

重イオン照射によるステンレス鋼(SUS304, SUS316)の スエリングに関する研究

Swelling of SUS 304 and SUS 316 Stainless Steels under Heavy Ion Irradiation

藤井 克彦 (Katsuhiko Fujii)* 古谷 元 (Gen Furutani)* 小西 隆男 (Takao Konishi)**

要約 加圧水型原子炉 (PWR) の炉内構造物材料であるステンレス鋼の中性子照射に伴うスエリングの精度よい予測に資するため、重イオン照射を用いて照射温度、損傷速度の影響、鋼種の違いを明らかにすることを試みた。SUS304およびSUS316に4 MeVのNi³⁺イオンを損傷速度、照射温度および損傷量をパラメータとして照射し、損傷組織を透過電子顕微鏡により観察した。照射温度300℃、照射量2 dpaの照射条件でSUS304およびSUS316にキャビティーの形成が観察された。また、SUS304およびSUS316のキャビティー形成・成長の損傷速度依存性が異なることが明らかになり、転位組織の損傷速度依存性の差異がその主要因である可能性を示した。さらに、照射初期にキャビティーの形成が飽和するSUS316に比べ、照射量25 dpaまでキャビティーの形成が継続するSUS304の方が大きなスエリングを生じることを示した。

キーワード スエリング, イオン照射, SUS304, SUS316, 加圧水型原子炉

Abstract To allow more accurate evaluation of the irradiation induced swelling behavior of PWR core internals made of SUS304 and SUS316 a heavy ion irradiation study was carried out. In particular, the effects of temperature and damage rate on swelling and the differences in swelling behavior between the two kinds of materials was studied. Microstructural changes in SUS 304 and SUS 316 induced by 4 MeV Ni³⁺ ion irradiation under variations of damage rate, damage level and temperature were observed by using a transmission electron microscope (TEM). Cavity formation was detected both in SUS 304 and SUS 316 at a temperature of 300℃ and an irradiation dose of 2 dpa. It was found that the damage rate dependence of the cavity formation and growth differed between SUS 304 and SUS 316. The primary cause may be the difference in the damage rate dependence of dislocation structures. It was also shown that the swelling of SUS 304, for which the cavity formation was saturated during the initial phase of irradiation, was larger than that of SUS 316 whose cavity formation continued until the exposure dose reached 25 dpa.

Keywords Swelling, ion irradiation, SUS 304, SUS 316, pressurized water reactor (PWR).

1. はじめに

オーステナイト系ステンレス鋼の中性子照射に伴うスエリングは、加圧水型原子炉 (PWR) の炉内構造物の形状変化のみならず各部に複雑な応力を付加することにつながるため、経年劣化事象の一つと見なされている。また、PWR炉内構造物の高経年化問題では、ステンレス鋼 (SUS304) 製炉心バップル板のスエリングがバップル - フォーマーボルトの照射誘起応力腐食割れの応力源となり得るため、精度良く予測することが求められている。このため、国内外の研究機関でPWRを対象にしたスエリングの研究

が二つの側面から実施されてきた。一つは実際のPWRの使用済み炉内部品材を分析し、スエリングを評価する研究である^(1,2)。国内PWRの取り替え材でスエリングを測定した報告が古谷ら⁽²⁾によりなされている。古谷らはSUS316製の炉内計装用シンプルチューブのスエリングを透過電子顕微鏡によるマイクロ組織観察から評価している。しかし、これまでのこうした研究は鋼種がSUS316のみであり、また、燃料領域で中性子束の高いデータであり、SUS304の低中性子束のスエリング量を定量的に把握することが求められている。もう一つは高速炉等で加速照射された材料を分析し、損傷速度や照射温度の依存性

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

** 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

をPWRの照射条件へ外挿してスエリングを予測しようとする試みである⁽³⁾。しかし、高速炉等では損傷速度や照射温度を精度良く制御することや400以下での照射が難しいことから、PWRの照射条件への外挿の妥当性は示されているとは言い難い。更に、これまで用いられてきたスエリングの損傷速度依存性を説明する「温度シフト」モデル⁽⁴⁾では説明しきれない研究結果も報告されており、素因子としての損傷速度や照射温度の効果を明らかにした上でスエリングを評価する必要があると考えられ始めている。

中性子照射と同様なカスケード損傷を材料中に導入する照射法に、重イオンを用いたイオン照射がある⁽⁵⁾。照射時間が短いことおよび照射条件の制御が容易である等の利便性を有するイオン照射により高中性子照射に伴うスエリングを調べるためには、中性子照射とイオン照射のキャビティー生成・成長等のミクロ組織の関係が明らかである必要がある。しかし、イオン照射を用いた研究⁽⁶⁾の多くがこれまで高速炉用材料の開発を念頭に行われてきたため、PWR温度条件付近におけるキャビティー組織変化に対するはじき出し損傷導入速度の影響等は明確になっていない。

そこで本研究では、PWRの温度条件において実用オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304およびSUS316）に4 MeVのNi³⁺イオンを損傷速度、照射温度および損傷量をパラメータとして照射し、透過電子顕微鏡により導入された損傷組織を観察した。観察されたキャビティーおよび転位に対して、サイズおよび数密度のそれぞれについて損傷速度依存性および損傷量依存性を調べると共に、SUS304およびSUS316のスエリングを算出してその関係を評価した。更に、PWRの条件における中性子照射の模擬法としての重イオン照射の有用性を評価した。

2. 実験方法

2.1 試料の作製

試料には、直径3 mm、厚さ0.2 mmの形状で、溶体化熱処理を施したSUS304およびSUS316を用い

た。それぞれの試料の化学成分を表1に示す。供試材は不純物成分元素を調整して作製しており、2つの供試材はほぼ同じ不純物組成となっている。

試料の作製は以下の手順で実施した。まず、ブロック状の供試材から厚さ1 mmの板材を切り出し、0.25 mmの厚さに冷間圧延した。この後、イオンを照射する面をSiC研磨紙（最終#2,400）で湿式研磨した。次に、その面を粒径0.25 μmダイヤモンドペーストによりパフ研磨し、0.25 μm以下の粗さの鏡面仕上げとした。この板材から直径3 mmの金型を用いて試料を打ち抜いた。更に、加工により導入された試料内の歪みを取り除くために、真空炉（約 1×10^{-4} Pa）中で1050において30分間の熱処理を施した。熱処理後の試料は、照射する直前に電解研磨を行い、表面付近の加工層および表面酸化膜を除去した。

表1 試料の化学組成

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS304	0.051	0.48	1.49	0.025	0.001	9.62	18.41	
SUS316	0.051	0.51	1.48	0.028	0.001	13.20	16.47	2.34

2.2 重イオン照射試験

重イオン照射試験は、東京大学原子力研究総合センター重照射研究設備（High Fluence Irradiation Facility: HIT）⁽⁷⁾にて実施した。SUS304およびSUS316の照射損傷（ポイドの生成・成長）に対するはじき出し損傷導入速度の影響を調べるために、それぞれの試料に対して4 MeVのNi³⁺イオンを、 1×10^{-3} 、 4×10^{-4} 、 1×10^{-4} dpa/sの損傷速度で照射温度300、400、500において損傷量2 dpaまで照射した。更に、照射量依存性を調べるために、4 MeVのNi³⁺イオンを 4×10^{-4} dpa/sの損傷速度で照射温度300においては25 dpaまで、400および500においては10 dpaまで照射した。表2にイオン照射実験条件の一覧を示す。

表2 4 MeVのNi³⁺イオン照射実験の条件一覧

No.	Material	Temperature ()	Dose rate (dpa/s)	Dose (dpa)
1	SUS304, 316	300	1×10^{-3}	2
2	SUS304, 316	300	4×10^{-4}	2
3	SUS304, 316	300	1×10^{-4}	2
4	SUS304, 316	400	1×10^{-3}	2
5	SUS304, 316	400	4×10^{-4}	2
6	SUS304, 316	400	1×10^{-4}	2
7	SUS304, 316	500	1×10^{-3}	2
8	SUS304, 316	500	4×10^{-4}	2
9	SUS304, 316	500	1×10^{-4}	2
10	SUS304, 316	300	4×10^{-4}	10
11	SUS304, 316	300	4×10^{-4}	25
12	SUS304, 316	400	4×10^{-4}	10
13	SUS304, 316	500	4×10^{-4}	10

2.3 照射後マイクロ組織観察

損傷組織の観察は透過型電子顕微鏡で実施した。4 MeVのNi³⁺イオンを照射した試料では、損傷は照射表面近傍1 μmに局在し導入されるため、本実験では観察領域を照射表面から770 nmを中心とした厚さ100 nm程度の部分とした。この領域は、現在進めている核変換生成ヘリウムの効果を探るための二重ビーム(4 MeV Ni³⁺ + 400 keV He⁺)同時照射実験で使用している400 keV He⁺イオンの注入ピークである。このため、Kestelらの報告⁽⁸⁾を参考にし、以下の手順で薄膜試料を作製した。

セクションング：照射表面から720 nmの深さまでを電解研磨により均一に除去

セクションング深さの測定と確認

バックシニング：非照射面側からの電解研磨による試料の薄膜化

なお、セクションング深さの測定には、空間分解能10 nmの表面段差測定器を使用した。

薄膜試料を作製した後、透過電子顕微鏡(日本電子製200 kV, 日立製300 kV)を用いて、2万倍から20万倍でマイクロ組織観察を行った。300 で照射

した試料については、生成したキャビティの成長が遅いため、非常に微細なもの(直径:1~2 nm)が観察されると考えられた。そこで、キャビティは明視野にてスルーフォーカスで観察すると共に、微細なキャビティを同定するためにアンダーおよびオーバーフォーカスで明視野像を撮影しコントラストの反転を観察した。また、転位組織は(111)または(200)暗視野像で観察した。また、試料の膜厚は等厚干渉縞写真を解析することにより求めた。

3. 結果および考察

3.1 損傷速度の効果

照射温度300 においては、キャビティ生成が生じない可能性⁽⁹⁾やキャビティが生成したとしてもその大きさが最も小さいことが予測されたが、図1に示すサイズ分布からわかるように比較的大きなキャビティが観察されると共に、アンダーおよびオーバーフォーカスで撮影した明視野像のコントラストの反転として直径1 nm以下の微細なキャビティらしきものが観察された。しかし、微細なキ

キャビティのサイズは、透過型電子顕微鏡の分解能程度であるため定量的な評価は難しく、更に数密度が極めて比較的低いため、本研究では観察された直径1 nm以上のキャビティに言及して議論する。

各試料におけるキャビティの定量データを表3にまとめて示す。また、SUS304およびSUS316のキャビティの数密度、平均直径およびスエリングの損傷速度依存性を図2から図5にそれぞれ示す。図2および図3から、キャビティ数密度の損傷速度依存性については、SUS304では照射温度にかかわらず損傷速度が低いほどキャビティの核生成が促進されること、および照射温度による損傷速度依存性の相違は小さいことがわかる。一方、SUS316では照射温度にかかわらずキャビティ数密度が損傷速

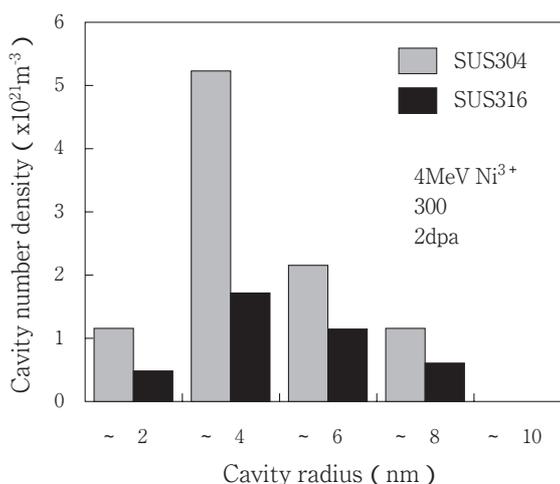


図1 SUS304, 316におけるキャビティのサイズ分布

表3 損傷速度効果実験の4 MeVのNi³⁺イオン照射条件とキャビティの数密度、平均直径およびスエリングの測定結果

SUS304					
Temperature ()	Dose rate (dpa/s)	Dose (dpa)	Number density (m ⁻³)	Diameter (nm)	Swelling (%)
300	4 × 10 ⁻⁴	2	8.45 × 10 ²¹	3.9	0.025
400	1 × 10 ⁻³	2	2.16 × 10 ²¹	3.5	0.005
400	4 × 10 ⁻⁴	2	4.16 × 10 ²¹	4.2	0.016
400	1 × 10 ⁻⁴	2	8.88 × 10 ²¹	5.0	0.058
500	1 × 10 ⁻³	2	1.25 × 10 ²¹	5.7	0.012
500	4 × 10 ⁻⁴	2	2.20 × 10 ²¹	6.0	0.024
500	1 × 10 ⁻⁴	2	4.51 × 10 ²¹	6.2	0.057
SUS316					
Temperature ()	Dose rate (dpa/s)	Dose (dpa)	Number density (m ⁻³)	Diameter (nm)	Swelling (%)
300	4 × 10 ⁻⁴	2	3.83 × 10 ²¹	2.7	0.004
400	1 × 10 ⁻³	2	4.92 × 10 ²¹	3.3	0.010
400	4 × 10 ⁻⁴	2	4.45 × 10 ²¹	2.9	0.006
400	1 × 10 ⁻⁴	2	4.87 × 10 ²¹	4.4	0.022
500	1 × 10 ⁻³	2	5.80 × 10 ²¹	4.0	0.020
500	4 × 10 ⁻⁴	2	5.79 × 10 ²¹	4.3	0.024
500	1 × 10 ⁻⁴	2	5.20 × 10 ²¹	4.5	0.024

表4 損傷速度効果実験の4 MeVのNi³⁺イオン照射条件と転位ループの数密度および平均直径の測定結果

SUS304				
Temperature ()	Dose rate (dpa/s)	Dose (dpa)	Number density (m ⁻³)	Diameter (nm)
300	4 × 10 ⁻⁴	2	3.87 × 10 ²²	5.4
400	1 × 10 ⁻³	2	1.10 × 10 ²²	12.3
400	4 × 10 ⁻⁴	2	2.82 × 10 ²²	17.7
400	1 × 10 ⁻⁴	2	4.41 × 10 ²²	18.2
500	1 × 10 ⁻³	2	2.40 × 10 ²¹	27.5
500	4 × 10 ⁻⁴	2	2.64 × 10 ²¹	32.7
500	1 × 10 ⁻⁴	2	4.04 × 10 ²¹	34.3
SUS316				
Temperature ()	Dose rate (dpa/s)	Dose (dpa)	Number density (m ⁻³)	Diameter (nm)
300	4 × 10 ⁻⁴	2	3.66 × 10 ²²	8.9
400	1 × 10 ⁻³	2	1.44 × 10 ²²	17.0
400	4 × 10 ⁻⁴	2	1.50 × 10 ²²	14.7
400	1 × 10 ⁻⁴	2	1.31 × 10 ²²	16.0
500	1 × 10 ⁻³	2	1.48 × 10 ²¹	28.0
500	4 × 10 ⁻⁴	2	1.57 × 10 ²¹	33.6
500	1 × 10 ⁻⁴	2	1.52 × 10 ²¹	33.2

度に依存しない。また、キャビティーの平均直径の損傷速度依存性については、SUS304、SUS316ともに、照射温度にかかわらず損傷速度が低いほどキャビティーの成長が促進されることがわかる。また、図4および図5から、スエリングの損傷速度依存性については、SUS304では照射温度にかかわらず損傷速度が低いほどスエリングが促進されること、および照射温度による損傷速度依存性の相違は小さいことがわかる。一方、SUS316では照射温度にかかわらずスエリングの損傷速度依存性は小さい。

各試料の転位組織の定量データを表4にまとめて示す。また、SUS304およびSUS316の転位ループ数密度および平均直径の損傷速度依存性を図6と図7にそれぞれ示す。転位ループの数密度の損傷速度依存性から、SUS304では照射温度にかかわらず低い損

傷速度による照射によって転位ループの形成が促進されることがわかる。また、特に400 °Cでは数密度は損傷速度の1/2乗に反比例しており、この依存性はこれまでに明らかにされている格子間原子型転位ループの形成に関する性質⁽¹⁰⁾に一致する。また、転位ループ数密度はキャビティー数密度と類似した損傷速度依存性を示しており、SUS304では低い損傷速度での照射による転位ループ形成の促進がキャビティー形成の促進原因になっていると考えられる。一方、SUS316では照射温度にかかわらずキャビティー数密度が損傷速度に依存しない。図8にSUS316における転位ループ数密度の照射量依存性を示す。照射量2 dpaにおいて既に転位ループの数密度は飽和する傾向にある。このような転位ループ形成の照射初期における飽和が、キャビティー形成

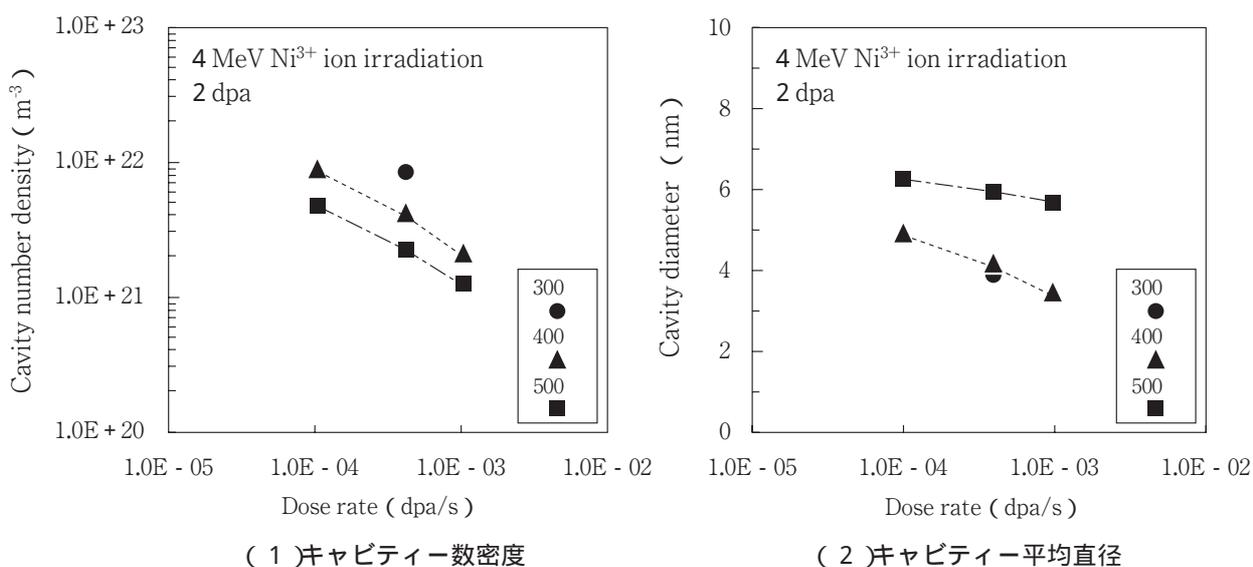


図2 SUS304のキャビティー数密度・平均直径の損傷速度依存性

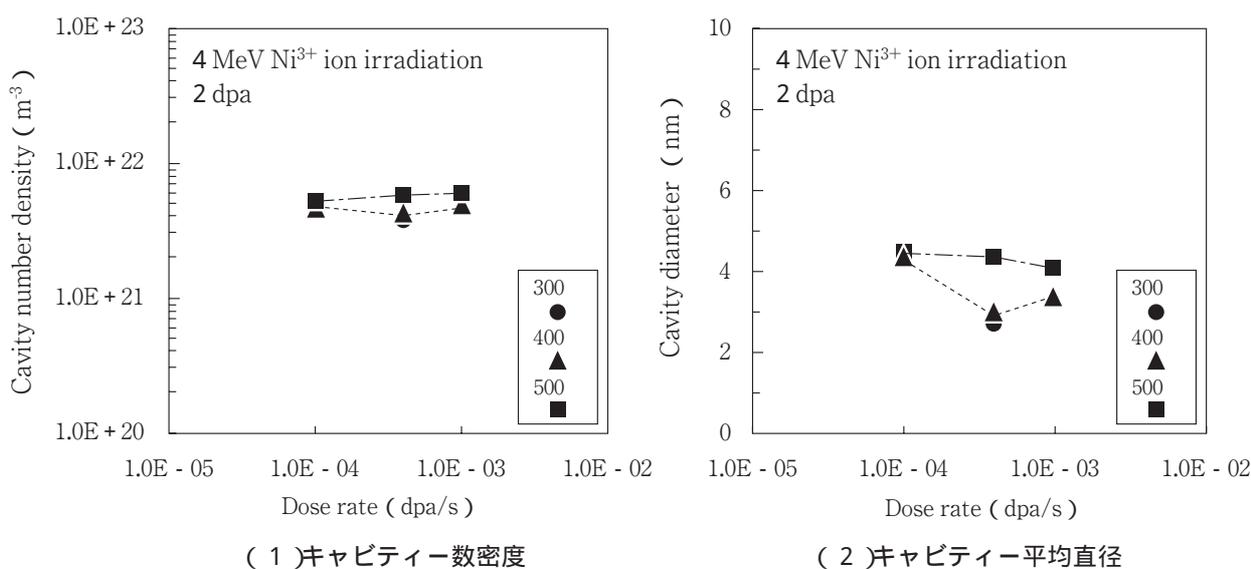


図3 SUS316のキャビティー数密度・平均直径の損傷速度依存性

を飽和させるとともにキャビティー数密度に照射速度依存性を生じさせない原因と考えられる。また、図6および図7から、転位ループの平均直径の損傷速度依存性については、SUS304では照射温度にかかわらず低い損傷速度による照射によって転位ループの成長が促進されることがわかるが、SUS316では損傷速度に依存しない。

SUS304とSUS316とは、キャビティー組織およ

び転位組織の損傷速度依存性が異なることが明らかになった。比較的低い照射量2 dpaまでにおいて、SUS304では転位組織発達が損傷速度に強く依存するのに対して、SUS316では損傷速度にほとんど依存しない。この転位組織の損傷速度依存性の違いが、SUS304およびSUS316のキャビティー組織の損傷速度依存性が異なる主要因であると考えられる。

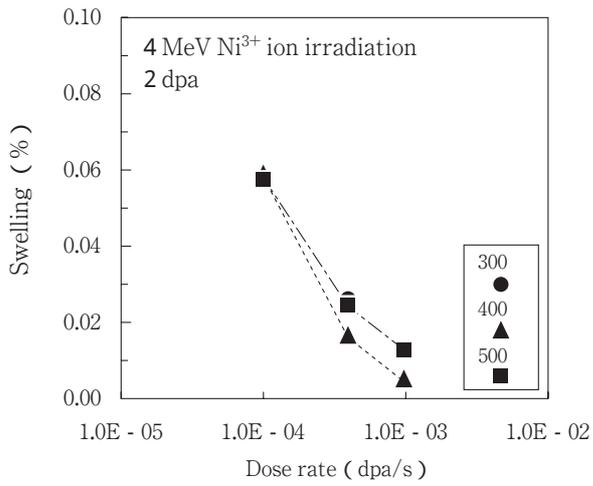


図4 SUS304のスエリングの損傷速度依存性

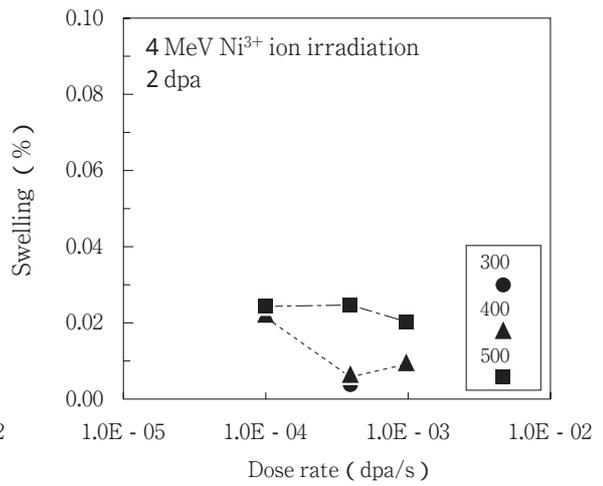


図5 SUS316のスエリングの損傷速度依存性

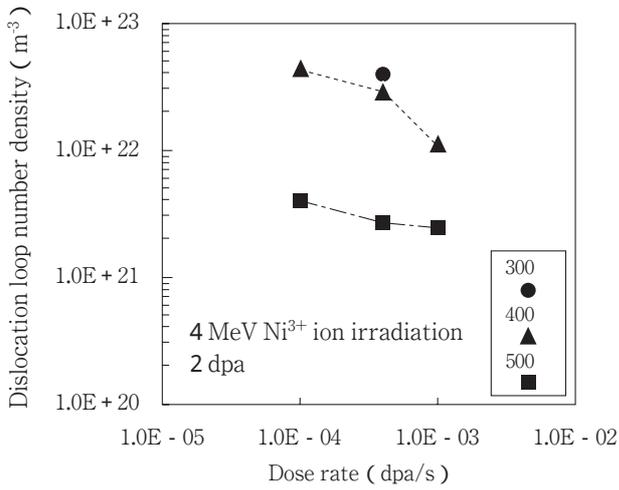


図6 SUS304の転位ループ数密度・平均直径の損傷速度依存性

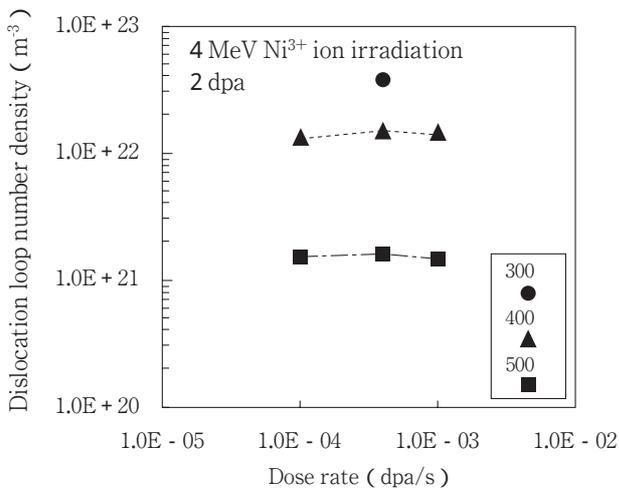
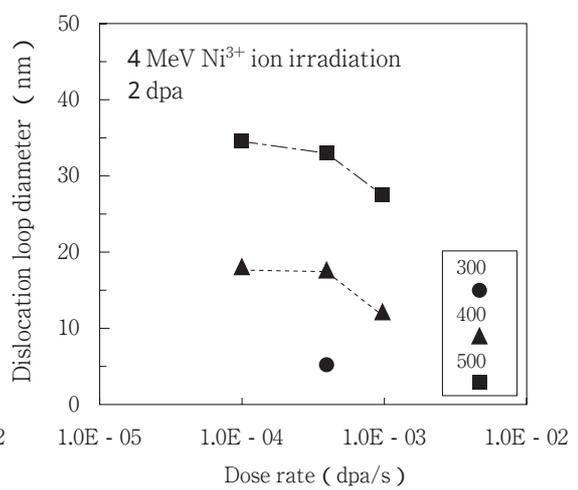
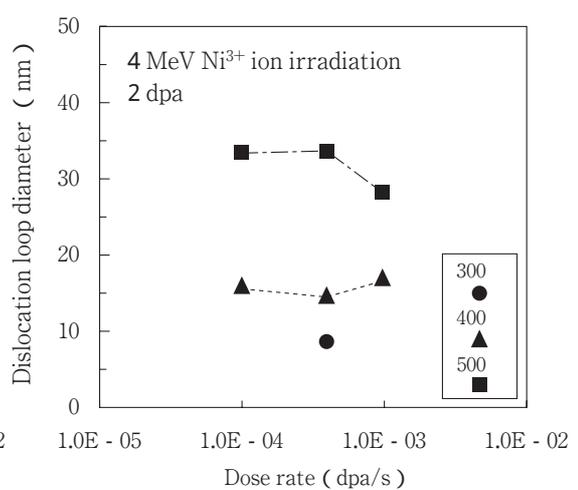


図7 SUS316の転位ループ数密度・平均直径の損傷速度依存性



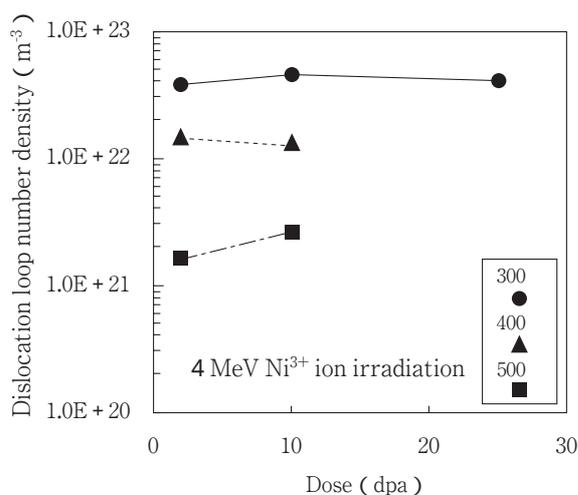


図8 SUS304の転位ループ数密度の損傷量依存性

3.2 損傷量依存性

各試料のキャビティーおよび転位組織の定量データを表5にまとめて示す。また、図9から図11に、4 MeVのNi³⁺イオンを 4×10^{-4} dpa/sの損傷速度で照射温度300 °Cにおいて照射したSUS304およびSUS316のキャビティー数密度、キャビティー平均直径、スエリング、転位ループ数密度および転位ループ平均直径の損傷量依存性を比較して示す。

SUS304ではキャビティー形成が25 dpaまで継続しているのに対して、SUS316では損傷量の増加に伴いキャビティー数密度が飽和する傾向にある。また、SUS304, 316共に照射初期にキャビティーが成長し平均径が飽和する傾向があり、高照射量での顕著なキャビティーの成長を生じない。このようなキャビティー組織の損傷量依存性、主にキャビティー形成の相違により、SUS304とSUS316のスエリング挙動に相違が生じることが明らかとなった。

一方、転位組織発達については、SUS304では照射初期(約2 dpa)に転位ループが形成された後、照射量10 dpa程度までその形成が継続し、高照射量では飽和する。これに対してSUS316では、SUS304と同様に照射初期に転位ループが形成されるが、その後の緩やかな形成、数密度の増加が生じず、低い照射量で飽和する。また、転位ループは、高照射量においてSUS304, SUS316共に緩やかに成長し、ほぼ等しい大きさとなる。

損傷速度依存性に関する試験結果から、転位組織の発達過程がキャビティー組織発達を律速している可能性が示された。今回のように不純物濃度が等しくなるように溶製したSUS304およびSUS316において得られた転位組織発達の損傷量依存性の違いは、転位ループ形成の鋼種間差であると考えられる。また、高照射量では照射量に依存せず転位組織の発達の差が同程度あることから、転位組織の発達過程が変化する照射量までは、キャビティーの形成が抑制されると考えられる。また、照射量の増加に伴うキャビティー成長が見られないことから、さらに高照射量(25 dpa以上)におけるSUS304およびSUS316のスエリングは、照射量25 dpaでの量的関係を保持し、照射量に依存せずほぼ一定の値となることが予測される。

SUS304とSUS316で認められた転位組織やキャビティーの発達の違いの原因として、本研究の2鋼種のC, Si, P, S等の量はほとんど同じあることから、Ni量とCr量の違いが考えられる。従来の高速炉等での研究から、高Ni低Crほどスエリングが小さいことがよく知られており^(11, 12)、高Niになると転位ループの発達が抑制されスエリングの駆動力である空孔の過飽和が抑制されることも報告されている^(13, 14)。本研究ではSUS316で比較的照射初期に転位密度が飽和しキャビティーの形成も飽和していることが判明したが、この結果は文献のNiの効果と一致しており、PWR条件でのSUS304とSUS316のスエリングの差がNi量の差で説明できる可能性を示唆するものと考えられる。

3.3 イオン照射の有用性評価

イオン照射を用い、SUS304およびSUS316のミクロ損傷組織発達に対する損傷速度、照射温度、損傷量の影響について系統的に評価した。PWR炉内構造物の供用温度付近である300 °Cでの照射による実用オーステナイト系ステンレス鋼でのキャビティー形成に関しては、十分な議論が必要であるとされてきた。しかし、本研究により300 °Cでの明確なキャビティーの形成が確認された。

また、SUS304およびSUS316で損傷組織発達に及ぼす損傷速度等の照射パラメータの影響に差異があ

表5 損傷量に関する実験の4 MeVのNi³⁺イオン照射条件と

キャビティーおよび転位ループの数密度と平均直径ならびにスエリングの測定結果

(a) キャビティー組織

SUS304						
Temperature ()	Dose rate (dpa/s)	Dose (dpa)	Number density (m ⁻³)	Diameter (nm)	Swelling (%)	
300	4 × 10 ⁻⁴	10	1.20 × 10 ²²	5.7	0.117	
300	4 × 10 ⁻⁴	25	3.90 × 10 ²²	5.0	0.257	
400	4 × 10 ⁻⁴	10	6.25 × 10 ²²	6.2	0.791	
500	4 × 10 ⁻⁴	10	2.78 × 10 ²²	6.7	0.434	
SUS316						
Temperature ()	Dose rate (dpa/s)	Dose (dpa)	Number density (m ⁻³)	Diameter (nm)	Swelling (%)	
300	4 × 10 ⁻⁴	10	1.17 × 10 ²²	6.1	0.141	
300	4 × 10 ⁻⁴	25	1.32 × 10 ²²	5.6	0.124	
400	4 × 10 ⁻⁴	10	5.12 × 10 ²²	3.9	0.159	
500	4 × 10 ⁻⁴	10	4.74 × 10 ²²	6.1	0.555	

(b) 転位組織

SUS304					
Temperature ()	Dose rate (dpa/s)	Dose (dpa)	Number density (m ⁻³)	Diameter (nm)	
300	4 × 10 ⁻⁴	10	5.40 × 10 ²²	9.0	
300	4 × 10 ⁻⁴	25	5.60 × 10 ²²	11.0	
400	4 × 10 ⁻⁴	10	4.68 × 10 ²²	19.3	
500	4 × 10 ⁻⁴	10	1.85 × 10 ²²	39.2	
SUS316					
Temperature ()	Dose rate (dpa/s)	Dose (dpa)	Number density (m ⁻³)	Diameter (nm)	
300	4 × 10 ⁻⁴	10	4.33 × 10 ²²	9.6	
300	4 × 10 ⁻⁴	25	4.06 × 10 ²²	11.3	
400	4 × 10 ⁻⁴	10	1.28 × 10 ²²	20.7	
500	4 × 10 ⁻⁴	10	2.59 × 10 ²¹	35.6	

ることも確認された。これより、これまでに用いられてきた「温度シフト」モデル⁽⁴⁾のような一義的な評価よりも、各照射パラメータの影響を素因子とした評価が必要であると言える。

このような結果は、照射パラメータの制御が容易であり、優れた加速照射性を有するイオン照射の長所を最大限に生かすことによって得られた知見であり、照射材料の評価にはイオン照射が利点を有していると再認識できる。

4. まとめ

SUS304およびSUS316に対して、4 MeVのNi³⁺イオンをはじき出し損傷導入速度 1 × 10⁻⁴, 4 × 10⁻⁴, 1 × 10⁻³ dpa/s、照射温度300, 400, 500 で、照射量25 dpaまで照射し、透過電子顕微鏡によるミクロ組織観察を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) PWRの温度条件付近の300 においても微細ではあるがキャビティーを4 MeV Ni³⁺イオン照射によ

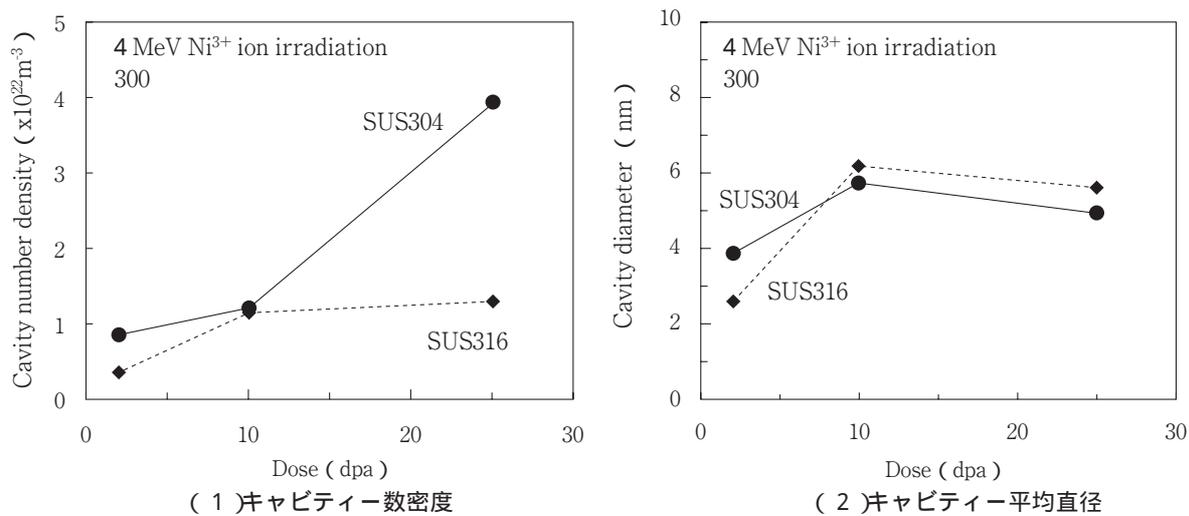


図9 キャビティー数密度・平均直径の損傷量依存性

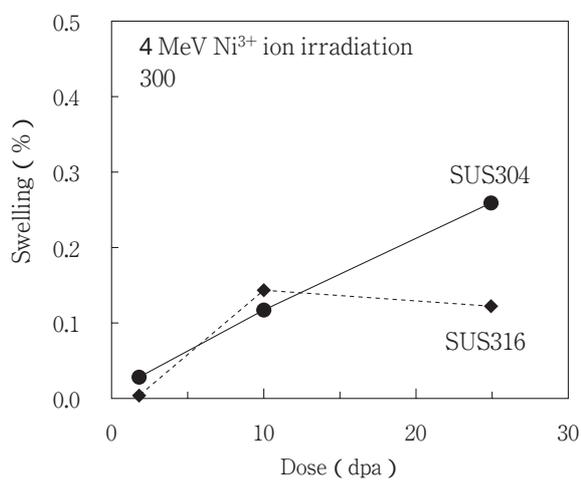


図10 スエリングの損傷量依存性

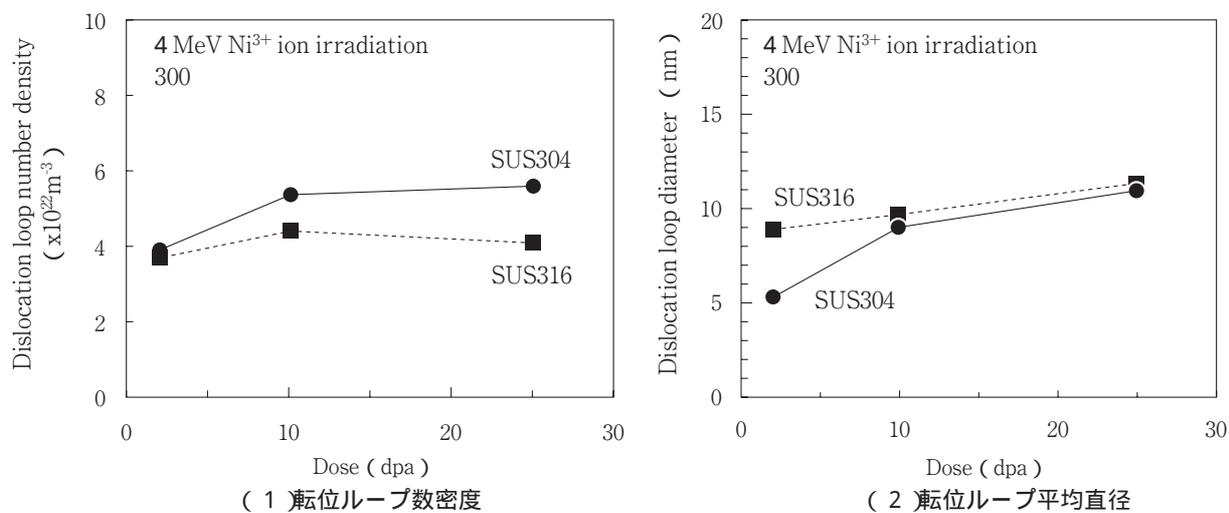


図11 転位ループ数密度・平均直径の損傷量依存性

り試料内に導入することが可能であることを示した。

(2) キャビティの形成・成長過程に対して、損傷速度および損傷量が複雑に影響することを明らかにした。更に、SUS304とSUS316とでは、キャビティ組織および転位組織の損傷速度および照射量依存性が異なることを示すと共に、転位組織の損傷速度依存性の差異がキャビティ形成・成長の損傷速度依存性が異なる主要因である可能性を示した。

(3) 照射初期にキャビティの形成が飽和するSUS316に比べ、照射量25 dpaまでキャビティの形成が継続するSUS304の方が大きなスエリングを生じることを示した。

5. 謝辞

本研究は、東京大学システム量子工学科の関村直人教授のご指導のもとに実施した。適切なご指導と貴重なご助言を賜りましたことに、ここにお礼申し上げます。

文献

- (1) J.P. Foster et al., J. Nucl. Mater., 224, 207 (1995)
- (2) G. Furutani et al., to be published in INSS Journal, vol.7, 2000
- (3) T.R. Allen et al., J of Metals, 51, 27 (1999)
- (4) N. H. Packan et al., J. Nucl. Mater., 78, 143 (1978)
- (5) M.M. Wilson, Radiation Effects, 1, 207 (1969)
- (6) W.G. Johnston et al., "Radiation Damage in Metals," American Society for Metals (1976).
- (7) Y. Kohno et al., J. Nucl. Mater., 141-143, 794 (1986)
- (8) B. J. Kestel, ANL-80-120-Rev. 1, Argonne National Laboratory (1986).
- (9) A. Kohyama et al., ASTM STP 1125, 1051 (1992)
- (10) M. Kiritani, J. Nucl. Mater., 169, 89 (1989)
- (11) F.A.Garner, Materials Science and Technology Vol.10A, Nuclear Materials, Part1, ed., B.R.T.Frost, 1995, VCH
- (12) F.A.Garner, J.Nucl.Mater., 205, 98 (1993)
- (13) T.Muroga et al., J.Nucl.Mater., 179-181, 546 (1991)
- (14) N.Sekimura et al., J.Nucl.Mater., 191-194, 1234 (1992)