

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK 補-III-3 改 10
提出年月日	平成 30 年 6 月 21 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)

補足説明資料

平成 30 年 6 月 21 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。

## 目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 評価対象と評価手法	4
(1) 評価対象	4
(2) 評価手法	5
4. 技術評価	6
4.1 炉内構造物の技術評価	6
(1) 健全性評価	6
(2) 現状保全	9
(3) 総合評価	14
(4) 高経年化への対応	14
4.2 制御棒の技術評価	15
(1) 健全性評価	15
(2) 現状保全	16
(3) 総合評価	17
(4) 高経年化への対応	17
5. まとめ	18
(1) 審査基準適合性	18
(2) 保守管理に関する方針として策定する事項	18
別紙 1. 原子炉冷却材の水質の管理値と至近の実績について	24
別紙 2. 炉内構造物の運転開始後 60 年時点での中性子照射量について	26
別紙 3. 上部格子板グリッドプレートに発生する応力について	32
別紙 4. 炉内構造物に関する照射誘起型応力腐食割れ発生可能性の評価について	35
別紙 5. 炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価について	37
別紙 6. 炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価について (追加評価)	49
別紙 7. ウォータージェットピーニング施工による応力腐食割れ抑制効果について	54
別紙 8. 貴金属コーティング施工による応力腐食割れ抑制効果について	65
別紙 9. 制御棒上部ハンドル部で確認されたひび及び応力腐食割れ対策について	69
別紙 10. 原子炉水のトリチウム濃度測定結果について	73

## 別紙

- 別紙 1. 原子炉冷却材の水質の管理値と至近の実績について
- 別紙 2. 炉内構造物の運転開始後 60 年時点での中性子照射量について
- 別紙 3. 上部格子板グリッドプレートに発生する応力について
- 別紙 4. 炉内構造物に関する照射誘起型応力腐食割れ発生可能性の評価について
- 別紙 5. 炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価について
- 別紙 6. 炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価について  
(追加評価)
- 別紙 7. ウォータージェットピーニング施工による応力腐食割れ抑制効果について
- 別紙 8. 貴金属コーティング施工による応力腐食割れ抑制効果について
- 別紙 9. 制御棒上部ハンドル部で確認されたひび及び応力腐食割れ対策について
- 別紙 10. 原子炉水のトリチウム濃度測定結果について



＜炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価について＞

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 周溶接継手を評価対象部位とする。

### 1.1 初期亀裂

H4 周溶接継手は、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 周溶接継手内表面にあるものとして評価する。

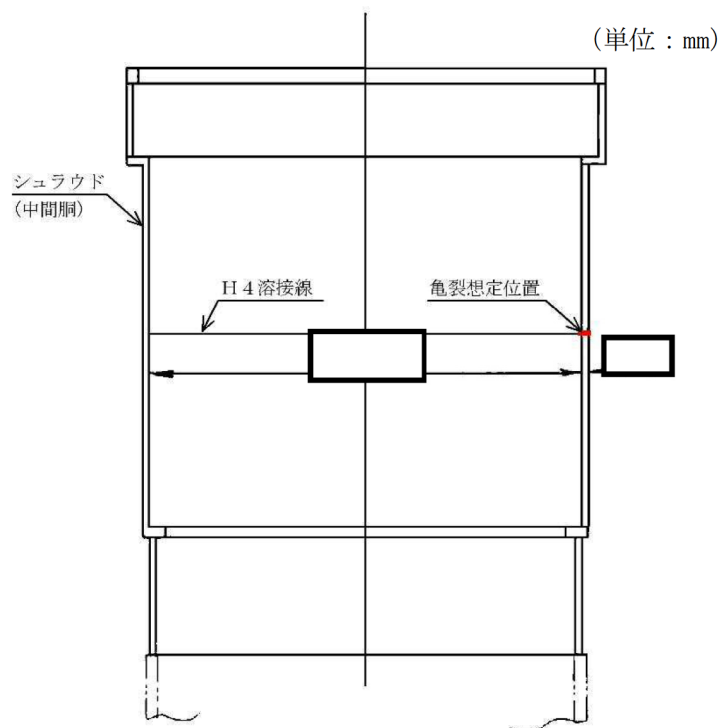


図1 炉心シュラウドの亀裂想定位置

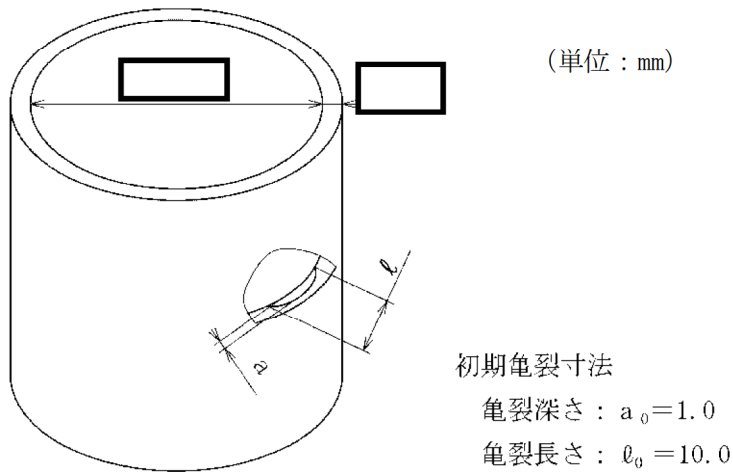


図2 炉心シュラウドの評価モデル (半楕円亀裂)

### 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。

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

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]

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。

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

Y : 運転期間[年]

2. 破壊評価

炉心シュラウド H4 周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 EJB-B-2-2 により、表 1 に示す差圧、自重及び地震荷重を考慮する。

差圧及び自重には、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]	自重 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 周溶接継手	0.070	1.04 × 10 <sup>6</sup>		

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、熱応力については、評価位置が中間胴の一般部であり、通常運転時の発生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 周溶接継手に作用する差圧 P による軸方向応力  $\sigma_P$  は、次式より求める。

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

$$D_o / D_i = \boxed{\phantom{000}} = \boxed{\phantom{000}}$$

$$D_o : \text{炉心シュラウド中間胴の外径} = \boxed{\phantom{000}} + 2 \times \boxed{\phantom{000}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ [mm]}$$

$$D_i : \text{炉心シュラウド中間胴の内径} = \boxed{\phantom{000}} \text{ [mm]}$$

(2) 自重による応力

H4 周溶接継手に作用する自重Wによる軸方向応力  $\sigma_w$  は、次式により求める。

$$\sigma_w = - \frac{W}{A} = - \frac{1.04 \times 10^6}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ [MPa]}$$

A : 炉心シュラウド中間胴の断面積

$$= (\pi/4) \times (\boxed{\phantom{000}} - \boxed{\phantom{000}}) = \boxed{\phantom{000}} \text{ [mm}^2\text{]}$$

(3) 地震荷重による応力

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

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

$$= \frac{\boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}} + \frac{\boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}} \times \frac{\boxed{\phantom{000}}}{2}$$

$$= \boxed{\phantom{000}} \text{ [MPa]}$$

I : 炉内シュラウド中間胴の断面二次モーメント

$$= (\pi/64) \times (\boxed{\phantom{000}} - \boxed{\phantom{000}}) = \boxed{\phantom{000}} \text{ [mm}^4\text{]}$$

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

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_w + \sigma_s = \boxed{\phantom{000}} - \boxed{\phantom{000}} + \boxed{\phantom{000}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ [MPa]}$$

### 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に示す運転期間において，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  $8 \times 10^{24}$  [n/m<sup>2</sup>]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周溶接継手）

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	313.48	156.740			28.7	43.1	43.2
5.24	314.06	157.030			28.8	43.2	
11.81	695.29	347.645			43.1	64.7	
11.82	695.87	347.935			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、今後も技術基準規則に定める基準に適合できると判断する。

#### 4. 炉心シュラウド H4 周溶接継手内面の 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の発生及び進展を考慮した評価において、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 周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 年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 年) 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、今後も技術基準規則に定める基準に適合できると判断している。

ここでは、4 定期検査毎 (約 4.6 年) の目視点検 (MVT-1) により、今後も技術基準規則に定める基準に適合できると判断していることについて、以下に補足する。

##### 4.1 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 周溶接継手は、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 周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える。

##### 4.2 炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した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 ( $9.2 \times 10^{-7}$  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 周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の発生及び進展を考慮した評価では、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) によって今後も技術基準規則に定める基準に適合できると判断している。

以 上



【SCC 事例】福島第二原子力発電所 2号機

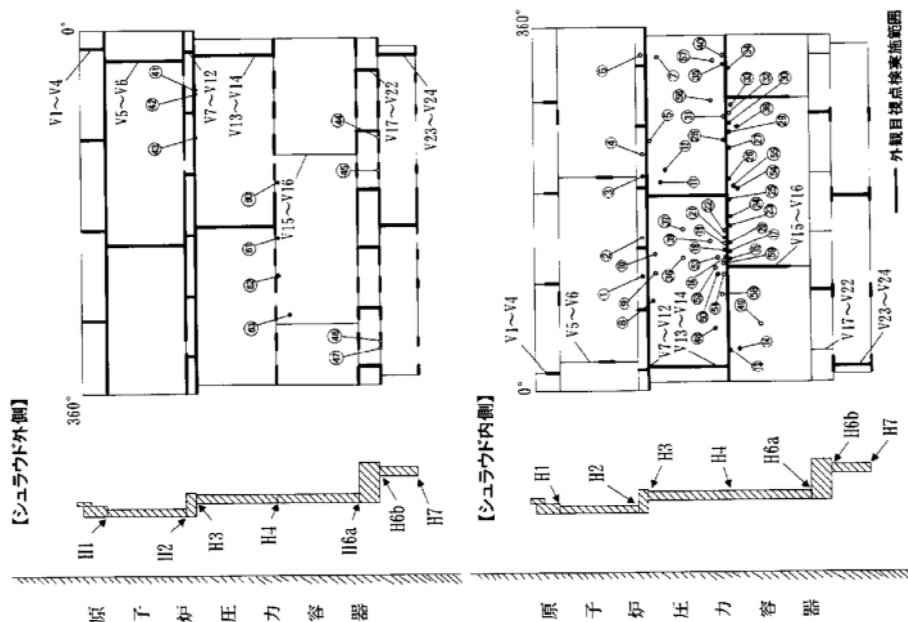
出典：NUCIA ホームページ 報告書番号 2002-東京-M013

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の指摘	インディケーション		みがき後のひびの様相		超音波探傷試験結果	
			有・無 (長さ)	有・無 (長さ)	有・無 (長さ)	有・無 (長さ)		
H3内側	① 113度付近	○	○ (約45mm)	○ (約30mm)	○ (約19mm)	○	○	
	③ 210度付近	○	○ (約40mm)	○ (約20mm)	○ (約9mm)	○	○	
	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10×18mm)	○ (約4mm)	○	○	
H3内側離	⑩ 210度付近	×	○ (約35×35mm)	○ (約10×18mm)	○ (約12mm)	○	○	
	⑩ 210度付近	×	○ (約60×70mm)	○ (約10×25mm)	○ (約4mm)	○	○	
	⑫ 150度付近	×	○ (約20×20mm)	○ (約10×15mm)	抽出されず	○	○	
	⑭ 159度付近	×	○ (約35×35mm)	○ (約25×30mm)	抽出されず	○	○	
	⑦ 328度付近	×	○ (約32mm)	×	—	○	○	
	⑨ 114度付近	×	○ (約10×30mm)	×	—	○	○	
	⑩ 130度付近	×	○ (約15mm, 約50mm)	×	—	○	○	
H4内側	⑬ 25度付近	○	○ (約200×40mm)	○ (約200×20mm)	○ (約19mm)	○	○	
	⑮ 144度付近	○	○ (約155×20mm)	○ (約120×20mm)	○ (約15mm)	○	○	
	⑯ 145度付近	○	○ (約75×20mm)	○ (約75×20mm)	○ (約27mm)	○	○	
	⑰ 147度付近	○	○ (約60×20mm)	○ (約60×15mm)	○ (約14mm)	○	○	
	⑱ 150度付近	○	○ (約130×35mm)	○ (約130×30mm)	○ (約15mm)	○	○	
	⑲ 155度付近	○	○ (約200×50mm)	○ (約200×30mm)	○ (約21mm)	○	○	
	⑲ 156度付近	○	○ (約120×30mm)	○ (約95×10mm)	○ (約20mm)	○	○	
H4内側	⑳ 160度付近	○	○ (約90×30mm)	○ (約80×20mm)	○ (約18mm)	○	○	
	㉑ 168度付近	○	○ (約40×20mm)	○ (約50×20mm)	○ (約14mm)	○	○	
	㉒ 193度付近	○	○ (約65×35mm)	○ (約60×10mm)	○ (約16mm)	○	○	
	㉓	○	○	○	○	○	○	

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		みかき後のひびの検出		超音波探傷試験結果		
			有・無 (長さ)	有・無 (長さ)	有・無 (長さ)	有・無 (長さ)	有・無 (最大深さ)	有・無 (最大深さ)	
H4内側	②6	203度付近	○	○	(約37×35mm)	○	○	(約4mm)	
	②7	245度付近	○	○	(約100×65mm)	○	○	(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25×30mm)	○	○	検出されず
		④3	296度付近	○	○	(約25×35mm)	○	○	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		みかき後のひびの検出		超音波探傷試験結果	
			有・無 (長さ)	有・無 (長さ)	有・無 (長さ)	有・無 (最大深さ)	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19×15mm)	○	○	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
H3外側	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	④1	200度付近	○	○	—	○	○	(約4mm)
	④2	245度付近	○	○	—	○	○	(約5mm)
	④3	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 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の例

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

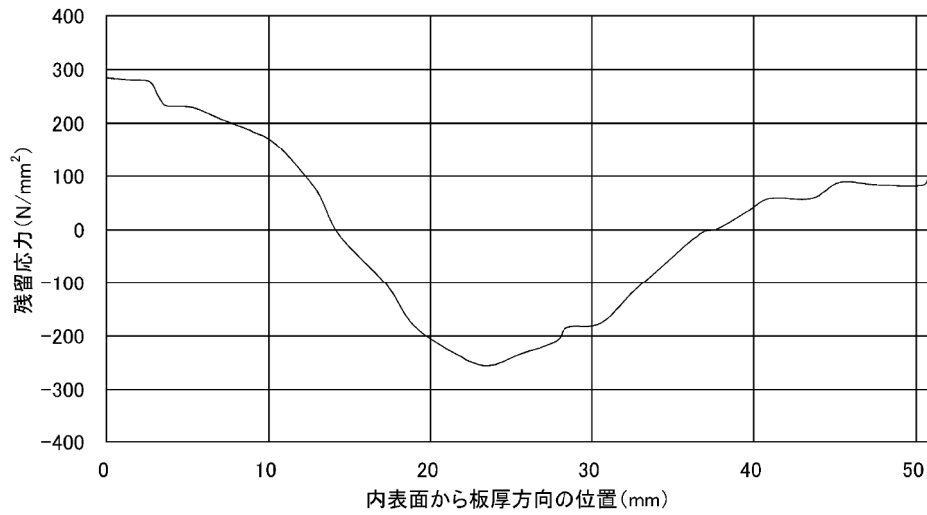
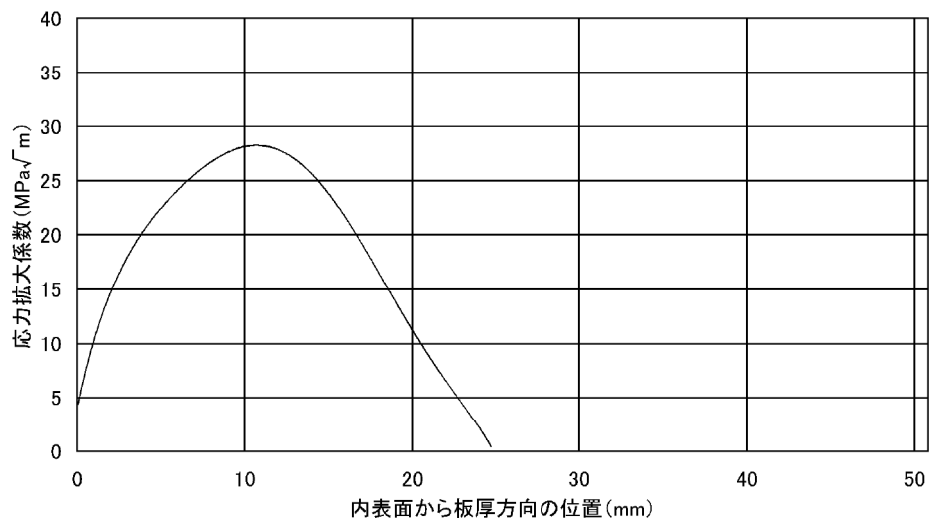


図 C-4 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H4: 継手形状 2)



(1) 内表面から板厚方向の K 値分布

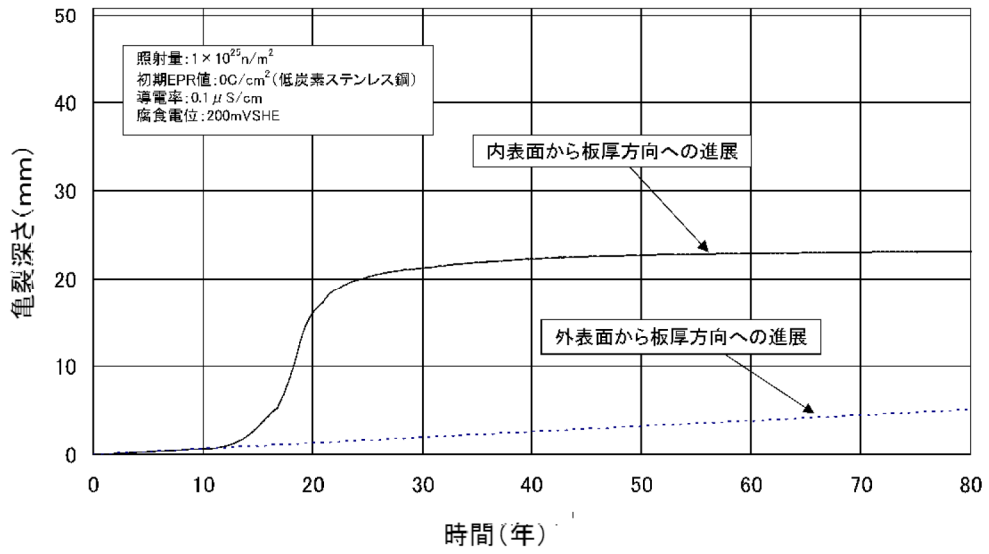


図 C-28(3) 亀裂深さと時間の関係 (II4 継手形状 2)  
 (通常炉内水質環境中, 高中性子照射領域)

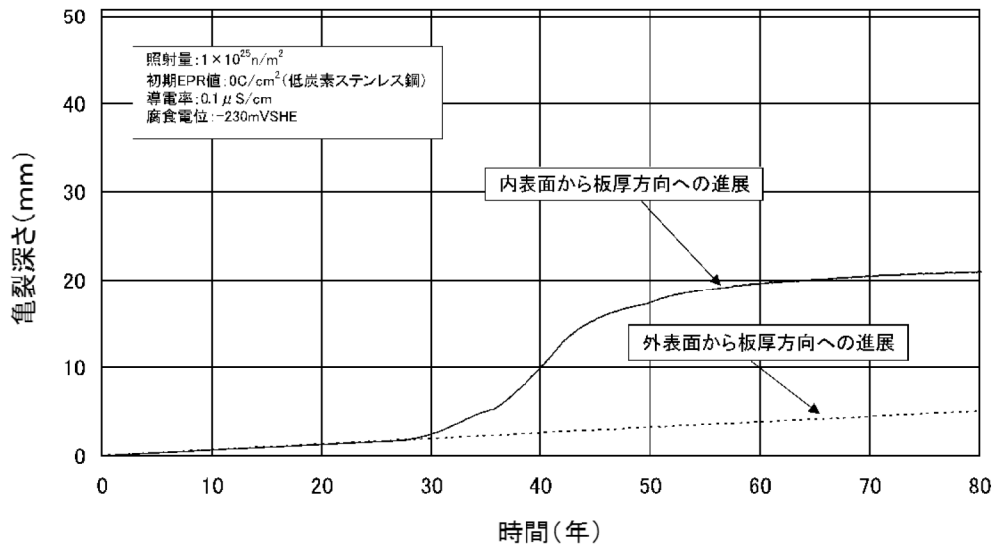


図 C-28(4) 亀裂深さと時間の関係 (II4 継手形状 2)  
 (水素注入環境中, 高中性子照射領域)

## 評価値は確認中

< 炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価について  
(追加評価) >

## 1. 概要

炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価においては、別紙 5 において以下の条件で評価を行った。

- ・破壊評価に考慮する荷重は、亀裂の解釈および維持規格 添付 E-7、添付 EJG-B-2-2 の規定により、差圧、自重及び地震荷重とする。
- ・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」（以下、「亀裂の解釈」という）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。板厚貫通亀裂が周方向にこの速度で進展するものとする。

審査基準の要求事項「照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を前提としても技術基準規則に定める基準に適合すること」については、別紙 5 による評価により確認しているが、ここでは、別の評価手法として、以下の条件で追加評価を行う。

- ・破壊評価に考慮する荷重は、維持規格 添付 E-15 の規定により、差圧、自重及び地震荷重に加え、溶接残留応力を加える。
- ・亀裂進展速度は、別紙 5 と同様に、亀裂の解釈に従い、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。ただし、板厚方向の進展については、溶接残留応力解析の結果から得られた応力拡大係数がゼロとなる深さ以上には進展しないものとし、その深さの半楕円亀裂が周方向に進展していくものとする。（H4 周溶接継手は継手形状が X 開先であり、板厚内部で溶接残留応力が圧縮となって応力拡大係数がゼロとなり、亀裂進展速度がゼロとなることが予想されるため、亀裂進展としてはより現実的な評価となる。）

以下に、その評価手法を示す。

## 2. 評価手法

- ① 溶接残留応力を算出する。
- ② 破壊評価に考慮する荷重は、維持規格 添付 E-15 の規定により、差圧、自重及び地震荷重に加え、溶接残留応力を加える。
- ③ 応力拡大係数を算出し、板厚方向の応力拡大係数がゼロとなる深さを求め、その深さ以上には進展しないものとする。
- ④ 亀裂の解釈に従い、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  $9.2 \times 10^{-7} \text{mm/s} = 30 \text{mm/年}$  を用いて周方向への進展を考慮し、応力拡大係数が破壊靱性値と等しくなる寸法を求める。

⑤ 亀裂進展速度を用いて、求めた寸法に達する期間を算出する。

ただし、半楕円亀裂を想定した評価モデルで求めた表面点の応力拡大係数が、溶接残留応力により大きな値となり破壊靱性値を超えることが想定される場合は、保守的に内表面全周亀裂を想定した評価モデルを用いて応力拡大係数を求め、最深点の応力拡大係数がゼロとなる時点の深さを最大亀裂深さとした極限荷重評価法による評価を行い、地震時に炉心シュラウド H4 周溶接継手に破壊が生じないことを確認する。

### 3. 適用規格・基準

- (1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格(2008年版) JSME S NA1-2008 (「維持規格 2008」)
- (2) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格(JSME S NA1)」(2008年版)に関する技術評価書 平成 21 年 2 月 原子力安全・保安院 独立行政法人 原子力安全基盤機構
- (3) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版) JSME S NA1-2012 (「維持規格 2012」)
- (4) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005年版) <第Ⅱ編 高速炉規格> JSME S NC2-2005

### 4. 関連図書

- (1) 複雑形状部機器配管健全性実証 (IAF) 事業 原子炉圧力容器の異材溶接部に関する高温材料特性データ集, 平成 25 年 6 月, JNES-RE-2012-0024, 独立行政法人 原子力安全基盤機構
- (2) 09 原高報-0012 平成 20 年度 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書 平成 21 年 9 月, 独立行政法人 原子力安全基盤機構
- (3) JANSI-VIP-06-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 (以下, 「ガイドライン」という) 一般社団法人 原子力安全推進協会 炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

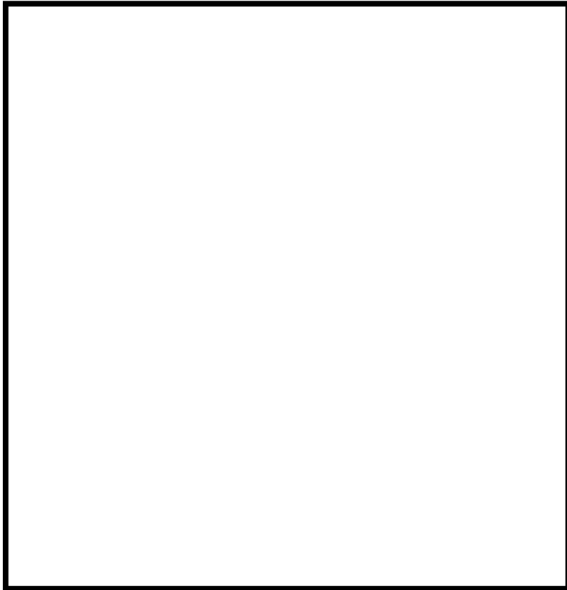
### 5. 評価内容

#### 5.1 溶接残留応力解析

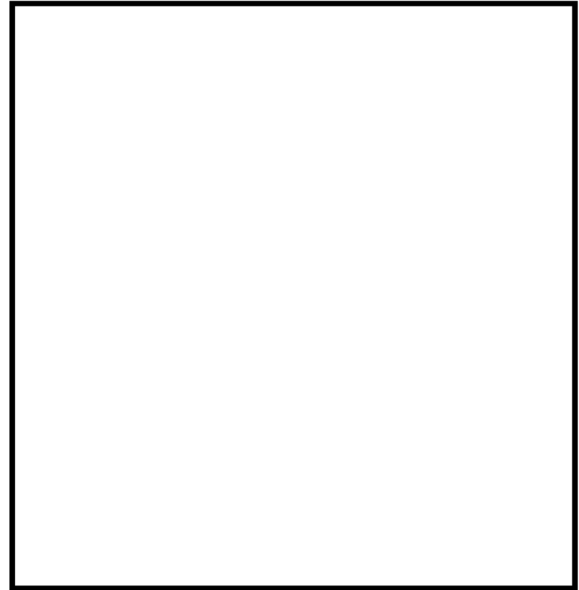
炉心シュラウド H4 周溶接継手の溶接残留応力は、下記のとおり設定した解析条件にて、FEMによる温度分布解析及び熱弾塑性解析により求めた。

- |               |                            |
|---------------|----------------------------|
| (1) 開先形状      | : 建設時の製作図より設定              |
| (2) 溶接パス数・入熱量 | : 建設時の溶接記録より設定             |
| (3) 溶接順序      | : 当時の溶接施工法より推定して設定         |
| (4) 物性値       | : 適用規格・基準(4)及び関連図書(1)により設定 |

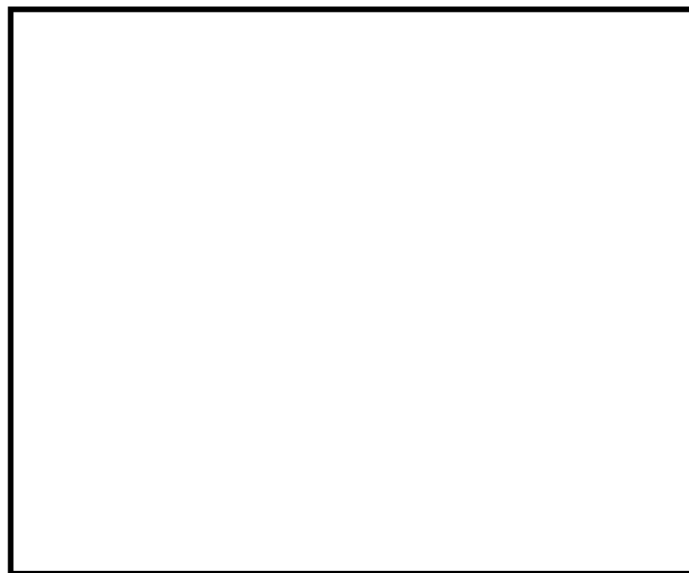
炉心シュラウド H4 周溶接継手の溶接残留応力解析モデル及び解析結果を図 1 に示す。



(a) 開先形状 (単位 : [mm])



(b) 解析モデル (メッシュ図)



(c) 軸方向の溶接残留応力コンター図 (単位 : [MPa])

図1 炉心シュラウド H4 周溶接継手の溶接残留応力解析モデル及び解析結果



## 5.2 考慮する荷重及び応力

### 5.2.1 考慮する荷重

炉心シュラウド H4 周溶接継手に作用する荷重は、表 1 に示す差圧、自重及び地震荷重（地震時のみ）を考慮する。

差圧及び自重には、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、基準地震動 Ss8 波に 1.5 倍の裕度を考慮した荷重を用いる。

表 1 考慮する荷重

評価部位	差圧 P [MPa]	自重 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 周溶接継手				

### 5.2.2 考慮する応力

考慮する応力を表 2 に示す。

表 2 考慮する応力

	差圧 による応力	自重 による応力	溶接残留応力	地震荷重 による応力
運転時	○	○	○	×
地震時	○	○	○	○

記号の説明 ○：考慮する／×：考慮しない

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少であるため考慮せず、地震荷重によるせん断力は、評価に用いないため考慮しない。

#### (1) 差圧による応力

H4 周溶接継手に作用する差圧 P による軸方向応力  $\sigma_P$  は、次式により求める。

$$\sigma_P = \frac{1}{Y^2 - 1} P = \text{[MPa]}$$

Y :  $D_o / D_i = \text{[mm]}$   
 $D_o$  : 炉心シュラウド中間胴の外径 =  $\text{[mm]}$   
 $D_i$  : 炉心シュラウド中間胴の内径 =  $\text{[mm]}$   
P : H4 周溶接継手に作用する差圧 =  $\text{[MPa]}$  (表 1 参照)





$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = e^{-0.19\phi} = \boxed{\phantom{00}}$$

$\sigma$  : 溶接残留応力 (緩和後) [MPa]

$\sigma_0$  : 溶接残留応力 (緩和前) [MPa]

$\phi$  : 中性子照射量 =  $\boxed{\phantom{00}}$  [dpa]

(保守的に、直近の炉心シュラウド H4 周溶接継手内面の点検時点の値を用いるものとし、以降の運転期間の中性子照射による緩和は考慮しない)

ここで、直近の炉心シュラウド H4 周溶接継手内面の点検を実施した、第 24 回定期検査時点の実効運転期間及び中性子照射量を、次式により求める。

$$Y = \left( \boxed{\phantom{00}} \text{ [GWD]} \times \boxed{\phantom{00}} \text{ [MWD} \cdot \text{GWD}^{-1}] \right) \div \left( \boxed{\phantom{00}} \text{ [MW]} \times 365 \text{ [日]} \right) \\ = \boxed{\phantom{00}} \text{ [EFPY]}$$

$$\phi = \left( Y \text{ [EFPY]} \times 365 \text{ [日]} \times 24 \text{ [時間]} \times 3600 \text{ [秒]} \times \text{中性子束} \text{ [m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \times \text{補正係数} \right) \\ \div \left( \boxed{\phantom{00}} \text{ [dpa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}] \right) \\ = \left\{ \boxed{\phantom{00}} \times 365 \times 24 \times 3,600 \times \boxed{\phantom{00}} \right\} \div \boxed{\phantom{00}} \\ = \boxed{\phantom{00}} \text{ [dpa]}$$

中性子束※ :  $\boxed{\phantom{00}}$  [m<sup>-2</sup>・s<sup>-1</sup>]

補正係数 :  $\boxed{\phantom{00}}$

※ : 本評価では、炉心シュラウド H4 周溶接継手の内表面に初期亀裂を想定しているが、保守的に、内面に対して中性子照射量の少ない外面での中性子束を用いる。

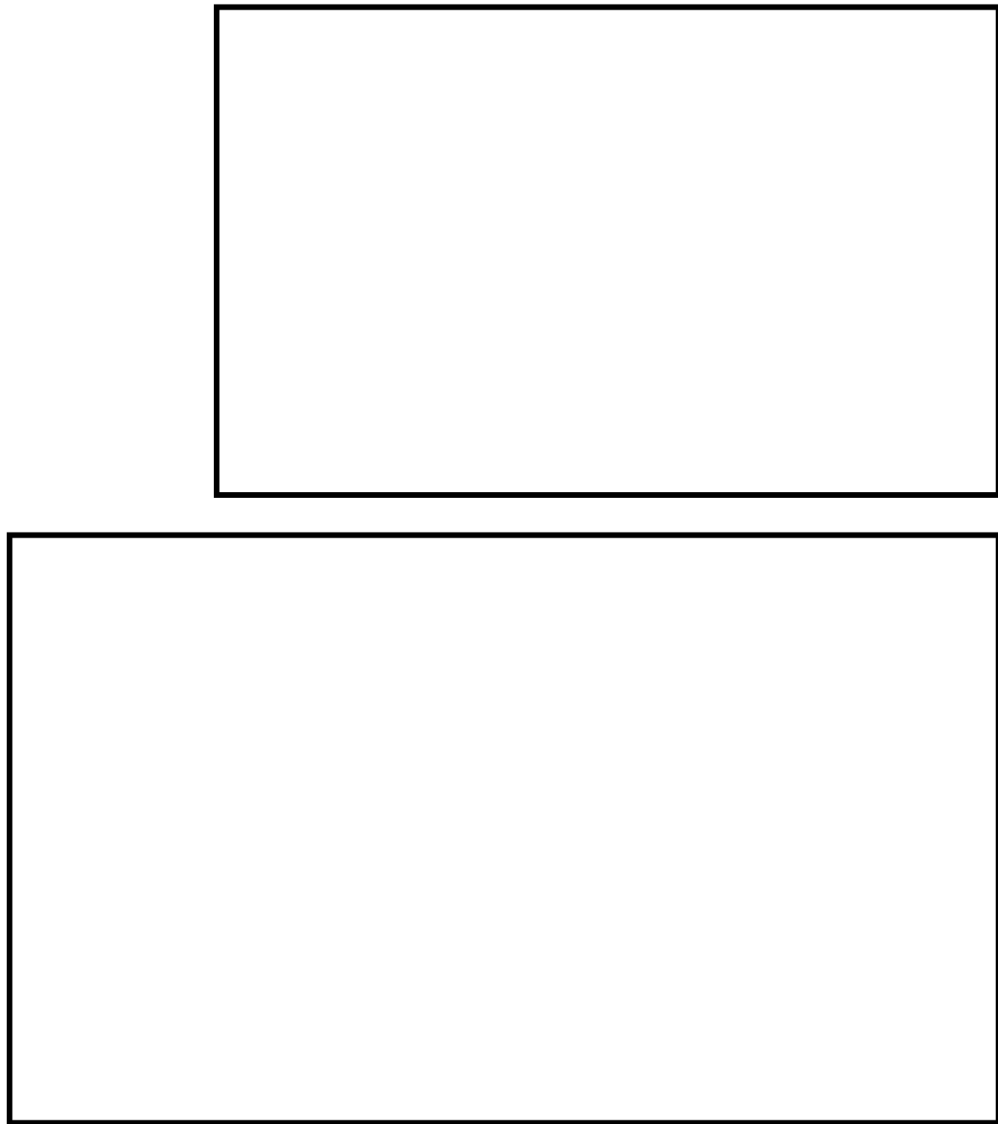


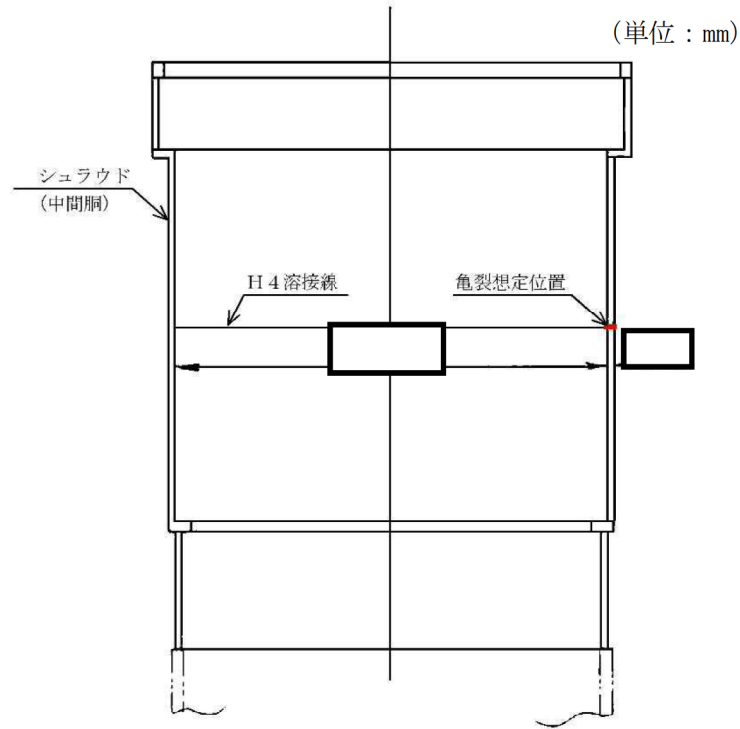
図 2 軸方向の溶接残留応力分布

### 5.3 半楕円亀裂を想定した評価

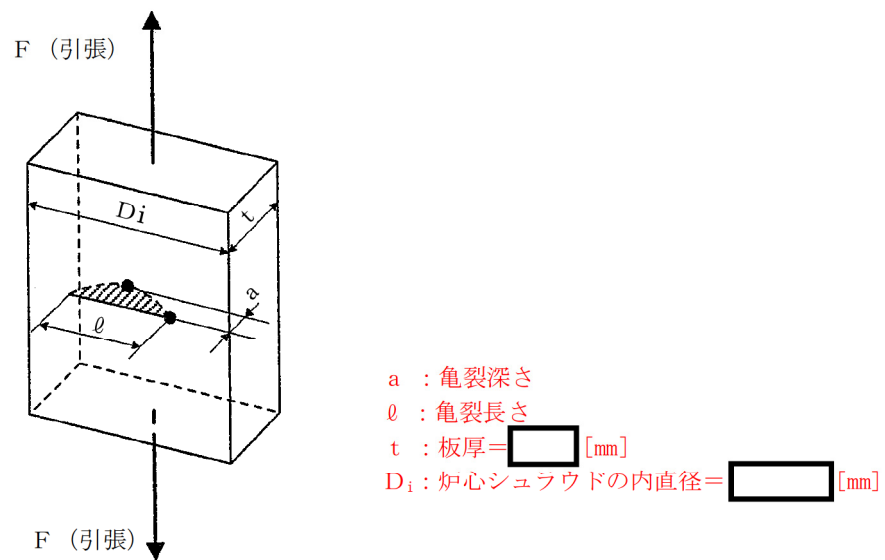
#### 5.3.1 亀裂想定位置及び評価モデル

炉心シュラウドH4周溶接継手の内表面に初期亀裂（深さ  $a_0=1.0$  [mm]，長さ  $\ell_0=10.0$  [mm]）を想定し，任意の一定速度にて亀裂を進展させたときの応力拡大係数を求める。

炉心シュラウドの半楕円亀裂想定位置及び評価モデルを図3に示す。



(a) 炉心シュラウドの亀裂想定位置



(b) 炉心シュラウドの評価モデル（平板モデル）

図3 炉心シュラウドの半楕円亀裂想定位置及び評価モデル

### 5.3.2 応力拡大係数の算出式

応力拡大係数の算出式には、ガイドラインにおける評価と同様に、以下に示す平板の表面亀裂の応力拡大係数を求める Wang の影響関数法<sup>※</sup>に基づく式を用いる（図 3 参照）。

なお、炉心シュラウドは、板厚に対する内半径の比が大きく（内半径／板厚＝），平板として模擬することは妥当である。

$$K = \left( \sum_{n=1}^4 S_n S_{in} \right) \times \sqrt{\pi a}$$

K : 応力拡大係数 [MPa√m]

S<sub>n</sub> : 亀裂深さ方向に n 次の応力分布 σ(x) が作用する場合の無次元化応力拡大係数

S<sub>in</sub> : 亀裂面に垂直（炉心シュラウド軸方向）に作用する応力分布の n 次の係数 [MPa]

a : 亀裂深さ [m]

※ : 出典 “Weight Function Estimation of SIF for Mode I Part-Elliptical Crack under Arbitrary Load” , G. S. Wang, Engineering Fracture Mechanics Vol. 41, No. 5, pp. 659-684, (1992).

### 5.3.3 評価結果

5.3.2 項に示す応力拡大係数の算出式により求めた最深点の応力拡大係数は、ガイドラインに示される評価結果と同様に、板厚中央近傍（最大亀裂深さ  [mm]）にて、ゼロとなった。

ただし、表面点の応力拡大係数が、内表面の高い溶接残留応力（約  [MPa]，緩和考慮）により大きな値となり、破壊靱性値を超えることが想定されるため、保守的に内表面全周亀裂を想定した評価を実施する。

## 5.4 内表面全周亀裂を想定した評価

### 5.4.1 評価モデル

炉心シュラウドH4周溶接継手に内表面全周亀裂（初期亀裂深さ  $a_0=1.0$  [mm]）を想定し、任意の一定速度にて亀裂を進展させたときの応力拡大係数を求める。

炉心シュラウドの評価モデル（円筒モデル）を図4に示す。

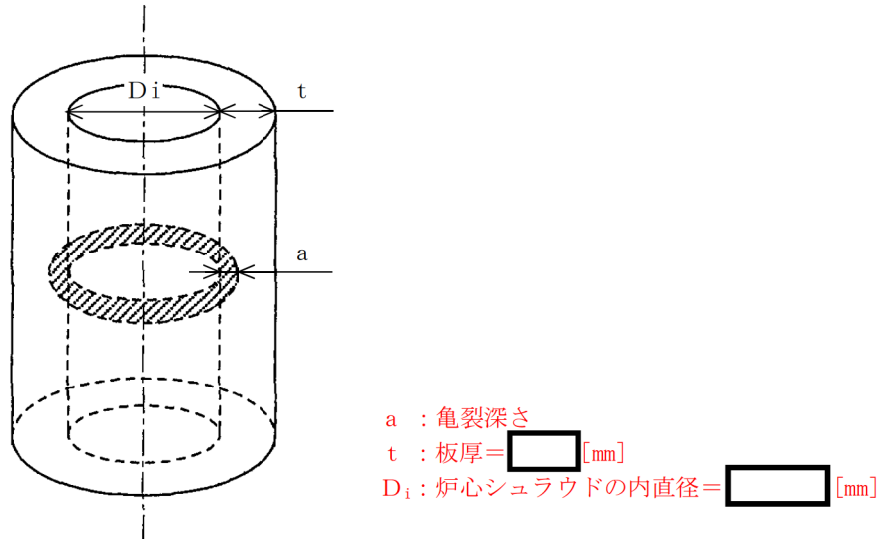


図4 評価モデル（円筒モデル（円筒内表面全周亀裂））

### 5.4.2 応力拡大係数の算出

円筒内表面全周亀裂の応力拡大係数は、維持規格 2012 添付 E-5 5.3(4)項に示される評価式のうち、評価に用いない係数  $\sigma_{bg}$  及び  $G_{bg}$ （断面曲げ応力及びその補正係数）を除いた次式により求める。

$$K = \left[ (\sigma_0 + \sigma_p) G_0 + \sigma_1 G_1 \left( \frac{a}{t} \right) + \sigma_2 G_2 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + \sigma_3 G_3 \left( \frac{a}{t} \right)^3 + \sigma_4 G_4 \left( \frac{a}{t} \right)^4 \right] \sqrt{\pi a}$$

a : 亀裂深さ [m]

t : 炉心シュラウドの板厚 =  [m]

$\sigma_0 \sim \sigma_p$  : 板厚方向の応力分布を四次多項式（板厚で規格化）で与えたときの係数

$\sigma_0 \sim \sigma_p$  : ただし、 $\sigma_p$  は円筒内表面の欠陥に作用する膜応力

$G_0 \sim G_4$  : 管厚比（内半径/板厚）及び欠陥深さ（亀裂深さ/板厚）から決定される補正係数

応力拡大係数の算出式により求めた最深点の応力拡大係数は、半楕円亀裂を想定した評価と同様に、板厚中央近傍でゼロとなり、その時点での最大深さは  [mm] であった。

### 5.4.3 極限荷重評価法による評価

応力拡大係数がゼロとなる時点の最大深さ  [mm] を最大亀裂深さとし、炉心シュラウド H4 周溶接継手の残存部における正味応力が流動応力より小さい場合は、破壊が生じないと考える。

炉心シュラウド H4 周溶接継手の残存部に生じる地震時の正味応力及び流動応力は、次式により求める。

また、流動応力については、維持規格 2008 添付 E-15 に示される許容状態 C 及び D に対する安全率 1.5 を考慮する。

#### (1) 差圧による応力

H4 周溶接継手に作用する差圧 P による軸方向応力  $\sigma_P$  は、次式により求める。

$$\sigma_P = \frac{1}{Y^2 - 1} P = \text{} \text{ [MPa]}$$

$$Y : D_o / D_i = \text{}$$

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

$$D_i : \text{H4 周溶接継手の最大亀裂深さを考慮した内径} = \text{} \text{ [mm]}$$

$$P : \text{H4 周溶接継手に作用する差圧} = \text{} \text{ [MPa]} \text{ (表 1 参照)}$$

#### (2) 自重による応力

H4 周溶接継手に作用する自重 W による軸方向応力  $\sigma_w$  は、次式により求める。

$$\sigma_w = -\frac{W}{A} = \text{} \text{ [MPa]}$$

$$W : \text{H4 周溶接継手に作用する自重} = \text{} \text{ [N]} \text{ (表 1 参照)}$$

$$A : \text{H4 周溶接継手の最大亀裂深さを考慮した断面積} \\ = \text{} \text{ [mm}^2\text{]}$$

(3) 地震荷重による応力

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

$$\sigma_s = \frac{V}{A} + \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2} = \boxed{\phantom{000000}} \text{ [MPa]}$$

V : H4 周溶接継手に作用する地震荷重 (軸力) =  $\boxed{\phantom{0000}}$  [kN] (表 1 参照)

M : H4 周溶接継手に作用する地震荷重 (モーメント) =  $\boxed{\phantom{0000}}$  [kN・m] (表 1 参照)

I : H4 周溶接継手の最大亀裂深さを考慮した断面二次モーメント

$$= \boxed{\phantom{0000000000}} \text{ [mm}^4\text{]}$$

(4) 正味応力

H4 周溶接継手に生じる正味応力  $\sigma$  は、(1)～(3)の合計として、次式により求める。

$$\sigma = \boxed{\phantom{000000}} \text{ [MPa]}$$

(5) 流動応力

流動応力  $\sigma_f$  は、安全率 1.5 を考慮して、次式により求める。

$$\sigma_f = (1/1.5) \times 2.7 \times S_m = \boxed{\phantom{0000}} \text{ [MPa]}$$

$S_m$  : 運転時の温度 ( $\boxed{\phantom{0000}}$  °C) における SUS304L の設計応力強さ =  $\boxed{\phantom{0000}}$  [MPa]

以上より、正味応力 ( $\boxed{\phantom{0000}}$  [MPa]) は、安全率を考慮した流動応力 ( $\boxed{\phantom{0000}}$  [MPa]) より小さく、最大亀裂を想定した場合でも、炉心シュラウド H4 周溶接継手において破壊が生じないことを確認した。