

## 疲労調査結果

### 1. 目的

通常運転中の溶接部（H6 a外）及び溶接部（H7内）における，高サイクル疲労及び低サイクル疲労の影響を調査した。

### 2. 高サイクル疲労

過去（平成14年8月）に柏崎刈羽3号機で同様の事象が発生した時の報告書によれば，変動応力<sup>\*1</sup>は約 $1\text{ N/mm}^2$  p-p以下であり，この値は繰返しピーク応力強さ<sup>\*2</sup>約 $9.5\text{ N/mm}^2$ <sup>\*3</sup>に比べ十分小さいことが報告されている。

柏崎刈羽3号機の炉心シュラウドは浜岡4号機と構造は同じであり，炉心シュラウドの変動応力は同程度であると考えられることから，ひび割れの発生原因に寄与しているとは考えられない。

\*1：引張から圧縮または0から引張など交互に値が変動する応力

\*2：変動する応力により発生する疲労破壊の許容限界を与える応力

\*3：告示501号別図第2許容繰返し回数 $=10^{11}$ に相当する許容繰返しピーク応力強さ

### 3. 低サイクル疲労

#### 3.1 溶接部（H6 a外）の低サイクル疲労

浜岡4号機建設時の工事計画認可申請書添付の応力計算書において，疲れ解析により求められた繰返しピーク応力強さ $14.2\text{ N/mm}^2$  ( $14.5\text{ kg/mm}^2$ )が告示501号に定められているステンレス鋼の設計疲労線図における $10^6$ 回に対する繰返しピーク応力強さ $17.8\text{ N/mm}^2$  ( $18.2\text{ kg/mm}^2$ )以下となることから，重要なサイクルは0回と評価されている。

従って，疲れ累積係数は0.000となり，低サイクル疲労がひび割れの発生原因に寄与しているとは考えられない。

#### 3.2 溶接部（H7内）の低サイクル疲労

浜岡4号機建設時の工事計画認可申請書添付のシュラウドサポートの応力計算書において，溶接部（H7内）位置の評価点における疲れ累積係数は0.001と評価されており，許容値以下であることが確認されている。従って，低サイクル疲労がひび割れの発生原因に寄与しているとは考えられない。

以上

## 中性子照射量について

## 1 . 目的

ひび割れが確認された溶接部 ( H 6 a 外 ) 及び溶接部 ( H 7 内 ) について , 中性子照射量を算出し照射誘起型応力腐食割れ ( I A S C C ) 発生の可能性を確認する。また , 5 年後においても溶接部 ( H 6 a 外 ) 及び溶接部 ( H 7 内 ) の中性子照射量が材料の延性低下を考慮すべき中性子照射量 (  $3 . 0 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  ) を下回っていることを確認する。

## 2 . 確認結果

浜岡 4 号機の定格出力運転時間と , 解析により求めた溶接部 ( H 6 a 外 ) 及び溶接部 ( H 7 内 ) 近傍の高速中性子束から , 中性子照射量を算出すると , 以下となる。

溶接部 ( H 6 a 外 ) 近傍の中性子照射量

< 現在 >

$$\begin{aligned} & ( 2998.907 \text{ 日} \times 24 \text{ 時間} \times 60 \text{ 分} \times 60 \text{ 秒} ) \times 3.3 \times 10^9 \text{ n/sec} \cdot \text{cm}^2 \\ & = 8.6 \times 10^{21} \text{ n/m}^2 \end{aligned}$$

< 5 年後 \* >

$$\begin{aligned} & ( 4458.907 \text{ 日} \times 24 \text{ 時間} \times 60 \text{ 分} \times 60 \text{ 秒} ) \times 3.3 \times 10^9 \text{ n/sec} \cdot \text{cm}^2 \\ & = 1.3 \times 10^{22} \text{ n/m}^2 \end{aligned}$$

溶接部 ( H 7 内 ) 近傍の中性子照射量

< 現在 >

$$\begin{aligned} & ( 2998.907 \text{ 日} \times 24 \text{ 時間} \times 60 \text{ 分} \times 60 \text{ 秒} ) \times 1.0 \times 10^7 \text{ n/sec} \cdot \text{cm}^2 \\ & = 2.6 \times 10^{19} \text{ n/m}^2 \end{aligned}$$

< 5 年後 \* >

$$\begin{aligned} & ( 4458.907 \text{ 日} \times 24 \text{ 時間} \times 60 \text{ 分} \times 60 \text{ 秒} ) \times 1.0 \times 10^7 \text{ n/sec} \cdot \text{cm}^2 \\ & = 3.9 \times 10^{19} \text{ n/m}^2 \end{aligned}$$

当該部の中性子照射量は , 5 年後 \* においても図 1 に示される I A S C C が発生すると評価されている約  $1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  に比べ十分少ない照射量であり , また , 材料の延性低下を考慮すべき中性子照射量 (  $3 . 0 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  ) を下回っていることを確認した。

\* : 実運転時間は 4 年 ( プラント稼働率 8 0 % を仮定 )

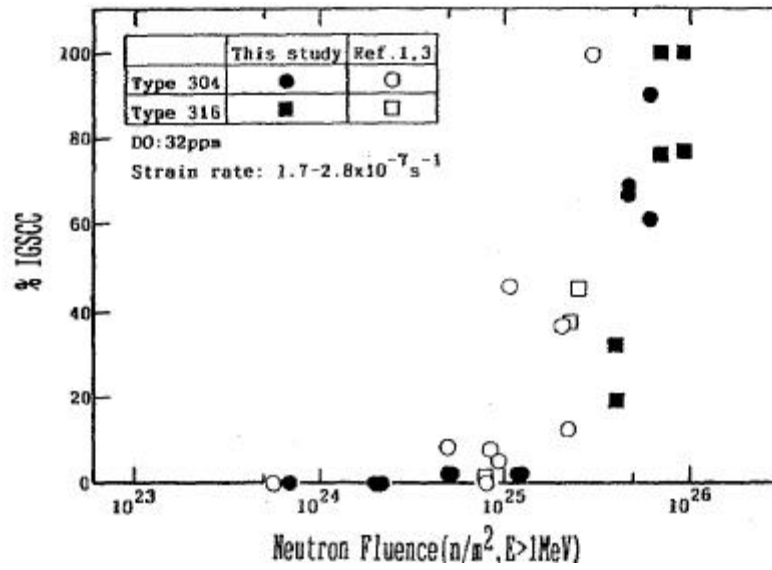
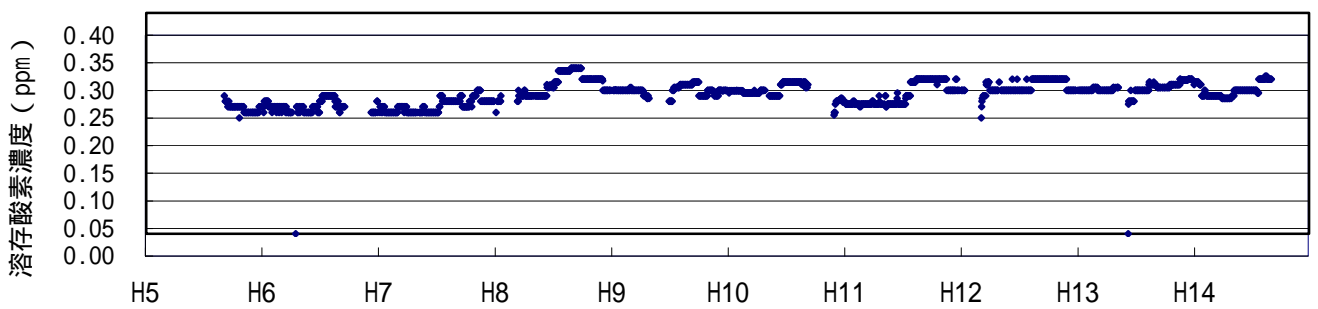
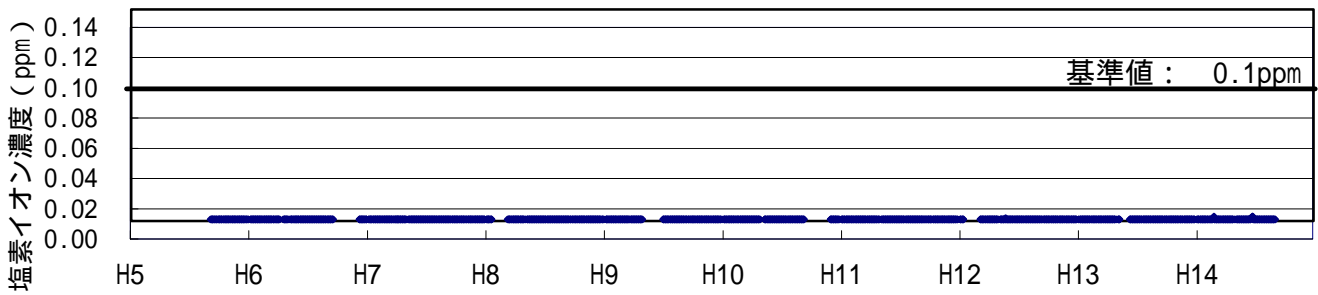
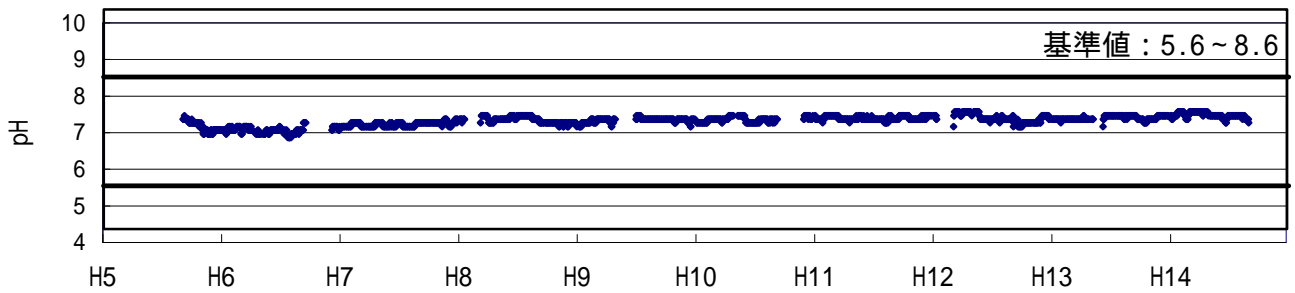
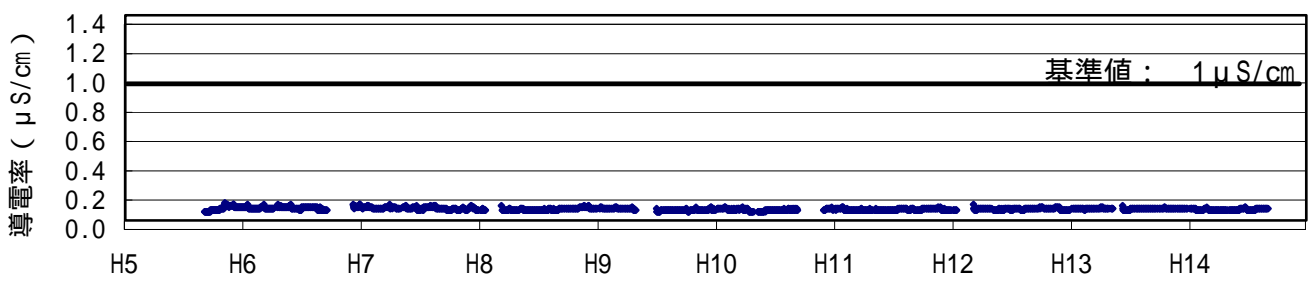
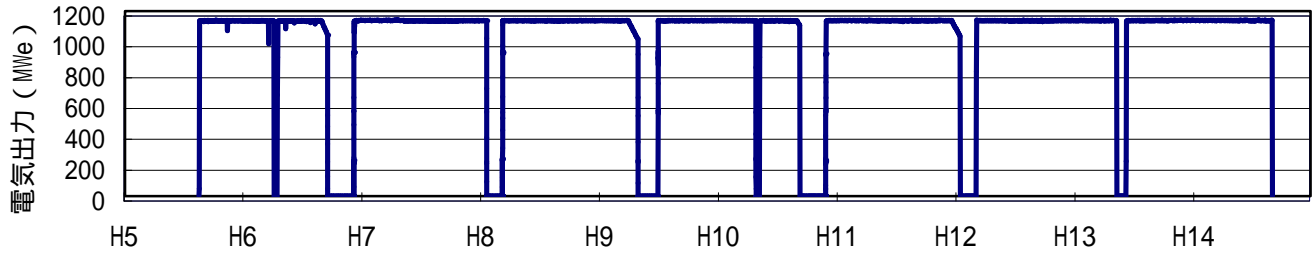


図1 中性子照射したオーステナイト系ステンレス鋼のIGSCC 破面率と照射量の関係

M.Kodama, S.Nishimura, J.Morisawa, S.Shima, S.Suzuki, M.Yamamoto  
 "EFFECTS OF FLUENCE AND DISSOLVED OXYGEN ON IASCC IN AUSTENITIC STAINLESS STEELS"  
 (The 5th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System-  
 Water Reactors, NACE(1991)948)

原子炉水の水質調査結果



## 残留応力評価

### 1. 目的

溶接部 (H6 a 外) 及び溶接部 (H7 内) について溶接施工後の残留応力を有限要素法により推定する。

### 2. 解析条件

解析コード：FEM汎用解析コードABAQUS\*

解析方法：軸対称非定常温度解析及び弾塑性応力解析

\*：ABAQUS

- ・米国 H.K.S(Hibbit.Karlsson&Sorensen)社が作成した有限要素法による汎用非弾性解析計算コードである。
- ・弾塑性，クリープ，大変形，接触，座屈等非線形現象の解析を行うことができる。
- ・汎用コードであり，数々の実績がある。

### 3. 解析手順

溶接金属を実際に行われた溶接施工手順通りに成層する解析モデルを作成する。まず，溶接金属の各層について，溶接時入熱をもとに温度解析を実施し，温度履歴を求める。次に，この温度履歴に基づいて冷却過程で生ずる残留応力の分布を求める。これを初層から最終層まで繰り返して実施し，最終的な残留応力分布を求める。解析フローを図1に示す。

### 4. 解析結果

ひび割れが発見された溶接部 (H6 a 外) 近傍 (シュラウド下部リング側) 及び溶接部 (H7 内) 近傍 (シュラウドサポートリング側及び下部胴側) の残留応力分布を算出した。シュラウド下部リング表面の軸方向残留応力分布を図2に，シュラウドサポートリング表面及び下部胴表面の軸方向残留応力分布を図3に示す。

また，下部リングの肉厚方向 (H6 a 溶接止端部から 4 mm，8 mm，12 mm の位置) の軸方向残留応力分布を図4に，シュラウドサポートリングの肉厚方向 (H7 a 及び H7 b 溶接止端部から 4 mm，10 mm，20 mm の位置) の軸方向残留応力分布を図5に示す。

## 5. 考察

解析の結果，シュラウド下部リングの外表面の溶接部（H6 a 外）近傍及びシュラウドサポートリングの内表面の溶接部（H7 内）近傍には，それぞれ 300 MPa 程度の引張応力が発生し，下部胴の内表面にも 300 MPa 程度の引張応力が発生していると推定した。

また，肉厚方向の軸方向残留応力分布は，シュラウド下部リング表面及びシュラウドサポートリング表面で最大となり，内部に行くに従って，引張から圧縮に転じ，再び引張応力になることがわかった。

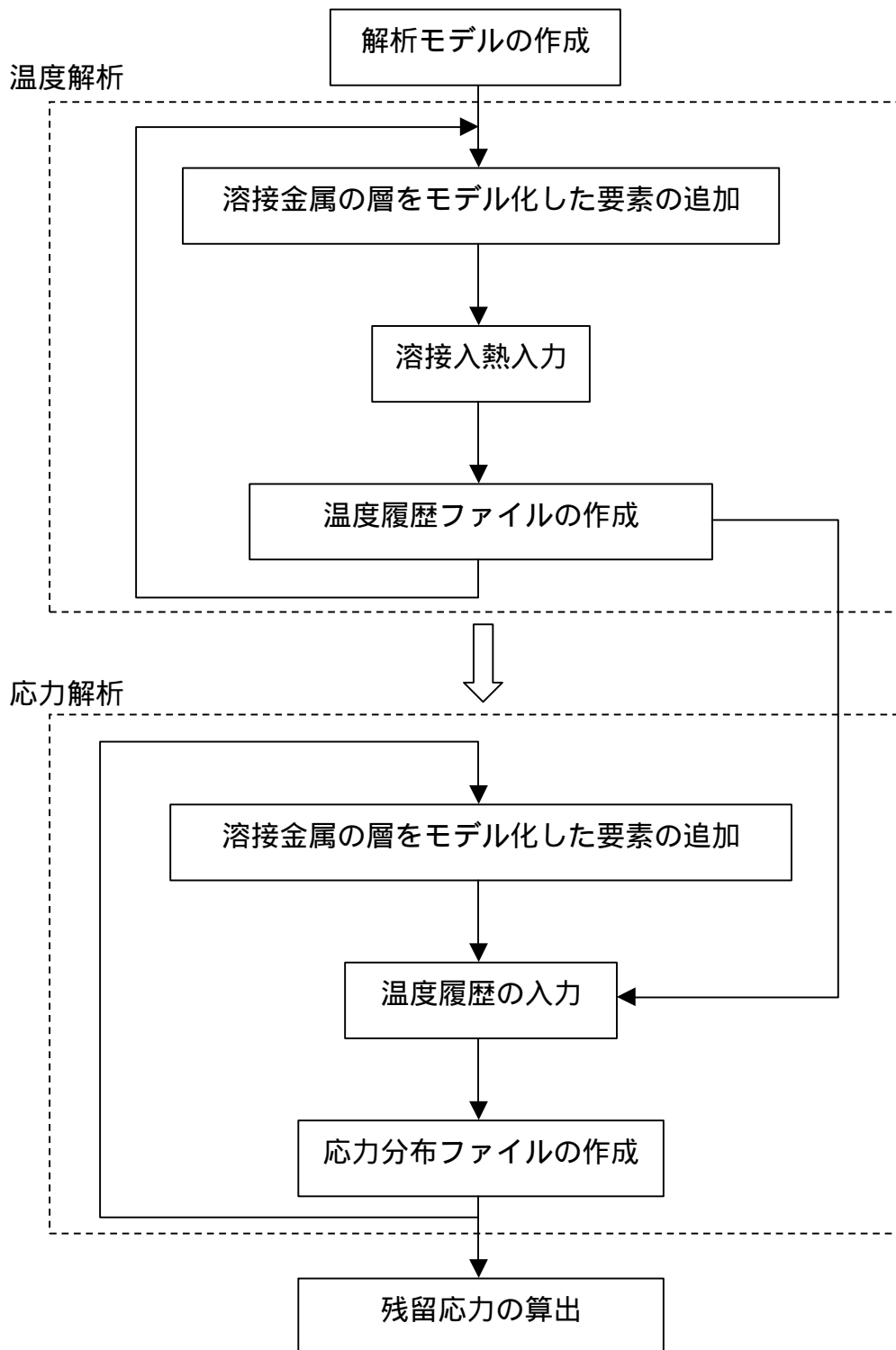


図 1 残留応力解析フロー

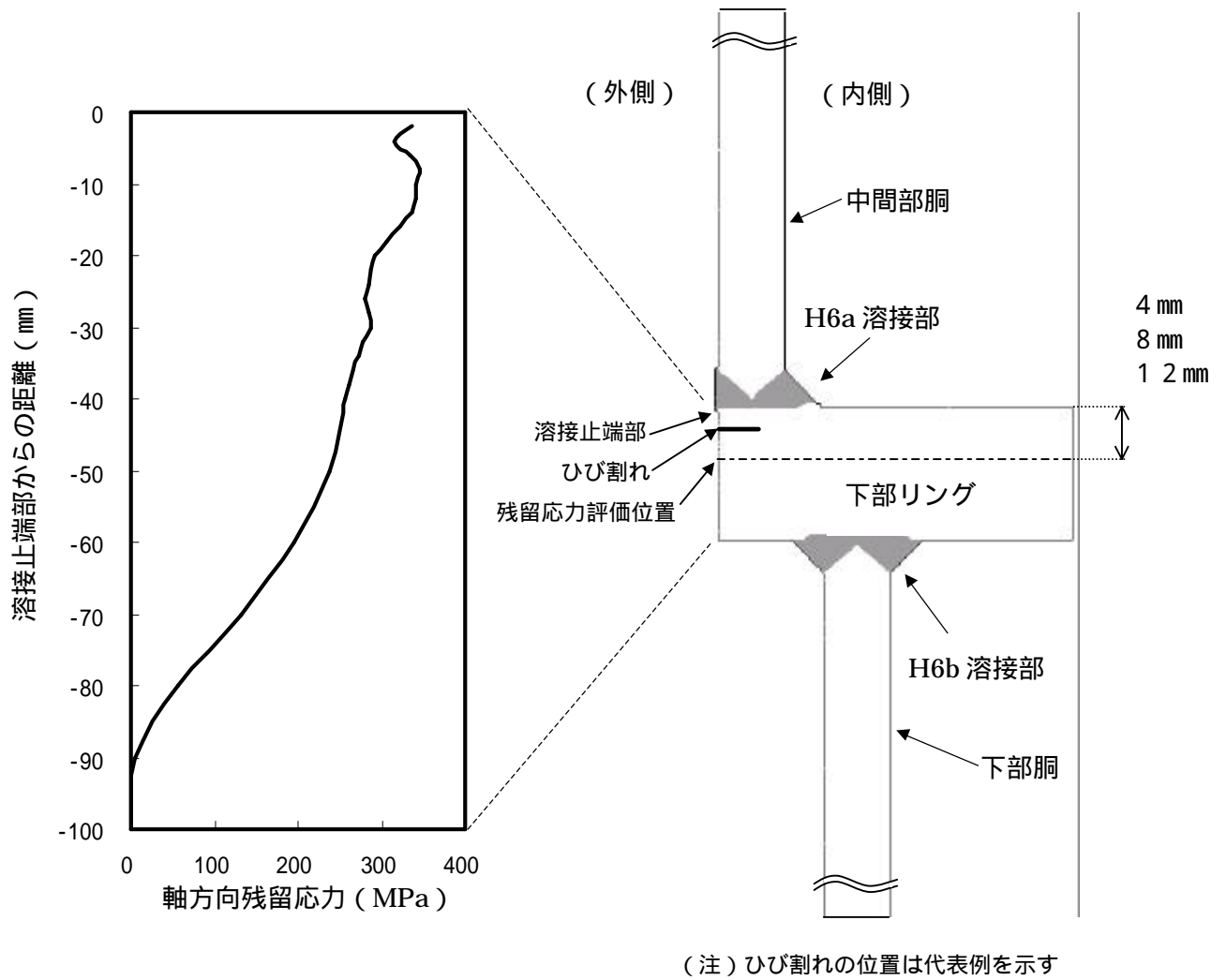


図 2 シュラウド下部リング外表面における軸方向残留応力の分布

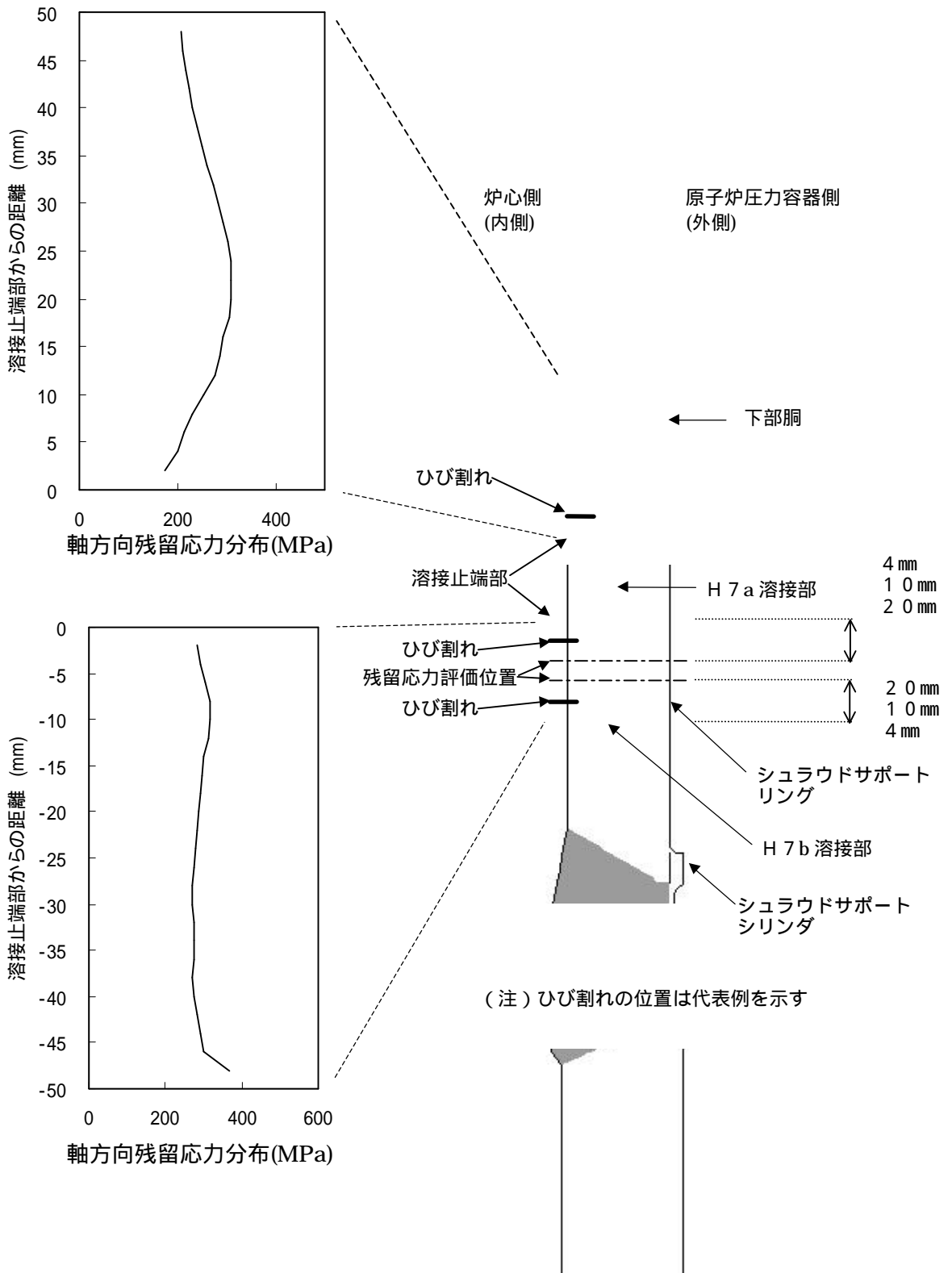


図3 シュラウドサポートリング内表面及び下部胴内表面における軸方向残留応力の分布

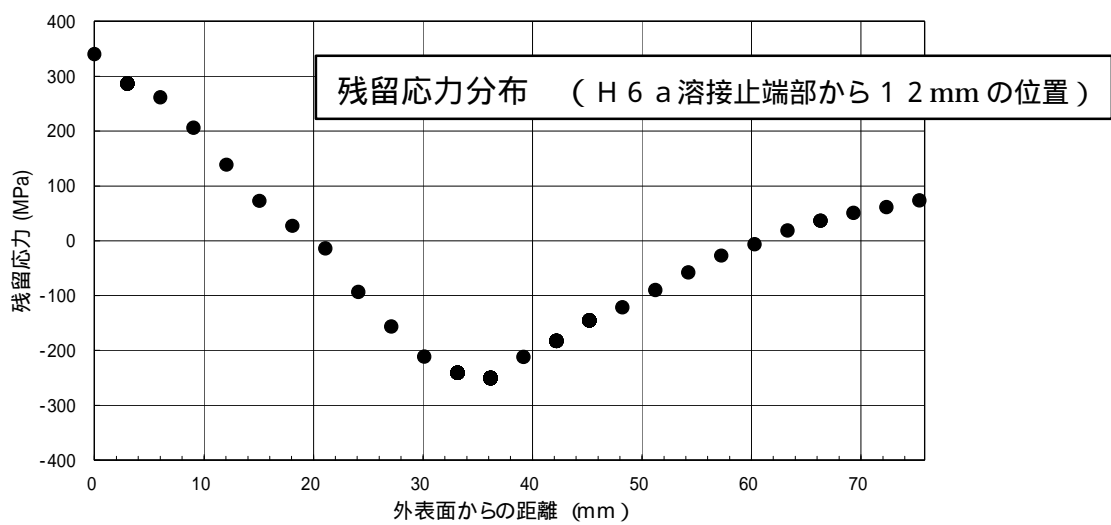
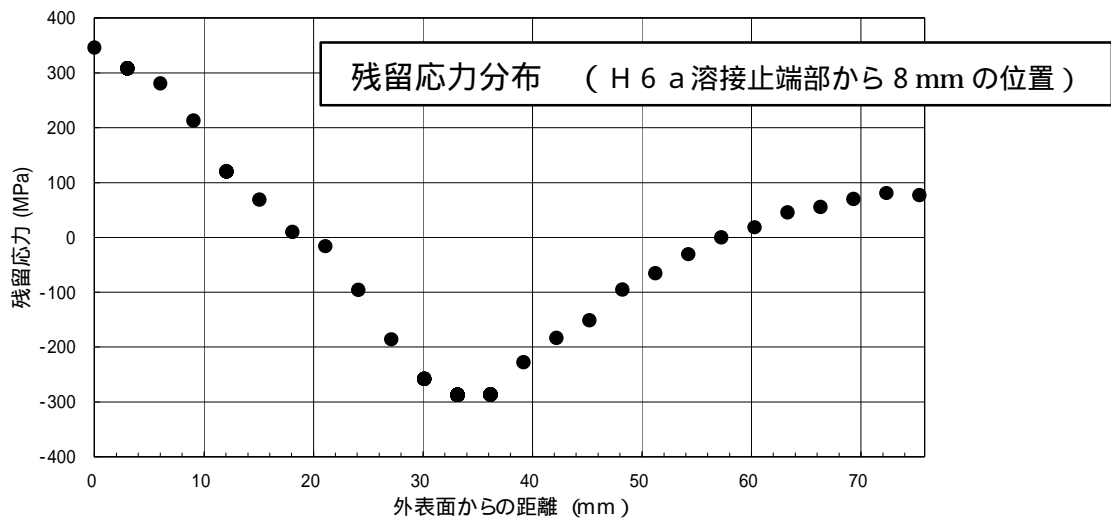
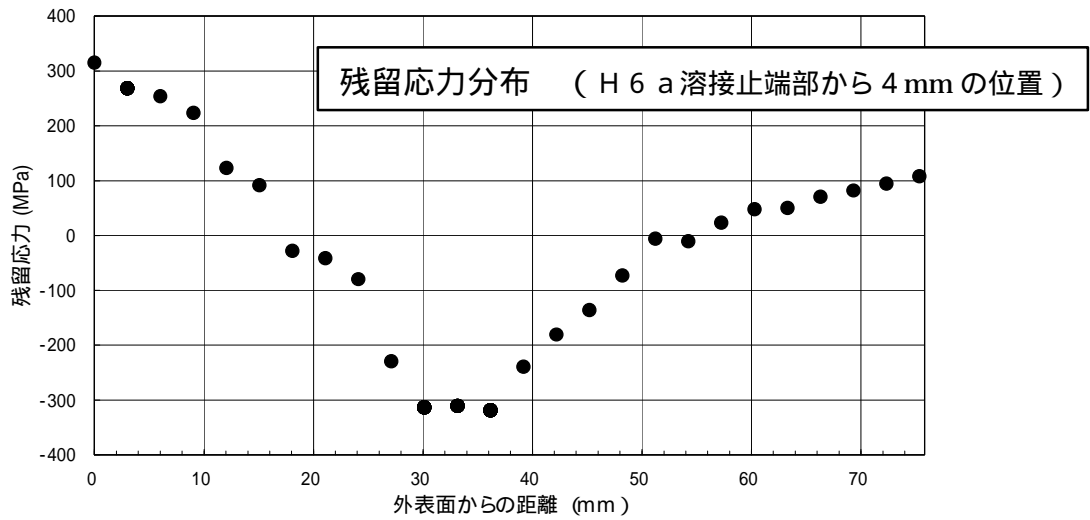


図 4 シュラウド下部リングの軸方向残留応力分布

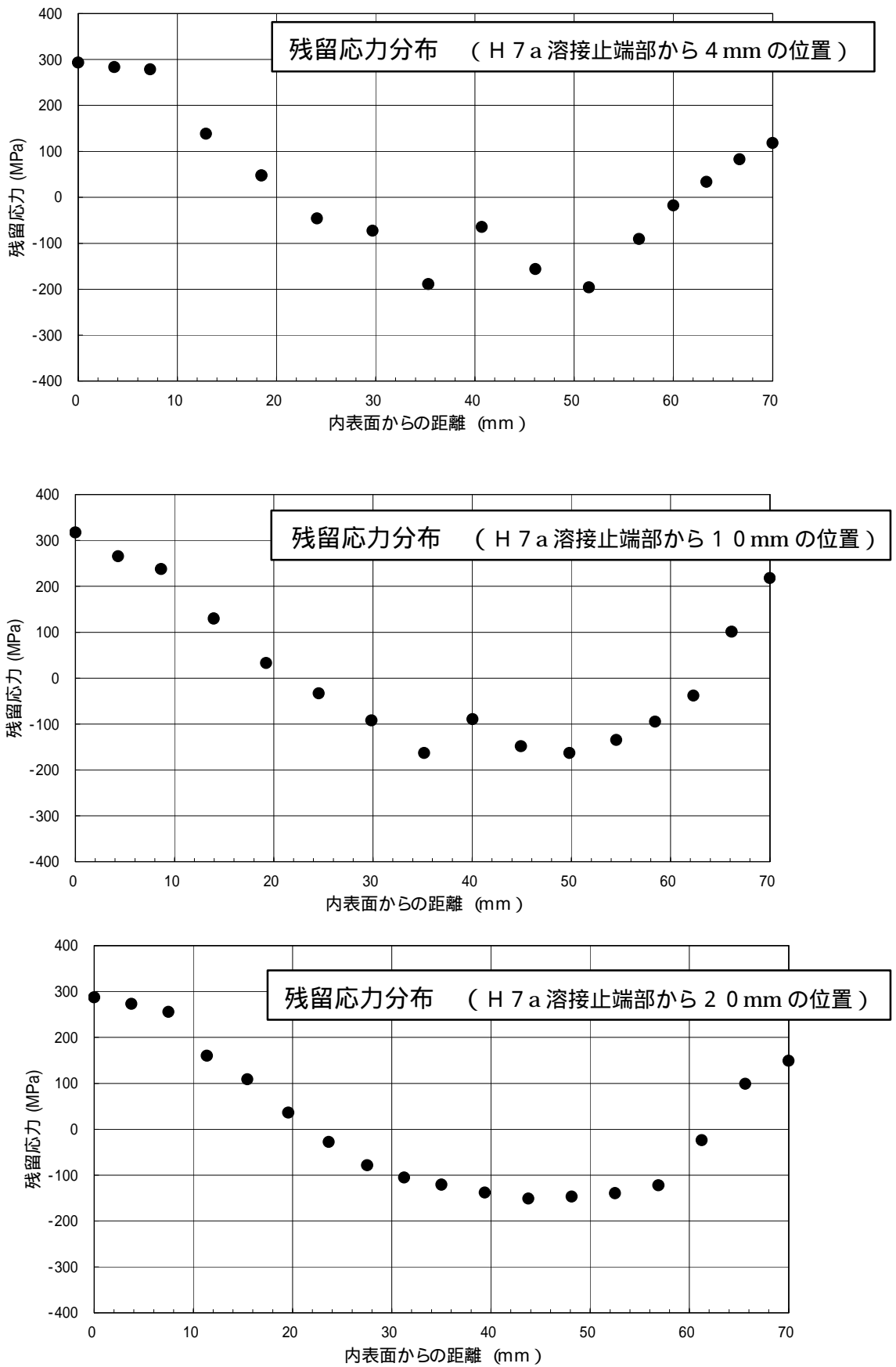


図 5 ( 1 ) シュラウドサポートリングの軸方向残留応力分布

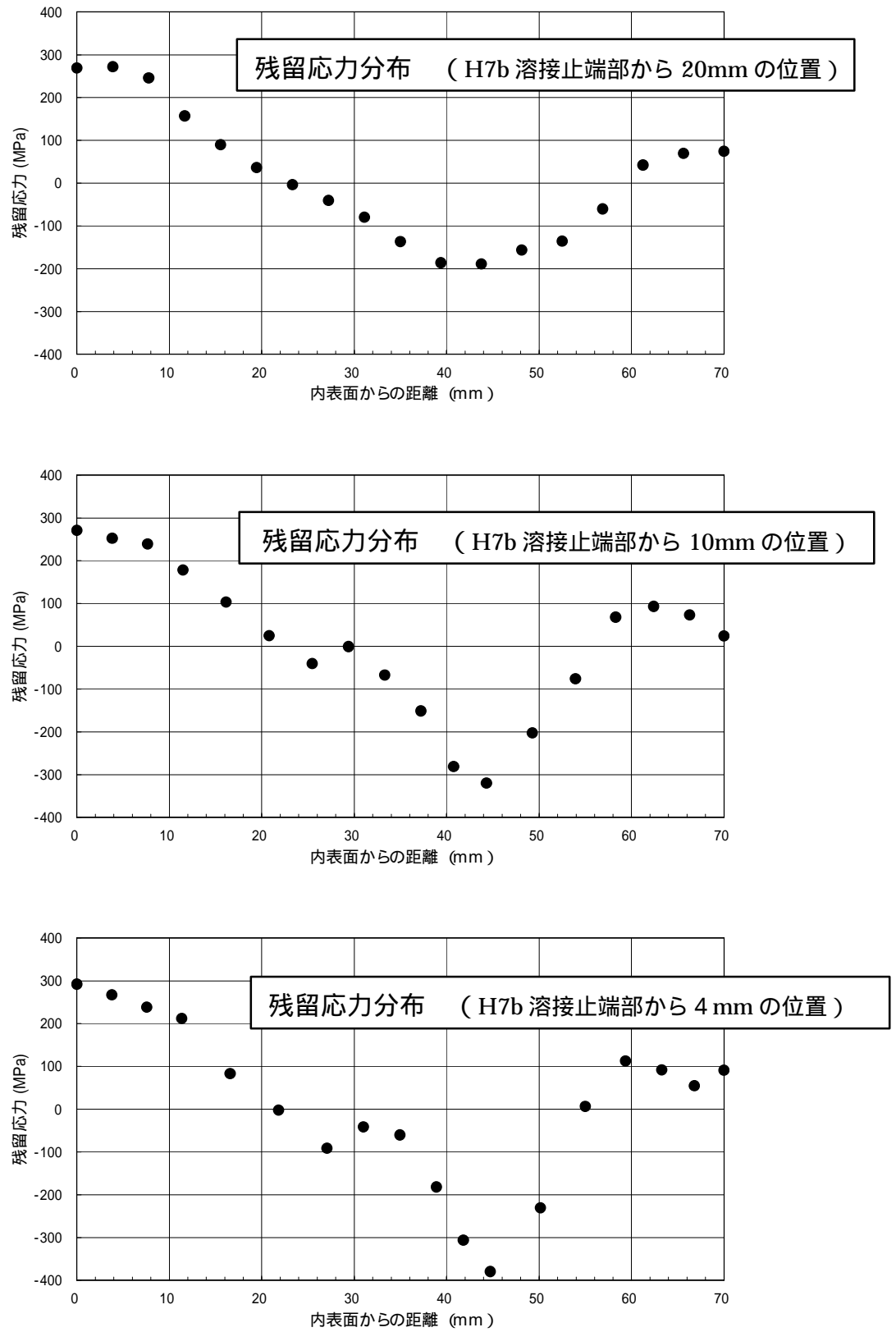


図5 ( 2 ) シュラウドサポートリングの軸方向残留応力分布

## 運転時の応力評価

### 1. 目的

溶接部（H 6 a 外）及び溶接部（H 7 内）の運転時に生じる応力について評価を行う。

### 2. 評価方法

現在当該部に観察されている割れの方から、割れに影響を及ぼす応力は炉心シュラウドの軸方向応力である。通常運転時には炉心シュラウドには、差圧、自重による死荷重及び熱応力が作用している。そこで、工事計画認可申請書添付の計算書に記載の通常運転時（運転状態 及び ）の当該部における軸方向応力を評価する。

### 3. 評価結果

工事計画認可申請書添付の計算書に記載の通常運転時（運転状態 及び ）の当該部における軸方向応力を下表に示す。

下表の通り、当該部に生じる通常運転時の軸方向組合せ応力は、溶接による残留応力 300 MPa 程度に比べ十分小さい。

運転時の軸方向応力

位置	荷重の種類	軸方向応力
H 6 a 外	差圧	2 MPa (0.2 kg/mm <sup>2</sup> )
	死荷重	- 2 MPa (- 0.2 kg/mm <sup>2</sup> )
	熱応力	24 MPa (2.4kg/mm <sup>2</sup> )
	組合せ応力	24 MPa (2.4 kg/mm <sup>2</sup> )
H 7 内	内圧	- 1 MPa (- 0.1 kg/mm <sup>2</sup> )
	差圧	0 MPa (0.0 kg/mm <sup>2</sup> )
	死荷重	- 5 MPa (- 0.5 kg/mm <sup>2</sup> )
	熱応力	13 MPa (1.3 kg/mm <sup>2</sup> )
	組合せ応力	7 MPa (0.7 kg/mm <sup>2</sup> )

\* 応力方向は上向きが正

## シュラウド下部リングの強度評価

### 1. はじめに

シュラウド下部リングの強度評価は、通商産業省令第62号「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」、(社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計指針 重要度分類・許容応力編」(J E A G 4 6 0 1・補 - 1 9 8 4)等の考え方にに基づき、以下のとおり実施した。

- (1)現時点のひび割れ深さあるいは一定期間後のひび割れ深さに対してひび割れを除いた部分であるリガメント部の面積をその時点での残存面積とする。
- (2)地震等の荷重が作用した時のリガメント部における応力強さが、通商産業省告示第501号(以下、「告示501号」という)に基づく許容応力強さと等しくなる場合のリガメント部面積を必要残存面積とする。
- (3)求めた残存面積と必要残存面積を比較する。
- (4)残存面積 > 必要残存面積であれば、シュラウド下部リングの強度は確保されていると判断する。

また、参考として(社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格」に基づく必要残存面積の評価結果を参考資料に示す。

### 2. 現在の強度評価

本評価は、現時点でのシュラウド下部リングの強度評価を実施したものである。評価は、以下の手順に従い実施した。

#### (1) 現在の残存面積

超音波探傷試験の測定結果より、ひび割れは大小さまざまな深さがあることから、ひび割れの平均的な深さを算出し、その平均的な深さのひび割れがシュラウド下部リングの全周にあるものと仮定した(図1参照)。その仮定の下で、ひび割れのない健全な部分(残存面積)を求めた。

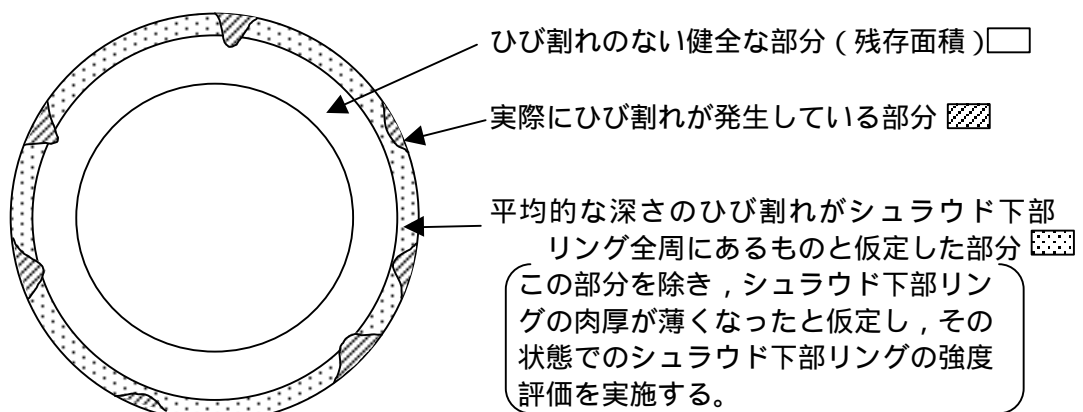


図1 ひび割れのモデル化

現在の残存面積を算出した結果を表1に示す。

表1 現在の残存面積

	シュラウド* 下部リング*
残存面積	約 $7.0 \times 10^5 \text{ mm}^2$
平均ひび割れ深さ	約 8 mm

(2) 必要残存面積

必要残存面積は、シュラウド下部リングにとってもっとも厳しい状態である、通常運転中に地震が発生した状態を考えて、以下のとおり求めた（詳細は添付1参照）。

a. 評価手順

- (a) 通常運転中に地震が発生した時に負荷される荷重より、リガメント部における応力強さを算出する。
- (b) 告示501号等に従い、許容応力強さを算出する。
- (c) (a), (b) 項より、応力強さが許容応力強さと等しくなる残存板厚を求め、その時の残存面積を必要残存面積とする。

b. 評価条件

炉心シュラウドは外径に比較して肉厚の薄い円筒構造であることから、板厚に平均的に働く力（一次一般膜応力）が構造強度に影響を及ぼすものとして評価する。告示501号の規定に基づき定めた評価条件を以下に示す。

- (a) 運転状態  $+S_1$  に対する許容応力強さ：  $1.5 S_m$
- (b) 運転状態  $+S_2$  に対する許容応力強さ：  $2/3 S_u$  と  $2.4 S_m$  の小さい方
- (c) ひび割れ：全周均一深さ

c. 荷重条件

運転状態  $+S_1$  及び  $+S_2$  について、建設時の工事計画認可申請書の耐震計算における最大応答値に余裕を考慮して表2に示す荷重条件を設定した。

表2 シュラウド下部リング荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 (MPa)	死荷重 (kN)	地震荷重		
				鉛直力 (kN)	水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
運転状態	, +S <sub>1</sub>	0.1	1500	430	2900	15000
運転状態	, +S <sub>2</sub>	0.1	1500	560	4400	23300

## d. 評価モデル

評価モデルを図2に示す。中間胴とシュラウド下部リングの溶接部（H6a外）は、すみ肉溶接部があり強度上期待できるものであるが、ここでは安全側にこれを有効板厚として考慮しないモデルとした。

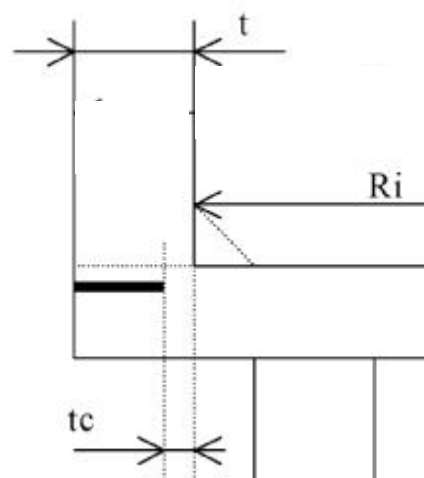


図2 評価モデル

$t_c$  : 残存板厚

$R_i$  : 中間胴内周半径

$t$  : 中間胴板厚

表3 評価モデル寸法

	$R_i$	$t$
シュラウド下部リング	約2.6m <sup>(注)</sup>	50.8mm

注：メーカーノウハウを含むため数値を丸めて記載

## (3) 評価結果

前述の条件、モデルから、残存面積が減少することに対する当該部の応力強さを求め、次に告示501号から求まる許容応力強さとの交点を求める。この時の残存面積が許容される最小の面積、すなわち必要残存面積となる。

必要残存面積の算出結果を表4に示す。(1)項で求めた現時点の残存面積は必要残存面積以上であり、現時点での強度が確保されていることを確認した。

表4 シュラウド下部リング必要残存面積

	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )
運転状態 , +S <sub>1</sub>	約 $9.6 \times 10^4$
運転状態 , +S <sub>2</sub>	約 $9.1 \times 10^4$

### 3. 一定期間後の強度評価

本評価は、一定期間後のシュラウド下部リングの強度評価を実施したものである。評価は5年後\*を対象に実施した。ひび割れの進展解析を行い、5年後\*のひび割れ深さから5年後\*の残存面積を算出し、必要残存面積と比較した。

\*：実運転時間は4年（プラント稼働率80%を仮定）

#### a. ひび割れの進展解析

ひび割れの進展解析は以下の手順により実施した。（詳細評価は添付2参照）

##### (a) 評価手順

解析により残留応力分布を求める。

評価時点でのひび割れの寸法と残留応力分布から、API（米国石油協会）規格の式に基づき、応力拡大係数を求める。

求められた応力拡大係数とSCC進展データよりひび割れの進展速度を求める。

一定量進展した欠陥寸法での計算を繰り返すことにより、時間とひび割れの進展量の関係を求める。

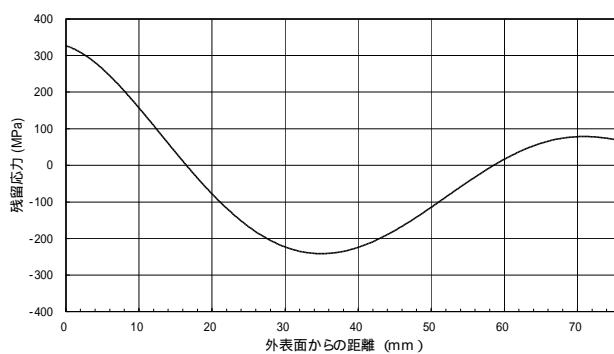


図3 残留応力分布の例

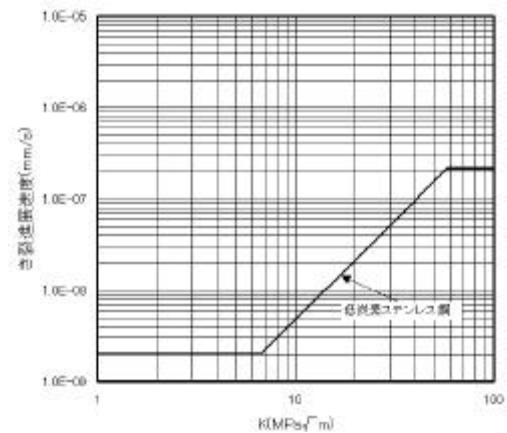


図4 低炭素ステンレス鋼のSCC進展データ

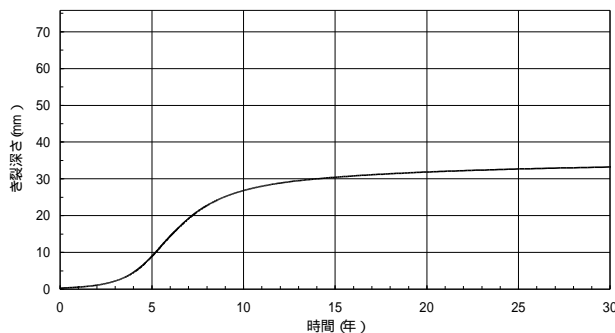


図5 時間とひび割れ深さの関係

(b) 評価条件

残留応力分布：FEM汎用解析コードABAQUSを用いて解析した値を用いる。

初期欠陥：円筒外側の全周欠陥（深さ0.3mm）

応力拡大係数：初期欠陥形状，及び残留応力分布からAPI規格の式を用いて求まる応力拡大係数を用いた。

ひび割れの進展速度：低炭素ステンレス鋼のSCC進展データを用いる。

(c) 5年後の残存面積

ひび割れの進展解析より5年後のひび割れ進展量を求めた結果を図6に示す。また，5年後の残存面積算出結果を表5に示す。

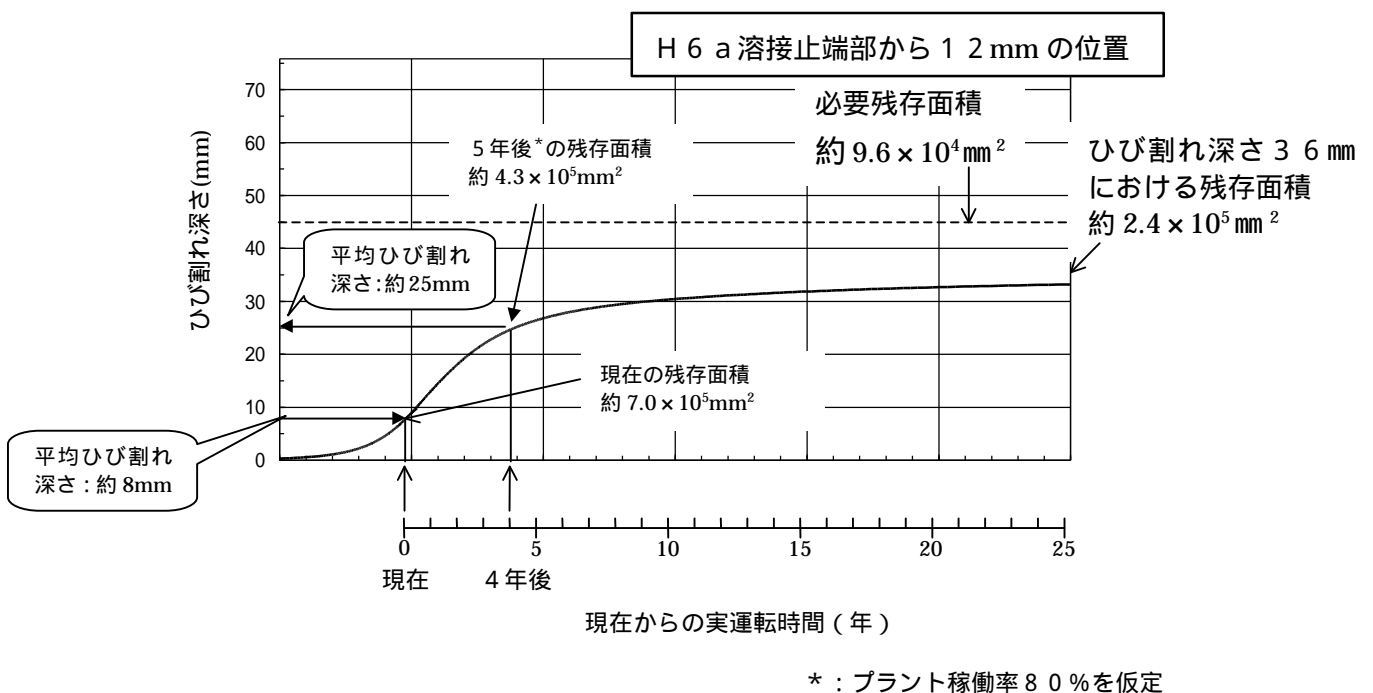


図6 ひび割れの進展解析結果

表5 5年後の残存面積

	シラウト下部リング*
残存面積	約 $4.3 \times 10^5 \text{ mm}^2$
平均ひび割れ深さ	約 25 mm

## b. 評価

ひび割れの進展予測結果より、約5年後\*のひび割れの深さを求め、残存面積を計算した。その結果、ひび割れの深さは約2.5mmとなり、残存面積は約 $4.3 \times 10^5 \text{mm}^2$  (ひび割れが無い場合の断面積：約 $8.3 \times 10^5 \text{mm}^2$ )と求めた。

以上の結果より、シュラウド下部リングにおいて最低限必要な残存面積(約 $9.6 \times 10^4 \text{mm}^2$ )に対して、5年後\*の残存面積は約4.5倍(約 $4.3 \times 10^5 \text{mm}^2$ )を有しており、5年後\*においてもシュラウド下部リングの構造上の必要な強度を有していると評価した。

## 4. 添付

添付1：シュラウド下部リングの必要残存面積

添付2：シュラウド下部リングのひび割れの進展評価

## 5. 参考

<参考資料> 日本機械学会 維持規格に基づくシュラウド下部リングの必要残存面積の評価

## 添付1：シュラウド下部リングの必要残存面積

## 1. はじめに

シュラウド下部リングの必要残存面積を、通商産業省令第62号「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」、(社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」(J E A G 4 6 0 1・補 - 1 9 8 4)等の考え方に基づいて以下に評価する。

## 2. 評価手順

## (1) リガメント部の応力解析による強度評価

評価は、SCCによるひび割れが全周にわたり均一に進展すると仮定し(図1参照)、リガメント部における応力強さが通商産業省告示第501号(以下、「告示501号」という)等に基づく許容応力強さ以下となることを確認するものである。以下に概略の手順を示す。

通常運転中に地震が発生した時に負荷される荷重より、リガメント部における応力強さを算出する。

告示501号等に従い、許容応力強さを算出する。

前項より、応力強さが許容応力強さと等しくなる残存板厚を求め、その時の残存面積を必要残存面積とする。

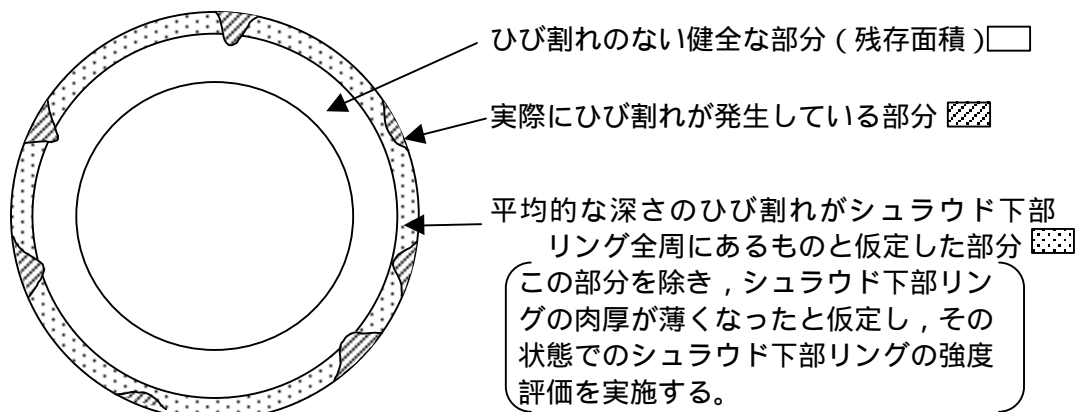


図1 ひび割れのモデル化

## (2) リガメント部における応力強さの算出

リガメント部において評価すべき応力強さは、地震荷重( $S_1$ ,  $S_2$ )を対象とし、一次一般膜応力強さを考慮する。この時以下の考え方に従い、二次応力強さ及びピーク応力強さは考慮しないものとした。

- 二次応力強さ : 地震は定格運転状態での発生を仮定するため十分小さいこと(拘束まで考慮するとひび割れ面に垂直方向の表面の応力は圧縮となること)から, 評価上はゼロとする。
- ピーク応力強さ : 疲労評価に使用するものであり, 今回の評価には使用しないこととする。

応力強さの算出を以下に示す。

a. 主応力

評価では, 図2に示すように半径方向(r軸), 周方向(t軸), 炉心シュラウド鉛直方向(l軸)とする円筒座標を使用する。

各種の荷重(65頁表2参照)による応力を成分毎に重ね合わせ, 組合せ応力を求める。組合せ応力は一般に6つの成分(t, l, r, tl, lr, rt)を持つ。炉心シュラウドに作用する荷重は, 炉心シュラウド内外差圧, 死荷重および地震荷重があり, この内, 差圧と死荷重は軸対象の応力を与え, 地震荷重は炉心シュラウド水平断面に分布する応力を与える。地震荷重の方向を図2のとおりとすると, 同荷重による垂直応力(t, l, r)はA点において最大となる。また, せん断応力(tl, lr, rt)は, 分布を考慮するとA点で最小となり, B点で最大となる。本評価では, 簡単化のためにせん断応力としてA点より大きな値となる平均せん断応力を使用し保守的に評価する。評価は, 応力が厳しいA点の垂直応力とせん断応力を組み合わせることで評価できるが, ここでは, A点における垂直応力とB点の平均せん断応力を組み合わせて主応力を算出する。

主応力( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )は, 上記の垂直応力とせん断応力から次の式(1)に関する3次式(1)を用いて算出することができる。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_l + \sigma_r)\sigma^2 + (\sigma_t\sigma_l + \sigma_l\sigma_r + \sigma_r\sigma_t - t_{tl}^2 - t_{lr}^2 - t_{rt}^2)\sigma \\ & - \sigma_t\sigma_l\sigma_r + \sigma_t t_{lr}^2 + \sigma_l t_{rt}^2 + \sigma_r t_{tl}^2 - 2t_{tl}t_{lr}t_{rt} = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

ここで, B点においては,  $t_{lr}=0, t_{rt}=0$ であるので, 式(1)は以下となる。

$$\sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_l + \sigma_r)\sigma^2 + (\sigma_t\sigma_l + \sigma_l\sigma_r + \sigma_r\sigma_t - t_{tl}^2)\sigma - \sigma_t\sigma_l\sigma_r + \sigma_r t_{tl}^2 = 0 \quad \dots\dots(2)$$

式(2)を変形すると

$$(\sigma - \sigma_r)\{\sigma^2 - (\sigma_t + \sigma_l)\sigma + \sigma_t\sigma_l - t_{tl}^2\} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

これより, 主応力( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )は, 次の式(4)で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} s_1 = \frac{s_t + s_\ell}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_t - s_\ell}{2}\right)^2 + t_{t\ell}^2} \\ s_2 = \frac{s_t + s_\ell}{2} - \sqrt{\left(\frac{s_t - s_\ell}{2}\right)^2 + t_{t\ell}^2} \\ s_3 = s_r \end{array} \right. \dots\dots\dots (4)$$

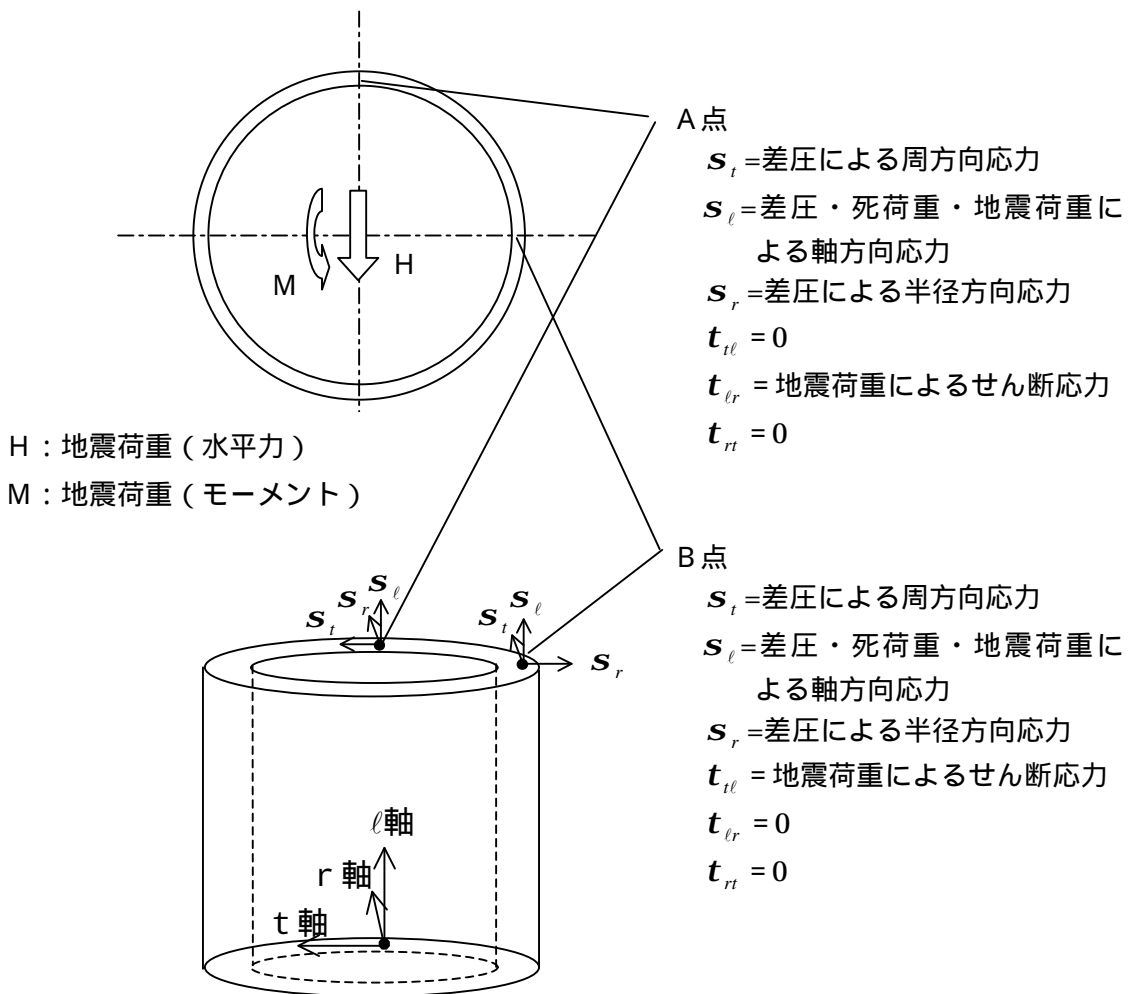


図2 シュラウドに発生する応力

ここで、組合せ応力に考慮する荷重を表1に示す。表中、「 $\square$ 」はその荷重を考慮すること、「 $-$ 」は考慮しないことを示す。

表1 組合せ荷重に考慮する応力

応力	差圧 $DP$	死荷重 $V_{DL}$	地震荷重		
			鉛直力 $V_S$	水平力 $H$	モーメント $M$
$s_t$ : 周方向応力		-	-	-	-
$s_\ell$ : 軸方向応力				-	
$s_r$ : 半径方向応力		-	-	-	-
$t_{t\ell}$ : せん断力	-	-	-		-

なお、各荷重による応力の算出は下式による。

$$\text{差圧による周方向応力 } s_t = \frac{1}{Y-1} \cdot DP$$

$$\text{差圧による軸方向応力 } s_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot DP$$

$$\text{差圧による半径方向応力 } s_r = \frac{-1}{Y+1} \cdot DP$$

$$\text{死荷重による軸方向応力 } s_\ell = -\frac{V_{DL}}{A}$$

$$\text{地震荷重による軸方向応力 } s_\ell = \frac{V_S}{A} + \frac{M}{Z}$$

$$\text{地震荷重によるせん断応力 } t_{t\ell} = \frac{H}{A}$$

ここで、 $Y$  : 内外径の比  $Y = \frac{D_o}{D_i}$  ( $D_o$  : 外径,  $D_i$  : 内径)

$$A : \text{断面積} \quad A = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4}$$

$$Z : \text{断面係数} \quad Z = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{32 D_o}$$

#### b. 応力強さ

応力強さ  $S$  は主応力差の絶対値で最大のものとして与えられる。

$$S = \text{Max}(|S_{12}|, |S_{23}|, |S_{31}|)$$

$$\text{ここで, } S_{12} = s_1 - s_2$$

$$S_{23} = s_2 - s_3$$

$$S_{31} = s_3 - s_1$$

## (3) 許容応力強さ

本評価における許容応力強さは(社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」(J E A G 4 6 0 1・補 - 1 9 8 4)(以下、「J E A G 4 6 0 1」という)第2章5項に基づき、表2のとおりとする。

表2 炉心シュラウドの許容応力

許容応力状態 \ 応力分類	一次一般膜応力強さ
$A_S$ (運転状態, $+S_1$ )	1.5Sm
$A_S$ (運転状態, $+S_2$ )	2/3Su と 2.4Sm の小さい方

ここで、表中の許容応力状態はJ E A G 4 6 0 1付録2より以下の定義とする。

$A_S$  : 告示501号の運転状態 相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な制限を加えた許容応力状態

$A_S$  : 告示501号の運転状態 相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な制限を加えた許容応力状態

## 2. 荷重条件

運転状態  $+S_1$  及び  $+S_2$  について、建設時の工事計画認可申請書の耐震計算における最大応答値に余裕を考慮して表3に示す荷重条件を設定した。

また、炉心シュラウド内外差圧は、105%出力、105%炉心流量(運転状態  $+S_1$ )における差圧解析結果に余裕を考慮して0.1MPaとした。

表3 荷重条件

評価部位 \ 荷重条件	差圧 (MPa)	死荷重 (kN)	地震荷重		
			鉛直力 (kN)	水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
運転状態 $+S_1$	0.1	1500	430	2900	15000
運転状態 $+S_2$	0.1	1500	560	4400	23300

## 3. 評価モデル

実際のひび割れはシュラウド下部リングの外表面にほぼ全周に断続的に発生しているが、条件を厳しく設定し、シュラウド下部リング全周にひび割れがあるものと仮定した。

当該溶接部は、すみ肉溶接部があり強度上期待できるものであるが、ここでは安全側にこれを有効板厚として考慮しないモデルとした(図2参照)。

$t_c$  : 残存板厚

$R_i$  : シュラウド中間胴内半径 = 約 2.6m (注)

$t$  : 中間胴板厚 = 50.8mm

注：メーカノウハウを含むため数値を丸めて記載

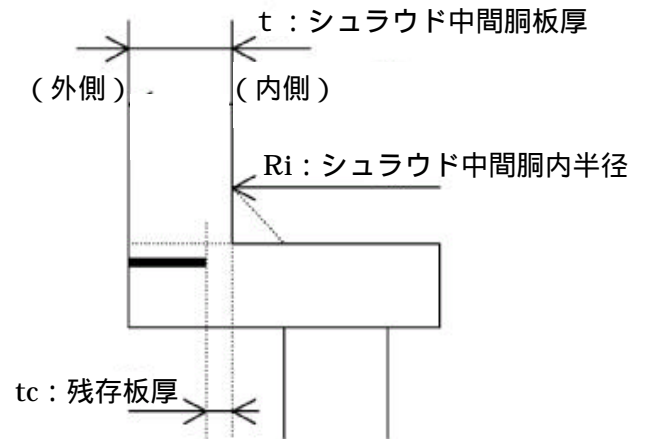


図3 評価モデル

#### 4. 評価結果

2. 項の荷重条件及び3. 項の評価モデルで、ひび割れの進展を考慮した応力強さを算出した結果を図4に示す。評価に用いる荷重は一定であることから、ひび割れの深さが大きくなるに従い、応力強さは大きくなる。

一方、運転状態  $+S_1$  及び  $+S_2$  に対する許容応力強さは、それぞれ表4のとおり求まる。

表4 許容応力強さ

許容応力状態	応力値	許容応力強さ
$A_S$ (運転状態 $+S_1$ )		$1.5S_m = 142\text{N/mm}^2$
$A_S$ (運転状態 $+S_2$ )		$2/3S_u$ と $2.4S_m$ のうち小さい方 = $2.4S_m$ = $228\text{N/mm}^2$

( $S_m$  : 設計応力強さ =  $95.3\text{N/mm}^2$  ; SUS316L at297 , 告示501号別表2より算出)

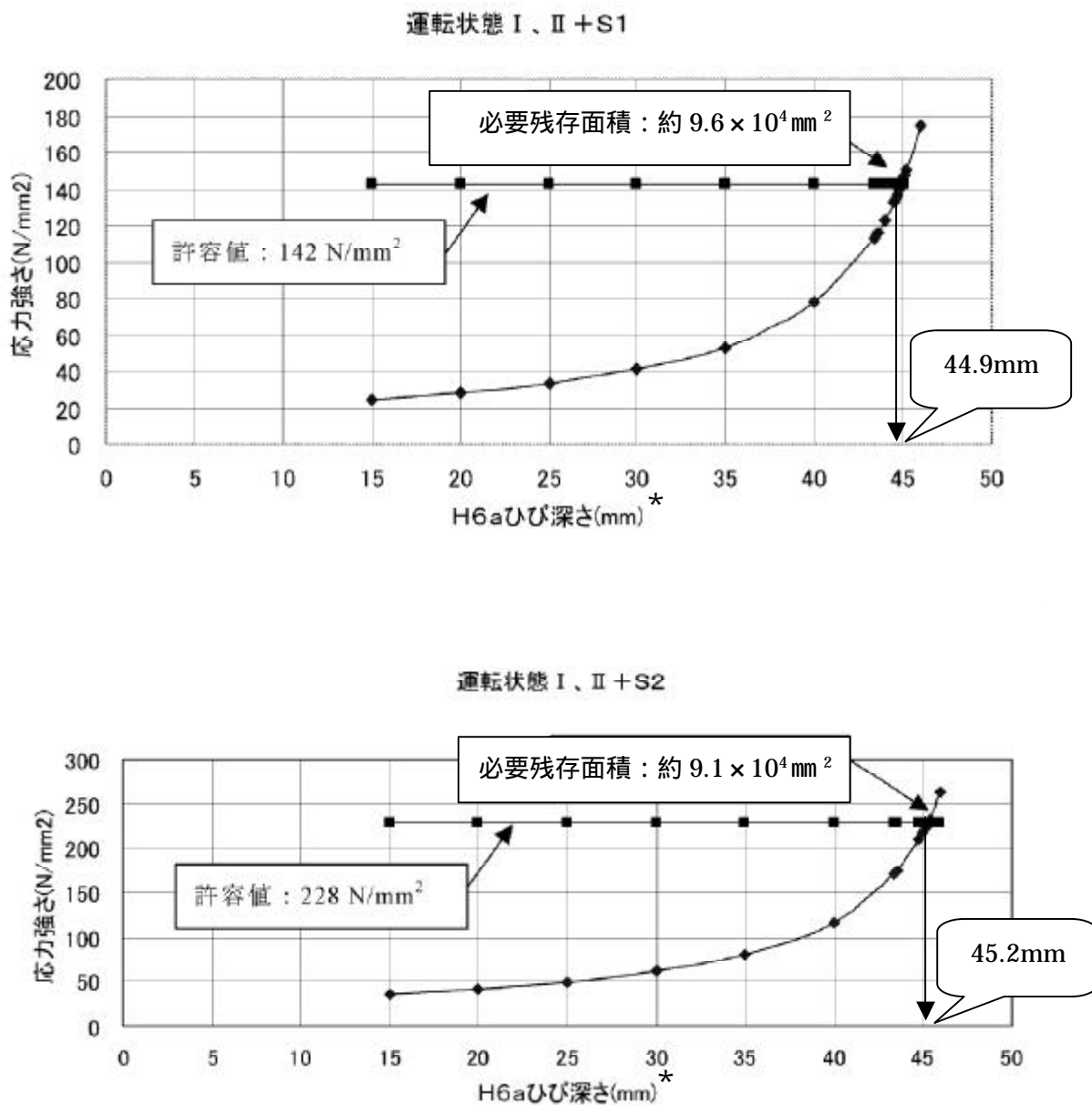
これらより、全周に均一な深さのひび割れを想定したモデルにおいて運転状態  $+S_1$  及び  $+S_2$  それぞれに対して、発生応力強さが許容応力強さに達するときのひび割れの深さを求め、この時の残存面積が必要残存面積となり表5のとおり求まる。

表5 必要残存面積

許容応力状態	必要残存面積
$A_S$ (運転状態 $+S_1$ )	約 $9.6 \times 10^4 \text{mm}^2$
$A_S$ (運転状態 $+S_2$ )	約 $9.1 \times 10^4 \text{mm}^2$

従って、シュラウド下部リングの必要残存面積は約  $9.6 \times 10^4 \text{mm}^2$  となる。

以上



\* : ひび割れの深さは、H6 a 外表面からの長さである。

図4 シュラウド下部リングの必要残存面積評価

## 添付2：シュラウド下部リングのひび割れの進展評価

### 1. はじめに

有限要素解析 ( F E M ) により求めた残留応力分布をもとに , シュラウド下部リングに発生した S C C によるひび割れが進展する速度及び , ある年数が経過した後の進展後のひび割れ寸法を推定する手法を以下に示す。

### 2. 評価手順

高温純水中におけるステンレス鋼の S C C では , 材料及び腐食環境の条件が一定な場合 , ひび割れの進展速度が応力条件に依存することが知られている。よって , 破壊力学の知見からひび割れの進展速度は応力拡大係数 ( K 値 : ひび割れ周辺の応力分布とひび割れの形状によって定まるパラメータ ) から評価できる。図 1 に S C C の進展評価の手順を示す。

- ( 1 ) 評価部位の初期欠陥形状・寸法を設定し , 解析で求めた残留応力分布から応力拡大係数を求める。
- ( 2 ) 求めた応力拡大係数におけるひび割れの進展速度を S C C 進展速度の線図から求め , ひび割れが単位長さを進展する時間を求める。
- ( 3 ) 単位長さ分進展したひび割れに対して ( 1 ) ( 2 ) の計算を繰り返し , 評価すべき時間までのひび割れの進展評価を行う。

### 3. 評価条件

- ( 1 ) 評価対象部位 : 溶接部 ( H 6 a 外 ) 近傍 ( シュラウド下部リング )
- ( 2 ) 残留応力分布 : F E M 汎用解析コード A B A Q U S を用いて解析した値を用いる ( 図 2 , 3 )
- ( 3 ) 初期欠陥 : 円筒外側の全周欠陥 ( 深さ 0 . 3 mm ) \* 1
- ( 4 ) 応力拡大係数 : A P I ( 米国石油協会 ) 規格 5 7 9 の導出式を用いる。
- ( 5 ) ひび割れの進展速度 : 低炭素ステンレス鋼の S C C 進展データ ( 図 4 )

\* 1 : 東京電力(株)福島第二原子力発電所 3 号機で確認された表面加工層の厚さを想定した。

### 4. 評価方法

#### ( 1 ) 初期欠陥の想定

ひび割れの進展速度評価は粒界型応力腐食割れの進展評価であるので , シュラウド極表層の加工硬化部に発生する粒内型応力腐食割れについては運転開始時 ( 直後 ) から存在していたものとし , 加工硬化部の深さを 0 . 3 mm と設定し

た。一方、欠陥は初期から全周にわたるものとした。

なお、初期欠陥の設定はSCC発生までの時間をゼロと評価することであり、全周欠陥とすることはK値を大きめに評価することになるため、安全評価上保守側の扱いとなる。

### (2) 応力拡大係数 (K 値)

応力拡大係数評価式は、円筒外側の全周欠陥に対するK値の算出式を規定していることからAPI規格579を引用した。

応力拡大係数の算出においては、まず、深さ方向の残留応力分布(図3)を次式のような4次多項式にて近似する。

$$s = s_0 + s_1 \left( \frac{x}{t} \right) + s_2 \left( \frac{x}{t} \right)^2 + s_3 \left( \frac{x}{t} \right)^3 + s_4 \left( \frac{x}{t} \right)^4$$

$s$  : 応力 (分布) [MPa]

$x$  : 円筒外側からの位置 (深さ) [m]

$t$  : 円筒肉厚[m]

$s_0 \sim s_4$  : 回帰係数

次に下記のAPIのK値評価式により初期欠陥設定値及び上記の係数を用いてK値を算出する(図5)。

$$K = \left[ G_0 s_0 + G_1 s_1 \left( \frac{a}{t} \right) + G_2 s_2 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + G_3 s_3 \left( \frac{a}{t} \right)^3 + G_4 s_4 \left( \frac{a}{t} \right)^4 \right] \sqrt{pa}$$

$G_0 \sim G_4$  : 影響係数 : API規格579において $\frac{a}{t}$ に対して定められる。

$a$  : 欠陥深さ[m]

### (3) ひび割れの進展量評価

算出されたK値に対するSCC進展速度を低炭素ステンレス鋼のSCC進展データ(図4, 算出式は以下に示す)から評価し、単位時間あたりのSCC進展量を求める。

S C C 進展速度  $\frac{da}{dt}$  [mm/sec]

$$\frac{da}{dt} = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{m})$$

$$\frac{da}{dt} = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7 \text{ MPa}\sqrt{m})$$

$$\frac{da}{dt} = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{m})$$

算出された単位時間あたりの S C C 進展量を初期欠陥深さに加算し、ひび割れ深さとする。

以上の計算を繰り返し、S C C 進展評価（ひび割れ深さと時間の関係）とする。

#### 5 . 評価結果

- 評価部位の欠陥の大きさ、及び残留応力により求めた応力拡大係数分布を図 5 に示す。
- ひび割れの進展深さと時間の関係を図 6 に示す。シュラウド下部リングに発生したひび割れは初期には緩やかに進展し、途中で進展量が増加し、その後再び緩やかな進展となる。

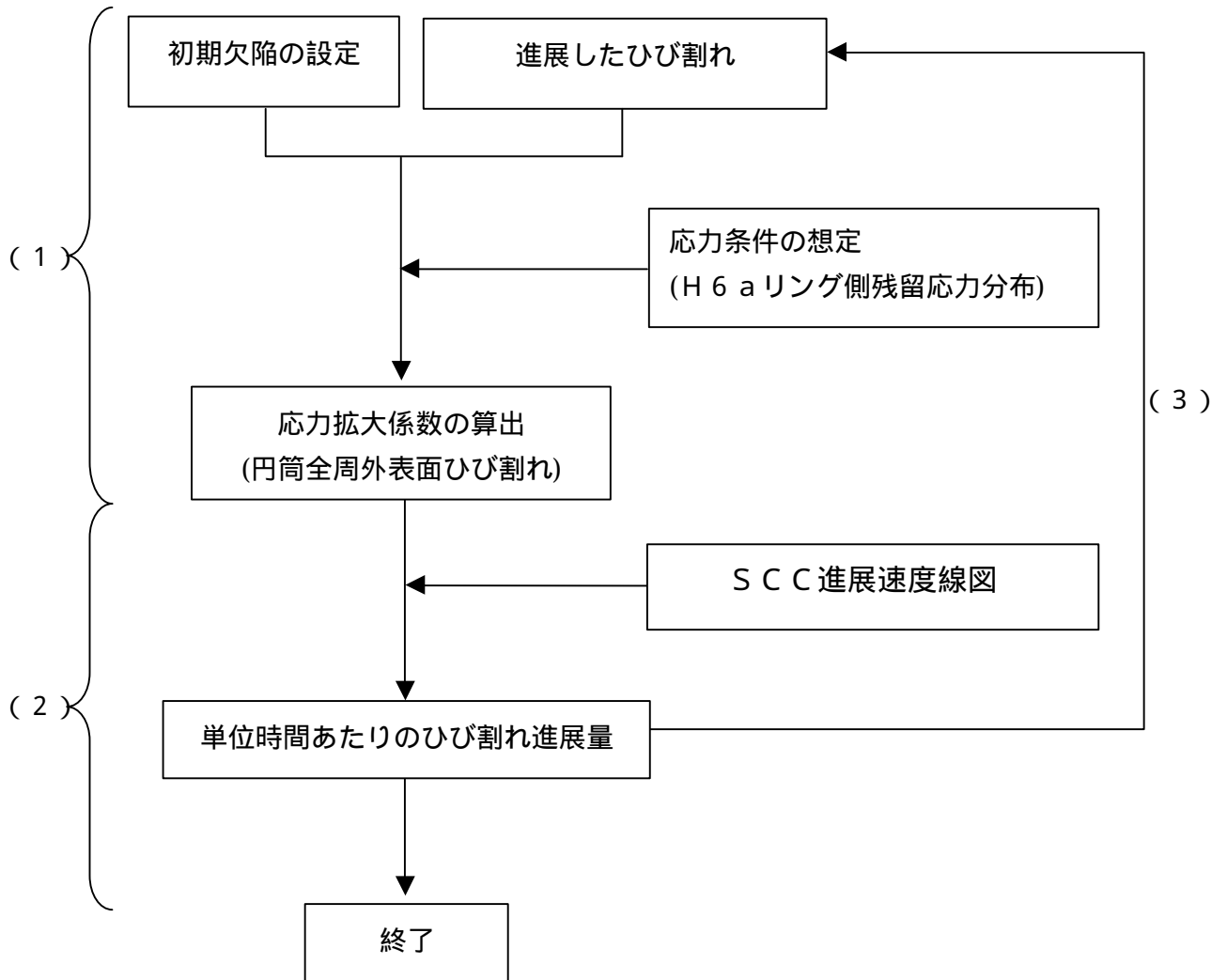


図1 ひび割れの進展評価手順

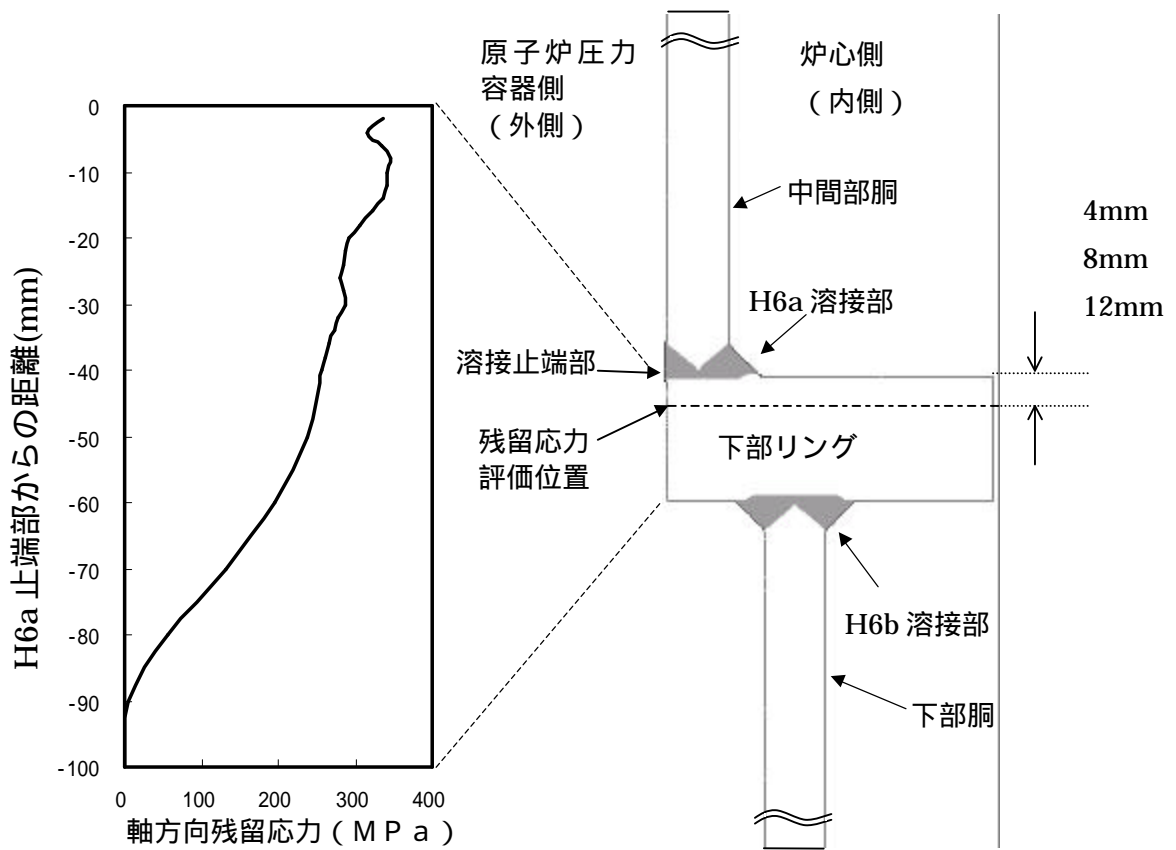


図2 軸方向残留応力分布 (下部リング外表面)

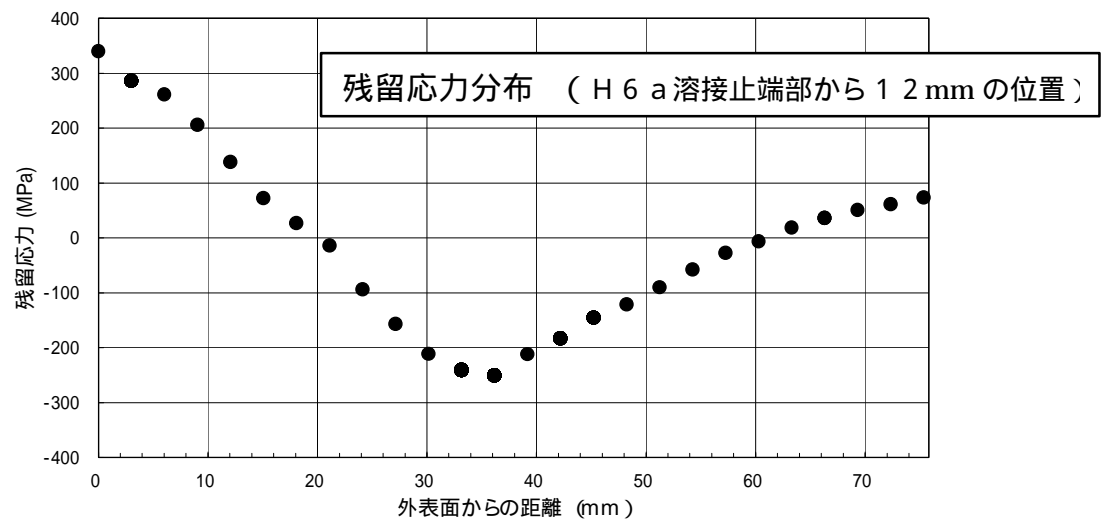
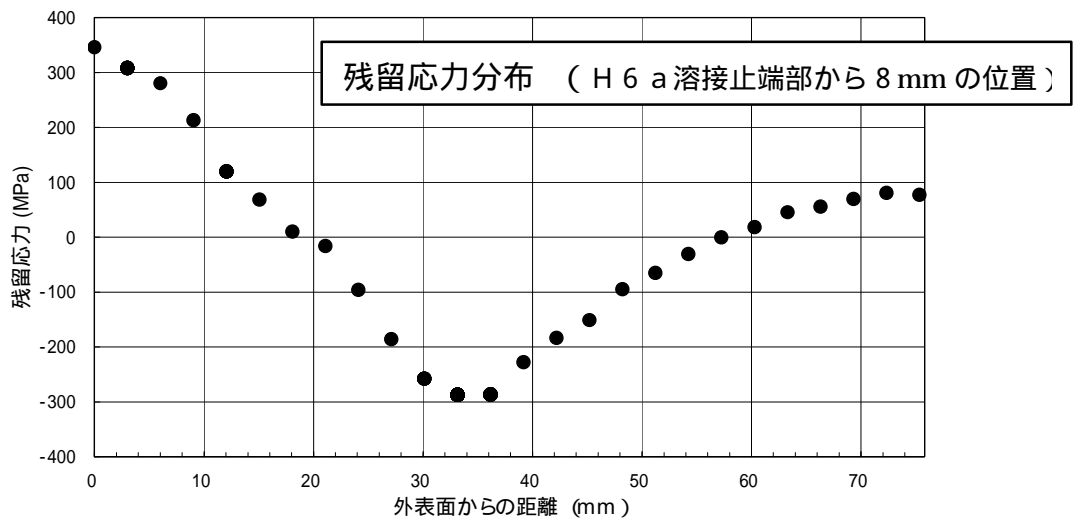
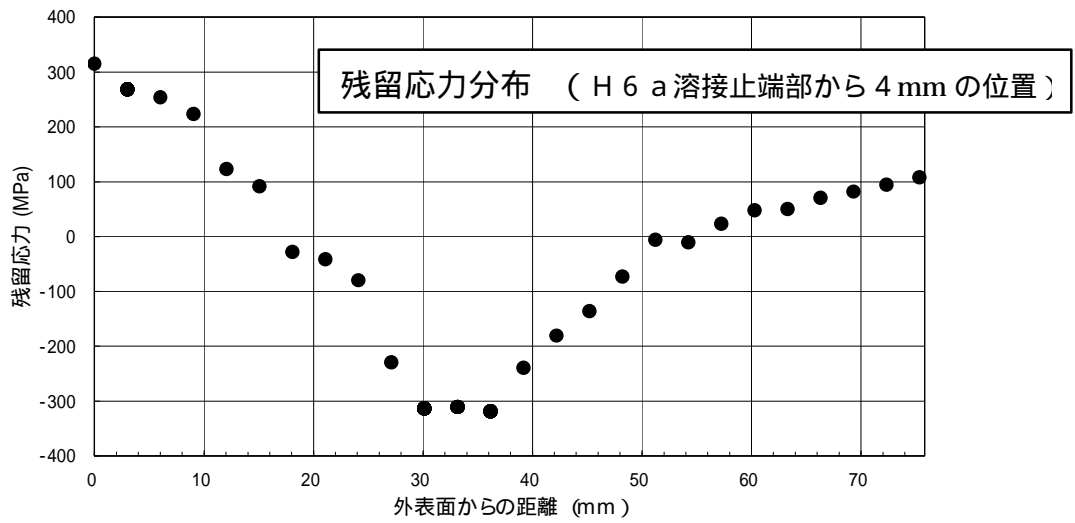


図3 下部リングの軸方向残留応力分布

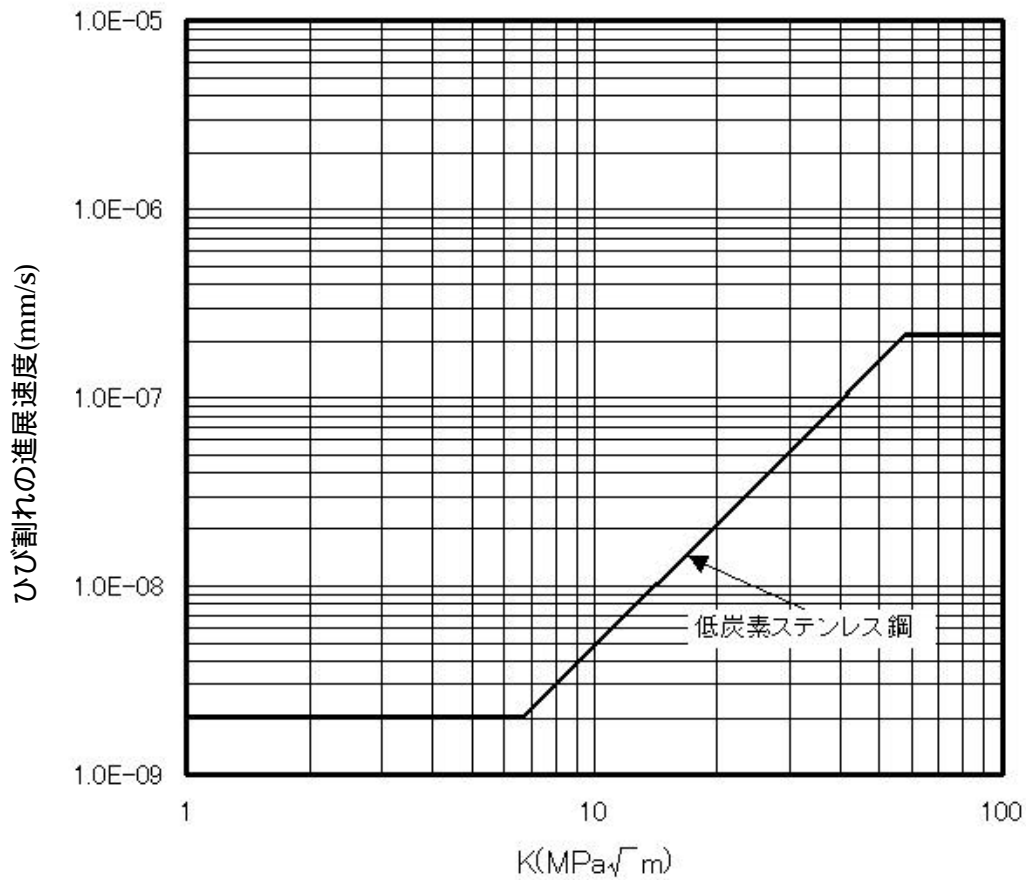


図4 低炭素ステンレス鋼のSCC進展データ

出典)

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン「炉心シュラウド」  
 (平成13年11月:(社)火力原子力発電技術協会)  
 に記載のオーステナイト系ステンレス鋼の通常炉内水質環境中の  
 SCC進展評価線図から低炭素ステンレス鋼の線図を抜粋した。

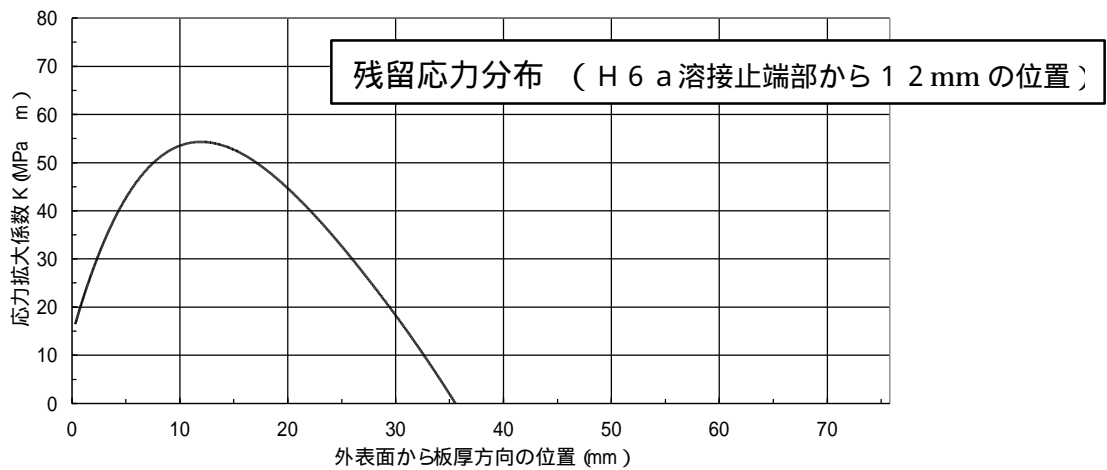
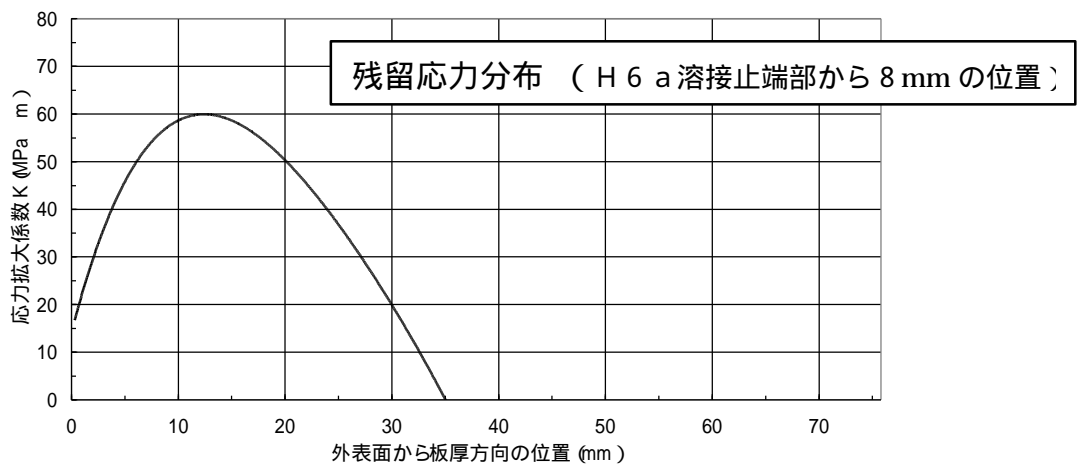
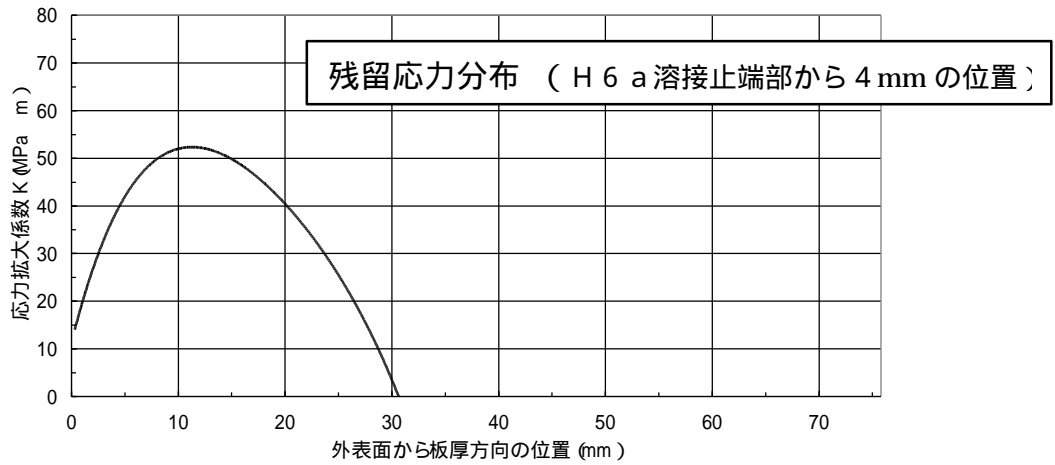


図 5 下部リングの応力拡大係数分布

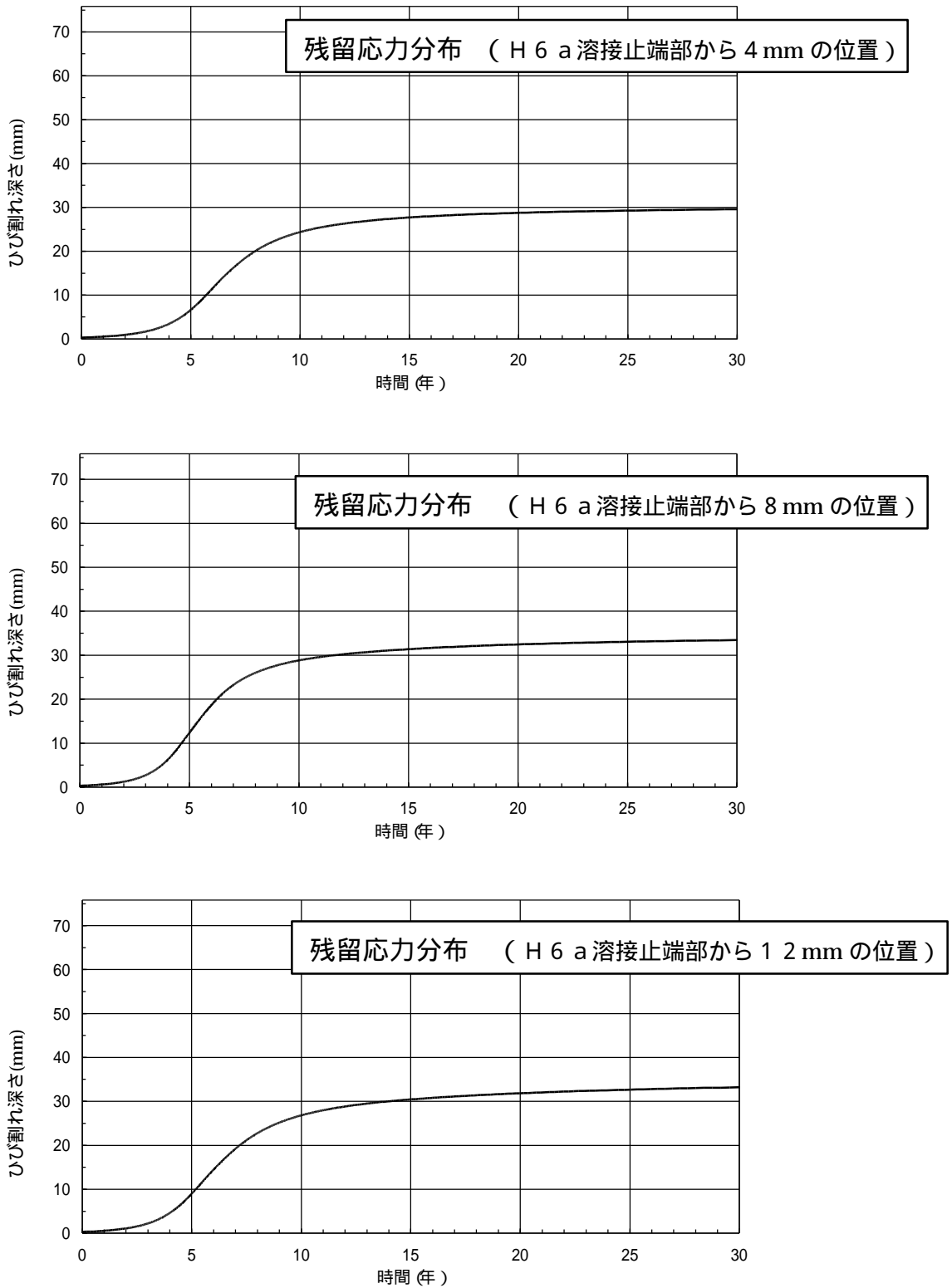


図6 下部リングのひび割れ深さと時間の関係  
 円筒全周 ( 外表面 ) 欠陥  
 ( 初期欠陥 0.3 mm 深さ )

＜参考資料＞ 日本機械学会 維持規格に基づくシュラウド下部リング  
の必要残存面積の評価

シュラウド下部リングの必要残存面積を、(社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格」(以下、「維持規格」という)の考え方に基づいて以下に評価する。

### 1. 評価方法

炉心シュラウドの材料であるオーステナイト系ステンレス鋼は延性を有する材料であるため、破壊はひび割れを有する円筒の正味断面が流動応力に達した時に起こるものとして、維持規格の極限荷重評価法の考え方に基づいて必要残存面積の評価を行う。

#### (1) 評価条件

維持規格に基づき定めた評価条件を以下に示す。

- a. 流動応力  $f = 2.7 S m$
- b. 安全率  $S F = 1.5$  (運転状態,  $+ S_2$ )

#### (2) 評価モデル

溶接部(H6a外)は、目視点検によりほぼ全周に断続的にひび割れがあることを確認していることから、全周に均一な深さのひび割れを想定した。

当該溶接部は、すみ肉溶接部があり強度上期待できるものであるが、ここでは安全側にこれを有効板厚として考慮しないモデル(図1参照)を作成した。

$$\text{評価断面積 } A = \{ (R_i + t_c)^2 - R_i^2 \}$$

ここで、 $t_c$  : 残存板厚

$R_i$  : 中間胴内半径 = 約 2.6 m (注)

$t$  : 中間胴板厚 = 50.8 mm

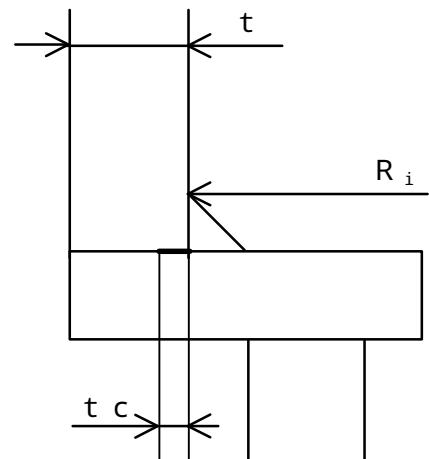


図1 評価モデル

注: メーカーノウハウを含むため数値を丸めて記載

#### (3) 極限荷重評価法

維持規格の極限荷重評価法の考え方は、断面全体が流動応力に達した時に不安定破壊を起こすという考え方に基づいている。そこで、必要残存面積を評価するにあたっては、構造強度上厳しくなるように周方向に一樣なひび割れを仮

定し、残存断面における応力値が流動応力に達するときの面積を必要残存面積として求めている。以下に必要残存面積の算出手順を示す。

a. 応力値の算出

3軸応力場での材料の破壊については、告示501号で最大せん断応力説を採用し、応力強さが破壊を決定付けるパラメータとしている。必要残存面積の評価にあたっては、周方向に一樣なひび割れを仮定しているため、応力強さに等しい応力となるような引張荷重が一樣に軸方向に働くものとして評価を行う。応力強さは、主応力の差の最大値として下式に示すとおり与えられる(70~72頁参照)。

$$S = \text{Max}(|S_{12}|, |S_{23}|, |S_{31}|) \quad \text{-----} (1)$$

b. 評価用荷重の算出

前項で求めた応力強さが軸方向に一樣引張となるような荷重Fを下式により算出する。

$$F = S(SF)((Ri + t)^2 - Ri^2) \quad \text{-----} (2)$$

ここで、

S：応力強さ

Ri：中間胴内半径=約2.6m

t：中間胴板厚=50.8mm

SF：安全率=1.5

c. 必要残存面積の算出

前項の荷重状態の下で、応力値が流動応力に達する時の断面積を下式より算出し、必要残存面積とする。

$$F = f A \quad \text{-----} (3)$$

ここで、

f：流動応力=2.7Sm=257.3N/mm<sup>2</sup>

(Sm：設計応力強さ=95.3N/mm<sup>2</sup>；SUS316Lat297，  
発電用原子炉設備に関する構造等の技術基準(告示第501号)  
別表第2より算出)

A：断面積

## 2. 荷重条件

評価上厳しい状態となる地震荷重を対象とし、運転状態、 $S_2$ について（維持規格に基づく場合、荷重が大きくなる  $S_2$ 地震が支配的）、建設時の工認耐震計算書記載の最大応答値に余裕を考慮して表1に示す荷重条件を設定した。

また、炉心シュラウド内外差圧は、105%出力、105%炉心流量（運転状態、 $S_2$ ）における差圧解析結果に余裕を考慮して0.1MPaとした。

表1 シュラウド下部リング荷重条件

評価条件 評価部位	差圧 (Mpa)	地震荷重	
		水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
シュラウド下部リング	0.1	4400	23300

## 3. 評価結果

以上より得られた下式に基づき必要残存面積を算出したところ、 $1.3 \times 10^5 \text{ mm}^2$ と求めた。

$$A = \frac{S \cdot (SF) \cdot ((R_i + t)^2 - R_i^2)}{f}$$

ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l} S = 26.5 \text{ N/mm}^2 \\ SF = 1.5 \\ R_i = \text{約} 2.6 \text{ m} \\ t = 50.8 \text{ mm} \\ f = 257.3 \text{ N/mm}^2 \end{array} \right.$$

以上

## シュラウドサポートリングの強度評価

### 1. はじめに

シュラウドサポートリングの強度評価は、通商産業省令第62号「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」、(社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計指針 重要度分類・許容応力編」(J E A G 4 6 0 1・補 - 1 9 8 4)等の考え方にに基づき、添付資料 - 14 ( 1 ) に示す方法と同様な方法で実施した。

また、参考として(社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格」に基づく必要残存面積の評価結果を参考資料に示す。

### 2. 現在の強度評価

本評価は、現時点でのシュラウドサポートリングの強度を評価したものである。評価は、以下の手順に従い実施した。

#### ( 1 ) 現在の残存面積

超音波探傷試験の測定結果より、ひび割れは大小さまざまな深さがあることから、ひび割れの平均的な深さを算出し、その平均的な深さのひび割れがシュラウドサポートリングの全周にあるものと仮定した(図1参照)。その仮定の下で、ひび割れのない健全な部分(残存面積)を求めた。

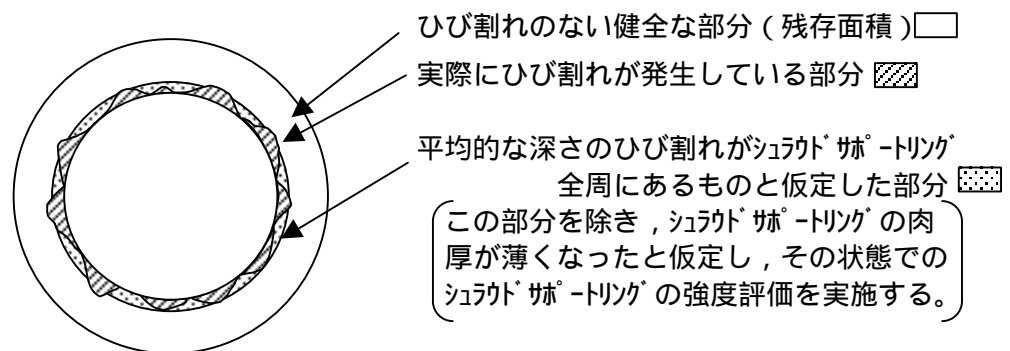


図1 ひび割れのモデル化

現在の残存面積を算出した結果を表1に示す。

表1 現在の残存面積

	シュラウドサポートリング
残存面積	約 $8.0 \times 10^5 \text{ mm}^2$
平均ひび割れ深さ	約 8 mm

(2) 必要残存面積

必要残存面積は、シュラウドサポートリングにとってもっとも厳しい状態である、通常運転中に地震が発生した状態を考えて、以下のとおり求めた(詳細は添付1参照)。

a. 評価手順

添付資料 - 14 (2)と同様に、通常運転中に地震が発生した時に負荷される荷重より求めたりガメント部での応力強さと、告示501号から求めた許容応力強さが等しくなる必要残存面積を求める。

b. 評価条件

添付資料 - 14 (2)と同様に一次一般膜応力が構造強度に影響を及ぼすものとして評価し、評価条件も同様とする。

c. 荷重条件

運転状態  $+S_1$  及び  $+S_2$  について、建設時の工事計画認可申請書の耐震計算における最大応答値に余裕を考慮して表2に示す荷重条件を設定した。

表2 シュラウドサポートリング荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 (MPa)	死荷重 (kN)	地震荷重		
				鉛直力 (kN)	水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
運転状態	$+S_1$	0.25	1900	550	4600	24800
運転状態	$+S_2$	0.25	1900	720	6800	38600

d. 評価モデル

評価モデルを図2に示す。欠陥は、全周に均一なひび割れがあるものとする。溶接部(H7内)は、余盛りがあり強度上期待できるものであるが、ここでは安全側にこれを有効板厚として考慮しないモデルとした。

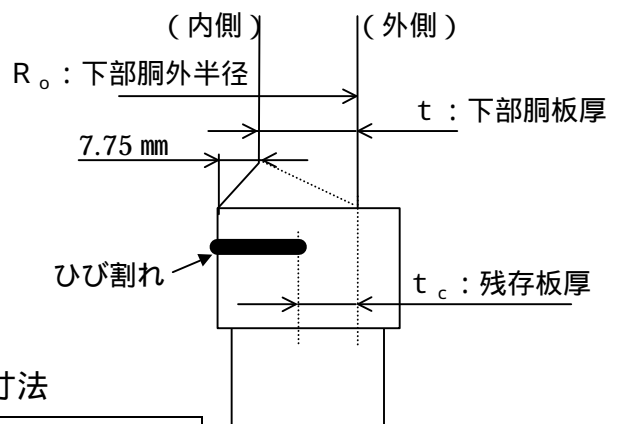


表3 評価モデル寸法

	$R_o$	t
シュラウドサポートリング	約 2.5 m (注)	50.8 mm

注：メーカーノウハウを含むため数値を丸めて記載

(3) 評価結果

前述の条件, モデルから, 残存面積が減少することに対するシュラウドサポートリングの応力強さを求め, 次に告示501号から求まる許容応力強さとの交点を求める。この時の残存面積が許容される最小の面積, すなわち必要残存面積となる。

必要残存面積の算出結果を表4に示す。(1)項で求めた現時点の残存面積は必要残存面積以上であり, 現時点での強度が確保されていることを確認した。

表4 シュラウドサポートリング必要残存面積

	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )
運転状態, + S <sub>1</sub>	約 1.7 × 10 <sup>5</sup>
運転状態, + S <sub>2</sub>	約 1.6 × 10 <sup>5</sup>

3. 一定期間後の強度評価

本評価は, 一定期間後のシュラウドサポートリングの強度評価を実施したものである。評価は5年後\*を対象に実施した。ひび割れの進展解析を行い, 5年後\*のひび割れ深さから5年後\*の残存面積を算出し, 必要残存面積と比較した。

\*: 実運転時間は4年(プラント稼働率80%を仮定)

a. ひび割れの進展解析

ひび割れの進展解析は以下の手順により実施した。(詳細評価は添付2参照)

(a) 評価手順

添付資料 - 14で実施したひび割れの進展解析と同様に, 残留応力分布, 応力拡大係数, SCC進展データより一定期間後のひび割れの進展量を算出する。

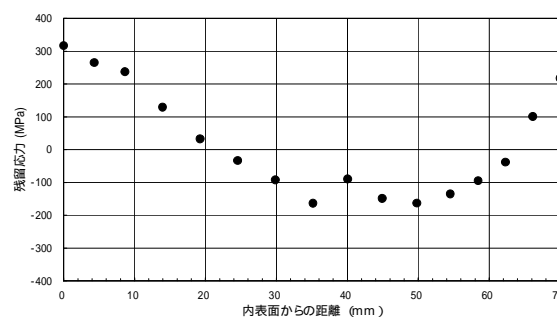


図3 残留応力分布の例

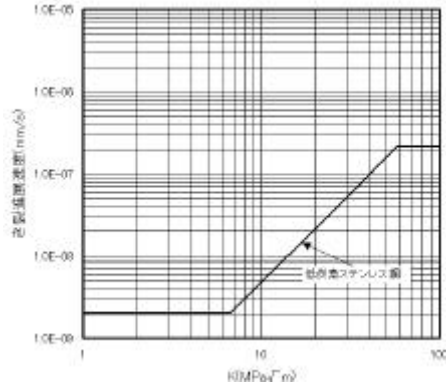


図4 低炭素ステンレス鋼の SCC 進展データ

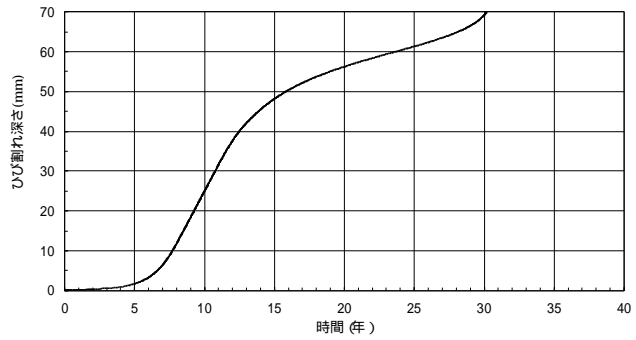


図5 時間とひび割れ深さの関係の例

( b ) 評価条件

残留応力分布： F E M汎用解析コード A B A Q U S を用いて解析した値を用いる。

初期欠陥： 円筒内側の全周欠陥 ( 深さ 0 . 1 mm )

応力拡大係数： 初期欠陥形状，及び残留応力分布から A P I 規格の式を用いて求まる応力拡大係数を用いた。

ひび割れの進展速度： 低炭素ステンレス鋼の S C C 進展データを用いる。

( c ) 5 年後の残存面積

ひび割れの進展解析より 5 年後のひび割れ進展量を求めた結果を図 6 に示す。また，5 年後の残存面積算出結果を表 5 に示す。

ひび割れは H 7 a 及び H 7 b 溶接線の近傍に確認されていることから，評価位置 ~ ( 添付資料 - 15 ( 2 2 ) ( 2 3 ) の図 6 参照 ) のうち必要残存面積 ( ひび割れ深さ約 4 . 8 mm に相当 ) に達する時間が最も速い「 H 7 a 溶接止端部から 1 0 mm の位置」を評価位置とし，5 年後の残存面積を算出した。

なお，H 7 a 及び H 7 b 溶接線近傍のそれぞれに全周割れがあると仮定して評価を行ったとしても，シュラウドサポートリングの強度は最初に必要残存面積に達するひび割れによって決められるため，本評価結果に包含される。

表 5 5 年後の残存面積

	シュラウド サポ-トリング
残存面積	約 3 . 9 × 1 0 <sup>5</sup> mm <sup>2</sup>
平均ひび割れ深さ	約 3 . 4 mm

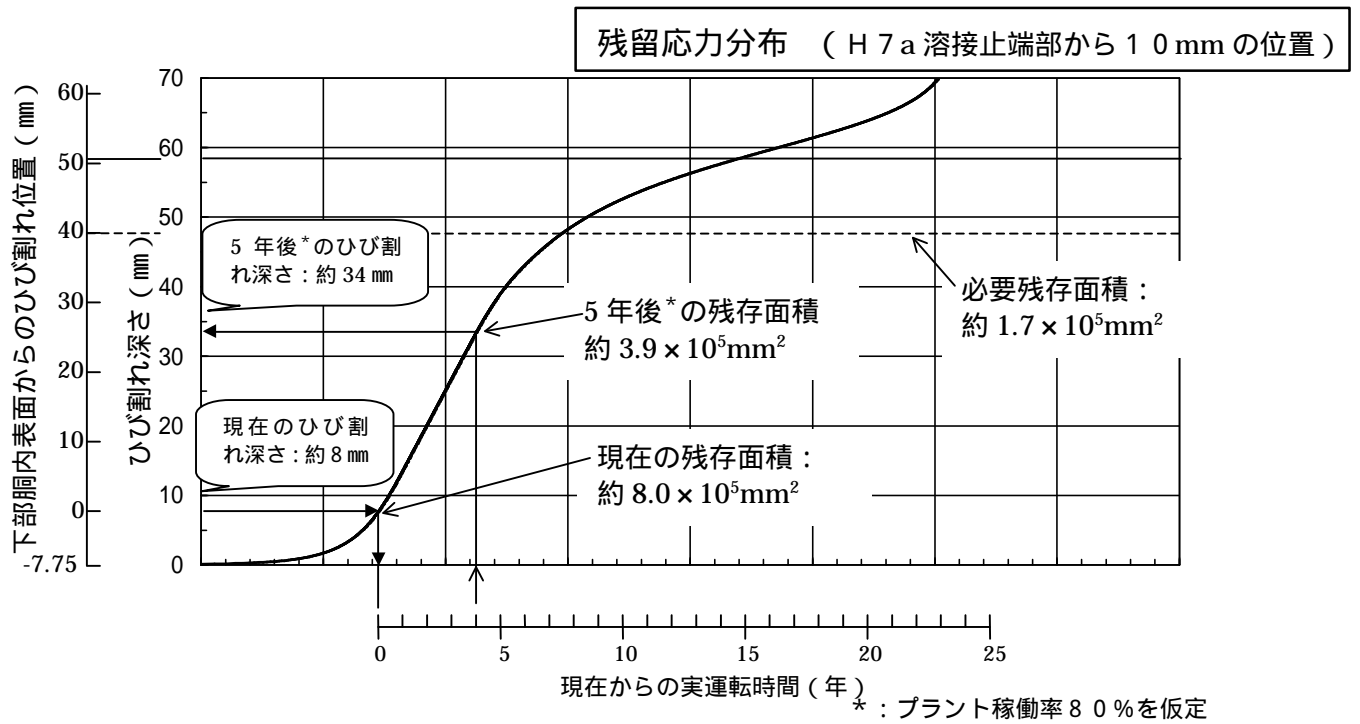


図6 ひび割れの進展解析結果

(2) 評価

ひび割れの進展予測結果より、5年後のひび割れの深さを求め、残存面積を計算した。その結果、ひび割れの深さは約34mmとなり、残存面積は約 $3.9 \times 10^5 \text{ mm}^2$  (ひび割れがない場合の断面積: 約 $9.3 \times 10^5 \text{ mm}^2$ )と求めた。以上の結果より、シュラウドサポートリングにおいて最低限必要な残存面積(約 $1.7 \times 10^5 \text{ mm}^2$ )に対して、5年後の残存面積は約2.3倍(約 $3.9 \times 10^5 \text{ mm}^2$ )を有しており、5年後においてもシュラウドサポートリングの構造上の必要な強度を有していると評価した。

4. 添付

添付1: シュラウドサポートリングの必要残存面積

添付2: シュラウドサポートリングのひび割れの進展評価

5. 参考

<参考資料> 日本機械学会 維持規格に基づくシュラウドサポートリングの必要残存面積の評価

以上

## 添付1：シュラウドサポートリングの必要残存面積

## 1. はじめに

シュラウドサポートリングの必要残存面積を、通商産業省令第62号「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」、(社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」(J E A G 4 6 0 1・補 - 1 9 8 4)等の考え方に基づいて以下に評価する。

## 2. 評価手順

## (1) リガメント部の応力解析による強度評価

評価は、SCCによるひび割れが全周にわたり均一に進展すると仮定し(図1参照)、リガメント部における応力強さが告示501号等に基づく許容応力強さ以下となることを確認するものである。なお、評価手順は添付資料 - 14 添付1と同様にして応力強さ及び許容応力強さより必要残存面積を求める。

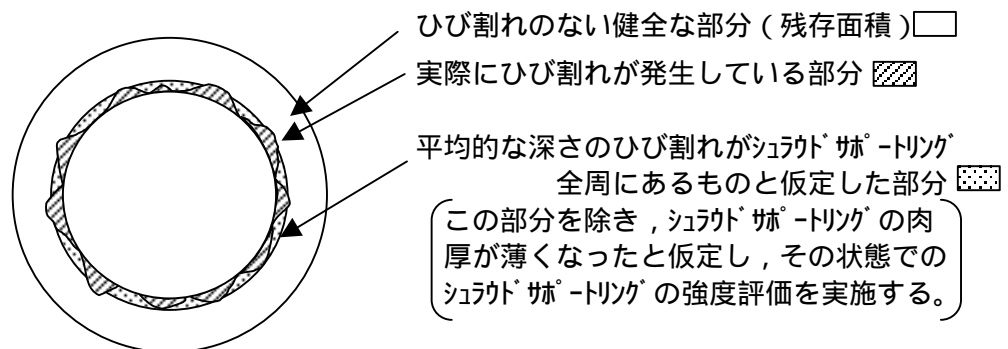


図1 ひび割れのモデル化

## (2) リガメント部における応力強さの算出

リガメント部において評価すべき応力強さは、地震荷重( $S_1, S_2$ )を対象とし、添付資料 - 14と同様に、一次一般膜応力強さを考慮する。

応力強さの算出を以下に示す。

## a. 主応力

各種の荷重(89頁表2)による応力を、応力のカテゴリ毎に重ね合わせ、組合せ応力を求める。組合せ応力は一般に( $t, l, r, tl, lr, rt$ )の6成分をもつが、本評価では $t, l, r, tl$ 成分を考慮し、次式により

主応力を求める（詳細は添付資料 - 14，添付1参照）。

$$\begin{cases} s_1 = \frac{s_t + s_\ell}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_t - s_\ell}{2}\right)^2 + t_{t\ell}^2} \\ s_2 = \frac{s_t + s_\ell}{2} - \sqrt{\left(\frac{s_t - s_\ell}{2}\right)^2 + t_{t\ell}^2} \\ s_3 = s_r \end{cases}$$

次に，組合せ応力に考慮する荷重を表1に示す。表中，「」はその荷重を考慮すること，「」は考慮しないことを示す。

表1 組合せ応力に考慮する荷重

応力	差圧 $DP$	死荷重 $V_{DL}$	地震荷重		
			鉛直力 $V_S$	水平力 $H$	モーメント $M$
$s_t$ ：周方向応力	<input type="checkbox"/>	-	-	-	-
$s_\ell$ ：軸方向応力	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-	<input type="checkbox"/>
$s_r$ ：半径方向応力	<input type="checkbox"/>	-	-	-	-
$t_{t\ell}$ ：せん断力	-	-	-	<input type="checkbox"/>	-

なお，各荷重による応力の算出は下式による。

$$\text{差圧による周方向応力 } s_t = \frac{1}{Y-1} \cdot DP$$

$$\text{差圧による軸方向応力 } s_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot DP$$

$$\text{差圧による半径方向応力 } s_r = \frac{-1}{Y+1} \cdot DP$$

$$\text{死荷重による軸方向応力 } s_\ell = -\frac{V_{DL}}{A}$$

$$\text{地震荷重による軸方向応力 } s_\ell = \frac{V_S}{A} + \frac{M}{Z}$$

$$\text{地震荷重によるせん断応力 } t_{t\ell} = \frac{H}{A}$$

ここで， $Y$ ：内外径の比  $Y = \frac{D_o}{D_i}$ （ $D_o$ ：外径， $D_i$ ：内径）

$$A：断面積 \quad A = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4}$$

$$Z : \text{断面係数} \quad Z = \frac{p}{32} \frac{(D_o^4 - D_i^4)}{D_o}$$

### b. 応力強さ

応力強さ  $S$  は主応力差の絶対値で最大のものとして与えられる。

$$S = \text{Max}(|S_{12}|, |S_{23}|, |S_{31}|)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで, } S_{12} &= s_1 - s_2 \\ S_{23} &= s_2 - s_3 \\ S_{31} &= s_3 - s_1 \end{aligned}$$

### (3) 許容応力強さ

本評価における許容応力強さは(社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」(J E A G 4 6 0 1・補 - 1 9 8 4)(以下、「J E A G 4 6 0 1」という)第2章5項に基づき、表2のとおりとする。

表2 炉心シュラウドの許容応力

許容応力状態 \ 応力分類	一次一般膜応力強さ
${}_A S$ (運転状態, $+S_1$ )	1.5Sm
${}_A S$ (運転状態, $+S_2$ )	2/3Su と 2.4Sm の小さい方

ここで、表中の許容応力状態はJ E A G 4 6 0 1 付録2より以下の定義とする。

- ${}_A S$  : 告示501号の運転状態 相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な制限を加えた許容応力状態
- ${}_A S$  : 告示501号の運転状態 相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な制限を加えた許容応力状態

## 2. 荷重条件

運転状態  $+S_1$  及び  $+S_2$  について、建設時の工事計画認可申請書の耐震計算における最大応答値に余裕を考慮して表3に示す荷重条件を設定した。

また、炉心シュラウド内外差圧は、105%出力、105%炉心流量（運転状態、）における差圧解析結果に余裕を考慮して0.25MPaとした。

表3 荷重条件

評価部位 \ 荷重条件	差圧 (MPa)	死荷重 (kN)	地震荷重		
			鉛直力 (kN)	水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
運転状態、 $+S_1$	0.25	1900	550	4600	24800
運転状態、 $+S_2$	0.25	1900	720	6800	38600

### 3. 評価モデル

実際のひび割れはシュラウドサポートリングの表面にほぼ全周に断続的に発生しているが、条件を厳しく設定し、シュラウドサポートリング全周にひび割れがあるものと仮定した。

当該溶接部は、余盛りがあり強度上期待できるものであるが、ここでは安全側にこれを有効板厚として考慮しないモデルとした（図2参照）。

$t_c$ ：残存板厚

$R_i$ ：下部胴外半径 = 約 2.5m（注）

$t$ ：下部胴板厚 = 50.8mm

注：メーカノウハウを含むため数値を丸めて記載

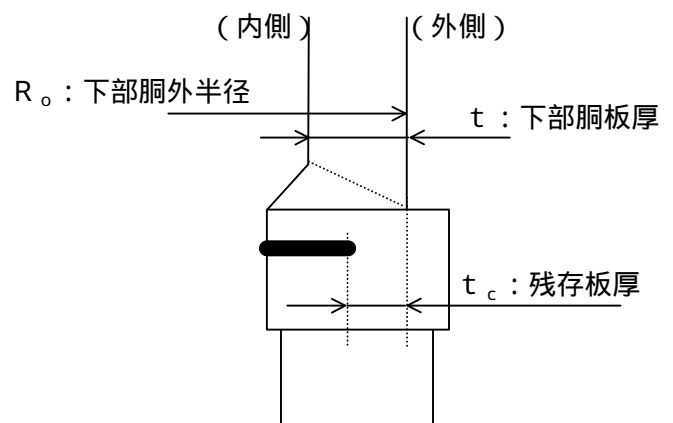


図2 評価モデル

### 4. 評価結果

2. 項の荷重条件及び3. 項の評価モデルで、ひび割れの進展を考慮した応力強さを算出した結果を図3に示す。評価に用いる荷重は一定であることから、ひび割れの深さが大きくなるに従い、応力強さは大きくなる。

一方、運転状態、 $+S_1$ 及び、 $+S_2$ に対する許容応力強さは、それぞれ表4のとおり求まる。

表4 許容応力強さ

許容応力状態 \ 応力値	許容応力強さ
${}_A S$ (運転状態 , $+S_1$ )	$1.5S_m = 142\text{N/mm}^2$
${}_A S$ (運転状態 , $+S_2$ )	$2/3S_u$ と $2.4S_m$ のうち小さい方 = $2.4S_m$ = $228\text{N/mm}^2$

( $S_m$ : 設計応力強さ =  $95.3\text{N/mm}^2$ ; SUS316L at297 , 告示 5 0 1 号別表 2 より算出)

これらより, 全周に均一な深さのひび割れを想定したモデルにおいて運転状態 ,  $+S_1$  及び ,  $+S_2$  それぞれに対して, 発生応力強さが許容応力強さに達するときのひび割れの深さを求め, この時の残存面積が必要残存面積となり表 5 のとおり求まる。

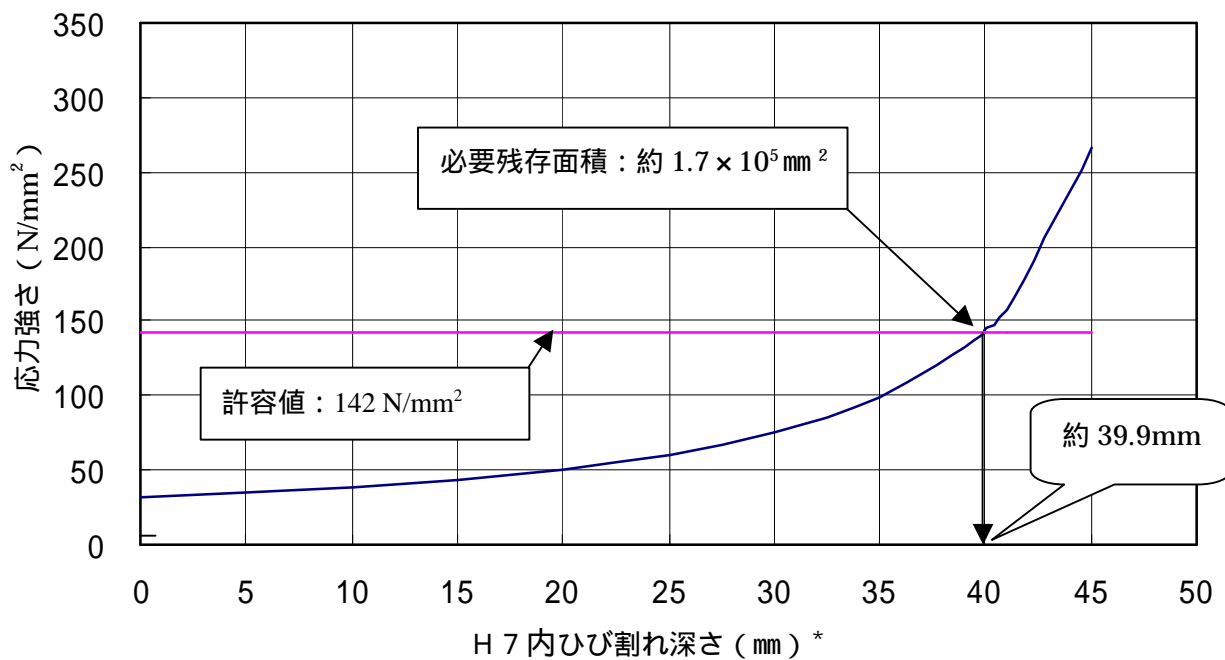
表5 必要残存面積

許容応力状態 \ 必要残存面積	必要残存面積
${}_A S$ (運転状態 , $+S_1$ )	約 $1.7 \times 10^5 \text{mm}^2$
${}_A S$ (運転状態 , $+S_2$ )	約 $1.6 \times 10^5 \text{mm}^2$

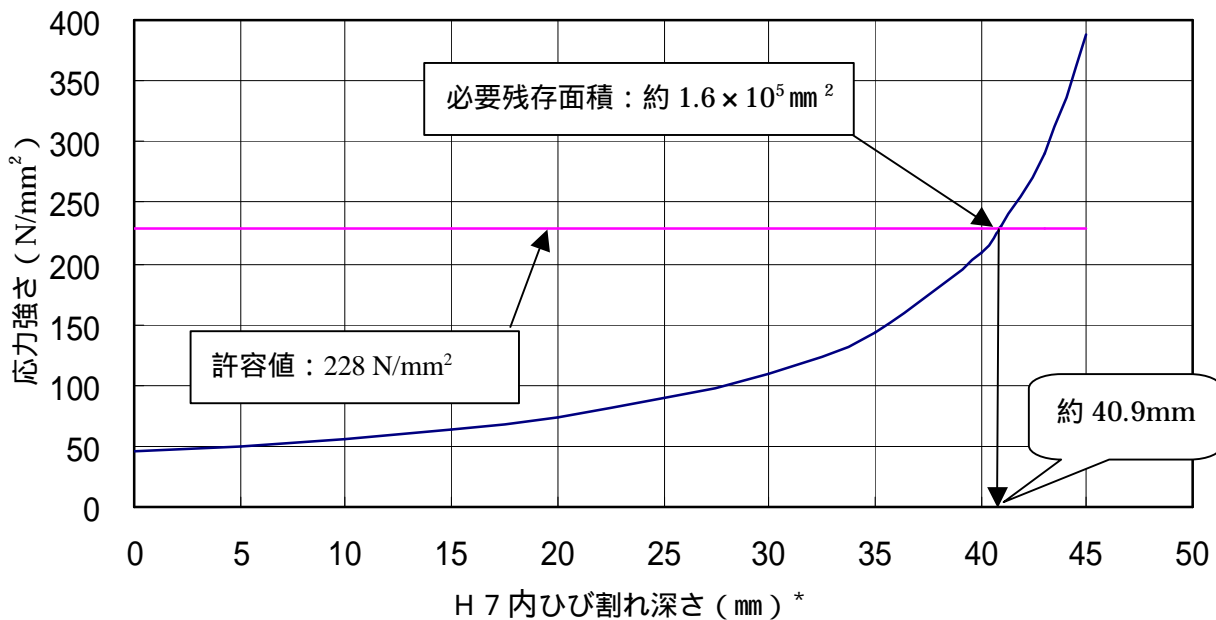
従って, 溶接部 (H 7 内) の必要残存面積は約  $1.7 \times 10^5 \text{mm}^2$  となる。

以上

運転状態 , +S1 ( H7 内 )



運転状態 , +S2 ( H7 内 )



\* : ひび割れの深さは , 下部胴内表面からの長さである。

図3 シュラウドサポートリングの必要残存面積評価

## 添付 2 : シュラウドサポートリングのひび割れの進展評価

### 1. はじめに

有限要素解析 ( F E M ) により求めた残留応力分布をもとに , シュラウドサポートリングに発生した S C C によるひび割れが進展する速度及び , ある年数が経過した後の進展後のひび割れ寸法を推定する手法を以下に示す。

### 2. 評価手順

高温純水中におけるステンレス鋼の S C C では , 材料及び腐食環境の条件が一定な場合 , ひび割れの進展速度が応力条件に依存することが知られている。よって , 破壊力学の知見からひび割れの進展速度は応力拡大係数 ( K 値 : ひび割れ周辺の応力分布とひび割れの形状によって定まるパラメータ ) から評価できる。図 1 に S C C の進展評価の手順を示すように , 添付資料 - 14 添付 2 と同様な評価手順である。

### 3 . 評価条件

- ( 1 ) 評価対象部位 : 溶接部 ( H 7 内 ) 近傍 ( シュラウドサポートリング )
  - ( 2 ) 残留応力分布 : F E M 汎用解析コード A B A Q U S を用いて解析した値を用いる ( 図 2 , 3 )
  - ( 3 ) 初期欠陥 : 円筒内側の全周欠陥 ( 深さ 0 . 1 m m ) \* 1
  - ( 4 ) 応力拡大係数 : A P I ( 米国石油協会 ) 規格 5 7 9 の導出式を用いる。
  - ( 5 ) ひび割れの進展速度 : 低炭素ステンレス鋼の S C C 進展データ ( 図 4 )
- \* 1 : 東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所 3 号機で確認された表面加工層の厚さを想定した。

### 4 . 評価方法

#### ( 1 ) 初期欠陥の想定

ひび割れの進展速度評価は粒界型応力腐食割れの進展評価であるので , 炉心シュラウド極表層の加工硬化部に発生する粒内型応力腐食割れについては運転開始時 ( 直後 ) から存在していたものとし , 加工硬化部の深さを 0 . 1 m m と設定した。一方 , 欠陥は初期から全周にわたるものとした。

なお , 初期欠陥の設定は S C C 発生までの時間をゼロと評価することであり , 全周欠陥とすることは K 値を大きめに評価することになるため , 安全評価上保守側の扱いとなる。

## ( 2 ) 応力拡大係数 ( K 値 )

応力拡大係数評価式は、円筒外側の全周欠陥に対する K 値の算出式を規定していることから A P I 規格 5 7 9 を引用した。

応力拡大係数の算出においては、まず、深さ方向の残留応力分布 ( 図 3 ) を次式のような 4 次多項式にて近似する。

$$s = s_0 + s_1 \left( \frac{x}{t} \right) + s_2 \left( \frac{x}{t} \right)^2 + s_3 \left( \frac{x}{t} \right)^3 + s_4 \left( \frac{x}{t} \right)^4$$

$s$  : 応力 ( 分布 ) [MPa]

$x$  : 円筒外側からの位置 ( 深さ ) [m]

$t$  : 円筒肉厚 [m]

$s_0 \sim s_4$  : 回帰係数

次に下記の A P I の K 値評価式により初期欠陥設定値及び上記の係数を用いて K 値を算出する ( 図 5 )。

$$K = \left[ G_0 s_0 + G_1 s_1 \left( \frac{a}{t} \right) + G_2 s_2 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + G_3 s_3 \left( \frac{a}{t} \right)^3 + G_4 s_4 \left( \frac{a}{t} \right)^4 \right] \sqrt{pa}$$

$G_0 \sim G_4$  : 影響係数 : A P I 規格 5 7 9 において  $\frac{a}{t}$  に対して定められる。

$a$  : 欠陥深さ [m]

## ( 3 ) ひび割れの進展量評価

算出された K 値に対する S C C 進展速度を低炭素ステンレス鋼の S C C 進展データ ( 図 4 , 算出式は以下に示す ) から評価し、単位時間あたりの S C C 進展量を求める。

S C C 進展速度  $\frac{da}{dt}$  [mm/sec]

$$\frac{da}{dt} = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{m})$$

$$\frac{da}{dt} = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7 \text{ MPa}\sqrt{m})$$

$$\frac{da}{dt} = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{m})$$

算出された単位時間あたりの S C C 進展量を初期欠陥深さに加算し、ひび割れ深さとする。

以上の計算を繰り返し、S C C 進展評価（ひび割れ深さと時間の関係）とする。

## 5 . 評価結果

- 評価部位の欠陥の大きさ、及び残留応力により求めた応力拡大係数分布を図 5 に示す。
- ひび割れの進展深さと時間の関係を図 6 に示す。シュラウドサポートリングに発生したひび割れは初期には緩やかに進展し、途中で進展量が増加し、その後再び緩やかな進展となる。

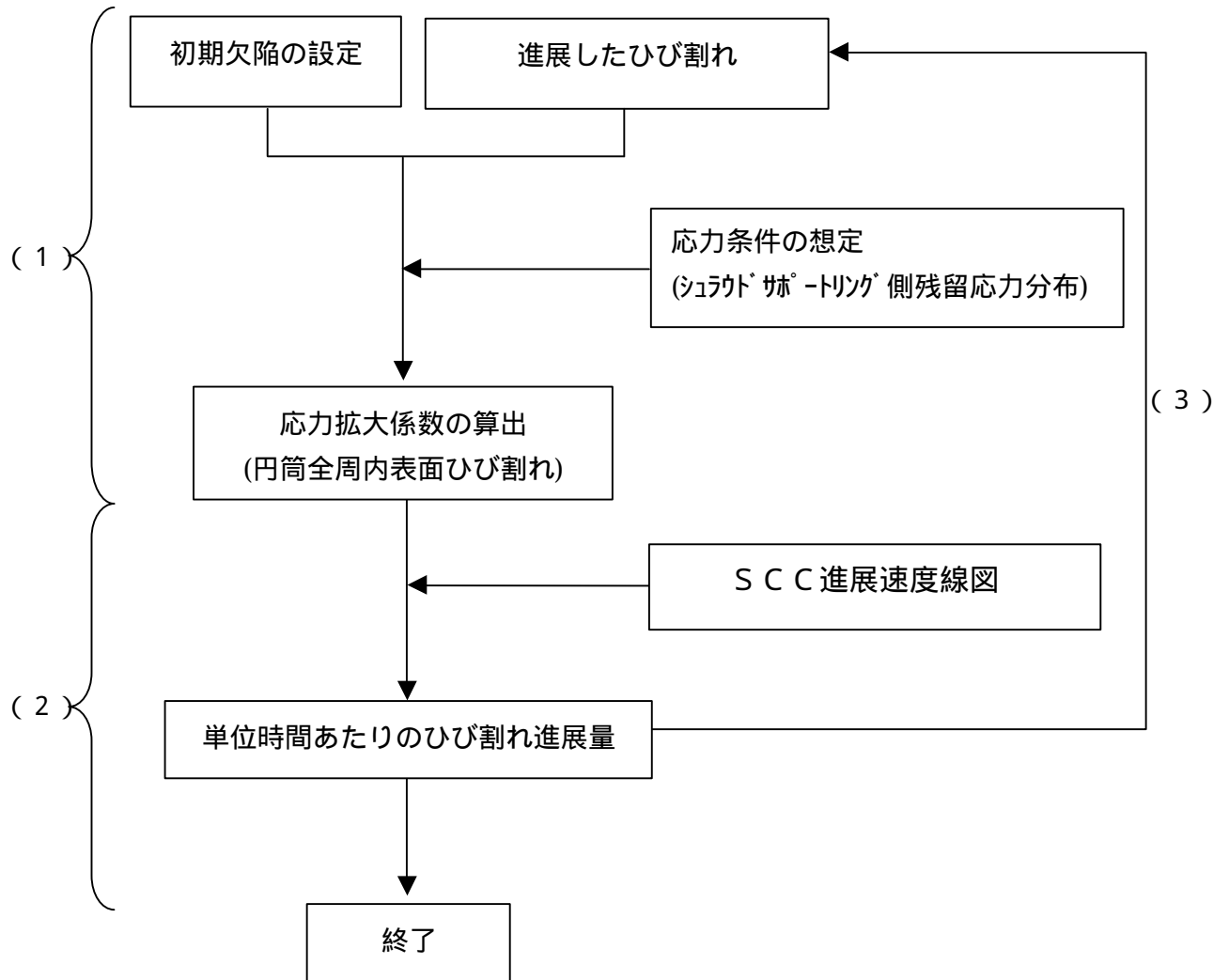


図1 ひび割れの進展評価手順

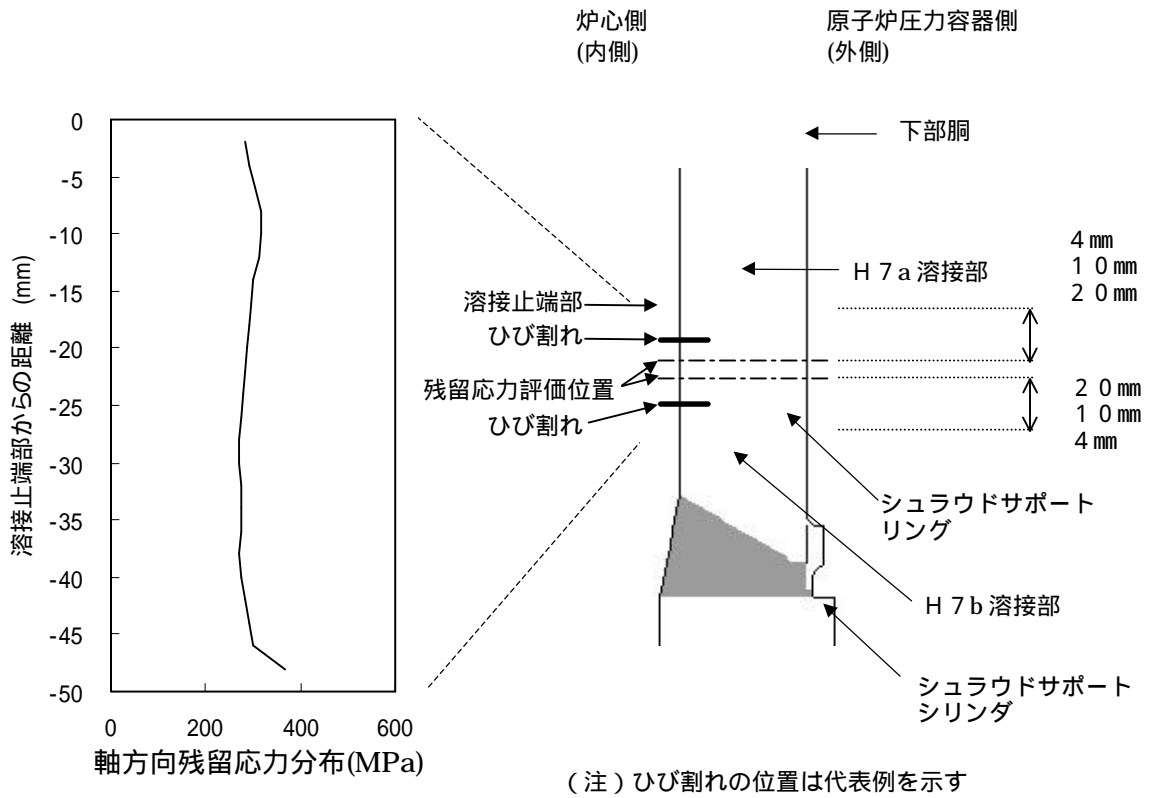


図2 軸方向残留応力分布 (シュラウドサポートリング内表面)

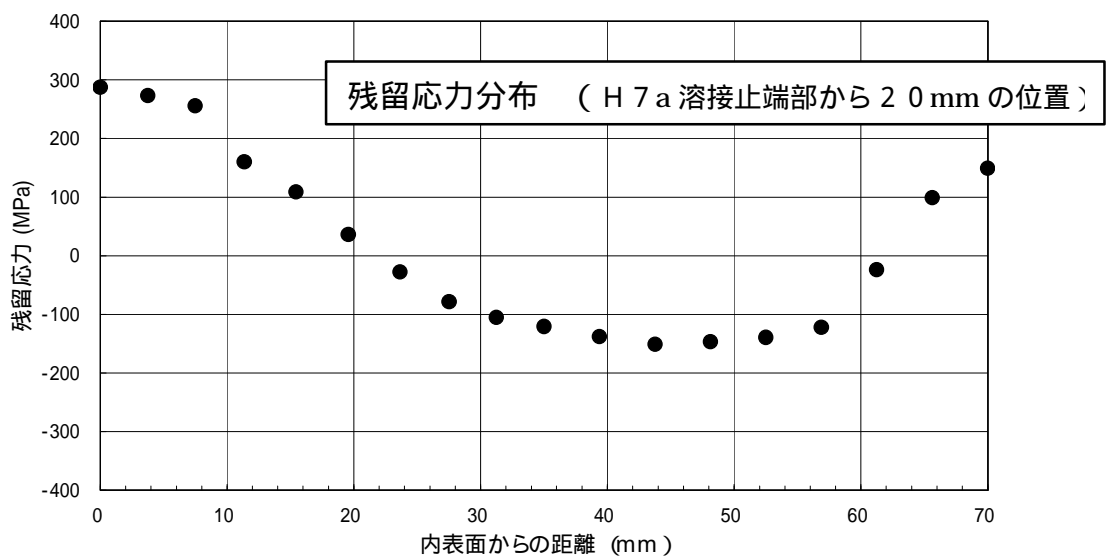
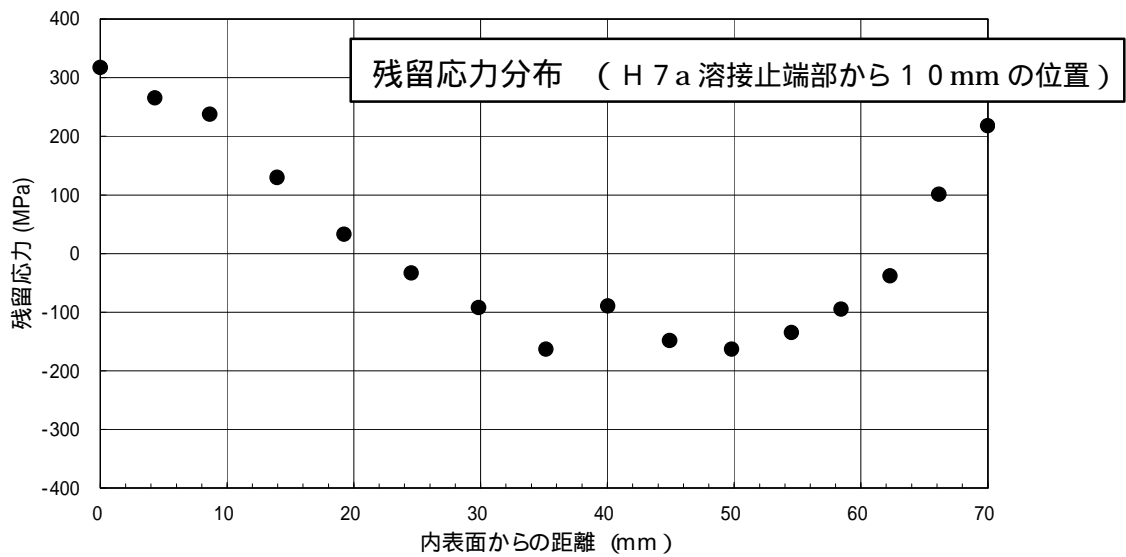
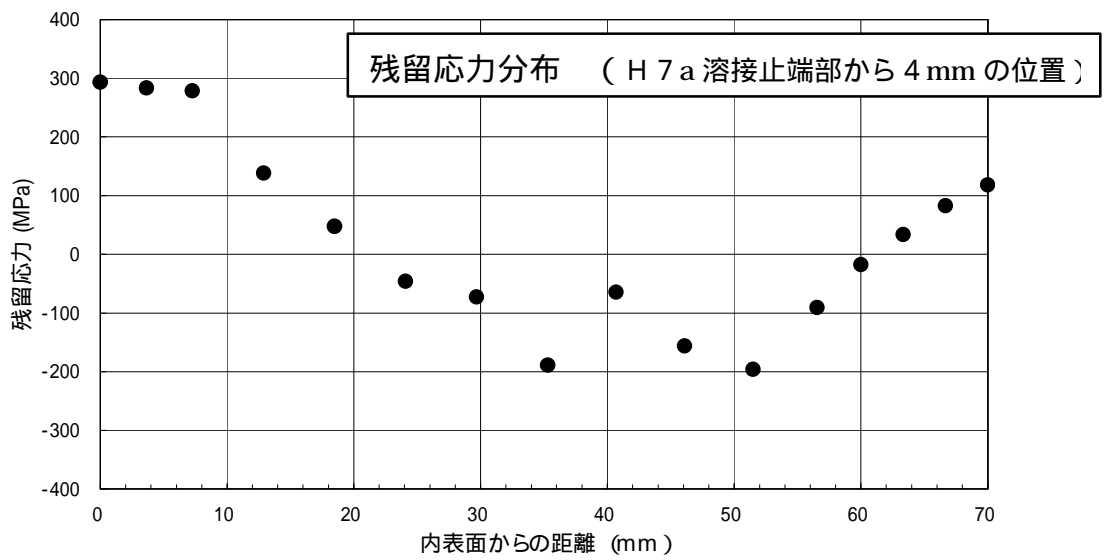


図 3 ( 1 ) シュラウドサポートリングの軸方向残留応力分布

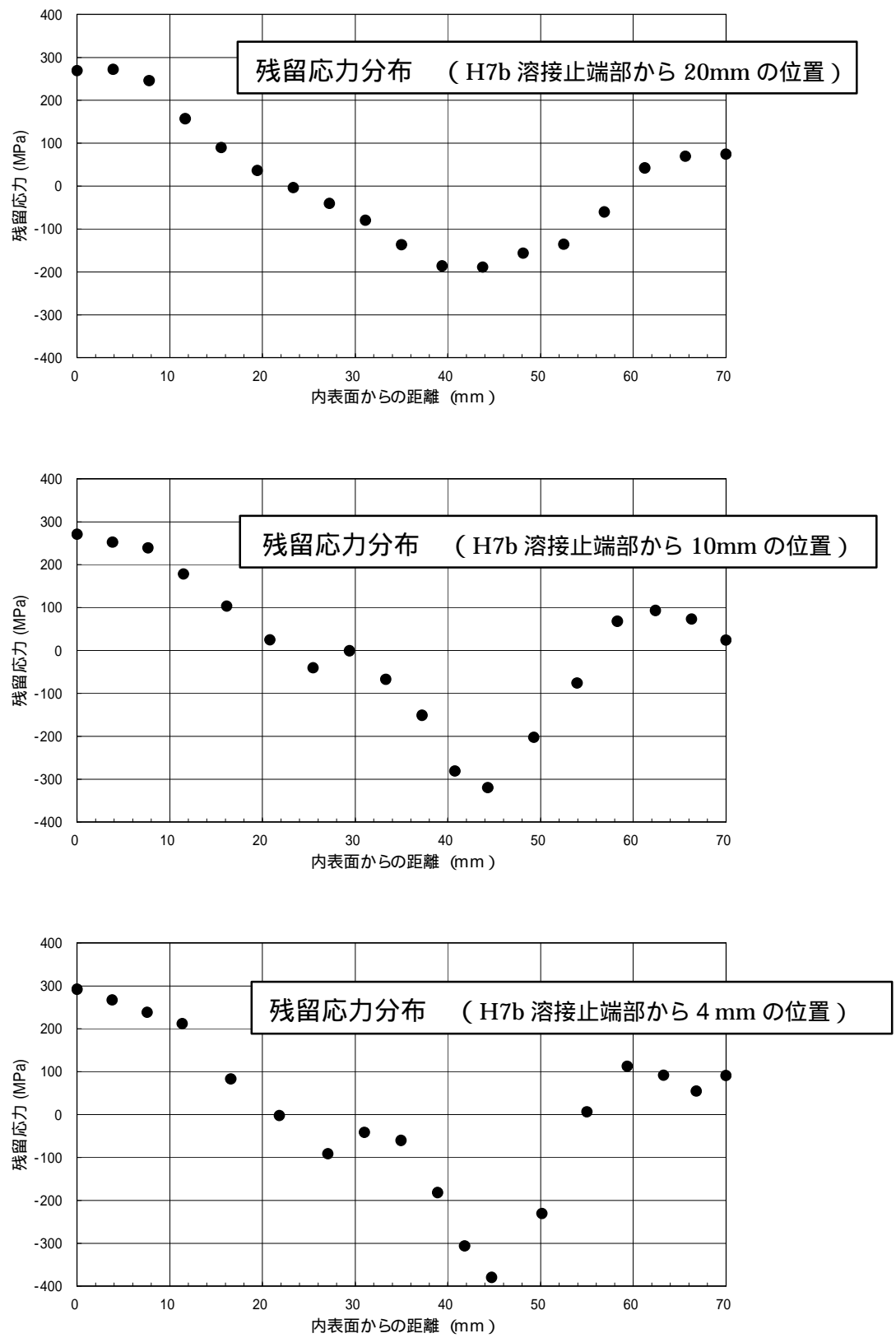


図3 ( 2 ) シュラウドサポートリングの軸方向残留応力分布

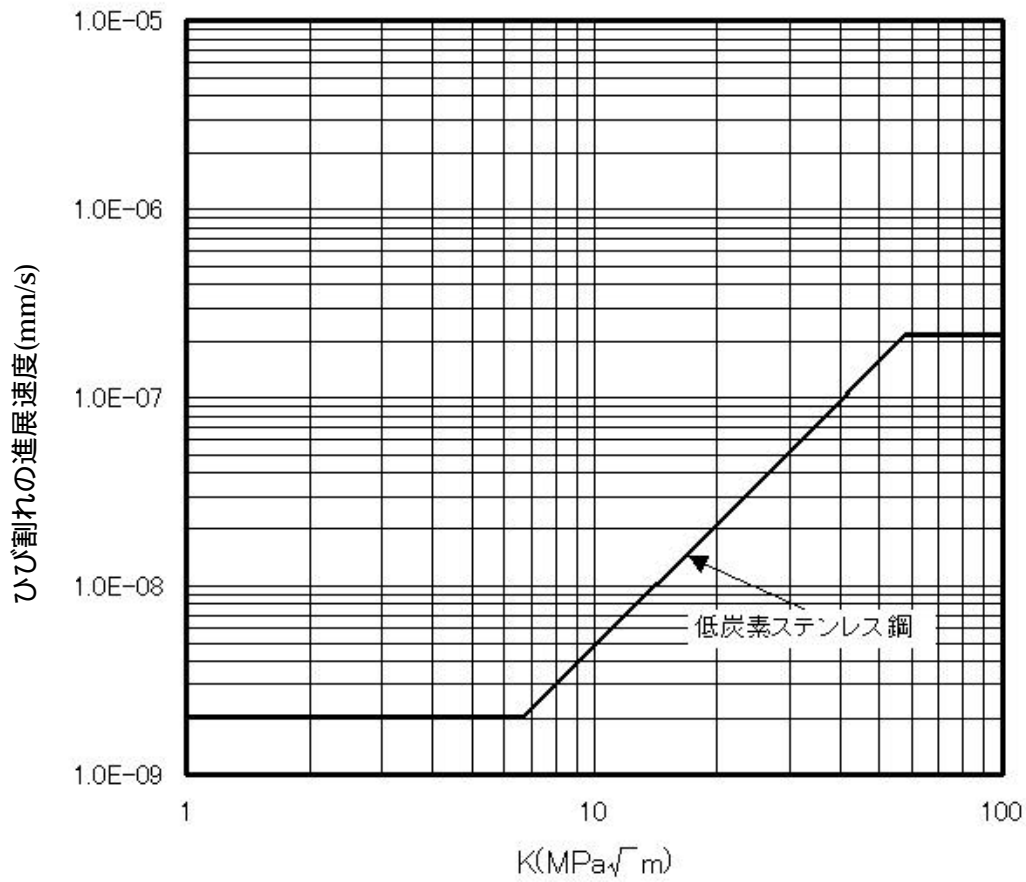


図4 低炭素ステンレス鋼のSCC進展データ

出典)

「BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [ 炉心シュラウド ]」  
 (平成13年11月:(社)火力原子力発電技術協会)  
 に記載のオーステナイト系ステンレス鋼の通常炉内水質環境中の  
 SCC進展評価線図から低炭素ステンレス鋼の線図を抜粋した。

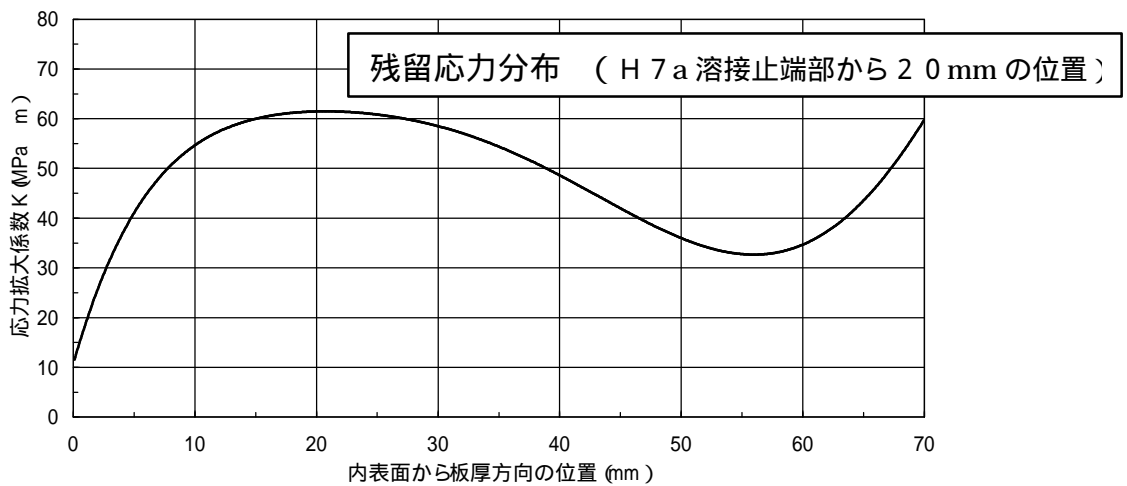
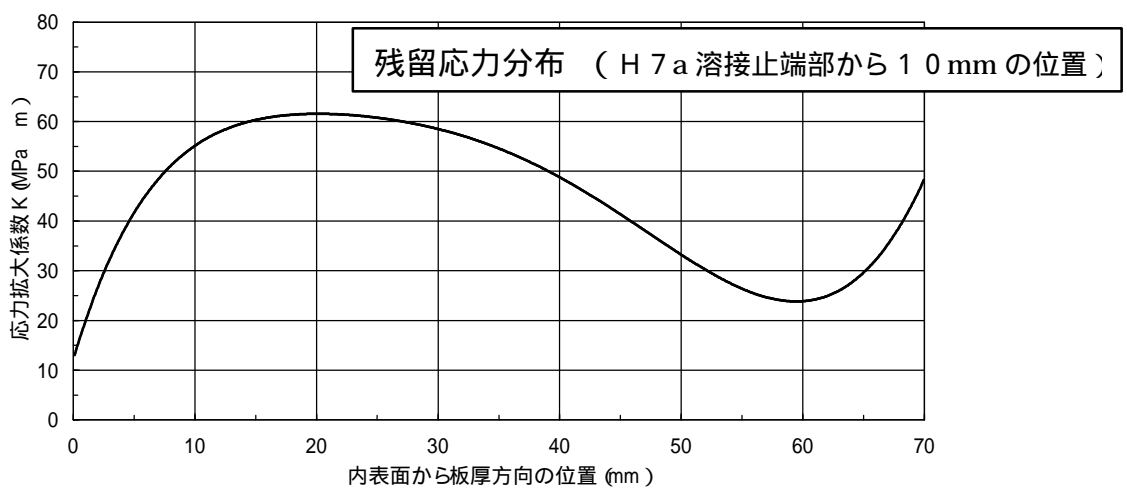
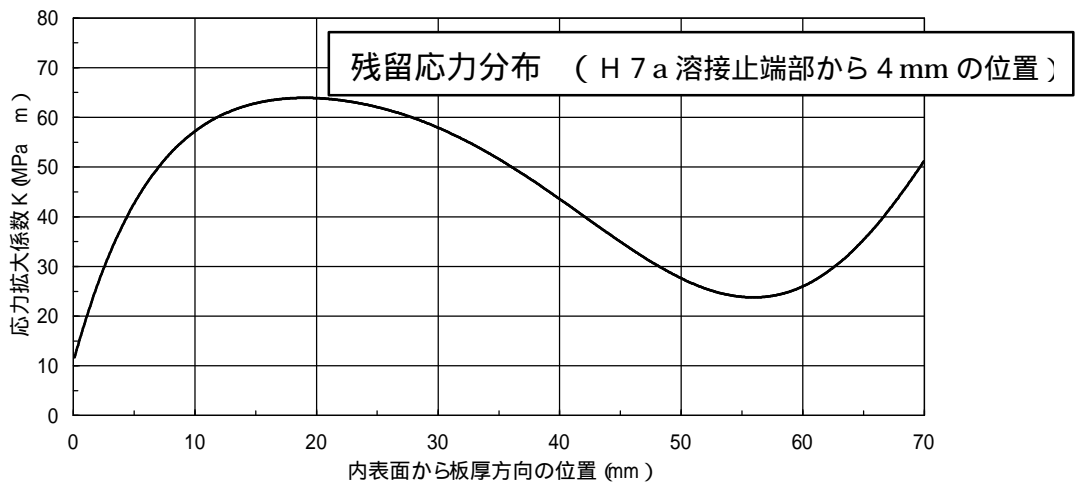


図 5 ( 1 ) シュラウドサポートリングの応力拡大係数分布

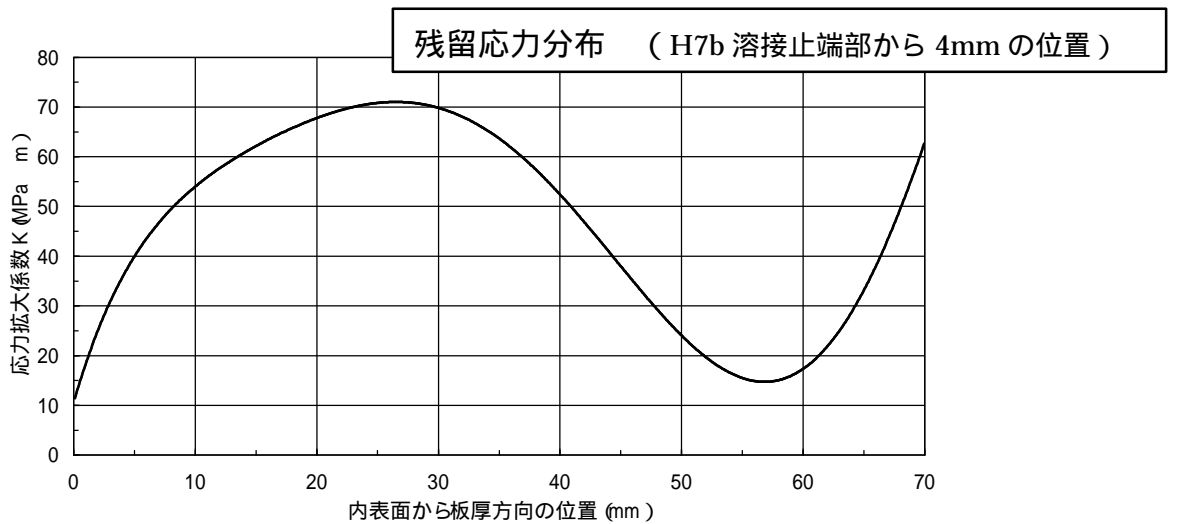
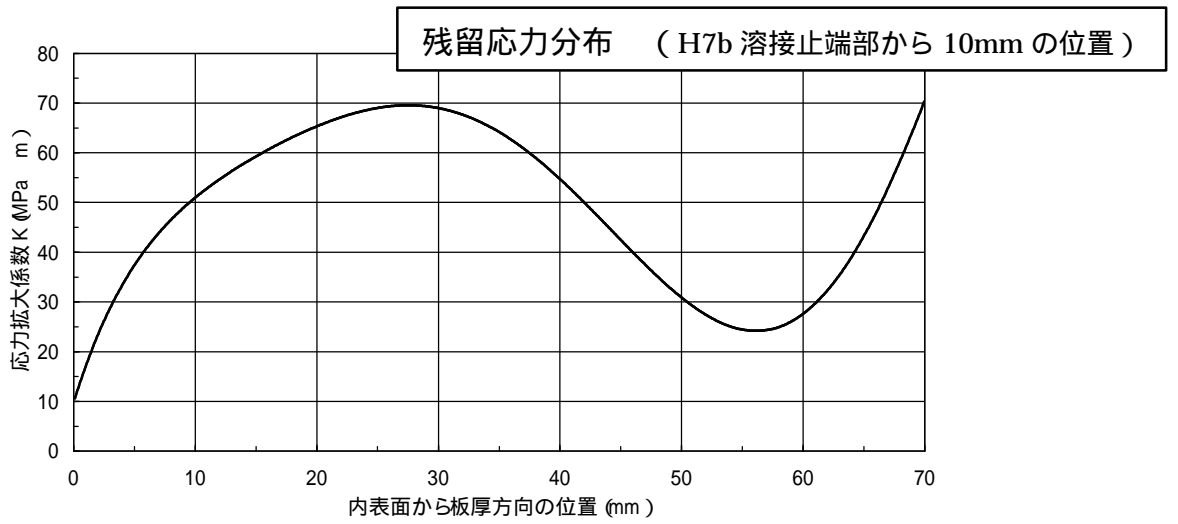
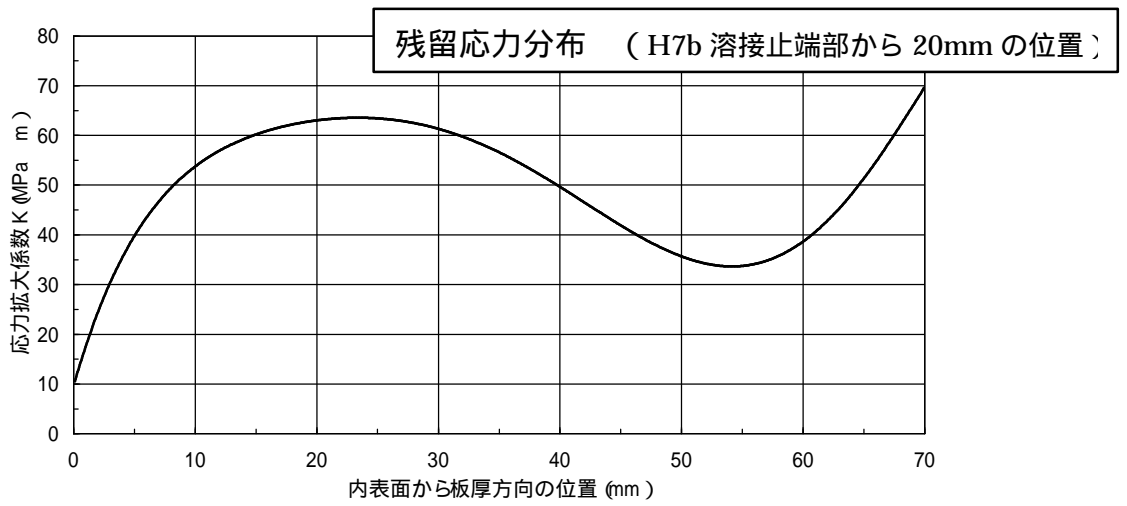


図 5 ( 2 ) シュラウドサポートリングの応力拡大係数分布

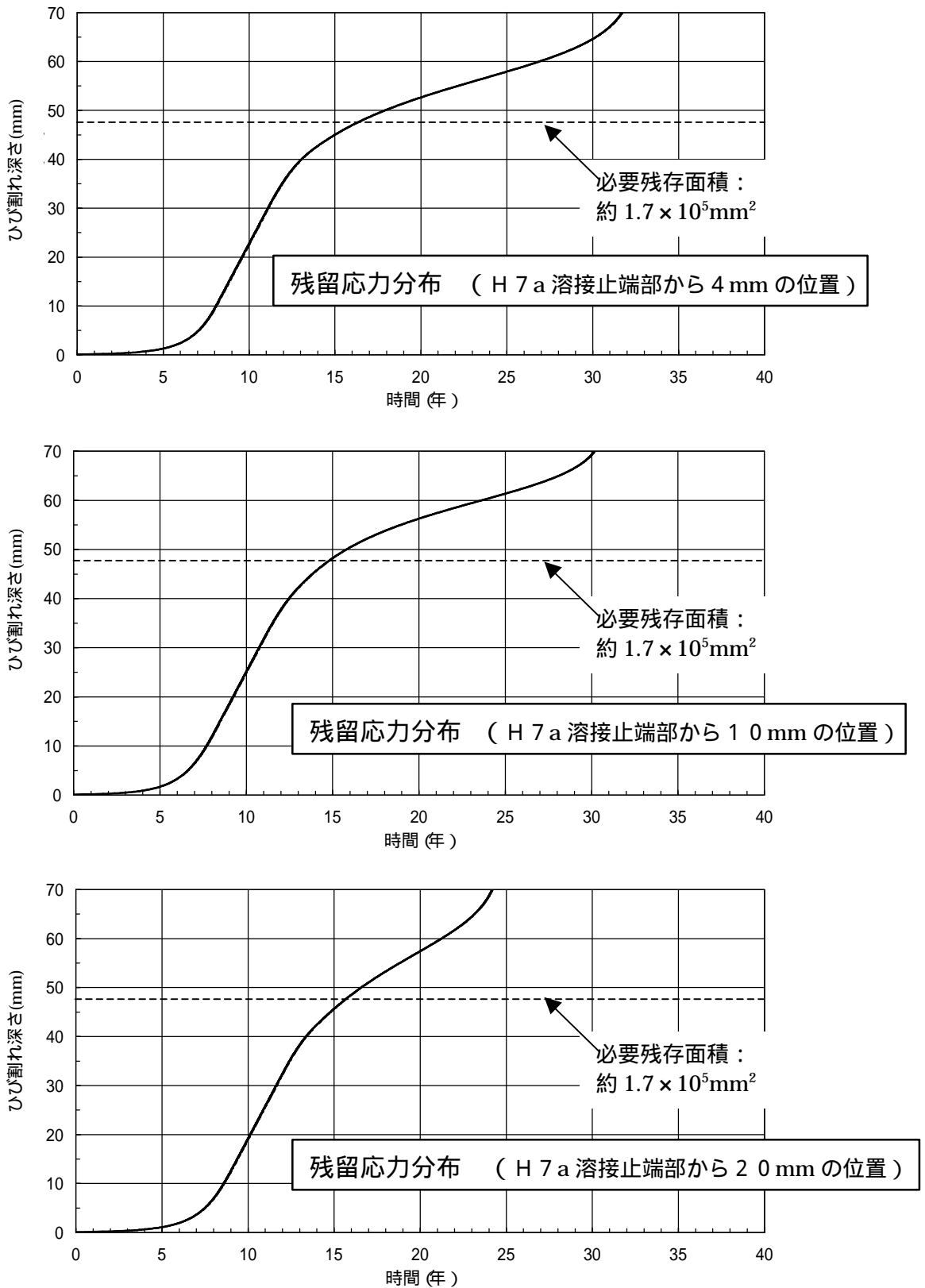


図 6 ( 1 ) シュラウドサポートリングのひび割れ深さと時間の関係

円筒全周 ( 内表面 ) 欠陥  
 ( 初期欠陥 0 . 1 mm 深さ )

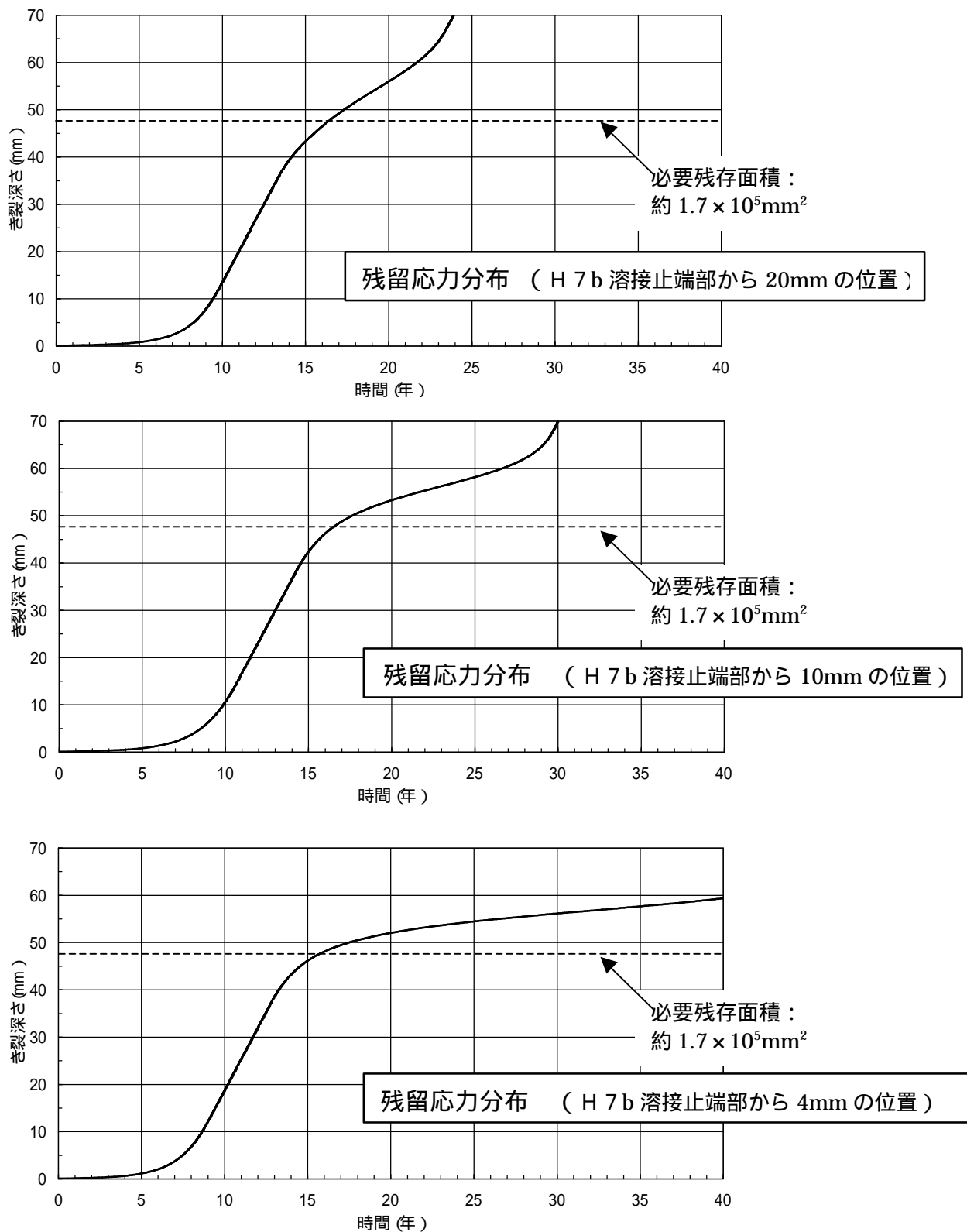


図6 ( 2 ) シュラウドサポートリングのひび割れ深さと時間の関係  
 円筒全周 (内表面) 欠陥  
 (初期欠陥 0.1 mm 深さ)

< 参考資料 > 日本機械学会 維持規格に基づくシュラウドサポートリング  
の必要残存面積の評価

シュラウドサポートリングの必要残存面積を、(社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格」(以下、「維持規格」という)の考え方に基づいて以下に評価する。

1. 評価方法

炉心シュラウドの材料であるオーステナイト系ステンレス鋼は延性を有する材料であるため、破壊はひび割れを有する円筒の正味断面が流動応力に達した時に起こるものとして、維持規格の極限荷重評価法の考え方に基づいて必要残存面積の評価を行う。

(1) 評価条件

維持規格に基づき定めた評価条件を以下に示す。

- a. 流動応力  $f = 2.7 S m$
- b. 安全率  $S F = 1.5$  ( 運転状態 ,  $+ S_2$  )

(2) 評価モデル

溶接部 ( H 7 内 ) は、目視点検によりほぼ全周に断続的にひび割れがあることを確認していることから、全周に均一な深さのひび割れを想定した。

当該溶接部は、すみ肉溶接部があり強度上期待できるものであるが、ここでは安全側にこれを有効板厚として考慮しないモデル ( 図 1 参照 ) を作成した。

$$\text{評価断面積 } A = \{ R_o^2 - ( R_o - t_c )^2 \}$$

ここで、 $t_c$  : 残存板厚

$R_o$  : 下部胴外周半径 = 約 2 . 5 m ( 注 )

$t$  : 下部胴板厚 = 50 . 8 mm

注: メーカーノウハウを含むため数値を丸めて記載

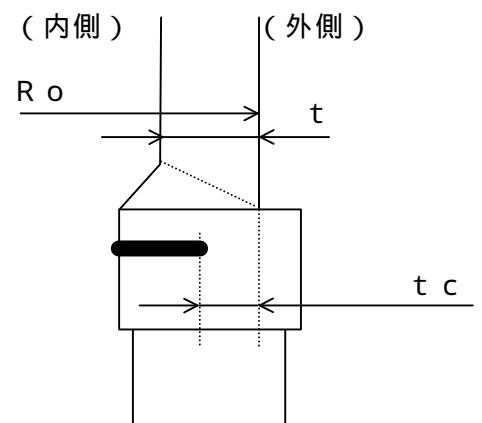


図1 評価モデル

(3) 極限荷重評価法

維持規格の極限荷重評価法の考え方は、断面全体が流動応力に達した時に不安定破壊を起こすという考え方に基づいている。そこで、必要残存面積を

評価するにあたっては、構造強度上厳しくなるように周方向に一様なひび割れを仮定し、残存断面における応力値が流動応力に達するときの面積を必要残存面積として求めている。以下に必要な残存面積の算出手順を示す。

a . 応力値の算出

3軸応力場での材料の破壊については、告示501号で最大せん断応力説を採用し、応力強さが破壊を決定付けるパラメータとしている。必要残存面積の評価にあたっては、周方向に一様なひび割れを仮定しているため、応力強さに等しい応力となるような引張荷重が一様に軸方向に働くものとして評価を行う。応力強さは、主応力の差の最大値として下式に示すとおり与えられる(70～72頁参照)。

$$S = \text{Max}(|S_{12}|, |S_{23}|, |S_{31}|) \quad \text{-----} (1)$$

b . 評価用荷重の算出

前項で求めた応力強さが軸方向に一様引張となるような荷重Fを下式により算出する。

$$F = S(SF)(R_o^2 - (R_o - t)^2) \quad \text{-----} (2)$$

ここで、

S : 応力強さ

R<sub>o</sub> : 下部胴外周半径=約2.5m

t : 下部胴板厚=50.8mm

SF : 安全率=1.5

c . 必要残存面積の算出

前項の荷重状態の下で、応力値が流動応力に達する時の断面積を下式より算出し、必要残存面積とする。

$$F = f A \quad \text{-----} (3)$$

ここで、

f : 流動応力 = 2.7Sm = 257.3 N/mm<sup>2</sup>

(Sm : 設計応力強さ = 95.3 N/mm<sup>2</sup> ; SUS316Lat297 ,  
発電用原子炉設備に関する構造等の技術基準 (告示第501号)  
別表第2より算出)

A : 断面積

## 2. 荷重条件

評価上厳しい状態となる地震荷重を対象とし、運転状態、 $S_2$ について（維持規格に基づく場合、荷重が大きくなる  $S_2$ 地震が支配的）、建設時の工認耐震計算書記載の最大応答値に余裕を考慮して表1に示す荷重条件を設定した。

また、炉心シュラウド内外差圧は、105%出力、105%炉心流量（運転状態、 $S_2$ ）における差圧解析結果に余裕を考慮して0.25MPaとした。

表1 シュラウドサポートリング荷重条件

評価条件 評価部位	差圧 (MPa)	地震荷重	
		水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
シュラウドサポートリング	0.25	6800	38600

## 3. 評価結果

以上より得られた下式に基づき必要残存面積を算出したところ、約  $2.2 \times 10^5 \text{ mm}^2$  と求めた。

$$A = S \cdot (SF) \cdot (R_o^2 - (R_o - t)^2) / f$$

ここで

$$\left\{ \begin{array}{l} S = 46.7 \text{ N/mm}^2 \\ SF = 1.5 \\ R_o = \text{約 } 2.5 \text{ m} \\ t = 50.8 \text{ mm} \\ f = 257.3 \text{ N/mm}^2 \end{array} \right.$$

以上

## 下部胴の強度評価

### 1. はじめに

下部胴の強度評価は、通商産業省令第62号「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」、(社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計指針 重要度分類・許容応力編」(J E A G 4 6 0 1・補 - 1 9 8 4)等の考え方に基づき、以下のとおり実施した。

- (1)現時点の周方向ひび割れ長さあるいは一定期間後の周方向ひび割れ長さに対して板厚方向には貫通を仮定し、貫通した部分を除いた部分であるリガメント部の面積をその時点での残存面積とする。
- (2)地震等の荷重が作用した時のリガメント部における応力強さが、通商産業省告示第501号(以下、「告示501号」という)に基づく許容応力強さと等しくなる場合のリガメント部面積を必要残存面積とする。
- (3)求めた残存面積と必要残存面積を比較する。
- (4)残存面積 > 必要残存面積であれば、下部胴の強度は確保されていると判断する。

### 2. 現在の健全性評価

本評価は、現時点での下部胴の強度評価を実施したものである。評価は、以下の手順に従い実施した。

#### (1) 現在の残存面積

現在の残存面積は、実際のひび割れに、ひび割れの両側に板厚分(50.8 mm)の余裕を考慮し、貫通した欠陥として図1に示すモデルに基づき算出した。

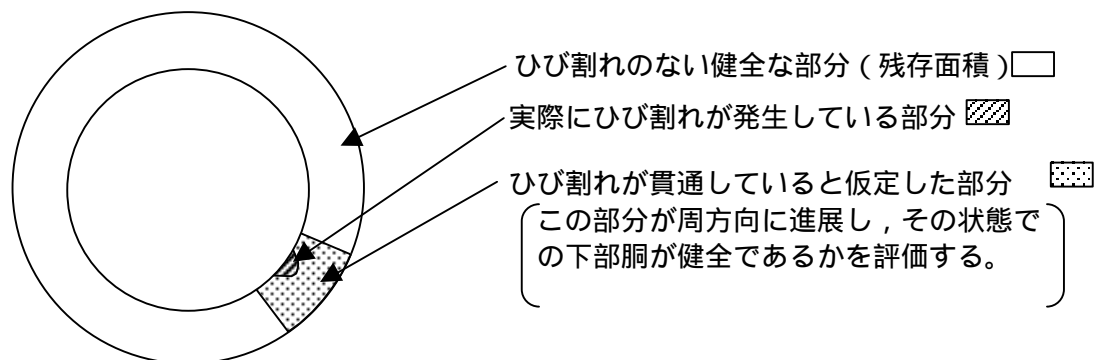


図1 ひび割れのモデル化

現在の残存面積を算出した結果を表1に示す。

表1 現在の残存面積

	下部胴
残存面積	約 $8.0 \times 10^5 \text{ mm}^2$
周方向ひび割れ長さ	約 116 mm

(2) 必要残存面積

必要残存面積は、下部胴にとってもっとも厳しい状態である、通常運転中に地震が発生した状態を考えて、以下のとおり求めた（詳細は添付1参照）。

a. 評価手順

- (a) 通常運転中に地震が発生した時に負荷される荷重より、リガメント部における応力強さを算出する。
- (b) 告示501号等に従い、許容応力強さを算出する。
- (c) (a)、(b)項より、応力強さが許容応力強さと等しくなる残存面積を必要残存面積とする。

b. 評価条件

シュラウドは外径に比較して肉厚の薄い円筒構造であることから、板厚に平均的に働く力（一次一般膜応力）が構造強度に影響を及ぼすものとして評価する。告示501号の規定に基づき定めた評価条件を以下に示す。

- (a) 運転状態  $S_1$  に対する許容応力強さ：  $1.5 S_m$
- (b) 運転状態  $S_2$  に対する許容応力強さ：  $2/3 S_u$  と  $2.4 S_m$  の小さい方
- (c) ひび割れ：部分的に貫通したひび割れ

c. 荷重条件

運転状態  $S_1$  及び  $S_2$  について、建設時の工事計画認可申請書の耐震計算における最大応答値に余裕を考慮して表2に示す荷重条件を設定した。

表2 下部胴の荷重条件

評価部位 \ 荷重条件	差圧 (MPa)	死荷重 (kN)	地震荷重		
			鉛直力 (kN)	水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
運転状態 , +S <sub>1</sub>	0.25	1900	550	4600	24800
運転状態 , +S <sub>2</sub>	0.25	1900	720	6800	38600

## d . 評価モデル

評価モデルを図2に示す。欠陥は、下部胴を貫通しているものとする。図中、Lは周方向のひび割れ長さを、Sは応力強さを示す。また、軸方向のひび割れは強度に影響を及ぼさないことから、本評価では周方向のみを考慮したモデルとする。

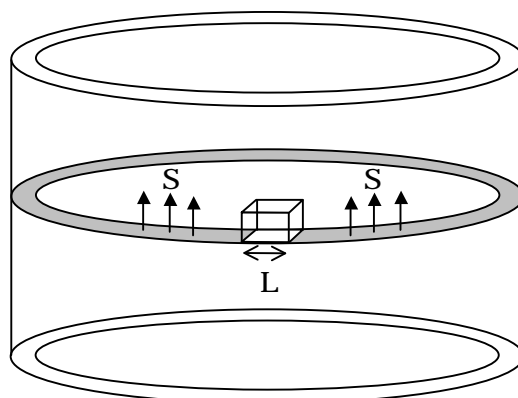


図2 評価モデル

## ( 3 ) 評価結果

前述の条件、モデルから、欠損部の周方向長さが増加する(ひび割れの進展)ことに対する当該部の応力強さを求める。評価に用いる荷重は一定であることから、欠損部の周方向長さが大きくなるほど応力強さは大きくなる。次に告示501号から求まる許容応力強さとの交点を求める。この時の周方向残存長さが許容される最小の周方向長さ、すなわち周方向必要最小長さとなる。

必要残存面積の算出結果を表3に示す。(1)項で求めた現時点の残存面積は必要残存面積以上であり、現時点での健全性が確保されていることを確認した。

表3 下部胴の必要残存面積

	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )
運転状態 , +S <sub>1</sub>	約 4.4 × 10 <sup>5</sup>
運転状態 , +S <sub>2</sub>	約 4.3 × 10 <sup>5</sup>

3. 一定期間後の健全性評価

本評価は、一定期間後の下部胴の強度評価を実施したものである。評価は5年後\*を対象に実施した。ひび割れの進展解析を行い、5年後\*の周方向ひび割れ長さから5年後\*の残存面積を算出し、必要残存面積と比較した。

\*：実運転時間は4年（プラント稼働率80%を仮定）

a. ひび割れの進展解析

ひび割れの進展解析は以下の手順により実施した。（詳細は添付2参照）

(a) 評価手順

板厚方向のひび割れの進展（シュラウドサポートリングのひび割れの進展）は、板厚方向の残留応力分布から解析により算出したが、周方向のひび割れの進展に対しては、その材料における最も早い進展速度を用いて算出した。浜岡4号機は下部胴にSUS316L材を使用しているため、進展速度は、低炭素ステンレス鋼のき裂進展速度の上限値（7mm/年）\*を用いた。

\*：(社)火力原子力発電技術協会「BWR炉内構造物点検評価ガイドライン[炉心シュラウド]」より、低炭素ステンレス鋼のき裂進展速度（図4）の上限値  $2.1 \times 10^{-7}(\text{mm/s})$ の換算値

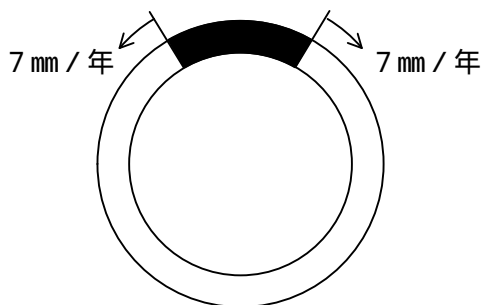


図3 周方向のひび割れの進展

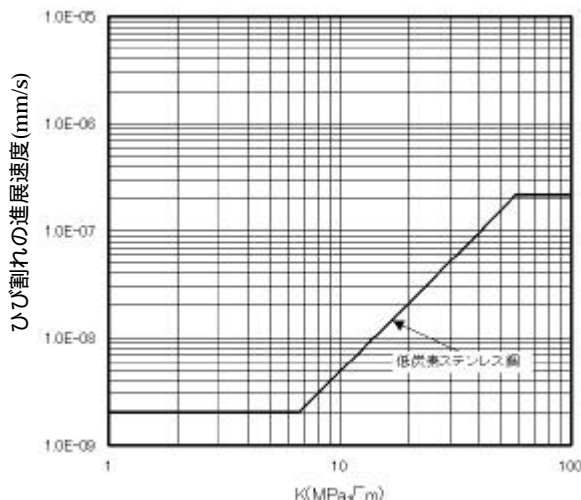


図4 低炭素ステンレス鋼のSCC進展データ

$$\begin{aligned}
 da/dt &= 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \text{ K } 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}^{1/2}) \\
 da/dt &= 2.0 \times 10^{-9} \quad (\text{K} < 6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}^{1/2}) \\
 da/dt &= 2.1 \times 10^{-7} \quad (\text{K} > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}^{1/2})
 \end{aligned}$$

(b) 5年後の残存面積

5年後のひび割れ進展量及びその時の残存面積を求めた結果を表4に示す。

表4 5年後の残存面積

	下部胴
ひび割れ進展量	56 mm
残存面積	約 $8.0 \times 10^5 \text{ mm}^2$

## (2) 評価

ひび割れの進展予測結果より、5年後のひび割れの周方向長さを求め、残存面積を計算した。その結果、下部胴のひび割れの周方向長さは、約172mmとなり、残存面積は約  $8.0 \times 10^5 \text{ mm}^2$  (ひび割れが無い場合の断面積：約  $8.1 \times 10^5 \text{ mm}^2$ ) と求めた。

以上の結果より、下部胴において最低限必要な残存面積 (約  $4.4 \times 10^5 \text{ mm}^2$ ) に対して、5年後の残存面積は約1.8倍 (約  $8.0 \times 10^5 \text{ mm}^2$ ) を有しており、5年後においても下部胴の構造上の必要な強度を有していると評価した。

## 4. 添付

添付1：下部胴の必要残存面積

添付2：断面二次モーメント及び断面係数の導出

## 添付 1 : 下部胴の必要残存面積

## 1. はじめに

下部胴の必要残存面積を、通商産業省令第62号「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」、(社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」(JEAG4601・補-1984)等の考え方に基づいて以下に評価する。

## 2. 評価手順

## (1) リガメント部の応力解析による強度評価

評価は、SCCによる部分的なひび割れが板厚方向に貫通しているものと仮定し(図1参照)、リガメント部における応力強さが告示501号に基づく許容応力強さ以下となることを確認するものである。以下に概略の手順を示す。

通常運転中に地震が発生した時に負荷される荷重より、リガメント部における応力強さを算出する。

告示501号等に従い、許容応力強さを算出する。

前項より、応力強さが許容応力強さと等しくなる周方向残存長さを求め、その時の残存面積を必要残存面積とする。

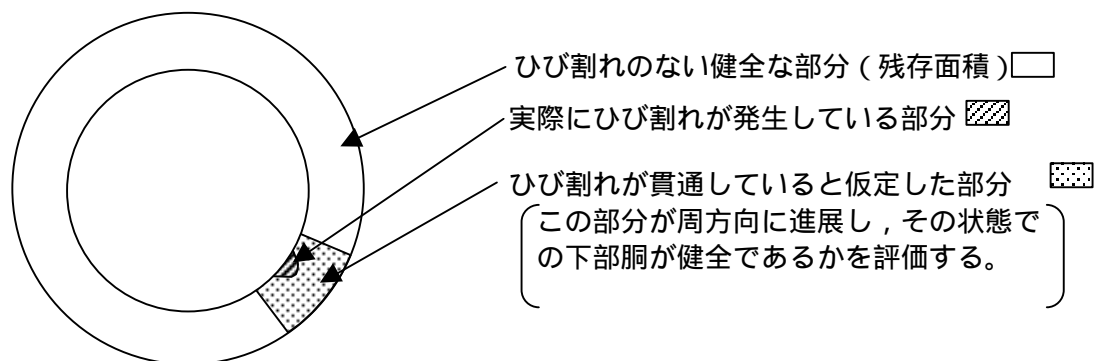


図1 ひび割れのモデル化

## (2) リガメント部における応力強さの算出

リガメント部において評価すべき応力強さは、地震荷重( $S_1$ ,  $S_2$ )を対象とし、添付資料-14と同様に、一次一般膜応力強さとする。

応力強さの算出を以下に示す。

## a. 主応力

各種の荷重（116頁表2参照）による応力を，応力のカテゴリ毎に重ね合わせ，組合せ応力を求める。組合せ応力は一般に  $s_t, s_l, s_r, t_{tl}$  の6成分をもつが，本評価では  $s_t, s_l, s_r, t_{tl}$  成分を考慮し，次式により主応力  $s_1, s_2, s_3$  を求める（詳細は添付資料 - 14，添付1参照）。

$$\begin{cases} s_1 = \frac{s_t + s_l}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_t - s_l}{2}\right)^2 + t_{tl}^2} \\ s_2 = \frac{s_t + s_l}{2} - \sqrt{\left(\frac{s_t - s_l}{2}\right)^2 + t_{tl}^2} \\ s_3 = s_r \end{cases}$$

次に，組合せ応力に考慮する荷重を表1に示す。表中，「 $\square$ 」はその荷重を考慮すること，「 $\square$ 」は考慮しないことを示す。

表1 組合せ応力に考慮する荷重

応力	差圧 $DP$	死荷重 $V_{DL}$	地震荷重		
			鉛直力 $V_S$	水平力 $H$	モーメント $M$
$s_t$ : 周方向応力		-	-	-	-
$s_l$ : 軸方向応力				-	
$s_r$ : 半径方向応力		-	-	-	-
$t_{tl}$ : せん断力	-	-	-		-

なお，各荷重による応力の算出は下式による。

$$\text{差圧による周方向応力 } s_t = \frac{1}{Y-1} \cdot DP$$

$$\text{差圧による軸方向応力 } s_l = \frac{pD_i^2}{4A} \cdot DP$$

$$\text{差圧による半径方向応力 } s_r = \frac{-1}{Y+1} \cdot DP$$

$$\text{死荷重による軸方向応力 } s_l = -\frac{V_{DL}}{A}$$

$$\text{地震荷重による軸方向応力 } s_{\ell} = \frac{V_s}{A} + \frac{M}{Z}$$

$$\text{地震荷重によるせん断応力 } t_{\ell} = \frac{H}{A}$$

ここで、 $Y$ ：内外径の比  $Y = \frac{D_o}{D_i}$  ( $D_o$ ：外径， $D_i$ ：内径)

$$A：\text{断面積} \quad A = \frac{p(D_o^2 - D_i^2)}{4} \times \frac{pD_i - L}{pD_i}$$

$L$ ：周方向のひび割れ長さ

$Z$ ：断面係数

断面係数  $Z$  は貫通した欠陥部を考慮して求める（詳細は添付 2 参照）。欠陥部を考慮すると断面係数は小さくなり、地震荷重による軸方向応力は大きくなる。

#### b. 応力強さ

応力強さ  $S$  は主応力差の絶対値で最大のものとして与えられる。

$$S = \text{Max}(|S_{12}|, |S_{23}|, |S_{31}|)$$

$$\text{ここで, } S_{12} = s_1 - s_2$$

$$S_{23} = s_2 - s_3$$

$$S_{31} = s_3 - s_1$$

#### (3) 許容応力強さ

本評価における許容応力強さは（社）日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」（J E A G 4 6 0 1・補 - 1 9 8 4）（以下、「J E A G 4 6 0 1」という）第 2 章 5 項に基づき、表 2 のとおりとする。

表 2 炉心シュラウドの許容応力強さ

許容応力状態 \ 応力分類	一次一般膜応力強さ
${}_A S$ (運転状態, $+S_1$ )	1.5Sm
${}_A S$ (運転状態, $+S_2$ )	2/3Su と 2.4Sm の小さい方

ここで、表中の許容応力状態は J E A G 4 6 0 1 付録 2 より以下の定義とする。

${}_A S$ ：告示 5 0 1 号の運転状態 相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な制限を加えた許容応力状態

${}_A S$ ：告示 5 0 1 号の運転状態 相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な制限を加えた許容応力状態

### 3. 荷重条件

運転状態  $1$  ,  $+S_1$  及び  $2$  ,  $+S_2$  について, 建設時の工事計画認可申請書の耐震計算における最大応答値に余裕を考慮して表3に示す荷重条件を設定した。

また, 炉心シュラウド内外差圧は, 105%出力, 105%炉心流量(運転状態  $1$  ,  $2$ )における差圧解析結果に余裕を考慮して0.25MPaとした。

表3 荷重条件

評価部位 \ 荷重条件	差圧 (MPa)	死荷重 (kN)	地震荷重		
			鉛直力 (kN)	水平力 (kN)	モーメント (kN・m)
運転状態 $1$ , $+S_1$	0.25	1900	550	4600	24800
運転状態 $2$ , $+S_2$	0.25	1900	720	6800	38600

### 4. 評価モデル

下部胴で確認されているひび割れの大きさを保守的に, 図2に示すような範囲の弓形の貫通欠陥として評価モデルを作成した。

$R_o$ : 下部胴外半径 = 約 2.5m (注)

$R_i$ : 下部胴内半径 = 約 2.5m (注)

$t$ : 中間胴板厚 = 50.8mm

注: メーカーノウハウを含むため数値を丸めて記載

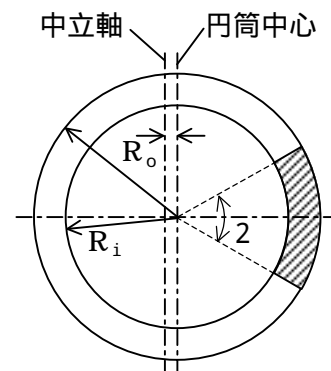


図2 評価モデル

シュラウドの強度に影響する荷重は, 地震によるモーメント荷重が支配的であることから, 以下の考え方により部分的に貫通したひび割れがある場合のシュラウドの発生応力を図2の評価モデルにより評価する。

欠陥を含む水平断面(軸に直角な断面)は, 部分的な欠損により断面二次モーメントの中立軸位置が, 円筒の中心から欠損位置の反対方向にだけずれ, 断面二次モーメントが小さくなる。地震によるモーメント荷重により発生する軸方向応力は, この欠損を考慮した断面二次モーメントにより計算する。(添付2参照)

差圧, 死荷重及び地震による軸方向荷重は水平断面で均一に負担するとして, 軸方向応力を計算する。

地震による水平方向荷重は, 鉛直断面で均一に負担するものとしてせん断応力を計算する。

## 5 . 評価結果

3 . 項の荷重条件及び4 . 項の評価モデルで , ひび割れの進展を考慮した応力強さを算出した結果を図3に示す。評価に用いる荷重は一定であることから , 周方向のひび割れ長さが大きくなるに従い , 応力強さは大きくなる。

一方 , 運転状態 , + S<sub>1</sub>及び , + S<sub>2</sub>に対する許容応力強さは , それぞれ表4のとおり求まる。

表4 許容応力強さ

許容応力状態 \ 応力値	許容応力強さ
<sub>A</sub> S ( 運転状態 , + S <sub>1</sub> )	1.5Sm = 142N/mm <sup>2</sup>
<sub>A</sub> S ( 運転状態 , + S <sub>2</sub> )	2/3Su と 2.4Sm のうち小さい方 = 2.4Sm = 228N/mm <sup>2</sup>

( Sm : 設計応力強さ = 95.3N/mm<sup>2</sup> ; SUS316L at297 , 告示501号別表2より算出 )

これらより , 部分的に貫通したひび割れを想定したモデルにおいて運転状態 , + S<sub>1</sub>及び , + S<sub>2</sub>それぞれに対して , 発生応力強さが許容応力強さに達するときの周方向のひび割れ長さを求めた。このときの残存面積が必要残存面積となり表5のとおり求まる。

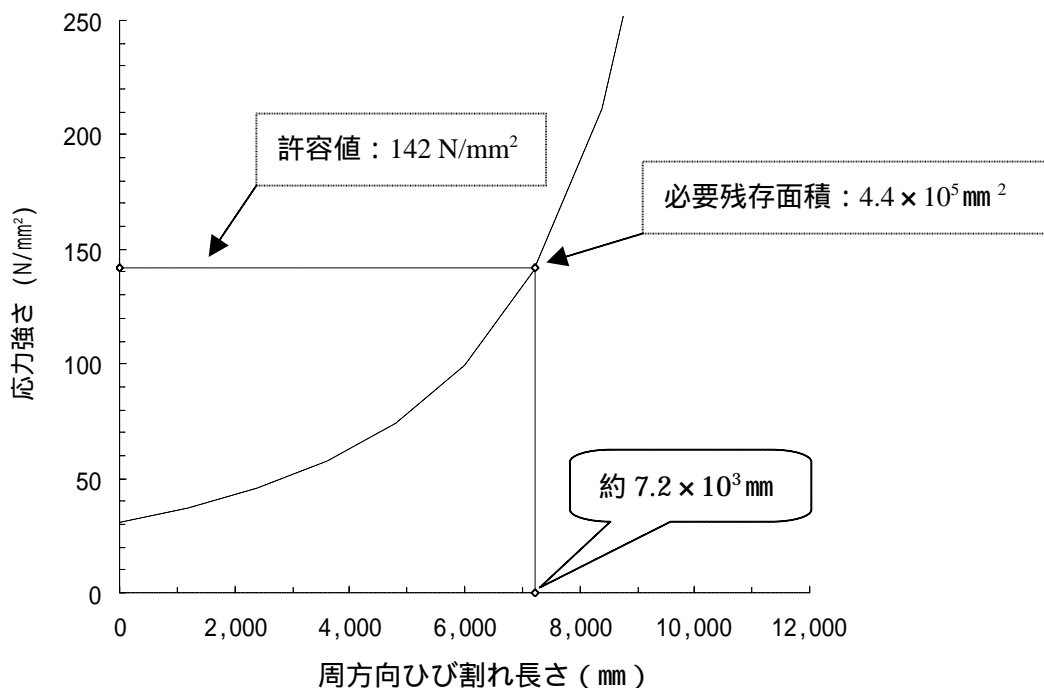
表5 必要残存面積

許容応力状態 \ 必要残存面積	必要残存面積
<sub>A</sub> S ( 運転状態 , + S <sub>1</sub> )	約 4 . 4 × 10 <sup>5</sup> mm <sup>2</sup>
<sub>A</sub> S ( 運転状態 , + S <sub>2</sub> )	約 4 . 3 × 10 <sup>5</sup> mm <sup>2</sup>

従って , 下部胴の必要残存面積は約 4 . 4 × 10<sup>5</sup>mm<sup>2</sup>となる。

以 上

運転状態 , + S1( 下部胴 )



運転状態 , + S2( 下部胴 )

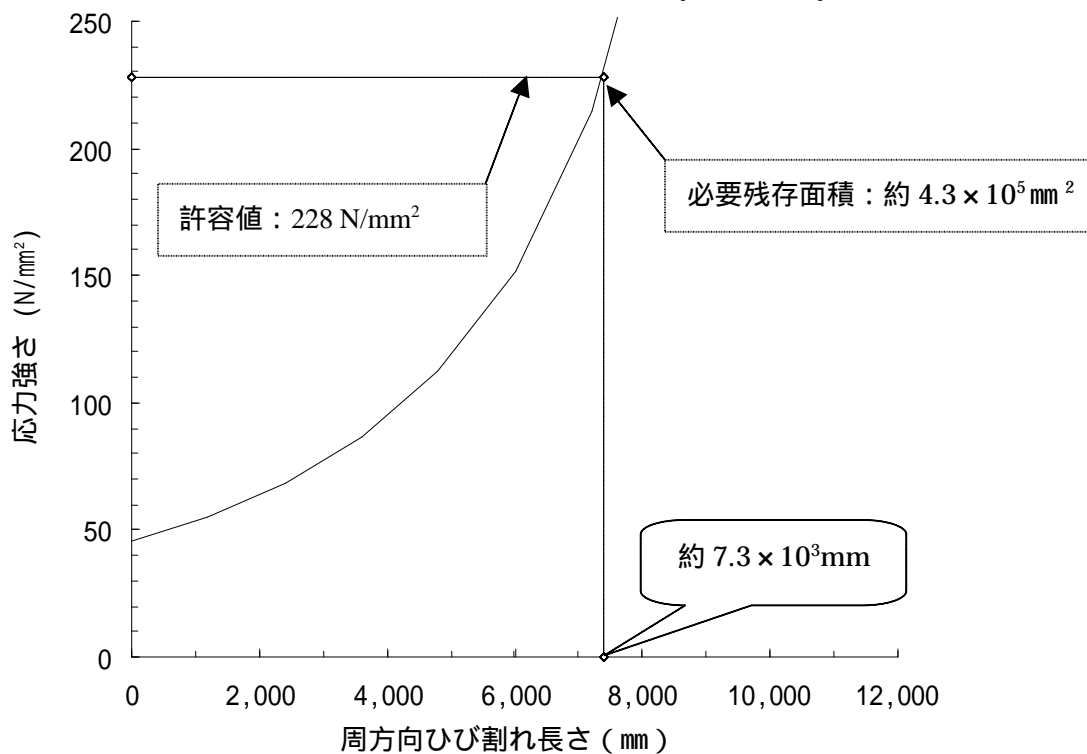


図 3 下部胴の必要残存面積評価

## 添付 2 : 断面二次モーメント及び断面係数の導出

## 1 . 断面二次モーメント

貫通したひび割れが周方向に進展していく際の , 残存部の断面二次モーメントの導出について以下にまとめる。

## 1 . 1 断面二次モーメント

図 1 において , 断面積 A の図形内に一点 P ( 微小面積  $dA$  ) をとり , P より x 軸に垂線 (  $\overline{PN}$  ) をおろす。  $dA \times \overline{PN}^2$  をこの微小面積の x 軸まわりの二次モーメントといい ,  $dA \times \overline{PN}^2$  を A 全体について加え合わせたものをその図形の x 軸に関する断面二次モーメント (  $I_x$  ) という。

$$I_x = \int_A y^2 dA$$

x 軸に平行で図形の中心をとる x' 軸に関する断面二次モーメントを  $I_{x'}$  とすると ,

$$I_x = \int_A y^2 dA = \int_A (a + y_1)^2 dA = a^2 \int_A dA + \int_A y_1^2 dA + 2a \int_A y_1 dA$$

x' 軸が図心であるので ,

$$\int_A y_1 dA = 0$$

また ,  $I_{x'} = \int_A y_1^2 dA$  であるので ,

$$I_x = a^2 A + I_{x'}$$

ここで ,  $\int_A y_1 dA = 0$  より a を求めると ,

$$\int_A y_1 dA = \int_A (y - a) dA = \int_A y dA - aA = 0$$

$$\therefore a = \frac{\int_A y dA}{A}$$

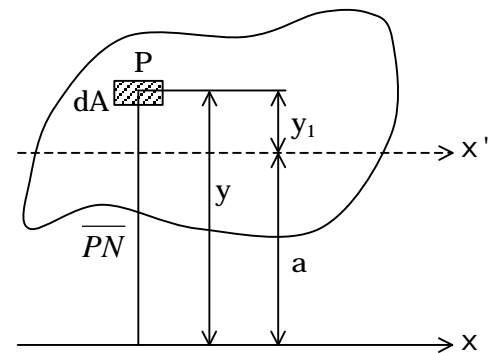


図 1

## 1.2 残存部の断面二次モーメント

残存部の断面二次モーメント ( $I_N$ ) は、前項より、 $x$  軸まわりの断面二次モーメント ( $I_C$ ) 及び中立軸 ( $x'$ ) との距離 から以下のとおり求まる。

$$I_C = d^2 A + I_N$$

$$\begin{aligned} I_N &= I_C - d^2 A \\ &= 2 \int_0^j \int_{Ri}^{Ri+t} r^3 \cos^2 q \, dr dq - d^2 A \end{aligned}$$

A : 残存部の断面積

ここで、 $x$  軸まわりの断面二次モーメント ( $I_C$ ) は以下のとおり求まる。

$$\begin{aligned} I_C &= 2 \int_0^j \int_{Ri}^{Ri+t} r^2 \cos^2 q \, rdqdr \\ &= 2 \int_0^j \left\{ \frac{(Ri+t)^4}{4} \cos^2 q - \frac{Ri^4}{4} \cos^2 q \right\} dq \\ &= \frac{1}{2} \left\{ (Ri+t)^4 \left( \frac{\sin j \cos j}{2} + \frac{1}{2} j \right) - Ri^4 \left( \frac{\sin j \cos j}{2} + \frac{1}{2} j \right) \right\} \\ &= \frac{1}{8} (4Ri^3 t + 6Ri^2 t^2 + 4Ri t^3 + t^4) (2 \sin j \cos j + 2j) \\ &= \frac{1}{8} (4Ri^3 t + 6Ri^2 t^2 + 4Ri t^3 + t^4) (\sin 2j + 2j) \end{aligned}$$

また、 $x$  軸と中立軸の距離 は前項に従い以下のとおり求まる。

$$\begin{aligned} d &= \frac{2 \int_0^j \int_{Ri}^{Ri+t} r \cos q \, rdqdr}{A} \\ &= \frac{2}{A} \int_0^j \left\{ \frac{(Ri+t)^3}{3} \cos q - \frac{Ri^3}{3} \cos q \right\} dq \\ &= \frac{2}{3A} \left\{ (Ri+t)^3 \sin j - Ri^3 \sin j \right\} \\ &= \frac{2}{3A} \sin j (3Ri^2 t + 3Ri t^2 + t^3) \end{aligned}$$

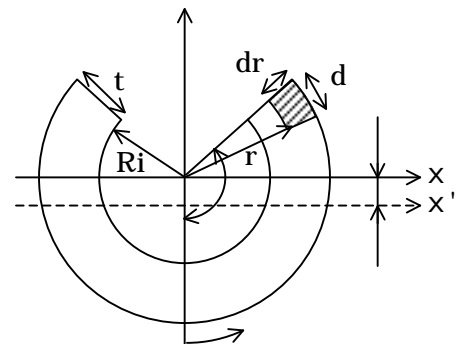


図 2

## 2 . 断面係数

貫通したひび割れが周方向に進展していく際の , 残存部の断面係数の導出について以下にまとめる。

### 2 . 1 断面係数

断面係数は , 梁 ( はり ) の断面の中立軸に関する断面二次モーメントの値を , 中立軸から外表面までの長さ  $d$  で除したものと定義され , 断面係数  $Z$  と断面二次モーメント  $I$  の関係式は下記のように表される。

$$Z = \frac{I}{d}$$

### 2 . 2 残存部の断面係数

前項に従い残存部の断面係数を求めると , 中立軸に対して表面までの距離が  $d_1$  ,  $d_2$  の 2 点求まる。ここで , モーメント  $M$  により発生する応力  $s$  が

$$s = \frac{M}{Z}$$

で与えられることから , 断面係数  $Z$  が小さい方が発生応力が大きくなり , 保守側の評価となる。従って , 断面係数は下式で定義する。

$$\begin{aligned} Z &= \text{Min} \left( \frac{I}{d_1}, \frac{I}{d_2} \right) \\ &= \text{Min} \left( \frac{I}{-Ro|\cos j| + d}, \frac{I}{Ro - d} \right) \end{aligned}$$

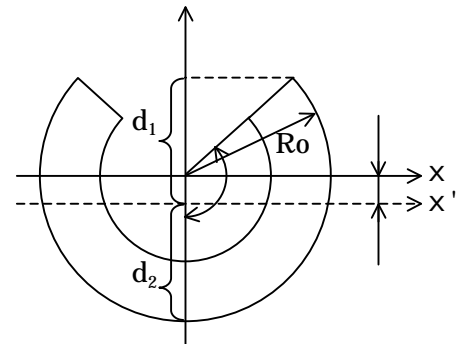


図 3

## 炉心シュラウドの座屈評価について

炉心シュラウドのような薄肉の円筒構造体では、軸方向に圧縮荷重が加わった場合、ある限界荷重を超えると構造物が不安定になり、急激に横方向に大きな変形が生じる「座屈」が発生する可能性がある。構造健全性を維持する観点からは、係る座屈の発生を防止することが重要である。(図1)

このため、炉心シュラウドは軸方向の圧縮荷重がかかった場合、告示501号第96条に従い十分な構造強度を持たせ座屈が発生しないように設計上の考慮がなされている。

炉心シュラウド胴部やリング部にひび割れが存在する場合、ひび割れの表面を通じて荷重が伝達される可能性もあると考えられるが、念のため、軸方向圧縮荷重がもっとも大きく座屈荷重に対してもっとも厳しいシュラウドサポートリングに対して、座屈応力解析を実施した。なお、解析はシュラウドサポートリングの上部、下部にひび割れが存在していることを加味して、シュラウドサポートリングの軸方向高さ全体に渡りひび割れ深さ分の板厚(半径方向)を減少させて(図2)実施した。

解析は、炉心シュラウドをモデル化し、有限要素法(FEM)<sup>\*1</sup>により変形挙動を求め、2倍勾配法<sup>\*2</sup>を用いて座屈を評価した。

### \*1 有限要素法

複雑な形状をもつ構造物を有限の大きさの多数の領域に分割し、各要素に単純な特性を与えて変形や強度等を解析する方法である。

### \*2 2倍勾配法

構造物の座屈強度を求める手法で、対象物の荷重に対する変位の関係をプロットして求める弾性勾配を2倍した勾配を剛性低下の基準として用いる方法である。

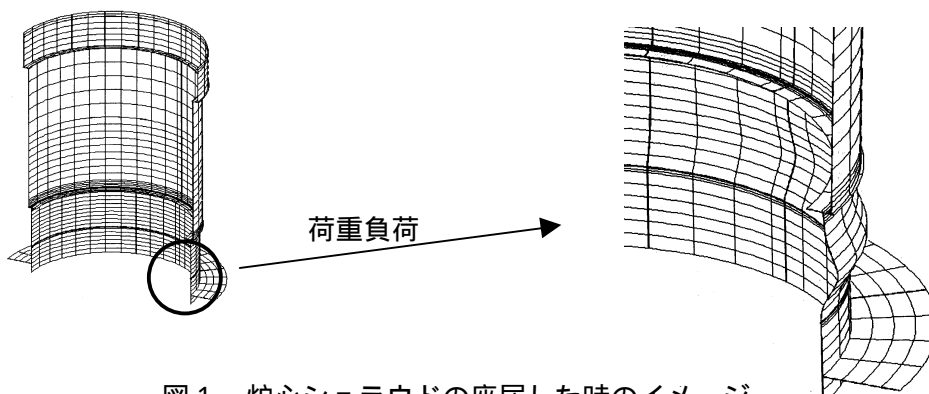


図1 炉心シュラウドの座屈した時のイメージ

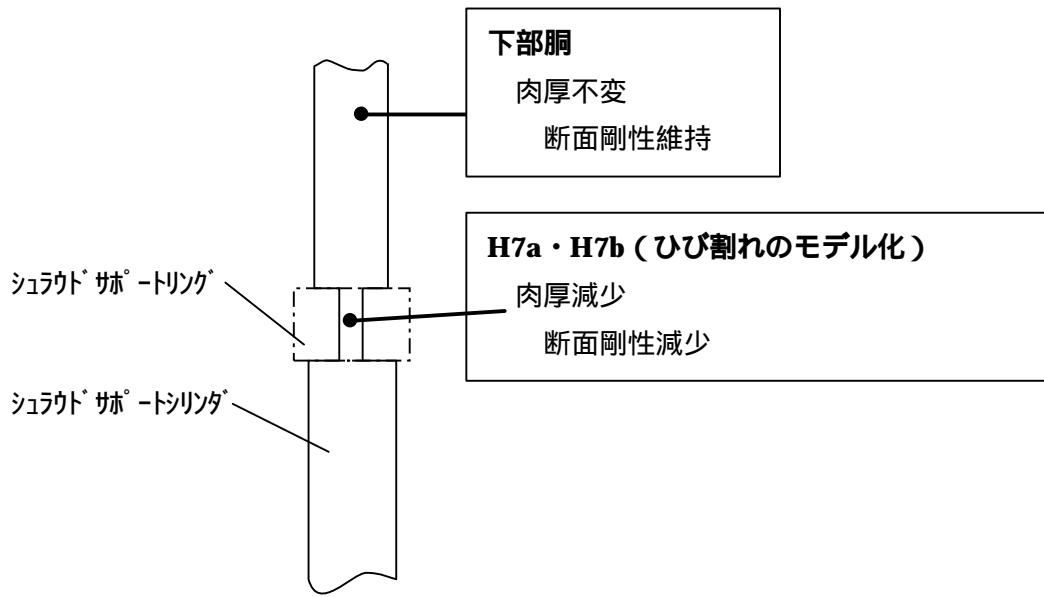


図2 板厚を減肉させた時のイメージ

その結果、ひび割れがある個所を減肉させて評価しても、残存面積（残存リガメント）が14%程度で、S2地震の1.5倍の荷重を負荷した場合においても、座屈は発生しないことがわかった（図3）。

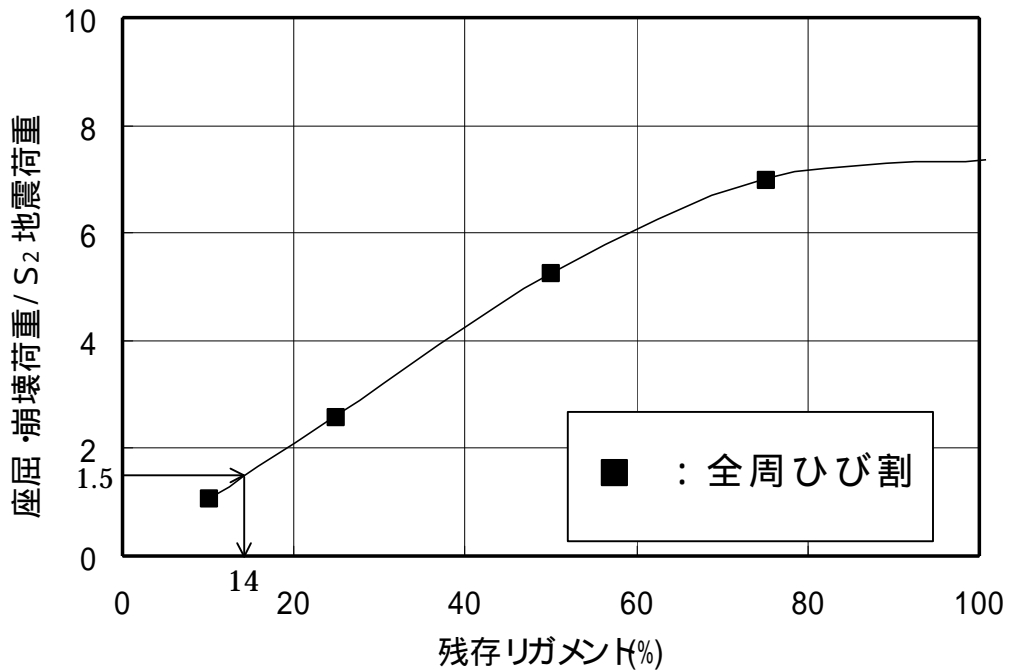


図3 座屈荷重に対する影響

## ひび割れによる炉心シュラウドの剛性への影響について

### 1. 解析モデル

図1に解析モデルを示す。目視点検結果により、シュラウドサポートリング（H7a 溶接部及び H7b 溶接部近傍）及び下部リング（H6a 溶接部近傍）にひび割れが確認されていることから、H7a、H7b 及び H6a にひび割れがある場合を想定した。なお、ひび割れ部は板厚を減少させることでモデル化した。

### 2. 評価方法

- (1) 荷重条件：S<sub>2</sub>地震荷重
- (2) 解析条件：以下の場合について、有限要素法（FEM）により解析を実施した。

ひび割れのない場合

H7a、H7b 及び H6a に板厚の 50%の全周ひび割れが存在する場合

H7a、H7b 及び H6a に必要残存面積相当のひび割れが存在する場合

- (3) 評価位置：上部格子板位置

### 3. 評価結果

H7a、H7b 及び H6a に対して板厚の 50%の全周ひび割れが存在する場合及び必要残存面積相当のひび割れが存在する場合について、地震荷重（転倒モーメント）による炉心シュラウドの剛性の変化を表1、図2に示す。

その結果、ひび割れによる上部格子板位置における剛性の低下は、板厚の 50%の全周ひび割れが存在する場合で 1.0%、必要残存面積相当のひび割れが存在する場合で 3.9%と十分小さいことを確認した。

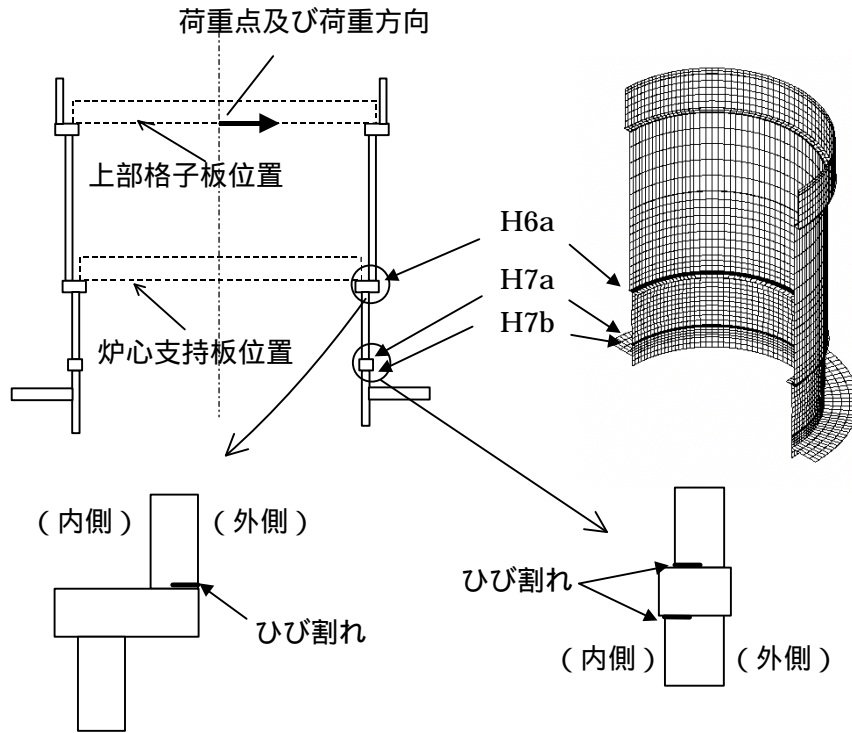


図1 解析モデルと荷重方向

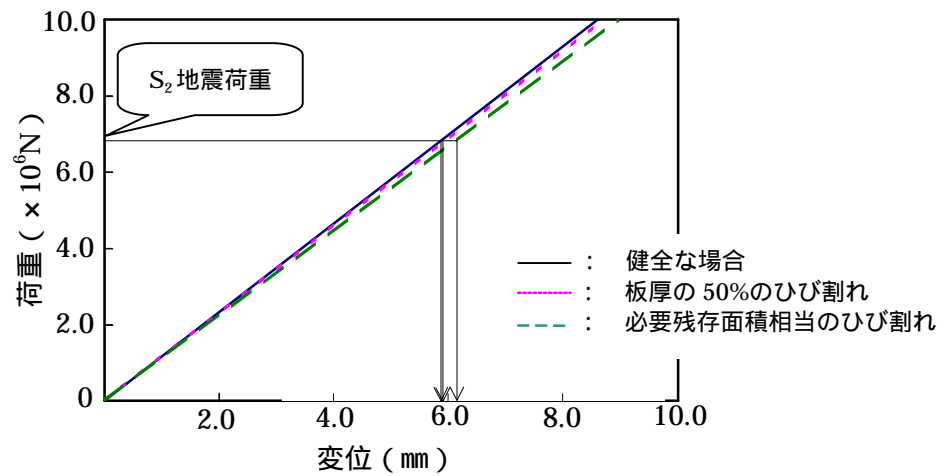


図2 荷重と荷重点変位の関係

表1 ひび割れによる剛性の変化

ひび割れ	S2地震荷重 ( $\times 10^6\text{N}$ )	変位 (mm)	剛性 ( $\times 10^6\text{N/mm}$ )	剛性低下率 (%)
なし(健全な場合)	6.8	5.849	1.163	-
板厚の50%相当	6.8	5.906	1.151	1.0
必要残存面積相当	6.8	6.085	1.118	3.9

## 下部胴に仮定した貫通したひび割れを通過する冷却水の流れ (バイパスフロー)の影響について

### 1. はじめに

下部胴に発生したひび割れの健全性評価として貫通したひび割れを仮定した場合、当該部ではバイパスフローが発生する。よって、バイパスフローがプラントに与える影響について考察した。

### 2. バイパス流量評価の保守性

構造強度評価においては、構造強度を保守的に評価する観点から直方体の欠損を仮定したが、実際にひび割れが貫通する場合、バイパスフローは非常に細かいひび割れからの漏えいとなる。従って、実際のひび割れの開口部面積は、直方体の欠損に対して非常に小さいと考えられる。

### 3. バイパスフロー発生時の炉心冷却機能評価

#### 3.1 LOCA 時の評価方法

炉心シュラウドの全周に高さ一定の開口部を仮定し、さらに炉心冷却に最も影響を及ぼす再循環系配管破断 (LOCA) 事象が発生した場合において、炉心の再冠水及び炉心冷却機能が確保できる最大の開口部面積を求めた。

#### 3.2 評価結果

評価の結果、開口部面積が約  $1.2 \times 10^5 \text{ mm}^2$  まで炉心再冠水は可能であり、また燃料被覆管最高温度は判断基準 (1200) 以下に抑えられ炉心冷却が可能であると評価した (図 1)。

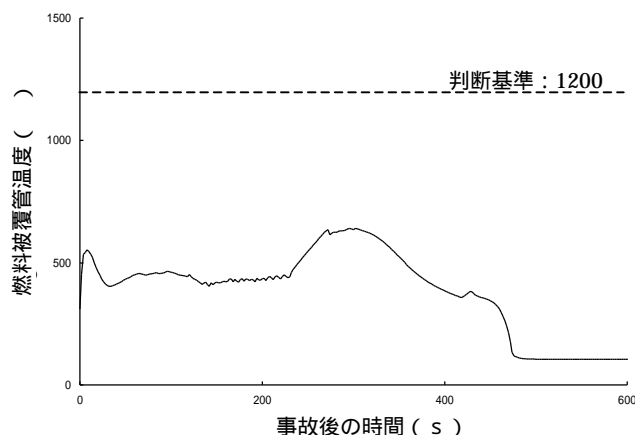


図 1 燃料被覆管温度変化

### 4. 評価のまとめ

5年後のひび割れによる開口部面積は、周方向及び軸方向の進展速度が同じであると仮定すると約  $4.9 \times 10^3 \text{ mm}^2$  となる。これは炉心の再冠水及び炉心冷却機能が確保できる最大の開口部面積 (約  $1.2 \times 10^5 \text{ mm}^2$ ) に比べて小さいものであり、バイパスフローがプラントの安全性に影響を与えるものではないと評価した。

以上