

東京電力(株)福島第二原子力発電所2号機
の炉心シュラウドのひび割れについて

平成15年11月27日

原子力安全・保安院

目 次

	頁
要 約	1
1．これまでの経緯	2
2．東京電力(株)による点検	4
3．東京電力(株)による原因調査	10
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	19
5．東京電力(株)による炉心シュラウドの健全性評価とこれに対する当院の見解 ...	33

要 約

東京電力(株)は、平成14年9月以降、福島第二原子力発電所2号機(以下「福島第二2号機」という。)の炉心シュラウドの点検を実施した。この結果、中間部胴の溶接線(H3及びH4)の近傍及び溶接線から乖離した部分等にひび割れを確認した。同社は当該炉心シュラウドのひび割れの調査結果を踏まえ、タイロッド工法による補修を実施することとしたが、参考として健全性評価を併せて実施しこの評価結果を原子力安全・保安院(以下「当院」という。)に報告した。当院は、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、これらのひび割れに対する調査の結果及び同社が他プラントにおいて実施した調査結果等を踏まえ、ひび割れの発生原因について次のように推定した。

溶接線近傍のひび割れは、表面硬化層に発生した粒内割れを起点とし溶接による残留応力に従って進展した応力腐食割れであると推定。

溶接線から離れた浅いひび割れは、研磨ディスクによる表面加工によって発生した表面硬化及び表層の残留応力に起因する応力腐食割れであると推定。

溶接線から離れた比較的深いひび割れは、シュラウド製造時の仮設物の除去部に発生した応力腐食割れであると推定。

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)により行われた福島第二2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。

1. これまでの経緯

東京電力(株)は、平成14年8月29日に発覚した不正記録問題に関し、米国ゼネラル・エレクトリック社 (General Electric Co.) から炉心シュラウドにひび割れの兆候があることを指摘されていた福島第二2号機の炉心シュラウドの点検を実施した。この結果、中間部胴の溶接線 (H3 及び H4) 近傍及び溶接線から乖離した部分等にひび割れを確認し、原因調査を含め詳細調査を行った。(炉心シュラウドについて: 参考資料1 - 1 参照)

東京電力(株)では、当該炉心シュラウドのひび割れの調査結果を踏まえ、タイロッド工法による補修を今定期検査期間中に実施することを決定した。タイロッド工法による補修が行われれば、今後とも当該炉心シュラウドの健全性は確保されることとなるため、ひび割れに関する健全性の評価は必ずしも必要ではないと考えられるが、東京電力(株)は参考として、タイロッド工法による補修を考慮しない条件下で当該炉心シュラウドの健全性について評価を行い、原因調査の結果も含め当院に報告した。

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。

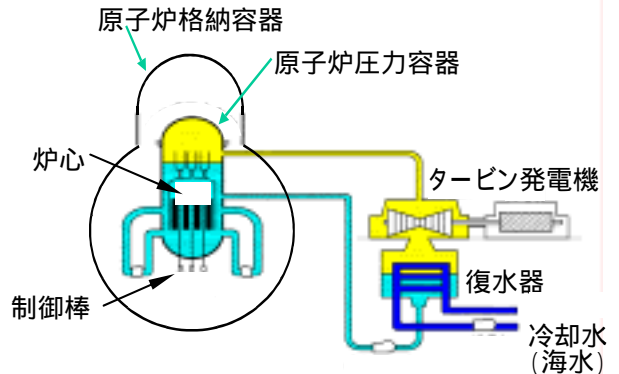


図1 原子力発電所全体系統概略図

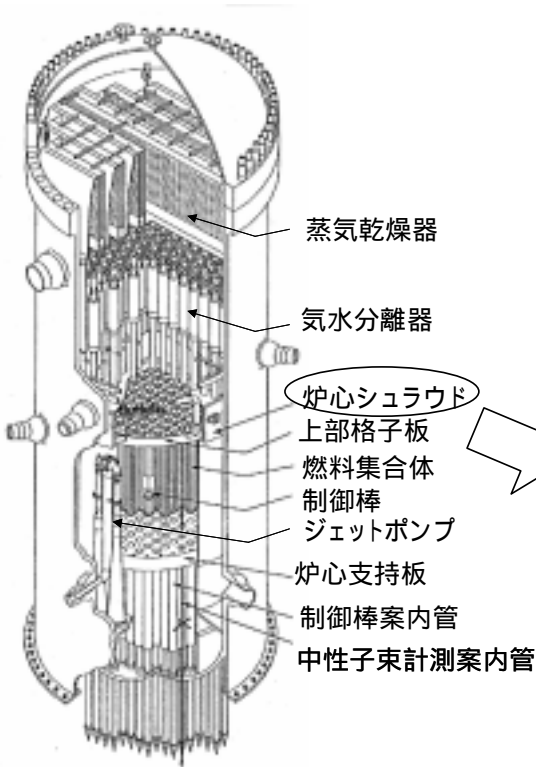


図2 原子炉压力容器鳥瞰図

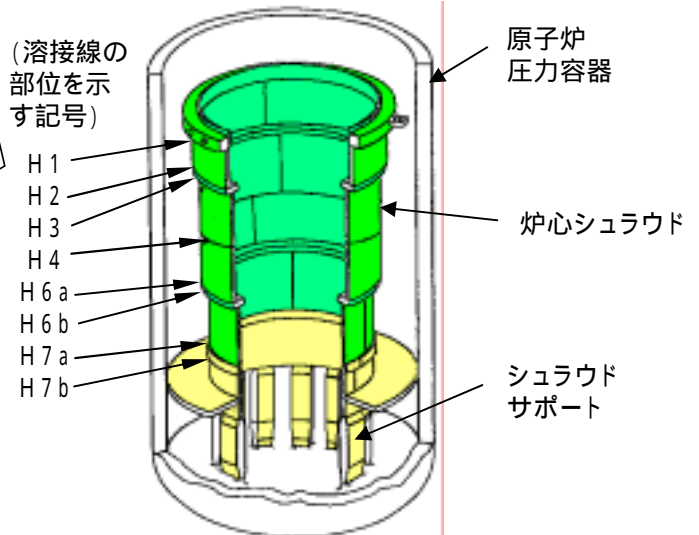


図3 炉心シュラウドの構造

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)による点検

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(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目視点検及び超音波探傷検査(以下「UT」という。)の記録評価に立ち会い、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(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)による点検の結果、次のようなひび割れが確認された。(点検結果:参考資料2-3参照)

表 福島第二2号機炉心シュラウドで確認されたひび割れ

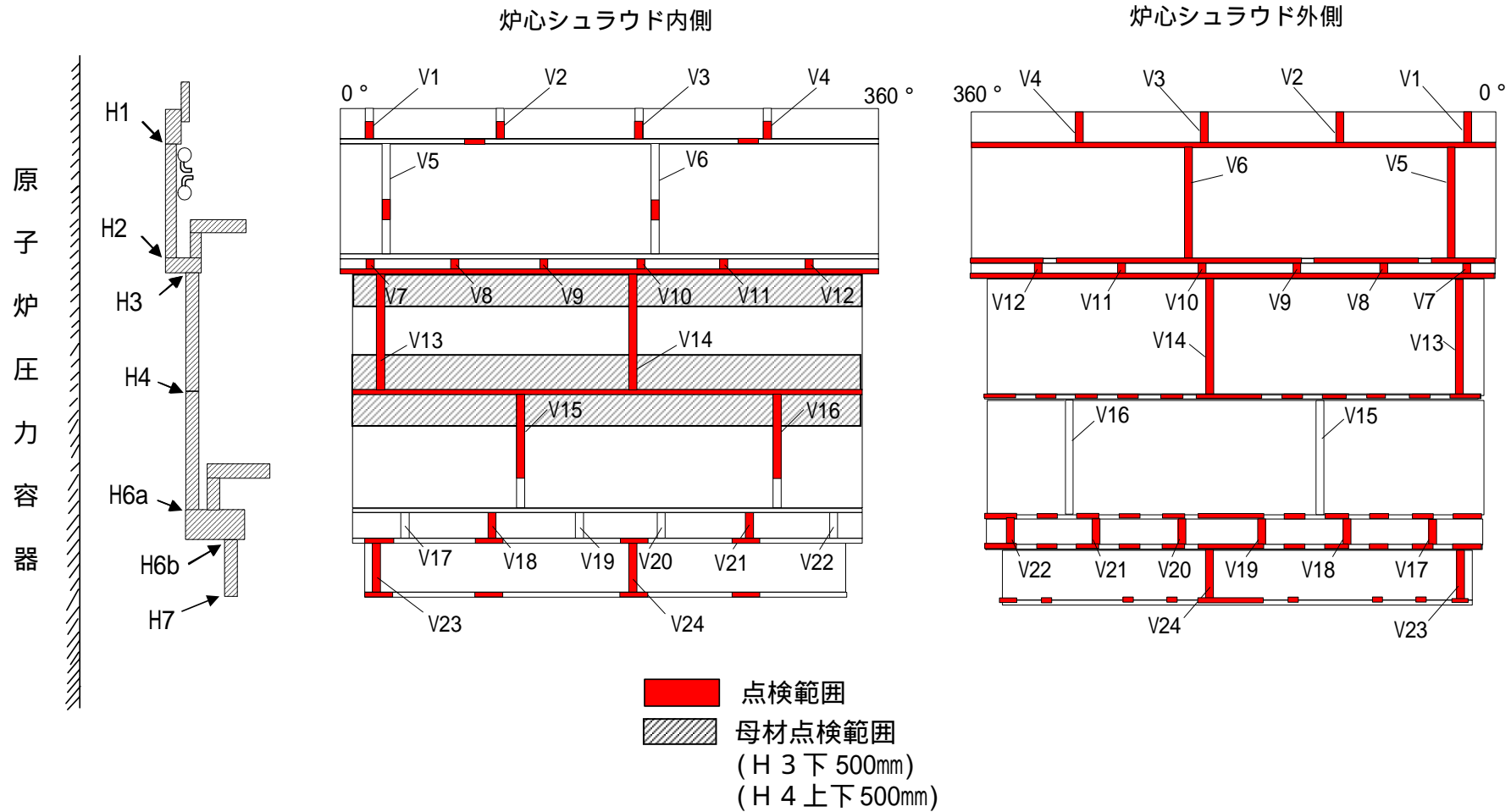
ひび割れの分類	発生場所	ひび割れの数	最大深さ	備考
溶接線近傍のひび割れ	胴部 H3 溶接線近傍(内側及び外側)及び H4 溶接線近傍(内側)	22箇所	約2.7mm	他のプラントでも類似のものが確認されている。
溶接線から離れた浅いひび割れ	胴部(内側)	15箇所	測定限界以下	測定限界値:約4mm
溶接線から離れた比較的深いひび割れ	胴部(内側)	10箇所	約2.3mm	
溶接金属のひび割れ	胴部上端 H3 溶接線(外側)	3箇所	約2.0mm	
計		50箇所		

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。

福島第二 2 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

試供体(1milワイヤ)による水中TVカメラの校正

溶接線の幅の寸法測定

目標物を基準とした円周方向の位置確認

目視点検

評価

異常なし

異常あり

接写による目視点検

完了

再評価

異常なし

異常あり

みがき(ブラッシング)

完了

みがき後の目視点検

再々評価

ひび割れの有無判断

無

有

完了

超音波探傷検査

標準試験体による感度の校正

探傷開始点の基準点合わせ

探傷

記録評価

< 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 >

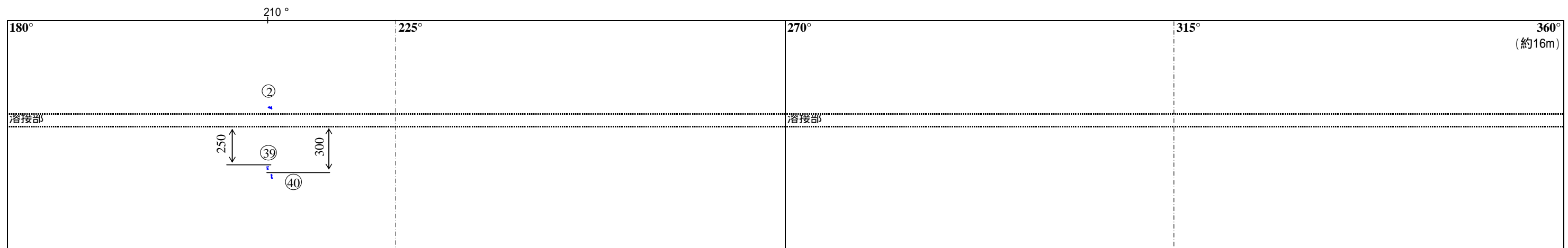
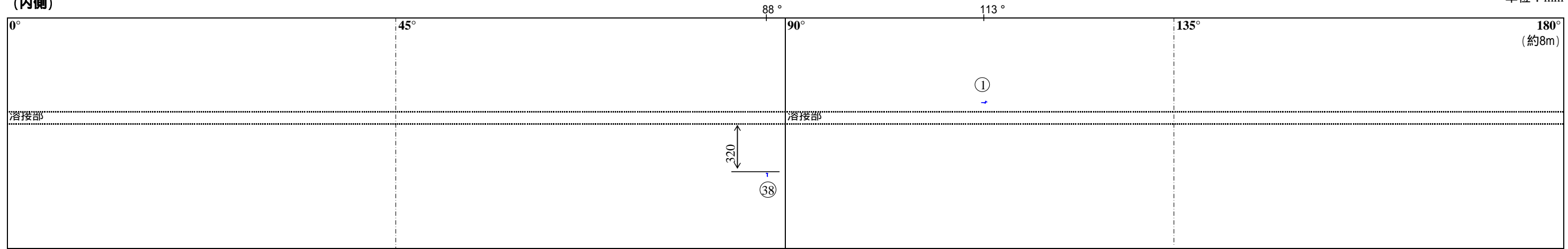
- ・超音波探傷検査は水浸パルス反射法による。
- ・検査に先立ち、装置の校正を行うため、基準欠陥を有する対比試験片により、欠陥からの反射波(エコー)の大きさをフルスクリーン高さの50%程度になるよう基準感度調整を行う。
- ・周波数5MHz、屈折角45、70°の探触子及び周波数2MHz、屈折角可変のアレイ探触子により、金属材料内部のひび割れの深さを測定する。
- ・点検記録にはひび割れの深さを記録する。

2F-2 H3溶接線近傍(内側,外側)目視点検結果

参考資料 2 - 3

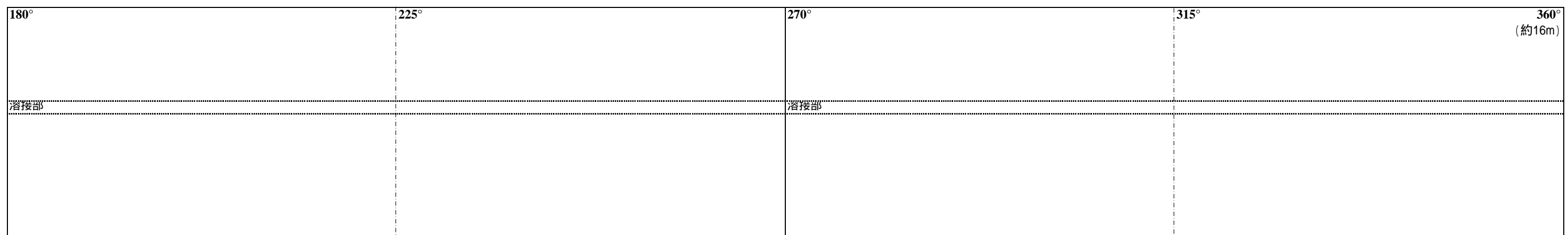
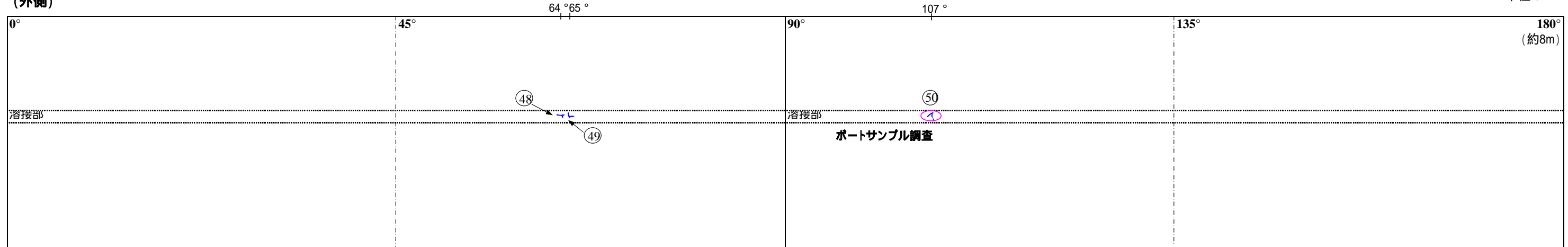
単位: mm

(内側)



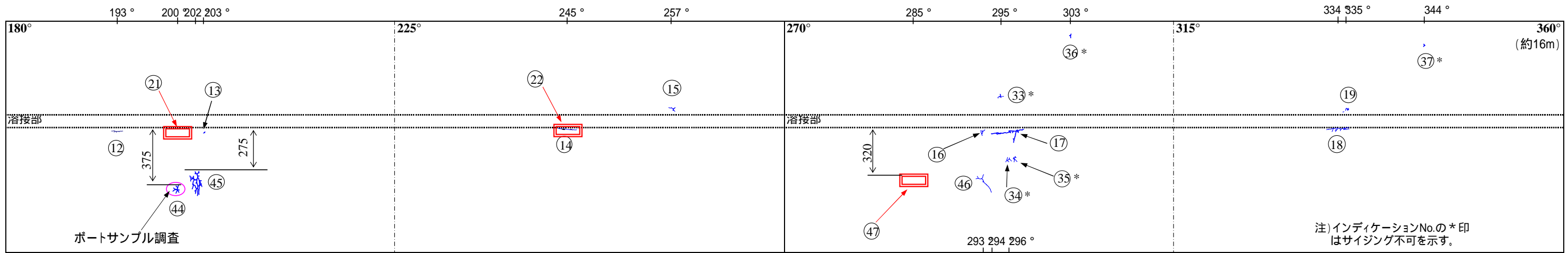
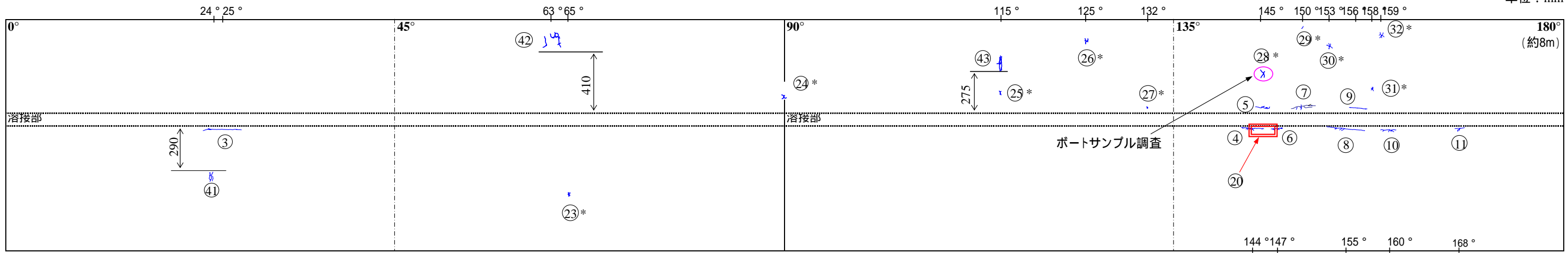
(外側)

単位: mm



2F-2 H4溶接線近傍(内側)目視点検結果

単位：mm



注)インディケーションNo.の*印はサイジング不可を示す。

H4内面の超音波探傷中に検出された外面のひびかrazとされる反射波(4箇所)については、 で探傷位置を表記した。

福島第二原子力発電所2号機シュラウド点検結果

a. 溶接線近傍のひび

	No.	位置	超音波探傷検査結果	
			目視点検結果 ひびの周方向長さ	超音波探傷検査結果 ひびの最大深さ
H3内側	①	113° 付近	約30 mm	約19 mm
	②	210° 付近	約20 mm	約9 mm
H4内側	③	25° 付近	約200 mm	約19 mm
	④	144° 付近	約120 mm	約16 mm
	⑤	145° 付近	約75 mm	約27 mm
	⑥	147° 付近	約60 mm	約14 mm
	⑦	150° 付近	約130 mm	約15 mm
	⑧	155° 付近	約200 mm	約21 mm
	⑨	156° 付近	約95 mm	約20 mm
	⑩	160° 付近	約80 mm	約18 mm
	⑪	168° 付近	約50 mm	約14 mm
	⑫	193° 付近	約60 mm	約16 mm
	⑬	203° 付近	約7 mm	約4 mm
	⑭	245° 付近	約100 mm	約18 mm
	⑮	257° 付近	約35 mm	約20 mm
	⑯	293° 付近	約20 mm	約8 mm
	⑰	294° 付近	約170 mm	約17 mm
	⑱	334° 付近	約120 mm	約21 mm
	⑲	335° 付近	約30 mm	約12 mm

b. 溶接線から離れた浅いひび

	No.	位置	超音波探傷検査結果	
			目視点検結果 ひびの周方向長さ	超音波探傷検査結果 ひびの最大深さ
H4内側	⑳	65° 付近	約11 mm	測定限界*以下
	㉑	90° 付近	約25 mm	
	㉒	115° 付近	約10 mm	
	㉓	125° 付近	約17 mm	
	㉔	132° 付近	約5 mm	
	㉕	145° 付近	約11 mm	
	㉖	150° 付近	約10 mm	
	㉗	153° 付近	約30 mm	
	㉘	158° 付近	約15 mm	
	㉙	159° 付近	約25 mm	
	㉚	295° 付近	約30 mm	
	㉛	296° 付近	約30 mm	
	㉜	296° 付近	約20 mm	
	㉝	303° 付近	約10 mm	
	㉞	344° 付近	約9 mm	

*: 測定限界値 約4mm

	No.	位置	超音波探傷検査結果	
			ひびの周方向長さ	ひびの最大深さ
H4外側	㉟	145° 付近	約77 mm	約13 mm
	㊱	200° 付近	約31 mm	約4 mm
	㊲	245° 付近	約0 mm	約5 mm

*: 目視点検が不可能な範囲で検出されたひびのため、
UT指示があった範囲をひび長さとして想定

c. 溶接線から離れた比較的深いひび

	No.	位置	超音波探傷検査結果	
			目視点検結果 ひびの周方向長さ	超音波探傷検査結果 ひびの最大深さ
H3内側	㉟	88° 付近	約10 mm	約4 mm
	㊳	210° 付近	約10 mm	約12 mm
	㊴	210° 付近	約10 mm	約4 mm
H4内側	㊵	24° 付近	約20 mm	約21 mm
	㊶	63° 付近	約97 mm	約19 mm
	㊷	115° 付近	約25 mm	約17 mm
	㊸	200° 付近	約35 mm	約22 mm
	㊹	202° 付近	約63 mm	約23 mm
㊺	293° 付近	約80 mm	約17 mm	

	No.	位置	超音波探傷検査結果	
			ひびの周方向長さ	ひびの最大深さ
H4外側	㊻	285° 付近	約81 mm	約5 mm

*: 目視点検が不可能な範囲で検出されたひびのため、
UT指示があった範囲をひび長さとして想定

d. 溶接金属のひび

	No.	位置	超音波探傷検査結果	
			目視点検結果 ひびの周方向長さ	超音波探傷検査結果 ひびの最大深さ
H3外側	㊼	64° 付近	約40 mm	約14 mm
	㊽	65° 付近	約32 mm	約14 mm
	㊾	107° 付近	約36 mm	約20 mm

3. 東京電力(株)による原因調査

(1) ひび割れの発生原因

東京電力(株)は、これまでの調査により、硬化した表層部では粒内型応力腐食割れ⁴が⁵発生する可能性があること、及び福島第二2号機の原子炉内の水に溶けている酸素濃度が250～300ppb程度と応力腐食割れが発生する可能性のある環境であったことを確認した。

また、同電力は、次に示すとおり、サンプル調査、類似プラントとの比較、または、その他の試験等を実施した結果を踏まえ、ひび割れは応力腐食割れによるものと推定した。

溶接線近傍のひび割れ

中間部胴の上端の溶接線(H3)及び真中の溶接線(H4)においては、溶接線に沿って母材部に単発的に放射状又は波形状のひび割れが確認された。

これらのひび割れは、レプリカ調査⁶等により応力腐食割れであると推定された福島第二3号機のH3溶接線近傍のひび割れ及びサンプル調査の結果、応力腐食割れであると推定された柏崎刈羽1号機のH4溶接線近傍のひび割れと発生状況が類似している。(サンプル調査の結果：参考資料3-1)

また、福島第二2号機の炉心シュラウドは、福島第二3号機及び柏崎刈羽1号機の炉心シュラウドと同様の製造履歴であり、これらの炉心シュラウドのリング部は機械加工により、また胴部の溶接線近傍はグラインダ加工により、表層部にピッカース硬さ⁷(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。

さらに、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、表面には300～400MPaを超える引張応力が生じていたものと評価された。

溶接線から離れた場所に発生したひび割れ

中間部胴の溶接線から離れた場所において、比較的深いひび割れ及び超音波探傷検査の検出限界以下の浅いひび割れが確認された。

また同電力は、福島第二2号機において炉心シュラウド製造時の記録の確認等により、製造過程において外観を向上させるために全面にわたり研磨ディスクによる表面加工が行われたとしている。同電力による試験の結果、研磨ディスクの加工に

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 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。

⁶ レプリカ調査：ひび割れがある所に型をあて、そこに樹脂を流し込んでひび割れを転写し、ひび割れの形状、進展状況等を調べること。

⁷ ピッカース硬さ：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。

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。

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。

より表層部に硬化層の形成とともに、1,000MPa を超える引張応力が生じることが確認された。(モックアップ試験結果：参考資料3 - 2)

さらに、同電力が研磨ディスク加工に起因する応力腐食割れの再現試験を行った結果、研磨ディスクによる表面仕上げを施した試験片(SUS316L)に応力腐食割れが発生することが確認された。(再現試験結果：参考資料3 - 3)

これらのひび割れのサンプル調査の結果、いずれも破面の大部分が応力腐食割れに特徴的な粒界割れ¹⁰であることが確認された。また、硬さ測定の結果、表層部に Hv400 程度の硬化層が形成されていることが確認された。また、比較的深いひび割れ部分のサンプル調査において、炉心シュラウド製作時に取り付けた仮設物の溶接跡と見られる部分が確認された。(サンプル調査の結果：参考資料3 - 4、3 - 5、3 - 6 参照)

これらを踏まえ、東京電力(株)では、溶接線から離れた場所に発生したひび割れの発生状況について、次のような分析を行った。

溶接線より離れた浅いひび割れ

これらのひび割れは、研磨ディスクによる表面加工によって発生した表面硬化層に起因する応力腐食割れであると推定した。ひび割れが浅いのは、残留応力がごく表面にしかないため、進展が直ぐに止まったためと考えられる。

溶接線より離れた比較的深いひび割れ

これらのひび割れは、浅いひび割れと同様応力腐食割れで、シュラウド製造時の仮設物の除去部に発生したものと推定した。ひび割れが深いのは、研磨ディスクによる表面加工によって発生した表面硬化層に発生したひび割れが、仮設物の溶接によって発生した残留応力によって内部まで進展したからであると考えられる。(仮設物について：参考資料3 - 7 参照)

なお、同電力は、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。

(2) 東京電力(株)が実施した原因調査に対する当院の評価

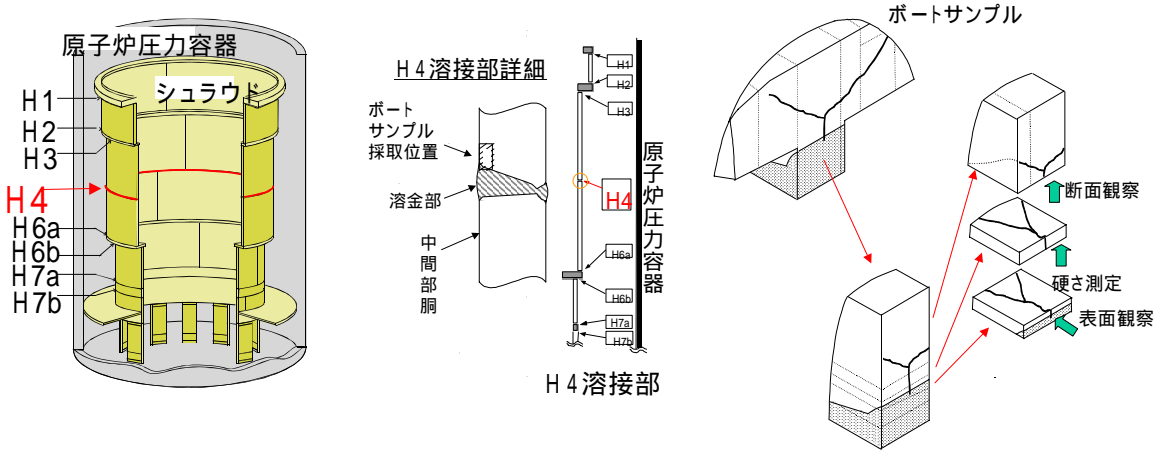
当院としては、東京電力(株)が実施したこれらの原因調査については、福島第二3号機や柏崎刈羽1号機他で発生したひび割れの原因究明で得られた知見等を総合的に勘案したうえで実施されたものであると考える。

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。

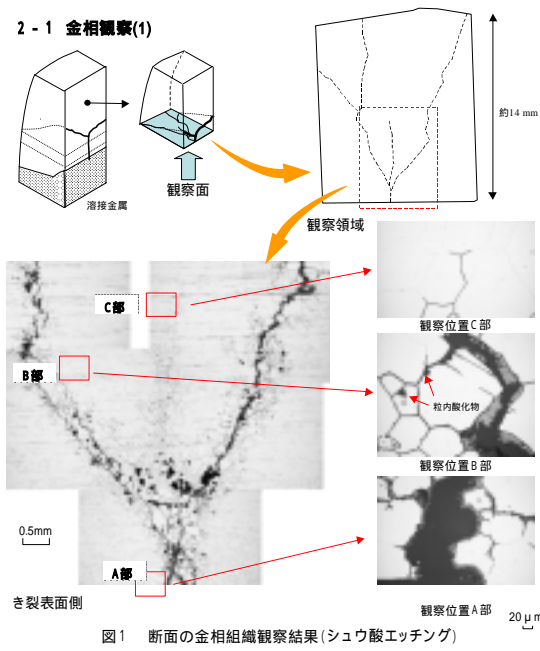
¹⁰ 粒界割れ：結晶粒の界に沿って進展するひび割れのこと。

1. 目的

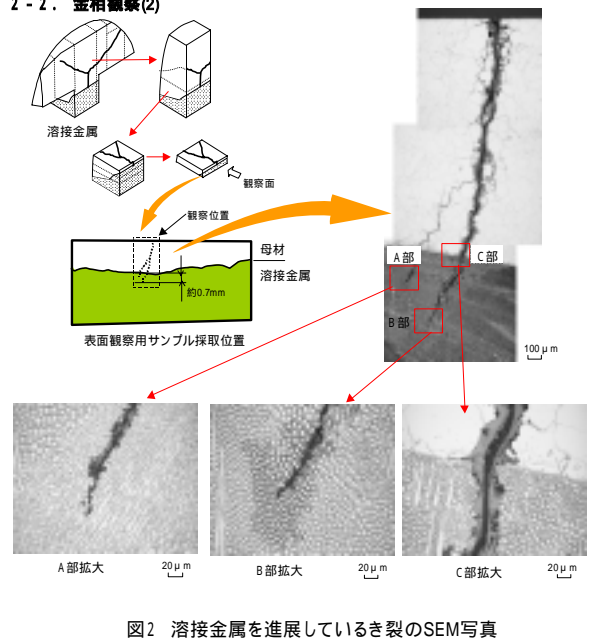
定期検査においてひび割れ(以下、き裂)が確認されたシュラウド中間部胴溶接部から採取したサンプルの各種検査を実施し、き裂発生の原因究明に資する。



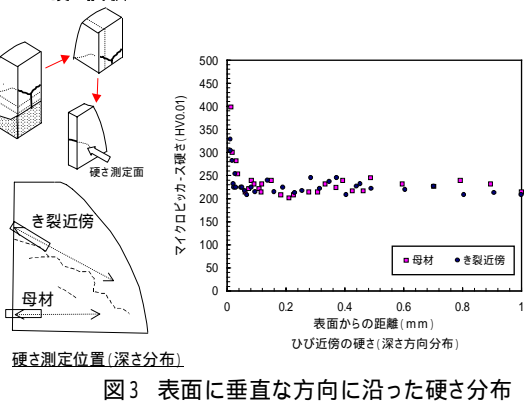
2-1 金相観察(1)



2-2 金相観察(2)



3. 硬さ試験



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10 μm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經由して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。

研磨ディスク施工モックアップ試験の結果

試験方法

(1)供試材

- ・母材: SUS316L 受入材
- ・溶接金属: SUS316ULC サブマージアーク溶接

(2)研磨ディスク施工

- ・押付け角度: 15 ~ 30°
- ・押付け角度: 30 ~ 45°



図 1: 研磨ディスク

残留応力測定

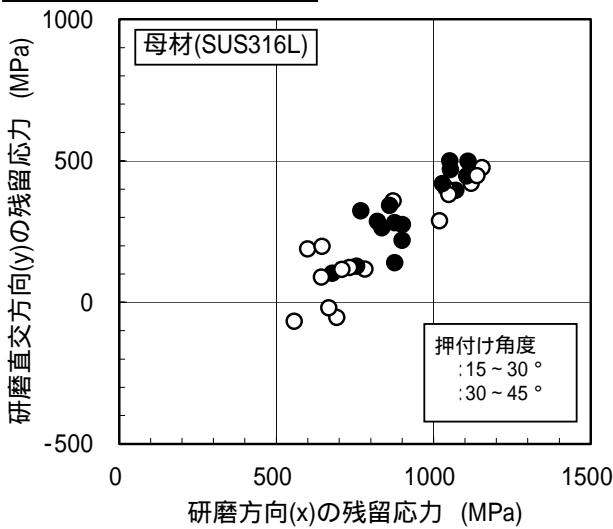


図 2: 研磨ディスク施工後の表面残留応力 (表面分布)

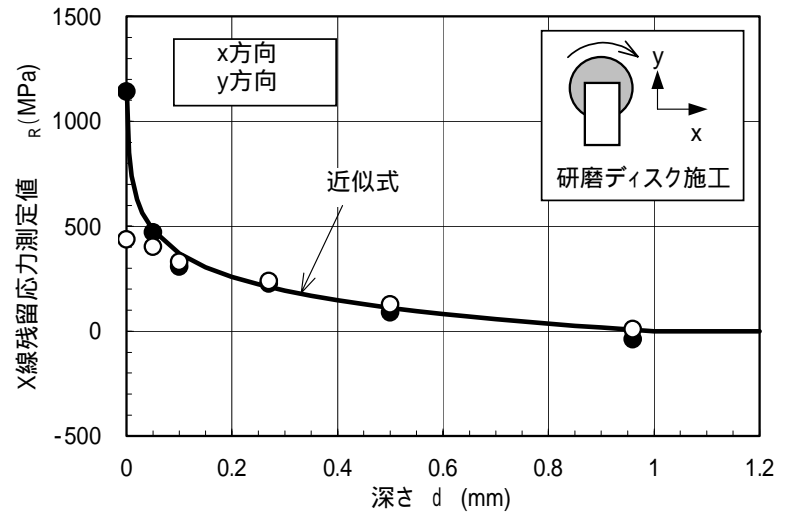
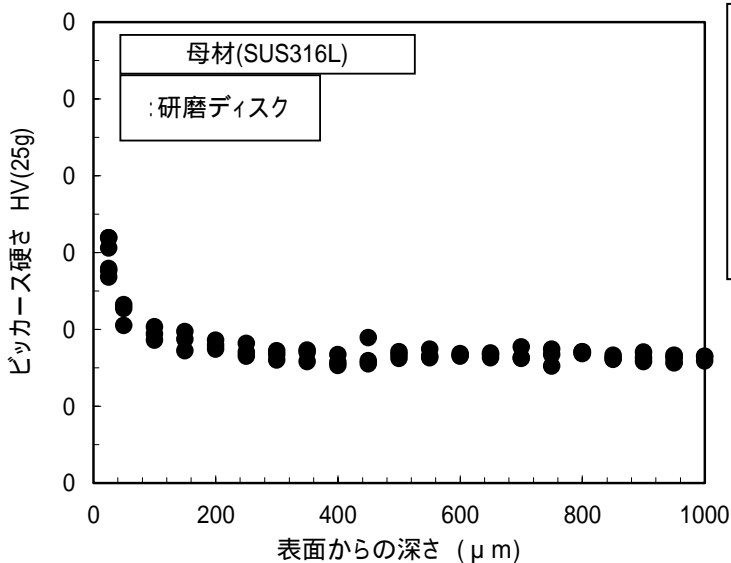


図 3: 研磨ディスク施工後の残留応力 (深さ方向分布)

硬さ試験



試験結果

- (1)表面仕上げに用いた研磨ディスク施工は、場合によっては、母材及び溶接金属の極表層に 1000MPa 程度の引張残留応力が生じ得ることを確認した。
- (2)表面仕上げに用いた研磨ディスク施工は、場合によっては、母材及び溶接金属の極表層に 300Hv 程度に硬化した領域を生じ得ることを確認した。

研磨ディスク施工仕上部 S C C 再現試験

試験概要

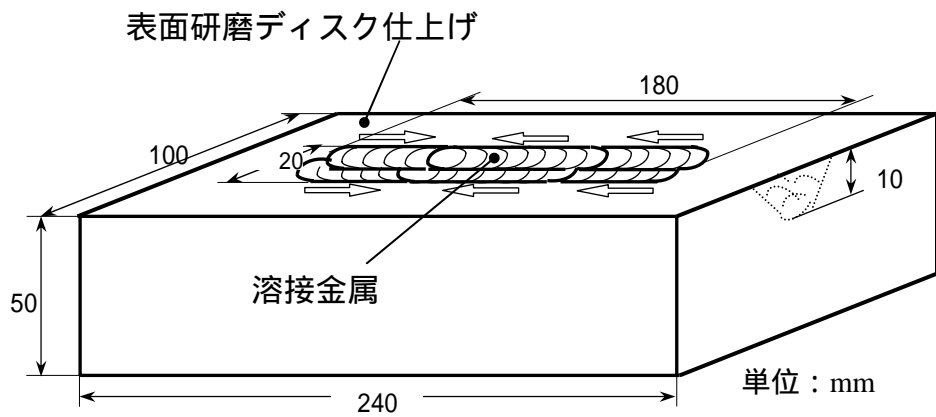


図 1-1 試験体形状

溶接金属	C	Si	Mn	P	S
	0.016	0.52	1.57	0.024	0.006
母材	Ni	Cr	Mo	N	
	12.22	19.65	2.32	0.053	
	C	Si	Mn	P	S
0.010	0.59	0.78	0.033	0.001	
12.16	17.22	2.06	記載なし		

表 1 化学成分 (ミルシート記載値)

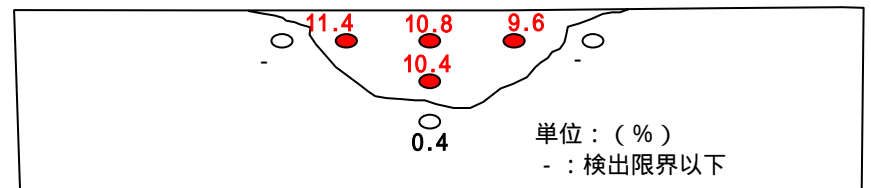


図 1-2 溶接金属部フェライト量測定

断面観察

試験体を切断し、曲げた後に断面観察を実施。

断面マクロ観察位置



図 2-1 観察位置



図 2-2 断面マクロ観察 1



図 2-3 断面マクロ観察 2

5mm

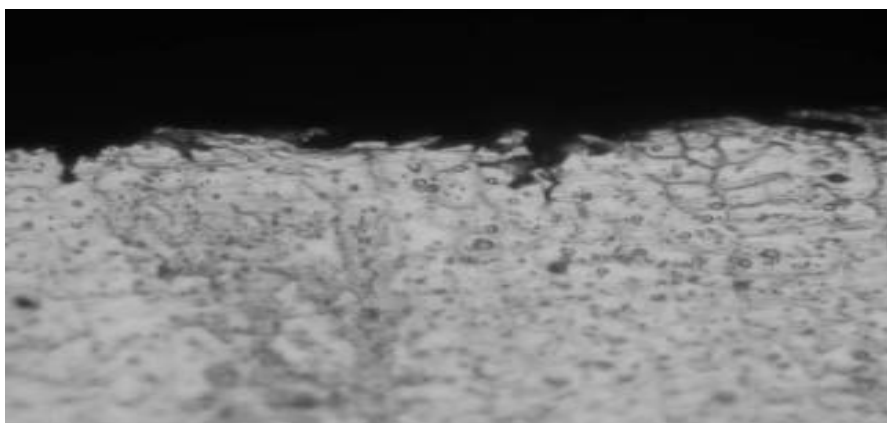


図 2-4 観察位置 B (溶接金属部)

20 μm

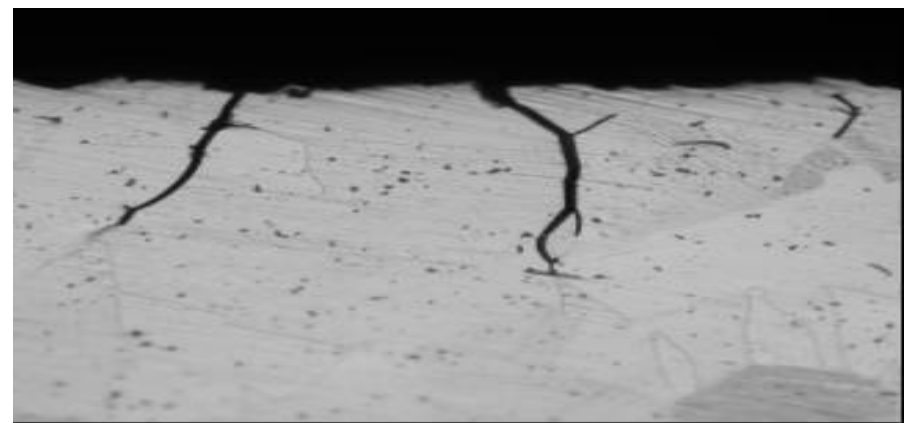


図 2-5 観察位置 C (母材部)

50 μm

(観察倍率: ×500)

(観察倍率: ×200)

- 母材部のき裂は粒界割れであり、深さ方向の分岐も観察された。
- 溶接金属部では微小な開口が生じていたが、き裂として進展していなかった。

硬さ測定結果

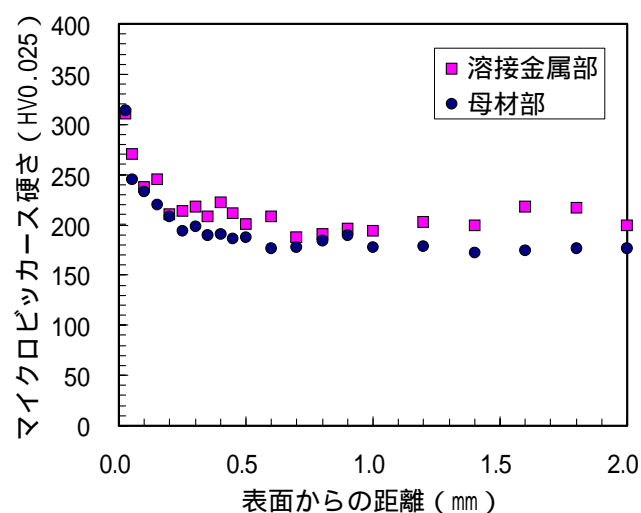
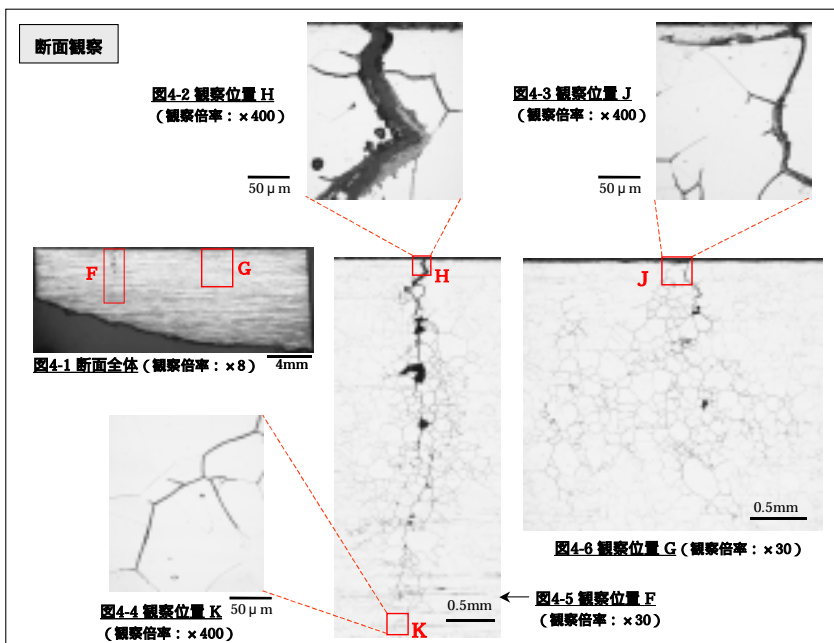
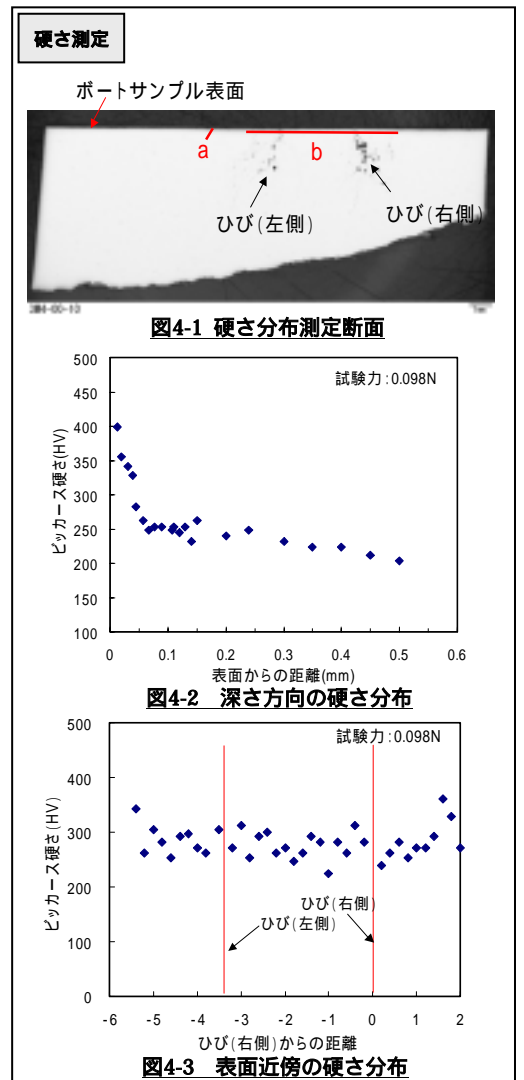
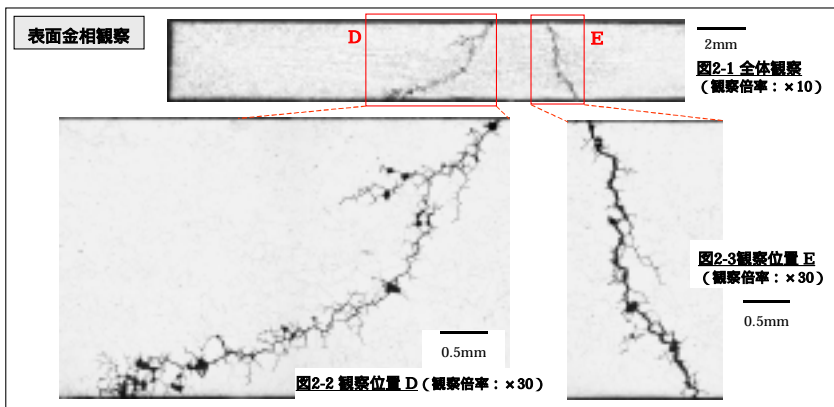
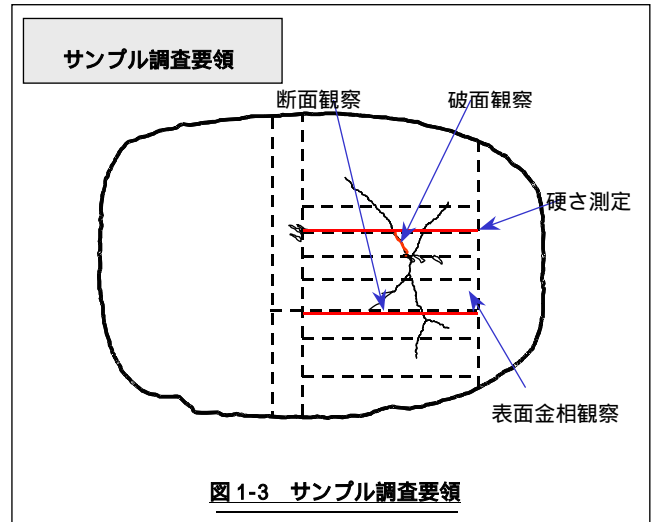
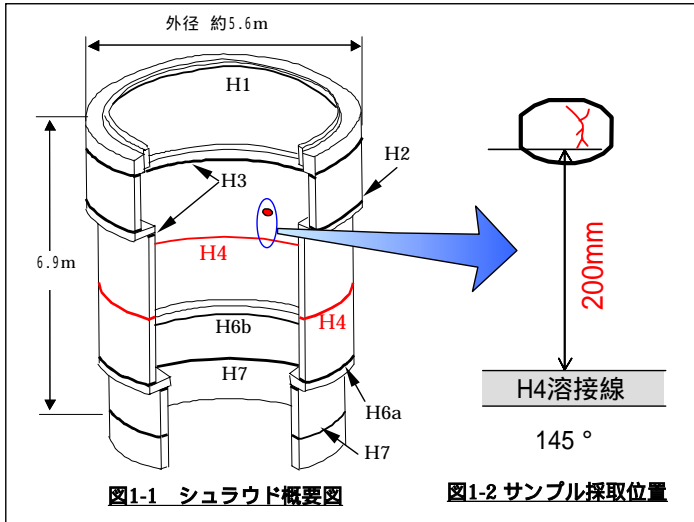


図 3 深さ方向硬さ分布

まとめ

- SUS316L 母材に開先加工を施して溶接した後に研磨ディスクを用いて表面仕上げした試験体を、288 の高温水中に 1500 時間浸漬したところ、母材部の表面硬化層より SCC が発生した。(母材部の表面硬化層の硬さは極表面層で HV300 を超えており、実機とほぼ同等)
- 溶接金属部ではき裂の進展は認められず、溶接金属は母材より SCC 感受性が低いことが確認された。(溶接金属のフェライト量は 10% 以上)
- なお、溶接金属部に微小な開口が認められており、より長時間の試験により、SCC の進展を生じる可能性が示唆された。

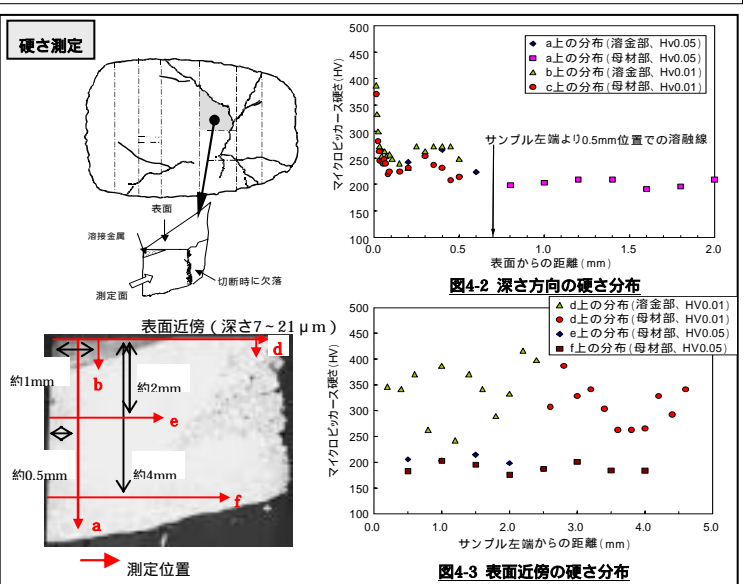
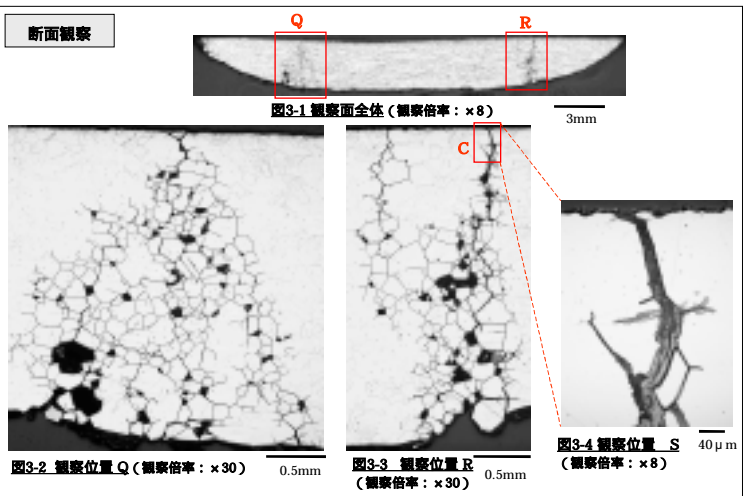
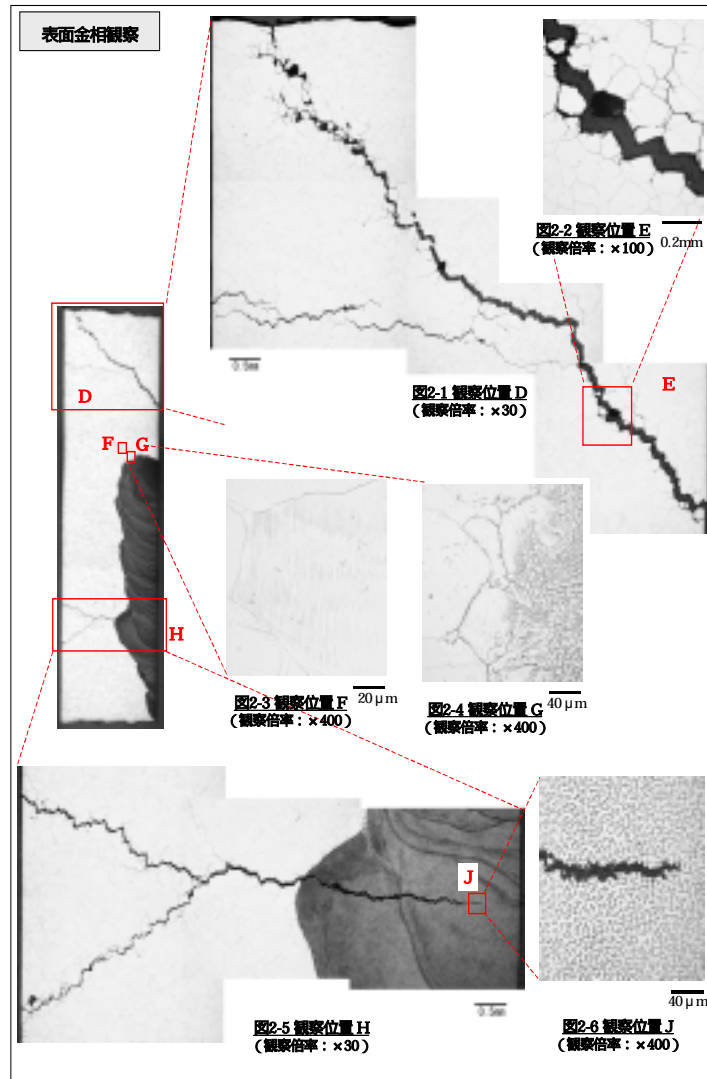
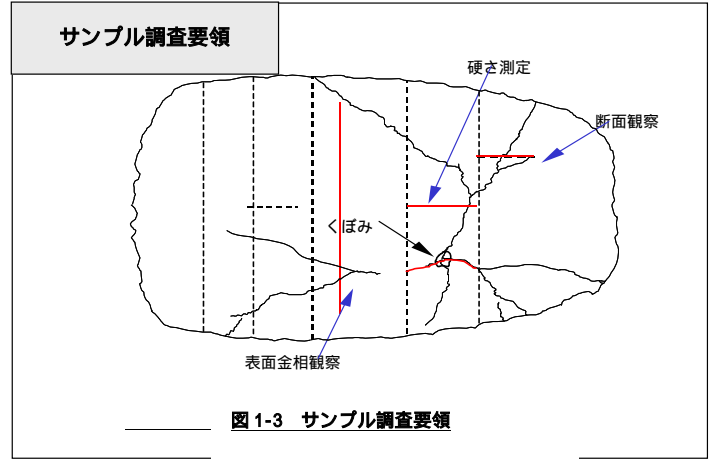
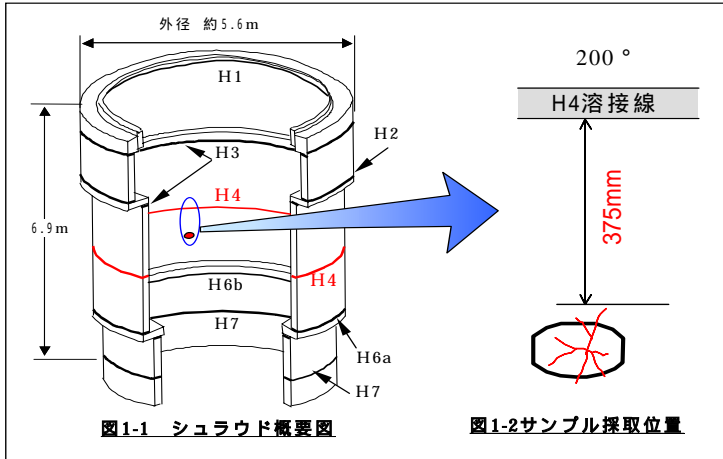
福島第二2号機H4ポートサンプル調査 (溶接線から離れた浅いひび割れ)



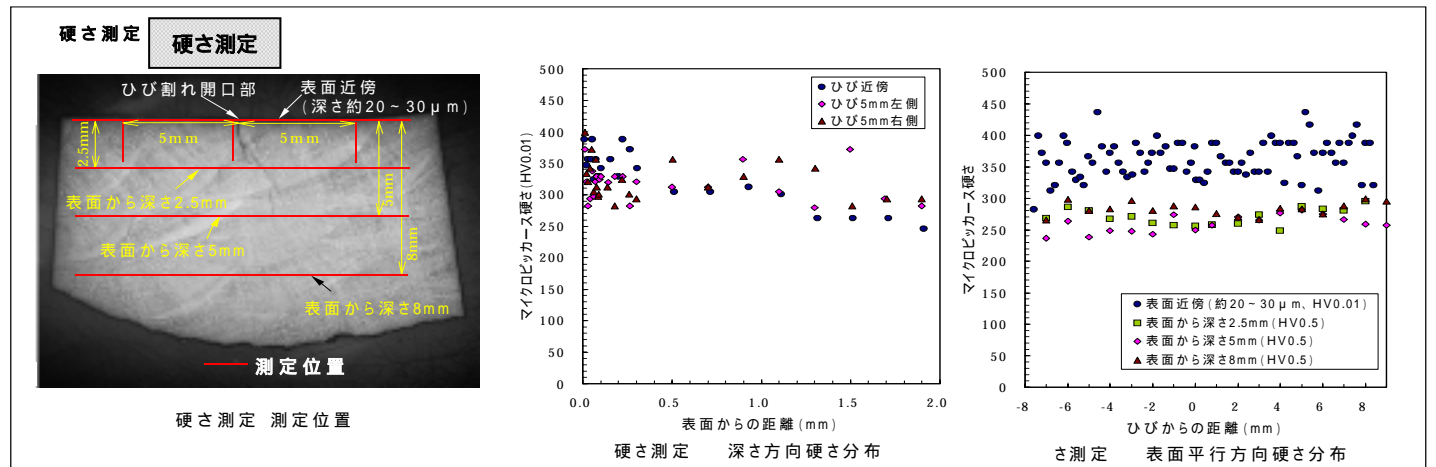
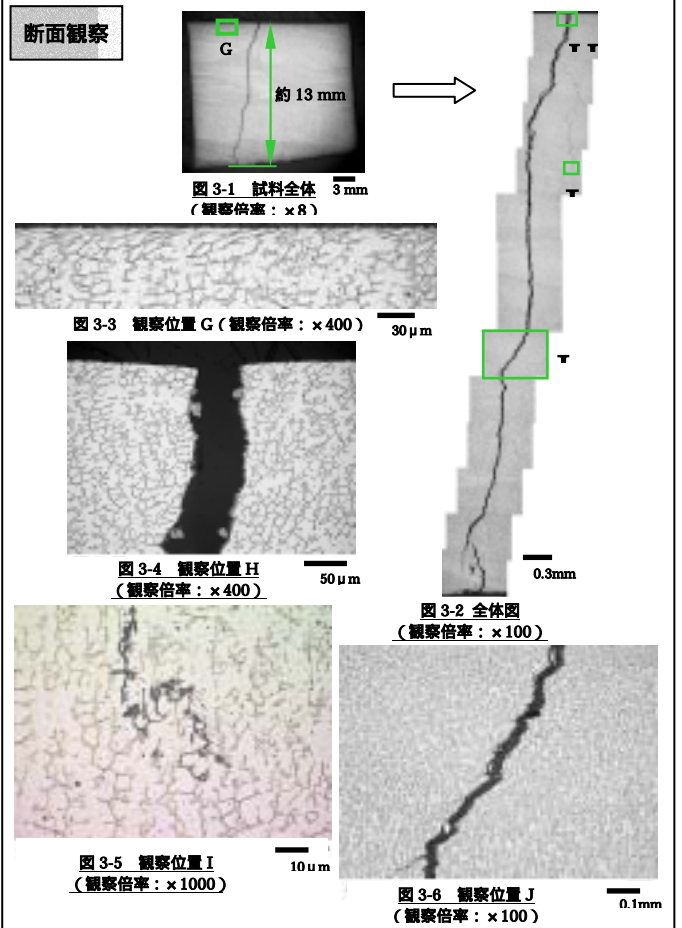
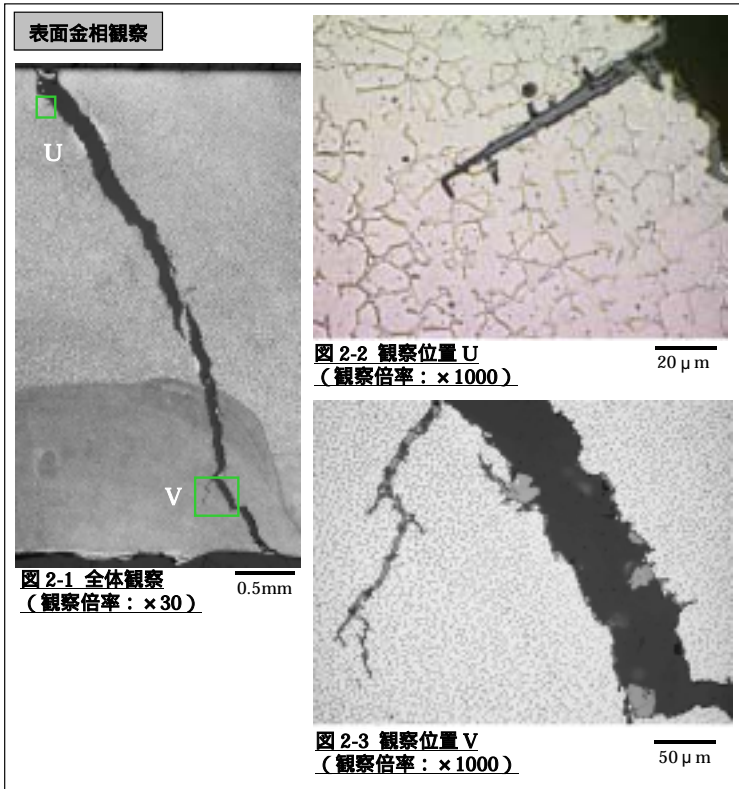
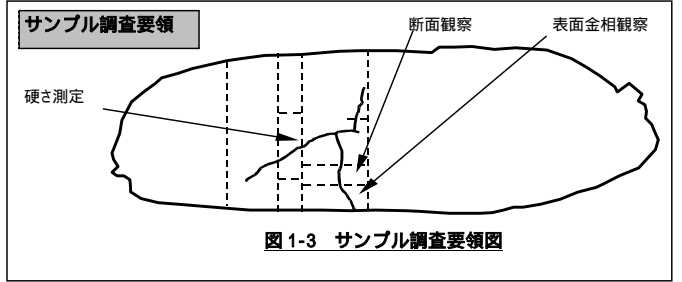
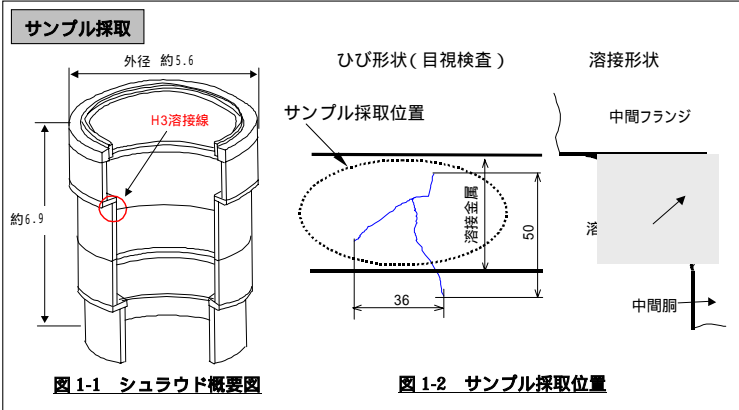
- まとめ**
- (1) 破面は大部分が粒界割れであり、SCCによるき裂であると考えられる。
 - (2) 深さ方向の進展においては、ひびが著しい分岐を生じている。(断面観察)
 - (3) 断面の硬さ測定の結果、表面の極近傍の硬さはHv400を超え、表面近傍に深さ 50µm 程度の硬化層が存在することが確認された。
 - (4) 表面の金相観察では、主として粒界割れが観察されたが、くぼみ近傍の破面観察等では、表面近傍に粒内割れが確認された。

福島第二2号機H4ボートサンプル調査 (溶接線から離れた比較的深いひび割れ)

参考資料3 - 5



- まとめ**
- 破面の大部分が粒界割れであり、SCCによるひびであると考えられる。
 - 母材の一部に溶接金属が確認された。
 - 深さ方向の進展においては、ひびが著しい分岐を生じている。(断面観察)
 - 断面の固さ測定の結果、表面の極近傍の硬さはHv380を超え、表面近傍に深さ10~20 μ m程度の硬化層が存在することが確認された。
 - 表面近傍には粒界割れでない破面も観察されたが、明確な粒内割れは確認されなかった。
 - 表面上のひびはくぼみを中心に放射状になっていることから、くぼみを起点としてSCCが生じたと推測される。(ボートサンプル中央のへこみは母材と溶接金属の境界に位置)



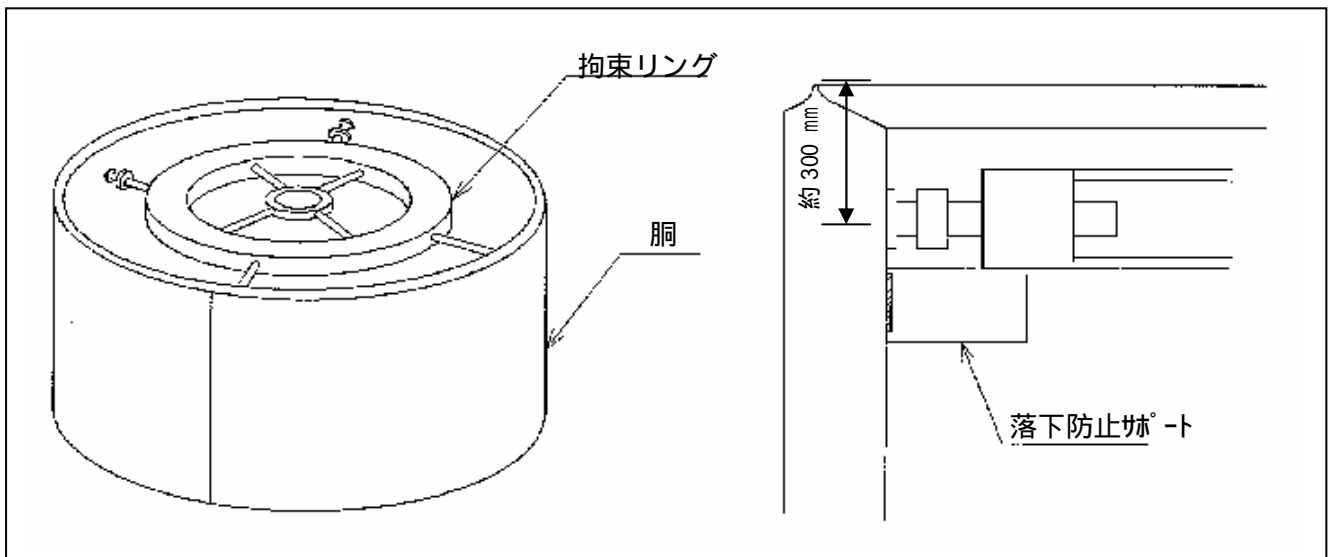
- まとめ
- (1) ひびは樹枝状晶組織境界(ID:Inter-dendrite)割れで進展していた。
 - (2) 表面近傍は硬さが上昇しており、組織の変形も認められた。
 - (3) 高温割れ等の溶接欠陥と判定できるものは認められなかった。

仮設物について

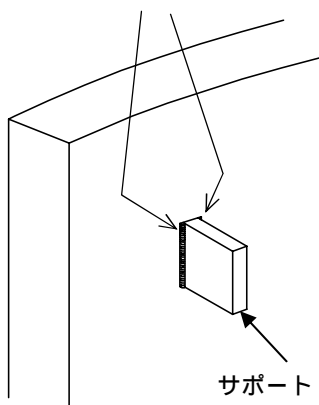
仮設物とは

製造時の変形を防止するために取り付ける拘束棒を固定するサポート等製造時にすみ肉溶接により一時的に取り付ける部品。

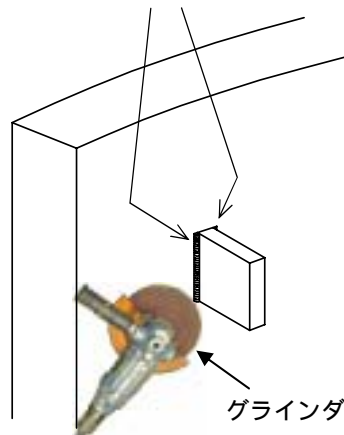
(例：内面拘束リング落下防止サポート)



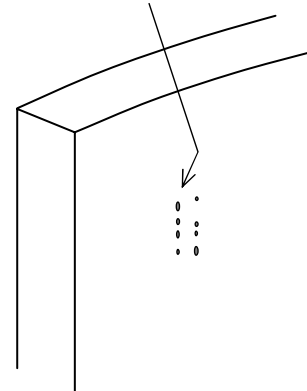
両側をすみ肉溶接



すみ肉溶接を削り取り



溶接跡



取付け方法

(溶接により取付け)

取外し方法

(グラインダにより取外)

取外し後

(実際の溶接跡は観察されない)

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)

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、同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。

同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。また、溶接線を挟んでリング部及び胴部に単発的にひび割れが存在する場合には、リング部のひび割れを溶接線に投影し、胴部のものと併せて評価することにより保守的に評価する。

ひび割れの進展を考慮し一定期間後の残存面積¹¹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同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¹²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。

¹¹ 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。

¹² 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。

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別添 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¹³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）

¹³ 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。

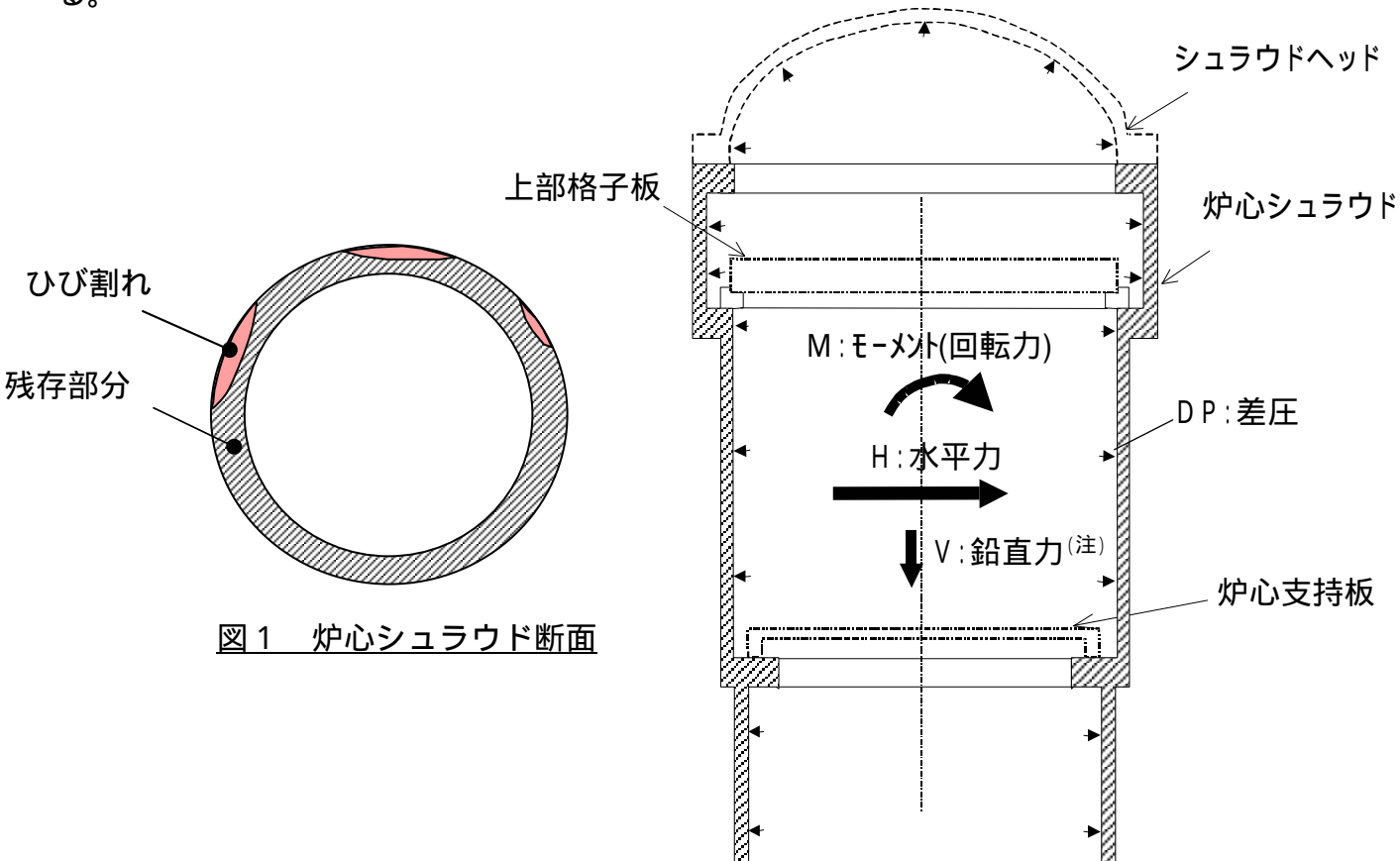


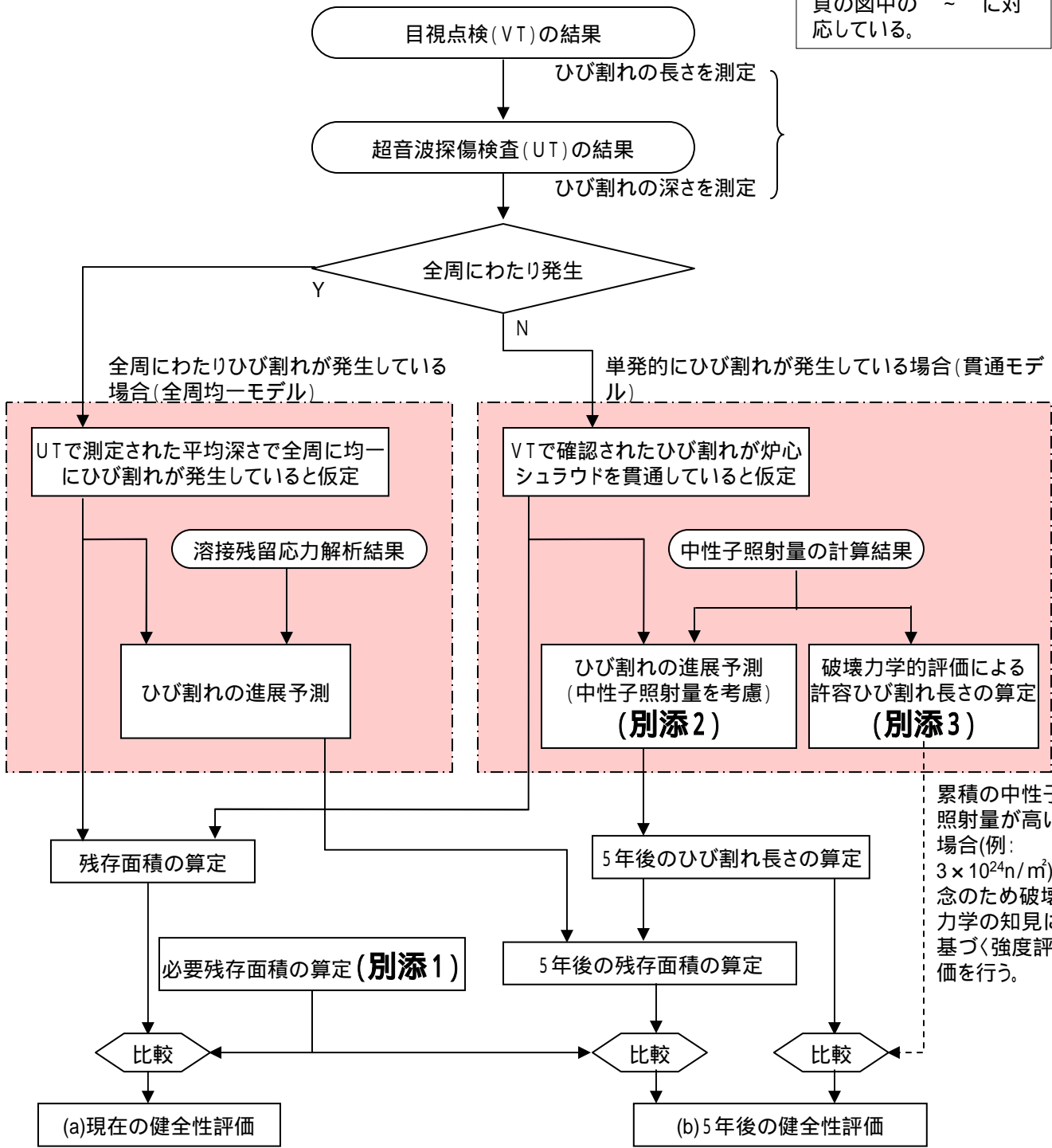
図1 炉心シュラウド断面

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

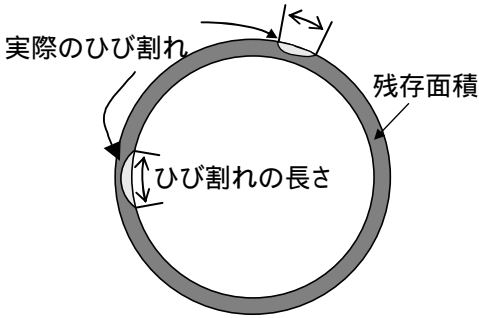
・ひび割れの進展評価により求めた5年後の残存面積が必要残存面積以上であることにより健全性を評価

単発的にひび割れが存在する場合 (部分貫通モデル)

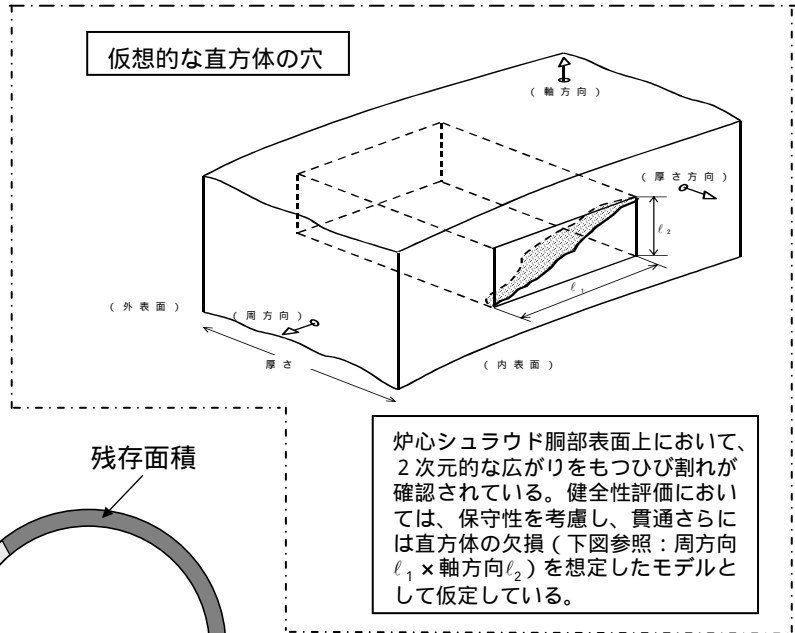
周方向のひび割れに関する評価手法

軸方向のひび割れの影響は非常に小さい。

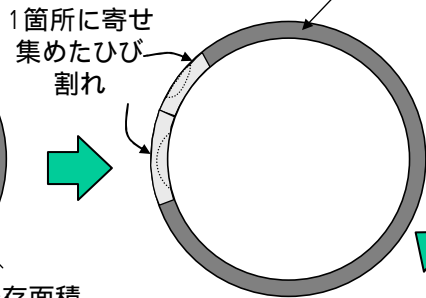
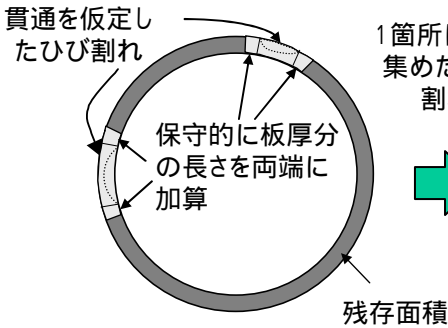
ひび割れの長さ



目視点検により周方向のひび割れの長さを求める。(同一平面上にひび割れがあると仮定)



炉心シュラウド胴部表面上において、2次元的な広がりをもつひび割れが確認されている。健全性評価においては、保守性を考慮し、貫通さらには直方体の欠損(下図参照:周方向 ℓ_1 ×軸方向 ℓ_2)を想定したモデルとして仮定している。

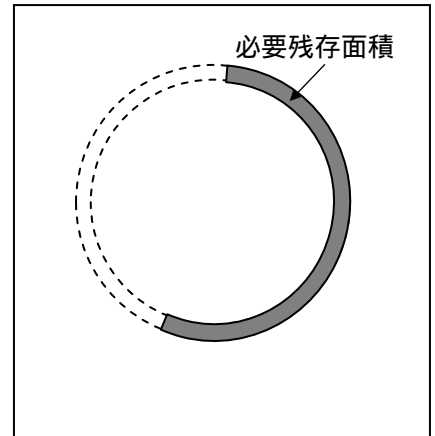


(a) 現在の健全性評価

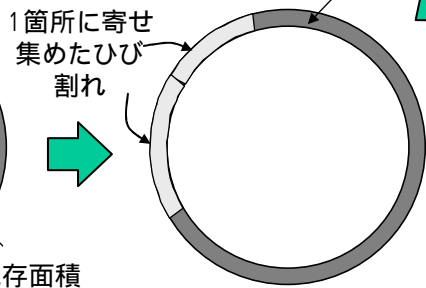
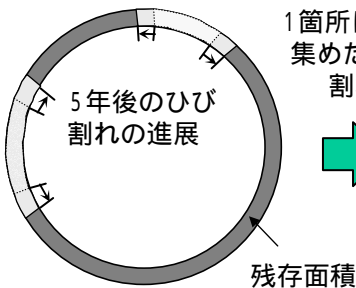
ひび割れは貫通しているものと仮定する。
(ひび割れの内部での広がり等を考慮し、ひび割れの両端に一定のマーヅン(例:板厚分の長さ)を加算)

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



(b) 5年後の健全性評価

(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。

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、炉心シュラウドの中間部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

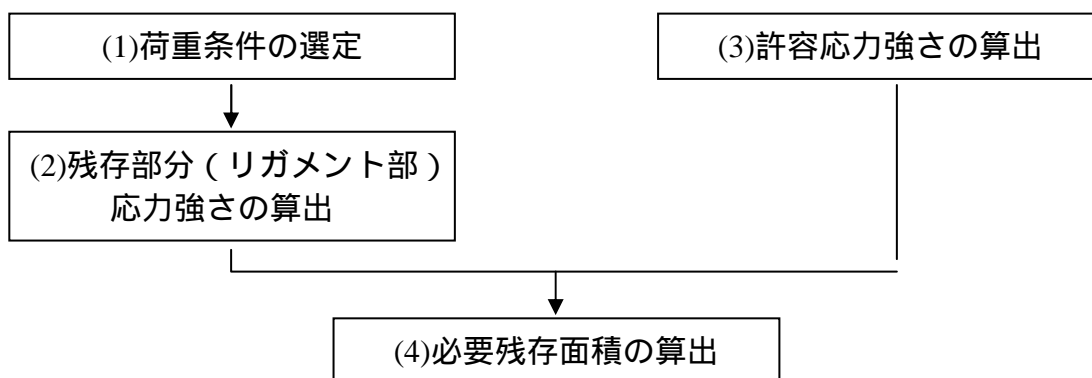


図1 必要残存面積の算出手順フロー図

(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

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、2/3S

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。

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。

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

ここで、 $S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$ ('MAX'とは、 $|S_{12}|$ 、 $|S_{23}|$ 、 $|S_{31}|$ のうち最大なものを選択すること)

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

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

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

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。

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。

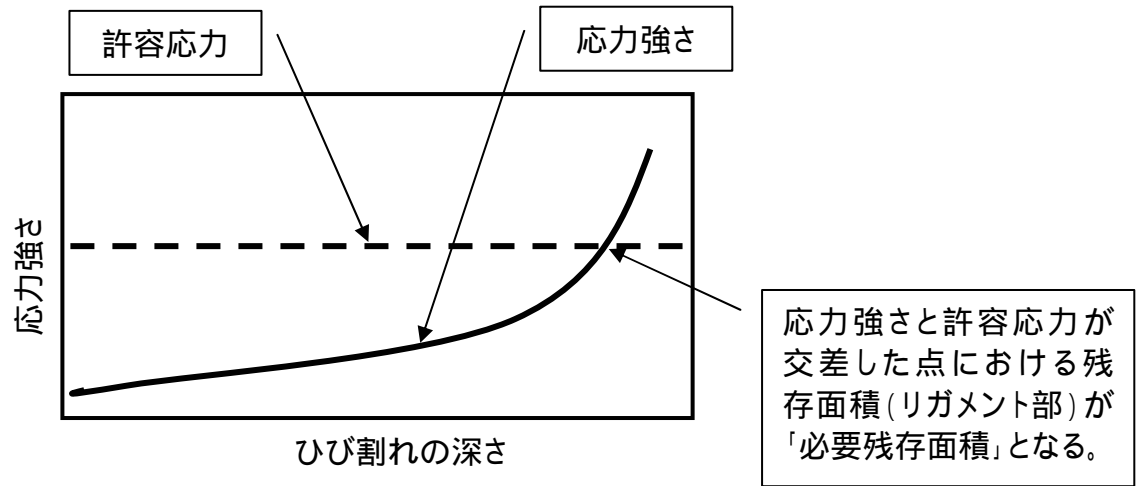


図2 ひび割れの深さに対する応力強さ

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、J E A G 4 6 0 1 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J E A G 4 6 0 1 に沿って行われる。

3. J E A G 4 6 0 1 (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
 $\underline{\underline{A}}S$: 運転状態 及び $\underline{\underline{A}}$ 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 $2.4Sm$ 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 $\underline{\underline{A}}S$ については同号ロ、 A 及び $\underline{\underline{A}}S$ 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

・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し、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。

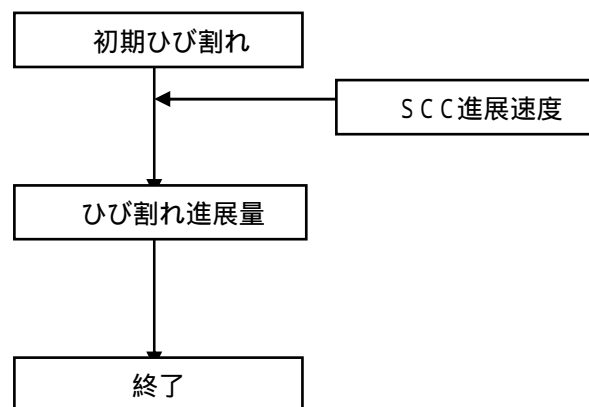


図1 ひび割れ進展予測の評価方法の流れ

(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2 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2 参照)

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

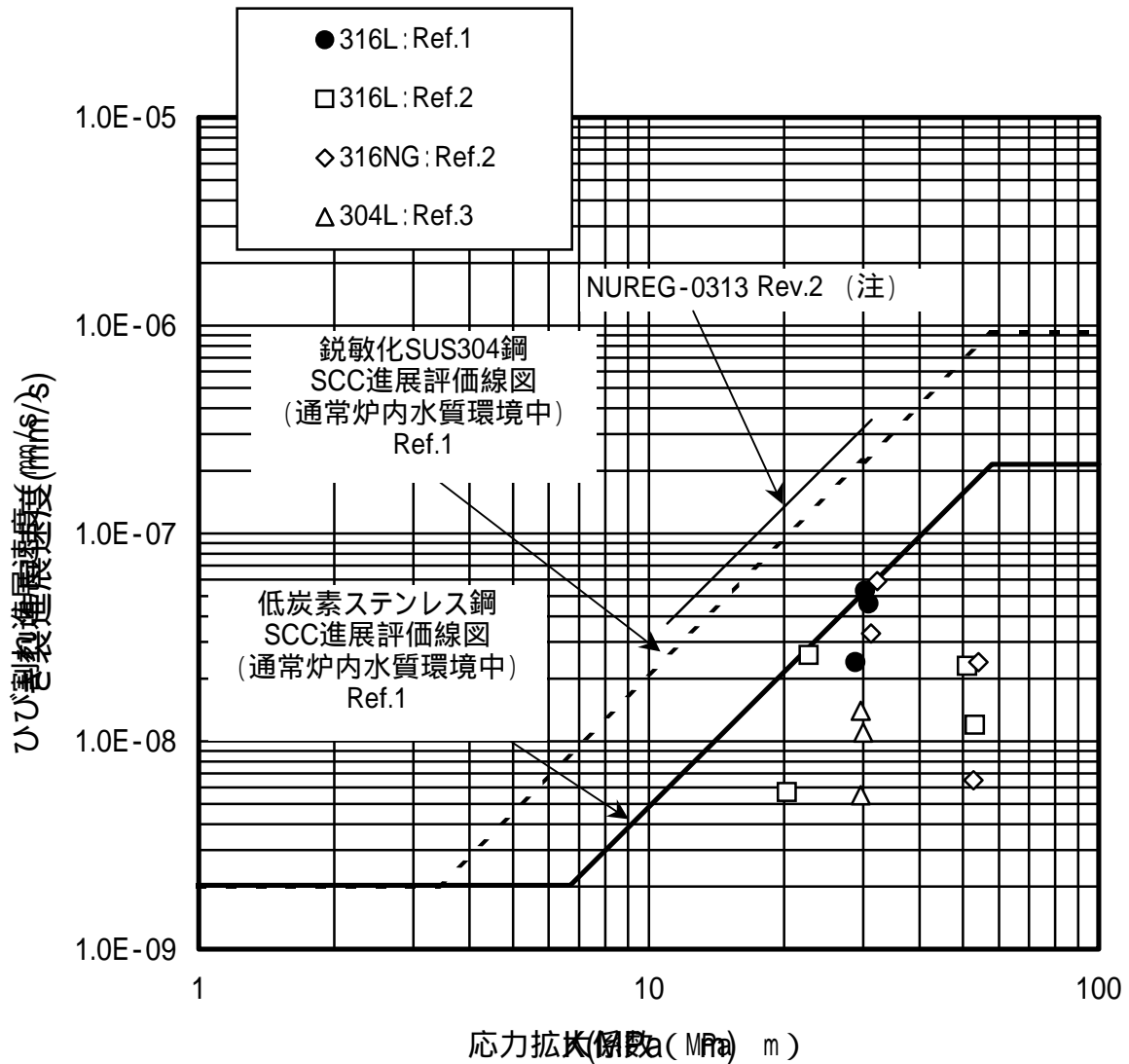


図2 低炭素ステンレス鋼の SCC 進展速度線図

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 2 中の実線) を式に表すと以下のとおり。

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

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の負荷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)。

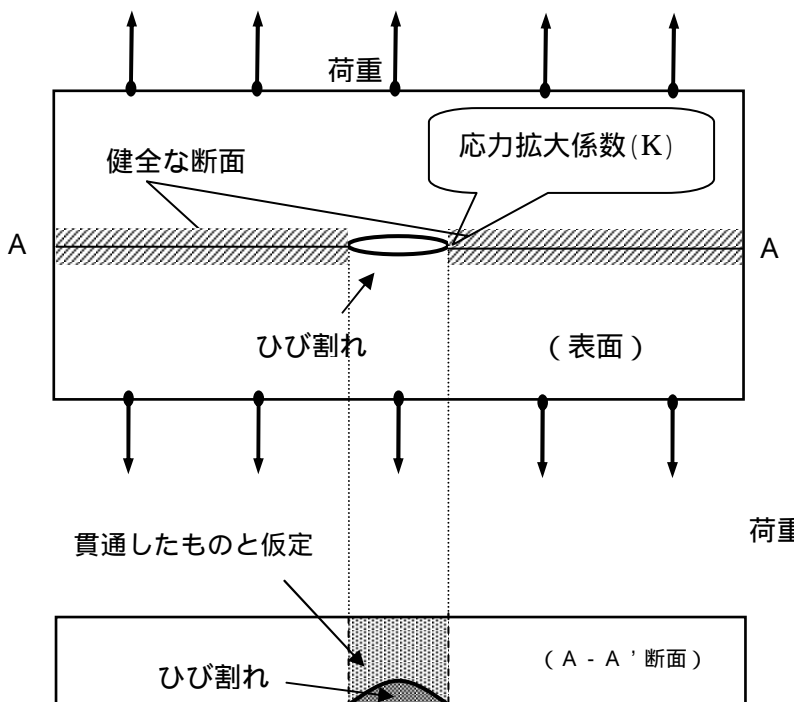


図1 ひび割れと破断の関係

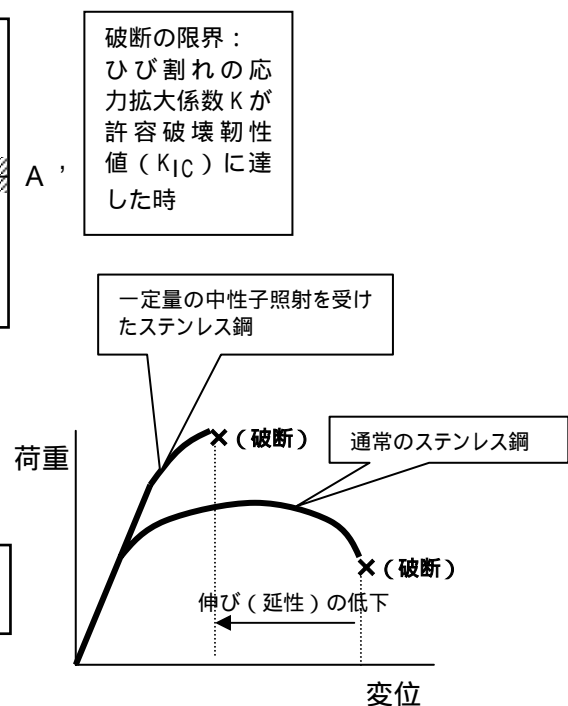
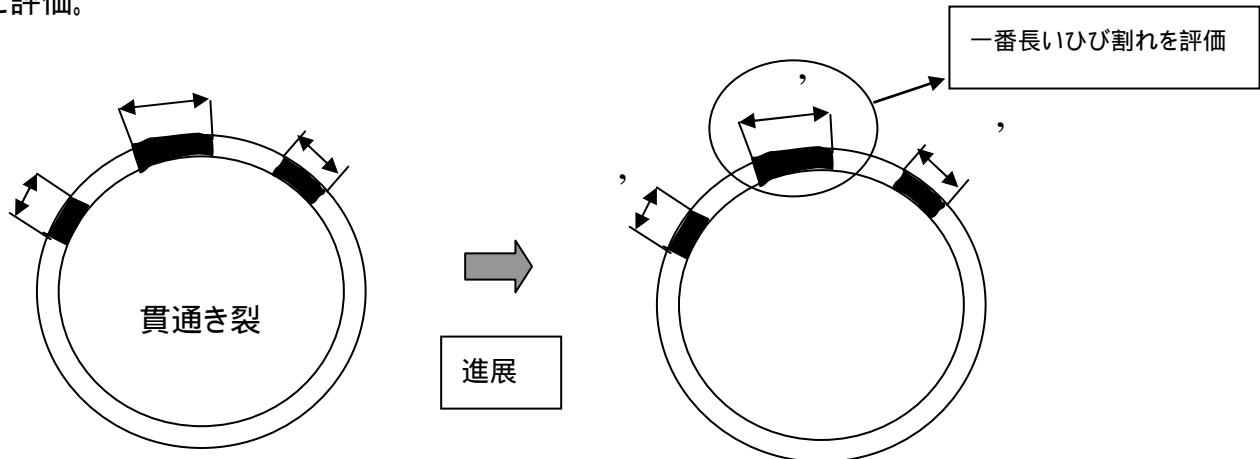


図2 一定量の中性子照射を受けたステンレス鋼の変形

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 $\cdot\text{m}$ (Ref.1) ($3.0 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 < \text{中性子照射量}$)
 43.2MPa $\cdot\text{m}$ (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とこれに対する当院の見解

(1) 東京電力(株)による健全性評価手法について

溶接近傍のひび割れについて

当院としては、炉心シュラウドの溶接線近傍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、ひび割れを軸方向及び周方向に分けて評価していることは妥当であると考えます。

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、考えられる最も厳しい荷重として地震(S1¹⁴又はS2¹⁵)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ます。

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。

溶接線より乖離した部位のひび割れについて

) 溶接線から離れた浅いひび割れ

東京電力(株)は、溶接線から離れた浅いひび割れに関しては、UTの検出限界に満たないほど浅いため、これによる残存面積の減少は考慮する必要が無く、さらに残留応力がごく表層部に留まるため、深さ方向の進展性がないと評価した。当院としては、同電力が、以上の点を踏まえ、これらひび割れは炉心シュラウドの構造強度には影響を及ぼさないと評価したことは妥当であると考えます。(溶接線から離れた浅いひび割れに係る健全性評価について：参考資料5-1)

) 溶接線から離れた比較的深いひび割れについて

H3又はH4溶接線から離れた比較的深いひび割れについて、東京電力(株)は、仮設物が存在したと思われる範囲(H3溶接線内面下500mm、H4溶接線内面上下500mm)を全周点検し、測定されたひび割れ長さに板厚分のマージンを加え、さらに近傍の溶接線に投影して、溶接線近傍のひび割れを併せて評価を行った。当院としては、同電力の評価手法は十分保守性を有しており妥当であると考えます。

また、点検を実施しなかった他の胴部(上部胴、下部胴及び中間部胴下方)に

¹⁴ 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。

¹⁵ 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。

も製造時に仮設物が取り付けられていたと考えられることから、東京電力(株)が保守的に仮設物の撤去跡には全てひび割れが発生していると仮定し、その中で強度に及ぼす影響が荷重条件上、最も厳しい箇所(H7)において健全性を確認したことは妥当であると考え。(仮設物跡に発生したひび割れに係る健全性評価について：参考資料5-2)

(2) 東京電力(株)による健全性評価の評価について

溶接部近傍のひび割れ及び溶接線から乖離した比較的深いひび割れについて

東京電力(株)は、福島第二2号機の間中部リングと中部部胴の溶接線(H3)近傍に発生したひび割れ、中部部胴溶接線(H4)近傍に発生したひび割れ及び溶接線から乖離した比較的深いひび割れに関し部分貫通モデルにより、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H3溶接線で $2.2 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 、H4溶接線で $2.9 \times 10^5 \text{ mm}^2$ と評価している。(福島第二2号機炉心シュラウドの健全性評価：参考資料5-3参照)

次に、現状の残存面積を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、H3溶接線で $7.9 \times 10^5 \text{ mm}^2$ (必要残存面積の約3.5倍)、H4溶接線で $6.2 \times 10^5 \text{ mm}^2$ (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、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、H3溶接線近傍のひび割れはSUS316L等低炭素ステンレス鋼の速度線図の上限値を、H4溶接線近傍のひび割れは5年後の中性子照射量が $5.0 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ を超えると推定されるため鋭敏化SUS304鋼の上限値をそれぞれ用いて、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H3溶接線で $7.8 \times 10^5 \text{ mm}^2$ (必要残存面積の約3.5倍)、H4溶接線で $5.0 \times 10^5 \text{ mm}^2$ (必要残存面積の約1.6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。なお、溶接線から乖離した比較的深いひび割れについては、仮設物の残留応力が部分的にしか存在しないため、周方向へは進展せず、現状のまま5年後も存在するとして残存面積の評価に用いている。

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ている。(軸方向のひび割れに対する評価について：参考資料5-4参照)

当院としては、溶接部近傍のひび割れ及び溶接線から乖離した比較的深いひび割れについて現状及び5年後の残存面積を評価し十分な構造強度を有するとして東京電力(株)の評価は妥当であると考え。

破壊力学的評価の結果

福島第二2号機のH4溶接線は、5年後に想定される中性子照射量が $6.1 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ 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1.52mは、許容されるひび割れ長さ6.32mを十分下回っており、5年後においても健全性が

確保されると評価している。

当院としては、東京電力(株)の破壊力学的手法を用いた評価の結果は妥当であると考える。

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¹⁶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、同社は念のため万ー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。

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¹⁷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。(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：参考資料5 - 5参照)

)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。

)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、LOCA¹⁸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程度で十分な余裕がある。

当院としては、万ールースパーツ及びバイパスフローが発生したと仮定した場合の東京電力(株)の評価結果は妥当であると考える。

¹⁶ 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。

¹⁷ 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。

¹⁸ LOCA：Loss of Coolant Accident 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。

溶接線から離れた浅いひび割れに係る健全性評価について

溶接線から離れた浅い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。

福島第二2号機の炉心シュラウドは、製造過程において外観を向上させるために研磨ディスクにより全面にわたる表面仕上げを実施した。溶接線から離れた浅いひび割れは、この研磨ディスクによる加工にともない発生した引張応力により生じたと考えられる。

研磨ディスク施工により材料にどれだけの引張応力が生じるかを調査するためモックアップ試験を実施した。その結果、表面仕上げに用いた研磨ディスク施工は、場合によっては、母材及び溶接金属のごく表層に1,000MPa程度の引張残留応力が生じ得ることを確認した。ただし、この残留応力はごく表層のみに発生し、少し内部に入ると急減し試験では表面から1mm程度で応力がなくなった。これにより、ひび割れの深さが超音波探傷試験の測定限界以下の極めて浅いものであったことが説明できる。また、このひび割れは残留応力がごく表層部に留まることから、深さ方向にはほとんど進展しないと考えられる。

従って、このひび割れによる炉心シュラウドの残存面積の減少は考慮する必要がない程度のものであり、また、ひび割れの深さ方向の進展性がないと考えられることからシュラウドの構造強度に影響を及ぼすものではないと評価される。

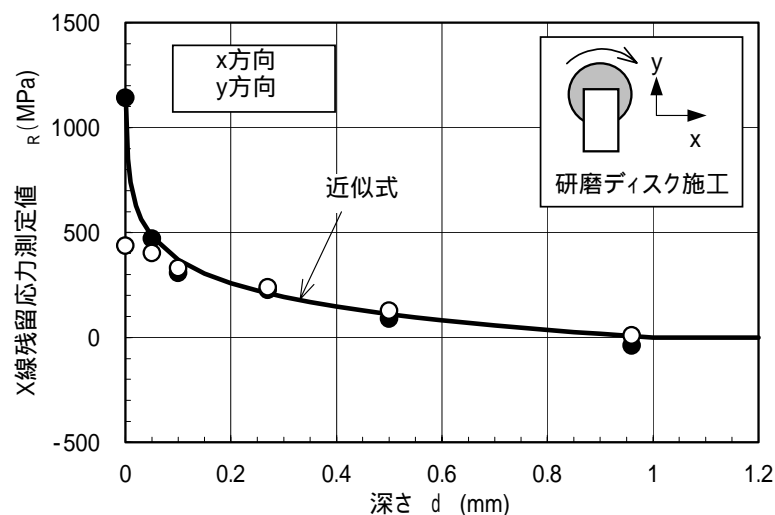


図 研磨ディスク施工後の残留応力
(深さ方向分布)

仮設物跡に発生したひび割れに係る健全性評価について

炉心シュラウドの仮設物とは、製造時に変形を防止するため、炉心シュラウドの内側溶接線から 300 mm 程度離れた位置に等間隔で取り付ける拘束棒を固定する治具や、シュラウドを吊り上げ時に使用するために、炉心シュラウド外側の溶接線から 300 mm 程度離れた位置に取り付けられる吊り具のことである。これらは、すみ肉溶接によりシュラウドに一時的にとりつけられるもので、炉心シュラウドが原子炉圧力容器に設置されるまでに、全て取り除かれる。今回、溶接部から乖離した部位に確認されたひび割れのうち、深いものはこの仮設物を取り除いた跡に発生したものである。こ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である。

1．ひび割れの状況

ポートサンプル調査の結果、溶接金属の痕を確認した。従って、このひび割れは研磨ディスクによる表面硬化層から発生したひび割れが、仮設物を溶接した際の残留応力によって深さ方向に進展したものと考える。

2．ひび割れの進展性について

仮設物取り付けによる残留応力が存在することから、ある程度の進展性を有するものと考えられる。しかし、周方向及び軸方向については、残留応力が溶接部から数十 mm 程度離れると急激に下がる(図 1)ことから、ひび割れの進展は停留するものと考えられる。また、板厚方向については、アライナブラケット等のすみ肉溶接部に発生したひび割れと同様、ある深さで残留応力は圧縮応力となるため、ひび割れが深さ方向へ進展する度合いは小さくなるものと考えられる。

3．シュラウド健全性評価

仮設物跡に発生したひび割れがシュラウドの健全性に与える影響について、以下の 2 点を検討した。

H 3 及び H 4 から乖離した部分に確認されたひび割れについて
未点検箇所中存在するひび割れについて

(1) H 3 及び H 4 から乖離した部分に確認されたひび割れについて

仮設物跡に発生したひび割れは、前述の通り、周方向、軸方向共に有意な進展性はない。また、溶接線近傍に発生したひび割れも、これまでの評価で確認されたとおり、溶接止端部から数十 mm 程度で軸方向残留応力が支配的となり(図 2)ひび割れは周方向に(溶接線に沿って)進展していき、軸方向に進展することは考えにくい。このことから、ある程度溶接部から離れた場所にあるひび割れと溶接部近傍のひび割れが合体することはないと考えるが、本件では、保守的に溶接線近傍のひび割れと同一位置に存在するとし、これまで胴部に発生したものと同様に計測されたひび割れ長さに板厚を 2 倍した長さを加えて評価を実施した。

(2) 未点検箇所中存在するひび割れについて

炉心シュラウドの内側に設置された仮設物は、H 3 及び H 4 溶接線付近の他に

未点検部位（H 1 , H 2 , H 6 a , H 6 b , H 7 溶接線付近）にも取り付けられた可能性がある（図 3）。このため、東京電力㈱は炉心シュラウドの構造強度に及ぼす影響が荷重条件上もっとも厳しいH 7 溶接線上に仮設物によるひび割れがあったとした場合の構造健全性への影響を以下の通り評価した。

仮設物の評価条件

今回確認された仮設物跡に発生したひび割れの長さは、10～97 mmであり、それらは単発的に存在し周方向への進展性がないことが分かっている。

製造時にシュラウドを取り扱う過程で設置された仮設物の跡と想定されるものは、H 3 とH 4 溶接線付近でそれぞれ3～4 箇所確認されたことから、未点検箇所においては保守的に同一周に8 箇所存在すると仮定する。

以上のことから、H 7 溶接線において仮設物によるひび割れが、 $8 \times (97 + 50.8 \times 2)$ （H 3 , H 4 溶接線付近の最大値+板厚の2 倍）= 1,589（mm）存在すると仮定する。

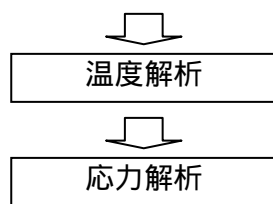
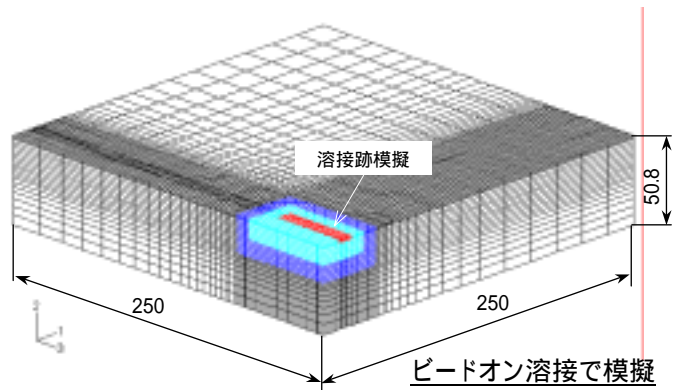
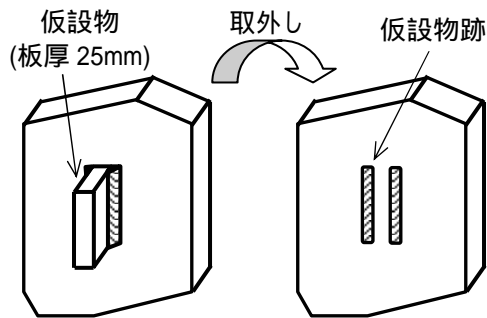
評価結果

福島第二 2 号機の地震等による荷重条件は、同型の炉心シュラウドを有する柏崎刈羽 2 号機のそれよりも小さいため、福島第二 2 号機よりも厳しい評価がなされている柏崎刈羽 2 号機のH 7 溶接線における必要最小面積の評価結果を踏まえ評価を行った。

柏崎刈羽 2 号機では、H7 溶接線の全周長さの約 70%（全周長さ 約 16,000（mm） \times 70（%）= 約 11,000（mm））に相当する円周上に等間隔に存在する貫通欠陥があっても構造健全性が保たれることが評価された。

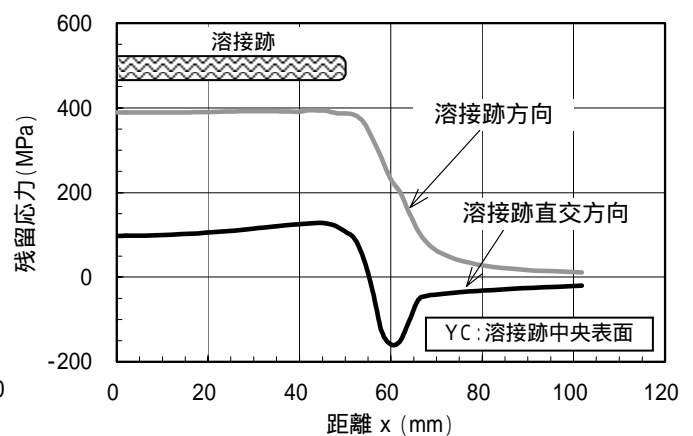
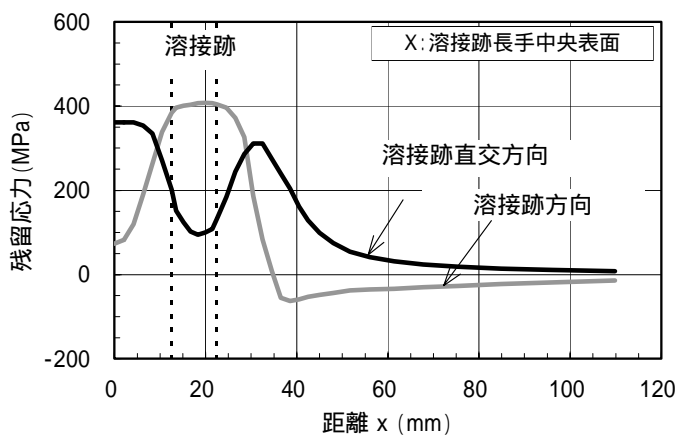
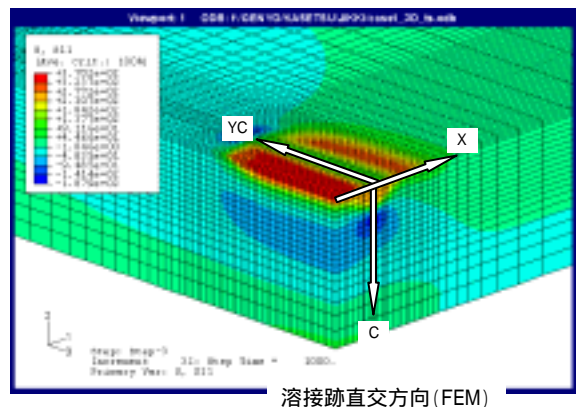
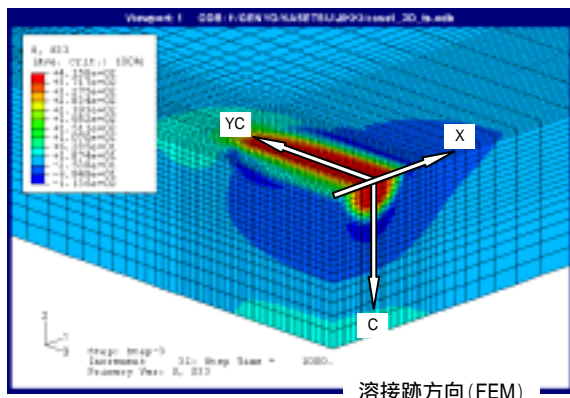
一方、福島第二 2 号機で想定したH 7 溶接線の仮設物によるひび割れ長さは 1,589 mmであり、上述の 11,000 mmに比べ十分小さく、また、ひび割れの部位が円周上に等間隔に存在すると推定されることから、これらのひび割れがあった場合においても炉心シュラウドの構造健全性に及ぼす影響はないと判断される。

3次元 FEM 解析 1/4 モデル



健全性評価小委員会*で認められた溶接残留応力解析に用いられた材料定数を用いて解析した。

*原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会



(a) 表面の残留応力分布(FEM)

図 1 仮設物除去部の有限要素法による残留応力解析

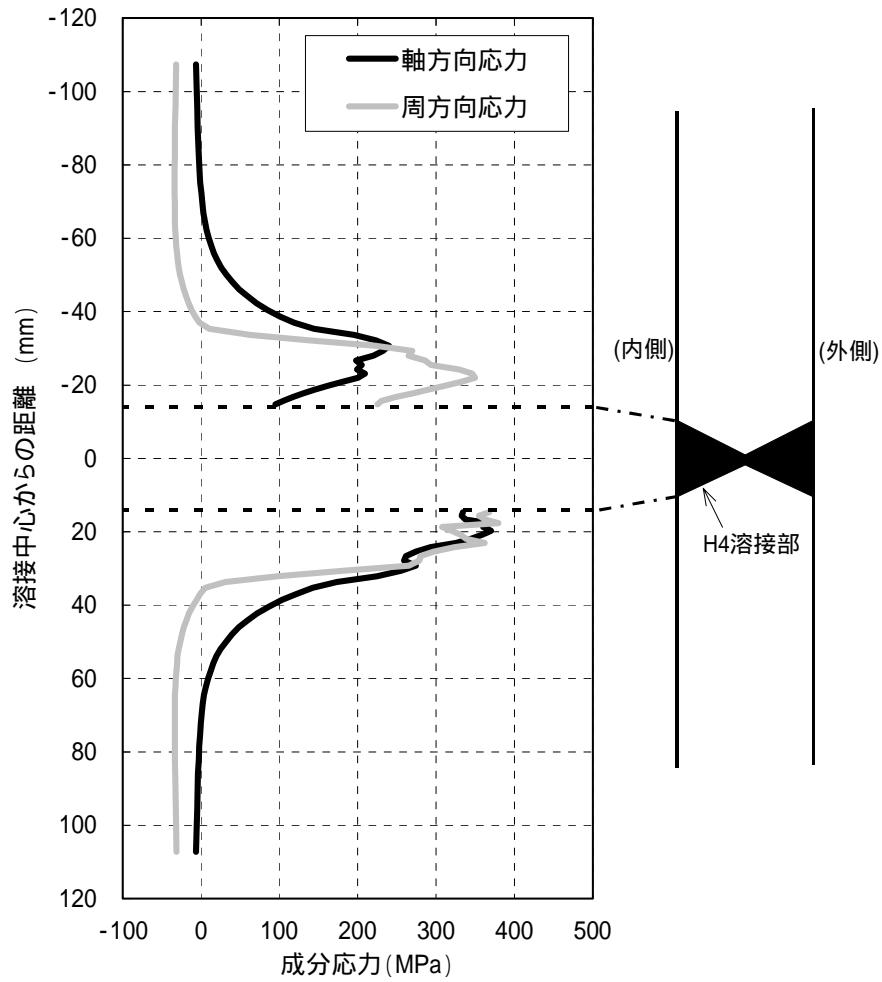


図2 福島第二2号機炉心シュラウド中間胴 H4 溶接部内側表面の周・軸方向残留応力分布

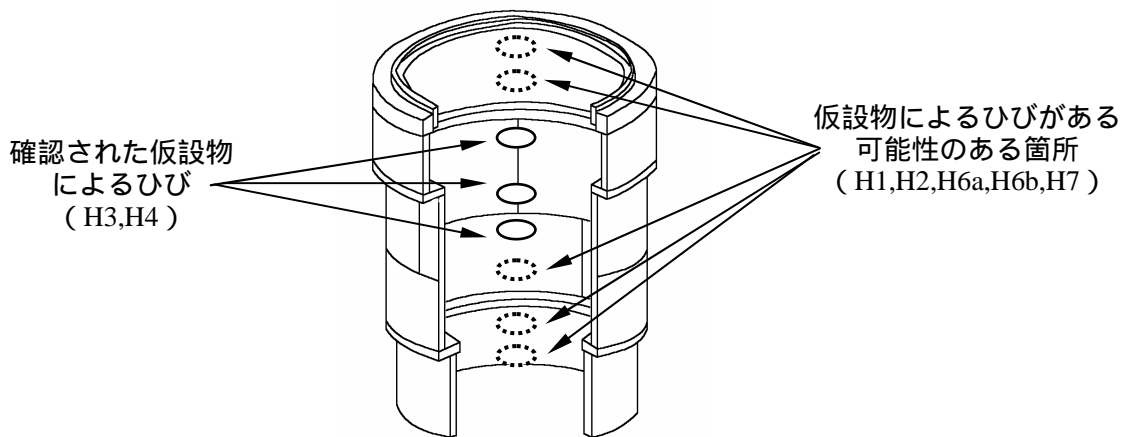


図 - 3 : 仮設物の取付位置例

福島第二2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	903	262	2,220	3,300
	運転状態 , +S2	0.1	903	262	3,330	4,950
H4	運転状態 , +S1	0.1	1,041	303	2,130	7,400
	運転状態 , +S2	0.1	1,041	303	3,195	11,100

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30mm及び20mm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 (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)
H3	8.3×10^5 (100%)	7.9×10^5 (95%) < 約 3.5 倍 >	7.8×10^5 (93%) < 約 3.5 倍 >	2.2×10^5 (27%)
H4	8.3×10^5 (100%)	6.2×10^5 (74%) < 約 2.1 倍 >	5.0×10^5 (60%) < 約 1.7 倍 >	2.9×10^5 (35%)

(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 (m)	現在のひび割れ長さ (m)	5年後の想定ひび割れ長さ (m)
6.32	0.58	1.52

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。

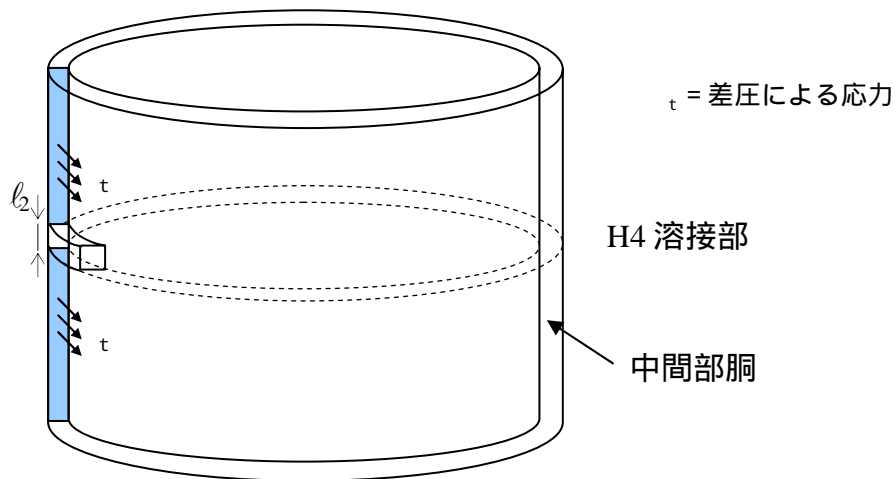


図 軸方向ひび割れ評価の概念（中間部胴の例）

（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（H3, 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



図-1 H4 近傍のひび割れ例
（柏崎刈羽 1 号機 H4）

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マ*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。

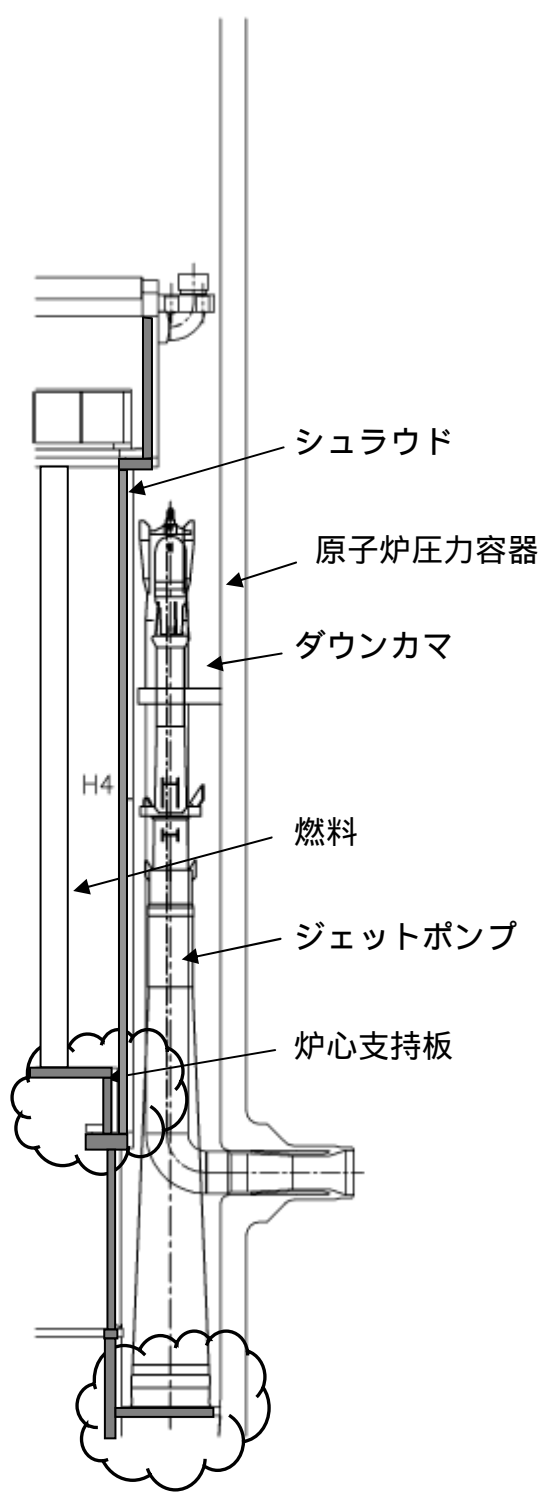
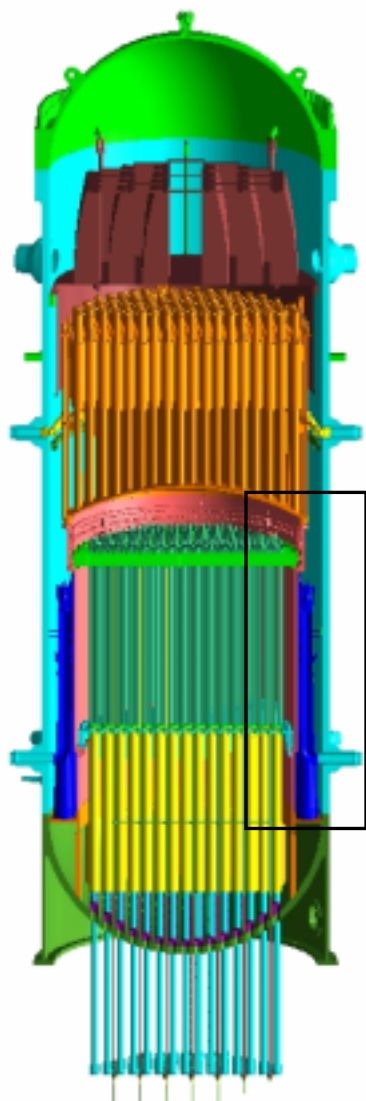
貫通部からの流量が増加すると、炉心バイパス流量が減少する。これにより、炉心バイパス部にボイドが発生し、原子炉出力の低下が生じる。

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、炉心シュラウドに開口部面積 $2.4 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 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 炉内断面