

중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 작성

- 일차계통 방호 위원회 -

김 동하(dhkim8@kaeri.re.kr)

2015. 10. 28



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

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)

Challenged 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 solid layer + pool
Lower head	Global failure (Creep)	»
		High temperature creep
	Melthrough (over T)	»
		Corium pool formation Focusing effect (thermal load) Ex-vessel NC
		Penetration failure
		»
	
RCS pressure boundary pipings	Temperature induced failure	»
		NC in RCS
	PORV open	»
	
	Out of containment piping break	»
		Interface LOCA
SGTR	»	
	Multiple SGTR Isolation failure	

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	hpme	ablation	thermal load	corium pool configuration	heat up
			safety injection	TI SGTR	creep(local)		corium composition and property	산화
				TI PZR	creep(global)		corium mass	재배치
				TI hot leg	penetration		재임계	blockage
			instrument 보강		melt through	pressure		
		heat		thermal load		외벽냉각		
	rds 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) (김동하/정법동/홍성완)	(실험/코드/연구필) (박래준/정용훈/김)	(action/유효성/필요성)	(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			
		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			
	lower head failure	재임계	heat transfer from corium pool to lower head				
			decay heat				
			pool heat transfer correlation				
			heat loss to ex-vessel (ERVC)				
			global failure (creep)				
	quenching (lower plenum)	HPME	penetration failure				
			focusing effect (local)				
	Upper head failure						
	in-vessel SA						
	mitigating systems	Depressurization					
	availability						
	(recovery action 항목 추가	in-vessel injection	reflooding (core)		loss of core geometry		
			quenching (lower plenum)		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			
Loss of SFP Cooling	Initial Events	ISLOCA				
		PORV(SRV)				
		SG tubes				
		Pipes				

제안된 PiRT (4)

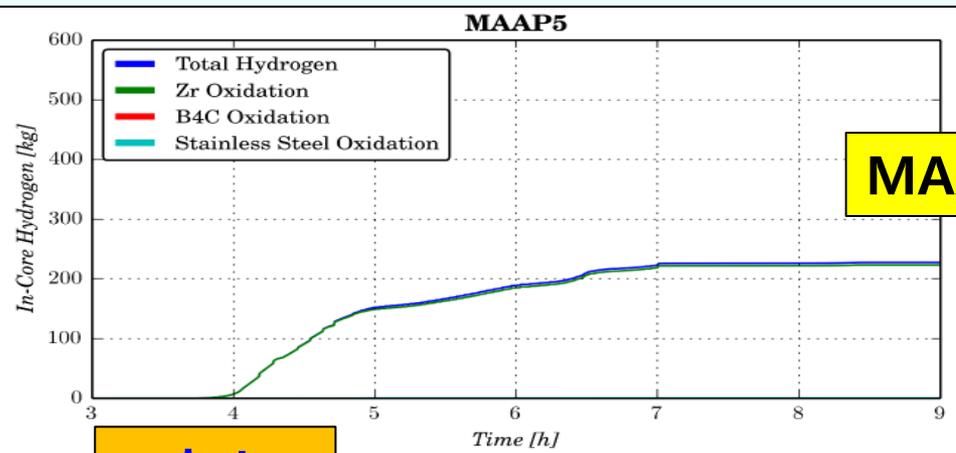


Failure Modes (2)	Major Phenomena involved	Regulatory significance	Related issues (어느 위치가 적합한지?)	related phenomena in containment integrity	related phenomena in FP behavior	Issue description (중요한 현안, 불확실한 현상 등 설명) 관련 문서 조사 후 내용 정리
		phenomena description (전반적인 현상 설명) (김동하/정법동/홍성완)	(박종운/윤선홍/김동하)	(김환열)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

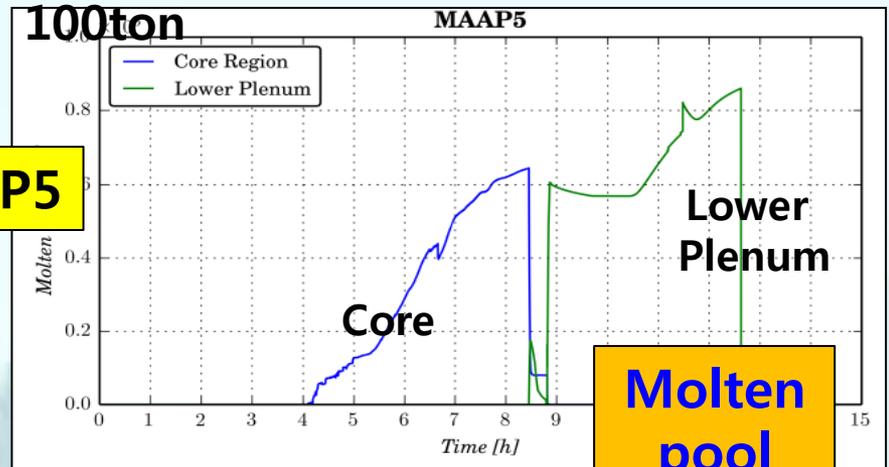
PiRT 정보 활용 예(1)

• MAAP-MELCOR crosswalk (phase 1)

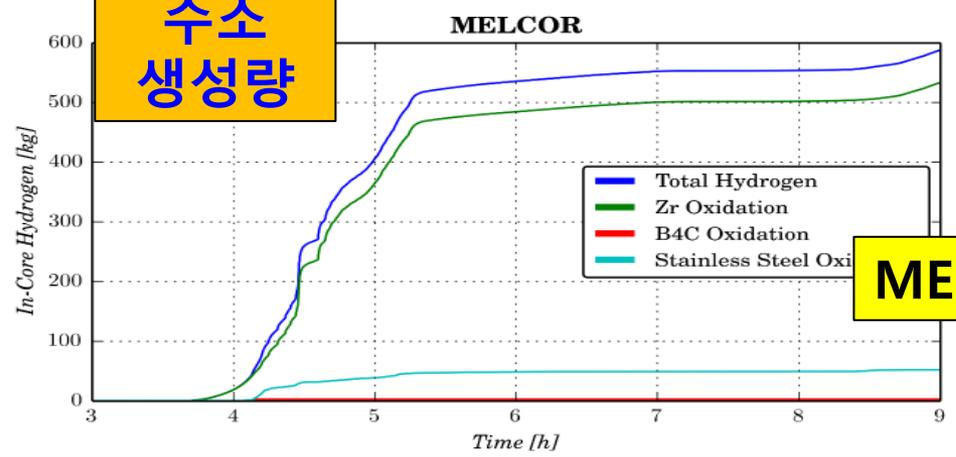
- 후쿠시마 사고 이후 사고진행에 따른 격납건물 pedestal room에서의 용융물 (냉각) 거동 비교를 위한 코드간 비교 시작
- 하부반구로부터 재배치되는 용융물의 특성을 현격히 달리 예측



MAAP5

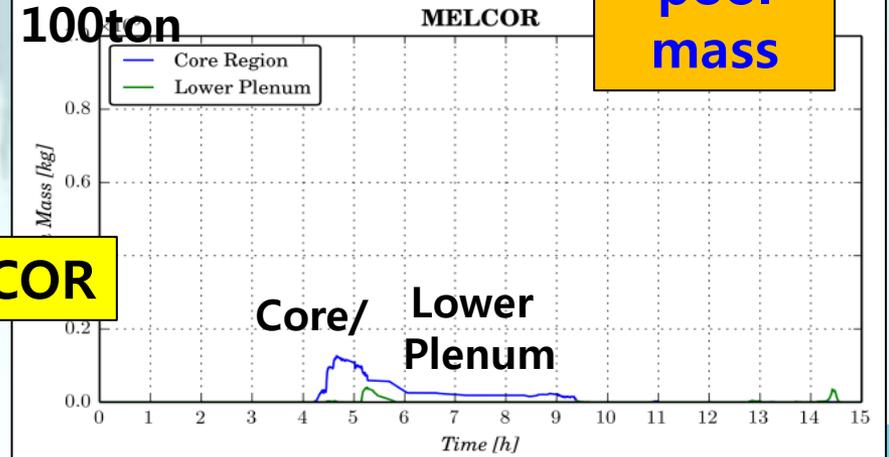


Molten pool mass



수소 생성량

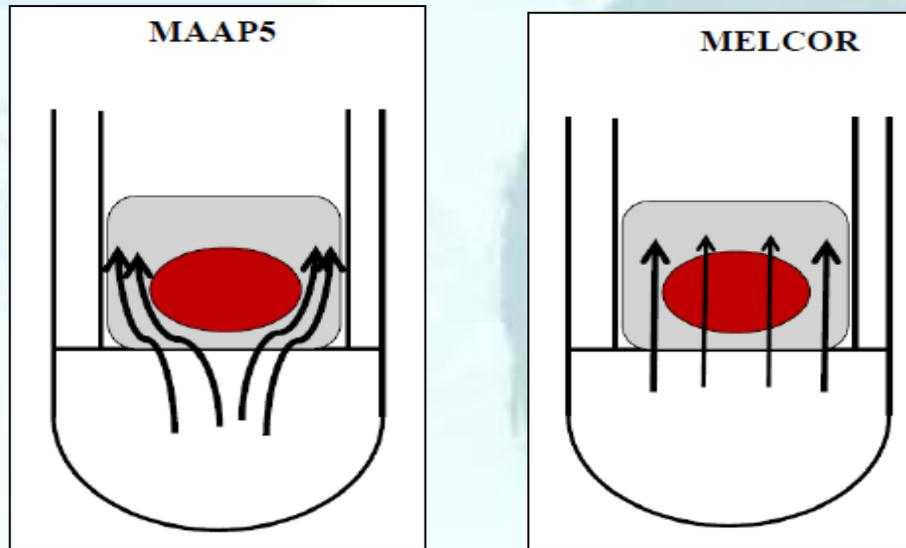
MELCOR



Molten pool mass

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) (김동하/정병동/홍성원)	knowledge level (실험/코드/연구필요성) (박래준/정승훈/김진동)	SAMG significance /mitigation actions (action/유보성/필요성)	Regulatory significance (action/Law/needs) (임국경/김상백)	Related issues (어느 위치가 적합한지?) (박종운/윤성훈/김동하)	related phenomena in containment integrity (김형일)	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		(이영승/이길우/박리준) depressurization 조치는 비상노심주입 가동 DCH 발지 숙련 노심 냉각수 상실로 인한 연효과		연출력 / 정지저출력 특성 정리 방수로 고유 현상을 관련 항목에 정리 (동원, 무관, 고유특성) 인부로부터 바닷물을 in-vessel injection시 영향 등			natural circulation within RPV reflooding issue 에 대한 내용 언급 위치 (여기 또는 SAMG action 포함 ?) oxidation by air oxidation for high burnup fuel
		cladding oxidation&melting	steam flow (rich/starvation) available cladding mass excess heat for melting hydrogen generation							oxidation by air oxidation for high burnup fuel
		channel blockage & molten pool formation	fuel relocation refreezing flow area reduction							spatial growth of molten pool in core?
		corium delivery to LP	blocked channel reopening corium flow to core support plate core support plate failure							corium pool failure modes
		heat loss to surroundings	lateral heat loss (shroud/RPV wall) upper/lower heat loss (upper/lower HS)							
		재입계 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							
		lower head heatup	corium pool configuration 2 layer 3 layer corium pool coolability water ingestion natural circulation inside pool heat transfer from corium pool to lower head decay heat pool heat transfer correlation heat loss to ex-vessel (ERVC)							재입계 가능성 연구? molten pool formation? characteristics of corium arrival in lower head debris bed behavior (coolable or not?) pool heat transfer to the wall
		lower head failure	global failure (creep) penetration failure focusing effect (local)							effect of penetration failure
		재입계								
		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 증대사고 진행 거동(overview)

제1절 early phase

1. loss of coolant accident

2. core heatup and uncovering

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

- **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.