炭素鋼配管の流れ加速型腐食ならびに酸化皮膜構造に及ぼす材料・環境因子の影響評価

阿部 博志^a, 渡邊 豊^a

^a 東北大学 大学院工学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-2)

Combined Effect of Material and Environment Factors on Flow Accelerated Corrosion and Oxide Film Property of Carbon Steel Pipes

Hiroshi ABE^a and Yutaka WATANABE^a

^a Graduate School of Engineering, Tohoku University (6-6-01-2, Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8579)

Keywords : Flow Accelerated Corrosion, Carbon Steel, Cr Content, pH, Oxide Solubility

1. はじめに

流れ加速型腐食(FAC: Flow Accelerated Corrosion)による炭素鋼配管の減肉は、原子力発電プラントにおける重要な経年劣化事象の一つである。特に流れの乱れる部位(オリフィス下流や曲り管など)で発生することが知られており、大面積の減肉が生じ得るために大規模な流体漏洩につながる可能性がある。FACは、流れにより配管壁面近傍の物質移動が促進されて酸化皮膜の溶解ならびに鋼の腐食が加速する現象であり、高温水/酸化皮膜界面とバルク水中における金属(主にFe)イオン濃度差が駆動力となる。そのため、流れの影響が大きいほど、また皮膜構成酸化物の溶解度が高いほど減肉速度が高くなる。

FACに影響する主要なパラメータは、物質移動を支配する流体力学因子、温度、pH、溶存酸素濃度などの水化学因子、さらに鋼の成分などの材料因子に大別できる。水化学因子の観点からは、例えば、pHはFAC減肉速度に大きく影響し、pH 9.2付近からpHの上昇にともない炭素鋼の減肉速度が急速に低下する^{1),2)}ことが知られており、これは広い温度域においてマグネタイト(Fe_3O_4)の溶解度がpHの上昇とともに低下するためであると理解されている^{3),4)}。また、溶存酸素も減肉抑制に効果があり、pH 7では数十ppb程度、pH 9.2では数~十数ppb程度の溶存酸素濃度が存在すれば、減肉抑制に大きな効果があると報告されている^{5)~8)}。これは、溶存酸素濃度上昇にともない安定な鉄酸化物がマグネタイトから溶解度が極めて低いヘマタイト(Fe_2O_3)に変化するためと考えられている。これらの知見に基づき、一部の加圧水型軽水炉(PWR: Pressurized Water Reactor)二次系では高pH運転が実施され、さらに近年、5ppb程度の低濃度の酸素注入を組み合わせた運転も開始されている。一方沸騰水型軽水炉(BWR: Boiling Water Reactor)では、基本的にpHは中性であるため、酸素注入(給水で50ppb程度)を採用しており、い

ずれも減肉抑制に一定の成果を挙げている。また材料因子の観点からは、鋼のFAC減肉速度は鋼材のCr含有量に強く依存し、比較的低いレベルのCr濃度で大きなFAC減速効果が期待できることが知られている^{1),9),10)}。現在、BWRではCrのFAC抑制効果に基づき、配管材料の低合金鋼への変更も進んでいる¹¹⁾が、減肉速度に及ぼすCr含有量・pHの組み合わせ効果については知見が不足しており、FAC抑制へのCrの作用機構については、皮膜の緻密性に影響し、皮膜欠陥(空孔)でのイオンの拡散を抑制するとの説があるが、メカニズムレベルでの理解は充分ではない。さらに、FAC減肉機構を理解する上で、皮膜中の物質移動は本質的に重要な要素であるが、物質移動様式については大別して2つの異なる考え方がある。具体的には、一方は酸化物中の物質移動の主体はイオンとしての固相拡散であるとの考え方^{12)~14)}であり、他方は、酸化皮膜中の微細な空隙に水が浸入しており、それを経路とした液相拡散が支配的であるとの立場^{15)~17)}である。しかしながら、FACにおいてどちらが支配的な役割を果たすかについては必ずしも明らかにされておらず、これは酸化皮膜に関する知見(結晶構造、空隙率あるいは皮膜中の成分分布など)が不足していることにその一因がある。

著者ら^{18),19)}は、流速、水質、鋼材中Cr含有量を変数としたFAC試験により、これまでデータが必ずしも十分でなかった減肉速度へのpH依存性および鋼材Cr含有量と水質パラメータの組み合わせ効果などについて系統的なデータを取得するとともに、実測した減肉速度データセットに基づき、減肉速度に及ぼすCr効果ならびにpH効果を係数として表現している。また、透過型電子顕微鏡などを用いた皮膜観察・分析に基づき、皮膜構造(Cr濃縮の有無、欠陥の多寡)の特徴を抽出している。本稿では、上述した著者らの取り組みについて紹介するとともに、FAC試験結果ならびに酸化皮膜の観察・分析事実に基づき、減肉機構の詳細ならびに減肉抑制に及ぼすCrの作用機構を考察する。

2. 試験方法

2. 1 供試材ならびに試験片

供試材は高圧配管用炭素鋼鋼管(JIS G3455)をベースとして、Cr含有量を6レベル(0.003, 0.014, 0.043, 0.10, 0.42, 1.01 wt%)に制御して溶製した実験用鋼を用いた。供試材の化学組成を表1に示す。これらのCr含有量は、過去の知見¹⁰⁾からCr効果が現れ始め減肉が大きく抑制される領域を広くカバーするように選ばれた。準静止水中試験ならびに流動加速腐食試験には、それぞれ10 mm × 10 mm × 4 mm および 9.5 mm × 15 mm × 2 mm の板状試験片を用いた。試験片表面はエメリー紙 #1000 で湿式研磨仕上げとした。マイクロメータを用いて10 μmの精度で各辺の長さを測定し、各試験片の表面積を算出した。アセトン中での超音波洗浄後、真空乾燥を施し、電子天秤により10 μgの精度で重量を測定した。

2. 2 試験条件ならびに試験方法

水質調整用サブループを備えた循環式高流速ループを用いてFAC試験を実施した。図1に示すように、6種類の試験片を試験片ホルダーに取り付け、試験部に固定した。試験片と試験片ホルダーはセラミックス製のスリーブ、ワッシャーを用いて絶縁した。各試験片は試験部中心に対して対称に配置されていることから、1回の試験で6種類の試験片の減肉評価が可能である。試験条件をまとめて表2に示す。温度：150℃、圧力：1.5 MPaとして、流速、pH、溶存酸素濃度、試験時間を変数として試験を実施した。流速を変数とした試験はpH：中性、溶存酸素濃度：<1 ppbとして実施し、pHを変数とした試験は流速：3.0 m/s、溶存酸素濃度：<1 ppbとして実施した。流速はポンプの吐出流量と試験部断面積から平均流速として算出した。pHの調整はアンモニア水を定量薬液ポンプで水質調整用サブループへ注入することにより行った。ここでのpHの値は、試験中に変動するpHの平均値を算出したものであり、試験ループ入口で計測したpHの変動は、目標値に対して±0.05程度であった。溶存酸素濃度の調整は人工空気ならびに高純度窒素ガスの吹き込みにより調整した。試験手順は、試験片を設置してからループ内の水質調整(pHならびに溶存酸素濃度)を行った後、流速ならび

に圧力を所定の値に調整した。試験装置からのリークや圧力変動がないことを確認し、昇温を開始した。試験部の温度が150℃に達した時点で試験開始とした。所定の時間が経過後、試験部ヒータの電源を切り、室温まで下がったことを確認してから流速・圧力を下げ、試験片を取り出した。

試験終了後、試験前後の試験片重量変化と試験片表面積から減肉速度を算出した。次に、試験片表面に形成された酸化皮膜を表面および断面方向から金属顕微鏡ならびに走査型電子顕微鏡(SEM：Scanning Electron Microscope)で観察した。また、X線回折(XRD：X-Ray Diffraction)およびラマン分光法により酸化皮膜の構成酸化物の同定を行った。さらに、皮膜構成酸化物の結晶構造、皮膜中の空隙の多寡ならびに成分分布を評価するため、透過電子顕微鏡+エネルギー分散型X線分光法(TEM：Transmission Electron Microscope + EDX：Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)を用いた観察・分析を実施した。TEM試料は、マイクロサンプリング機構を備えた収束イオンビーム(FIB：Focused Ion Beam)法により作製した。

3. 減肉速度に及ぼす材料・環境因子の組み合わせ効果の評価

FAC試験から得られた減肉速度について、Cr含有量を横軸としてプロットしたものを図2に示す。試験パラメータの影響について、以下に述べる。

3. 1 流速の影響

準静止水中試験では全ての試験片でFACは生じておらず、したがってCr含有量の影響は見られなかった。一方で流動水環境ではFACが生じており、減肉速度が準静止水中に比べて大幅に増大している。特にCr含有量の低い鋼材について、それが顕著に現れており、0.003 wt%Cr材は、0.3 m/sという比較的低い平均流速下でも約0.6 mm/y相当の減肉が観測さ

表1 供試材の化学組成(wt%)

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
CS0	Bal.	0.16	0.23	0.7	0.024	0.017	0.003
CS01	Bal.	0.15	0.23	0.69	0.024	0.017	0.014
CS04	Bal.	0.15	0.23	0.69	0.023	0.017	0.043
CS1	Bal.	0.15	0.24	0.69	0.023	0.017	0.10
CS4	Bal.	0.15	0.23	0.68	0.024	0.017	0.42
CS10	Bal.	0.15	0.23	0.7	0.023	0.016	1.01

図1 FAC試験片寸法ならびに試験片ホルダーとFAC試験装置外観

表2 FAC試験条件

Flow rate	pH	Neutral (6.86)	9.07 (NH ₃ addition)	9.36 (NH ₃ addition)	10.4 (NH ₃ addition)
Quasi-static		(#0) DO<1 ppb	Not tested	Not tested	Not tested
0.3 m/s		(#1) DO<1 ppb	Not tested	Not tested	Not tested
3.0 m/s		(#2) DO<1 ppb (#7) DO<1 ppb (#6) DO=1200 ppb	(#3) DO<1 ppb	(#4) DO<1 ppb	(#5) DO<1 ppb (#8) DO<1 ppb

Temperature: 150℃, Pressure: 1.5 MPa, Duration: 325 h (#0-6), 1100 h (#7,8)

れ、3.0 m/s では約 0.8 mm/y に上昇した。また、Cr 含有量の増加とともに減肉速度が低下しており、いずれの流動条件下でも鋼材中の Cr による FAC の抑制効果が確認された。特に Cr 含有量が 0.043 wt% 以上の鋼材では、流速 3.0 m/s での減肉速度が 0.3 m/s での減肉速度をむしろ下回っており、Cr 含有による FAC の抑制効果が高流速下でより顕著に現れた。また、Cr 含有量の変化に対する相対減肉速度の変化を見ると、Cr による FAC 抑制効果は高流速ほど低い Cr 含有量から強く現れ始めていることがわかった。

3. 2 pH の影響

いずれの pH においても Cr による FAC の抑制効果が認められた。FAC が最も問題となる 100 °C 台中盤の温度域での炭素鋼の FAC 減肉速度の pH 依存性について、初めて系統的なデータが取得され、本研究の条件範囲では pH の上昇とともに減肉速度が顕著に低下することが確認された。さらに、鋼材 Cr 含有量と pH の組み合わせ効果について系統的なデータが本研究により得られ、いずれの pH においても 1 % の Cr によって減肉速度がおよそ一桁低下することがわかった。

3. 3 溶存酸素濃度の影響

酸素注入により、Cr 含有量に依らず FAC の大幅な抑制が確認された。DO : 1200 ppb 試験での減肉速度は、3.0 m/s の

図2 減肉速度に及ぼす各試験パラメータの影響

図3 FAC 速度と Cr 含有量の相関(近似直線の傾きが Cr 効果、切片が pH 効果)

流速下にもかかわらず、準静止水中試験での減肉速度と同等まで抑制されており、0.42 wt% Cr 材の試験片に至っては、試験後の重量が増加していた。よって実質的に FAC は生じてなかったと判断された。脱気環境下において試験片に形成された酸化皮膜はマグネタイトで構成されていたのに対し、酸素注入条件で試験片に形成された酸化皮膜はヘマタイトであることが XRD ならびにラマン分光法により同定されたため、マグネタイトと比較して溶解度が極めて低い皮膜形成により FAC が抑制されたと判断された。よって、本研究の試験環境下では、酸素注入による FAC 抑制効果が支配的になっていたと言える。

3. 4 試験時間の影響

中性条件下では、1100 時間試験における減肉速度は 325 時間試験結果と比較して高い減肉速度を示した。これは、少なくとも今回の試験条件下では、流動下における初期の減肉速度は低く、一定時間経過後に減肉速度が一定になることを示唆している。一方 pH 10.4 の条件下では、Cr 含有量にかかわらず有意な減肉は認められなかった。

3. 5 減肉速度データセットに基づく pH・Cr 効果の係数化

これまで蓄積した減肉速度データセットに基づき、減肉速度に及ぼす Cr 効果ならびに pH 効果を係数として表現することで、種々の材料・環境組み合わせ条件下における減肉速度予測に寄与すると着想した。pH を変数とした FAC 試験(流速 : 3.0 m/s, 溶存酸素濃度 : < 1.0 ppb, 試験時間 : 325 時間)から得られた減肉速度データセットについて、便宜上減肉速度ならびに Cr 含有量を無次元化し、両対数グラフにまとめて図 3 に示す。それぞれの条件下における減肉速度(相対値)は、Cr 含有量が 0.003 ~ 0.42 wt% の範囲では直線近似が可能であると判断した。近似直線は以下の式で表現できる。

$$\log(\text{減肉速度}) = X_{\text{Cr}} \times \log(\text{Cr 含有量}) + \log(X_{\text{pH}}) \cdots (1)$$

ここで、 X_{Cr} : 材料係数(Cr 効果)、 X_{pH} : 環境係数(pH 効果)であり、(1)式において勾配が Cr 効果、切片が pH 効果を表している。減肉速度に及ぼす材料係数ならびに環境係数について図 4 に示す。pH の上昇とともに Cr 含有量にかかわらず減肉速度が低下し、減肉抑制に及ぼす pH 効果は pH 9 ~ 9.5 で大きくなることがわかる。この傾向は従来知見と一致し、pH の上昇とともにマグネタイトの溶解度が低下することか

図4 FAC 速度に及ぼす Cr 効果ならびに pH 効果の係数化

ら説明可能と考えられる。一方で減肉抑制に及ぼす Cr 効果は pH の上昇とともに小さくなる傾向を示した。つまり高 pH 環境下では、材料中 Cr より pH による減肉抑制が支配的であることがわかる。

4. 酸化皮膜の特徴抽出

減肉機構の詳細ならびに減肉抑制に及ぼす Cr の作用機構を考察する上で、酸化皮膜の特徴を把握することが不可欠である。ここでは、pH：中性、溶存酸素濃度：＜1 ppb で、準静止水と流動水条件下において高 Cr (1.01 wt%) ならびに低 Cr (0.003 wt%) 試験片に形成された酸化皮膜の特徴を詳細に調査した結果について以下に述べる。

4. 1 準静止水条件下で形成された酸化皮膜の特徴

準静止水条件下試験 (pH：中性、試験時間：325 時間) 後の試験片について、皮膜の TEM 観察・分析結果を図 5 に示す。両者とも有意な減肉は認められなかったものの、酸化皮膜構造には明確な違いが認められた。高 Cr 材の皮膜はポーラスな外層と緻密な内層の二層構造であった。内層は厚さが約 200 nm で比較的均一であった。外層中の Cr 濃度は母材と比較しても十分に低いことから、Cr を含まない鉄酸化物で構成されていることが明らかになった。それに対して内層中では Cr の濃縮が認められ、特に内層表面 (外層／内層境界近傍) で Cr 濃度が最も高く、母材に向かうに従い次第に減少する

傾向が認められた。XRD ならびにラマン分光法による分析から、脱気環境下で形成された酸化皮膜はマグネタイトで構成されていたことが示されていることから、内層皮膜に濃縮した Cr は Fe-Cr スピネル系酸化物 ($\text{Fe}_{(3-x)}\text{Cr}_x\text{O}_4$) として存在している可能性が考えられる。皮膜の溶解・析出により形成されたと考えられる外層が Cr を含まない鉄酸化物で構成されていることと併せて考えると、内層中の Cr 濃縮は内層から Fe 成分のみが優先溶解した結果であることが示唆された。一方で、低 Cr 材では厚さ 150 ～ 500 nm 程度のポーラスな皮膜一層のみが形成されており、高 Cr 材で観察された緻密な内層はほとんど認められなかった。また、皮膜／母材界面の凹凸が高 Cr 材と比較して顕著で、これは母材内方への不均一な腐食によるものと判断された。皮膜中への Cr の濃縮は一切認められなかった。よって、FAC が起きない準静止水環境においても、本研究で使用した供試材の Cr 含有量範囲 (0.003 ～ 1.01 %) で、皮膜の構造・緻密性が大きく異なることが明らかになった。

4. 2 流動水条件下で形成された酸化皮膜の特徴

FAC 試験 (流速：3.0 m/s, pH：中性、試験時間：325 時間) 後の皮膜について上記と同様に調査した結果を図 6 に示す。準静止水条件下と同様に、高 Cr 材の内層中に Cr 濃縮が認められ、外層／内層界面近傍で最も Cr 濃度が高かった。電子線回折による皮膜構造調査の結果、両者ともに内層は母材と

図 5 準静止水条件下試験 (pH：中性、試験時間：325 時間) で形成された酸化皮膜の断面 TEM 写真
(a) Cr：1.01 wt%, (b) Cr：0.003 wt%

図 6 流動水条件下 (流速：3.0 m/s, pH：中性、試験時間：325 時間) で形成された酸化皮膜の断面 TEM 写真
(a) Cr：1.01 wt%, (b) Cr：0.003 wt%

配向関係にあるマグネタイトから形成されていたことが明らかになった。これは、皮膜／母材界面で固相酸化が起きていたことを示している。皮膜厚さは両者とも数百 nm 程度で大きな差はなかったものの、皮膜の緻密性については顕著な違いが認められた。特筆すべき特徴としては、低 Cr 材皮膜中の空隙が、特に皮膜／母材界面に集中しており、さらにその近傍では多結晶のマグネタイトを含んだアモルファス鉄酸化物が形成されていたことである。これは、皮膜の空隙を経路として沖合から水が内層／母材界面まで浸入し、そこで溶解・析出反応が起きていたことの証左と考えられた。皮膜内部と比較して、皮膜／母材界面で溶解が促進されていた理由については後述する。

次に、上記と同じ試験条件下において、より長時間の FAC 試験(試験時間：1100 時間)を実施した試験片の皮膜観察・分析結果を図 7 に示す。高 Cr 材では、325 時間試験と同様に Cr 濃縮した緻密なマグネタイト皮膜が形成されており、厚さが数 μm まで成長していた。一方で、低 Cr 材は厚さ約 150 nm のポーラスなアモルファス層のみが観察された。減肉速度が高い箇所ほど薄い皮膜が形成されることはこれまで報告されており²⁰⁾、本研究における観察事実はこの知見と一致している。以上から、酸化皮膜の特性(膜厚ならびに空隙率)が FAC 速度と密接な関係を持つことが示唆された。

5. 減肉機構の詳細ならびに減肉抑制に及ぼす Cr の作用機構の考察

FAC 試験結果ならびに酸化皮膜の観察・分析事実から得られた知見に基づき、FAC 減肉機構を図 8 にまとめて示す。高い FAC 速度を示す条件下では、流れの作用により酸化皮膜表面近傍の Fe イオンが希釈されて鉄酸化物の析出が阻害されるため外層が形成されず、ポーラスな内層皮膜を経路とした物質移動(液相拡散)が支配的になると考えられた。また、

図 7 流動水条件下(流速：3.0 m/s, pH：中性, 試験時間：1100 時間)で形成された酸化皮膜の断面 TEM 写真
(a) Cr：1.01 wt%, (b) Cr：0.003 wt%

皮膜／母材界面では、式(2)に示す H_2O による鉄の直接酸化にともない、水素が発生する。

よって、皮膜／母材界面での局所的に水素分圧が上昇し、マグネタイト溶解度が増大^{21),22)}することで、皮膜の溶解ならびに空隙の形成が促進される可能性が示唆された。このことから、「酸化皮膜が沖合へ溶解→膜厚が低下→水分子の内方拡散が促進される→鉄の酸化にとまなう水素発生→局所的に酸化物溶解度が上昇→酸化皮膜内の空隙率上昇→皮膜内の物質移動と皮膜の溶解が促進される→・・・」がスパイラル状に進行することにより、FAC による減肉が加速されると考えられた。

減肉抑制に及ぼす Cr の作用機構の観点からは、皮膜中への Cr 濃縮(特に外表面)は Fe 成分が優先溶解した結果であり、溶解度の低い Fe-Cr スピネル系酸化物層で「蓋」をする作用があると考えられた。それによって緻密な内層が形成され、内層の空隙を経路とした酸化剤(H_2O)および Fe イオンの液相拡散を抑制することで、FAC 減肉速度が低下すると考えられた。

6. ま と め

本稿では、FAC に関する著者ら研究内容について紹介するとともに、FAC 試験結果ならびに酸化皮膜の観察・分析事実から得られた知見に基づき、減肉機構の詳細ならびに減肉抑制に及ぼす Cr の作用機構を考察した。得られた主な結果を以下に列記する。

- (1) 実測した減肉速度データセットについて、FAC 速度と Cr 含有量の関係を両対数グラフにプロットすることで、Cr の効果はほぼ直線の勾配で、pH の効果は切片で整理できることを示し、Cr 効果ならびに pH 効果を係数として表現した。
- (2) 高い FAC 速度を示す条件下では、ポーラスな内層皮膜を経路とした物質移動(液相拡散)が支配的になると考えられた。皮膜／母材界面での局所的な水素分圧上昇とそ

図 8 ポーラスな皮膜を経路とした物質移動を考慮した FAC 減肉モデル

れにともなう空隙の形成が、FACを加速させることが示唆された。

- (3)皮膜中へのCr濃縮(特に外表面)は、溶解度の低いFe-Crスピネル系酸化物層で“蓋”をする作用があると考えられた。それによって緻密な内層が形成され、内層の空隙を経路とした酸化剤(H₂O)およびFeイオンの液相拡散を抑制することで、FAC減肉速度が低下すると考えられた。

謝 辞

本報は、原子力安全・保安院 平成19-22年度高経年化対策強化基盤整備事業(経年劣化事象の解明など)の成果の一部であることを附記する。

(Received April 2, 2012)

文 献

- 1) T. Tsuruta, K. Murata, Y. Shoda, K. Yamamoto ; *Proc. Fontevraud 6 Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs*, **1**, 181 (2006).
- 2) W. Kastner, K. Riedle, H. Tratz ; *VGB Kraftwerkstechnik*, **64**, 411 (1984).
- 3) C. Cragolino ; *Proc. 3rd Int. Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors*, TMS/ASM, 397 (1987).
- 4) S.E. Ziemniak, M.E. Jones, K.E.S. Combs ; *Journal of Solution Chemistry*, **24**, 837, (1995).
- 5) I. S. Woolsey, G. J. Bignold, C. H. de Whalley, K. Garbett ; *Water Chemistry of Nuclear Reactor System 4*, p.337 (London: British Nuclear Energy Society, 1986).
- 6) 泉谷雅清, 水庭文夫, 大角克巳, 神林 剛, 松島雅憲, 丹野和夫 ; 火力原子力発電, **27**, 419 (1976).
- 7) 大橋健也, 本田 卓, 榎村栄二, 古谷保正 ; 防食技術, **37**, 198 (1988).
- 8) 日本原子力学会編 ; 原子炉水化学ハンドブック, (コロナ社, 2000).
- 9) H.G. Heitmann, P. Schub ; *Proceedings of the Third Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors*, p.243 (BNES, London, 1983).
- 10) M. Bouchacourt ; *4th International FAC Symposium*, EPRI, (1995).
- 11) JSME (発電用原子力設備規格): 沸騰水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格(2006).
- 12) P.H. Effertz ; *Proc. the Fifth NACE International Congress on Metallic Corrosion*, Tokyo, p.920 (1972).
- 13) L. Tomlinson ; *CORROSION*, **37**, 591 (1981).
- 14) L. Tomlinson, C.B. Ashmore ; *Br. Corros. J.*, **22**, 45 (1987).
- 15) L.E. Sanchez-Caldera ; *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **110**, 180 (1988).
- 16) J.E. Castle, H.G. Masterson ; *Corrosion Science*, **6**, 93 (1966).
- 17) J. Robertson ; *Corrosion Science*, **29**, 1275 (1989).
- 18) Y. Watanabe, K. Sue, H. Abe ; *Proc. 2009 ASME Pressure Vessel and Piping Division Conference*, No.78126, (2009)
- 19) Y. Watanabe, H. Abe, T. Miyazaki ; *Proc. 2010 ASME Pressure Vessel and Piping Division / K-PVP Conference*, No. 25584, (2010)
- 20) B. Paulson ; *Proc. Fifth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, (1991).
- 21) G.J. Bignold, K. Garbett, R. Garnsey, I.S. Woolsey ; *Proc. Second Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors*, p.5, (British Nuclear Engineering Society, London, 1980).
- 22) K. Fujiwara, M. Domae, K. Yoneda, F. Inada, T. Ohira, K. Hisamune ; *Nuclear Engineering and Design*, **241**, 4482 (2011).