

# 高温水中における SUS316 の IGSCC 感受性に及ぼす温度と水質の影響

Influence of Temperature and Water Chemistry on IGSCC Susceptibility  
of SUS316 in High-Temperature Water

福村 卓也 (Takuya Fukumura)\* 寺地 巧 (Takumi Terachi)\* 有岡 孝司 (Koji Arioka)\*

**要約** 冷間加工を加えた SUS316 は高温水中で粒界型応力腐食割れ (IGSCC) 感受性を持つ。そしてこの IGSCC 感受性は環境 (温度および水質) により影響を受けることが知られている。そこで SUS316 に及ぼす環境因子の影響を体系的に把握するために、温度および溶存水素、ほう酸と Li 濃度を变化させて高温水中での定引張速度試験 (CERT) を実施した。その結果、300 ~ 360 の温度範囲で温度は加速要因、15 ~ 45cc/kg H<sub>2</sub>O-STP の範囲で溶存水素は加速要因、50 ~ 3500ppm (B 換算) の範囲でほう酸は抑制要因、そして 2 ~ 10ppm の範囲で Li は少し加速要因であることが見出された。また、IGSCC 感受性を pH で整理すると、pH=7 ~ 9(320 ) の範囲で pH の増加は IGSCC 感受性を増加させることが分かった。試験片表面を観察したところ、粒子状の Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> で覆われているので、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の溶解度と IGSCC 感受性の関係を調べたところ、よい相関が認められた。このことから IGSCC のメカニズムに溶解がなんらかの寄与をしていると考えられる。

**キーワード** PWR, オートクレーブ, 腐食, IGSCC, ステンレス鋼, 環境, 水化学, CERT, SUS316

**Abstract** Cold-worked 316 stainless steel is susceptible to IGSCC in high-temperature water, and this IGSCC susceptibility is known to be influenced by environmental factors such as temperature and water chemistry. In order to understand systematically the influence of environmental factors on 316 stainless steel, a constant elongation rate test (CERT) was carried out in a high-temperature environment while varying the temperature as well as concentration of dissolved hydrogen, boric acid and Li. It was found that the temperature promoted IGSCC in the range of 300 to 360 ; dissolved hydrogen promoted IGSCC in the range of 15 to 45cc/kg H<sub>2</sub>O-STP; boric acid inhibited IGSCC in the range of 50 to 3500 ppm (as B); and Li slightly promoted IGSCC in the range of 2 to 10 ppm. Regarding pH, an increase in pH resulted in an increase of IGSCC susceptibility in the range of pH 7 to 9 (at 320 ). Observations of the surface of a specimen revealed that the surface was covered with particulate Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Accordingly, the relationship between the solubility of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and IGSCC susceptibility was investigated, and a close correlation was found, suggesting that solubility contributes to the mechanism of IGSCC.

**Keywords** PWR, autoclave, corrosion, IGSCC, stainless steel, environment, water chemistry, CERT, SUS316

## 1. はじめに

ステンレス鋼は構造材料として、原子力発電所の貯槽、配管等多くの場所で用いられている。沸騰水型原子炉 (boiling water reactor, BWR) のような少量の酸素を含む高温水中ではシュラウド等のステンレス鋼で応力腐食割れ (stress corrosion cracking, SCC) が報告されている<sup>(1,2)</sup>。

一方、加圧水型原子炉 (pressurized water reactor, PWR) のような水素を含む高温水中ではニッケル基

合金で SCC の発生は認められる<sup>(3)</sup>ものの、ステンレス鋼では塩化物 SCC や照射誘起応力腐食割れ (irradiation assisted stress corrosion cracking, IASCC) のような特殊なケースを除き報告されていない。そのため、水素を含む高温水環境におけるステンレス鋼の SCC に関する研究は非常に少ない。その中で、Coriou らが水素を含む高温水中では、ニッケル基合金では SCC を起こすが、鋭敏化していないステンレス鋼は SCC を起こさないという実験結果を報告<sup>(3)</sup>した。それに対し、戸塚や Smialowska らは試験片に曲げに

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

よる冷間加工を加えることにより，水素を含む高温水中でも SUS316 が粒界型応力腐食割れ (intergranular stress corrosion cracking, IGSCC) を起こすことを示唆する実験結果を報告<sup>(4,5)</sup>した．最近では米国 General Electric 社の研究により，冷間加工を加えたステンレス鋼は水素を含む高温水中での SCC 感受性に注意が必要としている<sup>(6-9)</sup>．また本稿の著者の 1 人 (有岡) は SUS316 は冷間加工を受けると，水素を含む高温水中で IGSCC 感受性を持ち，そしてこの IGSCC 感受性は環境により影響を受けることを報告している<sup>(10)</sup>．

このように，SUS316 は高温水と接する構造材料として非常に重要であるにもかかわらず，高温での環境の影響は系統的に把握されていない．そのため冷間加工を加えた SUS316 に及ぼす環境因子の影響を体系的に把握するために中央部に曲げ加工を施した平板試験片<sup>(4)</sup>を用い，温度 (300 ~ 360 )，溶存水素 (15 ~ 45cc/kg H<sub>2</sub>O-STP)，ほう酸 (B 換算 50 ~ 3500ppm)，Li (2 ~ 10ppm) を変化させて高温水中での定引張速度試験 (constant elongation rate test, CERT) を実施した．試験後，破断面観察から IGSCC 平均深さを破断時間で除したものを平均 IGSCC 進展速度として IGSCC 感受性の指標とし，環境の影響を評価した．

また，表面の酸化皮膜が IGSCC 感受性と密接な関係があると考え，表面皮膜のミクロ観察を行った．

## 2. 試験方法

### 2.1 試験片

試験に用いた材料はステンレス鋼 (SUS316) であり，化学組成の分析結果 (ミルシート) を表 1 に示す．試験材料の熱処理は 1150 で 10 分間溶体化処理し，その後鋭敏化を避けるために水冷した．試験片は平板の引張試験片であり，試験片の平行部長さ 20mm，幅 4mm，厚さ 2mm である．また，試験片中央部で金具を用いて冷間加工し，予歪みを付与して試験に供した．試験片の形状を図 1 に示す．試験片の表面状態を一定とするために，予歪みを与える前に試験部はエメリー研磨紙で 1200 番まで研磨した．

表1 試験材料(SUS316)の化学組成

単位: wt%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.049	0.45	1.5	0.027	0.005	2.0	17.1	2.1	Bal

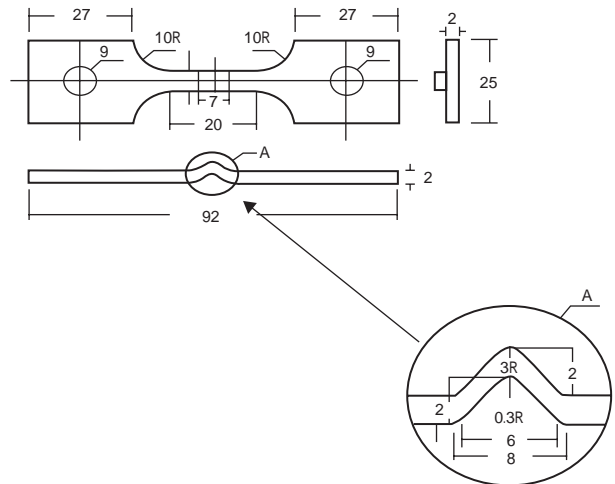


図1 CERT試験片の形状

### 2.2 試験条件

試験環境を表 2 にまとめる．温度 320 ，溶存水素濃度 30cc/kg H<sub>2</sub>O-STP，ほう酸濃度 500ppm (B 換算)，水酸化リチウム濃度 2ppm (Li 換算) をベースとし，温度を 300, 330, 360 ，溶存水素濃度 15, 45cc/kg H<sub>2</sub>O-STP，ほう酸濃度 50, 1200, 2300, 3500ppm (B 換算)，Li 濃度 4, 6, 8, 10ppm と環境を変化させて試験を実施した．

高温の環境を得るために循環式の CERT 試験装置を用いた．引張速度は 2 μ m/s 一定とした．なお，本試験装置には筆者の一人 (福村) が開発したイットリア安定化ジルコニウム単結晶からなる観察窓を備え，高温水中の試験片を *in-situ* で観察できる機能<sup>(11-13)</sup>を有する．CERT 試験装置系統概要を図 2 に示す．

表2 CERT試験環境

水素( cc/kg H <sub>2</sub> O-STP )	15, 30, 45
ほう酸( ppm )	50, 500, 1200, 2300, 3500
Li( ppm )	2, 4, 6, 10
温度( )	300, 320, 330, 360

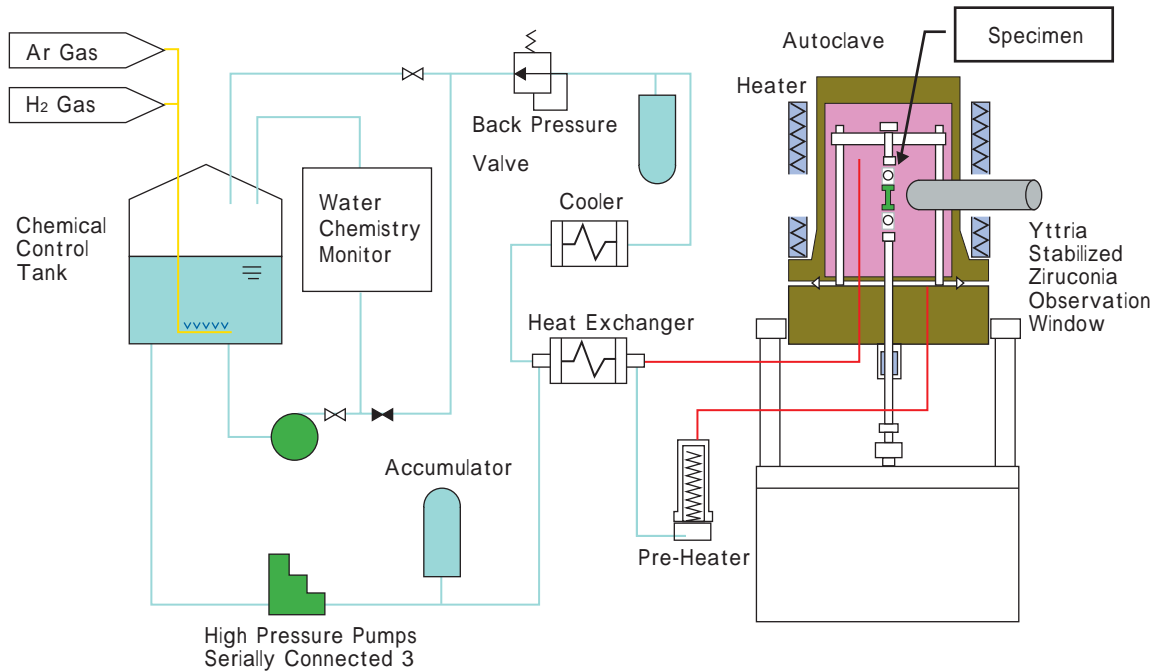


図2 CERT試験装置の系統概要

## 2.3 平均IGSCC 進展速度とその求め方

CERT 試験後，試験片破断面を走査型電子顕微鏡（SEM）により破断面形態およびIGSCC 平均深さを測定した．SEM 観察で得られたIGSCC 平均深さをを用い，次式で定義する平均IGSCC 進展速度を求めて，IGSCC 感受性の指標とした．

平均IGSCC 進展速度 (mm/s)

$$= \frac{\text{IGSCC 平均深さ (mm)}}{\text{破断時間 (s)}} \quad (1)$$

## 2.4 試験片のミクロ観察

試験後の試験片は環境（温度・水質）による酸化皮膜の変化を見るために，アルバックファイ社製オージェ電子分光（Auger electron spectroscopy, AES）分析装置（SAM-680）に搭載されているSEMによる表面状態の観察を行った．また，酸化皮膜の組成の変化を見るために断面のAES マッピング分析とライン分析を行った．AES 分析の測定条件を表3に示す．AES 断面分析においては，試料から約1 mm × 1 mmの薄片を切り出し，エメリー研磨紙で数十μ mまで研磨し，集束イオンビーム（focused ion beam, FIB）

にて断面を出して，AESによるO, Cr, FeおよびNiのマッピングとライン分析を行った．

表3 AES分析条件

電子銃	加速電圧 (kV)	10
	電流 (mA)	10
スパッタ用イオン銃	イオン	Ar <sup>+</sup>
	加速電圧 (kV)	2
	スパッタ面積 (mm × mm)	1 × 1
スパッタレート (SiO <sub>2</sub> 換算)	nm/min	16.0

## 3. 試験結果と考察

### 3.1 破断面形態

破断面の一例を図3に示す．いずれのケースでも予歪みをつけた試験片凹部側（この図ではA）にIGSCCがみられ，凸部側（この図ではB）へ行くに従い粒内型応力腐食割れ（transgranular stress corrosion cracking, TGSCC），延性破断面へとその形態が変化していくのが分かる．なお，観察窓を通して見た試験中の *in-situ* 観察より，凹部表面からき裂が発生していることが確認できており，まずIGSCCが進展し，その後TGSCCへ変化し，最終的に延性的に破断したと考えられる．

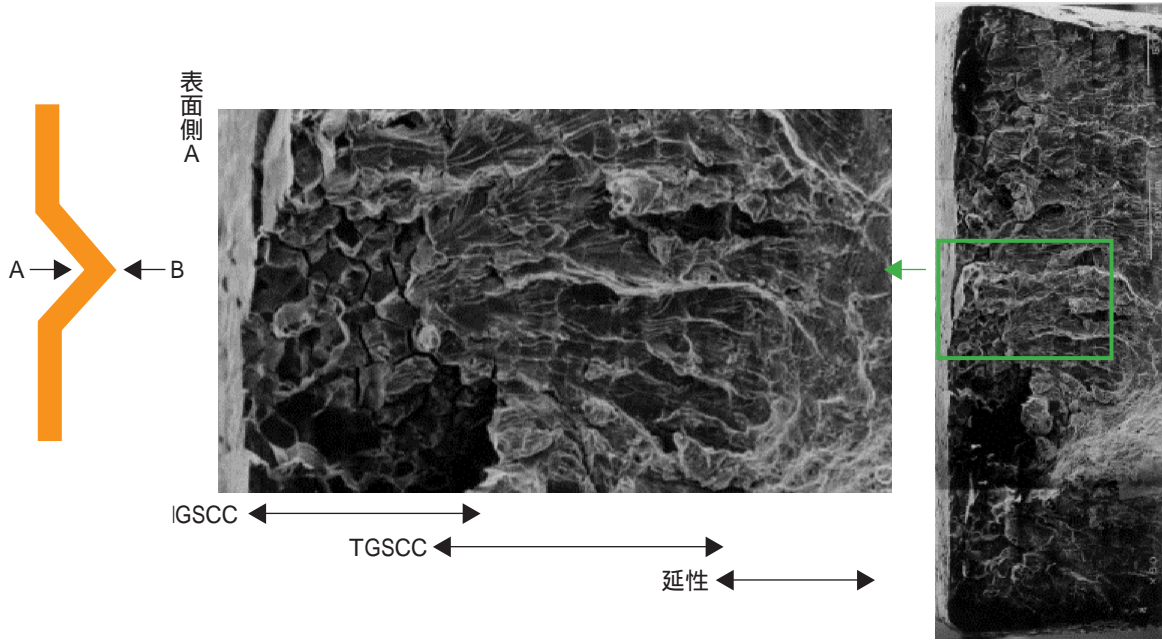


図3 破断面形態観察( SEM )の例( 320 2ppmLi 500ppmB 引張速度 $2 \times 10^{-6}$ mm/s )

### 3.2 高温水中での平均 IGSCC 進展速度に及ぼす温度の影響

(1) 式で定義した平均 IGSCC 進展速度に及ぼす温度の影響をほう酸 (B 換算) 50, 500, 2300ppm の条件で整理した結果を図 4 に示す。この場合、溶存水素と Li はそれぞれ 30cc/kg H<sub>2</sub>O-STP と 2ppm で条件を固定している。

温度範囲 320 ~ 360 で、各ほう酸濃度とも温度が上昇すると平均 IGSCC 進展速度がほぼ単調に上昇することが分かる。これより、温度は IGSCC 感受性に対し促進因子であると考えられる。

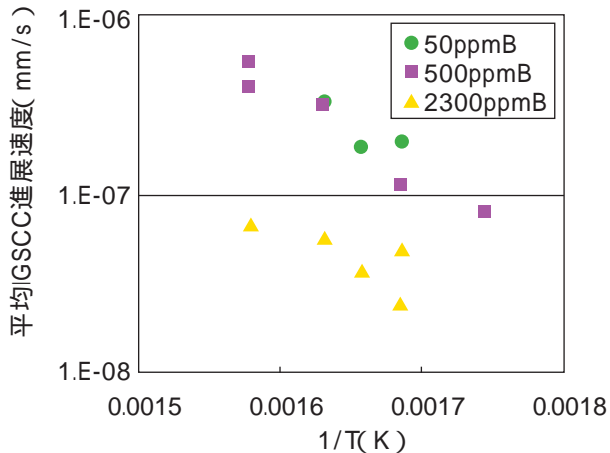


図4 平均IGSCC進展速度に及ぼす温度の影響 ( Li2ppm , 溶存水素30cc/kg H<sub>2</sub>O-STP )

### 3.3 高温水中での平均 IGSCC 進展速度に及ぼす溶存水素の影響

平均 IGSCC 進展速度に及ぼす溶存水素の影響をほう酸 (B 換算) 50, 500, 2300, 3500ppm の条件で整理した結果を図 5 に示す。この場合、温度と Li はそれぞれ 320 と 2ppm で条件を固定している。溶存水素 15 ~ 45cc/kg H<sub>2</sub>O-STP の範囲で、各温度ともに溶存水素が上昇すると平均 IGSCC 進展速度が上昇することが分かる。なお、古谷らが行った照射に

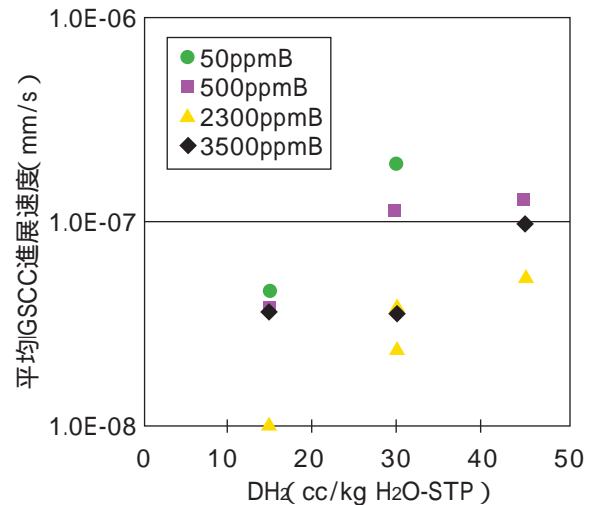


図5 平均IGSCC進展速度に及ぼす溶存水素の影響 ( 温度320 , Li2ppm )



よる硬化を受けたと考えられる試験結果<sup>(14)</sup>でも同様の傾向を示す。これより、溶存水素は IGSCC 感受性に対し促進因子であると考えられる。

### 3.4 高温水中での平均 IGSCC 進展速度に及ぼすほう酸の影響

平均 IGSCC 進展速度に及ぼすほう酸の影響を温度 320, 330, 360 の条件で整理した結果を図 6 に示す。この場合、溶存水素と Li はそれぞれ 30cc/kg H<sub>2</sub>O-STP と 2ppm で条件固定してある。

ほう酸 (B 換算) 50 ~ 3500ppm の範囲で、各温度ともにほう酸濃度が上昇すると平均 IGSCC 進展速度が低下することが分かる。柴田らは 304 ステンレス鋼においてほう酸の SCC 抑制効果を調べた結果<sup>(15)</sup>と一致している。これより、ほう酸は IGSCC 感受性に対し抑制因子であると考えられる。

また、320 の結果より、ほう酸濃度 1200ppm 以上ではその抑制効果が飽和しているように見受けられる。

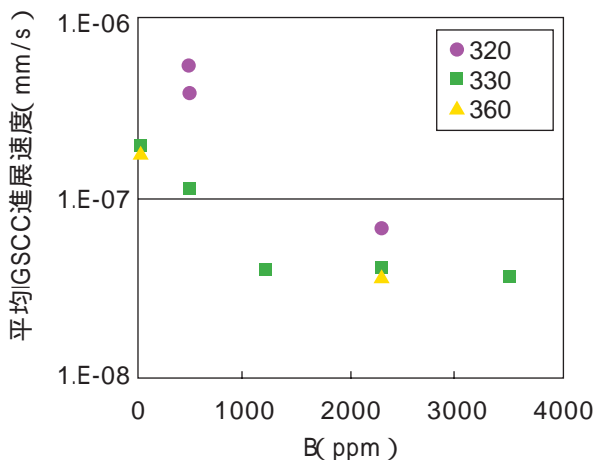


図6 平均IGSCC進展速度に及ぼすほう酸の影響 (溶存水素30cc/kg H<sub>2</sub>O-STP, Li2ppm)

### 3.5 高温水中での平均 IGSCC 進展速度に及ぼす Li の影響

最平均 IGSCC 進展速度に及ぼす Li の影響をほう酸 (B 換算) 50, 500, 1200, 2300, 3500ppm の条件で整理した結果を図 7 に示す。溶存水素と温度はそれぞれ 30cc/kg H<sub>2</sub>O-STP と 320 で条件固定してある。

Li 濃度 2 ~ 10ppm の範囲で、各温度ともに Li 濃度が上昇すると平均 IGSCC 進展速度が少し上昇するのが分かる。この傾向は Castano らが CT 試験片を用い

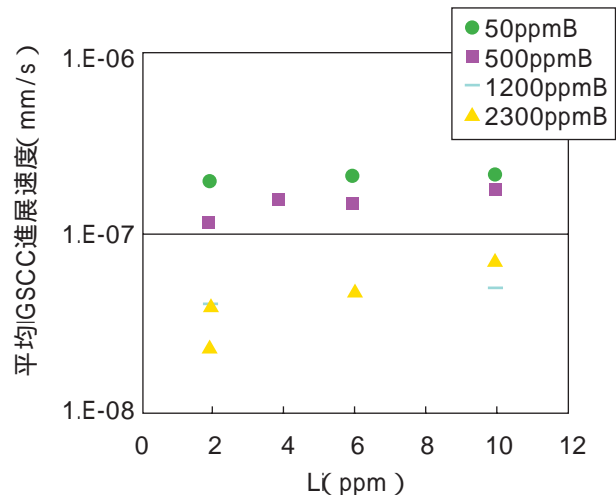


図7 平均IGSCC進展速度に及ぼすLiの影響(温度320, 溶存水素30cc/kg H<sub>2</sub>O-STP)

て行った結果<sup>(16)</sup>と合致している。Li は IGSCC 感受性に対し、促進因子であると考えられるが、その程度は他の因子に比べ小さい。また、データがほう酸濃度 50 および 500ppm (B 換算) と 1200 および 2300ppm (B 換算) のグループに分かれており、500 ~ 1200ppm (B 換算) の間でほう酸による抑制効果が変化しているように見受けられる。これは 3.4 節で述べたほう酸による抑制効果と同様の結果と考えられる。

Li の異なる環境で、試験片表面にき裂が発生する様子を *in-situ* 観察により観察した結果を図 8 に示す。Li の高い (pH は大きい) 条件でき裂が早く発生していることが分かる。

### 3.6 高温水中での平均 IGSCC 進展速度に及ぼす pH の影響

320 における pH を計算し、IGSCC 進展速度を pH で整理した結果を図 9 に示す。各水素濃度ともに平均 IGSCC 進展速度は pH に大きく依存している。

従って、水素を含む高温水中で冷間加工を加えた溶体化 SUS316 鋼の平均 IGSCC 進展速度は pH に大きく依存することが分かった。このことは、IGSCC 感受性を pH により制御できる可能性を示唆していると考えられる。なお、これについてはさらに低 pH 側のデータが必要であると考えられる。

また、同じ pH だとほう酸濃度が高い方が、平均 IGSCC 進展速度がわずかであるが低いようにも見受けられ、ほう酸による抑制効果を示唆していると考えられる。

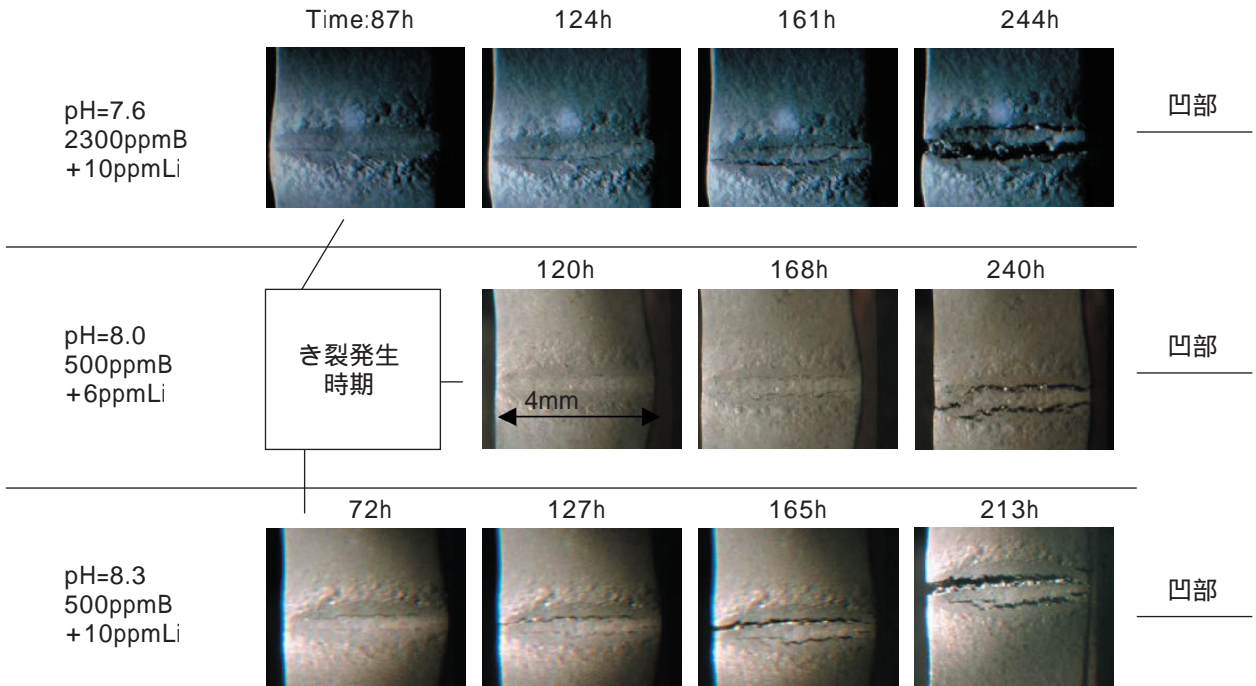


図8 イットリア安定化ジルコニア結晶製観察窓を通して観察した高温水中ステンレス鋼のき裂発生時期におよぼす水質の影響

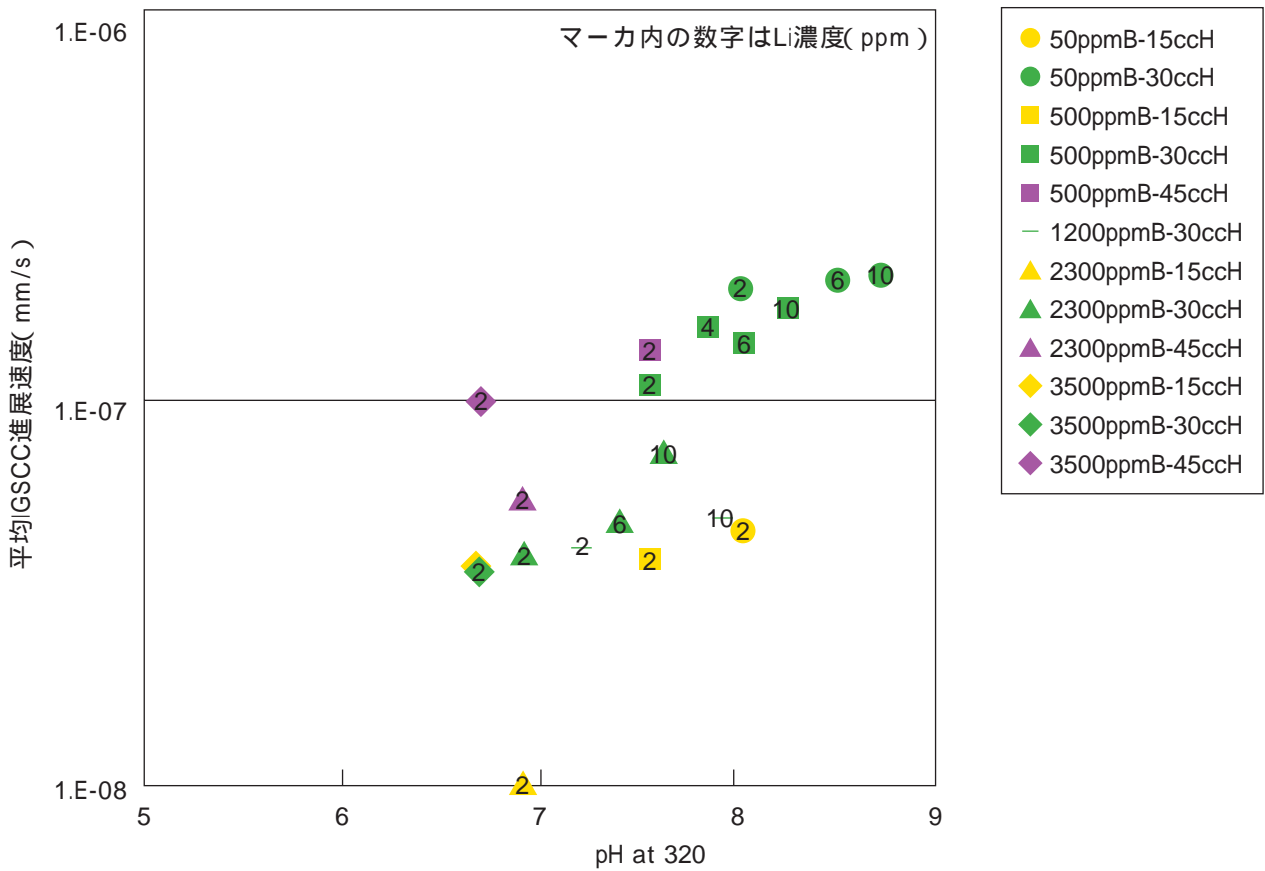


図9 IGSCC感受性に及ぼすpHの影響( 320 )

### 3.7 表面皮膜の組成

pHが変化することにより、平均IGSCC進展速度が変化する理由を調べるために酸化皮膜に着目した検討を実施中である。平均IGSCC進展速度が異なる環境における試験片表面酸化皮膜に変化が認められないか表面分析により調べた。

Li濃度を変化（pHを変化）させた試験に供した試料について、試料表面をSEMにより観察した結果を図10に示す。いずれの試料も表面は数μm以下の粒子状物質で覆われている。寺地らが一部の環境について、酸化皮膜断面を電子線回折等を用いて分析し

た結果<sup>(17)</sup>、この粒子状物質は単一の結晶粒からなるスピネル構造のFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>であることが分かっている。このFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>は母材が一度溶解し、再析出したものであると考えている。

次にLi濃度を变化させた試験に供した試料について、酸化皮膜断面をAESにより元素のマッピング分析を行った結果を図11に示す。各Li濃度共に、Crリッチな層がみられ、それに対応する場所のFeは一様に少なく、母材側でNiの若干濃化が見られる。これより、酸化皮膜はFeリッチな外層、Crリッチな内層およびNiの濃化した部分からなっており、その基本的構造はLi濃度で変化はない。

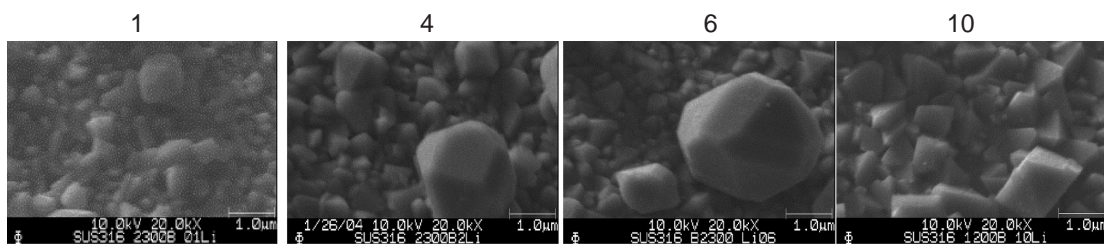


図10 試験片表面皮膜のSEM観察(写真の上の数字はLi(ppm))

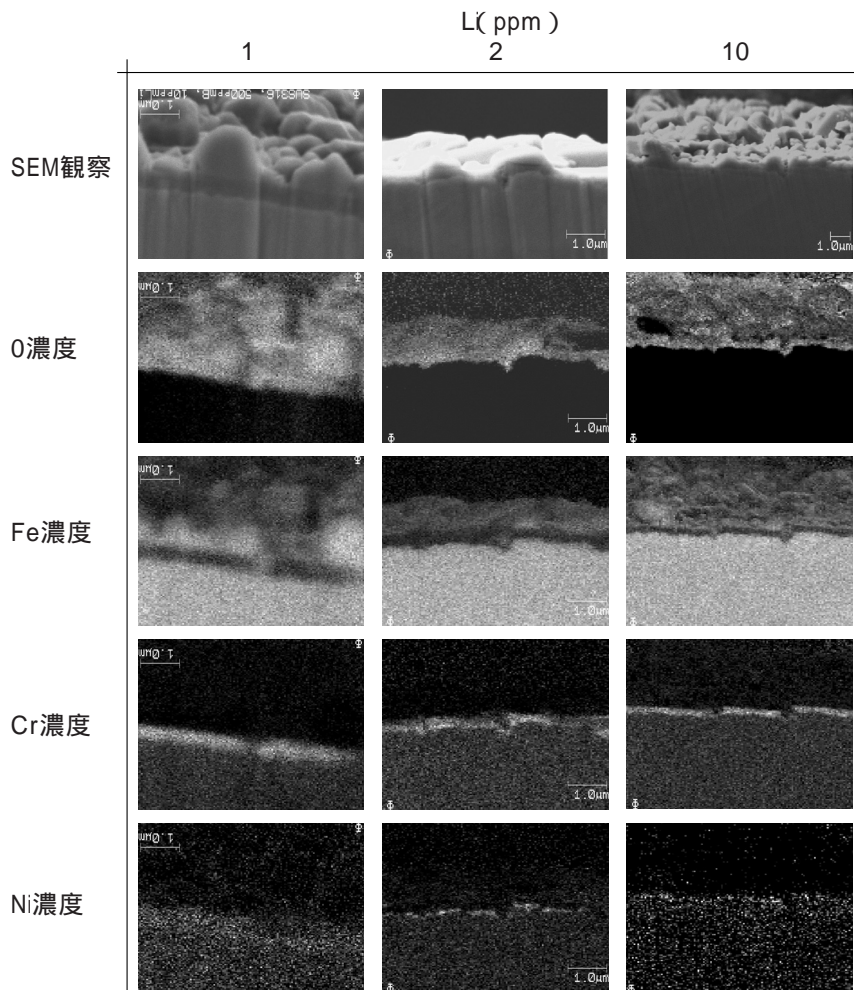


図11 AESIによる元素マッピング結果



酸化皮膜構造の一部をより詳細に見るために、酸化皮膜断面のライン分析を行った結果を図 12 に示す。酸化皮膜は Fe リッチな外層、Cr リッチな内層からなり、内層と母材の境界に Ni の濃化した部分が存在し、マッピングで得られた結果を裏付けている。寺地らは一部の環境で詳細な分析を行い、皮膜組成について同様の結果<sup>(17)</sup>を得ている。

今回の検討では、皮膜組成に及ぼす Li 濃度の影響は観察されなかった。今後は皮膜厚さ等に及ぼす環境の影響について分析の実施を予定している。

### 3.8 高温水中平均 IGSCC 進展速度に及ぼす Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 溶解度の影響

酸化皮膜の主要な構成物である Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> に着目し、熱力学データ等から計算により求めた Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の溶解度と IGSCC の感受性との関係を整理したものを図 13 に示す。平均 IGSCC 進展速度は Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の溶解度と非常によく合致している。このことより、溶存水素、ほう酸、

Li を含む高温水中における SUS316 の平均 IGSCC 進展速度は Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の溶解度によって制御できる可能性を示唆している。また、このことは IGSCC のメカニズムにおいて溶解が大きな役割を持っていると考えられる。

なお、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の溶解度の計算においては、(2) 式に示すように 2 価と 3 価の Fe イオン濃度の総和として算出した<sup>(10)</sup>。

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ の溶解度} = \{ \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}(\text{OH})^+ + \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{Fe}(\text{OH})_3^- \} + \{ \text{Fe}^{3+} + \text{Fe}(\text{OH})^{2+} + \text{Fe}(\text{OH})_2^+ \} \quad (2)$$

各イオンの平衡濃度は、定圧比熱データを用い標準自由エネルギーを算出して決定した。イオン種についての高温でのエントロピー計算は Criss-Cobble の corresponding 理論<sup>(18)</sup>を用いて計算した。また各イオン反応の平衡解離定数については、MacDonald らの報告した値<sup>(19~22)</sup>を用いた。

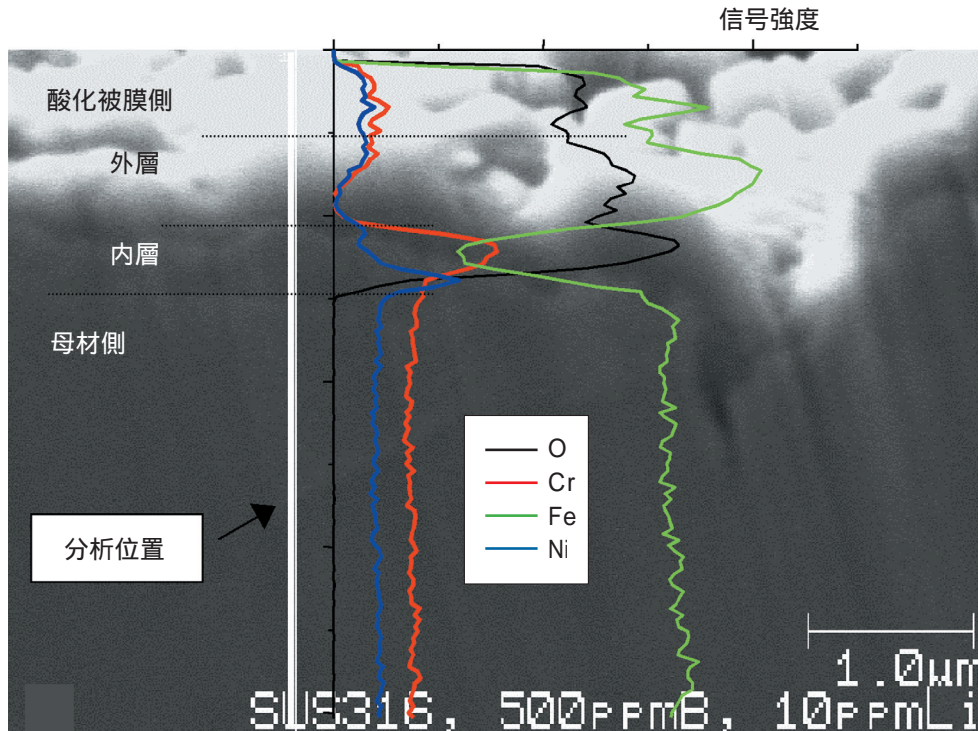


図12 AESライン分析結果( 500ppmB,10ppmLi,溶存水素30cc/kg H<sub>2</sub>O-STP,320 )



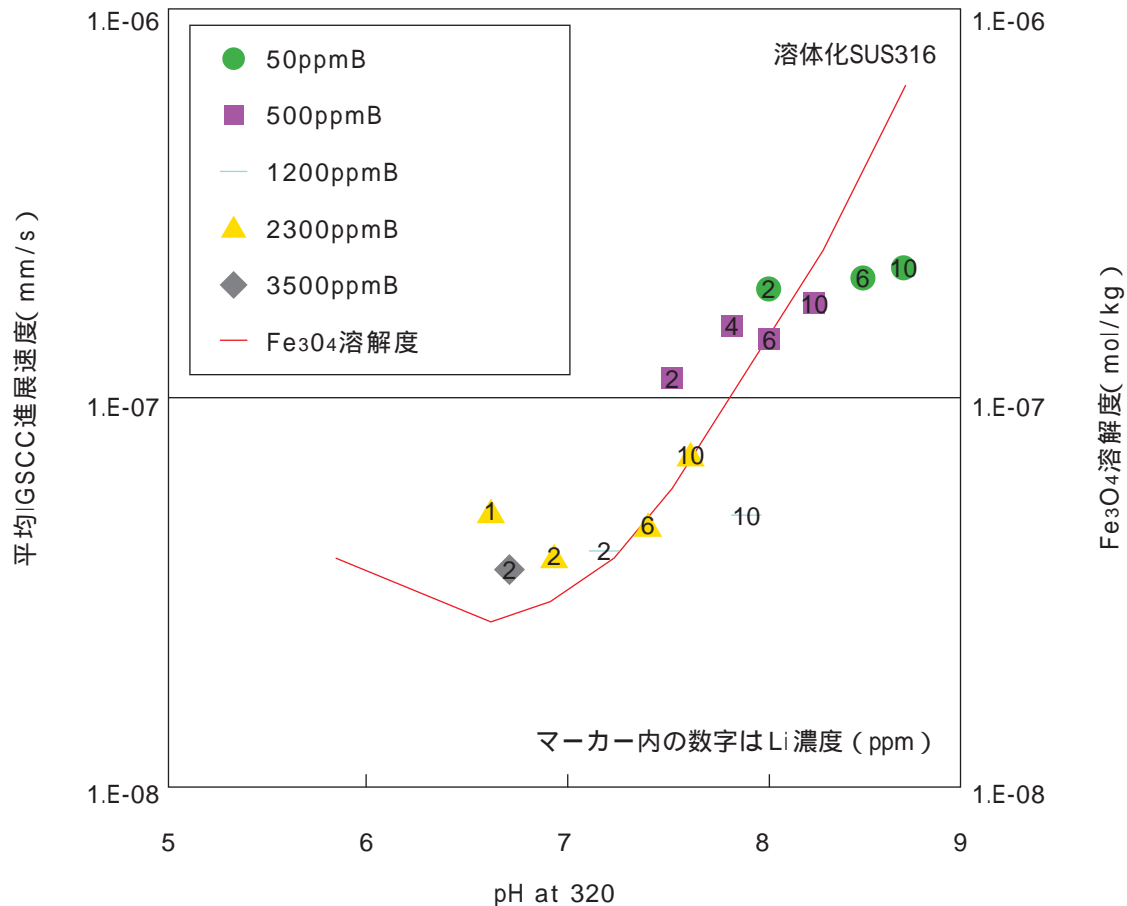


図13 IGSCC感受性に及ぼす $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 溶解度の関係( 温度320 溶存水素30cc/kg  $\text{H}_2\text{O}$ -STP )

#### 4. まとめ

高温水に接する構造材料としてよく使われるSUS316のIGSCC感受性に及ぼす環境(温度・水質)の影響を把握するために、冷間加工を加えた溶体化SUS316試験片について、温度、水素、ほう酸およびLi濃度を变化させて高温水中CERT試験を実施した。また、破断面を観察し、平均IGSCC深さを破断時間で割って得られた平均IGSCC進展速度をIGSCC感受性として評価した。また、さらに試験片の酸化皮膜を詳細に分析した。得られた知見をまとめると以下のようなになる。

- (1) 温度320～360の範囲で、温度はIGSCCを促進する。
- (2) 溶存水素15～45cc/kg  $\text{H}_2\text{O}$ -STPの範囲で、溶存水素はIGSCCを促進する。
- (3) ほう酸濃度50～3500ppm(B換算)の範囲で、ほう酸はIGSCCを抑制する。
- (4) Li濃度2～10ppmの範囲で、LiはIGSCCを若干促進する。

- (5) ほう酸およびLiをpHとして整理すると320ではpH=7～9の範囲で平均IGSCC進展速度はpHに大きく依存する。
- (6) 溶存水素、ほう酸およびLiを含む高温水中では、酸化皮膜は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の外層、Crリッチの内層およびNiの濃化層から成り、その基本的構造はLi濃度を变化させても変わらない。
- (7) 酸化皮膜の主要な構成物である $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の溶解度と平均IGSCC進展速度との間には強い相関が認められた。このことはIGSCCの発生と進展過程に溶解が重要な役割を果たしていることを示唆している。

なお、今後、IGSCCき裂進展速度に及ぼす環境依存性を調べるために、CT試験片を用い、より広いpH領域を含む環境で検討し、データの充足を行う予定である。

## 謝辞

この研究は関西電力(株)の委託研究の一環として実施したものである。ここに記して謝意を表します。また試験の遂行にあたり、関電興業(株)の村上公治氏、辻井克実氏、平尾充司氏に多大な協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## 文献

- (1) 鈴木俊一, “BWR 炉心シュラウドおよび再循環系配管の SCC 損傷評価について,” 日本金属学会秋期大会講演概要, 590 (2003)
- (2) 東京電力ホームページ, “福島第二原子力発電所 3 号機のシュラウドのひびについて,” <http://www.tepco.co.jp/fukushima2-np/2fnews/ne08-1-j.html>
- (3) H. Coriou, L. Grall, C. Mahieu and M. Pelas, “Sensitivity to Stress Corrosion and Intergranular Attack of High-Nickel Austenitic Alloys,” *Corrosion*, 22, 280 (1966)
- (4) N. Totsuka and Z. Szklarska-Smialowska, “Hydrogen Induced IGSCC of Two Unsensitized Austenitic Stainless Steels in High-Temperature Water,” *Corrosion*, 44, 124 (1988)
- (5) Z. Szklarska-Smialowska, Z. Xia and S.W. Sharkawy, “Comparative studies of SCC in two austenitic stainless steels and alloy 600 on exposure to lithiated water at 350 °C,” *Corrosion*, 48, 455 (1992)
- (6) Peter L. Andresen, Thomas M. Angeliu, William R. Catlin, Lisa M. Young and Ron M. Horn, “Effect of Deformation on SCC of Unsensitized Stainless Steel,” *Corrosion 2000*, Paper No.203
- (7) Peter L. Andresen, Thomas M. Angeliu and Lisa M. Young, “Effect of Martensite and Hydrogen on SCC of Stainless Steels and Alloy 600,” *Corrosion 2001*, Paper No.1228
- (8) Peter L. Andresen, “Similarity of cold work and radiation hardening in enhancing yield strength and SCC growth of stainless steels in hot water,” *Corrosion 2002*, Paper No.2509
- (9) Peter L. Andresen, L.M. Young, W. R. Catlin and R. M. Horn, “Stress Corrosion Crack Growth Rate Behavior of Various Grades of Cold Worked Stainless Steel in High Temperature Water,” *Corrosion 2002*, Paper No.2511
- (10) 有岡孝司, “PWR1 次系環境での非鋭敏化 SUS316 の粒界型応力腐食割れ感受性に及ぼす温度, 水素濃度およびほう酸濃度の影響,” *INSS Journal*, Vol 9, P. 116 (2002)
- (11) T. Fukumura, N. Nakajima, N. Totsuka, “Development of an Autoclave with Zirconia Windows for in-situ Observation of Sample Surface under the Primary Water Conditions of Pressurized Water Reactors,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, 39[3], 276 (2002)
- (12) T. Fukumura, N. Nakajima, N. Totsuka, Mechanism of Material Degradation and Non-Destructive Evaluation In Light Water Reactors, 417(2002)
- (13) 福村卓也, “加圧水型原子炉の 1 次冷却材環境下で材料表面の直接観察が可能なジルコニア結晶製観察窓付きオートクレーブの開発,” *INSS journal*, Vol 9, P. 234 (2002)
- (14) G. Furutani, N. Nakajima, T. Konishi, M. Kodama, *J. Nucl. Mater.*, 288, 279 (2001)
- (15) 柴田俊夫, 春名匠, 藤本慎司, 張勝寒, “原子炉環境水化学因子による応力腐食割れ抑制機構の研究,” *JAERI-Tech*, (2000)
- (16) M. L. Castano Marin, M. S. Garcia Redondo, G. de Diego Velasco, D. Gomez Briceno, 11th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, 845 (2003)
- (17) 寺地巧, 藤井克彦, 有岡孝司, “高温水中で生成する SUS316 の表面皮膜および IGSCC き裂先端の分析,” *INSS Journal*, Vol 10, P. 151 (2003)
- (18) C.M. Criss and J.M. Cobble, *J. Amer. Chem. Soc.*, 86 (1964)
- (19) D.D. MacDonald, G.R. Shierman and P. Bulter, Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-4136 (1972)
- (20) D.D. MacDonald, G.R. Shierman and P. Bulter, Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-4137 (1972)
- (21) D.D. MacDonald, G.R. Shierman and P. Bulter, Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-4138 (1972)
- (22) D.D. MacDonald, G.R. Shierman and P. Bulter, Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-4139 (1972)