

照射誘起応力腐食割れに対する材料特性変化の影響

Effects of Material Property Changes on Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking

中野 守人 (Morihito Nakano)* 福谷 耕司 (Koji Fukuya)* 藤井 克彦 (Katsuhiko Fujii)*

要約 照射ステンレス鋼, 照射後焼鈍したステンレス鋼および照射後変形加工したステンレス鋼に関して, PWR炉水環境下での照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 感受性とマイクロ組織およびマイクロ化学の照射誘起材料変化を調べた. PWRにて290~320°Cで $1 \sim 8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$)まで高照射されたステンレス鋼の降伏応力と粒界偏析量は高く, 高いIASCC感受性を示した. 高照射ステンレス鋼の照射後焼鈍により, IASCC感受性は粒界破面率89% (未焼鈍) から8% (550°C)へ有意な回復を示した. 一方, 硬さはHv375 (400°C) からHv315 (550°C)まで回復していたが, 粒界偏析の明らかな回復は観察されなかった. 材料試験炉 (JMTR) にて照射温度<400°Cで $5.3 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$)まで照射されたステンレス鋼は, 高い粒界偏析量であったが, 硬化は小さく, IASCC感受性は示さなかった. JMTR照射ステンレス鋼の照射後変形により, 硬さは増加したが, IASCCは発生しなかった. これらの結果から, 溶存水素を含むPWR 1次系水環境では硬化がIASCC発生の主要因であり, 低歪速度引張試験 (SSRT試験) でのIASCC発生に対する降伏応力のしきい値は約600MPaであることが示唆された.

キーワード 照射誘起応力腐食割れ(IASCC), 硬化, 粒界偏析, PWR, 焼鈍

Abstract Irradiation assisted stress corrosion cracking (IASCC) susceptibility and radiation-induced material changes in microstructure and microchemistry under pressurized water reactor (PWR) environment were examined on irradiated stainless steels (SSs), post-irradiation annealed SSs and post-irradiation deformed SS. The yield stress and grain boundary segregation were considerably high in SSs highly irradiated to $1-8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) in PWR at 290-320°C, resulting in a high IASCC susceptibility. Following post-irradiation annealing of highly irradiated SSs, IASCC susceptibility showed significant recovery from 89% (as-irradiated) to 8% (550°C) of %IGSCC, while the hardness recovered from Hv375 (400°C) to Hv315 (550°C). Apparent recovery of segregation at grain boundaries was not observed. The SSs irradiated to $5.3 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) in the Japan Materials Testing Reactor (JMTR) at <400°C, which had grain boundary segregation and low hardness, showed no IASCC susceptibility. Due to post-irradiation deforming for JMTR irradiated SS, the hardness increased but IASCC did not occur. These results suggested that the hardening would be a key factor for IASCC initiation under PWR hydrogenated water and that a yield stress threshold for IASCC initiation under slow strain rate tensile (SSRT) testing would be about 600MPa.

Keywords irradiation assisted stress corrosion cracking (IASCC), hardening, grain boundary segregation, PWR, annealing

1. はじめに

照射誘起応力腐食割れ (IASCC) は, 軽水炉の炉内構造物に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼の照射による材料変化に起因する粒界割れ現象を言う. 従って, IASCCは軽水炉の運転寿命延長に対する重要な工学的関心の一つであり, これまでいくつかのIASCCの総説が出されている^{(1)~(4)}. IASCC感受性への照射量の影響はよく調べられてお

り, BWRのような288°Cの溶存酸素を含む純水環境でのIASCC発生の照射量しきい値は約 $5 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) (約0.7dpa)であることが知られている. 一方, PWRのような290°Cの溶存水素を含む水環境での照射量しきい値は同じ温度で溶存酸素を含む水環境での照射量しきい値の約4倍である. IASCCのメカニズムを理解するためには, IASCC感受性への照射による材料変化の役割を評価することが重要であり, 溶存酸素を含む水環境でのIASCC感受性と照射

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

による材料のマイクロ組織およびマイクロ組成の変化との相関についてよく調べられている⁽²⁾⁽⁴⁾。照射硬化とIASCC感受性との関係については、降伏応力が約500MPaまで増加した時に照射ステンレス鋼はIASCC感受性を持つが、照射方法によっては降伏応力に大きなバラツキが見られ、必ずしも降伏応力とIASCC感受性との相関は見られない。一方、照射誘起偏析とIASCC感受性との関係については、粒界Cr濃度が初期の濃度から1～2wt%減少すると照射ステンレス鋼はIASCC感受性をもつ。溶存酸素を含む水環境での粒界SCCの原因は照射による粒界Cr欠乏であると考えられている。他方、溶存水素を含む水環境でのデータ、例えばIASCC感受性への試験温度⁽⁵⁾や溶存水素濃度の影響^{(6)～(8)}に関するデータは得られているが、照射による材料変化とIASCC感受性の相関に関するデータは極めて少なく⁽⁷⁾⁽⁸⁾、そのメカニズムはわかっていない。

そこで、本研究では異なるマイクロ組織やマイクロ組成をもついくつかの照射ステンレス鋼を用いて機械的特性、照射誘起偏析および溶存水素を含む水環境でのIASCC感受性に関する試験を実施し、機械的特性および粒界化学組成とIASCC感受性の相関を調べることを目的とした。なお、本研究の一部^{(6)～(8)}はこれまでに報告しているが、それらの結果と合わせてIASCC発生への照射誘起材料変化の主要因を議論した。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究では、国内のPWRと材料試験炉（JMTR）で照射された材料を用いて試験を行った。

PWRで照射された材料（PWR照射材）は15%冷間加工された316ステンレス鋼（316CW）でPWRの炉内計装用シンプルチューブから採取したものである。

このPWR照射材の中性子照射量は $1 \sim 8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$)であり、約7～53dpaに相当する。照射時の推定温度は290～320℃であった。また、照射による材料のマイクロ組織およびマイクロ組成の変化である照射硬化と照射誘起偏析を回復させるため、中性子照射量約 $3.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ (25dpa)のPWR照射材を400～550℃で1時間焼鈍した。なお、以下の文中では非焼鈍のPWR照射材を照射316CW、焼鈍したPWR照射材を照射後焼鈍316CWという。

JMTRで照射した材料（JMTR照射材）は304L、316および316Lステンレス鋼で、これらの中性子照射量は $5.3 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) (0.8dpa)、照射時の推定温度は400℃以下であった。なお、硬さのIASCC感受性への影響を評価するために、316Lについては照射後にSSRT試験片ゲージ部に曲げ変形を加えた（以下、照射後変形316Lという）。

PWR照射材とJMTR照射材の化学組成を表1に示す。

2.2 機械的特性試験

中性子照射によるマイクロ組織変化を調べるために、照射316CWについては引張試験を大気中で試験温度320℃、歪み速度約 $1.1 \times 10^{-4} \text{s}$ で実施した。引張試験の試験片寸法を図1に示す。照射後焼鈍316CWとJMTR照射材についてはビッカース硬さ試験を実施した。なお、ビッカース硬さは荷重500g、保持時間15秒で測定した。

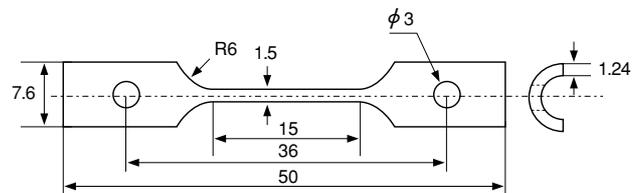


図1 照射316CWの試験片形状(引張試験)

表1 PWR照射材とJMTR照射材の化学組成(wt%)

材料		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
PWR照射材	316CW	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	Balance
	304L	0.014	0.52	0.89	0.027	0.003	8.70	18.12	0.04	Balance
JMTR照射材	316	0.060	0.66	1.02	0.032	0.005	11.06	16.74	2.32	Balance
	316L	0.012	0.02	0.86	0.002	0.001	10.35	16.71	2.05	Balance

2.3 粒界組成分析

中性子照射によるマイクロ組成変化を調べるために、エネルギー分散X線分析装置付きの日立H2000電界放射型透過電子顕微鏡を用いてすべての材料に対して粒界近傍の組成分析を実施した。分析のプローブ径は約1nmである。対象元素はFe, Cr, Ni, Mo, P, Siで、各試料につき3粒界に対して測定した。

2.4 SSRT試験

IASCC感受性を評価するために、320℃のPWR 1次系模擬水(500ppmB+2ppmLi, 30ccH₂/kgH₂O)中でのSSRT試験を実施した。歪み速度は約6.7×10⁻⁸/sである。PWR照射材の試験片は引張試験の試験片と同じ形状である。JMTR照射材の試験寸法を図2に示す。なお、照射後変形316Lについては試験片ゲージ部の中央を図2に示すような形状に曲げを加えてSSRT試験を実施した。本試験のクロスヘッド移動速度は約5.3×10⁻⁷mm/sである。

SSRT試験後、すべての試験片について走査型電子

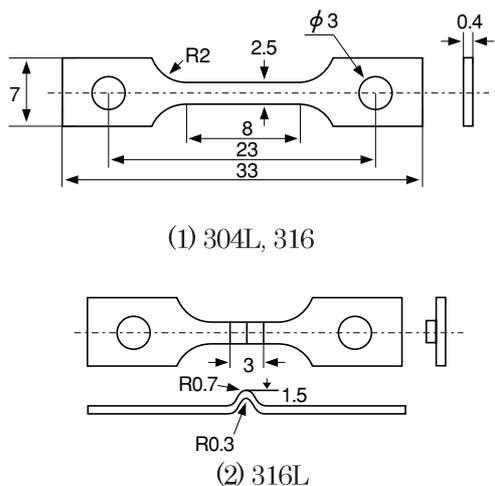


図2 JMTR照射材のSSRT試験片形状

表2 照射後焼鈍316CWの硬さ試験結果

照射量 (n/m ² , E>0.1MeV)	焼鈍温度 (℃)	硬さ (Hv)
3.8x10 ²⁶	未焼鈍	376
	400	375
	450	366
	500	350
	550	315

顕微鏡(SEM)による破断面観察を実施し、破断面の全面積に対する粒界割れ面積の割合(粒界破面率:%IGSCC)でIASCC感受性を評価した。

3. 結果

3.1 機械的特性試験

PWR照射材 照射後焼鈍316CWのビッカース硬さ試験結果を表2に示す。一方、照射316CWの引張試験データは文献7, 8に示されている。照射316CWの照射量と機械的特性の関係を図3に示す。この図が示すように、照射量1×10²⁶n/m²まで降伏応力と伸びは変化し、それ以上の照射量ではともに飽和しており、それぞれ~1000MPaと5%以下となった。図4に照射後焼鈍316CWの硬さと焼鈍温度の関係を

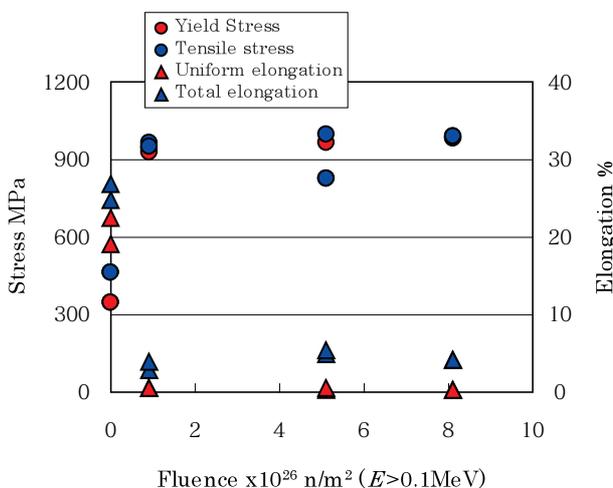


図3 照射316CWの照射量と機械的特性の関係(320℃)

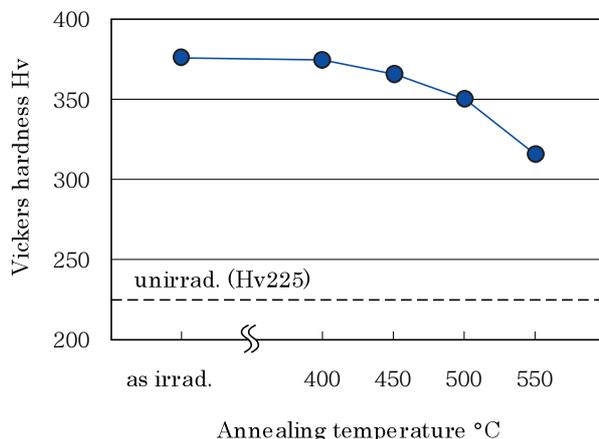


図4 照射後焼鈍316CWの硬さと焼鈍温度の関係

す。硬さは焼鈍温度400℃では回復しなかったが、焼鈍温度450℃以上では焼鈍温度の増加とともに硬さは徐々に減少した。

JMTR照射材 JMTR照射材のピッカース硬さ試験結果を表3に示す。照射による硬さの増加は7～23kgf/mm²と小さく、JMTR照射材では顕著な照射硬化が起こっていなかった。

3.2 粒界組成分析

PWR照射材 表4に照射後焼鈍316CWの粒界組成と偏析量（粒界と粒内の濃度の差）を示す。照射

表3 JMTR照射材の硬さ試験結果

材料	硬さ(Hv)	
	未照射	5.3x10 ²⁴ n/m ²
304L	142	157
316	131	138
316L	122	145

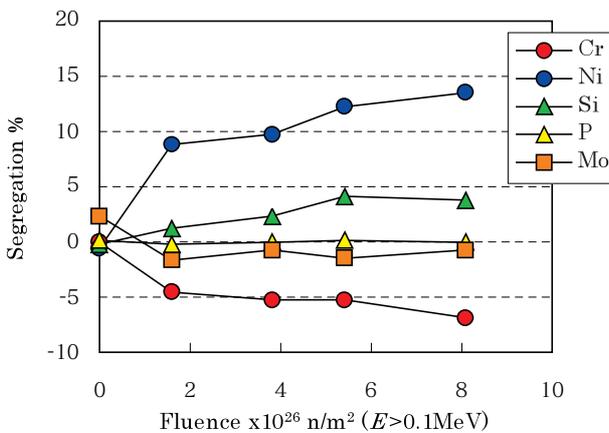


図5 照射316CWの照射量と粒界偏析量の関係

316CWの粒界分析データは文献7, 8に示されている。照射316CWの照射量と粒界偏析量の関係を図5に示す。照射によりCrとMoは欠乏し, NiとSiは濃縮している。Pについては明らかな偏析は観察されなかった。照射316CWの粒界偏析は照射量8×10²⁶n/m²まで続いており, 粒界でのCr, NiおよびSiの濃度はそれぞれ約13, 24および4%であった。

照射後焼鈍316CWの粒界偏析量と焼鈍温度の関係を図6に示す。Cr欠乏とSi濃縮は焼鈍温度550℃までにそれぞれ5.9%から5.0%, 2.2%から1.0%にわずかなのであるが回復していた。他方, Ni濃縮は9.8%から11%に増加する傾向が見られた。このように, 400～550℃×1hの照射後焼鈍では, 有意な粒界偏析の回復は見られなかった。

JMTR照射材 JMTR照射材の粒界組成と偏析量を表5に, 各元素の粒界偏析量を図7に示す。JMTR照射材の照射量はPWR照射材と比較してかなり低い, すべての鋼種で十分なCr欠乏およびNi濃縮とわずかなSi濃縮が観察された。

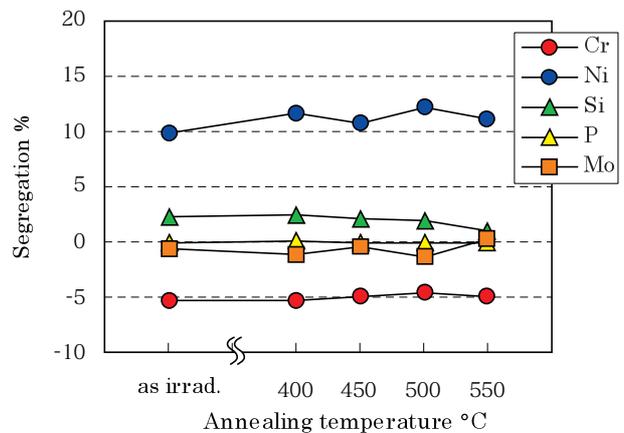


図6 照射後焼鈍316CWの粒界偏析量と焼鈍温度の関係

表4 照射後焼鈍316CWの粒界組成分析結果(wt%)

照射量 (n/m ² , E>0.1MeV)	焼鈍温度 (℃)		Fe	Cr	Ni	Si	P	Mo
3.8x10 ²⁶	未焼鈍	粒界	62.01	13.05	20.80	2.77	0.06	1.32
		偏析量	-5.90	-5.27	9.79	2.23	-0.15	-0.70
	400	粒界	59.32	13.48	23.28	2.84	0.02	1.06
		偏析量	-7.51	-5.27	11.64	2.33	0.02	-1.22
	450	粒界	60.92	14.02	21.64	2.50	0.01	0.91
		偏析量	-7.25	-5.01	10.64	2.06	-0.03	-0.41
	500	粒界	59.53	13.76	23.17	2.25	0.12	1.16
		偏析量	-7.72	-4.70	12.03	1.82	-0.08	-1.36
	550	粒界	59.90	14.12	21.55	1.81	0.00	2.65
		偏析量	-7.39	-4.95	11.08	1.04	-0.08	0.30

偏析量：粒界濃度－粒内濃度, 正の値は濃縮, 負の値は欠乏

3.3 SSRT試験

PWR照射材のSSRT試験結果を表6に、JMTR照射材のSSRT試験結果を文献データ⁽¹³⁾と合わせて表7に示す。PWR照射材とJMTR照射材の破断面の代表的なSEM写真を図8に示す。PWR照射材は粒界とデインプルの破面を示し、粒内破面は観察されなかった。他方、JMTR照射材では粒界破面は見られず、照射後変形316Lでは100%粒内破面を示した。

図9は照射316CWとJMTR照射材の試験温度320℃で溶存水素30ccを含むPWR1次系模擬水中でのIASCC感受性と照射量の関係を文献データ⁽⁵⁾と合わせ

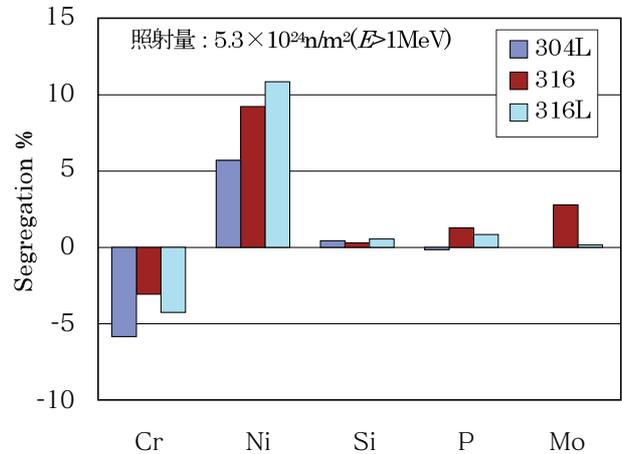


図7 JMTR照射材の粒界偏析量

表5 JMTR照射材の粒界組成分析結果(wt%)

材料	照射量 (n/m ² , E>1MeV)		Fe	Cr	Ni	Si	P	Mo
304L	5.3x10 ²⁴	粒界	70.88	14.00	13.97	1.12	0.03	—
		偏析量	-0.29	-5.85	5.76	0.49	-0.15	—
316	5.3x10 ²⁴	粒界	58.30	17.18	17.95	0.68	1.49	4.40
		偏析量	-10.54	-3.06	9.26	0.23	1.37	2.75
316L	5.3x10 ²⁴	粒界	63.86	14.74	18.88	1.09	0.89	0.53
		偏析量	-8.34	-4.24	10.92	0.60	0.87	0.18

表6 PWR照射材のSSRT試験結果

材料	照射量 (n/m ² , E>0.1MeV)	焼鈍温度 (℃)	破断歪み (%)	最大応力 (MPa)	最大応力時 歪み(%)	粒界破面率 (%)	粒内破面率 (%)	
316CW	9x10 ²⁵	—	4.2	971	3.0	59	0	
		—	2.8	858	2.5	54	0	
	5.3x10 ²⁶	—	2.8	848	2.4	78	0	
		—	4.4	966	3.9	94	0	
	8.1x10 ²⁶	—	4.4	966	3.9	94	0	
		—	2.3	876	2.1	81	0	
		3.8x10 ²⁶	未焼鈍	3.3	937	2.4	89	0
			400	2.1	508	1.9	63	0
450	2.6		660	2.2	50	0		
500	3.3		806	2.7	30	0		
550	8.4	865	6.1	8	0			

表7 JMTR照射材のSSRT試験結果(文献データ⁽¹³⁾含む)

材料	溶存水素 (ccH ₂ /kgH ₂ O)	変形	破断歪み (%)	最大応力 (MPa)	最大応力時 歪み(%)	粒界破面率 (%)	粒内破面率 (%)
304L	30	無	34.1	562	29.8	0	14
316	30	無	49.4	520	44.8	0	20
316L	30	有	20.6	540	19.0	0	100
304L ⁽¹³⁾	32ppm DO*	無	14.6	330	—	91	0
316 ⁽¹³⁾	32ppm DO*	無	9.1	477	—	60	0
316L ⁽¹³⁾	32ppm DO*	無	6.8	367	—	76	11

* : 288℃ 純水中

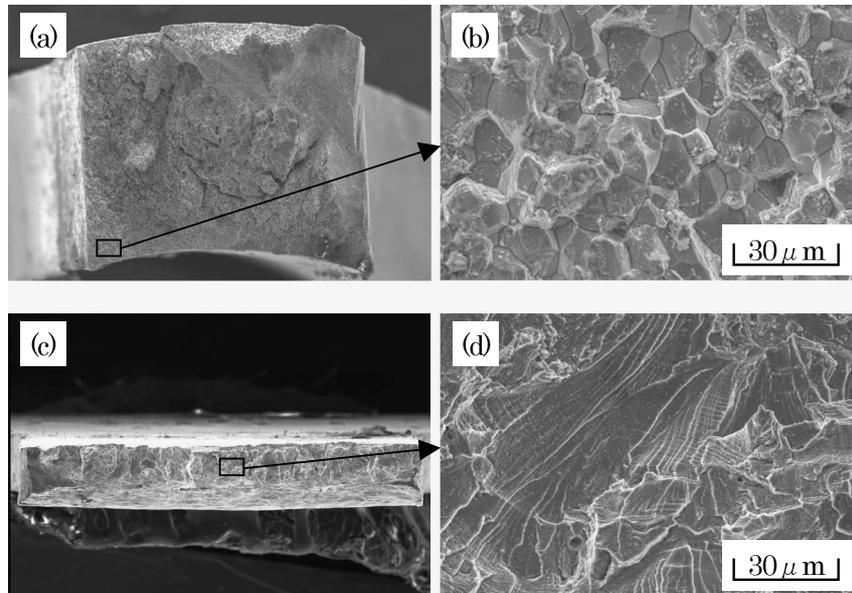


図8 破断面SEM写真 (a)照射後焼鈍316CW(400°C×1h) (b)(a)の拡大写真
(c)照射後変形316L (d)(c)の拡大写真

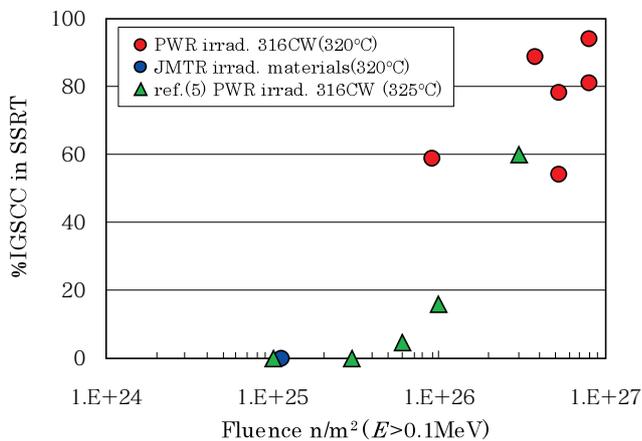


図9 照射316CWとJMTR照射材の
粒界破面率と照射量の関係

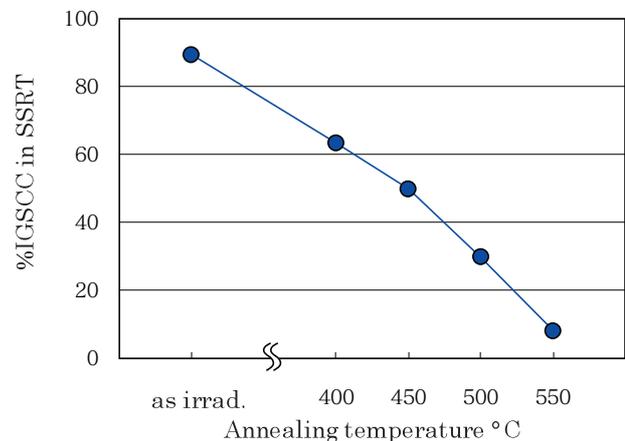


図10 照射後焼鈍316CWの
粒界破面率と焼鈍温度の関係

て示す。照射304Lおよび316と照射後変形316LではIASCCに対する感受性は見られなかったが、照射316CWは高い感受性を示し、照射量 $8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ では粒界破面率90%以上であった。試験温度320°CのSSRT試験における316ステンレス鋼のIASCC発生に対する照射量しきい値はおおよそ $5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ と考えられる。同じ水環境での照射後焼鈍316CWに対するIASCC感受性と焼鈍温度の関係を図10に示す。未焼鈍の照射316CWの粒界破面率は89%と高く、IASCC感受性は焼鈍温度の増加とともに単調に減少し、焼鈍温度550°Cで8%であった。

4. 考察

4.1 溶存水素を含むPWR水中でのIASCC発生と照射硬化および照射誘起偏析の関連

溶存水素を含むPWR水中でのIASCC感受性と機械的特性および粒界組成との相関を、試験温度320又は325°Cの溶存水素30ccを含むPWR 1次系模擬水中のIASCC感受性に関する本研究で得られたデータと文献データ⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を用いて検討した。IASCC感受性と降伏応力の関係を図11に、IASCC感受性と粒界Cr濃度および粒界Ni濃度の関係を図12に示す。照射後焼鈍316CWの降伏応力は照射ステンレス鋼の降伏応力と

硬さの関係⁽¹²⁾を用いて硬さから推定した。また、照射304Lと316の降伏応力はSSRT試験での応力-歪み曲線から推定した。なお、照射後変形316Lに関しては、同じ方法で未照射材を変形加工した試験片を用いて、照射後変形316L試験片がSSRT試験で破断した位置と同じ位置で硬さを測定し、その最大値~260を用いた。

図11に見られるように、高い降伏応力をもつ照射316CWは高いIASCC感受性を示し、照射後焼鈍316CWでは降伏応力の減少とともにIASCC感受性は低下した。一方、降伏応力の低いJMTR照射材ではIGSCC感受性を示さなかった。このように、溶存水素を含むPWR水中でのIASCC感受性は降伏応力と相関があることを示している。

図12では、照射316CWのように粒界Cr濃度が低いとより高いIASCC感受性を示すが、照射後焼鈍316CWでは低い粒界Cr濃度であるにも関わらず、IASCC感受性は大きく減少した。JMTR照射材の粒界Cr濃度は、溶存酸素を含むBWR水でのIASCC発生に

対するしきい値と考えられる16wt%より低い、すべてのステンレス鋼でIASCCの感受性は見られなかった。一方、粒界破面率と粒界Ni濃度の関係については、粒界Ni濃度のバラツキが大きく、IASCC感受性と粒界Ni濃度の相関は見られなかった。

図13は降伏応力-粒界Cr濃度マップにおける溶存水素を含むPWR水環境下でのIASCC発生範囲を示す。図中の数字はSSRT試験での粒界破面率を示す。この図は、IASCC発生には粒界Cr濃度は関係せず、降伏応力の高い材料ほどより高いIASCC感受性を示しており、SSRT試験でのIASCC発生に対する降伏応力のしきい値は約600MPaと推察される。図14に試験温度約300℃、歪み速度 $1.7\sim 4.0\times 10^{-4}/s$ での300系ステンレス鋼の降伏応力と一様伸びとの関係を示す^{(12)~(14)}。この図では、降伏応力が約600MPaに増加すると一様伸びがほとんどなくなり、照射材では照射誘起欠陥に起因する転位チャンネルが顕著になり、巨視的には加工硬化しなくなることを示している。従って、動的歪み条件下でのIASCC発生に対する降伏応力しきい値である600MPaは照射ステンレス鋼における加工硬化の喪失に対するしきい値に対応しているものと思われる。金島ほか⁽¹⁵⁾は、非照射の非鋭敏化ステンレス鋼を用いて360℃のPWR 1次系模擬水中(500ppmB+2ppmLi, 30ccH₂/kgH₂O)でのSSRT試験を実施し、材料の硬化が上昇するとともに非鋭敏化ステンレス鋼のSCC感受性も増加する可能性があることを報告している。これはSCC感受性が粒界組成変化に関係なく、硬化に依存していることを示唆している。これらの事実から溶存水素を含むPWR水中では硬化がIASCC発生には必要であると考えられる。

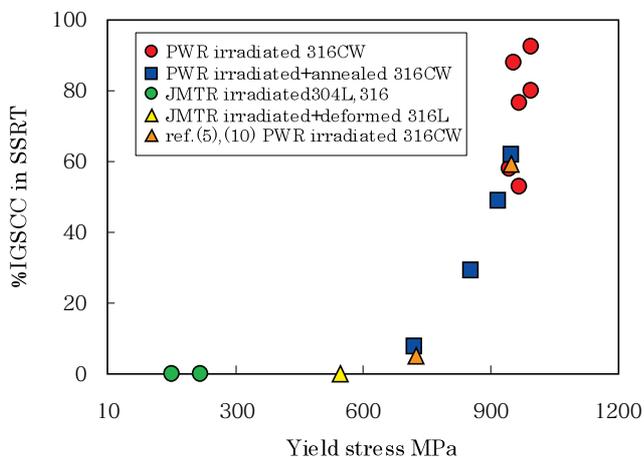


図11 粒界破面率と降伏応力の関係

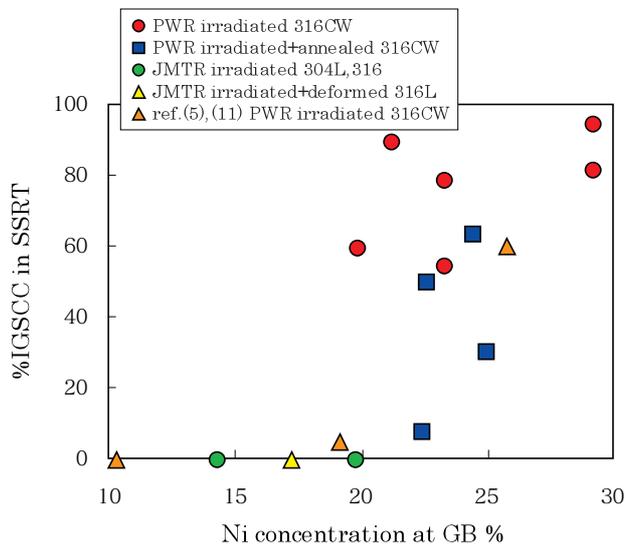
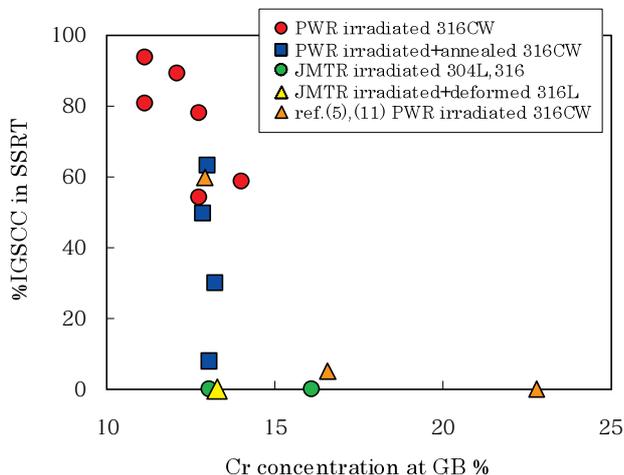


図12 粒界破面率と粒界Cr濃度・粒界Ni濃度の関係

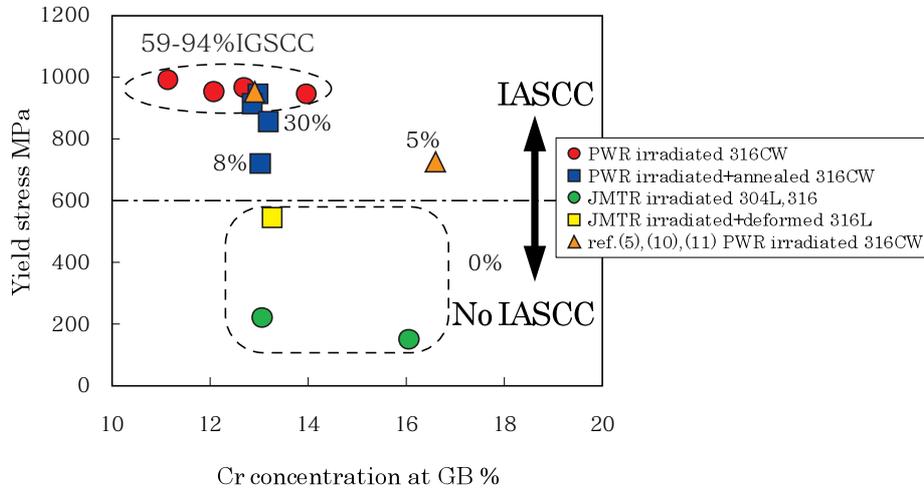


図13 降伏応力-粒界Cr濃度マップにおけるIASCC発生領域

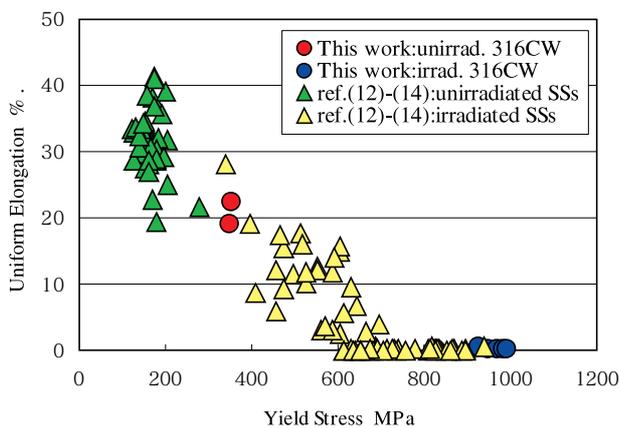


図14 300系ステンレス鋼の降伏応力と一様伸びの関係

4.2 溶存酸素を含むBWR水中でのIASCC発生と照射硬化および照射誘起偏析の関連

表7には本研究データと合わせて、同じJMTR照射材を用いて試験温度288℃で32ppmDOを含むBWR水環境下で実施したSSRT試験の文献データを示している。JMTR照射材は溶存水素を含むPWR水では感受性を示さなかったが、溶存酸素を含むBWR水では高い感受性を示している。このことは、溶存酸素を含むBWR水でのIASCC発生は照射誘起硬化には依存しないことを示している。JMTR照射材の粒界Cr濃度は16wt%以下であり、上述のように溶存酸素を含むBWR水環境では粒界Cr濃度がIASCC発生に対する重要な要因であると考えられる。

5. まとめ

異なる機械的特性と照射誘起偏析をもつ照射ステンレス鋼を用いて溶存水素を含むPWR水環境でのIASCC感受性を調べた。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) PWRにて照射温度290～320℃で $1 \sim 8 \times 10^{26}$ n/m² ($E > 0.1$ MeV) まで高照射された316CWは降伏応力と粒界偏析量が高く、高いIASCC感受性を示した。
- (2) 高照射316CWを照射後焼鈍することにより、IASCC感受性は粒界破面率89%（未焼鈍）から8%（照射条件550℃×1h）へ有意な回復を示した。一方、硬さは焼鈍温度400℃では回復せず、450℃以上では焼鈍温度の上昇とともに徐々に回復したが、粒界偏析では明らかな回復は観察されなかった。
- (3) JMTRにて照射温度<400℃で 5.3×10^{24} n/m² ($E > 1$ MeV) まで照射されたステンレス鋼は粒界偏析は生じているが、硬化は小さく、IASCC感受性は示さなかった。
- (4) 降伏応力および粒界Cr濃度とIASCC感受性の相関から、溶存水素を含むPWR水環境では硬化がIASCC発生に対して重要な要因であり、SSRT試験でのIASCC発生に対する降伏応力のしきい値は約600MPaであると推察される。

謝辞

本研究の試験に御協力いただきました日本核燃料開発(株)の関係者の方々に感謝の意を表します。

文献

- (1) P.Scott, *Journal of Nuclear Materials*, 211 (1994), p.101.
- (2) G.S.Was, S.M.Brueemmer, *Journal of Nuclear Materials*, 216 (1994), p.326.
- (3) H.M.Chung, W.E.Ruther, J.E.Saneki, A.Hins, N.L.Zaluzec, T.F.Kassner, *Journal of Nuclear Materials*, 239 (1996), p.61.
- (4) S.M.Brueemmer, E.P.Simonen, P.M.Scott, P.L.Andresen, G.S.Was, J.L.Nelson, *Journal of Nuclear Materials*, 274 (1999), p.299.
- (5) I.Suzuki, M.Koyama, H.Kanasaki, H.Mimaki, M.Akiyama, T.Okubo, Y.Mishima, T.R.Mager, *Proc. of 5th International Conference on Nuclear Engineering*, Vol. 5 (1996), p.205.
- (6) G.Furutani, N.Nakajima, T.Konishi, M.Kodama, *Journal of Nuclear Materials*, 288 (2001), p.179.
- (7) K.Fukuya, K.Fujii, M.Nakano, N.Nakajima, M.Kodama, *Proc. of 10th Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, NACE, 2001.
- (8) 中野守人, 福谷耕司, 藤井克彦, 中島宣雄, 古谷元, *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, Vol.8 2001, p.134-142.
- (9) M.Kodama, K.Fukuya, H.Kayano, *ASTM STP1175*, 1993, p.889.
- (10) 米澤利夫, 有岡孝司, 金崎宏, 藤本浩二, 安食和英, 松岡考典, 浦田茂, 水田仁, *日本原子力学会誌*, 42 [3], 212 (2000).
- (11) J.F.Williams, P.Spellward, J.Walmsley, T.R.Mager, M.Koyama, H.Mimaki, I.Suzuki, *Proc. of 8 th Int. Symp. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, ANS, 1997, p.725.
- (12) K.Fukuya, S.Shima, K.Nakata, S.Kasahara, A.J.Jacobs, G.P.Wozadlo, S.Suzuki, M.Kitamura, *Proc. of 6 th Int. Symp. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, TMS, 1993, p.565.
- (13) M.Kodama, S.Nishimura, Y.Tanaka, S.Suzuki, K.Fukuya, S.Shima, K.Nakata, T.Kato, *Proc. of 8 th Int. Symp. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, ANS, 1997, p.831.
- (14) A.J.Jacobs, G.P.Wozadlo, K.Nakata, T.Yoshida, I.Masaoka, *Proc. of 3 rd Int. Symp. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, PA, 1988, p.673.
- (15) Y.Kaneshima, N.Totsuka, T.Yamada, N.Nakajima, K.Negishi, *Proc. of 10th Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, NACE, 2001.