

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK 補-III-3 改 1
提出年月日	平成 30 年 2 月 22 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 2 月 22 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、商業機密
あるいは防護上の観点から公開できません。

目次

1. はじめに	1
2. 技術評価	2
(1) 健全性評価	2
(2) 現状保全	4
(3) 総合評価	10
(4) 高経年化への対応	10
3. まとめ	11
(1) 審査基準適合性	11
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	13
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	15
別紙 3. 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	20
別紙 4. 炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について	22
別紙 5. 上部格子板の照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について	27
別紙 6. 原子炉水トリチウム濃度測定実績について	35
別紙 7. 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	36
別紙 8. 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	40

1. はじめに

本資料は、照射誘起型応力腐食割れの劣化状況評価の補足として、評価結果を示すと共に、評価内容の補足説明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とともに、材料周辺の腐食環境が水の放射線分解により厳しくなることが知られている。**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。

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 °C である。また、原子炉冷却材の水質管理においては、**社内QMS 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。

海外の BWR プラントでは、米国のオイスタークリーク発電所 (BWR/2)、ナインマイルポイント発電所 1 号機 (BWR/2) にて、中性子照射量が多い上部格子板のグリッドプレートに**照射誘起型応力腐食割れの可能性が否定できないひび割れ**が確認されている。

また、東海第二及び福島第二**原子力**発電所 3 号機における制御棒ハンドル部のガイドローラ付近に**確認されたひび割れが照射誘起型応力腐食割れと推定**されている。

2. 技術評価

(1) 健全性評価

炉心を取り囲む機器である炉内構造物、炉心近傍に位置する制御棒のうち、材料がステンレス鋼の機器については、日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格 JSME S NA1-2008」(以下、「維持規格」という) IJG-B-3 に示される比較的高い累積照射量(以下、「しきい照射量」という)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 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

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

- a. 炉内構造物 (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)

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 [E>1MeV] 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 ² [E>1MeV])
炉心シュラウド	[Redacted]	約 2.0×10 ²⁵
上部格子板		約 2.9×10 ²⁵
炉心支持板		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	[Redacted]	約 2.1×10 ²⁴

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、炉心シュラウド及び上部格子板である。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発生の可能性はない。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 3 に示す。

炉心シュラウド及び上部格子板においては、運転開始後 60 年時点での中性子照射量がしきい照射量を上回り、照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性が否定できないことから、60 年時点での亀裂進展評価及び耐震安全性評価を実施した。

この評価の結果、上部格子板については60年時点での想定欠陥の応力拡大係数が破壊靱性値の下限値を下回ることから不安定破壊の可能性がないことを確認した。

また、炉心シュラウドについては、想定欠陥が進展し運転時間が5.24 EFPYとなる時点で応力拡大係数が破壊靱性値と等しくなり、地震時に不安定破壊に至る（破壊を引き起こす亀裂となる）結果となった。しかしながら、4定期検査毎（約4.6 EFPY）に目視点検により健全性を確認することとしていることから、照射誘起型応力腐食割れが発生・進展したとしても、破壊を引き起こす亀裂となる前に発見することができる。

炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について別紙4に、上部格子板の照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について別紙5に示す。

b. 制御棒

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： 2.0×10^{25} n/m²（熱中性子）、取替目標値： 1.5×10^{25} n/m²）に基づき取替を実施している。

制御材被覆管、シース、タイロッド、ピン、上部ハンドルはそれぞれ表3に示す材料を使用しており、取替基準の照射量がしきい照射量を超える。

表3 ボロン・カーバイド型制御棒の使用材用

部位	A社製	B社製
制御棒被覆管	[Blank Box]	[Blank Box]
シース		SUS316L
タイロッド		SUS316L
ピン		[Blank Box]
上部ハンドル		SUS316L

また、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応力が存在し、さらに制御材被覆管には、制御材の熱中性子捕獲による¹⁰B(n, α)⁷Li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、照射誘起型応力腐食割れの発生する可能性が否定できない。

なお、東海第二において、1999年にA社製制御棒（25本）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。

当該制御棒についてはすべてSCC対策品への交換を完了している。

(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）及びボロン・カーバイド型制御棒の保全の状況は以下のとおりである。

a. 炉内構造物（炉心シュラウド、上部格子板）

炉内構造物（炉心シュラウド、上部格子板）については、維持規格に基づき計画的に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	VT-3*1	10年	第25回定期検査（2015年）	異常なし
炉心シュラウド 周溶接継手H4*2	MVT-1	運転時間で 5～15年	第25回定期検査（2015年）	異常なし
上部格子板	VT-3*1	10年	第25回定期検査（2015年）	異常なし

*1 維持規格 表 IG-2500-1 及び添付 I-4-B-1 参照。

*2 炉心シュラウドの点検箇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。

炉心シュラウドの周溶接継手H4については、2.技術評価で述べたとおり、地震時に不安定破壊に至ることがないように、4定期検査毎に目視点検（MVT-1*3）により健全性を確認することとしている。

*3 炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価において想定した大きさ程度の初期欠陥であればMVT-1で検出可能であると考えられる。

また、中性子照射量が評価上最も厳しい上部格子板については、長期保守管理方針に基づき、第25回定期検査（2015年）に水中テレビカメラによる目視確認（MVT-1）を実施し、有意な欠陥は確認されていない。（図1参照）

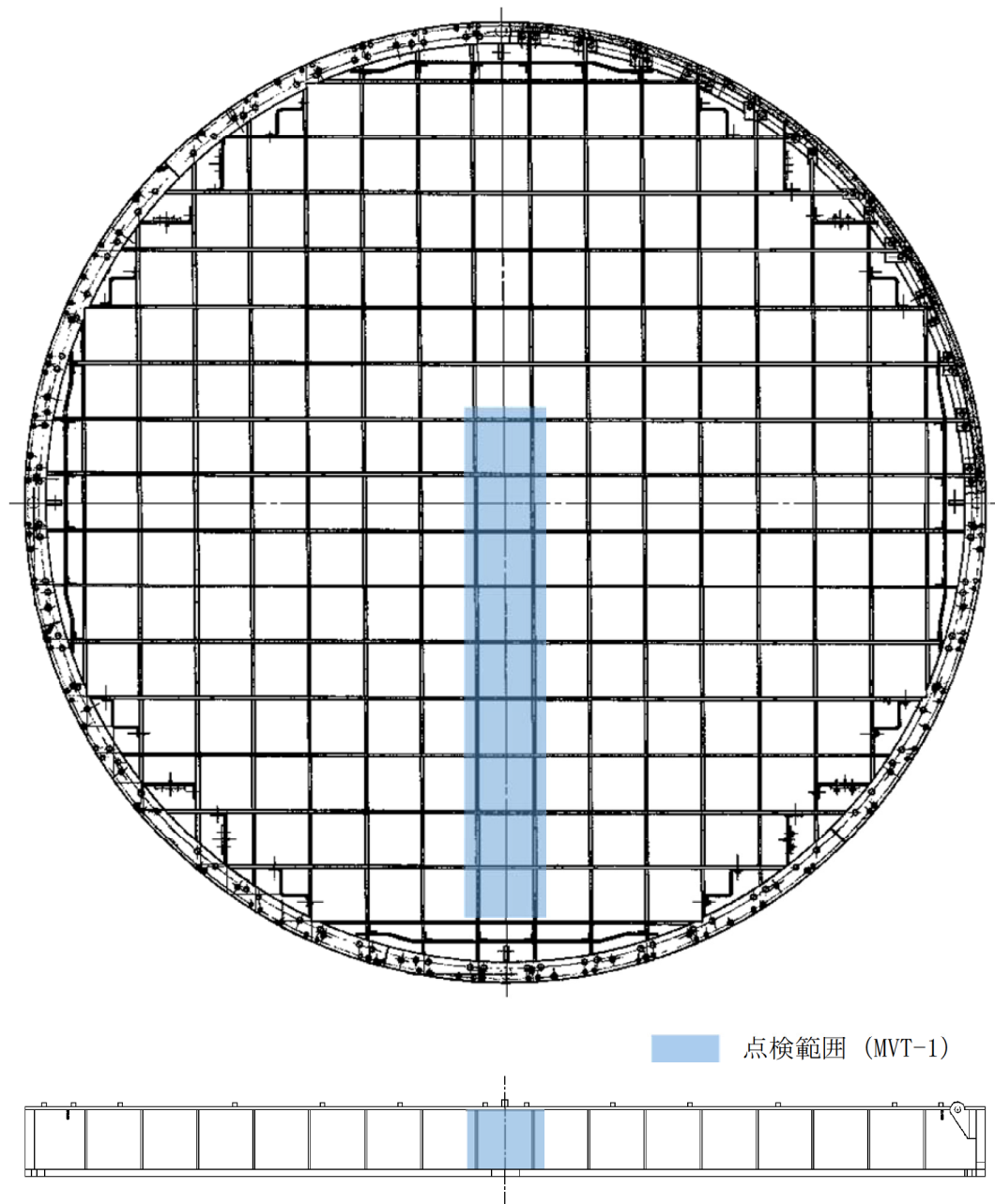


图 1 上部格子板点検範囲概略图

b. ボロン・カーバイド型制御棒

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： 2.0×10^{25} n/m²（熱中性子）、取替目標値： 1.5×10^{25} n/m²）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。

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

他プラントでの制御棒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、制御棒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6に示す。

② 事例規格「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮 (NC-CC-002)」への対応状況

日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 事例規格「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮 (NC-CC-002)」(以下、「事例規格」という)によると、応力腐食割れの発生因子である「応力」,「材料」,「環境」を改善することで SCC 発生を抑制する対応が例示されている。

a. 炉内構造物 (炉心シュラウド, 上部格子板)

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

抑制対策	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)*4	—
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)*5	▶ 水素注入による腐食電位の低減(1996 年～)

*4 周溶接継手 H3, H4 外面等

*5 周溶接継手 H3, H4 内面等

ウォータージェットピーニング施工は、事例規格において「xx-2222 材料表面の応力改善方法」に記載されている。また、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、事例規格において「xx-2231 接液部の環境 (6)」に水素注入、貴金属注入等の技術が記載されており、これと同等の効果が期待できる技術である。また、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。

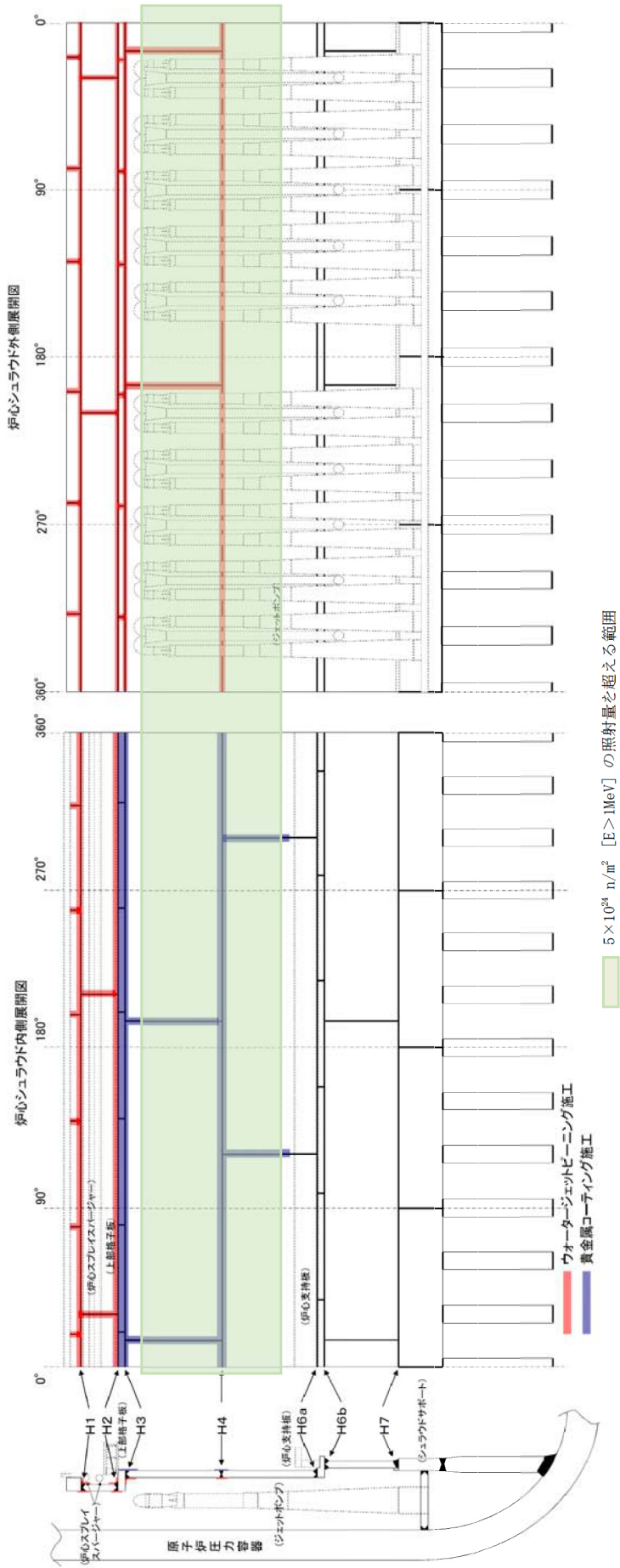
水素注入による応力腐食割れの発生・進展を抑制する技術は、国内外の数多くの沸騰水型軽水炉プラントで採用中されている。東海第二では、通常運転時に加え、起動時における水素注入を第 1 9 回定期検査後の起動時 (2002 年 12 月) から運用を開始している。

b. ボロン・カーバイド型制御棒

制御棒に対する応力腐食割れの抑制について、表 6 に示す。

表 6 制御棒の応力腐食割れの抑制対策

抑制対策	制御棒
応力	➤ 溶接部の残留応力低減（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～) ➤ 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を長穴構造化（取替品）



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その施工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%，H2 内面約90%，V2 内面約40%，貴金属コーティング：V5 内面約65%

図2 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

① 炉内構造物（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）

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，引張応力成分は低く，照射誘起型応力腐食割れの発生する可能性は小さい。

炉心シュラウドは，しきい照射量を超えるものの，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の発生する可能性は小さい。また，照射誘起型応力腐食割れの進展により耐震安全性評価において破壊を引き起こす亀裂となる可能性が否定できないが，破壊を引き起こす亀裂まで進展する期間より短い頻度で点検を行うため，破壊に至ることはない。

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発生の可能性はない。

② ボロン・カーバイド型制御棒（制御材被覆管，シース，タイロッド，ピン，上部ハンドル）

照射誘起型応力腐食割れに対しては，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。

さらに，新制御棒について不純物管理を徹底するとともに，SCC 対策品の制御棒に取替を実施することで，照射誘起型応力腐食割れの発生する可能性を低減できると考える。

健全性評価結果から判断して，評価対象機器については運転開始後60年時点までに損傷が発生する可能性は小さく，照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性はないと考える。

(4) 高経年化への対応

炉内構造物（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），及びボロン・カーバイド型制御棒（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。

3. まとめ

(1) 審査基準適合性

以上の評価結果について、原子力規制委員会「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」に規定されている延長しようとする期間における要求事項との対比を下表に示す。

評価対象事象 又は評価事項	要求事項	評価結果
照射誘起型 応力腐食割れ	○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>上部格子板については、現状割れは確認されておらず、また、引張応力成分も小さいため照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性は小さく、仮想亀裂を考慮した耐震評価においても60年時点で破壊に至らない。</p> <p>炉心シュラウドについては、現状割れは確認されておらず、また、残留引張応力の改善や腐食環境改善対策等を実施しているため照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性は小さい。照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震評価において現状保全で管理していれば、破壊に至らない。</p> <p>上部格子板、炉心シュラウド以外の炉内構造物については、累積照射量がしきい照射量を下回るため、照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性はない。</p> <p>ボロン・カーバイド型制御棒については、核的寿命を考慮した運用基準に基づく取替、不純物管理及び構造見直しによるSCC対策品制御棒の採用により照射誘起型応力腐食割れの可能性は小さい。また、割れが発生しても検知可能であること、これまでの制御棒駆動水圧系機能検査等で動作不良は認められておらず、制御棒挿入性に影響を及ぼさない。</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. 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 4. 炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 5. 上部格子板の照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について
- 別紙 6. 原子炉水トリチウム濃度測定実績について
- 別紙 7. 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 8. 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

<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 μ 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 に原子炉冷却材水質の推移データを示す。

以 上

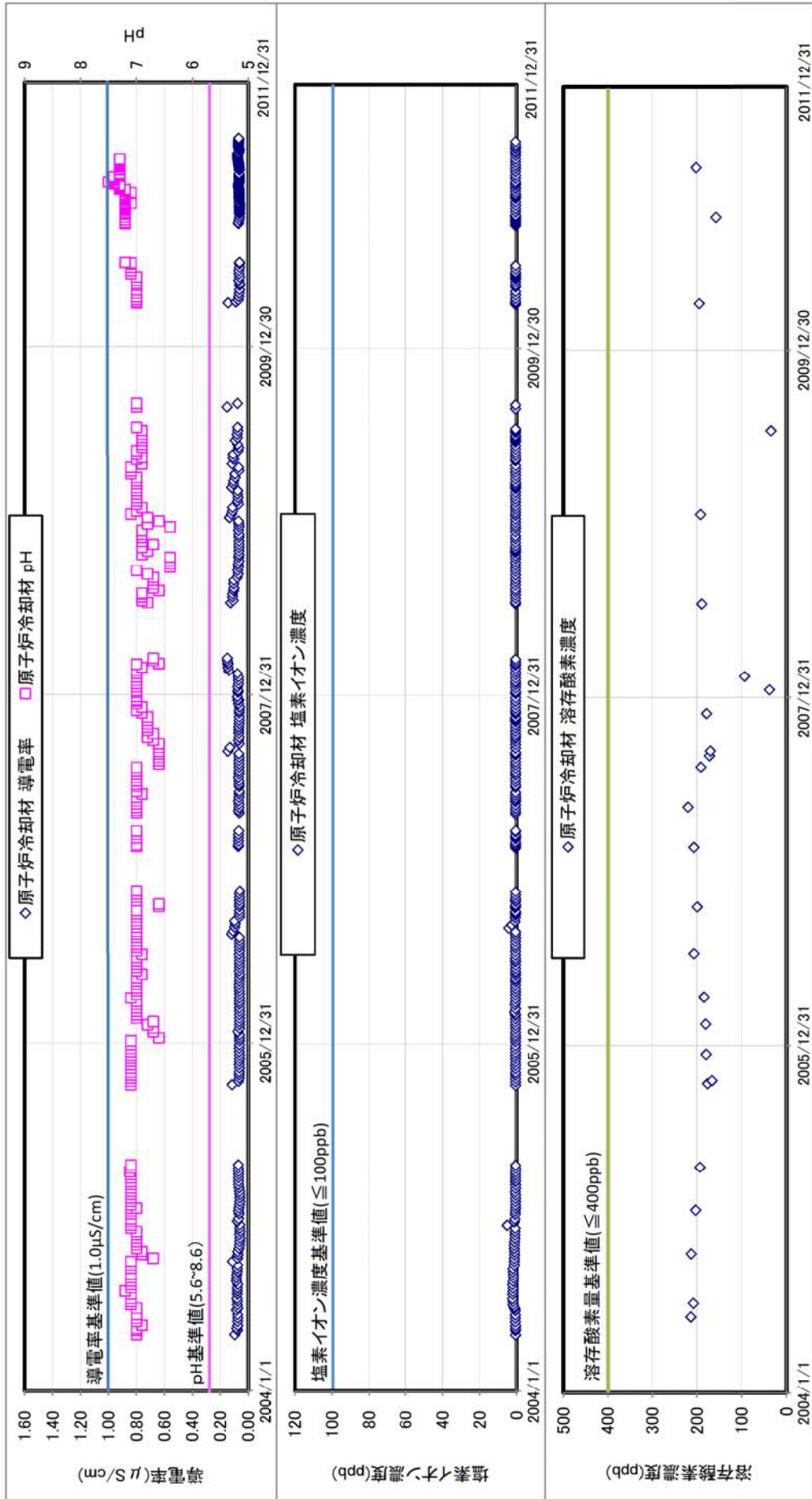


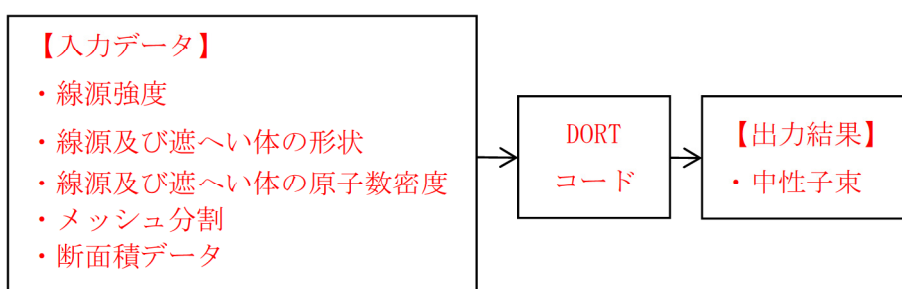
図1 原子炉冷却材水質の推移

＜炉内構造物各機器における運転開始後 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 ($E > 1\text{MeV}$) を 2 次元輸送計算コード DORT (DOORS3.2a バージョン) 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。



2. 中性子照射量の算出手順

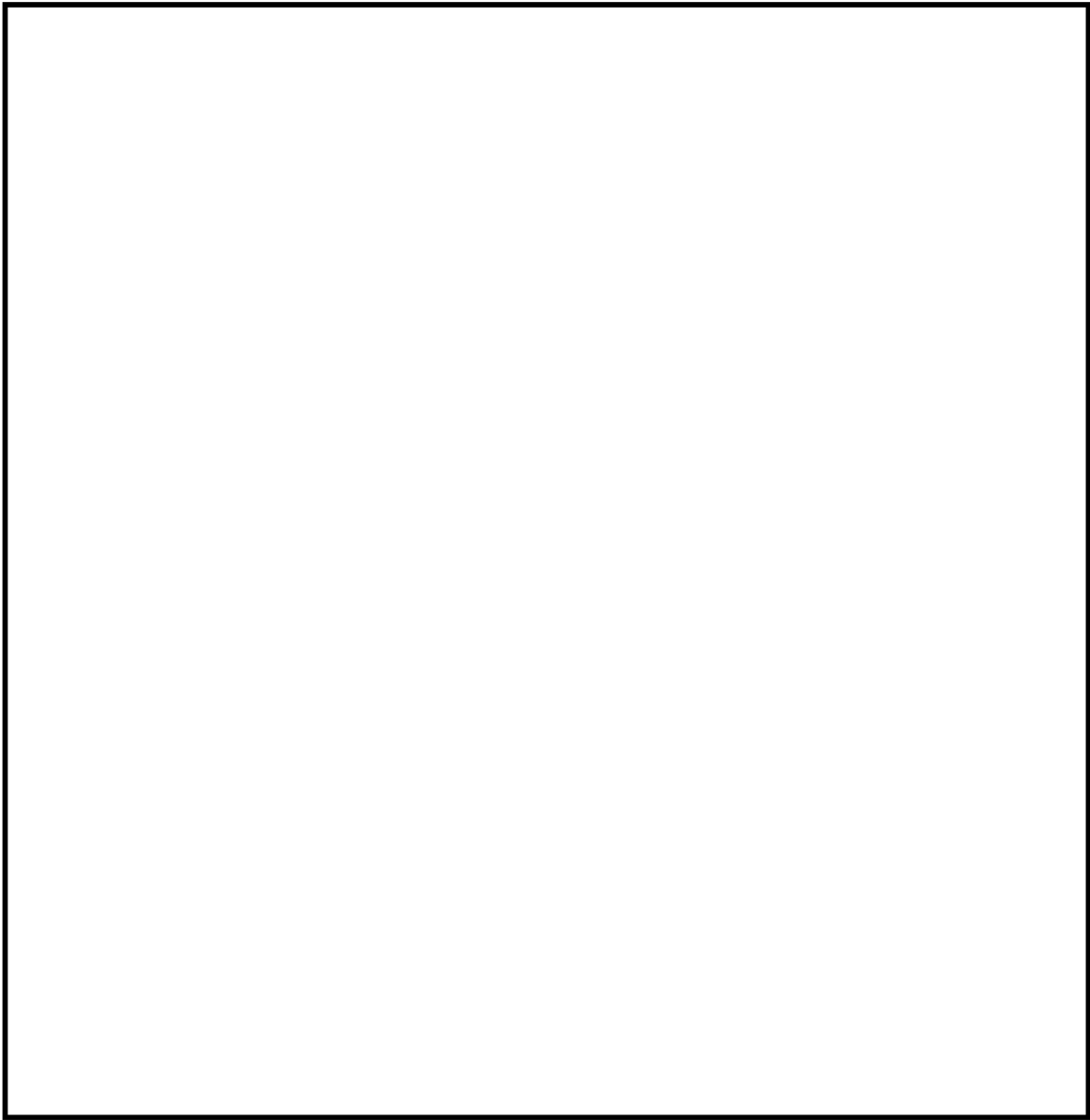
炉内構造物における中性子照射量は、以下の手順で算出している。

- (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- θ 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 年時点での運転時間を設定する。
- (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運転時間を乗じて、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

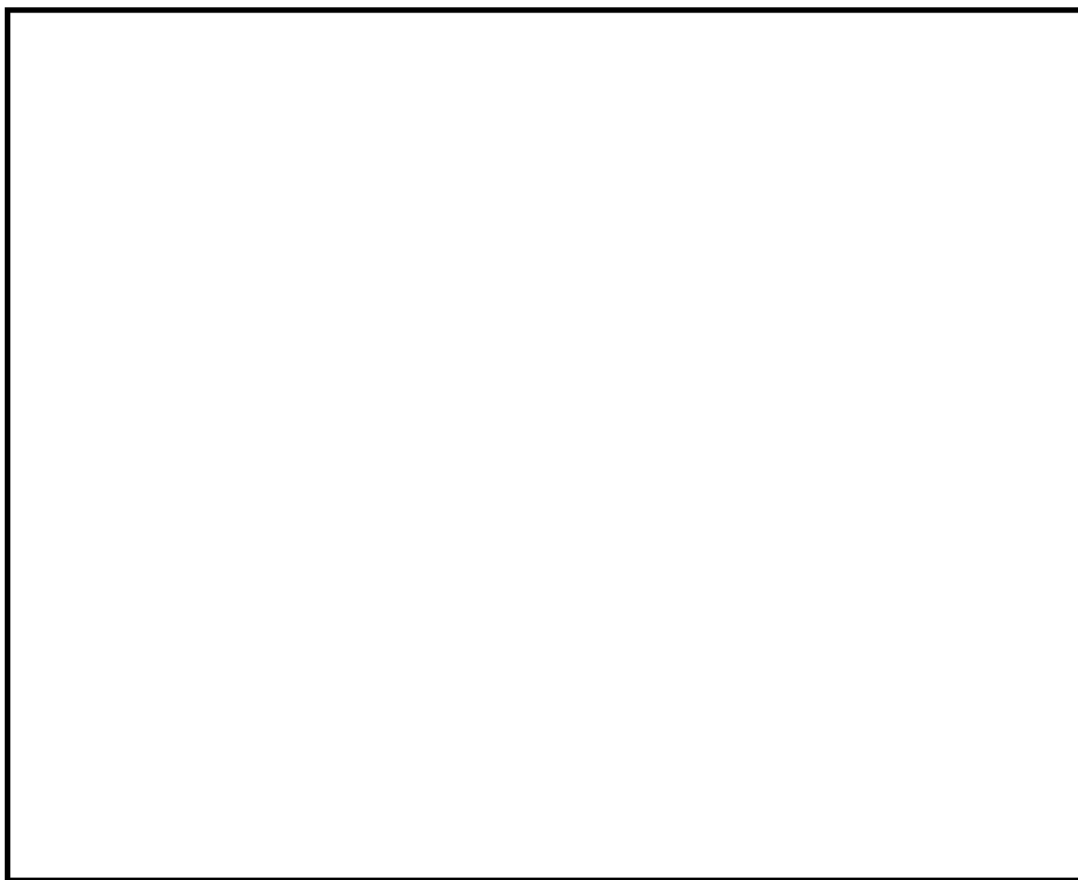
(1) R-Z 体系モデル（垂直断面モデル）

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- θ 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. 運転時間

運転開始から運転開始 60 年時点での運転時間は、38.94 EFPY とした。

(1) 現時点 23.71 EFPY

(2) 今後運転開始 60 年時点まで 15.22 EFPY *1

(3) 運転開始から運転開始 60 年時点まで 38.935... →38.94 EFPY

*1 今後の運転時間の考え方

①2015 年 9 月時点での中長期運転保守計画に基づき、以下とした。

- ・2019 年 8 月末まで停止が続き、暫定で同年 9 月 1 日に運転再開
- ・60 年時点までの日数は 7029 日、運転日数は、420 日×13 サイクル+96 日=5556 日 (設備利用率 79%)

②現在、社内で検討している運転再開時期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 月末まで停止が続き、暫定で同年 3 月 31 日に起動
- ・60 年時点までの日数は 6452 日、稼働率 80%とすると運転日数は約 5162 日

以上より、最新の①の運転日数が多くなることから、中性子照射量の算出のための設定としては十分保守的であるといえる。

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。また、中性子照射量が最大となる位置を図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 ²) [E>1MeV]
炉心シュラウド	母材部, 中間胴H4溶接継手の上約970 mm	2.0×10^{25}
炉心シュラウド(周溶接継手)*1	中間胴H4溶接継手内面	1.6×10^{25}
上部格子板	グリッドプレート下端, 炉中心位置	2.9×10^{25}
炉心支持板	支持板上端	2.1×10^{24}
周辺燃料支持金具	支持金具上端	7.1×10^{23}
制御棒案内管	上面, 炉中心位置	2.1×10^{24}

*1 炉心支持機能の維持のため必要な溶接継手として評価

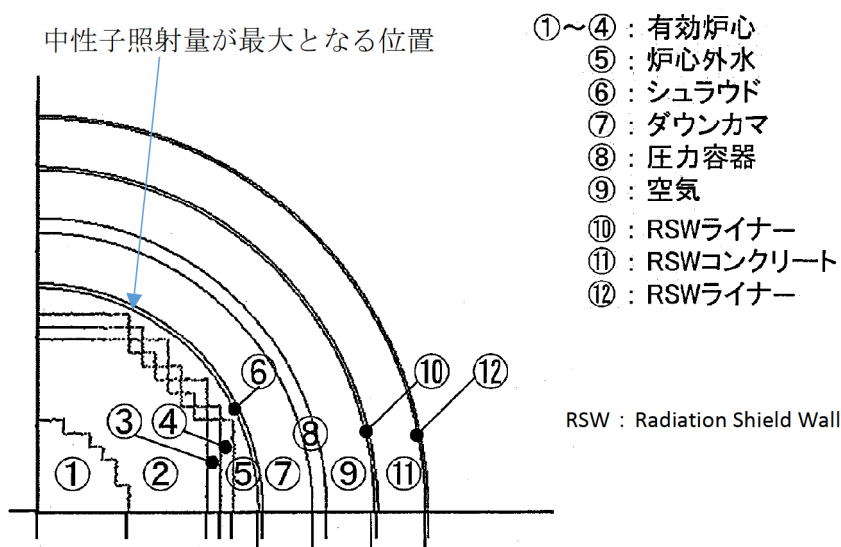


図1 中性子照射量が最大となる位置

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 (>1MeV, n/cm ² ・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 ⁸	3.85×10 ⁸	2.39

以上

< 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の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の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の可能性は小さい。

(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、炉心シュラウド及び上部格子板はしきい値よりも大きいことから、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、炉心シュラウド及び上部格子板について、照射誘起型応力腐食割れ発生条件の一つであると考えられる応力の観点から照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性を評価した。
- 炉心シュラウド及び上部格子板については、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の可能性は小さい。炉心シュラウドの中間胴の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の可能性は小さい。

(評価結果)

- 上部格子板のグリッドプレートには溶接継手はなく、運転中の差圧、熱、自重等に起因する引張応力成分は低いことから、しきい照射量を超えるものの照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性は小さい。
- 炉心シュラウド（中間胴）の溶接熱影響部には、ウォータージェットピーニング施工により残留応力の改善を図るとともに、溶接継手及び熱影響部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の可能性は小さい。

また、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発生の可能性はない。

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 ²) [E>1MeV] [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
炉心シェラウド	○ステンレス鋼 SUS304L	○炉水, 285°C	○ 2.0×10 ²⁵ [母材部, 中間胴 H4 溶接継手の上約 970mm]	▲運転中の差圧, 熱, 自重等に起因する引張応力は小さい。	▲引張応力が低いことから照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性は小さい。
炉心シェラウド (周溶接継手)	○ステンレス鋼 SUS304L	○炉水, 285°C ▲水素注入+貴金属コーティング (内面)	○ 1.6×10 ²⁵ [中間胴 H4 溶接継手内面] - 9.35×10 ²⁰ [中間胴 H4 溶接継手外面]	▲ウォーターージェットピエニング施工 (外面)	▲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, 外面はウォーター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発生の可能性は小さい。
上部格子板	○ステンレス鋼 SUS304	○炉水, 285°C	○ 2.9×10 ²⁵ [グリッドプレート下端, 炉中心位置]	▲運転中の差圧, 熱, 自重等に起因する引張応力は小さい。	▲引張応力が低いことから照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性は小さい。
炉心支持板	○ステンレス鋼 SUS304	○炉水, 285°C	- 2.1×10 ²⁴ [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。	-
周辺燃料支持金具	○ステンレス鋼 SUS304	○炉水, 285°C	- 7.1×10 ²³ [支持金具上端]	▲運転中の差圧, 熱, 自重等に起因する引張応力は小さい。	中性子照射量が照射誘起型応力腐食割れ発生のしきい値を超えないことから, 発生の可能性はない。
制御棒案内管	○ステンレス鋼 SUS304	○炉水, 285°C	- 2.1×10 ²⁴ [上面, 炉中心位置]	▲運転中の差圧, 熱, 自重等に起因する引張応力は小さい。溶接継手は入熱が小さく残留引張応力は小さい。	

*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 5×10^{24} n/m² [E>1MeV] (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の可能性は小さい

- : 照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性はない

▲及び-の部分をハッチング

<炉心シュラウドの照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について>

累積照射量がしきい照射量を超える炉内構造物のうち、炉心シュラウドについて亀裂進展評価及び破壊評価を実施する。

1. 亀裂進展評価

炉心シュラウドのうち、炉心近傍で引張応力の作用する可能性のある部位である中間胴溶接線の中から、地震時に亀裂進展しやすい周方向溶接線であるH4溶接線を評価対象部位とする。

1.1 初期亀裂

初期亀裂は維持規格 E J G - B - 2 - 1 でシュラウドサポートリング“無し”の場合に欠陥が検出されていない範囲に想定する初期欠陥として、深さ $a_0=1.0$ mm, 長さ $l_0=10.0$ mm の半楕円亀裂が H 4 溶接線内表面にあるものとして評価する。

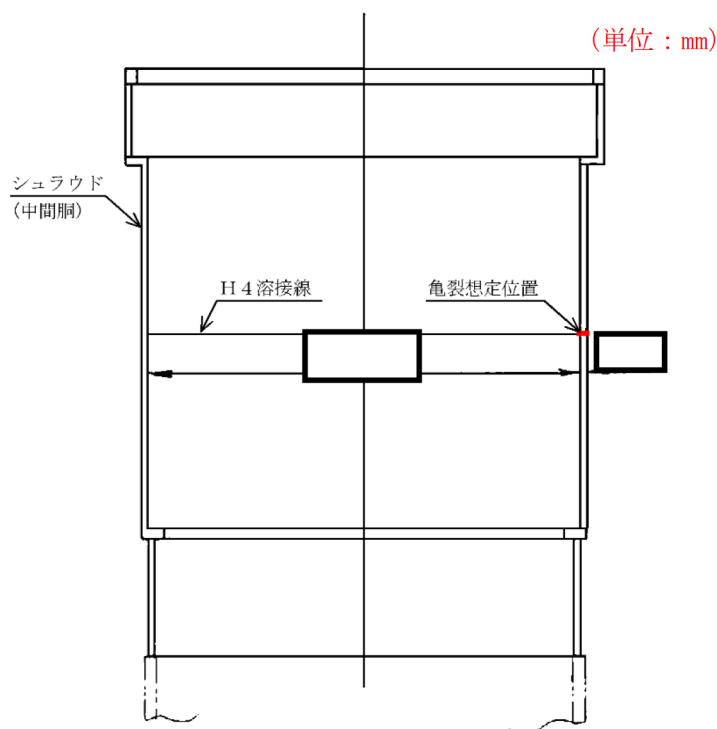


図 1 炉心シュラウドの亀裂想定位置

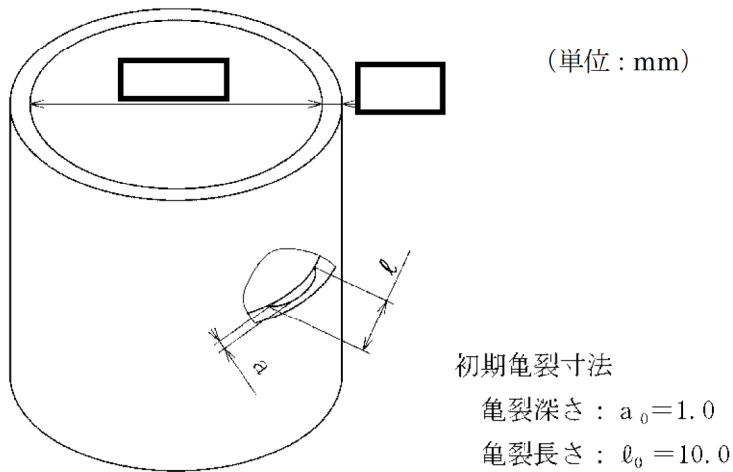


図2 炉心シュラウドの評価モデル (半楕円亀裂)

1.2 き裂進展速度

亀裂進展速度は、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」(別紙3) 3.(3) 亀裂進展速度に記載される、維持規格 図 添付 E-2-SA-2 に示される鋭敏化 SUS304 鋼の亀裂進展速度の上限値 ($9.2 \times 10^{-7} \text{mm/s} = 30 \text{mm/年}$) とする。

1.3 亀裂進展評価

(1) 亀裂深さ

亀裂深さ T は、次式より求める。

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{(t - a_0) [\text{mm}]}{U [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]} \times \frac{1}{3600 [\text{s}]} \times \frac{1}{24 [\text{h}]} \times \frac{1}{365 [\text{d}]} \\
 &= \frac{(\square - 1.0)}{9.2 \times 10^{-7}} \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{24} \times \frac{1}{365} \\
 &= \square [\text{EPY}]
 \end{aligned}$$

T : 亀裂深さが板厚に達するまでの期間

t : 炉心シュラウド中間胴板厚 [mm]

a_0 : 初期亀裂深さ = 1.0 [mm]

U : 鋭敏化 SUS304 鋼の亀裂進展速度の上限値

(2) 亀裂長さ

亀裂進展評価時点における亀裂長さ l は、周方向 2 箇所の亀裂先端より独立して進展し、亀裂両側において亀裂進展速度 U にて進展するものとして、次式より求める。

$$l = l_0 \text{ [mm]} + 2 \times U \text{ [mm} \cdot \text{s}^{-1}] \times Y \text{ [EPY]} \times 365 \text{ [d]} \times 24 \text{ [h]} \\ \times 3600 \text{ [s]}$$

l_0 : 初期亀裂欠陥長さ

Y : 亀裂進展期間 (応力拡大係数が破壊靱性値を満足する亀裂進展期間)

2. 破壊評価

炉心シュラウド H4 溶接継手に想定したき裂に対して、地震時応力により求めた応力拡大係数が破壊靱性値未満であれば、破壊を生じないと判断する。

2.1 考慮する荷重

評価位置に作用する荷重を、表 1 に示す。

死荷重及び差圧荷重は建設時工認の設計値、地震荷重には評価用地震動を考慮した荷重を用いる。

表 1 破壊評価に用いる荷重

評価部位	差圧 P [MPa]	死荷重 [N]	地震荷重	
			軸力 V [kN]	モーメント M [kN・m]
炉心シュラウド H 4 溶接線	0.070	1.04×10^6		

2.2 破壊評価に用いる応力

破壊評価に用いる応力は、表 1 の荷重による軸方向応力を考慮する。

熱応力は中間胴の一般部であり通常運転時の熱応力が微小であること、溶接残留応力は 1.3 項から評価年数時点で貫通欠陥と想定されることから、それぞれ考慮しない。

(1) 差圧による応力

H4 溶接線に作用する差圧 P による軸方向荷重は、次式より求める。

$$\sigma_p = \frac{1}{Y^2 - 1} \times P = \frac{1 \times P}{\text{[]}^{-1}} = \text{[]} \text{ [MPa]}$$

$$Y : D_0/D_i = \text{[]} = \text{[]}$$

D_0 : 炉心シュラウド中間胴の外径

D_i : 炉心シュラウド中間胴の内径

(2) 死荷重による応力

H4 溶接線に作用する死荷重 W による軸方向応力 σ_w は、次式より求める。

$$\sigma_w = - \frac{W}{A} = \frac{1.04 \times 10^6}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ [MPa]}$$

A : 炉心シュラウド中間胴の断面積

$$= (\pi/4) \times (\boxed{} - \boxed{}) = \boxed{} \text{ [mm}^2\text{]}$$

(3) 地震荷重による応力

H4 溶接線に作用する地震荷重による軸方向荷重は、次式より求める。

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{V}{A} + \frac{M}{I} \times \frac{D_0}{2} \\ &= \frac{\boxed{}}{\boxed{}} + \frac{\boxed{}}{\boxed{}} \times \frac{\boxed{}}{2} \\ &= \boxed{} \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

I : 炉内シュラウド中間胴の断面二次モーメント

$$= (\pi/64) \times (\boxed{} - \boxed{}) = \boxed{} \text{ [mm}^4\text{]}$$

(1) から (3) より破壊評価に用いる応力 σ は、

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_w + \sigma_s = \boxed{} - \boxed{} + \boxed{} = \boxed{} \text{ [MPa]}$$

2.3 応力拡大係数の算出

「1.3 亀裂進展評価」より、評価時点の想定亀裂は貫通亀裂となることから、想定欠陥の応力拡大係数 K_I は、次式により求める。

$$K_I = F_m \times \sigma \times (\sqrt{\pi \times c})$$

$$= \frac{1 - 0.025(c/b)^2 + 0.06(c/b)^4}{\sqrt{\cos((\pi \times c) / (2 \times b))}}$$

c : 亀裂長さ $l/2$

b : モデル平板の板幅/2

2.4 破壊靱性値

照射されたステンレス鋼の破壊靱性値 K_{IC} は、維持規格 E-14 3.(1) 中性子照射量 8×10^{24} [n/m²] を超える場合の値である $43.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用いる。

3. 亀裂進展及び破壊評価結果

表 2 に亀裂進展期間における想定亀裂長さ、想定亀裂に対する地震時の応力拡大係数を、破壊靱性値 K_{IC} と比較する。

亀裂進展期間 [EFPY]	想定亀裂長さ l [mm]	応力拡大係数 K_I [MPa $\sqrt{\text{m}}$]	破壊靱性値 K_{IC} [MPa $\sqrt{\text{m}}$]
5.23		43.1	43.2
5.24		43.2	

想定亀裂の応力拡大係数は、亀裂発生後 5.23 EFPY 時点までは破壊が起こらないことを確認した。

以 上

<上部格子板の照射誘起型応力腐食割れを考慮した耐震安全性評価について>

累積照射量がしきい照射量を超える炉内構造物のうち、上部格子板の下部グリッドプレートノッチ部について亀裂進展評価及び破壊評価を実施する。

1. 亀裂進展評価

上部格子板のうち、炉心側で地震時応力が集中する可能性のある形状と考えられる下部グリッドプレートノッチ部を評価対象部位とする。

1.1 初期亀裂

初期亀裂は長さ mm のグリッドプレート板厚貫通亀裂を想定し、ノッチ部高さを加えた mm を初期亀裂長さとして評価する。

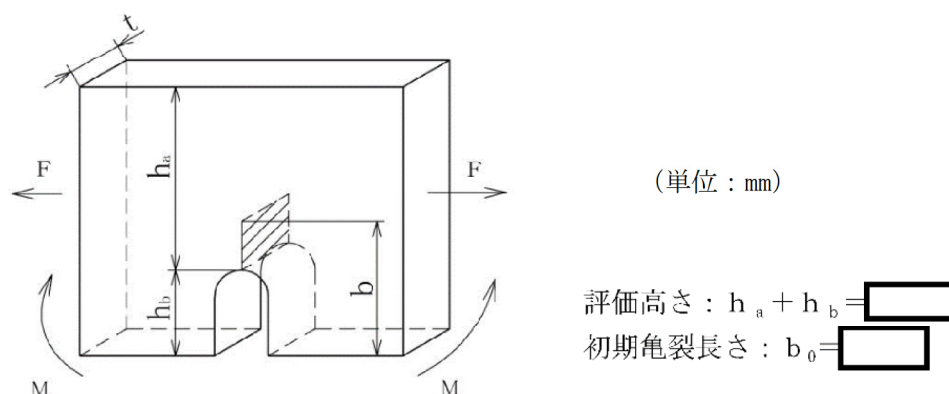


図2 上部格子板の評価モデル

1.2 き裂進展速度

(1) 亀裂深さ

亀裂進展速度は、維持規格 添付図 E-2 4.2(4)に示される照射誘起型応力腐食割れき裂進展速度線図 (表 添付 E-2-SA-1) を用いる。

$$\frac{da}{dt} = 7.8 \times 10^{-5} n^{3.6} (CK^4)^n$$

また、亀裂進展速度を算出する際に用いるパラメータについて、以下の通り設定する。

a. 高速中性子束

上部格子板における高速中性子束は、中性子照射量を算出した際に求めた 2.35×10^{16} [n/m²・s]とする。

b. 亀裂先端ひずみ速度補正係数 (C 値)

C 値は、維持規格 表 添付 E-2-SA-1 に記載される算出式を用いる。上部格子板の中
 性子照射量は 2.9×10^{25} [n/m²] であるため、

【 $5.0 \times 10^{24} < \text{中性子照射量} < 3 \times 10^{25}$ [n/m²】時に用いられる以下の式を使用する

$$1.14 \times 10^{-13} \ln(\text{中性子照射量}) - 6.03 \times 10^{-12}$$

c. 亀裂先端電流密度変化に対する定数 n

n 値は東海第二の表 1 に示す水質データにて、表 2 に抜粋した維持規格 表 添付 E-
 2-SA-1 に記載される値から導電率 k 及び鋭敏化度 EPR との関係を用いて、線形外挿
 により求める。

表 1 東海第二の水質データ

項目	データ
導電率 k	8 [μ S/m]
腐食電位 ϕ	212 [mV]
初期鋭敏化度 EPR ₀	0 [C/m ²]

表 2 導電率 k 及び鋭敏化度 EPR と n 値の関係

EPR [C/m ²]	導電率 [μ S/m]	腐食電位 ϕ [mV]	
		100	200
0	10	0.92	0.87
	20	0.86	0.80
1.5×10^5	10	0.73	0.63
	20	0.68	0.58
3.0×10^5	10	0.61	0.54
	20	0.53	0.48

1.3 評価期間

評価期間は、現在までの運転時間：23.71 EFPY 及び 60 年時点での運転時間：38.94 EFPY とし、中性子照射量がしきい照射量を超える時点で初期亀裂が生じるものとし、次式より求める。

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{\text{しきい照射量}[\text{m}^{-2}]}{\text{高速中性子束}[\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]} \times \frac{1}{3600 [\text{s}]} \times \frac{1}{24 [\text{h}]} \times \frac{1}{365 [\text{d}]} \\
 &= \frac{5.0 \times 10^{24}}{2.35 \times 10^{16}} \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{24} \times \frac{1}{365} \\
 &= 6.74 \text{ EFPY}
 \end{aligned}$$

t：しきい照射量に到達する運転年数[EFPY]

1.4 時間刻み

亀裂進展評価の時間刻みは EFPY とする。

1.5 考慮する応力

評価に用いる応力は、死荷重による応力とし、差圧による応力は保守的に考慮せず、熱膨張応力は通常運転時の熱応力が微小であることから考慮しない。

また、応力発生部位は最長グリッドプレート中央部の応力とし、想定亀裂が貫通亀裂のため応力集中は考慮しない。

(1) 死荷重

評価対象部位に生じる死荷重 W は、次の式で求める。

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

t：グリッドプレート板厚

h：グリッドプレート高さ

L：最長グリッドプレート長さ

γ：材料の比重 ([N/mm²])

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張りの公式より次の式で求める。

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

(2) 死荷重による応力

図 1 に示すモーメント M による曲げ応力 σ_b は材料力学の公式より, 次の式で求める。

$$\sigma_b = \frac{6 \times M}{t \times (h_a + h_b)^2} = \frac{6 \times \boxed{}}{\boxed{} \times (\boxed{})^2}$$

$$= \boxed{} \text{ [MPa]}$$

h_a : ノッチ部リガメント高さ

h_b : ノッチ部高さ

1.6 応力拡大係数の算出

想定亀裂の応力拡大係数 K_{IM} を算出し, 対応する亀裂進展速度で, 亀裂進展計算を順次行う。貫通亀裂の応力拡大係数 K_{IM} は次の式で求める。

$$K_{IM} = \sigma_b (\sqrt{\pi b}) \times F(\xi)$$

$$F = \sqrt{\frac{2}{\pi \xi} \tan \frac{\pi \xi}{2}} \times \frac{0.923 + 0.199 \{1 - \sin(\pi \xi / 2)\}^4}{\cos(\pi \xi / 2)}$$

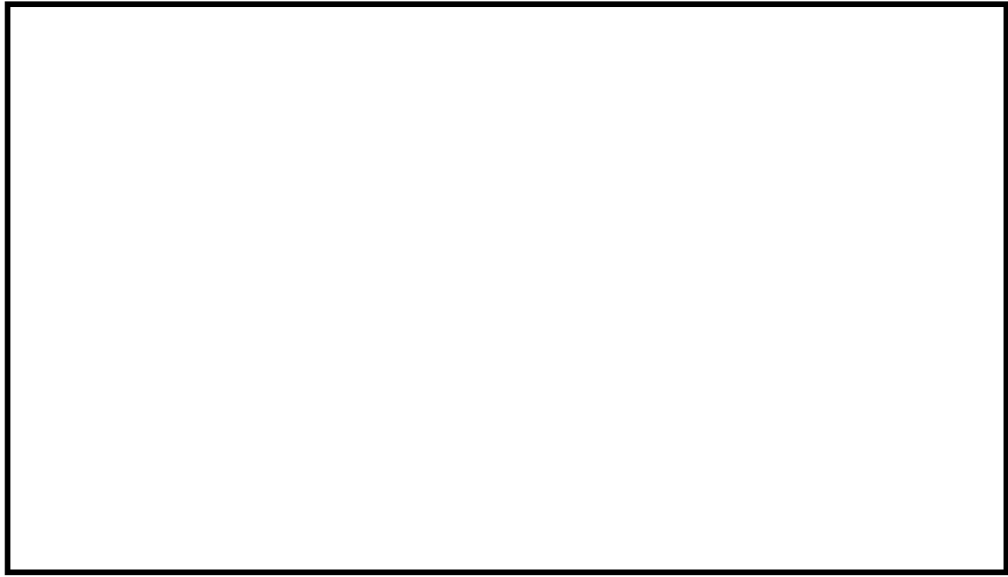
$$\xi = \frac{b}{(h_a + h_b)} \quad b : \text{亀裂長さ}$$

1.7 亀裂進展評価結果

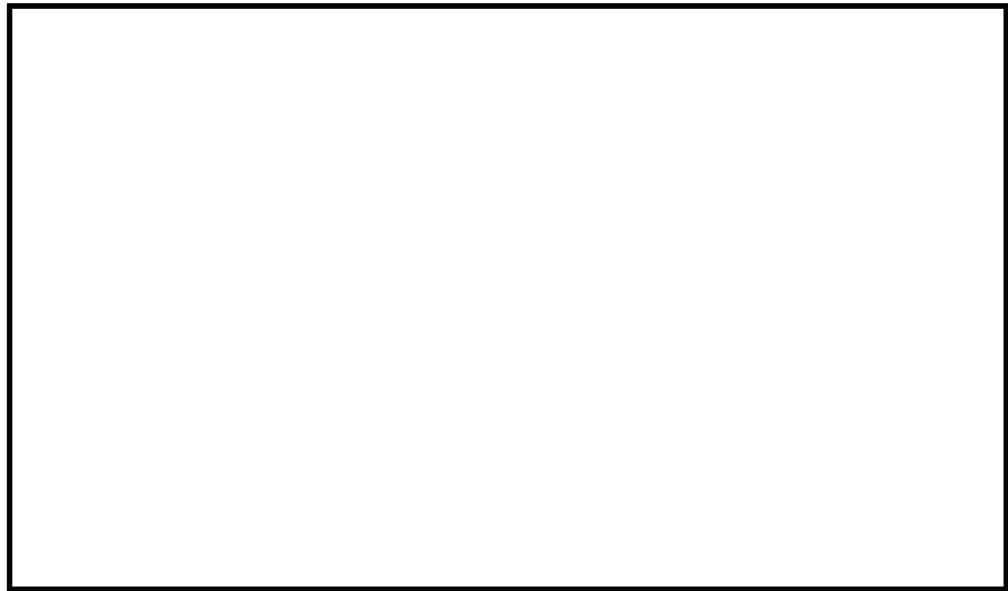
60 年時点での上部格子板グリッドプレートの亀裂進展評価結果を表 3 及び図 3 に示す。

表 3 上部格子板の亀裂進展評価結果

評価部位	板厚 (mm)	評価期間 [EFPY]	評価亀裂長さ
下側グリッドプレートノッチ部	$\boxed{}$	38.94	$\boxed{}$



(a) 亀裂長さと評価期間の関係



(b) 応力拡大係数と評価期間の関係

図3 亀裂進展評価結果

2. 破壊評価

亀裂進展評価から得られた 60 年時点での想定亀裂に対し、地震時応力により求めた応力拡大係数が破壊靱性値未満であれば、破壊を生じないと判断する。

2.1 考慮する荷重

評価位置に作用する荷重を、表 4 に示す死荷重及び地震荷重とし、差圧は保守的に評価しない。

表 4 破壊評価に用いる地震荷重

評価部位	地震荷重	
	鉛直力 (鉛直震度)	水平力[kN]
下部グリッド プレートノッ チ部	□	□

2.2 破壊評価に用いる応力

破壊評価に用いる応力は、表 4 の荷重による応力を考慮する。

熱膨張応力は中間胴の一般部であり通常運転時の熱応力が微小であることから、それぞれ考慮しない。

(1) 鉛直力による応力

死荷重及び地震の鉛直力による荷重は次の式から求める。

$$\begin{aligned}
 W_v &= t \times h \times L \times \gamma \times (1 + C_v) \\
 &= \square \times \square \times \square \times \square \times (1 + \square) \\
 &= \square \text{ [N]}
 \end{aligned}$$

C_v : 鉛直震度

図 1 に示す最長グリッドプレートの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式から求める。

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{W_v \times L}{24} = \frac{\square \times \square}{24} \\
 &= \square \text{ [N} \cdot \text{mm]}
 \end{aligned}$$

図 1 に示すモーメント M による曲げ応力 σ_b は、材料力学の公式より次の式から求める。

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= \frac{6 \times M}{t \times (h_a + h_b)^2} = \frac{6 \times \square}{\square \times \square^2} \\
 &= \square \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

(2) 水平力による応力

上部格子板の取付位置において、4本の燃料集合体がグリッドプレートに与える地震の水平力Fは、次の式から求める。

$$F = \frac{4 \times H}{764} = \frac{4 \times \boxed{}}{764}$$

$$= \boxed{} \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

H：地震の水平力

図1に示す水平力Fによる引張応力 σ_m は、材料力学の公式より次の式から求める。

$$\sigma_m = \frac{F}{t \times (h_a + h_b)^2} = \frac{\boxed{}}{\boxed{} \times \boxed{}^2}$$

$$= \boxed{} \text{ [MPa]}$$

2.3 応力拡大係数の算出

亀裂進展評価から得られた想定亀裂の応力拡大係数 $K_{I(\sigma_b)}$ は、 σ_b による応力拡大係数 $K_{I(\sigma_b)}$ 、 σ_m による応力拡大係数 $K_{I(\sigma_m)}$ の重ね合わせにより、次の式から求める。

$$K_{I(\sigma_b)} = k_{I(\sigma_b)} + k_{I(\sigma_m)}$$

$$K_{I(\sigma_b)} = \sigma_b (\sqrt{\pi b}) \times F(\xi)$$

$$F(\xi) \doteq \sqrt{\frac{2}{\pi \xi} \tan \frac{\pi \xi}{2}}$$

$$\times \frac{0.923 + 0.199 \{1 - \sin(\pi \xi / 2)\}^4}{\cos(\pi \xi / 2)}$$

$$\xi = \frac{b}{(h_a + h_b)}$$

$$K_{I(\sigma_m)} = \sigma_m (\sqrt{\pi b}) \times F(\xi)$$

$$F(\xi) \doteq \sqrt{\frac{2}{\pi \xi} \tan \frac{\pi \xi}{2}}$$

$$\times \frac{0.752 + 2.02 \xi + 0.37 \{1 - \sin(\pi \xi / 2)\}^3}{\cos(\pi \xi / 2)}$$

$$\xi = \frac{b}{(h_a + h_b)}$$

上記より求めた 60 年時点の想定亀裂の応力拡大係数 K_I を、表 5 に示す。

表 5 想定亀裂の応力拡大係数 K_I

評価時点 [EFPY]	亀裂長さ [m]	$K_{I(\sigma_b)}$ [MPa \sqrt{m}]	$K_{I(\sigma_m)}$ [MPa \sqrt{m}]	K_I [MPa \sqrt{m}]
38.94				7.59

2.4 破壊靱性値

照射されたステンレス鋼の破壊靱性値 K_{IC} は、維持規格 E-14 3.(1) にて中性子照射量 8×10^{24} n/m² を超える場合の値として記載のある 43.2MPa \sqrt{m} を用いる。

2.5 亀裂進展及び破壊評価結果

表 6 に亀裂進展期間における想定亀裂長さ、想定亀裂に対する地震時の応力拡大係数を、破壊靱性値 K_{IC} と比較する。

表 6 上部格子板の破壊評価

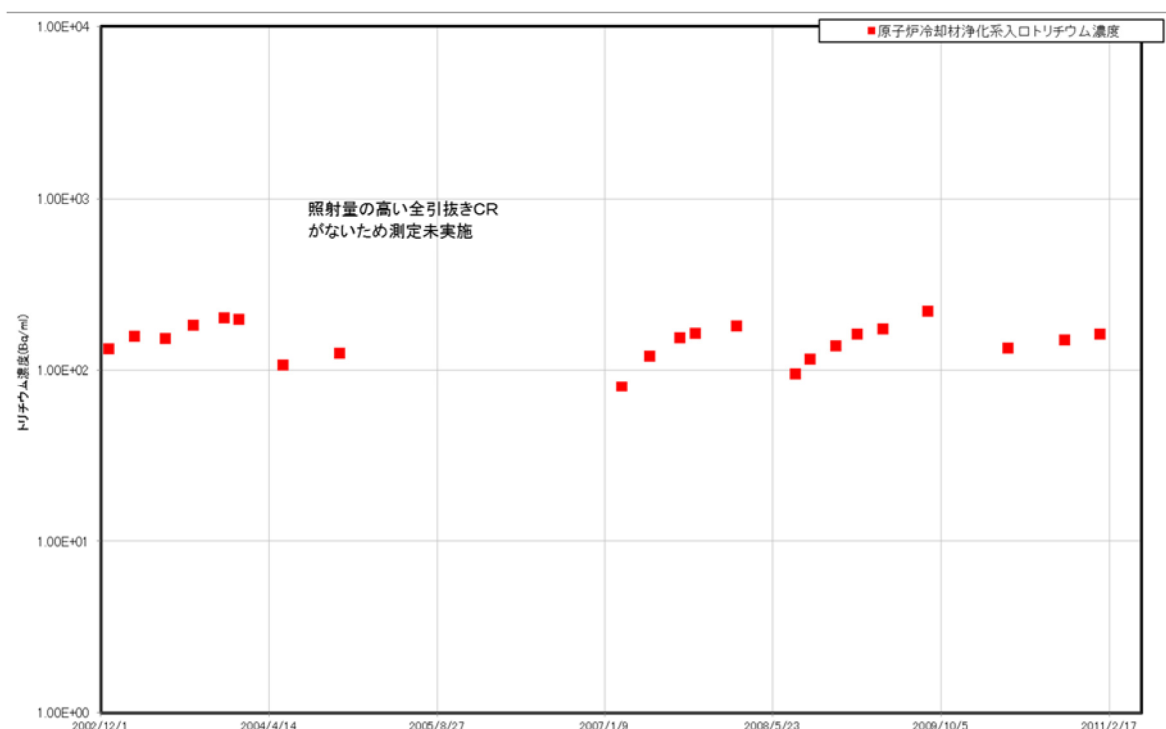
亀裂進展期間 [EFPY]	亀裂長さ l [mm]	応力拡大係数 K_I [MPa \sqrt{m}]	破壊靱性値 K_{IC} [MPa \sqrt{m}]
38.94			43.2

表 6 に示す通り、想定亀裂の応力拡大係数が、破壊靱性値に至らないため地震時に破壊が起こらないことを確認した。

以 上

<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、制御棒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。



＜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まで拡大させるため、炉心領域にある溶接部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。

ただし、貴金属コーティング施工に用いる装置は大型のプラズマヘッドを溶接部に近づける必要があるため、炉心シュラウドの上部胴内面や上部胴・中間胴の外面には施工が困難である。このためこれらの部位について、狭隘部にも適用が可能な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]^{*1}（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。

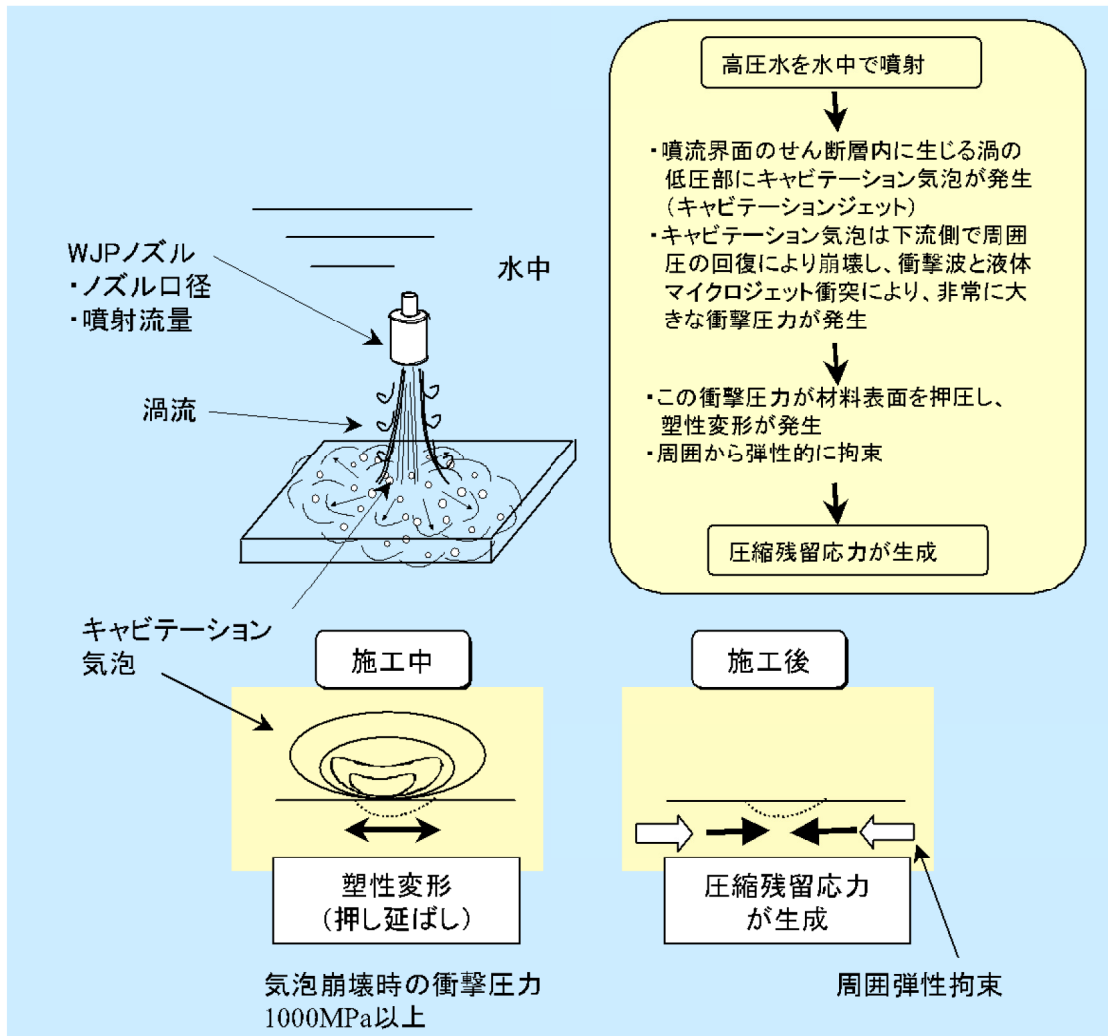
維持規格においては、W J Pが炉内構造物の予防保全工法として、「RB-2530 金属粉末溶射クラッド方法」に記載されている。また、「添付 IJG-B-2-1 シュラウドに対する予防保全の適用」の「表 添付 IJG-B-2-1-1 予防保全の適用」に、「ピーニング」を適用した場合に「予防保全実施時期を供用開始時期として、表 IJG-2500-B-2 の G3.10 および G3.20 を適用できる。」としており、W J Pの効果に関する規定がある。

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

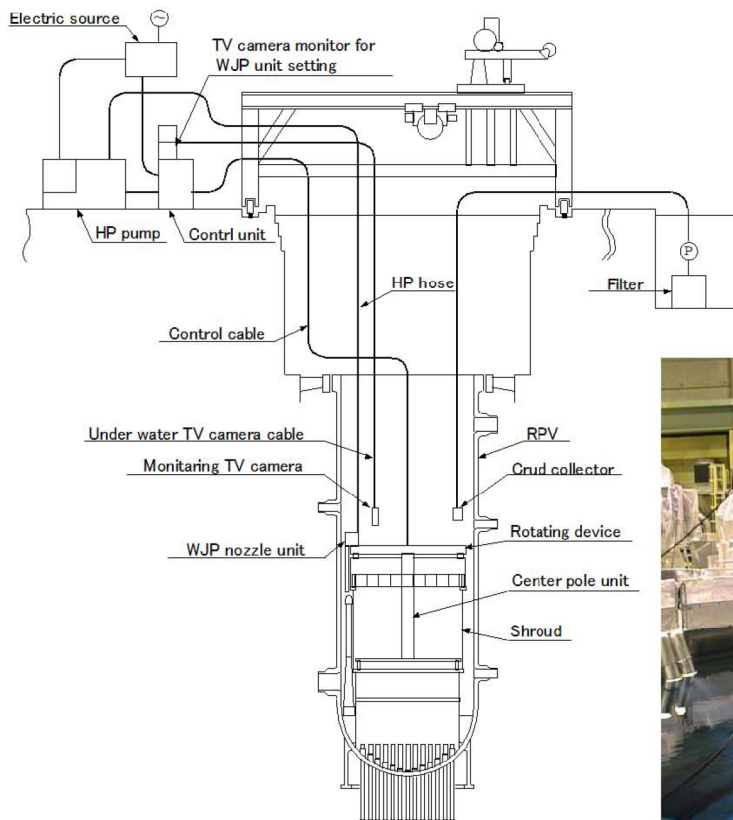
(解説 2-1) W J P の原理

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

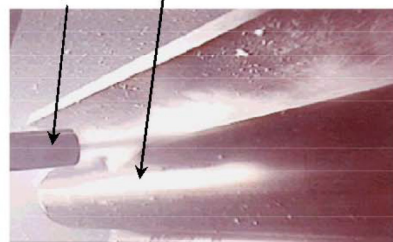
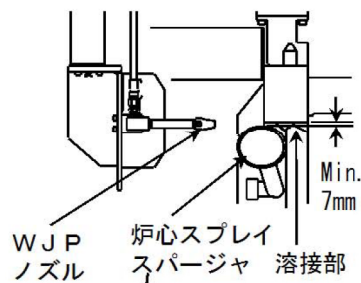
図1 W J Pによる引張残留応力改善の原理
(ピーニング工法ガイドラインより)



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

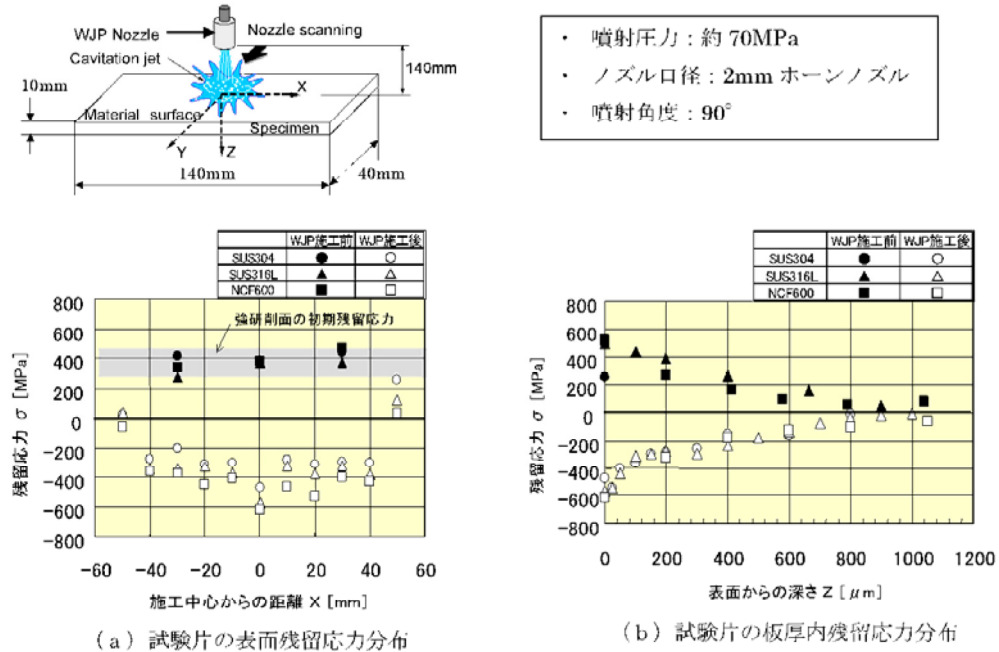


炉心スプレイ配管と炉心シュラウド上部リング
隙間への施工模式図とモックアップ試験状況

図2 WJPの現場施工の概要

3. WJPによる応力腐食割れの抑制効果

WJP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 WJP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WJP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。

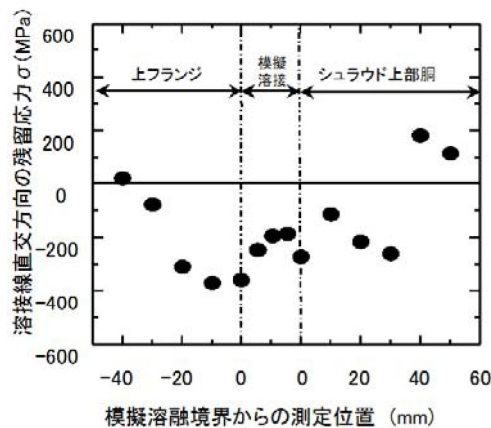


図4 WJPによる残留応力改善効果 (メーカー社内試験より)

＜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 EIJG-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。

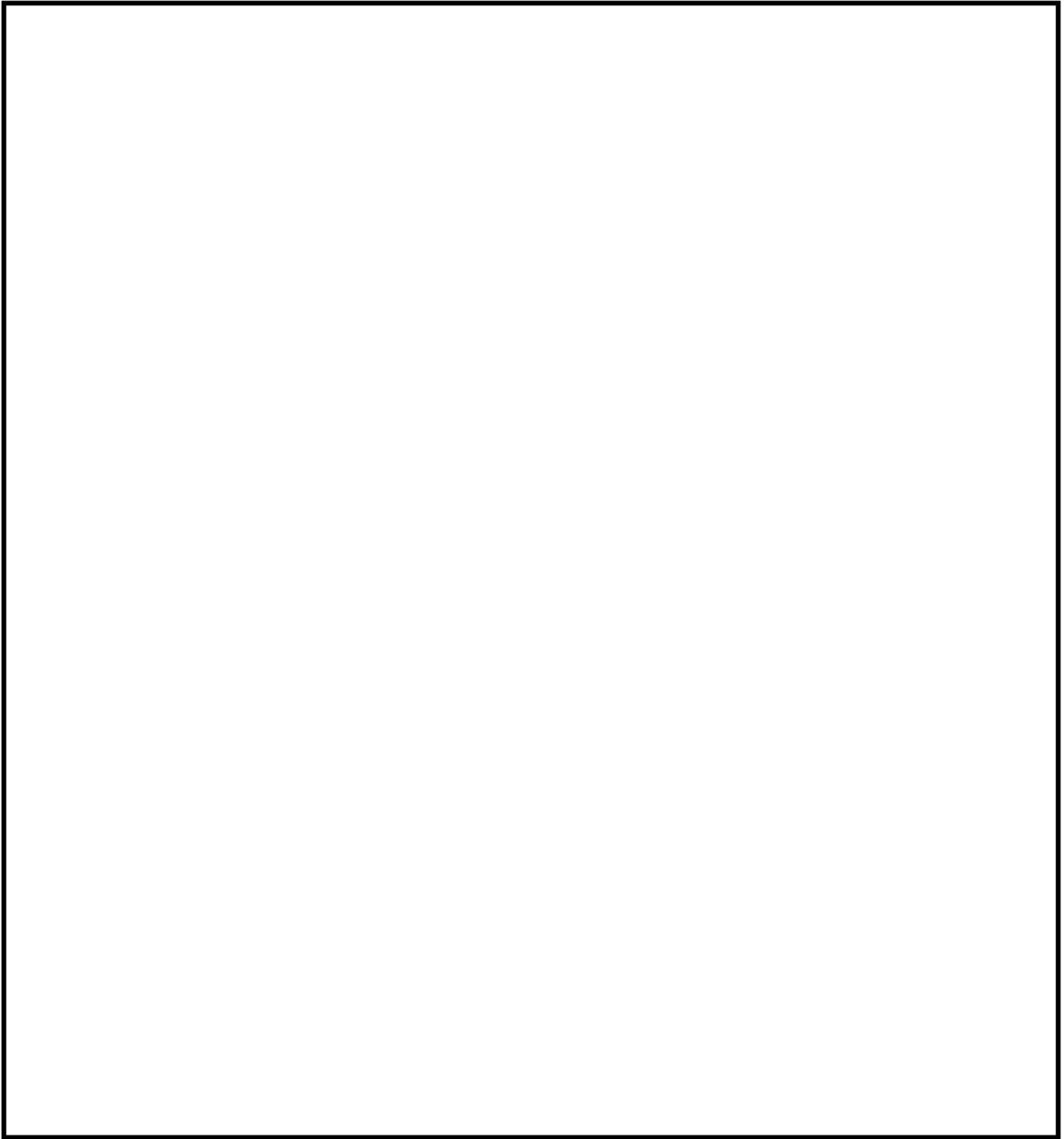


図1 NMCによる応力腐食割れ抑制効果のメカニズム
(NMC 確性試験報告書より)

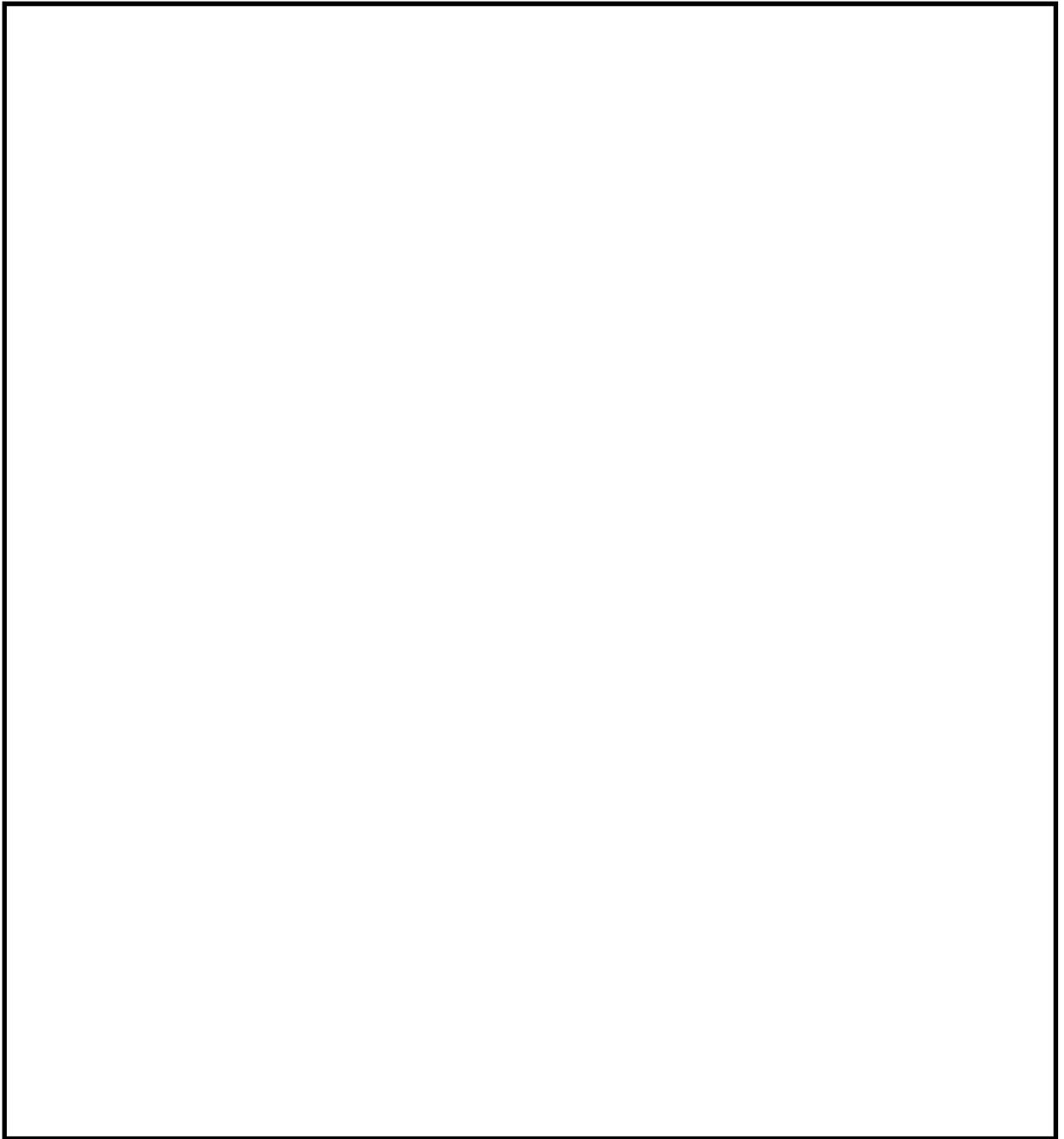


図2 NMCの現場施工の概要
(NMC確性試験報告書より)

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

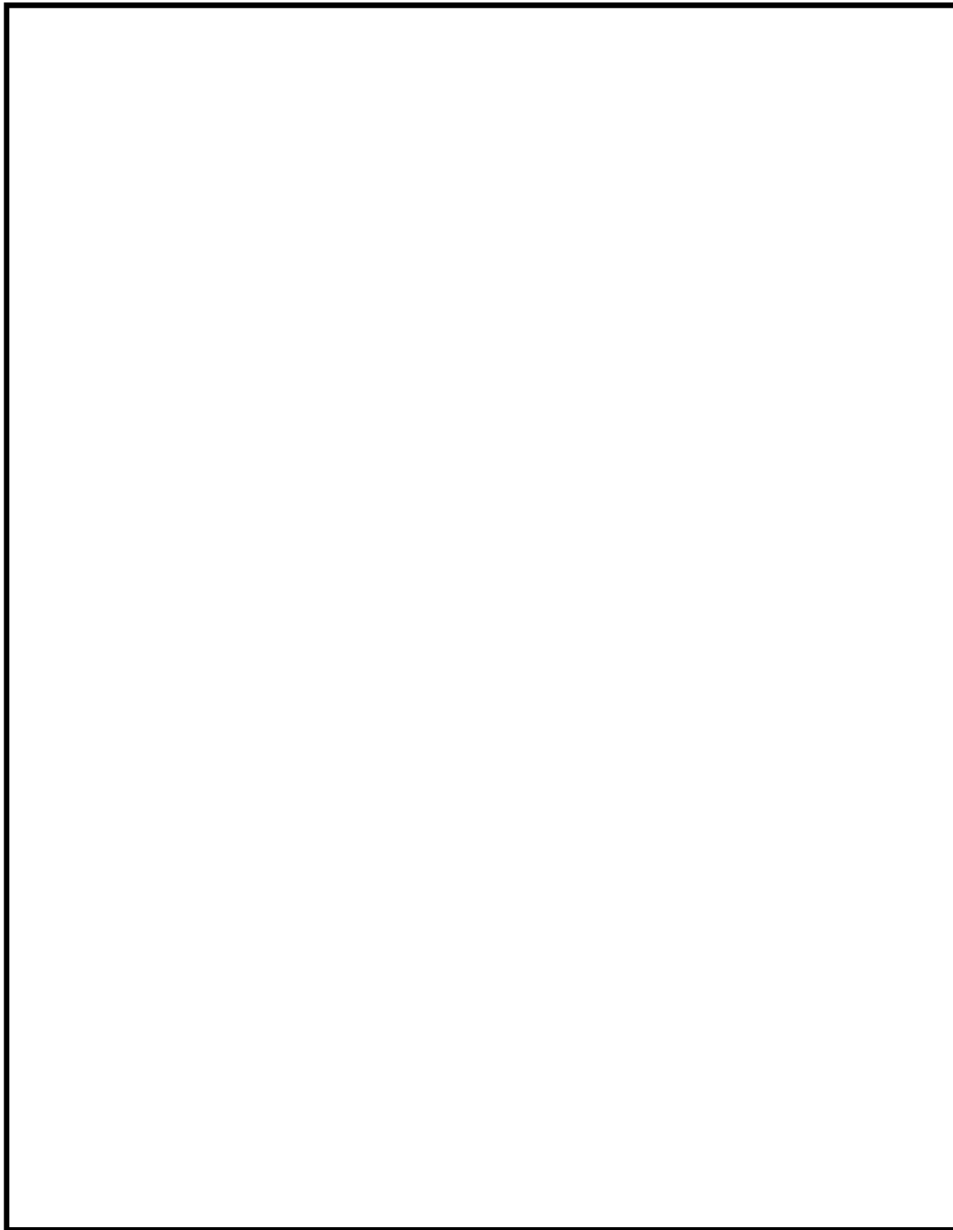


図3 NMC試験体の腐食電位測定結果
(NMC確性試験報告書より)