

## 回転円盤試験装置を用いた FAC(Flow Accelerated Corrosion)速度評価と 2次系系統鉄収支評価コードの概要

2007年10月

三菱重工業株式会社



### 背景と目的

1

- 火力、原子力発電プラントでは従来から炭素鋼材料のFACが経験されてきている。
- FACに及ぼす環境因子の影響評価は水処理、材料改善といった対応策を検討していく上で非常に重要である。
- 実機では様々な配管形状(エルボー、分岐部等々)が存在し実験室的評価に於いて、これら配管形状の流況をシミュレーションすることは困難である。
- また、上記実機環境を模擬した試験では、大量の高温、高流速水の供給が必要であり、従来大型モデルループにて実施していた。
- 本研究では、PWR2次系系統内の高流速部位でのFAC現象を再現することを目的として、回転円盤試験装置を用いた試験を実施した。
- 炭素鋼のFACの主要因子である pH、ヒドラジン濃度、材料(Cr濃度)、温度、流速について実機模擬環境下での実験室的評価を行った。

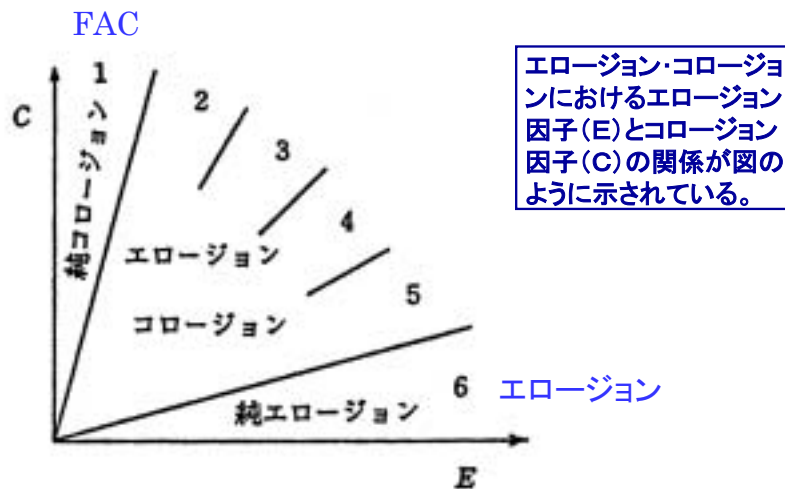


### エロージョンとコロージョンについて

- ・よく知られた海水中の銅合金のエロージョン・コロージョンの場合、流れのせん断力により皮膜剥離が生じ、その結果腐食が加速されるエロージョン・コロージョンである。
- ・それに対して、PWR原子力2次系や火力プラントの高温水中で生じる炭素鋼のFACはマグネタイト皮膜の密着力が強く、剥離ではなく溶解により生じる事象である。
- ・このように純然たる腐食事象であることを誤りなく示すため、国海外においては、本事象の呼称をFAC(Flow Accelerated Corrosion, Flow Assisted Corrosion)やFIC(Flow Induced Corrosion)のように呼んでいる。



### エロージョンとコロージョンの関係の模式図

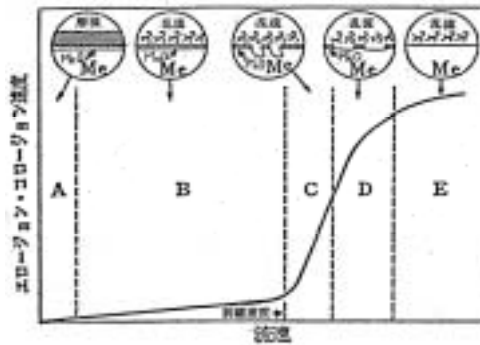


出典: "エロージョンとコロージョン-流体による材料の侵食-", 社団法人腐食防食協会編, 裳華房 (1987)



**流速とエロージョン・  
コロージョン速度の関係**

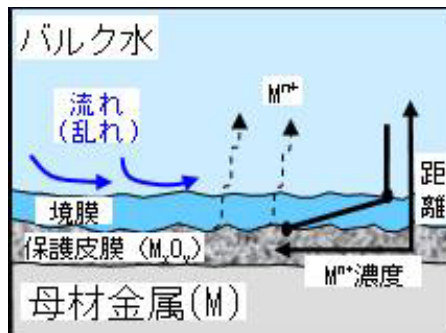
**各種金属材料の剥離速度**



銅	1.0 m/s
アルミニウム青銅	1.8
アルミニウム黄銅	2.3
10% キュプロニッケル	2.4
30% キュプロニッケル	3.6

**エロージョン・コロージョン速度は、配管内の流速に支配される。**

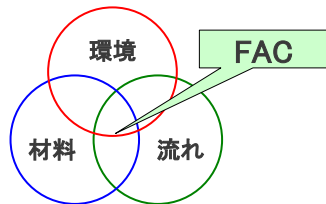
出典: "エロージョンとコロージョン-流体による材料の侵食-", 社団法人腐食防食協会編, 裳華房 (1987)



・金属材料表面の保護性酸化皮膜(脱気高温水中では炭素鋼表面にはマグネタイト $Fe_3O_4$ が生成)が、流れの乱れにより、溶解反応が加速され減肉する事象。

・母材自身が直接溶解するのではなく、表面の保護皮膜の加速溶解現象と理解されており、環境(温度、pH、酸素)、材料(Cr含有率)、流れ(流速、形状)などの影響を受ける。

・FACはFlow Accelerated Corrosionまたは Flow Assisted Corrosionの略。



## 導入：流れ加速腐食(FAC)の損傷事例と対策

6

事象発生年月	プラント名	当該部位	破損・減肉状況
1986/12	Surry 2	給水ポンプ吸込系統(18"配管エルボ)	大破断(周辺設備損壊・人災発生)
1987/06	Trojan	主給水系14"直管部(エルボから7D以上下流)	減肉(許容厚さ以下)
1988/09	Surry 2	給水ポンプ吸込系統エルボ	減肉(2.1mm/y)
1990/05	Loviisa 2	主給水系流量計オリフィス下流部直管	破断
1990/07	Millstone 3	湿分離器ドレン系統6"配管	破断
1990/07	San Onofre 3	給水制御弁バイパス管(6"配管溶接部の直下流側)	(蒸気漏洩)
1991/11	Millstone 2	湿分離器ドレンタンク～高圧給水加熱器間配管8"エルボ(制御弁、デフューザ下流)	破断
1991/11	Catawba 2	蒸気発生器給水ノズル(4"配管)	減肉(1mm/cycle)
1994/11	Sequoyah 1	#1低圧給水加熱器内14"配管	き裂(周方向減肉)
1997/04	Fort Calhoun	高圧タービン第4抽気系統(12"配管5Dエルボ)	破断(周辺設備損壊)
1999/08	Callaway	再熱ドレンタンク～高圧給水加熱器間配管	ギロチン破損

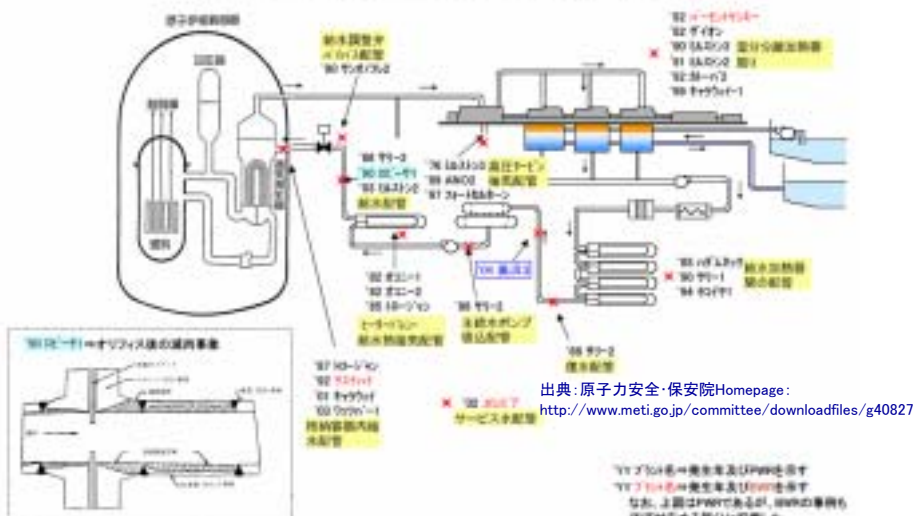
出典：NRC-Information Notice 2001-09より抜粋



## 導入：流れ加速腐食(FAC)の損傷事例と対策

7

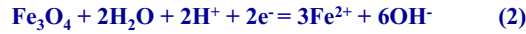
### (参考1)海外の配管減肉発生箇所



AVT高温環境下での炭素鋼の腐食は反応式(1)によって進行する。



マグネタイトと $\text{Fe}^{2+}$  イオンの平衡は反応式(2)によって与えられる。



材料表面の $\text{Fe}^{2+}$  イオンは流れによって系統水中に持ち去られることによりFACが加速される。

$$\frac{dm}{dt} = (D/\delta) \cdot (C_s - C_{\text{bulk}}) = k \cdot (C_s - C_{\text{bulk}}) \quad (3)$$

ここで、 $dm/dt$ : 腐食速度

$D$ :  $\text{Fe}^{2+}$  の拡散係数

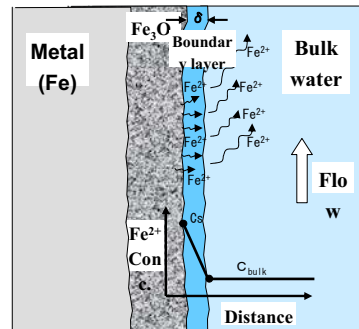
$\delta$ : 境界層の厚さ

(鉄の濃度勾配が生じる層の厚さ)

$C_s$ : マグネタイト表面の $\text{Fe}^{2+}$  濃度

$C_{\text{bulk}}$ : 系統水中の $\text{Fe}^{2+}$  濃度

$k$ : 物質拡散係数( $D/\delta$ )



試験装置(1/2)

- 試験装置は高流速条件下で水質条件を一定に保つため、ワンスルータイプとした。
- 試験供試体は高流速部位を模擬するため、回転円盤とした。
- 試験水はプレヒータで実機該当部温度まで昇温し供試部に供給した。

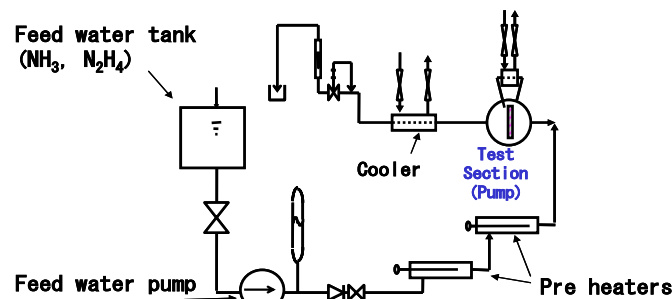
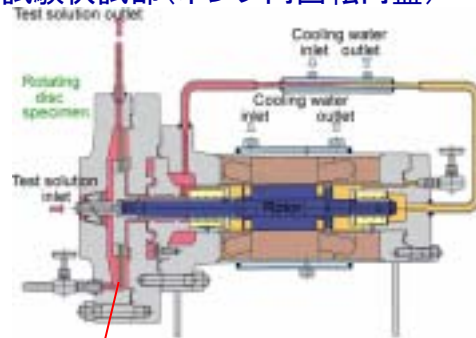
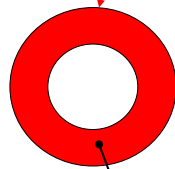


図. 試験装置概略系統

▶ 試験供試部(ポンプ内回転円盤)



・回転円盤周端流速：  
最大 45m/s



試験面

回転円盤供試体  
外径275mm

図. 試験供試部(回転円盤)



試験条件

表. 試験条件

試験供試体	炭素鋼(Cr含有率:0.02, 0.25wt%) 低合金鋼(Cr含有率:2.25wt%)
温度(°C)	70, 100, <u>150</u> , 190, 220
回転速度 (m/sec)	25, <u>35</u> , 45
pH (NH <sub>3</sub> で制御)	8.9, <u>9.2</u> , 9.5, 9.8, 10
N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	<u>0</u> , 0.05, 0.1, 0.2, 0.35, 0.5
DO <sub>2</sub> (ppm)	≤5
試験時間 (Hr)	<u>100</u>

※下線の値は本試験における標準条件



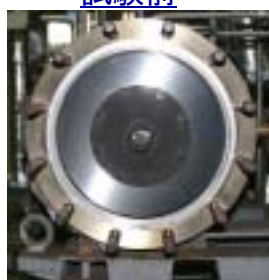
➤ FAC 速度は試験前後の回転円盤の重量減量により評価した。

$$[\text{FAC 速度}(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{hr})] = \frac{\{[\text{試験前円盤重量}] - [\text{試験後円盤重量}]\}}{\{[\text{試験時間}]\}}$$

試験部 (ポンプ)



試験前



試験後



図. 試験部の写真(回転円盤)



試験結果 – 試験時間の影響

- 炭素鋼試験片の重量減量は試験時間に対して直線的に増加している。
- 炭素鋼のFAC試験100時間で実施した。
- 低合金鋼の重量減量は非常に小さい。従って、低合金鋼のFAC試験は500時間で実施した。

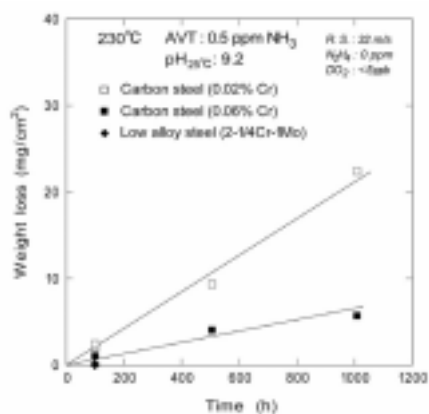


図. 試験時間の影響



## 試験結果 – 回転速度(流速)の影響

14

➤ FAC速度は円盤の回転速度(流速)の増加に伴って増加する。

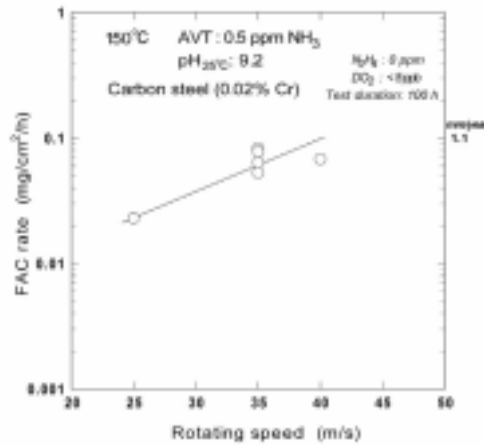


図. FAC速度に及ぼす流速の影響



## 試験結果 – 温度の影響

15

➤ 炭素鋼のFAC速度は150°C付近で最大となる。これは、鉄の溶解度と同様の傾向である。

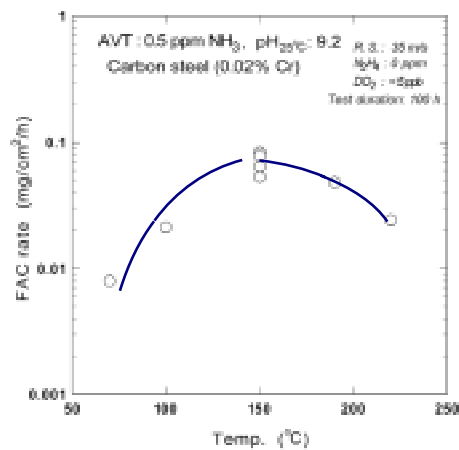


図. FAC速度に及ぼす温度の影響





- FAC速度はpHの上昇に伴って減少する。特にpH9.5以上でその傾向は顕著となる。
- 低合金鋼のFAC速度は炭素鋼の1/10~1/20と小さい。
- 低合金鋼のFAC速度は小さいため、pHとの関係は明確ではない。

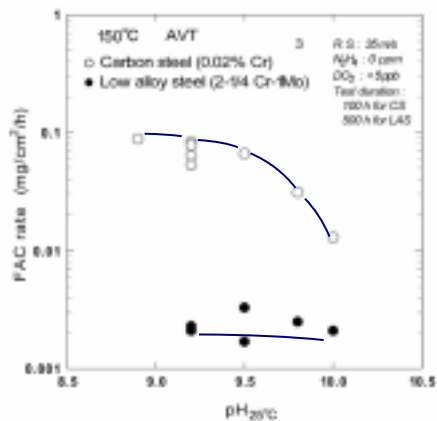


図. FAC速度に及ぼすpHと材料の影響



- 同一pH条件下でFAC速度はN<sub>2</sub>H<sub>4</sub>濃度1ppm以下で変化はない。

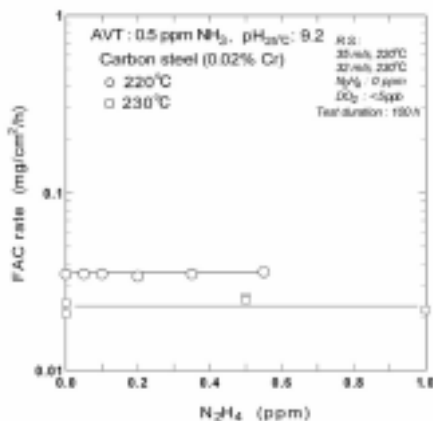


図. FAC速度に及ぼすN<sub>2</sub>H<sub>4</sub>の影響



試験結果 - 材料のCr含有率の影響

- ▶ Cr含有率2.25%の低合金鋼のFAC速度は、Cr含有率0.02%の炭素鋼の1/20~1/50である。
- ▶ 炭素鋼中の若干のCr含有率の変化はFAC速度に大きな影響を及ぼす。

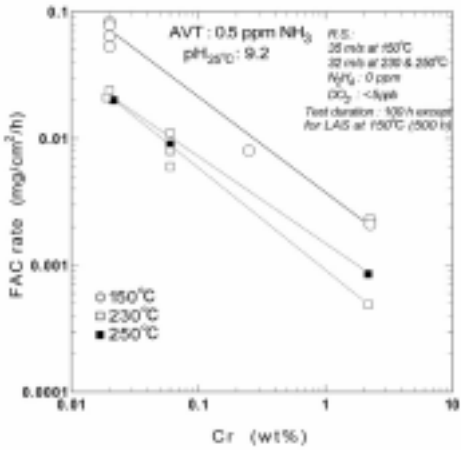
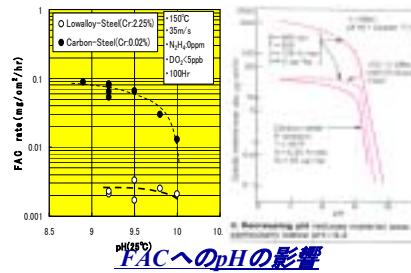


図. FAC速度に及ぼすCr含有率の影響

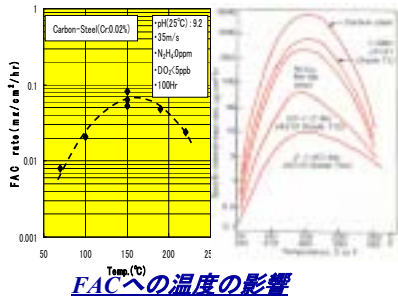


FAC評価への回転円盤試験装置適用妥当性

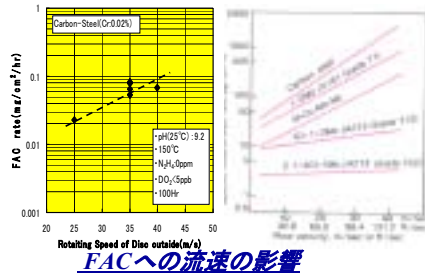
- ▶ 回転円盤試験装置を用いた実験室で実施したFAC試験結果は大型ループで実施した公開のデータと良い一致を示している。
- ▶ 従って、回転円盤試験装置を用いた本試験は、簡易的にかつ的確に有効なデータを得ることが可能である。



FACへのpHの影響



FACへの温度の影響



FACへの流速の影響



➤ 2次系系統における鉄低減効果を評価するため、「鉄分布評価コード」を開発した。

➤ 本評価コードに於いて本実験結果は最も重要なデータを供給している。

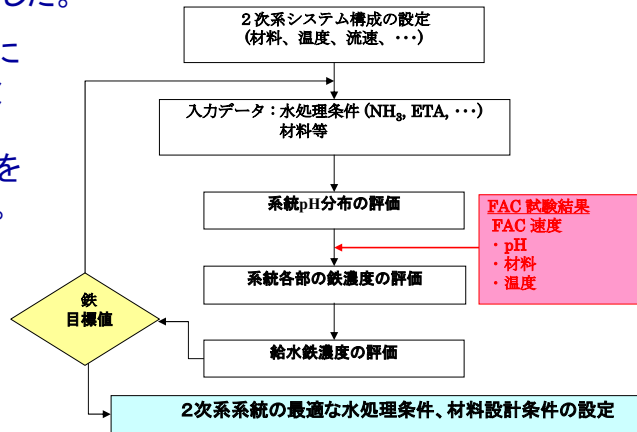


図 2次系鉄分布評価コードのフローチャート

➤ 2次系鉄分布評価コードで評価した系統各部の鉄濃度は、AVT環境下での実機鉄濃度計測結果と良い一致を示している。

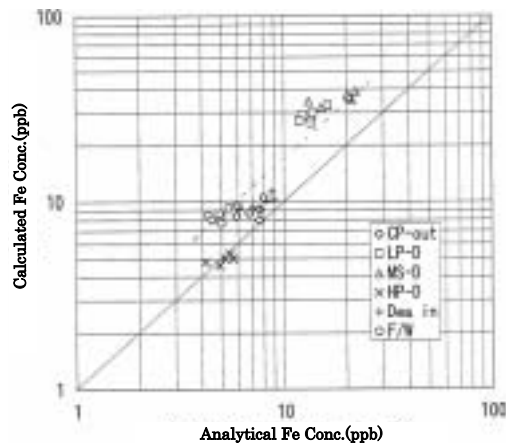


図 実機鉄濃度計測実績と計算コードによる評価値の比較

- 水処理条件変更時の給水鉄濃度評価結果は、実機実績と良い一致を示している。
- 本評価コードは、給水処理条件及び材料改善時の給水鉄濃度低減効果を十分に評価可能である。

表 各水処理条件適用時給水鉄濃度評価結果:単位(ppb)

項目	従来AVT	ETA処理	高pH処理	
			NH <sub>3</sub>	ETA
計算結果	4.8	2.1	0.6	1.0
実機実績	4~6	2~3	0.5~1	



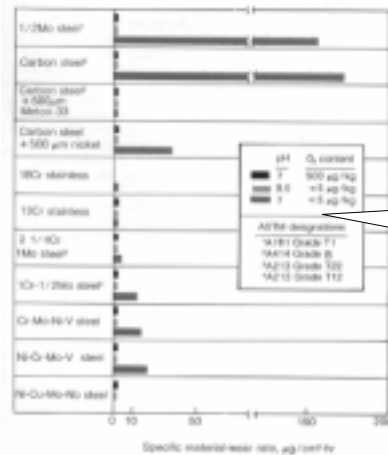
### 今後の検討課題

- FAC速度の低減対策として、pHの上昇以外に「材料の変更」並びに「溶存酸素の増加」がある。
- 材料の変更については、FACが顕著である部分への確に対策を施す必要があり、変更対象部位を確実に評価する必要がある。
- 溶存酸素の増加については、PWRプラントSG2次側では局部的に不純物が濃縮する場所が存在するため、当該部での不純物の濃縮と酸素の共存によって発生、加速される割れ、ピittingといった局部腐食防止のため、SGへの酸素持込防止を厳密に管理する必要がある。
- 従って、今後FAC抑制対策はプラント材料、構成を考慮した上で、水処理改善、材料変更等の効果を総合的に評価し、適正化していくことが必要である。



FAC速度に対する材料の影響

- 中性、脱酸素条件下での炭素鋼のFAC速度は大きく、低合金鋼、ステンレス鋼のFACに比べ桁違いに大きい。
- 特にステンレス鋼(18Cr Stainless)のFAC速度は非常に小さい。



○温度: 180°C  
 ○pH: 7, 9.5  
 ○溶存酸素: <math>< 5 \text{ppb}</math>, 500ppb  
 ○流速: 20 m/s

上段: pH7 酸素あり  
 中段: pH9.5 脱気(DO<sub>2</sub> <math>< 5 \text{ppb}</math>)  
 下段: pH7 脱気(DO<sub>2</sub> <math>< 5 \text{ppb}</math>)

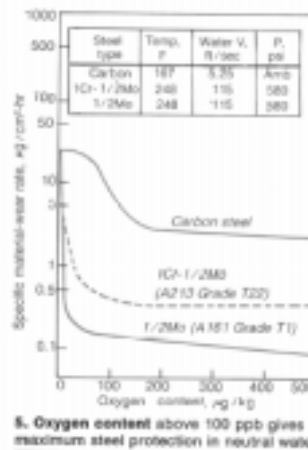
Fig. 1. Wear rate of various materials from erosion/corrosion in 356F water moving at 65.5 ft/sec, 580 psig, is shown for three typical pH/oxygen combinations

O.Jonas, "Control Erosion/Corrosion of Steels in Wet Steam", Power, March, p102(1985)



FAC速度に及ぼす溶存酸素の影響

- FAC速度は溶存酸素濃度に影響され、溶存酸素濃度が高くなるとFAC速度が減少。
- 溶存酸素濃度が高い時に炭素鋼表面に形成される鉄酸化物は、ヘマタイト(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)が安定な環境となる。ヘマタイトは溶解度が3価の鉄であり溶解度が小さいことから液中への鉄溶出速度が小さくFAC速度が小さくなる。



「炭素鋼」  
 ○温度: 75°C  
 ○pH: 7  
 ○溶存酸素: 0~500ppb  
 ○流速: 1.6 m/s

「0.5%Mo鋼  
 -1Cr-0.5Mo鋼」  
 ○温度: 120°C  
 ○pH: 7  
 ○溶存酸素: 0~500ppb  
 ○流速: 35 m/s

Fig. 1. Oxygen content above 100 ppb gives maximum steel protection in neutral water

O.Jonas, "Control Erosion/Corrosion of Steels in Wet Steam", Power, March, p102(1985)



- FAC速度に対する影響パラメータの評価を目的として、回転円盤試験装置の適用を試みた。
- FAC速度に対する影響パラメータ評価結果は、大型ループを用いて実施した試験結果と良い一致を示している。
- 回転円盤試験はFACに及ぼす影響パラメータの評価を簡便に実施可能である。
- FAC速度はpH、Cr濃度の増加によって減少し、回転円盤の回転速度(流速)の上昇によって増加する。
- FAC速度は温度150°C付近で最大となる。
- FAC速度は一定pH条件下でヒドラジン濃度0.6ppm以下では変化はない。



- FAC速度はマグネタイトの溶解度に強く依存する。
- FAC試験結果に基づいて2次系鉄分布評価コードを構築した。
- 本評価コードは水処理条件、材料変更時の実機2次系給水鉄濃度の評価に適用可能である。

