

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK 補-III-3-1 改 2
提出年月日	平成 30 年 5 月 2 日

東海第二発電所 劣化状況評価
(照射誘起型応力腐食割れ)
(耐震安全性評価)
共通事項に関する補足説明資料

平成 30 年 5 月 2 日

日本原子力発電株式会社

本資料のうち、枠囲みの範囲は、営業秘密又は
防護上の観点から公開できません。

<炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価>

累積照射量がしきい照射量を超える炉内構造物のうち、炉心シュラウドについて亀裂進展評価及び破壊評価を実施する。

1. 亀裂進展評価

炉心シュラウドのうち、炉心近傍で引張応力の作用する可能性のある部位である中間胴溶接線の中から、地震時に亀裂進展しやすい周方向溶接継手である H4 溶接継手を評価対象部位とする。

1.1 初期亀裂

H4 溶接継手は、中間胴上下の平板を両側開先の突合せで溶接する構造である。したがって、初期亀裂は、維持規格 添付 EJG-B-2-1 における「シュラウドサポートリング無し」の場合に欠陥が検出されていない範囲に想定する初期亀裂である、深さ $a_0=1.0$ mm、長さ $l_0=10.0$ mm の半楕円亀裂が、H4 溶接継手内表面にあるものとして評価する。

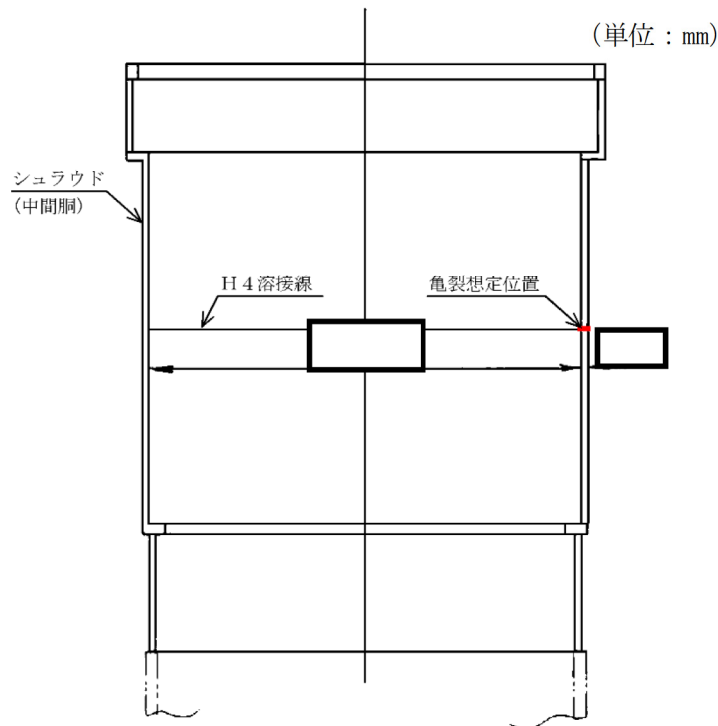


図1 炉心シュラウドの亀裂想定位置

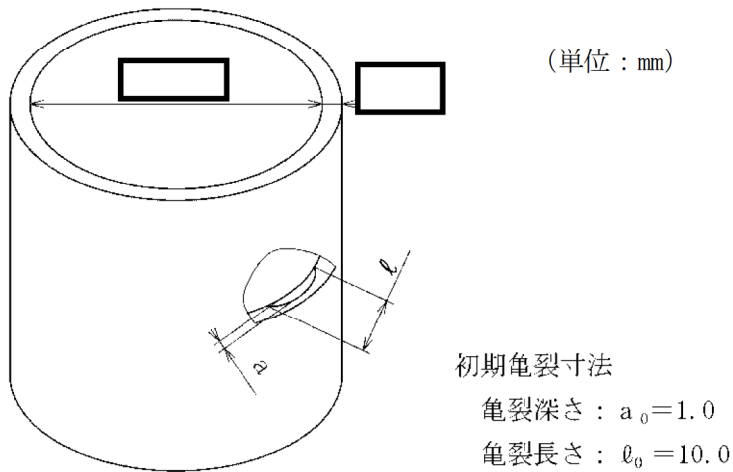


図2 炉心シュラウドの評価モデル (半楕円亀裂)

1.2 亀裂進展速度

亀裂進展速度は、原子力規制委員会「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈の制定について」に従い、保守的に維持規格 図添付 E-2-SA-2 に示される鋭敏化 SUS304 鋼の亀裂進展速度の上限値 $9.2 \times 10^{-7} \text{mm/s} = 30 \text{mm/年}$ を用いる。

1.3 亀裂進展評価

(1) 亀裂深さ

亀裂深さは、次式より運転期間 年を経過した時点で、炉心シュラウドの中間胴の板厚 (mm) に達する。

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{(t - a_0) [\text{mm}]}{U [\text{mm/s}]} \times \frac{1}{3,600 [\text{s}]} \times \frac{1}{24 [\text{h}]} \times \frac{1}{365 [\text{d}]} \\
 &= \frac{\text{} - 1.0}{9.2 \times 10^{-7}} \times \frac{1}{3,600} \times \frac{1}{24} \times \frac{1}{365} \\
 &= \text{} [\text{年}]
 \end{aligned}$$

T: 亀裂深さが板厚に達するまでの期間

t: 炉心シュラウド中間胴板厚 = [mm]

a_0 : 初期亀裂深さ = 1.0 [mm]

U: 鋭敏化 SUS304 鋼の亀裂進展速度の上限値 = $9.2 \times 10^{-7} [\text{mm/s}]$

(2) 亀裂長さ

亀裂進展評価時点における亀裂長さ l は、次式より求められる。

なお、亀裂長さは、周方向2箇所の亀裂先端より独立して進展するため、亀裂両側において亀裂進展速度 U にて進展する。

$$l \text{ [mm]} = l_0 \text{ [mm]} + 2 \times U \text{ [mm} \cdot \text{s}^{-1}] \times Y \text{ [年]} \times 365 \text{ [d]} \times 24 \text{ [h]} \times 3,600 \text{ [s]}$$

l_0 : 初期亀裂欠陥長さ = 10.0 [mm]

Y : 運転期間[年]

2. 破壊評価

炉心シュラウド H4 溶接継手内表面に想定した亀裂に対して、地震時の応力による応力拡大係数を求める。求めた応力拡大係数が、照射ステンレス鋼の破壊靱性値未満であれば、破壊を生じないと判断する。

2.1 考慮する荷重

評価位置に作用する荷重は、維持規格 添付 EJG-B-2-2 により、表 1 に示す差圧、死荷重及び地震荷重を考慮する。

差圧及び死荷重には、建設時工認に示される設計値を単位換算して用いることとし、地震荷重には、評価用地震動を考慮した荷重を用いる。

表 1 破壊評価に用いる荷重

評価部位	差圧 P [MPa]	死荷重 W [N]	地震荷重	
			軸力 V [kN]	モーメント M [kN・m]
炉心シュラウド H4 溶接継手	0.070	1.04×10^6		

2.2 破壊評価に用いる応力

評価に用いる応力は、表 1 の荷重による軸方向応力を考慮する。

なお、熱応力は評価位置が中間胴の一般部であり、通常運転時の熱応力が微小であることから考慮しない。

(1) 差圧による応力

H4 溶接継手に作用する差圧 P による軸方向応力 σ_P は、次式より求める。

$$\sigma_P = \frac{1}{(D_o/D_i)^2 - 1} \times P = \frac{1}{\square - 1} \times 0.070 = \square \text{ [MPa]}$$

$$D_o / D_i = \boxed{} = \boxed{}$$

$$D_o : \text{炉心シュラウド中間胴の外径} = \boxed{} + 2 \times \boxed{} = \boxed{} \text{ [mm]}$$

$$D_i : \text{炉心シュラウド中間胴の内径} = \boxed{} \text{ [mm]}$$

(2) 死荷重による応力

H4 溶接継手に作用する死荷重Wによる軸方向応力 σ_w は、次式により求める。

$$\sigma_w = - \frac{W}{A} = - \frac{1.04 \times 10^6}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ [MPa]}$$

$$A : \text{炉心シュラウド中間胴の断面積}$$

$$= (\pi/4) \times (\boxed{} - \boxed{}) = \boxed{} \text{ [mm}^2\text{]}$$

(3) 地震荷重による応力

H4 溶接継手に作用する地震荷重による軸方向応力 σ_s は、次式により求める。

$$\sigma_s = \frac{V}{A} + \frac{M}{I} \times \frac{D_o}{2}$$

$$= \frac{\boxed{}}{\boxed{}} + \frac{\boxed{}}{\boxed{}} \times \frac{\boxed{}}{2}$$

$$= \boxed{} \text{ [MPa]}$$

$$I : \text{炉内シュラウド中間胴の断面二次モーメント}$$

$$= (\pi/64) \times (\boxed{} - \boxed{}) = \boxed{} \text{ [mm}^4\text{]}$$

破壊評価に用いる応力 σ は、(1)から(3)の結果より、次式により求める。

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_w + \sigma_s = \boxed{} - \boxed{} + \boxed{} = \boxed{} \text{ [MPa]}$$

2.3 応力拡大係数の算出

「1.3 亀裂進展評価」より，想定亀裂の応力拡大係数 K_I は，表2に示す評価期時点において，想定亀裂は貫通亀裂となっているため，次式*1により求める。

$$K_I = F_m \times \sigma \times (\sqrt{\pi \times c}) \quad [\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$$
$$F_m = \frac{1 - 0.025(c/b)^2 + 0.06(c/b)^4}{\sqrt{\cos(\pi \times c/2b)}}$$

c : 亀裂長さ $l/2$

b : モデル平板の板幅/2 = / 2 = [mm]

*1 出典 構造健全性評価ハンドブック 共立出版 小林英男著, P158

大径薄肉円筒構造物の評価では，円筒の曲率による影響が小さいため，平板モデルへ置き換えて評価する場合がある。炉心シュラウドは以下のとおり内半径/板厚が十分大きく，大径薄肉円筒と見なせるため，平板モデルへ置き換えて評価する。

- 内半径 : / 2 = [mm]
- 板厚 : [mm]
- 内半径/板厚 = / = 50.8

2.4 破壊靱性値

照射ステンレス鋼の破壊靱性値 K_{Ic} は，維持規格 添付 E-14 3.(1)に示される中性子照射量 8×10^{24} [n/m²]を超える場合の値である $43.2 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用いる。

3. 亀裂進展及び破壊評価結果

表2に亀裂進展期間における想定亀裂長さ、想定亀裂に対する地震時の応力拡大係数及び維持規格 添付 E-15 に示される許容状態C及びDの安全率1.5を考慮した応力拡大係数を、破壊靱性値 K_{Ic} と比較して示す。

表2に示すように、想定亀裂の応力拡大係数は、安全率を考慮した場合は運転期間5.23年まで、安全率を考慮しない場合は11.81年まで、照射ステンレス鋼の破壊靱性値を下回っており、地震時に破壊が生じないことを確認した。

表2 亀裂進展評価及び破壊評価結果（炉心シュラウドのH4溶接継手）

運転期間 Y [年]	想定亀裂 長さ l [mm]	c $\times 10^{-3}$ [m]	b $\times 10^{-3}$ [m]	F m [-]	応力拡大係数 K_I [MPa \sqrt{m}]		破壊靱性 値 K_{Ic} [MPa \sqrt{m}]
					安全率 未考慮	安全率 考慮*2	
5.23					28.7	43.1	43.2
5.24					28.8	43.2	
11.81					43.1	64.7	
11.82					43.2	64.8	

*2 応力拡大係数（安全率未考慮） $\times 1.5$

現状保全においては、4定期検査毎（運転時間約4.6年）に目視検査（MVT-1）を実施し健全性を確認することになっていることから、耐震安全性は維持できる。

以 上

< 炉心シュラウド H4 溶接継手内面の 4 定期検査毎の目視検査 (MVT-1) について >

炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価において、維持規格添付 E-JG-B-2-1 における「シュラウドサポートリング無し」の場合に欠陥が検出されていない範囲に想定する初期亀裂である、深さ $a_0=1.0$ mm、長さ $l_0=10.0$ mm の半楕円亀裂が、H4 溶接継手内表面にあるものとし、その進展を考慮した場合、運転時間 5.24 EFPY で破壊を引き起こす亀裂となると評価された。現状保全においては、4 定期検査毎 (約 4.6 EFPY 毎) の目視点検 (MVT-1) を行って亀裂のないことを確認することで、耐震安全性は維持できるとしている。

ここでは、4 定期検査毎 (約 4.6 EFPY 毎) の目視点検 (MVT-1) により、耐震安全性は維持できるとしていることについて、以下に補足する。

1. 目視検査 (MVT-1) の妥当性について

- MVT-1 は 0.025mm 幅のワイヤが識別可能となるように調整した遠隔目視試験である。
- 維持規格による想定欠陥寸法である深さ 1 mm、長さ 10 mm は、1 回目の検査で欠陥が見つからなかった部位の 2 回目以降の検査間隔を定めるため、解析で初期条件として設定するものである。
- すなわち、深さ 1 mm、長さ 10 mm の想定欠陥は、検査で欠陥が見つからなかった部位に対する想定欠陥であり、検査で見落とす可能性のある最大クラスの大きさを想定していると解釈できる。
- 応力腐食割れは、その寸法が小さいものであっても MVT-1 で検出できることが実機の事例として報告されている (添付 1)。
- 評価部位である炉心シュラウドの H4 溶接継手は、シュラウドサポートリングのような機械加工面ではなく、平板を両開先の突合せで溶接した部位であることから、加工溝により欠陥を見落とすリスクは小さい。また目視検査に用いるカメラが検査対象部位に接近する際の妨げとなる干渉物もなく、検査性がよい。
- したがって、炉心シュラウドの H4 溶接継手の検査として MVT-1 を行うことは妥当であると考えられる。

2. 炉心シュラウドの耐震安全性評価の保守性について

- 想定欠陥の亀裂進展速度は、応力拡大係数に依存せず、保守的に維持規格の図 添付 E-2-SA-2 鋭敏化 SUS304 鋼の上限値 (9.2×10^{-7} mm/s = 30 mm/年) を適用している。東海第二の炉心シュラウドの H4 溶接継手は両開先溶接である。両開先溶接の場合、溶接による軸方向残留応力は板厚内部で圧縮側となるため、周方向亀裂の深さ方向への進展速度は板厚内で停滞することになる。このことは、BWR 炉内構造物点検評価ガイドラインに記載されている (添付 2)。
- 破壊評価において、破壊靱性値と比較する応力拡大係数には、維持規格 添付 E-15 にし

たがって安全率 1.5 倍を考慮している。

- 破壊靱性値は、維持規格 添付 E-14 により $43.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用いており、これは BWR 環境で照射された 304 ステンレス鋼を用いて得られた破壊靱性値の最小値を保守的に用いていることが、維持規格の解説 整理番号 E-25 に記述されている。

以上より、照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価では、亀裂進展速度は応力拡大係数に依らず一律鋭敏化 SUS304 鋼の最大速度を用いていること、応力拡大係数に安全率 1.5 倍を設定していること、及び破壊靱性値には保守的に得られたデータの最小値を用いていることから、十分に保守性をもった評価となっており、4 定期検査毎の目視点検 (MVT-1) によって十分耐震安全性を維持できると考える。

以 上

【SCC 事例】福島第二原子力発電所 2号機

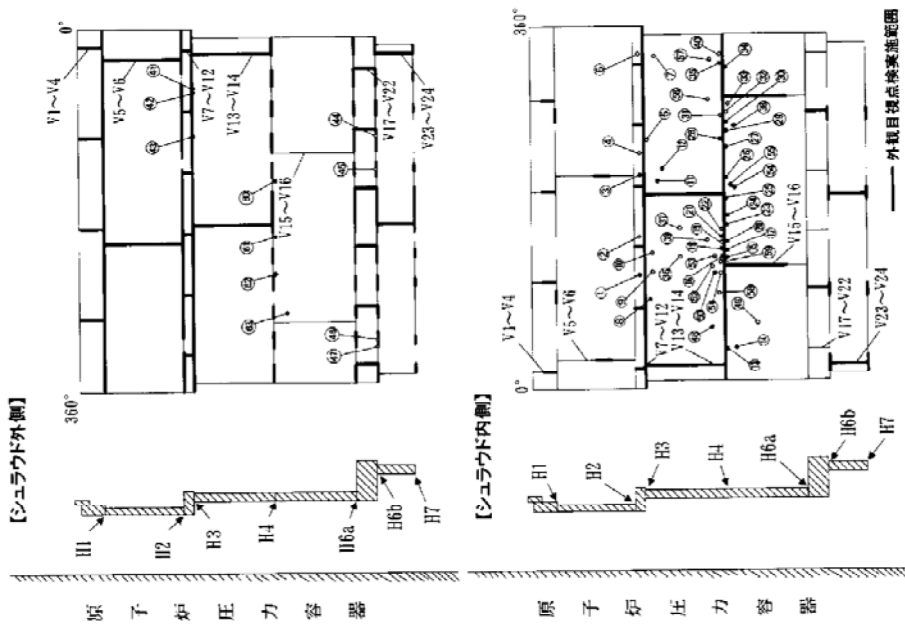
出典：NUCIA ホームページ 報告書番号 2002-東京-M013

注：下表における「みがき後のひびの様相」の記載は、MVT-1 によるもの。

シュラウド点検結果(1/3)

溶接線名	インディケーション の位置	GEの指輪	インディケーション		有・無 (長さ)	有・無 (長さ)	みがき後のひびの様相	超音波探傷試験結果 エコーの有無 (最大深さ)
			有・無 (長さ)	有・無 (長さ)				
H3内側	① 113度付近	○	○	(約30mm)	○	(約19mm)	○	
	③ 210度付近	○	○	(約40mm)	○	(約20mm)	○	
	② 150度付近	○	○	(約40mm)	×	-	-	
	④ 222度付近	○	○	×	×	-	-	
	⑤ 240度付近	×	○	(約20mm)	×	-	-	
	⑥ 328度付近	○	×	×	×	-	-	
	⑧ 88度付近	×	○	(約15×30mm)	○	(約4mm)	○	
H3内側裏面	⑩ 210度付近	×	○	(約35×35mm)	○	(約18mm)	○	
	⑩ 210度付近	×	○	(約60×70mm)	○	(約12mm)	○	
	⑫ 150度付近	×	○	(約20×20mm)	○	(約4mm)	○	
	⑭ 159度付近	×	○	(約35×35mm)	○	(約10×15mm)	○	
	⑯ 328度付近	×	○	(約32mm)	×	○	○	
	⑰ 114度付近	×	○	(約10×30mm)	×	-	-	
	⑱ 130度付近	×	○	(約15mm, 約50mm)	×	-	-	
H4内側	⑲ 29度付近	○	○	(約200×40mm)	○	(約19mm)	○	
	⑲ 144度付近	○	○	(約155×20mm)	○	(約15mm)	○	
	⑲ 145度付近	○	○※	(約75×20mm)	○	(約27mm)	○	
	⑲ 147度付近	○	○	(約60×20mm)	○	(約14mm)	○	
	⑲ 150度付近	○	○	(約130×35mm)	○	(約15mm)	○	
	⑲ 155度付近	○	○	(約200×50mm)	○	(約21mm)	○	
	⑲ 156度付近	○	○	(約120×30mm)	○	(約20mm)	○	
H4内側	⑲ 160度付近	○	○	(約90×30mm)	○	(約18mm)	○	
	⑲ 168度付近	○	○	(約40×20mm)	○	(約14mm)	○	
	⑲ 193度付近	○	○	(約65×35mm)	○	(約16mm)	○	

シュラウド展開図



● 超音波探傷試験の結果、エコーが確認された場所。
○ みがき後のひびの様相が確認されなかった場所及び超音波探傷試験の結果、エコーが確認されなかった場所。

シュラウド点検結果(2/3)

溶接線名	インディケーションの位置	GEの指摘	インディケーション		有・無 (長さ)	みがき後のひびの検出	超音波探傷試験結果		
			有・無 (長さ)	有・無 (長さ)			エコーの有無 (最大深さ)	エコーの有無 (最大深さ)	
H4内側	②6	203度付近	○	○	(約7×10mm)	○	○	(約4mm)	
	②7	245度付近	○	○	(約100×10mm)	○	○	(約19mm)	
	②8	257度付近	○	○	(約40×30mm)	○	○	(約20mm)	
	②9	293度付近	○	○	(約50×35mm)	○	○	(約9mm)	
	③0	294度付近	○	○	(約170×65mm)	○	○	(約17mm)	
	③4	334度付近	○	○	(約180×60mm)	○	○	(約21mm)	
	③5	335度付近	○	○	(約60×30mm)	○	○	(約12mm)	
	③8	152度付近	○	○	(約7×9mm)	○	○	—	
	④0	343度付近	○	○	—	○	○	—	
	H4内側垂線	④1	24度付近	○	○	(約140×200mm)	○	○	(約21mm)
		④2	156度付近	○	○	(約10×30mm)	○	○	検出されず
		④3	295度付近	○	○	(約10×30mm)	○	○	検出されず
		④2	296度付近	○	○	(約30×25mm)	○	○	検出されず
		④3	296度付近	○	○	(約20×30mm)	○	○	検出されず
		④8	293度付近	○	○	(約80×140mm)	○	○	(約17mm)
		④9	153度付近	○	○	(約30×30mm)	○	○	検出されず
		④9	63度付近	○	○	(約97×70mm)	○	○	(約19mm)
		④9	65度付近	○	○	(約11×20mm)	○	○	検出されず
		⑤0	115度付近	○	○	(約25×75mm)	○	○	(約7mm)
⑤1		115度付近	○	○	(約10×21mm)	○	○	検出されず	
⑤2		125度付近	○	○	(約17×23mm)	○	○	検出されず	
⑤3	145度付近	○	○	(約11×15mm)	○	○	検出されず		
⑤4	200度付近	○	○	(約35×38mm)	○	○	(約22mm)		

シュラウド点検結果(3/3)

溶接線名	インディケーションの位置	GEの指摘	インディケーション		有・無 (長さ)	みがき後のひびの検出	超音波探傷試験結果	
			有・無 (長さ)	有・無 (長さ)			エコーの有無 (最大深さ)	エコーの有無 (最大深さ)
H4内側垂線	⑤5	202度付近	○	○	(約63×115mm)	○	○	(約23mm)
	⑤6	303度付近	○	○	(約10×14mm)	○	○	検出されず
	⑤7	344度付近	○	○	(約9×15mm)	○	○	検出されず
	⑤8	90度付近	○	○	(約25×19mm)	○	○	検出されず
	⑤9	132度付近	○	○	(約5×10mm)	○	○	検出されず
	④1	64度付近	○	○	(約40×17mm)	○	○	(約14mm)
	④2	65度付近	○	○	(約32×20mm)	○	○	(約14mm)
	④3	107度付近	○	○	(約36×50mm)	○	○	(約20mm)
	⑥0	145度付近	○	○	—	○	○	(約13mm)
H4外側	⑥1	200度付近	○	○	—	○	○	(約4mm)
	⑥2	245度付近	○	○	—	○	○	(約5mm)
	⑥3	285度付近	○	○	—	○	○	(約5mm)
H4外側垂線	④4	110度付近	○	○	(約20×23mm)	○	○	—
	④9	130度付近	○	○	(約30×16mm)	○	○	—
	④6	317度付近	○	○	(約55×22mm)	○	○	—
	④7	322度付近	○	○	(約30×7mm)	○	○	—

※:GEは近接したインディケーションを各々数えて2箇所としたが、今回の点検では1箇所と数えた。

炉心シュラウド H4 溶接継手 両側開先形状における
 残留応力，応力拡大係数及び亀裂進展解析結果

出典：JANTI-VIP06－第 5 版 BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [炉心シュラウド] (第 5 版)
 平成 27 年 3 月 有限責任中間法人 日本原子力技術協会

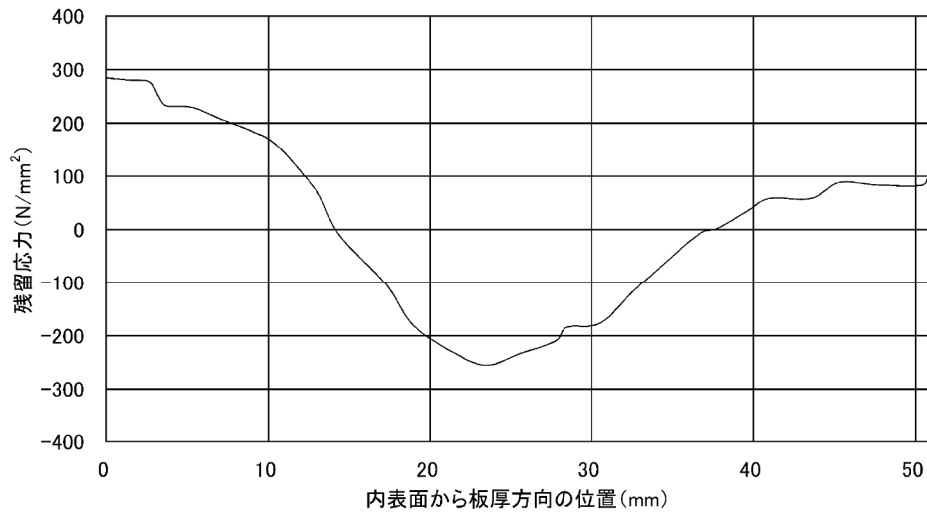
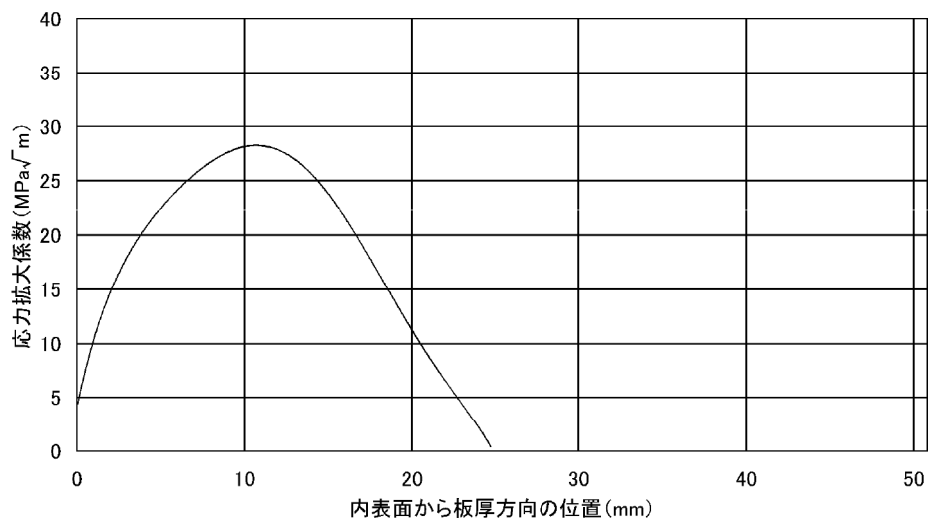


図 C-4 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H4: 継手形状 2)



(1) 内表面から板厚方向の K 値分布

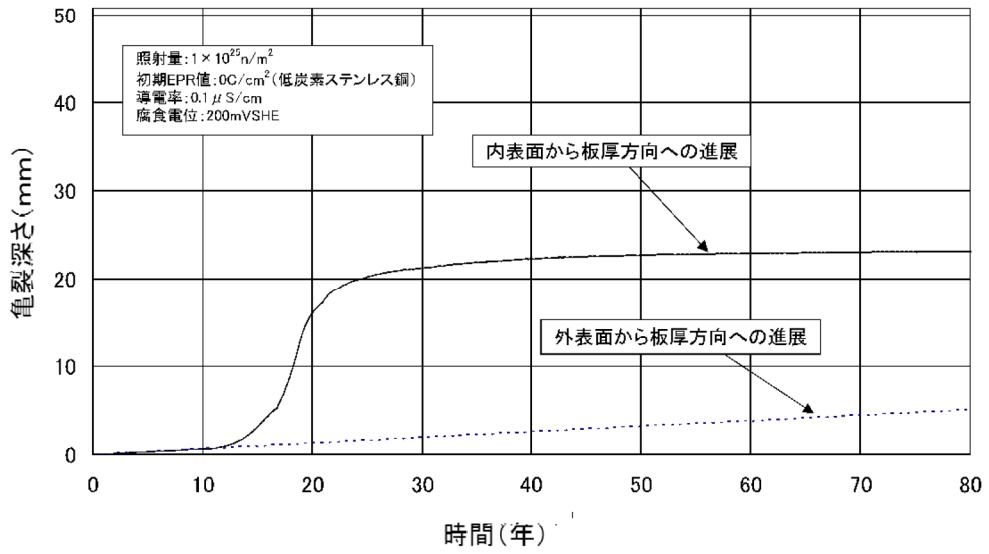


図 C-28(3) 亀裂深さと時間の関係 (II4 継手形状 2)
 (通常炉内水質環境中, 高中性子照射領域)

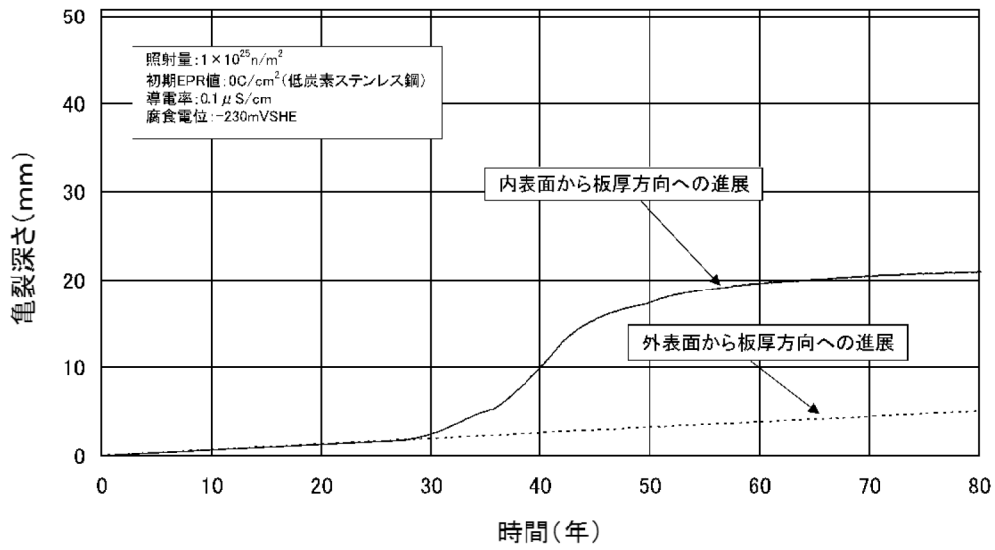


図 C-28(4) 亀裂深さと時間の関係 (II4 継手形状 2)
 (水素注入環境中, 高中性子照射領域)