

美浜発電所3号炉 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28年11月2日

関西電力株式会社

# 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	5
(3) 総合評価	5
(4) 高経年化への対応	5
3. まとめ	6
4. 参考	7

## 別紙1～14

### 【美浜3号炉】

別紙1. 炉内構造物の材質	10
別紙2. 1次冷却材の水質	11
別紙3. 炉内構造物の照射量	12
別紙4. 炉内構造物表面の温度	16
別紙5. 炉内構造物各部位における応力レベルの分類	18
別紙6. 炉心槽溶接部とバッフルフォーマボルトの応力比較	19
別紙7. 炉内構造物の代表部位の選定	22
別紙8. 炉心支持構造物における応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮	27
別紙9. 御棒クラスタ被覆管の材料、照射量、保全内容	28
別紙10. 技術評価で参考としたIASCC事例とその分析結果	29
別紙11. バッフルフォーマボルト損傷評価手法が使用できるとした検討結果	30
別紙12. バッフルフォーマボルト損傷予測評価結果	32
別紙13. 現状保全の考え方、点検の計画、方法、結果	36
別紙14. 炉心支持構造物に対する非破壊試験の計画と実績	38

## 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、高い中性子照射量を受けると応力腐食割れの感受性が高くなることが知られている。照射誘起型応力腐食割れ（IASCC）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。

照射誘起型応力腐食割れの発生要因としては、材料、環境及び応力の3つの要因が考えられ、運転時間が経過し、非常に高い中性子照射量を受けたステンレス鋼において発生する可能性がある。

また、これまで得られている材料試験データから、IASCCの発生環境としては中性子照射量・環境温度・応力が高いほど厳しいことが判明している。

海外では炉内構造物の点検によってIASCCによるバッフルフォーマボルトの損傷が確認されているが、原子炉の安全性に影響を及ぼすような事例は無い。なお、日本国内ではIASCCの発生が確認された事例はない。

表1 国内外3ループプラント・バッフルフォーマボルト点検結果の一例

	Robinson発電所2号	Surry発電所1号	Surry発電所2号	Farley発電所1号	Farley発電所2号	高浜発電所1号	高浜発電所2号	美浜発電所3号 (炉内構造物取替後)
営業運転開始日	1971.3.7	1972.12.22	1973.5.1	1977.12.1	1981.7.30	1974.11.14	1975.11.14	1976.12.1
点検時間	約31EFPY	約28EFPY	約28EFPY	約17EFPY	約15EFPY	約14EFPY	約12EFPY	約13EFPY
損傷本数*	9本	1本	2本	0本	0本	0本	0本	0本

※ バッフルフォーマボルトの全数は1088本

EFPY: 定格負荷相当年数

## 2. 技術評価

### (1) 健全性評価

#### ① 評価対象機器の抽出

材料がステンレス鋼で、照射誘起型応力腐食割れ感受性の発生が考えられる中性子照射量  $10^{21}\text{n/cm}^2$  [ $E>0.1\text{MeV}$ ] オーダー以上（運転開始後 60 年時点）を受ける機器を抽出した結果、対象機器は炉内構造物のみ<sup>\*</sup>であった。

炉内構造物の各部位の中性子照射量、温度、応力レベルを表 2 に整理した。これらの部位のうち、中性子照射量と環境温度が最も高く、応力レベルも大きく、海外での損傷事例もあるバブルフォーマボルトを最も厳しい評価部位として選定した。

※制御棒クラスタの被覆管については、有意な応力は発生せず、中性子照射量が  $5 \times 10^{22}\text{n/cm}^2$  [ $E>0.625\text{eV}$ ] を超えるまでに取り替える運用をしていることから抽出対象外としている。

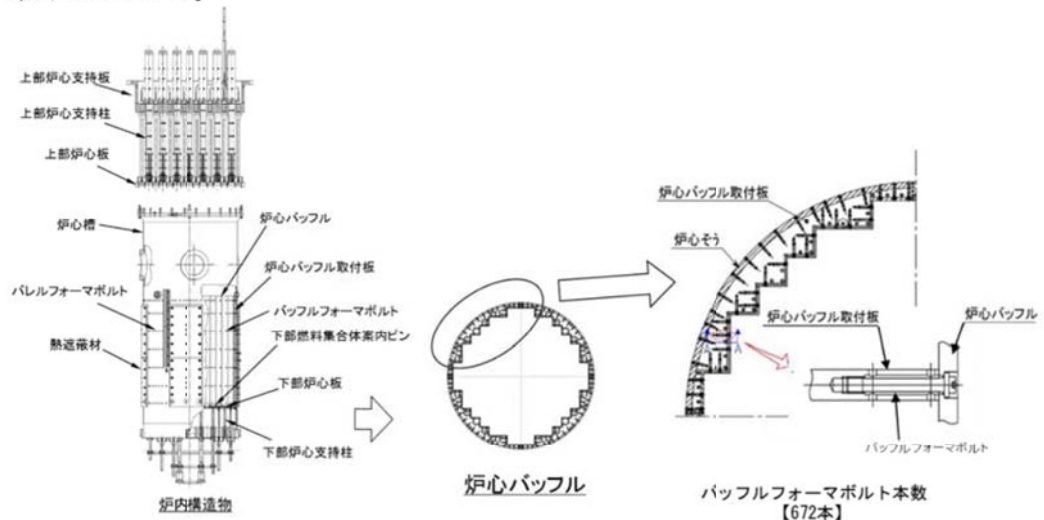


図 1 炉内構造物構造

表 2 ステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れ (IASCC) の可能性評価

部位	実機条件			海外の 損傷事例	可能性評価
	中性子照射量レベル <sup>*1</sup> [ $\text{n/cm}^2 \cdot E > 0.1\text{MeV}$ ]	応力レベル <sup>*2</sup> (応力支配因子)	温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]		
バブルフォーマボルト	$3 \times 10^{22}$	大 (締付+熱曲げ + 照射スウェリング)	323	有	発生可能性有り。炉心バブルの照射スウェリングにより応力増加が生じるためき裂発生可能性が大きくなる。海外損傷事例もあり最も厳しい。
炉心バブル、 炉心バブル取付板	$3 \times 10^{22}$	小 (熱応力)	323	無	バブルフォーマボルトよりも応力レベルが小さいため、発生の可能性はないと考えられる。
バレルフォーマボルト	$3 \times 10^{21}$	大 (締付+熱曲げ)	323	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量が小さいため、発生の可能性はないと考えられる。
炉心槽	$9 \times 10^{21}$	大 (溶接部) (溶接残留応力)	323	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量が小さいため、発生の可能性はないと考えられる。
下部炉心板、 下部燃料集合体案内ピン	$3 \times 10^{21}$	小 (熱応力、締付)	289	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量、応力レベル及び温度が小さいため、発生の可能性はないと考えられる。
下部炉心支持柱	$1 \times 10^{21}$	中 (曲げ)	289	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量、応力レベル及び温度が小さいため、発生の可能性はないと考えられる。
熱遮蔽材	$4 \times 10^{21}$	小 (熱応力)	289	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量、応力レベル及び温度が小さいため、発生の可能性はないと考えられる。
熱遮蔽材固定用ボルト	$4 \times 10^{21}$	大 (締付+熱曲げ)	289	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量及び温度が小さいため、発生の可能性はないと考えられる。

\*1: 中性子照射量レベルは運転開始後60年時点での各部位の推定最大中性子照射量レベルを示す。また、中性子照射量は運転期間延長認可期限日以降、設備利用率80%で運転すると仮定して算出した。

\*2: 応力レベルは各部位の最大応力値を示す。【大:  $> S_y$  (非照射材の降伏応力) 中:  $\approx S_y$  (非照射材の降伏応力) 小:  $< S_y$  (非照射材の降伏応力)】

## ②適用規格、評価条件

- ・発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1-2008) 日本機械学会
- ・照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書 原子力安全基盤機構 (平成 21 年 9 月)
- ・PWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [バッフルフォーマボルト] 原子力安全推進協会
- ・発電設備技術検査協会「平成 8 年度 プラント長寿命化技術開発に関する事業報告書」

## ③ 照射誘起型応力腐食割れの損傷予測評価

### ● 発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1-2008) に基づく評価

維持規格において、バッフルフォーマボルトの多数損傷時には炉心バッフルが燃料集合体に接触することにより、制御棒挿入性に影響を及ぼす可能性があるが、バッフルフォーマボルトは縦列 2 本のボルトが残存すればよく、ボルト本数全体の約 7 割が損傷した場合でも炉心の健全性は確保可能であるとの評価がなされている。維持規格では、バッフルフォーマボルトの仕様に従い、グループ 1～4 に分類がなされ、炉内構造物取替前の美浜 3 号炉はグループ 2 に分類される。維持規格では、損傷ボルト本数の合計本数が管理損傷ボルト数 (全体の 2 割) ※に至るまでの期間として、グループ 2 では運転時間で約 50 年 (約 44 万時間) とされている。炉内構造物取替後の美浜 3 号炉は、グループ 2 と比較して応力低減等による耐照射誘起型応力腐食割れ性の向上を図ったボルトを採用しており、ボルト損傷の可能性はグループ 2 よりも小さい。美浜 3 号炉の損傷ボルト本数が管理損傷ボルト数に至るまでの期間を、グループ 2 の損傷予測曲線を用いて保守的に評価すると、運転時間で約 50 年と評価される。

※管理損傷ボルト数：維持規格に規定されている、バッフルフォーマボルト点検時期を決定するための管理基準となる本数であり、炉心の健全性の確保が可能とされているバッフルフォーマボルトの 7 割の損傷に対して約 3 倍の余裕をとったもの。

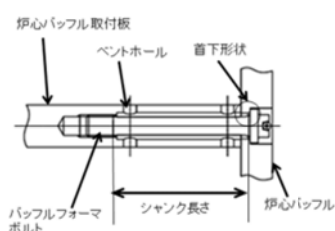


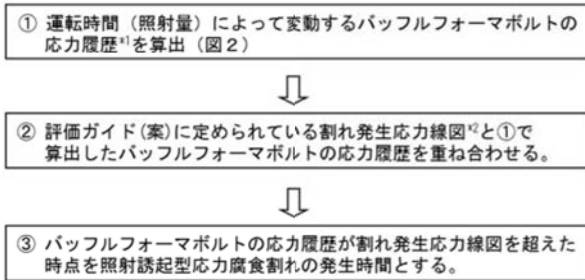
表3 美浜3号炉のバッフルフォーマボルトの仕様

	シャンク長さ	ボルト材料	首下形状	ベントホールの有無	維持規格での分類
炉内構造物取替え前	35mm	SUS316CW	R2	無	グループ2
炉内構造物取替え後	97mm	SUS316CW	パラボリック	有	—

●照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書等に基づく評価

最新知見が反映された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た評価ガイド (案) (以下、評価ガイド (案) という) 及び PWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [バッフルフォーマボルト] (以下、ガイドラインという) に基づき評価 (図 2) を行った。

<評価方法>



\*1: 全672本のバッフルフォーマボルトのうち、対象性を考慮した84本 (=672本÷8)の応力履歴を算出している。

\*2: 「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書」の評価ガイド (案) に示されたIASCC発生試験結果から設定したしきい線

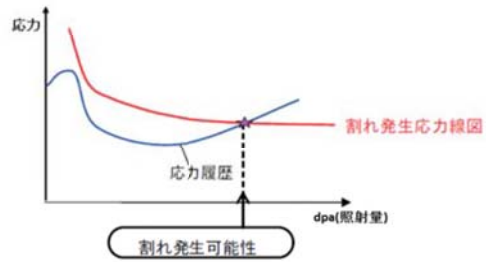


図 2 割れ発生予測評価概念図

[出典: 「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書」]

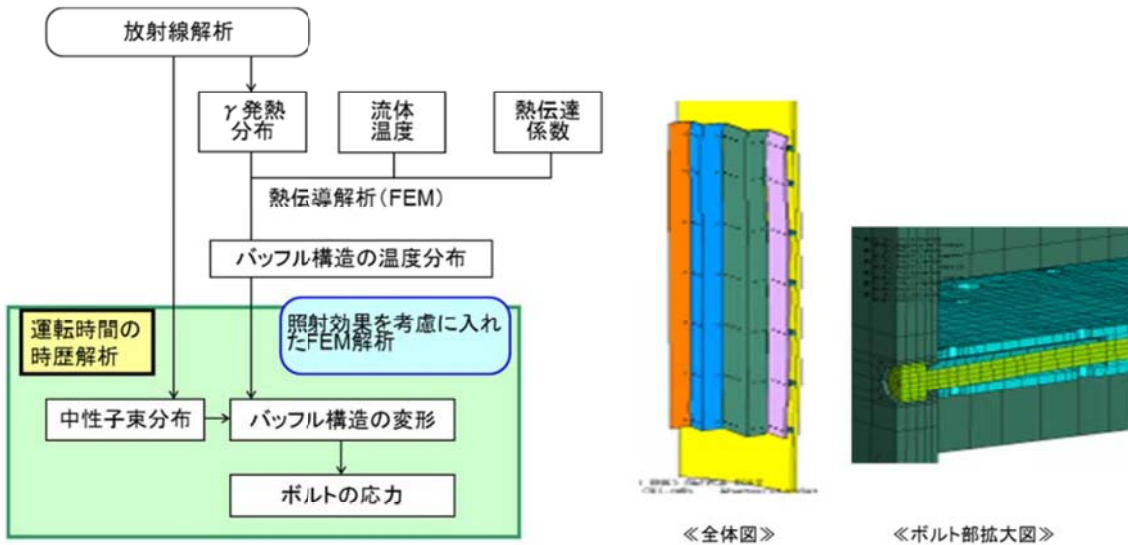


図 3 バッフルフォーマボルトの応力評価手法

評価ガイド(案) およびガイドラインに基づく評価の結果、炉内構造物取替えによりバッフルフォーマボルトは応力低減をしたものに取り替えることから、運転開始60年時点でのバッフルフォーマボルト損傷本数は0本となり、照射誘起型応力腐食割れは発生しないと評価した。(図4)

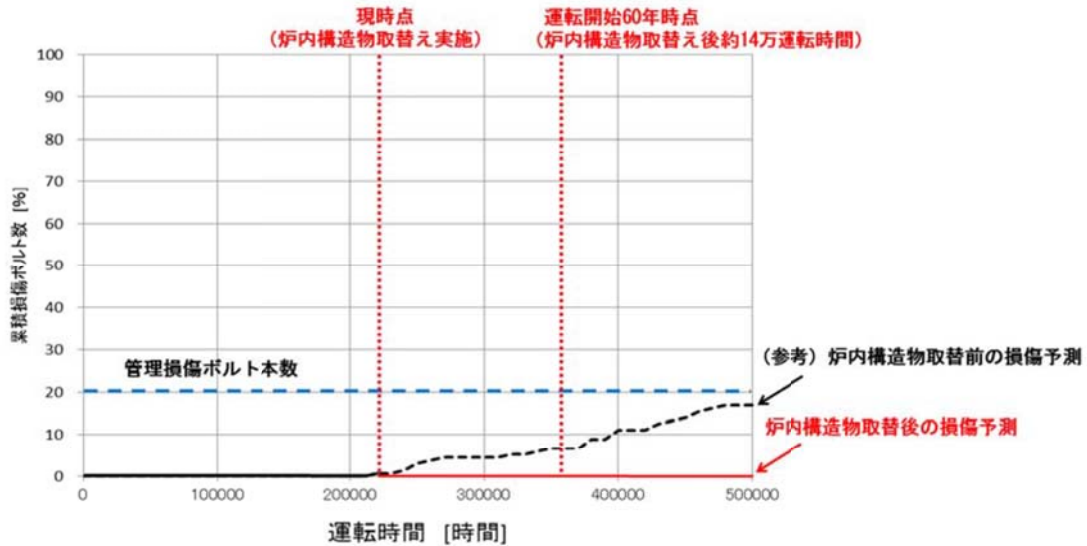


図4 バッフルフォーマボルトの累積損傷本数の予測

## (2) 現状保全

炉内構造物のステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れについては、炉内構造物取替え前においては、定期的に炉内構造物の可視範囲に対して水中カメラによる目視確認を実施し、異常がないことを確認している。また、評価上最も厳しいバッフルフォーマボルトに対して、第14回定期検査時(1994～1995年度)に超音波探傷検査を実施し、有意な欠陥のないことを確認している。炉内構造物取替え後においては可視範囲に対して水中カメラによる目視確認の実施を計画している。

## (3) 総合評価

健全性評価結果から判断して、バッフルフォーマボルトについては、現時点の知見による損傷発生予測の結果、運転開始後60年時点までにまでに損傷が発生する可能性はないと考える。バッフルフォーマボルト以外の部位については、バッフルフォーマボルトとの応力・中性子照射量の比較から、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

ステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れについては、バッフルフォーマボルトの可視範囲について定期的に水中テレビカメラによる目視確認を実施していく。

### 3. まとめ

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。	健全性評価の結果、バッフルフォーマボルトについては、運転開始60年時点においてもボルト損傷は発生せず、照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性はないと評価した。また、バッフルフォーマボルト以外の部位については、バッフルフォーマボルトとの応力・中性子照射量の比較から、照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性はないと評価した。



#### 4. 参考

##### (1) 高浜 1, 2 号炉との相違について

##### ①美浜 3 号炉の炉内構造物の取替えについて

美浜 3 号炉では、今回停止期間中に炉内構造物の取替えを予定しており、取替えを考慮した評価としている。炉内構造物の取替範囲と主な改善内容を図 5 に示す。

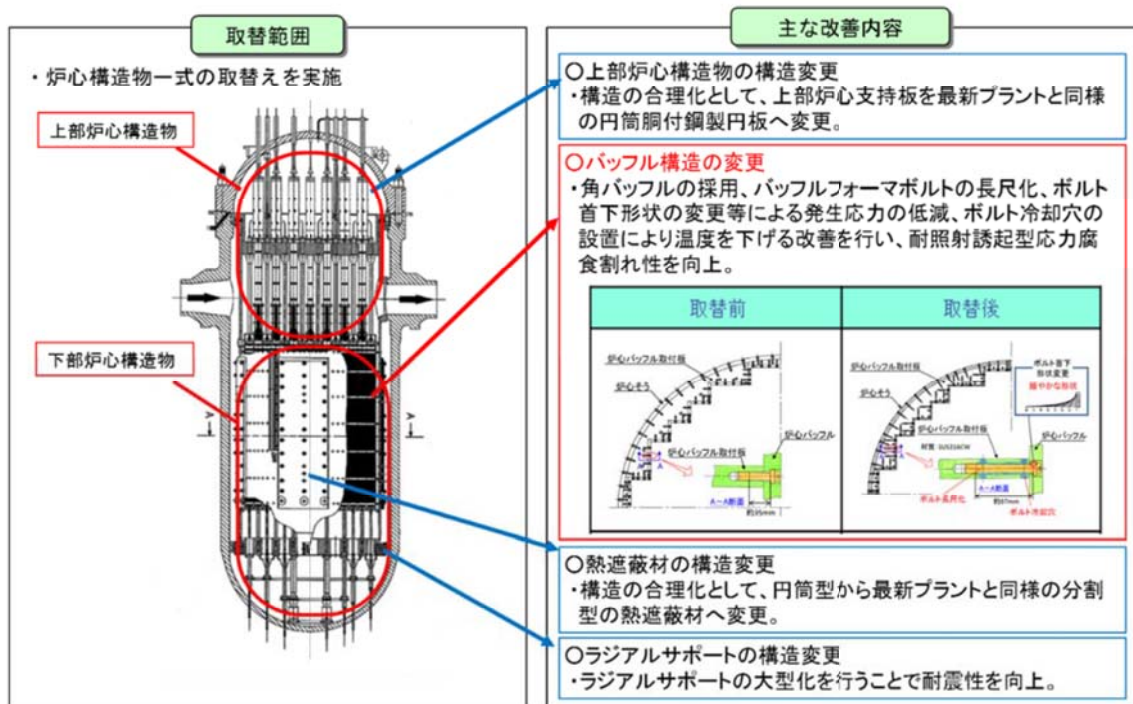


図 5 美浜 3 号炉 炉内構造物の取替範囲と主な改善内容

また、評価条件としては、高浜 1, 2 号炉の運転期間は運転開始から運転開始 60 年時点までとしたが、美浜 3 号機の運転期間は炉内構造物取替後から運転開始 60 年時点までとしている。

##### ②照射誘起型応力腐食割れに対する点検について

照射誘起型応力腐食割れに対する点検として、高浜 1, 2 号炉は通常保全に加えて超音波探傷検査を実施するとしたが、美浜 3 号炉は炉内構造物の取替えを実施すること、および健全性評価の結果、バッフルフォーマボルトの損傷は発生しないと評価したことを踏まえて、通常保全として目視点検を実施することとしている。

○照射誘起型応力腐食割れに対する点検について

<高浜1・2号炉>

**健全性評価結果**

バップルフォーマボルトの損傷予測評価の結果、ボルト損傷本数は管理損傷ボルト数(全体の20%)以下であり、運転開始後60年時点においても炉心の健全性に影響を及ぼす可能性はないと評価した。



**点検の考え方**

バップルフォーマボルトの損傷予測評価の結果から、照射誘起型応力腐食割れの発生は否定できないことから、通常保全に加えて、維持規格及びPWR炉内構造物点検評価ガイドラインに基づき、適切な時期に超音波探傷検査の実施を検討することとした。

<美浜3号炉>

**健全性評価結果**

美浜3号炉は炉内構造物の取替えを実施することとしており、炉内構造物取替後のバップルフォーマボルトについては、損傷予測評価の結果、運転開始60年時点までにボルトの損傷は発生せず、炉心の健全性に影響を及ぼす可能性はないと評価した。



**点検の考え方**

バップルフォーマボルトの損傷予測評価の結果から、照射誘起型応力腐食割れは発生しないが、通常保全として炉内構造物の機能に影響するような大きな構造変形や部品損傷等の異常がないことを確認するために、定期的に炉内構造物の可能範囲の目視点検を実施することとしている。

図6 照射誘起型応力腐食割れに対する点検について

# 別紙

## 【美浜3号炉】

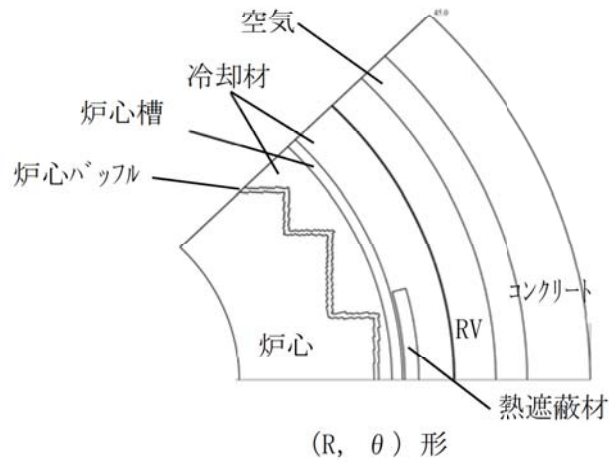
- 別紙1. 炉内構造物の材質
- 別紙2. 1次冷却材の水質
- 別紙3. 炉内構造物の照射量
- 別紙4. 炉内構造物表面の温度
- 別紙5. 炉内構造物各部位における応力レベルの分類
- 別紙6. 炉心槽溶接部とバッフルフォーマボルトの応力比較
- 別紙7. 炉内構造物の代表部位の選定
- 別紙8. 炉心支持構造物における応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮
- 別紙9. 御棒クラスタ被覆管の材料、照射量、保全内容
- 別紙10. 技術評価で参考としたIASCC事例とその分析結果
- 別紙11. バッフルフォーマボルト損傷評価手法が使用できるとした検討結果
- 別紙12. バッフルフォーマボルト損傷予測評価結果
- 別紙13. 現状保全の考え方、点検の計画、方法、結果
- 別紙14. 炉心支持構造物に対する非破壊試験の計画と実績

タイトル	炉内構造物主要部位の使用材料について																														
説明	<p data-bbox="448 472 1023 506">炉内構造物主要部位の使用材料を下表に示す。</p> <p data-bbox="692 546 1090 580">表 炉内構造物主要部位の材料</p> <table border="1" data-bbox="469 580 1267 1184"> <thead> <tr> <th data-bbox="469 580 850 622">部位</th> <th data-bbox="850 580 1267 622">材料</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="469 622 850 665">上部炉心板</td> <td data-bbox="850 622 1267 665">SUS304</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 665 850 707">上部炉心支持柱</td> <td data-bbox="850 665 1267 707">SUS304TKA</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 707 850 750">上部炉心支持板</td> <td data-bbox="850 707 1267 750">SUS304/ SUSF304</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 750 850 792">下部炉心板</td> <td data-bbox="850 750 1267 792">SUS304</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 792 850 835">下部炉心支持柱</td> <td data-bbox="850 792 1267 835">SUS304</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 835 850 878">下部炉心支持板</td> <td data-bbox="850 835 1267 878">SUSF304</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 878 850 920">炉心そう</td> <td data-bbox="850 878 1267 920">SUS304</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 920 850 963">下部燃料集合体案内ピン</td> <td data-bbox="850 920 1267 963">G316CW1</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 963 850 1005">炉心バップル</td> <td data-bbox="850 963 1267 1005">SUS304 / SUSF304</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 1005 850 1048">炉心バップル取付板</td> <td data-bbox="850 1005 1267 1048">SUS304</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 1048 850 1090">バップルフォーマボルト</td> <td data-bbox="850 1048 1267 1090">G316CW1</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 1090 850 1133">バレルフォーマボルト</td> <td data-bbox="850 1090 1267 1133">G316CW1</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 1133 850 1176">熱遮蔽材</td> <td data-bbox="850 1133 1267 1176">SUS304</td> </tr> <tr> <td data-bbox="469 1176 850 1218">熱遮蔽材固定用ボルト</td> <td data-bbox="850 1176 1267 1218">G316CW2</td> </tr> </tbody> </table> <p data-bbox="1230 1223 1321 1256">以上</p>	部位	材料	上部炉心板	SUS304	上部炉心支持柱	SUS304TKA	上部炉心支持板	SUS304/ SUSF304	下部炉心板	SUS304	下部炉心支持柱	SUS304	下部炉心支持板	SUSF304	炉心そう	SUS304	下部燃料集合体案内ピン	G316CW1	炉心バップル	SUS304 / SUSF304	炉心バップル取付板	SUS304	バップルフォーマボルト	G316CW1	バレルフォーマボルト	G316CW1	熱遮蔽材	SUS304	熱遮蔽材固定用ボルト	G316CW2
部位	材料																														
上部炉心板	SUS304																														
上部炉心支持柱	SUS304TKA																														
上部炉心支持板	SUS304/ SUSF304																														
下部炉心板	SUS304																														
下部炉心支持柱	SUS304																														
下部炉心支持板	SUSF304																														
炉心そう	SUS304																														
下部燃料集合体案内ピン	G316CW1																														
炉心バップル	SUS304 / SUSF304																														
炉心バップル取付板	SUS304																														
バップルフォーマボルト	G316CW1																														
バレルフォーマボルト	G316CW1																														
熱遮蔽材	SUS304																														
熱遮蔽材固定用ボルト	G316CW2																														

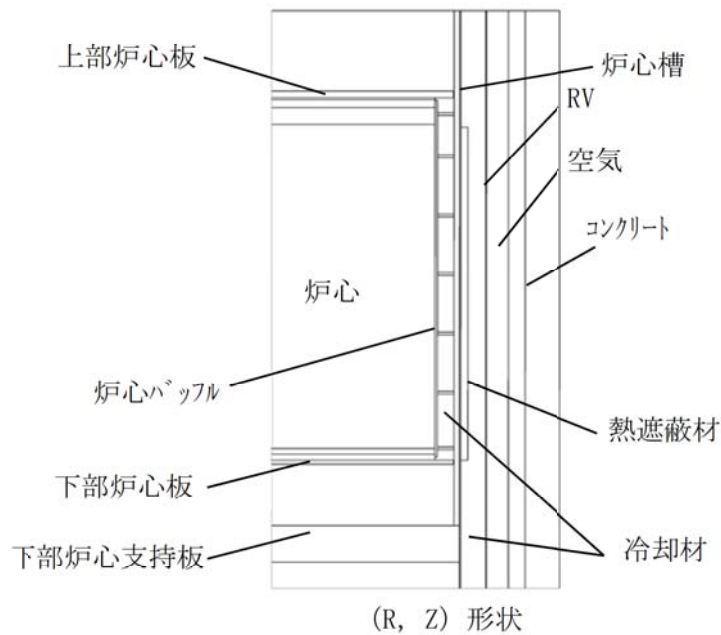
タイトル	炉内構造物（炉心支持構造物を含む）が接する1次冷却材の水質の管理について。
説明	<p>1次冷却材の水質については、「美浜発電所 化学管理業務所則」において、溶存酸素、溶存水素、塩素イオン、pHの基準値及び標準値を定め、定期的に水質分析を実施し管理している。</p> <p>基準値：設備の健全性に影響を与える可能性のある値をいい、これを超えるか超えるおそれのある場合は適切な措置を講じる。</p> <p>標準値：設備の健全性を維持していくために、通常管理している値。</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>

タイトル	炉内構造物各部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。
説明	<p>中性子照射量は、炉内構造物主要部位における中性子束 (<math>E &gt; 0.1 \text{ MeV}</math>) を2次元輸送計算コードDORT (ver1.5.11) 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。</p> <p>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、入力パラメータは以下のとおりである。</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> <pre> graph LR     A[①物性値 (密度, 組成)] --- B[DORT コード]     C[②遮蔽形状] --- B     D[③線源スペクトルおよび線源分布] --- B     E[④核分裂により発生する中性子スペクトル] --- B     B --- F[中性子束 (n/cm²/s)]             </pre> </div> <p>炉内構造物主要部位における中性子束は、以下の手順で算出している。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 代表中性子束 (<math>\phi_{\text{max}}</math>) として、炉心の水平断面形状 (<math>R, \theta</math> 計算) や垂直断面形状 (<math>R, Z</math> 計算) を用いて、炉内構造物において最大となる中性子束を算出する。</li> <li>(2) 炉心の水平断面形状 (<math>R, \theta</math> 計算) より算出した水平方向の補正係数 (<math>f_r, f_\theta</math>) と垂直断面形状 (<math>R, Z</math> 計算) より算出した軸方向の補正係数 (<math>f_z</math>) を用いて、代表中性子束 (<math>\phi_{\text{max}}</math>) を補正することで炉内構造物主要部位における中性子束分布を算出する。</li> </ol> $\phi(r, \theta, z) = \phi_{\text{max}} \times f_r \times f_\theta \times f_z$ <p style="margin-left: 40px;"> <math>\phi(r, \theta, z)</math> : 中性子束分布  <math>\phi_{\text{max}}</math> : 代表中性子束  <math>f_r</math> : 半径方向の補正係数  <math>f_\theta</math> : 周方向の補正係数  <math>f_z</math> : 軸方向の補正係数         </p>

炉内構造物主要部位における水平断面形状の評価では、下図（R,  $\theta$  計算）に示すような形状を入力して、水平方向の補正係数を算出している。



また、炉内構造物主要部位における垂直断面形状（R, Z計算）の評価では、下図に示すような形状を入力して、軸方向の補正係数（fz）を算出している。



以上により算出した炉内構造物主要部位における中性子束に対し、炉内構造物取替から運転開始60年時点での運転時間約14万時間（16.1EFPY）を乗じ、炉内構造物主要部位における中性子照射量を算出した結果を表1に示す。合わせてIASCC発生感受性が発生する中性子照射量（ $1 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ ）に達する時期についても表1に示す。また、中性子照射量が最大となる位置を添付1に示す。

なお、本解析で用いている解析コードについては、炉内構造物の取替前の原子炉容器の監視試験実施時の照射量の評価にも用いており、監視試験片の中性子照射量の実測値と解析から求めた中性子照射量に大きな相違がないことを確認している。

表 1 美浜 3 号炉 炉内構造物主要部位の中性子照射量  
およびIASCC感受性が発生するまでの時間

部位	運転開始後 60 年時点 の中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> )	中性子照射量が 1×10 <sup>21</sup> n/cm <sup>2</sup> に 達するまでの時間 (万時間)
バップルフォーマボルト	3×10 <sup>22</sup>	0.4
炉心バップル	3×10 <sup>22</sup>	0.4
炉心バップル取付板	3×10 <sup>22</sup>	0.4
バレルフォーマボルト	3×10 <sup>21</sup>	5.3
炉心槽	9×10 <sup>21</sup>	1.5
下部炉心板	3×10 <sup>21</sup>	5.1
下部燃料集合体案内ピン	3×10 <sup>21</sup>	5.1
熱遮蔽材	4×10 <sup>21</sup>	3.3
熱遮蔽材固定用ボルト	4×10 <sup>21</sup>	3.3
上部炉心支持板	— * 1	— * 2
上部炉心支持柱	— * 1	— * 2
上部炉心板	4×10 <sup>20</sup>	32
下部炉心支持柱	1×10 <sup>21</sup>	10
下部炉心支持板	3×10 <sup>17</sup>	41800

\* 1 : 上部炉心支持板、上部炉心支持柱は中性子束算出時のモデル化範囲外であり中性子束を算出していないが、上部炉心板よりも炉心から離れており、上部炉心板の中性子照射量よりも少ないと判断している。

\* 2 : 上部炉心支持板、上部炉心支持柱の中性子束は上部炉心板よりも小さいことから、上部炉心板の時間よりも長くなると判断している。

以 上



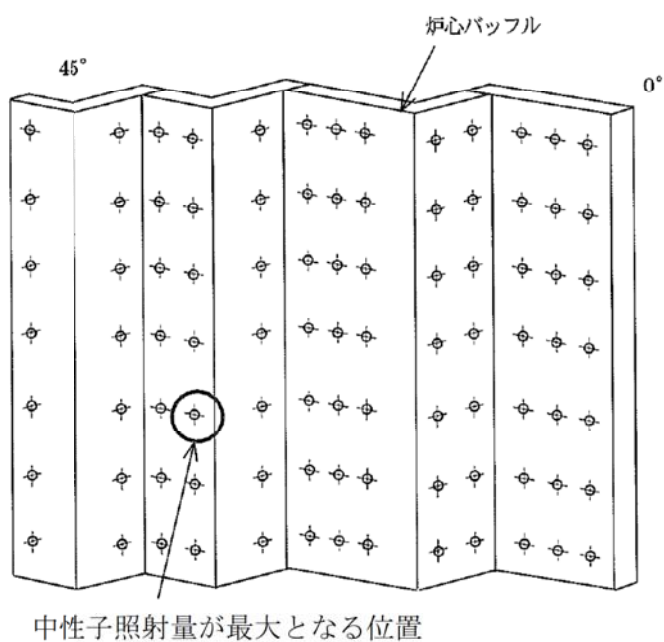


図 中性子照射量が最大となる位置図

タイトル	通常運転時（運転状態 1）における炉内構造物表面の温度について。																																		
説明	<p>通常運転時の炉内構造物は 1 次冷却材と接しており、炉内構造物の各部位表面の環境温度は下表のとおりである。炉内構造物各部位の位置と 1 次冷却材の流れの概念図を添付－1 に示す。</p> <table border="1" data-bbox="584 622 1198 1064"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>温度 (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>バップルフォーマボルト</td> <td>323</td> </tr> <tr> <td>炉心バップル</td> <td>323</td> </tr> <tr> <td>炉心バップル取付板</td> <td>323</td> </tr> <tr> <td>バレルフォーマボルト</td> <td>323</td> </tr> <tr> <td>炉心槽</td> <td>323</td> </tr> <tr> <td>下部炉心板</td> <td>289</td> </tr> <tr> <td>下部炉心支持柱</td> <td>289</td> </tr> <tr> <td>下部燃料集合体案内ピン</td> <td>289</td> </tr> <tr> <td>熱遮蔽材</td> <td>289</td> </tr> <tr> <td>熱遮蔽材固定用ボルト</td> <td>289</td> </tr> </tbody> </table> <p>なお、炉内構造物の温度については、フォーマ領域の 1 次冷却材温度およびガンマ発熱を考慮した熱伝導解析を実施しており、解析で算出した炉内構造物各部位の表面の最高温度を下表に示す。</p> <table border="1" data-bbox="584 1249 1198 1491"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>温度 (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>バップルフォーマボルト</td> <td>329</td> </tr> <tr> <td>炉心バップル</td> <td>334</td> </tr> <tr> <td>炉心バップル取付板</td> <td>333</td> </tr> <tr> <td>バレルフォーマボルト</td> <td>318</td> </tr> <tr> <td>炉心槽</td> <td>341</td> </tr> </tbody> </table> <p>なお、下部炉心板、下部炉心支持柱、下部燃料集合体案内ピン、熱遮蔽材、熱遮蔽材固定用ボルトについては解析モデル範囲外であり温度算出していないが、バップルフォーマボルトに比べると接する 1 次冷却材の温度が低いこと、また、炉心との位置関係からガンマ発熱の影響が小さいことから、バップルフォーマボルトの温度よりも低くなると考える。</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>	部位	温度 (°C)	バップルフォーマボルト	323	炉心バップル	323	炉心バップル取付板	323	バレルフォーマボルト	323	炉心槽	323	下部炉心板	289	下部炉心支持柱	289	下部燃料集合体案内ピン	289	熱遮蔽材	289	熱遮蔽材固定用ボルト	289	部位	温度 (°C)	バップルフォーマボルト	329	炉心バップル	334	炉心バップル取付板	333	バレルフォーマボルト	318	炉心槽	341
部位	温度 (°C)																																		
バップルフォーマボルト	323																																		
炉心バップル	323																																		
炉心バップル取付板	323																																		
バレルフォーマボルト	323																																		
炉心槽	323																																		
下部炉心板	289																																		
下部炉心支持柱	289																																		
下部燃料集合体案内ピン	289																																		
熱遮蔽材	289																																		
熱遮蔽材固定用ボルト	289																																		
部位	温度 (°C)																																		
バップルフォーマボルト	329																																		
炉心バップル	334																																		
炉心バップル取付板	333																																		
バレルフォーマボルト	318																																		
炉心槽	341																																		

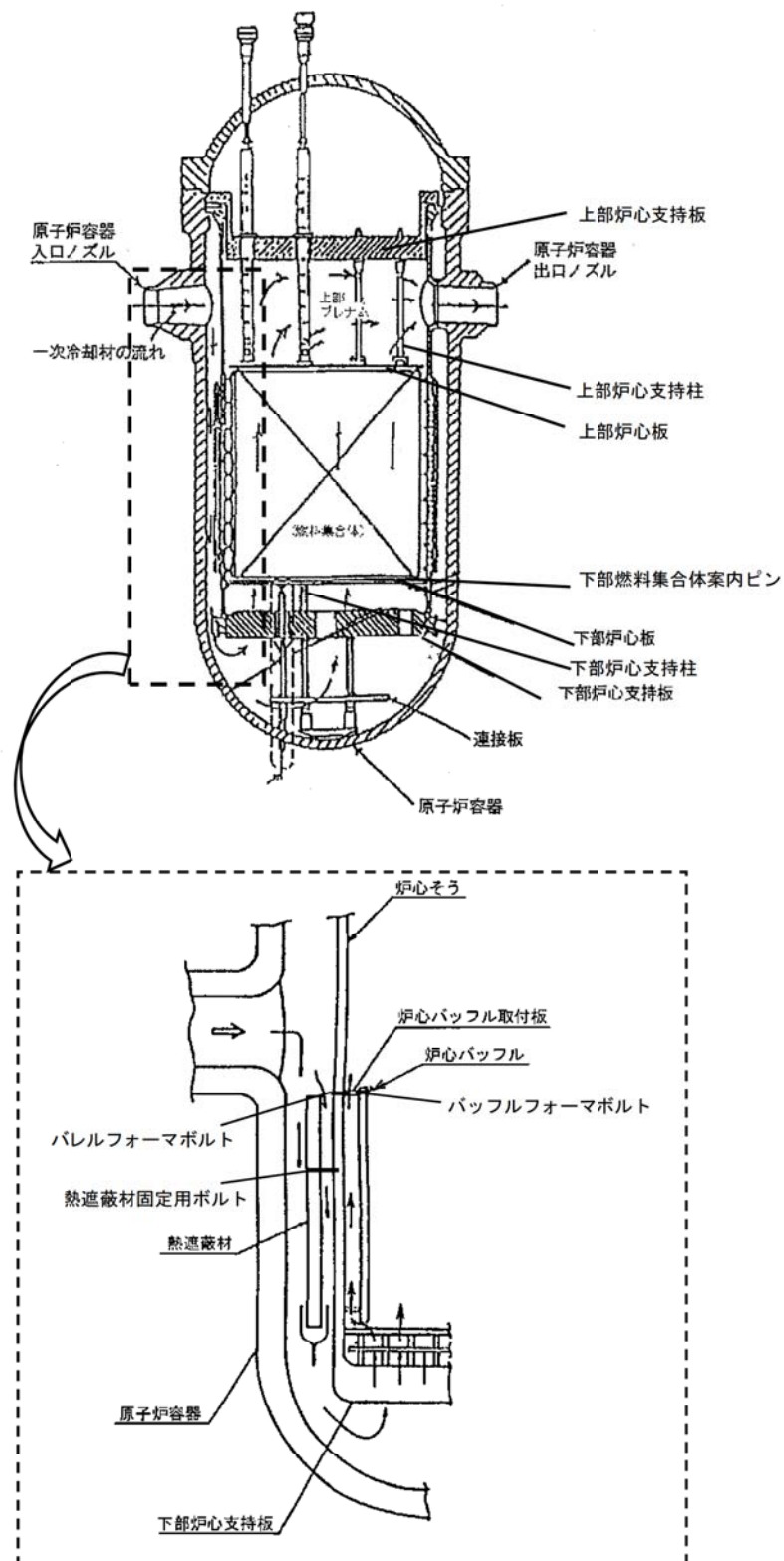


図 炉内構造物各部位と1次冷却材の流れの概念図

タイトル	炉内構造物各部位における応力レベルについて。																														
説明	<p>炉内構造物各部位の応力レベルは、各部位に作用する応力と非照射材の降伏応力の比較により分類を実施している。</p> <p>応力レベル大：&gt; 「非照射材の降伏応力」          応力レベル中：≒ 「非照射材の降伏応力」          応力レベル小：&lt; 「非照射材の降伏応力」</p> <p>具体的な各部位の応力レベルとその考え方を下表に示す。</p> <table border="1" data-bbox="437 674 1347 1727"> <thead> <tr> <th data-bbox="437 674 778 752">部位</th> <th data-bbox="778 674 895 752">応力レベル</th> <th data-bbox="895 674 1347 752">応力レベルの考え方</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="437 752 778 790">バップルフォーマボルト</td> <td data-bbox="778 752 895 790">大</td> <td data-bbox="895 752 1347 790" rowspan="3">ボルトの初期締付力で首下ピーク応力が非照射材の降伏応力を上回る。また、初期締付力に加えて熱曲げ応力が作用する。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="437 790 778 828">バレルフォーマボルト</td> <td data-bbox="778 790 895 828">大</td> </tr> <tr> <td data-bbox="437 828 778 866">熱遮蔽材固定用ボルト</td> <td data-bbox="778 828 895 866">大</td> </tr> <tr> <td data-bbox="437 866 778 904">炉心槽</td> <td data-bbox="778 866 895 904">大</td> <td data-bbox="895 866 1347 904">溶接部があり、一般的に溶接残留応力は降伏応力よりも大きい。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="437 904 778 943">炉心バップル</td> <td data-bbox="778 904 895 943">小</td> <td data-bbox="895 904 1347 943" rowspan="2">自重・1次冷却材による一次荷重に加えてγ発熱による二次荷重が作用するが、非照射材の降伏応力を上回るとは考え難い。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="437 943 778 981">炉心バップル取付板</td> <td data-bbox="778 943 895 981">小</td> </tr> <tr> <td data-bbox="437 981 778 1019">下部炉心板</td> <td data-bbox="778 981 895 1019">小</td> <td data-bbox="895 981 1347 1019">疲労評価における応力解析の結果から、通常運転時のピーク応力は約95 MPaであり、非照射材の降伏応力（130MPa）を下回る。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="437 1019 778 1057">下部炉心支持柱</td> <td data-bbox="778 1019 895 1057">中</td> <td data-bbox="895 1019 1347 1057">疲労評価における応力解析の結果から、通常運転時のピーク応力は約125MPaであり、非照射材の降伏応力（130MPa）と同等である。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="437 1057 778 1095">下部燃料集合体案内ピン</td> <td data-bbox="778 1057 895 1095">小</td> <td data-bbox="895 1057 1347 1095">熱・照射による影響は小さい。ナット締付時の首下応力を算出した結果、応力は約165MPaであり、非照射材の降伏応力（357MPa）を下回る。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="437 1095 778 1133">熱遮蔽材</td> <td data-bbox="778 1095 895 1133">小</td> <td data-bbox="895 1095 1347 1133">自重・1次冷却材による一次荷重で発生する応力が非照射材の降伏応力を上回るとは考え難い。</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">以上</p>	部位	応力レベル	応力レベルの考え方	バップルフォーマボルト	大	ボルトの初期締付力で首下ピーク応力が非照射材の降伏応力を上回る。また、初期締付力に加えて熱曲げ応力が作用する。	バレルフォーマボルト	大	熱遮蔽材固定用ボルト	大	炉心槽	大	溶接部があり、一般的に溶接残留応力は降伏応力よりも大きい。	炉心バップル	小	自重・1次冷却材による一次荷重に加えてγ発熱による二次荷重が作用するが、非照射材の降伏応力を上回るとは考え難い。	炉心バップル取付板	小	下部炉心板	小	疲労評価における応力解析の結果から、通常運転時のピーク応力は約95 MPaであり、非照射材の降伏応力（130MPa）を下回る。	下部炉心支持柱	中	疲労評価における応力解析の結果から、通常運転時のピーク応力は約125MPaであり、非照射材の降伏応力（130MPa）と同等である。	下部燃料集合体案内ピン	小	熱・照射による影響は小さい。ナット締付時の首下応力を算出した結果、応力は約165MPaであり、非照射材の降伏応力（357MPa）を下回る。	熱遮蔽材	小	自重・1次冷却材による一次荷重で発生する応力が非照射材の降伏応力を上回るとは考え難い。
部位	応力レベル	応力レベルの考え方																													
バップルフォーマボルト	大	ボルトの初期締付力で首下ピーク応力が非照射材の降伏応力を上回る。また、初期締付力に加えて熱曲げ応力が作用する。																													
バレルフォーマボルト	大																														
熱遮蔽材固定用ボルト	大																														
炉心槽	大	溶接部があり、一般的に溶接残留応力は降伏応力よりも大きい。																													
炉心バップル	小	自重・1次冷却材による一次荷重に加えてγ発熱による二次荷重が作用するが、非照射材の降伏応力を上回るとは考え難い。																													
炉心バップル取付板	小																														
下部炉心板	小	疲労評価における応力解析の結果から、通常運転時のピーク応力は約95 MPaであり、非照射材の降伏応力（130MPa）を下回る。																													
下部炉心支持柱	中	疲労評価における応力解析の結果から、通常運転時のピーク応力は約125MPaであり、非照射材の降伏応力（130MPa）と同等である。																													
下部燃料集合体案内ピン	小	熱・照射による影響は小さい。ナット締付時の首下応力を算出した結果、応力は約165MPaであり、非照射材の降伏応力（357MPa）を下回る。																													
熱遮蔽材	小	自重・1次冷却材による一次荷重で発生する応力が非照射材の降伏応力を上回るとは考え難い。																													

タイトル	<p>炉心槽溶接部の応力がバッフルフォーマボルト首下部の応力より低いとする根拠について。</p>
説明	<p>炉心槽については、運転中の炉心槽溶接部に発生する応力を評価するため、溶接残留応力や機械荷重・熱応力を考慮したFEM解析を実施している。各応力の評価方法を以下に示す。また、添付-1に炉心槽の材質、板厚、溶接方法を示す。</p> <p>①溶接残留応力を算出      材料の弾塑性を考慮した非定常熱伝導解析、弾塑性解析により、炉心槽溶接部残留応力を評価</p> <p>②機械荷重・熱応力を算出      ・機械荷重条件：下部炉心構造物の自重、燃料集合体の自重、炉心槽内外差圧を設定      ・温度条件：CFD解析により求めたフォーマ領域冷却材温度分布を考慮して求めた炉心槽の温度分布を設定</p> <p>上記の通り炉心槽溶接部の発生応力を算出した結果、運転初期で約 500 MPaと評価している。</p> <p>一方、バッフルフォーマボルトは運転初期で約 580 MPaと評価していることから、炉心槽に発生する応力はバッフルフォーマボルト以下であると判断している。</p>

また、日本機械学会 発電用原子力施設規格 維持規格 (JSME S NA1-2008) に基づき実施した、炉心槽溶接部のき裂安定性評価の結果を以下に示す。

【評価内容】

- ・炉心槽溶接部にき裂を想定し、FEM解析 (2次元断面モデル) によって応力拡大係数Kを算出する。

【評価条件】

- ・溶接タイプ (残留応力) : 電子ビーム溶接
- ・機械及び熱応力 : 通常運転時の応力
- ・地震による応力 :  $S_s$ 地震動による応力  
(約 24.5 MPa)
- ・想定き裂形状 : 溶接線中心 (内面) に全周き裂  
(図1にき裂のイメージを示す)
- ・炉心槽形状 : 板厚  $t$  mm、内径  $\phi$  mm

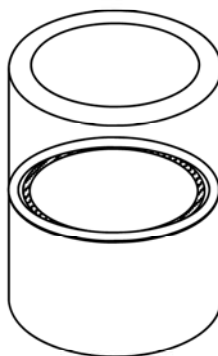


図1 想定き裂のイメージ  
(斜線部分)

【評価結果】

評価条件の応力状態における炉心槽に対し、き裂深さをパラメータとして応力拡大係数Kを算出した結果、応力拡大係数Kは最大値約  $37 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となり、破壊靱性値  $K_{Ic} : 51 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  に対して十分小さい値であった。

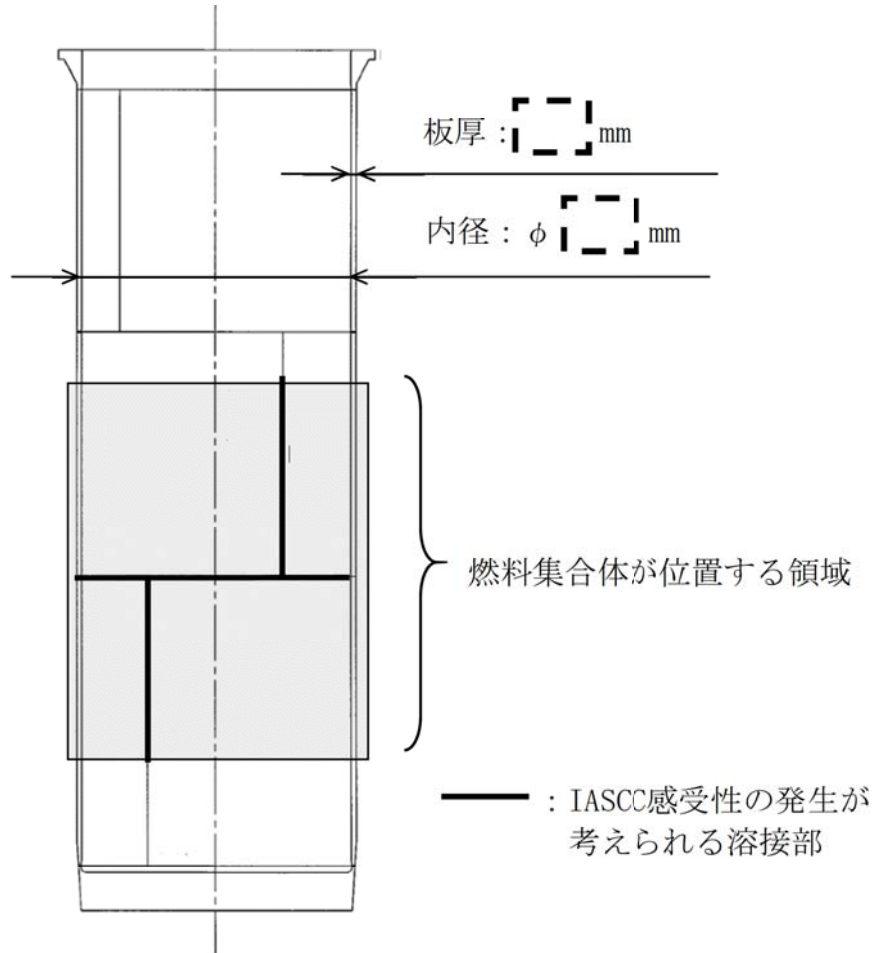
以上の結果から、仮に炉心槽溶接部にき裂が生じても不安定破壊は起こらないと評価している。

以上

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

炉心槽の材質、板厚、溶接方法について

- 材質：SUS304
- 板厚等：下図に示す。



溶接方法	開先形状	溶接パス順序
電子ビーム溶接 (表面にTIG盛り直し)	 電子ビーム溶接は炉心槽外側から照射	 外面 ④ ③ ② ① 内面 数字はTIG溶接による盛り直しのパス順を示す

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

タイトル	取替予定の炉内構造物における代表部位の選定について。
説明	<p>炉内構造物各部位に対して、IASCCの発生要因となる中性子照射量、応力、温度の比較結果、および海外におけるIASCC損傷事例の実績から、評価が最も厳しくなるバッフルフォーマボルトを直接的な評価部位として抽出している。炉内構造物各部位とバッフルフォーマボルトの具体的な比較結果を以下に示す。</p> <p>○バッフルフォーマボルトの中性子照射量、応力、温度</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・中性子照射量：<math>3 \times 10^{22} \text{n/cm}^2</math></li> <li>・運転初期の応力：約580 MPa</li> <li>・温度：329 °C</li> </ul> <p>なお、美浜3号炉では炉内構造物取替に際して、炉心バッフルに剛性の高い角バッフル構造を採用することにより、バッフル構造の変形を抑え、炉内構造物取替前に比べてバッフルフォーマボルトに発生する応力を低減している。また、バッフルフォーマボルトは、炉内構造物取替前に比べてボルトシャンク長さの増大し、ボルト首下形状をパラボリック形状とすることで応力の改善を図っている。</p> <p>○炉心槽</p> <p>中性子照射量 (<math>9 \times 10^{21} \text{n/cm}^2</math>) は、バッフルフォーマボルトに比べて小さい。</p> <p>炉心槽溶接部の運転初期の残留応力 (約500 MPa) は、バッフルフォーマボルトに比べて小さい。</p> <p>温度 (341 °C) はバッフルフォーマボルトに比べて若干高いが、照射誘起型応力腐食割れの発生評価に用いている照射誘起型応力腐食割れの発生応力しきい線は、290°C～340°CにおけるSCC発生試験結果から設定しており、炉心槽の温度はこの温度範囲と同等である。また、原子力基盤機構「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書」において、290°C、320°C、340°Cの各試験温度に対する負荷応力と中性子照射量に対する割れ発生の試験を実施した結果が示されており、本試験の結果からは、割れ発生応力に対する試験温度の有意な影響は見られていない (添付-1)。</p> <p>よって、バッフルフォーマボルトに比べてIASCC発生の可能性は小さいと評価している。</p> <p>○炉心バッフル、炉心バッフル取付板</p> <p>中性子照射量 (<math>3 \times 10^{22} \text{n/cm}^2</math>) は、バッフルフォーマボルトと同等である。</p>



炉心バップル、炉心バップル取付板には熱応力が作用するが、バップルフォーマボルトに比べて応力は小さい。

温度は、炉心バップルが334℃、炉心バップル取付板は333℃であり、バップルフォーマボルトに比べて若干高いが、照射誘起型応力腐食割れの発生評価に用いている照射誘起型応力腐食割れの発生応力しきい線は、290℃～340℃におけるSCC発生試験結果から設定しており、炉心バップルおよび炉心バップル取付板の温度はこの温度範囲に含まれる。また、原子力基盤機構「照射誘起型応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書」において、290℃、320℃、340℃の各試験温度に対する負荷応力と中性子照射量に対する割れ発生の試験を実施した結果が示されており、本試験の結果からは、割れ発生応力に対する試験温度の有意な影響は見られていない(添付-1)。

よって、バップルフォーマボルトに比べてIASCC発生の可能性は小さいと評価している。

○バレルフォーマボルト

応力レベルはバップルフォーマボルトと同等であるが、中性子照射量( $3 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ )と温度(318℃)はバップルフォーマボルトに比べて低い。

よって、バップルフォーマボルトに比べてIASCC発生の可能性は小さいと評価している。なお、バレルフォーマボルトは、炉内構造物取替前に比べてボルトシャンク長さの増大し、ボルト首下形状をパラボリック形状とすることで応力の改善を図っている。

○下部炉心板、下部炉心支持柱、下部燃料集合体案内ピン、熱遮蔽材

中性子照射量、応力、温度のいずれもバップルフォーマボルトよりも小さい。

よって、バップルフォーマボルトに比べてIASCC発生の可能性は小さいと評価している。

○熱遮蔽材固定用ボルト

応力レベルはバップルフォーマボルトと同等であるが、中性子照射量、温度はバップルフォーマボルトよりも小さい。

よって、バップルフォーマボルトに比べてIASCC発生の可能性は小さいと評価している。

以上

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

平成21年9月

独立行政法人 原子力安全基盤機構

#### 9.6 割れ発生応力と中性子照射量との関係

定荷重 SCC 試験結果に関して、各試験温度に対する負荷応力と中性子照射量に対する割れ発生の有無について整理した結果を図 9.6-1 に示す。

- ・ 中性子照射量の増加に伴い割れ発生応力値が低下する傾向が認められた。
- ・ 中性子照射量が 70dpa 程度になると約 400MPa (0.4 $\sigma_y$ ) でも割れが認められることがわかった。
- ・ 割れ発生応力値に対して、試験温度の有意な影響は認められなかった。

また、同様な定荷重 SCC 試験で SCC 発生が評価されているデータ<sup>[9.6-1,2]</sup>との比較検討を行った結果を図 9.6-2 に示す。

その結果、ほぼ同等の割れ発生応力値を示しており、本事業で得た試験データの妥当性を確認している。

[9.6-1] WH: F. Freyer et al., 13th Environmental Degradation Conference, Whistler, British Columbia August 19 - 23, 2007.

[9.6-2] INSS: H. Nishioka et al., 13th Environmental Degradation Conference, Whistler, British Columbia August 19 - 23, 2007.

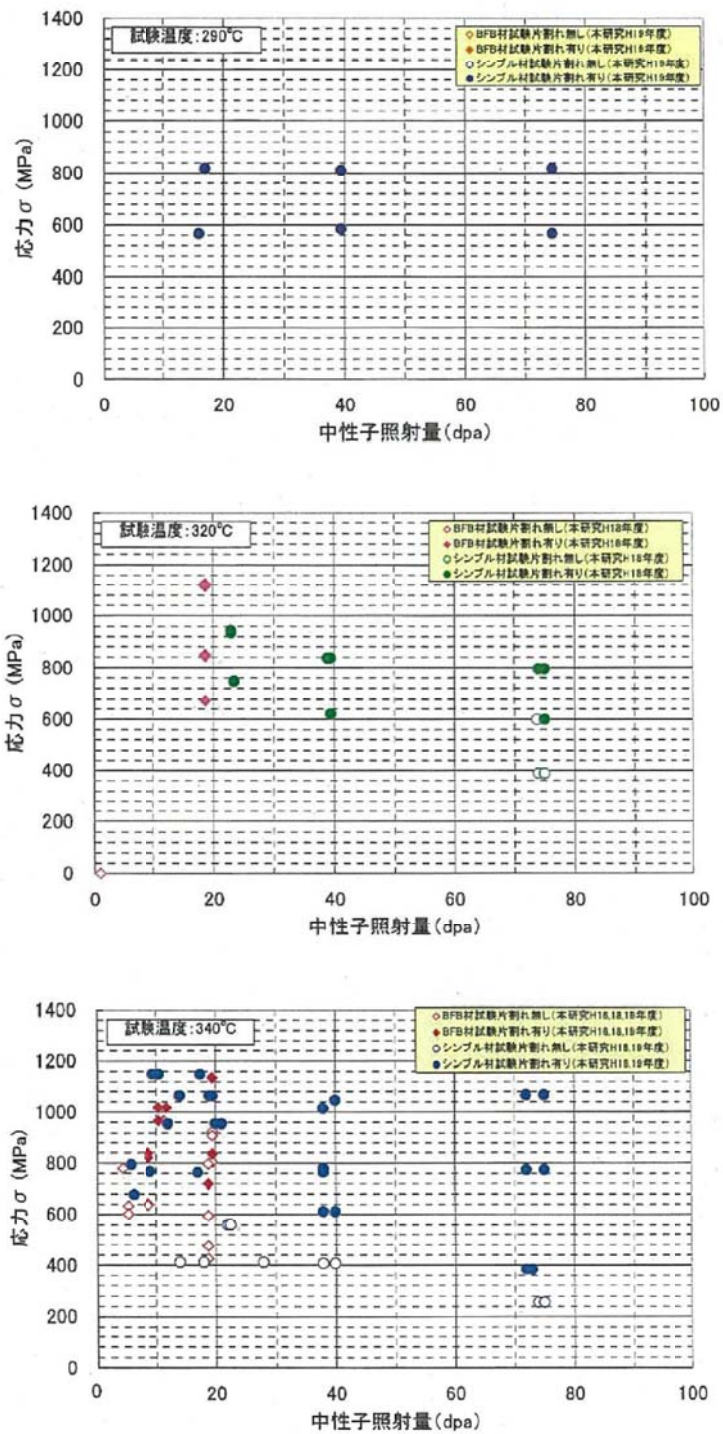


図 9.6-1 本事業での定荷重 SCC 試験結果 (応力 vs 中性子照射量)

タイトル	<p>炉心支持構造物の日本機械学会事例規格 発電用原子力設備における「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」の適用状況について。</p>
説明	<p>【事例規格】発電用原子力設備における「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」(NC-CC-002)によると、応力腐食割れ(SCC)発生因子である「材料」「応力」「環境」を改善することでSCC発生を抑制する対応が示されている。</p> <p>炉心支持構造物の各部位にはオーステナイト系ステンレス鋼を採用しており、オーステナイト系ステンレス鋼については、溶存酸素濃度が低く管理されているPWR水質環境ではSCCは発生し難いことが事例規格で示されている。美浜3号炉においては、1次冷却材の水質を溶存酸素5ppb以下に管理していることからSCC発生の可能性は小さいと考える。</p> <p>また、高い中性子照射量を受ける部位については、「材料」が変化することで照射誘起型応力腐食割れ(IASCC)が生じる可能性があると考えられている。</p> <p>このIASCCに対し、「材料(中性子照射による材料の変化)」「応力」「環境(温度)」の3因子で炉内構造物のうち最も厳しい部位を抽出した結果、最も厳しい部位はバッフルフォーマボルトとなる。バッフルフォーマボルトのIASCCに対しては、美浜3号炉では炉内構造物取替に際して以下の配慮を実施している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・炉心バッフルへの角バッフル構造の採用、バッフルフォーマボルトのシャンク長さの増大、首下形状のパラボリック形状の採用により、ボルトの応力低減</li> <li>・炉心バッフル取付板にボルト冷却孔を設け、バッフルフォーマボルトの温度を低減</li> <li>・炉心槽と炉心バッフルの間の領域を流れるバイパス流量を増加させることにより、バッフル構造の温度、熱変形を低減させ、バッフルフォーマボルトに発生する熱応力を低減</li> </ul> <p>また、バッフルフォーマボルトについては、「照射誘起型応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書((独)原子力安全基盤機構)」に示された評価ガイドおよび「PWR炉内構造物点検評価ガイドライン[バッフルフォーマボルト]((社)原子力安全推進協会)」に基づく評価をした結果、運転開始後60年時点においてもボルト損傷は発生せず、安全に関わる機能を維持できると評価している。</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>

タイトル	制御棒クラスタの被覆管の材料名、中性子照射量、保全内容について。																				
説明	<p>制御棒クラスタの被覆管の材料名、中性子照射量、保全内容を下記に示す。</p> <p>被覆管の材料：SUS304          供用期間中の最大の中性子照射量：<math>5 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup> (E&gt;0.625eV)          保全内容：制御棒クラスタ1本毎に累積の中性子照射量を管理し、累積中性子照射量が<math>5 \times 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup>に達する前に取り替える運用としている。制御棒クラスタの取替実績を下表に示す。</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">時 期</th> <th style="padding: 5px;">体数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">第7回定期検査時（1985年度）</td> <td style="padding: 5px;">2</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">第9回定期検査時（1987年度～1988年度）</td> <td style="padding: 5px;">3</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">第10回定期検査時（1989年度）</td> <td style="padding: 5px;">1 3</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">第11回定期検査時（1990年度～1991年度）</td> <td style="padding: 5px;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">第12回定期検査時（1991年度～1992年度）</td> <td style="padding: 5px;">1 0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">第13回定期検査時（1993年度）</td> <td style="padding: 5px;">7</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">第14回定期検査時（1994年度～1995年度）</td> <td style="padding: 5px;">7</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">第23回定期検査時（2008年度）</td> <td style="padding: 5px;">2</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">第24回定期検査時（2009年度）</td> <td style="padding: 5px;">2</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">以 上</p>	時 期	体数	第7回定期検査時（1985年度）	2	第9回定期検査時（1987年度～1988年度）	3	第10回定期検査時（1989年度）	1 3	第11回定期検査時（1990年度～1991年度）	8	第12回定期検査時（1991年度～1992年度）	1 0	第13回定期検査時（1993年度）	7	第14回定期検査時（1994年度～1995年度）	7	第23回定期検査時（2008年度）	2	第24回定期検査時（2009年度）	2
時 期	体数																				
第7回定期検査時（1985年度）	2																				
第9回定期検査時（1987年度～1988年度）	3																				
第10回定期検査時（1989年度）	1 3																				
第11回定期検査時（1990年度～1991年度）	8																				
第12回定期検査時（1991年度～1992年度）	1 0																				
第13回定期検査時（1993年度）	7																				
第14回定期検査時（1994年度～1995年度）	7																				
第23回定期検査時（2008年度）	2																				
第24回定期検査時（2009年度）	2																				

タイトル	技術評価で参考とした IASCC 事例の概要とその分析結果について。																								
説明	<p>バッフルフォーマボルトのIASCC事例については、1988年にフランスのBugey発電所2号炉において確認された損傷事例を初め、海外のプラントでIASCCによるバッフルフォーマボルト損傷事例が報告されている。</p> <p>米国NRCで公開されている美浜3号炉と同じ米国の3ループプラントにおけるバッフルフォーマボルトの点検実績（2016年5月時点）を下表に示す。</p> <table border="1" data-bbox="422 622 1329 775"> <thead> <tr> <th></th> <th>Robinson2u</th> <th>Surry1u</th> <th>Surry2u</th> <th>Farley1u</th> <th>Farley2u</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>営業運転開始日</td> <td>1971. 3. 7</td> <td>1972. 12. 22</td> <td>1973. 5. 1</td> <td>1977. 12. 1</td> <td>1981. 7. 30</td> </tr> <tr> <td>点検時間</td> <td>約31EFPY</td> <td>約28EFPY</td> <td>約28EFPY</td> <td>約17EFPY</td> <td>約15EFPY</td> </tr> <tr> <td>損傷本数</td> <td>9本</td> <td>1本</td> <td>2本</td> <td>0本</td> <td>0本</td> </tr> </tbody> </table> <p>日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格において、バッフルフォーマボルトはボルト全数の約7割が損傷した場合においても炉内構造物の安全機能の確保は可能と評価しており、これに比べると海外事例におけるボルト損傷本数はいずれも十分少なく、炉内構造物の安全機能に影響を及ぼすものではないと考える。</p> <p>なお、美浜3号炉は炉内構造物の一式取替を実施することとしており、炉内構造物取替に際しては以下の配慮を行なうことにより、バッフルフォーマボルトの耐IASCC性を向上させており、IASCCが発生する可能性は更に低いと考えられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・炉心バッフルへの角バッフル構造の採用、バッフルフォーマボルトのシャンク長さの増大、首下形状のパラボリック形状の採用により、ボルトの応力低減</li> <li>・炉心バッフル取付板にボルト冷却孔を設け、ボルトの温度を低減</li> <li>・炉心槽と炉心バッフルの間の領域を流れるバイパス流量を増加させることにより、バッフル構造の温度、熱変形を低減させ、バッフルフォーマボルトに発生する熱応力を低減</li> </ul> <p>また、3ループプラント以外も含めて米国で公開されているバッフルフォーマボルトの損傷事例について確認した結果、「PWR炉内構造物点検評価ガイドライン[バッフルフォーマボルト]（原子力安全推進協会）」等の国内知見を大きく超えるようなボルト損傷の事例は確認されていない。今後も国内外のバッフルフォーマボルトの点検結果を注視し、バッフルフォーマボルトの健全性評価手法の妥当性確認を継続して実施していく。</p> <p>また、バッフルフォーマボルト以外の炉内構造物の部位では、これまでに入手している国内外の情報の範囲においてはIASCCが発生した事例はない。</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>		Robinson2u	Surry1u	Surry2u	Farley1u	Farley2u	営業運転開始日	1971. 3. 7	1972. 12. 22	1973. 5. 1	1977. 12. 1	1981. 7. 30	点検時間	約31EFPY	約28EFPY	約28EFPY	約17EFPY	約15EFPY	損傷本数	9本	1本	2本	0本	0本
	Robinson2u	Surry1u	Surry2u	Farley1u	Farley2u																				
営業運転開始日	1971. 3. 7	1972. 12. 22	1973. 5. 1	1977. 12. 1	1981. 7. 30																				
点検時間	約31EFPY	約28EFPY	約28EFPY	約17EFPY	約15EFPY																				
損傷本数	9本	1本	2本	0本	0本																				

タイトル	<p>バッフルフォーマボルトの損傷本数評価手法が使用できるとした検討結果について。</p>
説明	<p>バッフルフォーマボルトの損傷本数評価については、「原子力安全基盤機構 照射誘起応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書」に示された評価ガイド(案)(以下、評価ガイドという)および「原子力安全推進協会 PWR炉内構造物点検評価ガイドライン[バッフルフォーマボルト]」(以下、ガイドラインという)に基づき評価を実施している。具体的には、バッフル構造をモデル化した応力解析結果と、原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ(IASCC)評価技術」事業で得られた最新知見に基づき設定したIASCC発生しきい線との比較によりボルトの損傷可能性を評価している。</p> <p>ガイドラインに規定された応力解析手法については、国内外の学会に解析内容を発表しており、有識者の評価を得ている。なお、応力解析におけるスウェリング量については、米国の実験炉EBR-II炉心の中性子反射体要素(SUS304材)から採取したデータを基に作成したdpaレイト補正Foster-Flinn式を用いて評価している。本評価式は照射量、dpaレイト(照射速度)、温度のスウェリング量への影響を定式化したものである。クリープ量については、原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ(IASCC)評価技術」事業において示された照射下クリープ評価式を用いた評価を行っている。本評価式は、Halden炉での照射下クリープデータに基づき作成されたものである。</p> <p>IASCC発生しきい線については、原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ(IASCC)評価技術」事業で得られたバッフルフォーマボルト材のIASCC発生試験結果の下限を取って設定している。</p> <p>また、美浜3号炉は炉内構造物取替を前提とした評価を実施している。炉内構造物取替後の類似プラントにおけるバッフルフォーマボルトの点検実績はないことから、同様の手法で評価した炉内構造物取替前のIASCC評価結果と、美浜3号炉と同時期に建設された米国のW社製3ループプラント*で、かつ、バッフルフォーマボルトの点検実績があるSurry1.2u、Farley1.2u、Robinson2uのバッフルフォーマボルト点検結果との比較を実施した結果、損傷本数評価結果と実機の損傷本数が概ね整合していることを確認している(表1、図1参照)。</p> <p>※日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格では、バッフルフォーマボルトの仕様によってプラントをグループ1~4に分類し、IASCCによるき裂発生についてはグループ1が最も厳しく、以下グループ2, 3, 4の順になると記載されており、炉内構造物取替前の美浜3号炉はグループ2に分類される。この分類は日本のPWRプラントを対象に作成されたものであるが、美浜3号炉と同時期に建設され</p>



た米国のW社製3ループプラントについては、ボルトの仕様からグループ1もしくは2に相当するものとする。

以上のことから、今回実施したバッフルフォーマボルトの損傷本数評価は妥当であると判断している。

表1. 米国3ループプラントにおけるバッフルフォーマボルト点検結果

	Robinson2u	Surry1u	Surry2u	Farley1u	Farley2u
営業運転開始日	1971. 3. 7	1972. 12. 22	1973. 5. 1	1977. 12. 1	1981. 7. 30
点検時間	31. 4EFPY	28EFPY	28EFPY	16. 6EFPY	15. 1EFPY
損傷本数 (炉内構造物取替前の美浜3号炉評価結果※1)	9本 <(48本)	1本 <(16本)	2本 <(16本)	0本 =(0本)	0本 =(0本)

※1: 各プラントの点検時間における評価損傷本数

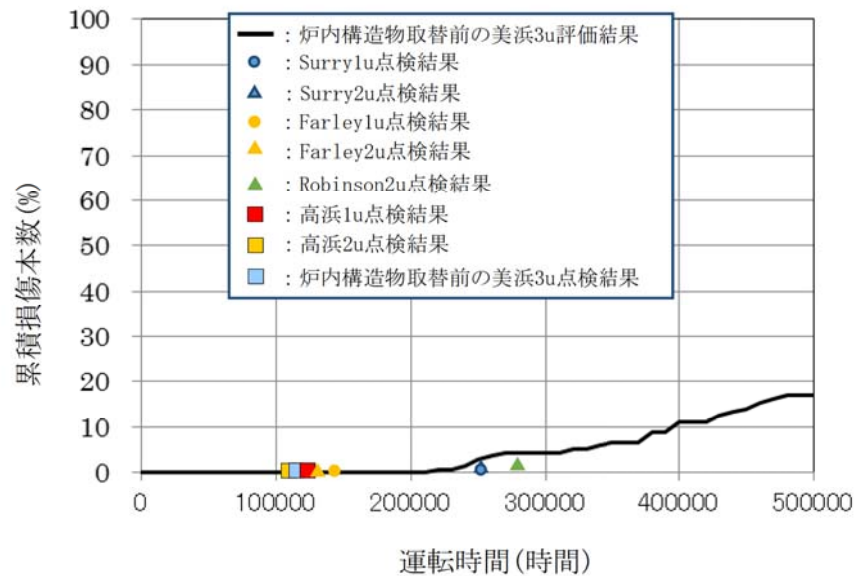
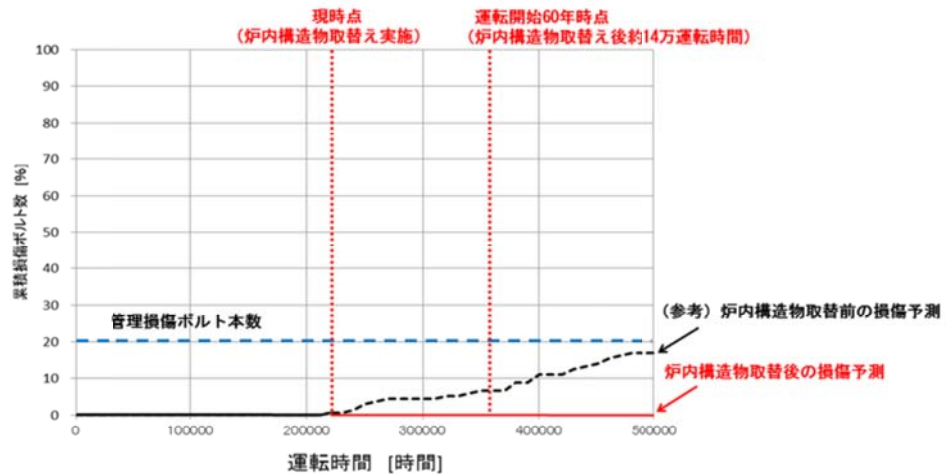


図1. 炉内構造物取替前の美浜3号炉 IASCC評価結果と米国点検実績の比較

以上

<p>タイトル</p>	<p>バッフルフォーマボルトの運転開始後60年時点までのボルト損傷予測について。</p>
<p>説明</p>	<p>バッフルフォーマボルトの照射誘起型応力腐食割れ発生可能性については、「原子力安全基盤機構 照射誘起応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書」に示された評価ガイド(案)(以下、「評価ガイド」)および「原子力安全推進協会 PWR炉内構造物点検評価ガイドライン[バッフルフォーマボルト]」の考え方にに基づき以下のとおり評価している。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>① 運転時間(照射量)によって変動するバッフルフォーマボルトの応力履歴を算出する(添付-1)</p> </div> <p style="text-align: center;">↓</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>② 評価ガイドに定められている IASCC 割れ発生しきい応力線図と①で算出したバッフルフォーマボルトの応力履歴を重ね合わせる</p> </div> <p style="text-align: center;">↓</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>③ バッフルフォーマボルトの応力履歴が IASCC 割れ発生しきい応力線図を超えた時点を照射誘起型応力腐食割れの発生時間とする</p> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p style="text-align: center;">割れ発生予測評価概念図</p> <p>[出典: 「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書」 (独) 原子力安全基盤機構]</p> </div>

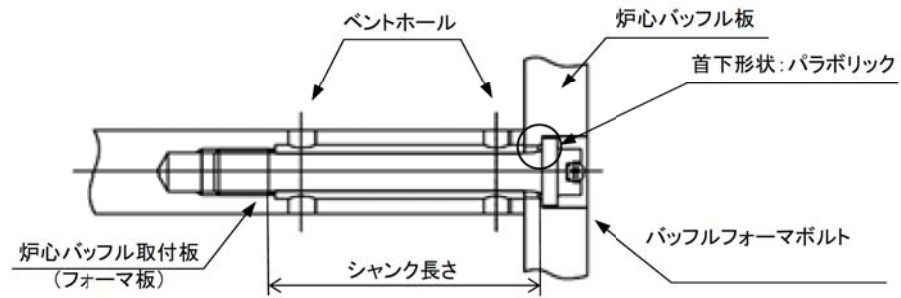
上記評価の結果、運転開始後60年時点（炉内構造物取替後約14万時間）までにバッフルフォーマボルト（全数）の応力履歴がIASCC割れ発生応力しきい線図を超えることはなく、IASCCは発生しないと評価している。



バッフルフォーマボルトの累積損傷本数の予測

<補足説明事項>

- 管理損傷ボルト本数は、日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格に記載のとおり、許容損傷ボルトパターン（最上段および最下段のボルトのみ健全でそれ以外は損傷しているパターン）に3倍の余裕をとって設定している。美浜3号炉の許容損傷ボルトパターンは5段/7段＝71.4%であるため、これに3倍の余裕をとることで管理損傷ボルト本数は $71.4/3=23.8\%$ 、これを丸めて20%とし、ボルト全数672本の20%にあたる134本が管理損傷ボルト本数となる。
- 美浜3号炉の運転開始後60年（炉内構造物取替後約14万時間）における照射量(dpa)は最大のバッフルフォーマボルトで約22dpaである。
- 美浜3号炉のバッフルフォーマボルトの仕様を以下に示す。
  - ・材料：G316CW 1
  - ・首下形状（R）：パラボリック
  - ・シャンク長さ：97, 83, 70mm（ベントホール有）



○スウェリングの評価について

今回の応力評価におけるスウェリングの影響については、米国の高速実験炉EBR-II炉心の中性子反射体要素(SUS304材)から採取したデータを基に作成したdpaレイト補正Foster-Flinn式(下式)を用いて評価している。本評価式は照射量、dpaレイト(照射速度)、温度のスウェリング量への影響を定式化したものとなっている。

スウェリングによる体積膨張率

$$S = \% \frac{\Delta V}{V_0} = A \cdot \left( \frac{\dot{d}pa \times 10^7}{1.25} \right)^{-0.73} \cdot \left( \frac{dpa}{4.9} \right)^2$$

$\Delta V$ : スウェリングによる体積膨張量

$V_0$ : スウェリング前の体積

$\% \Delta V/V_0$ :  $\Delta V/V_0 \times 100$  [%]

$\dot{d}pa$  = dpaレイト [dpa/sec]

$A = \exp(-1.591 + 0.245T - 1.210T^2 - 1.384T^3 - 1.204T^4)$

$T = (T' [^\circ\text{C}] - 490) / 100$        $T'$ : 評価箇所の温度[ $^\circ\text{C}$ ]

○照射下クリープの評価について

今回の応力評価における照射下クリープの影響については、国プロ「照射誘起応力腐食割れ(IASCC)評価技術」事業において示された照射下クリープ評価式を用いた評価を行っている。

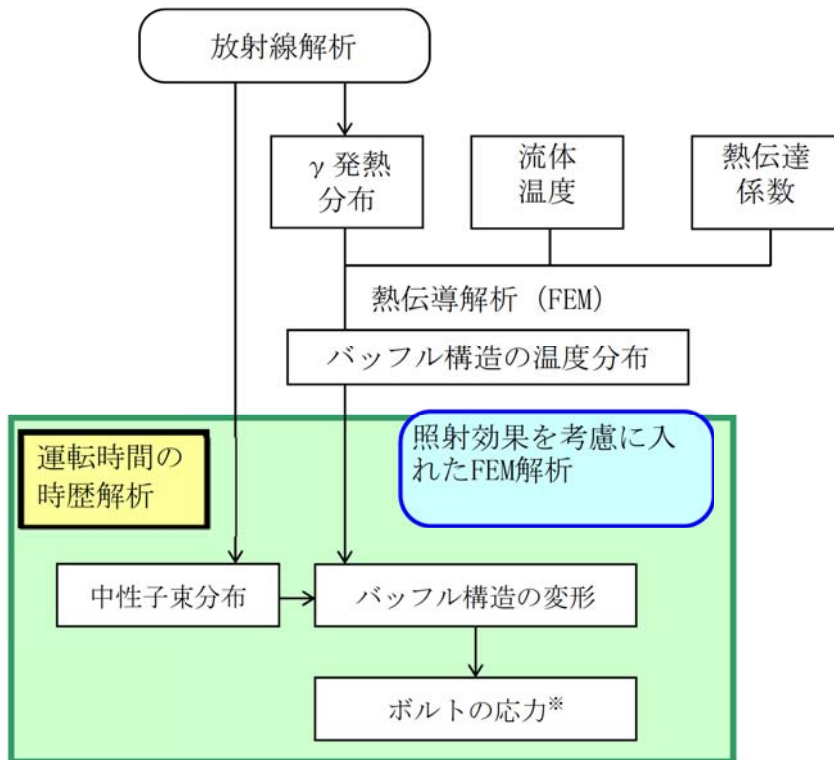
本評価式は、Halden炉での約1dpaまでの照射下クリープデータ(遷移クリープ、定常クリープ両方のデータ)に基づき作成されたものであり、この照射量(1dpa)は、実機PWRと同等の照射速度、現実的な照射時間(約2年間)で定常クリープ領域に達するのに必要な照射量として設定されたものである。

また、加速クリープの影響については、高照射領域での照射下クリープデータがないため考慮されていないが、考慮しない方が保守的(クリープが小さい方がボルトの応力緩和が小さくなる)であることから、実機評価を行う上では問題ないと考えている。

なお、評価ガイドにおいて、照射下クリープについて本評価式を用いることとされている。

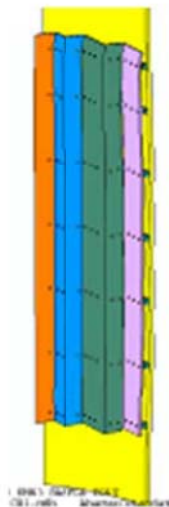
以上

バッフルフォーマボルトの応力評価手法について

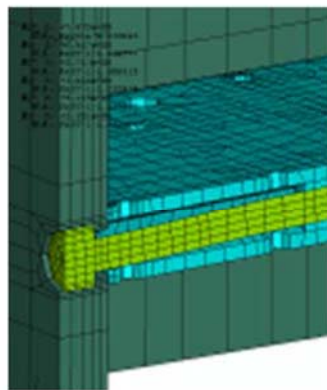


※ボルトの応力は、バッフル構造全体をモデル化したグローバルモデル解析で算出したボルト首下一般部の応力に係数 $\alpha$ を掛けて応力を算出している。

炉内構造物取替え前のバッフルフォーマボルトの損傷評価において、バッフル構造全体をモデル化したグローバルモデル解析とボルト周辺部を詳細にモデル化したローカルモデル解析によるボルト応力評価を実施しており、このグローバルモデル解析とローカルモデル解析で算出した全ボルトの応力履歴を算出し、最大の比を係数としている。



《全体図》



《ボルト部拡大図》

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

タイトル	<p>炉内構造物に対する現状保全の考え方、点検計画、点検方法、結果について。</p>																				
説明	<p>美浜3号炉の炉内構造物については、第25回定期検査時に炉内構造物の一式取替を実施することとしている。取替前の炉内構造物については、日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格を踏まえて、下表に示す定期的な目視検査（可視範囲100%）を実施し、炉内構造物に異常（バップル板の過大な変形や部品損傷等）がないことを確認している。</p> <p>また、炉内構造物取替前のバップルフォーマボルトに対しては、第14回定期検査時（約12万運転時間、中性子照射量は約<math>2.9 \times 10^{22} \text{n/cm}^2</math>）に超音波探傷検査を実施し、有意な欠陥がないことを確認している。</p> <p style="text-align: center;">日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格の検査内容</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">項目番号</th> <th style="width: 20%;">対象箇所</th> <th style="width: 35%;">試験対象</th> <th style="width: 15%;">方法</th> <th style="width: 15%;">頻度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>G1.10</td> <td>原子炉容器の内部</td> <td>炉心槽 炉心バップル※ 下部炉心板</td> <td>VT-3</td> <td>約3年</td> </tr> <tr> <td>G1.40</td> <td>構造物・取付け物</td> <td>制御棒クラスタ案内管 炉心バップル 熱遮蔽材 など</td> <td>VT-3</td> <td>約7年</td> </tr> <tr> <td>G1.50</td> <td>炉心支持構造物</td> <td>炉心槽 上部炉心支持板 など</td> <td>VT-3</td> <td>約7年</td> </tr> </tbody> </table> <p>※炉心バップル取付板、バップルフォーマボルト、バレルフォーマボルトを含む</p> <p>炉内構造物取替後のバップルフォーマボルトについては、IASCC損傷予測評価の結果、運転開始後60年時点（炉内構造物取替後約14万運転時間）においてボルトの損傷が発生することはなく、炉心の健全性に影響を与えることはないことを評価している。</p> <p>また、美浜3号炉の炉内構造物取替後から運転開始60年時点における運転時間は約14万運転時間であり、バップルフォーマボルトの中性子照射量は約<math>3 \times 10^{22} \text{n/cm}^2</math>と評価している。この運転時間と中性子照射量は、炉内構造物取替前のバップルフォーマボルトに対して超音波探傷検査を実施してボルトの健全性を確認した運転時間および中性子照射量とほぼ同じである。</p> <p>さらに、炉内構造物取替時には、下記の改良設計により炉内構造物取替前に比べて耐照射誘起型応力腐食割れ性の向上を図っている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・炉心バップルへの角バップル構造の採用、バップルフォーマボルトの</li> </ul>	項目番号	対象箇所	試験対象	方法	頻度	G1.10	原子炉容器の内部	炉心槽 炉心バップル※ 下部炉心板	VT-3	約3年	G1.40	構造物・取付け物	制御棒クラスタ案内管 炉心バップル 熱遮蔽材 など	VT-3	約7年	G1.50	炉心支持構造物	炉心槽 上部炉心支持板 など	VT-3	約7年
項目番号	対象箇所	試験対象	方法	頻度																	
G1.10	原子炉容器の内部	炉心槽 炉心バップル※ 下部炉心板	VT-3	約3年																	
G1.40	構造物・取付け物	制御棒クラスタ案内管 炉心バップル 熱遮蔽材 など	VT-3	約7年																	
G1.50	炉心支持構造物	炉心槽 上部炉心支持板 など	VT-3	約7年																	

	<p>シャンク長さの増大、首下形状のパラボリック形状の採用により、ボルトの応力低減</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・炉心バッフル取付板にボルト冷却孔を設け、バッフルフォーマボルトの温度を低減</li> <li>・炉心槽と炉心バッフルの間の領域を流れるバイパス流量を増加させることにより、バッフル構造の温度、熱変形を低減させ、バッフルフォーマボルトに発生する熱応力を低減</li> </ul> <p>よって、バッフルフォーマボルトについては、炉内構造物取替前の点検実績からも、運転開始後60年時点において損傷が発生する可能性はないと評価している。</p> <p>また、バッフルフォーマボルト以外の部位については、バッフルフォーマボルトとの相対的な評価から照射誘起型応力腐食割れは発生しないと評価している。</p> <p>以上より、バッフルフォーマボルトのIASCC損傷予測評価結果および炉内構造物取替前の点検実績から、運転開始後60年時点までに、炉内構造物に照射誘起型応力腐食割れは発生しないと評価しているが、念のため、炉内構造物取替後においても、炉内構造物の機能に影響するような大きな構造変形や部品損傷等の異常がないことを確認するために、日本機械学会発電用原子力設備規格 維持規格に基づき、定期的に炉内構造物の可能範囲の目視検査を実施することとしている。</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>
--	---

タイトル	炉心支持構造物を含む炉内構造物に対する非破壊試験について																				
説明	<p>炉心支持構造物を含む炉内構造物については、下表に示す発電用原子力設備規格 維持規格（日本機械学会）の要求事項に基づき定期的に目視検査（可視範囲100%）を実施しており、点検の結果、これまでに有意な異常は認められていない。</p> <p>また、美浜3号炉の炉内構造物は第25回定期検査時に一式取替をすることとしており、取替後も維持規格に基づく検査を実施する計画である。</p> <p>維持規格検査内容</p> <table border="1" data-bbox="424 712 1361 1128"> <thead> <tr> <th>項目番号</th> <th>対象箇所</th> <th>試験対象</th> <th>方法</th> <th>頻度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>G1.10</td> <td>原子炉容器の内部</td> <td>炉心槽 炉心バッフル※ 下部炉心板</td> <td>VT-3</td> <td>約3年</td> </tr> <tr> <td>G1.40</td> <td>構造物・取付け物</td> <td>制御棒クラスタ案内管 炉心バッフル 熱遮蔽材 など</td> <td>VT-3</td> <td>約7年</td> </tr> <tr> <td>G1.50</td> <td>炉心支持構造物</td> <td>炉心槽 上部炉心支持板 など</td> <td>VT-3</td> <td>約7年</td> </tr> </tbody> </table> <p>※炉心バッフル取付板、バッフルフォーマボルト、バレルフォーマボルトを含む</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>	項目番号	対象箇所	試験対象	方法	頻度	G1.10	原子炉容器の内部	炉心槽 炉心バッフル※ 下部炉心板	VT-3	約3年	G1.40	構造物・取付け物	制御棒クラスタ案内管 炉心バッフル 熱遮蔽材 など	VT-3	約7年	G1.50	炉心支持構造物	炉心槽 上部炉心支持板 など	VT-3	約7年
項目番号	対象箇所	試験対象	方法	頻度																	
G1.10	原子炉容器の内部	炉心槽 炉心バッフル※ 下部炉心板	VT-3	約3年																	
G1.40	構造物・取付け物	制御棒クラスタ案内管 炉心バッフル 熱遮蔽材 など	VT-3	約7年																	
G1.50	炉心支持構造物	炉心槽 上部炉心支持板 など	VT-3	約7年																	