

連成解析による気液二相流中構造物の振動・腐食評価手法の開発- 5

電気化学モデルと二層酸化皮膜モデルを連成させた配管減肉速度評価

Development of Evaluation Method on Flow-induced Vibration and Corrosion of Components in Two-phase Flow by Coupled Analysis -5

Evaluation of Wall Thinning Rate with the Coupled Model of Static Electrochemical Analysis and Dynamic Double Oxide Layer Analysis

エネルギー総合工学研究所	内田俊介	Shunsuke UCHIDA	Non-member
エネルギー総合工学研究所	内藤正則	Masanori NAITOH	Non-member
エネルギー総合工学研究所	岡田英俊	Hidetoshi OKADA	Non-member
エネルギー総合工学研究所	上原 靖	Yasushi UEHARA	Non-member

Wall thinning rates due to FAC were calculated with the coupled model of static electrochemical analysis and dynamic double oxide layer analysis at the identified danger zone. Anodic and cathodic current densities and ECPs were calculated with the static electrochemistry model and ferrous ion release rate determined by the anodic current density was used as input for the dynamic double oxide layer model. Thickness of oxide film and its characteristics determined by the dynamic double oxide layer model were used for the electrochemistry model to determine the resistances of cathodic current from the bulk to the surface and anodic current from the surface to the bulk. Two models were coupled to determine local corrosion rate and ECP for various corrosive conditions. The calculated results of the coupled models had good agreement with the measured ones.

Keywords: flow accelerated corrosion, corrosive conditions, mass transfer coefficient, oxygen, electrochemical corrosion potential, hydrazine

1. 緒言

炭素鋼あるいは低合金鋼の腐食、溶解に伴い表面に酸化皮膜が発達する。この酸化皮膜は材料の更なる溶解に対して保護作用を示す。配管内の流速が増大すると溶解した第1鉄イオン (Fe^{2+} イオン) がバルク水中に移行し、皮膜成長が阻害され、溶解・減肉が加速される。皮膜の成長と溶解を、腐食電位を指標に定量化し、実機での腐食環境測定とリンクした減肉速度解析を目指した。

2. 減肉速度評価手法

本モデル (Figure 1) では、流動解析で得た表面境界層/バルク領域間の質量移行係数および酸素濃度、pH

連絡先：内田俊介 〒103-0003 東京都港区西新橋1-14-2 新橋SYビル8階, (財)エネルギー総合工学研究所, 電話03-3508-8894, suchida@iae.or.jp

などの水質条件を入力として、まず静的な電気化学モデルで構造材からの Fe^{2+} イオンの溶解速度を求め、これを入力として動的な二層酸化皮膜モデル [1] で、酸化皮膜の厚さ、特性 (マグネタイト・ヘマタイト比) を求め、これに基づいて皮膜の腐食抵抗を求め、これを電気化学モデルに適用する。この計算を繰り返して減肉速度の時間変化を求める [1]。

金属 (炭素鋼) 表面では、金属の溶解反応 (アノード反応) は、酸化種の還元反応 (カソード反応) とバランスし、実効電流がゼロとなるようなポテンシャルを示す。Figure 2 に示す、アノード電流とカソード電流をそれぞれ計算して、溶解速度を求める。Figure 2 の電気化学バランスは、金属表面の酸化皮膜の厚さとその性状 (ポロシティやイオン透過性) が与えられると一意に決まる。すなわち、静的なバランスである。金属の溶解が進むにつれ、溶解した金属が酸化物となって金属表面に析出する。酸化皮膜の厚さは時間依存であり、溶解速度、表面境界層からバルク水への質量

Table 1 Evaluation code system for FAC

Calculation targets	Flow pattern	[O ₂], [Fe ²⁺]	Wall thinning rate and ECP (anodic/cathodic current density)	(oxide film formation)
Input	Reactor parameters: geometries, heat flux (Q), temperature (T)	Reactor parameters: T, flow velocity (v), surface/volume rate, mixing rate	[O ₂], T, pH, k _m , oxide film thickness, oxide properties	i _{corr} , ECP
Computer programs	1D CFD (RELAP5) 2-3D k-ε CFD (PLASHY, α-FLOW) 3D LES	N ₂ H ₄ -O ₂ reaction code (RADIOLYSIS -N2H4)	Static model (Electrochemistry)	Dynamic model (Oxide layer growth)
Output	T, v distributions along the flow path along the flow path	[O ₂] and [Fe ²⁺] distributions	i _{corr} , ECP wall thinning rate	oxide film thickness oxide properties (Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ ratio)

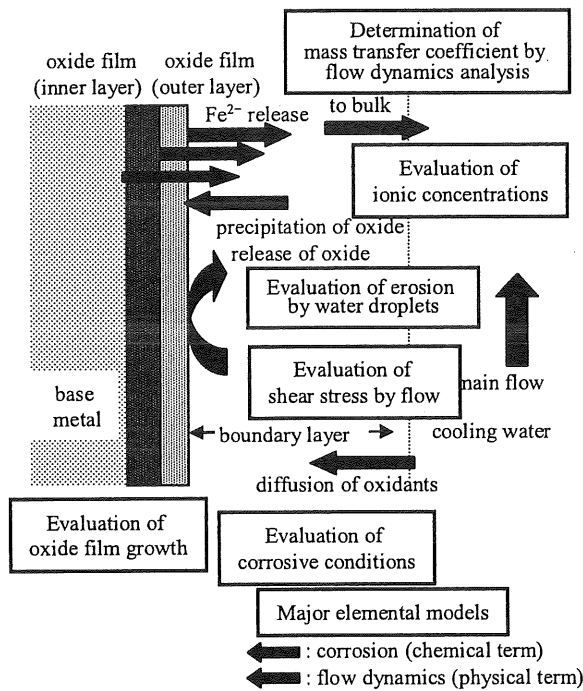


Figure 1 Elemental models to evaluate FAC

移行係数（流速に依存する）によって決まる。すなわち動的なバランスである。

FACによる減肉速度評価では、静的な電気化学モデルと動的な二層酸化皮膜モデルを連成させ、前者では溶解速度を、後者では酸化皮膜厚さを求めて、時々刻々変化する減肉速度を求める[2]。

両モデルの連成を Table 1 に示す。また両モデルに入力条件を与える流動解析モデルとの関連も Table 1 に示した。

2.1 電気化学モデル

金属表面での電荷バランスを Figure 2b)に示す。酸素濃度が低い場合、溶解速度が大きいですが、酸化皮膜は主

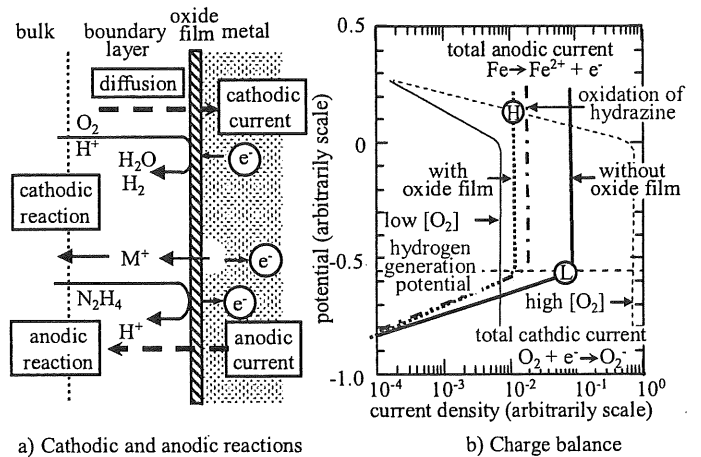


Figure 2 Schematic diagram of charge balance at surface

としてマグネタイトとなり、母材保護性は大きくないため、アノード電流は高い状態を保つが、酸素濃度が高くなり、酸化物がマグネタイトからヘマタイトに変わると共に、母材保護性が高まり、アノード電流が低下する。腐食電位で見ると、酸素濃度が低い場合は、電位は低く、酸素濃度が高くなり、腐食抑制が進むと共に、電位も増大する。

2.2 二層酸化皮膜形成モデル

ステンレス鋼の腐食に伴い形成される酸化皮膜の特性を評価するために開発された二層酸化皮膜モデルを炭素鋼用に改良した。モデルの概要を Figure 3 に示す。母材からの溶解速度は電気化学モデルで求め、これを入力として、表面境界層内での Fe²⁺イオンのバランスを計算する。境界層からバルク水への質量移行（流速に依存する）、過飽和分を酸化物としての析出、その表面への付着、イオンの感化物への吸着、酸化物の剥離、酸化物からの溶解などさまざまなプロセスを経て、イ

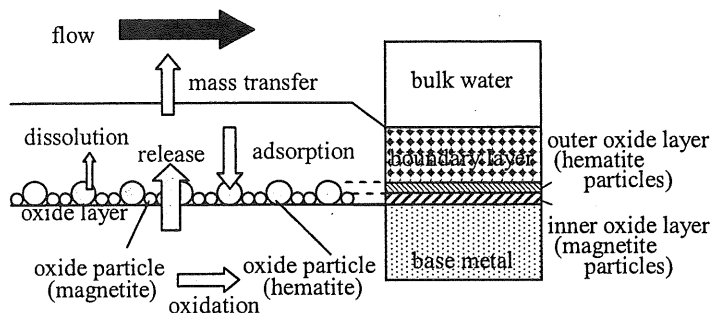


Figure 3 Modified double oxide layer model

オンの溶出を皮膜掲載がバランスする。これらを非線形レイト方程式として、数値解析することで、酸化皮膜の厚さを求める[2]。

2.3 連成解析

静的電気化学モデルと動的二層酸化皮膜モデルはタイムメッシュ毎に連成させ、前者から得られた溶解速度を後者の入力として、皮膜厚さとその性状（主としてマグネタイト・ヘマタイト比）を求め、これらを次タイムステップの静的電気化学モデルの入力として溶解速度を求める。

3. 評価結果

評価結果の一例として、求められた減肉速度の流速（質量移行係数）、温度、pH依存性をFigure 4に示す。計算結果は実測値と比較して妥当な精度を有するものとする。

4. 結言

腐食環境、流動条件の計算に引き続き、減肉速度評価モデルをまとめた。様々な環境条件下で、減肉速度の時間変化、環境変化が定量化できるため、残存肉厚の予測のほか、減肉抑制策の有効性の定量的な評価に適用可能である。

謝辞

本発表は経済産業省の提案公募事業「革新的実用原子力技術開発費補助事業」“連成解析による気液二相流中構造部品の振動・腐食評価手法の開発”において開発した平成19年度成果の一部である。

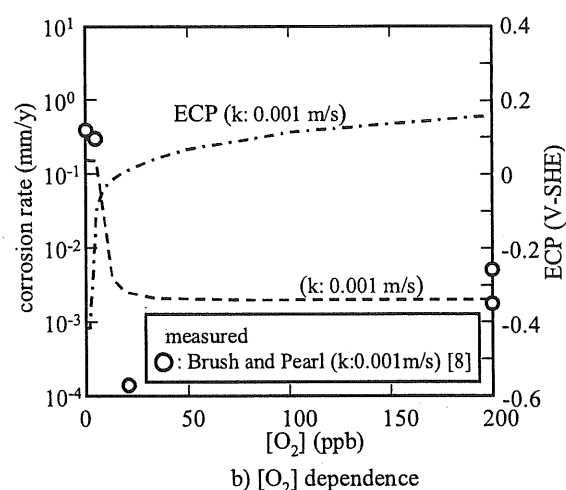
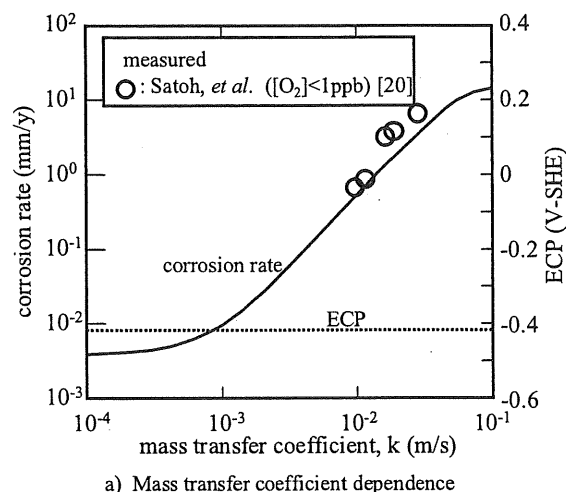


Figure 4 Results of wall thinning calculation (pH: 7)

参考文献

- [1] S. Uchida, M. Naitoh, Y. Uehara, H. Okada, K. Hotta, R. Ichikawa and S. Koshizuka, "Evaluation Method of Corrosive Conditions in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Combined Analyses of Flow Dynamics and Corrosion", *Power Plant Chemistry*, 9, 143 (2007)
- [2] S. Uchida, M. Naitoh, Y. Uehara, H. Okada, S. Koshizuka and D. H. Lister, "Evaluation Methods for Flow Accelerated Corrosion in Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics", *Proc. Int. Conf. on Flow Accelerated Corrosion 2008*, EDF, Lyon, France, Mar. 18-20 (2008) (DVD)