

東海第二発電所 劣化状況評価 (照射誘起型応力腐食割れ)

平成30年6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。

目 次

1. 概要	3
2. 基本方針	4
3. 評価対象と評価手法	5
4. 技術評価	7
4. 1 炉内構造物の技術評価	7
4. 2 制御棒の技術評価	21
5. まとめ	25

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉の設置，運転等に関する規則」第114条の規定に基づく，劣化状況評価の補足として照射誘起型応力腐食割れの評価結果を説明するものである。

2. 基本方針

- 照射誘起型応力腐食割れに対する評価の基本方針は、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について評価し、その可能性が将来にわたって発生することが否定できない場合は、その発生及び進展を前提としても今後60年時点までの期間において技術基準規則に定める基準に適合することを確認することである。
- 照射誘起型応力腐食割れについての要求事項を以下に示す。

審査基準*	要求事項
実用発電用原子炉の 運転の期間の延長の 審査基準	○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。

*「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

3. 評価対象と評価手法－評価対象

- 炉心を取り囲む機器である炉内構造物は材料がステンレス鋼であり, このうちオーステナイト系ステンレス鋼は比較的高い累積中性子照射量を受けた場合に照射誘起型応力腐食割れの感受性が現れると考えられている。
- 比較的高い累積中性子照射量を受ける機器としては, 炉内構造物のうち炉心を取り囲む機器である炉心シュラウド, 上部格子板, 炉心支持板, 周辺燃料支持金具, 制御棒案内管及び制御棒を評価対象とする。

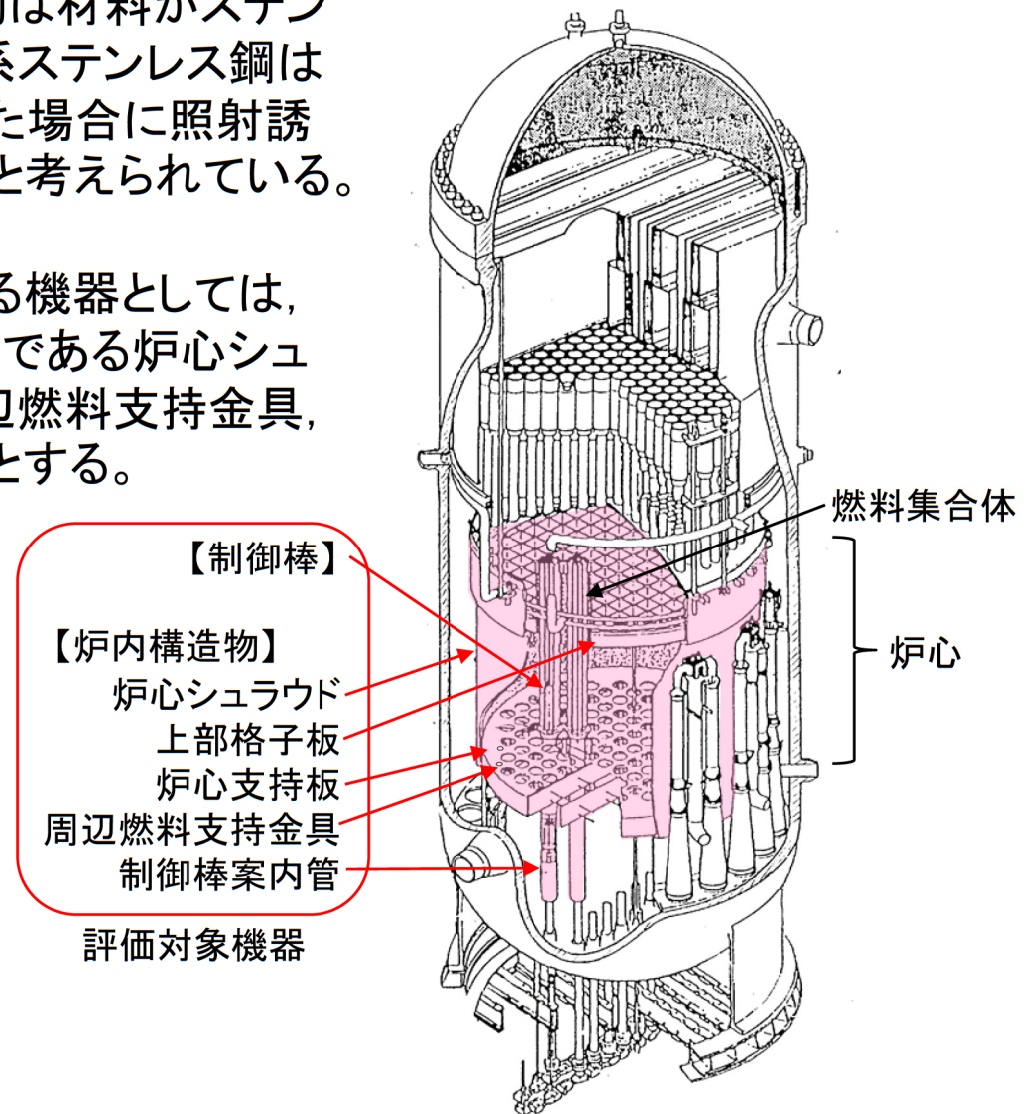
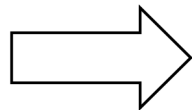


図 原子炉压力容器

3. 評価対象と評価手法－評価手法

【炉内構造物】

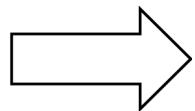
- ① 炉心を取り囲む機器である炉心シュラウド、上部格子板、炉心支持板、周辺燃料支持金具、制御棒案内管について、運転開始後60年時点での予想中性子照射量を算出し、照射誘起型応力腐食割れの感受性が現れると考えられている照射量（以下、「しきい照射量」という）を超えるかを確認する。
- ② しきい照射量を超えると予想された機器については、材料、環境及び応力の観点で照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性を評価する。
- ③ 評価の結果、その発生の可能性が否定できないものについては、その発生及び進展を前提としても60年時点までの期間において技術基準規則に定める基準に適合することを確認する。



4. 1項 炉内構造物の技術評価

【制御棒】

- ① 中性子照射量に応じた核的寿命に対して保守的に定めた取替基準に基づき取替を実施していることから、この取替基準に基づく取替によって制御棒の機能が維持できることを評価することで、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60年時点までの期間において技術基準規則に定める基準に適合することを確認する。



4. 2項 制御棒の技術評価

4. 1 炉内構造物の技術評価－しきい照射量

(1) 健全性評価(1／6)

① 中性子照射量と照射誘起型応力腐食割れの感受性の関係

- 炉心を取り囲む機器である炉内構造物は材料がステンレス鋼であり, このうちオーステナイト系ステンレス鋼はしきい照射量以上の中性子照射量を受けた場合に照射誘起型応力腐食割れの感受性が現れると考えられている。

表 しきい照射量*

材料	しきい照射量 [n/m ²]
ステンレス鋼(SUS304)	約 5×10^{24}
ステンレス鋼(SUS316)	約 1×10^{25}

* 高速中性子(エネルギー>1 [MeV])による照射量。
以降, 特に断りのない場合は高速中性子の照射量をいう。

4. 1 炉内構造物の技術評価－60年時点の照射量

(1) 健全性評価(2／6)

② 炉内構造物の使用材料及び中性子照射量(運転開始後60年時点)

評価対象機器	材料	中性子照射量 [n/m ²]
炉心シュラウド	SUS304L相当	約 2.0×10^{25} *
上部格子板	SUS304相当	約 2.9×10^{25}
炉心支持板	SUS304相当	約 2.1×10^{24}
周辺燃料支持金具	SUS304 TP	約 7.1×10^{23}
制御棒案内管	SUS304相当(上端部)	約 2.1×10^{24}

* 母材部の値。炉心シュラウド中間胴の溶接継手のうち構造維持に必要な周溶接継手では、中間胴の中央に位置するH4周溶接継手がかもとも照射量が高く、その値は内面で約 1.6×10^{25} [n/m²]、外面で約 9.4×10^{24} [n/m²]であり、内外面ともしきい照射量を超える。

- しきい照射量(SUS304: 約 5×10^{24} [n/m²]) 以上の中性子照射量を受ける炉内構造物は、炉心シュラウド中間胴及び上部格子板グリッドプレートである。

4. 1 炉内構造物の技術評価－割れ発生の可能性評価

(1) 健全性評価(3／6)

③ 炉内構造物の照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性評価

炉内構造物	照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性評価
炉心シュラウド 中間胴 H4周溶接継手(熱影響 部含む)内面	<u>しきい照射量を超えるものの</u> , 内面には水素注入に対して触媒効果のある貴金属をコーティングして, 局部的に <u>腐食環境の改善</u> 効果を向上させているため, 照射誘起型応力腐食割れが <u>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。
炉心シュラウド 中間胴 H4周溶接継手(熱影響 部含む)外面	<u>しきい照射量を超えるものの</u> , 外面にはウォータージェットピーニング施工による <u>残留応力の改善</u> を行っていることから, 照射誘起型応力腐食割れが <u>発生する可能性はない</u> と評価する。
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</u> , 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 <u>引張応力成分が低い</u> ことから, 照射誘起型応力腐食割れが <u>発生する可能性はない</u> と評価する。
上部格子板の グリッドプレート	<u>しきい照射量を超えるものの</u> , 溶接部がないため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 <u>引張応力成分は低い</u> ことから, 照射誘起型応力腐食割れが <u>発生する可能性はない</u> と評価する。
炉心支持板, 周辺燃料 支持金具及び制御棒案 内管	<u>しきい照射量を超えない</u> ことから, 照射誘起型応力腐食割れが <u>発生する可能性はない</u> と評価する。

4. 1 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価

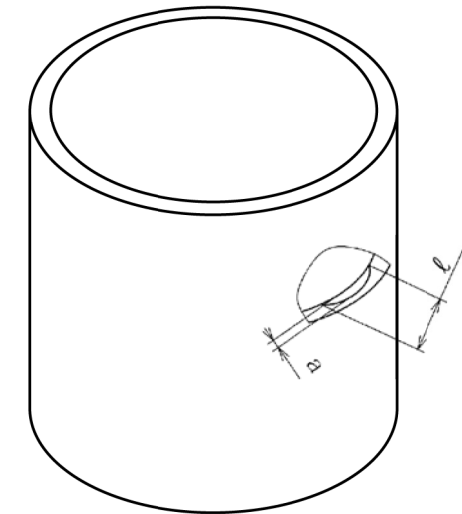
(1) 健全性評価(4／6)

④ 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

- 炉心シュラウド中間胴H4周溶接継手内面は、前述のとおり貴金属コーティングによる応力腐食割れ低減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。このため、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。

表 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の概要

破壊評価手法	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
破壊評価に 考慮する荷重	差圧, 自重及び地震荷重



亀裂深さ: $a_0 = 1.0$

亀裂長さ: $l_0 = 10.0$

単位 [mm]

* 維持規格 図 添付E-2-SA-2 及び

原子力規制委員会「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈の制定について」

図 炉心シュラウドの想定初期欠陥

4. 1 炉内構造物の技術評価－発生及び進展を考慮した評価(結果)

(1) 健全性評価(5／6)

④ 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(結果)

運転期間 [年]	想定亀裂長さ [mm]	応力拡大係数 [MPa√m]	応力拡大係数 [MPa√m] 安全率考慮 *1	破壊靱性値 [MPa√m]
5.23	313.48	28.7	43.1	43.2*2
5.24	314.06	28.8	43.2	
11.81	695.29	43.1	64.7	
11.82	695.87	43.2	64.8	

*1 維持規格 添付 E-15に示される許容状態C及びDの安全率1.5

*2 維持規格 添付 E-14に示される中性子照射量 $8 \times 10^{24}[\text{n/m}^2]$ を超える場合の値

- 想定亀裂が進展していく際の応力拡大係数が、照射ステンレス鋼の破壊靱性値を下回る期間、すなわち、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年であることを確認した。
- 現状保全においては、4定期検査毎(運転時間約4.6年)に目視検査(MVT-1)を実施し健全性を確認することにしていることから、今後も技術基準規則に定める基準に適合できると判断する。

4. 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(6／6)

④ 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(P10再掲)	追加評価
破壊評価手法	線形破壊力学評価法	同左
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*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
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。

* 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。

・現在、評価を実施中。

4. 1 炉内構造物の技術評価－炉心シュラウドの点検

(2) 現状保全(1／6)

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。

4. 1 炉内構造物の技術評価－炉心シュラウドの点検(図)

(2) 現状保全(2/6)

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

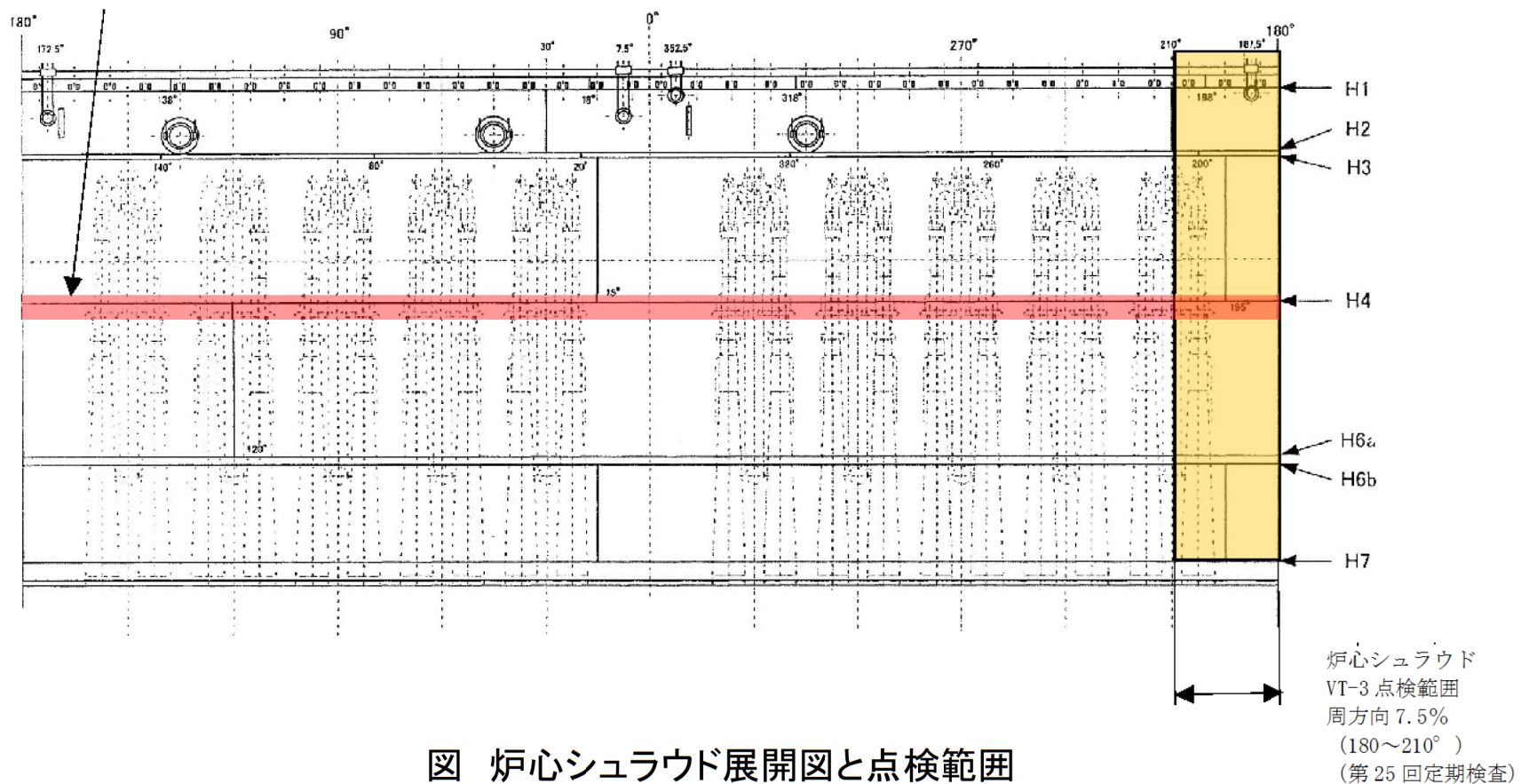


図 炉心シュラウド展開図と点検範囲

4. 1 炉内構造物の技術評価－上部格子板の点検

(2) 現状保全(3／6)

① 点検状況(上部格子板)

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
上部格子板	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
上部格子板 グリッドプレート	MVT-1	10年	第25回定期検査 (2015年)	良

4. 1 炉内構造物の技術評価－上部格子板の点検(図)

(2) 現状保全(4／6)

① 点検状況(上部格子板)(続き)

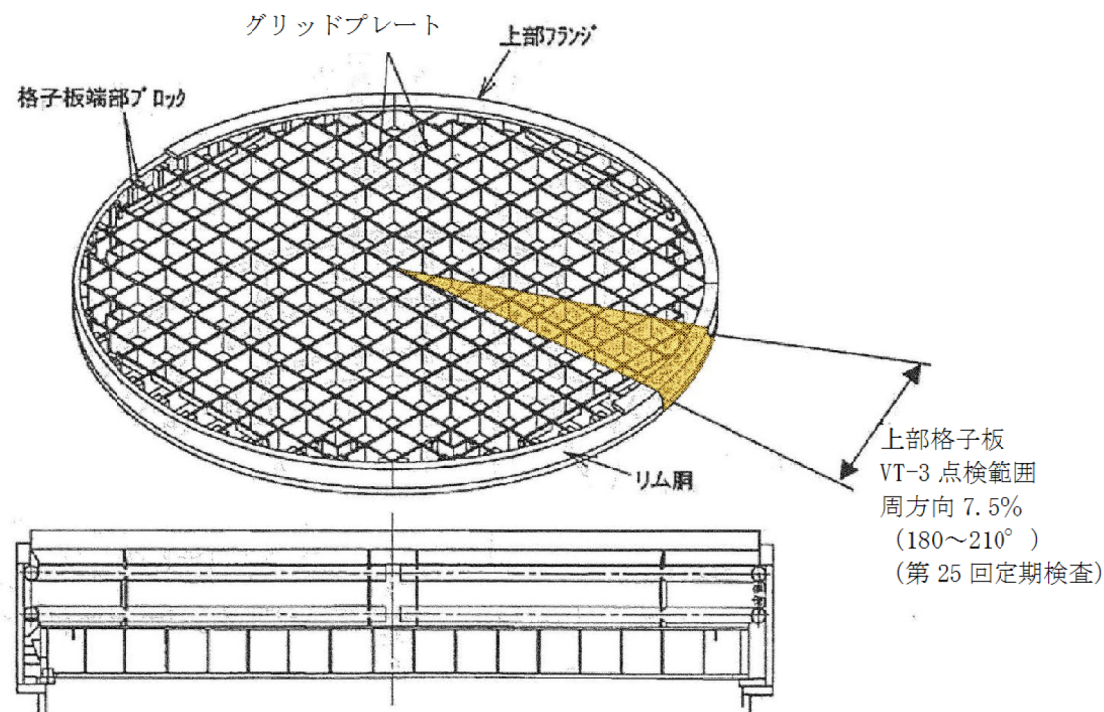


図1 上部格子板と点検範囲(VT-3)

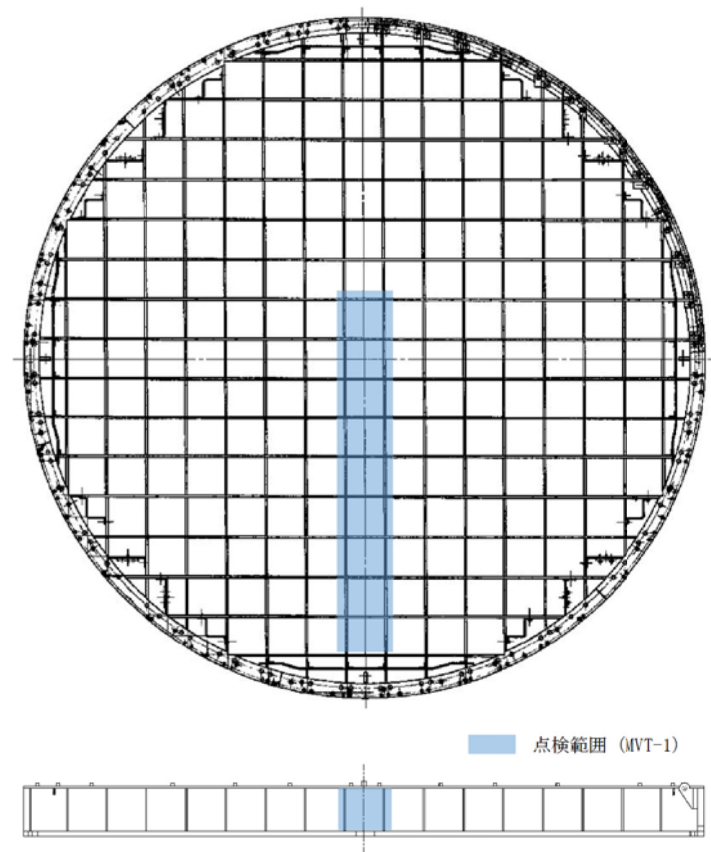


図2 上部格子板と点検範囲(MVT-1)

4. 1 炉内構造物の技術評価－予防保全対策

(2) 現状保全(5／6)

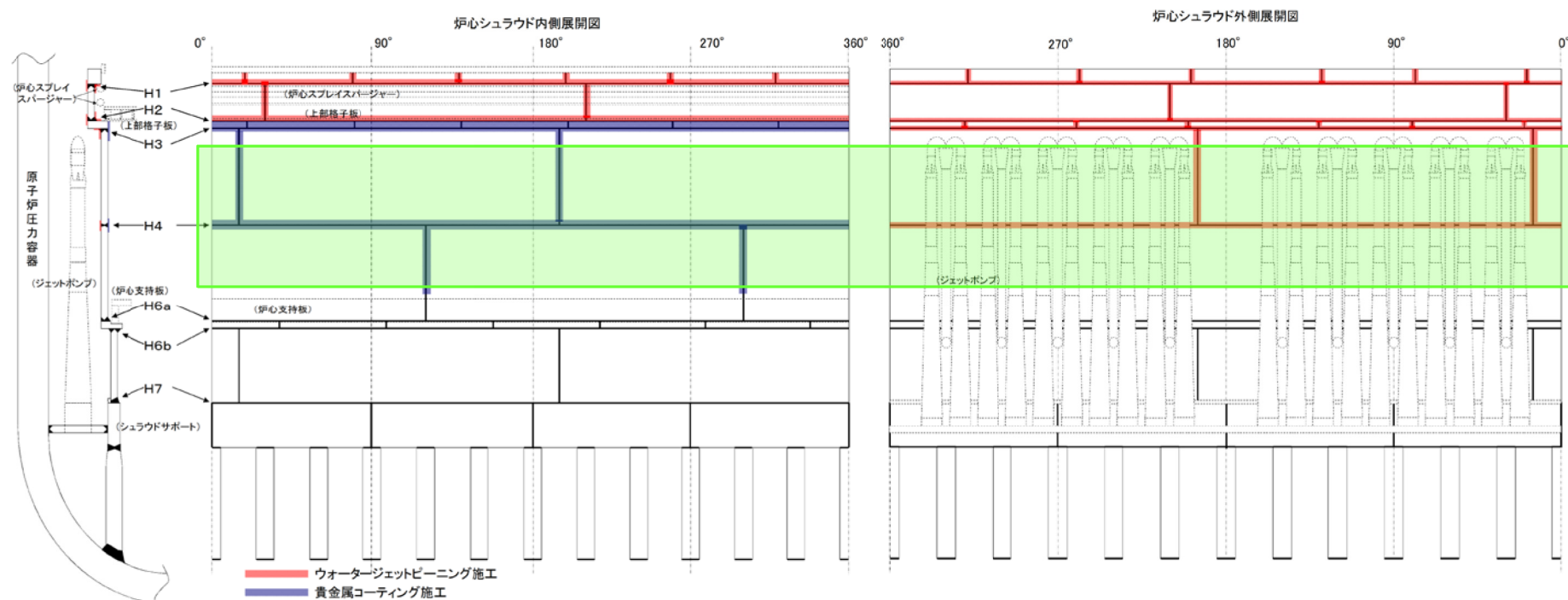
② 応力腐食割れに対する予防保全対策

発生因子	炉心シュラウド	上部格子板
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)	➤ 水素注入による腐食電位の低減(1997年1月～)

4. 1 炉内構造物の技術評価－予防保全対策(炉心シュラウド)

(2) 現状保全(6／6)

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)

4. 1 炉内構造物の技術評価－総合評価

(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 <u>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</u> 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</u> と評価する。
上部格子板の グリッドプレート	<u>しきい照射量を超えるものの、溶接部がないため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は低く、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はない</u> と評価する。 さらに、維持規格に基づく点検に加え、定期的に目視点検を実施することとしており、健全性の維持は可能であると判断する。
炉心支持板、周辺 燃料支持金具及び 制御棒案内管	<u>しきい照射量を超えないことから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はない</u> と評価する。

4. 1 炉内構造物の技術評価－高経年化への対応

(4) 高経年化への対応

炉心シュラウド, 上部格子板, 炉心支持板, 周辺燃料支持金具及び制御棒案内管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。

4. 2 制御棒の技術評価－しきい照射量, 使用材料

(1) 健全性評価(1／3)

① 中性子照射量と照射誘起型応力腐食割れの感受性の関係

- ・ 制御棒に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼は, しきい照射量 (SUS304: 約 5×10^{24} n/m², SUS316: 約 1×10^{25} n/m²) 以上の中性子照射量を受けた場合に照射誘起型応力腐食割れの感受性が現れると考えられている。

② 高い照射量を受ける制御棒上部の使用材料は, 一部を除きステンレス鋼である。

(東海第二の制御棒は, ボロン・カーバイド型)

部位	A社製	B社製
制御材被覆管	SUS304相当	SUS304相当 SUS304L相当
シース	SUS304相当	SUS316L
タイロッド	SUS304相当	SUS316L
ピン	コバルト基合金	ステンレス鋼
上部ハンドル	SUS304相当	SUS316L

4. 2 制御棒の技術評価－割れ発生の可能性評価

(1) 健全性評価(2／3)

③制御棒の照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性評価

- 制御棒は、核的寿命に対して保守的に定めた運用基準(取替基準: 2.0×10^{25} n/m²(熱中性子), 取替目標値: 1.5×10^{25} n/m²(熱中性子))に基づき取替を実施している。
 - ➡照射量の観点から、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性は否定できない。
- 制御材被覆管, シース, タイロッド, ピン, 上部ハンドルは溶接熱影響部に引張残留応力が存在する。また, 制御材被覆管には, 制御材の熱中性子捕獲による $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応によるHe発生に伴う内圧上昇, 並びに制御材の体積膨張によって引張応力が作用する。
 - ➡応力の観点から、照射誘起型応力腐食割れの発生する可能性は否定できない。
- 制御材被覆管に照射誘起型応力腐食割れが発生した場合, 内部のボロン・カーバイドの流出によって原子炉水のトリチウム濃度が上昇する。
 - ➡定期的にトリチウム濃度の測定(3か月に1度)を実施。トリチウム濃度の急上昇はなく, 制御材被覆管に照射誘起型応力腐食割れによるボロン・カーバイドの流出がないことを確認している。

4. 2 制御棒の技術評価－制御棒の点検, 予防保全対策

(2)現状保全

①点検状況

- 定期検査毎に実施している原子炉停止余裕検査, 制御棒駆動水圧系機能検査及び制御棒駆動機構機能検査により, 制御棒の制御能力及び動作性に問題が生じていないことを確認している。

②応力腐食割れに対する予防保全対策

発生因子	対 策
応力	➤ 溶接部の残留応力低減 (取替品) ➤ 製造時の不純物管理, 上部ハンドルガイドローラのピン穴に通水溝 (取替品) (右図)
材料	➤ 低炭素ステンレス鋼SUS316L, SUS304Lを使用 (取替品)
環境	➤ 水素注入による腐食電位の低減 (1997年1月～)

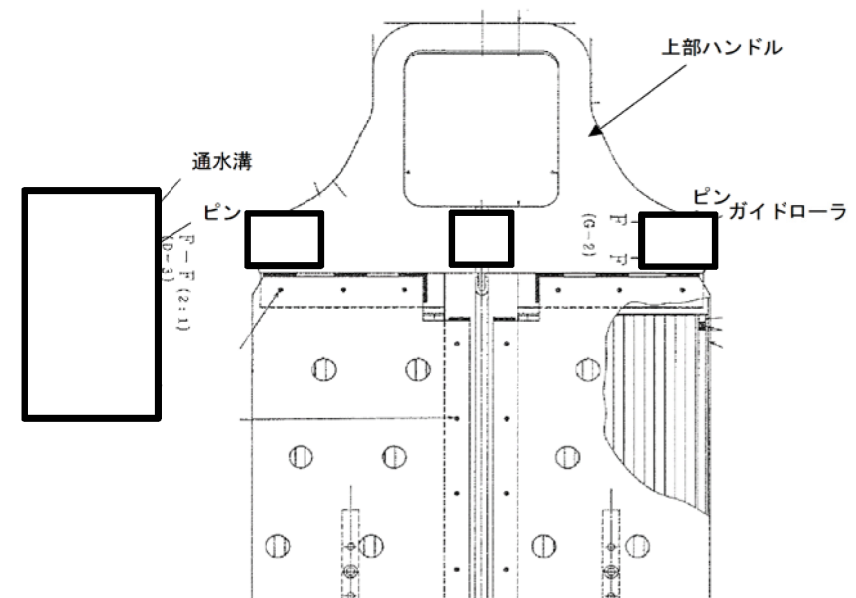


図 上部ハンドルガイドローラのピン穴長穴構造化

4. 2 制御棒の技術評価－総合評価, 高経年化への対応

(3) 総合評価

- 制御棒は, 照射量及び応力の観点から, ステンレス鋼を使用している上部に位置する部位について照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性は否定できない。
- しかしながら, 運用基準に基づく制御棒の取替, 定期検査毎の原子炉停止余裕検査, 制御棒駆動水圧系機能検査及び制御棒駆動機構機能検査を実施していくことで, 機能上の観点から健全性の確認は可能と判断する。
- また, 定期的なトリチウム濃度の測定によって, 制御材被覆管の照射誘起型応力腐食割れによるボロン・カーバイドの流出がないことを確認している。
- したがって, 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, これらの運用を継続することで, 技術基準規則第36条及び第59条に定める制御棒の機能は維持できることから, 技術基準規則に定める基準に適合するものと判断する。
- なお, 新制御棒については, 製造時の不純物管理を徹底するとともに, 応力腐食割れ対策品とすることで, 照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性を低減できると考える。

(4) 高経年化への対応

- 制御棒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。

5. まとめ－審査基準適合性

(1) 審査基準適合性

要求事項*	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、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。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。
	上部格子板 グリッドプレート	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は低く、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。
	炉心支持板、周辺燃料支持金具及び制御棒案内管	しきい照射量を超えないことから、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。
	制御棒	取替基準で定めた照射量の範囲で取替を実施しており、これまでの定期事業者検査や定期的な化学分析により制御棒の挿入性及び反応度の制御機能に影響がないことを確認している。したがって、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、これらの運用を継続することで制御棒の機能は維持できることから、技術基準規則に定める基準に適合するものと判断する。

*「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

5. まとめ－保守管理に関する方針として策定する事項

(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，上部格子板，炉心支持板，周辺燃料支持金具，制御棒案内管及び制御棒については，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。

(3) 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追加評価については現在実施中であり，6月中に結果を確認し，別途報告する。