JAERI-M
6100

鋭敏化したAISI304ステンレス鋼の高温水中の腐食割れ伝播

(交番荷重下の応力腐食割れと腐食疲労の重畳)

1975年4月

中島　甫・菊山　紀彦・新藤　雅美・鈴木　富男
菊地　正彦・小川　豊・(故)牧野　幸治・近藤　達男

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は，日本原子力研究所がJAERI-Mレポートとして，不定期に刊行している研究報告書です．入手，複製などのお問合わせは，日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて，お申しこしください．

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

鋭敏化したAISI 304ステンレス鋼の高温水中の腐食割れ伝播
（交番荷重下の応力腐食割れと腐食疲労の重畳）

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部
中島 甫，菊山紀彦，新藤雅美，鈴木
富男，菊地正彦，小川 豊，㊟牧野
幸治，近藤達男

（1975年2月24日受理）

軽水炉の炉内条件を想定した高温高圧純水中で，オーステナイトステンレス鋼の交番応力下の亀裂の伝播試験を行った。試験片に作用する台形波の最大荷重時における保持時間を種々に変化させることを利用して，亀裂の伝播のうち荷重の静応力成分によって生ずると考えられる応力腐食割れ効果による亀裂の伝播速度を評価することを試みた。適当な溶存酸素濃度と試験条件を選ぶことによって求めた結果から応力腐食割れと腐食疲労との重畳効果としての割れ進展を考えることが出来ることを示し，こうした機構にもとずいて破壊のモデルを考えることの重要性も合せて指摘した。

JAERI - M 6100

Environment-enhanced crack propagation of sensitized type 304 stainless steel in simulated B W R environment

(Combined effect of stress corrosion cracking and corrosion fatigue under cyclic loading)

Hajime NAKAJIMA, Toshihiko KIKUYAMA, Masami SHINDO, Tomio SUZUKI, Masahiko KIKUCHI, Yutaka OGAWA, late Yukiharu MAKINO and Tatsuo KONDO

Div. of Nuclear Fuel Research, Tokai, JAERI.
(Received February 24, 1975)

A preliminary work on the study of crack propagation of sensitized AISI type 304 stainless steel in simulated boiling water reactor environment is described. Particular stress is placed on the combined effect of cyclic and static stresses, when the material is loaded cyclically with trapezoidal stress wave form of varied holding time at tension. The measurement of propagation was made successful by using the tapered double-cantilever-beam type specimens, which gave a constant stress intensity factor under a fixed load level throughout the test. The effect of chemical environment, therefore, was evaluated by simple comparative examination. The load level and water chemistry were fixed during the test, and the effect of the time at tension was made an variable. For the two dissolved oxygen levels, ie. low (0.1 ppm) and high (10 to 40 ppm), a strong influence on the mode of cracking was observed. The major findings were;

1) Apparent accelerration of crack propagation in 200°C water comparative to the ambient air environment. and
2) Change in fracture mode from transgranular (fatigue) to intergranular (stress corrosion cracking) types with either increase of the oxygen content in water or the holding time at tension.

The results of measurements were analysed in terms of the combined effect of the time-dependent stress corrosion and the cycle-dependent corrosion fatigue.

目　　次

1. 研究開始の経緯 …… 1
2. 緒　論 …… 1
3. 実験方法 …… 2
3.1 試験機の概要と高温高圧水条件 …… 2
3.2 供試材と試験片形状 …… 3
3.3 試験方法と亀裂伝播速度の算出 …… 3
3.4 応力拡大係数の算出 …… 3
4. 実験結果 …… 4
4.1 交播応力下の亀裂伝播におよぼす高温高圧純水環境の影響 …… 4
4.2 オーステナイトステンレス鋼の応力腐食割れと腐食疲労の重畳下の亀裂伝播 …… 5
5. 討　論 …… 6
5.1 応力腐食割れによる亀裂伝播速度の測定法の評価 …… 6
5.2 応力腐食割れと腐食疲労との相異と両者の重畳の可能性 …… 6
6. 総　括 …… 7
7. 参考文献 …… 7

1　研究開発の経緯

昭和47年8月，JPDRの緊急時炉心冷却配管系の一部に水洩れが起り，原因究明研究の結果，Type 304鋼の溶接熱影響部に起った応力腐食割れであることが示された。[1] 高温水中の応力腐食割れの研究は国内外で少なからずなされているが，(1)低応力で長時間の間に起る現象としての把握，(2)亀裂発生後の伝播速度や破断モード，等原子炉の安全性評価に直結する立場での研究は極めて少ない。とくに割れの伝播を支配する力学的因子，冶金的因子ならびに水化学的因子については定量的な知見が乏しく，正確な議論をすることが困難である。応力腐食割れは時間依存の割れであり，元来静応力下で試験すべきものであるが，現状では急に装置の製作をする余裕がないことと，実際の原子炉は変動応力下にあることを考慮して次のような研究を試みた。

すなわち本研究はかって低合金鋼製圧力容器の腐食疲労の研究のために著者ら[9][10]が独自に開発した腐食疲労試験機を活用して変動応力下の鋭敏化ステンレス鋼の応力腐食割れ伝播試験の可能性をさぐったものである。

昭和49年4月に開始以来ここに示す結果により原理的にこの種の手法で応力腐食割れの伝播に関する新たな観点からの知見を蓄積できる可能性を認めたと言える。

なお本研究は室員の協力作業で進められたので，下にその分担を記す。

1. 計画立案と解析　　近藤 達男，中島　甫
2. 試験の推進　　中島　甫，菊山紀彦
3. 試験実施のための協力　　新藤 雅美，鈴木富男，菊地正彦，小川　豊
   (故) 牧野 幸治

2　緒　論

オーステナイトステンレス鋼における応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking 以後S. C. C. と呼ぶ）がはじめて見出されたのはかなり前のことである。一般工業材料のS. C. C. は主に塩化物を含んだ環境を対象としたものであったのに対し，[2]ここで問題とする高温高圧純水環境におけるものは性格が若干異るものである。[3]

軽水炉の実用化が本格的になった今日，高温高圧純水環境下でのオーステナイトステンレス鋼のS. C. C. が数多く経験されるようになったが，その時間的ズレの一つの原因はS. C. C. のもつ比較的長い潜伏期間のためと思われる。こうした宿命的な問題やS. C. C. が本来確率的なものである点からみて，実験室的規模での再現試験はかなり困難なものであるが，最近ようやくそれらの支配因子についての検討もあらためて系統的になされるようになった。[4][5][6]

S. C. C. についての研究が数十年間も続けられてきたにもかかわらず，その機構の複雑さ，支配因子の多様性，確率的性格等のゆえに亀裂の発生と伝播についての過程を定量的に解析した例は少ない。[7]それらのほとんどがなんらかの加速条件下で試験の開始から試験片の破断まで

1 研究開発の経緯

昭和47年8月，JPDRの緊急時炉心冷却配管系の一部に水洩れが起り，原因究明研究の結果，Type 304鋼の溶接熱影響部に起った応力腐食割れであることが示された。[1] 高温水中の応力腐食割れの研究は国内外で少なからずなされているが，(1)低応力で長時間の間に起る現象としての把握，(2)亀裂発生後の伝播速度や破断モード，等原子炉の安全性評価に直結する立場での研究は極めて少ない。とくに割れの伝播を支配する力学的因子，冶金的因子ならびに水化学的因子については定量的な知見が乏しく，正確な議論をすることが困難である。応力腐食割れは時間依存の割れであり，元来静応力下で試験すべきものであるが，現状では急に装置の製作をする余裕がないことと，実際の原子炉は変動応力下にあることを考慮して次のような研究を試みた。

すなわち本研究はかって低合金鋼製圧力容器の腐食疲労の研究のために著者ら[9][10]が独自に開発した腐食疲労試験機を活用して変動応力下の鋭敏化ステンレス鋼の応力腐食割れ伝播試験の可能性をさぐったものである。

昭和49年4月に開始以来ここに示す結果により原理的にこの種の手法で応力腐食割れの伝播に関する新たな観点からの知見を蓄積できる可能性を認めたと言える。

なお本研究は室員の協力作業で進められたので，下にその分担を記す。

1. 計画立案と解析　　近藤 達男，中島 甫
2. 試験の推進　　中島 甫，菊山紀彦
3. 試験実施のための協力　　新藤 雅美，鈴木富男，菊地正彦，小川 豊
   (故) 牧野 幸治

2 緒　論

オーステナイトステンレス鋼における応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking 以後S. C. C. と呼ぶ）がはじめて見出されたのはかなり前のことである。一般工業材料のS. C. C. は主に塩化物を含んだ環境を対象としたものであったのに対し，[2] ここで問題とする高温高圧純水環境におけるものは性格が若干異るものである。[3]

軽水炉の実用化が本格的になった今日，高温高圧純水環境下でのオーステナイトステンレス鋼のS. C. C. が数多く経験されるようになったが，その時間的ズレの一つの原因はS. C. C. のもつ比較的長い潜伏期間のためと思われる。こうした宿命的な問題やS. C. C. が本来確率的なものである点からみて，実験室的規模での再現試験はかなり困難なものであるが，最近ようやくそれらの支配因子についての検討もあらためて系統的になされるようになった。[4][5][6]

S. C. C. についての研究が数十年間も続けられてきたにもかかわらず，その機構の複雑さ，支配因子の多様性，確率的性格等のゆえに亀裂の発生と伝播についての過程を定量的に解析した例は少ない。[7] それらのほとんどがなんらかの加速条件下で試験の開始から試験片の破断まで

の時間，すなわち寿命という粗い評価法を取らざるを得なかった。

近年破壊力学（Fracture Mechanics 以後F. M. と呼ぶ）の進歩もあって，疲労亀裂の伝播や脆性破壊のような切欠感受性を持った材料の破壊現象への見通しを明るくし，この方向の研究への一つの足掛が出来てきた。F. M. の適用により，若干の定量性，再現性，試験効率の改善，設計および製造面への反映もより具体性を帯びてきた。

多くの研究者によりS. C. C. による亀裂の伝播に対するF. M. の適用の有効性が示唆されているが，[8] 今のところF. M. の利点を充分に生かしうるほどのデータの蓄積はなく，とくに高温高圧純水中のステンレス鋼の場合は実験技術上の困難さもあって，信頼出来るデータはあまりない。

本報告では，とくに高温高圧純水中のオーステナイトステンレス鋼のS. C. C. で，構造体の残存寿命を予測する上で興味のある亀裂伝播挙動に焦点を合わせた。例えばＪＰＤＲをはじめ海外のB. W. R. におけるステンレス鋼配管の溶接部近傍のＳ．Ｃ．Ｃ．が問題となっているが，亀裂発生以後の伝播に関する知見の重要性がしばしば指摘されている。本実験はこうした背景に対して従来の研究がカバーしなかった問題について測定技術の確立と評価を目ざして企画された。

F. M. の手法を用いて亀裂伝播におよぼすS. C. C. （時間依存の割れ）と腐食疲労（Corrosion Fatigue 以後C. F.と呼ぶ）（サイクル依存の割れ）の効果を分離することが出来たと仮定すれば，S. C. C. による亀裂の伝播速度の測定方法をもう一つ変化に富ませることになると期待される。またこの実験をベースに若干の支配因子についての検討も実施することとした。具体的方法としては，既設の腐食疲労試験機にF. M. によるパラメーター応力拡大係数K（Stress Intensity Factor 以後Kと呼ぶ）が亀裂の伝播によらずいつも一定となる試験片を装着し，高温高圧純水中で特定の応力波形を与えて最大荷重での保持時間の異なる数条件で繰返し疲労試験を実施し，得られた見掛けの亀裂伝播速度と最大荷重での保持時間 t_{hold}（以後 t_{hold} と呼ぶ）との対応関係があるかどうか調べることから出発した。

3 実験方法

3.1 試験機の概要と高温高圧水条件

容量１０トンの単軸引張圧縮型の電磁油圧式疲労試験機と高温高圧純水ループを組み合わせた腐食疲労試験機を用いた。[9][10] それらの詳細についてはここでは割愛するが，高温高圧純水中にある試験片は高温高圧純水と同圧力に保持されている常温のガス室を介したラムロッドにより正確に荷重を附加することが出来る。使用した高温高圧純水の条件は，試験能率を考慮して比較的低温ながら腐食効果の大きい２００℃を選び，４０気圧で比抵抗約１MΩ／cm の純水を用いた。またS. C. C. に大きな影響をおよぼすと考えられる溶存酸素は沸騰水型原子炉を想定した約 0.1 ppm 程度の場合と，一部加速の意味で１０～４０ ppm を含むものを用いて比較した。なおClarkeら[11] によると溶存酸素は２～３ ppm を超えるとS. C. C. に対する効果は落ちついたある一定の状態と見なせることが示されている。

の時間，すなわち寿命という粗い評価法を取らざるを得なかった。

近年破壊力学（Fracture Mechanics 以後F. M. と呼ぶ）の進歩もあって，疲労亀裂の伝播や脆性破壊のような切欠感受性を持った材料の破壊現象への見通しを明るくし，この方向の研究への一つの足掛が出来てきた。F. M. の適用により，若干の定量性，再現性，試験効率の改善，設計および製造面への反映もより具体性を帯びてきた。

多くの研究者によりS. C. C. による亀裂の伝播に対するF. M. の適用の有効性が示唆されているが，[8] 今のところF. M. の利点を充分に生かしうるほどのデータの蓄積はなく，とくに高温高圧純水中のステンレス鋼の場合は実験技術上の困難さもあって，信頼出来るデータはあまりない。

本報告では，とくに高温高圧純水中のオーステナイトステンレス鋼のS. C. C. で，構造体の残存寿命を予測する上で興味のある亀裂伝播挙動に焦点を合わせた。例えばJ P D Rをはじめ海外のB. W. R. におけるステンレス鋼配管の溶接部近傍のS．C.C.が問題となっているが，亀裂発生以後の伝播に関する知見の重要性がしばしば指摘されている。本実験はこうした背景に対して従来の研究がカバーしなかった問題について測定技術の確立と評価を目ざして企画された。

F. M. の手法を用いて亀裂伝播におよぼすS. C. C. （時間依存の割れ）と腐食疲労（Corrosion Fatigue 以後C. F.と呼ぶ）（サイクル依存の割れ）の効果を分離することが出来たと仮定すれば，S. C. C. による亀裂の伝播速度の測定方法をもう一つ変化に富ませることになると期待される。またこの実験をベースに若干の支配因子についての検討も実施することとした。具体的方法としては，既設の腐食疲労試験機にF. M. によるパラメーター応力拡大係数K（Stress Intensity Factor 以後Kと呼ぶ）が亀裂の伝播によらずいつも一定となる試験片を装着し，高温高圧純水中で特定の応力波形を与えて最大荷重での保持時間の異なる数条件で繰返し疲労試験を実施し，得られた見掛けの亀裂伝播速度と最大荷重での保持時間 t_{hold}（以後 t_{hold} と呼ぶ）との対応関係があるかどうか調べることから出発した。

3 実験方法

3.1 試験機の概要と高温高圧水条件

容量１０トンの単軸引張圧縮型の電磁油圧式疲労試験機と高温高圧純水ループを組み合わせた腐食疲労試験機を用いた。[9][10] それらの詳細についてはここでは割愛するが，高温高圧純水中にある試験片は高温高圧純水と同圧力に保持されている常温のガス室を介したラムロッドにより正確に荷重を附加することが出来る。使用した高温高圧純水の条件は，試験能率を考慮して比較的低温ながら腐食効果の大きい２００℃を選び，４０気圧で比抵抗約１MΩ／cm の純水を用いた。またS. C. C. に大きな影響をおよぼすと考えられる溶存酸素は沸騰水型原子炉を想定した約 0.1 ppm 程度の場合と，一部加速の意味で１０～４０ ppm を含むものを用いて比較した。なおClarkeら[11]によると溶存酸素は２～３ ppm を超えるとS. C. C. に対する効果は落ちついたある一定の状態と見なせることが示されている。

3.2 供試材と試験片形状

供試材は板厚12mmの日本金属工業（株）製のAISI304鋼であり，化学組成および熱処理条件を表1に示す。また試験片の形状は図1に示す如くであり，亀裂の進行方向は圧延方向に対して直角になるよう採取した。この試験片の形状はT. D. C. B. 型と呼ばれ，F. M. のパラメーターKが亀裂の進展によっても一定区間ほとんど変化しないことを特色とするものである。

このような形状の試験片を用いると，亀裂長さのある範囲内では応力条件を一定にすれば亀裂の伝播速度が一定となると期待され，これに腐食環境を与えればその効果が直接的に伝播速度の変化として読み取れると考えられる。試験片採取後620℃×24時間の鋭敏化熱処理を施し，その後亀裂の伝播する面をエメリーペーパーで湿式研磨し，最終的にダイヤモンドペースト仕上げののち，試験に供した。

3.3 試験方法と亀裂伝播速度の算出

試験片を試験機に装着後，0.6±0.5トン，30cpmの三角波による荷重制御方式により，予備亀裂の発生および伝播を行わせ，亀裂長さがKの計算の適用範囲に到達するまで実施し，その後各種の試験に供した。また予備試験として，亀裂伝播速度が亀裂長さに依存しないことも念のため確認した。

荷重の附加は0.8±0.6トン，60cpmの三角波による荷重制御状態で保持時間ゼロの場合を基本にし，高温高圧純水の場合はこれとは別にさらに荷重の増減時の速度は60cpmの場合と同一にしたまま，繰返し速度をかえ荷重の最高となっている時間すなわち台形の頂上の長さを変えた試験を実施した。

亀裂長さの測定は写真撮影およびカセトメーターにより直接読み取ることを行い，1/100mmの変化を読み取った。読み取り誤差は最大3/100mm程度であると思われる。

またS. C. C. による亀裂の伝播速度の算出方法の概要を図2に示す。すなわちオーステナイトステンレス鋼の高温高圧純水中において $K_{1\,S.C.C.}$（これより低いKではS. C. C. が伝播しないしきい値）が存在すると仮定する。この値は実測の例がなく今のところ不明である。しかし本実験で用いた最大荷重1.4トンから算出される K_{max} は36,600 $lb \cdot in^{-3/2}$ であり，それ自体充分大きいK値を与えるので，$K_{1\,S.C.C.}$ として一般に考えられる水準よりはかなり大きいと考えられ，t_{hold} の間試験片にはS. C. C. による亀裂伝播を生じることは過去の定性的なデータ[11]を参照すると一応確実と思われた。

3.4 応力拡大係数の算出

T. D. C. B. 型試験片の形状とK値との関係についてはF. M. の提唱された初期より多くの研究者により検討がなされてきた。[12][13]本実験ではMostovoy ら[14] により開発されたもので，ステンレス鋼の疲労伝播についての研究でJames ら[15]も採用して好ましい結果を得たことに注目し，彼の用いた試験片を近似した形状とした。この形状の試験片は亀裂長さが25.4mmから76.2mmの範囲でK一定の関係が成立し，K値は次の式で表わされる。

$$K = \sqrt{\frac{P^2 \times 8 \times m}{2 \times B_n \times B}}$$

但し　m　= 5.45

P　; 荷重（lb）

B_n : 溝の底における試験片厚さ（inch）

B　: 試験片厚さ（inch）

図2に示したような荷重附加モードで t_{hold} を可変とし K_{max} と K_{min} の間を交番する場合，本実験で用いた応力条件から計算によって求めたK値は次のようである。

$$K_{max} = 119\,kg \cdot mm^{-3/2} \quad (33{,}600\,lb \cdot in^{-3/2})$$

$$K_{min} = 17.0\,kg \cdot mm^{-3/2} \quad (4{,}800\,lb \cdot in^{-3/2})$$

また応力拡大係数振巾 ΔK（Stress Intensity Factor Range 以後 ΔK と呼ぶ）は

$$\Delta K = 102\,kg \cdot mm^{-3/2} \quad (28{,}800\,lb \cdot in^{-3/2})$$

である。

4　実験結果

4.1　交番応力下の亀裂伝播におよぼす高温高圧純水環境の影響

200℃，40気圧，溶存酸素0.1ppmの高温高圧純水中で0.8±0.6トンの三角波荷重制御方式による腐食疲労試験の途中で t_{hold} を0sec，5sec，10sec，29secとすることにより荷重附加の勾配を変えることなく，繰返し速度を変え，亀裂伝播速度におよぼす腐食環境の影響を調らべた結果が図3である。ここで t_{hold} を極端に変えると，腐食疲労試験後の破面はそれに対応した変化が生じるから，この変化を利用してその時々の亀裂長さを推定する方法を用いた。疲労亀裂長さのマーキング法として，平均応力の水準を変える方法[16]等が報告されているが，本実験で試みた繰返し速度を変える方が亀裂先端のひずみ域を大巾に変化させない点でむしろ好ましい手段と言える。

t_{hold} の長短の如何で亀裂伝播の様子が若干異ることが当然予測され，事実そのような傾向にあったが，ここでは各試験条件での定常状態の試験の繰返し数が不充分であったため，定量的な評価を試みるまでには至らなかった。したがって破面観察のときに途中経過を知る大まかな目安を与える程度の役割しかもたせることができなかった。しかしながら図4，5に示す光学顕微鏡組織や破面の観察結果から，全体としての亀裂の伝播挙動におよぼす腐食環境の影響が明らかに示された点に注目したい。繰返し速度を遅くし，t_{hold} を長くする効果も破面からは定性的にその影響が見られ，次第に粒界破壊の様相を深めることや，亀裂の枝分れ傾向を強めることがうかがわれた。このことから高温高圧純水中の t_{hold} の効果は試験条件を適度に選ぶことでより顕著になることが十分予想できる。すなわち

(1)　より長期間にわたり一定の条件を保持したこの種の試験を続けることや，長い t_{hold} を与え

$$K = \sqrt{\frac{P^2 \times 8 \times m}{2 \times B_n \times B}}$$

但し　m　= 5.45

P　; 荷重（lb）

B_n : 溝の底における試験片厚さ（inch）

B　: 試験片厚さ（inch）

図2に示したような荷重附加モードで t_{hold} を可変とし K_{max} と K_{min} の間を交番する場合，本実験で用いた応力条件から計算によって求めたK値は次のようである。

$$K_{max} = 119\,kg \cdot mm^{-3/2} \quad (33{,}600\,lb \cdot in^{-3/2})$$

$$K_{min} = 17.0\,kg \cdot mm^{-3/2} \quad (4{,}800\,lb \cdot in^{-3/2})$$

また応力拡大係数振巾 ΔK（Stress Intensity Factor Range 以後 ΔK と呼ぶ）は

$$\Delta K = 102\,kg \cdot mm^{-3/2} \quad (28{,}800\,lb \cdot in^{-3/2})$$

である。

4　実験結果

4.1　交番応力下の亀裂伝播におよぼす高温高圧純水環境の影響

200℃，40気圧，溶存酸素0.1ppmの高温高圧純水中で0.8±0.6トンの三角波荷重制御方式による腐食疲労試験の途中で t_{hold} を0sec，5sec，10sec，29secとすることにより荷重附加の勾配を変えることなく，繰返し速度を変え，亀裂伝播速度におよぼす腐食環境の影響を調らべた結果が図3である。ここで t_{hold} を極端に変えると，腐食疲労試験後の破面はそれに対応した変化が生じるから，この変化を利用してその時々の亀裂長さを推定する方法を用いた。疲労亀裂長さのマーキング法として，平均応力の水準を変える方法[16]等が報告されているが，本実験で試みた繰返し速度を変える方が亀裂先端のひずみ域を大巾に変化させない点でむしろ好ましい手段と言える。

t_{hold} の長短の如何で亀裂伝播の様子が若干異ることが当然予測され，事実そのような傾向にあったが，ここでは各試験条件での定常状態の試験の繰返し数が不充分であったため，定量的な評価を試みるまでには至らなかった。したがって破面観察のときに途中経過を知る大まかな目安を与える程度の役割しかもたせることができなかった。しかしながら図4，5に示す光学顕微鏡組織や破面の観察結果から，全体としての亀裂の伝播挙動におよぼす腐食環境の影響が明らかに示された点に注目したい。繰返し速度を遅くし，t_{hold} を長くする効果も破面からは定性的にその影響が見られ，次第に粒界破壊の様相を深めることや，亀裂の枝分れ傾向を強めることがうかがわれた。このことから高温高圧純水中の t_{hold} の効果は試験条件を適度に選ぶことでより顕著になることが十分予想できる。すなわち

(1)　より長期間にわたり一定の条件を保持したこの種の試験を続けることや，長い t_{hold} を与え

ることでもっと定量的な値を求めうる。その反面

(2) 溶存酸素を増すことでS. C. C. 成分の支配を強めることが出来ると考えられるから，比較的短い t_{hold} でも十分に測定範囲にもってこれる。

以上の二点をうまく組み合せると効率の良いS. C. C. とC. Fの重畳効果の実験が可能になるであろう。

4.2 オーステナイトステンレス鋼のS.C.C. とC.Fの重畳下の亀裂伝播

今回はとくに高温高圧純水中でオーステナイトステンレス鋼にS. C. C. を交番応力下で発生させ，その亀裂の伝播挙動を調べることに主眼を置く。前節の試験に比較して化学的な加速のため溶存酸素を10〜40ppmとし，さらに t_{hold} も範囲を大きくとり，最長5min とした。

このことは実験の長期化を余儀なくしたが，本報で述べる結果を得るには連続75時間の実験の継続を要した。

また亀裂の伝播に対して試験中で力学的条件を変える場合の履歴効果を防止する意味で，一条件一枚の試験片を用いることにし，条件の変るたびに試験片を更新して試験を繰返した。一連の試験で得られた結果はまとめて表2に示してある。また各試験片の光学顕微鏡組織および破面を図6〜図9に示す。

まず化学的な因子である溶存酸素についてみると，溶存酸素量が多くなるほど全体として亀裂伝播速度が大きくなることがわかる。t_{hold} の影響について特に注目してみるとその寄与は非常に大きい。これらの結果を生むに至る駆動成分を今仮りに独立に分け得ると仮定すると[17]それはサイクル依存成分と保持時間依存成分とを考えることができよう。この仮定に従って求めた1サイクル当りの亀裂の伝播速度をベースにさらに t_{hold} に注目し，時間依存のS. C. C. 亀裂伝播を考えてみる。これは単位時間当りの速度に対して前表に示した如く，0.1cpmの場合 4.0×10^{-4} mm/min，10cpm，の場合 3.4×10^{-3} mm/min という値となって求められる。

t_{hold} の効果は破面においてもその特色が明らかである。すなわち60cpmと言うように繰返し速度が早く，ほとんどG. F が支配的でS. C. C. はあまり生じないと考えられる条件の場合には大気中の疲労破面に見られる縞模様（Striation）に比較すると脆性的ではあるがいわゆる疲労破面特有の縞模様が明瞭に認められる。一方 t_{hold} が5min もある場合には60cpmの場合に見られた疲労破面は全く認められず，すべてがステンレス鋼の高温高圧純水中でのS. C. C. の特色である粒界破壊を示している。また t_{hold} が2.5sec となる10cpmの場合は前二者の混在した破面となっている。また光学顕微鏡組織検査の結果からも，t_{hold} が長くなるほど亀裂の枝分れが著るしくなり，粒界亀裂となる傾向が明らかとなった。

5 討　論

5.1 応力腐食割れによる亀裂伝播速度の測定法の評価

本法で求めた t_{hold} が 5min の場合に算出された２００℃，１０〜４０ppm溶存酸素，$K = 33,600\ lb \cdot in^{-3/2}$ での高温高圧純水中でのオーステナイトステンレス鋼のS.C.C.による亀裂の見掛けの伝播速度 4.0×10^{-4} mm/min はClarke ら[11]が一つの目安として静応力下の試験から算出した２８８℃，8ppm溶存酸素，$K = 15,000\ lb \cdot in^{-3/2}$ の場合の 3.3×10^{-4} mm/min に比較すると偶然近い値となっている。本来比較を定量化するにはS.C.C.の亀裂伝播速度におよぼす温度，溶存酸素，K値等の影響を明確にする必要があるので今のところこの比較はあまり大きい意義を持つものではない。一般にC.Fなどと異りS.C.C. の場合亀裂伝播速度 da/dt は伝播領域ではK値に対してさほど大きい依存はしないとの観測が高張力鋼などでは認められている[18]。ステンレス鋼については，高張力鋼と破壊の機構が異るので，必らずしも同様の傾向が得られるとは限らない。しかしながらもしステンレス鋼の場合も高張力鋼の場合と同様に亀裂伝播速度がK値に対して大きな依存関係を持たないとするならば，そのことは実際の原子炉におけるS.C.C. による最終破断モードを論ずる上で，きわめて重要と考えられる。

S.C.C.が本来時間依存的破壊である点からみて，当然オーステナイトステンレス鋼の高温高圧純水中でのS.C.C. による亀裂の伝播速度を求めるには，静応力下での試験から求めるのが適当である。一方本実験で確立したような動的な応力下の試験では応力の交番により絶えず一定の機械的な破壊の駆動（疲労効果）が加えられるから，その時間的成分をパラメーターとして利用するならば本来きわめて確率的な進行をするS.C.C. を測定の対象として活性化させる効果が期待できる。また実際の原子炉への応用と言う点を考えると，静応力下のS.C.C.の重要性はもちろんのことであるが，実際の原子炉は応力の変動下におかれるから，C.F. やS.C.C. とC.F. の重畳効果についての知見も必要である。したがって純粋の静応力下の亀裂伝播から純粋の動応力下の亀裂伝播（$t_{hold} = 0$）までのスペクトルをうめる知見が重要であり，本報告の結果はそのような研究の意義が十分にあり，かつ技術的に可能であることを示唆している。但しデータの解析の手法は取敢えず大胆な仮定を置いたのであるから，その正当性の如何はむしろ今後の研究にかかっていると言うべきである。

5.2 応力腐食割れと腐食疲労との相異と両者の重畳の可能性

本実験から見掛けの速度をもとに繰返し速度が0.1cpm（$t_{hold} = 5$ min）の場合S.C.C.による亀裂伝播速度は 4.0×10^{-4} mm/min，10cpm（$t_{hold} = 2.5$ sec）の場合は 3.4×10^{-3} mm/min と算出された。これらの数値は一応の参考となるものであるが両者の値はおよそ一桁異なる。これはS.C.C. とC.Fの重畳作用により，亀裂の伝播が加速された可能性を示しているとも受け取れる。10cpmの場合の t_{hold} は約2.5 sec と非常に短かいが，そのような短時間の保持時間が亀裂の伝播速度に有意の影響をもたらしていることもさることながら，注目に値するのは破面の形態にはっきり表われていることである。すなわち鋭敏化ステンレス

鋼の高温高圧純水中のS.C.C.は粒界破壊を特色としているのに対して，一般に腐食疲労は貫粒性破壊である。本実験で得られた結果もこのことを明瞭に裏付けていると解釈できる。前にも述べたように実際の構造物はほとんどS.C.C.とC.F.との同時作用下におかれていることを考えると，事故時の破面との対応と言う点でも注目に値することである。

6 総 括

既設の腐食疲労試験機を用い，破壊力学的な手法を基礎にしたK一定型試験片を用いると，亀裂伝播速度に与える腐食環境効果が明瞭に定量化される可能性のあることを示した。それには最大荷重における保持時間を変えることにより，高温高圧純水中におけるオーステナイトステンレス鋼の高応力下での応力腐食割れによる時間依存的な亀裂伝播の速度を求めることができる。200℃，10～40ppm溶存酸素の純水中で試験した結果，$K = 33,600\ lb \cdot in^{-3/2}$で$4.0 \times 10^{-4}$ mm/minという値を得た。

この方法により求めた亀裂伝播速度と最大荷重における保持時間の関係から，応力腐食割れと腐食疲労損傷の重畳作用または相互作用による亀裂の伝播の加速の可能性が示唆された。

7 参 考 文 献

(1) JPDR配管クラック調査委員会報告（1973）（未公開）

(2) 例えば長谷川正義編：ステンレス鋼便覧（1973）

(3) 小若：鉄と鋼，60（1974），p427

(4) A.E. Pickett., W.L. Pearl., M. C. Rowland.: Nucl. Appli., 1 (1965), p. 453.

(5) H. Coriou., L. Grall et al: Corrosion, 22 (1966), p280

(6) C.F. Cheng: Reactor Tech., 13 (1970), p310.

(7) W.E. Berry., E.L. White., W.K. Boyd: Corrosion, 29 (1973), p451.

(8) J.E. Truman., P.M. Haigh.: J. Inst. Metals, 101 (1973), p221.

(9) T. Kondo et al: Proc. 1st. Intern. Conf. on Corrosion Fatigue, NACE and A.I.M.E. (1972), p539.

(10) T. Kondo et al: Proc. Intern. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Aagust 15～20, (1971), Kyoto, Japan., VoL.Ⅲ p319.

(11) W.L. Clarke., G.E. Gordon: Corrosion, 29 (1973), pI.

(12) J.E. Srawley, B. Gross: Mat. Res. Stand., 7 (1967), p155.

(13) J.P. Gallagher: Engineering Fracture Mechanics, 3 (1971), p27.

(14) S. Mostovoy, P.B. Crosley, E.J. Ripling.: J. Mat., 2 (1967), p661.

(15) L.A. James: J. Testing & Evaluation, 1 (1973), p52.

鋼の高温高圧純水中のS.C.C.は粒界破壊を特色としているのに対して，一般に腐食疲労は貫粒性破壊である。本実験で得られた結果もこのことを明瞭に裏付けていると解釈できる。前にも述べたように実際の構造物はほとんどS.C.C.とC.F.との同時作用下におかれていることを考えると，事故時の破面との対応と言う点でも注目に値することである。

6 総 括

既設の腐食疲労試験機を用い，破壊力学的な手法を基礎にしたK一定型試験片を用いると，亀裂伝播速度に与える腐食環境効果が明瞭に定量化される可能性のあることを示した。それには最大荷重における保持時間を変えることにより，高温高圧純水中におけるオーステナイトステンレス鋼の高応力下での応力腐食割れによる時間依存的な亀裂伝播の速度を求めることができる。200℃，10～40ppm溶存酸素の純水中で試験した結果，$K = 33{,}600\ \mathrm{lb \cdot in^{-3/2}}$で$4.0 \times 10^{-4}$ mm/minという値を得た。

この方法により求めた亀裂伝播速度と最大荷重における保持時間の関係から，応力腐食割れと腐食疲労損傷の重畳作用または相互作用による亀裂の伝播の加速の可能性が示唆された。

7 参 考 文 献

(1) JPDR配管クラック調査委員会報告（1973）（未公開）

(2) 例えば長谷川正義編：ステンレス鋼便覧（1973）

(3) 小若：鉄と鋼，60（1974），p427

(4) A.E. Pickett., W.L. Pearl., M. C. Rowland.: Nucl. Appli., 1 (1965), p. 453.

(5) H. Coriou., L. Grall et al: Corrosion, 22 (1966), p280

(6) C.F. Cheng: Reactor Tech., 13 (1970), p310.

(7) W.E. Berry., E.L. White., W.K. Boyd: Corrosion, 29 (1973), p451.

(8) J.E. Truman., P.M. Haigh.: J. Inst. Metals, 101 (1973), p221.

(9) T. Kondo. et al: Proc. 1st. Intern. Conf. on Corrosion Fatigue, NACE and A.I.M.E. (1972), p539.

(10) T. Kondo. et al: Proc. Intern. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Aagust 15～20, (1971), Kyoto, Japan., VoL.Ⅲ p319.

(11) W.L. Clarke., G.E. Gordon: Corrosion, 29 (1973), p1.

(12) J.E. Srawley, R. Gross: Mat. Res. Stand., 7 (1967), p155.

(13) J.P. Gallagher: Engineering Fracture Mechanics, 3 (1971), p27.

(14) S. Mostovoy, P.B. Crosley, E.J. Ripling.: J. Mat., 2 (1967), p661.

(15) L.A. James: J. Testing & Evaluation, 1 (1973), p52.

鋼の高温高圧純水中のS.C.C.は粒界破壊を特色としているのに対して，一般に腐食疲労は貫粒性破壊である。本実験で得られた結果もこのことを明瞭に裏付けていると解釈できる。前にも述べたように実際の構造物はほとんどS.C.C.とC.F.との同時作用下におかれていることを考えると，事故時の破面との対応と言う点でも注目に値することである。

6 総 括

既設の腐食疲労試験機を用い，破壊力学的な手法を基礎にしたK一定型試験片を用いると，亀裂伝播速度に与える腐食環境効果が明瞭に定量化される可能性のあることを示した。それには最大荷重における保持時間を変えることにより，高温高圧純水中におけるオーステナイトステンレス鋼の高応力下での応力腐食割れによる時間依存的な亀裂伝播の速度を求めることができる。200℃，10～40ppm溶存酸素の純水中で試験した結果，$K = 33,600\ lb \cdot in^{-3/2}$で$4.0 \times 10^{-4}$ mm/minという値を得た。

この方法により求めた亀裂伝播速度と最大荷重における保持時間の関係から，応力腐食割れと腐食疲労損傷の重畳作用または相互作用による亀裂の伝播の加速の可能性が示唆された。

7 参 考 文 献

(1) JPDR配管クラック調査委員会報告（1973）（未公開）

(2) 例えば長谷川正義編：ステンレス鋼便覧（1973）

(3) 小若：鉄と鋼，60（1974），p427

(4) A.E. Pickett., W.L. Pearl., M.C. Rowland.: Nucl. Appli., 1 (1965), p. 453.

(5) H. Coriou., L. Grall et al: Corrosion, 22 (1966), p280

(6) C.F. Cheng: Reactor Tech., 13 (1970), p310.

(7) W.E. Berry., E.L. White., W.K. Boyd: Corrosion, 29 (1973), p451.

(8) J.E. Truman., P.M. Haigh.: J. Inst. Metals, 101 (1973), p221.

(9) T. Kondo et al: Proc. 1st. Intern. Conf. on Corrosion Fatigue, NACE and A.I.M.E. (1972), p539.

(10) T. Kondo et al: Proc. Intern. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Aagust 15～20. (1971), Kyoto, Japan., VoL. III p319.

(11) W.L. Clarke., G.E. Gordon: Corrosion, 29 (1973), p1.

(12) J.E. Srawley, R. Gross: Mat. Res. Stand., 7 (1967), p155.

(13) J.P. Gallagher: Engineering Fracture Mechanics, 3 (1971), p27.

(14) S. Mostovoy, P.B. Crosley, E.J. Ripling.: J. Mat., 2 (1967), p661.

(15) L.A. James: J. Testing & Evaluation, 1 (1973), p52.

(16) L. A. James., R. L. Knecht: Met. Trans. to be published
(17) R. P. Wei. J. D. Lands: Mat. Res. Stand., 9 (1969) No.7 p 25.
(18) 北川: 第19回材料強度と破壊国内総合シンポジウム論文集, (1974), p71.

Table 1 Chemical compositions and thermal history of the material.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Heat No. 9S 8455
0.05	0.73	1.13	0.030	0.029	8.63	18.71	Bal	1050°C X 30 min W.Q. →620°C X 24 hr F.C.

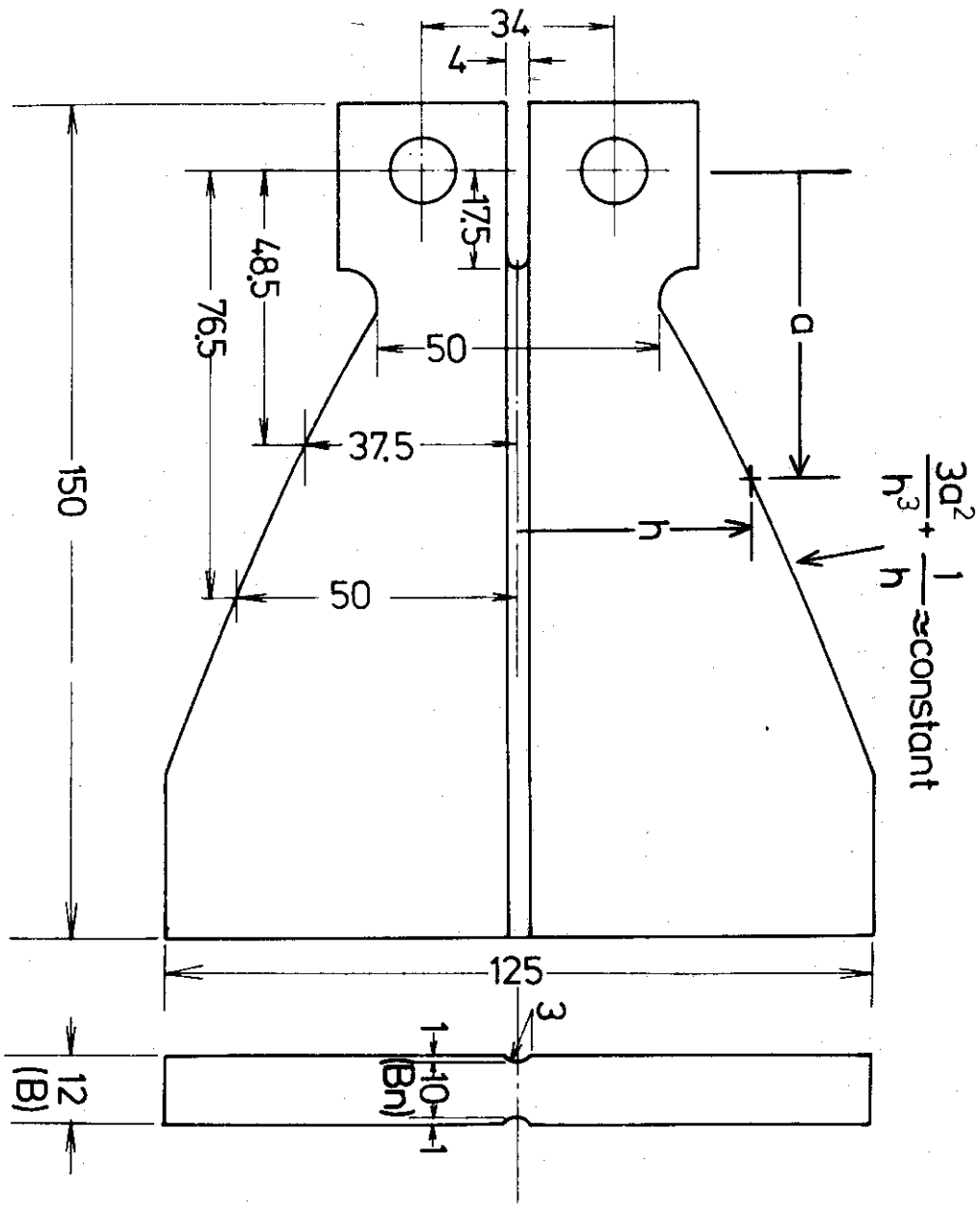


Fig. 1 Geometry of tapered double-cantilever beam type specimen.

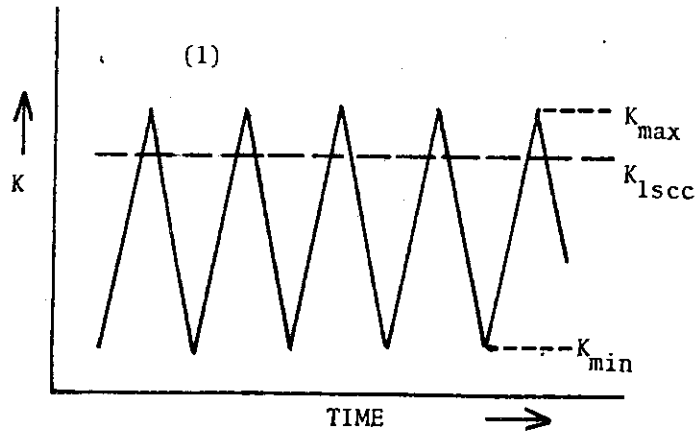
Table 2 Results of measurements on the effect of the test environments and loading condition on the crack propagation. The value of da/dt were obtained under the assumptions given in Fig. 2.

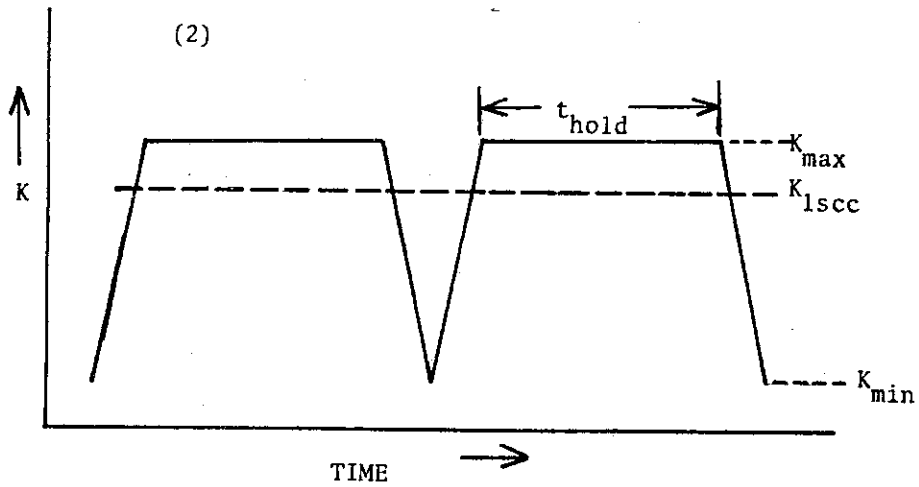
	(da/dN),mm/cycle	(da/dt),mm/min	$(da/dt)_{s.c.c.}$,mm/min
IN AMBIENT AIR 60c.p.m.	1.4×10^{-4}	8.4×10^{-3}	———
IN 200°C WATER			
0.1 p.p.m. DISSOLVED OXYGEN,60c.p.m.	1.8×10^{-4}	1.1×10^{-2}	———
40 p.p.m. DISSOLVED OXYGEN,60c.p.m.	2.8×10^{-4}	1.7×10^{-2}	———
30~40 p.p.m. DISSOLVED OXYGEN,10c.p.m.	4.2×10^{-4}	4.2×10^{-3}	3.4×10^{-3}
10~40 p.p.m. DISSOLVED OXYGEN,0.1c.p.m.	2.3×10^{-3}	2.3×10^{-4}	4.0×10^{-4}

* $(da/dt)=(da/dN)\times(dN/dt)$

* $(da/dt)^{0.1}_{s.c.c.}=\dfrac{(da/dN)_{0.1}-(da/dN)_{60}}{t_{hold}}$

* $(da/dt)^{10}_{s.c.c.}=\dfrac{(da/dN)_{10}-(da/dN)_{60}}{t_{hold}}$





$$(da/dN) = (da/dN)_{C.F.} + (da/dN)_{S.C.C._{dynamic.}} \quad \text{----------} (1)$$

$$(da/dN) = (da/dN)_{C.F.} + (da/dN)_{S.C.C._{dynamic}} + (da/dN)_{S.C.C._{static}} \quad \text{----} (2)$$

(1) - (2)

$$\Delta(da/dN) = (da/dN)_{S.C.C._{static}} \quad \text{----------} (3)$$

$$(da/dt)_{S.C.C.} = (da/dN)_{S.C.C._{static}} / t_{hold} \quad \text{----------} (4)$$

Fig. 2 Schematics of the loading waves applied to the present study and the equations representing the assumptions made for analysing the apparent rate in terms of the two environmentally enhanced cracking mechanisms.

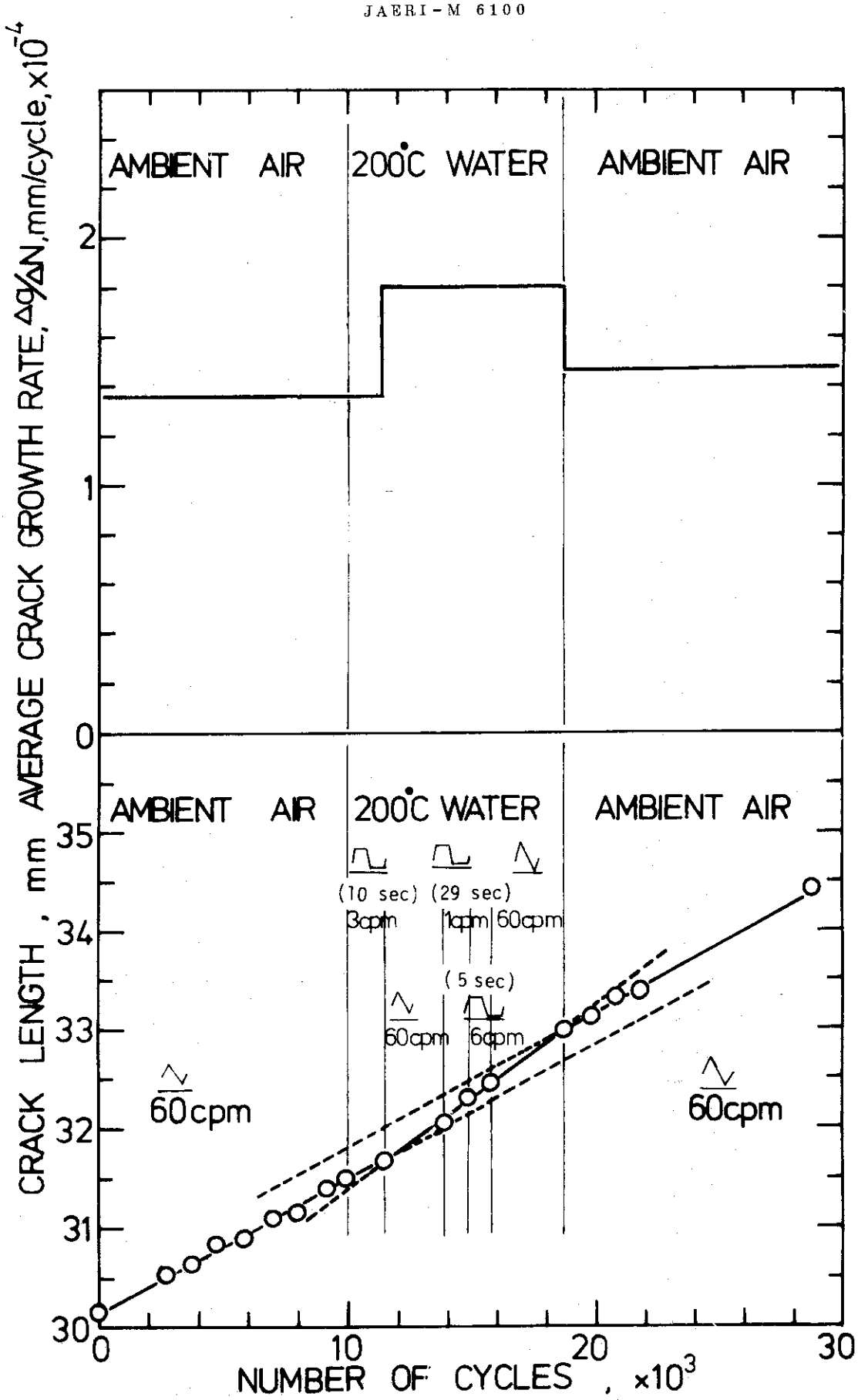


Fig. 3 Effect of test environment on the crack propagation rate of sensitized AISI 304 stainless steel.

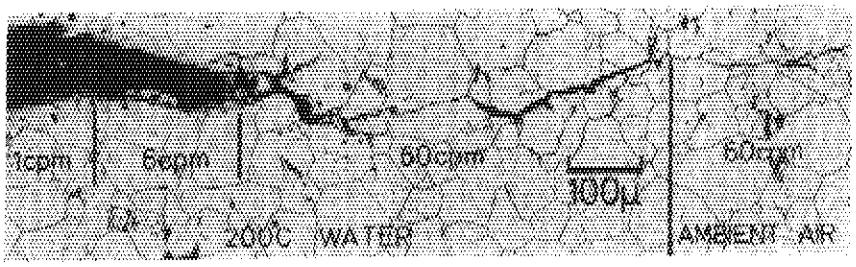


Fig. 4 Morphology of cracks formed in air and water containing 0.2 p.p. oxygen cyclically loaded with varied holding time.

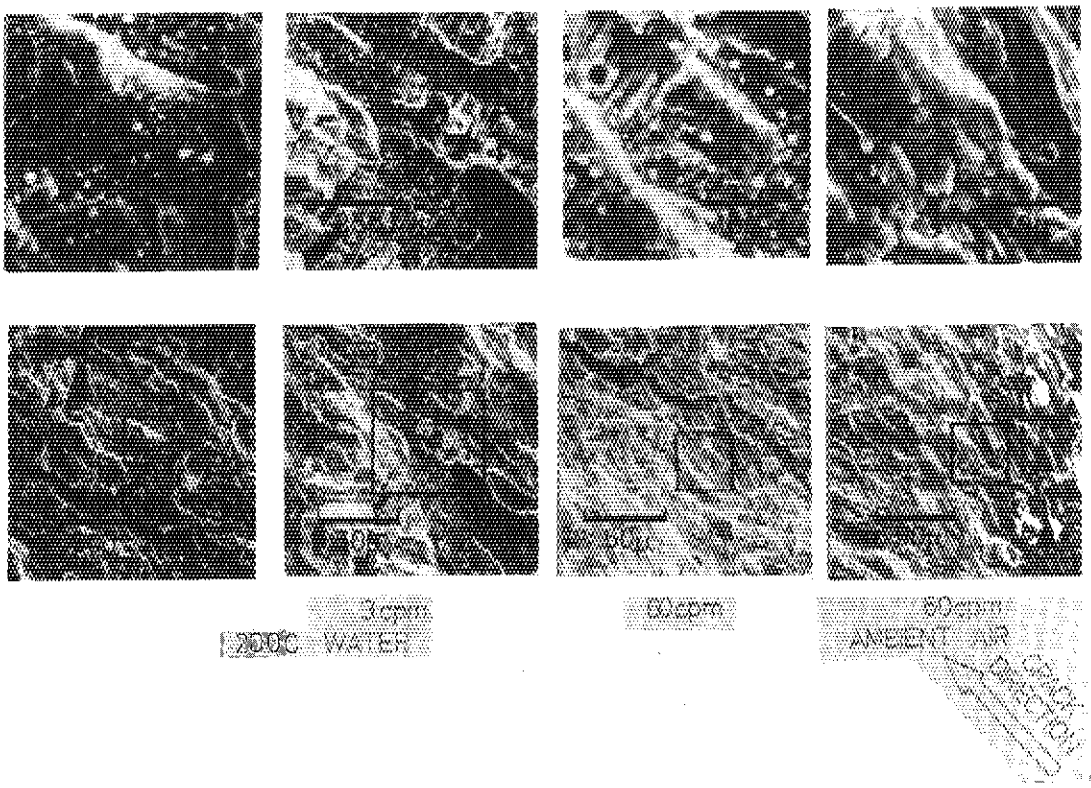


Fig. 5 Scanning electron micrographs of fracture surfaces formed under cyclic loading and the effect of air and water environment. The test conditions corresponds to Fig. 4.

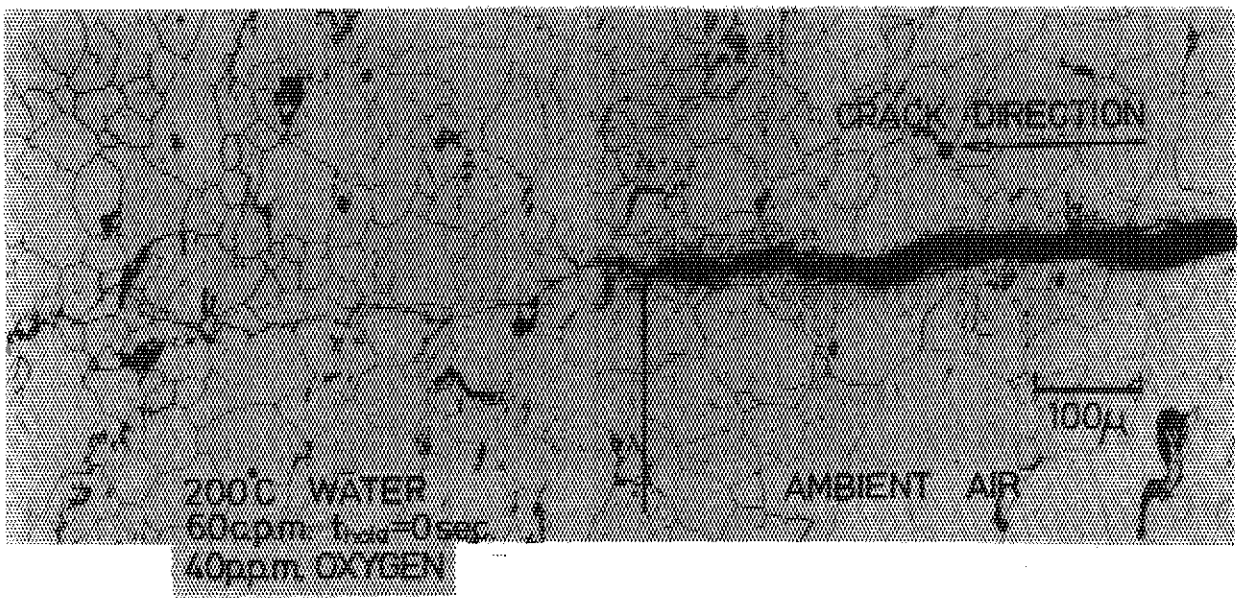


Fig. 6 Morphology of cracks formed under cyclic loading in water (30～40 p.p.m. O_2) without holding time at tension.

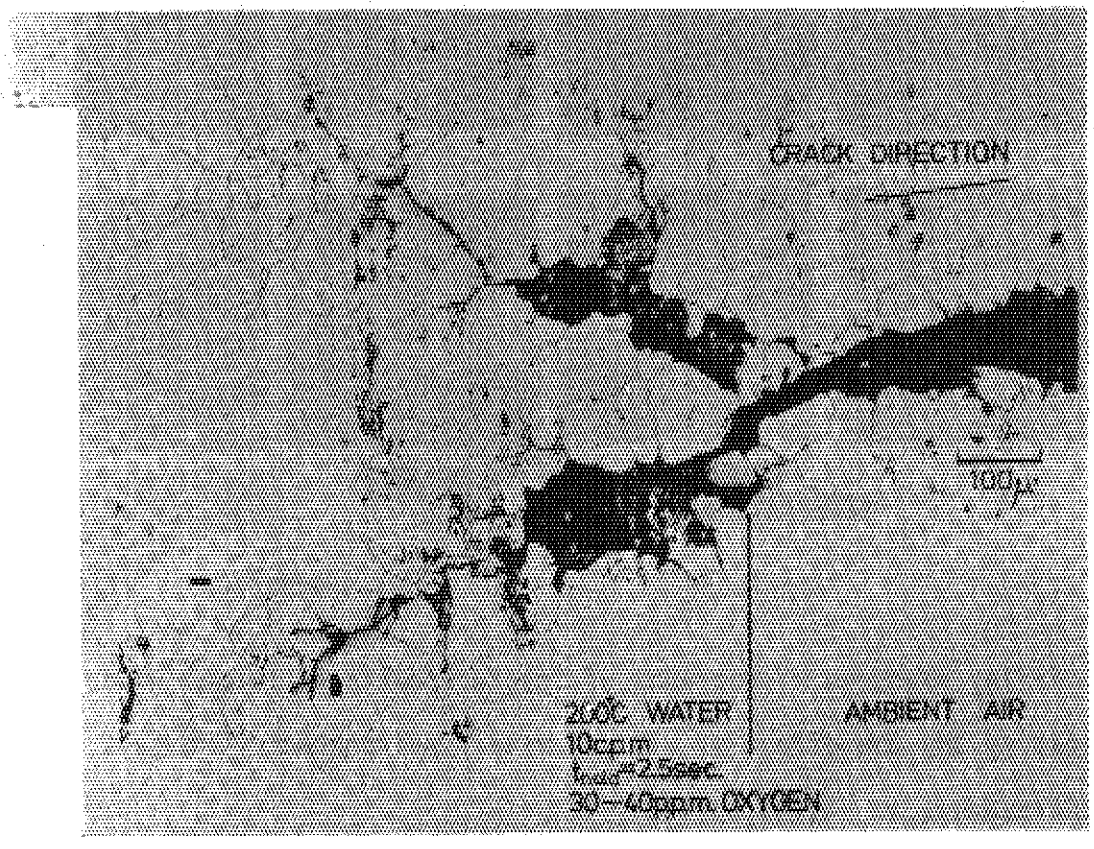


Fig. 7 Morphology of cracks formed under cyclic loading in water (30～40 p.p.m O_2) with holding time at tension for 2.5 seconds.

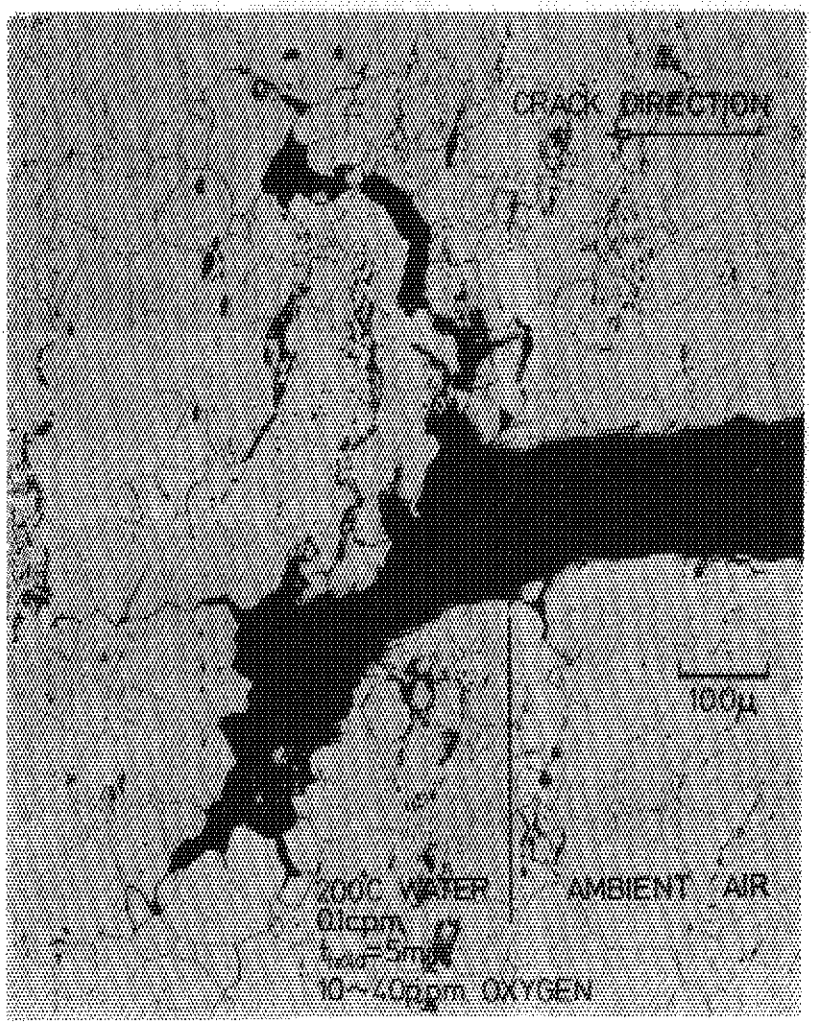
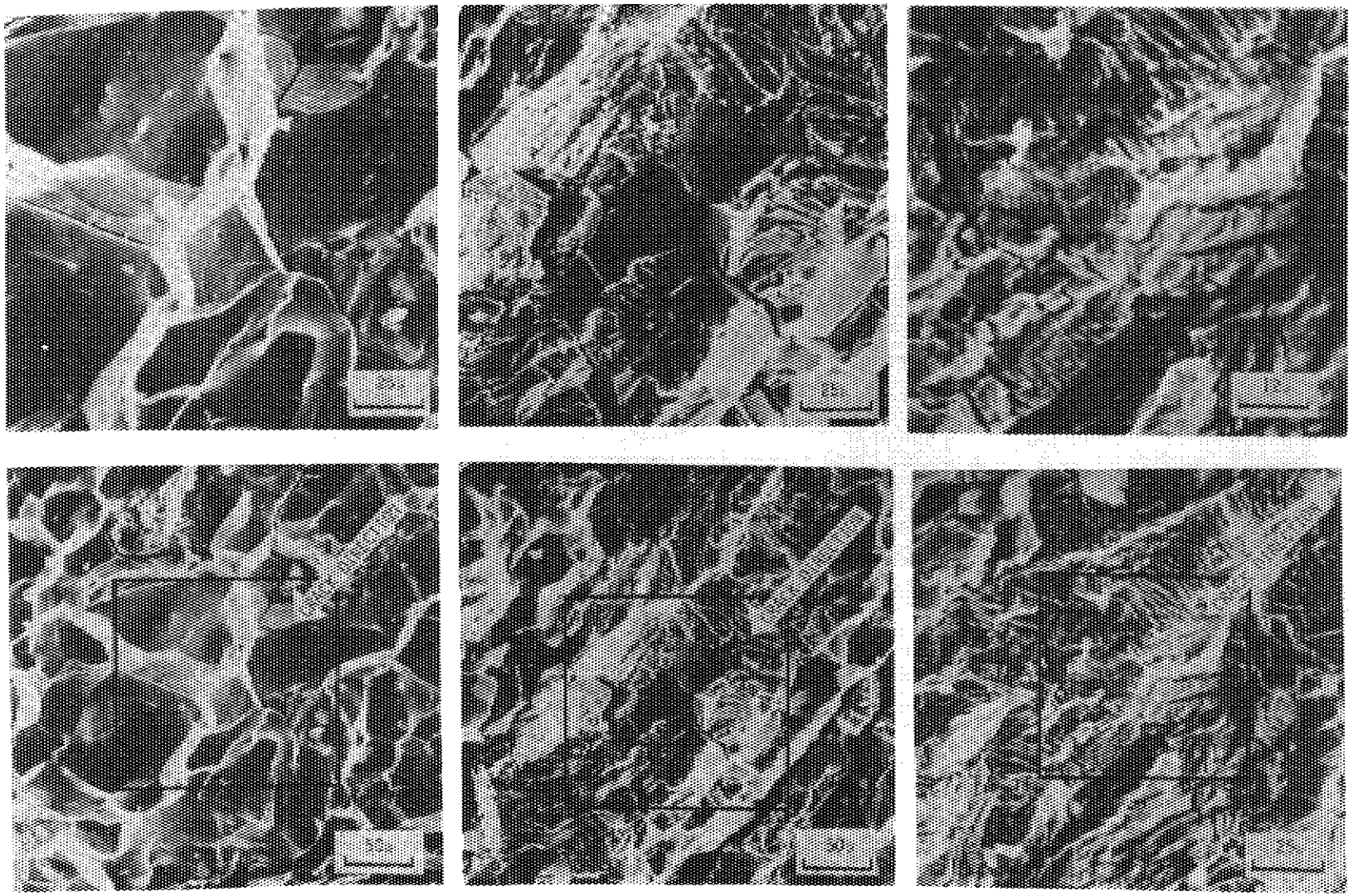


Fig. 8 Morphology of cracks formed under cyclic loading in water (10~40 p.p.m O_2) with holding time at tension for 5 minutes.



0.1c.p.m. 10c.p.m. 60c.p.m.

T_{hold}=5min. T_{hold}=2.5sec. T_{hold}=0sec.

Fig. 9 Scanning electron micrographs of fracture surfaces formed under cyclic loading in water environment (10~40 p.p.m. O_2) and the effect of holding time at tension.