

# FAC 저감을 위한 산소주입운전 기술 분석

2026.6.18

김홍표\*, 김범규\*, 백승헌\*, 손영호\*, 송근동\*, 황정호\*, 김홍덕\*\*

\*미래와도전

\*\*한국원자력연구원

# 차 례

1. 배경
2. FAC
3. 산소주입운전 기술분석
4. 결론

# World wide issues in water chemistry field

## ❖ Secondary Water Chemistry & Radiochemistry

- **Control & Corrosion(FAC, SCC)**
- **Film Forming Products & Dispersants**
- **Hydrazine Alternatives**

## ❖ Primary Water Chemistry & Radiochemistry

- Control & Corrosion(X-750 and Alloy 718 spacer corrosion)
- Source Term
- Zinc
- KOH
- Fuel and CRUDs

## ❖ Auxiliary Systems Water Chemistry & Waste Treatment

## ❖ Maintenance and Long Term Operation

## ❖ Monitoring Updates

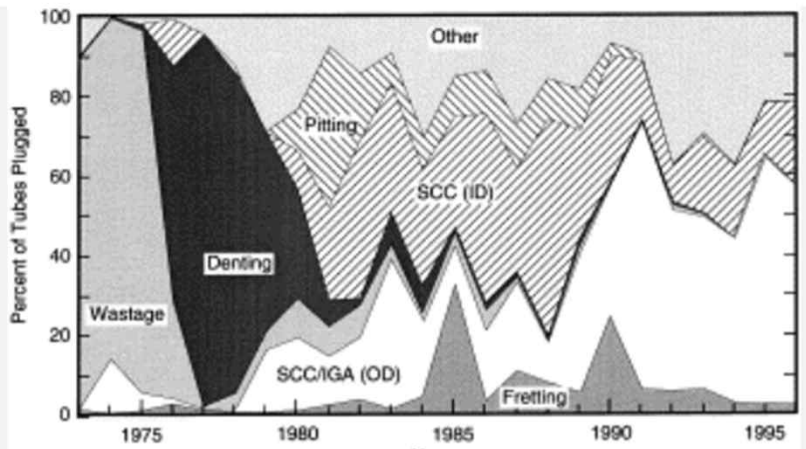
## ❖ Numerical and Simulation Tools

## ❖ Advanced Reactors

Juan de Dios Sánchez and Peter Rudling, Key Emerging Issues and Recent Progress Related to Plant Chemistry/Corrosion (PWR, CANDU, and BWR Nuclear Power Plants), ANT, 2024

## 2차 계통 수처리 목적

- ❖ 증기발생기 전열관 SCC 방지
  - ❖ 2차 계통 배관 감육(FAC) 억제
  - ❖ 기능 유지(열전도, 유로막힘, 파울링)
- pH(ETA)
  - ECP(용존산소,  $N_2H_4$ )
  - 불순물(전도도,  $Cl^-$ ,  $IX$ )



SG tube 손상추세



Mihama 3 August 9, 2004  
5명 사망

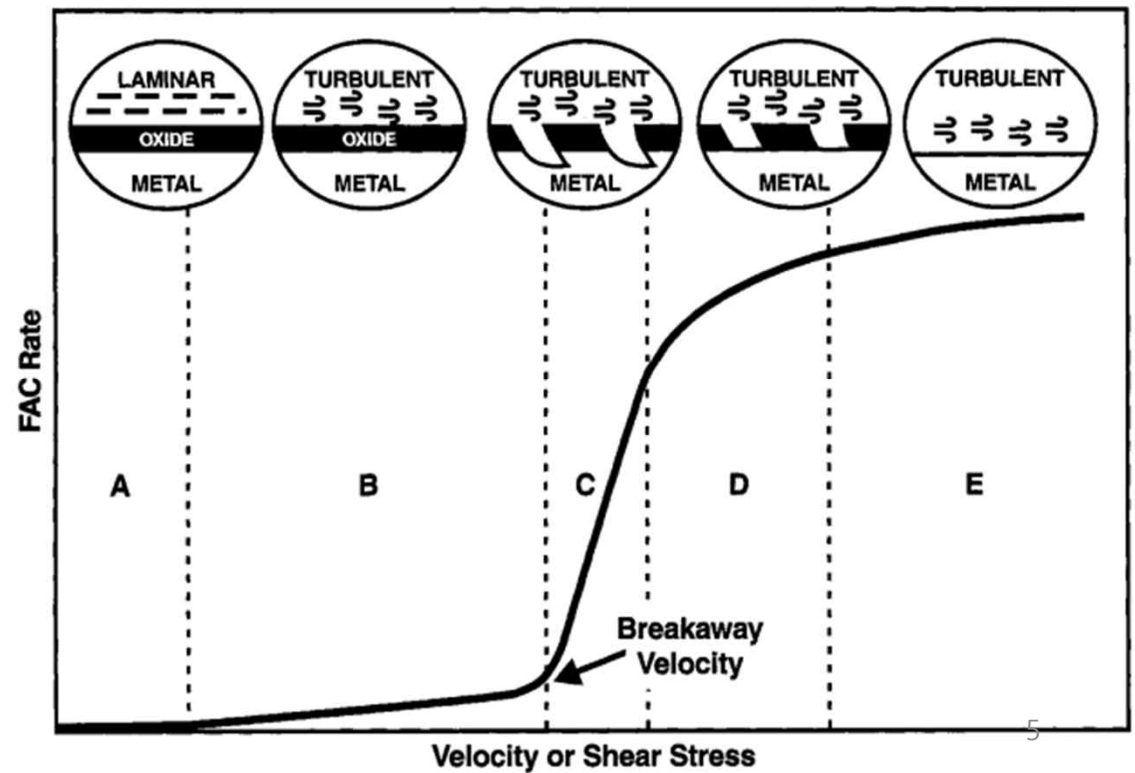


Surry Unit 2 in December 1986  
4명 사망

FAC( flow accelerated corrosion)

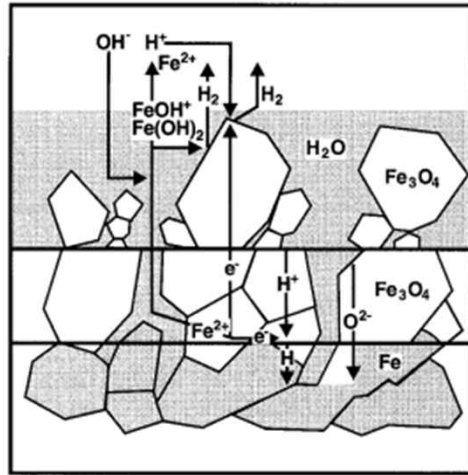
# FAC

- Corrosion: 재료/환경 물리화학적 상호 작용에 의한 재료 손상
- FAC: 표면산화물이 유지된 상태에서 유동유체에 의해 부식되는 현상, 표면산화물의 용해 발생
- Erosion corrosion: 표면산화물이나 금속표면이 기계적 힘에 의해 손상되면서 부식 발생
- Erosion: 기계적 손상이 발생

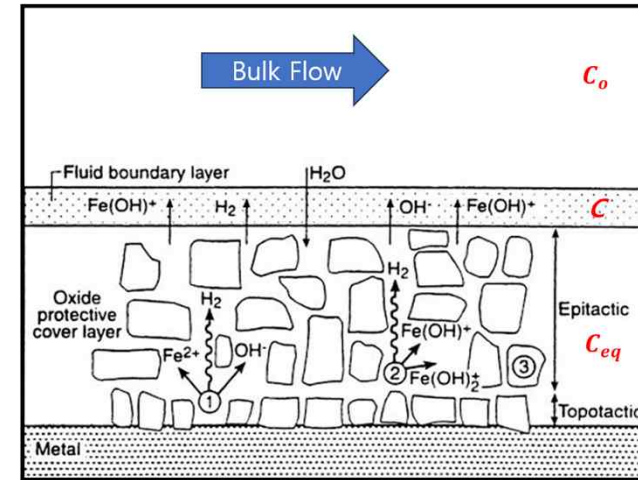
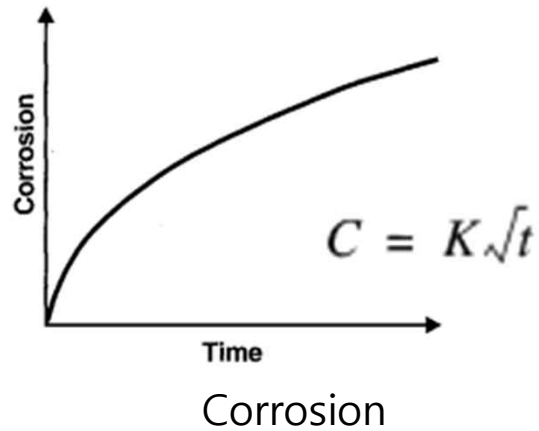


# Corrosion 과 FAC 차이

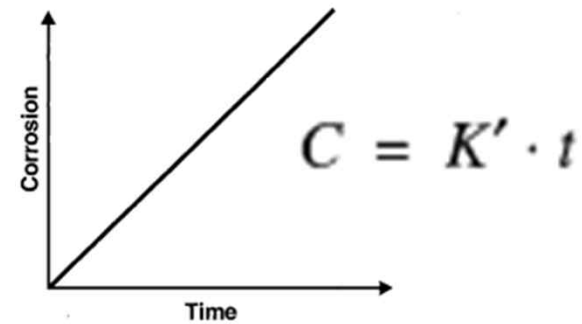
Outer layer  
Inner layer



Slow Dissolution of Oxide  
Net Oxide Formation  
Corrosion Rate Decreases As  
Oxide Thickness Increases

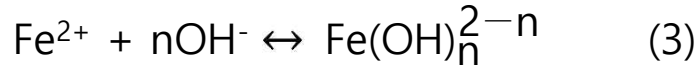
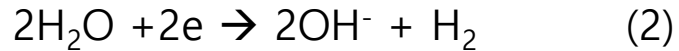


Flow →  
Transport of Dissolved Iron Controlled  
by Mass Transfer Rate  
Rapid Dissolution of Oxide  
Constant Thickness of Thin Oxide  
Rapid Corrosion At Constant Rate



FAC

# FAC model



$$V_c = K(C_{eq} - C) \quad (4)$$

$V_c$  is rate of dissolution at the oxide-water interface

$K$  is the reaction rate constant,

$C_{eq}$  is the soluble ferrous ion concentration at the equilibrium with the magnetite and

$C$  is the soluble ion concentration at the oxide-water interface.

$$V_{TC} = 2K(C_{eq} - C) \quad (5)$$

$V_{TC}$  is total corrosion rate of Fe

$$F_{IF} = K_m(C - C_o) \quad (6)$$

$K_m$  is the mass transfer constant

$F_{IF}$  is flux across in fluid boundary

$$V_{TC} = \frac{2KK_m(C_{eq} - C_o)}{K_m + 2K} \quad (7)$$

$$V_{TC} = K_m C_{eq} \quad (8)$$

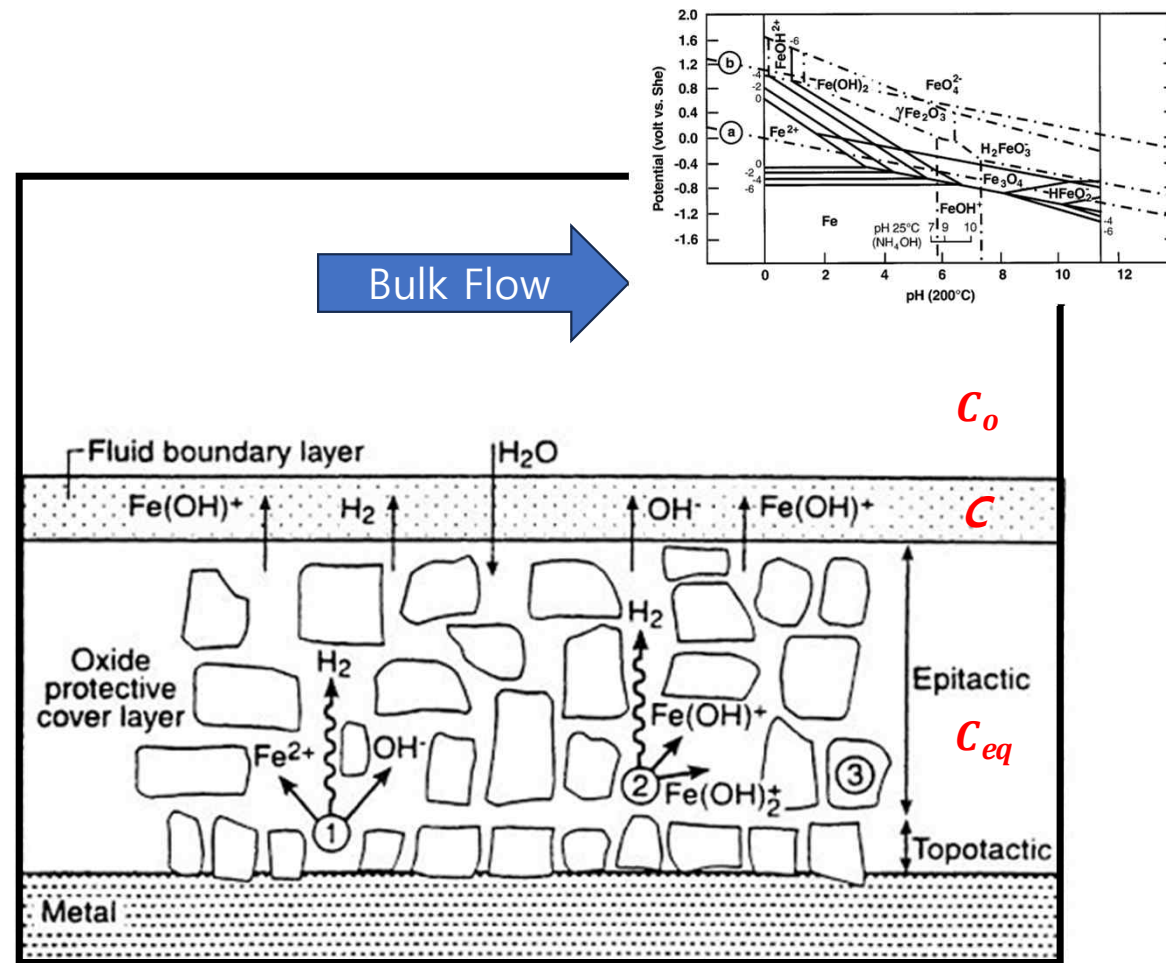
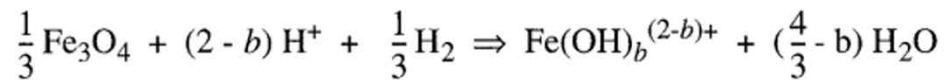
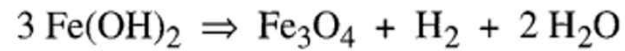
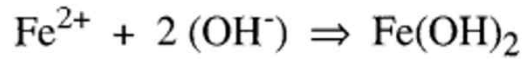


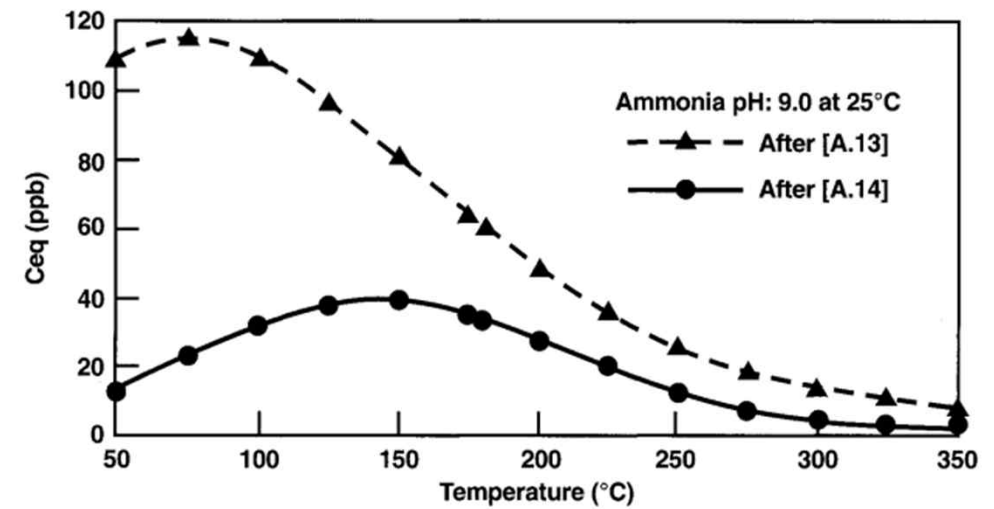
Figure 1: Schematic picture of the magnetite layer formed on the iron-based material surface during the operation with deoxygenated all-volatile treatment (AVT) in reducing conditions

## Magnetite 용해도



$$C_{eq} = [\text{H}_2]^{1/3} \cdot (K_1 [\text{H}^+]^2 + K_2 [\text{H}^+] + K_3 + K_4 / [\text{H}^+]) \quad \text{Sweeton}$$

$$C_{eq} = [\text{H}_2]^{1/3} \cdot (K_1 [\text{H}^+]^2 + K_2 [\text{H}^+] + K_3 + K_4 / [\text{H}^+]) \quad \text{Tremaine} \\ + 1/[\text{H}_2]^{1/6} (K_5 + K_6 / [\text{H}^+])$$





## 온도 영향

$$V_{TC} = K_m C_{eq}$$

Magnetite solubility

Mass transfer coefficient

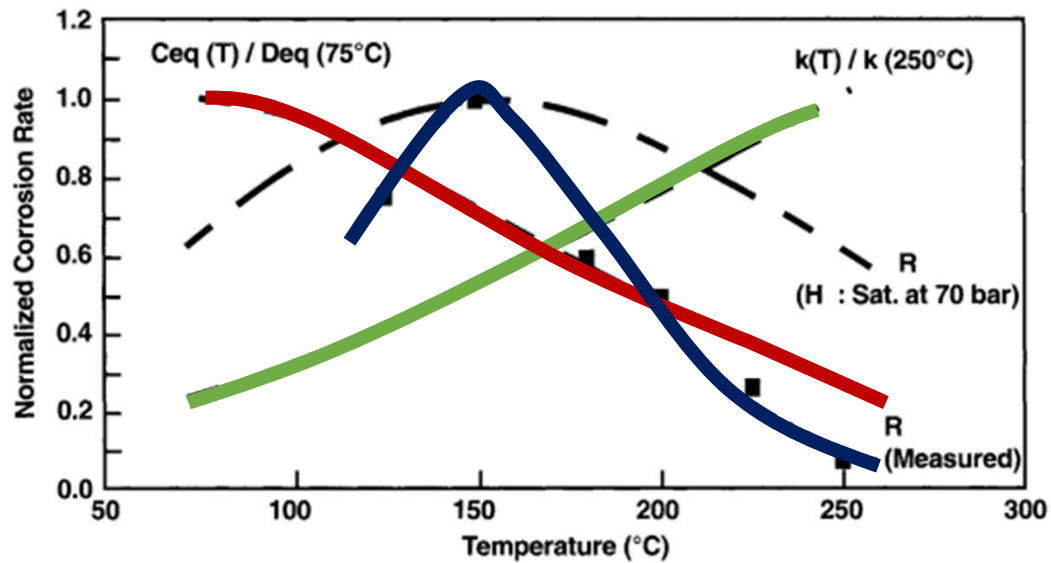
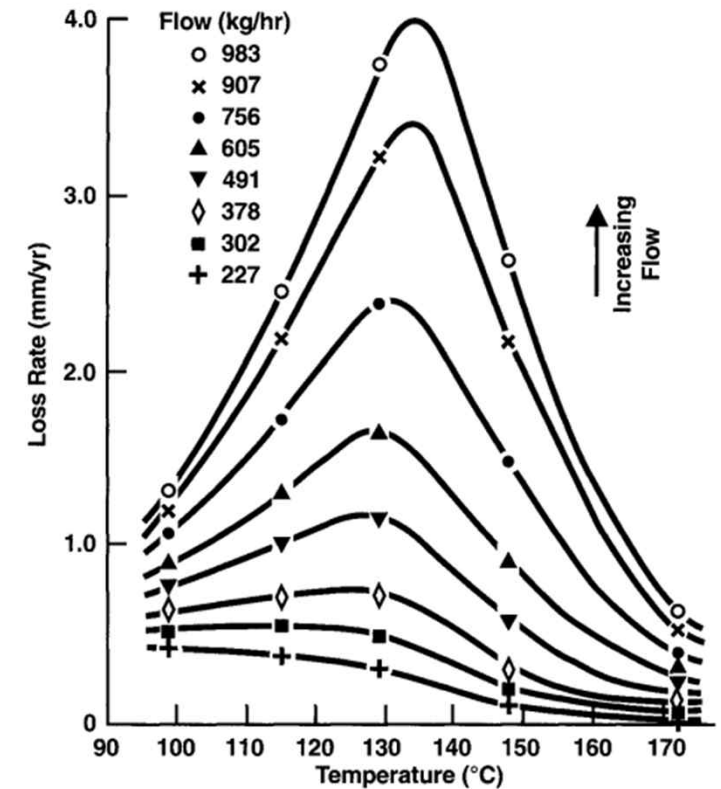


Figure 3-11. Temperature Dependence of Single-Phase FAC with Ammonia at a pH of 9.0

(From Bouchacourt [3.34])



EPRI TR-106611-R1

## 용존산소 FAC 영향

Table 3. FAC rate of the tube test specimens tested in R5 and R6 Unit:  $\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ .

Material ID	LDO	→Ox	→LDO	→Ox
Cr0.01%	0.30	0.0009	0.26	< 0.0003
Cr0.05%	0.12	0.0025	0.086	-
Cr0.1%	0.075	0.0086	0.0013	-
Cr0.3%	0.041	0.0021	0.0028	< 0.0003

DO : 2 → 30 ppb 증가 ➡ FAC rate 300배 감소

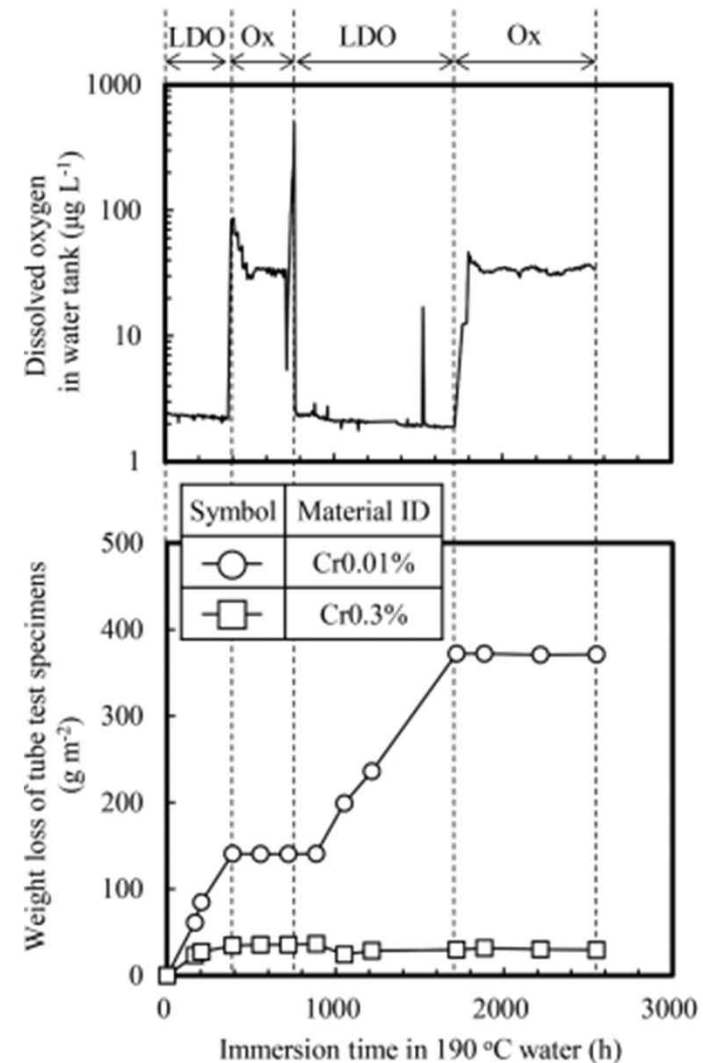
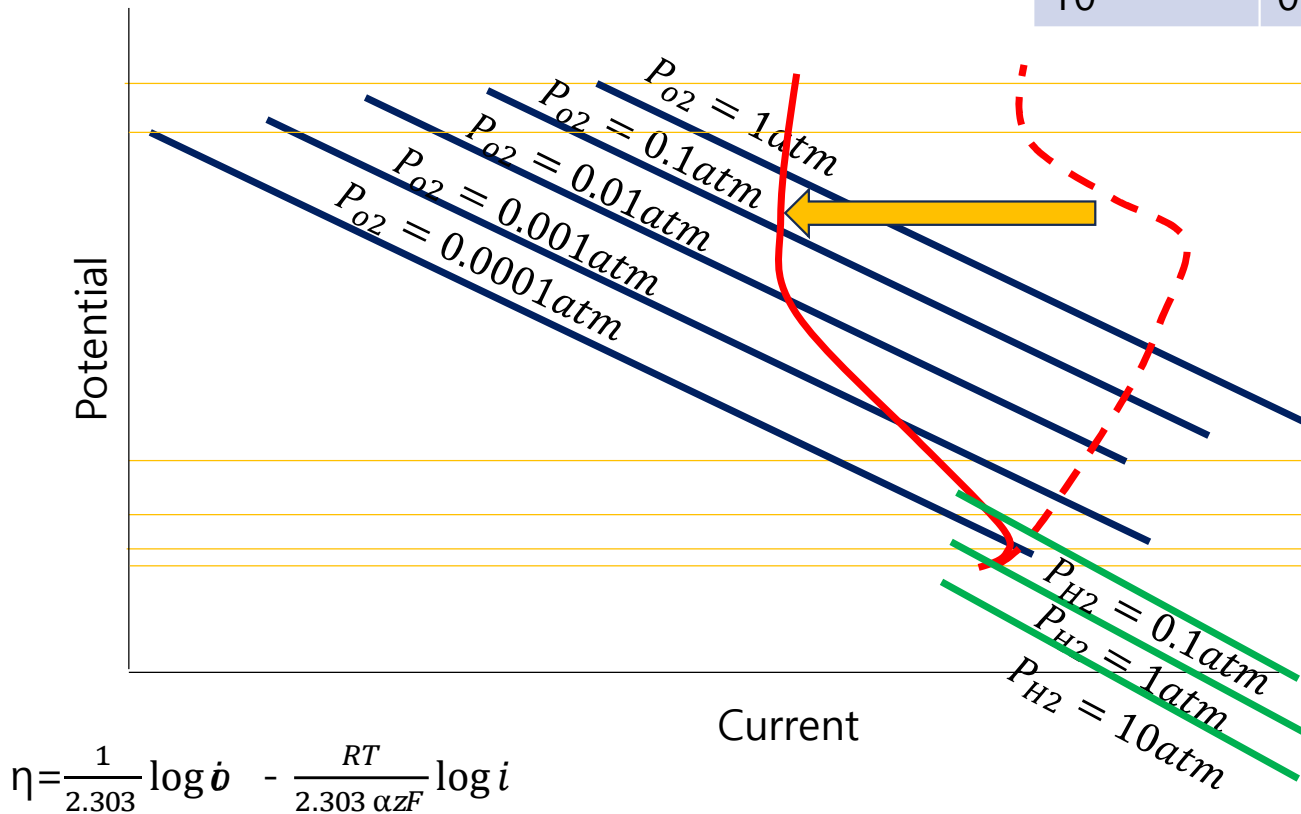
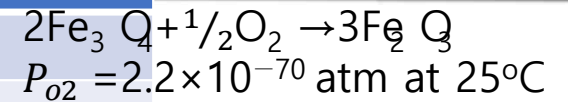


Figure 9. Weight loss of tube test specimens under repetition of low dissolved oxygen condition and oxygenated water condition: dependence on immersion time in 190 °C water (Cr 0.01%, Cr 0.3%).

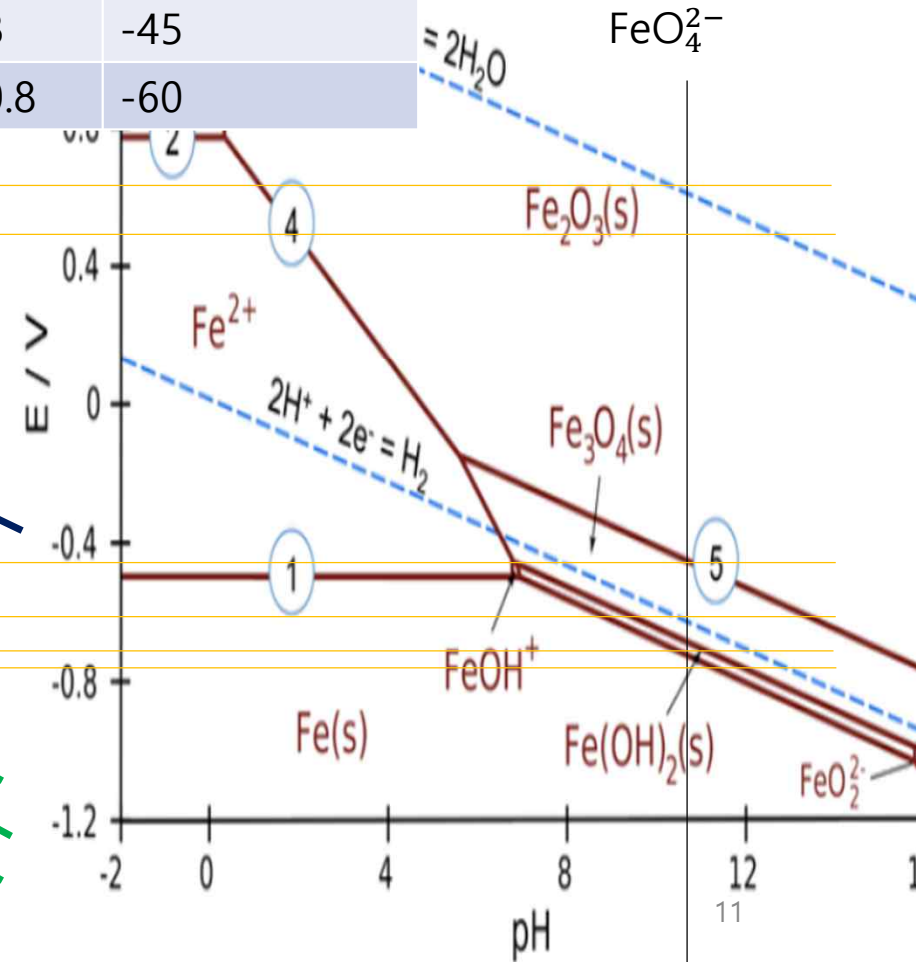
## 산소/수소 영향

- 산소 주입 → hematite 생성 → 용해도 감소
- 수소 주입 → magnetite 생성 → 용해도 증가

$P_{O_2}^1(\text{atm})$	ppb	$\Delta E(\text{mV}), 25^\circ\text{C}$
$10^{-0}$	8000	0
$10^{-1}$	800	-15
$10^{-2}$	80	-30
$10^{-3}$	8	-45
$10^{-4}$	0.8	-60

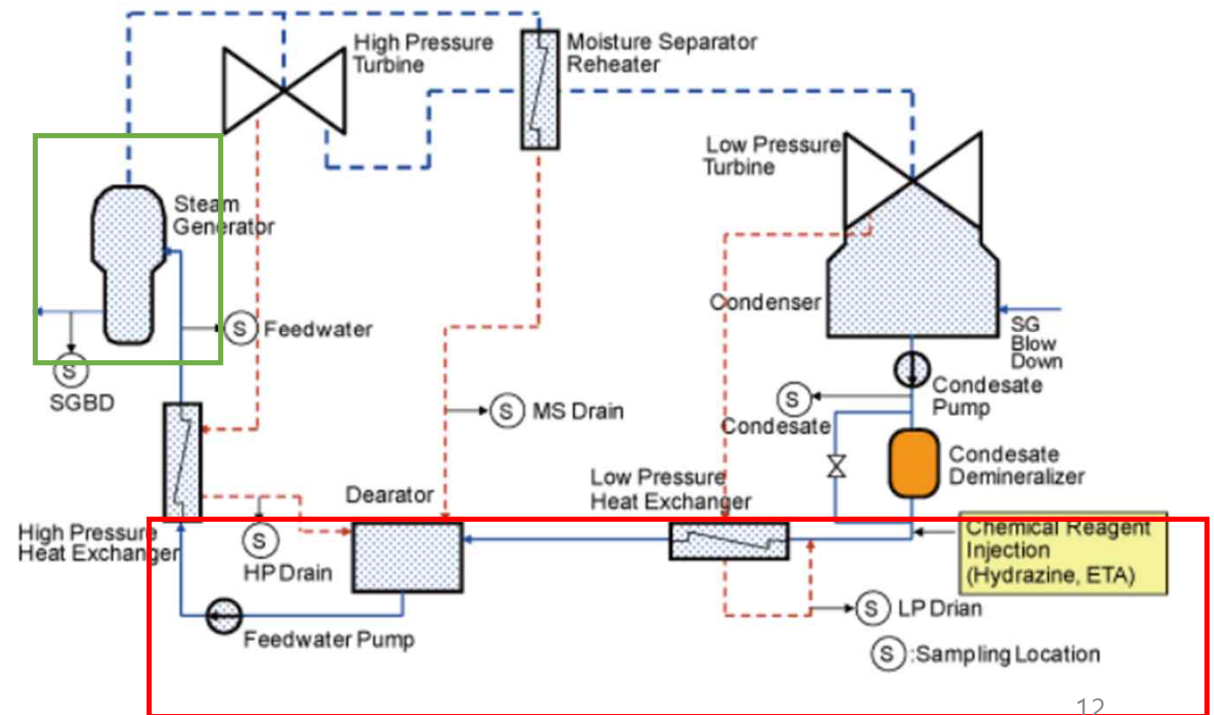
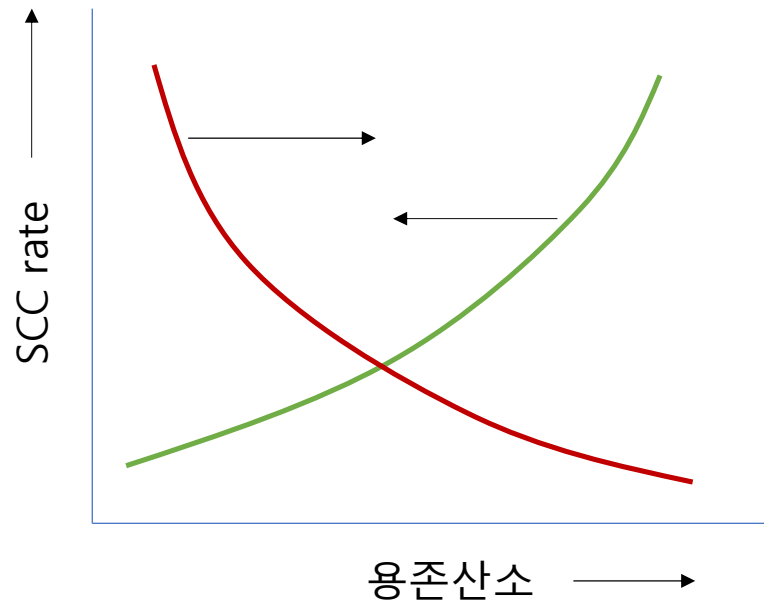


$$\eta = \frac{1}{2.303} \log \dot{\phi} - \frac{RT}{2.303 \alpha z F} \log i$$



## 용존산소 영향

EPRI는 2차계통 수처리 지침	Rev. 7, 2009	Rev 8, 2017
급수 용존산소 농도 (원자로 출력 30% 초과시)	5 ppb 이하	5 ppb 이하
급수 $N_2H_4$ 농도	MAX (DOx8, 20 ppb)	X (DOx8, 20 ppb)
<b>복수 용존산소 농도 (원자로 출력 5% 초과시)</b>	<b>10 ppb 이하</b>	<b>100 ppb 이하</b>



## 일본 Tsuruga-2 산소주입 사례

### ❖ Tsuruga-2

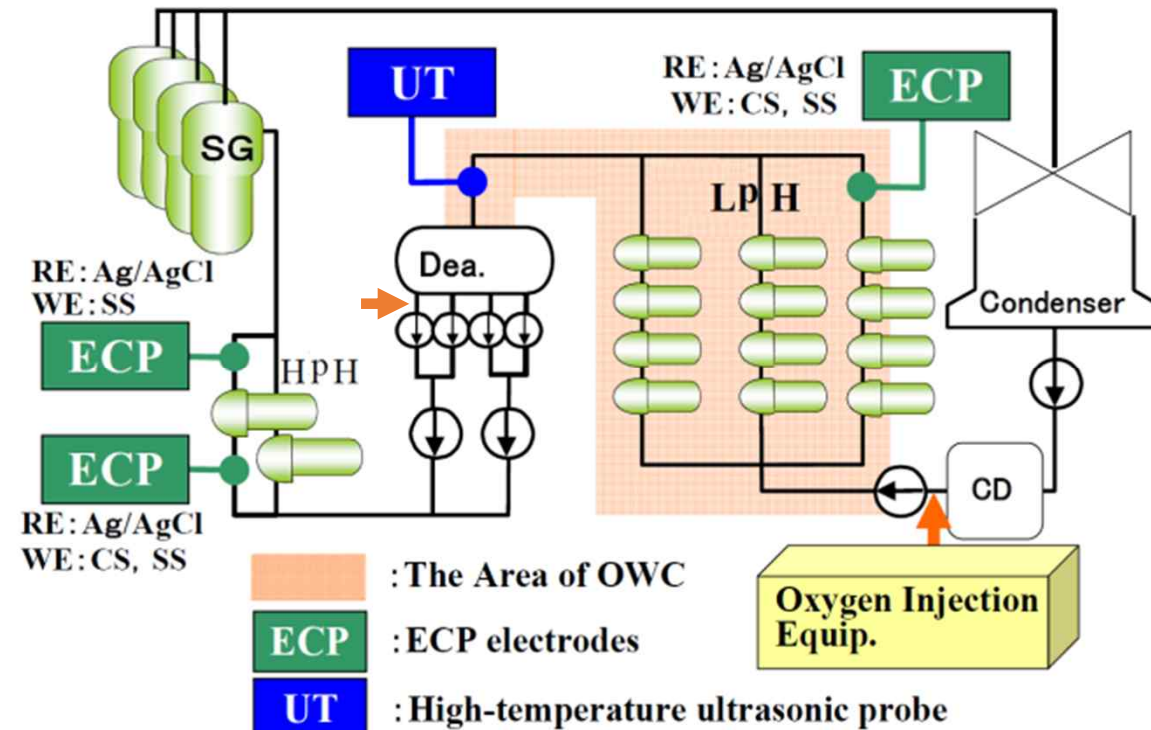
- 1,160MW PWR, JAPC, 1987년 상업운전 시작

### ❖ 2차계통 수질관리

- Low pH AVT: 전열관 부식과 열성능 저하  
⇒ High pH AVT (2005)
- High pH AVT로도 FAC 억제 미흡  
⇒ 산소 주입 추진

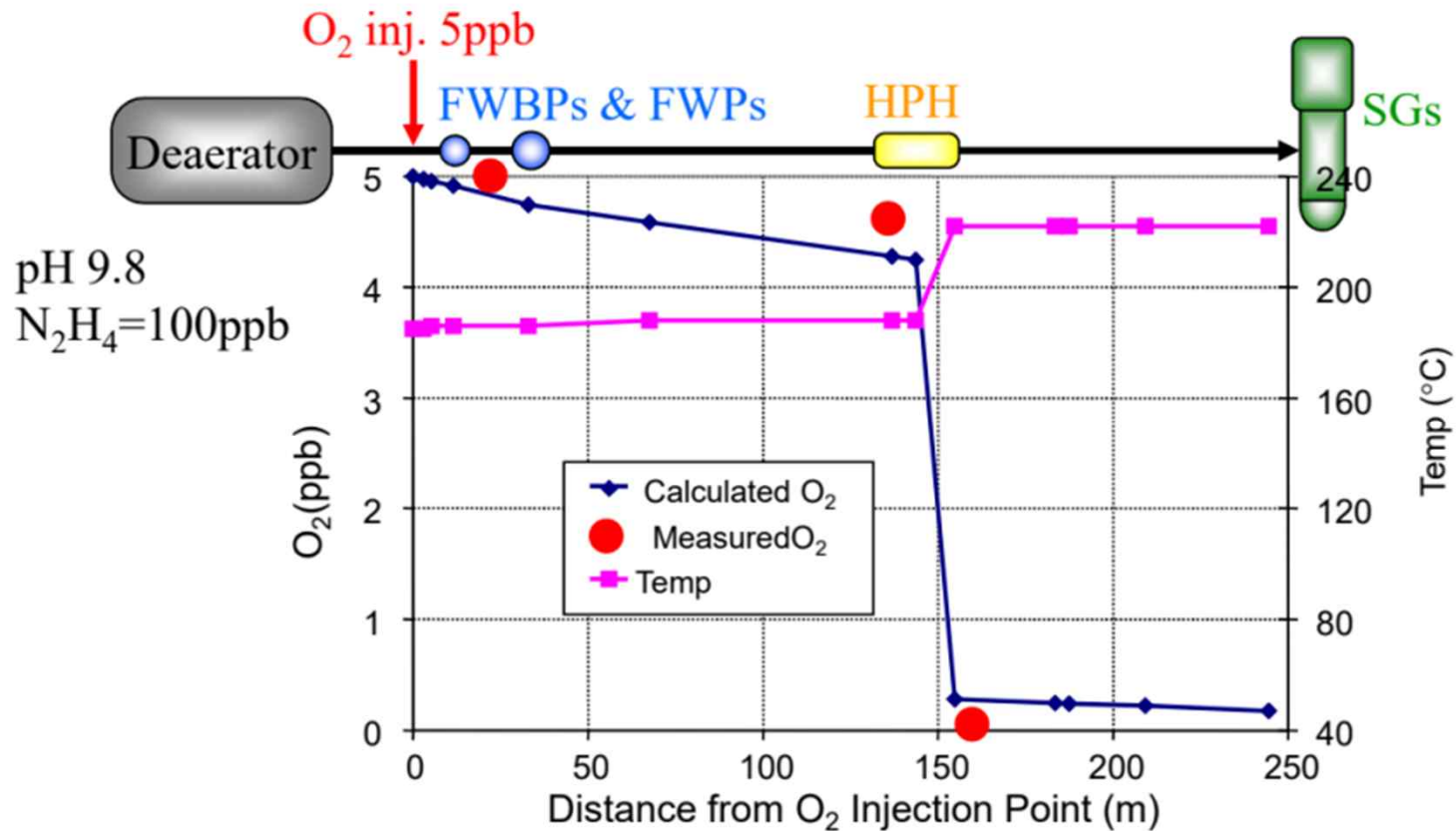
### ❖ 1차: 급수계통 산소 주입 (2007)

### ❖ 2차: 복수계통 산소 주입 (2011)



## Deaerator 후단 산소 주입

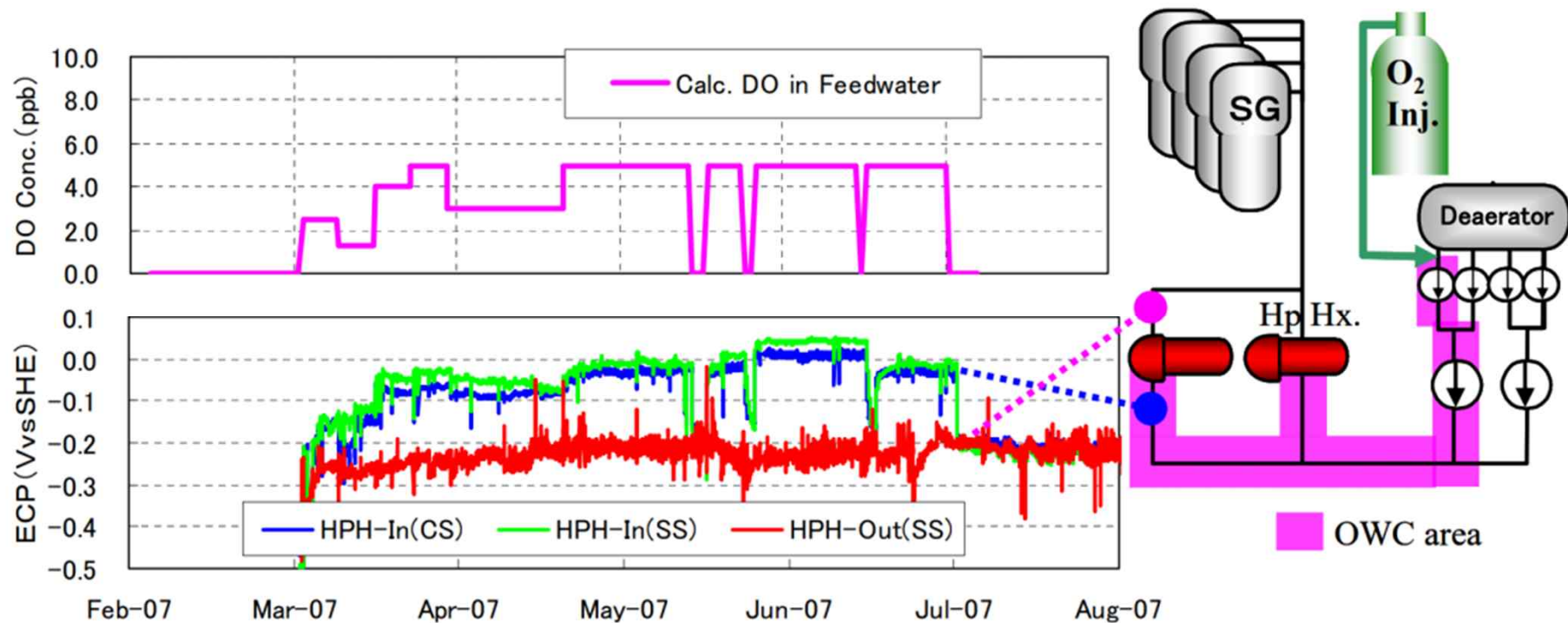
- DO는  $N_2H_4$ 만 충분하면 고압급수가열기에서 거의 전부 소멸됨
- DO는 180°C 이상에서  $N_2H_4$ 와 거의 전부 급격히 반응함
- DO는 180°C 이하에서  $N_2H_4$ 와 천천히 반응함





## Deaerator 후단 산소 주입시 ECP

- 고압급수 가열기 전후 ECP 차이 크다.
- 고압급수가열기에서 DO는  $N_2H_4$ 와 반응한다.
- HPH후단에서 실제 DO농도 측정한 것과 일치한다.

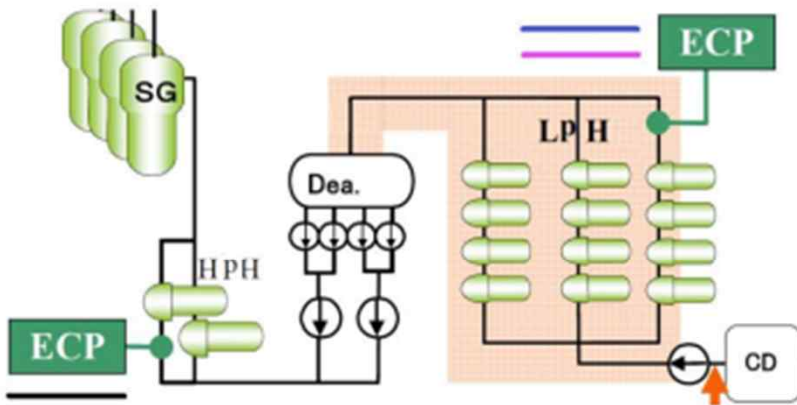


## CPP 후단 산소 주입

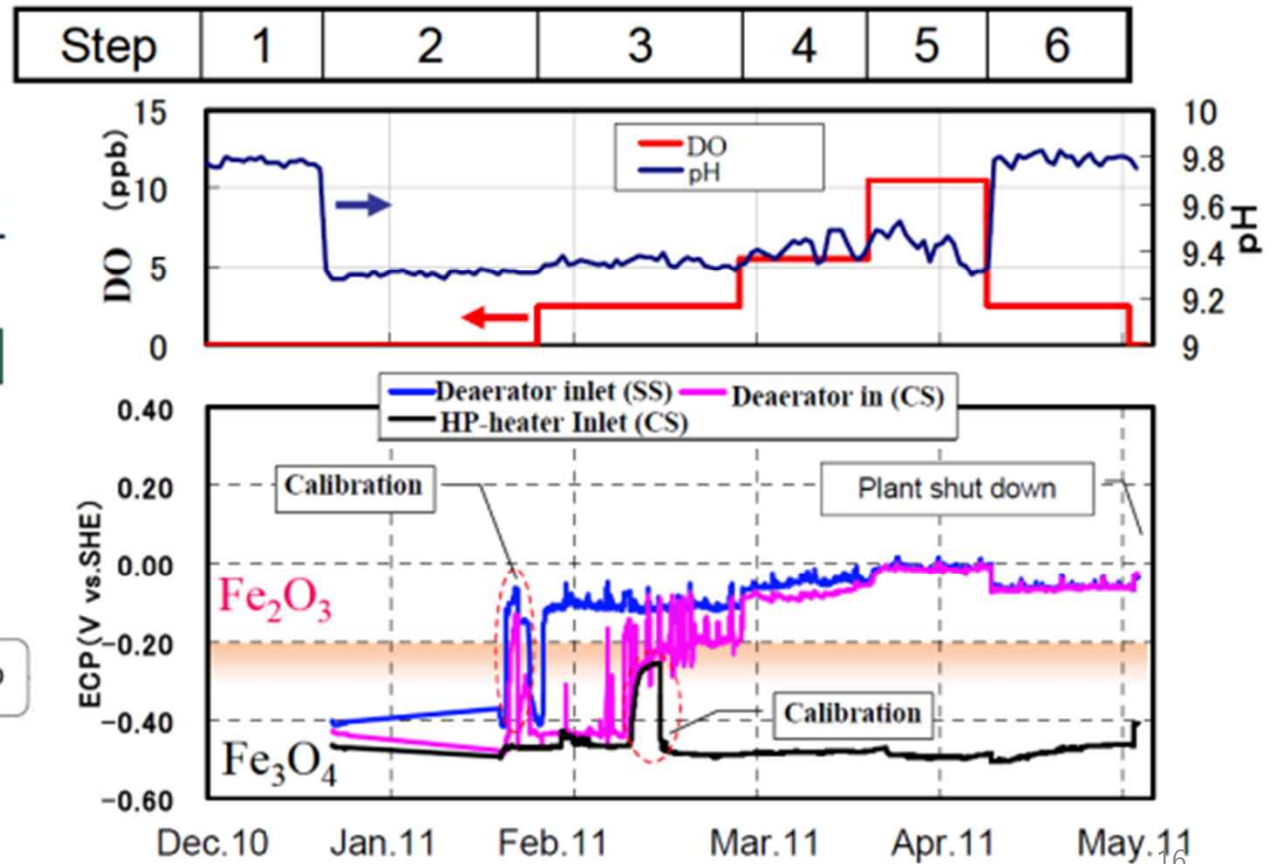
- Deaerator 전단 ECP 높음( $-0.05V_{SHE}$ ) → Hematite 생성 의미함
- HPH 전단 ECP 거의 변화 없고 낮음( $-0.47V_{SHE}$ ) → 주입산소가 HPH 전단 도달 전에 거의  $N_2H_4$ 와 반응

### ◆ HPH inlet (CS)

- ECP 안정, 산소 무관  
⇒ 주입된 산소 이미 소모



\* Calibration: 공기 포화된 물을 ECP probe 입구에 주입하여 전극을 체크





## 독일 산소주입 사례

Philippsburg 2 (KKP-2), Isar 2 (KKI-2), Biblis A/B (KWB-A/B)

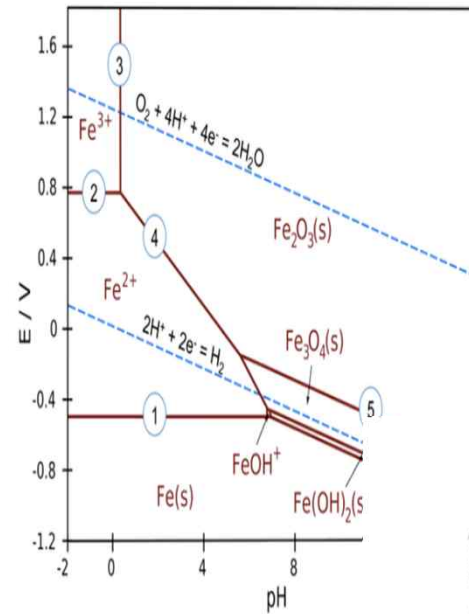
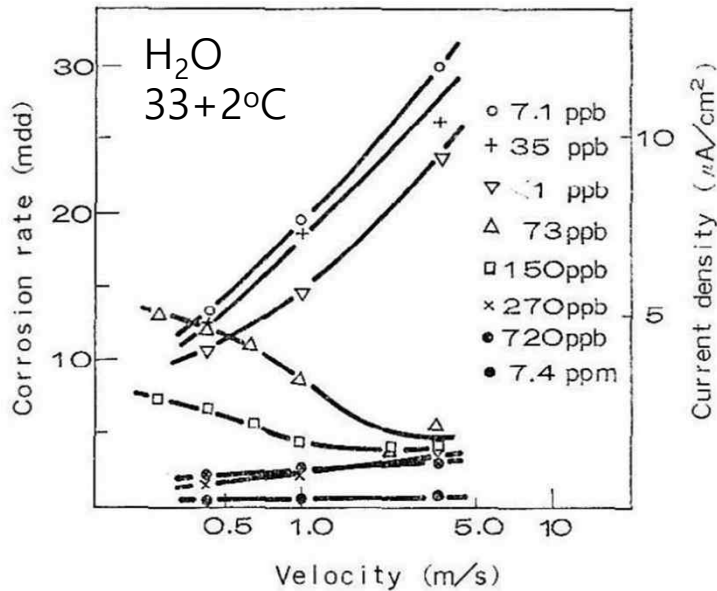
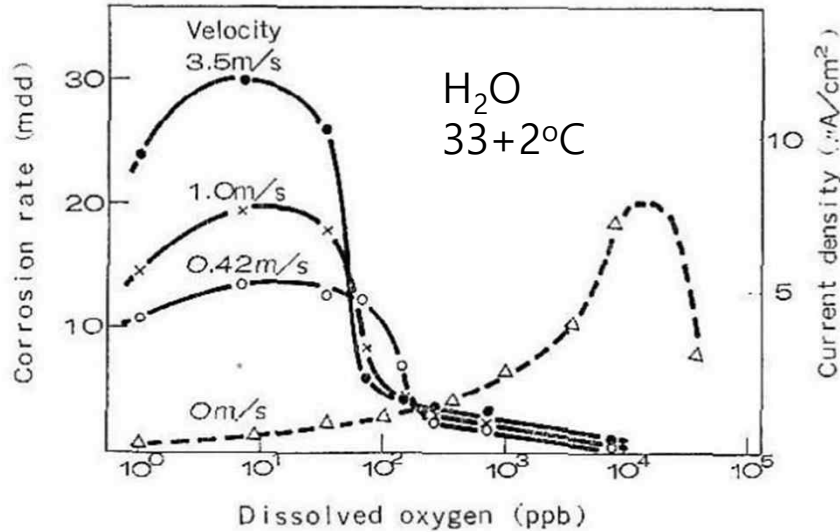
- ❖ 습분분리재열기 (MSR) 탄소강 튜브 FAC
- ❖ 암모니아 10 ppm, 급수 pH25°C 9.8 ( pH280°C 6.5) ⇒ FAC 방지 미흡
- ❖ 2-phase, MSRv튜브 표면 수막에 산소 100ppb 공급 ⇒ hematite 안정
- ❖ 급수 DO, ECP 측정
  - DO < 5 ppb
  - ECP -500 mV에서 -475 mv로 약간 증가(환원성 분위기 유지)
- ❖ 산소 주입 4주기 후 MSR 튜브 손상 정지

## 미국 산소주입 사례

1990년대 후반~, 복수 계통 (EPRI 3002018287, 2020)

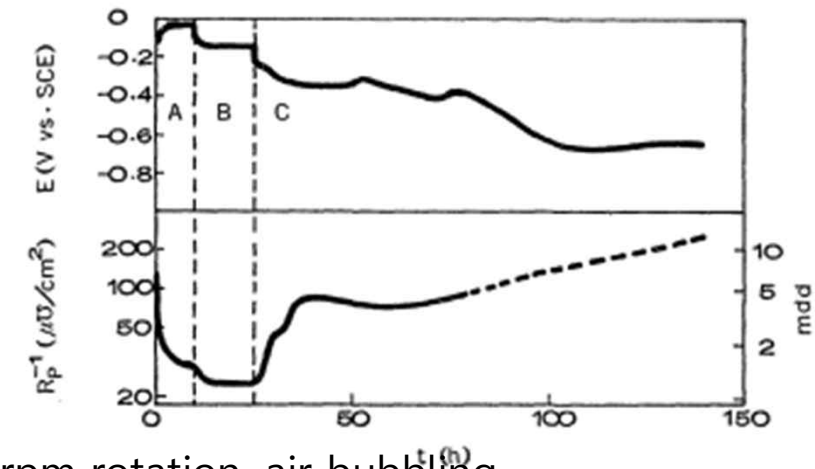
Plant	Purposed Air Addition?	CPD O <sub>2</sub> Target (ppb)	FW O <sub>2</sub> Target (ppb)
Beaver Valley	No	5-10	Unknown
Byron	No	2-4	Unknown
Calvert Cliffs	Sometimes	6-10	Unknown
Comanche Peak	No	Unknown	1-4
Millstone 2	Yes	10-12	Unknown
Palo Verde 1,2,3	No	6, 6-9, 3	Unknown
Salem 1	Yes	7-9	Unknown
Seabrook	Yes	2-6	Unknown
Sequoyah 1,2	No	5-10	Unknown
STP	No	3-9	Unknown
Surry 1,2	Yes	5-10	Unknown

# 저온(33°C) 물에서 산소 영향



$$E_{O_2/OH^-} = E_{O_2/OH^-}^{o'} + \frac{2.303 RT}{4F} \log \frac{P_{O_2}}{[OH^-]^4}$$

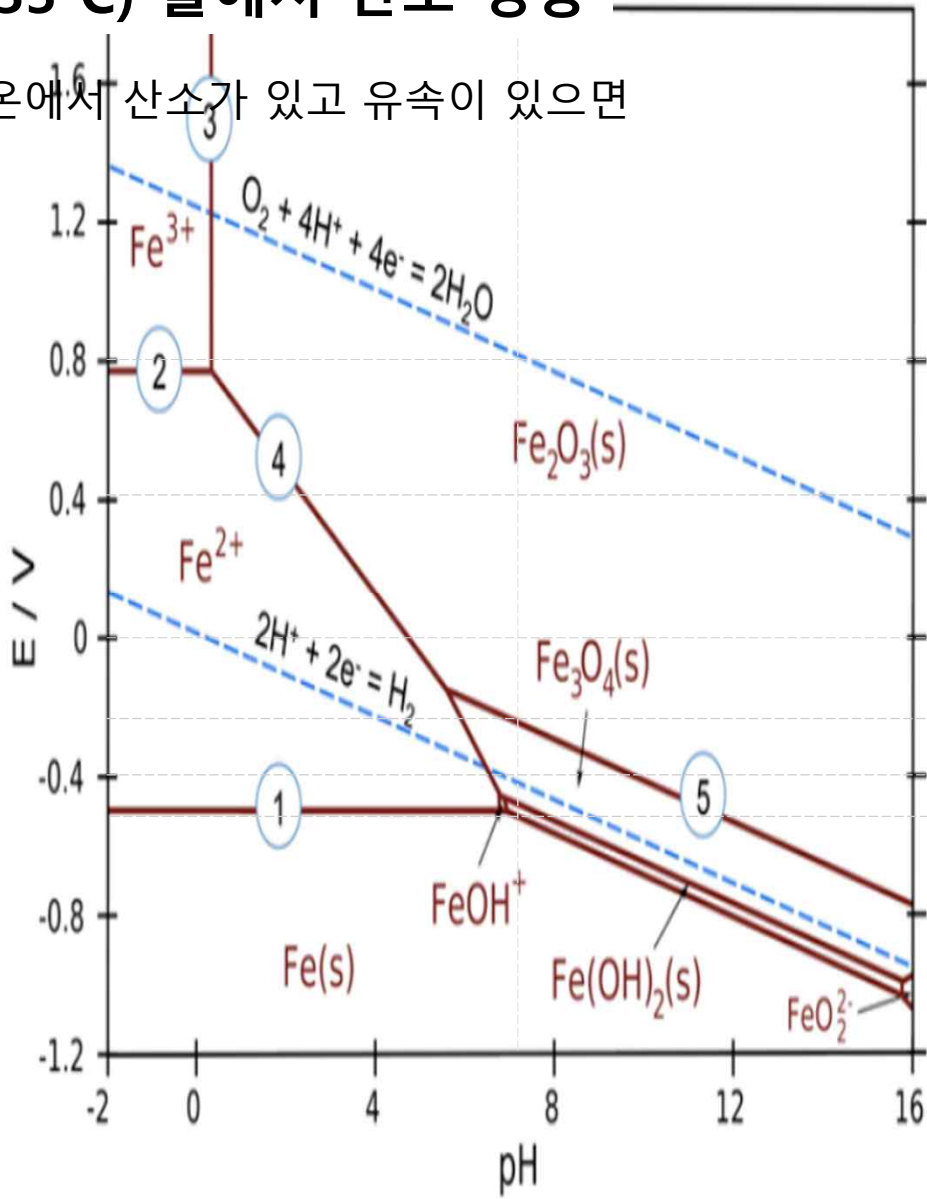
$P_{O_2}^1$ (atm)	ppb	$\Delta E$ (mV), 25°C
10 <sup>-0</sup>	8000	0
10 <sup>-1</sup>	800	-14.8
10 <sup>-2</sup>	80	-29.6
10 <sup>-3</sup>	8	-44.4
10 <sup>-4</sup>	0.8	-59.2



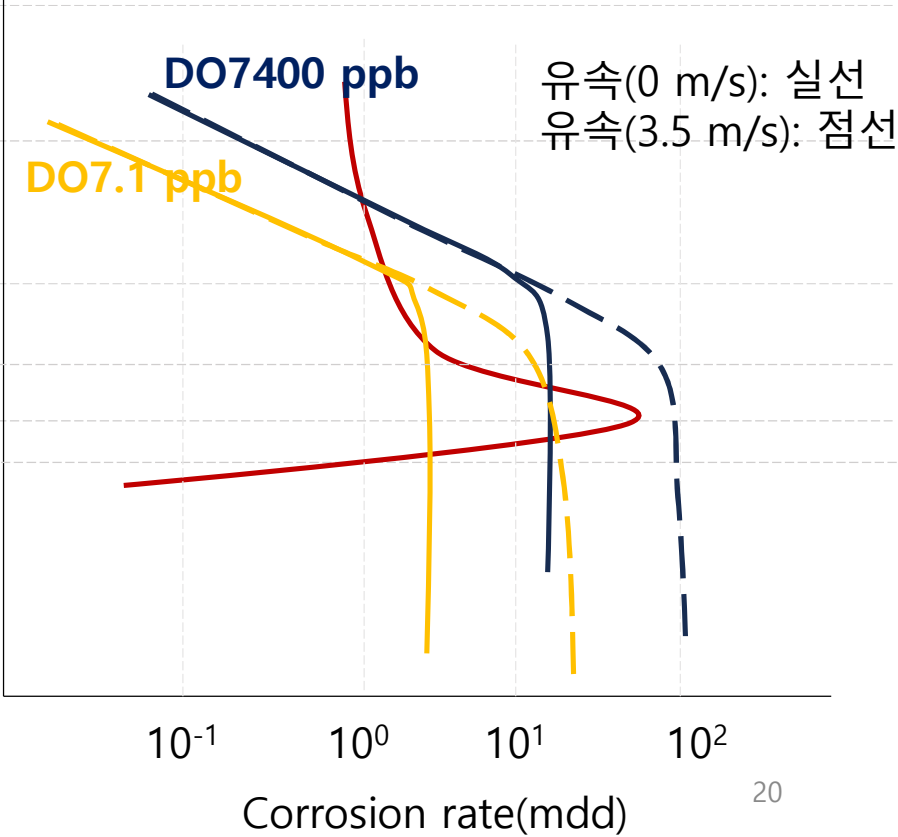
A: 1000 rpm rotation, air bubbling,  
 B: without rotation, air bubbling (one bubble/s),  
 C: without rotation, stagnant water 23.2°C.

# 저온(33°C) 물에서 산소 영향

저온에서 산소가 있고 유속이 있으면



DO(ppb)	유속(0 m/s)		유속(3.5 m/s)	
	CR(mdd)	ECP(SHE)	CR(mdd)	ECP(SHE)
7.1	2	-0.5	30	-0.35
7400	1	-0.4	20	0.2

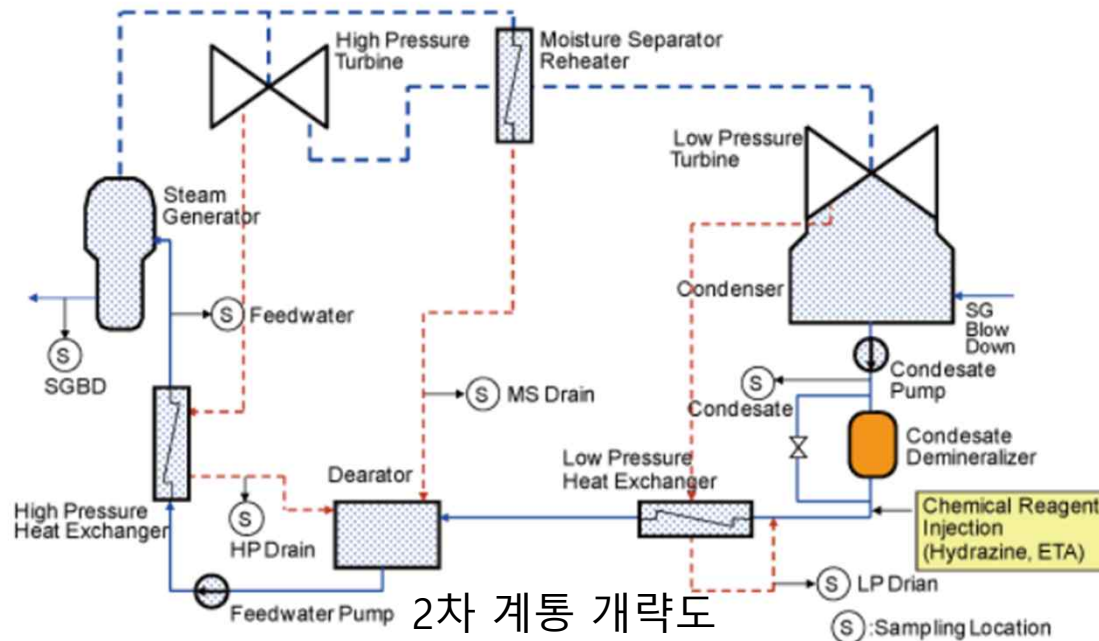


## 산소주입은 FAC/SG 이슈 완화

- 배관/용기 감육
  - 정기 검사 수행
  - 보수/교체
- 슬러지 발생
  - 증기발생기 전열관 침적 : SCC/denting 등 가속, 열전달 감소, 수위 불안정, 화학세정
  - 밸브 케이지 막힘
  - 벤츄리 파울링, 기능 상실
  - 이온교환수지 수명단축

## 산소주입운전 적용 타당성

- 앞에서 언급한 수많은 문제들이 FAC에 의해 발생되고 있다.
- 산소주입운전에서 FAC, 슬러지 저감 효과는 입증되었다.
- 산소주입운전에서 증기발생기 전열관 SCC 우려가 있지만 미국, 일본과 독일 원전에 적용사례가 있다.
- 국내 취약 증기발생기는 모두 교체되었다.
- 산소 주입운전에도 증기발생기 유입 산소농도는 EPRI 기준 적용이 가능하며, EPRI는 지침서 개정을 통해 복수 용존산소를 상향 조정하여 묵시적으로 산소주입을 권장하고 있다.



## 결 론

1. 산소는 2차 계통 수처리에 양면성이 있어 관리 대상이다.
2. 산소주입 전에 검증이 필요하다.
3. 산소주입을 검증할 국내 연구 인프라가 갖추어져 있다.

감사합니다