

2025 원자력학회 춘계학술발표회  
사용후핵연료의 안전한 저장을 위한 준비

# 사용후핵연료 건식저장 구조재료 열화 모델링

최성열<sup>1</sup>, 김상진<sup>1</sup>, 채관일<sup>1</sup>, 박사무엘<sup>1</sup>, 김지언<sup>1</sup>, 김승현<sup>2</sup>, 윤상혁<sup>2</sup>, 김승현<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy System Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup> Korea Radioactive Waste Agency

<sup>3</sup> Department of Nuclear Safety Research, Korea Institute of Materials Science

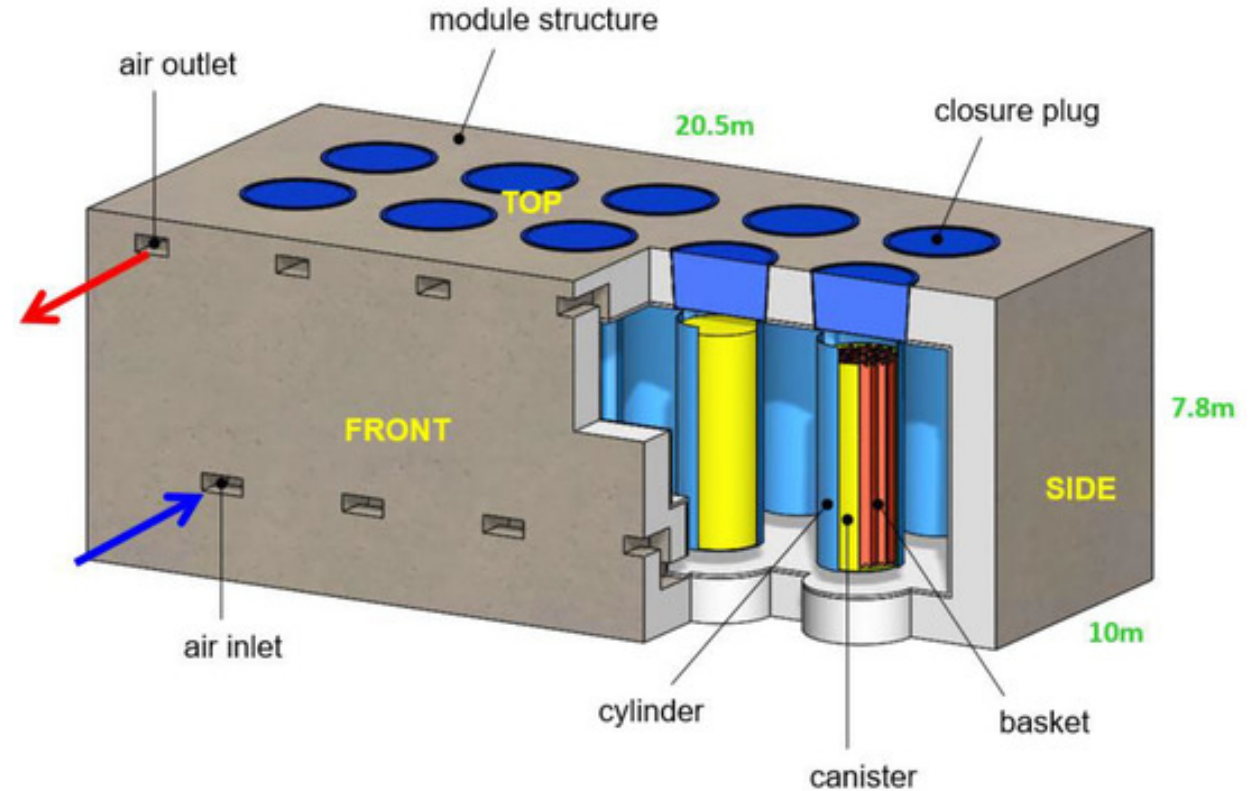
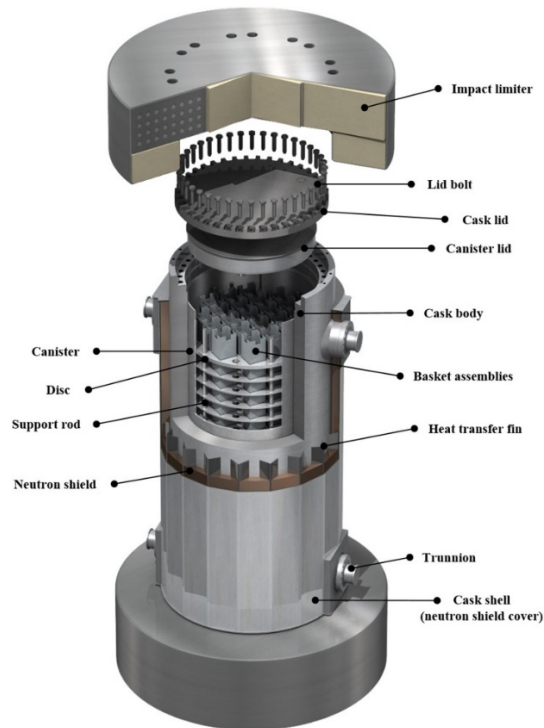
21 May 2025



# 국내 사용후핵연료 건식 중간저장 시설

## 다양한 국내 건식저장시설에 대한 연구 진행

- 한국원자력환경공단: KORAD-21 운반·저장 겸용용기
- 한국수력원자력: 수직모듈형 경수로 사용후핵연료 건식저장모델 (COSMOS)



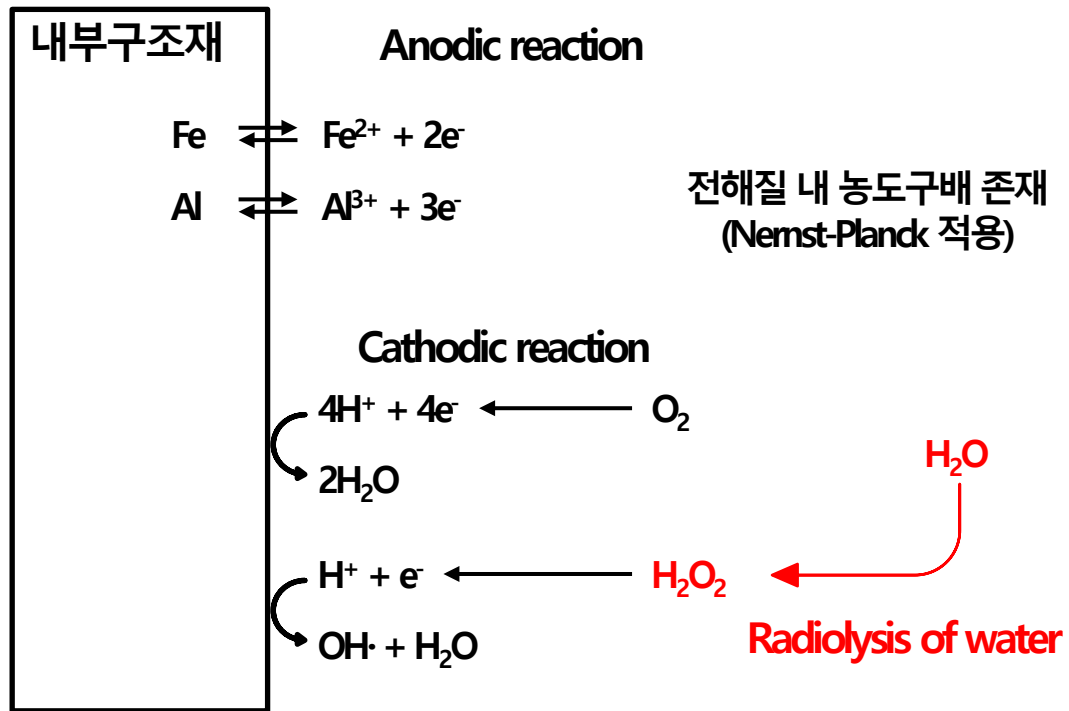
KORAD-21 운반·저장 겸용용기 (좌), 수직모듈형 경수로 사용후핵연료 건식저장모델 (COSMOS) (우).

# 금속 저장용기 내·외부구조재 열화 거동

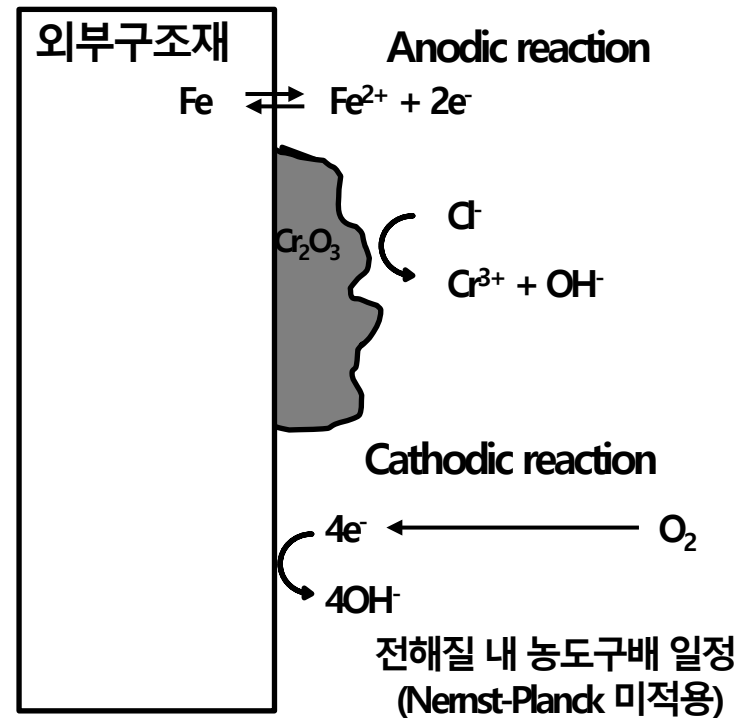
내·외부 주요 부식 거동은 다음과 같은 원인에 의해 발생

- 내부구조재 부식: 잔류수분의 방사분해로 인한 부식
- 외부구조재 부식: 염화물을 포함한 환경에서 부식

## 내부구조재 부식 거동



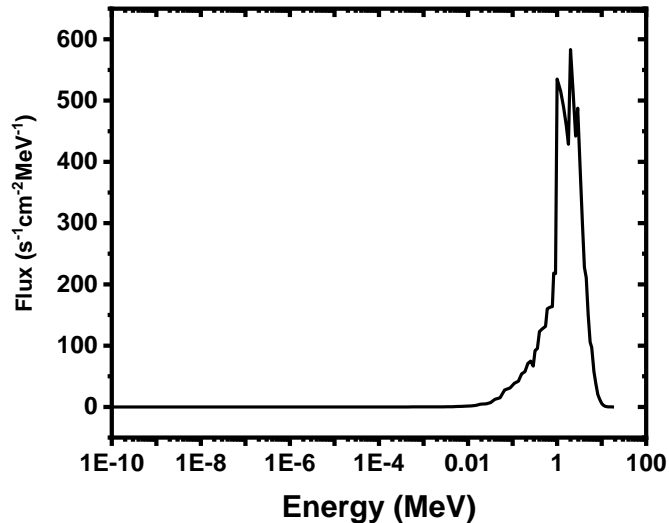
## 외부구조재 부식 거동



# 건식저장용기 내부 중성자 조사에 의한 재료열화 가능성

## 중성자로 인한 내부 구조재 조성 변화 가능성 고려

- 사용후핵연료에서 방출되는 중성자는 내부 구조재 금속 재료의 미세구조의 변형, 또는 특정 원소의 재배치와 함께 재료의 변화를 초래할 수 있음
  - 중성자 스펙트럼의 조사로 인한 재료의 dpa (displacement per atom) 값 계산



중성자 스펙트럼.

합금 SS17-4의 조성 [atomic percent]

Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb	Ta	SUM
1.969	0.07 1	0.052	18.607	0.582	71.408	2.826	4.35 0	0.089	0.046	100.0

합금 AA6061의 조성 [atomic percent]

Mg	Al	Si	Cu	Cr	SUM
0.8885	98.2580	0.7690	0.0637	0.0208	100.0

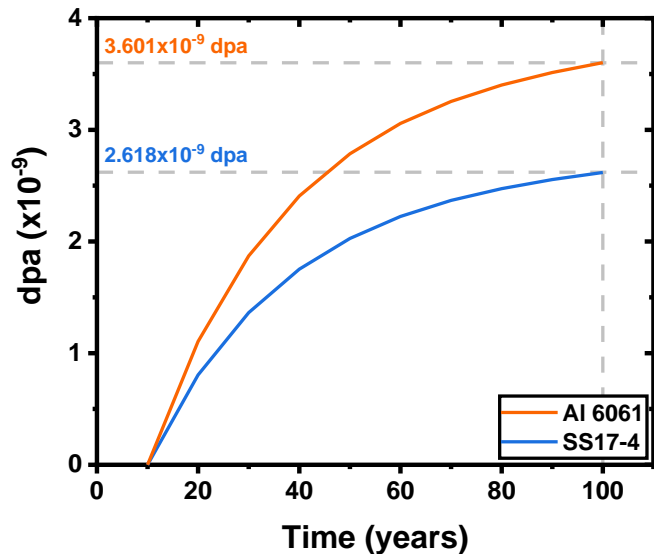
[1] Jung, Hunda, et al. "Extended storage and transportation: evaluation of drying adequacy." Rep. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission (2013).

[2] Shukla, Pavan K, and Robert L. Sindelar. Effects of Residual Water on Storage Canister Internal Components. No. SRNL-STI-2020-00428. Savannah River Site (SRS), Aiken, SC (United States). Savannah River National Lab.(SRNL), 2020.

# 건식저장용기 내부 중성자 조사에 의한 재료열화 가능성

## 중성자로 인한 내부 구조재 조성 변화 가능성 고려

- SS17-4와 Al6061의 중성자 조사에 의한 시간에 따른 누적 dpa 값 계산
  - 100년까지 각각 SS17-4는  $2.618 \times 10^{-9}$  dpa, AA6061은  $3.601 \times 10^{-9}$  dpa에 도달
  - 일반적으로 원자력 발전소 압력용기 내부 Baffle이 설계수명 동안 받는 조사손상은 약 수십 dpa 정도로<sup>[1]</sup>, 건식 저장용기 재료들의 dpa는 무시가능 수준



Material	SS17-4	AA6061
Time [yrs]	dpa (x10 <sup>-9</sup> )	dpa (x10 <sup>-9</sup> )
10	0.0000	0.0000
20	0.8042	1.1042
40	1.7524	2.4072
50	2.0276	2.7858
60	2.2243	3.0568
70	2.3673	3.2541
100	2.6180	3.6013

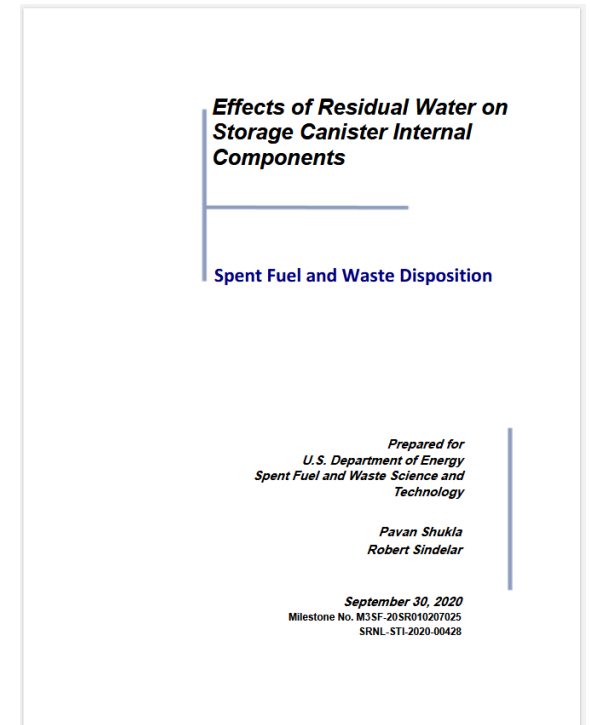
시간에 따른 각 합금의 누적 dpa.

[1] [https://www.kns.org/files/pre\\_paper/50/23A-119-권준현.pdf](https://www.kns.org/files/pre_paper/50/23A-119-권준현.pdf)

# 건식저장용기 내부 잔류수분 존재 가능성

## 미국, 건식저장용기 잔류수분의 열화 영향 평가 연구 다년간 수행 중

- US NRC는 건조이후에도 상당량의 잔류 수분 존재 가능성 제시
  - Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses는 최대 55mol 고려<sup>[1]</sup>
- US DOE는 2019년 잔류 수분영향을 연구 주제로 포함
  - Savannah River National Lab은 잔류수분을 무한대로 가정<sup>[2]</sup>



미 SRNL의 건식저장 잔류수분 영향 평가 보고서.

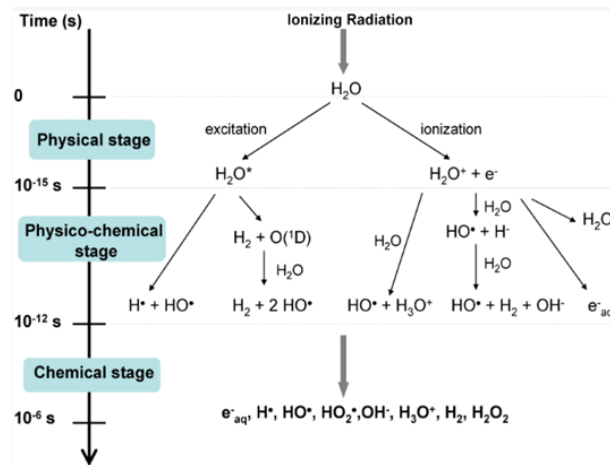
[1] Jung, Hunda, et al. "Extended storage and transportation: evaluation of drying adequacy." Rep. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission (2013).

[2] Shukla, Pavan K, and Robert L. Sindelar. Effects of Residual Water on Storage Canister Internal Components. No. SRNL-STI-2020-00428. Savannah River Site (SRS), Aiken, SC (United States). Savannah River National Lab.(SRNL), 2020.

# 잔류수분 방사분해로 인한 부식 가능성

## 미국, 건식저장용기 잔류수분의 열화 영향 평가 연구 다년간 수행 중

- 잔류수분은 방사선에 의해 방사분해 물질들을 생성해 냄
  - $H_2O_2$ ,  $O_2$  등 고산화성 방사분해물질들은 높은 표준 전위로 인해 내부 구조재를 부식시킬 수 있는 산화제로 작용 함<sup>[1]</sup>
  - ASTM (American society for testing and materials consensus standard guide for drying of SNF)는 잔류수분의 방사선 분해를 통해 건식 저장용기 내부 구조재의 부식을 유발할 수 있음을 확인 함<sup>[2]</sup>



물 방사능 분해 중 발생하는 주요 반응<sup>[1]</sup>.

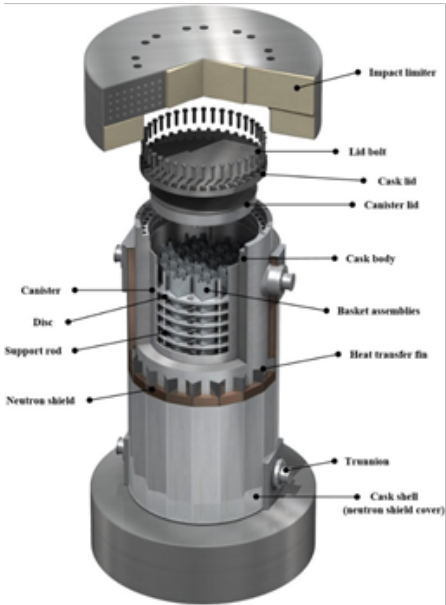
[1] Sophie Le Caër. Water radiolysis: influence of oxide surfaces on h2 production under ionizing radiation. Water, 3(1):235-253, 2011.

[2] d'Entremont, Anna, et al. "Drying of Spent Nuclear Fuel: Considerations and Examples." Nuclear Technology 210.9 (2024): 1639-1647.

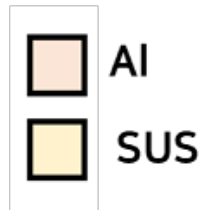
# 금속 저장용기의 주요 내부구조재

## 스테인리스 및 알루미늄 합금이 주요 내부구조재로 사용

- 스테인리스(SS17-4)
- 알루미늄(AA6061)



Component	
Cask	Lid seal
	Lid
	Screws
	Flat seal
	Port cover seal
Canister	Lid
	Screws
	Flat seal
	Body
Bottom plate	
Baskets assembly	
Neutron absorber	
Support rods	
Discs	



17-4 stainless steel		6061 Aluminium	
Element	Content (%)	Element	Content (%)
Fe	73	Al	98.56
Cr	15.0 - 17.5	Mg	1.20
Ni	3.0 - 5.0	Si	0.80
Cu	3.0 - 5.0	Fe	0.70
Mn	1.0	Cu	0.40
Si	1.0	Cr	0.35
Ta	0.45	Zn	0.25
Nb	0.45	Ti	0.15
Nb + Ta	0.15 - 0.45	Mn	0.15
C	0.070	(others)	0.15
P	0.040		
S	0.030		

KORAD-21 Dry Storage Cask.

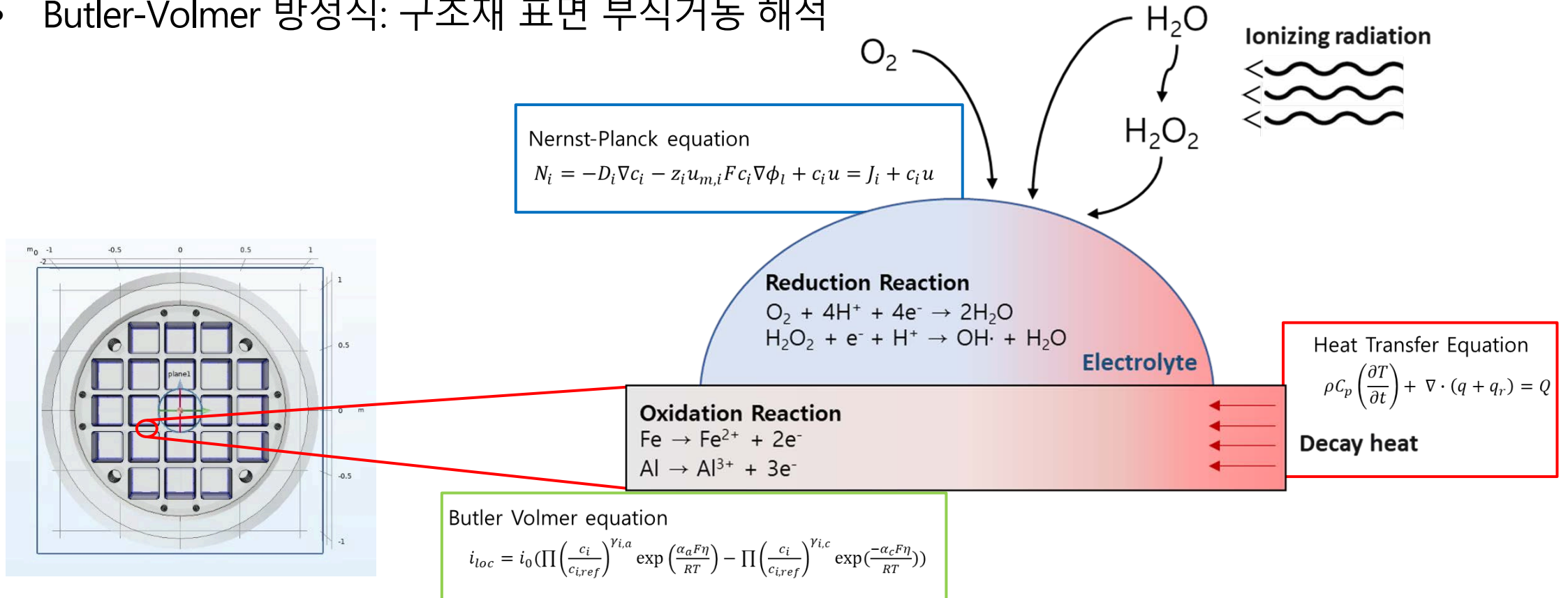
SS17-4 및 AA6061의 화학 조성



# 건식저장용기 내부구조재 다물리 부식거동 모델링

## 2D 내부구조재 열-전기화학 복합 부식 거동 모델

- Heat transfer 방정식: 사용후핵연료 붕괴열 해석
- Nernst-Planck 방정식: 산화제 (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 수송 해석
- Butler-Volmer 방정식: 구조재 표면 부식거동 해석



# 건식저장용기 내부 온도분포 모델링

## 건식저장용기 열 해석의 기본적인 물리현상

- 내부구조물들을 통한 conduction

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T$$

$\rho$ : density [kg/m<sup>3</sup>]  
 $C_p$ : specific heat capacity [J/(kg·K)]  
 $\lambda$ : thermal conductivity [W/(m·K)]

- 높은 온도에 의한 radiation

$$q_r = \varepsilon(H - e_b(T))$$

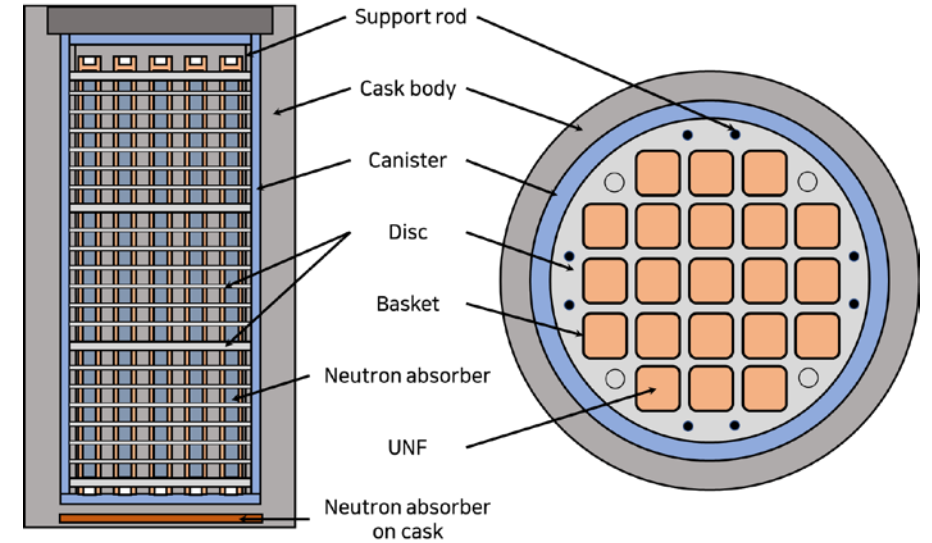
$q_r$ : heat flux by radiation [W/m<sup>2</sup>]  
 $\varepsilon$ : emissivity [-]  
 $H$ : irradiance [W/m<sup>2</sup>]  
 $e_b(T)$ : total radiated power across all wavelengths [W/m<sup>2</sup>]

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4$$

- 외부 공기흐름에 의한 convection

$$q = h \cdot (T_{ext} - T)$$

$q$ : heat flux by conduction [W/m<sup>2</sup>]  
 $h$ : heat transfer coefficient [W/(m<sup>2</sup>·K)]



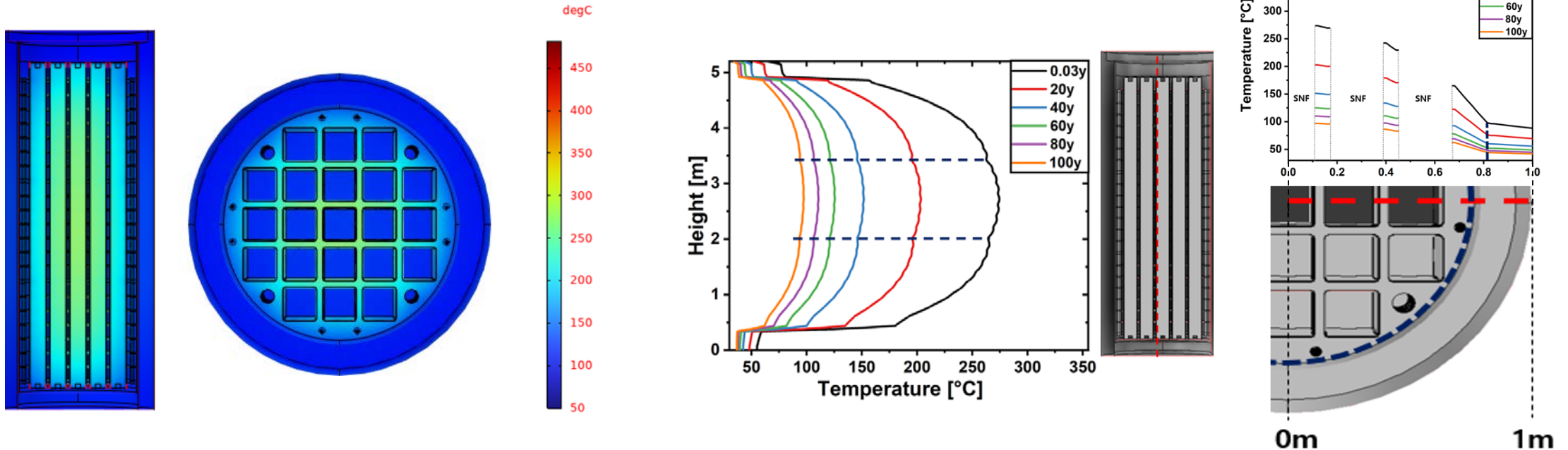
KORAD-21 건식저장용기 모델 Geometry<sup>[1]</sup>.

[1] Kim, Sangjin, et al. "Thermal Performance Evaluation of Dry Storage Cask Using Hybrid 3D and 2D Models under Normal and Fire Exposure Conditions." Nuclear Engineering and Technology (2025): 103618.

# 내부구조재 열해석 결과

## 100년 열해석 결과, 각 내부구조재 온도분포 확인

- 용기 내부 최고 온도는 저장용기의 중심부에서 273.85 °C (547 K)으로 계산됨
- 시간의 흐름에 따라 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있고 저장용기의 가장자리에 가까워질수록 온도가 감소하는 것을 관찰할 수 있음



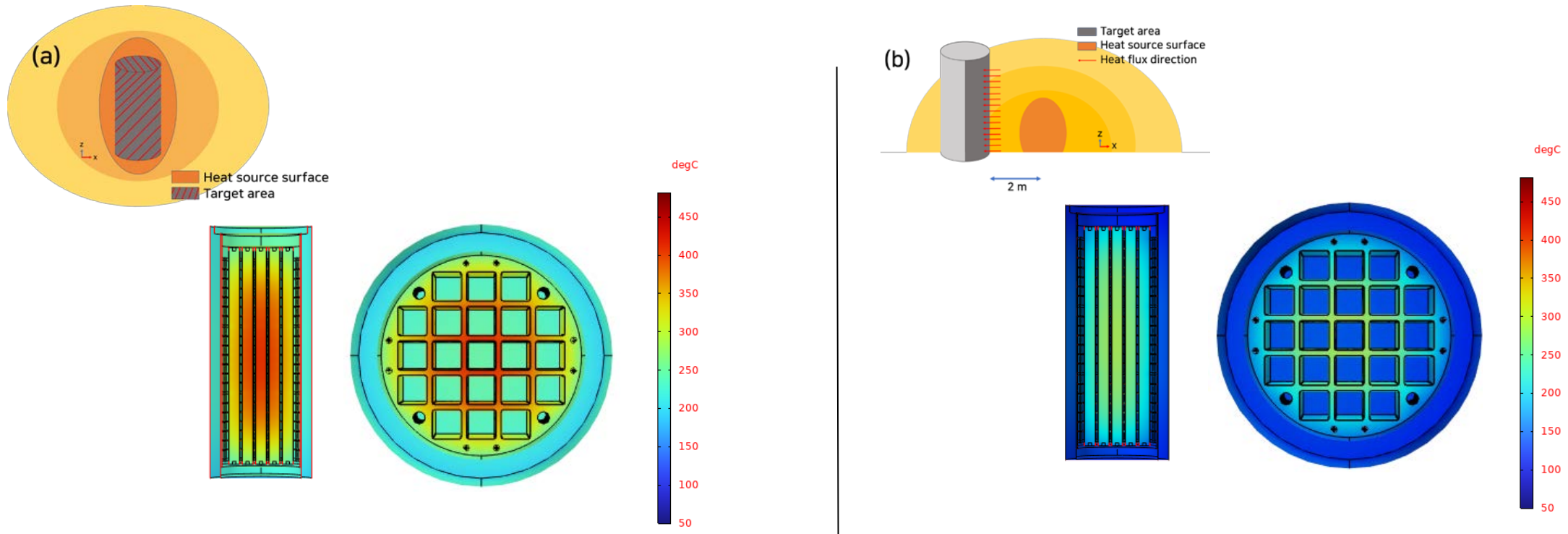
내부 구성 요소의 최고 온도 분포 수평(왼쪽) 수직(오른쪽).

정상 조건에서 여러 시간 경과에 따른 높이(왼쪽) 또는 반경(오른쪽) 방향 온도 분포<sup>[1]</sup>.

# 내부구조재 열해석 결과

## 화재 조건에 대한 열해석 결과, 각 극한 조건에서 내부 구조재의 온도 분포 확인

- (a) 조건에서는 최대 온도가 409.29°C로 나타났으며, (b) 조건에서는 290.8°C로 계산되었음



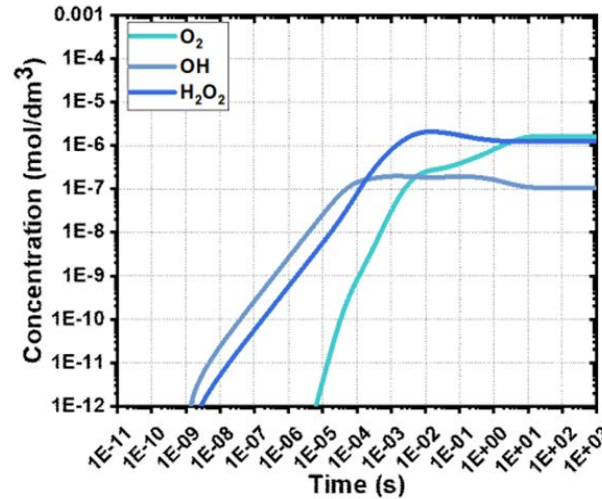
(a) 직접 화재 노출 조건과 (b) 간접 화재 노출에 대한 열해석 결과<sup>[1]</sup>.

# 잔류수분 방사분해 산화제의 농도계산

## 잔류수분의 방사분해에 따른 산화제 생성

- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, OH·, O<sub>2</sub>의 환원전위는 내부구조재 산화전위보다 높기에 산화제로 사용
- 방사분해 모델링을 통한 O<sub>2</sub>, OH·, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도 도출

No.	Reactions				k22 L/(mole)	k288 L/(mole)	EA (J/mol)
	Reactants	Products					
1	OH	OH	H2O2		5.50E+09	2.54E+10	7.90E+03
2	OH	e-	OH-		3.10E+10	5.35E+11	1.47E+04
3	OH	H	H2O		9.30E+09	4.50E+10	8.20E+03
4	OH	H2O2	H2O	O2	7.10E+09	1.11E+11	1.42E+04
5	OH	O2-	O2	OH-	1.00E+10	3.02E+11	1.76E+04
6	OH	H2O2	H2O	H2O	2.70E+07	4.22E+08	1.42E+04
7	OH	H2	H	H2O	3.40E+07	1.40E+09	1.92E+04
8	OH	OH-	H2O	O-	1.20E+10	1.86E+11	1.42E+04
9	OH	H2O2	H2O	OH-	7.50E+09	1.17E+11	1.42E+04
10	OH	O-	H2O2		1.80E+10	2.82E+11	1.42E+04
11	O-	H2O	OH	OH-	1.70E+06	1.50E+08	2.32E+04
12	e-	e-	H2	OH-	5.50E+09	5.50E+09	0
13	e-	H	H2	OH+	2.40E+10	3.61E+11	1.40E+04
14	e-	O2-	H2O2	OH+	1.30E+10	2.02E+11	1.42E+04
15	e-	H2O2	H2O2		2.00E+10	3.13E+11	1.42E+04
16	e-	H2O2	OH	OH-	1.20E+10	2.46E+11	1.56E+04
17	e-	O2	O2-		1.90E+10	2.65E+11	1.36E+04
18	e-	H+	H		2.30E+10	2.64E+11	1.26E+04
19	e-	H2O	H	OH-	1.90E+01	2.97E+02	1.42E+04
20	e-	H2O2	O-	OH-	3.50E+09	5.48E+10	1.42E+04
21	H	H	H2		5.50E+09	9.30E+10	1.46E+04
22	H	O2-	H2O2		2.00E+10	3.13E+11	1.42E+04
23	H	H2O2	H2O2		2.00E+10	3.13E+11	1.42E+04
24	H	H2O2	H2O	OH	5.10E+07	4.05E+08	1.07E+04
25	H	O2	H2O2		2.10E+10	1.54E+11	1.03E+04
26	H	OH-	e-	H2O	2.20E+07	3.20E+10	3.76E+04
27	H2O2	H2O2	H2O2	O2	8.42E+05	4.54E+07	2.06E+04
28	H2O2	O2-	O2	H2O2	9.60E+07	4.18E+08	7.60E+03
29	H2O2	H+	O2-		8.00E+05	8.90E+05	4.72E+03
30	H+	O2-	H2O2		5.00E+10	7.83E+11	1.42E+04
31	H2O2	OH+	H2O2	H2O	5.00E+08	1.91E+10	1.88E+04
32	H2O2	H2O	H2O2	OH-	5.70E+04	1.20E+07	2.77E+04
33	H2O2		H2O	O	4.00E+08	3.00E+02	6.30E+04
34	O	O	O2		5.00E+09	7.88E+10	1.42E+04
35	H2O	H+	OH-		2.60E+05	1.40E+02	8.02E+04
36	H+	OH-	H2O		1.42E+11	2.24E+12	1.42E+04
37	O2-	O2-	H2O2	OH-	1.77E9	9.50E+15	8.00E+04



주요 산화제들의 농도 변화.

$$\frac{dc_i}{dt} = D_i \nabla^2 c_i + \sum_{j=1}^m \prod_{k=1}^n c_k R_j$$

확산 계수 (Diffusivity):  $D = D_0 \exp(-E_a/RT)$

반응속도 (Reaction rate):  $R = R_0 \exp(-E_a/RT)$

건식저장용기 열화모델에 사용된 잔류수분 방사분해 데이터[1].

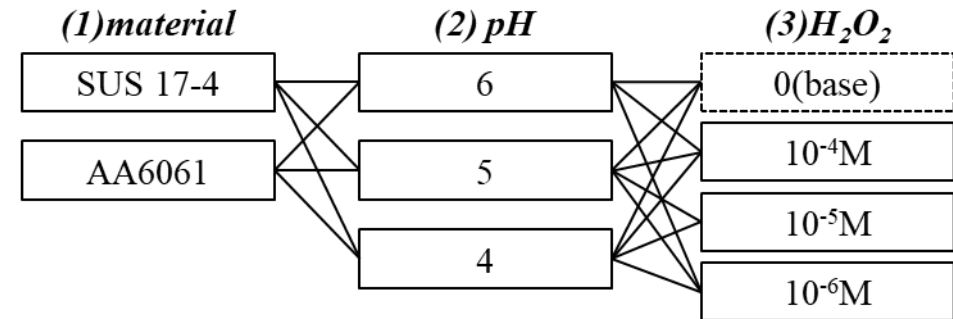
# 내부구조재 부식거동 데이터 확보

## 부식해석에 필요한 부식 물성치(Tefel plot) 확보를 위한 실험 수행

- 삼전극 시스템 (RE: SCE & CE: pt)
- 부식 실험 조건<sup>[1]</sup>



삼극셀과 타겟물질 시편



내부구조재 방사분해 실험 조건

[1] Final Safety Analysis Report for Shin-Hanul Units 1 and 2

[2] Holmbeck, Gregory Peter, et al. Milestone 1.2. 13: Preliminary Measurements of Radiolytic Nitric Acid Formation to Support Predictive Model Validation. No. INL/RPT-23-73873-Rev000. Idaho National Laboratory (INL), Idaho Falls, ID (United States), 2023.

[3] Daub, K, et al. "Effects of  $\gamma$ -radiation versus  $H_2O_2$  on carbon steel corrosion." *Electrochimica Acta* 55.8 (2010): 2767-2776.



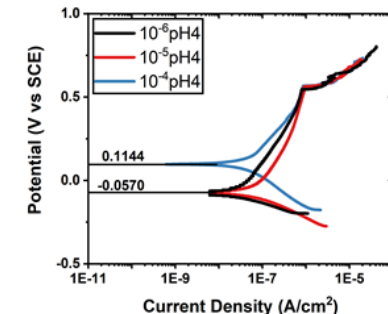
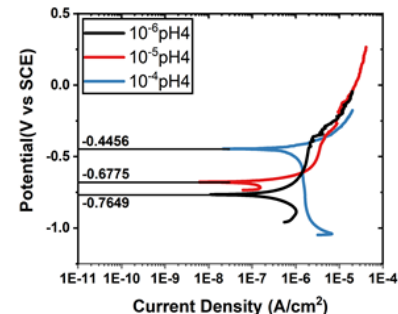
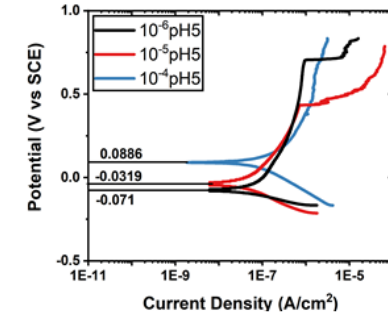
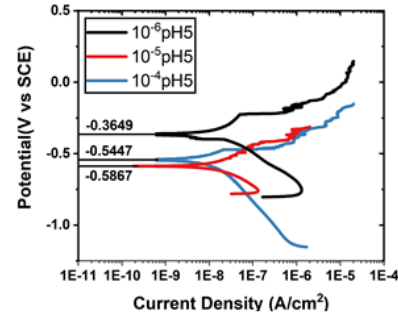
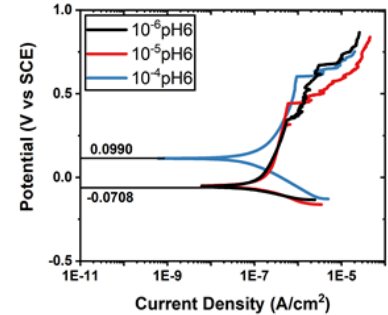
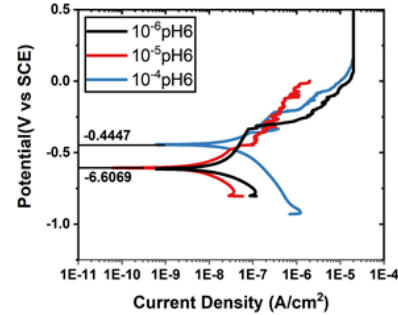
# 내부구조재 부식거동 데이터 확보

## Tafel plot 을 통한 부식모델 물성 데이터 측정

- 실험을 통해 내부 구조재 합금 SS17-4 와 AA6061의 각 타펠 물성치 수집

pH 및 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도에 따른 AA6061과 SS17-4의 물성치.

Material	pH	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도 [M]	potential [mV]	icorr [nA/cm <sub>2</sub> ]	β <sub>a</sub> [mV/decade]	β <sub>c</sub> [mV/decade]
sus	6	0.0001	97.304	195.559	232.5	561.852
		0.00001	-72.507	69.37	357.708	120.866
	5	0.000001	-93.016	44.55	344.229	101.909
		0.0001	90.745	193.39	265.397	415.985
		0.00001	-38.364	54.138	339.581	148.248
		0.000001	-65.202	43.462	268.162	119.245
4	0.0001	113.518	417.043	760.9	824.113	
	0.00001	-51.2	85.536	500.545	97.687	
Al	6	0.000001	-645.25	8.551	121.681	79.008
		0.00001	-751.85	14.486	202.481	224.515
	5	0.0001	-694.489	38.418	348.292	7.6
		0.000001	-714.768	25.179	79.739	39.178
		0.00001	-587.166	17.961	198.765	144.242
		0.0001	-646.725	17.753	450.038	940.749
	4	0.000001	-659.232	347.815	97.886	105.578
		0.00001	-469.944	160.4	81.975	131.1
		0.0001	-501.224	384.809	104.44	142.178

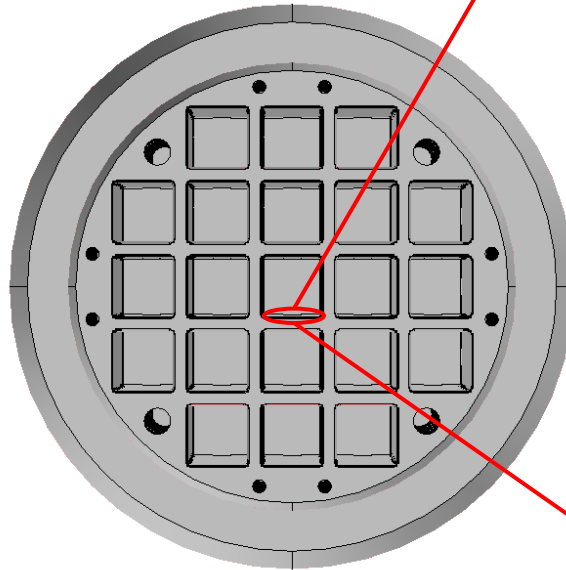
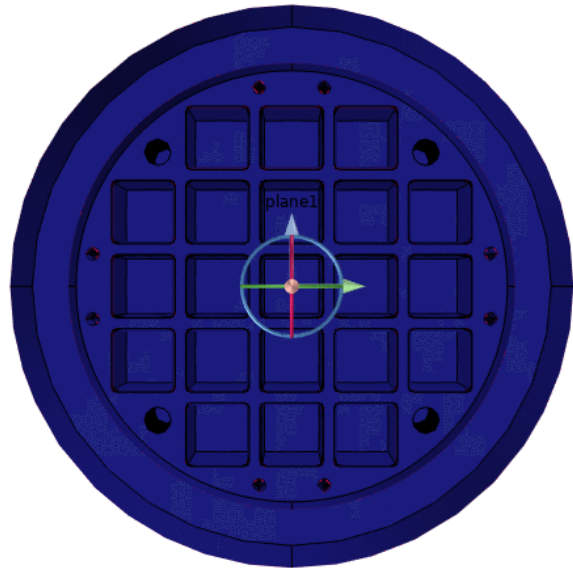


pH 및 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도에 따른 AA6061(왼쪽)과 SS17-4(오른쪽)의 Anodic polarization curve.

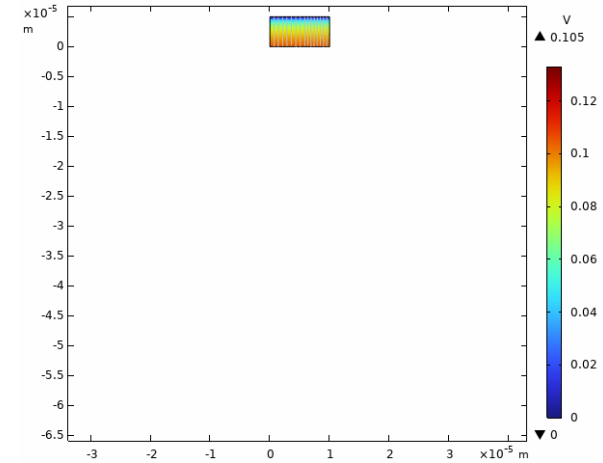
# 내부구조재 열-전기화학 거동 결과

## 50년 부식 해석 결과, 내부구조재 건전성 확인

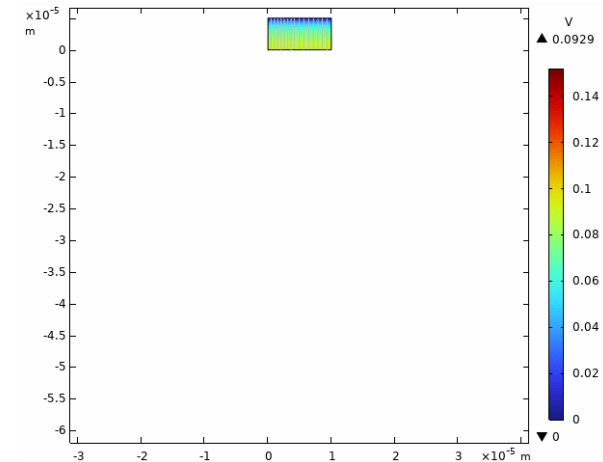
- SS17-4 부식 깊이: 58.6 $\mu\text{m}$
- AA6061 부식 깊이: 14.8 $\mu\text{m}$



AA6061



SS17-4

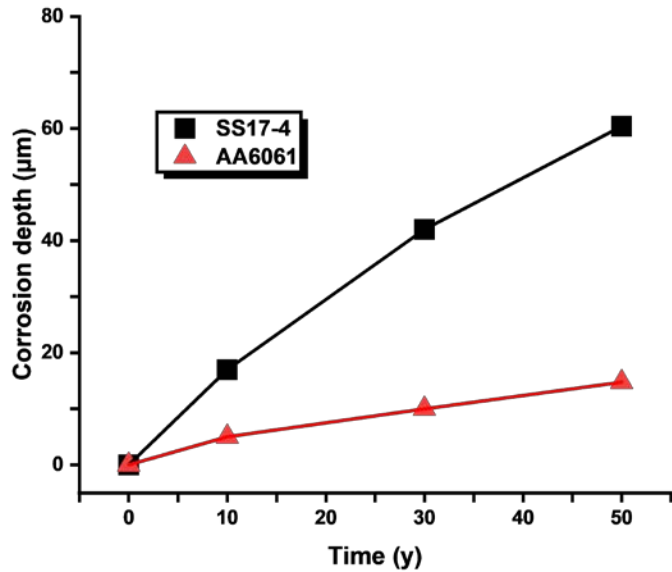




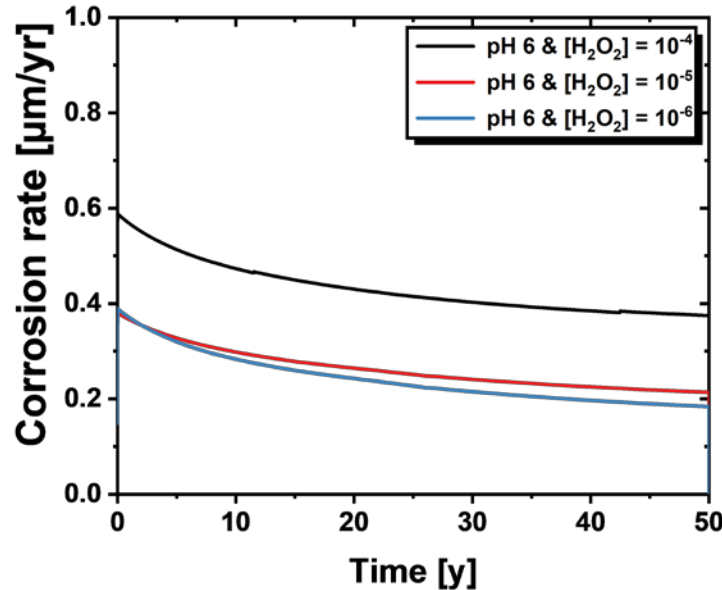
# 다양한 조건에서의 내부구조재 열-전기화학 거동

## 다양한 부식 조건에서 해석 결과

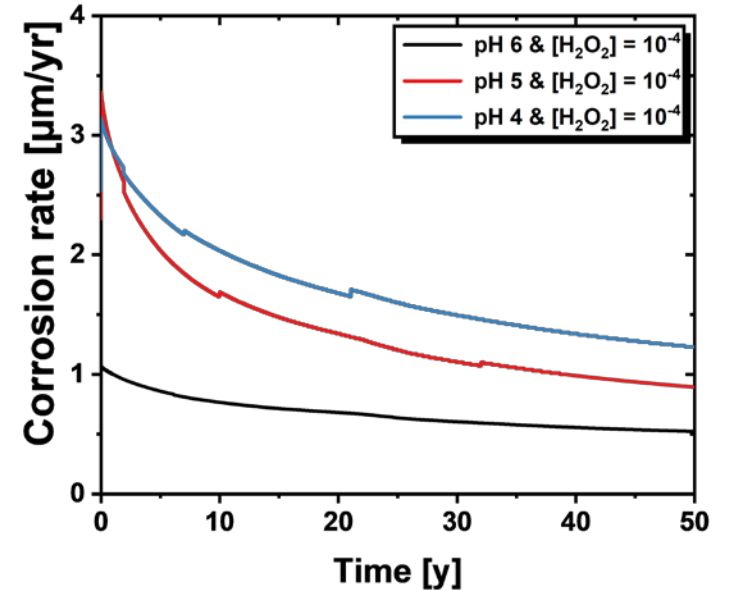
- SS17-4에 비해 AA6061은 산화막 형성으로 부식 속도가 안정적으로 유지
- pH가 감소하거나  $H_2O_2$  농도가 증가할 수록 부식 속도 증가



대표 케이스  $[H_2O_2] = 10^{-5}$  M 및 pH 5인 환경에서 50년 동안 SS17-4와 AA6061의 열화 진행 예측 결과.



AA6061의 부식 속도에 대한 pH의 영향.

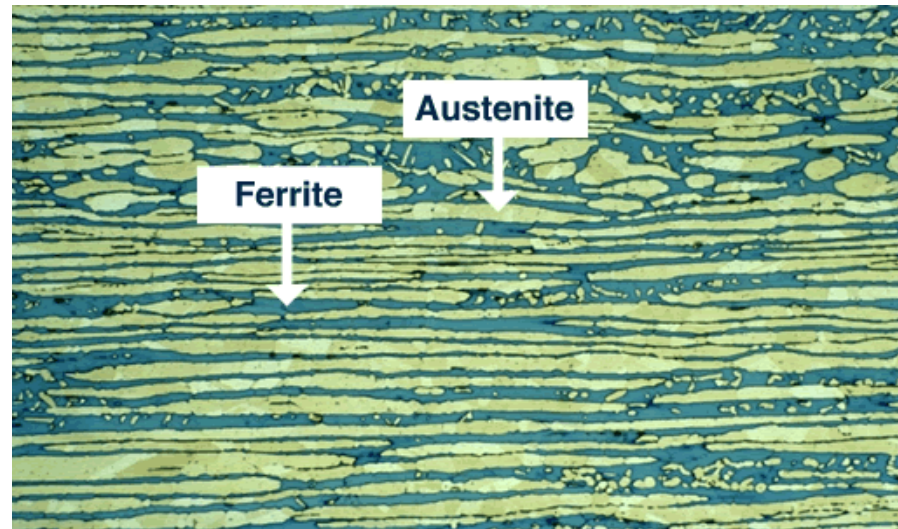


SS17-4의 부식 속도에 대한  $[H_2O_2]$ 의 영향.

# 금속 저장용기의 주요 외부구조재

## 염화물 환경에 강한 Duplex Stainless Steel (DSS)

- Duplex Stainless Steel: 오스테나이트계 와 페라이트계가 결합된 이중 구조 금속
- 우수한 내부식성 및 기계적 특성
  - Austenite: 우수한 내부식성 & Ferrite: 우수한 기계적 특성
- 이러한 이유로 DSS2205 및 DSS2101이 건식저장용기 외부 구조재로 널리 고려됨

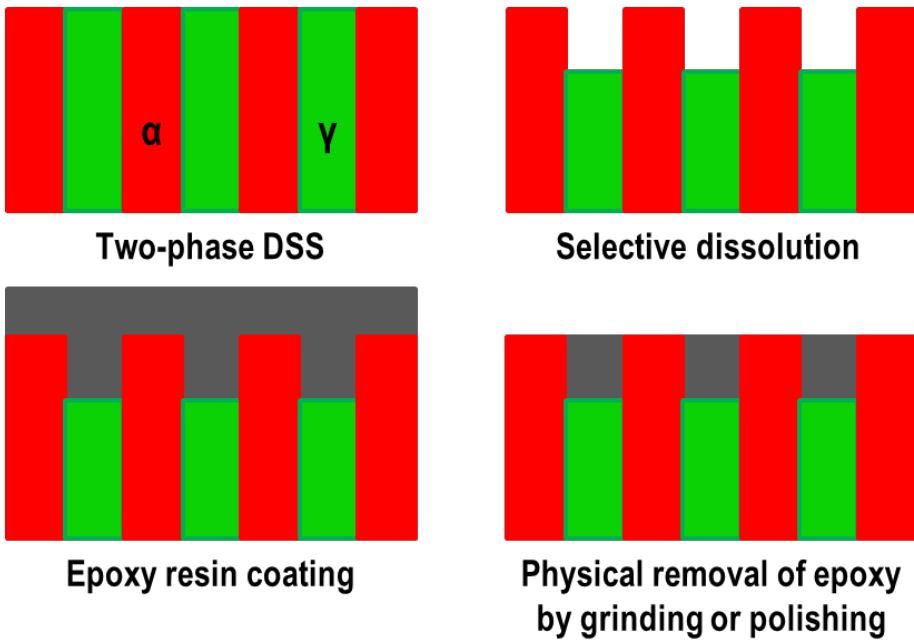


Duplex stainless steel의 미세구조

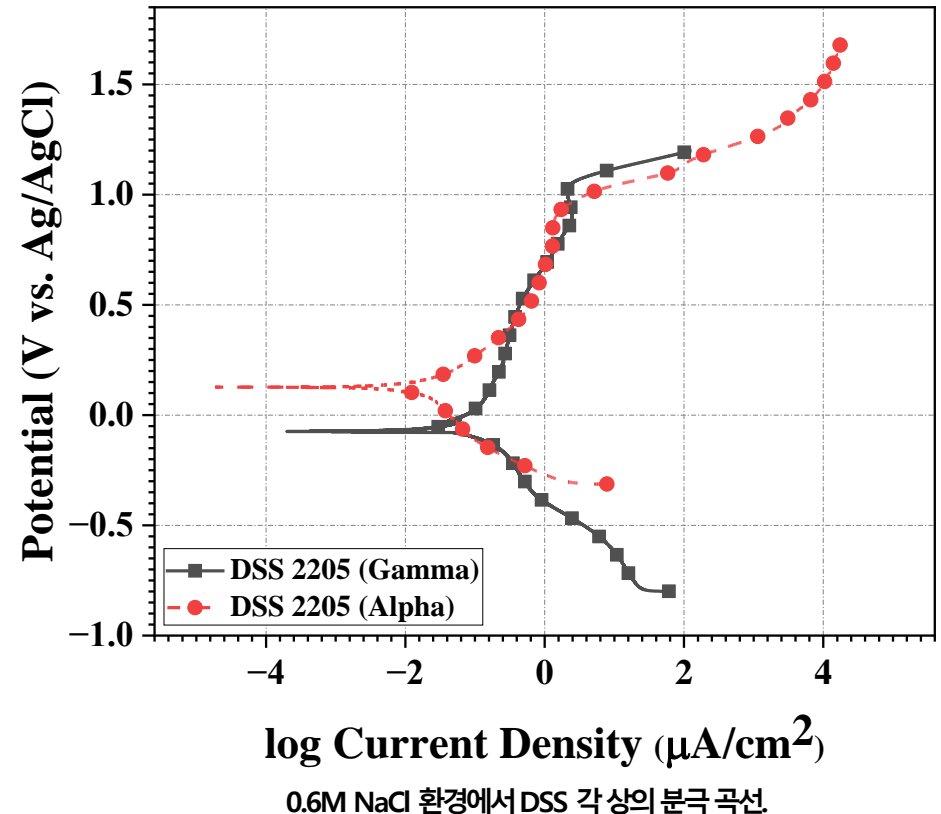
# 염화물 환경에서의 외부구조재 부식 특성

## DSS는 각 상(phase)에 따라 상이한 부식 거동을 보임

- 단일 상 분극 측정 (Single-phase polarization)을 통해 DSS의 부식 물성치 분석 (재료연 수행)
- 오스테나이트( $\gamma$ 상)와 페라이트( $\alpha$ 상)의 분극 곡선
  - 부식전위: 오스테나이트( $\gamma$ 상) < 페라이트 ( $\alpha$ 상)



단일 상 분극 곡선 측정 방법 (재료연 수행).



# 외부구조재 부식 해석 모델

## DSS 부식 거동 해석 접근법

- Monte Carlo method: MATLAB 활용 DSS내 미세 상의 무작위 분포 구현
- Butler-Volmer equation: 상 별로 구분된 전기화학 반응 (분극 곡선) 적용
  - Nernst-Planck equation 미 적용 (이온 수송 영향 미 고려)
- Level-set method: 각 상의 상이한 부식 속도 및 형상 변화 반영

```

clear all;
% 무작위 분포 생성
num_nodes = 5000; % 노드 수
x_range = [-1E-3, 1E-3]; % x 범위
y_range = [-4E-4, 0]; % y 범위

% x, y 좌표 생성
x_coords = x_range(1) + (x_range(2) - x_range(1)) * rand(num_nodes, 1);
y_coords = y_range(1) + (y_range(2) - y_range(1)) * rand(num_nodes, 1);

% 50:50 비율로 0과 1 할당
colors = zeros(num_nodes, 1);
colors(1:round(num_nodes/2)) = 1;
colors = colors(randperm(num_nodes)); % 순서대로 섞기

% 25:75 비율로 0과 1 할당
% colors = zeros(num_nodes, 1);
% colors(1:round(0.75 * num_nodes)) = 1;
% colors = colors(randperm(num_nodes)); % 순서대로 섞기

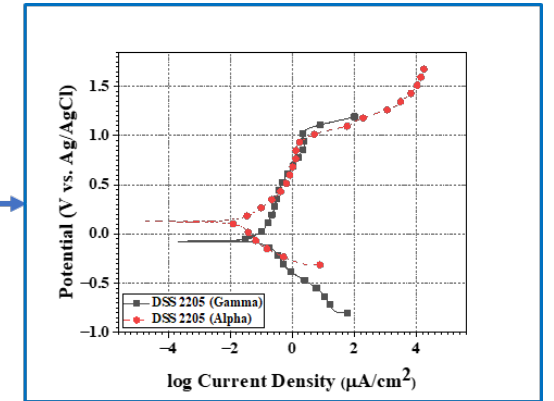
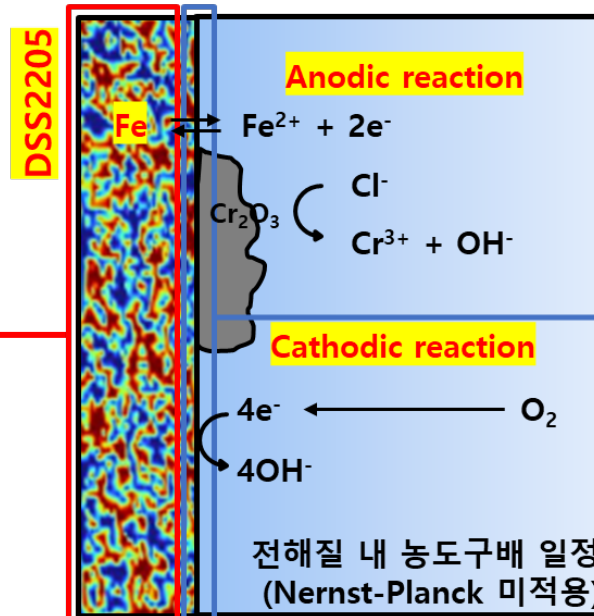
% 60:40 비율로 0과 1 할당
% colors = zeros(num_nodes, 1);
% colors(1:round(0.4 * num_nodes)) = 1;
% colors = colors(randperm(num_nodes)); % 순서대로 섞기

% 75:25 비율로 0과 1 할당
% colors = zeros(num_nodes, 1);
% colors(1:round(0.25 * num_nodes)) = 1;
% colors = colors(randperm(num_nodes)); % 순서대로 섞기

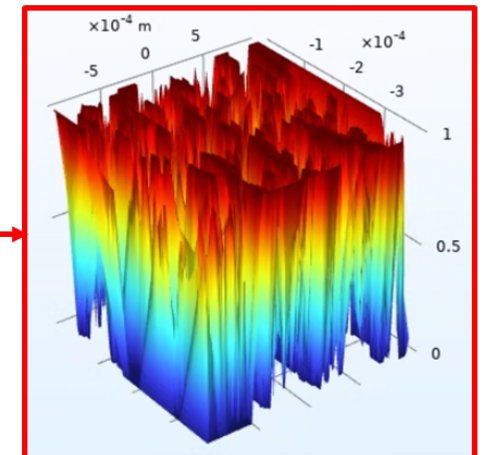
% 결과 저장
microstructure = [x_coords, y_coords, colors];

% 결과 출력
fprintf(' %d개의 노드와 y 좌표는 %d입니다. color는 %d\n', ...
    for i = 1:num_nodes
        fprintf('%d: %d\n', microstructure(i, 1), microstructure(i, 2), microstructure(i, 3));
    end
    
```

Matlab 코드로 구현된 Monte-Carlo DSS의 랜덤 분포 구현.



염환경에서 각 상 별 적용된 분극곡선.

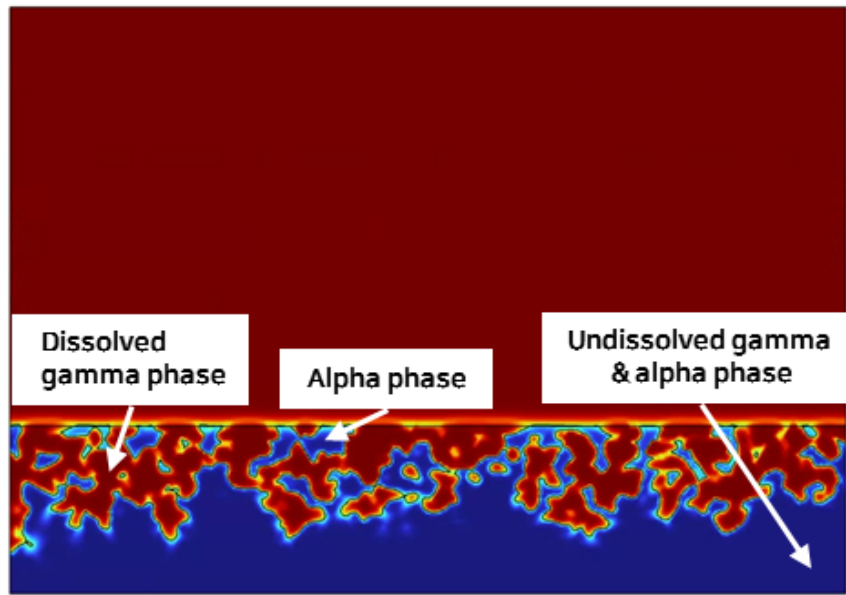


Level-Set 방법이 적용된 DSS2205 미세 상 분포.

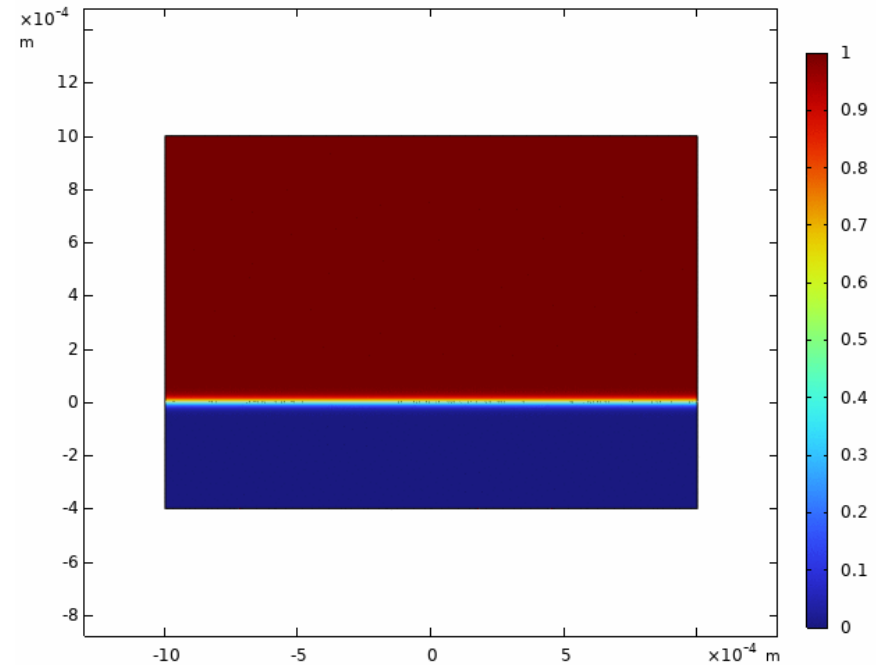
# DSS2205의 Micro-Galvanic Corrosion 해석 결과

## 상간 부식 전위 차이로, 오스테나이트( $\gamma$ 상)에 부식이 집중되는 경향 확인

- 부식전위 차이: Austenite ( $\gamma$ 상) < Ferrite ( $\alpha$ 상)
- 100년간 시뮬레이션 결과, 최대 부식 깊이 약  $400\mu\text{m}$  발생
  - 단, 본 해석에서는 온도 조건 미반영



$\alpha$  상: 50% /  $\gamma$  상: 50% 대표 케이스

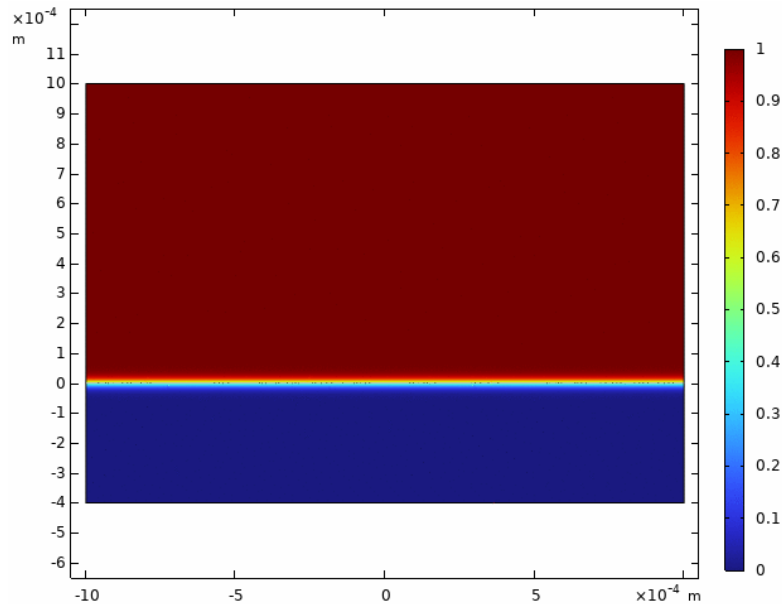


# 상 비율에 따른 부식 해석 결과

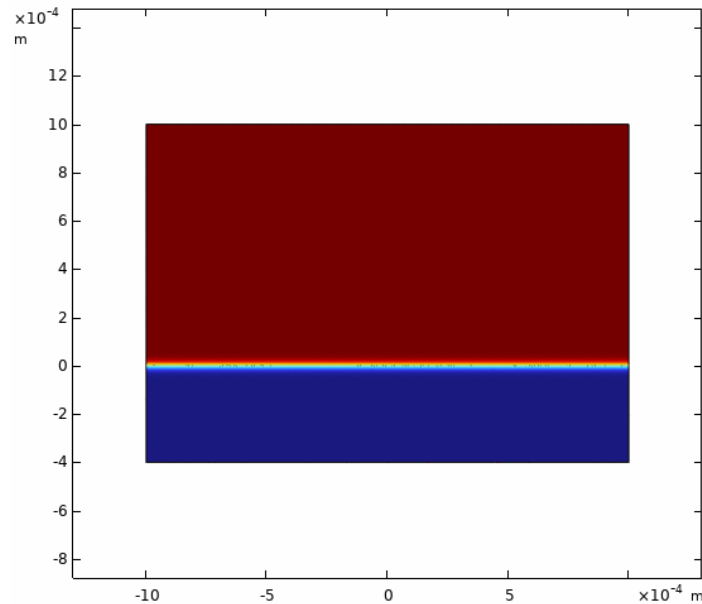
## DSS2205의 $\alpha/\gamma$ 상 비율에 따른 Micro-Galvanic Corrosion 거동

- 부식 전위 차이에 따른  $\gamma$ 상 집중 부식
  - $\gamma$  상 (Anodic)과  $\alpha$ 상 (Cathodic)의 면적 비율 차이로  $\gamma$  상 부식 집중

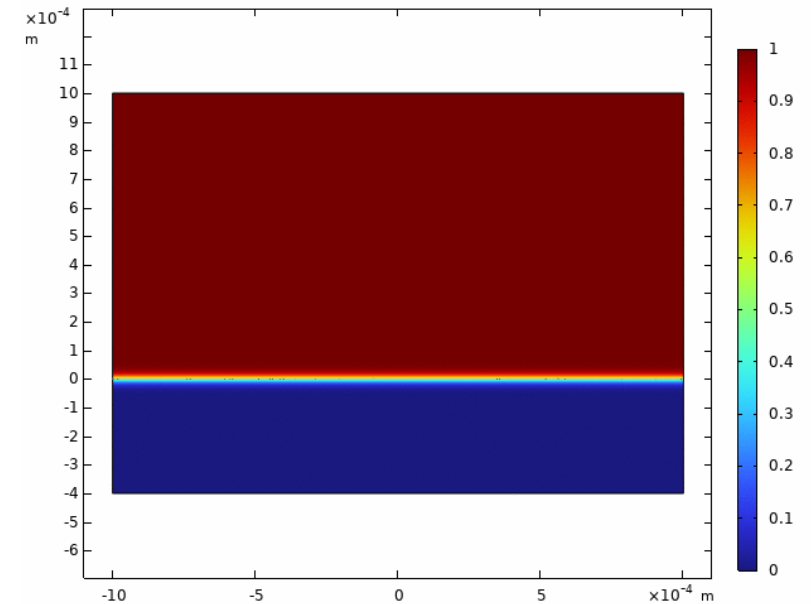
$\alpha$  상: 25% /  $\gamma$  상: 75%



$\alpha$  상: 50% /  $\gamma$  상: 50%



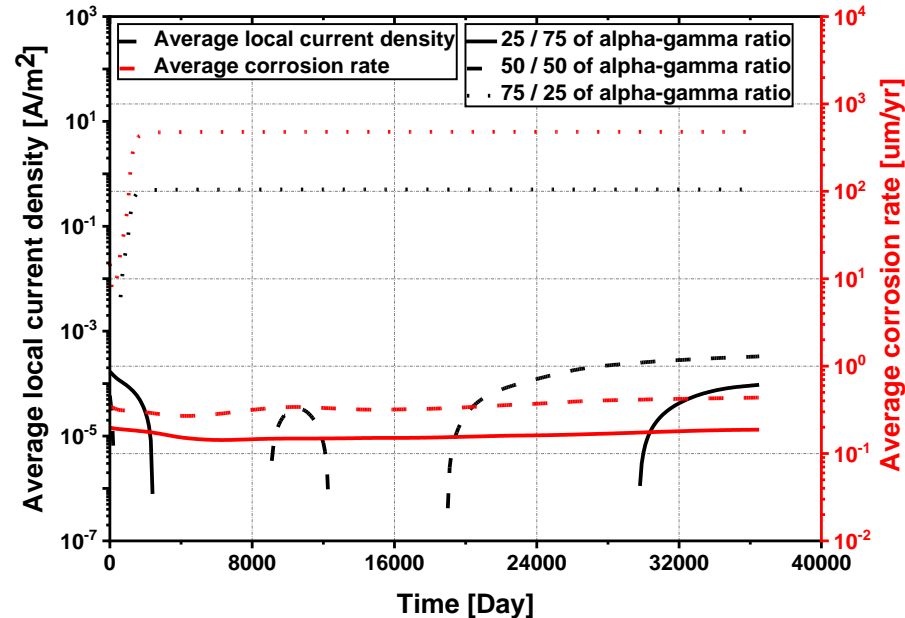
$\alpha$  상: 75% /  $\gamma$  상: 25%



# 상 비율에 따른 부식 해석 결과

## DSS2205의 $\alpha/\gamma$ 상 비율에 따른 Micro-Galvanic 부식 거동

- $\gamma$ 상 비율이 낮아질수록 current density 및 dissolution rate 증가
  - Solid line: 25/75 of  $\alpha/\gamma$  ratio
  - Dashed line: 50/50 of  $\alpha/\gamma$  ratio
  - Dotted line: 75/25 of  $\alpha/\gamma$  ratio



0.6M NaCl 환경에서 DSS의  $\alpha/\gamma$ 상 비율에 따른 average local current density (black) 및 average dissolution rate (red) 변화.  
Solid line: 25/75, Dashed line: 50/50, Dotted line: 75/25.

# 결론 및 추후 연구 계획

---

## 결론

- **내부구조재 부식 해석:**
  - 각 소재들의 장기 Uniform corrosion 해석 결과 보수적 결과 확보
  - AA6061의 비교적 낮은 부식률 확인
- **외부구조재 부식 해석:**
  - DSS 소재의 장기 Micro-Galvanic 부식 해석 결과 보수적 결과 확보
  - DSS 소재의 상 비율에 따른 Micro-Galvanic 부식 집중 확인

## 추후 연구 계획

- **내부구조재 부식 해석:**
  - 다원소를 고려한 SS17-4 부식 해석
  - 내부구조재 공식 (Pitting corrosion) 해석
- **외부구조재 부식 해석:**
  - 국내 개발 건식저장용기 DSS 소재에 대한 Micro-Galvanic 부식 해석
  - 염환경에서 응력부식균열 (CISCC) 해석





# Q&A

---



**Thank you for your attention**

**If you have any questions,  
Please feel free to ask me**

# 부록: 건식저장용기 내부 온도분포 모델링

## 열해석모델 초기,경계조건

- 초기온도는 20도로 고정
- $H_{\text{vertical}} = 97\text{W/m}^2$ ,  $H_{\text{horizontal}} = 387\text{W/m}^2$ 의 Insolation값<sup>[1]</sup>
- Fission products 들과 actinides들에 의한 붕괴열<sup>[2]</sup>

$$P(t) = 881.99 \times \frac{1}{e^{0.23990+141124 \times (t+10)}} [W/t HM]$$

For  $1 < t < 20$  years

$$P(t) = 14545.68 \times (t + 10)^{-0.75756} [W/t HM]$$

For  $20 < t < 10^6$  years

- Natural convection을 묘사하는 heat transfer coefficient<sup>[3]</sup>

$$h_{\text{horizontal}} = \left(\frac{k_f}{h}\right) \times 0.1(Gr \times Pr)^{1/3}$$

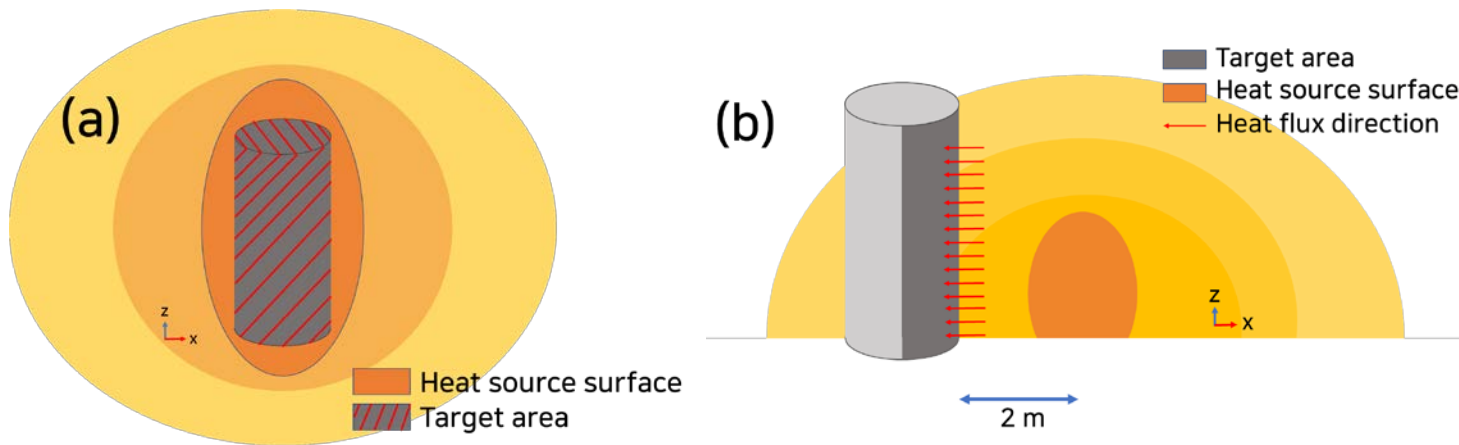
$$h_{\text{vertical}} = \left(\frac{k_f}{d}\right) \times 0.15(Gr \times Pr)^{1/3}$$

열해석 모델의 초기, 경계조건<sup>[2]</sup>.

# 부록: 건식저장용기 내부 온도분포 모델링

## 화재 사고조건을 반영한 열해석

- 직접화재 노출 (a)과 간접 화재 노출(b) 고려
  - 고온 조건 시 건식저장용기의 건정성 분석
  - 온도 조건 변화에 따른 부식 진행 민감도 분석



화재 노출 시나리오의 개략도: (a) 직접 화재 노출, (b) 간접 화재 노출.

$$q'' = Q \chi r / 4 \pi r^2$$

$q''$ : incident radiative heat flux on the target [kW/m<sup>2</sup>]  
 $Q$ : pool nor heat release rate [kW]  
 $\chi$ : radiative fraction [-]  
 $r$ : distance from center to the pool fire to edge of the target [m]

$$Q = m'' \Delta H_{c,eff} (1 - e^{-k\beta d}) A_f$$

$m''$ : mass burning rate of fuel per unit surface area [kg/m<sup>2</sup>·sec]  
 $\Delta H_{c,eff}$ : effective heat of combustion of fuel [kJ/kg]  
 $k\beta$ : empirical constant [m<sup>-1</sup>]  
 $D$ : diameter of pool fire [m]  
 $A_f$ : the surface area of pool fire [m<sup>2</sup>]