

316 ステンレス鋼の炉水環境中での疲労き裂進展 におけるひずみ速度の影響

Influence of Strain Rate on Fatigue Crack Growth in SUS316 under Reactor Coolant Environment

大阪大学	能勢 昂尚	Takahisa NOSE	Member
大阪大学	北田 孝典	Takanori KITADA	Non Member
大阪大学	竹田 敏	Satoshi TAKEDA	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

Abstract:

The purpose of this study is to investigate environmental effects on low cycle fatigue crack growth rate of SUS316 in different strain rate condition. The fatigue tests were conducted under different strain rate (0.4%/sec and 0.004%/sec) in simulated PWR environment with interrupting tests and the surface of specimens was observed. By the investigation of fatigue cracks growth, the effect of strain rate on crack growth rate was evaluated. From the results of tests, the followings were confirmed;

- Fatigue Life of 0.004%/sec strain rate is shorter than that of 0.4%/sec.
- The lower strain rate increases crack growth rate.
- Coalescence of crack is observed in all strain rate condition.
- The lower strain rate decreases density of crack and frequency of coalescence.
- Crack growth rate with crack coalescence influences fatigue life remarkably in low strain rate.

Keywords:

Environmental effects, Fatigue crack, Strain rate, Crack coalescence, Crack growth, Postulated crack growth curve

1. はじめに

現在、国内の原子力発電所には運転を開始して40年を超えるプラントがあり、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機器の取替などを行う保全活動がより重要になる。

原子力発電プラント機器において、疲労は代表的な経年変化事象となる。原子力発電所の機器の疲労損傷防止に対する非破壊検査の効果を最適化するため、疲労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]。

仮想き裂成長曲線は、実機における疲労き裂の発生・進展を予測・モデル化したもので、保全計画の検討において検査時期の設定などに適用されることが想定される。予測においては、多軸効果や環境効果などについて試験データをもとに検討し、き裂発生・進展モデルの精度を高めることが求められている。そのためき裂の発生から進展そして試験片破断に至るき裂の挙動を観察し、多軸効果や環境効果が与える影響を明らかとする研究が進められている。

PWR 1次冷却材による環境効果が疲労き裂の発生・進展挙動に与える影響は藤川らにより検討されている^[2]。ここでは、高温・高圧水中(以下、環境中と言う)でのき裂の成長挙動の観察を行うための2段階リカ法が開発・適用された。

その結果、環境中においては大気中と比較して疲労寿

連絡先: 能勢 昂尚

〒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: t-nose@ne.sec.eng.osaka-u.ac.jp

命が大きく減少する原因として、き裂の発生速度が加速されることが示された。さらに、き裂の合体が生じることによる進展の加速が重畳することも確認された。

しかしながら、環境効果には温度、ひずみ速度、溶存酸素濃度などの様々な影響因子があることが明らかとされており^[3]、仮想き裂成長曲線に環境効果を取り入れる際にはそれらの因子を考慮する必要がある。

本研究では環境中において疲労寿命に大きく影響を与えるひずみ速度に着目した。ひずみ速度がき裂の進展に及ぼす影響を実験的に調べることで、環境効果を取り入れた仮想き裂成長曲線作成の検討を行った。

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

$\Delta\varepsilon$: ひずみ範囲 (%)

$d\varepsilon/dt$: ひずみ速度 (%/sec)

ΔK_e : ひずみ拡大係数 ($m^{1/2}$)

da/dN : き裂進展速度 ($\mu m/cycle$)

3. 環境中疲労き裂成長挙動の観察

3.1 試験条件

PWR1 次冷却材環境中でのき裂成長挙動を観察するため途中止めで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。温度は325℃、ひずみ範囲は1.2%とし、ひずみ速度は0.4%/sと0.004%/sの2種類の条件で試験を行った (Table1 参照) 環境は、PWR1 次系を模擬した。水質条件を Table 2 に示す。

また試験片は、Table3 の化学成分を有する 316 ステンレス鋼を用いた。試験片形状は、Fig.1 に示す中空形状とした。試験片の中心孔に 325 °C の PWR1 次冷却材模擬水を循環させて試験を行った。試験片の肉厚全体にわたり 325℃の均一な温度となるように、試験片外表面から高周波加熱器で加熱した。

Table 1 Fatigue test condition

Temp.(°C)	Strain range (%)	Strain rate(%/sec)
325	1.2	0.4
325	1.2	0.004

Table 2 Water condition of simulated PWR environment

Dissolved oxygen(ppb)	Less than 5
Dissolved hydrogen(ppm)	2.7±0.1
H ₃ BO ₃ (ppm)	500±13
LiOH(ppm)	2.00±0.07

Table 3 Component of test material (SUS316) (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

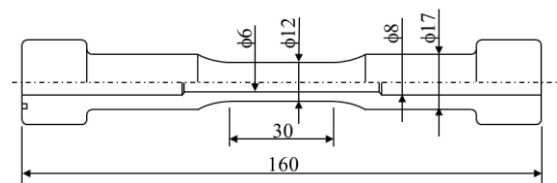


Fig.1 Sketch of hollow specimen (Unit : mm)

3.2 2段レプリカ法

2段レプリカ法は、中空試験片の内側表面き裂を観察するために藤川ら^[2]が開発した立体レプリカとフィルムレプリカを併用した観察手法である。

2段レプリカ法では、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とで、立体レプリカを採取する (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。光学顕微鏡により、フィルムレプリカを観察した様子を Fig.3 に示す。き裂が明確に認識できることがわかる。



Fig.2 Hollow specimen and 3-dimensional replica

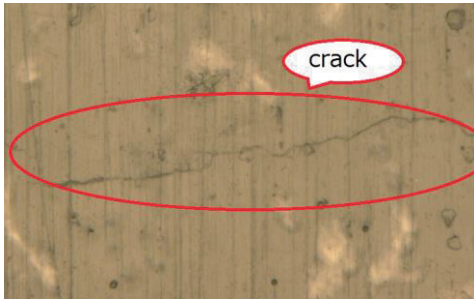


Fig.3 Example of film replica

3.3 試験結果

3.3.1 疲労寿命

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貫通するまでの繰返し数を疲労寿命 N_f と定義した。レプリカ法による観察は、疲労寿命到達後の他に、Table 4 に示す繰返し数で試験を2回中断して行った。

観察領域軸方向に 3.00mm 半径方向に 2.00mm とした。同一領域を観察することにより、新たなき裂の発生やそれぞれのき裂の進展、合体の様子を調べた。

Table 4 Fatigue life and cycles of observation

Strain rate(%/sec)	Observation(cycles)	Fatigue life(cycles)
0.4	600,1200	1511
0.004	300,400	709

3.3.2 き裂数

き裂長さが 0.10mm になった時点なき裂の発生と定義した。各観察におけるき裂数及び観察した繰返し数において新たに見つかったき裂の個数を Table 5,6 に示す。いずれのひずみ速度においてもき裂は初期に発生し、2回目以降に発生した新たなき裂は全体の 2%程度であり、最初の途中止めの段階（それぞれのひずみ速度において破断寿命の約 40%に相当する）でほとんどのき裂が発生していることが確認された。

Table 5 Number of cracks (Strain rate:0.4%/sec)

Cycles of observation	600	1200	1511
Number of crack	119	78	64
New crack	119	2	0

Table 6 Number of cracks (Strain rate: 0.004%/sec)

Cycles of observation	600	1200	1511
Number of crack	62	59	45
New crack	62	1	0

3.3.3 き裂長さ分布

き裂の長さの分布を Fig.4,5 に示す。ひずみ速度 0.4%/sec では、0.004%/sec と比較して 0.20mm 以下の微小き裂が多く存在していること、繰返し数が増えるにつれてき裂数が減少することが確認された。ひずみ速度 0.004%/sec の方が、0.4%/sec より長いき裂が多かった。

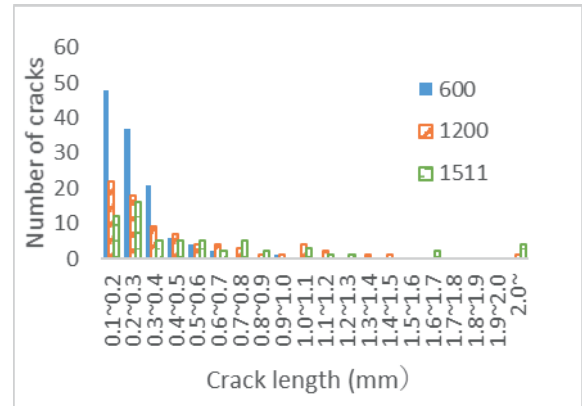


Fig.4 Distribution of crack length (Strain rate: 0.4%/sec)

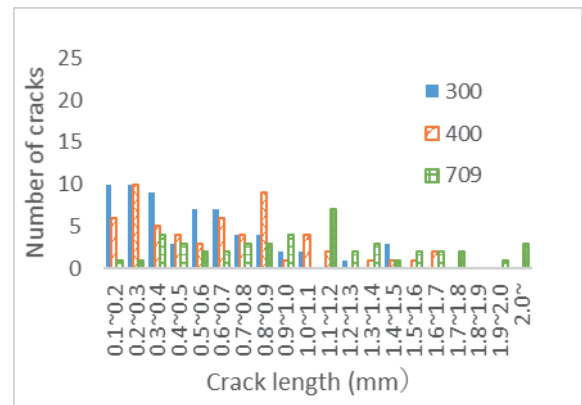


Fig.5 Distribution of crack length (Strain rate: 0.004%/sec)

3.3.4 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⁾。レプリカ観察結果から得られたき裂長さを基に繰返し数の増加によるき裂長さの進展量からき裂進展速度を求めた。この時、合体なしのき裂の進展速度に関して計算をおこなった。深さ方向の進展速度 (da/dN) は、き裂長さ $2c$ に対する深さ a の比 (アスペクト比 a/c) が 0.5 として算出した。

ひずみ拡大係数は式 (1) で定義される。

$$\Delta K = f \Delta \varepsilon \sqrt{\pi a} \dots \dots (1)$$

$$\frac{da}{dN} = D(a)^m \dots \dots (2)$$

本試験ではひずみ範囲が一定であるためひずみ拡大係数 ΔK_e はき裂深さ a に依存して大きくなる。き裂深さ a とき裂進展速度 da/dN の関係と最小二乗法で近似した直線を Fig.6 と 7 に示す。両者を比較した結果を Fig.8 に示す。また、最小二乗法により得られた定数 D と m を Table 7 に示す。定数 m はひずみ速度によらず 1.09 となった。定数 D は、ひずみ速度が 0.004%/sec の場合が 0.4%/sec よりおおよそ 1.6 倍となり、ひずみ速度が遅い方が進展速度が速くなった。

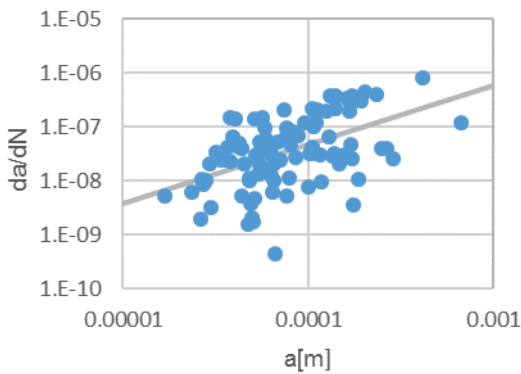


Fig.6 Crack growth rate vs. crack depth
(Strain rate: 0.4%/sec)

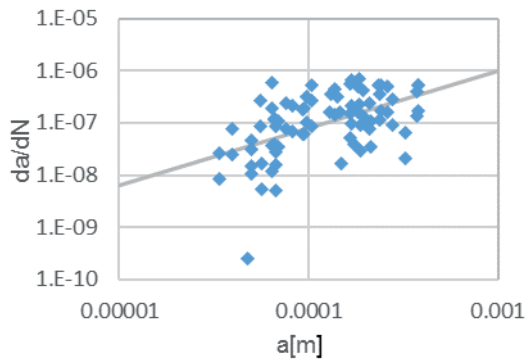


Fig.7 Crack growth rate vs. crack depth
(Strain rate: 0.004%/sec)

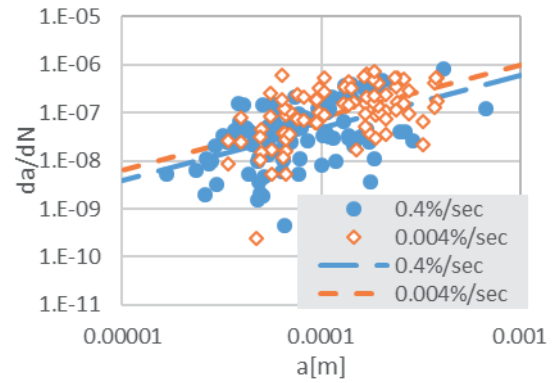


Fig.8 Comparison of crack growth rate
vs. crack depth

Table 7 Parameters in the calculation of crack growth rates

Strain rate(%/sec)	D	m
0.4	0.0011	1.09
0.004	0.0018	1.09

3.3.5 き裂の合体

Fig.9 に試験片の観察で見られたき裂の合体の一例を示す。藤川らによる観察²⁾では、環境中では大気中と比べ比較的早い段階で、き裂発生が促進され、き裂の合体が発生したことが示されている。とくに、き裂長さが微小な段階におけるき裂の合体はき裂の長さが倍近くになるき裂もあるため、見かけの進展速度が大幅に増加し疲労寿命に大きく影響した。環境中におけるき裂の合体はき裂進展加速の重要な要因と考察された。

本試験においてもき裂の合体が多く見られた。レプリカ観察から得られたそれぞれの繰返し数におけるき裂長さを元に繰返しにともなうき裂の合体が発生する様子を観察した。Table.6 に、疲労寿命の約 40%の繰返し数時点と、破断時の比較から合体したき裂数を調べた。き裂の最大合体数 (Maximum number of crack coalescence) は疲労寿命に対し約 40%時点で観測されたき裂が合体し、最終的に破断した時点で最大何本のき裂が合体して 1 本のき裂となったかを示す。き裂の合体比率 (Rate of crack coalescence) は疲労寿命の約 40%時点で観測されたき裂のうち破断時点までに合体したき裂の割合である。これらの数値の比較から本実験ではひずみ速度 0.4%/sec の方が 0.004%/sec に比べてき裂の合体頻度が多かった。

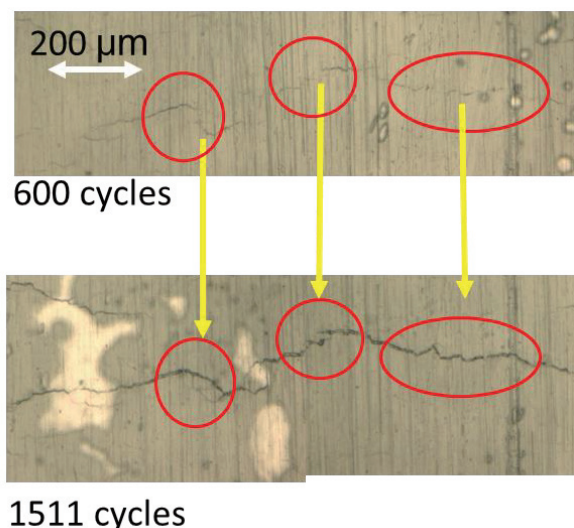


Fig.9 Coalescence of cracks observed in the replica

Table.6 Number and rate of crack coalescence

Strain rate(%/sec)	Maximum number of crack coalescence	Rate of crack coalescence (%)
0.4	11	69.3
0.004	4	41.5

3.3.6 合体ありのき裂進展速度

き裂の合体を見かけ上のき裂進展として算出したき裂進展速度および最小二乗法で求めた近似直線を Fig.10 に示す。き裂を観察したサイクル間において合体したき裂の観察結果をもとに合体する前後のサイクルでのき裂深さからき裂進展速度を計算した。合体したき裂の進展速度はひずみ速度 0.004%/secの方が0.4%/secよりも速かった。

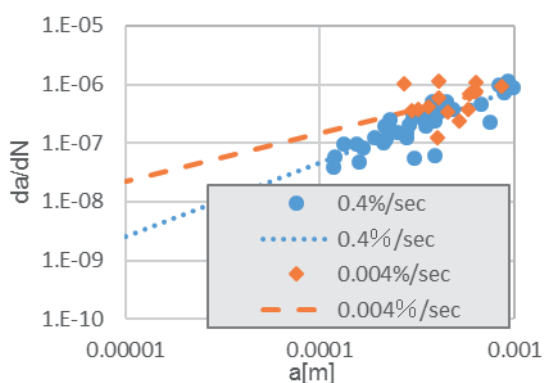


Fig.10 Cracks growth rate vs. crack depth with coalescence

4. ひずみ速度の影響評価

4.1 き裂進展速度

ひずみ速度がき裂進展速度に与える影響について検討した。Fig.4,5の比較から、ひずみ速度 0.4%/sec ではき裂長さが全体的に短い方に集まっている。一方ひずみ速度 0.004%/sec ではひずみ速度 0.4%/sec よりもひずみ長さの分布が全体的に右側によっており、1本のき裂の長さが長くなる傾向がみられる。これはひずみ速度 0.004%/sec においてはき裂の進展速度が速いため、き裂分布が長い方向に広がったためと考えられる。

また Fig.8 ではひずみ速度 0.004%/secの方がき裂進展速度が速いことが確認されており、ひずみ速度が遅くなると、き裂進展速度は速くなる傾向がある。

しかし、ひずみ速度の影響に関して環境効果にはしきい値があることが知られており¹⁾、ひずみ速度の違いがき裂進展速度に与える影響の定量化に関してはさらに詳細な観察が必要である。

4.2 き裂の合体

前述の藤川らの研究によると、き裂の合体は環境中においてき裂先端付近に存在するき裂が互いに成長し結合することによって起きると考えられる。本研究ではき裂の密度とき裂の合体の起こりやすさの関係について検討した。Table.5,6ではき裂の数を同じ面積で観察しているため、き裂の数がそのままき裂の密度として考えられる。

Table.5,6の比較からき裂の総数はひずみ速度 0.4%/secの方が多いため、き裂密度が高いためにき裂の合体が起こりやすくなったと考えられる。

また、き裂の合体ありの進展速度に関する考察も行った。Fig.10の近似曲線に示すようにひずみ速度 0.004%/secの方がき裂進展速度が速い。この原因はひずみ速度 0.4%/secでは多くのき裂が合体するがFig.4に示すようにき裂が短いものが多いため、合体によりき裂の進展が加速されるがひずみ速度 0.004%/secよりは遅くなったと考えられる。一方、ひずみ速度 0.004%/secではひずみ速度 0.4%/secよりもき裂の合体は少ないがFig.5に示すようにき裂が長いものが多いためき裂の合体がき裂進展速度に大きな影響を与えているものと考えられる。

また、藤川らの研究によれば、き裂先端付近は応力集中により他の領域よりもき裂が発生しやすくなることが考えられる²⁾ことから、き裂の合体の影響を仮想き裂成長曲線に取り入れるためにはき裂先端付近のき裂の存在が重要となる。

そのため観察範囲全体での観察結果から得られたき裂総数ではなく、き裂先端付近のき裂密度がき裂の合体に

関係すると考えられるため、今後き裂先端付近でのより詳細な試験片観察が必要と考えられる。また疲労寿命は主き裂の成長に大きく関係していることから、主き裂がどのように成長し合体を繰り返すかについても観察することが重要となると考えられる。

4.3 ひずみ速度の影響

仮想き裂成長曲線(Fig.11 参照)は疲労き裂が発生し、破断に至るまでのき裂の発生・進展について予測するものである。本試験では環境効果を取り入れた仮想き裂成長曲線を作成するためき裂の進展挙動に与えるひずみ速度の影響について評価をおこなった。

本試験ではひずみ速度が遅くなるとき裂の合体頻度は低下するが、き裂の進展速度が速くなることが明らかとなった。またき裂の進展速度が速い原因は、合体の頻度はひずみ速度が遅くなると少なくなるが、合体による見かけの進展速度が加速され、疲労寿命の低下に大きな影響があるためと考えられる。

このことからひずみ速度の変化はき裂の進展速度とき裂の密度に影響を与え、更なき裂の密度は合体の起こりやすさに影響を与える。き裂の進展速度はき裂の長さ分布と、き裂が合体することによる見かけ上のき裂進展速度に大きく影響を与える。これらの影響を定量化した評価モデルを仮想き裂成長曲線に導入することにより、ひずみ速度を取り入れた環境中での仮想き裂成長曲線の作成が可能となると考えられる。

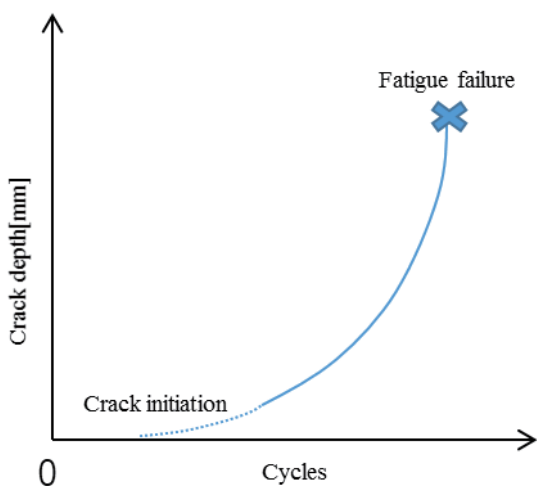


Fig.11 Concept of postulated crack growth curve

5. 結論

本研究では仮想き裂成長曲線に環境効果を取り入れる

ため、PWR 模擬 1 次冷却材環境中で 316 ステンレス鋼の異なるひずみ速度における低サイクル疲労試験を実施した。そしてき裂成長挙動を 2 段レプリカ法を用いて観察し、環境中でのひずみ速度がき裂の進展挙動に与える影響について検討した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (i) ひずみ速度 0.4%/sec および 0.004%/sec で低サイクル環境中疲労試験を行った結果それぞれ 1511 回および 709 回で破断し、ひずみ速度が遅くなると疲労寿命が低下した。
- (ii) 2 段レプリカ法を用いて試験片表面を観察した結果、ひずみ速度が遅くなると合体なしでのき裂の進展速度が加速されることが確認された。
- (iii) 試験片観察結果からいずれのひずみ速度においてもき裂の合体が確認された。
- (iv) ひずみ速度が遅いほどき裂の密度が低下し、その結果き裂の合体は起こりにくくなることが確認された。
- (v) 合体ありのき裂進展速度はひずみ速度の遅い方が速いことが確認された。
- (vi) 仮想き裂成長曲線に環境効果を取り入れるためにはひずみ速度の変化がき裂進展速度に与える影響、および微小き裂先端付近のき裂の発生を考慮したより詳細なき裂の合体挙動について評価する必要がある。そのためひずみ速度が異なる条件での試験データをさらに蓄積するとともに、き裂先端付近でのき裂の発生や合体に関するより詳細な観察が必要と考えられる。

参考文献

- [1] Kamaya, M. and Nakamura, T., 2015, "Fatigue damage management based on postulated crack growth curve", E-Journal of Advanced Maintenance, Vol. 7-1, pp.43-49.
- [2] Fujikawa, R., Nakamura, T., Kitada, T., Kamaya, M., "Environmental effect on low cycle fatigue crack growth of SUS316", Japan Society of Maintenology, Vol. 15, No. 2, (2016) pp.77-82.
- [3] 原子力安全基盤機構” 実用原子力発電設備環境中材料等疲労信頼性実証事業に関する報告書” 平成 18 年度
- [4] Masayuki 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.