

ISI 検査後の亀裂進展評価

(1月8日公開会合 QA 対応資料)

ご質問事項

大飯4号機について、検査した箇所に仮に検出限界ぎりぎりの傷があった場合も、1サイクル運転して問題ないと言えるのか。

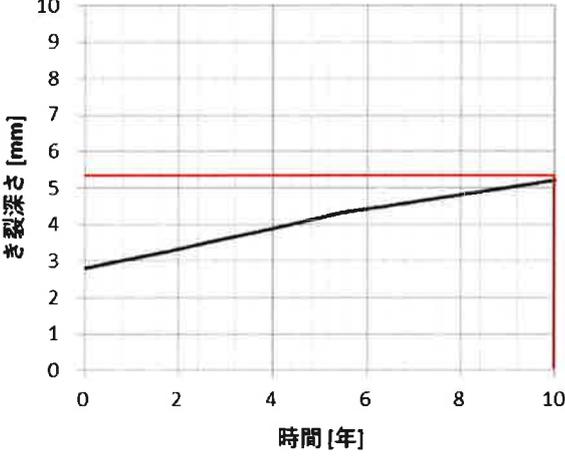
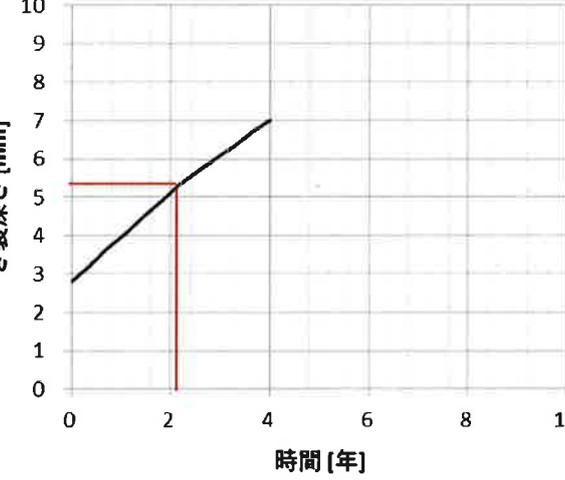
結論

ご指摘の項目については、想定される最大限の進展速度条件でも、Tsr を割るまでに1サイクル以上あることを確認しており、十分な裕度があることが分かっています。

必要最小板厚(Tsr)まで最も余裕の少ない4B配管の検出下限値2.8mmを初期亀裂長さとして評価を実施した。

その結果、必要最小板厚に至るまでの道のり2.5mmを進展するまでに、我々が妥当と考えた進展速度式の条件(ベストフィット曲線式：ケース1)で約9サイクル、更に最大限の進展速度条件(包絡曲線式：ケース2)を適用した場合でも約2サイクルの期間があることを確認できた。(添付資料、参考-1)

なお、亀裂進展速度に影響を及ぼす内部硬さのパラメトリックスタディとして、実機の内部硬さのすべての測定データより求めた近似式から、最大限の進展速度条件(包絡曲線式)でTsrまでの期間が1サイクルとなる想定亀裂先端(2.8mm)の内部硬さを求めた結果、当該部の実機内部硬さより30高い249HV程度であることを確認した。(参考-2)

計算結果と条件	SCC+ 疲労亀裂の進展曲線
<p>【ケース①】</p> <p>約 10 年 (約 9 サイクル) で Tsr に到達</p> <p>・亀裂進展速度式：当初妥当と考えた進展速度式 (電共研式：9 月 11 日会合で使用したもの)</p> <p>・硬さ分布：モックアップ(電共研)による硬さ分布(電共研条件)</p>	
<p>【ケース②】</p> <p>約 2 年 (約 2 サイクル) で Tsr に到達</p> <p>・亀裂進展速度式：最大限の進展速度式 (包絡曲線式：ばらつき成分を含む過度な進展速度を含むもの)</p> <p>・硬さ分布：実機当該部の硬さ分布 (特異と思われる溶接の硬さ)</p>	
<p>ケース①、②共通条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・口径：4B (外径:114.3mm, 板厚:13.5mm) ・必要最小板厚 (Tsr)：8.2mm ・許容亀裂深さ：5.3mm (板厚 13.5mm ベース) ・初期亀裂深さ：2.8mm (4B UT 検出限界) ・応力条件：残留応力 (初層 TIG+被覆アーク溶接) + 発生応力 (実機当該部と同等) 	

ISI 検査後の亀裂進展評価の詳細

1. 欠陥のモデル化

当該亀裂形状を参考に、4B 配管の UT 検出限界以下の想定亀裂（以下、「想定亀裂」とする）を表 1-1 の通りモデル化する。

表 1-1 欠陥のモデル化結果（4B 想定亀裂）

外径 ^{※1}	肉厚 ^{※1}
D (mm)	t (mm)
114.3	13.5

欠陥評価断面	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)	モデル形状 ^{※3}
周方向断面	2.8	38.2 ^{※2}	周方向半だ円表面 欠陥（内表面）

※1 公称値

※2 当該亀裂のアスペクト比（亀裂長さ/深さ=60 mm/4.4 mm）に基づき、欠陥深さより設定した値

※3 詳細は図 1-1 を参照のこと。

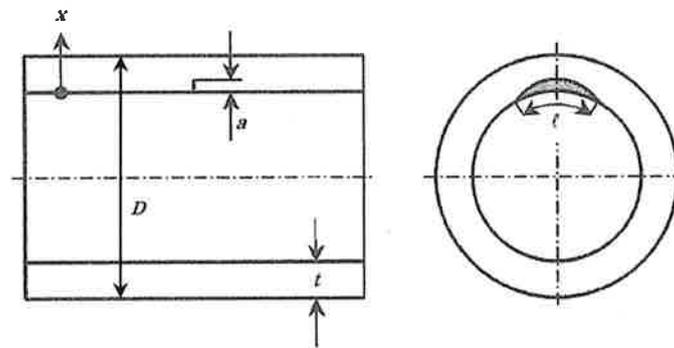


図 1-1 欠陥のモデル形状（周方向半だ円表面欠陥（内表面））

2. 亀裂進展評価

想定亀裂の亀裂進展評価は、維持規格 EB-4300 に従い、SCC による亀裂進展と疲労による亀裂進展の観点で実施する。

2.1 評価期間

評価期間は、評価期間末期で必要最小板厚（ T_{sr} ）を確保できる最大の期間として設定する。具体的には、SCC の亀裂進展速度評価式としてベストフィット曲線式（BFC 式）を

用いる場合は 9 サイクル (117 ヶ月)、包絡曲線式を用いる場合は 2 サイクル (26 ヶ月) とする。

2.2 亀裂進展式

評価に使用する、亀裂進展式を以下に示す。

a) SCC による亀裂進展評価の評価式

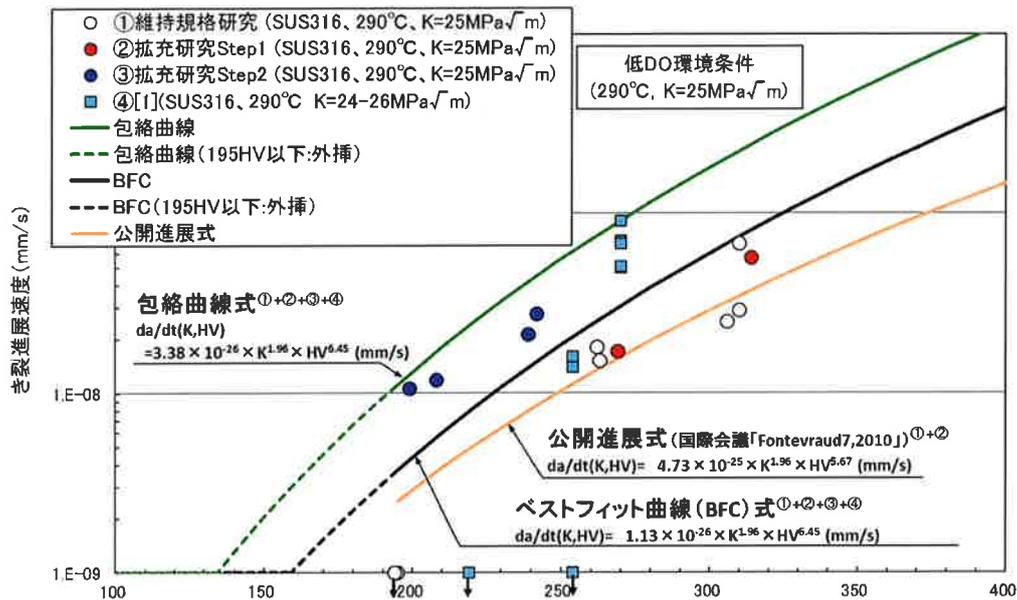
PWR 環境下における亀裂進展が硬度依存性を有することについて、電共研「強加工 SCC 懸念部位差別化のためのデータ拡充研究」及び電共研「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究」の成果として、強加工 SCC の亀裂進展速度の進展式 (亀裂進展速度線図) を作成されており、これに加えて他の研究知見で取得されたデータとの比較結果も踏まえ作成した BFC 式とより保守的な包絡曲線式を用いる。なお、包絡曲線式は、過度に保守的な値を採用したもので、今後精査を進めていく計画である。

$$\begin{aligned} \text{BFC 式} & : da/dt (K, HV) = 1.13 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45} \quad (\text{mm/s}) \\ \text{包絡曲線式} & : da/dt (K, HV) = 3.38 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45} \quad (\text{mm/s}) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} da/dt & : \text{亀裂進展速度} \quad (\text{mm/s}) \\ a & : \text{欠陥深さ} \quad (\text{mm}) \\ t & : \text{時間} \quad (\text{s}) \\ K & : \text{応力拡大係数} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \\ HV & : \text{ビッカース硬さ} \quad (\text{HV}) \end{aligned}$$

なお、過去の研究試験の結果では 195HV 以下の硬さでは亀裂進展が認められていないものの、200HV 付近でも亀裂進展が認められているデータもある事を踏まえ、195HV 以下の硬さ領域においても包絡曲線式を適用するものとする。



ビッカース硬さ（断面硬さ,HV1）

①維持規格研究「維持規格導入に向けた SUS 配管の SCC 評価データ整備研究」

②拡充研究 Step1 「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究」

③拡充研究 Step2 「PWR 環境下の SCC 進展データの拡充に関する研究(Step2)」

④[1] Journal of Nuclear Materials 426 (2012) 59-70

図 2. 2-1 亀裂進展速度線図

b) 疲労による亀裂進展評価の評価式

疲労評価に用いる進展式は、維持規格 添付 E-2 に規定されるオーステナイト系ステンレス鋼の軽水炉（PWR 一次系）にある表面欠陥の疲労亀裂進展速度式(式 2. 2-1)を用いる。

$$da/dN = 4.35 \times 10^{-10} \times T_C^{0.63} \times t_r^{0.33} \times (\Delta K)^{3.0} / (1 - R)^{1.56} \quad (\text{mm/cycle})$$

(式 2. 2-1)

ここで

- ΔK : 応力拡大係数変動範囲 (MPa√m)
 $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ ($R \geq 0$ の場合)
 $\Delta K = K_{max}$ ($R < 0$ の場合)
- K_{max} : 最大応力拡大係数 (MPa√m)
- K_{min} : 最小応力拡大係数 (MPa√m)
- T_C : 温度 (°C)
- t_r : 負荷上昇時間 (s)
- R : 応力比 ($R = K_{min}/K_{max}$)

2.3 入力条件

亀裂進展評価の入力条件については、次のとおり設定する。

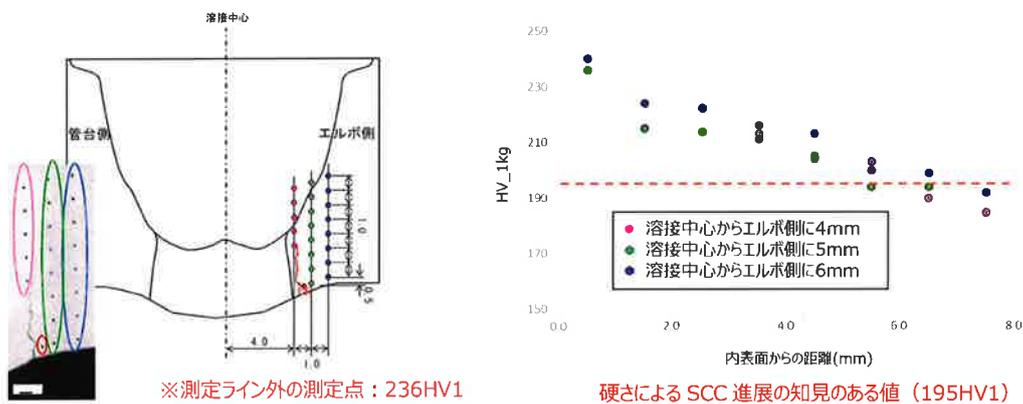
a. 応力拡大係数

亀裂進展式で用いる応力拡大係数は、維持規格 EB-4360 及び維持規格 添付 E-5 に従い、円筒内表面だ円欠陥に対する K 値式を用いて計算する。

b. 深さ方向の進展評価に用いる内部硬さ

BFC 式による深さ方向の亀裂進展評価には、電共研で取得した内部硬さを用いた。また、包絡曲線式による深さ方向の亀裂進展評価には、実機の 1kgf 荷重による硬さ計測結果のうち、溶接境界近傍領域（溶接中心から 4~6 mm位置）の内部硬さ分布を包絡したものをを用いた。実機の内部硬さ計測結果を表 2.3-1 に、使用する硬さ分布を表 2.3-2 に示す。

表 2.3-1 実機内部硬さ計測結果



荷重：1kg 単位：HV_1kg		溶接中心線からエルボ側への距離 (mm)			
		4mm	5mm	6mm	4~6mmの最大値
内表面からの距離 (mm)	7.5	185	192	192	192
	6.5	190	194	199	199
	5.5	203	194	200	203
	4.5	204	205	213	213
	3.5	213	216	211	216
	2.5	—	214	222	222
	1.5	—	215	224	224
	0.5	—	236	240	240

表 2.3-2 進展評価に用いる内部硬さデータ

内面からの距離	適用硬さ HV	
	BFC 式 (117 カ月)	包絡曲線式 (26 カ月)
7.0mm～外表面	191	192
6.0～7.0mm	191	199
5.0～6.0mm	191	203
4.0～5.0mm	192	213
3.0～4.0mm	207	216
2.0～3.0mm	209	222
1.0～2.0mm	209	224
0～1.0mm	209	240

c. 長さ方向進展評価に用いる内部硬さ

長さ方向の進展評価に用いる内部硬さは、0～1.0mm の深さに認められた硬さを用いた。BFC 式による評価には 209HV、包絡曲線式による評価には 240HV を用いる。

d. 溶接残留応力

進展評価に用いる残留応力分布は、当該部の溶接方法 (TIG+SMAW) を模擬した FEM 解析結果より、溶接中心部近傍 (0～5mm:1mm ピッチ) と 10mm 離れた位置での残留応力分布を包絡する分布として図 2.3-1 の通り設定する。

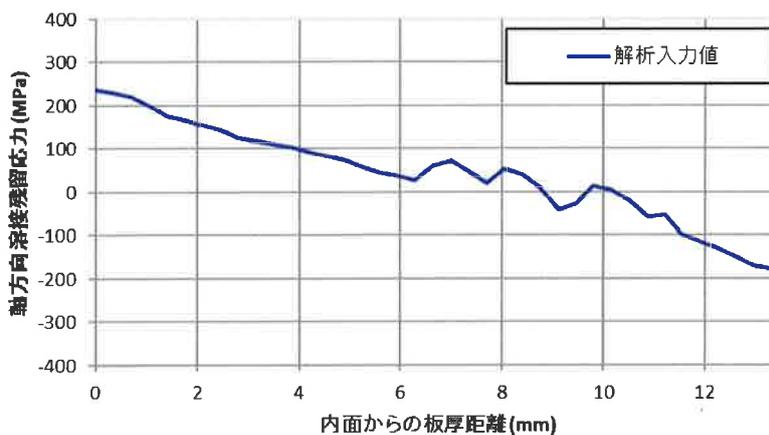


図 2.3-1 進展評価に用いる残留応力の分布

e. 荷重と荷重の組合せ

当該欠陥の亀裂進展評価に考慮する荷重と荷重の組合せは、維持規格 添付 E-7 の規定に従い、表 2.3-3 及び表 2.3-4 の通り設定する。

表 2.3-3 亀裂進展評価で考慮する荷重の種類

項目		評価内容	
		SCC による 亀裂進展評価	疲労による 亀裂進展評価
内圧	出力運転条件	○	○
	過渡条件	—	○
熱	出力運転条件	○	○
	過渡条件	—	○
機械的荷重		○	○
地震 ^{※1}	1/3Sd*	—	○
溶接残留応力		○	○

凡例：○ ⇒考慮、— ⇒考慮せず

※1：Sd*は、弾性設計用地震動（Sd）による地震力と静的地震力のうち大きい方の地震力の値を示す。

表 2.3-4 亀裂進展評価で考慮する荷重の組合せ

評価内容	組合せ
SCC による 亀裂進展評価	出力運転条件（内圧、熱）＋機械的荷重＋溶接残留応力
疲労による 亀裂進展評価	出力運転条件（内圧、熱）＋機械的荷重＋過渡条件（内圧、熱） ＋溶接残留応力
	出力運転条件（内圧、熱）＋機械的荷重＋地震＋溶接残留応力

f. 出力運転条件による応力

亀裂進展評価にて出力運転条件として用いる設計条件は表 2.3-5 に示す通り、当該亀裂部の条件と同じものと設定する。

表 2.3-5 亀裂進展評価に考慮する出力運転条件

運転圧力 (MPa)	運転温度 (°C)	発生応力 (MPa)
15.41	291.7	100

g. 過渡条件

亀裂進展評価に用いる過渡条件を表 2.3-6 に示す。過渡回数は評価期間(2サイクル)に基づき設定している。

表 2.3-6 亀裂進展評価で考慮する過渡条件

No	運転ケース	変動応力 (MPa)	過渡回数 (回)	
			BFC 式 (117 カ月)	包絡曲線式 (26 カ月)
1	起動・停止	96		
2	負荷上昇 (15→100%)	35		
3	負荷減少 (100→15%)	35		
4	90%から 100%へのステップ状負荷上昇	35		
5	100 から 90%へのステップ状負荷減少	35		
6	100%からの大きなステップ状負荷減少	36		
7	燃料交換	14		
8	0%から 15%への負荷上昇・15%から 0%への負荷減少	33		
9	1 ループ停止 / 1 ループ起動 I) 1 ループ停止	35		
10	1 ループ停止 / 1 ループ起動 II) 1 ループ起動	34		
11	負荷の喪失	44		
12	外部電源喪失	47		
13	1 次冷却材流量の部分喪失	35		
14	100%からの原子炉トリップ I) 不注意な冷却を伴わないトリップ	34		
15	100%からの原子炉トリップ II) 不注意な冷却を伴うトリップ	38		
16	100%からの原子炉トリップ III) 不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	51		
17	1 次冷却系の異常な減圧	45		
18	制御棒クラスタの落下	37		
19	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	43		
20	1 次冷却系停止ループの誤起動	40		
21	1 次系漏えい試験	75		
22	タービン回転試験	44		

i. 地震力

亀裂進展評価に用いる地震力は、維持規格 添付 E-7 で規定される評価すべき地震力の S_1 を S_d (弾性設計用地震動)と読み替え、 $1/3S_d^*$ として、 S_d 地震力と静的地震力の大小

きいものを 1/3 したものをを用いる。なお、評価に用いる地震力は既工認において用いた地震力と同等の地震力とする。なお、地震時の発生回数については、一般社団法人 日本電気協会「原子力発電所 配管破損防護設計指針 (JEAG 4613-1998)」に基づいて設定 (10 年に 1 回地震 (地震 1 回あたり 60 回の繰り返し回数) が発生すると仮定) し 60 回とする。また、地震の負荷上昇時間は 1s とする。

2.4 破壊評価

破壊評価は、2.3 項の亀裂進展評価から求めた評価期間末期における平面欠陥の予測寸法を基に、維持規格 EB-4400 に従い実施する。

2.4.1 破壊評価式

本評価では、維持規格 EB-4420 において規定される、当該配管のオーステナイト系ステンレス鋼管の評価に用いる評価法の内、弾塑性破壊力学評価法 (維持規格 添付 E-9) の許容曲げ応力による評価とし、許容曲げ応力 S_c を満足することを確認する。なお、当該亀裂の評価期間末期の欠陥角度は 60° 以下であるため、維持規格の事例規格 (NA-CC-002) は適用しない。

許容曲げ応力 S_c は式 2.4.1-1 で与えられる。

$$S_c = \frac{1}{SF} \left(\frac{P_b'}{Z} - P_e \right) - P_m \left(1 - \frac{1}{Z(SF)} \right) \quad (\text{式 2.4.1-1})$$

P_b' は塑性崩壊時の曲げ応力で下式により求められる。

$$P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta \right) \quad (\text{式 2.4.1-2})$$

ここで、

P_m : 一次一般膜応力

P_e : 熱膨張応力

SF は安全率で、

許容状態 A 及び B に対して、 $SF=2.77$

許容状態 C 及び D に対して、 $SF=1.39$

β は周方向欠陥付き管の中立軸に対応する角度であり、式 2.4.1-3 で与えられる。

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{a}{t} \theta - \pi \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \quad (\text{式 2.4.1-3})$$

ここで、

σ_f : 流動応力 ($\sigma_f = 2.7Sm$)

a : 平面欠陥の深さ

t : 管の厚さ

θ : 周方向欠陥半長に対する角度 (欠陥角度)

Z係数は、オーステナイト系ステンレス鋼管の GTAW (ティグ溶接) および SMAW (被覆アーク溶接) に適用される式 2.4.1-4 を用いる。

$$Z = 0.292 \log\{(OD)/25\} + 0.986 \quad (\text{式 2.4.1-4})$$

2.4.2 荷重と荷重の組合せ

破壊評価に考慮する荷重との荷重の組合せは、維持規格 添付 E-7 の規定に従い、表 2.4-1 及び表 2.4-2 の通り設定する。

表 2.4-1 破壊評価で考慮する荷重の種類

項目		評価内容	
		許容状態 A, B	許容状態 C, D
内圧	出力運転条件	○	○
	過渡条件	○	○
熱	出力運転条件	○	○
	過渡条件	○	○
機械的荷重		○	○
地震	Sd ^{*1}	—	○
	Ss ^{*2}	—	○

凡例：○ ⇒ 考慮、— ⇒ 考慮せず

※1 Sd^{*}は、弾性設計用地震動 (Sd) による地震力と静的地震力のうち大きい方の地震力の値を示す。

※2 Ss^{*}は、基準地震動による地震力の値を示す。

表 2.4-2 破壊評価で考慮する荷重の組合せ

評価内容	組合せ
許容状態 A, B	供用状態 A, B における過渡条件 (内圧、熱) + 機械的荷重
許容状態 C, D	供用状態 A, B, C, D における過渡条件 (内圧、熱) + 機械的荷重 + Sd [*] 地震力
	供用状態 A, B, C における過渡条件 (内圧、熱) + 機械的荷重 + Ss [*] 地震力
	SA における過渡条件 (内圧、熱) ^{※1,2} + 機械的荷重

※1 重大事故 (SA) 条件に関しては維持規格上の規定はないが、許容状態 C, D の規定を準用して評価を行う。

※2 SA 時に DB 条件 (負荷喪失) を上回る事象としては、ATWS (制御棒挿入

失敗) + 主給水流量喪失 or 負荷喪失の事象が挙げられるが、当該事象が DB 条件 (負荷喪失) を上回る期間は 4 時間程度と非常に短期的であることから、SA 条件は Ss, Sd 地震共に組合せは不要となる。

2.4.3 入力条件

a. 出力運転条件による応力

圧力+熱+自重による軸方向応力として、亀裂進展評価に用いた表 2.3-5 の値を用いる。

b. 過渡条件及び地震力による応力

破壊評価に用いる地震力は、維持規格 添付 E-7 で規定される評価すべき地震力の S_1 及び S_2 を Sd (弾性設計用地震動) 及び Ss (基準地震動) と読み替える。Sd*として Sd 地震力と静的地震力の大きいものを用いる。なお、評価に用いる地震力は当該亀裂部の既工認において用いた地震力と同等の地震力とする。

表 2.4-2 の荷重の組合せの中から、許容状態 A, B 及び許容状態 C, D において、最も厳しい条件における軸方向応力を表 2.4-3 に示す。

表 2.4-3 破壊評価に用いる過渡条件及び地震力による応力

供用状態	P_m 一次一般 膜応力 (MPa)	P_e 熱膨張 応力 (MPa)	P_b 一次曲げ応力			
			自重 (MPa)	自重を除く 機械的 荷重 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)
A, B	38.1	72.0	3.8	-	-	3.8
C+Ss	40.0	78.9	3.8	-	61.0	64.8
D+Sd	32.7	78.9	3.8	6.4	41.8	52.0
SA	40.9	79.4	3.8	-	-	3.8

3. 評価の結果

想定亀裂の亀裂進展評価結果を以下に示す。

3.1 亀裂進展評価の結果

SCC 及び疲労による亀裂進展量を加味した評価期間末期の亀裂寸法を表 3.1-1 に、進展量のグラフを図 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 当該欠陥の亀裂進展評価結果

	BFC 式		包絡曲線式	
	評価期間：117 ヶ月		評価期間：26 ヶ月	
	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)
初期寸法	2.80	38.2	2.80	38.2
SCC による進展量	2.22	2.6	2.45	4.2
疲労による進展量	0.15	0.1	0.05	0.1
評価期間末期の亀裂寸法	5.17	40.9 (53.7°)	5.30	42.5 (55.8°)

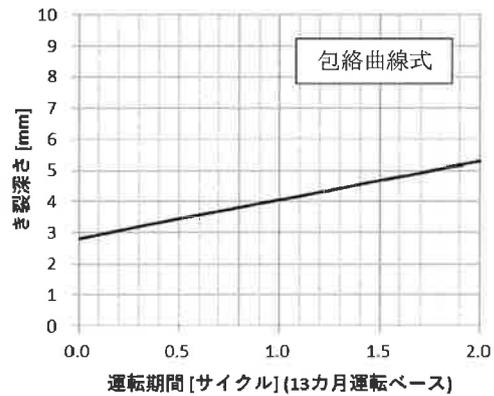
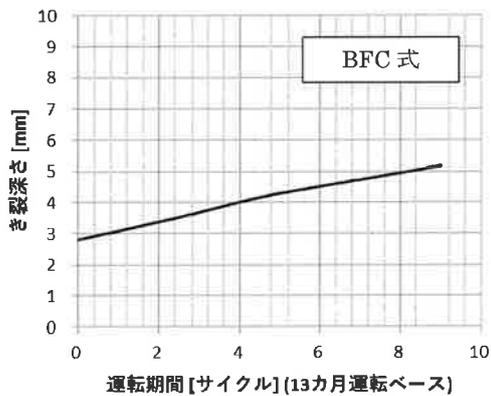


図 3.1-1 評価期間中の亀裂進展量

3.2 破壊評価の結果

亀裂進展評価から求めた評価期間末期における亀裂寸法を用いて、許容曲げ応力による評価を行った結果を表 3.1-2 に示す。

表 3.1-2 許容曲げ応力による評価結果

評価式	評価期間 (月)	荷重の 組合せ	一次曲げ応力 P_b (MPa)	許容曲げ応力 S_c (MPa)	判定 $P_b < S_c$
BFC 式	117	A, B	3.8	55.1	○
		C+Ss	64.8	143.2	○
		D+Sd	52.0	144.5	○
		SA	3.8	134.3	○
包絡曲線式	26	A, B	3.8	54.2	○
		C+Ss	64.8	141.5	○
		D+Sd	52.0	142.8	○
		SA	3.8	132.6	○

以上

1 サイクル程度で Tsr に至る内部硬さ条件の評価

パラメトリックスタディとして、参考 1 に示した包絡曲線式の計算方法を用い、1 サイクルで必要最小板厚 (Tsr) に至る内部硬さを検討した。

その結果、割れが認められた実機の内部硬さの最小二乗近似直線(図 1)に、+30 高い値を用いた表 1 の硬さ条件で、1 サイクル程度で必要最小板厚に到達することが確認された(図 2)。なお、この評価は検出下限値相当の 2.8mm の初期亀裂長さを見込んだもので、今後精査が必要と考えられる過度な進展速度を示す包絡曲線式を採用した結果である。なお、想定亀裂先端(2.8mm)の内部硬さは 249HV であった。

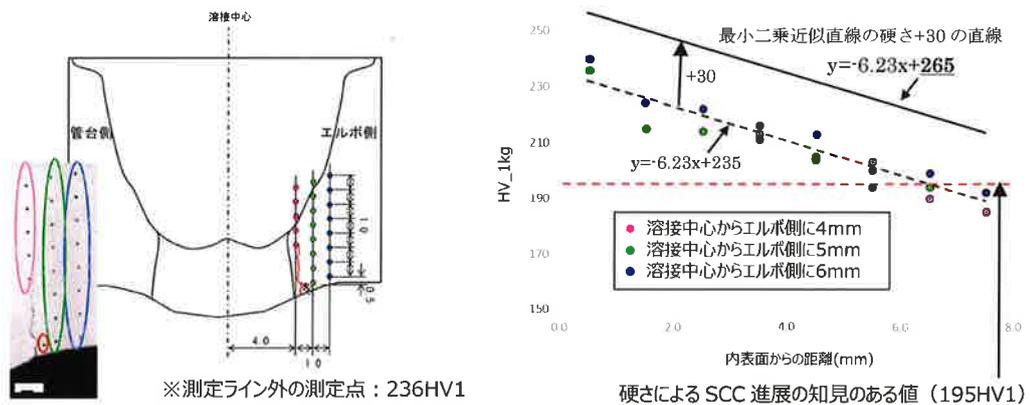


図 1 実機内部硬さ計測結果

表1 き裂進展評価に用いた硬さデータ

(単位: HV)

内面からの距離	1サイクルで Tsr に至る内部硬さ
7.0mm~外表面	218
6.0~7.0mm	224
5.0~6.0mm	231
4.0~5.0mm	237
3.0~4.0mm	243
2.0~3.0mm	249
1.0~2.0mm	256
0~1.0mm	262

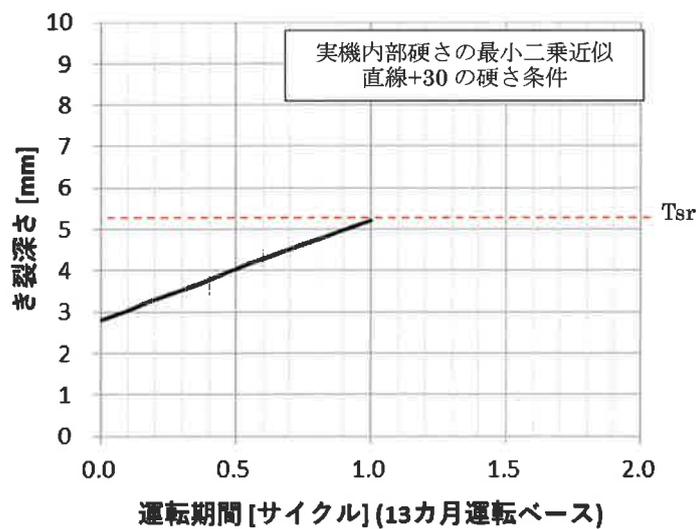


図2 1サイクルで必要最小板厚に到達する条件での亀裂進展評価結果