

高温水中での粒界型応力腐食割れに及ぼす 加工方位及び粒界炭化物析出の影響と粒界すべりの役割

Influence of Rolling Direction and Carbide Precipitation
on IGSCC Susceptibility in Hydrogenated High Temperature Water

有岡 孝司 (Koji Arioka)* 山田 卓陽 (Takuyo Yamada)*
寺地 巧 (Takumi Terachi)* 千葉 吾郎 (Goro Chiba)*

要約 水素添加高温水中でオーステナイト系ステンレス鋼の粒界型応力腐食割れ (IGSCC) 進展挙動を CT 試験片を用いた SCC 試験により検討した結果, 以下のような知見が得られた. (1) き裂進展速度は冷間加工の方位により大きく異なり顕著な異方性が存在する. (2) き裂進展速度に及ぼす材料因子の効果を検討した結果, 粒界が顕著に Cr 欠乏している場合でも粒界に炭化物が析出するとき進展速度は大きく抑制される. (3) 材質のき裂進展速度におよぼす影響には明確な Cr 濃度依存性がある. (4) 一方 Mo 添加では大きな効果は認められない. また, 高温水中での IGSCC 発生と進展メカニズムの研究の一環として粒界すべりに及ぼす冷間加工の影響を腐食環境の影響のない大気中で検討した結果, 高温水中での IGSCC 発生と進展過程には粒界すべりが重要な役割を果たしていることを示す結果が得られた.

キーワード ステンレス鋼, IGSCC, 炭化物析出, 冷間加工方位, 粒界すべり

Abstract IGSCC growth behaviors of austenitic stainless steels in hydrogenated high temperature water were studied using compact type specimens (0.5T for cold worked materials). The effect of cold rolling direction, alloy composition and carbide precipitation on crack growth behaviors was studied in hydrogenated high temperature water. Then, to examine the effect of cold work and carbide precipitation on IGSCC behaviors, the role of grain boundary sliding was studied in high temperature air using CT specimens. The similar dependences of carbide precipitation and cold work on IGSCC and creep behaviors suggest that grain boundary sliding might play an important role by itself or in conjunction with other reactions such as crack tip dissolution etc.

Keywords stainless steel, IGSCC, carbide precipitation, grain boundary sliding.

1. 序言

PWR 1 次系におけるステンレス鋼の実機での不具合事例の報告はキャノピーシール溶接部⁽¹⁾, および安全注入系第一隔離弁の上流側⁽²⁾などの酸素滞留部での事例報告はあるものの, 脱気され水素の添加された RCS (reactor coolant systems) 条件での粒界応力腐食割れ (inter-granular stress corrosion cracking : IGSCC) 発生事例はほとんどない. その結果, PWR 環境でのオーステナイト系ステンレス鋼の IGSCC 研究は酸素滞留域を模擬した研究が主体となり⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 脱気され水素が添加されている RCS 条件での系統的な研究はほとんど報告されていない. しかし, 近年著者らは PWR の 1 次系環境模擬条件下で定引張速度

試験 (constant extension rate technique : CERT) を行い冷間加工と高応力とが重畳すると鋭敏化していない SUS316 が IGSCC 感受性を示すことを報告している⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾. また Andresen らは BWR の水素注入模擬環境 (288°C 純水, 水素濃度 : 18cc/kg) でも, 冷間加工した非鋭敏化 SUS316 が IGSCC 感受性を示すことを報告⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾している. これらの実験結果は従来報告されていた IGSCC の臨界電位の存在⁽¹²⁾⁽¹³⁾を根本的に否定するものであり, 今後その SCC 感受性に及ぼす材料および環境因子の影響についての実験データの充実に加えメカニズムの詳細検討が工学的のみならず科学的にも極めて重要である. そこで従来の CERT 試験による検討に替わり CT 試験片 (compact tension type test specimen) を用いて低電位高温水中でのき

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

裂進展速度におよぼす炭化物析出および材料組成 (Cr, Mo 濃度) の影響を調べた。さらに非鋭敏化ステンレス鋼の IGSCC 発生起点部で粒界すべりの兆候が観察され、その発生に粒界すべりの関与が認められたことから、IGSCC のメカニズム研究の一環として粒界すべりの影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 試験材料

試験材料は PWR 1 次系配管仕様の SUS316 および SUS304 である。試験材料は 1060°C で溶体化処理後鋭敏化を避けるために水冷した。一方 IGSCC き裂進展速度におよぼす炭化物析出の影響を検討するため一部材料は、溶体化処理後真空中で 650°C x 1,5,24 および 48h の鋭敏化熱処理を行い粒界炭化物析出量の異なる材料を作成して試験に供した。さらにき裂進展速度におよぼす材料中の Cr および Mo 添加の効果を検討するため Cr 濃度が異なる材料を実験室溶解炉で作成した。試験材料の化学成分を表 1 に示す。SCC き裂進展速度の測定には表 1 に記載の試験材料をロール圧延により 20% の冷間加工を加え PWR 1 次系模擬環境で試験を行った。また同じ材料を用いて粒界すべり挙動を大気中で検討した。

表1 試験材料の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
Fe-Cr-14%Ni-2.3%Mo	0.059	0.50	1.51	0.007	0.006	14.35	12.05	2.26	Bal.
Fe-Cr-14%Ni-2.3%Mo	0.059	0.50	1.51	0.008	0.006	14.20	15.00	2.27	Bal.
SUS 316	0.049	0.44	1.46	0.022	0.001	10.97	16.49	2.09	Bal.
SUS 316	0.047	0.045	1.42	0.024	0.001	11.00	16.45	2.07	Bal.
Fe-Cr-10%Ni	0.056	0.47	1.58	0.002	0.001	9.85	12.03	-	Bal.
Fe-Cr-10%Ni	0.057	0.48	1.54	0.002	0.001	10.05	15.05	-	Bal.
SUS 304	0.04	0.31	1.59	0.031	0.001	9.21	18.34	-	Bal.

2.2 高温水中でのき裂進展速度

試験は再循環ループを有する試験装置を用い定荷重試験により行なった。試験片形状は 1/2CT 試験片であり厚さ 12.5mm である。き裂進展速度に及ぼす冷間加工の加工方位依存性を検討する目的で図 1 に示す加工方位に対して平行な方向にき裂が進展する場合 (T-L) および垂直な方向 (T-S) の場合について

それぞれのき裂進展挙動の異方性について検討した。放電ノッチ先端には大気中で約 2mm 長さの疲労破面を付与した後、高温水中での SCC 試験を行った。試験終了後試験片を大気中で疲労破壊させ破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察し破面形態および IGSCC 深さを 5 箇所について測定した。IGSCC き裂進展速度は SEM 観察結果を用いて次式でき裂進展速度を求め評価した。

き裂進展速度 (mm/sec)

$$= \text{SCC 平均深さ (mm)} / \text{破断時間 (sec)} \quad (1)$$

試験温度および応力は全ての条件で 320°C および 30 MPa $\sqrt{\text{m}}$ である。試験環境は PWR の起動初期 (H₃BO₃ (2300ppm as B) + LiOH (2ppm as Li) + DH₂ (30cc/kgH₂O)) と燃料サイクルの中間状態を模擬した条件 (H₃BO₃ (500ppm as B) + LiOH (2ppm as Li) + DH₂ (30cc/kgH₂O)) である。室温における試験溶液の電気伝導度は約 22 μ S/cm であった。一部き裂進展挙動に与える水素濃度の影響を検討するため水素濃度を 0, 3, 7, 15cc/kgH₂O でも実施した。試験液中の水素濃度は調整タンクの圧力および混合ガス濃度で調整し、試験装置入り口濃度は(株)東亜電波製の水素計を用い連続的に監視した。

2.3 大気中での粒界すべり挙動

粒界すべりにおよぼす冷間加工と温度の影響を検討するため、水中での金属溶解などの電気化学反応の影響を除去するため大気中で定荷重式のクリープ試験を行った。試験材は 20% CWSUS316 と冷間加工のない SUS316 である。試験片には平板の引っ張り試験片を用いた。試験片の平行部長さは 20mm、幅 4mm および厚さ 2mm である。試験温度は 380, 425, 450, 500, 525, 550 および 575°C であり、引っ張り応力は 343 MPa である。試験中の最小クリープ速度の測定は試験片の肩と肩の間の長さ変化をダイヤルゲージでモニターし、破断した試験片については試験中のクリープ変形および破壊におよぼす粒界すべりの関与を調べるため破断面の SEM 観察を行った。また冷間加工方位の粒界すべりへの影響の検討を目的に SCC き裂進展速度測定に用いた 20% CWSUS316 の CT 試験片を用いて 475°C で大気中定荷重試験を行ない破面形態とき裂進展方位を SCC き裂進展挙動と比較することから SCC 進展過程での粒界すべりの役割を考察した。試験応力は 40 MPa $\sqrt{\text{m}}$ である。

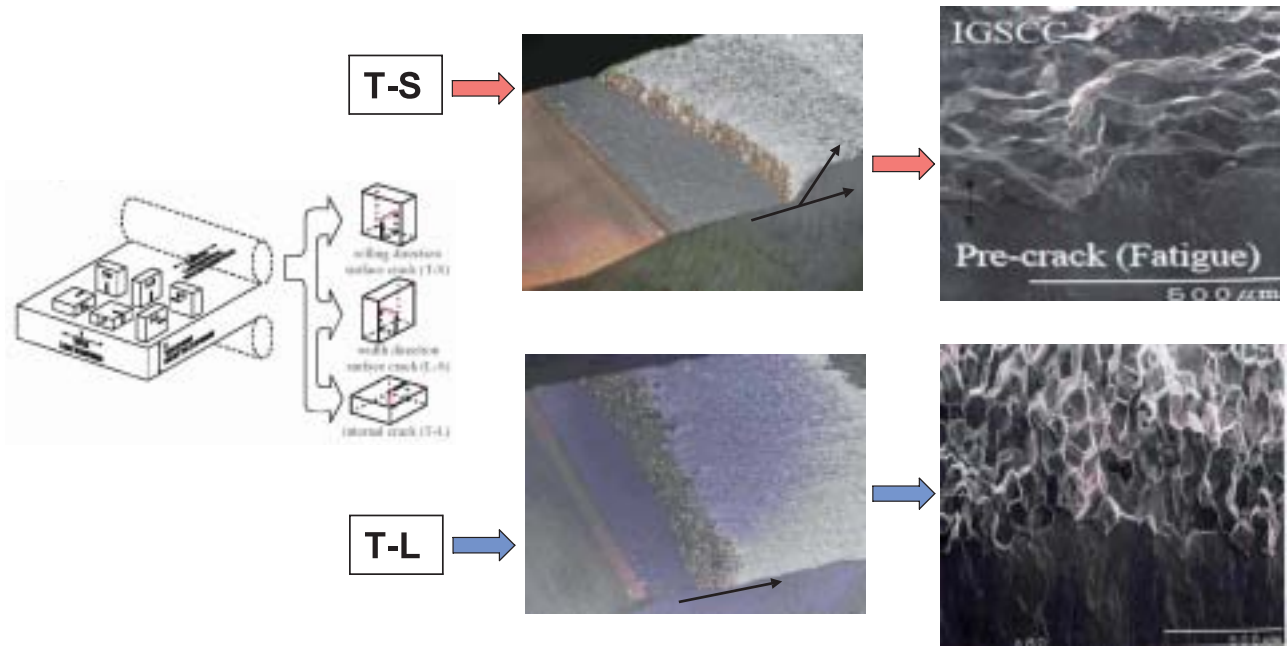


図1 き裂進展挙動におよぼす加工方位の影響 (20%CW316, 320°C, 500ppmB - 2ppmLi - 30cc H₂/kgH₂O)

2.4 粒界組成分析

溶体化処理材と鋭敏化処理材の粒界での炭化物析出状態と粒界近傍での元素濃度分布を測定するために粒界組成分析を実施した。分析に用いた薄膜の作成は-50°Cの5%過塩素酸+メタノール溶液中で25-55Vの電解条件によりツイング電解研磨法で作成した。観察および分析はEDS装置を有するFEG-TEM (日立 HF 3000) を用い加速電圧300kVで行った。

3. 試験結果および考察

3.1 き裂進展速度におよぼす加工方位の影響

き裂進展挙動におよぼす方位依存性についてNi系溶接金属 (Alloy182) についてデンドライトに沿った方位のき裂進展速度がデンドライトと垂直な方位へのそれと比べ早く進展速度に異方性があることが報告されている。⁽¹⁴⁾ しかし高温水中でのき裂進展速度の加工方位依存性についてはその工学的な重要性にも拘わらず研究報告例はない。そこで図1に示す加工方位の異なる2種類 (T-L, T-S) の試験片についてき裂の進展方向および進展速度に関する異方性について検討した。き裂の破面形態および進展方向についての観察結果を図1に示す。き裂は何れの加工方位でも粒界型の破面形態を示した。また進展方位

には明らかな異方性が認められ、T-L方位では応力最大方向に平行にき裂が進展しているのに対し、T-S方位では応力最大方向から約60度傾いた方向へき裂が進展する傾向が全ての試験材で観察された。そこで進展速度におよぼす加工方位の影響を幾つかの環境条件で観察した結果を図2に示す。明確な進展速度の加工方位依存性が認められ、T-L方位の進展速度はT-S方位のそれに比べ約3~7倍の速度が認められた。現実の構造物でき裂が進展する場合、加工方位に垂直な方向に応力が働く場合が多いことから上記の試験結果はSCCメカニズムを考える上のみならず工学的にも重要な事象である。

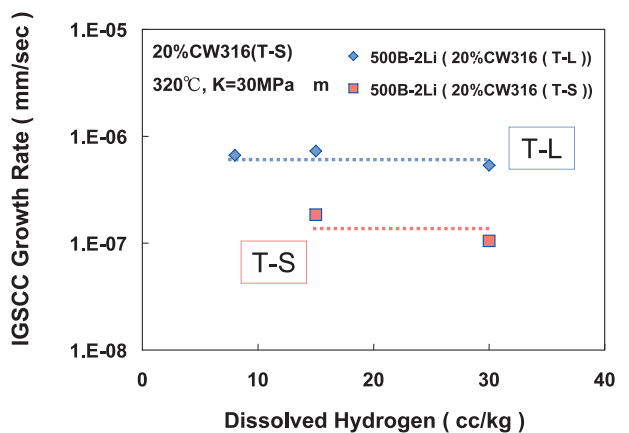


図2 き裂進展速度におよぼす加工方位の影響

3.2 き裂進展速度におよぼす鋭敏化の影響

前節の結果を踏まえ本節および次節に記すき裂進展速度に及ぼす炭化物析出および材料組成依存性についてはT-S方位の冷間加工材を用いて検討した。測定されたき裂進展速度を650℃での鋭敏化熱処理時間の関数として整理した結果を図3に示す。

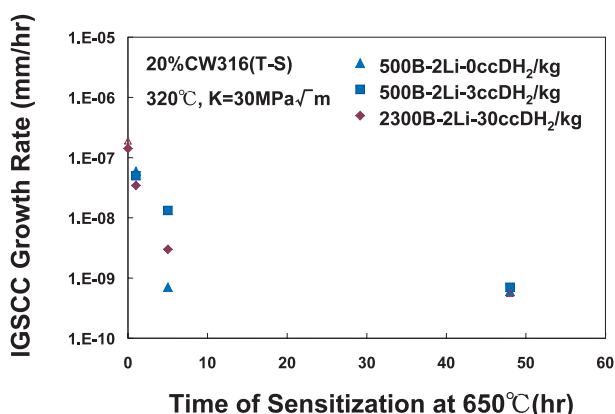


図3 き裂進展速度におよぼす鋭敏化の影響

き裂進展速度は鋭敏化時間が長くなると共に小さい値となり48時間鋭敏化材ではIGSCCの進展は殆ど観

察されない。48時間鋭敏化材は図4に示すとおり粒界で高密度の炭化物析出が観察されると共に100mm以上の幅にわたり顕著なCr欠乏相の存在が認められる。

この二つの観察結果は水素添加の低電位高温水中では顕著なCr欠乏相を持つ状態であったとしても十分な粒界炭化物析出の存在があればIGSCCの進展は十分に抑制されることを示している。この傾向はCERT試験の結果⁽⁸⁾⁽⁹⁾とも類似の傾向を示しており低電位高温水中でのIGSCCの発生・進展には粒界炭化物析出量の増加と共にIGSCC感受性は抑制されることを示しており、粒界炭化物の存在が粒界結合力を強化する何らかのメカニズムが存在していることを示唆している。またこの結果は1970年代前半から繰り返し議論されてきた従来の酸素を含む高電位高温水中でのステンレス鋼のIGSCCメカニズム⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁸⁾と全く異なる結果である。この電位条件の差に起因する鋭敏化の影響の差はCr欠乏相での溶解に及ぼす電位の影響を示すものと考えられ、酸素を含む高電位高温水中では析出した炭化物近傍のCr欠乏相が選択溶解され炭化物の持つ粒界すべり抑制機能など粒界結合を強化する機能を排除してしまうのに対し、水素を含む低電位高温水中ではCr欠乏相の選択溶解が

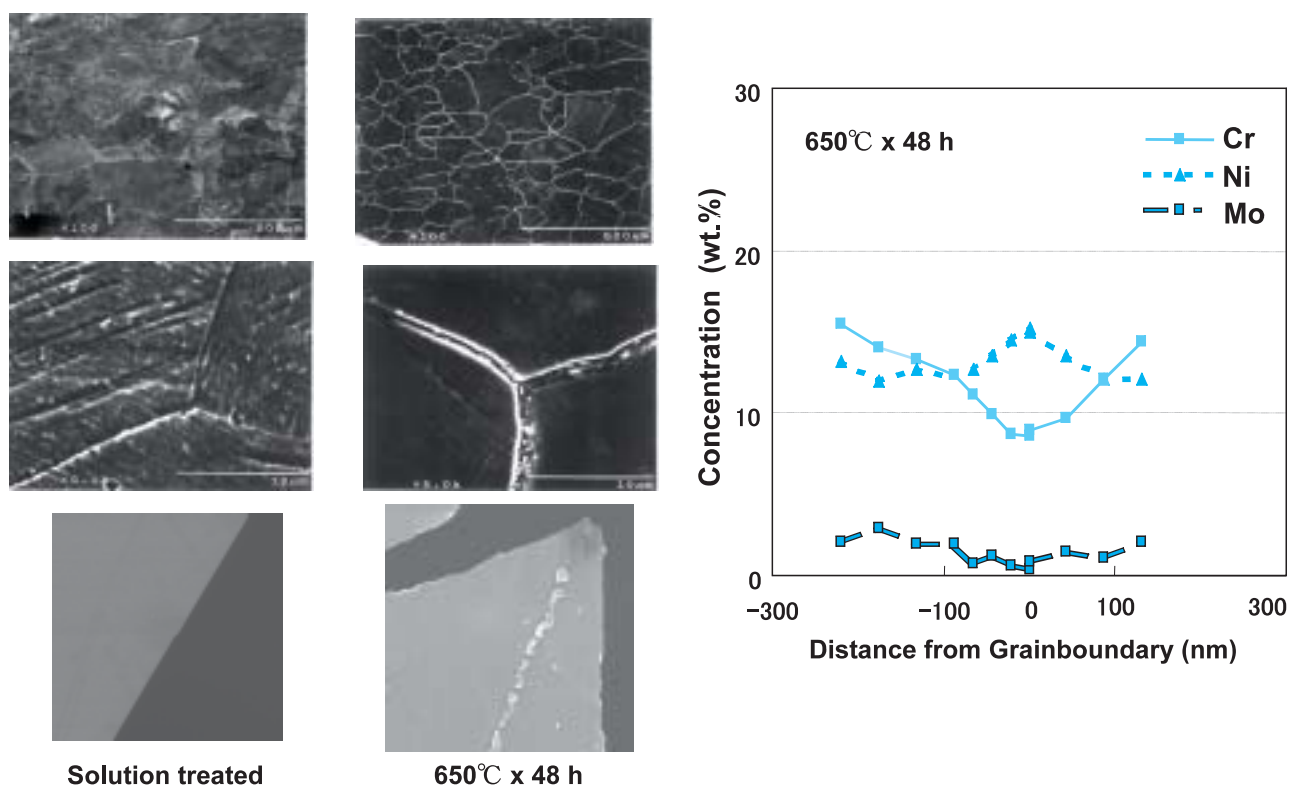


図4 粒界化学組成分析結果および炭化物析出状況

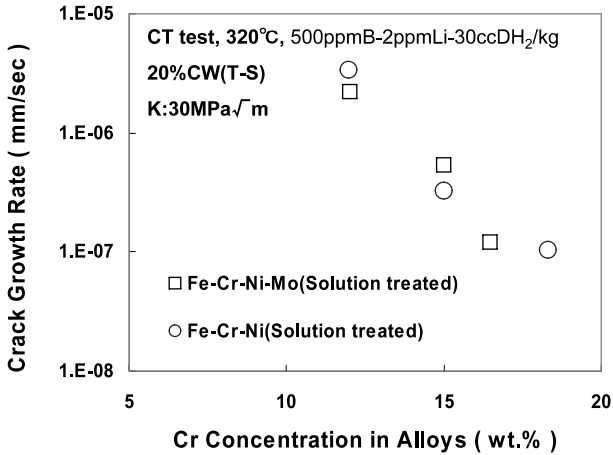


図5 き裂進展速度におよぼすCr濃度依存性

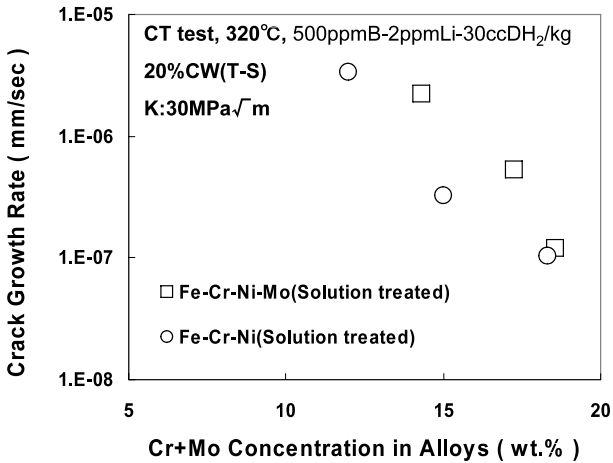


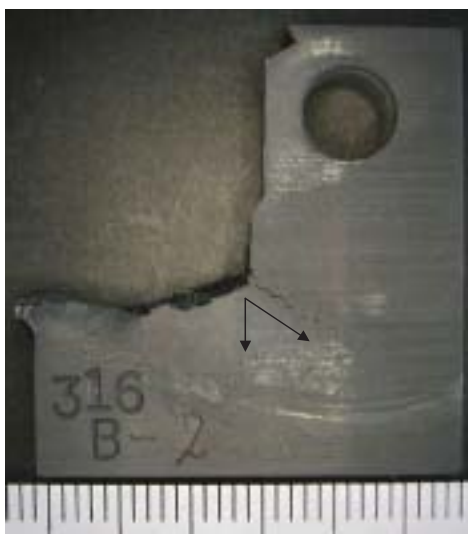
図6 き裂進展速度におよぼす (Cr + Mo) 濃度依存性

抑制されるなどの結果炭化物析出の粒界結合強化機能が維持されるものと考えられる。確認されたこれらの結果は、BWRも水素注入などにより低電位に移行する趨勢にある現在今後の耐SCC性軽水炉構成材料の開発の考え方に対し重要な知見であり、今後そのメカニズムについて詳細な検討が必要である。

3.3 き裂進展速度におよぼす材料組成 (Cr, Mo) の影響

IGSCC感受性におよぼす材料組成の影響をCERT試験で検討しCr濃度依存性を示すことをすでに報告している。(8)(9) そこでき裂進展速度におよぼす材料組成を表1に示すCrおよびMo濃度を変化させた実験室溶解材を用いて検討した。図5および図6に示すように水素添加の低電位高温水中でのき裂進展速度は明確なCr濃度依存性が認められる。

一方Mo添加は顕著なき裂進展速度抑制効果は確認されない。Mo-H₂Oの化学平衡計算結果(19)によると250°C以上の低電位高温水中では耐食性に寄与するであろうMoO₂は安定して存在することが出来ないことを示している。この結果は室温では耐食性改善効果を示すMoは低電位高温水中では有効に効果を示さないことを示しており図6に示したMo添加がき裂進展速度の抑制効果がないことを示す試験結果を裏付けている。そこで同じ実験室溶解材を用いて炭化物析出のき裂進展速度への影響を溶体化材と炭化物を析出させた鋭敏化材のき裂進展速度を比較する



20%CW Fe-12%Cr-14%Ni-2.3%Mo (Solution treated)



20%CW Fe-12%Cr-14%Ni-2.3%Mo (Sensitized (650°Cx48h))

図7 Fe-12%Cr-14%Ni-2.3%Moのき裂進展挙動

ことから検討した。図7および図8に示すように SUS316,304 の場合と同様 Cr 濃度の低い実験室溶解材でも鋭敏化はき裂進展速度を大きく低減する効果を示す。この傾向は CERT 試験で得られた傾向と同じであり炭化物析出は低電位高温水中での IGSCC の発生と進展を抑制する効果を持つことを示している。

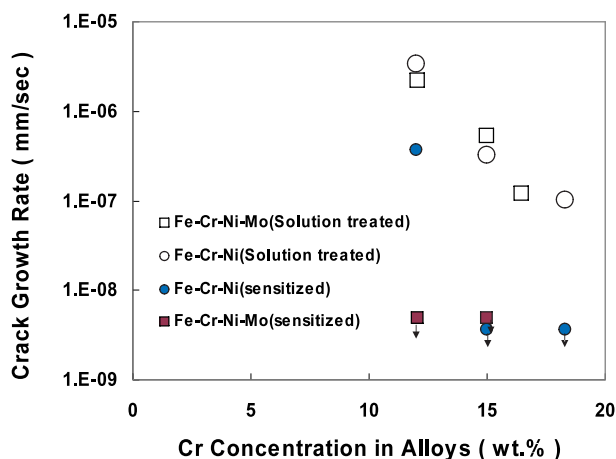


図8 き裂進展速度におよぼす粒界炭化物析出の影響

3.4 IGSCCの発生・進展過程における粒界すべりの役割

耐食性に乏しいCr欠乏相が殆ど形成されないはずのSUS316L材で何故粒界型のSCCが発生し進展するかについて未だ系統的な検討例は少なく学会での合意を得るには至っていない。一方高Ni合金では、1991年にWasら⁽²⁰⁾が高純度Ni-Cr-Fe合金を360℃のアルゴンと水素の混合ガス中でCERT試験を実施し

た結果、粒界すべりの兆候が観察されたことに端を発し、Michigan大学のWasら⁽²¹⁾⁻⁽²⁶⁾により種々実験が行われている。また著者らは前節で述べた材料側の影響因子の一つとして考えられる粒界炭化物析出の効果を粒界すべり抑制効果と推定し、粒界すべりの関与を水中で生じる溶解などの電気化学反応の影響を除去するため大気中で定荷重式のクリープ試験を行ない破断面に優れた粒界割れを観察し大気中での粒界すべりの発生を確認し報告している。⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

そこで本節では低電位高温水中でのIGSCCき裂進展挙動におよぼす冷間加工と加工方位の影響に着目してその発生・進展過程における粒界すべりの役割を検討するため冷間加工材と冷間加工なしの材料について同じ応力条件で長時間の大気中クリープ試験を行い両者の挙動を比較することから粒界すべりにおよぼす冷間加工の影響を検討した。図10から500℃以上の温度では冷間加工による顕著なクリープ速度抑制効果が認められ従来の冷間加工はクリープを抑制するという知見を裏付ける結果を示している。一方粒界割れ破面が多くなる低温で両者のクリープ速度は逆転する傾向を示した。この結果は軽水炉運転温度を含む低温では冷間加工は粒界すべりを加速する可能性があることを示唆しているものと考えられる。

そこで図10に示した平板試験では約10,000時間まで破断が確認出来ていない475℃で20%CW316 (T-S方位)のCT試験片を用いて約1,000時間の大気中クリープ試験を行った結果図11に示すように、SCCき裂と同じ方向に進展する粒界き裂が確認された。こ

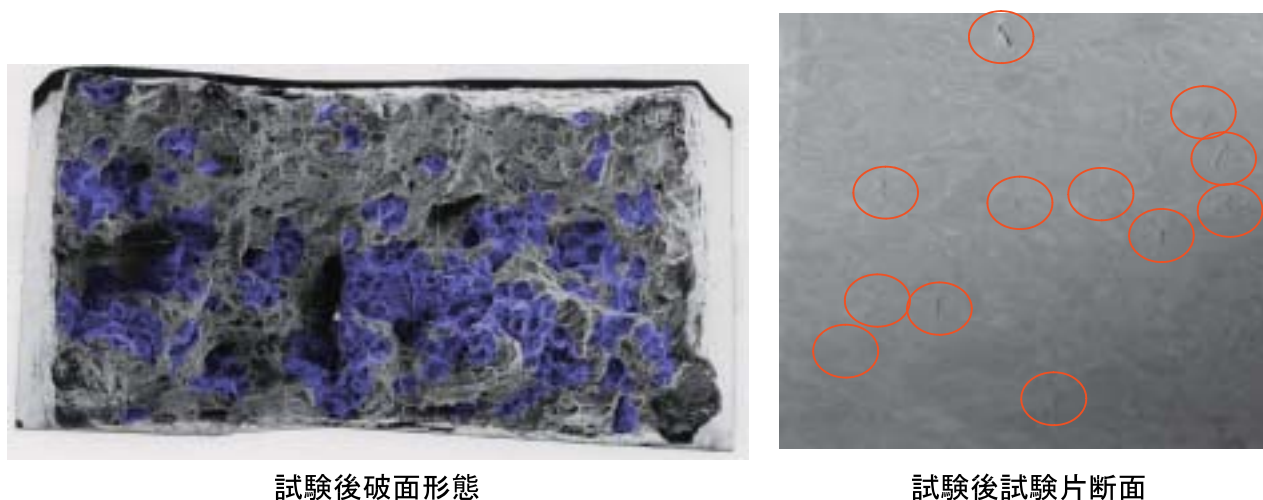


図9 大気中クリープ試験後の粒界割れ (SUS316(溶体化), 525℃)

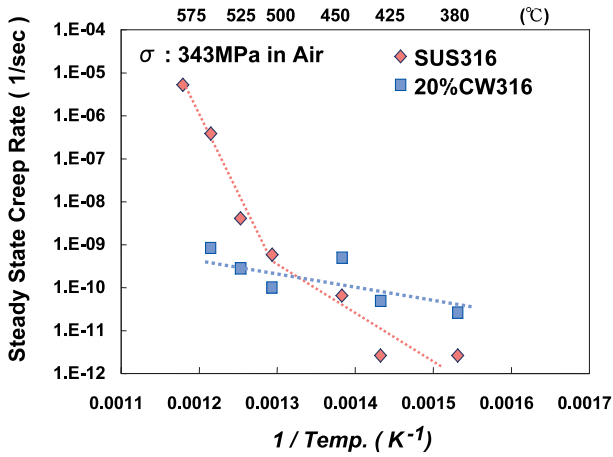


図10 定常クリープ速度におよぼす冷間加工の影響

の応力勾配を持つCT試験片と単純引っ張り試験の粒界割れ発生までの顕著な時間の差は粒界すべり速度を律速すると考えられる空孔の粒界拡散が応力勾配により大きく加速されることを示唆しているものと考えられる。応力勾配下でのき裂発生と進展メカニズムを考察する上で重要な知見である。

3.5 IGSCCの発生・進展メカニズム

Herring は粒界空孔の化学ポテンシャルが応力の影響を受け⁽²⁾式で表されることを提案している。⁽²⁷⁾

$$\mu = \mu_0 - \sigma \Omega \quad (2)$$

ここで μ : 粒界での空孔の化学ポテンシャル,
 σ : 応力, Ω : 空孔体積

この仮説は拡散が化学ポテンシャル勾配を駆動力として進行するという定義にもとづくと、濃度勾配を駆動力として移動する物質移動に加え応力勾配を駆動力として空孔が粒界拡散する可能性があることを示唆している。この概念は定性的には時々論文の中で引用されるものではあるが論文が発表されてから50年以上経た現在も粒界拡散が応力勾配下で加速することを実験的に検証した報告はない。一方前節に記した応力勾配下での試験であるCT試験片で粒界すべりが加速された結果は空孔粒界拡散が応力勾配下で加速されることを暗示しておりHerringの仮説の可能性を示唆している。このことから応力勾配下で応力の高いき裂先端あるいはき裂起点部粒界に空孔が拡散集積し、高応力場での空孔濃度が増加し粒界結合力を低下させその結果粒界き裂および粒界すべりが発生し新生粒界金属面が高温水と接触し腐食が進行するIGSCC発生・進展メカニズムが考えられ

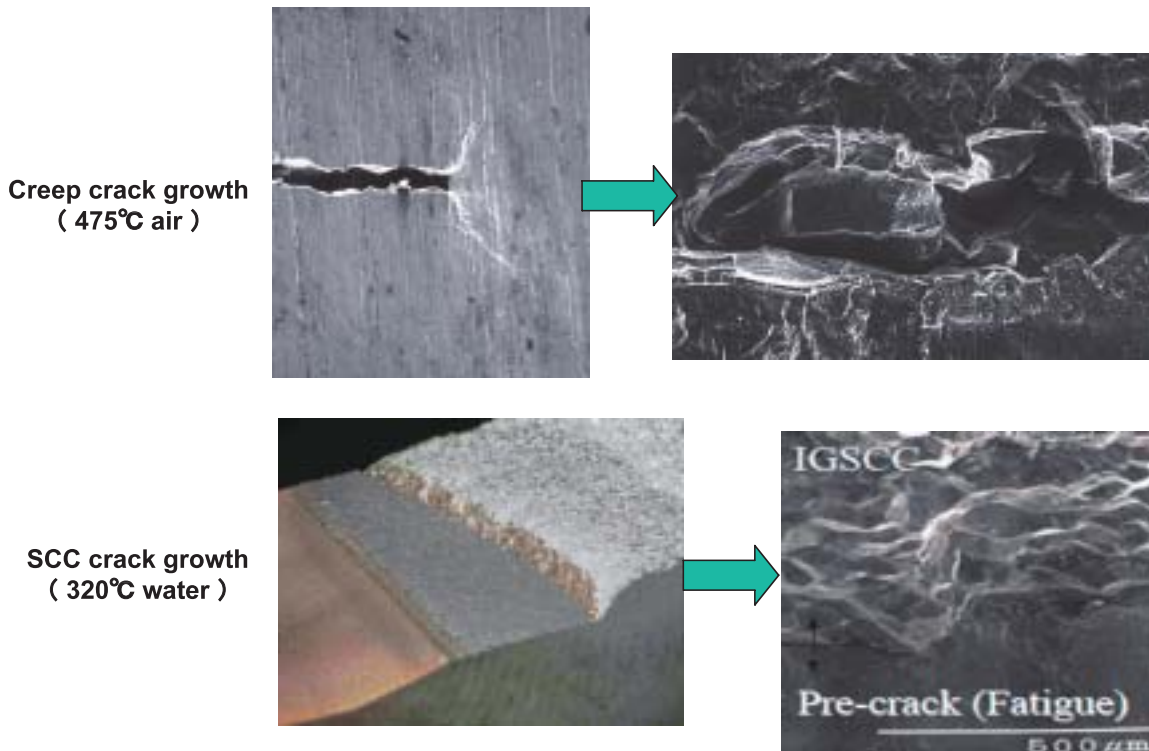
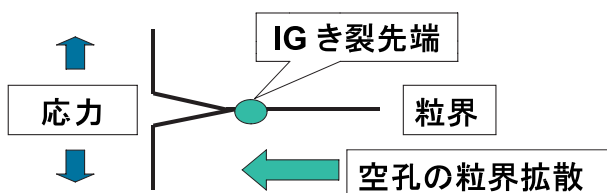


図11 SCCとクリープき裂進展方向に及ぼす加工方位の影響

る。この空孔粒界拡散モデルの概念を図12に示す。Vitek⁽²⁸⁾はこの概念を低合金鋼の550℃以上のクリープ速度の解析に適用し(3)式が実験結果を近似できると報告している。

$$da/dt = k_0 D_{gb} \Omega G(K/G)^4 / kT \quad (3)$$

ここで、 da/dt ：き裂進展速度、 D_{gb} ：粒界拡散係数、 K ：応力拡大係数、 G ：剛性率、 k_0 、 k ：定数



律速過程：き裂先端への空孔の粒界拡散
駆動力：応力勾配

図12 空孔粒界拡散によるき裂発生・進展モデル

応力勾配下でのき裂先端では、庄子らの3次元弾塑性解析⁽²⁹⁾では冷間加工および応力拡大係数の増加と共に応力勾配が大きくなることを報告しており、この解析結果を空孔粒界拡散モデルに組み込むと非鋭敏化ステンレス鋼のIGSCC き裂進展速度が冷間加工で加速される実験事実を定性的には説明できる。またこのモデルは(3)式に示す様にIGSCC き裂進展

速度⁽⁷⁾、粒界すべりき裂進展速度および250～400℃でのSUS316中の⁵¹Crの粒界拡散係数⁽³⁰⁾はそれぞれ類似の温度依存性を示すことが示唆されることから温度依存性に関する実験結果を図13に取り纏めた。

今後詳細な検討が必要であるが以上の検討結果は低電位高温水中でのIGSCC発生・進展には粒界すべりが重要な役割を果たしているものと考えられる。

4. 結言

- (1) き裂進展方位および進展速度は顕著な冷間加工方位依存性を示し、T-L方位はT-S方位に比べ約3～7倍の進展速度を示す。
- (2) 粒界Cr欠乏相の存在下でも炭化物析出によりき裂進展速度は大きく抑制される。この傾向は酸素を含む高電位高温水中での挙動と全く逆である。
- (3) 低電位高温水中でのき裂進展速度は明確な材料中Cr濃度依存性を示す。一方材料中Mo添加はき裂進展速度に対し明確な抑制効果は確認されない。
- (4) 粒界すべり方位にはIGSCC同様加工方位依存性が確認された。また粒界すべりはIGSCC同様冷間加工により加速される。これらの粒界すべりとIGSCC挙動の類似性は低電位高温水中でのSCC発生・進展メカニズムには粒界すべりが重

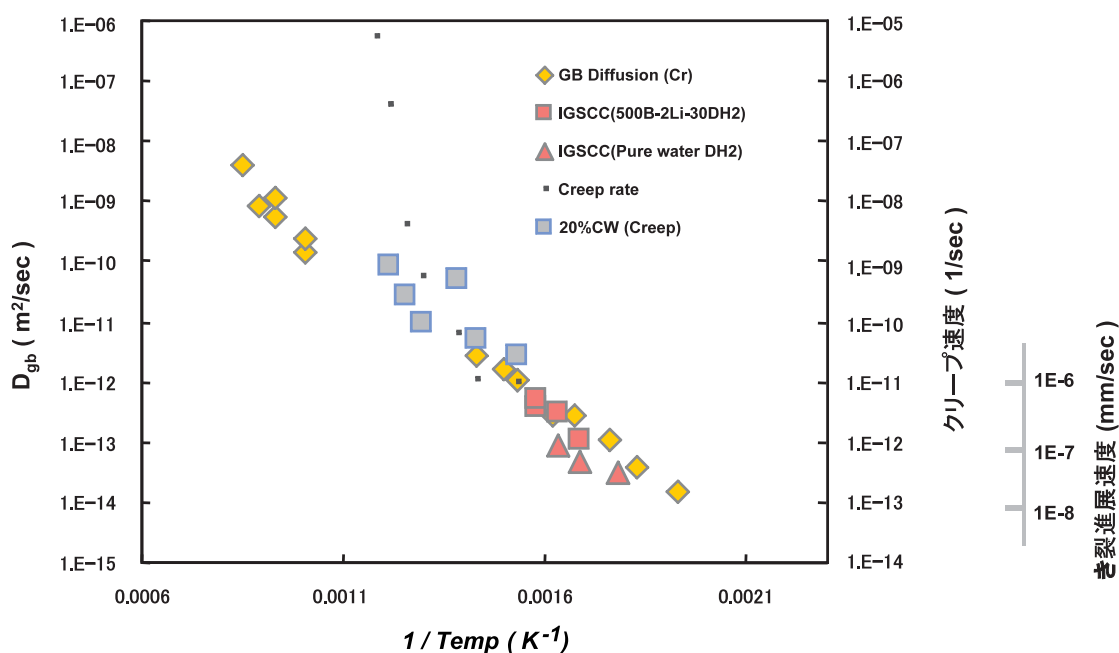


図13 IGSCC,クリープおよび粒界拡散の温度依存性

要な役割を演じているものと考えられる。

- (5) 軽水炉運転条件での粒界すべり発生メカニズムとして応力勾配下での空孔拡散モデルの適用性を検討し、IGSCC、粒界拡散および粒界すべりに類似の温度依存性を示す結果が得られた。

謝辞

研究の遂行にあたって有意義な議論と情報の提供を戴いた Roger W. Staehle 教授に感謝致します。また実験の遂行に当たっては関電プラント(株)の村上公治、辻井克実 および平尾充司各氏の全面的な協力を得ました。ここに記して感謝を表します。

文献

- (1) C.M. Pezze and I.L.W. Wilson, "Proceedings of the Fourth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems", Jekyll Island, GA, (1989) pp. 4-164.
- (2) G.V. Rao, D.E. Boyle and R. Phillips, "Proceedings of International Symposium on Fontevraud IV", SFDN, (1998).
- (3) K. Arioka, T. Nojima, T. Kanechiku, C.G. Schmidt, D.D. MacDonald, and T. Mager, "The 3rd JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering", Kyoto, Japan (1995) S112-1.
- (4) A. Bertuch, D.D. MacDonald, J. Pang, L. Kriksunov and K. Arioka, "Proceedings of International Conference of Chemistry in Water Reactors", Nice, France (1994).
- (5) K. Arioka, M. Hourai, S. Okamoto and K. Onimura, Corrosion '83, Paper No. 135, Anaheim (1983).
- (6) K.Arioka, J. Institute of Nuclear Safety System, 9 (2002) pp.116-123.
- (7) K.Arioka, "Proceedings of International Symposium on Fontevraud V", SFDN, (2002), 149
- (8) K.Arioka, T.Yamada, T.Terachi, "Proceedings of the 11th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactor", Gary Was chair, American Nuclear Society, Steevenson, WA, (2002).
- (9) K.Arioka, T.Yamada, T.Terachi, R.W.Staehle, Corrosion, to be published
- (10) T.M. Angeliu, P.L. Andresen, E. Hall, J.A. Sutliff, S. Sitzman, R.M. Horn, "Proceedings of the Ninth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactor", Newport Beach, CA, p.311 (1999).
- (11) P.L. Andresen, M.T. Angeliu and L.M. Young, Corrosion 2001, Paper No. 01228 (2001).
- (12) G. Cragolino, L. Lin and Z. Szklarska-Smialowska, Corrosion, 37 (1981) 312.
- (13) D.D. MacDonald and G. Cragolino, "Proceedings of the Second International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems", Monterey, CA, p. 211 (1985).
- (14) W.H.Banford, J.P.Foster, R.S.Pathania, "Proceedings of the Nineth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactor", S.Brueemmer, P.Ford, Gary Was edited, TMS, p.279 (1999).
- (15) W.E.Berry, E.L.White, W.K.Boyd, Corrosion, 29 (1973) 451.
- (16) B.M.Gordon, Corrosion, 36 (1980) 29.
- (17) F.P.Ford, D.F.Taylor, P.L.Andresen, R.G.Ballinger, "Environmentally Controlled Cracking of Stainless Steel and Low Alloy Steels in Light Water Reactor Environments", NP-5064M, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1987.
- (18) S.M.Brueemmer, B.W.Arey and L.A.Charlot, Corrosion, 48 (1992) 42.
- (19) J.B.Lee, Corrosion, 37(1981)467.
- (20) J.K.Sung, and G.S.Was, Corrosion, 47 (1991) 824.
- (21) G.S.Was, J.K.Sung, and T.M.Angeliu, Metallurgical Transaction A, 23A (1992) 3343.
- (22) T.M.Angeliu, and G.S.Was, "Proceedings of the Fifth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems", p. 475 (1992).

- (23) T.M.Angeleu, and G.S.Was, Metallurgical and Material Transactions A, 25A (1994) p.1169
- (24) T.M.Angeleu, D.J.Paraventi, and G.S.Was, Corrosion, 51 (1995) 837.
- (25) Y.Yi, G.S.Was, J.Cookson, J.S.Fish, S.A.Attnasio, H.T.Krasodonski, and W.W.Wilkening, "Proceedings of the Ninth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems", p. 269 (1999).
- (26) B.Capell, L.Fournier, and G.S.Was, "Proceedings of the Tenth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems", (2002)
- (27) C.Herring, J.Appl.Phys, 21 (1950) 437.
- (28) V.Vitek, Acta Metall, 26 (1978) 1345.
- (29) T.Shoji, "Proceedings of the 11th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactor", Gary Was chair, American Nuclear Society, Steevenson, WA, (2002).
- (30) M.Mizouchi, Y.Iijima, K.Arioka, Mater.Trans., 45 (2004) 2945.