



12%冷間加工316ステンレス鋼の炉内照射損傷に及ぼす低はじき出し損傷速度の影響

吉武 庸光 赤坂 尚昭 堂野前貴子
 宮川 俊一 ハンチャン・ツサイ*
 トッド・アレン* ジェームズ・コール*

大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部
 *米国アルゴンヌ国立研究所

資料番号：10 - 8

The Effect of Lower-Dose-Rate Conditions on Neutron Irradiation Behavior of 12% Cold-Worked Type 316 Stainless Steel

Tsunemitsu YOSHITAKE Naoaki AKASAKA Takako DONOMAE
 Shun-ichi MIYAKAWA Hanchung TSAI*
 Todd R. ALLEN* James I. COLE*

Fuels and Materials Division, Irradiation Center, O-arai Engineering Center
 *Argonne National Laboratory, USA

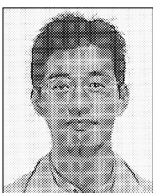
高速炉炉心材料として使用されるオーステナイト鋼の高速中性子照射損傷に及ぼす低はじき出し損傷速度の影響を評価することを目的として、米国の高速実験炉EBR-IIの反射体ラッパ管として照射された316ステンレス鋼12%冷間加工材の照射挙動を評価した。はじき出し損傷速度 $1.0 \times 10^8 \sim 5.8 \times 10^7$ dpa/s、照射温度371～444℃、はじき出し損傷量最大56dpaの照射条件においてスエリング挙動及び引張強度・延性特性を評価した結果、スエリングについてははじき出し損傷速度が小さい条件において増加する傾向が見られたが、引張強度・延性特性については、はじき出し損傷速度の影響は見られなかった。

The effects of lower-dose-rate conditions on the neutron irradiation behavior of 12% cold-worked type 316 stainless steel hexagonal ducts which were irradiated in the outer rows of EBR-II were investigated. The samples were irradiated to temperatures between 371 and 444°C to doses up to 56dpa and at dose-rates ranging from 1.0×10^8 to 5.8×10^7 dpa/s. Immersion density measurements and transmission electron microscopy (TEM) examinations were conducted to evaluate the swelling behavior and microstructural evolution. Tension tests and fractographic examinations were carried out to understand the irradiation effect on the tensile properties and failure mode. The results of these examinations showed that the swelling increased moderately as dose rate decreased, corresponding to an increase in void size, although density decreased where within the bounds of statistical error and that there was no significant effect of dose rate on tensile properties for the range of irradiation conditions of this study.

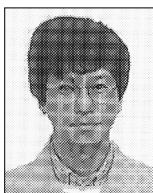
キーワード

12%冷間加工316ステンレス鋼，EBR-II，反射体ラッパ管，低はじき出し損傷速度，スエリング，引張強度・延性特性，照射効果，炉心材料

12% Cold-Worked Type 316 Stainless Steel, EBR-II, Reflector Duct, Lower-Dose-Rate Irradiation, Swelling, Tensile Properties, Irradiation Effect, Fast Reactor Core Material



吉武 庸光



赤坂 尚昭



堂野前貴子



宮川 俊一



ハンチャン・ツサイ



トッド・アレン



ジェームズ・コール

1. はじめに

高速炉炉心材料として使用される316ステンレス鋼をはじめとするオーステナイト鋼では、照射によるスエリングが燃料集合体の重要な寿命制限因子の一つであることから、316ステンレス鋼のスエリング挙動を評価することは、炉心材料の健全性・寿命予測評価を行う上で重要である。スエリングははじき出し損傷量（以下、損傷量）だけでなく、はじき出し損傷速度（以下、損傷速度）の影響を受けることが知られており、特に損傷速度が遅い条件においてスエリングが促進されることが報告されている¹⁾。したがって、高速炉の炉心外周部で長期間使用される中性子遮へい体などの炉心構成材の健全性を評価するためには、損傷速度が小さい条件でのスエリング挙動を評価する必要がある。また、近年では軽水炉の寿命延長に関連して、同様な低損傷速度条件に当たる軽水炉の炉内構造物のスエリングによる変形が問題視されている。このようなスエリングの問題のほか、照射による機械的性質の劣化も炉内構造物の健全性評価上重要な評価項目である。特に、低損傷速度で長期間にわたって照射された材料の照射硬化、延性低下を評価することは、全供用期間でのこれら炉内構造物の照射脆化に起因する破損を防止する観点からも重要である。しかしながら、このような炉心構成材の多くは炉に固定され、あるいは交換頻度が低いために照射後試験片の採取が難しいことから、これまで損傷速度の影響について広範囲な研究はなされていない。

米国の高速実験炉EBR-IIは30余年の運転を終了し、現在は廃炉プログラムが進められている。ここでは、低損傷速度条件をはじめとする様々な照射条件で照射された炉内構造物を取り出して材料の照射効果研究に利用できる状況にある。

このような背景から、大洗工学センター燃料材料試験部では、316ステンレス鋼の照射損傷に及ぼす損傷速度の影響、特に低損傷速度の影響を評価することを目的として、1997年1月から4年間計画で米国アルゴンヌ国立研究所（以下、ANL）と「EBR-II炉心構成材の照射効果評価」に関する共同研究を実施してきた。

本稿では、EBR-IIにおいて照射された316ステンレス鋼12%冷間加工材のスエリング挙動及び引張強度・延性特性に及ぼす低損傷速度の影響について報告する。

表1 316ステンレス鋼12%冷間加工材の化学成分（ミルシート値）(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	17.48	11.34	2.61	0.35	bal.

2. 試験方法

2.1 供試材

本研究で用いた供試材は、反射体集合体ラッパ管としてEBR-IIにて照射された316ステンレス鋼12%冷間加工材である。表1に化学成分（ミルシート値）を示す。これらのラッパ管は1,121～1,149にて溶体化処理された後、最終冷間加工された。

供試材の採取に当たっては、できるだけ低損傷速度条件で損傷量が大きい反射体を選定することとし、EBR-II炉心第8列と第9列で照射されたU9861とU9922を試験対象集合体に選定した。これらは同じ損傷量においてU9861の損傷速度がU9922のそのほぼ2倍大きい関係にある。これら供試材は、軸位置に依存して照射温度範囲371～444で照射された。また、損傷量は最大56dpa、損傷速度は $1.0 \times 10^{-8} \sim 5.8 \times 10^{-7}$ dpa/sである。

2.2 密度測定

密度測定は、ANL-WestのHot Fuel Examination Facility（以下、HFEF）において行った。2体のラッパ管から直径19mm（肉厚約1mm）の円盤状試料を20個ずつ採取し、合計40試料について密度測定を行った。密度測定は液浸法により行い、各試料について5回測定した平均値を密度測定値とした。測定精度は 0.02 g/cm^3 である。

2.3 透過電子顕微鏡観察

密度測定結果から選定した9条件（試料）について、照射後組織評価を目的とした微細組織観察を行った。観察はANL-WestのElectron Microscopy LaboratoryにてJEOL JEM-2010透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて行った。加速電圧は200kVとした。

TEM観察用試料は密度測定に用いた試料を機械研磨した後、直径3mmのディスクに打ち抜いて作製した。打ち抜いたディスクはツイングジェット研磨法により薄膜試料とし観察に供した。また、析出物の同定には抽出レプリカ法を用いた。

2.4 引張試験

引張試験片形状を図1に示す。引張試験片は、ラッパ管の軸方向と引張方向が一致するように切り出した短冊片にまず2つの穴を機械加工で空けたのち、ワイヤ式放電加工により試験片形状に切

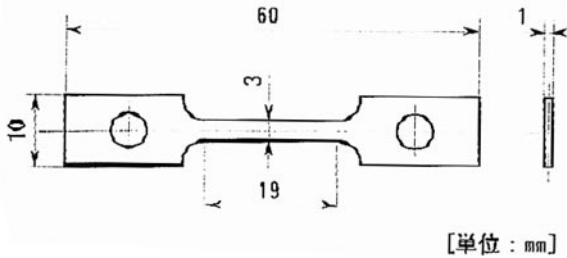


図1 引張試験片の形状

り出した。

引張試験はANL-EastのAlpha-Gamma Hot Cell Facility (以下, AGHCF) 内Clean Transfer Area に設置されたインストロンTT型引張試験機を用いて17試料について実施した。試験雰囲気は空気とし、試験温度は原則として照射温度に合わせることにし380 または430 とした。なお、一部の試験片については照射温度と無関係に、室温及び430 で試験した。また、引張速度は 1.9×10^{-2} mm/s 一定とした(初期ひずみ速度 1.0×10^{-3} /s)。

試験実施に当たっては、マニプレータによる遠隔操作を考慮し、試験片取扱いに際しての曲げ、落下等を防止するために電磁石を利用した試験片固定治具を用いて試験機への取付けを行った。

なお本試験では、0.2%オフセット法により降伏応力を求めた。また、一様伸び及び破断伸びは荷重-変位チャートから算出した値を用いた。

2.5 破面観察

照射材の破壊形態を調査するために、引張試験後の4試料について破面観察を行った。観察にはAGHCF内Electron Beam Laboratoryに設置されたETEC Model U1走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた。

3. 試験結果

3.1 密度測定結果

密度測定結果を各試料の採取位置[ラッパ管面、炉心中心からの高さ(DFCC)]及び照射条件(照射温度、損傷量及び損傷速度)と共に表2に示す。なお、本研究では照射材と同一ロットの受入れ材(非照射材)が入手不可能であったことから、スエリング量評価に際しては同一鋼種の別ロット材について新たに測定して得られた密度値 7.938 g/cm^3 を非照射材の基準とした。図2に密度測定結果から求めたスエリング量と損傷量の関係を三つの照射温度範囲に区分して示す。本照射条件では、スエリング量は最大1.6%であり、ま

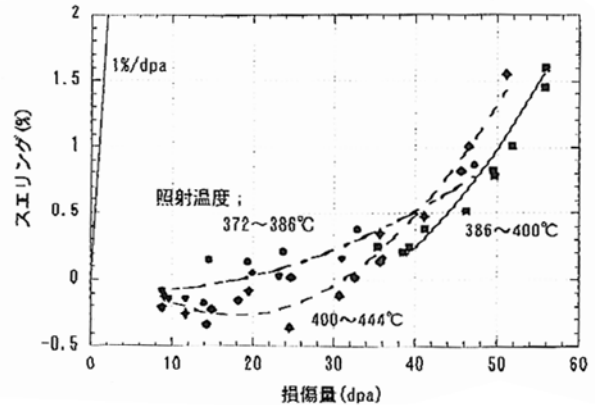


図2 スエリングに及ぼす損傷量及び照射温度の影響

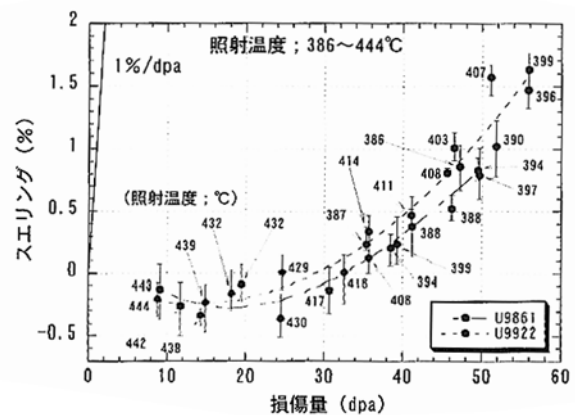


図3 スエリングに及ぼす損傷量及び損傷速度の影響

た、スエリング速度はオーステナイト鋼の定常スエリング速度と考えられている $1\% / \text{dpa}^2$ に達していないことから、スエリングは遷移領域にあると考えられる。照射温度 $372 \sim 386$ の低温度条件でのスエリング速度は、より高照射温度のデータに比較して小さい結果が得られた。また、照射温度 $400 \sim 444$ で約 30 dpa までの低損傷量条件では、焼きしまり³⁾が原因と考えられる密度増加が見られた。一方、損傷速度の影響については、U9922, U9861両者のスエリング量(ノミナル値)を損傷量及び照射温度が近い条件で比較した結果、スエリングの発生が顕著なおおむね 30 dpa 以上の高損傷量域では損傷速度が小さいU9922のスエリングのほうがU9861よりも大きい傾向が見られるが、密度測定値のばらつきを考慮すると、両者に統計的な有意な違いは見られなかった(図3)。

3.2 微細組織観察結果

写真1に代表的な微細組織写真を示す。スエリングの原因であるポイドの形成はどの照射条件においても比較的少ないが、損傷速度が異なる条件

表2 密度測定結果

試験片 番号*)	ラッパ管 面番号	DFCC**) (mm)	照射温度 (°C)	損傷量 (dpa)	損傷速度 ($\times 10^{-7}$ dpa/s)	密度 (平均値) (g/cm ³)	スエリング $\Delta V/V$ (%)***)
N1	5	-493	372	8.8	0.49	7.944	-0.08
N2	5	-357	376	19.3	1.07	7.928	0.13
N3	5	-321	377	23.7	1.31	7.921	0.21
N4	5	-159	386	47.2	2.61	7.870	0.86
N5	5	-118	390	51.8	2.86	7.858	1.02
N6	5	-48	396	55.8	3.08	7.823	1.47
N7	5	-17	399	55.9	3.08	7.811	1.63
N8	5	57	407	51.1	2.82	7.815	1.57
N9	5	264	429	24.7	1.36	7.937	0.01
N10	5	365	438	14.3	0.79	7.965	-0.34
N11	5	451	444	8.8	0.49	7.955	-0.21
N12	4	-213	382	32.9	1.82	7.909	0.37
N13	4	-186	384	36	1.99	7.925	0.16
N14	4	-133	388	41.2	2.27	7.908	0.38
N15	4	124	414	35.7	1.97	7.911	0.34
N16	4	154	418	32.6	1.80	7.937	0.01
N17	4	292	432	18.2	1.01	7.951	-0.16
N18	1	-398	375	13.9	0.77	7.952	-0.18
N19	1	21	403	46.5	2.57	7.859	1.01
N20	1	91	411	41.1	2.27	7.901	0.47
E1	1	-267	376	19.9	2.32	7.934	0.05
E2	1	-243	376	23.2	2.70	7.936	0.03
E3	1	-90	388	46.2	5.39	7.897	0.52
E4	1	-40	394	49.5	5.77	7.873	0.83
E5	1	-17	397	49.7	5.80	7.876	0.79
E6	1	61	408	45.6	5.32	7.874	0.81
E7	1	230	430	24.5	2.86	7.967	-0.36
E8	1	324	439	14.9	1.73	7.956	-0.23
E9	1	368	442	11.7	1.36	7.959	-0.26
E10	2	-292	375	14.5	1.69	7.926	0.15
E11	2	-141	383	31	3.62	7.925	0.16
E12	2	-98	387	35.4	4.13	7.919	0.24
E13	2	-42	394	38.5	4.50	7.921	0.21
E14	2	64	408	35.7	4.16	7.928	0.13
E15	2	241	432	19.5	2.27	7.945	-0.09
E16	2	392	443	9.1	1.07	7.948	-0.13
E17	5	-360	374	9.6	1.11	7.949	-0.14
E18	5	-329	374	11.7	1.36	7.949	-0.14
E19	5	2	399	39.3	4.59	7.919	0.24
E20	5	129	417	30.7	3.58	7.948	-0.13

*) N; U9922, E; U9861 (反射体集合体番号)

**) 炉心中心からの距離 (Distance From Core Center)

***) 非照射材密度値は7.938 g/cm³とした。

の組織を比較した場合、低い損傷速度で照射された試料の方がポイド組織が発達していることが分かる。特に、照射温度が比較的高い430 で照射した試料ではポイド組織発達に対する損傷速度依存性が顕著に現れている。図4にポイド平均径及び数密度の照射温度依存性を示す。ポイド平均径は照射温度が高くなるにしたがい増加する傾向にあり、ポイド数密度は逆に低下する傾向がある。また、ポイド平均径は低損傷速度の方が大きい傾向があるが、ポイド数密度に対する損傷速度の影響は明確に現れていない。

図5に転位ループの平均径及び数密度の照射温度依存性を示す。ポイド組織と同様に、平均径は

照射温度が増加するにしたがい増加し、数密度は低下する傾向が分かる。しかし、両者とも損傷速度の影響は明確に現れていない。

また、写真1に示すように、いずれの照射条件においても結晶粒内に粒状析出物の形成が認められた。抽出レプリカ試料による析出物の組成分析及び電子線回折像の解析から、これら析出物は照射により形成が誘起あるいは促進されたM₆Cタイプの炭化物であることが明らかとなった。この析出物形成挙動については、照射条件による明確な差は認められなかった。

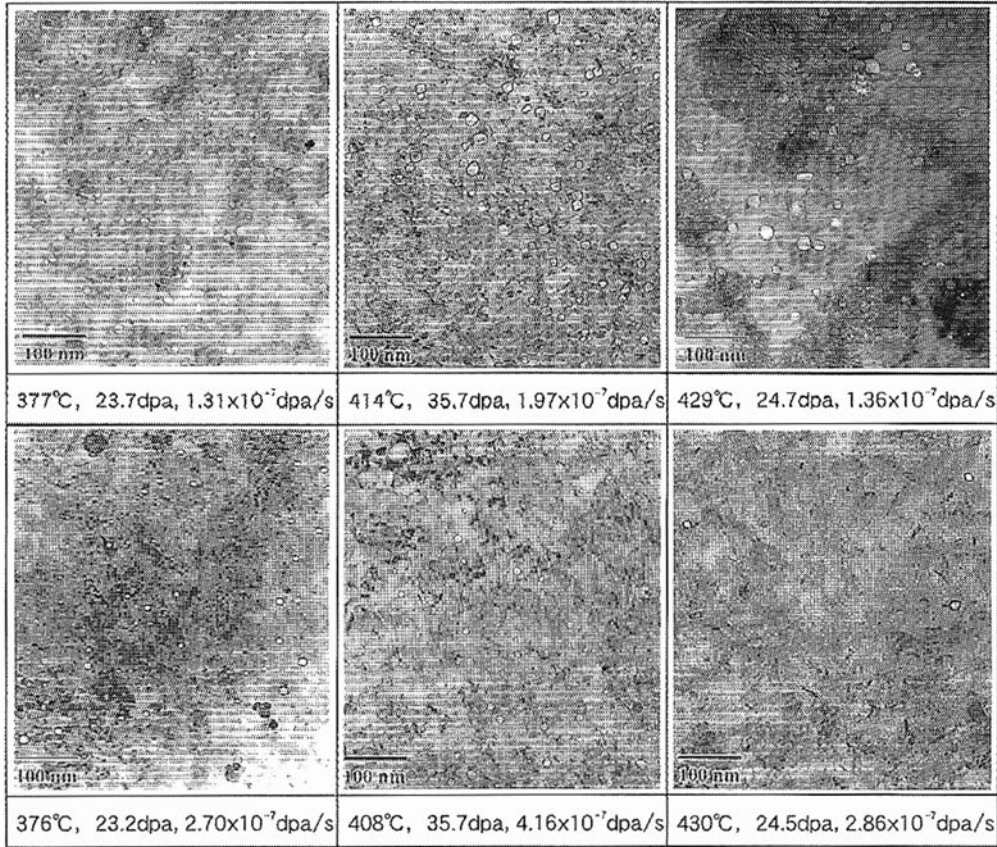


写真 1 316ステンレス鋼12%冷間加工材の組織変化挙動の損傷速度依存性

3.3 引張試験結果

引張試験結果を表 3 に示す。表には試験片軸方向中心位置における照射条件を含わせて示した。本稿では、主として、強度については照射効果が顕著に現れると考えられる降伏応力、伸びについ

ては照射材の延性評価で重要と考えられる一様伸びについて述べる。降伏応力及び一様伸びの損傷量との関係を図 6 示す。引張試験に関しても同一ロット材の非照射材が入手できなかったことから、非照射材データとしては室温試験結果の比較

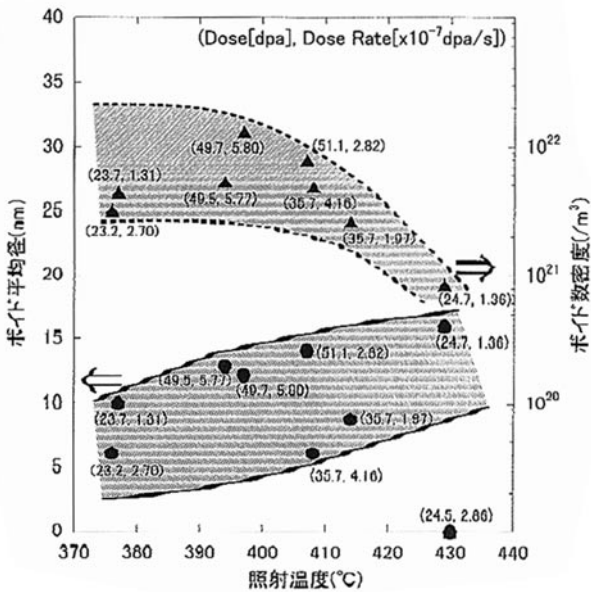


図 4 ポイド平均径及び数密度の照射温度依存性

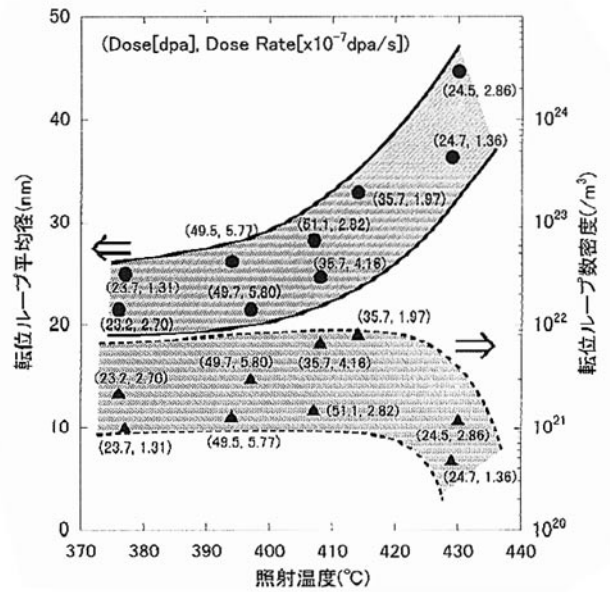


図 5 転位ループの平均径及び数密度の照射温度依存性

表3 引張試験結果

試験片番号	照射条件			強度(MPa)		伸び(%)		(比)		
	照射温度(°C)	損傷量(dpa)	損傷速度($\times 10^{-7}$ dpa/s)	試験温度(°C)	降伏応力[YS]	引張強さ[UTS]	一様伸び[UE]	破断伸び[TE]	YS/UTS	UE/TE
ET11	438	14.0	1.63	432	583	689	8.8	11.3	0.85	0.78
NT12	432	19.2	1.06	429	643	750	8.0	10.3	0.86	0.78
ET10	432	19.5	2.28	430	588	701	8.8	11.5	0.84	0.76
NT11	422	30.1	1.66	432	683	770	6.7	9.3	0.89	0.72
ET08	417	30.2	3.52	430	707	770	5.3	8.5	0.92	0.63
ET15	371	0.9	0.10	383	568	687	11.4	14.5	0.83	0.78
NT15	371	2.2	0.12	23	792	916	17.8	26.4	0.86	0.67
ET06	374	9.1	1.06	377	786	856	2.9	6.2	0.92	0.47
NT01	375	13.6	0.75	380	791	861	3.3	6.6	0.92	0.50
NT08	409	40.5	2.23	428	709	776	5.4	7.8	0.91	0.69
ET03	425	30.2	3.52	429	613	719	8.6	11.9	0.85	0.72
NT04	417	40.5	2.24	428	670	744	6.7	9.4	0.90	0.71
ET04	435	19.2	2.24	428	568	701	10.5	13.8	0.81	0.76
NT05	425	30.1	1.66	428	649	739	7.6	10.3	0.88	0.74
ET05	444	9.1	1.06	429	545	667	10.4	13.9	0.82	0.75
NT09	436	14.2	0.78	429	610	752	8.4	11.8	0.81	0.71
ET14	371	0.9	0.10	427	569	689	10.9	14.2	0.83	0.77

注1) クロスヘッドスピード：1.14 mm/min

注2) ET;U9861, NT;U9922 (反射体集合体番号)

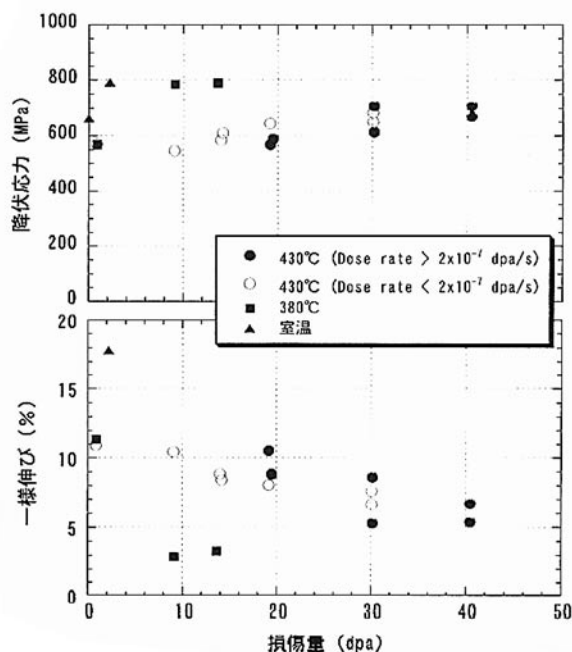


図6 降伏応力、一様伸びと損傷量の関係

のみについてミルシート記載の引張試験結果を用いた。降伏応力は損傷量の増加に伴い上昇し、照射硬化は380 のほうが430 より顕著であった。降伏応力は380 では約9, 14dpaでほぼ同じであったのに対し、430 では本図からは約40dpaまでの範囲でわずかに増加しているように見える。ここで試験温度430 のデータは、損傷速度の影響を見るために各試験片の損傷速度のほぼ平均で

ある 2.0×10^{-7} dpa/sを超える場合、超えない場合で区分して示したが、明らかな損傷速度の影響は見られなかった。また、照射温度が等しく、試験温度が異なる条件で試験したET14 (照射温度371, 試験温度427) とET15 (照射温度371, 試験温度383) の降伏応力はほぼ同じであった。これより、このような照射温度条件では、強度は照射温度に強く影響されることが示唆された。また、損傷量が2.2dpaと小さい条件での室温試験(NT15)の結果から、照射の初期段階から照射硬化による明らかな強度上昇が生じることが分かった。一様伸びは照射硬化に対応して損傷量の増加に伴い低下し、低下は380 のほうが430 よりも大きかった。また、430 の一様伸びは降伏応力と同様に損傷速度範囲ごとに示したが、損傷速度の影響は見られなかった。

引張強さも同様の傾向を示した。また、破断伸びも一様伸びと同様の傾向を示した。破断伸びは6.2~26.4%の範囲であった。この結果から、本照射条件範囲においては材料が照射後においても十分な延性を有していた。

次に、同じく降伏応力及び一様伸びの損傷速度との関係を図7に示す。図から分かるように、降伏応力、一様伸びともに本試験結果では損傷速度の影響は見られなかった。なお引張強さ及び破断伸びもそれぞれ降伏応力と一様伸びと同様の傾向を示した。

表4 破面観察結果

試験片番号	照射条件			試験温度(°C)	破壊様式	断面積 (mm ²)		
	照射温度(°C)	損傷量(dpa)	損傷速度(x10 ⁻⁷ dpa/s)			試験前	試験後	断面減少率(%)
ET03	425	30.2	3.52	429	延性破面	3.12	2.29	27
NT04	417	40.5	2.24	428	延性破面	3.03	1.95	36
ET04	435	19.2	2.24	428	延性破面	3.07	1.96	36
NT05	425	30.1	1.66	428	延性破面	3.02	1.95	36

注1) ET; U9861, NT; U9922 (反射体集合体番号)

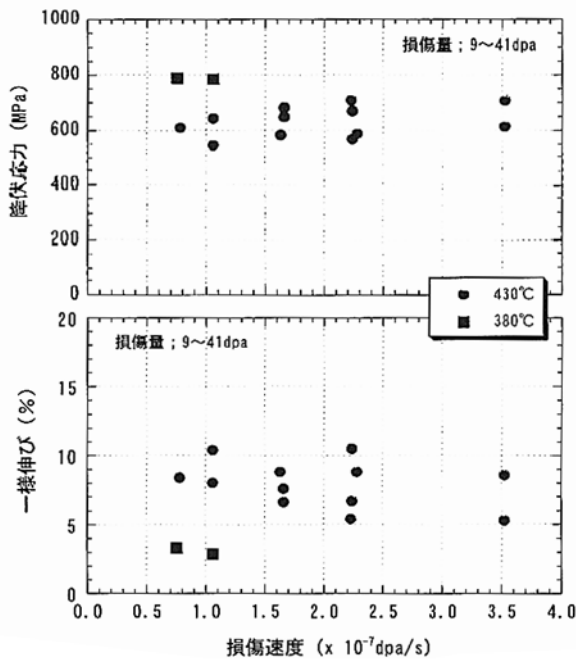


図7 降伏応力、一様伸びと損傷速度の関係

3.4 破面観察結果

SEMによる破面観察はET03, NT04, ET04及びNT05の4試験片について行った。観察結果を表4に、また代表的な破面を写真2に示す。4試験片ともに絞りは27~36%を示した。破面はいずれの照射条件においても、すべて延性破面を示した。

4. 考察

4.1 照射後組織とスエリング挙動

密度測定によるスエリング量の評価結果からは、スエリング挙動に対する損傷速度の影響は明確に認められない。一方、照射組織発達、特にポイド組織の発達に対しては損傷速度の影響が明確に現れている。密度測定結果に損傷速度の影響が現れなかったのは、すべての試験片がスエリング遷移期の初期に当たるため、損傷速度の差が密度の差として巨視的には顕著に現れなかったものと考えられる。

えられる。組織観察の結果はスエリング量が低くてもポイド組織の発達状況には差が出ていることを示しており、照射が更に進むとスエリング挙動に損傷速度の影響が明確に現れる可能性を示唆している。

低損傷速度で照射した試料では、高損傷速度の試料に比べ、ポイドが大きく成長している。点欠陥の生成速度及び過飽和度が低いと考えられる低損傷速度での照射においてポイドが成長する要因として、照射期間の長短が考えられる。同程度の照射温度及び損傷量で比較する場合、低損傷速度で照射した材料は炉内滞在時間が長く、析出物形成に代表される組織の熱力学的変化が進むことになる。スエリング挙動、すなわち照射により形成する点欠陥の挙動は、照射中に形成する析出物に大きく影響されることが知られている^{4),5)}。組織観察で形成が認められたM₆Cタイプの析出物はスエリング挙動に影響を与える典型的な析出物である。組織観察の結果からは、析出物の形成挙動に損傷速度の影響は明確に認められなかったが、これは観察した試料の炉内滞在時間が十分に長いためであり、低損傷速度で照射された試料では比較的低照射量の段階で析出物の形成が開始すると考えられる。その影響により低照射量から点欠陥の挙動が変化した低損傷速度照射材でポイドの成長が進んだものと考えられる。また、照射温度が高温になるにしたがい、析出物の形成は容易になり点欠陥、特に原子空孔の拡散速度も増加するため、比較的高温で照射した試料においてポイド形成挙動差が顕著になったものと考えられる。

4.2 照射後引張強度・延性特性

316ステンレス鋼等のオーステナイト鋼照射材の引張強度・延性特性に関しては、本試験結果よりも損傷速度が約1桁速い10⁶dpa/sオーダーの燃料被覆管等について多くの報告がある⁶⁾。照射温度約500~550以下では照射温度に依存した照射硬化による強度の上昇が生じており、本試験結果

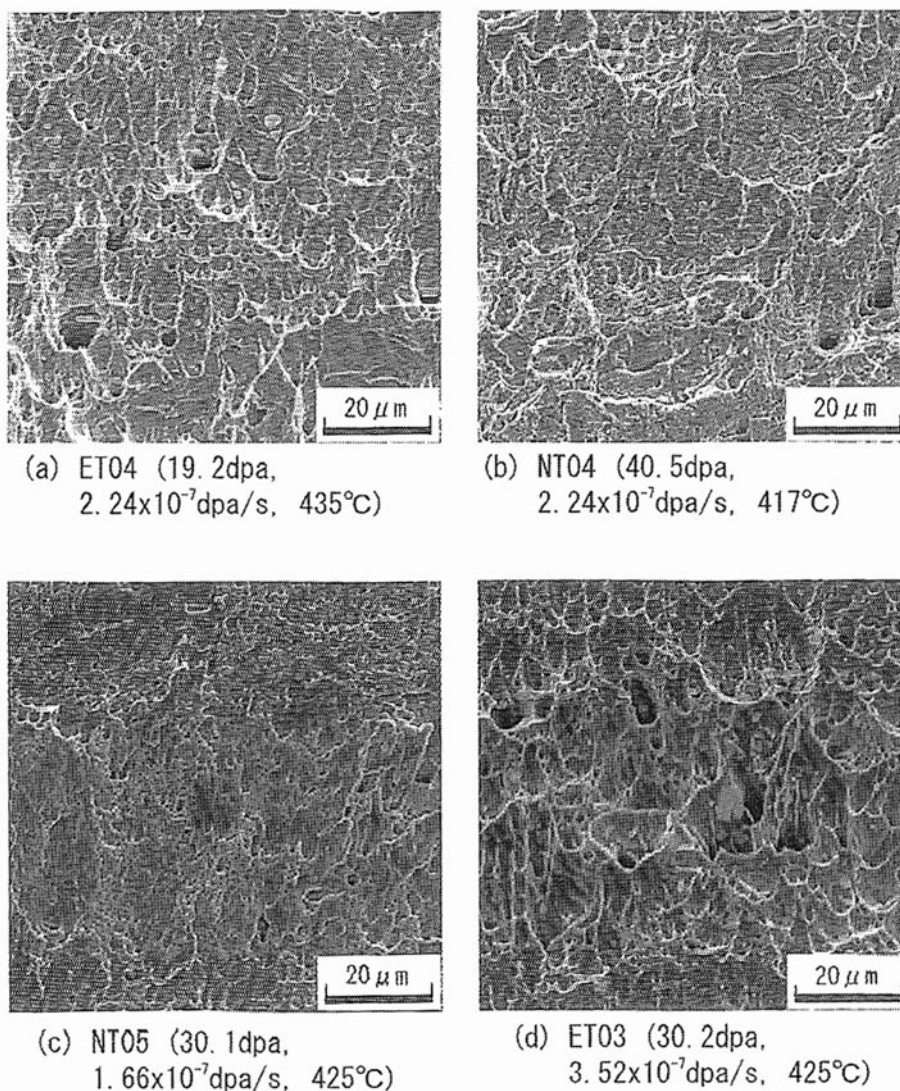


写真2 引張試験後の破面観察写真(SEM)

もこれらの結果によく一致している。照射材の降伏応力は、材料固有の強度と照射により導入されるフランクフループ、ポイド、析出物による照射硬化による寄与の和で表せられ、本照射条件のような比較的低温での照射では、フランクフループと析出物の寄与が大きいと考えられる⁷⁾。本微細組織観察の結果、析出物形成挙動には照射条件の違いによる明確な差が見られなかったことから、本照射条件では、主としてフランクフループが強度・延性特性に影響を及ぼすと推察される。

降伏応力に対するフランクフループによる寄与(硬化量)は、ループ平均直径とループ数密度の積の平方根に比例すると考えられることから⁷⁾、図5に示した転位ループ組織の測定結果から、照射温度380 及び430 における転位ループによる

硬化量を評価すると、380 における硬化量は430 の約1.4倍となる。一方、表3より、照射温度約370 及び430 における降伏応力はそれぞれ、おおむね790MPa、600MPaであることから、両者の比は約1.3となり、フランクフループによる硬化量の比とほぼ一致する。よって本照射条件では、降伏応力の温度依存性は、主としてフランクフループ形成の照射温度依存性に起因していると推察される。

また、照射材の降伏応力、引張強さはこれまでの結果から高速中性子照射量おおむね $3 \sim 5 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)で飽和することが知られている。この照射量は本試験結果ではほぼ15~25 dpaに対応すると考えられることから、本試験では図6のように、430 では約40dpaまで降伏応

力がわずかに増加しており、この場合強度の飽和が遅れたことが推察される。DupouyらはPHENIXとRAPSODIEで照射温度約390℃にて照射された316ステンレス鋼溶体化処理材について引張試験を行い、損傷速度が約2倍異なる条件での比較において、損傷速度が速い場合の方が降伏応力が高く、またより小さい照射量で降伏応力が飽和することを報告している⁸⁾。このことから、このような照射温度条件では、低損傷速度の場合は照射欠陥導入による硬化よりも照射欠陥の回復効果のほうが相対的に大きくなる結果、照射硬化が遅れたのではないかと推察される。一方、これらの結果は次のようにも解釈できると考えられる。試験温度430℃での降伏応力は照射量の増加に伴い、わずかに上昇する傾向が見られたが、これは各試験片の照射温度の違いによる影響であると考えられる。表3から分かるように、各試験片の照射温度は高損傷量条件で比較的低く(409~425℃)、低損傷量条件で比較的高い(432~444℃)ことから、降伏応力は主として照射温度によって決まり、結果的に低損傷量条件で比較的低く、高損傷量条件で比較的高くなったと推察される。

ところで、炉心材料の健全性評価を行うためには、照射硬化と延性低下、さらにこの結果である照射脆化について理解する必要がある。一般に照射材の引張試験では降伏応力は引張強さに近づき⁹⁾、また高照射量条件でおおむね6%を超えるスエリングが生じた場合には破断伸びは一樣伸びに近づくことが知られている¹⁰⁾。これらの結果は具体的には照射材では降伏後の加工硬化が小さく、最大荷重を示した後はほとんどくびれを生ずることなく破断に至ることを示している。表3に、本試験結果における降伏応力と引張強さの比(YS/UTS)及び一樣伸びと破断伸びの比(UE/TE)を併せて示しているが、YS/UTSの最大値は0.92であり、ミルシートから求めた非照射材のYS/UTS(室温)が0.9であることを考慮すると、本試験結果では照射による加工硬化性能の低下は大きくないことが推察される。一方、伸びの比UE/TEも0.8未満であることから材料が大きな絞りを示したことが分かった。しかし、このUE/TEが小さい場合であっても、380℃では10dpaでの条件においてUE/TEが約0.5であるにもかかわらず、破断伸びは6%程度まで減少していることから、照射後の延性評価においては伸びの大きさと荷重-伸び曲線の双方に注意する必要がある。引張試験及びその後のSEM観察の結果、破壊は全般的に延性的な破壊であったことから、本照射条件範囲では、

破壊様式に及ぼす照射の影響はほとんど見られないと考えられる。

引張特性に及ぼす損傷速度の影響については、図7に示したように本照射条件範囲における約2倍の比較ではほとんど影響は見られなかった。そこで、損傷速度についてより広範囲での比較を行うために、「常陽」MK-1炉心で照射された14%冷間加工316ステンレス鋼ラッパ管の引張試験結果(試験温度400, 450℃)と比較してみる。本材料は厳密にはEBR-II材とは異なるが、本比較においては両材料の化学成分、冷間加工度の違いは照射後の引張特性には大きな影響は及ぼさないと判断して比較した。図8に降伏応力と一樣伸びの損傷速度との関係を示す。図に示すとおり、試験結果を照射温度で整理すると、両者の降伏応力、一樣伸びはほぼ同レベルであることが分かる。引張強さと破断伸びに関しても同様であり、本試験結果及び「常陽」照射材の試験結果を考慮すると、おおむね損傷速度 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ dpa/sの範囲においては引張強度・延性特性に及ぼす損傷速度の影響は少ないと考えられる。

4.3 照射挙動に及ぼす損傷速度の影響

前項までに述べたように、本試験結果では照射による組織の発達(スエリング挙動)には損傷速度の影響が現れたが、引張特性には損傷速度の影響は見られなかった。オーステナイト鋼の照射に

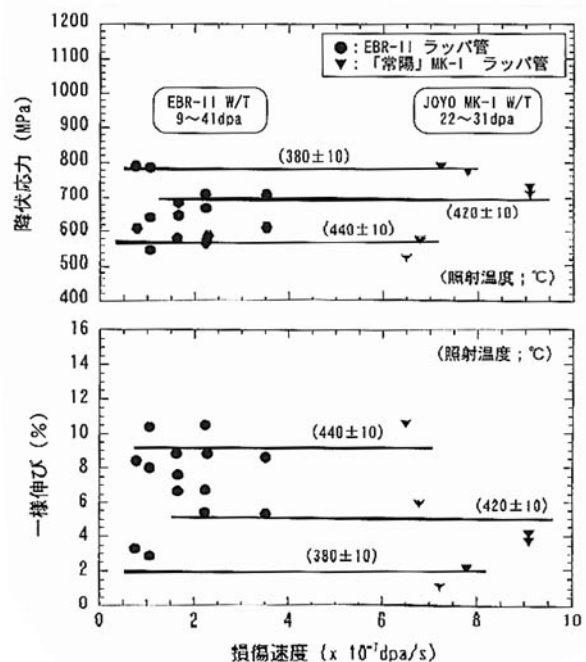


図8 降伏応力と一樣伸びの損傷速度依存性
(「常陽」MK-1ラッパ管との比較)

よる組織変化と機械的性質変化との相関については、スエリングが大きくなると材料の機械的性質に強度・延性の劣化や脆化等の影響を及ぼすことが考えられる。これまでに実施したPNC316, 15Cr-20Ni鋼燃料被覆管照射材の強度試験結果から、スエリング量約10%までの範囲では400 付近では延性の低下が認められるものの、スエリングの増大に伴う材料の強度特性の著しい劣化は見られていない¹¹⁾。よって、この結果を考慮すると、本照射条件ではスエリング量は最大1.6%(56 dpa)であったことから、このようなスエリング量ではスエリングが引張特性に有意な影響を及ぼすことはないと推察される。したがって、本照射条件範囲では、引張特性に関してはスエリングよりも転位組織や析出物の影響のほうが大きいと考えられる。

本試験結果では、前項に示したように、TEM観察結果から転位組織や析出挙動に及ぼす損傷速度の影響はほとんど認められなかった。したがって、転位組織、析出挙動が損傷速度の違いによらず同様であった結果は、本試験において引張特性に及ぼす損傷速度の影響がほとんど見られなかったことを組織面から示唆しているといえる。

5. おわりに

EBR-IIにおいて反射体集合体ラッパ管として照射された12%冷間加工316ステンレス鋼の照射挙動に及ぼす低損傷速度の影響を評価した結果、以下の結論を得た。

本照射条件範囲において、スエリングは損傷速度の減少に伴い増加傾向を示した。

本試験では最大のスエリング量は1.6%(56dpa)であり、「もんじゅ」中性子遮へい体などの照射条件におけるスエリング量は本試験結果と同程度であると推察される。

本照射条件範囲では、引張特性に及ぼす損傷速度の影響は見られなかった。また、材料は照射後においても十分な延性を示した。

損傷速度がより速い「常陽」MK-Iのラッパ管材(14%冷間加工316ステンレス鋼)との比

較の結果、 $7.5 \times 10^{-8} \sim 9.1 \times 10^{-7}$ dpa/sの損傷速度範囲では、引張特性に及ぼす損傷速度の影響は少ないと考えられる。

謝 辞

本成果は、米国アルゴンヌ国立研究所とサイクル機構の国際的な共同研究で得られたものであり、本共同研究の実現に御尽力いただいた関係機関の方々に、この場を借りて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) J. L. Seran, J. M. Dupouy : "The Swelling of Solution Annealed 316 Cladding in RAPSODIE and PHENIX," Effects of Radiation on Materials : 11th Int. Conf., ASTM STP 782, p.5-16 (1982).
- 2) F. A. Garner : "Irradiation Performance of Cladding and Structural Steels in Liquid Metal Reactors," Materials Science and Technology, Vol.10A Nuclear Materials Part I, p.447 (1994).
- 3) J. L. Straalsund, M. M. Paxton : "Thermal Densification of Austenitic Stainless Steel," Nucl. Tech., Vol. 13, p.99 (1972).
- 4) L. K. Mansur : "Theoretical Evaluation of a Mechanism of Precipitate-Enhanced Cavity Swelling during Irradiation," Phil. Mag. A, Vol. 44, p.867-877 (1981).
- 5) H. R. Brager, F. A. Garner : "Microchemical Evolution of Neutron-Irradiated Stainless Steel," Effects of Radiation on Materials : 10th Int. Symp., ASTM STP 725, p.470-483 (1981).
- 6) F. A. Garner, M. L. Hamilton et al. : "The Microstructural Origins of Yield Strength Changes in AISI 316 During Fission or Fusion Irradiation," J. Nucl. Mater., Vol. 103 and 104, p.803 (1981).
- 7) G. D. Johnson, F. A. Garner et al. : "A Microstructural Interpretation of the Fluence and Temperature Dependence of the Mechanical Properties of Irradiated AISI 316," Effects of Radiation on Materials : 10th Int. Symp., ASTM STP 725, p.393-412 (1981).
- 8) J. M. Dupouy, J. Erler et al. : "Post Irradiation Mechanical Properties of Annealed and Cold Worked 316 Stainless Steel after Irradiation to High Fast Neutron Fluences," Proc. Int. Conf. Radiation Effects in Breeder Reactor Structural Materials, Scottsdale, The Metallurgical Society of AIME, New York, p.83-93 (1977).
- 9) J. J. Holmes, J. L. Straalsund : "Effects of Fast Reactor Exposure on The Mechanical Properties of Stainless Steels," Proc. Int. Conf. Radiation Effects in Breeder Reactor Structural Materials, Scottsdale, The Metallurgical Society of AIME, New York, p.53-63 (1977).
- 10) A. Fissolo, R. Cauvin et al. : "Influence of Swelling on Irradiated CW Titanium Modified 316 Embrittlement," Effects of Radiation on Materials : 14th Int. Symp., ASTM STP 1046 Vol. II, p.700-713 (1990).
- 11) 吉武庸光, 大森 雄 他 : "「もんじゅ」型燃料集合体(MFA-1, 2)被覆管の急速加熱破裂挙動評価", JNC TN9400 2000-095 (2000).