

상용원전 및 소형모듈원자로 설계를 위한 전산유체역학 해석

2023.05.17.(수)

임상규 (sglim@ismr.or.kr)

혁신형 SMR 기술개발 사업단

발표순서

1. 개 요

2. APR1400 해석

- 붕소희석사고 분석
- 천이노심에서의 고온관 열성충 현상

3. iPOWER PCCS 응축 해석

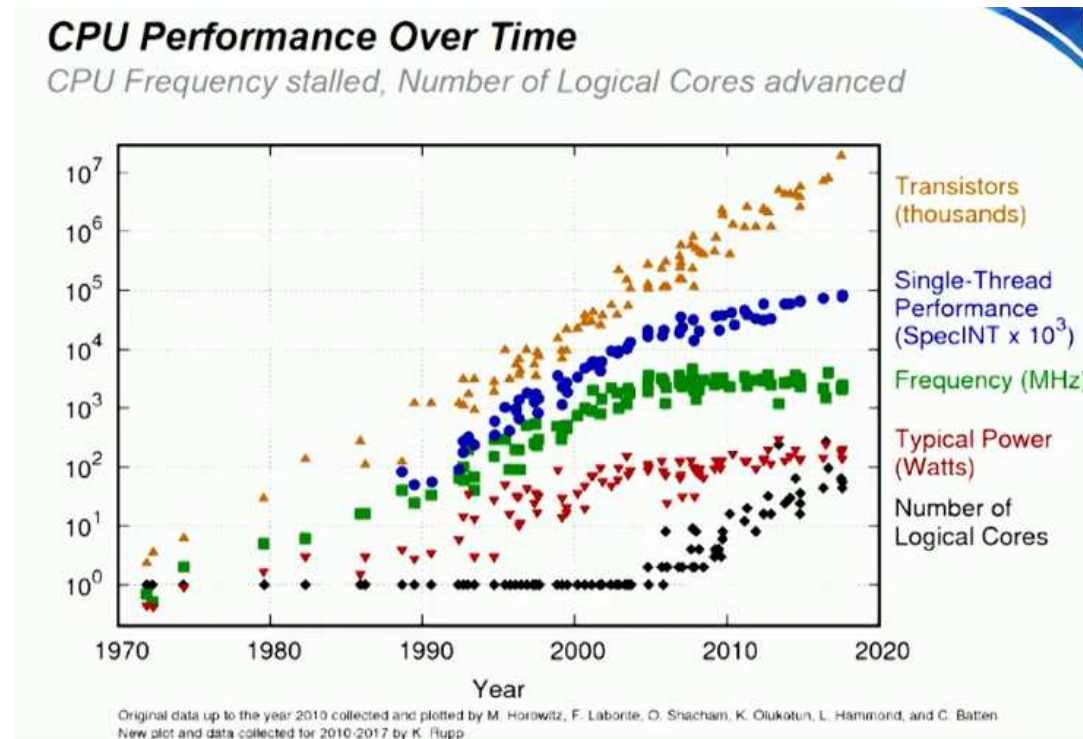
4. i-SMR 철제 격납용기 열손실 및 열복사 해석

5. 결 론



1. 개요

- 시대별 CPU 성능의 변화 추이



- 컴퓨터 성능, 클러스터 보급 확대에 따른 CFD의 원자력 설계 활용이 점증

- ❖ 1D 코드의 한계 → 3차원 현상 분석에 대한 니즈 증대

- ❖ Passive system 적용에 따른 자연순환력 등 3차원 효과 고려한 CFD 활용 필요 → Passive system 성능평가

2. APR1400 해석 – 붕소희석 사고 분석

● 배경

- ❖ APR1400 NRC DC 과정에서 규제기관의 RAI 답변을 위해 수행
- ❖ 운전모드 4,5에서 모든 RCP 정지상태에서 1계열의 정지냉각계통이 작동되고 있는 상태에서 부적절한 붕소희석사고시 Specified acceptable fuel design limits를 만족하는지 보여라.
- ❖ 질의 핵심
 - 사고해석에서 사용하고 있는 단순모델인 Perfect maxing model이 여전히 유효한가?

● 해석접근 방법

- ❖ CFD 해석의 불확실도를 고려하여 보수적인 운전조건을 가정
 - 1계열의 정지냉각계통 작동도 안되는 조건을 가정
- ❖ 부주의한 붕소희석에 의해 충전배관을 통해 주입되는 유량을 보수적으로 가정
- ❖ 이러한 상태에서 운전원 조치시간(30분) 전에 노심입구에서의 붕소농도의 분포가 임계붕소농도 이상인지 확인

2. APR1400 해석 – 붕소희석 사고 분석

● 해석코드, 해석모델 및 해석격자 (1/2)

❖ 해석코드 : ANSYS CFX

❖ 해석모델

- Multicomponent flow model (Pure water, Borated water)

• Scalar Transport equation : pure water (0ppm)

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\tilde{\rho}_i \tilde{U}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_i (\tilde{U}_{ij} - \tilde{U}_j) - \overline{\rho_i'' U_j''}) + S_i$$

• Constraint equation : borated water (1371ppm)

$$\sum_{i=A,B,C..}^{N_c} Y_i = 1$$

Where, $\tilde{\rho}_i$ is the mass-average density of fluid component I in the mixture

\tilde{U}_j is the mass-average velocity field

\tilde{U}_{ij} is the mass-average velocity of fluid component I

$\rho_i (\tilde{U}_{ij} - \tilde{U}_j)$ is the relative mass flux

S_i is the source term for component I

Y_i is mass fraction for component I

- SST Turbulence model

- 부력항 고려

2. APR1400 해석 – 붕소희석 사고 분석

● 해석코드, 해석모델 및 해석격자 (2/2)

❖ 과도해석 조건

- Time step: 0.05sec
- Time scheme: second order backward Euler
- Total simulation time: 1,930sec
- Convergence criteria: RMS residuals $1e-4$

❖ 초기 및 경계조건

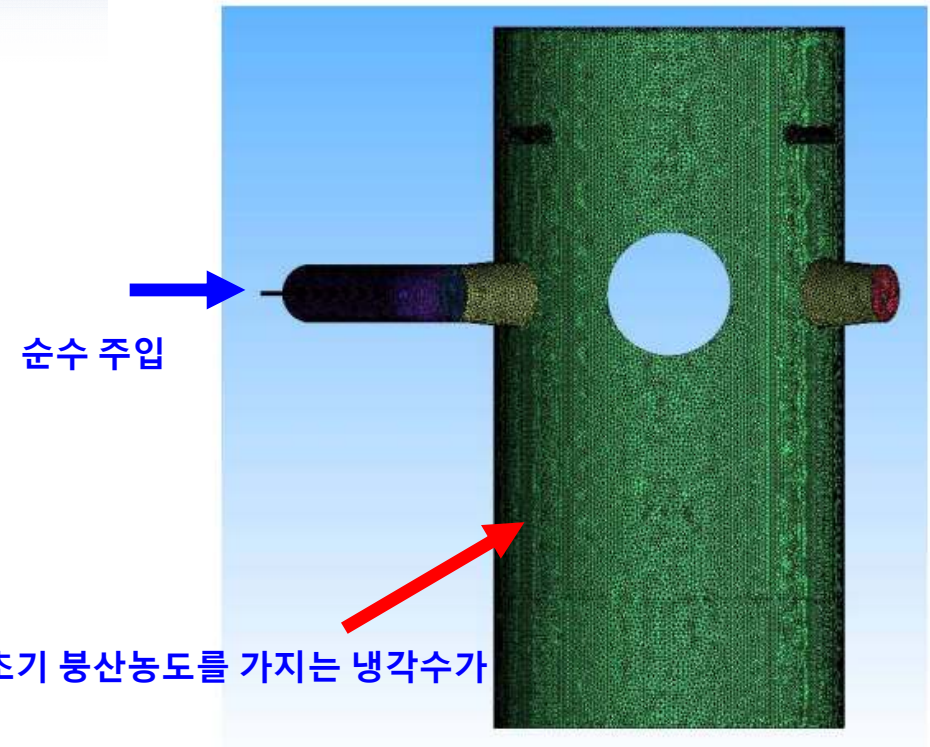
1) Initial Condition

- RCS reference pressure : 31bar
- RCS initial temp : 350°F
- RCS initial velocity : stagnant flow(zero movement)

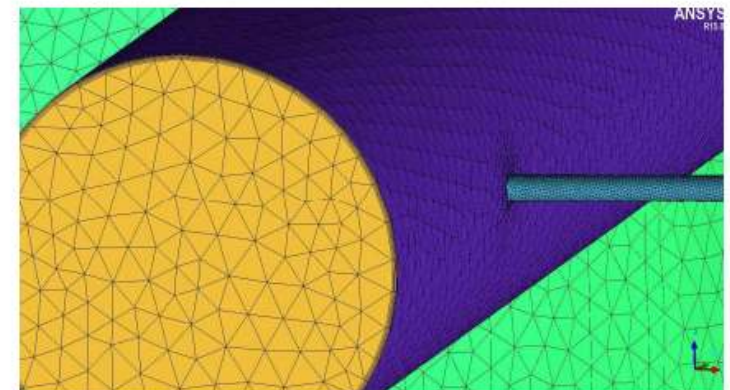
(보수적 조건)

2) Boundary Condition

- Charging inlet flow rate: 180gpm
- Charging inlet temperature: 60°F
- Outlet(located at Active Core Inlet): pressure boundary condition
- Thermal boundary at walls: adiabatic



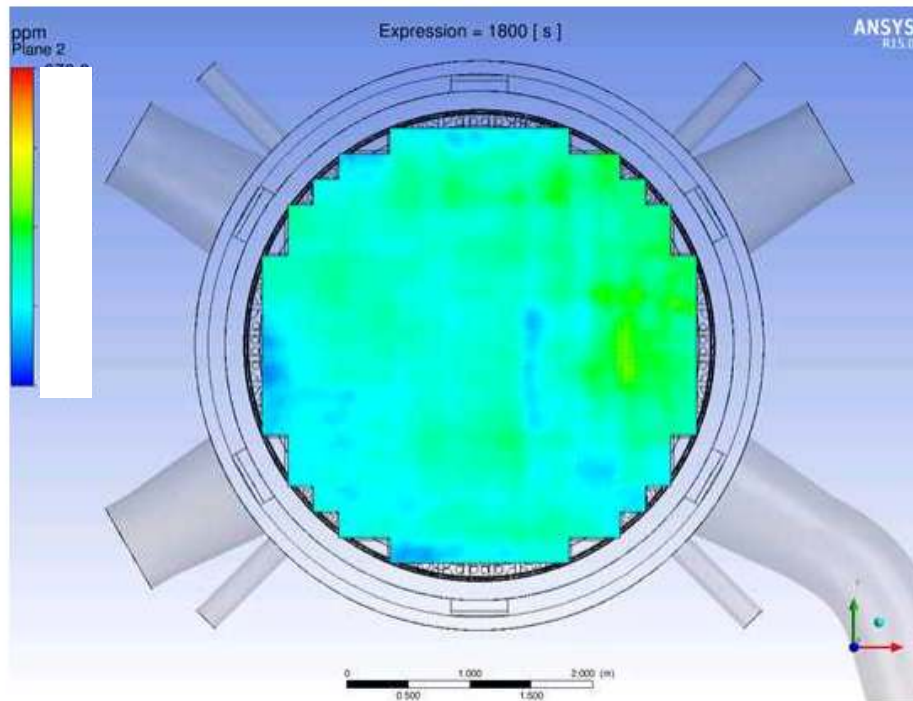
모드4 진입조건에서 초기 붕산농도를 가지는 냉각수가 정체된 상태로 가정



2. APR1400 해석 – 붕소희석 사고 분석

● 해석결과

- ❖ 보수적인 조건에서도 노심 입구로 유입되는 최소 붕산 농도는 임계농도치 이하로 내려가지 않음을 확인
- ❖ 노심 입구에서 평균 및 최소 농도의 차이가 시간에 지남에 수렴하였으며, 그 차이는 1.6%로 크지 않음을 확인



노심 입구 평면에서의 붕산 농도 분포

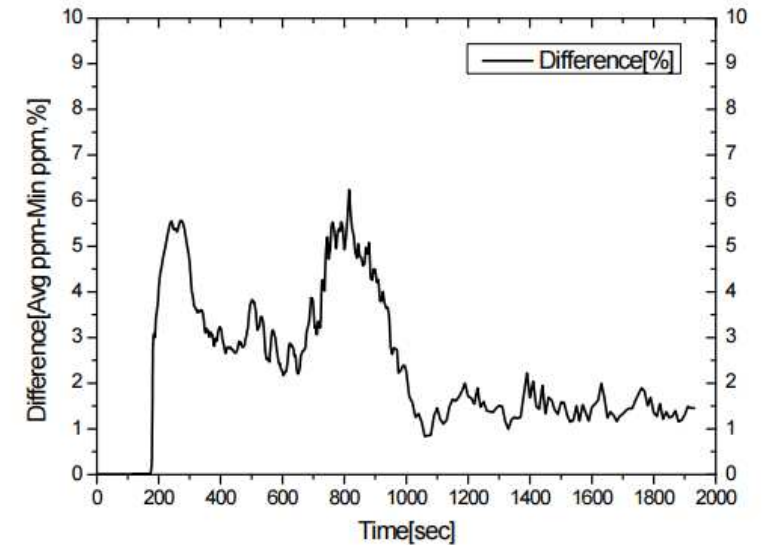


Figure 6. The difference of minimum and average boron concentration at the active core inlet plane

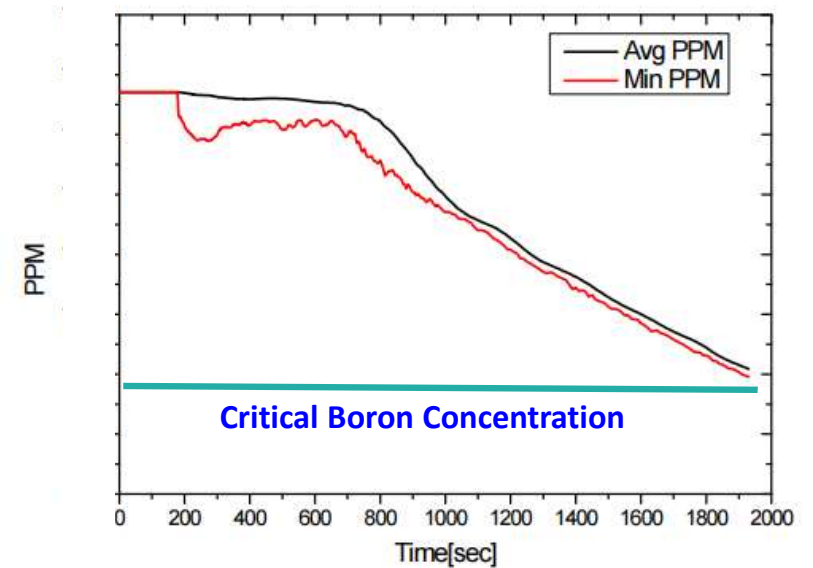


Figure 5. The variation of minimum and average boron concentration at the active core inlet plane

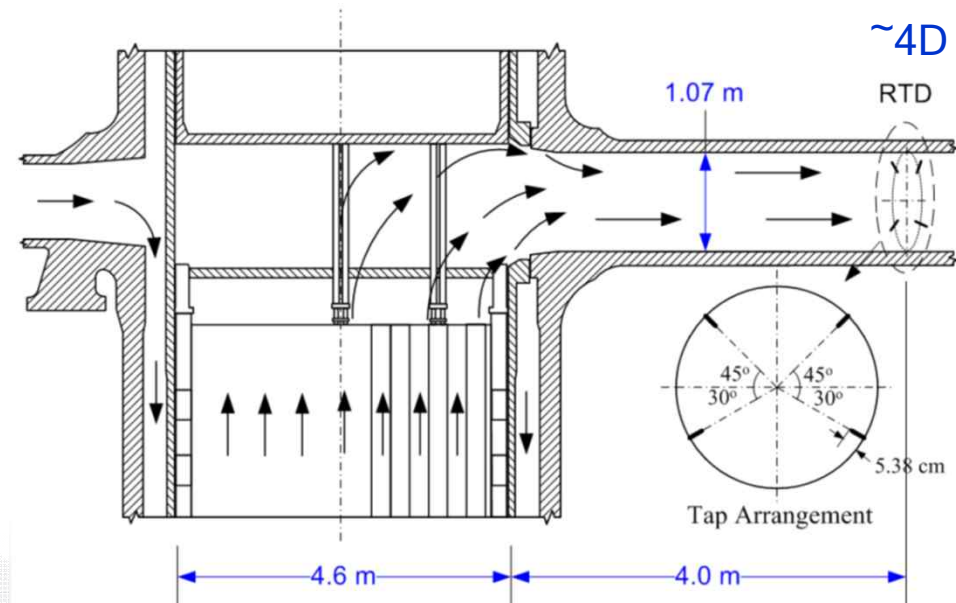
2. APR1400 해석 – 천이노심에서의 고온관 열성충 현상

● 배경

- ❖ 신고리 3호기 2~3주기 천이노심에서 '열평형법'에 RCP 유량 평가결과 유량감소 지시
- ❖ RCP 차압을 이용한 유량 평가결과는 이상없음
- ❖ 고온관 온도는 4개의 RTD 온도를 단순 평균하여 측정
- ❖ 만약 상부 열전대의 온도가 과다지시가 되면 고온관 평균온도가 높게 지시 → RCS 유량이 작게 평가
 - ✓ 열평형법 : $RCS \text{ 유량} = \text{이차측 열출력} / [Cp \cdot (T_{hot} - T_{cold})]$

● 해석목적

- ❖ CFD 분석과 현장 데이터 비교를 통해 천이노심에서 고온관내의 열성충 가능성을 평가

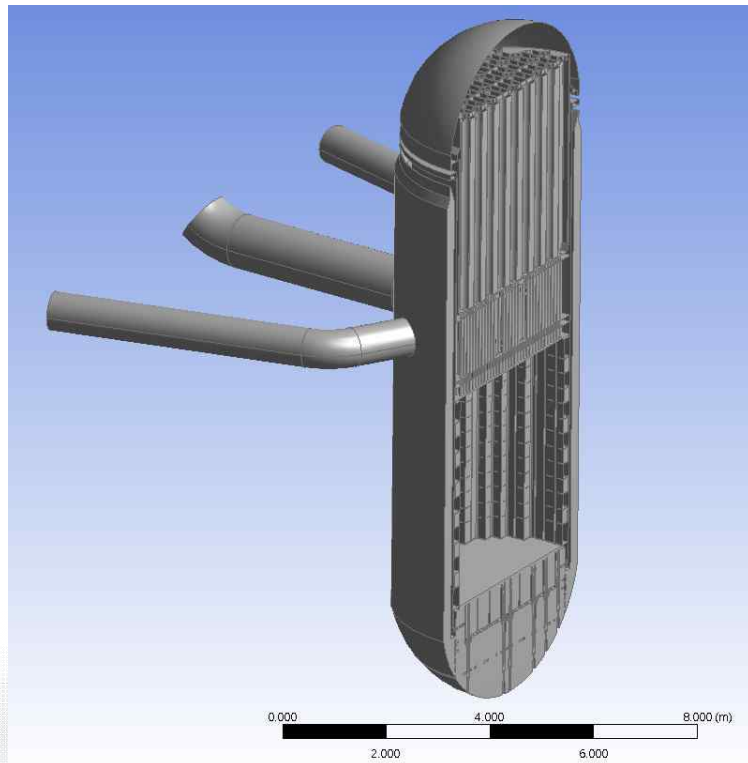


* Entrance effect : $\sim 40D_e$ [Kays et al.]

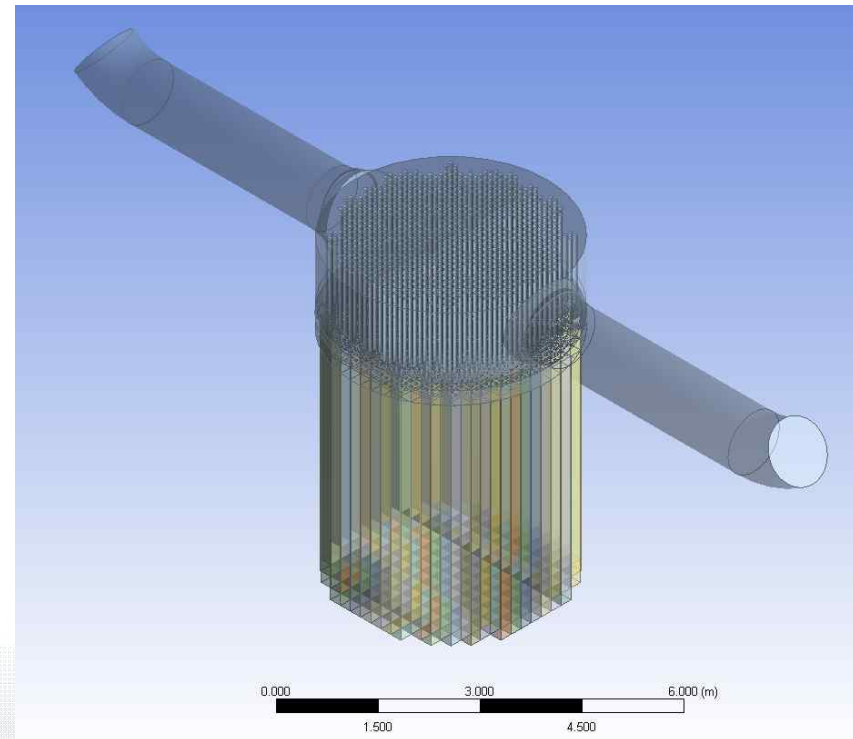
2. APR1400 해석 – 천이노심에서의 고온관 열성충 현상

● 해석 방법

- ❖ 241개 핵연료 집합체 채널, UGS, 2개 고온관 모의
- ❖ 241개 핵연료 집합체 채널에서 출구 온도는 노심해석 결과로 부터 입력자료로 처리
- ❖ 각 핵연료 집합체 출구 유량은 동일하게 적용 (노심유동분포 실험결과, 유량은 유효 높이 50%를 지나면 출구에서 평탄화됨) *노심 우회유량 제외



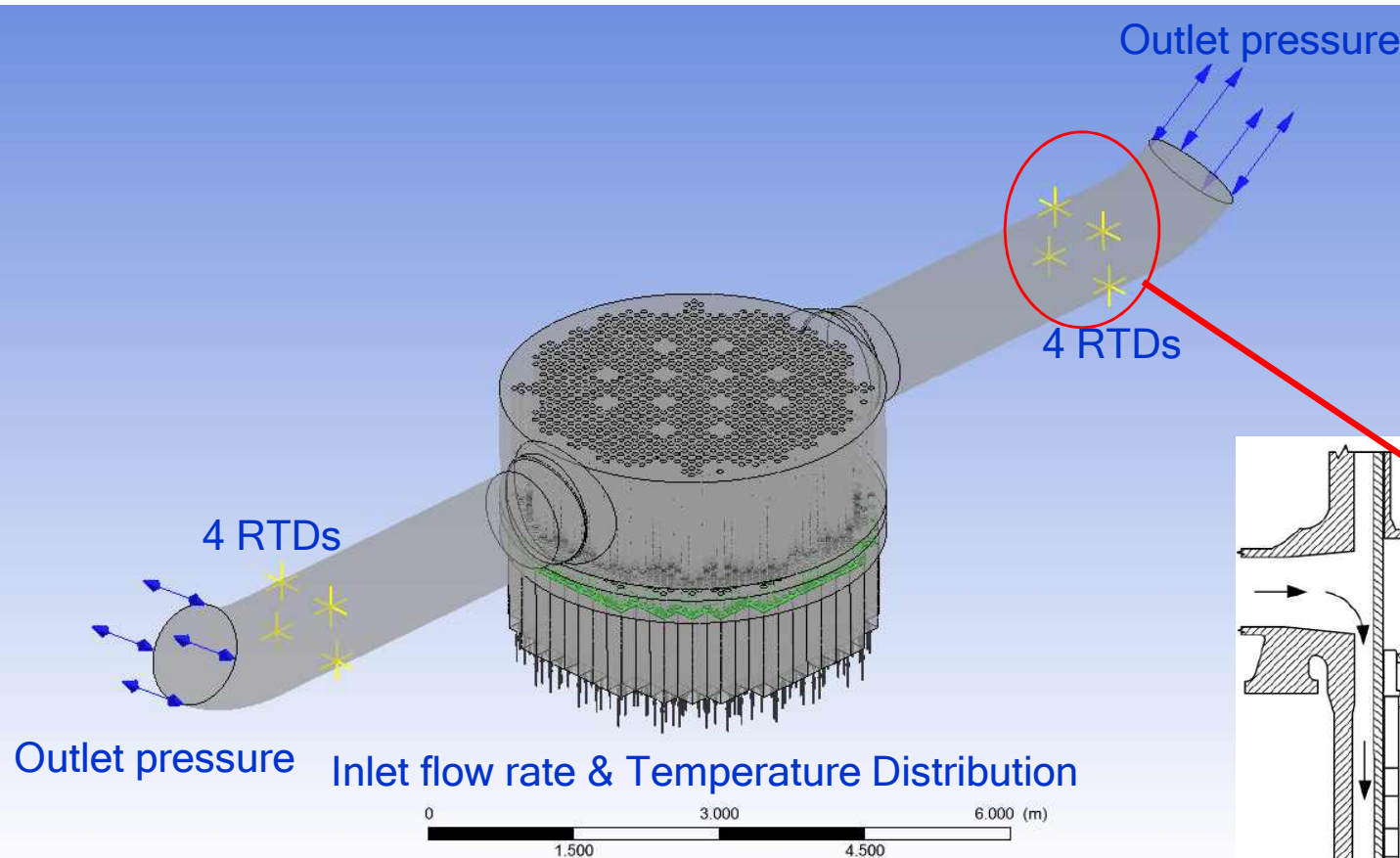
APR1400



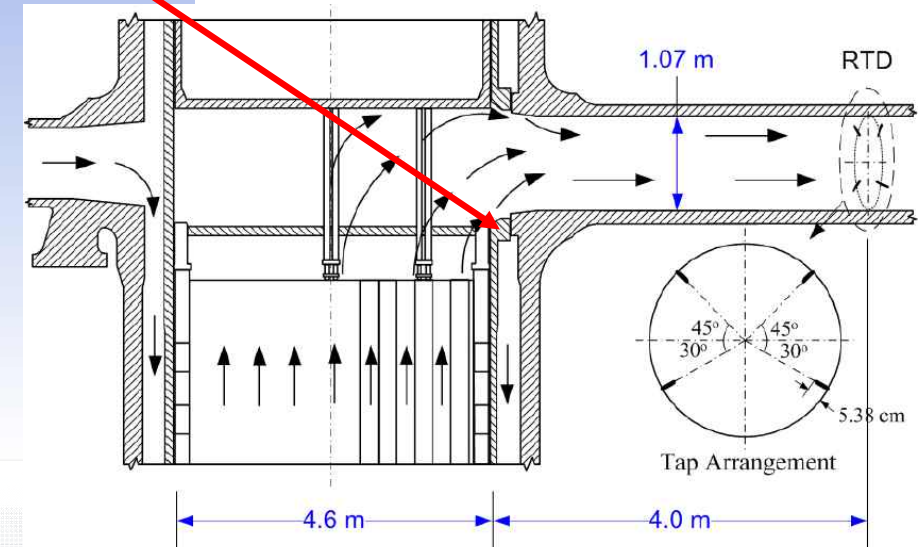
Simplified model

2. APR1400 해석 – 천이노심에서의 고온관 열성충 현상

● 해석 경계조건 (1/2)



주요 경계조건	운전조건
입구 온도	주기별 FA별 다름
노심출구 유량	RCP 차압법
출구 압력	155bar

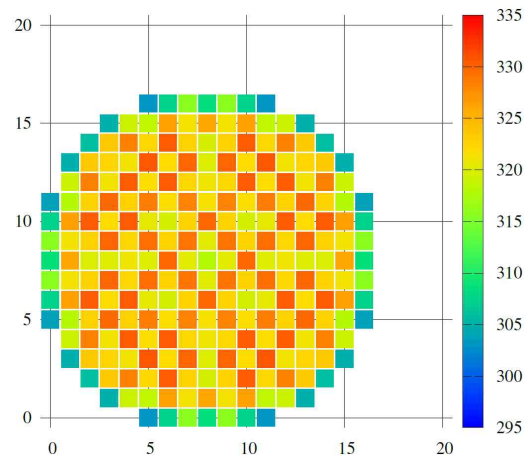


2. APR1400 해석 – 천이노심에서의 고온관 열성충 현상

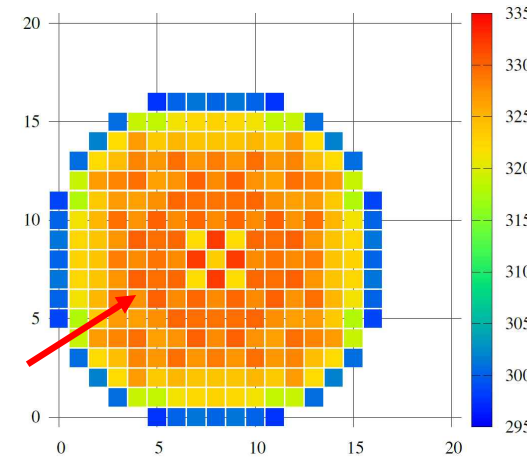
● 해석 경계조건 (2/2)

- ❖ 주기별 241개 핵연료집합체별 출구온도를 경계조건으로 입력
- ❖ 입구(출구) 유량은 동일하게 가정하였으므로, 채널간 Cross flow는 고려하지 않음

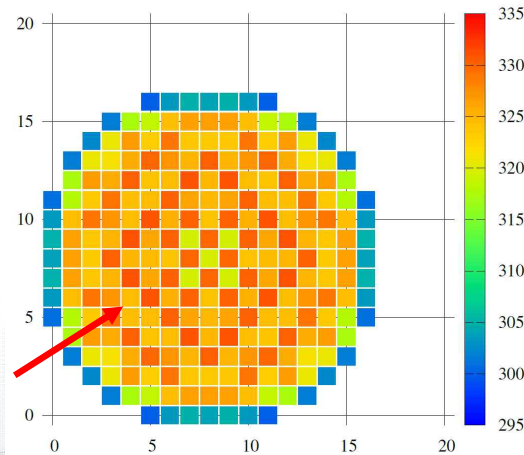
2주기-EOC



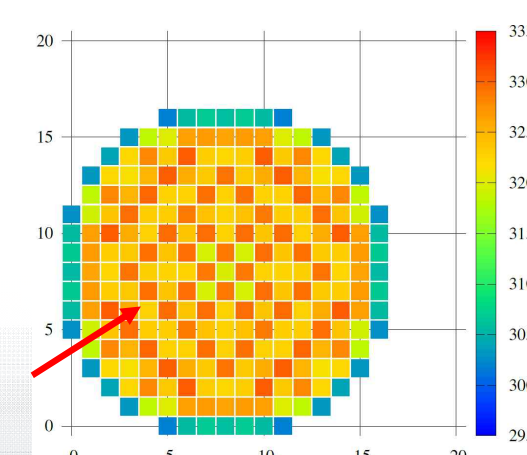
3주기-BOC



3주기-MOC



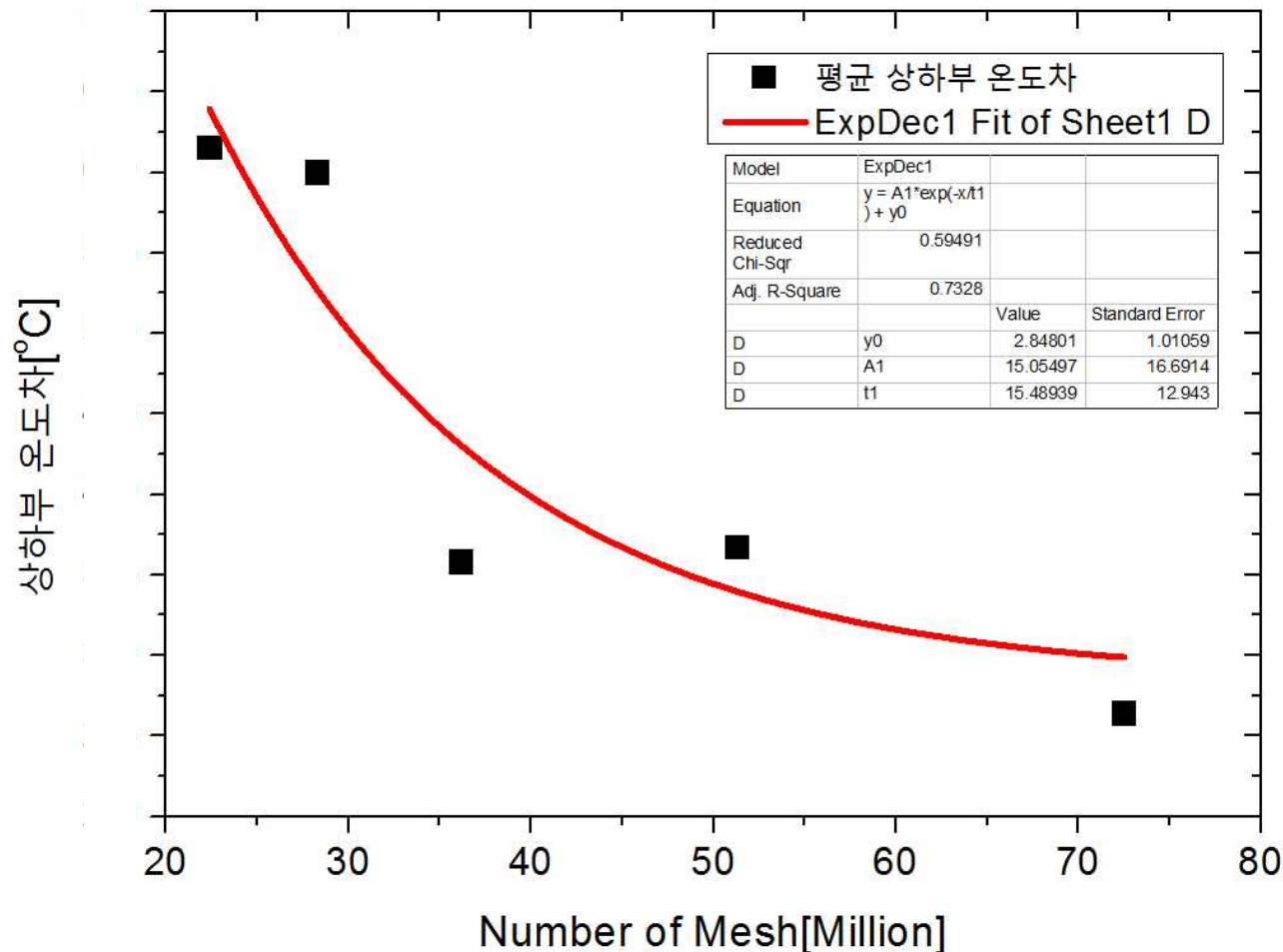
3주기-EOC



2. APR1400 해석 – 천이노심에서의 고온관 열성충 현상

● 격자 민감도

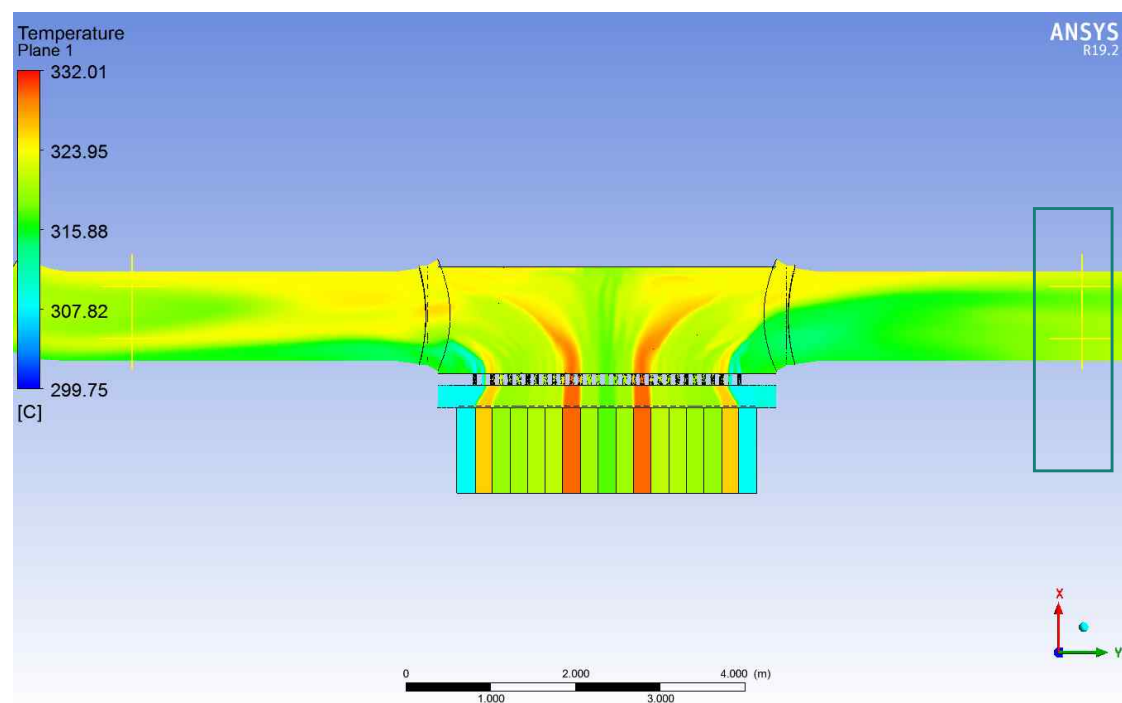
- ❖ 경계조건하에서 격자 수를 증가시켰을때 상하부 온도차의 변화가 점근(Asymptotic)으로 수렴함을 확인
- ❖ 따라서 72Million 격자 시스템을 본 해석에 적용



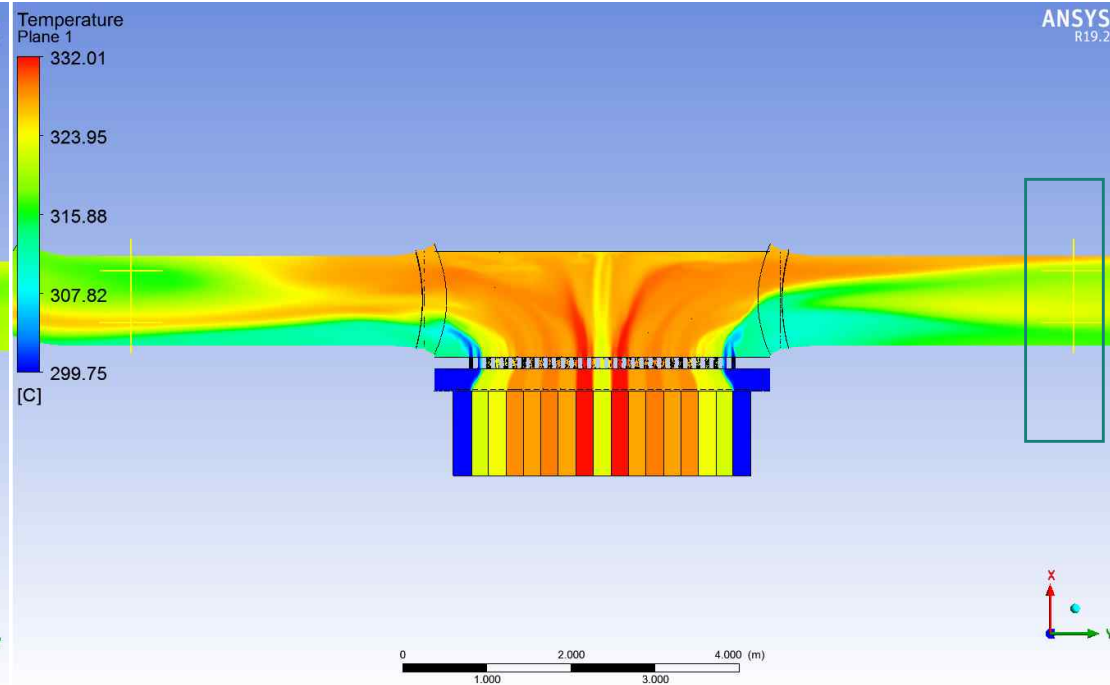
2. APR1400 해석 – 천이노심에서의 고온관 열성충 현상

● 해석결과 (1/2) – 2주기 EOC VS 3주기 BOC

- ❖ 2주기 EOC 대비 3주기 BOC에서는 노심 외곽과 노심 내부의 온도차가 매우 크게 나타남
- ❖ 이로 인해 측정부 위치에서 상하부 온도차가 3주기 BOC에서 크게 나타남



2주기-EOC

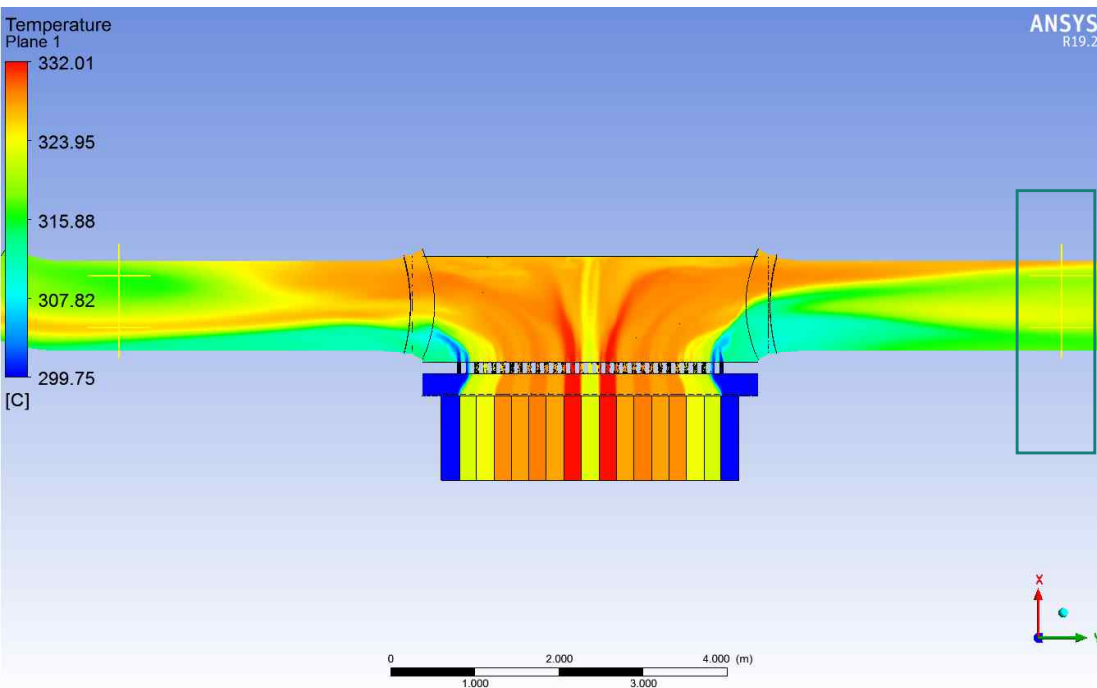


3주기-BOC

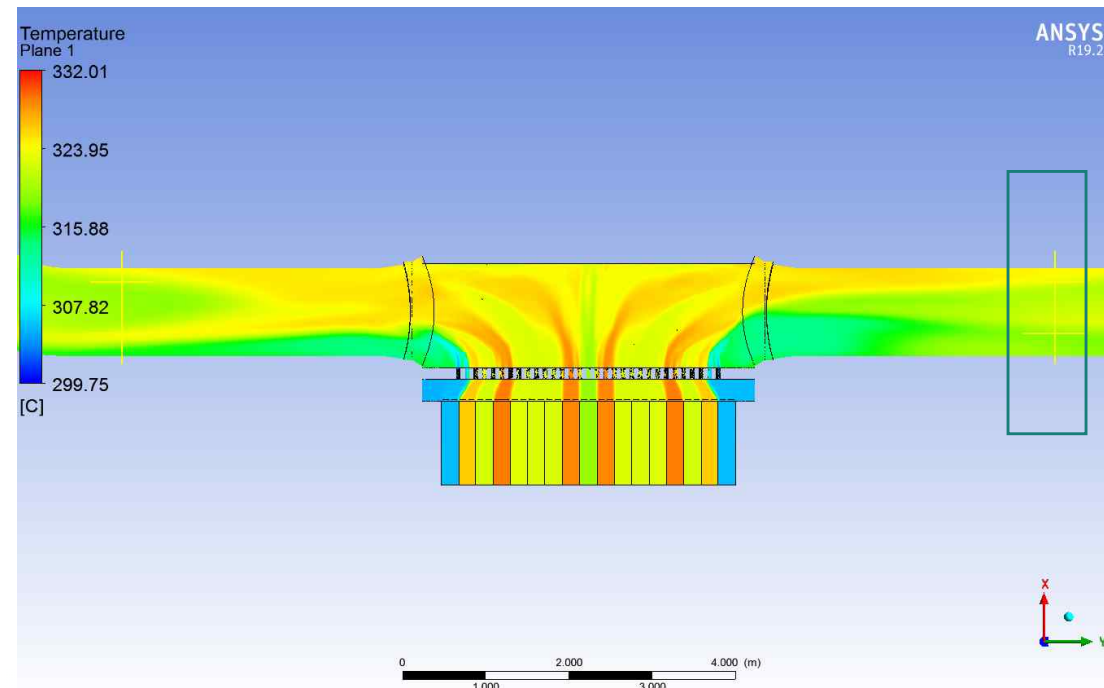
2. APR1400 해석 – 천이노심에서의 고온관 열성충 현상

● 해석결과 (2/2) – 3주기 BOC VS 3주기 EOC

- ❖ 3주기 BOC 대비 3주기 EOC에서는 노심 외곽과 노심 내부의 온도차가 감소됨
- ❖ 이로 인해 측정부 위치에서 상하부 온도차가 감소하는 것으로 평가됨



3주기-BOC

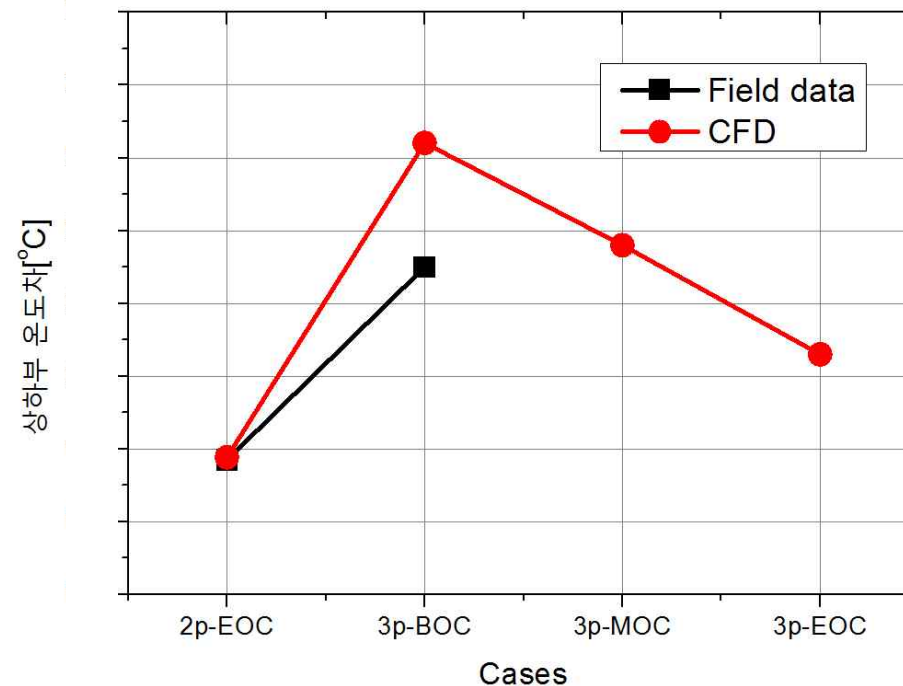


3주기-EOC

2. APR1400 해석 – 천이노심에서의 고온관 열성충 현상

● 해석 결론

- ❖ 3주기 BOC의 예측결과와 현재 현장 측정값의 차이는 약 0.35도로 여러가지 가정사항 및 수치해석의 불확실성을 감안하여 볼때, CFD 예측결과가 실측결과와 유사한 것으로 판단됨
- ❖ 3주기 MOC 및 EOC로 가게 되면 상하부 온도차가 감소되는 것으로 예측되었으며, 2주기 EOC 보다는 상대적으로 높은 값을 유지할 것으로 평가됨
- ❖ 결론적으로 천이노심 장전모형에 따라 노심 외곽과 노심 중심부와의 출구 온도차로 인해 열성충이 발생하는 것으로 예측됨

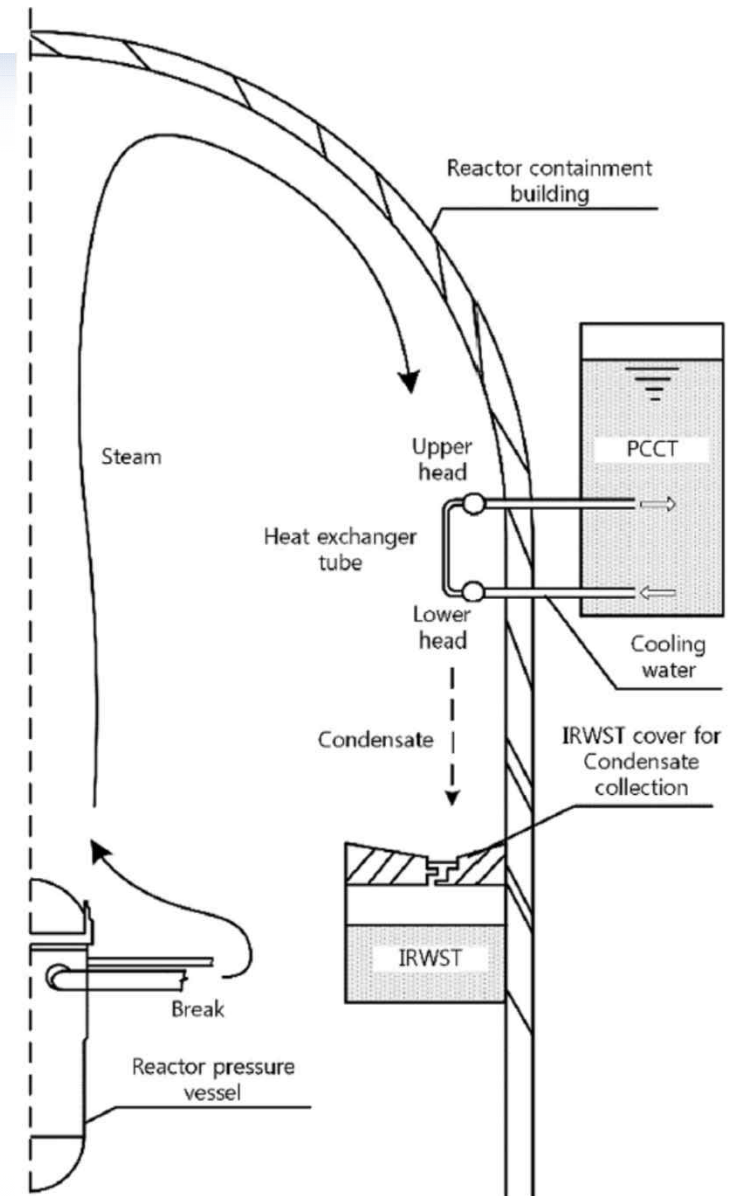
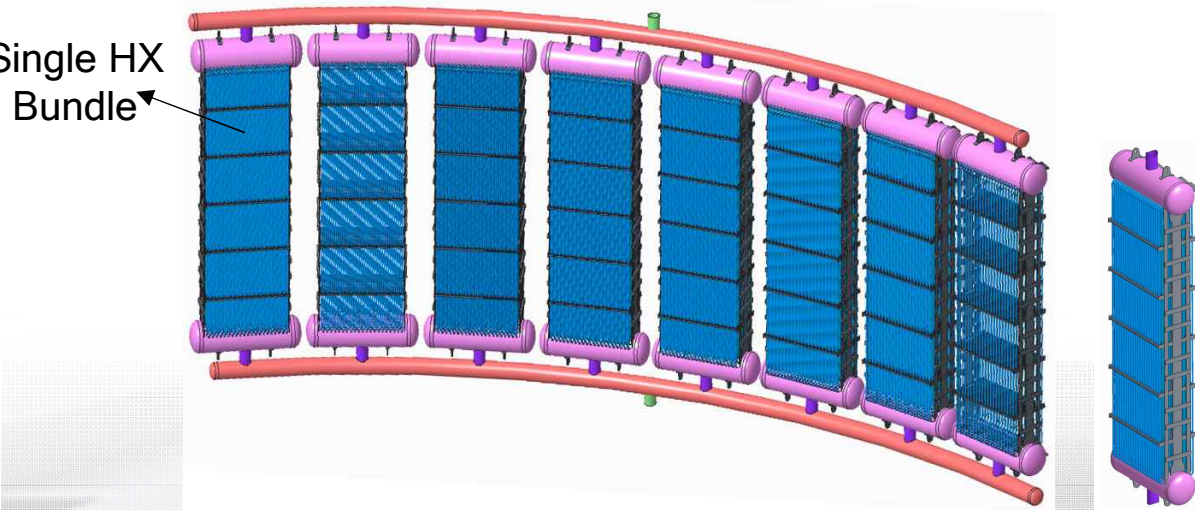


현장 측정결과(평균)와 CFD 분석결과의 비교

3. iPOWER PCCS 응축해석

● iPOWER PCCS 설계 개요

- ❖ Heat Exchanger
- ❖ Diameter/Length : 31.75mm/6m
- ❖ Pitch to Diameter : 2.83
- ❖ System Configuration
- ❖ No. of tubes/bundle : 42x8 (336)
- ❖ No. of bundles/train : 8, No. of trains : 4

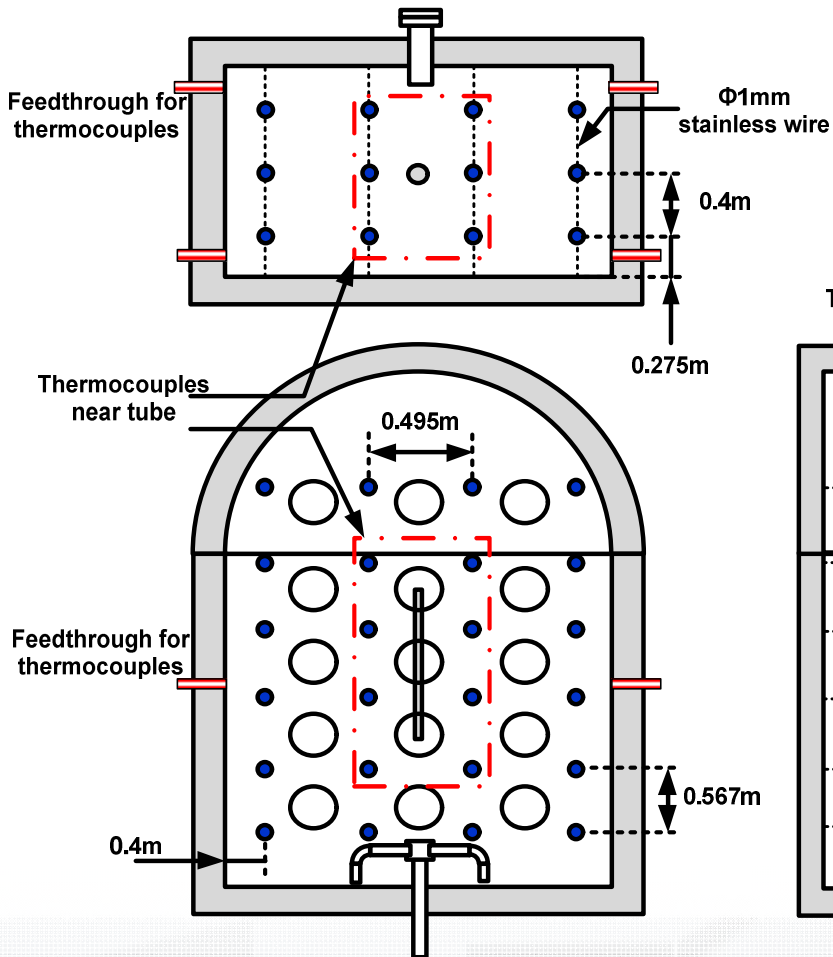


Schematic diagram of PCCS in iPOWER
(S.W. Lee et al., NET, 2017)

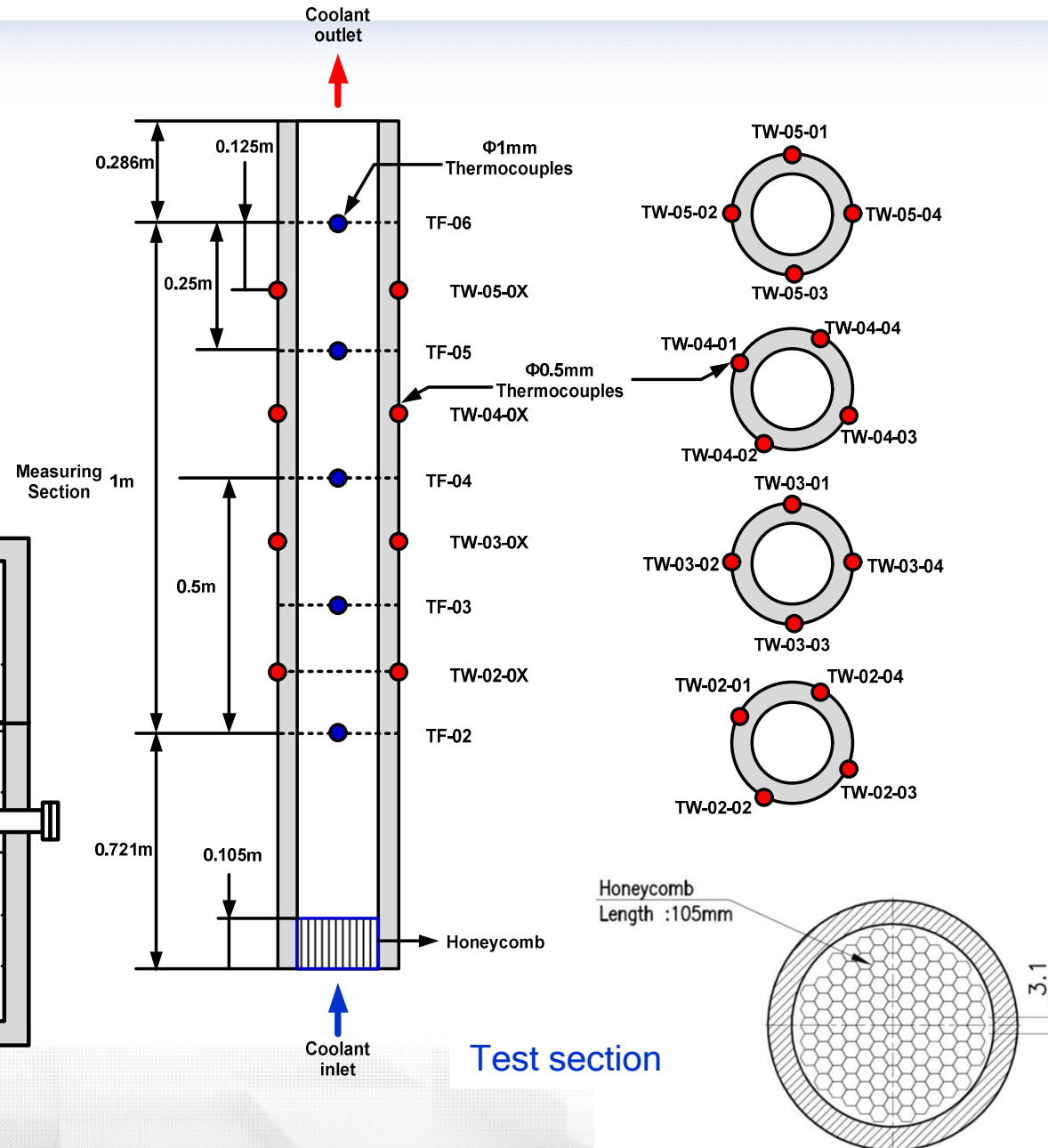
3. iPOWER PCCS 응축해석

● 한수원의 PCCS 응축실험 (1/2)

❖ 원형 열교환기의 열전달계수 측정 시험



Bulk temperature measurements



Test section

3. iPOWER PCCS 응축해석

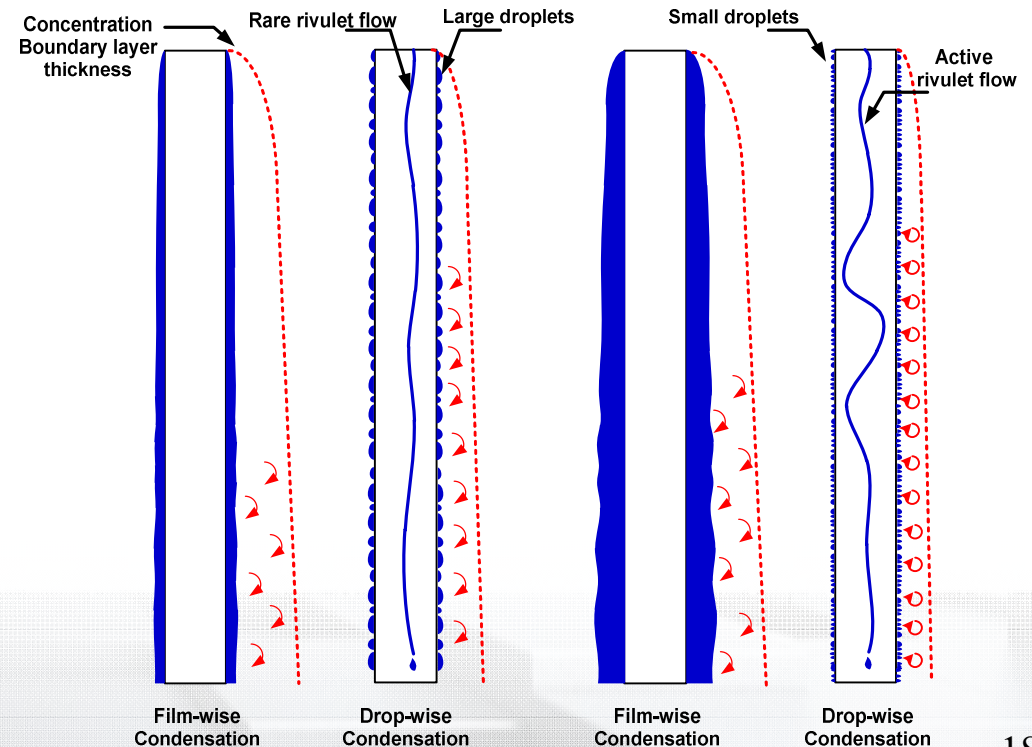
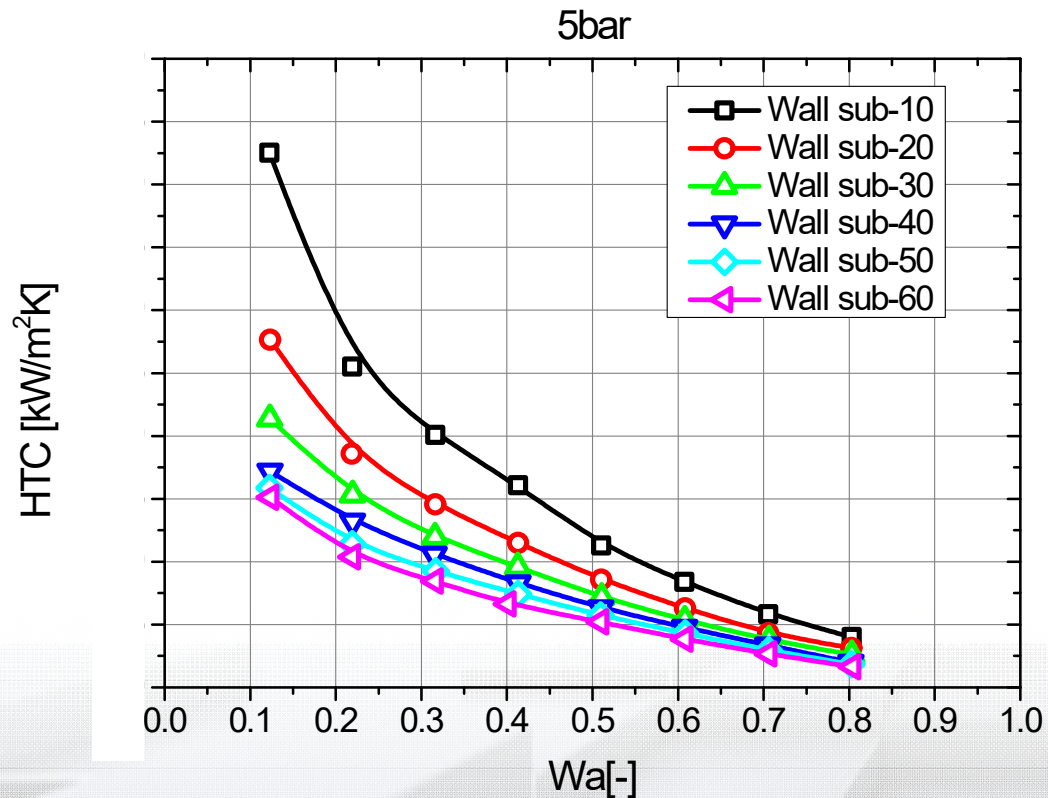
● 한수원의 PCCS 응축실험 (2/2)

❖ 원형 열교환기의 열전달계수 측정 시험

✓ 다양한 벽면과냉각도, 압력, 비응축성 기체조성비에 대해 열전달 계수 실험데이터 확보

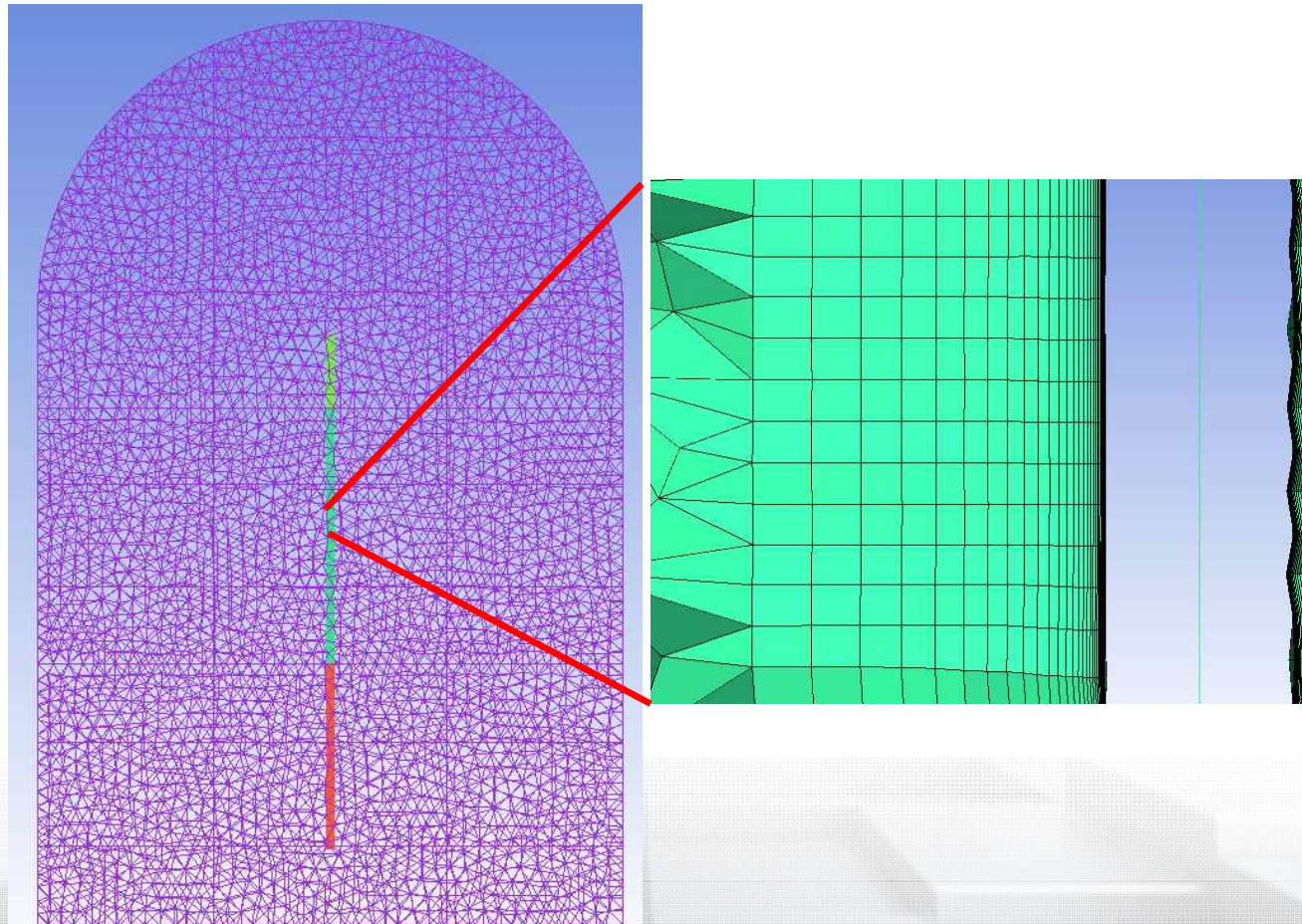
✓ 실험시 열교환기 표면에서 Rivulet 유동 관찰

➔ Rivulet 생성에 따라 주기적으로 벽면을 빠르게 타고 내려오는 현상 확인



3. iPOWER PCCS 응축해석

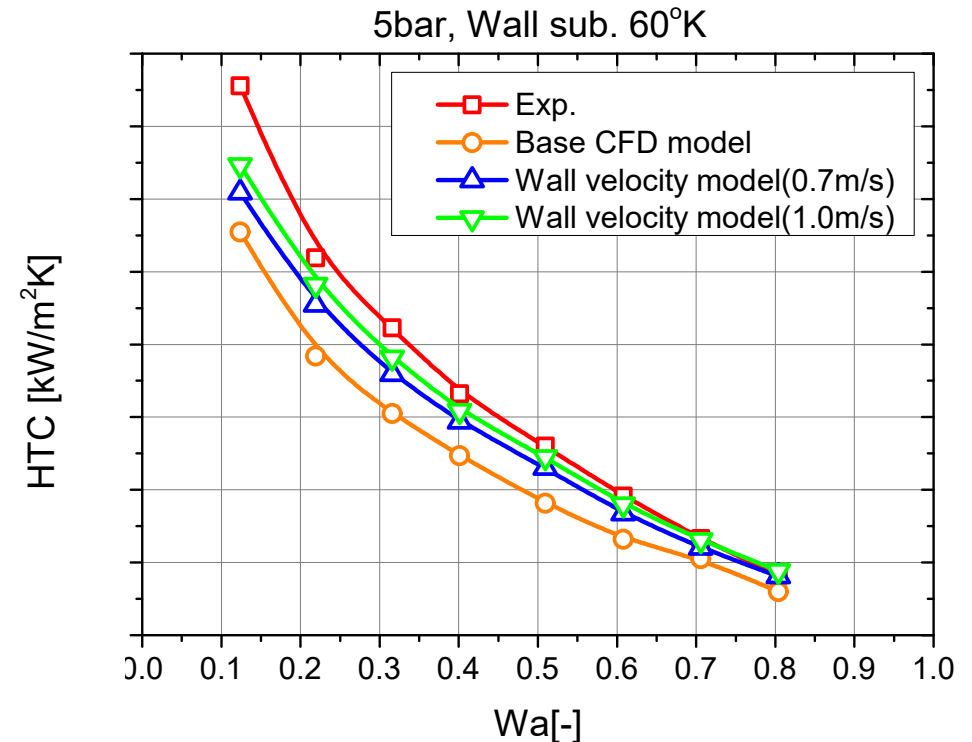
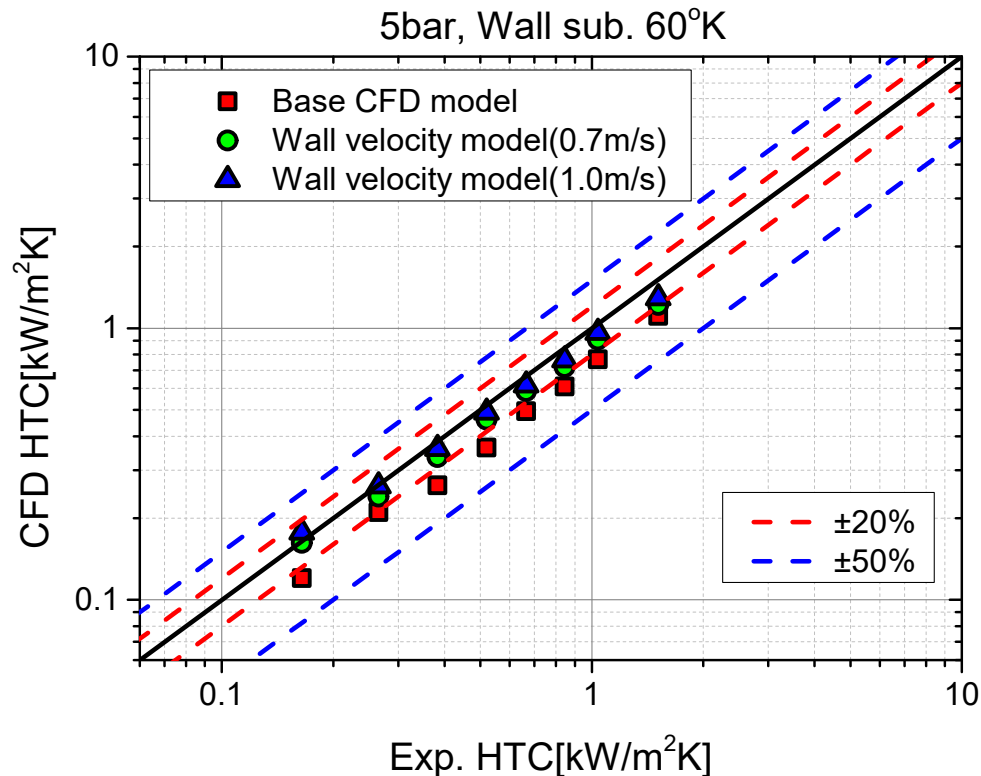
- 해석 목적 : 벽면 근방에서의 속도장 변화가 응축에 미치는 영향을 CFD로 평가
 - ❖ Species transport equation
 - ❖ 별도의 Suction correction 미고려
 - ❖ $Y^+ < 1$ 유지



3. iPOWER PCCS 응축해석

● 해석 결과 (1/2)

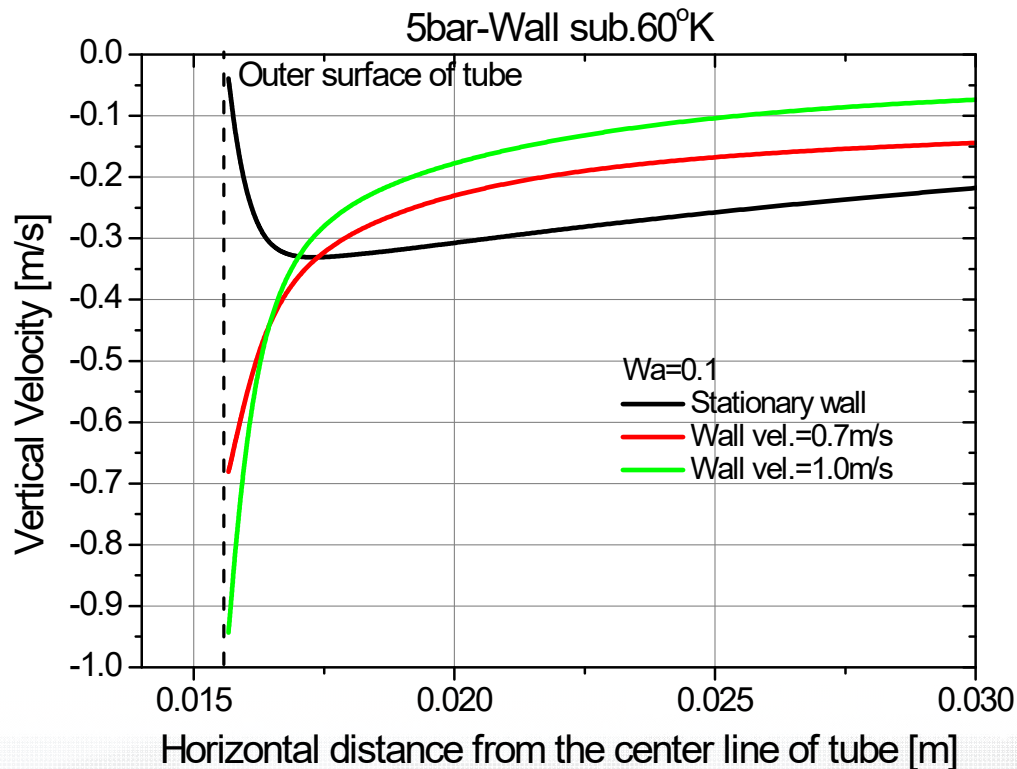
- ❖ Rivulet과 같은 유동효과가 고려되지 않은 기본 모델의 경우 실험결과를 20% 정도 과소 예측
- ❖ CFD 기본 모델에서 하방면으로 벽면이 일괄적으로 움직이는 것을 가정하는 경우 응축열전달량이 증진되는 것을 확인



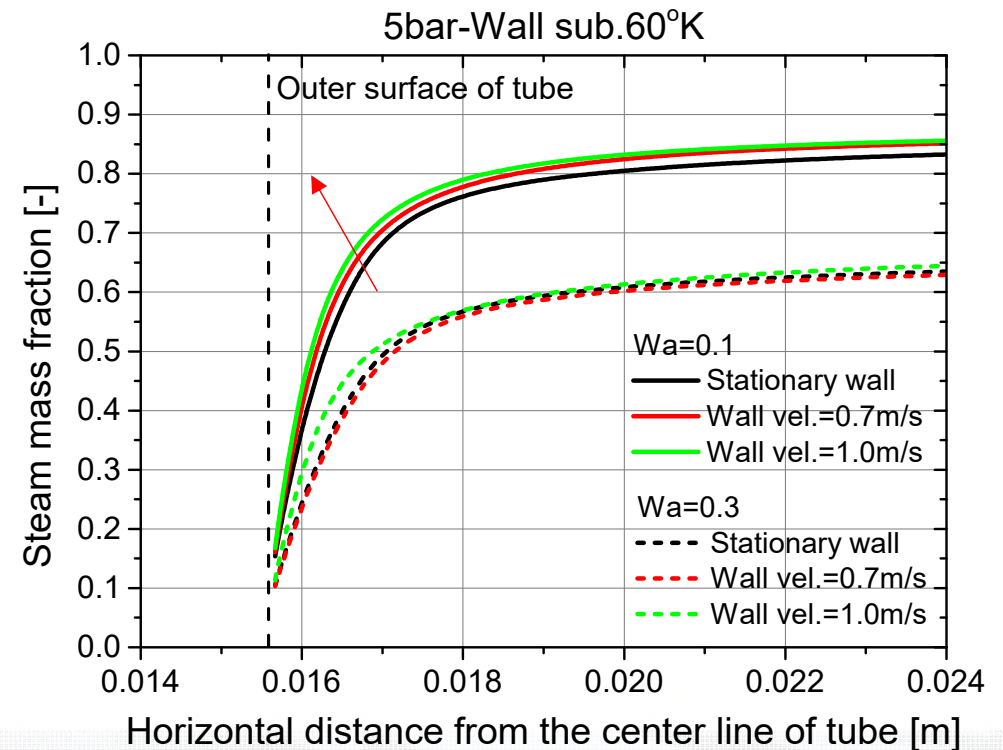
3. iPOWER PCCS 응축해석

● 해석 결과 (2/2)

- ❖ Stationary wall 대비 Rivulet과 같은 유동효과가 고려되면, 벽면 근방의 혼합기체 속도가 증진됨
- ❖ 응축벽면 근방의 증기분율의 기울기가 증대되는 효과가 확인되었으며, 이는 약 20%의 증진효과가 있음을 확인



Vertical velocity profile in gas-side



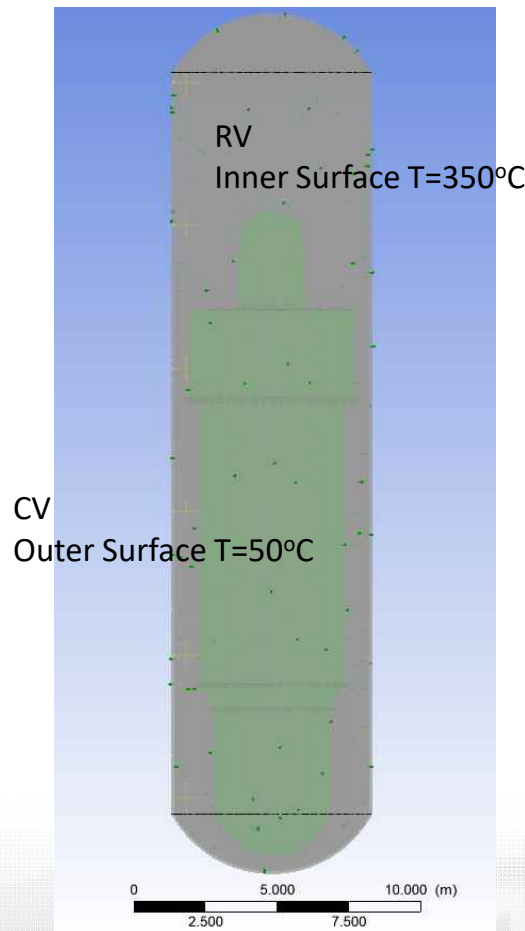
Concentration profile in gas-side

4. i-SMR 철제 격납용기 열손실 및 열복사 해석

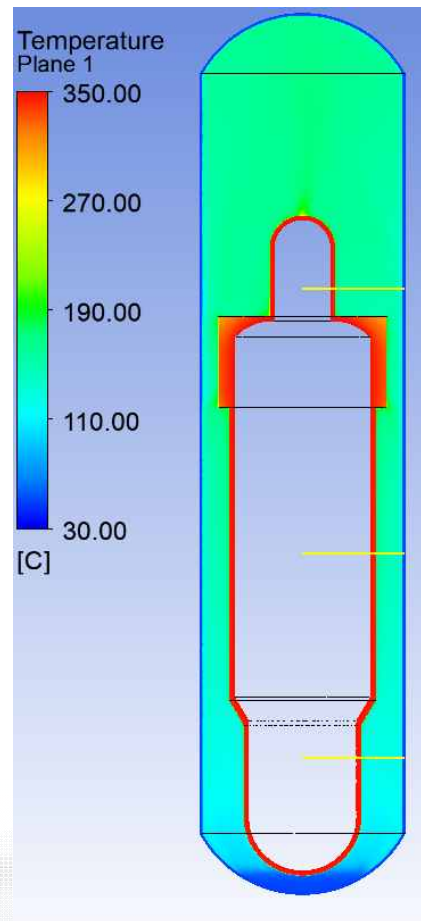
● 정상운전 조건 중 철제 격납용기 대기온도 예비 분석

❖ CFX 코드 활용, CV 대기온도 분포 분석

❖ RV 및 CV 전도 고려



해석모델

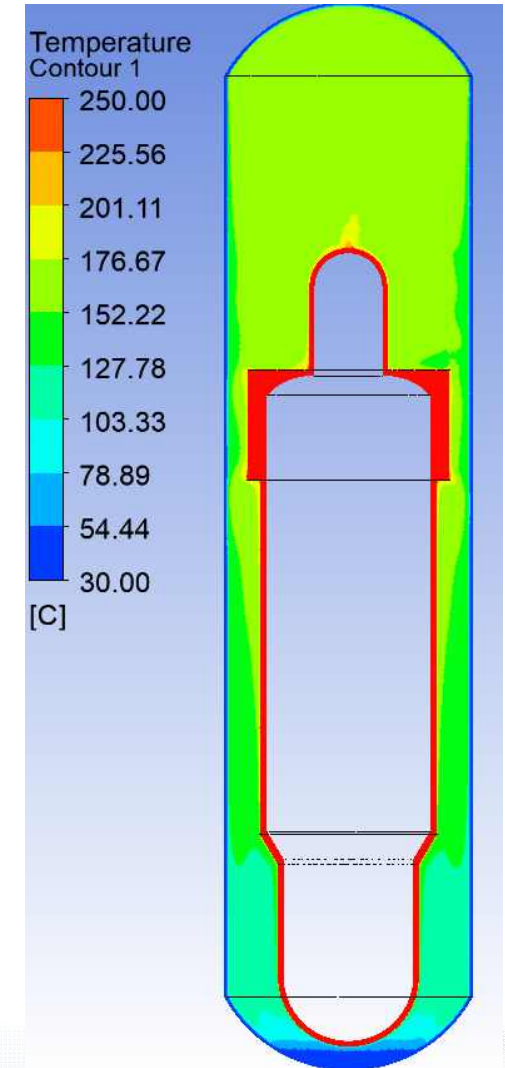
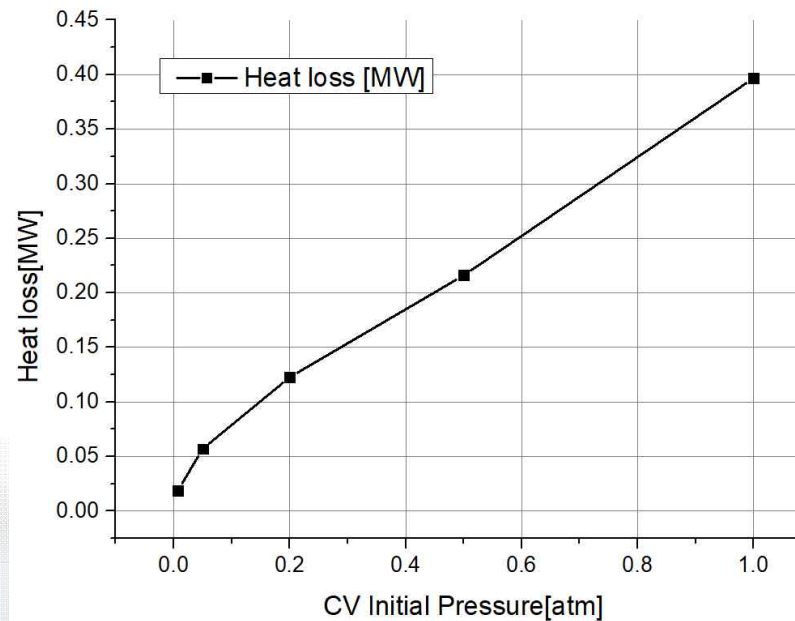
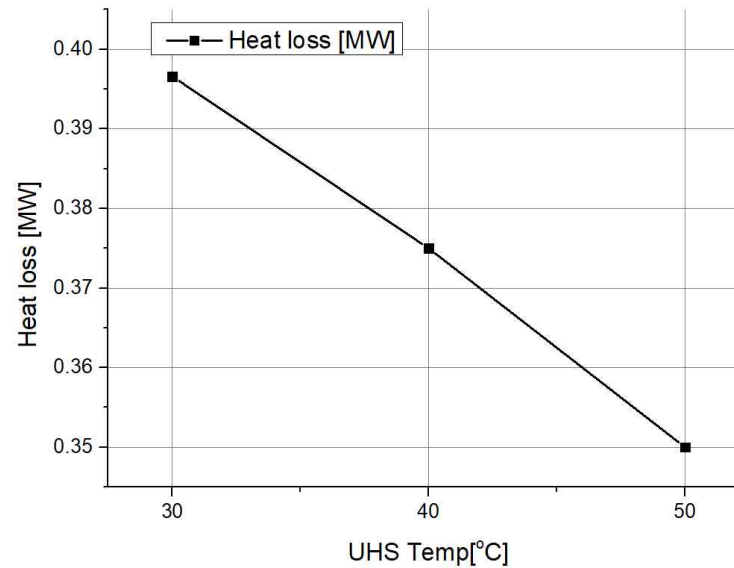
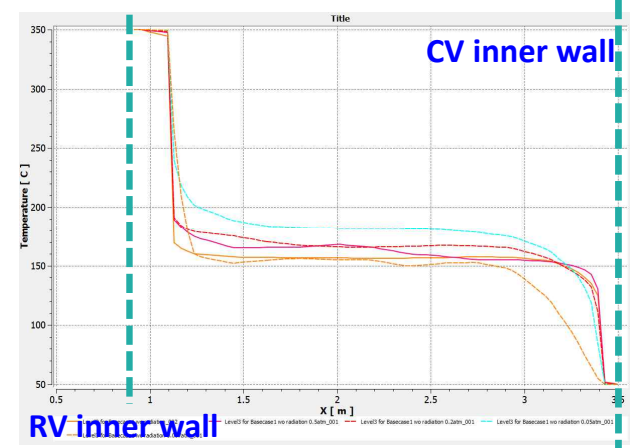
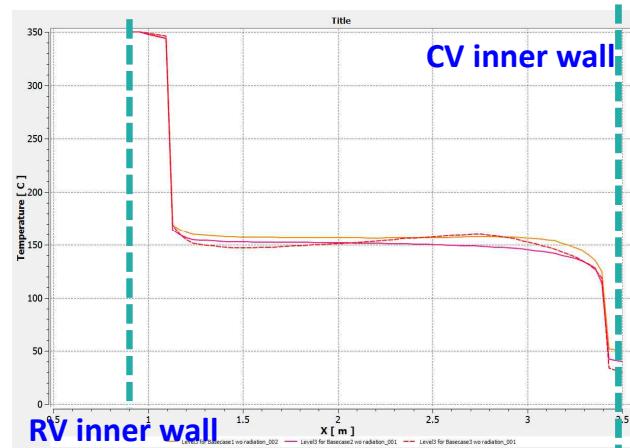


해석결과(예시)

Cases	UHS ini. Temp [°C]	CV ini. Pressure [atm]	Species
Case1	50	1.0	Air
Case2	40		
Case3	30		
Case4	50	0.5	
Case5		0.2	
Case6		0.05	
Case7		0.007	
Case8	30	1.0	Ar
Case9	30		N ₂

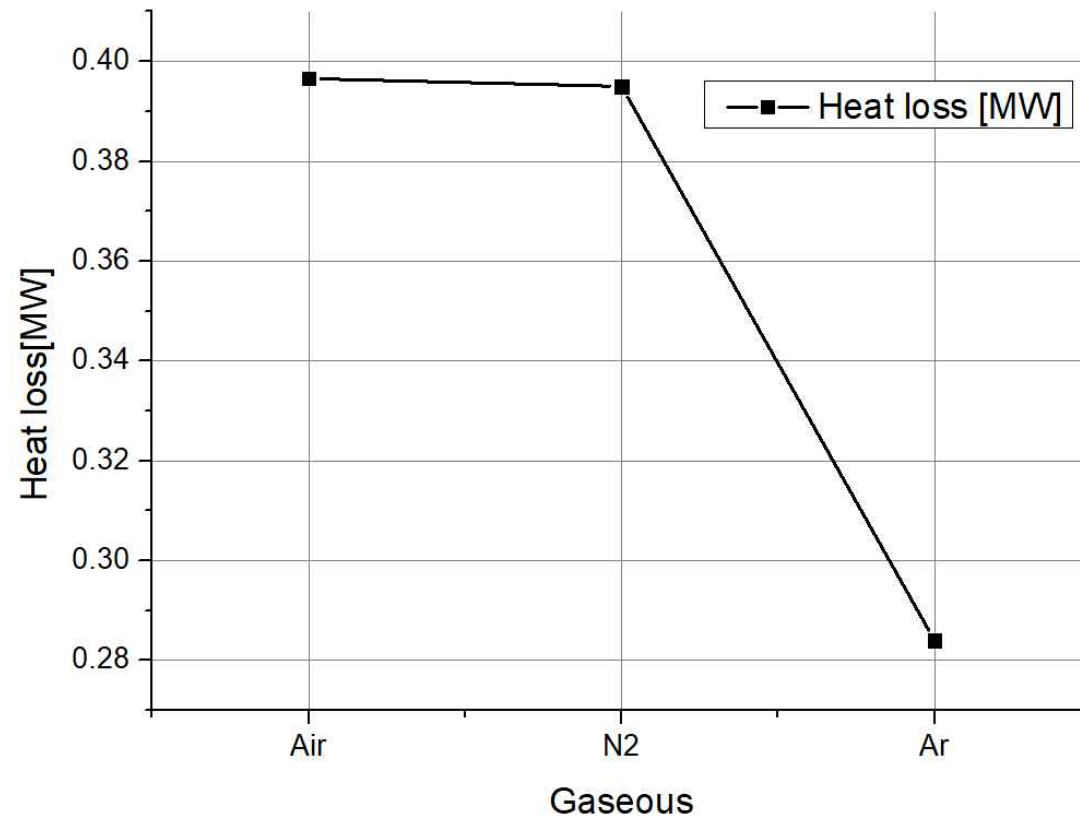
4. i-SMR 철제 격납용기 열손실 및 열복사 해석

- CV 대기온도 분석 결과 -w/o thermal radiation

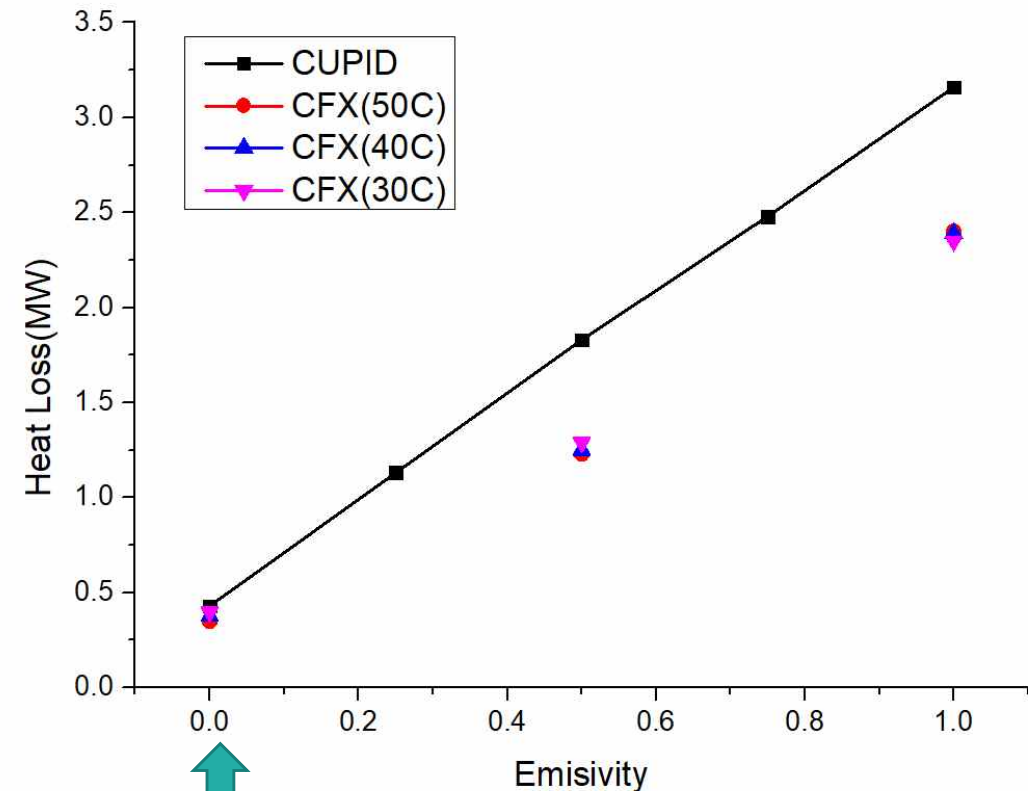


4. i-SMR 철제 격납용기 열손실 및 열복사 해석

- CV 대기온도 분석 결과 – w thermal radiation (P1 model)



W/O thermal radiation (Gaseous)



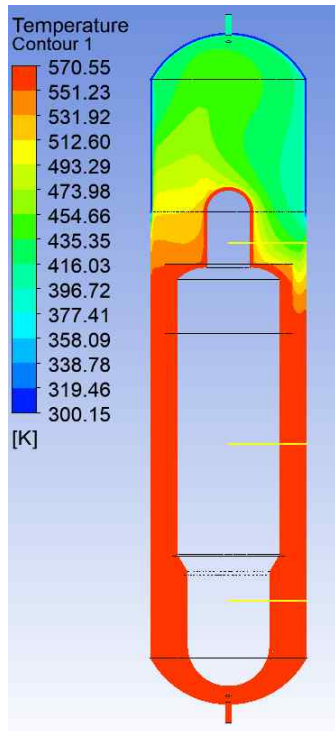
No thermal radiation

W thermal radiation (Code to Code validation)

4. i-SMR 철제 격납용기 열손실 및 열복사 해석

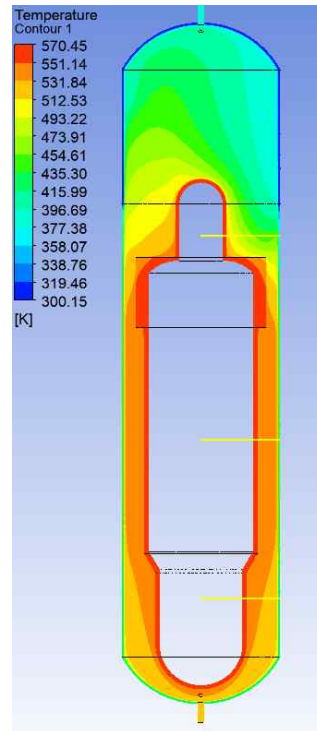
- 전체 침수, 부분 침수 등 다양한 조건에서의 열복사 해석을 통한 열손실량 평가

- ① 진공이며 상부 침수의 경우, 열손실이 전체 침수조건보다 감소
- ② [3] 건식형의 경우, 열교환기 배치에 따라 CV 상부영역의 온도가 상대적으로 더 낮게 유지될 것으로 예상



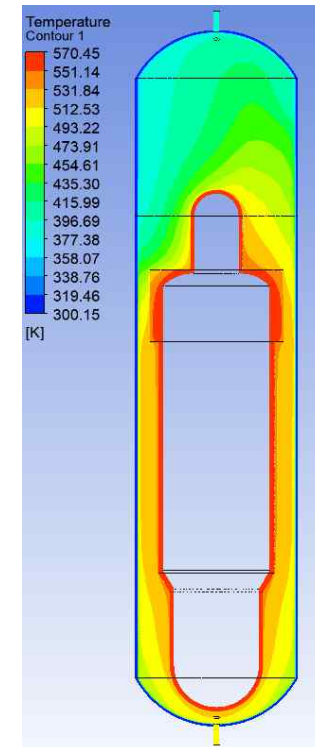
0.0942MW

<상부 침수, 하부 단열>
<진공 조건>



0.375MW

<상부 침수, cv 외벽 자연대류 열전달 고려>



0.517MW

*NuScale=0.253MW

<전체 침수>

5. 결론

설계적용 현황

- 컴퓨팅 성능의 눈부신 발달로 원자로 설계 분야 CFD 활용도가 점증
- 과거 단상유동해석 분야에서 응축, 비등 등 일부 2상 유동해석 영역까지 확장을 시도하고 있음
- 2상 유동해석의 경우, 해석의 복잡성, CFD 스케일의 검증 문제 등 여전히 한계점도 있음

한계점 및 제언

- 단상 / 2상 유동 CFD 해석의 검증을 위한 다양한 기초/기기/시스템 레벨의 실험데이터가 부족
 - CFD 스케일의 실험을 위해서는 실험연구자의 추가적인 노력이 요구(예산, 시간 등)
- System 코드 해석 연구 분야에 비해 협업 체계가 상대적으로 약해 기술협업/상호검증 노력이 필요
- CMFD 코드 해석과의 협업도 필요 (상호간 장단점, 한계점 등)
- 국내 CFD 스케일 실험 및 해석연구자 간의 국내표준문제 추진 등 국내 협업체계 구축 필요