

혁신형 SMR 혁신기술 개발

Innovative Technology Development of i-SMR

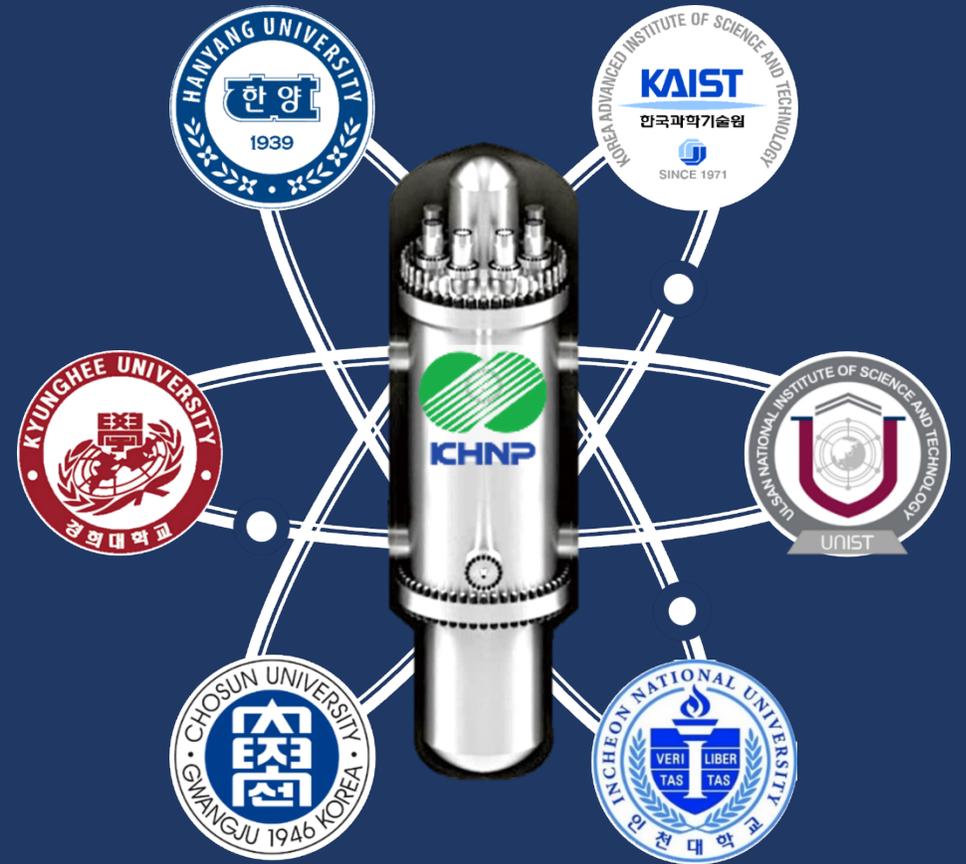
Prof. Sung Joong Kim (sungjkim@hanyang.ac.kr)

Advanced Thermal Hydraulic Engineering for Nuclear Application (ATHENA) Lab.

Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

2024년 05월 08일 16:40 ~ 17:00

제주국제컨벤션센터, 한라홀B (Room HallaHall B, 3F)



Contents

01. 혁신형 SMR 혁신 열수력 기술 필요성

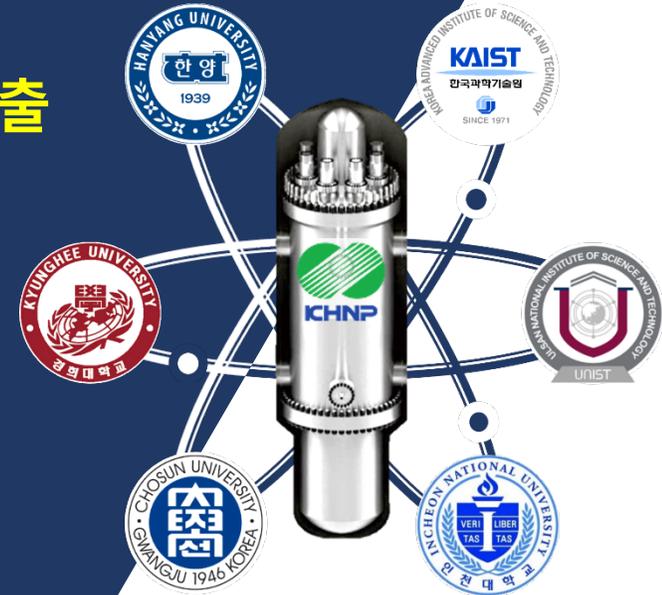
02. (혁신기술1) 히트파이프 피동 냉각 시스템 개념 설계 및 최적 설계

03. (혁신기술2) 피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석

04. (혁신기술3) 혁신형 SMR 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법 도출

05. (혁신기술4) LAES 공정개념 개발 및 최적화

06. 요약 및 결론



01 혁신형 SMR 혁신 열수력 기술 필요성

국내외 SMR 개발 수요 증가



□ 탄소중립(Net-Zero) 패러다임에 따른 안전성·경제성·유연성 확보 경수로형 SMR 개발경쟁 가속화

안전성

경제성

유연성

- 후쿠시마 원전사고 → 강화된 원자력 안전성 요구 증가
- 계통 단순화, 일체형 원자로, 피동형 안전계통 등 기술 도입
- 재생에너지원과 공존 용이 → 2050년 탄소중립 실현 유리
- 대형원전 대비 건설비용 및 건설기간 감소 → 초기비용 절감
- 용량 추가 및 출력 탄력적 조절 용이
- 발전원 외 다양한 산업적 활용 가능

글로벌
SMR
시장확대

개발경쟁 가속화

다양한 SMR(HTR, MSR 등) 중 경수로형 SMR 급부상
→ 2030년대 상용화 기대

□ SMR 개발에서 시장성, 혁신성, 경제성 확보를 통한 경쟁 노형 대비 우위 확보



01

혁신형 SMR 혁신 열수력 기술 필요성



혁신형 SMR 최상위설계요건 (2022.03)

□ 혁신형 SMR 최상위설계요건(안)

안전성	경제성	유연성	기타요건
<ul style="list-style-type: none"> • 무봉산 운전 • 노심손상빈도 (CDF) $\leq 1.0 \times 10^{-9}/M\cdot Y$ • 방사능대량조기누출빈도(LERF) $\leq 1.0 \times 10^{-10}/M\cdot Y$ • EPZ: 부지경계 이내 • 운전원조치여유시간 ≥ 72 hr • 발전소정전대처시간 ≥ 72 hr • 핵연료 열적 여유도 $\geq 15\%$ • 부적절 노출시간(UET) Zero • 완전피동형 노심/잔열/격납용기 냉각 • 부지: 포괄 부지, 내진설계 0.5g, 해안 및 내륙 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계수명: 80년(목표 100년) • 건설단가 $\leq \\$4,000/kWe$ (목표 $\\$3,600/kWe$) • 발전단가 $\leq LCOE \\$65/MWh$ • 건설공기 : 첫 모듈 24개월 / 전 모듈 42개월 이하 • 모듈 공장 제작 및 육상 운송 가능 설계 • 가동율 $\geq 95\%$ • 하나의 주제어실에서 여러 개 모듈 운전 가능 • 3인 이하의 운전원으로 운영 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 모듈형 가압경수로 • 전기출력: 170 MWe • 탄력운전 <ul style="list-style-type: none"> - 일일 부하추종 - 불시 출력변동 - 주파수제어 • 재장전 주기 \geq 24개월 	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후연료 저장조 용량 기준 : 발전소 설계수명 • 핵비확산 및 해체 고려 설계 • 항공기 충돌, 사이버 보안, 사보타주 등 인위적 재해 대응 설계

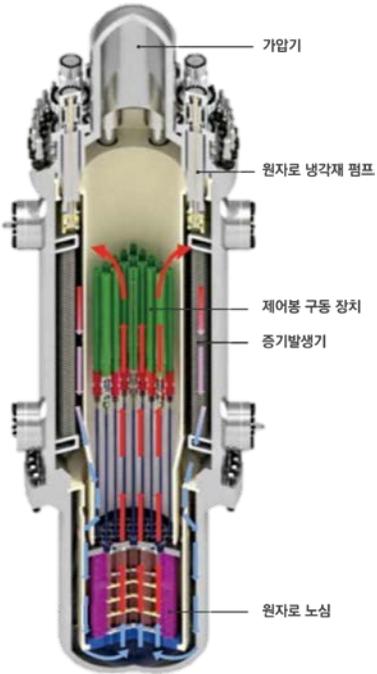
01

혁신형 SMR 혁신 열수력 기술 필요성



혁신형 SMR 혁신기술 개발

□ 최상위 설계요건 기반 혁신형 SMR 대상 개발 혁신기술 도출 (3개 분야(노심, 계통, 종합) 9개 혁신기술)



[혁신형 SMR 원자로 도식]



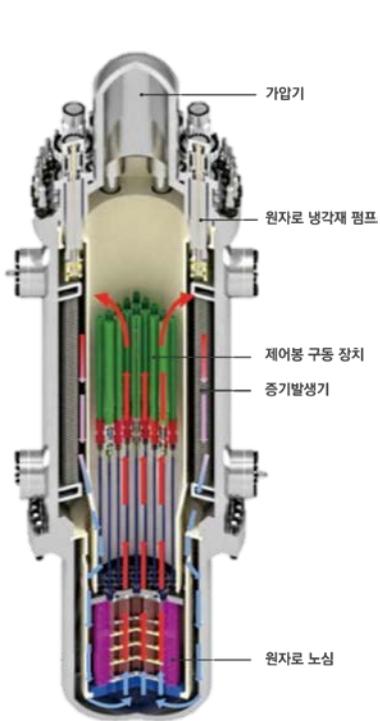
⋮

02 히트파이프 피동 냉각 시스템 개념 설계 및 최적 설계

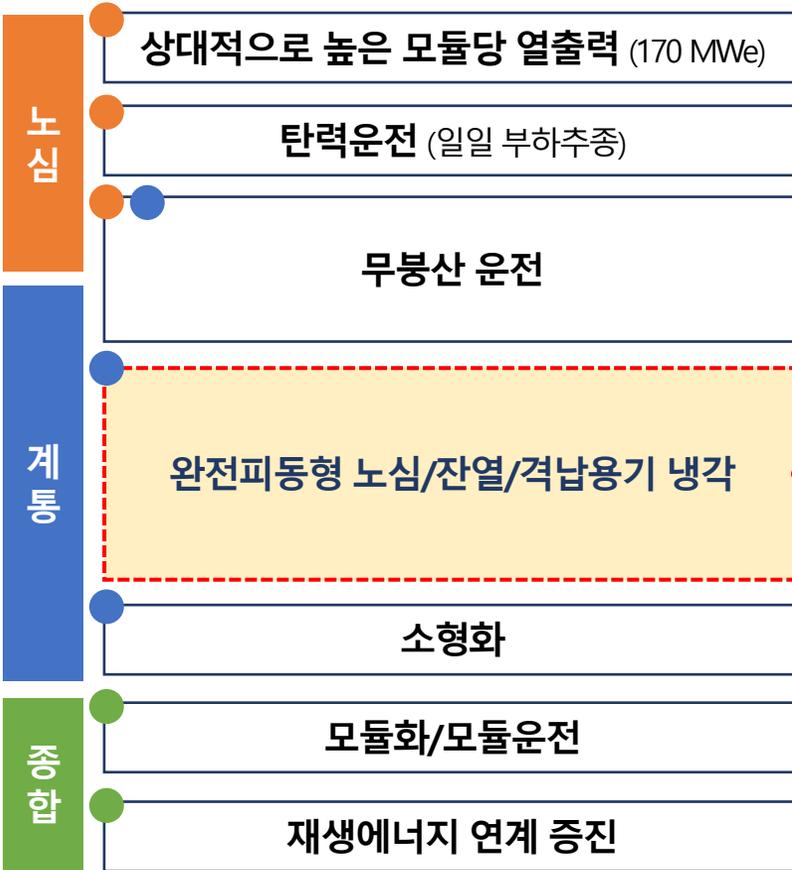
혁신 기술 연구 배경



□ 혁신형 SMR 최상위설계요건 주요 특징



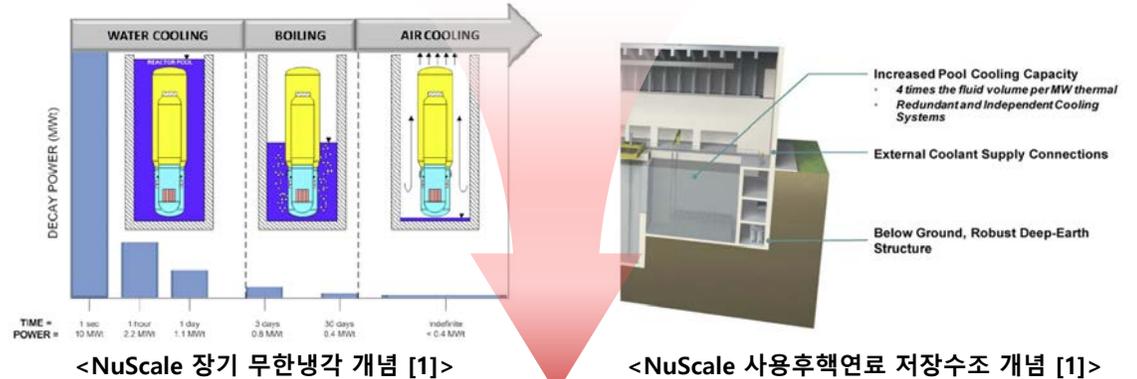
[혁신형 SMR 원자로 도식]



사고대비 잔열 제거 및 냉각재 수위 최소화 설비 필요

- 침수형 냉각방법(NuScale)에 의한 목표 열 제거 용량 상승
→ 수조 수위 상실로 인한 기기의 국부적 열 과부하 발생 가능
- 제한된 수조 용량 수위 유지 장기화 및 냉각 수조 용량 최소화 필요
→ 피동 냉각 시스템 필요

히트파이프 피동 냉각 시스템 이용
사고 대비 수위 유지 장기화 및 냉각수조 용량 최소화



히트파이프 피동 냉각 시스템 개념 설계 및 최적 설계



연구 수행 방법론

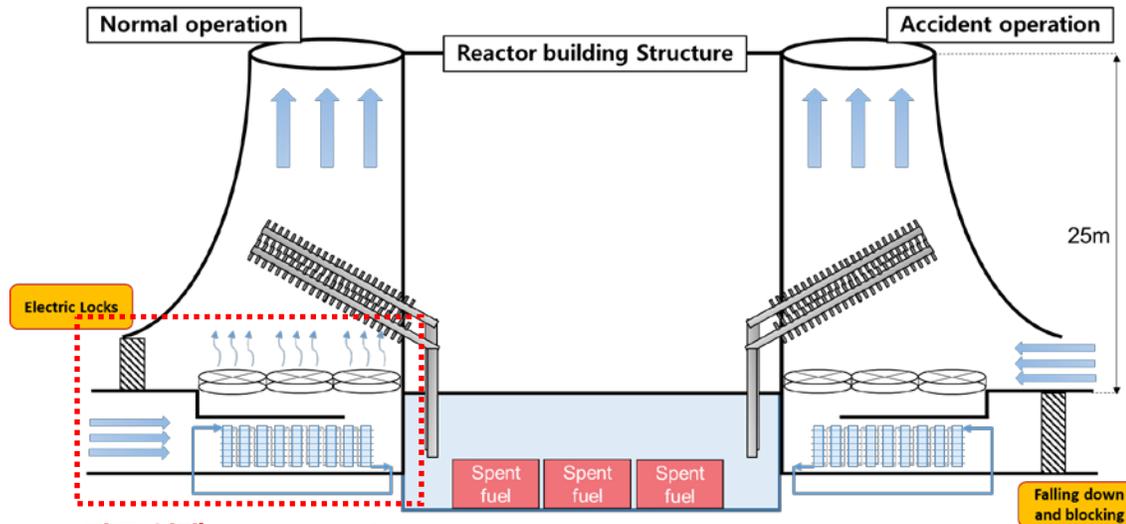
□ 사용후핵연료 저장 수조히트파이프 피동 냉각 시스템 제안

기존 설계개념

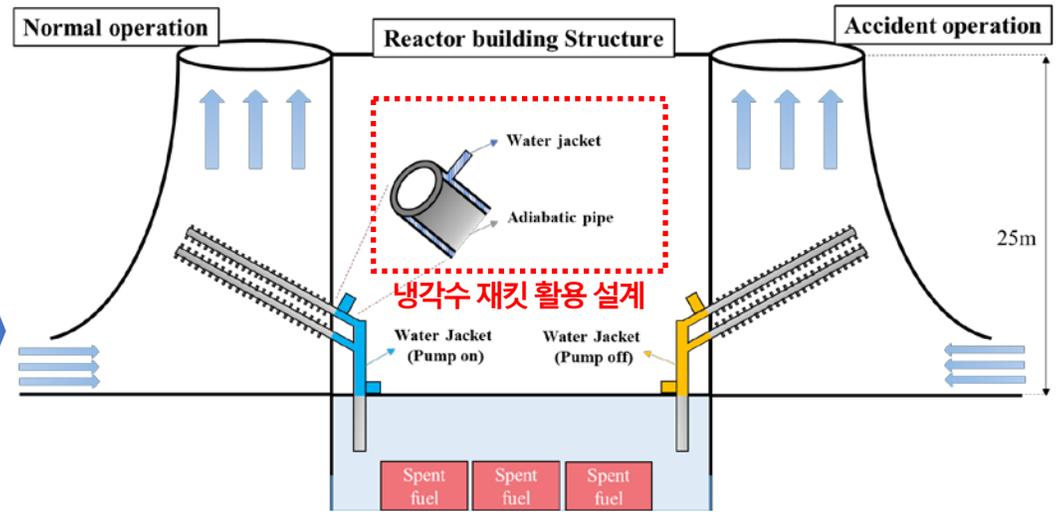
- [정상운전 시] 팬을 이용한 강제순환으로 히트파이프 응축부에 열침원 제공
- [사고상황 시] 피동적으로 외부 공기 유입로 변경 (w/ 전기 차단막)
- [사고상황 시] 냉각탑 내/외부 공기 온도 및 밀도 차이로 인한 자연순환 발생 (열침원)

히트파이프 피동 냉각 시스템 (w/ Water Jacket)

- [정상운전 시] Heat pipe 단열부가 응축부 역할 수행
- [정상운전 시] Water jacket 냉각수를 펌프로 순환시켜 Spent fuel pool 열 제거
- [사고상황 시] (Water jacket pump 중지) 물이 가열되고 다시 단열부로 회귀
- [사고상황 시] 공기 냉각탑 내부 자연순환을 통한 응축부 열침원 제공



냉각수 재킷 활용



기존 설계 (복잡한 시스템 구성)

- 하부 공기 강제 순환용 팬 설치
- 순환용 팬 하부 공기 냉각 시스템
- Electric Locks 설치 및 운영



시스템 개선 필요

02

히트파이프 피동 냉각 시스템 개념 설계 및 최적 설계



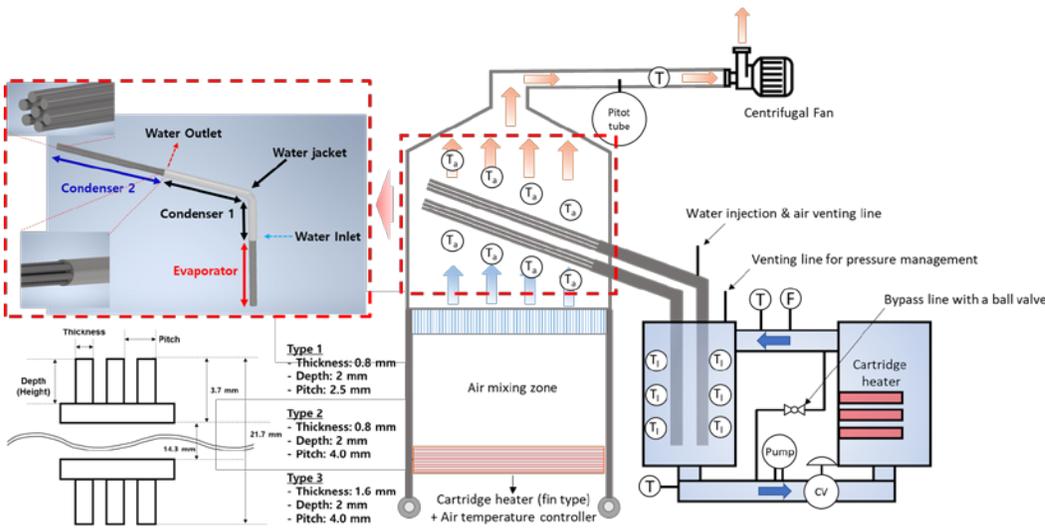
연구 수행 방법론

□ 히트파이프 피동 냉각계통 적용성 평가를 위한 연구 수행 방법론

- 히트파이프 냉각 성능 평가 코드 구축
 - 계통의 적용성 및 타당성을 여유도 있게 평가하기 위해 보수적인 가정을 적용
- 히트파이프 실험 장치 설계
 - MATLAB 코드의 검증 및 개선을 위해 실험장치 설계 및 구축
 - Aspect ratio를 기준으로 히트파이프 장치 스케일 다운 설계 (A.R. = 10)

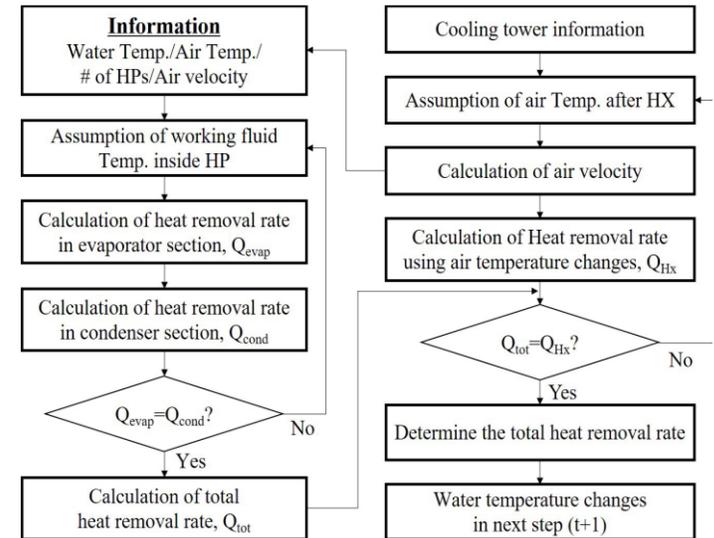
[MATLAB 코드의 보수적 냉각 성능 평가를 위한 가정 사항]

사용후핵연료 집합체 배치	사용후핵연료 집합체 사이 공간(Gap) 없음
사용후핵연료 저장 수조 냉각재 용량	사용후핵연료 집합체 상부에만 냉각재 존재
사용후핵연료 집합체 수	수명 60년 가정하에 최대 수량 존재
잔열량 (Decay heat)	잔열 곡선을 따르지 않고, 13.3MWth의 잔열이 일정하게 방출



[히트파이프 피동 냉각 시스템 평가를 위한 실험장치 개념도(좌) 및 실제 사진(우)]

MATLAB 코드 계산 순서도



[히트파이프 냉각 성능 과도 상태 계산 순서도 (MATLAB)]

02

히트파이프 피동 냉각 시스템 개념 설계 및 최적 설계

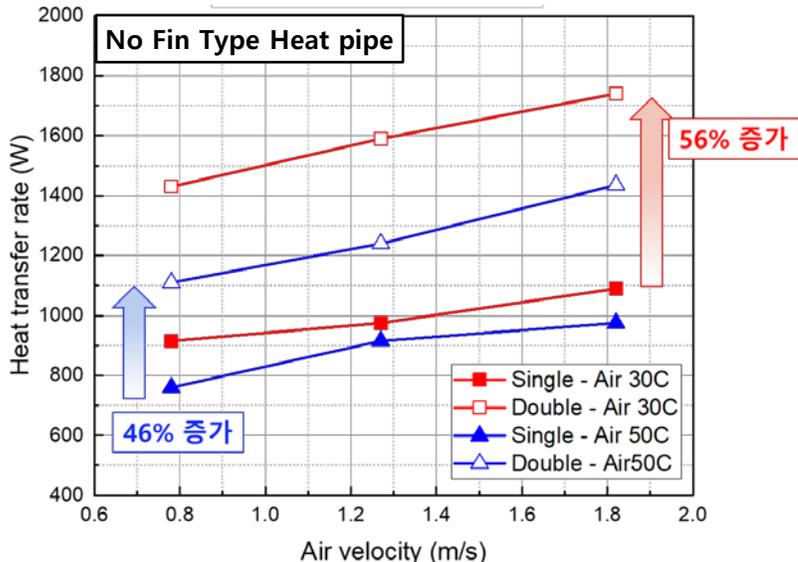
주요 연구 내용



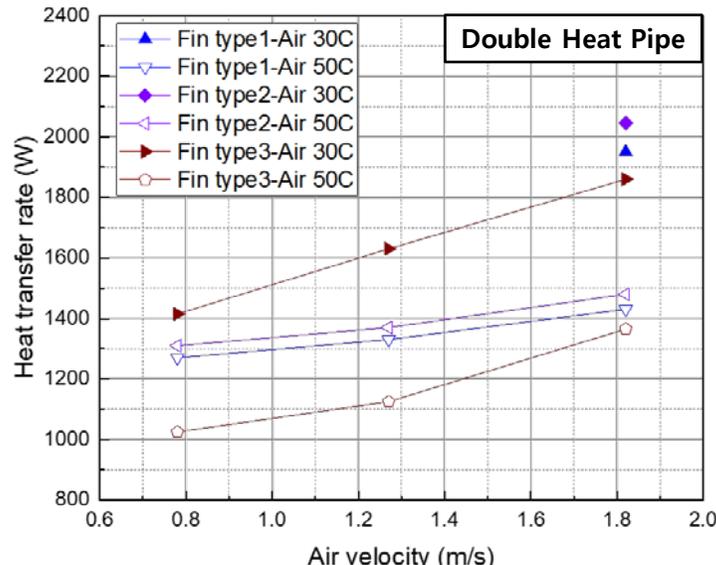
□ 히트파이프 냉각 성능 평가 실험 결과

- No fin type 단일/복수 히트파이프 냉각 성능 평가 결과 (Double heat pipe > Single heat pipe)
 - 냉각탑 내 공기 속도 ↑ & 공기 온도 ↓ → 열 제거량 ↑
 - $HTR_{\text{Single heat pipe}}$ 대비 $HTR_{\text{Double heat pipe}}$: 최대 56% ↑
→ 적층 구조상 하부에서 가열된 공기가 상부 히트파이프를 만나면서 **파이프 내/외부 유체 온도 차이 감소**로 열전달면적 상승 대비 열제거 효율 감소 야기
- Fin type 별 냉각 성능 평가 결과 (Type 2 > Type 1 > Type 3)
 - Pitch size ↑ & Wall thickness ↓ → 열 제거량 ↑

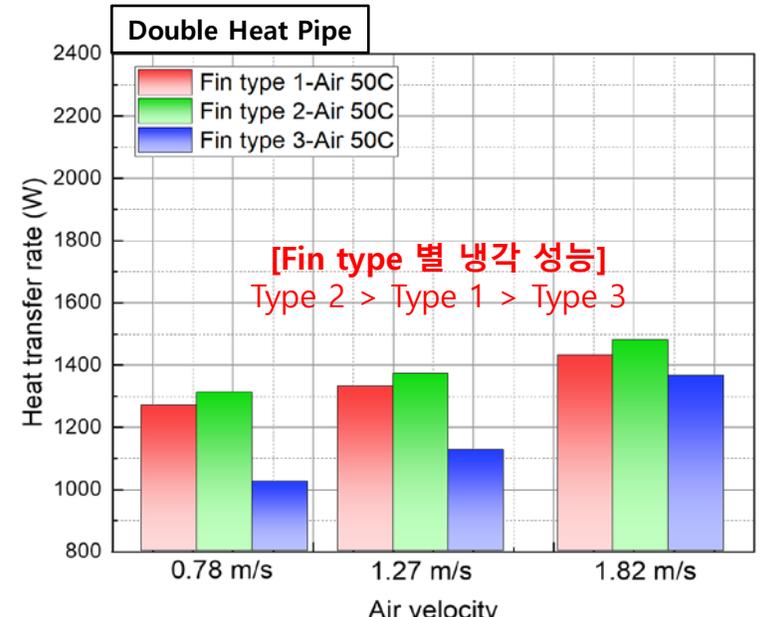
Test matrix		
수조 냉각재 온도	90°C	
냉각탑 내 공기	온도	30°C, 50°C
	속도	1.78m/s, 1.27m/s, 0.78m/s
히트파이프 개수	1 (single), 2 (Double)	
응축부 튜브 표면	No fin, Fin type 1-3	



[No fin 타입 공기 온도/속도에 따른 단일/복수 히트파이프 냉각성능 평가 결과]



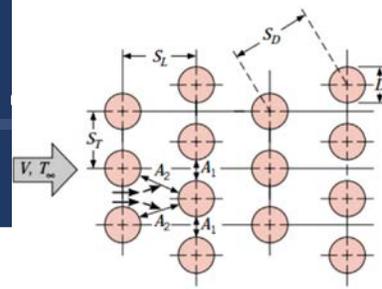
[Fin type 별 공기 온도/속도에 따른 히트파이프 냉각성능 평가 결과]



[Fin type 별 공기 온도 50°C에서 공기 속도에 따른 히트파이프 냉각성능 평가 결과]

02 히트파이프 피동 냉각 시스템 개념 설계 및 최적 설계

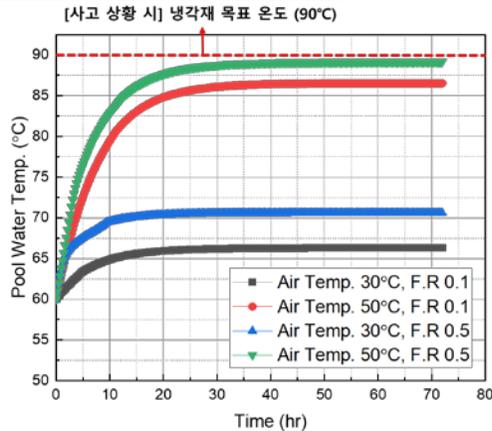
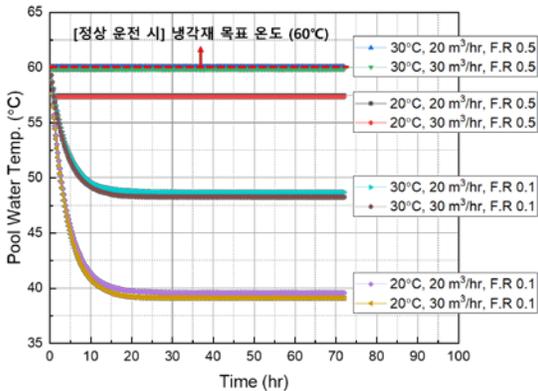
주요 연구 내용



□ 냉각성능 평가 코드를 활용한 히트파이프 피동냉각계통 적용성 평가

- 냉각성능 평가 코드 계산 결과 저장 수조 온도
 - 정상 운전 시 Water Jacket 가동으로 60°C 이하를 유지
 - 사고 발생 시 냉각탑 성능만으로 목표 수조 온도 유지
 - **[정상 운전] 60°C / [사고 상황] 90°C → 목표 온도 이하 유지 확인**

Code test matrix		
히트파이프 냉각수 재킷	냉각재 수온	20°C, 30°C
	질량 유속	20m³/hr, 30m³/hr
공기 냉각탑 유입 공기온도		30°C, 50°C
충진율 (Filling ratio; F.R.)		0.1, 0.5



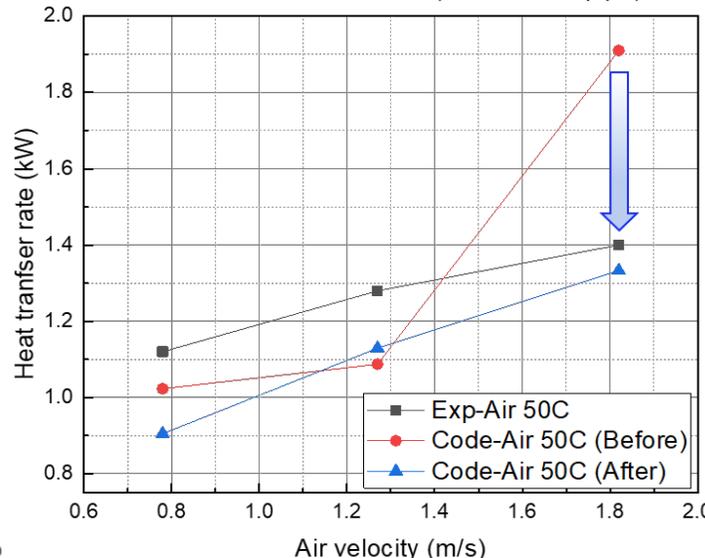
[냉각 성능 평가 코드를 활용한 시간에 따른 냉각재 수조 온도 변화] (좌: 정상 운전, 우: 사고 상황)

- MATLAB 코드 개선 및 실험 결과 비교
 - 기존 코드에 사용된 Zukauskas 상관식(V_{max})은 비압축성 유체를 가정
 - 본 모델의 압축성 유동 및 주위 환경으로 인한 유동 방해 고려했을 때 새로운 V_{max} 식 필요
 - CFD를 기반으로 V_{max} 를 만족하는 f_{CFD} 상수를 찾고, 이를 MATLAB 코드에 적용.
 - **계산 결과 코드 정확도 향상: (기존 코드 vs 실험 편차) 최대 63% → (개선 코드 vs 실험 편차) 최대 25%**

[Zukauskas 상관식 내 엇갈린 관군 유동 형상]

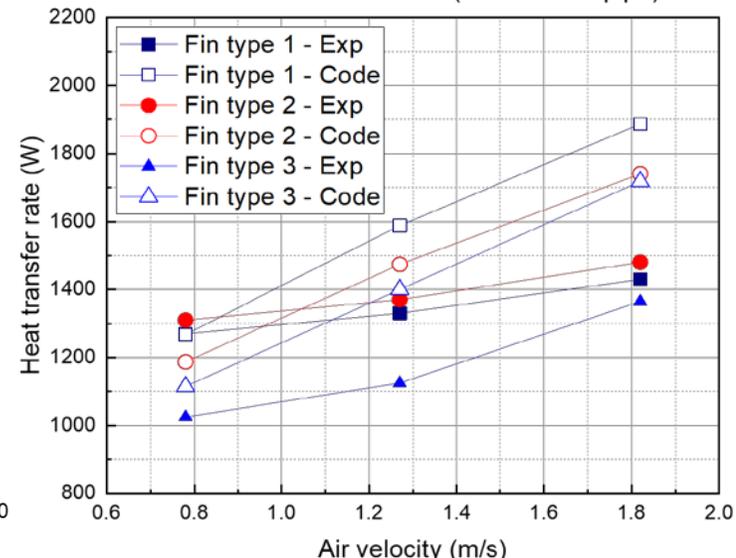
$$V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \rightarrow V_{max} = f_{CFD} \cdot \frac{S_T}{2(S_D - D)} V$$

Water - 90°C/Air - 50°C (Double Heatpipe)



[코드 개선 전/후 및 냉각성능 실험 평가 결과 비교] (공기온도: 50°C)

Water - 90°C/Air - 50°C (Double Heatpipe)



[코드 개선 후 및 냉각성능 실험 평가 결과 비교] (히트파이프 타입 별, 공기온도: 50°C)

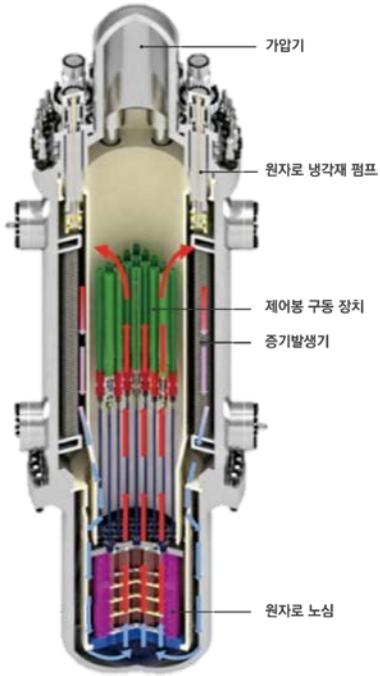
03

피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석

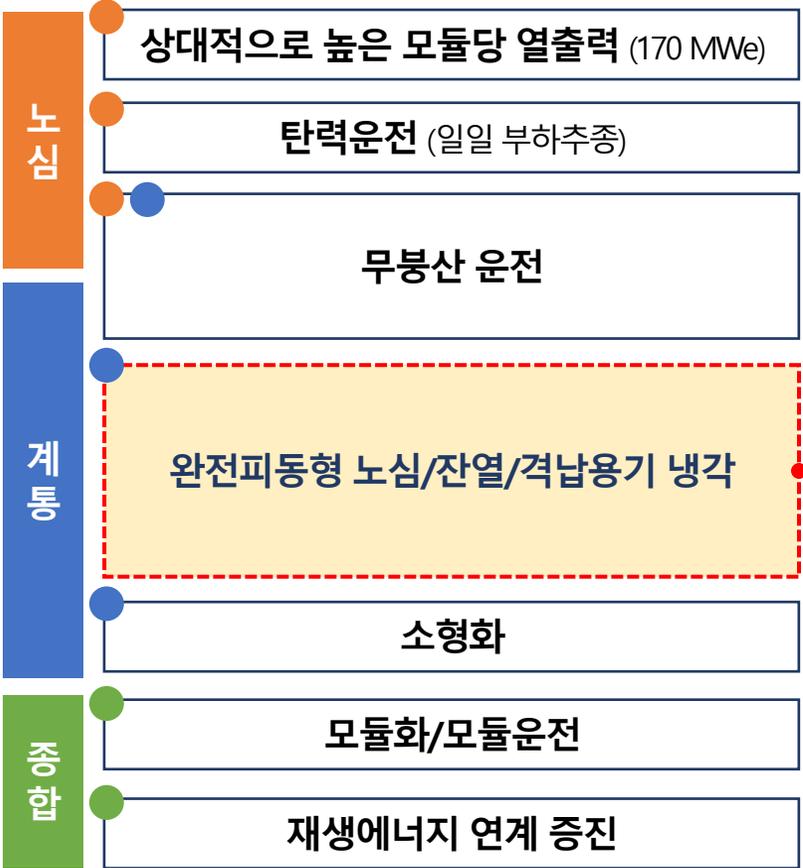


혁신 기술 연구 배경

□ 혁신형 SMR 최상위설계요건 주요 특징



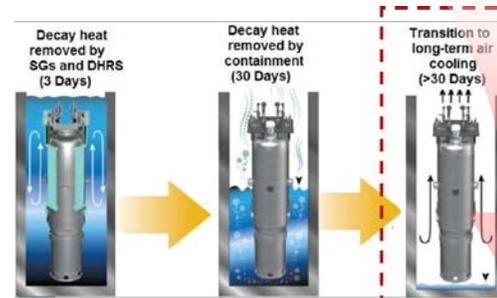
[혁신형 SMR 원자로 도식]



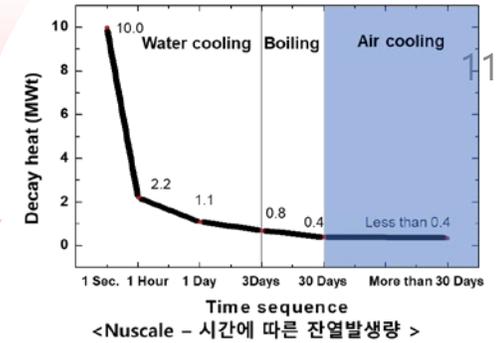
장기냉각 위한 공랭식 피동잔열제거(용기 외벽냉각) 설비 필요

- 경쟁노형(NuScale) 장기냉각 특성: 30일 이후 공기외벽냉각
- 열전달계수 고려 시, 요구 냉각성능 비교
 - ➔ 비등 열제거(0.8MWt) 목적 << 공기냉각 열제거(0.4MWt) 목적
 - ➔ 공기 냉각성능 증진 방안 모색

장기냉각을 위한 외벽냉각 방식 피동잔열제거 계통 도입 및 최적화 필요



<Nuscale - 장기냉각 전략 [1]>



피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석

03

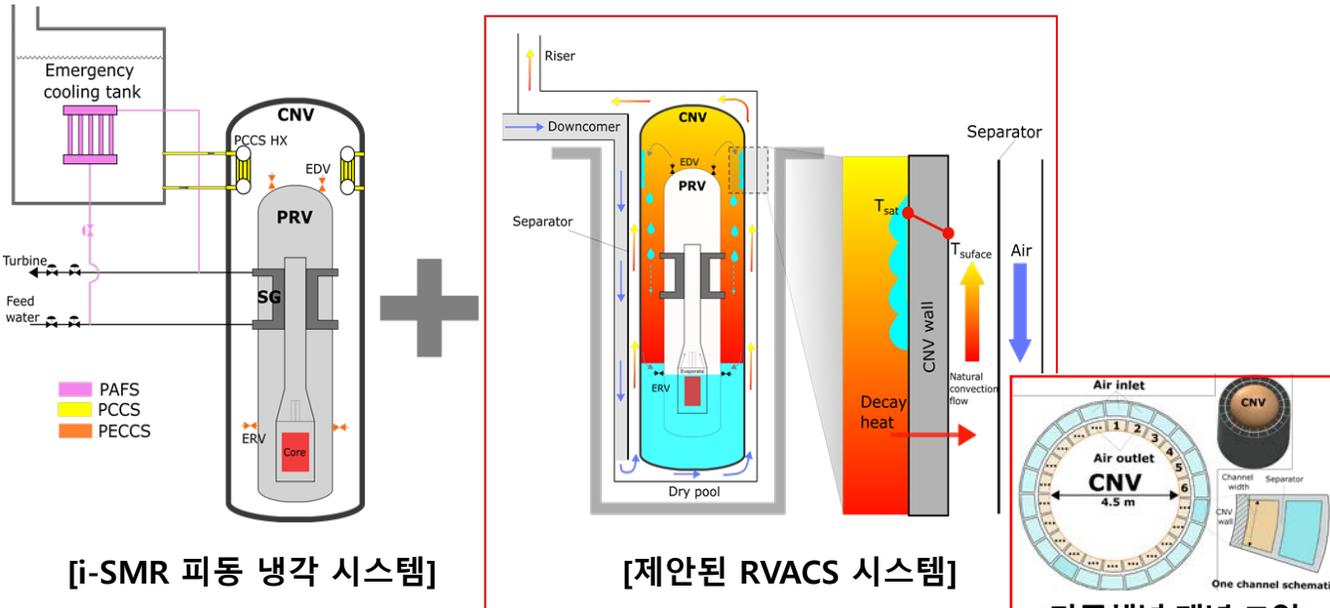
피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석



연구 수행 방법론

□ 피동잔열제거계통(PRHRs) 설계안 제시

- RVACS 개념 도입
 - 채널 내/외부 온도차에 의한 자연대류로 CNV 잔열 제거
 - 굴뚝 형상에 따라 열제거 능력 변화로 인해 최적 설계 필요
- 다중채널 개념 도입
 - 열전달 표면 전체에 유동을 균일하게 분산시켜 열제거 능력 향상
 - 마찰 & 형태손실에 따른 압력손실 증가로 인해 최적 설계 필요



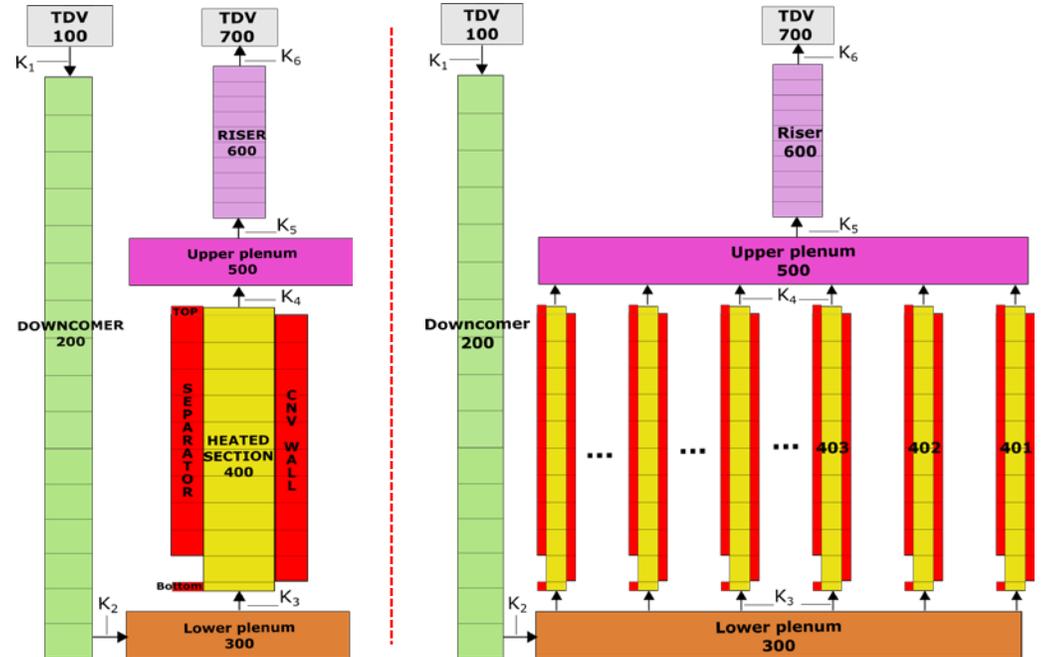
[i-SMR 피동 냉각 시스템]

[제안된 RVACS 시스템]

[다중채널 개념 도입]

□ RVACS 성능 평가를 위한 MARS-KS 예비해석 모델 개발

- 단일 환형 채널 RVACS 예비해석 모델 개발
 - 주요 열전달 메커니즘: 기류영역의 대류, CNV와 분리기 사의 복사열전달
 - 주요 설계 변수: 수직벽면 간격, 굴뚝 높이/직경, CNV/분리기 방사율
- 다중 채널 RVACS 예비해석 모델 개발
 - 주요 설계 변수: 채널 수, 플레넘 크기



[MARS-KS Nodalization: (L) 단일채널, (R) 다중채널]

03

피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석

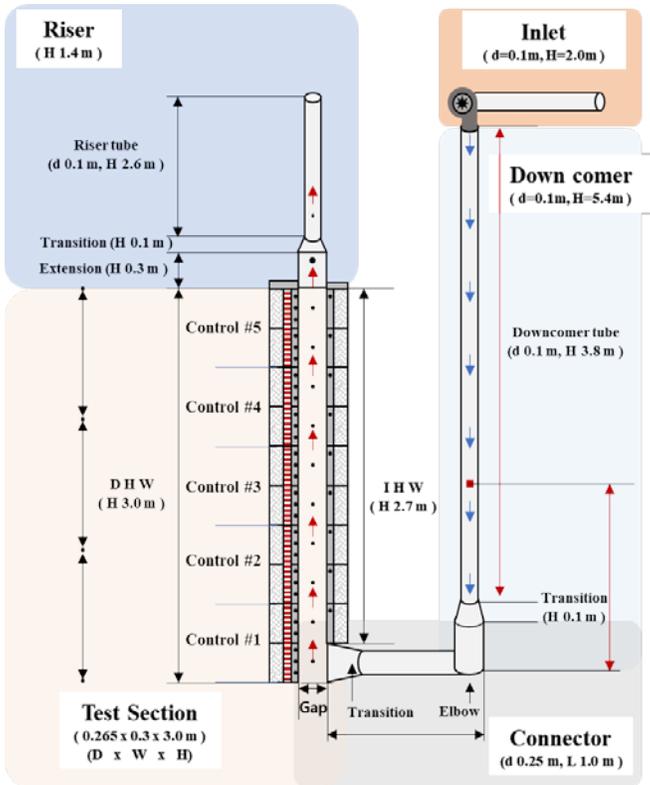
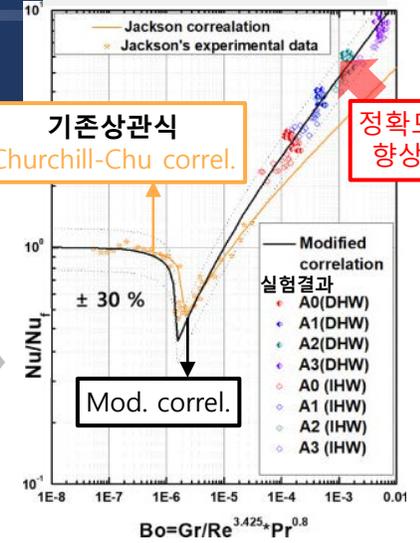
주요 연구 내용

□ MARS-KS 코드 정확성 향상을 위한 벤치마크 실험 수행 (굴뚝효과, 댐퍼효과 적용)

- 실험 결과를 바탕으로 MARS-KS 코드 벽면 열전달상관식(Churchill-Chu correlation) 개선
 - 벽면-대류 및 복사열전달 / 굴뚝효과 / 댐퍼효과 모두 고려 (기존 상관식은 복사열전달 고려x)
 - (기존 상관식 vs 실험 데이터 편차) 최대 63% → (개선 상관식 vs 실험 데이터 편차) 최대 28%

Test matrix	Heat input		
	0.8 kW	3.0 kW	6.5 kW
굴뚝효과 (강제순환 유량제어) $m_n=2.3$ (Ref. case-0deg) $m_n=1.5$	○	○	○
댐퍼효과 (댐퍼 개방각 제어) $K=6.0$ K-loss coefficient $K=21.2$	○	○	○

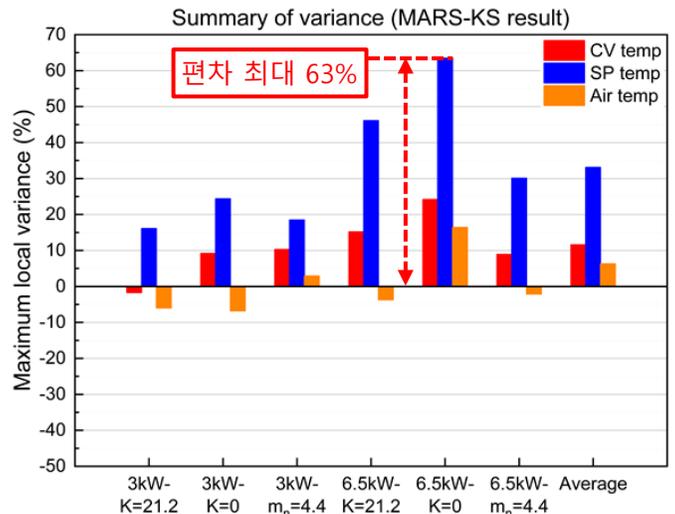
[적용 혼합대류 상관식]



[외벽냉각 실험장치]

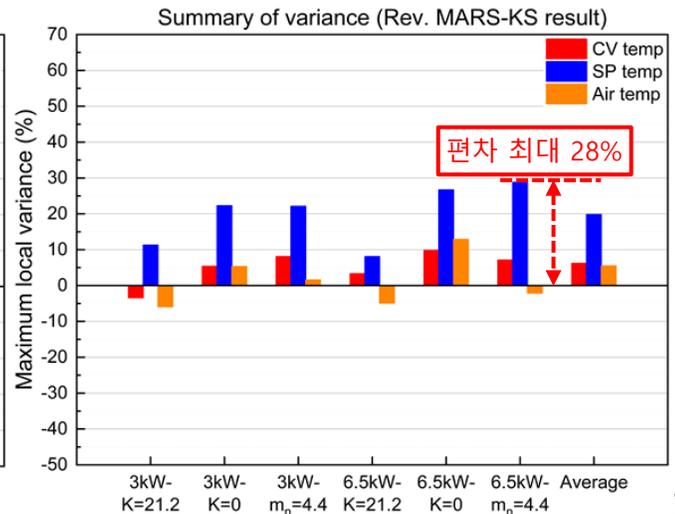
Churchill-Chu correlation (Orig.)

$$Nu_x = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_x^{1/6}}{\left\{ 1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right\}^{8/27}} \right]^2$$



Mixed convection correlation (Rev.)

$$\frac{Nu}{Nu_f} = \left\{ 1 - 170000 Bo \left(\frac{Nu}{Nu_f} \right)^{-1.8} \right\}^{0.6}$$



[실험 데이터 vs (좌) MARS-KS(Orig.) / vs (우) MARS-KS(Rev.) 오차 비교]

03

피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석



주요 연구 내용

다중채널 RVACS 설계 최적화 및 최종 냉각성능 평가

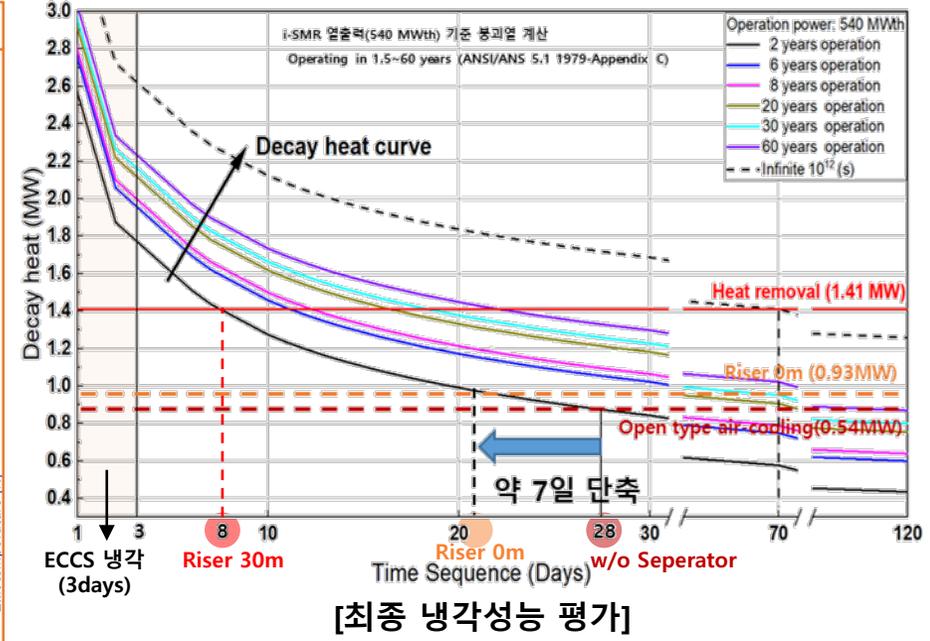
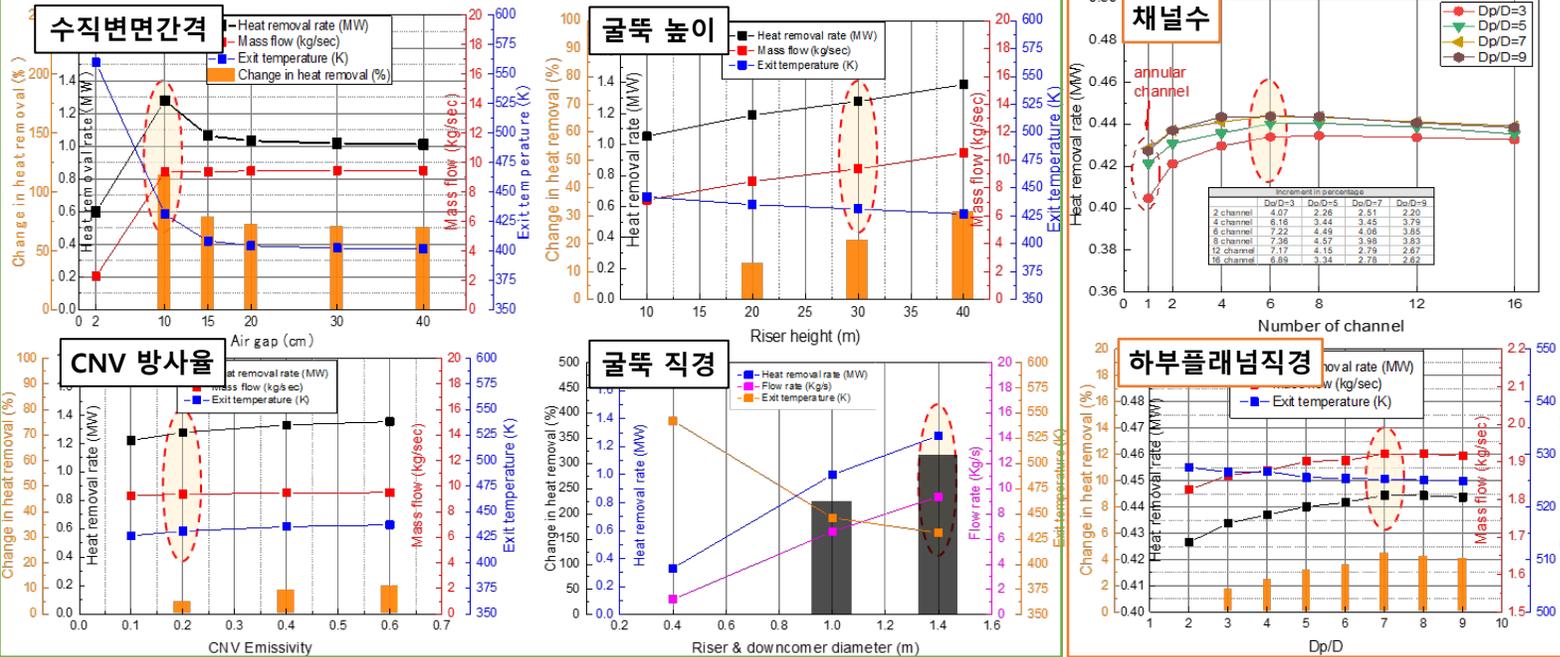
- 개선 상관식 사용 RVACS 설계 변수 민감도 평가(MARS-KS)

- 최적설계 다중채널 RVACS 최종 냉각성능 평가

단일화형해석

- 최적설계변수 산출을 위한 주요변수대상 1D MARS-KS 코드 해석

다중채널해석



변수	공기유로 분리기	다중채널	굴뚝높이	열제거량	무한냉각 가능 시기
개방형 공기냉각	X	-	-	0.54MW (원자로 정지 후)	28일
다중채널 RVACS	O	O	0m	0.93MW (원자로 정지 후)	21일
다중채널 RVACS	O	O	30m	1.41MW (원자로 정지 후)	8일

다중채널 RVACS 최적설계변수

변수	최적값	영향	변수	최적값	영향	변수	최적값	영향
수직벽면간격	0.1m	유속 vs 압력손실	굴뚝 높이	30m	선형증가	채널 수	6	유속, 유동분포, 압력손실 등 복합적 작용
CNV 방사율	0.2	영향력 ↓	굴뚝 직경	1.4m	선형증가	하부플래넘 직경	1.4m	직경비≥7에서 유량분포 균일

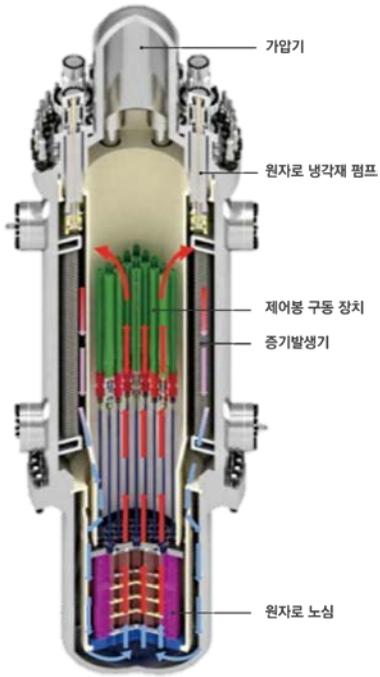
03

피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석

혁신 기술 연구 배경



□ 혁신형 SMR 최상위설계요건 주요 특징



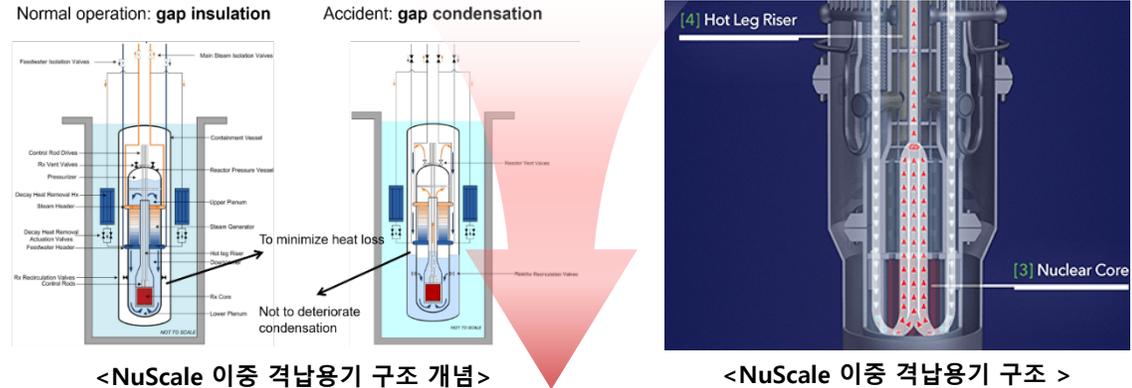
[혁신형 SMR 원자로 도식]



격납용기 정상운전 및 사고상황 시 단열 및 냉각성능 확보

- | | | |
|-----------------|-------------|-----------------|
| ○ 정상운전 조건 | 단열성능 최대 확보 | → 열효율 증진 |
| ○ 과압 조건 및 사고 상황 | 피동냉각(예: 응축) | → 충분한 냉각성능 확보 |
| ○ NuScale | 진공+침수 개념 적용 | → 단열 및 냉각 성능 개선 |
| ○ i-SMR | 진공+건식 개념 적용 | → 단열 및 냉각 성능 개선 |

충전조건에 따른 갭 내부 열전달 메커니즘 확인



이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법 도출

04

[계통3] 이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법



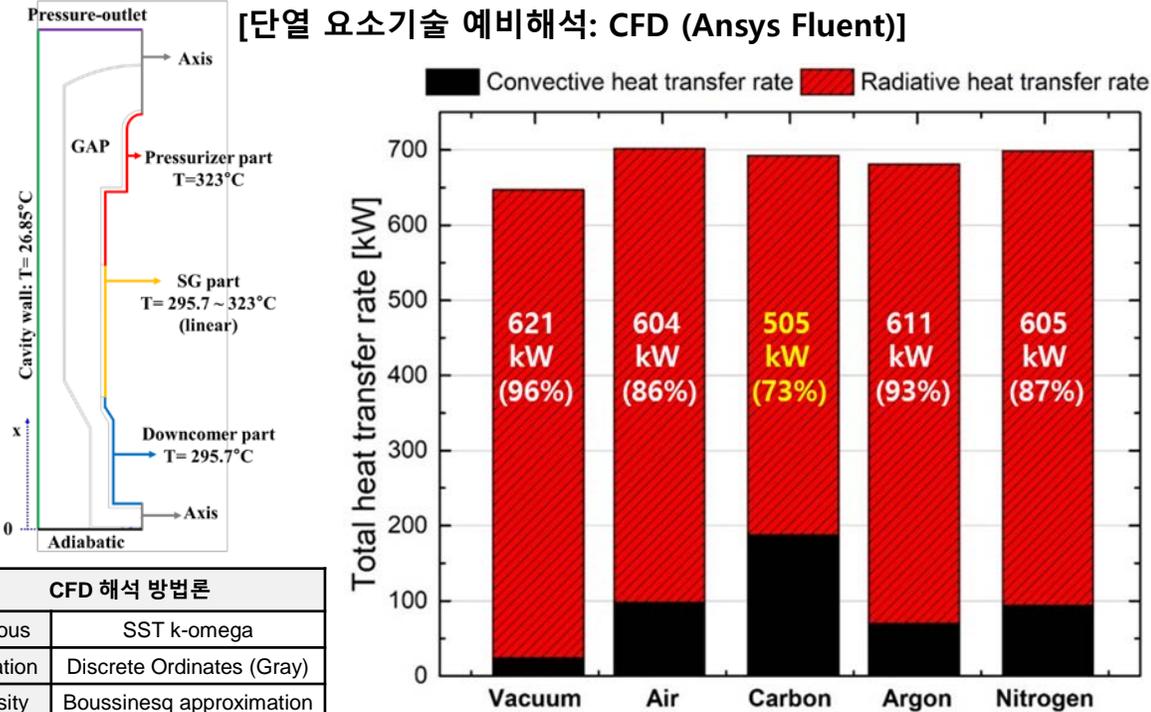
연구 수행 방법론

□ 혁신형 SMR 이중 격납용기 모사를 위한 예비해석

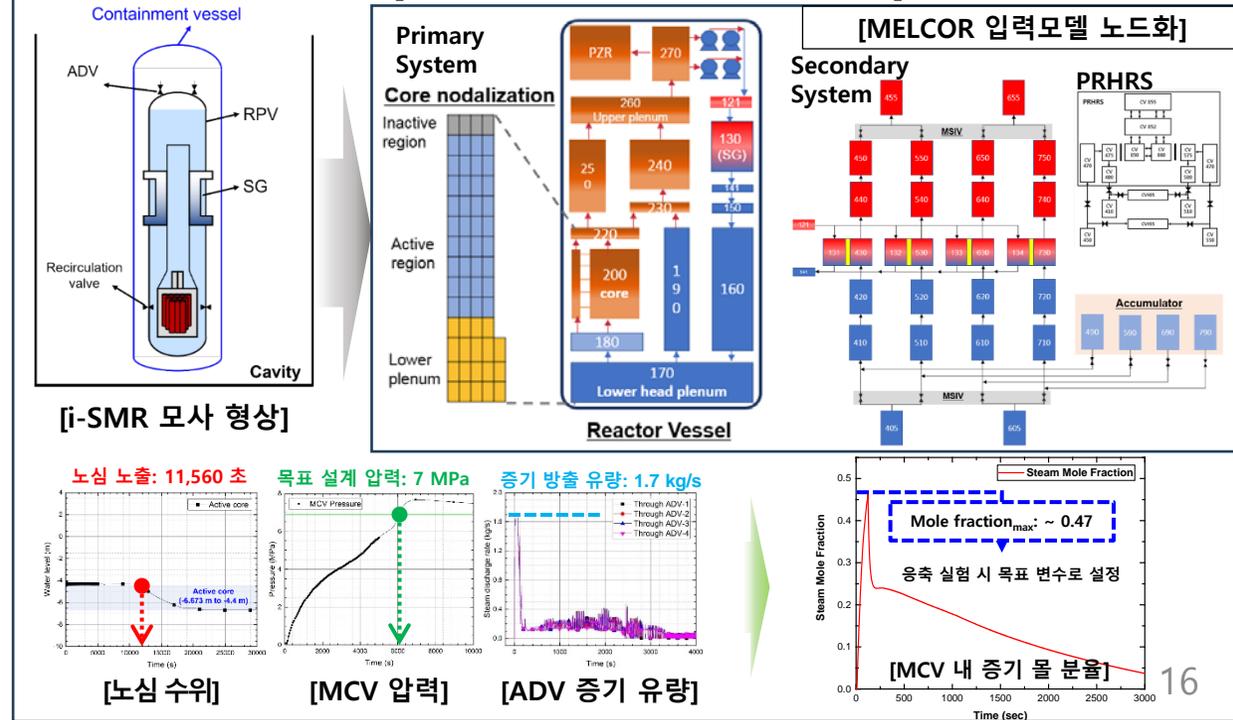
- 단열성능평가 실험 경계조건 도출을 위한 예비해석
 - 정상운전 시 갭 내부 충전조건에 따른 열전달 메커니즘을 정량적으로 확인
 - 이를 바탕으로 단열 성능 개선을 위한 **Shielding** 개념 도출
- 복사가 가장 큰 기여도를 보이는 진공 조건에서 **Shielding** 성능을 평가

- 냉각성능평가 실험 경계조건 도출을 위한 예비해석
 - **i-SMR MELCOR** 입력모델 작성,
 - 과도상태 시나리오: **ADV Stuck open**
 - **Mole fraction** 계산하여 실험 목표 변수로 설정

[단열 요소기술 예비해석: CFD (Ansys Fluent)]



[냉각 요소기술 예비해석: MELCOR]



04 [계통3] 이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법

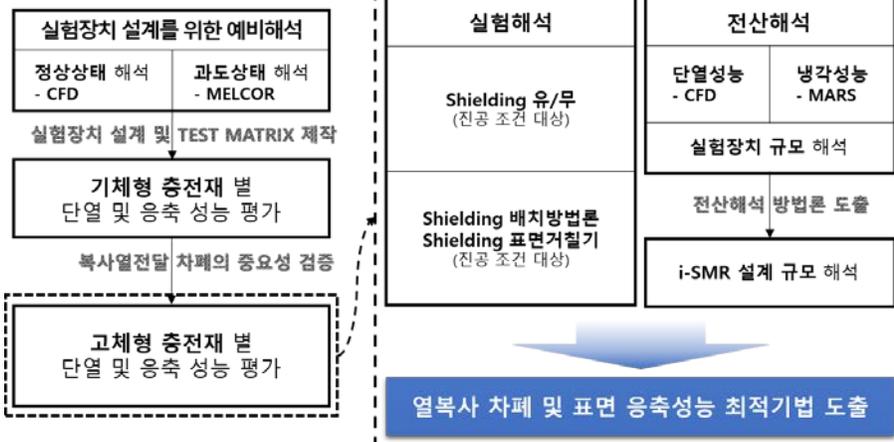


주요변수	척도비
높이	1/40
직경	1/22
온도	1
압력 (단열실험)	1

□ 혁신형 SMR 학술 용역 수행 흐름도 및 실험장치 설계

- 최종 수행 목표 달성을 위한 수행 흐름도 작성
- 예비해석 결과를 통해 실험 Matrix 작성 및 실험장치 제작

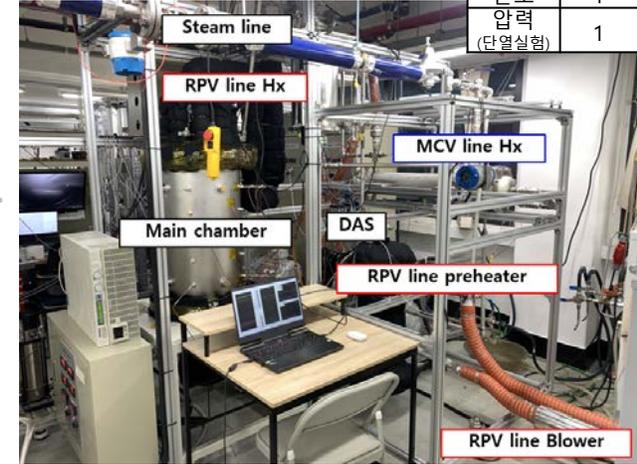
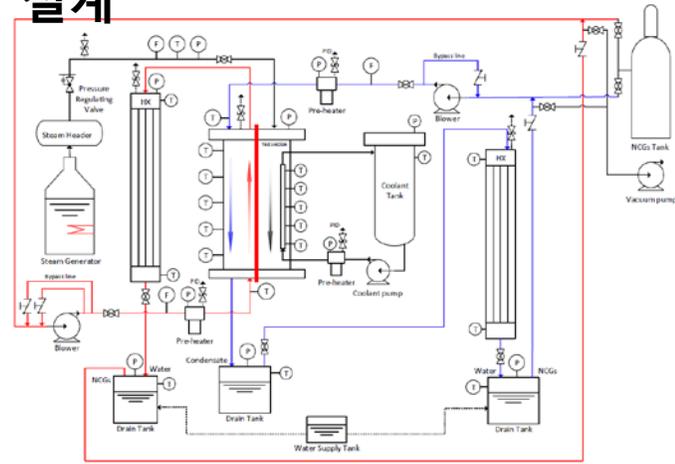
[학술 용역 수행 흐름도]



[단열 및 냉각 성능 평가 실험 Matrix]

갭 충전 조건	Shielding 종류	히터온도	증기주입량	분석 목표 열전달	외기온도
Insulator	-	320°C (@ PRZ)	0.32kg	전도	20°C
Ar	-			전도+복사+대류	
N ₂	-			전도+복사	
Vacuum	-	320°C (@ PRZ)	0.32kg	전도+복사	20°C
	SS 400mm				
	SS 200mm				
	Al 400mm				
	Al 200mm				

[복합 열전달 평가를 위한 실험장치]



[고체형 충전재(Thermal radiation shielding) 개념 도출]

Al-400

Al shielding ($\epsilon: 0.04$)

재질에 따른 단열 및 냉각 성능 평가

SS304-400

SS304 shielding ($\epsilon: 0.1$)

재질에 따른 단열 및 냉각 성능 평가

Al-400

Diameter: 400 mm

직경에 따른 단열 및 냉각 성능 평가

Al-200

Diameter: 200 mm

직경에 따른 단열 및 냉각 성능 평가

- 진공 조건에서 고체형충전재의 단열 및 냉각 성능 파악

※ 척도비 = 시험장치/기준원전 변수

* MELCOR 결과의 Mole fraction 고려하여 증기 주입

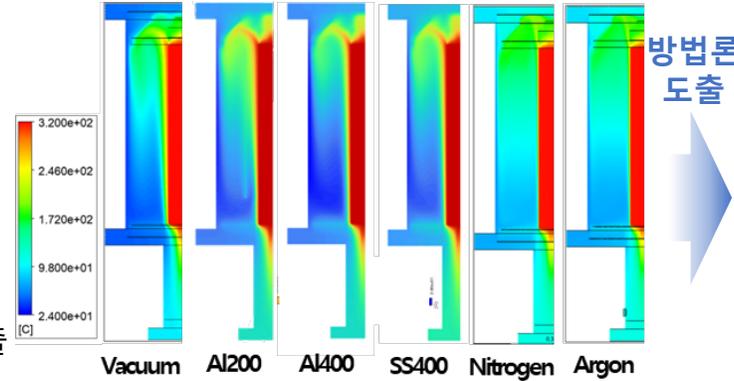
04 [계통3] 이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법



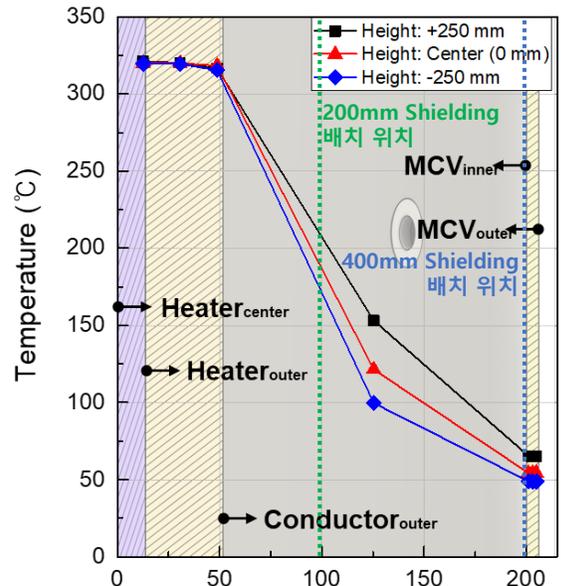
주요 연구 내용

이중 격납용기 단열 성능 최적 기법 도출

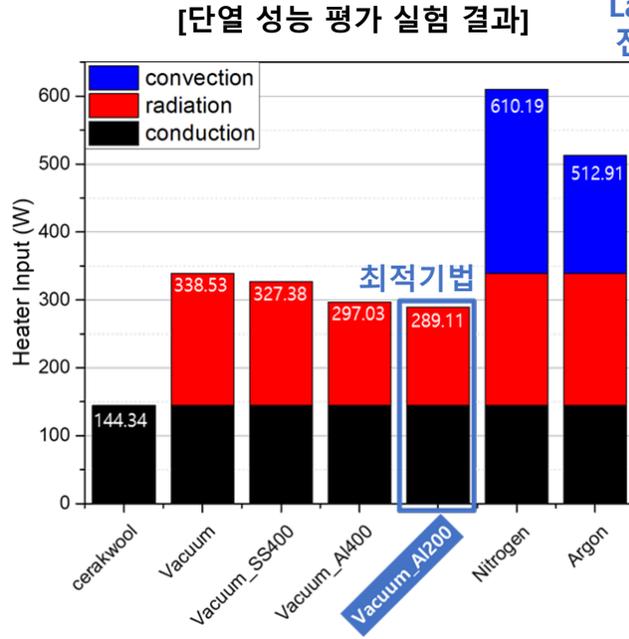
- 기체형 및 고체형 단열 성능 평가 실험 결과
 - 실험을 통해 복사로 인한 열손실이 지배적이라는 것과 Al200 Shielding 적용 시 열손실이 최소가 됨을 도출
 - 실험결과를 바탕으로 Lab-scale 전산해석 수행하여 해석 방법론 도출
 - 해당 방법론 Full-scale 전산해석에 적용하여 실제 크기의 i-SMR 에서의 고체형충전재 최적기법 도출



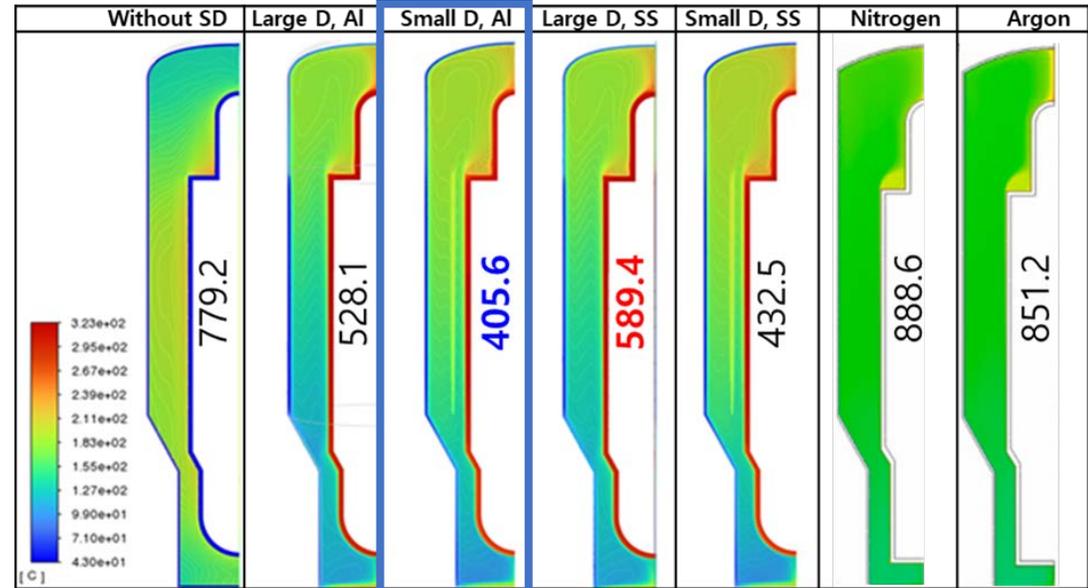
CFD 해석 방법론	
Viscous	Realizable k-epsilon (w/ Enhanced wall treatment)
Radiation	Discrete Ordinates (Gray)
Density	Polynomial function of (T)
Solver	Coupled
Spatial Discretization	Gradient: Least Squares Cell Based Pressure: Body Force Weighted Momentum: 2 nd Order Upwind Energy: 2 nd Order Upwind



[중심으로부터 반경방향 및 높이별 온도]



Lab-scale 전산해석



단열최적기법

Vacuum 상태, Al shielding의 갭 내 1/3지점 배치

04 [계통3] 이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법



주요 연구 내용

이중 격납용기 냉각 성능 최적 기법 도출

- 기체형 및 고체형 냉각 성능 평가 실험 결과
 - ADV stuck open 사고 시 전제 별 냉각 성능을 실험을 통하여 평가
 - 주입 증기의 물분율 변화를 통하여 냉각 성능 평가 (ideal gas law)

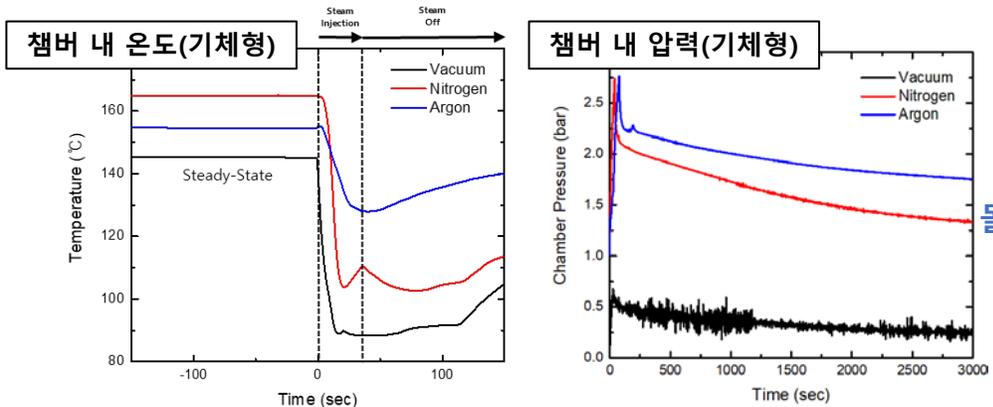
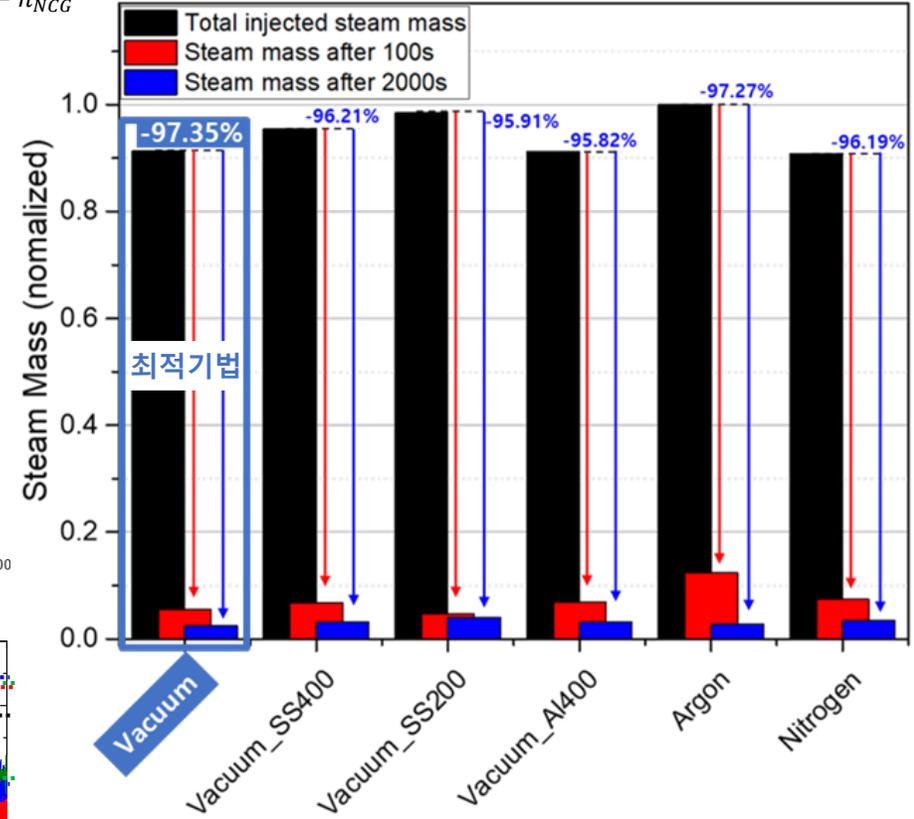
$$n_{NCG} = \frac{P_{chamber,initial} V_{chamber}}{RT_{bulk,initial}}$$

$$n_{steam} = \frac{P_{chamber} V_{chamber}}{RT_{bulk}} - n_{NCG}$$

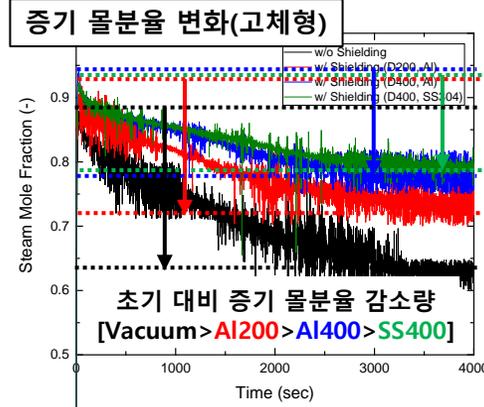
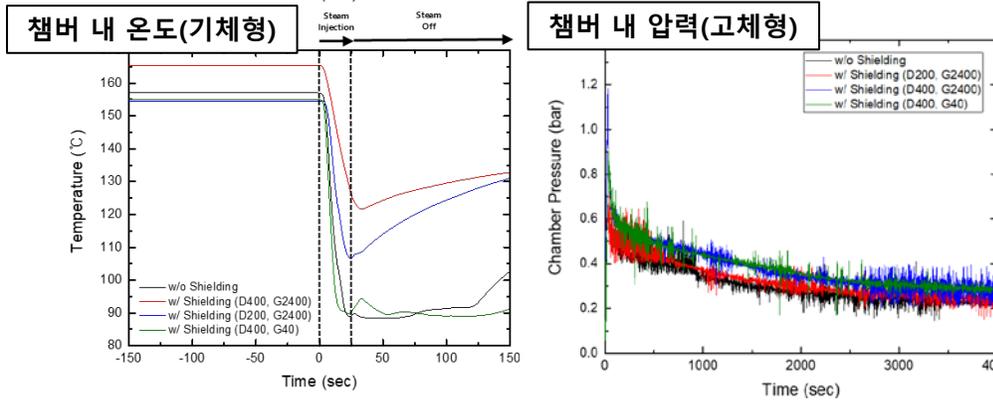
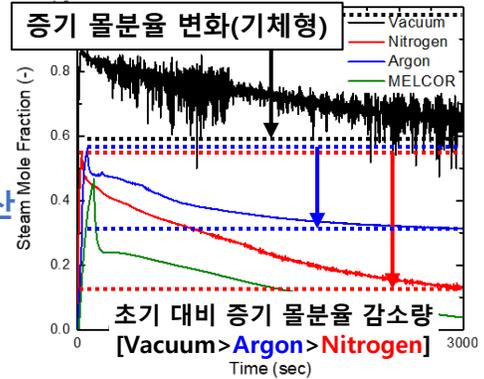
$$X_{NCG} = \frac{n_{NCG}}{n_{NCG} + n_{steam}}$$

$$X_{Steam} = 1 - X_{NCG}$$

[냉각 성능 평가 실험 결과]



물분율 계산



냉각최적기법
Vacuum 상태, w/o shielding

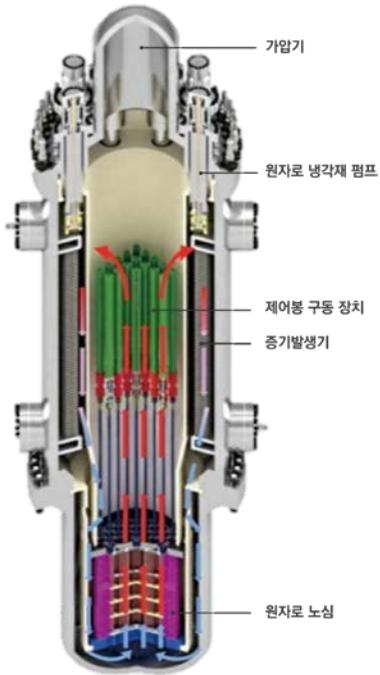
03

피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석

혁신 기술 연구 배경



□ 혁신형 SMR 최상위설계요건 주요 특징



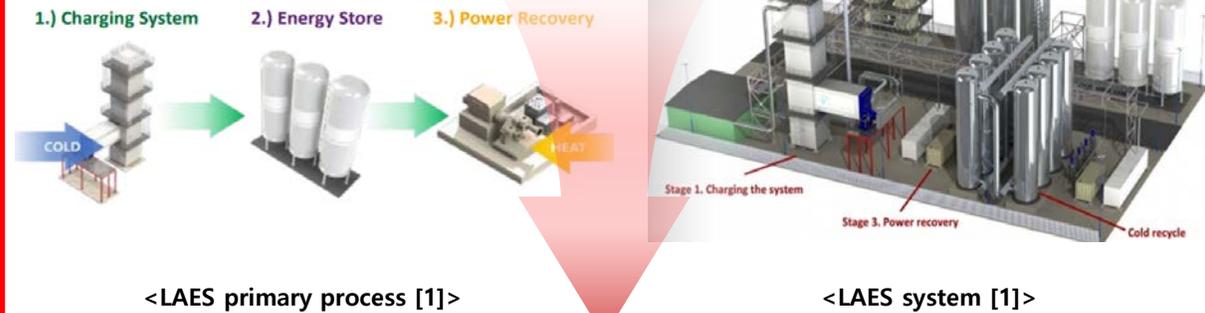
[혁신형 SMR 원자로 도식]



재생에너지 연계 에너지 변환 기술 요구

- 경쟁노형(NuScale) → 재생에너지 연계 에너지 변환기술 필요성 인식
- 재생에너지 변동성 → 기존 대형 원전 **부하 추종 능력 요구**
- 대안: **대용량 에너지 저장 시스템-가동 중 원전 발전시스템 연계 운전**

LAES(Liquid Air Energy Storage)-혁신형 SMR 연계



<LAES primary process [1]>

<LAES system [1]>

액체 공기 저장 시스템 (LAES) 연계 혁신형 SMR 유연 운전 기술 개발

05 LAES 공정개념 개발 및 최적화



연구 수행 방법론

□ 혁신형 SMR 연계 LAES 공정 개념 도출 및 성능 평가

- 혁신형 SMR 증기발전계통 연계 증기터빈 구동 압축기(STDC) 및 LAES 시스템 개념도 도출
 - APR1400 개념도를 차용하여 재가열 steam Rankine cycle로 설계
 - 저압터빈 입구 우회 증기로 STDC를 구동하여 증기발전계통-LAES 연계 도모 → 탄력운전(부하추종운전) 가능

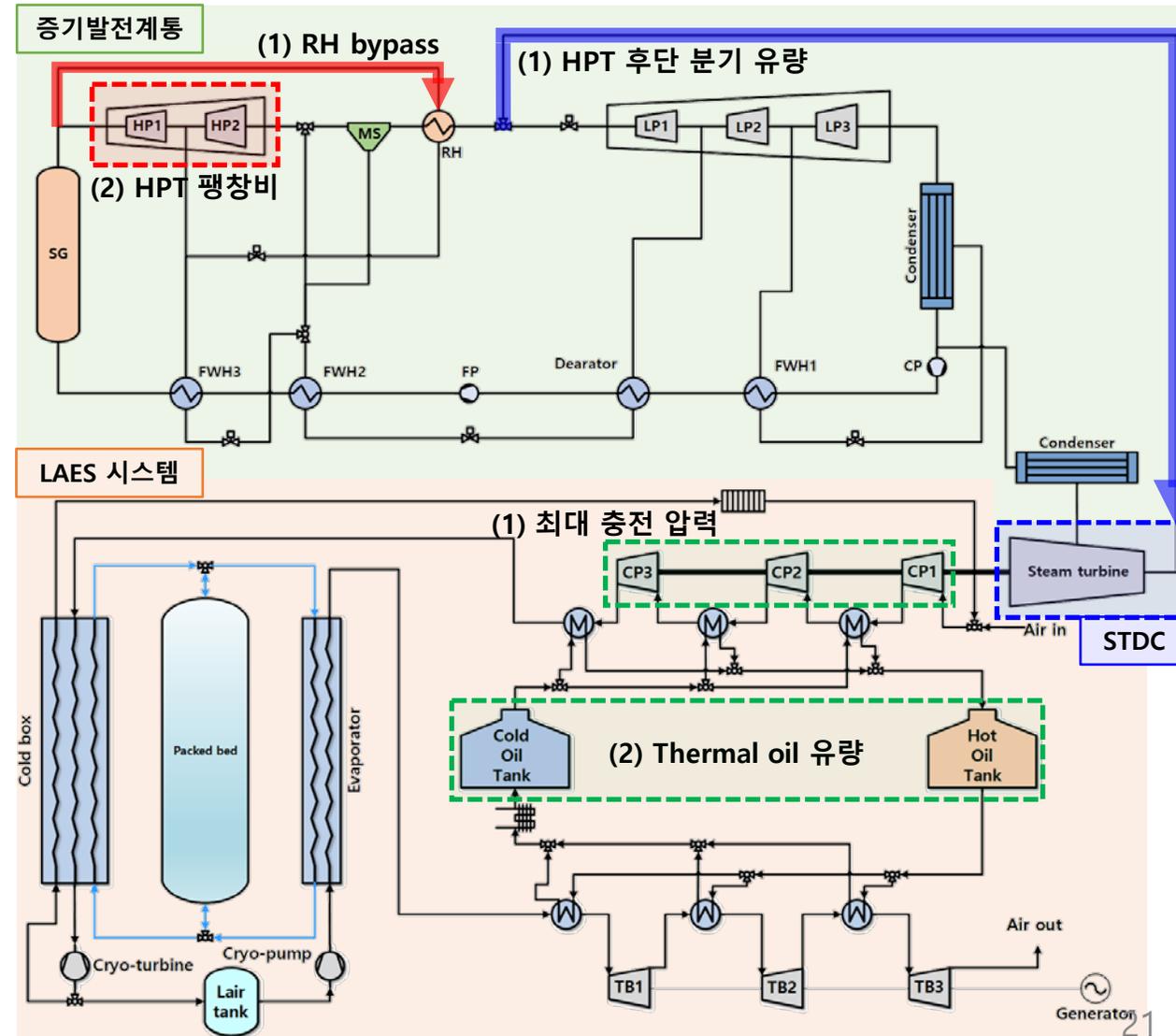
○ 상기 3개 계통 주요 설계 인자 도출

- (i-SMR 증기발전계통) **1) 재가열기(RH) 유량, 2) 고압터빈(HPT) 팽창비**
- (STDC) **1) HPT 후단 분기 유량**
- (LAES) **1) 최대 충전 압력, 2) Thermal oil 유량**

○ 설계 tool: **KAIST-CCD** (MATLAB 기반 사이클 정상상태 설계 코드)

○ 혁신형 SMR 사이클 제약 조건

Target Variables	Value	Target Variables	Value
SG thermal power	520MW _{th}	SG inlet temperature	230°C
Target power	170MW _e	SG outlet temperature	297.8°C
Target efficiency	32.69%	SG inlet pressure	5.335MPa
		SG outlet pressure	5.25MPa



[iSMR-LAES 연계 개념도]

1) STDC: Steam-turbine-Driven-Air compressor, 증기터빈 구동 압축기

05 LAES 공정개념 개발 및 최적화

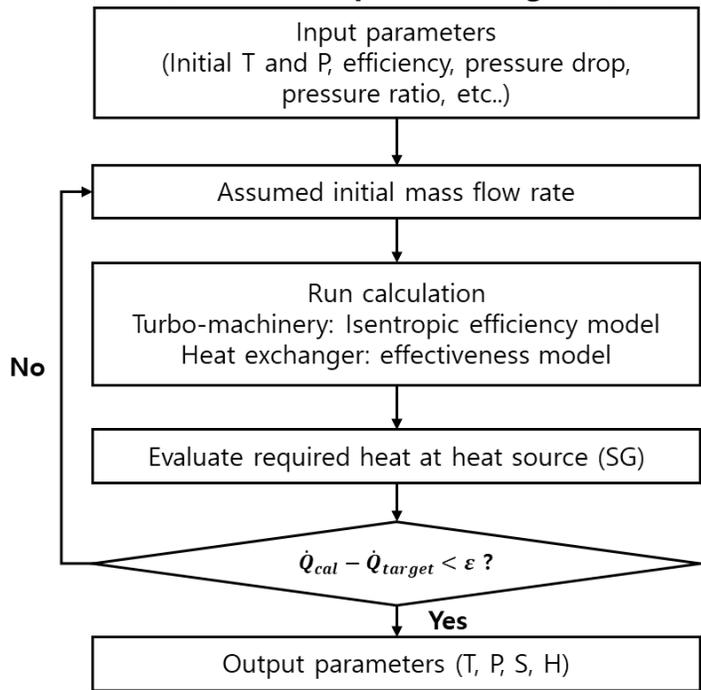
주요 연구 내용



□ 혁신형 SMR 증기발전계통 주요 인자 도출 및 최적화 (w/o LAES)

- KAIST-CCD를 사용하여 혁신형 SMR의 제약 조건(ex) 출력 170MW_e 만족을 위한 최적화 공정 수행 (1) 재가열기(RH) 유량, 2) 고압터빈(HPT) 팽창비)
 - 참고문헌을 통해 혁신형 SMR 사이클 고정 변수 선정 (터빈 및 펌프 효율 등)
- RH bypass 및 HPT 팽창비에 대한 효율 민감도 분석 수행

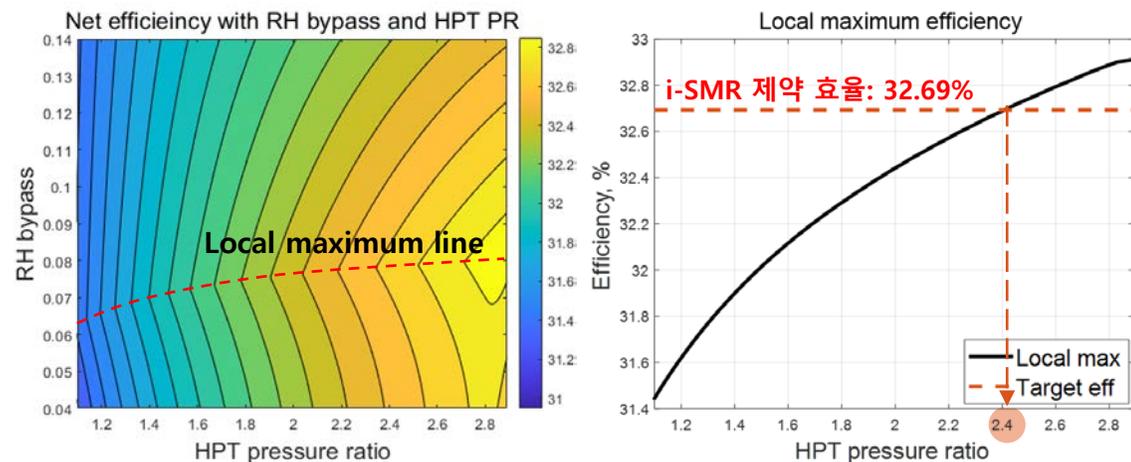
[KAIST-CCD process diagram]



[혁신형 SMR 사이클 고정 변수]

Fixed variables	
Parameters	Value
Turbine efficiency	85%
Pump efficiency	80%
FWH effectiveness	90%
Hot side pressure drop	9%
Cold side pressure drop	7%
Generator efficiency	96%
Condenser outlet temperature	40°C
Turbine extraction fraction	7%

1) FWH: Feedwater Heater, 주급수 가열기



[주요설계인자에 따른 증기발전계통 효율]

[혁신형 SMR 증기발전계통 주요인자 도출 및 최적화 결과]

Optimized variables		Target Variables	
Parameters	Value	Parameters	Value
재가열기 분기 비율	7.85%	Net efficiency	32.69%
고압터빈 팽창비	2.41	발전량	170MW _e
저압터빈 팽창비	274.3332	증기발생기 입구 온도	229.9956°C
고압터빈 후단 분기 비율	15.15%	증기발생기 열량	520MW _{th}

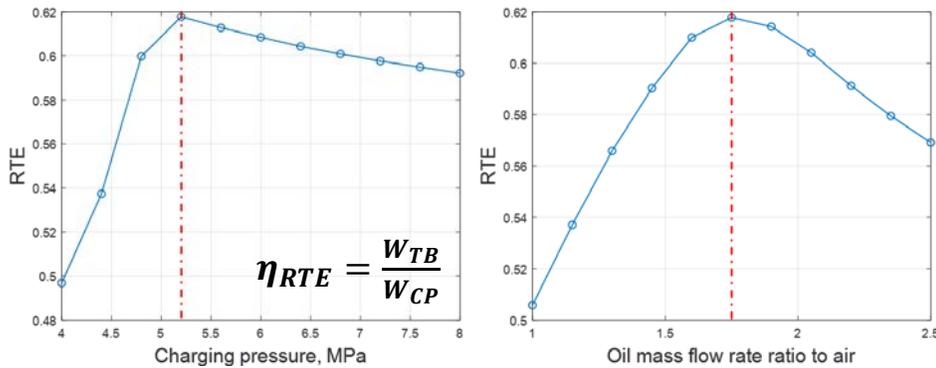
05 LAES 공정개념 개발 및 최적화

주요 연구 내용



□ LAES 시스템 주요인자 도출 및 최적화 (w/o SG)

- KAIST-CCD를 사용한 주요 인자 왕복효율(RTE) 민감도 분석
 - 주요 인자: 1) 최대 충전 압력, 2) Thermal oil 유량
 - [왕복효율] Max. $RTE_{LAES} = 61.7\%$



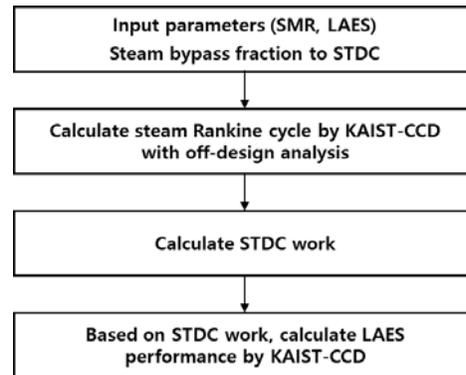
[주요설계인자에 따른 왕복효율]

[LAES 시스템 최적 설계 결과]

Optimized Variables	Value	Optimized Variables	Value
Optimal round-trip efficiency	61.7%	Thermal oil mass flow rate ratio	1.75
Charging pressure	5.2MPa	Liquid air yield	67.3%
Discharging pressure	12MPa		

□ 혁신형 SMR 증기발전계통-LAES 연계 성능 평가

- KAIST-CCD를 사용한 혁신형 SMR-LAES 연계 계통의 성능 평가
 - 주요 성능 인자: 1) 충전 및 발전량, 2) 액체공기 생산량, 3) 왕복효율
 - [왕복효율] 약 20% 저장 및 17.6% 발전 가능
 - Max. $RTE_{i-SMR-LAES} = 50\% < \text{Max. } RTE_{LAES} (= 61.7\%) (\because \text{SMR의 exergy loss})$



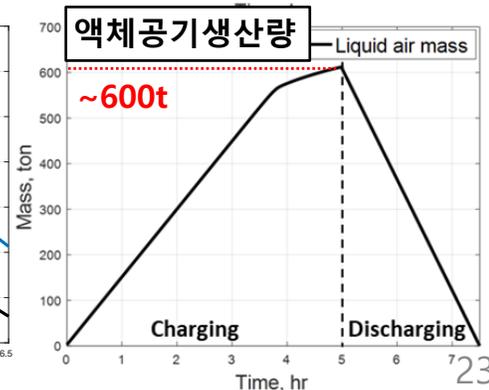
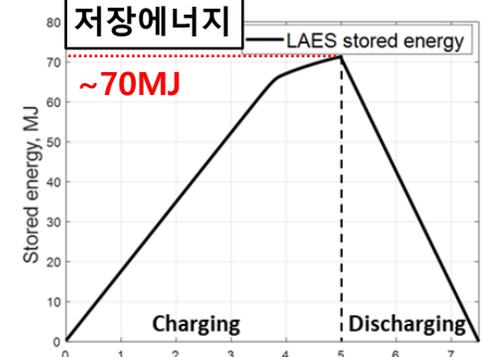
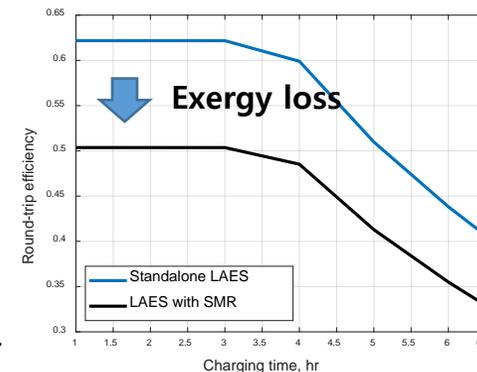
[혁신형 SMR 연계 LAES 성능 분석 흐름도]

$$\eta_{RTE,LAES} = \frac{W_{TB}}{W_{CP}}$$

$$\eta_{RTE,iSMR-LAES} = \frac{W_{TB}}{W_{CP} + W_{loss \text{ of SMR}}}$$

SMR의 Exergy loss를 고려하여 왕복효율 평가

발전
왕복효율 ~ 50%
저장



1) 증기발전계통의 bypass 유량은 전체 유량의 20%로 가정

2) 최적설계 증기발전계통 STDC 탈설계(off-design) 성능 해석 → 보충자료

[혁신형 SMR 연계 LAES 성능 분석]

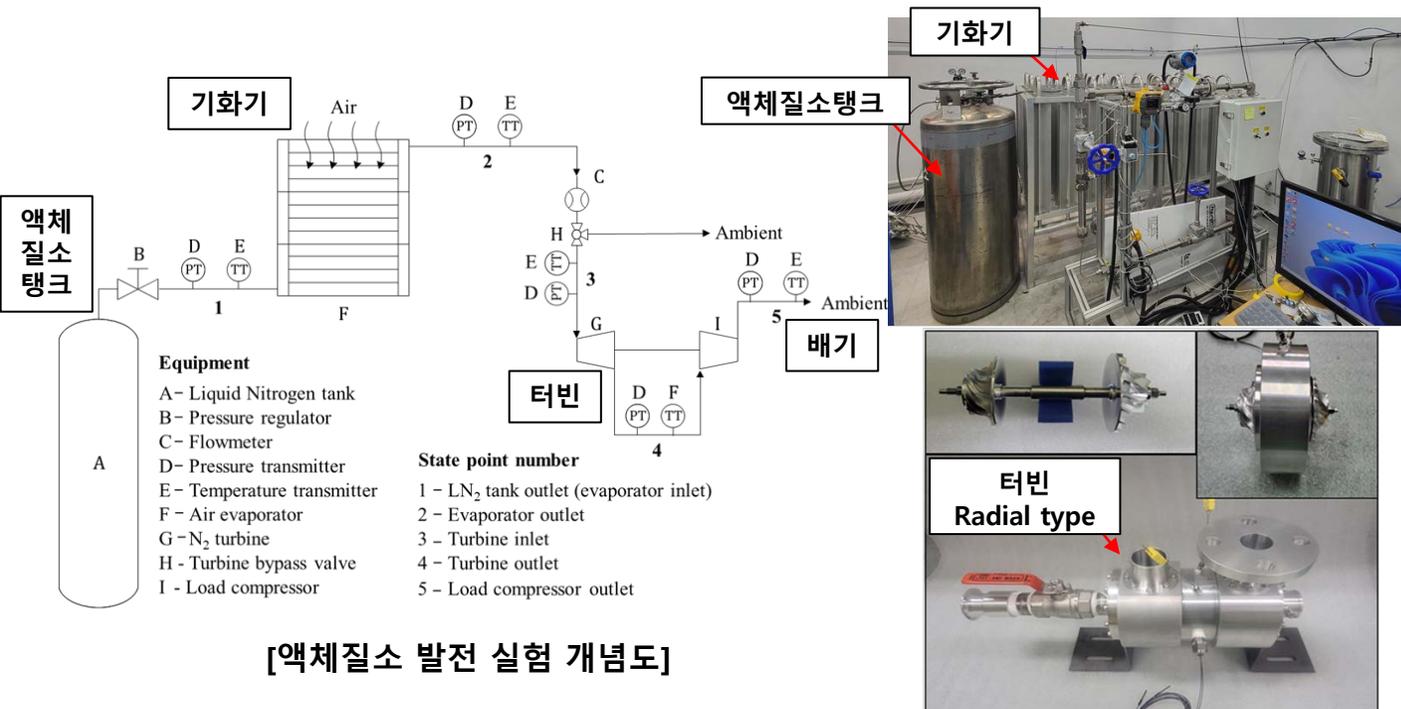
05 LAES 공정개념 개발 및 최적화

주요 연구 내용



□ Lab-scale 액체 질소 발전 실험

- LAES 연계 타당성 평가를 위해 lab-scale 실험 장치 구축
 - 액체질소를 이용한 소규모 발전 실험 수행
 - 실험 목적: 1) 터빈 성능 확인, 2) 액체질소 발전 가능성 확인
 - 액체질소 → 기화기 → 터빈 → 배기 순으로 수행



[액체질소 발전 실험 개념도]

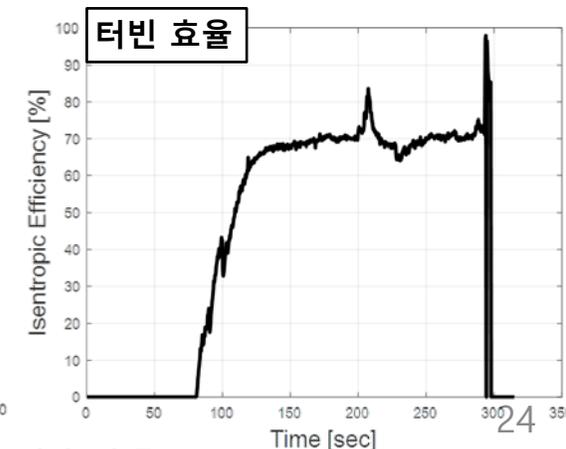
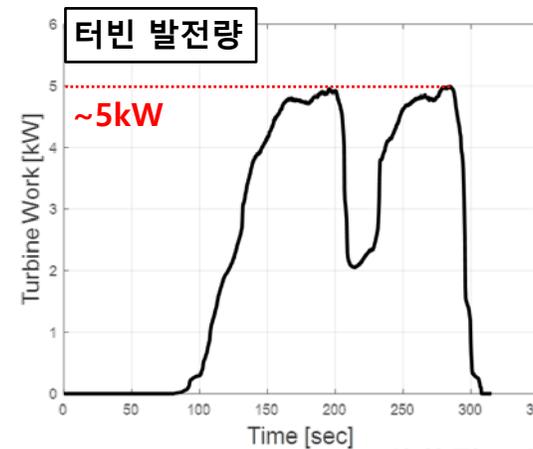
- 액체질소 발전 실험 결과
 - 4kg/min 유량에서 5kW (4kg/min) 발전 성공
 - 적은 유량으로도 높은 발전 가능 → LAES 발전 가능성 확인

[터빈 설계 정보]

Parameter	Value
설계 유량	6kg/min
팽창비	5
설계 효율	80%
설계 RPM	100,000

[액체질소 발전 실험 결과]

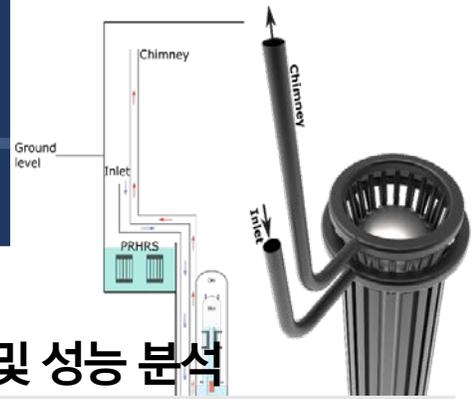
Parameter	Value
실험 유량	4kg/min
팽창비	5
관측 효율	70%
관측 RPM	100,000
터빈 발전량	5kW



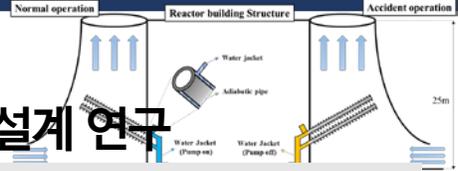
[액체질소 발전 실험 결과]

06 요약 및 결론

i-SMR 개발에서의 활용 방안



□ 피동 냉각 시스템 개념 설계 및 최적 설계 연구



개념 히트파이프(water jacket) 및 공기 냉각탑 이용 SF 잔열 제거 피동냉각계통

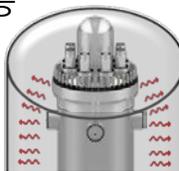
주요 연구 내용

방법 (성능평가) 자체 개발 MATLAB 코드 & (코드 정확도 향상) 실험장치 구축
 → 히트파이프 열전달량 및 사용후핵연료 저장 수조 냉각재 변화량 평가

결과 사용후핵연료 저장 수조 온도: (정상 운전) 60 °C, (사고 상황) 90 °C
 → 목표 온도 이하 유지 확인을 통해 히트파이프 계통 도입 가능성 확인

활용 방안 히트파이프 피동냉각계통 도입 시 저장 수조 구조 최적화(히트파이프 배치, 응축부 구조 및 핀 구조)를 통해 더 높은 냉각성능의 히트파이프 계통 개발 가능

□ 이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법



개념 이중 격납용기 갭 내부 radiation shielding 도입 및 단열/냉각 성능 설계 최적화

주요 연구 내용

방법 (실험 초기 조건 산출) CFD·MELCOR 코드 & (갭 내부 조건별 성능평가) i-SMR의 형태계수를 고려한 실험장치 구축
 → (단열) 격납용기 외벽 열손실량 평가, (냉각) 특정 시간 후 잔여 증기 물분율 평가

결과 (정상 운전/단열성능) Vacuum 상태, Al shielding의 갭 내 1/3지점 배치
 (사고 상황/냉각성능) Vacuum 상태, w/o Radiation shielding

활용 방안 Radiation shielding 도입 시 성능 최적화 CFD 방법론 및 실험 벤치마킹 데이터 제공 가능. Radiation shielding 배치 제안: 현 이중 격납용기 내 PCCS 설계에 따라 열교환기 사이 배치. 또한, CFD 결과에 따라 증기발생기 높이(최대 복사열전달 손실)에 배치.

□ 피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석

개념 혁신형 SMR 장기냉각을 위한 다중채널 RVACS 적용 최적 피동잔열제거계통 개발

주요 연구 내용

방법 (성능평가) 단일/다중채널 RVACS 모사 MARS-KS 코드 & (코드 검증 및 정확도 향상) 실험장치 구축
 → 주요 설계변수(굴뚝 높이/직경 등) 최적화 및 최종 냉각성능 평가

결과 무한냉각: (기존 개방형 공기냉각) 0.54MWe/28일 → (다중채널 RVACS) 1.41MWe/7일

활용 방안 다중채널 RVACS 피동잔열제거계통 도입 시 설계 최적화 MARS-KS 코드 및 실험 벤치마킹 데이터 제공 가능

□ LAES 공정개념 개발 및 최적화



개념 혁신형 SMR의 유연운전능력 향상을 위한 증기발전계통 연계 STDC 및 LAES 시스템 개발

주요 연구 내용

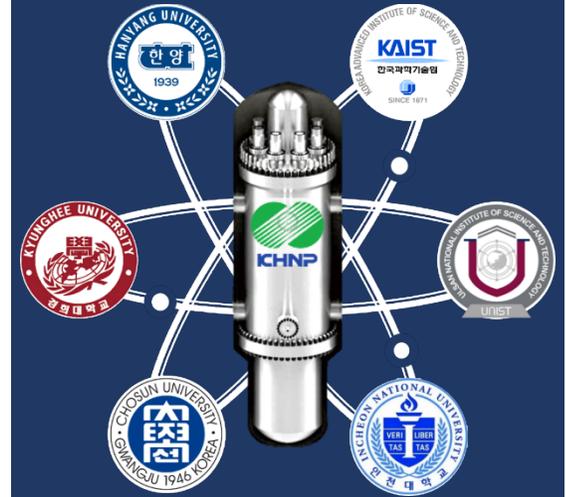
방법 (성능평가) MATLAB 기반 KAIST-CCD 코드 & (실증가능성 평가) 실험장치 구축
 → i-SMR 사이클 제약 조건 만족 i-SMR 증기발전계통, STDC, LAES 주요 설계인자(HPT 패창비, bypass 분기 유량 등) 최적화 및 최종 총/발전량 평가

결과 약 20% 저장(약 34MWe) 및 17.6% 발전(약 30MWe) 가능 (왕복효율=약 50%)

활용 방안 LAES 공정 연계를 통해 재생에너지 비중이 높은 분산전원-SMR 간 연계성 향상 가능. 또한 LAES 사용 시 산업 연계성(냉방, 냉동, 공조 등) 증진.

Thank you for your attention

sungjkim@hanyang.ac.kr



00 보충자료

국내 SMR 정책 동향



□ (과기부) 미래원자력기술 발전전략 ('17.12) ~

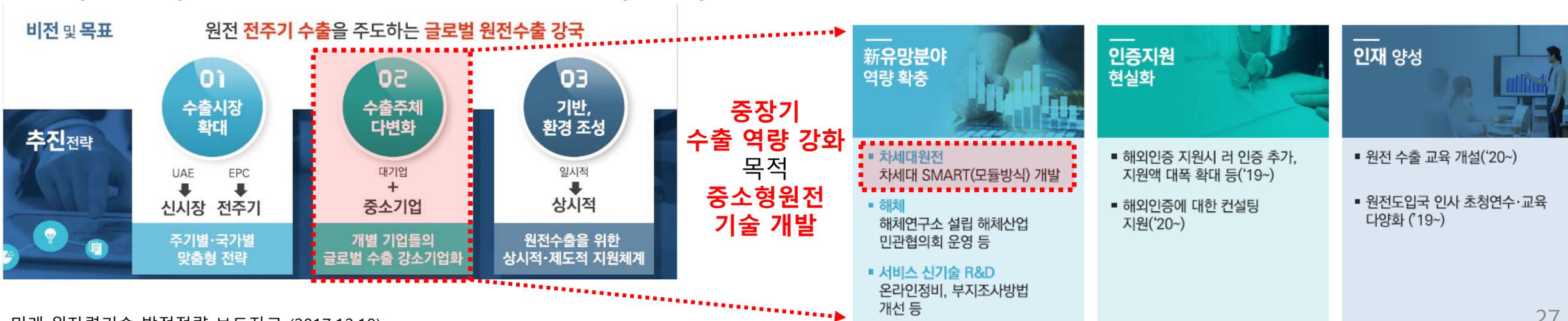
- 종합적인 기술역량 확보를 위한 5대 핵심전략 및 13개 실천과제 도출

□ 제9차 원자력진흥위원회 ('20.12) ~

- 세계 원자력 新시장 개척을 위한 소형원자로 기술개발 전략 관련 논의
 - [전략1: 초기시장 창출] SMART 해외 건설
 - [전략2: 경쟁력 고도화] 혁신기술이 집약된 소형모듈원자로 (i-SMR) 개발

□ (산업부) 원전 쏘주기 수출활성화 방안 ('19.9)

핵심전략	세부 실천과제
원전 안전 및 해체연구	- 가동 원전의 안전성 제고 및 사고방지 기술개발 - 원전 해체 핵심기술 및 해체 인프라 확보 - 안전하고 친환경적 원자력 폐기물 관리기술 개발
방사선기술 등의 활용 확대	- 의료·바이오 부문과 융합연구 강화 - 첨단소재·환경기술 개발에 적용 확대 - 우주·국방·해양·극지 분야에 활용 촉진
해외수출 지원 강화	- 연구로 및 중소형원자로 해외수출 지원 - 국내 개발 요소기술의 수출기반 조성
미래에너지원 확보노력	- 핵융합에너지의 핵심기술 및 운영역량 강화 - 국제핵융합실험로 건설사업에 주도적 참여
핵심기술의 사업화 추진	- 방사선 융복합 기술 사업화 지원 - 연구로-SMART의 국내 특화산업 육성 - 해체기술의 산업화 지원 강화



1) 미래 원자력기술 발전전략 보도자료 (2017.12.19)
2) 원전 쏘주기 수출활성화 방안 ('19.9) 발표자료

00 보충자료

경쟁 노형 특허 현황



□ NuScale의 특허 출원 현황

- 한국, 미국, 일본 등 총 62건의 **국내·외 특허 출원** (국내 특허 등록: 42건, 해외 특허 등록: 54건)

분야	특허명	특허 공개/등록번호	출원일	대상 국가
1	Nuclear Reactor Protection System and Method	KR20190109428	2018-01-02	2018 JP EP CN KR WIPO US CA / 2021 US
2	Passive cooling for cold shutdown	KR20180077217	2018-07-06	2015 US / 2016 EP CN WIPO CA KR / 2018 HK
3	Reactor vessel coolant deflector shield	KR101366218	2014-02-17	2009 US KR JP EP WIPO PL ES CA CA CN / 2012 US
⋮				
61	Inadvertent actuation block valve for a small modular nuclear reactor	US20190362861A1	2019-03-06	2019 US
62	Controlling a nuclear reaction (Controlling a power output of a nuclear reaction without control rods)	US11309094B2	2022-04-19	2018 EP WO US US US

분류 계						
노심 시스템	계통 시스템	종합 시스템	사용후 핵연료	컴포넌트	기타	계
11	19	15	2	14	1	62

00 보충자료

학술 용역 개요



□ 학술 용역 개요

- 학술 용역명: 혁신형 SMR 혁신기술 개발 (Innovative Technology Development of i-SMR)
- 총 예산: ₩ 3,516,047,000

항목	예산	비고
인건비 총액	₩ 2,615,004,569	VAT 제외 총 예산 대비 81.8% (2022년: 37.7%)
여비	₩ 96,512,032	국내 회의 및 국외 학회
시약 및 연구용 재료비	₩ 276,271,399	
유인물비, 회의비	₩ 27,690,000	착수회의 및 진도점검회의
일반관리비	₩ 180,928,364	인건비+경비의 6.00%
부가가치세	₩ 319,640,636	인건비+경비+일반관리비의 10.00%
합계	₩ 3,516,047,000	

- 총 연구기간: 2022. 04. 08 - 2023. 11. 30
 - 1차년도 연구기간: 2022. 04. 08 - 2022. 09. 30
 - 2차년도 연구기간: 2022. 10. 01 - 2023. 04. 30
 - 3차년도 연구기간: 2023. 05. 01 - 2022. 11. 30

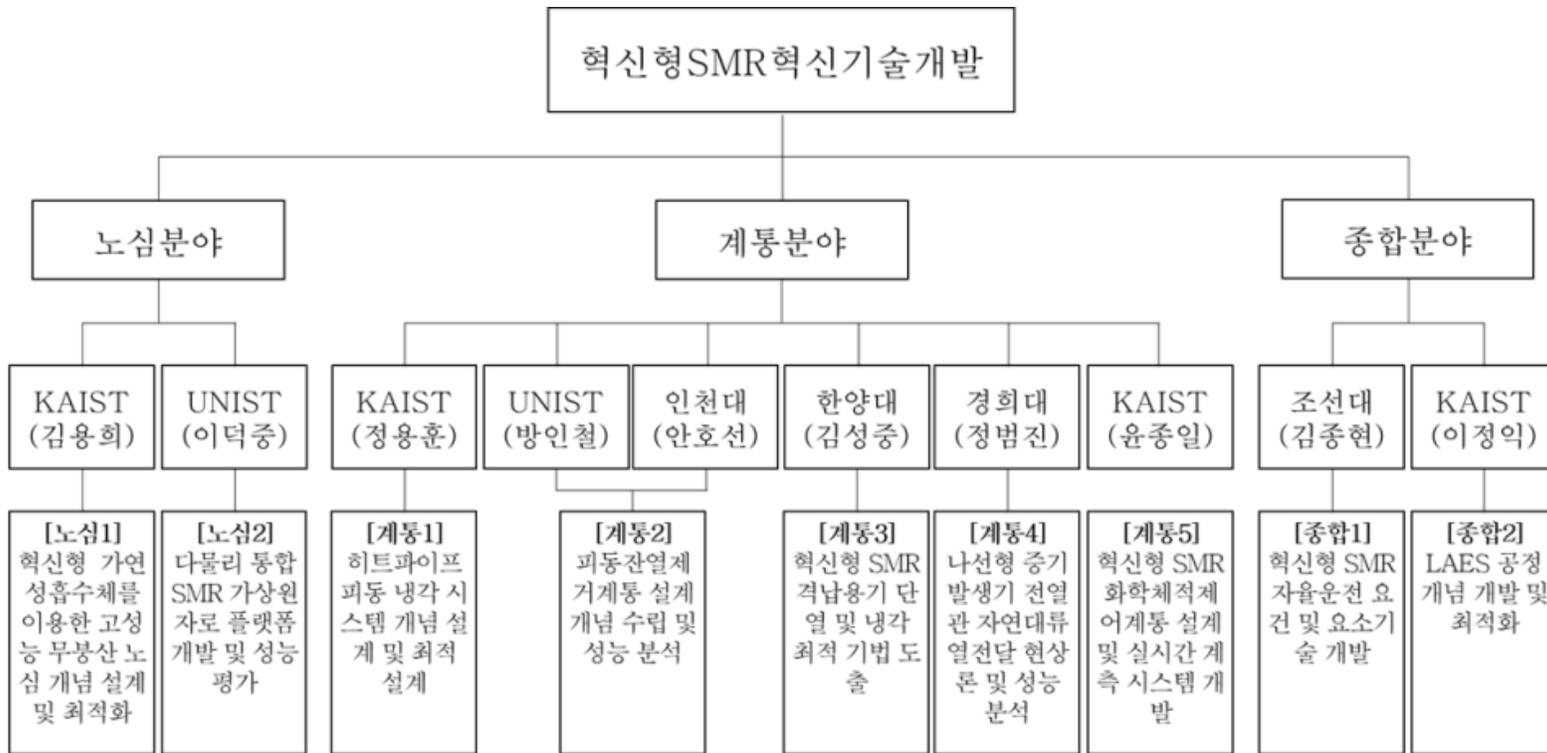
00 보충자료

참여 인력



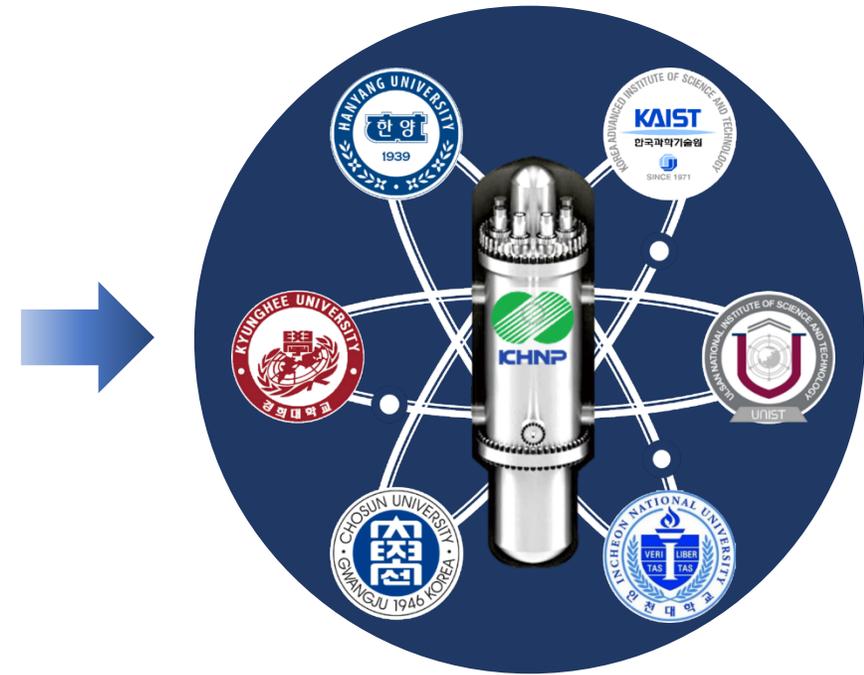
□ 참여 인력

- 참여기관: 총 10개 기관, 총 94명 (연구책임자 1명, 분야별 책임기술자 9명, 용역참여원 84명)



수행분야별 조직도

학술 용역 대표 로고



00 보충자료

용역 결과물



□ 1, 2, 3차년도 연구 성과물

○ 총 31개 용역결과물 보고서 및 9개 기술보고서 제출 완료

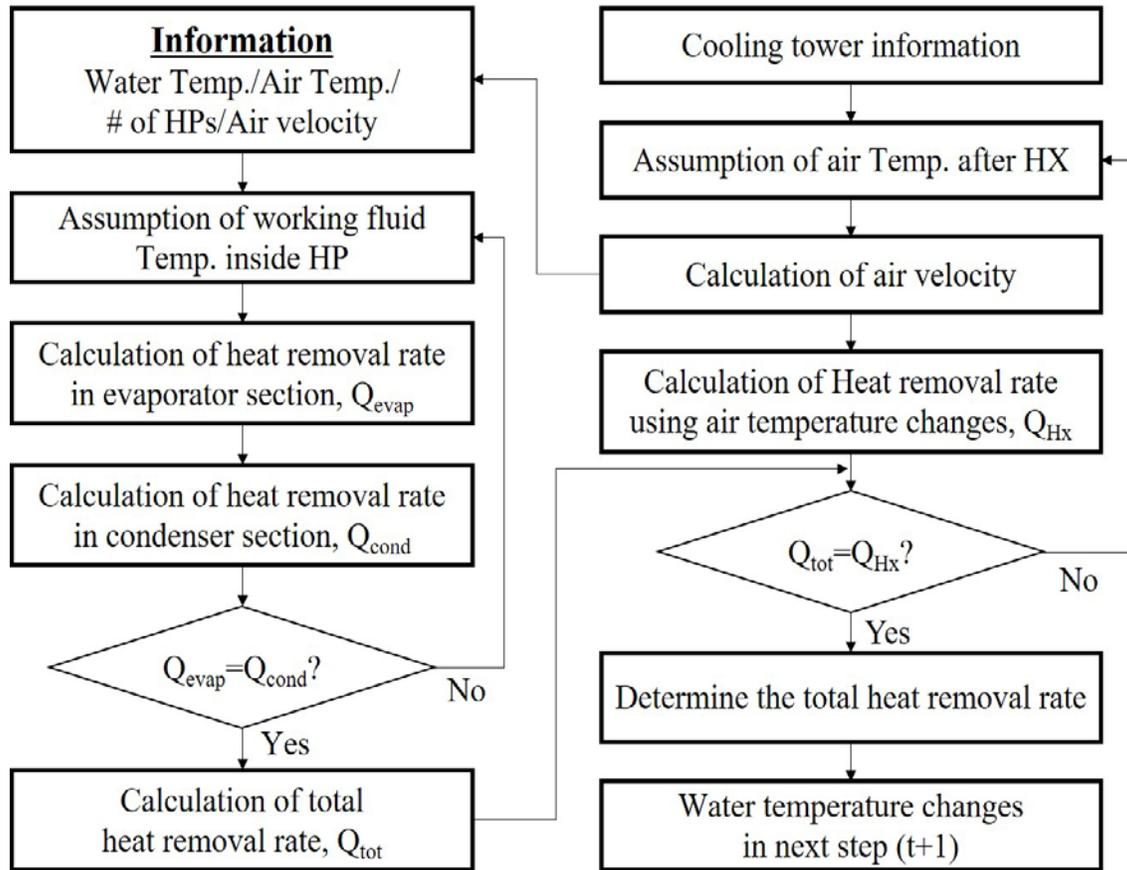
분야	기 제출 용역결과물명	제출월	PNS #
노심2	SMR 전노심 수송해석 계산 기능 구현 보고서	2022.06	9-034-AZ-460-001
계통3	SMR 격납용기 단열 및 냉각 요소기술 현황 보고서	2022.09	
계통2	피동 공기냉각 계통 관련 연구개발 현황	2022.09	9-034-AZ-460-014
노심2	SMR 노심 및 내부구조물 3차원 모델 개발 보고서	2022.09	9-034-AZ-460-002
노심2	SMR 원자로 3차원 노물리 병렬계산 기능 구현 보고서	2022.12	9-034-AZ-460-003
종합2	LAES 기술 보고서	2022.09	9-034-AZ-460-008
계통5	CVCS 실시간 계측시스템 기술 보고서	2022.09	9-034-AZ-460-011
종합1	자율운전 개념설계 보고서	2022.09	
	⋮		
노심1	피동 부하추종운전 성능 보고서	2023.11	9-034-AZ-460-025
계통1	히트파이프 피동냉각 시스템 예비타당성 보고서	2023.11	
계통4	사고시 노심/증기발생기 자연대류 열전달보고서	2023.11	

분야	기 제출 기술보고서명	제출월
노심1	혁신형 가연성흡수체를 이용한 고성능 무봉산 노심 개념 설계 및 최적화	2023.11
노심2	다물리 통합 SMR 가상원자로 플랫폼 개발 및 성능 평가	2023.11
계통1	히트파이프 피동 냉각 시스템 개념 설계 및 최적 설계	2023.11
계통2	피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석	2023.11
계통3	혁신형 SMR 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법 도출	2023.11
계통4	나선형 증기발생기 전열관 자연대류 열전달 현상론 및 성능 분석	2023.11
계통5	혁신형 SMR 화학체적제어계통 설계 및 실시간 계측 시스템 개발	2023.11
종합1	혁신형 SMR 자율운전 요건 및 요소기술 개발	2023.11
종합2	LAES 공정개념 개발 및 최적화	2023.11



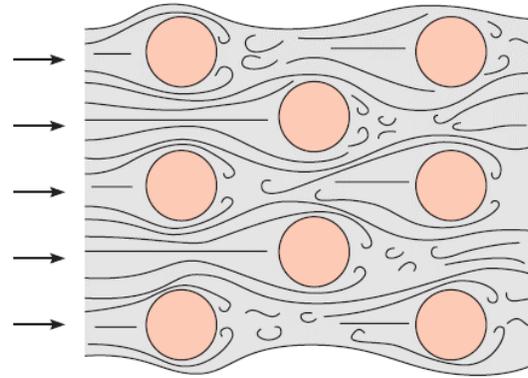
히트파이프 피동냉각계통 냉각성능 평가 코드 개발

MATLAB 코드 계산 순서도

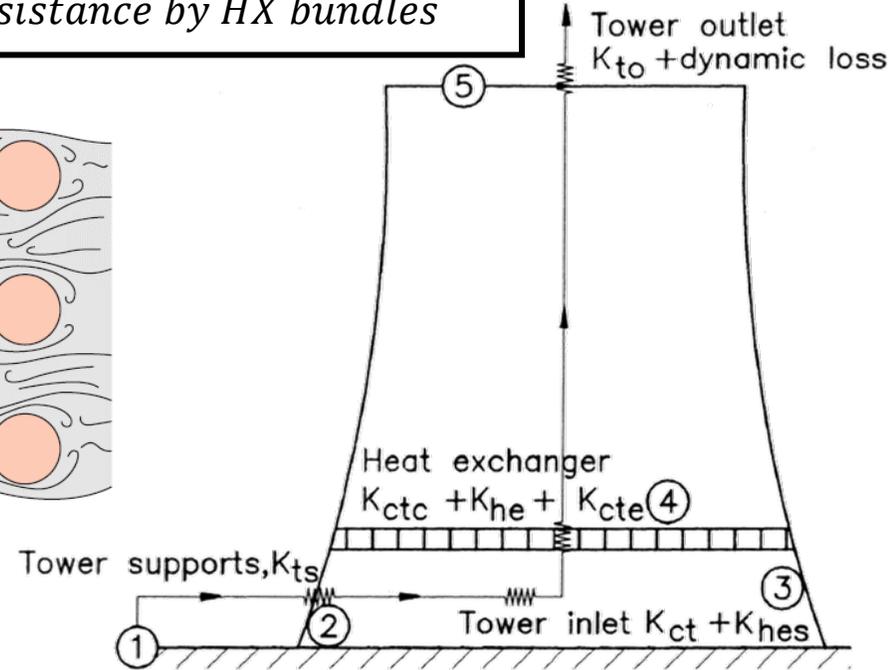


$$K_{he} \left(\frac{\dot{m}}{A_{fr}} \right)^2 = 2\rho_{a34}(\rho_{a3} - \rho_{a4})g(H_5 - H_4)$$

H_5 : Tower height, 25m
 H_4 : Height after HX, 5m + HX stacks
 K_{he} : Flow resistance by HX bundles



$$K_{he} = N_L \chi f$$



$$P_a \approx (\rho_{ao} - \rho_{ai})g \left[H_5 - \frac{H_3 + H_4}{2} \right] = \sum \text{flow resistance}$$

00 보충자료

피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석



□ 예비해석 모델 주요특징

○ 주요구성, 조건 및 가정

- 계통구성: Heated section, Riser, Downcomer, Lower & upper plenums
- MARS-KS 코드 특성상 환형유로 → 수직평행판 유로로 가정 (가열벽면(CNV wall) 기준 동일한 유로 디멘전 (길이, 면적 등))
- CNV 벽면 균일 벽면온도 조건(내부 증기조건 가정- CNV design pressure → $T_{sat}=295\text{ }^{\circ}\text{C}$ @ 80 bar), 대류 및 복사 열전달 모델 고려
- 가정: 횡방향 교차유동(crossflow) 영향 무시가능 → 복사 2D view factor 고려 (Appendix A)

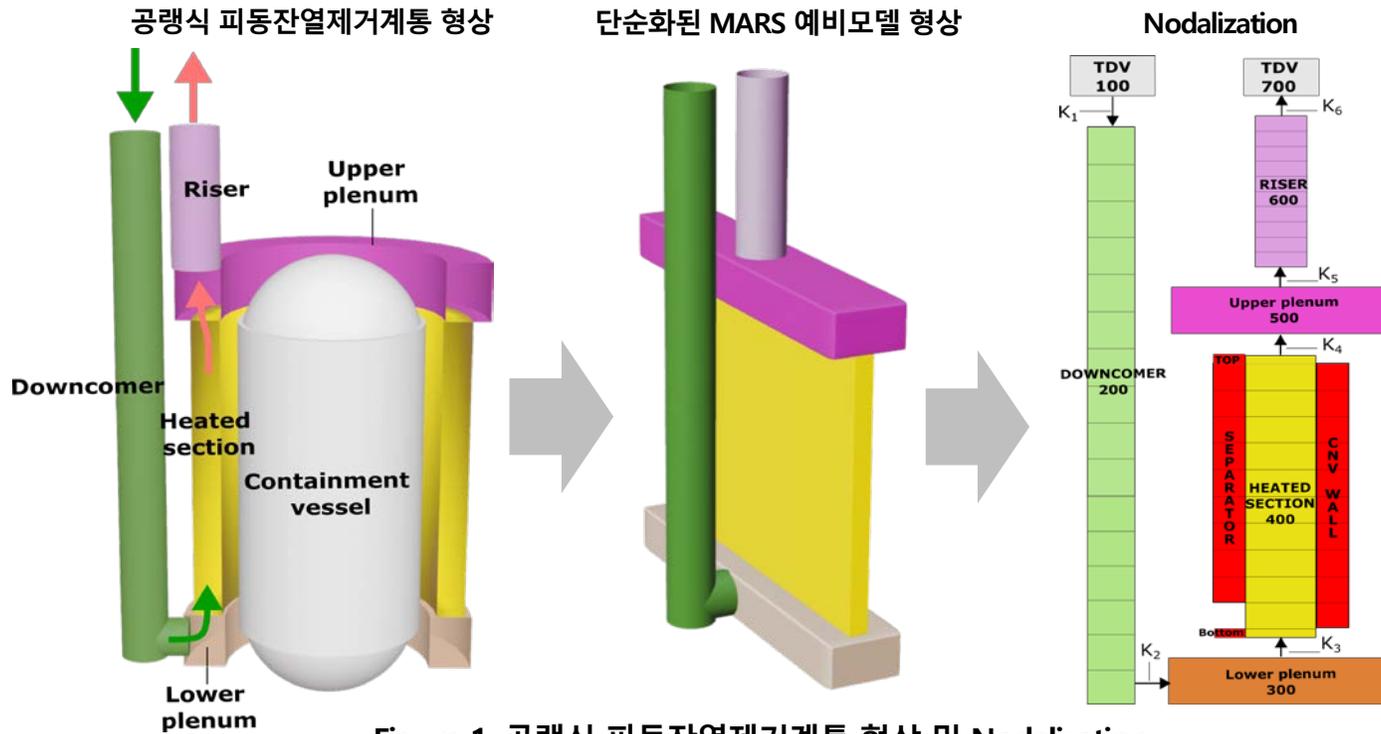


Figure 1. 공랭식 피동잔열제거계통 형상 및 Nodalization

Table 1. MARS 코드 해석 시 형상손실계수 입력값

Location	Type	Value
K1	Entrance	0.8
K2	Sudden expansion	0.98-1.0
K3	Sudden contraction	0.32-0.39
K4	Sudden expansion	0.56-0.86
K5	Sudden contraction	0.36-0.4
K6	exit	1.0

Table 2. 형상 및 변수 범위

i-SMR CNV dimension	
CNV height, m	25
CNV outer diameter, m	9
Studied geometrical parameters	
Parameters	Value
Air gap, cm	2-40
Lower plenum size, D_p/D	2(0.4m)-7(1.4m)
Upper plenum size, D_p/D	2(0.4m)-7(1.4m)
Riser height, m	10-40
Riser & downcomer diameter, m	0.4-1.4
Surface emissivity	0.2-0.6

* D_p is diameter of plenum

* D is hydraulic diameter of heated section (Annular)

00 보충자료

피동잔열제거계통 설계 개념 수립 및 성능 분석



□ CNV 관통부 배치 자유도 증대를 위한 멀티채널 구성

○ 멀티채널 형상 주요 특징

- NuScale(수직)과 달리 배관, 계측라인이 수평방향으로 전개
→ 관통부 중첩으로 인한 환형유로 형상 적용불가, CNV 관통부 배치 자유도 증대 위한 매니폴드 형태의 멀티채널 형상 제안
- 유량 및 열제거량 분포, 계통 전체성능은 플레넘 형상, 채널 개수 및 크기에 따라 결정될 수 있음
- 문헌값(ASHRAE Handbook) 기준 형상손실계수 고려하여 해석 수행

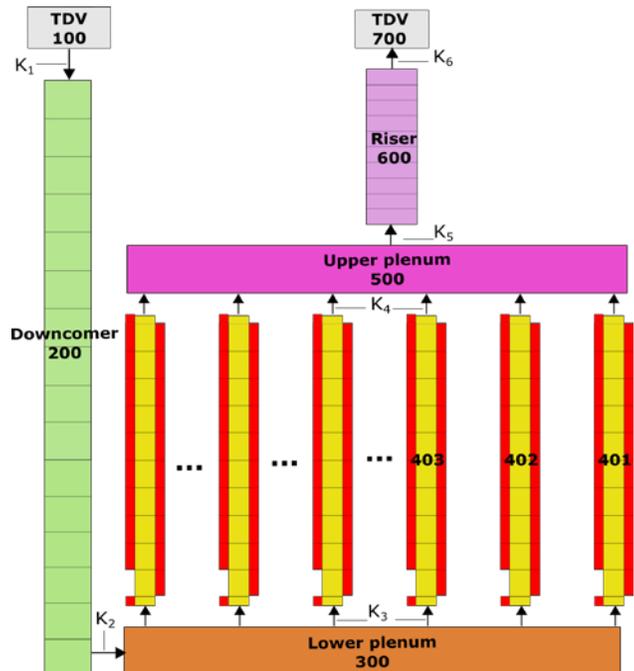


Table 3. 다중채널 형상 및 변수 범위

Studied parameters							
Number of channel	2-16						
Plenum ratio, D_p/D	2-9						
K loss coefficient for K_3 and K_4							
Ratio	Number of channels						
	2	4	6	8	10	12	16
$D_p/D = 2$	0.99	1.60	2.56	3.5	4.65	5.15	8.11
$D_p/D = 3$	0.88	1.10	1.37	1.63	1.88	2.06	2.70
$D_p/D = 4$	0.77	1.00	1.12	1.23	1.40	1.54	1.84
$D_p/D = 5$	0.71	0.96	1.06	1.20	1.25	1.40	1.50
$D_p/D = 6$	0.67	0.93	0.98	1.13	1.18	1.30	1.44
$D_p/D = 7$	0.63	0.90	0.92	1.05	1.10	1.20	1.30
$D_p/D = 8$	0.60	0.87	0.90	0.98	1.05	1.10	1.20
$D_p/D = 9$	0.58	0.86	0.89	0.93	1.01	1.05	1.10

Figure 9. 다중채널 Nodalization

00 보충자료

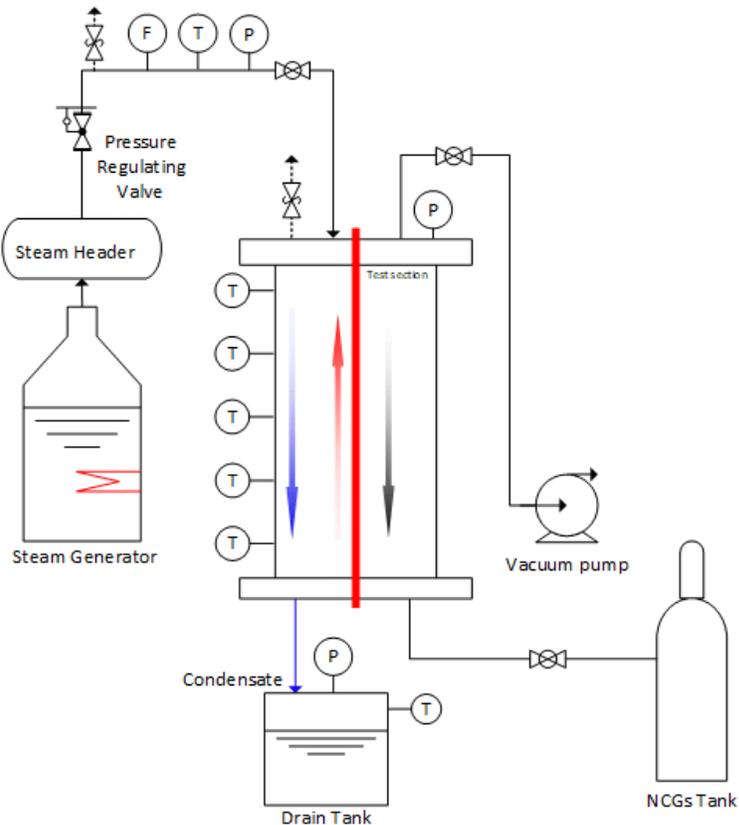
이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법



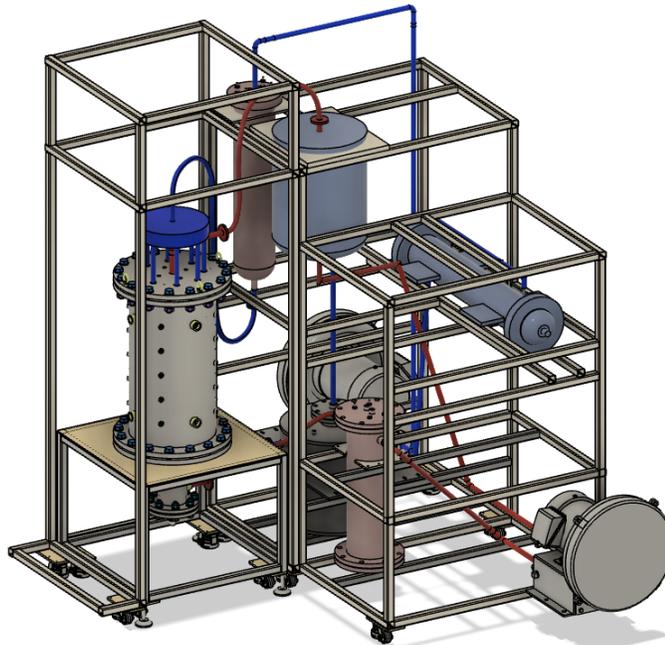
□ 격납용기 모사 열전달 실험장치 구축

- 복합 열전달(Conjugate HT) 평가: 전도+자연대류+복사열전달

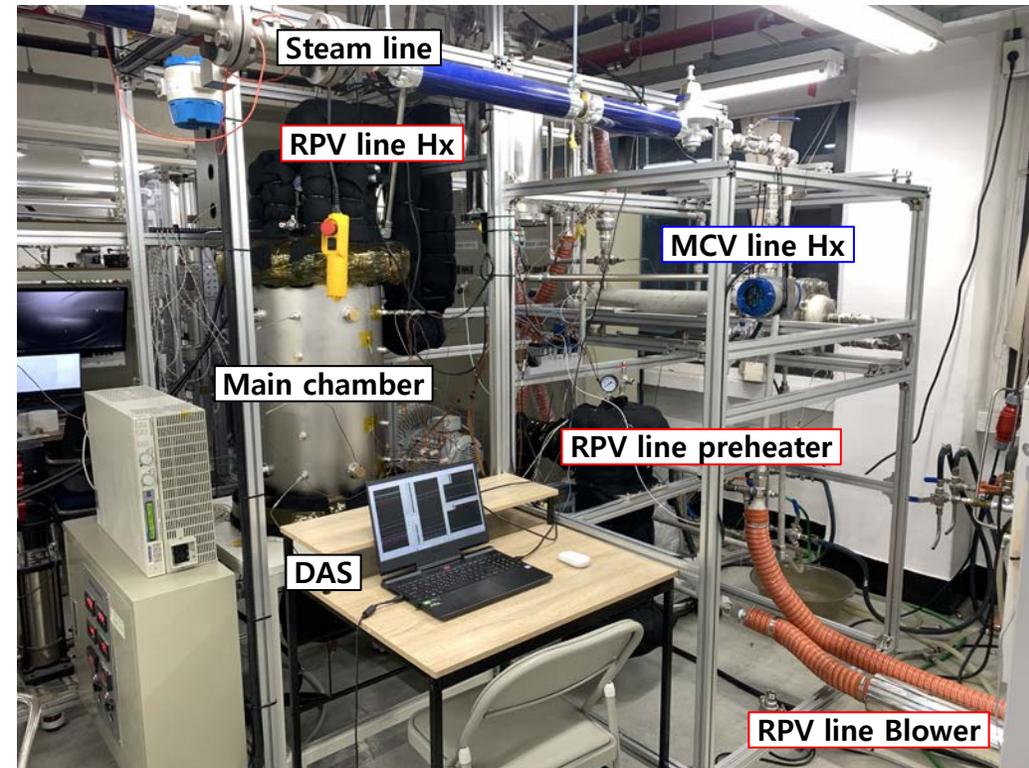
실험장치 계통도



최종 실험장치 (3D)



실험장치 사진



02 보충자료

이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법

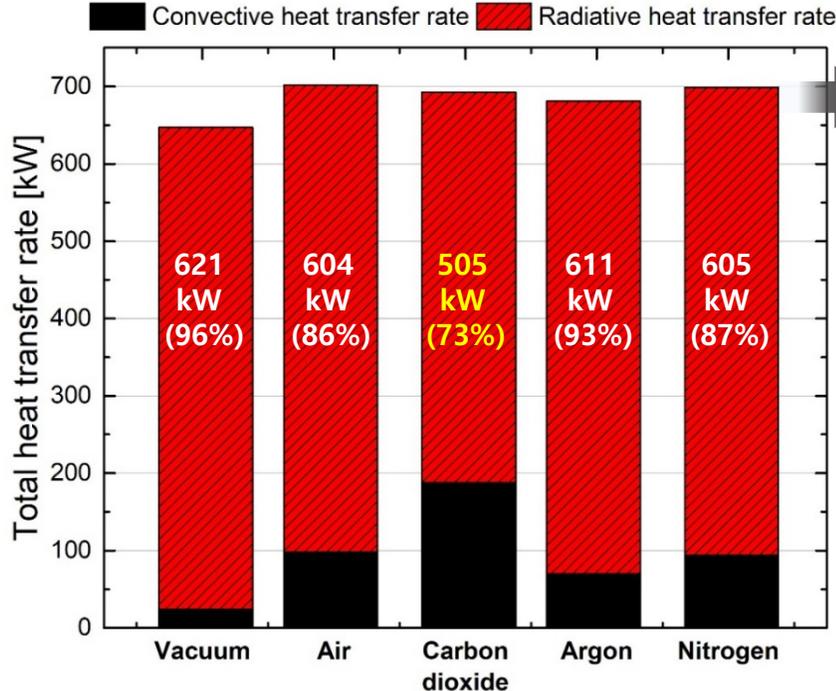


□ Test matrix용 CFD: 단열성능 예비해석 (용역시방서 상 대기압 기체형 충전재 제안)

- CFD 예비해석 (Ansys FLUENT): 단열성능평가 실험 경계조건 도출을 위한 i-SMR 최신 설계 변수 적용 CFD 해석 수행
- 정상운전 시 갭 내부 충전조건에 따른 열전달 메커니즘을 정량적으로 확인
 - 이를 바탕으로 단열 성능 개선을 위한 Shielding 개념 도출 → 복사가 가장 큰 기여도를 보이는 진공 조건에서 Shielding 성능을 평가

[i-SMR 2차원 CFD 해석]

[MCV 내벽에 도달하는 열전달 메커니즘 분석]



복사열전달 지배적 (73% ↑)

- 총 열손실량 차이는 미미.
- 복사열전달량: 후보들 간 3% 차이 (이산화탄소 예외)
- 이후 예비 실험 결과 해석에 활용



- ✓ 고체형 충전재 개발 방향성
- Shielding을 통한 복사열 차단
- 단열 성능 개선 예상

[단열성능 평가 실험 Matrix]

분석 목표 열전달	히터 온도	갭 충전 조건
전도	(@ PRZ) 320 [°C]	세라크올 (Shielding 유/무)
복사		진공 (Shielding 유/무)
대류		Air, Ar, N ₂ , CO ₂ (Shielding 미배치)

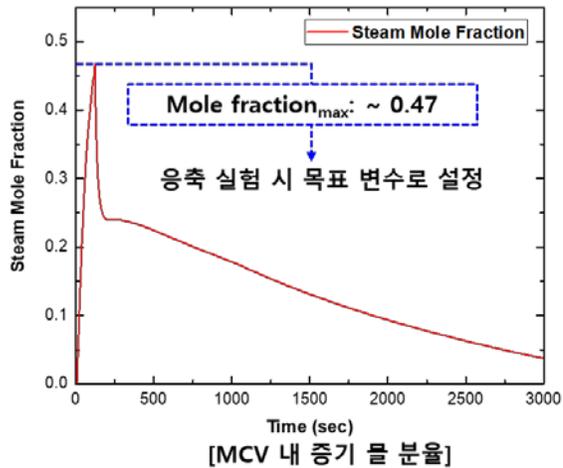
02 보충자료

이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법



□ Test matrix용 MELCOR: 냉각성능 예비해석

- 중대사고 전산해석코드(MELCOR): 냉각성능평가 실험 경계조건 도출을 위한 540MW_{th} i-SMR 사고 모사 (w/ ADV stuck-open, w/o recirculation valve open)
- 과도상태 냉각성능 해석&검증을 목적으로 갭 충전조건에 따른 금속 격납용기 냉각성능 평가



[냉각성능 평가 실험 Matrix (MELCOR)]

갭 충전 조건	히터 작동	증기 주입량 [kg]	외기온도 [°C]
Vacuum	Off	0.32 (Mole fraction 고려하여 주입) (MELCOR 결과)	20
Air			
Ar			
CO ₂			
N ₂			

과도상태 모사

원자로용기 내 과압 → ADV 통해 갭으로 증기 방출

예상되는 한계

기체형 충전재: 비응축 기체 → 진공 대비 응축성능 감소

종합전산해석 코드 (MELCOR)

실험을 통한 정량적 성능 평가 수행

과도상태 모사 실험용 경계조건 설정

요소기술 별 응축 성능 평가 수행

- ✓ 격납용기 내부조건(비응축 가스 등)에 따른 응축열전달 냉각 성능 정량화 및 비교
- ✓ 사고 초기 충분한 냉각 성능 확보 가능 조건 → 최적 충전조건 도출 (w/ 단열성능)

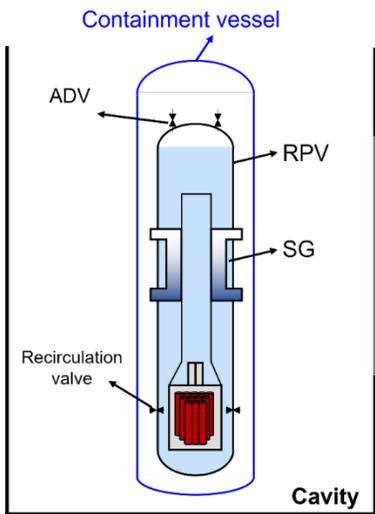
00 보충자료

이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법

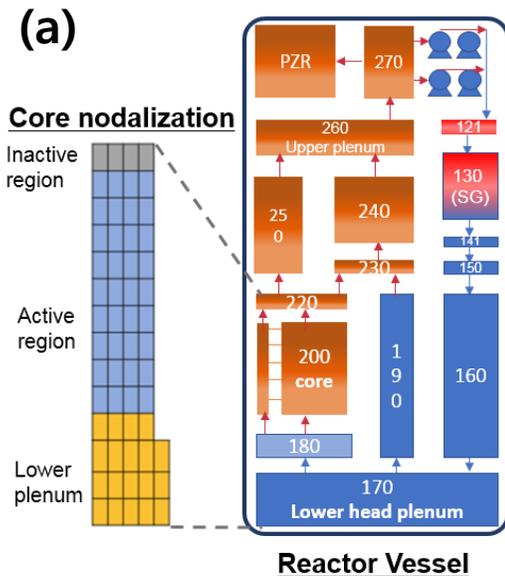


□ Test matrix용 MELCOR: 냉각성능 예비해석

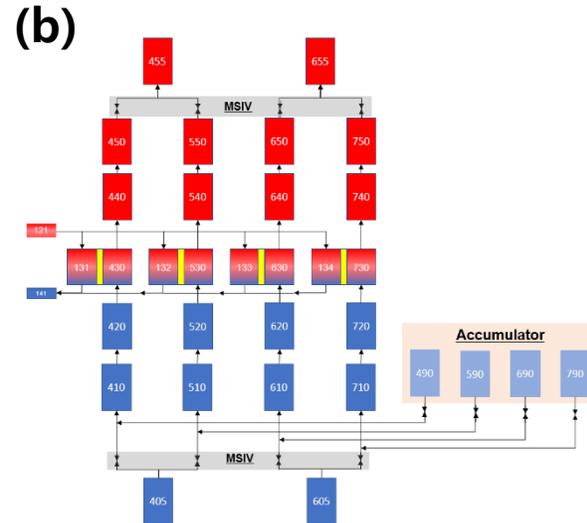
- 중대사고 전산해석코드(MELCOR): 540MW_{th} i-SMR 사고 모사 (w/ ADV stuck-open, w/o recirculation valve open)
- 분석 대상: 재순환밸브 가동 필요 시점, 증기 방출로 인한 가압에 따른 MCV 건전성 유지 시점



[i-SMR 모사 형상]



[MELCOR 입력모델 노드화]
(a) 1차계통 (b) 2차계통



Design parameter	Values
Core power [MW _{th}]	540
Primary pressure [MPa]	14.94
Primary system mass flow rate [kg/s]	1,523.4
Core inlet temperature [°C]	267.8
Core outlet temperature [°C]	310.6
Secondary system mass flow rate [kg/s]	38.92
Secondary system pressure [MPa]	4.8
SG Primary inlet temperature [°C]	310.6
SG Primary outlet temperature [°C]	267.9
SG secondary inlet temperature [°C]	217.2
SG secondary outlet temperature [°C]	256.5

[i-SMR MELCOR 입력모델 정상 운전 조건]

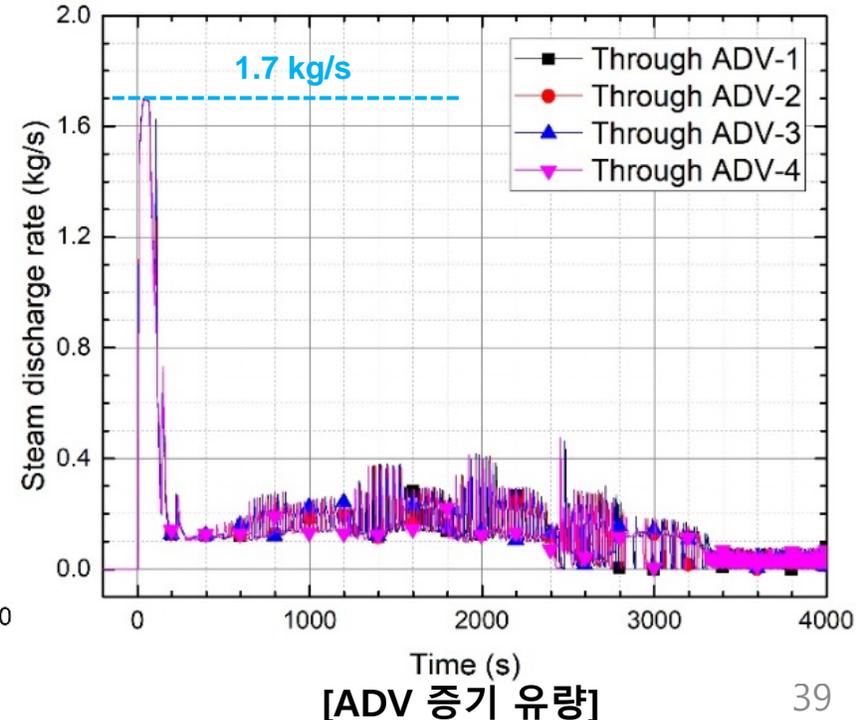
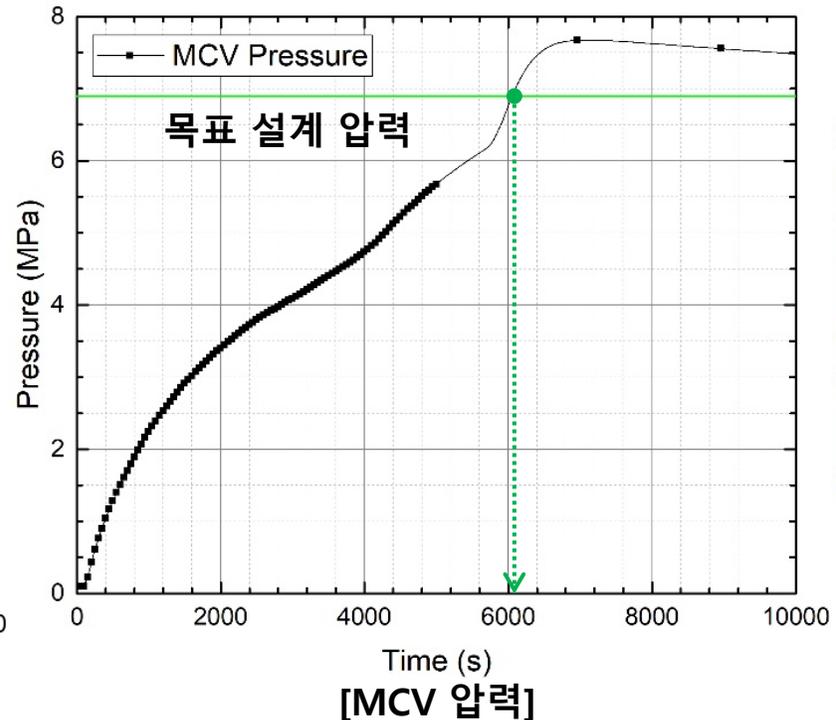
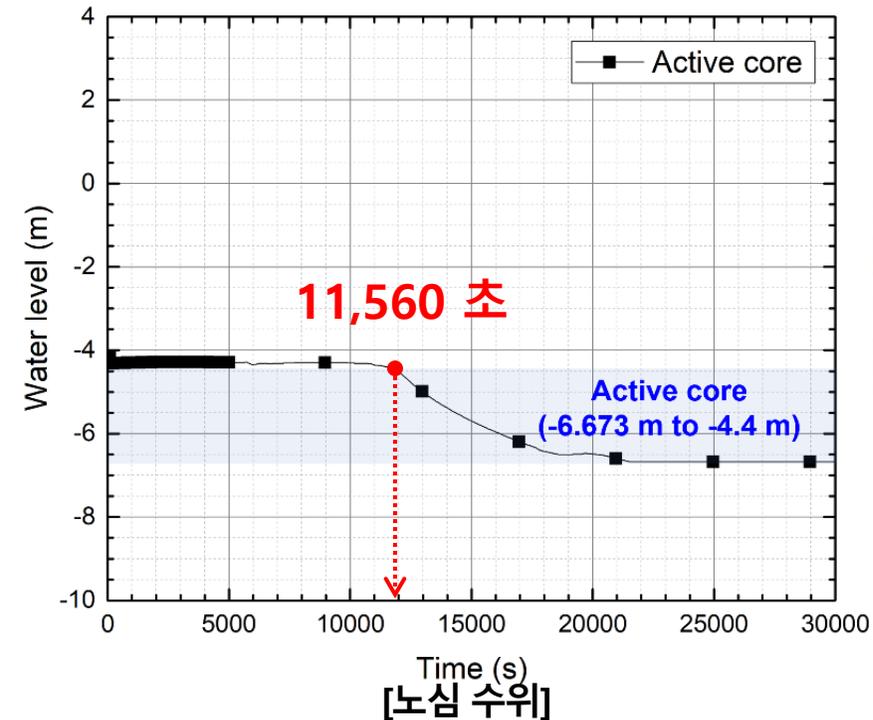
00 보충자료

이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법



□ Test matrix용 MELCOR: 냉각성능 예비해석 (MELCOR 계산 결과)

- 재순환밸브 가동 필요성: RPV 내 수위 감소/갭 내 수위 증가 → 노심 노출: **11,560 초** 이전에 재순환 필요
- MCV 건전성: **6,000 초** 이전에 방출된 증기의 효과적 응축 필요
- 밸브 개방 직후에 압력 차이 등에 의해 MCV 내로 증기가 빠르게 주입 (**~1.7kg**), 이후 미소 유량(**~0.2 kg/s**)만 주입



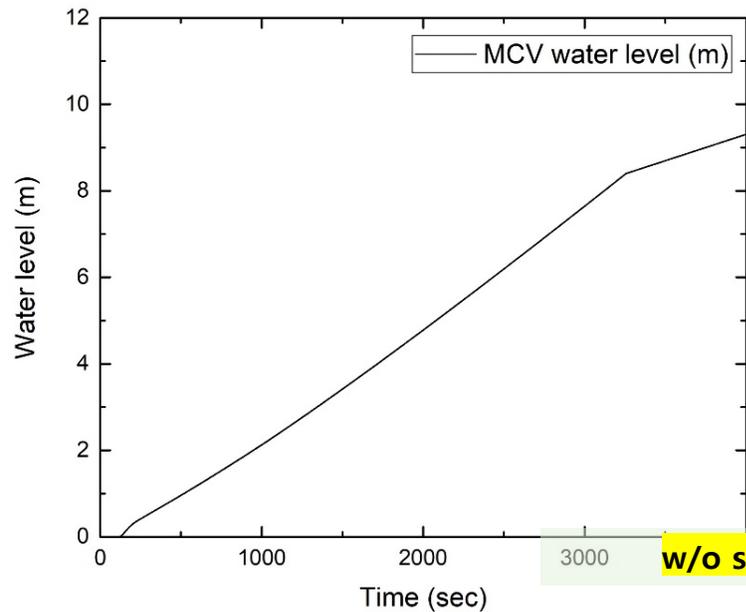
00 보충자료

이중 격납용기 단열 및 냉각 최적 기법

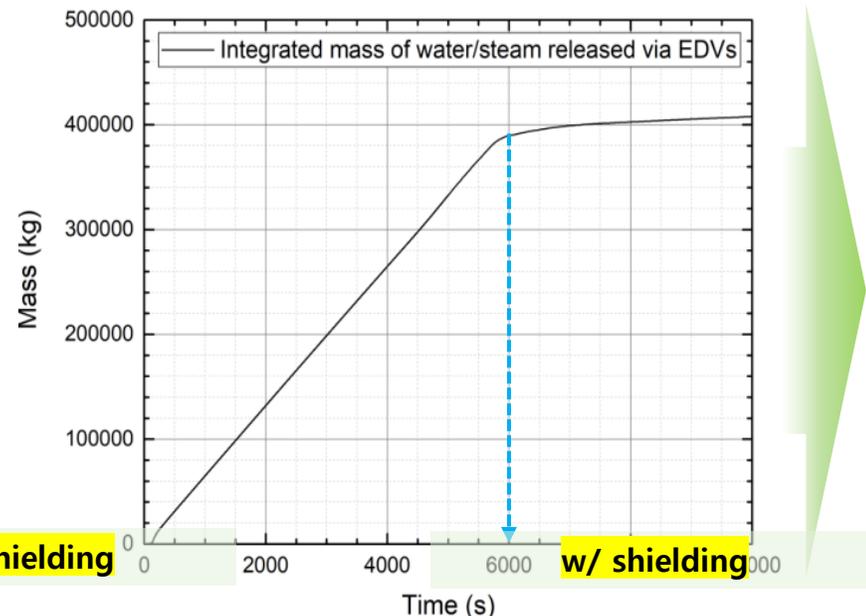


□ Test matrix용 MELCOR: 냉각성능 예비해석 (MELCOR 계산 결과)

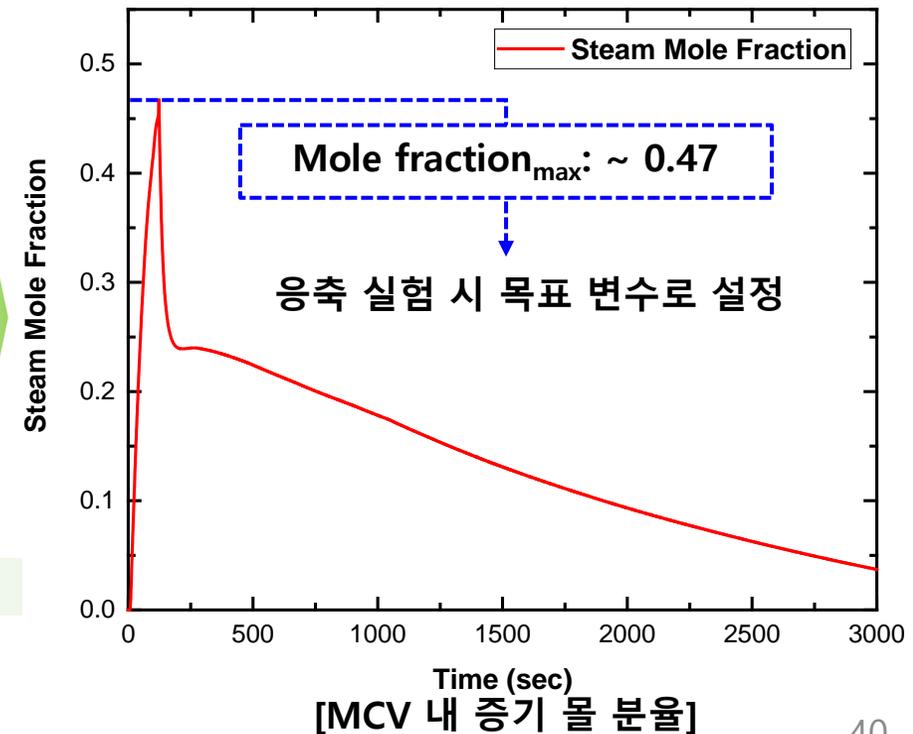
- 증기 주입으로 인해 MCV 내부 물 분율이 0.47까지 증가 후 감소 → 예비 실험 시 이를 모사하는 것을 목표로 수행
- MCV 내 증기 물 분율의 경우 ADV 개방 이후 MCV 내 수위 및 MCV 내부로 방출된 증기 및 물의 질량을 사용하여 계산



[ADV 개방 이후 MCV 내 수위]



[MCV로 방출된 증기 및 물의 질량]

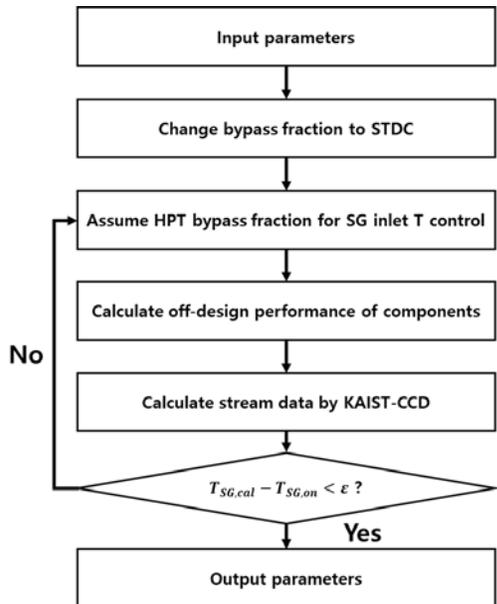




□ 최적설계 증기발전계통 탈설계(off-design) 성능 해석

- 증기발전계통 탈설계(off-design) 성능 평가
 - 증기터빈: Stodola's cone law 사용 → 증기터빈 압력, 출구 엔트로피, 터빈 효율 산출
 - 주급수 가열기: e-NTU 방법론 사용 → 열교환기 효율도 산출
 - 주급수 펌프: Affinity law 사용 → 펌프 압축비 및 펌프 효율 산출

[탈설계 성능 분석 흐름도]



[Stodola's cone law]

$$\frac{\dot{m}_{off}}{\dot{m}_{on}} = \frac{P_{off,in} / \sqrt{T_{off,in}}}{P_{on,in} / \sqrt{T_{on,in}}} \sqrt{\frac{1 - (P_{off,out} / P_{off,in})^{\frac{n+1}{n}}}{1 - (P_{on,out} / P_{on,in})^{\frac{n+1}{n}}}}$$

$$\eta_{turbine,off} = \eta_{turbine,on} - \alpha \left(\frac{N_{on} / \sqrt{\Delta H_{on}}}{N_{off} / \sqrt{\Delta H_{off}}} - 1 \right)^2$$

[Epsilon NTU method]

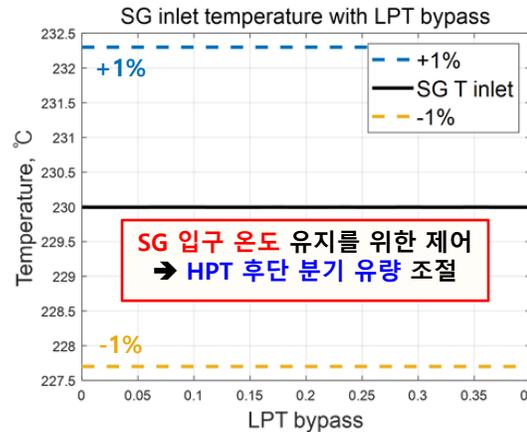
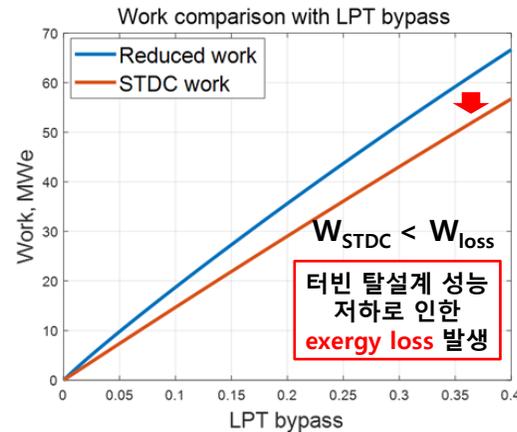
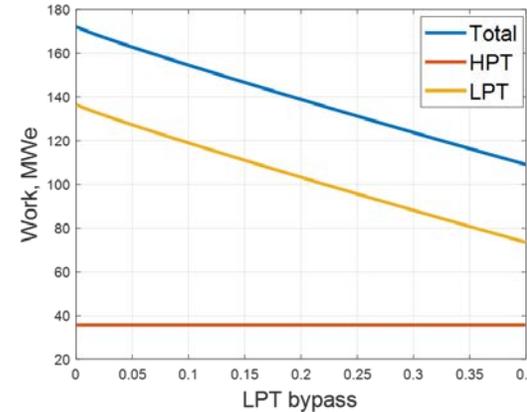
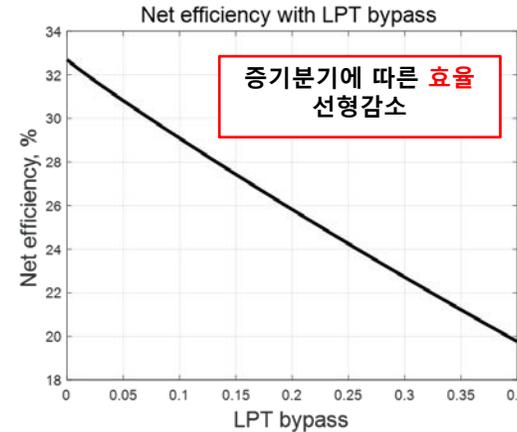
$$\varepsilon_{off} = \frac{1 - \exp[1 - NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[1 - NTU(1 - C_r)]} \quad C_{min} = \min(\dot{m}_{hot} c_{p,hot}, \dot{m}_{co} c_{p,co})$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

[Affinity law]

$$PR_{off} = PR_{on} * (P_1 * (m_{off}/m_{on})^4 + P_2 * (m_{off}/m_{on})^3 + P_3 * (m_{off}/m_{on})^2 + P_2 * (m_{off}/m_{on}) + P_1)$$

$$\eta_{off} = \eta_{on} * (a_1 * (m_{off}/m_{on})^2 + a_2 * (m_{off}/m_{on}) + a_3)$$



[STDC 우회 증기 분기에 따른 증기발전계통 성능 변화]

증기발생기 입구 온도 제어를 적용하여 1차 계통(노심)으로의 영향 최소화 가능

1) Stodola's cone law: 주어진 설계변수에 대한 터빈의 입구 및 출구 압력과 터빈을 통과하는 질량 흐름 사이의 관계
 2) e-NTU(Number of Transfer units) 방법론: LMTD를 계산하기에 충분한 정보가 없을 때 대항류 열교환기 효율도 계산을 위해 사용되는 방법
 3) Affinity law: 정상상태와 탈설계 상태에서의 유량비로 펌프의 압축비와 효율을 fitting하는 방법



□ 혁신형 SMR 연계 수소 생산 가능성 연구

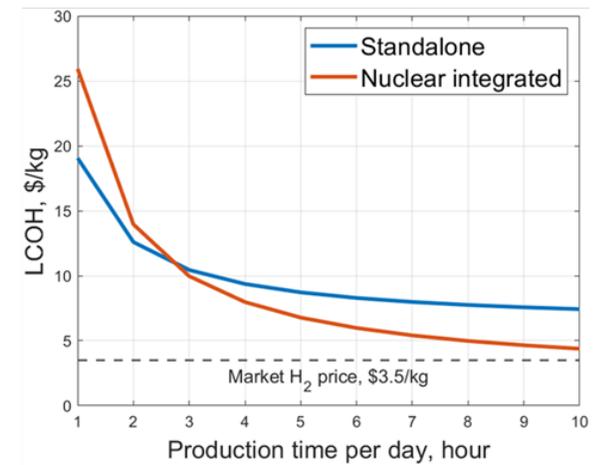
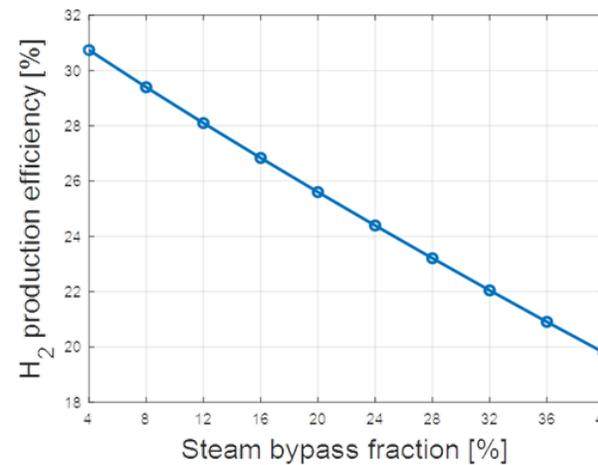
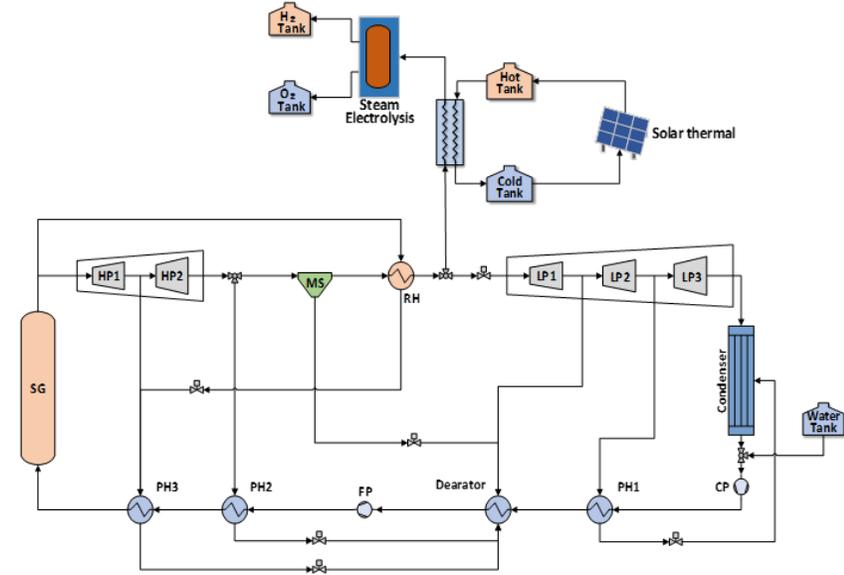
- iSMR 증기발전계통을 이용한 수소 생산 가능성 연구
- 수소생산 효율 및 경제성 평가 수행

□ 혁신형 SMR 연계 수소 생산

- 증기발전계통의 증기를 우회하여 수전해 설비에 제공
- 태양열 등의 재생에너지와 연계하여 수소 생산
- 증기 분기에 따라 수소 생산 효율 감소 (30%~20%)
- 초기 투자 비용을 고려하면 장시간 생산이 효과적
- NEXO 차량 기준 11780~117800대 운행 가능

[iSMR 생산 수소로 운행 가능한 수소차 대수]

Results		Value	Unit
연간 이용 가능 수소연료전지차 수 (하루 36km 운행)	Operation time 1 hour	11787	대
	Operation time 10 hour	117871	대



[iSMR 연계 수전해 개념도 및 수소생산효율과 LCOH]