

## 4 . 炉心シュラウドの健全性評価手法についての当院の考え方

炉心シュラウドの安全機能は炉心の支持及び炉心内の冷却材流路の仕切りである。炉心シュラウドの一部にひび割れが存在していても、構造等の技術基準を満たすことによって、地震などで発生する荷重に耐えてこれら二つの機能が維持できると判断できる限りにおいて、その健全性が損なわれているとする必要はない。

炉心シュラウドに用いられるオーステナイト系ステンレス鋼は、非常に粘りのある（延性に富んでいる）材料であり、破壊する場合も延性的に破壊する。従って、ひび割れを含む断面のうち健全な部分が作用する荷重に耐えることができれば炉心シュラウドは破断しない。（炉心シュラウドの機能維持について：参考資料4 - 1 参照）

ひび割れが存在する炉心シュラウドの構造上の健全性については、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令（昭和40年通商産業省令第62号）」及び「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和55年通商産業省告示第501号）」（以下「技術基準」という。）等の考え方を踏まえて評価する。

なお、ライナーブラケット、上部格子板用ベース、及びシュラウドヘッドボルトブラケットの近傍に単発的に発生しているひび割れに関しては、炉心シュラウドの構造強度に対する影響の有無も含め、個々の発生状況に応じて評価を行う。

### (1) リング部のひび割れに関する健全性評価について

リング部において全周にわたって点在または断続的に発生しているひび割れについては、全周に均一な深さのひび割れが一様に存在するものと仮定（「全周均一モデル」と呼ぶことにする。）し、ひび割れ部分を実際に測定されたものより大きめに（保守的に）見積もることが適当である。炉心シュラウドの断面から、このように保守的に見積もられたひび割れの面積を差し引いた部分の面積を残存面積とする。さらに、このひび割れが、全周にわたり一様に進展するものとする。

最大の地震荷重を含め運転中に想定される外力が作用した場合に、構造強度を確保するために必要な炉心シュラウドの断面の面積（必要残存面積）を求め、この必要残存面積と、現時点の残存面積<sup>16</sup>及びひび割れの進展を算定した5年後の残存面積とをそれぞれ比較することにより健全性を評価することとする。（全周均一モデル：参考資料4 - 2 - (1)参照）

### (2) 胴部のひび割れに関する健全性評価について

胴部において、主に放射状の表面形状をもち、単発的に発生しているひび割れについては、ひび割れの軸方向の長さと同方向の長さをもつ長方形の欠損が炉心シュラウドを貫通していると仮定（「部分貫通モデル」と呼ぶことにする。）することが適当である。この場合の炉心シュラウドの健全性は、貫通しているひび割れを軸方向と同方向に分けて考え、それぞれが炉心シュラウドの構造強度に与える影響を評価すること

<sup>16</sup> 残存面積：炉心シュラウド等の部材においてひび割れ部分を除いた健全な部分の面積をいう。

により確認できる。

軸方向のひび割れが炉心シュラウドの構造強度に与える影響は、炉心シュラウドの内と外との圧力の差（内外差圧）だけであることから、周方向のひび割れが構造強度に与える影響に比べて小さいものと考えられる。

周方向のひび割れが炉心シュラウドの構造強度に与える影響については、保守的な評価を行うため、ひび割れ部分の面積を目視点検により測定されたものより大きめに（保守的に）見積もるとともに、複数のひび割れがある場合には、同一平面に投影しそれらを1箇所に集めて一つのひび割れとする。炉心シュラウドの断面の面積からこのひび割れの面積を差し引いたものを残存面積とする。

ひび割れの進展を考慮し一定期間後の残存面積を算定する場合には、個々のひび割れがそれぞれの両端において周方向に進展するものとする。隣り合ったひび割れが進展の途中で重なる場合は、その時点からひとつのひび割れと見なす。累積の中性子照射量が高く、照射誘起型応力腐食割れ<sup>17</sup>に対する感受性が顕れはじめる可能性がある場合には、ひび割れの進展速度として鋭敏化SUS304の進展速度等の保守的なものを使用することが適当である。

最大の地震荷重を含め運転中に想定される外力が作用した場合に、構造強度を確保するために必要な炉心シュラウドの断面の面積（必要残存面積）を求め、この必要残存面積と、現時点の残存面積及びひび割れの進展を算定した5年後の残存面積とをそれぞれ比較することにより健全性を評価することとする。（部分貫通モデル：参考資料4-2-(2)参照）

なお、胴部の中央（H4内側）付近は炉心シュラウドの中で最も中性子束の高い領域であり、累積の中性子照射量がある程度（例えば $3 \times 10^{24} \text{ n / m}^2$ ：米国NRC承認値）以上になると、オーステナイト系ステンレス鋼の延性が低下しはじめることが知られている。オーステナイト系ステンレス鋼は、このような高照射量でも延性的に破壊するため、残存部分の面積による健全性評価が可能であるが、延性がやや低下することを考慮して、念のため破壊力学の知見に基づく評価<sup>18</sup>を併せて行うことが適当である。（破壊力学的評価：参考資料4-2別添3参照）

<sup>17</sup> 照射誘起型応力腐食割れ：中性子の照射を受けることを要因のひとつとして生じる応力腐食割れのこと。

<sup>18</sup> 破壊力学の知見に基づく評価：延性が低下した材料に関しひび割れ形状を考慮して破壊に至る挙動の評価を行うこと。

## 炉心シュラウドの機能維持について

< 炉心支持機能と仕切板機能の健全性 >

炉心シュラウドの一部にひび割れが存在する場合でも、ひび割れの無い部分(残存部分)によって地震などで発生する荷重<sup>1</sup>に耐えることができれば、燃料集合体の支持や制御棒の挿入の機能を確保できる。

同様に仮に全周にひび割れが存在する場合でも、残存部分で作用する荷重に耐えることができれば、炉心シュラウドは形状を維持し仕切板としての機能を確保できる。

また、部分的にひび割れが貫通しても、残存部分で荷重に耐えることができれば炉心シュラウドの安全機能は維持される。

1：作用する荷重 = 設計上想定される最大の地震 + 炉心シュラウド内外の圧力差による荷重 + 自重

(参考)

炉心シュラウドに用いられるオーステナイト系ステンレス鋼は延性に富んだ材料であり、破壊する場合は延性的に破壊し、例えばガラスのように脆い材料に見られるようなひび割れが瞬時に伝播する破壊を生じない。よって、炉心シュラウドのひび割れを含む断面の内、健全な部位が、作用する荷重に耐えることができれば炉心シュラウドは破断しないと評価できる。

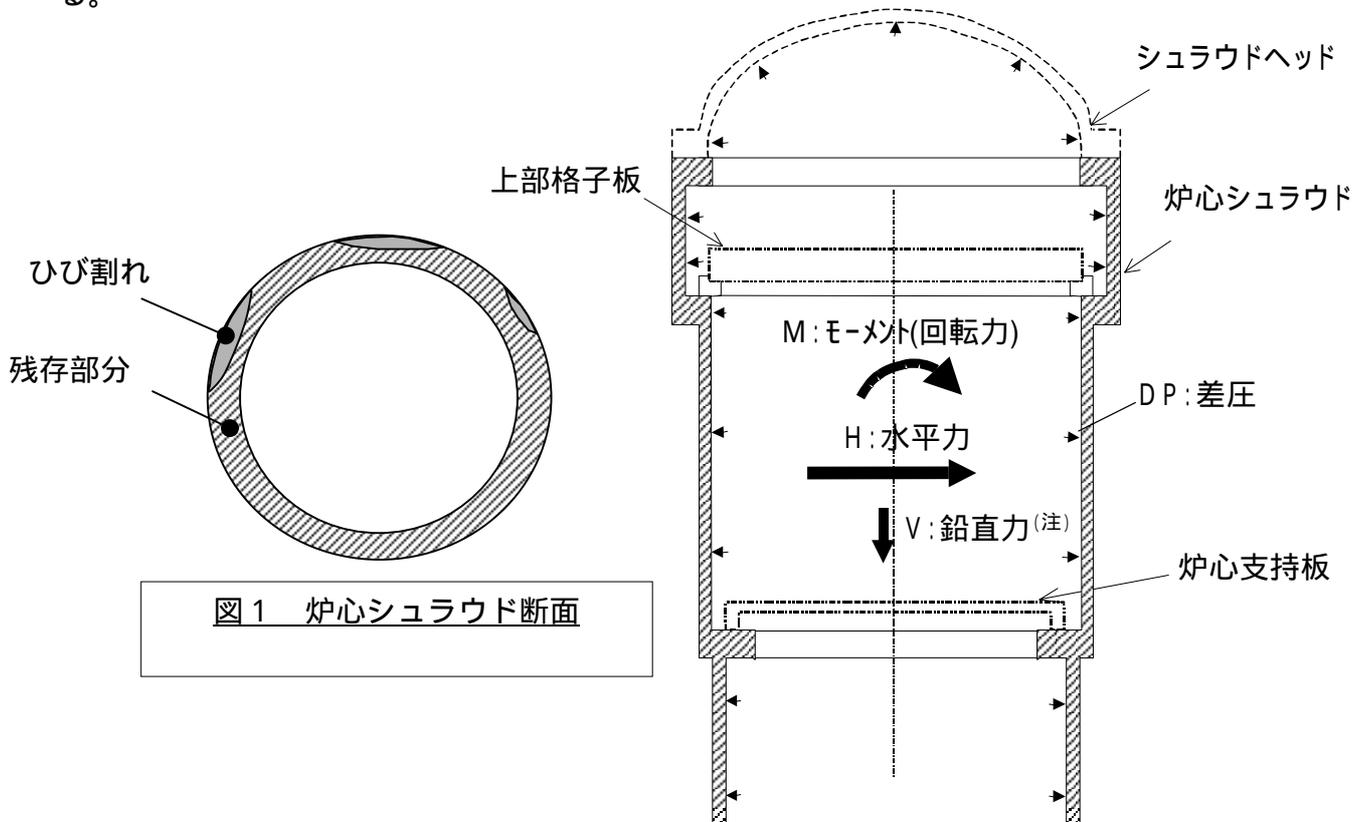


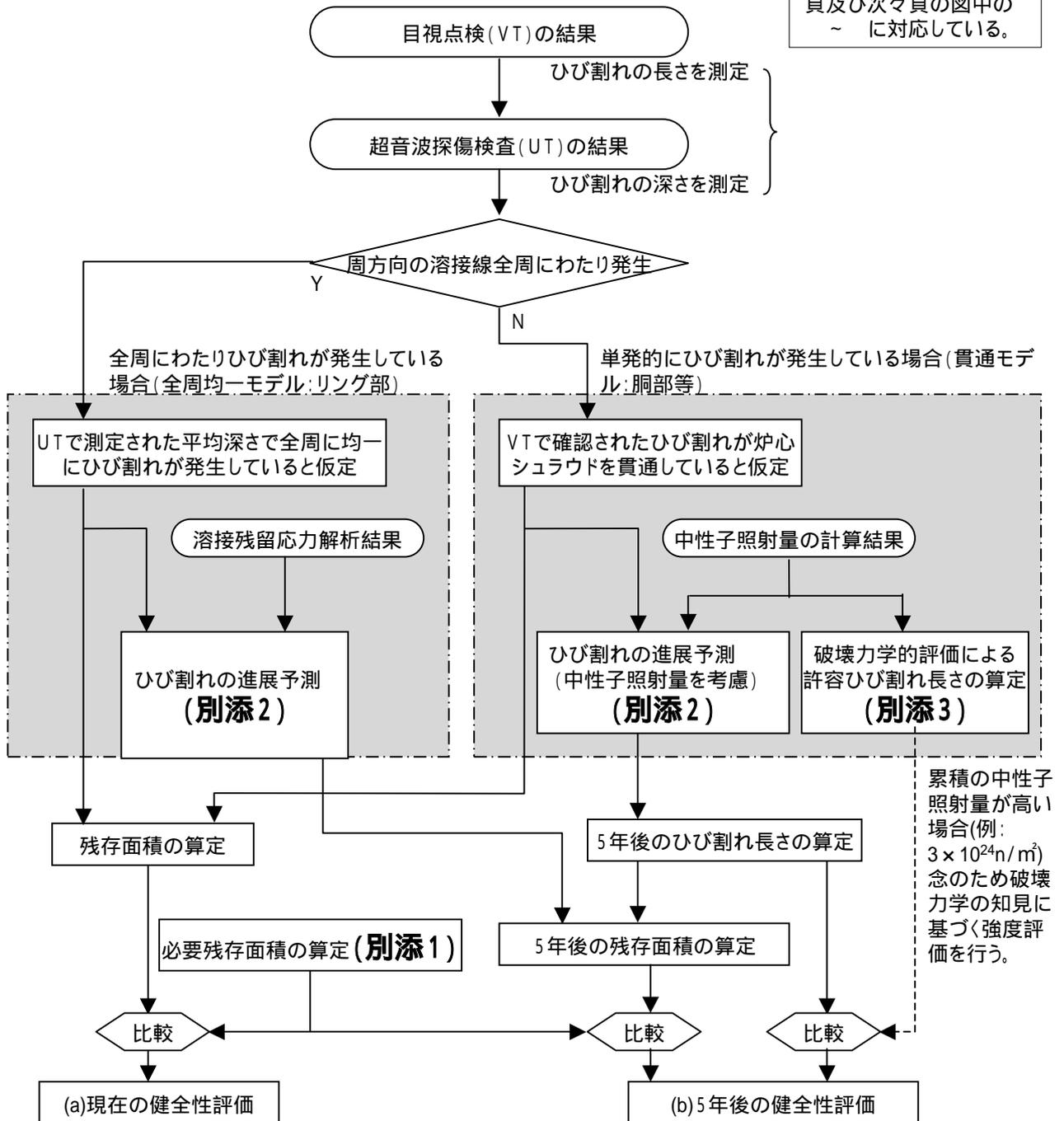
図1 炉心シュラウド断面

図2 荷重の方向

(注) 鉛直力(V)は死荷重( $V_{DL}$ )と鉛直の地震荷重( $U_S$ )の和である。

# 健全性評価の考え方

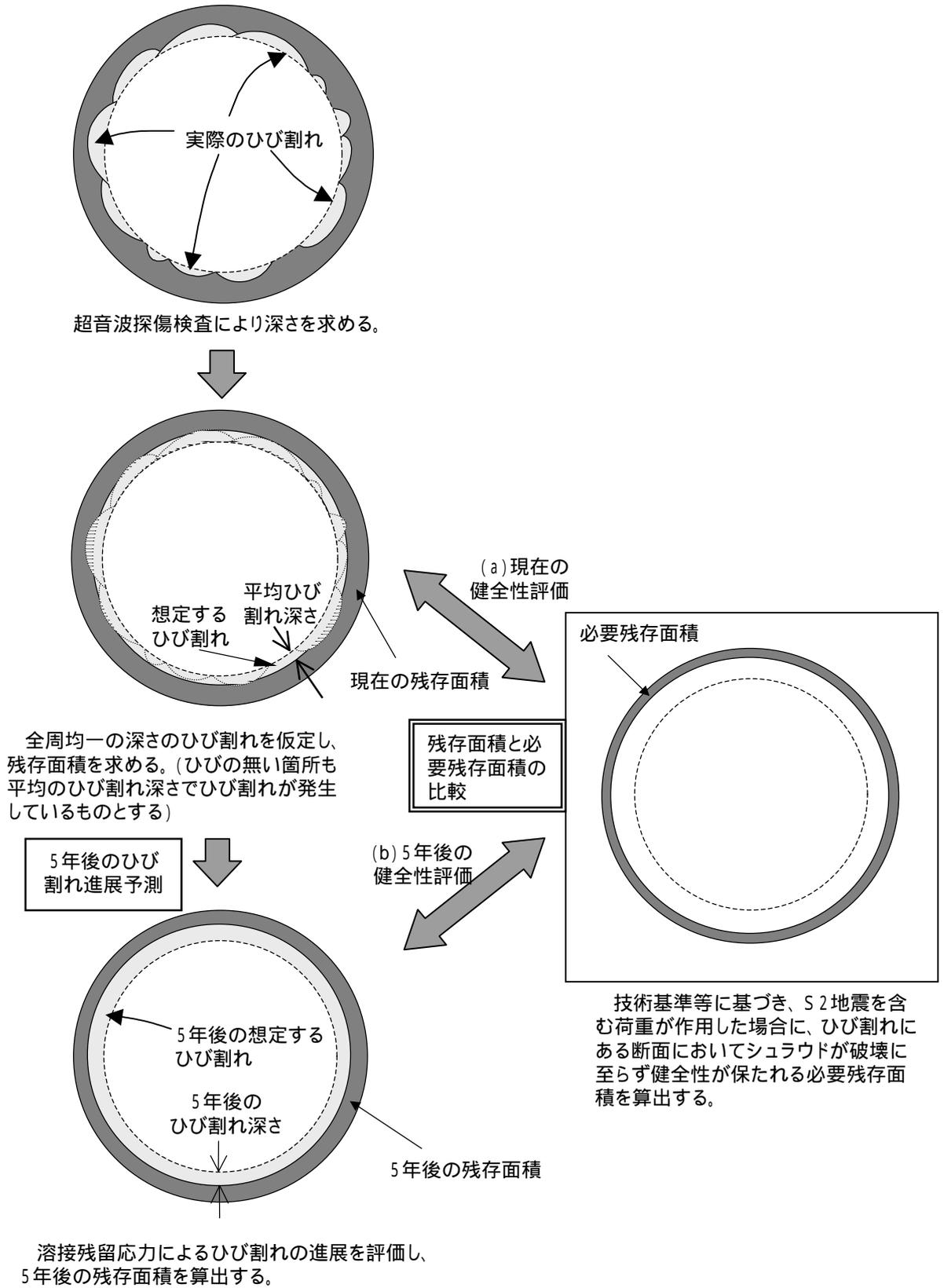
(注)以下の ~ は次頁及び次々頁の図中の ~ に対応している。



・ひび割れの発生部位の現在の残存面積が必要残存面積以上であることにより健全性を評価

・ひび割れの進展評価により求めた5年後の残存面積が必要残存面積以上であることにより健全性を評価

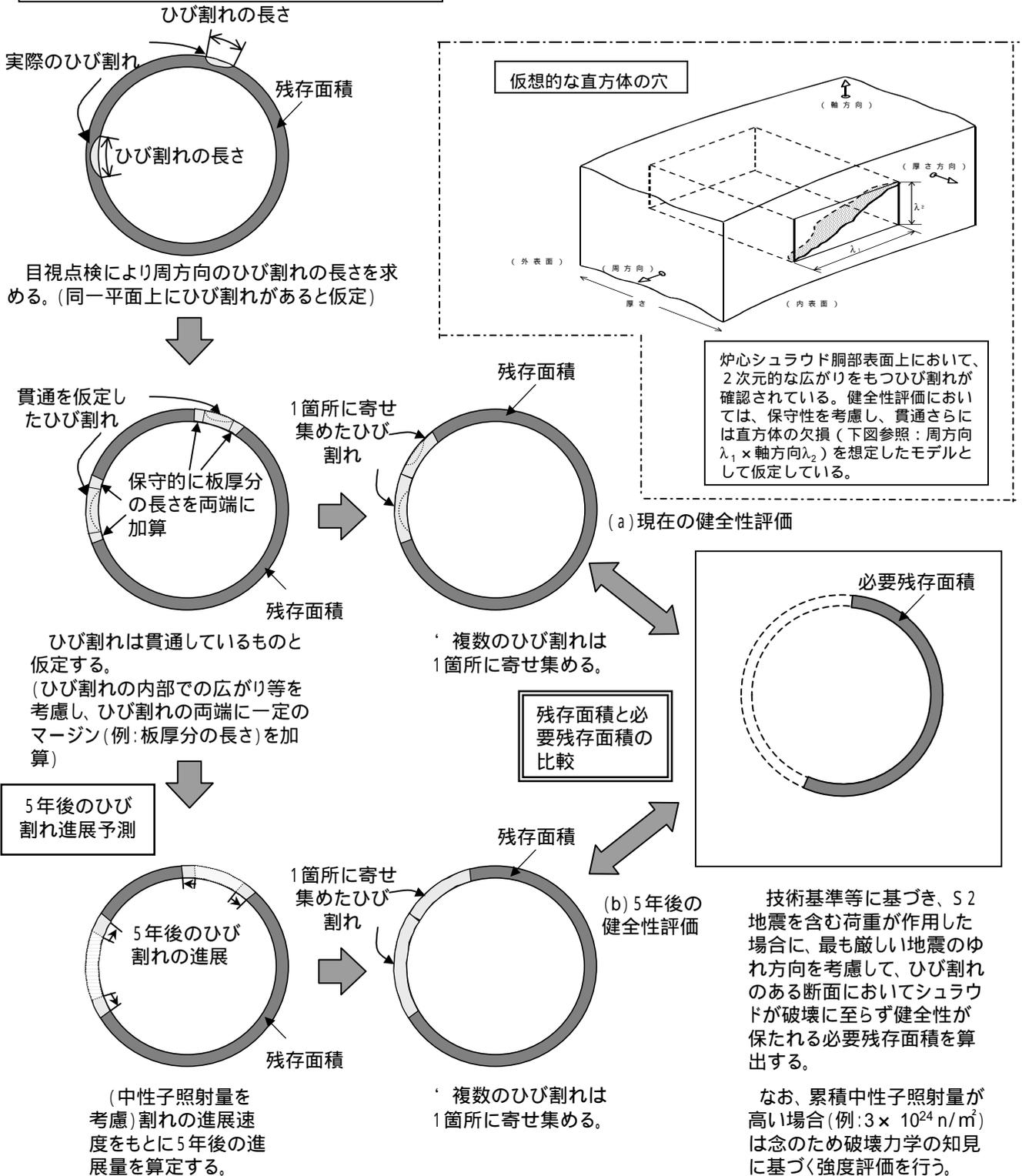
(1) 全周にわたりひび割れが存在する場合 (全周均一モデル: リング部)



## (2) 単発的にひび割れが存在する場合 (部分貫通モデル: 胴部)

### 周方向のひび割れに関する評価手法

軸方向のひび割れの影響は非常に小さい。



# 必要残存面積の算定方法

## 1. 事業者が行った必要残存面積の算出方法の考え方

事業者は、炉心シュラウドの下部リング、シュラウドサポートリング及び胴部のひび割れについて、ひび割れを有する断面に作用する応力によりシュラウドが破壊に至らず構造健全性が確保される必要残存面積を、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令(通商産業省令第62号)」、「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準(通商産業省告示第501号)」(以下「告示501号」という)及び(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)」(以下「JEAG4601」という)に基づいて評価している(参考参照)。

## 2. 必要残存面積の算出手順

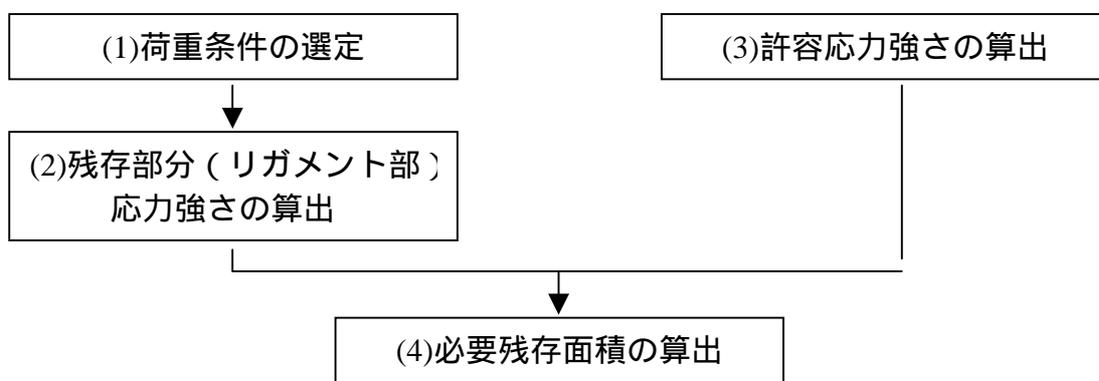


図1 必要残存面積の算出手順フロー図

### (1) 荷重条件の選定

炉心シュラウドに対する荷重が厳しい条件として、JEAG4601に基づき次の2例に対し荷重条件を選定した。

プラント状態が運転状態<sup>注1</sup>及び<sup>注2</sup>において、設計用最強地震(S1)が発生した場合。

プラント状態が運転状態<sup>注1</sup>及び<sup>注2</sup>において、設計用限界地震(S2)が発生した場合。

### (2) 残存部分(リガメント部)応力強さの算出

(1)で選定された荷重条件時の応力強さを算出する。考慮すべき応力強さとしては、炉心シュラウドが円筒で、かつ外径(R)と板厚(t)の比(R/t)が十分大きく、薄く一様な膜状の構造物と見なされることから一次一般膜応力<sup>注3</sup>強さとしている。

### (3) 許容応力<sup>注4</sup>強さの算出

炉心シュラウドの許容応力は告示501号に定められた許容応力を基にJEAG4601に定められている。

プラント状態が運転状態<sup>注1</sup>及び<sup>注2</sup>において、設計用最強地震(S1)が発生した場合、1.5Sm

注1 運転状態：計画的な運転状態又はこれらの間の計画的移行をいう。

注2 運転状態：発電設備の供用期間中に予想される機器の単一故障、運転員の単一誤操作等の事象によって、原子炉が通常運転状態から外れるような状態をいう。

注3 一次一般膜応力：圧力又は機械的荷重によって生ずる膜応力であって、構造上の不連続性及び応力集中のない部分のものをいう。

注4 許容応力：機械や構造物を安全に使用するのに許しうる限界の応力をいう。

プラント状態が運転状態 及び において、設計用限界地震(S2)が発生した場合、2/3S と 2.4Sm のうち、小さい方( $S_m$ <sup>注5</sup>、 $S_u$ <sup>注6</sup>)は告示501号別表より選択)

#### (4) 必要残存面積の算出

応力強さは、リガメント部の面積減少に伴い増大する。(3)の と の両方について、応力強さと許容応力が等しくなるリガメント部の面積を必要残存面積として算出し、面積の大きい方を採用する。

### 3. リガメント部の応力強さの算出について

応力強さ  $S$  については、告示501号で材料力学の最大せん断応力説に基づき、3軸条件の主応力の差の絶対値で最大のものとして与えられる。

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

(「MAX」とは、 $|S_{12}|$ 、 $|S_{23}|$ 、 $|S_{31}|$  のうち最大なものを選択すること)

ここで、 $S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

主応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 及び $\sigma_3$ については、円筒形の構造体である炉心シュラウドは、2次元軸対象モデルと考えられるので、周方向応力、軸方向応力、半径方向応力、及びせん断応力から求められる。

ここで、考慮する荷重は下表のとおり。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 応力として考慮する荷重

応力	差圧(DP)	死荷重 ( $V_{DL}$ )	地震荷重		
			鉛直( $V_S$ )	水平(H)	モーメント(M)
周方向応力		-	-	-	-
軸方向応力				-	
半径方向応力		-	-		-
せん断応力	-	-	-		-

### 4. 必要残存面積の算出について

#### (1) 全周均一モデル(リング部)

ひび割れが全周にわたって存在する場合には、応力腐食割れによるひび割れが全周にわたり一様に進展し、リガメント部の面積が減少していくと仮定する。さらに、炉心シュラウドに対する荷重が非常に厳しくなる「荷重条件」を選定し、選定された荷重条件時にリガメント部の告示501号に定める材料の単位面積当たりが発生する力である「応力強さ」を算出する。この「応力強さ」は、リガメント部の面積が減少するに従い増大していく。これと、告示501号に定める材料の「許容応力強さ」が等しくなる場合のリガメント部の面積を「必要残存面積」として算出している。

#### (2) 部分貫通モデル(胴部)

ひび割れが部分的に存在する場合には、保守的にこれらが板厚を貫通しているものとし、周

注5  $S_m$  : 設計応力強さを表し、告示501号別表第2に規定される値を用いており、降伏応力に0.9を乗じた値をいう。降伏応力とは、材料にある力が加わり変形した場合でも元の形に戻る応力の限界値である。

注6  $S_u$  : 設計引張り強さを表し、告示501号別表10に規定される値を用いており、材料にある応力を加えた場合に応力が最大となる強さをいう。

方向に進展して、リガメント部の面積が減少すると仮定する。これに想定される最も大きな地震荷重が作用した時にリガメントに発生する最も大きな応力強さが告示501号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の面積を必要残存面積として算出する。

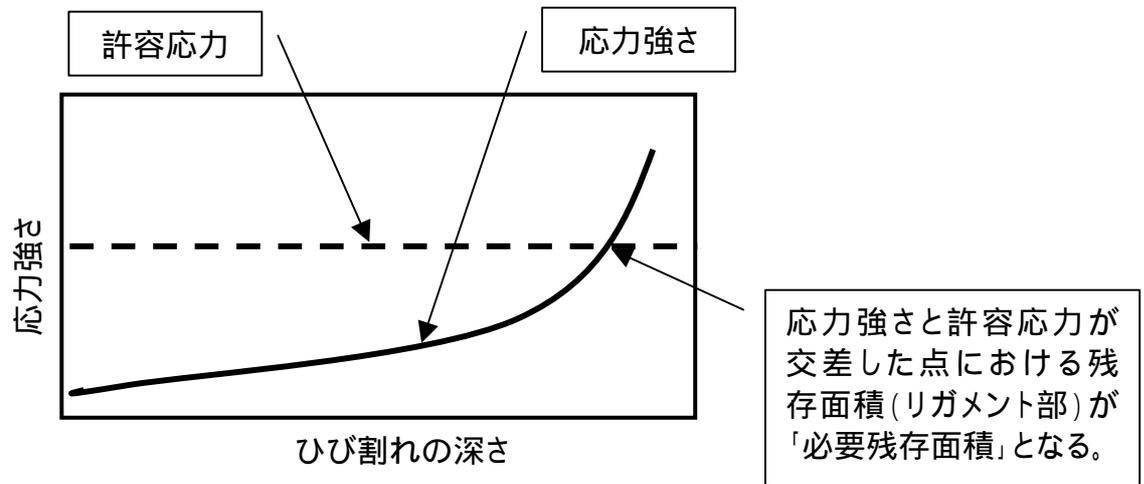


図2 ひび割れの深さに対する応力強さ

# 関係基準・指針

## 1. 「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」第9条(抜粋)

(材料及び構造)

第9条 原子炉施設(圧縮機及び補助ボイラーを除く。)に属する容器、管、主要ポンプ若しくは主要弁若しくはこれらを支持する主要な構造物又は原子炉压力容器内の燃料体を支持する構造物の材料及び構造は、別に告示する区分に応じ、それぞれ別に告示する規格に適合するものでなければならない。

## 2. 告示501号第96条第1項第一号(抜粋)

(材料の応力強さの限界及び許容応力)

第96条 材料の応力強さの限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

一 炉心支持構造物(ボルトを除く。)にあっては、次によること。

イ (略)

ロ 運転状態 において生ずる応力の応力解析による一次応力強さは、次の値を超えないこと。ただし、運転状態 において生ずる荷重が、材料の降伏点が別表第2に定める値の1.5倍である完全弾塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限を超えない場合は、この限りでない。

(イ)一次一般膜応力強さは、別表第2に定める値の1.5倍の値

(ロ)一次一般応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さは、(イ)に定める値の1.5倍の値

ハ 運転状態 において生ずる応力の応力解析による一次応力強さは、次の値を超えないこと。ただし、運転状態 において生ずる荷重が、材料の降伏点が別表第2に定める値の2.3倍である完全弾塑性体として極限解析により求めた崩壊荷重の下限の0.9倍の値を超えない場合は、この限りではない。

(イ)一次一般膜応力強さは、別表第10に定める値の3分の2の値。ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあっては、別表第2に定める値の2.4倍又は別表第10に定める値の3分の2の値のいずれか小さい方の値

(ロ)一次一般応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さは、(イ)に定める値の1.5倍の値

(注)炉心シュラウドでは、JEAG4601に定める運転状態と基準地震動の組合せで生ずる応力の方が、告示501号に定める運転状態又は で生ずる応力より大きい場合、実際の解析はJEAG4601に沿って行われる。

## 3. JEAG4601(抜粋)

### 第1章 基本事項

#### 1.3. 運転状態と基準地震動の組合せ及び対応する供応力区分表

(1)表1は、各運転状態により生ずる荷重と地震による荷重の組合せと許容応力レベルについて示すものであって、許容応力の絶対値は表1に基づき第2章に定める。

表1 運転状態と基準地震動の組合せ及び対応する許容応力区分  
(その3:炉心支持構造物等)

炉心支持構造物

	地震動	-	S 1	S 2
運転状態		A	$\underline{\underline{A}}S$	$\underline{\underline{A}}S$
		A	$\underline{\underline{A}}S$	$\underline{\underline{A}}S$
		A	$A S$	$A S$
	(L)	A	$A S$	
	(S)	A		

(備考)運転状態 : 告示501号の運転状態 の状態  
 運転状態 : 告示501号の運転状態 の状態  
 運転状態 : 告示501号の運転状態 の状態  
 運転状態 (L): 告示501号の運転状態 の状態のうち、長期間のものが作用している状態  
 運転状態 (S): 告示501号のの運転状態 の状態のうち、短期間のもの(例:冷却注入による過渡現象等)が作用している状態  
 $A_S$ : 運転状態 及び  $A$  において設計用最強地震(S1)が発生した場合の許容応力状態  
 $A_S$ : 運転状態 及び  $A$  において設計用限界地震(S2)が発生した場合の許容応力状態

第2章 耐震  $A_S$  及び A クラス施設の許容応力

2.5 炉心支持構造物の許容応力

2.5.1 炉心支持構造物(ボルト等を除く)の許容応力

炉心支持構造物(ボルト等を除く)の許容応力を次に示す。

許容 応力状態	応力 分布	1次一般膜応力	1次一般膜 応力 + 1次 曲げ応力	1次 + 2 次応力	1次 + 2 次ピーク 応力	特別な応力限界		
						純せん 断応力	支圧 応力	ねじり 応力
設計条件		$S_m^{(*)}$						
A		(略)						
A								
A								
A								
$\underline{\underline{A}}S$		$1.5 S_m$			(略)			
$\underline{\underline{A}}S$		$\frac{2}{3}Su$ 。ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $\frac{2}{3}Su$ と $2.4S_m$ の小さい方。						

(\*) 告示501号第96条第1項第一号の崩壊荷重の下限に基づく評価(ただし、設計条件については同号イ、 $A$  及び  $A_S$  については同号ロ、 $A$  及び  $A_S$  については同号ハの評価)を適用する場合は、この限りでない。

(注) JEAG4601に基づき、炉心シュラウドの場合は、運転状態、 $A$  と S1、S2との組合せた応力について評価する。

# ひび割れの進展予測について

## 1. 全周均一モデルによる進展予測

### (1) 事業者が行ったひび割れの進展予測の考え方

事業者は、シュラウドの下部リング及びシュラウドサポートリングにおける応力腐食割れ(SCC)によるひび割れの進展について、高温純水中におけるステンレス鋼のSCCでは材料及び腐食環境の条件が明らかな場合、「ひび割れ進展速度」が残留応力条件に依存することが知られていることから、有限要素法を用いた解析(FEM解析)により求めた残留応力分布に基づいて評価している。

### (2) 板厚方向に対するひび割れに関して

ひび割れが発生した部位の初期ひび割れ形状を設定。

FEM解析によりひび割れが進展する部位の残留応力分布を求める。

ひび割れ形状及び残留応力分布から応力拡大係数(K値)<sup>(注)</sup>を求める。

実験等から得られたSCC進展速度線図を用いて、求めたK値におけるひび割れ進展速度を決定し、ひび割れ量を算出、算出したひび割れ進展量を初期ひび割れに加算し、この計算を繰返すことで評価すべき時間までのひび割れが進展する深さを評価している。

(注)「応力拡大係数(K値)」とは、ひび割れの形状とひび割れ先端に加わる引張力(荷重条件)によって決まる数値で、この数値とひび割れの進展速度を関係付けることにより、ひび割れの進展を予測するのに用いる。

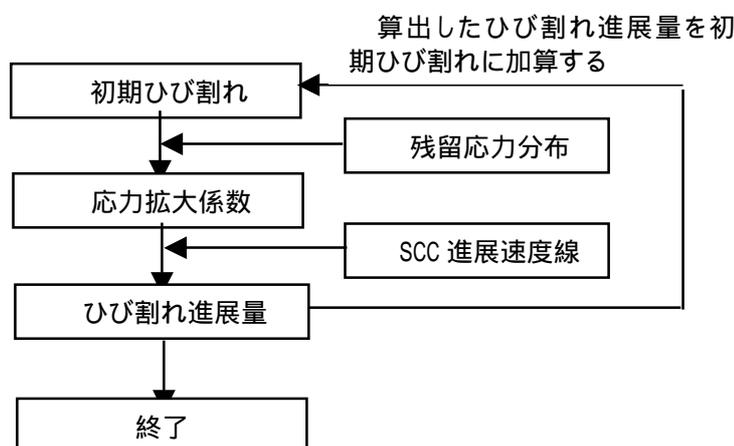


図1 ひび割れ進展予測の評価方法の流れ

### (3) K値の算出について

今回評価するシュラウドは「円筒形」でありかつ炉心シュラウドの「内周及び外周の全周ひび割れ」に対して進展評価を行うため、管(円筒形)の内周及び外周の全周ひび割れに対してのK値の算出方法として実績のある米国石油協会(API)規格579の評価式を用いて、K値を算出している。

まず、K値の算出においては、式 の係数である  $0.4$  を算出するため、解析等により求め

た残留応力分布を式 3-10 の4次多項式にて近似を行う。

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t}\right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{t}\right)^4 \quad \dots \text{式 3-10}$$

$\sigma$  : 応力(分布) ; (MPa)

$x$  : 炉心シュラウド表面からの位置(深さ) ; (m)

$t$  : 炉心シュラウド肉厚 ; (m)

$\sigma_{0-4}$  : 係数

次に、得られた係数  $\sigma_{0-4}$  及び初期ひび割れ深さを式 3-11 のAPI規格579の評価式に代入し、K値を算出する。

$$K = \left[ G_0 \sigma_0 + G_1 \sigma_1 \left(\frac{a}{t}\right) + G_2 \sigma_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3 \sigma_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4 \sigma_4 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\pi a} \quad \dots \text{式 3-11}$$

$G_{0-4}$  : 係数 ; API579 において  $\frac{a}{t}$  に対して定められている。

$a$  : ひび割れ深さ ; (m)

#### (4) ひび割れ進展速度について

事業者により使用された低炭素ステンレス鋼のひび割れ進展速度は、温度、導電率、腐食電位等の沸騰水型原子炉内の環境条件を模擬した実験において得られた実験データから設定された、SCC進展速度線図(図3)に基づいている。この線図については、実験データの上限(進展速度が最も速い)値を包絡し、かつ米国原子力委員会(NRC)がNUREG-0313 Rev. 2の中で、SUS304について定めた速度線図と同一の傾きを有するように設定された。

また、K値が小さい領域( $K < 6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ )では鋭敏化SUS304と同じ進展速度の領域があるとして設定されている。

ひび割れ進展量の算出に当たっては、この線図を基に、K値におけるひび割れ進展速度を求め、算出したひび割れ進展量を初期ひび割れ深さに加算していく。以上の計算を繰り返し、ひび割れ進展を評価している。

## 2. 部分貫通モデルによる進展予測

### (1) 事業者が行ったひび割れの進展予測の考え方

事業者は、シュラウドの中間胴における応力腐食割れによるひび割れについては、現時点で炉心シュラウドの壁面を貫通していると、ひび割れはそれぞれの両端で周方向に進展すると仮定している。その際、複数のひび割れがある場合には個々の進展を考慮し、最終的にはそれぞれ進展したひび割れを一箇所に集め、一つのひび割れとしている。この場合、板厚方向の進展評価とは異なり、特に定まった算出方法がないことから、その材料における最も

速い進展速度を用いて評価している。

(2) ひび割れ進展予測の評価方法の流れ

ひび割れが発生した部位の初期のひび割れ形状を設定。

中性子照射量、材料等を考慮しひび割れ進展速度を設定する。

初期のひび割れ長さにひび割れ進展量を加算することで評価すべき時間までのひび割れが進展する長さを評価している。

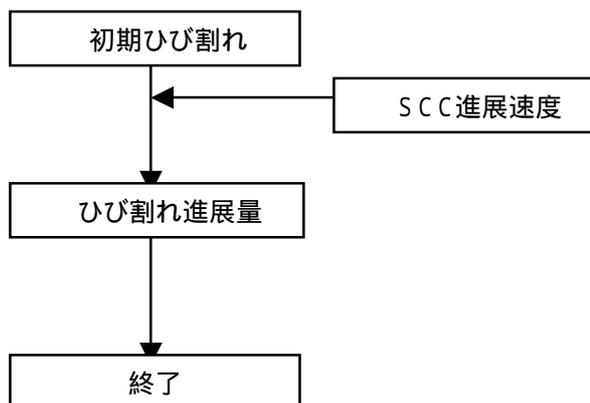


図2 ひび割れ進展予測の評価方法の流れ

(3) ひび割れ進展速度について

事業者が使用した低炭素ステンレス鋼のひび割れ進展速度は累積の中性子照射量、材料等を考慮して以下の分類に従い設定されている。ここで、高照射量とは中性子照射量が  $5 \times 10^{24} \text{ n / m}^2$  を超えた範囲を示している。

SUS304L / SUS316L (低照射量)

低炭素ステンレス鋼のひび割れ進展速度の上限値 (図3参照)

$$da / dt = 2.1 \times 10^{-7} \text{ mm / s} = 7 \text{ mm / 年}$$

SUS304L / SUS316L (高照射量)

鋭敏化SUS304のひび割れ進展速度の上限値 (図3参照)

$$da / dt = 9.2 \times 10^{-7} \text{ mm / s} = 30 \text{ mm / 年}$$

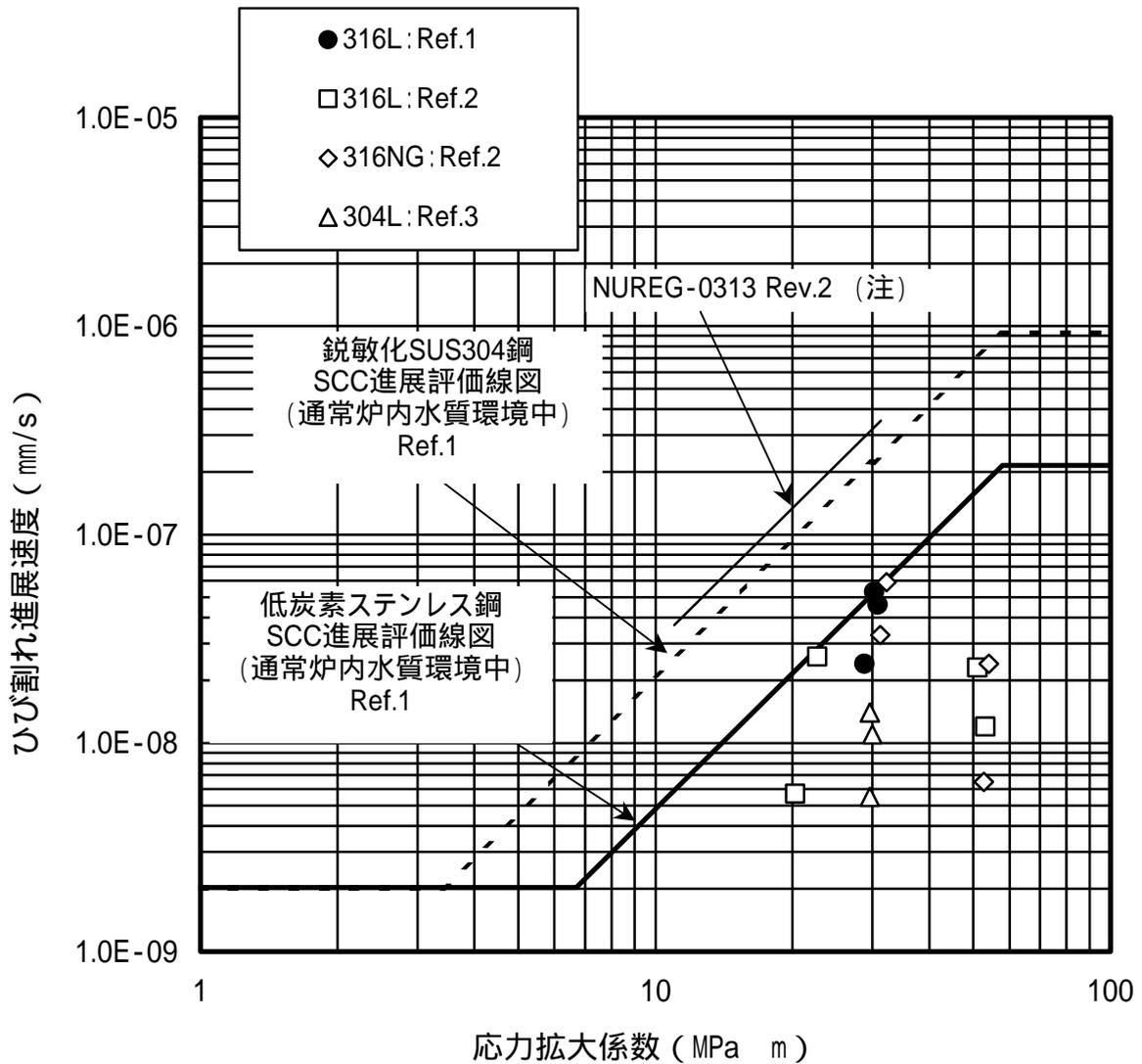


図3 低炭素ステンレス鋼の SCC 進展速度線図

Ref.1) (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]、JBWR-VIP-04、平成 13 年 11 月。

Ref.2) 生田目、鈴木、田中、伊藤、国谷、島貫、“BWR 炉内環境中でのオーステナイト系ステンレス鋼の SCC 進展速度と評価線図の提案、”(社) 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集 ( I )、2933、pp.441-442、2002 年 9 月。

Ref.3) 共同研究報告書「低炭素系ステンレス鋼の耐 IGSCC 評価研究」、平成 12 年度上半期 (最終報告書)、平成 12 年 9 月。

(注) NUREG-0313 Rev.2 の SCC 進展速度線図は、鋭敏化 SUS304 について定めたものである。

低炭素ステンレス鋼の SCC 進展速度線図 ( 図 3 中の実線 ) を式に表すと以下のとおり。

$$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dt} &= 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \\ \frac{da}{dt} &= 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \\ \frac{da}{dt} &= 2.1 \times 10^{-7} \quad (57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K) \end{aligned} \right\} \dots \text{式}$$

# (別添3)

## 破壊力学の知見に基づく評価法

### 1. 評価の基本的な考え方

破壊力学の知見に基づく評価法は、延性の低下した材料からなる部材にひび割れがあったときの破壊を推定する方法である。このような材料では、下図のように、ひび割れがある状態で荷重を受けると健全な断面(斜線部)が余り伸びず、ひび割れが急速に成長して破断することがあり、これを評価する方法に破壊力学がある。破壊力学では、ひび割れ長さが長いほど健全性上厳しくなるが、この状態を表すために、ひび割れを進行させる指標(ひび割れ長さと同程度荷重の関数である応力拡大係数:  $K$ )を用いる。これが限界値(許容破壊靱性値:  $K_{IC}$ )に達するとひび割れが急速に成長すると想定し、このときのひび割れ長さを「許容限界き裂長さ」という(図1)。

ステンレス鋼に中性子が照射されても、極端な延性の低下(脆化)は引き起こさないことが知られているが、SUS316Lや304Lのようなオーステナイト系ステンレス鋼は、材料の単位面積あたりの中性子照射量(照射される個数)が  $3.0 \times 10^{24}n/m^2$  を超えると、延性の低下がみられ始めるといふ知見<sup>(Ref.1)</sup>も得られており、念のため、残存部が余り変形せずにひび割れが急速に成長して破断する非延性的な破壊(非延性破壊の極端な例は、ガラスの割れ)を考慮する(図2)。

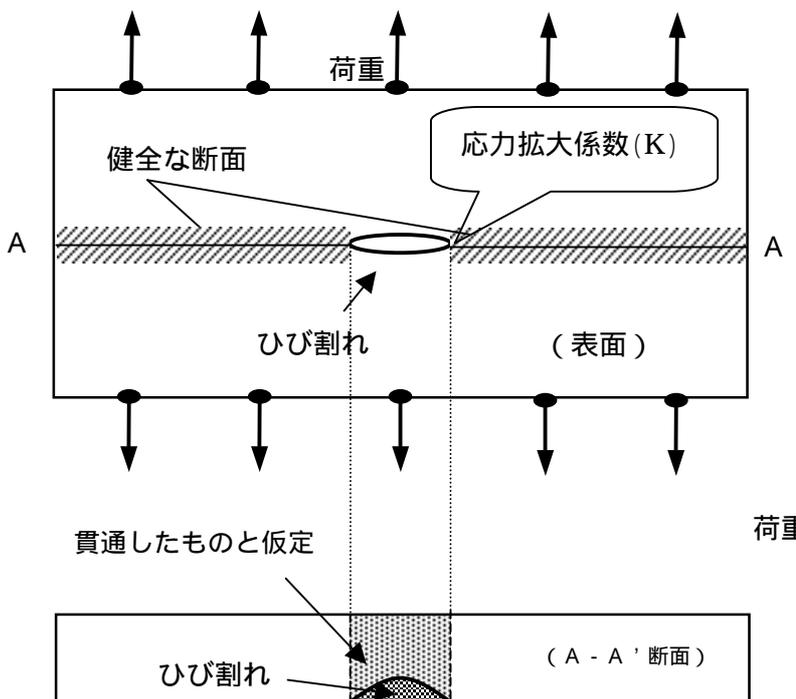


図1 ひび割れと破断の関係

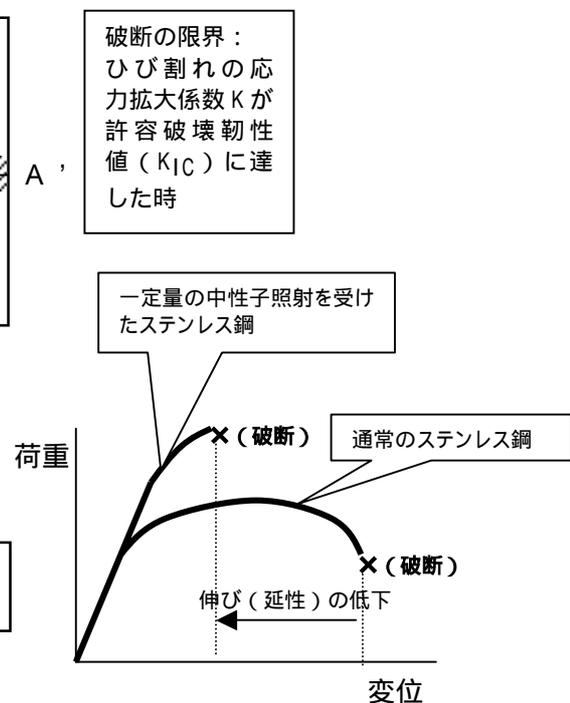
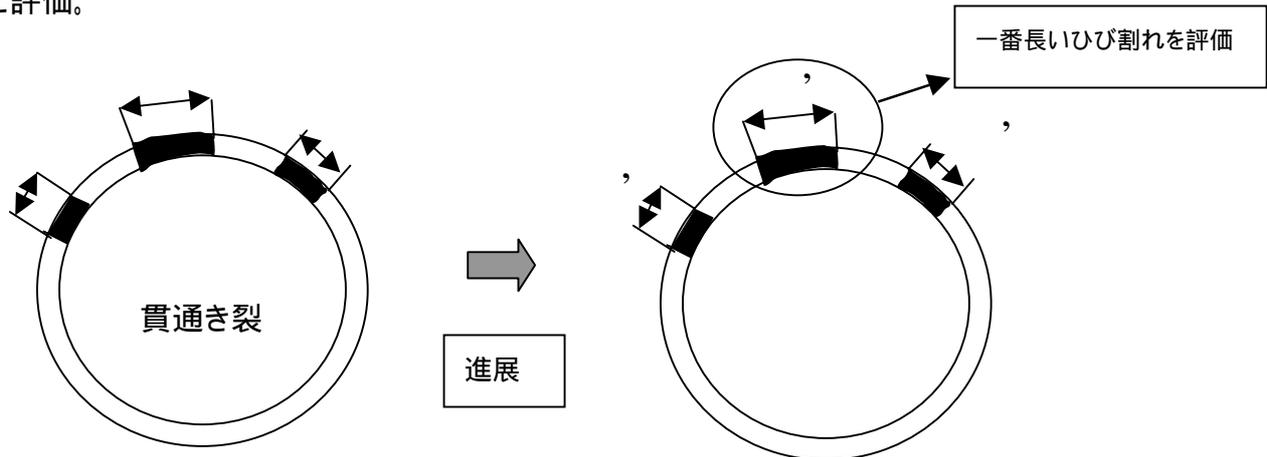


図2 一定量の中性子照射を受けたステンレス鋼の変形

## 2. 評価の手法

表面に存在する部分的なひび割れを保守的に貫通であると仮定し、かつ、同一平面上に存在するものとする。ひび割れは独立に応力腐食割れにより進展( )する(ひび割れが伸びて交差したら1つのひび割れと見なす)ものとし、ひび割れの長さが長いものほど評価上厳しい(破壊力学による評価では、ひび割れの応力拡大係数Kと破壊靱性値 $K_{IC}$ との比較で破壊の有無を評価することから、個々のひび割れごとに評価することが適当)ので、「一番長いひび割れの長さ」と、破壊靱性値 $K_{IC}$ から求まる「許容ひび割れ長さ」とを比較し、小さければ健全であると評価。



### [計算式]

- (1) 現在のひび割れ長さ:  $L_0$
- (2) 5年後のひび割れ長さ:  $L_5$   
 $L_5 = L_0 + [\text{進展速度} V] \times 2 (\text{両側}) \times 5 (\text{年}) \times 0.8 (\text{設備利用率})$   
 ここでVは、中性子照射量  $< 5.0 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  ならば、  
 $V_{\text{low}} = 7 (\text{mm/年})$  (Ref.3)  
 中性子照射量  $> 5.0 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  ならば、  
 $V_{\text{high}} = 30 (\text{mm/年})$  (Ref.3) とする。

### (3) 許容ひび割れ長さ

$$K = G_m \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{Ref.2}) \dots\dots\dots$$

ここで、負荷される応力 :  $= P_m + P_b$   
 ひび割れの半長 :  $a$   
 補正係数 :  $G_m = 0.2227a(R \cdot t)^{-0.5} + 1$

ただし、  
 $P_m$  : 評価する部位にかかる一次一般膜応力  
 $P_b$  : 評価する部位にかかる一次曲げ応力  
 $R$  : シュラウド平均半径 = (シュラウド内径  $D_i$  + 板厚  $t$ ) / 2  
 $SF$  : 安全率 = 1.39  
 $K_{IC}$  : 165MPa  $\cdot \text{m}^{1/2}$  (Ref.1) ( $3.0 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 < \text{中性子照射量}$ )  
           43.2MPa  $\cdot \text{m}^{1/2}$  (Ref.4) (中性子照射量が  $8.0 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  を超える場合)

式に  $K = K_{IC} / (SF)$  を代入して求まる  $a$  が許容ひび割れの半長であり、5年後のひび割れ長さ  $L_5$  を許容ひび割れ長さ  $2 \times a$  と比較し、 $2 \times a$  より小さければ健全であると評価。

Ref.1) BWR VIP\*

\*: BWRVIP (BWR Vessel Internals Project) は、米国 EPRI (電力中央研究所)、BWR オーナーズグループ、プラントメーカー (GE) を中心に組織され、炉内構造物の点検・評価手法等を制定している。米国 NRC もこの手法を用いた事業者の評価を承認している。(NUREG-1544)

Ref.2) D.P.Rooke, D.J.Cartwright : Stress Intensity Factors, Sept. 1974

Ref.3) (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]」

Ref.4) (財) 発電設備技術検査協会編、平成 6 年度プラント長寿命化技術開発に関する調査報告書、平成 7 年 3 月

## 5 . 東京電力(株)による炉心シュラウドの健全性評価手法と評価結果

### (1) 東京電力(株)による健全性評価手法に対する評価

#### リング部のひび割れに関する評価手法について

当院としては、柏崎刈羽2号機の下部リングの溶接部(H6a)外側近傍及びシュラウドサポートリングの溶接部(H7a)内側近傍に発生したひび割れに関し、東京電力(株)が算定した現時点での残存面積は、ひび割れが確認されなかった箇所も含め全周にひび割れが均一深さで存在するものとして保守的に見積もられていると考える。また、考えられる最も厳しい荷重として地震(S1<sup>19</sup>又はS2<sup>20</sup>)を考慮し、運転中にこれらが作用した場合に、技術基準等から導き出される必要な残存面積と現時点での残存面積との比較により、構造強度を評価していることは妥当であると考え。さらに、SUS316L等の低炭素ステンレス鋼の応力腐食割れの進展速度に基づき5年後のひび割れの進展を算定し、必要な残存面積との比較により、5年後における十分な構造強度を評価していることは妥当であると考え。

#### 胴部のひび割れに関する評価手法について

当院としては、福島第一4号機、福島第二3号機、同4号機、柏崎刈羽1号機及び同2号機の炉心シュラウド胴部に単発的に発生したひび割れに関し、東京電力(株)が、部分貫通モデルの考え方に従い、ひび割れを軸方向と周方向に分けて評価していることは妥当であると考え。

周方向のひび割れが炉心シュラウドの構造強度に与える影響に関し、東京電力(株)が採ったひび割れの残存面積の算定方法については、ひび割れが炉心シュラウドの壁を貫通していると仮定し、さらに周方向の両端に板厚分のマージンを加算していることから、十分に保守的である。さらに、ひび割れの進展予測については、SUS316L等低炭素ステンレス鋼の応力腐食割れ進展速度線図の中の上限值を使っており、十分な保守性を有している。

必要残存面積の算定に当たっては、同社は、技術基準等に基づき、考えられる最も厳しい荷重として運転中に地震(S1又はS2)が作用した場合を考慮しており、妥当であると考えられる。

なお、炉心シュラウドの中で最も中性子束の高い領域である胴部の中央(H4内側)付近のひび割れについて、累積の中性子照射量が $3 \times 10^{24} \text{ n / m}^2$ を超えた場合の破壊力学的評価においては、保守的な破壊靱性値が使用されている。

### (2) 東京電力(株)による健全性評価の結果

東京電力(株)は、福島第一4号機、福島第二3号機、同4号機、柏崎刈羽1号機及び同2

<sup>19</sup> S1：過去の地震並びに活動性の高い活断層による地震のうち、敷地に最も影響を与える地震(設計用最強地震)を想定したときにもたらされる地震動。

<sup>20</sup> S2：活動性の高い活断層及び地震地体構造等による地震のうち、敷地に最も影響を与える地震(設計用限界地震)を想定したときにもたらされる地震動。

号機の炉心シュラウドのひび割れに関し、次のとおり現時点及び5年後において炉心シュラウドは十分な構造強度を有していると評価した。

#### 技術基準等に基づく健全性評価の結果

東京電力(株)が、福島第一4号機、福島第二3号機並びに4号機、及び柏崎刈羽1号機並びに2号機の炉心シュラウドの健全性について評価した結果を表-3及び表-4に示す。

さらに、ひび割れの進展予測を行うに当たり、同社は、照射誘起型応力腐食割れに対する感受性が顕れはじめる可能性がある累積の中性子照射量として  $5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  をとり、今後5年間のうちにこれを超える場合には、保守的に鋭敏化SUS304の進展速度の上限値(30mm/年)を使用している。(表-5参照)

また、柏崎刈羽2号機の間胴部の縦溶接部(V16)外側近傍に確認された長さ20mmのひび割れについては、保守的に荷重条件が厳しくなるH4溶接部にあるものとして、部分貫通モデルにより評価された。

なお、東京電力(株)は、軸方向のひび割れが構造強度に与える影響を検討し、その影響は非常に小さいものと評価した。(参考資料5-6参照)

表-3 リング部に全周にわたって発生しているひび割れに関する評価結果

発電所名	号機	近傍溶接線	評価上の全断面面積 (mm <sup>2</sup> )	現在の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	5年後の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	ひび割れ停留時の 残存面積(mm <sup>2</sup> )	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )	備考
柏崎刈羽	2	H6a	$8.3 \times 10^5$ <sup>1</sup> (100%)	$6.6 \times 10^5$ (79%) <約4.7倍>	$5.1 \times 10^5$ (61%) <約3.6倍>	$4.2 \times 10^5$ (50%) <約3.0倍>	$1.4 \times 10^5$ (17%)	参考資料5-5-(1)参照
		H7a	$9.3 \times 10^5$ <sup>2</sup> (100%)	$7.8 \times 10^5$ (83%) <約3.9倍>	$3.7 \times 10^5$ (39%) <約1.9倍>	-	$2.0 \times 10^5$ (22%)	参考資料5-5-(2)参照

注) ( )内は評価上の全断面面積との比較、< >内は必要残存面積との比較。

1 下部リングの厚みは約270mmであるが、同リングの外側表面から中間胴内側表面までの距離(中間胴の厚み)である50.8mmを用いて、評価上の全断面面積(100%)として算定している。

2 シュラウドサポートリングの厚みは約70mmであるが、同リングの内側表面のすみ肉溶接部の厚さを含め、シュラウドサポートリング内側表面から下部胴外側表面の距離である58.6mmを用いて、ここでの面積を評価上の全断面面積(100%)として算定している。

表 - 4 胴部に単発的に発生しているひび割れに関する評価

発電所名	号機	近傍溶接線	評価上の全断面面積 (mm <sup>2</sup> )	現在の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	5年後の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )	備考
福島第一	4	H4	5.3×10 <sup>5</sup> (100%)	5.2×10 <sup>5</sup> (98%) <約2.3倍>	5.1×10 <sup>5</sup> (96%) <約2.3倍>	2.2×10 <sup>5</sup> (42%)	参考資料5 - 1参照
福島第二	3	H3	8.3×10 <sup>5</sup> (100%)	8.1×10 <sup>5</sup> (97%) <約2.7倍>	8.1×10 <sup>5</sup> (97%) <約2.7倍>	3.0×10 <sup>5</sup> (37%)	参考資料5 - 2参照
		H4	8.3×10 <sup>5</sup> (100%)	8.2×10 <sup>5</sup> (98%) <約2.2倍>	8.1×10 <sup>5</sup> (97%) <約2.2倍>	3.6×10 <sup>5</sup> (44%)	参考資料5 - 2参照
	4	H3	8.3×10 <sup>5</sup> (100%)	7.9×10 <sup>5</sup> (95%) <約3.0倍>	7.8×10 <sup>5</sup> (93%) <約3.0倍>	2.6×10 <sup>5</sup> (32%)	参考資料5 - 3参照
		H4	8.3×10 <sup>5</sup> (100%)	8.1×10 <sup>5</sup> (97%) <約2.7倍>	7.7×10 <sup>5</sup> (92%) <約2.5倍>	3.0×10 <sup>5</sup> (37%)	参考資料5 - 3参照
柏崎刈羽	1	H4	8.3×10 <sup>5</sup> (100%)	8.0×10 <sup>5</sup> (96%) <約1.6倍>	7.4×10 <sup>5</sup> (89%) <約1.5倍>	4.9×10 <sup>5</sup> (59%)	参考資料5 - 4参照
	2	V16	8.3×10 <sup>5</sup> (100%)	8.2×10 <sup>5</sup> (98%) <約2.2倍>	8.2×10 <sup>5</sup> (98%) <約2.2倍>	3.7×10 <sup>5</sup> (45%)	参考資料5-5-(3)参照

注) ( )内は評価上の全断面面積(胴部の場合は壊裂時の断面積)との比較。< >内は必要残存面積との比較。

表 - 5 各部の累積中性子照射量とひび割れ進展速度

発電所名	号機	近傍溶接線	現時点での中性子照射量 (n / m <sup>2</sup> )	5年後の中性子照射量 (n / m <sup>2</sup> )	ひび割れ進展速度 (mm / 年)	備考
福島第一	4	H4	1.3×10 <sup>25</sup>	1.6×10 <sup>25</sup>	30	
福島第二	3	H3	1.5×10 <sup>24</sup>	2.0×10 <sup>24</sup>	7	
		H4	4.0×10 <sup>24</sup>	5.3×10 <sup>24</sup>	30	
	4	H3	1.6×10 <sup>24</sup>	2.0×10 <sup>24</sup>	7	
		H4	4.1×10 <sup>24</sup>	5.4×10 <sup>24</sup>	30	
柏崎刈羽	1	H4	4.5×10 <sup>24</sup>	5.8×10 <sup>24</sup>	30	
	2	V16	3.4×10 <sup>24</sup>	4.6×10 <sup>24</sup>	7	保守的にH4溶接線位置で評価

### 破壊力学的評価の結果

東京電力(株)は、胴部の中央(H4内側)付近は炉心シュラウドの中で最も中性子照射量の高い領域であることから、中性子照射量が3×10<sup>24</sup> n / m<sup>2</sup> (米国NRC承認値)を超える場合は破壊力学的評価を併せて実施している。その結果を表 - 6 に示す。

表 - 6 破壊力学的評価

発電所名	号機	近傍溶接線	全周長 (mm)	現時点でのひび割れ長さ (mm)	破壊力学的評価		破壊靱性値 (MPa m)	備考
					許容ひび割れ長さ (mm)	5年後の想定ひび割れ長さ (mm)		
福島第一	4	H 4	13,900	257	821	497	43.2	
福島第二	3	H 4	16,200	118	3,450	358	165	
	4	H 4	16,200	133	5,290	373	165	
柏崎刈羽	1	H 4	16,200	134	1,620	374	165	
	2	V 1 6	16,200	122	3,450	178	165	保守的にH4溶接線位置で評価

その他のひび割れに関する健全性の評価

) アライナーブラケット及び上部格子板用ベースの直下のひび割れに関する健全性について

東京電力(株)は、この部分の溶接部はすみ肉溶接であり、引張残留応力は、表面及び奥行きとも比較的小さいことから、ひび割れの進展は、比較的浅く停まるものと考えられ、実際にUTによる測定では、ほとんどが検出限界以下であったとしている。また、発生箇所もアライナーブラケット及び上部格子板用ベースの直下部分だけであり、水平方向につながることは考え難いとしている。

当院としては、同社がこれらのひび割れについて、炉心シュラウドの健全性に影響を及ぼすものではないと判断していることは妥当であると考え。(参考資料5 - 7 参照)

) シュラウドヘッドボルトブラケット直下のひび割れに関する健全性について

東京電力(株)は、シュラウドヘッドボルトブラケットの下のすみ肉溶接部の直下部分に1箇所だけ確認されていることから、これがすみ肉溶接の範囲を超えて周方向に成長し、さらに、他のシュラウドヘッドボルトブラケットの下に発生するひび割れとつながることは、考え難いとしている。

また、この1箇所のひび割れが上部リングの構造健全性に与える影響については、上部リングが炉心シュラウドの上端に位置し、通常運転中に地震が発生した時の荷重は、炉心シュラウドの下部のリングに比べて、非常に小さいことから、問題にはならないもの等としている。

当院としては、同社がこのひび割れについて、炉心シュラウドの健全性に影響を及ぼすものではないと判断していることは妥当であると考え。(参考資料5 - 8 参照)

ルースパーツ及びバイパスフローについて

東京電力(株)では、炉心シュラウド中間部胴に見られるような複雑な分岐を伴うひび割れにより表面部分が脱落してルースパーツ<sup>20</sup>となる可能性について検討し、以下

<sup>20</sup> ルースパーツ：行方がわからなくなった部品又はその一部をいう。

のことなどから、可能性は非常に小さいと評価している。

i) 局所的に接合部を切り離す強い力が加わることがなく、ひび割れが合流したとしても一箇所でも母材側につながっていれば脱落しないと考えられること。

ii) ひび割れは先端に近づくにつれ、分岐が少なくなる傾向にあること。

しかし、同社は念のため万一ルースパーツが発生したと仮定してその影響を検討したところ、ルースパーツはそのまま沈んで炉心シュラウドの付近に留まると推定され、プラントの安全性に対しては問題とならないと評価した。(参考資料5 - 9 参照)

当院としては、これらの評価は妥当であると考えます。

また、東京電力(株)は、ひび割れの貫通に伴うバイパスフロー<sup>21</sup>について、実際のひび割れの発生状況からみて、このような事象が現実には発生することは考え難いが、念のため万一発生した場合を想定しても、以下のことから原子炉の安全性に影響を与えるものではないと評価している。

i) ひび割れが炉心シュラウドを貫通する場合、開口部は非常に細いものと考えられ、そこから生じるバイパスフローもごくわずかであると考えられること。

ii) 炉心流量5%相当のバイパスフロー(開口部面積 $8.2 \times 10^4 \text{mm}^2$ 以上)を想定した場合に発生する2~3%の原子炉出力の低下は検知可能であり、他のプラントパラメーターと考え合わせることにより、バイパスフローの発生を推定し、適切な対処ができると考えられること。

iii) なお、炉心シュラウドに $2.4 \times 10^5 \text{mm}^2$ の開口部が存在した状態で、LOCA<sup>22</sup>が発生しても、炉心を再冠水し燃料の温度を1,200以下に制限することが可能と評価されている。炉心流量5%のバイパスフローを発生させ得る炉心シュラウドの開口部面積 $8.2 \times 10^4 \text{mm}^2$ は、これの約1/3程度であり十分な余裕がある。

(参考資料5 - 9 参照)

当院としては、これらの評価は妥当であると考えます。

---

<sup>21</sup> バイパスフロー：万一ひび割れが炉心シュラウドを貫通した場合に、その穴を通して冷却水が内から外へ流れ出すこと。

<sup>22</sup> LOCA：冷却材喪失事故事象。原子炉冷却系配管の破断に伴う冷却材喪失又は冷却機能低下がもたらす事故事象の総称。

## 福島第一4号機炉心シュラウドの健全性評価

評価条件:

- a. 評価対象部位: 中間胴内側の H4 溶接部近傍
- b. 評価モデル: 部分貫通モデル
- c. 初期ひび割れ: 保守的に板厚方向に貫通していると仮定して評価
- d. 荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 DP (MPa)	死荷重 $V_{DL}$ (kN)	地震荷重		
				鉛直力 $V_s$ (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN·m)
運転状態	+ S1	0.1	759	220	2,080	7,160
運転状態	+ S2	0.1	759	220	3,120	10,700

e. ひび割れ進展速度: 3.0 mm / 年 (鋭敏化 SUS304 の SCC 速度線図の上限値)

表1 現在及び5年後の残存面積と必要残存面積との比較

評価上の全断面積 (mm <sup>2</sup> )	現在の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	5年後の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )
5.3 × 10 <sup>5</sup> (100%)	5.2 × 10 <sup>5</sup> (98%) < 約 2.3 倍 >	5.1 × 10 <sup>5</sup> (96%) < 約 2.3 倍 >	2.2 × 10 <sup>5</sup> (42%)

(注) < > 内は必要残存面積との比較

表2 破壊力学的評価による許容ひび割れ長さとして現在及び5年後の想定ひび割れ長さ

許容ひび割れ長さ (mm)	現在のひび割れ長さ (mm)	5年後の想定ひび割れ長さ (mm)
821	257	497

## 福島第二3号機炉心シュラウドの健全性評価

評価条件：

- a. 評価対象部位：中間胴内側の H3・H4 溶接部近傍
- b. 評価モデル：部分貫通モデル
- c. 初期ひび割れ：保守的に板厚方向に貫通していると仮定して評価
- d. 荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 DP (MPa)	死荷重 $V_{DL}$ (kN)	地震荷重		
				鉛直力 $V_s$ (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN・m)
H3	運転状態 , + S1	0.1	990	290	1,400	3,200
	運転状態 , + S2	0.1	990	290	3,400	14,000
H4	運転状態 , + S1	0.1	1,200	330	1,700	6,500
	運転状態 , + S2	0.1	1,200	330	5,400	24,000

e. ひび割れ進展速度：H3： 7 mm / 年 (低炭素ステンレス鋼の SCC 速度線図上限値)

H4： 30 mm / 年 (鋭敏化 SUS304 の SCC 速度線図の上限値)

中間部リングの溶接部(H3)の内側近傍に確認された長さ 8 mm のひび割れについては、H3 溶接部近傍の胴部にあるひび割れと合わせて、部分貫通モデルにより評価

表1 現在及び5年後の残存面積と必要残存面積との比較

評価部位	評価上の全断面積 ( $\text{mm}^2$ )	現在の残存面積 ( $\text{mm}^2$ )	5年後の残存面積 ( $\text{mm}^2$ )	必要残存面積 ( $\text{mm}^2$ )
H3	$8.3 \times 10^5$ (100%)	$8.1 \times 10^5$ (97%) < 約 2.7 倍 >	$8.1 \times 10^5$ (97%) < 約 2.7 倍 >	$3.0 \times 10^5$ (37%)
H4	$8.3 \times 10^5$ (100%)	$8.2 \times 10^5$ (98%) < 約 2.2 倍 >	$8.1 \times 10^5$ (97%) < 約 2.2 倍 >	$3.6 \times 10^5$ (44%)

(注) ( )内は必要残存面積との比較

表2 破壊力学的評価による許容ひび割れ長さと現在及び5年後の想定ひび割れ長さ

許容ひび割れ長さ (mm)	現在のひび割れ長さ (mm)	5年後の想定ひび割れ長さ (mm)
3,450	118	358

# 福島第二4号機炉心シュラウドの健全性評価

評価条件:

- a. 評価対象部位: 中間胴内側の H3・H4 溶接部近傍等
- b. 評価モデル: 部分貫通モデル
- c. 初期ひび割れ: 保守的に板厚方向に貫通していると仮定して評価
- d. 荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 DP (MPa)	死荷重 V <sub>DL</sub> (kN)	地震荷重		
				鉛直力 V <sub>s</sub> (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M(kN・m)
H3	運転状態 , + S1	0.1	906	263	2,950	5,000
	運転状態 , + S2	0.1	906	263	4,420	8,900
H4	運転状態 , + S1	0.1	1,080	320	2,110	8,400
	運転状態 , + S2	0.1	1,080	320	3,280	14,200

- e. ひび割れ進展速度: H3: 7mm/年 (低炭素ステンレス鋼のSCC速度線図データの上限值)  
H4: 30mm/年 (鋭敏化SUS304のSCC進展線図の上限值)

表1 現在及び5年後の残存面積と必要残存面積との比較

評価部位	評価上の全断面積 (mm <sup>2</sup> )	現在の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	5年後の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )
H3	8.3 × 10 <sup>5</sup> (100%)	7.9 × 10 <sup>5</sup> (95%) < 約 3.0 倍 >	7.8 × 10 <sup>5</sup> (93%) < 約 3.0 倍 >	2.6 × 10 <sup>5</sup> (32%)
H4	8.3 × 10 <sup>5</sup> (100%)	8.1 × 10 <sup>5</sup> (97%) < 約 2.7 倍 >	7.7 × 10 <sup>5</sup> (92%) < 約 2.5 倍 >	3.0 × 10 <sup>5</sup> (37%)

(注) ( )内は必要残存面積との比較

表2 破壊力学的評価による許容ひび割れ長さとして現在及び5年後の想定ひび割れ長さ

許容ひび割れ長さ (mm)	現在のひび割れ長さ (mm)	5年後の想定ひび割れ長さ (mm)
5,290	133	373

# 柏崎刈羽1号機炉心シュラウドの健全性評価

評価条件:

- a. 評価対象部位: 中間胴内側の H4 溶接部近傍
- b. 評価モデル: 部分貫通モデル
- c. 初期ひび割れ: 保守的に板厚方向に貫通していると仮定して評価
- d. 荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 DP (MPa)	死荷重 V <sub>DL</sub> (kN)	地震荷重		
				鉛直力 V <sub>S</sub> (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN・m)
運転状態	+ S 1	0.1	1,100	310	8,700	34,000
運転状態	+ S 2	0.1	1,100	300	13,000	51,000

e. ひび割れ進展速度: 3.0 mm / 年 (鋭敏化 SUS 304 の SCC 速度線図データの上限值)

表1 現在及び5年後の残存面積と必要残存面積との比較

評価上の全断面積 (mm <sup>2</sup> )	現在の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	5年後の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )
8.3 × 10 <sup>5</sup> (100%)	8.0 × 10 <sup>5</sup> (96%) < 約 1.6 倍 >	7.4 × 10 <sup>5</sup> (89%) < 約 1.5 倍 >	4.9 × 10 <sup>5</sup> (59%)

(注) ( )内は必要残存面積との比較

表2 破壊力学的評価による許容ひび割れ長さとして現在及び5年後の想定ひび割れ長さ

許容ひび割れ長さ (mm)	現在のひび割れ長さ (mm)	5年後の想定ひび割れ長さ (mm)
1,620	134	374

# 柏崎刈羽2号機下部リング(H6a) ひび割れ進展予測

評価条件:

- a. 評価対象部位: 下部リング外側の H6a 溶接部近傍
- b. 残留応力分布: 汎用 FEM 解析コード ABAQUS を用いて解析した値を用いる。
- c. 初期ひび割れ: 保守的にひび割れが全周に存在すると仮定して評価(円筒外側の全周欠陥(深さ 0.3mm)<sup>(注)</sup>)

d. 荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 DP (MPa)	死荷重 V <sub>DL</sub> (kN)	地震荷重		
				鉛直力 V <sub>S</sub> (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN・m)
H6a	運転状態 , +S 1	0.1	1,500	430	4,300	19,900
	運転状態 , +S 2	0.1	1,500	420	7,100	33,600

e. 応力拡大係数: API(米国石油協会)規格 579 の導出式を用いた。

f. ひび割れ進展速度: 低炭素ステンレス鋼の SCC 速度線図を用いた。

(注) 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

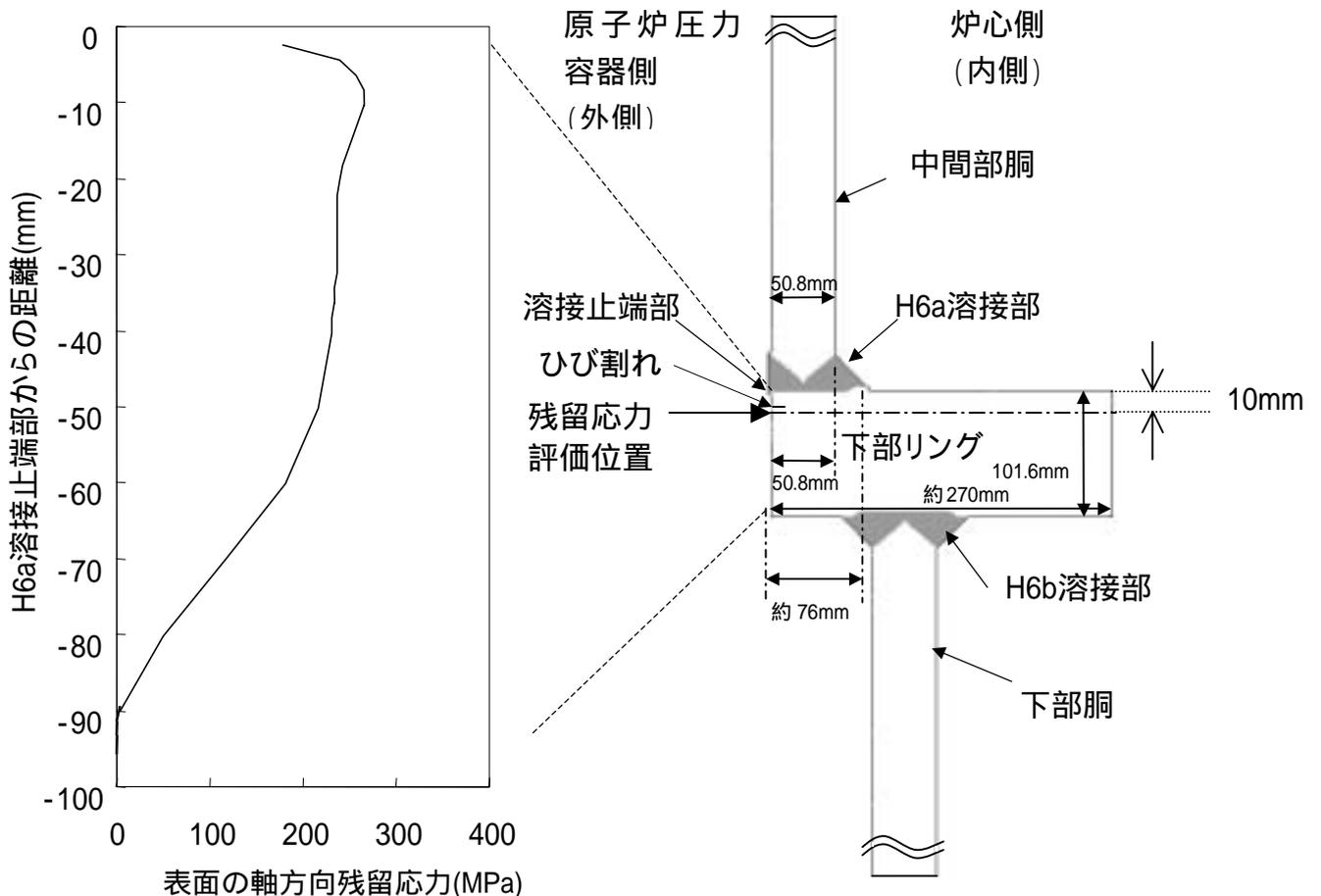
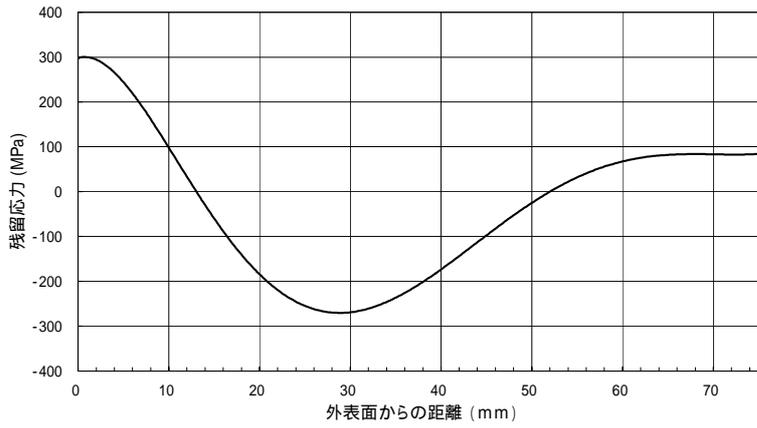


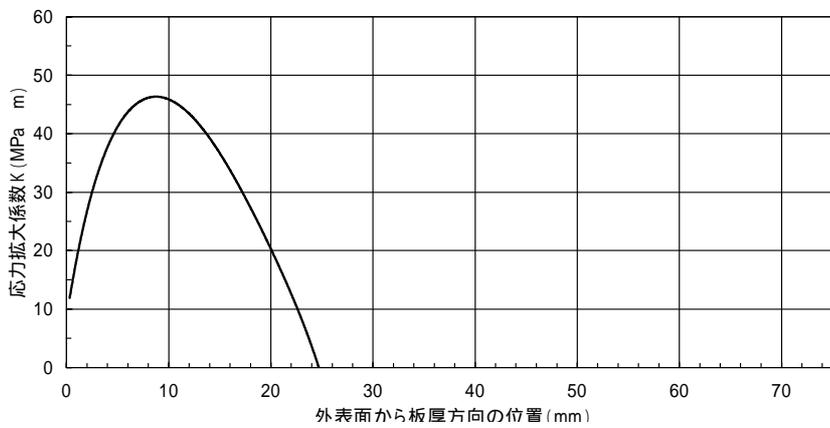
図1 軸方向残留応力分布(下部リング外表面)



(注)FEM による応力分布解析は、全ての範囲(板厚約270mm)で行っているが、本グラフでは、応力拡大係数の算出に必要な範囲の近似曲線を示している。

参考資料4 - 2別添2「ひび割れの進展予測について」式 による近似曲線

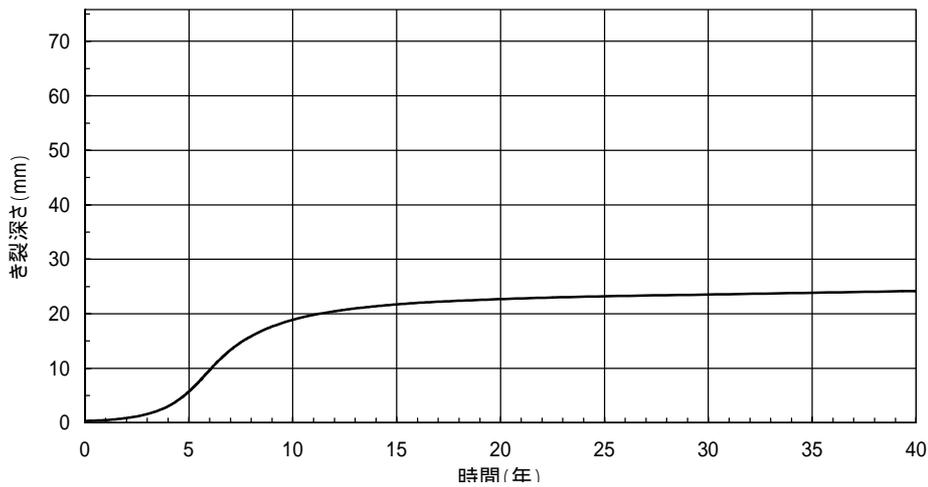
**図2 軸方向残留応力分布(H6a)**



(注)下部リングの厚みは約 270mm であり、応力拡大係数の算出にあたっては、中間胴厚さ(50.8mm)に溶接厚さを加えた厚さ約 76mm を用いる。結果として 30 数 mm 以上は本係数はゼロとなる。

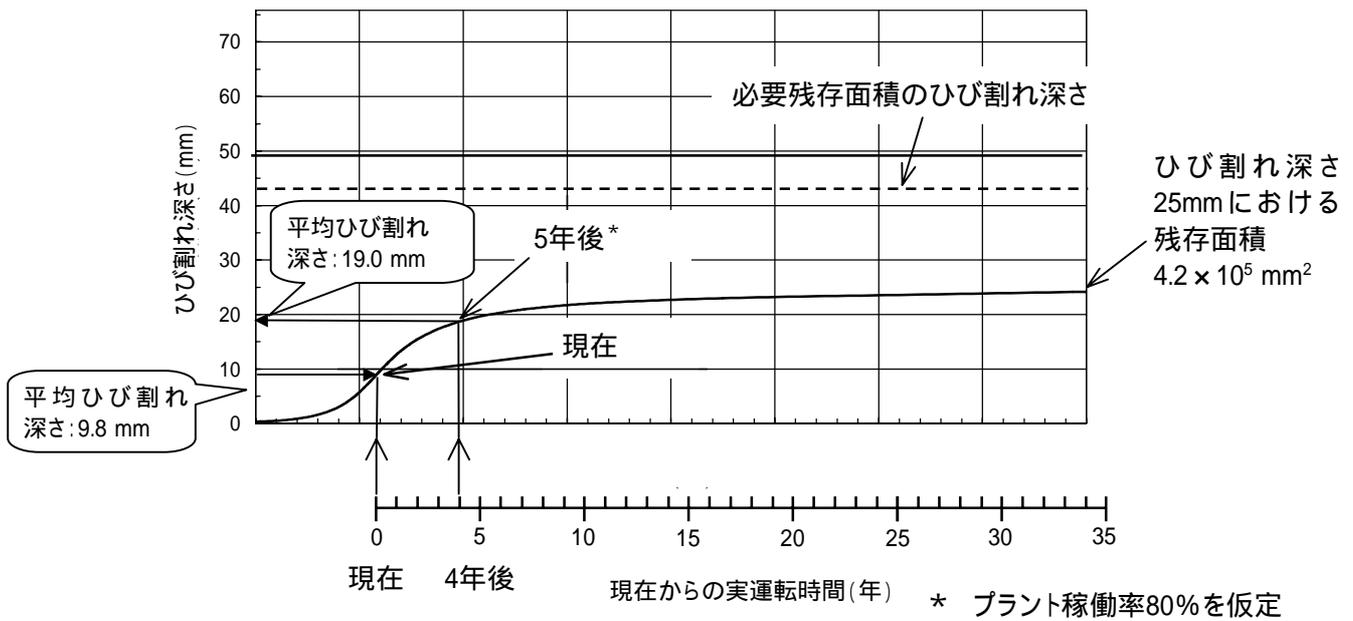
参考資料4 - 2別添2「ひび割れの進展予測について」式 で求めた応力拡大係数(K値)

**図3 応力拡大係数分布(H6a)**



参考資料4 - 2別添2「ひび割れの進展予測について」式 (低炭素ステンレス鋼の SCC 進展速度線図)を用い、上記で求めた応力拡大係数(K 値)から算出したひび割れ進展速度。

**図4 ひび割れ深さと時間の関係(H6a)**



(注)下部リングの厚みは約 270mm であるが、必要残存面積の算定には下部リング外側表面から中間部胴内側表面までの距離である 50.8mm を使用している(図 1 参照)。

図5 H6a 全周ひび割れ進展解析結果

表1 現在及び5年後の残存面積と必要残存面積との比較

評価上の全断面積 (mm <sup>2</sup> )	現在の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	5年後の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )
8.3 × 10 <sup>5</sup> (100%)	6.6 × 10 <sup>5</sup> (79%) < 約 4.7 倍 >	5.1 × 10 <sup>5</sup> (61%) < 約 3.6 倍 >	1.4 × 10 <sup>5</sup> (17%)

注1: < > 内は必要残存面積との比較

注2: 下部リングの厚みは約 270 mm であるが、同リングの外側表面までの距離(中間部胴の厚み)である 50.8 mm を用いて評価上の全断面積(100%)としている。

# 柏崎刈羽2号機シュラウドサポートリング(H7a) ひび割れ進展予測

評価条件:

- 評価対象部位: シュラウドサポートリング内側の H7a 溶接部近傍
- 残留応力分布: 汎用 FEM 解析コード ABAQUS を用いて解析した値を用いる。
- 初期ひび割れ: 保守的にひび割れが全周に存在すると仮定して評価(円筒内側の全周欠陥(深さ 0.1mm)<sup>(注)</sup>)
- 荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 $DP$ (MPa)	死荷重 $V_{DL}$ (kN)	地震荷重		
				鉛直力 $V_S$ (kN)	水平力 $H$ (kN)	モーメント $M$ (kN·m)
H7a	運転状態 , +S 1	0.25	4,200	1,200	4,600	31,000
	運転状態 , +S 2	0.25	4,200	1,200	7,500	51,000

- 応力拡大係数: API(米国石油協会)規格 579 の導出式を用いた。
- ひび割れ進展速度: 低炭素ステンレス鋼の SCC 速度線図を用いた。

(注) 柏崎刈羽原子力発電所 3 号機 H7a 溶接部ポートサンプルの表面加工層の厚さを想定

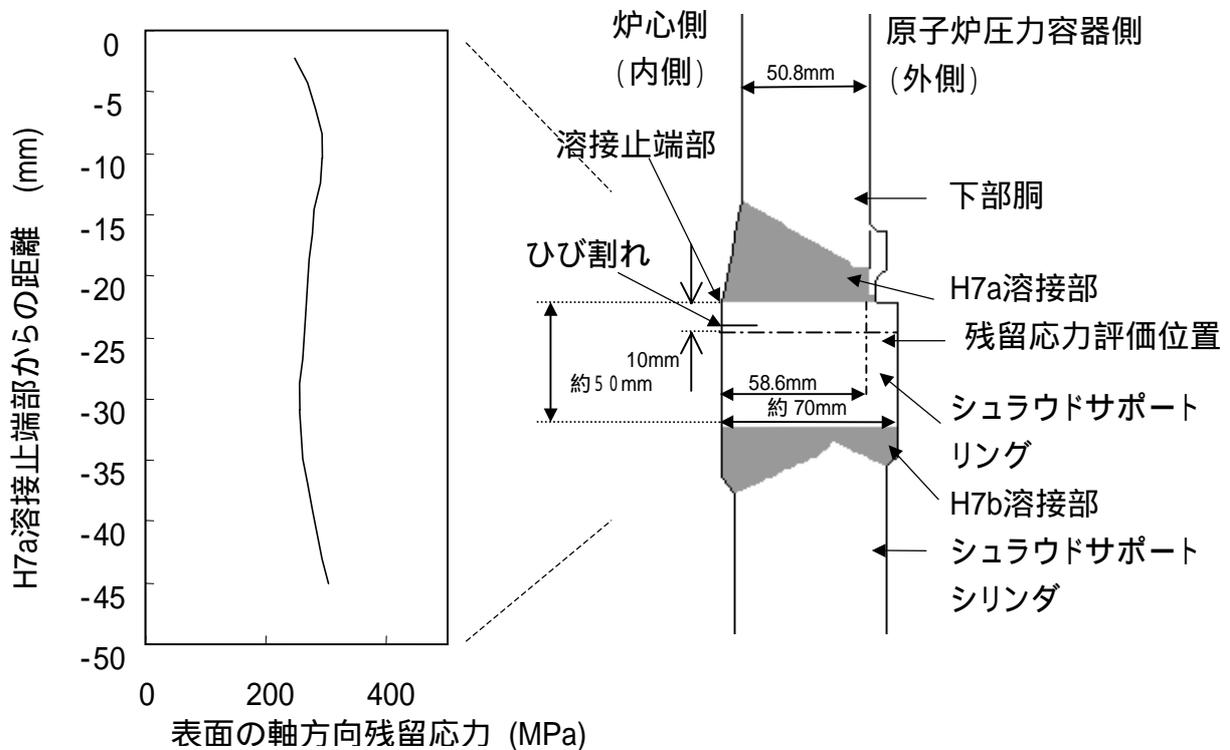
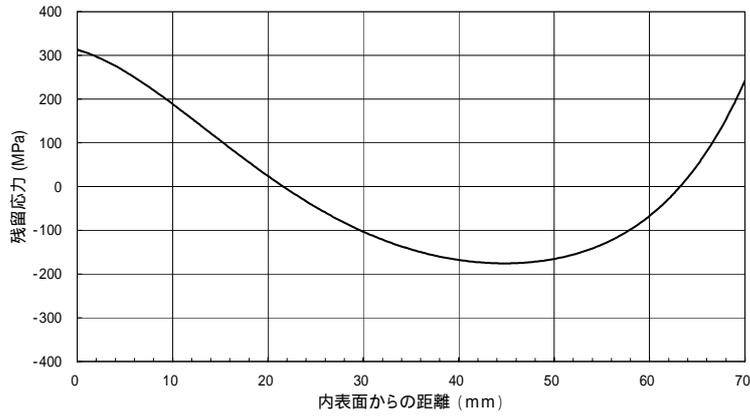
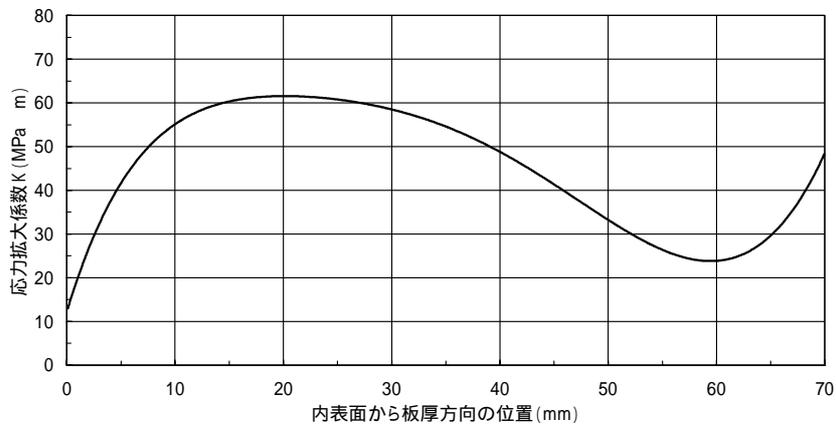


図1 軸方向残留応力分布(シュラウドサポートリング内表面)



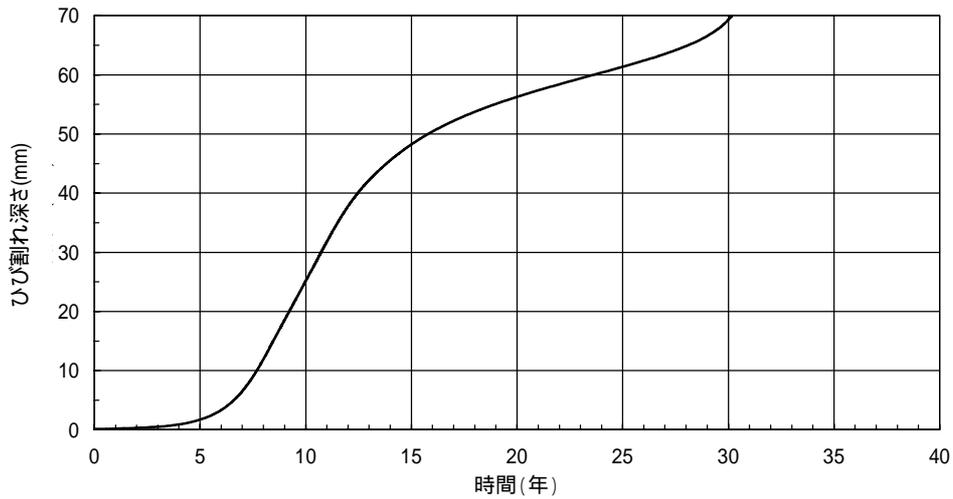
参考資料4 - 2別添2「ひび割れの進展予測について」式 による近似曲線

**図2 軸方向残留応力分布(H7a)**



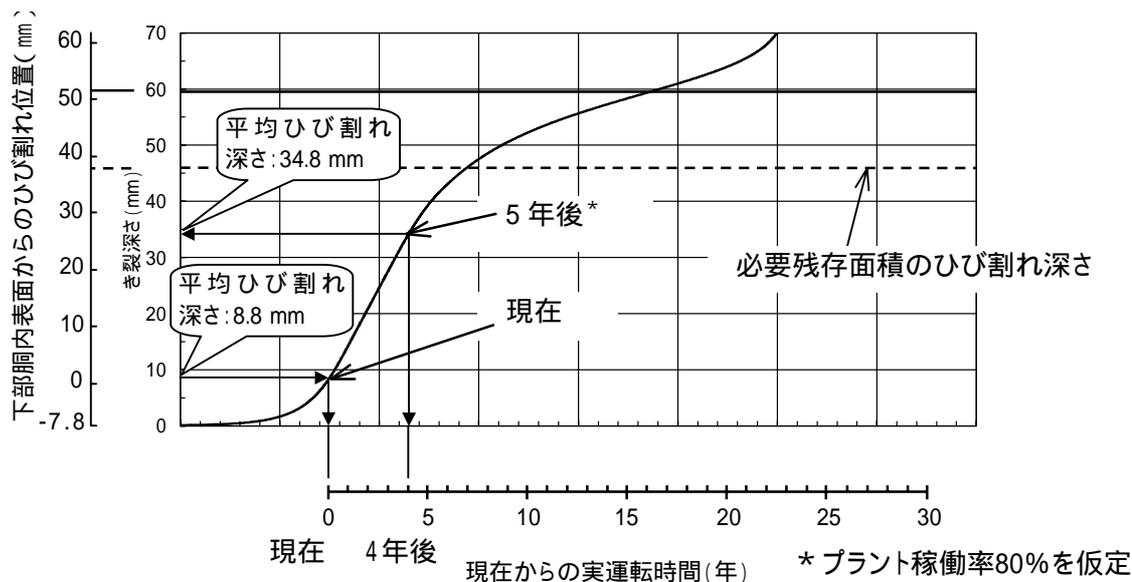
参考資料4 - 2別添2「ひび割れの進展予測について」式 で求めた応力拡大係数

**図3 応力拡大係数分布(H7a)**



参考資料4 - 2別添2「ひび割れの進展予測について」式 (低炭素ステンレス鋼の SCC 進展速度線図)を用い、上記で求めた応力拡大係数(K 値)から算出したひび割れ進展速度。

**図4 ひび割れ深さと時間の関係(H7a)**



(注)シュラウドリングの厚みは約 70mm であるが、必要残存面積の算定にはシュラウドサポートリング内側表面から下部胴外側表面までの距離である 58.6mm を使用している(図 1 参照)。

図5 H7a 全周ひび割れ進展解析結果

表1 現在及び5年後の残存面積と必要残存面積との比較

評価上全断面積 (mm <sup>2</sup> )	現在の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	5年後の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )
9.3 × 10 <sup>5</sup> (100%)	7.8 × 10 <sup>5</sup> (83%) < 約 3.9 倍 >	3.7 × 10 <sup>5</sup> (39%) < 約 1.8 倍 >	2.0 × 10 <sup>5</sup> (22%)

注1: < > 内は必要残存面積との比較

注2: シュラウドサポートリングの厚みは約 70 mm であるが、同リングの内側すみ肉溶接部の厚さを含め、シュラウドサポートリング内側表面から下部胴外側表面の距離である 58.6 mm を用いて、ここでの面積を評価上の全断面積(100%)として算出している。

## 柏崎刈羽2号機 胴部健全性評価

評価条件:

- a. 評価対象部位: 中間胴縦溶接部 (V16)
- b. 評価モデル: 部分貫通モデル
- c. 初期ひび割れ: 保守的に板厚方向に貫通していると仮定
- d. 荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 DP (MPa)	死荷重 V <sub>DL</sub> (kN)	地震荷重		
				鉛直力 V <sub>s</sub> (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN・m)
V16	運転状態, +S1	0.1	1,400	390	3,700	15,000
	運転状態, +S2	0.1	1,400	370	6,200	24,000

V16はH3とH4溶接線のほぼ中間に位置するため保守的にH4溶接線に投影して評価

- e. ひび割れ進展速度: 7mm / 年 (低炭素ステンレス鋼のSCC速度線図の上限値)

表1 現在及び5年後の残存面積と必要残存面積との比較

評価部位	評価上の全断面積 (mm <sup>2</sup> )	現在の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	5年後の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )
V16	8.3 × 10 <sup>5</sup> (100%)	8.2 × 10 <sup>5</sup> (98%) < 約 2.2 倍 >	8.2 × 10 <sup>5</sup> (98%) < 約 2.2 倍 >	3.7 × 10 <sup>5</sup> (45%)

(注) ( )内は必要残存面積との比較

表2 破壊力学的評価による許容ひび割れ長さと現在及び5年後の想定ひび割れ長さ

許容ひび割れ長さ (mm)	現在のひび割れ長さ (mm)	5年後の想定ひび割れ長さ (mm)
3,450	122	178

## 軸方向のひび割れに対する評価について

軸方向のひび割れが炉心シュラウドの強度に与える影響に関する事業者の考え方は以下のとおり。

強度評価は、通常運転中に地震が発生した時に負荷される荷重を考慮し、その際発生する応力を貫通ひび割れを除いた残りの部分で一様に受ける（一次一般膜応力）として、発生応力 < 許容応力であることを確認する。評価の概念図を下図に示す。

周方向のひび割れと同様、ひび割れの進展により残存部分が減少し、発生応力が増大する。発生応力 = 許容応力となった時の軸方向の健全部分の長さが軸方向の必要残存長さとなる。

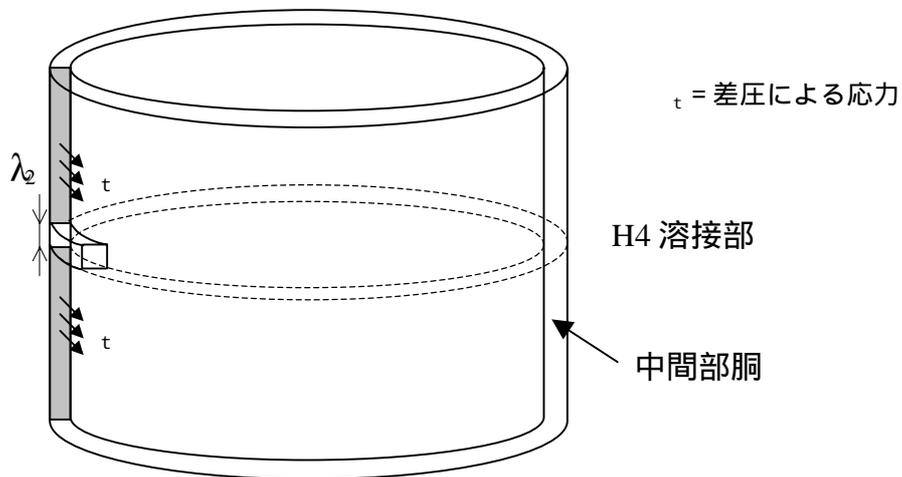


図 軸方向ひび割れ評価の概念（中間部胴の例）

（参考）

軸方向必要残存長さ（福島第二4号機の間中部胴の場合）

	軸方向必要残存長さ（mm）
運転状態 I、II+S <sub>1</sub>	152.5
運転状態 I、II+S <sub>2</sub>	95.4

この場合、軸方向の必要残存長さは約 4 m の中間部胴高さに対して約 150 mm（全面積  $2.1 \times 10^5 \text{ mm}^2$  に対して必要残存面積は  $7.8 \times 10^3 \text{ mm}^2$ ）と非常に小さいことが確認された。

## アライナーブラケット及び上部格子板用ベース部の直下のひび割れ に係る健全性評価について

事業者は、福島第二3号機及び柏崎刈羽1号機で確認されているアライナーブラケット(以下「ブラケット」という。)及び上部格子板用ベース(以下「ベース」という。)の溶接部の直下に発生したひび割れについては、以下の通り、炉心シュラウドの構造健全性に及ぼす影響はないものと評価している。

### (1) ブラケット及びベースの機能について

ブラケットはシュラウド中間部リング上に4個が等方(0°, 90°, 180°, 270°)に、上部格子板台座は同リング上に8個(各ブラケットの間に30°ピッチで2個)設置されており、それぞれすみ肉溶接により同リングに取付けられている板状の部材である。ブラケットは、建設時に上部格子板の位置合わせをする際に使用する偏心ピンを取付けるために設置され、ベースは上部格子板を載せる台座として設置されたものである。(図1)

### (2) ひび割れの状況

今回発見されたひびは、ブラケット(幅×奥行き×高さ:約370mm×約200mm×約55mm)及びベース(幅×奥行き×高さ:約200mm×約120mm×約55mm)及びとシュラウド中間部リング内面とのすみ肉溶接部(脚長13mm)の直下に蛇行した形状で部分的に見られている。これらのひび割れの発生箇所は、ブラケット及びベースの直下部分に限られておりブラケット及びベースを超えているものはほとんどなく、リング部内面全体で見ればごく限定的である。また、当該部位のひびは、以下の理由により応力腐食割れが発生したものと考えられる。

材料条件:中間部リング部の内面加工部位であり、表面硬化層が存在すると推定される。

環境条件:運転中の溶存酸素が300ppb程度、導電率が0.2μS/cm以下であり、応力腐食割れが発生する可能性がある。

応力条件:すみ肉溶接により表面に引張残留応力(約200Mpa)が存在すると推定される。

外観:ひび割れは部分的かつ細かい折れ曲がりを持つ形状であり、疲労による直線的なものとは異なる。

### (3) ひび割れの進展について

当該溶接部はすみ肉溶接であり、内部は圧縮荷重が支配的なことから、ひび割れが深さ方向へ進展する度合いは小さく、表面近傍で留まるものと考えられる。実際に

UTによる測定でもほとんどが検出限界以下であった。

#### (4)健全性への影響

ひび割れの深さ方向への進展は小さく、更にひび割れは溶接部近傍でのみ発生すると考えられるため、仮にブラケット及びベースの全長に渡ってひびが成長したとしても、ブラケットとベースまたはベースとベースの間隔はひび割れの長さに対して十分に長いため、ひび割れが水平方向につながることは考え難い。また、ブラケット及びベースは上部格子板により中間部リングに押さえつけられていること等からブラケット及びベース自体も中間部リングと切り離されることは考え難い。

従って、ブラケット及びベースの直下ひび割れが炉心シュラウドの構造健全性に及ぼす影響はないと評価される。

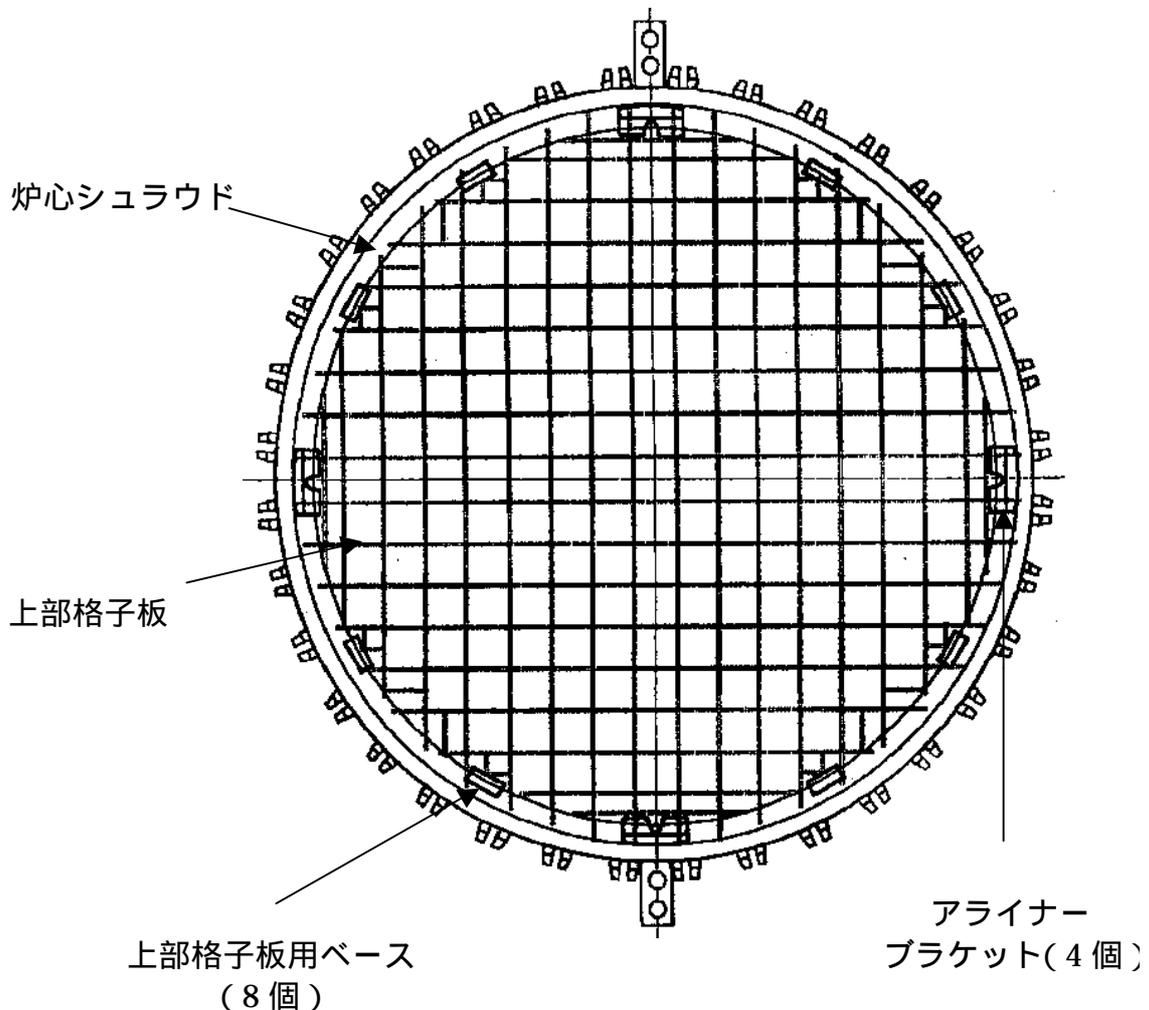
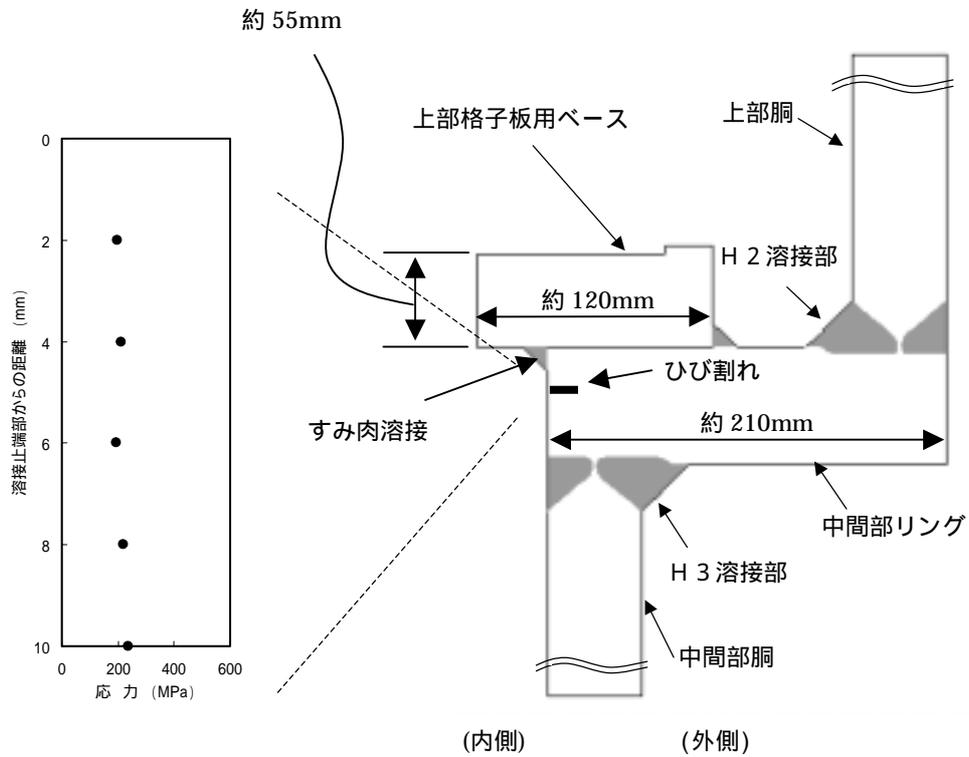


図1 炉心シュラウド及び上部格子板の上部平面図



上部格子板用ベースの直下の軸方向残留応力は表面で約 200MPa となっている。

図2 東京電力(株)が実施した中間部リング内側表面における軸方向残留応力の分布解析(ベースの直下部分)

## シュラウドヘッドボルトブラケットの直下のひび割れ に関する健全性について

事業者は、柏崎刈羽2号機で確認されているシュラウドヘッドボルトブラケット(以下「ボルトブラケット」という。)の溶接部の直下に発生したひび割れについては、以下の通り、炉心シュラウドの構造健全性に及ぼす影響はないものと評価している。

### (1) ボルトブラケットの機能について

ボルトブラケットはシュラウド上部リング上に36箇所(1箇所に2個)等方に設置されており、周囲を溶接により同リングに取付けられている梁状(幅×高さ×奥行き:約60mm×約100mm×約110mm)の部材で、シュラウド上部リング外面に開先付すみ肉溶接(すみ肉溶接脚長:13mm)により取付けられている。このブラケットは、一対でシュラウドヘッドボルトのT字型端部を引掛ける構造を有し、シュラウドヘッドボルトを介して、通常時は運転差圧によるシュラウドヘッドの浮き上がり力を支えている。(図1)

### (2) ひび割れの状況

今回発見されたひび割れは、ボルトブラケットとシュラウド上部リング外面との開先付すみ肉溶接部の直下に蛇行した形状で1箇所(長さ90mm)だけ確認されている。

当該部位のひびは、以下の理由により、応力腐食割れが発生したものと考えられる。

材料条件: 上部リング部の外面加工部位であり、表面硬化層が本部位にも存在すると推定される。

環境条件: 運転中の溶存酸素が300ppb程度、導電率が $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下であり、水質上、応力腐食割れが発生する可能性がある。

応力条件: すみ肉溶接により表面に引張残留応力(柏崎刈羽1号並びに福島第二3号機の上部格子板台座の約200MPaとほぼ同程度と推定)が存在すると推定される。

外観: ひび割れは部分的かつ細かい折れ曲がりを持つ形状であり、疲労による直線的なひびとは異なる。

### (3) 健全性への影響

当該ひび割れは、当該すみ肉溶接の直下部分にのみ確認されており、この範囲を超えて周方向に成長することは考え難い。

シュラウド上部リングはシュラウドの上端であるため、健全性評価上支配的な地震時の荷重はシュラウド下部リングと比較して十分小さい(例えば、上部リング部の地震時モーメントは下部リング部の約1/7程度)ため、構造上十分な余裕がある。

万一、片方のボルトブラケットが荷重を支えられなくても、もう片方のボルトブラケットで荷重を支えることが可能であるため機能上の問題は生じないと評価出来る。

原子炉圧力容器

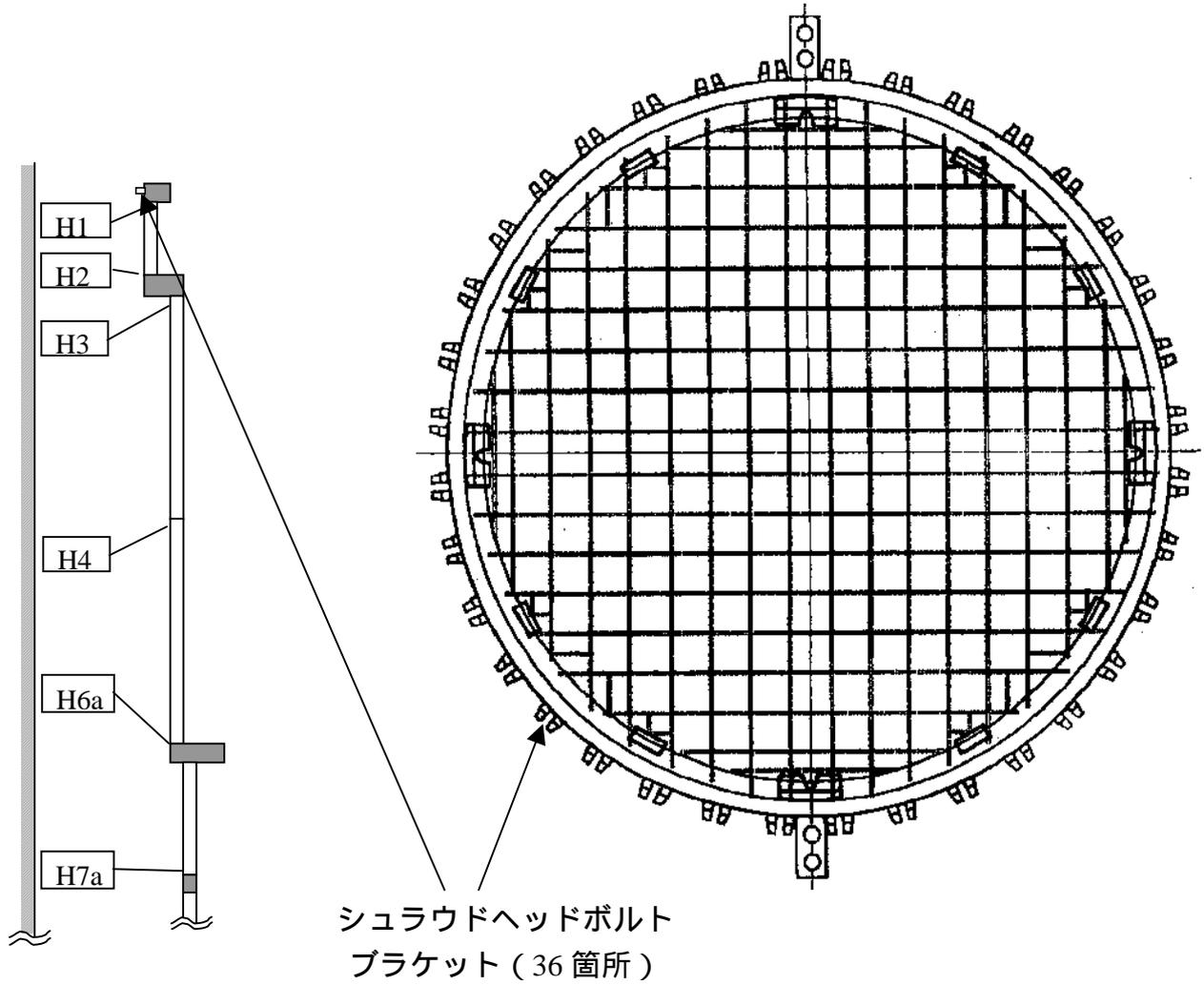


図1 上部格子板部位平面図

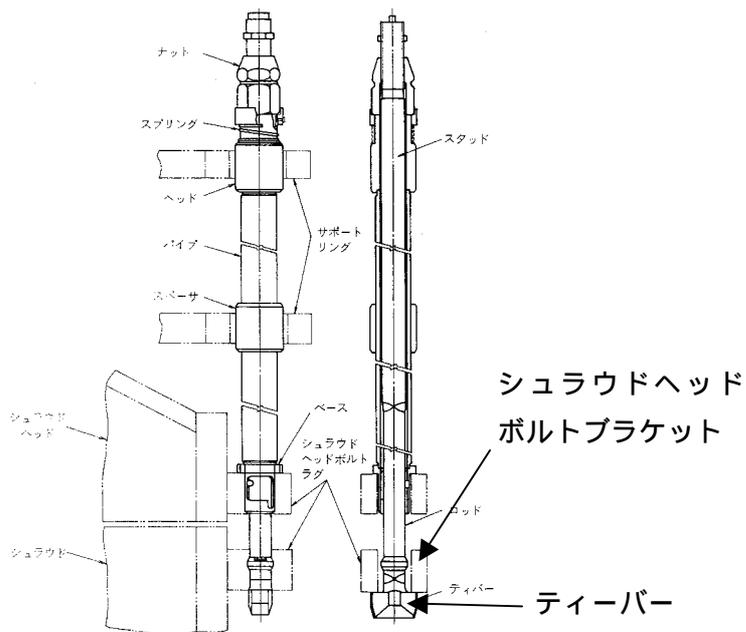


図2 シュラウドヘッドボルトブラケットの構造

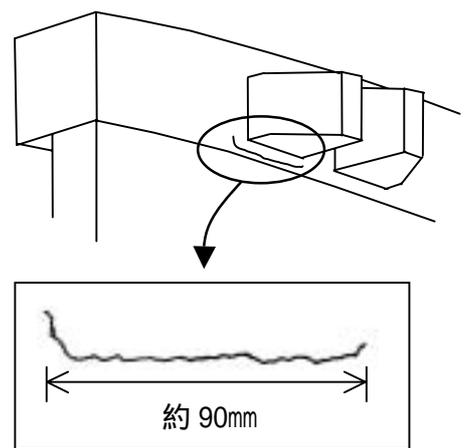


図3 ひびの状況

(参考)シュラウドヘッドボルトブラケットの応力評価について

東京電力(株)は、シュラウドヘッドボルトブラケット1対(2個)にかかる荷重を想定し、仮に片方のブラケットが無い状態でもブラケットの構造健全性に問題がないかについて応力評価を実施した。荷重については、「差圧によるシュラウドヘッドの浮き上がり力」、「地震時の鉛直力」及び「シュラウドヘッドボルト一本あたりの地震モーメントによる鉛直力」を考慮した。(表1)

表1 荷重条件

運転状態	鉛直荷重 V (kN)	モーメント M (N・mm)
運転状態 , + S1	67	$4.0 \times 10^6$
運転状態 , + S2	93	$5.6 \times 10^6$

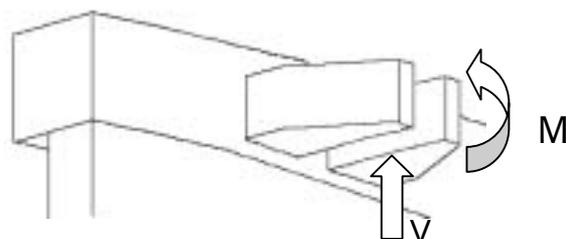


図1 評価モデル

表1の荷重を考慮した結果、表2の通り、片方のみのブラケットでも構造上の余裕は十分あり健全性に問題はないとしている。

表2 評価結果

運転状態	一次応力		
	応力強さ (N/mm <sup>2</sup> )	許容値 (N/mm <sup>2</sup> )	許容値に対する裕度 [ ( ) は片側の場合 ]
運転状態 , + S1	33	128	3.8 倍 (1.9 倍)
運転状態 , + S2	46	205	4.4 倍 (2.2 倍)

## 複雑な分岐を伴うひび割れが存在した場合のルースパーツ発生及び中間部胴に想定した部分貫通のひび割れによるバイパスフローの影響について

事業者は、ルースパーツ（行方がわからなくなった部品又はその一部）及びバイパスフロー（万一ひび割れが炉心シュラウドを貫通した場合に、その穴を通して冷却水が内から外へ流れ出すこと。）の発生の可能性及び万一発生した場合の影響について以下のとおり評価している。

### 1. ルースパーツについて

炉心シュラウド中間部胴（H4 溶接部）内表面には複雑な分岐を伴うひび割れが観察されている。複雑な分岐を伴うひび割れが、内部でひび割れが合流し、ルースパーツとなる可能性について評価した。

表面近傍の複雑な分岐により、ひび割れとひび割れが合流したとしても、一箇所でも母材側につながっていれば、ルースパーツとなることはない。また、接合部分を切り離すように局所的に強い力が加わることはない。

複雑な分岐を伴うひび割れは、開口部付近では、主となるひび割れに沿って多岐に分岐し、主となるひび割れの先端に近づくにつれ、分岐は少なくなる傾向にあることが確認されている（図-1 参照）。すなわち、内部にいくほど、ひび割れ進展に支配的となる応力が明確となり、回り込んでルースパーツを発生するような特異なひび割れ進展は考えられない。

また、これまで確認されたひび割れでは、表面近傍（内部）で複雑に分岐しているものの、表面では一本となっており、この場合はルースパーツとならない。

なお、複雑な分岐を伴うひび割れは、主に炉心シュラウド胴部溶接部（H4）内表面に見られるが、仮にルースパーツとなったとしてもルースパーツは上昇することなく（炉心シュラウド内壁と最外周燃料とのギャップ 66.5 mm、上向きの流速 0.3 m/s）、炉心支持板上もしくは炉心支持板と炉心シュラウド壁間に滞留すると考えられる。

一方、外表面に見られるひび割れは内表面ほど表面のひび割れ形状が複雑でなく、ルースパーツ発生の可能性はさらに低いと考えられる。仮にルースパーツが発生したとしても炉心シュラウド外壁近くの流速は遅いためダウンカメラ\*底部に滞留するものと考えられる。（図-2 参照）

万一、原子炉再循環系に移行するような微細なルースパーツが発生し、炉内

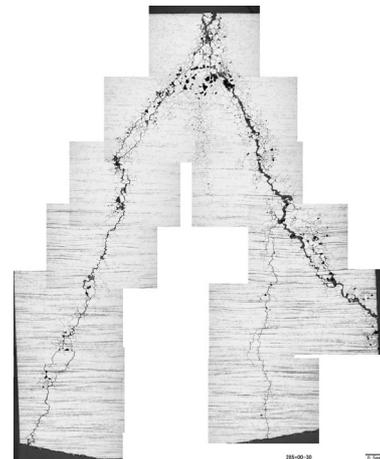


図-1 H4 近傍の特異なひび割れ

に持ち込まれたとしても、プラントの安全性に対しては問題となるものではないと考えられる。

以上より、複雑な分岐を伴うひび割れはルースパーツとなる可能性は低く、仮に発生したとしても安全性に問題とはならないと評価した。

\*：シュラウド外壁と圧力容器内壁の間の領域

## 2. バイパスフローについて

炉心シュラウド中間部胴に応力腐食割れによるひび割れが発生した場合、これまでのひび割れの発生状況からみてひび割れは部分的であり、また、ひび割れが進展する挙動は緩やかであることから、ひび割れが板厚方向に急激に進展して貫通することは考え難い。

しかし、胴部の構造強度の評価を行う場合に、部分的なひび割れは全て板厚方向に貫通している仮定しているため、実際には想定し難いことではあるが、念のため次のとおりバイパスフローの影響について検討し、原子炉の安全性に問題となるものではないと評価した。

実際に炉心シュラウドに発生したひび割れが貫通したとする場合、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り、実際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。

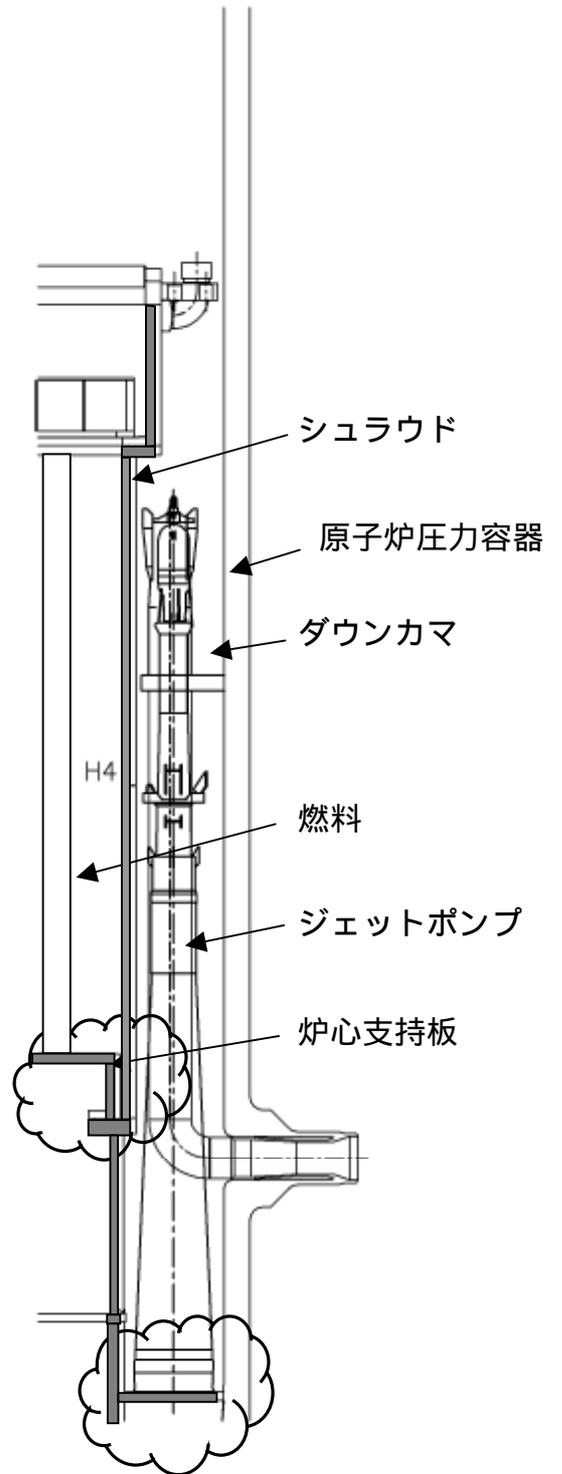
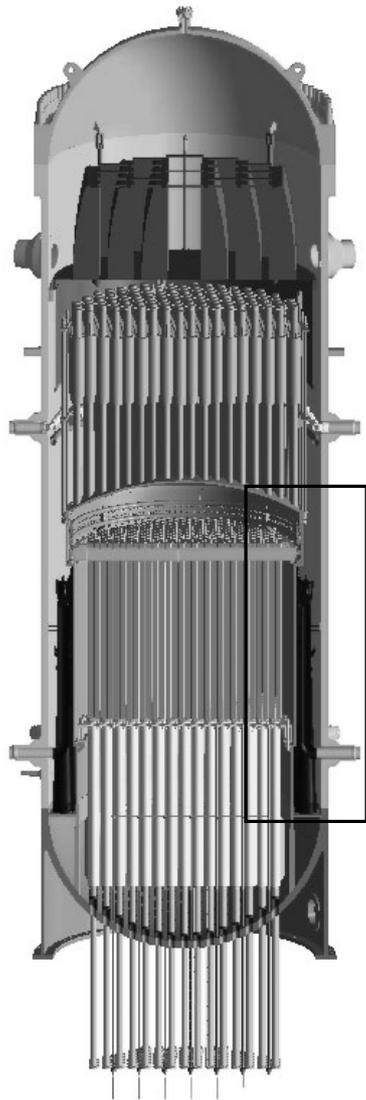
また、万一、バイパスフローが発生した場合に考えられる影響としては以下のことが考えられる。

貫通部からの流量が増加すると、炉心バイパス流量が減少する。これにより、炉心バイパス部にボイドが発生し、原子炉出力の低下が生じる。

貫通部からの流量が増加すると、セパレータを通過する流量が減少する。この結果、ジェットポンプ総流量が増加し、これにより炉心支持差圧も増加する。

他方、バイパスフローが発生してもその発生を検知することができれば、原子炉の安全に支障を及ぼすことなく対応することが可能となる。バイパスフローの発生は、炉心流量5%相当の漏えいに対して、原子炉出力が2～3%低下するとともにジェットポンプ流量と炉心支持板差圧も増加（1%程度）すること等が解析上評価されており、これらを考え合わせるとバイパスフローの発生を推定することが可能である。

また、炉心シュラウドの開口部面積 $2.4 \times 10^5 \text{ mm}^2$ が存在している状態を仮定しても、LOCA（原子炉再循環系配管の破断）時に炉心を再冠水し燃料の温度を1200以下に制限することが可能と評価されている。炉心流量5%のバイパスフローを発生させ得る、炉心シュラウドの開口部は $8.2 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 以上であるが、この面積は上述の $2.4 \times 10^5 \text{ mm}^2$ に対し約1/3程度であり、十分な余裕があるため、再冠水を達成するまでに要する時間は長くなるものの安全評価の結果を変えるものではない。



☁️ : ルースパーツ滞留想定箇所

図 -2

## 6．東京電力(株)による炉心シュラウドの健全性評価結果に対する当院の見解

### (1) リング部のひび割れに関する評価について

当院としては、東京電力(株)が実施した柏崎刈羽2号機のリング部のひび割れに関する健全性の評価は妥当なものであり、現時点及び5年後においても炉心シュラウドは十分な構造強度を有するとの評価結果を踏まえ、リング部のひび割れについては、現時点においては補修を必要とするものではないと判断する。ただし、当院としては、今回の健全性評価はあくまで解析に基づくものであることから、今後ひび割れの実際の進展状況について適切に監視を行っていくことが重要であると考えます。

下部リングのひび割れについては、今後ひび割れが進展しても必要残存面積に至る前に停まるとの解析結果を考慮し、また、一層の技術的知見を蓄積する観点からも、目視点検及び超音波探傷検査により、次回の定期検査時、その後は2年毎を目途にひび割れの進展状況を把握していく必要があると考えます。

他方、シュラウドサポートリングのひび割れについては、進展解析の結果によれば、このひび割れは必要残存面積に至る前に停まるという条件下にはないため、毎回の定期検査等の機会に、目視点検及び超音波探傷検査により、ひび割れの実際の進展状況を把握し、十分な構造強度を有するうちに、すなわち残存面積が必要残存面積より小さくなるより前に、補修等の対策を講じる必要があると考えます。

なお、ひび割れの切除による補修を行う場合には、切除により一部の板厚が減少することから構造強度の確認を確実に行うとともに、切除を行ったとしても依然として引張残留応力は残ること等から、ひび割れの切除痕に対するピーニング<sup>22</sup>等の応力緩和措置を併せて実施する必要があると考えます。また、補修を行った後でも、定期的に点検を行う必要があると考えます。

### (2) 胴部のひび割れに関する評価について

当院としては、東京電力(株)による福島第一4号機、福島第二3号機、同4号機、柏崎刈羽1号機及び同2号機の胴部のひび割れに関する健全性の評価は妥当なものであり、炉心シュラウドが現時点及び5年後においても十分な構造強度を有するとの評価結果を踏まえ、これらのひび割れは直ちに補修を必要とするものではないと判断する。

しかし、当院としては、胴部のひび割れが周方向に進展し続ける可能性があることから、毎回の定期検査等の機会に目視点検及び超音波探傷検査により、ひび割れの実際の進展状況を把握し、十分な構造強度を有するうちに、補修等の対策を講じる必要があると考えます。

なお、切除により一部の板厚が減少することから構造強度の確認を確実に行うとともに、切除を行ったとしても依然として引張残留応力は残ること等から、ひび割れの切除痕に対してピーニング等の応力緩和措置を併せて実施する必要があると考えます。また、補修を行った後でも、定期的に点検を行う必要があると考えます。

---

<sup>22</sup> ピーニング：鋼球やレーザ等を材料の表面にあてることによって、材料表面の残留応力を引張応力から圧縮応力に変換させる方法。