

## 東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所第3号機炉心シュラウドのひび割れについて(案)

平成15年2月18日  
原子力安全・保安院

### 1. ひび割れが確認された経緯

東京電力(株)は、原子力安全・保安院(以下「当院」という。)の「沸騰水型原子炉炉心シュラウドの応力腐食割れに関する対応について」(平成13年9月6日付け平成13・09・05原院第3号)の指示に基づき、平成14年8月からの柏崎刈羽原子力発電所第3号機(以下「柏崎刈羽3号機」という。)の第7回定期検査において炉心シュラウドの点検を行った。(添付1参照)

この結果、東京電力(株)は、炉心シュラウド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溶接部(H7a)内側近傍にひび割れを確認した。なお、これら2つの溶接部近傍以外には、ひび割れは発見されなかった。

東京電力(株)は、このひび割れについて原因究明も含めた詳細調査を行うとともに、炉心シュラウドの健全性について検討を行い、当院に対し報告した。

### 2. 本件に係る東京電力(株)の点検及び原因調査に対する評価

#### (1) 点検体制及び点検結果について

東京電力(株)からは、今回実施した炉心シュラウドの点検は、(社)日本電気協会の技術規程等に基づきプラントメーカーの非破壊検査<sup>1</sup>有資格者により行われ、また、点検結果の公正を期す観点から、第三者機関として(財)発電設備技術検査協会の検査員による点検の現場作業立会と記録確認が行われた旨の報告があった。この点検方法は、(社)日本電気協会の技術規程等に基づく十分な性能を有する水中カメラや超音波探傷<sup>2</sup>装置を用いるなど技術的に確立された手法を用いたものであるとともに、ひび割れの様相に対するブラッシング<sup>3</sup>や必要に応じた水中カメラによる接写等現場においてひび割れを的確に確認するための工夫がなされたものであり、妥当なものであると考えられる。(添付2、3参照)

また、当院としても、原子力保安検査官が目視点検及び超音波探傷検査の記録評価に

<sup>1</sup> 非破壊検査：材料や製品の形や寸法を変えたり壊したりせずに、その健全性を調べる検査。

<sup>2</sup> 超音波探傷：非破壊検査方法の一つ。超音波により材料や製品の傷を調べる検査方法。

<sup>3</sup> ブラッシング：炉心シュラウド表面に付着した水垢等の汚れを取り除き、ひび割れの様相の有無を検査するためナイロン製等のブラシにより磨くこと。

立ち会い、点検の体制、作業内容、記録方法等の実施状況を確認しており、東京電力㈱の炉心シュラウドの点検は適切に行われたものとする。

東京電力㈱による目視点検の結果、当該シュラウド下部リングの溶接部（H 6 a）外側近傍において、全周にひび割れが点在していることが確認され、そのひび割れの合計の長さは約 2.9m であり、超音波探傷検査の結果、そのひび割れの最大の深さは約 11 mm であると測定された。（添付 4 参照）

また、シュラウドサポートリングの溶接部（H 7 a）内側近傍においても、目視点検によりほぼ全周にひび割れが断続的に存在していることが確認され、超音波探傷検査の結果、ひび割れの最大の深さは約 15 mm であると測定された。（添付 5 参照）

## (2) 原因調査について

### i) 炉心シュラウド下部リングの溶接部（H 6 a）外側近傍について

炉心シュラウドの下部リングの溶接部（H 6 a）外側近傍に発生したひび割れは、平成 13 年に福島第二原子力発電所第 3 号機（以下「福島第二 3 号機」という。）炉心シュラウドの下部リングの溶接部で発見されたひび割れと発生箇所及びひび割れの形状が類似していた。このことから、東京電力㈱は、福島第二 3 号機のひび割れと同様に、機械加工による極表層部の硬化、高い残留応力<sup>4</sup>と原子炉の内部にある水に溶け込んだ酸素等による腐食環境によって発生した応力腐食割れ（SCC）<sup>5</sup>であると推定した。（添付 6）

### ii) シュラウドサポートリングの溶接部（H 7 a）内側近傍について

東京電力㈱は、シュラウドサポートリングの溶接部（H 7 a）内側近傍より幅 46 mm 程度のサンプルを採取し、ひび割れの原因究明のため詳細調査を実施した。このサンプル調査については、第三者機関である日本原子力研究所の専門家の現場立会・レビューの下で、日本核燃料開発㈱が調査を行うとともに、日本原子力研究所も同じデータを用いて詳細評価を行った。（添付 7 参照）

サンプルの破面及び断面の観察の結果、極表層部では金属の結晶粒<sup>6</sup>の内部を貫通する割れが発生していた。また、極表層部から内側に入るにつれて金属の結晶粒界<sup>7</sup>に沿って割れが発生しており、応力腐食割れに特徴的なひび割れであることが確認された。

東京電力㈱は、サンプルの破面及び断面の観察結果を踏まえ、以下の～が確認されたこと等から、機械加工による極表層部の硬化、残留応力及び腐食環境によって極表層部に粒内型応力腐食割れ<sup>8</sup>が発生したものと推定した。

<sup>4</sup> 残留応力：溶接や切削加工等を行うことにより、物体内に残留する応力のこと。応力とは物体が外力を受けたとき、外力に応じて物体の内部に生じる抵抗力をいう。

<sup>5</sup> 応力腐食割れ：溶接や外力等によって発生する応力並びに腐食環境の因子等によって発生する割れのこと。

<sup>6</sup> 結晶粒：原子が規則的に並んでいる固体物質を結晶という。金属は結晶が集まってできており、この場合、個々の結晶を結晶粒と呼ぶ。

<sup>7</sup> 結晶粒界：結晶粒と結晶粒の境界面。

<sup>8</sup> 粒内型応力腐食割れ：結晶粒内を貫通して進展する応力腐食割れのこと。

極表層部において機械による加工が原因と考えられるビッカース硬さ<sup>9</sup>(HV)300を超える硬化層が確認されたこと。

溶接によって発生する残留応力を有限要素法<sup>10</sup>により解析した結果、当該炉心シュラウドの下部リング外側及び内側の表面に300MPa程度の引張応力が生じていたものと評価されたこと。

柏崎刈羽原子力発電所における、運転中の原子炉の内部にある水に溶けている酸素濃度を測定した結果、200～250ppbであったため、応力腐食割れが発生する可能性がある環境であったことが確認されたこと。

さらに、内部のひび割れについては、表層部に発生した粒内型応力腐食割れを起点とする粒界型応力腐食割れ<sup>11</sup>であると推定した。この推定原因は、福島第二3号機のひび割れの推定原因と同じであった。

なお、東京電力(株)は、応力腐食割れ以外の原因の可能性についても検討を行ったが、金属調査等から、材料不良、溶接不良、腐食及び疲労がひび割れの原因となる可能性はないものと評価した。

#### ）原因調査に関する当院の考え方

当院としては、東京電力(株)が実施したこれらの原因調査については、材料不良、溶接不良、疲労、応力腐食割れ等ひび割れの原因となり得る事項を幅広く検討したものであるとともに、今回のサンプル調査結果や福島第二3号機で発生したひび割れの原因究明で得られた知見等を総合的に勘案した上で実施されたものであると考える。また、今回のサンプル調査の実施に当たっては、公正を期すために第三者機関の立会・レビューを受けており、その調査結果は信頼できるものであると考える。

これらのことから、東京電力(株)がひび割れの発生原因を応力腐食割れであると推定したことについては、サンプル調査を始めとする各種の調査及び解析の結果からみて、科学的合理性を有するものとする。

### 3. 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

炉心シュラウドに求められる機能は炉心の支持及び炉心内の仕切板であり、炉心シュラウドの健全性については、その一部にひび割れが存在する場合でも、地震などで発生する荷重に耐えることができる構造上の健全性が確保されていれば、炉心シュラウドに求められる機能を安全に維持することができる。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

<sup>9</sup> ビッカース硬さ：材料の硬さを表す尺度の一つ。正四角錐の圧子で、試験体表面を一定の力で押し付け、その時生じたくぼみの面積から硬さを求める。数字が大きいほど硬いことを表す。

<sup>10</sup> 有限要素法：構造解析に用いられる数値解析法の一つ。構造物を有限な大きさの要素に分割し、これらの要素を特定の関係式を用いて解くことにより、全体の構造物状態について解析する。

<sup>11</sup> 粒界型応力腐食割れ：結晶粒界に沿って進展する応力腐食割れのこと。

性的に破壊し、ひび割れが瞬時に伝搬することはない。したがって、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。(添付8参照)

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。具体的手順としては、運転中に、想定される最大の地震荷重を含めた外力がかかった場合でも構造強度の確保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、現時点でのひび割れの面積を考慮した残存面積<sup>12</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評価することとする。(添付9参照)

残存面積の算定に当たっては、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)見積もるとともに、ひび割れの進展評価に当たっても、その進展速度を速めに(保守的に)見積もることが適当であると考え。(添付9参考1.2参照)

#### 4. 東京電力(株)による炉心シュラウドの健全性評価及びそれに対する当院の見解

##### (1) シュラウド下部リングの溶接部(H6a)外側近傍について

東京電力(株)は、下部リング溶接部(H6a)外側近傍の全周にわたって点在するひび割れについて、ひび割れが全周に均一にあるものと仮定し、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<sup>13</sup>又はS2<sup>14</sup>)が作用した場合でも炉心シュラウドが破壊に至らず、構造上の健全性の確保に必要な残存面積を $9.5 \times 10^4 \text{ mm}^2$ と評価した。(添付10参照)

また、現状の残存面積を超音波探傷検査の結果に基づき、保守的に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計算すると、 $7.1 \times 10^5 \text{ mm}^2$ (必要残存面積の約7.5倍)となり、現時点で十分な構造強度を有すると評価した。(添付10参照)

さらに、東京電力(株)は、当該溶接部近傍における残留応力の解析結果及びSUS316L(JIS規格)等低炭素ステンレス鋼の応力腐食割れに関して、一般的に知られている進展速度に基づき、5年後のひび割れの進展について評価した結果、5年後の残存面積は $4.6 \times 10^5 \text{ mm}^2$ (必要残存面積の約4.8倍)となり、5年後においても十分な構造強度を有すると評価した。(添付10参照)

なお、下部リング内部の残留応力は、表面から奥に入るに従って引張り方向から圧縮方向に変化しており、圧縮方向の応力が比較的大きいため、ひび割れの深さ方向への進

<sup>12</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。

<sup>13</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>14</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。

展は最終的には 30 mm 程度の深さで停まるものと評価されている。ひび割れの深さが 30 mm のときの残存面積は  $3.3 \times 10^5 \text{ mm}^2$  (必要残存面積の約 3.5 倍) であり、必要残存面積以上を確保すると評価された。(添付 10 参照)

当院としては、東京電力(株)が算定した現時点の残存面積は、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の残存面積との比較により、現時点で十分な構造強度を有しているとの評価は妥当であると考ええる。さらに、SUS316L 等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評価し、必要な残存面積との比較により、5 年後においても十分な構造強度を有していることは妥当であると考ええる。

したがって、当院としては、炉心シュラウドが現時点及び 5 年後において十分な構造強度を有するとの評価結果を踏まえ、現時点においては当該溶接部近傍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理論的な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える。具体的には、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える。

## (2) シュラウドサポートリングの溶接部 (H7 a) 内側近傍について

東京電力(株)は、シュラウドサポートリング溶接部 (H7 a) 内側近傍のひび割れについても、下部リング溶接部 (H6 a) 外側近傍と同様な手法により評価を実施した。(添付 9 参照)

その結果、シュラウドサポートリングの必要残存面積  $1.6 \times 10^5 \text{ mm}^2$  に対し、現状の残存面積は  $7.9 \times 10^5 \text{ mm}^2$  (必要残存面積の約 4.9 倍)、5 年後の残存面積は  $3.8 \times 10^5 \text{ mm}^2$  (必要残存面積の約 2.4 倍) になると評価され、十分な構造強度を有しているとの評価した。(添付 11 参照)

なお、シュラウドサポートリングのひび割れの進展については、内部の残留応力が表面から奥に入るに従って引張り方向から圧縮方向に変化するため、進展速度は途中で緩和するものの、圧縮方向の応力が比較的小さいため、ひび割れの進展は停まることなく継続していくものと評価した。(添付 11 参照)

当院としては、東京電力(株)が算定した現時点の残存面積は、下部リングの溶接部 (H6 a) と同様に、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の残存面積との比較により、現時点で十分な構造強度を有しているとの評価は妥当であると判断する。さらに、SUS316L 等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評価して得られた残存面積と、必要残存面積との比較により、当該部分が5年後においても十分な構造強度を有しているとの評価は妥当であると考える。

したがって、当院としては、シュラウドサポートリング溶接部（H7a）内側近傍のひび割れは直ちに補修する必要はないと判断する。しかし、進展解析の結果によれば、当該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る点検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る。

なお、補修の際、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>15</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る。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る。

---

<sup>15</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。

# 炉心シュラウドについて

## 1. 炉心シュラウドの概要

炉心シュラウドは、原子炉压力容器内に燃料集合体（炉心）を囲むように設置されている円筒状のステンレス製構造物であり、原子炉内の冷却水の流れを分離する仕切板の役割をするものである。

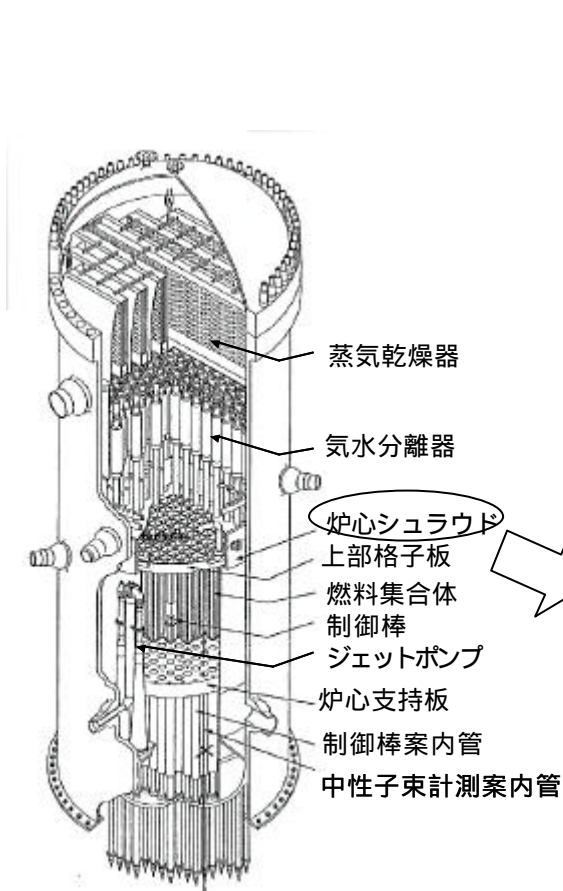


図2 原子炉压力容器鳥瞰図

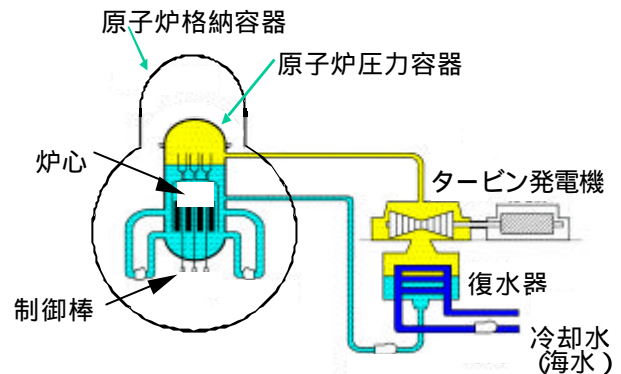


図1 原子力発電所全体系統概略図

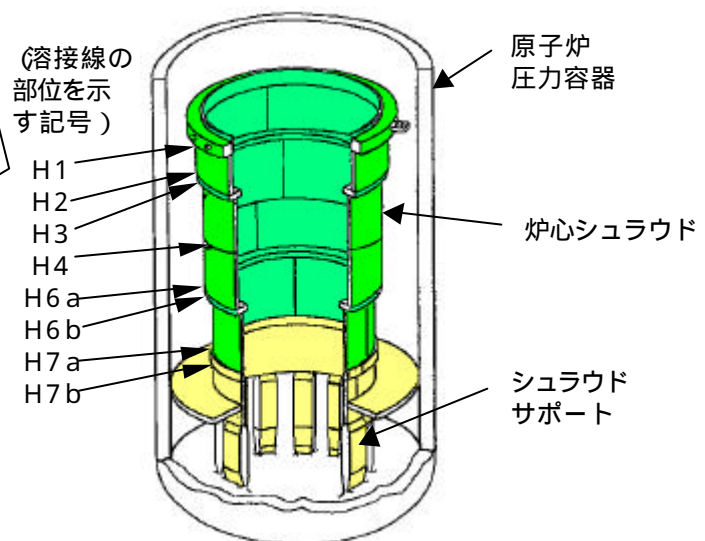


図3 炉心シュラウドの構造

## 2. 炉心シュラウドの安全機能

炉心シュラウドには、以下の二つの安全機能が要求される。

### 炉心の支持機能

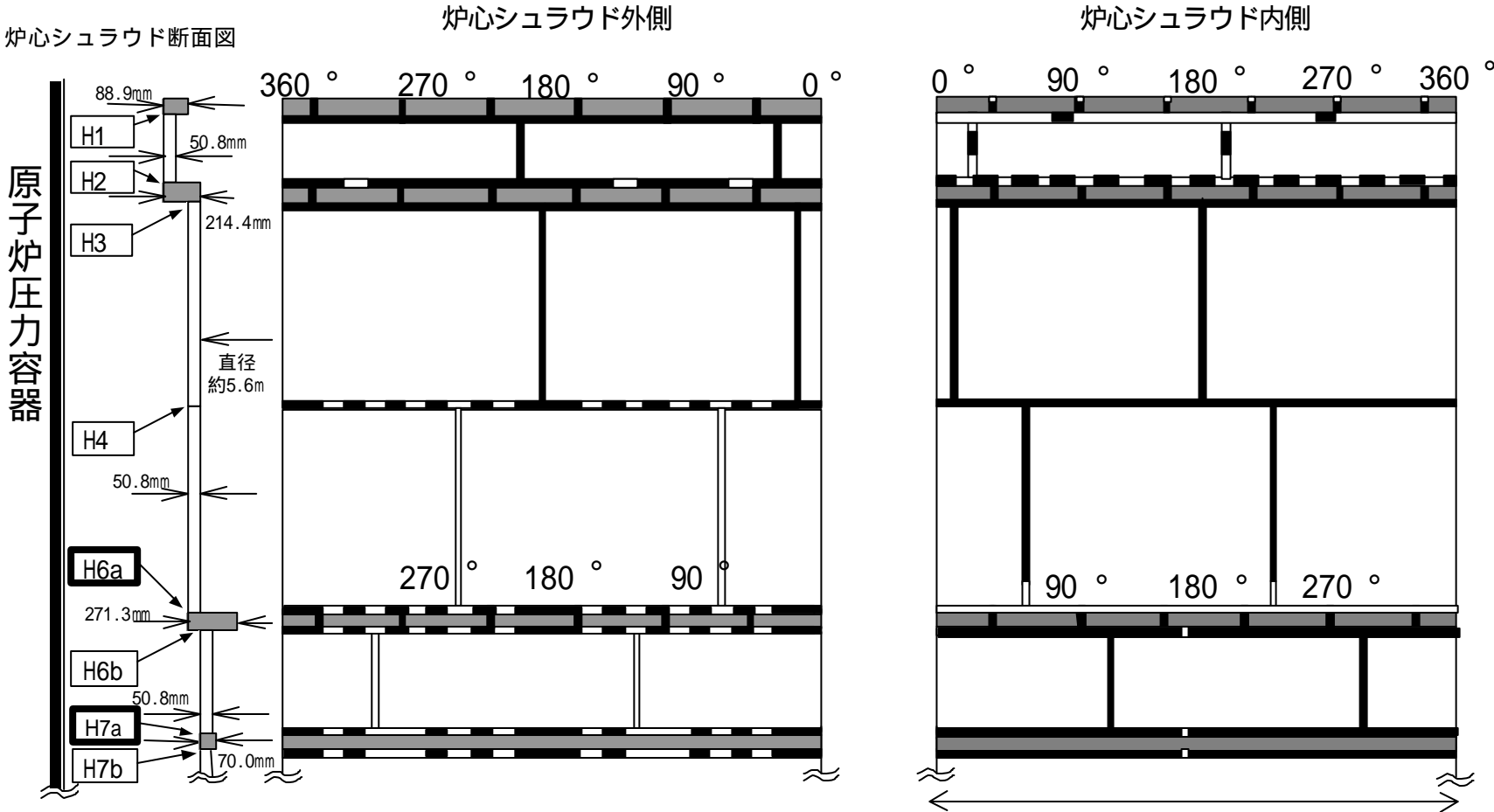
想定される地震力に対し、炉心を支持し、<sup>1</sup>制御棒の挿入性を満足させる。

1：燃料集合体に作用する水平方向地震荷重が主となる。なお、周辺部の燃料集合体を除く燃料集合体の鉛直地震荷重は、制御棒案内管が支持しており炉心シュラウドには作用しない。

### 炉心冷却機能

炉心冷却機能として、炉内の冷却材流路を確保するとともに、事故時の炉水再冠水（事故時においても炉心を水で満たす）のための仕切り（隔壁）となる。

# 柏崎刈羽 3号機炉心シュラウドの溶接線と目視点検範囲

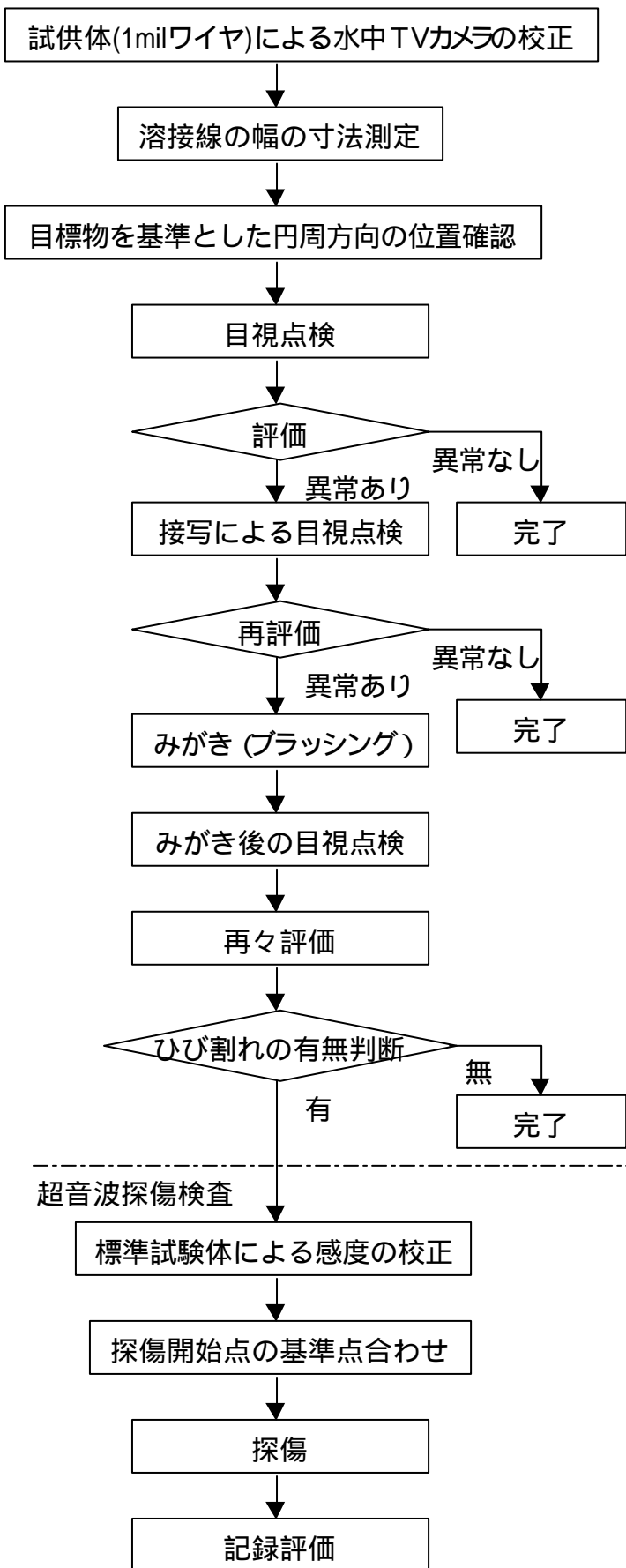


- 外観目視点検実施範囲
- 干渉物により外観目視点検出来ない範囲



# 炉心シュラウドの点検方法

## 目視点検



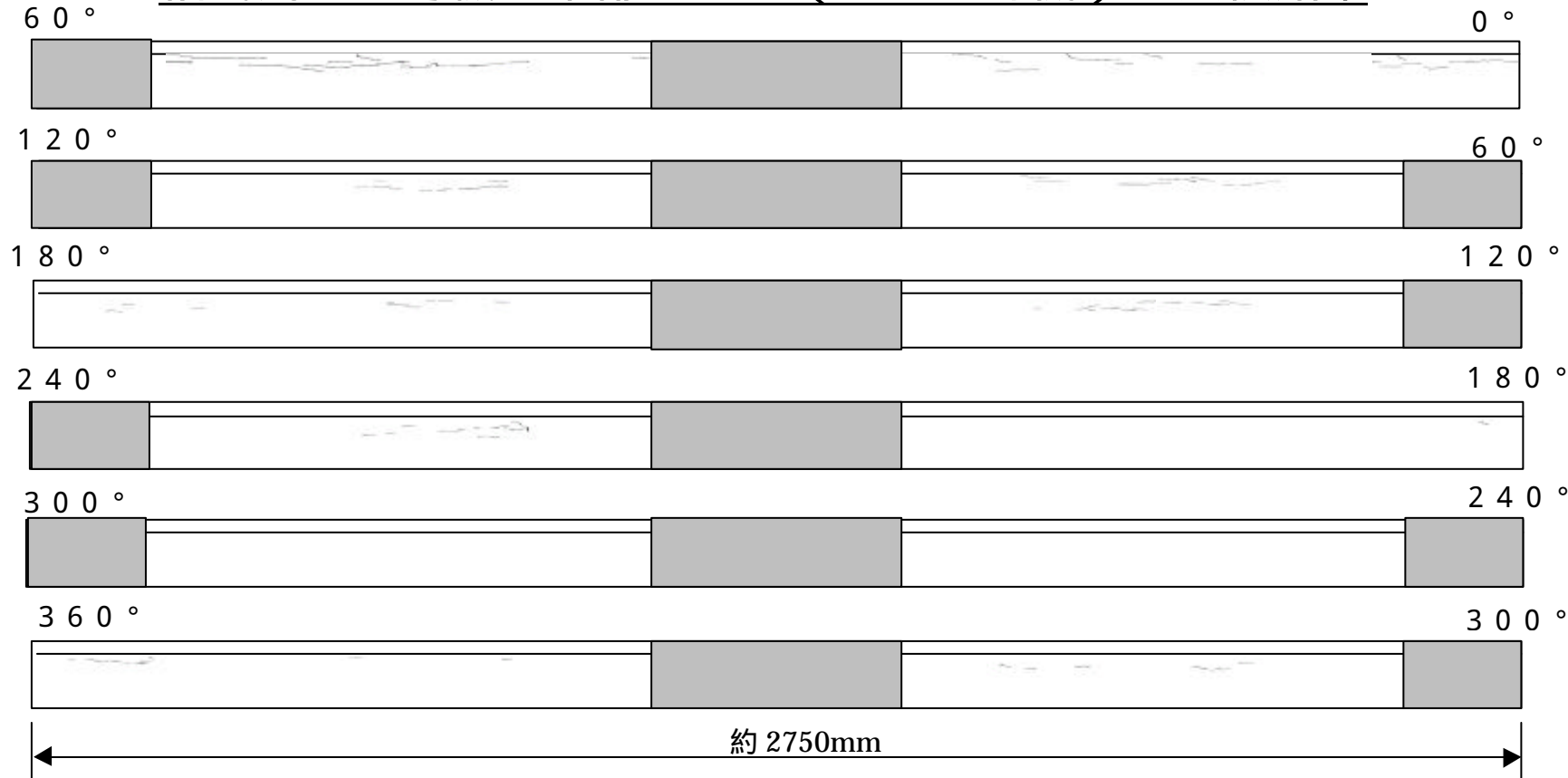
### < 目視点検方法 >

- 目視点検は、水中TVカメラによる遠隔肉眼試験による。
- 水中TVカメラは、点検表面において太さ1mil(0.025mm)のワイヤの識別が可能なものを使用する。また、適切な照明装置を使用し、必要に応じ点検表面の付着物を除去する。
- クラッドの付着、機器等の摺動痕などひびとは性状を異なると判断できないものが認識された場合には、点検表面の異物をブラッシング等により除去して検査を実施する。
- クラッド等の付着、機器等の摺動痕等のように明らかにひび割れとは性状を異にすると判断されるインディケーション(指示模様)については、上記の限りではない。
- 点検記録には、点検範囲におけるひび割れの有無、ひび割れがあった場合にはその位置、大きさ及び形状等を記録する

### < 超音波探傷検査方法 >

- 超音波探傷検査は水浸パルス反射法による。
- 検査に先立ち、装置の校正を行うため、基準欠陥を有する対比試験片により、欠陥からの反射波(エコー)の大きさをフルスクリーン高さの50%程度になるよう基準感度調整を行う。
- 周波数2MHz、屈折角60°の探触子により、金属材料内部のひび割れの深さを測定する。
- 点検記録にはひび割れの深さを記録する。

# 柏崎刈羽 3 号機 下部リング ( H 6 a 外側 ) の点検結果



目視点検不可範囲

図 1 目視点検結果

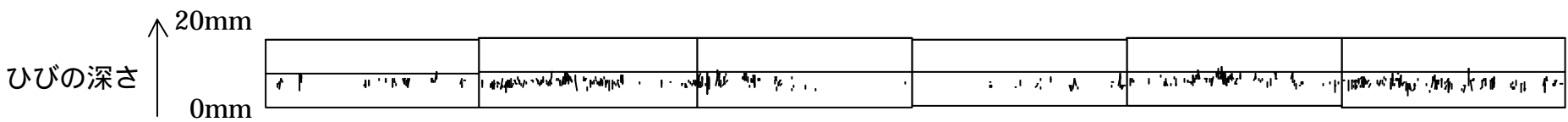


図 2 超音波探傷検査結果

### 柏崎刈羽 3号機 シュラウドサポートリング (H7 a内側) の点検結果

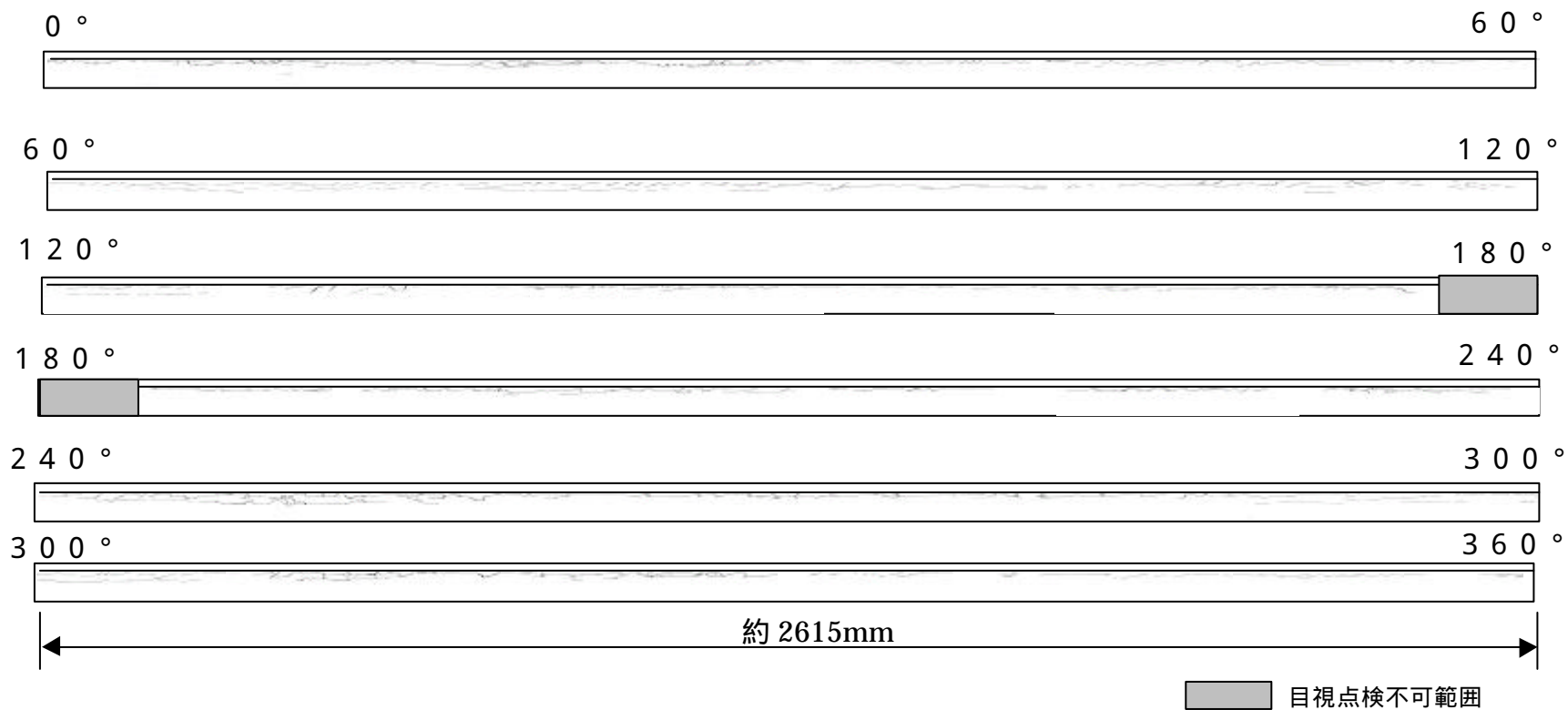


図 1 目視点検結果

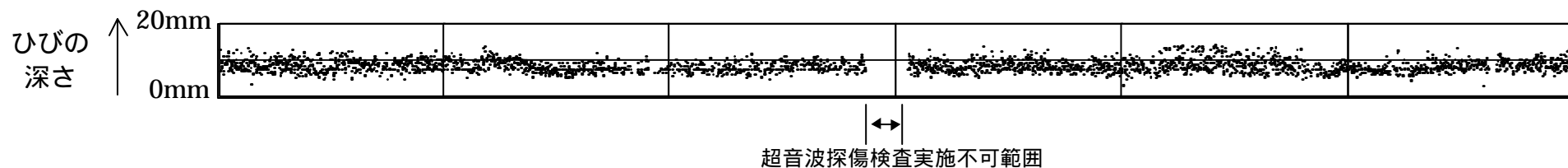
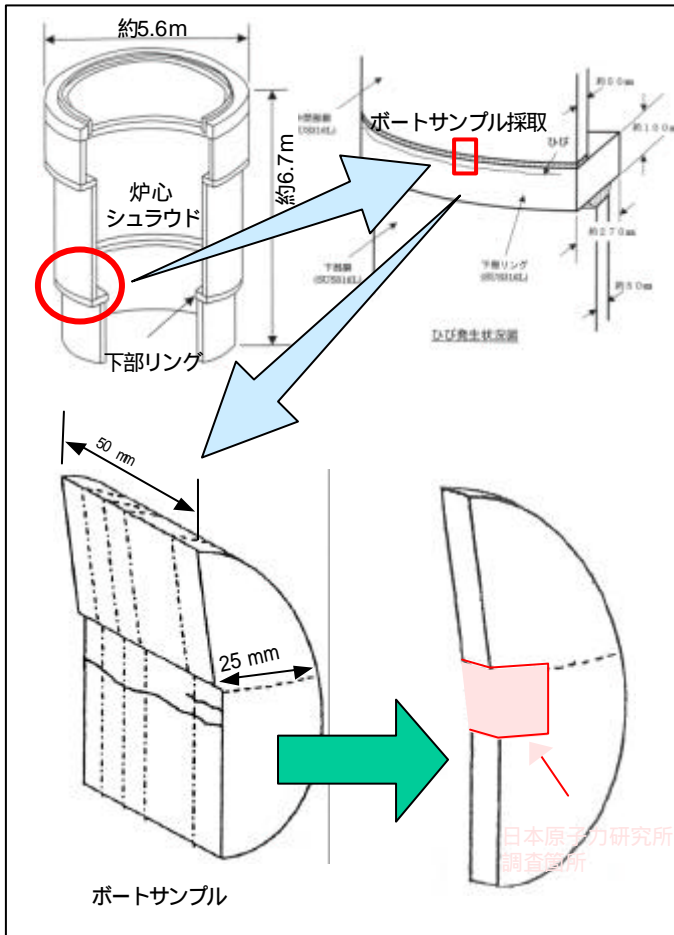


図 2 超音波探傷検査結果

# 福島第二 3号機 H6aボートサンプル調査

添付 6

第11回定期検査 (平成13年実施)においてひび割れ (以下、き裂)が確認された福島第二 3号機のシュラウド下部リング外表面の溶接部近傍から採取した材料サンプルの残材について、各種検査を改めて日本原子力研究所にて実施した。



## (1)金相観察

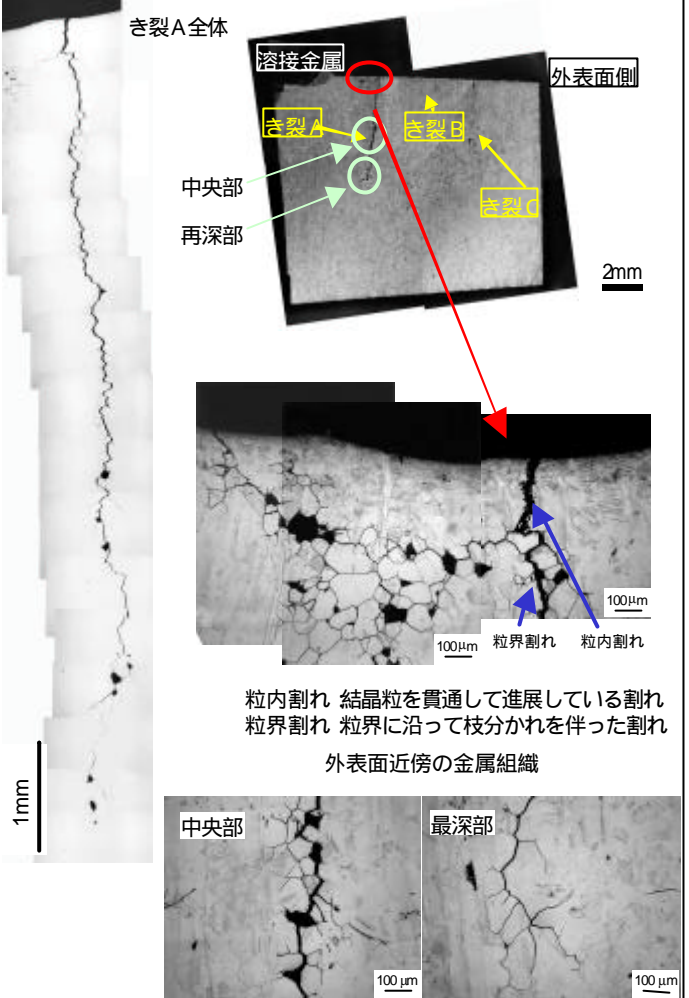
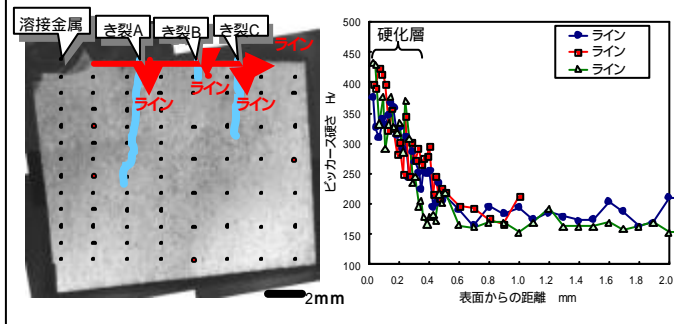


図1 き裂Aの全体 (左図) 及び中央部、最深部の金属組織 (エッチング後)

## (2)硬さ測定

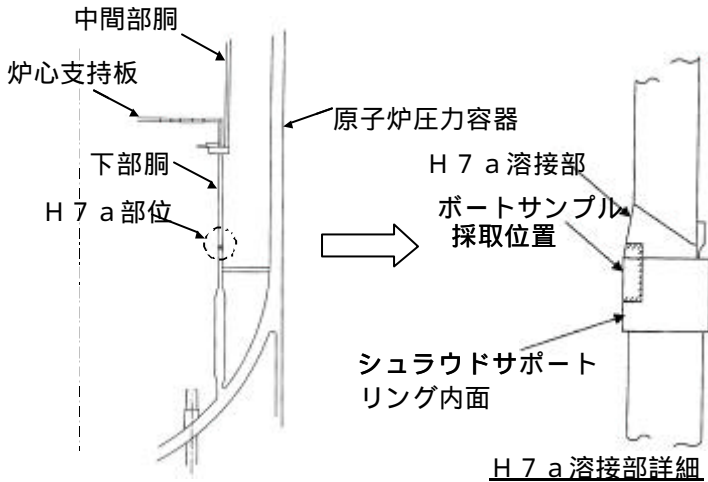
- 1) 試料断面全体の硬さ分布測定 (1mmまたは2mmピッチ)
- 2) き裂に沿った外表面から深さ方向の硬さ分布測定 (き裂から0.5mmの位置)
- 3) 外表面近傍の硬さ分布測定 (深さ50 µmの位置)



## (3)結果

- き裂は溶接金属端から約 3 ~ 9mm離れた位置に 3箇所観察され、最大深さは約8mmであった。
- 2箇所の子裂破面を観察した結果、き裂破面のほぼ全面が粒界割れであったが、き裂開口部には、約 300mmの範囲に粒内割れが観察された。
- 表面から約 500mmの深さまで、最高Hv400を越える硬化層が形成されていた。
- 溶接により想定される引張残留応力及び炉水の溶存酸素濃度レベル(250ppb)を考えると、き裂は応力腐食割れであると推察される。

# 柏崎刈羽 3号機 H7aボートサンプル調査



H7a 溶接部詳細

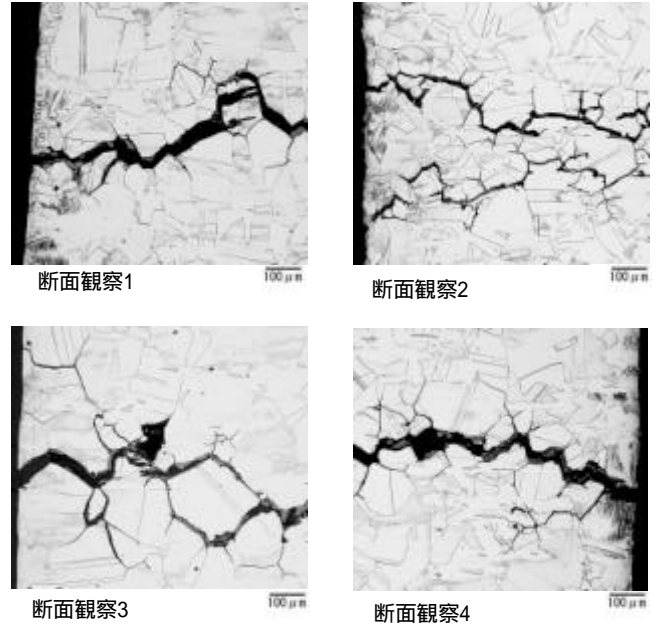


図 2 断面観察結果 (観察倍率 : × 100)

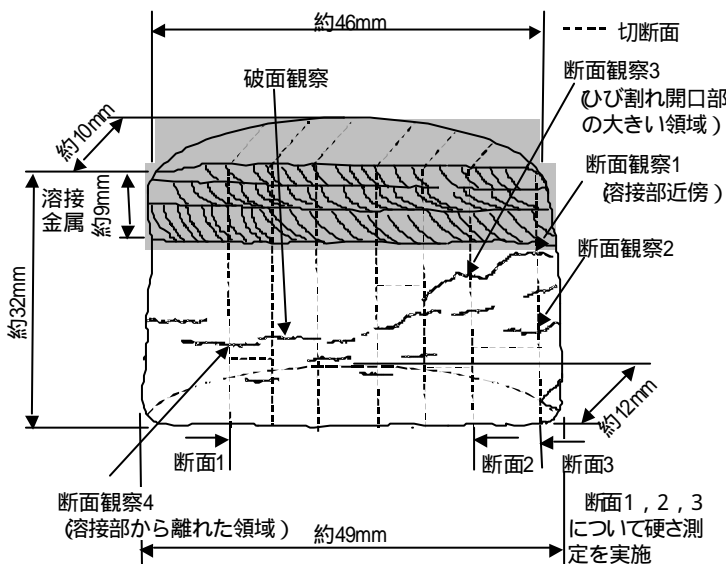


図 1 ボートサンプル切断面および観察点

## 結果

断面観察より外表面から数十 μm までは粒内割れであり、その後粒界割れで進展。加工硬化層は外表面から深さ 100 μm 弱。

・金属内部 (外表面から 250 μm 以上内側) では粒界型応力腐食割れの特徴である粒界割れが観察された。

・硬さ分布により、溶接線から約 4mm 以上離れた表面近傍に HV300 を超える硬化層が認められており、機械加工による硬化と考えられる。また、溶接線近傍は、硬さが減少している。

・溶接により想定される引張残留応力及び炉水の溶存酸素濃度レベル (250ppb) を考えると、ひび割れは応力腐食割れであると推察される。

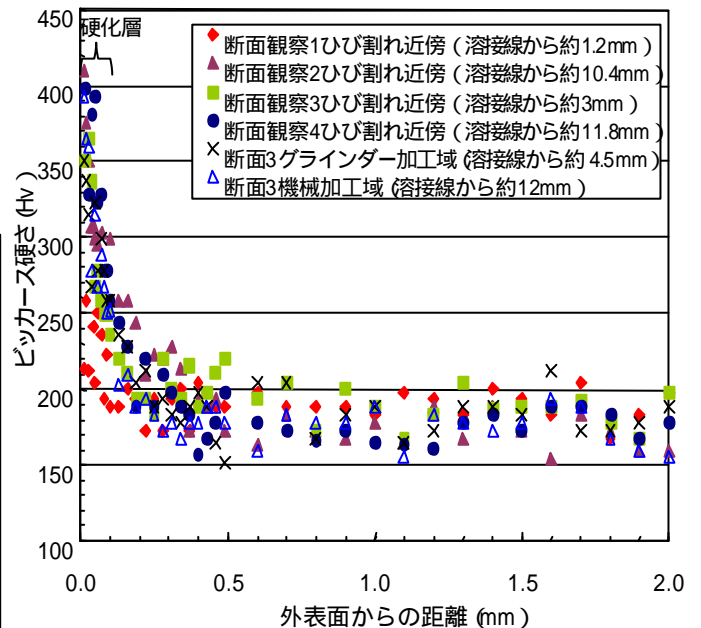


図 3 硬さの分布

# 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。

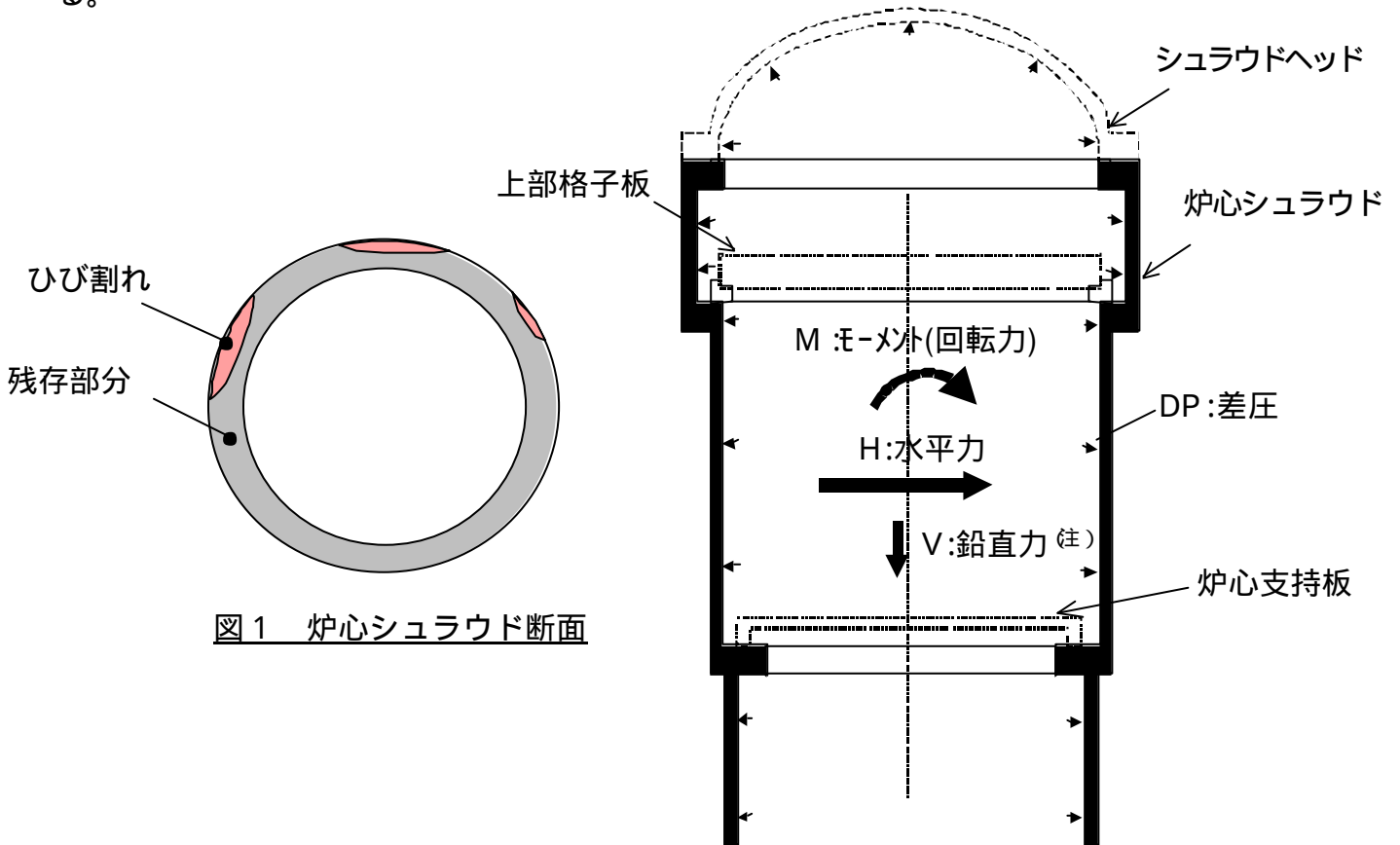
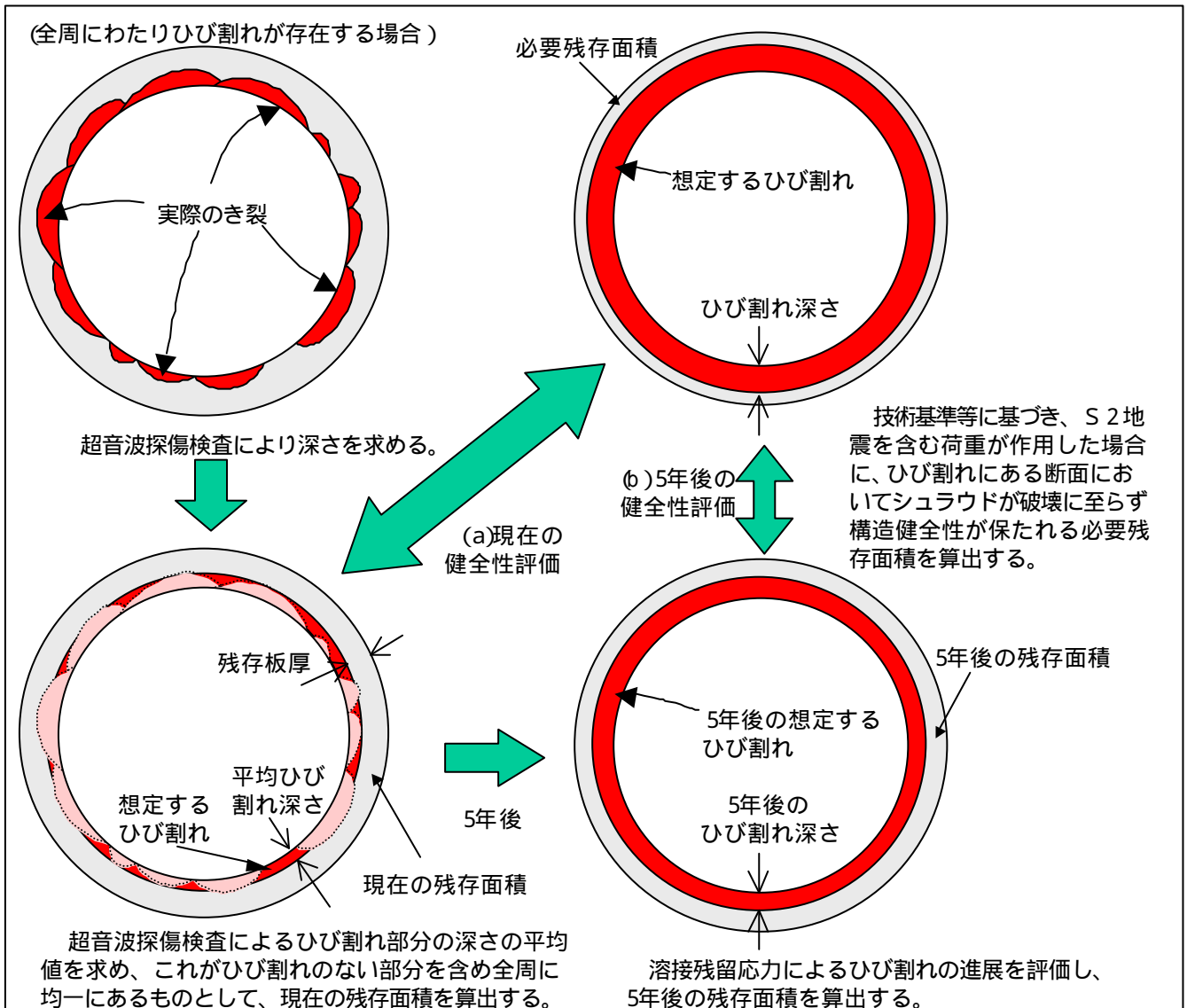
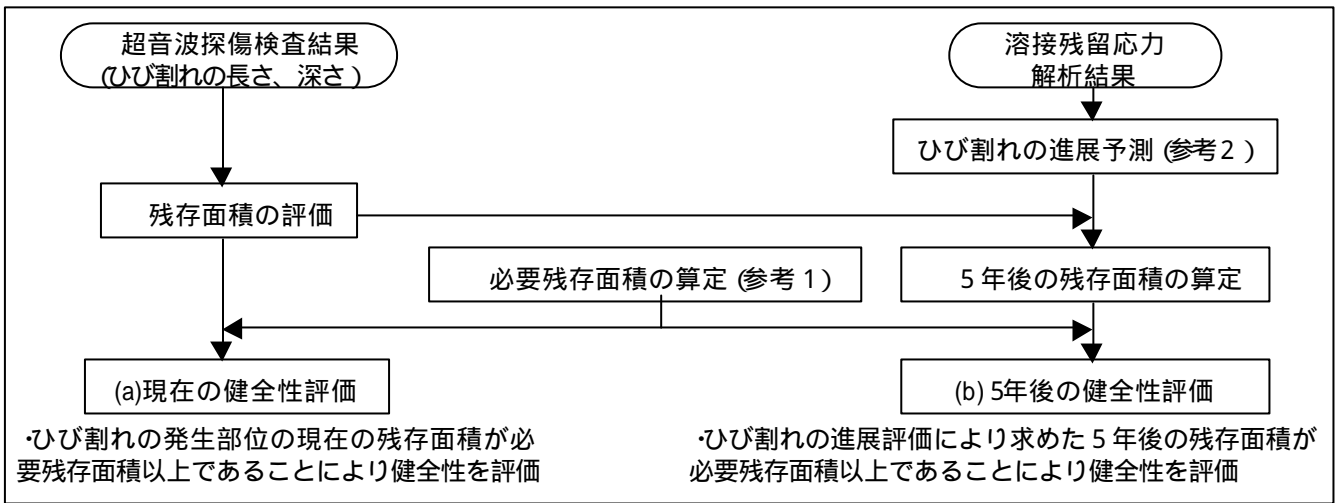


図1 炉心シュラウド断面

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

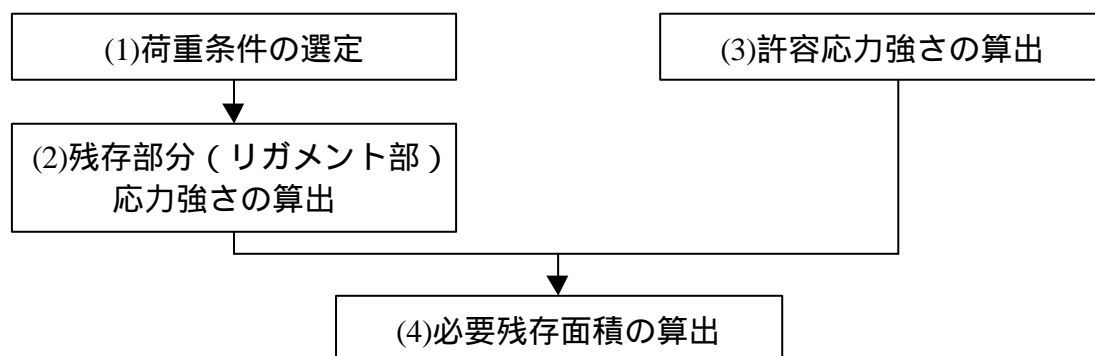


# 必要残存面積の算定方法

## 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及びシュラウドサポートリング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）<sup>1)</sup>、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）<sup>2)</sup>（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（別添参照）。

## 2. 必要残存面積の算出手順



### (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

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、2/3Suと2.4Smのうち、小さい方(Sm<sup>注5)</sup>、Su<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。これと、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する。

(注1)「運転状態」とは、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」とは、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」とは、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)許容応力とは、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。

(注5)Smは、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)  $S_{ul}$ は、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。

### 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。

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

(「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、 $S_{12} = s_1 - s_2$

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

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

主応力 $s_1$ 、 $s_2$ 及び $s_3$ 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

必要残存面積を算出するに当たり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 (SCC) 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あたりに発生する力である「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。

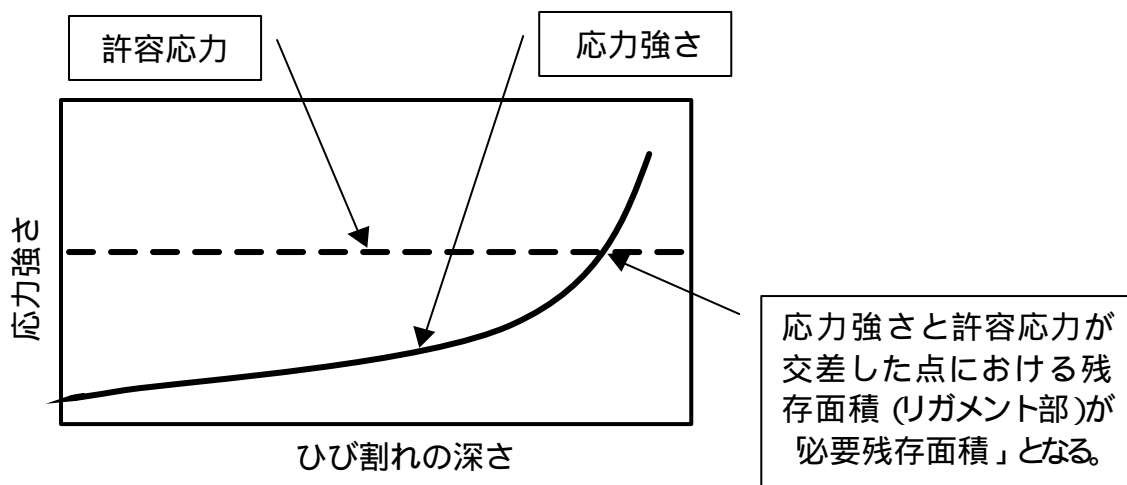


図1 ひび割れの深さに対する応力強さ

# 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	-	S1	S2
運転状態			
	A	$\frac{A}{S}$	$\frac{A}{S}$
	A	$\frac{A}{S}$	$\frac{A}{S}$
	A	$\frac{A}{S}$	$\frac{A}{S}$
(L)	A	$\frac{A}{S}$	$\frac{A}{S}$
(S)	A	$\frac{A}{S}$	$\frac{A}{S}$

(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:冷却注入による過度現象等)が作用している状態

$\frac{A}{S}$ : 運転状態  $\frac{A}{S}$  及び  $\frac{A}{S}$  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

$\frac{A}{S}$ : 運転状態  $\frac{A}{S}$  及び  $\frac{A}{S}$  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		$S_m^{(*)}$						
$\frac{A}{S}$		(略)						
$\frac{A}{S}$								
$\frac{A}{S}$								
$\frac{A}{S}$								
$\frac{A}{S}$		$1.5 S_m$						
$\frac{A}{S}$		$\frac{2}{3} S_u$ 。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 $\frac{2}{3} S_u$ と $2.4 S_m$ 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、 $\frac{A}{S}$  及び  $\frac{A}{S}$  については同号ロ、 $\frac{A}{S}$  及び  $\frac{A}{S}$  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、 $\frac{A}{S}$  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. 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. 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、この計算を繰り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。

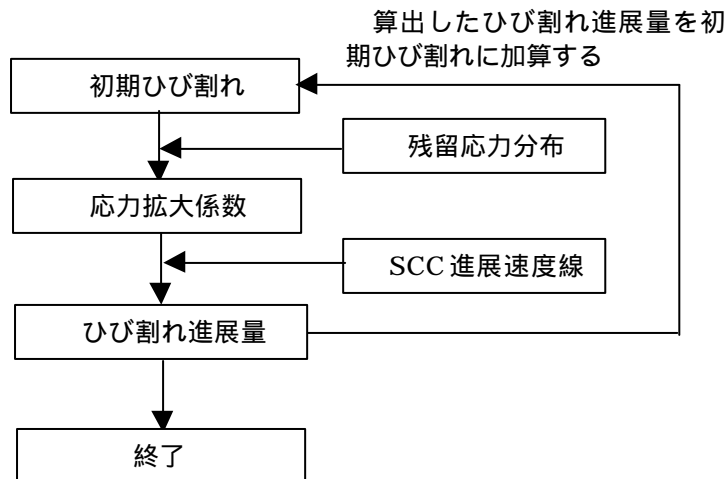


図 1 ひび割れ進展予測の評価方法の流れ

## 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 の4次多項式にて近似を行う

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

：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)

$s_{0-4}$  :係数

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

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

$G_{0-4}$  :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 2)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。

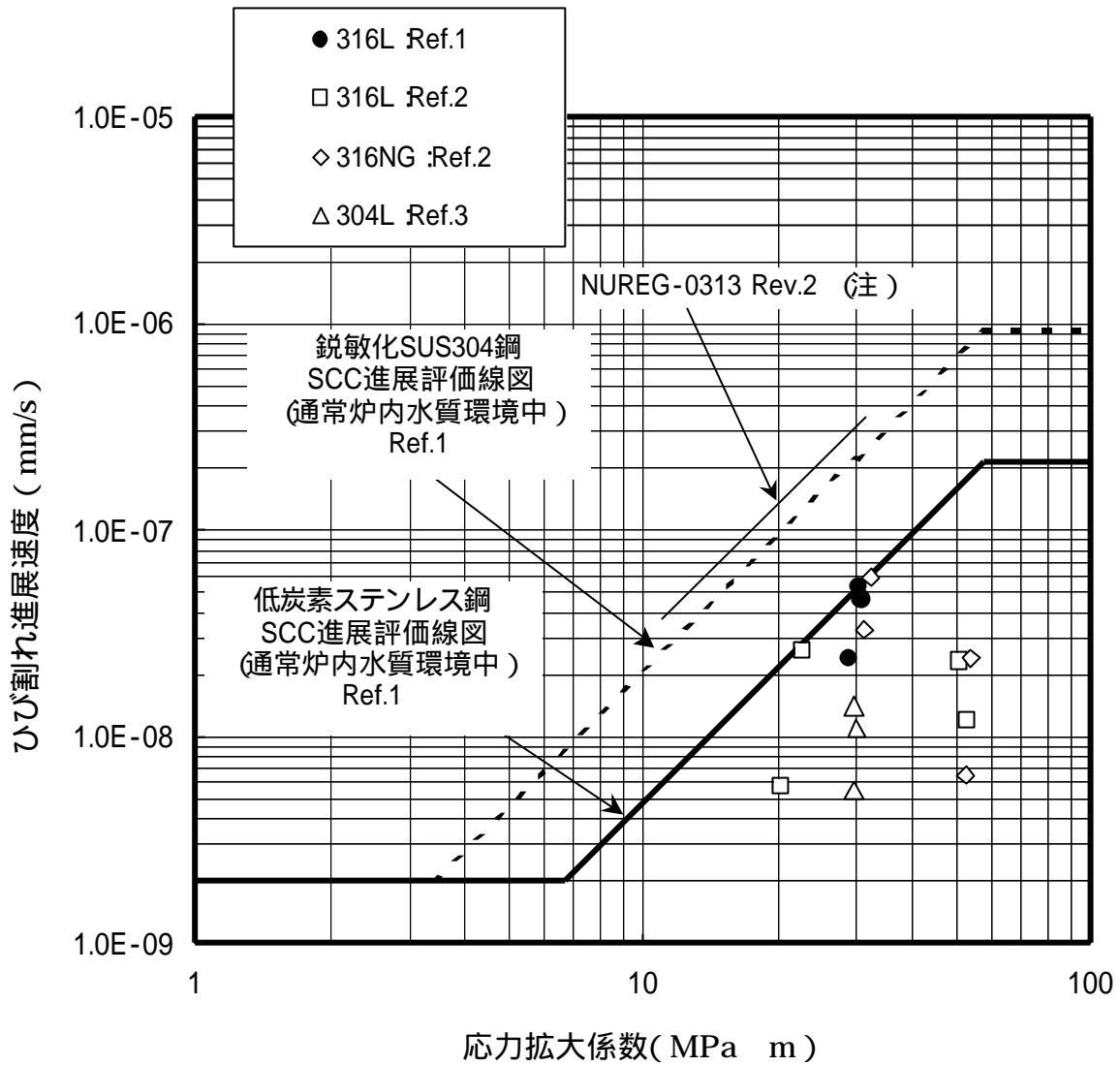


図2 低炭素ステンレス鋼のSCC進展速度線図

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、島貴、“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 2 中の実線 ) を式に表すと以下のとおり。

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

# 柏崎刈羽 3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) (注))

d. 荷重条件

評価部位	荷重条件	差圧 DP (MPa)	死荷重 VOL (kN)	地震荷重		
				鉛直力 Vs (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN・m)
運転状態	+ S 1	0.1	1,500	430	2,900	14,200
運転状態	+ S 2	0.1	1,500	420	3,600	17,600

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 進展データ

(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

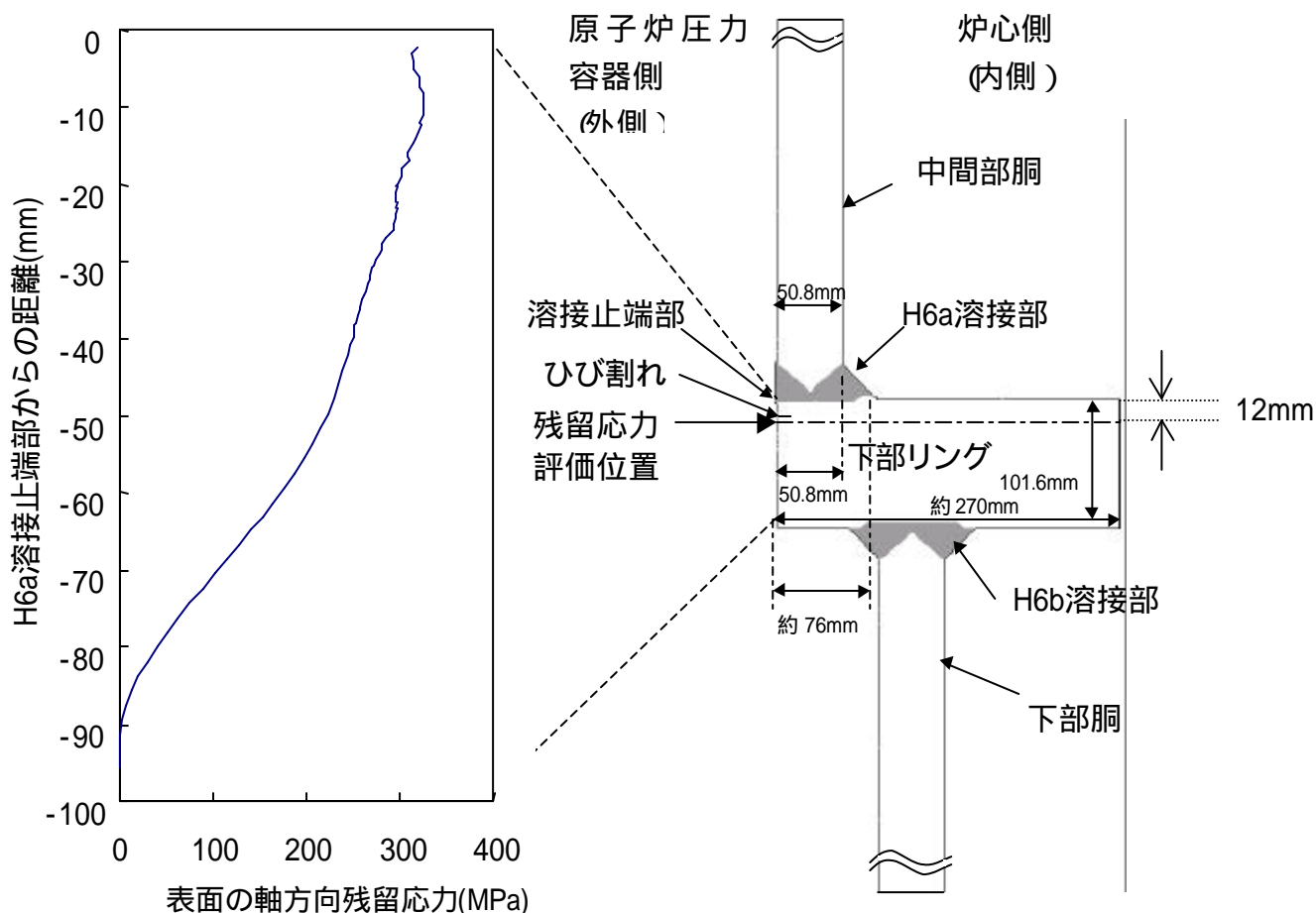
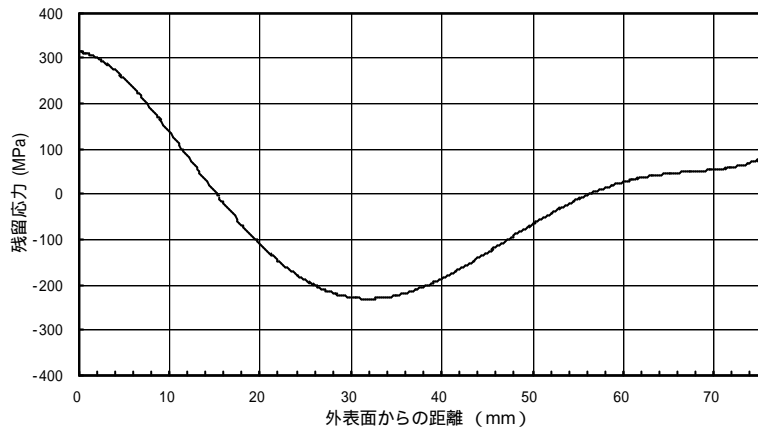


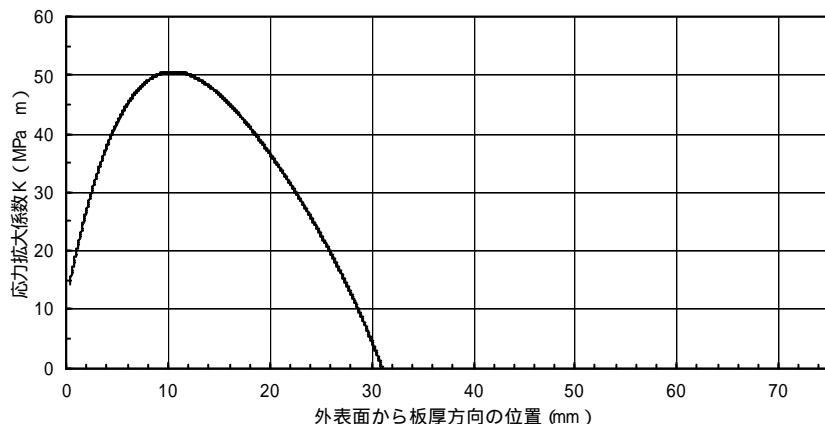
図 1 軸方向残留応力分布 (下部リング外表面)



(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。

添付9 (参考2) 「ひび割れの進展予測について」式による近似曲線

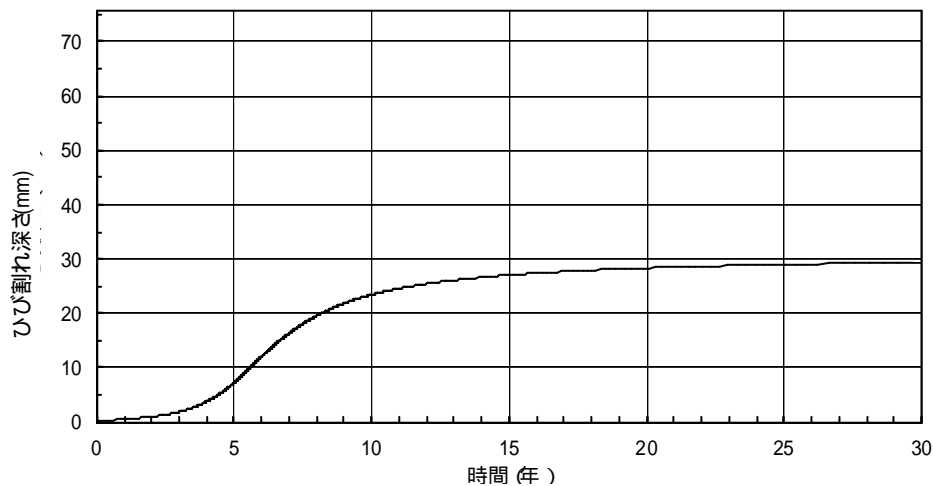
**図2 軸方向残留応力分布 (H6a)**



(注)下部リソグの厚みは約 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。

添付9 (参考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)

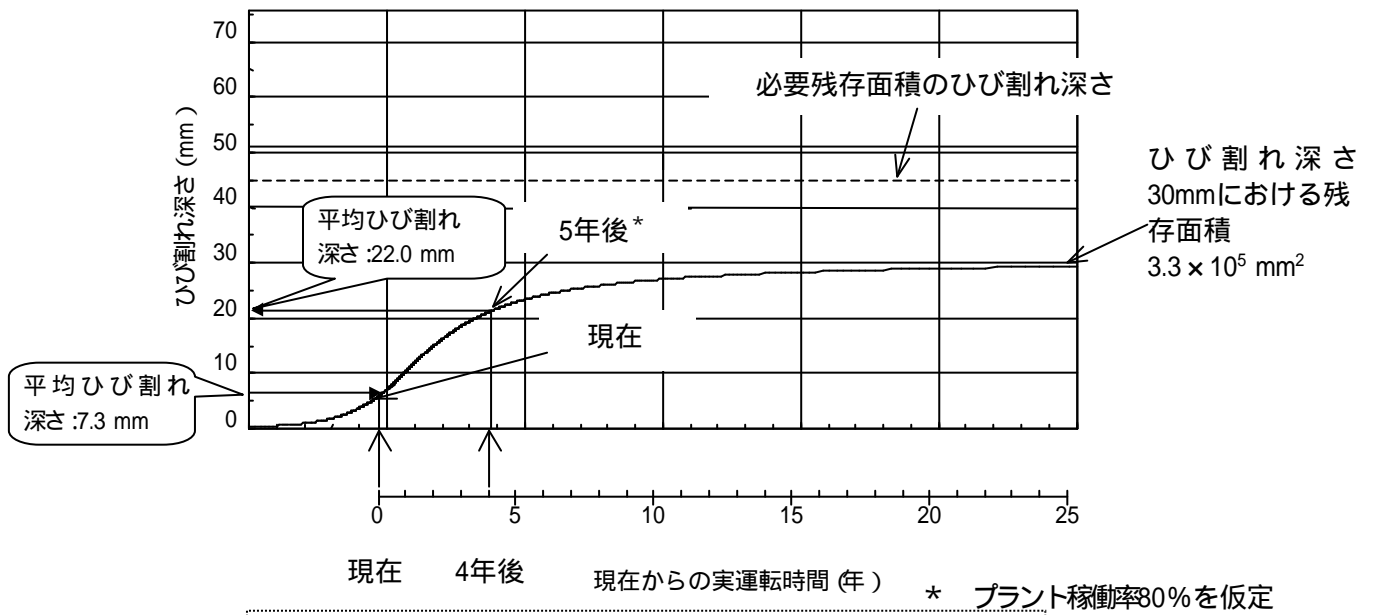
**図3 応力拡大係数分布 (H6a)**



添付9 (参考2) 「ひび割れの進展予測について」式 (低炭素鋼ステルス鋼の 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

必要残存面積 ( $\text{mm}^2$ )	現状の残存面積 ( $\text{mm}^2$ )	5年後の残存面積 ( $\text{mm}^2$ )
$9.5 \times 10^4$	$7.1 \times 10^5$ (約 7.5 倍)	$4.6 \times 10^5$ (約 4.8 倍)

(注) ()内は必要残存面積との比較

# 柏崎刈羽 3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：

- a. 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
- 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 (円筒内側の全周欠陥 (深さ0.1mm) (注))

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	+ S 1	0.25	4,200	1,200	3,600	23,000
運転状態	+ S 2	0.25	4,200	1,200	4,400	28,000

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 進展データ

(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

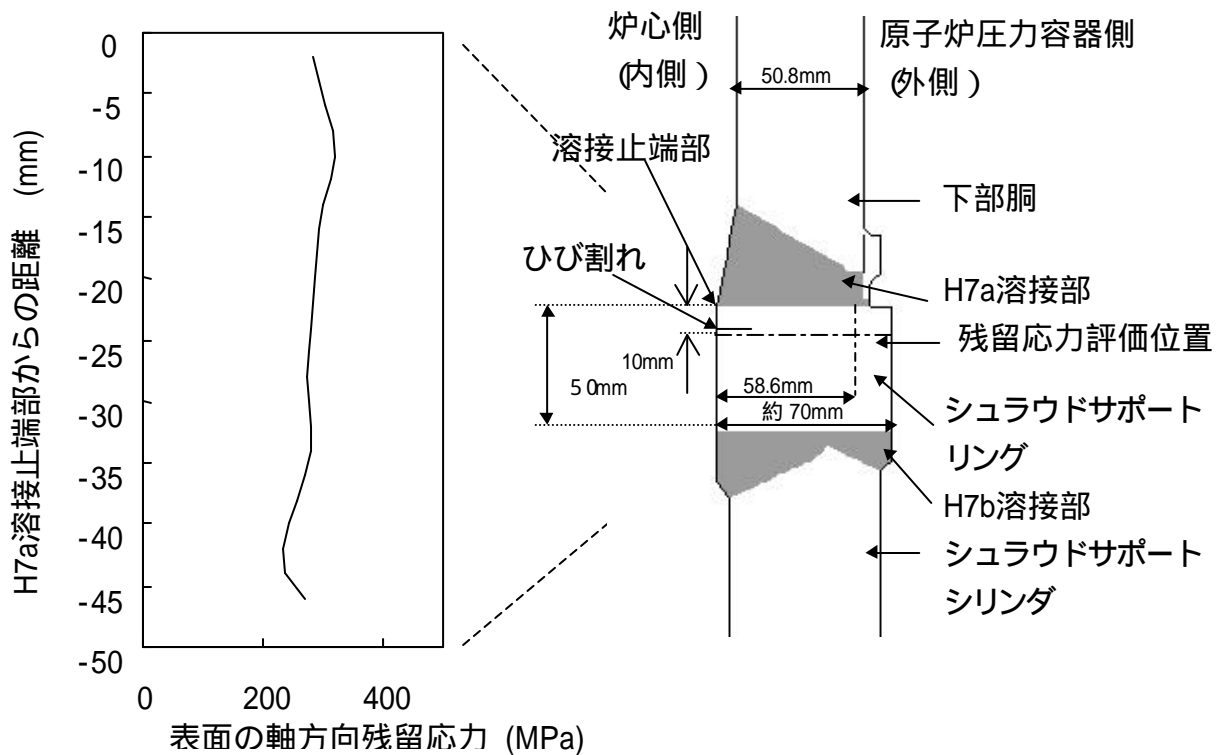
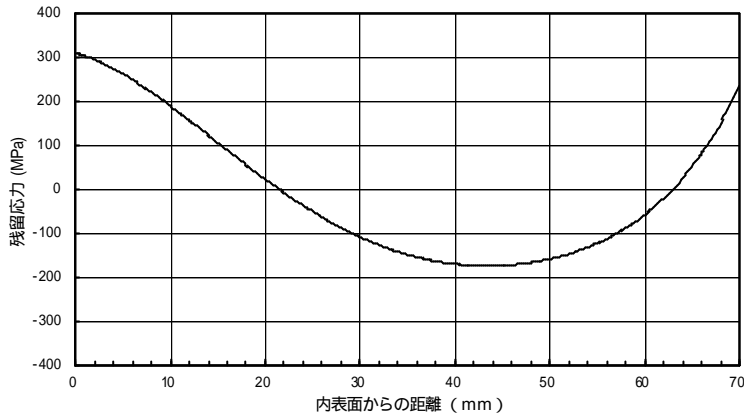
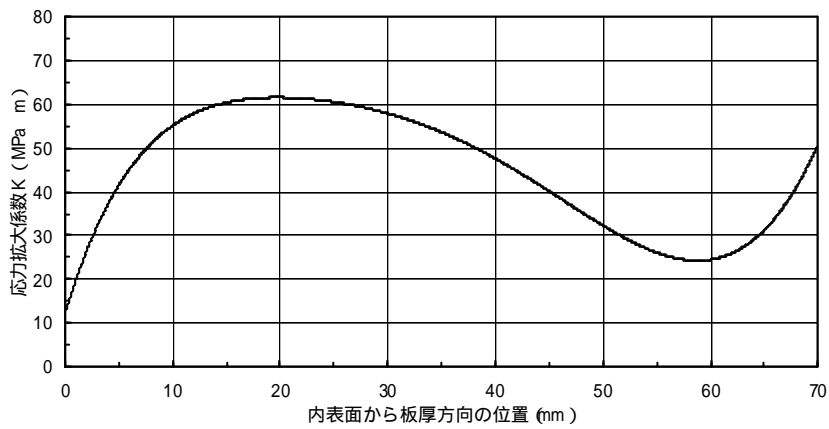


図 1 軸方向残留応力分布 (シュラウドサポートリング内表面)



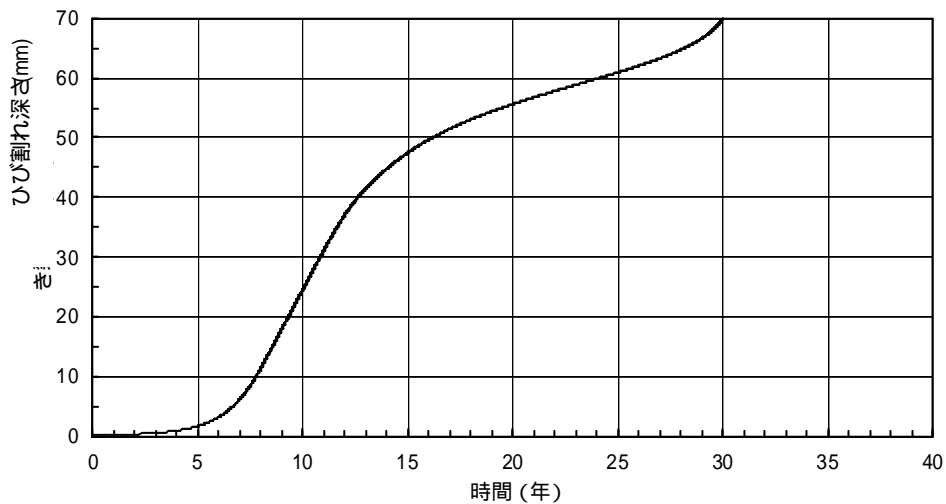
添付9 (参考2)「ひび割れの進展予測について」式 による近似曲線

**図2 軸方向残留応力分布 (H7a)**



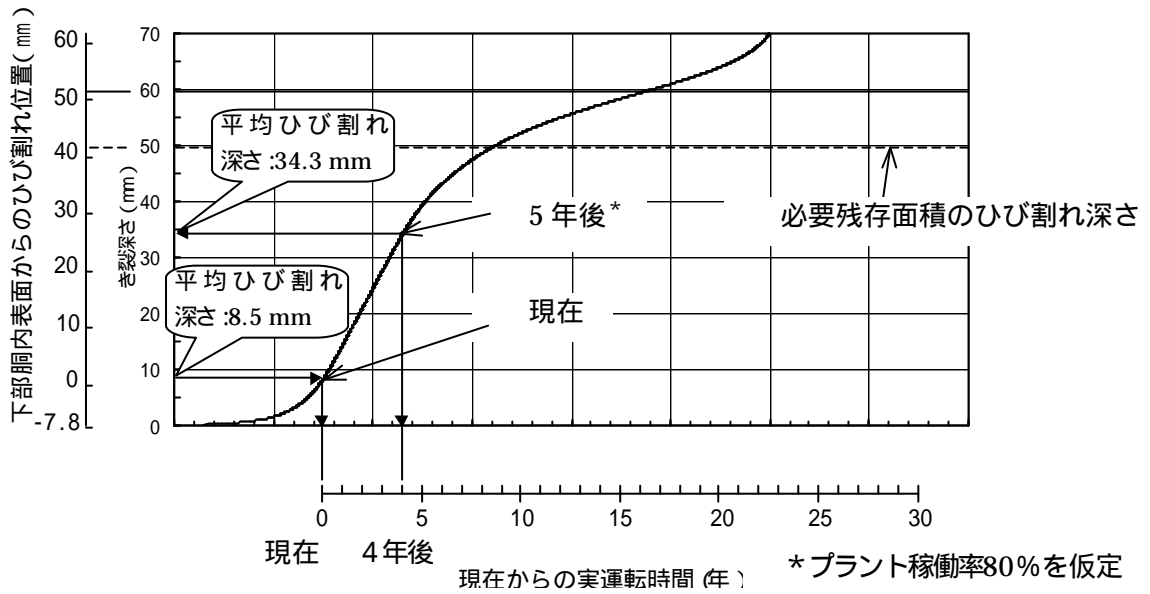
添付9 (参考2)「ひび割れの進展予測について」式 で求めた応力拡大係数(K値)

**図3 応力拡大係数分布 (H7a)**



添付9 (参考2)「ひび割れの進展予測について」式 (低炭素鋼ステンレス鋼の 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) シェラ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ェラド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

必要残存面積 (mm <sup>2</sup> )	現状の残存面積 (mm <sup>2</sup> )	5年後の残存面積 (mm <sup>2</sup> )
1.6 × 10 <sup>5</sup>	7.9 × 10 <sup>5</sup> (約 4.9 倍)	3.8 × 10 <sup>5</sup> (約 2.4 倍)

(注) ()内は必要残存面積との比較