

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK 補-III-3 改6
提出年月日	平成30年5月17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)

補足説明資料

平成30年5月17日

日本原子力発電株式会社

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	1
2. 基本方針	1
3. 評価対象と評価手法	4
4. 技術評価	5
4.1 炉内構造物の技術評価	5
(1) 健全性評価	5
(2) 現状保全	7
(3) 総合評価	12
(4) 高経年化への対応	12
4.2 制御棒の技術評価	13
(1) 健全性評価	13
(2) 現状保全	14
(3) 総合評価	15
(4) 高経年化への対応	15
5. まとめ	16
(1) 審査基準適合性	16
(2) 保守管理に関する方針として策定する事項	16

別紙 1. 原子炉冷却材の水質の管理値と至近の実績について	22
別紙 2. 炉内構造物の運転開始後 60 年時点での中性子照射量について	24
別紙 3. 上部格子板グリッドプレートに発生する応力	30
別紙 4. 炉内構造物に関する照射誘起型応力腐食割れ発生可能性の評価について	33
別紙 5. ウォータージェットピーニング施工による応力腐食割れ抑制効果について	35
別紙 6. 貴金属コーティング施工による応力腐食割れ抑制効果について	46
別紙 7. 制御棒上部ハンドル部で確認されたひび及び応力腐食割れ対策について	50
別紙 8. 原子炉水のトリチウム濃度測定結果について	54

## 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（昭和53年通商産業省令第77号。以下、「実用炉規則」という）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が適切であることを説明するとともに、評価内容の補足資料をとりまとめたものである。

オーステナイト系ステンレス鋼は、高い中性子照射を受けると材料自身の応力腐食割れの感受性が高くなる。照射誘起型応力腐食割れは、この状況に引張応力が作用すると粒界型応力腐食割れが生じる現象である。

なお、炉内構造物の各機器及び制御棒は原子炉冷却材と接液しており、通常運転時の温度は約285℃である。また、原子炉冷却材の水質管理においては、社内規程「化学管理基準」において管理値を定め、水質管理を実施している。原子炉冷却材の水質の管理値と至近の実績について別紙1に示す。

## 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を評価するに当たっての要求事項を表1に整理する。

表1(1/3) 照射誘起型応力腐食割れについての要求事項

審査基準, ガイド	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期間延長認可申請に係る運用ガイド	運転期間延長認可申請に伴うものとして評価を行い, その結果の記載が求められる事項は次のとおり。 ①特別点検の結果を踏まえた劣化状況評価。 運転期間延長認可申請に伴い策定するものとして記載が求められる事項は次のとおり。 ①劣化状況評価を踏まえた保守管理に関する方針。

表 1(2/3) 照射誘起型応力腐食割れについての要求事項

審査基準, ガイド	要求事項
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド</p>	<p>(1) 高経年化技術評価の審査</p> <p>⑫健全性の評価            実施ガイド 3. 1 ⑤に規定する期間の満了日までの期間について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の発生又は進展に係る健全性を評価していることを審査する。</p> <p>⑬現状保全の評価            健全性評価結果から現状の保全策の妥当性が評価されていることを審査する。</p> <p>⑭追加保全策の抽出            現状保全の評価結果から、現状保全に追加する必要がある新たな保全策が抽出されていることを審査する。</p> <p>(2) 長期保守管理方針の審査</p> <p>①長期保守管理方針の策定            すべての追加保全策について長期保守管理方針として策定されているかを審査する。</p>

表 1(3/3) 照射誘起型応力腐食割れについての要求事項

審査基準, ガイド	要求事項
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド</p>	<p>3.1 高経年化技術評価の実施及び見直し</p> <p>③運転開始後 40 年を迎えるプラントの高経年化技術評価には、当該申請に至るまでの間の運転に伴い生じた原子炉その他の設備の劣化の状況の把握のために実施した点検(特別点検)の結果を適切に反映すること。なお、運転開始後 40 年を迎えるプラントの高経年化技術評価を行うに当たっては、30 年時点で実施した高経年化技術評価をその後の運転経験、安全基盤研究成果等技術的知見をもって検証するとともに、長期保守管理方針の意図した効果が現実に得られているか等の有効性評価を行い、これら結果を適切に反映すること。</p> <p>⑤抽出された高経年化対策上着目すべき経年劣化事象について、以下に規定する期間の満了日までの期間について機器・構造物の健全性評価を行うとともに、必要に応じ現状の保守管理に追加すべき保全策(以下「追加保全策」という。)を抽出すること。</p> <p>3.2 長期保守管理方針の策定及び変更</p> <p>長期保守管理方針の策定及び変更にあたっては、以下の要求事項を満たすこと。</p> <p>①高経年化技術評価の結果抽出されたすべての追加保全策(発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたもの及び冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたもののすべて。)について、発電用原子炉ごとに、保守管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期保守管理方針を策定すること。</p> <p>なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたもの間で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期保守管理方針を策定すること。</p>

### 3. 評価対象と評価手法

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。

炉内構造物については、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。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。

評価の結果、照射誘起型応力腐食割れ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。

制御棒については、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. 技術評価

##### 4.1 炉内構造物の技術評価（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）

###### (1) 健全性評価

###### 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\*1。（表1参照）

表1 照射誘起型応力腐食割れの感受性発現しきい照射量\*2

材質	しきい照射量 [n/m <sup>2</sup> ]
ステンレス鋼 (SUS304)	5×10 <sup>24</sup>
ステンレス鋼 (SUS316)	1×10 <sup>25</sup>

\*1 「東海第二発電所 劣化状況評価書」（平成29年11月）のうち、「炉内構造物の技術評価書」図2.3-2参照。

\*2 高速中性子（エネルギー>1 [MeV]）。本文にて特に断りのない場合は高速中性子の照射量をいう。

###### ② 炉内構造物の中性子照射量

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、制御棒案内管における運転開始後60年時点での予想中性子照射量は以下の値と想定される。（表2参照）

炉内構造物の各部における使用材料及び運転開始後60年時点での中性子照射量、その算出の考え方及び算出過程については別紙2に示す。

表2 炉内構造物各機器の使用材料及び運転開始後60年時点での中性子照射量

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

照射誘起型応力腐食割れ感受性の発生が考えられるしきい照射量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。



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

炉心シュラウド中間胴 H4 周溶接継手（熱影響部含む）は、しきい照射量を超えるものの、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、局部的に腐食環境の改善効果を向上させているため、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。一方、炉心シュラウド中間胴 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施工による残留応力の改善を行っていることから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はないと評価する。

炉心シュラウド中間胴の母材部は、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。

上部格子板のグリッドプレートは、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と評価する。上部格子板のグリッドプレートに発生する応力を評価した結果を別紙 3 に示す。

炉心支持板、周辺燃料支持金具及び制御棒案内管については、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。

炉内構造物に関する照射誘起型応力腐食割れ発生可能性の評価を別紙 4 に示す。

④ 炉内構造物のうち、炉心シュラウドの耐震安全性評価

炉心シュラウド中間胴 H4 周溶接継手内面は、上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う。

評価結果は、耐震安全性評価にて報告する。

(2) 現状保全

① 点検状況

中性子照射量評価により、照射誘起型応力腐食割れのしきい照射量を超える中性子照射を受ける炉内構造物（炉心シュラウド、上部格子板）の保全の状況は以下のとおりである。

炉内構造物（炉心シュラウド、上部格子板）については、維持規格に基づき定期的に水中テレビカメラによる目視点検を実施しており、有意な欠陥は確認されていない。維持規格に基づく点検内容を表4に、点検範囲の概略図を図1に示す。

表4 維持規格に基づく点検内容（炉内構造物供用期間中検査）

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 <sup>*4</sup>	内面	MVT-1	運転時間で 5～15年	第24回定期検査 (2009年)	良 <sup>*7</sup>
	外面	MVT-1	運転時間で 5～15年	第25回定期検査 (2015年)	良 <sup>*7</sup>
炉心シュラウド <sup>*5</sup>		VT-3	10年 <sup>*6</sup>	第25回定期検査 (2015年)	良 <sup>*8</sup>
上部格子板 <sup>*5</sup>		VT-3	10年 <sup>*6</sup>	第25回定期検査 (2015年)	良 <sup>*8</sup>

\*4 維持規格 IJG 炉内構造物の個別検査（表 IJG-2500-B-2）に、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」の条件（縦溶接線との交差部を含む）を課した上で実施。

H4 は、炉心シュラウドの点検個所である周溶接継手のうち、中性子照射量が照射誘起型応力腐食割れ発生の感受性発現しきい照射量を超えるもの。

\*5 維持規格 IG 炉内構造物の標準検査（表 IG-2500-1、添付 I-4）による。

\*6 維持規格 IA-2310 検査間隔による。

\*7 MVT-1 の判定基準；表面について、摩耗、き裂、腐食、浸食等の異常がないこと。

\*8 VT-3 の判定基準；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。

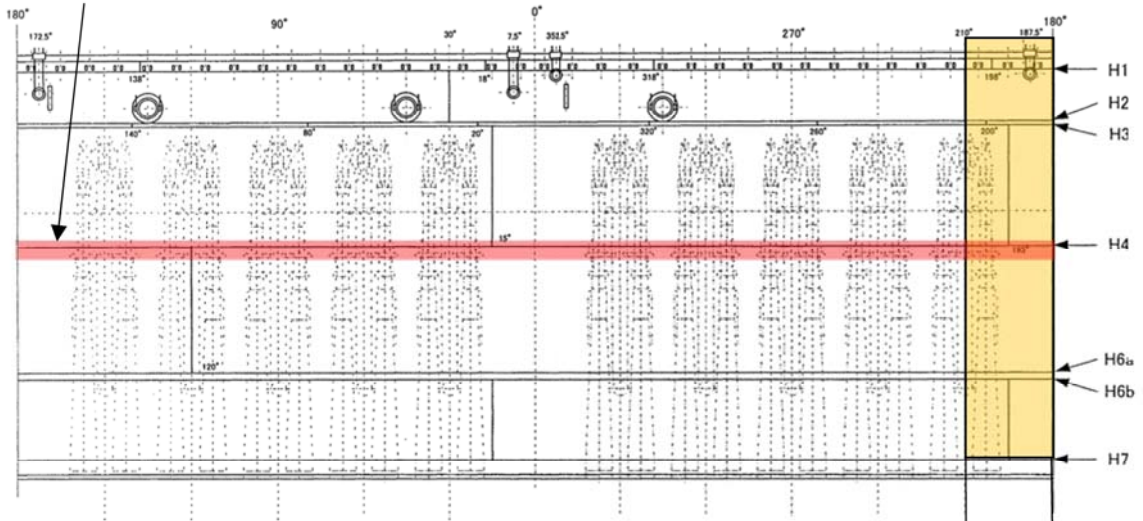
炉心シュラウドの周溶接継手 H4 内面については、耐震安全性評価の結果により、必要に応じて計画することから、耐震安全性評価にて報告する。

また、中性子照射量が評価上最も厳しい上部格子板のグリッドプレートについては、長期保守管理方針に基づき、第25回定期検査時（2015年）に水中テレビカメラによる目視点検（MVT-1）を実施し、有意な欠陥は確認されていない（図2参照）。今後は、表4の維持規格に基づく点検に加え、保守管理の実施に関する計画に基づく点検計画にしたがって定期的（維持規格 IA-2310 検査間隔に準じて10年）に目視点検（MVT-1）を実施し、健全性を確認することとしている。

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



炉心シュラウド  
VT-3 点検範囲  
周方向 7.5%  
(180~210°)  
(第 25 回定期検査)

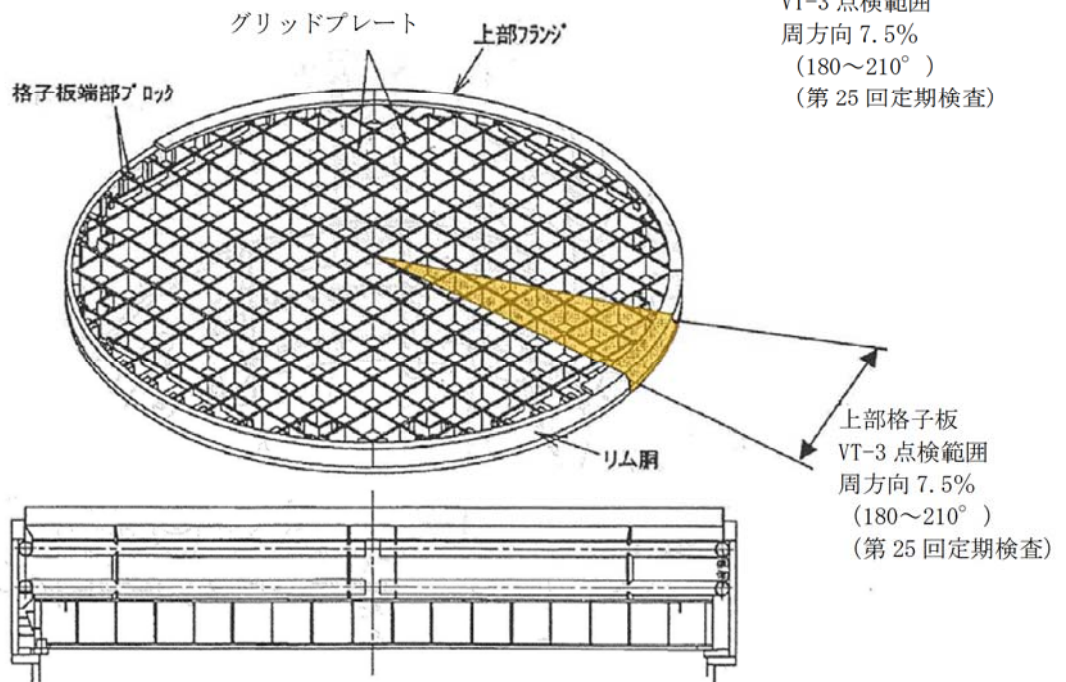


図 1 維持規格に基づく点検範囲概略図

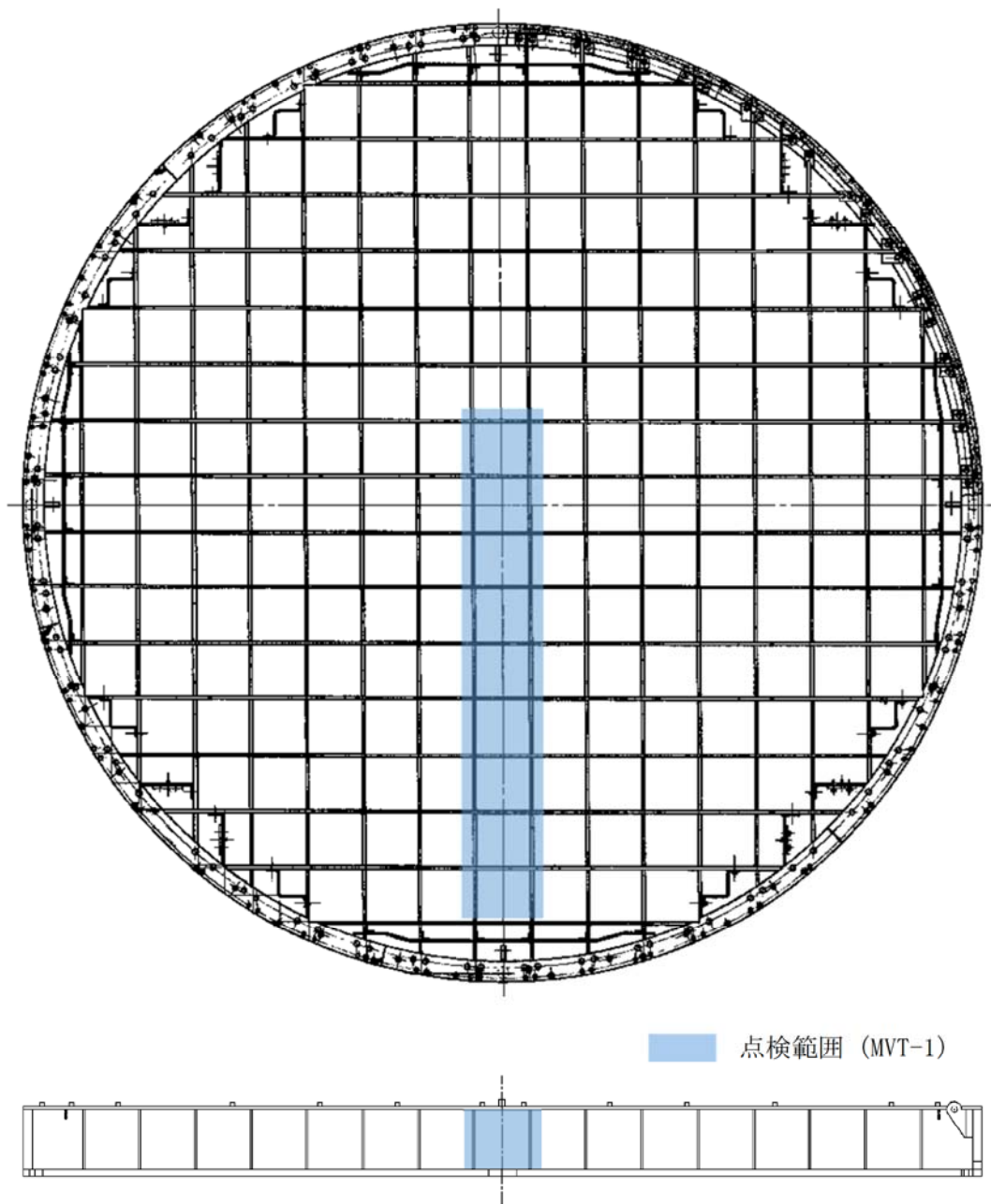


图 2 上部格子板点検範囲概略图

② 応力腐食割れに対する予防保全対策

応力腐食割れについては、発生因子である「応力」、「材料」、「環境」を改善することで発生を抑制する効果が期待できる。

照射誘起型応力腐食割れのしきい照射量を超える中性子照射を受ける炉内構造物（炉心シュラウド、上部格子板）に対する応力腐食割れの抑制対策について表5に示す。

表5 炉内構造物（炉心シュラウド、上部格子板）の応力腐食割れの抑制対策

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)*9	—
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(1996年～) ▶ 貴金属コーティング施工による腐食環境の改善(1999年)*10	▶ 水素注入による腐食電位の低減(1996年～)

\*9 周溶接継手 H3, H4 外面等 図3 参照

\*10 周溶接継手 H3, H4 内面等 図3 参照

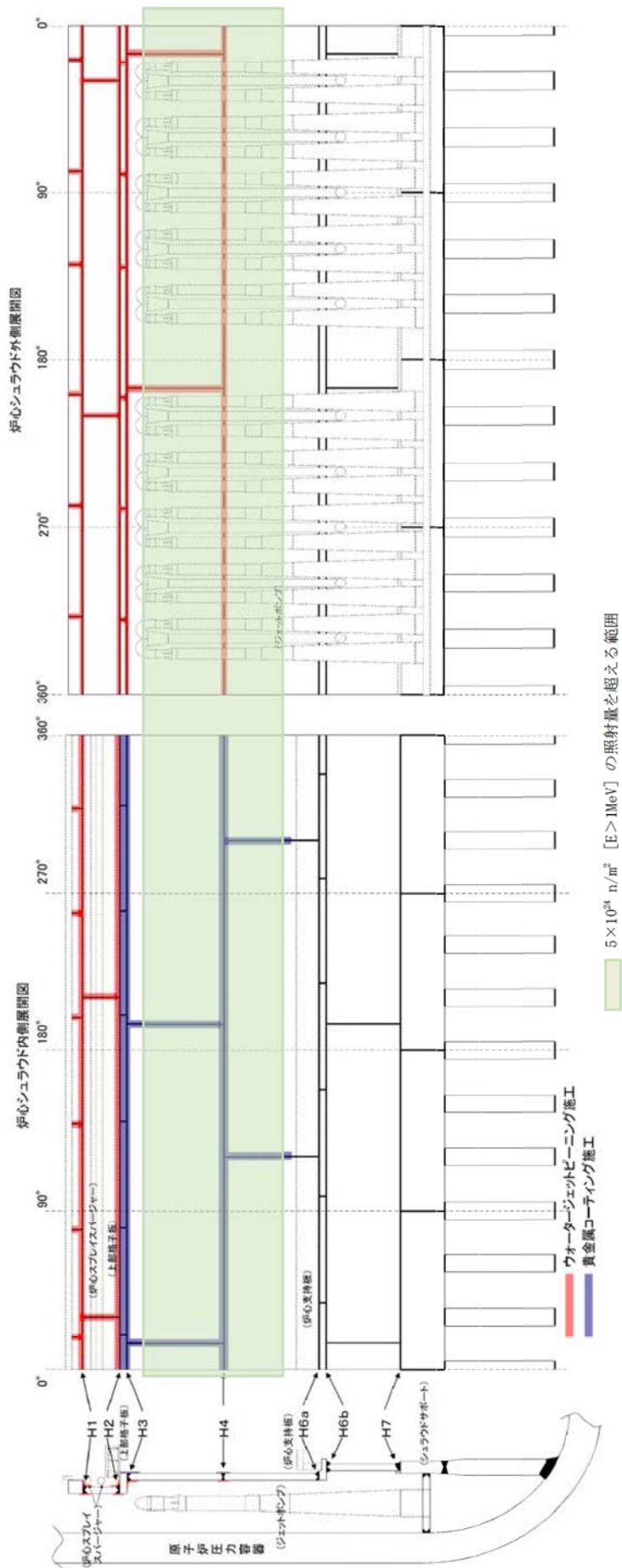
なお、ウォータージェットピーニング施工及び貴金属コーティング施工に先立ち、目視点検（MVT-1）を実施し、有意な欠陥のないことを確認している。

ウォータージェットピーニング施工は、維持規格において、「RB-2450 ピーニング方法」に応力腐食割れの予防保全として施工方法が記載されている。

貴金属コーティング施工は、維持規格において、「RB-2530 貴金属粉末溶射クラッド方法」に応力腐食割れの予防保全として施工方法が記載されている。

炉心シュラウドに実施したウォータージェットピーニング施工に関する応力腐食割れの抑制効果を別紙7に、貴金属コーティング施工に関する応力腐食割れの抑制効果を別紙8に示す。

水素注入による応力腐食割れの発生・進展を抑制する技術は、国内外の数多くの沸騰水型軽水炉プラントで採用されている。東海第二では、通常運転時に加え、起動時における水素注入を第19回定期検査後の起動時（2002年12月）から運用を開始している。



注) 干渉物により溶接継手全長の施工が不可となった箇所と、施工できた範囲は以下のとおり。  
 ウォータージェットピーニング : H1 内面約 90%, H2 内面約 90%, H4 内面約 90%, H6 内面約 40%, 貴金属コーティング : V5 内面約 65%

図 3 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)

### (3) 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）は、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う。評価結果は、耐震安全性評価にて報告する。

炉心シュラウド中間胴の母材部は、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。

上部格子板のグリッドプレートは、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と評価する。

さらに、維持規格に基づく点検に加え、定期的な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については、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。

### (4) 高経年化への対応

炉心シュラウド中間胴H4周溶接継手（熱影響部含む）については、耐震安全性評価の結果により必要に応じて対応を決定することから、耐震安全性評価にて報告する。

炉心シュラウド（中間胴母材部）、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

### (1) 健全性評価

制御棒に使用されているステンレス鋼は、4.1で述べたとおり、しきい照射量（SUS304： $5 \times 10^{24}$  n/m<sup>2</sup>，SUS316： $1 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>）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。

東海第二で使用している制御棒はボロン・カーバイド型制御棒であり、その上部に位置し、高い照射量を受ける制御材被覆管、シース、タイロッド、ピン、上部ハンドルについては、表3に示す材料を使用しており、一部を除きステンレス鋼である。

ボロン・カーバイド型制御棒は、軸方向に4分割した各セグメントのいずれかの平均反応度が新品の90%まで減少した時の核的寿命に対して保守的に定めた運用基準（取替基準： $2.0 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>（熱中性子）、取替目標値： $1.5 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>（熱中性子））に基づき取替を実施している。ボロン・カーバイド型制御棒を出力制御用として運転中炉心に挿入する場合、その上部は高い中性子照射を受けることになり、この取替の運用基準に従って取替えることになる。

以上より、照射量の観点からは、ステンレス鋼を使用している上部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。

表3 ボロン・カーバイド型制御棒の上部の使用材料

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

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<sup>10</sup>B (n, α) <sup>7</sup>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。

このため、ボロン・カーバイド型制御棒については、応力の観点からも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。

なお、東海第二において、第17回定期検査時（1999年）にA社製制御棒上部ハンドルローラ近傍に製造時の残存不純物と照射量蓄積の相乗効果により、照射誘起型応力腐食割れと推定されるひびが発見された。この制御棒は、出力調整のため運転中炉心に挿入されていたため比較的高い中性子照射量となっていた。このため、ひびが発見された制御棒及び同じ製造履歴のA社製制御棒25本について、不純物が残留している恐れのないB社製制御棒と取替を実施した。その後、B社製制御棒は上部ハンドルガイドローラのピ



ン穴に通水溝を設けた応力腐食割れ対策品に設計変更されており、ボロン・カーバイド型制御棒の取替にあたっては、第18回定期検査以降、この応力腐食割れ対策品を採用している。

B社製制御棒のうち、応力腐食割れ対策品に設計変更される以前に取り付けた制御棒については、2011年に照射誘起型応力腐食割れと推定されるひびが発見され、応力腐食割れ対策品に取替を実施している。

制御棒上部ハンドル部で確認された照射誘起型応力腐食割れと推定されるひび及び応力腐食割れ対策について別紙9に示す。

前述のとおり、ボロン・カーバイド型制御棒を出力調整用に使用した場合、中性子照射量がしきい照射量を超える。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。

他プラントでは、制御材被覆管の割れが原因と考えられる原子炉水のトリチウム濃度の上昇が確認されたため、1985年より定期的にトリチウム濃度の測定（現状、3か月に1度）を実施している。その結果、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。原子炉水のトリチウム濃度測定実績を別紙10に示す。

## (2) 現状保全

### ① 点検状況

中性子照射量評価により、照射誘起型応力腐食割れのしきい照射量を超える中性子照射を受ける制御棒の保全の状況は以下のとおりである。

東海第二で使用しているボロン・カーバイド型制御棒は、軸方向に4分割した各セグメントのいずれかの平均反応度が新品の90%まで減少した時の核的寿命に対して保守的に定めた運用基準に基づき取替を実施している。

また、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。

なお、前述のとおり、定期的なトリチウム濃度の測定を行うことで、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。

## ②応力腐食割れに対する予防保全対策

制御棒に対する応力腐食割れの抑制対策について、表6に示す。

表6 制御棒の応力腐食割れの抑制対策

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）
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(1996年～)

### (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（制御材被覆管，シース，タイロッド，ピン，上部ハンドル）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

### (1) 審査基準適合性

「2. 基本方針」で示した要求事項について技術評価を行った結果、すべての要求を満足しており、審査基準に適合していることを確認した。照射誘起型応力腐食割れについての要求事項との対比を表7に示す。

### (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 中間胴 H4 周溶接継手（熱影響部含む）については、耐震安全性評価の結果により、必要に応じて策定することから、耐震安全性評価にて報告する。

炉心シュラウド（中間胴母材部）、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。

表 7 照射誘起型応力腐食割れについての要求事項との対比

審査基準, ガイド	要求事項	技術評価結果
<p>実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準</p>	<p>○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ある場合は、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。</p>	<p>炉内構造物のうち照射誘起型応力腐食割れの感受性発現しきい照射量を超えると予測される機器は、炉心シユラウド中間胴及び上部格子板グリッドプレートである。</p> <p>炉心シユラウド中間胴 H4 周溶接継手は、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う。評価結果は、耐震安全性評価にて報告する。</p> <p>炉心シユラウド中間胴の母材部は、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。</p> <p>上部格子板のグリッドプレートは、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。</p> <p>制御棒については、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、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。</p>

表 7 照射誘起型応力腐食割れについての要求事項との対比

審査基準, ガイド	要求事項	技術評価結果
<p>実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド</p>	<p>運転期間延長認可申請に伴うものとしての評価を行い、その結果の記載が求められる事項は次のとおり。 ①特別点検の結果を踏まえた劣化状況評価。 運転期間延長認可申請に伴い策定するものとして記載が求められる事項は次のとおり。 ①劣化状況評価を踏まえた保守管理に関する方針。</p>	<p>照射誘起型応力腐食割れに関して、特別点検によって確認する事項はない。  「4.1(4)」及び「4.2(4)」の「高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、劣化状況評価の観点から追加すべきものはなく、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。 炉心シユラウド 中間胴 H4 周溶接継手（熱影響部含む）については、耐震安全性評価にて報告する。</p>
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド</p>	<p>(1)高経年化技術評価の審査 ⑫健全性の評価 実施ガイド3. 1⑤に規定する期間の満了日までの期間について、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の発生又は進展に係る健全性を評価していることを審査する。 ⑬現状保全の評価 健全性評価結果から現状の保全策の妥当性が評価されていることを審査する。</p>	<p>「4.1(1)」及び「4.2(1)」の「健全性評価」に示すとおり、中性子照射量の比較的高い炉内構造物及び制御棒について照射誘起型応力腐食割れの発生又は進展に係る健全性を評価した。炉心シユラウドについては、照射誘起型応力腐食割れが将来にわたって発生することが否定できないため、発生及び進展にかかるとの健全性を評価した。  「4.1(2)」及び「4.2(2)」の「現状保全」に示すとおり、健全性の評価から現状の保全策が妥当であることを確認した。炉心シユラウドについては、地震時に不安定破壊に至ることがないよう設定した頻度で目視点検を実施することとしている。  「4.1(4)」及び「4.2(4)」の「高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加する新たな保全策はなかった。 炉心シユラウド 中間胴 H4 周溶接継手（熱影響部含む）については、耐震安全性評価にて報告する。</p>

表 7 照射誘起型応力腐食割れについての要求事項との対比

審査基準, ガイド	要求事項	技術評価結果
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド</p>	<p>(2)長期保守管理方針の審査 ①長期保守管理方針の策定 すべての追加保全策について長期保守管理方針として策定されているかを審査する。</p>	<p>「4.1(4)」及び「4.2(4)」の「高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはなく、保守管理に関する方針として策定する事項はなかった。 炉心シミュラウド 中間胴 H4 周溶接継手 (熱影響部含む) については、耐震安全性評価にて報告する。</p>
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド</p>	<p>3.1 高経年化技術評価の実施及び見直し ③運転開始後 40 年を迎えるプラントの高経年化技術評価には、当該申請に至るまでの間の運転に伴い生じた原子炉その他の設備の劣化の状況の把握のために実施した点検 (特別点検) の結果を適切に反映すること。 ⑤抽出された高経年化対策上着目すべき経年の満了日までの期間について機器・構造物の健全性評価を行うとともに、必要に応じ現状の保守管理に追加すべき保全策 (以下「追加保全策」という。) を抽出すること。</p>	<p>照射誘起型応力腐食割れに関して、特別点検によって確認する事項はない。  「4.1(4)」及び「4.2(4)」の「高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加する新たな保全策はなかった。 炉心シミュラウド 中間胴 H4 周溶接継手 (熱影響部含む) については、耐震安全性評価にて報告する。</p>

表 7 照射誘起型応力腐食割れについての要求事項との対比

審査基準, ガイド	要求事項	技術評価結果
<p>実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド</p>	<p>3.2 長期保守管理方針の策定及び変更 長期保守管理方針の策定及び変更に当たっては、以下の要求事項を満たすこと。 ①高経年化技術評価の結果抽出されたすべての追加保全策（発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提として抽出されたもの及び冷温停止状態が維持されることを前提として抽出されたものすべて。）について、発電用原子炉ごとに、保守管理の項目及び当該項目ごとの実施時期を規定した長期保守管理方針を策定すること。 なお、高経年化技術評価の結果抽出された追加保全策について、発電用原子炉の運転を断続的に行うことを前提とした評価から抽出されたものと冷温停止状態が維持されることを前提とした評価から抽出されたもの間で、その対象の経年劣化事象及び機器・構造物の部位が重複するものについては、双方の追加保全策を踏まえた保守的な長期保守管理方針を策定すること。</p>	<p>「4.1(4)」及び「4.2(4)」の「高経年化への対応」に示すとおり、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはなく、保守管理に関する方針として策定する事項はなかった。 炉心シュラウド 中間胴 H4 周溶接継手（熱影響部含む）については、耐震安全性評価にて報告する。</p>

## 別紙

- 別紙 1. 原子炉冷却材の水質の管理値と至近の実績について
- 別紙 2. 炉内構造物の運転開始後 60 年時点での中性子照射量について
- 別紙 3. 上部格子板グリッドプレートに発生する応力
- 別紙 4. 炉内構造物に関する照射誘起型応力腐食割れ発生可能性の評価について
- 別紙 5. ウォータージェットピーニング施工による応力腐食割れ抑制効果について
- 別紙 6. 貴金属コーティング施工による応力腐食割れ抑制効果について
- 別紙 7. 制御棒上部ハンドル部で確認されたひび及び応力腐食割れ対策について
- 別紙 8. 原子炉水のトリチウム濃度測定結果について



<原子炉冷却材の水質の管理値と至近の実績について>

原子炉冷却材の測定項目と基準値を表 1 に示す。

表 1 原子炉冷却材の主な水質測定項目と基準値

項目	基準値・管理値
導電率 (25℃において)	1 $\mu$ S/cm 以下 (基準値)
pH (25℃において)	5.6~8.6 (基準値)
塩素イオン	0.1 ppm ( 100 ppb ) 以下 (基準値)
溶存酸素濃度	0.4 ppm ( 400 ppb ) 以下 (管理値)

図 1 に原子炉冷却材のサンプリング点を、図 2 に原子炉冷却材水質の推移データを示す。

以上

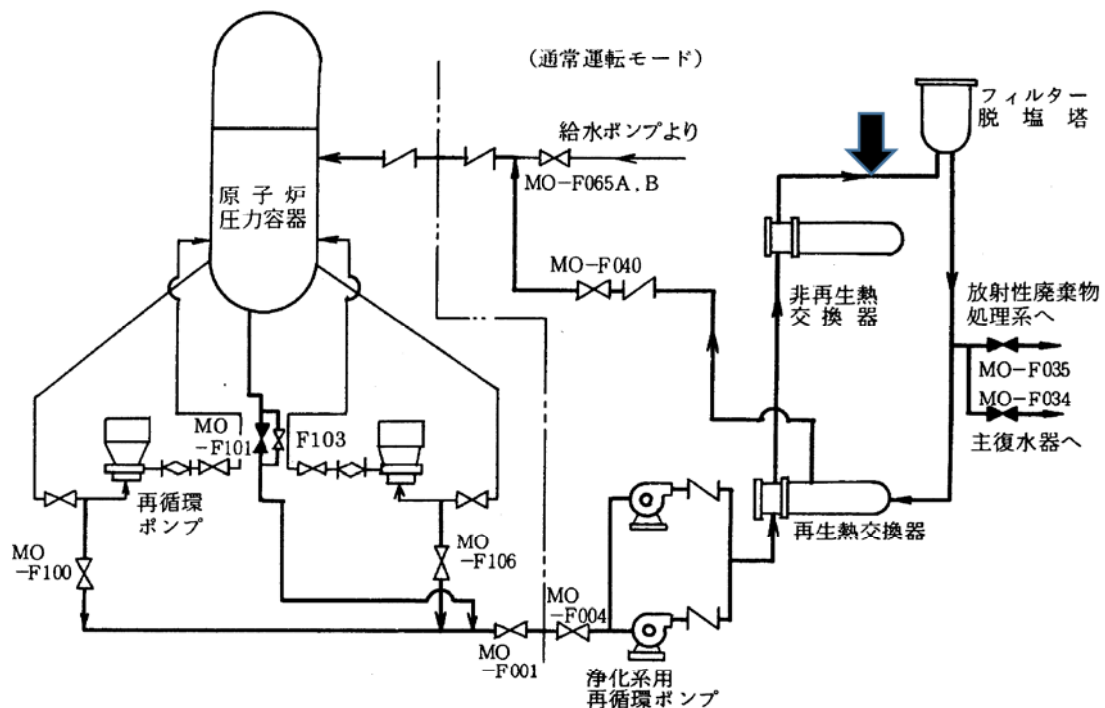


図 1 東海第二 原子炉冷却材浄化系概略図

(原子炉冷却材のサンプリング点は➡部)

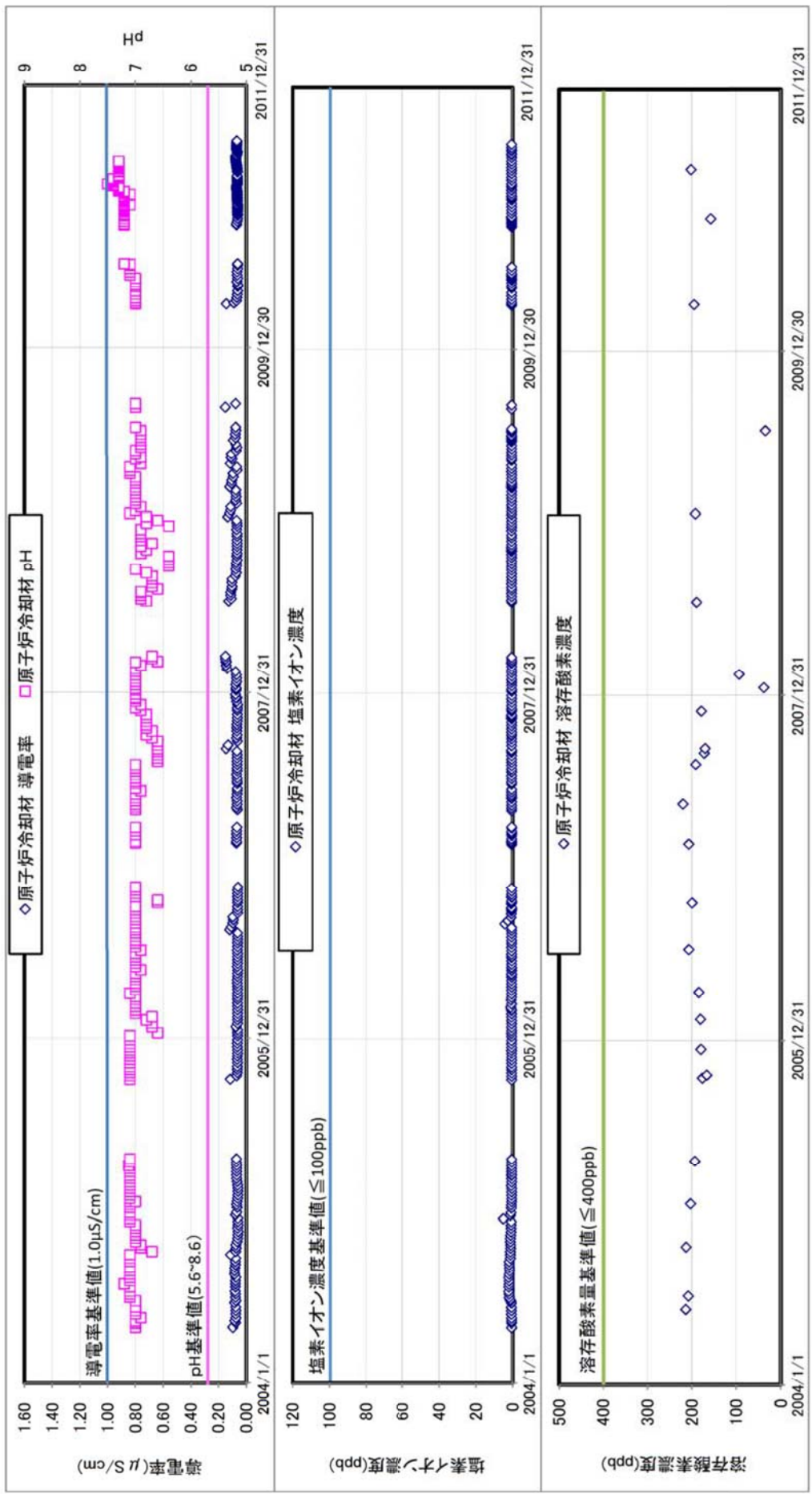


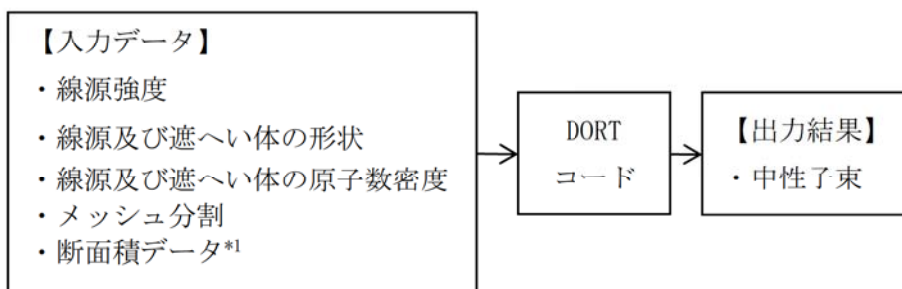
図2 原子炉冷却材水質の推移

＜炉内構造物の運転開始後 60 年時点での中性子照射量について＞

1. 中性子照射量の算出に用いる計算機コード

中性子照射量は、炉内各位置における中性子束を 2 次元輸送計算コード DORT (DOORS3. 2a パージョン) により算出し、運転時間を掛けることで中性子照射量を求めている。

DORT コードは、米国のオークリッジ国立研究所で開発された中性子輸送方程式を数値的に解くコードであり、プログラムの構成は以下のとおりである。



\*1 評価済み核データ JENDL-3.3 より作成された輸送計算用断面積ライブラリ MATXS LIB-J33 を使用。

2. 中性子照射量の算出手順

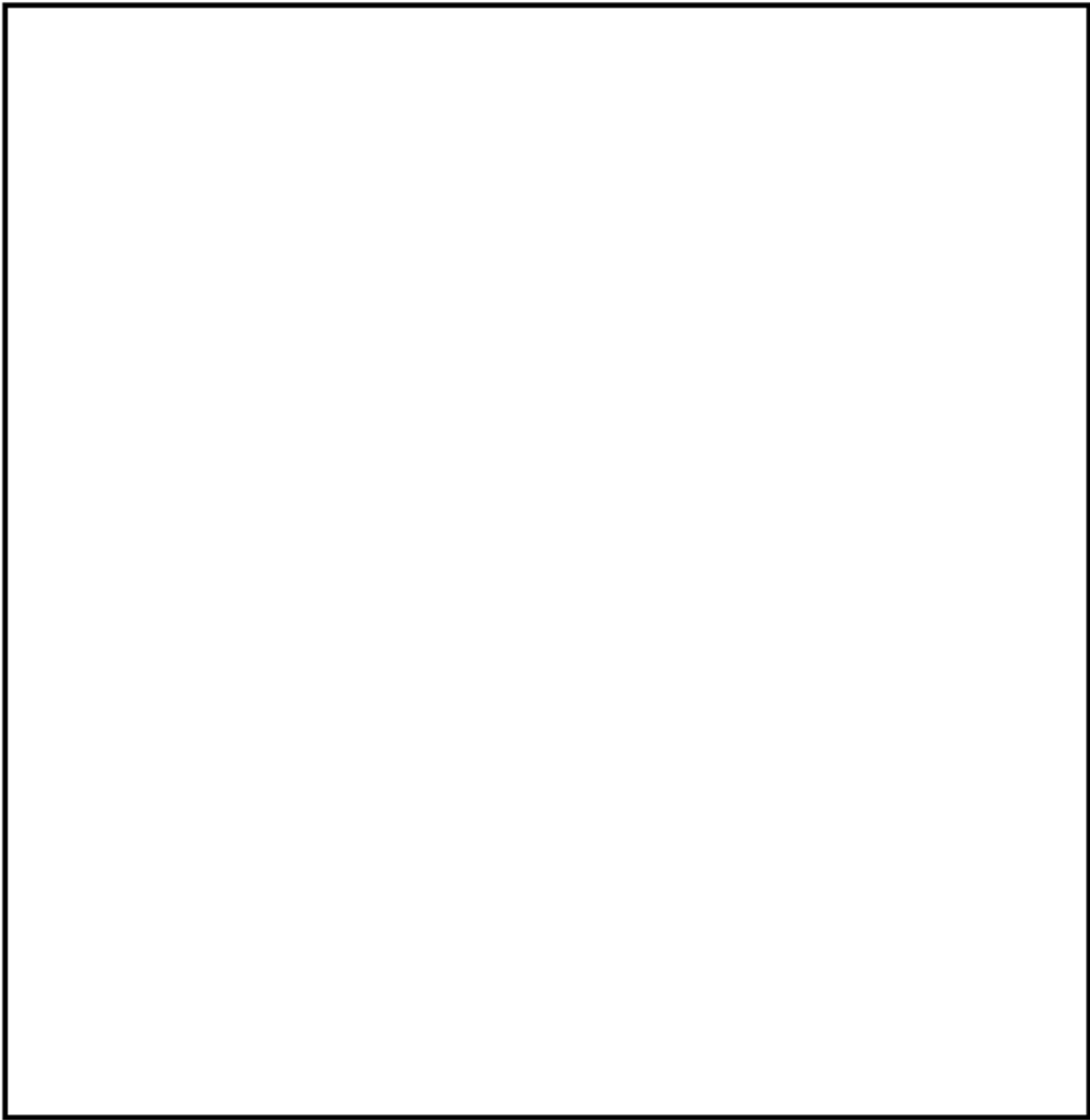
炉内構造物における中性子照射量は、以下の手順で算出している。

- (1) 基準計算として、R-Z 体系モデル（垂直断面モデル）により、炉内各位置の中性子束を算出する。
- (2) 補正計算として R- $\theta$  体系モデル（水平断面モデル）により、燃料配置の影響を考慮した周方向中性子束の分布から補正係数を算出し、基準計算にて得られた中性子束に乗じることで、炉内各位置の中性子束分布とする。
- (3) 炉内構造物のうち、炉心を取り囲む評価対象機器（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）について、(2) で求めた中性子束分布から、構造上最も中性子束が高くなる位置及びその位置の中性子束を求める。
- (4) 運転開始後 60 年時点での実効運転期間を設定する。
- (5) 評価対象機器の中性子束が最も高くなる位置における中性子束と実効運転期間を乗じて、評価対象機器の運転開始後 60 年時点での中性子照射量とする。

### 3. 計算モデル

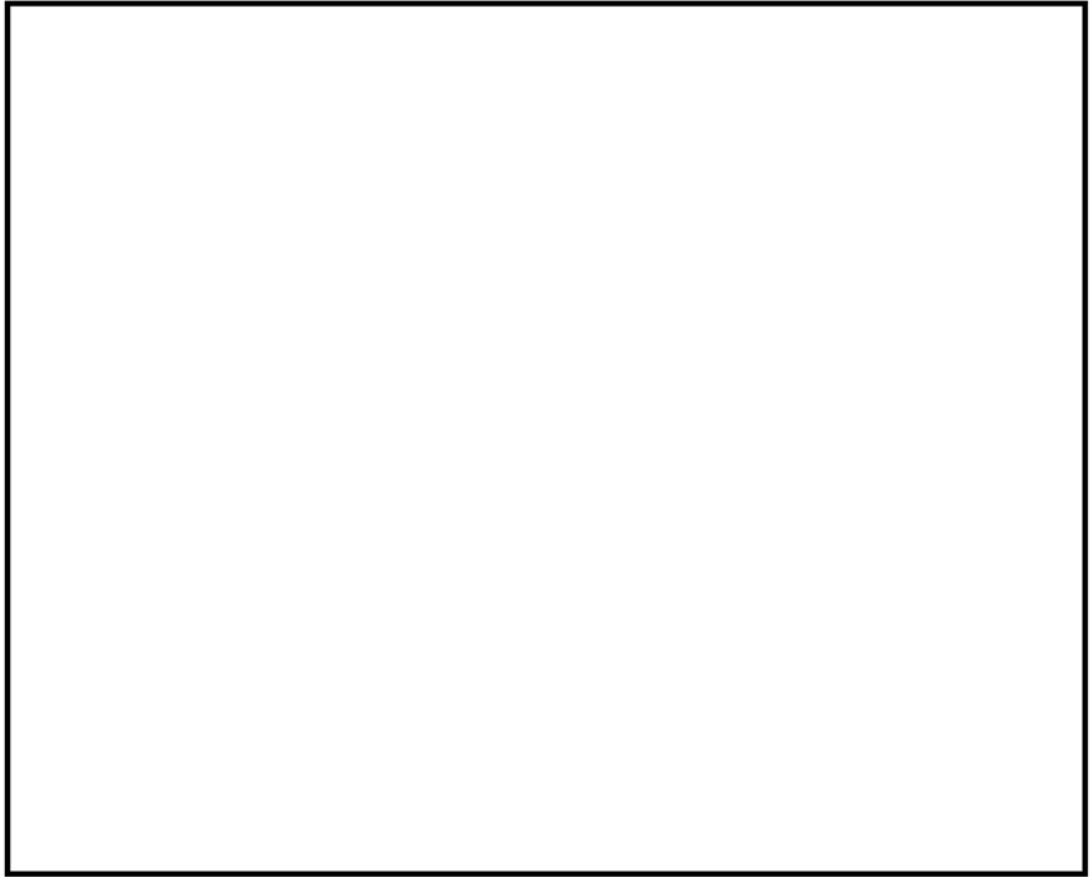
#### (1) R-Z 体系モデル（垂直断面モデル）

基準計算として、下図のような形状のモデルを用いて炉内各位置の中性子束を算出する。



(2) R- $\theta$  体系モデル (水平断面モデル)

下図のような形状のモデルを用いて燃料配置による周方向中性子束分布から補正係数を算出する。



#### 4. 60年時点の実効運転期間

2016年11月時点及び運転開始後60年時点の実効運転期間（EFPY）は、積算熱出力から下記の通り算出した。

<2016年11月時点のEFPY>

$$= 2011年3月時点の積算熱出力 \div 定格熱出力 \div 365$$

$$= \frac{28,502.9 \text{ (GWD)} \times 1,000 \text{ (MWD/GWD)}}{3,293 \text{ (MW)} \times 365 \text{ (D)}}$$

$$= 23.71\text{EFPY}$$

<60年時点のEFPY>

$$= (\text{次回起動日以降の積算熱出力} + 2011年3月時点の積算熱出力) \div 定格熱出力 \div 365$$

$$= \frac{(18295.9 \text{ (GWD)} + 28,502.9 \text{ (GWD)}) \times 1,000 \text{ (MWD/GWD)}}{3,293 \text{ (MW)} \times 365 \text{ (D)}}$$

$$= 38.94 \text{ EFPY}$$

- ・ 定格熱出力：3,293 (MW)
- ・ 次回起動日以降の運転日数：5,556 日\*を想定
- ・ 次回起動日以降の積算熱出力

$$= \frac{5,556 \text{ (D)} \times 3,293 \text{ (MW)}}{1,000 \text{ (MW/GW)}} = 18,295.91 \text{ (GWD)}$$

\*: 2015年9月時点の中長期運転保守計画に基づく次回起動日以降60年時点までの運転日数は、420日×13サイクル+96日=5,556日とした。

一方、現在社内で検討している次回起動日及び将来の設備利用率を80%とした場合の運転日数は、以下となる。

- ・ 2021年3月末まで停止、暫定で同年3月31日起動想定
- ・ 60年時点までの日数は6,452日であることから、稼働率80%の場合は運転日数6,452日×80%=5,162日

よって、中性子照射量の算出に用いた次回起動日以降の運転期間は、将来の設備稼働率を80%以上とした計画より大きな設定となっている。

5. 中性子照射量の算出結果

評価対象機器の中性子照射量の算出結果を表1に示す。

表1 炉内構造物各機器の中性子照射量

評価対象機器	中性子束が最大となる位置	運転開始後60年時点の中性子照射量[n/m <sup>2</sup> ]
炉心シュラウド	中間胴H4周溶接継手から上へ 約970mmの母材部 (周方向位置は図1参照)	$2.0 \times 10^{25}$
炉心シュラウド (周溶接継手)*2	中間胴H4溶接継手内面 (周方向位置は図1参照)	$1.6 \times 10^{25}$
上部格子板	グリッドプレート下端, 炉中心位置	$2.9 \times 10^{25}$
炉心支持板	支持板上端	$2.1 \times 10^{24}$
周辺燃料支持金具	支持金具上端	$7.1 \times 10^{23}$
制御棒案内管	上面, 炉中心位置	$2.1 \times 10^{24}$

\*2 炉心支持機能の維持のため必要な溶接継手として評価

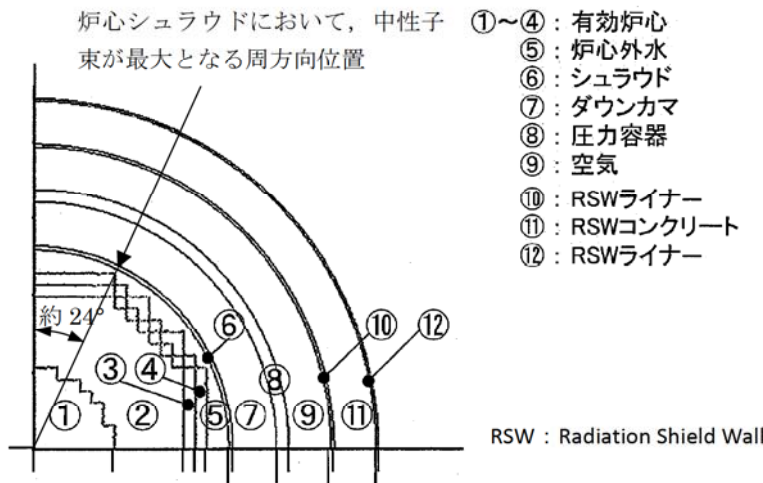


図1 炉心シュラウドにおいて、中性子束が最大となる周方向位置

## 6. 解析値と監視試験片の線量から評価した値と比較

第4回監視試験片の位置における解析により求められた中性子束と、第4回監視試験片の線量から評価した中性子束を表2に示す。解析値(C)と試験片評価値(E)の比(C/E)は約2.4であり、解析値は十分に保守性があることを確認した。

表2 解析による中性子束と第4回監視試験片の評価による中性子束の比較

位置	中性子束 [n/cm <sup>2</sup> ・s]		比較
	解析による評価結果	監視試験による評価結果	
	(C)	(E)	(C/E)
監視試験片位置	9.20×10 <sup>8</sup>	3.85×10 <sup>8</sup>	2.39

以 上



＜上部格子板グリッドプレートに発生する応力＞

上部格子板のグリッドプレートは、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と評価している。上部格子板のグリッドプレートに発生する応力を評価した結果を以下に示す。

1. 差圧による応力

運転中の差圧による応力は、評価部位であるグリッドプレート下端に生じる自重による応力を低減させる方向に働くことから、応力腐食割れの評価には保守的に評価しない。

2. 熱による応力

上部格子板はすべて同じ温度領域にあり、同じ材料（ステンレス鋼）であるため、急激な温度さや熱膨張差は生じず、運転中の熱による応力は微小であることから、熱による応力は、応力腐食割れの評価には保守的に評価しない。

3. 自重による応力

自重による応力は、その値が最大となるように、最長のグリッドプレートの中央部の応力とする。

(1) 自重W

評価対象部位に生じる自重Wは、次式より求める。

$$\begin{aligned}
 W &= t \times h \times L \times \gamma \\
 &= \boxed{\phantom{000}} \times \boxed{\phantom{000}} \times \boxed{\phantom{000}} \times 7.78 \times 10^{-5} \\
 &= \boxed{\phantom{000}} \text{ [N]}
 \end{aligned}$$

t : グリッドプレート板厚 =  $\boxed{\phantom{000}}$  [mm]

h : グリッドプレート高さ =  $\boxed{\phantom{000}}$  [mm]

L : 最長グリッドプレート長さ =  $\boxed{\phantom{000}}$  [mm]

$\gamma$  : 材料の比重 =  $\boxed{\phantom{000}}$  [N/mm<sup>3</sup>]

図 1 及び図 2 に示す最長グリッドプレート中央部の曲げモーメントMは等分布荷重を受ける両端固定梁の公式より、次のように求める。

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{W \times L}{24} = \frac{\boxed{\phantom{000}} \times \boxed{\phantom{000}}}{24} \\
 &= \boxed{\phantom{000}} \text{ [N} \cdot \text{mm]}
 \end{aligned}$$

(2) 死荷重による応力  $\sigma_b$

モーメントMによる曲げ応力  $\sigma_b$  は、材料力学の公式より、次のように求める。

$$\sigma_b = \frac{6 \times M}{t \times (h_a + h_b)^2} = \frac{6 \times \boxed{\phantom{000000}}}{\boxed{\phantom{0000}} \times (\boxed{\phantom{000000}})^2}$$
$$= \boxed{\phantom{000}} \text{ [MPa]}$$

$h_a$  : ノッチ部リガメント高さ =  $\boxed{\phantom{0000}} \text{ [mm]}$

$h_b$  : ノッチ部高さ =  $\boxed{\phantom{0000}} \text{ [mm]}$

以上より、上部格子板のグリッドプレートにかかる荷重は主に自重であり、その応力は最大でも  $\boxed{\phantom{000}} \text{ [MPa]}$  と小さい。

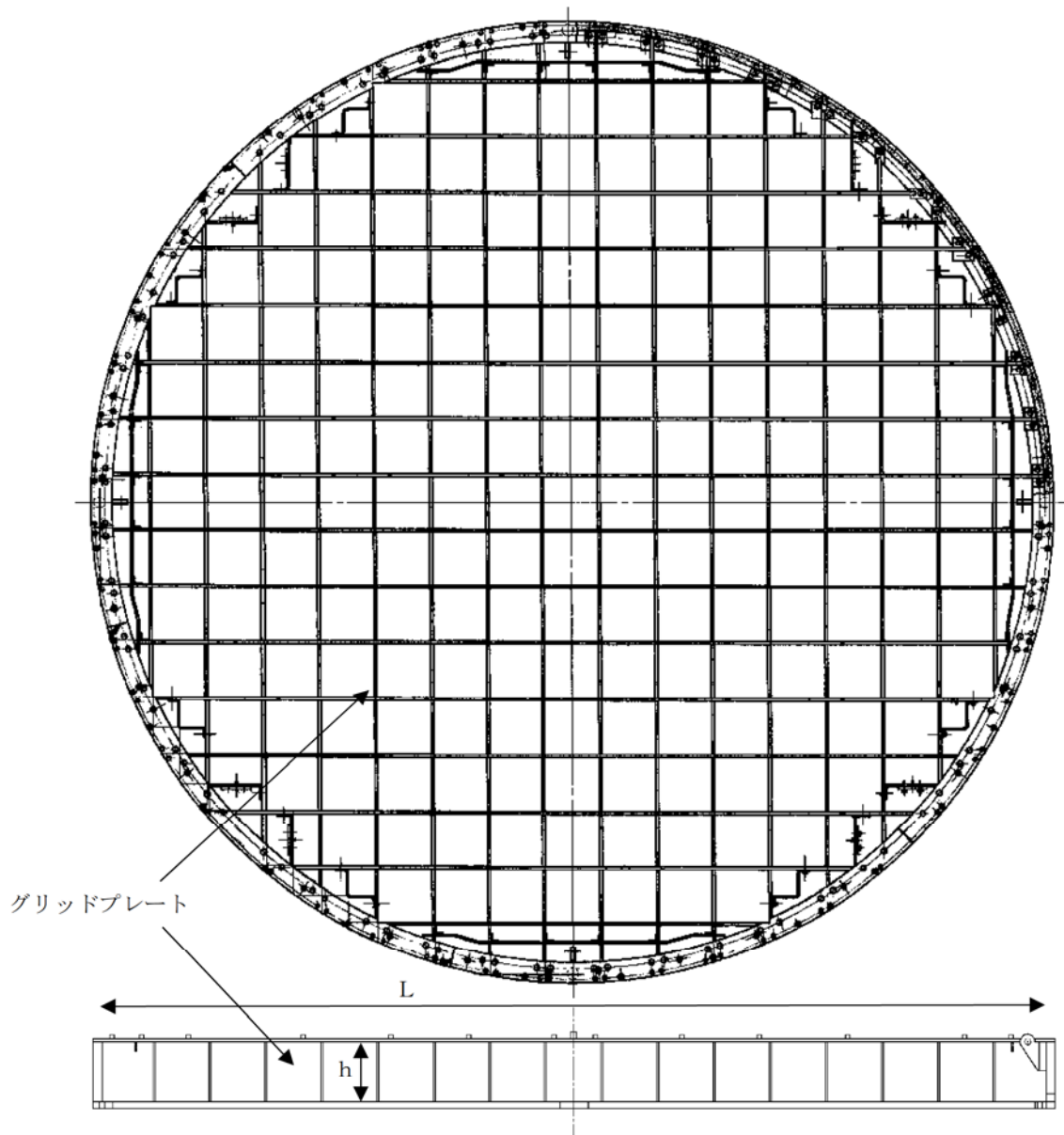


図1 上部格子板の構造図

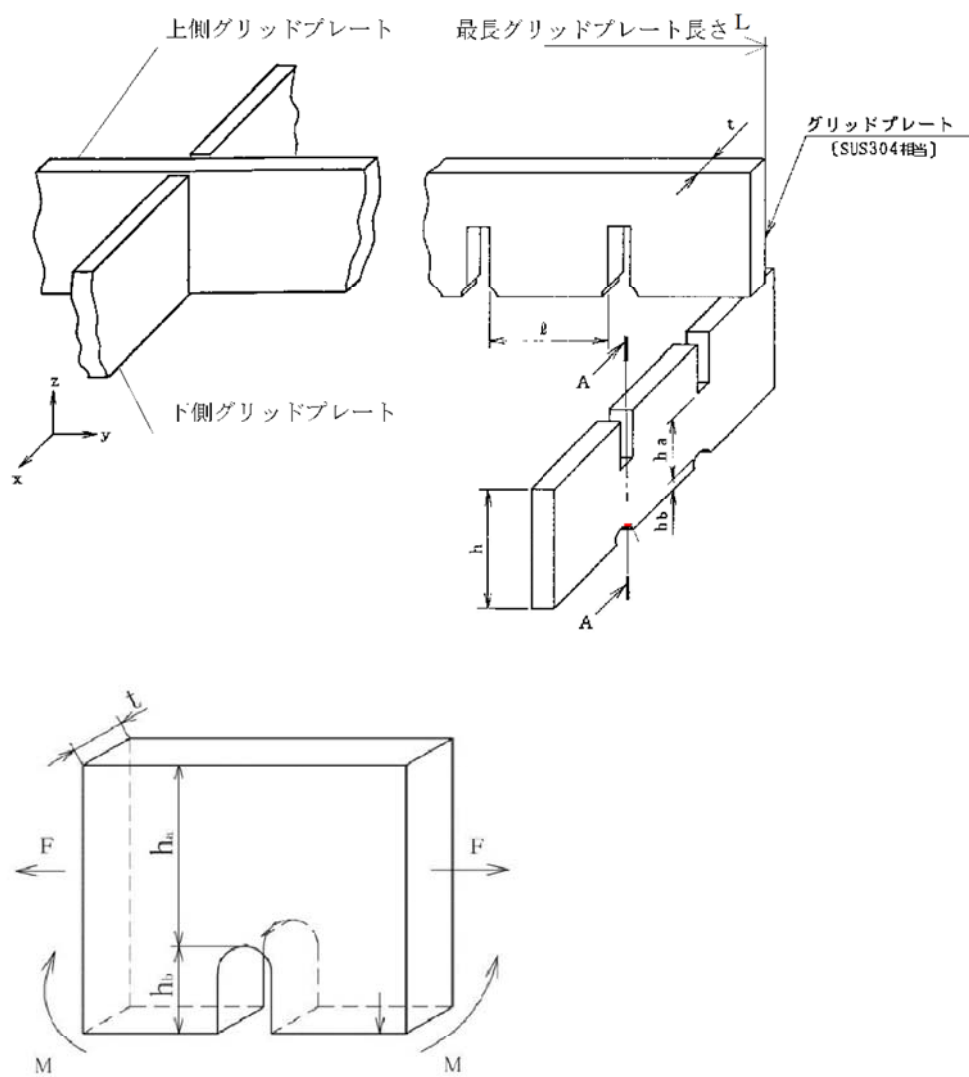


図2 上部格子板グリッドプレートの構造図

## ＜炉内構造物に関する照射誘起型応力腐食割れ発生可能性の評価について＞

炉心を取り囲む評価対象機器（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）について、環境、応力、材料及び中性子照射量に基づき、照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性を評価する。結果を表 1 に示す。

## （材料）

- 評価対象機器の材料はすべてステンレス鋼（SUS304L 又は SUS034）であり、照射誘起型応力腐食割れ発生因子となる可能性が否定できない。

## （環境）

- 評価対象機器の環境は通常運転時 285 °C の純水であり、照射誘起型応力腐食割れ発生因子となる可能性が否定できない。ただし、炉心シュラウド中間胴の周溶接継手（熱影響部含む）の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、局部的に腐食環境の改善効果を向上させているため、照射誘起型応力腐食割れ発生因子となる可能性は小さい。

## （中性子照射量）

- 照射誘起型応力腐食割れの感受性の発現しきい照射量と評価対象機器の中性子照射量を比較した結果、炉心シュラウド中間胴母材部、中間胴 H4 周溶接継手及び上部格子板グリッドプレートの照射量はしきい照射量よりも大きくなると予測されたことから、照射誘起型応力腐食割れが発生する因子となる可能性は否定できない。

## （応力）

- 上述の中性子照射量がしきい値を超えると予測されている、炉心シュラウド中間胴母材部及び上部格子板グリッドプレートについては、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は小さく、照射誘起型応力腐食割れ発生因子となる可能性はないと評価する。炉心シュラウドの中間胴 H4 周溶接継手外面については、ウォータージェットピーニング施工による残留応力の改善を行っていることから、照射誘起型応力腐食割れ発生因子となる可能性はないと評価する。

## （評価結果）

- しきい照射量を超える部位のうち、炉心シュラウド中間胴 H4 周溶接継手の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、局部的に腐食環境の改善効果を向上させているため、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。
- 炉心シュラウド中間胴 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施工による残留応力の改善を行っていることから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はないと評価する。
- 炉心シュラウド中間胴の母材部及び上部格子板のグリッドプレートは、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。
- 炉心支持板、周辺燃料支持金具及び制御棒案内管については、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。

以上

表 1 照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性に関する評価

評価対象機器	材料	環境 (温度は通常運転時)	中性子照射量 [n/m <sup>2</sup> ] [最大となる位置]*1*2	応力 (中性子照射量が最大となる位置の評価)	照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性に関する総合評価
炉心シユウ ラウド (周溶接 継手)	内 面	▲水素注入+ 貴金属コーテ ィング	○ 1.6×10 <sup>25</sup> [中間胴 H4 周溶接継手]	○周継手溶接による残留引張応力	内面は水素注入及び貴金属コーティングによる腐食環境の改善を行っていることから、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。
	外 面	○炉水, 285℃	○ 9.4×10 <sup>24</sup> [中間胴 H4 周溶接継手]	－ウオータージェットピーニング施工	外面はウオータージェット施工による残留応力の改善を行っていることから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はないと評価する。
炉心シユウ ウド	○ステンレ ス鋼 SUS304L	○炉水, 285℃	○ 2.0×10 <sup>25</sup> [中間胴 H4 周溶接継手から 上へ約 970 mm の母材部]	－溶接部ではないため溶接による残留引張応力はない。運転中の差圧、熱、自重等に起因する引張応力は小さい。	溶接部はなく引張応力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	○ステンレ ス鋼 SUS304	○炉水, 285℃	○ 2.9×10 <sup>25</sup> [グリッドプレート下端, 炉中心位置]	－溶接部ではないため溶接による引張残留応力はない。運転中の差圧、熱、自重等に起因する引張応力は小さい。	溶接部はなく引張応力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。
炉心支持板	○ステンレ ス鋼 SUS304	○炉水, 285℃	－ 2.1×10 <sup>24</sup> [支持板上端]	▲運転中の差圧、熱、自重等に起因する引張応力は小さい。溶接部は入熱が小さく残留引張応力は小さい。	中性子照射量が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。
周辺燃料支 持金具	○ステンレ ス鋼 SUS304	○炉水, 285℃	－ 7.1×10 <sup>23</sup> [支持金具上端]		
制御棒案内 管	○ステンレ ス鋼 SUS304	○炉水, 285℃	－ 2.1×10 <sup>24</sup> [上面, 炉中心位置]		

\*1 運転開始後 60 年時点の中性子照射量とその位置。別紙 2 参照

\*2 照射誘起型応力腐食割れの感受性発現しきい照射量  $5 \times 10^{24}$  [n/m<sup>2</sup>] (ステンレス鋼 SUS304 材の値) と比較し評価。

凡例 ○：照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性を否定できない ▲：照射誘起型応力腐食割れ発生因子となる可能性は小さい

－：照射誘起型応力腐食割れ発生因子となる可能性はない 「▲」及び「－」をハッチング

## ＜ウォータージェットピーニング施工による応力腐食割れ抑制効果について＞

### 1. はじめに

ウォータージェットピーニング施工（以下、「W J P」という）とは、高圧水を水中でノズルから噴射することにより発生させたキャビテーションを含むジェットで、機器表面をピーニングすることにより、材料表面の引張残留応力を圧縮側に改善する方法である。

東海第二では、応力腐食割れの抑制対策として、環境改善のため1996年より水素注入を実施しており、この効果を炉心領域のまで拡大させるため炉心領域にある内面の溶接継手に対して貴金属コーティング施工を1999年の第17回定期検査にて実施した。また、炉心シュラウドの上部胴内面や上部胴・中間胴の外面の溶接継手にはW J Pを同年に実施した。

W J Pによる応力腐食割れの抑制効果に関する概要を以下に述べる。

### 2. W J Pの概要

W J Pは、財団法人発電設備技術検査協会にて「原子炉炉内構造物へのショットピーニングおよびウォータージェットピーニング方法適用に関する確性試験（以下、「W J P確性試験」という）」の審議が行われ、平成8年9月に合格証明書が発行されている。

W J Pを適用する場合には、その施工を受ける部材の耐食性等の健全性が損なわれていないこと、即ち、材料に対して悪い影響が与えられていないことの確認を行う必要があり、W J P確性試験において各種の試験が実施された。また、残留応力が圧縮側に改善されるW J Pの施工条件が確認されている。

また、日本原子力技術協会の予防保全工法ガイドライン [ピーニング工法]<sup>\*1</sup>（以下、「ピーニング工法ガイドライン」という）において、応力腐食割れの予防保全工法としてW J Pが添付されている。

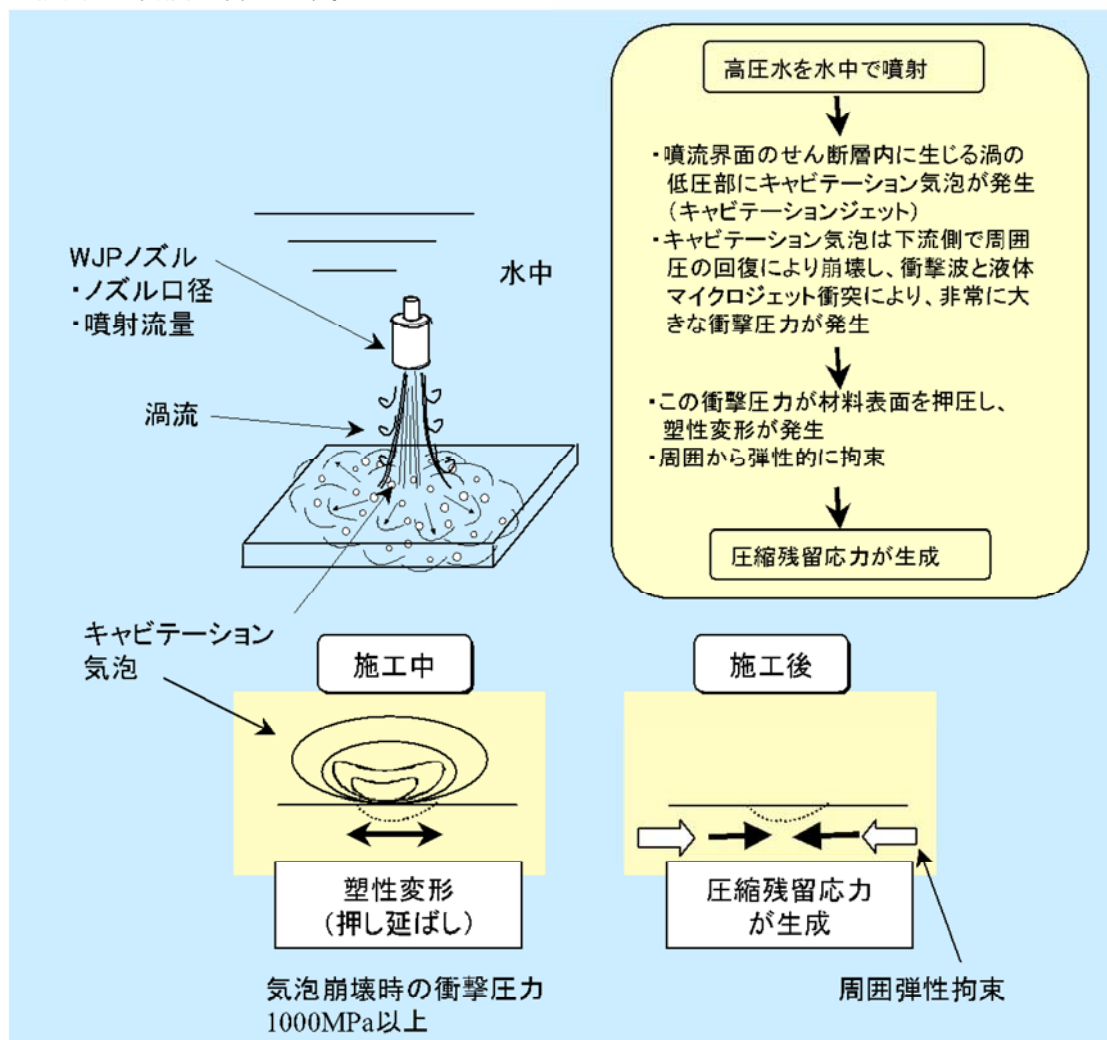
維持規格においては、W J Pが炉内構造物の予防保全工法として、「RB-2450 ピーニング法」に記載されている。また、「添付 IJG-B-2-1 シュラウドに対する予防保全の適用」の「表 添付 IJG-B-2-1-1 予防保全の適用」に、「ピーニング」を適用した場合に「予防保全実施時期を供用開始時期として、表 IJG-2500-B-2 のG3.10 およびG3.20 を適用できる。」としており、W J Pの効果に関する規定がある。

W J Pによる引張残留応力改善の原理を図1に、W J Pの現場施工の概念を図2から4に示す。

\*1 JANTI-VIP03-第2版 予防保全工法ガイドライン [ピーニング工法] 平成20年1月 有限責任中間法人 日本原子力技術協会

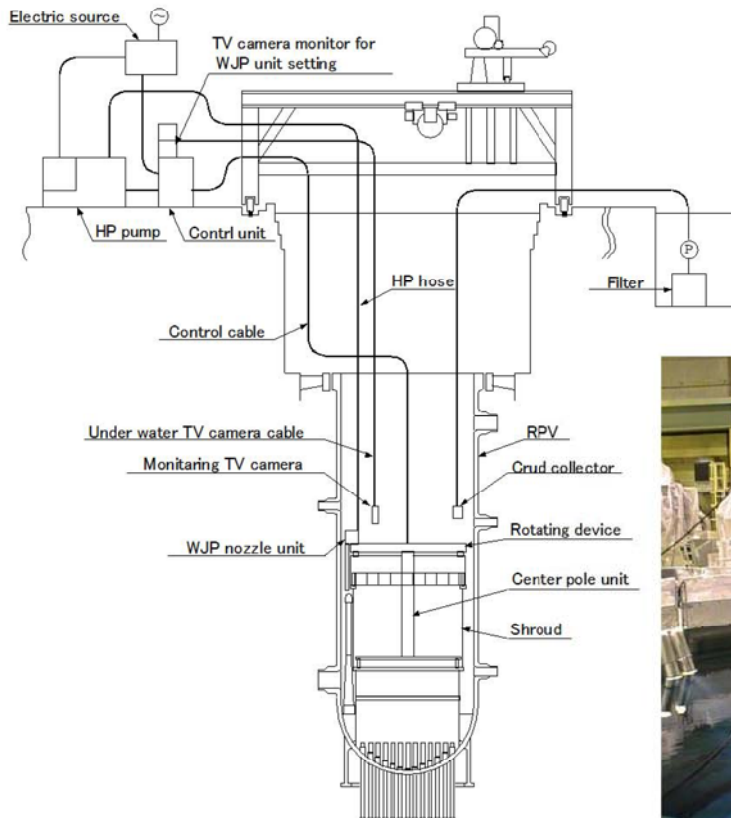
(解説 2-1) W J P の原理

W J P は、高圧水を水中でノズルから噴射することにより発生させたキャビテーションを含むジェットで、機器表面をピーニングする技術である。この W J P の原理を、解説図 2-1(1)及び(2)に示す。



解説図 2-1(1) W J P の原理

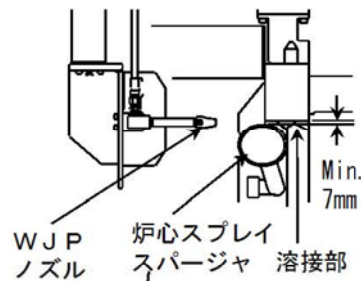
図 1 W J P による引張残留応力改善の原理  
(ピーニング工法ガイドラインより)



炉心シュラウド適用時の装置の配置



センターポールユニット



WJP ノズル 炉心スプレイ スパージャ 溶接部



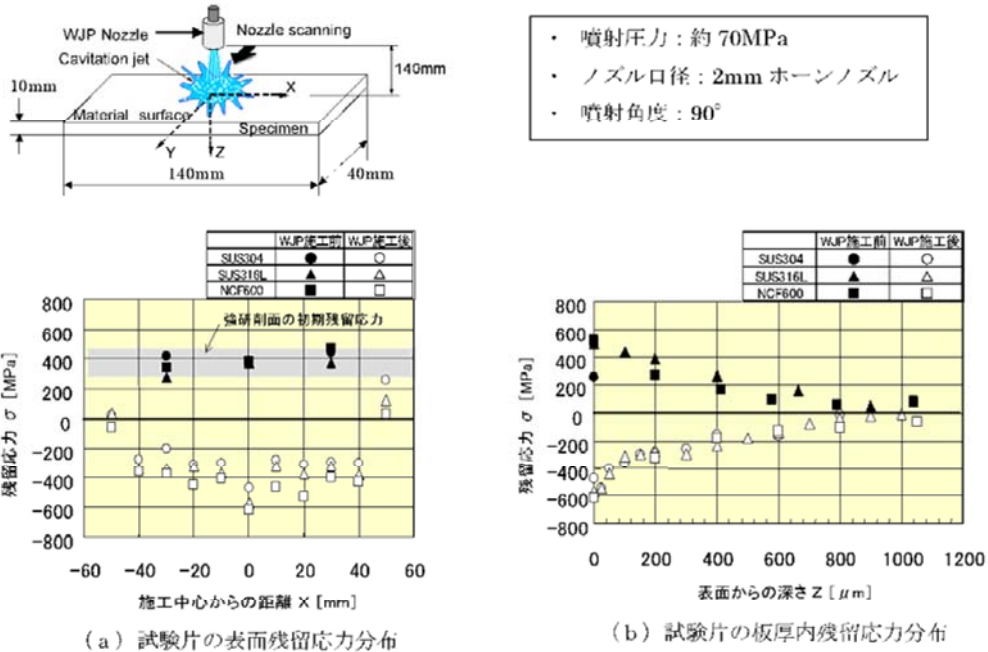
炉心スプレイ配管と炉心シュラウド上部リング  
隙間への施工模式図とモックアップ試験状況

図2 WJPの現場施工の概要



### 3. W J Pによる応力腐食割れの抑制効果

W J Pによる応力腐食割れの抑制効果として、ピーニング工法ガイドラインに記載された残留応力低減効果の確認試験結果を図3に示す。強研削によって付与した初期の引張残留応力が、圧縮側になっていることが確認できる。



解説図 1-1 ウォータージェットピーニングによる残留応力低減効果例

(出典：日本ウォータージェット学会「噴流工学」Vol.20、No.1 (2003年2月))

図3 W J Pによる残留応力改善効果 (ピーニング工法ガイドラインより)

また、図2に示した炉心シュラウドのモックアップ試験体にW J Pを行った場合の残留応力測定結果を図4に示す。狭隘部であっても溶接による残留応力が、圧縮側になっていることが確認できる。

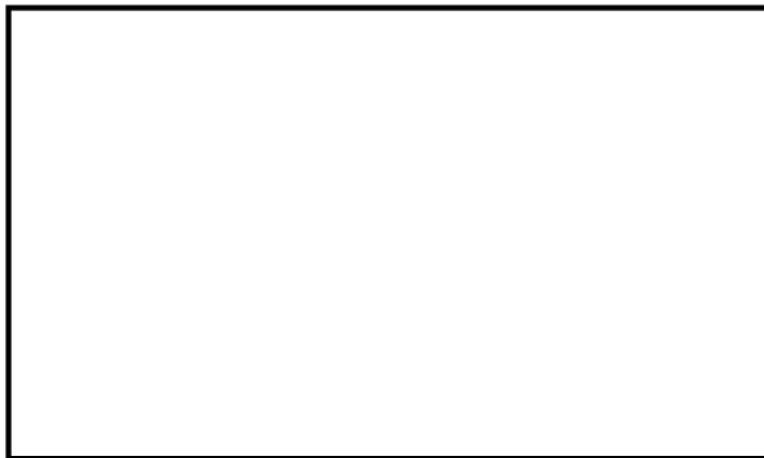


図4 W J Pによる残留応力改善効果 (メーカー社内試験より)

#### 4. W J Pの効果の持続性

W J Pにより付与された圧縮残留応力については、60年運転を考慮した場合、起動停止による繰り返しのひずみ負荷や運転期間中の熱によって持続することができるかを検討した。

応力腐食割れの予防保全対策として応力改善工法を適用した場合の効果の持続性については、国内電力10社による共同研究の成果があり、このうちステンレス鋼の溶接熱影響部にW J Pを施工した場合に関する成果について、要点を以下に紹介する。なお、研究の成果は、(財)発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター技術レビューVol.9 2013 及び保全学 Vol. 11, No4(2013)に紹介されており、以下は前者を出典としている。

- (1) 試験片の製作：SUSU316LとNCF600、溶接金属がインコネル182合金の異材溶接継手を製作、表面にW J P等を施工（表1、図5）
- (2) ひずみ負荷：320℃（BWR運転温度290℃よりも厳しいPWRの条件）で0.07%のひずみを試験片長手方向（溶接線方向）に、実機60年運転を想定した設計上の繰り返し数以上となる200回まで負荷。
- (3) 熱時効処理：上記ひずみを負荷した後、320℃で60年間（525,600時間）相当の熱履歴をラーソンミラーパラメータで加速条件を算出し、400℃で461時間に相当するとして熱時効処理を実施。
- (4) 残留応力測定：ひずみ負荷後、及び熱時効処理後の表面及び板厚内部（100μm）の残留応力をX線回折法で測定（図6）。

表1 試験片へのW J P施工条件

WJP	流量	800cm <sup>3</sup> /s
	入射時間	24s/cm
	入射距離	140mm
	入射角	90°
	ノズル径	2mm

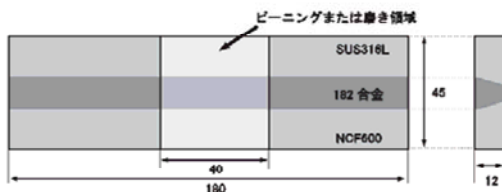


図5 試験片

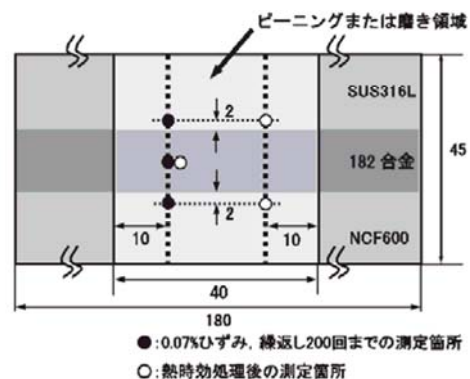


図6 試験片と残留応力測定箇所

(5) 結果：ひずみを繰り返し与えた場合、さらにその後熱時効処理を施した場合においても表面及び内部に圧縮残留応力が持続していた。なお、1回目のひずみ負荷時に昇温とひずみ負荷に伴う応力の再分配が生じて圧縮残留応力の緩和が生じるが、その後は同等の熱的、および力学的な負荷に対して圧縮残留応力の変化は少なくなっている（図7）。

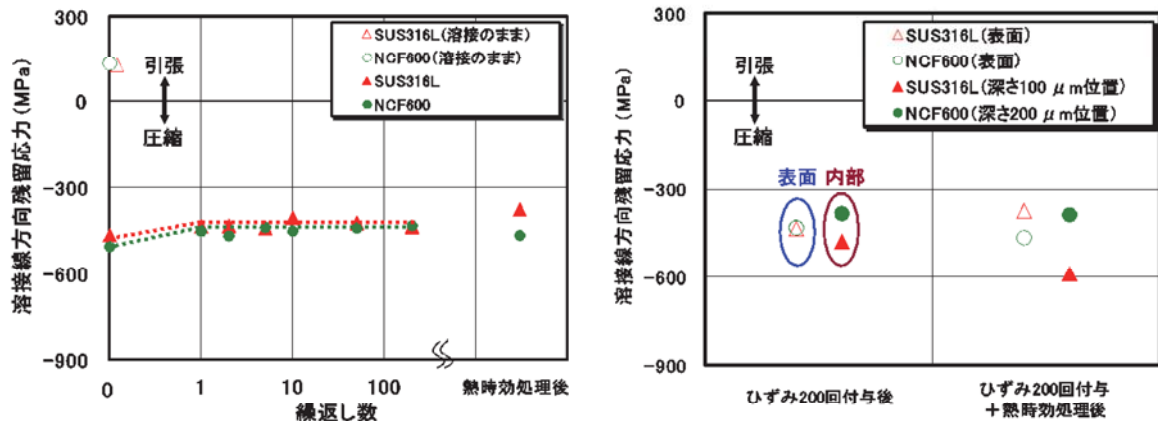


図7 残留応力測定結果

以上より、WJPにより付与された圧縮残留応力は、実機の60年運転を想定した条件下でも持続すると考えられる。

以上

## 5. 東海第二へのW J P施工の有効性

東海第二の炉心シュラウドH4周溶接継手の外面（以下、「H4外面」という）は、1999年の第17回定期検査にてW J P施工による残留応力の改善を行っていることから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はないと評価している。ここでは、W J Pが残留応力の改善に有効な条件で施工されたことを以下に示す。

炉心シュラウドH4外面へのW J P施工図を図8に、残留応力改善の基本支配因子に対する施工条件を表2に示す。実機の施工記録のうち、ノズル仕様、噴射距離及び噴射角度については確性試験の施工条件の範囲内となっている。噴射流量及び噴射時間は実機の施工記録が確性試験の施工条件外となっているが、確性試験のデータや追加確認試験により応力改善効果を確認している。

表2 炉心シュラウドH4外面へのW J P施工条件

確認項目	確性試験における 施工条件*1	東海第二炉心シュラウドH4外面施工条件	
		確認試験*2 ( )内は実機施工条 件での追加確認試験*3	実機の施工記録
ノズル仕様	噴射口径 2mm のホー ンノズル (穴数:1)	同左	同左
噴射流量 [L/min]	45～49		
噴射距離 [mm]	80～140		
噴射時間 [min/m]	30～60		
噴射角度 [°]	15 以上 45 未満		

\*1 ピーニング工法ガイドライン 解説表 4-1(2)より引用。ノズル移動方向が走行方向（噴射角度の方向にノズルが走行する方向）における条件。

\*2 確認試験は、平板試験体の表面に研削加工によって引張残留応力を付与し、W J P施工前後で残留応力を測定し、施工後に圧縮側になっていることを確認した。図9参照。

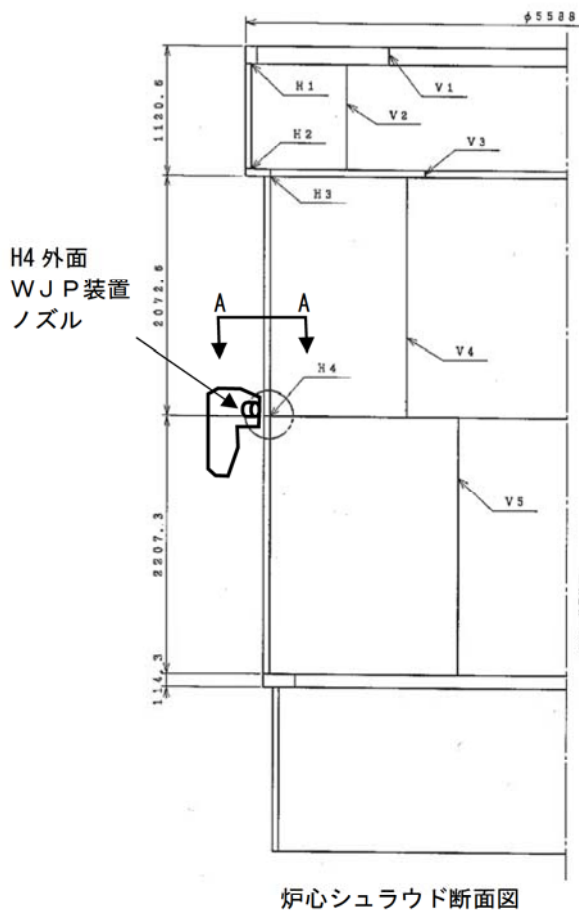
\*3 確性試験の施工条件外であるが、確性試験のデータや追加確認試験により応力改善効果を確認している。図10参照。

\*4 実機における実測は困難であるため、あらかじめW J P装置の寸法を測定。数値は装置の検査成績書の噴射距離（ノズル先端から施工面までの距離）の値について、ノズル取付寸法を現地における測定記録（W J P施工前及び施工後）で補正した値。

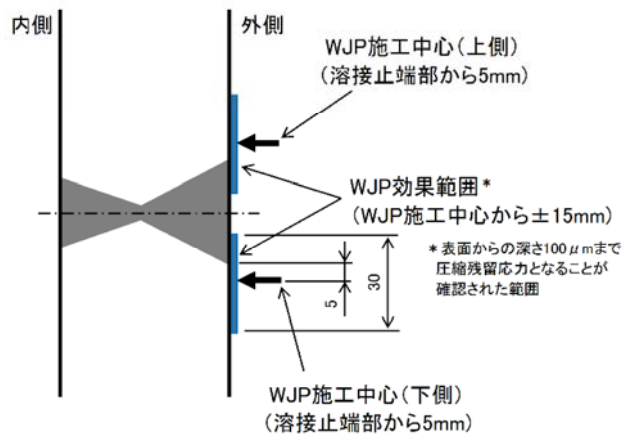
\*5 実機における実測は困難であるため、あらかじめW J P装置の寸法を測定。数値は装置の検査成績書の噴射角度の値。

また、1999年の第17回定期検査において、炉心シュラウドH4外面へのW J P施工前に目視点検（MVT-1）を行い、有意な欠陥がないことを確認している。

以上より、東海第二の炉心シュラウドH4外面には、W J Pが残留応力の改善に有効な条件で施工されている。



- 炉心シュラウド H4 外面用W J P装置は、ノズルを2個装着し、炉心シュラウドの外表面に沿って水平にノズルを走行させ施工を行う。
- 溶接熱影響部上下2箇所施工（下図）。
- 一度の設置によって円周方向  の範囲が施工可能であり、装置を約  ずらした位置（計12箇所）に設置することで全周の施工を行った。
- 炉心シュラウドH4外面とジェットポンプの狭隘部にノズルを接近させる必要があることから、施工条件は噴射角度  として確認試験を行った。



A-A 断面 (H4 外面W J P 装置ノズル可動範囲)

図8 東海第二炉心シュラウドH4外面 施工図

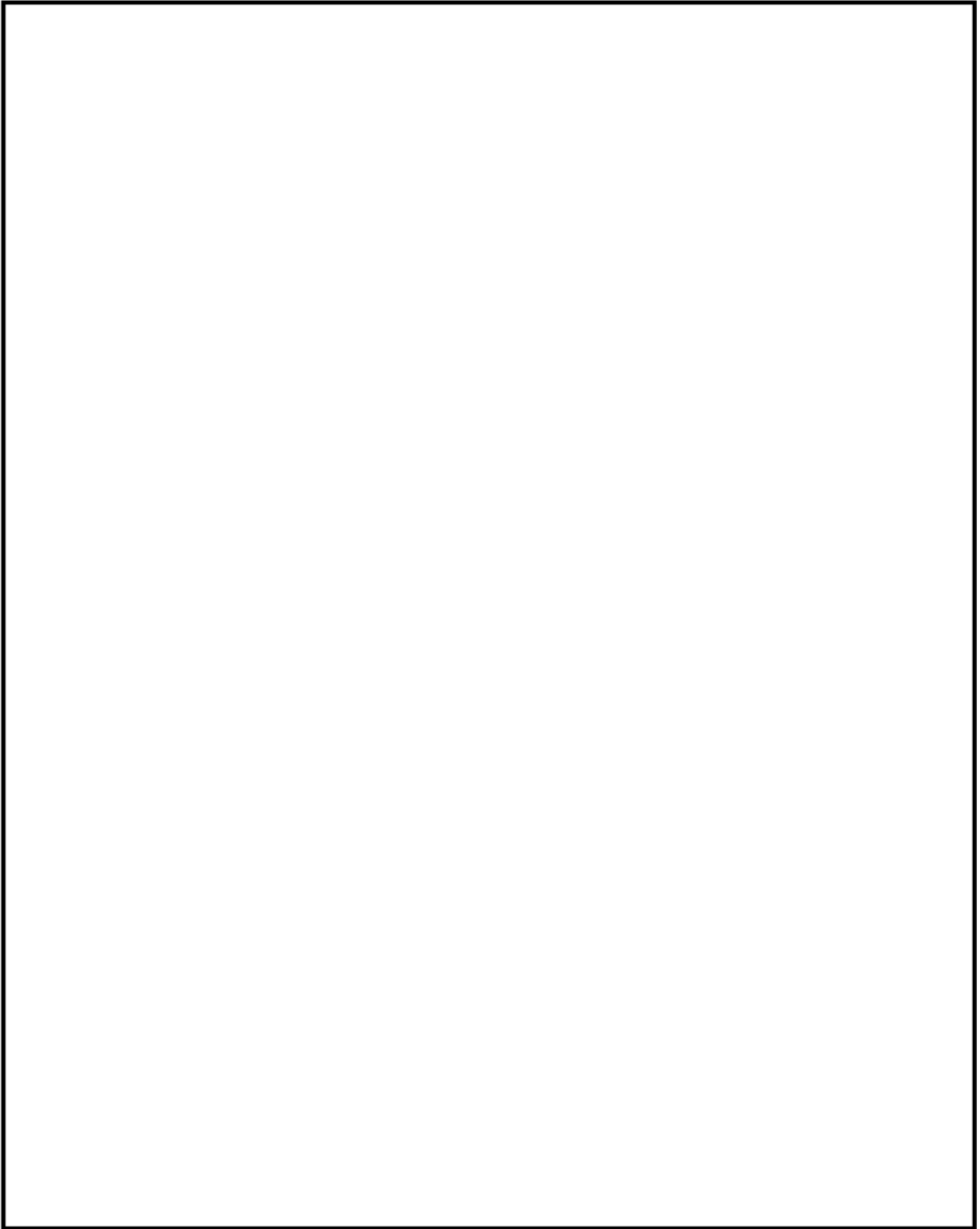


図9 東海第二炉心シュラウドH4外面 施工条件確認試験

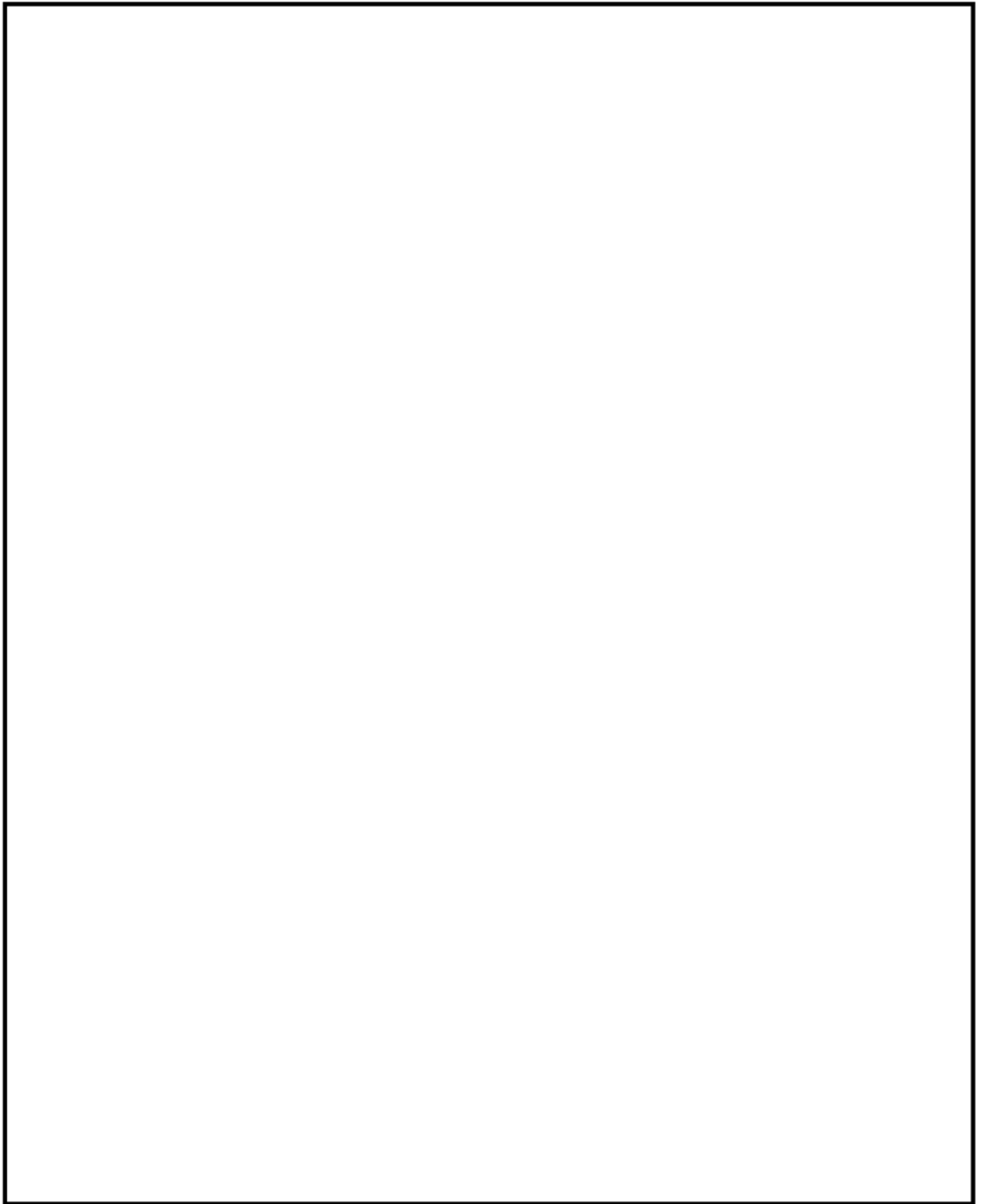


図 10 東海第二炉心シュラウド H4 外面 施工条件確認試験（実機施工条件での追加試験）



## ＜貴金属コーティング施工による応力腐食割れ抑制効果について＞

### 1. はじめに

貴金属コーティング施工（以下、「NMC」という）とは、パラジウムを含有するインコネル材の粉末を水中プラズマ溶射法により溶接熱影響部にコーティングし、その金属表面に溶射被膜を形成させるものである。

原子炉の炉内環境におけるこの溶射被膜の存在が、水素と酸素との再結合のための触媒作用をもたらし、溶接熱影響部の腐食電位を低下させ当該溶接部における応力腐食割れを防止する。

東海第二では、応力腐食割れの抑制対策として、環境改善のため1996年より水素注入を実施しており、この効果を炉心領域まで拡大させるため、炉心領域にある溶接部に対してこのNMCを1999年の第17回定期検査にて実施した。

NMCによる応力腐食割れの抑制効果に関する概要を以下に述べる。

### 2. NMCの概要

NMCは、財団法人発電設備技術検査協会にて「原子炉炉内構造物へのノーブルメタルコーティング法適用に関する確性試験（以下、「NMC確性試験」という）」の審議が行われ、平成9年12月に合格証明書が発行されている。

確性試験では、重点的に(1)施工対象部への悪影響がないこと、(2)コーティング層の密着強度が十分あり、施工対象部位から剥離しないこと、について審議が行われた。また、NMC確性試験の参考試験として腐食電位測定試験が行われ、水素注入環境において $-230\text{ mV}_{\text{SHE}}$ 以下に低下することを確認している。

維持規格においては、NMCが炉内構造物の予防保全工法として、「RB-2530 金属粉末溶射クラッド方法」に記載されている。また、「添付 IJG-B-2-1 シュラウドに対する予防保全の適用」の「表 添付 IJG-B-2-1-1 予防保全の適用」に、「貴金属表面処理」を適用した場合に「試験部位の腐食電位を評価し、添付 E-2 のき裂進展速度式を用いてき裂進展量を求め、添付 EJB-B-2-1 に示す方法により、試験程度および試験実施時期を設定することができる。」としており、NMCの効果に関する規定がある。

NMCによる応力腐食割れ抑制効果のメカニズムを図1に、NMCの現場施工の概要を図2に示す。

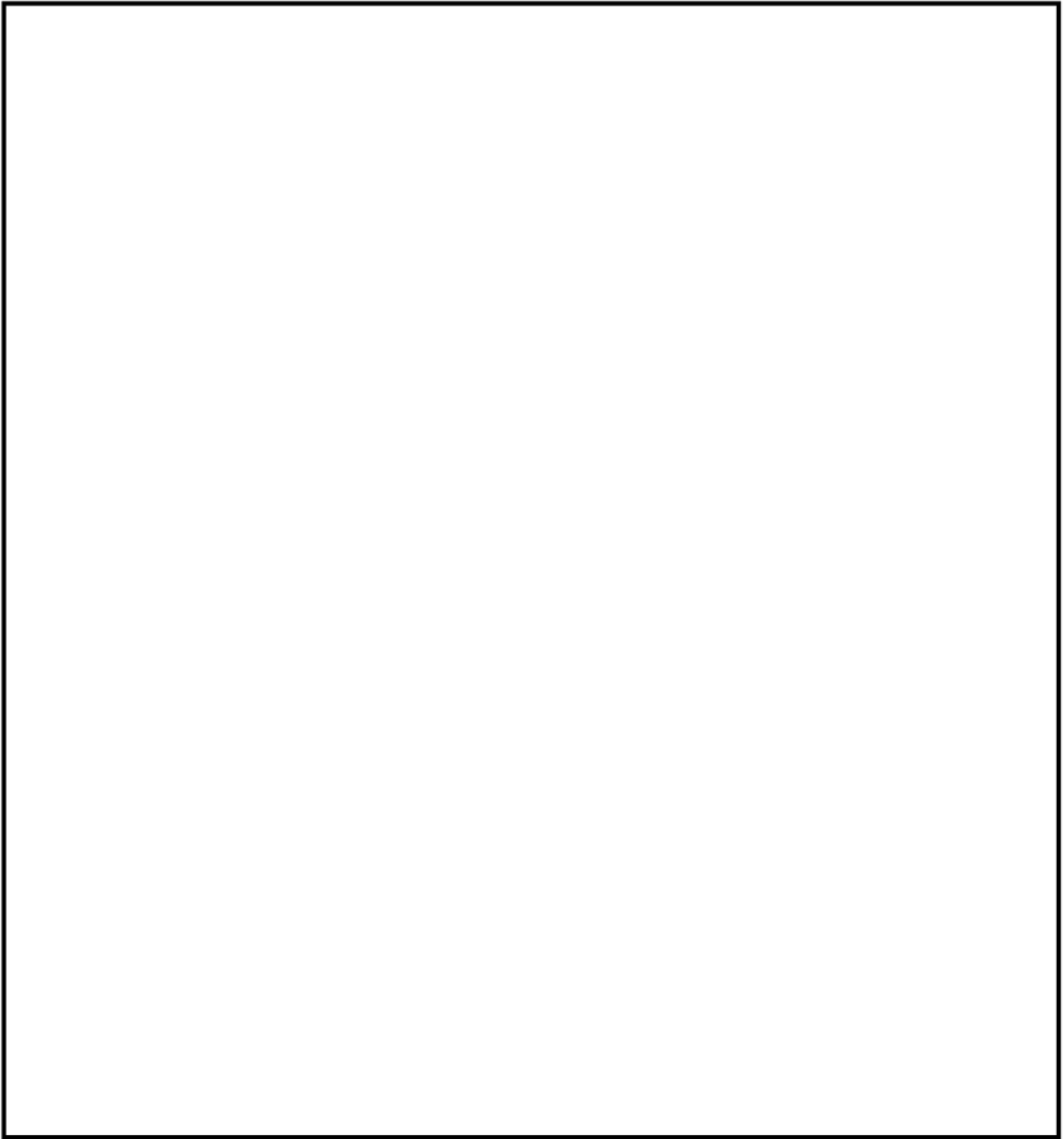


図1 NMCによる応力腐食割れ抑制効果のメカニズム  
(NMC 確性試験報告書より)

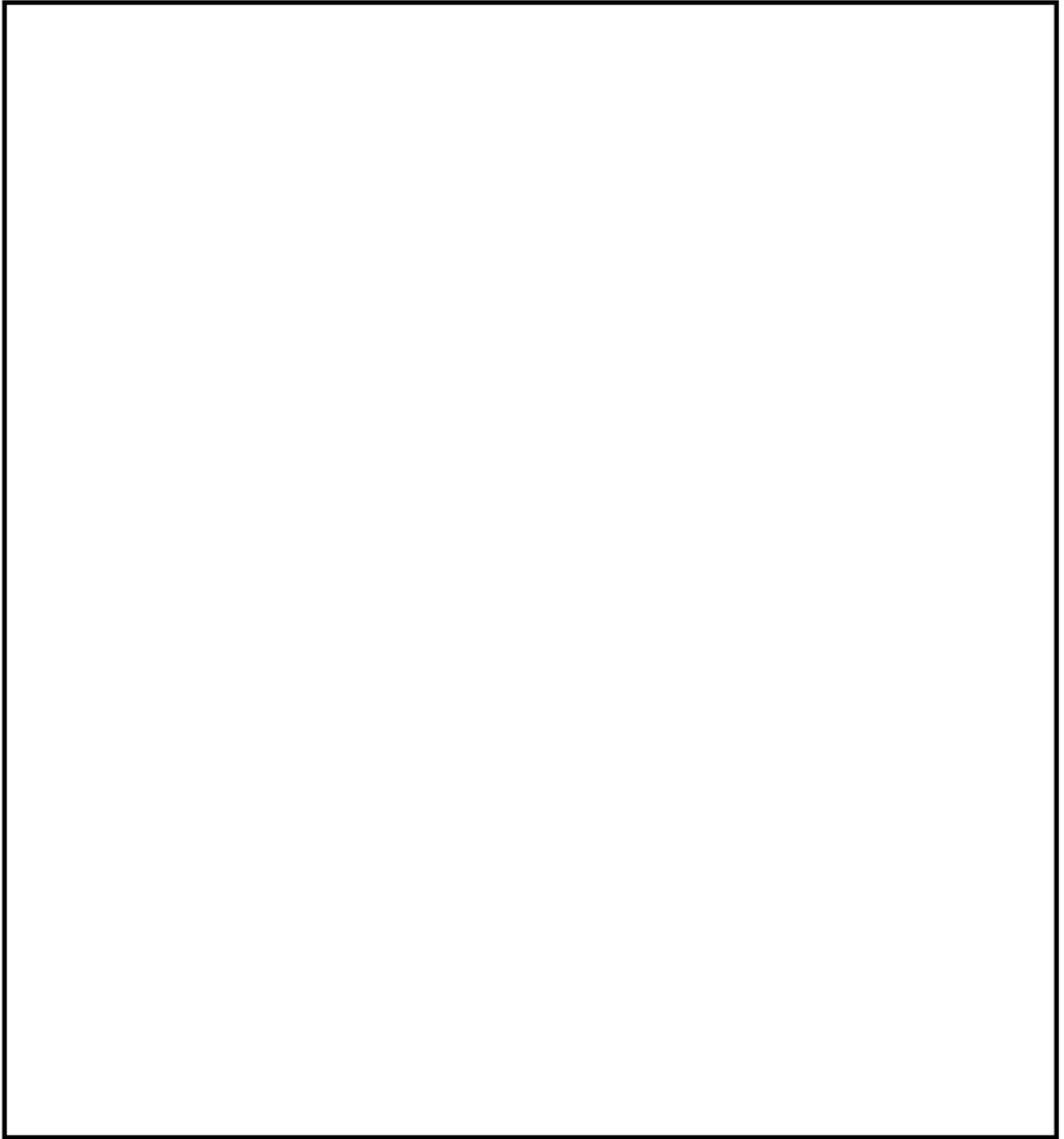


図2 NMCの現場施工の概要  
(NMC確性試験報告書より)

### 3. NMCによる応力腐食割れの抑制効果

NMCによる応力腐食割れの抑制効果として、NMC確性試験で実施した腐食電位測定試験結果を図3に示す。図中の試験体1と2は、施工条件の上限下限の値で施工したものである。

グラフ中、凡例でECPと記載した腐食電位の値はNMC施工部、304SSと記載した値はNMC未施工部である。NMCを施工したいずれの試験片も、 $H_2/O_2$ のモル比が2:1以上で腐食電位が応力腐食割れのしきい値とされる $-230\text{ mV}_{\text{SHE}}$ 以下\*1に低下することが確認されている。

\*1 JANSI-VIP-18-第2版 BWR予防保全工法ガイドライン [水素注入による環境改善効果の評価方法]  
(第2版)平成29年3月一般社団法人 原子力安全推進協会 炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

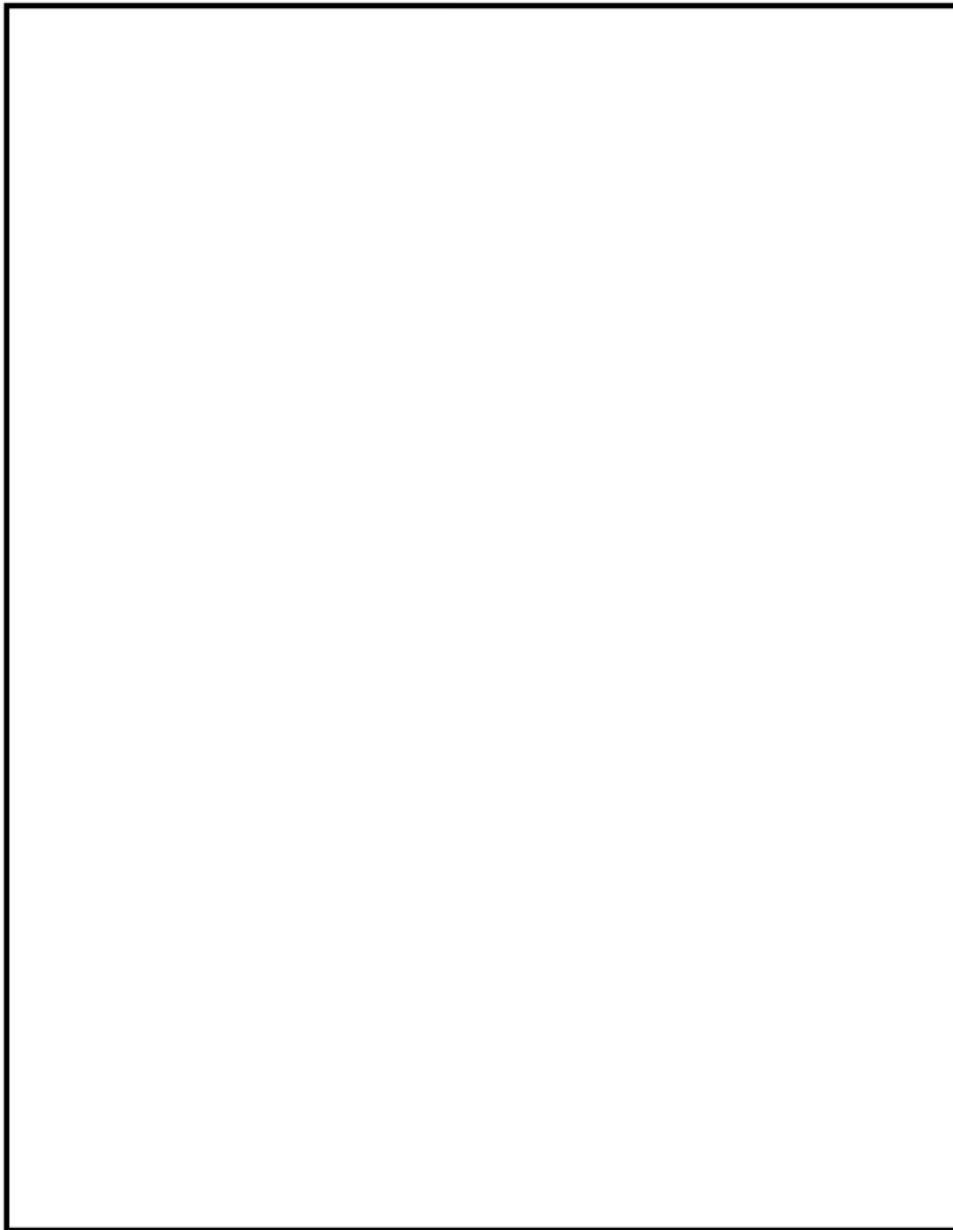


図3 NMC試験体の腐食電位測定結果  
(NMC確性試験報告書より)

<制御棒上部ハンドル部で確認されたひび及び応力腐食割れ対策について>

1. 制御棒上部ハンドル部で確認された照射誘起型応力腐食割れと推定されるひび

①第 17 回定期検査, 1999 年 A 社製制御棒

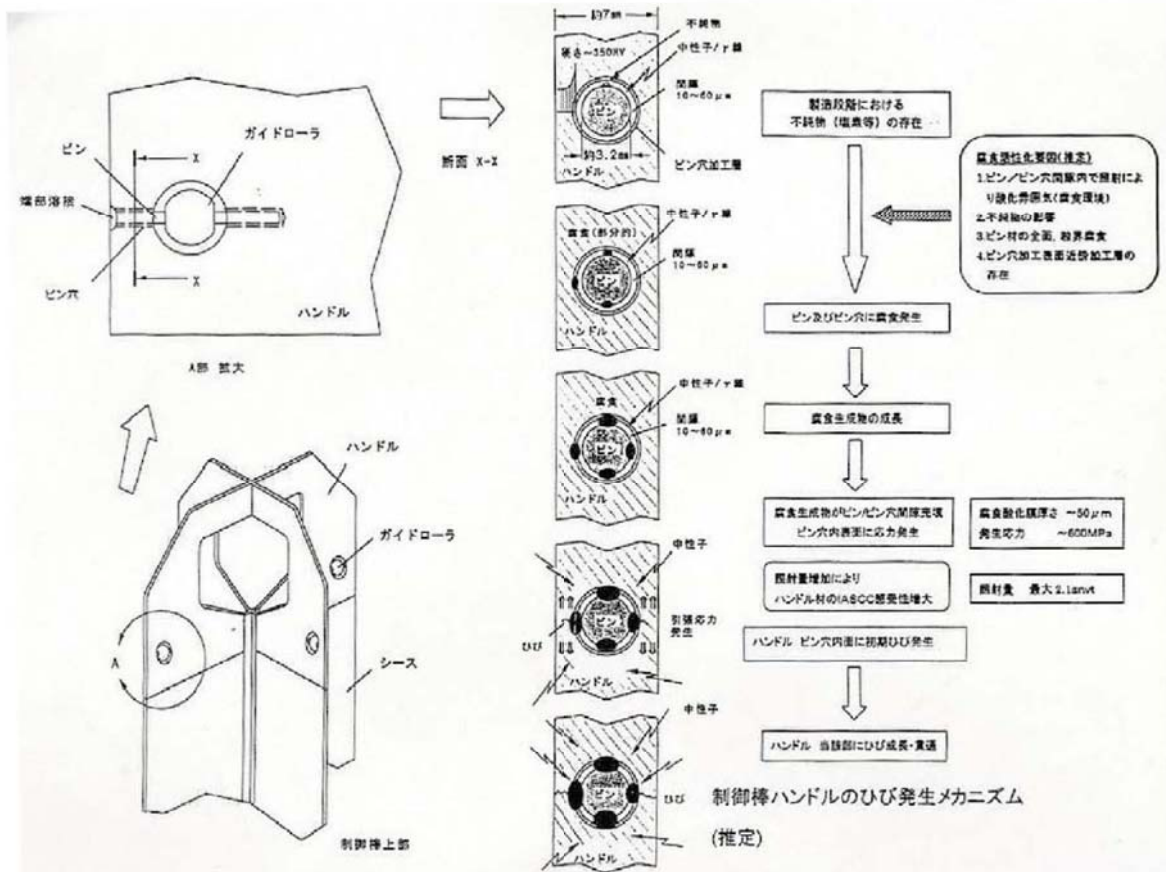


図 1 A 社製制御棒上部ハンドル部のひび (原電ホームページ プレス資料)

- ひびが発見された制御棒及び同じ製造履歴の A 社製制御棒合計 25 本は, 前回第 16 回定期検査時に取り付けたものであり, 上部ハンドル部材質は SUS304 である。
- これら 25 本のうち, ひびが確認された制御棒 13 本は運転中に挿入されていた実績があり中性子照射量が約  $1.3 \sim 2.1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  と高く, SUS304 のしきい照射量  $5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  を超えていた。ひびが確認されなかった残りの 12 本の中性子照射量は, 約  $0.3 \sim 1.3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  と比較的低い値であった。
- ひびが発見された制御棒及び同じ製造履歴の A 社製制御棒合計 25 本は, 不純物が残留している恐れのない B 社製制御棒と取替を実施した。
- なお, この上部ハンドル部ガイドローラ部近傍のひびは, 制御棒の機能 (制御棒挿入性) には影響しないと評価している。

②第 25 回定期検査，2011 年 B 社製制御棒

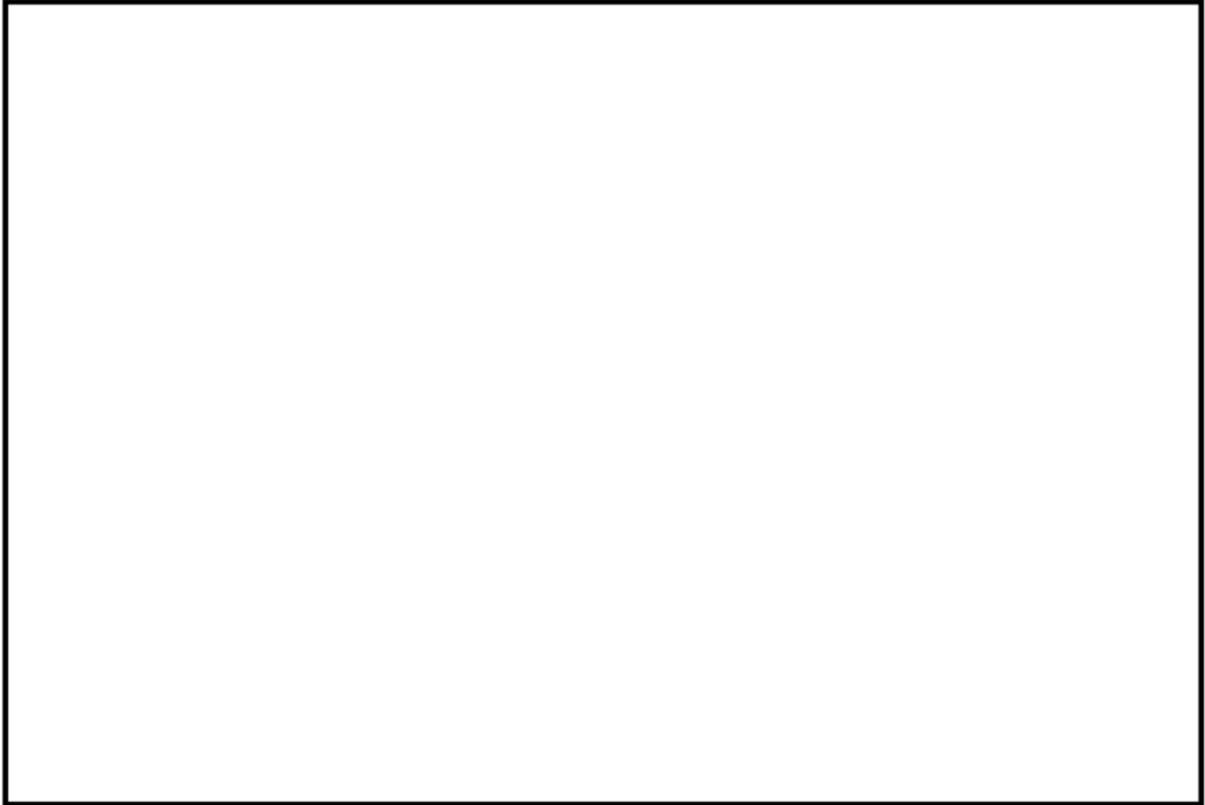


図 2 B 社製制御棒上部ハンドル部のひび（炉内取り付け座標 42-11 の例）

- ひびが発見された制御棒及び同じ製造履歴の B 社製制御棒は，①で述べた A 社製制御棒 25 本の取替品として第 17 回定期検査時に取り付けたものであり，上部ハンドル部材質は SUS316L である。
- これらの第 17 回定期検査時に取り付けた B 社製制御棒 25 本は，取替基準に基づいて取替や全引き抜き座標への配置替えが実施され，第 25 回定期検査時には炉内の全引き抜き座標に配置された 8 本が残っていた。ひびはこの 8 本で確認され，中性子照射量が約  $0.7\sim 1.1\times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>（熱中性子）と高く，SUS316 のしきい照射量  $1\times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup> に近い値であったと考えられる。
- 制御棒の取替にあたっては，第 18 回定期検査（2000 年）以降，上部ハンドル部ガイドローラ穴に通水溝を設けた応力腐食割れ対策品（2 項に記述）を採用している。前述のとおり，上部ハンドル部のひびは制御棒の機能に影響しないことから，第 18 回定期検査以降に寿命や不具合により取り替える制御棒を対象として，応力腐食割れの対策品を採用することとしていた。
- しかしながら，第 25 回定期検査では第 17 回定期検査時に取り付けた（応力腐食割れ対策品の採用前）B 社製制御棒 8 本にひびが確認されたことから，全て応力腐食割れ対策品に取替を実施した。

## 2. 制御棒上部ハンドル部の照射誘起型応力腐食割れ対策

- 第 18 回定期検査（2000 年）以降に採用している B 社制御棒は、上部ハンドル部ガイドローラのピン穴に通水溝を設けた応力腐食割れ対策品である。
- 制御棒上部とハンドル部ガイドローラ穴の構造を下図に示す。ハンドル部ガイドローラのピンとピン穴の隙間環境を改善するため、穴の上下に通水溝を設けている。

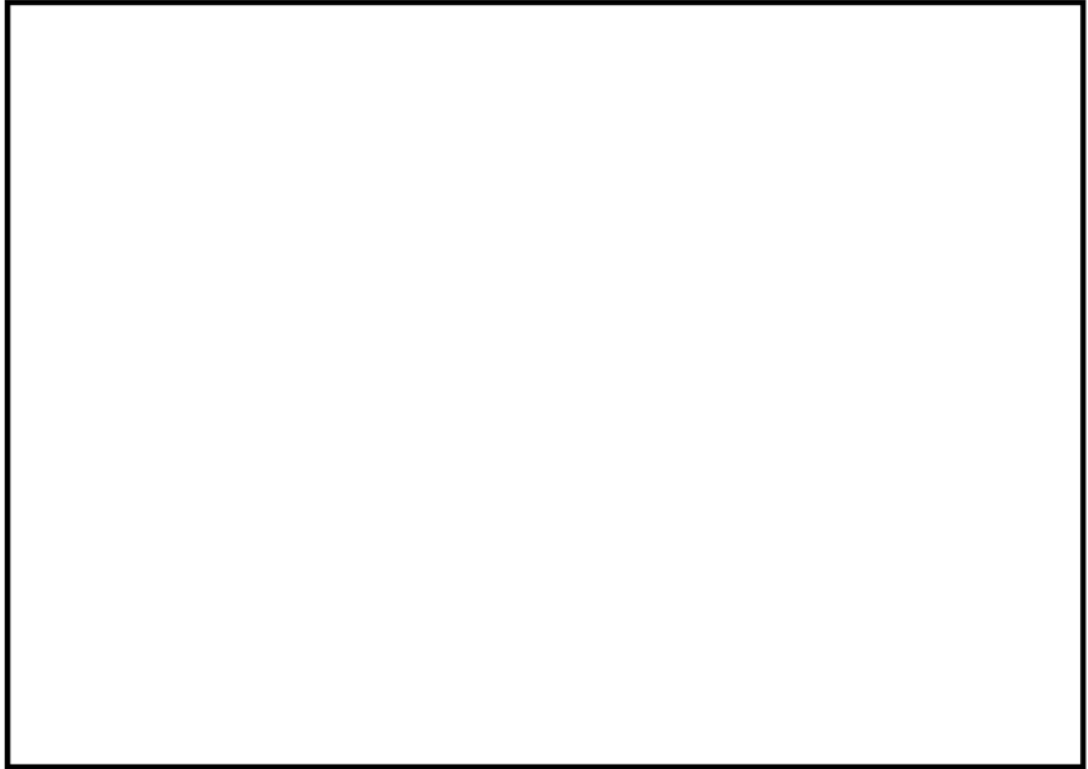


図 3 B 社製制御棒上部ハンドル部の応力腐食割れ対策（第 18 回定期検査以降に採用）

- 東海第二では、第 19 回定期検査（2002 年）に制御材にハフニウムを使用した制御棒を採用しており、その上部ハンドル部にもピン穴に通水溝を設けた応力腐食割れ対策を行っている。このハフニウム制御棒は、その後定期的に点検を行っており、第 22 回定期検査（2006 年～2007 年）時にシース部にひびが確認されたことから全て取り出し、現在使用していない。
- このときのハフニウム型制御棒の上部ハンドルの材料は SUS316L であり、中性子照射量は約  $3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ （熱中性子）であり、ハンドル部はしきい照射量  $1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  を超えていたと考えられるが、ハンドル部ピン穴にひびが確認されておらず、応力腐食割れの対策が有効であったと考えられる。

表 制御棒上部ハンドル部で確認されたひび及び応力腐食割れ対策

定期検査	事 象	備 考
第 16 回定期検査 (1998 年)	●A 社製制御棒 25 本を炉内へ取り付け。	
第 17 回定期検査 (1999 年)	●前回定期検査で取り付けした A 社製制御棒 25 本のうち 13 本の上部ハンドルにひび。 ●この 25 本を全て B 社製制御棒へ取替。	IASCC と推定。
第 18 回定期検査 (2000 年)	●B 社製制御棒に上部ハンドル部ガイドローラ穴に通水溝を設けた応力腐食割れ対策品を採用。	以降の定期検査において寿命や不具合により取り替える制御棒は、全て上部ハンドル部応力腐食割れの対策品を採用。
第 19 回定期検査 (2002 年)	●ハフニウム制御棒の採用 (B 社製)	ハフニウム制御棒の上部ハンドル部の応力腐食割れ対策品の設計は、第 18 回定期検査で採用した設計と同じ。
第 22 回定期検査 (2006 年～2007 年)	●ハフニウム制御棒のシースにひびを確認したため、全てボロン・カーバイド制御棒に変更 (B 社製)。 ●取り出したハフニウム制御棒の上部ハンドル部にひびは確認されず。	
第 25 回定期検査 (2011 年～)	●第 17 回定期検査で取り付けした B 社製制御棒 8 本 (上部ハンドル部応力腐食割れ未対策品) の上部ハンドル部にひび。 ●8 本を全て B 社製制御棒 (上部ハンドル部応力腐食割れ対策品) に取替。	IASCC と推定。 この 8 本の取り替えにより、17 回定期検査で取り付けした B 社製制御棒 (上部ハンドル部応力腐食割れ未対策品) の炉内本数は 0 本となった。



<原子炉水のトリチウム濃度測定結果について>

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・カーバイドの流出は生じていないと評価する。

