

流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響 －エルボ管における減肉速度の計測－

Effects of Local Flow Field on Flow Accelerated Corrosion
－Wall Thinning Rate at Elbow Pipe－

釜堀 孝一 (Koichi Kamahori) *¹

歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara) *¹

中村 晶 (Akira Nakamura) *¹

村瀬 道雄 (Michio Murase) *¹

要約 流れ加速型腐食 (FAC) に及ぼす流れ場の影響について評価するために、著者らはこれまでオリフィス及び玉形弁の下流を対象に、電気抵抗法を用いた減肉速度測定、流速分布測定、数値流体シミュレーションを実施してきた。本研究では、エルボ管を単体で配置した場合を対象に、減肉速度測定を行った。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、管断面平均流速は6.22m/sのち4.98m/sへと実験途中で変化させ、水温は $150 \pm 1^\circ\text{C}$ 以内に制御した。減肉速度分布は、エルボ試験部での減肉速度がその上流部および下流部よりも大きくなった。また、減肉速度はエルボ管の周方向に非対称な分布となり、エルボ管内の背側のほうが腹側よりも大きくなった。

キーワード 流れ加速型腐食, エルボ管, 減肉速度, 電気抵抗法

Abstract In order to evaluate the effects of a flow field on wall thinning rate due to flow accelerated corrosion (FAC), the authors have carried out wall thinning rate measurements using the electrical resistance method, measurements of the velocity profile, and numerical simulation for each piping component such as an orifice and a globe valve. In this study, wall thinning rates were measured were conducted at an elbow pipe without the orifice. In the wall thinning rate measurement, a test loop operated at high temperature and high pressure conditions was used. The pipe inner diameter was 50mm, and the average velocity was changed during the experiment from 6.22m/s to 4.98m/s. The water temperature was controlled within $150 \pm 1^\circ\text{C}$. The wall thinning rates in the elbow pipe were larger than those upstream and downstream from the elbow pipe. The distribution of wall thinning rates in the elbow pipe was asymmetrical to the center axis in the circumferential direction of the pipe, and the wall thinning rate at the extrados of the elbow pipe was larger than that at intrados.

Keywords flow accelerated corrosion, elbow pipe, wall thinning rate, electrical 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重要な要因として知られている。関西電力美浜3号機の2次系配管損傷事故を契機に、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理方法を定めた。FACによる減肉

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の減肉速度に対する、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。減肉メカニズムのモデルと評価式⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

がいくつか提案され、海外では、米国電力研究所 (EPRI) で開発されたCHECWORCS⁽¹¹⁾、フランス電力会社 (EDF) で開発されたBTR-CICERO⁽¹²⁾などが減肉評価に用いられている。しかしながらこれらのコードは、減肉速度の具体的な評価手法が開示されていない場合が多く、また、実機の減肉速度の予測値と測定値のばらつきが大きく^{(13),(14)}精度よく予測できる段階に至っていない。

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、エルボといった部位での減肉速度にも影響を与えらる。現在、FACに及ぼす流れ因子の影響を解明し、その影響の程度を定量的に評価することを目的とした研究が多数行われており、オリフィス⁽¹⁵⁾や堰⁽¹⁶⁾といった比較的単純な形状での減肉速度の測定も行われている。

著者らは、FACに及ぼす局所的な流れの影響を調査するために、これまで基礎的な配管形状としてオリフィス下流を対象に、流れ場の計測および数値解析により局所流れ場を把握するとともに、減肉速度測定を実施し、流れ場と減肉速度との関係について検討を進めてきた⁽¹⁷⁾⁻⁽²⁵⁾。また、玉形弁単体の下流を対象とした流れ場の計測と数値解析シミュレーション⁽²⁶⁾の検討を進めるとともに、減肉速度データを取得した⁽²⁷⁾。さらに、配管要素が組み合わさった場合のケーススタディとして、上流に玉型弁を配置した場合のオリフィス下流を対象に減肉速度データを取得した⁽²⁸⁾。

オリフィスについては、ある程度知見がまとまりつつある^{(29),(30)}が、他の配管要素については知見がまだ十分備わっていない。よって、著者らは、実機配管系統で多用され、減肉事例も多く報告されているエルボに注目した。

本報告では、新たに製作したエルボ試験体を用いて、エルボ管を単体で配置した場合の減肉速度測定を実施し、これまでのオリフィスや玉形弁だけでなくエルボでの減肉傾向の把握を試みた。

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・試験部・循環ポンプ・配管等で構成される流動ループと、窒素加圧装置、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まで設定可能である。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、ループの水の温度は、温水タンクに設置されている電気ヒータ (10kW×2) で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ポンベは純窒素 (純度: 99.999%) を使用しており、系統加圧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。なお、実験装置には、実験期間中の鉄イオン濃度が上昇しないよう、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も備えられている。

水質測定系は、手分析のための採水ラインがあ

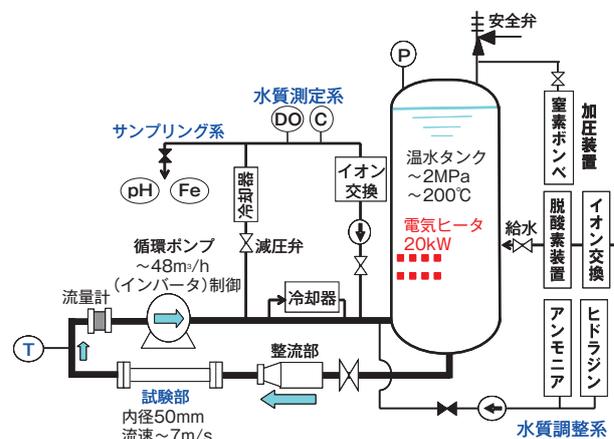


図1 局所熱流動実験装置の概要

るほか、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窒素雰囲気中で手分析により行っている。表1に水質測定機器の仕様を示す。

2.2 試験体

図2に、減肉速度試験で使用した試験部の構成を示す。試験部は、上流側から順に、エルボ上流側試験部配管（長さ650mm）、直配管（長さ180mm）、エルボ試験部（90°ロングエルボ相当）とエルボ下

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： 0～20～200ppb 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 COMPANY	Pocket Colorimeter II	TPTZ法 検出限界： 0.01mg/L Fe 精度： 1.0 ± 0.02mg/L Fe

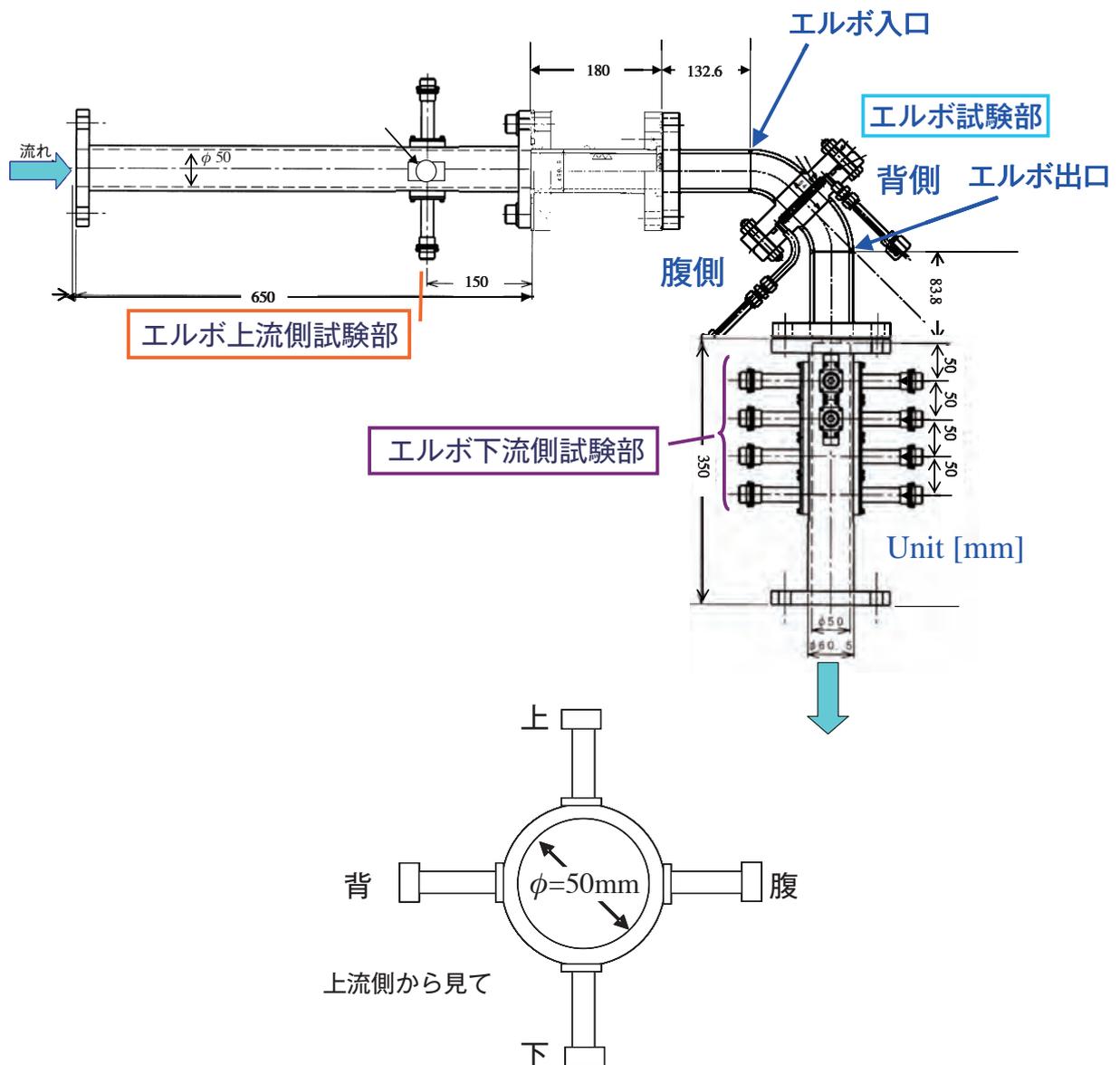


図2 減肉速度測定試験部の構成および腐食速度センサの配置

流側試験部配管 (350mm) から構成されており、直配管とエルボ試験部の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50mmのSUS304製の円管である。なお、管中心軸は同一の水平面上となるよう試験体を配置している。つまり、エルボは水平面上で曲がるよう配置した。

エルボ上流側試験部配管には、エルボ入口より上流462.6mm (9.25D) の位置に腐食速度センサ (測定原理等については後述) を4個設置しており、エルボ上流側直管部の減肉速度を測定する。エルボ下流側試験部は、エルボ出口より下流133.8, 183.8, 233.8, 283.8mm (2.68D, 3.68D, 4.68D, 5.68D) の位置に腐食速度センサをそれぞれ4個、4個、2個、2個の合計12個設置しており、エルボ下流側直管部の減肉速度を測定する。図2に流れ上流側から見た腐食速度センサの配置を示す。以降、配管周方向の呼称 (背・腹・上・下) は本定義に従う。

エルボ試験部の流路形状の詳細を図3に示す。エルボ試験体は、曲率半径80mmの45°エルボ2個により減肉速度測定センサを挟み込む構造になっている。加工精度は公差0.1mm以下である。

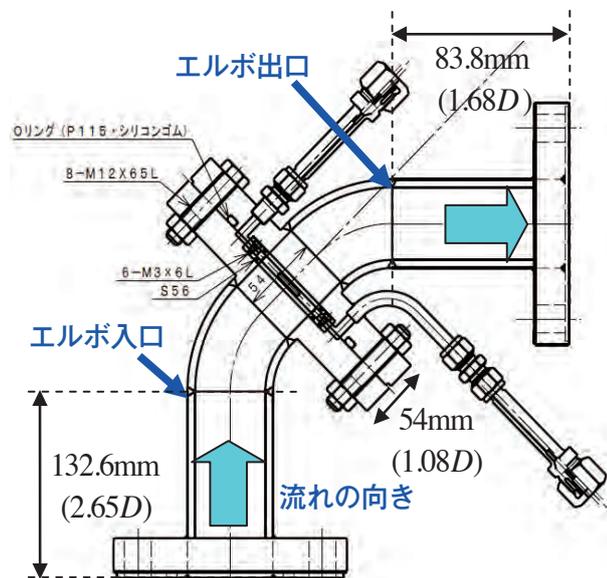


図3 エルボ試験部の形状

エルボ試験部の腐食速度センサの取り付けにあたっては、エルボ前後の配管と干渉しないように、リード線を横から取り出すスペースを確保する必要があった。また、耐圧の観点から、エルボ45°位置のフランジに対し一定の厚みを持たせる必要があった。これらの設計上の制約を考慮してエルボ試験部

を製作したため、エルボ試験部は、エルボ内45°位置に約54mm (1.08D) の直線部をもつ形状となり、一般の90°ロングエルボのような一定曲率をもつ形状とは異なるものとなった。従って、一般の90°ロングエルボでの流れ場における計算結果と比較する場合には、エルボの形状の違いに十分留意する必要がある。

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4に示す。腐食速度センサは、図4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。露出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おり、露出試験片の初期形状は図5の通りである。配管内表面に露出した試験片は、腐食減肉の進行により試験片厚さが減少するが、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 R の変化を計測することにより、厚み d の変化を測定する。なお、腐食速度センサの電気抵抗値と厚み d の関係式は式(1)の通りである。

$$d = \rho \frac{L}{w R} \quad (1)$$

ここで ρ は電気抵抗率、 L 、 d 、 w は露出試験片の長さ、厚みと幅である。具体的な換算方法については、既報⁽²⁵⁾にて報告している。

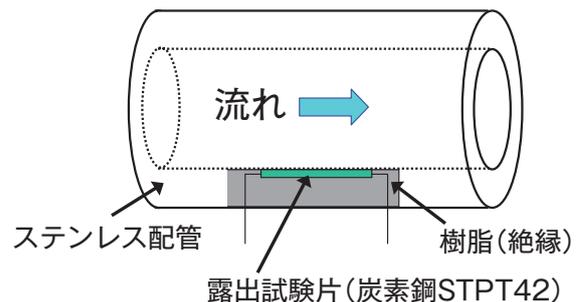


図4 腐食速度センサ取付方法

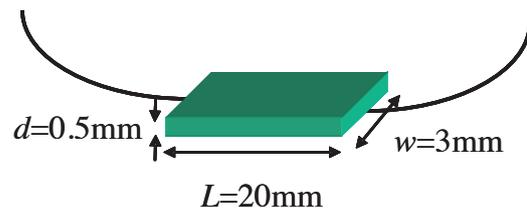


図5 露出試験片の初期形状

今回使用した腐食速度センサは、既報⁽²³⁾⁻⁽²⁵⁾で使用したセンサとは異なり、温度補償用の参照試験片をなくし露出試験片のみとした。形状を簡単にし、露出試験片の電気抵抗測定回路を2系統（図8）にすることで、センサ故障による測定データ欠落を低減することができる。但し、温度変動による影響を強く受けるため、以下、電気抵抗に及ぼす温度の影響について検討する。

金属の電気抵抗は、温度の増加に従い、直線的に増加するため、以下の近似式が成り立つ。

$$R_t = \rho_{t_0} \{1 + \alpha(t - t_0)\} \frac{L}{S} \quad (2)$$

ここで R_t は温度 t の時の電気抵抗、 ρ_{t_0} は温度 t_0 時の電気抵抗率、 t_0 は基準温度、 α は温度係数、 L と S は露出試験片の長さと同断面積である。図6は昇温時の電気抵抗特性例であるが、基準温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ とすると、昇温特性の傾き a と切片 b は以下の通りである。図6の場合、昇温特性の傾き、切片がそれぞれ

$$a = \frac{\rho_0 L}{S} \alpha, \quad b = \frac{\rho_0 L}{S} \quad (3)$$

$a=0.0153$, $b=4.0159$ であることから温度係数 α は以下の通りとなる。

$$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{0.0153}{4.0159} = 0.00381 \text{ [1/}^\circ\text{C]} \quad (4)$$

炭素鋼の温度係数を実測した例では、 $\alpha = 0.0037$ [1/°C] との報告⁽³¹⁾もあり、ほぼ同じ値であることから妥当と判断した。試験期間を通して温度が約149.2°C（表2参照）とほぼ一定であり、センサ厚さ $d = 500\mu\text{m}$ とすると、 $\pm 1^\circ\text{C}$ の精度で制御できていることから、 $\pm 0.2\mu\text{m}$ の誤差となる。減肉速度算出には10 μm 以上減肉させた時刻歴データを用いて

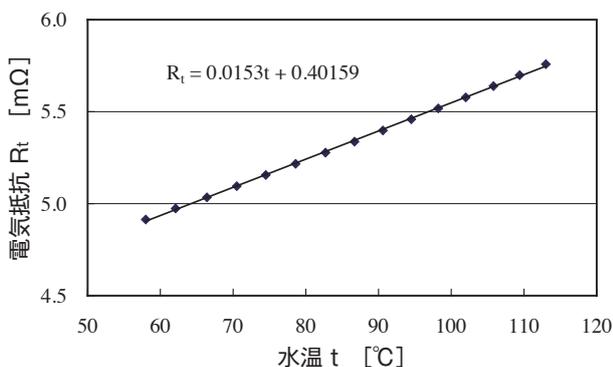


図6 昇温時のセンサ電気抵抗特性例

おり、この誤差は十分小さい。

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7、図8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Corrocean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。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。

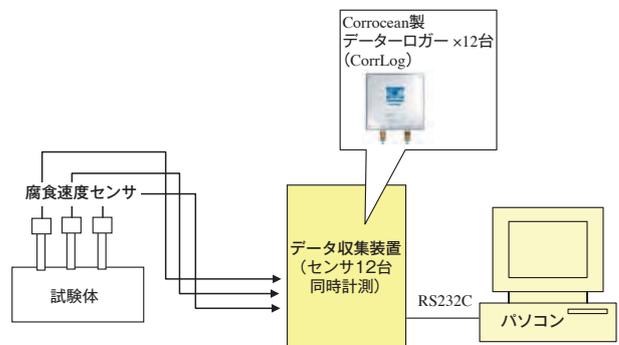


図7 電気抵抗計測システム

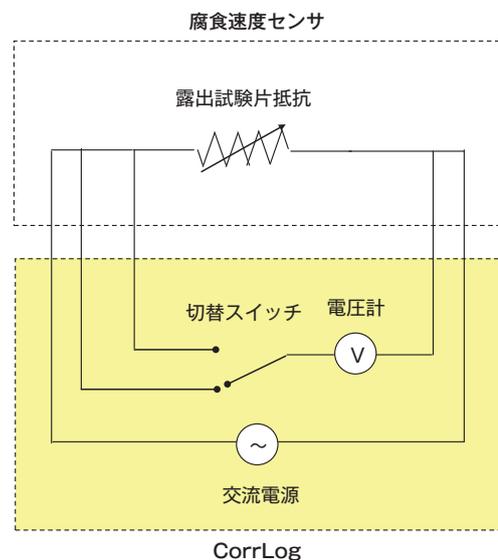


図8 電気抵抗計測回路図

2.5 試験条件

減肉速度測定の実験条件を表2に示す。試験時間は系統水の昇温を含め3週間を目安に実施した。流速条件については、管断面平均流速を6.22m/sから4.98m/sへと実験途中で変化させた。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、試験期間中のpHは平均で6.9~7.0とほぼ中性であった。鉄濃度は、流れ加速型腐食による減肉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減肉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 減肉速度測定の実験条件

回次	試験条件	Run1-1	Run1-2
【流動条件】		エルボ単体	
管断面平均流速 (流量)	-	6.22m/s (44.0m ³ /h)	4.98m/s (35.2m ³ /h)
温度 [℃]	150 ± 1℃	149.3	149.2
【計測時間】			
試験時間[h]		300	261
計測時間[h]		89	112
データ点数		267	336
【使用した試験体】			
エルボ		90°エルボ相当 曲率半径80mm	
腐食速度 センサ		初期形状 20mm × 3mm × 0.5mm 材質 炭素鋼STPT42 (Ni:0.02%, Cr:0.04%, Mo:0.01%)	
【水質】			
溶存酸素濃度 [ppb]	5ppb以下	0.2	0.1
pH*	中性付近	6.9 (6.5~7.6)	7.0 (6.2~7.5)
鉄濃度** [ppm]	参考データ	0.00~0.04	0.01~0.04
導電率** [μS/cm]	参考データ	0.22~0.69	0.37~0.41

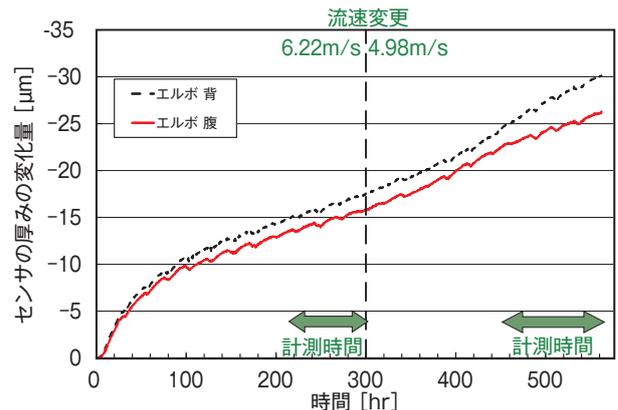
*注1：溶存酸素濃度、pHの実測データについては、試験期間内の平均値を記載。()内については、指示値の最大値と最小値を記載。

**注2：鉄濃度、導電率の実測データについては、試験期間における最大値と最小値を記載。

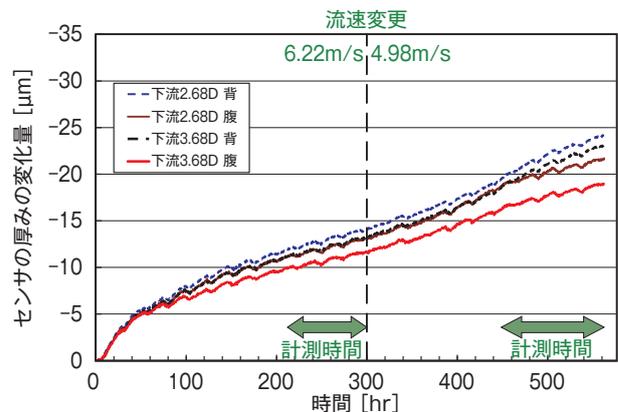
3. 実験結果と考察

3.1 エルボ管における減肉速度分布

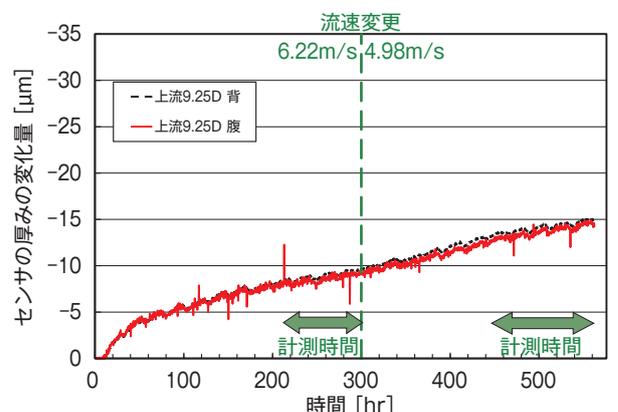
図9(a)(b)(c)にそれぞれ昇温完了以降のエルボ試験部、エルボ下流2.68D、3.68Dおよびエルボ上流9.25Dでの減肉量の推移を示す。溶存酸素濃度0.1~0.2ppb、pHは6.9~7.0である。20分間隔で測定



(a)エルボ試験部



(b)エルボ下流部



(c)エルボ上流部

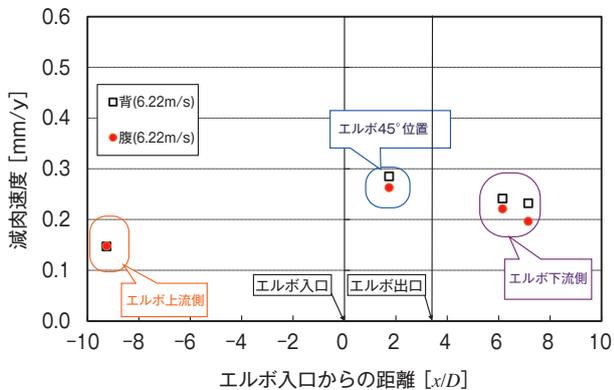
図9 エルボ管の減肉量の推移

した電気抵抗値 R から、露出試験片の減肉量 Δd を求めた。具体的には、電気抵抗値 R からセンサの厚み d へ換算し、当該データの前後2時間のデータ(計15点)を使って、センサの厚みの変化量の傾きを求めることにより算出した。実験途中(試験開始から300時間後)で、管断面平均流速を6.22m/sから4.98m/sに変化させている。

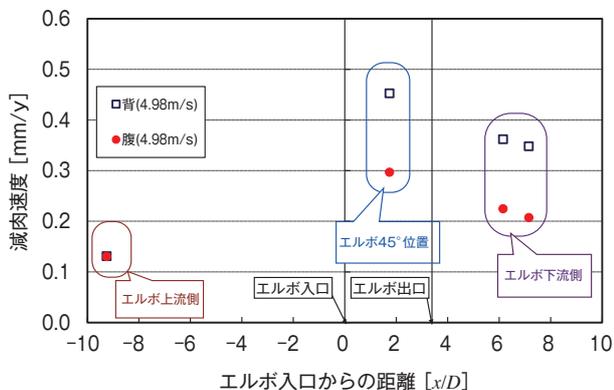
図9(a)(b)を見ると、実験初期の50時間程度を除いて、エルボ試験部およびエルボ下流部での減肉量がほぼ直線的に変化していることを確認できる。

一方、図9(c)を見ると、エルボ上流部において、時間の経過とともに徐々に曲線の勾配が減少した。この傾向は以前実施したオリフィスでの減肉速度測定^{(20),(24)}でも確認され、オリフィス上流で時間とともに減肉速度が減少する対数則的な時間変化となっていた。エルボ上流では物質移動係数が低く、酸化被膜の成長速度が溶解速度を上回ることが一因と考えられる。

図10(a)(b)は、エルボ内及びその上・下流部における減肉速度分布である。管断面平均流速は(a)が6.22m/s、(b)が4.98m/sである。



(a)管断面平均流速 6.22m/s



(b)管断面平均流速 4.98m/s

図10 エルボ内及びその上・下流部における減肉速度分布

図9に見られるように減肉量の推移が安定した期間(それぞれ(a)は89時間、(b)は112時間)を計測時間とし、この期間に対し減肉量データの時間変化率を求め、減肉速度を算出した。

エルボ管の減肉速度の分布は、エルボ内で最大となり、管周方向分布は腹側よりも背側で大きくなった。また、エルボ下流における減肉速度の分布は、下流に行くに従い減少する傾向を示した。

3.2 考察

今回は、エルボ単体でのエルボ管での減肉速度測定を実施している。試験開始後および流速変更後のしばらくの期間は減肉量の推移が一定にならなかったため、その期間を除く一定した減肉速度となった期間を計測時間の対象とし、減肉速度を算出した。

今回の測定では、流速が遅くなったにもかかわらず、エルボ内およびエルボ下流における背側の減肉速度は大きくなった。流速条件を変化させたことにより、エルボ内およびエルボ下流における流れ場が変化した可能性がある。今後、エルボ内の流れ場の構造について可視化実験や数値シミュレーションにより検討する必要がある。

また、エルボ下流における減肉速度の分布は、下流に行くに従い減少する傾向を示したが、エルボからの距離が長くなるにつれ、エルボでの局所流動の影響が徐々に小さくなることを示唆している。

なお、エルボ内およびエルボ下流での減肉速度の値は、エルボ上流部(直管)での減肉速度の値の数倍以下であり、今後追加で減肉データを拡充することにより、減肉速度の測定精度をあげ、再現性を確かめる必要がある。

エルボ単体の場合では、オリフィス下流等と比較して減肉速度が1桁ほど小さいため、酸化被膜の変化や経過時間の影響が大きく、高精度測定にはより長時間の実験が必要である。

4. まとめ

エルボ単体の場合のエルボ管の減肉速度測定を実施した結果、以下のことを確認した。

- (1) エルボ管の減肉速度の分布は、エルボ内で最大となり、管周方向分布は腹側よりも背側で大きくなった。

(2) エルボ下流における減肉速度の分布は、下流に行くに従い減少する傾向を示した。

なお、エルボ管を対象として、FACの直接的な流体力学的因子と言われている物質移動係数の計測実験を計画している。今後は、物質移動係数とFAC減肉速度との比較・分析を進めていく予定である。

また、配管要素が組み合わせられることで、配管要素単体に比べ流れ場の構造がどのように変化し、減肉速度分布が変化するかを今後確認していく予定である。

さらに、実機減肉データについても、代表的な配管要素の組み合わせについて順次データを蓄積し、配管要素組み合わせの影響について確認していく予定である。

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 Nassdampfturbinen 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-CICEROTM and updating to version 3.0, International Conference on Flow Accelerated Corrosion, Lyon-France (2008).
- (13) S. Trevin, F. Dupuis and P. Lardert, EDF knowledge of flow-assisted corrosion in PWR type Npp, EDF report ENTECH050089 (2005).
- (14) V. K. Chexal, J. S. Horowitz, Flow assisted corrosion in carbon steel piping parameters and influences, 4th International Symposium Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, 9-1 (1989).
- (15) 矢島佐知子, 額賀孝訓, 梅村文雄, 絞り部付き炭素鋼管を用いた高温水減肉試験及び流体力学的解析, 材料と環境, 第56巻, 第5号, p.222 (2007).
- (16) 米田公俊, 森田良, 佐竹正哲, 藤原和俊, 流れ加速型腐食に対する影響因子の定量的な評価 (その3) - 減肉予測モデルの提案 -, 電力中央研究所報告, L08016, (2009).
- (17) Y. Utanohara, A. Nakamura, RANS Predic-

- tion of Orifice Flow and Comparison with Measurements and LES, International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF-2008), Berlin, Germany (2008).
- (18) 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 Safety (NUTHOS-7), Seoul, Korea (2008).
- (19) Y. Utanohara, Y. Nagaya, A. Nakamura, and M. Murase, Influence of Local Flow Field on Flow Accelerated Corrosion Downstream from an Orifice, the Journal of Power and Energy System, Vol.6, No.1, p.18 (2012).
- (20) Y. Utanohara, Y. Nagaya, A. Nakamura, M. Murase and K. Kamahori, Correlation between Flow Accelerated Corrosion and Wall Shear Stress Downstream from an Orifice, the Journal of Power and Energy System, Vol.7, No.3, p.138 (2013).
- (21) K. Kamahori, Y. Utanohara, A. Nakamura, M. Murase and Y. Nagaya, Flow Accelerated Corrosion Downstream from an Orifice (1.Measurement of Corrosion Rate), International Conference on Flow Accelerated Corrosion, Paper No.1234, Avignon- France (2013).
- (22) Y. Utanohara, K. Kamahori, A. Nakamura, M. Murase and Y. Nagaya, Flow Accelerated Corrosion Downstream from an Orifice (2. Evaluation by Numerical Simulation), International Conference on Flow Accelerated Corrosion, Paper No.1232, Avignon- France (2013).
- (23) 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).
- (24) 長屋行則, 中村晶, 村瀬道雄, 歌野原陽一, 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－, INSS JOURNAL, Vol. 17, p.104 (2010).
- (25) 歌野原陽一, 長屋行則, 中村晶, 村瀬道雄, 流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響－オリフィス下流の壁面せん断応力と腐食速度の関係－, INSS JOURNAL, Vol. 18, p.94 (2011).
- (26) 歌野原陽一, 中村晶, 長屋行則, 村瀬道雄, 玉形弁流れのLDV計測と非定常RANS計算, INSS JOURNAL, Vol. 17, p.88 (2010).
- (27) 長屋行則, 中村晶, 村瀬道雄, 歌野原陽一, 流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響－玉形弁下流における腐食速度－, INSS JOURNAL, Vol. 18, p.84 (2011).
- (28) 長屋行則, 歌野原陽一, 中村晶, 村瀬道雄, 流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響－配管要素組み合わせにおける腐食速度－, INSS JOURNAL, Vol. 19, p.65 (2012).
- (29) 辻義之, 近藤昌也, FAC評価における流動場および物質移動の影響と課題, 日本機械学会論文集, 第78巻, 第787号, p.455 (2011).
- (30) 木綿隆弘, 歌野原陽一, 中村晶, 木村繁男, 小松信義, 山田紘司, 菅原康裕, 中道淳平, 円管内オリフィス下流域における壁面せん断応力の時間平均と変動成分, 日本機械学会論文集, 第79巻, 第799号, p.258 (2012).
- (31) S. Yoshino, S. Hamada, Y. Kaieda, Accuracy Comparison of the Electrical Potential Drop Technique and Ultrasonic Testing For the Pipe Wall Thinning in the Thermal Power Plant, the ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Division / K-PVP Conference (PVP2010), PVP2010-25410, (2010).