

316 ステンレス鋼の低サイクル疲労き裂成長における環境効果

Environmental Effect on Low Cycle Fatigue Crack Growth of SUS316

大阪大学	藤川 亮祐	Ryosuke FUJIKAWA	Member
大阪大学	北田 孝典	Takanori KITADA	Non Member
大阪大学	中村 隆夫	Takao NAKAMURA	Member
原子力安全システム 研究所	釜谷 昌幸	Masayuki KAMAYA	Member

The purpose of this study is to investigate environmental effects on low cycle fatigue crack growth of SUS316. Low cycle fatigue test and periodical observation on inner surface of a hollow specimen was conducted by developing new type of replica observation. The crack growth in PWR environment was measured and the investigation of environmental effects on crack growth was conducted. Crack initiation rate of fatigue test in PWR environment is faster than in air condition. Crack initiation is estimated to be dominant in crack growth both in environmental fatigue and Stress Corrosion Cracks (SCC) condition. Consideration of crack initiation in earlier period of fatigue test, acceleration of crack growth rates in PWR environment and coalescence of cracks by short initiation time and high density of cracks is necessary to quantify environmental effects.

Keywords: Environmental effect, SUS316, 3-dimensional replica observation, initiation dominant growth

1. 序論

原子力発電所の安全確保において重要なことは、事故時に一時的に喪失した安全機能をアクシデントマネジメントにより如何に早く必要なレベルまで回復させ、シビアアクシデントに至るのを防止できるかにある。そこで、原子力発電所における安全機能の信頼度を経年変化と保全活動の効果を取り入れて簡易かつ定量的に評価するため「レジリエンス指標」が提案され、その策定手法の開発が進められている。[1]

国内の原子力発電所の中には運転を開始して40年を超えるプラントもあり、今後、機器の経年変化の影響がより顕著に現れてくることが予想される。その影響を把握して取替などを行うことが保全活動においてより重要なものになると考えられる。

疲労は経年変化の中でも機器の安全機能に及ぼす影響が大きく、その中でも高温水による環境効果が疲労に及ぼす影響については、試験条件が高温高压であるため大気中での疲労試験のように途中止め試験を行ってき裂の成長過程を観察することが難しい。このため、き裂発生と進展が環境効果によってどのように変化するかを調べ

ることが困難であった。著者らは、これまで破断後の試験片表面き裂長さを測定し、進展速度を逆算することで環境効果によるき裂の発生への影響についての検討を行った。[2]

本研究では、316 ステンレス鋼の PWR1 次冷却材中での環境効果がき裂の成長に及ぼす影響の定量化について検討を行った。軸方向ひずみ制御の環境中低サイクル疲労試験中に途中止めを行うことにより、新たに開発した2段レプリカ法で中空試験への内表面のき裂の成長挙動を観察し、環境効果の影響について検討した。

2. 記号説明

a : き裂深さ(μm)

f : 形状係数

$\triangleleft \varepsilon$: ひずみ範囲

$\triangleleft K_{\varepsilon}$: ひずみ拡大係数

da/dN : き裂進展速度($\mu\text{m}/\text{cycle}$)

3. 環境中疲労き裂成長挙動の観察

3.1 き裂観察手順

PWR1 次冷却材を模擬した環境中での疲労試験において、レプリカ法を用いて疲労き裂の観察を行った。試験片は 316 ステンレス鋼の中空試験片を用いた。疲労試験

連絡先：藤川 亮祐、

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻、

E-mail: r-fujikawa@ne.see.eng.osaka-u.ac.jp

条件を Table 1 に、試験片形状を Fig.1 に示す。中空試験片の内表面から発生したき裂が表面まで貫通するまでの繰返し数 (疲労寿命) N_f は 1511 サイクルであった。繰返し数が 600 サイクルと 1200 サイクルで試験の途中止めを行い、その都度レプリカ法によりき裂成長挙動を観察しき裂長さを測定した。

本研究では、中空試験片の内側表面き裂を観察するために立体レプリカとフィルムレプリカを併用した、2 段階レプリカ法を新たに開発した。立体レプリカでは、液体状のシリコンゴムを中空試験片内に充填し、固まった円柱状のゴムを試験片から取り出す (Fig.2 参照) ゴム表面には試験片内表面の凹凸情報 (き裂形状) が写し取られているので、それをフィルムレプリカに転写した。フィルムレプリカ上のき裂を光学顕微鏡により、倍率 200 倍で観察した。観察範囲は軸方向に 3 mm、径方向に 2 mm とし、試験片を貫通した主き裂から離れた領域を選定して観察した。

Table 1 Conditions of fatigue test

Diameter		Temp. p.	Strain rate	Strain range
Outer	Inner			
(mm)	(mm)	(°C)	(%/sec)	(%)
12.00	6.01	325	0.4	1.2

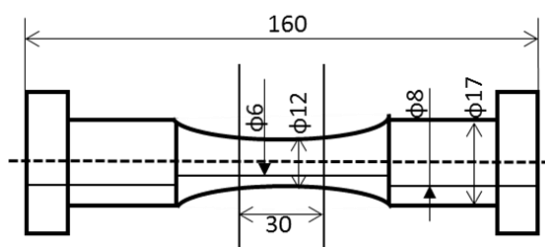


Fig.1 Sketch of hollow specimen (unit : mm)



Fig.2 Hollow specimen and 3-dimensional replica

3.2 き裂観察結果

Fig.3 に得られたレプリカ画像の一例を示す。得られた画像から、立体レプリカとレプリカフィルムを用いた 2 段階のレプリカ採取を行うことにより中空試験片の内表

面のき裂を観察できることを確認した。き裂観察の結果、繰返し数が 600 サイクルで 177 個、600~1200 サイクルの間に 10 個、1200~1511 サイクルの間に 14 個のき裂が新たに発生していることが確認された。

繰返し数 600 サイクルの時の観察領域内において最も長いき裂長さは 390 μm 、177 個中 122 個のき裂長さは 100 μm 以下であった。また、繰返し数 1200 サイクルにおいて最も長いき裂は 595 μm であり、これは 600 サイクルの時に 390 μm の長さのき裂が進展したものであった。疲労寿命である $N_f=1511$ サイクルにおいては、最も長いき裂長さは 933 μm で 1200 サイクル時の最大長さのき裂とは異なるき裂であった。

観察された試験片表面のき裂は密に発生しており、き裂の合体が多く見られた。Fig.4 に合体が観察された部位のき裂の観察イメージを示す。同じ場所における 600 サイクルと 1511 サイクル時の観察結果を並べて示しているが、600 サイクルでは別々であったき裂が 1511 サイクルで合体している様子が見られた。

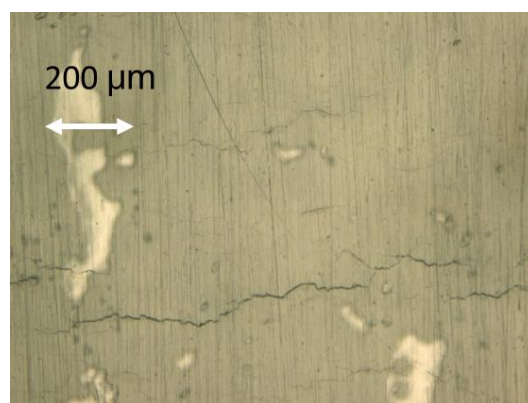
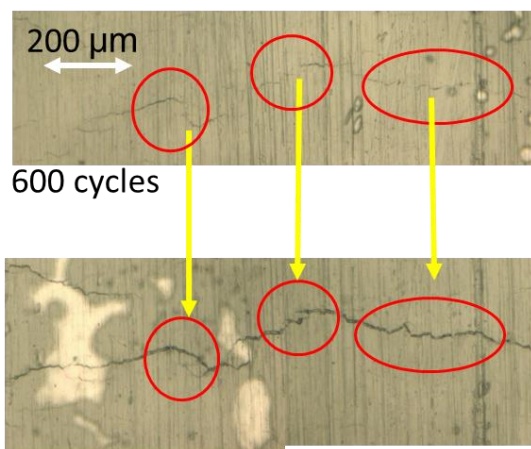


Fig.3 Photo of replica



1511 cycles

Fig.4 Coalescence of cracks on replica film

3.3 き裂進展速度

レプリカ観察から得られたき裂長さを元に環境中での深さ方向のき裂進展速度(da/dN)を算出した。深さ方向の進展速度はアスペクト比を 0.5 として、表面方向のき裂進展速度に基づき推定した。ひずみ拡大係数範囲を式(1)のように定義した。

$$\Delta K_{\varepsilon} = f \Delta \varepsilon \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$f = 0.929 \left(\frac{a}{t}\right)^4 - 0.836 \left(\frac{a}{t}\right)^3 + 0.333 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0.0106 \left(\frac{a}{t}\right) + 0.657 \quad (2)$$

ここで、 f は式(2)で定義される中空試験片の形状係数であり、 a はき裂深さ、 t は試験片厚さ(=3 mm)である。深さ方向のき裂進展速度とひずみ拡大係数範囲との関係は次式で近似した。[3]

$$\frac{da}{dN} = D(\Delta K_{\varepsilon})^m \quad (3)$$

Fig.5 にレプリカ観察のき裂長さを元に得られたき裂進展速度とひずみ拡大係数の関係を示す。また、過去に得られた大気中での疲労試験で得られたき裂進展速度とひずみ拡大係数の関係[3]も合わせて示す。また、それぞれ合体を考慮した場合としない場合の2種類のデータをプロットした。実線は大気中での疲労試験のデータ[4]である。ここで合体を考慮した場合は、600 サイクルの時点で複数個であったき裂が $N=1200, 1511$ サイクル時点でひとつのき裂となっていた場合のことを言う。合体を考慮しない場合においては全てのき裂を個別に測定し、進展速度を算出した。進展がほとんど停止したき裂のデータも含まれているため、大気中の進展速度よりも遅いき裂がある一方で、多くのき裂は大気中に比べて速い進展速度を持つことがわかる。き裂進展速度の計算に用いた式(3)における D と m の値はそれぞれプロットした各データの最小二乗近似により求めた。Table 2 には大気中[4]、環境中(合体無し)、環境中(合体有り)におけるき裂進展速度を計算する際の D と m の値を示す。

Table 2 Parameters in the calculation of crack growth rates

	D	m
Air	3.94×10^3	2.85
Env.(no coalescence)	6.77×10^5	1.88
Env.(coalescence)	4.00×10^8	2.50

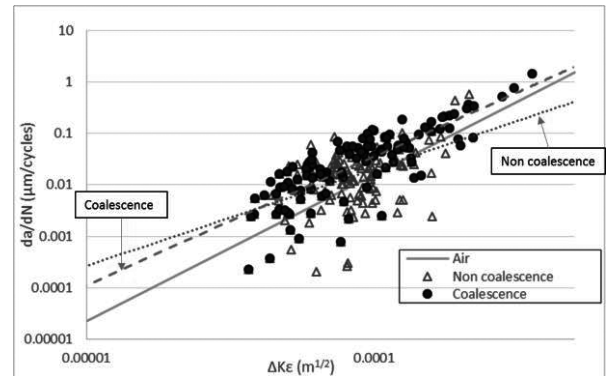


Fig.5 Relationship between the fatigue crack growth rates identified from replica observation and strain intensity factor.

4. き裂成長に関する考察

4.1 環境効果のき裂発生への影響

本研究の環境中疲労試験では 600 サイクル($N/N_f=0.4$)時点で疲労寿命時までに発生するき裂のうちほとんど(177/201 個)の数のき裂が発生している。一方、大気中疲労試験の場合は、 $N/N_f=0.4$ の時、31/198 個のき裂が発生していた。[5]このことは、大気中より環境中の疲労試験の方が同じ寿命比(疲労寿命に対する繰返し数 N/N_f)の時点におけるき裂の発生速度が速くなっていることを意味している。

4.2 環境効果によるき裂進展速度の加速について

Fig.5 のき裂の観察結果より、大気中に比べて環境中試験の方がき裂進展速度は速い場合が多いが、そうでないき裂も存在していることがわかる。これは進展が停止するか、ほとんど進展しなかったき裂である。これらのき裂の多くは Fig.6 に示すように比較的大きなき裂の付近で見られる。これはき裂付近における応力緩和の影響と推定される。

一方、き裂先端付近では応力が集中し、き裂が発生しやすくなっていると推定される。例えば Fig.7 のき裂の観察結果では破線で囲まれた部分のようにき裂の先端付近に別のき裂が発生している様子が多く観察された。また、Fig.4 に示すように複数のき裂が合体することにより、表面き裂の長さが増加している。このように、あるひとつのき裂が発生し、その先端付近の応力集中部で別のき裂が連鎖的に発生・合体して見掛けのき裂進展が加速する現象が起きているものと推定される。これは SCC で見られた発生支配型成長[6]と同様と考えることができる。

環境中でのき裂観察結果から、き裂の成長は疲労試験

の比較的初期段階で寿命までに発生するき裂のほとんどが試験片表面に発生し、それらが合体することでまず表面方向のき裂長さが大きくなり、そして表面上長くなったき裂に応力が加わり深さ方向への進展が進み、破断に至るものと推定される。

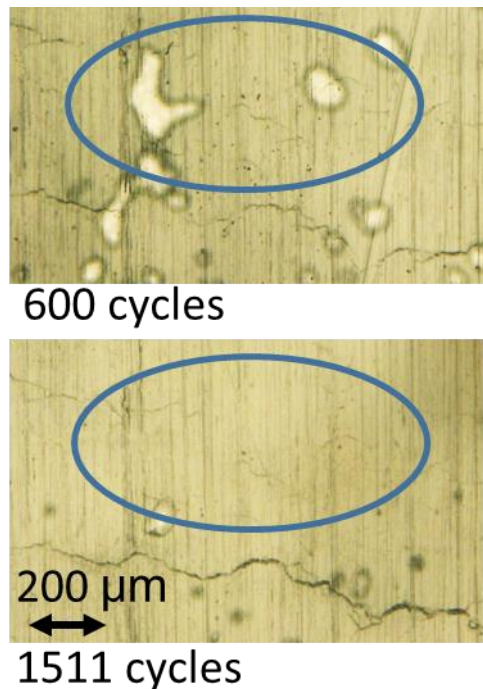


Fig.6 Crack growth at the neighborhood of large cracks

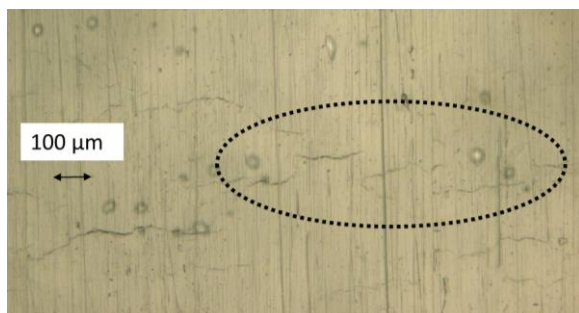


Fig.7 Crack initiation at the neighborhood of crack tips

5. まとめ

本研究ではPWR1次冷却材環境中での316ステンレス鋼の低サイクル疲労試験の途中止め試験とレプリカ観察を行い、き裂の成長挙動に与える環境効果の影響について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 環境中疲労試験において途中止めを行い、新たに開発した立体レプリカとフィルムレプリカを併用した2段レプリカ法により、環境中疲労き裂の成長を

観察した。

- (2) 環境中疲労き裂の観察結果から、寿命比(N/N_f)で見た場合、環境中では大気中より早い段階でき裂が発生した。また、SCCに見られる発生支配型成長と同様なき裂の発生・成長の様子が見られた。
- (3) 環境中におけるき裂進展速度の評価においてはき裂の合体により見かけ上の進展速度は加速した。また、き裂の合体により表面長さは増加するが、深さは大きく変化しない。そのためアスペクト比が変化する。
- (4) 環境効果がき裂の成長に与える影響を評価するためには、疲労試験初期におけるき裂発生時の加速、環境中におけるき裂進展速度の加速、き裂の合体による表面き裂進展速度の加速の効果を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 出町他, 原子力発電所のシステム安全評価のためのレジリエンス指標の提案, 日本原子力学会 2015 年春の年会, 講演番号 I14(2015).
- [2] 藤川 亮祐, 阿部 茂樹, 中村 隆夫, 釜谷 昌幸, "疲労試験片表面観察に基づく微小き裂の発生・成長に与える環境効果の影響評価", 日本保全学会第 11 回学術講演会要旨集, pp493-498, (2014).
- [3] 釜谷 昌幸, 川久保 政洋, "き裂成長予測による低サイクル疲労の損傷評価", 日本機械学会論文集(A 編), 78 巻 795 号(2012-11).
- [4] M. Kamaya, "Environmental effect on fatigue strength of stainless steel in PWR primary water Role of crack growth acceleration in fatigue life reduction", International Journal of Fatigue 55 (2013) 102-111, 2013, pp.102-111.
- [5] Shigeki ABE, Takao NAKAMURA, Masayuki KAMAYA, "Statistical Model of Micro Crack Growth for the Evaluation of Accumulated Fatigue in NPPs", E-Journal of Advanced Maintenance Vol.7 (2015) 00-00 Japan Society of Maintenology.
- [6] 釜谷 昌幸, 春名 匠, "高温水中 304 ステンレス鋼の応力腐食割れにおける「発生支配型成長」の観察と予測", INSS JOURNAL Vol.12, p.222.