

ATOM 피동안전계통 개념 설계 및 예비타당성 평가

핵심연구원: 김성중

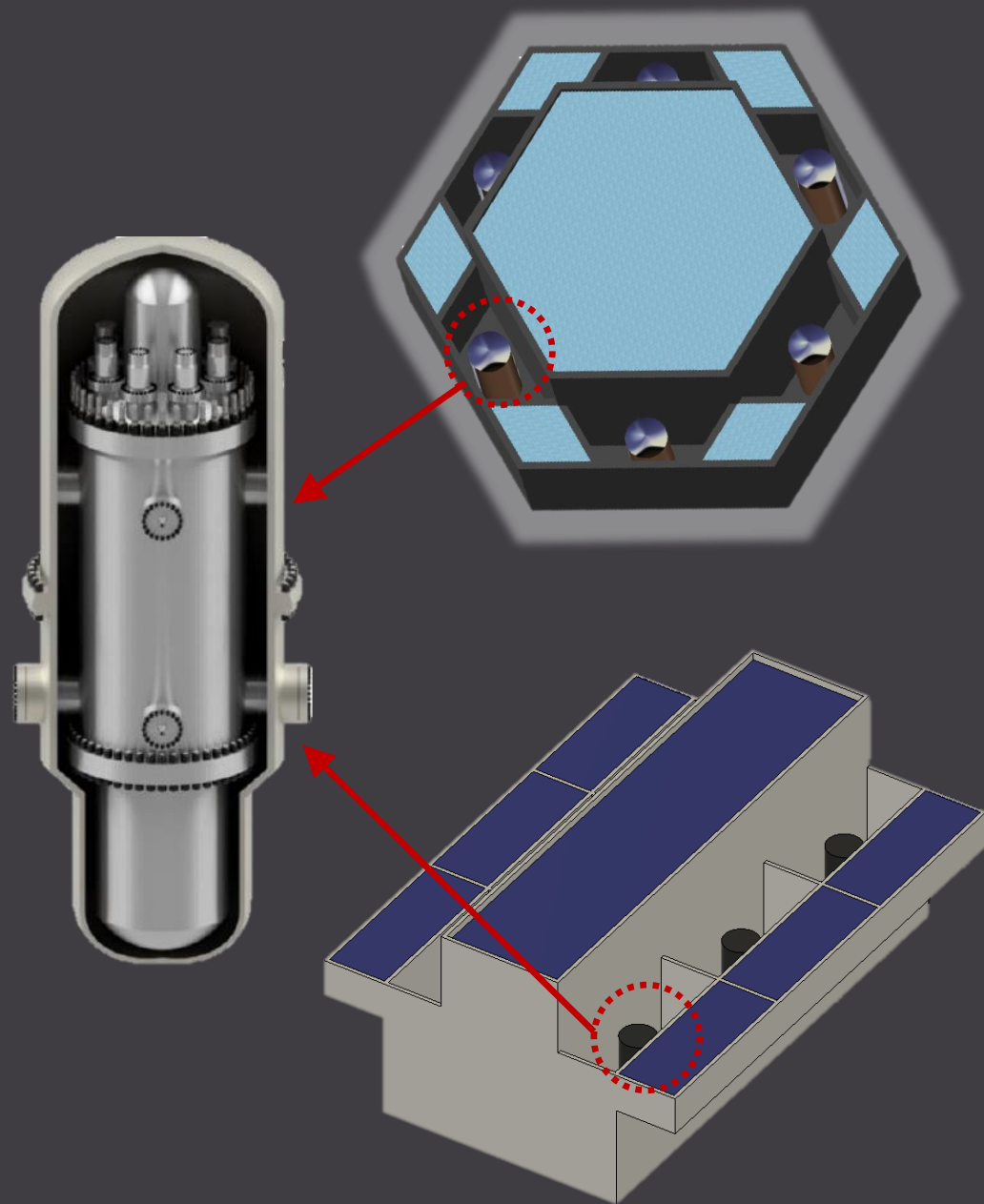
실무연구원: 박재형, 송창현, 이건형, 안효준

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

Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

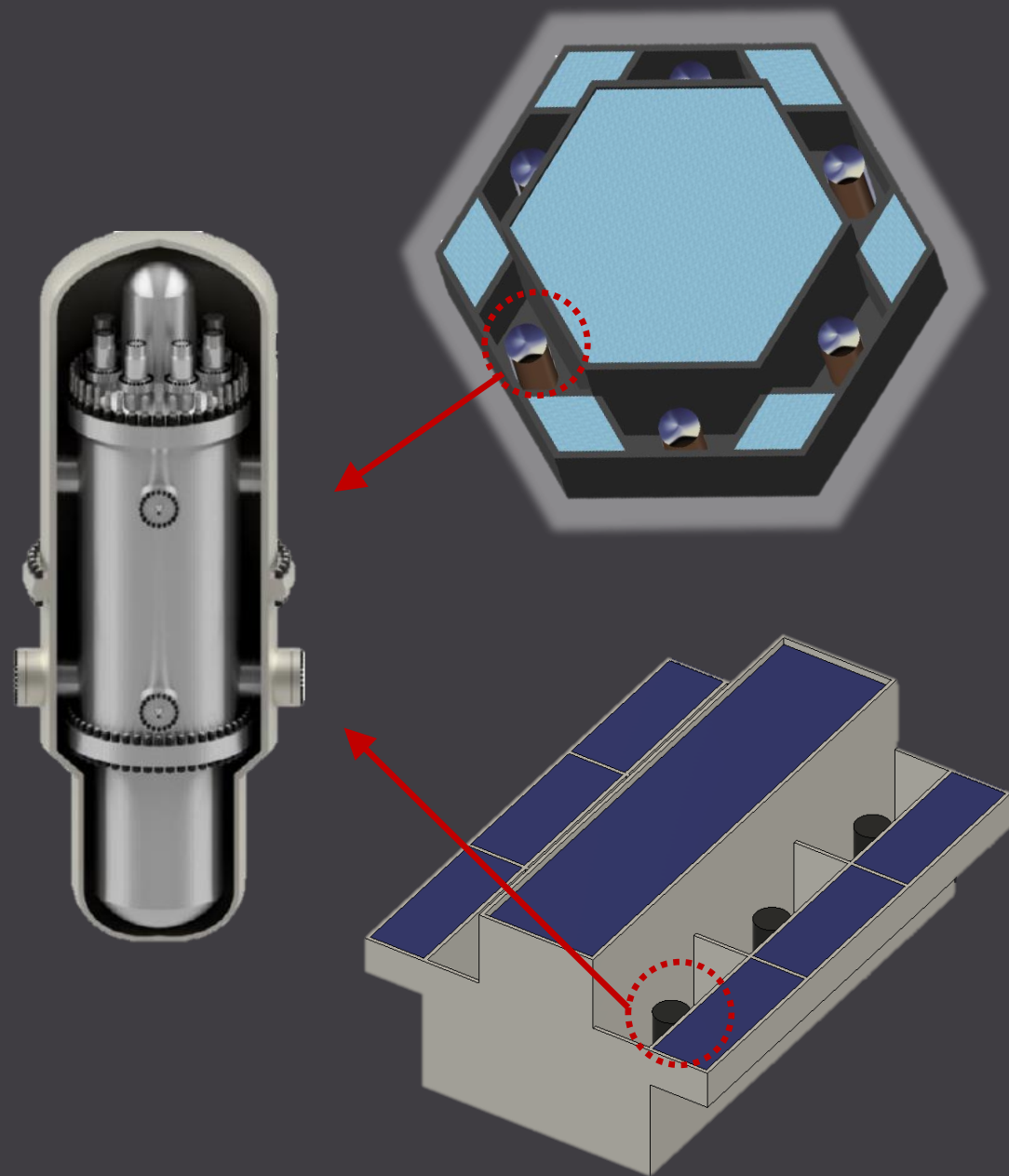
2022.07.08.

피동안전계통 기술혁신 워크숍, 한국원자력연구원



CONTENTS

- 침수형 배치 SMR (NuScale)
- 충수형 관리 시스템 개념
- 충수형 관리 시스템 사고 관리 평가
- 요약 및 토의사항



침수형 배치 SMR (NuScale)

NuScale 기본 정보

- NuScale 건물 배치 (Plant building + BOP)

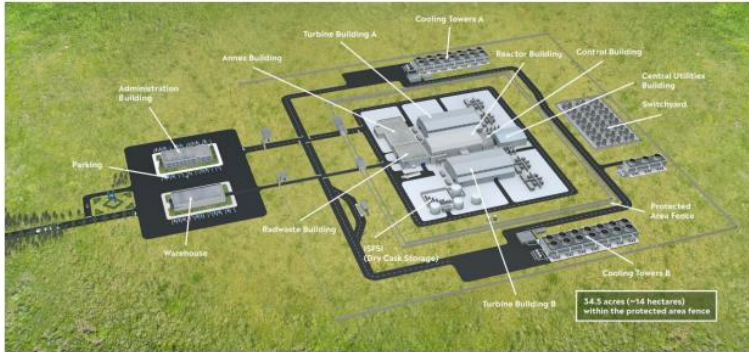


Figure 2. Layout of a 12-module NuScale power plant

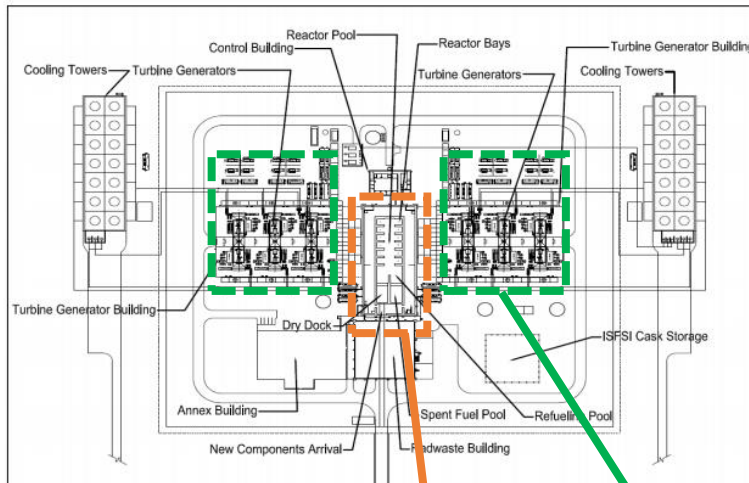


Figure 3. Plan view of a 12-module NuScale power plant

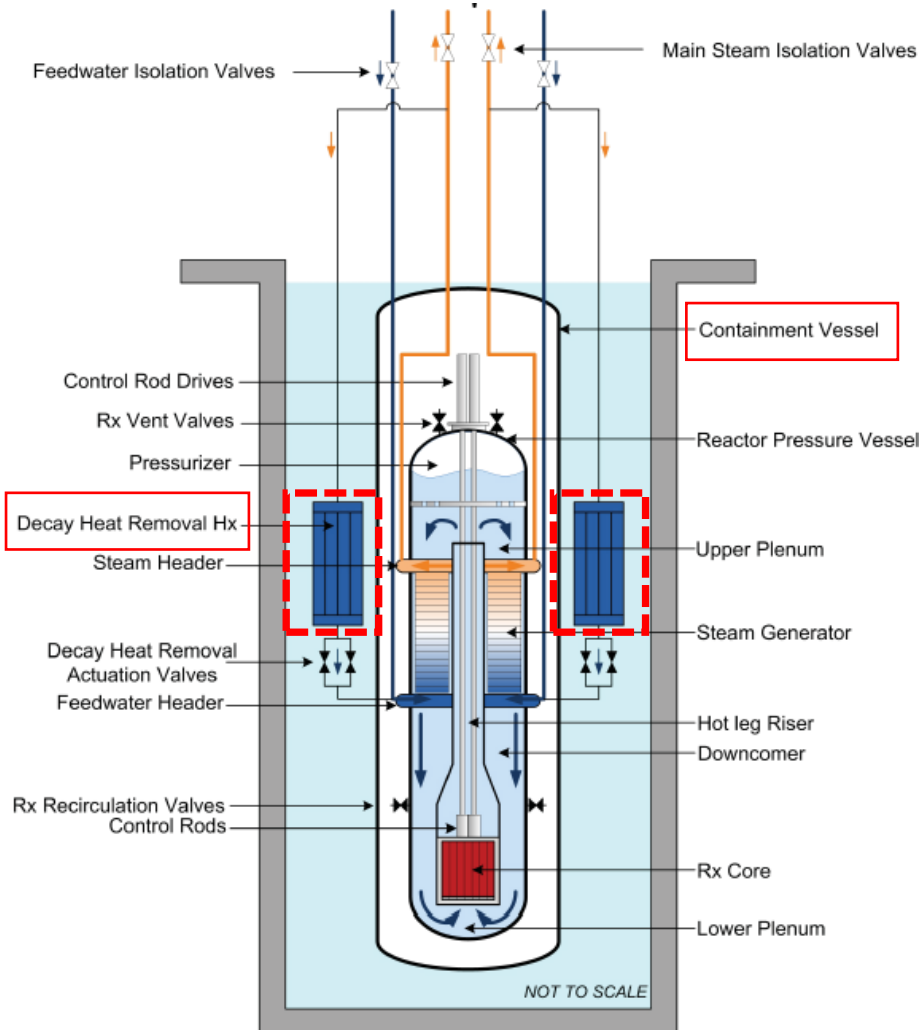
Plant building BOP

NuScale 발전소 주요 구성

- ✓ 12 modules (77 MWe/module) per site (~924 MWe)
- ✓ 2 turbine buildings (360 MWe per building for initial design)
- ✓ 6 turbine generator sets each
- ✓ Forced draft cooling towers for condenser
- ✓ Water volume ~ 28,000 m³ (28,000,000 Liters)

침수형 배치 SMR (NuScale)

NuScale 핵심 특허 및 장기냉각 개념

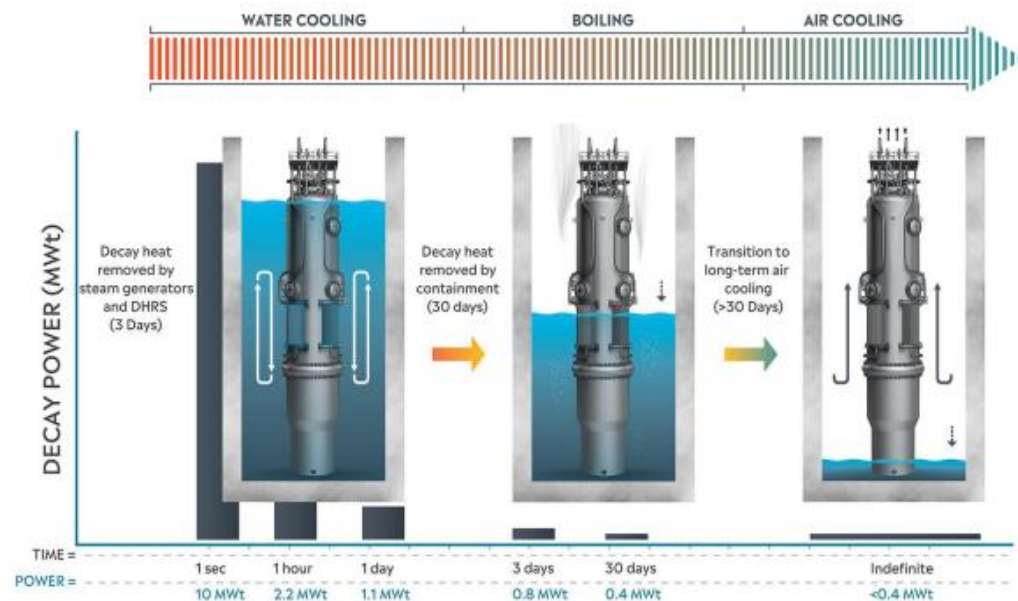


- 진공조건 금속 격납용기 (Containment vessel)

- ✓ 약 진공조건 (~2 mbar)
- ✓ 상시 침수 (Submerged) 상태
- ✓ 정상운전 시 단열 효과
- ✓ 사고 상황 시 응축 효율 증가 및 수소 연소 위험 X

- 침수 + 열교환기 (Decay Heat Removal HX)

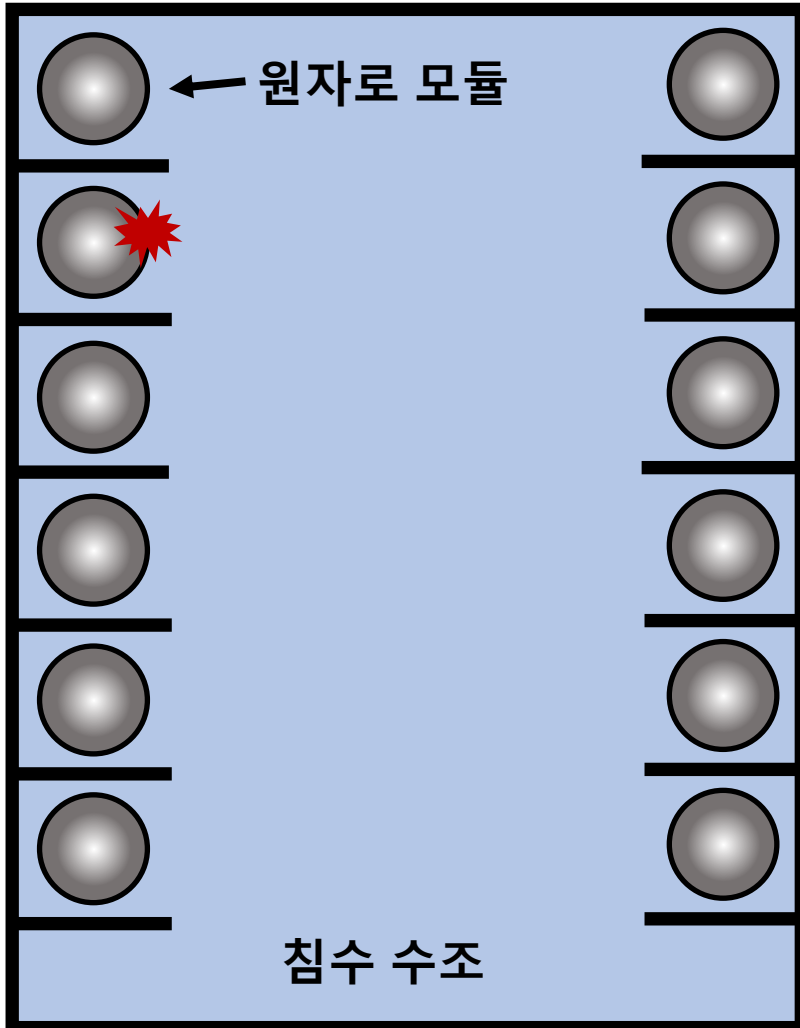
- ✓ 기존 PRHRS+ECT 개념 대체
- ✓ Non-LOCA 사고 시 2차 측을 이용한 피동냉각
- ✓ 별도의 ECT를 필요로 하지 않음



200 MW_{th}
60 MW_e 기준
30일 이후
공기냉각

침수형 배치 SMR (NuScale)

침수형 배치 (Submerged configuration)



침수형 배치 (NuScale 안전계통)

• 침수형 배치의 장점

- ✓ 설계의 용이성
- ✓ 단순한 배치 구성
- ✓ 원자로 건물 내 환경 온도 관리 용이
- ✓ 수조 내에서 핵연료 재장전 가능

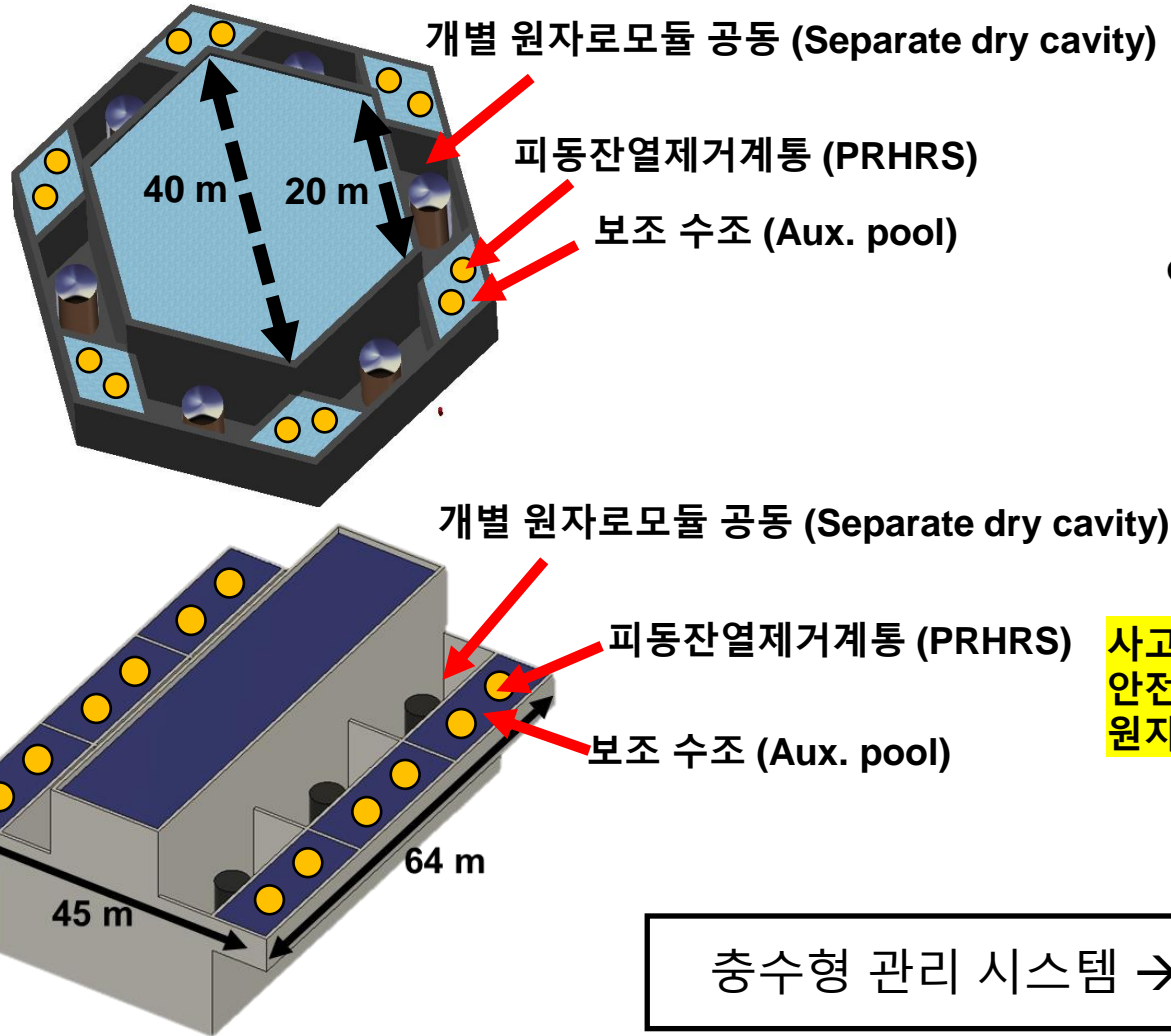
• 침수형 배치의 단점

- ✓ 수조의 radiological activation issue (NRC 질의)
- ✓ 물에 의한 추가적인 열손실 (복사열전달)
- ✓ 유지 보수를 위한 접근성 취약
- ✓ 사고 상황에서 Fail-safe 개념의 부재
- ✓ 하나의 모듈 사고 시 전체 모듈에 영향
- ✓ 지적 재산권 문제

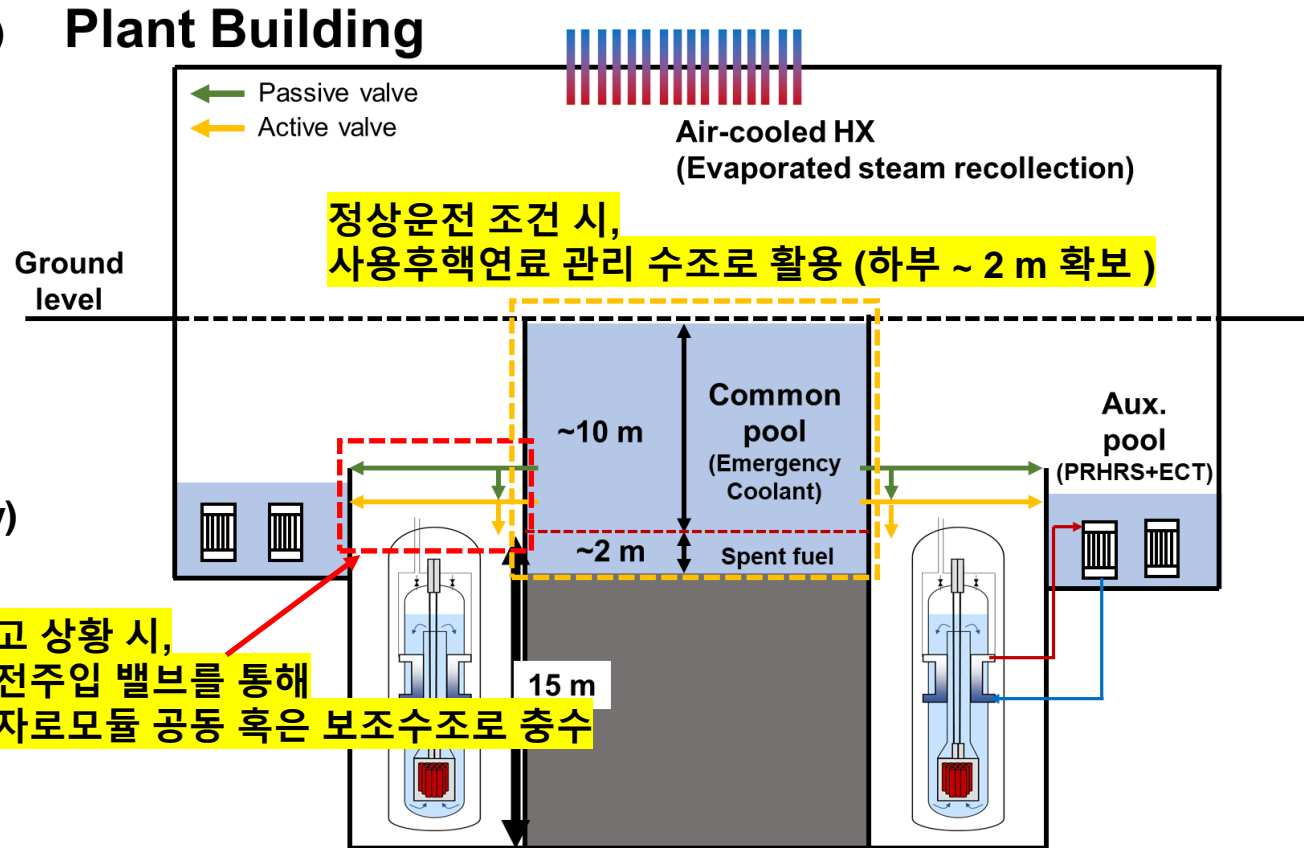
충수형 관리 시스템 개념

충수형 관리 시스템 개요

개념 설계 3D Schematics



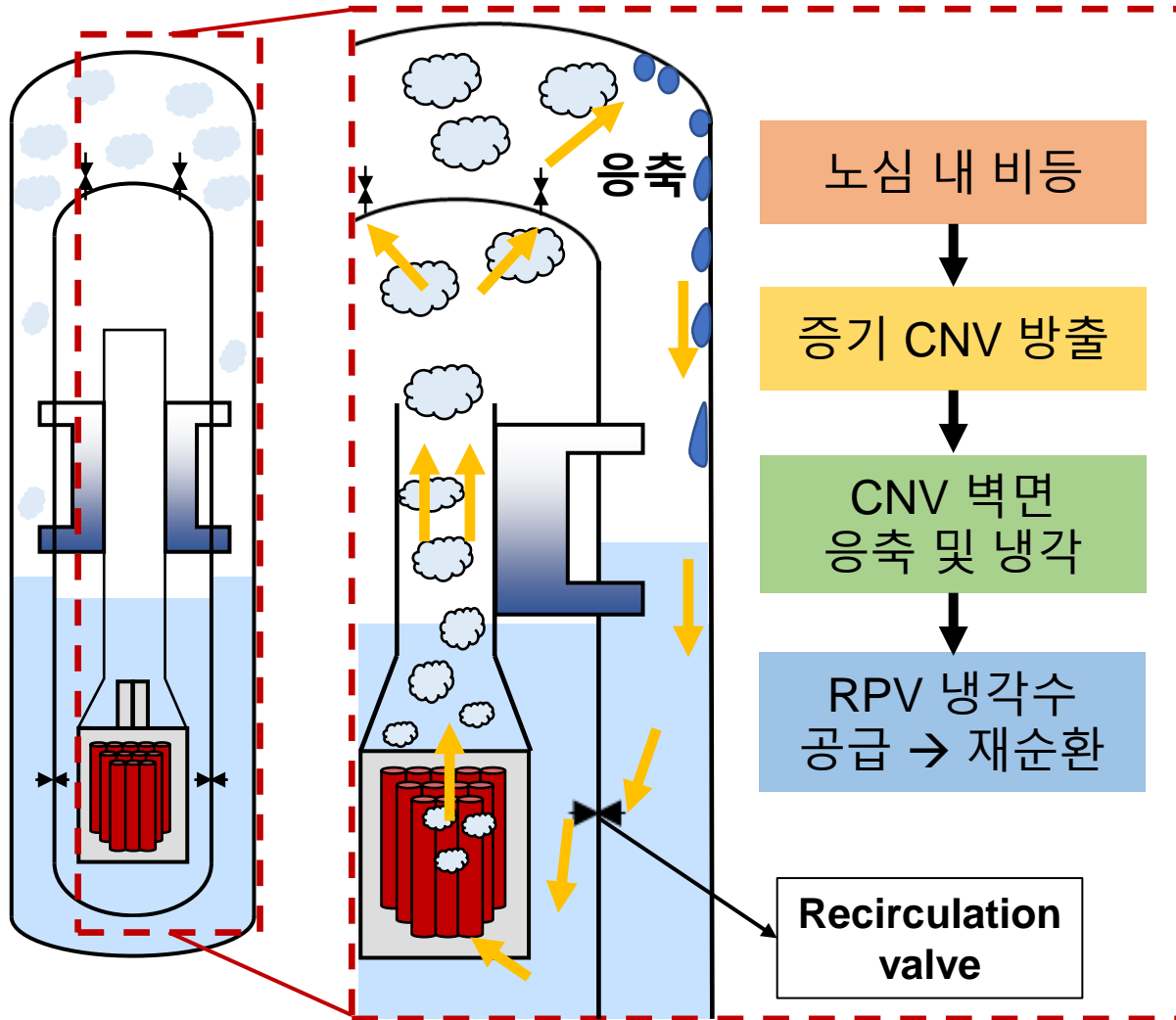
개념 설계 2D Schematics



충수형 관리 시스템 → 정상운전: 비침수, 사고상황: 충수 + 모듈 개별 관리

충수형 관리 시스템 개념

충수형 관리 시스템 장기냉각 (열제거) 메커니즘



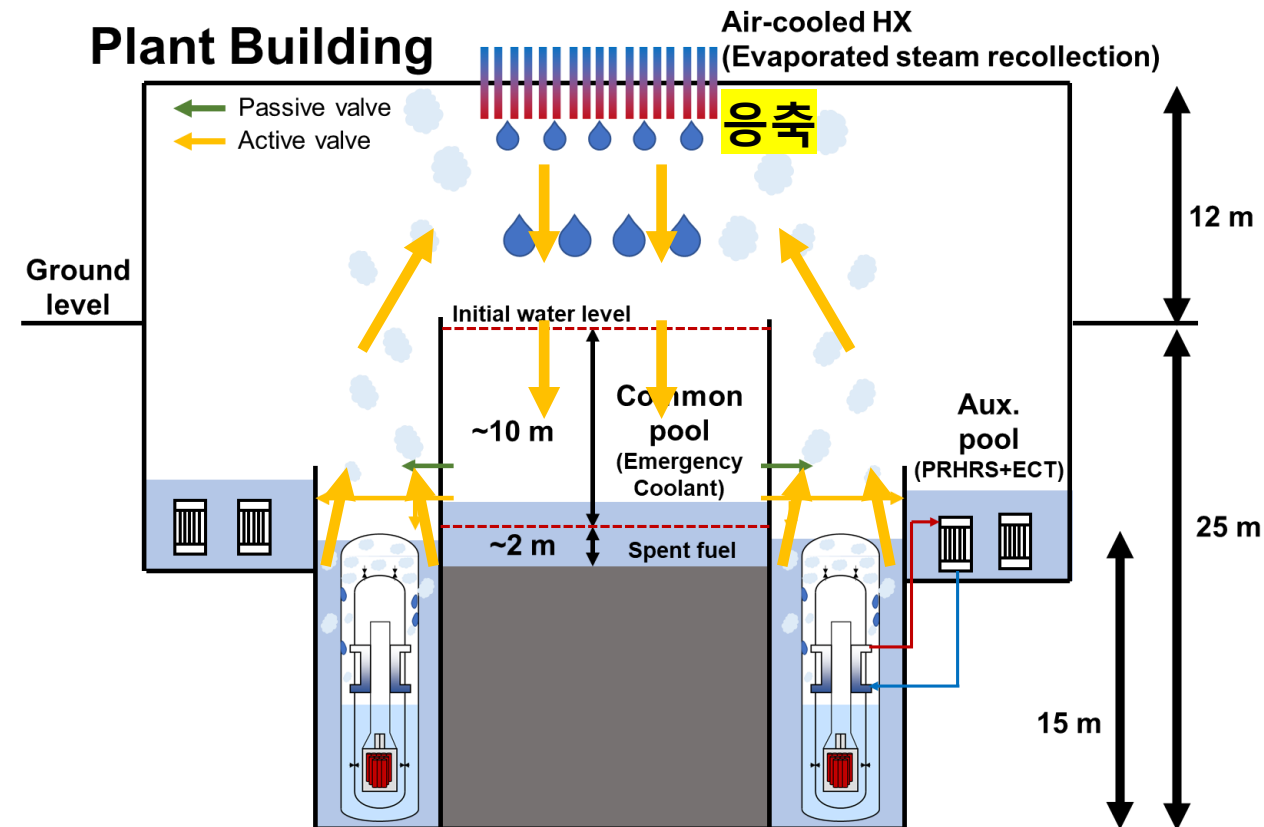
RPV-CNV 냉각수 재순환 형성

- 사고 시 충수 → **CNV 냉각**
- **RPV-CNV 내부 열전달**
 - ✓ 노심 내 비등 → 증기 발생 및 CNV 방출
 - ✓ CNV 냉각 → 증기 응축 및 냉각
 - ✓ 재순환밸브를 통한 RPV 내부로의 유동 형성 (Two-phase natural circulation)

고출력 SMR → CNV 냉각 유지수단 추가 필요

충수형 관리 시스템 개념

충수형 관리 시스템 장기냉각 (열제거) 메커니즘



발전소건물 비상냉각수 재수집 및 재순환 형성

- 발전소건물 내부 열전달

- ✓ 원자로모듈 공동 내 비등
→ 비상냉각수 감소, 증기 발생
- ✓ 건물 상부 공랭응축기에서 피동적으로 냉각
- ✓ 공동 수조로 재수집 및 공동으로 재공급
→ 공동 내 비상냉각수 수위 유지

원자로 장기냉각 수행

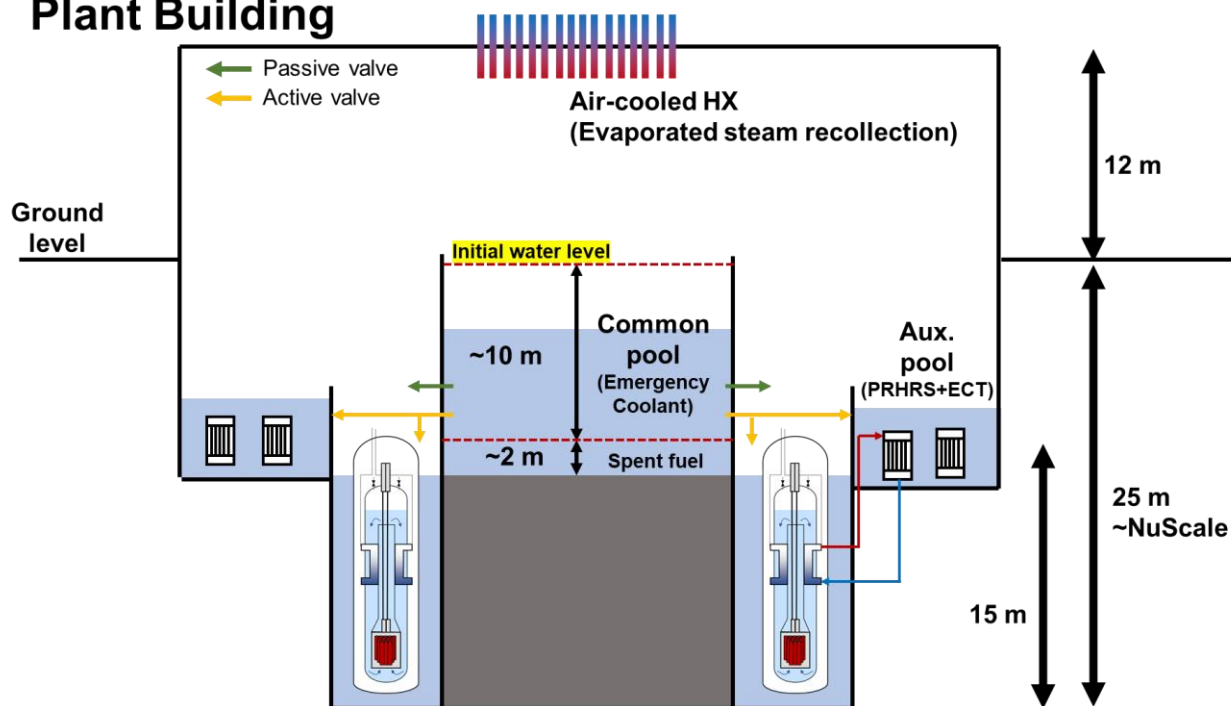
충수형 관리 시스템 개념

Flooding safety system (FSS) 개념

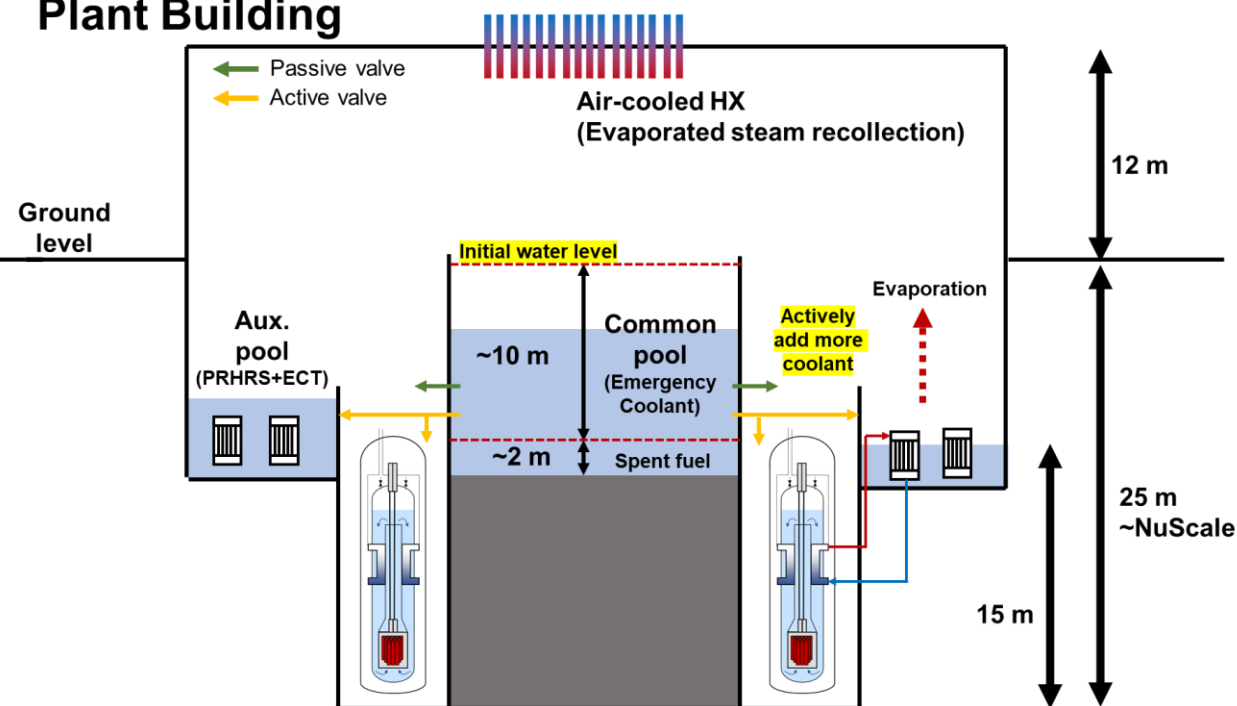
- RPV 외부로 냉각재 누출되는 사고 (LOCA, SBO)
→ 원자로모듈 외벽 냉각 필요 → 공동으로 충수

- 냉각재 누출이 없는 사고 (MSLB, SGTR, 2차측 사고)
→ SG에 연결된 PRHRS를 활용한 냉각

Plant Building

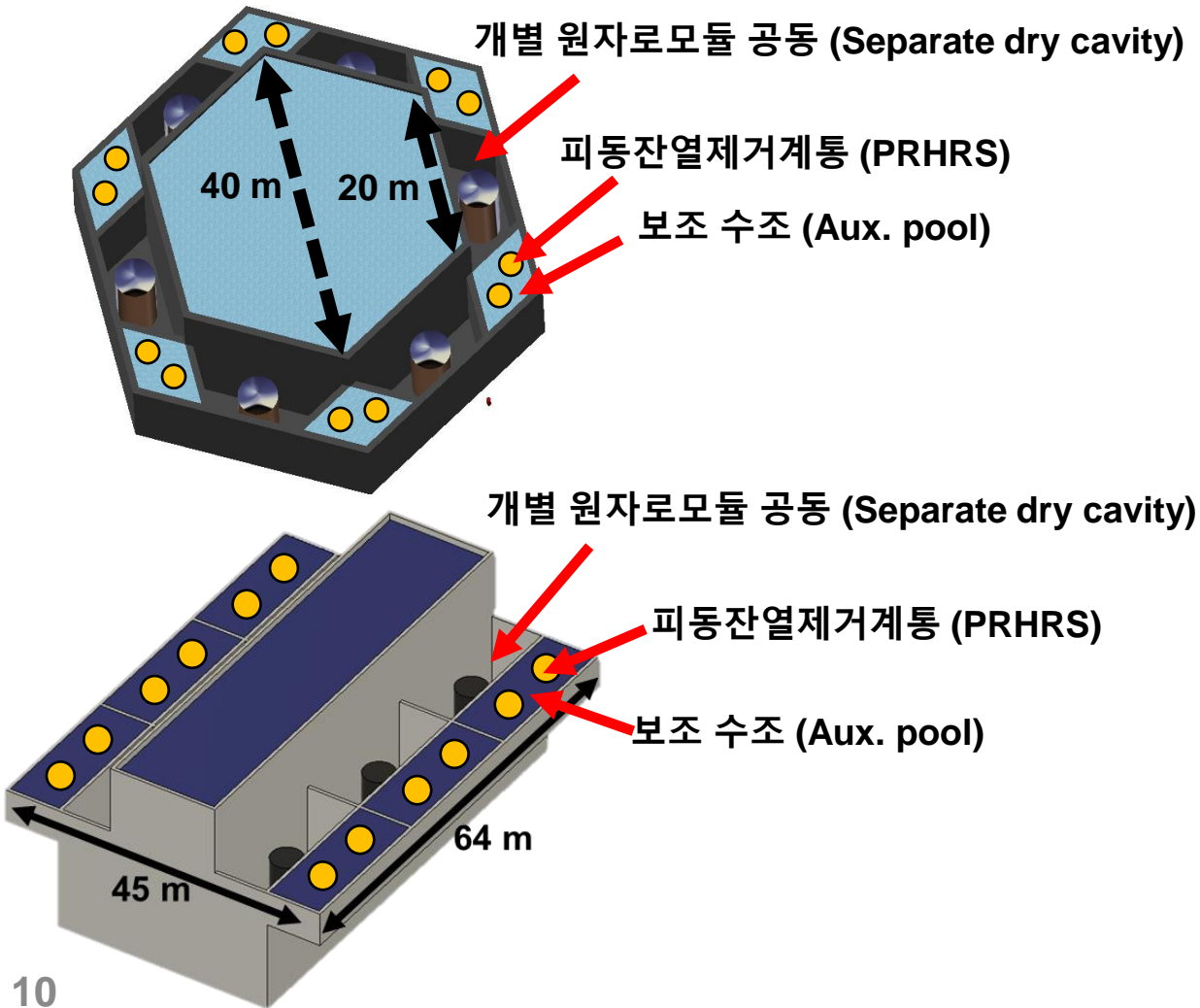


Plant Building



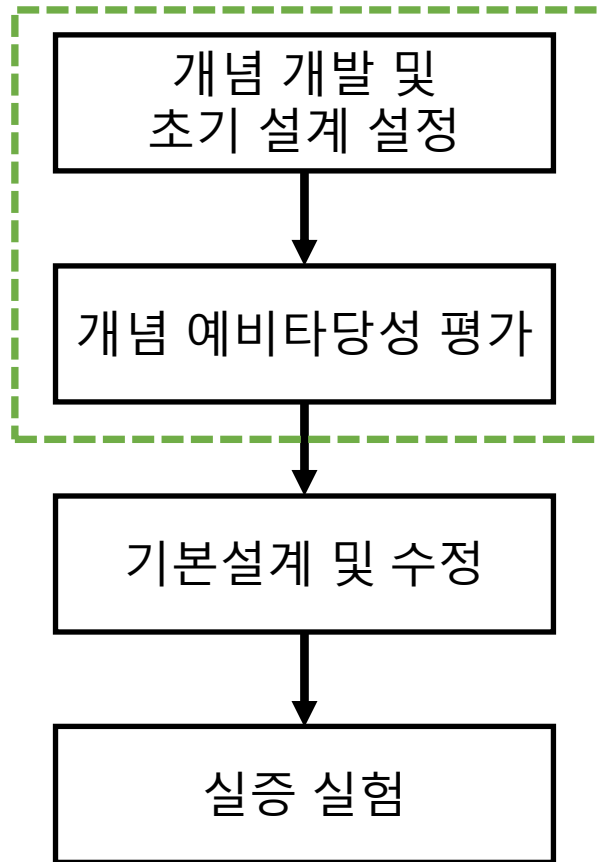
충수형 관리 시스템 개념

침수형 안전계통 - 충수형 관리 시스템 비교



	침수형 배치	비침수형 배치
설계 용이성	수조 단일 설계	수조 및 공동 개별 설계
열손실	물에 의한 추가 열손실	공기에 의한 단열 효과
모듈 접근성	낮음	좋음
Fail-Safe	X	O
단일 모듈 사고 관리	전체 모듈 영향	개별 모듈 사고 관리
비상냉각수 부피	많음	적음
지적 재산권	해외	국내

현재 단계 (HYU)



충수형 관리 시스템 설계 필요 사항

충수 전략을 위한 대응 전략 개발

- ✓ 충수 및 재수집을 위한 필요 설계 도출
(개별 원자로모듈 공동, 공동 수조, 충수계통, ...)
- ✓ 사고경위에 따른 대응전략 분석 → **사고해석 필요**

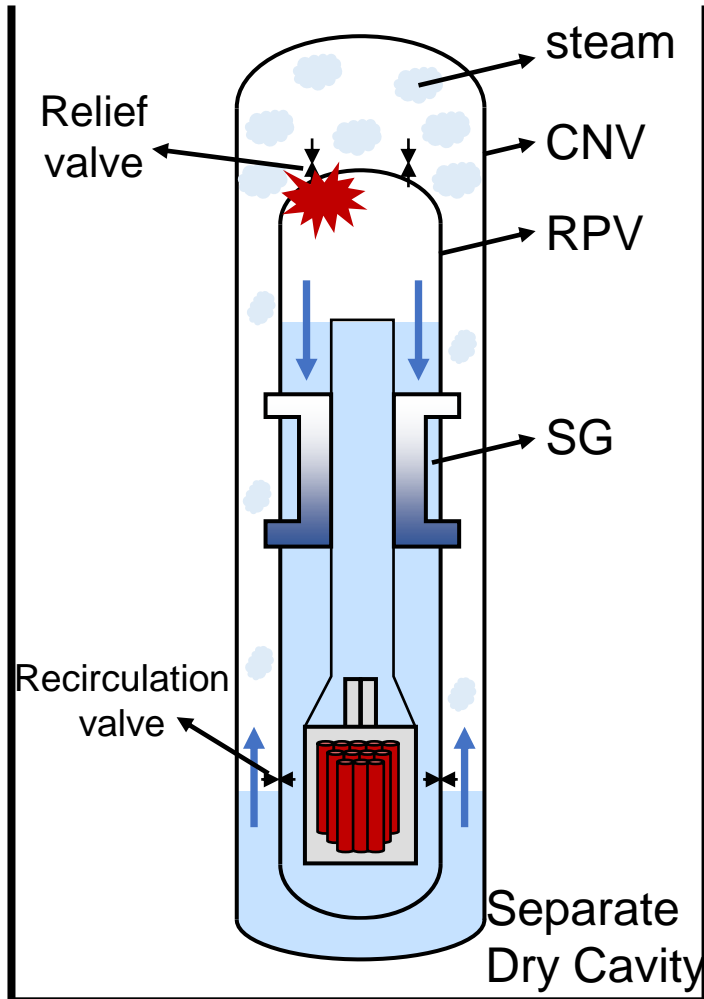
사고해석

- ✓ 혁신형 SMR에서 발생할 수 있는 **주요 사고 선정**
- ✓ 사고 경위 및 **base case 해석**
- ✓ 충수형 관리 시스템 대응전략에 따른 사고경위 해석
- ✓ Tool: MELCOR, MARS-KS, In-house code

충수형 관리 시스템 개념

LOCA 관리

- 냉각재상실사고 (LOCA): RPV 상단 Relief valve (ADS valve) 고장으로 인한 냉각재 방출 가정



원자로용기 (RPV) 내부

Sequences

- ✓ 냉각수 상실 시작 → RPV 내 수위 및 압력 감소
- ✓ 원자로정지, 상부 안전밸브 작동

Measurement signal

- ✓ RPV 저압, RPV 저수위

격납용기 (CNV) 내부

Sequences

- ✓ 냉각수 상실 시작 → CNV 내 수위 증가
- ✓ 증기 다량 발생 → CNV 내 압력 증가, 국부적인 응축

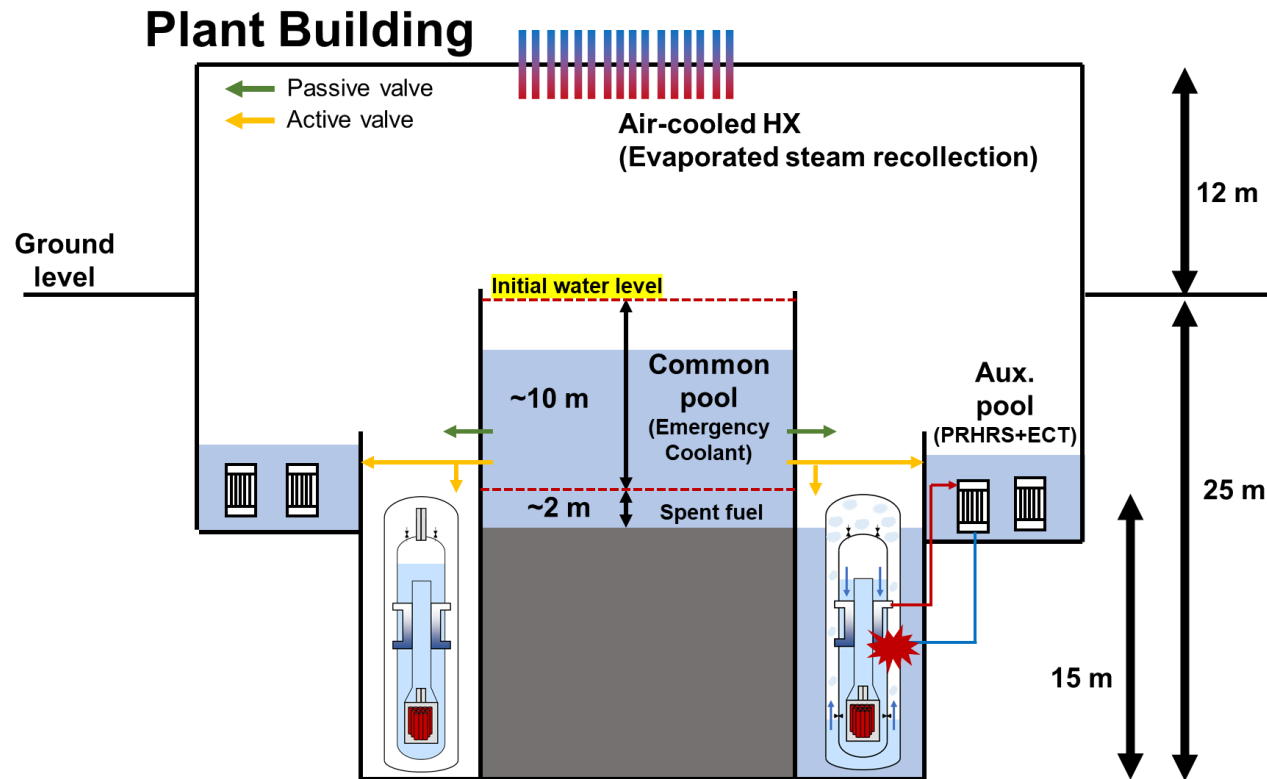
Measurement signal

- ✓ RPV 내 방사성 동위원소 검출, CNV 고압 및 고온

충수형 관리 시스템 개념

LOCA 관리

• 냉각재상실사고 (LOCA) - 비상냉각수 공급



비상냉각수 공급

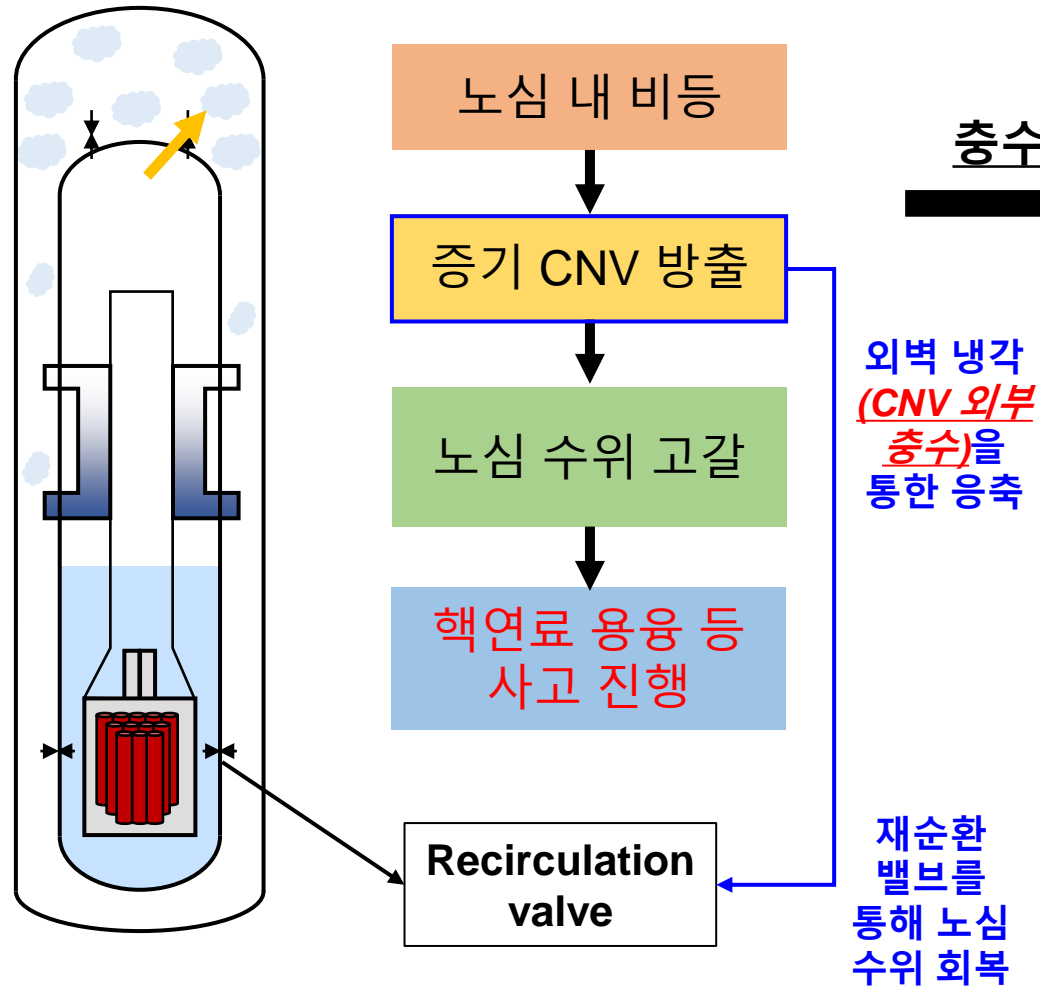
냉각재상실사고

- ✓ 소내전원 사용가능 → 능동밸브 개방
- ✓ 사고모듈 cavity만 비상냉각수 공급
- ✓ 사고발생 모듈 충수 → CNV 외벽 냉각 시작
- ✓ RPV-CNV 내 냉각수 재순환 형성
- ✓ CNV-Cavity 간 열전달

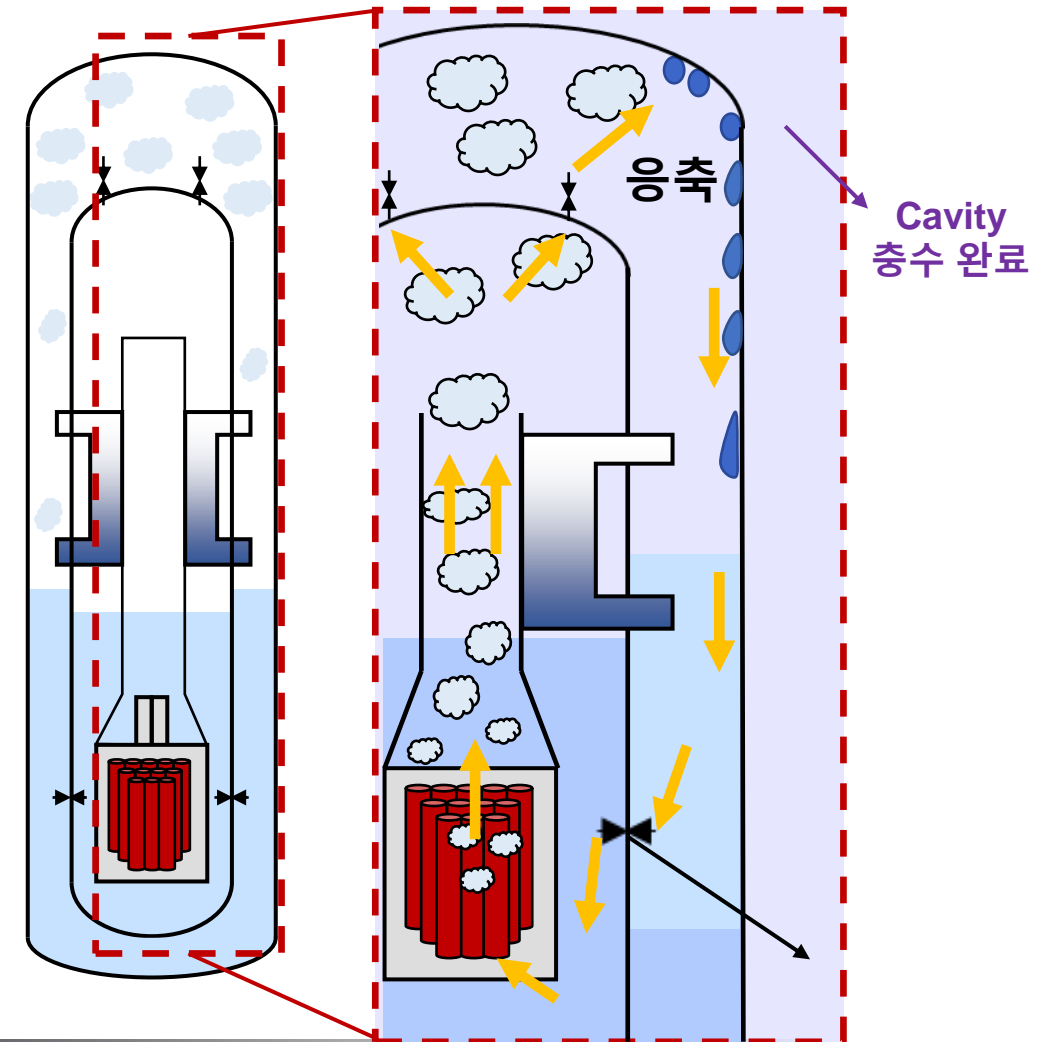
충수형 관리 시스템 개념

LOCA 관리

LOCA 사고 진행 (without flooding)



원자로모듈 공동 충수에 따른 CNV 벽면 냉각

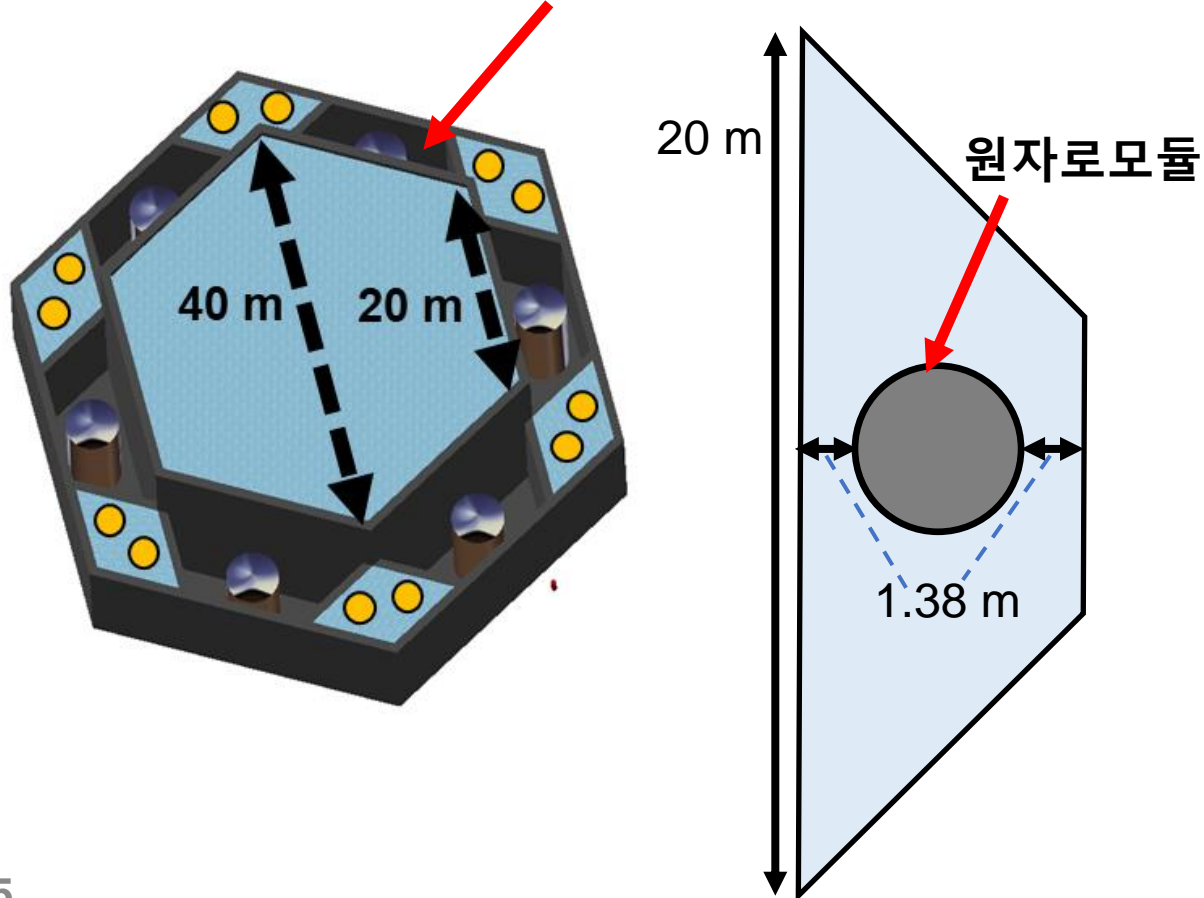


충수형 관리 시스템 개념

충수형 관리 시스템 예비설계

Step 1. 개별 원자로모듈 공동 크기 설정

개별 원자로모듈 공동 (Separate dry cavity)



CNV - 공동 벽간 거리

- ✓ 정육각형 한 변 길이 20 m
- ✓ **1.38 m**로 설정 (NuScale CNV-벽간 거리)

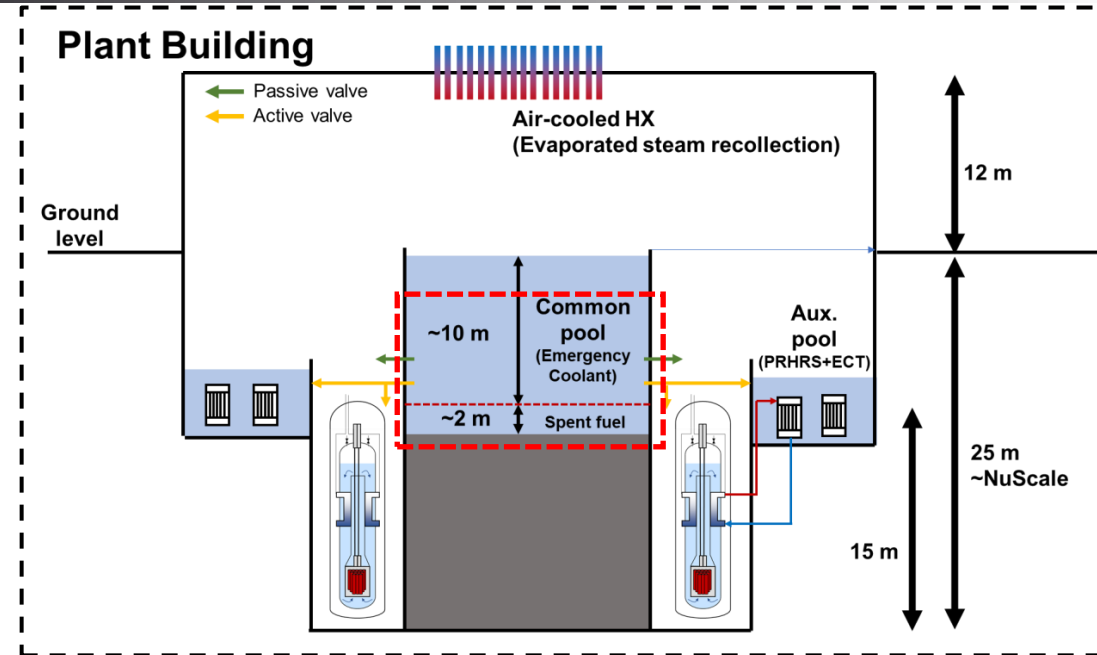
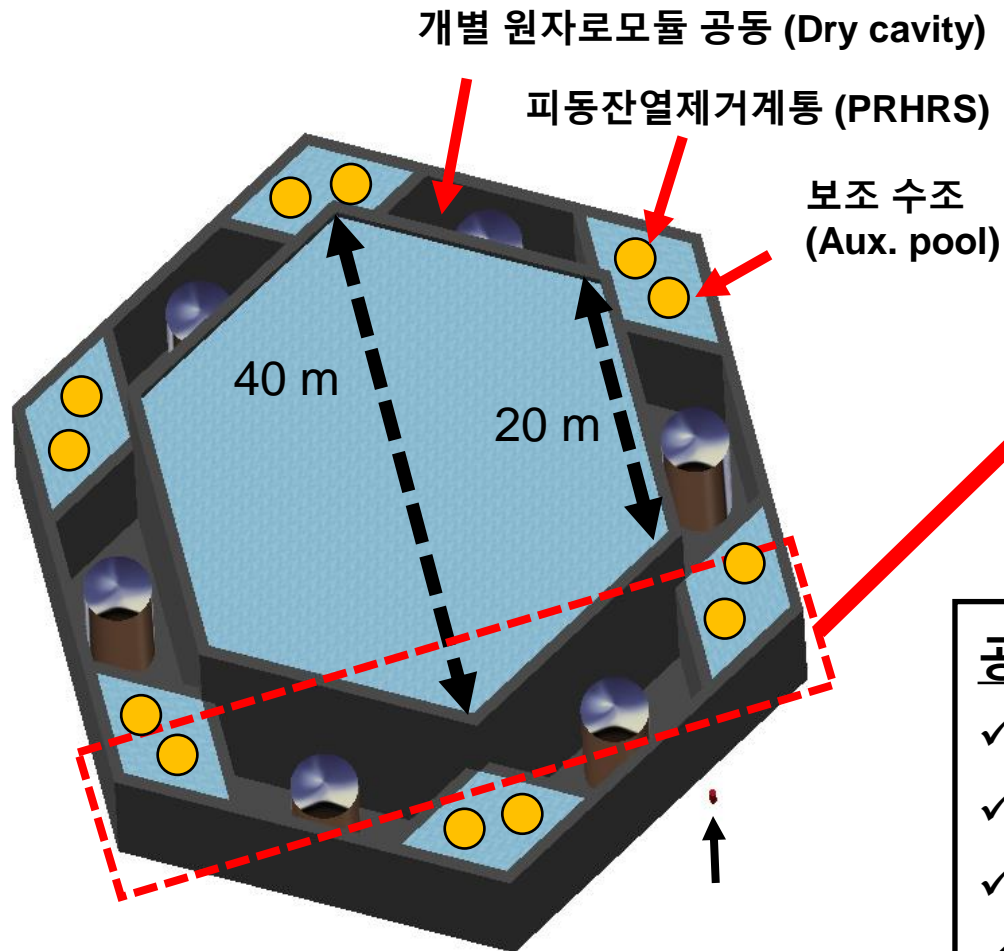
공동 깊이

- ✓ **원자로모듈의 길이를 최소 깊이**로 설정
- ✓ 본 예비해석에서는 **15 m로 설정함**

충수형 관리 시스템 개념

충수형 관리 시스템 예비설계

Step 2. 공동 수조 부피 설정



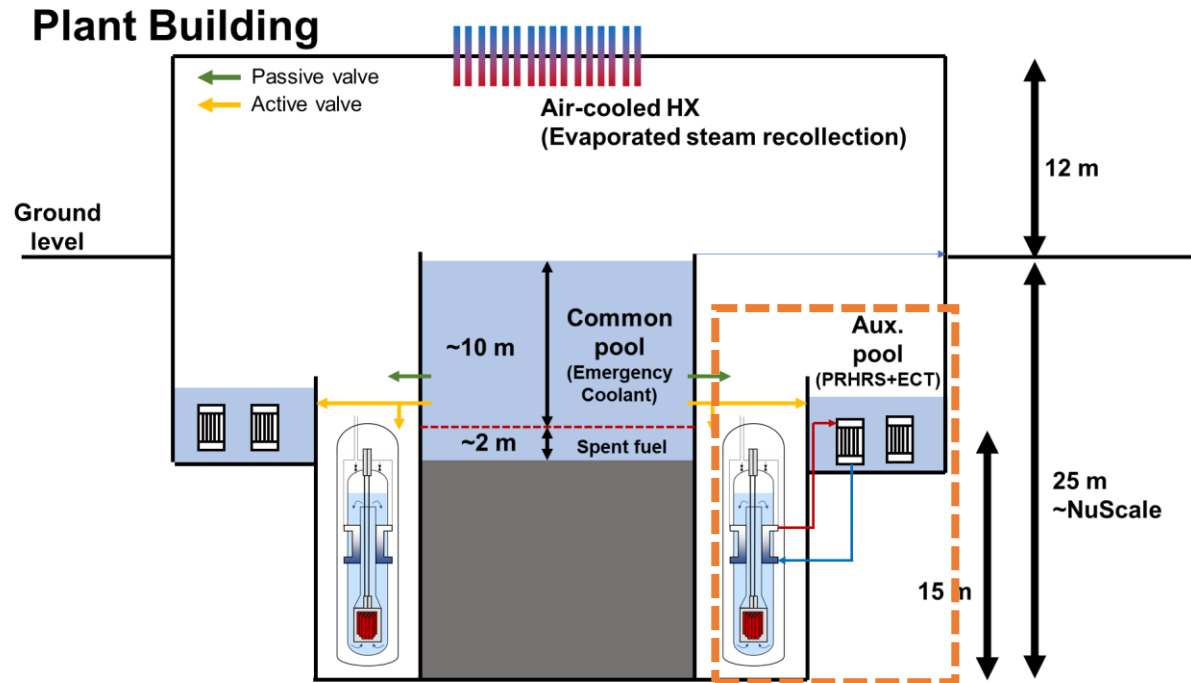
공동수조 크기 및 비상냉각수의 부피 설정

- ✓ 6개의 원자로모듈 공동을 가득 채울 수 있는 양
- ✓ + 사용후핵연료 길이 (~2 m) 고려
- ✓ 15 m 공동 깊이 가정 시 → 11,486 m³ (41% of NuScale)
- ✓ 공동수조 최소 필요 높이: 9~10 m

충수형 관리 시스템 개념

충수형 관리 시스템 예비설계

Step 3. 보조 수조 설정



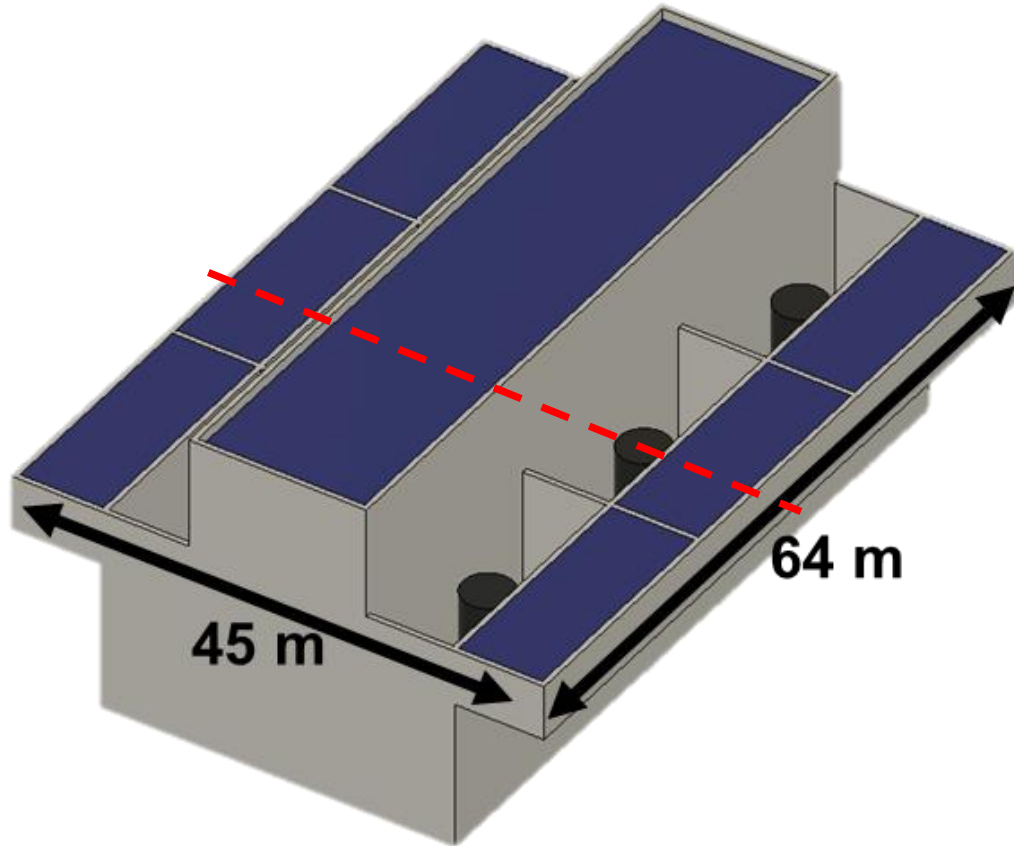
보조 수조

- ✓ **PRHRS의 ECT 역할**을 수행함
- ✓ 열교환기가 노출됨에 따라 냉각능력을 상실 [1]
→ **공동 수조로부터 냉각수 공급 받아 수위** 유지
- ✓ PRHRS 작동 → 보조 수조 내 비등 발생
→ 상부 공랭응축기 피동적으로 응축 및 재수집
- ✓ 단, SBO 상황에서 피동적으로 보조 수조에 비상 냉각수 공급 시 보조 수조가 매우 커져야 함
→ **SBO 시 원자로모듈 공동 충수전략** 이용
→ **보조 수조 소형화**

충수형 관리 시스템 개념

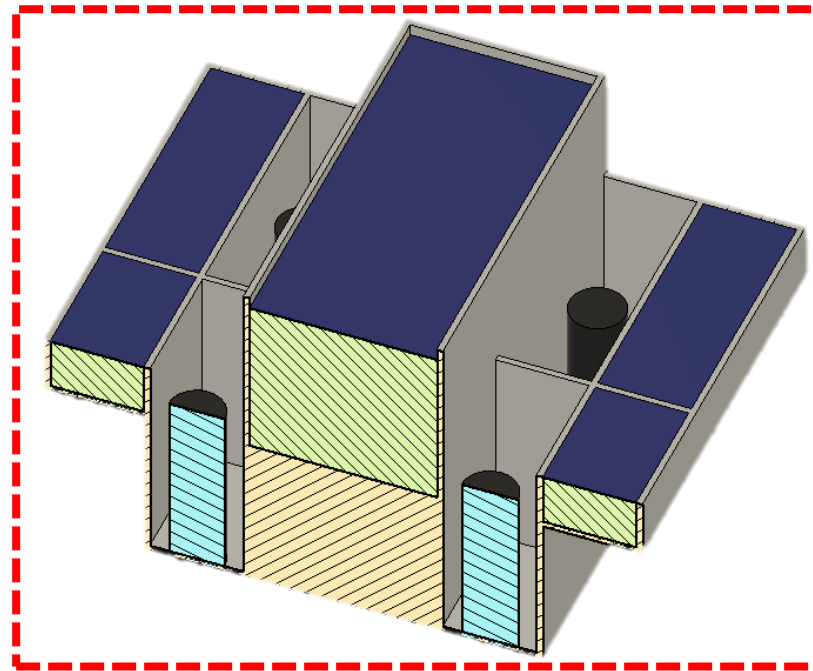
충수형 관리 시스템 예비설계

Step 4. 충수개념 유지, 공동수조 및 모듈 배치 모양 변경



크레인 설치 용이성

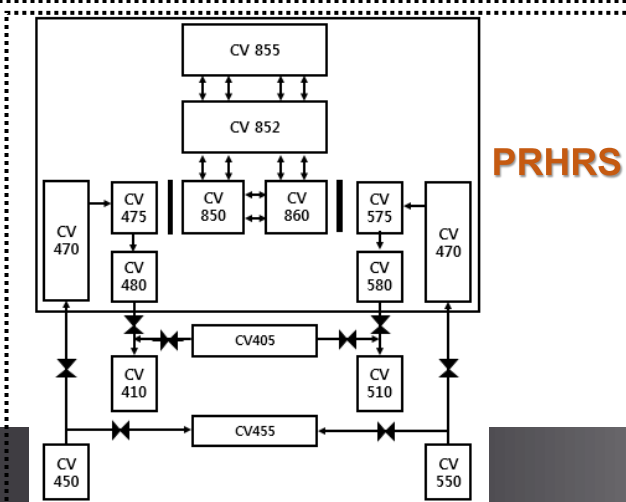
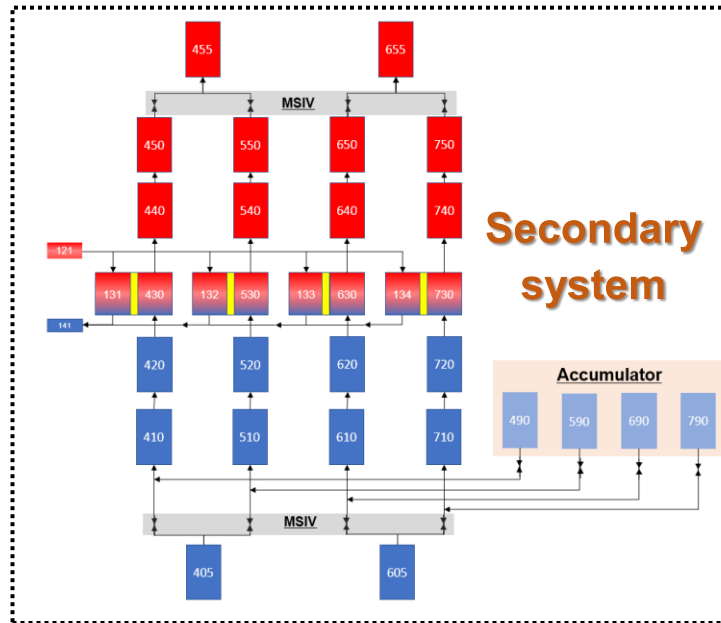
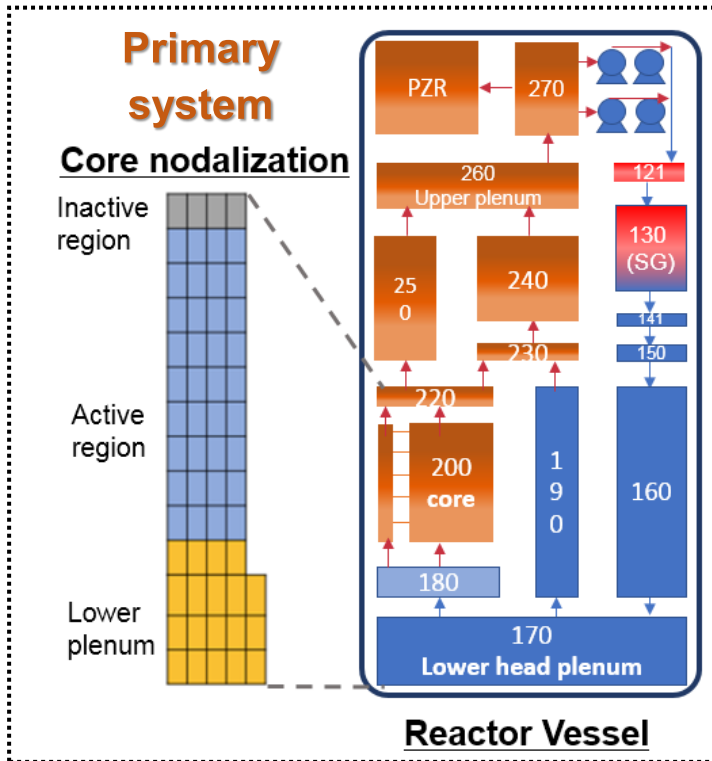
- ✓ 공동수조 및 모듈 배치 형상 직사각형으로 변경
- 비상냉각수 부피 및 높이를 동일하게 설정 시
- ✓ 공동수조 크기: $15 \times 64 \text{ m}^2$
- ✓ 원자로모듈 공동 크기: $21 \times 7 \text{ m}^2$



충수형 관리 시스템 개념 평가

노심 노출 시간 및 충수 대응 시간 평가 (MELCOR)

MELCOR SMR Nodalization



Vessel Geometry

Outer radius for active core region [m]	0.9518
Radius of inside of vessel cylinder [m]	2.05
Thickness of cylindrical vessel wall [m]	0.331
Vessel height [m]	7.345

	MARS	MELCOR
Core power [MW]	330	331
Primary pressure [MPa]	15	14.67
Primary mass flow rate [kg/s]	1551.12	1529.8
SG_Primary_inlet_temp [K]	584.62	584.0502
SG_Primary_outlet_temp [K]	544.8	543.1509
Core_inlet_temp [K]	-	542.7
Core_outlet_temp [K]	-	581.0
Secondary_mass flow rate [kg/s]	38.92	38.917
SG_secondary_temp_in [K]	430.71	430.67
SG_secondary_temp_out [K]	529.39	528.2371
SG_secondary_pressure_in [MPa]	4.74	4.92
SG_secondary_pressure_out [MPa]	4.42	4.33
Quality	99.999	95.24

충수형 관리 시스템 개념 평가

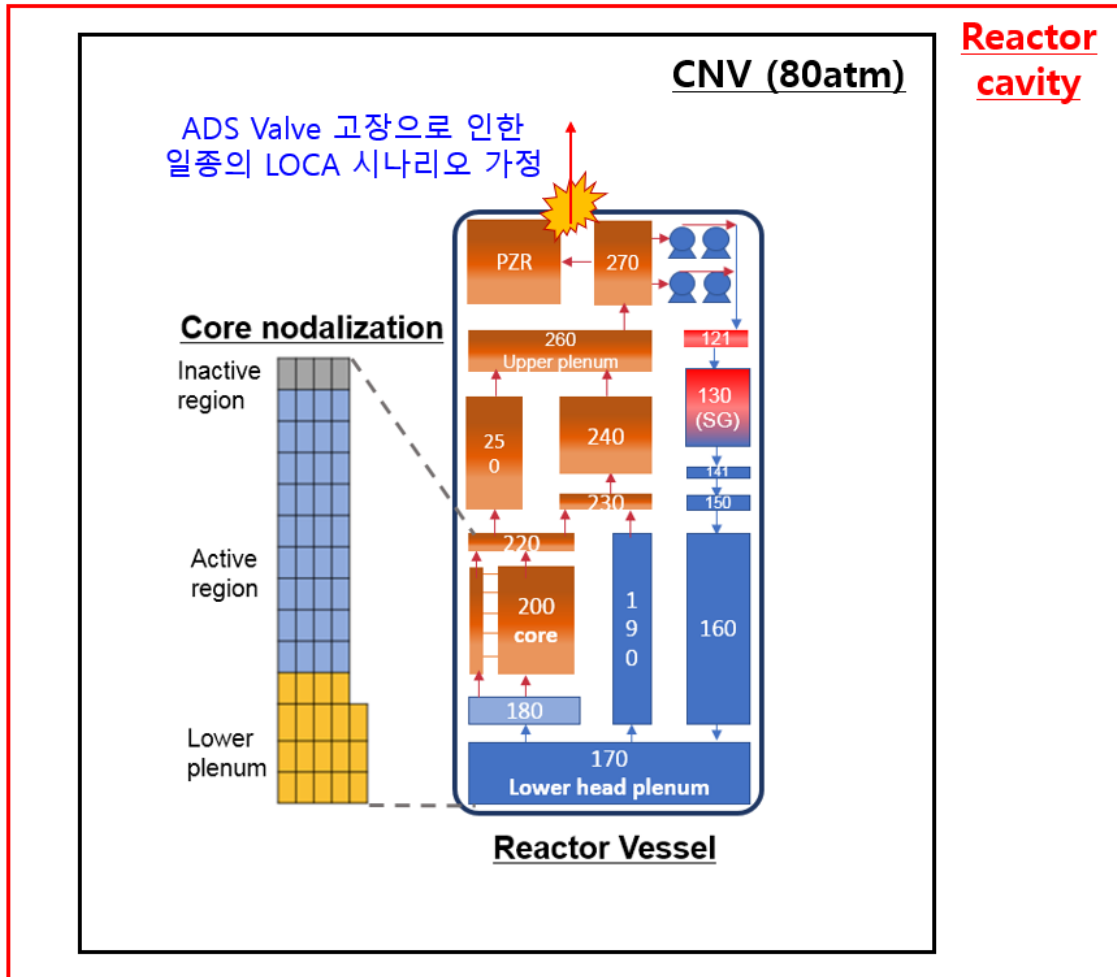
노심 노출 시간 및 충수 대응 시간 평가

ADS Valve 고장 사고 가정 (330 MW 출력 기준)

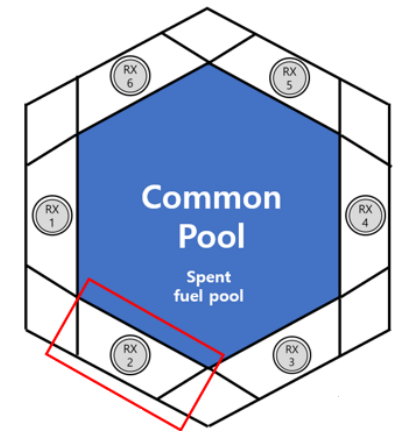
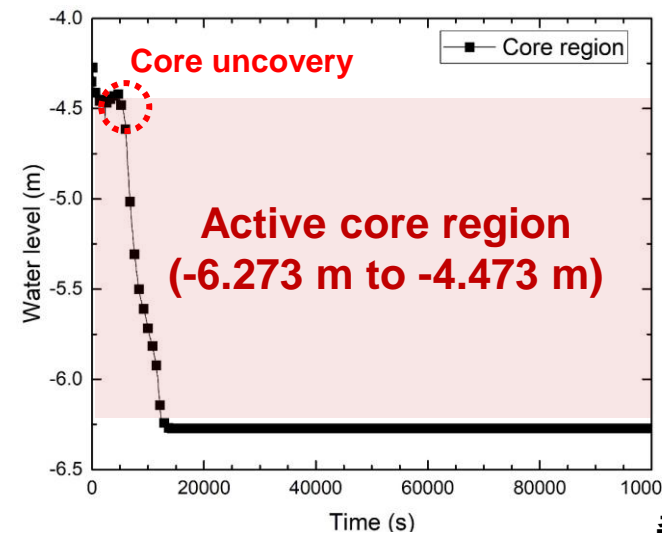
*ADS (Automatic Depressurization System):

피동 감압 계통 (Open: 17.24MPa, Close: 14.06MPa)

***1차 측 냉각수 질량: 37177.42 kg**



- Vessel 내부 잔존 냉각수 수위 감소 경향



*노심 수위 노출 시작 시점: **5,240 s**

*노심 수위 완전 고갈 시점: 14,320 s

충수 냉각수 Cross-section: **120.43 m²**

CNV height: 20 m로 가정

→ 완전 침수: **약 2400 m³ 냉각수 필요**

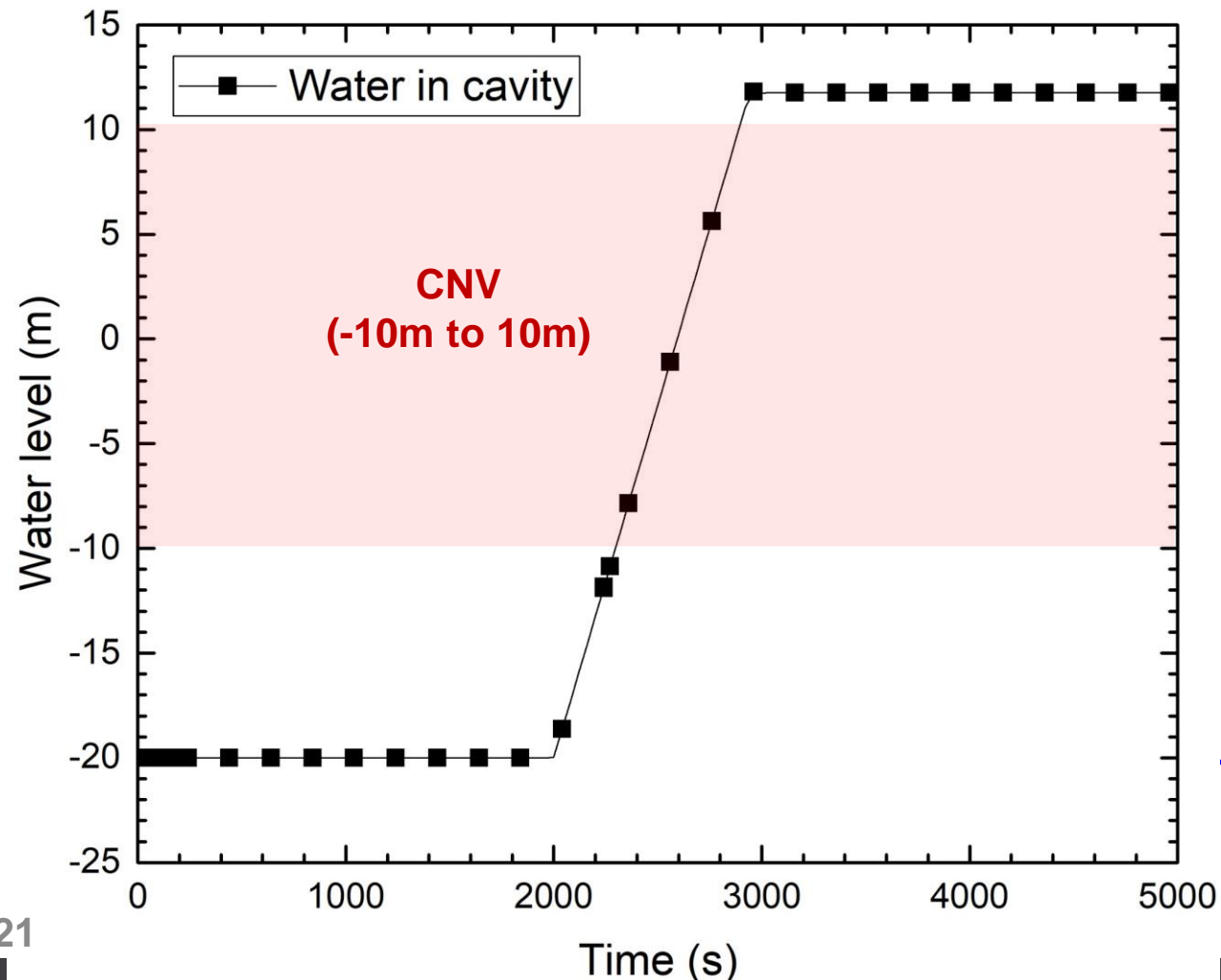
• **충수 소요 시간 1,000 s 로 가정 시 필요 유량: 2,400 kg/s**

• **충수 소요 시간 5,000 s 로 가정 시 필요 유량: 480 kg/s**

충수형 관리 시스템 개념 평가

노심 노출 시간 및 충수 대응 시간 평가

ADS Valve 고장 사고 cavity 충수 전략 시나리오 해석 (MELCOR)



재순환 밸브를 통한 노심 수위 회복

- ADS Valve 를 통한 증기 방출
- 증기의 CNV 내벽에서의 응축
→ CNV 내부 수위가 점차 증가
- CNV 내 응축된 냉각수가 **재순환 밸브를 통해 노심으로 주입되어 RPV 내부 수위 증가**

주요 가정사항 (MELCOR)

- Gap thickness (btw RPV and CNV wall): 12 cm
- 재순환 밸브 개방 시점: CNV 수위 -3.0 m 도달
(재순환 밸브 위치 + 1.3 m; 수두차)

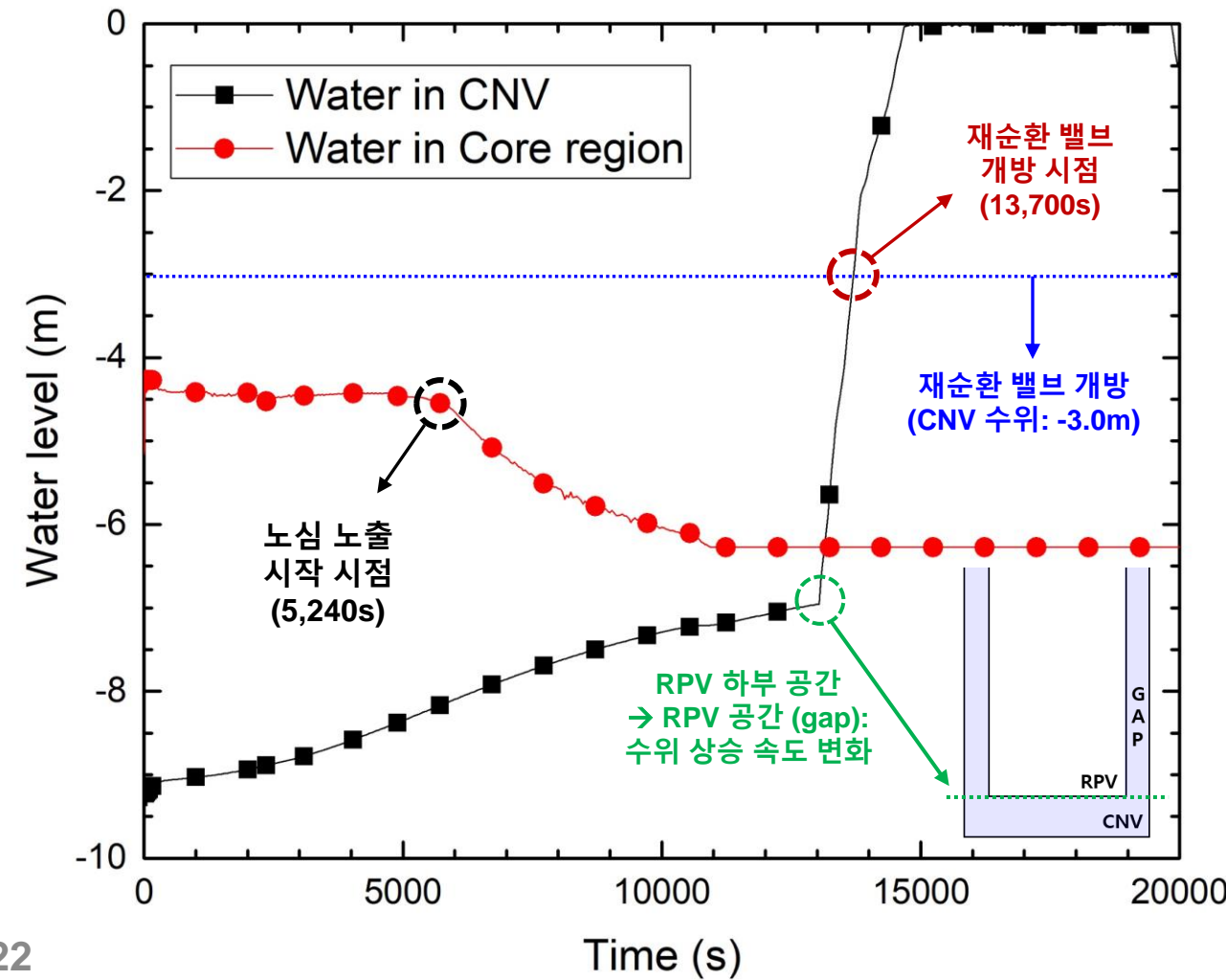
설계 시 고려해야 할 사항

1. **CNV 내 수위 상승 속도: CNV design**
- **RPV 하부 공간 체적**, 응축 면적, gap thickness 등
2. **재순환 밸브 설계**
- 위치 & 개방 시점: 주입되기 위한 필요 수두차 등

충수형 관리 시스템 개념 평가

노심 노출 시간 및 충수 대응 시간 평가

1. RPV 하부 공간의 체적이 큰 경우 (40 m³ 로 가정)



기 설계 특성 반영 시 한계점

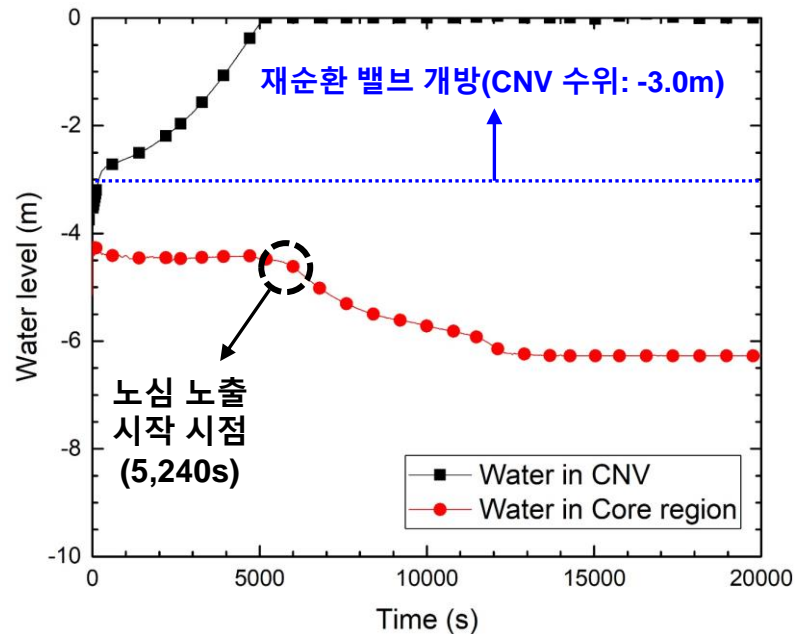
- SMR 설계 특성상 1차 측 냉각수 질량이 상대적으로 적음
- RPV 하부 공간의 체적을 크게 설계할 경우, 목표로 하는 노심 노출 시작 시점에도 **재순환 밸브가 개방되는 위치까지 수위가 상승하지 않음** → 노심 수위 회복 불가
- 결과적으로 노심 손상이 불가피함

**RPV 하부 공간의 체적을 가능한 최소화
할 수 있는 설계 필요**

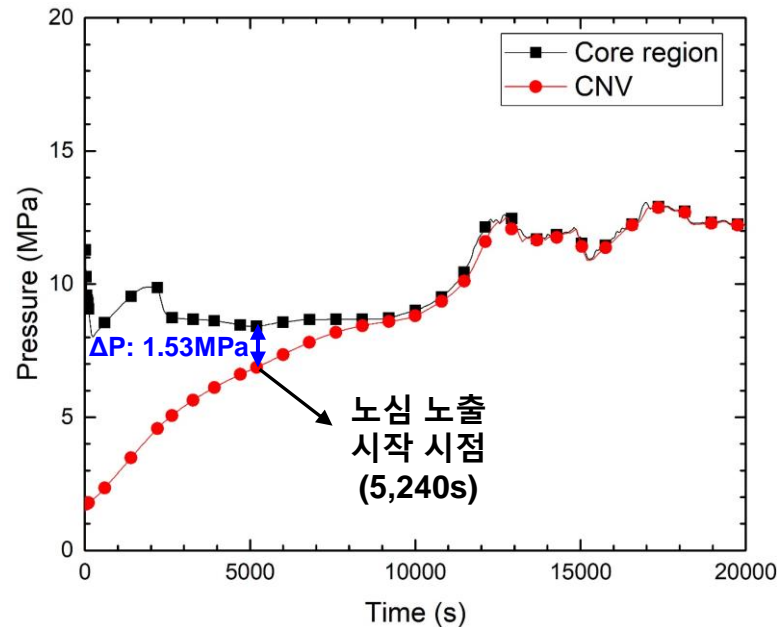
충수형 관리 시스템 개념 평가

노심 노출 시간 및 충수 대응 시간 평가

2. RPV 하부 공간의 체적이 작은 경우 (10 m³ 로 가정)



*노심 노출 시작 시점 이전에 CNV 수위가 목표 수위에 도달함.
→ 재순환 밸브 개방 조건 만족



*하지만 CNV 내 공간의 압력이 1차 측(노심) 공간 압력보다 낮음.
노심 노출 시작 시점 ΔP: 약 1.53 MPa (약 15 atm)
→ 응축수가 노심으로 유입되지 못함.

기 재순환 밸브 설계 시 한계점

- 압력차가 매우 크기 때문에 응축된 냉각수의가 재순환 밸브를 통해 노심으로 유입되지 못함.
→ 노심 수위 회복 불가
- 작은 수두차로도 유입될 수 있도록 재순환 밸브를 설계하여야 함.



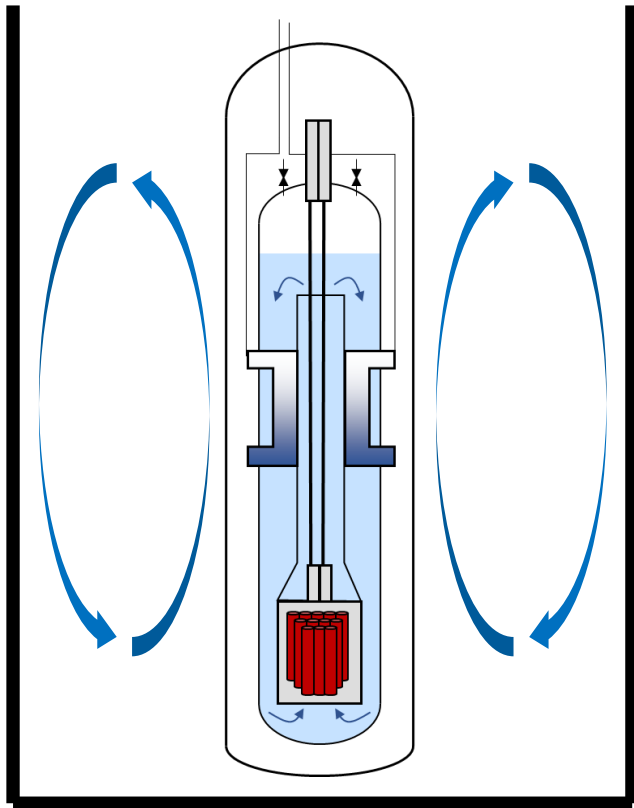
- 수두차를 만족할 수 있는 설계 필요
 1. Longer CNV height (약 10m per 1atm)
 2. 큰 면적의 방출 밸브 추가 설계
→ 가능한 빠른 속도로 압력차를 최소화 (ex: 전원 차단 시 개방되는 밸브)
- 수두차 외에 다른 특성으로 개방되는 재순환 밸브 설계 고려 필요

충수형 관리 시스템 개념 평가

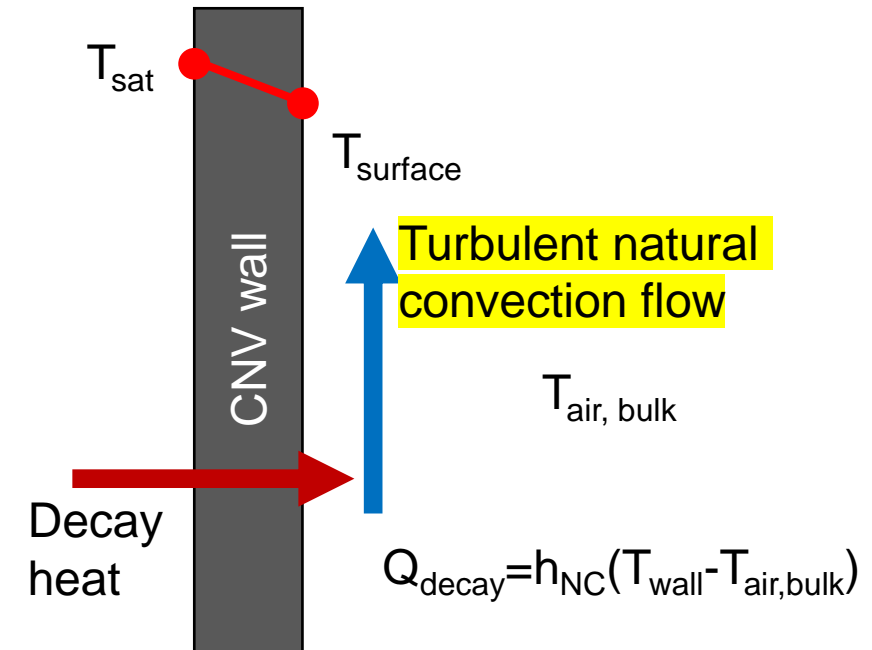
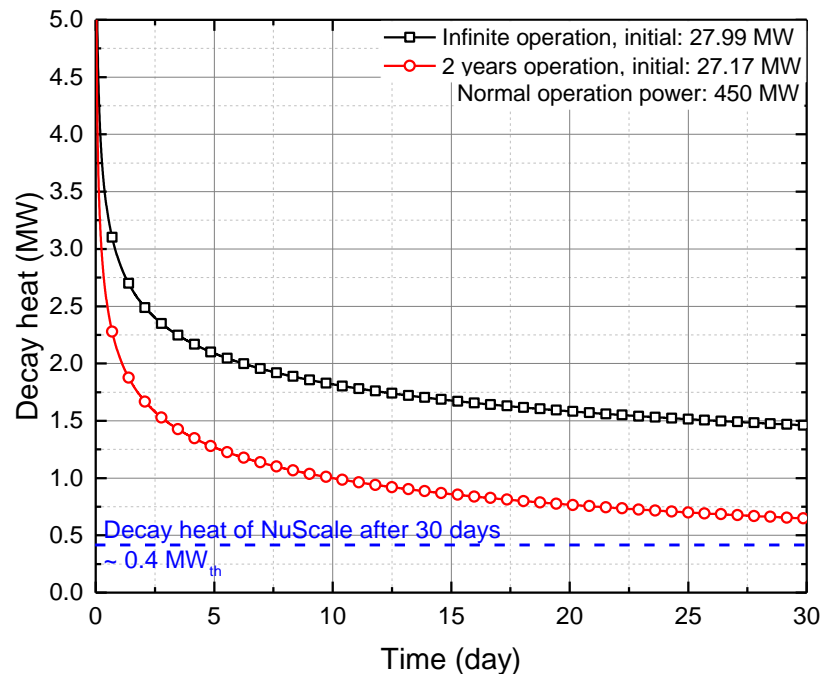
공기냉각 가능 여부 평가

공기냉각에 의한 붕괴열 제거 가능 시점 평가

원자로모듈 공동



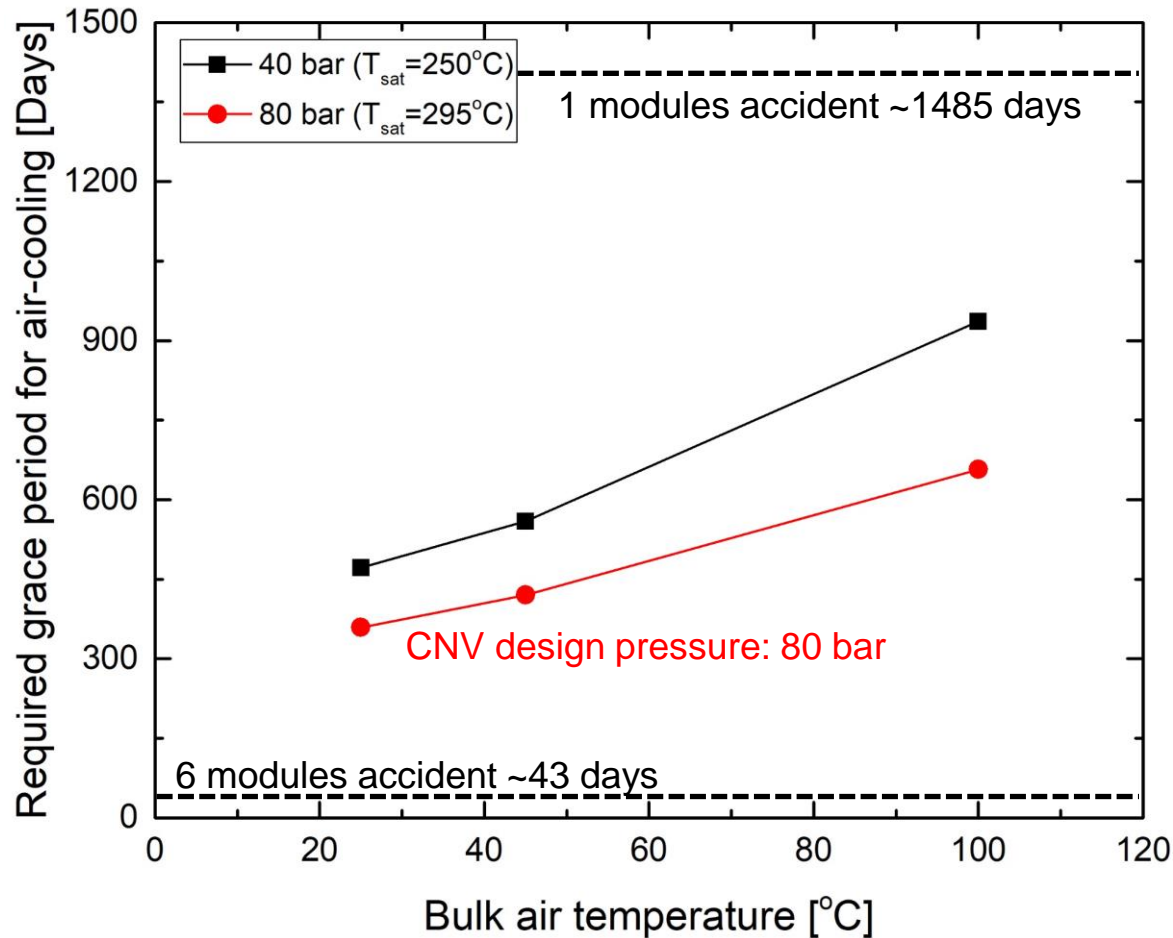
- 예비평가를 위한 가정
 - 모든 붕괴열은 CNV 측면으로 전달
 - 모듈 주변 공기 온도는 일정하게 가정
 - CNV 내벽 온도는 증기의 포화온도로 가정
 - CNV 외경: 4.5 m & CNV 높이: 15 m 원기둥 가정



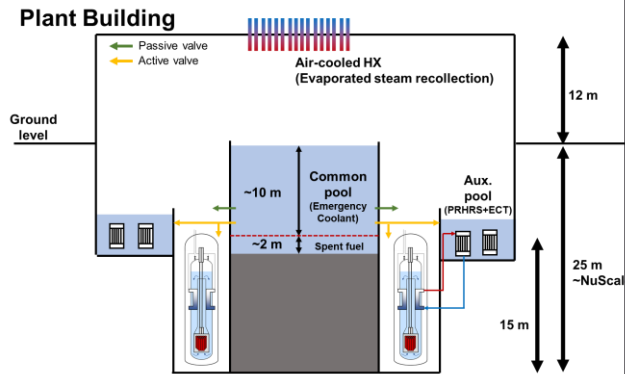
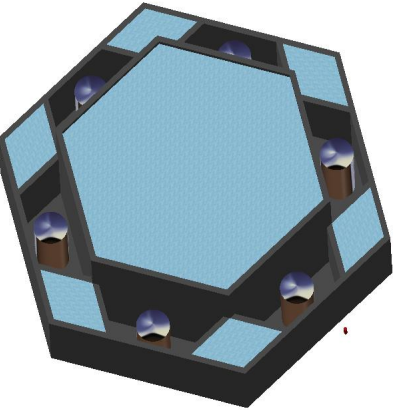
충수형 관리 시스템 개념 평가

공기냉각 가능 여부 평가

공기냉각에 의한 붕괴열 제거 가능 시점 평가



- 증발수 회수 고려하지 않는 경우
 - 6 모듈 사고 시, 43일 이후에는 사고 완화 불가
 - 1 모듈 사고 시, 공기 냉각만으로 사고 완화 가능
- 압력 제한치 또는 원자로모듈 근처 공기 온도에 크게 영향을 받음
- 공기냉각 시간을 앞당기기 위해서는 **CNV의 크기 증가** 혹은 **증발수 회수 계통 효율성 증대**가 필요함
 - CNV 크기 증가 → CNV 내부 응축수 재순환 고려 필요
 - 증발수 회수 계통 효율 증대 → 회수율 0.7~0.8 이상



• 비침수 배치 / 충수형 안전계통

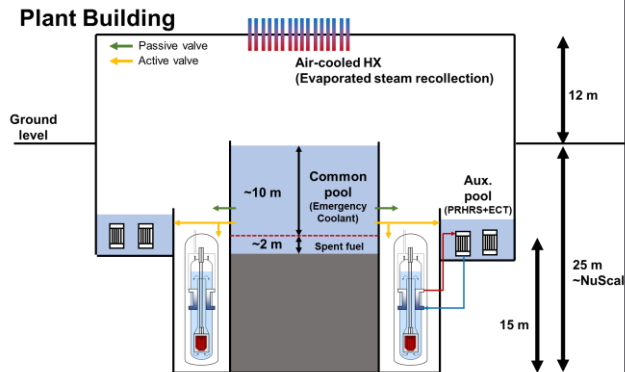
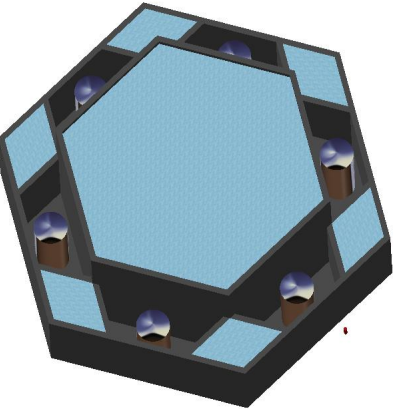
- ✓ NuScale 특허 대안
- ✓ 사고 모듈 개별 관리 가능
- ✓ 무기한 장기 냉각 성능 가능성 확인
- ✓ 높은 열출력 SMR 관리 가능성 확인

추가 논의 사항

• CNV 크기 설계: 충수형 안전계통에서 중요한 변수

CNV 직경 ↑ → Gap 부피 ↑ → CNV 내 노심 재순환 불가
 ↓
 공기냉각 요구시간 ↓

CNV 높이 ↑ → 원자로모듈 공동 깊이
 ↓
 공동수조 초기 냉각수 부피
 ↓
 공기냉각 요구시간 ↓



• 비침수 배치 / 충수형 안전계통

- ✓ NuScale 특허 대안
- ✓ 사고 모듈 개별 관리 가능
- ✓ 무기한 장기 냉각 성능 가능성 확인
- ✓ 높은 열출력 SMR 관리 가능성 확인

추가 논의 사항

• CNV 크기 설계

- 크기가 커질 수록 공기냉각 가능성이 높아짐
- 직경이 커질수록 Gap 체적 증가로 인해 재순환계통에 문제
- 높이가 커질수록 원자로 모듈 공동의 깊이, 공동수조 초기 냉각수 부피가 커져야 함

• 요구 충수 속도에 따른 충수 방법

- 노심 노출 시작 시점 기반으로 시간 여유도 확보 필요
- Fail-safe 작동 밸브
- 고유량의 물 제어 방법
- 적정 원자로모듈 공동 사이즈

• 공동수조 모양

- 정육각형: 컴팩트한 디자인, 멋진 외관
- 직사각형: 크레인 설치의 용이성

Thank you for your attention

E-mail: sungjkim@hanyang.ac.kr