圧力容器用低合金鋼の高温高圧水中疲労き裂伝ば挙動 に及ぼす流速の影響[†]

片 田 康 行* 永 田 徳 雄** 佐 藤 俊 司**

Effect of Flow Rate on Fatigue Crack Growth Behaviour of A533B Steels in High Temperature Pressurized Water

by

Yasuyuki KATADA*, Norio NAGATA** and Shunji SATOH**

Effect of water flow rate on fatigue crack growth behavior in high temperature water simulating BWR environments was examined by using a flow rate change test method. Materials used in this work were two types of low alloy pressure vessel steels A533B cl 1; one was medium sulfur material ($S=0.014$ wt%) and the other low sulfur material ($S=0.004$ wt%). Corrosion potentials during the tests were successfully measured in the relevant conditions.

As a result, the fatigue crack growth rate in high temperature water was more accelerated with decreasing flow rate, and this trend was more striking for the medium sulfur material compared to the low sulfur material. Change of corrosion potential during the tests showed a good correlation with the change of water flow rate.

Key words: Low alloy steel, A533B steel, Fatigue crack growth rate,
Environmentally boiling water reactor, Flow rate, MnS,
Corrosion potential, Environmentally assisted cracking

1 緒 言

軽水炉冷却材環境を模擬した高温高圧水中における圧力容器の健全性評価については、疲労を中心に疲労き裂の発生や伝ば挙動を含めて、それらの影響因子や環境助長割れ機構に関する研究^{1)~6)}が行われている。高温水中疲労き裂伝ば挙動に及ぼす流速の影響については、Tice⁷⁾らは、これまでに得られている PWR 模擬環境でのデータをもとに、流速と材料中の硫黄 (S) 含有量の関係における環境助長割れ (EAC) の発生領域線図を提案している。従来の流速効果に関する実験では、主にオートクレーブ内での平均的な流速の大小を比較の対象としてきた。工学的見地からみると十分に価値のあるデータであるが、環境助長割れ機構の解明という観点からみるとより定量的な現象の把握が必要となる。

本研究では、同環境下における環境助長割れ機構解明の基礎的知見を得る目的で、オートクレーブ内に設

けたノズルを用いて、圧力容器低合金鋼のコンパクトテンション (CT) 試験片の切欠部に直接高温水を吹き付け、き裂先端部に高流速を与えるとともに、さらにバルブ切替を併用した流速切替試験を提案し、環境助長割れの流速効果を調べた。また同時に同試験中における腐食電位を測定し、流速効果との関係についても検討した。

2 実験方法

2・1 供試材および試験片

供試材は、圧力容器用低合金鋼 JIS SQV2A (ASTM A533B C1.1 相当) で、硫黄 (S) 含有量の異なる中 S 材および低 S 材の 2 種類である。本供試材は、日本原子力研究所構造安全研究委員会腐食疲労専門部会で行われた国内共通試験⁸⁾のための供試材として使用されたものである。供試材の化学成分、機械的性質および熱処理条件を Table I, Table II および Table III に示す。本実験で用いた試験片は、板厚 25 mm の CT 試

Table I. Chemical compositions (wt %) of the materials used.

JIS SQV2A	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Low sulfur	0.17	0.24	1.37	0.003	0.004	0.60	0.07	0.46	0.02
Medium sulfur	0.21	0.29	1.45	0.007	0.014	0.65	0.03	0.51	0.03

[†] 原稿受理 平成 4 年 2 月 10 日 Received Feb. 10, 1992

* 正 会 員 金属材料技術研究所 〒153 東京都目黒区中目黒, National Res. Inst. for Metals, Meguro-ku, Tokyo, 153

** 金属材料技術研究所 〒153 東京都目黒区中目黒, National Res. Inst. for Metals, Meguro-ku, Tokyo, 153

Table II. Mechanical properties of the materials used.

JIS SQV2A	Temperature (K)	0.2% yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Low sulfur	293	468	622	24	72
	573	416	586	21	70
Medium sulfur	293	475	629	22	61
	573	422	608	18	57

Table III. Conditions of heat treatments of the materials used.

Normalizing	1243K×7 hr (Air cooling) (Low sulfur)
	1193K×7 hr (Air cooling) (Medium sulfur)
Tempering	933K×7 hr (Air cooling)
Quenching	1173K×7 hr (Water quench)
Tempering	933K×5 hr (Air cooling)
Stress relief	873K×25 hr*

*) Heating/Cooling rate 323K/hr in max.

Table IV. Test conditions used.

Material	JIS SQV2A (equivalent to ASTM A533B cl. 1)
Control mode	Load
Wave form	Sinusoidal
Frequency	0.0167 Hz
Stress ratio	0.2
Temperature	561K
Pressure	8.0 MPa
Water chemistry	DO : 0.2 ± 0.005 ppm
	pH : 6.8 ± 0.1
	Cond.: $< 0.2 \mu\text{S/cm}$
	Cl^{-1} : < 0.1 ppm
	Flow rate : $2 \text{ m/s} \sim 3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
Reference Electrode	Ag/AgCl (0.01M-KCl)
Insulator	(Automatic pressure equilibrium-type external reference electrode) ZrO ₂

試験片で、試験片の採取方向は、ASTM E399⁹⁾で定義されている T-L 方向である。試験片はすべて、室温大気中において疲労予き裂を導入後試験に供した。

2.2 実験装置

本実験で用いた高温高压水中腐食疲労試験装置は、前報¹⁰⁾で用いたものと同じで、動的負荷容量 $\pm 98 \text{ kN}$ の電気油圧サーボ式疲労試験機、内容積 0.015 m^3 、SUS 316L 製の倒立型オートクレーブおよび最大循環流量 $0.060 \text{ m}^3/\text{h}$ の純水循環装置からなる。循環水の水質監視のため給水側で溶存酸素 (DO) 濃度、pH、液電導度および塩素イオンを、戻り水側では DO 濃度、pH および液電導度をそれぞれ連続的に測定した。また給水側の DO 濃度は、貯水槽内において窒素ガスおよび窒素アルゴン混合ガスにより調整し、所定の濃度になるように制御し、この制御値を試験時の DO 濃度とした。オートクレーブ内への注水の方法としては、(1) ノズル (内径 $\phi 3$ および $\phi 6 \text{ mm}$) による試験

片切欠部への直接注入、(2) ノズルを閉止し、オートクレーブ蓋板から注入、(3) バルブ切替えによる (1) と (2) の交互注入の 3 方法を用いた。Fig. 1 にオートクレーブ内部の模式図を示す。

2.3 実験条件

実験条件をまとめて Table IV に示す。水環境条件としては、沸騰水型炉 (BWR) 冷却材模擬環境とした。疲労き裂伝ば試験は荷重幅一定 ($\Delta P = 22 \text{ kN}$) で、応力比 0.2 を基本とした。本実験における流速は 2 m/s (ピーク値) $\sim 3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (平均値) の範囲とした。本実験で用いた照合電極は圧力平衡型外部照合電極 (Ag/AgCl, 0.01M-KCl) である。試験片の電氣的絶縁には酸化ジルコニウム箔を用いた。き裂長さの測定には高温高压水用差動トランス (LVDT) を用いたコンプライアンス法により行い、試験終了後、試験片の破面から実測して求めた平均の初期き裂長さとして最終き裂長さを用いて補正した。疲労き裂伝ば速度 (da/dN) の解析および応力拡大係数範囲 (ΔK) の算出については、ASTM E647¹¹⁾ に推奨されている Incremental polynomial 法による 7 点多項式近似法並びに計算式をそれぞれ用いた。

3 実験結果

3.1 各種注水方法による影響

高温水中疲労き裂伝ば挙動に及ぼす各種注水方法の

Fig. 1. Schematic diagram of water flow in the autoclave.

Fig. 2. Comparison of various water injection methods on a - N curves of medium sulfur material.

影響を調べるため、特に流速効果が顕著に現れると考えられる中 S 材 (M 材) を用いて、2・2 節で述べた各種注水方法による比較検討を行った。Fig. 2 は、(a) $\phi 3$ mm および (b) $\phi 6$ mm のノズルを用いた場合、並びに (c) ノズルなしの場合のそれぞれの疲労き裂伝ば曲線で、いずれも流速効果をより明瞭に捉えるためバルブ切替えによる流速切替試験結果を示したものであ

る。図にみるように、まずノズルを用いた (a) および (b) の場合、流速切替えに伴うき裂伝ば曲線の変化は明瞭に認められる。また、(a)、(b) 両結果よりノズル内径の影響をみると、 $\phi 3$ mm の場合の方が $\phi 6$ mm の場合より曲線の変化は大きい。一方、ノズルなしの (c) の場合、注水方法が異なるため (a)、(b) 両結果と直接の比較はできないが、オートクレープ蓋板からの流量が 30 L/h および 10 L/h の変化範囲では流速切替えに伴うき裂伝ば曲線の変化は極めて小さい。

Fig. 3 は、Fig. 2 の各き裂伝ば曲線から求めた疲労き裂伝ば速度 (da/dN) と応力拡大係数範囲 (ΔK) の関係を示したものである。図中の縦線は流速切替え位置を示したものである。切替えにより各き裂伝ば速度が切替え位置より若干早い時点で変化しているのは、き裂伝ば速度の計算に 7 点多項式近似法を用いた解析上の理由による。この図からも明らかなように、流速切替えによるき裂伝ば速度の変化は、 $\phi 3$ mm ノズルの場合が最も大きく、ノズルなしの場合が最も小さいことがわかる。

Fig. 4 は、中 S 材を用いて、流速以外の実験条件を揃えて疲労き裂伝ば曲線における流速効果を比較したものである。図中の (a) はノズル ($\phi 3$ mm) より注水した場合、(b) はノズルなしで蓋板より注水した場合、並びに (c) は蓋板からの注水とノズルからの注水を交互に行った場合の流速切替試験による結果である。まず、(a) と (b) の両曲線に注目し、同一き裂長さに到達するまでの繰返し数で比較すると、ノズルを用いた (a) の方がノズルを用いない (b) よりかなり大きな値となっている。一方、(c) の流速切替試験による結果をみると、流速切替による曲線の変化は明瞭に現れており、さらに (a)、(b) 両曲線と比較すると、曲線 (c) のノズルなしの範囲における曲線の傾きは曲線 (b) の同じき裂長さ範囲のそれとよく一致しており、また同じく

Fig. 3. Comparison of various water injection methods on da/dN - ΔK curves of medium sulfur material.

 Fig. 4. Effect of flow rate a - N curves of medium sulfur material at 561K.

 Fig. 5. Effect of flow rate on da/dN - ΔK curves of medium sulfur material at 561K.

ノズルありの場合の曲線の傾きは曲線(a)の同じき裂長さに対応した曲線の傾きによく一致しているのがわかる。Fig. 5は、Fig. 4の各き裂伝ば曲線から求めたき裂伝ば速度(da/dN)を応力拡大係数範囲(ΔK)に対して整理したものである。図中の実線はASME Code Sec XI¹²⁾の参照曲線である。Fig. 4からも予想されるように、ノズルを用いた(a)のき裂伝ば速度が最も遅く、ノズルを用いない(b)のそれが最も速くなっている。一方、(c)のき裂伝ば速度は、流速の切替えに対応して加速、減速を繰返しているのが明瞭に認められる。

以上の結果より、高温高圧水中疲労き裂伝ば挙動における流速の影響は顕著であり、特に注水がき裂の内部に向けて行われた場合その効果は極めて顕著であることから、流速が同環境下の疲労き裂伝ば速度の重要な影響因子の一つであることがわかった。

3.2 材料中の硫黄(S)含有量と流速効果

Fig. 6は、材料および流速条件以外を同一条件にし、中S材の疲労き裂伝ば曲線に及ぼす流速の影響を調べたものである。この図以降における流速切替試験はすべて流速効果が顕著な $\phi 3$ mmのノズルを使用して行った。図より、それぞれの流速条件下での中・低両

 Fig. 6. Effects of sulfur content and flow rate on a - N curves.

 Fig. 7. Effects of sulfur content and flow rate on da/dN - ΔK curves.

S材との結果を比較すると、まず低流速条件下では最終き裂長さに到達するまでの繰返し数は中S材の方が低S材に比べて3分の1程度にまで低下しているのに対して、高流速条件下では、中S材の最終繰返し数は低S材の場合の約80%程度に低下しているのがわかる。Fig. 7は、Fig. 6の a - N 曲線から得られた da/dN を ΔK に対して整理したものである。図より、低流速条件下では中S材の da/dN は低S材のそれより最大4倍程度加速しているのに対し、高流速条件下では、同じく1.5倍程度の加速を示すにすぎないことがわかる。

以上の結果より、高温水中疲労き裂伝ば挙動に及ぼす流速の影響は、材料中の硫黄(S)含有量に強く依存し、低S材より中S材の方がより顕著な環境加速効果を示すことがわかった。

3.3 破面観察結果

Fig. 8は、中S材の(a)ノズルありおよび(b)ノズルなしの場合のSEMによる典型的な破面観察写真である。き裂はいずれも左から右へ伝ばしている。両破面写真にはいずれもMnSの溶出痕とみられる細長いボイドが圧延方向に平行に多数観察された。これらのボイドの状況を流速との対応から比較してみると、(a)のノズルを用いた高流速の場合、ボイドおよびその周辺は腐食によりかなり溶解した様子がみられるのに対

Direction of crack growth

Medium sulfur

(a) Fast flow with a nozzle and (b) Slow flow without a nozzle.

Fig. 8. Typical examples of microscopic fracture surfaces of medium sulfur material.

して、(b)のノズルなしの低流速の場合には、(a)でみられたような腐食による著しい溶解はとくに認められなかった。またボイドの輪郭は明瞭に残っており、ボイド周辺の破面も平面的で擬へき壊破面を呈している。

Fig. 9. Effects of flow rate on a - N curves (a) and corrosion potential (b) & (c).

以上の観察結果より、両流速条件に対応して高温水中疲労き裂伝ば機構に差異があることがわかった。

3・4 き裂伝ば特性と腐食電位

高温水中疲労き裂伝ば曲線に及ぼす流速効果と腐食電位の関係について明らかにするため、中・低両 S 材を用いてそれぞれ流速切替試験を実施し、同時にその時の腐食電位を測定した。その結果を Fig. 9(a), (b) および (c) に示す。Fig. 9(a) は、中・低両 S 材に対して行った流速切替試験により得られたき裂伝ば曲線を示したもので、これらの伝ば挙動は Fig. 4(c) のそれと定性的に同じである。Fig. 9(a) において、高流速から低流速への切替えに伴うき裂伝ば曲線の変化をみると、中 S 材の方が低 S 材より曲線の傾きが大きく立ち上がっているのがわかる。同図(b)および(c)は、同図(a)のき裂伝ばに伴う腐食電位の変化をそれぞれ中 S 材および低 S 材について測定したものである。ここで縦軸の電位については、測定感度をあげるため測定電圧から初期の腐食電位を差し引いた電位差(ΔE)を用いた。(b)(c)両図とも、き裂伝ば曲線の傾きが増加する高流速から低流速への切替え時の腐食電位はいずれも卑の方向へ急激に低下しているのが認められ、さらにその低下の度合いは中 S 材の方が低 S 材より顕著であることがわかる。

4 考 察

4・1 高温水中疲労き裂伝ば挙動の流速効果

Fig. 2~7 に示したように、本実験で得られた一連の流速切替試験並びに定流速試験結果より、ノズルを用いる方が、すなわち高流速の方がき裂伝ば速度は減

Fig. 10. Relations between the ratio of environmental acceleration in da/dN and water flow rate.

速する傾向にあり、またノズルなしの場合、すなわち低流速の方がき裂伝ば速度を加速させる傾向にあることがわかった。これらの結果をまとめて、大気中の疲労き裂伝ば速度 $(da/dN)_{air}$ に対する高温水中での疲労き裂伝ば速度 $(da/dN)_{water}$ の比 $\{(da/dN)_{water} / (da/dN)_{air} = A^*\}$ で表した環境助長割れ係数 (A^*) を用い、流速に対して整理したものが Fig. 10 である。ここで横軸の流速の値は、高压ポンプから間欠的に吐出される流量をもとに時間的な平均化処理をして求めたものである。図より、環境助長割れ係数 (A^*) は流速の低下とともに増加し、その傾向は中 S 材の方が低 S 材に比べ、特に低流速域で顕著であることがわかる。縦軸の環境助長割れ係数 (A^*) については、流速の低下とともに無限に増加するようなものではなく、その極限值としては、本実験結果からも明らかのように、高 S 材/滞留水の因子の組み合わせ以外にも、高応力比¹⁴⁾、低繰返し速度等¹⁵⁾の影響因子をも考慮した最大加速率と関連した値で、例えば、水素誘起割れを伴う応力腐食割れ現象に対応した限界値のようなのであろうと考えられる。

本実験で得られた流速切替試験結果および定流速試験結果において認められた流速効果については、定性的に以下のように説明することができよう。すなわち、水環境の中で疲労き裂が伝ばする場合、上下のき裂面で挟まれたき裂のすき間内部においては、溶存酸素 (DO) や pH に代表される水化学性状はバルクのそれとはかなり異なっているものと考えられる^{16), 17)}。DO 濃度については、水中の酸素が疲労き裂の伝ばに伴って生じた新生面の酸化皮膜の生成に消費されるため、バルクからの水の供給が十分でない場合にはすき間内の DO は低下することになる。またすき間内の pH については、新生面での腐食溶解に伴うカソード反応により発生する水素イオンや、4・2 節でも述べるように、材料中の MnS 介在物の溶解により生成される水素イ

オンによりき裂のすき間内の pH はバルクに比べて低下してくるものと考えられる。このような状況下のもので流速切替試験を行うと、ノズルを用いて水を直接切欠部へ注水した場合、き裂にすき間内の水はバルクのそれと置き換わってしまうことになる。このように吹付けによる効果は DO の供給並びに pH の上昇という相反する二つの事象を誘発することになる。すなわち DO 濃度の観点からみると、DO 濃度の高いバルクの水を供給することは腐食を促進する方向へ働くはずである。実際、文献によると、Fe の全面腐食に及ぼす中性液中での水流速の影響を調べた結果、乱流以上の流速条件下では、流速の増加とともに腐食量も増加すると言われている。本実験の場合、バルクの DO 濃度は 0.2 ppm と、561K における飽和濃度 (8 ppm) に比べてかなり低いいため、結果的には、酸素の供給効果や吹付けによる腐食生成物の除去効果よりも水の置換による pH の上昇に伴い、すき間内の腐食溶解あるいは水素ぜい化割れが抑制される効果の方が大きいものと考えることができる。著者らはすでに高温水環境下での SQV2A 材の疲労き裂伝ば速度に及ぼす DO 濃度の影響¹⁹⁾を調べた。それによると DO 濃度が 1 ppm 以下では環境加速はほとんど認められないという結果を得ており、このことから DO 濃度が 0.2 ppm の環境下で行った流速切替試験における酸素の供給効果は小さいものと考えられる。

Tice ら⁷⁾のまとめた流速と S 含有量との関係における環境助長割れ発生機構線図は、PWR 冷却模擬環境下 (温度: 593K, 圧力: 15 MPa, DO: <5 ppb, ほう酸: 6000 ppm, LiOH: 2 ppm) で、応力比が 0.7 の場合のデータであるが、基本的には本実験結果の傾向と同様に、流速の低下とともに環境助長割れが加速する傾向を示している。しかしながら流速の表示については層流や乱流等の表示のみで具体的な流速値は明瞭ではない。

4・2 高温高压水中疲労き裂伝ば機構

高温高压水中疲労き裂伝ば機構を明らかにするには、Fig. 6～10 に示した一連の実験結果からも明らかのように、MnS の溶解挙動とき裂伝ば挙動との関係を明らかにすることが重要となるものと考えられる。流速切替試験時における疲労き裂伝ば挙動と腐食電位の関係を調べた Fig. 9 の結果から、流速をノズルありからノズルなしに切替えた場合、すなわち高流速から低流速へ変化させると電位はいずれの供試材の場合も卑の方向へ急激に低下しているのが認められた。この吹付け停止による電位の低下の理由としては、二つ考えられる。一つには、吹き付け停止に伴いき裂のすき間内における溶存酸素濃度が低下したことによるいわゆる通気差電位によるものである。これについては、高温

水中における低合金鋼の腐食電位と DO 濃度との関係を調べた Atkinson²⁰⁾らの実験結果やき裂内の DO 濃度を測定した Gabetta¹⁶⁾らの実験結果からも定性的に説明できる。二つ目の理由としては、すき間内における MnS の溶解やカソード反応による pH の低下である。高温水環境下における MnS の溶解に伴う化学反応式は式(1)のように与えられる。

式(1)より、MnS の溶解が進むにつれて水素イオンが増加し pH が低下することになる。すき間内において pH が低下することは Combrade¹⁷⁾の実験結果において示されている。Fig. 9 において、流速切替時に対応した電位低下部分の曲線の傾きに注目すると中 S 材の方が急激に低下しているのがわかる。これは中 S 材の場合、カソード反応による水素イオンの生成が活発であるため系の電位が卑の方へ引き下げられたものとみることができる。

き裂のすき間内において、pH の低下によりき裂先端部の金属の溶解がどの程度促進されるのか、あるいはき裂先端部に拡散した水素が MnS 介在物とどのように結びついて水素ぜい化割れを引き起こすのか等については、局部現象を詳細にモニターし、定量的な把握が可能な微小電極等による高温水環境下でのき裂面内部の水化学に関する直接計測技術の確立が不可欠であり、今後の課題である。

5 結 言

硫黄(S)含有量の異なる2種類の压力容器用低合金鋼(中 S 材: S=0.014 wt%, 低 S 材: S=0.004 wt%)を用いて、高温水中疲労き裂伝ば挙動に及ぼす流速の影響等を調べた結果は以下のようである。

(1) 流速効果を調べるための試験法としては、ノズルによる試験片切欠部への直接吹付法を用いた流速切替試験が最も有効である。

(2) 高温水中疲労き裂伝ば速度は、流速が遅いほど加速する傾向にあり、この傾向は S 含有量が高いほど顕著であった。

(3) 高温水環境下の疲労き裂伝ば試験において腐食電位の連続計測を行った結果、流速切替試験時のき裂成長曲線の変化と電位が良い相関を示したことから、同環境助長割れ機構の解明においては電気化学的手法が有効となる可能性があることがわかった。

(平成2年7月19日 第4回疲労国際会議にて講演)

参 考 文 献

- 樋口 洵, 坂本 博, 鉄と鋼, **71**, 1025 (1985).
- 佐藤俊司, 永田徳雄, 片田康行, 鉄と鋼, **75**, 1928 (1989).
- 例えば, Proc. of the 3rd IAEA Specialists Meeting on Subcritical Crack Growth (1990).
- B. Tomkins, Int. J. Pres. Ves. & Piping, **40**, 331 (1989).
- Y. Katada and N. Nagata, Corrosion Science, **25**, 693 (1985).
- Y. Katada, N. Nagata and S. Sato, Int. J. Pres. Ves. & Piping, **48**, 37 (1991).
- D. R. Tice, J. D. Atkinson & P. M. Scott, Proc. of the 2nd IAEA Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth, **1**, 251 (1985).
- H. Kitagawa, H. Nakajima, N. Nagata, Y. Sakaguchi and T. Iwadate, Proc. of the 2nd IAEA Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth, **1**, 135 (1985).
- ASTM Standard E 399-83 (1983).
- 永田徳雄, 片田康行, 鉄と鋼, **74**, 718 (1988).
- ASTM Standard E 647-83 (1983).
- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section XI, Appendix A (1980).
- S. Matsushima, Y. Katada, S. Sato and N. Nagata, Proc. of the 7th APCCC, **1**, 112 (1991).
- W. H. Bamford, ASME Trans., J. Pres. Ves. Tech., **102**, 433 (1980).
- W. A. Van Der Sluys and R. H. Emanuelson, Proc. of the 2nd IAEA Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth, **1**, 199 (1985).
- G. Gabetta and G. Buzzanca, Proc. of the 2nd IAEA Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth, **2**, 219 (1985).
- P. Combrade, M. Foucault and G. Slama, Proc. of the 2nd IAEA Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth, **2**, 201 (1985).
- 伊藤伍郎, “改訂腐食科学と防食技術”, p. 101 (1983) コロナ社
- N. Nagata and Y. Katada, Trans. of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne, **F**, 167 (1987).
- J. D. Atkinson, J. E. Forrest, Proc. of the 2nd IAEA Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth, **2**, 153 (1985).
- H. Choi, F. H. Beck, Z. Szklarska-Smialowska and D. D. Macdonald, Corrosion, **38**, 136 (1982).