

SMART 피동안전계통 검증시험

2022. 7. 8.

박현식, 배황, 양진화, 유승엽, 문주형(KAERI), 홍순준(FNC)
(hspark@kaeri.re.kr)

혁신계통안전연구부
한국원자력연구원

- 피동안전계통 개요
- SMART 피동안전계통 검증시험
- SMART 피동잔열제거계통(PRHRS)
 - 계통 특성, 인허가 이슈, 주요 현상 및 시험결과
- SMART 피동안전주입계통/자동감압계통(PSIS/ADS)
 - 계통 특성, 인허가 이슈, 주요 현상 및 시험결과
- SMART 격납건물압력및방사능저감계통(CPRSS)
 - 계통 특성, 인허가 이슈, 주요 현상 및 시험결과
- 요약

□ 피동안전계통에 대한 IAEA 정의

○ 피동기기 또는 구조물로만 구성되거나, 피동 작동이 가능하도록 매우 제한된 방식으로 능동기기를 사용하는 계통

▶ Either a system which is composed entirely of passive components and structures or a system which uses active components in a very limited way to initiate subsequent passive operation. (IAEA-TECDOC-626, 1991)

○ 피동성 정도 구분을 위해 4개 범주로 구분 → Category A, B, C, D (IAEA-TECDOC-1624, 2009)

▶ 외부 전원 또는 힘을 사용하지 않는 안전계통은 피동안전계통임.(A~D)

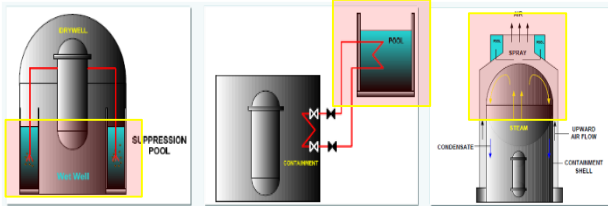
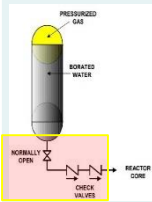
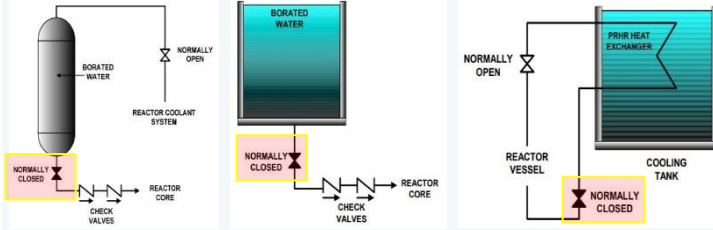
▶ Category A: It has no external power sources or forces, no signal inputs of 'intelligence', no moving mechanical parts, and no moving working fluid.

Category vs Degree of passivity	A (high)	B	C	D (low)
External power sources or forces, 외부 전원 또는 힘	No	No	No	No
Signal inputs of intelligence, 지능적인 신호 입력	No	No	No	Yes
Moving mechanical parts (→ device), 가동 기기	No	No	Yes	Limited
Moving working fluid (→ convection fluid), 가동 유체	No	Yes	Yes	Limited

피동안전계통: 분류 (1/3)

□ 피동안전계통에 대한 IAEA 분류 IAEA-TECDOC-1624 (IAEA, 2009)

○ Four categories: Category A, B, C, D (Highest passivity in Category A)

Category	Degree of passivity	Examples	
A	<ul style="list-style-type: none"> no signal inputs of 'intelligence' no external power sources or forces no moving mechanical parts, and no moving working fluid. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Structure (구조물) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Physical barriers such as fuel cladding, RCS ✓ Hardened building structure, Containment ✓ Core cooling systems relying only on conduction (전도) or radiation (복사)
B	<ul style="list-style-type: none"> no signal inputs of 'intelligence' no external power sources or forces no moving mechanical parts; but moving working fluids. (→ convection fluid) (대류) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Suppression pools (B&C) ✓ CTMT HR (B&D) ✓ CTMT spray (B&D) 	
C	<ul style="list-style-type: none"> no signal inputs of 'intelligence' no external power sources or forces; but moving mechanical parts (→ device such as check valve), whether or not moving working fluids are also present. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Accumulator 	
D	<ul style="list-style-type: none"> signal inputs of 'intelligence' to initiate the passive process energy to initiate the process must be from stored sources such as batteries or elevated fluids active components are limited to controls, instrumentation and valves to initiate the passive system manual initiation is excluded. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Core Makeup Tanks ✓ Drank Tanks ✓ PRHR HXs 	

피동안전계통: 정의 및 분류 (2/3)

□ 피동안전계통에 대한 IAEA 분류 IAEA-TECDOC-1624 (IAEA, 2009)

○ 신형원자로 피동안전계통: 노심잔열 제거, 격납용기 냉각

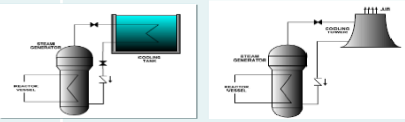
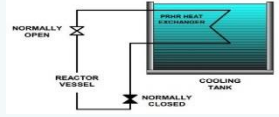
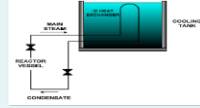
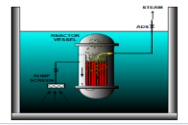
ID	Functions	Abbreviation	Description
PSS-A	Core Decay Heat Removal (노심잔열 제거)	Passive-Decay Heat	PSIS, PRHRS
PSS-B	Containment Cooling and Suppression (격납용기 냉각)	Passive-Containment	PCCS

PSIS (피동안전주입계통)

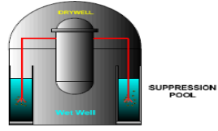
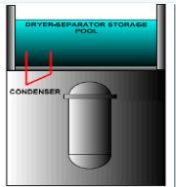

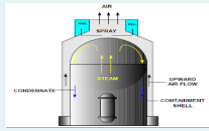
ID	Types	Abbrev.	Schematics	Description	Category
PSS-A-1	Pre-pressurized core flooding tanks (accumulators)	Accumulators		<ul style="list-style-type: none"> - Part of ECCS in existing NPPs - About 75% cold borated water & 25% pressurized gas 	C
PSS-A-2	Elevated tank natural circulation loops (core make-up tanks)	Makeup Tanks		<ul style="list-style-type: none"> - Connected to the RCS without presurized gas 	D
PSS-A-3	Elevated gravity drain tanks	Drain Tanks		<ul style="list-style-type: none"> - Used under low pressure conditions 	D

피동안전계통: 정의 및 분류 (3/3)

PRHRS (피동잔열제거계통)

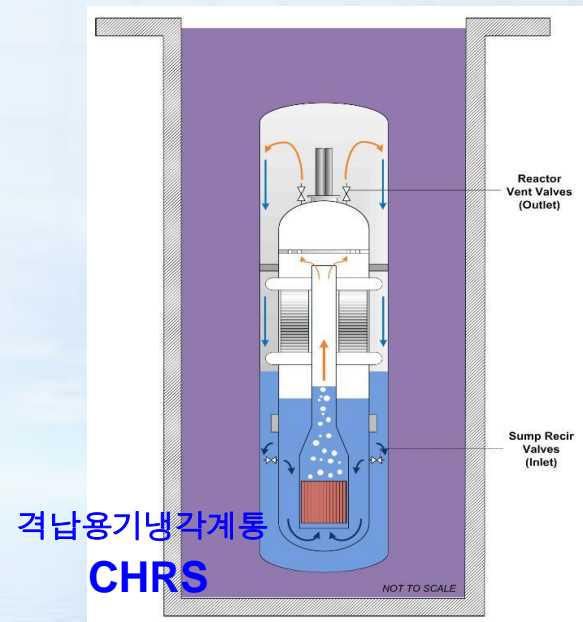
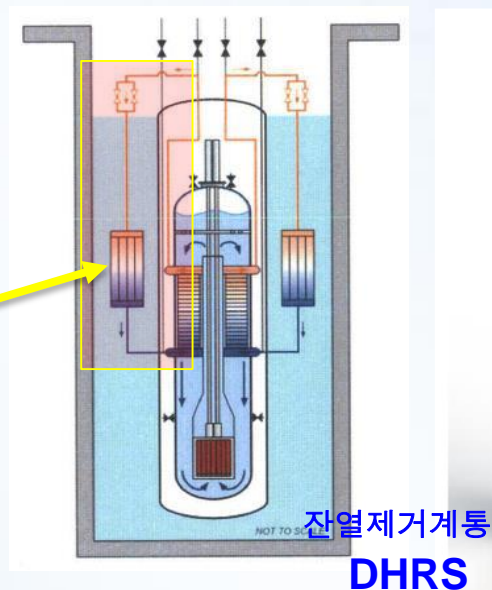
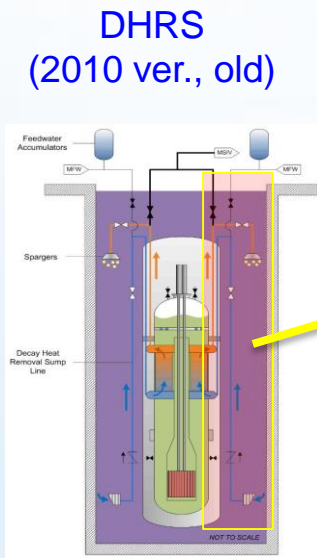
ID	Types	Abbrev.	Schematics	Description	Category
PSS-A-4 (a/b)	Passively cooled steam generator natural circulation (a=water cooled, b=air cooled)	SG NC		- Decay heat is removed passively through the steam generators	D
PSS-A-5	Passive residual heat removal heat exchangers (single-phase liquid)	PRHR HXs		- Provide extended periods of core decay heat removal by transferring heat using a single-phase liquid natural circulation loop	D
PSS-A-6	Passively cooled core isolation condensers (steam)	Isolation Condensers		- Provide extended periods of core decay heat removal by transferring heat using boiling and condensation	D
PSS-A-7	Sump natural circulation	Sump NC		- The reactor is completely immersed in water and the isolation valves are opened. Decay heat removal occurs by boiling in the core.	D

PCCS (피동격납용기냉각계통)

ID	Types	Abbrev.	Schematics	Description	Category
PSS-B-1	Containment pressure suppression pools	Suppression Pools		- Containment pressure reduction following a LOCA using steam condensation in suppression pools	B&C
PSS-B-2 (a/b/c)	Containment passive heat removal/pressure suppression systems (a=Steam Condensation on Condenser Tubes, b=External Natural Circulation Loop, c=(External Steam Condenser Heat Exchanger)	Containment Heat Removal	 	- Containment pressure reduction and heat removal following a LOCA using steam condensation on condenser tubes, an external natural circulation loop and an external steam condenser heat exchanger.	B&D
PSS-B-3	Passive containment spray systems	Containment Spray		- A natural draft air cooled containment, an elevated pool and containment vessel sprays	B&D

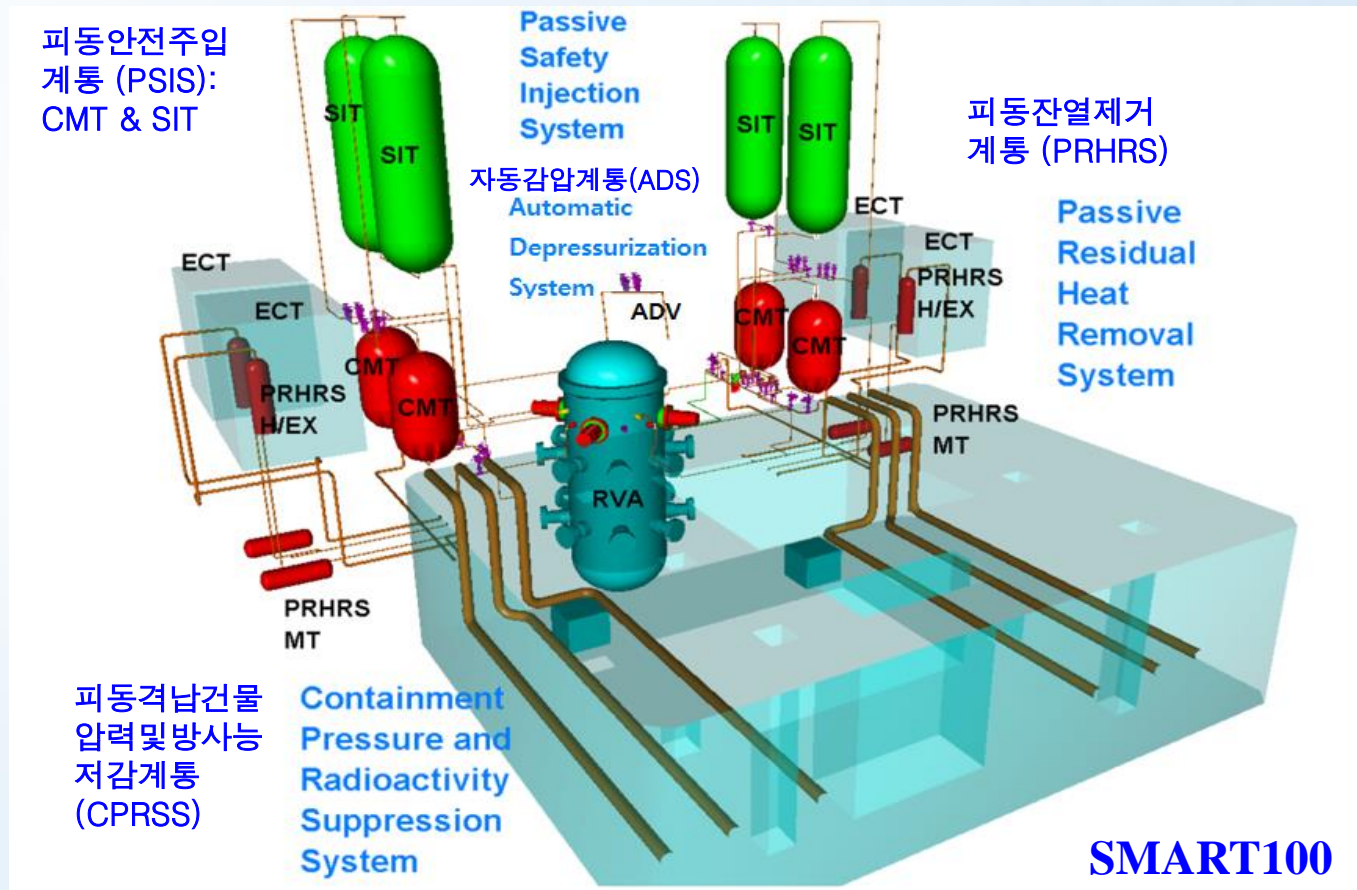
피동안전계통: NuScale

- ❑ DHRS (Decay Heat Removal Using Steam Generators), CHRS (Decay Heat Removal Using Containment) **with inherent PSIS & PCCS function**
- High-pressure containment vessel (CNV, 고압격납용기) is
 - ▶ in vacuum state and submerged in a reactor pool.
- Decay heat is removed to the pool by decay heat removal
 - ▶ through SG (DHRS: Natural Circulation & Sparger → Heat Exchanger) or
 - ▶ condensation on the inside wall of the containment (CHRS).



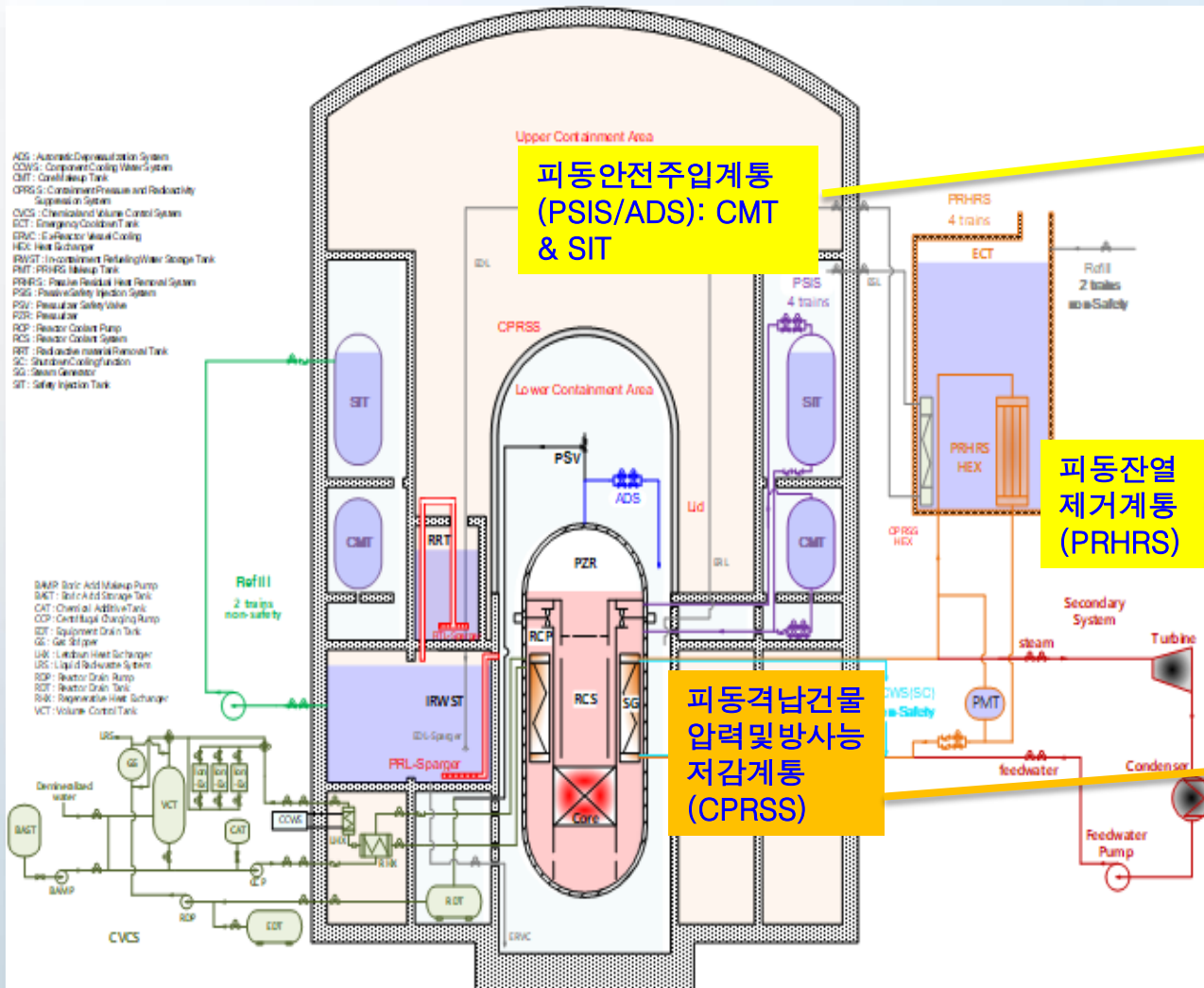
피동안전계통: SMART

- PRHRS (Passive Residual Heat Removal System), PSIS (Passive Safety Injection System), ADS (Automatic Depressurization System), PCCS (Passive Containment Cooling System, or CPRSS)

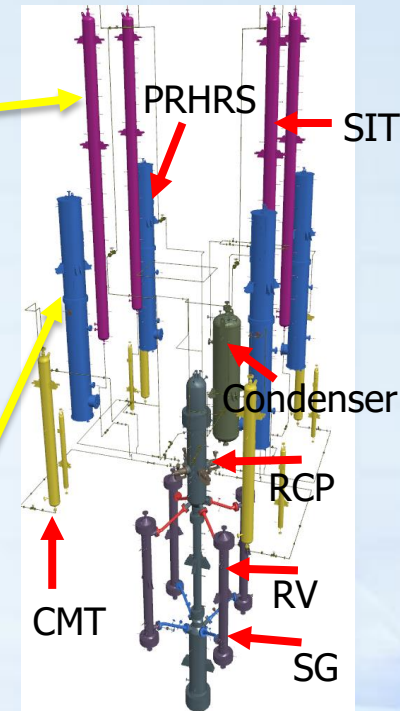


SMART 피동안전계통 검증시험 (1/5)

□ SMART 피동안전계통 검증시설



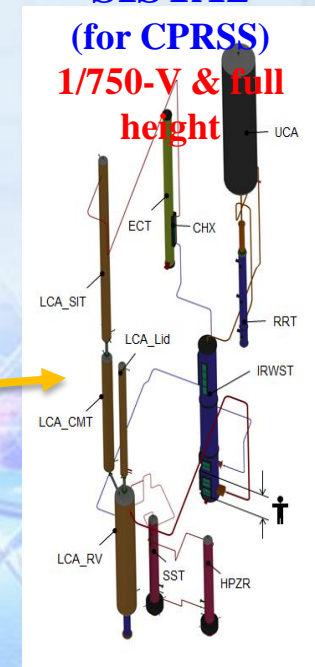
SMART-ITL
(for PRHRS, PSIS/ADS)
1/49-V & full height



SISTA1
(for CPRSS)
1/5000-V & reduced height



SISTA2
(for CPRSS)
1/750-V & full height



VISTA-ITL
(for PRHRS)
1/1310-V & reduced height

SMART 피동안전계통 검증시험 (2/5)

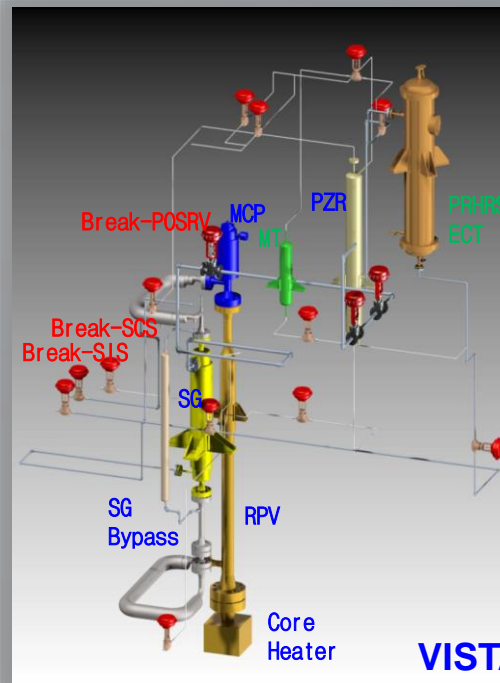
□ SMART PRHRS 검증

○ VISTA-ITL (Integral Test Loop), small-scale

- ▶ Reference Plant: SMART-330
- ▶ Core power : 365 MWth
- ▶ Design press. & temp. : 17.0 MPa / 350 °C
- ▶ Mass flow rate in core : 2,507 kg/s



VISTA-ITL - Photo



VISTA-ITL

○ VISTA-ITL Design Characteristics

- ▶ SG & PRHRS : 1 train
- ▶ Design press. & temp.: 17.0 MPa, 350 °C
- ▶ Major scaling ratio : Length, height, time : 1/2.77; Area : 1/473, volume : 1/1318
- ▶ Maximum core heater power : 0.82 MW (120% of scaled full power)
- ▶ Major systems : Primary/Secondary Systems, Active Safety Injection System (SIS), Passive Residual Heat Removal System (PRHRS), Break System (BS), Break Measuring System (BMS), Auxiliary System

○ VISTA-ITL PRHRS Tests

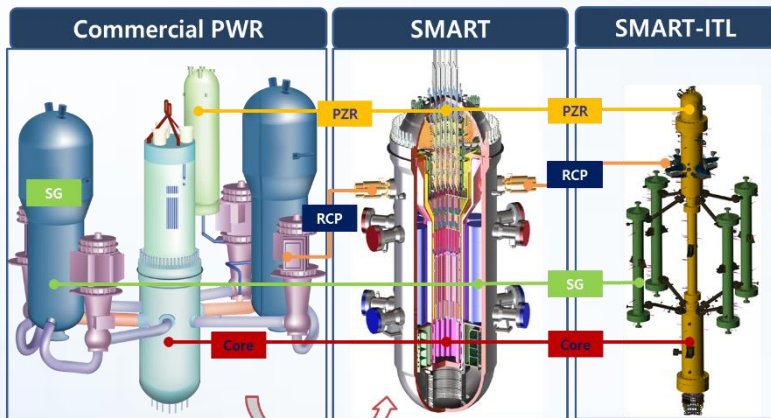
- ▶ SBLOCA Tests / CLOF tests
 - ✓ SIS, SCS, PSV line break
- ▶ PRHRS performance tests
 - ✓ Steady-state tests
 - ✓ Transient test (SBLOCA)

SMART 피동안전계통 검증시험 (3/5)

□ SMART PRHRS/PSIS 검증

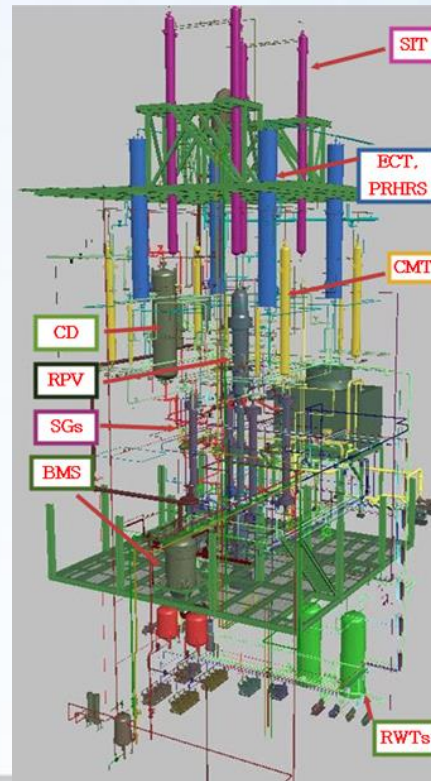
○ SMART-ITL (Integral Test Loop), FESTA

- ▶ Reference Plant: SMART, an Integral Type Reactor
- ▶ Core power : 365 MWth
- ▶ Design press. & temp. : 17.0 MPa / 350 °C
- ▶ Mass flow rate in core : 2,507 kg/s



Parameters	Scale Ratio	SMART-ITL	VISTA-ITL
Length	l_{OR}	1/1	1/2.77
Diameter	d_{OR}	1/7	1/21.75
Area	d_{OR}^2	1/49	1/473
Volume	$l_{OR} d_{OR}^2$	1/49	1/1310
Time scale, Velocity	$l_{OR}^{-1/2}$	1/1	1/1.664
Power/Vol., Heat flux	$l_{OR}^{-1/2}$	1/1	1.664
Core power, Flow rate	$d_{OR}^2 l_{OR}^{1/2}$	1/49	1/787
Pump head, Pres. drop	l_{OR}	1/1	1/2.77

SMART-ITL



○ SMART-ITL Design Characteristics

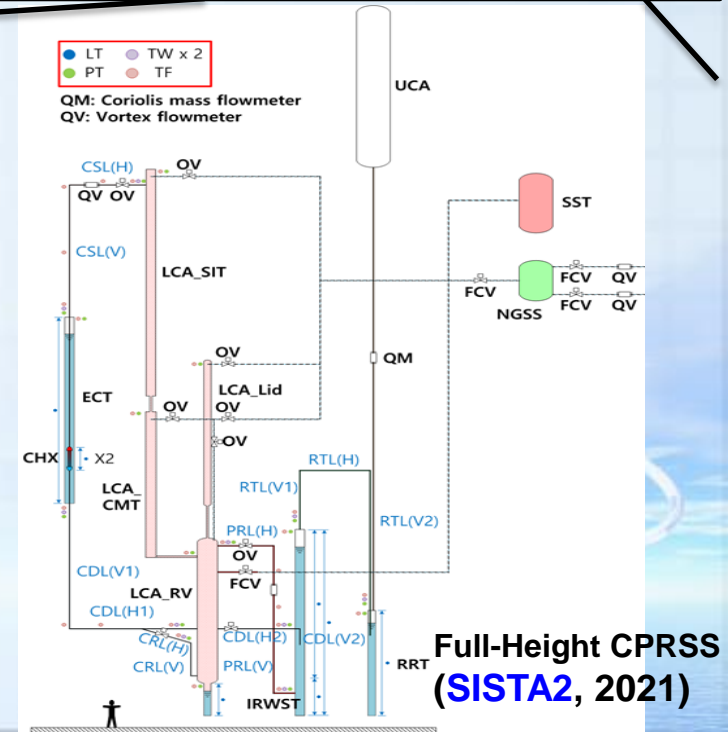
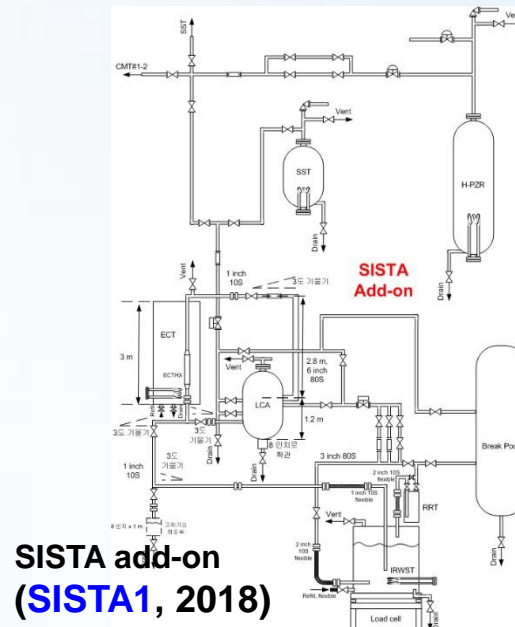
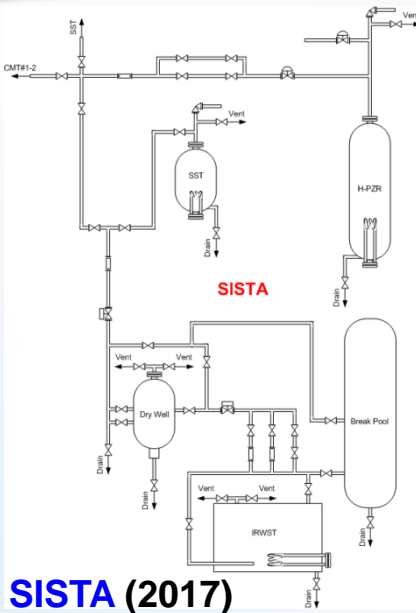
- ▶ SG & PRHRS & PSIS : 4 trains
- ▶ Design press. & temp.: 170 bar, 350 °C
- ▶ Major scaling ratio : Length, height, time : 1/1; Area, volume : 1/49
- ▶ Maximum core heater power : 2.0 MW (30% of scaled full power)
- ▶ Major systems : Primary/Secondary Systems, Passive/Active Safety Injection System (PSIS & SIS), Passive Residual Heat Removal System (PRHRS), Break System (BS), Break Measuring System (BMS), Auxiliary System

○ SMART-ITL PRHRS/PSIS Tests

- ▶ PSIS performance tests
 - ✓ 1, 2, 4-train PSIS tests (2, 0.4 inch SBLOCA)
 - ✓ 7/32 inch smallest SBLOCA
- ▶ PRHRS performance tests
 - ✓ Effect of RCS Temp. & Train No.

SMART 피동안전계통 검증시험 (4/5)

□ SMART CPRSS 검증 경과



SMART 피동안전계통 검증시험 (5/5)

□ SMART CPRSS 검증

○ SET → IST (Integral System Test)

SISTA1: SMART IRWST Separate effect Test Apparatus1
SISTA2: SMART-CPRSS Integral System Test Apparatus2

		CPRSS	SISTA1	SISTA2
Objectives		SMART PCCS	Conceptual validation Separated effect tests	SDCA support
Design reference		MARS analysis (FNC)	Modified MARS analysis	PPE PSAR
Scaling ratios	V	1	1:2,000 → 1:5,000	1:750
	H	1	1:10	1:1
Capability for reproducing of significant phenomena				
1	Pressure difference	-	X	O (reduced UCA)
2	CHX condensation	-	Δ	O
3	IRWST DCC	-	Δ	O
4	Chugging on sparger	-	Δ (PRL / CDL = 2 / 1)	Δ (PRL / CDL = 4 / 1)
5	Long term simulation	-	X	O
6	NC gas distribution	-	X	Δ

SMART 피동잔열제거계통(PRHRS) (1/8)

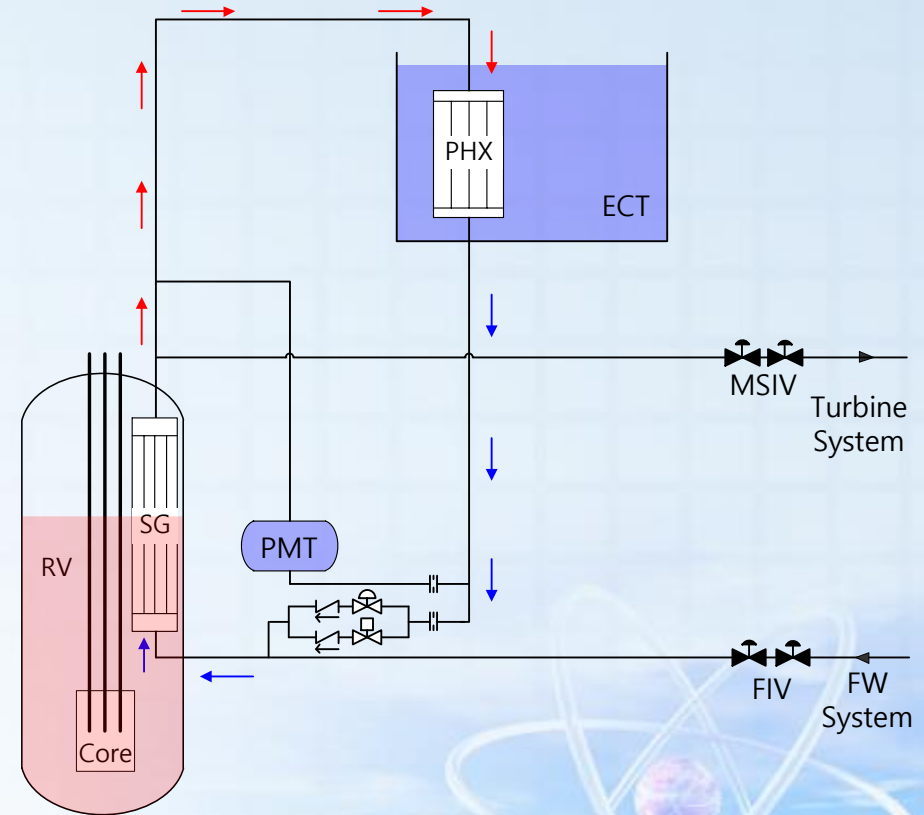
□ SMART PRHRS 설계 특성 (1)

○ 주요 기능

- ▶ 주로 non-LOCA 설계기준사고(DBA)에 대해 안전정지조건(safety shutdown condition, 고온정지)을 달성/유지하기 위해 원자로냉각재계통(RCS)의 잔열 및 현열(residual and sensible heat)을 제거함

○ 계통 구성

- ▶ 독립적인 4계열
- ▶ 설계 압력: 17 MPa
- ▶ PRHRS 열교환기 (PHX)
- ▶ PRHRS 보충탱크 (PMT)
- ▶ 물 주입 배관
- ▶ 증기 방출 배관
- ▶ 밸브 및 계측기 등

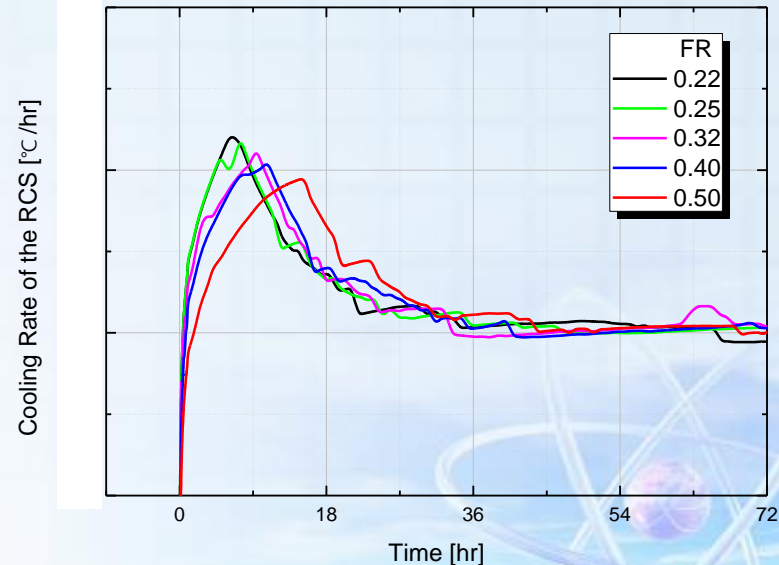
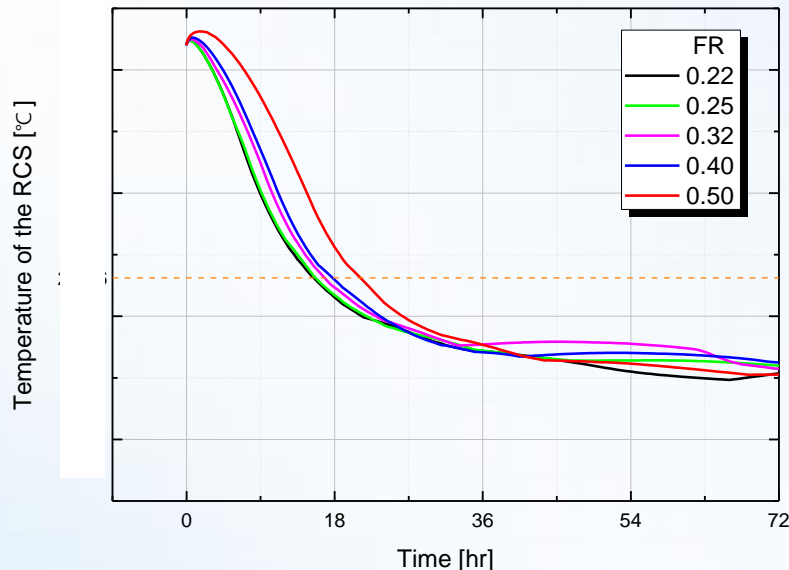


SMART PRHRS 개략도

□ SMART PRHRS 설계 특성 (2)

○ 성능 설계 요건 (Performance Design Requirements)

- ▶ 원자로냉각재계통(RCS)는 운전원의 도움이나 외부 교류전원(External AC power) 없이 사고 발생 후 36 시간 이내에 안전정지조건 온도(215.6°C , 고온정지)보다 낮은 온도에 도달하여야 하고, 사고 후 최소 72시간까지 이 상태를 유지하여야 한다.
- ▶ 원자로냉각재계통의 냉각률은 최대 허용치(40°C/hr)를 넘지 않아야 한다.



SMART PRHRS 성능 해석 예측

(PRHRS 3계열 운전 중의 RCS 온도 및 냉각률)

□ SMART PRHRS 인허가 이슈 (1)

○ 주요 질의 #1:

- ▶ 원자로냉각재계통을 '36시간' 이내에 안전정지조건 온도와 같거나 낮게 냉각하고, 이 조건을 '72시간'까지 유지하는 것으로 수립된 설계기준에 대한 근거 및 배경과 적합성의 제시 필요.

○ 답변 요약:

- ▶ 미국 원자력규제위원회 규제지침서(RG) 1.139에 따르면, 36시간 이내에 저온정지조건을 달성할 것을 요구함.
- ▶ 전력연구소 사용자요건서 (EPRI URD)는 피동형 원자로에서는 저온정지조건을 달성할 필요가 없으며, 대신 36시간 이내에 안전안정조건(safe stable condition: 420°F (215.6°C))을 달성하고, 72시간 동안 운전원의 조치 없이 안전한 상태를 유지할 것을 요구함.
- ▶ 상기 요건은 SECY-94-084 및 NUREG-0800, SRP 19.3에서 정식 요건으로 채택되었음
- ▶ 한국원자력안전기술원 경수로형 원전 규제지침 7.12 피동형 안전계통 설계(KINS/RG-N07.012, Rev.02, 2021.06.)에 관련 내용이 반영됨.



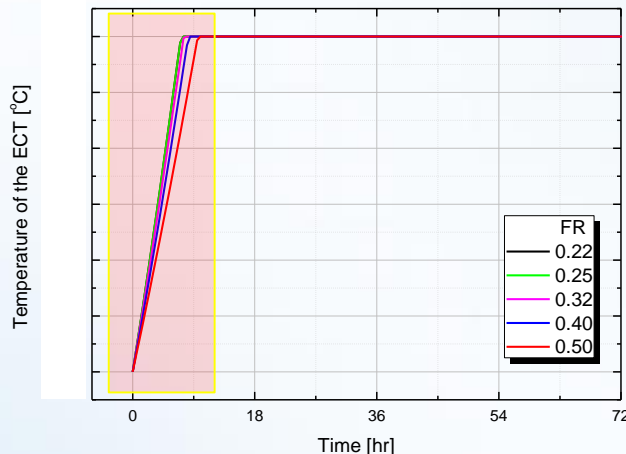
□ SMART PRHRS 인허가 이슈 (2)

○ 주요 질의 #2:

- ▶ 최종 열제거원으로 비상냉각탱크를 제시하고 있는데, 비상냉각탱크 용량이 최종열제거원으로 충분한 용량임을 입증하여야 함.

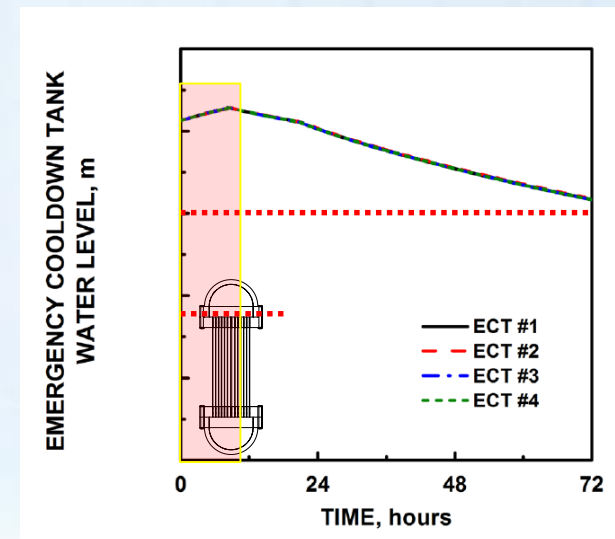
○ 답변 요약:

- ▶ 비상냉각탱크의 수위는 사고 발생 후 72시간 동안 6 m 아래로 떨어지지 않았음.
- ▶ 피동잔열제거계통 열교환기의 전열관 최상단의 높이는 3.6 m이므로 전열관이 수면 밖으로 노출되기에는 상당한 여유가 있음.



시간에 따른 비상냉각탱크 온도 변화

(PRHRS 3계열 운전 중의 ECT 온도)



시간에 따른 비상냉각탱크 수위 변화

(SMART100 표준설계안전성분석보고서 그림 5D-10 인용)

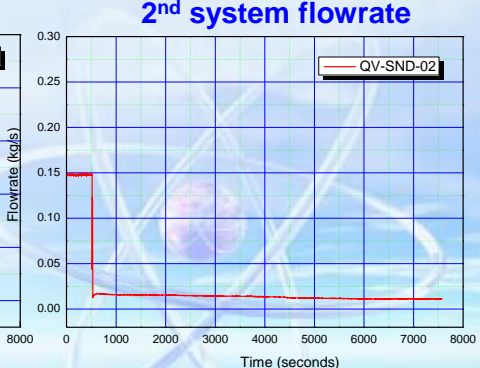
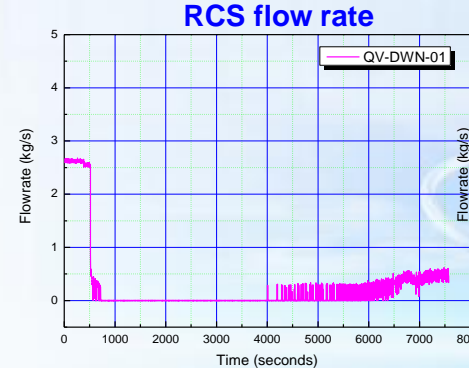
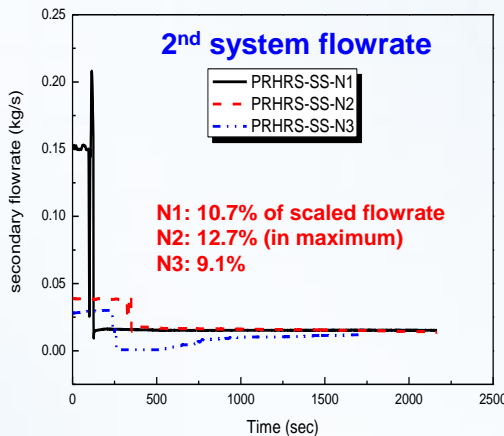
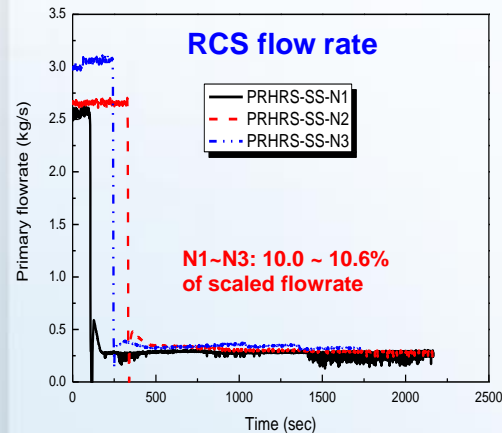
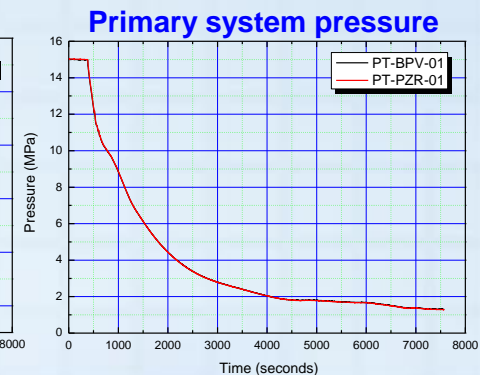
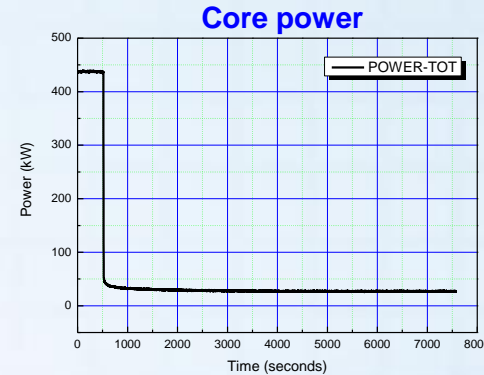
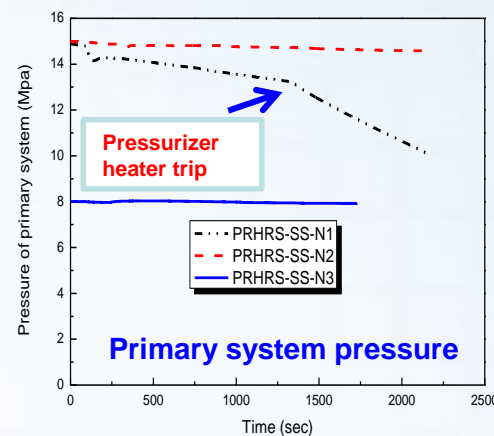
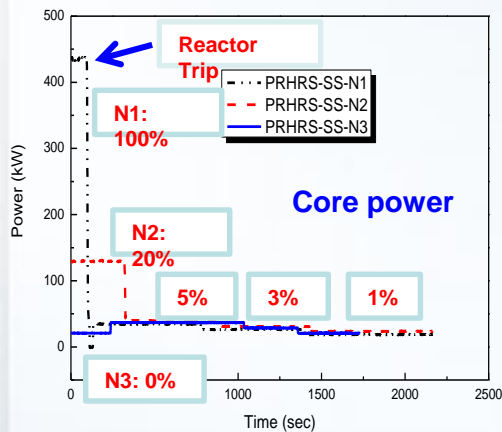
SMART 피동잔열제거계통(PRHRS) (5/8)

□ SMART PRHRS 주요 현상 및 시험결과 (1)

○ VISTA-ITL을 이용한 PRHRS 성능시험 (안전주입: 능동)

- ▶ 정상상태: 정격출력의 100%, 20%, 0%(Hot standby)에서의 PRHRS 성능
- ▶ 과도상태: 안전주입배관(SIS) 배관 파단 SBLOCA 모의시험

Sequence of Event (SOE) – SBLOCA	
SIS break occur	
Reach LPP set-point	
Rx trip signal (FW stop, Pump coastdown)	
Reactor Trip	
PRHR actuation signal	
PRHRS IV full open	
SS FIV/MSIV full close	
Safety injection signal	
Safety injection start	



PRHRS 정상상태 시험 (100%, 20%, 0%)

PRHRS 과도상태 시험 (SBLOCA)

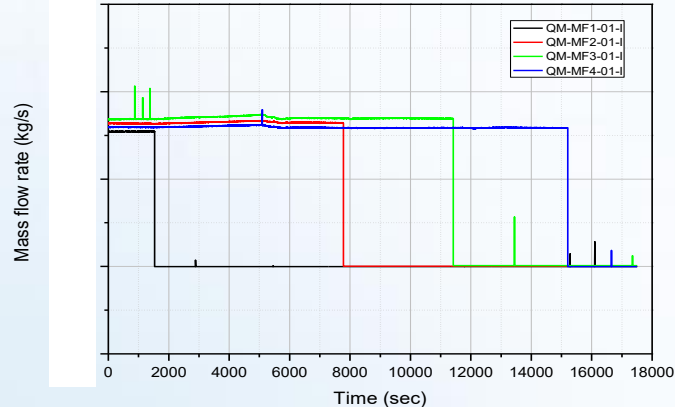
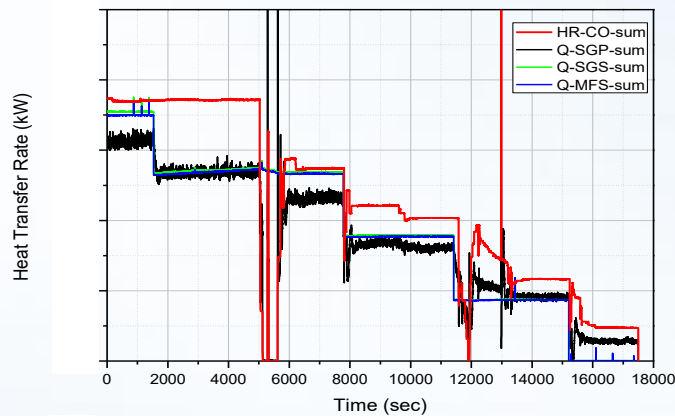
SMART 피동잔열제거계통(PRHRS) (6/8)

□ SMART PRHRS 주요 현상 및 시험결과 (2)

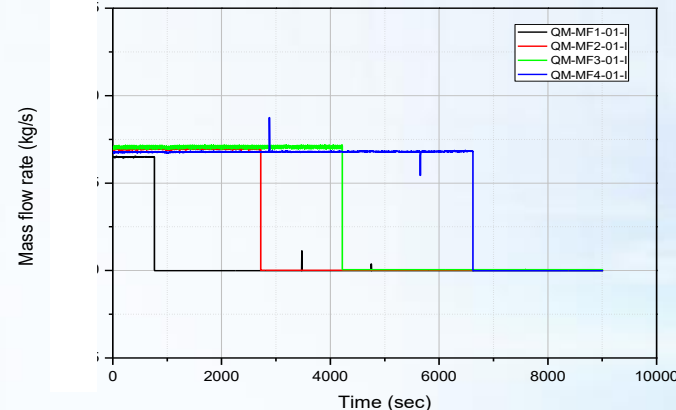
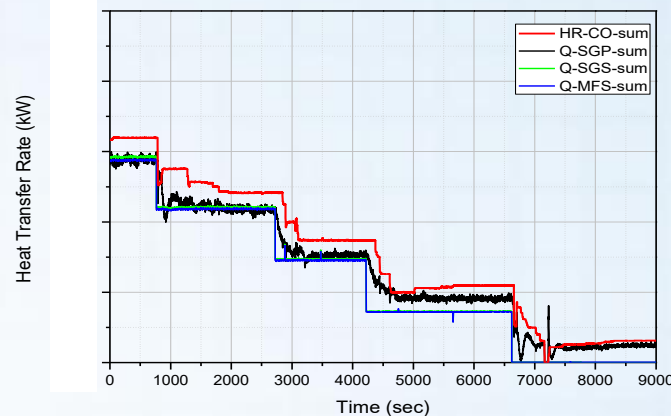
○ 열적 경계(Thermal Boundary)를 정상상태로 유지함: 일정한 RCS 및 ECT 온도

▶ SP-PRHRS-01: RCS 300 °C vs. ECT 100 °C + PRHRS 4→3→2→1 train

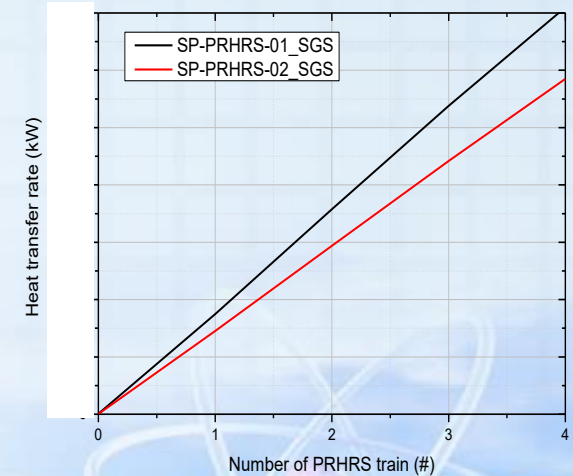
▶ SP-PRHRS-02: RCS 250 °C vs. ECT 100 °C + PRHRS 4→3→2→1 train



SP-PRHRS-01



SP-PRHRS-02

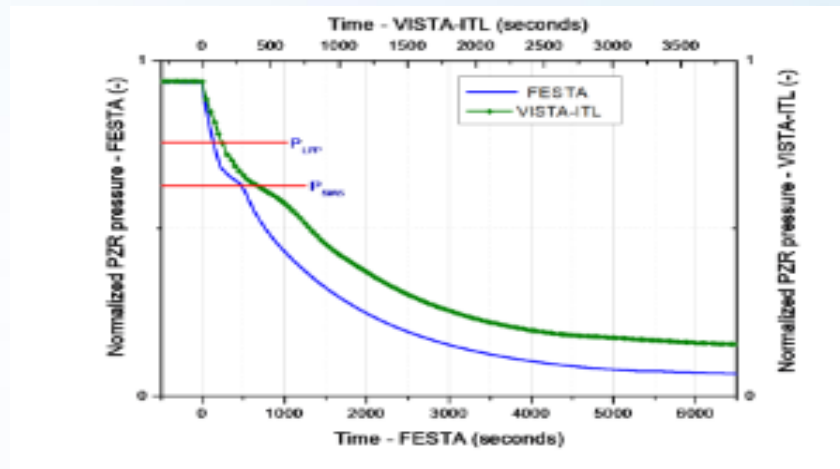


Steady-state heat transfer rate
(SG secondary side)

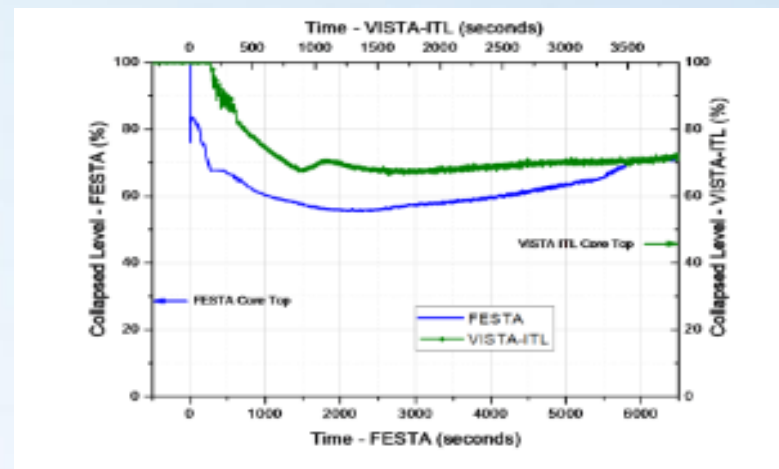
SMART 피동잔열제거계통(PRHRS) (7/8)

□ SMART PRHRS 주요 현상 및 시험결과 (3)

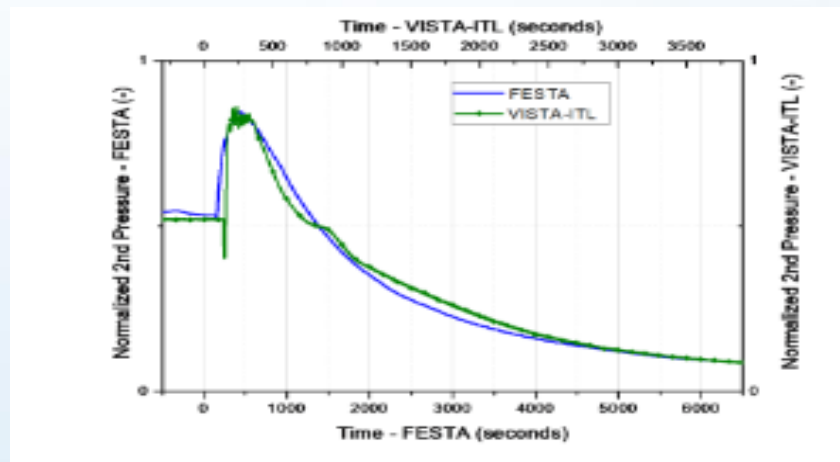
○ SBLOCA 시나리오에 대한 대응시험(VISTA-ITL versus SMART-ITL) 결과 비교



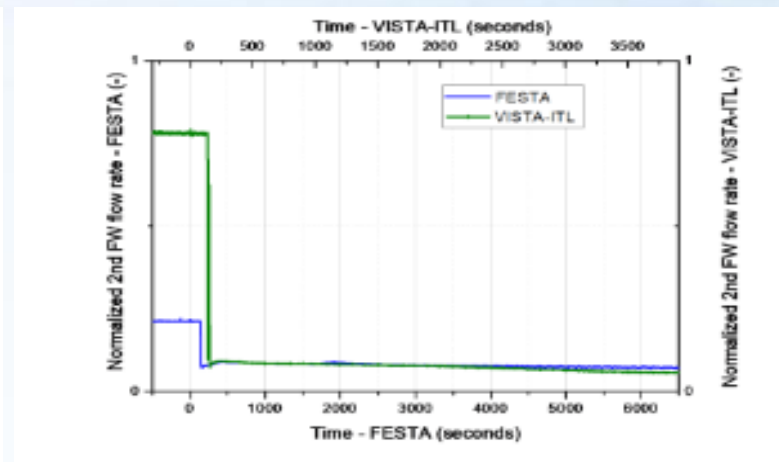
Primary pressure



Collapsed water level



Secondary pressure



Secondary flow rate

SMART 피동잔열제거계통(PRHRS) (8/8)

□ SMART PRHRS 주요 현상 및 시험결과 (4)

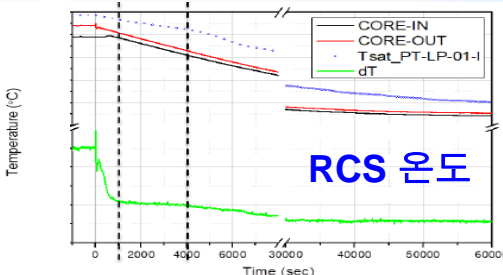
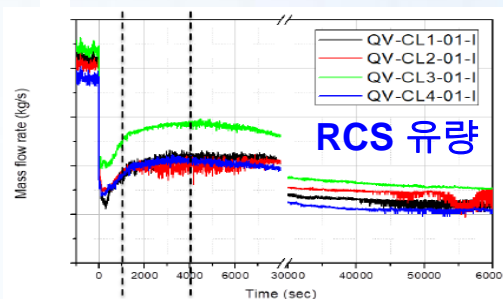
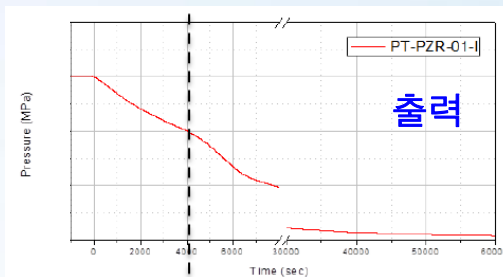
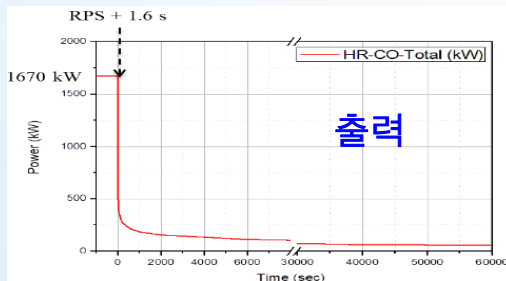
○ 원자로냉각재유량완전상실사고(Complete Loss of RCS Flowrate, CLOF) 모의시험

▶ 원자로 냉각재는 포화온도에서 과냉각도를 유지하면서 냉각되며 시험이 종료될 때까지 안전정지조건인 215°C 이하로 유지된다. → SMART100 자연순환 냉각능력 모사 및 평가 완료

CLOF 시험조건

변수	목표치	측정치
노심출력 (MW)	1.50	1.67 (열손실: 0.17)
노심 입구/출구 (°C)	295.5 / 320.9	295.5 / 320.6
냉각재 유량 (kg/s)	10.23	10.26
가압기 압력 (MPa)	15.00	15.05
가압기 온도 (°C)	342.1	342.1
가압기 수위 (%)	70.0	70.6
노심잔열곡선	ANS-73 × 1.2	ANS-73 × 1.2

시간에 따른 주요 변수 변화



CLOF 시나리오

사건	신호 설정치 및 작동시간
과도발생 (예: 소내정전)	RCP 정지 및 관성 서행 급수펌프 정지 터빈 정지
RCP 저속도 신호(RPS) 설정치 도달	RCP 저속도 (정격속도의 90%) RCP 정지 후 +0.37초
원자로정지신호 발생 - 피동잔열제거계통신호(PRHRSAS) 발생 - 노심보충탱크작동신호(CMTAS) 발생 - 주증기/급수 격리밸브 폐쇄 시작 - 피동잔열제거계통 격리밸브 개방 시작	RPS 설정치 도달 후 +1.1초
제어봉 삽입	RPS 설정치 도달 후 +1.6초 (원자로정지신호 발생 후 +0.5초)
4계열 노심보충탱크 주입	RPS 설정치 도달 후 +2.2초 (CMTAS 발생 후 +1.1초)
주증기/급수 격리밸브 완전 폐쇄 피동잔열제거계통 격리밸브 완전 개방	RPS 설정치 도달 후 +6.1초 (PRHRSAS 발생 후 +5.0초)
사건종료	PRHRSAS 발생 후 +36시간 (냉각재 온도 215°C 이하)

SMART 피동안전주입계통(P SIS/ADS) (1/8)

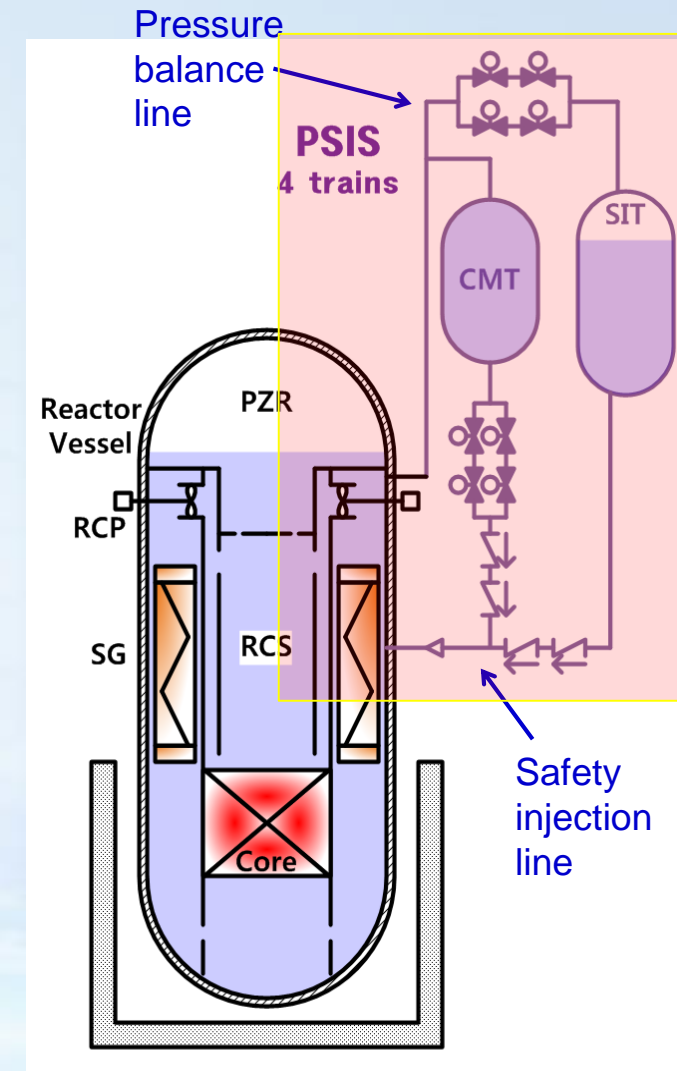
□ SMART PSIS 설계 특성

○ 주요 기능

- ▶ LOCA 시 노심 노출을 방지하기 위해 노심보충탱크(CMT) 및 안전주입탱크(SIT)를 이용하여 중력에 의한 원자로압력용기(RPV)로의 안전 주입
- ▶ Non-LOCA 시 노심보충탱크(CMT)를 이용하여 중력에 의한 봉산수(Borated Water) 주입
- ▶ 기타 기능
 - ✓ 교류전원 또는 운전원 조치 없이 최소 72시간 가동
 - ✓ 중기관파단(SLB) 기인 RCS 급냉에 따른 Shutdown margin 증가를 위해 RCS로의 봉산수 주입
 - ✓ 안전정지(safety shutdown) 동안 비상봉소주입 가능
 - ✓ RCS의 Low Temperature Over-pressurization Protection (LTOP) 제공
 - ✓ 노심 장기냉각을 위해 SIT refilling pump 이용 IWSS 물의 SIT 재충수

○ 계통 구성

- ▶ 독립적인 4계열
- ▶ 노심보충탱크(CMT)
- ▶ 안전주입탱크(SIT)
- ▶ 안전주입배관(Safety Injection Line)
- ▶ 압력평형배관(Pressure Balance Line)
- ▶ 밸브 및 계측기 등



SMART PSIS 개략도

SMART 피동안전주입계통(PSIS/ADS) (2/8)

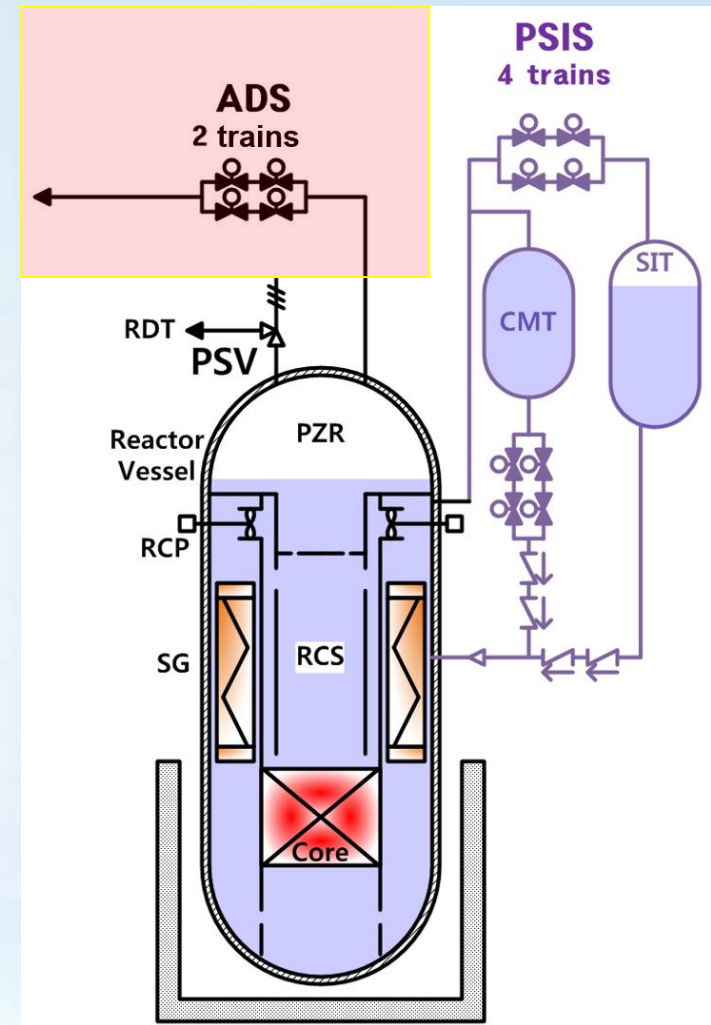
□ SMART ADS 설계 특성

○ 주요 기능

- ▶ LOCA 시 원자로냉각재계통(RCS)의 감압
- ▶ TLOSHR 시 원자로냉각재계통(RCS)의 감압 (Feed : PSIS, Bleed : ADS)
- ▶ 기타 기능
 - ✓ 중력 수두를 이용한 SIT로부터 RCS로의 초기 주입을 위해 급격한 RCS 감압
 - ✓ IWSS로의 SIT 재충수펌프 조기 연결을 위한 RCS 감압
 - ✓ TLOSHR과 같은 bDBA 조건에서 노심잔열을 제거하기 위해 ADS의 수동 운전 및 RCS에 PSIS와 ADS를 연결하여 feed-and-bleed operation

○ 계통 구성

- ▶ 독립적인 2계열
- ▶ 각 계열에 2 x 2 밸브
- ▶ 방출 배관(Discharge Line)
- ▶ 밸브 및 계측기 등



SMART ADS 개략도

SMART 피동안전주입계통(PSIS/ADS) (3/8)

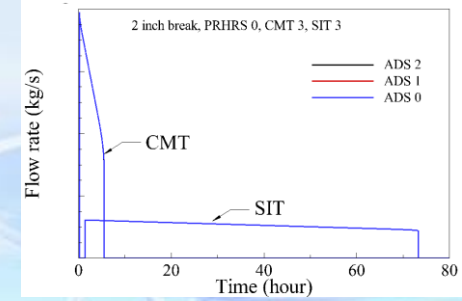
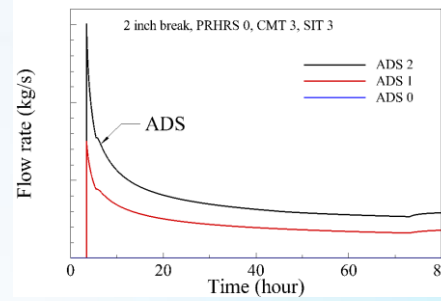
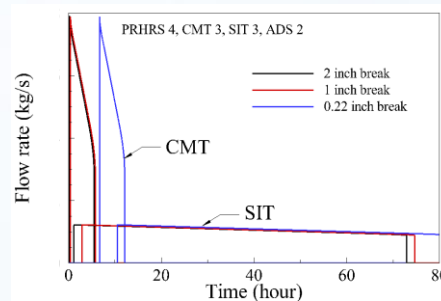
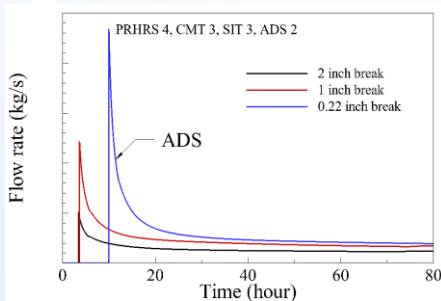
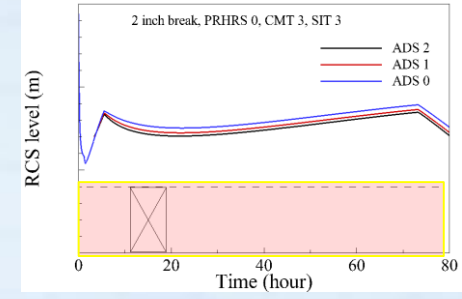
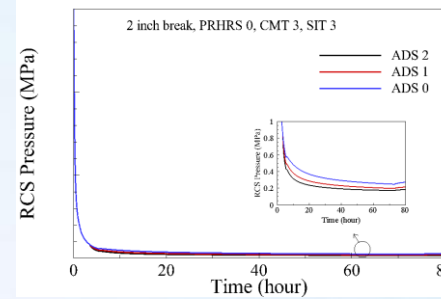
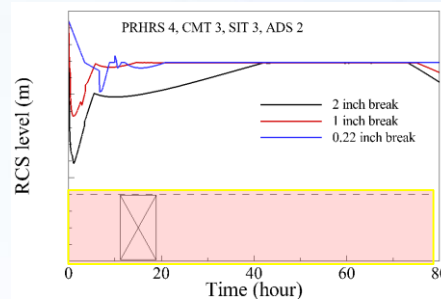
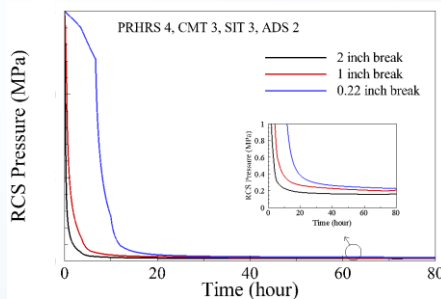
□ SMART PSIS/ADS 설계 특성

○ PSIS 성능 설계 요건 (Performance Design Requirements)

▶ 교류전원 또는 운전원 조치 없이 LOCA 이후 최소 72시간 동안 RCS 수위는 노심을 덮고 있어야 한다.

○ ADS 성능 설계 요건

▶ 교류전원 또는 운전원 조치 없이 LOCA 이후 최소 72시간 동안 재충수 계통의 작동 압력 이하로 RCS 압력을 감압시켜야 한다. PSIS/ADS를 활용한 Feed-and-Bleed 운전을 위해 충분한 방출 능력을 확보해야 한다.



DBA – SBLOCA (2 inch, 1 inch, 0.22 inch)
(PRHRS 4 trains, CMT 3 trains, SIT 3 trains, ADS 2 trains)

Beyond DBA – SBLOCA (2 inch)
(PRHRS 0 train, CMT 3 trains, SIT 3 trains, ADS 0~2 trains)

SMART PSIS/ADS 성능 해석 예측 결과

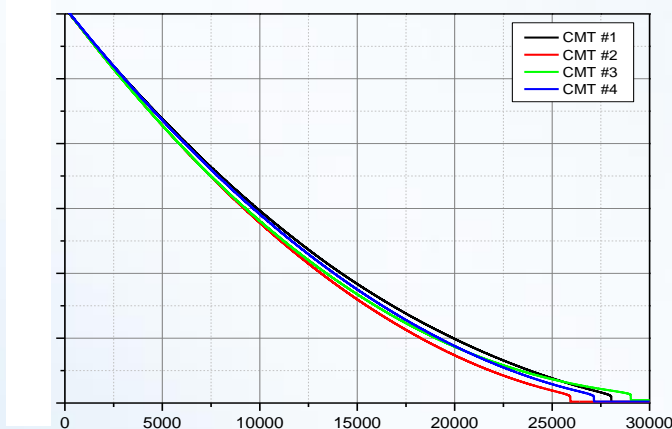
□ SMART PSIS 인허가 이슈

○ 주요 질의 #1: 피동안전주입계통 초기시험 관련 질의, 7번 항목

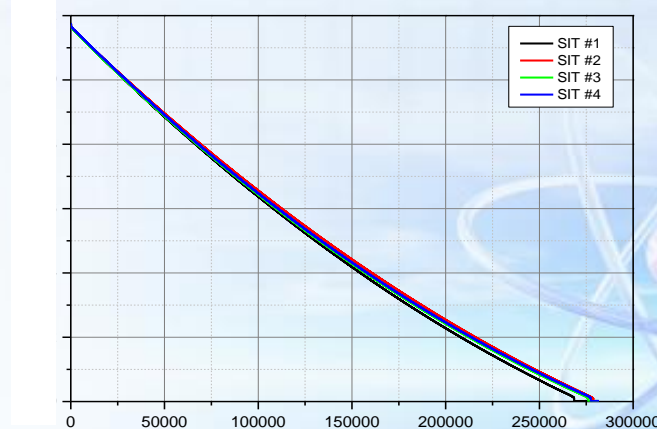
- ▶ SSAR 14.2.13.1.6절의 시험방법 3.6과 관련하여, 제작사의 시간에 따른 노심보충탱크 및 안전주입탱크 수위 변화 곡선을 제시하고, 각 수위변화곡선에 대한 시험 조건 설명.

○ 답변 요약:

- ▶ 탱크 제작사는 시간에 따른 노심보충탱크 및 안전주입탱크 수위 변화 곡선을 제공하지 않으며, 제작사는 설계자가 제공하는 탱크 제작을 위한 크기, 형상 등의 기본 요건에 따라 탱크를 제작하여 공급한다.
- ▶ 시간에 따른 노심보충탱크 및 안전주입탱크 수위 변화 곡선은 이론적 상관식에 의해 산정되며, 검증시험을 통해 상관식이 검증된다.
- ▶ 노심보충탱크와 안전주입탱크 모두 탱크 수위와 탱크 안전주입노즐 사이의 높이차에 따른 중력수두에 의해 주입이 이루어진다.
- ▶ SMART-ITL 검증시험에서의 시간에 따른 탱크 수위 변화곡선은 아래와 같다.



노심보충탱크의 시간에 따른 수위 변화곡선



안전주입탱크의 시간에 따른 수위 변화곡선

SMART 피동안전주입계통(P SIS/ADS) (5/8)

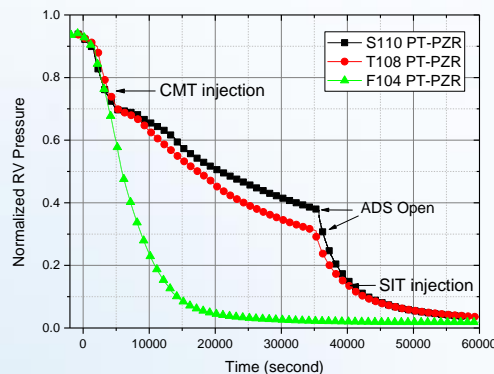
□ SMART PSIS 주요 현상 및 시험결과 (1)

○ 원자로냉각재계통(RCS)에서의 노심 냉각 거동

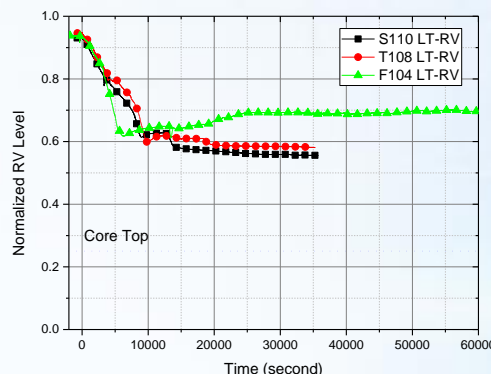
▶ SMART 피동안전계통 검증시험을 위한 Test Matrix (PSIS: 1, 2, 4 계열; PRHRS: 4계열; ADS: 2계열)

No.	1-Train Test	2-Train Test	4-Train Test	Break (inch)	Description
1	S105	T101	F101	2	CMT only
2	S107	T102	F102	2	SIT only
3	S108	T103	F103(R)	2	Reference case
4	S110	T108	F104	0.4	Break size
5	S201	T201	-	2	Pressurized SIT
6	-	-	F301	2	Break @PSV line

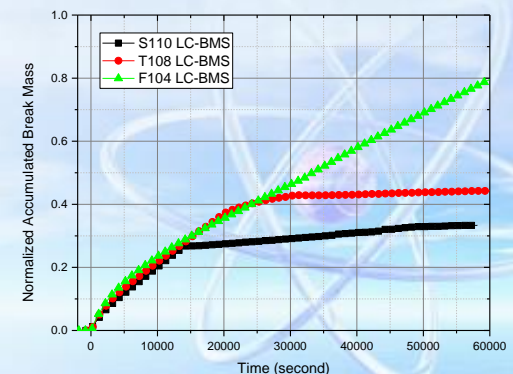
▶ PRHRS 및 PSIS, ADS가 설치된 SMART-ITL에서의 노심냉각 특성을 고찰하기 위해, F104 (4계열 시험)이 S110 (1계열 시험), T108 (2계열 시험)과 함께 비교됨.



RV pressure



RV water level

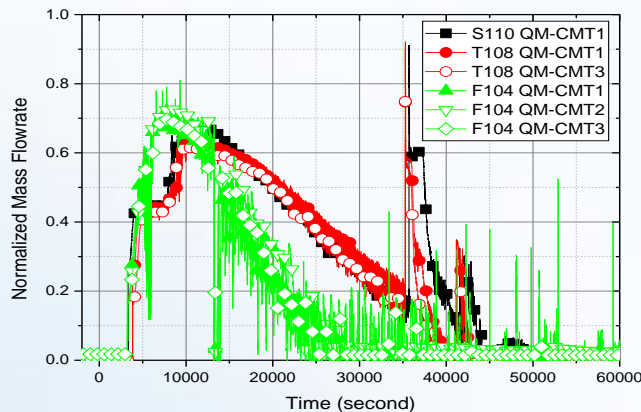


Accumulated break mass

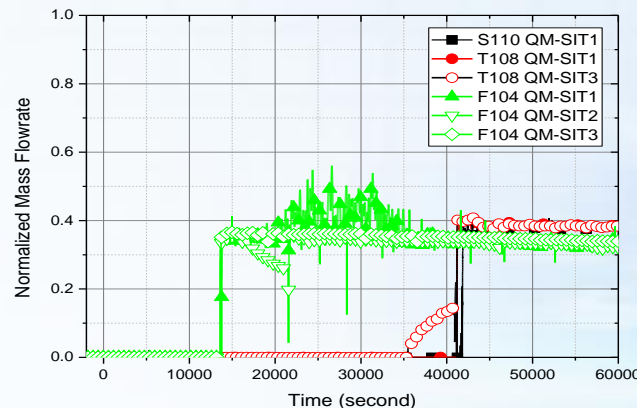
□ SMART PSIS 주요 현상 및 시험결과 (2)

○ 피동안전주입계통(P SIS)에서의 안전 주입 거동

- ▶ SMART PSIS에서의 안전주입 거동을 비교하기 위해, F104 (4계열 시험)이 S110 (1계열 시험), T108 (2계열 시험)과 함께 비교됨.
- ▶ CMT와 SIT의 각 계열은 독립적으로 작동되고, 계열 수에 따른 효과는 무시할 정도로 작음. 즉, 모든 계열의 주입 유량 등이 동일하게 작동됨.
- ▶ S110, T108 시험의 경우, 35,000초 근처에서의 급격한 유량 증가는 ADS #1의 개방에 따른 것임. 41,000초 근처에서의 급격한 유량 증가는 SIT 주입 작동에 기인함.
- ▶ F104 시험에서의 CMT 유량은 S110, T108 시험의 경우와 비교하여 초기 상태에서는 약간 높으나 후기에는 낮아짐.
- ▶ 다른 경우에 비해 F104 시험에서 압력이 빨리 감소하고 SIT 작동신호가 일찍 작동되면서, SIT 주입 유량은 15,000초 근처에서 급격히 증가함.

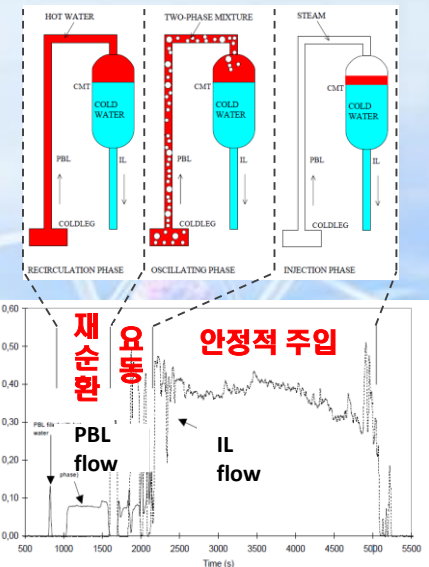


CMT injection flowrates



SIT injection flowrates

T-H
Phenom
ena in
CMT
and
PBL
(PACTEL)

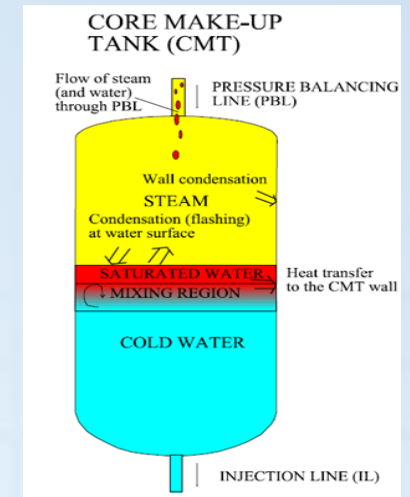


SMART 피동안전주입계통(P SIS/ADS) (7/8)

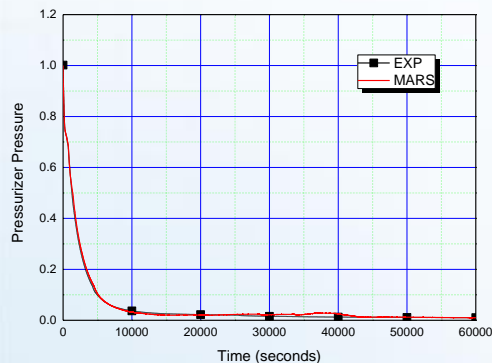
□ SMART PSIS 주요 현상 및 시험결과 (3)

○ 2인치 SIS 배관 SBLOCA 시험(F103) 및 MARS-KS 코드를 이용한 모의

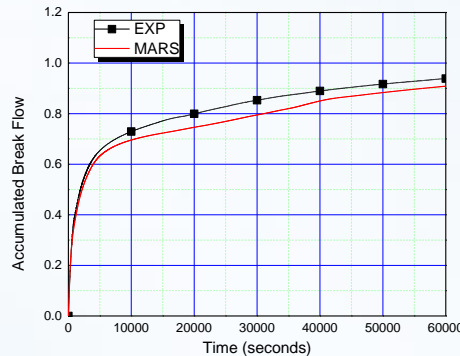
- ▶ RCP 방출부 노즐에 위치한 안전주입계통 배관에서 파단 발생
- ▶ SMART 설계의 양단파단에 해당되는 2 인치 파단
- ▶ PSIS 3계열 작동으로 RPV 수위는 완만히 상승하며, 노심은 항상 잠겨 있음.
- ▶ CMT 수위가 20% 정도 남는 것은 CMT 내부 응축에 의한 압력강하 때문임.
 - ✓ SMART-ITL에서의 CMT 내부 벽면 열전달은 원형로와 비교하여 클 것으로 예측됨.
- ▶ MARS-KS 모의 결과
 - ✓ 압력 및 누적 파단 유량은 MARS-KS에 의해 잘 모의됨.
 - ✓ RPV 수위를 초기에 조금 낮게 예측하나 유사한 경향을 보임.
 - ✓ MARS-KS 코드는 CMT 수위가 20,000~40,000초 구간에서 정체되는 것으로 예측함.
 - ✓ 이는 CMT 내부 및 압력평형배관에서의 과도한 응축량 예측으로 압력평형배관에서의 차압이 크게 예측되어 CMT 물의 중력 구동력을 증가하기 때문임.



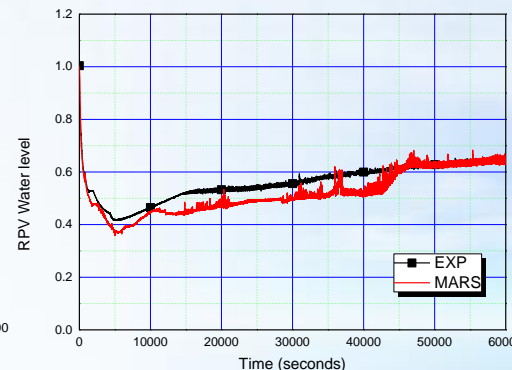
Phenomena in the CMT during injection from CMT



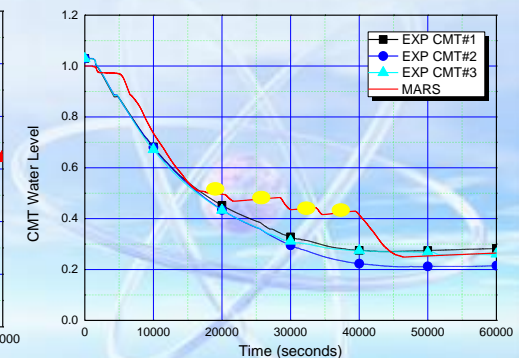
RV pressure



Accumulated break mass



RV water level



CMT water level

□ 계통안전 해석코드(SPACE)를 위한 특수기기모델 개발 및 검증

○ Special component model: Special TH component + Special HS model

- ▶▶ Special thermal-hydraulic component: Realistic calculation of the interfacial heat transfer
- ▶▶ Special heat structure model: Analytical calculation on the heat transfer from the hot steam to the cold tank wall

○ The new model was assessed using the SMART-ITL PSIS test data. (F101)

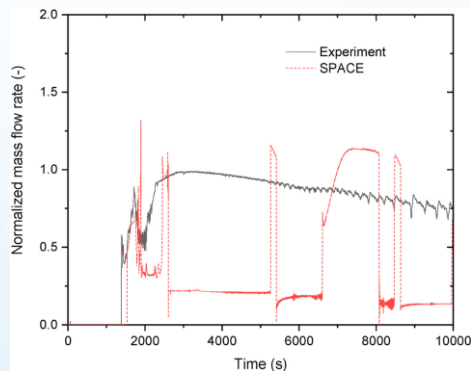


Fig. 7. CMT #1 injection flow rate of the F101 test (normalized).

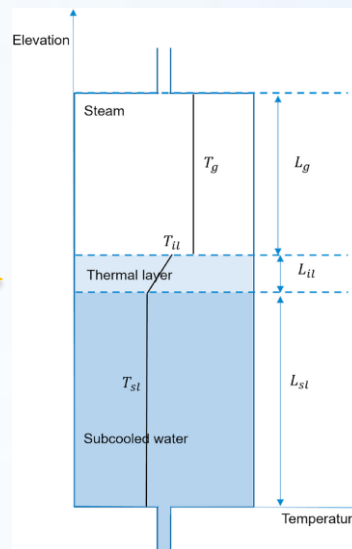


Fig. 13. Temperature distribution in the CMT and SIT.

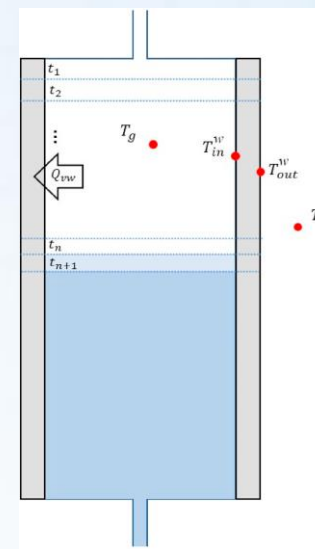


Fig. 14. Heat structure model.

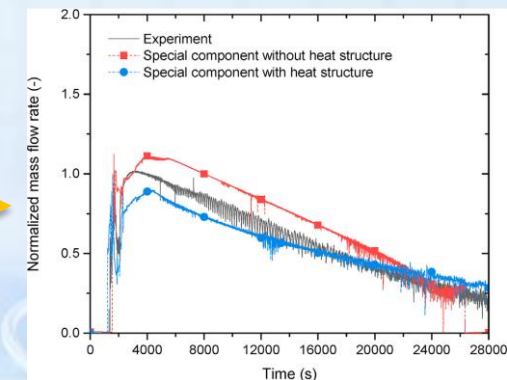


Fig. 16. Measured vs. calculated CMT #1 injection flow rate: F101 test.

SMART 격납용기압력및방사능저감계통(CPRSS) (1/8)

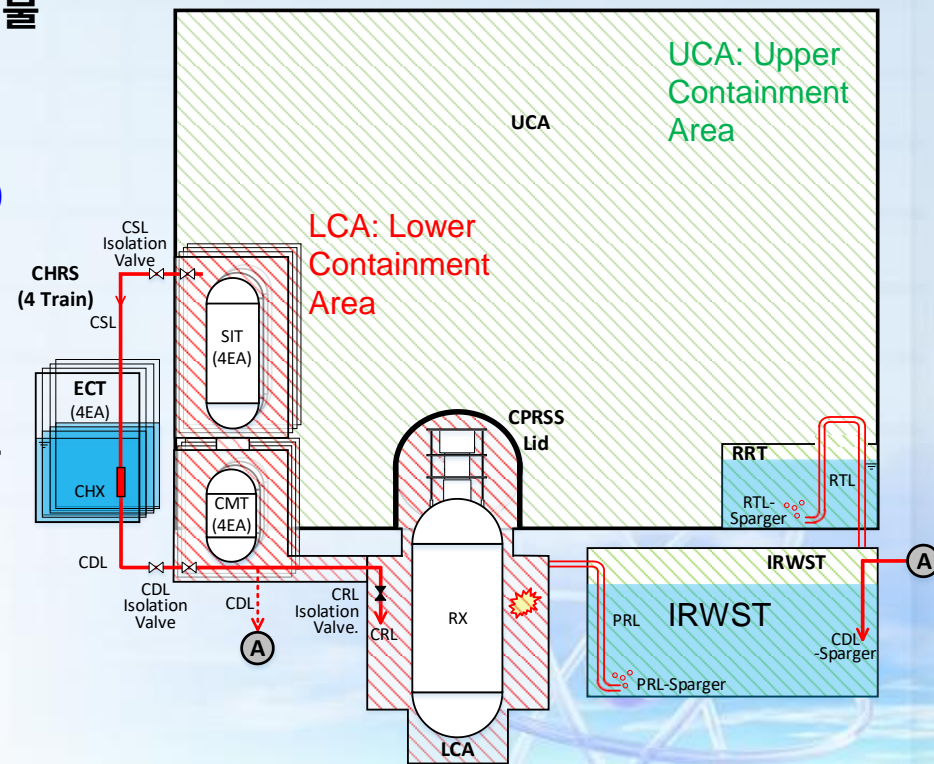
□ SMART CPRSS 설계 특성 (1)

○ 주요 기능

- ▶ LOCA 및 MSLB 발생시 격납건물 압력/온도(P/T)를 낮추기 위해 격납건물 열을 제거함.
- ▶ LOCA 발생시 격납건물 내부에 축적되는 핵분열생성물 (Fission Products)을 제거함.

○ 계통 구성

- ▶ LCA (하부격납건물영역) & UCA (상부격납건물영역)
- ▶ CPRSS Lid (덮개): UCA와 LCA 영역의 분리
- ▶ PRL (Pressure Relief Line, 압력배출배관) & PRL-Sparger (증기분사기)
- ▶ IRWST (격납용기내 핵연료재장전수조)
- ▶ RTL (Radioactive material Transport Line, 방사성물질 이송배관) & RTL-Sparger (증기분사기)
- ▶ RRT (Radioactive material Removal Tank, 방사성물질 제거탱크)
- ▶ CHRS (CPRSS 열제거계통)
 - ✓ ECT / CHX (CPRSS Heat eXchanger) / CSL (CPRSS Steam Line) / CSL Isolation valve / CDL (CPRSS Discharge Line) & CDL-Sparger / CDL Isolation valve / CRL (CPRSS Return Line) / CRL Isolation valve

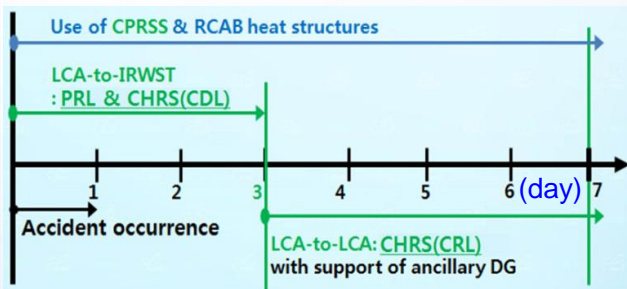


SMART CPRSS 개략도

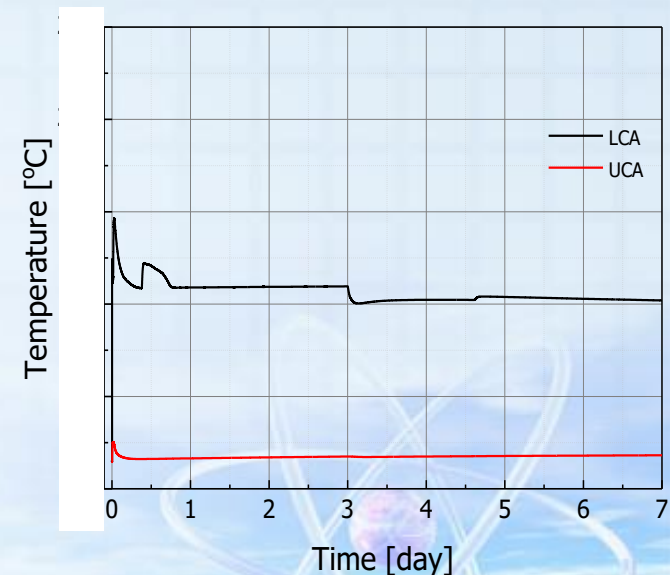
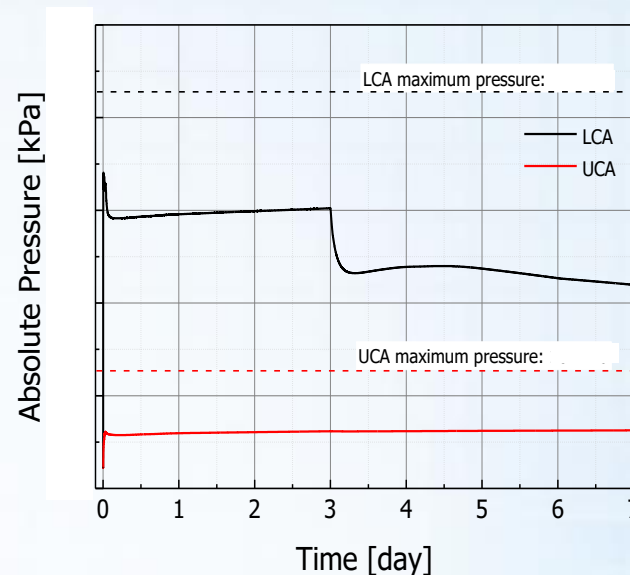
□ SMART CPRSS 설계 특성 (2)

○ CPRSS 성능 설계 요건 (Performance Design Requirements)

- ▶ LOCA/non-LOCA 사고 이후 최소 72시간 동안 교류전원 또는 운전원 조치 없이 격납건물의 압력/온도 (P/T)를 설계압력(Design Pressure) 이하로 억제해야 한다.
- ▶ 72시간 이후, 최소한의 능동기기 도움으로 격납건물의 압력/온도를 설계값보다 (훨씬) 낮은 값으로 유지해야 한다.



Heat Removal Strategy of SMART CPRSS



P/T Simulation Results during SBLOCA

* RCAB: Reactor Containment and Auxiliary Building
(원자로격납및보조건물)

SMART CPRSS 성능 해석 예측 결과

□ SMART CPRSS 인허가 이슈 (1)

○ 72시간 피동 성능의 타당성

- ▶ 미국 EPRI URD 요건으로서 72시간 동안 운전원 조치 없이 피동 방식 작동
- ▶ 72시간 이후 붕괴열 감소 및 방출 질량/에너지 감소로 자연순환 냉각 가능

○ 신속한 감압: 사고후 24시간 이내에 격납건물 압력을 첨두 압력의 50%이하로 감소

- ▶ 안전심사지침서에 따라서 불만족시 방사선비상팀에 통보: 소외선량기준 만족
- ▶ 기존 국내 경수로 대비 더 낮은 압력 유지.
- ▶ 해외 원전(ESBWR 등)의 경우보다 더 낮은 압력 유지 및 설계압력 대비 여유도가 큼
- ▶ 타 노형 격납건물 압력 거동과 비교

○ 격납건물 장기냉각

- ▶ 격납건물 장기냉각계통 개념 수립
- ▶ 낮은 질량/에너지 방출 및 강제순환, IRWST-UCA-LCA 압력 평형(격리밸브 개방)
- ▶ 지속적인 P/T 감소 및 안정화

○ 압력/온도(P/T) 계산 방법론

- ▶ 수계산에 의한 최대 압력 계산: 공기 이동 및 수두 관계
- ▶ CAP 코드로 과도 계산: 코드 version-up 및 보수적 방법론 (ToR 제출)



□ SMART CPRSS 인허가 이슈 (2)

○ 핵분열생성물 제거성능 (DF 값의 타당성): RRT에서의 Pool Scrubbing

- ▶ Sparger 설계(배치 및 형상), 잠긴 깊이(~6 m), 폐하(pH) 유지(사고시 7.0 이상)
- ▶ 유사설계 성능 참조: ESBWR 설계 및 NUREG 보고서
- ▶ 점검 요구사항: 증발 등에 의한 수위 감소 및 보충 방안

○ 격납건물 누설률 시험 방안

- ▶ 공기 용해 영향
- ▶ LCA, UCA의 누설률 시험 방안
- ▶ 기존 기술기준 부합성

○ 수조 내 물의 역류 가능성

- ▶ Vacuum breaker 및 과도 분석을 통한 역류 가능성 배제

○ CSL 증기배관 확대/차압 감소

- ▶ CHRS 열교환 성능 향상

○ 방사능물질 방출 관련 강화된 허용기준

- ▶ 기존 허용기준(Iodine) : < 250 mSv
- ▶ 신규 허용기준(Iodine) : < 50 mSv (USA) & < 25 mSv (EU)
- ▶ 방사능물질 방출 저감을 위해 CPRSS 개념이 도입됨.



SMART 격납용기압력및방사능저감계통(CPRSS) (5/8)

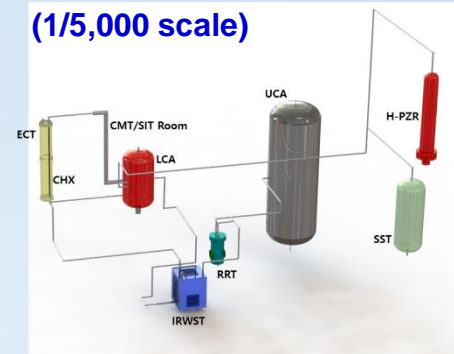
□ SMART CPRSS 주요 현상 및 시험결과 (1)

○ CPRSS PIRT 개발

▶ 시간대 구분

- ✓ 1단계(사고 초기): PRL 및 CDL 증기분사기를 통한 CPRSS의 방출모드 운전 기간
- ✓ 2단계(사고 초기~72시간): CDL 증기분사기를 통한 CPRSS의 방출모드 운전 기간
- ✓ 3단계(72시간 이후): CRL 개방 및 CHRIS 순환모드 운전 기간

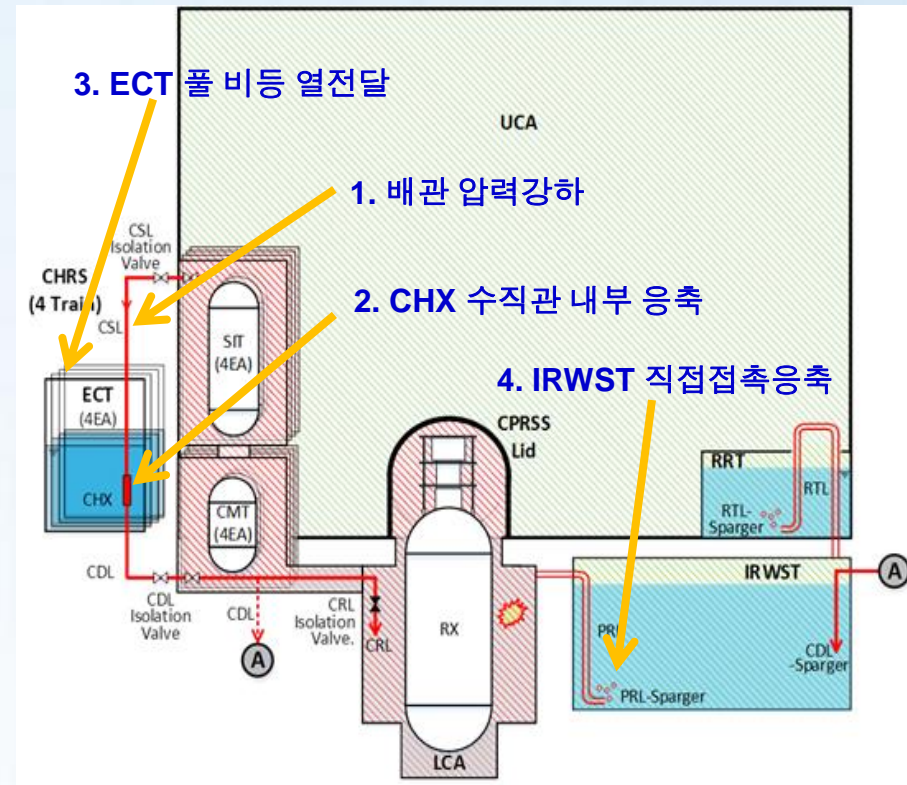
SISTA-1
(1/5,000 scale)



○ 검증이 필요한 (신규) 핵심 현상

순번	주요 현상	평가 방법
1	(각종 배관의) 압력강하	GE 실험 (Janssen, 1964)
2	응축열교환기(CHX)를 통한 응축 열전달	MIT 실험 (Siddique, 1993) KAIST 실험 (Park et al., 1999)
3	비상냉각탱크(ECT) 내부 비등 열전달	코드 간 예측성능 비교 (계통열수력해석코드: MARS)
4	IRWST 내부 직접접촉 응축 열전달	KAERI SISTA1 실험 (2018) KAERI SISTA2 실험 (2021)

○ 기타 현상은 CAP 코드 개발시 검증 완료



SMART 격납용기압력및방사능저감계통(CPRSS) (6/8)

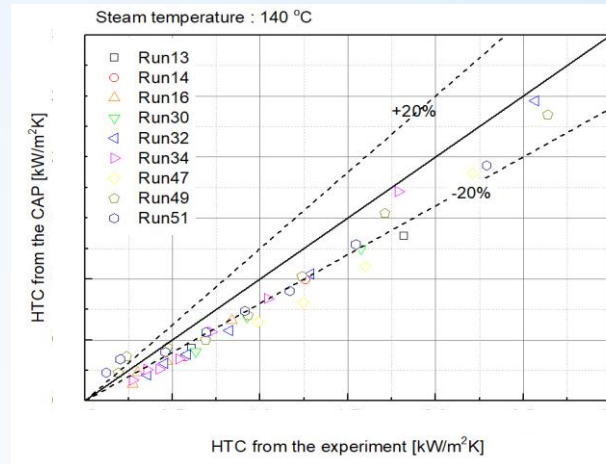
□ SMART CPRSS 주요 현상 및 시험결과 (2)

○ 개별효과실험 결과를 이용한 CAP 코드 검증

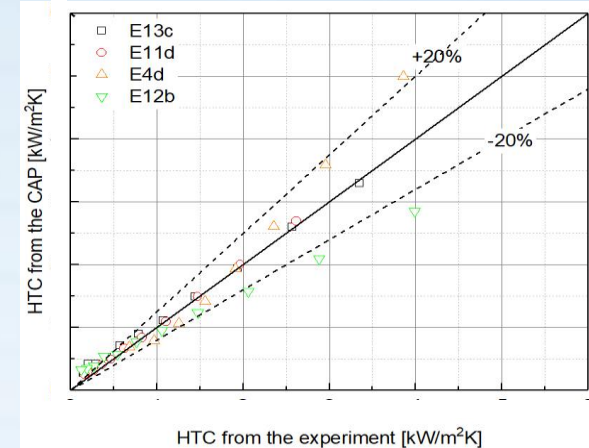
○ 응축 열전달

- ▶ MIT (1993)
- ▶ KAIST (1999)

MIT 수직응축관 실험 (1993)

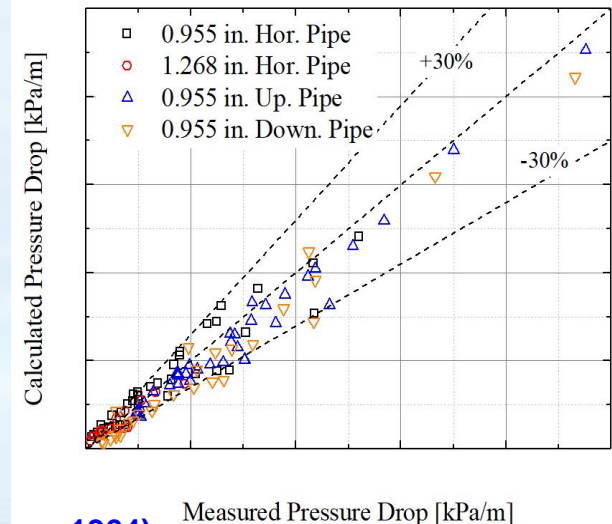
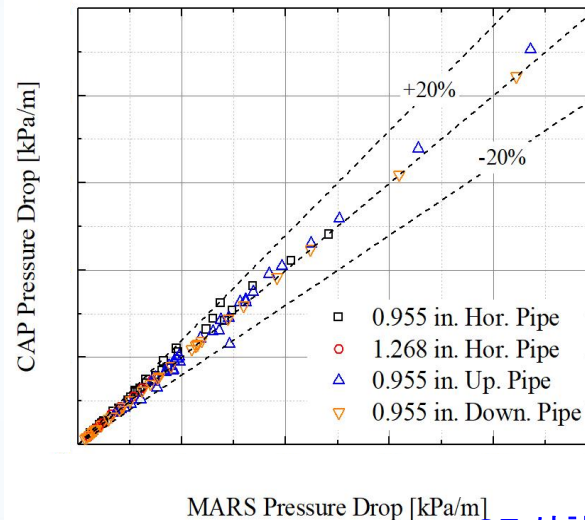


KAIST 수직응축관 실험 (1999)



○ 이상유동 압력강하

- ▶ MARS 코드
- ▶ GE (1964)

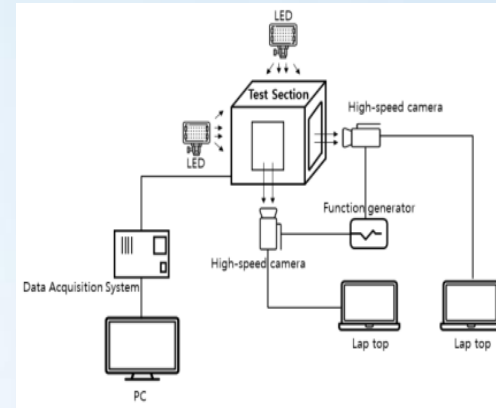


GE 실험 (Janssen, 1964)

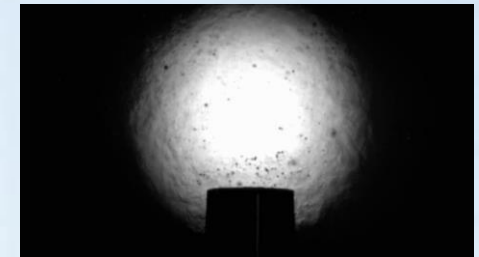
□ SMART CPRSS 주요 현상 및 시험결과 (3)

○ IRWST 내부 직접접촉응축

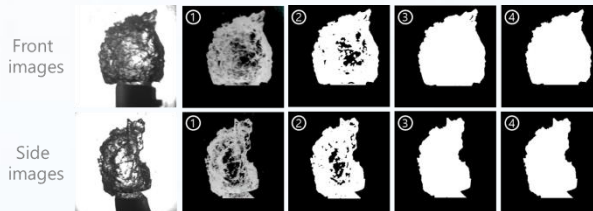
- ▶ Visualization system (유동가시화)
 - ✓ 2 LED/high speed camera + shadow-graphy
- ▶ 3D reconstruction method (3차원 재구성법)
 - ✓ Volume quantification
- ▶ Non-condensable gas effect (불응축성기체)
 - ✓ Air mixing test (vs. pure steam test)
 - ✓ Only 0.5% of air can diminish chugging effect.



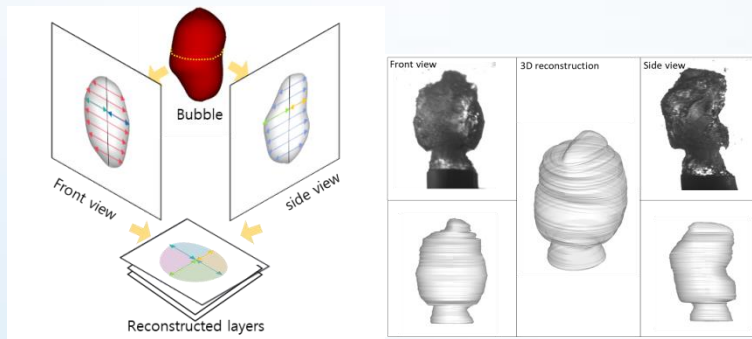
① Visualization System



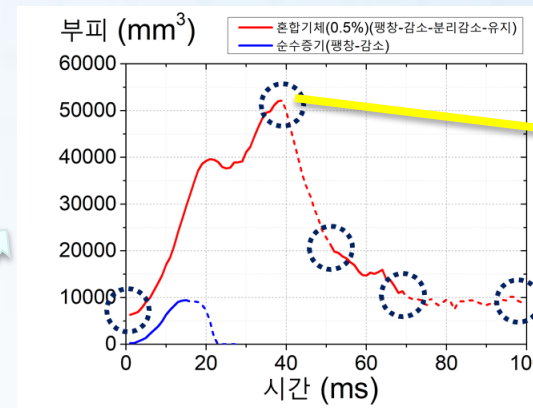
② Pure Steam Condition



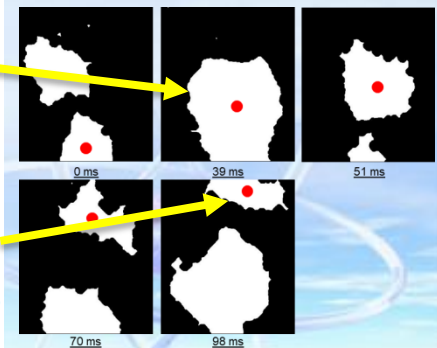
③ Image Processing



④ 3D Reconstruction Method



⑤ Volume Quantification



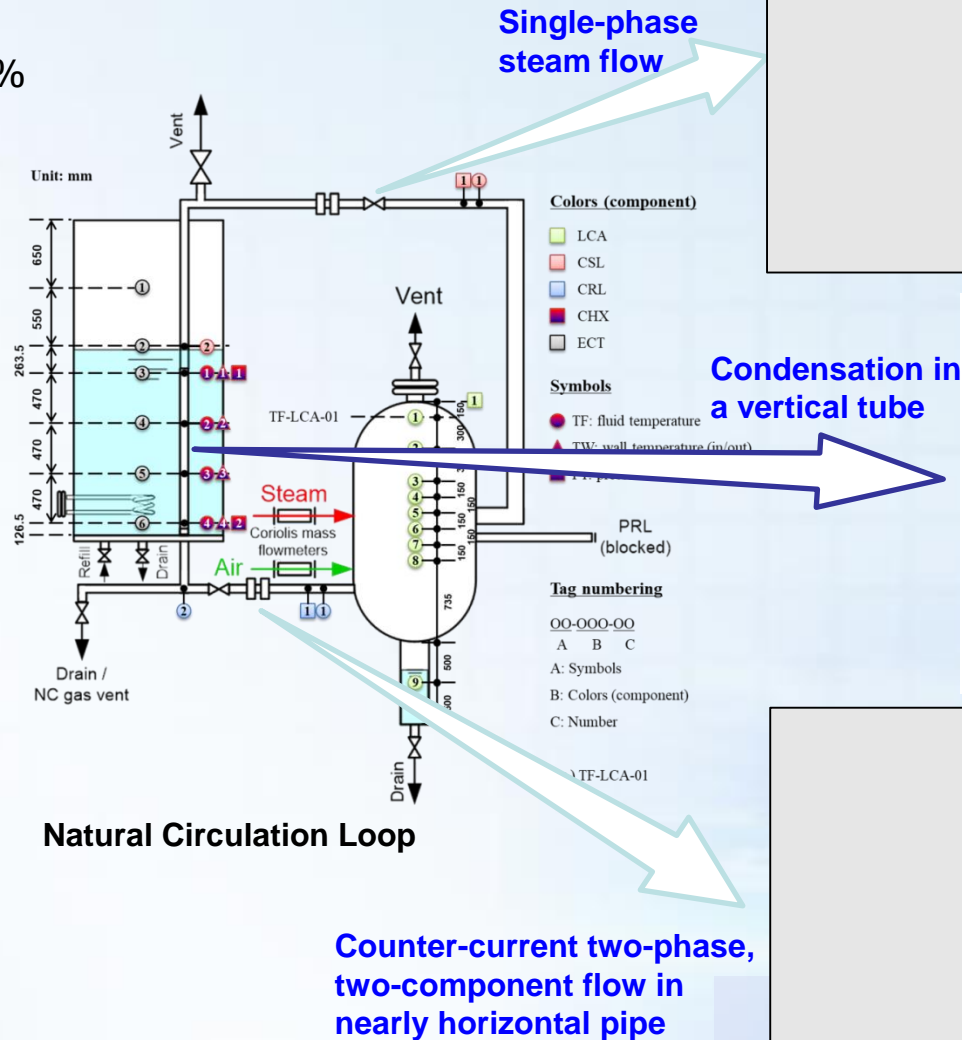
⑥ Air Mixing Test Results

□ SMART CPRSS 주요 현상 및 시험결과 (4)

○ CHX 수직관 내부 응축

- ▶ Air 주입: 5%, 8%, 14%
- ▶ CSL (증기배관)
 - ✓ 단상 증기 유동
- ▶ CHRS 열교환기
 - ✓ HX 상부: 증기 응축
 - ✓ HX 하부: air 축적
- ▶ CDL (방출배관)
 - ✓ Air 축적

○ Air 양을 줄이면 LCA 압력 낮게 유지할 수 있음.



주입 증기유량 vs LCA 압력

- SMART 피동안전계통: PRHRS, PSIS/ADS, CPRSS
- SMART 피동안전계통 검증 및 SMART100 인허가 지원
 - PRHRS & PSIS/ADS 검증: VISTA-ITL, SMART-ITL
 - CPRSS 검증: SISTA1 & SISTA2
- SMART 피동잔열제거계통(PRHRS)
 - Non-LOCA 설계기준사고(DBA)에 대해 고온정지조건을 36시간 이내 달성 및 최소 72시간까지 유지하도록 적절히 RCS의 잔열 및 현열을 제거하였음.
- SMART 피동안전주입계통(PSIS/ADS)
 - LOCA 이후 최소 72시간 동안 RCS 수위는 노심을 덮고 있으며, 재충수계통의 작동 압력 이하로 RCS 압력을 감압시켰음.
- SMART 격납건물압력및방사능저감계통(CPRSS)
 - LOCA/non-LOCA 사고 이후 교류전원 또는 운전원 조치 없이 최소 72시간 동안 격납건물 압력/온도(P/T)를 설계값 이하로 억제하였음.

Thank you for your attention!
Any Question or Comment?

