



# TN-32B 캐스크 내 자연대류 열전달에 대한 종합적 예비 수치해석

*Preliminary Numerical Analysis of Natural Convection  
Heat Transfer in a TN-32B Cask*

한국원자력학회 2026 춘계학술대회  
2026. 05. 07. (목요일)

Research Lab. for Green Energy System  
정태영, 김진현, 김도윤, 정재호

**01** Introduction

**02** Computational Model

**03** Numerical Conditions

**04** CFD Results Analysis

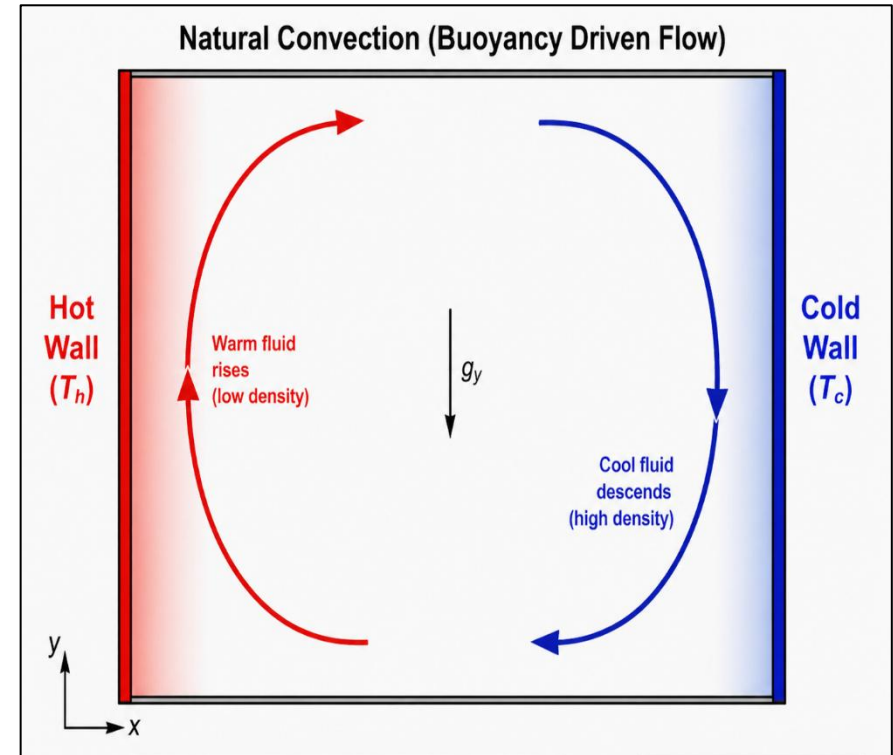
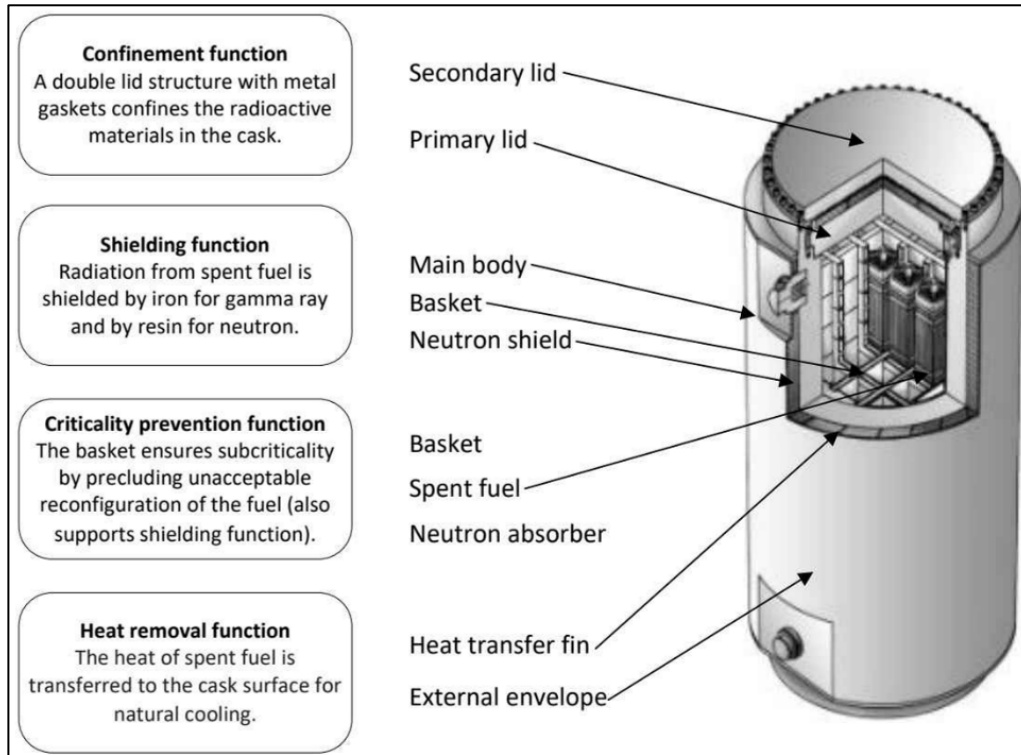
**05** Conclusions

# 01

## Introduction

# 1. Introduction ( 1 / 4 )

- » **사용후핵연료 건식저장용기의 열적 안전성**
  - 사용후핵연료는 연소 이후에도 지속적인 붕괴열 발생
  - 건식저장용기는 별도의 능동 냉각계통 없이 전도, 자연대류, 복사에 의존
  - 내부 헬륨 영역에서는 온도 차이에 의해 형성되는 부력 기반 자연대류가 열전달에 기여
  - 피복관 최고온도 예측은 건식저장 안전성 평가의 핵심 지표



[Fig. 1. Structure of a dry storage cask with major safety functions]

[Fig. 2. Schematic of buoyancy-driven natural convection]

# 1. Introduction ( 2 / 4 )

## » TN-32B 캐스크의 자연대류 냉각 구조

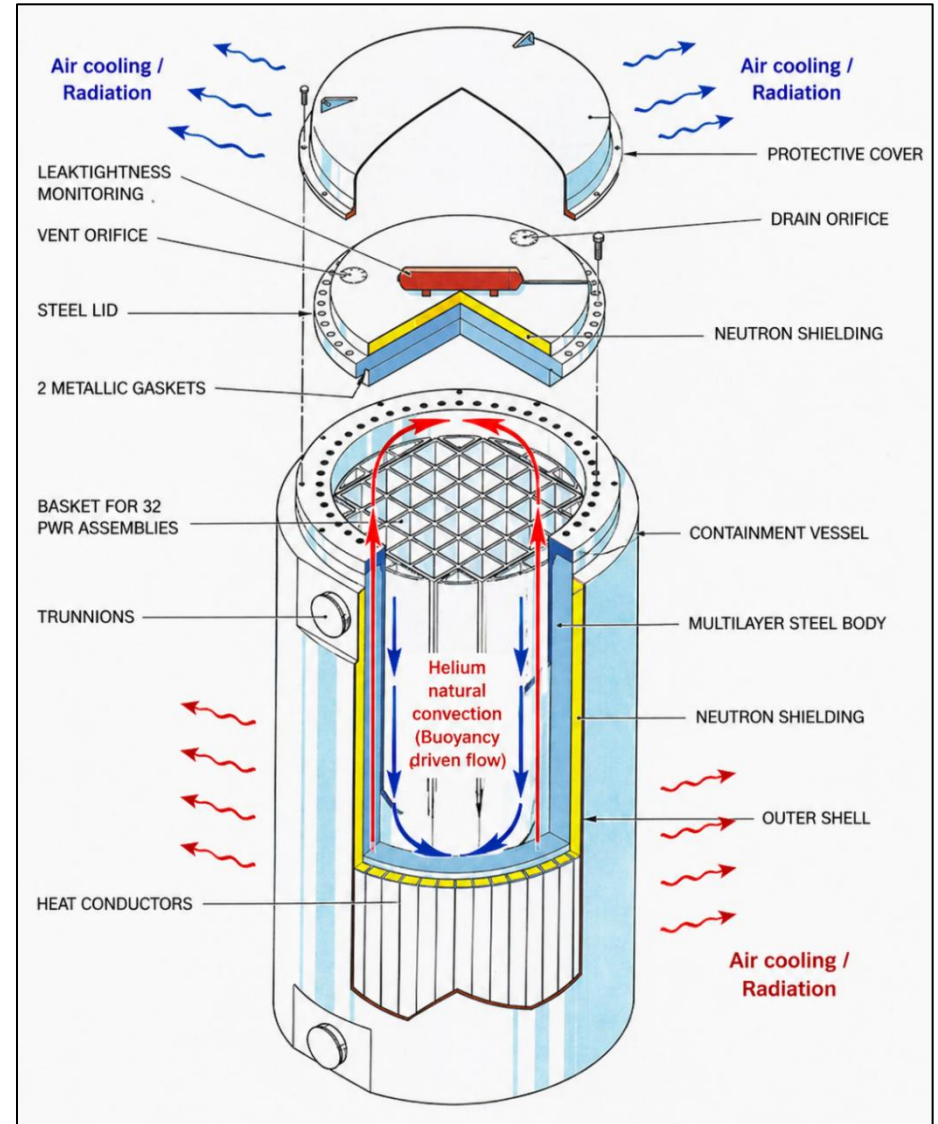
- ▶ 내·외부 열전달 매커니즘으로 구성

## » 내부 열전달 메커니즘

- ▶ 연료봉에서 발생한 붕괴열은 캐스크 내부 구조물로 전달
- ▶ 온도 차이에 따른 내부 헬륨 밀도 변화로 부력 기반 자연대류 순환 형성
- ▶ 고온 저밀도 유체는 상승, 저온 고밀도 유체는 하강

## » 외부 열제거 메커니즘

- ▶ 캐스크 외벽에서 자연대류 및 복사를 통해 열 방출
- ▶ 외부 공기 유동에 의해 추가적인 냉각 효과 발생



[Fig. 3. Heat removal paths in the TN-32B dry storage cask]

# 1. Introduction ( 3 / 4 )

## » 기존 연구 동향

[Table 1. Summary of Previous TN-32B Thermal Modeling Studies]

연구 기관	주요 접근 방법	역할
EPRI	Benchmark data 제공	실험/기준 데이터 기반 검증 자료
PNNL	Porous-media CFD 해석	연료집합체 평균화 기반 열성능 예측



## » Porous-media 기반 해석의 한계

- 연료봉 간 세부 유로 및 국부 형상 반영 제한
- 연료집합체 내부 유동·온도장의 평균화
- 국부 hotspot 및 최고온도 위치 예측 한계
- 상세 열유동 메커니즘 분석에 제약



## » 개선 사항

- 내부 국부 열유동 특성 평가를 위한 rod-resolved fuel assembly 모델 필요

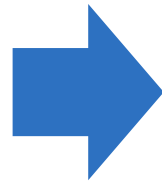
# 1. Introduction ( 4 / 4 )

## » 연구 목적 및 해석 전략

- TN-32B 캐스크에 대해 rod-resolved fuel assembly 모델 구축
- 1/4 대칭 모델을 적용하여 계산 효율 확보
- STAR-CCM+ 기반 정상상태 자연대류 및 복사 열전달 해석 수행
- EPRI benchmark 조건을 반영하여 해석 결과의 타당성 검토

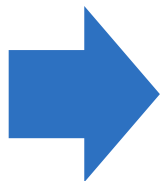
### » 기존 한계

- Porous media 모델
- 국부 열유동 해석 한계



### » 상세 모델 구축

- Rod-resolved fuel assembly
- 연료봉 직접 구현



### » 수치해석 수행

- CFD (STAR-CCM+)
- 자연대류 및 복사 열전달 고려



### » 타당성 검토

- EPRI benchmark 비교
- 피복관 온도 및 축방향 온도분포 검토

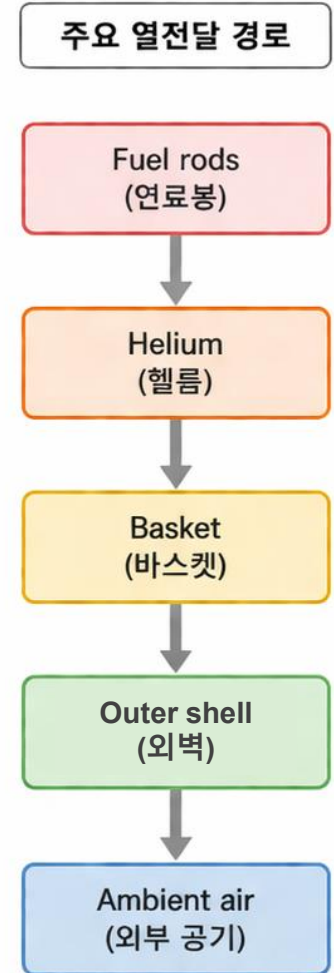
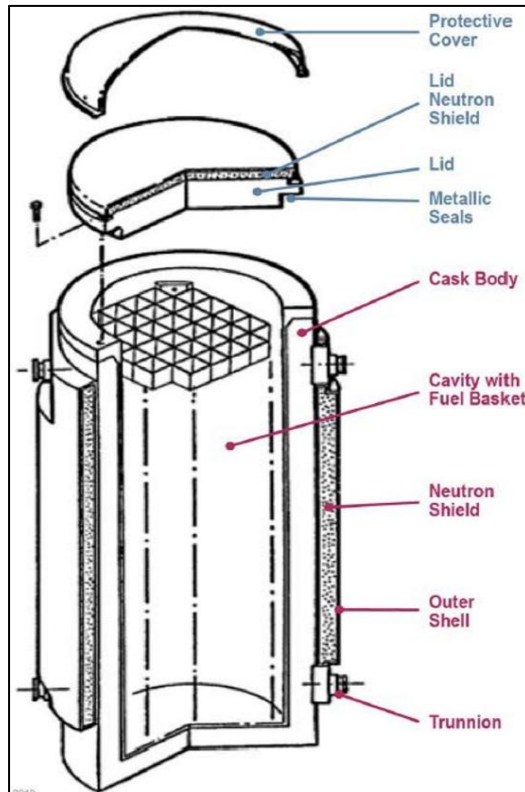
# 02

## Computational Model

## 2. Computational Model ( 1 / 4 )

### » TN-32B 캐스크 형상 및 주요 열전달 경로

- ▶ TN-32B 캐스크는 outer shell, neutron shield, basket, fuel rods로 구성됨
- ▶ 연료 집합체는 바스켓 내부에 배열되며, 내부 공간은 헬륨으로 충전
- ▶ 헬륨은 자연대류를 통해 연료에서 발생한 붕괴열을 구조물로 전달
- ▶ 전체 형상 및 주요 관심 열전달 경로는 하기와 같음



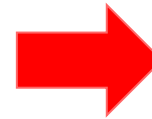
[Fig. 4. TN-32B cask configuration and major heat removal paths]

## 2. Computational Model ( 2 / 4 )

### » 1/4 대칭 해석 영역

- ▶ 전체 32개 연료집합체 중 90° sector에 해당하는 8개 연료집합체를 해석 대상으로 선정
- ▶ 두 대칭면에 Symmetry 조건을 적용하여 전체 캐스크의 열거동을 대표함
- ▶ EPRI Benchmark의 붕괴열을 기준으로, 선정된 연료집합체의 열하중을 부여
- ▶ 계산 효율을 확보하면서도, 공간적 열원 분포 특성을 유지

	1.	2.	3.	4.		
	912.2	978.2	914.4	799.5		
	[W]	[W]	[W]	[W]		
5.	6.	7.	8.	9.	10.	
800.9	1008.6	1142.4	1121.2	975.1	814.5	
[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	
11.	12.	13.	14.	15.	16.	
802.6	1135.0	573.8	1037.0	1124.8	941.3	
[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	
17.	18.	19.	20.	21.	22.	
961.7	1131.1	920.2	646.2	1135.8	941.2	
[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	
23.	24.	25.	26.	27.	28.	
934.7	914.2	1133.7	1136.3	988.2	916.9	
[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	
	29.	30.	31.	32.		
	914.2	968.0	927.7	804.3		
	[W]	[W]	[W]	[W]		



[Fig. 5. Fuel assembly decay heat loading map of the TN-32B cask]

[Fig. 6. Quarter-symmetry computational domain of the TN-32B cask]

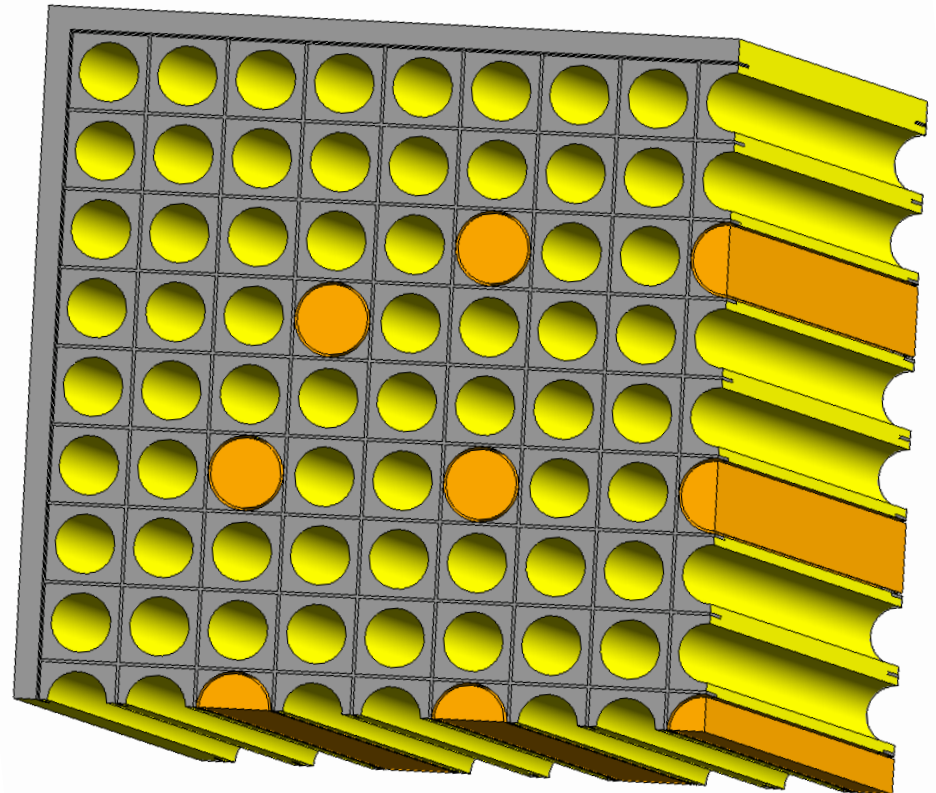
## 2. Computational Model ( 3 / 4 )

### » 연료집합체 상세 형상 모델링

- ▶ 기존 Porous-media 연료집합체 영역을 균질 매질로 단순화함
- ▶ 본 연구에서는 fuel rods와 basket을 직접 반영한 rod-resolved model을 적용
- ▶ 벤치마크 형상 정보를 기반으로 헬륨 유로를 포함한 기하학적 배치를 반영
- ▶ 이를 통해 국부 유동·온도 분포 및 hotspot 위치 평가 가능

### Key Point

연료 집합체 내부 형상을  
직접 반영한 상세 모델 구축

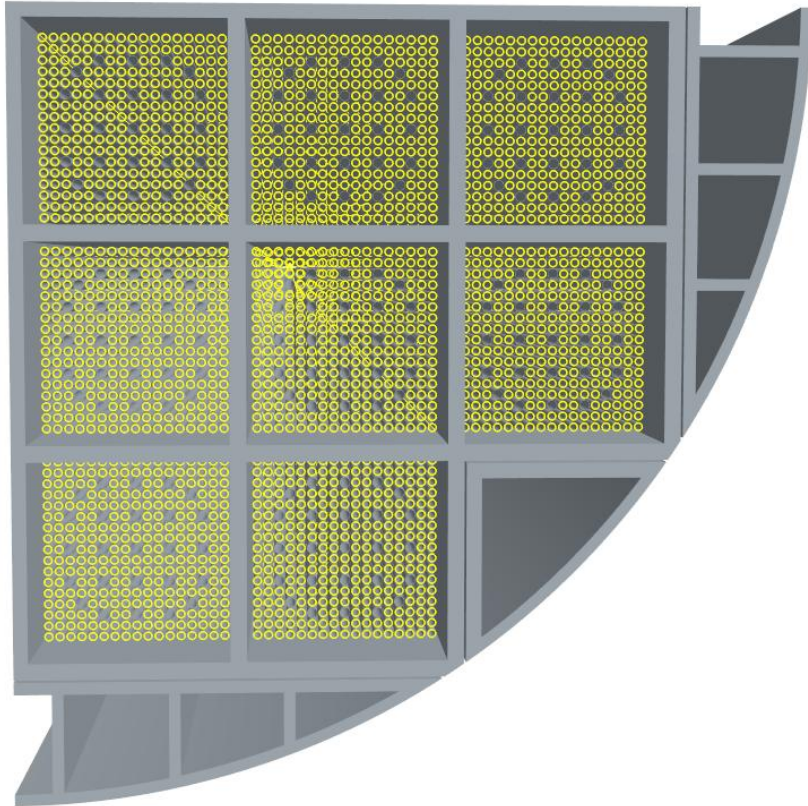


[Fig. 7. Rod-resolved fuel assembly model]

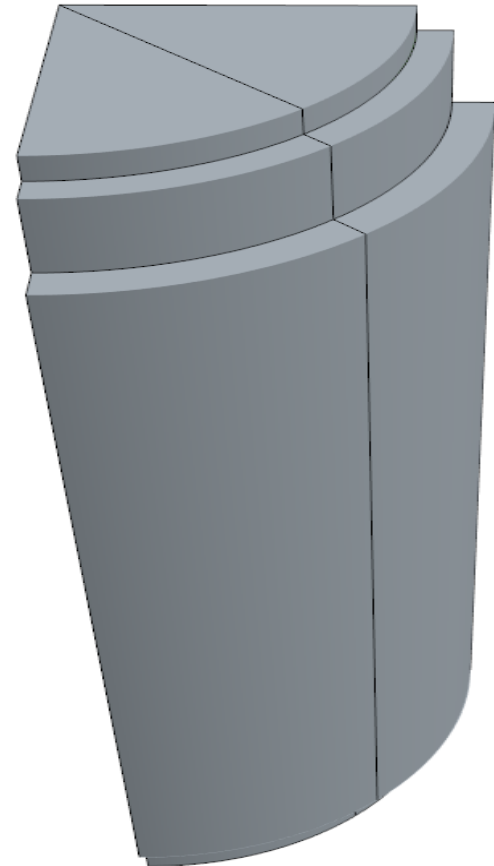
## 2. Computational Model ( 4 / 4 )

### » 격자 생성 및 Grid Resolution

- ▶ 연료봉-헬륨-바스켓 사이 좁은 간극을 고려하여 국부 격자 세분화
- ▶ 본 격자는 pointwise 기반 structured hexahedral mesh를 적용
- ▶ 1/4 영역에 대해 총 124,657,732 cells로, 세밀한 구성을 통해 격자 해상도 확보



[Fig. 8. Detailed mesh in the fuel assembly region]



[Fig. 9. Quarter-symmetry computational domain]

# 03

## Numerical Conditions

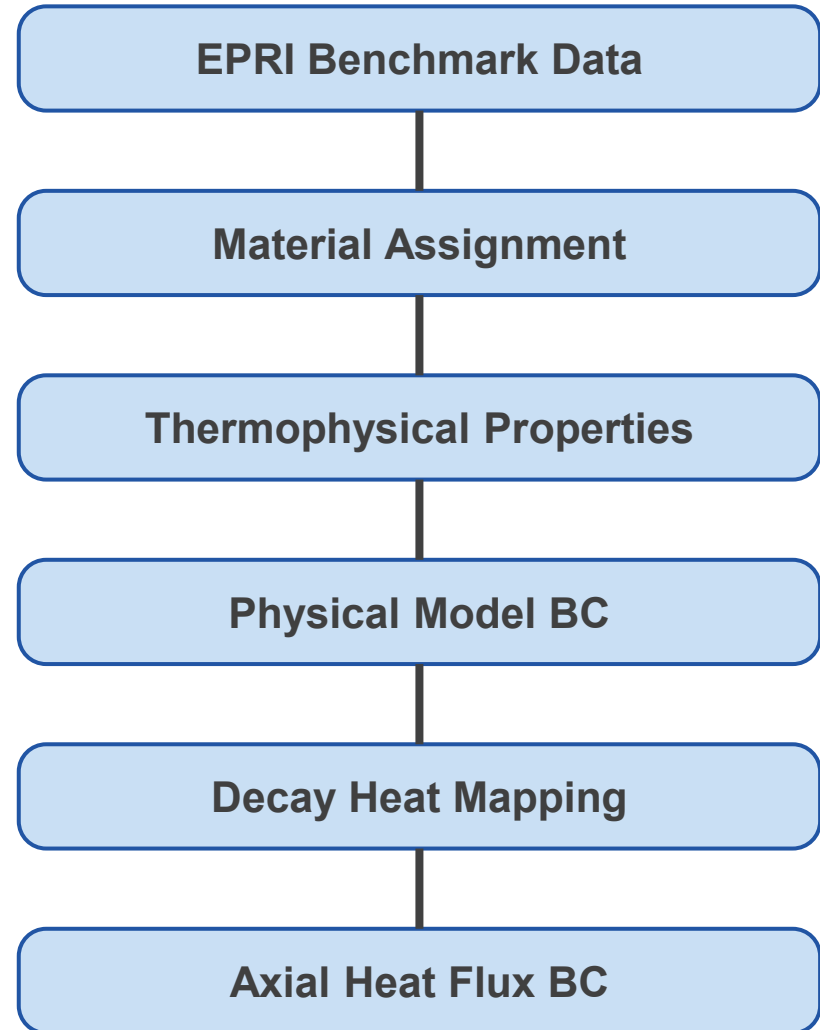
# 3. Numerical Conditions ( 1 / 7 )

## » Computational Conditions

[Table 2. Overview of Numerical Conditions]

Category	Setup
CFD code	STAR-CCM+
Analysis type	Steady-state
Computational domain	1/4 sector model
Reference condition	EPRI benchmark data
Heat transfer modes	Conduction, natural convection, radiation
Ambient Temperature	25 [°C]
constant absolute pressure	2,200 [mbar]
Quarter-sector applied power	7.497 [kW]

## » Numerical Procedure



### 3. Numerical Conditions ( 2 / 7 )

#### » Material Assignment

- TN-32B 캐스크의 주요 구성품별 material을 문헌 기반으로 지정
- 구조재, 차폐재, 작동유체 및 fuel rods 영역에 해당하는 물성치를 적용

[Table 3. Material Assignment for Major TN-32B Components]

Parts	Material
Fluid region	Helium
Basket	Al 6061-T6
Basket rail	Al 6061-T6
Clad	Al 6061-T6
Outer shell	Carbon Steel SA 516 Gr 70
Gamma shield	Carbon steel SA 516 Gr 70
Inner shell	Carbon Steel SA 203 Gr A
Cask lid	Carbon steel SA 203 Gr A
Neutron shield	Polyester resin
Tube(Fuel rod)	Cladding material

#### TN-32B 주요 재료

- Helium
- Al 6061 T6
- Carbon Steel SA 516 Gr 70
- Carbon Steel SA 203 Gr A
- Polyester resin
- Cladding

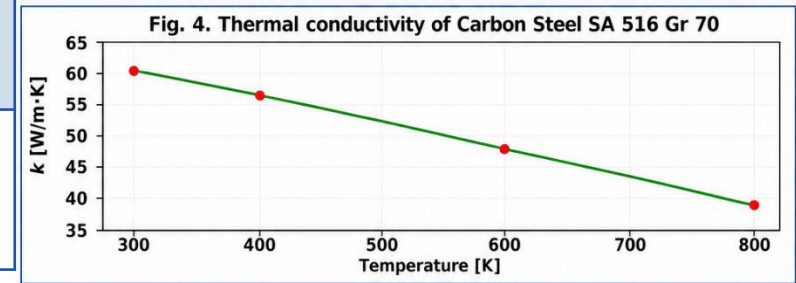
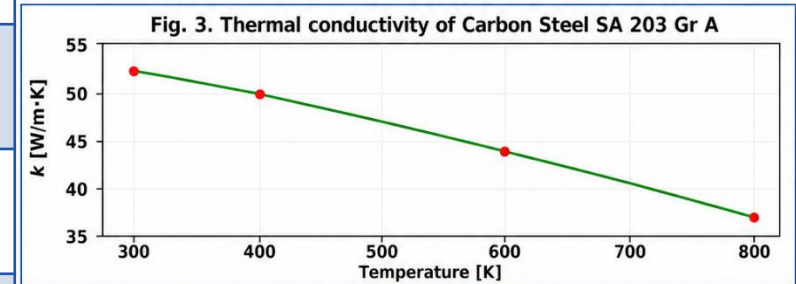
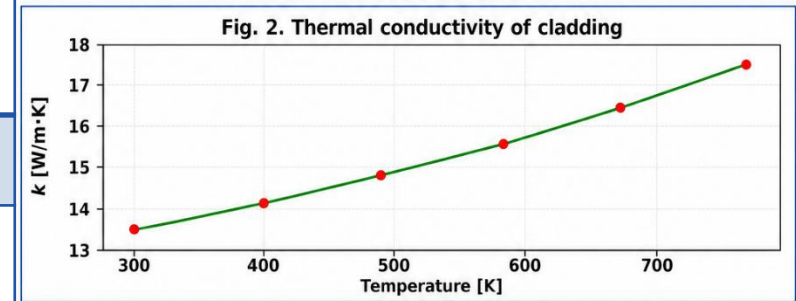
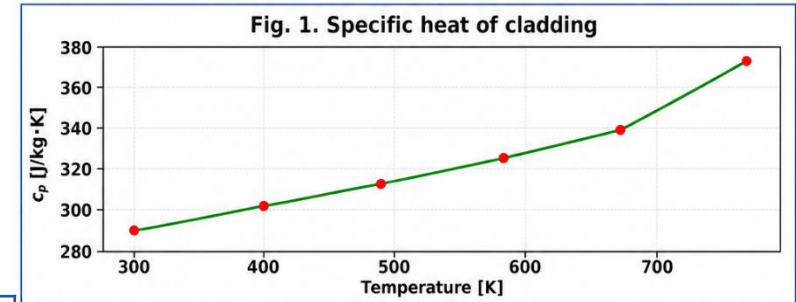
# 3. Numerical Conditions ( 3 / 7 )

## » Thermophysical Properties

- ▶ 주요 재료의 밀도, 비열, 열전도율을 재료별로 적용
- ▶ 온도 의존 열물성치를 적용하여 물성 변화를 반영

[Table 4. Thermophysical Properties Used in the CFD Model]

	Al 6061 T6	Al 6063 T5	Cladding	Carbon steel SA 203 Gr A	Carbon steel SA 516 Gr 70	Polyester resin
Density [ $kg/m^3$ ]	2700.0	2700.0	8055.0	7817.0	7854.0	1577.75
Specific Heat [ $J/kg \cdot K$ ]	903.0	903.0	Figure 1	434.0	434.0	1297.908
Thermal Conductivity [ $W/m \cdot K$ ]	167.0	209.0	Figure 2	Figure 3	Figure 4	0.18
Radiation Temperature [K]	300	300	300	300	300	300
Static temperature [ $^{\circ}C$ ]	150	150	150	150	150	150
Standard State Temperature [K]	-	-	298.15	-	-	-



# 3. Numerical Conditions ( 4 / 7 )

## » Radiation Boundary Conditions

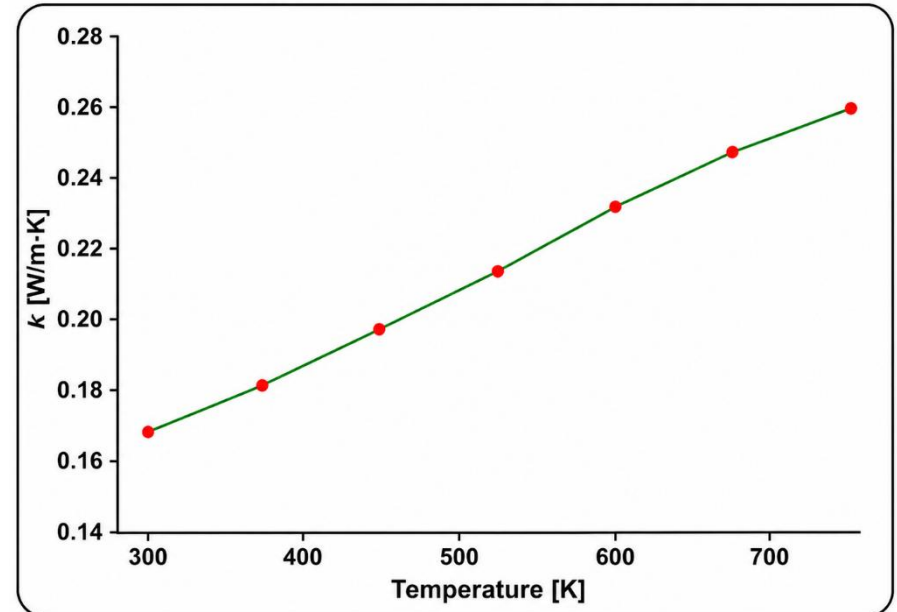
- 복사에는 Surface-to-surface model이 적용됨
- 해석에 사용된 재료별 emissivity를 지정
- 최외곽 부분은 도장 표면 방사율 0.9를 적용
- Ground sink는 benchmark 조건과 일관되도록 16 °C로 설정

[Table 5. Surface Emissivity Values for Radiation Heat Transfer]

Material	Emissivity
Carbon Steel	0.45
Aluminum	0.20
Exterior Painted Surfaces	0.90
Stainless Steel	0.30

## » Helium Properties for CFD

- 자연대류 해석을 위한 헬륨 유동 물성
- Boussinesq 해석을 위한 헬륨 기준 물성 적용
- Density : 0.15 [kg/m<sup>3</sup>]
- Specific heat : 5193.0 [J/kg · K]
- Radiation Temperature : 300 [K]
- Thermal Conductivity : 우측 그래프
- Dynamic viscosity : 1.9891e-5 [Pa · s]
- Thermal expansion coefficient : 0.0035 [1/K]



### 3. Numerical Conditions ( 5 / 7 )

#### » 지배방정식 및 물리 모델

- ▶ 정상상태 자연대류 열전달 해석 수행
- ▶ 모든 조건은 EPRI Benchmark data와 일관되도록 설정
- ▶ Boussinesq 근사 및 층류 가정에 대해, 무차원수를 통한 타당성 검토

[Table 6. Physical Models Used in the CFD Analysis]

Model	Setting
Flow model	정상상태, 층류
Buoyancy model	Boussinesq 근사
Heat transfer	전도 + 자연대류
Radiation	S2S radiation

#### 적용한 지배 방정식

연속 방정식:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

운동량 방정식 (Boussinesq 근사):

$$\rho_0(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho_0 g \beta (T - T_0) \mathbf{e}_z$$

에너지 방정식:

$$\mathbf{u} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T$$

$\mathbf{u}$ : 속도벡터,  $p$ : 압력,  $T$ : 온도,  $\rho_0$ : 기준 밀도,  $\beta$ : 체적팽창계수,  $\mu$ : 동점도,  $\alpha$ : 열확산계수,  $\mathbf{e}_z$ : 중력 방향 단위벡터

#### 가정 근거 검토

- ▶ Boussinesq 근사:  $\beta = 0.0035 \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T \approx 200 \text{ K} \rightarrow \beta \Delta T \approx 0.70$
- ▶  $D_h \approx 0.0118 \text{ m}$ ,  $U = 0.1 \text{ m/s}$
- ▶  $Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \approx 8.9$
- ▶  $Ra = \frac{g \beta \Delta T D_h^3}{\nu \alpha} \approx 3.0 \times 10^2$

**결론:**  $Re \ll 2300$  이므로 내부 헬륨 유동은 층류로 가정

### 3. Numerical Conditions ( 6 / 7 )

#### » 열부하 조건 및 Heat Flux 경계조건

- EPRI fuel assembly loading map 기반 붕괴열 적용
- 각 연료집합체의 붕괴열을 연료봉 표면 heat flux boundary condition으로 변환
- 모든 heated section은 동일한 연료봉 표면적  $A_i = 25.35[m^2]$  를 사용
- Applied heat rate는 각 section의 decay heat와 동일하게 적용

[Table 7. Decay heat and equivalent heat flux for each heated section]

Heat Section	Applied heat flux $q''$ [W/m <sup>2</sup> ]	Decay heat $Q_i$ [W]
Cell20	25.491	646.2
Cell21	44.804	1135.8
Cell22	37.128	941.2
Cell26	44.824	1136.3
Cell27	38.982	988.2
Cell28	36.170	916.9
Cell31	36.596	927.7
Cell32	31.728	804.3

#### Heat flux calculation concept

$$q''_i(z) = \frac{Q_i}{A_i} f(z)$$

$$A_i = N_{rod} \pi D_0 L_{active} = 25.35 m^2$$

$$Q_{applied} = Q_i$$

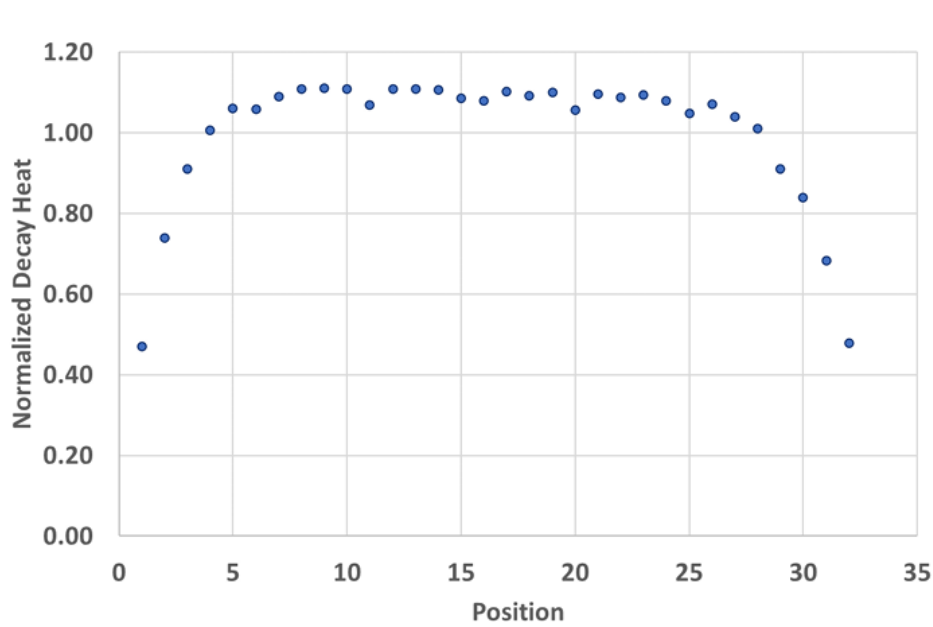
# 3. Numerical Conditions ( 7 / 7 )

## » 축방향 Heat Flux Profile 적용

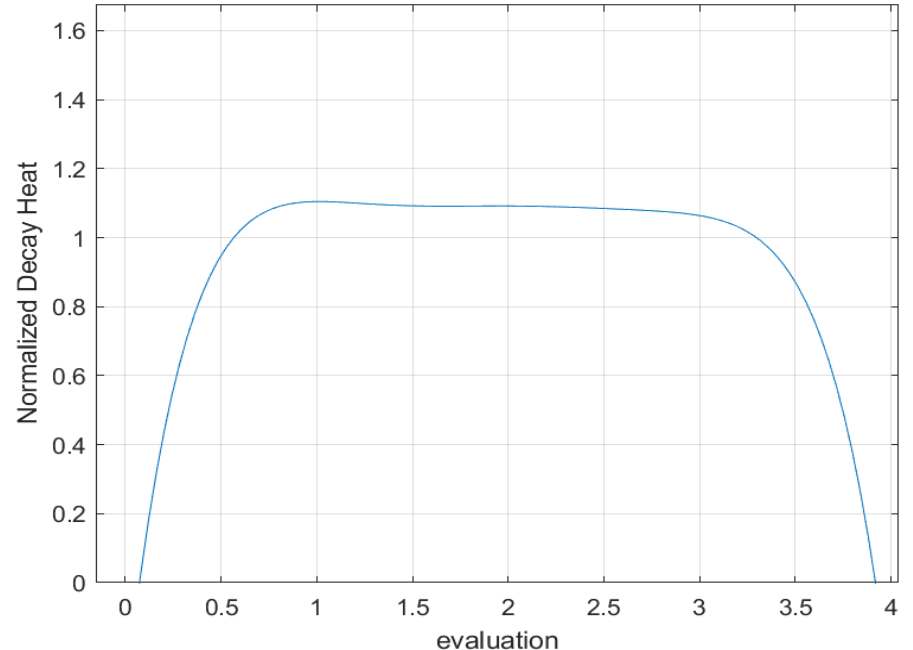
- ▶ 각 연료집합체의 붕괴열을 연료봉 표면 heat flux로 환산하여 적용
- ▶ 축방향 열발생 분포는 EPRI normalized profile을 적용
- ▶ STAR-CCM+ 입력을 위해 다항식 피팅 함수 사용

$$q''_i(z) = q''_{i,0} f(x), \quad q''_{i,0} = \frac{Q_i}{A_i}, \quad x = z \text{ [m]}$$

$$f(x) = -0.0332x^6 + 0.4045x^5 - 2.0049x^4 + 5.1434x^3 - 7.1634x^2 + 5.0974x - 0.3393$$



[Normalized decay of each evaluation(EPRI)]



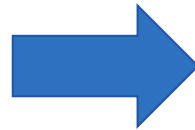
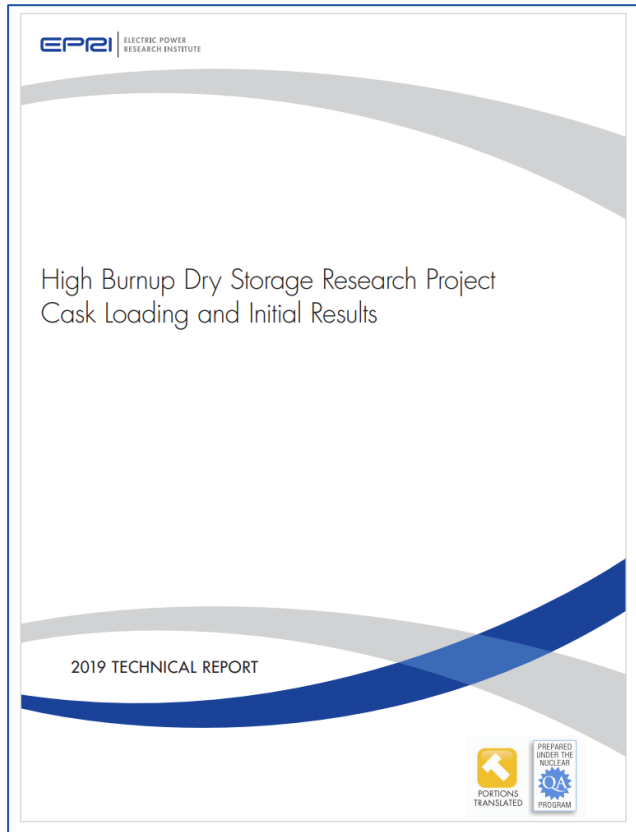
[Normalized decay of each evaluation(Input)]

# 04

## CFD Results Analysis

# 4. CFD Results Analysis

- » CFD 검증을 위한 Benchmark 데이터 및 비교 기준
  - EPRI benchmark는 총 7개 계측 cell에 대해 9개 축방향 위치의 온도 측정 데이터 제공
  - 본 연구에서는 Cell 31의 축방향 온도 데이터를 기준으로 CFD 결과를 검증



	1	2	3	4	
5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28
29	30	31	32		

**선정 근거**

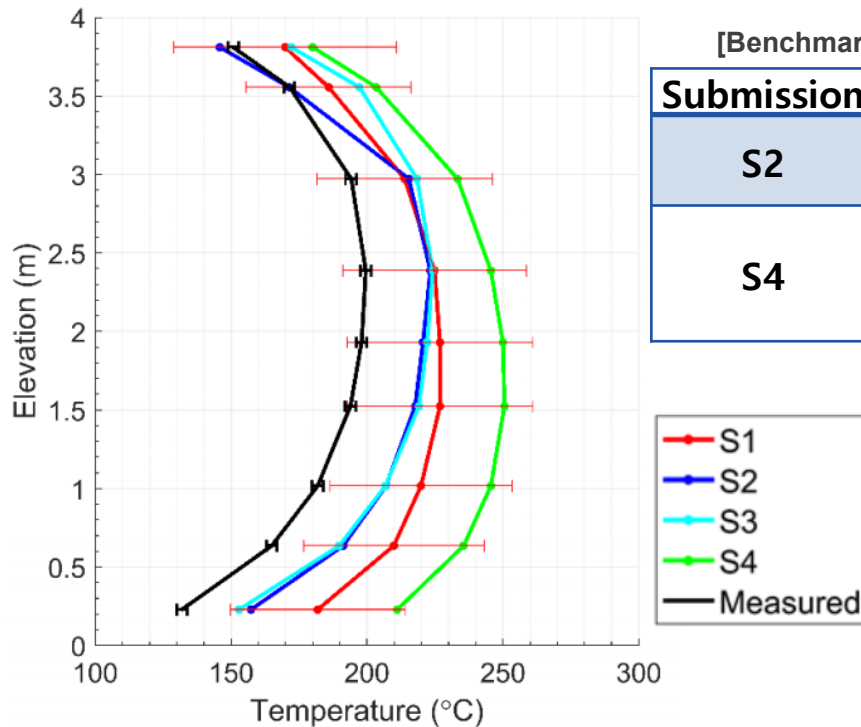
Cell 31은 외곽부 계측 위치로서, 내부 열발생과 외벽 방향 열손실 영향이 동시에 반영되는 대표적인 비교 지점

# 4. CFD Results Analysis

- » CFD 검증을 위한 Benchmark 데이터 및 비교 기준
  - Table 8은 EPRI benchmark에서 제공하는 Cell 31의 축방향 온도 측정 데이터
  - 본 해석의 성능 평가를 위해 EPRI round-robin 결과 중 S2와 S4를 비교군으로 선정
  - S2는 측정값과 비교적 근접한 결과를 보였으며, S4는 상대적으로 큰 양의 편차를 보이는 결과

[Table 8. Measured Temperature Data at Cell 31]

Elevation [m]	Temperature [°C]
3.810	150.7
3.556	171.5
2.972	194.2
2.388	199.6
1.903	198.0
1.524	193.9
1.016	181.8
0.635	164.9
0.229	131.9



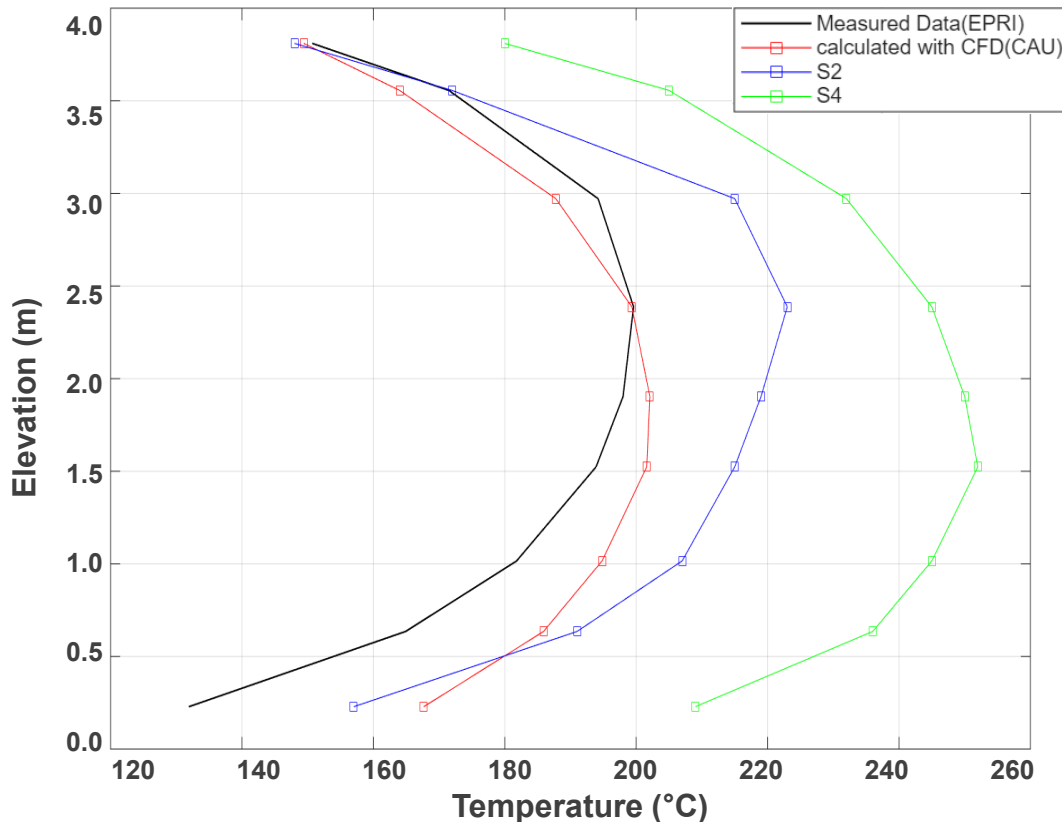
[Benchmark Submissions Used for Comparison]

Submission	Method	Software
S2	Finite volume CFD	STAR-CCM+
S4	Finite Element Analysis (FEA)	ANSYS APDL

# 4. CFD Results Analysis

## » Cell 31 축방향 온도 비교

- ▶ 본 해석 결과의 Cell 31 기준 평균 절대오차(MAE)는 10.78 °C, RMSE는 15.15 °C
- ▶ MAE 기준 S2 대비 약 41.5%, S4 대비 약 79.2% 감소, 전체적인 예측 정확도가 향상
- ▶ 본 해석의 최대 절대오차는 35.76 °C(0.23 m), 최소 절대오차는 0.26 °C(2.39 m)



[Fig. 10. Axial Temperature Comparison at Cell 31]

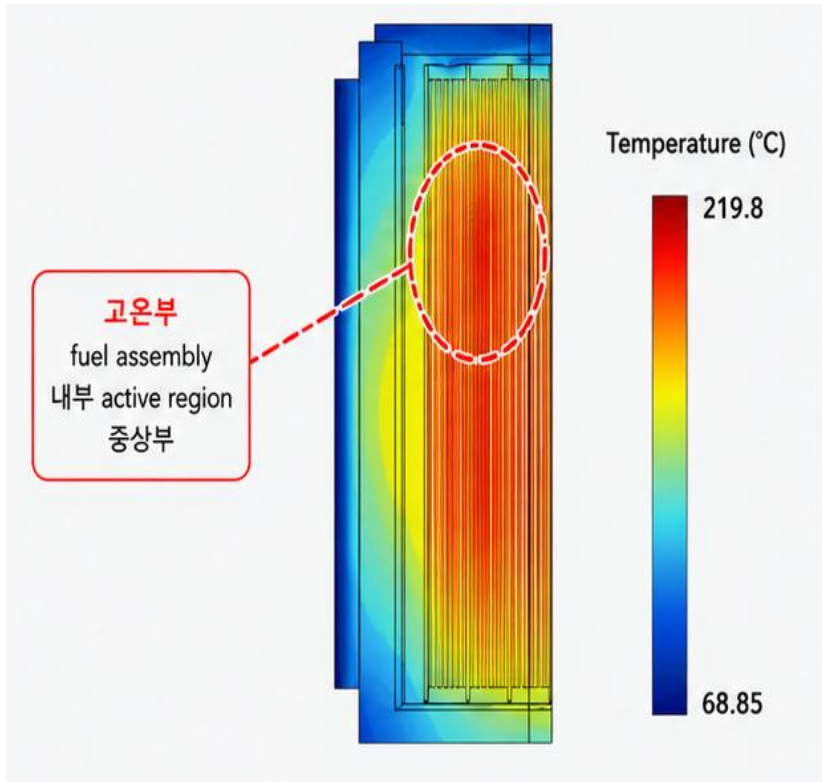
Table 10. Error Metrics for Axial Temperature Prediction at Cell 31

Model	MAE (°C)	RMSE (°C)
CAU	10.78	15.15
S2	18.43	20.60
S4	51.94	54.31

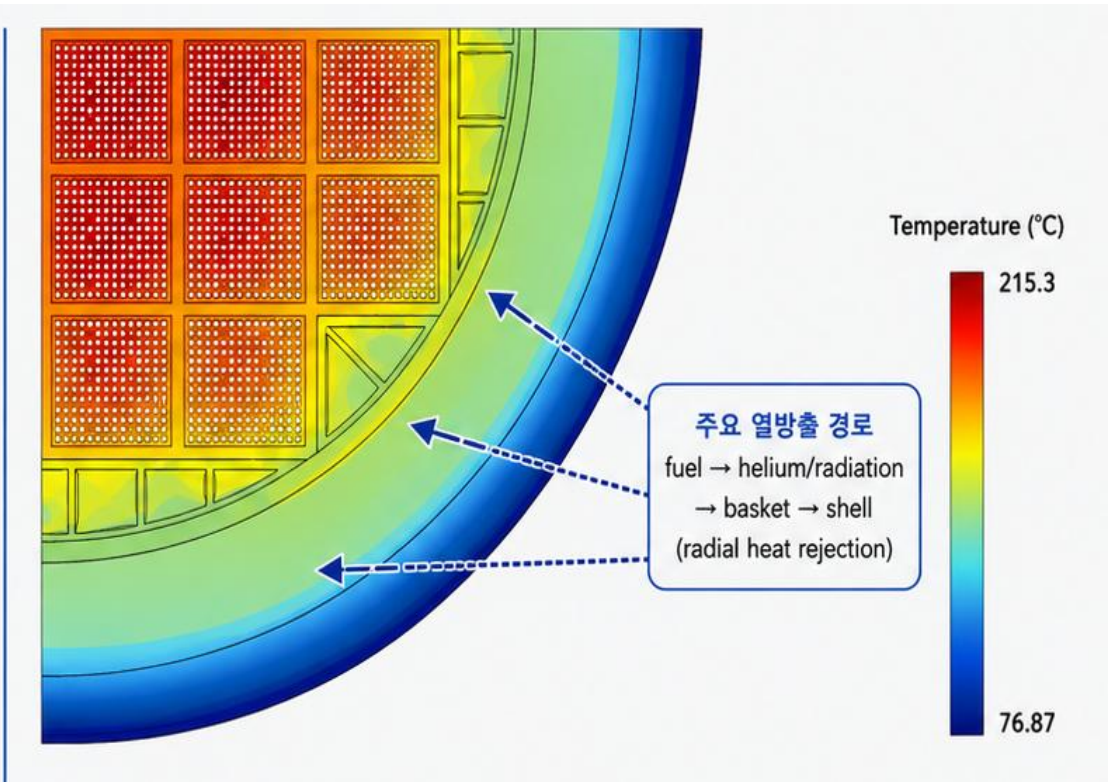
# 4. CFD Results Analysis

## » 온도 분포 및 측정값 비교

- ▶ 고온부는 외벽이 아닌 fuel assembly 내부 active region 중상부에서 형성
- ▶ 축방향 heat flux profile에 따라 active length 중상부 부근 열발생이 상대적으로 큼
- ▶ 주요 열방출은 외곽 방향의 radial heat rejection 경로를 통해 발생



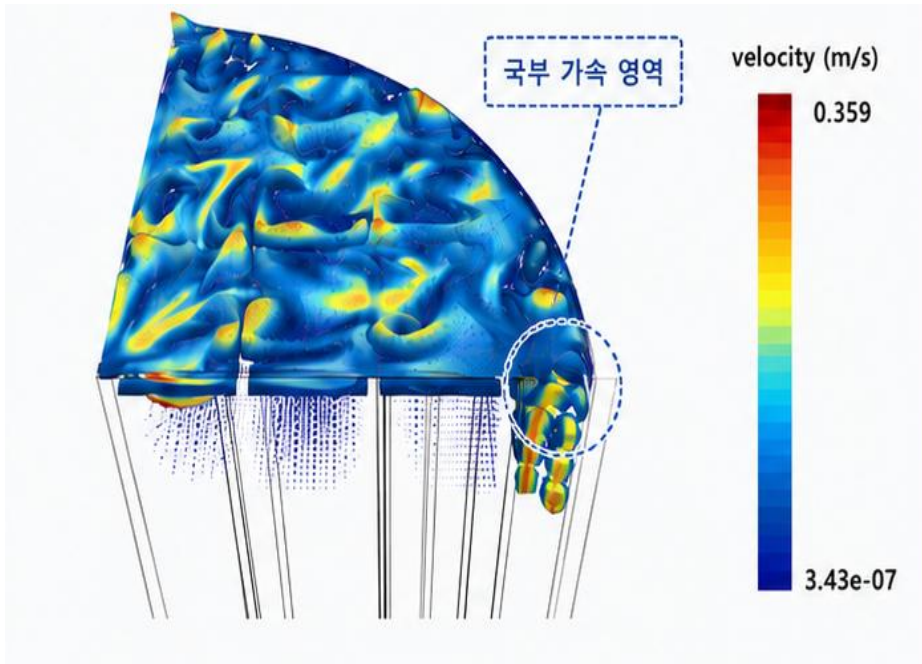
[Fig. 11. Axial Temperature Distribution]



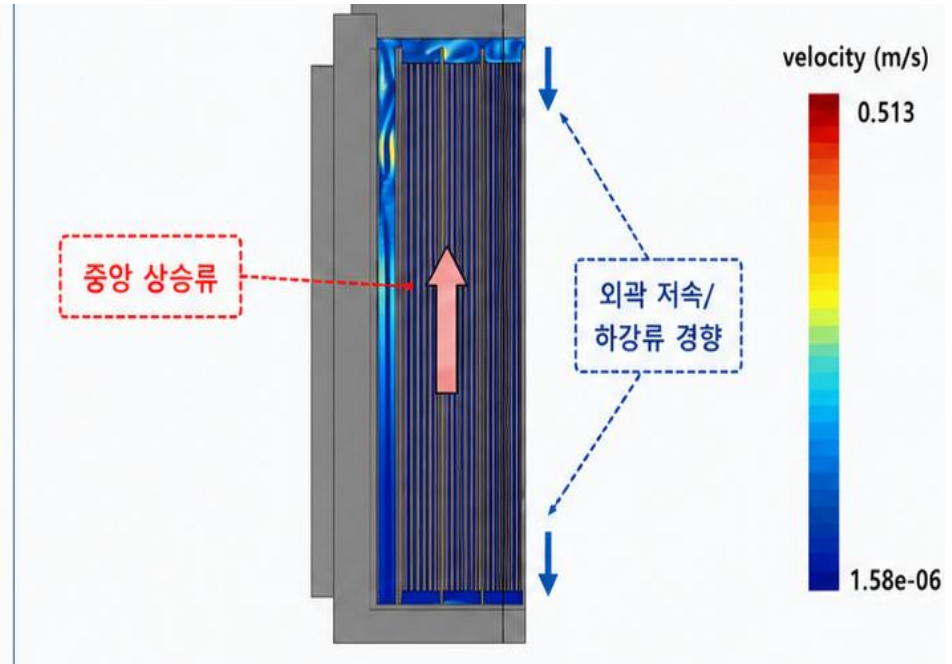
[Fig. 12. Radial Temperature Distribution]

# 4. CFD Results Analysis

- » Active region 중상부 고온부와 중앙부 상승류 형성 원인
  - Fuel rod heat flux에 의해 rod bundle 내부 헬륨 가열
  - 중앙 subchannel은 외곽부보다 벽면 냉각 영향이 작아 상대적으로 고온
  - 고온 He의 밀도 감소 → fuel assembly 중앙부 국부 상승류 형성
  - Basket wall/shell 인접부는 냉각 효과로 하강류 및 저속 영역 형성
  - 전체 규모의 강한 자연순환보다는 fuel assembly 내부의 국부 자연대류가 지배적



[Fig. 13. Axial Velocity Distribution in the Fuel Assembly Region]



[Fig. 14. Helium Velocity Vector Field near Basket Rail and Drain Region]

# 05

## Conclusions

## 5. Conclusions

### » 연구 결과 및 향후 계획

- ▶ TN-32B 캐스크의 1/4 sector에 대해 rod-resolved CFD 모델을 구축
- ▶ EPRI/PNNL benchmark 조건을 반영하여 Cell 31 온도 분포를 재현  
MAE = 10.78°C, RMSE = 15.15°C
- ▶ 고온부는 active region 중상부에서 형성되며, 이는 축방향 decay heat profile + radial heat rejection + 제한적 헬륨 자연대류의 결과로 해석됨
- ▶ 속도장은 강한 전역 순환보다, fuel assembly 내부 국부 상승류와 basket rail 주변 제한 유로, basket-cell drain hole을 통한 순환이 지배적인 것으로 해석됨
- ▶ 경계조건, 격자 민감도 분석을 통해 모델 신뢰도를 보완 및 외부 환경의 영향도 평가 해석 진행, 다공성 모델의 위치 의존적 오차 메커니즘을 규명

# End of Document

Tae-Yeong Jung

e-mail: [wjdxodudabc123@gmail.com](mailto:wjdxodudabc123@gmail.com)

# . Reference

## » Reference

- EPRI, High Burnup Dry Storage Research Project: Cask Loading and Initial Results, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 3002015076, 2019.
- EPRI, High-Burnup Used Fuel Dry Storage System Thermal Modeling Benchmark: Round Robin Results, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 3002013124, 2020.
- Fort, J. A., Richmond, D. J., Cuta, J. M., and Suffield, S. R., Thermal Modeling of the TN-32B Cask for the High Burnup Spent Fuel Data Project, PNNL-28915, Pacific Northwest National Laboratory, 2019.
- EPRI, International Thermal Modeling Benchmark Description for a High-Burnup Used Fuel Dry Storage System, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 3002018498, 2020.
- Fulpagare, Y. et al., "CFD analysis of spent fuel dry cask storage system for high burnup nuclear fuel," Progress in Nuclear Energy, Vol. 161, 104713, 2023.