

# PWR一次系水模擬環境における中性子照射ステンレス鋼の 粒界酸化の照射量依存性

Irradiation Dose Dependence of Grain Boundary Oxidation of Neutron Irradiated Stainless Steel in Simulated PWR Primary Water Environment

福村 卓也 (Takuya Fukumura) \*<sup>1</sup>      三浦 照光 (Terumitsu Miura) \*<sup>1</sup>

藤井 克彦 (Katsuhiko Fujii) \*<sup>1</sup>      福谷 耕司 (Koji Fukuya) \*<sup>1</sup>

橘内 裕寿 (Yuji Kitsunai) \*<sup>2</sup>

**要約** 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 機構の解明の一環として、中性子照射されたSUS316ステンレス鋼を用いて照射が粒界酸化に及ぼす影響を調べた。3 dpa, 19 dpaおよび73 dpa照射されたフラックスシムブルチューブ材からOリング試験片を加工し、320℃のPWR一次系水模擬環境で一定荷重を荷したまま、応力腐食割れ (SCC) 試験を行った。SCC試験後、粒界断面の酸化状況を透過型電子顕微鏡観察により調べた。観察したほとんどの粒界にシャープなくさび状の粒界酸化が観察された。平均粒界酸化長さは照射量3 dpa, 19 dpaと73 dpaでそれぞれ100 nm, 340 nm, 400 nmであった。照射量3 dpaから19 dpaにかけては粒界酸化長さが比較的大きく増加し、73 dpaにかけて緩やかに増加する照射量依存性が認められた。粒界酸化部ではFeとNiの欠乏とCrの濃化が生じており、粒界酸化部の前方では粒界に沿ってNiの濃化も確認された。粒界酸化部とその近傍の組成分布は照射量により変化せず、基本的な酸化過程は照射量により大きくは変化しないと考えられた。

**キーワード** 照射誘起応力腐食割れ, ステンレス鋼, 腐食, 加圧水型原子炉, 粒界酸化, 粒界偏析

**Abstract** To elucidate the irradiation assisted stress corrosion cracking (IASCC) mechanism, effects of irradiation on the grain boundary (GB) oxidation were investigated using irradiated stainless steel specimens. O-ring specimens were prepared from 3 dpa, 19 dpa and 73 dpa irradiated flux thimble tubes and the stress corrosion cracking (SCC) test was performed in the simulated PWR primary water environment at 320°C with constant load condition. After the SCC test, the oxidation state of the GBs was examined using a transmission electron microscope. Sharp wedge-shaped grain boundary oxidation was observed in almost the GBs. The observed average GB oxidation length at 3 dpa, 19 dpa and 73 dpa was 100 nm, 340 nm and 400 nm, respectively. A relatively significant increase of GB oxidation length from 3 dpa to 19 dpa and a moderate increase of GB oxidation length from 19 dpa to 73 dpa were observed. Fe and Ni depletion and Cr enrichment were observed; additionally, Ni enrichment was observed in front of the GB oxides. The distribution of major elements near the GB oxides was almost the same before and after irradiation, therefore it was considered that the basic oxidation process did not change significantly due to irradiation.

**Keywords** Irradiation assisted stress corrosion cracking, stainless steel, corrosion, PWR, grain boundary oxidation, grain boundary segregation

## 1. はじめに

軽水炉の炉内構造物の高経年化における重要な技術的問題のひとつに照射誘起応力腐食割れ (Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking,

IASCC) がある。IASCCは高温水中で中性子照射されたステンレス鋼に発生する粒界割れである。海外の加圧水型原子炉 (Pressurized Water Reactor, PWR) ではIASCC事例としてバッフルフォーマボルト (Baffle Former Bolt, BFB) の損傷<sup>(1)</sup>が知ら

\*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\*2 日本核燃料開発株式会社

れている。IASCC発生条件や発生機構についてこれまで多くの研究<sup>(2)~(5)</sup>が行われており、IASCC発生しきい応力については約20 dpaまでは照射量の増加に伴って大きく低下するが、約20 dpa以上ではその傾向が変化する照射量依存性<sup>(6)~(10)</sup>が知られている。

IASCCはSCCの発生要因である材料、環境、応力にそれぞれ照射が影響する複雑な事象である。中性子照射により材料内には多量の欠陥（転位ループやキャビティ、析出物）や粒界偏析（Cr欠乏、Ni濃化等）が生じるため、これらが腐食挙動（表面酸化膜性状、粒界酸化状況）や機械的特性に影響する。このため機構解明には、照射材の機械的性質の変化とともに、高温水中での腐食挙動の理解が重要と考えられる。しかしながら、軽水炉環境における照射ステンレス鋼の腐食挙動に関するデータは少ない。そのため、INSSでは照射ステンレス鋼の酸化状態について系統的にデータを蓄積し、その特徴を把握するため、中性子照射材を用いてPWR一次系水模擬環境で腐食試験を行い、酸化皮膜の性状や粒界酸化の状態を調べる研究を進めている<sup>(11)~(13)</sup>。これまでに照射量3 dpaおよび73 dpa材で粒内の腐食が照射量とともに増加すること、粒界の腐食が粒内よりも進行することを報告している<sup>(12)</sup>。

本報告では中程度の照射量である19 dpa材についてPWR一次系水模擬環境での粒界酸化挙動を詳細に調べた結果を加え、中性子照射ステンレス鋼の粒界酸化の照射量依存性についてまとめた結果を報告する。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験材

試験材はPWRで使用された冷間加工SUS316ステンレス鋼製炉内計装用シングルチューブ（Flux Thimble Tube, FTT）であり、SCC試験に供した3 dpa材、19 dpa材、73 dpa材および未照射材である。化学成分を表1に、照射条件を表2に示す。

SCC試験片はチューブ状のFTT材から2 mm幅のOリング状試験片を切り出し、試験片の切断面を機械研磨とバフ研磨により鏡面仕上げした。

SCC試験は表3に示すPWR一次系水模擬環境条件で一定荷重で1149時間実施した。試験片の荷重は図1(上)の青矢印に示すように、Oリング試験

片の上下方向に専用治具を用いて一定荷重を荷重した。上部荷重方向を0度とし、試験開始時の応力分布を有限要素法（FEM）により解析した結果を図1（上：X方向、下：Y方向）に示す。90度および270度の外周側に最大400 MPaの引張応力が荷重され、0度および180度の内面側に最大900 MPaの引張応力が荷重された。より詳細なSCC試験条件は前報<sup>(12)</sup>の通り。

表1 試験材の化学成分（wt%）

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	Bal.

表2 試験材の照射条件

照射損傷量 (dpa)	中性子フルエンス (n/m <sup>2</sup> )	照射速度 (dpa/s)	温度 (°C)
3	$5.2 \times 10^{25}$	$8.7 \times 10^{-9}$	323
19	$2.9 \times 10^{26}$	$4.8 \times 10^{-8}$	323
73	$1.1 \times 10^{27}$	$1.5 \times 10^{-7}$	297

表3 PWR一次系水模擬環境条件

温度 (°C)	溶存水素 (ppm)	ほう酸 (ppm as B)	水酸化リチウム (ppm as Li)	溶存酸素 (ppb)
320	2.7	500	2	< 1

### 2.2 SCC試験片の観察および分析

SCC試験後の観察位置の一例として、73 dpa材のデジタルマイクロスコープによる外観を図2(上)に、表面および断面分析位置を図2(下)に示す。

図2(上)の白丸に示すように、73 dpa材では約10度および170度の内面側と約80度および260度の外面側にき裂が認められたため、図2(下)の赤線に示すようにき裂を避けて270度方向の中央部と外周部の2箇所を表面および断面観察位置とした。き裂は19 dpa材でも認められた。基本的に他の照射量の試験片でも同じ部位を観察対象としたが、19 dpa材については、よりき裂を避けるために約225度方向から断面試料を採取した。

断面の観察には円周方向を観察面とした。集束イオンビーム（Focused Ion Beam, FIB）加工装置を用いて100 nm程度まで薄膜化した透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope, TEM）試料を作製し、TEM観察とエネルギー分散型X線分光（Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS）分析を行った。

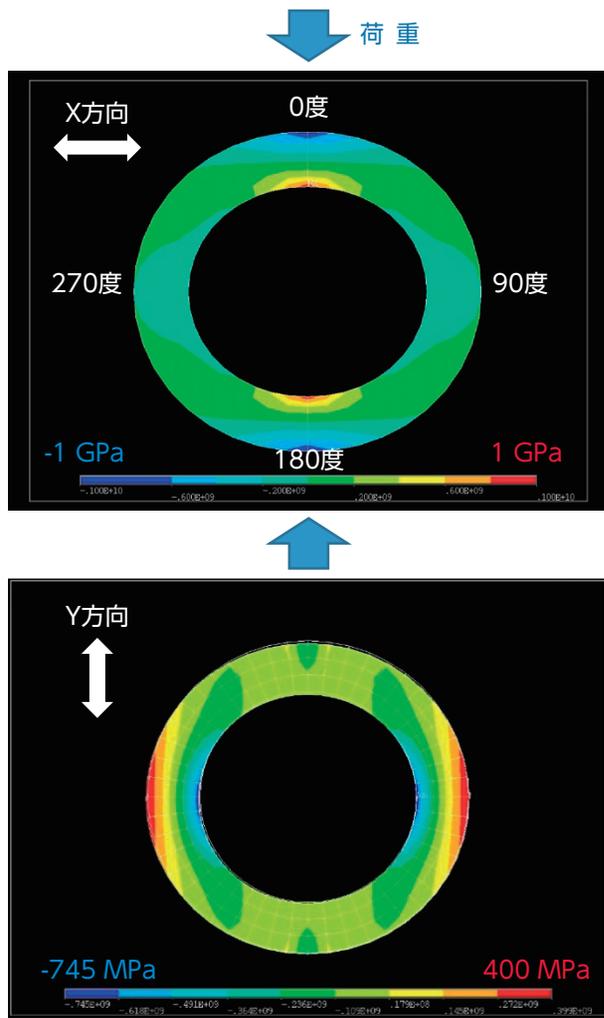


図1 Oリング状試験片応力負荷方向とFEMによる応力解析結果（上：X方向，下：Y方向）  
青矢印：荷重負荷方向 白両矢印：応力解析方向

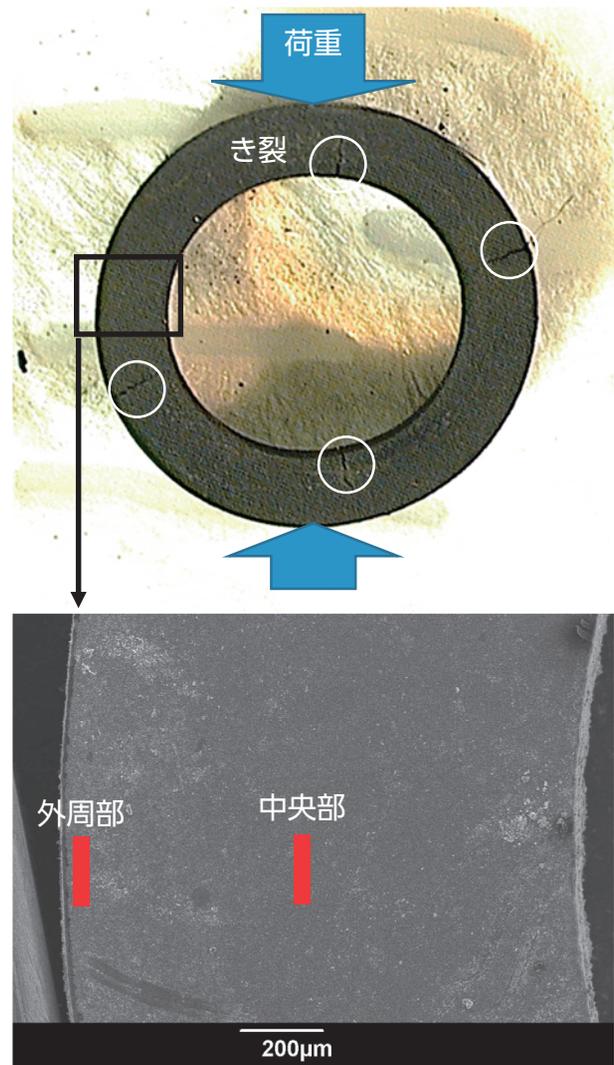


図2 73 dpa材試験片のSCC試験後の外観（上），  
表面および断面観察位置（下）  
青矢印：荷重負荷方向 白丸：き裂発生位置  
赤線：表面および断面観察位置

### 3. 試験結果

#### 3.1 表面の腐食状況

未照射材，3 dpa材，19 dpa材および73 dpa材の表面中央部の腐食状況の走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope, SEM）による比較を図3に示す。

未照射材や3 dpa材に比べて19 dpa材と73 dpa材では大きな粒状の腐食生成物が認められた。これまでの研究<sup>(11)</sup>からこの粒状の腐食生成物はFeを主体としたスピネル構造の酸化物であることが分かっている。なお，中央部と外周部の表面腐食状況には顕著な違いは認められなかった。

#### 3.2 断面の腐食状況

3 dpa材，19 dpa材，73 dpa材の断面の腐食状況のZコントラスト像による比較を図4に示す。また，図4（d）には73 dpa材断面の拡大を合わせて示す。

3 dpa材では酸化膜は薄く，粒子状の酸化物もほとんど認められない。19 dpa材と73 dpa材の酸化膜は3 dpa材に比べて厚く，粒子状の酸化物も多く見られ，表面の腐食状況の観察結果と整合している。

酸化膜は元表面と考えられる平滑面を挟んで外層と内層の2層構造である。過去の研究<sup>(11),(12)</sup>から外層はFeを主体としたスピネル構造の酸化物であり，内層はCrを主体としたスピネル構造の酸化物であることが分かっている。

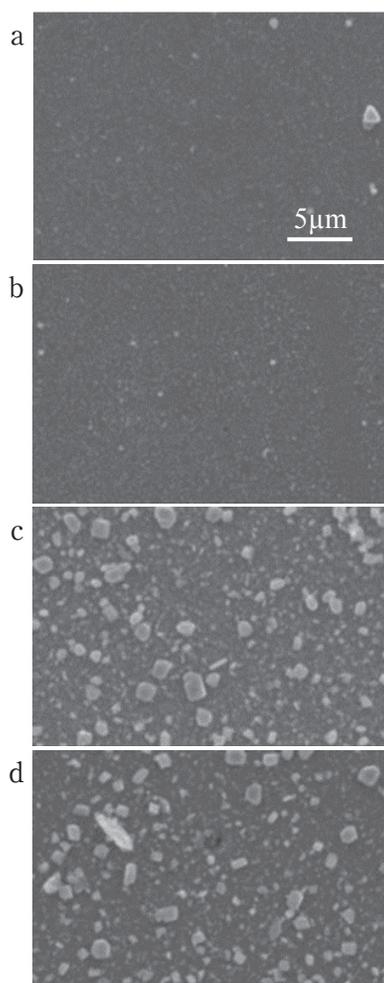


図3 SCC試験後の表面腐食状況 (SEM)  
a. 未照射材, b. 3 dpa材, c. 19 dpa材, d. 73 dpa材

図4 (d) の73 dpa材断面の拡大には粒界酸化が観察された。3 dpa材, 19 dpa材, 73 dpa材のそれぞれ7個, 3個, 4個の粒界を詳細に観察したところ, その全てにシャープなくさび状の粒界酸化を確認した。各照射量の粒界酸化を含む断面観察例を図5に示す。

図5 (d) と (e) には酸化部の電子線回折の例として73 dpa材の粒界酸化部と内層酸化膜の電子線回折像を示す。内層酸化膜はリング状のスピネル構造の回折が認められた。粒界酸化部も内層酸化物とほぼ同様であるが, やや不明瞭であり, 結晶性が低いと考えられる。

粒界酸化部の元粒界では19 dpa材と73 dpa材でZコントラスト像に濃いコントラストが見られた。Zコントラスト像では原子番号の二乗に比例した信号強度が得られ, 粒界酸化した元粒界上で原子番号の大きい原子の原子密度が低下していることを示している。

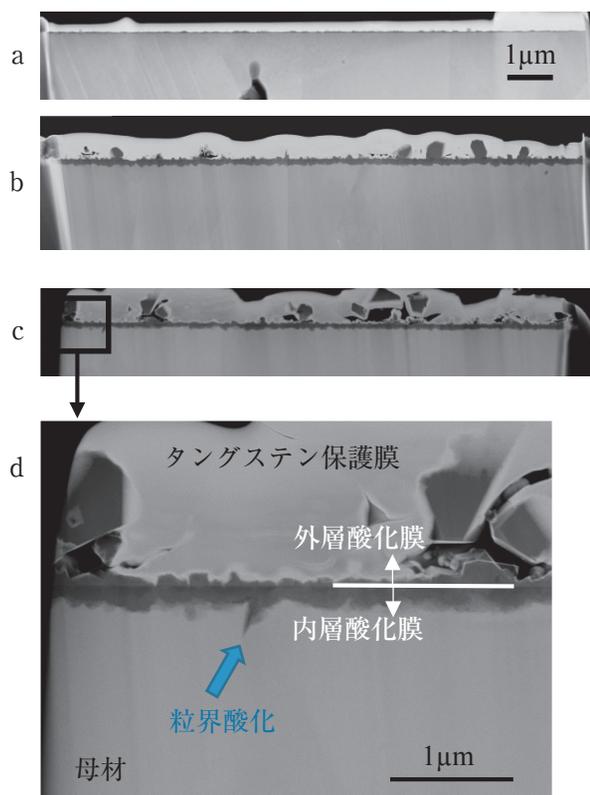


図4 中央部断面のZコントラスト像  
a. 3 dpa材, b. 19 dpa材, c. 73 dpa材, d. 73 dpa材拡大

### 3.3 内層酸化膜厚さおよび粒界酸化長さ

内層酸化膜厚さおよび粒界酸化長さと照射量の関係を図6に示す。図中のエラーバーは最大と最小である。

内層酸化膜厚さとしてZコントラスト像を基に元表面からの酸化膜の厚さを100点計測し, 平均値を評価した。各照射量の平均内層厚さは3 dpa, 19 dpa, 73 dpaでそれぞれ20 nm, 191 nm, 173 nmであり, 照射量3 dpaから19 dpaで大きく増加するが19 dpa以上では飽和する傾向が認められた。

なお, 内層はOが内方拡散して形成され, 内層酸化膜厚さは腐食の直接的な指標であると考えられるが, 外層は母材のFeが溶出し, Schikorr反応を経て形成され, 溶出したFeは系統水との間で物質移動を伴うため, 外層酸化膜厚さは評価から除外した。

また, 中央部と外周部を比較すると, 内層酸化膜厚さの平均値は3 dpa材の中央部, 外周部, 19 dpa材の中央部, 外周部, 73 dpa材の中央部, 外周部でそれぞれ17 nm, 23 nm, 158 nm, 225 nm, 158 nm, 193 nmであった。各照射量とも外周部の内層酸化膜厚さは中央部に比べて僅かに大きい。図1

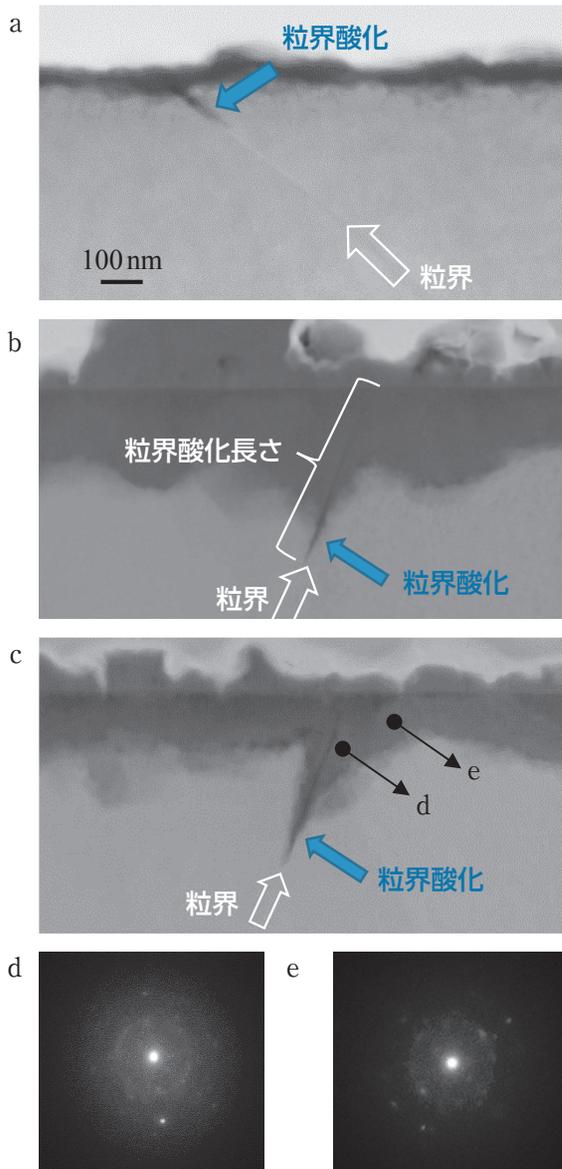


図5 粒界酸化を含む断面のZコントラスト像および電子線回折像  
 a. 3 dpa材粒界酸化部Zコントラスト像  
 b. 19 dpa材粒界酸化部Zコントラスト像  
 c. 73 dpa材粒界酸化部Zコントラスト像  
 d. 73 dpa材粒界酸化部電子線回折像  
 e. 73 dpa材内層酸化膜電子線回折像

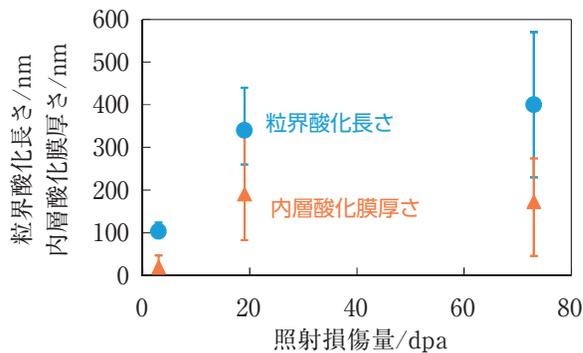


図6 内層酸化膜厚さおよび粒界酸化長さと照射量の関係

(下)に示すようにSCC試験開始時は中央部より外周部の方が高い引張応力が負荷されており、応力の影響により外周部でより内層酸化膜が厚くなった可能性が考えられるが、19 dpa材と73 dpa材では試験中にき裂が発生したため応力が試験中に変化しており、正確な応力履歴は不明である。

粒界酸化の指標として、元表面から粒界に沿った酸化長さを粒界酸化長さとして評価した。各照射量の平均粒界酸化長さは照射量3 dpa, 19 dpa, 73 dpaでそれぞれ100 nm, 340 nm, 400 nmであり、3 dpaから19 dpaで大きく増加し、19 dpaから73 dpaにかけて緩やかに増加する照射量依存性が認められた。

### 3.4 粒界組成分布

粒界酸化部を含むEDS面分析の例として73 dpa材の結果を図7に、粒界に沿った線分析と粒界酸化部の粒界に垂直方向に点分析した例を図8に示す。

粒界酸化部を含む面分析と粒界に沿った線分析による組成分布から粒界酸化部ではFeとNiの欠乏、Crの濃化およびSiの僅かな濃化が認められた。粒界酸化部の先の母材側には顕著なNiの濃化が認められた。これらの組成分布は他の照射量でも同様に認められた。

粒界酸化部の粒界に垂直方向の組成分布から、O, Fe, Cr, Niが10 nm以上の幅で変化しているのが

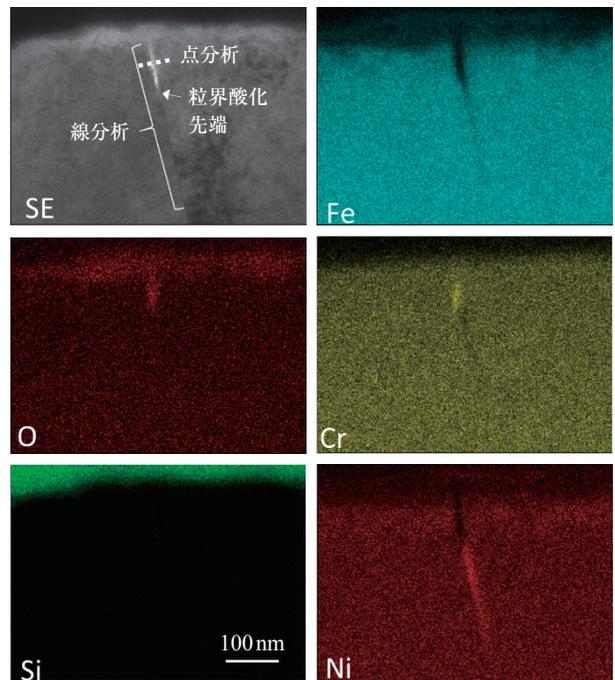


図7 73 dpa材断面のEDS面分析

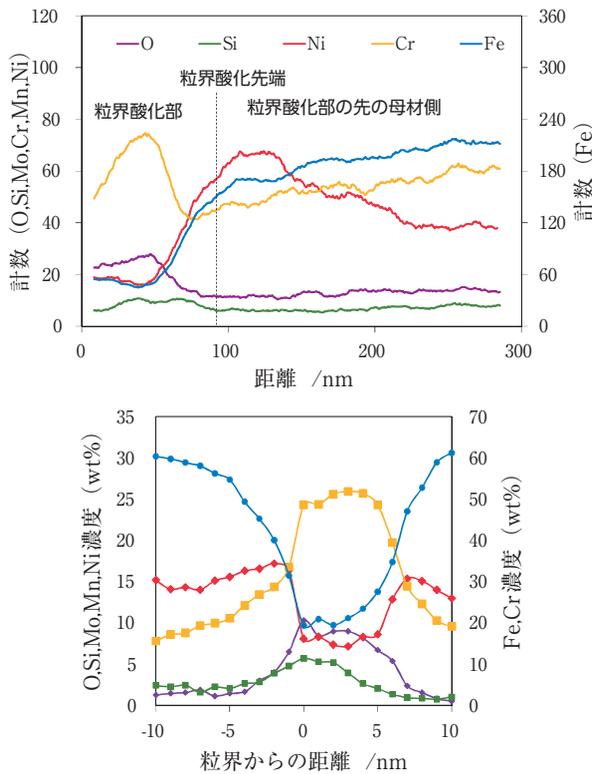


図8 73 dpa材の粒界に沿った線分析（上）および粒界酸化部の粒界に垂直方向のEDS点分析（下）

認められた。これらの組成分布は他の照射量でも同様に認められた。

#### 4. 考察

##### 4.1 粒界酸化部の組成に及ぼす照射影響

粒界酸化部ではFeとNiが欠乏し、CrとSiが濃化しており、粒界酸化の先の母材側ではNiの濃化を確認した。これらの酸化に伴った粒界の組成変化は、粒内の酸化過程と同様に粒界よりFeの流出とともにNiが粒界酸化部を超えて母材側の粒界へ移動したことによって生じたと考えられる。ただし、粒内の酸化過程ではSiの濃縮は認められておらず、Niの濃化も顕著ではない場合があり、粒界の酸化過程の方が粒内の酸化過程より物質移動が促進されている可能性が考えられる。

粒界酸化過程が照射により影響を受けるか検討するため、粒界に沿ったFe, Cr, Ni, Siの規格化した組成分布を図9に示す。組成変化はTEM/EDS線分析における特性X線の計数を表面から最も離れた測定点での計数で比をとり規格化して縦軸とし、横軸は粒界酸化先端からの距離とした。

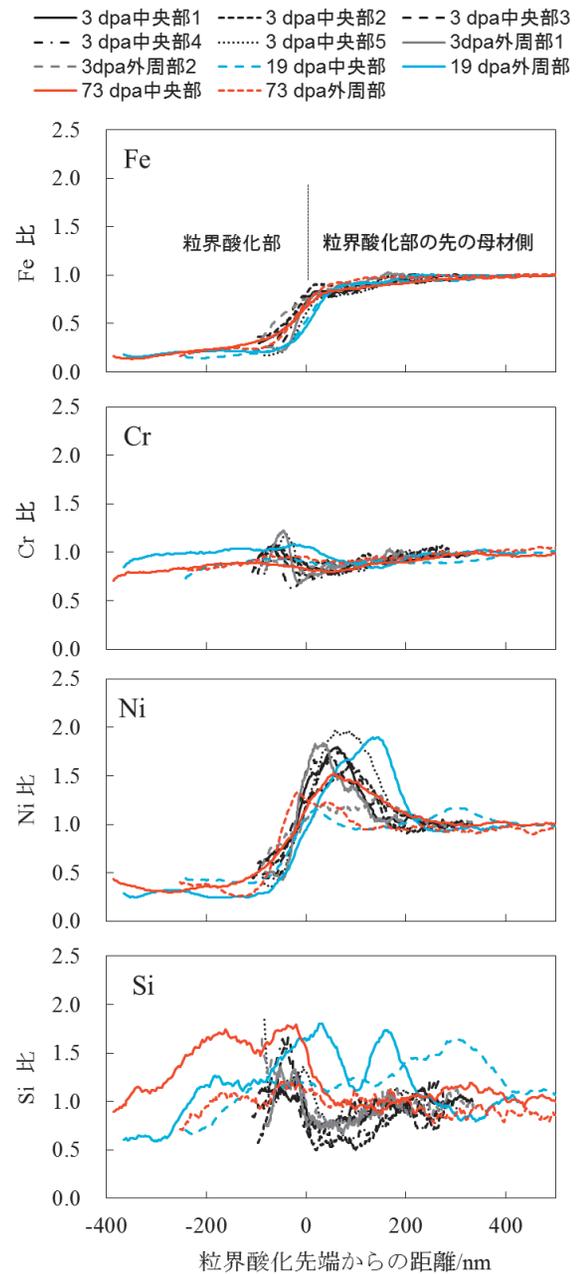


図9 粒界に沿ったFe, Cr, Ni, Siの組成分布

Fe比はいずれの試料も表面で0.2程度に低下し、粒界酸化の先端付近ではほぼ1近くへ回復している。Cr比はいずれの試料もわずかに粒界酸化部の中央付近でピークが、粒界酸化の先端近傍でボトムが認められる。Ni比はいずれの試料も表面で0.5程度に低下し、粒界酸化部先の母材側で1.5から2程度のピークが幅200 nm程度で認められる。Si比は粒界の酸化部で1.1から1.8程度のピークが認められるが計数が少ないためにばらつく傾向がある。粒界によりピークの位置や高さが若干異なるが、照射量で明確な違いは認められなかった。粒界酸化の基本的な

過程は、3 dpaから73 dpaの範囲では照射により大きくは変化しないと考えられる。

### 4.2 粒界酸化長さに及ぼす照射影響

粒界酸化長さは3 dpaから19 dpaにかけて大きく増加し、73 dpaにかけて緩やかに増加した。内層酸化膜厚さは3 dpaから19 dpaにかけて大きく増加しているが、19 dpa以上では飽和傾向にある。

内層酸化膜が照射により厚くなる、即ち一様腐食が照射により促進されるのは、照射により母材に導入された転位ループやキャビティ等の照射欠陥が拡散パスとして働き、物質移動が促進されている可能性が考えられる。転位ループやキャビティの密度は照射量10~20 dpaで飽和しており、内層酸化膜厚さが照射量19 dpa以上で飽和することと対応する。

粒界酸化長さは照射量19 dpa以上でも緩やかに増加しており、内層酸化膜厚さと照射量依存性が異なる。3 dpa材、19 dpa材、73 dpa材での粒界酸化長さと福谷ら<sup>(4)</sup>による3 dpa材、25 dpa材、73 dpa材の粒界偏析量 (Cr, Ni, Si) と対応させて整理した結果を図10に示す。粒界偏析は高照射量でも進行しており、Crの欠乏やNiとSiの濃化の度合いが増加すると粒界酸化長さが増加する関係にあり、照射誘起偏析により粒界からFeとCrが欠乏し、NiとSiが濃化することが粒界の腐食特性に影響していると考えられる。寺地ら<sup>(14)</sup>はCr濃度を变化させたFe-Cr-Niモデル合金を用いてPWR一次系水模擬環境で腐食試験を行い、Cr濃度の低い材料で表面酸化膜が厚く、腐食が促進されることを報告している。粒内と粒界の違いを考慮する必要があるが、粒界偏析によりCr濃度が低下した粒界で優先的な酸化が生じた可能性が推察される。Niに関しては600

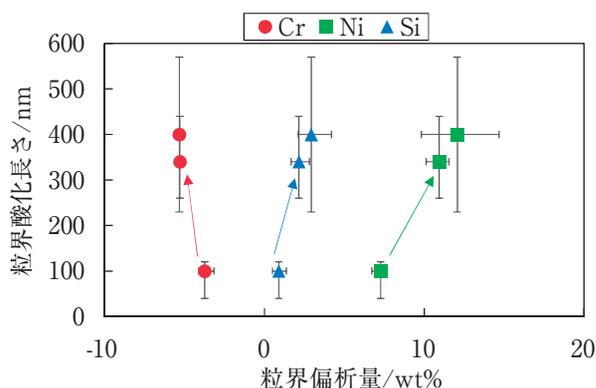


図10 粒界偏析量と粒界酸化長さの関係

合金のようなNi基合金で顕著な粒界酸化が生じることが知られており、Niの濃化も粒界の優先酸化に影響した可能性が考えられる。またSiは酸化ポテンシャルが高く、濃化することで粒界の優先酸化を促進する可能性がある。現状ではこれらの粒界偏析が粒界酸化長さに及ぼす影響を定量的には把握できておらず、詳細な検討にはNiやSiの組成を変えたモデル合金を用いて、粒界組成と粒界酸化長さの関係を把握する必要があると考えられる。

### 4.3 粒界酸化長さとIASCC特性

粒界酸化長さやIASCC特性（発生しきい応力と粒界破面率）、硬さ、転位ループ密度、粗大すべり間隔、粒界偏析(Cr, Ni, Si)の照射による変化傾向(相対値)の比較を図11に示す。IASCC発生しきい応力は約20 dpa程度まで大きく低下し、40 dpa以降は緩やかに減少あるいは飽和傾向となる照射量依存性がある。粒界酸化長さは3 dpaから19 dpaにかけて大きく増加し、73 dpaにかけて緩やかに増加しており、粒界酸化長さはIASCC発生しきい応力と類似の変化を示している。ただし、他の指標でも類似の変化を示しており、IASCC特性を説明するには更に詳細な検討が必要であると考えられる。

粒界酸化長さとIASCC特性の関係をより詳細に検討するためには同じ材料をIASCC特性の異なる環境で腐食試験を行うことが有効と考えられる。

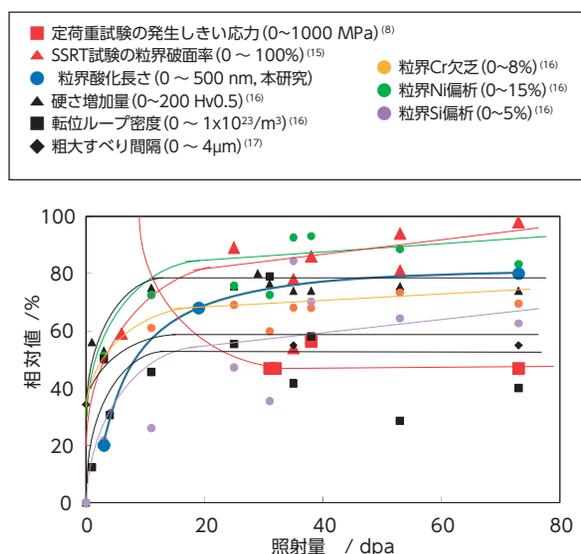


図11 粒界酸化長さとIASCC特性（発生しきい応力と粒界破面率）、粒界酸化長さ、硬さ、転位ループ密度、粗大すべり間隔、粒界偏析 (Cr, Ni, Si) の照射による変化傾向 (相対値) の比較

非照射材の粒界型SCC (IGSCC) では、その機構の一つとして冷間加工により材料中に導入された空孔が粒界上でキャビティを形成し、粒界の結合強度を低下させる可能性が指摘されている<sup>(18)</sup>。IASCCについては、これまでの研究から照射と腐食による粒界の結合強度の低下(粒界のミクロ組織と組成の変化)と粒界で応力集中やひずみの蓄積(照射欠陥の形成に起因して発現する転位チャンネル変形機構)が起こるようになることが発生機構として重要であると考えている。粒界酸化は粒界に高い応力やひずみの蓄積が生じた場合に粒界割れの発生や進展を促進する可能性があり、粒界劣化の一要因と考えられる。本研究で粒界酸化は照射により促進されることが明らかになった。

粒界の結合強度に及ぼす照射影響については、ミクロンサイズの試験片を用いた超微小試験技術を用いた検討<sup>(19)</sup>が行われており、IASCC機構における粒界酸化の寄与を詳細に把握することが今後必要であると考えられる。

## 5. まとめ

IASCC機構解明のため320℃のPWR一次系水模擬環境でSCC試験に供した3 dpa, 19 dpaおよび73 dpa中性子照射されたステンレス鋼を用い、粒界酸化部の挙動を調べ、以下の知見を得た。

1. 粒界酸化長さは照射量とともに増加する。
2. 粒界酸化部とその近傍の組成分布は照射により変化せず、基本的な酸化過程は照射量により大きくは変化しない。
3. 粒界酸化長さの照射による変化傾向はIASCC発生しきい応力の照射による変化傾向と類似している。

## 参考文献

- (1) R. Cauvin, O. Goltrant, Y. Rouillon, E. Verzaux, A. Cazus, P. Dubuisson, P. Poitrenaud and S. Bellet, Fontevraud 3, FNES, vol.1, pp.54-65,1994.
- (2) O.K. Chopra, A.S. Rao, "A review of irradiation effects on LWR core internal materials - IASCC susceptibility and crack growth rates of austenitic stainless steels," *Journal of Nuclear Materials*, vol.409, pp. 235-256, 2011.
- (3) G.S. Was, S.M. Bruemmer; "Effects of irradiation on intergranular stress corrosion cracking," *Journal of Nuclear Materials*, vol.216, pp. 326-347, 1994.
- (4) 福谷耕司, 西岡弘雅, 藤井克彦, "ステンレス鋼の軽水炉照射挙動," INSS MONOGRAPHS No.4, 2009.
- (5) K. Fukuya, "Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials," *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.50, pp.213-254, 2013.
- (6) J. Conermann, R. Shogan, K. Fujimoto, T. Yonezawa, Y. Yamaguchi, "Irradiation Effects in a Highly Irradiated Cold Worked Stainless Steel Removed from a Commercial PWR," *Proc. of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors* -, pp. 277-284, 2005.
- (7) P. Freyer, T. Manger, M. Burke, "Hot Cell Crack Initiation Testing of Various Heats of Highly Irradiated 316 Stainless Steel Compositions Obtained from Three Commercial PWRs," *Proc. of 13th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, 2007.
- (8) H. Nishioka, K. Fukuya, K. Fujii, T. Torimaru, "IASCC Initiation in Highly Irradiated Stainless Steels under Uniaxial Constant Load Conditions," *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.45, no.10, pp.1072-1077, 2008.
- (9) K. Takakura, K. Nakata, K. Fujimoto, K. Sakima, N. Kubo, "IASCC Properties of Cold Worked 316 Stainless Steel in PWR Primary Water," *Proc. of 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, pp. 1207-1218, 23-27 August 2009.
- (10) R.W. Bosch, M. Vankeeberghen, R. Gerard, F. Somville, "Crack initiation testing of thimble tube material under PWR conditions to determine a stress threshold for IASCC,"

- Journal of Nuclear Materials*, vol.461, pp. 112-121, 2015.
- (11) 西岡弘雅, 福谷耕司, 藤井克彦, 橋内裕寿, “PWR一次系模擬水中で形成した照射ステンレス鋼の酸化皮膜分析,” *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, vol. 19, pp. 131-143, 2012.
- (12) 福村卓也, 福谷耕司, 藤井克彦, 三浦照光, 橋内裕寿, “PWR一次系模擬水中における照射ステンレス鋼の腐食挙動その2,” *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, vol. 22, pp. 92-101, 2015.
- (13) K. Fukuya, H. Nishioka, K. Fujii, Y. Kitsunai, “Characterization of surface oxides formed on irradiated stainless steels in simulated PWR primary water,” *Proc. of Fontevraud 8*, 2014.
- (14) 寺地巧, 有岡孝司, “高温水環境下におけるSUS316の皮膜に及ぼす水化学環境と材料中Cr濃度の影響,” *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, vol. 11, pp. 153-160, 2004.
- (15) K. Fukuya, M. Nakano, K. Fujii and T. Torimaru, “IASCC Susceptibility and Slow Tensile Properties of Highly-irradiated 316 Stainless Steels,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.41, pp.673-681, 2004.
- (16) K. Fukuya, K. Fujii, M. Nishioka and Y. Kitsunai, “Evolution of Microstructure and Microchemistry in Cold-worked 316 Stainless Steels under PWR Irradiation,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.43, pp.159-173, 2006.
- (17) H. Nishioka, K. Fukuya, K. Fujii and T. Torimaru, “IASCC properties and mechanical behavior of stainless steels irradiated up to 73dpa,” *Proc. of 13th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, 19-23, August, 2007.
- (18) K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, “Dependence of Stress Corrosion Cracking for Cold-Worked Stainless Steel on Temperature and Potential, and Role of Diffusion of Vacancies at Crack Tips,” *Corrosion* 64, pp. 691-706, 2008.
- (19) 三浦照光, 藤井克彦, 西岡弘雅, 福谷耕司, “超微小引張試験による中性子照射ステンレス鋼の粒界破壊特性の評価,” *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, vol. 19, pp. 155-165, 2012.