

증기발생기 철부식생성물 침적에 따른 열성능 변화와 수화학 관리 방안

제21회 원전 수화학 및 부식 워크숍
2026. 6. 18 (목)

한국수력원자력 중앙연구원 기계연구소
한제오, 김승재, 이국희



1

• 국내 증기발생기 현황

2

• 증기발생기 관리프로그램(SGMP)

3

• 2차계통 수질관리 목적

4

• 증기발생기 열성능 관리

5

• 증기발생기 침적물 관리

6

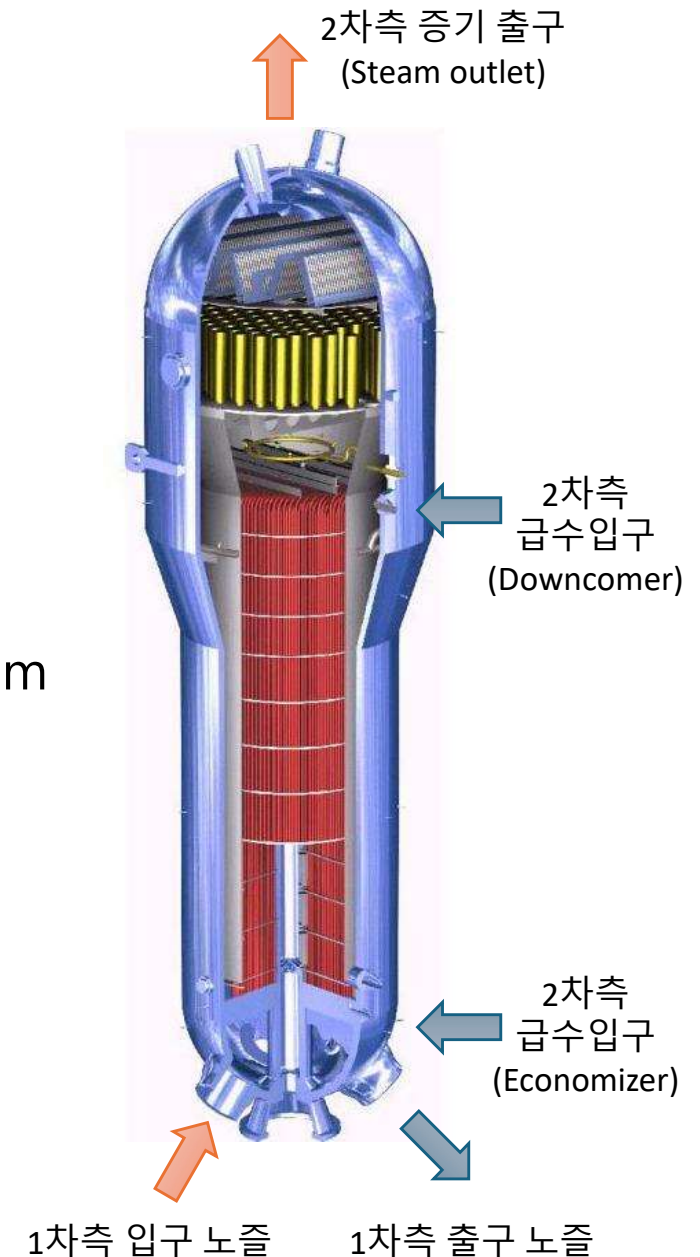
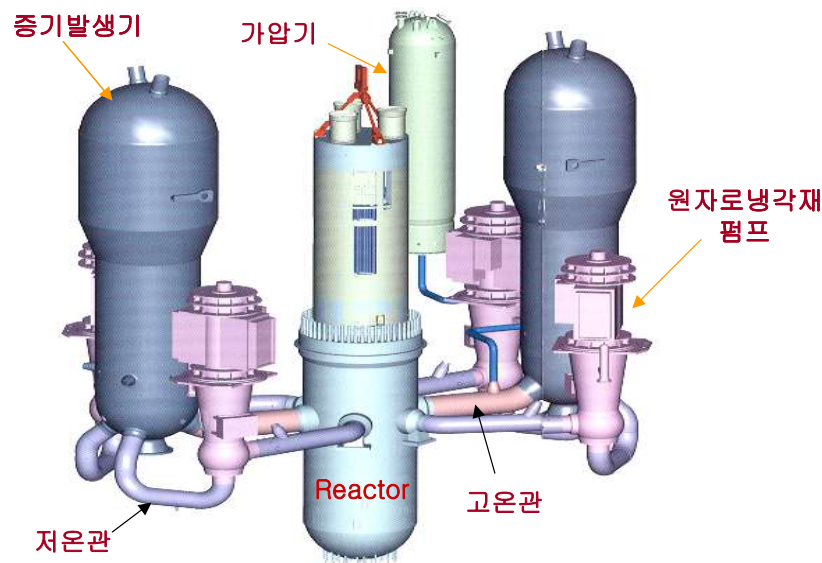
• 결론

● 증기발생기(Steam Generator) 기능

- ✓ RCS로부터 열을 전달 받아 포화증기를 생산하는 대형 열교환기
- ✓ 1차 계통과 2차 계통의 압력경계부 형성

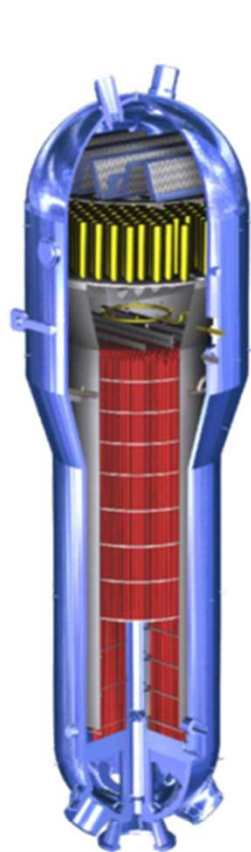
● 전열관(Tube)

- ✓ Ni-based(Alloy 600, 690)
또는 Fe-based superalloy(Alloy 800)로 제작됨
- ✓ (OPR1000, APR1400) 외경: 19.05 mm, 두께: 1.07 mm



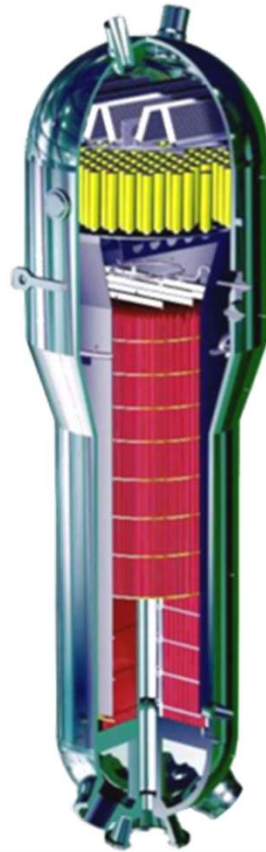
○ 국내 증기발생기 모델 및 전열관 재질

- ☑ 총 5개 모델, 총 3종류의 전열관 재질



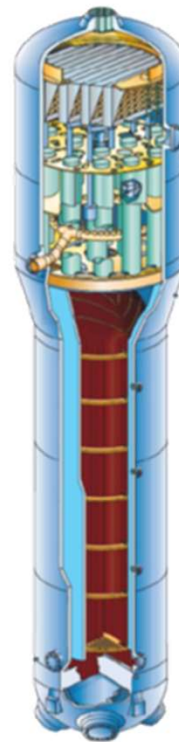
OPR1000
(Alloy 690TT)

한울 3~6호기
한빛 3~6호기
신고리 1,2호기
신월성 1,2호기



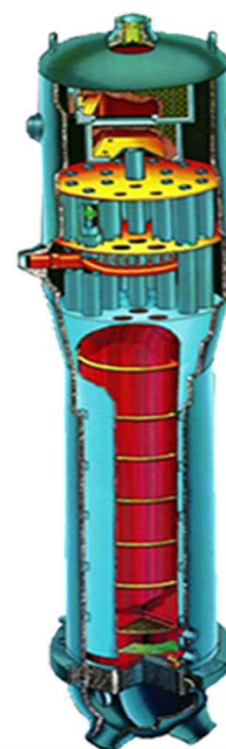
APR1400
(Alloy 690TT)

새울 1~4호기
신한울 1,2호기



**Westinghouse
Delta 53**
(Alloy 690TT)

한울 1,2호기



**Westinghouse
Model F**
(Alloy 600TT)

고리 2~4호기
한빛 1,2호기



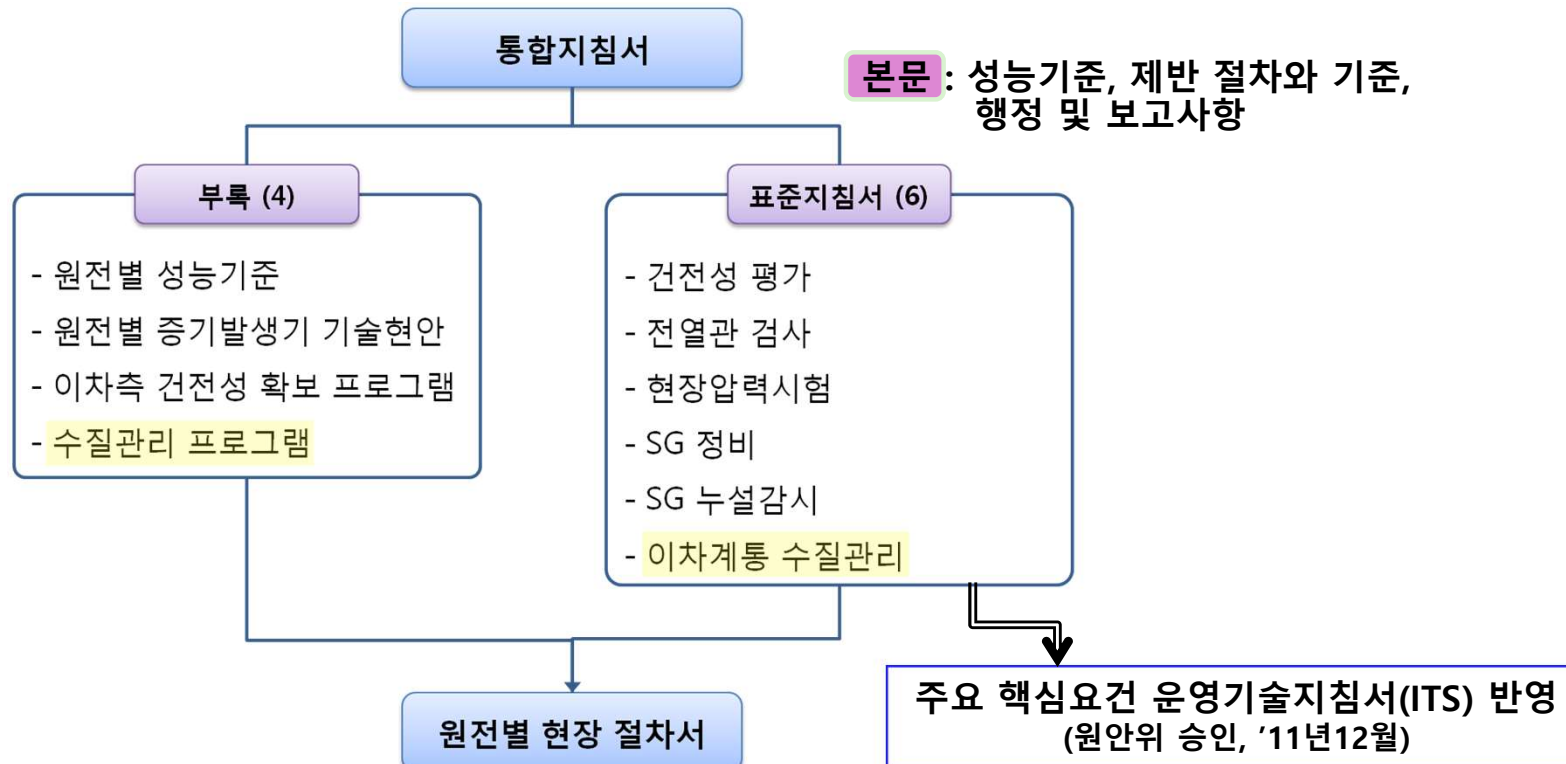
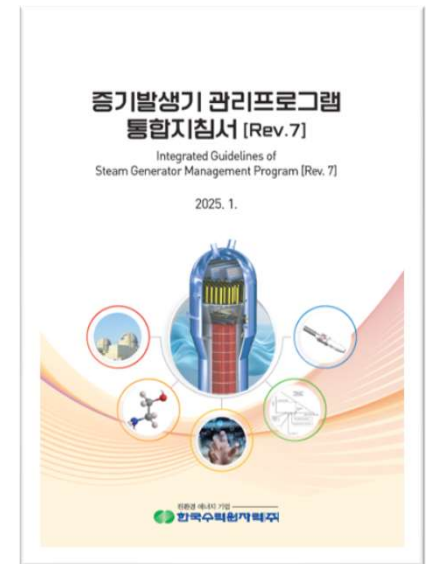
**B&W
CANDU**
(Alloy 800)

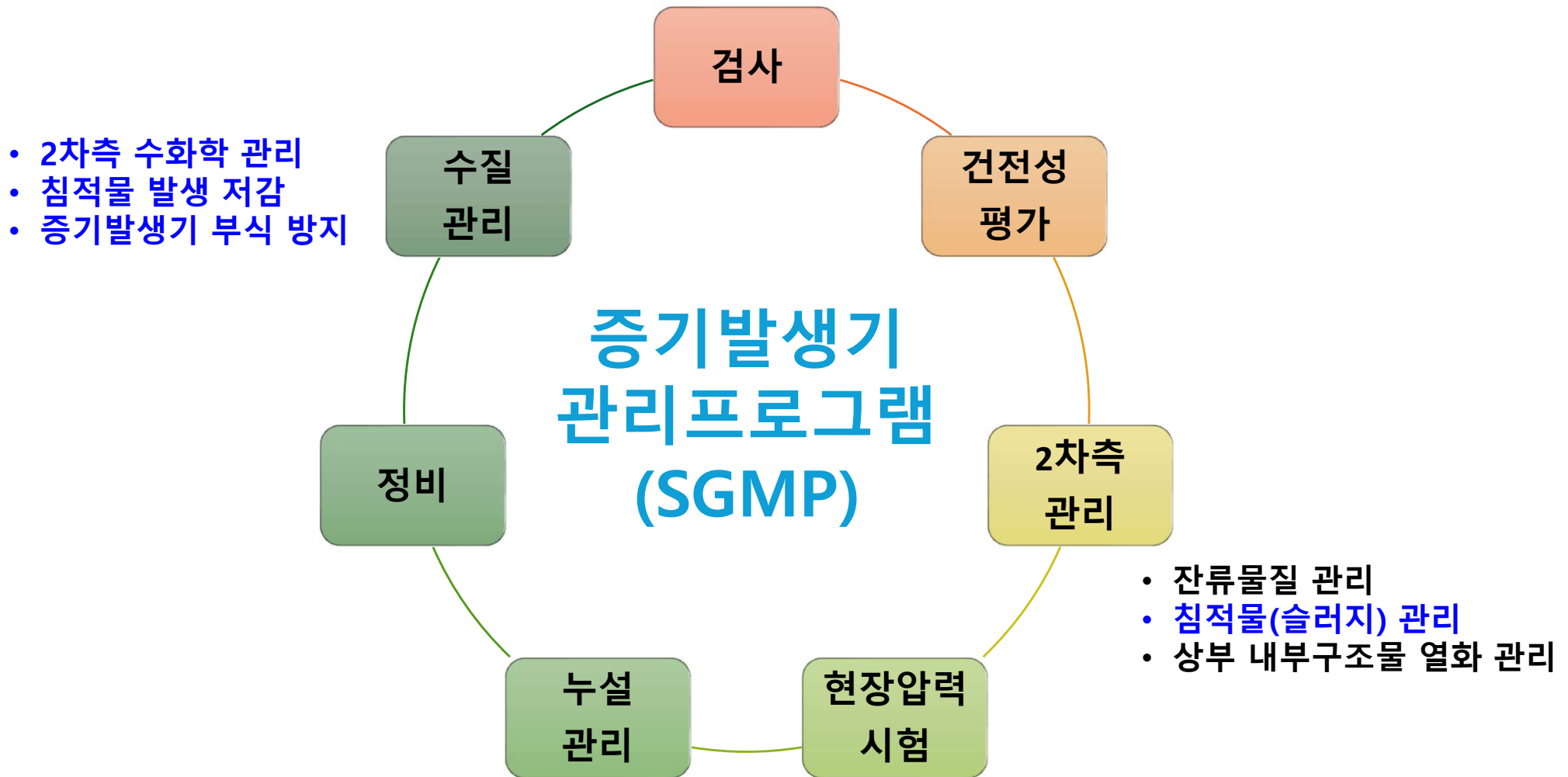
월성 2~4호기

증기발생기 관리프로그램

(SGMP : Steam Generator Management Program)

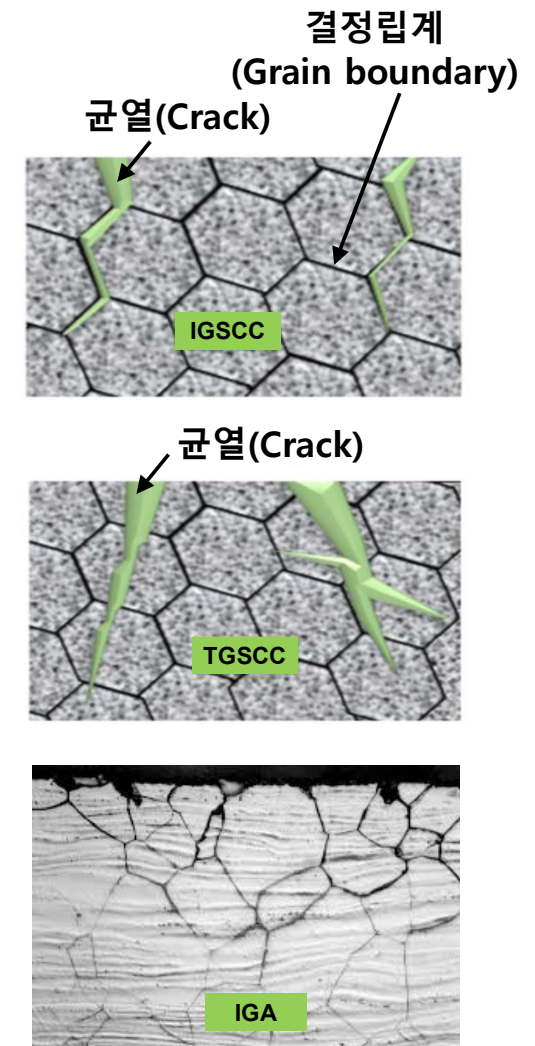
- ✓ 증기발생기 전열관의 파단 및 파열 방지
- ✓ 증기발생기 전열관의 건전성 입증을 위한 성능기준 제시, 이를 만족시키기 위한 절차와 기준
- ✓ 규제기관 승인 후 현장 적용
- ✓ 핵심사항은 운영기술지침서 '증기발생기 프로그램'에 반영됨





증기발생기 전열관의 건전성 유지

- ④ 증기발생기 누설, 파단 등에 의한 발전정지 예방
 - 대부분의 증기발생기 전열관 재질 변경 (Alloy 600 → Alloy 690TT)
- ④ 초창기 원자력발전소 2차계통 수질관리 목적



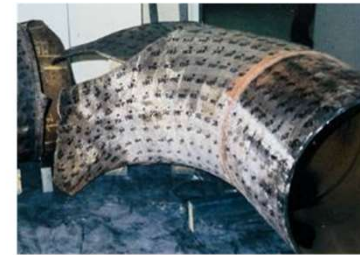
2차계통 배관, 터빈 부식 억제

☑ 탄소강 배관의 유동가속부식(Flow-Accelerated Corrosion, FAC) 억제

- ☑ 철부식생성물 형성, 배관 파단까지 발생 가능
- ☑ 철부식생성물은 증기발생기 파울링의 주요 인자

2차계통 운영효율 향상

- ☑ 2차계통 유동가속부식 발생 억제
- ☑ 증기발생기로의 철부식생성물 유입 억제
- ☑ 철부식생성물 침적 억제
- ☑ 침적물 저감 관리(물리적, 화학적 세정)
- ☑ 증기발생기 열성능 감소 완화
- ☑ **현재 원자력발전소 2차계통 수질관리의 주요목적**



18" elbow wall thickness decreased from 12.7 to 1.6 mm on feed-water pump at Surry, 1986.



Failure downstream of the LCV in the reheater drain line at Millstone unit 2, 1991.



Failure in a high pressure extraction line at Fort Calhoun, 1997.



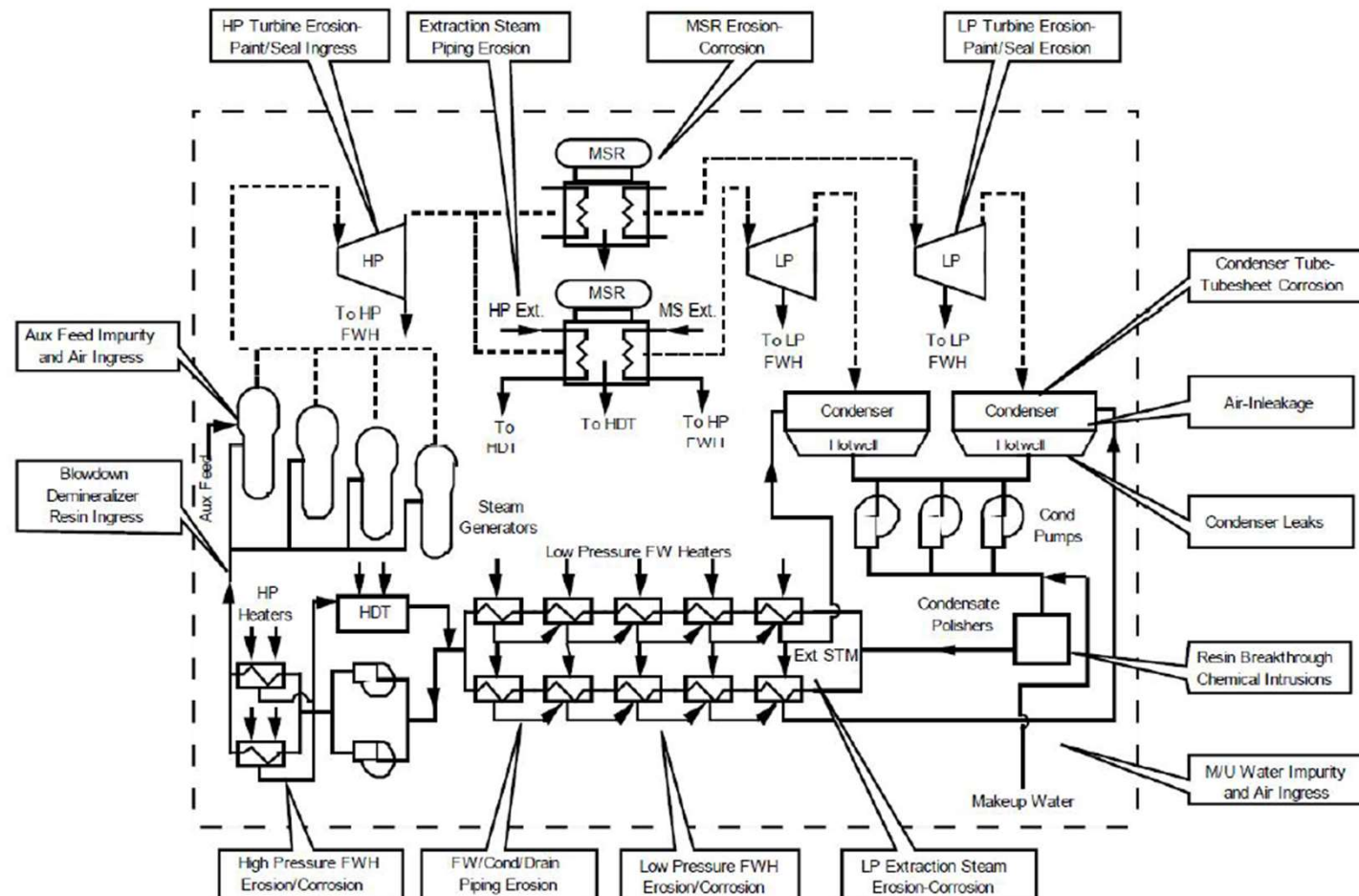
Failure in a main line in the condensate system at Mihama 3, 2004.

침적물(Deposit)이란?

증기발생기 2차측 침적물의 주요 발생 원인

2차측 기기 및 배관의 부식생성물

- 발전소의 증기 계통, 복수기, 급수 계통과 같은 **BOP(Balance of Plant)** 기기 및 배관 재료(탄소강)의 **유동가속부식(FAC)**에 의해 형성됨
- 일반적으로 침적물의 약 95%는 **철산화물(마그네타이트, Fe_3O_4)**



○ 파울링과 열성능

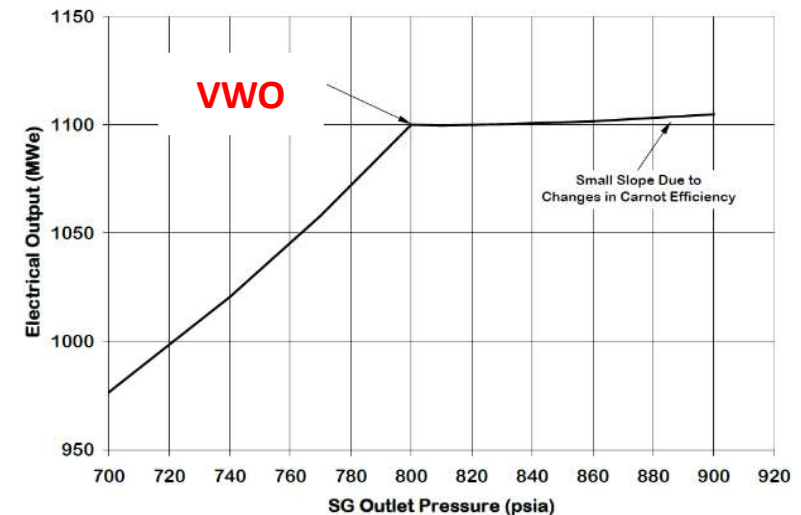
- ✓ 파울링 : 열전달 표면에 침적물이 형성되는 현상
 - 전열관의 1차측에서의 2차측으로의 열전달을 방해하여 증기발생기 열성능을 저하시킴
- ✓ 파울링 계수(Fouling Factor, R''_f)
 - 운전 개시 시점(깨끗한 상태) 대비 증기발생기 열성능 변화량을 보여주는 정량적 지표
 - 열전달 계수의 역수
 - $FF < 0$: 열성능 증가, $FF > 0$: 열성능 감소

$$R''_f = \Delta R = R'' - R''_0 = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0}$$

U_0 : 파울링이 발생하지 않은 상태의 열전달 계수
 R''_0 : 파울링이 발생하지 않은 상태의 총괄 열저항
 U : 현재 열전달 계수
 R'' : 현재 총괄 열저항

○ 증기발생기 파울링에 의한 열성능 저하

- ✓ 증기발생기 전열관 외면 스케일 증가
 - 열성능 저하 → 출구 증기압 감소
- ✓ Governor Valve가 최대 개방되는 Valve Wide Open(VWO) 압력까지 출구 증기압이 감소하면,
 - **전기 출력 감소**



● 증기발생기 전열관 표면 스케일 성장에 따른 열성능 변화

④ 가동 극초기 : A

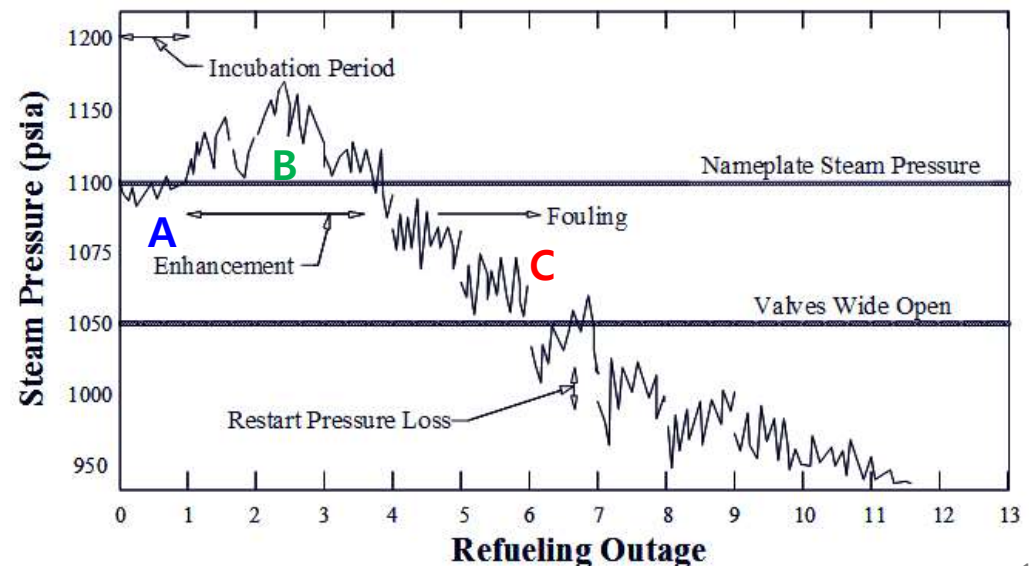
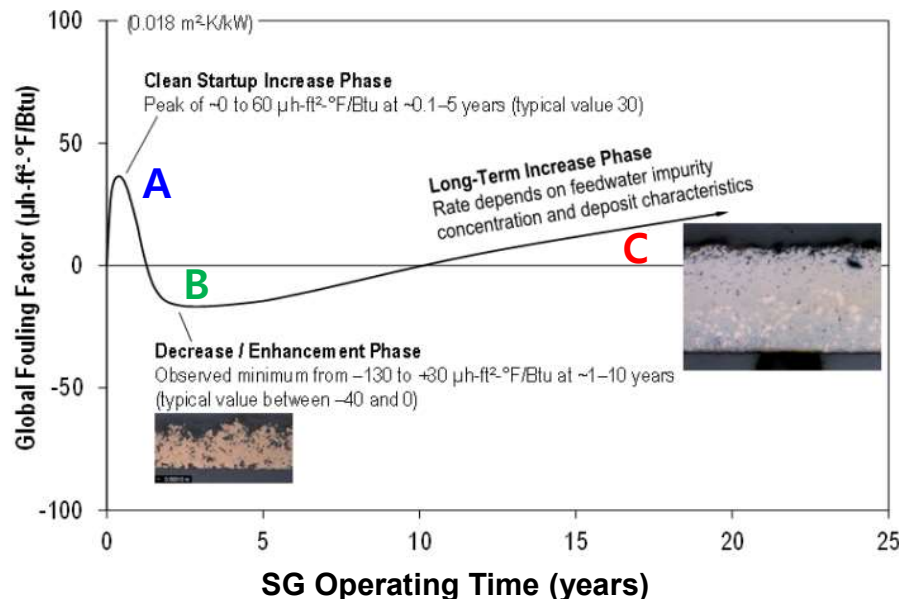
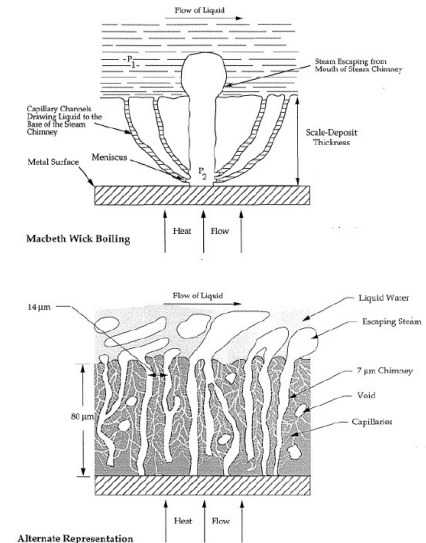
- 전열관 표면에 매우 얇은 스케일 성장
- 열전도율 감소 (파울링 계수 증가, 출구 증기압 감소)

④ 가동 초기(운전 수주기 이내) : B

- 표면 거칠기가 큰 스케일은 핵비등 위치를 다수 발생시킴
- 비등 열전달 효율 증가 (파울링 계수 감소, 출구 증기압 증가)

④ 가동 초기 이후(운전 수주기 이후) : C

- 스케일이 두터워지고 치밀해짐
- 열전도율 감소 (파울링 계수 지속적 증가, 출구 증기압 지속적 감소)



● 대수평균 온도차(LMTD) 방법을 이용한 증기발생기 열성능 변화 평가

✓ LMTD : Logarithmic Mean Temperature Difference

- ✓ 증기발생기 파울링 계수 평가를 위한 일반적으로 고전적인 방법(열수력 해석 불필요)
- ✓ 증기발생기 1,2차측 온도차이가 **대수평균 온도차**를 가진다고 가정
- ✓ 증기발생기 2차측 전체 영역에 물이 포화상태에 있다고 가정
 - 예열기 영역의 물은 과냉액 상태이므로 일부 오차(수% 이내) 발생할 수 있음
- ✓ 증기발생기 전체 열전달 표면의 총괄 파울링 계수 계산

열전달율(Q)

$$Q = UA\Delta T_m = UA \frac{(T_{Pri,In} - T_{Pri,Out})}{\ln\left(\frac{T_{Pri,In} - T_{sat}}{T_{Pri,Out} - T_{sat}}\right)}$$

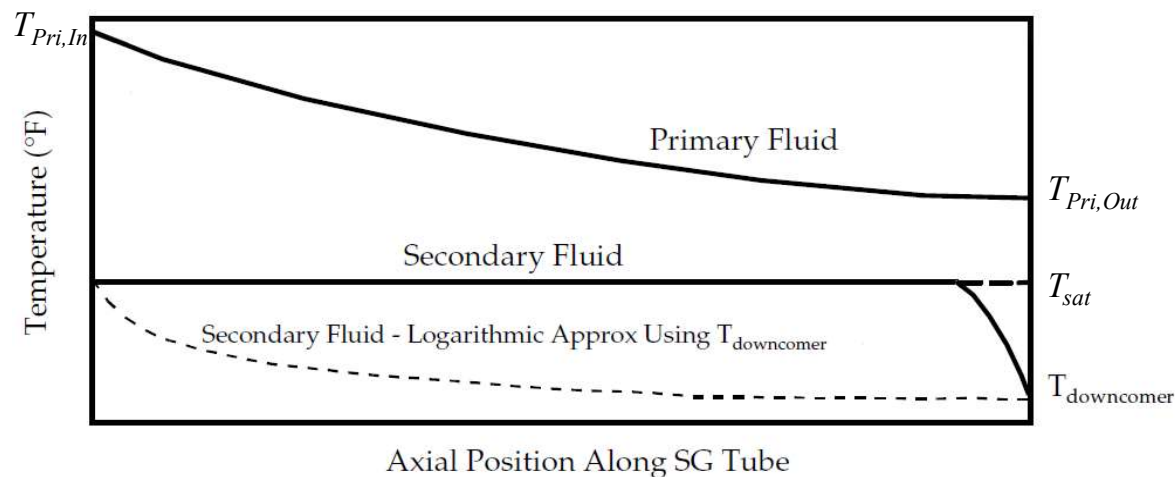
U : 총괄 열전달계수

A : 열전달면적

$T_{Pri,In}$: 1차측 입구온도

$T_{Pri,Out}$: 1차측 출구온도

T_{sat} : 포화온도

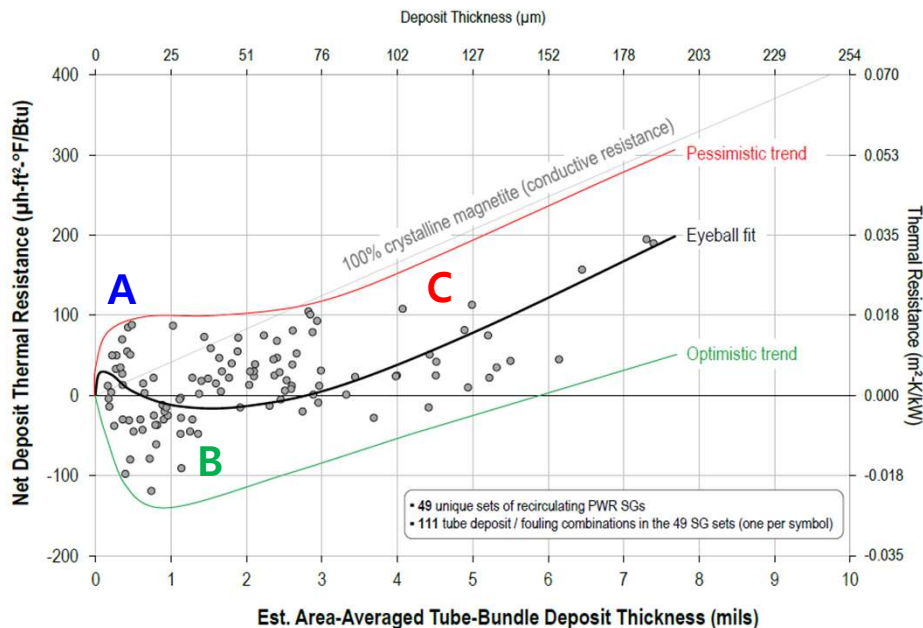


● 급수 철농도 및 전열관 침적물 두께를 이용한 열성능 평가

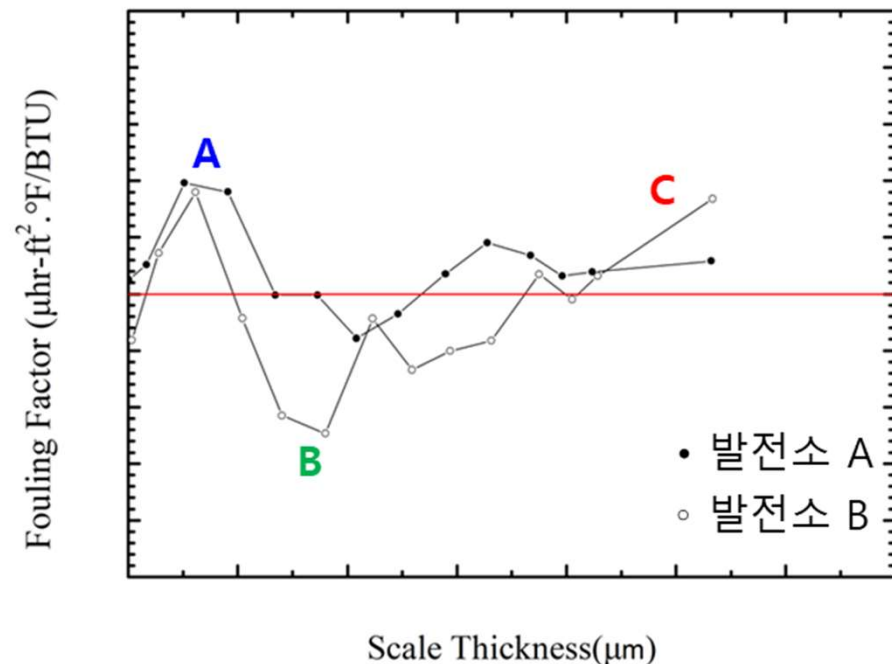
- ✓ 전열관 외면 스케일 두께-파울링 계수의 상관관계
- ✓ 전열관 외면 스케일 두께 계산(물질수지 계산법)

$$\text{침적물 두께} = \frac{(Q_F \times C_F) - (Q_B \times C_B) \times 10^{-9} \times EFPY \times 1.38}{\text{마그네타이트 밀도} \times \text{증기발생기 수량} \times \text{전열면적}}$$

- ✓ 파울링 계수는 LMTD 방법으로 계산



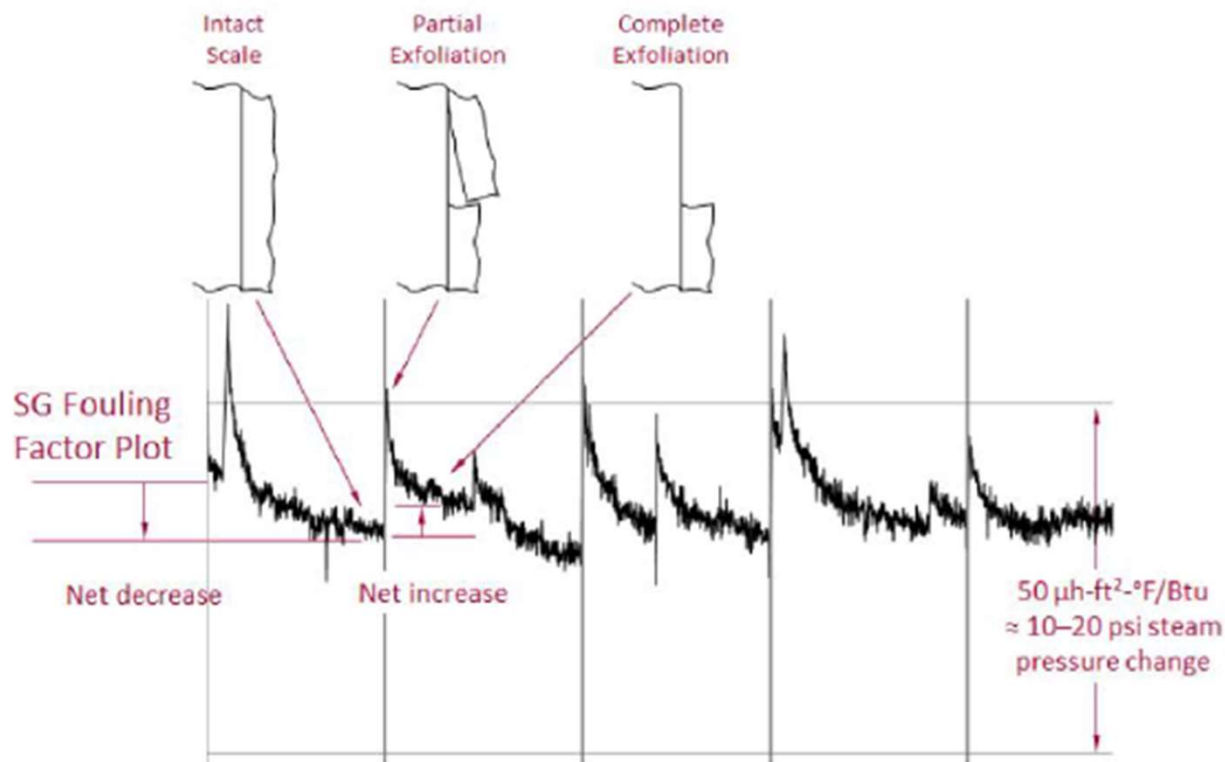
EPRI SGMP 해외 원전



국내 원전 증기발생기

● 계획예방정비 이후 증기발생기 열효율 과도상태

- ✓ 발전정지 이후 재기동 시 총괄 파울링 계수 급격하게 증가함
 - 과도상태 기간 중 전열관과 스케일의 열팽창 계수 차이로 인한 스케일 박리
- ✓ 부분 박리 : 전열관 표면에서 증기 밀봉(Blanket) 발생 → 열저항 증가
- ✓ 완전 박리 : 전열관 국부 표면에서 대류 및 비등 열전달 촉진 → 파울링 계수 감소



증기발생기 침적물 상태감시를 통한 건전성 평가

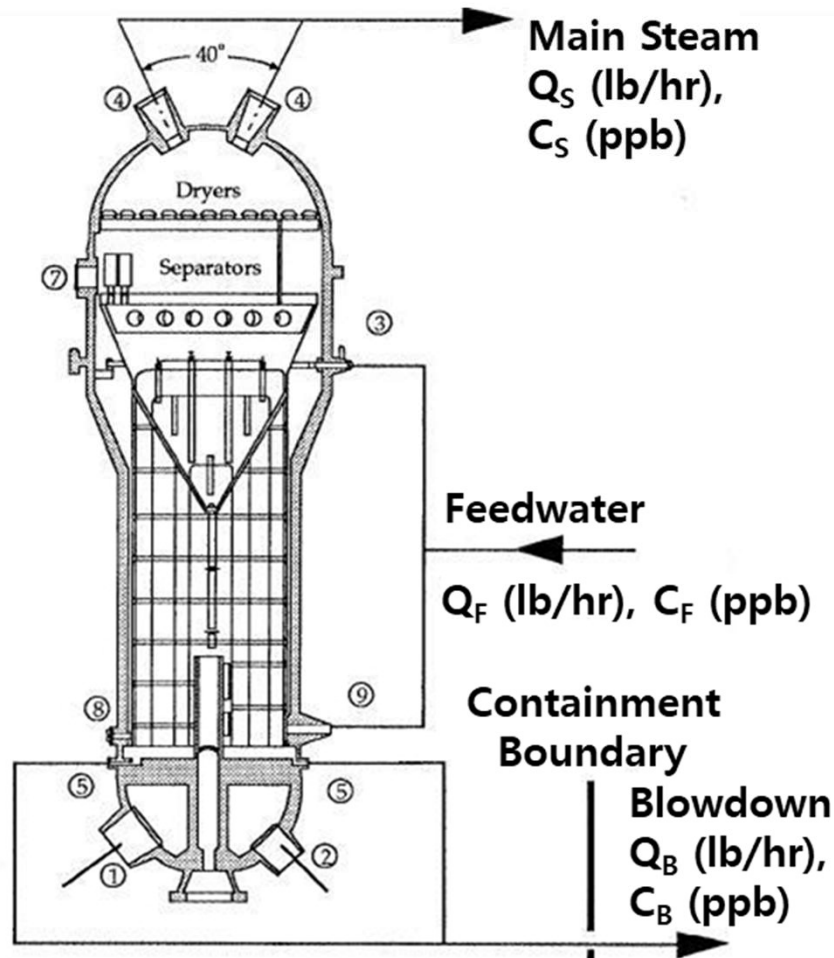
- ✓ 증기발생기 2차측 침적물에 의해 발생 가능한 관리 항목 별 점수화
 - 평가기간 : 상, 하반기 각 1회(2회/1년)
 - 평가대상 : 상업운전 시작 후 5주기 이상의 가압경수로형 증기발생기
 - WH형/표준형(OPR1000, APR1400) 증기발생기 모델 별 평가
 - 총 5개 관리 항목 중 13개 세부 항목 평가
 - 일정 점수 이상 도달 시 침적물 감시 강화, 조치 계획 수립 또는 침적물 저감 실행

관리 항목

전열관 건전성 (WH형)	수위 불안정 (WH형)	화학인자 (WH, 표준형)	침적물 제거 및 재고 (WH, 표준형)	열성능 (WH, 표준형)
① ODSCC/IGA ② 침적물 유발 덴트	① 광역수위 ② 광역수위 증가속도 ③ 유로흐름막힘(WR)	① 하이드라진 농도비 ② 급수 pH ③ HORT 방출량	① 스케일 침적 두께 ② 랜싱제거효율	① 파울링계수 ② 파울링계수 증가량 ③ WWO 압력 여유도

● 침적물에 의한 증기발생기 하이드라진 농도비 변화 (1/2)

- ✓ 이상적 하이드라진 농도 : 증기발생기 물 > 급수
- ✓ 2차측 침적물 재고량 증가 → **촉매반응 및 자발적 열분해에 의한 가속화**



$$Q_F \times C_F = (Q_B \times C_B) + (Q_S \times C_S)$$

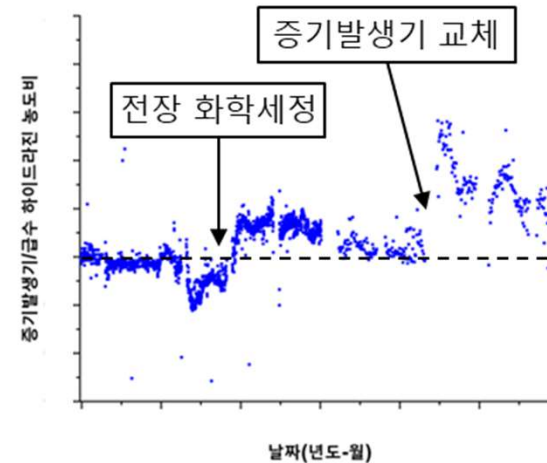
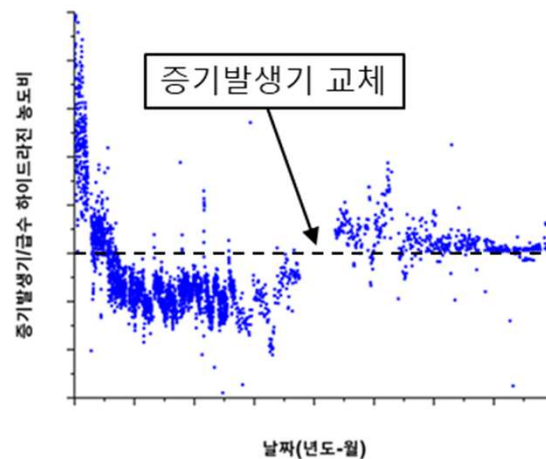
여기서,

- 용존 산소와의 반응
 - 하이드라진 소모량 ≈ 0
 - 헤마타이트 환원반응 참여
 - 하이드라진 소모량 ≈ 0
 - 취출수 제거량
 - 급수 유량의 1 %
 - 하이드라진 소모량 ≈ 0
 - 증기를 통한 배출
 - 약 20 % (80%는 증기발생기 내부에서 재순환)
 - 자발적 분해(침적물 고려 X)
 - 일정(단, 증기발생기 조건에 따라 차이 발생)
- ∴ 이상적 하이드라진 농도
- 증기발생기 물 > 급수

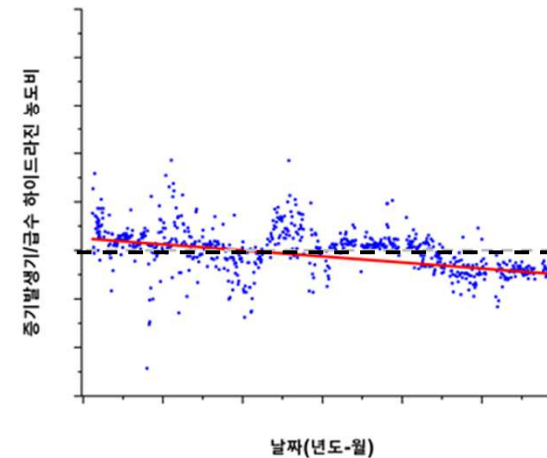
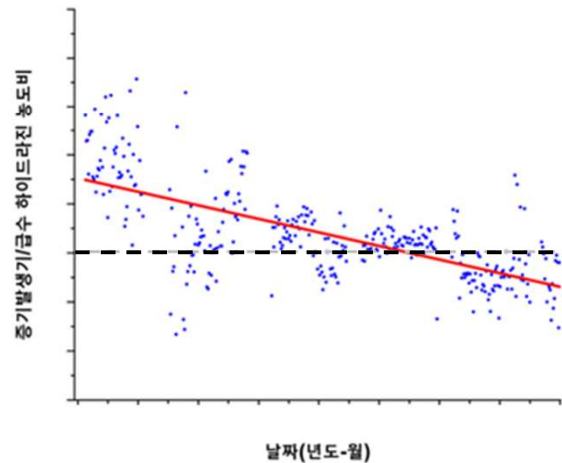
● 침적물에 의한 증기발생기 하이드라진 농도비 변화 (2/2)

- ✓ 침적물 제거가 수행될 경우, 하이드라진/급수 농도비 상승
- ✓ 가동년수 증가에 따라 하이드라진/급수 농도비 지속적 감소
- ✓ 하이드라진 분해에 의한 암모니아 농도 증가는 명확히 관찰되지 않음

침적물 제거 이력 有



침적물 제거 이력 無

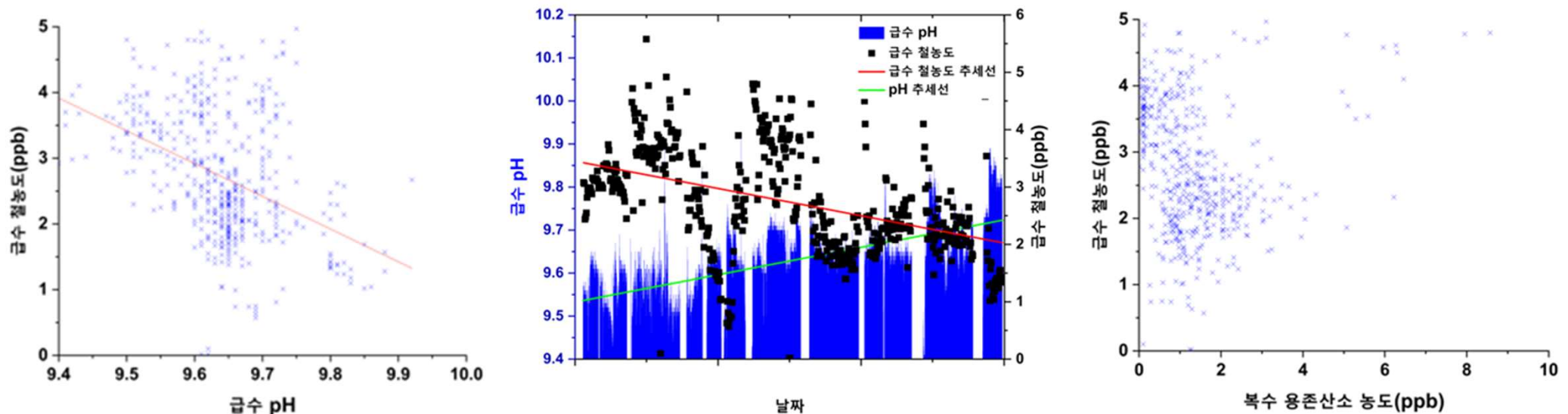


● 급수 pH 및 복수 용존 산소농도에 따른 급수 철농도 상관관계 비교

- ☑ 대부분의 발전소에서 급수 pH 증가에 따른 급수 철 농도 감소 현상이 관찰됨

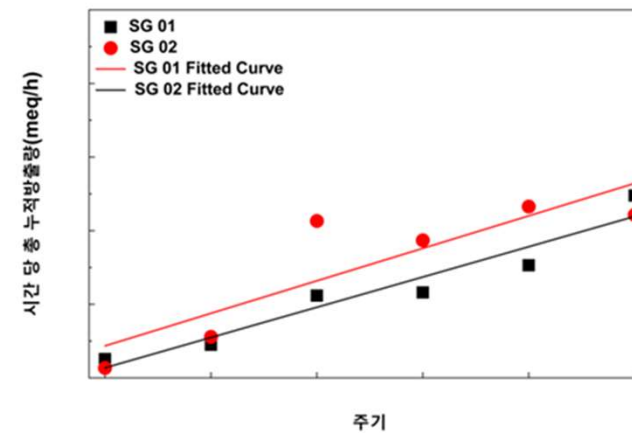
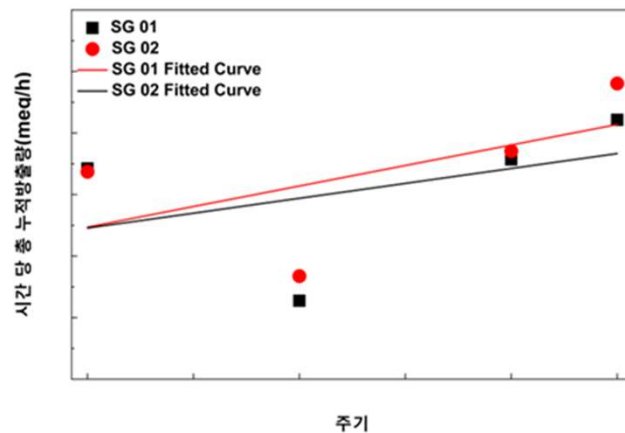
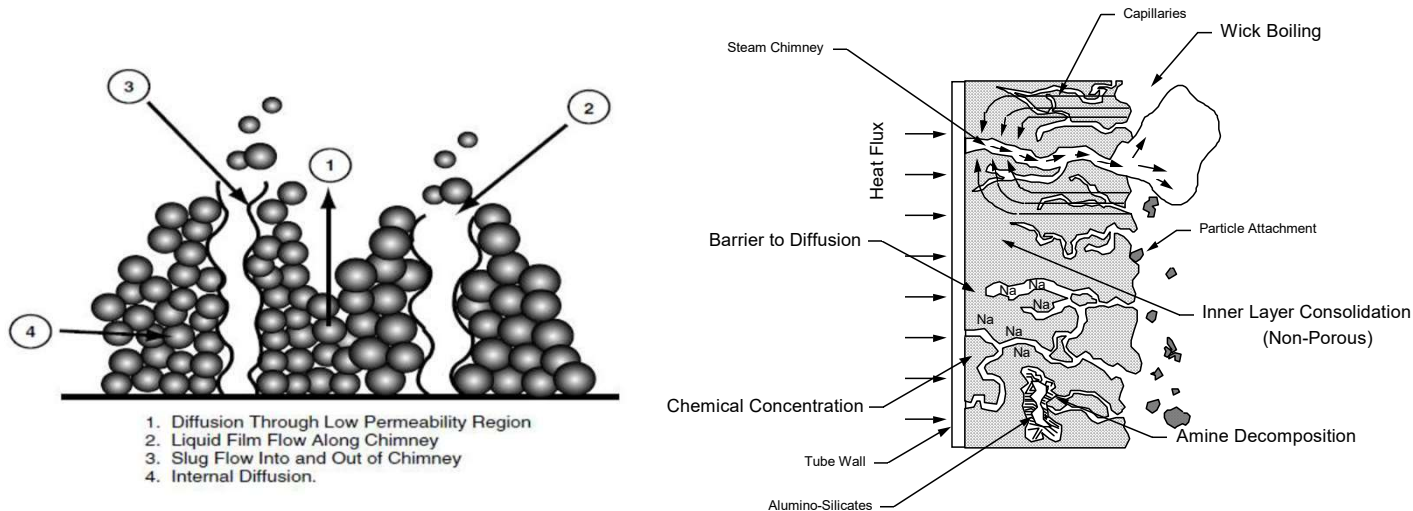
$$[Fe \text{ 농도}] = -3.75 \times pH + 38.4 \quad [\text{EPRI pH-Fe 농도 예측식}]$$

- ☑ 복수 용존산소 농도 증가에 따른 급수 철농도 감소 현상은 명확히 관찰되지 않음
- 주급수 산소를 적절히 감시하며 급수가열기 및 복수기 전열관에 구리 합금이 없을 경우 100 ppb 미만으로 운전 가능(SGMP 통합지침서)



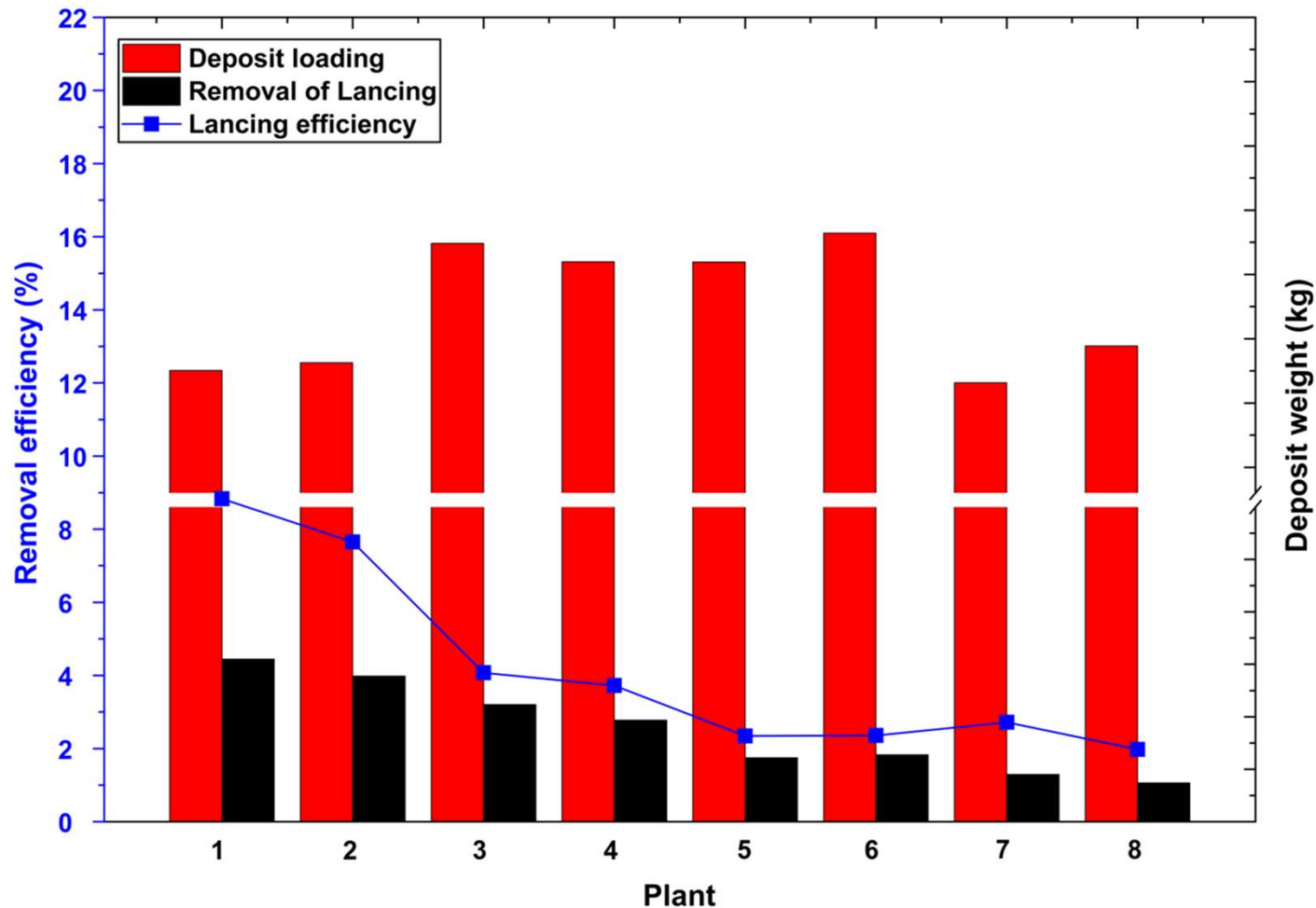
○ 잠복불순물 방출량 비교

- ✓ 다공성 매질(예. 침적물 기공)에 불순 화학성분 농축 증가
- ✓ 침적물 재고량 \propto 잠복불순물 농축량(또는 방출량)
- ✓ 불순성분은 침적물 뿐만 아니라 증기발생기 틈새 모든 곳에서 잠복 및 방출 가능



증기발생기 물리적 세정

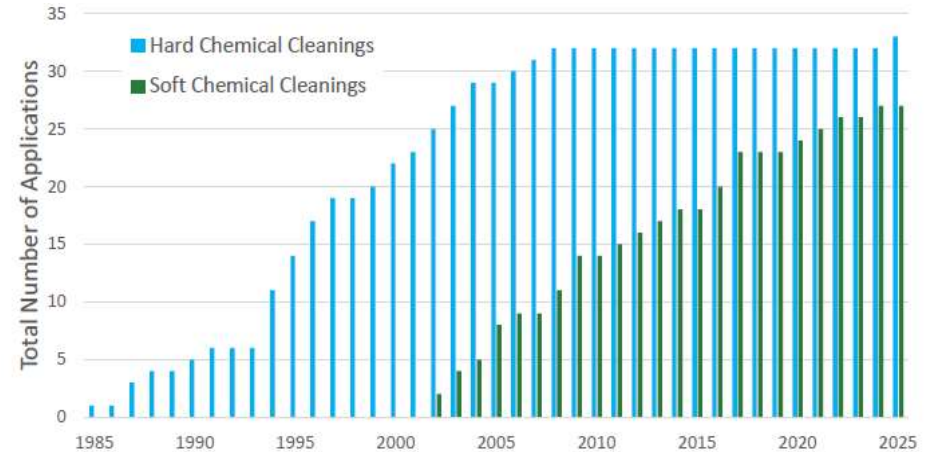
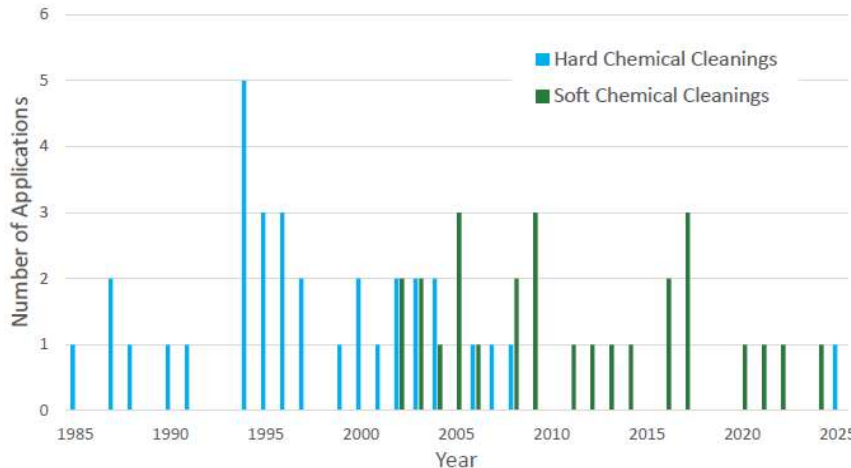
- ✓ 평균 랜싱 제거 효율 : 약 4 % (OPR1000 증기발생기)
- ✓ 랜싱은 관판 상단 전열관의 SCC 및 Dent 발생 완화를 위한 슬러지 제거 목적



발전소 별 주기 평균 침적량, 평균 랜싱 제거량, 랜싱 효율 비교

○ 미국 원전 화학세정 수행 이력

- ✓ 2010년부터 현재까지 경성 화학세정 대비 연성 화학세정 수행 이력 증가



○ 대표 연성 화학세정 공정 비교

비교 항목	ASCA (Advanced Scale Conditions Agents)	DMT (Deposit Minimization Treatment)	비고
세정제 종류 및 농도	EDTA 1~2 %	옥살산(Oxalic acid) 1 %	
세정 온도	≈ 80 °C	≤ 93 °C	외부열원 또는 잔열제거계통 사용
세정폐액 처리방법	플라즈마 소각 또는 화학적 열분해 처리	화학적 처리	1) 2)
적용 경험	국내외 원전 다수 적용	Palo Verde 1~3호기에 적용 (2022~2024년)	3)

- 1) ASCA는 입증된 기술로서 신뢰성이 높은 반면, 난분해성 EDTA 폐액처리가 어려움
- 2) 옥살산 사용 DMT 세정기술은 폐액 처리가 용이한 반면, 현장 적용을 위해 신뢰성 검증이 필요함
- 3) Palo Verde 발전소는 국내 표준형 원전인 OPR1000과 동일한 CE형 증기발생기지만 출력이 1400 MWe로 더 큼.
해당 발전소는 2003~2007년에 Alloy 600HTMA에서 Alloy 690TT 전열관으로 교체한 후 약 17년 운전한 후 DMT 화학세정이 수행되었으며 (2022년~2024년), 1호기는 3551 kg, 2호기는 미확인, 3호기는 3630 kg의 침적물이 제거됨

2차계통 수화학 관리 최적화

왜 수질관리가 중요할까?

증기발생기와 2차계통을 건강하게 지키는 핵심 관리

1 부식 예방

배관과 전열관
손상 감소



2 침적물 억제

스케일과 슬러지
축적 방지



깨끗한 물이
안전하고 효율적인
발전의 시작!



3 열전달 유지

전열성능과
증기 품질 유지



4 설비 수명 연장

정비 부담과
고장 위험 감소



5 안전·경제성 향상

안전한 운전과
발전 효율 향상



최적화 관리가
필요한 이유

pH 적정 pH

O₂ 용존산소 제어

불순물 최소화

침적물 관리

불순성분 형성 저감

- pH 최적 운전
- FAC 저감 수질관리
- ALARA 수질관리
- 용존산소 농도 관리
- 보호피막 형성

증기발생기 유입 및 침적 저감

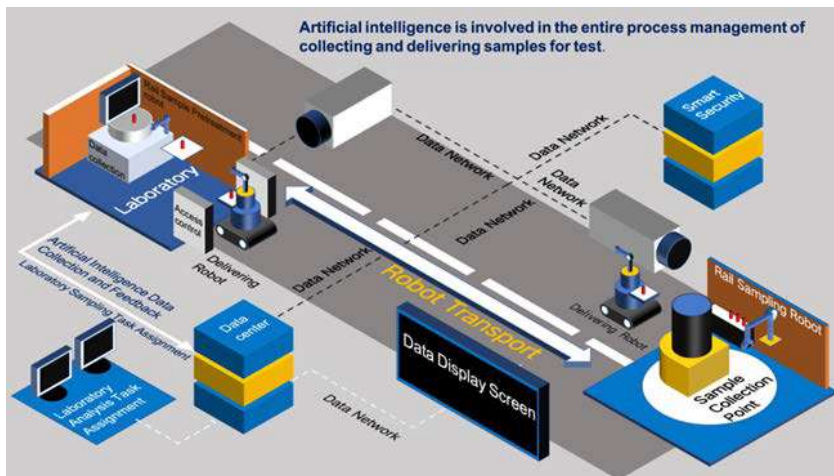
- 기동, 정지시 수질관리
- 틈새 수질환경 관리
- 분산제 주입

불순성분 제거

- 복수탈염설비 최적운전
- SG 취출수 최적운전
- SG 물리적, 화학적 세정

로봇 자동화 및 AI기술과 수화학 관리의 접목

- ✓ 로봇을 활용한 시료 샘플링, 이송, 분석 등 수행 (중국 Sanmen 원전, 2025)
- ✓ AI 연계형 통합 수화학 관리(단순 측정 중심에서 데이터 통합, 예측진단 수행)



기후에너지 정책 변화에 맞는 유연한 수화학 관리

탄력운전 운영 목표

	현재	2027년	2032년
출력	80% 출력까지 감발	70% 출력까지 감발	50% 출력까지 감발
일수	18개월에 27일 내외	1년에 100일 내외	1년에 100일 내외
속도	3%p/시간	3%p/시간	10%p/시간

탄력운전 적용 목표

새울 1호기	2032년 10월	2호기	2033년 7월
3호기	2035년 5월	4호기	2036년 7월
신한울 1호기	2036년 4월	2호기	2035년 8월
3호기	2035년 4월	4호기	2036년 4월

감사합니다.

