水素を溶存した高温水中における SUS 304 鋼腐食表面への Co イオン取り込みに及ぼす Zn 添加の効果*

萩沼真之**, 小野昇一**, 高守謙郎***,
武田邦彦†, 橋孝二††, 石樽顕吉†††

** 財団法人 産業創造研究所柏研究所

*** 東京電力株式会社電力技術研究所

† 芝浦工業大学工学部

†† 東京理科大学理学部

††† 東京大学工学部

Effect of Zinc Addition on Cobalt Ion Accumulation into the Corrosion Surface of Type 304 Stainless Steel in High-Temperature Water Containing Dissolved Hydrogen*

Masashi Haginuma**, Shoichi Ono**, Kenro Takamori***
Kunihiko Takeda†, Koji Tachibana†† and Kenkichi Ishigure†††

** Kashiwa Research Laboratory, Institute of Research and Innovation

*** Power Engineering R & D Center, Tokyo Electric Power Company

† Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology

†† Faculty of Science, Science University of Tokyo

††† Faculty of Engineering, The University of Tokyo

The effect of zinc addition on the corrosion and the cobalt accumulation on type 304 stainless steel exposed to water at 561 K has been investigated. The exposure tests were carried out at three different zinc concentrations 0, 0.2 and 0.8 μM , and also using three different types of zinc compounds ZnO , ZnSO_4 , and $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$. The structure and elemental depth distributions of the corrosion surface were analyzed by EPMA, XRD and GDS. The zinc addition suppressed the amount of corrosion and the cobalt accumulation. These effects were related to the zinc concentration, however, no significant change was observed with the zinc constitution. The cobalt accumulation suppression by the zinc addition is due to two separate factors; first, the reduction in amount of corrosion film, and secondly, the suppression of the cobalt concentration increase with time in the corrosion film.

Key word : cobalt, zinc, stainless steel-304, GDS, surface analysis, distribution, corrosion, corrosion film, high-temperature water, dissolved hydrogen, BWR

* 日本原子力学会春の年会（東京，1997 年）で発表

** 〒277 柏市高田 1201 (1201, Takada, Kashiwa, 277 Japan)

*** 〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1 (4-1, Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, 230 Japan)

† 〒108 東京都港区芝浦 3-9-14 (9-14, Shibaura 3-chome, Minato-ku, Tokyo, 108 Japan)

†† 〒162 東京都新宿区神楽坂 1-3 (3, Kagurazaka 1-chome, Shinjuku-ku, Tokyo, 162 Japan)

††† 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1 (3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan)

1. 緒 言

BWR プラントの一次系線量の上昇は，構造材料から冷却水中に放出した極めて微量の腐食生成物が放射化して生成した ^{60}Co などがこれら構造材料の内表面に付着することによって生ずる¹⁾。これらの放射性腐食生成物の付着抑制は，作業従事者の被曝低減の観点から軽水炉技術の重要な課題の一つであり，わが国でも浄化系の強化による腐食生成物の除去，低 Co 材の使用による Co 源の低減などの対策が実施され効果を上げてきた²⁾。一

方, このような対策が取りにくい海外の BWR プラントに対して, 近年, 一次冷却水中に微量の Zn を注入して放射能蓄積を抑制させる技術が適用されており³⁾, わが国でもより一層の抑制対策技術として最近注目されている。Zn 注入による抑制メカニズムについては, ラボ試験において腐食が抑制されること⁴⁾や Co イオン取り込みが抑制されること⁵⁾が明らかにされているが, Co 取り込み挙動と皮膜の構造や生成過程とを関連づけた研究は少なく, 詳細は不明な点が多い。他方近年, 海外の BWR では水素注入による SCC 発生の予防を目的とした炉内環境改善対策が実施されている⁶⁾。Zn 注入による Co 取り込み抑制は水素注入と組み合わせることでより効果的であるとの報告もあり⁷⁾, 水素添加条件下での Zn 添加の効果に関する詳細な検討が望まれている。

前報⁸⁾で我々は, 非放射性 Co イオンを添加した低溶存酸素条件下の高温水中で暴露した SUS 304 鋼腐食皮膜内の微量な Co 濃度分布をグロー放電発光分析法 (GDS) を用いて測定できることを示した。本報では同様の手法を用いて, 溶存水素を含む高温水中における SUS 304 鋼の腐食挙動と腐食表面への Co イオン取り込み挙動に及ぼす Zn 添加の効果を検討した。特に, 現在までに報告例が少ない Zn 添加濃度依存性と添加形態による pH の変化を考慮して試験を実施し, その効果と抑制メカニズムの検討を行った。

2. 実 験

2.1 試 験 片

試験片には市販の SUS 304 鋼を用いた。暴露試験後切断などの加工をせずに表面分析に供せるよう, 以下に示すような寸法が異なる 3 種類の形状の試験片を用意した。

試験片 A : $20 \times 50 \times 1$ mm, グロー放電発光分析 (GDS) に使用

試験片 B : $15 \times 30 \times 1$ mm, 重量測定と X 線回折分析 (XRD) に使用

試験片 C : $6 \times 6 \times 4$ mm, 電子線マイクロアナライザー分析 (EPMA) に使用

各試験片は 800 番のエメリー紙で研磨した後, トリクロロエチレン, アセトンおよび蒸留水中で超音波洗浄し, 真空乾燥して試験に供した。

2.2 暴露試験

暴露試験は, 高温水接触部が SUS 304 鋼で構成された高温高圧試験ループを用いて実施した。Fig. 1 に試験ループのフローを示す。試験ループは一部の調整槽を共通とし, 異なる 2 条件の試験を同時に実施できるよう同一仕様の 2 系列のループで構成される。試験水には蒸留水をイオン交換したものを使用し, 調整槽中を Ar ま

Fig. 1 Schematic diagram of experimental loop. (1: Reservoir tank, 2: Feed pump, 3: Pre-heater, 4: Autoclave, 5: Electric furnace, 6: Cooler, 7: Filter holder, 8: Back pressure valve, 9: Ion exchange column, 10: Sampling line, 11: Purifier system, 12: Storage tank)

たは H_2 ガスで曝気して溶存水素濃度を実機の平均的な水素注入濃度を考慮して 100 ppb に調整するとともに, Zn と Co イオンの添加を行った。試験流量は $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ とした。試験パラメータとした試験水中への Zn 添加濃度は無添加系と, 実機での Zn 注入濃度を考慮した $0.2 \mu\text{M}$ および濃度依存性を検討するための $0.8 \mu\text{M}$ の 3 水準とし, ZnO を溶解して実施した。また, $0.8 \mu\text{M}$ 添加系では ZnO のほかに, ZnSO_4 および $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ の添加形態の試験を実施した。Co イオンの添加濃度はすべての系で $0.02 \mu\text{M}$ とし, ZnO および ZnSO_4 添加系では CoSO_4 を用いて, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 添加系では $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ を用いて行った。この添加濃度は実機プラントの炉水濃度より 1~2 桁高い設定である。Zn と Co の添加は配管部への付着による濃度の低下を避けるため, 共にオートクレーブ直前より添加した。オートクレーブは容量 600 cm^3 ($180 \text{ mm}\phi \times 120 \text{ mm}$) の円筒形容器で, 561 K に温度制御した。試験圧力は沸騰を抑制するため, 9.1 MPa に制御した。暴露試験は 1,000 時間まで行い, 途中, 経時変化データを収得するために, 190 時間と 500 時間経過時に各試験片を $1/3$ 量ずつ取り出した。

2.3 分 析

暴露後試験片表面に生成した酸化皮膜の形状を EPMA (島津製作所製 EPMA-8705), 結晶形態を XRD (理学電子製 RAD-2C), 皮膜内各元素の濃度とそれらの深さ方向への濃度分布を GDS (島津製作所製 GDLS-5017) を用いて測定した。

Fig. 2 Weight of corroded metal and weight of corrosion film as a function of exposure time. a) weight of corroded metal, b) weight of corrosion film

3. 結 果

3.1 腐食量と腐食皮膜量

試験片の腐食量 W_c 、皮膜量 W_f 、および放出金属量 W_d は、暴露試験前後の重量 W_0 および W_1 と酸化皮膜を AP-AC 法 (100 kg/m³ NaOH と 30 kg/m³ KMnO₄ 混合沸騰溶液中で 300 s 処理後、100 kg/m³ クエン酸アンモニウム沸騰溶液中で 300 s 処理、その後水洗) を用いて除去した後の重量 W_2 より、以下の (1), (2) および (3)式より算出した。

$$W_c = W_0 - W_2 \quad (1)$$

$$W_f = W_1 - W_2 \quad (2)$$

$$W_d = W_c - xW_f \quad (3)$$

ここで、 x は酸化皮膜中の金属の重量割合で、以下の評価ではマグネタイトから求められる 0.72 の数値を使用した。

Fig. 2 に、試験片の腐食量と皮膜量の経時変化を示す。Zn 無添加系と 0.2 μM 添加系の腐食量と皮膜量は、試験時間の経過とともに増加したが、0.8 μM 添加系では 190 時間以降の増加は顕著ではなかった。腐食量および皮膜量は、Zn 添加濃度に依存して減少した。また Zn の添加形態による差異は見られなかった。一方、試験水中に放出される金属量の割合は、Zn 無添加系と 0.2 μM 添加系では 30~40%であったが、0.8 μM 添加系では Zn 添加形態にかかわらず、試験水中への放出割合は非常に少ないと評価された。

3.2 皮膜構造

Fig. 3 に、各 Zn 濃度で 1000 時間暴露した試験片表面の SEM 像を示す。Zn 無添加系の表面は角張った数 μm 径の結晶粒子に覆われていたが、Zn 添加濃度に依存して小粒径化した。また、添加形態による差異は見られなかった。XRD 分析の結果、いずれもスピネル型酸化物に帰属するピークのみが検出された。このピーク強

Fig. 3 SEM photographs of specimens after exposed for 1000 hours. a) no Zn, b) 0.2 μM ZnO, c) 0.8 μM ZnO, d) 0.8 μM ZnSO₄, e) 0.8 μM Zn(NO₃)₂

Fig. 4 GDS depth profiles of Fe, Cr, Ni, Zn and Co atomic fraction of specimen exposed for 1000 hours. a) no Zn, b) 0.2 μM ZnO

度は Zn 添加濃度の増加に伴い減少した。これは腐食皮膜量に対応するものと考えられた。

Fig. 4 に Zn 無添加系と 0.2 μM 添加系 1000 時間暴

露後試験片の GDS により求めた深さ方向の濃度プロファイルを示す。腐食皮膜内の各元素分布は不均一で、Zn 添加にかかわらず、母材に比べ Fe に富み Cr が欠乏した外層部分と、その内側に Fe が欠乏し Cr に富む内層の明瞭な 2 層構造を示した。Zn の添加により、皮膜厚みに対応する GDS 放電時間は内外層とも減少した。これらの傾向は 190 および 500 時間暴露された試験片においても同様であった。皮膜内の Co 濃度は母材中の存在比と比較して高かった。皮膜内の Co 濃度分布は不均一で、Zn 無添加系においては、皮膜の外層と内層の境界部付近に最大濃度を示したが、 $0.2\ \mu\text{M}$ 添加系では外層内に最大値を示した。Zn の添加により内外層における平均 Co 濃度は、外層で 1.0% から 0.8% へ、内層で 0.8% から 0.3% にそれぞれ減少する同一の傾向を示したが、内層での Co 濃度低減効果は外層に比べ顕著であった。Zn を添加した試験片の皮膜内には Zn が検出され、Co と同様に、外層部に最大濃度を有する濃度分布を示した。Fig. 5 に Zn $0.8\ \mu\text{M}$ 添加系で 1000 時間暴露した試験片の GDS 深さ分析結果を示す。 $0.8\ \mu\text{M}$ 添加系試験片に生成した皮膜の厚みに対応する GDS 放電時間は、小さな値となり、生成した皮膜は非常に薄いものと評価された。しかし、添加形態による明瞭な差異は見られなかった。この結果は、重量測定より算出した皮膜量の結果と一致した。試験片上に生成した皮膜が非常に薄いため、皮膜の 2 層構造は明確ではなかった。試験水中から取り込まれた Co と Zn の皮膜内濃度分布は、皮膜の最表面で最大値を示し、深さ方向に単調に減少する類似の挙動を示した。皮膜最表面での Zn 濃度は Zn $0.2\ \mu\text{M}$ 添加系に比べ高かった。

Fig. 6 に、Zn 無添加系と ZnO $0.2\ \mu\text{M}$ および $0.8\ \mu\text{M}$ 添加系の皮膜内 Co 濃度分布の経時変化を示す。Zn 無添加系の皮膜内 Co 濃度は経時的に増加する傾向にあり、ピーク濃度は顕著に増加した。一方、Zn 添加系における皮膜内 Co 濃度の経時的な増加はわずかであった。

3.3 皮膜内に取り込まれた Co および Zn 量の評価

GDS により測定した皮膜内の Co および Zn 濃度プロファイルを積分し、皮膜内に取り込まれたそれぞれの総量を算出した。算出に必要な GDS による皮膜のスパッタリング速度は、重量測定結果より算出した皮膜中の金属重量を皮膜に対応する GDS 放電時間で除することにより求めた。結果を Fig. 7 に示す。Co 取り込み量

は、Zn 添加濃度に依存して減少し、Zn 添加形態による差異は見られなかった。Zn 無添加系の Co 取り込み

Fig. 5 GDS depth profiles of Fe, Cr, Ni, Zn and Co atomic fraction of specimen exposed for 1000 hours. a) $0.8\ \mu\text{M}$ ZnO, b) $0.8\ \mu\text{M}$ ZnSO₄, c) $0.8\ \mu\text{M}$ Zn(NO₃)₂

Fig. 6 Exposure time dependency of Co atomic fraction of specimens. a) no Zn, b) $0.2\ \mu\text{M}$ ZnO, c) $0.8\ \mu\text{M}$ ZnO

Fig.7 Amount of Co accumulation in corrosion film as a function of exposure time.

Fig.8 Amount of Zn accumulation in corrosion film as a function of exposure time.

量は、試験時間の経過とともに増加したが、Zn 添加系では 190 時間以降の増加は顕著ではなかった。その結果、1000 時間経過時の Co 取り込み量は、無添加系を基準にして 0.2 μM の Zn の添加により 37%に、0.8 μM 添加により 4%に減少した。

Fig. 8 に Zn 0.2 μM 添加系と Zn 0.8 μM 添加系の皮膜内に取り込まれた Zn 量の経時変化を示す。Zn 取り込み量は添加濃度にかかわらず、試験初期に大きく増加したが、190 時間以降の増加は顕著ではなかった。また、0.8 μM 添加系において皮膜内に取り込まれた Zn 量に添加形態による差異は明瞭には見られなかった。皮膜中の Zn 濃度は添加濃度に依存して増加するものの、皮膜量が Zn を 0.8 μM 添加することにより大きく減少するため、Zn を高濃度で添加した方が全体として取り込み量は減少した。

Table 1 pH values at 561 K in loop water.

conditions	pH
no Zn	5.66
0.2 μM ZnO	5.67
0.8 μM ZnO	5.68
0.8 μM ZnSO ₄	5.57
0.8 μM Zn(NO ₃) ₂	5.53

4. 考 察

4.1 pH の影響評価

本試験では Zn 0.8 μM 添加系において、ZnO、ZnSO₄ および Zn(NO₃)₂ の異なる 3 形態での Zn 添加を行った。これらは水中で異なる pH となることが予想されたため、既存の高温熱力学データ^{9),10)}を使用して 561 K における本試験条件での pH を計算した。Table 1 にその結果を示す。ZnO 添加系の pH は Zn 無添加系と比較してわずかではあるが上昇し、ZnSO₄ および Zn(NO₃)₂ 添加系の pH は逆に低下することがわかる。しかしながら、Fig. 2 および Fig. 7 に示した腐食量と Co 取り込み量の減少に Zn 添加形態による影響は見られず、Zn 添加濃度にのみに依存した。以上のことから、腐食挙動および Co 取り込み挙動に及ぼす Zn 添加の効果は、pH の変化などの副次的な効果ではなく、Zn 自身がステンレス鋼の腐食および Co 取り込みを抑制したものと結論された。

4.2 腐食挙動に及ぼす Zn 添加の影響

Zn 無添加系で生成した皮膜は Fe に富んだ粗い外層と Cr に富んだ内層の明瞭な 2 層構造を示した。高温水中で暴露されたステンレス鋼表面に生成する腐食皮膜が 2 層構造を示すことは既に多くの研究により示されている^{8),11),12)}。Potter と Mann¹³⁾によれば、酸化性の化学種により腐食反応が進行し、アノード反応により生成した Fe イオンは金属界面で析出してマグネタイトの皮膜を形成するが、一部は試験水方向へ拡散し、水/皮膜界面で溶解度の相違からここでさらに析出して結晶性の外層を形成する。この結果、皮膜は 2 層構造となる。ステンレス鋼の場合においては鋼材中に Cr や Ni が含まれており、皮膜は Cr や Ni を含むスピネル型の酸化物となるが、Cr は本試験条件のように溶存酸素を含まない条件では、Fe に比べ試験水方向に拡散しにくいいため内層に濃縮され、内外層は Cr および Fe 濃度が異なった組成となったものと考えられる。

高温水中でのステンレス鋼の耐食性は内層の Cr を含む酸化物の寄与によるものと考えられている¹⁴⁾。本試験で試験水中に添加した Zn は皮膜内に取り込まれ、主として、ZnFe₂O₄ および ZnCr₂O₄ の形態で存在するものと考えられる。ZnCr₂O₄ は Zn 無添加系において内層に

存在すると考えられる FeCr_2O_4 や NiCr_2O_4 よりも熱力学的に安定であると考えられ¹⁵⁾, より耐食性の高い皮膜が形成されたものと推測される。皮膜中に生成する ZnCr_2O_4 の割合は Zn 添加濃度に依存すると考えられ, Zn $0.8\text{ }\mu\text{M}$ 添加系において生成した皮膜が非常に薄く, また, GDS 分析により皮膜の 2 層構造が明確に確認できなくなった理由も, この耐食性皮膜の形成により酸化性化学種の母材方向への拡散および Fe イオンの試験水方向へ拡散が大きく抑制されたためと考えられた。

4.3 Zn 添加による Co 取り込み抑制機構の検討

前報⁸⁾において, ステンレス鋼の腐食表面への Co イオン取り込み過程は以下の 2 つの過程により進行するものと推測した。

- ① Lister モデル¹⁶⁾に代表される腐食皮膜形成時に, その近傍に存在する Co イオンが共沈の形で取り込まれる過程
- ② 既に形成した皮膜内に後から Co イオンが取り込まれる過程

①の過程では Co 取り込みは皮膜量と相関し, 皮膜の成長に伴って深さ方向にその量を増加させる。しかしながら, 皮膜中の Co 濃度は皮膜形成時のバルク濃度で決定し, 経時的に変化しないものと考えられる。一方, ②の過程は (4) 式

ここで Me(II) は Co 以外の 2 価金属イオン

で示される交換反応や酸化物表面への Co イオンの吸着が推定される。これらの反応は皮膜中の Co 濃度の増加に寄与し, Co 濃度はバルク濃度と平衡に達するまで経時的に増加するものと考えられる。 Zn 添加条件においても同様な過程で Co 取り込みが進行するものと考えられる。

皮膜内への Co 取り込み量は, 皮膜量と皮膜内の Co 濃度の積で決定される。 Zn の添加により Co 取り込みが減少した第 1 の要因は, 皮膜形成時に Zn が存在することにより腐食を抑制され, Co が取り込まれるスピネル型酸化物の総量が減少したためである。一方, 皮膜内 Co 濃度の増加傾向も Zn の添加により抑制された。このことは, Zn の添加が ① の過程だけでなく ② の過程による Co 取り込みをも抑制し, 皮膜内への Co 濃度を低下させる第 2 の要因として寄与していることは明らかである。

Zn 添加による Co 取り込み抑制を, 皮膜量減少による効果と皮膜内 Co 濃度低下効果の 2 つの要因に分別し, Zn 無添加系の皮膜量および皮膜内平均 Co 濃度を基準として規格化した Co 取り込み抑制係数を Table 2 に示す。皮膜量減少による抑制係数は Zn 添加濃度到大

Table 2 Co accumulation reduction factor with Zn .

		film reduction	Co conc reduction	total reduction
$0.2\text{ }\mu\text{M Zn}$	190h	2.3	0.6	1.4
	500h	1.5	1.6	2.4
	1000h	1.5	1.8	2.7
$0.8\text{ }\mu\text{M Zn}$	190h	15.0	0.9	13.5
	500h	10.3	1.9	19.6
	1000h	11.5	2.3	26.5

きく依存して増加することがわかる。一方, 皮膜内 Co 濃度の低減による抑制係数も Zn 添加濃度に依存する傾向が見られるが, その度合いは, 皮膜量減少による抑制係数より小さい。しかしながら, 経時的に増大する傾向にあり, 時間の経過とともにその寄与は大きくなっていくと予測される。これは添加した Zn が, Co が取り込まれるスピネル型酸化物の 2 価サイトに入ること, CoFe_2O_4 や CoCr_2O_4 の生成を抑制したこと起因すると推測された。一方, 190 時間時の皮膜内 Co 濃度の低減による抑制係数は 1 より小さな値を示し, 190 時間経過時の皮膜内 Co 濃度は Zn の添加により逆に増加した。暴露初期の Co 取り込みは ① の腐食皮膜形成時に, その近傍に存在する Co イオンが共沈の形で取り込まれる過程の寄与が大きいものと考えられ, 試験水中に Zn が存在することにより, Co の共沈反応が促進されることが考えられた。

5. 結 言

高温水中での SUS 304 鋼の腐食挙動と腐食表面への Co イオン取り込み挙動に及ぼす Zn 添加の効果を検討し, 以下のような結論を得た。

1) 腐食は Zn の添加濃度に依存し抑制され, 生成される皮膜は薄膜化される。これは Zn を含む高耐食性の皮膜の生成に起因する。

2) Co 取り込みは, Zn 添加濃度に依存して抑制される。これは, 表面に生成される皮膜量の減少と皮膜内 Co 濃度の経時的増加の抑制の 2 つ要因に起因する。

3) Zn 添加の効果は添加形態による差異はない。腐食および Co 取り込み挙動に及ぼす Zn 添加の効果は, pH の変化などの副次的な効果ではなく, Zn 自身の効果と結論された。

謝 辞

本研究の実施にあたり, 石川島検査計測(株)の宮野征巳氏, (財)産業創造研究所の結城真美氏にご協力をいただいた。また, 東京大学工学部システム量子工学科の広石大介氏には有益なご助言をいただいた。厚く感

謝する次第である。

(Manuscript received February 20, 1997 ;
in final form June 5, 1997)

引用文献

- 1) 石樽顕吉 : 防食技術, **32**, 276 (1983).
- 2) M. Aizawa, K. Ohsumi, Y. Asakura, Y. Morikawa, Y. Hirahata, T. Sakai & K. Haraguchi : Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 6, BNES, Bournemouth, Vol. 1, p.39 (1992).
- 3) C. J. Wood, W.J. Marble, M. Prystupa, M. J. B. Hudson & D. L. Wilkens : Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 5, BNES, Bournemouth, Vol.1, p.111 (1989).
- 4) D. H. Lister: JAIF Int'l Conf. on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, Tokyo, Vol.2, p.341 (1988).
- 5) W. J. Marble, R. L. Cowan & C. J. Wood : Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 4, BNES, Bournemouth, Vol.1, p.113 (1986).
- 6) R. L. Cowan, R. A. Heah, M. E. Indig, C. P. Ruiz & J. L. Simpson : JAIF Int'l Conf. on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, Tokyo, Vol.1, p.191 (1988).
- 7) C. C. Lin: EPRI NP-4725, Project 2295-3, Interim Report August (1986).
- 8) S. Ono, M. Haginuma, M. Kumagai, M. Kitamura, K. Tachibana & K. Ishigure : *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32**, 125 (1995).
- 9) 半澤有希子, 広石大介, 松浦千尋, 石樽顕吉, 長尾雅志, 萩沼真之 : 日本原子力学会春の年会予稿集, p.461 (1997).
- 10) W. L. Marshall, E. V. Jones : *J. Phys. Chem.*, **70**, 4028 (1966).
- 11) 藤原和雄, 泊里治夫, 中山武典, 下郡一利 : 防食技術, **36**, 368 (1987).
- 12) K. Tachibana, N. Fujita & T. Osaka : 防食技術, **29**, 491 (1980).
- 13) E. C. Potter & G. M. W. Mann : Proc. 2nd Inter. Conf. Metallic Corrosion, London, p. 872 (1963).
- 14) 本田 卓, 大橋健也, 樫村栄二, 古屋保正 : 防食技術, **37**, 278 (1988).
- 15) J. Korb & B. Stellwag : Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7, BNES, Bournemouth, Vol. 2 (1996).
- 16) D. H. Lister : *Nucl. Sci. Eng.*, **59**, 406 (1976).