

東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所 5 号機
の炉心シュラウドのひび割れについて
(案)

平成 15 年 9 月 1 日

原子力安全・保安院

目 次

	頁
要 約	1
1 . ひび割れが確認された経緯	2
2 . 東京電力(株)の点検に対する評価	4
3 . 東京電力(株)の原因調査に対する評価	9
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	13
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	30
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	37

要 約

東京電力(株)は、平成15年3月1日からの柏崎刈羽原子力発電所5号機(以下「柏崎刈羽5号機」という。)第10回定期検査において炉心シュラウドの点検を実施した。この結果、同社は、炉心シュラウド中間部胴内側の溶接部(H4)近傍及び中間部胴内側の縦溶接線(V14)近傍にひび割れを確認し、本年8月に当該炉心シュラウドの健全性の評価を含め、原子力安全・保安院(以下「当院」という。)に対し報告を行った。これを受け、当院においては、同社から提出された報告の妥当性について評価を行った。

東京電力(株)は、中間部胴にひび割れが発生した原因調査を行った結果、他のプラントにおいてこれまでに実施したひび割れの原因調査結果等も勘案して、ひび割れは応力腐食割れによるものであると推定した。

これまでの「原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会」の検討においては、ひび割れの発生状況に応じて、現時点でひび割れが進展しない部分の面積(残存面積)と要求される構造強度を維持するために必要な面積(必要残存面積)を比較して十分余裕があることを確認するとの評価手法は適切であるとされた。さらに、ひび割れの進展についての既存の知見に基づき、5年後のひび割れの進展状況を予測して得られた残存面積を算定し、これと必要残存面積とを比較して十分な余裕があることを確認するとの評価手法は適切であるとされた。

当院としては、東京電力(株)による柏崎刈羽5号機の炉心シュラウドに対する健全性の評価手法は、この考え方に沿ったものであり、現時点及び5年後においてこれらの炉心シュラウドが十分な構造強度を有しているとの評価は妥当なものであると考える。

従って、当院としては、柏崎刈羽5号機の炉心シュラウドで発生しているひび割れについては、直ちに補修等の対策を講じる必要はないが、この場合においても、今後適切な頻度で点検を実施し、ひび割れの実際の進展状況を把握していく必要があると考える。また、ひび割れが進展し続ける場合には、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る。

1．ひび割れが確認された経緯

東京電力(株)は、平成15年3月1日からの柏崎刈羽5号機第10回定期検査において、炉心シュラウドの点検を実施した。この結果、炉心シュラウド中間部胴内側の溶接部(H4)近傍及び中間部胴内側の縦溶接線(V14)近傍にひび割れを確認した。(炉心シュラウドについて：参考資料1参照)

東京電力(株)では、このひび割れについて原因調査を含めた詳細調査を行うとともに、当該炉心シュラウドの健全性について検討を行い、当院に報告した。

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。

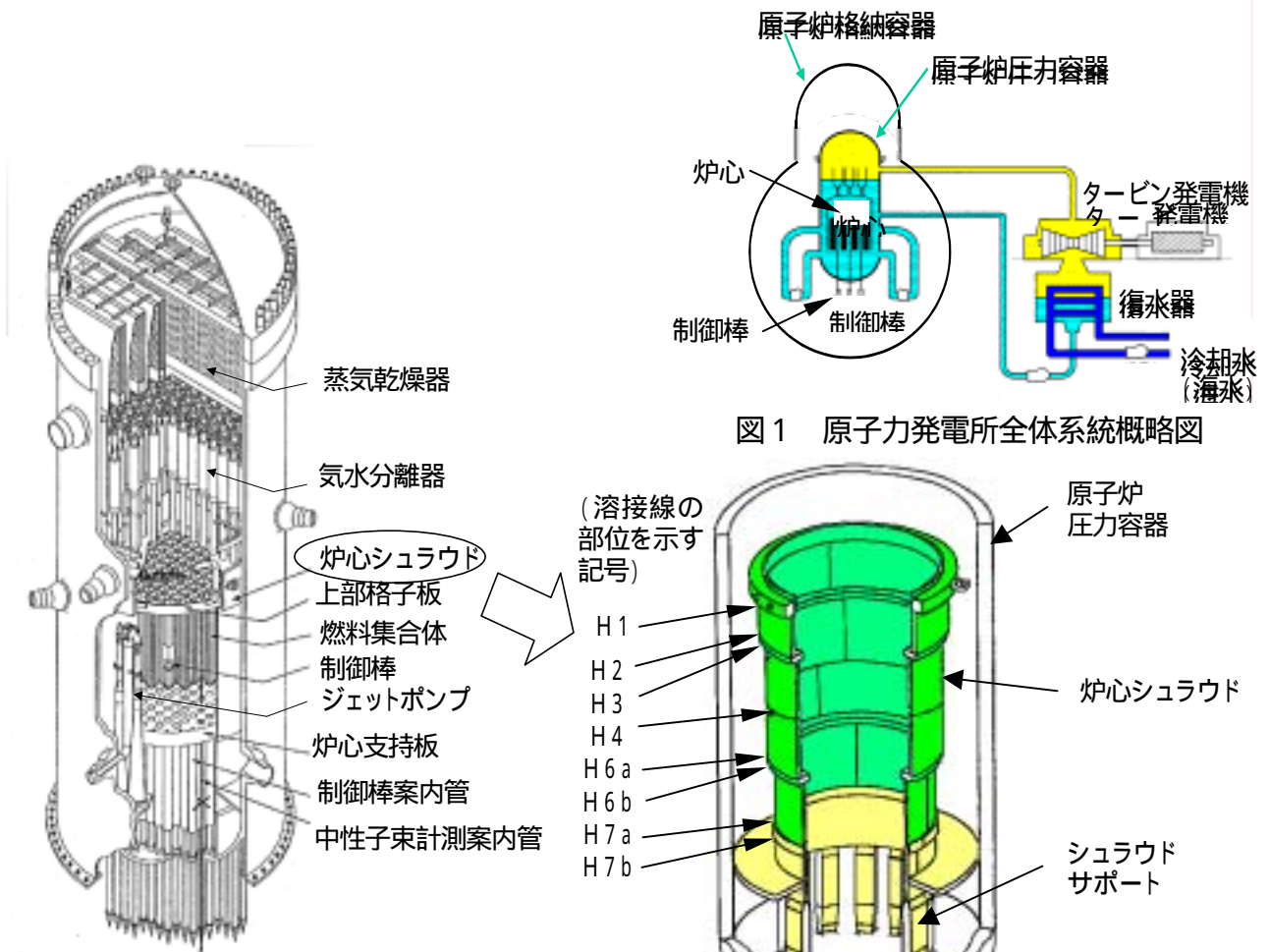


図2 原子炉压力容器鳥瞰図

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を有している。

炉心の支持機能

想定される地震力に対し、炉心を支持し、制御棒の挿入性を満足させる。

：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

原子炉容器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。

2．東京電力(株)の点検に対する評価

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¹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、第三者機関として日本検査(株)の検査員により適宜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²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³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。(点検範囲と点検手法について:参考資料2-1、2-2参照)

また、当院としても、原子力保安検査官が点検の体制、作業内容等について、当院に提出された点検計画に基づき実施されていることを確認するとともに、適宜、目視点検及び超音波探傷検査の記録を確認しており、東京電力(株)の炉心シュラウドの点検は適切に行われたものとする。

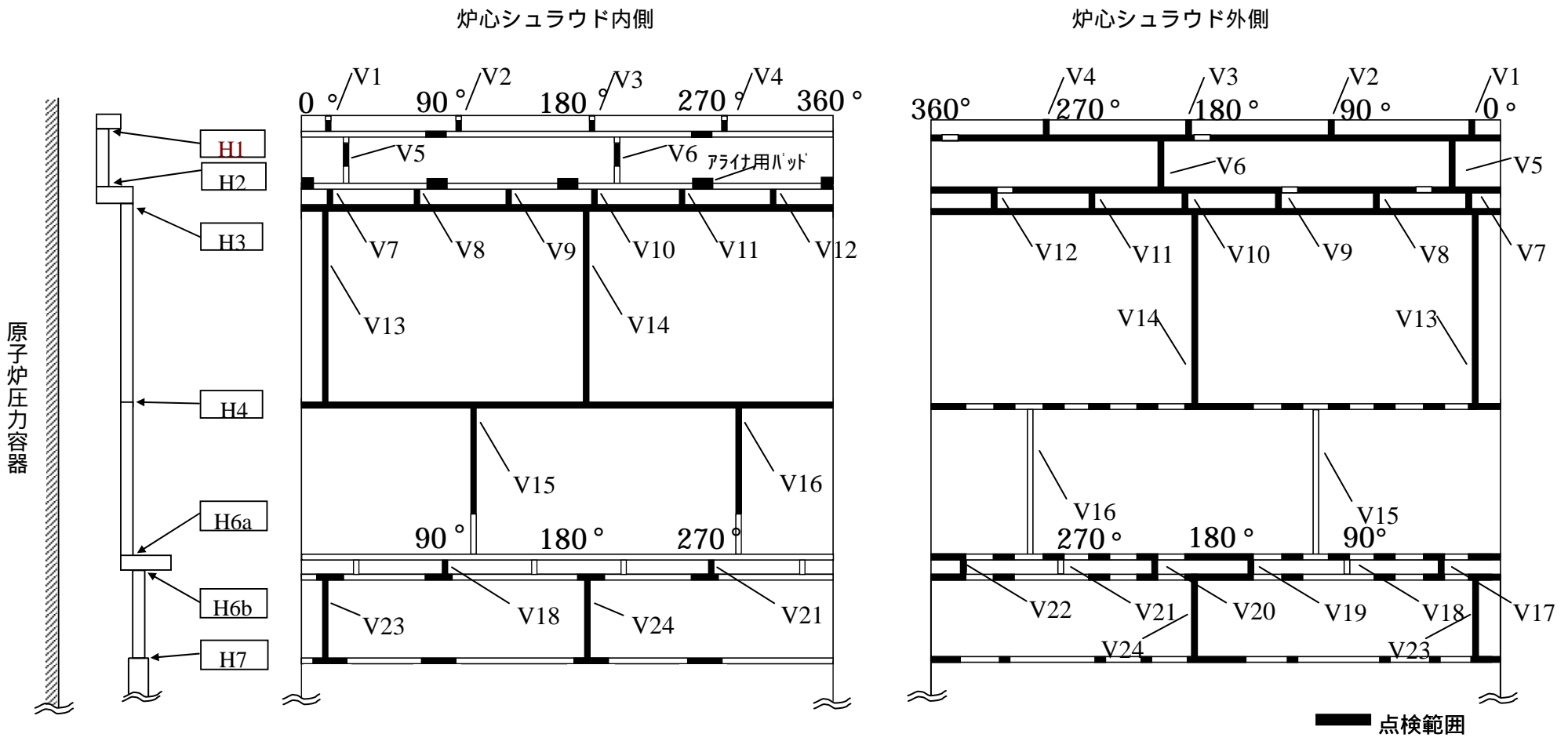
東京電力(株)による目視点検の結果、中間部胴内側溶接部(H4)のすぐ上の部分にY字型のひび割れが1ヶ所、中間部胴内側の縦溶接線(V14)近傍に放射状のひび割れが1ヶ所確認された。(点検結果:参考資料2-3参照)

¹ 非破壊検査:材料や製品等の形や寸法を変えたり壊したりせずに、その内部の状態を調べる検査。

² 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等を調べる検査方法。

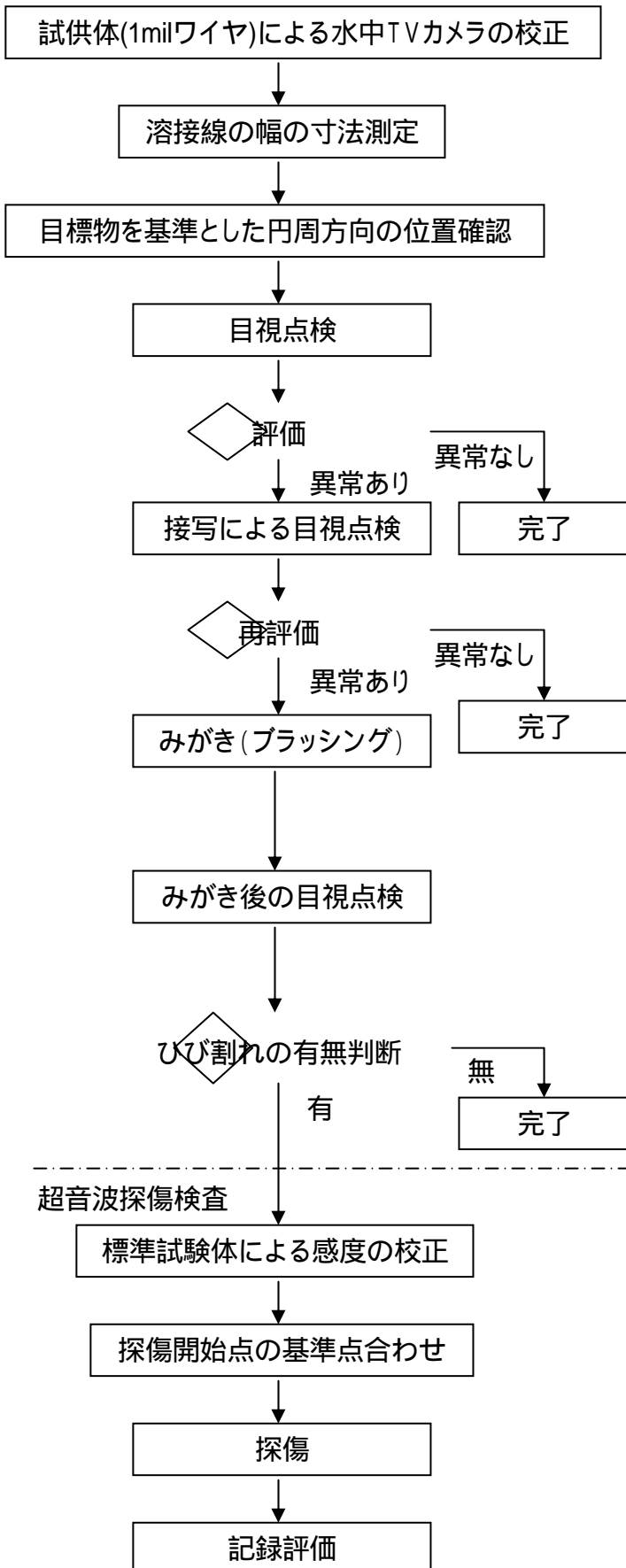
³ ブラッシング:炉心シュラウド表面に付着した水垢等の汚れを取り除き、ひび割れの様相の有無を検査するためナイロン製のブラシにより磨くこと。

柏崎刈羽 5 号機炉心シュラウドの溶接線と目視点検範囲



炉心シュラウドの点検方法

目視点検



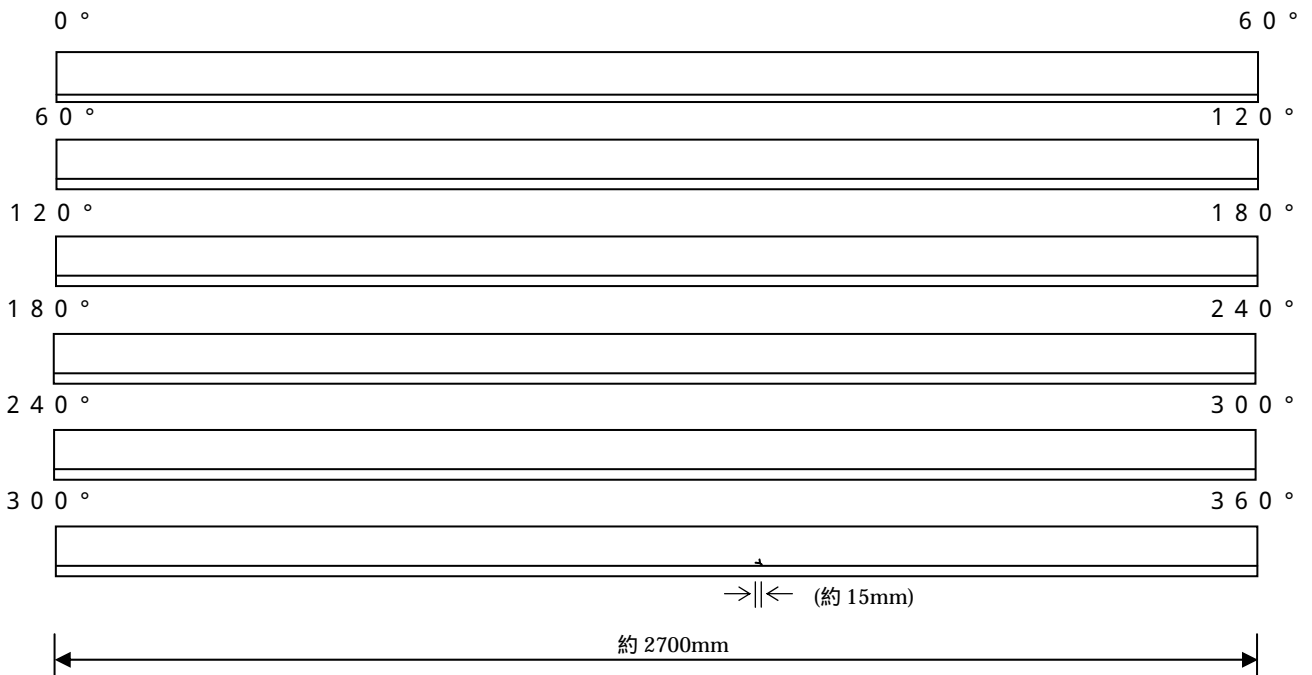
< 目視点検方法 >

- 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

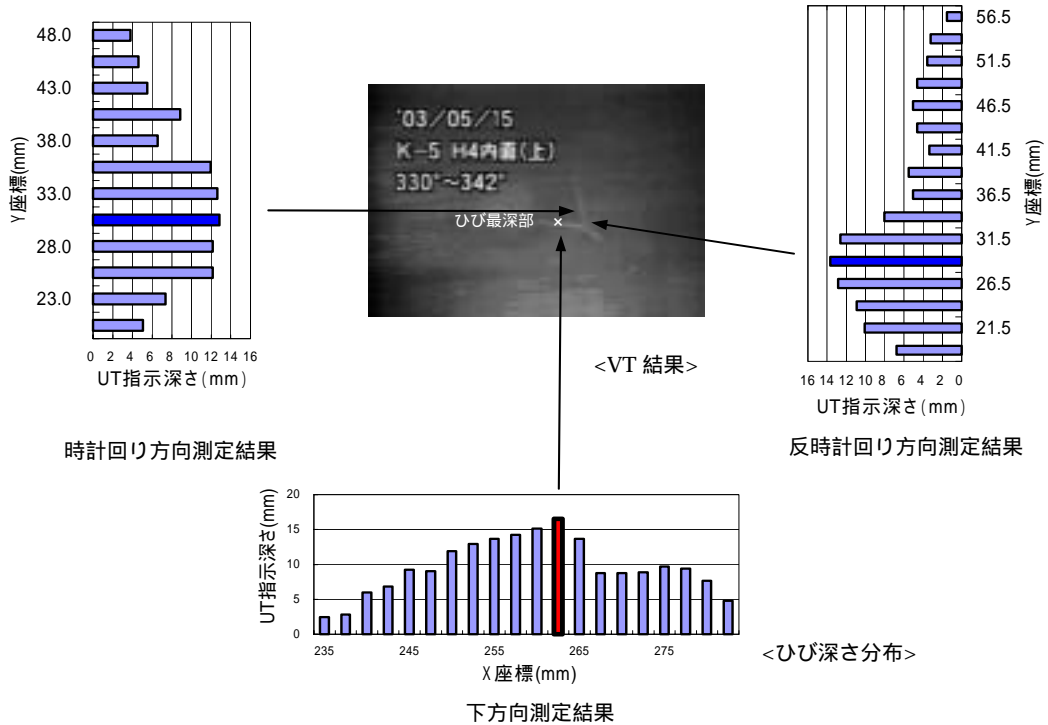
< 超音波探傷検査方法 >

- 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5MHz、屈折角45°, 70°の探触子及び周波数2MHz、屈折角可変のアレイ探触子により、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 5 号機中間部胴溶接部 (H 4 内側) 近傍の点検結果

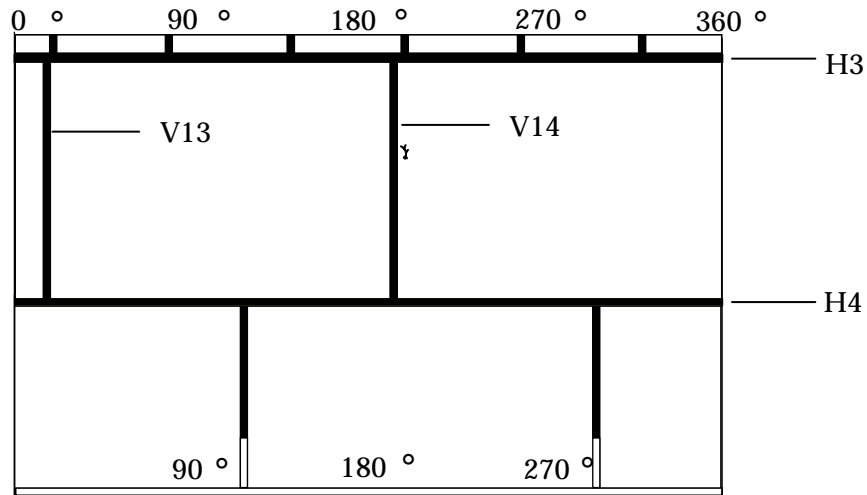


中間胴溶接部 (H 4 内側) 近傍の目視点検結果



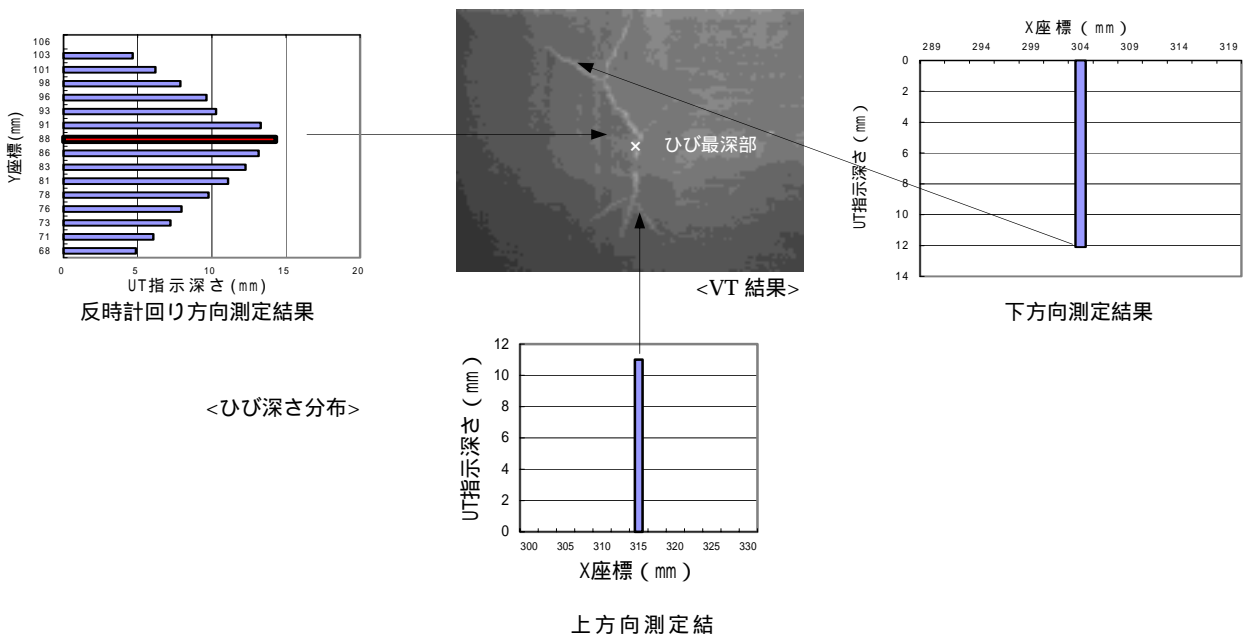
中間胴溶接部 (H 4 内側) 近傍の超音波探傷検査結果

柏崎刈羽 5 号機中間部胴縦溶接部 (V 1 4 内側) 近傍の点検結果



目視点検範囲
 目視点検不可範囲

中間胴縦溶接部 (V 1 4 内側) 近傍の目視点検結果



中間胴縦溶接部 (V 1 4 内側) 超音波探傷検査結果

3. 東京電力(株)の原因調査に対する評価

(1) 中間部胴のひび割れについて

東京電力(株)は、以下の理由から、中間部胴に発生したひび割れは応力腐食割れ⁴であると推定した。

東京電力(株)福島第一原子力発電所4号機(以下「福島第一4号機」という)及び柏崎刈羽原子力発電所1号機(以下「柏崎刈羽1号機」という。)では、平成14年に炉心シュラウドの中間部胴に放射状のひび割れが確認され、調査分析のためサンプルが採取された。調査結果から、このひび割れは応力腐食割れであると推定された。(サンプル調査の結果：参考資料3-1、3-2参照)

柏崎刈羽5号機において確認された、中間部胴の溶接部内側近傍のひび割れは、製造履歴が同様な柏崎刈羽1号機のひび割れと、発生状況(ひび割れの形状、炉心シュラウドの材料、表面加工方法、製造方法等)が類似している。

低炭素ステンレス鋼の溶接部を含むモックアップ試験体を製作しグラインダによる表面仕上げを行い断面の硬さ試験を実施した結果、表面がグラインダ加工によって表層部にビッカース硬さ⁵(HV)300を超える硬化層が形成されることが確認されている。このように硬化した表層部では粒内型応力腐食割れ⁶が発生する可能性がある。また、粒内型応力腐食割れを起点として、粒界型応力腐食割れ⁷が進展することが確認されている。

溶接によって発生する残留応力⁸を有限要素法⁹により解析した結果、中間部胴内側の表面において、軸方向に200MPa強程度及び周方向に300MPa強程度の引張応力が生じていたものと評価されている。

柏崎刈羽5号機の原子炉内部にある水に溶けている酸素濃度を測定した結果、200~350ppb程度であり、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。

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、材料不良、溶接不良、疲労等がひび割れの原因となる可能性はないものと評価した。

⁴ 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。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。

⁵ 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。

⁶ 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。

⁷ 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。

⁸ 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。

⁹ 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。

(2) 東京電力(株)が実施した原因調査に対する当院の考え方

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、柏崎刈羽1号機他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うえで実施されたものであると考える。

また、当院としては東京電力(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、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。

福島第一4号機H4ボートサンプル調査

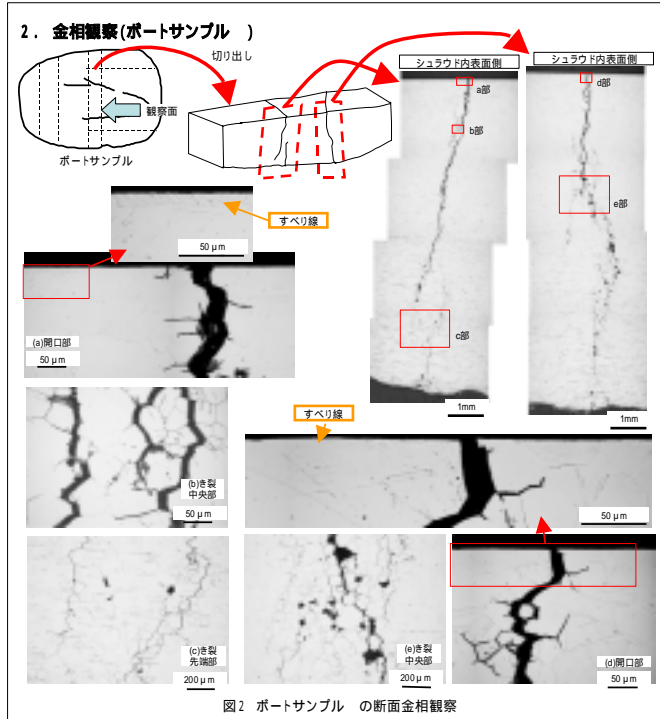
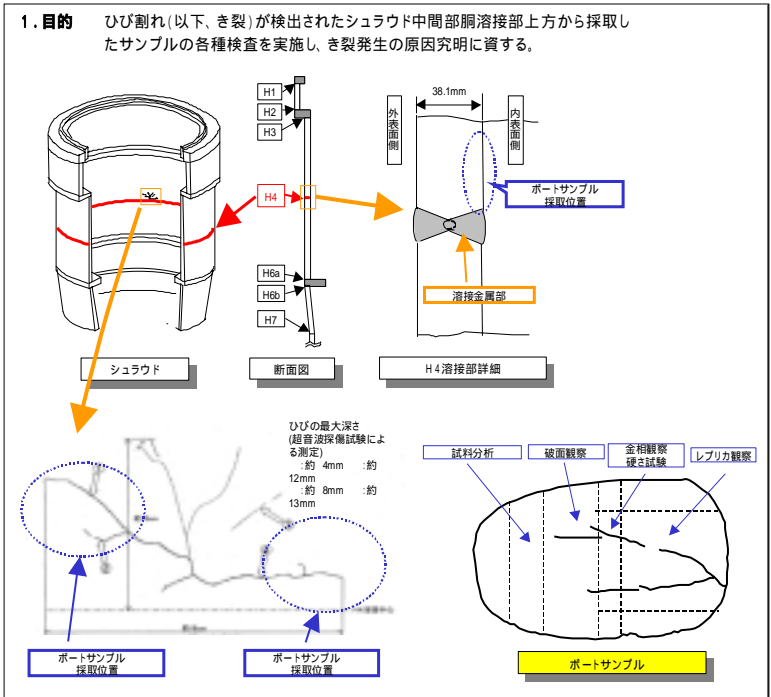


図2 ボートサンプルの断面金相観察

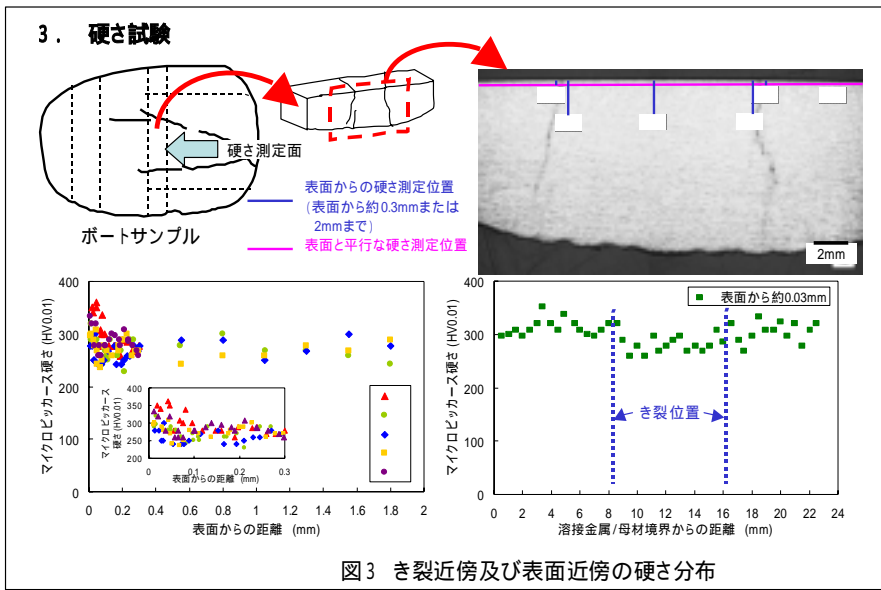


図3 き裂近傍及び表面近傍の硬さ分布

4. 結論

- ・シュラウド内表面で発生したき裂は、表面では放射状に進展していた。
- ・観察したき裂のほぼ全体が粒界割れであった。き裂内部には腐食生成物が付着し、一部は粒内に成長していた。また、2次き裂の一部は溶接金属に達していた。
- ・表面(50 μm程度まで)は硬さがHV300程度に高くなっていた。また、照射硬化による母材の硬化が認められた。
- ・結晶粒界でのCr濃度の低下とNi及びSi濃度の増加が観察され、これら合金元素の濃度変化は照射誘起偏析によると考えられる。

本調査の結果と溶接により発生する引張残留応力及び炉水中の比較的高い溶存酸素濃度を考慮すると、このき裂は応力腐食割れ(SCC)であると考えられる。

1. 目的 定期検査においてひび割れ(以下、き裂)が確認されたシュラウド中間部胴溶接部から採取したサンプルの各種検査を実施し、き裂発生の原因究明に資する。

原子炉圧力容器
シュラウド
H1
H2
H3
H4
H6a
H6b
H7a
H7b

H4溶接部詳細
ポートサンプル採取位置
溶金属部
中間部胴
原子炉圧力容器
H4
H6a
H6b
H7a
H7b
H4溶接部

ポートサンプル
断面観察
硬度測定
表面観察

2-1 金相観察(1)

溶接金属
観察面
観察領域
約14mm
観察位置C部
観察位置B部
観察位置A部
0.5mm
き裂表面側
20μm

図1 断面の金相組織観察結果(シュウ酸エッチング)

2-2 金相観察(2)

溶接金属
観察面
観察位置
母材
溶接金属
約0.7mm
表面観察用サンプル採取位置
A部
B部
C部
100μm
A部拡大 20μm
B部拡大 20μm
C部拡大 20μm

図2 溶接金属を進展しているき裂のSEM写真

3. 硬さ試験

硬さ測定面
き裂近傍
母材
硬さ測定位置(深さ分布)
マイクロビッカース硬さ(HV0.01)
表面からの距離(mm)
ひび近傍の硬さ(深さ方向分布)

図3 表面に垂直な方向に沿った硬さ分布

4. 結論

- ・表面側で発生したき裂は、内部への進展に伴い、3次的に複雑に分岐する成長挙動を呈しており、サンプル採取部の厚さ約14mmを貫通していた。
- ・き裂の主たる形態は粒界型であった。
- ・き裂の一部は溶接金属に到達していた。
- ・き裂の内壁面には、皮膜が厚く、酸化物が粒内に成長した部位も見られた。
- ・表面の加工層は、通常の研磨や機械加工で入り得る数10μm程度であった。
- ・結晶粒界には、従来の鋭敏化材に見られるCr濃度の顕著な低下傾向が見られなかった。
- ・組成は、JIS規格SUS316Lを満足しているが、Cr, Ni, Moの量は下限側に近い値であった。

以上の点から、き裂は、浅い加工層を有する表面で応力腐食割れ(SCC)により発生後、SCCとして内部へ分岐しながら結晶粒界を経由して3次的に成長し、き裂の一部は溶接金属内部へ進展していた。なお、主き裂に沿った粒界腐食の発生状況及び粒界や粒内の酸化物の成長状況等から、放射線により発生した遊離基の影響等環境側の腐食条件がより厳しかった可能性も示唆される。

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。(健全性評価の考え方について：参考資料4 - 2 参照)

(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(以下「全周均一モデル」という。)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¹⁰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(以下「部分貫通モデル」という。)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

¹⁰ 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箇所を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、その時点から一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¹¹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¹²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）

¹¹ 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。

¹² 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¹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。

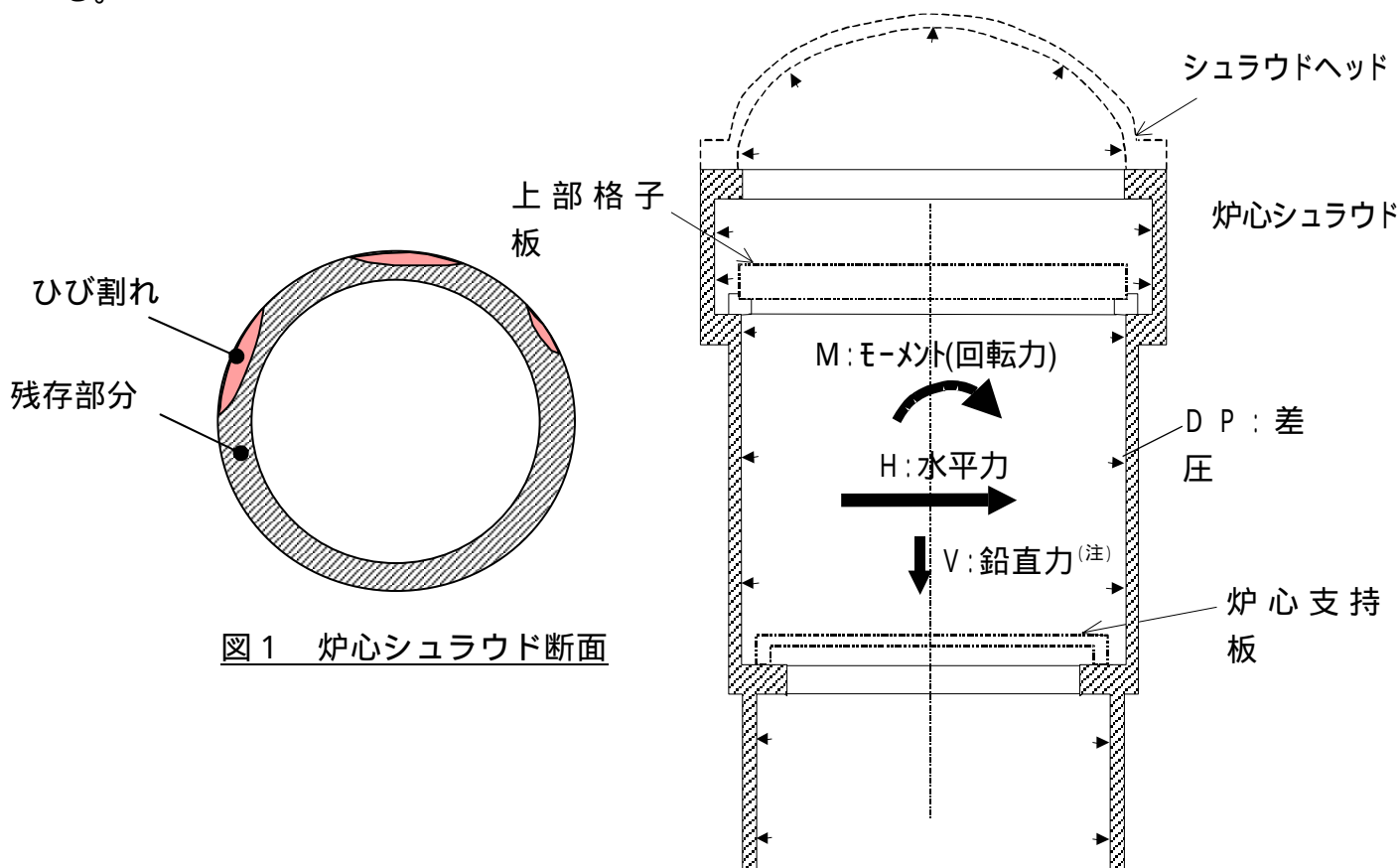


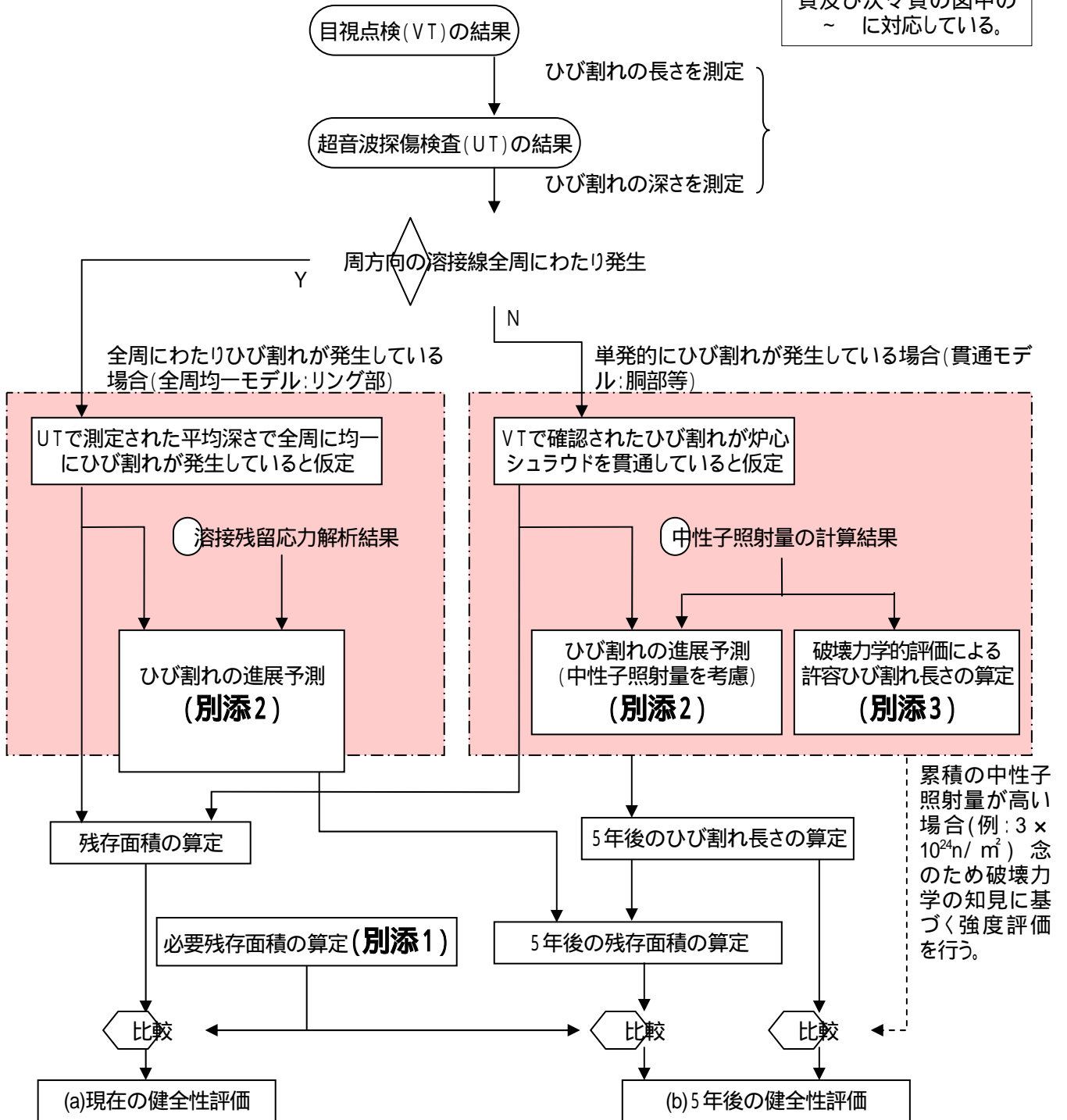
図1 炉心シュラウド断面

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

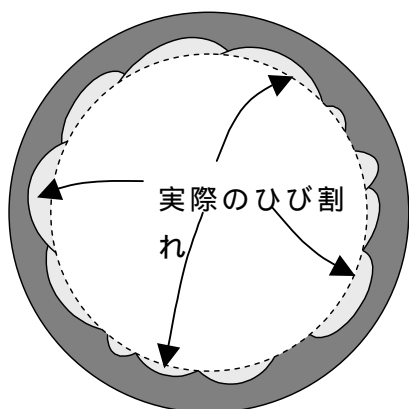
(注)以下の ~ は次頁及び次々頁の図中の ~ に対応している。



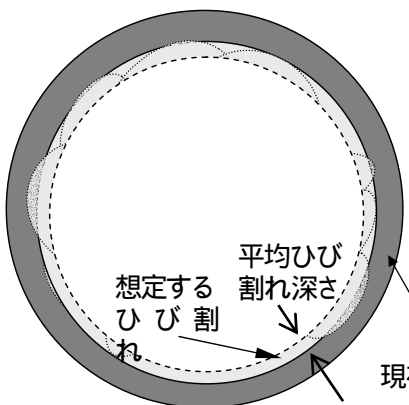
・ひび割れの発生部位の現在の残存面積が必要残存面積以上であることにより健全性を評価

・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)



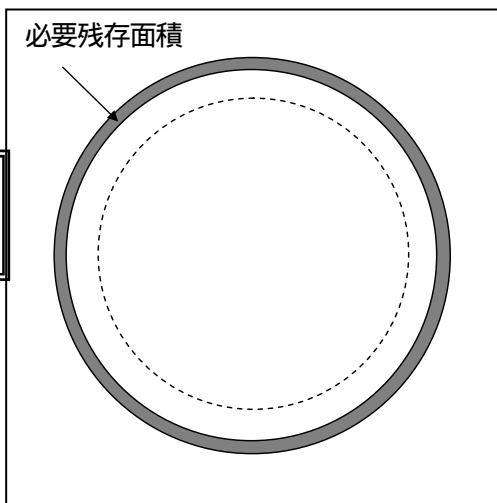
超音波探傷検査により深さを求める。



全周均一の深さのひび割れを仮定し、残存面積を求める。(ひびの無い箇所も平均のひび割れ深さでひび割れが発生しているものとする)

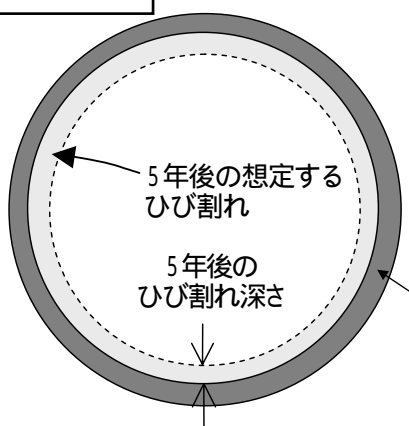
(a)現在の健全性評価
現在の残存面積

残存面積と必要残存面積の比較



技術基準等に基づき、S2地震を含む荷重が作用した場合に、ひび割れにある断面においてシュラウドが破壊に至らず健全性が保たれる必要残存面積を算出する。

5年後のひび割れ進展予測



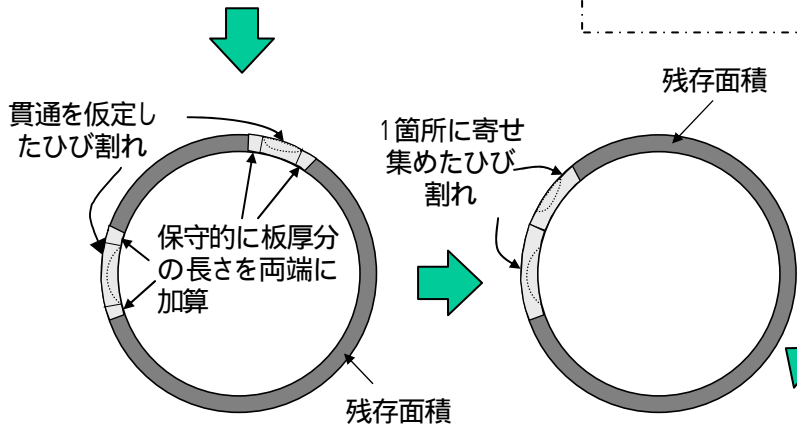
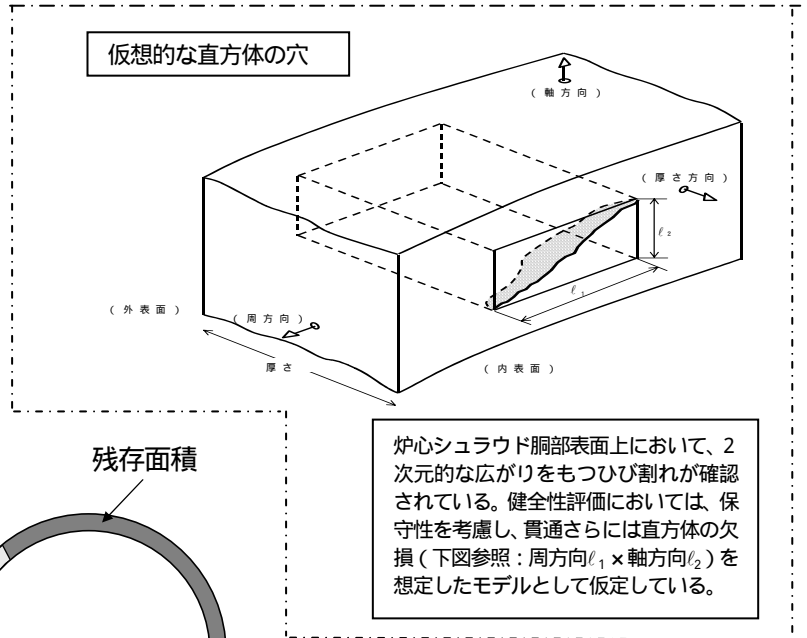
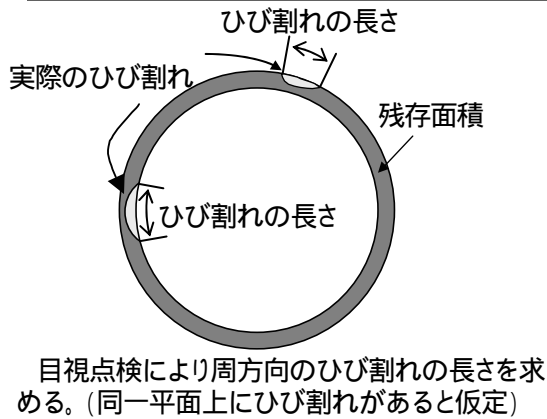
(b)5年後の健全性評価
5年後の残存面積

溶接残留応力によるひび割れの進展を評価し、5年後の残存面積を算出する。

(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。

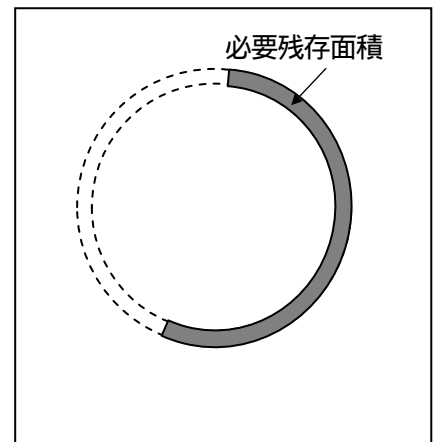


(a) 現在の健全性評価

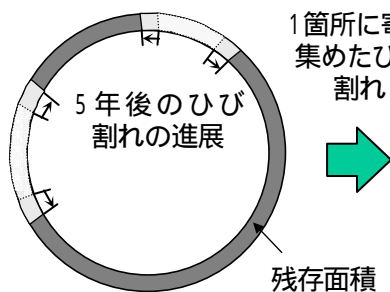
ひび割れは貫通しているものと仮定する。
(ひび割れの内部での広がり等を考慮し、ひび割れの両端に一定のマージン(例: 板厚分の長さ)を加算)

複数のひび割れは1箇所に寄せ集める。

残存面積と必要残存面積の比較



5年後のひび割れ進展予測



(中性子照射量を考慮) 割れの進展速度をもとに5年後の進展量を算定する。

複数のひび割れは1箇所に寄せ集める。

(b) 5年後の健全性評価

技術基準等に基づき、S2地震を含む荷重が作用した場合に、最も厳しい地震のゆれ方向を考慮して、ひび割れのある断面においてシュラウドが破壊に至らず健全性が保たれる必要残存面積を算出する。

なお、累積中性子照射量が高い場合(例: $3 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$)は念のため破壊力学の知見に基づく強度評価を行う。

(別添3)

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

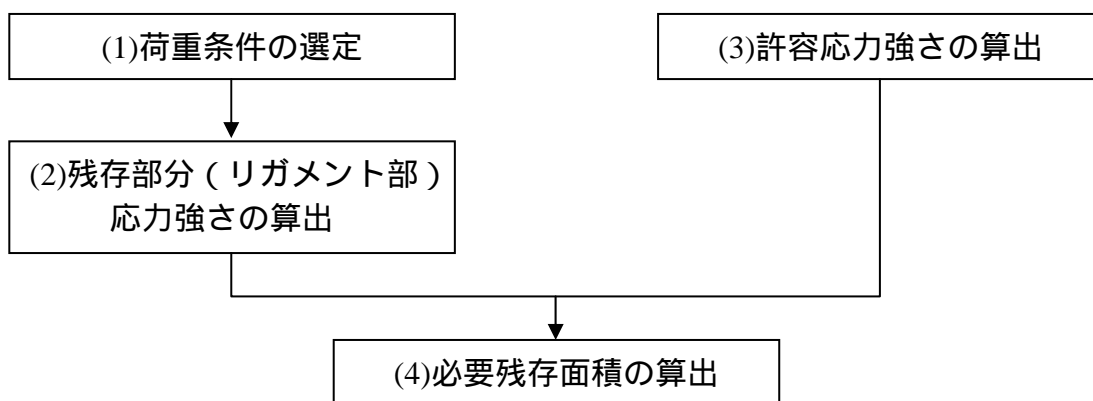


図1 必要残存面積の算出手順フロー図

(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^{注1}及び^{注2}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^{注1}及び^{注2}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^{注3}強さとしている。

(3) 許容応力^{注4}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^{注1}及び^{注2}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 ^{注5}、 S_u ^{注6})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。

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

(「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、 $S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$

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

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

主応力 σ_1 、 σ_2 及び σ_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。

(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。

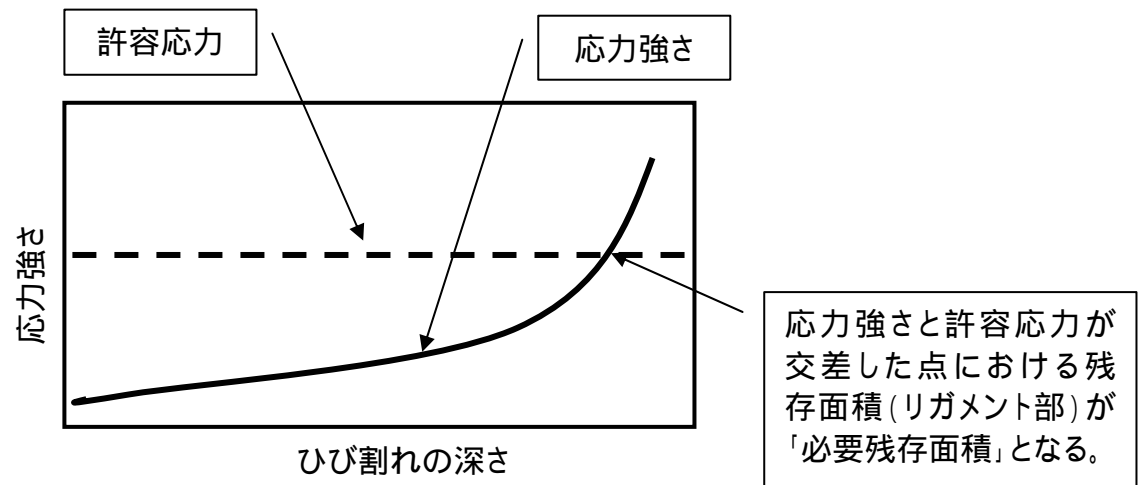


図2 ひび割れの深さに対する応力強さ

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、JEA G4601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JEA G4601に沿って行われる。

3. JEA G4601(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 \ 運転状態	-	S1	S2
	A	$\frac{A}{S}$	$\frac{A}{S}$
	A	$\frac{A}{S}$	$\frac{A}{S}$
	A	$\frac{A}{S}$	$\frac{A}{S}$
(L)	A	$\frac{A}{S}$	
(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
 $\frac{A}{S}$: 運転状態 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 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		$S_m^{(*)}$						
A		(略)						
A								
A								
A								
$\frac{A}{S}$		$1.5 S_m$						(略)
$\frac{A}{S}$		$\frac{2}{3} S_u$ 、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、 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、 $\frac{A}{S}$ 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. 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)^(注)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。

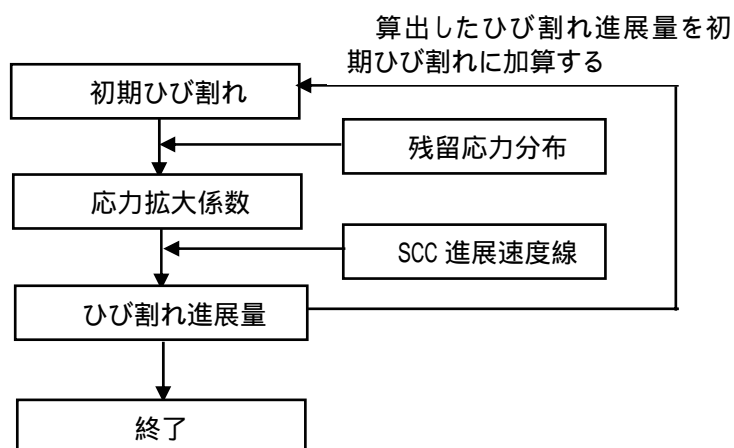


図1 ひび割れ進展予測の評価方法の流れ

(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 3-10 の4次多項式にて近似を行う。

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

σ : 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)

σ_{0-4} : 係数

次に、得られた係数 σ_{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。

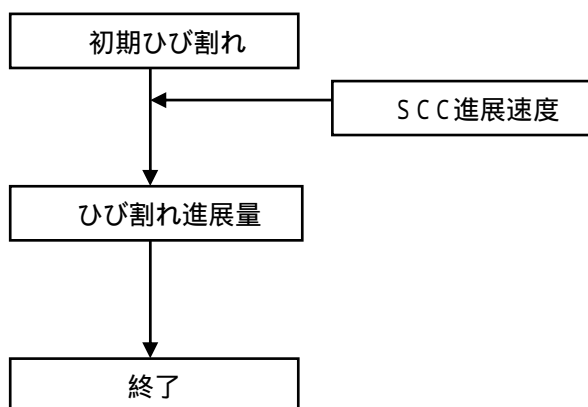


図2 ひび割れ進展予測の評価方法の流れ

(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 $5 \times 10^{24} \text{ n} / \text{ m}^2$ 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)

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

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)

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

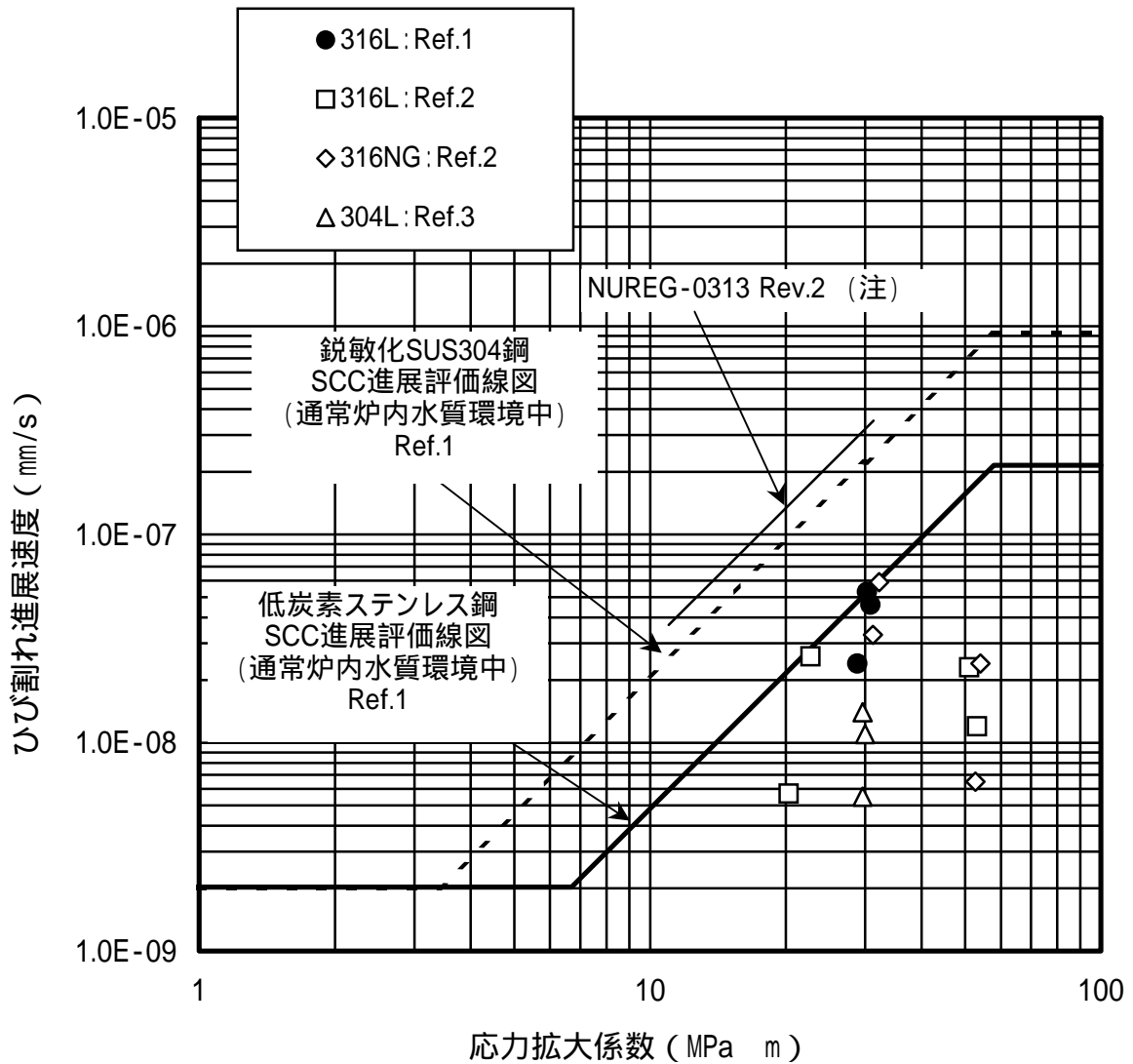


図3 低炭素ステンレス鋼の SCC 進展速度線図

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。

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

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^(Ref.1)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)。

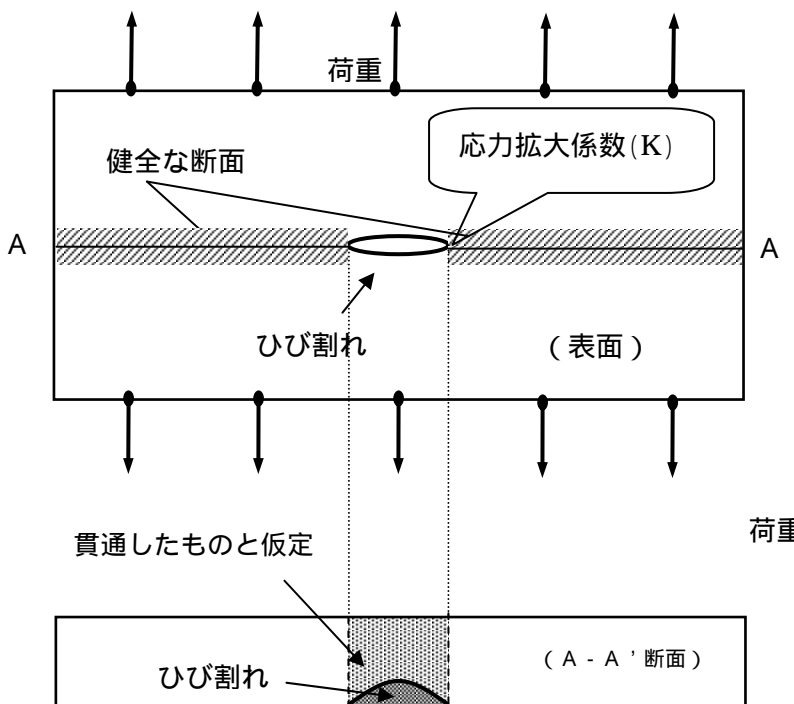


図1 ひび割れと破断の関係

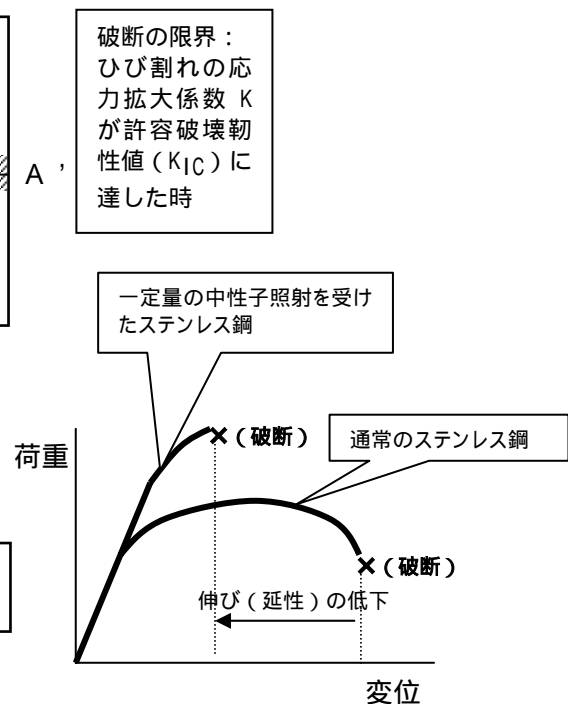
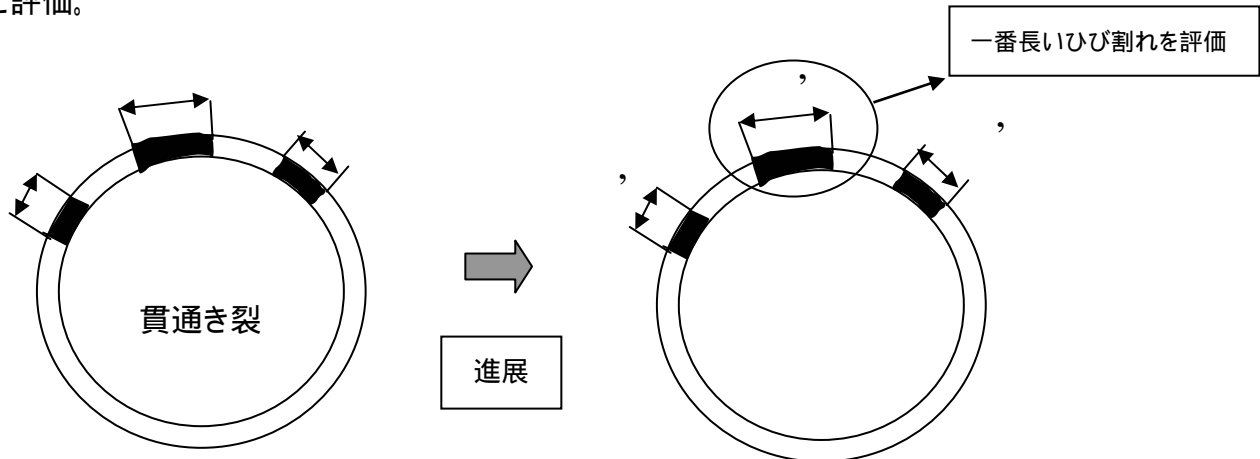


図2 一定量の中性子照射を受けたステンレス鋼の変形

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

当院としては、柏崎刈羽5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、低炭素ステンレス鋼の応力腐食割れ進展速度線図の上限値を使っており、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

技術基準に基づく健全性評価の結果

東京電力(株)は、中間部胴溶接部(H4)内側近傍に存在するY字形のひび割れ及び中間部胴縦溶接部(V14)内側近傍に存在する放射状のひび割れを1ヶ所に寄せ集めて(保守的に負荷条件が厳しくなるH4溶接部にあるものとして)部分貫通モデルにより評価を行っている。

まず、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 $3.8 \times 10^5 \text{ mm}^2$ と評価している。(参考資料5 - 1参照)

次に、現状の残存面積を目視点検の結果に基づき、保守的にひび割れの両側に板厚分の余裕を考慮し貫通した欠陥として計算すると、 $8.1 \times 10^5 \text{ mm}^2$ (必要残存面積の約2.1倍)となり、現時点で十分な構造強度を有すると評価している。

さらに、東京電力(株)は、SUS316L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対して最も速い進展速度を用いて、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 $8.1 \times 10^5 \text{ mm}^2$ (必要残存面積の約2.1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ている。

軸方向のひび割れが構造強度に与える影響については、検討の結果その影響は非常に小さいものと評価した。(参考資料5 - 2参照)

破壊力学的評価の結果

柏崎刈羽5号機のH4溶接部は、5年後に想定される中性子照射量が $4.9 \times 10^{24} \text{ n / m}^2$ となり、材料の延性低下を考慮すべき中性子照射量である $3.0 \times 10^{24} \text{ n / m}^2$ を超えるため、東京電力(株)では破壊力学的評価を実施している。

東京電力株が実施した破壊力学評価では、5年後の推定ひび割れ長さ 174 mmは、許容されるひび割れ長さ 4,520 mmを十分下回っており、5年後においても健全性が確保されていると評価している。

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内側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¹³となる可能性について検討し、以下のことなどから、可能性は非常に小さいと評価している。

）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。

）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支持板又は炉心支持板と炉心シュラウド壁間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 - 3参照)

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¹⁴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。(参考資料5 - 3参照)

）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。

）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。

）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、LOCA¹⁵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。

¹³ 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。

¹⁴ 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。

¹⁵ 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。

柏崎刈羽5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)
H4	運転状態 , + S 1	0.1	1,300	400	4,000	17,400
	運転状態 , + S 2	0.1	1,300	400	2,600	11,500

V14 は保守的に 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

評価上の全断面積 (mm ²)	現在の残存面積 (mm ²)	5年後の残存面積 (mm ²)	必要残存面積 (mm ²)
8.3 × 10 ⁵ (100%)	8.1 × 10 ⁵ (98%) < 約 2.1 倍 >	8.1 × 10 ⁵ (98%) < 約 2.1 倍 >	3.8 × 10 ⁵ (46%)

(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¹⁾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)
4,520	118	174

目視点検によるひび割れ長さ(16mm)に板厚分の2倍(102mm)を加算。

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する部分が減少し、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。

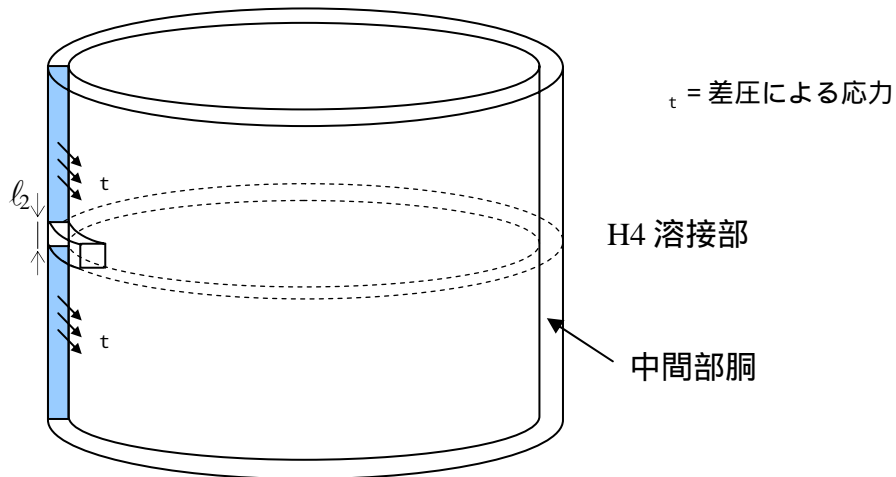


図 軸方向ひび割れ評価の概念（中間部胴の例）

（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 ₁	152.5
運転状態 I、II+S ₂	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。

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。



図-1 H4 近傍の

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

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。

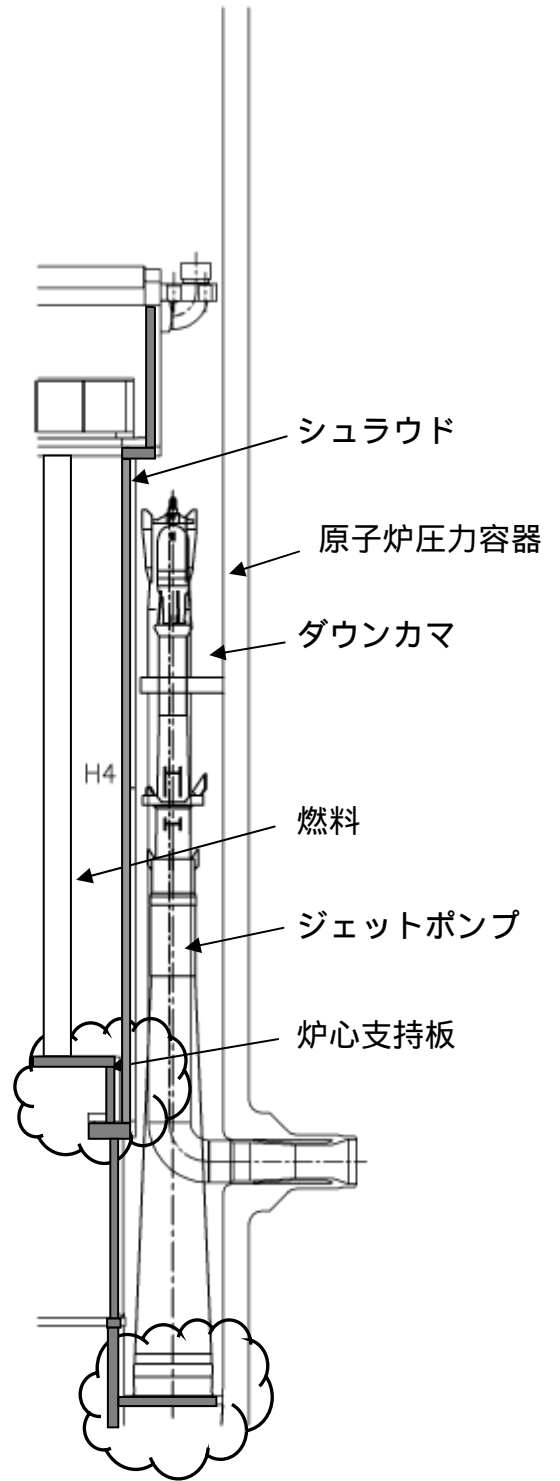
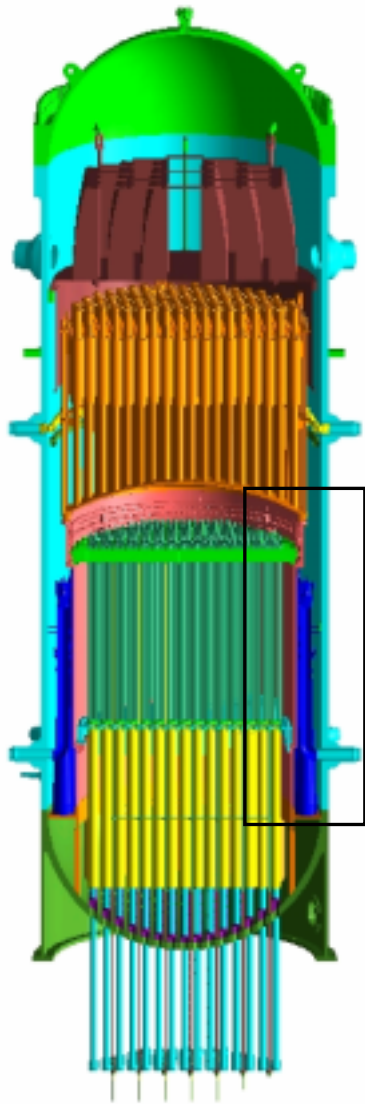
また、万一、バイパスフローが発生した場合に考えられる影響としては以下のことが考えられる。

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

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

当院としては、東京電力(株)による中間部胴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る。

なお、ひび割れ部分の切除を行う場合は、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を行うとともに、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。