

エルボ配管における流れ加速型腐食に対する 流速と温度の影響^{*1}

Influence of Flow Velocity and Temperature on Flow Accelerated Corrosion Rate at an Elbow Pipe

歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara) ^{*2} 村瀬 道雄 (Michio Murase) ^{*2}

要約 流れ加速型腐食 (FAC: Flow accelerated corrosion) は火力および原子力発電所の高経年化対策において考慮しなければならない重要な問題の1つである。FACに対する熱流動場の影響を理解するため、様々な流速と温度条件下でエルボでのFAC減肉速度を測定した。エルボ試験体はステンレス鋼 (内径 $D = 49.5$ mm) で作成し、FAC減肉速度は炭素鋼製のセンサで測定した。溶存酸素濃度は 0.1 ppb 以下となるよう調整し、pHはほぼ中性 (約7.0) に保っていた。管断面平均流速は 0.39 から 5.74 m/s (Reynolds数 約 1.0×10^6) に変化させた。ループ水温が 150°C の時、エルボにおけるFAC減肉速度は腹側の値が周方向の他の値より低くなり、この傾向はエルボ下流まで続いた。エルボでのFAC減肉速度はエルボ上流や下流よりも大きく、エルボ下流の減肉速度は下流に行くにつれて減少した。減肉速度は流速の増加とともに線形ではないが単調に増加した。エルボ上流の直管部の減肉速度を基準とすると、エルボにおける減肉速度の比は約1.7から2.9となった。ループ水温を 100°C に低下させると、エルボ腹側の減肉速度が他の周方向位置の値に比べ大きくなった。温度をさらに 50°C に低下させると、FAC減肉速度は低下したが、無視できるほど小さい値ではなかった。流速の影響は 50°C においては無視できるほど小さく、100°C および 150°C では顕著となった。流速と温度の複合影響は場所によって異なり、エルボにおいて特に強くなった。

キーワード 流れ加速型腐食, エルボ配管, 配管減肉速度, 電気抵抗法

Abstract Flow accelerated corrosion (FAC) is one of the important issues that must be considered for aging fossil and nuclear power plants. To understand the effect of thermal flow field on FAC, FAC rates at an elbow pipe were measured under different flow velocity and temperature conditions. The elbow test section was made of stainless steel (diameter $D = 49.5$ mm) and FAC rates were measured using corrosion sensors made of carbon steel. The dissolved oxygen concentration was kept under 0.1 ppb, and pH was nearly neutral (about 7.0) at room temperature. The mean cross-sectional velocity was changed from 0.39 to 5.74 m/s (Reynolds number, about 1.0×10^6). When the water temperature was about 150°C, the FAC rate was smaller at the intrados of the elbow pipe than at other circumferential locations. This tendency continued downstream. The FAC rates at the elbow pipe were larger than those upstream and downstream from the elbow pipe and the FAC rates downstream from the elbow pipe decreased along the flow direction. FAC rates increased as flow velocity increased and their relationship was not linear. The ratios of the maximum FAC rate at the elbow to the FAC rate in the upstream straight pipe ranged from about 1.7 to 2.9. When temperature decreased to 100°C, FAC rate at the intrados became the largest of the other circumferential sensors. When temperature decreased further to 50°C, FAC rate also decreased, but the value was not negligible. The influence of flow velocity was negligibly small at 50°C and remarkable at 100°C and 150°C. The combination effect of flow velocity and temperature was different from place to place and particularly strong at the elbow.

Keywords Flow accelerated corrosion, elbow pipe, wall thinning rate, electric resistance method

*1 本原稿は Nuclear Engineering and Design (2019), Vol.342, pp. 20-28 (1) で公表したものを和訳し転載したものである。

*2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. はじめに

流れ加速型腐食 (Flow accelerated corrosion, 以下FAC) は火力および原子力発電所の高経年化対策において重要な問題である。FACはオリフィスやエルボの下流のように、配管内の流れが強く乱れた箇所が発生する。FACにより配管は減肉し、時として配管破断に至る可能性がある⁽²⁾。従来、事業者は独自にガイドラインを定め、非破壊検査による肉厚測定から余寿命を評価し配管肉厚を管理してきたが、2005年に日本機械学会による「配管減肉管理に関する規格」⁽²⁾が制定され、日本の発電所における配管減肉管理方法が統一された。以後、原子力プラントでは、日本機械学会の規格に基づいて、実測を主体とした配管減肉管理が行われている。

一方、配管減肉管理の合理化に向け、減肉速度の予測に関する研究も進められている。減肉予測にはFACの影響因子の理解が重要である。FACの影響因子は一般に、環境因子 (温度, pH, 溶存酸素濃度等の水質), 材料因子 (クロム等の含有量等), 流体力学因子に分類される⁽³⁾。従来、流体力学因子には管断面平均流速^{(4),(5)}を用いることが多かったが、最近ではFACと局所の流れ場の相関に関する研究が行われるようになってきた^{(6)~(10)}。FACの本質的な流体力学因子は壁面近傍の物質移動係数とされており、多くの研究がその点を踏まえて行われている。減肉速度の予測には、実測値による妥当性検討が必要である。これまでの発電所での肉厚測定により多くの実機減肉データが存在するが、一般に局所の運転条件や水質の点で不確かさが大きい。それゆえ著者らは、十分に実験条件を管理した上でFAC実験を行い、オリフィス^{(11)~(13)}やエルボ⁽¹⁴⁾での減肉速度測定を行ってきた。これらの一連の研究は、FACに対する局所の流れ場の影響を評価できる数値シミュレーション手法を開発することが最終目標である。

本研究では、配管要素としてエルボに注目し、FAC減肉速度測定を行った。エルボは発電所において必要不可欠な配管要素である。エルボのFAC研究事例として、エルボでの物質移動係数を測定した実験⁽⁷⁾、実機の減肉速度を分析した事例⁽⁸⁾があるが、エルボでのFAC減肉速度を実験で計測した事例はこれまで見当たらない。著者らのこれまでの研究⁽¹⁴⁾では、内径49.5 mmのエルボ配管を対象に、流速約5 m/s, 温度約150℃の一定の条件でFAC減

肉速度を測定している。また、エルボ部における物質移動係数の測定と流れ場の数値シミュレーションも行っている⁽¹⁵⁾。同じエルボ形状でFAC減肉速度と物質移動係数の比較を行うことで、両者の定量的な相関関係を明らかにすることを試みている。従って、熱流動場がFAC減肉速度に与える影響を理解するには、流速と温度をパラメータとした、より詳細な実験が必要となる。特に、FACは通常、100~280℃の範囲において発生し、130~150℃近辺で減肉速度が最大となることが知られている^{(3),(16)}。しかし、米田ら⁽¹⁷⁾によると、50℃という比較的低い温度においても無視できない大きさのFAC減肉速度が確認されている。従って、本研究では50℃にまで温度を低下させてFAC減肉速度を計測した。ここでは、いくつかの流速と温度条件下でFAC減肉速度を測定し、得られた知見を述べる。

2. 実験方法

2.1 実験ループ

FAC減肉速度測定に用いた実験ループを図1に示す。実験方法は既報^{(11)~(14)}とほぼ同じである。循環ポンプは試験体の下流に設置し、ポンプで発生する乱れが試験部に及ばないようにした。ループ水は給水前に脱気装置で溶存酸素濃度をある程度低減させた上で注入し、ヒータで目的の温度まで加熱した。実験中、溶存酸素濃度は0.1 ppb以下に抑制した。pHの調整は行っていないが、室温においてほぼ中性に保たれていることを確認した。鉄イオン濃度は実験実施中にループ水の一部を脱塩装置に通すことで上昇を抑制した。ループ水温度はヒータと試験部下流に設けた冷却器により制御した。実験定常状態では循環ポンプにより入熱が発生するため、冷却器により除熱する必要がある。実験ループ中でのキャビテーション発生を防止するため、窒素ガスの注入でループ水の圧力を1.5 MPaに自動制御した。実験中は温水タンク圧力、水温、流量を継続的に計測した。ループ水サンプリング装置では、ループ水を大気圧まで減圧し、室温まで冷却した上で溶存酸素濃度、導電率を計測し、再度実験ループに合流させた。さらに、ループ水を定期的に採取し、室温まで冷却した上でpHと鉄イオン濃度を手動で計測した。手動計測においては採取したループ水が大気に暴露しないよう、窒素ガス雰囲気中で行った。水質の計測

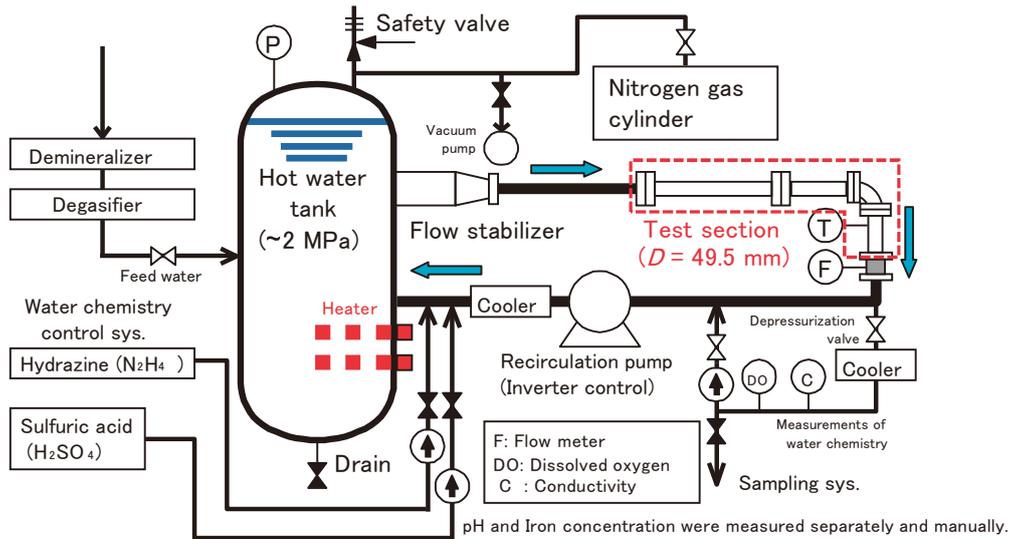


図1 FAC減肉速度測定 実験装置

装置は表1に示すものを用いた。

表1 水質測定機器仕様

測定項目	製造者	形式	仕様
溶存酸素濃度	日機装	7115-22	隔膜型ポーラログラフ式
導電率	日機装	9792	
pH	堀場製作所	D-51	ガラス電極法
鉄イオン濃度	Hach	Pocket colorimeter II	TPTZ法

減肉速度計測用の試験体を図2に示す。試験体の配管はステンレス鋼 (SUS304) 製で、内径 $D = 49.5$ mmである。腐食センサは炭素鋼 (STPT42: Ni, 0.02 wt. %; Cr, 0.04 wt. %; Mo, 0.01 wt. %) 製のプレートで、図3に示すように配管の内面に設置した。腐食センサとステンレスパイプとは樹脂で絶縁しており、センサの炭素鋼プレート表面が温水に露出するようにした。

腐食センサ設置数は合計20箇所、エルボ入口から $9.25D$ 上流の直管部に4箇所、エルボ管の中央に4箇所、エルボ出口から $2.68D$, $3.68D$ 下流に4箇所ずつ、 $4.68D$, $5.68D$ 下流に2箇所ずつ設置した。

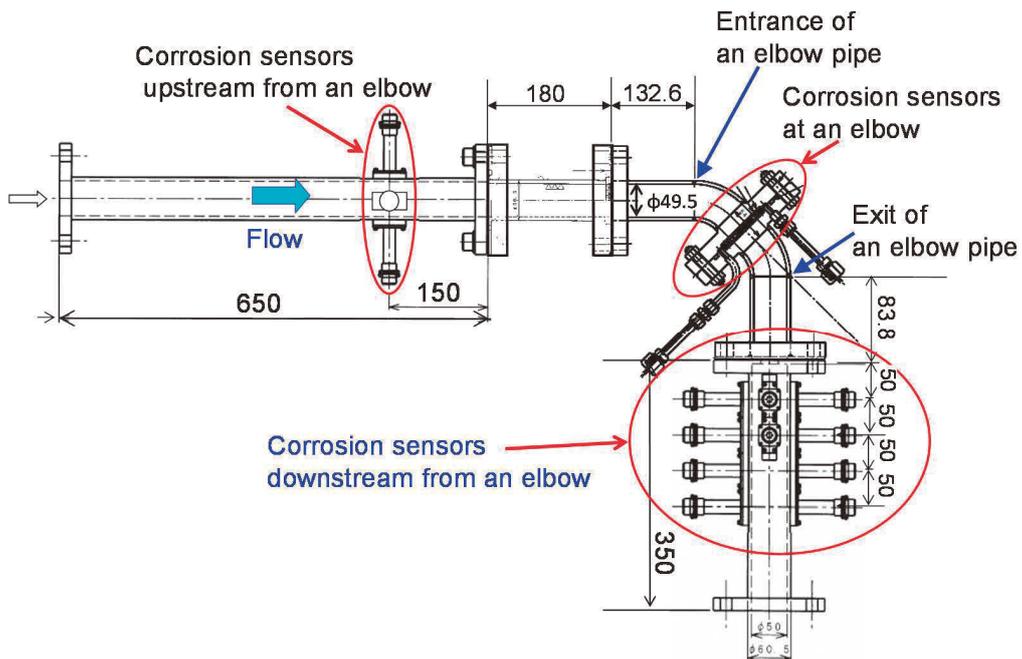


図2 減肉速度測定試験体、俯瞰図 (単位: mm)

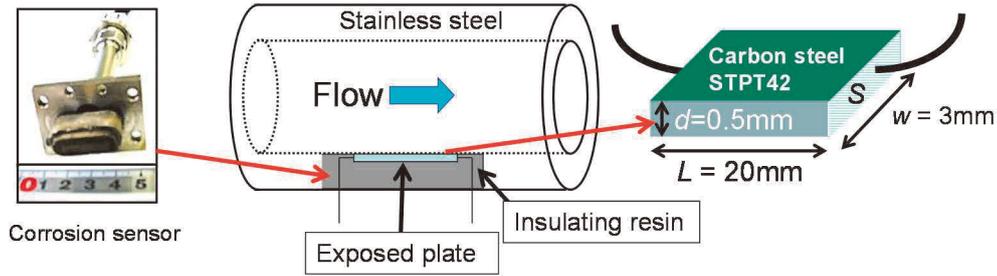


図3 腐食センサ

なお、エルボの曲げ方向は水平面内、つまり、上流直管、エルボ管、下流直管は全て水平面に設置されている。

図4に実験で使用したエルボ試験体の詳細形状を示す。通常のエルボ形状では管内面に腐食センサの設置が困難であったため、工業用に使される一般的なエルボ形状とは異なる形状を採用した。これまで著者らが作成した試験体^{(11),(12)}では管内面を滑らかにするために中ぐり加工を行い、腐食センサと管内面が面一になるようにしていた。しかし、そのような加工はエルボ管内面で行うことができない。従って、54 mmの直管部を2つの45°エルボ（曲率半径 $R_e = 76.2$ mm）で挟み、直管部に腐食センサを取り付けた。作成したエルボ試験体の等価曲率半径は $R_{ep} = 114.4$ mmである。

上流側から下流を見た場合の腐食センサの位置関係を図4に示す。エルボ試験体中央には4つの腐食センサが周方向に取り付けられており、それぞれupper（上）、lower（下）、extrados（背）、intrados（腹）とする。

2.2 FAC減肉速度測定方法

FACによる減肉速度は電気抵抗法で計測する。電気抵抗 R と炭素鋼試験片厚さ d とは式(1)で関係付けられる。

$$R = \rho_e \frac{L}{S} = \rho_e \frac{L}{d \cdot w} \quad (1)$$

ここで ρ_e は炭素鋼の電気抵抗率、 S 、 L 、 d 、 w は図3に示すように、それぞれ腐食センサの炭素鋼プレートの断面積、長さ、厚さ、幅である。炭素鋼プレートの厚さ d は電気抵抗 R から計測することができ、炭素鋼プレートの減肉速度は減肉量の時間履歴の勾配から算出することができる。 ρ_e は温度に依存するため、測定データは温度変動の影響を受けることになる。ここでは ρ_e を一定値として取り扱うことにし、測定データに対する温度変動の影響は3.1節で述べるように、減肉速度算出過程で除去した。

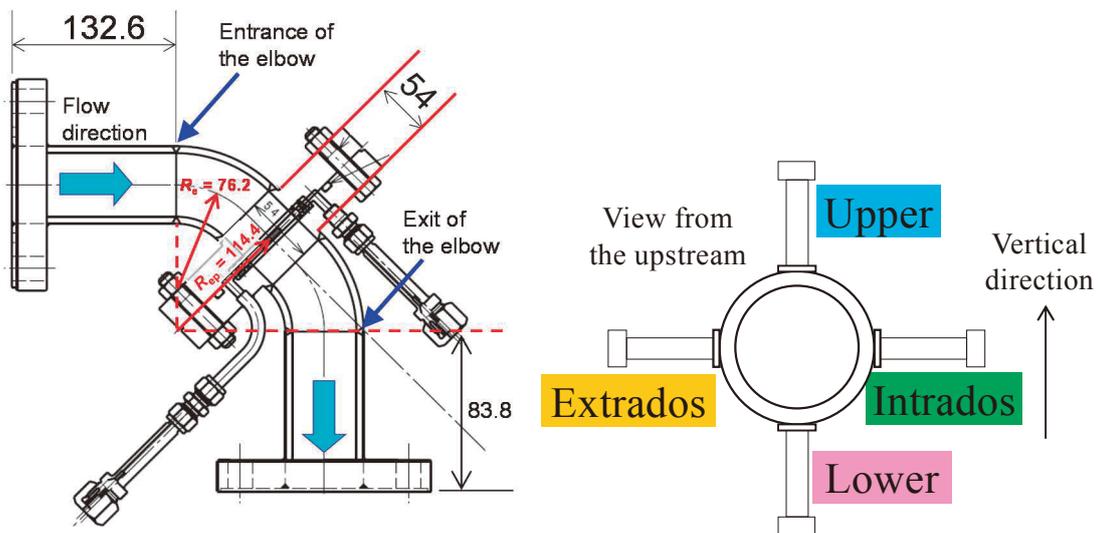


図4 エルボ試験体の詳細形状（単位：mm）

2.3 実験条件

実験条件を表2に示す。実験はRun1からRun9まで中断することなく実施し、次のRunに移る際に流速や温度などの条件を変更した。それぞれのRunにおける実験時間は数日以上となった。Run1を始める前に、腐食センサの表面を紙やすりで磨き酸化被膜を除去した。実験中、流速はRun1からRun3にかけて流速を徐々に増加させた。表2の2014 Run4と標記したRunは以前実施した計測のものであり、参考値として示した。温度はRun1からRun5まで150℃に調整したが、実際の計測値はRun毎に異なっていた。その理由として、熱バランスがRun毎に異なっていることが考えられる。つまり、速度の増加とともに試験部に流入するエンタルピ量は増加するが、試験部からの放熱量はほぼ一定で

あるためと考えられる。より詳細な議論は3.1節にて述べる。Run6以後、温度を段階的に下げ100℃ (Run6, Run7), 50℃ (Run8, Run9) で実験を行った。溶存酸素濃度はほとんど常に0.1 ppb以下を保つことができた。なお、PWR2次系における溶存酸素濃度管理値は復水で10 ppb以下、給水で5 ppb以下である。一般に、FACは溶存酸素濃度が低い条件下で発生し、溶存酸素濃度の増加とともにFAC減肉速度が減少する。これは、溶存酸素濃度が増加すると酸化被膜がFe₃O₄ (マグネタイト) から溶解度の低いFe₂O₃ (ヘマタイト) に変化するためである。本実験では、溶存酸素濃度を0.1 ppb以下に低下させたことで、溶存酸素濃度のFAC減肉速度への影響を無視できると考えられる。

図5にRun1からRun9まで間のpHと鉄イオン濃度を示す。pHと鉄イオン濃度は断続的に計測した。

表2 FAC実験条件

Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	2014 Run 4
実験時間 [h]	444	175	141	332	78	145	113	580	1624	503
管断面平均流速 [m/s]	0.39	1.40	4.34	5.74	4.73	4.73	1.37	1.34	4.78	3.64
温度 [℃]	145.2	148.8	149.2	149.2	149.2	99.2	98.9	49.0	49.2	149.2
Reynolds数	9.7×10^4	3.6×10^5	1.1×10^6	1.4×10^6	1.2×10^6	8.0×10^5	2.3×10^5	1.2×10^5	4.3×10^5	9.0×10^5
溶存酸素濃度 [ppb]	0.1以下					0.1以下				
pH ^a	6.8 (6.4~7.3)	6.8 (6.7~7.0)	7.3	7.5	7.1 (6.9~7.3)	7.3 (7.2~7.4)	6.6	7.5	---	6.9 (6.5~7.2)
鉄イオン濃度 [ppm]	0.02~0.06	0.03~0.07	0.05	0.05	0.06~0.11	0.05	0.06	0.02~0.03	---	0.03

a : pHは1Run当たりの平均値、括弧内の数字は最小値と最大値を示した。

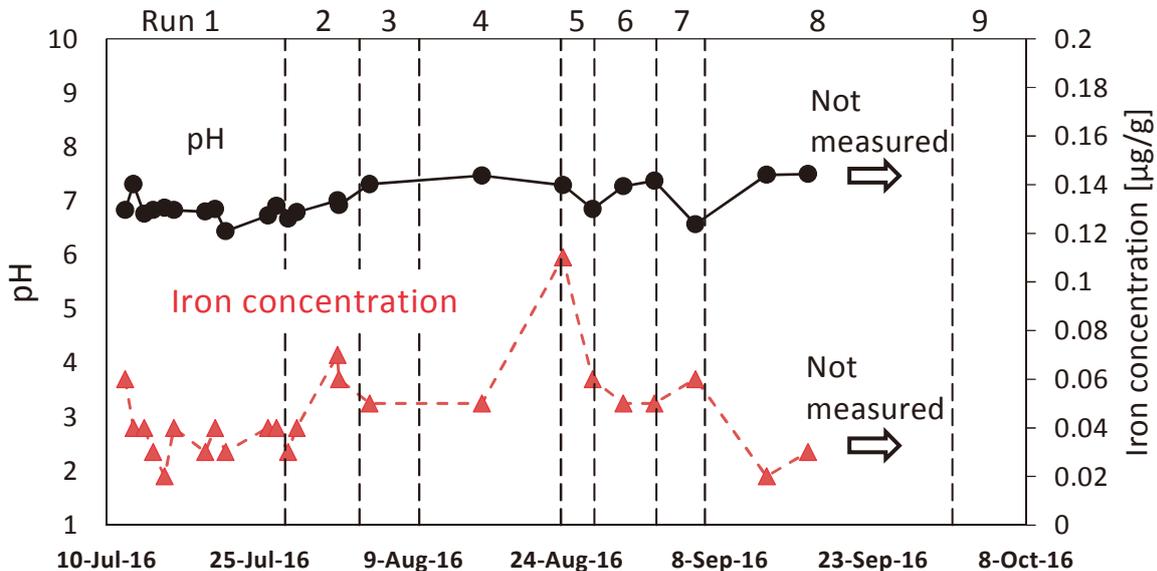


図5 pHと鉄イオン濃度の履歴

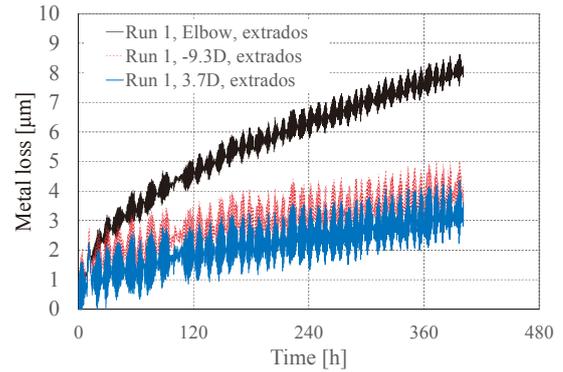
pHの値は調整していないが、室温下でほぼ中性を保つことができた。鉄イオン濃度はRun5の場合を除き $0.04 \pm 0.02 \mu\text{g/g}$ に保つことができた。Run5における鉄イオン濃度の上昇した原因は不明であるが、FAC減肉速度に大きな影響は無いと考えられる。

3. 実験結果

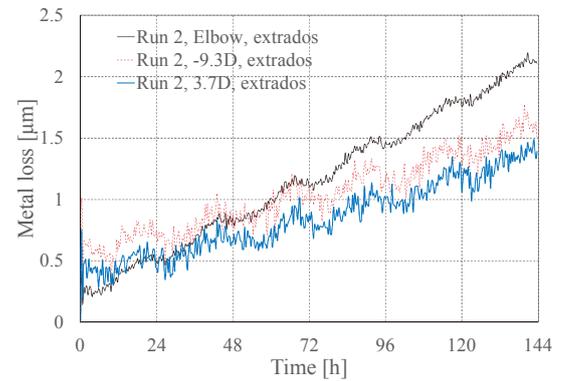
3.1 減肉量の時間履歴

図6にRun1～Run4における腐食センサの減肉量時間履歴を示す。全て、エルボ背側に沿った値である。管路流れ方向原点はエルボ入口とした。減肉量は時間とともに線形に増加したが、変動も見られた。変動の幅は速度増加とともに減少した。変動の主な原因は、ループ水の温度変動に起因するセンサ厚みの測定誤差と考えられる。式(1)の電気抵抗とセンサ厚さの関係において、電気抵抗率 ρ_e は水温に依存するので、減肉量も水温に影響を受けて変動することになる。水温が変動する主な原因としては、ヒータ入熱量と系外への放熱量のエネルギーバランスに関係すると考えられる。系外への放熱量は流速に関係無くほぼ一定と考えられるが、試験部への流入エンタルピは流速低下とともに減少するため、試験部の水温も低下する。逆に、流速が増加すると試験部への流入エンタルピが増加するため、試験部の水温低下量は小さくなり、温度変動も小さくなる。室温の日変動も水温に影響し、図6(b)～(d)に示すように24時間周期の変動が現れている。上述の通り、流速増加とともに試験部の水温低下幅も小さくなるため、室温の日変動が塗りつぶされずに目立つようになったと考えられる。いずれにせよ、FAC減肉速度は減肉量時間履歴の傾きから算出するため、ある特定の時間幅で傾きを移動平均処理することで変動の影響を除去することが可能である。

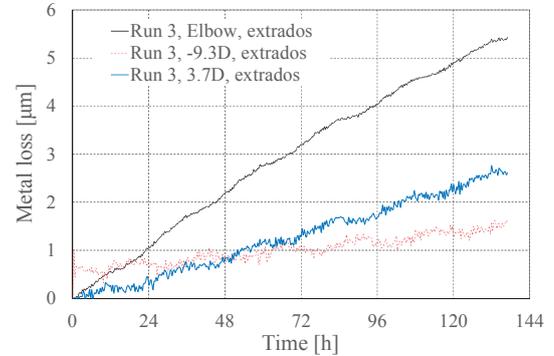
図6(a)に示すRun1では減肉量は時間とともに増加し、実験開始から約190時間経過後に傾きが比較的一定となった。類似の傾向は既報⁽¹⁴⁾でも示されている。一方、Run2～Run4では傾きはRun開始の早い段階から比較的一定である。Run1開始直後は腐食センサ上に酸化被膜が全く無く、酸化被膜が形成されるとともに減肉速度が減少しているものと考えられる。減肉量時間履歴の傾きが一定になると、酸化被膜厚さは定常に達したと考えられる。Run2,



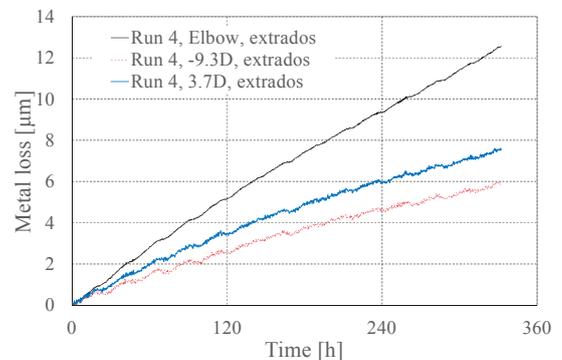
(a) Run 1



(b) Run 2



(c) Run 3



(d) Run 4

図6 腐食センサの減肉量時間履歴

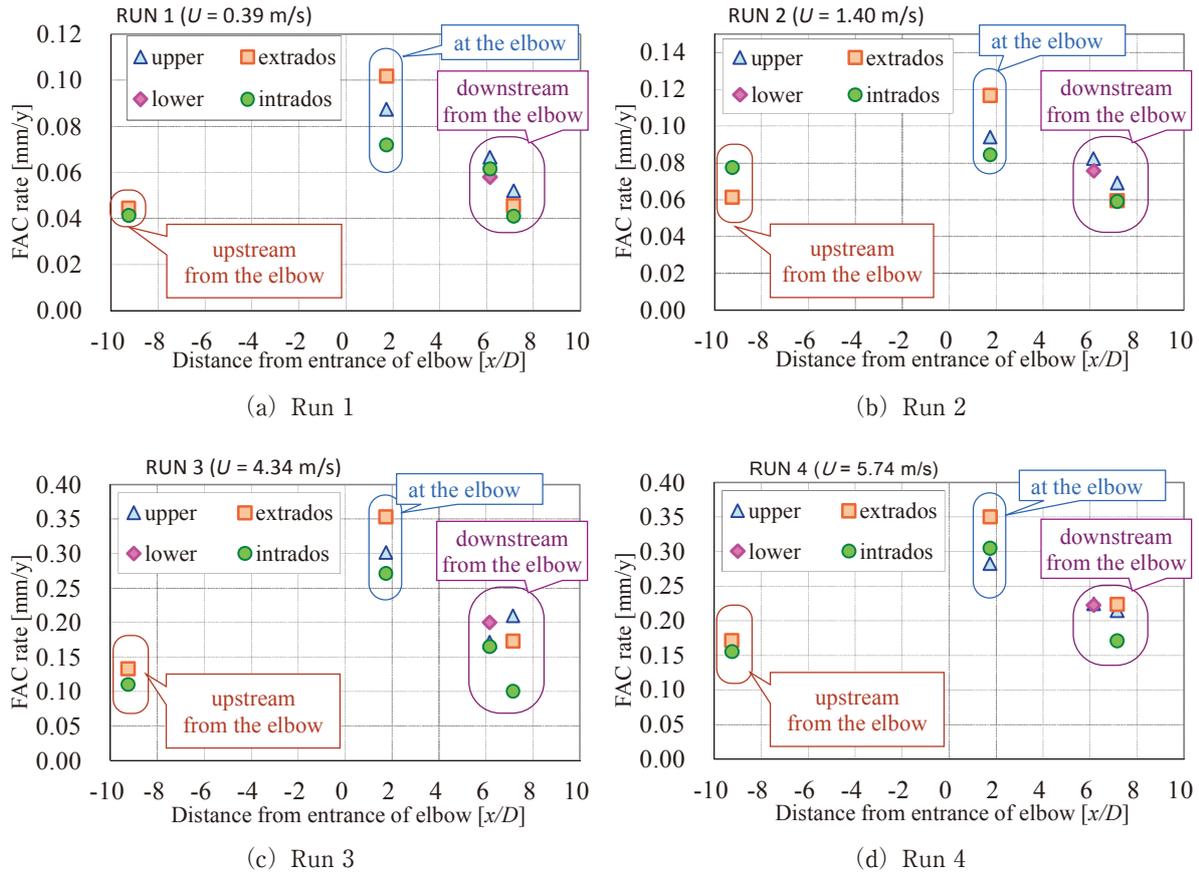


図7 FAC減肉速度分布 (Run1～Run4)

Run3およびRun4では、腐食センサ上に酸化被膜が既にある状態から開始しているので、Run1に比べて比較的すぐに酸化被膜厚さが定常に達すると考えられる。よって、Run1では定常状態に達したと想定される実験開始後192時間後から384時間後までの192時間（8日間）の減肉量時間履歴を対象に、24時間の区間幅で傾きを移動平均処理し、算出された値をさらに時間平均して減肉速度を算出した。

3.2 FAC減肉速度分布

図7にFAC減肉速度分布を示す。3.1節で述べたように、減肉量時間履歴の傾きを移動平均および時間平均処理した値を示している。分布の傾向は既報⁽¹⁴⁾での計測値と類似するものだった。つまり、エルボにおけるFAC減肉速度は腹側の値が周方向の他の値より低くなり、エルボにおけるFAC減肉速度はエルボ上流や下流の減肉速度に比べて大きくなった。そして、エルボ下流の減肉速度は下流に行くにつれて減少している。エルボ腹側における低い減肉速度については、エルボ内で流れがはく離し壁

面近傍の流速が低下したことが原因の1つと考えられる。既報⁽¹⁵⁾において、実験で用いたエルボ形状を対象に図8に示すような流れ場の数値シミュレーションを実施している。図ではショートエルボ、ロングエルボ、本実験で用いたエルボの3種類で流速分布を比較している。その結果、本実験で用いたエルボでは腹側で比較的低い流速になっており、その

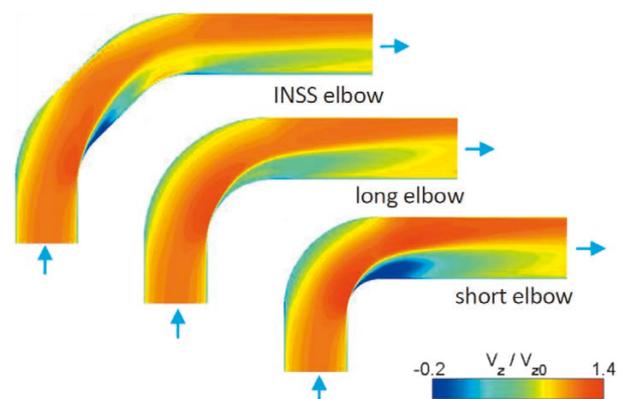


図8 エルボでの時間平均流速分布（流れ方向成分）⁽¹⁵⁾, $Re = 45000$, INSSエルボは本実験のエルボ形状を示す。

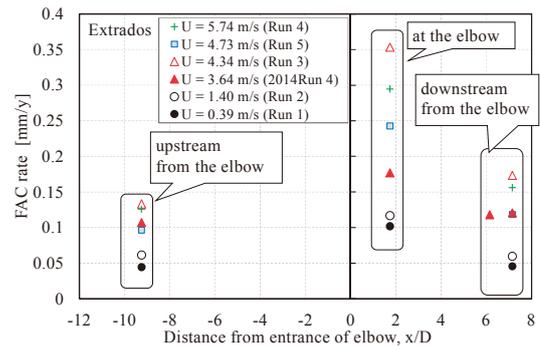
傾向がエルボ下流まで続いている。従って、エルボ腹側の物質移動も低下していた可能性がある。流れのはく離はショートエルボで最も強く発生していたが、ロングエルボでは発生していない。本実験で用いたエルボ形状では1段目のエルボで比較的弱いはく離が発生するとともに、エルボ背側での流速がショートエルボ、ロングエルボの場合よりも速くなっている。このように、エルボ形状は流れ場に影響を与えており、壁面近傍の物質移動にも影響を与えていると考えられる。エルボ形状の影響についてより詳細に議論するには、実験によるFAC減肉速度と数値シミュレーションによる熱流動場を比較する必要がある、今後の検討課題となる。

異なる流速同士で比較すると、FAC減肉速度分布は同様な傾向を示した。エルボにおいて減肉速度が最大となる箇所はRun1～Run4とも背側であった。エルボ上流側の直管での減肉速度を基準としてエルボにおける最大減肉速度の比を示すと、Run1では2.4, Run2では1.7, Run3では2.9, Run4では2.14となった。

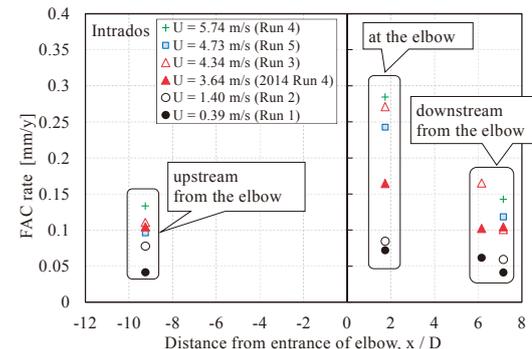
3.3 流速の影響

図9にエルボ背側および腹側に沿ったFAC減肉速度に対する流速の影響を示す。Run3を除き、全測定点で流速増加とともに減肉速度は増加する傾向を示す。流速が変化しても分布の形状は類似しており、エルボにおいて最も減肉速度が大きい。

流速の影響を調べるために、図10にエルボ背側および腹側での流速依存性を示す。図において減肉速度は流速の増加とともに増加する傾向を示した。Run3を除外すれば、減肉速度は流速の増加とともに単調に増加した。Run3の傾向が他と異なる原因は不明である。既往の研究^{(4),(5),(12),(17)}においても減肉速度が流速とともに増加する傾向が報告されている。しかし、減肉速度と流速の相関関係は実験によって異なり、減肉速度が流速の1.0乗に比例する例から2.3乗に比例する例まで指数に幅が存在する⁽¹⁷⁾。理由として、減肉速度は流速だけでなく流れの乱れにも依存するが、実験装置ごとに流れの乱れの強さが異なるためと考えられる。よって、FAC減肉速度に対する流れ場の影響を調べるためには、壁面近傍の流れ場を数値シミュレーションなどで詳しく知る必要がある。

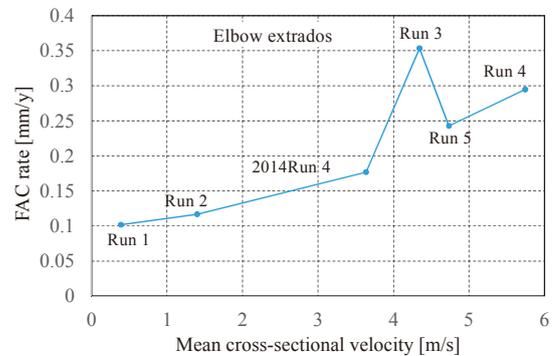


(a) エルボ背側

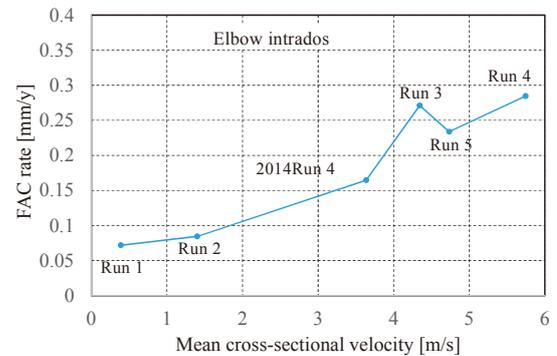


(b) エルボ腹側

図9 異なる流速間でのFAC減肉速度の比較



(a) エルボ背側



(b) エルボ腹側

図10 FAC減肉速度に及ぼす流速影響

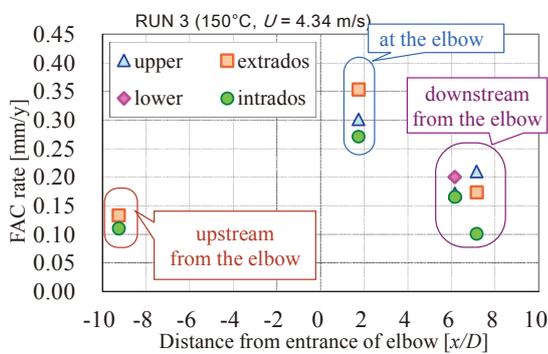
3.4 温度の影響

図11に異なる温度条件におけるFAC減肉速度分布を示す。150℃ (Run3) の場合、3.2節で述べたように、エルボ腹側のFAC減肉速度は周方向の他の位置よりも小さくなった。しかし、温度を100℃まで下げた場合 (Run6)、傾向が変化し、エルボ腹側の減肉速度が周方向の他の位置よりも大きくなった。Run3とRun6で流速はほぼ同じなので、傾向の変化は150℃から100℃への温度変化に起因するものと考えられる。理由は明確でないが、物性値の変化によりエルボ腹側のはく離点位置がずれたな

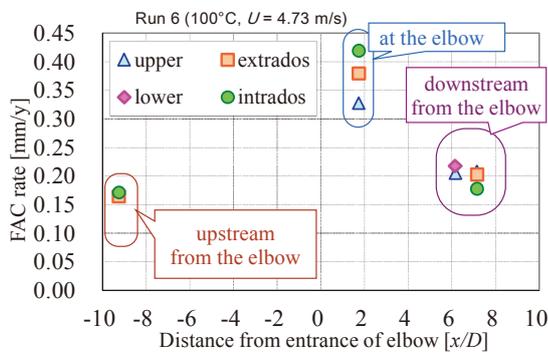
ど、流れ場の構造が変化したことが原因として考えられる。

温度がさらに50℃まで低下した時、FAC減肉速度は全体的に低下した。エルボ腹側の減肉速度が周方向の他の位置よりも大きくなる傾向は100℃の時と同様だった。1章で述べたように、FACは通常100℃以上で発生し、130~150℃近辺で最大値となる⁽¹⁶⁾。しかし、50℃におけるFAC減肉速度は無視できるほど小さい値ではなく、エルボ腹側で0.09 mm/yとなった。100℃におけるFAC減肉速度の最大値を基準に50℃におけるFAC減肉速度の最大値を表すと0.2となった。低温環境下でもFACが発生する傾向は米田らによる実験結果⁽¹⁷⁾と整合する。

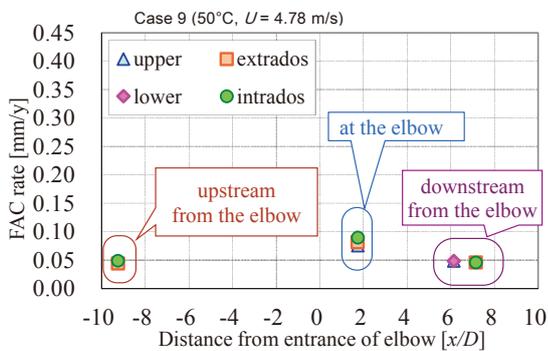
図12はFAC減肉速度に対する流速と温度の影響を示す。同じ流速条件で比較すると、100℃でのFAC減肉速度は150℃や50℃での値に比べ大きい。この傾向は、既往研究⁽¹⁶⁾での130~150℃で最大値が現れるという知見とは異なっている。また、50℃のFAC減肉速度 (Run8およびRun9) は150℃、1.40 m/s (Run2) における減肉速度と同等



(a) Run3 (150℃, 4.34 m/s)

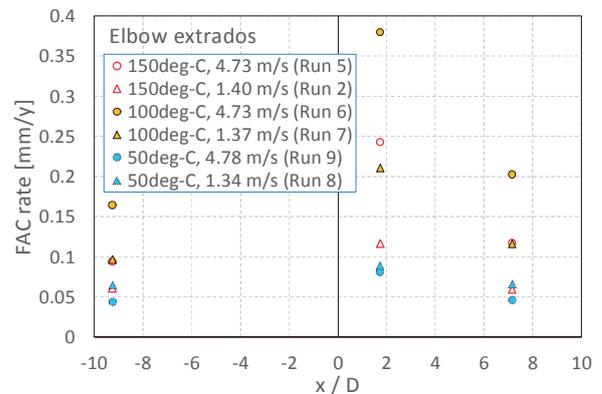


(b) Run6 (100℃, 4.73 m/s)

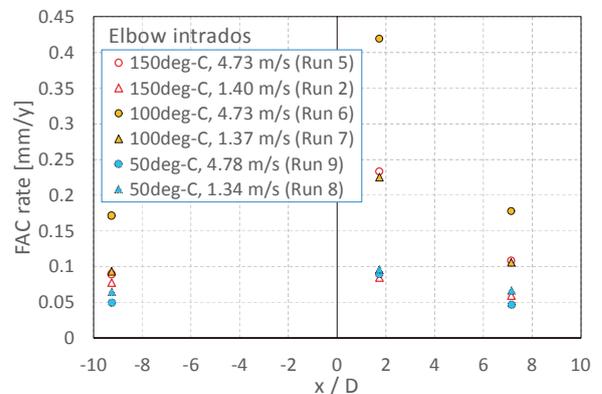


(c) Run9 (50℃, 4.78 m/s)

図11 異なる温度間でのFAC減肉速度の比較



(a) 背側



(b) 腹側

図12 FAC減肉速度に及ぼす流速と温度の影響

表3 流速増加によるFAC減肉速度の増加率

温度 [°C]	流速 [m/s]	上流		エルボ		下流	
		背側	腹側	背側	腹側	背側	腹側
150	1.40 to 4.73	1.5	1.1	2.1	2.8	2.0	1.8
100	1.37 to 4.73	1.7	1.8	1.8	1.9	1.7	1.7
50	1.34 to 4.78	0.7	0.8	0.9	0.9	0.7	0.7

であった。

流速と温度の複合影響をより明確にするために、表3に流速増加によるFAC減肉速度の増加率を示す。ここで、50°Cにおける増加率は1.0以下となり、流速増加にともないFAC減肉速度が低下したかのような、不合理な結果となった。そこで、FAC減肉速度の変化は無視できるほど小さかったとして50°Cでの増加率は全て1.0として取り扱うことにした。いずれにせよ、50°Cにおける流速の影響は小さく、100°Cおよび150°Cで比較的大きくなった。同様に、既往研究⁽¹⁶⁾でも130~150°Cにおいて流速の影響が大きくなったと報告されている。エルボにおけるFAC減肉速度の増加率はエルボ上流や下流に比べて大きくなった。このことから、流速と温度の複合影響は場所によって異なり、エルボにおいて特に強くなることが示された。

一般に、FACは腐食（鉄母材の酸化と酸化被膜の溶解）と物質移動の2つのプロセスで進行する⁽³⁾。温度は酸化や溶解に影響し、流れ場（流速や乱れ）は物質移動に影響する。すなわち、鉄イオンの溶解度は温度上昇とともに増加し、物質移動は流速増加にともなって促進される。また、エルボのような配管形状は乱流混合を引き起こして流れ場に影響を与え、物質移動を促進させる。しかし、50°Cにおける実験結果では、鉄の溶解度が減少したためか、流れ場（流速、配管形状）の変化はそれほど減肉速度に影響していない。このことから、低温でのFACでは鉄の溶解過程が律速となっているため、流れ場の影響に対して感度が低くなっている可能性がある。

4. 結論

本研究では、エルボにおけるFAC減肉速度を異なる流速と温度条件下で計測し、熱流動場がFAC減肉速度に与える影響を調べた。

150°Cのループ水においては、FAC減肉速度はエルボ腹側の値が他の周方向位置の値に比べ小さくなった。エルボにおけるFAC減肉速度はエルボ上

流や下流よりも大きくなり、エルボ下流では下流に行くにつれて減肉速度が低下した。流速増加にともないFAC減肉速度は増加したが、線形的な相関関係とはならなかった。エルボ上流の直管部の減肉速度を基準とすると、エルボにおける減肉速度の比は約1.7から2.9となった。

温度を100°Cに低下させると、エルボ腹側の減肉速度が他の周方向位置の値に比べ大きくなった。温度をさらに50°Cに低下させると、FAC減肉速度は低下したが、エルボ腹側で0.09 mm/yと無視できるほど小さい値ではなかった。同程度の流速で測定結果を比較すると、100°Cでの減肉速度が150°Cや50°Cでの減肉速度に比べて高くなった。流速と温度の複合影響について、50°Cにおいては流速影響が無視できるほど小さく、100°Cおよび150°Cでは顕著となった。また、流速と温度の複合影響は場所によって異なり、エルボにおいて特に強くなった。流速と温度の複合影響は腐食過程と物質移動によって説明可能である。50°Cの時は鉄の溶解度が小さいため、流れ場の変化（流速、配管形状）が減肉速度にそれほど影響を与えなかった。

5. 参考文献

- (1) Utanohara, Y. and Murase, M., Influence of flow velocity and temperature on flow accelerated corrosion rate at an elbow pipe, Nuclear Engineering and Design, Vol.342 (2019), pp. 20-28.
- (2) 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).
- (3) R. B. Dooley and V. K. Chexal, "Flow-Accelerated Corrosion of Pressure Vessels in Fossil Plants," International Journal of Pressure Vessels and Piping, 77 (2-3), pp.85-90 (2000).
- (4) G. J. Bignold, K. Garbett, R. Garnsey and I. S. Woolsey: "Erosion-Corrosion in Nuclear

- Steam Generators”, *Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 2*, British Nuclear Engineering Society, pp. 5-18 (1981).
- (5) H. G. Heitmann and P. Schub: “Initial Experience Gained with a High pH Value in the Secondary System of PWRs”, *Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 3*, Vol. 1, British Nuclear Engineering Society, pp. 243-252 (1983).
- (6) K. Yoneda, T. Ohira, K. Tanji, S. Akiba, K. Niiyama, R. Morita and F. Inada: “Evaluation of Hydraulic Factors Affecting Flow Accelerated Corrosion and Its Verification with Power Plant Data”, *Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference (PVP2009)*, Prague, Czech Republic, July 26-30, Paper No. PVP2009-77486 (2009).
- (7) M. El-Gammal, H. Mazhar, J. S. Cotton, C. Shefski, J. Pietralik and C. Y. Ching: “The Hydrodynamic Effects of Single-phase Flow on Flow Accelerated Corrosion in a 90-degree Elbow”, *Nuclear Engineering and Design*, 240, pp.1589-1598 (2010).
- (8) M. J. Pietralik and S. C. Schefski: “Flow and Mass Transfer in Bends under Flow-Accelerated Corrosion Wall Thinning Conditions”, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133, pp.012902 (2011).
- (9) N. Fujisawa, T. Yamagata, S. Kanno, A. Ito and T. Takano: “The Mechanism of Asymmetric Pipe-Wall Thinning behind an Orifice by Combined Effect of Swirling Flow and Orifice Bias”, *Nuclear Engineering and Design*, 252, pp. 19-26 (2012).
- (10) 恒吉達矢, 神谷一彰, 伊藤高啓, 辻義之, オリフィス下流における物質移行係数の直接測定およびLESによる乱流スカラー輸送の解析, *日本機械学会論文集*, 81 (828), Paper No. 15-00162, (2015).
- (11) Y. Utanohara, Y. Nagaya, A. Nakamura, M. Murase, “Influence of Local Flow Field on Flow Accelerated Corrosion Downstream from an Orifice”, *JSME Journal of Power and Energy Systems*, 6(1), pp. 18-33(2012).
- (12) Y. Utanohara, Y. Nagaya, A. Nakamura, M. Murase, K. Kamahori, “Correlation between Flow Accelerated Corrosion and Wall Shear Stress Downstream from an Orifice”, *JSME Journal of Power and Energy Systems*, 7(3), pp. 138-147 (2013).
- (13) K. Kamahori, Y. Utanohara, A. Nakamura, M. Murase and Y. Nagaya, “Flow Accelerated Corrosion Downstream from an Orifice (1. Measurement of Corrosion Rate)”, *Proceedings of the Conference on Flow Accelerated Corrosion (FAC2013)*, Avignon, France, May 21-24, Paper No.1234 (2013).
- (14) Y. Utanohara, K. Kamahori, A. Nakamura and M. Murase, “Measurement of Flow Accelerated Corrosion Rate at an Elbow Pipe and Combination Effect of an Upstream Orifice”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, 8 (1), pp. 1-12 (2016).
- (15) 恒吉達矢, 伊藤高啓, 歌野原陽一, 辻義之, 形状係数測定における壁面伝達境界条件が及ぼす影響に関する研究, *日本機械学会論文集*, 83 (847), Paper No.16-00417, (2017).
- (16) G. J. Bignold, K. Garbett, and I. S. Woolsey, in Ph. Berge and F. Kahn eds., “Mechanistic aspects of temperature dependence of erosion-corrosion,” *Corrosion-Erosion of Steels in High Temperature Water and Wet Steam (France: Electricite de France, Les Renardieres)*, Paper No. 12 (1982).
- (17) K. Yoneda, R. Morita, K. Fujiwara and F. Inada, “Development of Flow-accelerated Corrosion Prediction Method (1) Acquisition of Basic Experimental Data Including Low Temperature Condition,” *Mechanical Engineering Journal*, 3 (1), Paper No.15-00232 (2016).
- (18) 日本機械学会, 配管減肉管理法の改良・実用化に向けた調査研究分科会 成果報告書, P-SCCII-4, (2014).