

流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響 —腐食速度の流速依存性—

Effects of Local Flow Field on Flow Accelerated Corrosion —Effect of Flow Velocity on Corrosion Rate—

長屋 行則 (Yukinori Nagaya)*¹ 中村 晶 (Akira Nakamura)*¹
村瀬 道雄 (Michio Murase)*¹ 歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara)*¹

要約 流れ加速型腐食 (Flow Accelerated Corrosion : FAC) は、プラントの経年劣化の重要課題のひとつである。この研究では、FACによる配管の腐食速度に対する流れ場の影響を求めめるため、オリフィス下流を対象に、電気抵抗法を用いた腐食速度測定を行った。測定には、高温高圧実験ループを用い、試験部は配管内径50mm、オリフィスには内径24.3mmのものを使用し、オリフィス絞り比を約0.5とした。水温は $150 \pm 1^\circ\text{C}$ 以内に制御した。FACに及ぼす流速の影響を評価するために、流速条件の異なる腐食速度測定として、期間の途中で流速を1.4から5.0m/sに変更した測定と、2.1から3.5m/sに変更した測定の2通りの条件にて腐食速度測定を実施した。それらの結果、オリフィス下流における腐食速度は流速が増加することによって顕著に増加した。しかしながら、オリフィス上流の腐食速度の変化は、流速が増加してもほとんど変化しなかった。このことは、オリフィス下流と上流では、腐食速度に及ぼす流速の影響が異なる可能性がある。また、オリフィス下流の最大腐食速度については、レイノルズ数 $Re = 3.5 \times 10^5 \sim 1.3 \times 10^6$ の範囲で $Re^{0.82}$ に比例する結果となったが、水質のわずかな違いやセンサ表面の初期状態の違いが腐食速度に影響している可能性があり、今後それらの影響について評価する必要がある。オリフィス下流の腐食速度について、流速をもとに定義するパラメータによって評価できる可能性があることを確認した。

キーワード 流れ加速型腐食, オリフィス, 腐食速度, 電気抵抗法

Abstract Flow accelerated corrosion (FAC) is one of important issues for aging of nuclear power plants. In this study, in order to evaluate the effects of flow field on corrosion rate due to FAC, corrosion rates downstream of an orifice were measured using an electric resistance method. In these experiments, a test loop under high temperature and high pressure conditions was used. The pipe inner diameter was 50 mm and the ratio of orifice diameter which was 24.3 mm to the pipe diameter was about 0.5. The water temperature was controlled at 150 within ± 1 deg-C. To evaluate the effect of flow velocity on FAC rate, we carried out two series of measurements. During each period of measurements, we changed the flow velocity from 1.4 to 5.0 m/s, or from 2.1 to 3.5 m/s. In these results, FAC rates downstream of the orifice increased remarkably by increasing the flow velocity, while the changes of FAC rates upstream were little. The results show a possibility that the effect of flow velocity on FAC rate in the upstream of the orifice is different from that in the downstream. It turned out that the maximum FAC rate downstream of the orifice is proportional to $Re^{0.82}$ in the range of Reynolds number, $Re = 3.5 \times 10^5 - 1.3 \times 10^6$. However these measurement results might be different on the little difference of water quality or the difference of initial conditions of sensor surface, therefore we have to evaluate these effects in the future. We confirmed that FAC rates downstream of the orifice can possibly be evaluated by the parameter based on the flow velocity.

Keywords Flow accelerated corrosion, Orifice, Corrosion rate, Electric resistance method

1. はじめに

流れ加速型腐食 (Flow Accelerated Corrosion : FAC) は、火力、原子力、化学プラントにおける配

管減肉の一要因として知られている。日本機械学会は2005年に「発電用設備規格配管減肉管理に関する規格」⁽¹⁾を制定し、FACと液滴衝撃エロージョンによる配管減肉に対して、民間規格として統一した管

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

理方法を定めた。FACによる腐食速度は、環境（温度、pH、溶存酸素量などの水質）、材料（炭素鋼のクロムなどの含有量）、流れ（配管形状、流速）などの種々な因子によって影響される。

FACのメカニズムは、金属表面に形成された酸化皮膜の溶解と、流れによる鉄イオンの拡散によるという説が一般的である⁽¹⁾。これまで、FACの腐食速度に対する、温度⁽²⁾⁽³⁾、pH⁽⁴⁾、溶存酸素量⁽⁵⁾⁽⁶⁾、流速⁽³⁾などの影響が報告されている。Keller⁽²⁾は、弁などの配管要素がFACに及ぼす影響について報告した。腐食メカニズムのモデルと評価式^{(7)~(10)}がいくつか提案され、EPRIで開発されたCHECWORKS⁽¹¹⁾、EDFで開発されたBTR-CICERO⁽¹²⁾などが海外で評価に用いられている。

プラントの系統の中で減肉の起こりやすい部位としては、配管の流路断面積を変化させるような弁、オリフィス、レデューサ、デフューザが挙げられ、また流れの方向を変化させるようなエルボ、ベント、分岐、合流管が挙げられる。これらの配管要素による流れの変化は、その下流にある直管や弁、エルボといった同様の部位における腐食速度にも影響を与えたと考えられる。しかし、この影響度合いを定量化することを試みた文献は、Keller⁽²⁾以外はほとんど見当たらない。

著者らは、配管要素およびその組み合わせにより発生する局所的な流れの偏り等について数値解析により再現するとともに、配管要素を模擬した試験で測定した局所的な腐食速度データをもとに、流れ場と腐食速度との関係について検討を進めている^{(13)~(16)}。腐食速度の測定については、オリフィス下流の腐食速度測定結果^{(14)~(16)}を報告した。今回、腐食速度に及ぼす流れ場の影響を確認するために、オリフィス下流を対象に管断面平均流速をパラメータとした腐食速度測定を実施した。本報告では、オリフィス下流の腐食速度の流速依存性について報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

図1に実験装置の概要を示す。実験装置は、温水タンク・試験体・循環ポンプ・配管で構成される流動ループと、窒素加压装置、水質調整系、水質測定系で構成される。

温水タンクは、温度200℃、圧力は2MPaまで使

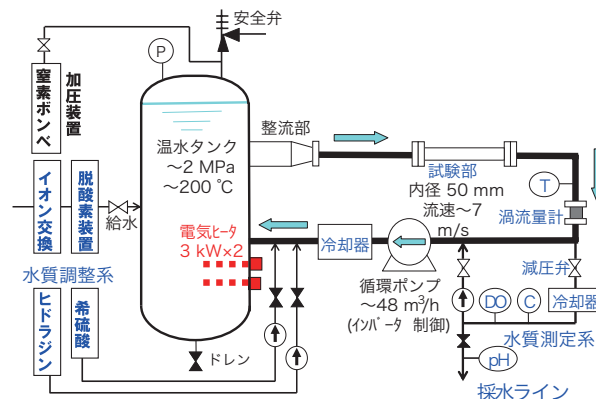


図1 局所熱流動実験装置の概要

用可能である。循環ポンプは、インバータ制御のポンプを使用しており最大流量48m³/hまで流量制御が可能である。また、ループの温度は、温水タンクに設置されている電気ヒータ（3kW×2）により加熱することにより昇温する。当該ヒータは、温度制御器により設定温度±1℃の精度で温水タンク温度を制御可能である。温水タンク・循環ポンプ・配管はステンレス鋼製であり、試験体を除いた流動ループでのFAC発生は考慮する必要はない。

系統の圧力調整に使用している窒素ボンベは、純窒素（純度：99.999%）を使用しており、系統加压による溶存酸素濃度への影響を排除している。

水質調整系として、給水処理用の脱酸素装置・イオン交換樹脂ユニット、薬品注入用のタンクおよび薬注ポンプが3組あり、ヒドラジン・希硫酸・アンモニアを注入可能である。脱酸素装置は給水時に使用する他に、水張り後の系統水に対しても脱酸素処理に使用するために主系統からの通水ラインを設けている。

水質測定系では、手分析のための採水ラインがある他、溶存酸素分析計と導電率計が設けてあり、常時モニタリングが可能である。水質測定系は、FACにおいて影響が大きいとされるpH、溶存酸素濃度、鉄濃度に異常な変化がないか監視しており、pHと鉄濃度の測定は適宜採水したサンプル水を手分析により行っている。表1に水質測定機器仕様を示す。

2.2 試験体

今回の腐食速度測定で使用した試験体を、図2に示す。試験体は、オリフィス上流の腐食速度を測定するための上流側試験部（長さ650mm）と下流側の

表1 水質測定機器仕様

測定機器	製造者	型式	仕様
溶存酸素分析計	日機装株式会社	7115-22型	測定範囲：0~20 / 0~200ppb 隔膜型ポーログラフ式
導電率計	日機装株式会社	9792型	測定範囲：0~0.2/2.0/20.0mS/cm
pHメータ	株式会社堀場製作所	D-51	ガラス電極法 分解能：0.01pH
鉄濃度計	HACH CAMPANY	Pocket Colorimeter II	TPTZ法 精度：1.0 ± 0.02mg/L Fe 検出限界：0.01mg/L Fe

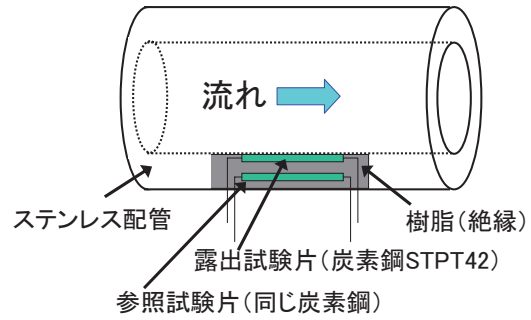


図3 腐食速度センサ取付方法

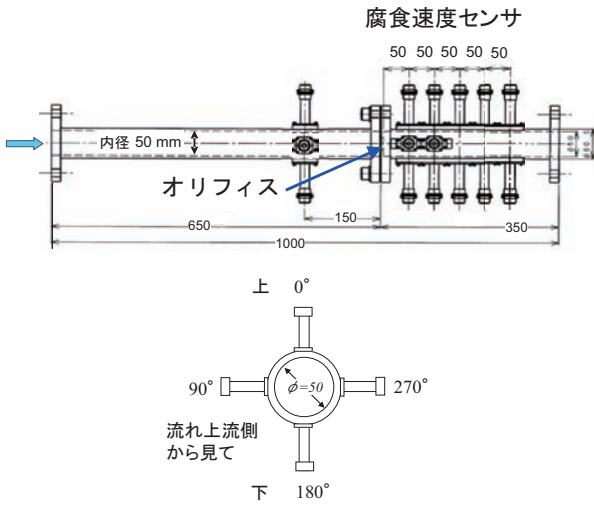


図2 腐食速度測定用試験体

腐食速度を測定するための下流側試験部（350mm）の2本に分かれており、フランジ接続部にオリフィスを設置できる仕様となっている。配管は、内径 $D = 50\text{mm}$ の SUS304 製の円管であり、オリフィスは配管内径の約 $1/2$ （24.3mm）のものを取り付けた。上流側試験部には、オリフィス上流 150mm の位置に腐食速度センサ（測定原理については後述）を周方向4箇所を設置しており、直管部の腐食速度を測定する。下流側試験部には、オリフィス下流 50, 100, 150, 200, 250mm の位置に腐食速度センサを合計 14 箇所設置しており、オリフィス下流での腐食速度の分布を測定する。試験体については、前回の測定^{(14)~(16)}でセンサ不良などの理由により評価可能なデータが少なかったことから、今回、測定箇所を増やした試験体に改良している。

2.3 腐食速度センサの測定原理

腐食速度センサの取付方法を図3に示す。腐食速

度センサは、図3のように炭素鋼製の試験片を配管内表面に段差がないように露出させ、絶縁材の樹脂で固定している。試験片の両端に取り付けられたリード線により外部から電気抵抗を測定する構造となっている。配管内表面に露出した試験片は、腐食の進行により試験片厚さが減少することとなるが、試験片厚さの減少に伴う断面積の減少により、電気抵抗が増加する。この電気抵抗の変化を計測することにより、厚みの変化を測定する。

金属の電気抵抗は、次式で与えることができる。

$$R = \rho \frac{L}{S} \tag{1}$$

R は電気抵抗 [Ω]、 ρ は電気抵抗率 [$\Omega \text{ m}$]、 S は抵抗体の断面積 [m^2]、 L は抵抗体の長さ [m]である。

直方体形状の抵抗を考えた場合、幅 w 、厚み d とすると断面積 $S = w \cdot d$ となり、式(1)は厚さ d を求める形に変形することができる。

$$d = \rho \frac{L}{wR} \tag{2}$$

電気抵抗率 ρ 、長さ L および幅 w が既知であれば、電気抵抗 R を測定することにより、その時々抵抗体の厚さ d を求めることができる。電気抵抗は温度の影響を大きく受けることから、露出試験片と同一ロットの母材から切り出し、露出試験片の初期形状と同一形状に加工した参照試験片の電気抵抗を測定することにより、温度による抵抗変化を補正する。

試験片の大きさは、試験体の大きさ、測定対象箇所、センサの感度等を考慮して、図4のとおりとしている。

露出試験片の温度と参照試験片の温度は等しく、

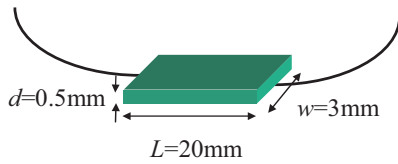


図4 露出試験片の初期形状

材質も同じことから参照試験片の電気抵抗率 ρ は露出試験片の電気抵抗率と等しいと見なすことができる。露出試験片の厚さおよび電気抵抗をそれぞれ d_{exp} 、 R_{exp} 、また、参照試験片の厚さおよび電気抵抗をそれぞれ d_{ref} 、 R_{ref} とすると、式(2)から次式を求めることができる。

$$d_{exp} = d_{ref} \frac{R_{ref}}{R_{exp}} \quad (3)$$

ここで、 $d_{ref} = 0.5\text{mm}$ で一定であることから、 R_{exp} および R_{ref} を一定時間毎に計測することで、腐食量が測定でき、これから腐食速度を算出することができる。

2.4 計測システム

電気抵抗の計測システムおよび計測回路図をそれぞれ図5、図6に示す。計測システムは、腐食速度センサ、データ収集装置およびパソコンで構成されており、データ収集装置には12台のCorroOcean製データロガー（製品名：CorrLog）が収納されており、腐食速度センサの抵抗を計測することが可能である。パソコンには、CorrLog用計測ソフト「MultiTrend」をインストールしており、計測データのログ管理、計測システムの監視およびオンラインでのモニタリングが可能である。

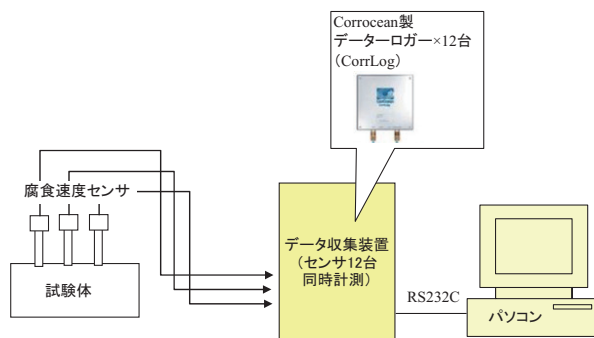


図5 電気抵抗計測システム

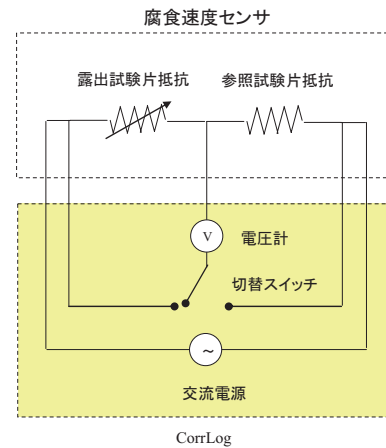


図6 電気抵抗計測回路図

3. 実験結果と考察

3.1 試験条件

腐食速度測定（Run 1, Run 2, Run 3とする）の試験条件を表2に示す。実験装置には、試験進行に伴い溶出する鉄イオンを除去するための浄化装置が備えられていないため、試験時間は系統水の昇温を含め2週間を目安に実施した。Run 1は、前回報告時^{(14)~(16)}に用いたデータであり、流速条件は試験期間を通じ5.0m/sである。今回、流速条件が異なる試験として、Run 2では試験期間途中で管断面平均流速 U_{ave} を1.4から5.0m/sに変化させ、Run 3では2.1から3.5m/sに変化させることにより、4ケースの流速条件の腐食速度測定を実施した。系統圧力は約1.5MPa、温度はほぼ150℃に維持しており、キャビテーションが発生しない条件としている。溶存酸素濃度については、給水時および低温時ループ水の脱酸素装置通水により20ppb以下に低減した後、昇温することにより、ヒドラジンを追加することなく150℃時点で1ppb以下に下げることができている。また、これまでの試験では、薬液注入によるpH調整は行っておらず、各試験期間中のpHはそれぞれ6.6、6.0、6.2とほぼ中性であった。鉄濃度は、流れ加速型腐食による腐食量に影響する可能性のあるパラメータと考えられることから、鉄濃度の飽和による腐食速度の鈍化を監視する目的でデータを採取している。

表2 腐食速度測定の実験条件

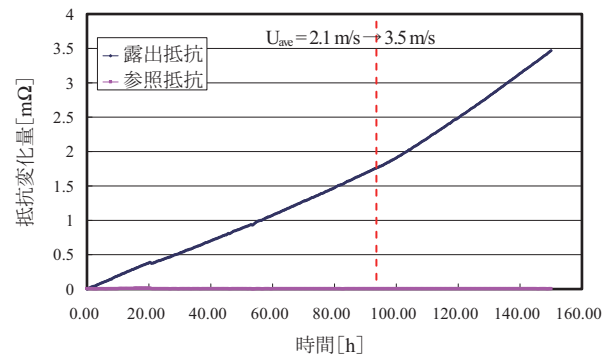
	Run 1	Run 2		Run 3	
		(1)	(2)	(1)	(2)
測定時間[h]	70	117	60	93	57
管断面平均流速[m/s]	5.0	1.4	5.0	2.1	3.5
温度[°C]	149.7	149.8		149.8	
溶存酸素濃度*1 [ppb]	0.1 (0~0.1)	0.1 (0~0.2)		0.1 (0~0.4)	
pH*1	6.6 (6.1~6.9)	6.0 (5.8~6.2)		6.2 (6.0~6.3)	
鉄濃度 [ppm]	0.14-0.35	0.03-0.12	0.12-0.20	0.12-0.19	0.19-0.21
腐食速度センサ材質	炭素鋼 STPT 42 Ni; 0.02% , Cr; 0.04% , Mo; 0.01%				

*1：腐食速度測定中の平均値を記載。
()内は、指示値の最小値と最大値。

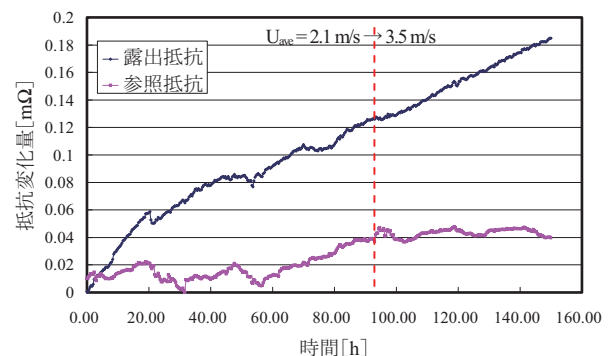
3.2 腐食速度センサの電気抵抗変化

図7に、腐食速度センサによる電気抵抗の測定例を示す。常温から試験条件 150°C まで水温を上昇させる間は、約 2~5°C/h で昇温しており、測定する抵抗値も大きく変化する。このような過渡的な温度変化時は、参照抵抗による温度補償でも温度の影響を十分に取り除くことが困難であることから、昇温が完了し温度が安定していることを確認した後、腐食速度測定を開始している。また、ノイズの影響を抑制するため、測定した電気抵抗は、前後2時間(計4時間)の移動平均処理を行った。腐食速度センサは特注で製作しているため、絶縁材としている樹脂の埋め込み不足など、外観あるいは気中での電気特性からは、センサ自体の良否について十分判断できない。そのため、試験期間中の電気抵抗の変動傾向から、センサの良否について判断した。

Run 3では、測定時間 150 時間のデータとなったが、期間中の温度変動はほとんどなかった。図7のように、(a) 良好センサの測定例では、参照抵抗の抵抗変化はほとんどみられず、また、露出抵抗の抵抗変化は、ほぼ直線的に増加しており、 U_{ave} を変更



(a) センサ良好例(オリフィス下流 50mm, 0°)



(b) センサ不良例(オリフィス下流 200mm, 180°)

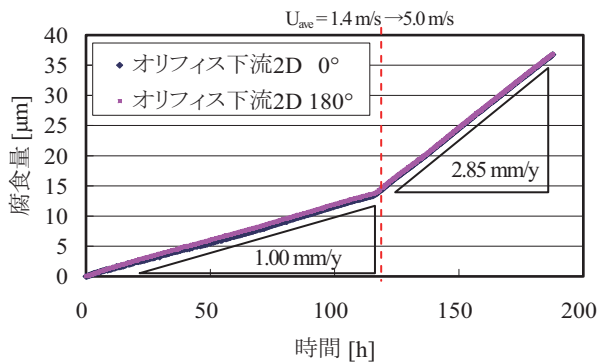
図7 腐食速度センサによる電気抵抗の測定例 (Run 3)

した 93 時間付近を境に直線の傾きが変化していることが分かる。一方、(b) 不良センサの測定例では、参照抵抗の抵抗変化は非常に不安定であり、露出抵抗も右肩上がりの傾向は示しているものの、(a) の例と比べ抵抗変化率が安定していない。(a) と (b) とで温度変動が異なることは考え難く、センサ不良の原因は樹脂の絶縁不良などが考えられる。そのため、抵抗測定結果に信頼性がないことから、(b) のようなデータについては、評価データから除外している。

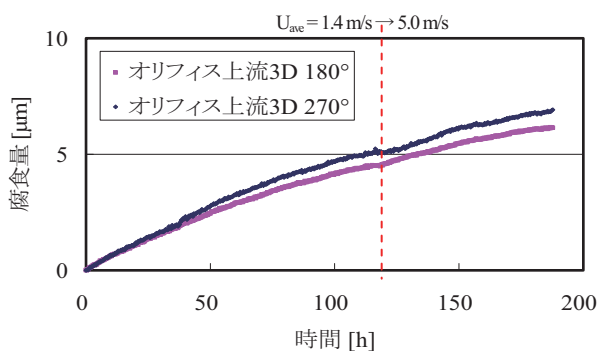
3.3 流速変更に伴う腐食速度の変化

図 8 に、Run 2 における腐食量の推移を示す。腐食速度の算出には、20 分間隔で測定した電気抵抗値を、式 (3) により露出試験片の腐食量を求めた。腐食速度が、腐食量がほぼ直線的に変化していることを確認し、最小二乗法により近似直線の傾きから求めた。

オリフィス下流 2D における腐食量の変化は、 U_{ave} が一定の場合、時間の経過とともにほぼ直線的に増加していることが分かる。また、 U_{ave} を変化させた



(a) オリフィス下流 2D (100mm)

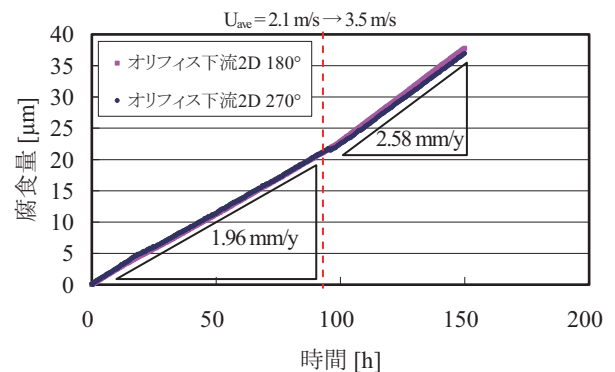


(b) オリフィス上流 3D (-150mm)

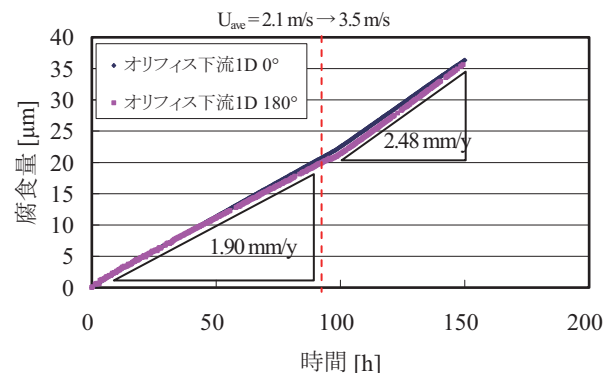
図 8 Run 2 試験期間中における腐食量の推移

場合、直線の傾きが大きく変化することがわかる。Run 2 では、測定開始後 117 時間で U_{ave} を変化させており、各流速での腐食速度を算出すると、 $U_{ave} = 1.4\text{m/s}$ の時の腐食速度は 1.00mm/y 、 $U_{ave} = 5.0\text{m/s}$ に変化させた後の腐食速度は 2.85mm/y となり、流速の変更前後で約 2.85 倍となった。オリフィス下流 1D および 3D においても同様に、腐食量の変化は時間の経過とともに直線的に変化し、 U_{ave} を変化させるとその傾きが変わる結果となった。一方、オリフィス上流 3D の腐食量の変化は、時間の経過とともに傾きが徐々に小さくなる結果となった。 U_{ave} を変化させた場合でも、オリフィス下流の変化とは異なり、徐々に腐食量の傾きが小さくなる傾向が継続した。

次に、Run 3 における腐食量の推移を図 9 に示す。Run 3 では、測定開始後 93 時間で $U_{ave} = 2.1\text{m/s}$ から 3.5m/s に変化させている。オリフィス下流の腐食量の変化は、Run 2 と同様の傾向を示し、流速一定条件では、時間の経過とともに直線的に増加し、流速を変化させると、その直線の傾きが変わることがわかる。Run 2 に比べ、Run 3 は U_{ave} の変化



(a) オリフィス下流 2D (100mm)



(b) オリフィス下流 1D (50mm)

図 9 Run 3 試験期間中における腐食量の推移

の程度が小さいため、傾きの変化も小さい。オリフィス下流の腐食速度の変化は下流 1D で 1.90mm/y から 2.48mm/y, 下流 2D で 1.96mm/y から 2.58mm/y となり、約 1.3 倍の増加となった。

オリフィス下流の部位では管断面平均流速 U_{ave} が大きくなるに従い腐食速度も顕著に増加するが、オリフィス上流の直管部では流速の範囲が 1.4~5.0m/s 程度ではほとんど腐食速度に影響しない結果となった。

3.4 オリフィス下流の流れ方向の腐食速度の変化

図 10 に、流速条件が $U_{ave} = 5.0\text{m/s}$ の場合の、Run 1 と Run 2 (2) の腐食速度分布を示す。腐食速度測定結果の周方向の平均値を取った。オリフィス下流の腐食速度分布の傾向は、Run 1, Run 2 (2) ともに、オリフィス下流 1D から 2D の間で最大の腐食速度となった。最大腐食速度は、Run 1 に比べ Run 2 (2) の方が約 2 倍の大きさとなった。流れの影響による差異ではなく水質といった環境の違いによるものと考えられる。表 2 に示すように Run 2 の pH は、Run 1 に比べ酸性側であり、わずかな pH の差が腐食速度に影響する可能性がある。また、Run1 と Run2 とではセンサの使用履歴が異なるため、センサ表面の初期状態の差が腐食速度の違いに影響している可能性がある。今後、精緻な pH 計測を行い、試験ごとの pH の違いをより正確に把握するとともに、センサ表面の初期状態を一定とした腐食試験を行い、この腐食速度測定結果のばらつきの原因について明らかにしていく予定である。

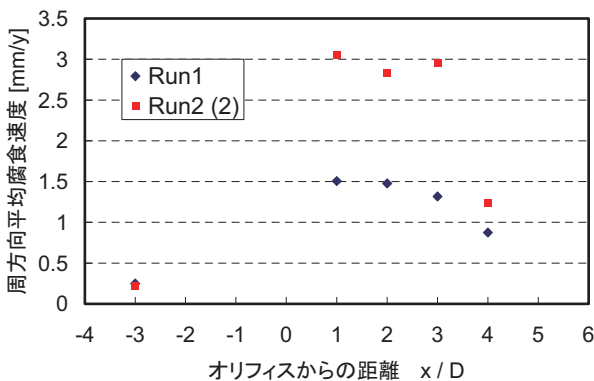


図10 オリフィス下流における流れ方向の腐食速度の変化 ($U_{ave} = 5.0\text{m/s}$)

次に、各流速ごとのオリフィス下流各位置での腐食速度の比較を図 11 に示す。評価には水質条件がほぼ同じである Run 2, Run 3 の腐食速度測定結果を用い、周方向の平均値を取った。試験の結果、 $U_{ave} = 1.4, 2.1, 3.5, 5.0\text{m/s}$ のどの流速条件においても、オリフィス下流の腐食速度は、下流 1D から 3D の間で最大となり、それより下流では減少した。また、管断面平均流速 U_{ave} の増加に従い、腐食速度が増加することが確認できる。増加の度合いはオリフィス下流 1D から 3D の間で顕著であった。

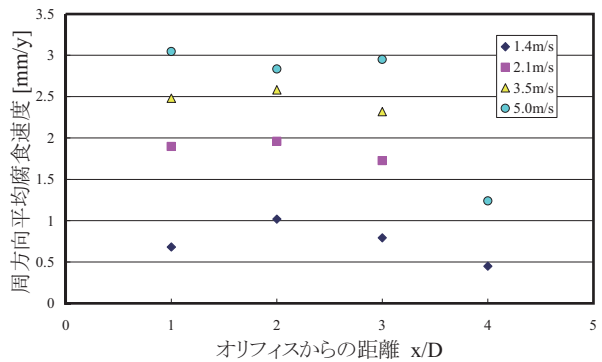


図11 各流速ごとのオリフィス下流位置での腐食速度分布の比較

3.5 腐食速度のレイノルズ数依存性

図 12 にオリフィス下流における最大腐食速度のレイノルズ数依存性を示す。Run 2 と Run 3 で取得した各流速条件ごとの最大腐食速度について、下式 (4) のとおり定義したレイノルズ数 Re を用いて整理した。

$$Re = \frac{U_{ave}D}{\nu} \tag{4}$$

ここで、 U_{ave} は管断面平均流速 [m/s], D は配管内径 [m], ν は動粘性係数 [m^2/s] である。Run 2, Run 3 とともに管断面平均流速 U_{ave} を除き試験配管、試験条件は同じであり、 $D = 0.05\text{m}$, 圧力 1.5MPa, 温度 150℃ であることから $\nu = 1.986 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ と一定である。

その結果、本試験条件における最大腐食速度は、レイノルズ数に依存し $Re^{0.82}$ に比例する結果となった。これは、発達した円管内乱流での物質伝達率の特性 ($Re^{0.8}$ に比例) (17) とほぼ一致する。この結果は、2 回の腐食速度測定の実験データをもとにした評価

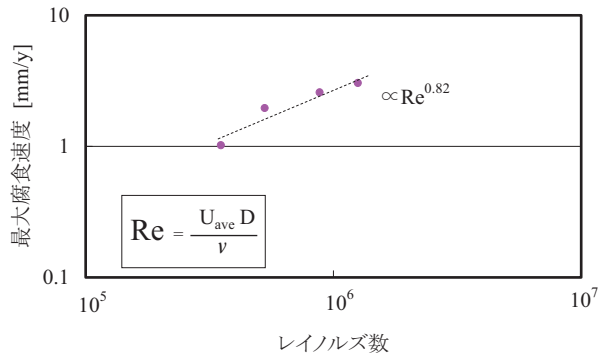


図12 オリフィス下流における最大腐食速度のレイノルズ数依存性

のためサンプル数が少なく、さらにデータを充実し精査する必要がある。また、オリフィス下流の壁面近傍の物質伝達率は $Re^{0.54}$ に比例するとの報告⁽¹⁸⁾もあることから、今後、更に腐食速度データの充実を図ることによって、この点について明らかにしていきたい。

4. まとめ

オリフィス下流を対象に管断面平均流速をパラメータとした腐食速度測定を行い、腐食速度の流速依存性について評価した。その結果、以下のことを確認した。

- (1)オリフィス下流の流れ方向の腐食速度分布については、オリフィス下流 1D から 3D の間で最大の腐食速度になった。
- (2)オリフィス下流の腐食量は、時間とともに直線的に増加した。しかしながら、オリフィス上流の直管部では時間の経過とともに腐食速度が減少した。
- (3)オリフィス下流の腐食速度は、管断面平均流速が大きくなるに従い、増加した。本試験体系におけるオリフィス下流の最大腐食速度は、レイノルズ数 $Re = 3.5 \times 10^5 \sim 1.3 \times 10^6$ の範囲で $Re^{0.82}$ に比例した。しかしながら、水質のわずかな違いやセンサ表面の初期状態の違いが腐食速度測定結果に影響している可能性があり、それらの影響について確認する必要がある。

文献

- (1) 日本機械学会, 発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 (2005年版) (増訂版) (2006)。

- (2) H. Keller, Erosionskorrosion an Nassdampfturbien. VGBKraftwerk-technik 54, 5, p. 292 (1974)。
- (3) G. J. Bignold, K. Garbertt and I. S. Woolsey, in Ph. Berge and F. Kahn, eds., Corrosion-Erosion of Steel in High Temperature Water and Wet Steam (Electricite de France, Les Renardies, 1982), Paper No. 12.
- (4) H. G. Heimann and P. Schub, Initial experience gained with a high pH value in the secondary system of PWRs, Proc. of the Third Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, BNES, London, p. 243 (1983)。
- (5) 日本原子力学会, 原子炉水化学ハンドブック, コロナ社 (2000)。
- (6) O. de Bouvier, M. Bouchacour and K. Fruzzetti, "Redox Condition Effect on Flow Accelerated Corrosion: Influence of Hydrazine and Oxygen," Proc. of International Conference Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems, 117, Avignon, France (2002)。
- (7) P. Berge, J. Ducreux and P. Saint-Paul, "Effects of chemistry on corrosion-erosion of steels in water and wet steam." Proc. of the Second Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, British Nuclear Engineering Society, London, 5 (1980)。
- (8) L. E. Sanchez-Caldera, The Mechanism of Corrosion-Erosion in Steam Extract Lines of Power Stations, Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts (1984)。
- (9) W. Kastner and R. Riedle, Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtagen durch Erosionkorrosion, VBG-Kraftwerkstechnik, 66, 12, p. 1171 (1986)。
- (10) V. K. Chexal, H. Horowitz, R. Jones, et al., Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants, EPRI TR-106611, Electric Power Research Institute, Palo Alto (1996)。
- (11) H. M. Crockett and J. S. Horowitz, U. S. Approach to Flow-Accelerated Corrosion, International Conference on Flow Accelerated Corrosion, Lyon-France (2008)。
- (12) S. Trevin, M. Persoz and I. Chapuis, Making

FAC calculations with BRT-CICERO™ and updating to version 3.0, International Conference on Flow Accelerated Corrosion, Lyon-France (2008).

- (13) 歌野原陽一, 長屋行則, 中村晶, 村瀬道雄, オリフィス下流における流れ加速型腐食の評価 (1. 流れ場の計測と数値解析), 日本機械学会 第13回動力・エネルギー技術シンポジウム, A108 (2008).
- (14) 長屋行則, 歌野原陽一, 中村晶, 村瀬道雄, オリフィス下流における流れ加速型腐食の評価 (2. 腐食速度の測定と流れ場の影響評価), 日本機械学会 第13回動力・エネルギー技術シンポジウム, A109 (2008).
- (15) Y. Utanohara, A. Nakamura, M. Murase and Y. Nagaya, Measurements of Flow Field and Flow Accelerated Corrosion in the Downstream of an Orifice, The 7th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safty (NUTOS-7), Seoul, Korea (2008).
- (16) 中村晶, 村瀬道雄, 歌野原陽一, 長屋行則, 流れ加速型腐食に及ぼす局所的流況の影響—研究の背景とオリフィス下流の腐食速度の計測—, INSS JOURNAL, Vol. 15, p. 78 (2008).
- (17) 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第5版, p. 84 (2009)
- (18) 黒田祐志, 小城烈, 近藤昌也, 辻義之, オリフィス下流における流れ加速腐食機構に関する研究 (1) —電気化学法による壁面近傍の物質伝達率の測定1—, 日本原子力学会, 2010年春の年会, E19 (2010).