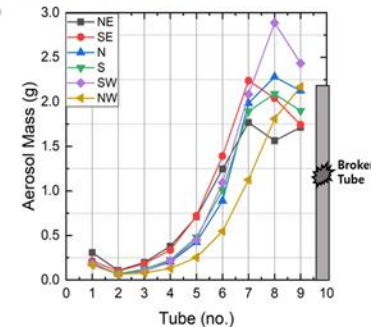
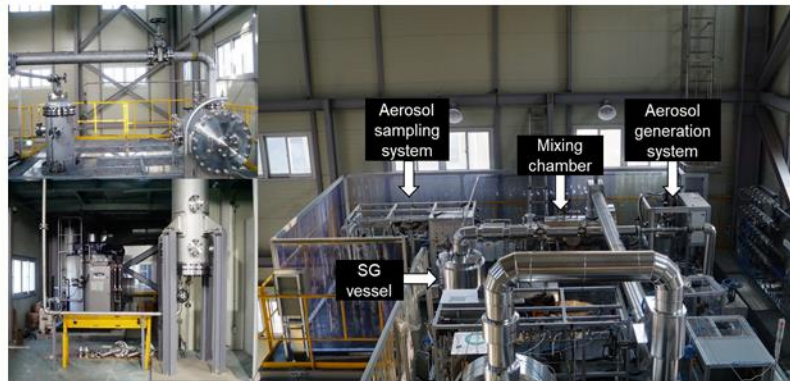
<온도 및 운반기체 조성에 따른 NaIO₃의 분해 생성물>

No.	Sample name	콘크리트 조성 (처리)	모사 핵분열생성물 조성	FP 첨가량	FP 처리
1	C-S-01	시멘트 + 모래	-	-	-
2	C-X-02	시멘트 only	-	-	-
3	C-S-03	시멘트 + 모래	FP-0	각 1g	X
4	C-S-04	시멘트 + 모래	FP-0	각 1g	X
5	C-S-05	시멘트 + 모래	FP-w-o-v	각 2g	P1
6	C-S-06	시멘트 + 모래	FP-0	각 1g	P1
7	I-X-07	Iron sheet (외부 Al foil)	No FP	Wt3	P2
8	C-S-08	시멘트 + 모래	FP-0	Wt3	P2
9	F-X-09	필터 only	-	-	-
10	C-S-10	시멘트 + 모래	FP-0	Wt3	P3
11	C-S-11	시멘트 + 모래	FP-0	Wt3	P3

<콘크리트 고온반응에 의한 비휘발성 핵종 (Mo, Ba, Nb 등) 유도 휘발 데이터 생산>

주요 연구수행 내용 (3)

과제명	중대사고 기인 증기발생기 세관파단사고 평가기술 개발		
수행기관	한국원자력연구원	과제책임자	김성일
최종연구목표	<ul style="list-style-type: none"> SGTR 사고 시 방사성물질 평가 도구 개발 (MELCOR 해석 + 실험 데이터) SGTR 사고 시 방사성물질 방출 저감 위한 사고관리전략 평가 및 개선안 도출 		
주요 연구내용	<ul style="list-style-type: none"> 증기발생기 세관파단사고 시 에어로졸 평가 증기발생기 세관파단사고 위해도 평가 및 사고관리전략 개선 		
지식수준 변화	<ul style="list-style-type: none"> 수조여과 분야(고속, 데이터베이스 구축): 하 → 중 증기발생기 내 에어로졸 역류: 하 → 중 		



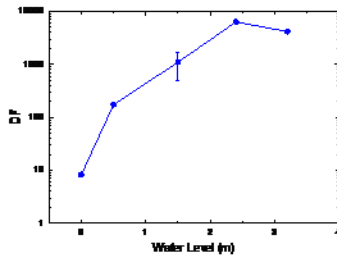
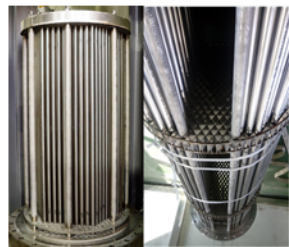
<증기발생기 세관파단사고 시험 설비 구축 및 에어로졸 시험 수행>

<증기발생기 내 제염계수 정량화>

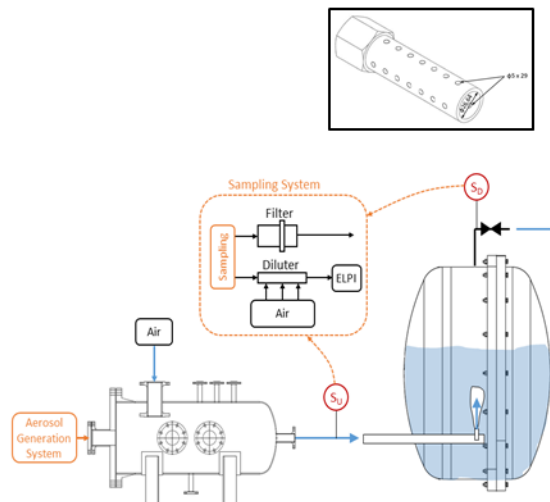
<고속 수조제염 열수력 데이터 측정 및 모델링>

주요 연구수행 내용 (4)

과제명	원전 격납건물 우회사고 대처기술 개발		
수행기관	한국원자력연구원	과제책임자	하광순
최종연구목표	<ul style="list-style-type: none"> 원전 격납건물 우회 중대사고 동안 방사성물질 방출 최소화를 위한 대처 기술 개발 		
주요 연구내용	<ul style="list-style-type: none"> 격납건물 우회사고 시 방사성물질 거동 평가 중대사고 코드 방사성물질 방출 저감을 위한 중대사고 대처설비 및 방안 		
지식수준 변화	<ul style="list-style-type: none"> 우회사고 시 방사선영향 완화수단 및 전략 개발: 중 → 상 		



<에어로졸 수조제염 중합 시험 (dryer+separator)>



<우회사고 대처설비 설계, 제작 및 제염성능 평가>



- 참여기관: KAERI, KNT, KAIST, FNC, KINS, KEPCO E&C, 한양대

<“원전 격납건물 우회사고 대처기술 개발” 포럼 구성 및 운영>

향후 일정

- 기존 PIRT 재평가를 위한 연구수행현황 조사
 - 분과별 내용 취합
 - 기존 보고서 리뷰 및 개정 로드맵 보고서 작성
 - 보고서 목차 확정 회의 (11월 초 예정)
 - 기존 보고서의 전반적인 구조는 유지
 - 원자력 관련 정책적 환경 및 현상별 중요도 변화에 초점
 - 개정된 PIRT 및 보고서 작성
 - 2022년 5월 이전
-



THANK YOU