

### 3 dpa 中性子照射ステンレス鋼の高温水中における粒界酸化

Grain boundary oxidation of 3 dpa neutron-irradiated stainless steels  
in high temperature water

福村 卓也 (Takuya Fukumura) \*1      三浦 照光 (Terumitsu Miura) \*1  
藤井 克彦 (Katsuhiko Fujii) \*1      福谷 耕司 (Koji Fukuya) \*1  
橋内 裕寿 (Yuji Kitsunai) \*2

**要約** 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 機構の解明の一環として, 3 dpa 中性子照射された SUS316 ステンレス鋼を応力腐食割れ (SCC) の試験を実施し, 照射と応力が粒界酸化に及ぼす影響を調べた. 3 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°C の加圧水型原子炉一次系模擬環境条件で一定荷重を負荷したまま 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. 観察した粒界すべてに粒界酸化が観察され, ほとんどがシャープなくさび状であった. 3 dpa という比較的低い照射量でも粒界酸化が起こることが確認された. 観察された粒界酸化長さは平均で 100 nm であり, 73 dpa 照射材で観察された粒界酸化長さの平均 400 nm より短く, 照射により粒界酸化が促進されることが分かった. 粒界酸化部では Fe と Ni の欠乏と Cr の濃化が観察された. 粒界酸化部の前方では粒界に沿って Ni の濃化も観察された. 引張応力の有無による粒界酸化の状況に違いは観察されなかった.

**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** As part of elucidation of the irradiation assisted stress corrosion cracking (IASCC) mechanism, stress corrosion cracking (SCC) test of 3 dpa neutron-irradiated SUS316 stainless steel was performed and the effects of irradiation and stress on the grain boundary oxidation were investigated. O-ring specimens were prepared from 3 dpa irradiated flux thimble tubes and corrosion test was performed in the simulated pressurized water reactor (PWR) primary coolant environment at 320°C with constant load condition. After the SCC test, the oxidation state of grain boundary was observed by TEM. Grain boundary (GB) oxidation was observed in all of observed grain boundaries, even so relatively low dose as 3 dpa, and almost all GB oxidations were sharp wedge-shaped. Observed average GB oxidation length was 100 nm, which was shorter than the average GB oxidation length of 73 dpa material, 400 nm, indicating the promotion of GB oxidation by irradiation dose. On the GB oxidation, Fe and Ni depletion and Cr enrichment was observed. Also in the front of GB oxidation, Ni enrichment was observed. No difference of GB oxidation length with and without the tensile stress was observed.

**Keywords** irradiation assisted stress corrosion cracking, stainless steel, corrosion, PWR, grain boundary oxidation, radiation induced segregation

#### 1. はじめに

軽水炉の炉内構造物の高経年化に対す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 事例としてバツフルフォーマボルト (baffle former bolt, BFB) の損傷<sup>(1)</sup> が知られている. 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 までは低下度合が大きく, 約 40 dpa 以上で低下度合が緩やかになる

\*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)

ような照射量依存性<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、応力に照射の影響がそれぞれ加わった複雑な事象である。中性子照射により材料内に多量の欠陥（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と考えられる。このためメカニズム解明には、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のデータは少ない。そのため、INSSでは照射材の腐食特性を把握する目的で、中性子照射材を用いてPWR一次系模擬環境条件で腐食試験を行い、皮膜の性状や粒界の状態を調べる研究を進めている<sup>(11)~(13)</sup>。これまでに3~73 dpaで粒内の腐食が照射量とともに増加することを確認している。また、粒界腐食が粒内よりも進行することを73 dpa照射材で確認している<sup>(12)</sup>。

本研究では照射後の粒界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、IASCC感受性が発現し、しきい応力が大きく変化する照射量である3 dpaの照射材について詳細に調べた結果を報告する。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験材

前報<sup>(12)</sup>で用いたSCC試験済みの3 dpa照射材について粒界部の断面を詳細に分析した。試験材はPWRで使用されたSUS316ステンレス鋼製炉内計装用シンプルチューブ（flux thimble tube, FTT）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幅のリング状試験片を切り出し、試験片の切断面を機

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

照射量 (dpa)	照射量 (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

表3 PWR一次系模擬環境条件

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

械研磨とバフ研磨により鏡面仕上げとした。

SCC試験は表3に示すPWR一次系模擬環境条件で1149時間、定荷重を負荷した。定荷重は図1に示すように試験片の上下に荷重を最大900MPaの引張応力（FEM解析値）となるように負荷した。

### 2.2 SCC試験片の観察および分析

分析位置は、図1に示すように荷重を負荷した部位から90度離れた部位の肉厚の中央部（応力中立部）と外周部（FEM解析値で引張応力400 MPa相当）の各2箇所とし、前報<sup>(12)</sup>で分析した部位の近傍とした。荷重（引張応力）方向に平行な断面を観察面とした。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

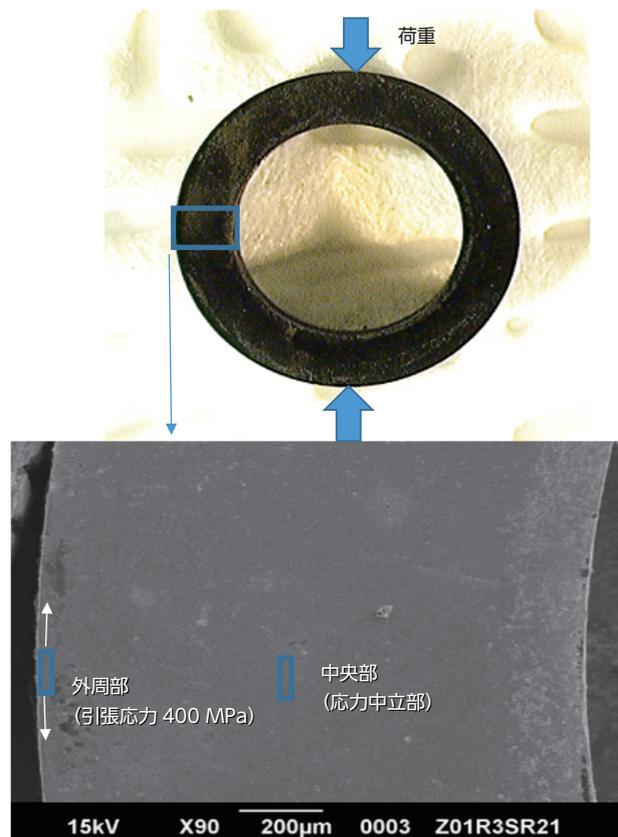


図1 3 dpa照射材断面観察位置

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。

### 3. 試験結果

#### 3.1 粒界酸化状況

中央部で4個, 外周部で4個の合計8個の粒界を観察した。粒界は電子線回折により双晶ではないことを確認した。

中央部の断面TEM像と粒界部のZコントラスト像の観察例を図2に, 外周部断面のTEM像と粒界部のZコントラスト像の観察例を図3に示す。

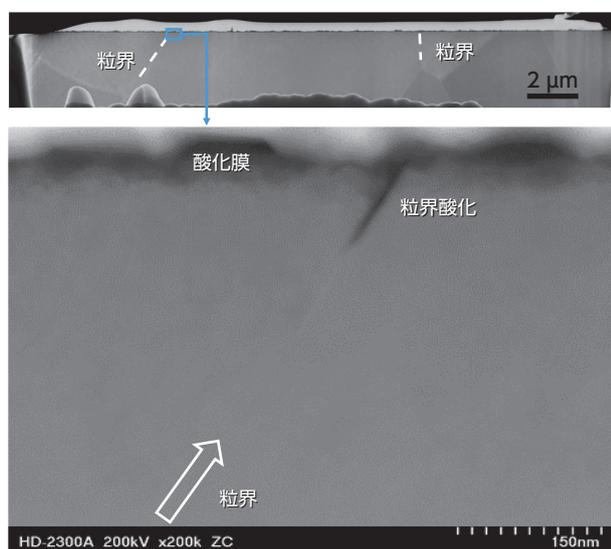


図2 3 dpa照射材中央部断面全体TEM像 (上), 粒界近傍のZコントラスト像 (下)

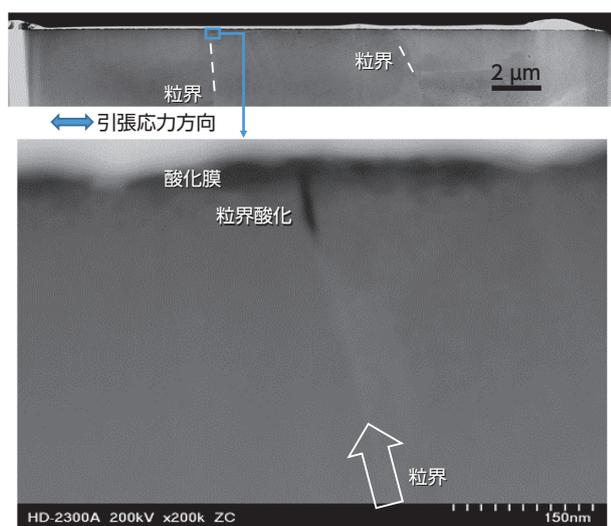


図3 3 dpa照射材外周部断面全体TEM像 (上), 粒界近傍Zコントラスト像 (下)

試験片の表面は前報<sup>(10)</sup>で示した通り, Feリッチスピネルの外層とCrリッチスピネルの内層の2層構造でからなる薄い酸化膜であり, 平均的な内層厚さは約20 nmであった。

中央部で観察したすべての粒界においてシャープなくさび状の粒界酸化が観察された。コントラストの違いから評価した粒界酸化長さは, それぞれ100, 110, 110, 120 nmであり, 粒界酸化長さ120 nmは大傾角粒界 (15度以上) で, 残りの3個は小傾角粒界であった。前報<sup>(12)</sup>で同試料について観察した1個の粒界酸化長さ100 nmを加えた粒界酸化長さの平均は108 nmである。

外周部の4箇所すべての粒界でも, くさび状の粒界酸化が観察された。コントラストの違いから評価した粒界酸化長さは, それぞれ40, 90, 100, 100 nmであり, 粒界酸化長さ40 nmは小傾角粒界で, 残りの3個は大傾角粒界であった。粒界酸化長さの平均は83 nmである。粒界酸化長さの平均値のt検定結果, 中央部と外周部, 大傾角粒界と小傾角粒界ともに有意水準5%で有意差がなく, 引張応力の有無や粒界性格による粒界酸化長さへの影響は見られない。

過去の試験データと併せて粒界酸化長さを照射量で整理した結果を図4に示す。なお, 非照射材については粒界酸化は確認されていない。なお, 照射量22 dpaのデータは3 dpaや73 dpaとは異なる時期の無負荷試験の結果であり, 条件が異なることに留意する必要があるが, 3から73 dpaの範囲で照射量の増加に伴い粒界酸化長さが増加する, 即ち粒界酸化が促進されることが分かった。また図4には照射量と内層酸化膜厚さとの関係も合わせて示した。前報<sup>(12)</sup>では照射量が3 dpaから73 dpaに増加すると, 表面酸化膜の平均内層厚さも20 nmから180 nmに増加しており, 腐食量が照射により増加する

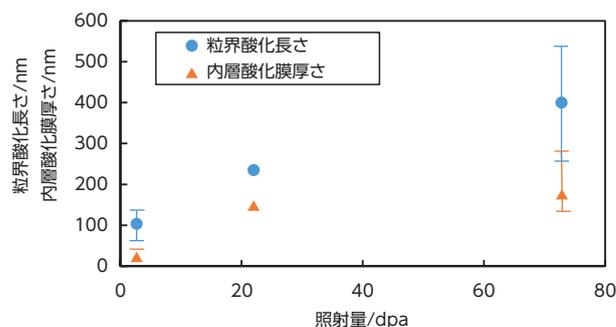


図4 照射量と粒界酸化長さおよび内層酸化膜厚さの関係

ことを報告した. この平均内層厚さの増加160 nm に対して平均粒界酸化長さの増加は300 nmであり, 照射により粒界酸化は表面の腐食より促進されることが分かった.

中央部と外周部の粒界酸化部の元粒界, 表面酸化膜および母材における回折図形の比較をそれぞれ図5および図6に示す. 母材ではオーステナイト粒の回折図形が見られ, 表面酸化膜ではスピネルの回折図形と微細な結晶構造を示すリング状の回折パターンが重なった図形が見られた. 対して粒界酸化部の元粒界上ではスピネルの複数の回折図形とぼやけた回折パターンが重なった図形が見られた.

FTT材の腐食後の酸化膜の分析から, 酸化膜外層はFeリッチスピネル酸化物, 酸化膜内層はCrリッチスピネル酸化物であることが分かっている<sup>(11)~(13)</sup>. 粒界酸化部もスピネル構造を持つが, その組成については3.2項で述べる.

粒界酸化部に複数のスピネルの回折図形が認められたのは, 粒界の両側の母材は結晶方位が異なり,

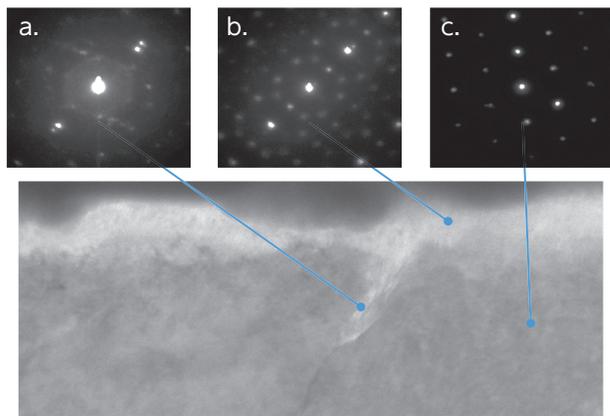


図5 中央部の粒界近傍の電子線回折図形  
a.粒界酸化部元粒界, b.表面酸化膜, c.母材

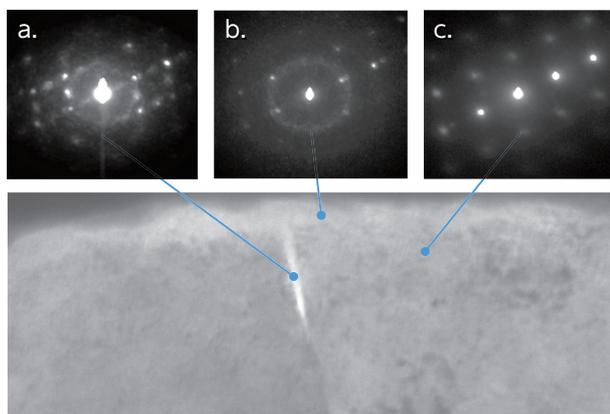


図6 外周部の粒界近傍の電子線回折図形  
a.粒界酸化部元粒界, b.表面酸化膜, c.母材

2種類の母材の粒界方位の影響を受けた酸化物が生成しているためと考えられる.

### 3.2 粒界組成の変化

図3で示した外周部断面についてEDS面分析結果を図7に, 粒界上の線分析による組成変化の分析結果を図8に, 粒界に垂直方向の組成変化のスポット分析結果を図9に示す. 線分析は1 nm間隔で測定し, 傾向を把握しやすくするために21点移動平均によりデータの平滑化処理を行なった. 横軸は試料表面からの距離, 縦軸は各元素のカウントを表す. 粒界に垂直方向の組成変化については粒界酸化先端を基準として200 nm前方, 50 nm前方, 0 nm, 50 nm後方を幅±10 nm, 1 nm間隔で測定した.

図7の面分析に示すように, 粒界酸化部にはOが検出され, Crの濃化とFeとNiの欠乏が観察された.

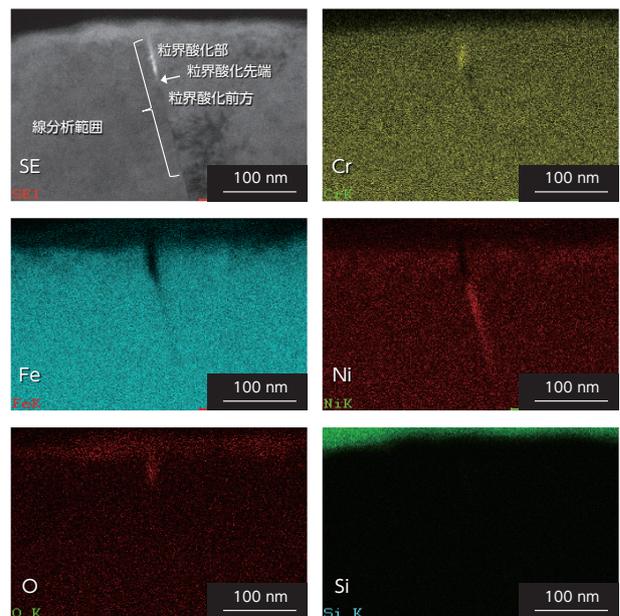


図7 外周部の粒界を含む TEM/EDS面分析

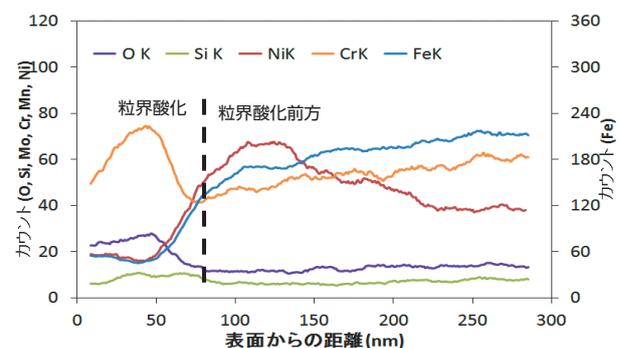


図8 外周部の粒界上の組成変化分析

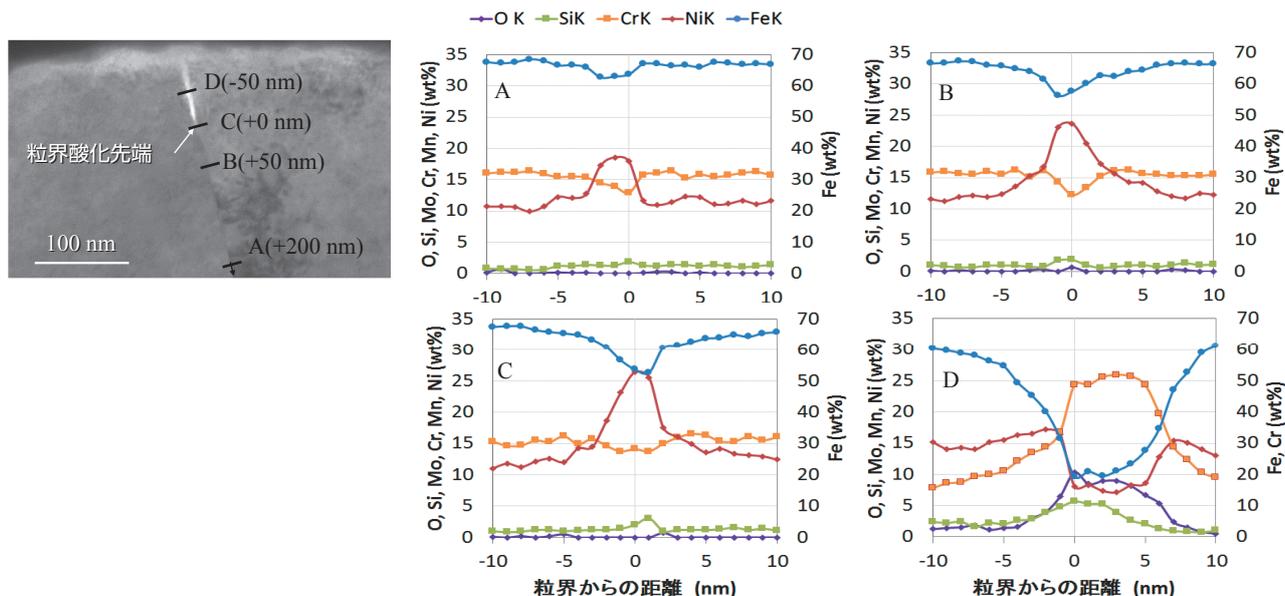


図9 外周部の粒界垂直方向の組成変化  
(粒界酸化先端を基準としてA:200 nm前方, B:50 nm前方, C:0 nm, D:50 nm後方)

Siについては明確な輝度の変化は認められなかった。なお、表面でSiの輝度が高くなっているのは表面保護を目的として蒸着したのタングステンを検出しているためである。粒界酸化の前方ではNiの濃化とFeとCrのわずかな欠乏が見られた。

図8の粒界上の組成変化分析に示すように、表面から約80 nmまでOのカウントが高く、Niのカウントは粒界酸化の前方でピークが見られ、Crのカウントは粒界酸化部でピークがあり、粒界酸化先端近傍でボトムがみられた。また、Feのカウントは粒界酸化部で低いことが観察された。Siのカウントは粒界酸化部でわずかに高くなっていた。

粒界酸化部はCrリッチな酸化物であり、電子線回折の結果とあわせてCrリッチスピネルであることが確認できた。なお、前報<sup>(12)</sup>で73 dpa照射材の粒界酸化部もCrリッチスピネルであることを確認している。

図9に示すように、粒界酸化先端から200 nm前方の粒界上ではFe, Cr, Ni, Si濃度はそれぞれ64, 13, 19, 2 wt%であり、過去の研究<sup>(4)</sup>の3 dpa照射材のバルクの粒界組成63.39, 13.55, 20.14, 1.50 wt%にほぼ対応している。組成変化している幅も数nmから10 nm程度であり、3 dpa照射材のバルクの組成分布と明確な違いは見られない。粒界酸化先端から50 nm前方では粒界上のFe, Cr, Ni, Si濃度はそれぞれ58, 12, 24, 2 wt%であり、200 nm前方に比べてFe欠乏とNi濃化が見られる。またNi

組成変化の幅も10 nm以上に広がっている。粒界酸化先端のFe, Cr, Ni, Si濃度はそれぞれ52, 14, 26, 3 wt%であり、50 nm前方より更にFe欠乏とNi濃化が見られる。Niの組成変化の幅は10 nm程度である。粒界酸化先端から50 nm後方の粒界上のFe, Cr, Ni, Si, O濃度はそれぞれ20, 25, 8, 5, 10 wt%であり、金属と酸素のモル比(M/O)は約1.6である。スピネル酸化物(M<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)の金属と酸素のモル比0.75と比較して金属が過剰な状態であり、完全には酸化された状態ではないと考えられる。

## 4. 考察

### 4.1 粒界酸化長さに及ぼす照射および応力の影響

3 dpa照射材の粒界全てに粒界酸化が観察され、3 dpaという比較的低い照射量でも粒界酸化が起ることを確認した。また、平均粒界酸化長さを照射量で整理した図4に示すように、3から73 dpaの範囲で照射量の増加とともに粒界酸化長さも増加する傾向が認められた。

照射により粒界酸化が促進する機構として、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ことが考えられる。図10に照射量3, 22, 73 dpaでの粒界酸化長さと福谷ら<sup>(4)</sup>による照射量3, 25, 73 dpa

のFTT材の粒界偏析量 (Cr, Ni, Si) と対応させて整理した結果を示す。Crの欠乏やNiとSiの濃化の割合が増加すると粒界酸化長さが増加している。寺地ら<sup>(14)</sup>はCr濃度を変化させたFe-Cr-Niモデル合金を用いてPWR一次系模擬環境中で腐食試験を行い、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。粒内と粒界では腐食の部位は異なるが、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。ただし、Crについては22 dpaから73 dpaにかけて偏析量は大きく増加していないが、粒界酸化長さは約2倍に増加しており、高照射領域での粒界酸化長さの変化をCrの偏析量のみで定量的に説明することは難しい。NiとSiに関しては粒界酸化長さとの比較的比例関係にある。高照射領域でのNiやSiの粒界偏析の進行が粒界酸化の促進に関係している可能性があり、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の把握が必要だと考えられる。

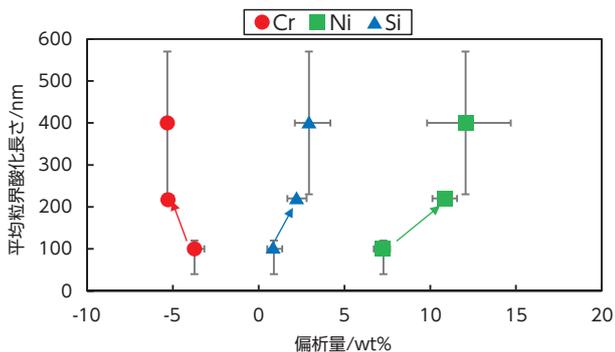


図10 粒界偏析量と粒界酸化長さの関係

応力の影響については、3 dpa照射材で400 MPaの引張応力の有無で粒界酸化長さには有意差は認められなかった。前報<sup>(12)</sup>で同じ3 dpa照射材の表面酸化膜を分析し、400 MPa引張応力部の内層酸化膜の平均厚さ23 nmは応力を負荷していない部位の17 nmより有意に厚く、応力が表面の腐食を促進すること示した。同じ試験材を用い、3 dpa照射材での400 MPaの引張応力は表面の腐食は促進するが、粒界酸化は促進しない結果となった。表面の腐食と粒界の腐食で挙動が異なる理由については、照射誘起偏析による粒界腐食の促進の影響は応力による腐食の影響よりも大きいことが考えられる。ただし、高照射領域での腐食挙動に及ぼす応力の影響は確認できておらず、今後の課題である。

## 4.2 粒界酸化部とその前方での組成変化

図7から9に示したように粒界酸化部ではFeとNiが欠乏し、CrとSiが濃化しており、粒界酸化の前方ではNiの濃化を確認した。これらの粒界に沿った組成変化は前報<sup>(12)</sup>の73 dpa照射材でも確認されており、粒内の酸化過程と同様にFeの流出とともにNiが粒界酸化の前方へ移動する。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より促進された可能性がある。

粒界の酸化過程における粒界上の組成変化に対する照射量と応力の影響を検討するため、図11に粒界に沿ったFe, Cr, Ni, Siの組成変化を示した。組成変化はTEM/EDS線分析による特性X線のカウントと表面から最も離れた測定点でのカウントとの比を縦軸にとり、横軸は粒界酸化先端からの距離で整理した。また、粒界は試料奥行き方向に粒界が垂直(エッジオン条件)に調整できた3 dpa照射材の中央部の粒界5個(前報<sup>(12)</sup>の1個を含む)、外周部の粒界2個および前報<sup>(12)</sup>の73 dpaの粒界2個とした。

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の酸化部の中央付近でピークと粒界酸化先端近傍でボトムが見られる。Ni比はいずれの試料も表面で0.5程度に低下し、粒界酸化前方に1.5から2程度のピークが幅200 nm程度で見られる。Si比は粒界の酸化部に1.1から1.8程度のピークが見られる。粒界によりピーク比やピークの位置が若干異なるが、応力の有無や照射量の違いによる明確な違いは見られなかった。酸化過程に伴う粒界の組成変化は、3 dpaから73 dpaの範囲で同じ機構で起こっており、応力が負荷されても大きな影響はないと考えられる。

## 4.3 IASCC発生しきい応力と粒界酸化長さの関係

IASCC発生のしきい応力は約20 dpa程度まで大きく低下し、40 dpa以降は緩やかになる照射量依存性がある。図12に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)の比較を示す。現時点

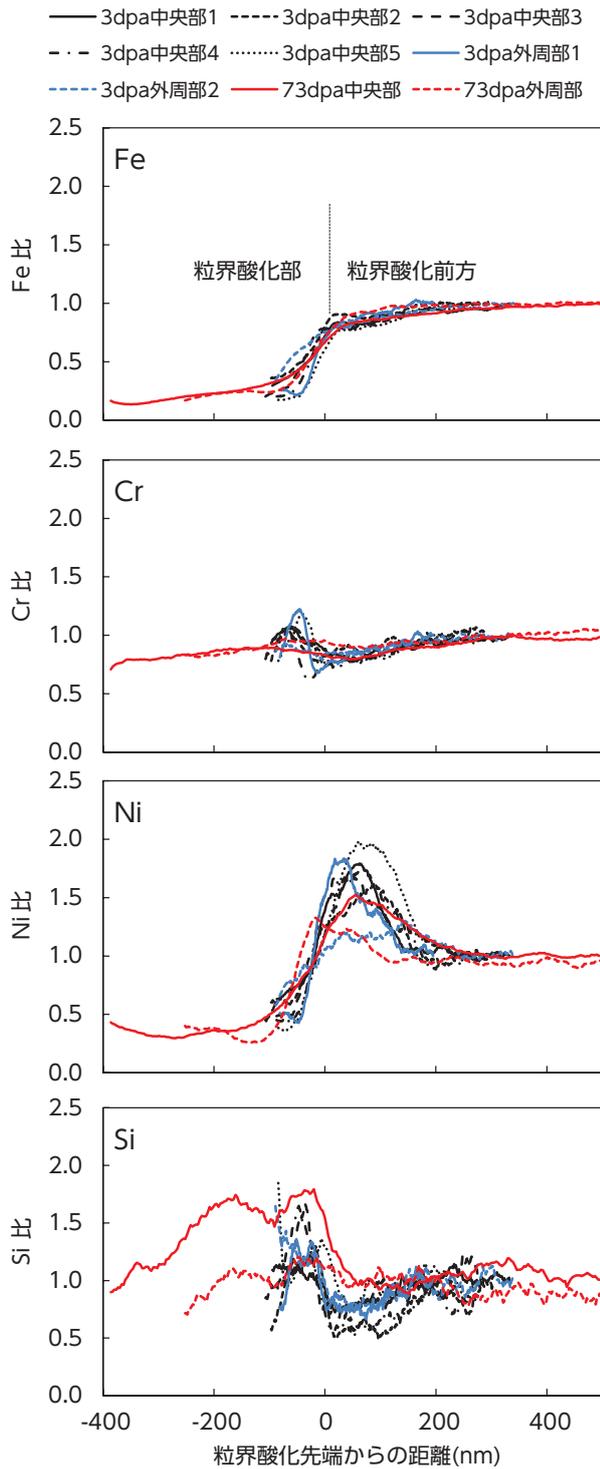


図11 粒界酸化先端を基準とした粒界組成変化

ではIASCC発生しきい応力の照射量依存性が何に起因しているか十分に説明できていない。粒界酸化長さの相対値は照射量3, 22, 73 dpaでそれぞれ25, 55, 75%に増加しており、IASCC発生しきい応力のトレンドとは異なる。粒界酸化長さからIASCC発生応力の照射量依存性を説明するのは難しい。

近年、非照射のステンレス鋼でも冷間加工を加

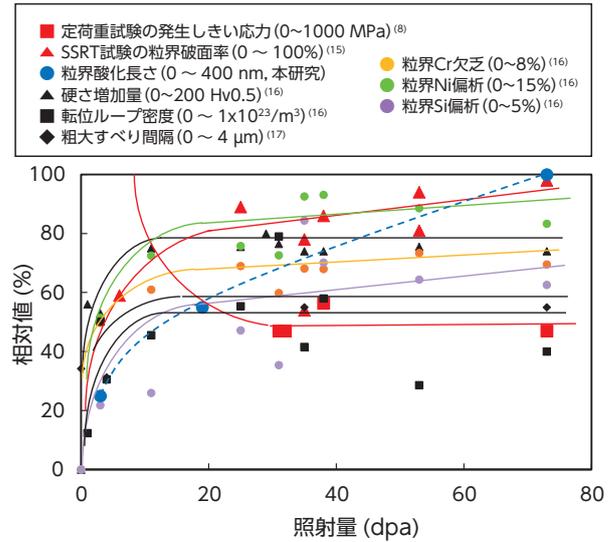


図12 IASCC特性（発生しきい応力と粒界破面率）と粒界酸化長さ、硬さ、転位ループ密度、粗大すべり間隔、粒界偏析（Cr, Ni, Si）の照射による変化傾向（相対値）の比較

えることによりPWR一次系模擬環境で粒界型応力腐食割れ（intergranular stress corrosion cracking, IGSCC）を起こすことが知られており、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となり、粒界の結合強度を低下させている可能性が指摘されている<sup>(18)</sup>。IASCC機構については、これまでの研究から照射と腐食による粒界のマイクロ組織と組成の変化に伴う粒界の結合強度の低下と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によって粒界で応力集中やひずみの蓄積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が、粒界の結合強度が照射によりどう変化するかは分かっていない。

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を照射や応力が促進する機構解明のための基礎的な研究として、照射されたステンレス鋼の

粒界の酸化挙動に着目し、320℃のPWR一次系模擬環境中でSCC試験された3 dpa照射材に対して表面の粒界の断面観察を行い、以下の知見を得た。

1. 比較的低い照射量3 dpaで粒界酸化が起こることを確認した。
2. 3 dpa照射材で観察された平均粒界酸化長さは100 nmであった。同一SCC試験の73 dpa照射材で観察された平均粒界酸化長さは400 nmであり、照射量が増加することにより粒界酸化長さが増すことが分かった。
3. 粒界酸化部ではCrの濃化とFe, Niの欠乏が73 dpa照射材と同様に確認された。また、粒界酸化部の前方ではNiの濃化が73 dpa照射材と同様に確認された。
4. 3 dpa照射材で400 MPaの引張応力の有無により、粒界酸化長さや粒界組成に明確な差は認められなかった。

## 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, 橘内裕寿, "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, 橘内裕寿, "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.