



## 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 initiation and propagation was conducted. Crack initiation rate of fatigue test in PWR environment is faster than in air condition. Crack propagation is accelerated apparently by the increase of coalescence of cracks. 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 are necessary to quantify environmental effects in addition to the acceleration of crack growth rates in PWR environment.

**Keywords:** Environmental effect, SUS316, 3-dimensional replica observation, coalescence of cracks

### 1. はじめに

現在、国内の原子力発電所の中には運転を開始して 40 年近いプラントがあり、今後の運転において機器の経年変化がより顕著に現れてくることが予想される。原子力発電所の安全確保のためには、経年変化の影響を把握して適切に取替などを行う保全活動がより重要なものになる。経年変化の中でも疲労は機器の安全機能に及ぼす影響が大きい。保全活動が原子力発電所の機器の疲労損傷防止に及ぼす影響を評価するため、低サイクル疲労によるき裂の発生と進展をモデル化した仮想き裂成長曲線の活用が検討されている[1]。

実機に適用できる仮想き裂成長曲線を作成するためには、多軸効果や環境効果などについて検討し、き裂発生・進展モデルの精度を高めることが必要である。そのためき裂の発生から試験片破断に至るまでのき裂の成長挙動を観察し、多軸効果や環境効果が与える影響を明ら

かとする必要がある。

しかし高温水による環境効果が疲労に及ぼす影響については、試験条件が高温高圧であり、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はこれまで困難であった。そこで著者らは先行研究において破断後の試験片表面のき裂の観察からき裂発生挙動を逆算する逆解析手法を試みた[2],[3]。この手法では、まず環境中及び大気中疲労試験で破断させた後の試験片の表面き裂長さを測定し、き裂の長さ分布を求めた。更に一様のき裂進展速度を仮定することによりき裂の発生サイクル数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。その結果、環境中では疲労寿命までに発生するき裂個数が大気中に比べて増加することが明らかとなった。また、大気中と環境中の試験片表面観察結果を比較することにより環境中ではき裂密度が高いことからき裂の合体が起こっていると判断した。そして合体を条件に含む場合と含まない場合についてモンテカルロシミュレーションを行いそれぞれの疲労寿命を試験結果と比較した。その結果、合体を含む条件の疲労寿

連絡先：藤川 亮祐

〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル 8階

原子力規制庁 原子力規制部 原子力規制企画

E-mail: ryosuke\_fujikawa@nsr.go.jp

命が試験結果と良い一致を示したため、環境中での疲労寿命にはき裂の合体が影響していると推定された。以上の結果から、環境効果による疲労寿命の低下は、従来から述べられていたき裂進展速度の加速だけではなく、き裂の発生の加速とき裂の合体による進展の加速も影響していると推定された[2],[3]。これらの推定を証明するためには環境中での途中止め疲労試験を行い、き裂の発生から試験片破断に至るまでの、き裂の成長過程を観察する必要があった。

本研究は、PWR1 次冷却材環境中の仮想き裂成長曲線を作成するために、環境中におけるき裂の発生から  $\mu\text{m}$  サイズへのき裂進展、さらに試験片破断までの  $\text{mm}$  サイズのき裂成長挙動を観察し、環境効果による寿命低減のメカニズムを解明することを目的とする。このため本研究では、環境中疲労試験で使用する中空試験片内側表面のレプリカ観察を可能とするために、新たに2段階レプリカ法を開発した。そして軸方向ひずみ制御の低サイクル疲労試験において途中止めを行い、2段階レプリカ法を用いて環境中でのき裂成長挙動の観察を行った。

## 2. 記号説明

- a : き裂深さ (m)
- t : 試験片厚さ (m)
- f : 形状係数
- D : 材料定数
- m : 材料定数
- $\Delta \epsilon$  : ひずみ範囲 (%)
- $\Delta K_{\epsilon}$  : ひずみ拡大係数 ( $\text{m}^{1/2}$ )
- 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 PWR1 次冷却材環境中疲労試験

PWR1 次冷却材環境中でのき裂成長挙動を途中止めで観察するため低サイクル疲労試験を行った。制御方法は軸方向ひずみ制御とし、ひずみ比は-1とした。疲労試験条件を Table 1 に示す。PWR 一次冷却材を模擬した水質条件を Table 2 に、試験片形状及び化学成分を Fig.1 及び Table 3 に示す。

試験片は 316 ステンレス鋼の中空試験片を用いた。試験片の中空部分に  $325^{\circ}\text{C}$  の PWR 一次冷却材模擬水を循環させて試験を行った。試験片の外表面からも高周波加熱器で加熱し、試験片の内表面、外表面の温度が  $325^{\circ}\text{C}$  となるように制御した。き裂は試験片の内側

表面に発生し、外側表面まで進展した。中空試験片の内側表面から発生したき裂が外側表面までを貫通するまでの繰返し数 (疲労寿命) Nf は 1511 サイクルであった。疲労試験において 600 サイクルと 1200 サイクルで途中止めを行い、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。

Table 1 Fatigue test condition

Temp.	Strain rate	Total strain range
T	d $\epsilon$ /dt	$\Delta \epsilon_t$
( $^{\circ}\text{C}$ )	(%/sec)	(%)
325	0.4	1.20

Table 2 Water quality condition of PWR environment

Dissolved oxygen(ppb)	Less than 5
Dissolved hydrogen(ppm)	$2.7 \pm 0.1$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (ppm)	$500 \pm 13$
LiOH(ppm)	$2.00 \pm 0.07$

Table 3 Chemical content of test material (wt%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Bal.	0.06	0.5	1.3	0.031	0.027	10.18	16.94	2.02

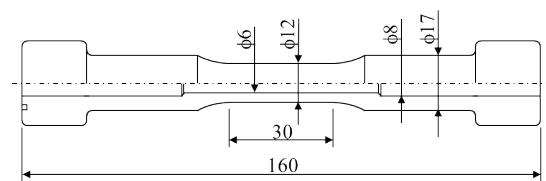


Fig.1 Sketch of hollow specimen (unit : mm)

### 3.2 2段階レプリカ法による観察手順

PWR1 次冷却材を模擬した環境中での低サイクル疲労試験においては、新たに開発した2段階レプリカ法を用いて中空試験片の内表面に発生する疲労き裂の成長挙動の観察を行った。

2段階レプリカ法は、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新たに開発した手法である。2段階レプリカ法の手順は、まず、試験機から取り外した中空試験片の内部に液体状のシリコンゴムを充填する。このゴムが固まった後、試験片内部から取り出す。これが立体レプリカである (Fig.2 参照)。立体レプリカ表面には試験片内側表面の凹凸情報 (き裂形状) が写し取られており、それをフィルムレプリカに転写する。以上が2段階レプリカ法の手順である。そして

採取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3mm、周方向に2mmとし、主き裂による応力緩和の影響を避けるため、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を行った。

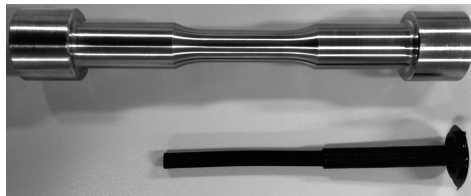


Fig.2 Hollow specimen and 3-dimensional replica

### 3.3 き裂観察結果

Fig.3 に合体が観察された部位のき裂のレプリカ画像の一例を示すが、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。600サイクルでは別々であったき裂が成長し、1511サイクルで合体している様子が見られた。このことから2段階レプリカ法により中空試験片の内表面のき裂の成長挙動を観察できることを確認した。

#### 3.3.1 き裂個数

本研究ではき裂の発生をき裂長さが20μmになった時点と定義した。これはき裂と判断できる観察限界が20μmであったことによる。発生したき裂個数、合体したき裂の個数、及び発生したき裂の数と合体の数の差、すなわち合体した複数のき裂をひとつのき裂として数えたき裂の個数(Total number of cracks)のそれぞれをTable 4に示す。また、き裂観察の結果から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を確認した。600、1200及び1511サイクルでのき裂長さの分布をFig.4に示す。Table 4において発生したき裂個数が減少しているのは600サイクルでは観察できたものが1200,1511サイクル時に観察できなかった場合があったためである。観察できなかったき裂はいずれも40μm以下の短いき裂であるため、本論文の検討結果には影響与えない。

Table 4 Number of cracks and coalescence

Cycle	600	1200	1511
Number of crack initiation	177	123	168
Number of coalescence		39	61
Total number of cracks	177	84	107

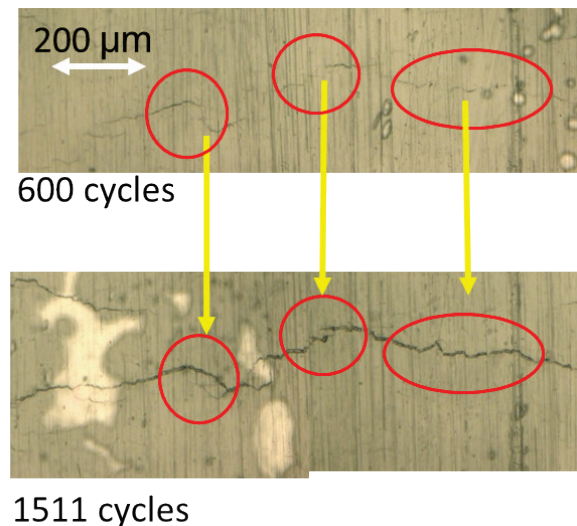
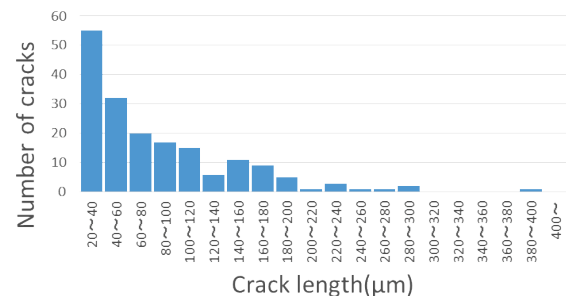
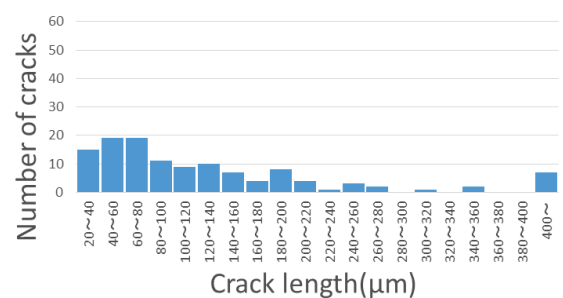


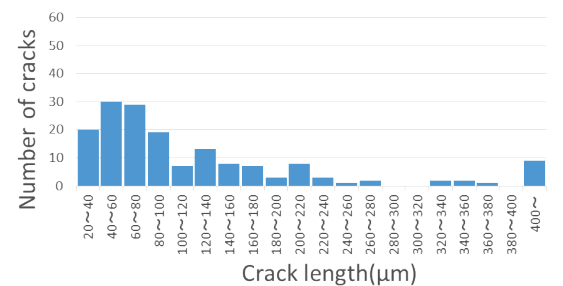
Fig.3 Coalescence of cracks observed in the photo of replica



(a) Number of cracks in 600 cycles



(b) Number of cracks in 1200 cycles



(c) Number of cracks in 1511 cycles

Fig.4(a)~(c) Distribution of crack length at each cycle

### 3.3.2 き裂長さ

試験片表面を観察した結果、表面積 1 mm<sup>2</sup>あたり約 34 個のき裂が密に発生しており、またき裂の合体が多く確認された。

600 サイクルの時点で観察された観察領域内における最も長いき裂は 1200 サイクルにおいても最も長いき裂であった。疲労寿命である N<sub>f</sub>=1511 サイクルにおいて、最も長いき裂長さは 2509 μm で、1200 サイクル時に最長のき裂とは別のき裂であり、合体により急激に長さが増していることが確認された。Table 5 に各サイクル数における最長のき裂長さを示す。

Table 5 Maximum crack length at each cycle

Number of cycle	600	1200	1511
Maximum crack length (μm)	390	1012	2509

### 3.4 ひずみ拡大係数とき裂進展速度

低サイクル疲労のき裂進展速度はひずみ拡大係数と良い相関を示すことが釜谷らにより報告されている[4]。このため本研究ではひずみ拡大係数を用いた。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、表面方向のき裂進展速度に基づきアスペクト比を 0.5 と仮定して推定し、ひずみ拡大係数範囲を式(1)で定義した。

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

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

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

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式(3)で近似した[4]。

Fig.5 にレプリカ観察結果から得られたき裂長さを基に求めたき裂進展速度とひずみ拡大係数の関係を示す。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データの最小二乗近似により求めた。Table 6 に大気中[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の値を示した。ここでは合体を考慮した場合としない場合の2

種類のき裂進展速度の値を記載した。ここで合体とは、600 サイクルの時点では独立したき裂だったものが N=1200,1511 サイクル時点でひとつのき裂となった場合と定義する。き裂が合体した場合の進展速度(da/dN)は、例えば 10 μm, 20 μm, 30 μm の長さのき裂が合体した場合、30 μm のき裂(合体した中で最も長いもの)が長さ 60 μm になったとして合体の影響を大きめに計算している。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。また、実線は過去の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の近似線[4],[5]である。この近似線は室温大気中での中空試験片の主き裂の進展速度を表しているが先行研究[5]において中空試験片結果とも良い相関が示されている。Fig.5 には、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存在する。また、ひずみ拡大係数が大きくなる領域では近似線の傾きが大気中と逆転している。これは今回の試験で得られた環境中のき裂進展速度が、主き裂とは異なるき裂の進展速度を用いているためである。それでも多くのき裂は大気中に比べて進展速度が速く、特に合体したき裂の進展速度のほとんどは同じひずみ拡大係数において大気中の主き裂よりも速いものとなっており、合体の影響が無視できないことを示している。

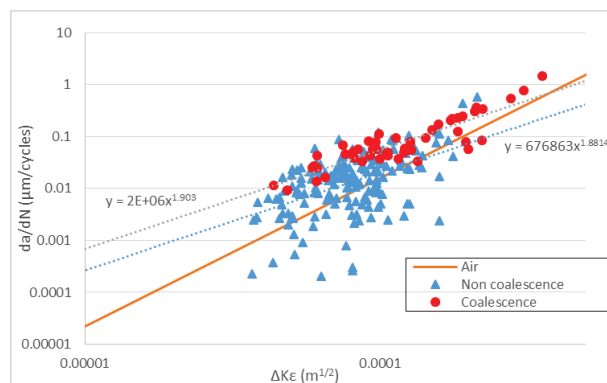


Fig.5 Relationship between crack growth rate identified from replica observation and strain intensity factor

Table 6 Parameters in the calculation of crack growth rates

	D	m
Air	3.94 × 10 <sup>3</sup>	2.85
Env.(no coalescence)	6.77 × 10 <sup>5</sup>	1.88
Env.(coalescence)	2.00 × 10 <sup>6</sup>	1.93

## 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

本研究で実施した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約 90 % (177/201 個)の数のき裂が発生していることが観察された。一方、先行研究で実施した大気中疲労試験 (SUS316、常温、中実試験片)の場合、 $N/N_f=0.4$  の時点で、約 15 % (31/198 個)のき裂が発生していた[1]。

このことから、大気中より環境中で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(個数/ $N/N_f$ )が速くなっていることが推定された。

### 4.2 環境効果によるき裂進展速度の加速

Fig.5 に示したき裂進展速度の計算結果から、大気中と比較して環境中のき裂進展速度が速いき裂が多い一方で、き裂進展速度が遅いき裂も存在していることが確認された。観察結果から、き裂進展速度の低下したき裂は比較的大きなき裂の付近で見られたことから、速度が低下する原因は大きなき裂の付近における応力緩和の影響と考えられる。一例を Fig.6 に示す。実線で囲った部分の下部には長さが 1000  $\mu\text{m}$  を超えるき裂が存在している。そのき裂の近くの、実線で囲った部分のき裂は 600~1511 サイクルの間にほとんど進展していないことが確認された。

一方でき裂の先端付近において別のき裂が発生している様子も多く観察された。一例を Fig.7 に示すが、破線内において一つのき裂の先端付近に別のき裂が分布している様子が確認された。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ことが原因であると推定される。また、Fig.3 に示すように複数のき裂が合体することによる表面き裂の長さの増加が観察された。これはき裂の先端付近の応力集中部で別のき裂が連鎖的に発生・合体してき裂の成長が加速する、SCC における発生支配型成長[6]と同様の現象が起こっていると推定された。

SCC における発生支配型成長は、寿命比( $t/t_f$ )が 0.8 付近から、き裂数が急増し合体してき裂が成長する現象である。PWR1 次冷却材環境中では SCC とは異なり、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内表面に発生する。そして連鎖的に発生したき裂が合体することで表面方向のき裂長さが大きくなり、更に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んで、破断に至るものと推定される。

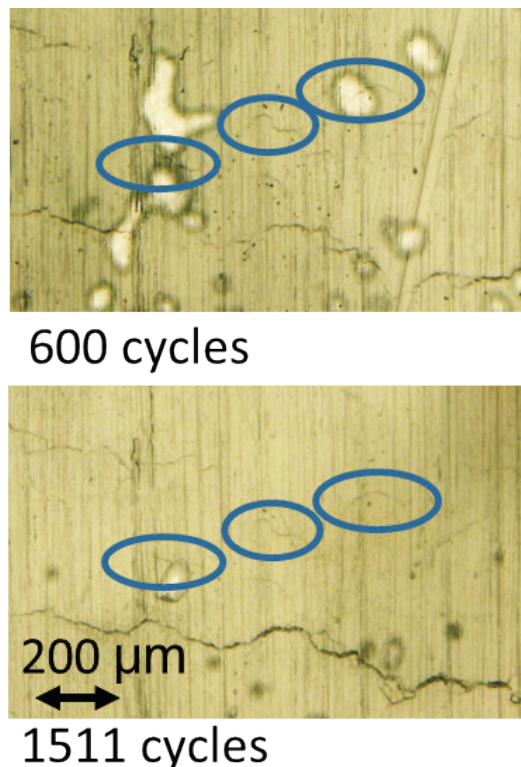


Fig.6 Crack growth at the neighborhood of large cracks

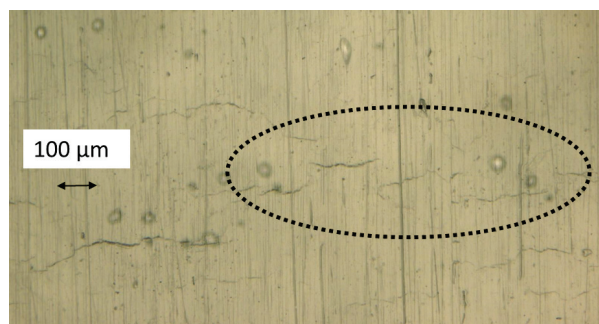


Fig.7 Crack initiation at the neighborhood of crack tips

## 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におけるき裂成長挙動を検討するために、新たに開発した 2 段レプリカ法によりき裂の発生・進展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、環境中疲労き裂の発生・進展挙動を観察した。
- (2) 途中止め試験で得られたき裂成長挙動の観察結果から、環境中では大気中よりき裂の発生速度(個数

/(N/Nf)が速くなっていることが推定された。

(3) 環境中ではき裂の先端付近の応力集中部で別のき裂が連鎖的に発生・合体してき裂の成長が加速する様子が観察された。

(4) 環境中におけるき裂進展速度の評価結果から、き裂の合体によりき裂の表面長さが増加し、見かけ上のき裂進展速度が加速されることが推定された。

(5) 環境効果がき裂の成長に与える影響には、疲労試験初期におけるき裂発生・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それぞれの効果が寄与しているものと推定され、今後これらの効果を仮想き裂成長曲線の検討に取り入れて行く必要がある。

### 参考文献

- [1] S. Abe, T. Nakamura, M. Kamaya: "Statistical model of micro crack Growth for the evaluation of accumulated fatigue in NPPs", E-Journal of Advanced Maintenance Vol.7-1 pp.129-137 (2015)
- [2] R. Fujikawa, S. Abe, T. Nakamura, M. Kamaya: "Influence of PWR environment on fatigue crack initiation and growth of type 316 stainless steel", PVP2015-45812,

(2015)

- [3] 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, 八戸, 2014 年 7 月 23-25 日, pp.493-498 (2014)
- [4] 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, pp.1518-1533 (2012-11)
- [5] 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, pp.102-111 (2013)
- [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, pp.222-229 (2005)

(平成 27 年 10 月 16 日)