伝承すべき高温材料試験とその現状

2. クリープ疲労き裂進展試験

—高温破壊試験法の標準化—[†]

田淵正明*

Material Tests at High Temperatures to Be Maintained in Future and Their Present State of Affairs

II: Creep Fatigue Crack Growth Test

-Standardization of Test Procedures for High Temperature Fracture Mechanics-

by

Masaaki TABUCHI*

Key words: High temperature, Creep fatigue crack growth, Fracture mechanics, Standardization

1 緒 言

CO₂削減や省資源のために高温機器の高効率化が進められている。使用温度、圧力の向上に加え、経済性の面から起動停止が頻繁に行われ、材料の使用環境は複雑、過酷になる傾向にある。高経年化した機器では、設計寿命を越えた運転も検討されている。また、次世代発電プラント（A-USC 700℃級石炭火力、1700℃級ガスタービン、高速炉、高温ガス炉等）の開発も国内外で進められている。このため、材料と構造体の安全性、信頼性向上が求められている。高温損傷や高温破壊に関する研究ニーズはますます高まっており、世界各国で活発に研究活動が行われている。

日本材料学会 高温強度部門委員会では、クリープ、クリープ疲労下でのき裂進展試験と評価法（ J^* 、 ΔJ_I 、 ΔJ_c など）の研究開発を世界に先駆けて行ってきた。また、高温き裂進展の貴重なデータも時間をかけて蓄積されている。「高温き裂進展試験法ワーキンググループ（WG）」では、これらの学術成果や試験技術を伝承するための活動を行っている。

2 試験技術の必要性と経緯

高温構造部材では、使用中に応力やひずみの集中部にクリープ損傷（ポイド、微視き裂）が発生、成長、合体し、巨視的なき裂となり、時間とともに進展して最終破壊に至る。高温構造物の健全性評価、寿命・余寿命評価のためには、検出されたき裂の高温クリープおよびクリープ疲労下での進展の可能性や進展速度を破壊力学により推定することが重要となる。

高温クリープき裂進展への破壊力学の適用は、1970年代からである。クリープき裂進展速度を評価する力学パラメータに関して多くの研究がなされた。定常クリープ状態においては、応力とひずみ速度の間に Norton の指数則が成り立つ。これに基づき、Rice らの J 積分¹⁾をクリープ問題へ応用した、クリープ J 積分、 $J^{*2)}$ が提案された。これは J 積分の変位・ひずみを、クリープ変位速度・ひずみ速度で置き換えたものとして定義される。その後 J^* をき裂開口変位速度から簡便に計算する方法が提案され³⁾、1970年代後半から1980年前半にかけて、各種

耐熱材料について、種々の試験片を用いた、多くのクリープき裂進展の評価に関する研究が行われた^{4)~9)}。それ以来、 J^* は延性材料の大規模クリープ状態においては、試験片形状、寸法、試験荷重によらず、クリープき裂進展速度を評価できるパラメータとして、一般的に利用されている。

クリープと疲労（低サイクル疲労）が重畳する、クリープ疲労条件でのき裂進展については、クリープ J 積分と疲労 J 積分範囲を用いて評価されるが、クリープ疲労条件では、応力が一定でない場合が多く、特にクリープ J 積分の算出が難しくなる場合が多い。これらの課題に対して、クリープと疲労 J 積分範囲の分離方法について研究が数多く行われ^{10)~13)}、低速引張や変位保持（応力緩和が伴う除荷過程）条件など、クリープと疲労が重畳する条件でのパラメータの算出法が提案された。

クリープき裂進展試験法は、新材料の試験評価技術に関する VAMAS 国際共同研究¹⁴⁾の課題として取り上げられ、1987年からの活動に基づき1992年に ASTM E1457規格が作成され、その後高温ぜい性材料、各種試験片形状、溶接部などを含むように改訂が行われている¹⁵⁾。

3 試験技術の概要

3.1 試験装置

クリープ・疲労き裂進展試験では、試験片に定荷重または変動荷重を与えることによりき裂を進展させ、その挙動を観察する。試験装置には次の機能が要求される。

- ・試験片に所定の荷重を与える。
 - ・試験片を所定の温度に加熱する。
 - ・変位およびき裂長さを十分な精度で計測し記録する。
- 負荷を変化させる試験では、荷重または変位を、十分な精度で制御することも必要となる。

定荷重のクリープき裂進展試験の場合は重錘を用いて負荷するレバー式のクリープ試験装置を、クリープ疲労き裂進展試験の場合はサーボ式の疲労試験装置を用いることが推奨される。試験片の加熱は、電気炉で行うことが望ましい。き裂進展試験では比較的大きなき裂が存在することや、試験片形状が板状であることが多いので、高周波誘導加熱では均一な加熱が難しい。また、電

[†] 原稿受理 平成27年4月10日 Received Apr. 10, 2015 ©2015 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 物質・材料研究機構 〒305-0047 つくば市千現, National Institute for Materials Science, Sengen, Tsukuba, 305-0047

位差法によりき裂長さを計測する際のノイズが、電気炉の方が生じにくい。

3.2 試験片

3・2・1 試験片の形状と寸法 ASTM E1457 規格では、CT(Compact Tension)試験片を対象としたクリープき裂進展試験方法が詳細に記載されており、Annex にその他の試験片：CS(T)、SEN(T)、SEN(B)、DEN(T)、M(T)の形状と破壊力学パラメータ (K および $J^*(C^*)$) の計算式が記載されている¹⁵⁾。ここでは、CT と CCT(Center Cracked Tension)を用いたクリープおよびクリープ疲労き裂進展試験方法の概要を述べる。

CT 試験片の形状寸法を Fig. 1 に示す¹⁵⁾。ここでは切欠開口部に、ナイフエッジを用いたレバー方式の変位計を取り付ける場合の形状を示した。CT 試験片の場合には、疲労予き裂を含めた初期き裂寸法 a_0 が、 $0.45W \leq a_0 \leq 0.55W$ (W : 板幅) となるように切欠を機械加工する。

Fig. 2 に CCT 試験片の模式図を示す。試験片の長さ L は、取り付け部とき裂の距離を十分に確保したうえで決定する。初期き裂長さ a_0 は、クリープき裂進展試験に関しては $0.5W$ 程度、クリープ疲労き裂進展試験に関しては $0.2W$ 程度が目安である。

試験片の板厚 B は、両試験片共に $W/8 \leq B \leq W/2$ の範囲を目安とする^{15), 16)}。クリープき裂進展速度には板厚（変形拘束）の影響があるので、CT 試験片の板厚は $B=W/2$ が推奨されている¹⁵⁾。

3.2.2 疲労予き裂 試験片の機械加工ノッチ先端に室温で疲労予き裂を導入する。疲労予き裂導入時の最大荷重は、負荷履歴の影響を避けるために段階的に減少し、予き裂の最終部分(最後の 0.5mm)では、クリープ・疲労予き裂進展試験の試験荷重や最大荷重を超えないようにする。CT 試験片に疲労予き裂を導入する場合の条件については、ASTM E1457 に詳細が記載されている¹⁵⁾。CT 試験片では、疲労予き裂は 0.05W 以上導入する。

3・2・3 サイドグループ クリープ・疲労き裂進展試験では、板厚中央で表面よりもき裂が長くなる現象（トンネリング現象）が生じるため、その抑制として試験片側面（き裂進展経路上）にサイドグループ（SG）を設け

Fig. 1 Schematic drawing of a CT specimen¹⁵⁾.

Fig. 2 Schematic drawing of a CCT specimen.

Fig. 3 Schematic of displacement measurement devices.
(Lever-type extensometer)

必要がある。SG 底での板厚 B_N は多くの材料で $0.8B$ が適切である。材料のクリープ延性によっては、SG を浅くしたり深くする。SG の角度は 90 度以下、SG 底の R は $0.4 \pm 0.2 \text{ mm}$ 以下とする¹⁵⁾。SG は疲労予き裂導入後に加工する。

3・2・4 治具 引張荷重のみの場合には、試験片取り付けのための治具は、一般的にはピンで試験体と治具を接続する構造が推奨される。引張り、圧縮の両方向に荷重を与えるクリープ疲労き裂進展試験の場合には、取り付け部をねじやボタンヘッド形状とし、試験片と治具の間にガタを生じない構造とする必要がある。その他、平板または円筒型の取り付け部とし、油圧式チャックでつかむ方法もある。また、軸芯精度の観点から、負荷軸とき裂面の直角度は 0.05mm 以内が推奨される。治具の材質は、高温において試験体よりも高耐力で、高強度である必要がある。

3.3 計測装置

3.3・1 荷重線変位の計測装置

クリープ・疲労き裂進展試験においては、破壊力学パラメータの算出のため、き裂開口変位 (COD) を計測する必要がある。COD は、厳密には、塑性変形によるき裂先端の開口量として定義されるが、これを測定するのは困難なので、き裂を挟む荷重線上の 2 点間の距離 (荷重線変位) を計測する。CT 試験片では、Fig. 1 の切欠開口部の段差間の距離を測定することが望ましい (Fig. 3)。試験片の剛性が十分確保されている場合は、ピン孔間の距離や治具間距離で代用することもできる。変位計測用のデバイスは、低サイクル疲労試験で用いられる伸び計と同様のこの原理を応用したレバー式のものや (Fig. 3)、複数の円筒や棒を組み合わせ、それらの相対的な変位を測定する方式のものがある。CCT 試験片については、き裂中央を挟んで上下に検出端を取付けた変位計により、き裂中央開口変位を計測する。押し当て式の変位計などを用いるが、計測値に試験片の変形など、き裂開口による変位以外が含まれないよう、標点距離は 5 mm 以下とすることが望ましい (6)。

計測された変位を電気信号に変換するため、LVDT、ひずみゲージ式、渦電流式などのセンサーが用いられる。計測精度は計測範囲の±1%以下である必要がある。較正は、各試験の始めと終わりに行うことが望ましい。

3・3・2 き裂長さの計測装置 高温炉中の試験片のき裂長さは、直流電位差法を用いて計測することが推奨されている。Fig. 4 に直流電位差法によるき裂計測の装置構成を示す。定電流電源装置により試験片に一定の直流電流を供給し、き裂を挟む2点間の出力電圧を増幅器により増幅し、電圧計測装置により測定する。電流供給位

置は、CT 試験片の場合は、通常試験片の上面および下面に取り付ける。CCT 試験片の場合は、き裂からできるだけ離れた平行部の表面と裏面に取り付けるとよい。出力電圧測定位置は、き裂近傍で、き裂面に対して対称となる位置とする。

直流電位差法によるき裂長さ測定に用いる定電流電源装置として、5A～50A の電流を供給できるものが望ましい。長時間試験では熱起電力が変化することもあるので、電源装置は極性の反転に対応するものであることが望ましい。電圧計測装置は、1 μ V 以上の分解能を有するものが望ましい。

電流供給用リード線の材質は、ステンレス等耐酸化性を有する材料であることが望ましい。また、電圧計測用リード線は、0.5 mm 以上の線径を有し、材質としては試験材と同材あるいは白金線、ステンレス線が望ましい。リード線は、ねじ止めまたはスポット溶接により試験片に取り付ける。CCT 試験片の場合は、平行部に取り付けるので、スポット溶接が望ましい。

測定に際して、試験片と試験装置とは可能な限り電氣的絶縁を行うことが望ましい。また、出力電圧のノイズを小さくするために、電源装置、増幅器、電圧計測装置、記録計などの計測装置を接地（アース）することが重要である。

3.4 試験方法および試験手順

3.4.1 試験片および計測装置の取付方法 温度計測用の熱電対と、き裂長さ計測用の電流と電圧の入出力端子（リード線）を試験片に取り付けた後、試験片を試験装置に取り付ける。このとき、CT 試験片およびピン方式の CCT 試験片では、試験片と治具間のガタ、ゆがみを防止するために試験荷重の 10% 程度の引張荷重を負荷する。CCT 試験片では試験片の中心軸と荷重線の直線性が保たれるように注意が必要であり、試験片の表裏面に生じる曲げひずみが試験片の軸方向ひずみの 5% 以下になるようにする。次に、電流の入出力ケーブルを電源装置に、出力電圧の入出力ケーブルを電圧計測装置に接続する。その後、荷重線変位計測のための変位計を取り付ける。クリープ疲労き裂進展試験を変位制御で実施する場合は、荷重線変位計測のための変位計に加えて、試験片に与える変位を制御するための変位計も取り付ける。

3.4.2 温度計測 試験片の温度は熱電対を用いて計測する。熱電対はき裂面の上下 ± 5 mm 以内に取り付ける。試験片の温度はクリープ試験と同様に、試験期間中、試験温度（規定温度 T ）が $T \leq 600^\circ\text{C}$ の場合 $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内、 $600 < T \leq 800^\circ\text{C}$ の場合 $\pm 4^\circ\text{C}$ 以内、 $800 < T \leq 1000^\circ\text{C}$ の場合 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内、 $1000 < T \leq 1100^\circ\text{C}$ の場合 $\pm 6^\circ\text{C}$ 以内に保持する必要がある^{17), 18)}。規定温度まで加熱する時は除々に温度を上昇させて、加熱期間中も試験片の温度が常に許容温度差を超えないようにする必要がある^{17), 18)}。

3.4.3 クリープき裂進展試験の負荷手順 試験温度まで加熱した後、試験片全体の温度が安定するまで保持する。保持時間は板厚 25mm あたり 1 時間以上、かつ、24 時間以内とする。荷重を負荷する際、レバー式クリープ試験装置を使用する場合は、衝撃荷重が作用しないように、サーボ式の試験装置を使用する場合は、衝撃荷重に加えて過荷重が負荷されないように制御することが必要である。変位と電位差は常時計測し、変位計が正しく設置されるとともに、試験後の解析に有効なデータが取得できていることを確認する必要がある。

Fig. 4 Schematic diagram of the DC potential system.

3.4.4 クリープ疲労き裂進展試験の負荷手順 クリープ疲労き裂進展試験の負荷方法としては、①荷重制御試験と②変位制御試験があり、試験目的に応じて選択する。これらの試験方法以外に、1本の試験片で取得できるデータ範囲が広いスロープライン制御試験も行われている¹⁹⁾。荷重および変位は、それぞれ最大荷重の $\pm 1\%$ 以内、最大変位の $\pm 2.5\%$ 以内に制御されることが必要である。

荷重制御試験、変位制御試験とも、負荷は最大引張荷重または最大変位で一定時間保持する台形波形を標準とする。保持時間は試験目的、材料、温度などに応じて選択する。荷重速度、変位速度も試験目的に応じて選択するが、保持時間以外にクリープ変形が生じることを抑制するために、試験装置と変位計の追従性や安定性を考慮したうえで、十分に高い速度とすることが望ましい。

3.4.5 き裂長さ計測 き裂が進展することにより、き裂を挟む2点間の電気抵抗が増加するため、一定電流の場合、出力電圧が増加する。CT 試験片においては、Fig. 4 に示した電流、電圧の入出力位置の場合に、以下の Johnson 式により、測定した出力電圧 V よりき裂長さ a を求めることができる²⁰⁾。

$$a = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \frac{\cosh(\pi y_0 / 2W)}{\cosh \frac{V}{V_0} \left[\cosh^{-1} \left\{ \frac{\cosh(\pi y_0 / 2W)}{\cos(\pi a_0 / 2W)} \right\} \right]} \quad (1)$$

ここで、 a_0 : 初期電圧 V_0 に対応した初期き裂長さ、 y_0 : 電圧出力間距離の半分である。CCT 試験片においては、き裂面を挟んだ試験片中央部に電圧の出力位置を、き裂面から離れた場所での電流密度が一定になる位置を電流の入力位置とした場合に、Johnson 式により、測定した電圧よりき裂長さを求めることができる。電流の入力位置は、き裂面より $3W$ 以上離すことが望ましい。

直流電位差法では、2箇所の電圧測定用リード線と試験片の接点（電圧の出力位置）の間に温度差がある場合には、熱起電力が発生する。試験中の温度変動により、熱起電力は変化するので、出力電圧のばらつきの原因となる。定期的に電流を流す方向を反対にして出力電圧 V を測定し、平均することによって熱起電力の影響をなくすることが望ましい。また、定期的に電流供給を止めて熱起電力を測定してもよい。この場合には、き裂長さを求める際に用いる V_0 および V は、熱起電力 (V_{th}) を差し引いた値を用いなければならない。1日に1度は電流の反転または熱起電力の測定を行うことが望ましい。

3.4.6 データの計測 高温におけるき裂進展挙動を把握するため、以下のデータを測定し、き裂進展速度と

破壊力学パラメータを求め、必要なものを記録する。①試験片寸法，②試験温度，③荷重線変位の時刻歴，④荷重の時刻歴，⑤き裂長さ（出力電圧）の時刻歴，⑥試験時間または繰返し数。

クリープき裂進展試験では、①，②，③，⑤，⑥試験時間を計測する。破壊力学パラメータ算出のために荷重線変位と時間の関係が必要であり、荷重線変位と時間をデジタル値として定期的にコンピュータに取得するか、ペン型の X-t レコーダなどに連続的に記録する。

クリープ疲労き裂進展試験では、①，②，③，④，⑤，⑥繰返し数を計測する。破壊力学パラメータ算出のために、荷重と荷重線変位のヒステリシスループが必要であり、代表的なサイクルにおける荷重と荷重線変位の関係をデジタル値としてヒステリシスループを描画できる程度の時間間隔でコンピュータに取得するか、ペン型のX-Yレコーダなどに連続的に記録する。

3・4・7 試験の終了 試験は、最終破壊よりも前に終了させることが望ましい。これは、クリープ・疲労き裂前縁の形状を明瞭にし、電位差法により測定されたき裂長さの補正に必要な最終き裂長さを破面上で正確に実測するためである。

試験終了後、荷重を除荷し加熱装置を止める。試験片が冷却された後、試験装置より取り外す。破面開放のため試験片を2つに分断する。このとき、低荷重の条件で繰返し荷重を負荷して疲労破壊させる方法、あるいは、液体窒素等により試験片を十分冷却した上で衝撃荷重によりぜい性破壊させる方法が推奨される。

なお、電位差法により測定されるき裂長さを補正するために、クリープき裂については試験終了直前の電位差を、クリープ疲労き裂については試験終了直前のサイクルの電位差を計測し、記録しなければならない。

3.5 試験結果の解析

3・5・1 き裂長さの決定 CT 試験片, CCT 試験片ともに, 電位差法により得られた最終き裂長さが, 試験終了後に試験片破面で観察される最終き裂長さと合うように補正を行う。試験終了後に試験片を2つに分断した後, 破面上において初期き裂長さ a_0 と最終き裂長さ a_f を実測する。Fig. 5 にトンネリングした疲労予き裂とクリープき裂の長さの測定方法を示す²¹⁾。試験片中央を中心として, サイドグループの底から試験片中心方向に試験片板厚の5%離れた位置を両端(図中の1と9)とし, その間を8等分した線上における初期き裂長さ(a_{01} から a_{09})と最終き裂長さ(a_{f1} から a_{f9})を実測し, 以下の式により, 初期き裂長さ a_0 と最終き裂長さ a_f を決定する。

$$a_0 = 0.125[0.5(a_{01} + a_{09}) + a_{02} + a_{03} + \dots + a_{08}] \quad (2)$$

$$a_f = 0.125|0.5(a_{f1} + a_{f9}) + a_{f2} + a_{f3} + \dots + a_{f8}| \quad (3)$$

破面で実測した最終き裂長さ a_f と、電位差法の出力電圧 V から式(1)により算出した最終き裂長さ a_{pf} 、初期き裂長さ a_0 との間に以下の関係が成り立てば、算出されたき裂長さは有効である¹⁵⁾

$$0.85 \leq \left(\frac{a_{pf} - a_0}{a_f - a_0} \right) \leq 1.15 \quad (4)$$

電位差法により算出した試験中のき裂長さ a_p を、以下の式を用いて線形補間した値を、き裂長さ q とする。

Fig. 5 Measurement method of crack length after test. ²¹⁾

$$a = \left\{ \frac{a_f - a_0}{a_{pf} - a_0} (a_p - a_0) \right\} + a_0 \quad (5)$$

3・5・2 荷重線変位速度の算出 時間 t と荷重線変位 δ の関係から、保持中の荷重線変位速度 $d\delta/dt$ を、セカント法もしくは増分多項式法により計算する。

3・5・3 き裂進展速度の算出 時間 t あるいは繰返し数 N とき裂長さ a の関係から、単位時間あたりのき裂進展速度 da/dt 、あるいは単位繰返し数あたりのき裂進展速度 da/dN を、セカント法もしくは増分多項式法により計算する。

3・5・4 破壊力学パラメータの算出 クリープき裂の進展速度を示す場合は、クリープ変形の時間依存性と非線形性を考慮した非線形破壊力学パラメータであるクリープ J 積分 J^* (Creep J-integral) により表示する。繰返し依存型の疲労き裂の進展速度を示す場合には、材料の非線形挙動を考慮した弾塑性破壊力学に基づく疲労 J 積分範囲 ΔJ_f (Fatigue J-integral range) を用いる。一方、時間依存型のクリープ疲労き裂の進展速度を示す場合は、 J^* の時間積分値であるクリープ J 積分範囲 ΔJ_c (Creep J-integral range) により表示する。

(1) クリープ J 積分 J^*

CT 試験片の場合は、曲げに加えて引張りも考慮した次式により計算する^{22)~24)}。

$$J^* = \frac{n}{n+1} \frac{P\dot{\delta}}{Bh} F(\xi) \quad (6)$$

$$F(\xi) = \gamma - \beta / \alpha \quad (\xi > 0.3)$$

$$\gamma = \frac{\frac{2(1+\eta)(1+\xi)}{1+\eta^2} + \eta(1-\xi)}{1+\xi + \eta(1-\xi)}$$

$$\beta = \frac{\eta}{\eta + (1 + \xi)/(1 - \xi)}$$

$$\eta(\xi) = \sqrt{(2a/b)^2 + 2(2a/b) + 2 - (2a/b + 1)}$$

ここで、 P : 荷重, $\dot{\delta}$: 荷重線変位速度, B : 板厚, b : リガメント長さ ($b=W-a$), ξ : a/W , W : 試験片板幅, a : き裂長さ, n : Norton 則 $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$ のクリープ指数である.

CCT 試験片の場合は、次式により計算する³⁾。

$$J^* = \frac{n-1}{n+1} \frac{P\delta}{2Bb} \quad (0.1 \leq \xi \leq 0.75) \quad (7)$$

サイドグループ付き試験片の場合は, CT 試験片, CCT 試験片ともに, 板厚 B としてサイドグループ底での板厚 B_N を用いる.

なお, 式(6)および式(7)の J^* は, クリープ延性材料の大規模クリープ状態におけるクリープき裂進展にのみ適用できるものであり, クリープぜい性材料や小規模クリープ状態でのクリープき裂進展では適用範囲外である. 荷重線変位速度 $\dot{\delta}$ ならびに荷重線クリープ変位速度 $\dot{\delta}_c$ が以下の式を満足する場合は J^* を使用できる¹⁵⁾

$$\frac{\dot{\delta}_c}{\dot{\delta}} \geq 0.5 \quad \dot{\delta}_c = \dot{\delta} - \frac{aB}{P} \left(\frac{2K^2}{E} \right) \quad (8)$$

ここで, $\dot{a}$: き裂進展速度 (da/dt), K : 応力拡大係数, E' : E (平面応力), $E/(1-\nu^2)$ (平面ひずみ), E : 縦弾性係数, ν : ポアソン比である.

(2) 疲労 J 積分範囲 ΔJ_f

CT 試験片の場合は, 次式により計算する^{22), 25), 26)}.

$$\Delta J_f = \frac{S_p}{Bb} F(\xi) \quad (9)$$

$$F(\xi) = 2(1+\eta)/(1+\eta^2)$$

$$\eta(\xi) = \sqrt{(2a/b)^2 + 2(2a/b) + 2 - (2a/b + 1)}$$

ここで, S_p : Fig. 6 のヒステリシスループで定義されるエネルギーである.

CCT 試験片の場合は, 次式により計算する²⁶⁾.

$$\Delta J_f = \frac{\Delta K^2}{E'} + \frac{S_p}{Bb} \quad (10)$$

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} F(\xi)$$

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta P}{2BW}$$

$$F(\xi) = \sqrt{\sec(\pi\xi/2)}$$

ここで, ΔP : Fig. 7 のヒステリシスループで定義される荷重範囲, S_p : Fig. 7 で定義されるエネルギーである.

ΔJ_f はヒステリシスループから求めるので, CCT 試験片の荷重線変位の測定においては, き裂先端以外の情報を最小限にするために評点間距離を十分小さくする必要がある. サイドグループ付き試験片の場合は, CT 試験片, CCT 試験片ともに, 板厚 B としてサイドグループ底での板厚 B_N を用いる.

CT 試験片, CCT 試験片のいずれにおいても S_p を評価する場合, き裂開閉口が生じているときは荷重-荷重線変位曲線のき裂開口点 (図中の A) を基準とすることが望ましい. しかし, き裂開口点が判別しにくい場合が多く, その場合は比較的求めやすいき裂閉口点 (図中の C) を便宜的に基準とする. ただし, 閉口点を基準とする場合, 開口点を基準とする場合に比べて ΔJ_f を過大に評価してしまう場合があることに注意が必要である²⁶⁾.

(3) クリープ J 積分範囲 ΔJ_c

CT 試験片の場合の ΔJ_c は, 荷重保持の場合および変位保持の場合は式(11)で計算する^{22), 24)}.

Fig. 6 Schematic illustration of the S_p for the CT specimen.

Fig. 7 Schematic illustration of the S_p for the CCT specimen.

Fig. 8 Schematic illustration of the S_c for the CT specimen

Fig. 9 Schematic illustration of the S_c for the CCT specimen.

$$\Delta J_c = \frac{n}{n+1} \frac{S_c}{Bb} F(\xi) \quad (11)$$

ここで, $F(\xi)$: クリープ J 積分の式(6)と同じ, S_c : Fig. 8 で定義されるエネルギーである.

CCT 試験片の場合の ΔJ_c は, 荷重保持の場合および変位保持の場合は, 式 (12)で計算する^{3), 12)}.

$$\Delta J_c = \frac{n-1}{n+1} \frac{S_c}{2Bb} \quad (12)$$

ここで, S_c : Fig. 9 で定義されるエネルギーである. サイドグループ付き試験片の場合は, 同様に板厚 B としてサイドグループ底での板厚 B_N を用いる.

3・5・5 き裂発生時間の決定 クリープき裂進展が始まってから, き裂進展量が 0.2mm まで到達するのに要す

る時間は、き裂の発生あるいは初期進展時間である¹⁵⁾。この時間は、小規模クリープから大規模クリープへの遷移時間を全部、あるいは部分的に含む。クリープJ積分は、この領域のき裂進展を評価対象としないため、試験結果報告では、この領域のデータを省いて評価を実施する。

3・6 報告事項

試験が終了したら、試験条件と試験結果を報告する。試験条件では、材料、化学組成、製造方法、熱処理、機械的性質、試験片の採取方法、試験片形状・寸法、疲労予き裂導入方法、温度、加熱方法、荷重、負荷方法（制御方法、制御波形、荷重範囲、ひずみ範囲）、荷重線変位とき裂長さの計測方法について詳細を記述する。

試験結果では、以下を報告する。1) クリープき裂進展試験の場合は、荷重線変位とき裂長さの時刻歴、試験終了までの時間。2) クリープ疲労き裂進展試験の場合は、荷重線変位、荷重、およびき裂長さの時刻歴、代表的なサイクルにおける荷重-荷重線変位関係（ヒステリシスループ）とそのときの繰返し数、試験終了までの繰返し数。3) 最終破断面から測定した初期き裂長さとき裂長さの補正方法および補正したき裂長さの時刻歴。4) 単位時間当たりまたは1サイクルあたりのき裂進展速度(da/dt , da/dN)。クリープき裂進展試験の場合は、クリープJ積分 J^* 。クリープ疲労き裂進展試験の場合は、疲労J積分範囲 ΔJ_f 、クリープJ積分範囲 ΔJ_c 。5) クリープき裂進展試験の場合は、き裂進展速度と J^* の関係をプロットする。クリープ疲労き裂進展試験の場合は、き裂進展速度と ΔJ_f 、 ΔJ_c の関係をプロットする。Log-Logスケールを用いる。

4 試験技術の保有・伝承状況

主に火力発電所ボイラ、蒸気タービンおよびガスタービンの高温部品の一部にき裂進展解析が適用されており、健全性確認や余寿命診断に使用されている。このため、クリープ・疲労き裂進展試験と評価は重要な課題である。最近では高Cr鋼溶接部のType-IV破壊が問題となっていることから、これを対象とした共同研究が行われている。EUのSOTAプロジェクトやHIDAプロジェクト²⁷⁾、VAMAS TWA31（第31作業部会）に参加している機関では、試験技術が保有・伝承されている。現在は韓国、中国もTWA31に参加し、試験技術を保有する大学、研究機関は複数ある。国内では、高温強度部門委員会非弾性解析WG²⁸⁾やTWA31²⁹⁾に参加している機関（大学、研究機関、企業の研究所）等で、試験技術が保有・伝承されている。

5 今後の課題

クリープき裂進展は、材料のクリープ特性、温度、荷重、時間、構造の形状、材料の組織に係わる複雑な現象であることから、未解明な課題も残されている。クリープき裂進展の初期には、き裂先端のクリープ変形成がリガメント部に比べて小さい、小規模クリープ状態でき裂進展すると考えられる。き裂進展試験初期には J^* の積分経路独立性が成り立たないことや³⁰⁾、HRR特異性が成り立たないこと³¹⁾が示されている。この問題に関し、小規模クリープ状態から大規模クリープ状態への遷移時間の評価式³⁰⁾や小規模クリープ状態でのき裂進展速度を評価する Ct パラメータ³²⁾などが提案されている。クリープき裂進展速度は、材料の延性³³⁾や試験片の板厚³⁴⁾（変形拘束）の影響を受ける。変形拘束の影響は実機で問題となるが、多軸応力下での破断延性の低下を考慮

したNSWモデル³⁵⁾や Q パラメータ³⁶⁾等を用いた研究が行われている。 J^* は経路積分で定義され、有限要素法のクリープ解析で得られる各時間の応力、ひずみ、変位の数値を用いて計算することができるが、実機へ応用する場合に3次元の計算は複雑で時間もかかるため、参照応力法³⁷⁾などによる簡易評価法の研究が進められている。溶接部でのクリープき裂進展試験法については、最近、ASTM E1457-13¹⁵⁾のAnnex A3に記述された。

クリープ疲労き裂進展は、 ΔJ_f （または ΔK ）と ΔJ_c を用いて評価するが、相互作用の有無などまだ明らかになっていない点がある。実用的には、クリープ支配型と疲労支配型の識別が難しいことや、保守性が確保しやすい点などから、線形累積損傷則による評価が行われる場合が多い。

$$da/dN = (da/dN)_c + (da/dN)_f \quad (13)$$

クリープ疲労き裂進展法については、ASTM E2760-10規格が作成された³⁸⁾。

6 結 言

本報告では、CTとCCT試験片を対象としたクリープおよびクリープ疲労き裂進展試験技術の概要を述べた。紙面の関係で、十分記述できなかった部分もあるが、参考文献をご参照下さい。

本報告は、日本材料学会高温強度部門委員会の「高温き裂進展試験法WG」での調査結果に基づいて概要を述べたものです。WGの幹事と委員の皆様深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) J. R. Rice, "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks", Transactions of the ASME, Journal Applied Mechanics, Vol.35, Issue 2, pp.379-386 (1968).
- 2) K. Ohji, K. Ogura, S. Kubo, "Kuri-pu kiretsu monndai ni okeru J sekibun no ouyou", Proceedings of Mechanical Engineering Congress, 1974 Japan (Kikouron), No.740-11, pp.207-210 (1974) The Japan Society of Mechanical Engineers.
- 3) K. Ohji, K. Ogura, S. Kubo, "Zenndanmenn sosei ni okeru J sekibun no kannbenn shiki to soreno kuri-pu kiretsu monndai heno ouyou", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.44, No.382, pp.1831-1838 (1978).
- 4) R. Ohtani and A. Nitta, "Crack propagation in creep (Experimental results on crack propagation rate)", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.25, No.275, pp.746-752 (1976).
- 5) R. Koterazawa and T. Mori, "Applicability of fracture mechanics parameters to crack propagation under creep condition", Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.99, Issue 4, pp.298-305 (1977).
- 6) K. Ohji, K. Ogura, Y. Katada, M. Takemoto and H. Nakajima, "A study on correlating parameters of creep crack growth rate by using tension-type and bending-type specimens", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.27, No.302, pp.1089-1095 (1978).
- 7) K. Ohji, K. Ogura, S. Kubo, Y. Katada and H. Saito, "A study on correlating parameters of creep crack growth

- rate of 1 Cr-1 1/4 Mo-1/4 V steel”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.27, No.303, pp.1165-1170 (1978).
- 8) S. Taira, R. Ohtani and T. Kitamura, “Application of J-integral to high-temperature crack propagation: Part I—Creep crack propagation”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.101, Issue 2, pp.154-161 (1979).
 - 9) K. Sadananda and P. Shahinian, “Review of the fracture mechanics approach to creep crack growth in structural alloys”, Engineering Fracture Mechanics, Vol.15, Issues 3-4, pp.327-342 (1981).
 - 10) S. Taira, R. Ohtani and T. Kitamura, “Application of J-integral to high-temperature crack propagation: Part II—Fatigue crack propagation”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.101, Issue 2, pp.162-167 (1979).
 - 11) R. Koterazawa and T. Mori, “Crack propagation under intermittent overloading at elevated temperatures”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.27, No.303, pp.1178-1184 (1978).
 - 12) S. Taira, R. Ohtani, T. Kitamura and K. Yamada, “J-integral approach to crack propagation under combined creep and fatigue conditions”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.28, No.308, pp.414-420 (1979).
 - 13) R. Ohtani, T. Kitamura and S. Enomoto, “Creep crack propagation under decreasing load condition”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.37, No.414, pp.283-288 (1988).
 - 14) M. Kanao, K. Nii and Norio Shinya, “International collaboration in testing methods and evaluation for advanced materials -Versailles project on advanced materials and standards (VAMAS)-”, Tetsu-to-Hagane, Vol.74, No.2 pp.207-214 (1988).
 - 15) ASTM E1457-13, “Standard Test Method for Measurement of Creep Crack Growth Times and Rates in Metals” (2013).
 - 16) FCC subcommittee, “Creep-fatigue crack propagation behavior of structural materials for LMFBR (General report)”, (1987) Japan Welding Engineering Society.
 - 17) ISO 204, “Metallic materials – Uniaxial creep testing in tension – Method of test” (2009).
 - 18) JIS Z2271, “Metallic materials – Uniaxial creep testing in tension – Method of test” (2010).
 - 19) H. Kino, H. Yamauchi and S. Nakano, “Elastic-plastic fatigue crack growth behavior under slope line control”, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol.18, No.6, pp.801-808, (1981).
 - 20) H.H. Johnson, “Calibrating the electric potential method for studying slow crack growth”, Materials Research and Standard, Vol.5, No.9, pp.442-445 (1965).
 - 21) A. Saxena, “Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers”, p.158 (1998) CRC Press.
 - 22) J.G. Merkle and H.T. Corten, “A J integral analysis for the compact specimen, considering axial force as well as bending effects”, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 96, Issue 4, pp. 286-292 (1974).
 - 23) J.R. Rice, P.C. Paris and J.G. Merkle, “Some further results on J-integral analysis and estimates”, ASTM STP 536, pp.231-245 (1973).
 - 24) H.A. Ernst, “Unified solution for *J* ranging continuously from pure bending to pure tension”, ASTM STP 791, pp.I-499-I-519 (1983).
 - 25) G.A. Clarke and J.D. Landes, “Evaluation of the J integral for the compact specimen”, Journal of Testing and Evaluation, Vol.7, Issue 5, pp.264-269 (1979).
 - 26) N.E. Dowling, “Geometry effects and the J-integral approach to elastic-plastic fatigue crack growth”, ASTM STP 601, pp.19-32 (1976).
 - 27) I.A. Shibli and N. Le Mat Hamata, “Creep crack growth in P22 and P91 welds - overview from SOTA and HIDA projects”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.78, Issues 11-12, pp.785-793 (2001).
 - 28) Inelastic analysis working group (phase 7), “Inelastic analyses of creep crack growth behavior in high chromium steels”, (2010) The Society of Materials Science, Japan.
 - 29) M. Tabuchi, A.T. Yokobori Jr., R. Sugiura, M. Yatomi, A. Fuji and K. Kobayashi, “Results of a Japanese round robin program for creep crack growth using Gr.92 steel welds”, Engineering Fracture Mechanics, Vol.77, Issue 15, pp.3066-3076 (2010).
 - 30) K. Ohji, K. Ogura, S. Kubo, “Stress field and modified J-integral near a crack tip under condition of confined creep deformation”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.29, No.320, pp.465-471 (1980).
 - 31) C. Y. Hui and H. Riedel, “The asymptotic stress and strain field near the tip of a growing crack under creep conditions”, International Journal of Fracture, Vol.17, No.4, pp.409-425, (1981).
 - 32) A. Saxena, “Creep crack growth under non-steady-state conditions”, ASTM STP 905 pp.185-201 (1986).
 - 33) R. Ohtani, T. Kitamura, A. Nitta and K. Kuwabara, “High-temperature low cycle fatigue crack propagation and life laws of smooth specimens derived from the crack propagation laws”, ASTM STP 942, pp.1163-1180 (1988).
 - 34) M. Tabuchi, K. Kubo and K. Yagi, “Effect of specimen size on creep crack growth rate using ultra-large CT specimens for 1Cr-Mo-V steel”, Engineering Fracture Mechanics, Vol.40, pp.311-321 (1991).
 - 35) K. M. Nikbin, D. J. Smith and G. A. Webster, “An engineering approach to the prediction of creep crack growth”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.108, Issue 2, pp.186-191 (1986).
 - 36) R.A. Ainsworth and N.P. O’Dowd, “Constraint in the failure assessment diagram approach for fracture assessment”, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.117, Issue 3, pp.260-267 (1995).
 - 37) R.A. Ainsworth, “Some observations on creep crack growth”, International Journal of Fracture, Vol.20, Issue 2, pp.147-159 (1982).
 - 38) ASTM E2760-10, “Standard Test Method for Creep-Fatigue Crack Growth Testing” (2010).