

粒界腐食速度の応力依存性を仮定した環境助長割れ解析

Analysis of Environmentally Assisted Cracking Based on Stress-Dependent Intergranular Corrosion Concept

時政勝行 / Katsuyuki Tokimasa • 総合技術研究所 研究主幹 工博

要 約

PWR蒸気発生器管材料の実機使用条件下でのSCC損傷の発生・進展プロセスを粒界腐食(IGC)過程と粒界応力腐食割れ(IGSCC)過程とに分け、SCC寿命がほぼIGC過程で支配され、かつIGC速度が作用応力に依存すると仮定することにより、SCC寿命予測をかなり合理的に行うことができる。本稿では、このようなSCC寿命予測の考え方をSSRT(Slow Strain-Rate Test)寿命の解析に応用した結果を解説的に報告するとともに、SSRT法により粒界腐食速度の応力依存性を決定する具体的手法についても記述した。

Synopsis

This paper describes some results of the author's recent study on the analysis of SSRT (Slow-Strain-Rate-Test) life based on the stress dependent intergranular corrosion (IGC) concept. This paper also discusses how quantitative information can be obtained from SSRT, especially concerning the intergranular corrosion rate and the crack propagation rate, by which the SCC life in service can be predicted. Finally, practical procedures are proposed to determine the stress dependency of IGC of materials by SSRT.

1. 緒 言

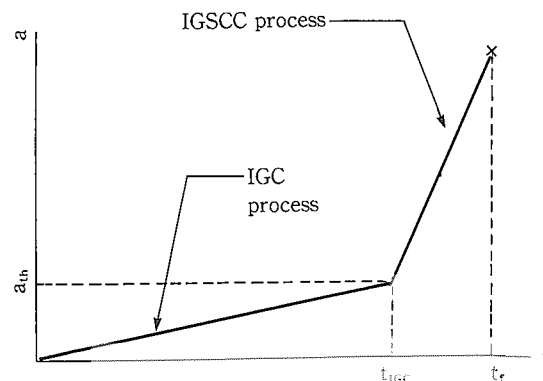
筆者らは、PWR 蒸気発生器管材料の実機使用条件下での SCC 寿命を予測することを目的に、高温高圧水環境下における損傷の発生・進展とき裂進展特性に及ぼす材料因子、力学因子、環境因子の影響について研究を進めている^{1)~4)}。これまでの研究の結果、一定応力下の SCC 試験における損傷プロセスを第 1 図に示すように粒界腐食(IGC)過程と粒界応力腐食割れ(IGSCC)過程とに分けて考え、SCC 寿命がほぼ IGC 過程で支配されることおよび IGC 速度が作用応力に依存すると仮定することにより、これまでに報告されている加速 SCC 試験結果をかなり合理的に説明できることが明らかとなった。また、暫定的にはあるが、MA 600 および TT 600 合金の PWR 一次側および二次側模擬環境下の IGC 速度の応力依存性を定式化することができた^{3),4)}。

このような IGC 速度の応力依存性の定量化は、実機条件下の寿命を予測する場合に特に重要である。その理由は、一般に、加速試験条件下では負荷応力レベルが高くて IGC き裂の浅い状態でき裂先端の応力拡大係数 K が SCC 進展の下限値 K_{ISCC} を越えてしまうのに対し、実機条件下では応力が低く IGC き裂が管厚を貫通してもき裂先端の K が K_{ISCC} を越えず、寿命は IGC き裂の進展に支配されると考えられるからである。

したがって、もし簡便な加速試験法でこのような IGC 速

度の応力依存性が定量的に評価できれば、従来行われてきた定性的な材料評価から定量的な材料評価へと改めることが可能となる。すなわち、加速試験の結果から、実機条件下で所望の寿命性能を有するか否かの評価が可能となる。

本報は、筆者らが暫定的に定式化した IGC 速度の応力依存性が定荷重 SCC 試験とリバース U ベンド試験のデータに基づいていることを考慮し、このような IGC 速度の応力依存性評価式が、最近加速試験としてしばしば用いられている Slow Strain-Rate Test (略して SSRT) データへも



第 1 図 作用応力一定条件下での IGC/IGSCC プロセスの簡略モデル

Fig.1 Simplified IGC/IGSCC process (Applied stress is constant.)

$$t_f = t_{IGC} + t_{IGSCC} \\ \cong t_{IGC} \quad (t_{IGC} \gg t_{IGSCC})$$

適用可能か否かを検討した結果を解説的にとりまとめたものである。検討の過程で、「IGC 速度の応力依存性を簡便評価できる試験法」として SSRT が利用できるとの知見も得られたので、あわせてその内容についても説明を加えた。

2. SSRT 寿命推定の基本的な考え方および方法^{3),4)}

第 1 図および第 2 図に示すように、腐食割れ過程を IGC 過程と IGSCC 過程とに分け、以下のような仮定を設定する。

- (1) IGC 過程は熱活性化過程であり、IGC の進展速度 (da/dt) は一般的に次式で表示できる。

$$\frac{da}{dt} = a_0 \exp\left(-\frac{Q_0 - q_0 \sigma}{RT}\right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 a_0 は定数、 Q_0 は活性化エネルギー、 q_0 は活性化体積、 R はガス定数、 T は温度である。一定温度下では、 $V_0 = a_0 \exp(-Q_0/RT)$ 、 $q = q_0/RT$ は定数となり、次式が成立する。

$$\frac{da}{dt} = V_0 \exp(q\sigma) \quad \dots\dots\dots(2)$$

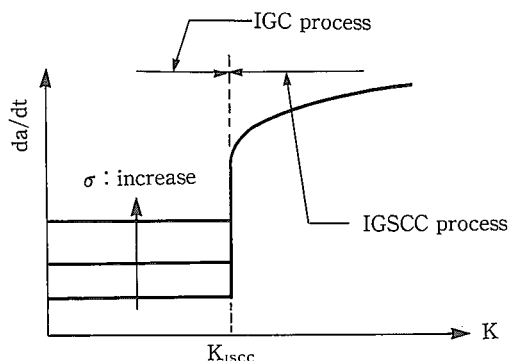
- (2) IGSCC 過程においては、き裂進展速度はき裂先端の応力拡大係数 K により支配され、IGC から IGSCC への遷移は次式が成立するとき生じる。

$$a \geq a_{th} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{ISCC}}{\eta \sigma} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 η はき裂の形状に依存する定数であり、 σ は作用応力である。

- (3) IGC 速度に比べて IGSCC 速度は極めて速く、全寿命に占める IGSCC 寿命 (t_{IGSCC}) は IGC 寿命 (t_{IGC}) に比べて無視できる。

いま、SSRT においては、試験片は試験期間中一定のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で負荷されるものとする。通常は、変位速度一定で試験されることが多いが、ここでは $\dot{\epsilon}$ 一定で負荷され



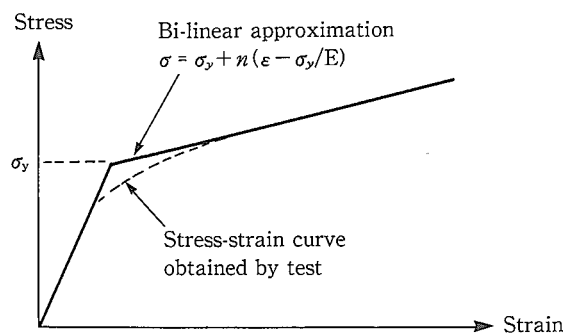
第 2 図 IGC/IGSCC プロセスの提案モデル (da/dt は $K < K_{ISCC}$ では作用応力が大きくなると増大する。)

Fig.2 Proposed model of IGC/IGSCC process (da/dt increases with the increase of applied stress at K below K_{ISCC})

るものとして解析を進める。このとき、試験開始後時間 t における試験片のひずみ ϵ は $\dot{\epsilon} t$ に等しく、作用応力 σ は材料の変形特性に応じた値となる。試験材のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ における変形特性 (応力ひずみ関係) を、第 3 図に示すように 2 直線近似 (bi-linear approximation) して、

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E\epsilon & (\sigma \leq \sigma_y) \\ \sigma &= \sigma_y + n \left(\epsilon - \frac{\sigma_y}{E} \right) & (\sigma > \sigma_y) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

と表示するとき、 σ は上式で $\epsilon = \dot{\epsilon} t$ とおくことにより得られる。実際には、試験開始後時間 t においては、次式で計算される IGC き裂が生ずるが、応力 σ には影響しないものと仮定する。



第 3 図 供試材の応力ひずみ関係の 2 直線近似

Fig.3 Bi-linear approximation of the stress versus strain relationship of the material tested

$$\begin{aligned} a &= \int_0^t V_0 \exp(q\sigma) dt \\ &= \frac{V_0}{\dot{\epsilon} E q} \{ \exp(q\sigma_t) - 1 \} & (\sigma_t \leq \sigma_y) \\ &= \frac{V_0}{\dot{\epsilon} E q} \{ \exp(q\sigma_y) - 1 \} \\ &\quad + \frac{V_0}{\dot{\epsilon} n q} \{ \exp(q\sigma_t) - \exp(q\sigma_y) \} & (\sigma_t > \sigma_y) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式(5)において、 σ_t は t 時間後の作用応力である。このとき、SSRT 寿命を決定するクライテリオン式(3)は次式となる。

$$a \geq a_{th} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{ISCC}}{\eta \sigma_t} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

さらに、IGC き裂の成長がひずみの増大に比べて遅い場合には、SSRT 寿命は材料の真破断ひずみによって規定されることを考慮して、次のようなもう一つのクライテリオンを設定する。

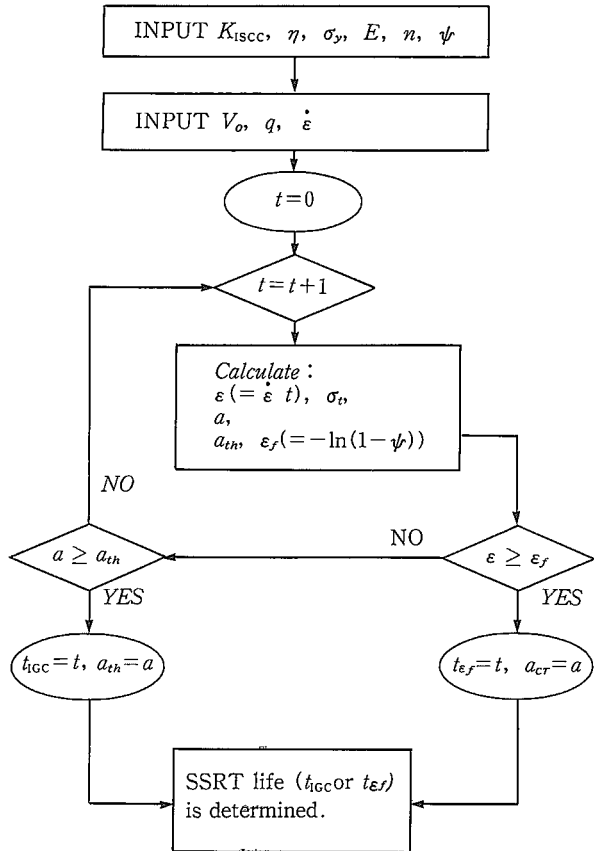
$$\epsilon \geq \epsilon_f \quad (\epsilon_f = -\ln(1-\psi)) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 ψ は引張試験で得られる破断絞りである。

本報においては、式(6)が成立して得られる寿命を t_{IGC} と定義し、式(7)が成立して得られる寿命を $t_{\epsilon f}$ 、そのときにまでに成長した IGC 深さを a_{cr} と定義した。

第 4 図に SSRT 寿命の計算プロセスをフローチャートで示す。

解 説



第4図 計算過程のフローチャート

Fig.4 Flow chart of calculation process

3. SSRT 寿命解析結果

ここでは、IGC 速度の応力依存性を仮定した環境助長割れ解析を、MA 600 の PWR 一次側模擬環境下での SSRT 寿命解析に適用した結果を紹介する。理解を容易にするために、SSRT 寿命に及ぼすひずみ速度と材料変形特性の影響に関する解析結果について述べる。なお、特に断らない限り、式(1)～式(7)中の定数および変数の単位は以下に示すとおりである。

a : μm t : hr V_0 : $\mu\text{m/hr}$ q : MPa^{-1}
 σ , E , n : MPa K_{ISCC} : $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$

解析に用いた MA 600 の一次側模擬環境下における IGC 速度の応力依存性を次式に示す。

$$\frac{da}{dt} = 0.00291 \exp(0.0064 \sigma) \quad \dots\dots\dots(8)$$

式(8)は、PWR 一次側模擬環境 (360°C, 500 ppmB³⁺, 1~2 ppmLi⁺, 30 ccH₂/kg, DO₂<5 ppb) 下で実施された定荷重 SCC 試験およびリパース U ベンド (RUB) 試験の結果より求められたものである^{3),4)}。

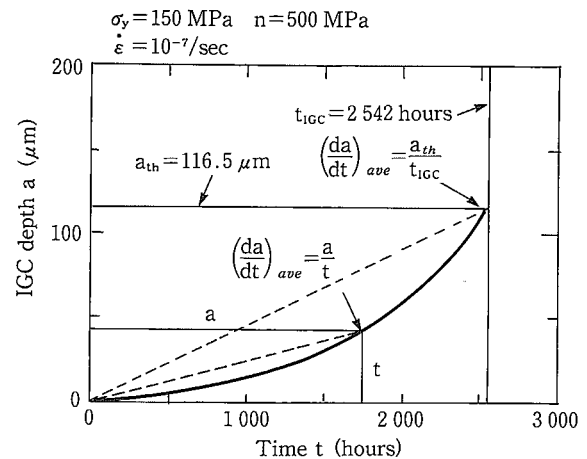
3-1 ひずみ速度の影響

SSRT 寿命に及ぼすひずみ速度の影響解析には次に示すような材料強度パラメータを用いた。

$$\left. \begin{aligned} E &= 200\,000 \text{ MPa} & n &= 500 \text{ MPa} & \sigma_y &= 150 \text{ MPa} \\ \psi &= 0.64 & K_{ISCC} &= 13 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(9)$$

また、ひずみ速度としては、3つの異なるひずみ速度、 10^{-6} 、 10^{-7} および $10^{-8}/\text{sec}$ を選んだ。

第5図は、 $\dot{\epsilon} = 10^{-7}/\text{sec}$ の場合の IGC 深さ a と試験時間 t の関係である。図から明らかなように、IGC 速度は SSRT 中一定でなく、第1図の一定応力下の場合と異なっており、図中に示す平均き裂進展速度 $(da/dt)_{ave}$ は試験時間 t が大きいほど大きく破断時 ($t = t_{IGC}$ のとき) に最大となる。



第5図 SSRT試験中のIGC成長挙動

Fig.5 An example of the calculated IGC growth behavior during SSRT conducted at the strain rate of $10^{-7} 1/\text{sec}$

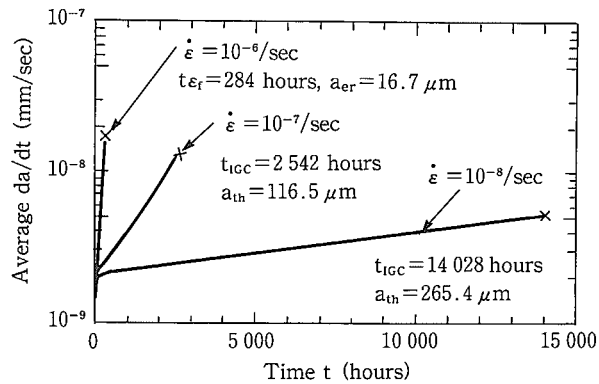
通常、SSRT の結果には、破断時のき裂の大きさから平均的なき裂進展速度を計算して示す場合があり、次節で評価の対象とする J. M. Boursier らの報告⁵⁾にもこれに相当する値が記載されている。したがって、本報においても、平均き裂進展速度 $(da/dt)_{ave}$ を次式のように求めこのような試験データと対比できるようにした。

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{da}{dt} \right)_{ave} &\equiv \frac{a}{t} \\ &= \frac{V_0}{\dot{\epsilon} t E q} \{ \exp(q \sigma_t) - 1 \} & (\sigma_t \leq \sigma_y) \\ &= \frac{V_0}{\dot{\epsilon} t E q} \{ \exp(q \sigma_y) - 1 \} \\ &\quad + \frac{V_0}{\dot{\epsilon} t n q} \{ \exp(q \sigma_t) - \exp(q \sigma_y) \} & (\sigma_t > \sigma_y) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(10)$$

本式は、式(5)で与えられる IGC 深さ a を試験時間 t で除した値であり、 t が破断寿命に等しい場合の値が通常 SSRT 試験結果で報告される平均き裂進展速度に対応する。

解析結果を、 $(da/dt)_{ave}$ と試験時間 t との関係で示し、第6図にまとめて示す。これから、次のことが明らかである。

- (1) SSRT 寿命は試験ひずみ速度が遅いほど長寿命となる。
- (2) 試験ひずみ速度が高速になると IGSCC よりも延性破壊で寿命が決まるようになる傾向がある。



第6図 SSRT寿命に及ぼすひずみ速度の影響に関する計算結果

Fig.6 The calculated results on the effect of strain rate $\dot{\epsilon}$ on the SSRT life

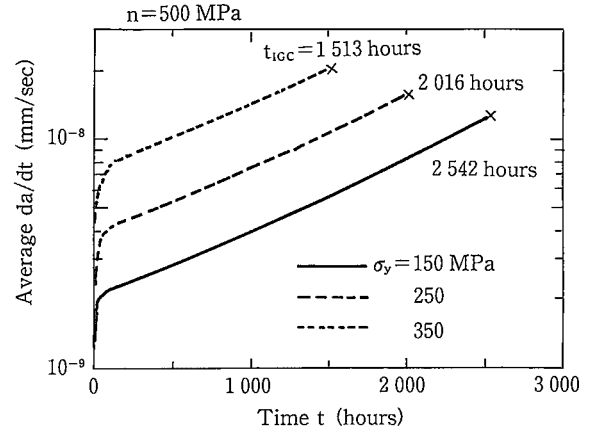
- (3)平均き裂進展速度はSSRT試験時間が長くなればなるほど増大し、またその増加速度は試験ひずみ速度が速いほど大きい。

3-2 材料の降伏強度とひずみ硬化係数の影響

SSRT寿命に及ぼす降伏強度 σ_y とひずみ硬化係数 n の影響については、 $\dot{\epsilon} = 10^{-7}/\text{sec}$ の場合を解析した。また、式(9)の材料強度パラメータのうち、 σ_y の影響を検討する場合は $n = 500 \text{ MPa}$ とし、 n の影響を検討する場合は $\sigma_y = 150 \text{ MPa}$ として、その他のパラメータは式(9)に示す値を用いた。解析結果を第7図および第8図に示す。これらの解析結果より次のことが明らかである。

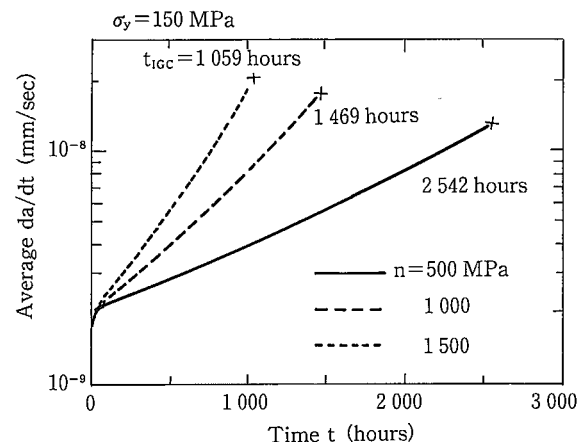
- (1) σ_y , n とともに、その減少はSSRT寿命を長くし、平均き裂進展速度を低下させ、試験片破断時のひずみ ($t_{IGC} \times \dot{\epsilon}$) を増大させる傾向にある。
- (2) 解析した範囲内では、延性破壊よりもIGSCCによる試験片の破断が先行している。 σ_y , n の値がさらに小さくなると、延性破壊がIGSCCよりも先行すると予想される。
- (3) 同一の耐SCC性を有していたとしても、 σ_y , n の値が異なれば、SSRT寿命や平均き裂進展速度は異なることになり、従来の評価によれば、高 σ_y , 高 n の材料ほど耐SCC性が劣るという実際とは異なる判断が下される危険性がある。
- (4) また、逆に、耐SCC性が劣っていたとしても、 σ_y , n の値が小さくて、SSRT試験結果上は耐SCC性が優れると判断される危険性もある。

以上を総括すると、「SSRTはこれまで行われてきたようなやり方を踏襲する限りは、結果として得られる情報にはあまり定量的な価値が無く、変形特性の異なる材料を評価する場合には誤った結論を下す可能性がある」ということであり、結果の評価には特にこの点に留意が必要である。



第7図 SSRT寿命に及ぼす降伏強度 σ_y の影響に関する計算結果

Fig.7 The calculated results on the effect of yield strength σ_y on the SSRT life ($\dot{\epsilon} = 10^{-7}/\text{sec}$)



第8図 SSRT寿命に及ぼすひずみ硬化係数 n の影響に関する計算結果

Fig.8 The calculated results on the effect of strain hardening coefficient n on the SSRT life ($\dot{\epsilon} = 10^{-7}/\text{sec}$)

4. MA 600 の一次側模擬環境下でのSSRT試験結果に関する文献データ⁵⁾とその評価

本節では、筆者らが暫定的に求めたMA 600の一次側模擬環境下のIGC速度の応力依存性(式(8))を用いてSSRT試験結果を評価できるかどうかを検討する。

前節および前々節での記述内容から明らかのように、SSRT寿命の正確な評価には、材料の変形特性、 K_{ISCC} および ψ に関する情報が必要である。したがって、評価の対象とする文献については、このような情報が記載されていることが必須となる。しかしながら、このような文献はほとんど見当たらないのが実状である。

そこで、ここでは、不十分ながらも変形特性について記述のあるJ. M. Boursierらの試験データ⁵⁾に対する評価結果を以下に報告する。

第1表は、彼らが供試した3種類のAlloy 600①、②および③の主要特性であり、そのリバースUバンド試験、定荷重試験およびCERT(Constant Extension-Rate Test)

解 説

第1表 J. M. Boursier らが供試した Alloy 600 管の主要特性と実験的に求めた 360°C 水素加圧一次側環境下における SCC 感受性⁵⁾

Table 1 Main characteristics of Alloy 600 tubings studied by J. M. Boursier et al. and their susceptibility experimentally determined with the reverse U-bend (RUB) tests, the constant load tests and CERT (360°C primary water, 1000ppmB³⁺ 2ppmLi⁺, 4 bar hydrogen overpressure at 125°C)⁵⁾

| (a) | | | | |
|---------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|
| Tubes studied | Carbon content (%) | MA temperature (°C) | ASTM grain size | Yield stress at 350°C (MPa) |
| ① | 0.033 | 1 070 | 8 (22 μm) | 280 |
| ② | 0.026 | 980 | 10 (11 μm) | 330 |
| ③ | 0.030 | 915 | 10 (11 μm) | 290 |

| (b) | | | | |
|---------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| Tubes studied | RUB tests | Constant load tests | | CERT ⁺ |
| | Time to cracking (hr) | Nominal stress (MPa) | Time to cracking (hr) | Crack depth (μm) |
| ① | > 36 000 | — | — | 10 |
| ② | < 1 000 | 684 | 822 | 100 |
| ③ | < 500 | 570 | 900 | 325 |

*Strain rate : 5×10^{-8} /sec, 50 μm electropolished tube
Test duration is not clearly described.

試験の結果を示したものである。また、第9図は供試材③についての CERT 試験後のき裂分布の測定例とそれに基づくき裂進展速度の評価例を示す。J. M. Boursier らは CERT 試験中のき裂進展速度があるき裂大きさを境にして Slow Crack Growth Rate (Slow CGR) から Rapid Crack Growth Rate (Rapid CGR) へと変化するところおよびこれら2種類のき裂進展速度をき裂分布の測定結果から解析的に求めている。第10図は、第9図と同じ材料について CERT 試験のひずみ速度を変化させてこのようなき裂進展速度を求めた結果である。

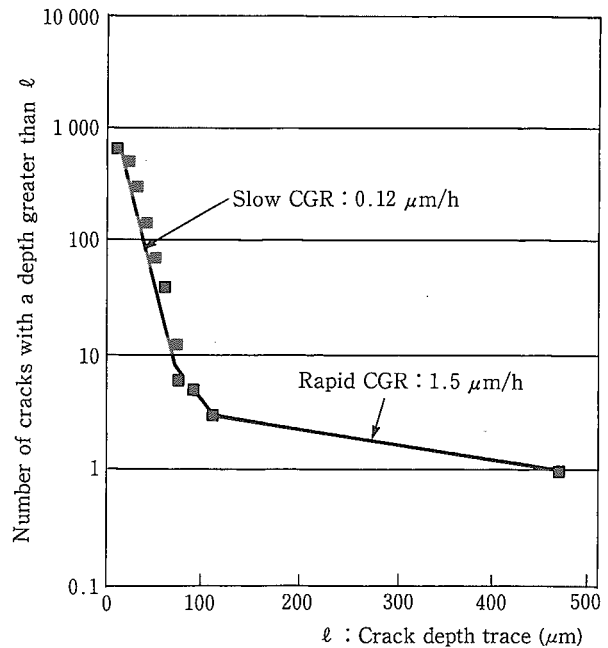
いま、CERT と SSRT を同等と考えると、J. M. Boursier らの求めた Slow CGR は、本報で求めている平均 IGC 進展速度(式(10))の試験片が破断する時点の値に相当すると考えることができる。そこで、式(8)、(10)を用いて、このような J. M. Boursier らの報告している Slow CGR がどの程度評価できるかを調べた。

第2表は、まず、第1表に示した定荷重試験寿命を式(8)により推定した結果である。計算では、限界き裂大きさ a_{th} の値も決定することができ、その値も表中には記載されている。供試した材料・環境が文献の場合と式(8)を求めた場合とで必ずしも同一ではないこと、また、寿命の求め方も J. M. Boursier らがある所定の大きさのき裂成長(50~80 μm)が認められた時点寿命としていることを考慮すると、第2表の推定結果は十分満足できるものであると言える。

次に、第11図は、J. M. Boursier らの示した Slow CGR の式(10)による推定値を実験値と比較して示したものである。

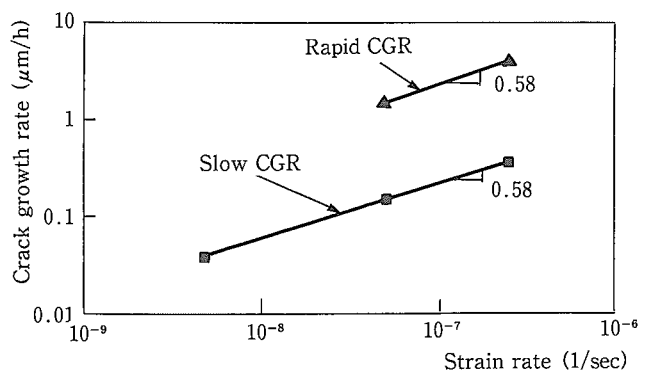
この場合の計算には、材料強度特性として下記数値を用いた。

$$\left. \begin{aligned} E &= 200\,000 \text{ MPa} \\ n &= 2\,777 \text{ MPa}, \sigma_y = 290 \text{ MPa} \\ K_{ISCC} &= 13 \text{ MPa} \sqrt{m} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$



第9図 PWR一次側模擬環境下における CERT 試験後のき裂長さ分布とそれに基づくき裂進展速度の計算例⁵⁾

Fig.9 Number of cracks with a trace depth greater than l , as a function of l (tube ③, CERT at 5×10^{-8} /sec, primary water 360°C, 4 bar overpressure of hydrogen at 125°C)⁵⁾



第10図 Slow CGR および Rapid CGR に及ぼす CERT ひずみ速度の影響⁵⁾

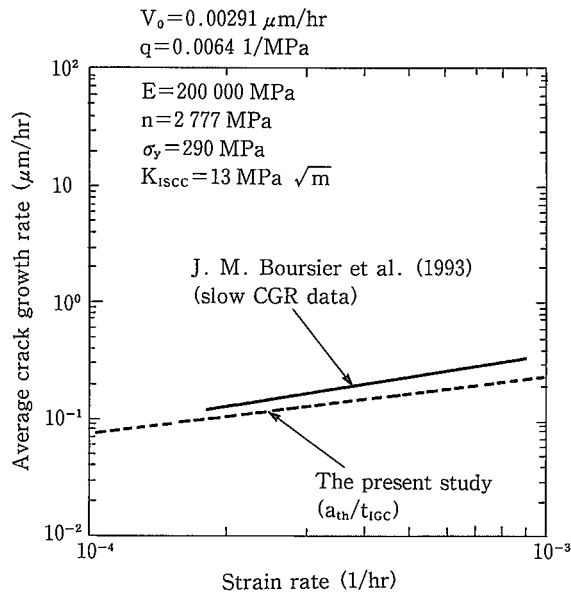
Fig.10 Evolution of crack growth rate as a function of strain rate (tube ③, primary water 360°C, 4 bar overpressure of hydrogen at 125°C)⁵⁾

第2表 第1表の定荷重試験寿命の推定値

Table 2 Estimated values of the constant-load-test life and a_{th} of tubes and ③ shown in Table 1

| Tube | Nominal stress (Mpa) | Time to cracking (hr) | Critical IGC depth, a_{th} (μm) |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| ② | 684 | 410 | 95.0 |
| ③ | 570 | 1 225 | 136.9 |

($\eta = 1.12$, $K_{ISCC} = 13 \text{ MPa} \sqrt{m}$)

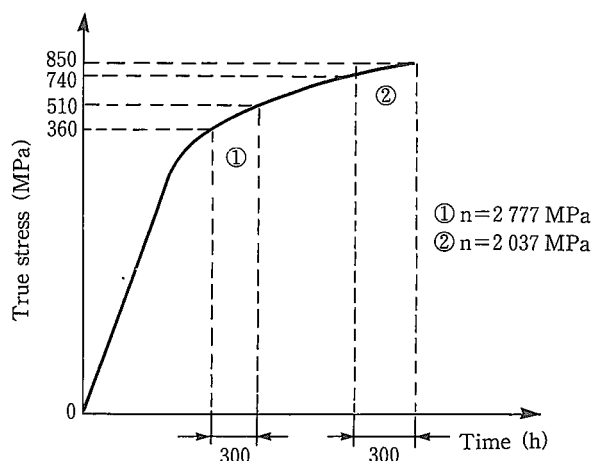


第11図 第10図に示した Slow CGR とその IGC 速度の応力依存性を仮定した考え方による推定値との比較

Fig.11 Comparison of the estimated values of Slow CGR based on the stress dependent IGC concept with the values reported by J. M. Boursier et al.⁵⁾

σ_y は第1表に与えられており、 n は、供試材②の変形特性が第12図のように文献に示されているので、供試材③の変形特性もこれに等しいとして、図中①の領域の応力変化量から求めた値を用いた。第11図においても、推定値と文献値とはよく一致していることがわかる。

したがって、これらの結果から、筆者らが定荷重試験結果およびリバース U ベンド試験結果をもとに暫定的に定式化した MA 600 の PWR 一次側模擬環境下の IGC 速度の応力依存性式(8)が、異なる MA 600 の SSRT 試験寿命推定へもかなりの精度で適用できることが明らかとなった。このことは、SCC 寿命予測に腐食速度の応力依存性という概念を導入することにより、これまで評価不能であった材



第12図 文献に報告されている供試材の変形特性⁵⁾

Fig.12 Change in stress during CERT at 5×10^{-8} 1/sec (tube ②, primary water 360°C, 4 bar overpressure of hydrogen at 125°C) reported in the literature⁵⁾

料の変形特性の差による SCC 寿命の差の評価が可能となったためと考えられる。

このような見地で、第1表に示した3種類の異なる SCC 試験(リバース U ベンド試験、定荷重試験および CERT)の結果をみると、各材料毎の結果の相違、とくにリバース U ベンド試験で供試材①が最も長寿命となっている理由などは材料間の変形特性の差の影響が大きいと考えることもできる。すなわち、第2表の結果より、供試材②と③の間で耐 SCC 性に大きな差がないと考えると、第1表の CERT 結果の差は、ひずみ硬化係数 n の差に起因し、 n の値は、管①<管②<管③となるものと考えられる。したがって、同じリバース U ベンド条件でも発生応力は、①<②<③となるものと推察され、寿命は、①>②>③となるものと考えられる。

5. IGC 速度の応力依存性の SSRT による簡便評価

筆者は、IGC 速度の応力依存性を簡便に評価する手法として、SSRT を改良した次のような2つの方法が、現時点では有望と考えている。いずれも、実験的な裏付けがなく、今後の研究の進展に期待しなければならない。

(1) SSRT 中の応力変化と IGC 深さの変化を monitor する方法

もし、このような試験が可能となれば、式(5)を微分して得られる次式より、材料の IGC 速度の応力依存性を表す材料定数 q と V_0 を求める。

$$\ln \left(\frac{\Delta a}{\Delta \sigma} \right) = q\sigma + \ln \left(\frac{V_0}{\dot{\epsilon} n} \right) \quad \text{when } \sigma > \sigma_y, \dots\dots\dots(12)$$

すなわち、式(12)は $\ln(\Delta a/\Delta \sigma)$ と σ の一次関係式であるから、この関係式を図式表示し、傾きから q の値が得られ、縦軸の切片の値から、 $\dot{\epsilon}$ 、 n が既知だから、 V_0 の値が得られる。

最近、SSRT 中のき裂の発生進展挙動を ACPD (Alternate Current Potential Drop) 技術で評価する試みが精力的に行われている^{6),7)}。その研究成果は上述の観点から大いに期待されるところであり、当社でも基礎的な研究を開始している状況にある。

(2) 同一試験材料について、SSRT 試験時間 t 、平均 IGC 速度 $(da/dt)_{ave}$ 、試験時間 t における作用応力に関する情報を最低2個採取する方法

この方法は上記(1)の方法よりはかなり現実的である、この場合、例えば、ある一定のひずみ速度で2つの異なる時間でこれらの情報が得られたとすると、式(10)より、 $\sigma > \sigma_y$ のとき、次式が成立する。

$$\left(\frac{da}{dt} \right)_{ave1} = \frac{V_0}{\dot{\epsilon} t_1 E q} \{ \exp(q\sigma_y) - 1 \} + \frac{V_0}{\dot{\epsilon} t_1 n q} \{ \exp(q\sigma_1) - \exp(q\sigma_y) \} \dots\dots\dots(13-1)$$

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{ave2} = \frac{V_0}{\epsilon \cdot t_2 E q} \{\exp(q\sigma_y) - 1\} + \frac{V_0}{\epsilon \cdot t_2 n q} \{\exp(q\sigma_2) - \exp(q\sigma_y)\} \quad (13-2)$$

添字 1, 2 は異なる 2 個の SSRT データを示す。

もし、ひずみ速度が異なる場合のデータが得られれば次式が成立する。(ひずみ速度が異なると σ_y と n も異なる値となることを考慮。)

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{ave3} = \frac{V_0}{\epsilon \cdot t_3 E q} \{\exp(q\sigma_{y3}) - 1\} + \frac{V_0}{\epsilon \cdot t_3 n_3 q} \{\exp(q\sigma_3) - \exp(q\sigma_{y3})\} \quad (13-2)$$

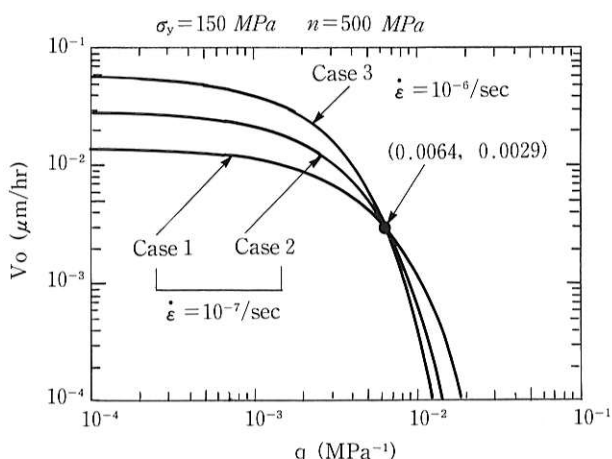
上 3 式において、未知数は q , V_0 の 2 つであり、解析的にはこれら 3 つの式のいずれか 2 つの式を用いて q , V_0 の値を求めることができる。

実際に計算されたデータをもとに、図式的に q , V_0 の値を逆算で求めた結果を第 13 図に一例として示す。

方法(2)を採用する場合、SSRT を試験片が破断するまで行うよりは、試験途中で中断し、き裂の発生進展に関する正確な情報を得るやり方が望ましいと言える。

SSRT 法は、もし上述のような試験ができるように高度化されれば、定荷重試験に比べてきわめて短時間評価できるということ、およびリパス U ベンド試験に比べれば大量試験ができない点は劣るものの作用応力を正確に評価できるという長所があり、もっとも優れた加速試験法となる可能性がある。

Case 1 : $\dot{\epsilon} = 10^{-7}$ 1/sec
 $t_1 = 1004$ hrs, $\sigma_1 = 330.3$ MPa,
 $(da/dt)_{ave1} = 3.966 \times 10^{-9}$ mm/sec
 Case 2 : $\dot{\epsilon} = 10^{-7}$ 1/sec
 $t_2 = 2004$ hrs, $\sigma_2 = 510.3$ MPa,
 $(da/dt)_{ave2} = 8.265 \times 10^{-9}$ mm/sec
 Case 3 : $\dot{\epsilon} = 10^{-6}$ 1/sec
 $t_3 = 284$ hrs, $\sigma_3 = 660.8$ MPa,
 $(da/dt)_{ave3} = 1.632 \times 10^{-8}$ mm/sec



第 13 図 q , V_0 の計算 (σ_y と n は 3 ケースで等しいとして計算)
 Fig.13 Calculation of q and V_0 based on at least different two sets of experimental data about t , σ and $(da/dt)_{ave}$, at t , where it is assumed that σ_y and n take the same value in all three cases shown above

6. 結 言

筆者らが提案しその適用性の検討を進めている「IGC 速度の応力依存性を仮定した環境助長割れ解析」を SSRT 寿命解析に適用した結果を解説的に記述した。

IGC 速度の応力依存性を考慮した考え方に立てば、従来のやり方で SSRT を実施する限りは、結果として得られる情報にはあまり定量的な価値が無く、変形特性の異なる材料を評価する場合には誤った結論を下す可能性があり、この点に特に留意する必要があることがわかった。

しかし、換言すれば、SCC 寿命予測に腐食速度の応力依存性という概念を導入することにより、これまで評価不能であった材料の変形特性の差による SCC 寿命の差の評価が可能となったということであり、したがって、変形特性の差を考慮できる従来とは異なったより高度化した SSRT 試験法を確立すれば、IGC 速度の応力依存性を求める手段として、SSRT 法がもっとも簡便な方法となり得ることも明らかとなった。

本稿では、紙面の都合上取り扱えなかったが、材料の変形特性に及ぼす因子として、クリープの影響や動的ひずみ時効の影響についても考慮する必要があることを付記しておきたい。加速試験の結果から、このような加速試験特有の因子の影響を除去することができるようになれば、現在においても種々提案されている SCC メカニズム⁵⁾についても、論議の収束が期待できよう。



時政勝行/Katsuyuki Tokimasa

総合技術研究所
研究主幹 工博

(問合せ先: 06(489)5967)

参考文献

- 1) 長野博夫, 時政勝行, 田中健一, 柘植宏之, 日本機械学会講演論文集 No.850-1, 1985, p.43
- 2) 長野博夫, 時政勝行, 田中健一, 柘植宏之, 鉄と鋼, **74** (1988), p.527
- 3) 菅田登, 時政勝行, 山中和夫, 井上守, 住友金属, **46-2** (1994), p.24
- 4) N. Konda, K. Tokimasa, K. Yamanaka and M. Inoue : Draft Proceedings of International Symposium on Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures, Paper No. A II 16, May 15-18, 1995, Sapporo, Japan
- 5) J. M. Boursier et al, Corrosion-Deformation Interaction CDF'92, October 5-7, 1992, Fontainebleau (France), Les Editions de Physique (June 1993)
- 6) T. Shoji et al, Draft Proceedings of International Symposium on Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures, Paper No. A III 06, May 15-18, 1995, Sapporo, Japan
- 7) S. Suzuki and T. Shoji, ibid. Paper No. A III 07