

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK審-24 改1
提出年月日	平成30年7月5日

東海第二発電所 劣化状況評価 (照射誘起型応力腐食割れ(追加評価))

平成30年7月5日

本資料のうち、枠囲みの範囲は、営業秘密
又は防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所 審査会合における指摘事項の回答一覧表

No.	指摘事項	回答
0581-2 劣化状況評価 (平成30年6月5日 第581回審査会合)	照射誘起型応力腐食割れについて、追加評価を踏まえた保守管理に関する方針を策定すること。	平成30年●月●日 P15 ~ P16

目次

1. 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価(追加評価)	4
2. まとめ	16

1. 炉内構造物の技術評価 – 発生及び進展を考慮した評価(追加評価)

炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価(追加評価)

	既評価	追加評価
破壊評価手法	線形破壊力学評価法	線形破壊力学評価法, 極限荷重評価法*1
亀裂進展速度等	鋭敏化SUS304鋼の上限値 $9.2 \times 10^{-7} \text{mm/s} = 30 \text{mm/年}$ (板厚方向及び周方向) ⇒貫通亀裂の周方向進展	同左 ただし, 板厚方向の進展については, 溶接残留 応力解析の結果から得られた 応力拡大係数が ゼロとなる*2 深さ以上には進展しないものとする。 ⇒半楕円亀裂の周方向進展 周方向亀裂の進展継続が想定される場合 ⇒全周亀裂を想定した評価*1
破壊評価に 考慮する荷重	差圧, 自重及び地震荷重	差圧, 自重及び地震荷重に加え, 溶接残留応力 を考慮。
破壊靱性値	維持規格に示される値	維持規格に従い適切に定める値*1
評価結果	地震時に破壊が生じない期間 は, 運転期間で11.81年, 安全 率を考慮した場合でも運転期 間5.23年と評価	今回, 評価結果を説明

*1 平成30年6月5日第581回審査会合以降に検討した事項

*2 H4周溶接継手は継手形状がX開先であり, 板厚内部で溶接残留応力が圧縮となって応力拡大係数がゼロとなり, 亀裂進展速度がゼロとなることが予想されるため, 亀裂進展としてはより現実的な評価となる。

1. 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価(追加評価)

(1) 健全性評価

1) 溶接残留応力

評価に用いる応力分布*1	溶接残留応力[MPa]*2
内側溶接部の溶接止端部及び熱影響部	最大 約 440

*1: 炉心シュラウドH4周溶接継手の外面には、ウォータージェットピーニングを施工していることから、追加評価においては、内側溶接部の残留応力分布を用いた。

*2: 日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格－2008」の添付-15に従い、中性子照射による緩和の影響を考慮した値。緩和率の算出には、原子力安全基盤機構「平成20年度 照射誘起応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書」に示される緩和率の基本式を用いた。

2) 破壊靱性値の検討(1/3)

● 維持規格に示される破壊靱性値: $43.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

- ・ 高い中性子照射を受けた試験片のデータにより設定された値
- ・ 策定当時の限られた知見を基に設定

↓
高い保守性

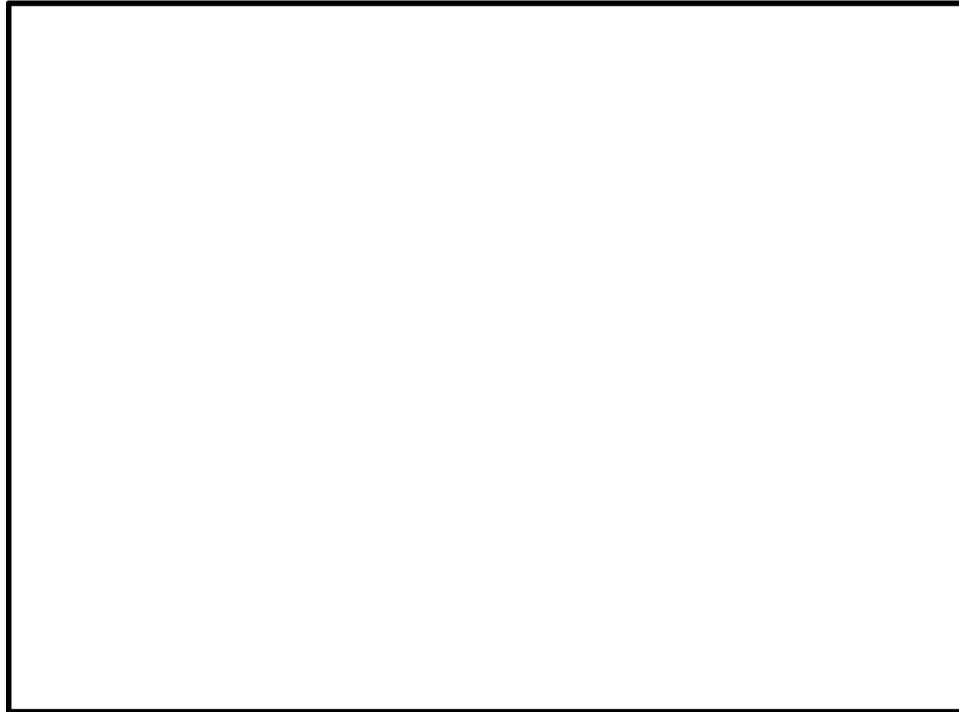
● 維持規格に従い、技術的根拠に基づき適切な破壊靱性値を設定

- ・ 共同研究の成果に基づく破壊靱性評価式を使用
- ・ 中性子照射の依存性を考慮した適切な破壊靱性値を設定

1. 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価(追加評価)

2) 破壊靱性値の検討(2/3)

<共同研究における破壊靱性評価式の策定>



中性子照射量に応じた破壊靱性値の算出が可能

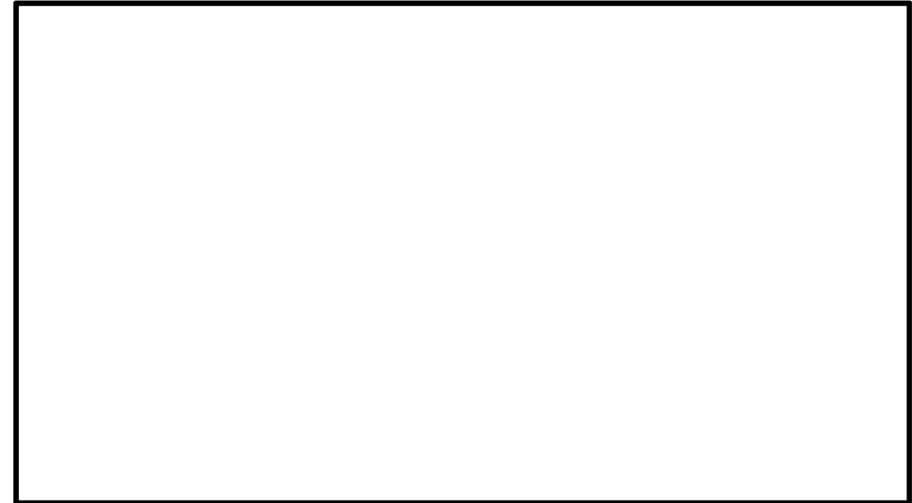


図 収集された破壊靱性値の試験データ群



図 参考としたNRC曲線

1. 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価(追加評価)

2) 破壊靱性値の検討(3/3)

<破壊靱性評価式①>

	<ul style="list-style-type: none">● 全データ点の下限值を包絡した評価式● <u>追加評価では本評価式による、運転開始後60年時点の破壊靱性値</u> <input type="text"/> <u>を用いて評価する</u>
--	--

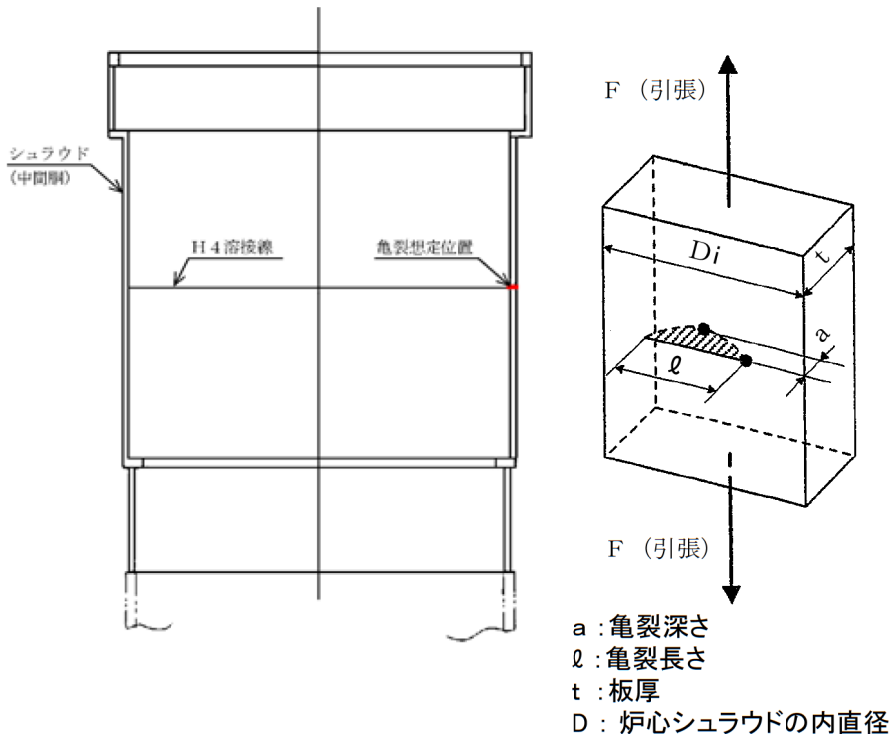
<破壊靱性評価式②>

	<ul style="list-style-type: none">● 硫黄成分の破壊靱性値への影響を考慮した評価式<ul style="list-style-type: none">・ 実機材の硫黄成分量：<input type="text"/> に適用可能・ 東海第二の炉心シュラウドに適用可能● 実機材適用に際してより現実的な破壊靱性値となる
--	--

1. 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価(追加評価)

3) 半楕円亀裂を想定した評価

<亀裂想定位置及び評価モデル>



炉心シユラウドH4周溶接継手の内表面に初期亀裂を想定

深さ $a_0 = 1.0$ [mm]

長さ $l_0 = 10.0$ [mm]

<応力拡大係数の算出>

ガイドライン*の評価手法と同様に、Wangの影響関数法に基づく式を用いて応力拡大係数を算出

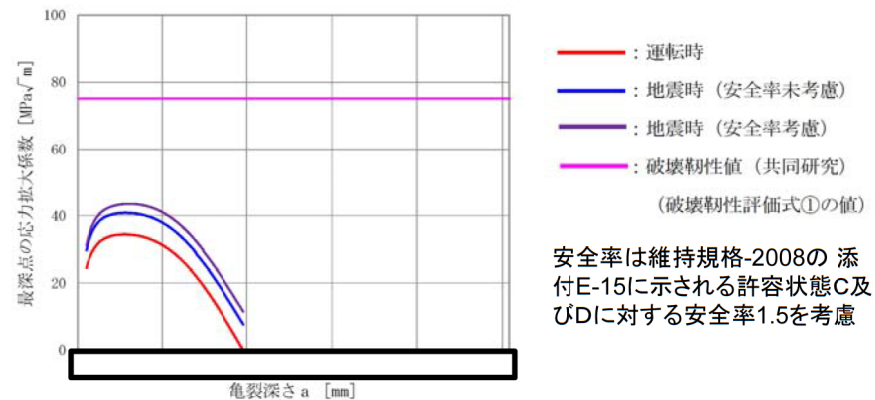
$$K = \left(\sum_{n=0}^4 S_n S_{in} \right) \times \sqrt{\pi a}$$

K : 応力拡大係数[MPa√m]

S_n : 亀裂深さ方向にn次の応力分布 $\sigma(x)$ が作用する場合の無次元化応力拡大係数

S_{in} : 亀裂面に垂直(炉心シユラウド軸方向)に作用する応力分布のn次の係数[MPa]

a : 亀裂深さ[m]



半楕円亀裂を想定した評価による応力拡大係数(最深点)

最深点は、安全率を考慮した応力拡大係数が運転開始後60年時点の破壊靱性値を下回ることを確認し、板厚中央近傍でゼロとなることを確認した。

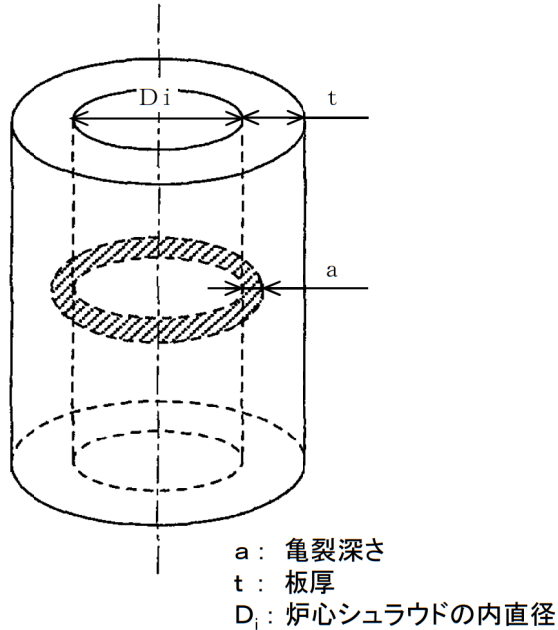
一方、表面点は溶接残留応力により応力拡大係数が大きな値となり、周方向への亀裂進展が想定されるため、保守的に内表面全周亀裂を想定した評価を実施する。

* : 原子力安全推進協会「炉内構造物点検評価ガイドライン[炉心シユラウド](第5版)」

1. 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価(追加評価)

4) 内表面全周亀裂を想定した評価(1/2)

<亀裂想定位置及び評価モデル>



保守的に炉心シュラウドH4周溶接継手の内表面全周に初期亀裂を想定
 深さ $a_0 = 1.0$ [mm]

<応力拡大係数の算出>

日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格-2012」の添付-5に基づく式を用いて応力拡大係数を算出

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

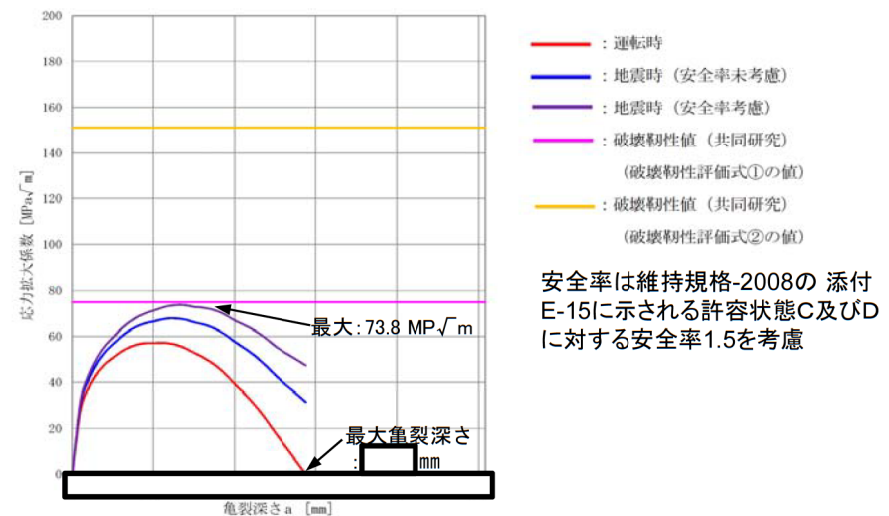
a : 亀裂深さ[m]

t : 炉心シュラウドの板厚

$\sigma_0 \sim \sigma_p$: 板厚方向の応力分布を四次多項式(板厚で規格化)で与えたときの係数

ただし, σ_p は円筒内表面の欠陥に作用する膜応力

$G_0 \sim G_4$: 管厚比(内半径/板厚)及び欠陥深さ(亀裂深さ/板厚)から決定される補正係数



内面全周亀裂を想定した評価による応力拡大係数

応力拡大係数は、安全率を考慮した場合でも運転開始後60年時点の破壊靱性値を下回ることを確認した。

また、実機炉心シュラウドの硫黄成分量を考慮した運転開始後60年時点の破壊靱性値を踏まえると、更なる保守性が確認できる。

1. 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価(追加評価)

4) 内表面全周亀裂を想定した評価(2/2)

<極限荷重評価法による評価>

内面全周亀裂の想定及び破壊靱性値の検討を踏まえ、炉心シュラウドの板厚(□ mm)に対して、最大亀裂深さ(□ mm)を考慮した、炉心シュラウド周溶接継手の残存部に対する極限荷重評価を実施する。

正味応力 [MPa]	流動応力 [MPa] *
93	172

* :維持規格-2008の 添付E-15に示される許容状態C及びD
に対する安全率1.5を考慮



正味応力は、安全率を考慮した流動応力を下回ることから、運転開始後60年時点においても最大亀裂深さを考慮した場合に、炉心シュラウド周溶接継手に破壊が生じないことを確認した。

以上より、既評価のとおり地震時に不安定破壊に至ることがないように設定した頻度で目視点検を実施することにより、破壊を引き起こす亀裂となる前に検知可能であり、技術基準規則に定める基準に適合するものと判断する。

1. 炉内構造物の技術評価－現状保全

(2) 現状保全 (1/4)

① 点検状況 (炉心シュラウド)

表1 維持規格に基づく点検内容

点検対象		点検方法	点検頻度	至近の点検実績	点検結果
炉心シュラウド 周溶接継手H4	内面	MVT-1	運転時間で5～15年	第24回定期検査 (2009年)	良
	外面	MVT-1	運転時間で5～15年	第25回定期検査 (2015年)	良
炉心シュラウド		VT-3	10年	第25回定期検査 (2015年)	良

表2 維持規格に基づく点検に加えて実施する点検内容

点検対象	点検方法	点検頻度	至近の点検実績	点検結果
炉心シュラウド周溶接 継手H4内面	MVT-1	4定期検査毎	第24回定期検査 (2009年)	良

<判定基準>

MVT-1; 表面について、摩耗、き裂、腐食、浸食等の異常がないこと。

VT-3 ; 過度の変形、心合わせ不良、傾き、部品の破損及び脱落がないこと。

1. 炉内構造物の技術評価－現状保全

(2) 現状保全 (2/4)

① 点検状況 (炉心シュラウド) (続き)

炉心シュラウド周溶接継手 H4 MVT-1 点検範囲

内面：全長の 100% (第 24 回定期検査)

外面：全長の 100% (第 25 回定期検査) ジェットポンプを取り外して点検

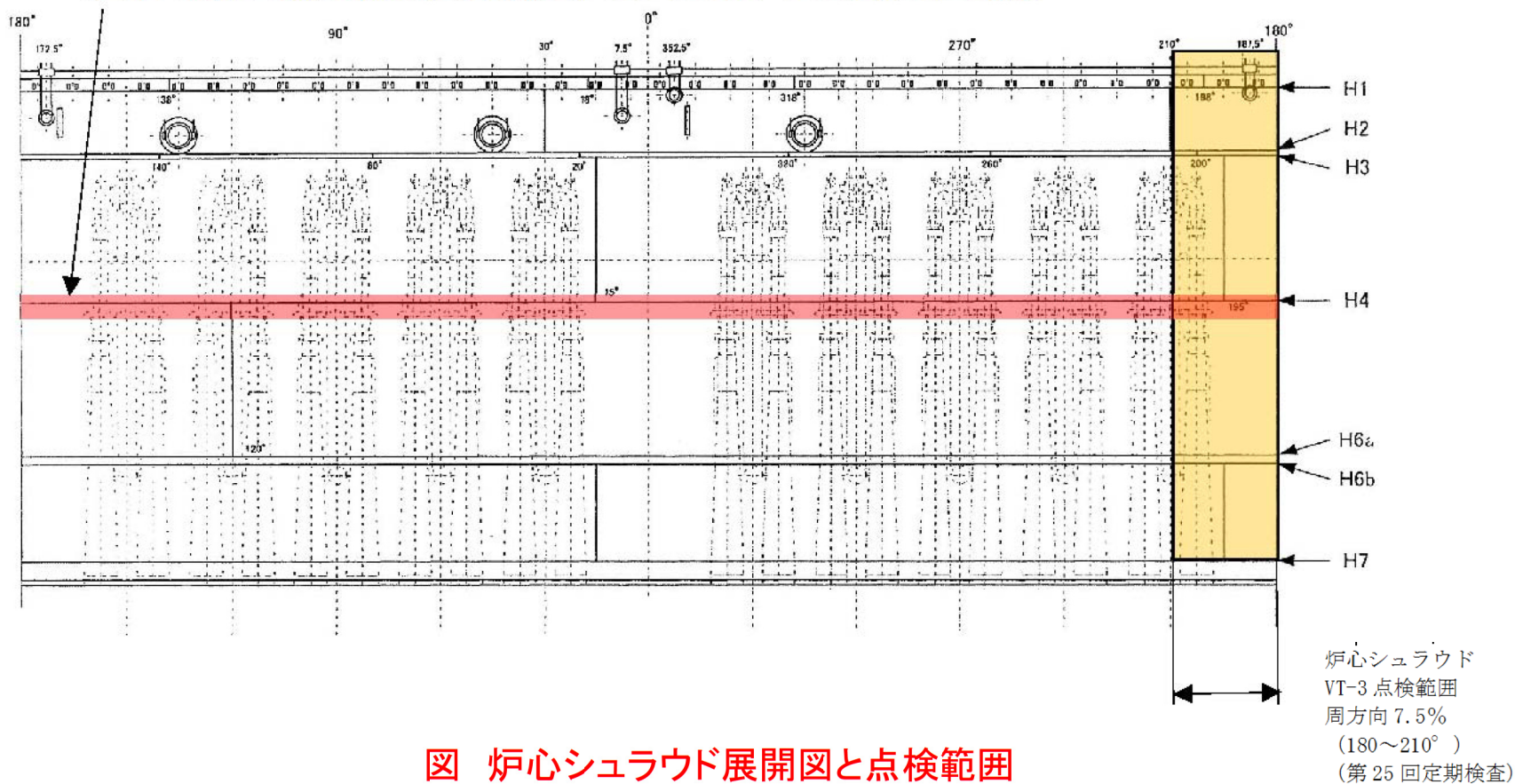


図 炉心シュラウド展開図と点検範囲

1. 炉内構造物の技術評価－現状保全

(2) 現状保全(3/4)

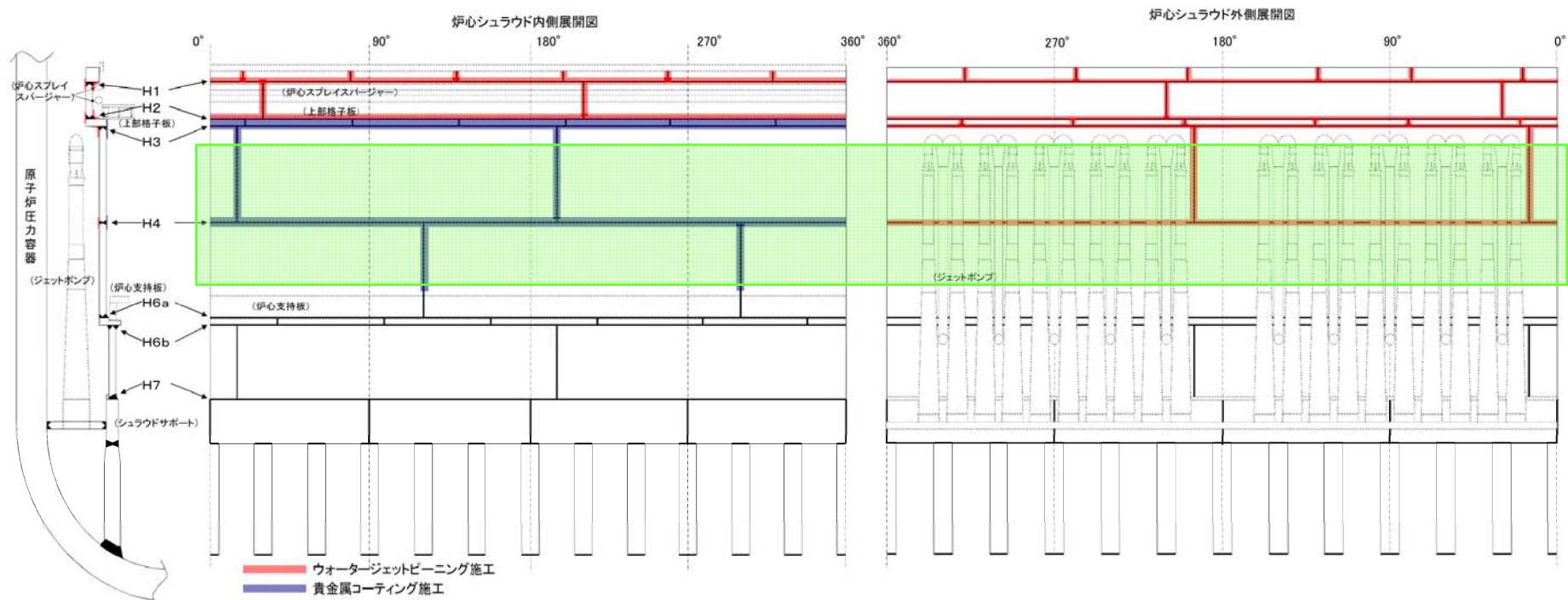
② 応力腐食割れに対する予防保全対策

発生因子	炉心シュラウド
応力	➤ ウォータージェットピーニング施工による溶接残留応力の改善(1999年)
材料	➤ 低炭素ステンレス鋼SUS304Lを使用
環境	➤ 水素注入による腐食電位の低減(1997年1月～) ➤ 貴金属コーティング施工による腐食環境の改善(1999年)

1. 炉内構造物の技術評価－現状保全

(2) 現状保全(4/4)

② 応力腐食割れに対する予防保全対策(続き)



しきい照射量 約 5×10^{24} n/m² [E>1MeV] の照射量を超える範囲

図 炉心シュラウド 応力・環境改善箇所概要図(1999年第17回定期検査)

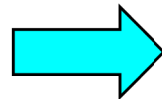
1. 炉内構造物の技術評価－総合評価, 高経年化への対応

(3) 総合評価

炉内構造物	総合評価
炉心シュラウド 中間胴H4周溶接継手 (熱影響部含む)	<u>応力腐食割れの抑制対策を実施しており照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性は小さいものの, 将来にわたって発生することが否定できないため, 照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価を行った。</u> この結果, 地震時に不安定破壊に至ることがないように設定した頻度で目視点検を実施することにより, 破壊を引き起こす亀裂となる前に検知可能であり, 技術基準規則に定める基準に適合するものと判断する。
炉心シュラウド 中間胴の母材部	<u>しきい照射量を超えるものの, 溶接による残留引張応力はなく, 運転中の差圧, 熱, 自重等に起因する引張応力成分が低いことから, 照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はないと評価する。</u>

(4) 高経年化への対応

炉心シュラウドについては, 照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価を踏まえ, 不安定破壊に至ることがないように設定した頻度で目視点検を実施する。



保守管理に関する方針として策定

2. まとめ－審査基準適合性, 保守管理に関する方針として策定する事項

(1) 審査基準適合性

要求事項*1	評価対象機器	技術評価の結果
○健全性評価の結果、評価対象部位において照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性が認められる場合は、照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を前提としても技術基準規則に定める基準に適合すること。	炉心シュラウド 中間胴H4周溶接継手(熱影響部含む)	応力腐食割れ発生の低減対策を実施していることから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性は小さいものの、 <u>将来にわたって発生することが否定できない</u> ため、照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価を行った。この結果、地震時に不安定破壊に至ることがないように設定した頻度で目視点検を実施することにより、破壊を引き起こす亀裂となる前に検知可能であり、技術基準規則に定める基準に適合するものと判断する。
	炉心シュラウド 中間胴の母材部	しきい照射量を超えるものの、運転中の差圧, 熱, 自重等に起因する引張応力成分が低いことから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はないと評価する。

*1: 「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」に規定される延長しようとする期間における要求事項

(2) 保守管理に関する方針として策定する事項

機器名	保守管理に関する方針	実施時期*2
炉心シュラウド	照射誘起型応力腐食割れの発生及び進展を考慮した評価を踏まえ、不安定破壊に至ることがないように設定した頻度で目視点検を実施する。	長期

*2: 実施時期は以下の期限を示す。

2018年11月28日からの5年間を「短期」、2018年11月28日からの10年間を「中長期」、2018年11月28日からの20年間を「長期」とする。