



한국원자력학회

원자력시설해체 및 방사성폐기물관리  
2023년 Spring Conference

# 방사성물질 심해 유출률 평가를 위한 해석모델 구축에 관한 연구

Development of Model for Radionuclides Release Rate Calculation from  
a Transport Cask Submerged in the Deep Sea

2023-05-19

정구현, 이재호, 이상훈\*

\*shlee1222@kmu.ac.kr



원자력안전위원회



한국원자력안전재단  
KOREA FOUNDATION OF NUCLEAR SAFETY



CAOD LAB

Computer-Aided Optimal Design



1. 연구배경

2. 연구목적

3. 방법론

4. 결과

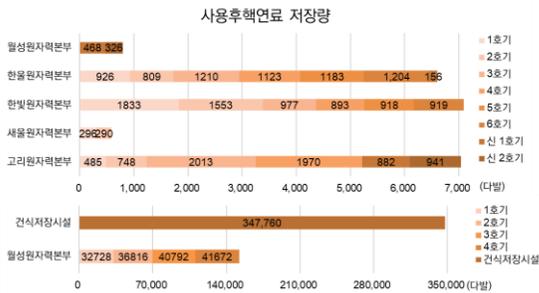
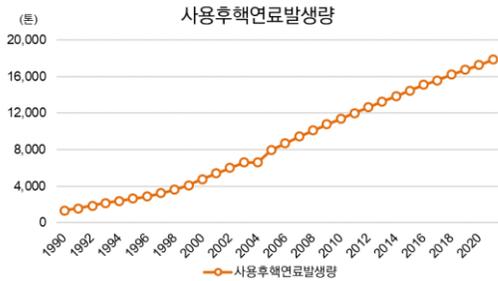
5. 결론



## 사용후핵연료 저장 현황



- 사용후핵연료가 꾸준히 발생함에 따라 원전별 저장량이 증가함. [1]
- 전력수급계획이 바뀔에 따라 사용후핵연료 설명회가 개최되었으며, 저장시설 포화전망을 재산정한 결과를 발표함. [2]
- 기존계획대비 원전별 저장시설 포화전망이 1~2년 단축됨.



### 사용후핵연료 저장량

경수로 월성원자력본부 468 326

#### 포화전망 재산정 결과

	고리 (경수로)	한빛 (경수로)	한울 (경수로)	새울 (경수로)	신월성 (경수로)	월성 (중수로)
기본계획 ('21.12)	2031년	2031년	2032년	2066년	2044년	-
중수태산정 ('23.2)	2032년*	2030년	2031년	2066년	2042년	2037년

↓ 단축

\*고리 2호기 습식저장시설 내 조밀저장대 미설치 가정시 2028년 포화전망 재산정

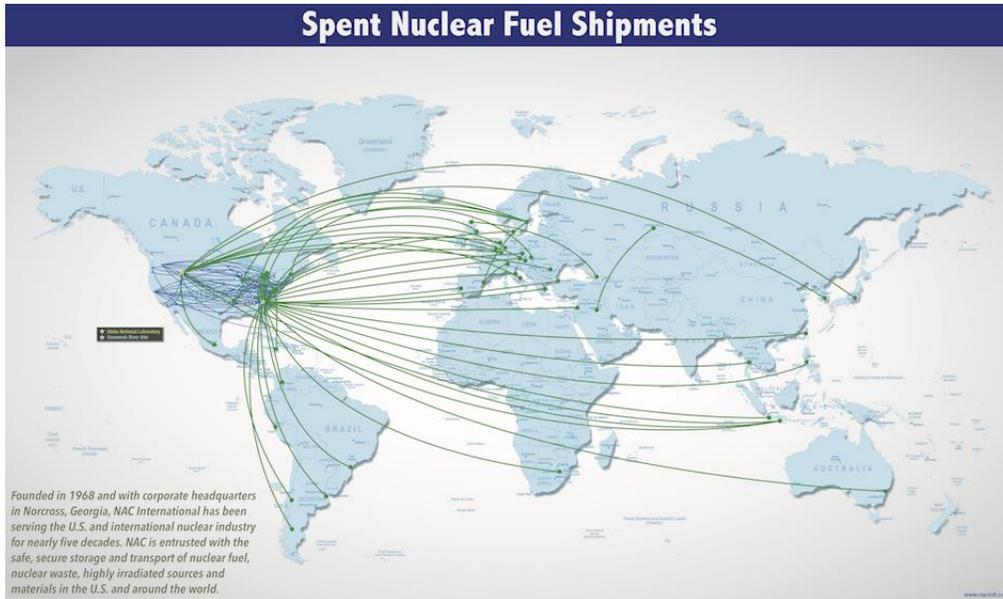
월성원자력본부 32728 36816 40792 41672

0 70,000 140,000 210,000 280,000 350,000 (다발)



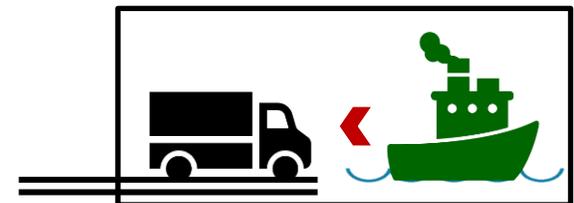
## 사용후핵연료 운반 현황

- 현재 원전별로 임시저장시설을 개발하려는 추세를 보이지만 중·장기적으로 사용후핵연료의 집중 관리를 위한 관리시설의 개발은 불가피하며 이러한 시설로의 운반이 필요함.
- 모든 원전이 연안에 위치한 국내 특성상 관리시설도 연안에 위치할 가능성이 높아 사용후핵연료의 해상운반은 불가피함. [3]
- 사용후핵연료의 해상운반시 사고에 의해 핵종이 유출되면 환경 및 지역 거주민에게 영향을 끼칠 수 있기에 위험도 평가는 필수적임. [4]
- 원자력 선진국에서는 해상운반을 수행하고 있으며, 그에 따른 위험도 평가는 코드를 이용하여 경로 별로 수행됨.



## Risk Assessment Code for Maritime transportation

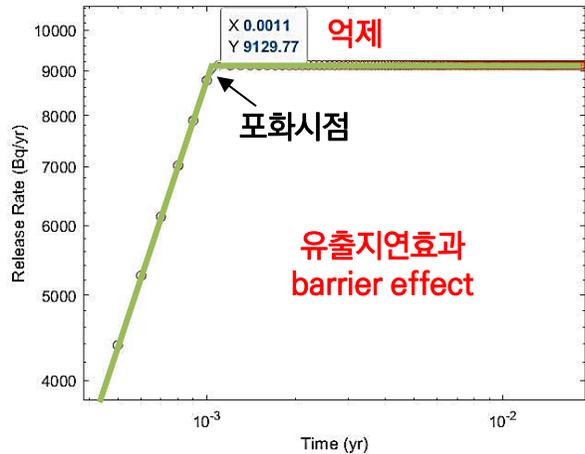
- MARINRAD
- POSEIDON
- Barrier Effect Model





## Barrier Effect Model

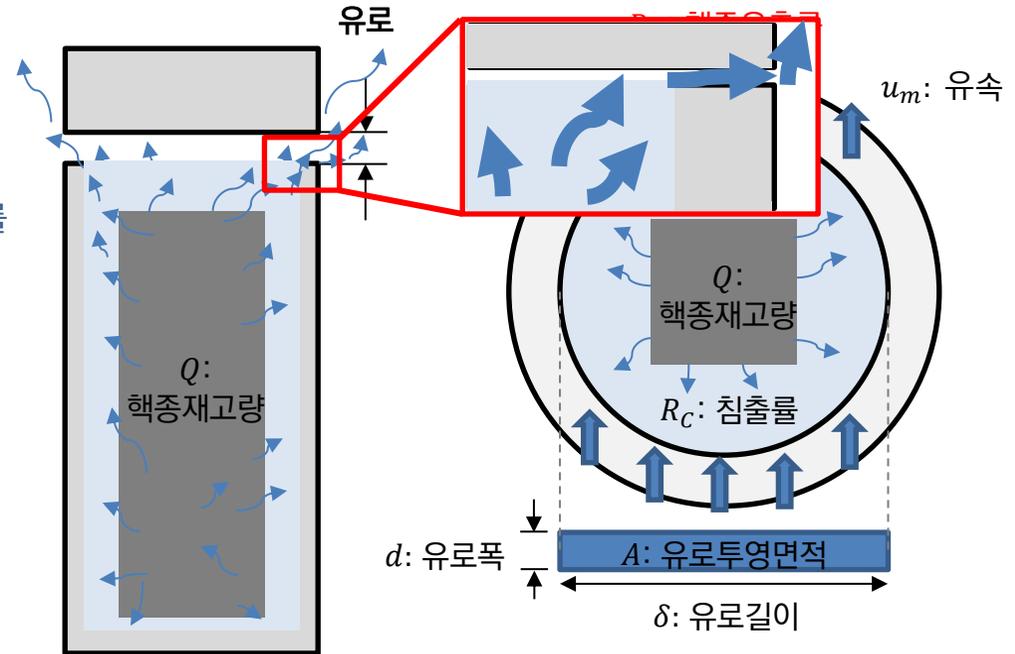
- MARINRAD의 유출률 평가 모델**
  - 운반용기의 격납경계 손상 여부에 따라 핵종의 유출을 결정함.
    - 내부 핵종의 유출률 = 사용후핵연료 핵종 침출률
- 일본 CRIEPI 사에서 개발한 모델 [5]**
  - MARINRAD + 운반용기 내부 핵종이 침출된 후 유로를 통해 용기 밖으로 유출되는 양
    - 핵종 침출률 < 용기 내부 핵종농도 x 내부 해수의 유출률
      - 내부 핵종의 유출률 = 핵종 침출률
    - 핵종 침출률 > 용기 내부 핵종농도 x 내부 해수의 유출률
      - 내부 핵종의 유출률 = 용기 내부 핵종 포화농도 x



〈운반 용기 내부 핵종 농도 = 운반 용기 외부로의 유출률〉

## 격납경계 손상

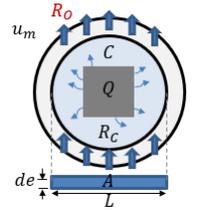
- Case 1: 큰 유로폭 → 격납 성능 소실
- Case 2: 작은 유로폭 → 격납 성능 잔존





## Barrier Effect Model

- 운반용기 설계조건 상 가혹한 사고조건에 의해 격납경계가 손상, 유로가 생성되어도 그 크기가 매우 작을 것으로 예상됨.
  - Barrier Effect Model과 같이 유출지연효과를 고려하는 것이 합리적일 것으로 판단됨.
- CRIEPI의 모델은 유출률( $R_o$ ) 평가에 주요한 인자인 유속( $u_m$ )을 온도차이에 인한 부력 및 수평 자세에 국한하여 계산함.



Release rate of nuclide,  $R_o$  ( $Bq \cdot y^{-1}$ )

Flow

Activity  $Q$  ( $Bq$ )

Radioactive materials

Concentration,  $C$  ( $Bq \cdot m^{-3}$ )

Volume,  $V$  ( $m^3$ )

Cavity

Body of package

핵종 재고량 변화:  $\frac{dQ}{dt} = -R_c - \lambda Q$

핵종 농도 변화:  $\frac{dC}{dt} = \frac{R_c}{V} - \frac{R_o}{V} - \lambda C$   $C < C_s, R_o \leq R_c$

국내에는 언급된 해상운반 위험성 평가 코드와 유사한 기능을 하는 코드가 없어,  
원자력안전위원회 과제로 위험도 평가 코드를 개발 중에 있음.  
본 연구는 그 일환으로 해양 운반시 유실된 용기에서의 핵종유출률 평가를 위해 진행함.

$u_m$  를: — 제한적

$$u_m = \left( \frac{2\rho g \beta \Delta\theta L}{\left(1 + \frac{\lambda_f L}{de}\right) \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$Q$ : 핵종재고량       $\Delta\theta$ : 내·외부 온도차

$C$ : 핵종농도       $L$ : 채널 길이(m)

$R_c$ : 침출률       $\lambda_f$ : 채널의 마찰 계수

$A$ : 유로투영면적       $Re$ : 레이놀즈 수

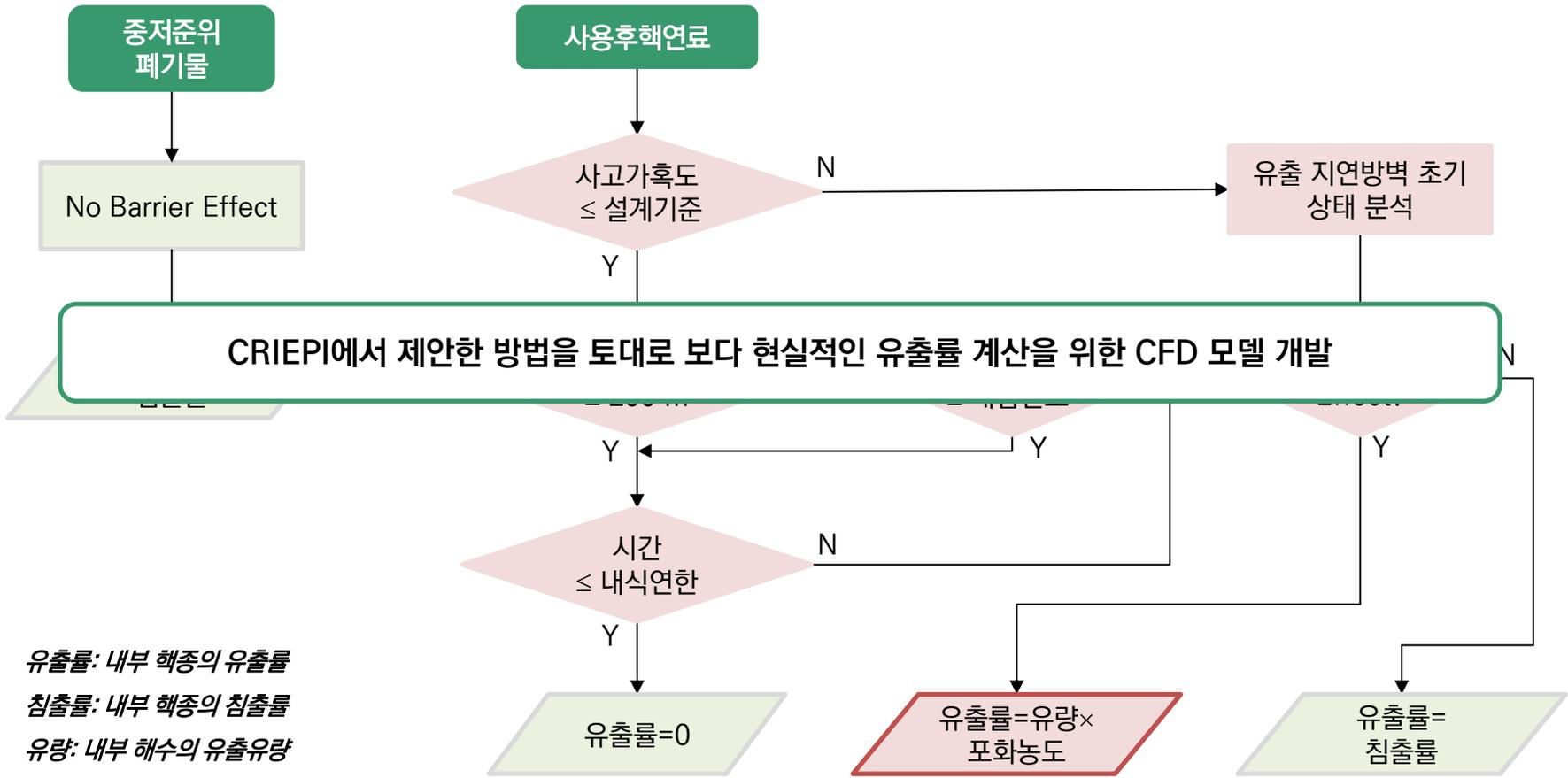
$\beta$ : 바닷물 체팽창계수       $de$ : 유로폭(m)

<CRIEPI 개략도>

<CRIEPI 주요 식 [6]>



## 방사성폐기물 심해 유출 시나리오

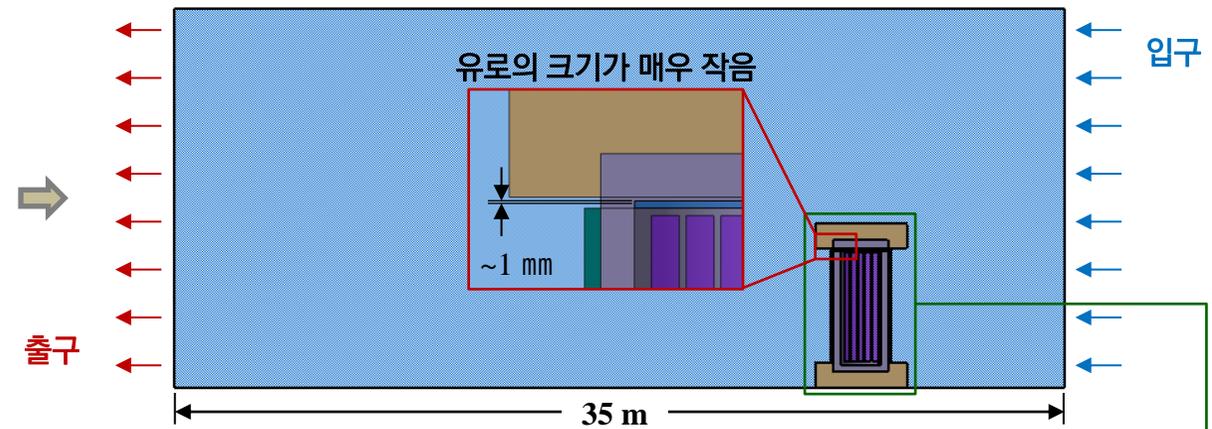




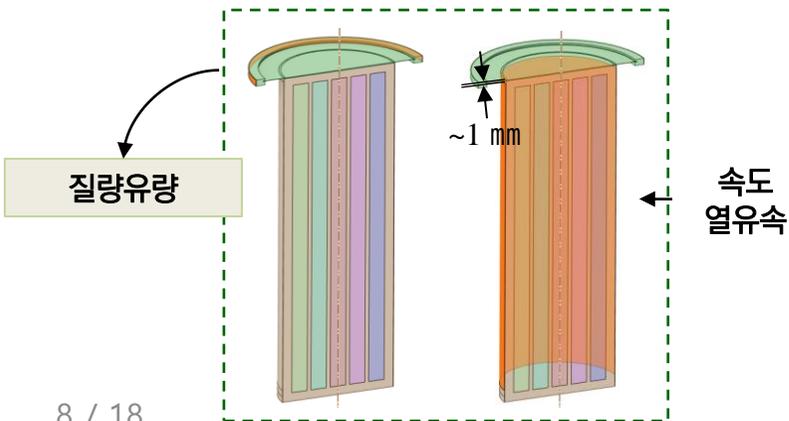
## 해석방법

### ➤ Sub-Modeling 기법

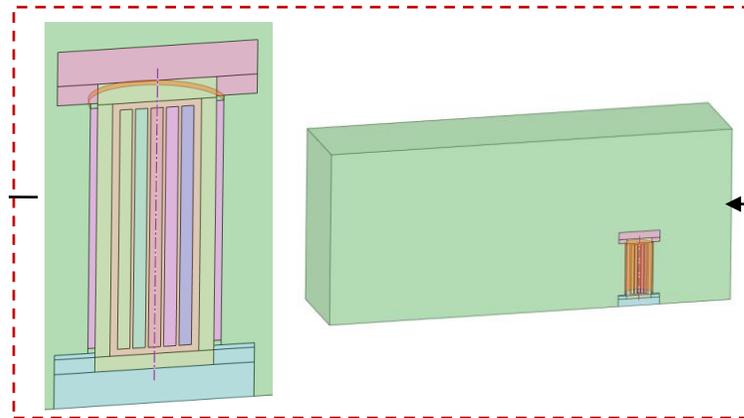
- 심해 환경 전체는 해석이 제한되기에 심해 환경의 일부를 외부 유동장으로 설정함.
- 외부 유동장의 크기와 유로의 크기가 극심하여 CFD 해석 제한됨.



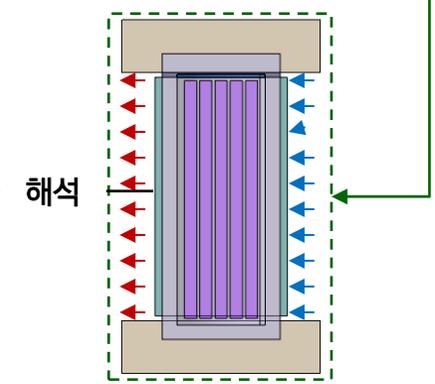
유로가 있는 국소 해석 모델 프로파일 입력



전체 해석 모델 프로파일 추출



유로가 없는 전체 해석 모델 모델링

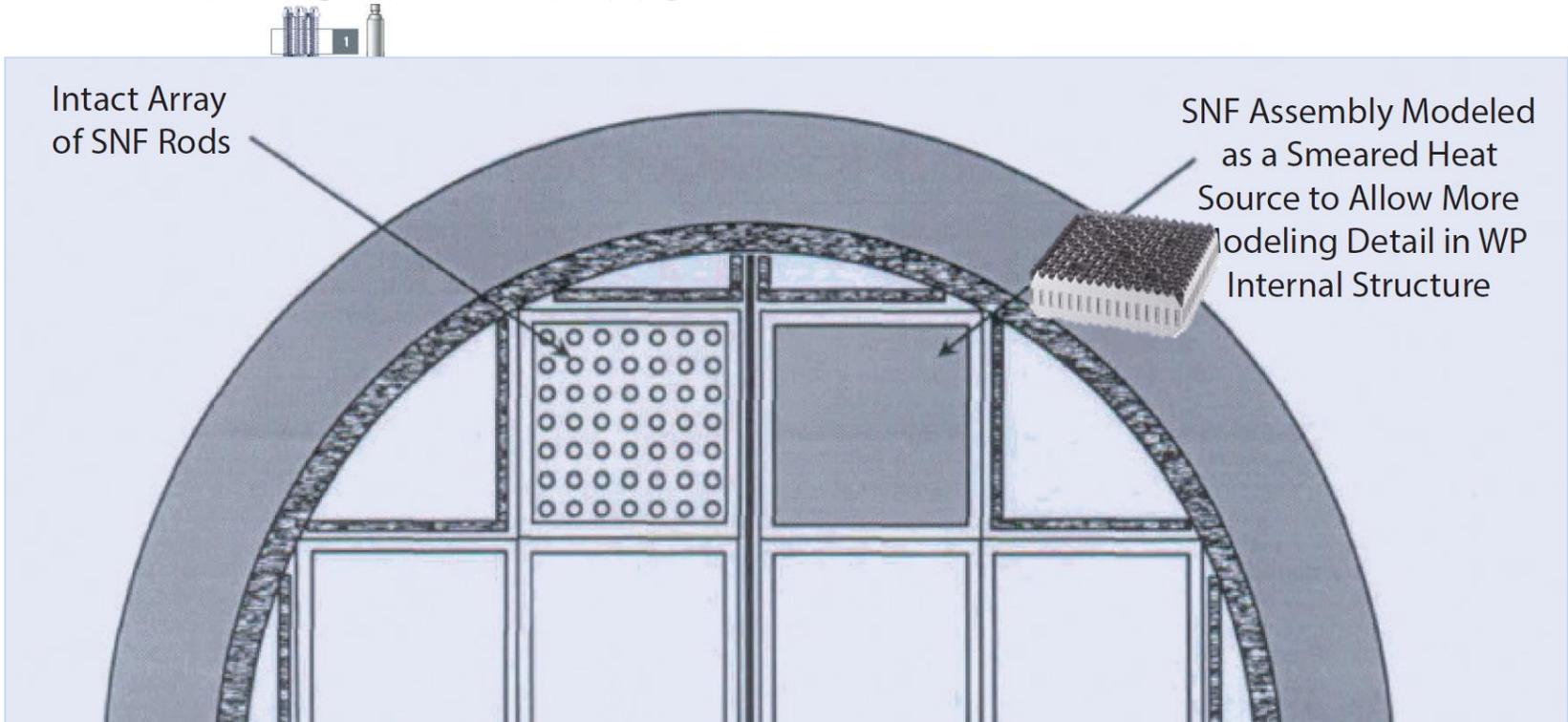
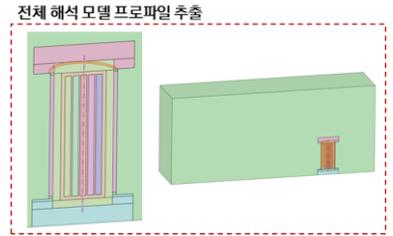






## 전체 해석 모델 (Full Field Model)

- 사용후핵연료 집합체 단순화 모델
  - 상세모델을 사용하면 해석에 비효율적이므로 단순화 모델 필요함.
  - DOE의 Porous media model을 이용함. [7]
  - 열전도도를 기반으로 동일하게 열전달 되도록 구성됨.



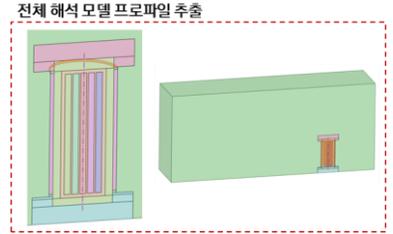
〈사용후핵연료 집합체 Porous Media model〉



## 전체 해석 모델 (Full Field Model)

### ➤ DOE의 Porous media 기법으로 사용후핵연료 단순화

- 방향에 따른 유효열전도도 필요함. [8][9]
- 두 면이 정사각형인 직육면체이며, 내부에 열원이 있을 때 유효열전도도를 계산하는 식을 사용함. [9] (등방성 재료임을 가정)



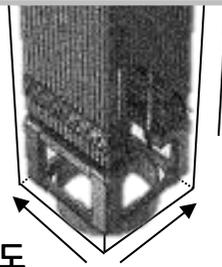
$$q'''(a^2 - x^2)^n \cos \left[ \frac{(2n + 1)\pi x}{2a} \right] \cosh \left[ \frac{(2n + 1)\pi y}{2a} \right]$$

최대 온도  
C  
벽면에서의 온도  $\neq 0 \Rightarrow q''$

x, y축 유효열전도도		z축 유효열전도도	
Temperature [°C]	Conductivity [W/mK]	Temperature [°C]	Conductivity [W/mK]
104.85	0.4154	104.85	3.5515
211.85	0.5608	211.85	3.1984
321.85	0.7684	321.85	3.0115
432.85	1.0177	432.85	2.9492

〈Porous model의 이방성 유효열전도도 물성〉

$$k_{e,axial} = \sum_{i=1}^n A_i k_i$$



x, y 유효열전도도

z 유효열전도도

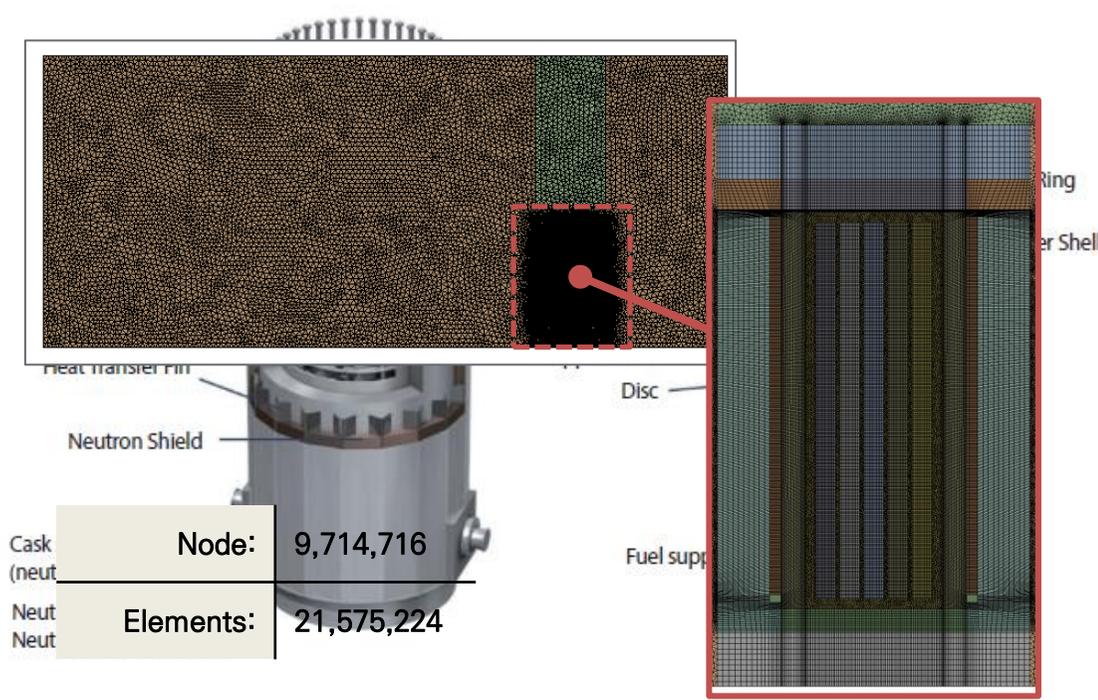
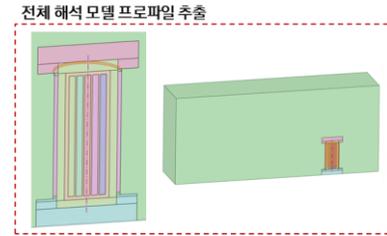
- $L_a$ : Nuclear fuel assembly length
- $k_e$ : Transverse effective thermal conductivity
- $k_{e,axil}$ : Axial effective thermal conductivity
- $Q$ : Assembly heat generation [W]



## 전체 해석 모델 (Full Field Model)

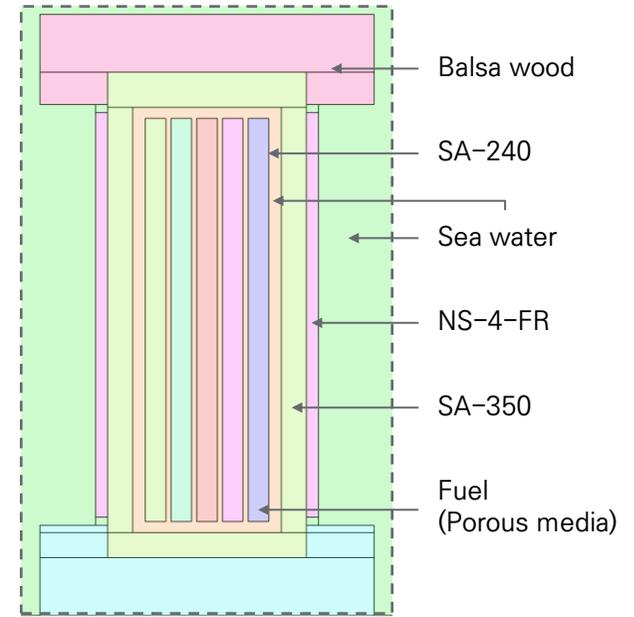
### ➤ 유동 해석 모델

- 범용 열유동 해석 코드인 FLUENT 2021 R1 사용함.
- 21개의 경수로 핵연료 다발이 적재 가능한 운반용기를 참조하여 3 차원 1/2 의 온건한 모델 생성함.
- 운반용기 주변에서 더 균일하며, 전체 평균 0.81의 Orthogonal Quality를 가지는 Mesh 생성함.



Cask (neut)	Node:	9,714,716
Neut Neut	Elements:	21,575,224

〈경수로 사용후핵연료 운반용기 해석 모델〉



〈열물성〉

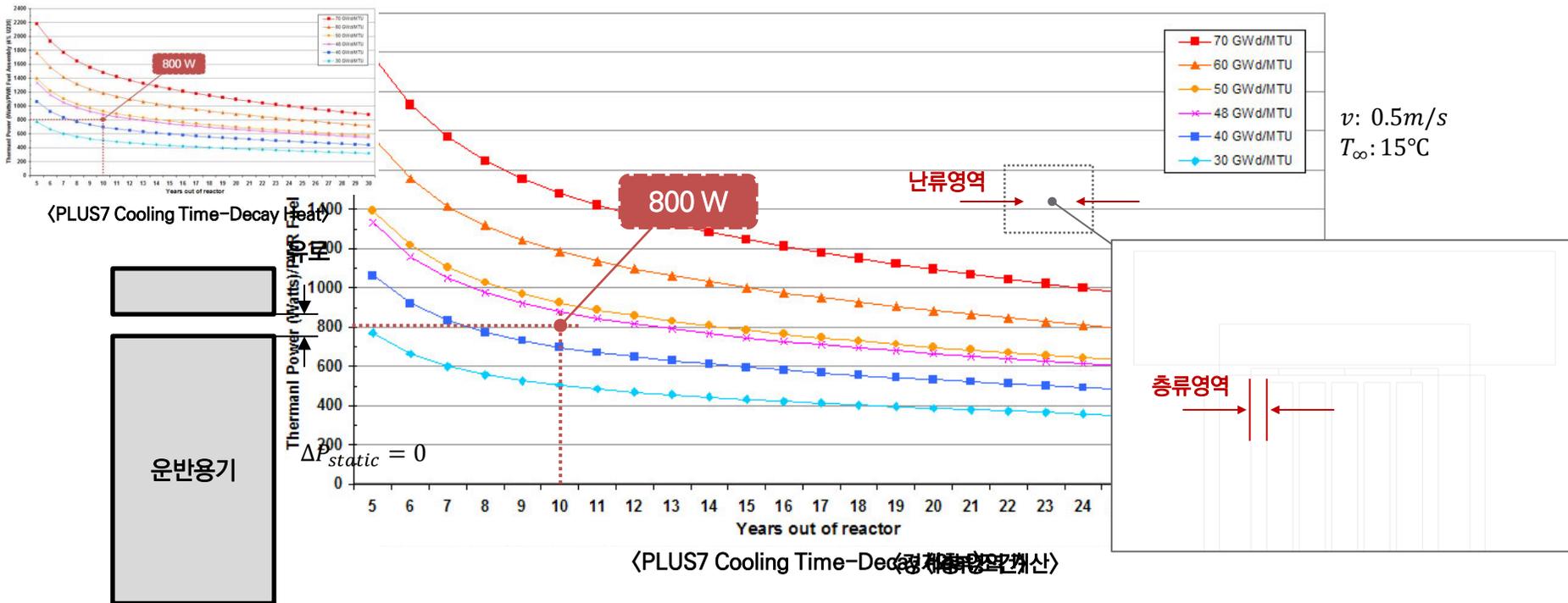
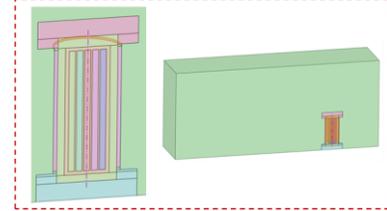


## 전체 해석 모델 (Full Field Model)

### ➤ 해석 가정 조건 및 경계 조건

- 기준연료 PLUS7의 연소도 45 GWd/MTU, 냉각기간 10년 가정함. [10]
- 심해 환경을 고려해 0.5m/s 외부유속 및 15°C의 외부온도를 가정하여 경계조건을 설정함.
- 격납경계가 손상되어 운반용기 유로가 있음을 가정하여 내·외부 정압 차이는 없음.
- 운반용기 외부의 유동이 중요하므로 Standard  $k-\epsilon$  모델 사용함.
- 운반용기 내부 해수로 가득 찬 정상상태를 가정함.

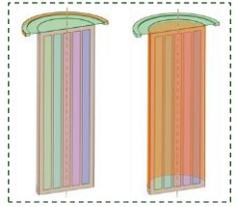
전체 해석 모델 프로파일 추출





## 국소 해석 모델 (Local Field Model)

국소 해석 모델 프로파일 입력

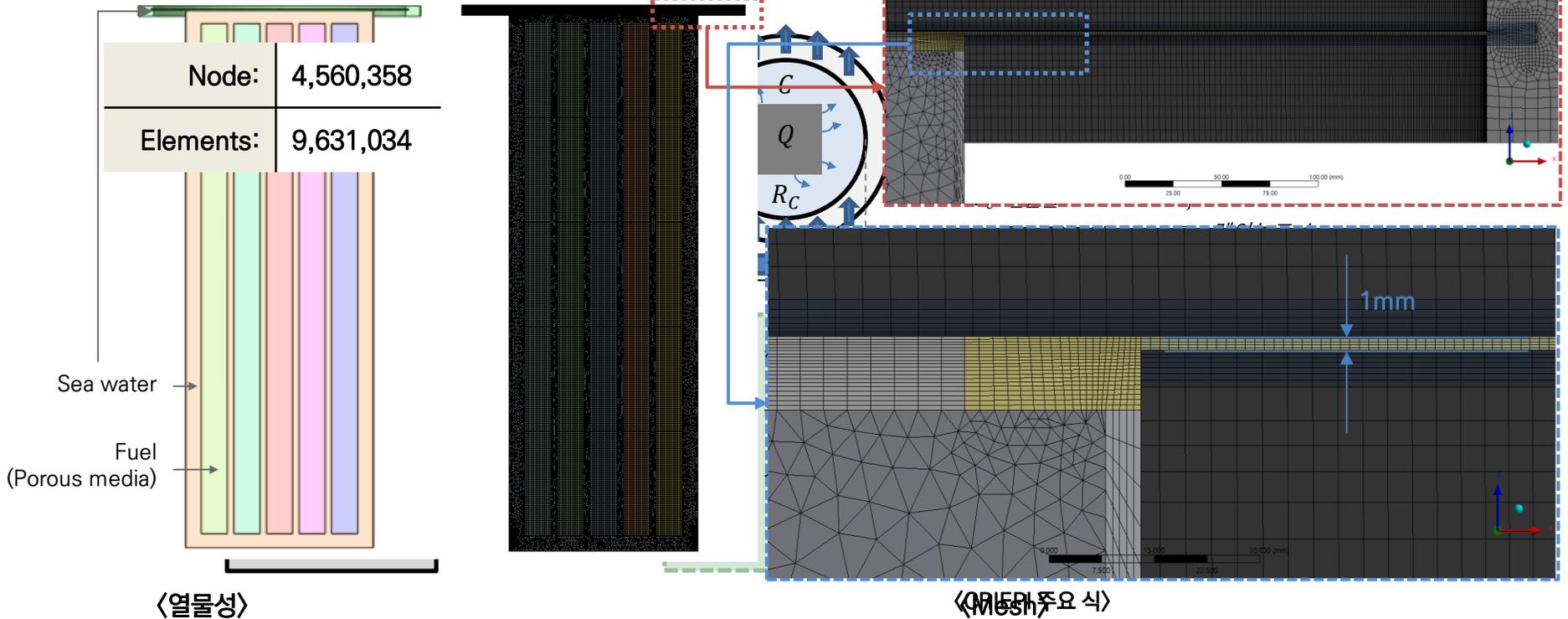


### ➤ 유동 해석 모델

- 유출지연효과를 고려하기 위해선 핵종의 침출률이 유출률 보다 큰 필요조건을 만족해야 함.  
→ 다양한 인자에 의해 복합적으로 적용되기에 본 연구에서는 유로의 폭을 1mm로 가정함.
- 해석의 용이성을 위해 내부 해수 및 사용후핵연료 집합체만 모사함.
- 평균 0.79의 내부 핵종 유출률, 이를 추정하여 핵종 침출률.

복합적으로 작용

핵종 재고량, 핵종 외부 유속, 유로폭, 유로 길이

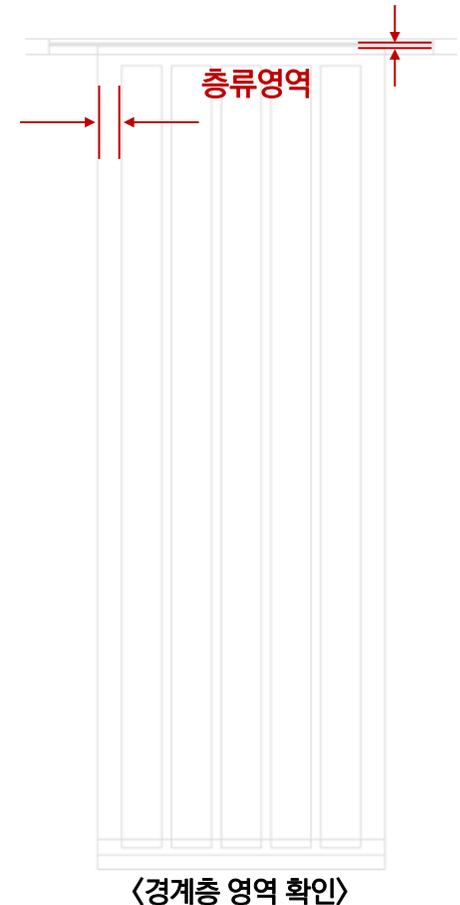
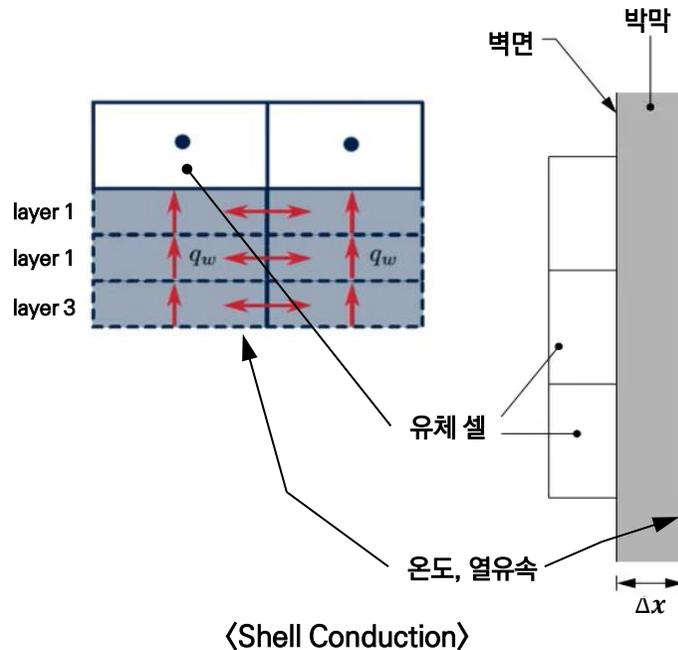
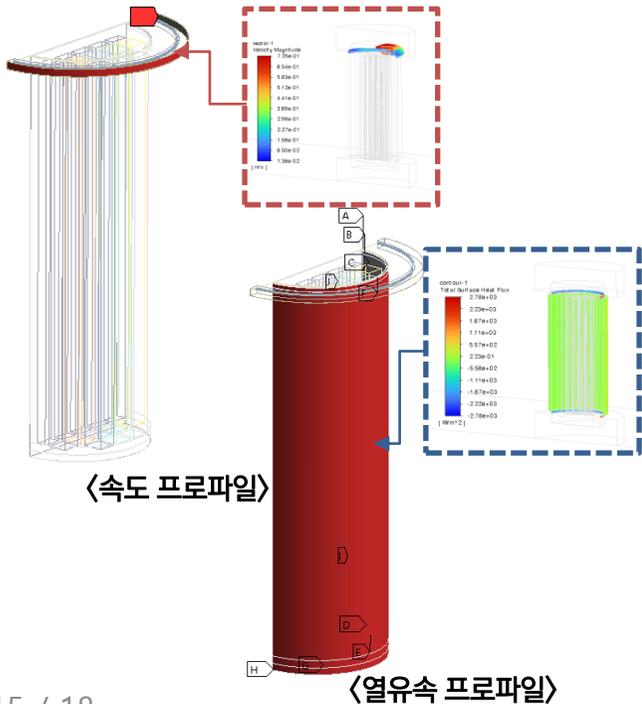




## 국소 해석 모델 (Local Field Model)

### ➤ 해석 가정 및 경계 조건

- 해수로 가득 찬 정상상태를 가정함.
- 전체 해석 모델과 동일하게 PLUS7 한 다발의 봉괴열은 800W로 가정함.
- 속도와 열유속 프로파일을 전체 해석 모델에서 가져옴.
- 외부 열 조건을 고려하기 위해 벽면에서의 열조건을 입력할 수 있는 Shell Conduction 사용함  
→ 벽면에서 가상의 고체 재료 물성과 두께를 입력할 수 있음.
- 경계층 유동을 레이놀즈 수로 계산한 결과 층류 영역이므로 Laminar 모델 사용함.



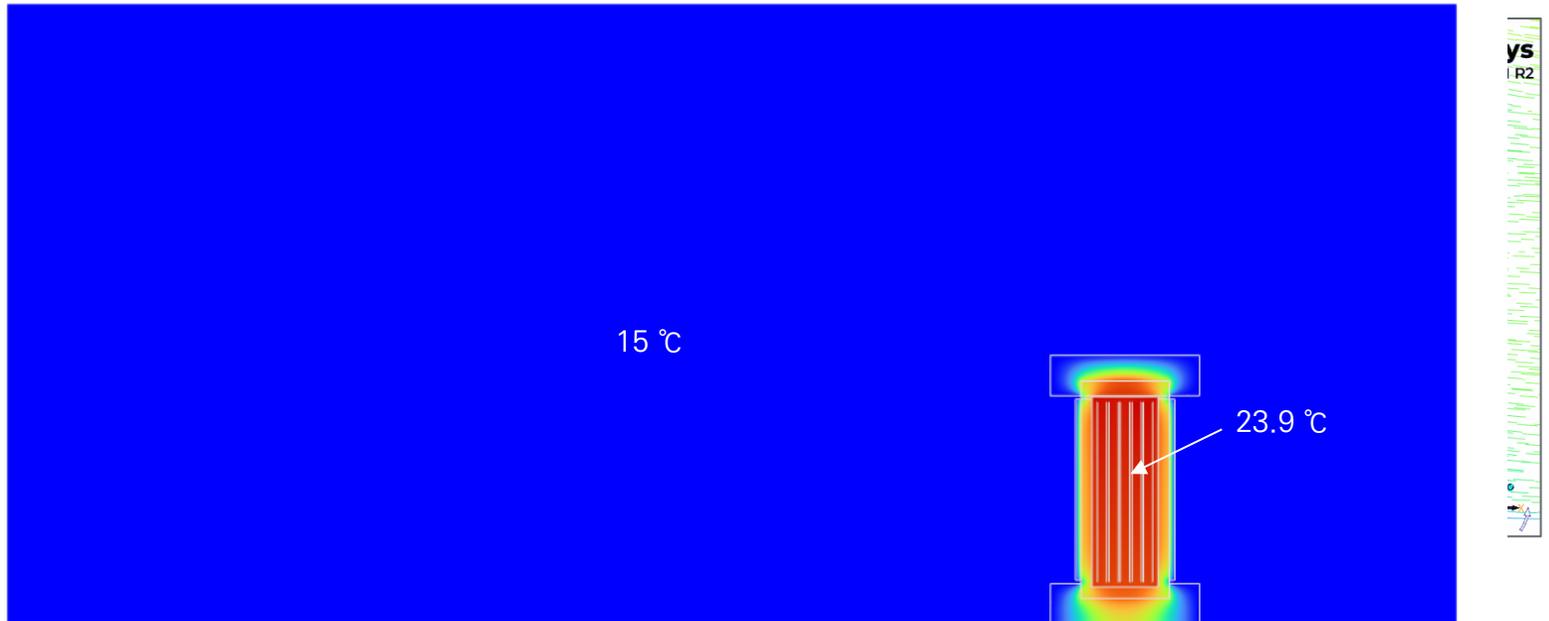
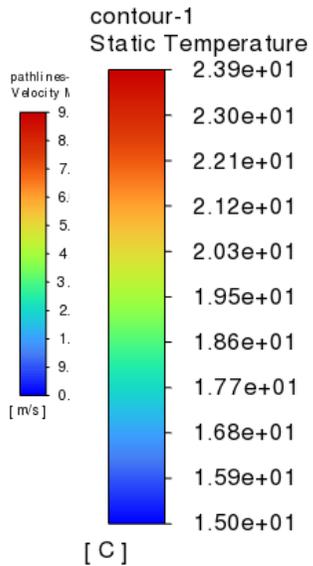
# ■ 결과



## 전체 해석 모델 (Full Field Model)

### ➤ 해석 결과 및 분석

- 내·외부 온도차이는 약 9도임.
- 운반용기 외부 강제대류에 따른 유동 및 운반용기 내부의 자연대류에 의한 유동을 확인함.
- 서브 모델링 기법 사용을 위해 프로파일을 추출할 영역에서의 유동을 확인함.



〈온도 분포〉



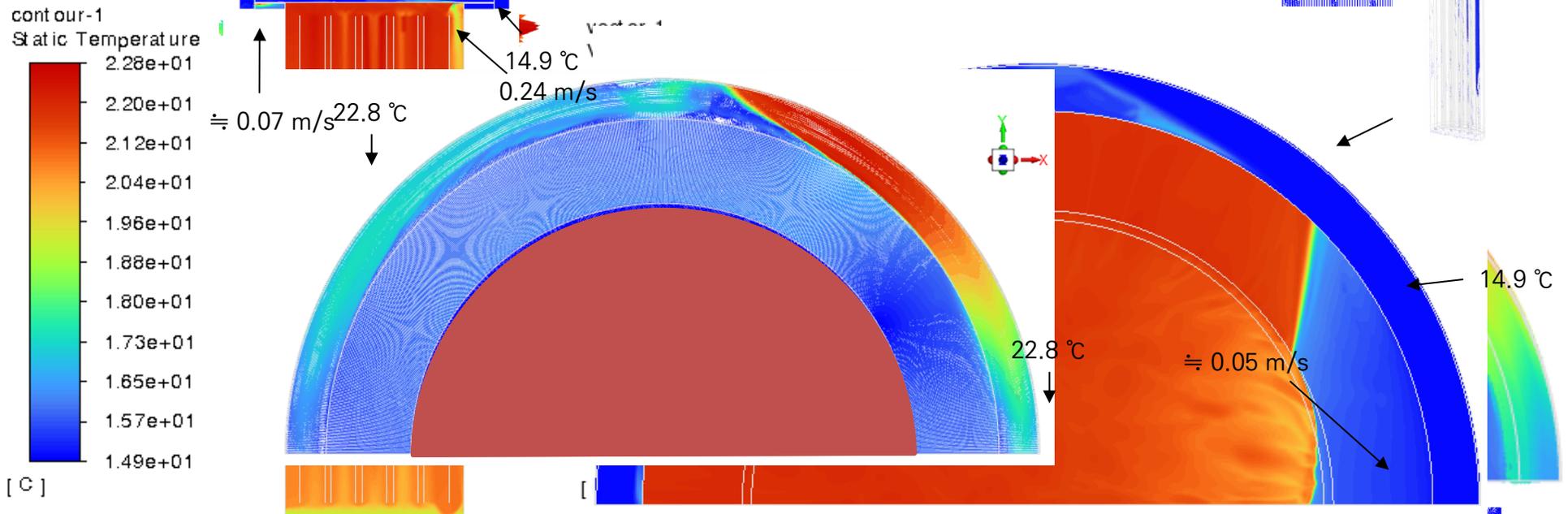
# ■ 결과



## 국소 해석 모델 (Local Field Model)

### ➤ 해석 결과 및 분석

- 내·외부 온도차이는 약 8도로 전체 해석 모델 대비 감소함.
- 1mm의 매우 작은 유로를 통한 유동을 확인함.
- 유로 내 일부 영역만 입구로 활용되고, 그 외의 영역은 출구로 활용되는 것을 확인함.
- 유로를 통해 운반용기 내부로 들어온 유체는 모두 내부에서 섞여 포화농도를 가지는 것을 가정함.
- 운반용기의 유로를 통해 나가는 해수의 유출률은 66.325 g/s임.



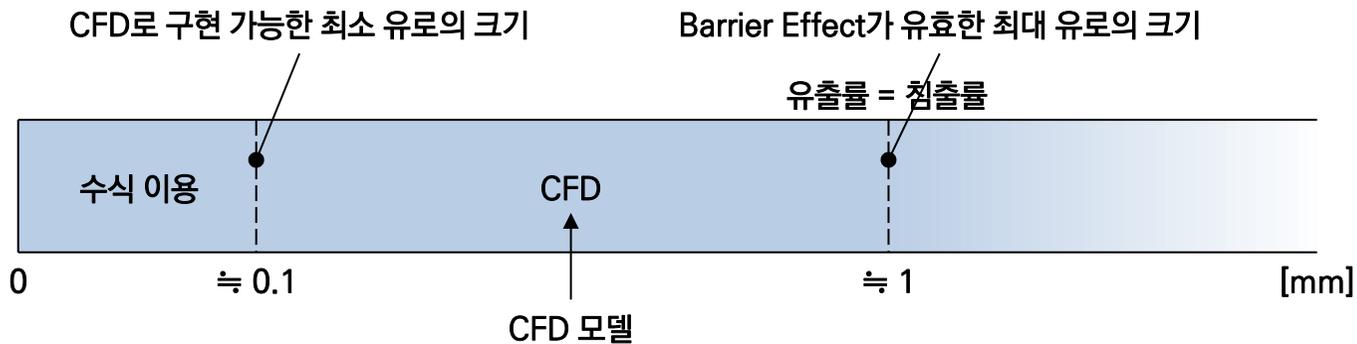
〈Path(유로 분포) 분포〉



Barrier effect를 고려할 때 유로를 통한 유출률을 보다 정확한 CFD를 이용하여 계산하는 모델을 개발하였으며, 추후 개발된 모델을 토대로 국내 상황에 맞는 해양운반 위험성 평가 코드 개발이 가능할 것으로 판단됨.

## [결론]

- DOE에서 제안한 Porous media 방법으로 국내 사용후핵연료의 많은 비율을 차지하고 있는 PLUS7 연료를 단순화함.
- 운반용기의 격납성능이 완전히 소실되지 않아 Barrier effect를 고려해야 할 매우 작은 크기의 유로를 가질 때 mesh의 크기 차이, 개수와 같은 기술적인 문제를 Sub-Modeling 기법으로 유출률을 계산하는 모델을 개발함.
- 기존 CRIEPI의 가정 조건인 자연대류 상황, 수평 자세를 벗어나 보다 정확하고 범용성 있게 유출률을 계산할 수 있을 것으로 판단됨.
- 추후 Barrier Effect가 유효한 범위를 합리적으로 설정하여 각 범위에 맞는 방식으로 유로를 통한 유출률 계산이 가능할 것으로 판단됨.
- CFD로 구현 가능한 범위일 경우 본 연구에서 사용된 방식으로 모델을 개발하여 유출률 계산이 가능할 것으로 판단됨.
- 최종적으로 국내 상황에 맞는 해양 운반 위험성 평가 코드 개발에 이바지할 수 있을 것으로 기대됨.





END



# Reference



- [1] 2022.08.24 국가지표체계-산업통상자원부, 사용후핵연료 공론화위원회, 한국원자력산업회의, 원자력안전위원회
- [2] 2023.02.10 산업통상자원부, 한국원자력환경공단
- [3] 2023.03.31 한국수력원자력
- [4] NAC INTERNATIONAL
- [5] IAEA Safety Standards. (2018). Regulations for Safe Transport of Radioactive Material, 2018 Edition, Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev.1)
- [6] Characteristics for the Representative Commercial Spent Fuel Assembly for Preclosure Normal Operations. (2007). Bechtel
- [7] von Kármán, Th. (1930). Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Fachgruppe 1 (Mathematik) 58-76
- [8] 한국원자력연구원, 건식저장용기 내부 핵연료집합체 해석을 위한 Porous model 방법론 검토
- [9] DOE,. (1996). SPENT NUCLEAR FUEL EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY REPORT. United States.  
<https://doi.org/10.2172/778872>
- [10] Dong-Keun Cho, Jung-woo Kim, In-Young Kim, Jong-Youl Lee. (2019). Investigation of PWR Spent Fuels for the Design of a Deep Geological Repository. Journal of Nuclear Science and Technology 17:3, pages 339-346