

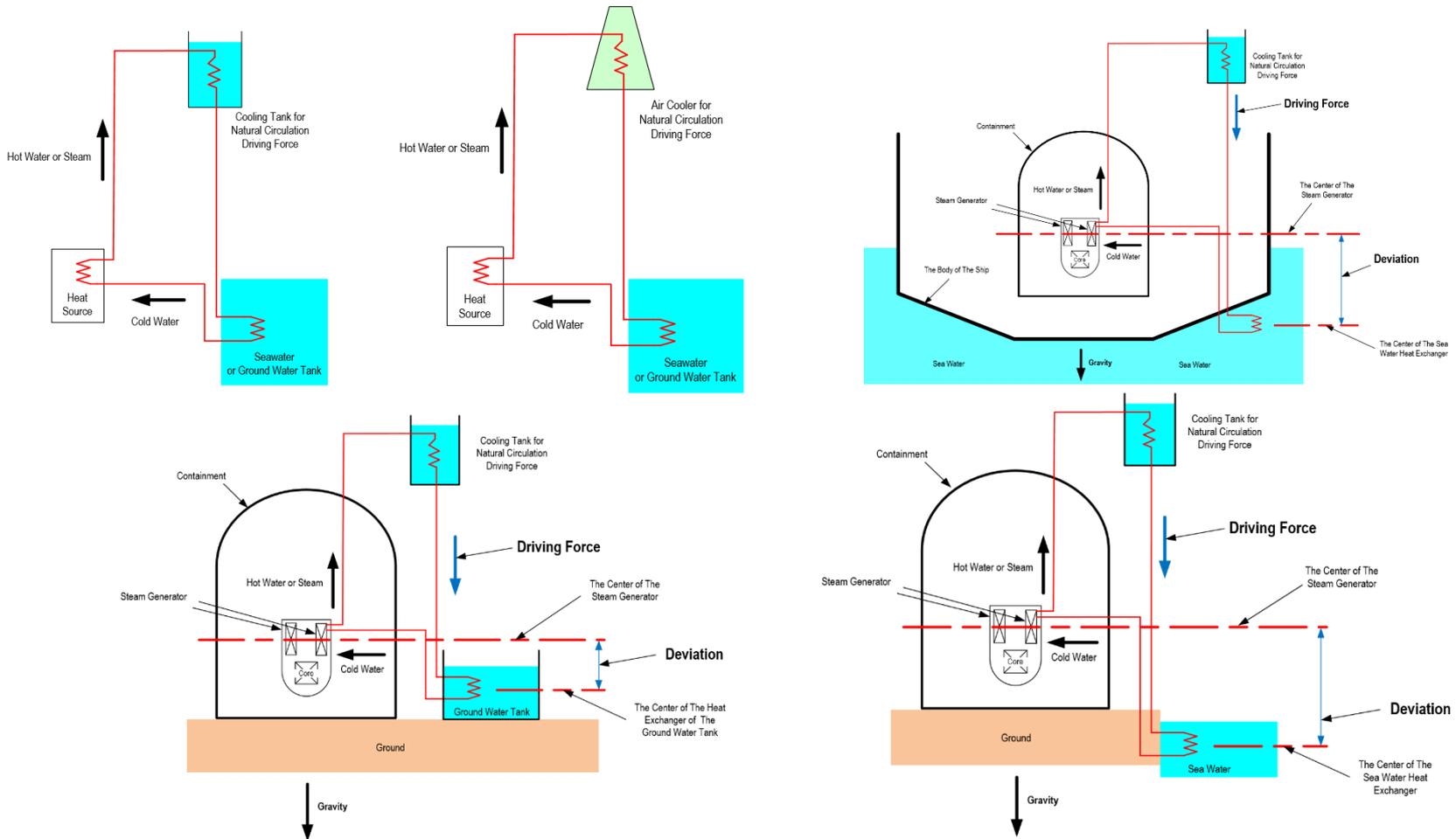
Concepts of Passive Residual Heat Removal System for 130 MWth Nuclear Powered Ship

2020-12-02

Yong Hwan Yoo

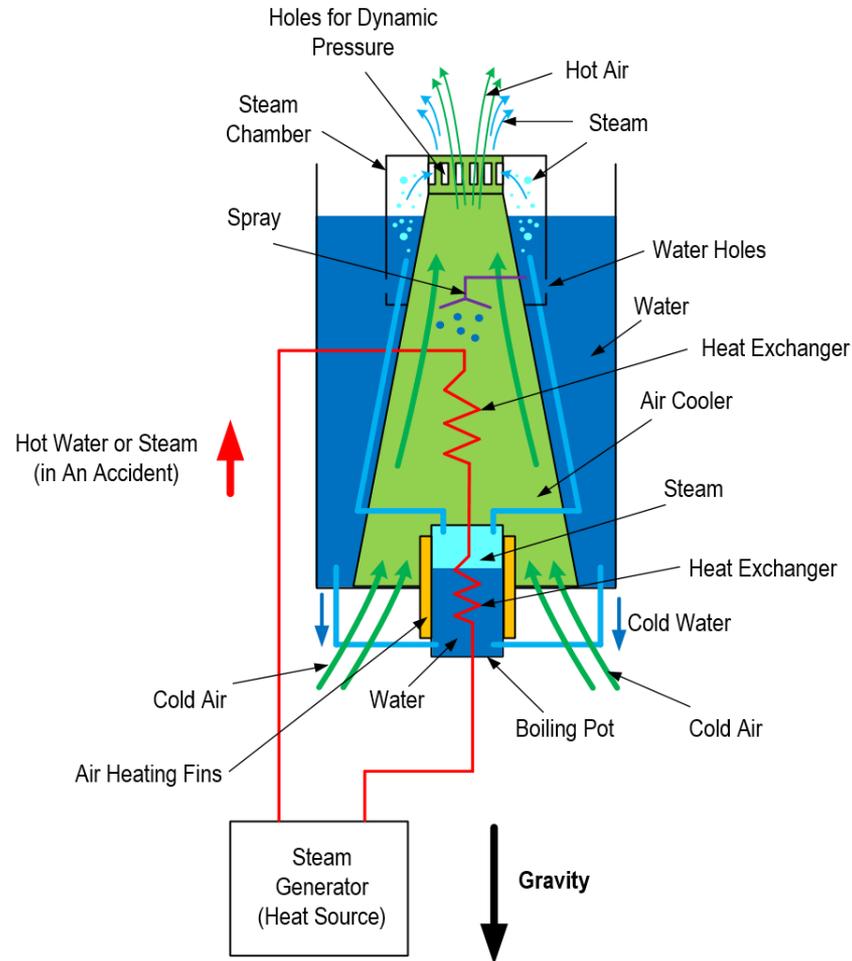
PRHRS with the Seawater Cooling

- 열원의 상부에 위치하는 피동냉각장치 구동력을 이용한 피동계통



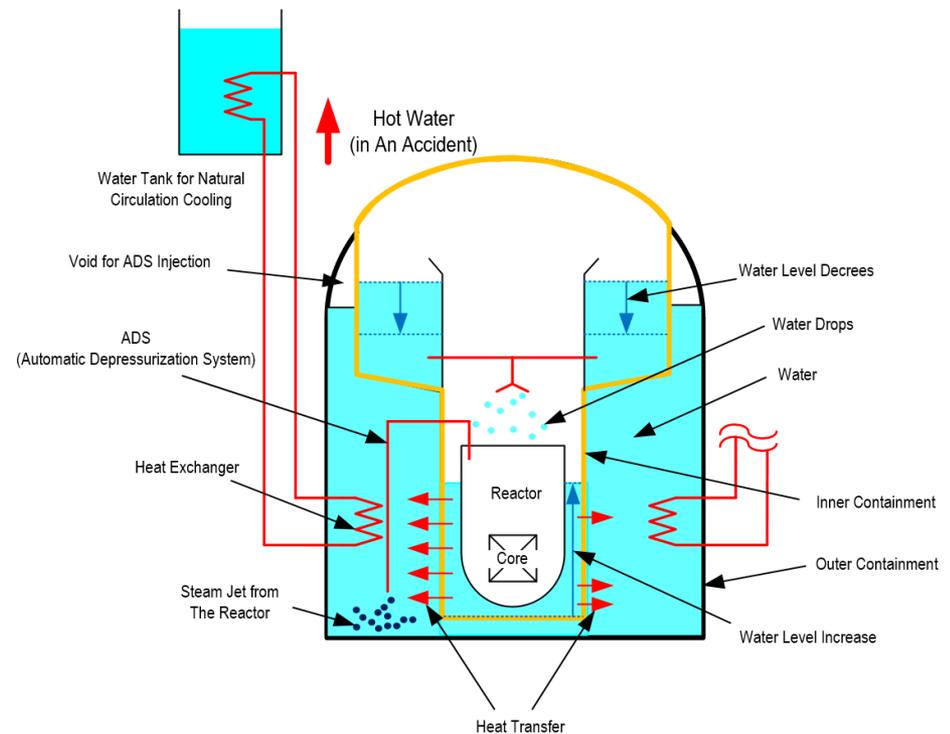
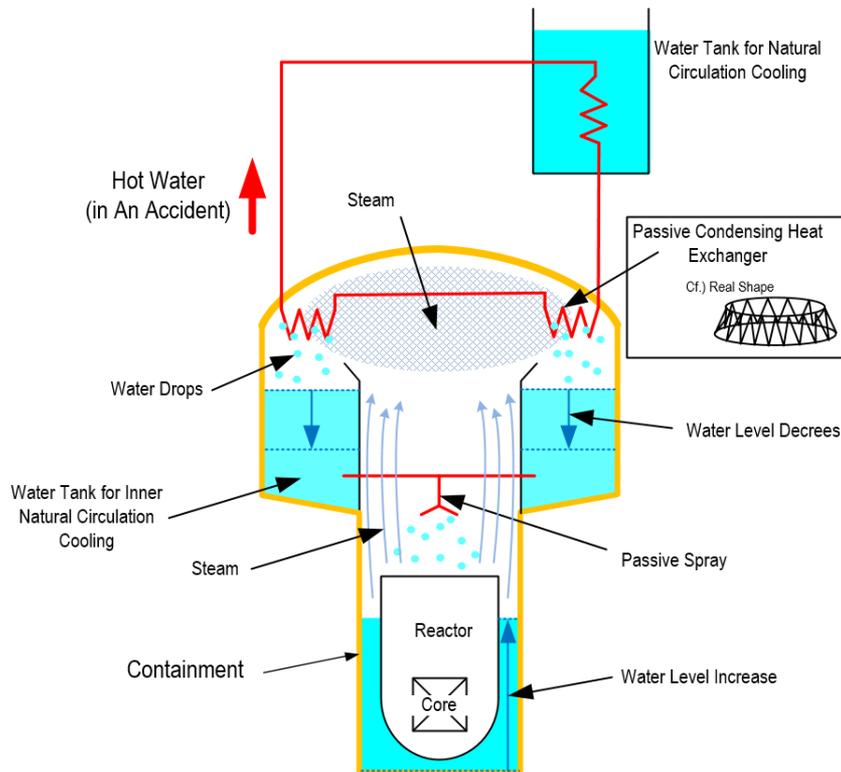
Hybrid SG-PRHRS

- 복합(수냉 및 공냉) 증기발생기 피동잔열계통 구성(안)



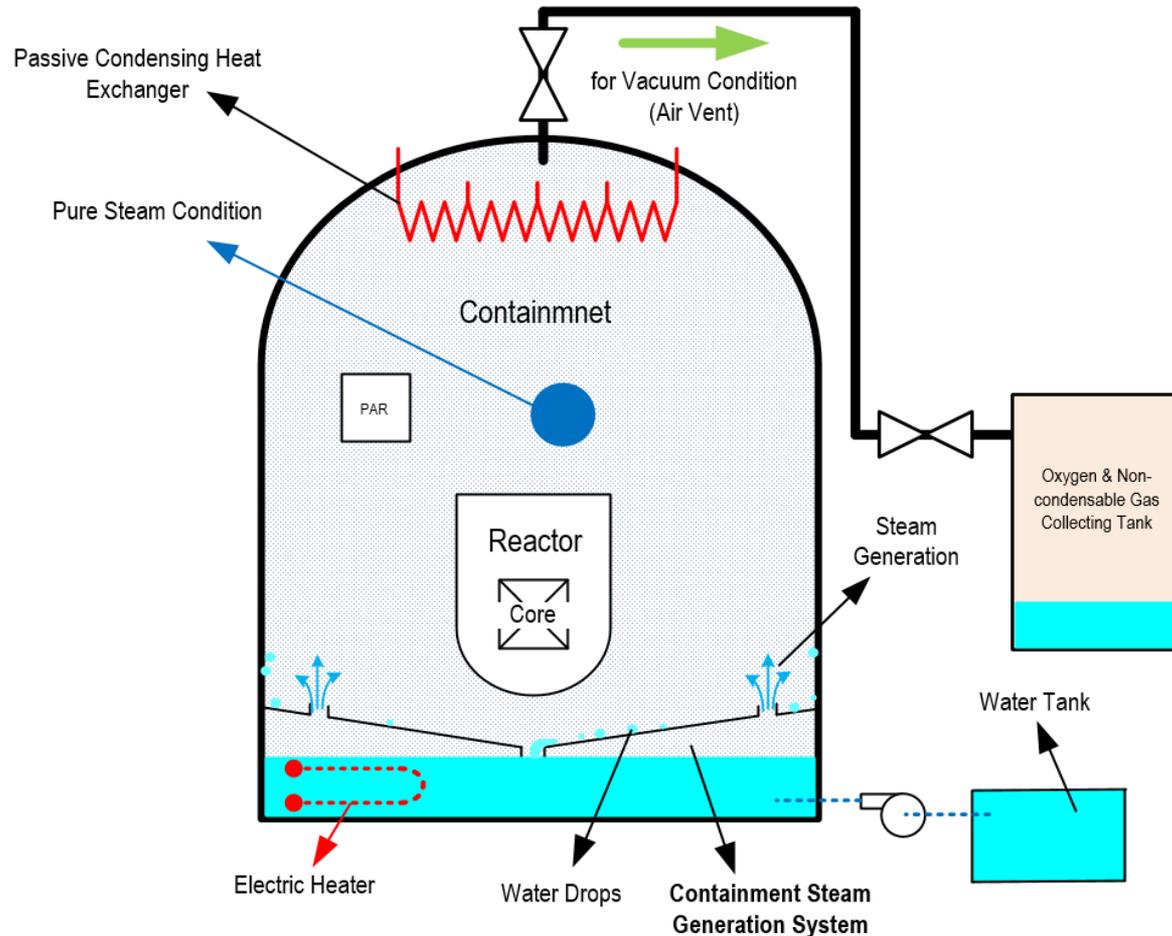
PRHRS for Containment Pressure Rise Prevention

- 격납실 내부의 자연대류현상을 이용한 잔열제거 및 격납실 압력 상승 방지 방안
- 격납실 외벽냉각을 이용한 잔열제거 및 격납실 압력 상승 방지 방안



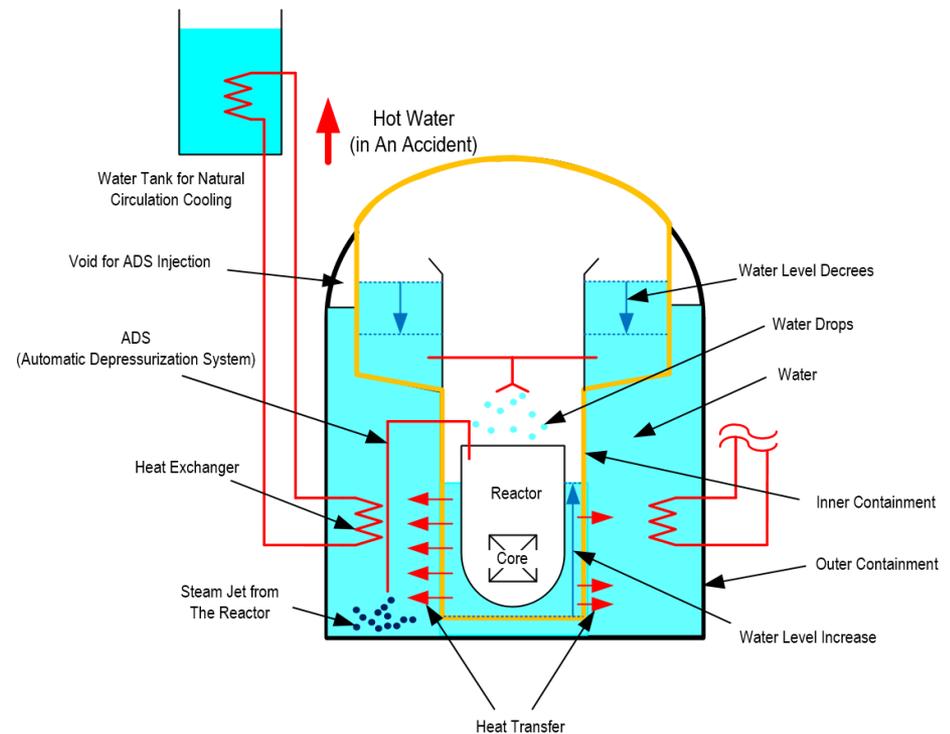
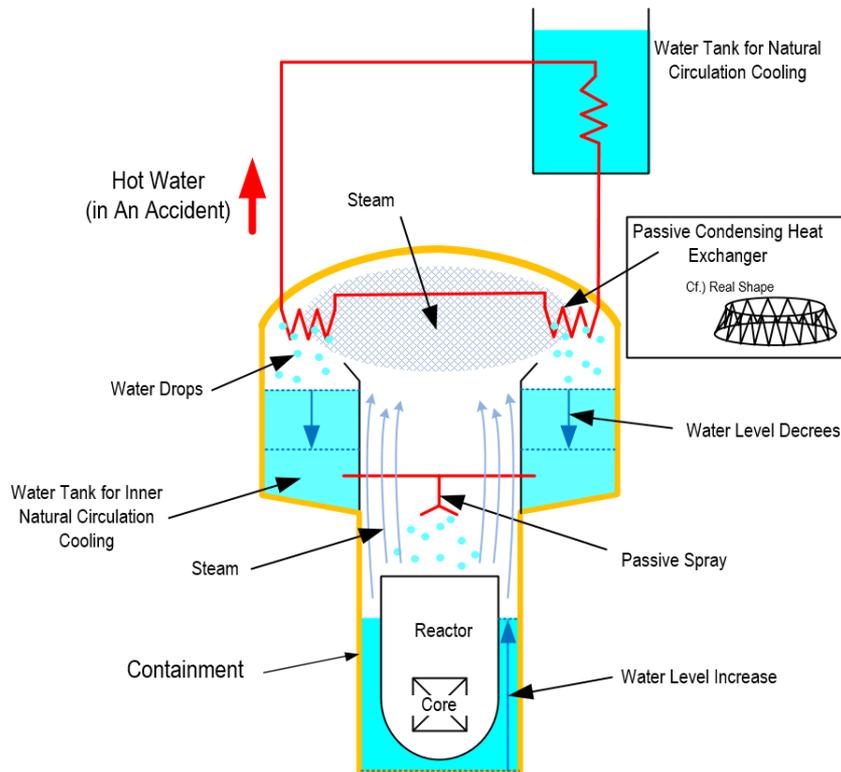
Pure Steam Atmosphere System for Containment

- 수소폭발방지 및 비응축성기체 저감계통(안)



PRHRS for Containment Pressure Rise Prevention

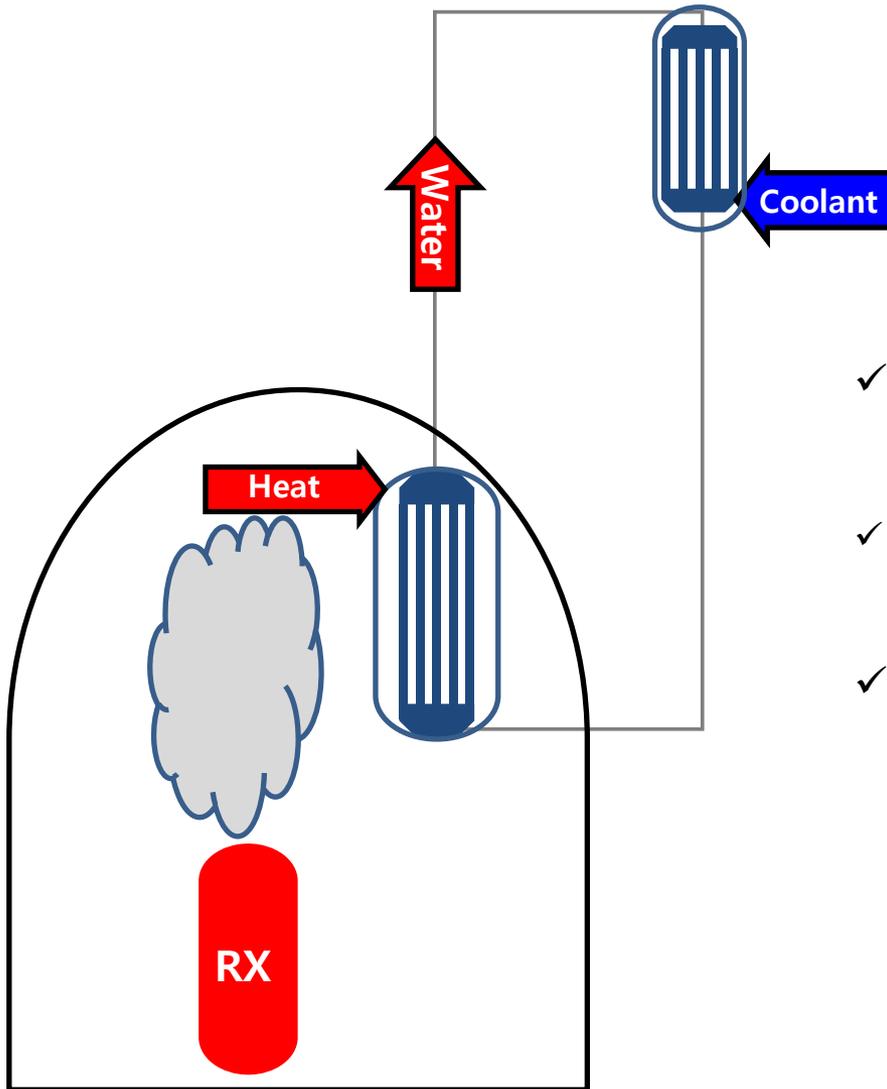
- 격납실 내부의 자연대류현상을 이용한 잔열제거 및 격납실 압력 상승 방지 방안
- 격납실 외벽냉각을 이용한 잔열제거 및 격납실 압력 상승 방지 방안



수행내용 요약

- ✓상부, 외벽 자연순환계통 가능성 검토
- ✓계통 레이아웃 설계
 - 열원 조건 가정, 고온 및 저온 열교환기 배치, 컴퍼넌트 연결 배관 구성
- ✓ 계통 개념설계: 열원 온도, 열량 고려 열교환기 형태, 사이즈 설정
- ✓주요 열교환기 사양 선정, 사이즈 설계
- ✓MARS 코드 입력 작성, 해석, 민감도 분석
- ✓상세 데이터 부재 고려
 - 학술적 아닌 설계 특성 → 이론, 문헌 조사 대신 계통 개념설계 및 MARS 모델링 우선 수행
 - 열원 크기, 온도, 압력 조건 가정 → 계통 열설계
 - 상세 조건 반영 업데이트 예정 : 외벽 냉각재 풀, 격납용기 크기 및 열유동 조건

상부냉각계통 자연순환 계통 구성



✓ 열원

- 원자로의 고온 스팀

✓ 메인 루프 (물 자연순환)

- 하부 가열 고온, 상부 냉각 저온열교환기 배치

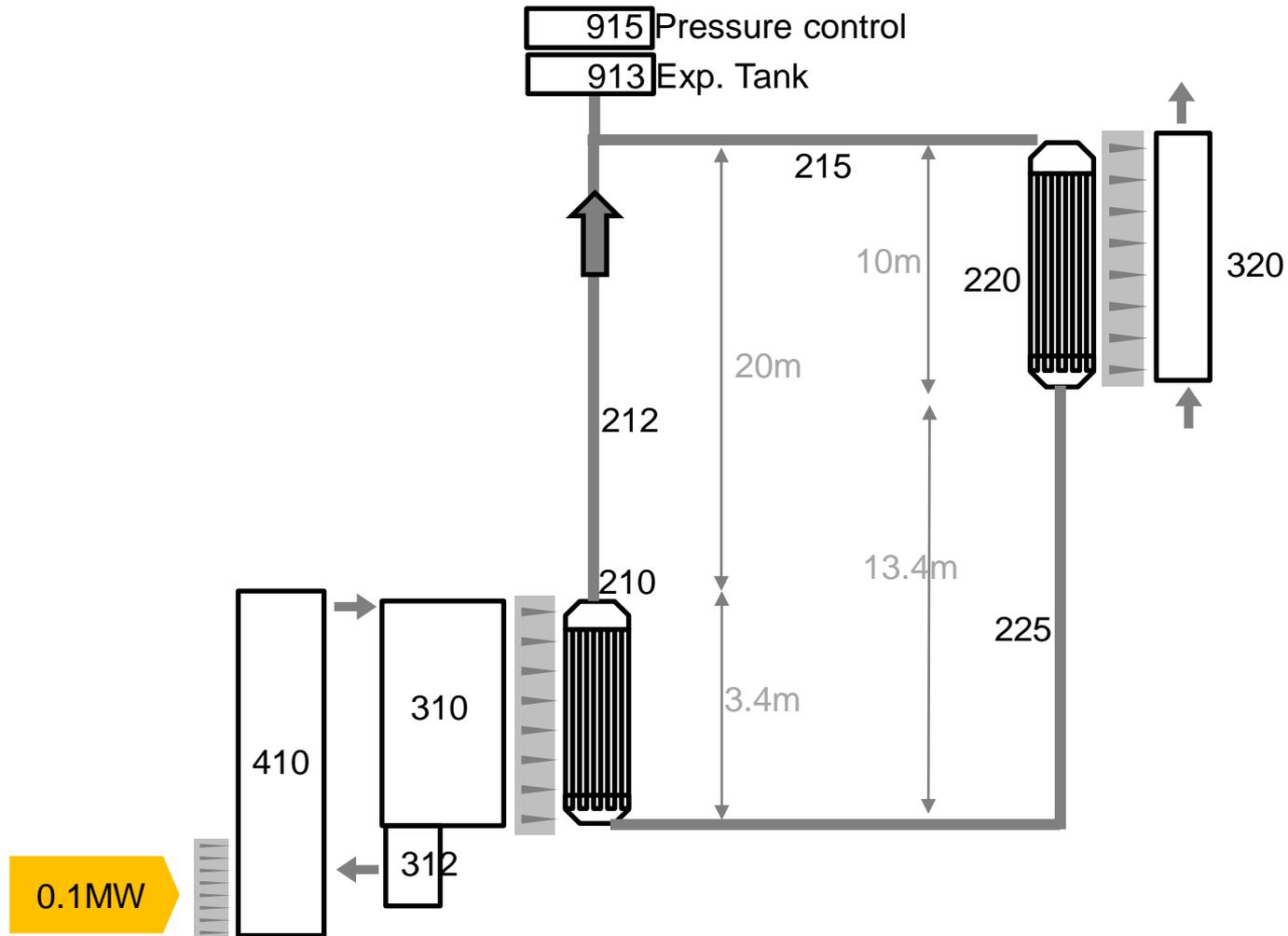
✓ 열교환기 (S&T 타입)

- Shell 측: 열원 격납용기 내부 스팀 응축 자연순환
저온 열교환기 냉각수
- Tube 측 메인루프 물 자연순환

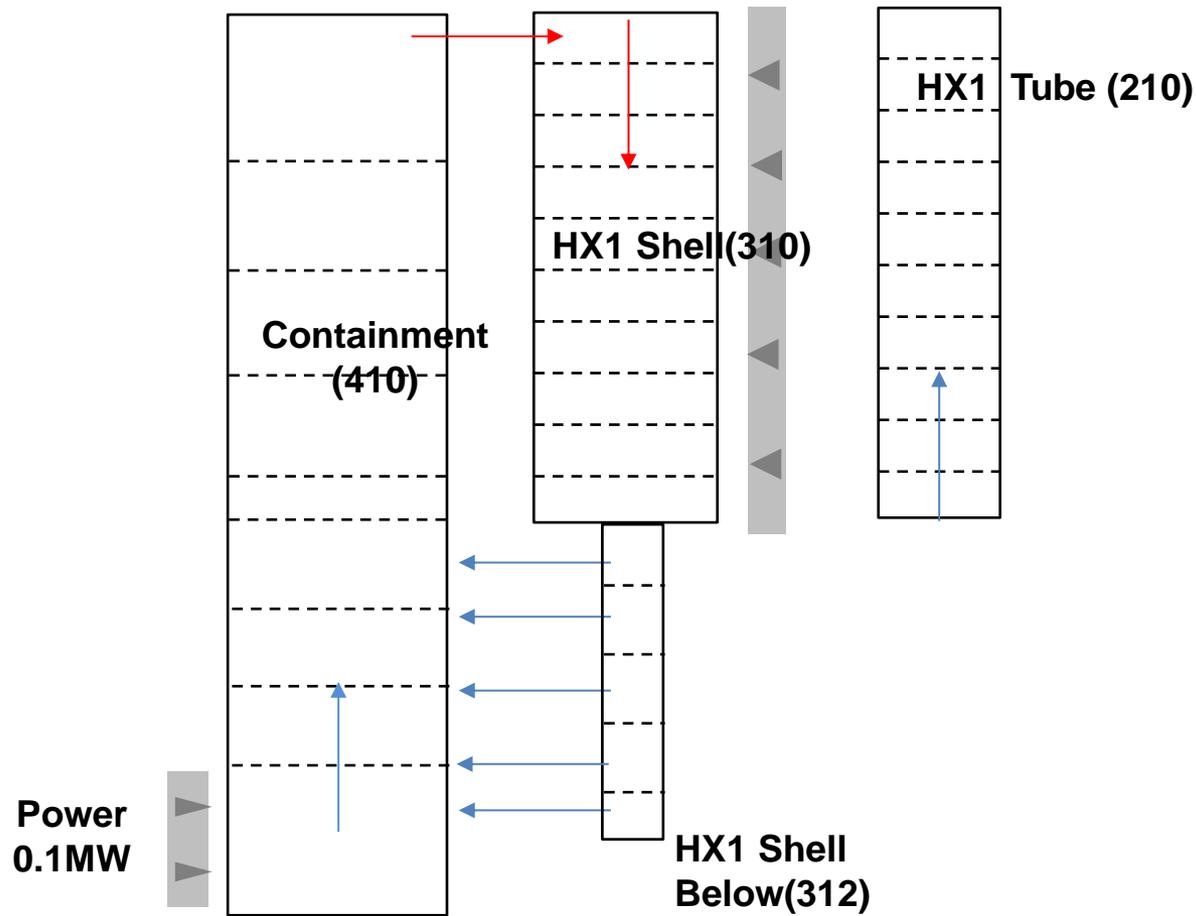
상부냉각계통 열교환기 사이즈 설계

	HX1	HX2
Tube Area Tot	0.00173	0.00145
Dh_tube	0.00957	0.00430
R	0.0047867	0.00215
Tube #	24	100
Node #	60	10
L node	0.33	1
L total	19.800	10.000
Slope (Deg)	9.9	90
H node (m)	0.0567366	1.0
H total (m)	3.40420	10.0
P/D	2.50	1.50
Area 1ea	0.00007198	0.00001450
Shell Area Tot	0.010178	0.002148
Dh_shell	0.05640	0.00636
H node	0.05674	1.00

상부냉각계통 MARS 코드 입력 작성

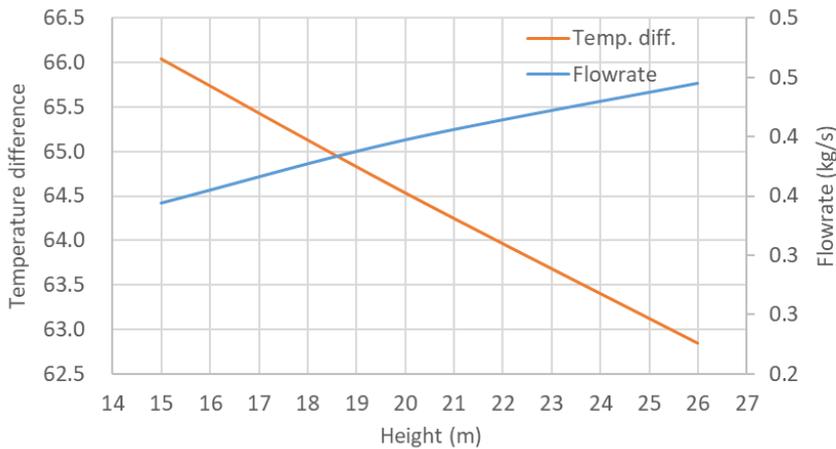


고온열교환기 격자

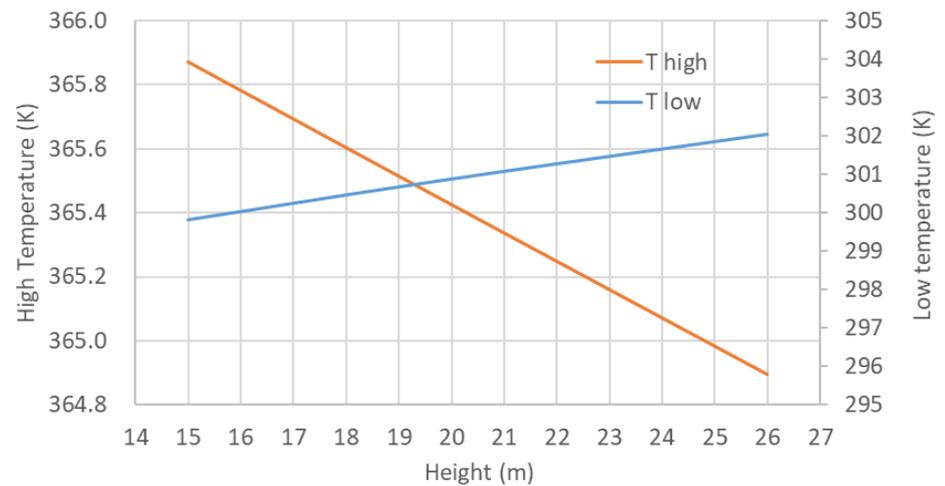


민감도 분석 계산결과

높이에 따른 온도 및 유량

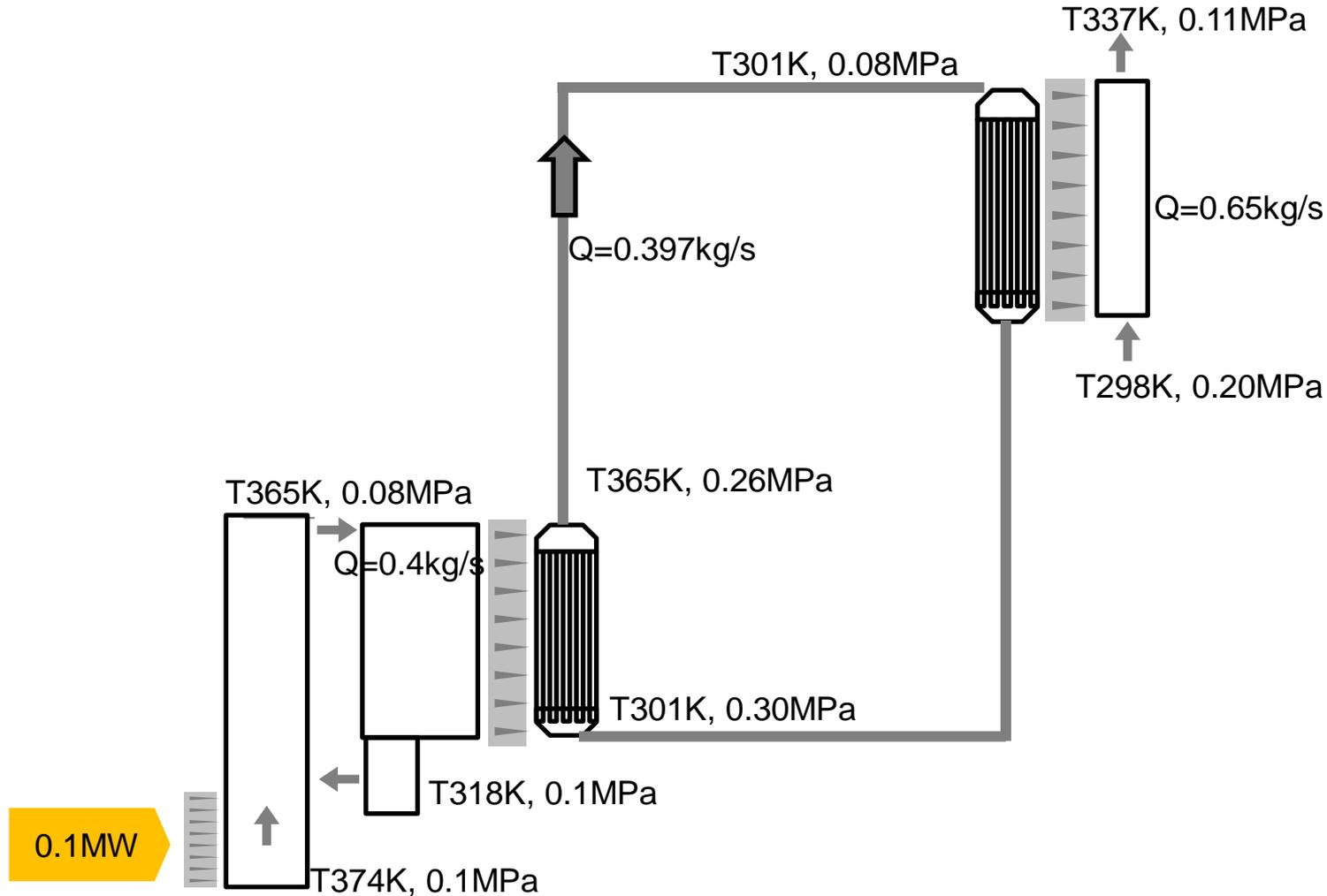


높이에 따른 HX1 입출구 온도

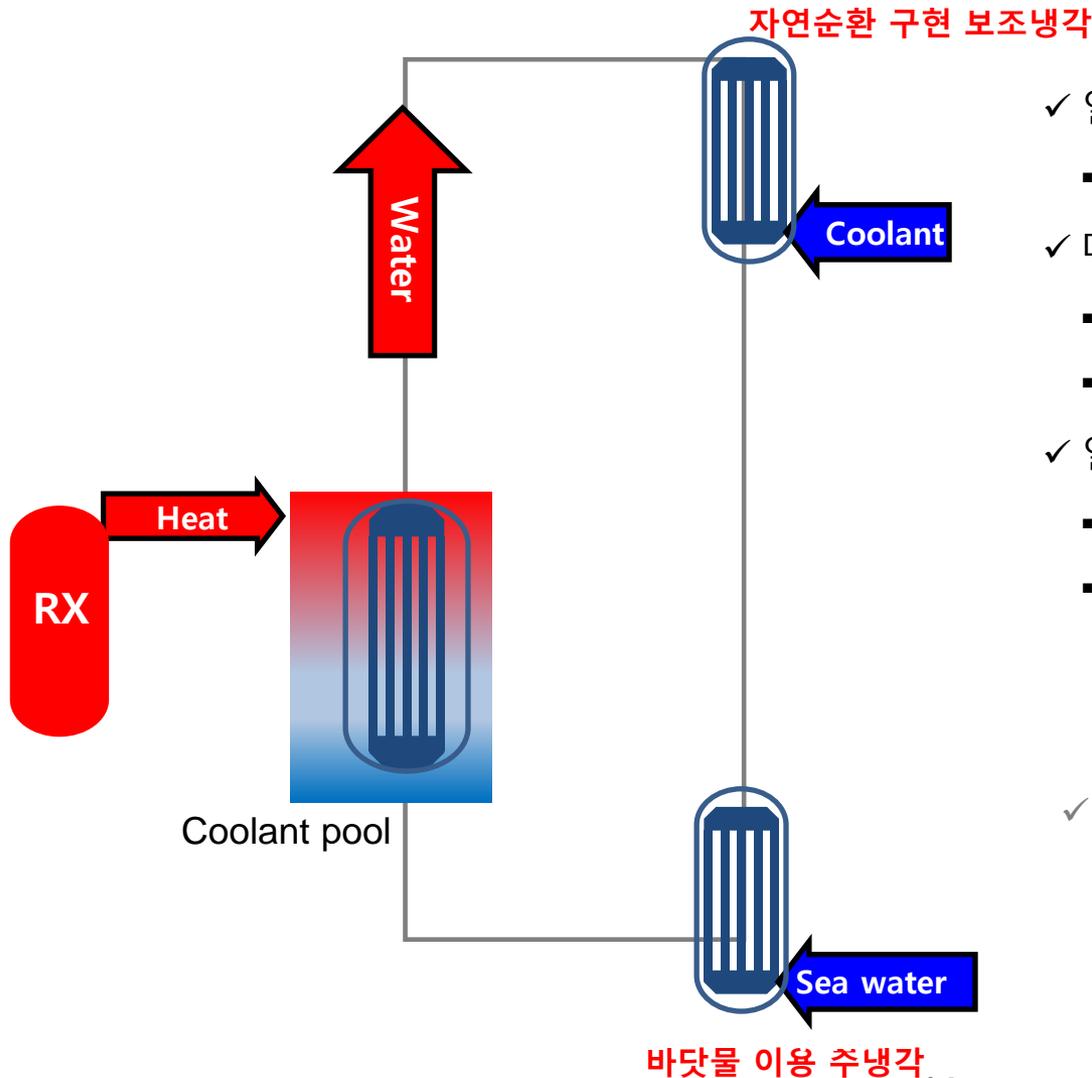


- ✓ 배관 길이에 비례 고온열교환기 입구와 출구 사이의 온도는 감소, 반면 유량은 증가
- ✓ 약 높이가 약 19m 지점에서 두 선이 교차
- ✓ 배관 길이에 비례 고온열교환기 출구 온도는 감소, 반면 저온열교환기 온도 증가

최적 사이즈 성능해석 결과



외벽냉각계통 자연순환 계통 구성

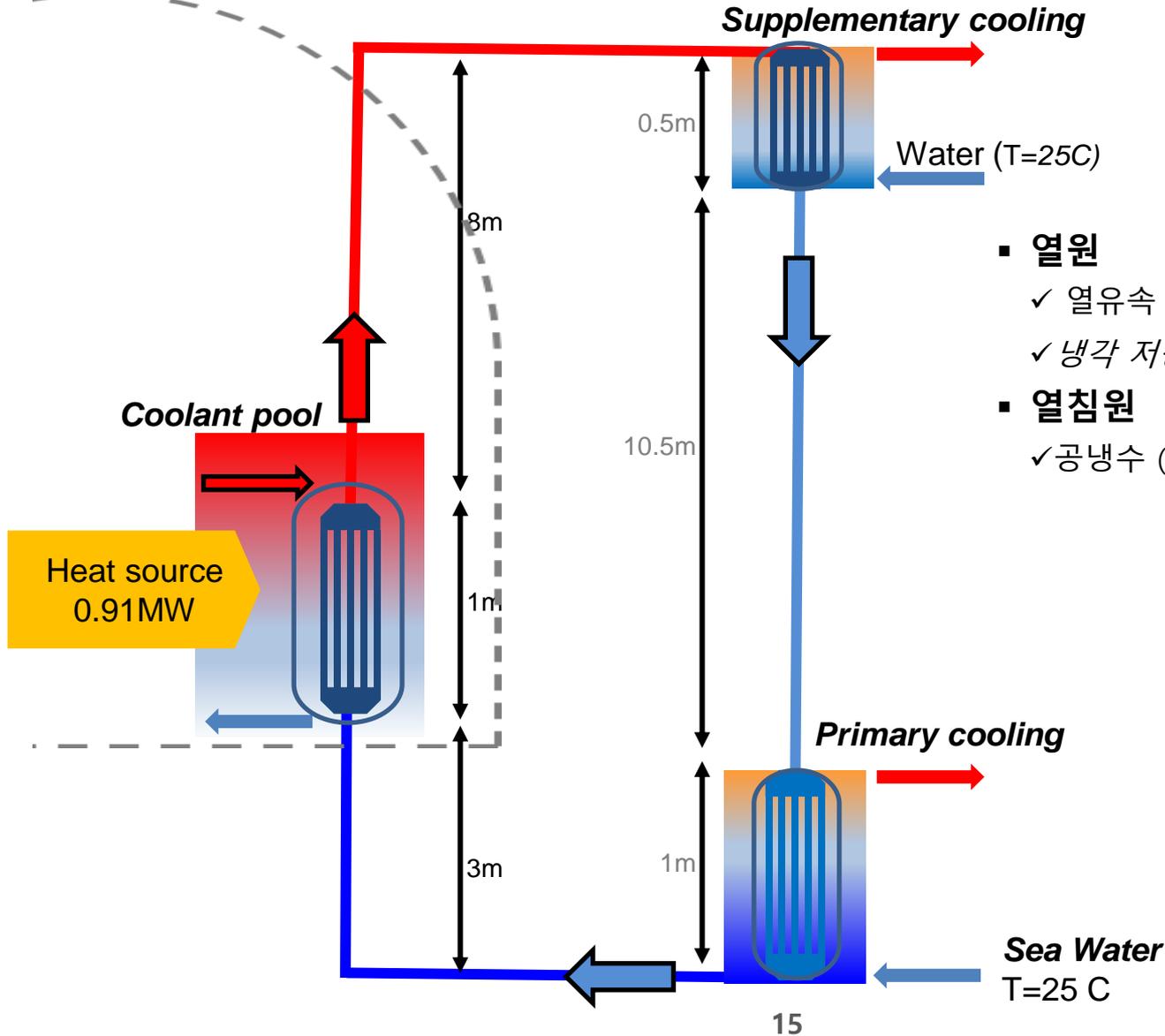


- ✓ 열원
 - 원자로 고온 냉각수 → 외벽 냉각수저장조 주입
- ✓ 메인 루프 (물 자연순환)
 - 하부 가열 고온, 상부 냉각 저온 열교환기 배치
 - 하부 주냉각 저온 열교환기
- ✓ 열교환기 (S&T 타입)
 - Shell 측: 열원, 냉각원 자연순환 구동
 - Tube 측: Main loop 물 자연순환

$$Gr = \frac{\rho g \beta (T_s - T_o) L^3}{\mu^2} > 10^{12} \sim 10^9$$

- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| ✓ Water at 100 °C | ✓ Steam at 100 °C |
| ▪ $\rho=958 \text{ kg/m}^3$ | ▪ $\rho=0.6 \text{ kg/m}^3$ |
| ▪ $\beta=0.000750 \text{ /K}$ | ▪ $\beta=0.000750 \text{ /K}$ |
| ▪ $\mu=0.000279 \text{ N-s/m}^2$ | ▪ $\mu=0.000012 \text{ N-s/m}^2$ |

외벽냉각계통 개념설계

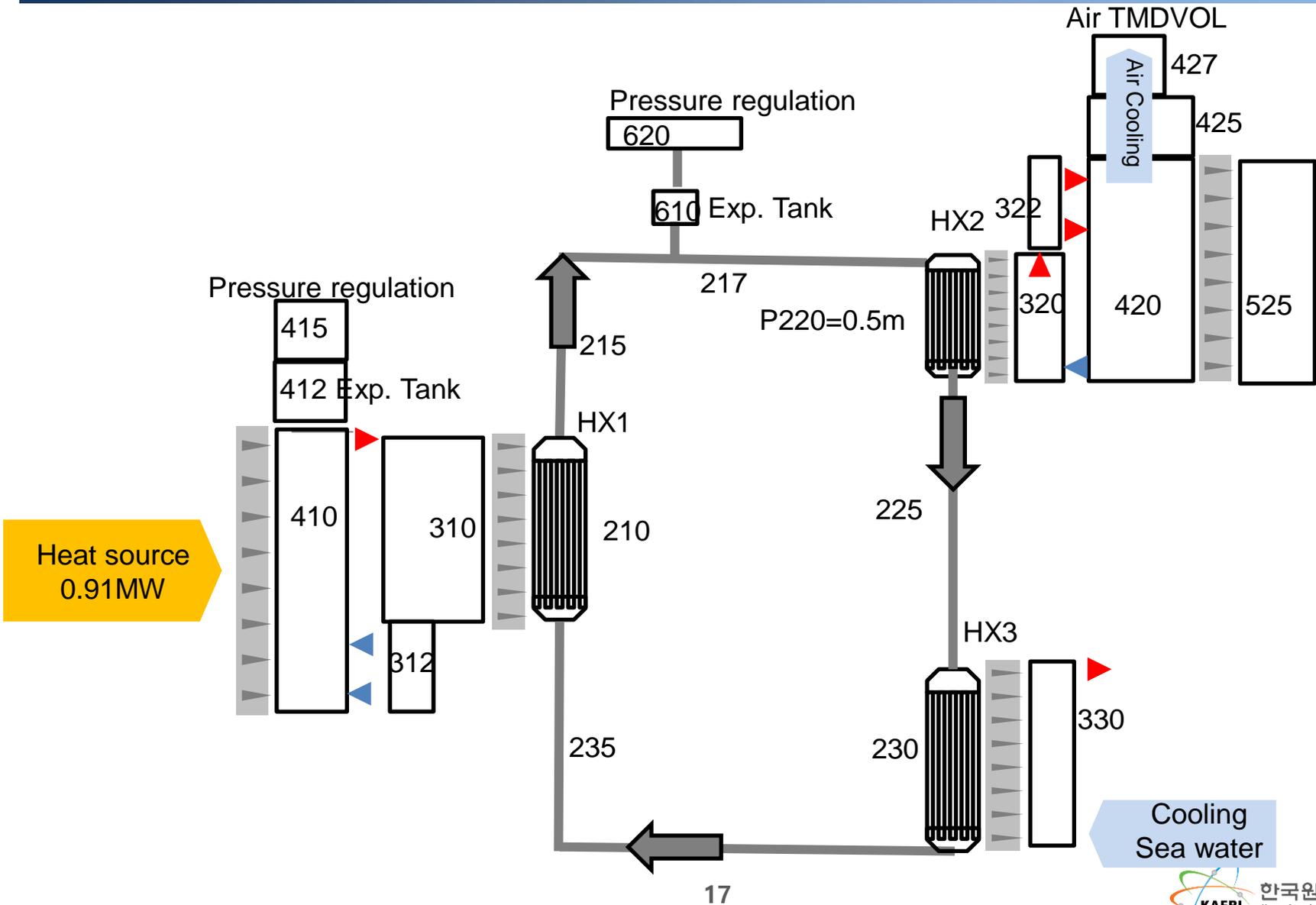


- 열원
 - ✓ 열유속 0.91MW 외벽냉각풀 가열
 - ✓ 냉각 저장조 *사이즈 / 2X2X2.5m*
- 열침원
 - ✓ 공냉수 (T=25C), 바닷물 (T=25C)

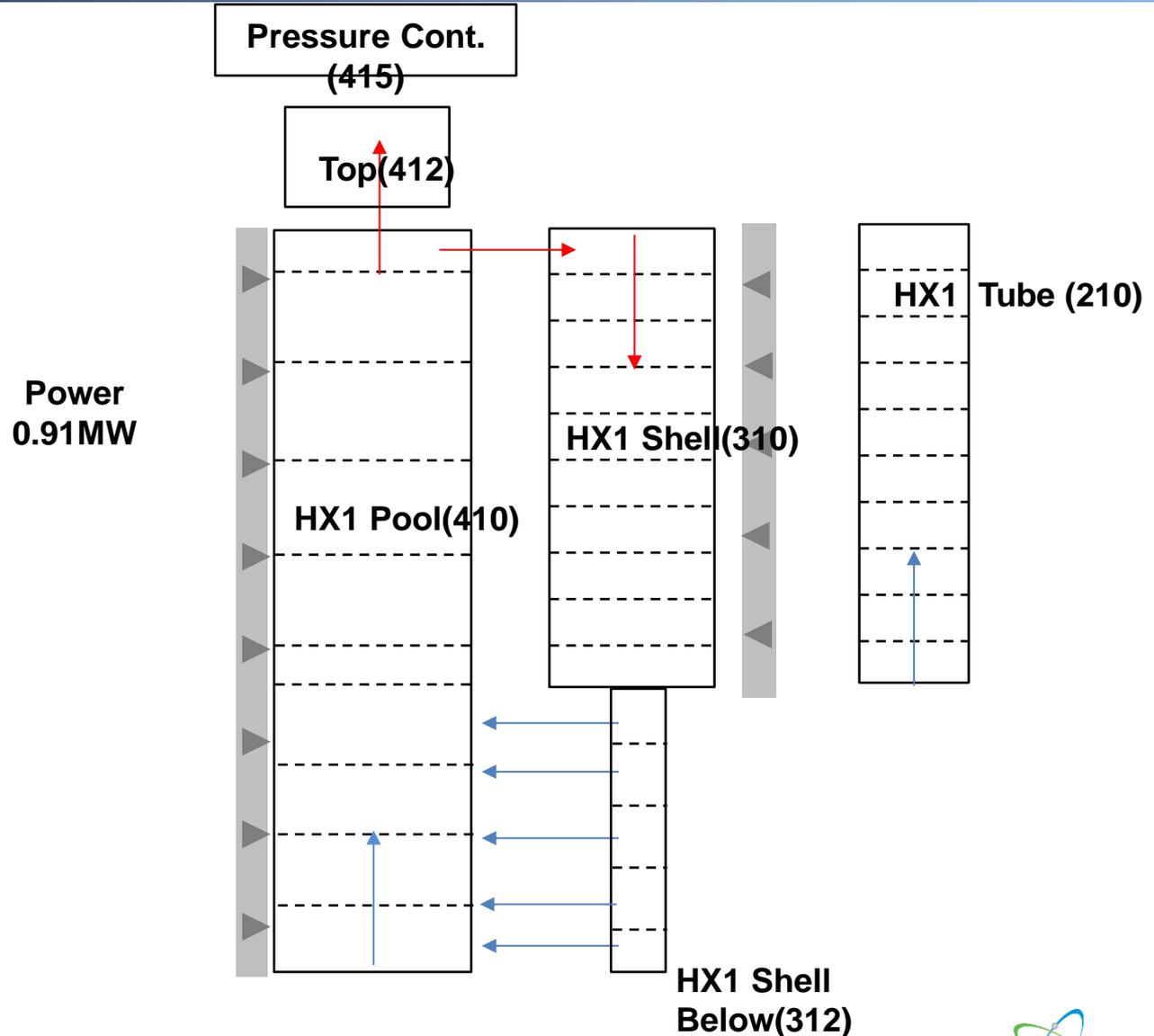
외벽냉각계통 열교환기 사이즈 설계

	HX1	HX2	HX3
Tube Area Tot	0.31416	0.00707	0.78540
Dh_tube	0.020	0.030	0.010
R	0.01	0.015	0.005
Tube #	1000	10	10000
Node #	10	10	10
L node	0.1	0.1	0.1
L total	1.0	1.0	1.0
Slope (Deg)	90	90	90
H node (m)	0.10	0.10	0.10
H total (m)	1.0	1.0	1.0
P/D	1.50	1.50	2.50
Area 1ea	0.000314	0.000707	0.000079
Shell Area Tot	0.4653	0.0105	4.6273
Dh_shell	0.030	0.044	0.059
H node	0.10	0.10	0.10

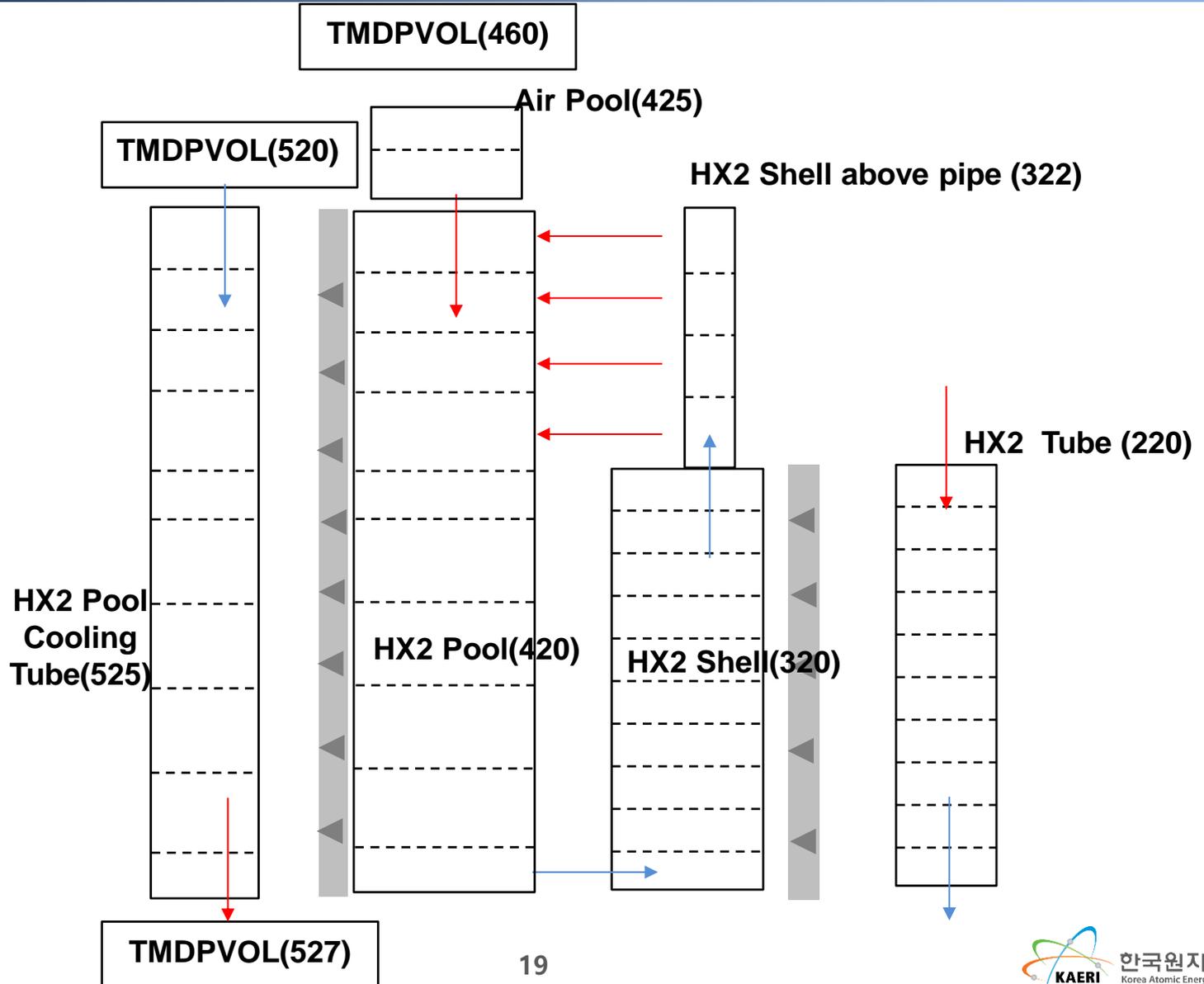
외벽냉각계통 MARS 코드 입력 작성



고온열교환기 격자

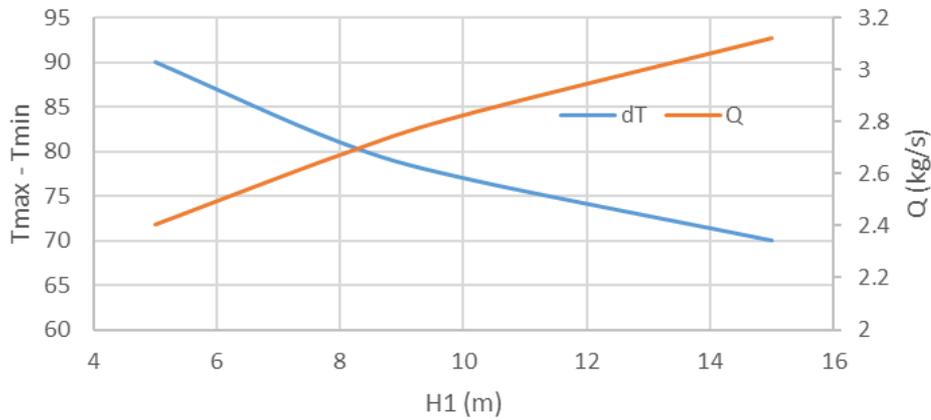


상부 저온열교환기 격자

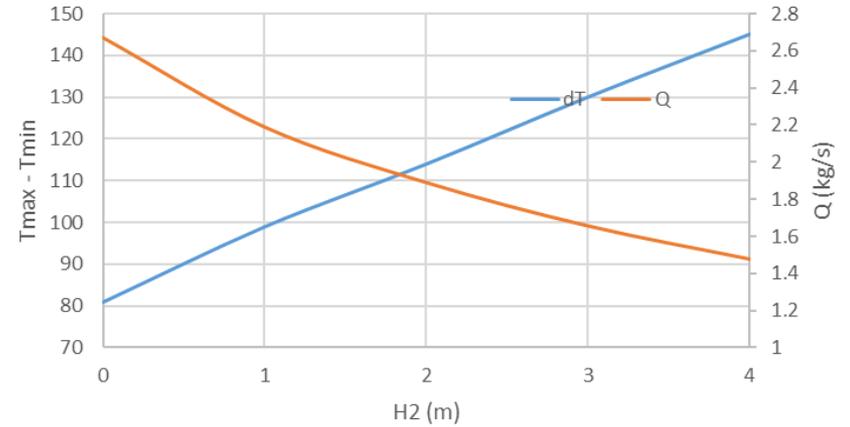


민감도 분석 계산결과

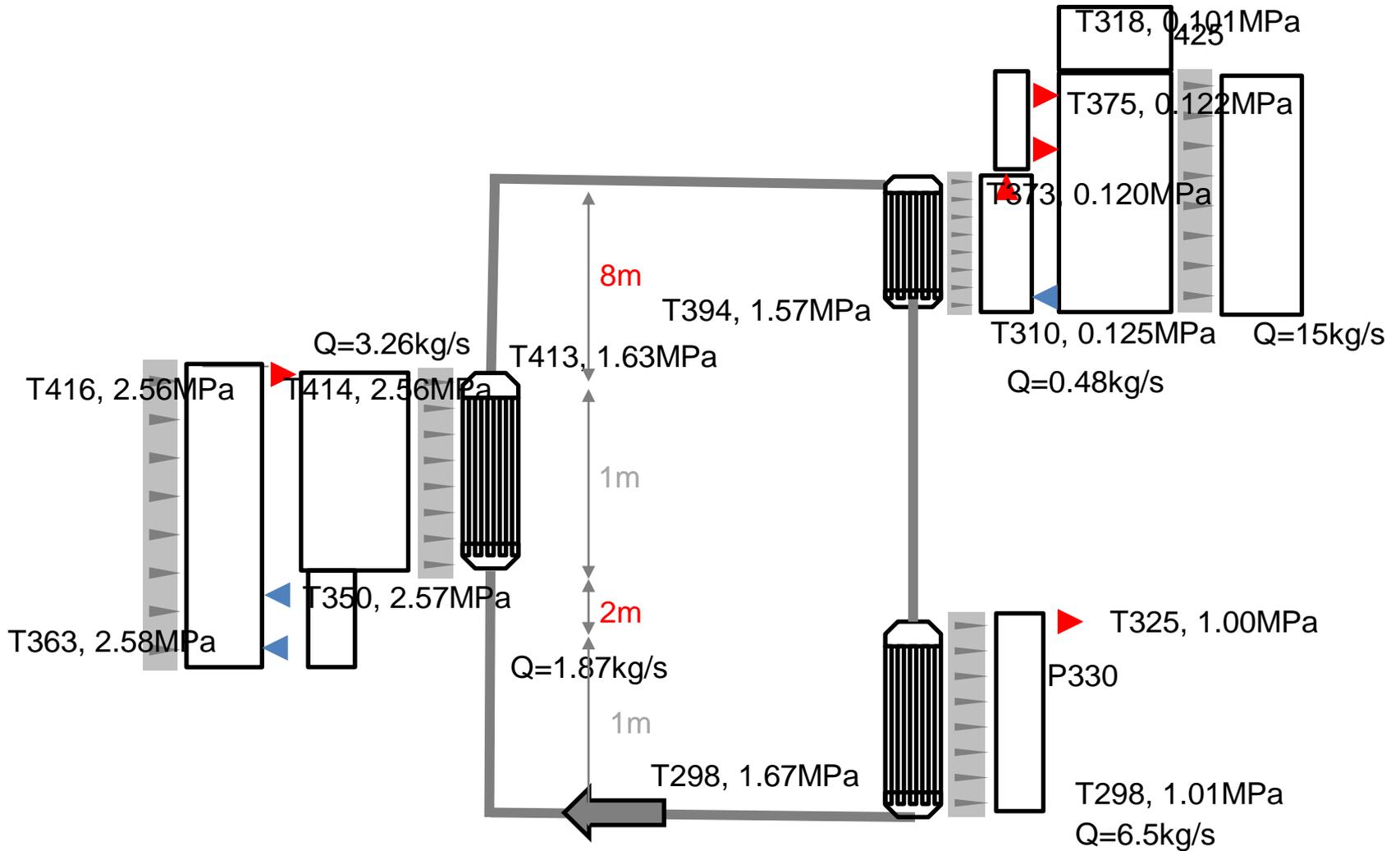
H1 변화에 따른 온도 및 유량



H2 변화에 따른 온도 및 유량

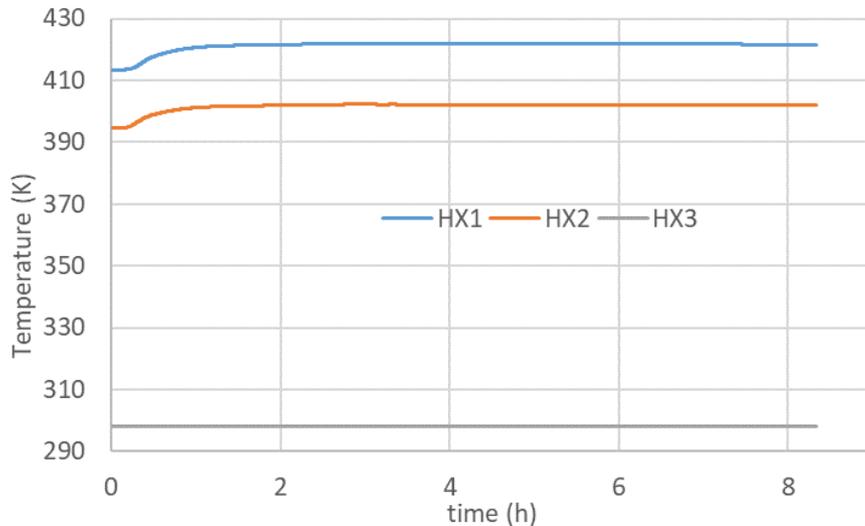


최적 사이즈 정상상태 성능해석 결과

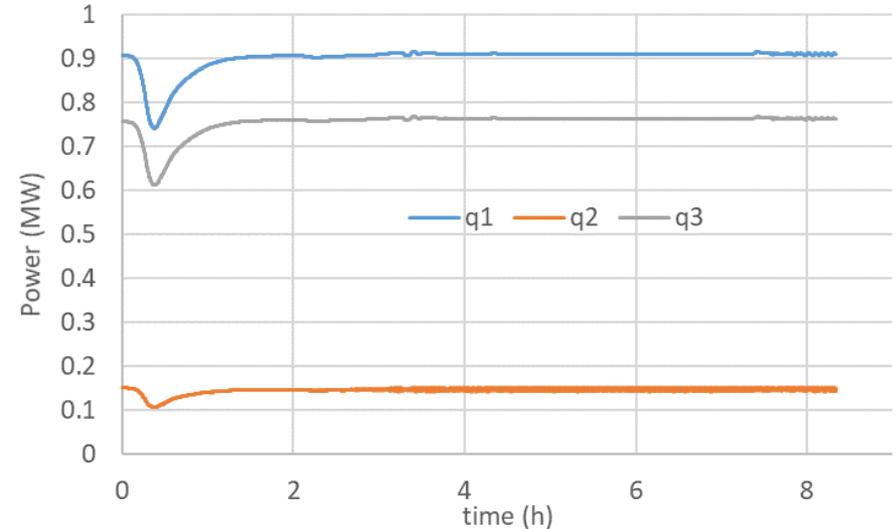


최적 사이즈 적용 과도상태 계산결과

HX1, HX2, HX3 튜부 출측 온도



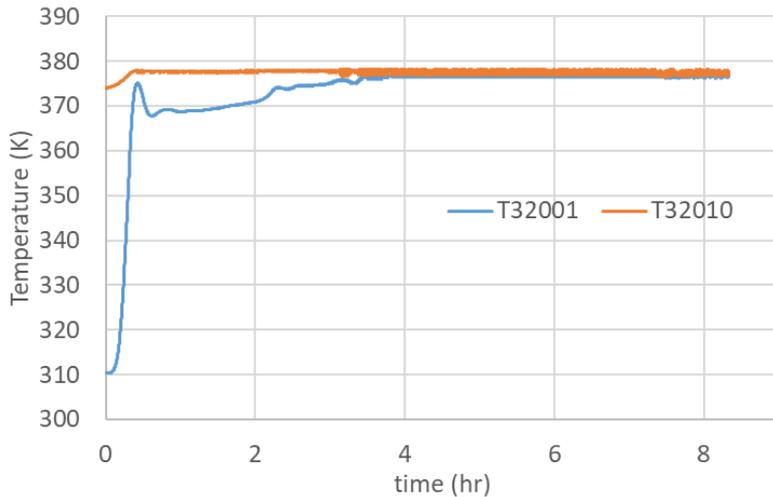
HX1, HX2, HX3의 열출력



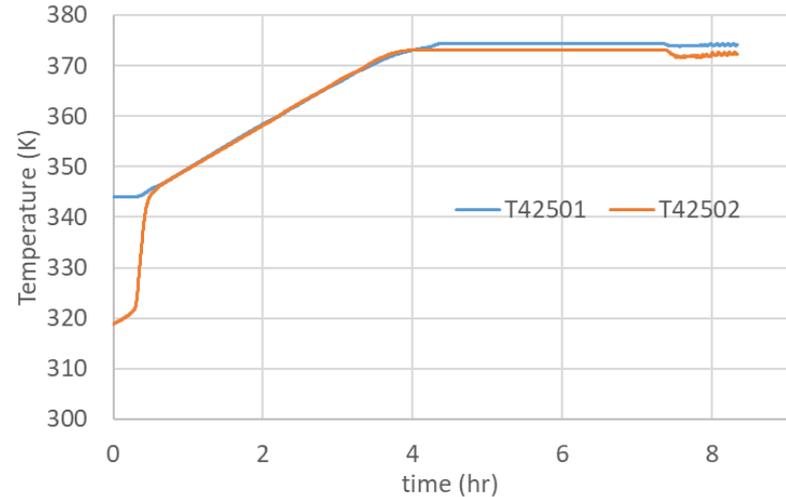
- ✓ 상부냉각탱크 냉각능력 감소로 인해 과도 시작 후 HX1, HX2 열교환기 후단 온도 상승
- ✓ 열출력 급격히 하락 후 정상 값 회복
- ✓ 열출력 회복은 하부 저온열교환기 열출력 증가 및 상부열교환기 열출력 회복에 기인
- ✓ HX2 열출력 회복값은 정상 값 대비 작고, 이를 HX3 열출력 증가가 만회

최적 사이즈 적용 과도상태 결과

상부열교환기 쉘측 온도



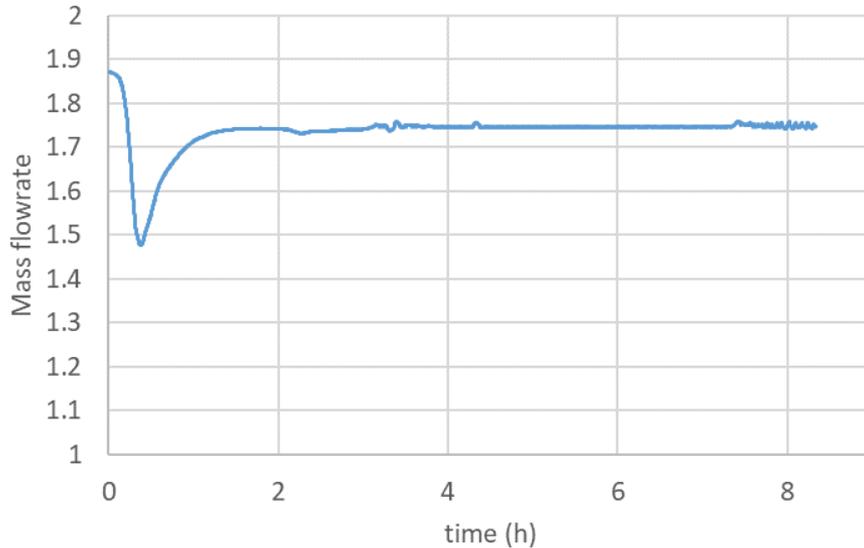
상부냉각탱크 최 상단 온도



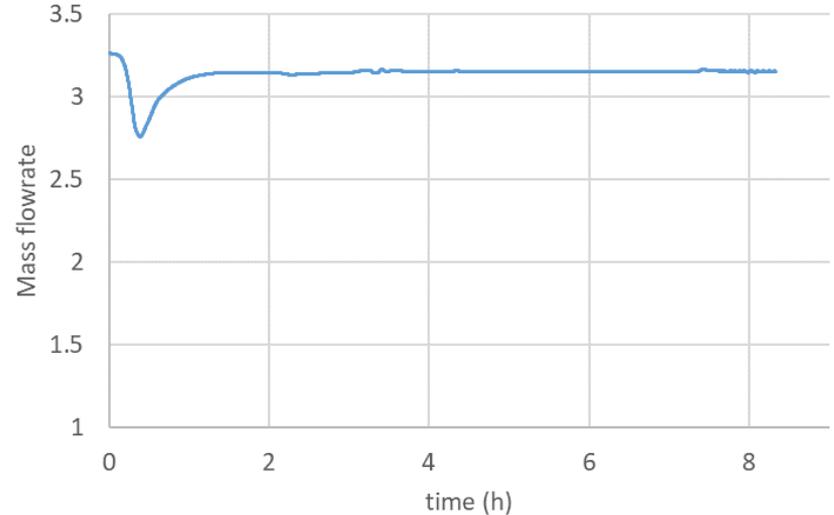
- ✓ 상부냉각탱크 냉각 불과로 인해 과도 시작과 동시에 온도 상승, 약 4시간 후 비등
- ✓ 열교환기 쉘 입구 온도 급격히 상승하여 약 30분 후 비등

최적 사이즈 적용 과도상태 계산결과

메인 루프 유량



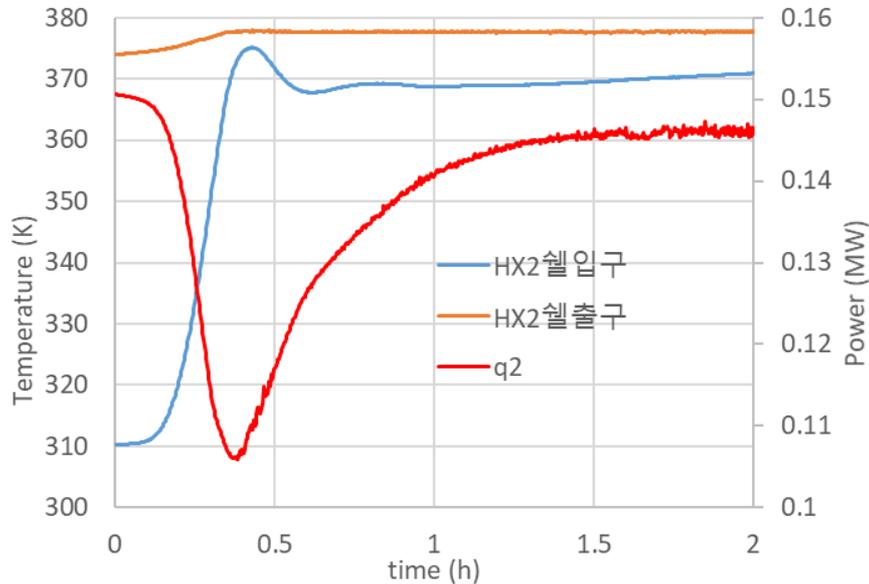
고온열교환기 쉘측 유량



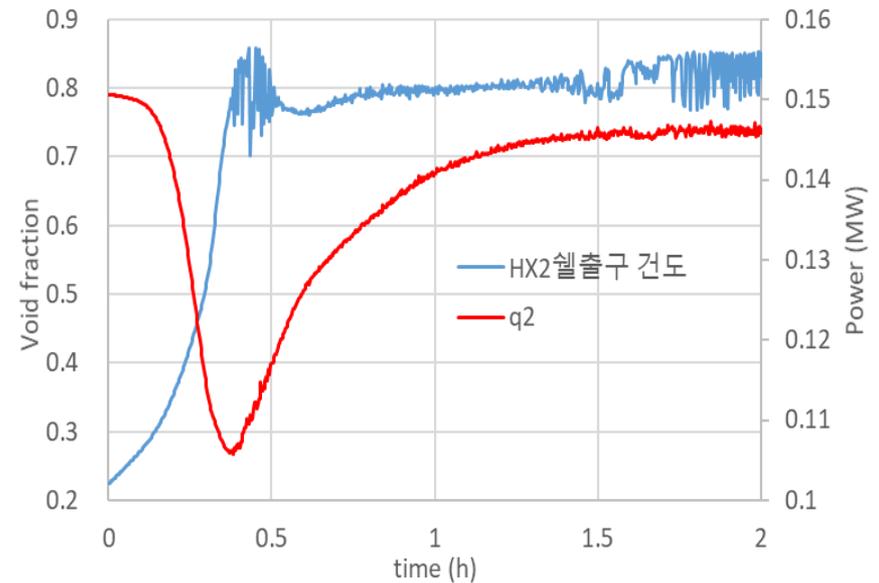
- ✓ 과도 시작 후 메인루프, 고온열교환기 쉘측 유량 급격히 감소 후 회복

최적 사이즈 적용 과도상태 계산결과

상부열교환기 쉘 온도 및 열출력

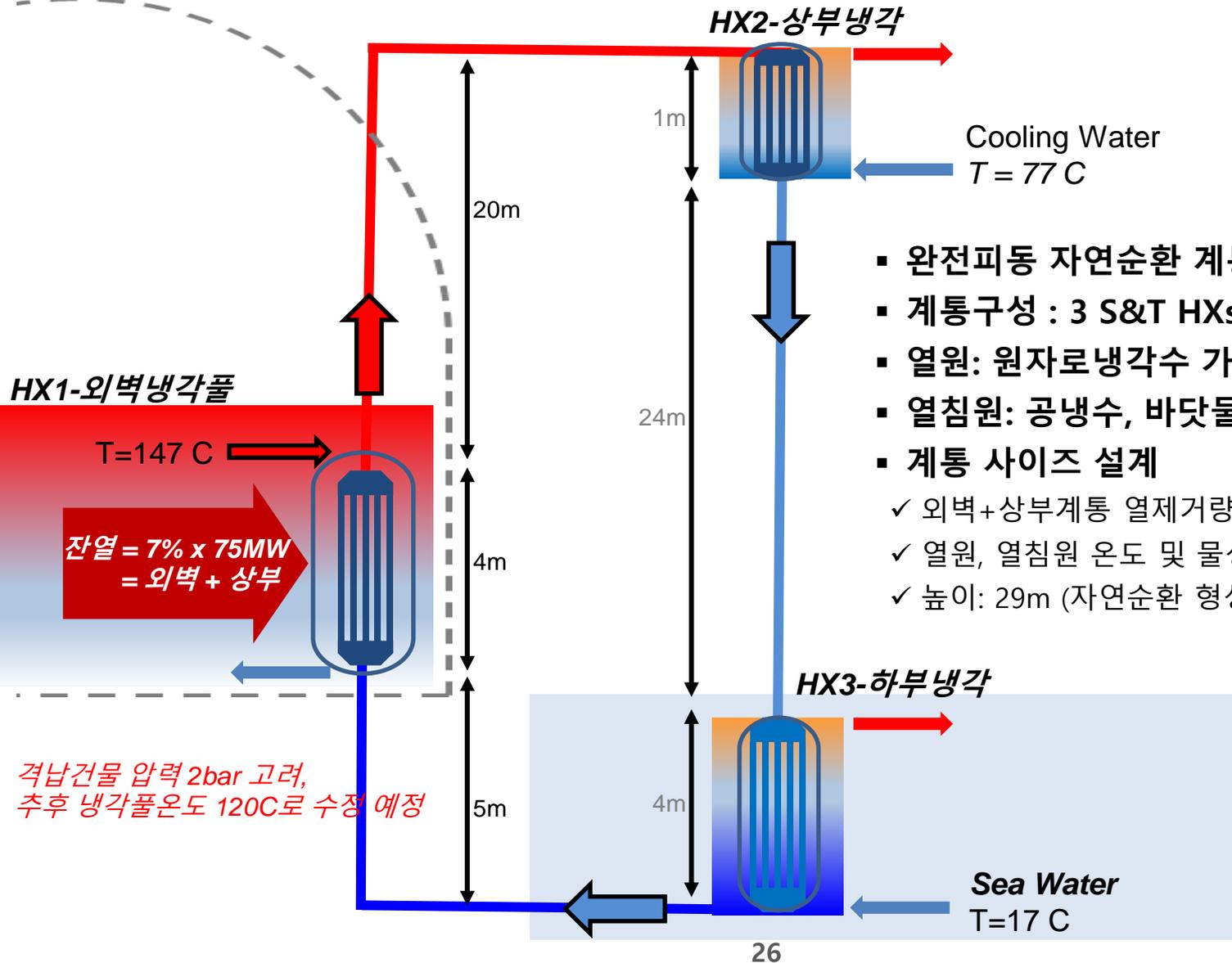


상부열교환기 쉘 건도 및 열출력



- ✓ 상부열교환기 쉘 입구온도 증가, 약 30분 후 비등점 도달
- ✓ 쉘측 출구온도는 초기 값이 비등점에 근접해있어 증가 폭 작아, 입구와 출구 온도차는 입구 온도 상승에 따라 감소
- ✓ 입구, 출구 온도 차이 감소에도 불구하고 쉘 내부 비등 발생에 의한 열전달 증가로 약 0.5시간 시점부터 열출력 증가

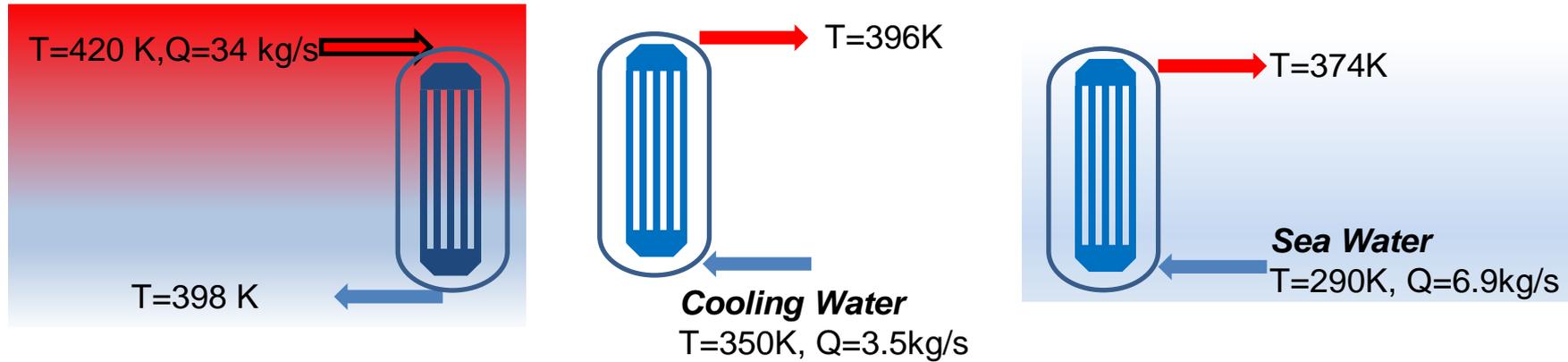
외벽냉각계통 계통구성 / 개념설계



- 완전피동 자연순환 계통구성
- 계통구성 : 3 S&T HXs
- 열원: 원자로냉각수 가열 외벽냉각풀
- 열침원: 공냉수, 바닷물
- 계통 사이즈 설계
 - ✓ 외벽+상부계통 열제거량 = 잔열 = $7\% \times 75\text{MW}$
 - ✓ 열원, 열침원 온도 및 물성 가정 (추후 수정)
 - ✓ 높이: 29m (자연순환 형성 고려 default)

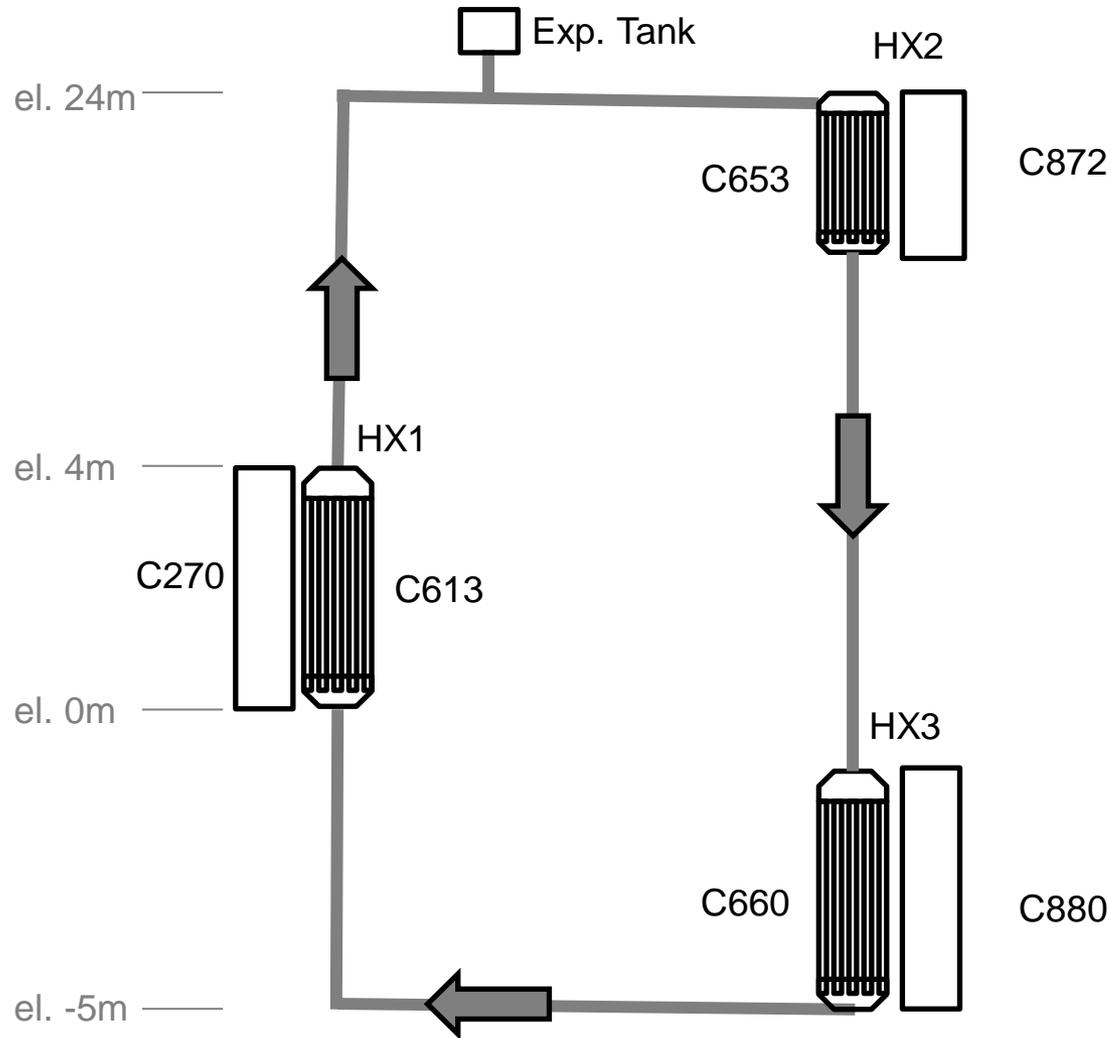
격납건물 압력 2bar 고려,
추후 냉각풀온도 120C로 수정 예정

외벽냉각계통 열교환기 사이즈 설계

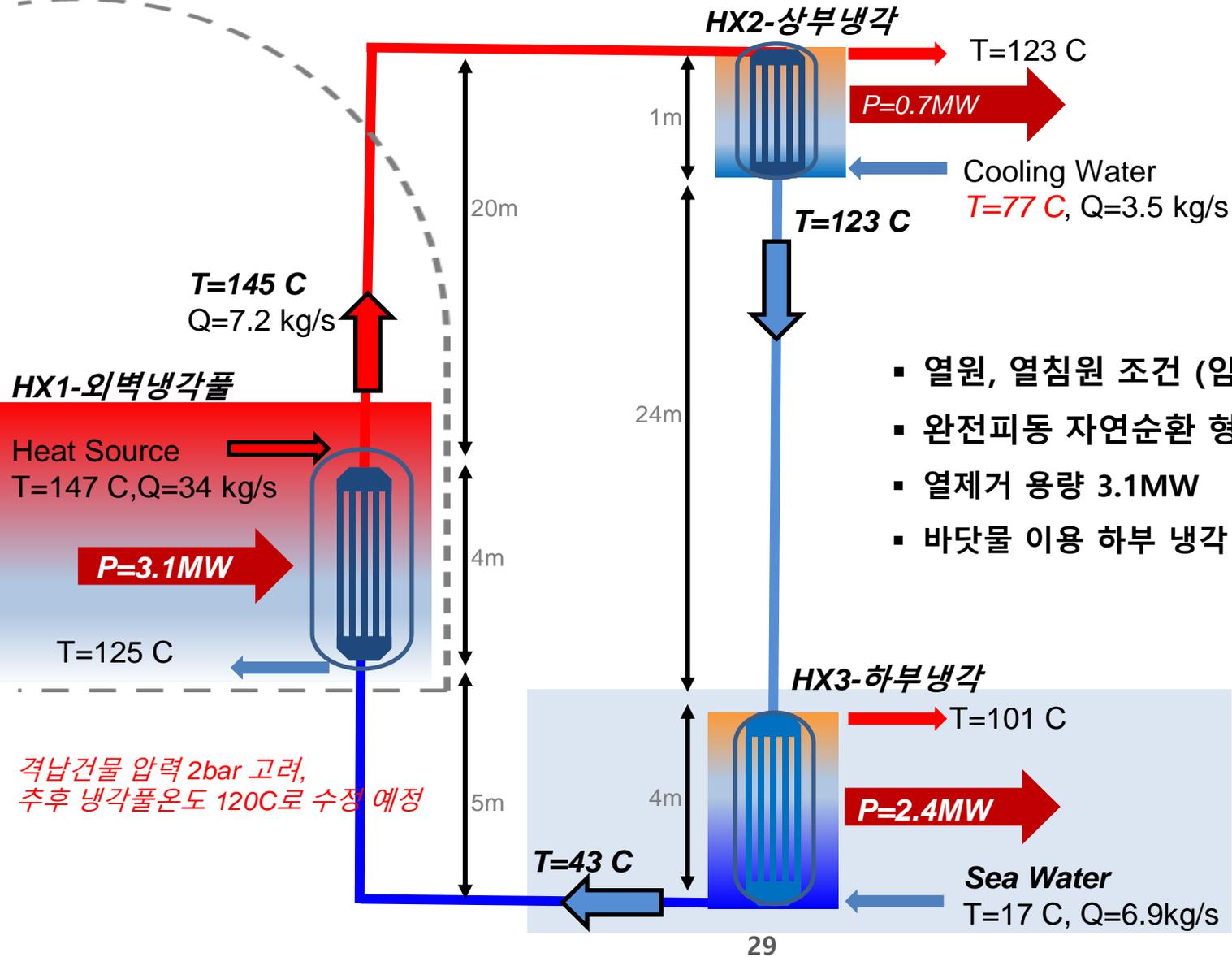


	HX1	HX2	HX3
전열관 내경/외경, mm	25.2 / 27.2	25.2 / 27.2	25.2 / 27.2
전열관 개수	100	10	100
전열관 길이, m	4	1	4
Tube 측 유량, kg/s	7.2	7.2	7.2
Tube 측 유로면적, m ²	0.05	0.005	0.05
Shell 측 유량, kg/s	34	3.5	6.9
Shell 측 유로면적, m ²	0.025	0.0025	0.025
Shell 측 수력직경, m	0.03737	0.03737	0.03737
P/D	1.5	1.5	1.5

외벽냉각계통 MARS 코드 입력 작성



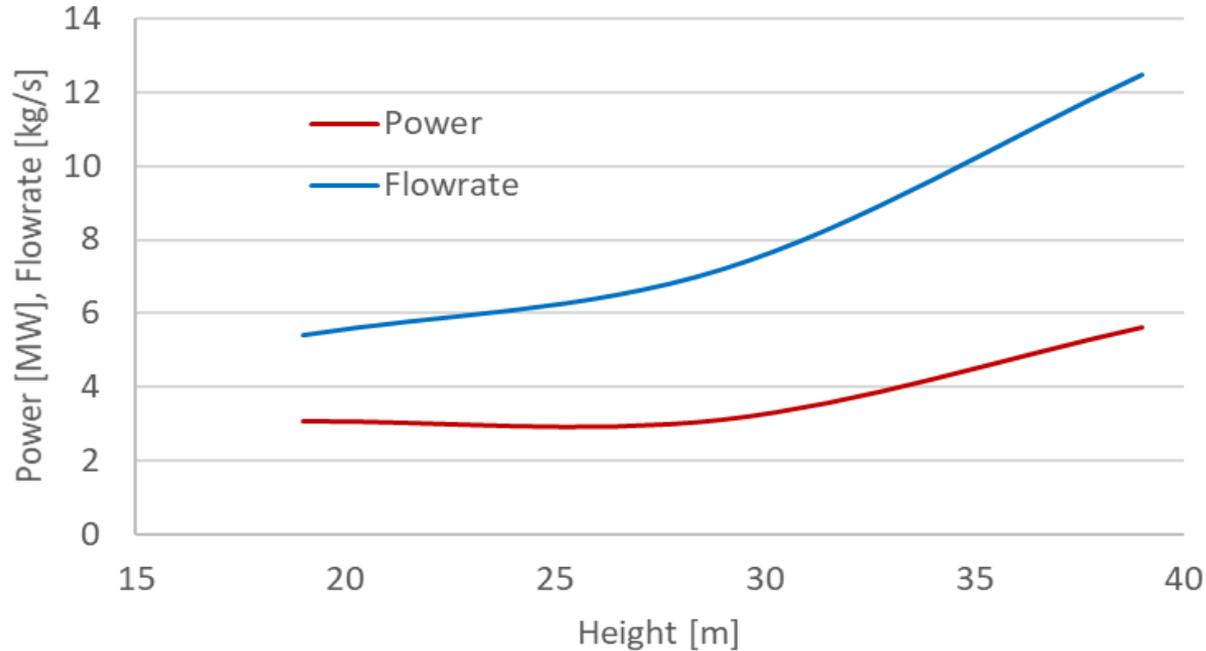
외벽냉각계통 MARS 해석



- 열원, 열침원 조건 (임의 설정, 향후 수정)
- 완전피동 자연순환 형성
- 열제거 용량 3.1MW
- 바닷물 이용 하부 냉각 우수

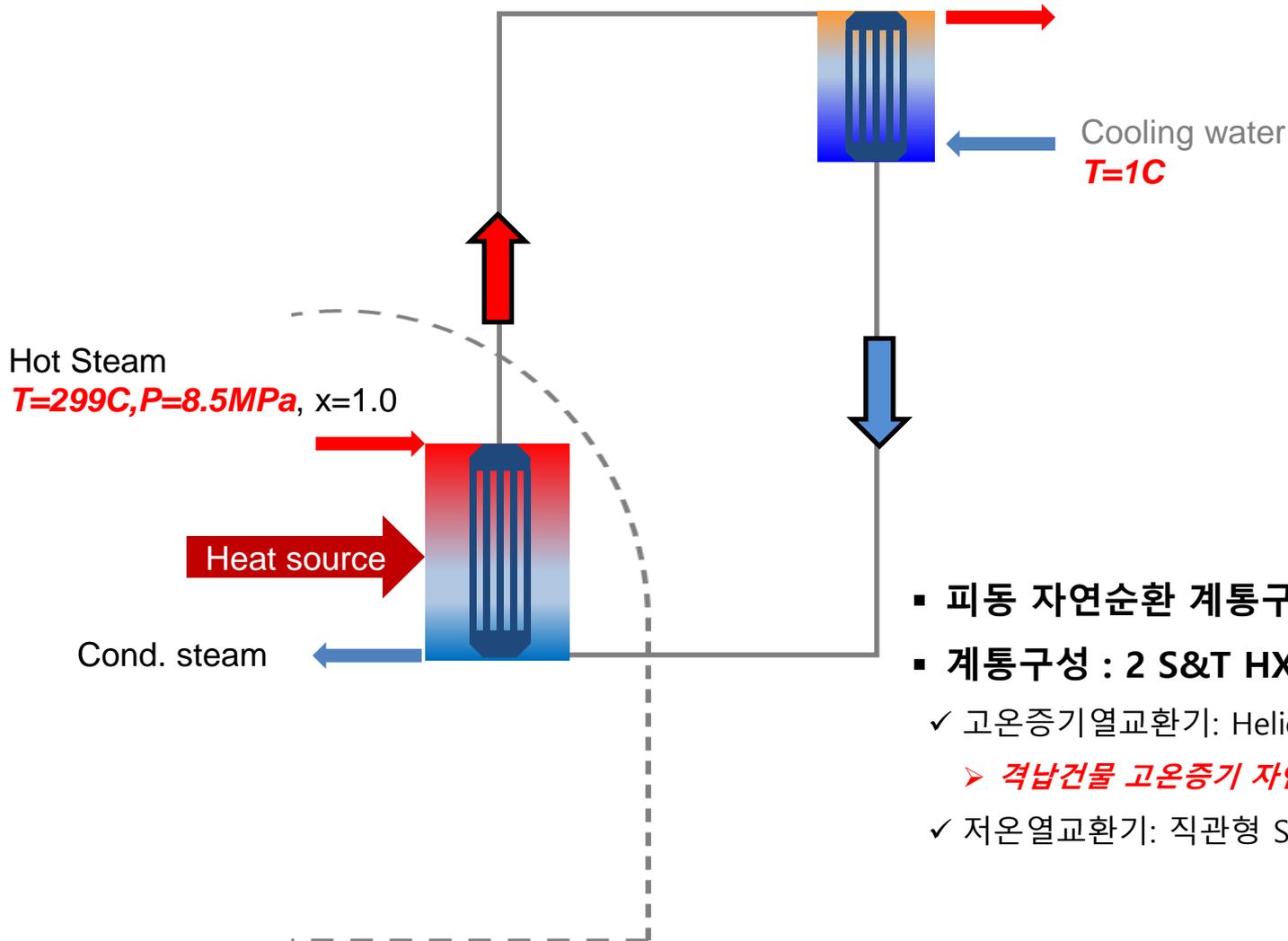
외벽냉각계통 민감도분석

계통 높이 \propto 열제거량 & 자연순환유량



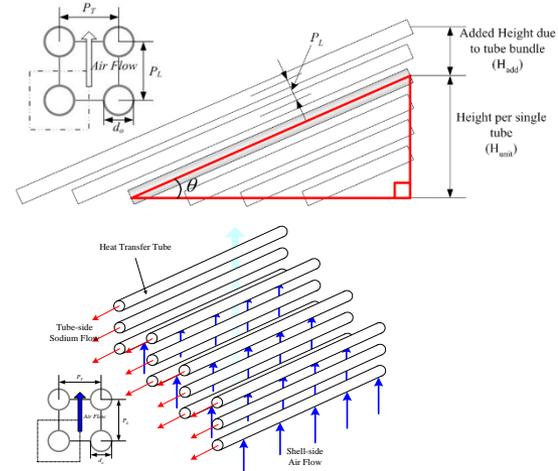
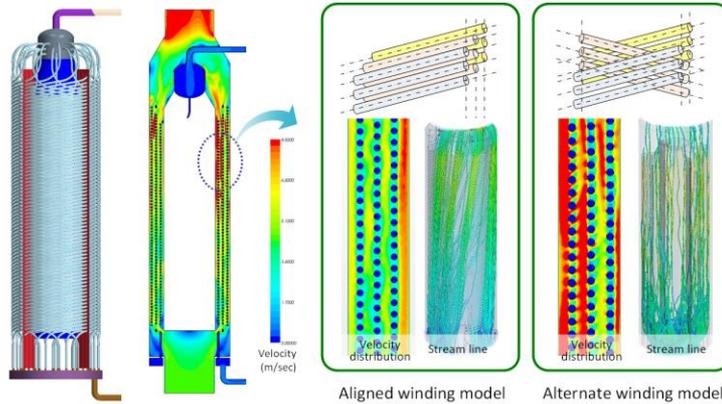
계통 높이	열제거량 (MW)	자연순환 유량 (kg/s)
19	3.06	5.4
29	3.10	7.2
39	5.6	12.5

상부냉각계통 계통구성 / 개념설계



- 피동 자연순환 계통구성
- 계통구성 : 2 S&T HXs
 - ✓ 고온증기열교환기: Helical tube
 - 격납건물 고온증기 자연순환 응축냉각 구현
 - ✓ 저온열교환기: 직관형 S&T type

상부냉각계통 고온증기열교환기 상사설계



증기냉각 고온열교환기 설계

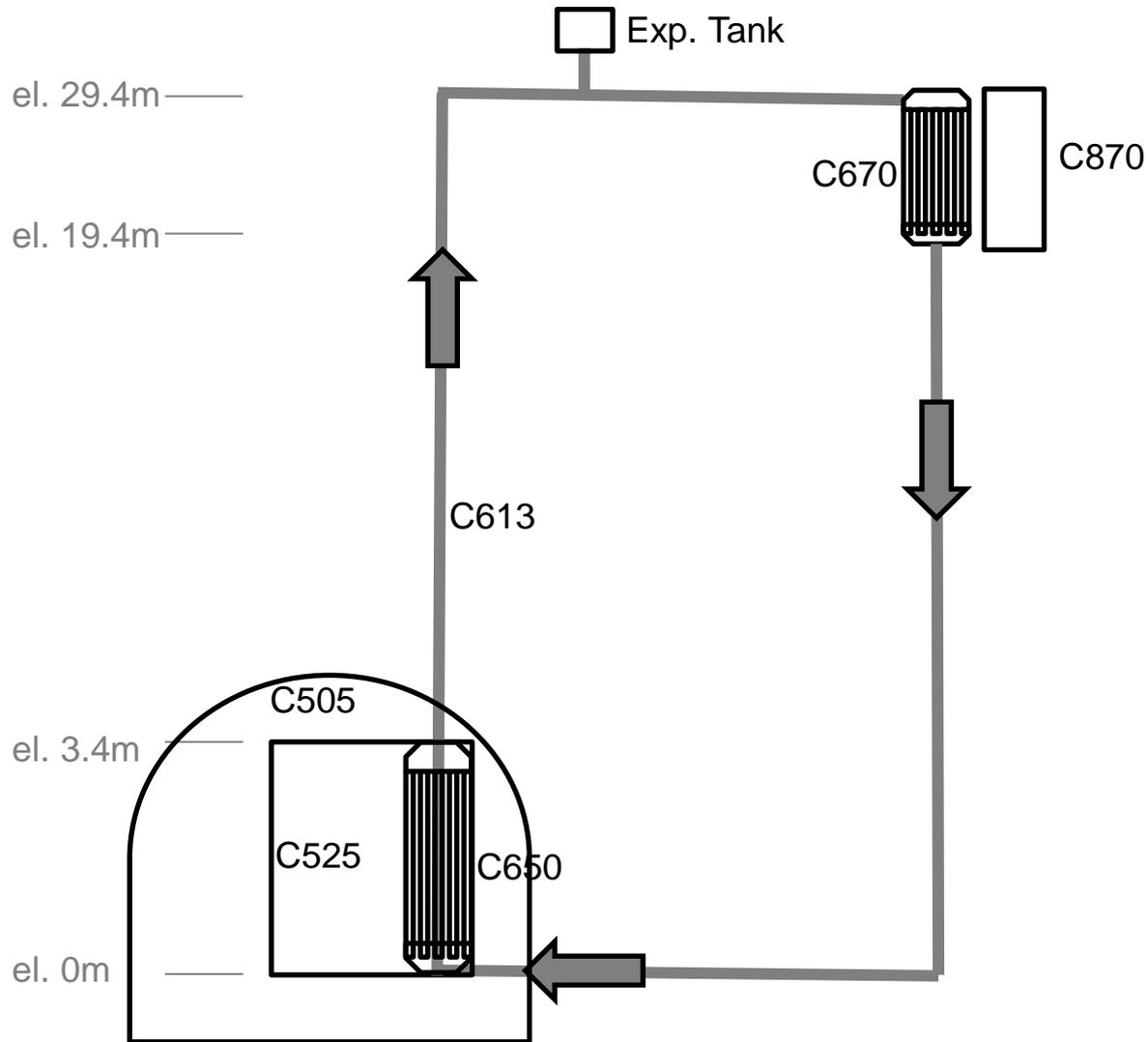
- SFR 헬리컬타입 소듐-공기 잔열제거열교환기 설계자료 기반 상사설계
- Source: SFR-513-DF-302-001

격납용기 증기 냉각: 고온 증기 (x=1.0) → 응축 증기 (x=0.2)

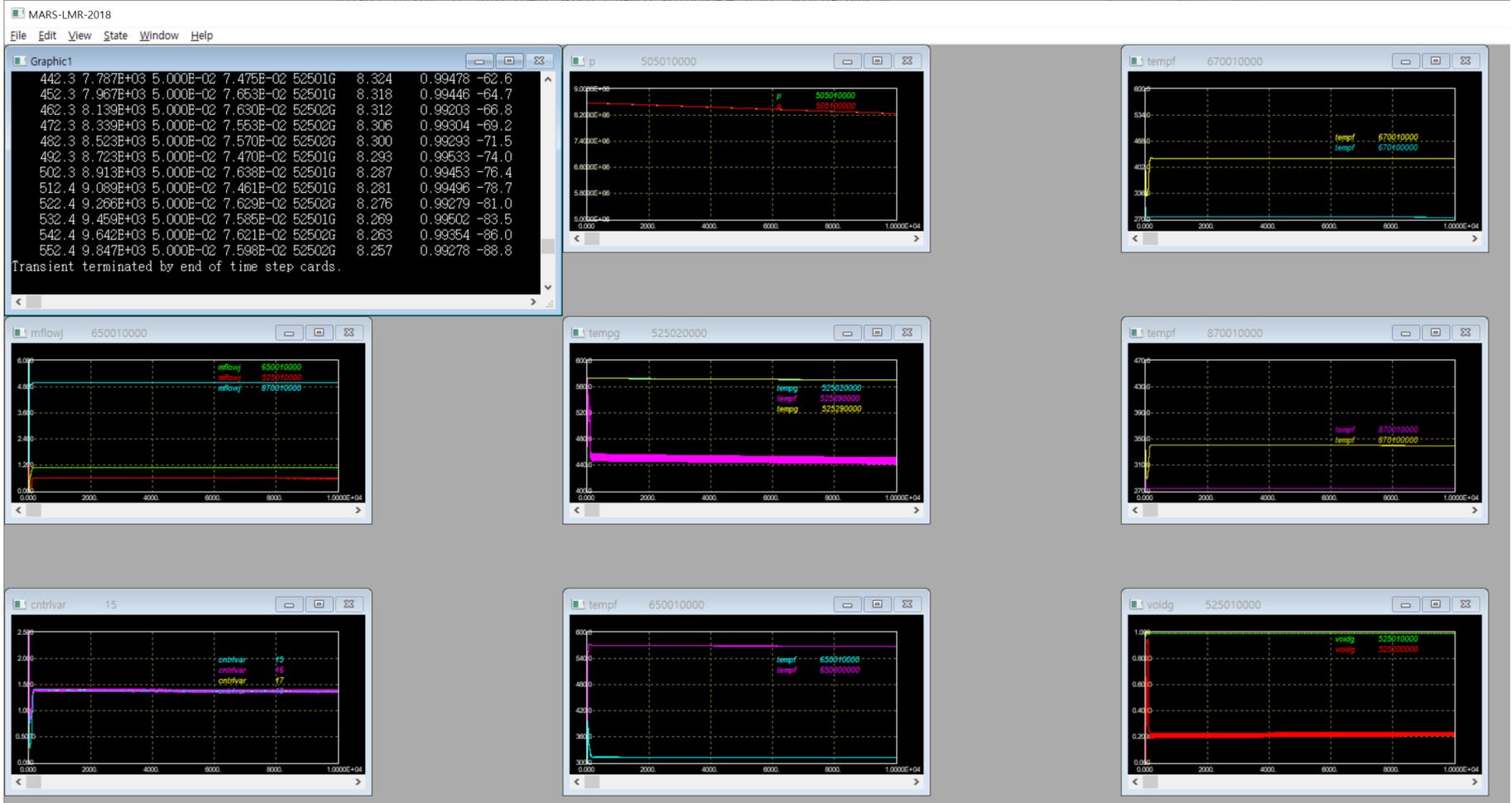
열제거량 = 1.4MW

	설계값
전열관 내경/외경, mm	3.0 / 4.0
전열관 개수	24
전열관 길이, m	19.8
Shell 측 유량, kg/s	0.6
Tube 측 유량, kg/s	1.1
Shell 측 유로면적, m ²	0.00892
Shell 측 수력직경, m	0.01327
Tube 측 유로면적, m ²	0.00173
P/D	1.5

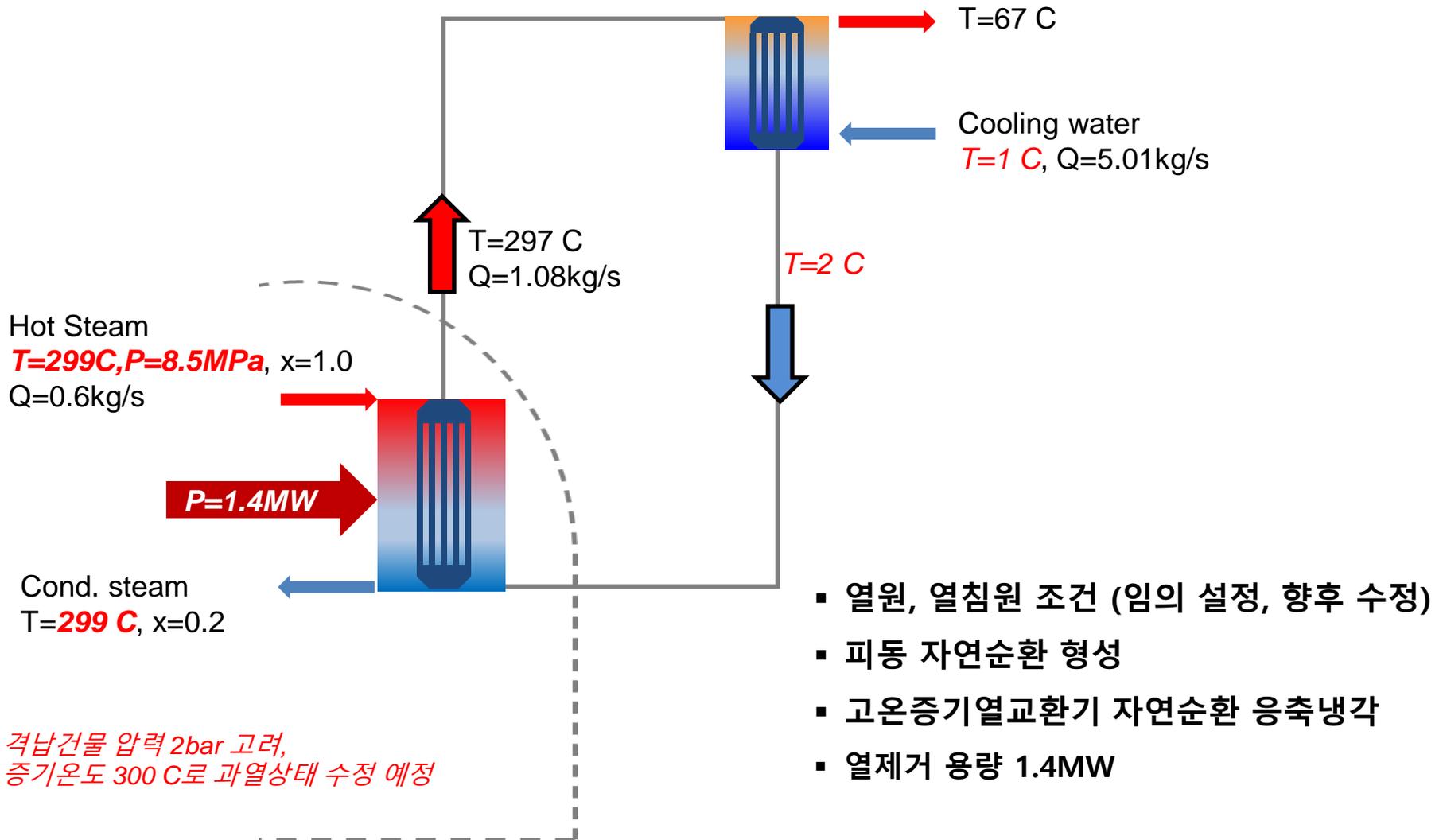
외벽냉각계통 개념설계 MARS 입력 작성



외벽냉각계통 MARS 해석



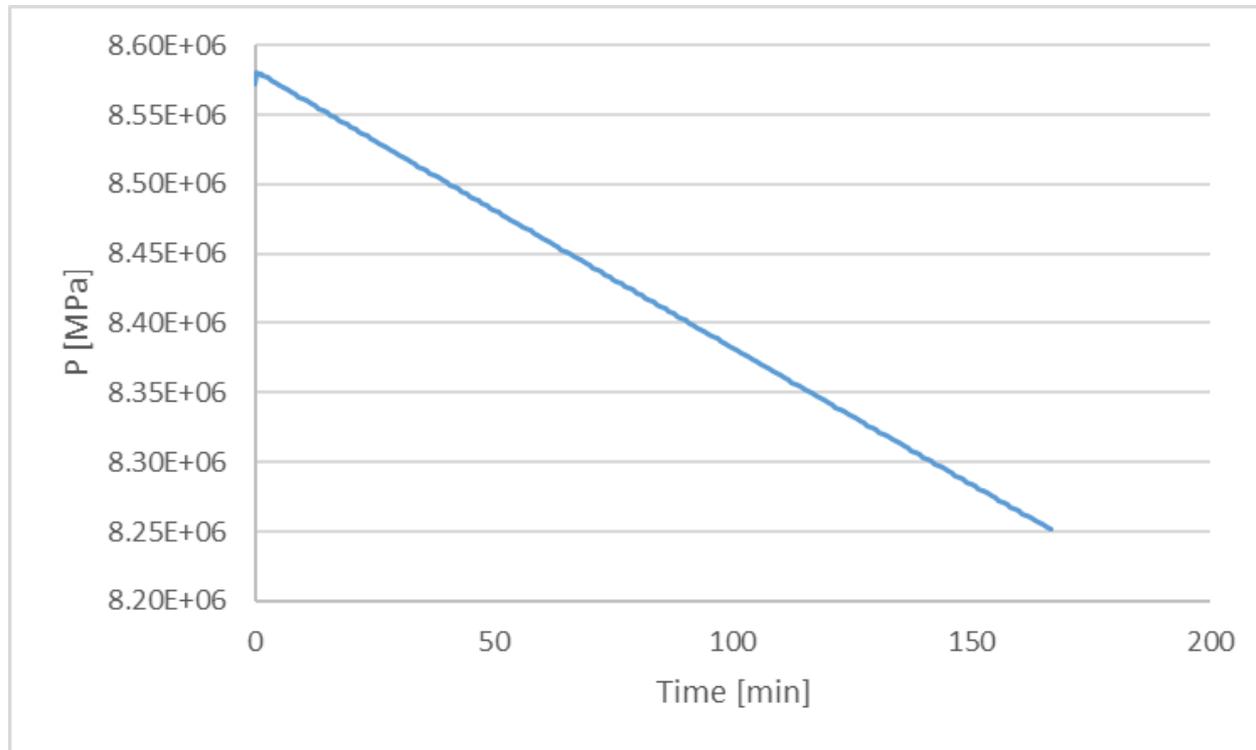
상부냉각계통 MARS 해석결과



- 열원, 열침원 조건 (임의 설정, 향후 수정)
- 피동 자연순환 형성
- 고온증기열교환기 자연순환 응축냉각
- 열제거 용량 1.4MW

상부냉각계통 MARS 해석결과

격납용기 압력감소



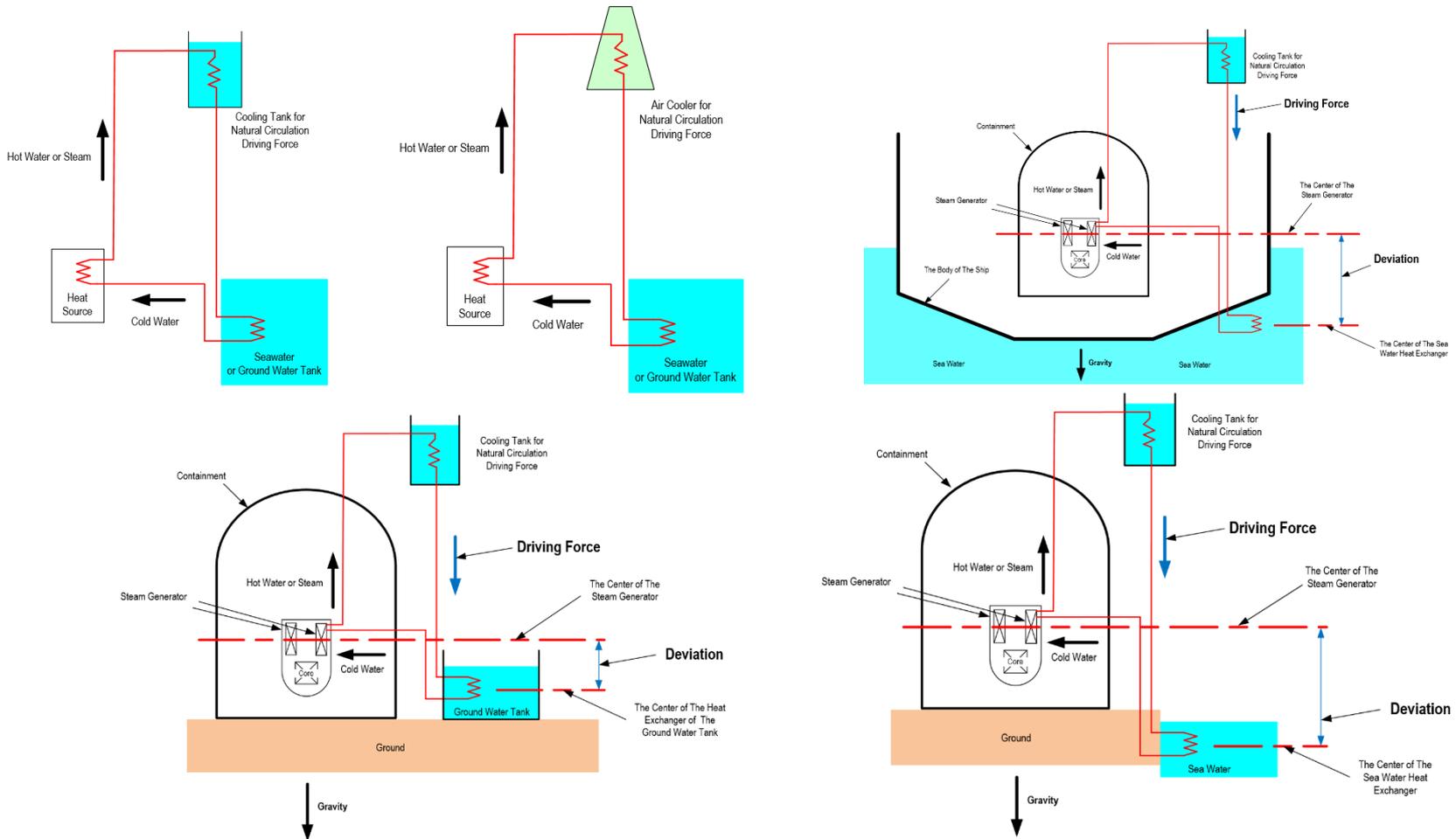
- 압력 감소율 = 0.118 MPa/h

결과 요약

- **외벽냉각계통 구성, 개념설계, MARS 모델링**
 - 완전피동 자연순환 계통구성 및 개념설계
 - 1차 개념설계 MARS 입력 작성 및 모델링
 - 최종 열침원 바닷물 적용에 따른 냉각성능 분석
- **상부냉각계통 구성, 개념설계, MARS 모델링**
 - 피동 자연순환 계통구성 및 개념설계
 - 고온 증기냉각 열교환기 상사설계
 - 1차 개념설계 MARS 입력 작성 및 MARS 모델링
 - 피동 냉각에 의한 격납용기 압력감소 분석
- **향후계획**
 - 원자로 작동조건 반영 계통 출력, 온도, 압력, 유량 변경
 - 증기응축 열교환기 개선을 위한 사양 변경 검토
 - 냉각재 및 열원 온도, 압력 값 적절성 검토 및 보완

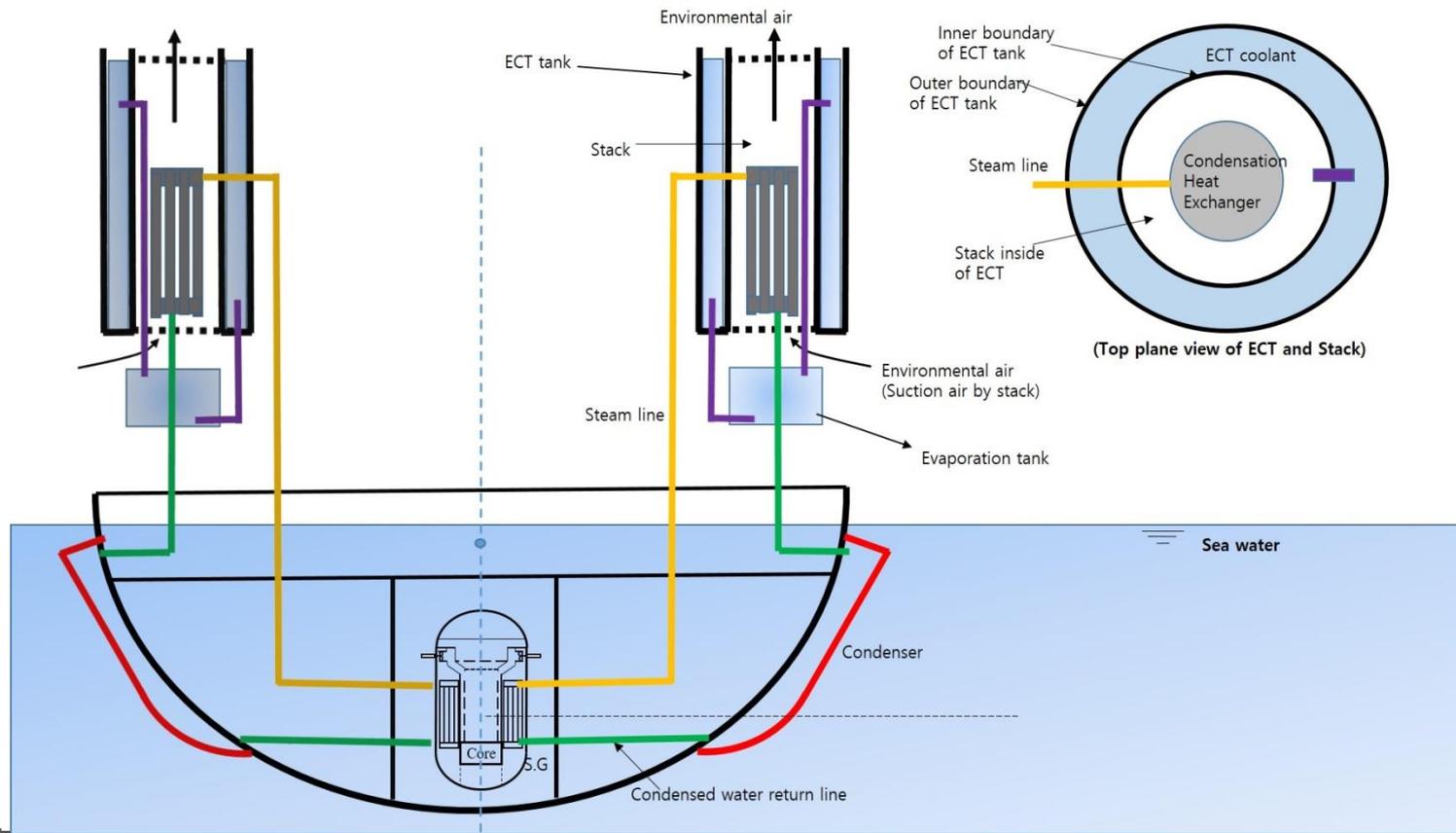
PRHRS with the Seawater Cooling

- 열원의 상부에 위치하는 피동냉각장치 구동력을 이용한 피동계통

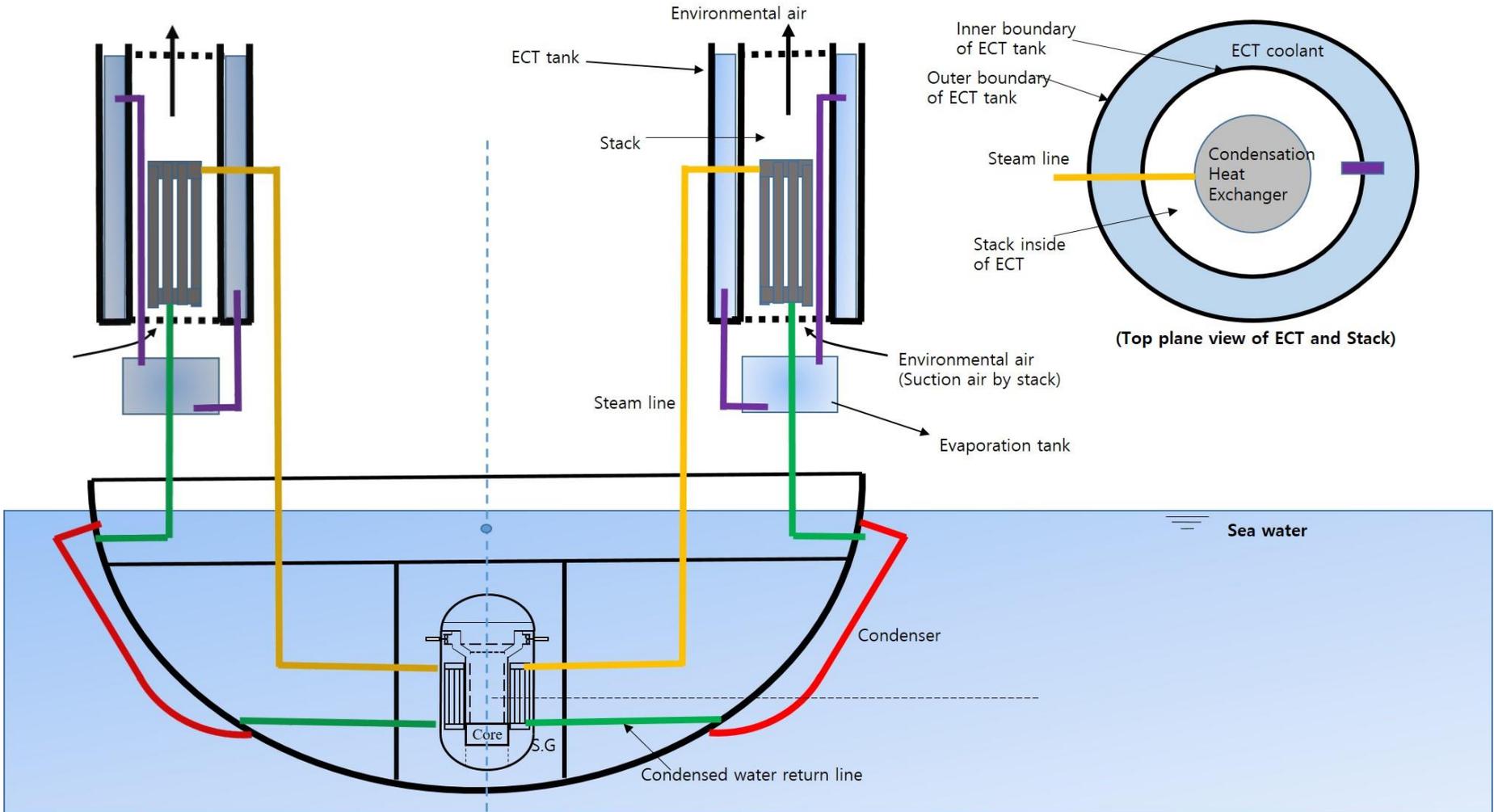


PRHRS with the Seawater Cooling

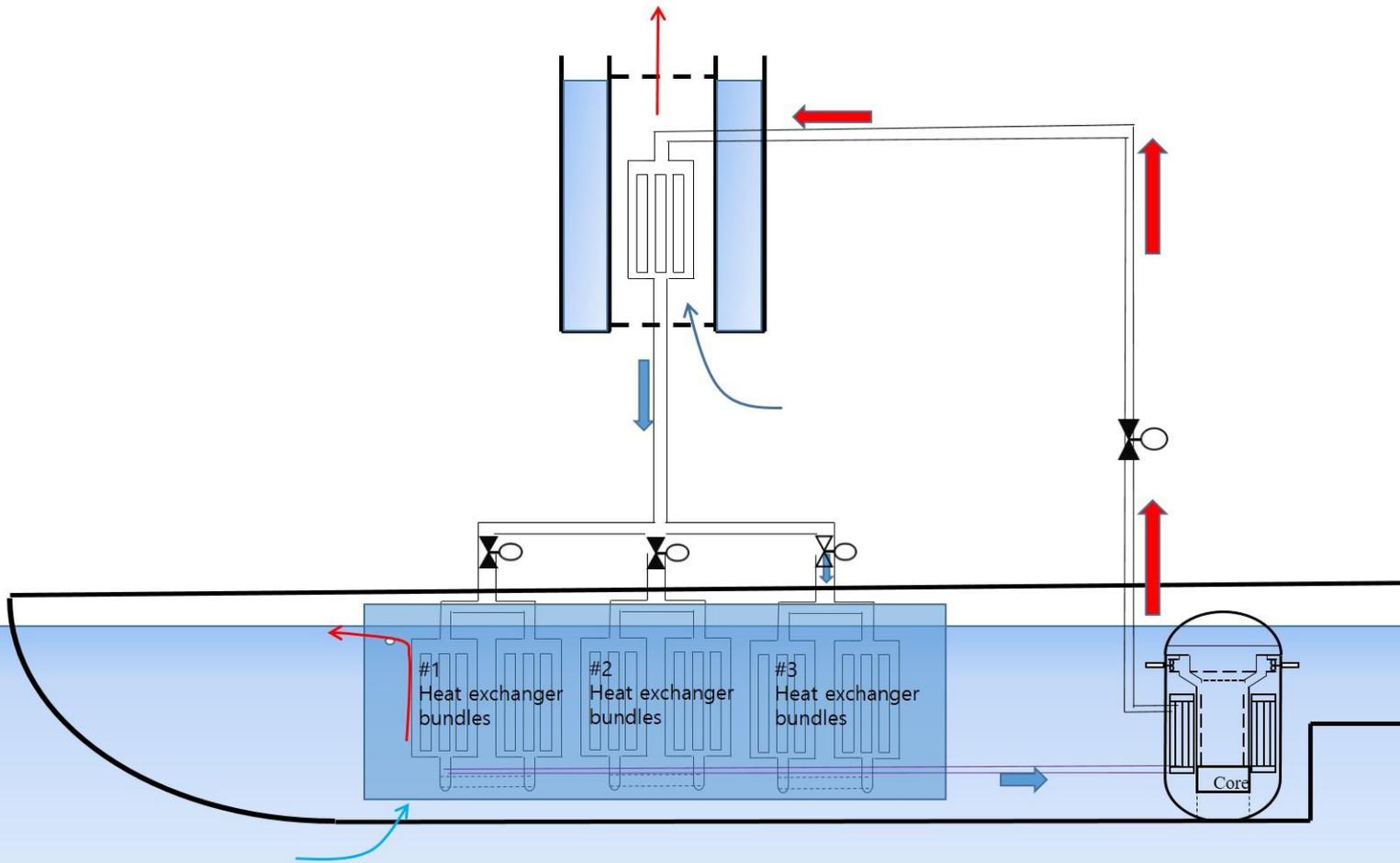
- ❖ SG-PRHRS Hybrid 모델 선박배치 정립
- ❖ 선박요소기술 관련 특허 출원 8건
- ❖ 원자로 출력에 따른 예비 사이즈 확정(진행중)



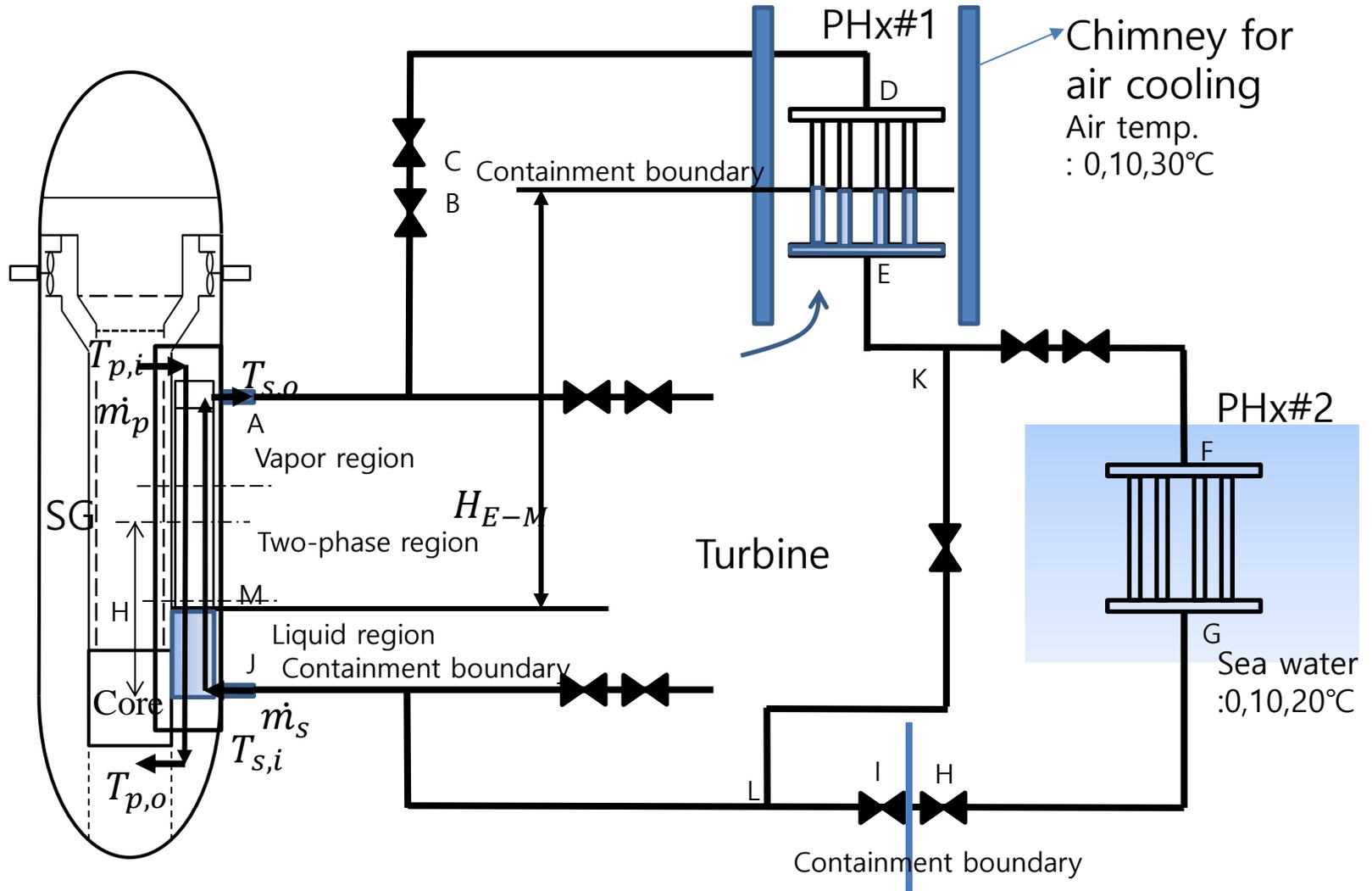
피동냉각계통 예비배치



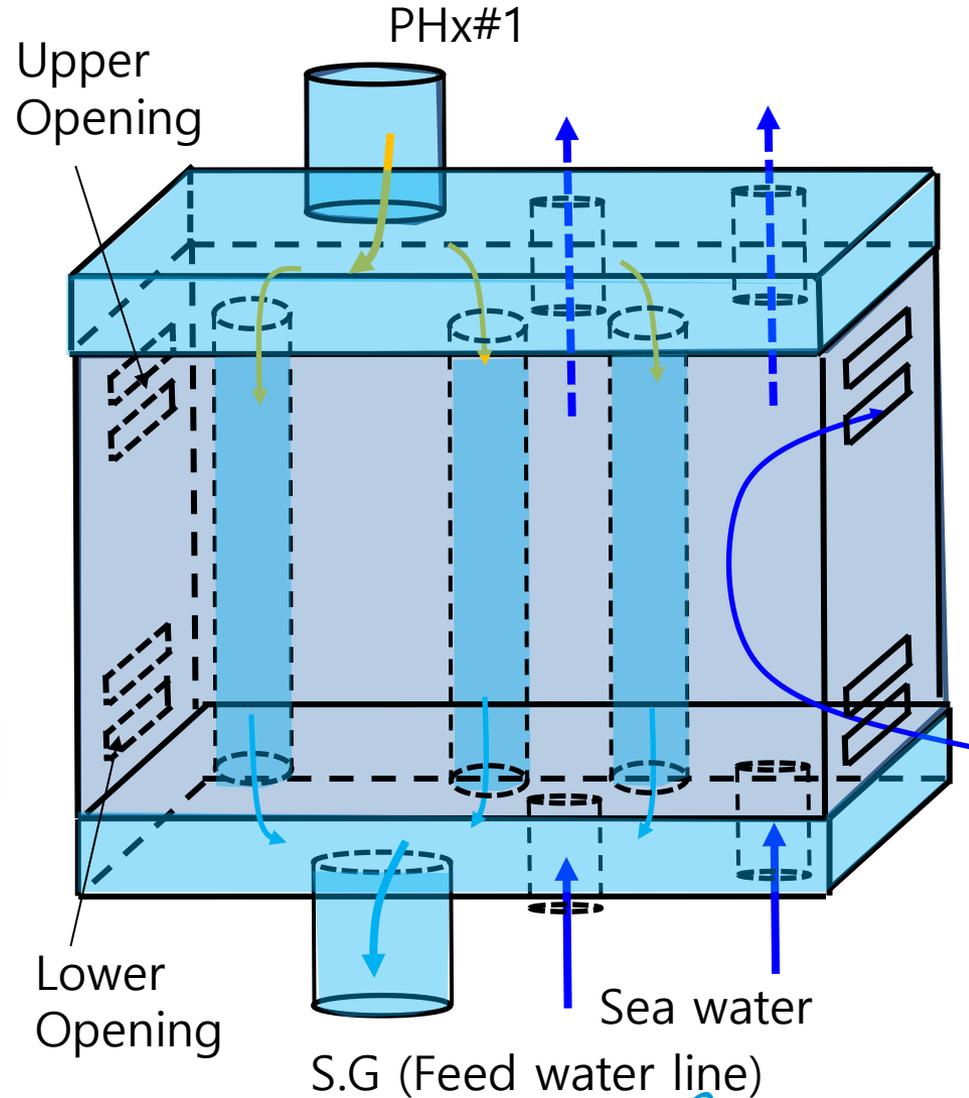
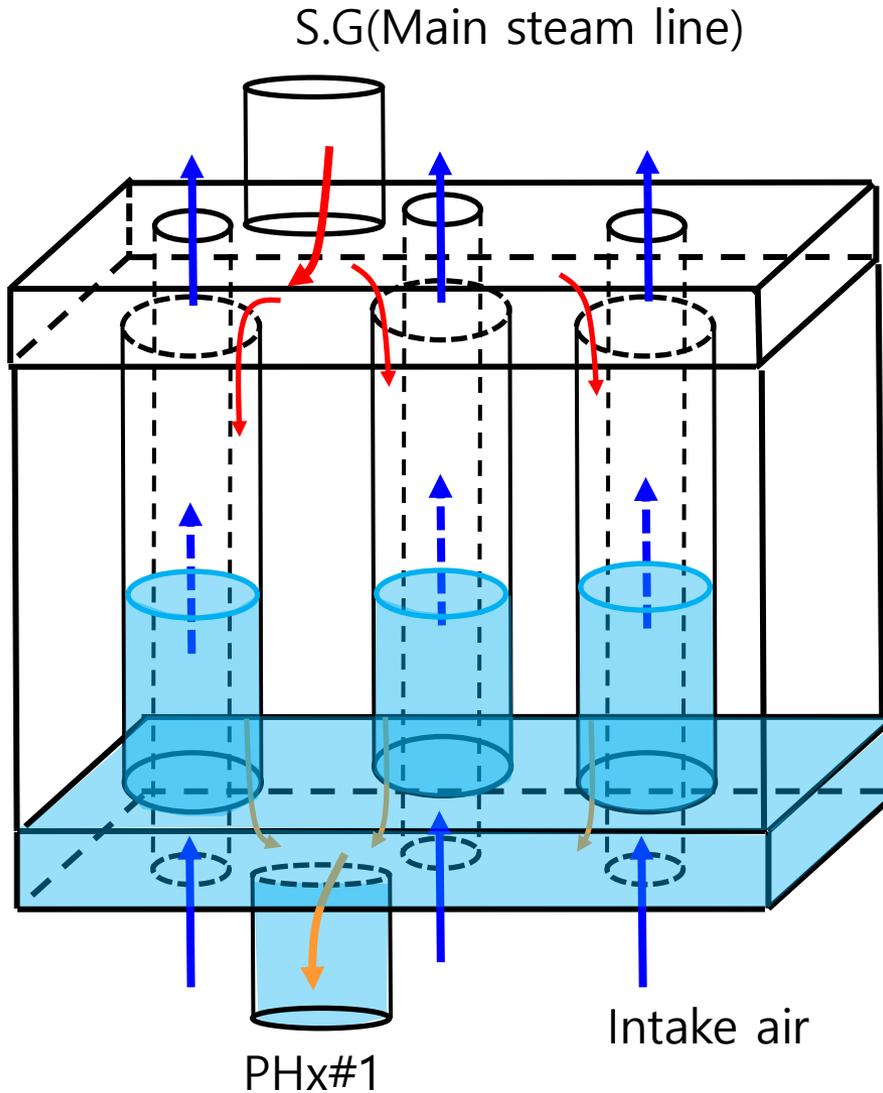
피동냉각계통 예비배치



피동냉각계통 구성 및 설계인자

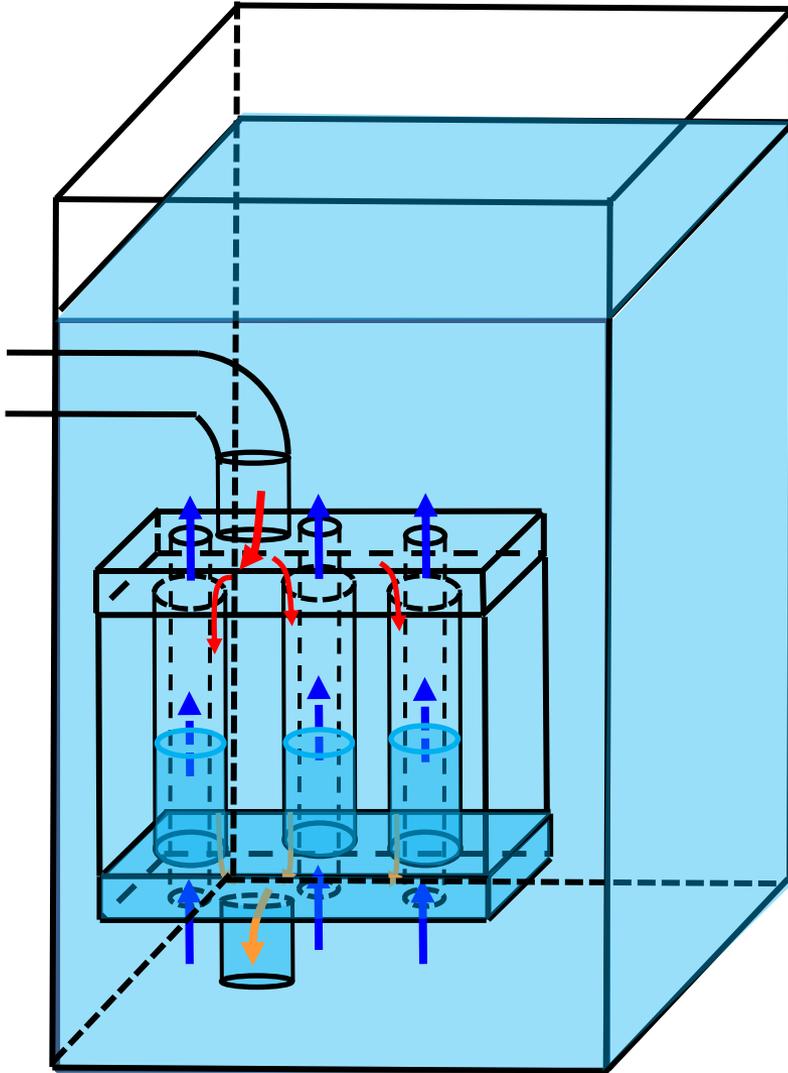


해수부 열교환기설계

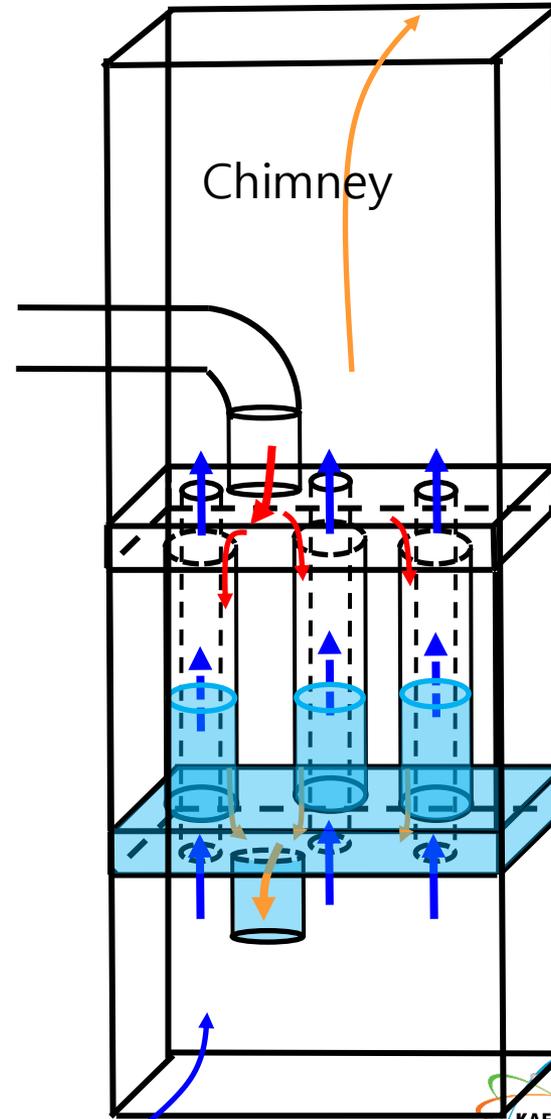


상부열교환기 설계

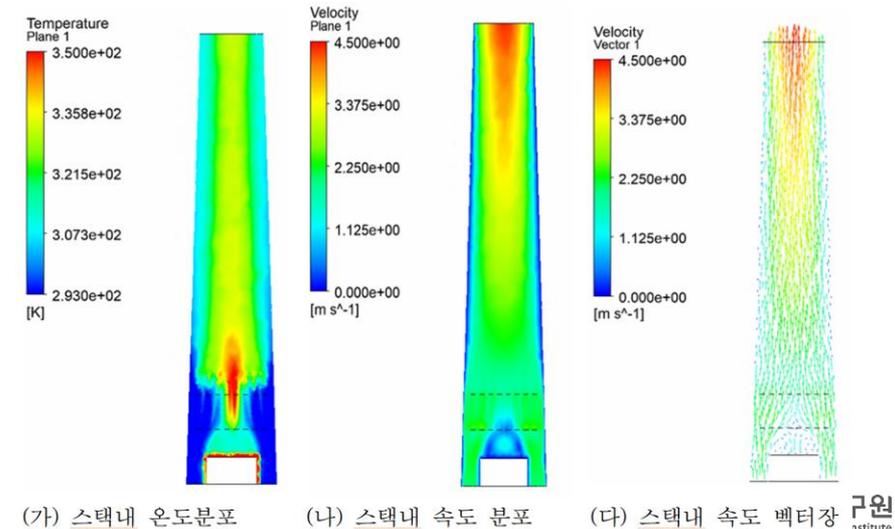
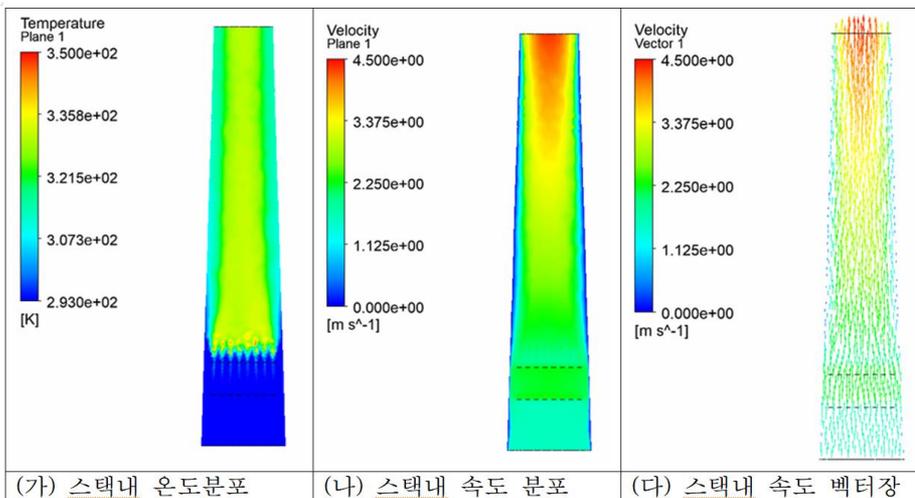
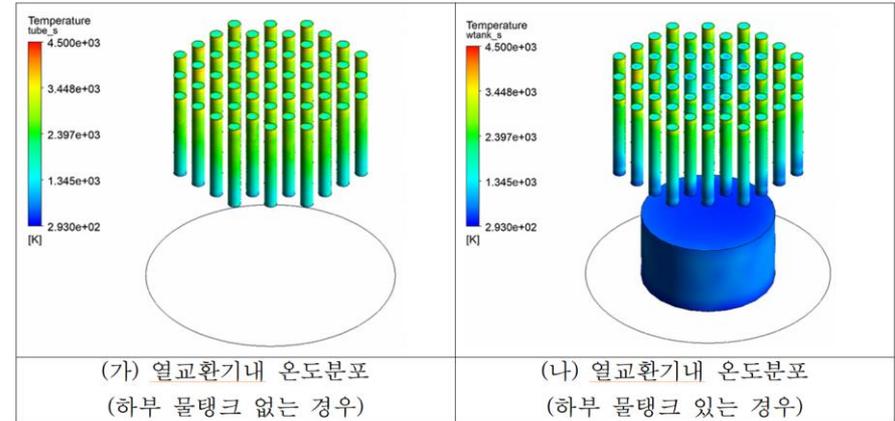
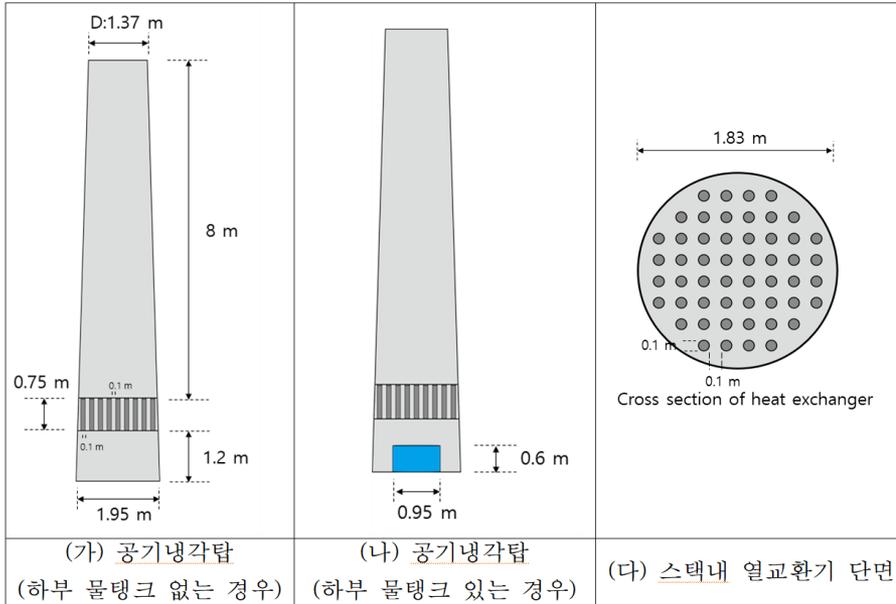
Water tank



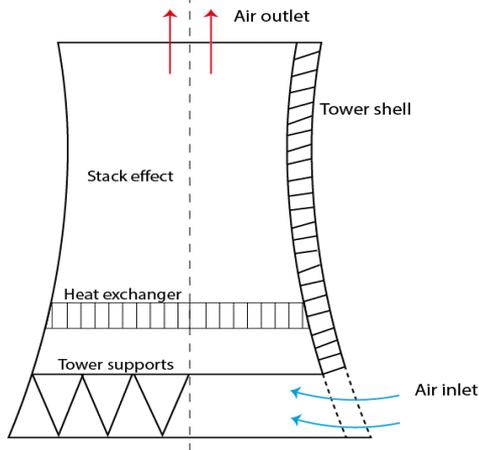
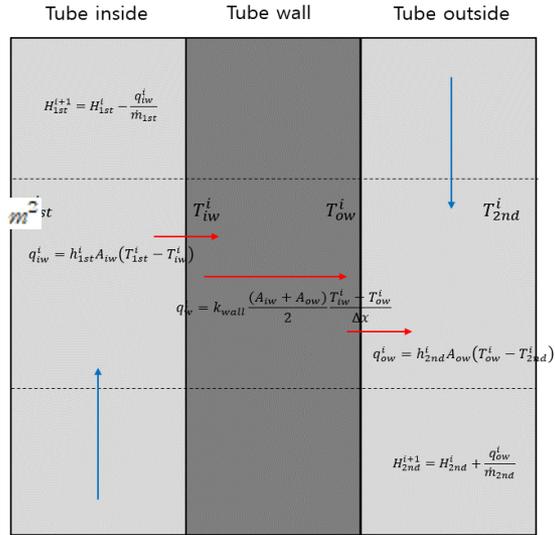
Air cooling with chimney



상부공기냉각기 CFD 해석

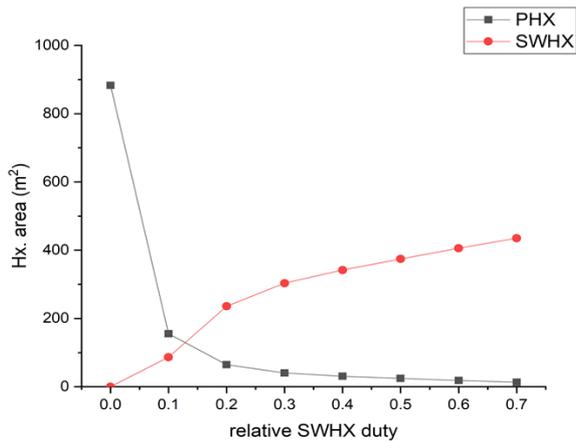
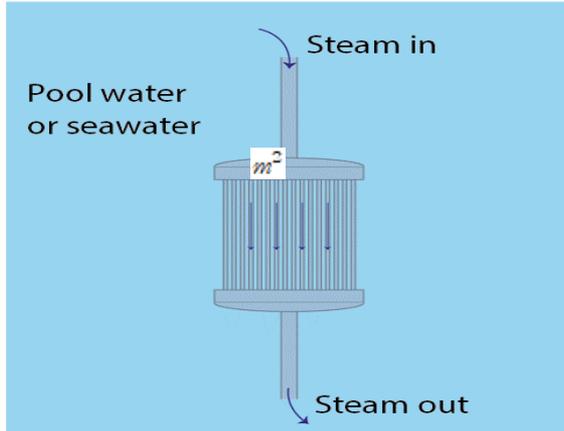


열교환기 설계(냉각수조 및 공기냉각기)



항목		
수조 열교환기	전열관 외경	21.34 mm
	전열관 두께	3.735 mm
	전열관 길이	1.5 m
	전열관 재질	Inconel 600
해수 열교환기	전열관 외경	31.75 mm
	전열관 두께	1.65 mm
	전열관 길이	1 m
	전열관 재질	Titanium
공랭식 열교환기	전열관 외경	29.2 mm
	전열관 두께	2.11 mm
	환상공간 직경비 (Dto/Do)	0.9
	전열관 재질	Inconel 600
	부지면적 1/3/5 에 따른 전열관 개수	607/1822/3037

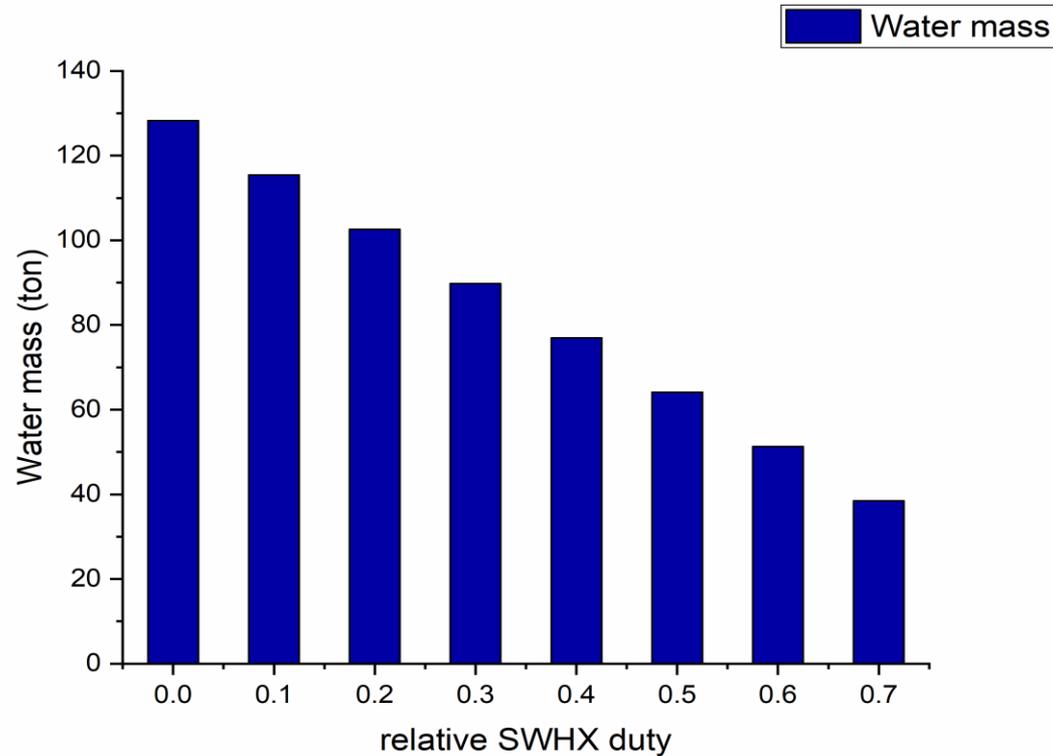
냉각수조



항목		
수조 열교환기	전열관 외경	21.34 mm
	전열관 두께	3.735 mm
	전열관 길이	1.5 m
	전열관 재질	Inconel 600
해수 열교환기	전열관 외경	31.75 mm
	전열관 두께	1.65 mm
	전열관 길이	1 m
	전열관 재질	Titanium
공랭식 열교환기	전열관 외경	29.2 mm
	전열관 두께	2.11 mm
	환상공간 직경비 (Dto/Do)	0.9
	전열관 재질	Inconel 600
	부지면적 1/3/5 에 따른 전열관 개수	607/1822/3037

그림 3.3-46 해수 부담률에 따른 열교환기의 필요 열전달 면적 (목표 열제거량 7%)
원자력융복합기술개발사업

해수 부담률에 따른 필요 수조수의 양



공기냉각기

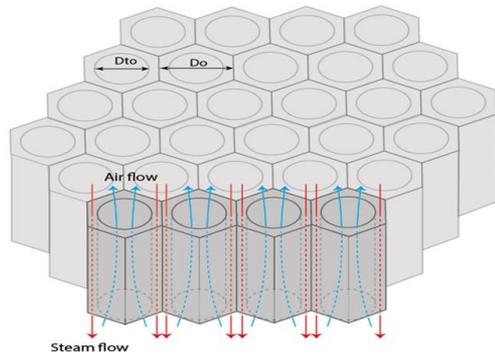


그림 3.3-48 공랭식 열교환기의 형상

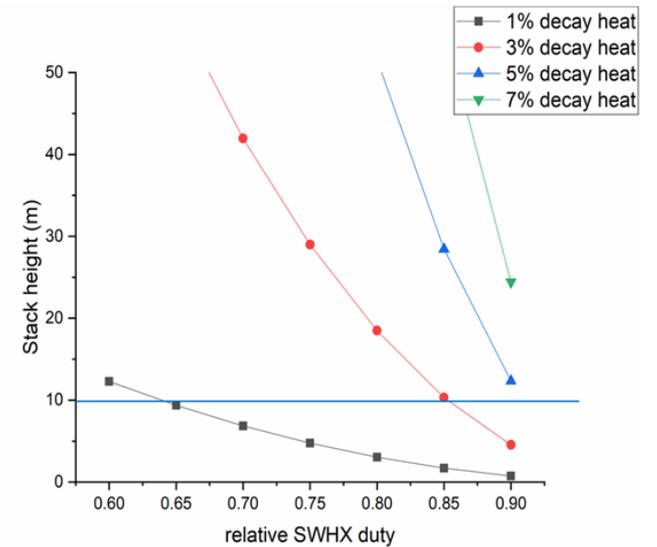
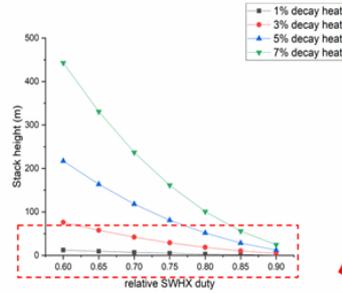


그림 3.3-50 해수 부담률에 따른 필요 스택 높이
(부지면적 $3m^2$)

피동잔열제거계통 민감도 분석

- 개념안 : 공기냉각탑과 해수의 결합 구성
- 열제거량 : 3.9 MW (정상운전시 열출력의 3% 잔열)
- 공기냉각탑 부지면적 : 3m^2
- 해수 열교환기의 열부하량 : 3.315 MW (해수가 85%를 부담)
- 공랭식 열교환기의 열부하량 : 0.585 MW (공기가 15%를 부담)

설계변수

68 m ² m ²		항목	
시스템 변수		총 열부하량 (계열당)	3.9 MW
		공기냉각탑 열부하량 (계열당)	0.585 MW (15%)
		해수 열부하량 (계열당)	3.315 MW (85%)
		공기냉각탑 부지면적 (계열당)	
		공기냉각탑 스택높이 (계열당)	8 m
공랭식 열교환기		형태	honeycomb 구조의 항류형 이중관
		전열관 재질	Inconel 600
		전열관 외경	1.5 in
		전열관 두께	0.065 in
		환상공간 직경비	0.9
		전열관 길이	1.43 m
		열전달 면적 (계열당)	
		전열관 개수 (계열당)	1072
		공기 입구 온도	30°C
		공기 출구 온도	121.8°C
		공기 유량	6.3 kg/s
해수 열교환기		형태	수직관다발
		전열관 재질	Titanium
		전열관 외경	0.75 in
		전열관 두께	0.109 in
		전열관 길이	1.5 m
		열전달 면적 (계열당)	
		전열관 개수 (계열당)	757
		해수 온도	20°C

디자인 결과 요약

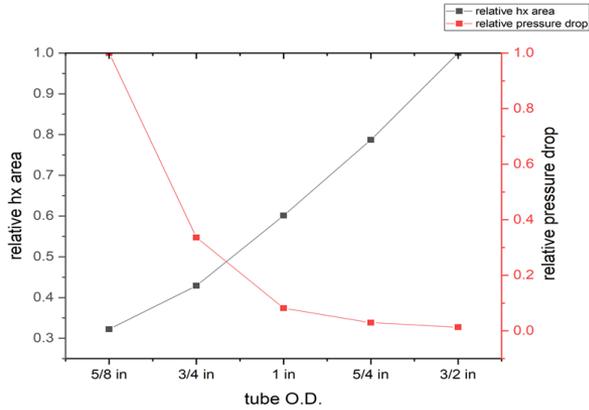


그림 3.3-55 전열관 외경에 따른 상대적인 필요 열전달 면적과 압력강하

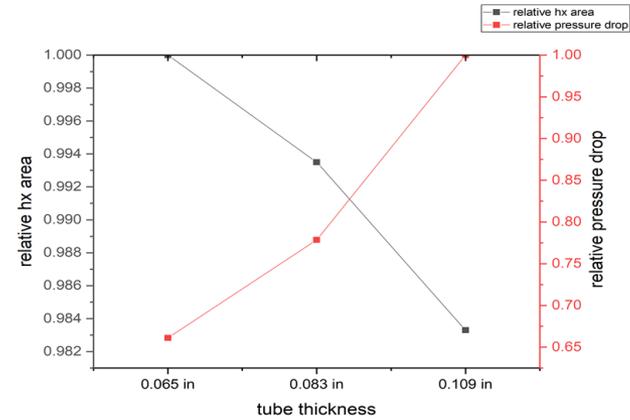


그림 3.3-56 전열관 두께에 따른 상대적인 필요 열전달 면적과 압력강하

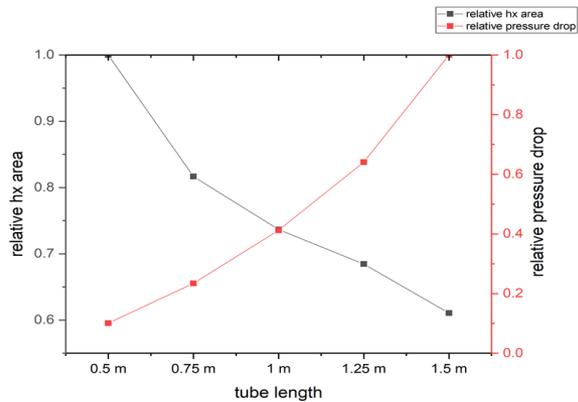


그림 3.3-57 전열관 길이에 따른 상대적인 필요 열전달 면적과 압력강하

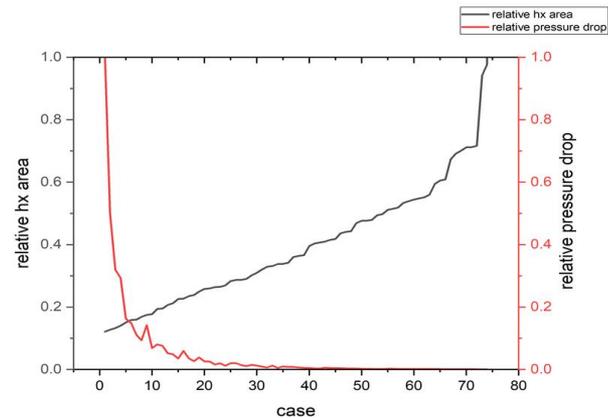


그림 3.3-58 가능한 모든 변수 집합들의 계산 결과

공기 및 해수온도의 영향 분석

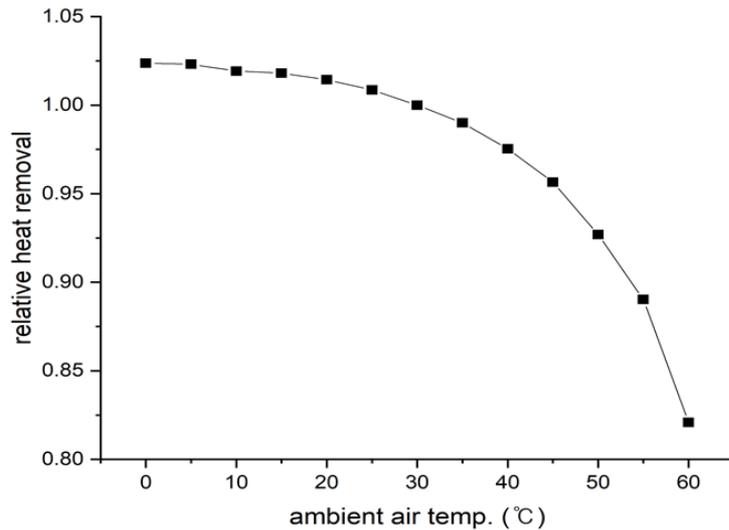


그림 3.3-59 외부 공기 온도에 따른 열교환기의 상대적인 열제거량

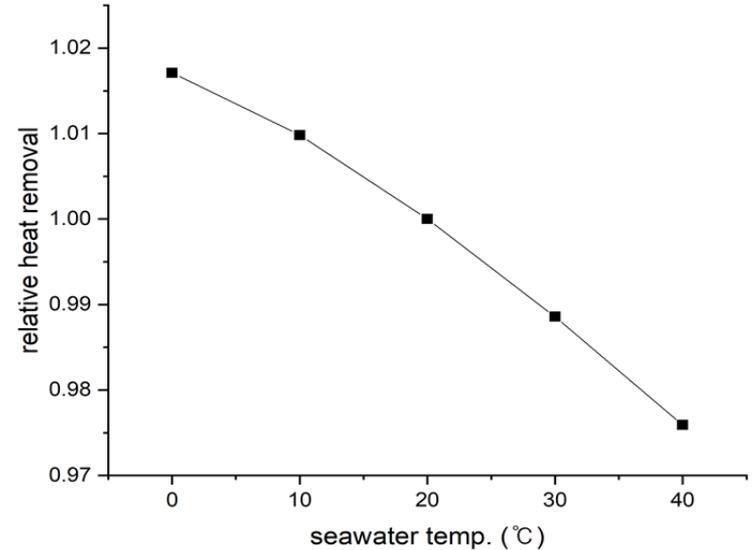


그림 3.3-60 외부 해수 온도에 따른 열교환기의 상대적인 열제거량

충전율 평가

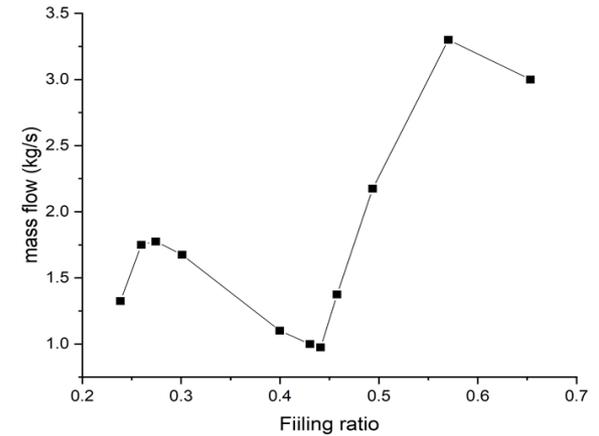
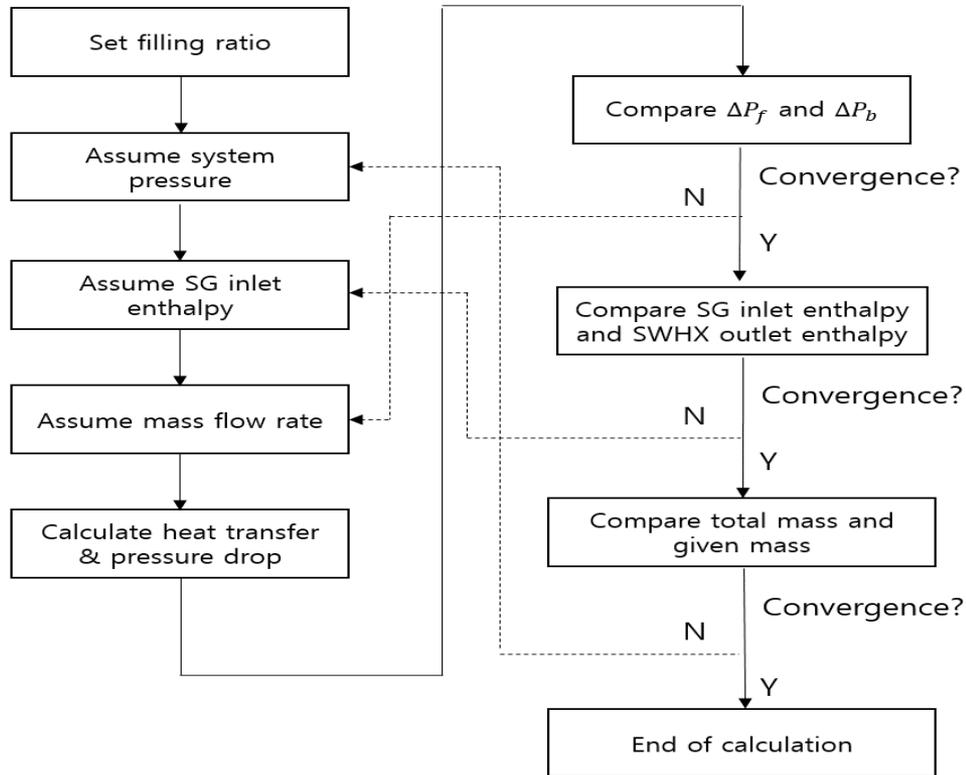


그림 3.3-64 충전율에 따른 계통 내 자연순환 유량

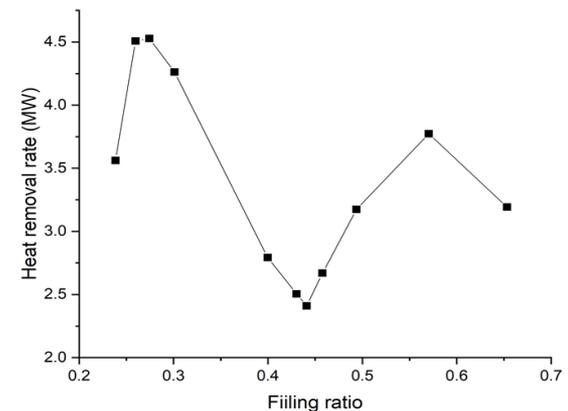
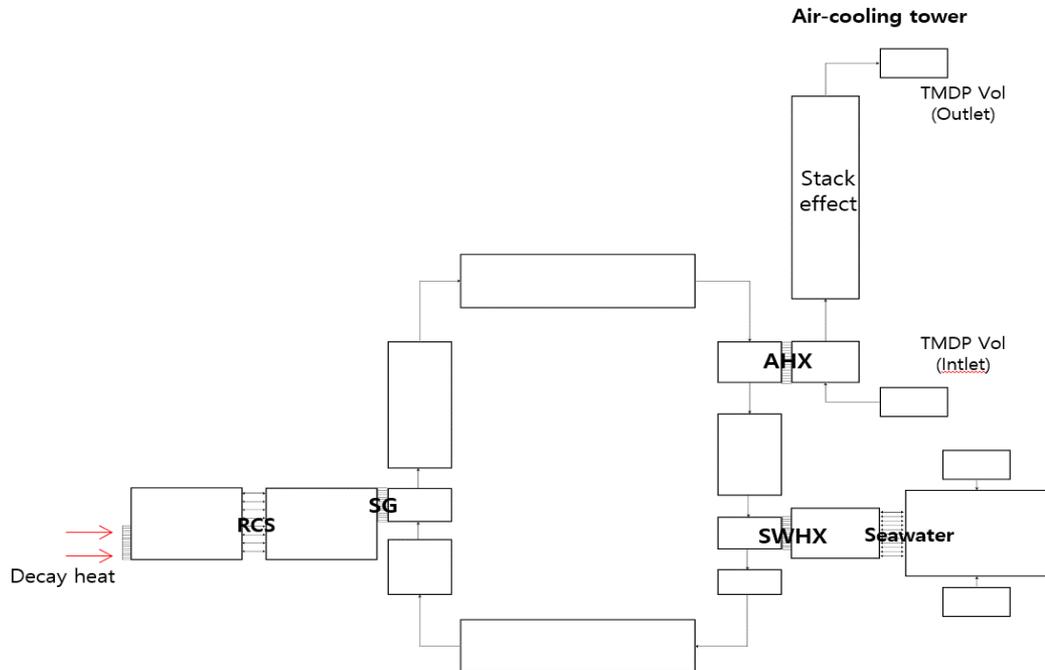


그림 3.3-66 충전율에 따른 계통의 열제거량

예비성능평가

- ☞ 소외전원상실 및 단일계열고장을 가정한다.
- ☞ 원자로냉각재계통은 항상 과냉각 상태가 유지되어야 한다.
- ☞ 원자로냉각재계통은 36시간 이내에 안전정지조건(215℃, 2.8 MPa)에 도달해야 한다.
- ☞ 원자로냉각재계통의 최대 냉각률은 100℃/hr를 넘지 말아야 한다.



예비성능평가

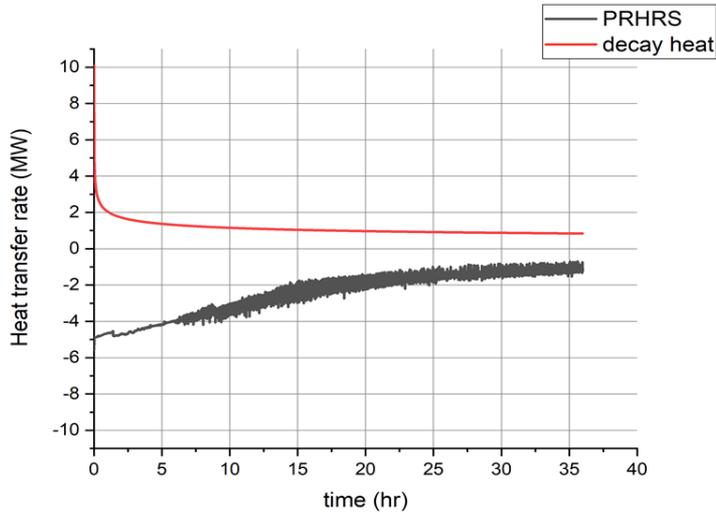


그림 3.3-72 시간에 따른 노심 잔열과
 피동잔열제거계통의 열제거량

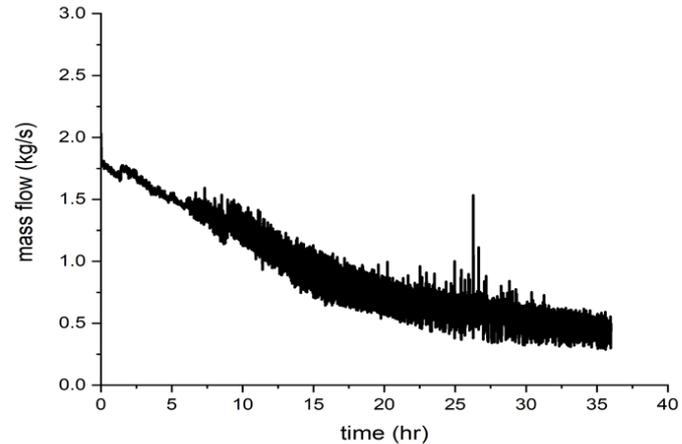


그림 3.3-73 시간에 따른 계통 내 자연순환 유량

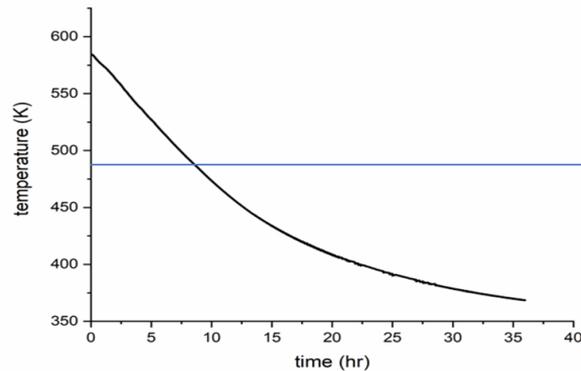
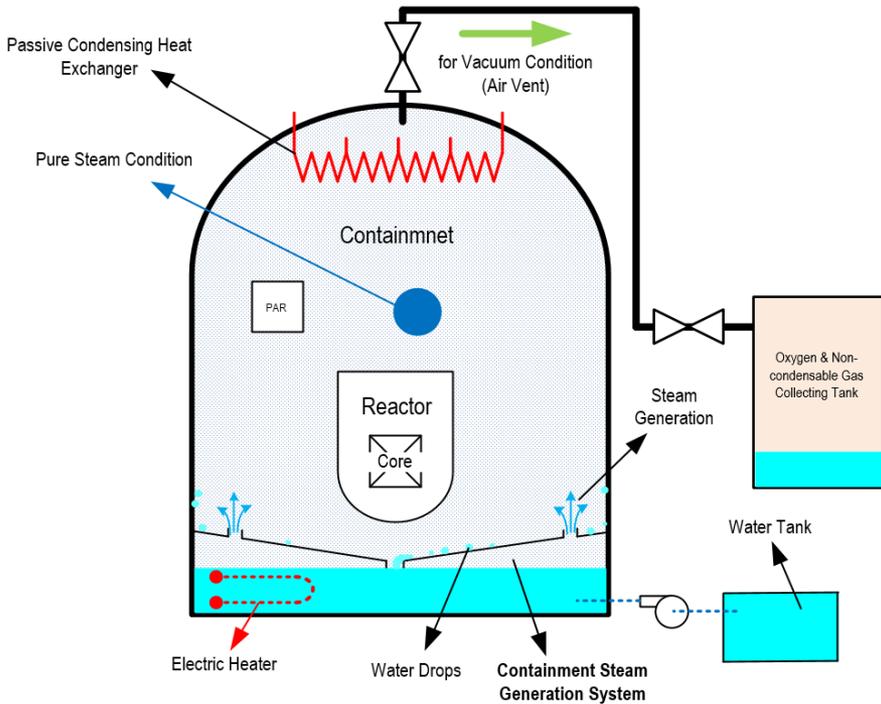


그림 3.3-74 시간에 따른 원자로냉각재계통의
 온도 변화

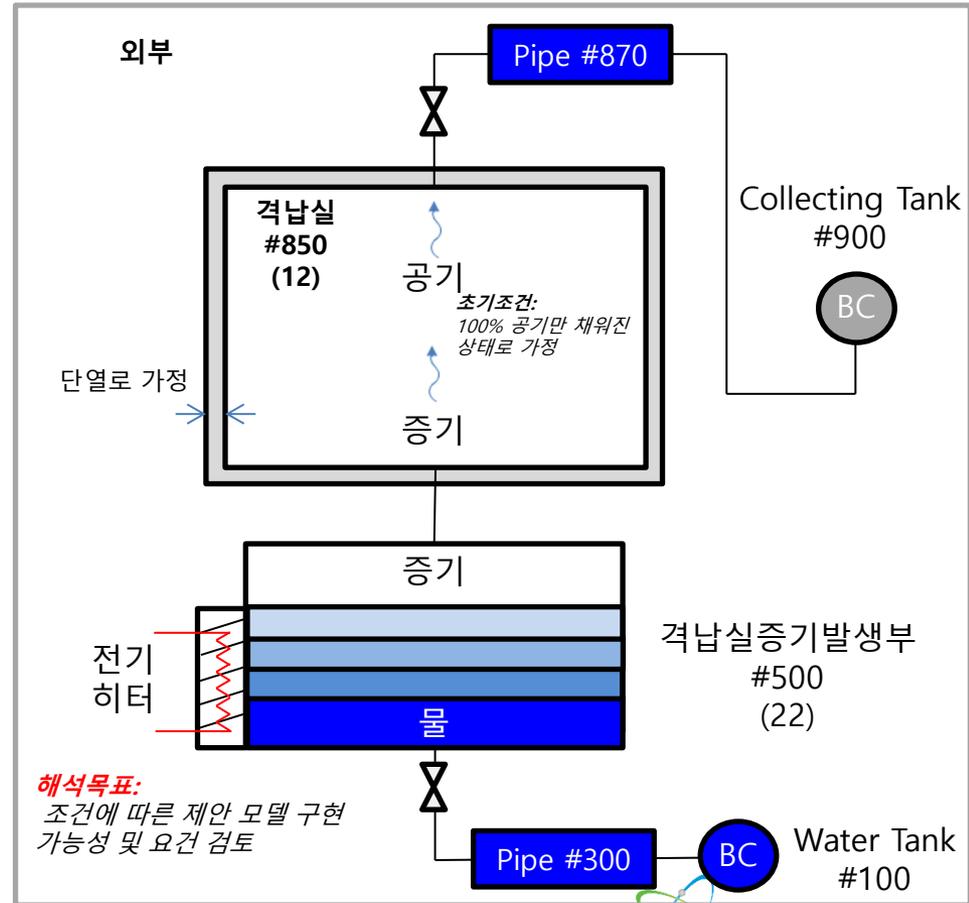
비응축성기체 저감계통 모델 분석

❖ 개발기술 개념

- 비응축성기체 저감계통 설치 방안

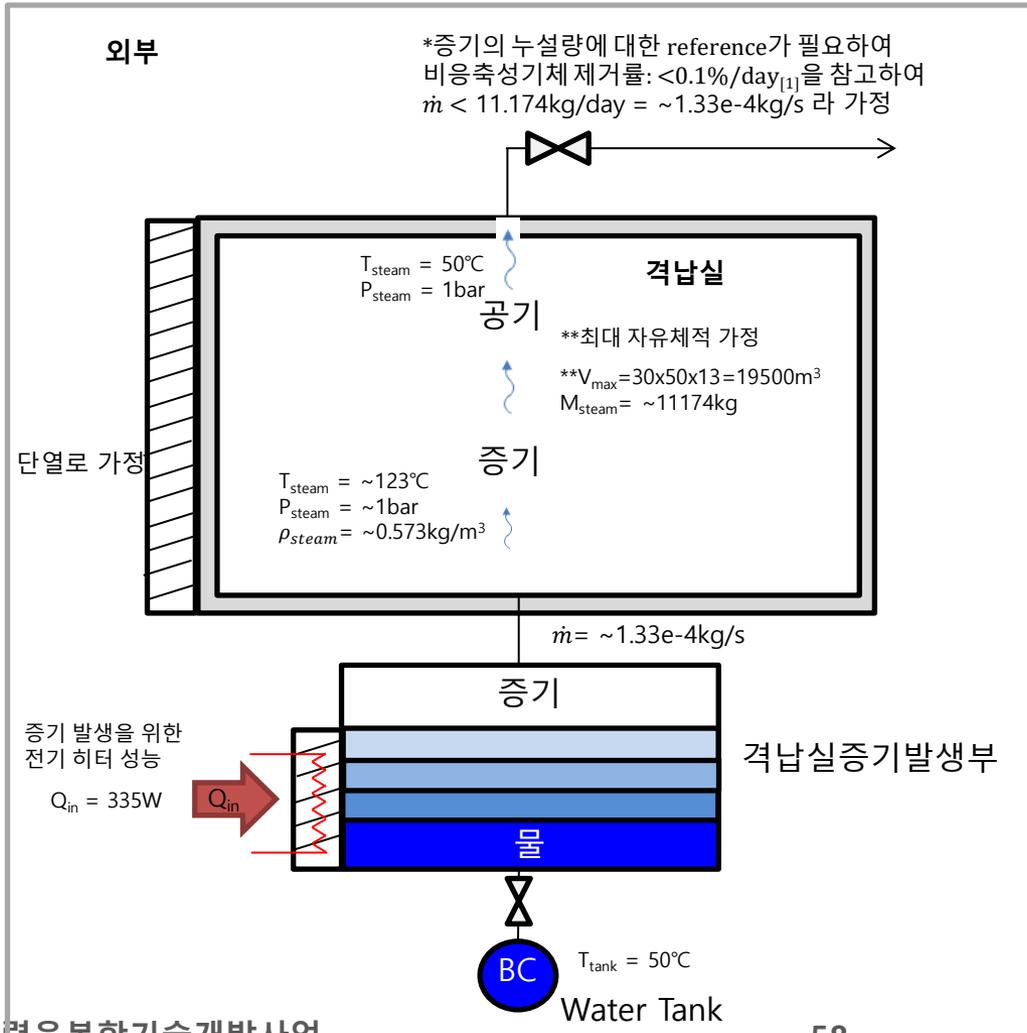


- 분석을 위한 MARs 모델링 안



비응축성기체 저감계통 모델 분석

❖ MARs 해석을 통한 성능 검토 조건

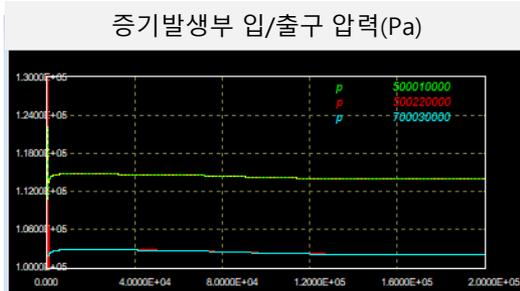


- 격납실 초기 조건은 공기(비응축성기체)만 채워진 상태로 가정
- 격납실 외벽은 단열상태로 가정
- MARs 계산 시 모의 시간 단축을 위해 최대 자유체적의 1/1000으로 모사
- 모의 목표
 - 증기발생부에서의 안정적인 증기 발생 상황 모사
 - 실제 격납실 내에서의 열 손실에 의한 응축을 고려하여 약 20~25°C 과열 증기 생성이 가능한 Electric heater 용량 가정
 - 증기발생을 통한 격납실 내 완전 증기 조건 정상상태 도달
 - 완전 증기 정상상태에서 증기 누설량 $\sim 1.33e-4kg/s$ (steam) 달성
- 격납실 초기조건
 - Volume = $19.5m^3$ (=1/1000 V_{max})
 - 공기 온도 = $50^{\circ}C$
 - 압력 = 1bar
 - 공기 quality = ~ 1.0
- 격납실증기발생부 조건
 - 증기발생부 입구 온도(water, $x < 0$) = $50^{\circ}C$
 - 증기발생부 출구 온도(steam, $x > 1$) = $120^{\circ}C$
 - 증기발생부 출구 압력(steam, $x > 1$) = $\sim 1bar$
 - 증기 발생량 = $1.33e-4kg/s$
 - 증기 발생을 위한 열량 = 335W

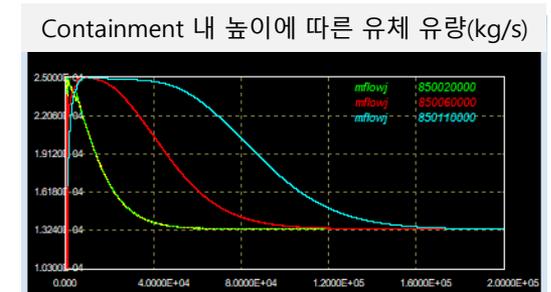
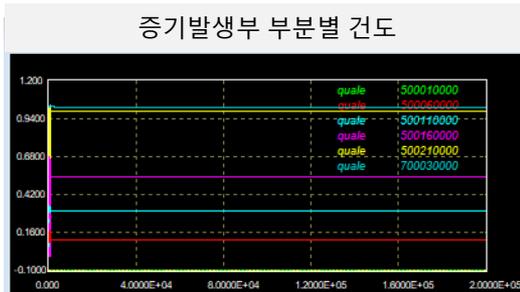
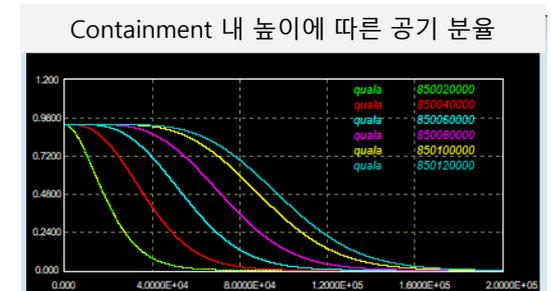
비응축성기체 저감계통 모델 분석

❖ MARs 해석을 통한 성능 검토 결과

격납실증기발생부 결과



격납실 결과



- 증기발생부의 결과를 보면 초기 안정화되는 기간을 무시하면 전 영역에서 안정적으로 증기발생이 이루어지는 것을 확인할 수 있음
 - 증기발생부 입/출구 온도, 압력 안정적 (출구 증기: ~1bar, ~123°C)
 - 증기발생부 부분별 건도 안정적 (부분에 따라 x=0~1.02)
 - 증기발생부 입/출구 유량 안정적 ($\dot{m} \sim 1.33e-4$ kg/s)
- 즉, 증기발생부의 결과를 보면 해석 동안 목표대로 1.33e-4kg/s의 증기 발생 상황이 모사 되고 있음
- 격납실 내 높이에 따른 공기 분율을 보면 증기가 격납실로 유입됨에 따라 높이가 낮은 node부터 공기 분율이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있음
- 격납실 내 공기 분율이 줄어들고 증기 분율이 높아짐에 따라 높이에 따른 유체 유량이 증기발생부의 증기 유량(1.33e-4kg/s)과 동일해 짐
- 격납실 내 완전 증기 정상상태 도달을 최 상단의 공기 분율이 1% 미만일 때로 가정하면 약 175000sec 이후임
- 즉, 본 해석은 최대 격납실 부피의 1/1000로 수행한 것이므로 최대 부피를 순수증기 환경으로 만들기 위해서는 약 175000000sec가 소요될 것으로 예상됨
- 이 경우 격납실을 순수증기 환경으로 만들기 위해서는 약 48611hr동안 전기 히터에서 16.3MWh의 전력이 필요함을 뜻함
- 따라서 본 컨셉에서의 이슈는 격납실 내 비응축성기체를 증기 공급을 통해 완전히 제거하여 순수증기 환경을 만드는 것이라 판단됨
- 그러므로 보다 효과적으로 순수증기 환경을 만들기 위해서 ① 증기 공급 전에 비응축성기체를 저감 시키거나 ② 초기 순수증기 환경을 만들기 위한 추가적인 전기 히터를 이용하는 방안 등이 고려되어야 할 것으로 판단됨

**Thank you
for
your kind listening.**

