국내 장기휴관 원전 2차계통 대기부식 특성 평가 및 관리 방안

2026. 06. 18.

전순혁, 하성준, 홍민성, 심희상, 허도행

한국원자력연구원

KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

연구협력 및 지원

본 연구는 현장 협조 및 기술 지원을 통해 수행되었습니다.

현장 협조

고리2호기

- 김병훈
- 정소영
- 권순우

고리3호기

- 김종완
- 이형진
- 김용석
- 김형주

기술 지원

중앙연구원

- 권혁철

연구배경

국내 원전 호기별 계속운전 신청·심사 경과

출처 : 원안위 계속운전 심사 현황 보고자료

대상호기	노형	설계수명 만료일	계속운전 PSR 신청일	운전변경 허가신청일	현재 진행사항 (05.04 기준, 한수원 사이트 참고)
고리2호기	Westinghouse (650MWe)	2023.04.08.	2022.04.04.	2023.03.30.	발전 재개 (2026.04.04)
고리3호기	Westinghouse (950MWe)	2024.09.28.	2022.09.26.	2023.11.16.	계획예방정비 및 심사중
고리4호기		2025.08.06.	2022.09.26.	2023.11.16.	계획예방정비 및 심사중
한빛1호기		2025.12.22.	2023.06.30.	2024.12.13.	계획예방정비 및 심사중
한빛2호기		2026.09.11.	2023.06.30	2024.12.13.	심사 준비 및 운전중
한울1호기	Framatome (950MWe)	2027.12.22.	2023.10.30.	2024.09.30.	심사 준비 및 운전중
한울2호기		2028.12.28.	2023.10.30.	2024.09.30.	심사 준비 및 운전중
월성2호기	CANDU (700MWe)	2026.11.01.	2024.04.08.	미제출	계획예방정비
월성3호기		2027.12.29.	2024.04.08.	미제출	계획예방정비
월성4호기		2029.02.07.	2024.04.08.	미제출	계획예방정비

- 계속운전 대상 원전 10기 : 계속운전 재가동 승인 후 운전 (1기), 운전 (3기), 계획예방정비 (6기)
- 고리2호기 재가동 소요 기간 : 약 35개월 (후속 원전 소요 시간 : 약 2~3년 사이 예상)

→ 장기휴관 중 부식 저감을 위한 적절한 휴관 처리 필요

연구배경

국내 휴관 처리 대상 설비

손동수, 울진 3, 4호기 장기 휴관처리 수행경험, 제12회 원전 수화학 및 부식 워크샵, 2013

구 분	관련 계통
1차 계통	원자로 냉각재 계통 및 부속 설비
2차 계통	증기발생기, 터빈 및 부속 설비
전기설비	발전기 및 부속 설비
계측설비	현장 판넬 및 각종 계측 설비

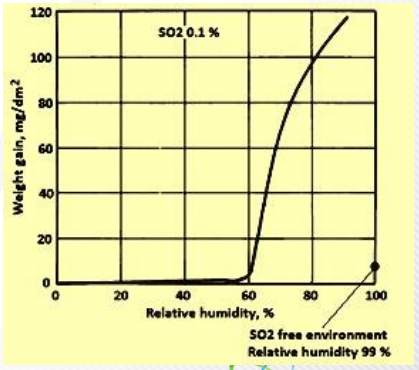
국내 계통별 휴관처리 방법

구 분	관련 계통
습식 휴관	1차계통, 증기발생기 및 취출수 계통
건식 휴관	2차계통, 발전기 및 부속계통

국내 2차계통 휴관처리 기준 및 방법

- 단기 휴관처리 : 발전소 정지기간 1주일~2개월 미만
- 장기 휴관처리 : 발전소 정지기간 2개월 이상
- 증기발생기 : 습식 보관 (pH ≥ 9.5, N_2H_4 ≥ 75 ppm), 부식 저감 목적
- 건식 휴관처리계통 : 상대습도 (Relative Humidity) ≤ 40% 유지

Effect of RH and SO_2 on the corrosion of carbon steel



연구배경

건식 휴관 관리 미흡 시 기술적 리스크

(1) 대기부식 가속화

- 수막 형성 : 상대습도 임계치 초과시 설비 표면에 수막(water film) 형성 → 표면 전해질 형성
- 부식 기작 활성화 : 수막 내 산소 용해 및 이온 이동속도 증가 → 산화 속도 급증

(2) 취약부 국부 습식부식

- 대상 취약부 : 배관 저점부 (low point), 곡관(elbow), 데드레그(dead leg) 및 저유속 구간
- 원인 : 배수 불안정에 의한 잔류수 체류, 중력에 의한 응축수 정체 → 국부습식 환경(wet) 조성
- 결과 : 대기부식 대비 극심한 감육 및 손상 발생 가능

(3) 유동가속부식 (FAC) 민감도 증가

- 산화막 불안정화 증가
  - 정상 운전 : 치밀한 구조의 Fe_3O_4 형성 → 금속 표면 보호 및 이온 용출 억제
  - 관리 미흡 : 다공성의 불안정한 Fe_2O_3/FeOOH 다량 형성 → 약한 접착력으로 보호 성능 상실
- FAC 가속화 : 재기동 시 산화막 박리 용이

(4) 계통 내 부식생성물 축적 및 이동

- 박리(Spallation) : 휴관 중 발생한 철산화물이 재기동시 유동에 의해 대량 탈락
- 2차 계통 영향 : 증기발생기 파울링, 밸브/오리피스 막힘 유발

→ 화학세정 및 부품 교체 가능성 증가, 재기동 지연 및 유지보수 비용 증가

연구배경

일본 원전 장기 휴관 후 재기동 사례

Plants	Outage dates	Outage duration (years)
Sendai #1	‘11.Apr. ~ ’15.Aug.	4.4
Sendai #2	‘11.Aug. ~ ’15.Oct.	4.2
Takahama #3	‘12.Feb. ~ ’16.Feb.	4.1
Takahama #4	‘11.Jun. ~ ’17.May.	6.0
Ikata #3	‘11.Apr. ~ ’16.Aug.	5.4
Ooi #3	‘13.Sep. ~ ’18.Mar.	4.5
Ooi #4	‘13.Sep. ~ ’18.May.	4.7
Genkai #3	‘10.Dec. ~ ’18.Mar.	7.3
Genkai #4	‘11.Dec. ~ ’18. Jun.	6.5

S. Yamazaki et al. “Water Chemistry Management for Plant Start-Up after Long-Term Outage”, AWC 2019, Korea

(1) 2011년 후쿠시마 사고 이후, 전 원전 운영 중단

- 약 4~7년 장기 휴관 후 재기동

(2) 장기 휴관시 문제점 (2차계통)

- 계통 내부 표면에 부식생성물 증가
- 대기 유입으로 인한 불순물 (Na, Cl, SO_4) 증가
- 대기노출에 의한 총유기탄소(TOC) 증가

(총유기탄소: 수중 내 유기물의 탄소량, 물의 오염도)

→ 재기동 전 제거 및 저감 필요 (지연 및 비용 발생)

→ 휴관 원전에 대한 적절한 건식 휴관 처리 및 계통 건전성 평가 필요함

연구배경

» 연구 목적 및 내용

(1) 국내 장기휴관 원전 2차계통 대기부식 평가

- 건식 휴관 처리의 적절성 평가
- 계통 건전성 평가
- 대기부식 저감을 위한 관리방안 제시
- 인허가 선제 대응 : 재기동 대비 계통 건전성 입증 데이터 사전 확보

  → 고리 2호기 (평가 완료), 고리 3호기 (평가 진행중)

(2) 정밀 모사 감시시편 활용 대기부식 정량 평가 기술 개발

- 기존 방식(직접 채취) 한계 극복 :

  - 설비 표면 손상 및 결함 유발 방지

  - 운전/정지 기간별 부식생성물 혼재에 따른 평가 오류 제거

- 현장 재현성 및 정밀도 강화

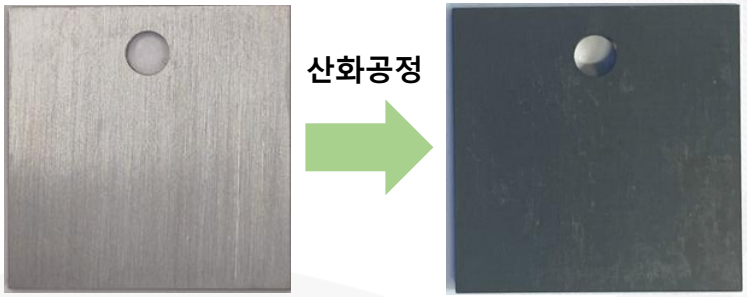
  - 사전 산화(pre-oxidation) 공정 추가 : 정상 운전 조건의 배관 및 설비 표면 산화막 정밀 모사

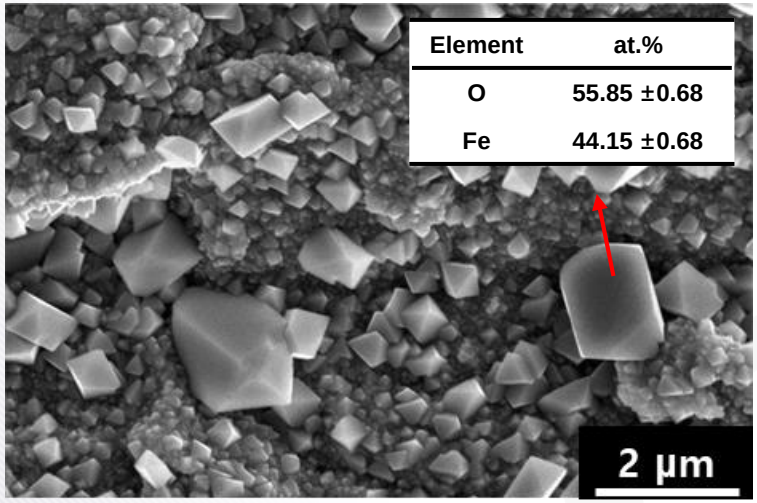
  - 정량화 : 정지 기간 내 부식속도 및 부식량의 정밀 평가 (미세조직 기반)

수행 방법

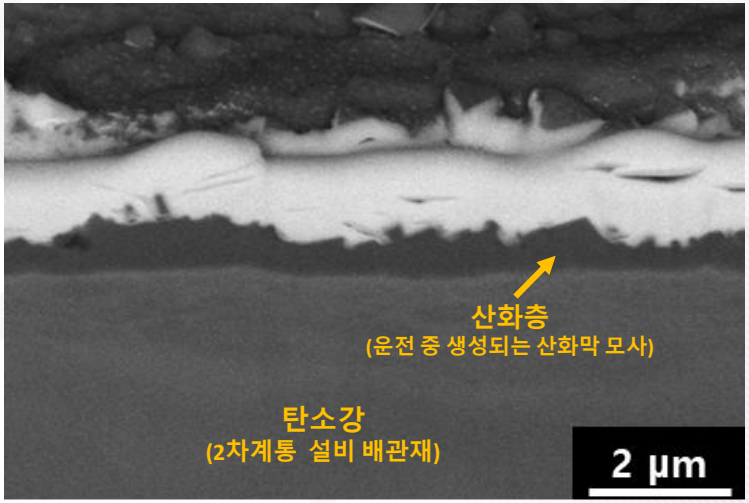
정상운전 조건 배관 모사 감시시편 제작

- 재료 : 탄소강 (SA106 Gr.B)
- 온도 : 230 ℃ (증기발생기 inlet 온도)
- 기간 : 28 days
- 용액 : 5 ppm ETA solution ($pH_{25℃}$ 9.57)
- 용존산소 : 5 ppb 이하 유지





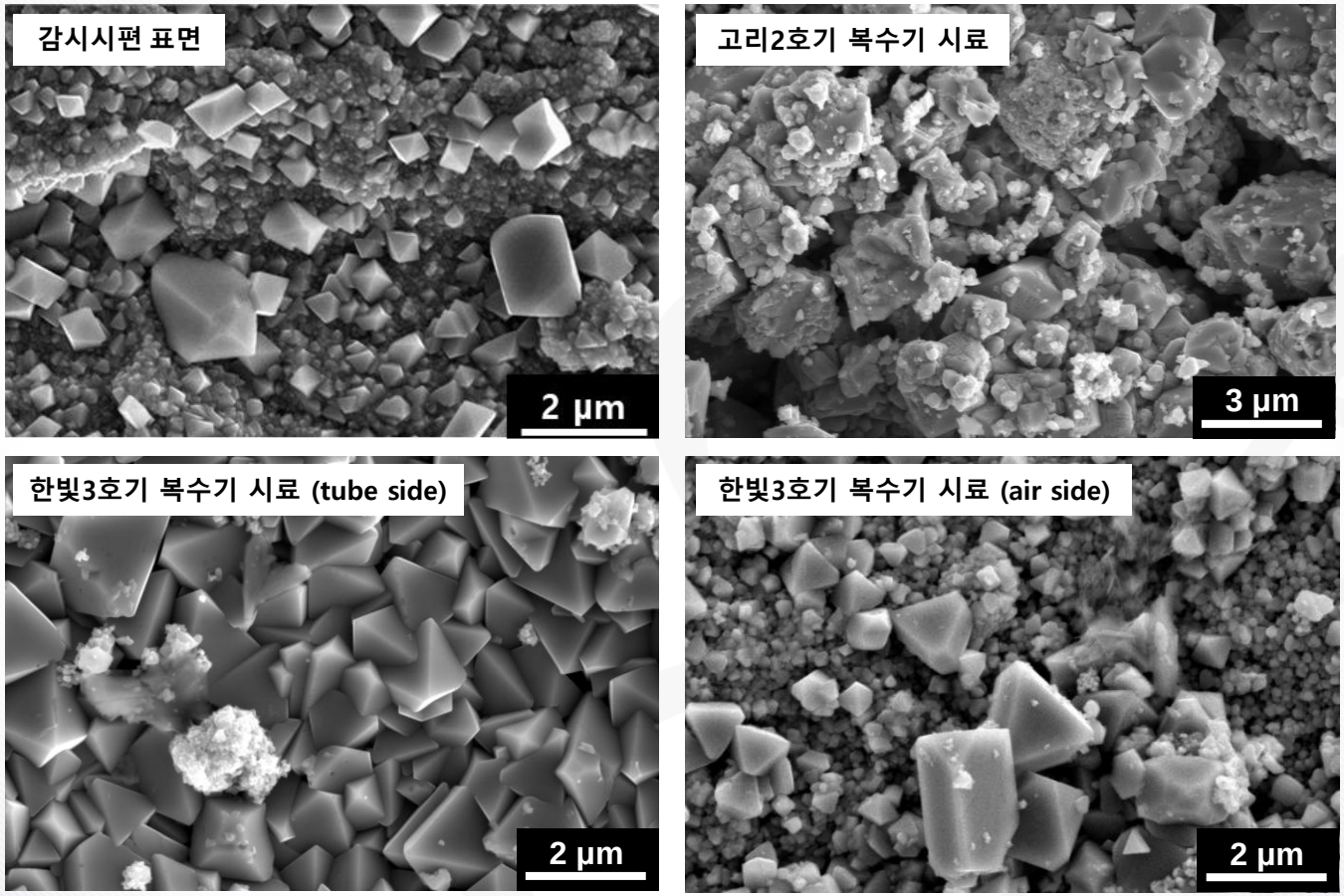
감시시편 표면



감시시편 단면

수행 방법

» 감시시편과 발전소 채취 시료 표면 형상 비교

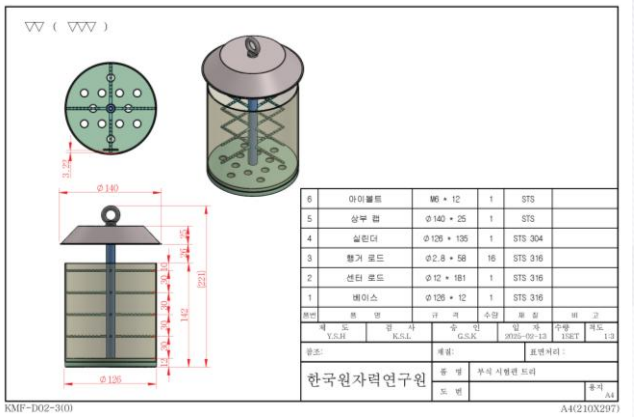


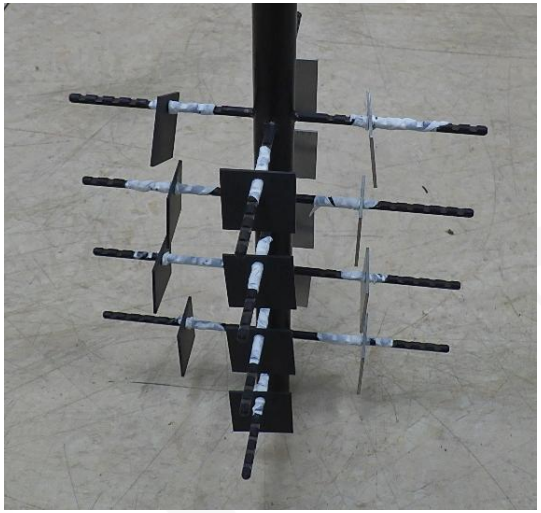
- 모사 감시시편은 실제 발전소 부식생성물 시료와 매우 유사한 형상을 나타냄

수행 방법

감시시편 트리 설계

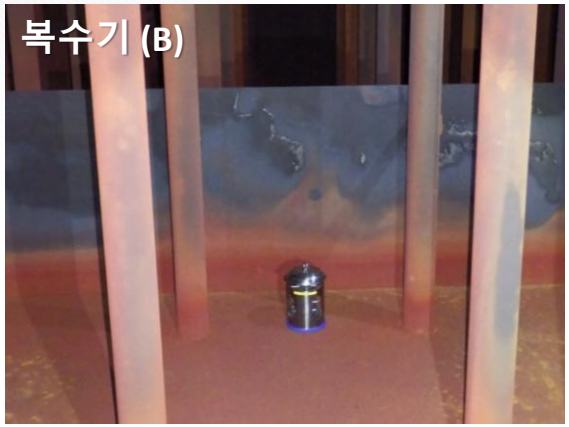
- 재질 : 스테인리스강
- 상부 캡 : 응축수 영향 차단
- 실린더 : 건조공기 영향 차단
- 절연 테이프를 통해 시편/시편트리 갈바닉 부식 차단
- 폴리카보네이트 덮개 : 계통 손상 방지

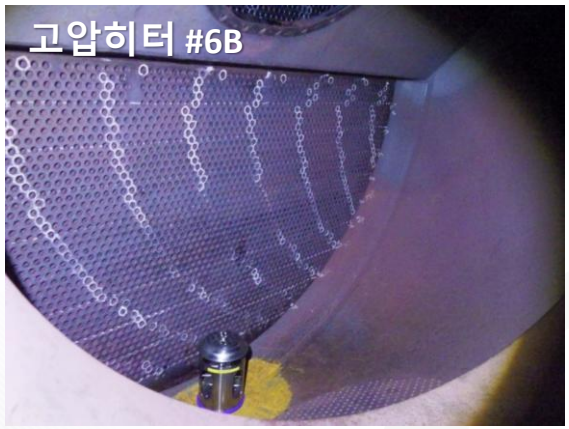


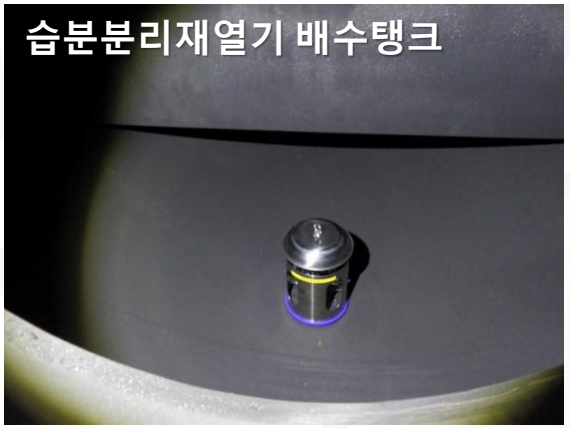


수행 방법

감시시편/시편트리 장입 모습 (고리3호기)







- 고리 2호기 : 5개 위치 장입 (복수기, 저압히터, 탈기기, 고압히터, 습분분리재열기 배수탱크)
- 고리 3호기 : 4개 위치 장입 (복수기, 고압히터, 습분분리재열기, 습분분리재열기 배수탱크)

→ 발전소 현장 상황 및 작업 계획을 고려하여 평가 위치 선정

수행 방법

» 무게 변화 기반 부식률 평가법 (중량감소 기반 평가법, ASTM G1)

(1) 산화물 제거

- 재료별 세정액에서 산화물을 반복적으로 제거하여

  모재가 노출되는 단계에서 종료하여 최종 무게를 선정함

(2) 부식속도 식에 대입하여 계산

- 단위 : MPY (mills penetration per year)

- MPY = 534 W / DAT

  W : 무게감량 (초기 시편 무게 – 산화물 제거 후 시편 무게, mg)

  D : 금속의 밀도 (g/cm^3), A : 표면적 (in^2), T : 시간 (h)

<ASTM G1>

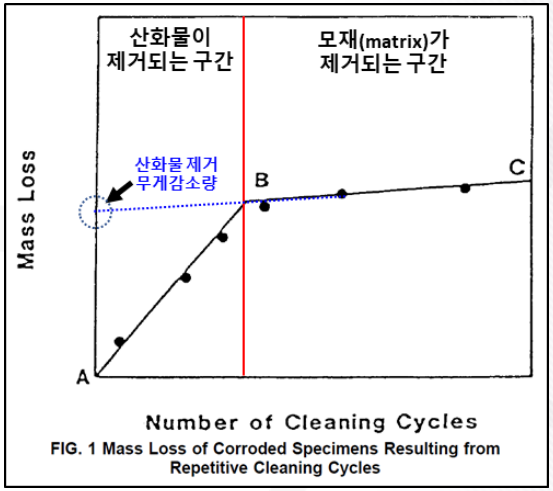


FIG. 1 Mass Loss of Corroded Specimens Resulting from Repetitive Cleaning Cycles

(3) 중량감소 기반 평가법 한계

- 휴관 원전 대기부식 환경에서는 매우 얇은 산화층 형성

  → 산화물이 짧은 시간 내 제거되어 산화물 제거구간과 모재 노출 구간의 변곡점 선정 어려움

  → 정확한 중량감소량 산정 한계 존재

- 정상운전 조건 배관 모사 감시시편의 경우 기존 산화층과 대기부식 생성 산화층의 선택적 제거 어려움

  → 다른 부식속도 평가 방법론 적용 필요

Fontana, M.G., 1986. Corrosion Engineering

수행 방법

» 무게 변화 기반 부식률 평가법 (중량 증가 기반 평가법 개발)

(1) 초기/최종 중량 측정

- 산화막 제거 없이 중량 변화 평가

→ $\Delta W = W_a - W_i$

(2) Pickup mass 산정

- 대기부식 시 모재 용출은 매우 제한적
- 측정된 중량 증가량을 산화물 pickup mass로 가정
- 산소(O), 수소(H) 결합에 따른 중량 증가 반영
- 불순물(S 등) 기여도는 무시할만한 수준으로 간주, 계산 제외

→ $\Delta W = W_{Pickup}$

(3) 대기 부식생성물 조성 기반 Fe 환산

- 산화물 종류별 화학양론(stoichiometry) 적용
- Pickup mass → Fe equivalent mass 변환

→ $W_{Fe} = W_{Pickup} \times (W_{Fe}/W_{Pickup})_{Phase}$

$(W_{Fe}/W_{Pickup})_{Phase}$: 산화물별 환산 계수 (Fe_2O_3 : 2.33, FeOOH : 1.69)

(4) MPY 부식속도 계산

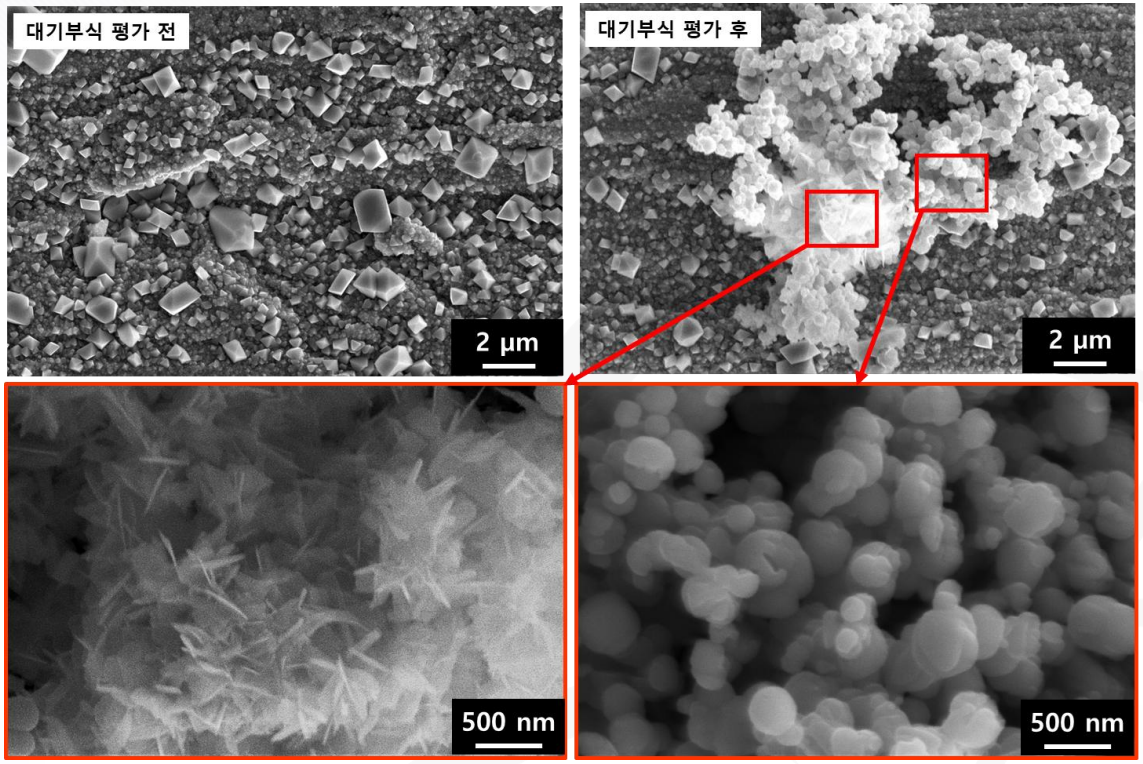
- Fe equivalent mass 기반 부식속도 계산

→ $MPY = 534 \times W_{Fe} / D \times A \times t$

W_i : 감시시편 초기 시편 무게 (mg)
W_a : 대기 부식 평가 후 시편 무게 (mg)
ΔW : 대기 노출에 따른 중량 변화량 (mg)
W_{Pickup} : O/H 기인 중량 증가 무게 (mg)
W_{Fe} : 철 산화물의 철 이온 무게 (mg)
D : 금속의 밀도 (g/cm^3)
A : 표면적 (in^2)
t : 시간 (h)

연구 결과

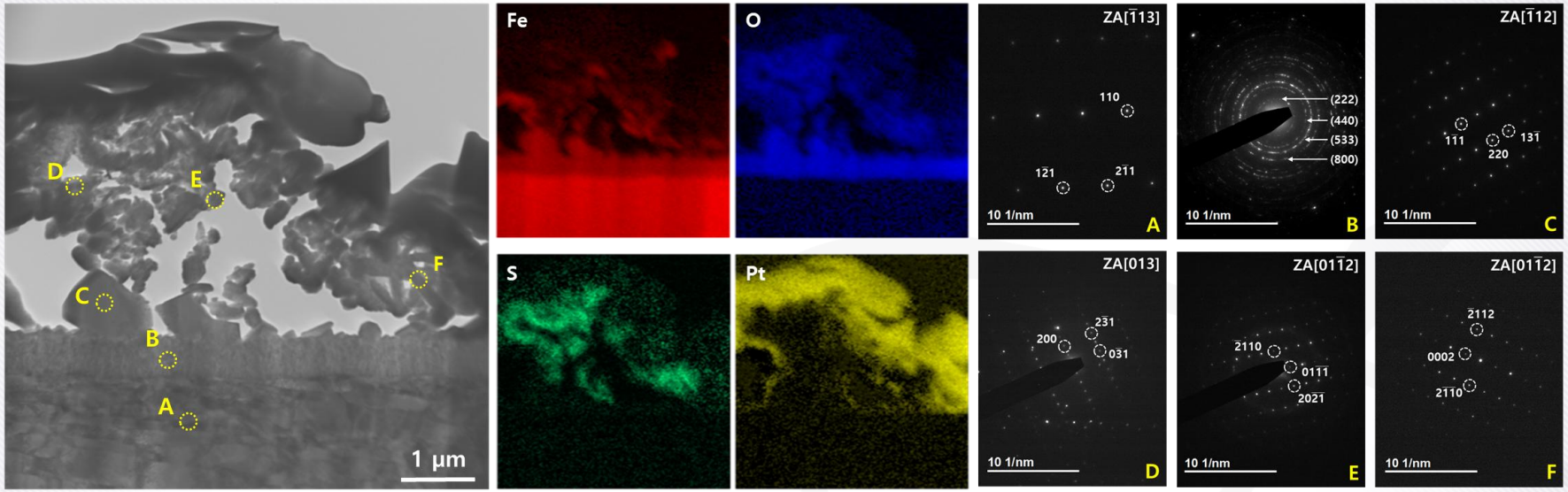
대기부식 평가 후 부식생성물 SEM 분석 결과 (고리2호기 고압히터)



- 대기부식에 의해 꽃잎형 및 구형 부식생성물이 관찰됨
- 선행연구에 따르면 꽃잎형은 goethite (α-FeOOH), 구형은 hematite (α-Fe_2O_3)로 추정됨
- 정확한 상(phase) 분석을 위해 TEM 분석 필요

연구 결과

대기부식 평가 후 부식생성물 TEM-EDS & SAED 패턴 분석 결과 (고리2호기 고압히터)

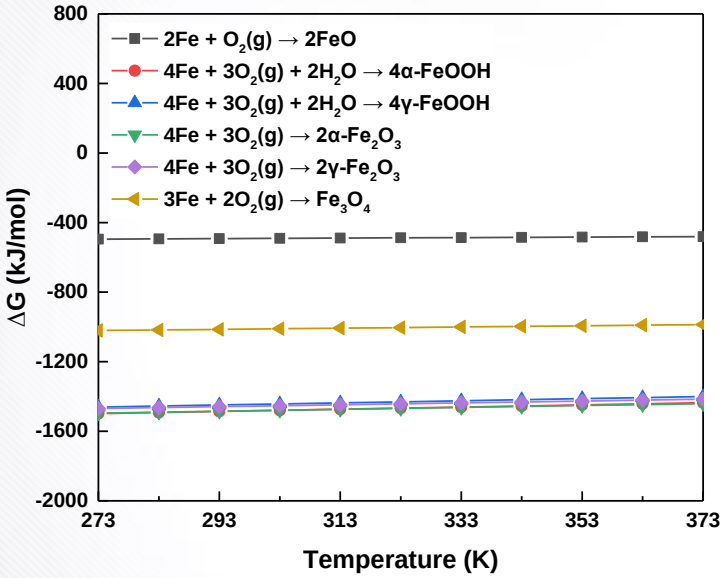


- TEM 분석 결과, 막대형 및 구형을 포함한 다공성 구조의 부식생성물이 관찰됨
- EDS 분석 결과, 부식생성물 내 일부 S 성분이 확인됨
- S 존재는 장기휴관 기간 중 대기오염물 SO_2 영향으로 판단됨
- SAED 패턴 분석 결과, (A)는 matrix, (B)(C)는 Fe_3O_4, (D)는 Fe_2O_3, (E)(F)는 FeOOH 계열로 확인됨

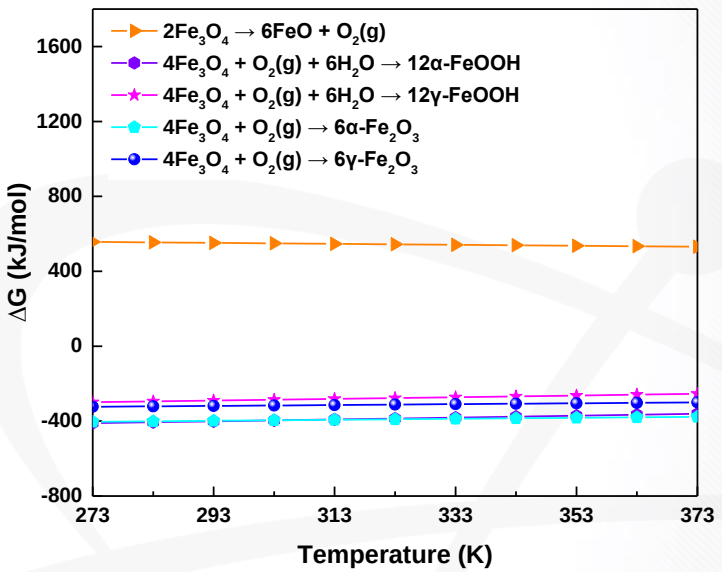
연구 결과

대기노출 시 부식생성물 형성 거동 예측 (열역학 계산)

<철의 대기부식 생성물 형성 거동>



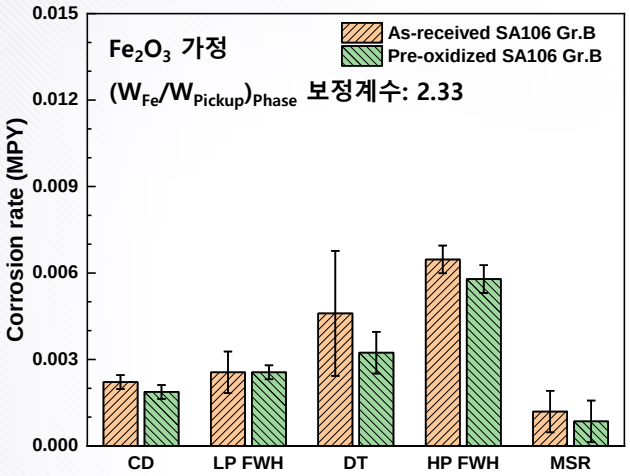
<마그네타이트의 대기부식 생성물 형성 거동>



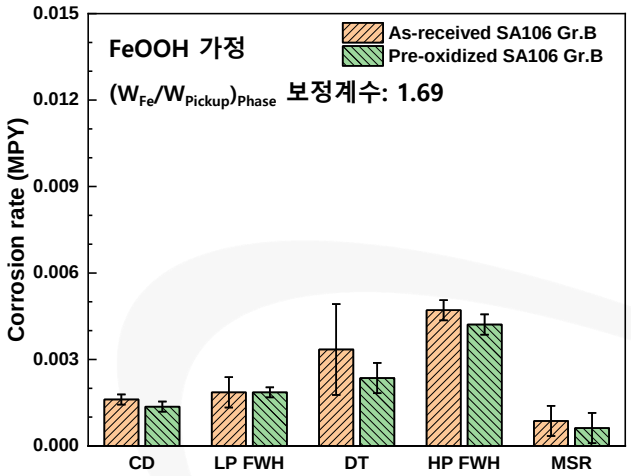
- Pre-oxidation 시편에서는 철의 부식생성물 형성 및 마그네타이트의 상변화가 발생 가능함
- 열역학 계산 결과, 부식생성물은 Fe_2O_3 및 FeOOH 계열이 지배적으로 형성될 것으로 예측됨

연구 결과

감시시편 활용 대기부식 속도 (고리2호기, 약 3200시간 평가)



Location of specimens placed for atmospheric corrosion



Location of specimens placed for atmospheric corrosion

<평가 위치별 상대습도(%RH)>

위치	상대습도 관리x	상대습도 관리o
CD	92.5	37.5
LP-FWH	93.9	15.8
DT	81.0	34.8
HP-FWH	95.1	58.0
MSR	95.0	36.2

- Fe_2O_3 기준 평가 결과, 최대 부식속도는 약 0.0058 MPY로 나타남 (pre-oxidation 시편 기준)
- 상대습도가 가장 높은 HP-FWH에서 가장 높은 부식 속도가 확인됨
- EPRI 가이드라인 대비 MPY 값이 매우 낮은 수준으로 건식관리가 양호하게 수행된 것으로 판단됨

*부식감시용 시편 부식속도(MPY) 가이드라인 (EPRI)[1]

	탄소강	구리합금	스테인리스강
Good	<0.3	<0.2	<0.1
Marginal	0.3~0.5	0.2~0.3	
Poor	>0.5	>0.3	>0.1

Closed Cooling Water Chemistry Guideline; Revision 2, EPRI, Palo Alto, CA, USA (2013) 3002000590

연구 결과

장기 휴관 원전 건식관리 계통 연간 부식량 추정 (예시)

- 가정 조건 :

  - 건식관리 계통 표면적 : 30,000 m^2 (650 MWe 급 기준 추정, ChatGPT·Gemini 활용)

  - 탄소강 재질 밀도: 7850 kg/m^3

위치	부식속도 (MPY)	연간 두께 감소량 (μm/year)	추정 연간 부식량 (kg/year)	3년 누적 부식량 (kg)
HP-FWH	0.0058	0.147	34.8	104.4
MSR	0.0009	0.023	5.5	16.5
저감 효과	-84.5%	-84.5%	29.3 kg 절감	87.9 kg 절감

- 장기 휴관 원전에서는 미세한 환경 조건 차이가 대규모 표면적으로 인해 누적 부식량 차이가 크게 확대됨
- 대형 노형(OPR1000, APR1400)은 넓은 표면적으로 인해 부식량 증가 가능성 존재
- 상대습도 저감 및 건식관리 강화 시, 최대 약 88 kg (3년 기준)의 부식생성물 저감 효과 기대 가능

대기부식 억제를 위한 건식 관리 방안

» 초기 단계 : 고온 배수 및 초기 건조

- 계통 정지 직후, 설비 잔열이 남아있는 상태 (약 60~90℃)에서 고온 배수 수행
- 금속 표면 잔열을 활용하여 잔류 수분을 자연 증발시키는 Self-drying 방식 적용
- 배수와 동시에 질소 가압 alc 퍼지를 수행하여 내부 습윤 공기를 제거하고 건조한 불활성 환경 조성
- 설비별 권장 배수 온도 범위 내에서 가능한 한 높은 온도 조건으로 배수 수행 필요

  → 배관 저점부, 곡관(elbow), dead leg, 저유속 구간 등 취약부의 자연 건조 효율 향상

  → 후속 건조 공정 시간 단축 및 대기부식 억제 효과 극대화

» 정밀 건조 단계

- 고온 배수 이후 설비 내부에 남아있는 미세 수분을 제거하기 위한 후속 건조 공정 수행
- 배수 완료 후 설비 온도가 하강하기전 진공 건조 또는 질소 순환 건조를 신속히 적용

  → 골든타임 준수 : 설비 온도 하강 시 수분 증발 속도가 급격히 감소하여 건조 효율 저하 가능

대기부식 억제를 위한 건식 관리 방안

» 관리 단계 : 이슬점(dew point) 기반 관리 전략

- 상대습도(RH)의 정의 :

  상대습도 RH(%) = 현재 수증기량 / 포화 수증기량 × 100

  → 포화 수증기량은 온도에 따라 크게 변하므로 RH는 온도 변화에 따라 변하는 상대적 지표

- 이슬점의 정의 :

  → 현재 수분 상태에서 응축이 시작되는 절대 온도

  → 이슬점은 공기온도와 상대습도가 반영된 식(Magnus eq.)으로 계산 가능하며 온도에 변하지않는 직접적 지표

- 실제 대기부식 발생 조건 :

  $$T_{surface} \leq T_{dew}$$

  → 금속 표면온도가 이슬점 이하로 내려가면 응축 발생 → 수막 형성 → 대기부식 발생

  → 보수적으로 ΔT ($T_{surface} - T_{dew}$) ≥ 5 ºC 으로 관리 권고

- 실제 발전소 건식관리에는 일반적으로 상대습도(RH) 40% 이하 유지 기준 적용

  → RH 40% 이하는 실무적으로 유용한 보수적 가이드라인

  → 실제 대기부식 여부는 이슬점, 설비 표면온도, ΔT margin으로 결정됨

대기부식 억제를 위한 건식 관리 방안

» 관리 단계 : 부식 감시 체계 구축

- 환경 감시 : 대기부식 관련 인자 (상대습도, 이슬점, 설비 표면 온도, 산소 농도) 모니터링 수행
- 재료 감시 : 감시시편 운영
- 국부 습식부식 감시 : 취약부 집중 점검 (잔류수 존재 영역)

» 재기동 시 주요 관리 항목

(1) 재기동 전 flushing 수행

- 배관 내 잔류 산화물 및 침전물 제거를 위한 flushing 수행 (저점부, 체류부 등 취약 영역 집중 관리 필요)
- 초기 저유량 순환 후 단계적 유량 증가를 통해 대량 산화물 탈락 및 배관 충격 최소화
- Flushing 중 필터 차압(filter DP), 철 농도 모니터링을 통해 산화물 제거 상태 확인

(2) 재기동 초기 산화물 탈락(spallation) 및 수화학 관리 강화

- 재기동 초기에 산화물 탈락 및 일시적 수질 불안정 가능성 존재
- 초기 유량 및 온도 상승 속도 단계적 관리를 통해 열/유동 충격 최소화 필요
- 급수 철 농도 및 필터 차압 점검을 통한 철 이동 집중 감시 수행
- pH, 용존산소, 전기전도도 등 수화학 조건 강화 관리를 통한 산화막 안정화 및 FAC 억제 필요

THANK YOU