

疲労き裂の発生・成長挙動に与える 炉水環境中での温度の影響について

Influence of Temperature on the Fatigue Crack Initiation and Growth in Reactor Coolant Environment

大阪大学	三澤 樹	Tatsuru MISAWA	Member
大阪大学	北田 孝典	Takanori KITADA	
大阪大学	竹田 敏	Satoshi TAKEDA	
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 fatigue tests were conducted under different temperature (325°C and 200°C) in simulated PWR reactor coolant condition with interrupting tests and replica-observation. By observing fatigue crack on the specimen surface, the effect of temperature on crack initiation and growth were studied. From the results of the fatigue tests, the followings were confirmed;

- The number of cycles that fatigue cracks initiate is almost the same in different temperature. On the other hand, the number of cracks that initiate on the specimen increase in high temperature.
- The crack growth rate is accelerated and the number of cracks coalescence increase in high temperature condition.
- The increase of temperature decreases fatigue life and the decrease of fatigue life is mainly caused by the increase of crack coalescence.

Keywords:

Fatigue crack, Environmental effect, Temperature, Crack initiation, Crack growth, Crack coalescence

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劣化が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、経年劣化の影響を把握して適切に取替や修理などを行う保全活動が重要となる。

より効果的な保全活動をおこなうために、釜谷らは疲労累積損傷の度合いに対応した仮想き裂寸法に基づき疲労による経年劣化を管理する手法^[2]を提案しており、そのためにはき裂の発生・成長挙動を正確に把握することが求められている。

原子力プラントの冷却材を模擬した高温・高圧水中(以下、環境中という)では大気中と比べて疲労寿命が低下することが明らかとされており、これを環境効果と呼んでいる。^[3]

環境効果が疲労き裂の発生・成長過程に及ぼす影響については、藤川らにより検討が行われており、環境中でのき裂の発生・成長挙動を観察するために2段階レプリカ法が開発された。検討の結果、環境中では大気中と比べてき裂成長速度の加速、き裂の発生の促進、き裂の合体の増加に影響を与えることが明らかとなった。^[4]

環境効果については温度、ひずみ速度、溶存酸素濃度などが疲労寿命の低下に影響を与えることが明らかとされており、それらの因子は日本機械学会発電用設備規格環境疲労評価手法において考慮されている。

能勢らは炉水環境中の疲労寿命に影響を与える因子のうち、ひずみ速度に注目してき裂の発生・成長挙動に与える影響について検討したが^[5]、本研究では、温度に着目して、その違いがき裂の発生・成長挙動に与える影響について調査し、疲労寿命の低下との関係について明らかとした。

2. 記号説明

a : き裂深さ (m)

f : 形状係数

D : 定数

m : 定数

$\Delta\varepsilon$: ひずみ範囲 (%)

ΔK_ε : ひずみ拡大係数

da/dN : き裂成長速度 (m/cycle)

3. 試験の実施

3.1 試験条件

本研究では、PWR 一次冷却材を模擬した試験条件で、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 中空試験片を用いた低サイクル疲労試験を実施した。き裂の発生・成長を調査するため、途中で試験を中断し 2 段レプリカ法を用いてき裂の観察を行った。疲労試験はひずみ制御で、ひずみ範囲 1.2% で固定し、ひずみ速度は増加側で 0.004%/sec、下降側で 0.4%/sec ののこぎり波で実施した。今回の試験では、温度は 200°C で実施し、能勢らの研究で得られた 325°C での試験結果と比較した。Table 1,2,3 に試験条件を、Fig. 1 に試験片寸法を示す。

Table 1 Chemical 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

Table 2 Fatigue test condition

Temp.(°C)	Strain range(%)	Strain rate(%/sec)
325	1.2	0.004
200	1.2	0.004

Table 3 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

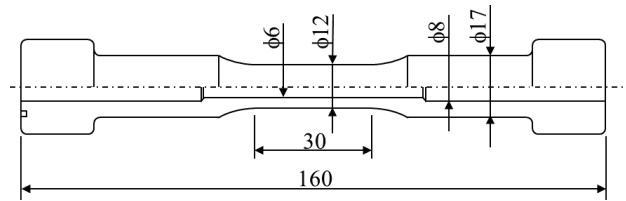


Fig.1 Sketch of hollow specimen (Unit : mm)

3.2 試験方法

本研究では、中空試験片の内側表面に発生するき裂の発生・成長を観察するために、試験を途中で中断し、2 段レプリカ法を用いてき裂の観察を行った。

2 段レプリカ法は、中空試験片の内側表面の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。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。(Fig.2,3 参照)

き裂の観察範囲は、軸方向に 3mm、試験片周方向に 2mm とし、最終的に最も長くなったき裂の周辺を含む範囲から選定した。

き裂の発生は、顕微鏡でのき裂の観察限界を考慮してき裂の長さが 20 μm になった時点と定義した。



Fig.2 Hollow specimen and 3-dimensional replica

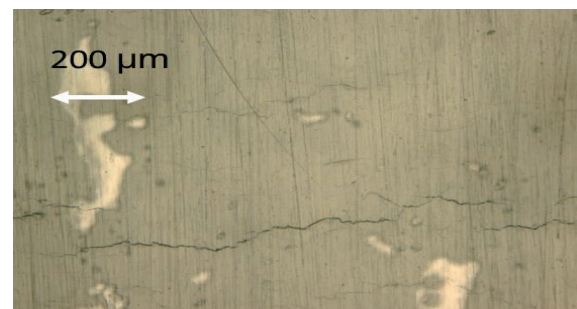


Fig.3 Cracks on the film replica

3.3 試験結果

3.3.1 疲労寿命

中空試験片の内側表面から発生したき裂が外側表面に貫通するまでの繰返し数を疲労寿命と定義し、200℃と325℃で疲労寿命に対するサイクル数の比がほぼ同じとなるサイクル数で疲労試験を途中止めし、2段レプリカ法により、き裂の観察を行った。Table.4 に観察を行ったサイクル数と疲労寿命を示す。

Table 4 Observation cycle and fatigue life in fatigue test

Tem.(°C)	Observation cycles	Fatigue life
325	25,50,100,150,200,300,400	709
200	50,100,200,300,500,700,1000,1525	1525

3.3.2 き裂数

Table5、6に200℃、325℃の試験の各サイクルにおいて観察されたき裂の数と、新たに観察されたき裂数、合体数を示す。ここで、合体数は、き裂同士が合体した箇所の数である。

Table 5 Number of cracks (200°C)

Cycles	50	100	200	300	500	700	1000	1525
Total Cracks	0	0	16	40	69	74	61	32
Crack Initiation	0	0	16	26	33	20	3	1
Crack Coalescence	0	0	0	2	4	16	16	30

Table 6 Number of cracks (325°C)

Cycles	25	50	100	150	200	300	400	709
Total Cracks	0	0	0	24	96	107	91	/
Crack Initiation	0	0	0	24	76	33	21	/
Crack Coalescence	0	0	0	0	4	21	37	/

Fig.4 に、200℃と325℃で観察したき裂数の推移を示す。き裂数のピークは325℃で300サイクル、200℃では700サイクルであり、それぞれき裂数は107個、74個であった。

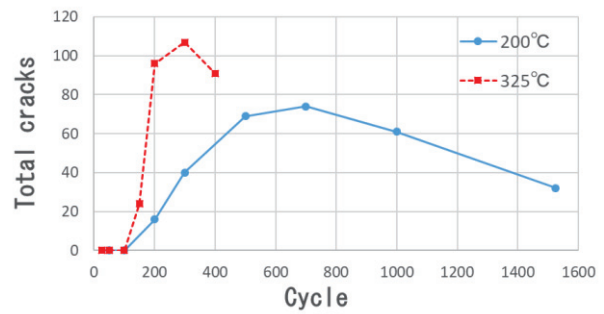


Fig.4 Number of total cracks

3.3.2.1 き裂の発生

Fig.5 と 6 に、200℃及び325℃で各サイクル間に発生したき裂の発生率(1サイクルあたりに発生したき裂数)を示す。200℃では、100-200サイクルで初めてき裂が発生し、200-300サイクル間でき裂の発生率がピークとなった。325℃では、100-150サイクルで初めてき裂が発生し、150-200サイクル間でき裂の発生率がピークとなった。

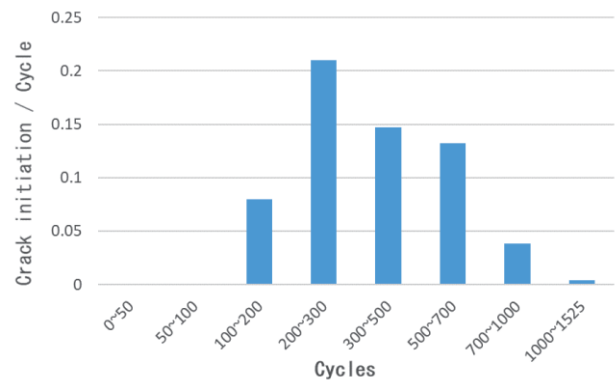


Fig.5 Crack initiation rate (200°C)

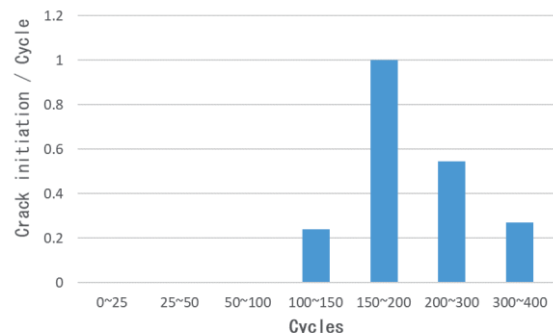


Fig.6 Crack initiation rate (325°C)

3.3.2.2 き裂の合体

Fig7 と 8 に、200℃及び325℃で各サイクル間に合体したき裂の合体頻度(1サイクルあたりのき裂の合体数)を示す。

す。325°Cの方が200°Cよりもき裂の合体頻度は高かった。

200°Cでは、500-700 サイクルでき裂の合体頻度がピークとなり、その後合体頻度は減少した。325°Cでは、合体頻度はサイクルを経るごとに増加した。

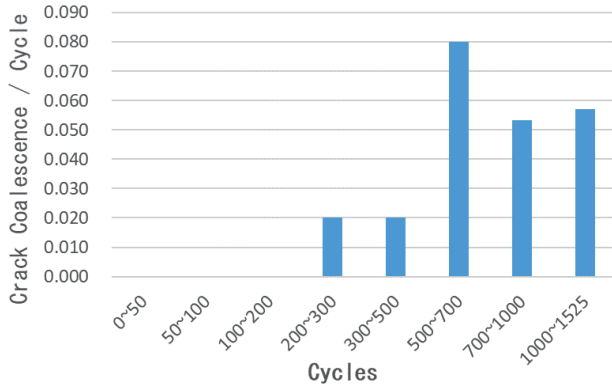


Fig.7 Crack coalescence per cycle (200°C)

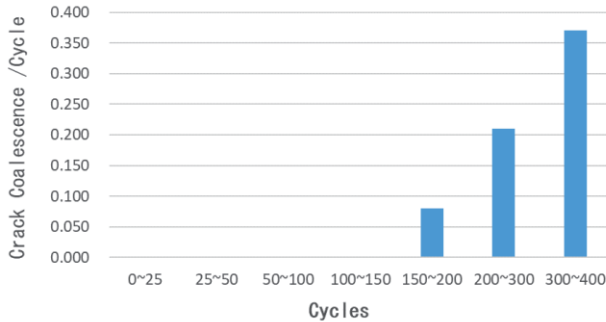


Fig.8 Crack coalescence per cycle (325°C)

Fig.9 と 10 に、き裂 1 本当たりのき裂の合体頻度(1 サイクル当たりのき裂の合体数をき裂数で割ったもの)を示す。この比較から、325°Cの方が200°Cよりもき裂 1 本当たりの合体頻度が高い結果となった。また、いずれの場合も、サイクルが進むにつれてき裂 1 本あたりのき裂の合体頻度は増加傾向にあることが分かった。

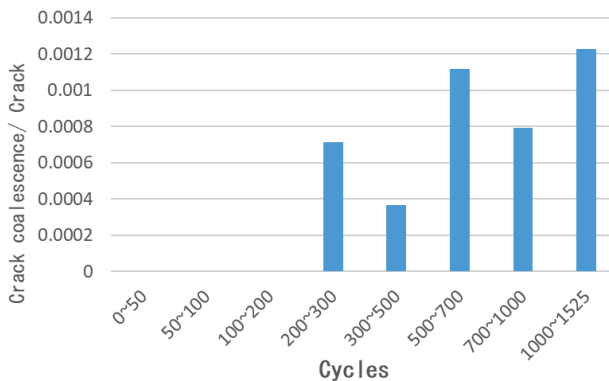


Fig.9 Crack coalescence per crack (200°C)

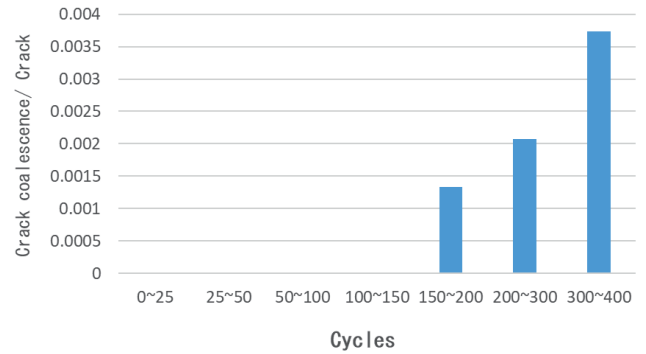


Fig.10 Crack coalescence per crack (325°C)

3.3.3 き裂長さ

Fig11 と 12 に、200°Cと 325°Cで観察した各サイクルでのき裂長さ分布を示す。き裂は成長、合体を繰り返しながら長くなるため、サイクルを経るごとに長いき裂が増えるが、325°Cの方が200°Cよりも早い段階から長いき裂が多くなった。き裂が発生してからしばらくの間はどちらの温度でも短いき裂がほとんどであるが、300 サイクル時点で 0.4mm を超えるき裂が 200°Cではなかった一方で、325°Cでは 6 本あり、最も長いき裂の長さは 0.8mm 以上あった。また、200°Cでは 325°Cよりも 0.1mm 以下のき裂の割合の減り方が大きかった。

Fig.13 に、各サイクルで観察されたき裂の長さの和を「総き裂長さ」として示し、観察領域がどれくらいき裂で占められているかを示した。総き裂長さが長いほど、き裂密度が高くなる。

200°Cでは、700 サイクル以降で総き裂長さの成長が遅くなり、このときの総き裂長さは約 21000 μm であった。200-700 サイクルと 700-1525 サイクルでの総き裂長さの成長を共に一次関数とみなすと 1 サイクル当たりの総き裂長さの成長は、200-700 サイクルでは、約 40 μm/cycle、700-1525 サイクルでは約 4 μm であった。325°Cでは、200°Cほどき裂の成長が遅くなることなく、200°Cでき裂の成長が遅くなった 21000 μm を超えてもほぼ一定の速さで成長した。200-400 サイクルでの総き裂長さを一次関数とみなすと、1 サイクル当たりの総き裂長さの成長は、約 66 μm であった。

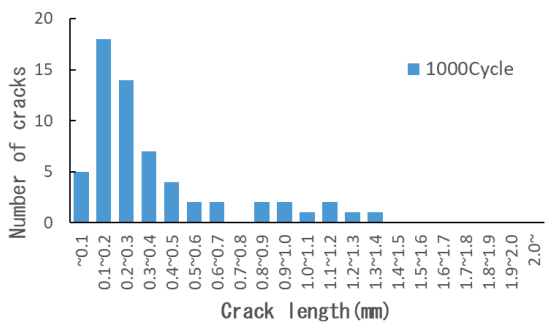
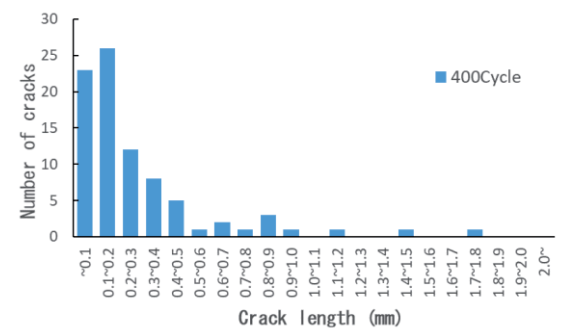
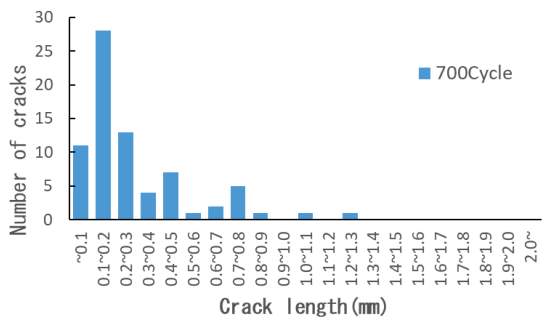
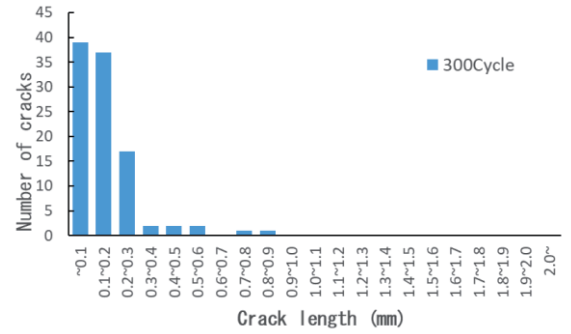
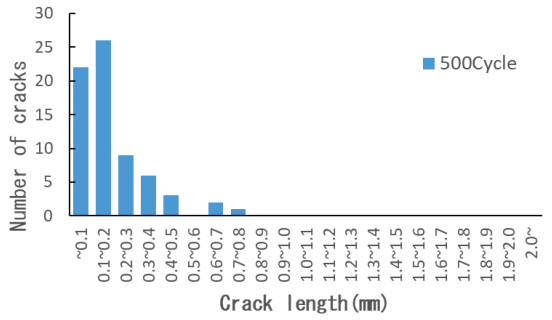
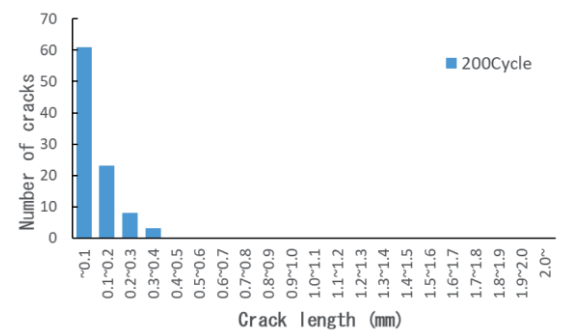
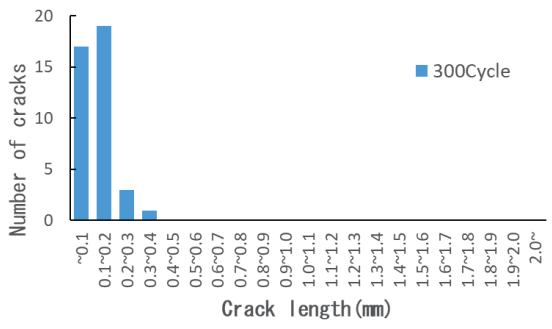
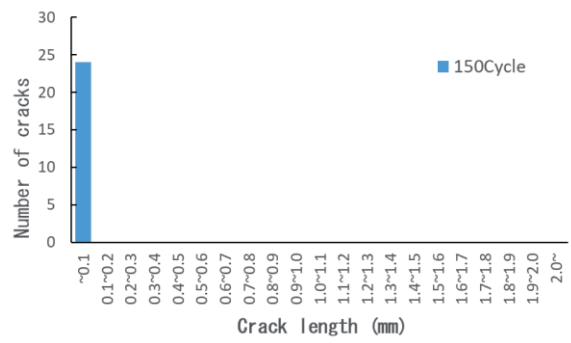
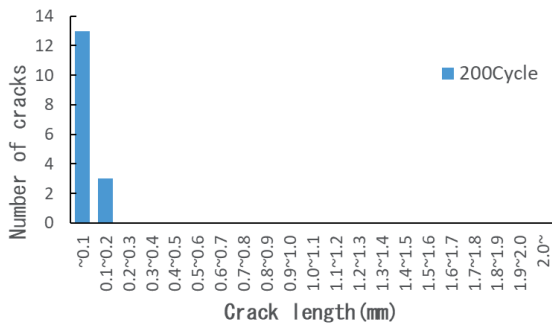


Fig.12 Distribution of crack length (325°C)

Fig.11 Distribution of crack length (200°C)

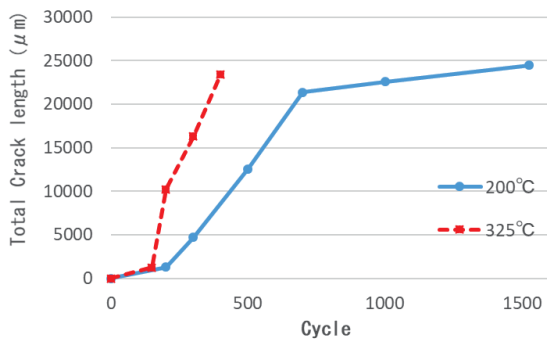


Fig.13 Total crack length

Fig.14 と 15 に、合体したき裂も含めて観察したサイクル間でのき裂の成長分の長さをき裂数で割った、き裂の 1 サイクル当たりの平均成長量を示す。

200°Cでは、き裂の平均成長量は 200-700 サイクルで 0.4 ~ 0.5μm/cycle の間で徐々に小さくなり、700 サイクル以降では平均成長量が急激に小さくなった。325°Cでは、150-200 サイクルでき裂の平均成長量は最も大きく、き裂数が増える 200-300 サイクルで平均成長量は一旦小さくなり、合体によってき裂数が減る 300 サイクル以降では平均成長量は再び増加した。

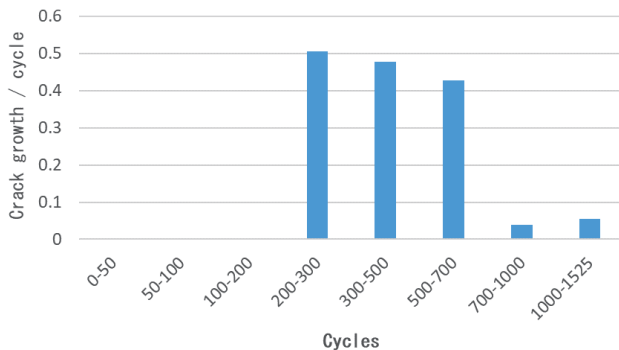


Fig.14 Average crack growth rate (200°C)

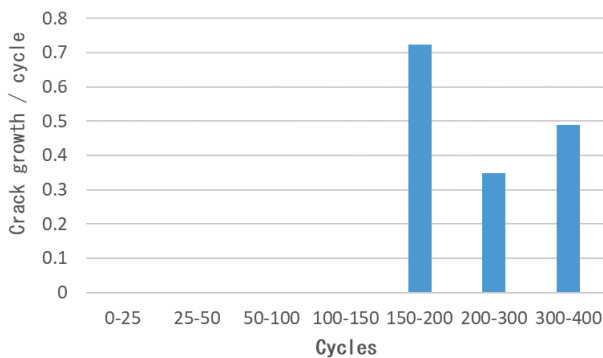


Fig.15 Average crack growth rate (325°C)

3.3.4 き裂成長速度

低サイクル疲労におけるき裂成長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。本研究ではひずみ拡大係数を用いて、き裂成長速度との関係を検討した。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成長速度(da/dN)を算出した。深さ方向の成長速度は、表面方向のき裂成長速度に基づきアスペクト比を 0.5 と仮定して推定した。ひずみ拡大係数は式 (1) で表される。

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

き裂成長速度とひずみ拡大係数の関係の式 (2) はプロットした実験データから最小二乗法により求めた。

$$\frac{da}{dN} = D (\Delta K_{\epsilon})^m \dots (2)$$

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 はき裂深さ a に対応して大きくなる。き裂の合体の影響を取り除くため、合体が観測されたき裂を除外してき裂の成長速度を求めた。Fig.16 に、200°C と 325°C のひずみ拡大係数 ΔK_{ϵ} とき裂成長速度 da/dN の関係および最小二乗法により求めた近似直線を示す。また、Table7 に最小二乗法により得られた定数 D と m の値を、Table8 には、それぞれの温度での 100、500、1000μm におけるき裂成長速度と成長速度の比を示す。

どちらの温度でも ΔK_{ϵ} が大きくなるほど、つまりき裂が深くなるほどき裂成長速度は速くなり、温度の違いによるき裂成長速度の比は、 m の値が同じではないためにき裂の深さによって若干変化するが、325°Cの方が約 4.2 倍速い結果となった。

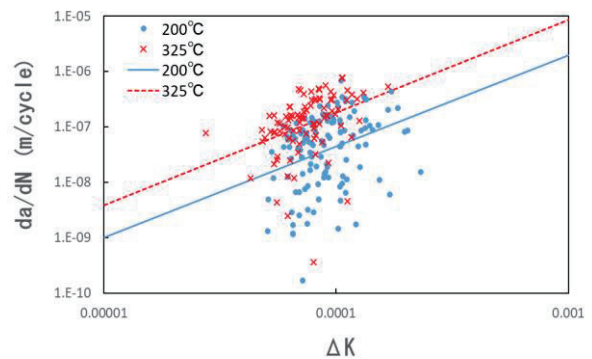


Fig.16 Crack growth rates vs. ΔK_{ϵ}

Table7 Parameters in crack growth rates

	D	m
200°C	1.68E-01	1.65E+00
325°C	8.86E-01	1.67E+00

Table8 Crack growth rate in each crack length

Crack length (μm)	Crack growth rate($\mu\text{m}/\text{cycle}$)		Ratio 325°C/200°C
	200°C	325°C	
100	0.025	0.10	4.11
500	0.092	0.38	4.19
1000	0.164	0.70	4.22

3.3.5 貫通き裂のき裂成長挙動

本項では貫通したき裂の成長挙動を調査し、温度の違いが疲労寿命に与える影響について検討した。

貫通き裂の成長においては、200°Cでは5本のき裂が、325°Cでは15本のき裂が合体した。300サイクルまでは200°Cと325°Cとでき裂1本あたりの長さに大きな差はなかった。

200°Cでは300-700サイクルの間はき裂は合体しないまま成長し、700-1000サイクルで3本のき裂が合体して長くなった。合体前の3本のき裂の長さの和は約1200 μm 、合体後は約1310 μm であったことから700-1000サイクルの間での成長量は約110 μm となる。合体前の最も長いき裂の長さとは比べると2倍程度の長さに成長している。

一方で、325°Cでは300-400サイクルの間に10本のき裂が合体したことにより、き裂が大きく成長した。これら10本の合体前の長さの和は約1560 μm 、合体後の長さは約1710 μm であったことから、き裂の成長量は約150 μm となる。合体前の最も長いき裂の長さと比較すると6倍以上に成長している。

4. 考察

4.1 き裂の発生への影響

温度の違いがき裂の発生に与える影響について検討した。

初めてき裂が観察されたのは、200°Cでは100-200サイクルの間であり、325°Cでは100-150サイクルの間であった。このことから、き裂が発生するまでのサイクル数に対する温度の違いによる影響は大きくないと考えられる。

1サイクルあたりに発生するき裂数については、200°Cでは200-300サイクルの区間でピークとなり、1サイクルあたり0.21本であった。一方で、325°Cでは150-200サイクルの区間でピークとなり、1サイクルあたり1本であった。また、最も発生量が少なかった100-150サイクル区間でも1サイクルあたり0.24本発生していることから、温度の違いによってき裂の発生量が増加し、き裂数の違いに影響したものと考えられる。

4.2 き裂の成長への影響

温度の違いがき裂の成長に与える影響について検討した。

Fig.16より、200°Cよりも325°Cの方がき裂成長速度が速いため、温度が高い方がき裂の成長が促進されると考えられる。

200°Cよりも325°Cの方が成長速度が約4.2倍速かった。しかし、成長速度の差が大きくなる1000 μm ほどの長いき裂でも100サイクルで60 μm ほどの違いにしかならないことから、き裂の成長速度への寄与は小さいと考えられる。しかし、325°Cの方が200°Cよりもき裂数が多いため、Fig.13に示すように総き裂長さには大きな差が生じている。

Fig.14と15より、き裂の平均成長量はどちらの温度でも疲労寿命の前半で大きく、き裂が増えるにつれて小さくなる傾向にあることからき裂が少ないほど応力がき裂に集中しやすく、き裂の数が増えると応力が分散して成長量が小さくなるものと考えられる。

4.3 き裂合体への影響

温度の違いがき裂の合体に与える影響について検討した。

Fig.7と8より、温度が高いほうがき裂の合体が起こりやすくなることが分かった。温度が高いほど合体の頻度が高くなることで、き裂の成長がより促進されると考えられる。また、藤川らの研究³⁾では、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推定しており、き裂の合体にはき裂数が関係していると考えられる。

Fig.9と10より、温度が高い方がき裂1本あたりの合体頻度は高いことから、温度が高いほうがき裂数は多くなるために合体はさらに起こりやすくなると考えられる。

200°Cのき裂の合体数を見ると、500-700サイクルでき裂の合体は最もよく起こっており、その後合体数は減少

した。しかし、Fig.9 でき裂 1 本当たりの合体頻度は増えることから、合体数が減少したのはき裂数が減少したことが原因と考えられる。

一方、325°Cではき裂数の減少量が少ないが、Fig.10 に示すようにき裂の合体頻度が大幅に増加したため、き裂の合体数が増加し、200°Cと比べてき裂の成長が加速されたものと考えられる。

4.4. 疲労寿命への影響

温度が疲労寿命に与える影響について検討した。

き裂が発生するまでのサイクル数に大きな違いがなかったことから、温度の違いはき裂が発生してからのき裂の成長過程に影響を与えていると考えられる。き裂の発生量については温度が高いほうが多いため、合体が起こりやすくなり、疲労寿命の低下に影響したと考えられる。

疲労寿命に影響を与えている貫通き裂の成長過程について、き裂 1 本当たりの成長速度は温度が高いほど速くなり疲労寿命を低下させると考えられるが、貫通き裂の成長挙動から 300 サイクルまでのき裂 1 本当たりの長さはそれほど変わらなかった。しかし、この時点でき裂長さの和は、200°Cでは約 400 μm 、325°Cでは約 1560 μm と大きな差があり、そのあとそれらのき裂が合体して 1 本のき裂になった段階で、き裂長さには大きな差が生じた。このことから、き裂の成長速度の違いよりも、き裂の合体数の違いが疲労寿命に大きく影響していると考えられる。

5. 結論

本研究では環境中でのき裂成長挙動を観察することにより、炉水環境中で温度がき裂の発生および成長挙動に与える影響について調査・検討した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) き裂発生までのサイクル数には温度の違いによる影響は小さいが、発生するき裂の数は温度が高いほど多くなる。
- (2) 温度が高いほどき裂の成長速度は速くなるが、き裂の成長速度の差が疲労寿命に与える影響は合体に比べると小さい。
- (3) 温度が高いほどき裂の合体が起こりやすくなり、それによってき裂の成長が大きく促進されることが、疲労寿命の低下の大きな要因である。

参考文献

- [1] INSS journal vol.19 2012 NT-12 Masayuki Kamaya, Masahiro Kawakubo “Damage Assessment of Low-cycles Fatigue by Crack Growth Prediction”
- [2] The Japan Society of Mechanical Engineers, Fatigue evaluation task “Report on Fatigue Evaluation in Design” 2017
- [3] Fujikawa, R., Nakamura, T., Kitada, T., Kamaya, M., “Environmental effect on low cycle fatigue crack growth of SUS316”, Japan Society of Maintenance, Vol. 15, No. 2
- [4] 能勢昂尚、北田孝典、竹田敏、中村隆夫、釜谷昌幸 “PWR 環境中でのステンレス鋼の環境効果（レプリカ観察による亀裂発生・成長挙動の調査）”、日本保全学会第 15 回学術講演会要旨集、pp.439-444