ニッケル基合金の BWR 環境中疲労き裂進展速度線図の検討 (第2報, Time-domain 様式によるき裂進展速度式の検討)

青池聡^{*1}, 長瀬博^{*2}, 小川琢矢^{*3}, 板谷雅雄^{*3}, 米陀英毅^{*4}

Study on Fatigue Crack Growth Behavior for Ni-base Alloys in BWR Water Environment (2nd report, Expressions in Time-domain format)

Satoru AOIKE^{*5}, Hiroshi NAGASE, Takuya OGAWA,
Masao ITATANI, and Hideki YONEDA

^{*5} Hitachi, Ltd. Hitachi Research Laboratory
1-1, Saiwai-cho 3-chome, Hitachi-shi Ibaraki-ken, 317-8511 Japan

In order to evaluate the structural integrity of BWR reactor internals made of nickel-base alloys, fatigue crack growth rate curves expressed in Time-domain format were formulated. Effects of Stress ratio and Rise time of cyclic loading on fatigue crack growth rate in simulated BWR environment were evaluated in Time-domain format. As a result of this study, fatigue crack growth rate curves for nickel-base alloys (alloy 600 or alloy 182 and modified alloy 182) in BWR environment were proposed.

Key Words : Fatigue Crack Growth Rate Curve, Nickel-base Alloy, Time-domain format

1. 結 言

BWR プラント原子炉底部の溶接構造物は、ニッケル基合金で製作されている。BWR 環境中におけるニッケル基合金のき裂進展特性は、日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格⁽¹⁾ (以降、維持規格と呼ぶ) に溶接金属の SCC き裂進展速度線図が規定されている。しかしながら、BWR 環境中における疲労き裂進展速度線図は維持規格に規定されていない。このため本研究では、健全性評価における疲労き裂進展評価に資することを目的に、先行研究⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾で評価した大気中および BWR 炉水模擬環境中における疲労き裂進展試験データに基づき、BWR 環境中におけるニッケル基合金の疲労き裂進展速度線図を検討した。本報では、ニッケル基合金溶接金属および母材熱影響部 (HAZ) の BWR 環境中疲労き裂進展速度線図を Time-domain 様式により検討した結果を報告する。

2. BWR 環境中疲労き裂進展速度線図の策定方法

2・1 線図策定に用いたき裂進展速度データ 本研究で BWR 環境中疲労き裂進展速度線図の検討に使用した試験データについて、溶接金属 (182 合金および改良 182 合金) の試験データを図 1 に、母材 (600 合金 HAZ) の試験データを図 2 に示す。図中には、当該材の大気中疲労き裂進展試験データの内、き裂進展速度 da/dN が 10^{-9}

m/cycle 以上のき裂進展特性を母集団として、最小自乗法により策定した疲労き裂進展速度式 (平均線) を記載している。また、母材の試験データには、先行研究⁽⁴⁾における評価と同様に、原子力安全基盤機構で実施された、ニッケル基合金応力腐食割れ (SCC) 進展評価手法の調査研究⁽⁵⁾ (NiSCC PJ) で取得された試験データを併せてプロットし、以降の検討に用いた。BWR 炉水模擬環境中で取得した溶接金属と母材の疲労き裂進展速度は、応力比 R と負荷上昇時間 t_r の増大に伴い da/dN が大気中に比べて加速した。また、182 合金と改良 182 合金の疲労き裂進展試験データは、き裂進展速度のばらつきが比較的小さい ΔK が $10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上の領域で重複してプロットされており、き裂進展特性に有意な差は見られなかった。このため、両者のき裂進展特性を同等と見なして BWR 環境中疲労き裂進展速度線図を検討した。

2・2 環境中疲労き裂進展速度線図の策定方法 本研究では、NUREG/CR-6176⁽⁶⁾での検討を参考に、環境中の疲労き裂進展速度を時間基準のき裂進展速度で表した Time-domain 様式により検討した。NUREG/CR-6176 の環境中き裂進展速度式を次式に示す。

$$(da/dt)_{\text{total}} = (da/dt)_{\text{air}} + (da/dt)_{\text{env}} + (da/dt)_{\text{SCC}} \quad (1)$$

環境中の疲労き裂進展速度 $(da/dt)_{\text{total}}$ は、大気中の疲労き裂進展速度項 $(da/dt)_{\text{air}}$ 、腐食環境による加速項 $(da/dt)_{\text{env}}$ 、SCC き裂進展速度項 $(da/dt)_{\text{SCC}}$ の和として評価する。 $(da/dt)_{\text{air}}$ は、大気中の疲労き裂進展速度 $(da/dN)_{\text{air}}$ から式(2)により評価し、 $(da/dt)_{\text{env}}$ は、式(3)により評価する。

^{*1} 正員、(株)日立製作所 日立研究所

(〒317-8511 茨城県日立市幸町三丁目1番1号)

^{*2} 正員、日立 GE ニュークリア・エナジー(株) 日立事業所

^{*3} 正員、(株)東芝 電力・社会システム技術開発センター

^{*4} 北陸電力(株) 原子力本部

E-mail: satoru.aoike.rg@hitachi.com

$$(da/dr)_{air} = (da/dN)_{air} / t_r \quad (2)$$

$$(da/dr)_{env} = A (da/dr)_{air}^{0.5} \quad (3)$$

本研究では、平均線に相当する近似式を策定した後、近似式に対する試験データの乖離が正規分布に従うと仮定して標準偏差 σ を評価、 2σ に相当する係数を式(1)右辺に乗じて 95%信頼上限線を策定した。このため、 $(da/dN)_{air}$ には図 1 および図 2 に記載した平均線を、 $(da/dr)_{SCC}$ には公開文献⁹⁾から SCC き裂進展速度式（平均線）を引用して使用した。 $(da/dr)_{SCC}$ の評価には、 ΔK と R により次式として表される繰返し荷重の平均値による応力拡大係数を K_{mean} と定義して使用した。

$$K_{mean} = \Delta K(1+R)/(1-R)/2 \quad (4)$$

式(3)右辺の係数 A は、策定した近似式に対する試験データの乖離が最小となる値を最小自乗法により決定した。なお、時間基準のき裂進展速度 $(da/dt)_{total}$ は、次式により $(da/dN)_{total}$ に変換した。

$$(da/dN)_{total} = t_r (da/dt)_{total} \quad (5)$$

3. BWR 環境中疲労き裂進展速度線図の策定結果

3-1 溶接金属の疲労き裂進展速度線図 本研究で策定した溶接金属の BWR 環境中疲労き裂進展速度式について、近似式で評価したき裂進展速度 $(da/dr)_{pre}$ と試験で得られたき裂進展速度 $(da/dr)_{exp}$ の比較結果を図 3 に示す。図中には近似式からの乖離に基づき策定した 95%信頼上限線を併記した。95%信頼上限線は、全ての試験データを包含した。溶接金属の BWR 環境中疲労き裂進展速度線図（95%信頼上限線）を次式に、各荷重条件に対応した線図の比較結果を図 4 に示す。

$$(da/dN)_{total} = 3.75[(da/dr)_{air} + (da/dr)_{env} + (da/dr)_{SCC}] t_r \quad (6)$$

$$(da/dr)_{air} = 8.09 \times 10^{-13} \Delta K^{2.60} / t_r \quad (7)$$

$$(da/dr)_{env} = 9.58 \times 10^{-5} (da/dr)_{air}^{0.5} \quad (8)$$

$$(da/dr)_{SCC} = 0 \quad (K \leq 0) \quad (9-1)$$

$$(da/dr)_{SCC} = 2.70 \times 10^{-17} K^{4.50} \quad (0 < K \leq 56.0) \quad (9-2)$$

$$(da/dr)_{SCC} = 2 \times 10^{-9} \quad (56.0 < K) \quad (9-3)$$

公開文献⁹⁾より引用した $(da/dr)_{SCC}$ は、式(4)の K_{mean} を K に代入して評価した。

策定した溶接金属の BWR 環境中疲労き裂進展速度線図は、保守性をもって全ての試験データを包含した。なお、 $t_r=1s$ の条件では、先行研究での検討結果⁹⁾を参考に、下限応力拡大係数範囲 ΔK_{th} を $3.4MPa\sqrt{m}$ とした。

3-2 母材熱影響部の疲労き裂進展速度線図 本研究で策定した母材熱影響部の BWR 環境中疲労き裂進展速度式について、近似式で評価したき裂進展速度 $(da/dr)_{pre}$ と試験で得られたき裂進展速度 $(da/dr)_{exp}$ の比較結果を図 5 に示す。図中には 95%信頼上限線を併記した。95%信頼

上限線は、全ての試験データを包含した。母材熱影響部の BWR 環境中疲労き裂進展速度線図（95%信頼上限線）を次式に、各荷重条件に対応した線図の比較結果を図 6 に示す。

$$(da/dN)_{total} = 4.51[(da/dr)_{air} + (da/dr)_{env} + (da/dr)_{SCC}] t_r \quad (10)$$

$$(da/dr)_{air} = 4.67 \times 10^{-12} \Delta K^{2.92} / t_r \quad (11)$$

$$(da/dr)_{env} = 1.89 \times 10^{-6} (da/dr)_{air}^{0.5} \quad (12)$$

$$(da/dr)_{SCC} = 1.11 \times 10^{-11} K^{0.97} \quad (13)$$

公開文献⁹⁾より引用した $(da/dr)_{SCC}$ は、式(4)の K_{mean} を K に代入して評価した。策定した母材熱影響部の BWR 環境中疲労き裂進展速度線図は、保守性をもって全ての試験データを包含した。なお、 $t_r=1s$ の条件では、先行研究での検討結果⁹⁾を参考に、 ΔK_{th} を $3.0MPa\sqrt{m}$ とした。

4. 結 言

ニッケル基合金溶接金属および母材熱影響部の BWR 炉水模擬環境中における疲労き裂進展特性を検討し、Time-domain 様式による BWR 環境中疲労き裂進展速度線図を策定した。さらに、策定した線図が、保守性をもって全ての試験データを包含することを確認した。

謝 辞

本研究は、北陸電力(株)、東北電力(株)、中部電力(株)、中国電力(株)、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、(株)東芝および日立 GE ニュークリア・エナジー(株)で実施した共同研究の一部であり、関係各位の御討論に深謝いたします。

文 献

- (1) JSME, *Codes for Nuclear Power Generation Facilities - Rules on Fitness-for-Service for Nuclear Power Plants -*, JSME S NA1-2008, (2008).
- (2) T. Ogawa, et al., *Study on Fatigue Crack Growth Rate Curve for Nickel-Base Alloy in Air*, JSME M&M2010, OS1015, (2010).
- (3) T. Ogawa, et al., *Study on Fatigue Crack Growth Behavior for Nickel-base Alloy Weld Metal in BWR Water Environment*, JSME M&M2012, OS0801, (2012).
- (4) S. Aoiike, et al., *Evaluation of Fatigue Crack Growth Behavior for Heat-Affected Zone in Nickel Base Alloys*, JSME M&M2012, OS0802, (2012).
- (5) JNES, *Annual Report, Evaluation Technology for Stress Corrosion Crack Growth of Nickel Based Alloy in Japanese*, (2006).
- (6) W. J. Shack, T. F. Kassner, *Review of environmental effects on fatigue crack growth of austenitic stainless steels*, NUREG/ CR-6176, (1994).
- (7) H. Nagase, et al., *Proposal of SCC Crack Growth Rate Curve for Nickel-Base Alloy Weld Metal in BWR Environments*, JSME M&M2009, OS1409, (2009).

Fig. 1 Fatigue crack growth rates for Ni-base weld metals

Fig. 4 Comparison of fatigue crack growth rate curves for Ni-base weld metals in simulated BWR environment

Fig. 2 Fatigue crack growth rates for alloy 600 (HAZ)

Fig. 5 Relationship between experimental and predicted fatigue crack growth rates for alloy 600 (HAZ)

Fig. 3 Relationship between experimental and predicted fatigue crack growth rates for Ni-base weld metals

Fig. 6 Comparison of fatigue crack growth rate curves for alloy 600 (HAZ) in simulated BWR environment