

690 合金冷間加工材のPWSCCに及ぼす水素ガスの影響

Influence of Hydrogen Gas on PWSCC of Cold Worked Alloy 690

寺地 巧 (Takumi Terachi) *¹ 山田 卓陽 (Takuyo Yamada) *¹
岡本 マキエ (Makie Okamoto) *¹ 有岡 孝司 (Koji Arioka) *¹

要約 原子力発電プラントの更なる安全性・信頼性の向上には、690合金のPWSCC機構解明が重要である。ニッケル基合金のPWSCCは水素を含む還元性環境で生じるため、機構への水素の関与が示唆されてきた。本研究では、水素ガス導入時の材料変形挙動を評価し、PWSCC機構への水素の役割を検討した。その結果、水素ガス中の試験によりPWR一次系相当の低い水素分圧(25 kPa)、および温度(320℃)の条件でも、水素が690合金(10～30%CW: cold work)のき裂先端を変形させることが明らかとなった。これは水素導入により高応力場で転位の移動が促進され、変形が生じた結果と考えられる。水素による転位の移動を助長する効果は、同時に粒界への空孔拡散を誘起する可能性があり、690合金のPWSCC発生過程として提案されている粒界キャビティの生成を促すと推察される。そのため、材料の長期健全性を評価する際には水素の影響を考慮することが重要と考えられる。

キーワード 690合金, PWSCC, 水素ガス, 冷間加工度

Abstract For the further improvement of the safety and integrity of nuclear power plants, it is important to elucidate the PWSCC mechanism of Alloy 690. Since the PWSCC of nickel based alloy occurs in a reducing environment containing dissolved hydrogen, the involvement of hydrogen in the mechanism has been proposed. Material deformation behavior with hydrogen gas was evaluated and the role of hydrogen in the PWSCC mechanism was examined. The results indicated that hydrogen enhances the deformation at the crack tip of Alloy 690(10 to 30% CW: cold work) even under the condition of low hydrogen partial pressure(25 kPa) and temperature(320 °C) corresponding to PWR primary water. The enhancement of dislocation mobility by hydrogen accounts for the deformation at the condition of a high stress field. Therefore, the effect of accelerating the migration of dislocations by hydrogen enhances the diffusion of vacancies to the grain boundaries, which is thought to induce the generation of grain boundary cavities which has been previously proposed as the PWSCC initiation process in Alloy 690. Therefore, it is important to consider the influence of hydrogen when evaluating the integrity of materials for long term operation.

Keywords Alloy 690, PWSCC, hydrogen gas, cold work

1. はじめに

690合金は加圧水型軽水炉 (pressurized water reactor: PWR) 一次冷却水中での応力腐食割れ (primary water stress corrosion cracking: PWSCC) の対策材として、蒸気発生器の伝熱管や圧力容器の管台部等の重要な部位で使用されている。本材料は優れた耐PWSCC性を有し、現在までのところ原子力発電プラントでのPWSCC発生は報

告されていない。その一方で、強い冷間加工を施した場合に、PWSCC進展感受性を示すことが報告されている^{(1)~(3)}。原子力発電プラントは40年から60年の供用期間が想定されており、更なる安全性及び信頼性の向上を果たすには、構造材についての劣化機構を解明することが重要と考えられる。INSSでは、材料劣化に関する研究を長期に亘り継続実施し、ステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ (IASCC) や、弁棒等に用いられるSUS630合金の熱時効な

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

ど、様々な手法により幅広い検討に取り組むことで、SCC機構の体系的な理解に努めている。

690合金のPWSCC発生に対しては、粒界キャビティが重要な役割を果たす可能性が報告されている^{(4),(5)}。粒界キャビティに関する議論はCANDU炉（重水減速重水冷却圧力管型炉）におけるSCCおよびクリープき裂の発生を契機に、690合金に対して検討を深化させたものがある。炉系や材料が異なる事象について深く分析評価することで、従来評価されてこなかった現象の重要性を見出した結果である⁽⁶⁾。この粒界キャビティに関する議論は、長期の供用期間中に空孔が集積し、PWSCCを生じさせる事を懸念したものだが、軽水炉程度の温度域で十分な粒界キャビティが成長するには、空孔移動の加速因子が必要である。具体的な加速因子としては、冷間加工により導入される空孔に加え、水素の影響でらせん転位の移動に伴い生成する空孔の存在が考えられる⁽⁷⁾。水素がらせん転位の移動を加速することは、透過型電子顕微鏡内で環境セルに水素を添加した時に転位の移動が加速される事象として直接的な観察例が有る⁽⁸⁾。また、主に鉄鋼材料の水素脆化研究の成果として、多くの材料が水素の影響により軟化や硬化することが報告されているが⁽⁹⁾、PWRプラントの実機環境で同種の加速効果が生じるかどうかは確認されていない。

材料特性に水素が影響する事象の一つとしては、水素助長局所塑性（Hydrogen enhanced localized plasticity: HELP）が知られており、SCC機構との関係についても議論されてきた^{(10),(11)}。Paraventiら⁽¹²⁾はNi-16Cr-9Fe合金を用い、アルゴンガス、水素ガスおよびPWR環境中でクリープ試験を行い、定常クリープ速度が水素ガス中とPWR環境中で加速することを報告している。690合金に対しては、Ariokaら⁽⁷⁾が高温ガス中試験において、環境をアルゴンガスから水素ガスに切り替えた時に材料が短期間に変形することを確認している。これらの知見は、固体中に吸収された水素が変形を加速することを示し、その過程で転位や空孔の拡散が助長されることを示唆している。しかし、Ariokaらの報告は試験温度が450℃と高く水素ガス分圧も0.1

MPa程度とPWR一次系水中より高い条件であったため、実機相当条件で同様の事象が起こり得るか更に検証が必要である。

水素の役割については、粒界キャビティ生成の加速因子以外にも水素型PWSCC機構に関する挙動が注目されてきた^{(13)~(15)}。これは、PWSCCがカソード側の定電位試験で加速されることを受けて⁽¹³⁾、比較的速い進展速度を示す600合金のPWSCC機構の対象として議論されてきたものである。

本研究の狙いは、690合金に将来PWSCCが生じる可能性を明らかにし、適切に評価されたリスクを保全に反映することにある。将来起こり得るPWSCCのリスクを評価するためには、機構解明が必要であり、これまでも取組みの成果を本誌に寄稿してきた^{(16),(17)}。本稿は690合金のPWSCC発生研究として実施している取組みの一部を紹介するもので、特に水素の影響について検討した成果である。具体的には、固体中に吸収された水素が690合金のPWSCCに及ぼす影響を検討するために、PWR一次系水中相当の水素分圧条件で高温ガス中試験を行い、水素ガス導入時の変形挙動を評価した。加えて、PWSCCへの影響因子として知られる温度、加工度、材料をパラメータとして水素ガスの影響を調べた。また、ガス中試験のデータを解釈するために、PWR一次系模擬水中で溶存ガスをアルゴンガスから水素ガスに切り替え、ガス置換の影響を評価した。これにより、690合金がPWSCCを生じさせるリスクと水素の関係について検討を行った。

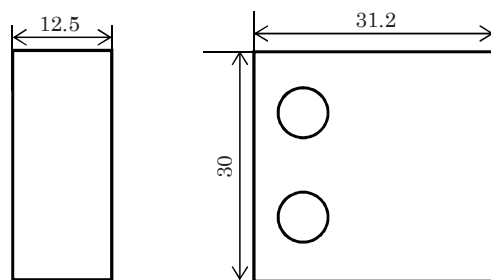
2. 実験方法

(1) 供試材および試験片

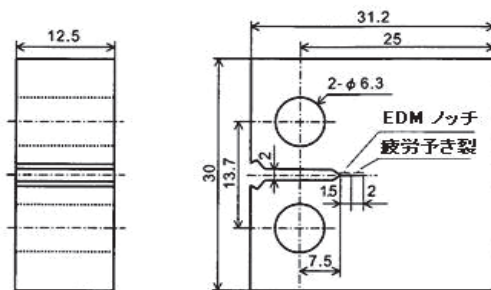
試験に供した690合金および600合金の組成を表1に示す。690合金は溶体化熱処理+TT処理（700℃×15 h）、600合金は1050℃×30 minの熱処理を施した材料である。高温ガス中試験の試験片形状を図1に示す。図1(a)は治具の変形量を評価するために用いた予備試験用の試験片で、0.5T CT（compact tension）試験片からき裂部を除いた形状とした。図1(b)はASTM(E399)

表1 試験材の化学組成

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Cu
690合金	0.019	0.30	0.32	0.009	0.0006	59.25	30.18	9.42	0.04
600合金	0.060	0.33	0.35	0.006	<0.001	76.26	16.02	6.94	0.03



(a) 予備試験用試験片



(b) 0.5T CT 試験片

図1 高温ガス中試験の試験片形状

に準拠した0.5T CT試験片である。試験片は圧延後にき裂進展速度が速い方位として知られるT-L方位にて切り出し製作した。

(2) 高温ガス中試験

使用装置は定荷重を付与できる常圧の一般的なクリープ試験機で、容器の内容積9.2 L、内部治具の容積が0.9 Lの装置である。試験に先立ち、試験治具周りの影響による変形量を評価するために、図1(a)の試験片を用い320℃でガス置換時の変形を検証した。その他の試験は、図1(b)形状の試験片に応力拡大係数 $K=40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の定荷重を付与することで行った。試験マトリックスを表2に示す。試験開始時の環境は250℃～360℃の常圧アルゴンガスとし、一次クリープが終息した約140～167時間後に、25 kPa程度の水素分圧（PWR一次系水中溶存水素濃度相当の分圧）になるよう調整した混合ガス（水素25%＋アルゴン75%）に切り替えた。この時のガス流量は4.8 L/hであった。開口変位は恒温容器の外側に設置した最低読み値0.001 mmの変位計にて評価した。ガス中の試験は材料（690合金、600合金）、冷間加工（10、20、30%）、試験温度（250、320、360℃）をパラメータとし、ガス切り替えの影響を検討した。

表2 試験マトリックス

分類	材料	冷間加工度 (%)	温度 (℃)	応力 (MPa√m)	備考
ガス環境	690 合金	20	320	—	予備試験
	600 合金				標準状態
					600 合金
	690 合金		250	40	温度依存性
			360		
		10	320		
30					
PWR 模擬水	20			水環境	

(3) PWR一次系模擬水中における水素ガス変更試験

ガス中試験と同様の試験をPWR一次系模擬水中で行った。試験水は標準的なPWR一次系模擬水として、320℃のほう酸、水酸化リチウム水（500ppmB + 2ppmLi）を用い、図1(b)の試験片形状に加工した690合金（20%CW）へ $K=40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の定荷重を付与した。アルゴン脱気水の条件で試験を開始後、140時間経過時に溶存水素30 cc・STP/kg- H_2O 条件に切り替えた。この時、試験水の平均流量は約3 L/h、圧力容器の容量は1.4 Lであった。その後、温度条件および溶存ガスの切り替えを複数回行い、環境変化に伴う開口変位の状況を評価した。

(4) 試験片の観察

試験後のサンプルは、き裂の側面を走査型電子顕微鏡（SEM）により観察した後、放電加工機にて切断し、き裂断面の観察に供した。また、一部の断面については電子後方散乱回折（EBSD）による結晶方位差分布の測定を行った。

3. 結果

3.1 予備試験

き裂を導入していない試験片（図1(a)）を用いて行った320℃の高温ガス中試験の結果を図2に示す。試験開始2.4時間後に水素混合ガスに切り替えたところ、3 μm 程度の変位の増加が観察された。試験片にはき裂に相当する応力集中部が存在しない

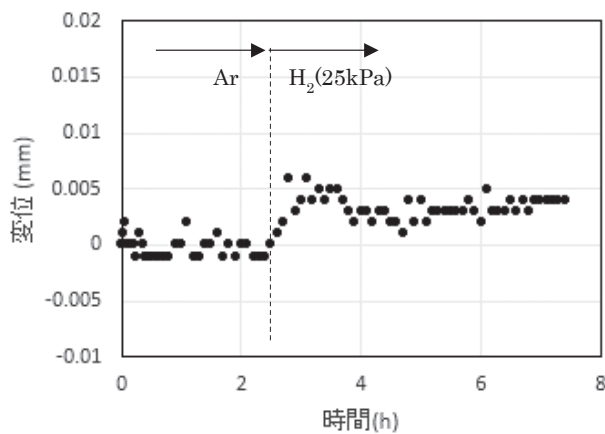


図2 予備試験片による高温ガス中試験結果

ことから、変形はき裂以外の要因で生じたと考えられる。そのため、後述する試験において $3\text{ }\mu\text{m}$ 以上の変形が観察されたものは、予き裂先端や応力集中部で生じた変形と推察される。

3.2 高温ガス中試験

690合金(20%CW)材の 320°C で実施した高温ガス中試験の結果を図3に示す。アルゴンガスから水素ガスに切り替えたタイミングで、 $8\text{ }\mu\text{m}$ 程度急激に変位が増加していることがわかる。大きな変形は約4時間程度かけて生じ、その後当初の定常クリープ相当の変形速度に戻ったため、試験を終了し試験片を観察した。試験後のき裂断面について試験片の側面から約 1 mm ピッチで観察したSEM像の代表例を図4に示す。試験片の側面ではき裂が開口し、先端には微細な割れが多数存在することがわかる。図4(e)に示した高温ガス中試験に用いる前の未使

用材の疲労予き裂先端にも同様の微細き裂が存在することから、微細き裂は試験前から存在していたものが開口した結果と考えられる。

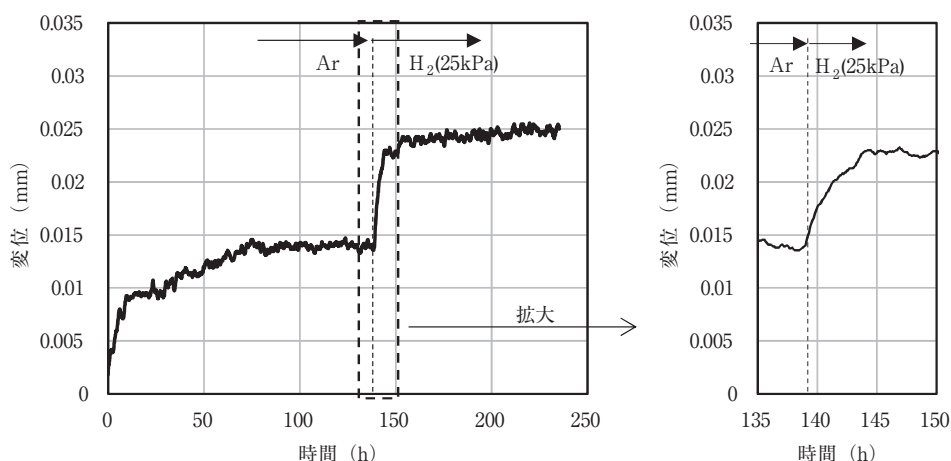
一方、試験片内部の断面はき裂が開口した状況を呈し、先端部は明確に鈍化していた。試験片中央に位置する側面から 6.2 mm のき裂は分岐き裂を形成していたが、 1 mm 間隔でスライスし断面観察した他の5つのき裂先端は単一き裂で大きく開口していた(例:図4(b),(c))。そのため、試験中に生じた変形はき裂が進展したものではなく、き裂先端が局所的に変形することで変位が観察されたものと考えられる。なお、開口したき裂内に破砕物形状の物質が認められるが、開口および物質の状況から断面サンプル加工後の研磨時に混入したものと考えられる。

3.3 変形量への試験温度の影響

690合金(20%CW)のガス中試験への温度の影響を図5に示す。1次クリープは 250°C で小さい傾向を示したが、水素ガス導入に伴う変形量は約 $7\text{ }\mu\text{m}$ (250°C , 360°C)および約 $8\text{ }\mu\text{m}$ (320°C)と評価され、温度による明確な差は確認されなかった。何れの試験でも、水素導入時の変形は水素導入直後から数時間継続し、その後定常クリープ相当の変形に戻った。

3.4 変形量への材料、冷間加工度の影響

PWSCC感受性の高い600合金(20%CW)を比較材として試験した結果を図6に示す。水素ガス導入

図3 690合金(20%CW)材、 320°C ガス中試験での変位の時間変化

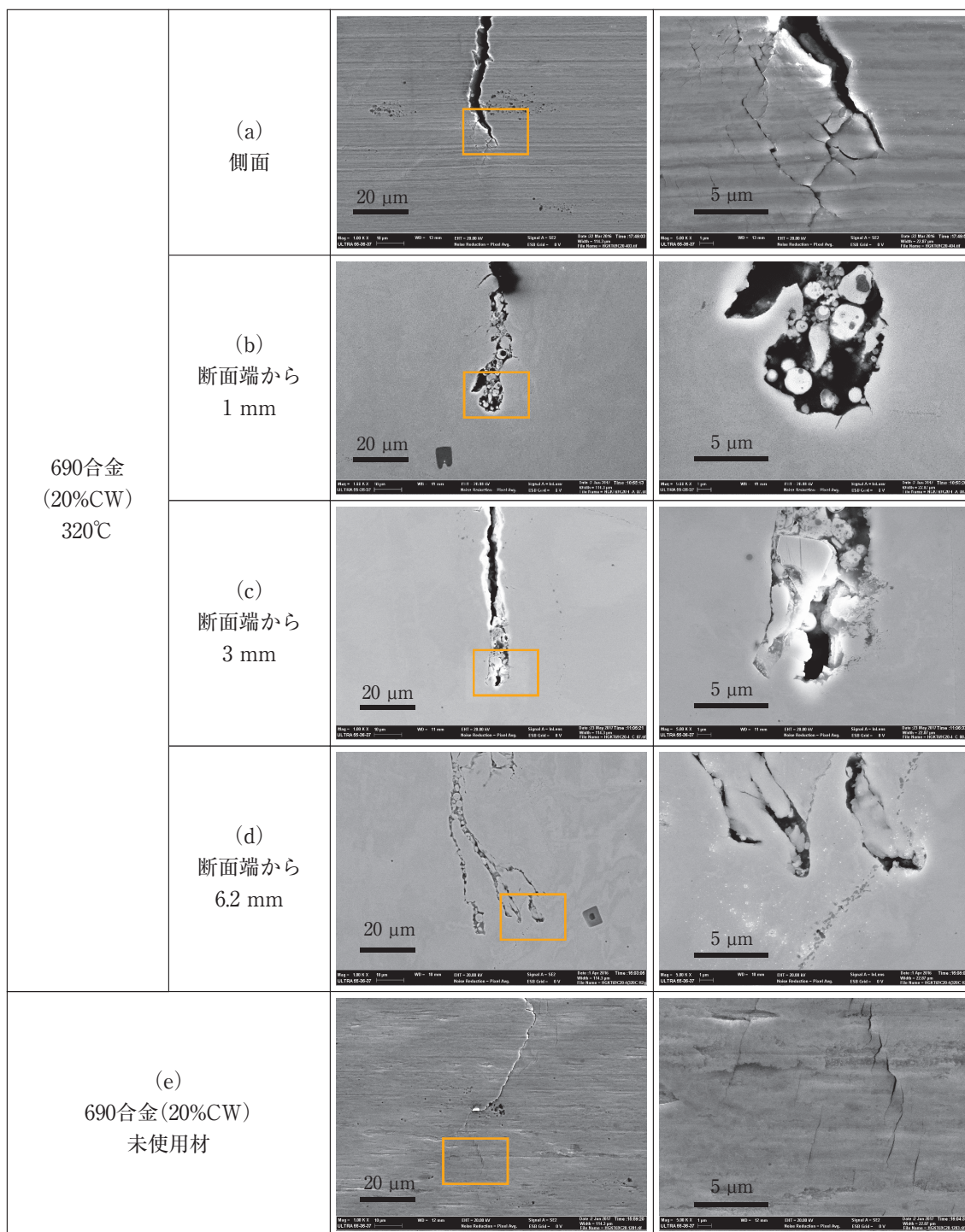


図4 690合金(20%CW)のガス中試験後の試験片SEM像

時の変形が直接的にSCCの支配因子であるとするれば、600合金(20%CW)で大きな変形が認められると考えられたが、変形量は約8 μm であり、690合金(20%CW)との差異は認められなかった。

690合金の冷間加工度をパラメータとして試験した結果についても、図7のとおり加工度依存性は確認されなかった。水素導入時の短期間の変

形は10%CW材で約6 μm 、20%CW材で約8 μm 、30%CW材で約5 μm であった。

3.5 PWR一次系模擬水中での変形量

PWR一次系模擬水中で水素ガスの影響評価を試みた結果を図8に示す。試験はアルゴン脱気条件で

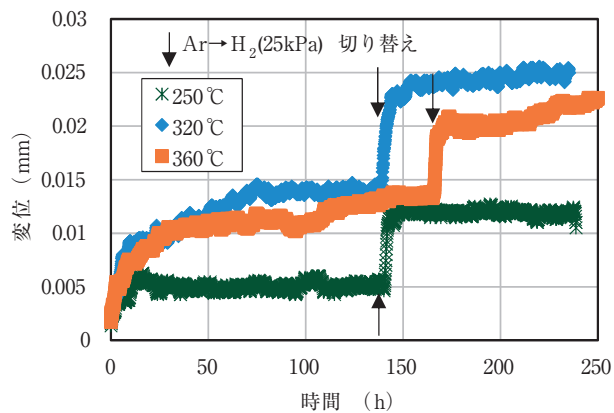


図5 690合金 (20%CW), ガス中試験への温度の影響

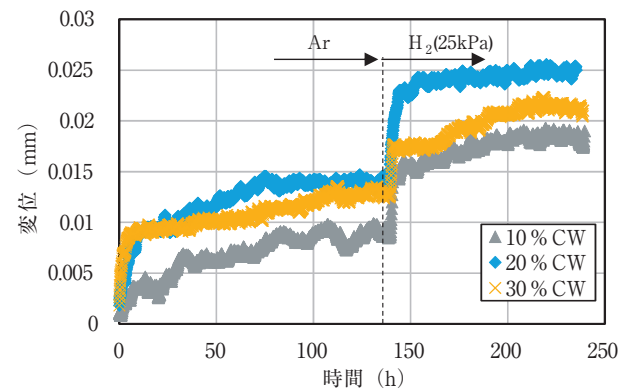


図7 690合金 (10%CW, 20%CW, 30%CW) の320℃ガス中試験

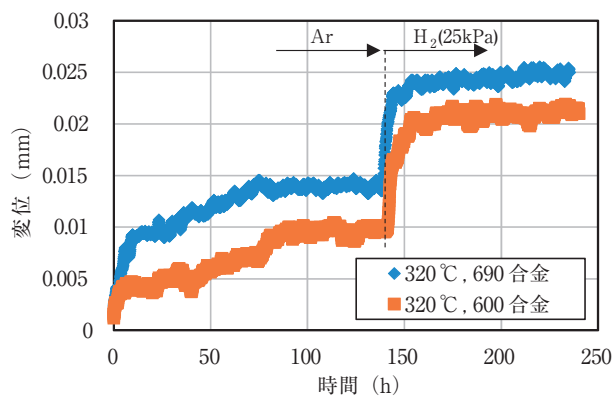


図6 600合金 (20%CW) および690合金 (20%CW) の320℃ガス中試験結果

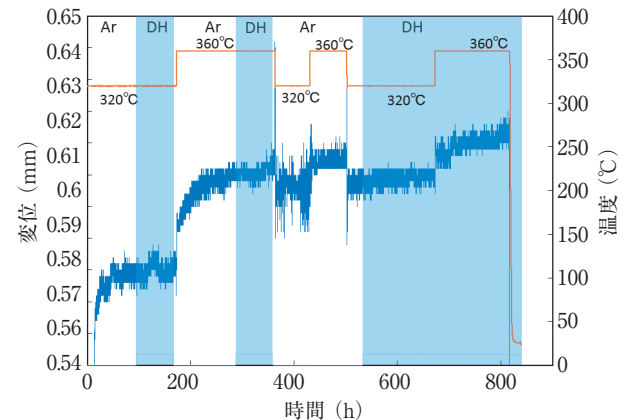


図8 690合金 (20%CW) PWR1次系模擬水中試験へのガス置換の影響

開始し、1次クリープが終息した時点で水質調整槽のカバーガスを溶存水素に切り替えた。これにより腐食試験装置に導入される環境水中の溶存水素濃度を30 cc・STP/kg-H₂Oの条件に変更した。試験中は320℃と360℃の温度条件で複数回、アルゴン脱気から溶存水素環境への変更を行ったが、ガス置換に影響を受けたと思われる有意な変形は確認されなかった。

3.6 試験片側面と断面の観察結果

き裂側面のSEM観察結果の一部データを図9に示す。材料と環境の異なる条件で試験を実施したが、図4に示した690合金 (20%CW) 320℃の試験結果と同様に、何れの試験片もき裂が開口し、試験毎の差は確認されなかった。断面も同様に観察したが、定性的な材料および環境による違いを認めることはできなかった。

EBSDによりき裂断面における歪みの状況を評価した結果を図10に示す。PWSCCのき裂先端は粒界

を伝播するが、観察された高温ガス中試験後の断面はき裂先端が粒内に位置し、鈍化した状態となっていた。歪み量の指標となるKAM (kernel average misorientation) 像では、き裂先端において歪みが増加している様相も認められたが、水素ガス中で実施した図10(a)と水中で実施した図10(d)の間に明瞭な違いは確認されなかった。き裂先端近傍における粒界周辺の歪みの状態や粒界キャビティの状況についても、SEM観察およびEBSDの分析では、ガス中と水中で大きな違いは観察されなかった。ただし、分岐き裂の存在や粒界との位置、すべり方位等の影響が強く出現することで、定量的な試験材および環境による影響を把握できなかった可能性がある。

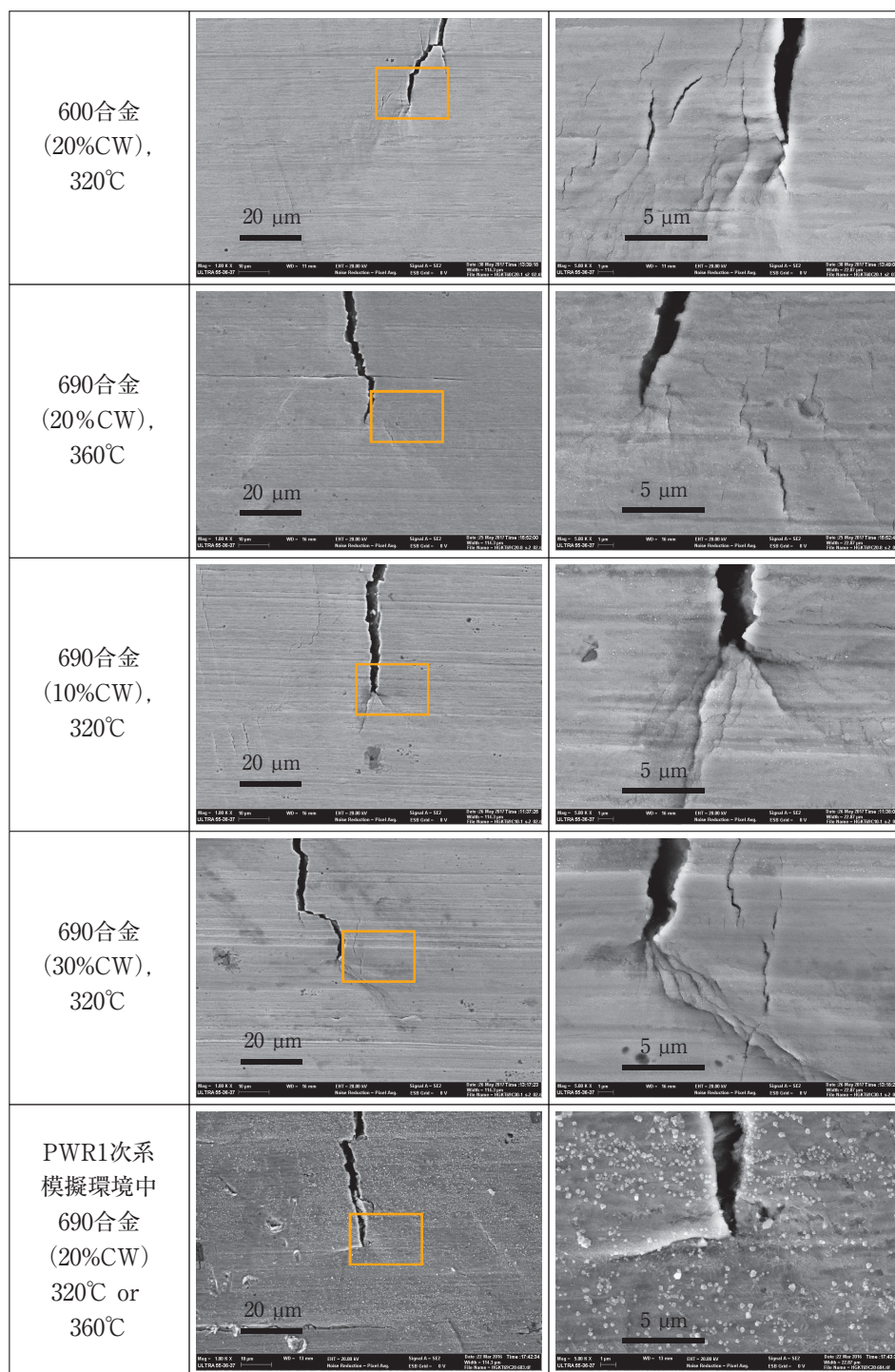


図9 き裂側面のSEM観察結果

4. 考察

4.1 水素ガスへの置換による材料変形挙動

本研究では高温ガス中き裂進展試験時にアルゴンガスから水素ガスへの置換を行い、PWR一次系に相当する25 kPaの水素分圧でも、水素が試験片の変位を増加させることを確認した。変位の増加は水

素導入直後から始まり短期間で終息したため、微量な水素でも即座に材料を変形させる効果があると考えられる。試験片の外表面には微細き裂が認められたが、表面には試験前より同様のき裂が生じていることがわかり、微細き裂の発生が変形を説明することは困難と思われた。また、き裂内部の断面には類似の微細き裂が殆ど認められず、き裂先端部が変形することで鈍化していることがわかった。そのため

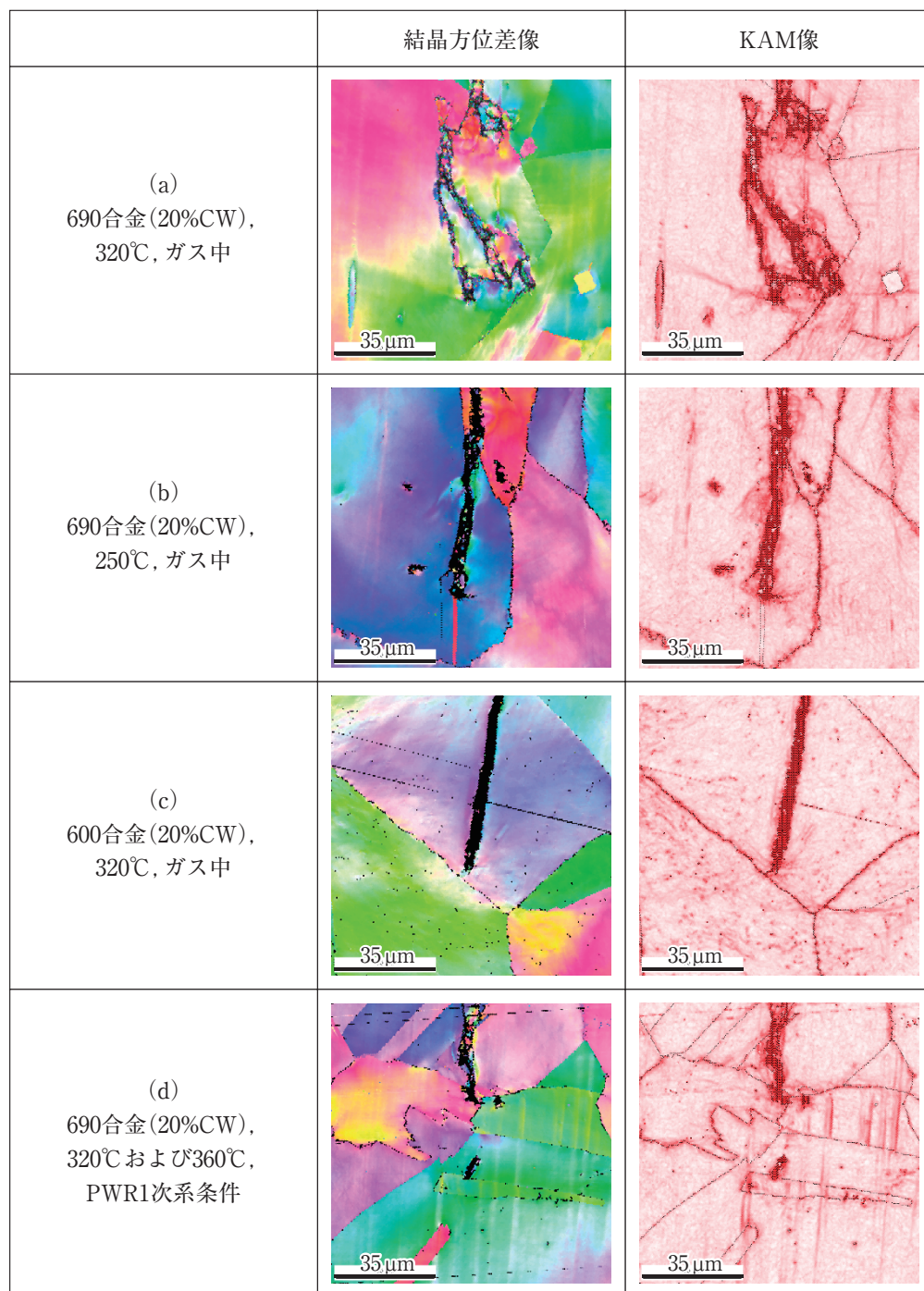


図10 690合金 (20%CW) き裂断面のEBSD測定結果

水素導入時の短期間に生じた変位の増加は、き裂先端近傍が鈍化したことにより生じたものと考えられる。

水素が材料特性に影響を及ぼすことについては、様々な鋼種に対する水素脆性に関する研究の一環として知見が報告されているが、試験片サイズや温度条件などにより材料が硬化するという知見や軟化することを示した報告など、一貫した挙動として理解

されていない⁽⁹⁾。本研究に近い挙動を示すものとしては、試験中に環境をアルゴンガスから水素ガスに切り替えてクリープ変形挙動を評価したXuら⁽¹⁸⁾によるパラジウムに関する知見が有る。パラジウムは水素吸蔵合金として知られており、690合金とは異なる挙動を示す可能性もあるが、736 K~1,200 K (463℃~927℃)において、水素ガス中でのクリープ変形がアルゴンガス中より5倍程度大きいことを

報告している。高温クリープ挙動が加速されたと解釈できるため、水素が物質拡散を加速することでクリープ変形を助長したと理解される。

転位と水素の相互作用についても多くの検討例が存在する⁽¹¹⁾。Ferreiraら⁽¹⁹⁾は透過電子顕微鏡内で環境セルを用い、310Sステンレス鋼への水素ガスの影響を直接観察することで、水素の導入が転位間の距離を縮小することを示している。これにより、水素が転位間等の弾性相互作用を低下するとしている。これらの知見は、水素が金属原子の結合状態に影響を及ぼし、応力付与条件下で転位が移動しやすくなることを定性的に説明している。また、透過型電子顕微鏡内での検討は、90 Torr (12 kPa) 程度の低い水素分圧で影響が生じることを示した結果であり、25 kPaで行った本試験程度の水素ガスが材料の変形に影響することとも符合する。

4.2 SCCへの水素ガスの影響

本研究では、SCC感受性の低い690合金(20%CW)を用いた場合でも、PWR一次系水中相当の水素分圧(25 kPa)が材料の局所的な変形を助長することを明確に示した。短期間の試験であり、長期の拡散挙動により生じる粒界キャビティ生成への影響は明確ではないが、高応力場で水素が材料の変形を助長する効果が明らかとなった。ただし、水素ガスを導入した時に観察された変形は、き裂先端が鈍化することで応力の集中を解放する現象であり、粒界き裂を進展させたものでは無かった。また、粒界キャビティ生成への直接的な影響もSEMによる観察では認められていない。今後、粒界キャビティ生成に対する水素の影響を直接的に評価するには、金属の内部組織について更なる詳細評価が必要と考えられる。

水素ガス導入時の変形量がSCCの決定因子となるパラメータであった場合、SCC感受性の高い600合金(20%CW)において、水素導入時の変化量がより大きく出現すると想定されたが、690合金(20%CW)との差は認められなかった。また、温度や冷間加工度についても水素導入時の変形量に差は生じず、5~8 μm 程度と評価された。前項における議論のとおり水素が転位の移動を助長しているのであれば、試験温度や材料内に存在する転位の量が結果に影響すると推察されたが、観察結果からその影響を見出すことは出来なかった。結果の解釈として

は、水素の影響による変形量が大きいため、物質拡散などの熱活性化過程や転位の導入量が律速過程とならなかった可能性が考えられる。すなわち、結晶粒径等の幾何学因子やその他何らかのパラメータが律速となることで、水素による変形の加速効果を定量的に評価できていない可能性がある。

ガス環境と同様の試験をPWR一次系模擬条件で実施した結果では、溶液中の溶存ガスをアルゴンから水素に置換した影響は認められなかった。PWR一次系では試験片表面にスピネル構造の腐食生成物を形成し、その過程で水が還元されて水素が生じる⁽²⁰⁾。アルゴン脱気条件の環境水でも材料表面では腐食が生じ試験片に水素が導入される。そのため、水素ガスへの切り替えまでの期間に、十分な水素が試験材に取り込まれていたと考えられる。これらの結果は、腐食により生じる水素が、試験水に含まれる溶存水素よりも大きな影響を有することを示唆している。

本試験の結果は、直接的に水素がPWSCCに影響を及ぼすことを確認したものでは無い。しかし、PWR相当の低い水素分圧でも、疲労予き裂先端の微小領域の変形に水素が影響を及ぼすことを示す結果と理解できる。水素による変形の促進は空孔拡散を加速する効果を持つ可能性が有り、PWR相当の水素分圧であっても粒界キャビティの生成を促進することを考慮することが重要と考えられる。

5. まとめ

690合金および600合金の冷間加工材を用い高温ガス中試験を行い、水素ガス導入時の材料変形を評価することでPWSCC機構への影響を検討し以下の結果を得た。

- ・PWR一次系相当の低い水素分圧(25 kPa)、320℃の条件でも、水素ガス導入により690合金(10~30%CW)疲労予き裂先端の変形が誘起されることが明らかとなった。変形はき裂先端部の局所領域で生じ、き裂は伝播せずに先端が鈍化した。水素が導入されたことで、高応力場において転位の移動が加速され変形が生じたと推察される。
- ・690合金について冷間加工度(10, 20, 30%)および温度(250, 320, 360℃)をパラメータとして変形量を比較したが、有意な差は認められなかった。試験手法の影響により、物質拡散や

転位の導入量以外の項目が試験の律速過程となった可能性がある。

- ・PWR一次系模擬水中で溶存ガスを切り替えて水素の影響評価を試みたが、溶存水素導入時に変形は生じなかった。腐食により生じた水素が、材料の変形に対して溶存水素以上の効果を有することが結果に影響したと考えられる。

参考文献

- (1) P. L. Andresen, M. M. Morra, A. Ahluwalia and J. Wilson, "SCC of Alloy 690 in High Temperature Water," CORROSION 2010, paper No.10241, (2010).
- (2) S.M. Bruemmer, M. J. Olszta, N. R. Overman and M. B. Toloczko "Microstructural Effects on Stress Corrosion Crack Growth in Cold-Worked Alloy 690 Tubing and Plate Materials," Proc. of 16th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Asheville, Aug. 11-15, (2013).
- (3) U.S.NRC, "Expanded Materials Degradation Assessment Volume 2: Aging of Core Internals and Piping Systems," NUREG/CR-7153, Vol. 2, (2014).
- (4) K. Arioka, T. Miyamoto, T. Yamada and T. Terachi, "Formation of Cavities Prior to Crack Initiation and Growth on Cold-Worked Carbon Steel in High-Temperature Water," Corrosion, 66 (1), pp.015008-015008, (2010).
- (5) K. Arioka, T. Miyamoto, T. Yamada et al., "Role of Cavity Formation in Crack Initiation of Cold-Worked Carbon Steel in High-Temperature Water," Corrosion, 69 (5), pp. 487-496, (2013).
- (6) K. Arioka, "2014 W.R. Whitney Award Lecture: Change in Bonding Strength at Grain Boundaries Before Long-Term SCC Initiation," Corrosion, 71 (4), pp. 403-419, (2015).
- (7) K. Arioka, R.W. Staehle, T. Yamada et al., "Degradation of Alloy 690 after Relatively Short Times," Corrosion, 72 (10), pp.1252-1268, (2016).
- (8) I.M. Robertson, and H. K. Birnbaum, "An HVEM Study of Hydrogen Effects on the Deformation and Fracture of Nickel," Acta Metallurgica 34.3, pp.353-366, (1986).
- (9) 南雲道彦, "水素脆性の基礎 水素の振るまいと脆化機構," 内田老鶴圃, pp. 166-183, (2008).
- (10) M.M. Hall and D.M. Symons, "Hydrogen Assisted Creep Fracture Model for Low Potential Stress Corrosion Cracking of Ni-Cr-Fe Alloys," Proc. of Chemistry and Electrochemistry of Stress Corrosion Cracking :A Symposium Honoring the Contributions of R.W. Staehle edited by R.H. Jones, TMS, pp.447-466, (2001).
- (11) H.K. Birnbaum and P. Sofronis, "Hydrogen-Enhanced Localized Plasticity-a Mechanism for Hydrogen-Related Fracture," Materials Science and Eng., A176, pp. 191-202, (1994).
- (12) D.J. Paraventi, T.M. Angeliu and G.S. Was, "Effect of Hydrogen on Creep in High-Purity Ni-16Cr-9Fe Alloys at 360 °C," Corrosion, 58 (8), pp. 675-686, (2002).
- (13) N. Totsuka, and Z. Szklarska-Smialowska, "Effect of Electrode Potential on the Hydrogen-Induced IGSCC of Alloy 600 in an Aqueous Solution at 350 °C," Corrosion, 43 (12), pp. 734-738, (1987).
- (14) T .M. Angeliu, D. J. Paraventi and G. S. Was, "Creep and Intergranular Cracking Behavior of Nickel-Chromium-Iron-Carbon Alloys in 360 °C Water," Corrosion, 51 (11) , pp. 837-848, (1995).
- (15) F. Foct, O.D. Bouvier and T. Magnin, "Stress Corrosion Cracking Mechanisms of Alloy 600 Polycrystals and Single Crystals in Primary Water-Influence of Hydrogen," Met. Trans. A, 31 (8), pp. 2025-2036, (2000).
- (16) 寺地巧, 宮本友樹, 福村卓也 他, "690 合金の SCC 進展に及ぼす粒界キャビティの影響," INSS Journal 22, pp. 129-139, (2015).
- (17) 寺地巧, 山田卓陽, 宮本友樹 他, "SSRT 試験

- による 690 合金冷間加工材の PWSCC 発生条件に関する検討,” INSS Journal 23, pp. 60-69, (2016).
- (18) Z. R. Xu,, and R. B. McLellan. “Hydrogen Enhanced Diffusional Creep.” *Acta materialia* 46,13, pp. 4543-4547. (1998).
- (19) P. J. Ferreira,, I. M. Robertson, and H. K. Birnbaum. “Hydrogen Effects on the Interaction between Dislocations.” *Acta materialia* 46.5, pp. 1749-1757. (1998).
- (20) 寺地巧, 戸塚信夫, 山田卓陽, “ニッケル基合金溶接部の SCC き裂進展に関する機構論的研究 (その 4) き裂の詳細分析による腐食の影響評価,” INSS Journal 15, pp. 125-140, (2008).