

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17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、評価結果を基に点検頻度を定める場合は、保守管理に関する方針として策定すること。	平成30年7月17日 P13 ～ P14

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	14

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

	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
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	溶接残留応力を考慮し、 <u>板厚方向は、応力拡大係数がゼロとなる*1深さ以上には進展しないものとし周方向亀裂の進展継続を想定</u> <u>➡全周亀裂を想定した評価*2</u>
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、 <u>溶接残留応力を考慮</u>
破壊靱性値	維持規格*3に示される値	<u>維持規格*3に従い適切に定める値*2</u>

*1: 炉心シュラウド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。

*2: 平成30年6月5日第581回審査会合以降に検討した事項

*3: 日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格-2008年版」（以下、「維持規格」という）

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 450

*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: 維持規格の添付E-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 添付E-14に示される破壊靱性値: $43.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($8 \times 10^{24}\text{n/m}^2$ ($E > 1\text{MeV}$)を超える場合)
 - ・ 高い中性子照射を受けた試験片のデータを包絡するよう最小値で設定された値
 - ・ 策定当時の限られた知見を基に設定*3



- 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(最新知見)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

*3: 発電設備技術検査協会「原子力プラント長寿命化技術開発に関する調査報告書(平成3年度)」

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＞

1. 軽水炉環境(中性子照射, 温度), 材料(SUS304系, SUS316系)を考慮し試験データを収集
 - ・ 原子力安全基盤機構「照射誘起型応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書(平成17年度他)」
 - ・ 発電設備技術検査協会「原子力プラント長寿命化技術開発に関する調査報告書(平成3年度)」等

2. NUREG/CR-7027を参考に破壊靱性評価式のモデル式を策定

$$\text{モデル式: } J_{IC} = A + (B - A) * \exp(-C * dpa^D)$$

3. モデル式に基づき, 試験データの全データの下限値を包絡する破壊靱性評価式を策定

中性子照射量に応じた破壊靱性値の算出が可能

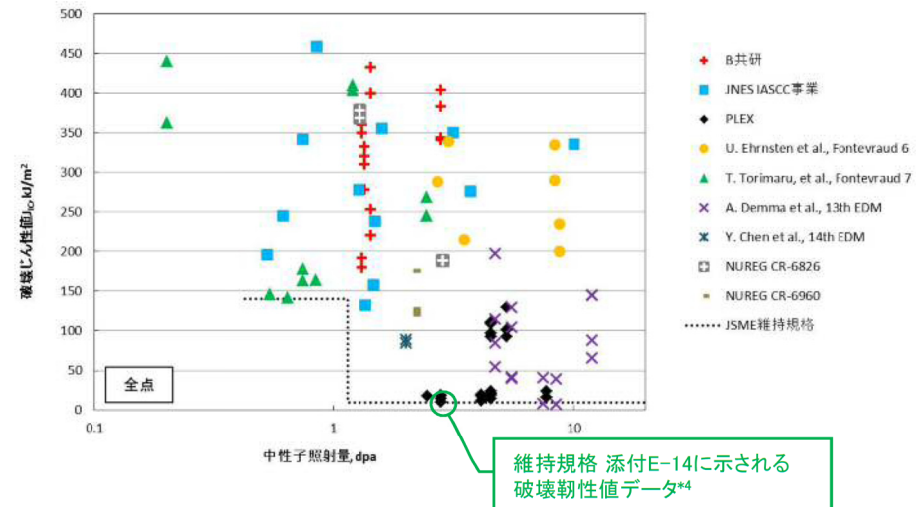


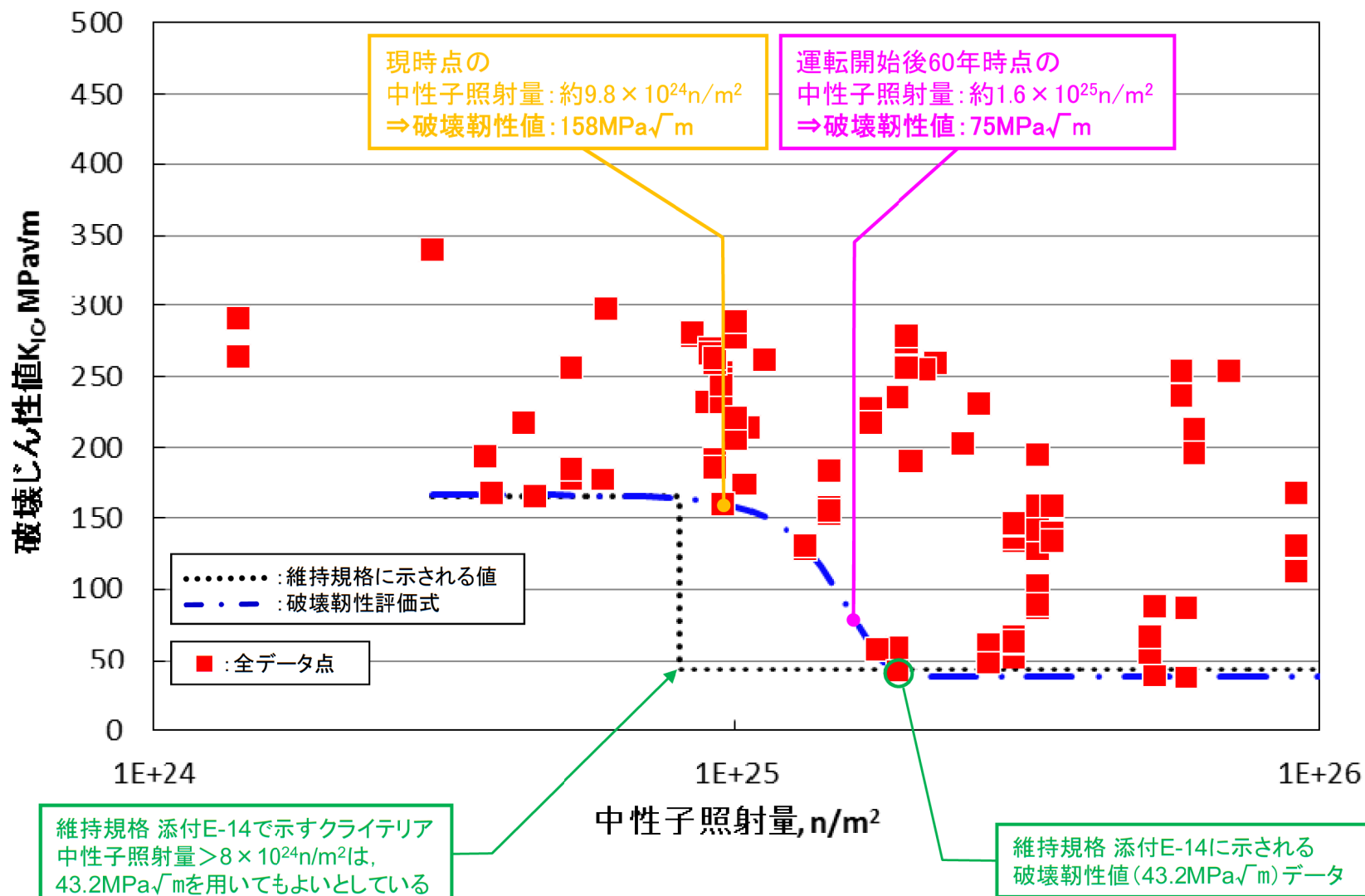
図 収集された破壊靱性値の試験データ群

*4: 発電設備技術検査協会「原子力プラント長寿命化技術開発に関する調査報告書(平成3年度)」

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＞ ● 収集した試験データの全データ点の下限値を包絡した評価式

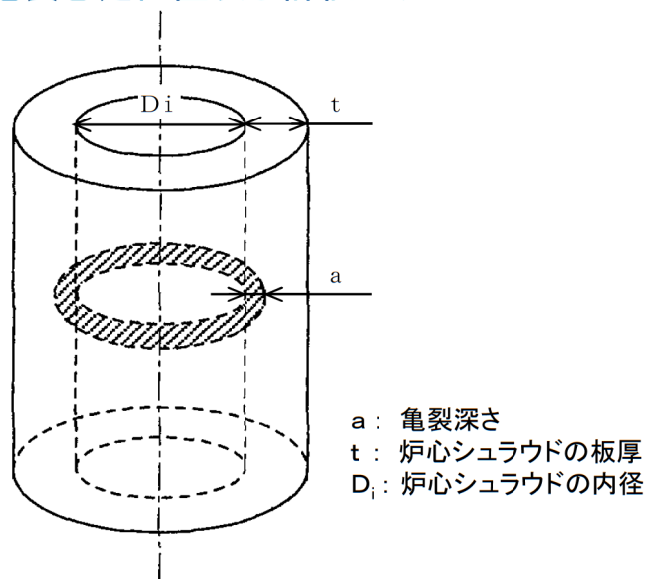


1. 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価(追加評価)

3) 内表面全周亀裂を想定した評価

溶接残留応力を考慮すると、応力拡大係数は板厚中央近傍でゼロとなる見込みであるが、表面は大きな値となり、周方向の亀裂進展が想定されること及び周方向に複数の応力腐食割れの発生を想定し、内表面全周亀裂を想定した評価を実施する。

<亀裂想定位置及び評価モデル>



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年版」の添付-5に基づく式を用いて応力拡大係数を算出

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

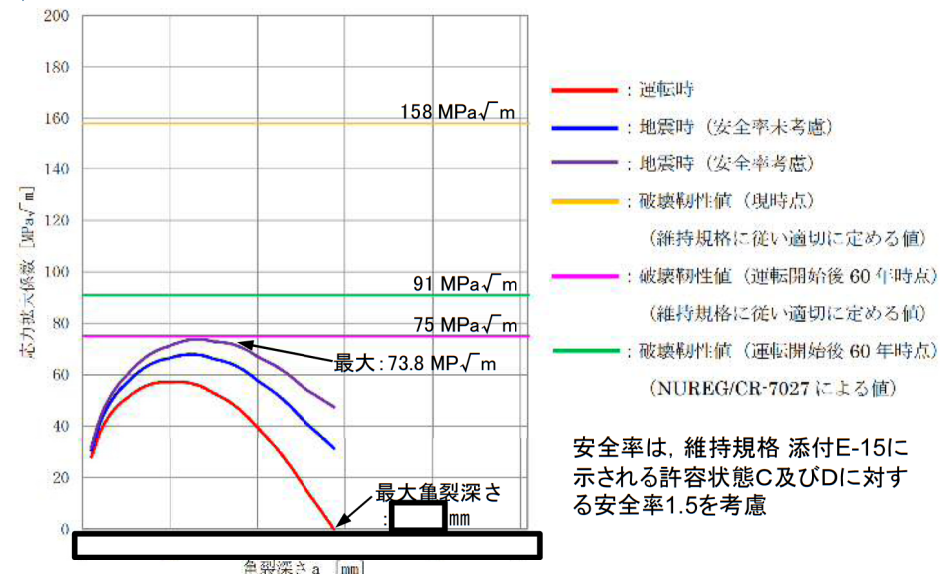
a : 亀裂深さ[m]

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

安全率は、維持規格 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

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。

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

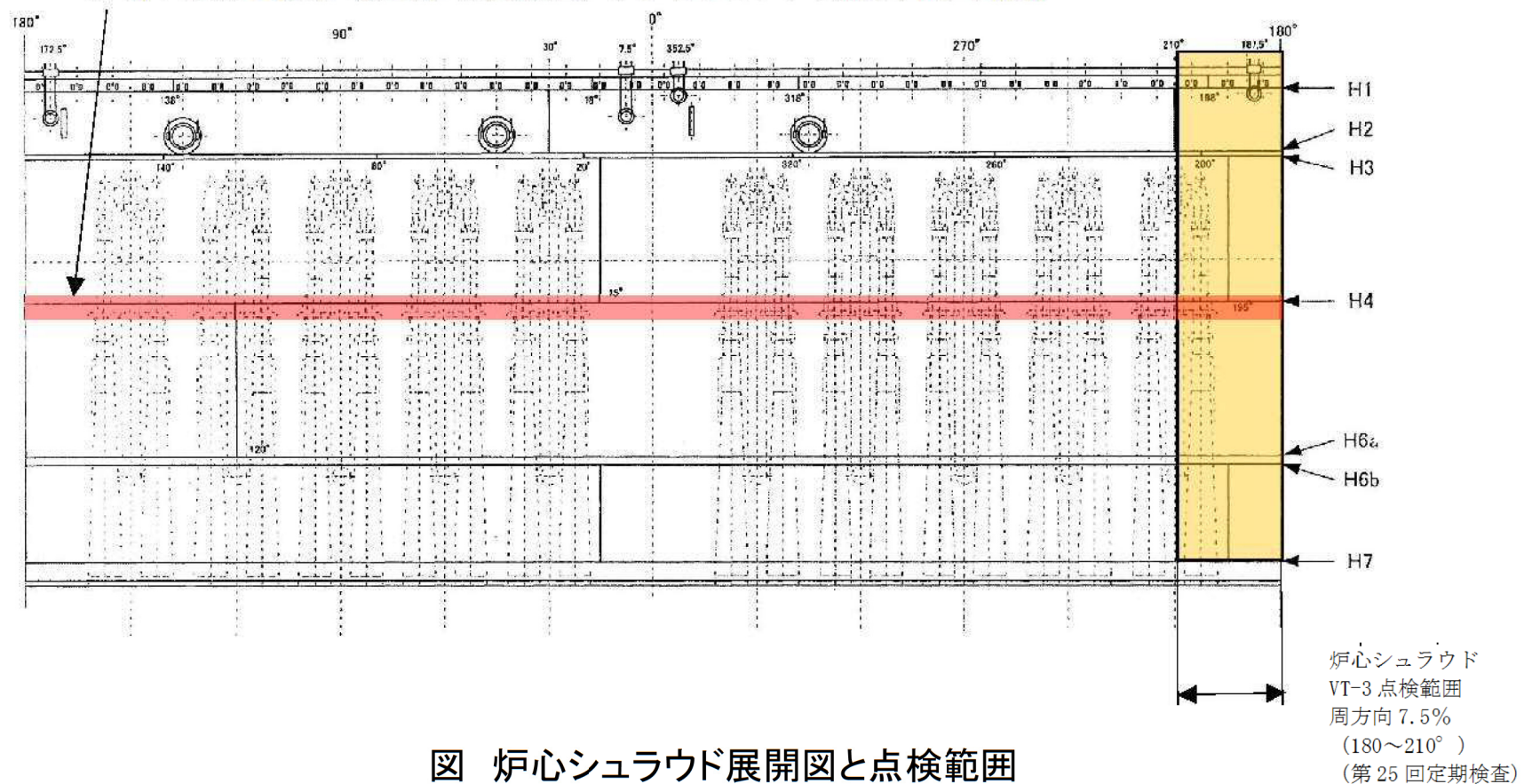


図 炉心シュラウド展開図と点検範囲

1. 炉内構造物の技術評価－現状保全

(2) 現状保全(3／4)

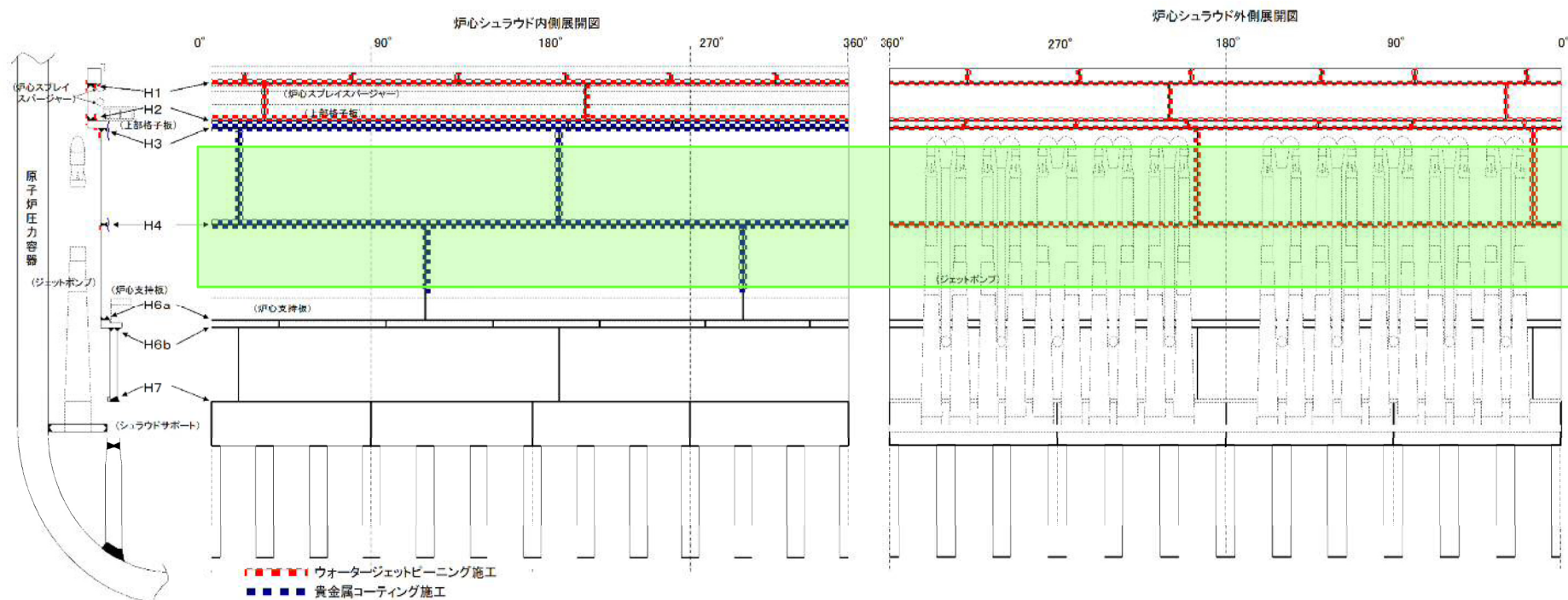
② 応力腐食割れに対する予防保全対策

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 $5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 [E > 1 \text{ MeV}]$ 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 内面（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，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結果， <u>運転開始後60年時点の中性子照射量を考慮しても不安定破壊に至ることはなく，維持規格等に基づき計画的に目視点検を実施することにより健全性の確認は可能であると判断する。</u>

(4) 高経年化への対応

炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れに対しては，高経年化対策の観点から現状保全の内容に追加すべき項目はない。

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 継手内面(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、 <u>運転開始後60年時点の中性子照射量を考慮しても不安定破壊に至ることはなく、</u> 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:「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

炉心シュラウドについては、保守管理に関する方針として策定する事項は抽出されなかった。