

IASCC の発生に及ぼす結晶粒径の影響検討
— 照射ステンレス鋼の局所変形に及ぼす結晶粒径の影響 —

A study for effects of grain size on occurrence of IASCC
— Effects of grain size on localized deformation of irradiated stainless steel —

三浦 照光 (Terumitsu Miura) 藤井 克彦 (Katsuhiko Fujii)
福谷 耕司 (Koji Fukuya) Zhijie Jiao
Gary S. Was



株式会社 原子力安全システム研究所

Institute of Nuclear Safety System, Incorporated

〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田64号

Tel 0770-37-9100 Fax 0770-37-2008

URL <http://www.inss.co.jp>

IASCC の発生に及ぼす結晶粒径の影響検討 — 照射ステンレス鋼の局所変形に及ぼす結晶粒径の影響 —

A study for effects of grain size on occurrence of IASCC
— Effects of grain size on localized deformation of irradiated stainless steel —

三浦 照光 (Terumitsu Miura)*¹ 藤井 克彦 (Katsuhiko Fujii)*¹ 福谷 耕司 (Koji Fukuya)*¹
Zhijie Jiao*² Gary S. Was*²

要約 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) の発生に及ぼす結晶粒径の影響を検討するため, IASCC 発生の主要因の一つと考えられている照射材の局所変形に対する結晶粒径の影響を調べた. 結晶粒径 30 μm と 14 μm の SUS304 ステンレス鋼に 2.0MeV プロトンを 5dpa まで照射した後, 硬さを測定するとともに 300 $^{\circ}\text{C}$ の Ar ガス雰囲気中で 2% まで引張変形し, 表面に生じるすべり線の間隔と段差を測定した. 結晶粒径が小さくなると, 照射によるすべり線の間隔と段差の増加が小さくなった. 硬さは照射前後ともに結晶粒径に依らなかった. 結晶粒径が小さい方が照射材の局所変形は小さくなることがわかった.

キーワード 照射誘起応力腐食割れ, 結晶粒径, 局所変形, ステンレス鋼, プロトン照射

Abstract To discuss effects of grain size on occurrence of irradiation assisted stress corrosion cracking (IASCC), the effects of grain size are investigated on localized deformation of irradiated stainless steel that has been thought as one of key factors for occurrence of IASCC. After 2.0MeV proton-irradiation to 5dpa, type 304 stainless steel specimens with average grain sizes of 30 and 14 μm were subjected to Vickers hardness measurements and tensile tests to 2% plastic strain under an argon gas atmosphere at 300 $^{\circ}\text{C}$ and then surface slip line spacing and height were measured. Increase of slip line spacing and height due to irradiation became small for small grain size specimens. The hardness was independent of grain size both before and after irradiation. It turned out that localized deformation of irradiated stainless steel became mild for small grain size materials.

Keywords IASCC, grain size, localized deformation, stainless steel, proton irradiation.

1. はじめに

照射誘起応力腐食割れ (irradiation assisted stress corrosion cracking, IASCC) は高温高圧水中で中性子照射されたステンレス鋼に生じる粒界割れであり, 軽水炉の炉内構造物における主要な高経年化課題の一つである. PWR では 1988 年にフランスのブジェ発電所のバッフルフォーマボルトで最初の破損事例が報告されており, IASCC の発生条件や発生機構について研究が行われている. 近年, 照射材の局所変形が IASCC メカニズムとして重要な役割

を果たしている可能性が指摘されている⁽¹⁾. 照射材では, 照射によって導入された欠陥集合体の一つである転位ループがすべりによって消去されることにより, 照射欠陥による変形抵抗が周囲と比較して小さい転位チャンネルが形成され, 変形が転位チャンネルに集中する. このように変形が局所化すると, 粒界に局所的に高い応力や歪みが生じ, 粒界割れが発生すると考えられている.

バッフルフォーマボルトは, 原子炉の想定運転年数を 60 年とすると, 60dpa 相当の中性子照射を受ける. IASCC の発生条件や発生機構を研究するた

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 University of Michigan, U.S.A.

めには、同等の照射条件で 60dpa 相当まで照射されたステンレス鋼材料を用いることが望ましいが、PWR の場合、そのような材料としては炉内中性子計装の案内管として用いられたシンプルチューブがほぼ唯一の材料となっている。著者らもこれまでに、シンプルチューブを試験材料として照射ステンレス鋼の変形挙動について調べ、照射量の増加に伴って転位チャンネルの間隔が増し、変形の局所化が促進されることや粗大な転位チャンネルと粒界の相互作用によって粒界はく離が発生することを明らかにしている⁽²⁾。また、試料が放射化せず、照射量や照射温度を高精度かつ比較的容易に変えて試験が行えるイオン照射を用いた研究も行っており、照射による変形の局所化が変形温度の低下によって抑制されることや積層欠陥エネルギーの小さい金属では促進されることを明らかにしている^(3,4)。

シンプルチューブはバッフルフォーマボルトと同じ冷間加工 SUS316 製ではあるが、加工熱処理条件の違いにより結晶粒径や加工度が異なる。シンプルチューブの平均粒径は 10 μm 程度であるが、バッフルフォーマボルトでは 70 μm 程度である。また、原子炉内で使用される位置の違いから、シンプルチューブでは中性子束が高く、照射温度が低い⁽⁵⁾。Takakura ら⁽⁶⁾は、バッフルフォーマボルトとシンプルチューブの IASCC 発生応力を調べており、シンプルチューブの方が発生応力が低い傾向にあることを指摘している。また、変形挙動の観点からもバッフルフォーマボルトとシンプルチューブの違いを調べており、320 $^{\circ}\text{C}$ の Ar ガス雰囲気において 1.3 ~ 1.4% まで引張変形させた結果、表面に生じたすべり線の平均間隔はバッフルフォーマボルトが 5.5 μm で、シンプルチューブは 2.8 μm であったことを報告している。変形試験に用いられたバッフルフォーマボルトとシンプルチューブの平均照射温度と照射量はそれぞれ、302 $^{\circ}\text{C}$ 、18.8dpa と 290 $^{\circ}\text{C}$ 、19.5dpa であり、照射温度の違いなどによりミクロ組織に差異はあると予想されるものの、バッフルフォーマボルトの方が同等の照射量に対して変形がより局所化している。バッフルフォーマボルトとシンプルチューブの IASCC 発生応力や局所変形の違いについては、

結晶粒径の違いが影響している可能性が考えられるが、材料組成や加工度、照射条件も異なるため、IASCC の発生に結晶粒径が影響するのかどうかは不明である。

そこで本研究では、IASCC の発生に及ぼす結晶粒径の影響を検討するため、照射条件や材料条件が等しく、結晶粒径のみ異なるステンレス鋼の照射後変形試験を実施し、照射材の局所変形に及ぼす結晶粒径の影響を調べた。照射には、短時間で高照射量まで照射が可能であるイオン照射を用いた。ミシガン大学の Was 教授、Jiao らとの共同研究により、結晶粒径が 30 μm と 14 μm の SUS304 ステンレス鋼に 2.0MeV プロトンを照射した後、300 $^{\circ}\text{C}$ の Ar ガス雰囲気中で引張試験し、表面に生じるすべり線の間隔と段差から結晶粒径が局所変形に及ぼす影響を考察した。

2. 試験方法

2.1 供試材および照射条件

供試材には平均粒径 30 μm と 14 μm の SUS304 ステンレス鋼を用いた（以下 SUS304R、SUS304S と呼ぶ）。最終熱処理温度はそれぞれ 950 $^{\circ}\text{C}$ と 920 $^{\circ}\text{C}$ であり、各温度を 30 分間保持した後、水冷した。表 1 に化学組成を示す。供試材より図 1 に示す小型引張試験片を作製した。試験片表面は SiC#4000 までの湿式機械研磨を施した後、電解研磨により最表面の加工層を除去した。

プロトン照射は Michigan Ion Beam Laboratory のタンデロン加速器を用いて行った。2.0MeV のプロトンを試験片ゲージ部の片面に 300 $^{\circ}\text{C}$ で照射した。図 2 に弾き出しエネルギーを 40eV とし、損傷計算コード SRIM-2006⁽⁷⁾を用いて評価した損傷の深さ方向分布を示す。SRIM-2006 により評価した損傷の最大深さは 20 μm であった。試験片最表面の結晶粒については SUS304R では粒内の大部分が、SUS304S では粒全体が照射されており、中性子照射材に近い条件が模擬できている。損傷速度が深さ方向にほぼ一定であるプラトー領域（深さ 10 μm ）

表 1 供試材の化学組成 (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.040	0.31	1.59	0.031	0.001	9.21	18.34	0.37	balance

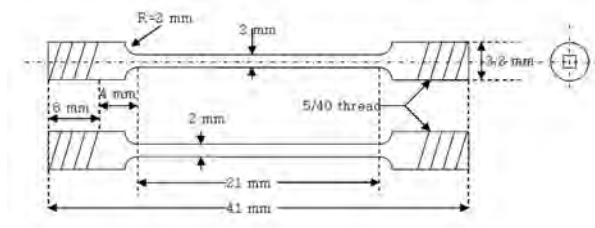


図1 引張試験片の形状

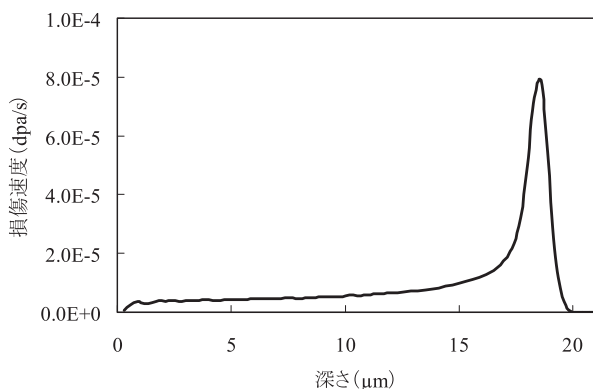


図2 損傷速度の深さ方向分布の計算結果

における損傷速度を 5×10^{-6} dpa/s とし、0.25 dpa と 5 dpa 照射した。本報告における試験片の損傷量は、プラトー領域の値で定義する。

2.2 硬さ試験

試験片の未照射面と照射面について、Buehler社製ビッカース硬さ試験機 MICROMET II を用いて硬さを測定した。荷重は 25g とし、圧子の押し込み深さが照射深さの 1/3 以下となるようにした。圧痕同士の間隔は 0.1mm とし、硬さは 20 点以上ずつ測定した。

2.3 ミクロ組織観察

照射後のミクロ組織を透過型電子顕微鏡 (Transmission electron microscope, TEM) JEOL 2010F を用いて観察した。観察は 5 dpa まで照射した SUS304R の 10 μm 深さについて行った。TEM 観察試料は集束イオンビーム (Focused ion beam, FIB) 加工装置を用いて作製した。FIB 加工によるダメージ層は低エネルギーのイオンビームスパッタリングにより除去した。

2.4 引張試験および表面観察

Korros-Data 社製 multiple-specimen CERT test system を用いて、照射後の試験片を Ar ガス雰囲気において引張変形させた。変形温度は 300°C、変形速度は 10^{-7} /s とし、塑性変形量は 2% とした。なお、ゲージ部の変形量は試験前に硬度計を用いて形成した圧痕間隔の変化量から求めた。

引張試験後の試験片表面を走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscope, SEM) を用いて観察し、表面に生じた粗大なすべり線について平均間隔を結晶粒ごとに測定した。測定は試験片の未照射面と照射面についてそれぞれ行い、100 個の結晶粒についてデータを得た。また、Veeco 社製原子間力顕微鏡 (Atomic force microscope, AFM) Nanoscope IIIa を用いて、すべり線の平均段差を測定した。試験片の未照射面と照射面について、それぞれ平均 10 個の結晶粒についてデータを得た。

3. 試験結果

3.1 硬さ

図 3 に未照射面および照射面の硬さを示す。SUS 304R では未照射面の硬さは 170HV であり、0.25 dpa 照射後では 220HV、5 dpa 照射後では 370HV まで硬さが増加した。SUS304S でも硬さは同じであった。

3.2 ミクロ組織

転位ループが主要な照射欠陥として形成しており、ボイドの形成は確認されなかった。図 4 に

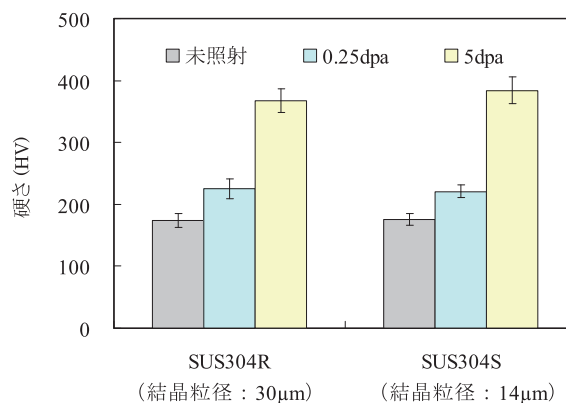


図3 ビッカース硬さ

5dpa 照射後のマイクロ組織について、(111) 面上の積層欠陥に起因したストリークにより観察した暗視野像を示す。線状の白いコントラストは転位ループの像を示す。転位ループの平均直径と数密度は、それぞれ 5.4nm と $1 \times 10^{23}/\text{m}^3$ であった。

3.3 すべり線の平均間隔と段差

図 5 に引張試験後の SUS304R の未照射面と 5dpa 照射面の例を示す。大部分の結晶粒ですべり線が生じているが、5dpa 照射面では幾つかの結晶粒です

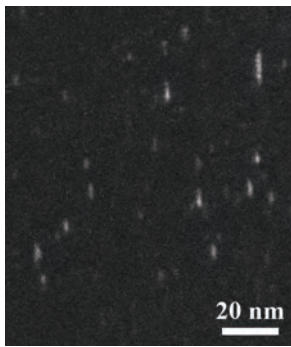


図 4 5dpa 照射後のマイクロ組織の暗視野像

べり線が観察されなかった。図 5 (b)にて、すべり線が観察されなかった結晶粒を 1、単一のすべり系によるすべり線のみが観察された結晶粒を 2、複数のすべり系によるすべり線が観察された結晶粒を 3 で示した。照射面では未照射面と比較してすべり線が明確に観察されており、すべり線の間隔も広い。照射に伴ってすべり線の間隔と段差が増加し、変形が局所化していることが伺える。

図 6 にすべり線間隔の平均値を示す。SUS304R では未照射面で 1.4 μm であり、0.25dpa 照射面では 2.5 μm 、5dpa 照射面では 10.0 μm まで間隔が増加した。SUS304S では、未照射面で 1.4 μm であり、0.25dpa 照射面では未照射面と同じ 1.4 μm 、5dpa 照射面では 4.3 μm であった。照射量の増加に伴って間隔が増加しており、高照射では変形がより局所化している。SUS304R と SUS304S では、未照射面での間隔は同じだが、照射面での間隔は SUS304S の方が狭く、0.25dpa 照射面については未照射面の間隔から有意に増加していなかった。

図 7 にすべり線段差の平均値を示す。SUS304R では未照射面で 7nm であり、0.25dpa 照射面では 33nm、5dpa 照射面では 107nm であった。SUS304S では、未

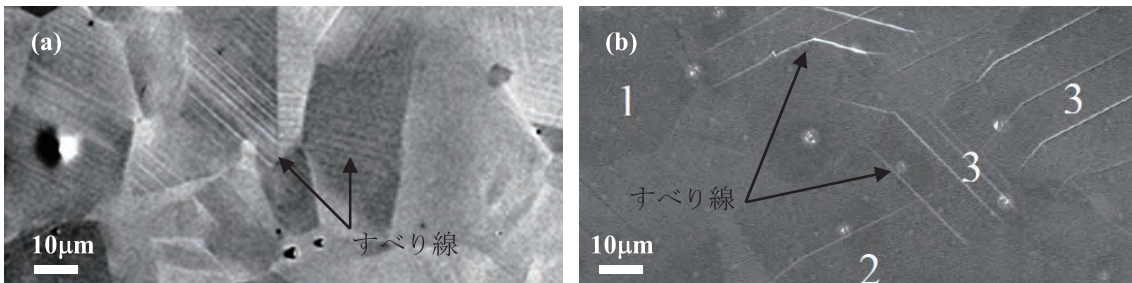


図 5 引張試験後の表面
SUS304R の (a) 未照射面, (b) 5dpa 照射面

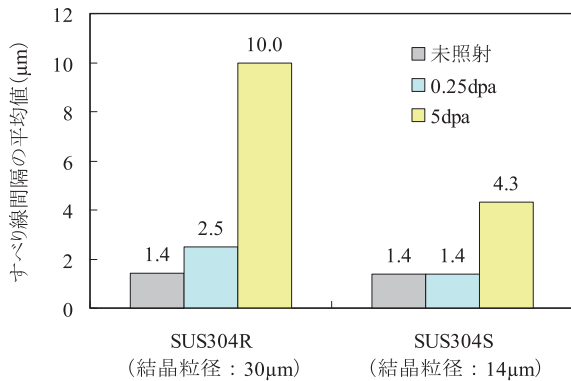


図 6 すべり線間隔の平均値

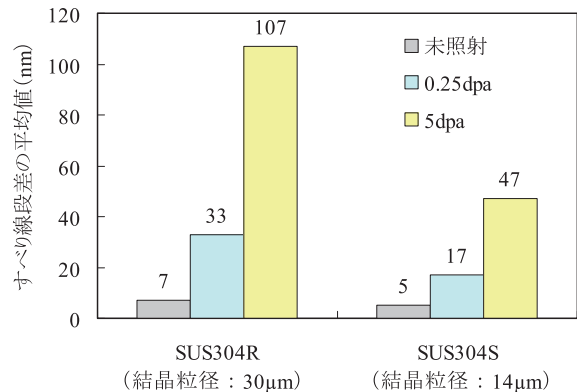


図 7 すべり線段差の平均値

照射面で5nmであり, 0.25dpa照射面では17nm, 5dpa照射面では47nmであった. 段差についても間隔と同様に, 照射量の増加に伴って増加した. また, SUS304Sの段差はSUS304Rと比較して小さかった.

4. 考察

4.1 照射に伴う変形の局所化に及ぼす結晶粒径の影響

SUS304RとSUS304Sでは, 未照射面でのすべり線の間隔と段差は同程度であったが, 照射面ではSUS304Sの方が小さくなった. これは, SUS304Sでは一つの転位チャンネルに集中する変形量がSUS304Rと比較して少ないことを示す. 硬さについては未照射面と照射面ともにSUS304RとSUS304Sで同じであったことから, 照射により形成された照射欠陥も同等であったと予想される. よって, 結晶粒径が小さい材料では, 同じ照射欠陥が形成されたとしても変形の局所化は小さくなることがわかった. Takakuraら⁽⁶⁾の報告において, バッフルフォーマボルトのすべり線間隔がシンプルチューブと比較して2倍程度広くなっていたのは, バッフルフォーマボルトの結晶粒径が大きいからであったと推測される. 粒界に局所的に生じる高い応力や歪みにIASCCの発生が強く依存すると仮定すると, 結晶粒径の小さい材料では局所変形が小さくなるため, IASCCの発生は抑制されると推察される.

次に, 結晶粒径が照射に伴う変形の局所化に影響する機構について考察する. 結晶粒径が変形挙動に影響を与えることは未照射材料では良く研究されており, 巨視的な影響としては, 降伏応力や引張強さが結晶粒径の1/2乗に反比例して上昇するHall-Petchの関係があり⁽⁸⁾, 微視的な影響としては, 引張変形時に粒界近傍の局所的に生じる段差や表面荒さが結晶粒径の小さい材料では小さくなることが報告されている^(9,10). しかし, 転位チャンネルを介してすべり変形が進展する照射材の変形挙動に対する結晶粒径の影響についてはほとんど研究例がない. そこで, まずは転位チャンネルでの変形機構から結晶粒径の影響について考察する. 北島らの報告⁽¹¹⁾を引用すると, 転位チャンネル内での転位運動は, 欠陥集合体による転位運動に対する抵抗場(短距離相互作用力)とチャンネル内での転位間相互作用による加工硬化(長距離相互作用力)の競合で決定されると考えられている. 未照射の結晶粒が持つ変形抵抗を τ_0 とし, 欠陥集合体による変形抵抗の増分を $\Delta\tau$ とすると, 照射領域内の変形抵抗 τ_b は $\tau_b = \tau_0 + \Delta\tau$ で表される. 転位チャンネル内では形成過程において転位ループが消去されているため, 転位チャンネル内の変形抵抗 τ_c は τ_b より小さく, $\tau_c = \tau_0 + \Delta\tau' + \tau_s(n)$ で表される. ここで, $\Delta\tau'$ は転位ループ以外の欠陥集合体による変形抵抗であり($\Delta\tau > \Delta\tau'$), $\tau_s(n)$ は転位チャンネルを通過した転位の数 n に依存して生じる加工硬化による変形抵抗である. 図8に照射領域と転位チャンネル内の変形抵抗

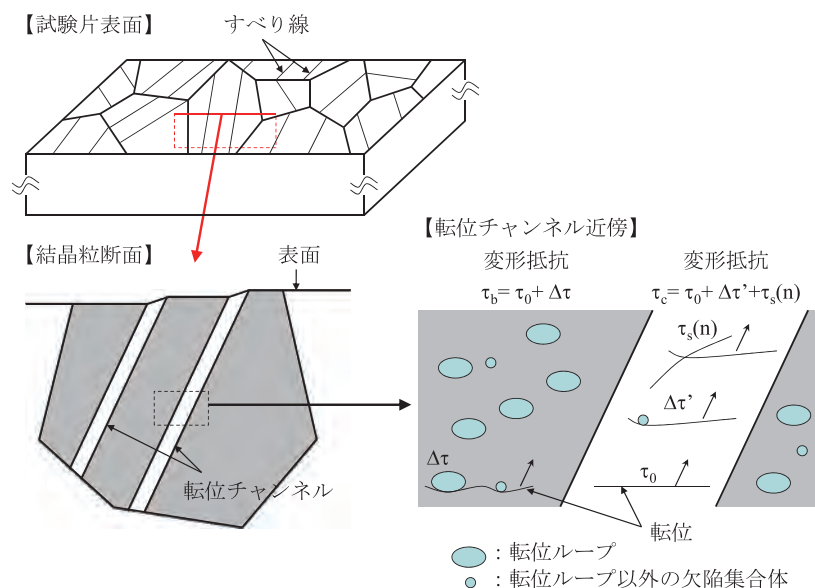


図8 照射領域と転位チャンネル内の変形抵抗の概略図

の概略図を示す。転位の通過数が少ない場合、転位チャンネル内の変形抵抗は未変形の照射領域に比べて小さいため ($\tau_c < \tau_b$)、変形は転位チャンネルに集中する。変形が集中するにつれて $\tau_s(n)$ が増加し、 τ_c が τ_b と等価になると、 $\tau_s(n)$ を増加させながら変形を続けるよりも ($\tau_c < \tau_b$)、未変形の照射領域に新たに転位チャンネルを形成する方がより低い外部応力で変形を進行させることができるため、古いチャンネル内での転位運動は停止する。以上の変形機構は個々の転位チャンネルの形成と死滅を念頭に置いたものであり、転位チャンネル同士の相互作用については考えられてはいないが、転位チャンネル内の変形機構の基礎的要因は捉えられている。未照射における変形抵抗や照射欠陥の形成および転位同士の相互作用による加工硬化は転位チャンネル変形の基礎的要因であるが、これらは結晶粒径には依存しない。結晶粒径が小さいほど転位チャンネルに集中する変形量が少なくなると言うことは、転位チャンネル外の要因、すなわち外部応力に対して結晶粒径が影響していることが予想される。

多結晶材料では隣接粒との変形の連続性を確保するため、変形拘束により粒界局所に応力が生じることは良く知られており、すべり面によってはシュミット因子で計算されるせん断応力以上の応力が生じることが解析と実験を通して報告されている⁽¹²⁾。粒界局所応力は変形に伴って変化することから⁽¹³⁾、転位チャンネルのように局所的にすべり変形が集中した場合、他のすべり面に転位チャンネルを新たに形成し、粒界での変形集中を緩和する方向に粒界局所応力分布が変化する可能性は十分考えられる。結晶粒径が小さい材料では結晶粒径が大きい材料と比較して変形拘束が強く働くため、このような粒界局所応力分布の変化を仮定すると、結晶粒径が小さいほど転位チャンネルが多数形成され、個々の転位チャンネルに集中する変形量は減少すると考えられる。この仮説が正しいのであれば、照射に伴う変形の局所化は結晶粒径の小さい材料では小さくなり、試験結果と一致する。転位チャンネルのように局所的にすべり変形が集中する体系において変形に伴う粒界局所応力分布の変化を計算により解析するのは難しいが、近年、転位チャンネル変形の解析例が散見されるようになってきている^(14, 15)。今後、計算解析により転位チャンネル変形と粒界局所応力分布の関係が明らかになることで現象の理解が進むと思われる。

4.2 He, Fe イオン照射とプロトン照射の相違

これまでに、結晶粒径は異なるが本研究で使用した供試材と同じ組成の材料について He イオン照射と Fe イオン照射を行い、Ar ガス雰囲気下同条件の引張試験を実施している^(3, 4)。ここでは、照射深さが異なる He イオン、Fe イオン照射とプロトン照射を比較し、照射深さの影響について考察した。He イオンや Fe イオン照射では表面から 1 μ m 程度しか損傷が導入されず、照射領域は表面近傍に限られる。He イオンや Fe イオン照射材では、変形により表面に生じたすべり線の間隔はイオン種や照射量によって異なるが、概ね 2 μ m 前後であり、5dpa まで照射したプロトン照射材と比較すると 1/5 程度であった。Fe イオンを 5dpa 照射した SUS304 では、平均直径 125nm の転位ループが数密度 $1 \times 10^{23}/\text{m}^3$ で形成されており⁽⁴⁾、本研究で測定したプロトン照射材での値と比較すると、数密度は同じだが、サイズが 2 倍以上大きい。転位ループの数密度とサイズから判断すると、Fe イオン照射材の方がプロトン照射材よりもすべりを阻害する転位ループの影響が強く、変形はより局所化すると考えられる。しかし、プロトン照射材では He イオンや Fe イオン照射材よりも深くまで照射されており、すべりが転位チャンネルを形成して表面に到達するまでにより多くの転位ループを消去しなければならない。そのため、プロトン照射材では新たに転位チャンネルを形成することが困難になり、照射領域の浅い He イオンや Fe イオン照射材に比べて既存の転位チャンネルに変形が集中する傾向が強くなり、変形がより局所化すると推察される。これまでに利用した He イオン照射や Fe イオン照射は、試料が放射化しないことが利点の一つであり、照射深さが浅いために変形を局所化させる効果は弱いものの有効な照射方法である。プロトン照射では変形の局所化が明確に生じる利点があるが試料が放射化してしまう欠点もあり、互いの特徴を生かして使用することが重要であると考えられる。

5. まとめ

IASCC の発生に及ぼす結晶粒径の影響を検討するため、照射材の局所変形に及ぼす結晶粒径の影響を調べた。プロトン照射した SUS304 ステンレス鋼

を 300℃ の Ar ガス雰囲気 で引張変形させた結果、結晶粒径 14 μm の試験片では、結晶粒径 30 μm の試験片と比較して照射後のすべり線の間隔と段差は小さくなっており、結晶粒径が小さいと照射に伴う変形の局所化は小さくなることがわかった。結晶粒径が変形の局所化に影響する機構としては、結晶粒径の小さい材料ほど変形拘束が強く働くことにより、転位チャンネルが多数形成され、個々のチャンネルに集中する変形量が減少する可能性が推察された。粒界に局所的に生じる高い応力や歪みに IASCC の発生が強く依存すると仮定すれば、結晶粒径の小さい材料では局所変形が小さくなり、IASCC の発生は抑制されることが推察された。

文献

- (1) G. S. Was, Z. Jiao, J. T. Busby, "Recent Developments in Understanding the Mechanism of IASCC", Proc. of Int. Symp. Research for Aging Management of Light Water Reactors, 8-1, (2007).
- (2) H. Nishioka, K. Fukuya, K. Fujii, Y. Kitsunai, "Deformation Structure in highly Irradiated Stainless Steels", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 45, P. 274, (2008)
- (3) 三浦照光, 藤井克彦, 福谷耕司, 川岸礼佳, 伊藤慶文, "イオン照射したステンレス鋼の変形挙動", INSS JOURNAL, Vol. 14, P. 167, (2007).
- (4) T. Miura, K. Fujii, K. Fukuya, "Interaction between Dislocation Sliding and Damage Structure in Ion-irradiated Stainless Steels", Material Research Society Symposium Proceedings, Vol. 1125, 1125-R07-07, (2008).
- (5) 例えば, 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, 株式会社原子力安全システム研究所, (2009).
- (6) 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. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, P. 1207, (2009).
- (7) J. F. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon, New York, (1985).
- (8) 例えば, 講座・現代の金属学 材料編第3巻 材料強度の原子論, 日本金属学会.
- (9) 上谷保裕, 片山暢, 松田健二, 寺山清志, 池野進, "Al-1%Mg2Si 基合金の粒界近傍における局所変形に及ぼす結晶粒径の影響", 軽金属, Vol. 47, P. 104, (1997).
- (10) 王晓群, 阿部武治, 多田直哉, 清水一郎, "多結晶高純度アルミニウムの引張塑性変形に伴う微視的表面形状変化", 軽金属, Vol.55, P.68, (2005).
- (11) 北島貞吉, 篠原和敏, "転位チャンネルリングの立場から見た結晶塑性 中性子照射を中心として", 日本金属学会会報, 第15巻, 第11号, P. 675, (1976).
- (12) 北村隆行, 澄川貴志, 大石和義, "銅多結晶の高サイクル疲労下における粒界近傍すべり挙動と局所応力", 日本機械学会論文集 A 編, 67巻, 663号, P. 1819, (2001).
- (13) 酒井高行, 緒方隆志, "高温構造材料の粒界局所応力解析手法の開発 -クリープ条件下のポイド成長シミュレーションへの適用-", 電力中央研究所報告, (2008).
- (14) P. Evrard, M. Sauzay, "Modelling of the effect of dislocation channel on intergranular microcrack nucleation in pre-irradiated austenitic stainless steels during low strain rate tensile loading", Journal of Nuclear Materials, Vol. 405, P. 83, (2010).
- (15) M. Sauzay, K. Bavard, W. Karlsen, "TEM observations and finite element modelling of channel deformation in pre-irradiated austenitic stainless steels - Interactions with free surfaces and grain boundaries", Journal of Nuclear Materials, Vol. 406, P. 152, (2010).