

피동안전계통 기술혁신 워크숍
한국원자력연구원 국제원자력연수관 대강당
2022.07.08일(금) 9:30~18:00

대형 원전 피동안전계통 성능분석

홍 순 준



|주|미래와도전

FNC Technology Co., Ltd.

www.fnctech.com



목 차

- I** 개요
- II** PAFS 성능 분석
- III** Passive ECCS 성능 분석
- IV** PCCS 성능 분석
- V** 맺음말



1. 개요

01. 개요

■ 피동안전계통 원리

(1) 압력차 | (2) 중력: ① 낙하 ② 자연순환 | (3) 관성: ① 기계적 ② 열적

■ 피동안전계통 유형

(노심 잔열 제거)

- 1) 축압 주입
- 2) 중력 주입 (폐쇄 유로)
- 3) 중력 주입 (개방 유로)
- 4) SG 자연순환 냉각
- 5) 단상 자연순환 잔열제거 냉각
- 6) 이상 자연순환 격리응축기 냉각
- 7) 집수조 자연순환

■ 피동안전계통 유형

(격납건물 냉각)

- 1) 압력억제수조
- 2) 격납건물 냉각계통
- 3) 피동살수계통
- 4) 피동열침원: ① 고체 ② 상변화

01. 개요

■ 피동계통 주요 열수력 현상: 12 개 현상

- 1) Behavior in large pools of liquid
- 2) Effects of non-condensable gases on condensation heat transfer
- 3) Condensation on containment structures
- 4) Behavior of containment emergency systems (PCCS, external air cooling, etc.)
- 5) Thermo-fluid dynamics and pressure drops in various geometrical configurations
- 6) Natural circulation

01. 개요

■ 피동계통 주요 열수력 현상 (계속)

- 7) Steam liquid interaction
- 8) Gravity driven cooling and accumulator behavior
- 9) Liquid temperature stratification
- 10) Behavior of emergency heat exchangers and isolation condensers
- 11) Stratification and mixing of boron
- 12) Core make-up tank behavior

01. 개요

■ 우리 나라 대형원전 피동안전계통 개발

▶ PAFS (Passive Auxiliary Feedwater System)

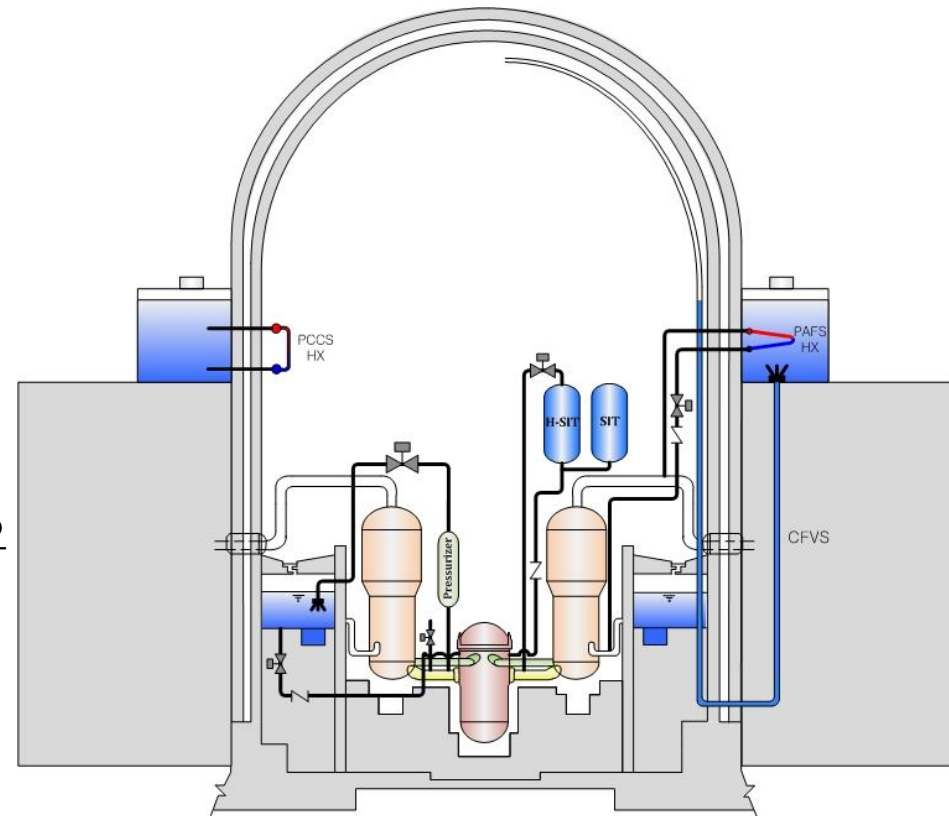
- APR+ 개발에서 채택 (2014년 표준설계 인가)
- 보조급수계통 완전 대체

▶ PECCS (Passive ECCS)

- Hybrid-SIT 와 동시 개발
 - 기존 원전 고압 사고 대처
- 향후의 iPOWER 대비
 - ADS (Automatic Depressurization System) 필요

▶ PCCS (Passive Containment Cooling System)

- 격납건물 살수 대체





2. PAFS 성능 분석

02. PAFS 성능 분석

■ 설계 개념

▶ 주요 설계 기준

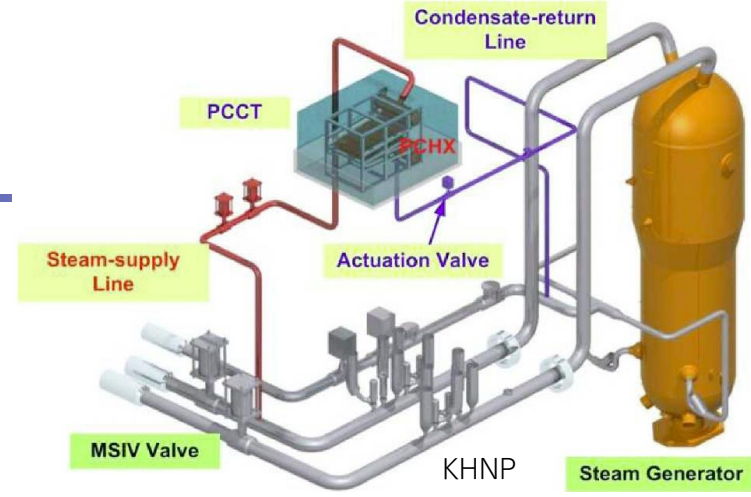
- 기존 보조급수 완전 대체
- 2계열 / 계열당 100% 용량
- 8시간(14시간) 이상 운전 (PCCT 용량)
- 원자로 정지후 5분 후의 붕괴열제거

▶ 계통 구성

- 증기공급관 / 피동응축열교환기(PCHX) /
피동응축냉각탱크(PCCT) / 응축수 회수관 /
기동밸브 등 각종 밸브

■ 작동원리: 증기발생기 자연순환 냉각

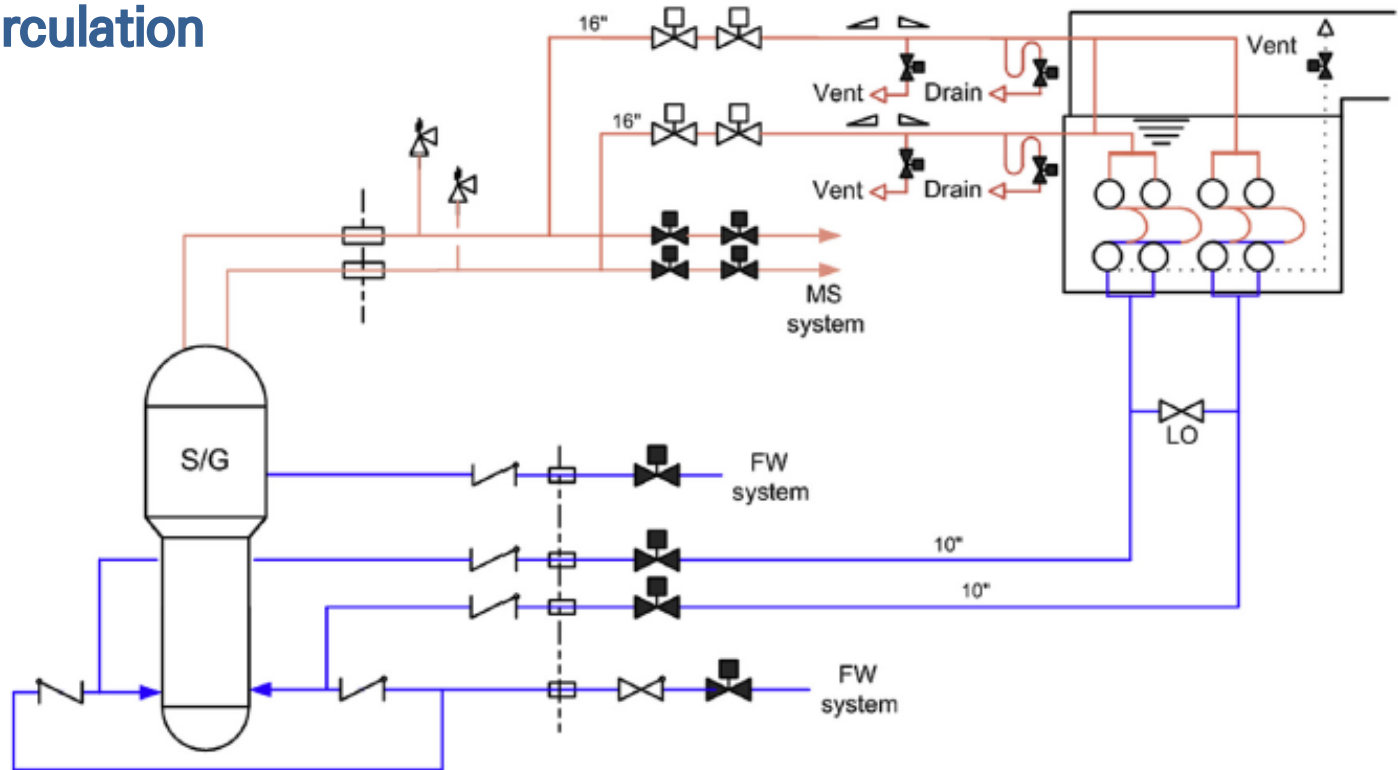
▶ 기동: 증기발생기 저수위 -> 회수관 기동밸브



02. PAFS 성능 분석

■ 핵심 열수력 현상: PIRT

- ▶ In-tube condensation
- ▶ Boiling heat transfer in outer wall of the tube
- ▶ Natural circulation



02. PAFS 성능 분석

■ 핵심 열수력 현상 모델 평가: 응축

(MARS-KS에 탑재하여 평가, Purdue)

- ▶ 유동양식 별 응축모델 예측능력 평가
- ▶ 계통해석코드 응축모델 예측능력 확인
- ▶ 최적모델 선정

• Annular flow condensation model

■ Shah (1979)

$$h = 0.023 Re_L^{0.8} Pr_L^{0.4} \left[1 + \frac{3.8}{Pr_L^{0.38}} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.76} \right] \left(\frac{k_L}{D} \right)$$

- Focus on vertical tube

■ Dobson-Chato (1998)

$$h = 0.023 Re_L^{0.8} Pr_L^{0.4} \left[1 + \frac{2.22}{X_g^{0.88}} \right] \left(\frac{k_L}{D} \right)$$

- Focus on horizontal tube

• Stratified flow condensation model

■ Chato (1962)

$$h = 0.296 \left[\frac{\rho_L (\rho_L - \rho_v) h_{fg} g D^3}{k_L \mu_L (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4} \left(\frac{k_L}{D} \right)$$

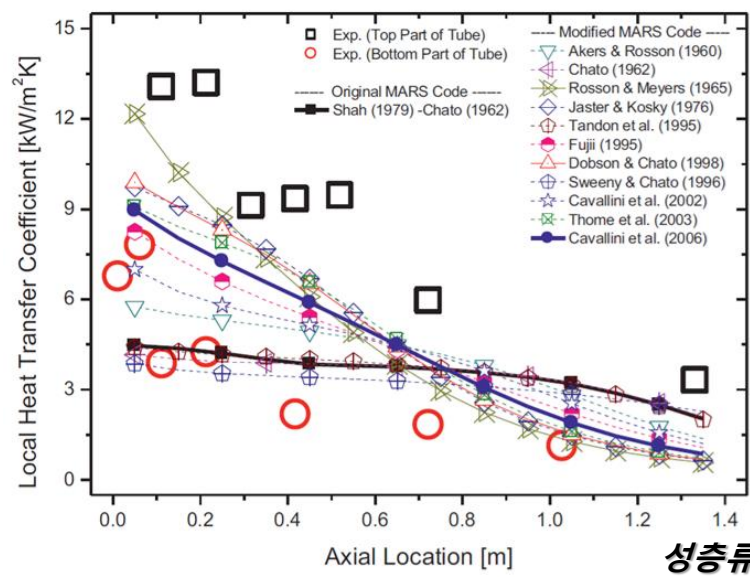
- Based on lower vapor velocity

- Neglect the heat transfer at bottom

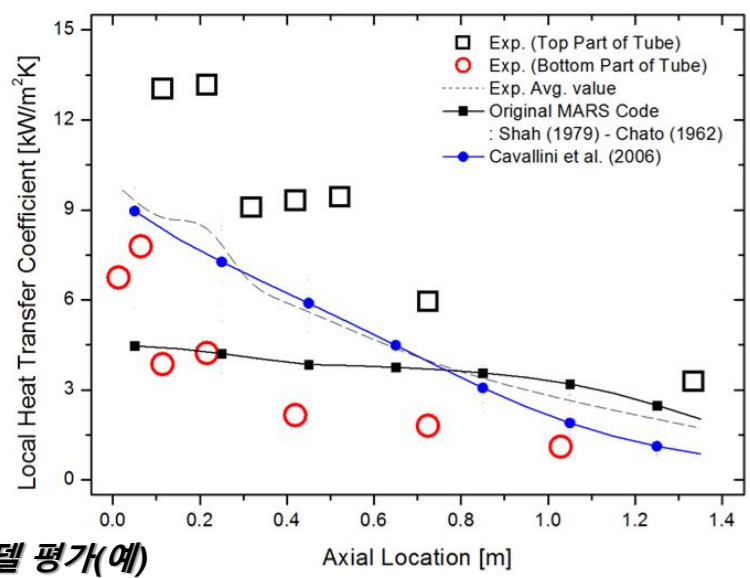
■ Cavallini et al. (2006)

$$h_{tot} = 0.725 \left[1 + 0.741 \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.332} \right]^{-1} \left[\frac{k_L^3 \rho_L (\rho_L - \rho_v) h_{fg} g}{\mu_L D (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4} + (1-x^{0.887}) h_{LO}$$

Film condensation (top) Convection (bottom)



성층류 응축모델 평가(예)

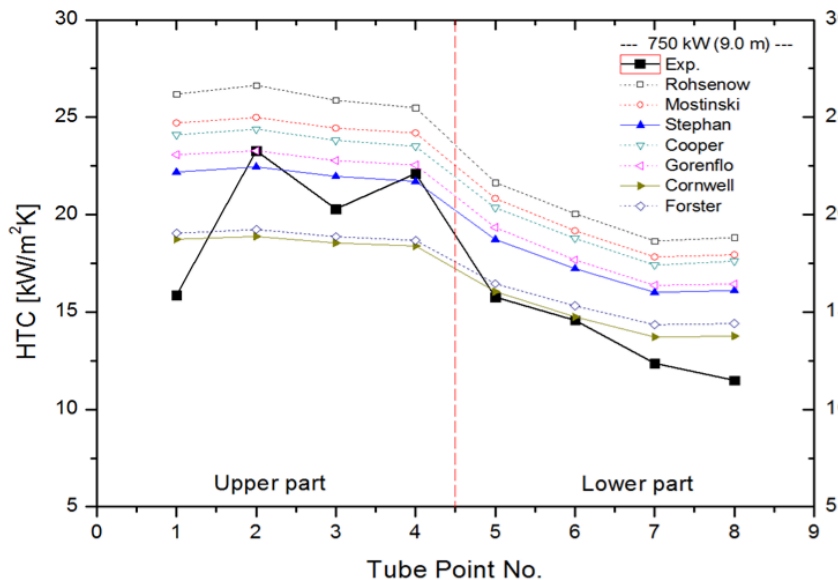
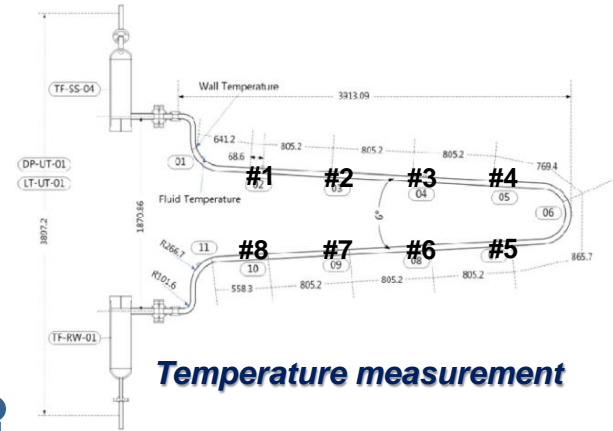


02. PAFS 성능 분석

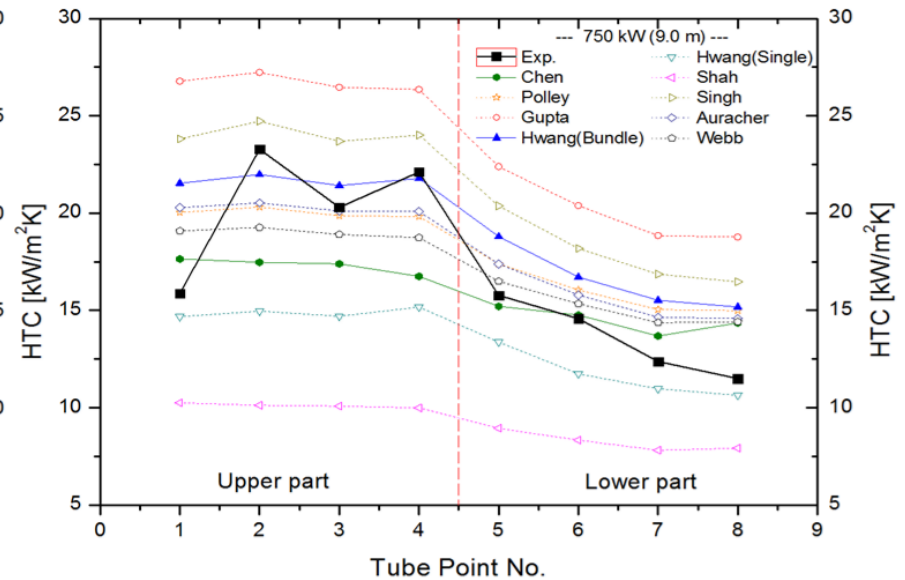
■ 핵심 열수력 현상 모델 평가: 비등

(MARS-KS, PASCAL)

- ▶ 비등열전달 모델 예측능력 평가
- ▶ 계통해석코드 응축모델 예측능력 확인
- ▶ 수조 내 U-튜브 비등 열전달 모델 개발 필요



7 Pool boiling correlations



9 Forced convective boiling correlations

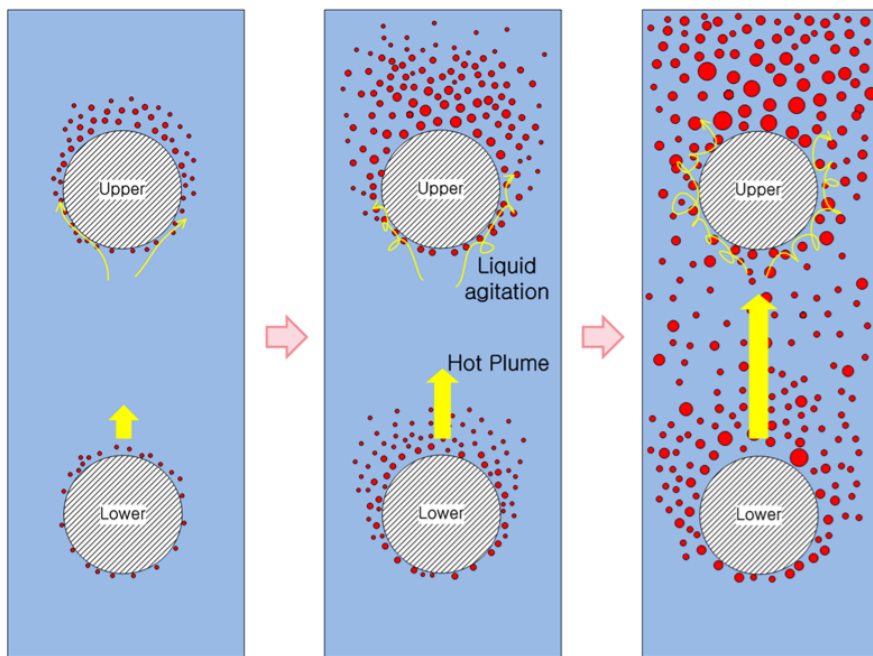
02. PAFS 성능 분석

■ 핵심 열수력 현상 모델 평가:비등

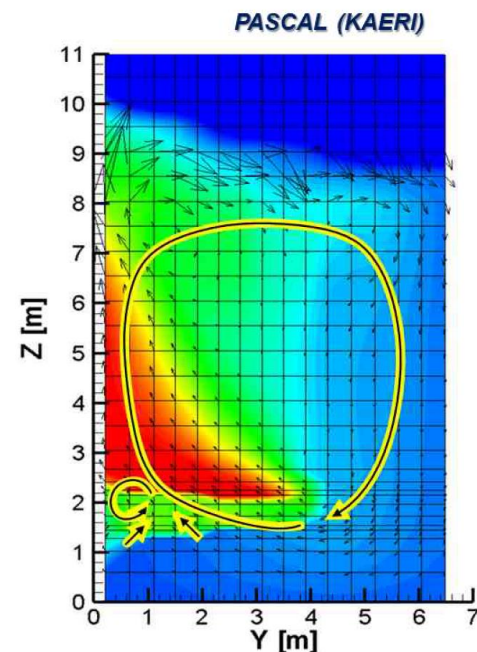
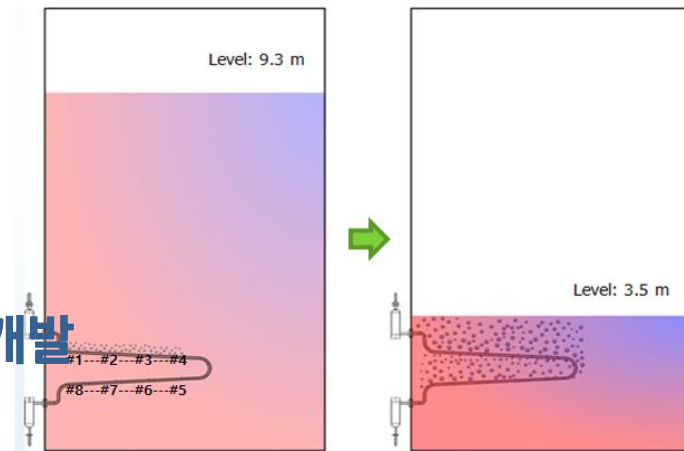
▶ 비등 열전달 메커니즘 규명

- MARS MULTID 이용 유동장 기반

▶ 수조 내 U-튜브 자연대류 비등열전달 모델 개발



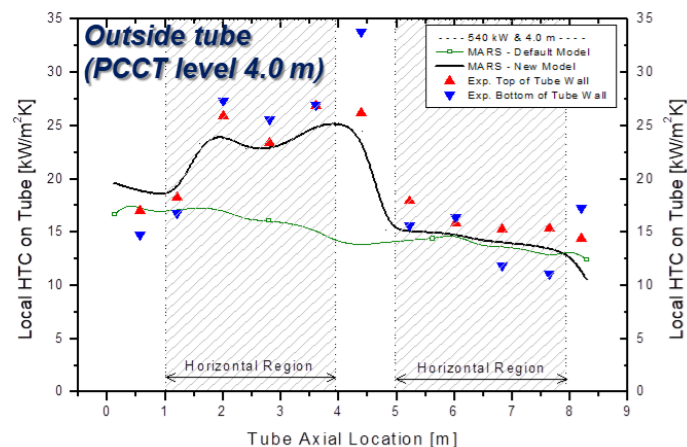
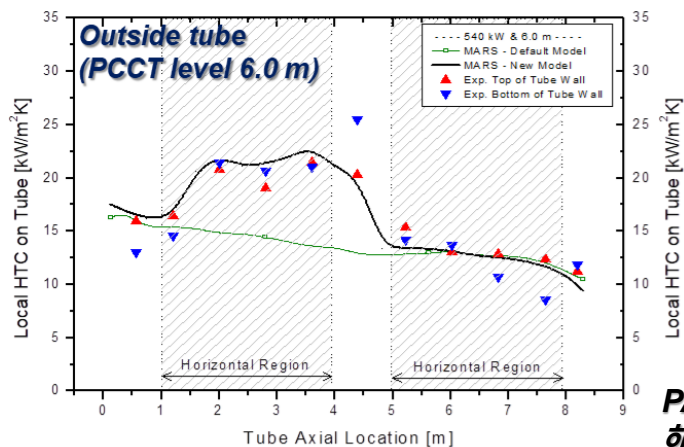
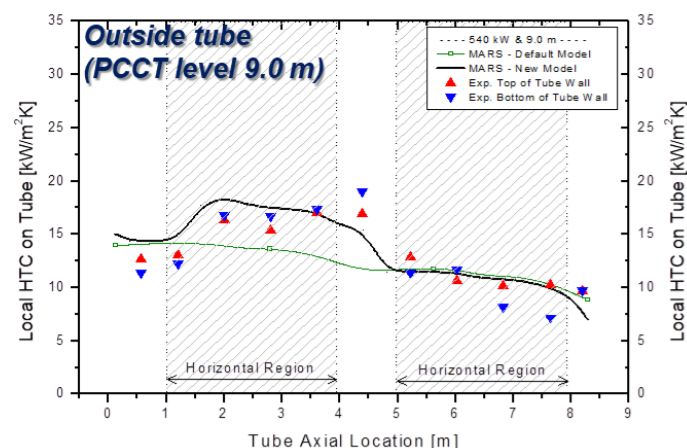
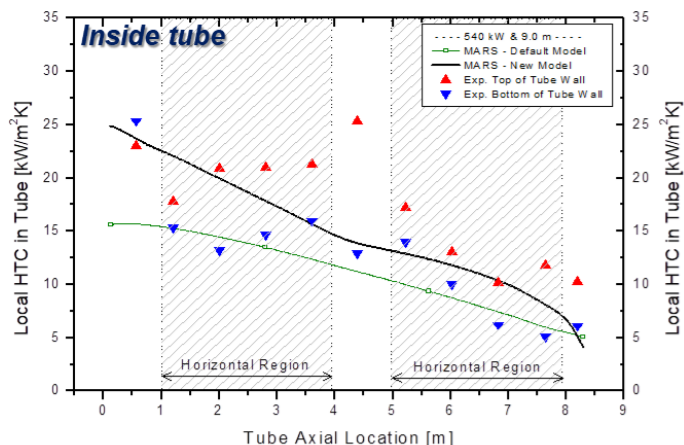
Heat transfer mechanism of PASCAL



02. PAFS 성능 분석

■ 핵심 열수력 현상 모델 평가: 응축 및 비등

▶ 응축 및 비등열전달 예측능력 평가

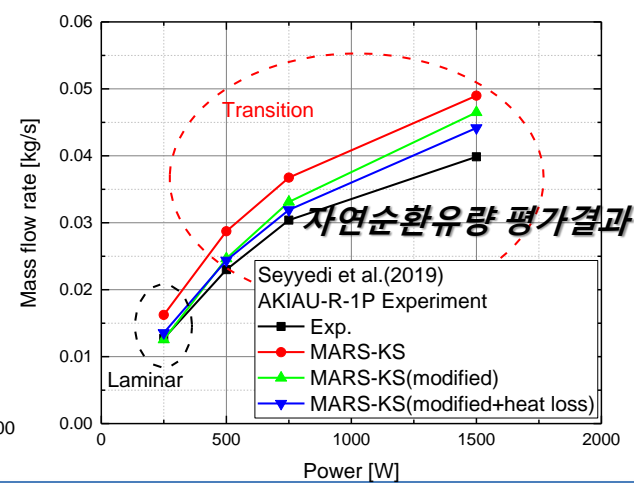
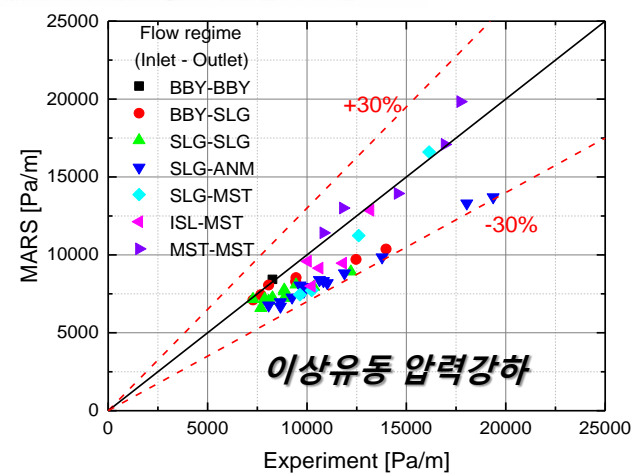
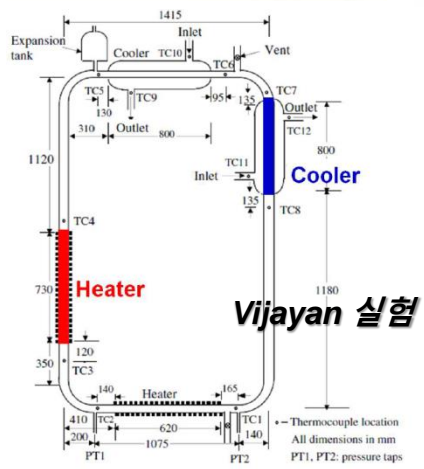
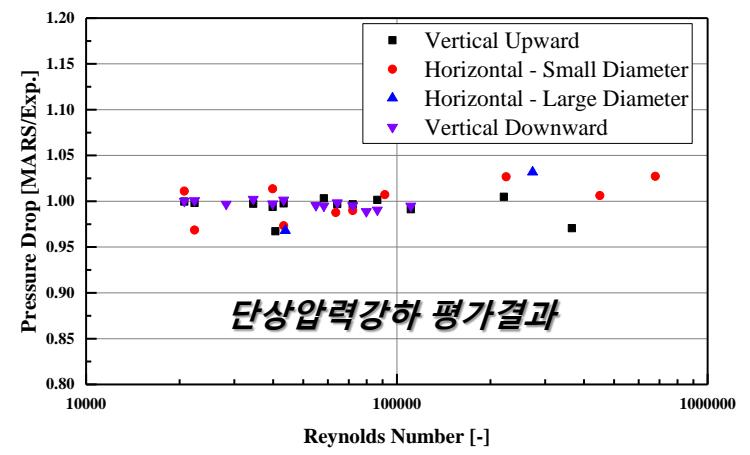
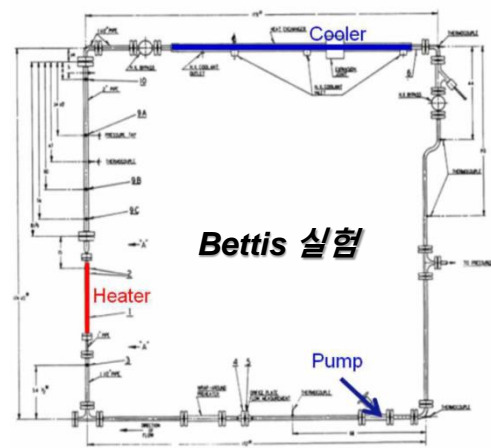
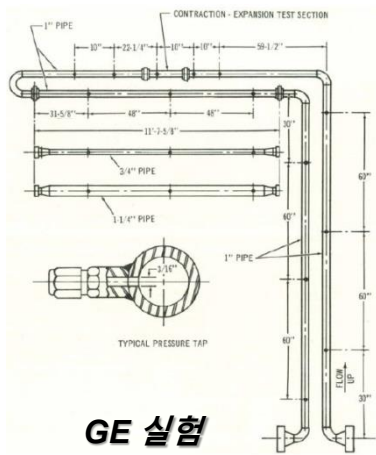


PASCAL
해석결과

02. PAFS 성능 분석

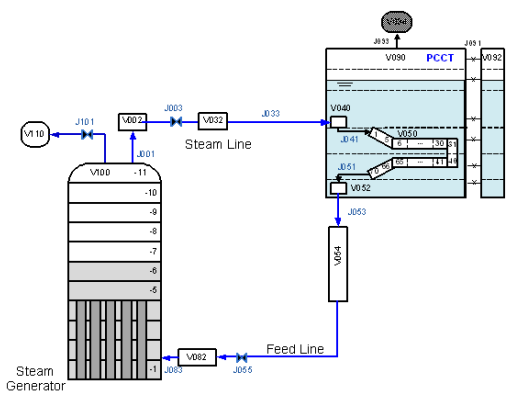
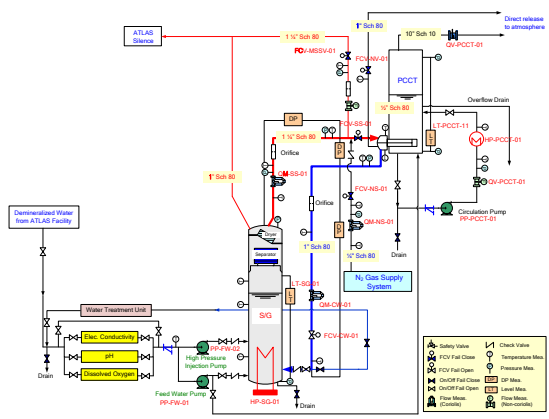
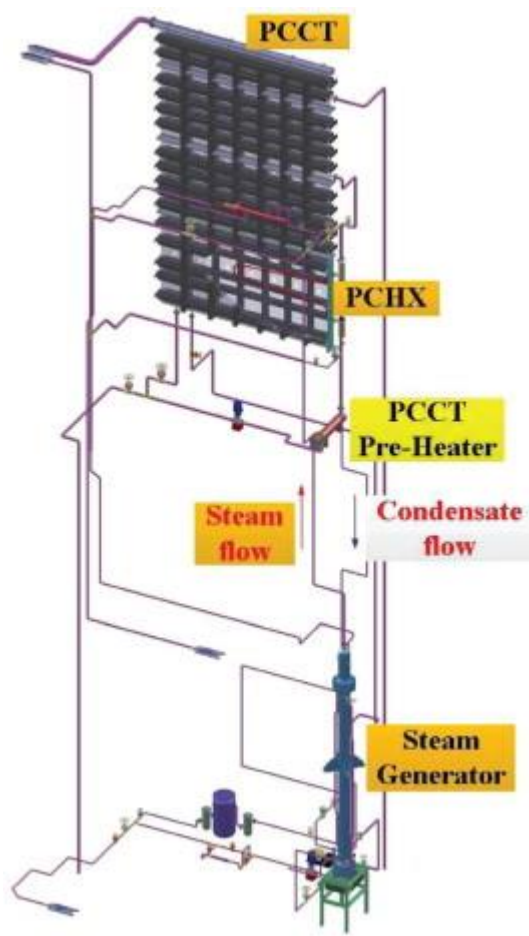
■ 핵심 열수력 현상 모델 평가 (계속)

▶ 단상 및 이상유동 압력강하 & 자연순환유량 평가 (SPACE)



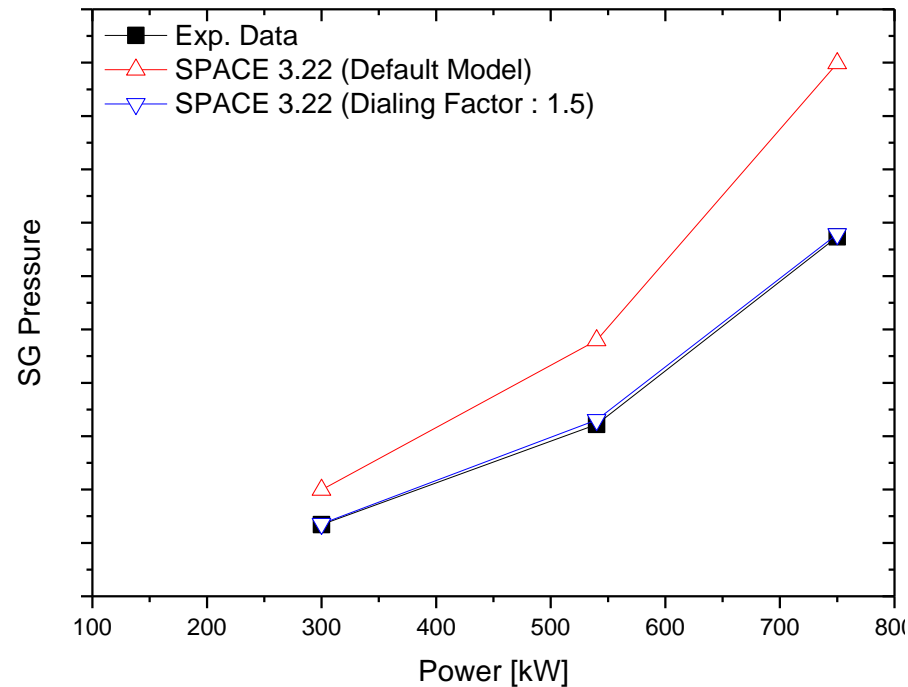
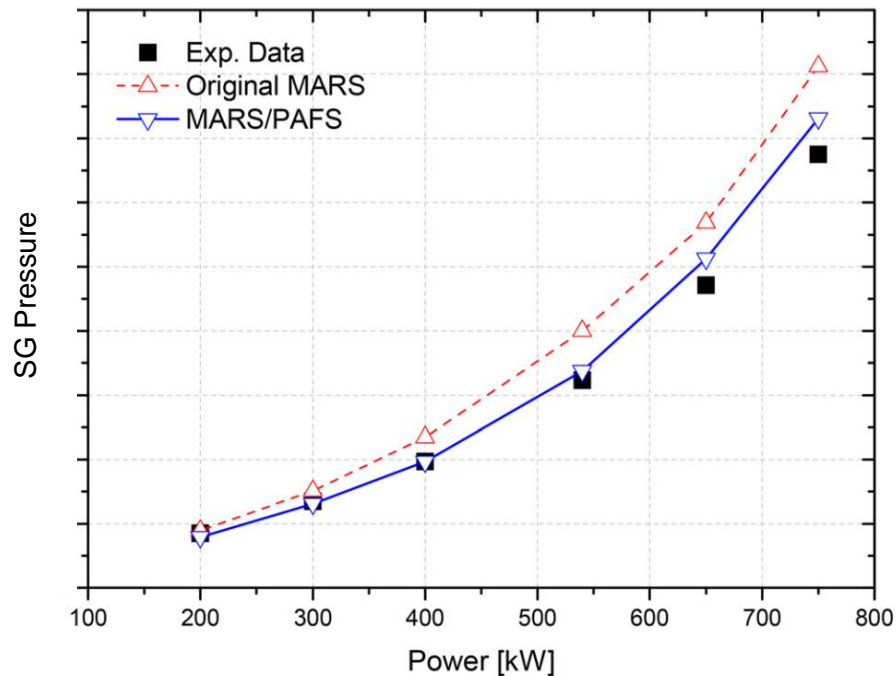
02. PAFS 성능 분석

■ 실증실험 평가: PASCAL (Full height, single tube)



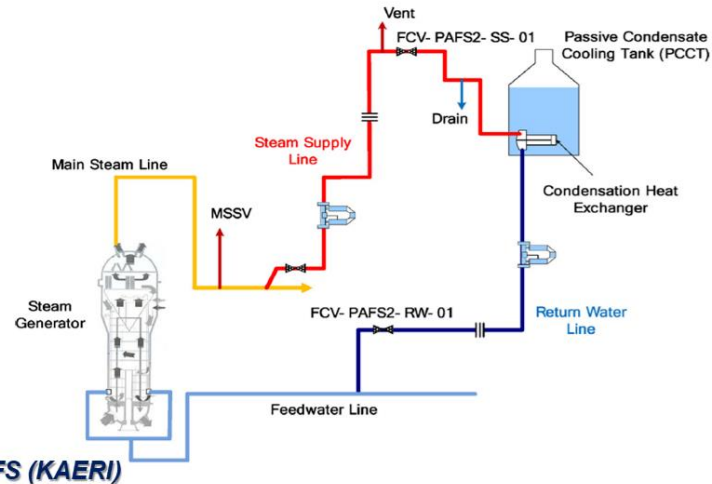
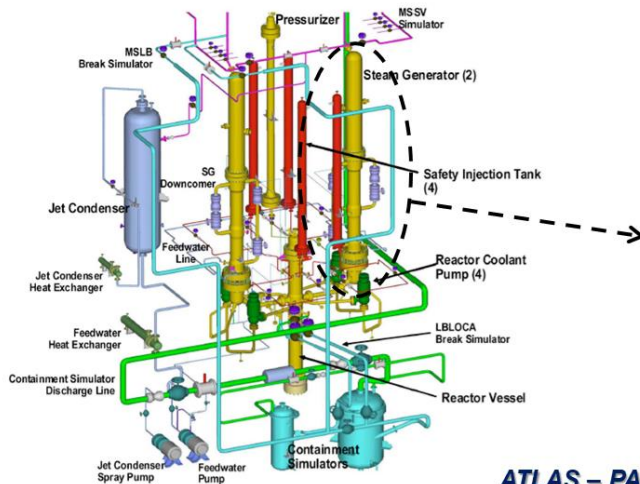
02. PAFS 성능 분석

▶ MARS-KS & SPACE 평가: PAFS 모델 및 fouling factor 입력 조정

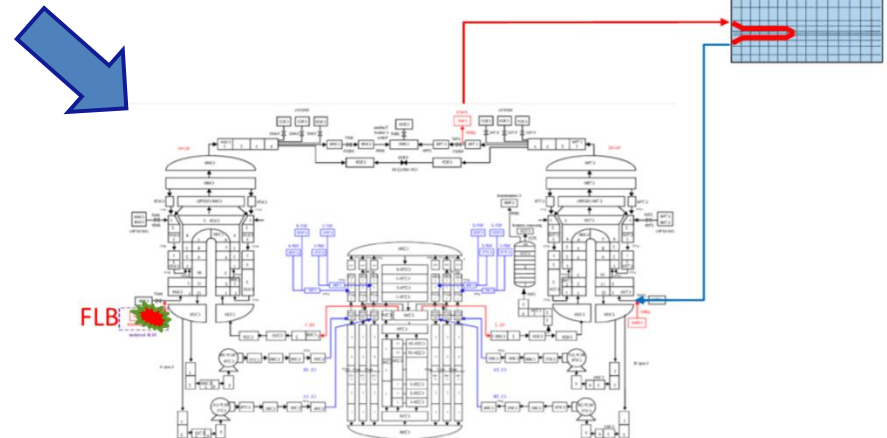
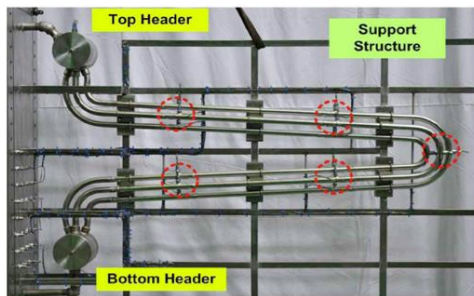


02. PAFS 성능 분석

■ 실증실험 평가: ATLAS-PAFS (Reduced height, 3 tubes)



ATLAS - PAFS (KAERI)



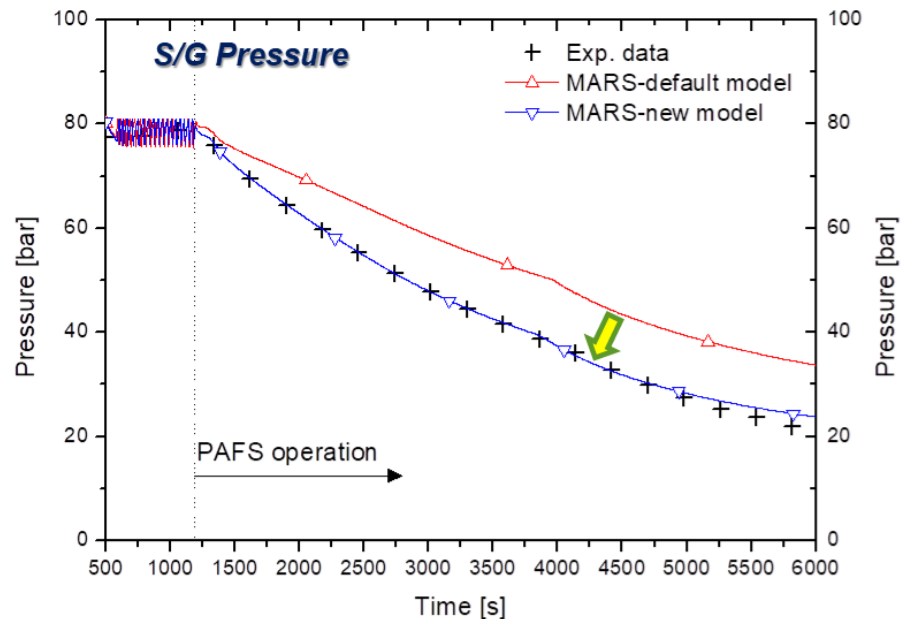
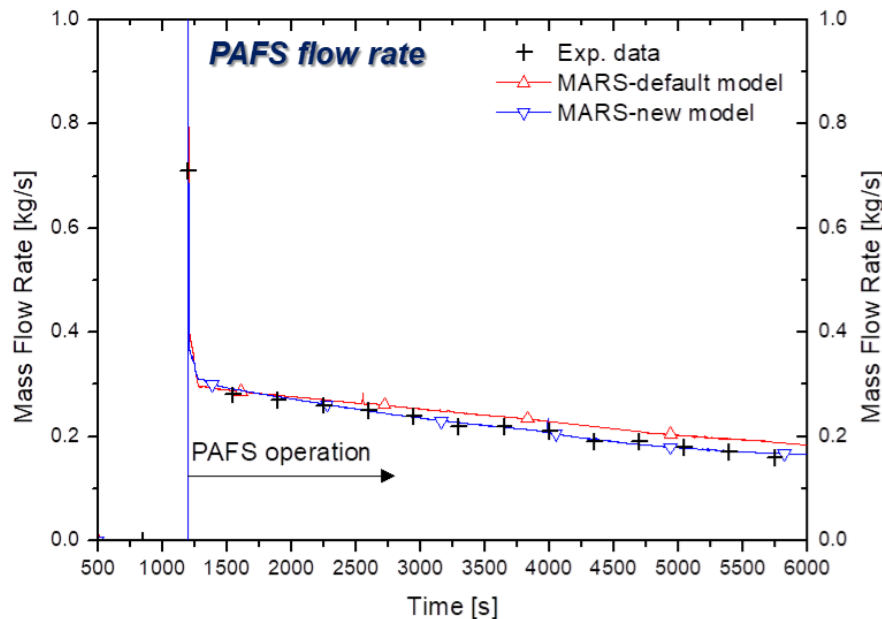
Nodalization of ATLAS-PAFS

02. PAFS 성능 분석

■ 실증실험 평가: ATLAS-PAFS

● FLB simulation

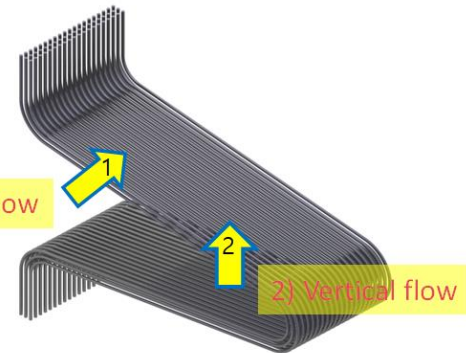
- PAFS natural circulation flow rate
- Primary and secondary pressure
 - New model predicted the Exp. S/G pressure better than default model.



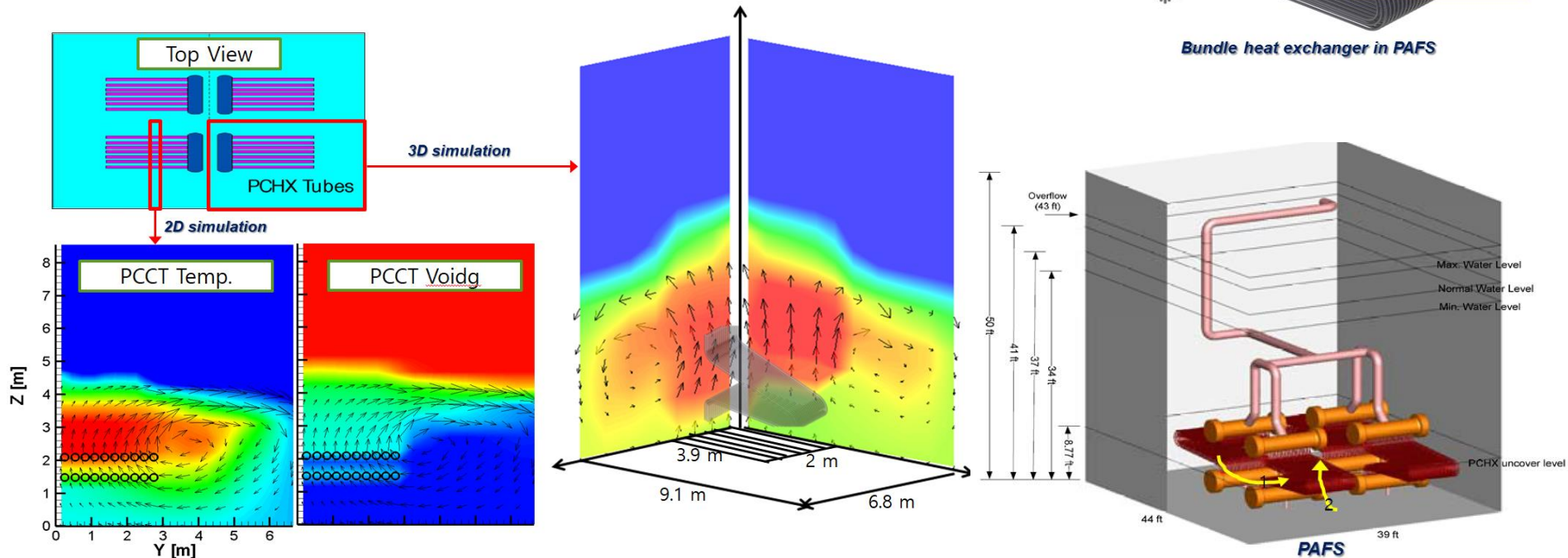
02. PAFS 성능 분석

■ PAFS 열교환기 번들 효과 검토

- Geometry
 - No. of bundle: 4 / train
 - No. of U-tube: 60 / bundle (20 X 3)
- Bundle Effect
 - Flow direction (1) → Bundle effect is large.
 - Flow direction (2) → Bundle effect is small.



Bundle heat exchanger in PAFS

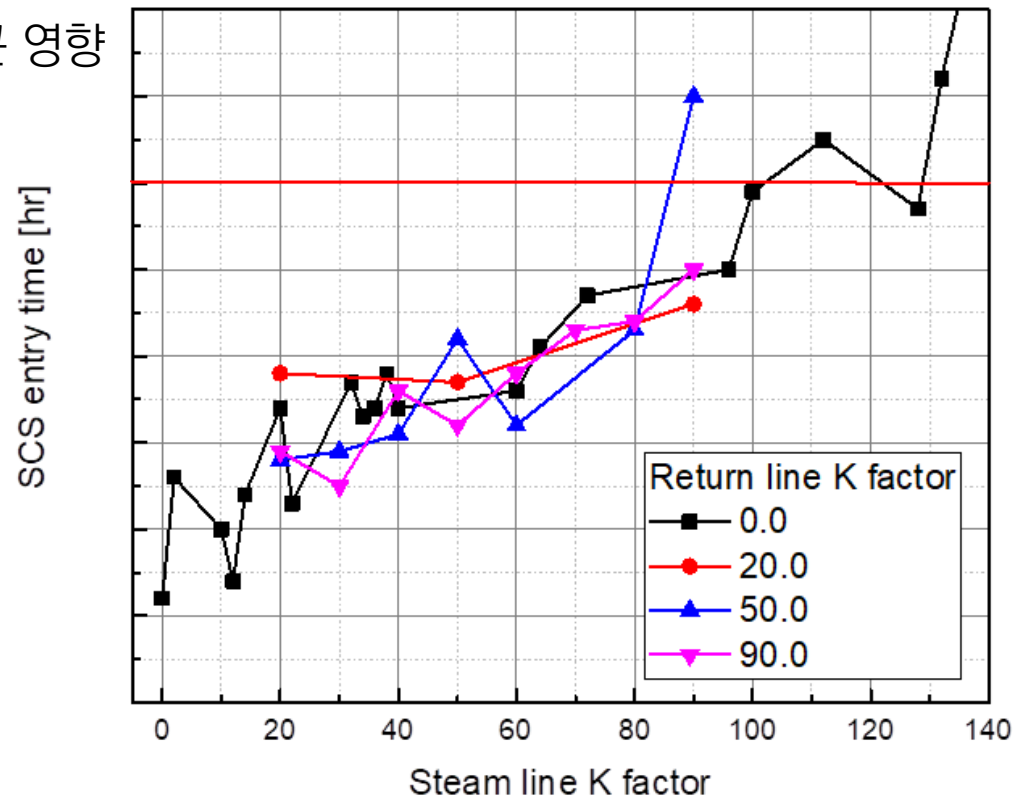


02. PAFS 성능 분석

■ 성능 분석

▶ Natural circulation 설계 특성 평가: 압력 강하 영향 (SPACE)

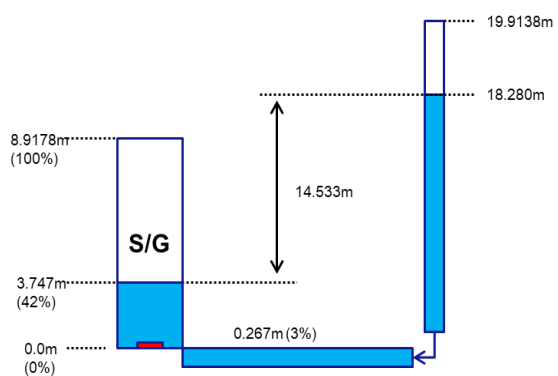
- MFLB시 정지냉각진입 시점 평가
- 증기관 압력강하가 성능에 큰 영향



02. PAFS 성능 분석

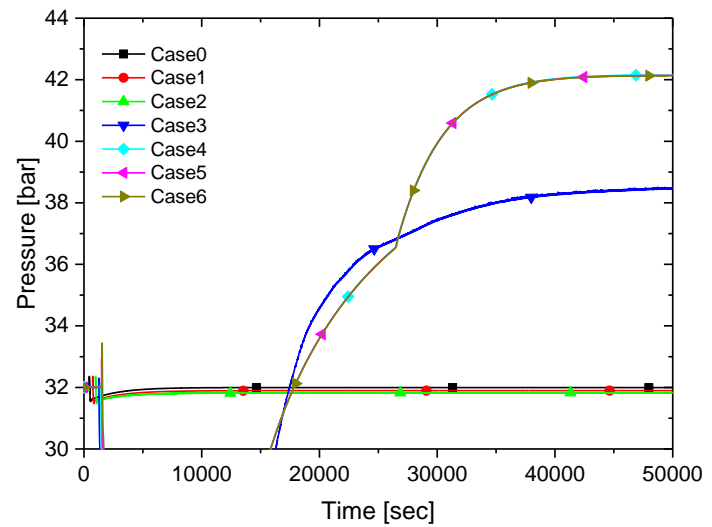
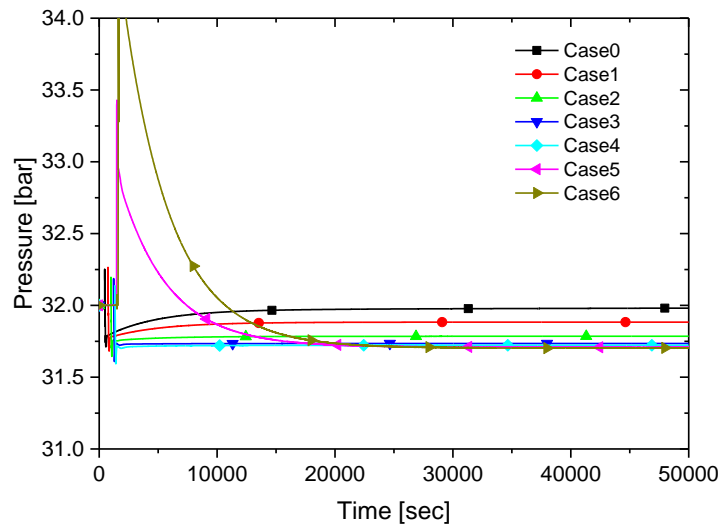
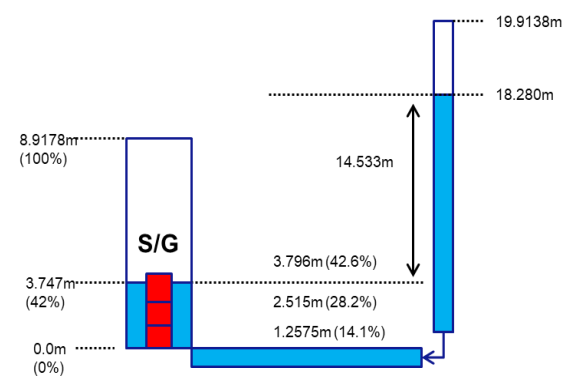
▶ SG 수위 영향: PASCAL 실험 장치로 평가 (SPACE)

<전열기 물에 잠김>



Case	증기발생기 수위 (Collapsed Water Level) [m(%)]
#0	3.747(42.0%)
#1	2.703(30.3%)
#2	1.836(20.6%)
#3	0.950(10.7%)
#4	0.508(5.7%)
#5	0.331(3.7%)
#6	0.271(3.0%)

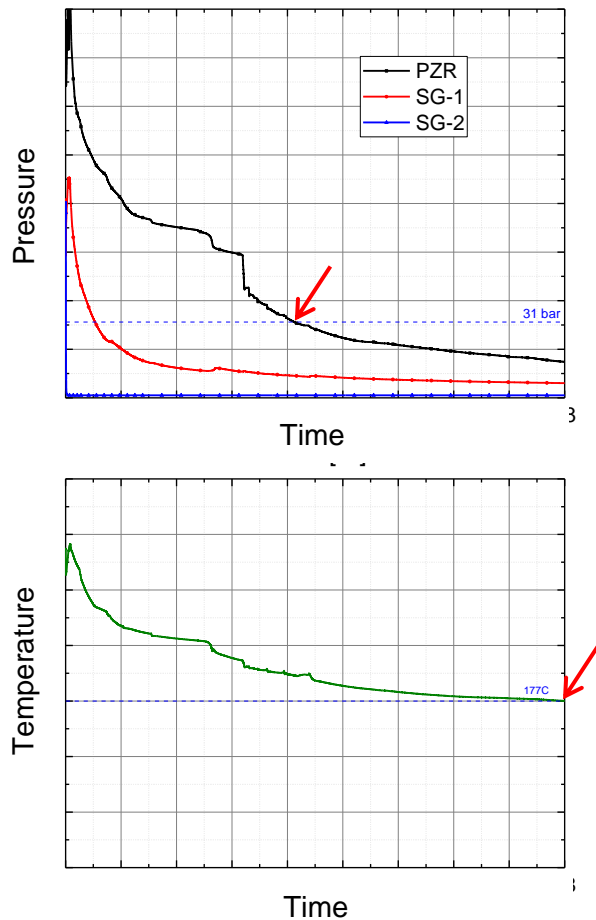
<전열기 노출>



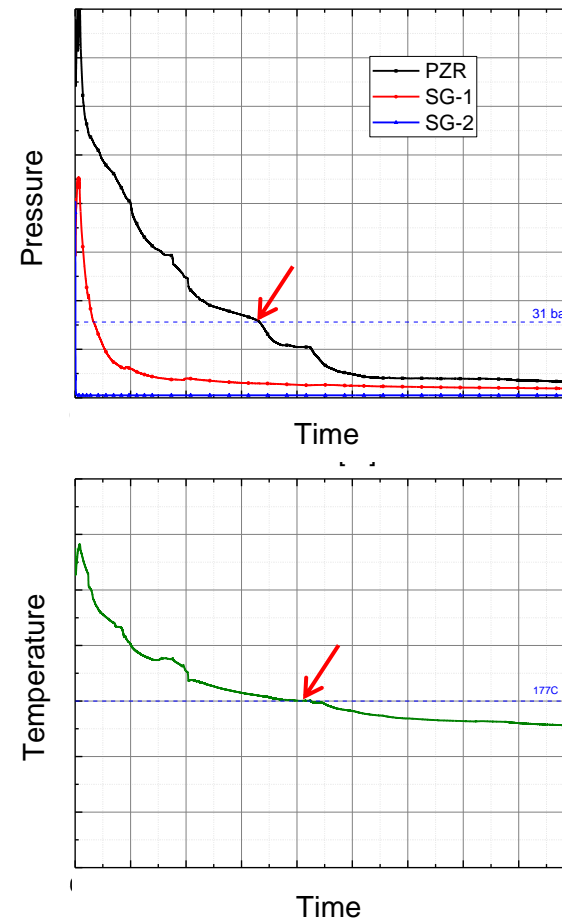
02. PAFS 성능 분석

■ 성능 분석: Main feedwater line break (EUR Rev. E 요건 만족)

Default 모델 해석결과



PAFS 모델 해석결과



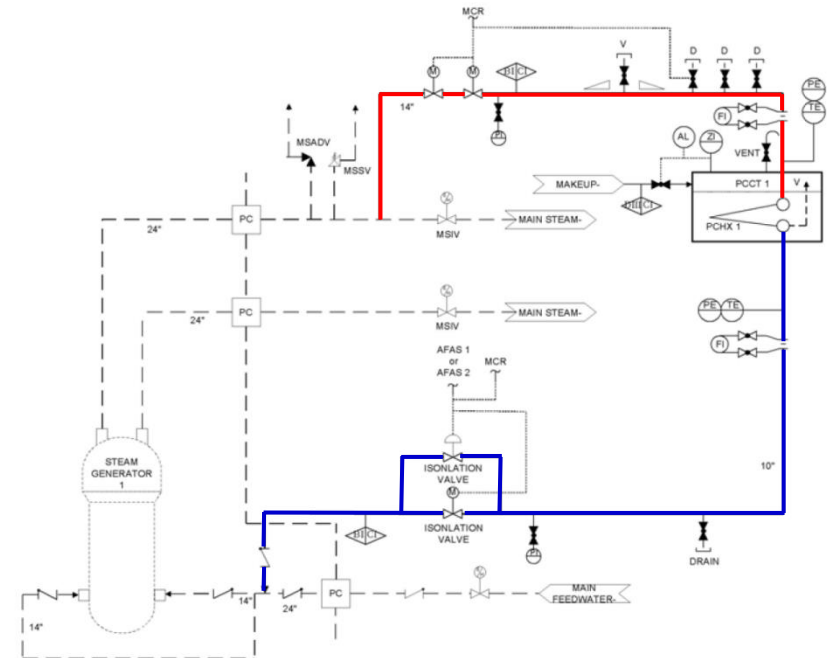
02. PAFS 성능 분석

■ 기타 현안

▶ 증기관/회수관 이중화

▶ 수격현상

- 경사 설계
- MARS코드를 이용한 열해석





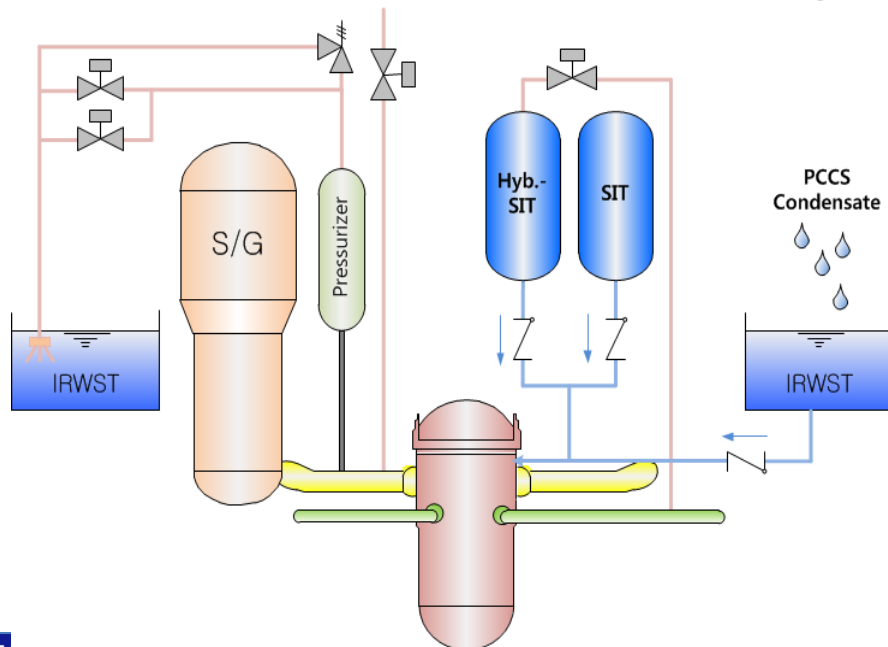
3. Passive ECCS 성능 분석

03. Passive ECCS 성능 분석

■ 설계 개념

▶ 주요 설계 기준: 개념 개발

- 피동 원전 적용
- 모든 안전주입 사용 사고 대처: SBO 포함
- SBLOCA는 PAFS 없이 대처 가능



▶ 주요 구성 요소

- 충수계통
 - 고압주입: Hybrid-SIT (압력평형 및 중력주입)
 - 중압주입: SIT (축압방식)
 - 저압주입: IRWST (중력 주입)
 - 본 분석에서는 10m 이상 수두 확보를 가정하고 RCS가 2bar 이하이면 IRWST 주입 성공 가정
- 자동감압계통
 - ADV #1 ~ #4
- 응축수회수계통: 개념 검토만
 - PCCS 및 GA 연계

03. Passive ECCS 성능 분석

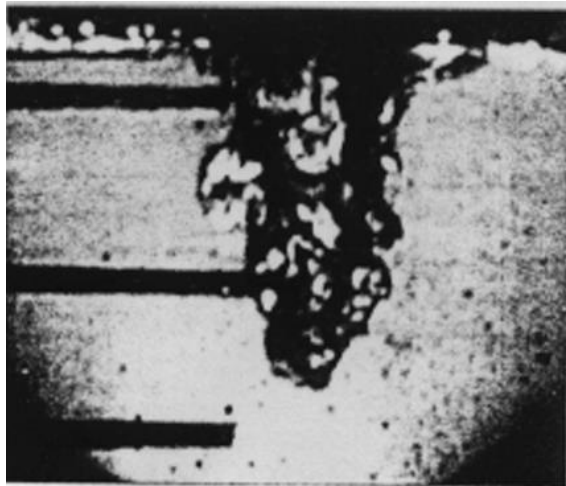
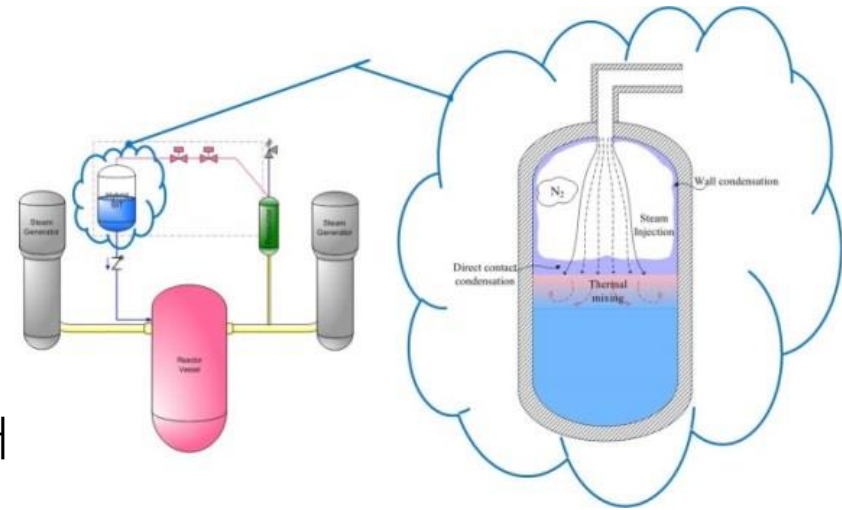
■ 핵심 열수력 현상

▶ Hybrid-SIT 가압 (압력 평형)

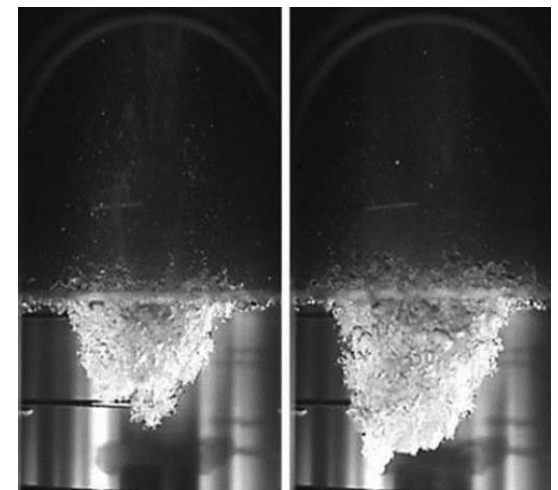
- 증기제트
- 수면에서 증기 응축: 비응축성 기체 존재
- 벽면에서 증기 응축 : 비응축성 기체 존재

▶ 중력 주입

- 폐쇄유로 / 중력주입



Steam cavity in CMT, Lee et al. 1998



Steam penetration in Hyb-SIT, Ryu et al. 2018

03. Passive ECCS 성능 분석

■ PECCS 개념 설정 및 최적해석모델링: RELAP5

▶ 충수계통

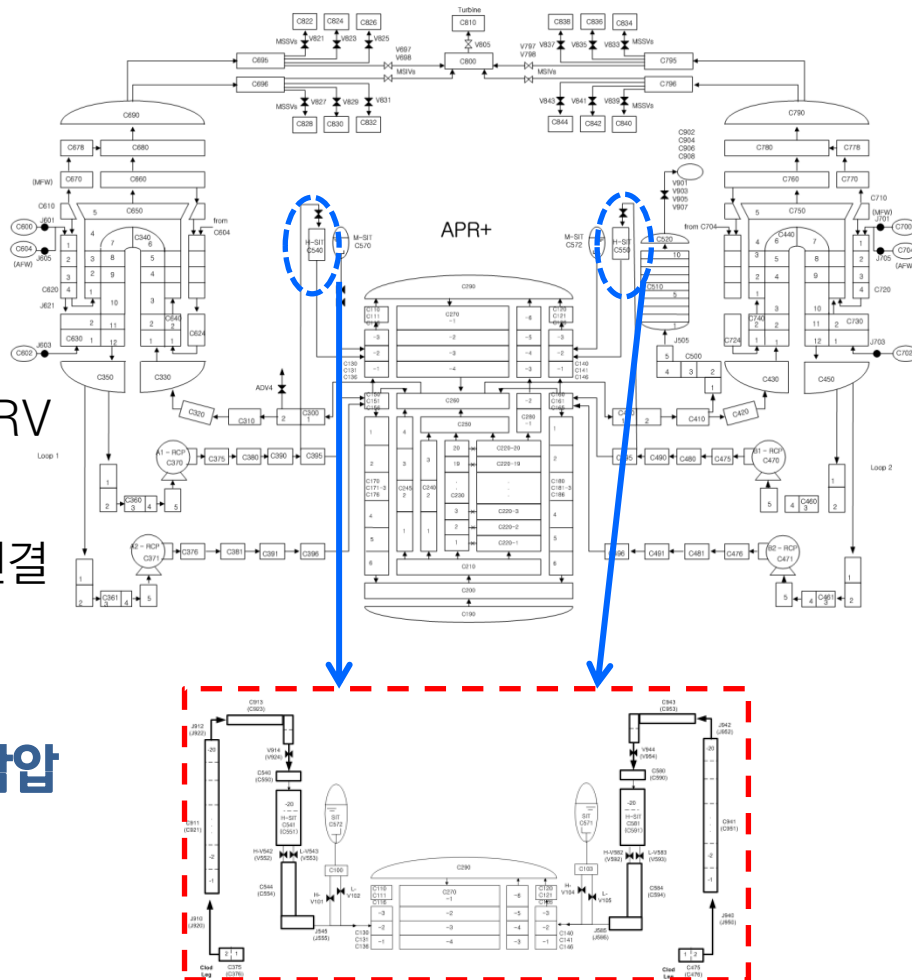
- Hyb-SIT: SIT 상부와 저온관 연결
- SIT: 기존 SIT
- IRWST (10m 수두): 모의 X

▶ 자동감압계통

- ADV #1,#2,#3 : 다단 감압 (POSRV 활용, 1 + 1 + 2)
- ADV #4 : 대구경 고온관에 직접 연결

■ 성능 요건

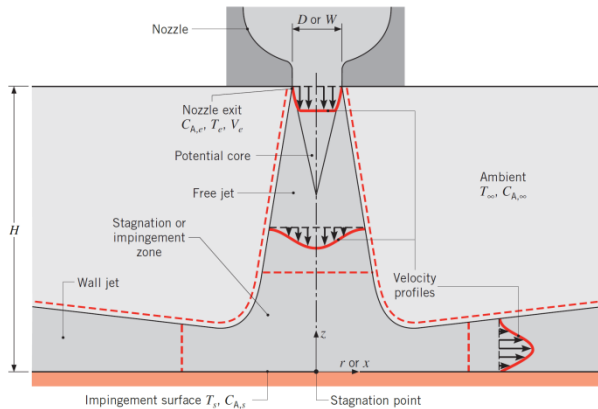
- ▶ IRWST 주입압력 (~2bar) 이하로 감압
- ▶ IRWST 주입압력에 도달 전 PCT 제한치 (1477K) 만족



03. Passive ECCS 성능 분석

■ Hybrid-SIT 가압 현상: 수면 열전달

〈Impinging jet〉



$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^{0.42}} = G\left(A_r, \frac{H}{D}\right) [2 Re^{1/2} (1 + 0.005 Re^{0.55})^{1/2}]$$

$$G = 2A_r^{1/2} \frac{1 - 2.2A_r^{1/2}}{1 + 0.2(H/D - 6)A_r^{1/2}}$$

〈RELAP5 수면 열전달〉
Vertically stratified flow

- Liquid side:

$$H_{if} = Nu \frac{k_f}{D} a_{gf} (1 - F_{30}) + H_{if, REG} F_{30}$$

- Gas side:

$$H_{ig} = Nu \left(\frac{k_g}{D} \right) a_{gf} (1 - F_{35}) + H_{ig, REG} F_{35}$$

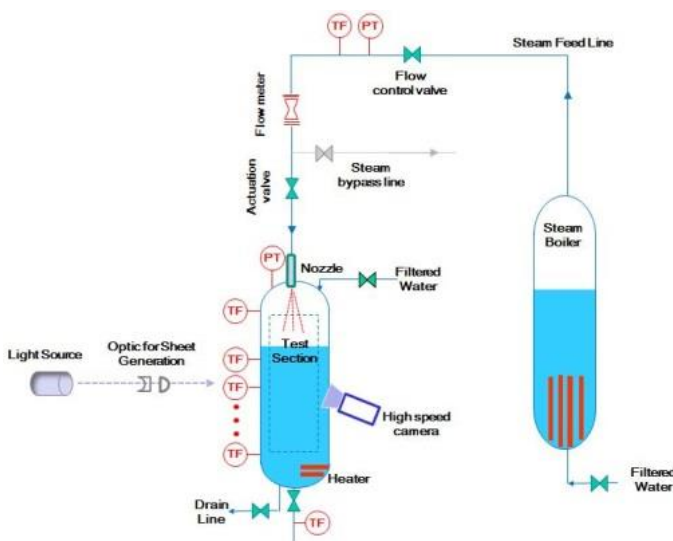
- Nu number: McAdams

$$Nu = 0.27 (GrPr)^{0.25}$$

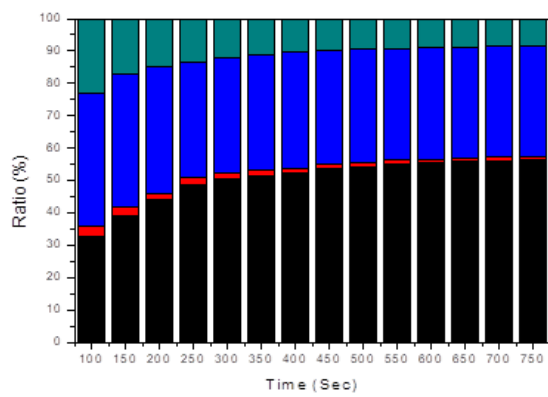
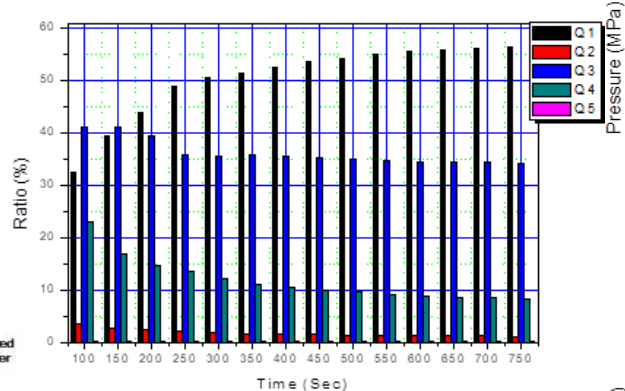
실제로는 Impinging jet의 패턴, 비응축성기체 존재 등으로 복잡함.

03. Passive ECCS 성능 분석

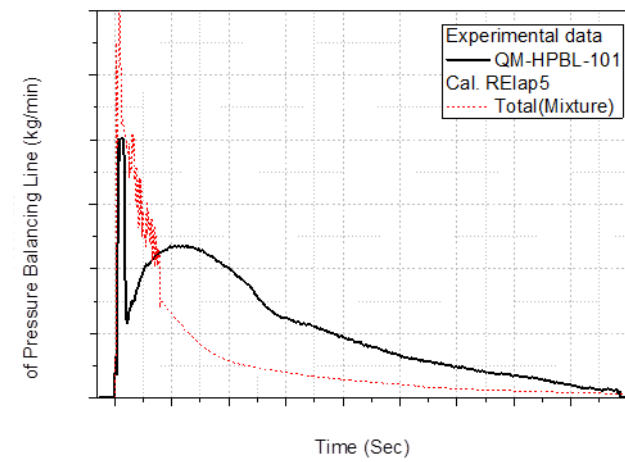
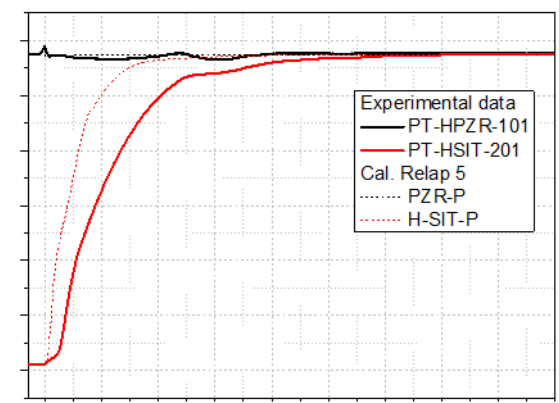
〈KAERI 실험〉



Q1: SIT 금속 Q2: 내부 질소
Q3: 수면 응축 Q4: 배관
Q5: 열손실



〈RELAP5 모의 결과〉



높이비: 1/4 | 직경비: 1/5

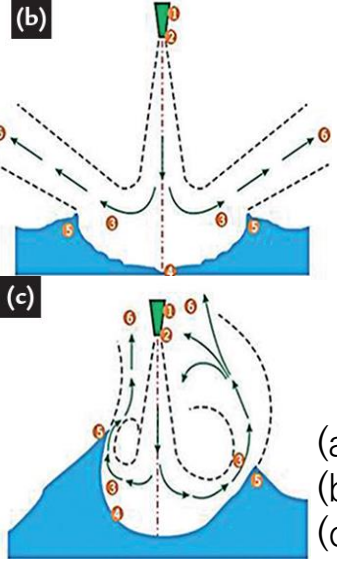
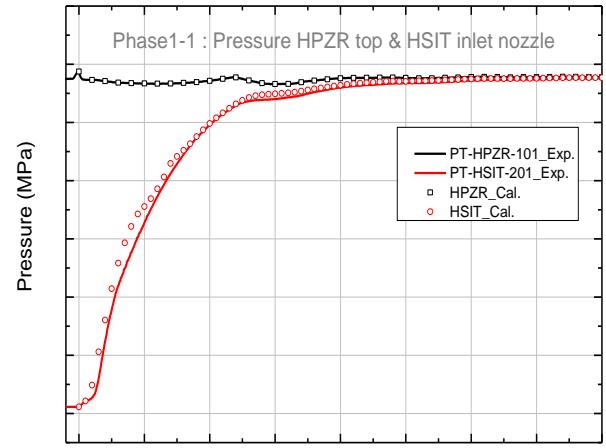
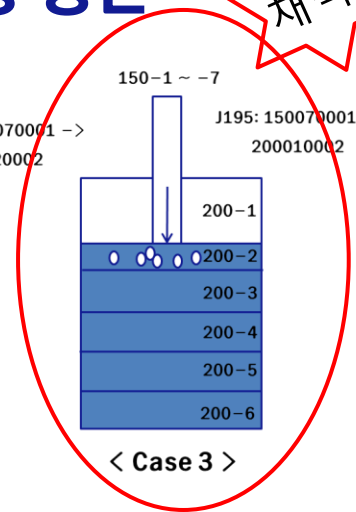
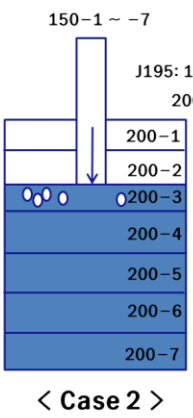
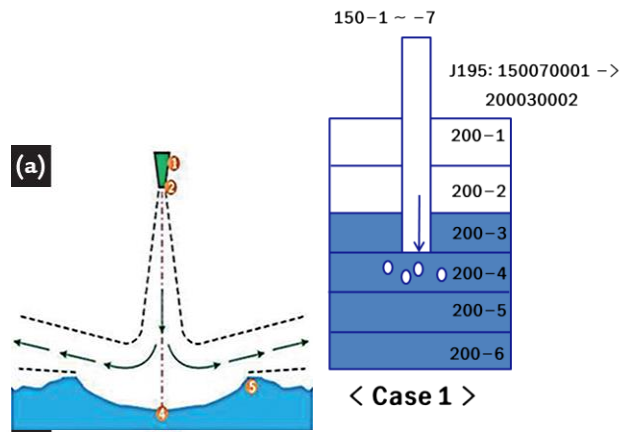
- SIT 금속과 배관 금속으로 손실되는 열이 매우 많음!
- 수면 응축되는 열도 많음.

- 계산 압력 상승 속도가 실험 보다 빠름!

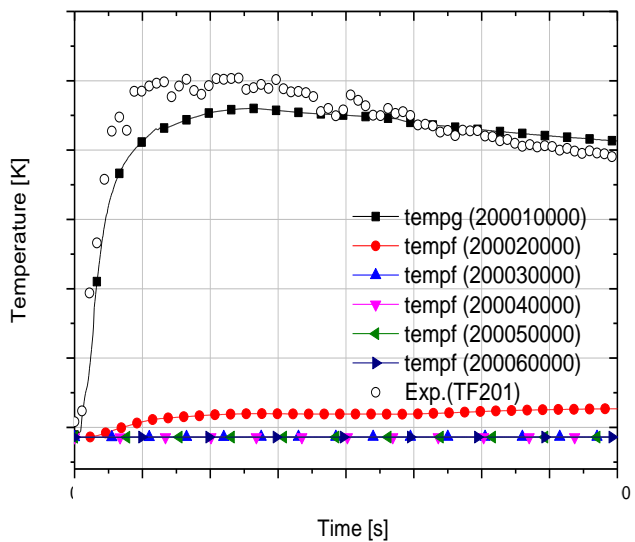
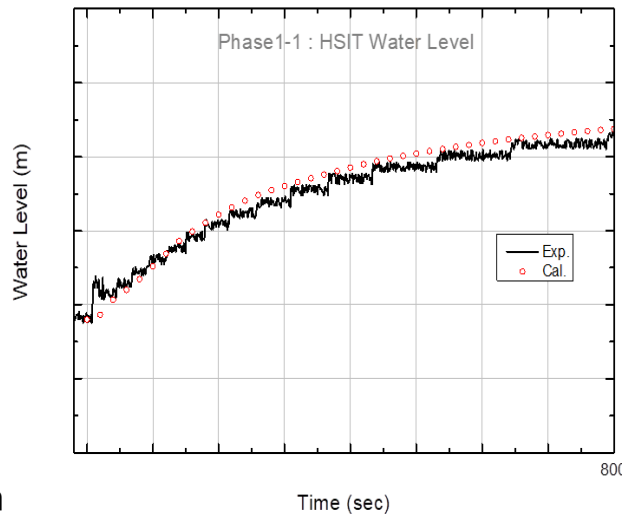
03. Passive ECCS 성능 분석

■ SET 반영한 Hyb-SIT 모델링 방안

채택!



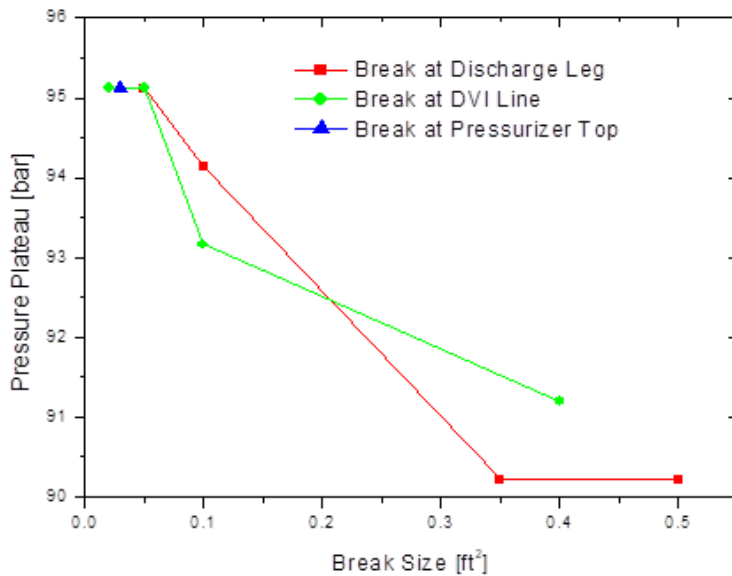
- (a) Depression
- (b) Spreading
- (c) Penetration



03. Passive ECCS 성능 분석

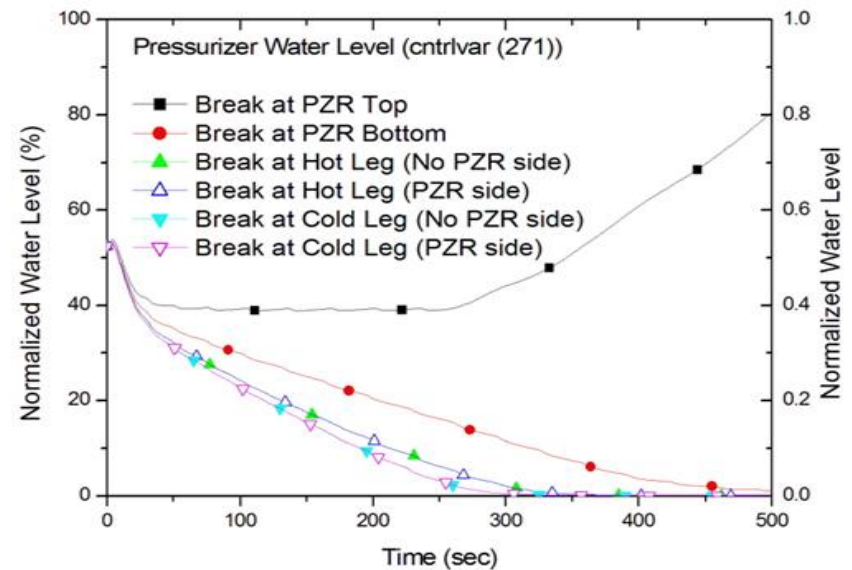
■ 기본성능분석: SBLOCA

〈SBLOCA 압력 Plateau 경향〉



- ADV 개방 설정치에 활용
- Hyb-SIT 작동 설정치에 활용

〈SBLOCA 파단 위치 영향〉



- 질량재고량은 차가운 물을 방출할수록 빨리 감소함
- 가압기 수증기를 방출하는 것이 가장 감압이 빠르고 가압기 포화수를 방출하는 것이 가장 감압이 느림.
- 방출 미포화수의 온도는 차가울수록 감압이 빠름.

03. Passive ECCS 성능 분석

■ 안전기능 원리

▶ 저압 사고

- RCS 저압력시 Hyb-SIT 작동 및 주입
- SIT 작동 유도를 위한 자동감압 조치
- IRWST 중력 주입 작동을 위한 완전 감압 조치
- 방출 냉각수를 IRWST로 회수하여 장기냉각

▶ 고압사고: SBO

- PAFS 작동 -> PCCT 고갈 -> 냉각재방출냉각 | PAFS 실패 -> 냉각재방출냉각
- RCS 과열시 Hyb-SIT 작동으로 냉각재 보충
- SIT 작동 유도를 위한 자동감압 조치
- IRWST 중력 주입 작동을 위한 완전 감압 조치
- 방출 냉각수를 IRWST로 회수하여 장기냉각

03. Passive ECCS 성능 분석

■ 주요 사고별 성공 요건: PCT 제한치 만족

▶ LBLOCA & SBLOCA

- PAFS 없이 RCS 2bar이하로 감압

▶ Non-LOCA (MSLB, SGTR, ...)

- ADV 개방 배제

▶ SBO

- PAFS 없이 2bar까지 감압

▶ 정지운전 LOCA (LTOP 밸브 개방 고착)

- RCS 2bar 감압

▶ 정지냉각계통기능상실 사고

- RCS 2bar 감압

03. Passive ECCS 성능 분석

■ PECCS 개발

▶ 기기 용량

- 주입계통
 - Hyb-SIT 용량 및 개수
 - 압력 평형관 설치 위치 및 배관 크기
 - SIT 용량 및 개수
- 자동감압계통
 - ADV #1~#3 설치 위치, 방출 용량: 밸브 면적
 - ADV #4 방출 용량, 밸브 수, 설치 위치

▶ 기기 작동 설정치

- 주입계통
 - Hyb-SIT (압력 평형관 개방 설정치): RCS 압력 vs. 기타
 - SIT: RCS 압력
- 자동감압계통
 - ADV #1: RCS 압력 vs. Hyb-SIT 수위
 - ADV #2: RCS 압력 vs. Hyb-SIT 수위 vs. ADV #1 연동
 - ADV #3: RCS 압력 vs. Hyb-SIT 수위 vs. ADV #1&2 연동
 - ADV #4: RCS 압력 vs. Hyb-SIT 수위

03. Passive ECCS 성능 분석

■ 설계 내용 및 AP1000과의 비교: 감압계통

계 통	AP1000		PECCS	
	설정치	설 명	설정치	비 고
ADV #1	<input type="radio"/> CMT level low (67.5%)	CMT 저수위시 감압을 위해 ADV#1 개방	<input type="radio"/> H-SIT ____ low (____)	<input type="radio"/> non-LOCA 사고시 H-SIT 주입 후의 수위보다 낮은 값을 선정
	<input type="radio"/> Manual	<input type="radio"/> 필요시 수동 개방	<input type="radio"/> Manual	필요시 수동 개방
ADV #2	<input type="radio"/> ADV#1 + 70sec	<input type="radio"/> Accumulators 주입 및 NRHR 구동을 위한감압 시간 지연 <input type="radio"/> ADV 작동 오신호 발생시 ADV#1이 개방되어도 ADV#2,3 개방을 지연시켜 사고 초기에 운전원 조치로 모든 ADV가 개방되는 것을 방지할 수 있음.	<input type="radio"/> ADV#1 + ____	<input type="radio"/> SBO 사고시 안정적 감압 위해 ADV#2,3 개방 필요.
ADV #3	<input type="radio"/> ADV#2 + 120sec		<input type="radio"/> ADV#2 + ____	<input type="radio"/> Delay Time 민감도 분석결과 감압에는 큰 영향 없음 <input type="radio"/> 단, ADV#1 오동작시 대처 시간 충분치 않음
ADV #4A	<input type="radio"/> Low CMT level (20%) + low RCS pressure (1200psig) + time delay (120sec) after third stage actuation	<input type="radio"/> ADV#1,2,3 개방 및 CMT가 주입되어도 IRWST 주입 압력까지 감압이 안되었을 경우 최종 감압 수단. CMT 수위 오신호 및 고압에서 개방되지 않도록 1차측 저-압력신호로 Interlock 시킴.	<input type="radio"/> Low H-SIT ____ (____) + low RCS ____ (____)	
	<input type="radio"/> Loop1 and 2 hot leg level < Low setpoint (3in)	<input type="radio"/> 정지저출력 운전중(normal RHR에 의한 냉각, Accumulator는 차단) RHR 기능 상실시 1차측 냉각을 위하여 IRWST주입이 필요하며 주입압력까지 감압하기 위해 ADV#4 개방이 필요	<input type="radio"/> Loop1 and 2 hot leg ____ < Low setpoint (____)	<input type="radio"/> 정지저출력 운전시
	<input type="radio"/> Manual	<input type="radio"/> 필요시 수동 개방	<input type="radio"/> Manual	<input type="radio"/> 필요시 수동 개방
ADV #4B	<input type="radio"/> Time delay (60sec) after stage 4A actuation	<input type="radio"/> Redundant 설비	<input type="radio"/> time delay (____) after stage 4A actuation	<input type="radio"/> Redundant 설비로 적용.

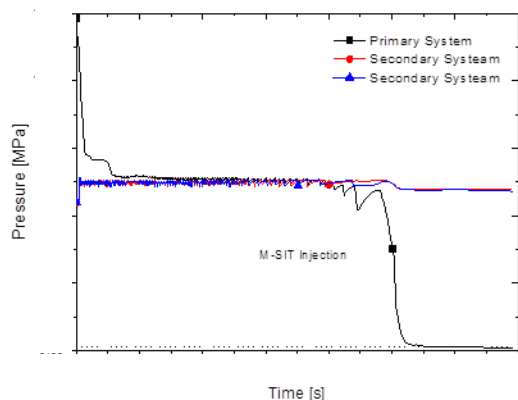
03. Passive ECCS 성능 분석

설계 내용 및 AP1000과의 비교: 주입계통

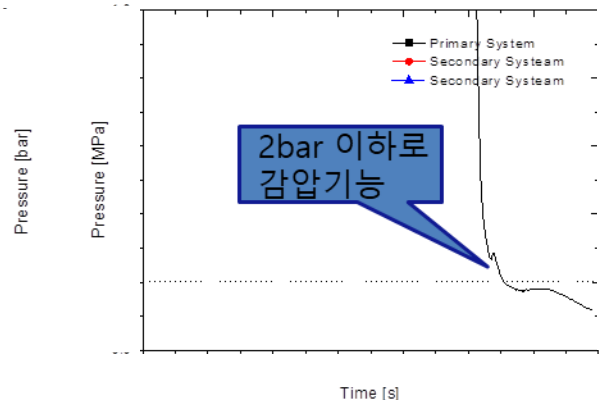
계통	AP1000			PECCS	
	설정치	설명		설정치	비고
CMT / Hyb-SIT	Safeguards actuation (S) signal	<input type="radio"/> Low pressurizer pressure (1685psig)	<input type="radio"/> 안전주입신호와동일	<input type="radio"/> Low pressurizer ____ (____)	<input type="radio"/> 압력 Plateau 이상에서 주입 가능하도록 설정
		<input type="radio"/> Low lead-lag compensated steam line pressure (390psig)		<input type="radio"/> 미적용	<input type="radio"/> APR+의 Steam Line 저압 신호는 급수 차단에만 사용
		<input type="radio"/> High containment pressure (8psig)		-	<input type="radio"/> 추후 필요시 적용
		<input type="radio"/> Low reactor coolant inlet temperature (500F)	<input type="radio"/> 안전주입신호와동일 <input type="radio"/> AP1000 경우 부주의한 PRHR 동작으로 1차측 과냉에 의한 신호 발생	<input type="radio"/> 미적용	<input type="radio"/> PAFS는 설계 특성상 부주의에 의한 동작으로 1차측 과냉이 발생하지 않음
	<input type="radio"/> Automatic 또는 manual actuation of first stage of ADS		<input type="radio"/> ADV#1 수동 또는 자동 개방시 주입신호 발생	<input type="radio"/> Automatic 또는 manual actuation of first stage of ADS	<input type="radio"/> ADV#1 수동 또는 자동 개방시 주입신호 발생
	<input type="radio"/> Low pressurizer level(7%)		<input type="radio"/> 정지 저출력 운전 중 ('S'signal차단) 사고 가압기 저수위로 주입 신호 발생	<input type="radio"/> Low pressurizer level(7%): OPR1000 이후 원전의 설계 및 운전 특성을 고려하여 재검토 필요	<input type="radio"/> OPR1000 이후 원전은 운전절차상 정지 냉각운전 이전의 이차측 냉각운전 중인 경우, SIS 설정치를 낮추어지면서 신호 발생
	<input type="radio"/> Low WR SG level (55,000lbm) + high hot leg temperature (636F)		<input type="radio"/> 주급수관파단시 급수 상실로 인한 증기발생기 저수위 및 PRHR 작동실패로 인한 1차측 냉각 감소로 고온관 온도 상승으로 주입신호 발생	<input type="radio"/> Low WR SG ____ (____) + high hot leg temperature(636F)	<input type="radio"/> SBO 사고시 1차측 Makeup을 위하여 CMT 주입이 필요함. 민감도 분석 후 최적의 설정치 적용
	<input type="radio"/> Manual		<input type="radio"/> 필요시 수동으로 주입	<input type="radio"/> Manual	<input type="radio"/> 필요시 수동으로 주입

03. Passive ECCS 성능 분석

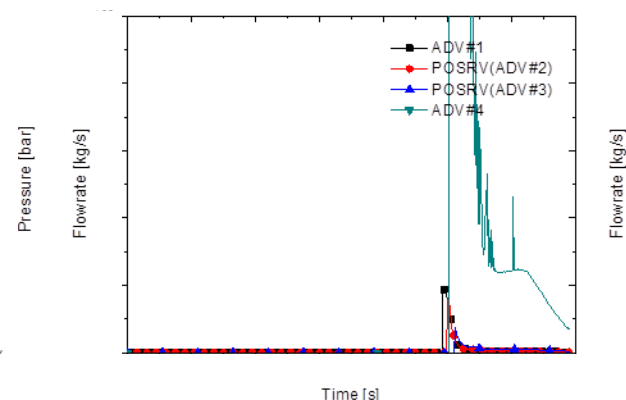
■ 성능 분석: SBLOCA



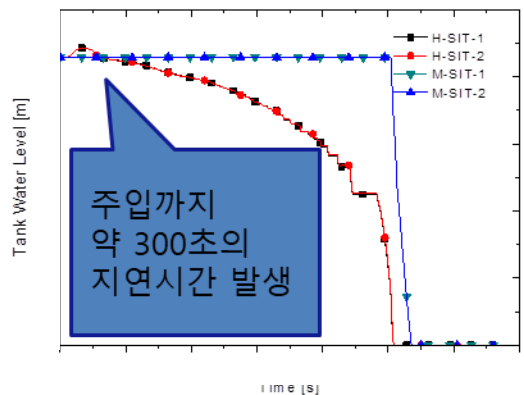
<노심압력>



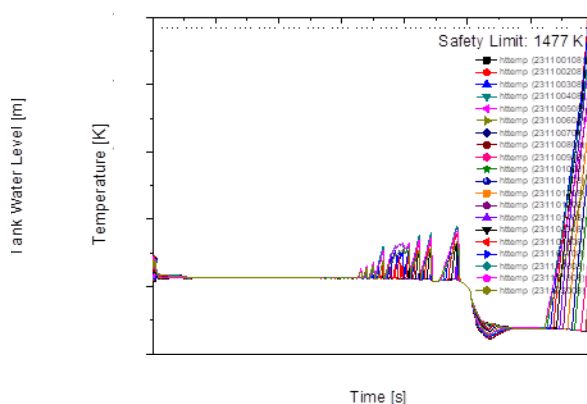
< 노심압력 >



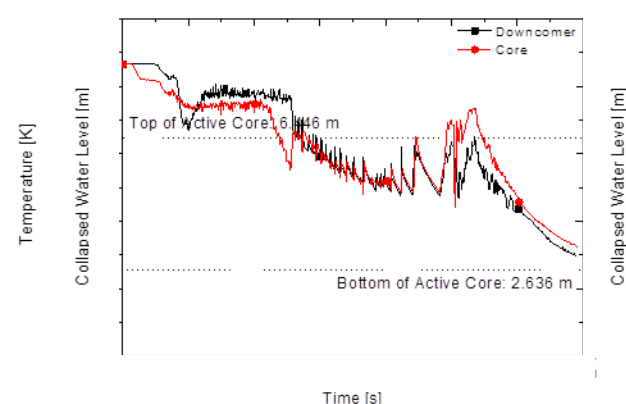
< ADV 유량 >



<H- & M-SIT 재고량>



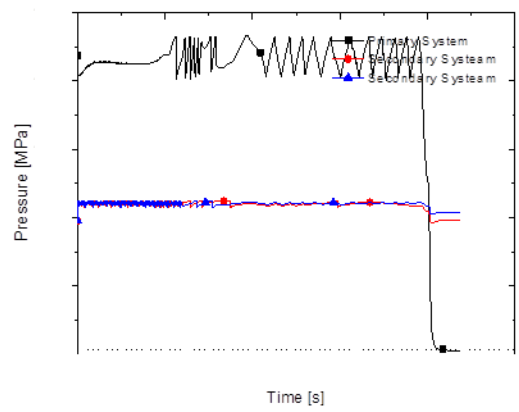
<피복재 온도>



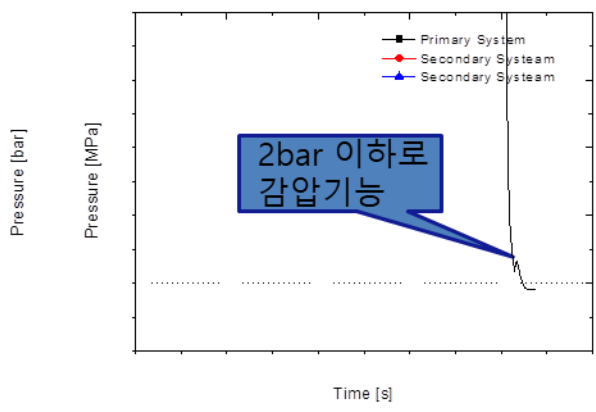
<DC & 노심 수위>

03. Passive ECCS 성능 분석

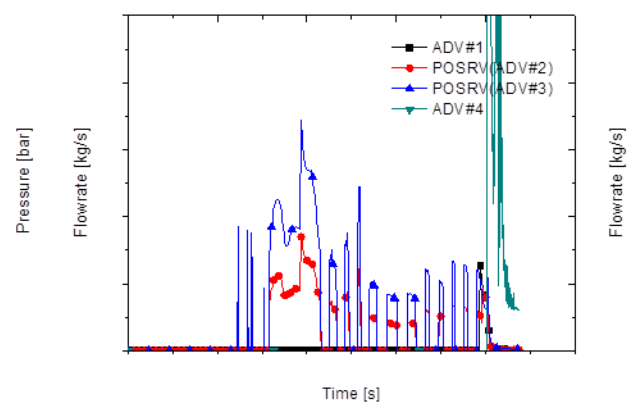
■ 성능 분석: SBO



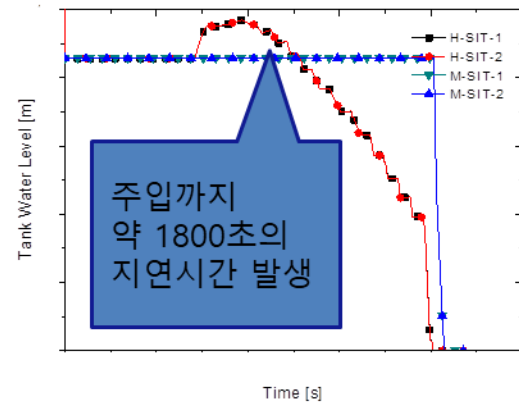
<노심압력>



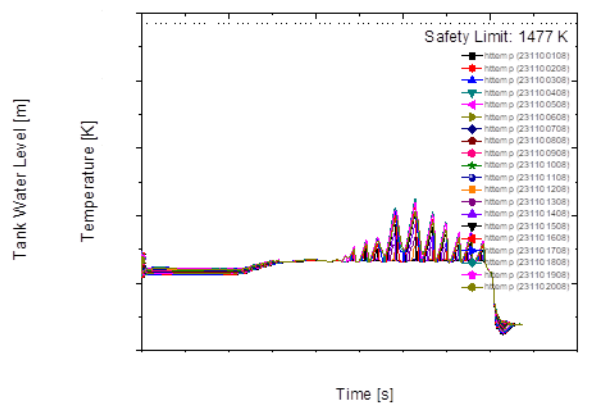
< 노심압력 >



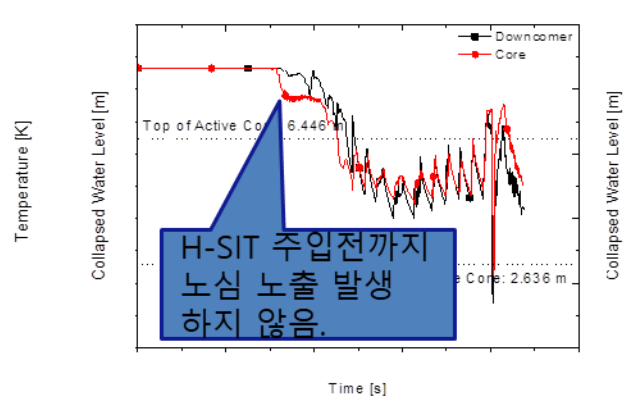
< ADV 유량 >



<H- & M-SIT 재고량>



<피복재 온도>



<DC & 노심 수위 >

03. Passive ECCS 성능 분석

■ 기타 현안

- ▶ IRWST 주입을 위한 구체적 설계 및 성능 분석
- ▶ 회수계통에 대한 성능 분석
- ▶ ADV #4 개방 전 운전원 대처 방안

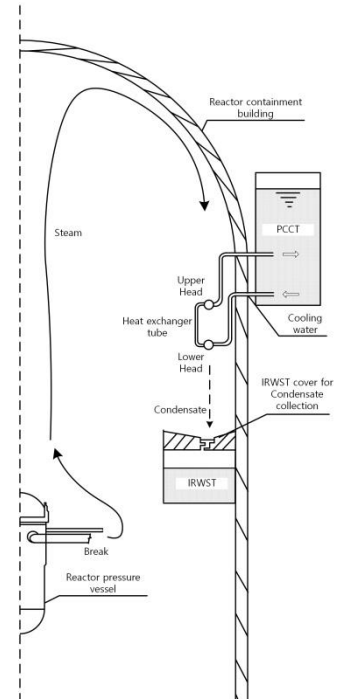


4. PCCS 성능 분석

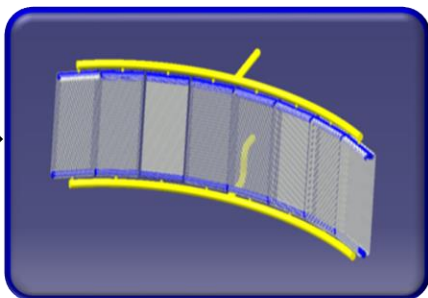
04. PCCS 성능 분석

■ 설계 개념

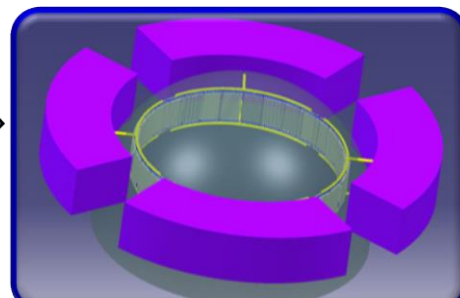
- ❖ **유로** : 열교환기 (원자로건물 내부) → 배관 → 냉각탱크 (원자로건물 외부) → 배관 → 열교환기
- ❖ **원리** : 배관 내 냉각수 충수 → 원자로건물 내부 온도상승 → 열교환기와 열교환 (밸브 동작 없음)
[외부 : 응축, 내부 : 대류] → 열교환기/냉각탱크간 자연순환 → 원자로건물 온도/압력 ↓
- ❖ **구동력/안전여유시간** : 자연력 (AC/DC 불필요) 및 최소 72시간 (3일) 이상
- ❖ **운전 모드** : 정상운전 (대기상태) / 정지 (정비, 점검 수행) / 피동냉각운전 (사고 시 냉각)
- ❖ **기타 요건** : 원자로건물 설계 압력/온도 이하 유지, 단일고장 고려, 내진설계, 항공기 충돌 대처, 응축수 IRWST로 회수등



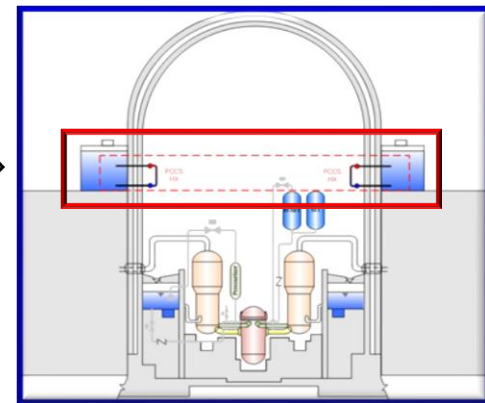
1개 모듈 :
[8열 × 42개/열 튜브]



1개 계열 :
[8개 모듈 (33% 용량)]



계통 구성
[33%/계열 × 4계열]



[배치]

04. PCCS 성능 분석

■ 핵심 열수력 현상: PIRT

원자로건물 시스템

Subsystem	Process	Phenomena	Rank
Atmosphere	Pressurization, Depressurization	Multicomponent gas compression/expansion	M
		Atmosphere cooling by PCCS	H
	Mixing (Intra-compartment)	Jet-plume gas interaction/entrainment (localized)	L
		Buoyancy/stratification (regional)	L-M
		Buoyancy/wall interaction (regional)	L
	Transport(Inter-compartment)	Buoyancy	M
		Form and friction losses	L
Structure (Outer)	Sensible Heat Transfer	Free convection	L
		Forced/mixed convection	L
		Liquid film resistance	L
		Liquid film advection	L
	Latent heat and mass transfer	Condensation/evaporation (free convection)	H
		Condensation/evaporation (forced/mixed convection)	L
		Liquid film advection	L-M
	Transport (film flow)	Interfacial drag (film/gas interaction)	L
Structure(Inner)	Heat Transfer	Heat Conduction	M-H
Pool (Inner)	Mixing	Buoyancy/stratification	M-H
	Transport	Filling and draining	L
Pool (Surface)	Mixing	Buoyancy/stratification	L
	Transport	Filling and draining	L

PCCS 시스템

Modules	Process	Phenomena	Rank
Downcomer	Heat transfer	Heat conduction	L
	Transport	Convection	L
Header	Transport	Friction and form losses	M
	Heat transfer	Heat conduction	L
	Mixing	Buoyancy	L
Riser	Transport	Friction and form losses	M
	Heat transfer	Heat conduction	M
	Latent Heat and Mass Transfer	Flashing	L
	Transport	Friction and form losses	M
		Interfacial drag	L
PCCT	Heat transfer	Heat conduction	L
	Latent Heat and Mass Transfer	Natural convection (free surface)	L
		Evaporation (free surface)	L
	Mixing	Buoyancy/stratification	H
	Transport	Water Inventory	L
Tube (Inner and Solid)	Heat transfer	Heat conduction	L
		Convection	H
Tube (Outer)	Latent Heat and Mass Transfer	Condensation/evaporation (free convection)	H
	Sensible Heat Transfer	Convection	M
		Liquid film resistance	H
		Liquid film advection	H
		Liquid film waviness	L

04. PCCS 성능 분석

■ 응축열전달 모델 평가 검토의 특성 비교(Mechanistic Model)

Type	Reference	Condensation Heat Flux	Coefficient	Unit and Description
Mass Transfer Coefficient (Driving Force with terms of pressure and mole fraction)	Crawford (1958)	$q_{cond}'' = K_c M_s (P_{sb} - P_{si}) h_{fg}$	$K_c = C \frac{D_{AB}}{LRT} \frac{P_t}{P_{B,avg}} (Gr \cdot Sc)^{0.373}$	$K_c = [\# \text{ mol/hr-ft}^2\text{-atm}]$
	Ackers (1960)		$K_c = C \frac{D_{AB}}{L} \left(\frac{gL^3 \rho}{\mu D_{AB}} \left(\frac{\rho_o}{\rho_i} - 1 \right) \right)^{0.373}$	$K_c = [\text{m/s}], \text{Ref. Collier}$
	Collier (1994)	$q_{cond}'' = K_c \rho_g \frac{(P_{sb} - P_{si})}{P_{am}} h_{fg}$	$K_c = \left(\frac{h_g}{\rho_g c_{pg}} \right) \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3}$	$K_c = [\text{m/s}]$
	MARS-KS (1.4)	$q_{cond}'' = j_g \cdot h_{fgb}$ $= K_c \rho_g \ln \left(\frac{1 - y_{si}}{1 - y_{sb}} \right) h_{fgb}$	$K_c = Sh \frac{D_{AB}}{D_h}$	$K_c = [\text{m/s}]$
	GOTHIC (8.2QA)	$q_{cond}'' = j_g c_{p_s} (\Delta T_{cond})$ $= K_c M_s \bar{c} \cdot \ln \left(\frac{1 - y_{si}}{1 - y_{sb}} \right) c_{p_s} (\Delta T_{cond})$	$K_c = Sh \frac{D_{AB}}{D_h}$	$K_c = [\text{m/s}]$ Choice of among the several options by user
Heat Transfer Coefficient (Driving Force with terms of temperature)	Peterson (1993)	$q_{cond}'' = h_c (T_b^s - T_i^s)$ $= Sh \frac{k_c}{L} (T_b^s - T_i^s)$	$h_c = Sh \frac{k_c}{L} = C_c (Gr \cdot Sc)^{1/3} \frac{k_c}{L}$ $k_c = \frac{1}{\phi T_{avg}} \left(\frac{h_{fg}^2 P_0 M_v^2 D_0}{R^2 T_0^2} \right)$ $\phi = \frac{y_{a,avg}}{y_{s,avg}} = - \frac{\ln[(1 - x_{ab}) / (1 - x_{ai})]}{\ln[x_{ab} / x_{ai}]}$	$h_c = [\text{W/m}^2\text{K}]$ $k_c = [\text{m}^3\text{K/W}]$
	Anderson (1997)	$q_{cond}'' = h_c (T_b^s - T_i^s)$ $= Sh \frac{k_c}{L} (T_b^s - T_i^s)$	$h_c = Sh \frac{k_c}{L} = \Theta C_c (Gr \cdot Sc)^{1/3} \frac{k_c}{L}$ $k_c = \frac{1}{\phi} \left(\frac{h_{fg}^2 c M_v^2 D}{RT_b T_i} \right)$	same unit with Peterson =Suction Factor

04. PCCS 성능 분석

■ 응축열전달 모델 평가 검토의 특성 비교(Exp. Correlation)

Author	Experimental Correlation	Applicable Range
Dehbi(1991)	$\bar{h} = \frac{L^{0.05} [(3.7 + 28.7P) - (2438 + 458.3P) \log W_a]}{\Delta T_w^{0.25}}, \text{ where } P \text{ in atm}$	$0.3 \leq L \leq 3.5m$ $0.152 \leq P \leq 0.456 MPa$ $10 \leq T_b - T_w \leq 50^\circ C$
Liu(2000)	$\bar{h} = 55.635 X_s^{2.344} P^{0.252} \Delta T_w^{0.307}, \text{ whter } P \text{ in Pa}$	$0.2533 \leq P \leq 0.4559 MPa$ $0.395 \leq W_a \leq 0.873$ $4 \leq T_b - T_w \leq 25^\circ C$
Kawakubo(2009)	$\bar{h} = (1/\bar{h}_f + 1/\bar{h}_i)^{-1}$ \bar{h}_f : Film HTC evaluated by Nusselt's theory $\bar{h}_i = \min \left[0.33 X_a^{-0.8} \Delta T_w^{0.25}, X_a^{-0.1} \Delta T_w^{-0.2} X_{ar}^{-0.25} \right] \cdot (P + 0.5), \text{ where } P \text{ in MPa}$	$0.33 \leq L \leq 1.0m$ $0.2 \leq P \leq 0.4 MPa$ $0.05 \leq X_a \leq 0.5$ $5 \leq T_b - T_w \leq 50^\circ C$
Su(2013)	$\bar{h} = [10189.3 + 90416.4P - (4314.4 + 46537P) \log 10(100W_a)] \Delta T_w^{-0.6}$	$0.2 \leq p \leq 0.6 MPa$ $0.20 \leq W_a \leq 0.80$ $27 \leq T_b - T_w \leq 70^\circ C$
Su(2014)	$\bar{h} = [-2913.62 + 7957.3P - (7841.62 + 3051.85P) \log 10(W_a)] \Delta T_w^{-0.35}$	$0.4 \leq p \leq 0.6 MPa$ $0.07 \leq W_a \leq 0.52$ $13 \leq T_b - T_w \leq 25^\circ C$
Lee(2017)	$\bar{h} = Nu_D k / D_0$ $Nu_D = 890 Gr_L^{0.125} W_s^{*0.966} Ja^{-0.327}$ $Gr = \frac{g \rho (\rho_w - \rho_b) L^3}{\mu^2}, W_s^* = 1 - W_a^{0.01}, Ja = \frac{c_p (T_b - T_w)}{h_{fg}}$	$0.1 \leq L \leq 3.5m$ $1.36 \cdot 10^{10} \leq Gr_L \leq 5.05 \cdot 10^{12}$ $1.16 \cdot 10^{-3} \leq W_s \leq 2.35 \cdot 10^{-2}$ $0.009 \leq Ja \leq 0.035$

04. PCCS 성능 분석

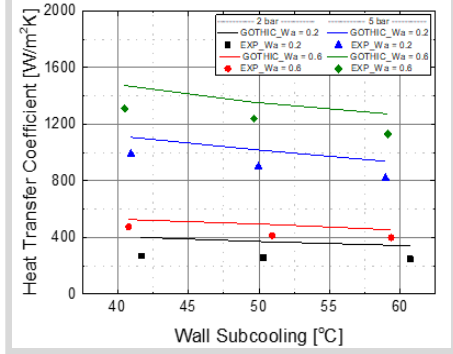
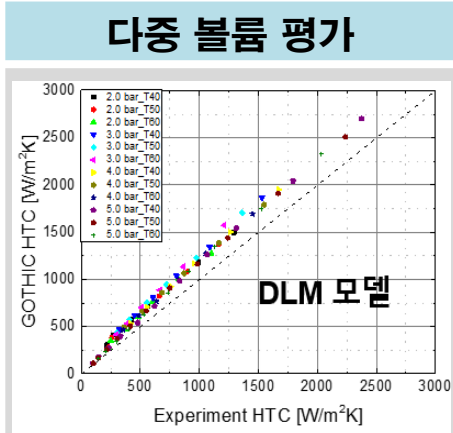
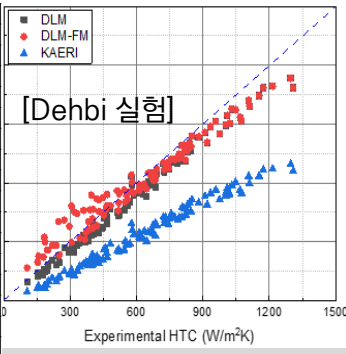
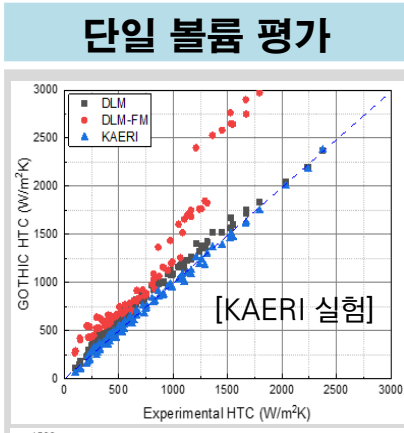
■ 응축열전달 모델 SET 실험 평가

- ❖ 목적 : PCCS 열교환기와 동일한 수직형, 튜브, 외벽, 응축 실험 검증을 통해 코드가 보유한 응축열전달 및 자연순환 예측성능을 확인 (GOTHIC 코드 이용)

	KAERI (2018)		Dehbi (1991)		Kawakubo (2009)		Su (2013)		제주대학교 (2013)	
	시험부	수직 전열관	시험부	수직 전열관	시험부	수직 전열관	시험부	수직 전열관	시험부	수직 전열관
높이 [m]	8.9	2.5/5	4.5	3.5	2.7	1.0	3.45	2.0	2.0	1.0
직경 [m]	2.4	0.03175	0.45	0.038	0.5	0.01	0.416	0.038	0.61	0.04
수직전열관 두께 [m]	0.003		0.005		0.002		0.002		0.005	
비용축성 기체 유형	공기		공기, 헬륨		공기		공기, 헬륨		공기	
비용축성 기체 질량분율	0.0-0.93		0.25 - 0.90		0.08 - 0.62		0.10 - 0.80		0.00 - 0.88	
시험 압력 [bar]	2.0-5.0		1.5 - 4.5		2.0 - 4.0		2.0 - 6.0		2.0 - 5.0	
실험 장치 구성도										

Dehbi 실험에
대한 모델과
상관식의 비교

	Series A			Series B			Series C		
	A38	A30	A25	B39	B33	B28	C25	C16	C9
Experimental Condition and HTC									
P(bar)	1.5			3.0			4.5		
T _h (°C)	101	94	79	125	113	85	137	127	95
T _w (°C)	72	65	60	90	88	62	100	82	60
W _{air} (-)	0.33	0.56	0.80	0.34	0.59	0.85	0.35	0.58	0.88
HTC(W/m²K)	644	367	200	854	446	189	888	491	144
HTC of Mechanistic Models									
GOTHIC7.2a	572	299	119	683	385	145	801	420	125
MARS-KS1.4	424	209	77	506	269	88	594	277	70
Peterson	544	341	197	710	478	195	808	465	180
Anderson	860	448	215	1076	591	211	1197	610	192
HTC of Experimental Correlations									
Uchida	624	321	144	605	295	113	586	303	94
Tagami(SS)	588	235	82	563	209	62	539	217	50
Kataoka	758	355	142	731	321	107	706	332	87
Dehbi	712	383	178	821	459	174	943	492	168
Liu	1685	803	148	2073	801	102	2276	1112	79
Su2013	875	531	386	1105	718	313	1361	646	209
Su2014	700	114	-327	1030	480	31	1376	751	340
JNU	799	448	206	906	516	175	985	516	140



04. PCCS 성능 분석

■ PCCS 설계 요소 평가

▶ 회수배관 상대적 높이

▶ PCCT 설계 및 모델링

- PCCT 분할 방법
- PCCT Vent 개수
- 분할 탱크 연결 배관 크기 효과
- PCCT-공급배관 연결 Elevation 효과

▶ PCCS 공급/회수 배관

- 공급/회수 배관 크기
- 공급/회수배관 볼륨 타입 및 분할 개수
- 배관 K-Factor

▶ PCCS 열교환기 모델

- 열교환기 Tube 격자 수
- 열전달 모델의 영향

▶ 작동 TRAIN 개수의 영향

▶ RCS 모델링

▶ ME 민감도

▶ Droplet Phase 영향

▶ GOTHIC Option 에 따른 영향

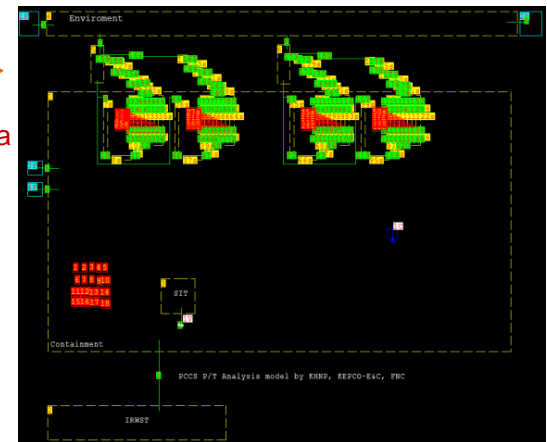
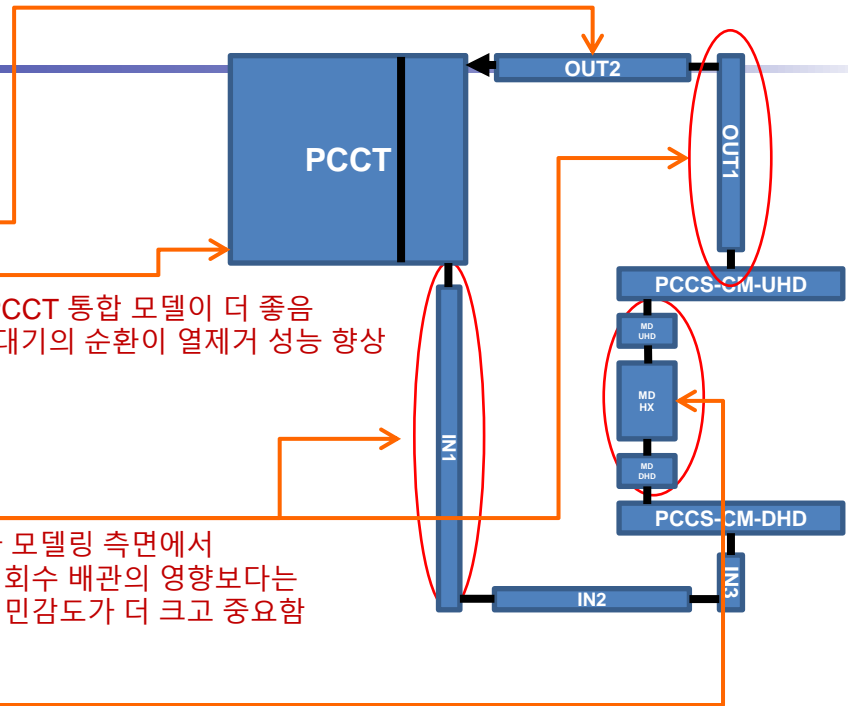
- 열제거 측면에서 PCCT 통합 모델이 더 좋음
- Vent를 통한 외부 대기의 순환이 열제거 성능 향상

- 열제거 성능과 모델링 측면에서 공급배관/수평회수 배관의 영향보다는 수직회수배관 민감도가 더 크고 중요함

- 응축모델에 따른 열제거 성능 DLM-FM > DLM > UCHIDA

- DLM-FM이 DLM, UCHIDA보다 30kPa 정도 낮게 예측
- ¼기준 대비 4Train 작동할 경우 20kPa 정도 낮게 예측
- 출력을 20% 줄여도 압력은 7% 정도 감압 효과

- 회수배관은 가능한 높게 위치시킬수록 열제거 관점에서 유리
- 최종회수배관은 수직상향으로 하면 Flashing에 의한 유량 진동 감소



04. PCCS 성능 분석

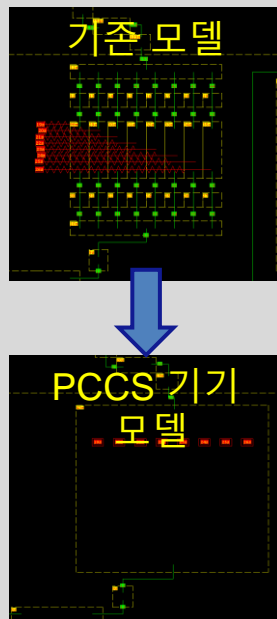
■ 격납건물 적용 시 PCCS 성능 평가 (GOTHIC 분석)

Zachry (NAI) 협력 내용

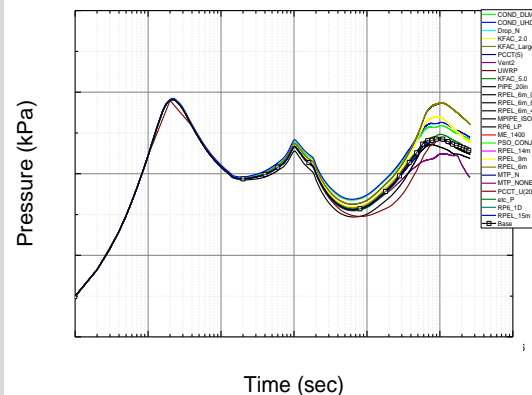
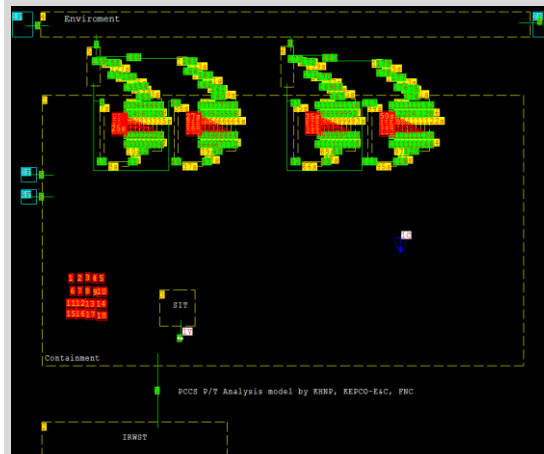
- ❖ KAERI 상관식 DLL 구현

$$Nu_D = 0.103 Gr_L^{0.268} W_s^{*1.545} Ja^{-0.907}$$

- ❖ Add-on 기능을 활용한 PCCS 기기모델 개발

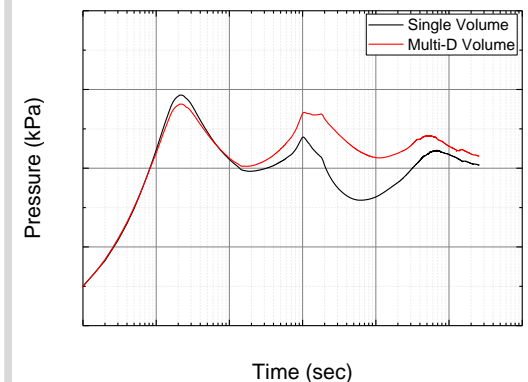
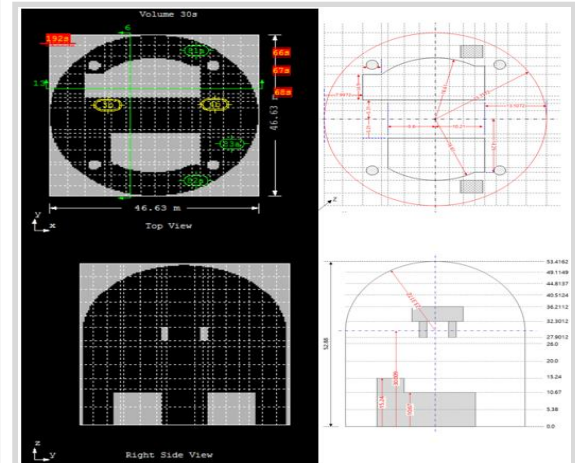


집중체적모델개발 및 성능분석



KAERI 응축모델 Add-on PCCS

다차원 모델개발 및 성능분석

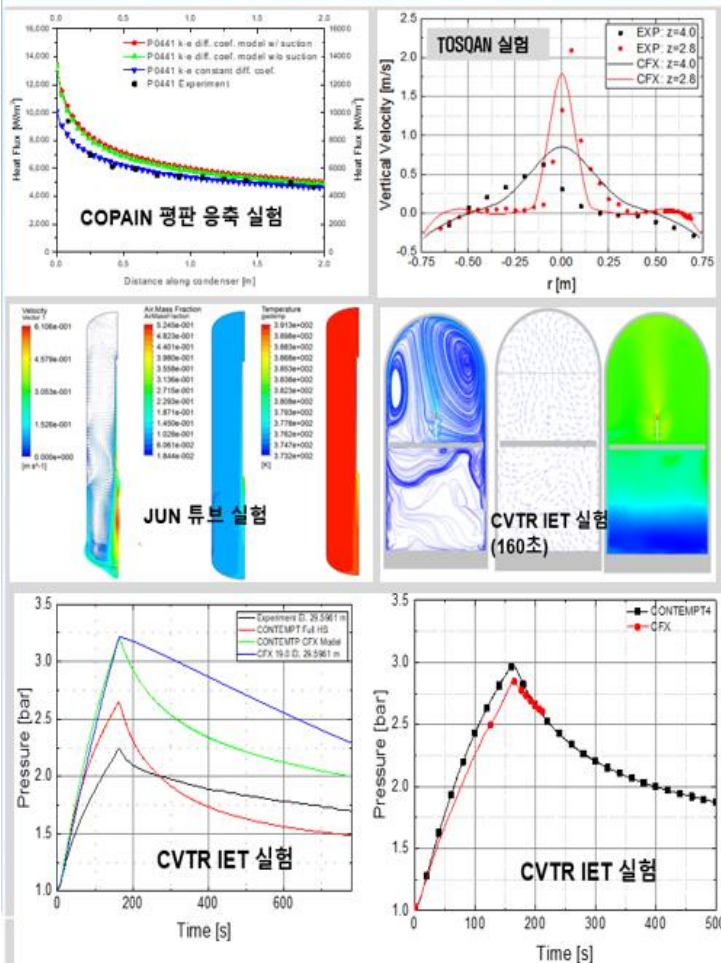


EO관점 : 집중체적에 비해 보수적

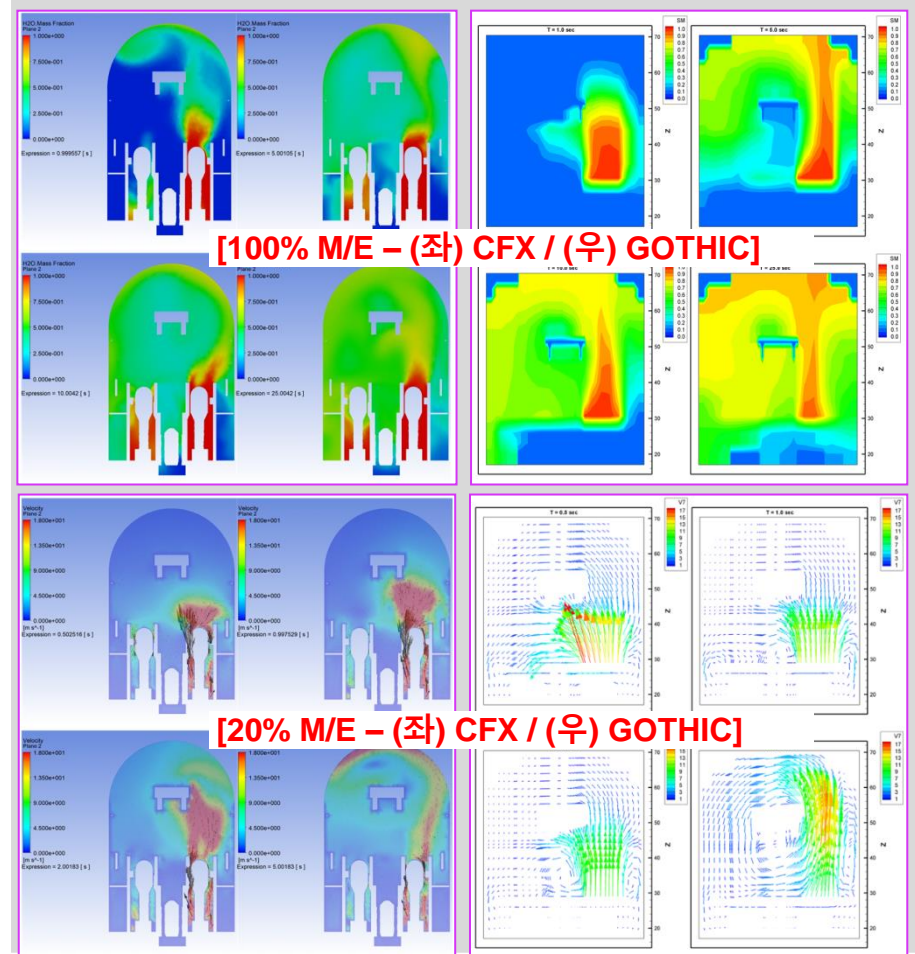
04. PCCS 성능 분석

■ 격납건물 적용 시 PCCS 성능 평가(CFD 분석)

CFD를 이용한 원자로건물대기 유동 민감도 분석



사고 초기 상부 영역 해석 결과



04. PCCS 성능 분석

■ PCCS P/T 분석 방법론 수립

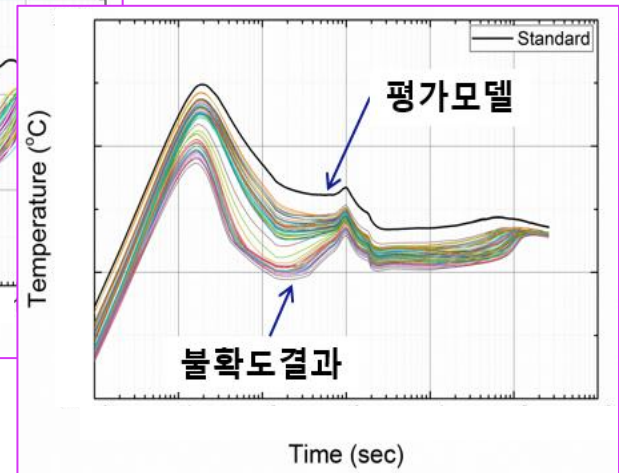
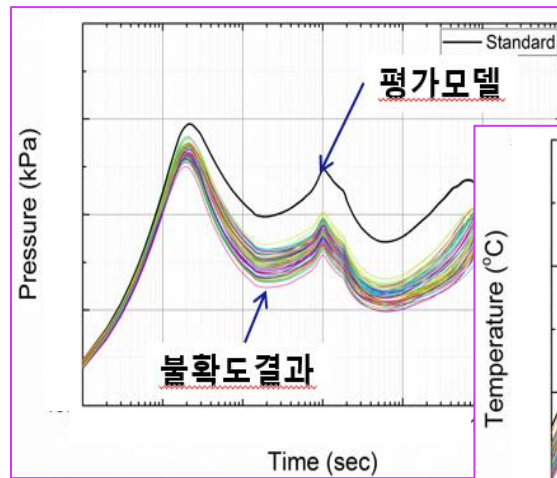
❖ Reg. Guide 1.203
- EMDAP 방법론 적용

❖ 민감도 분석
- 종합평가 및 예시 계산

방법론 Framework 수립

1. 개요
 - 1.1 배경
 - 1.2 관련 규제 요건
2. 계통 설명
3. 분석 방법론 성능 요건
 - 3.1 요건 (EMDAP 단계 1)
 - 3.2 성능지표 (EMDAP 단계 2)
 - 3.3 주요 기기 분석 (EMDAP 단계 3)
 - 3.4 주요 현상 분석 (EMDAP 단계 4)
4. 검증 기반 개발
 - 4.1 SET 및 IET 검증 기반 자료 정의 (EMDAP 단계 5)
 - 여기서는 주요 현상과 그에 대한 설명 자료들은 연관하여 정리한다. 아울러 노드 체계, 척도해석 및 기타 보상 오차 등을 고려하여 정리한다.
 - 4.2 척도해석 및 상사 요건 수립 (EMDAP 단계 6)
 - 주요 현상에 대한 주요 척도 변수를 규명하고 이에 대한 보존관계를 규명한다.
 - 4.3 SET 및 IET 자료 데이터베이스 구축(EMDAP 단계 7, 8, 9)
 - 데이터 베이스 구축(EMDAP 단계 7)
 - 상사성 왜곡 평가 (EMDAP 단계 8)
 - 실험 불확실도 평가 (EMDAP 단계 9)
5. 분석 코드
 - 5.1 코드 선정 기준 (EMDAP 단계 10)
 - EM개발 계획을 기술하는 단계이지만 우리의 경우 코드 선정 기준으로 하는 것이 적절함
 - 규제 요건 분석 부합성을 분석해서 코드 선정의 타당성을 보여야함
 - 5.2 코드 구조 (EMDAP 단계 11)
 - 5.3 구성 방정식 및 모델 (EMDAP 단계 12)
 - 구성 방정식을 정리하고 이에 대한 적용 범위, 내력 등을 분석함
6. SET 검증 (EMDAP 단계 13,14,15)
 - 각 실험을 세부 검토하고 다음 내용을 기술한다.
 - 각 SET와 관련된 모델들의 적용 범위 규정 (EMDAP 단계 13)
 - 각 SET에 대한 입력 마련 (EMDAP 단계 14)
 - 각 SET의 scalability 분석 (EMDAP 단계 15)
7. IET 검증 (EMDAP 단계 15)
 - 각 실험을 세부 검토하고 다음 내용을 기술한다.
 - 각 IET와 관련된 유동장 방정식 및 수치해석, 방법론의 적용성 분석 (EMDAP 단계 16, 17)
 - 각 IET에 대한 입력 마련 (EMDAP 단계 18)
 - 각 IET의 scalability 분석 (EMDAP 단계 19)
8. 종합적 불확실도 평가 (EMDAP 단계 20)
 - SET IET 평가결과를 기반으로 불확실도 평가
9. 평가 방법론 정리 및 예시 계산
 - 9.1 평가 방법론 정리
 - 9.2 예시 계산
10. 결론

Case	<1>	<2-1>	<2-2>	<2-3>	<3-1>	<3-2>	<3-3>	<3-4>	<3-5>	<3-6>	<3-7>	<3-8>	<3-9>	<3-10>	<3-11>
1	0.961125	0.912403	1.12345	1.273104	1.007342	1.002062	1.005174	0.979355	1.011718	0.950533	1.007121	1.002572	1.01089	0.973963	0.980731
2	1.020082	1.163038	0.827066	0.421983	1.002445	1.001117	1.013957	1.03831	0.991955	0.987194	0.999084	0.971168	1.025744	0.988021	0.956252
3	1.031031	1.036663	0.77504	1.243543	1.001613	1.001875	1.022925	0.999168	0.977295	1.045902	1.032308	1.046766	0.989127	0.970453	1.019925
4	0.985454	0.855123	1.071794	1.026787	1.000449	1.006985	1.019348	0.98559	1.000948	1.006138	1.027792	0.991195	0.974013	0.932197	0.979632
5	1.007301	0.993067	0.994319	1.628685	1.002158	1.002823	0.996535	0.989863	1.021334	0.989566	1.042983	1.032548	1.023093	0.980503	1.060225
6	1.027083	0.928621	0.960688	1.446712	1.001858	1.003301	1.005705	1.026843	0.991165	1.03459	0.996308	1.025364	1.018336	0.971307	1.050376
7	0.998208	1.038995	1.238069	0.76465	1.004888	0.990862	0.985748	0.976798	1.002822	0.956836	1.038551	1.013	1.013101	0.962167	0.987559
8	1.006388	0.824043	0.913812	0.798089	0.99976	1.000333	1.024314	1.006565	1.015734	0.968938	1.045043	0.998801	0.958591	1.000874	1.008019
9	0.995046	0.998386	0.974555	0.852944	1.005322	1.005915	1.001688	1.003999	1.002514	1.013483	0.970485	0.980106	1.003227	1.042314	0.997784
10	0.984109	0.941031	0.793554	0.935563	1.006588	1.004753	1.008923	0.989631	1.008208	1.027023	0.992265	1.02024	1.034712	1.015977	1.044591



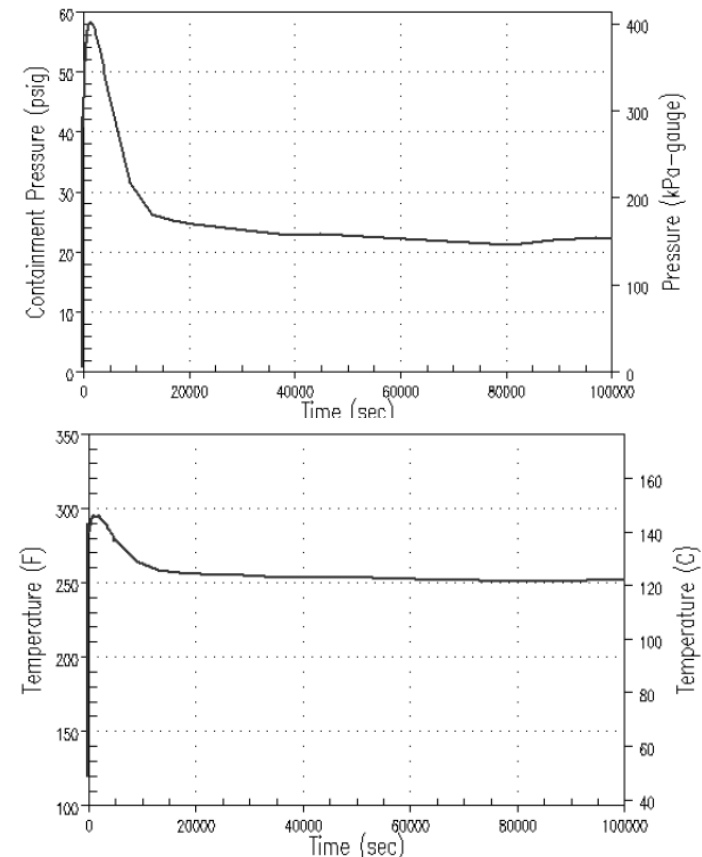
04. PCCS 성능 분석

▶ 24 hr 50% 고찰

- PCCT 수온: 100℃
- Thus, 격납건물 온도 > 100℃
- 100℃에 대한 수증기압: 1bar
 - 110 ℃ 에 대한 수증기압: ~1.5bar
 - 120 ℃ 에 대한 수증기압: ~2.0bar
- 기존 격납건물 공기 분압: 1bar
- 따라서 PCCT 비등시 격납건물 압력 > 2.0bar (1.0bar.g)
- 분석된 최고 압력 ~4.0bar (3.0bar.g)
- 이 값의 50%: 1.5bar.g
- 결론: 격납건물 온도를 110 ℃이하로 냉각해야함!
- Or 최대 격납건물 압력을 올린다?

▶ AP1000 PT: 만족

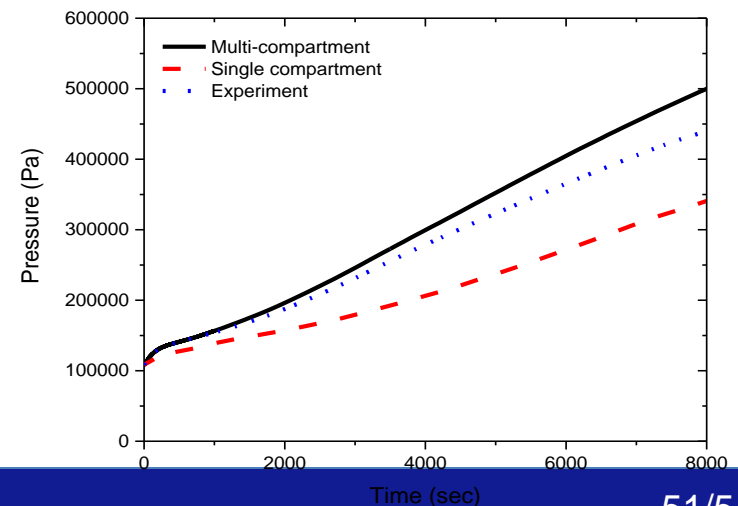
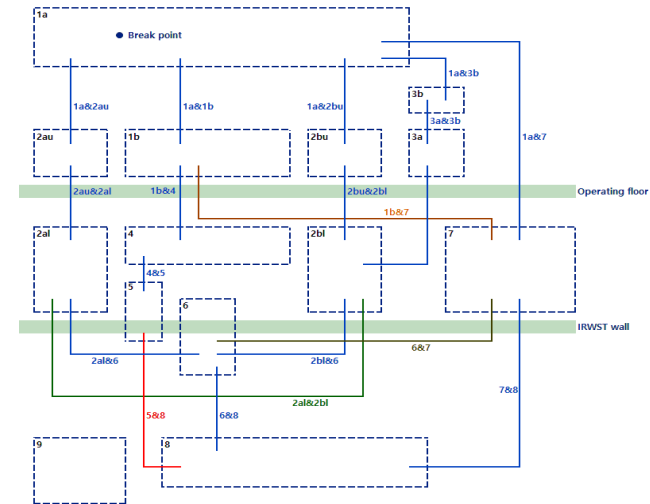
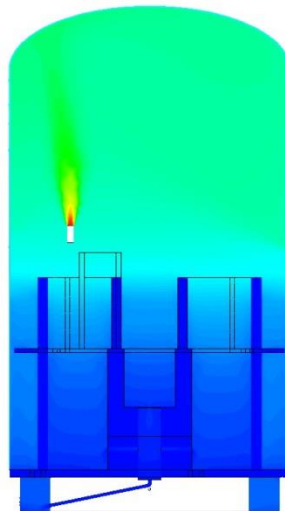
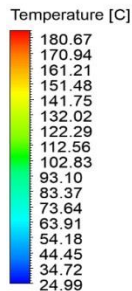
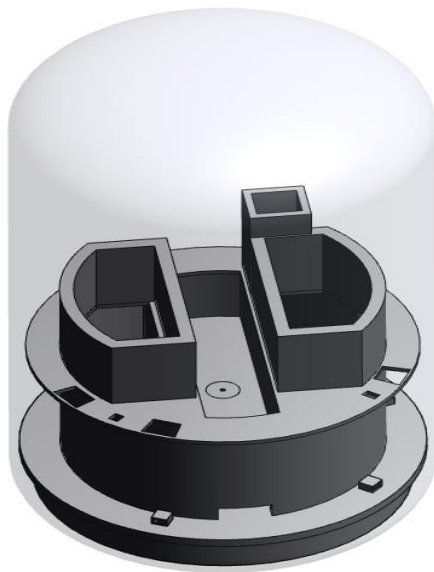
- 공기냉각 (저온 열침원)
- 높은 침두 압력



04. PCCS 성능 분석

■ ATLAS-CUBE (KAERI) 설계 지원 및 실험 분석

- ▶ 장치 설계를 위한 Scaling Analysis
- ▶ 실험 결과에 대한 CAP Assessment
 - 비균질 대기 분석: 다격실 모델
- ▶ CFD 분석으로 Field 정보 재생산



04. PCCS 성능 분석

■ PCCS 적용 시 현안 및 주안점

▶ 격납건물 내 PCCS 배치 및 설치 문제와 응축수 회수

▶ 24시간 내 1/2 감압 실패

- 수조 용량 vs. 수온 상승의 관계에 따라 감압 거동

▶ 배관내 유동 불안정성

- 수조 온도 상승에 따른 순환배관 내 불안전성 발생

→ 냉각 성능보다는 배관의 구조적 문제점

▶ 살수가 없는 상황에서 다차원 효과에 따른 PCCS 성능 평가

- PCCS 냉각에 의한 자연순환 구동력이 발생과 PCCS 위치에 따른 감압성능 결정



5. 맺음말

05. 맺음말

■ 대형원전 피동안전계통

- ▶ PAFS는 비교적 1차원적 현상이 지배적
- ▶ PECCS, PCCS는 보다 복잡한 영향 고려 필요
 - 고유 계통에 대한 고유 실험 / 고유 모델

■ 피동안전계통 성능 특성

- ▶ 간단한 원리, 그러나 복잡한 해석
- ▶ 성능이 주요 기기 하나로 결정되는 것이 아니라, 모든 요소가 영향을 미침
 - 다양한 분석 경험
 - 각 기기의 열수력 현상에 대한 고도의 이해를 바탕으로 한 개발
- ▶ 성능 분석 모델의 영향이 매우 크며 이에 대한 평가가 매우 중요
 - 모델에 대한 심층 이해
 - 고유 모델 개발

F

N

C



www.fnctech.com

본 사 : 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13, 32층(영덕동, 흥덕아이티밸리 타워동) 우)16954
TEL. 031-8065-5114 / FAX. 031-8065-5111

연구소 : 경기도 용인시 기흥구 탑실로 46 (주)미래와도전 부설 미래에너지기술연구소 우)17084
TEL. 031-8005-6010 / FAX. 031-8005-6014

대전 지사 : 대전시 유성구 대덕대로 593, 10층 1004-2호(도룡동, 대덕테크비즈센터) 우)34112
TEL. 042-867-5114 / FAX. 042-867-5110

UAE 아부다비 지사 : #2335, Sky Tower, Al Reem Island PO Box 5101041, Abu Dhabi, UAE
TEL. +971-2-406-9719

THANK YOU