

# 중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 작성

- 일차계통 방호 위원회 -

김 동하([dhkim8@kaeri.re.kr](mailto:dhkim8@kaeri.re.kr))

2015. 10. 28



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

\*References: MELCOR manual, MAAP5 manual, SARNET short course on SA phenomenology

# 목 차

- ❖ PiRT 개발 경위
- ❖ 일차계통 방호위원회 구성
- ❖ PiRT 구성 방법 및 제안
- ❖ PiRT 정보 활용 예

# PiRT 개발 경위



모임	일시/장소	주요 협의 내용
착수회의	2014.12.19 대전 INTEC	취지 설명, 위원회 구분 (일차계통/격납건물/소스팀 그룹) 향후 일정 논의, 19명 참석
1차	2015.2.4 대전 INTEC	전문위원 소개, 기존 PiRT 소개 로드 맵 개발/구성 방향 논의 (13명 참석)
리더회의	2015.3.12 INTEC	박현선, 송진호, 김동하, 김한철, 하광순 다른 위원회와의 연관성 고려
2차	2015.4.28 대전 INTEC	전문위원 PiRT 제안 및 논의 (정용훈, 박종운 교수) (10명 참석)
리더회의	2015.6.4 포스텍	류용호, 박현선, 송진호, 김동하, 송용만 참석 PiRT 개발 후 로드맵 개발 Backward approach 적용
3차	2015.6.29, NTEC	사고관리 측면에서의 구성 시도 (11명 참석)
4차	2015.8.24, INTEC	PiRT 의견 수렴 및 보고서 내용 협의(8명 참석)
리더회의	2015.10.2 대전 INTEC	원자력학회 워크샵 준비 및 일정 협의 위원회별 현황 공유 및 일정 협의(10명 참석)

# 착수회의 참가자 및 일차계통 방호위원회 위원

## 착수회의 참가자 명단

소속기관	이름	1지망	2지망
KAERI	손동건	1	3
	하광순	3	1
	박래준	1	2
	김환열	1	2
	송진호		
	홍성완	2	1
	정법동	1	2
	김동하	1	2
	송용만	3	2
	김성일	3	
KEPCO E&C	김병조	2	1
	문영태	2	1
한수원	김형택	2	3
KINS	김한철	3	2
	조용진	2	3
	임국희	1	
FNC	이두용	3	2
POSTECH	박현선	2	1
해양대	방광현	2	1
KAIST	정용훈	1	2
동국대	박종운	1	

## 일차계통 방호위원

소속	이름
KAERI	손동건, 박래준, 하광순, 김환열, 정법동, 홍성완, 김상백, 김희동, 김동하
KINS	임국희, 조용진, 김균태
KAIST	정용훈
동국대	박종운
KEPCO E&C	윤선홍
한수원 CRI	이영승
KNF	이걸우

# PiRT 구성 방법 논의

- 다양한 목적으로 사용할 수 있도록 구성
  - 중대사고 주요 현상에 대한 체계적인 정보 제공
  - 현안 도출 과정 제시
  - 규제 법제화 입력
  - 사용 주체의 관심에 따라 재구성 가능하도록 관련 정보 수록
- Backward approach 적용
  - 관심이 되는 항목을 앞에 나열 (eg., 경계 건전성 유지)
  - 각 항목을 구성/대표하는 현상을 뒤에 나열

# 기본 PiRT 구성 (heading) 제안

- ◆ 방향: 규제, 연구 산업체 관점이 반영된 PiRT 개발,  
주요 현상에 대해 규제, 연구, 대처설비 및 사고관리 측면 반영

Major Barrier	Sub barrier	Major Phenomena	Major components
------------------	-------------	--------------------	---------------------

Sub components	Knowledge level (exp/simulation)	Further research needs
-------------------	-------------------------------------	---------------------------

SAMG actions	Regulatory significance	
-----------------	----------------------------	--

# 기본 PiRT 구성 제안

Major Barrier	Sub barrier	Major Phenomena	Major components
RPV	Core integrity	Core heatup, oxidation & melting, Channel blockage...	Less heat transfer to coolant, decay heat distribution, ...
	Lower head integrity	Lower plenum water behavior, lower head heatup & failure	Water inventory, corium pool configuration, ...
	Surrounding structure integrity	Shroud heat/melting, RPV wall heat/melting	Radiation heat transfer,...
	Core upper structure	Upper plenum heatup & melting, relocation	Coolant level, radiation HT,...
RCS boundary	PZR surge line	Temperature-pressure induced natural circulation	Natural circulation, Failure mechanism
	Hot leg		
	SG u tubes		

# 전문 위원 PiRT 제안 (정용훈 교수)

Challanged Physical Barrier	Major Phenomena	Sub-Phenomena
Reactor core (cladding)	Core melt progression	»
		Core melt
		Corium relocation
	Corium pool formation	»
		2 layer pool
		3 layer pool
Lower head	Global failure (Creep)	solid layer + pool
		»
		High temperature creep
	Meltthrough (over T)	»
		Corium pool formation
		Focusing effect (thermal load)
RCS pressure boundary pipings	Penetration failure	Ex-vessel NC
		»
		.....
	Temperature induced failure	»
		NC in RCS
		»
	PORV open	.....
		»
		Interface LOCA
	Out of containment piping break	»
		Multiple SGTR
		Isolation failure
	SGTR	»
		Multiple SGTR



# 전문 위원 PiRT 제안 (박종운 교수)

발전소 출력	경계	challenges	action	results	파손모드	main parameter	phenomena (direct, indirect) (하부반구)	core
전출력	RPV	high pressure temperature	depressurization safety injection	hpme TI SGTR TI PZR TI hot leg	ablation creep(local) creep(global) penetration	thermal load	corium pool configuration corium composition and property corium mass 재임계	heat up 산화 재배치 blockage
			instrument 보강		melt through			
		heat		thermal load		외벽냉각		
	rcs boundary				TI SGTR TI PZR TI hot leg			
	activities							
정지저출력								
recovery (SI injection?, 바닷물)								
actions 고려방안?	operator action system dependent							
중수로 관련 내용 포함 (동일적용, 상관없음, 특이사항)								

경계 건전성을 위협하는 요소 (challenges)를 먼저 언급, 그에 대한 조치사항 (action) 정리,  
조치 실패시 그로 인한 결과 및 파손모드 정리  
파손 주요 요소 및 관련 현상 언급

# PiRT 추가항목 도출

		Major Barrier (Goal)	Sub Barrier/Systems	Major Phenomena involved	specific phenomena involved (level 1)	specific components involved or
			lower head integrity	lower plenum water behavior	water inventory (water level) heat transfer from core to lower plenum coolant	corium delivery condition convection radiation
				lower head heatup	corium pool configuration corium pool coolability	2 layer 3 layer water ingestion natural circulation inside pool
					heat transfer from corium pool to lower head heat loss to ex-vessel (ERVC)	decay heat pool heat transfer correlation
				lower head failure	global failure (creep) penetration failure focusing effect (local)	
				재임계		
			in-vessel SA mitigating systems availability recovery action 항목 추가	Depressurization in-vessel injection ex-vessel cooling	reflooding (core) quenching (lower plenum) outer surface heat transfer	PORV/SDS, RCS boundary failure SIT, ECCS, injection from outside cavity flooding system
		RCS Boundary	SG u-tube Pressurizer surge line Hot leg	pressure/tempetaure induced creep	natural circulation failure mechanism (creep)	

# 제안된 PiRT (1)

Failure Modes(1)	Failure Modes (2)	Major Phenomena involved	phenomena description	knowledge level	SAMG significance /mitigation actions	Regulatory significance
			(전반적인 현상 설명)	(실험/코드/연구필)	(action/유효성/필요성)	(action/Law/needs)
			(김동하/정법동/홍성완)	(박래준/정용훈/김)		(임국희/김상백)
Loss of RPV integrity	Loss of core integrity	core heatup	less heat transfer to coolant decay heat distribution		(이영승/이결우/박래준)	
					depressurization 조치는 비상노심주입 가용, DCH 방지 목적	
		cladding oxidation&melting	steam flow (rich/starvation) available cladding mass excess heat for melting hydrogen generation		노심 냉각수 상실로 인한 역효과	
		channel blockage & molten pool formation	fuel relocation refreezing flow area reduction			
		corium delivery to LP	blocked channel reopening corium flow to core support plate core support plate failure			
		heat loss to surroundings	lateral heat loss (shroud/RPV wall) upper/lower heat loss (upper/lower HS)			
		재임계				
		reflooding (core)			depressurization/SAMG action	

# 제안된 PiRT (2)

Failure Modes(1)	Failure Modes (2)	Major Phenomena involved	phenomena description	knowledge level	SAMG significance	Regulatory significance
	Loss of lower head integrity	lower plenum water behavior	water inventory (water level) corium delivery condition heat transfer from core to lower plenum coolant convection radiation			
		lower head heatup	corium pool configuration 2 layer 3 layer corium pool coolability water ingress natural circulation inside pool heat transfer from corium pool to lower head decay heat pool heat transfer correlation heat loss to ex-vessel (ERVLC)			
		lower head failure	global failure (creep) penetration failure focusing effect (local)			
		재임계				
		quenching (lower plenum)				
		HPME			depressurization	
	Upper head failure					
	in-vessel SA					
	mitigating systems	Depressurization				
	availability					
	(recovery action 항목 추가)	in-vessel injection	reflooding (core) quenching (lower plenum)		loss of core geometry 방지 조치	
		ex-vessel cooling			loss of LH 방지 조치	
			outer surface heat transfer			

# 제안된 PiRT (3)

Failure Modes(1)	Failure Modes (2)	Major Phenomena involved	phenomena description	knowledge level	SAMG significance	Regulatory significance
Loss of RCS Boundary	Temperature(Pressure)-induced Failure	S/G	natural circulation			
		Surge Line	failure mechanism (creep)			
		Hot Leg	pressure/temperature			
		Check Valve	induced creep			
	Initial Events	ISLOCA				
		PORV(SRV)				
		SG tubes				
		Pipes				
Loss of SFP Cooling						

# 제안된 PiRT (4)

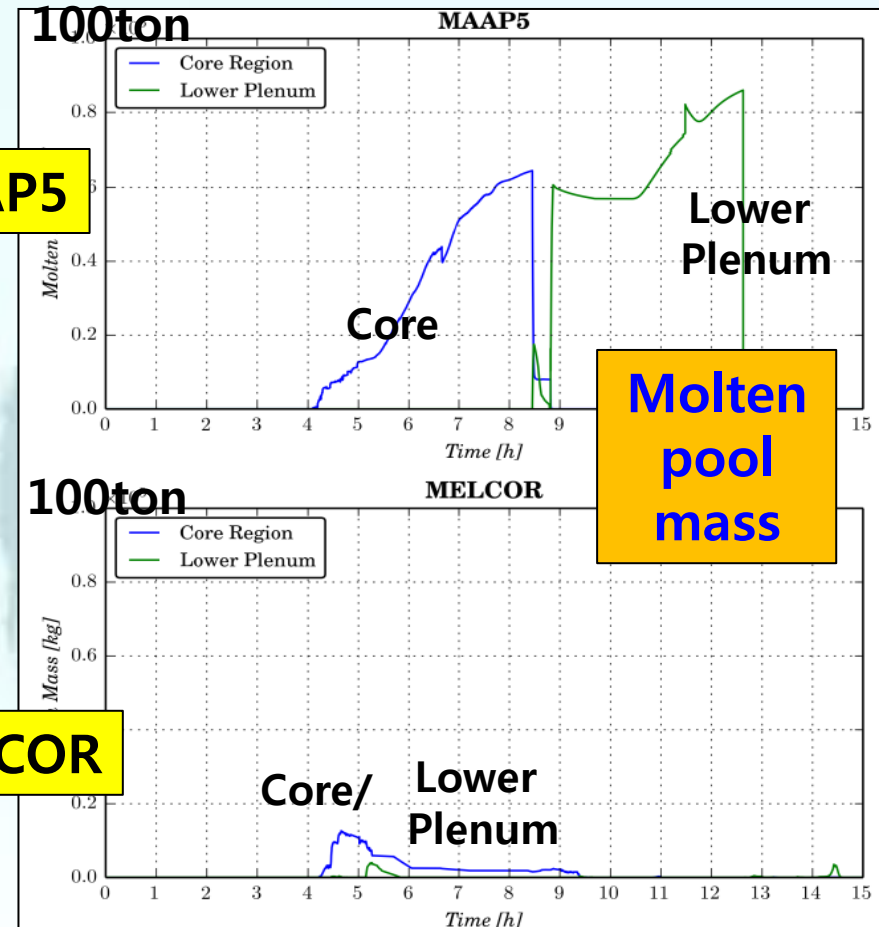
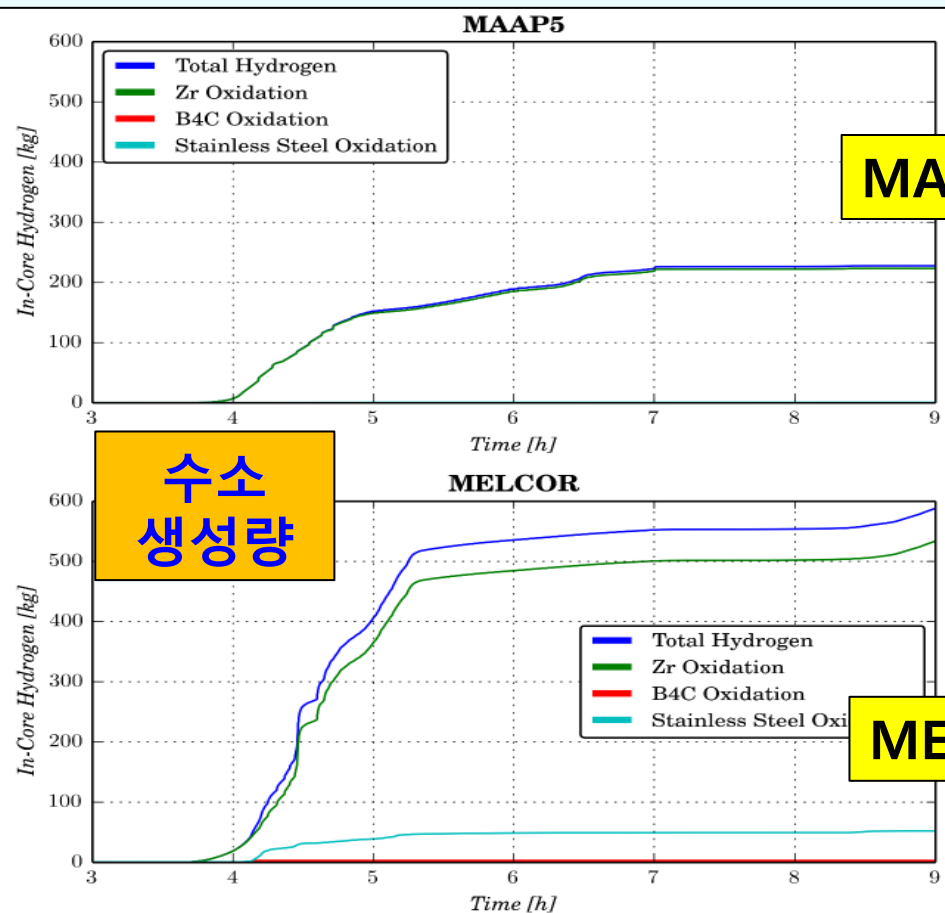


Regulatory significance			Related issues (어느 위치가 적합한지?)	related phenomena in containment integrity	related phenomena in FP behavior	Issue description (중요한 현안, 불확실한 현상 등 설명) 관련 문서 조사 후 내용 정리
Failure Modes (2)	Major Phenomena involved	phenomena description	(박종운/윤선홍/김등하)	(김환열)	(하광순)	natural circulation within RPV
Loss of core integrity	core heatup	(전반적인 현상 설명)	전출력 / 정지저출력 특성 정리			
		(김동하/정법동/홍성완)	중수로 고유 현상을 관련 항목에 정리 (등일, 무관, 고유특성)			reflooding issue 에 대한 내용 언급 위치 여기 또는 SAMG action 칼럼 ?)
	cladding oxidation&melting	less heat transfer to coolant	외부로부터 바닷물을 in-vessel injection시 영향 등			
		decay heat distribution				oxidation by air oxidation for high burnup fuel
		steam flow (rich/starvation)				
		available cladding mass				spatial growth of molten pool in core?
	channel blockage & molten pool formation	excess heat for melting				
		hydrogen generation				corium pool failure modes
		fuel relocation				
	corium delivery to LP	refreezing				
		flow area reduction				
		blocked channel reopening				
	heat loss to surroundings	corium flow to core support plate				
		core support plate failure				
	재임계	lateral heat loss (shroud/RPV wall)				
		upper/lower heat loss (upper/lower HS)				
	reflooding (core)					

# PiRT 정보 활용 예(1)

## • MAAP-MELCOR crosswalk (phase 1)

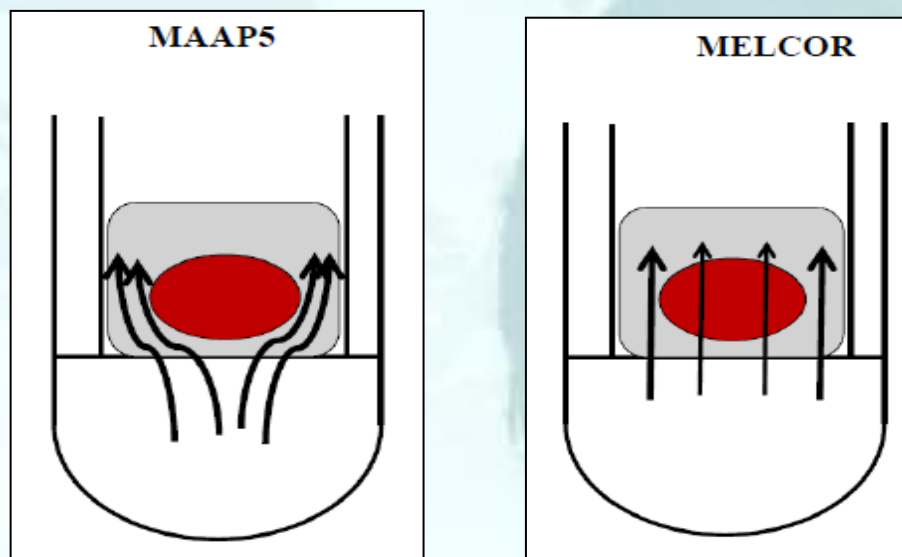
- 후쿠시마 사고 이후 사고진행에 따른 격납건물 pedestal room에서의 용융물 (냉각) 거동 비교를 위한 코드간 비교 시작
- 하부반구로부터 재배치되는 용융물의 특성을 현격히 달리 예측



## PiRT 정보 활용 예 (2)

### • Knowledge level에 관련 최신 정보 제공

- 두 코드간 근본적인 차이는 채널 봉쇄 이후 생성되는 용융물 풀의 냉각 여부로, 풀 내부로의 수증기로의 흐름에 대한 허용 여부에 따라 냉각 정도가 달리 예측됨.
- 이로 인해 그 이후의 사고진행이 서로 다르게 예측됨.



Expected Steam flows in both codes



# PiRT 정보 활용 예(3)

Failure Modes(1)	Failure Modes (2)	Major Phenomena involved	phenomena description (전반적인 현상 설명) (김동하/정법동/홍성완)	knowledge level (실험/코드/연구필) (박래준/정용훈/김)	SAMG significance /mitigation actions action/유효성/필요성	Regulatory significance (action/Law/needs) (임국희/김상백)
Loss of RPV integrity	Loss of core integrity	core heatup	less heat transfer to coolant decay heat distribution		(이영승/이결우/박래준)	
		cladding oxidation&melting	steam flow (rich/starvation) available cladding mass excess heat for melting hydrogen generation		depressurization 조치는 비상노심주입 가용, DCH 방지 목적 노심 냉각수 상실로 인한 역효과	
		channel blockage & molten pool formation	fuel relocation refreezing flow area reduction	MAAP- MELCOR Crosswalk 결과 소개		
		corium delivery to LP	blocked channel reopening corium flow to core support plate core support plate failure			
		heat loss to surroundings	lateral heat loss (shroud/RPV wall) upper/lower heat loss (upper/lower HS)			
		재임계				
		reflooding (core)			depressurization/SAMG action	

# 보고서 작성 방향 (안)

## • 보고서 초반에 PiRT 전체 틀과 중요 정보 제시

Failure Modes(1)	Failure Modes (2)	Major Phenomena Involved	phenomena description (전반적인 현상 설명) (기동화/정비/정비/정비)	knowledge level (실험/코드/연구필요성) (박래준/정준호/김정호)	SAMG significance /mitigation actions (action/요구성/필요성) (이영승/이필우/박래준)	Regulatory significance (action/Law/needs) (임국경/김상백)	Related issues (어느 위치가 적합한지?) (박준우/윤선홍/김동하)	related phenomena in containment integrity (김현열)	related phenomena in FP behavior (한광순)	Issue description (중요한 현안, 불확실한 현상 등 설명) (관련 문서 조사 후 내용 정리)
Loss of RPV integrity	Loss of core integrity	core heatup	less heat transfer to coolant decay heat distribution		depressurization 조치는 비상노심주입 가동 DCH 방지 측면 노심 냉각수 상실로 인한 연효과		전술적 / 정지저출력 특성 정리 항수로 고유 현상을 관련 항목에 정리 (동일, 무관, 고유특성) 외부로부터 바닷물을 in-vessel injection시 영향 등			natural circulation within RPV
		cladding oxidation&melting	steam flow (rich/starvation) available cladding mass excess heat for melting hydrogen generation							reflooding issue 에 대한 내용 언급 위치 여기 또는 SAMG action 일할 ?
		channel blockage & molten pool formation	fuel relocation refreezing flow area reduction							oxidation by air oxidation for high burnup fuel
		corium delivery to LP	blocked channel reopening corium flow to core support plate core support plate failure							spatial growth of molten pool in core?
		heat loss to surroundings	lateral heat loss (shroud/RPV wall) upper/lower heat loss (upper/lower HS)							corium pool failure modes
		재일계 reflooding (core)			depressurization/SAMG action					
	Loss of lower head integrity	lower plenum water behavior	water inventory (water level) corium delivery condition heat transfer from core to lower plenum coolant convection radiation							재일계 가능성 언급? molten pool formation?
		lower head heatup	corium pool configuration 2 layer 3 layer							characteristics of corium arrival in lower head debris bed behavior (coolable or not?)
			corium pool coolability water ingress natural circulation inside pool heat transfer from corium pool to lower head decay heat pool heat transfer correlation heat loss to ex-vessel (ERVC)							pool heat transfer to the wall
		lower head failure	global failure (creep) penetration failure focusing effect (local)							effect of penetration failure
		재일계 quenching (lower plenum)								
		HPME			depressurization					

## • 상세 내용은 보고서에 수록, PiRT도 세분화하여 수록

# 보고서 목차 (안)

## 목 차

### 제1장 서론

제1절 배경 및 필요성

제2절 목적 및 내용

### 제2장 노내 중대사고 진행 거동(overview)

제1절 early phase

1. loss of coolant accident

2. core heatup and uncover

3. cladding oxidation and melting

제2절 late phase

1. channel blockage and molten pool formation

2. corium relocation to lower nodes and lower plenum

제3절 RPV/RCS boundary failure

1. lower head corium cooling and lower head failure

2. RCS boundary failure due to natural circulation

### 제3장 현안 및 평가

제1절 Loss of RPV integrity

1. Loss of core integrity

가. core heatup

(1) Phenomena description

(2) Related phenomena in containment integrity

(3) Related phenomena in FP behavior

(4) Significance on issue

(5) SAMG action

(6) Regulatory aspects(Rule making)

나. cladding oxidation and melting

(1) ~ (6)

다. channel blockage and molten pool formation

(1) ~ (6)

라. corium delivery to lower plenum

(1) ~ (6)

마. heat loss to surroundings

(1) ~ (6)

바. 재임계 및 reflooding

(1) ~ (6)

### 2. Loss of lower/upper head integrity

가. lower plenum water behavior

(1) Phenomena description

(2) Related phenomena in containment integrity

(3) Related phenomena in FP behavior

(4) Significance on issue

(5) SAMG action

(6) Regulatory aspects(Rule making)

나. lower head heatup

(1) ~ (6)

다. lower head failure

(1) ~ (6)

라. 재임계 및 quenching

(1) ~ (6)

마. HPME

(1) ~ (6)

바. upper head failure

(1) ~ (6)

### 3. Recovery actions

가. depressurization

(1) Phenomena description

(2) Related phenomena in containment integrity

(3) Related phenomena in FP behavior

(4) Significance on issue

(5) SAMG action

(6) Regulatory aspects(Rule making)

나. In-vessel injection

(1) ~ (6)

다. ex-vessel cooling

(1) ~ (6)

### 제2절 Loss of RCS boundary

1. Temperature(and/or pressure) induced RCS boundary failure

가. natural circulation

(1) Phenomena description

(2) Related phenomena in containment integrity

(3) Related phenomena in FP behavior

(4) Significance on issue

(5) SAMG action

(6) Regulatory aspects(Rule making)

나. Location-wise failure (S/G, surge line, hot leg)

(1) ~ (6)

2. Initial failure events

가. ISLOCA and S/G tubes failure

(1) Phenomena description

(2) Related phenomena in containment integrity

(3) Related phenomena in FP behavior

(4) Significance on issue

(5) SAMG action

(6) Regulatory aspects(Rule making)

나. PORVs and pipes break

(1) ~ (6)

### 제3절 Loss of SEP cooling

1. Natural boiloff by decay heat

2. Rapid loss of water inventory by natural disaster

### 제4절 관련 현안

1. 정지저출력 조건

2. 중수로 특성

### 제5절 현안별 DB 및 기존 코드 해석 특성

1. early phase

2. late phase

### 제4장 결론

### 제5장 참고문헌

# 마 무 리

- **Backward 방법에 따른 PiRT 구성**
  - 일차계통 경계의 건전성 확보를 목표로 기본 틀 구성.
  - 시각적 관점에서 순차적으로 기술.
- **다양한 사용자를 고려한 PiRT 구조**
  - 기본적으로는 현상 위주로 정리
  - 규제 및 사고관리, 연구 분야에서 결과물을 활용할 수 있도록 PiRT heading 추가 (regulatory significance, SAMG action, knowledge level 등)
  - 격납건물과 source term 관점에서의 연관성도 기술할 수 있도록 heading 추가 (related phenomena in containment & source term 등)
- **특정 목적에 적용하기 위한 기본 정보 수록**

경청해주셔서  
감사합니다.