

資料〇-〇-〇



# 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

関西電力株式会社

平成28年7月14日

1. 高浜1,2号炉の運転期間延長審査を踏まえた反映事項.....	2
2. 照射誘起型応力腐食割れについて .....	3
3. 評価対象機器の抽出 .....	4
4. 健全性評価 .....	6
5. 現状保全 .....	10
6. 総合評価 .....	10
7. 高経年化への対応 .....	10
8. まとめ .....	11

# 1. 高浜1,2号炉の運転期間延長審査を踏まえた反映事項

分類	反映事項	頁
評価条件 (設備、 関わる事項 手法の 相違) に	<p>美浜3号炉は今回の停止期間中に炉内構造物の取替を予定しており、取替を考慮した評価としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・バッフルフォーマボルト等は高浜1, 2号炉に比べて耐照射誘起型応力腐食割れ性の向上を図った仕様である。</li> <li>・60年までの運転期間の想定が高浜1, 2号炉と異なる。              高浜1, 2号炉 → <u>運転開始時点</u>～運転開始60年時点              美浜3号炉 → <u>取替え後</u>～運転開始60年時点</li> <li>・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。</li> </ul>	12、13 (参考)

## 2. 照射誘起型応力腐食割れについて

### 【照射誘起型応力腐食割れ（IASCC）とは】

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。

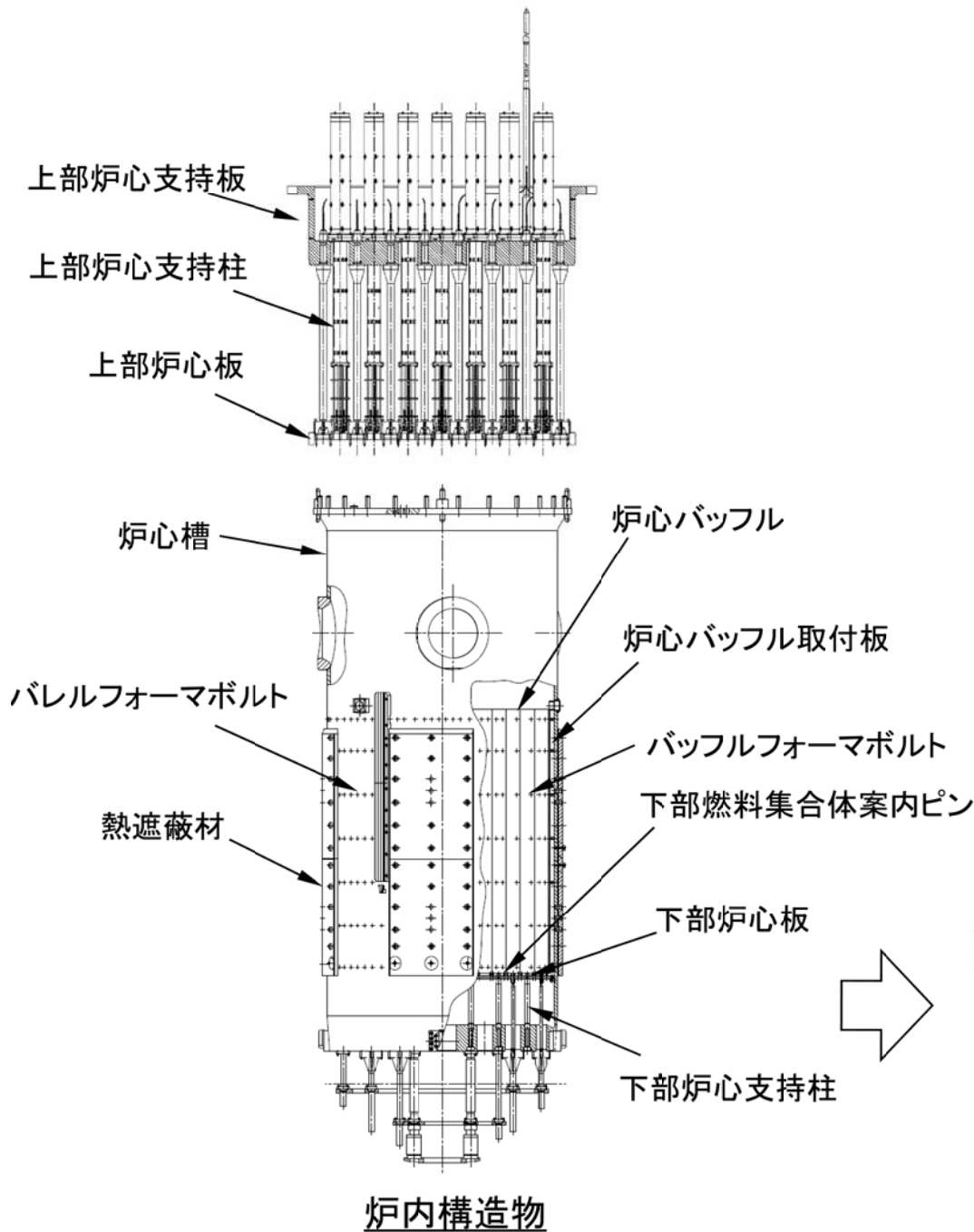
表1 国内外3ループプラント・バッフルフォーマボルト点検結果の一例

	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 (炉内構造物取替前)
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 <sup>※</sup>	9本	1本	2本	0本	0本	0本	0本	0本

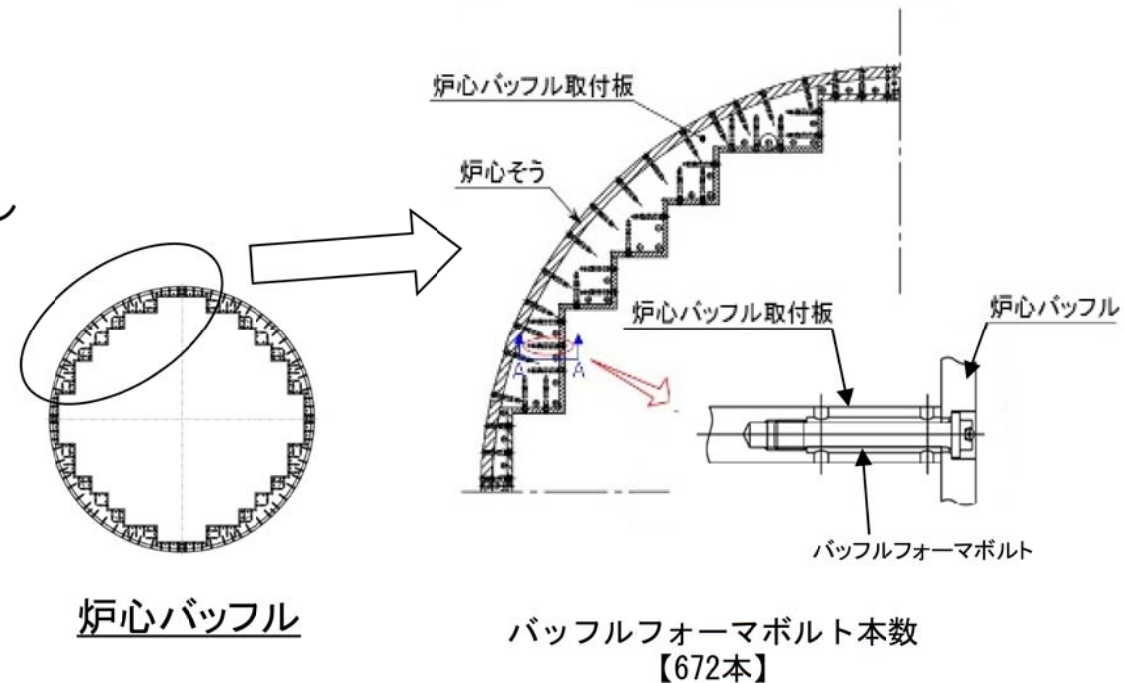
※ バッフルフォーマボルトの全数は1088本

EFPY: 定格負荷相当年数

### 3. 評価対象機器の抽出(1/2)



- ・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であった。
- ・炉内構造物の各部位の中性子照射量、環境温度、応力レベルを表2に整理した。これら部位のうち、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ッフ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。



### 3. 評価対象機器の抽出(2/2)

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*1 [n/cm <sup>2</sup> :E>0.1MeV]	応力レベル*2 (応力支配因子)	環境温度 [°C]		
バッフルフォーマボルト	$3 \times 10^{22}$	大 (締付+熱曲げ +照射スウェリング)	323	有	発生可能性有り。炉心バッフ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。
炉心バッフル、 炉心バッフル取付板	$3 \times 10^{22}$	小 (熱応力)	323	無	バッフルフォーマボルトよりも応力レベルが小さいため、バッフルフォーマボルトに比べて発生可能性は小さい。
バレルフォーマボルト	$3 \times 10^{21}$	大 (締付+熱曲げ)	323	無	バッフルフォーマボルトよりも中性子照射量が小さいため、バッフルフォーマボルトに比べて発生可能性は小さい。
炉心槽	$9 \times 10^{21}$	大 (溶接部) (溶接残留応力)	323	無	バッフルフォーマボルトよりも応力及び中性子照射量が小さいため、バッフルフォーマボルトに比べて発生可能性は小さい。
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	バッフルフォーマボルトより中性子照射量、応力レベル及び環境温度が小さいため、バッフルフォーマボルトに比べて発生可能性は小さい。
下部炉心支持柱	$1 \times 10^{21}$	中 (曲げ)	289	無	バッフルフォーマボルトより中性子照射量、応力レベル及び環境温度が小さいため、バッフルフォーマボルトに比べて発生可能性は小さい。
熱遮蔽材	$4 \times 10^{21}$	小 (熱応力)	289	無	バッフルフォーマボルトより中性子照射量、応力レベル及び環境温度が小さいため、バッフルフォーマボルトに比べて発生可能性は小さい。
熱遮蔽材固定用ボルト	$4 \times 10^{21}$	大 (締付+熱曲げ)	289	無	バッフルフォーマボルトより中性子照射量及び環境温度が小さいため、バッフルフォーマボルトに比べて発生可能性は小さい。

\*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）】

## 4. 健全性評価(1/4)

### 4. 1 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] (第2版) 原子力安全推進協会
- ・ (財) 発電設備技術検査協会 「プラント長寿命化技術開発」 報告書

### 4. 2 照射誘起型応力腐食割れの損傷予測評価

#### (1) 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。

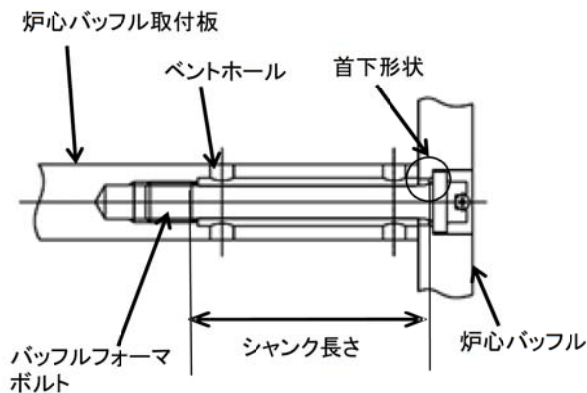


表3 美浜3号炉のバッフルフォーマボルトの仕様

	シャンク長さ	ボルト材料	首下形状	バントホールの有無	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	—

## (2) 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)、及びPWR炉内構造物点検評価ガイドライン[バッドフォームボルト]に基づき評価(図1)を行った。

### <評価方法>

① 運転時間(照射量)によって変動するバッドフォームボルトの応力履歴を算出(図2)



② 評価ガイド(案)に定められている割れ発生応力線図と①で算出したバッドフォームボルトの応力履歴を重ね合わせる。



③ バッドフォームボルトの応力履歴が割れ発生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。

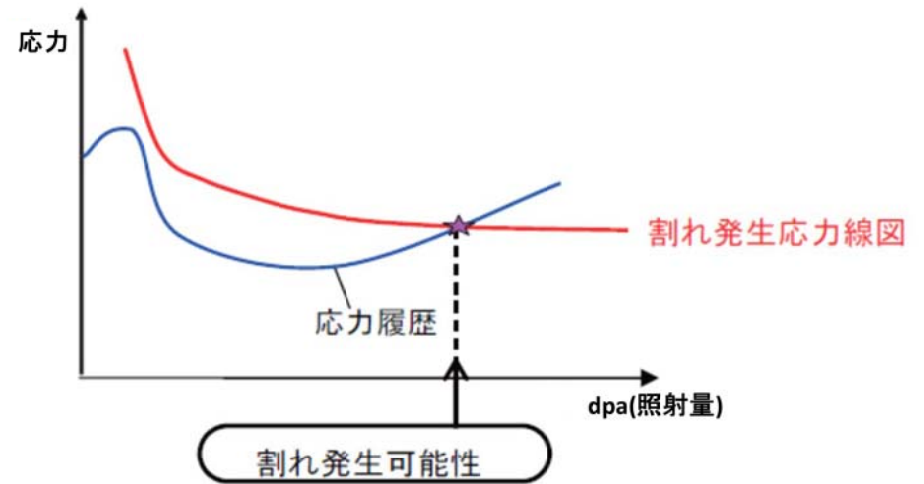


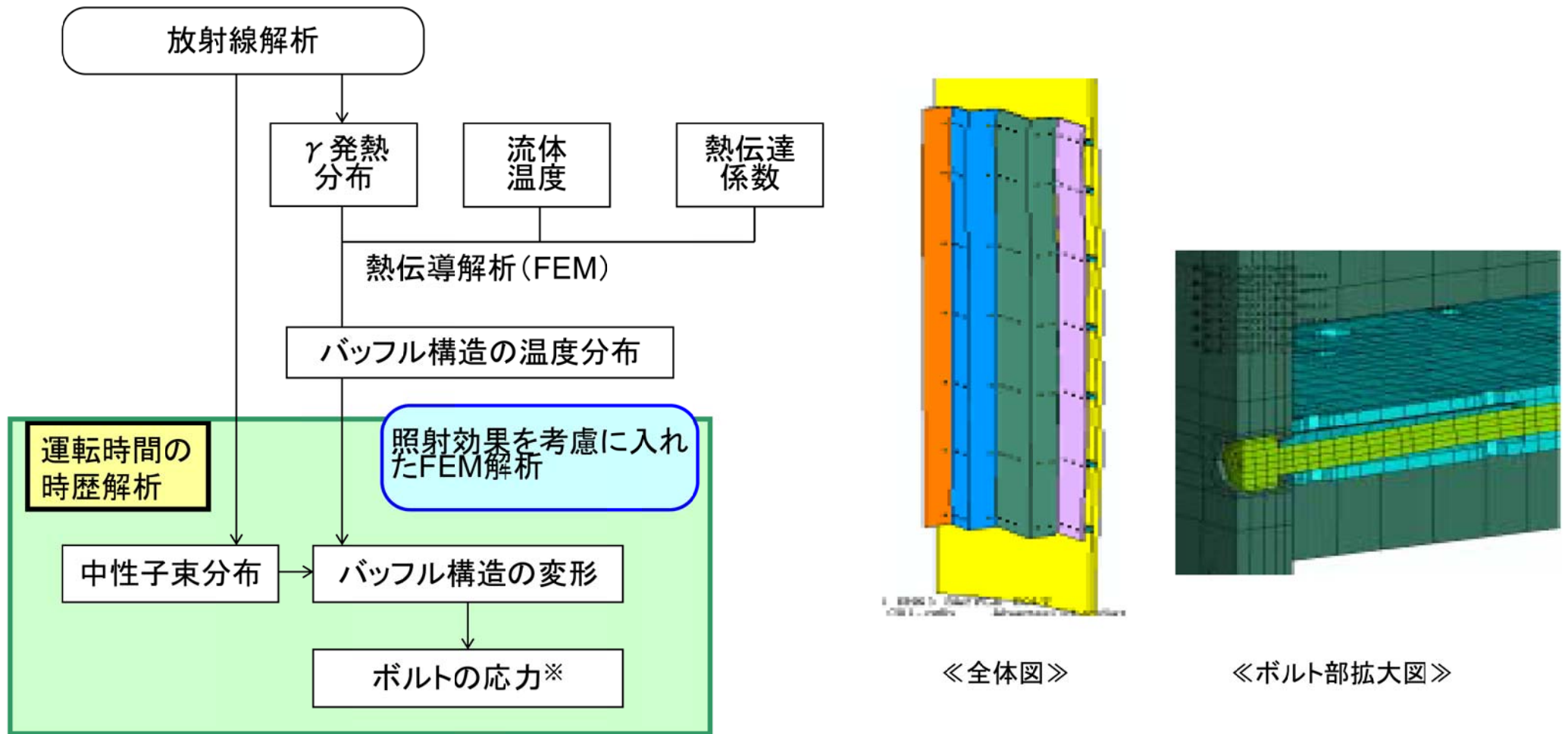
図1 割れ発生予測評価概念図

[出典: 「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書」  
(独) 原子力安全基盤機構]

\*1: 全672本のバッドフォームボルトのうち、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





※ボルトの応力は、解析で算出したボルト首下一般部の応力に応力集中係数を掛けて応力を算出

図2 バッフルフォーマボルトの応力評価手法

## 4. 健全性評価(4/4)

<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結果>

評価の結果、運転開始60年時点でのバッフルフォーマボルトの予測損傷本数は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3)。

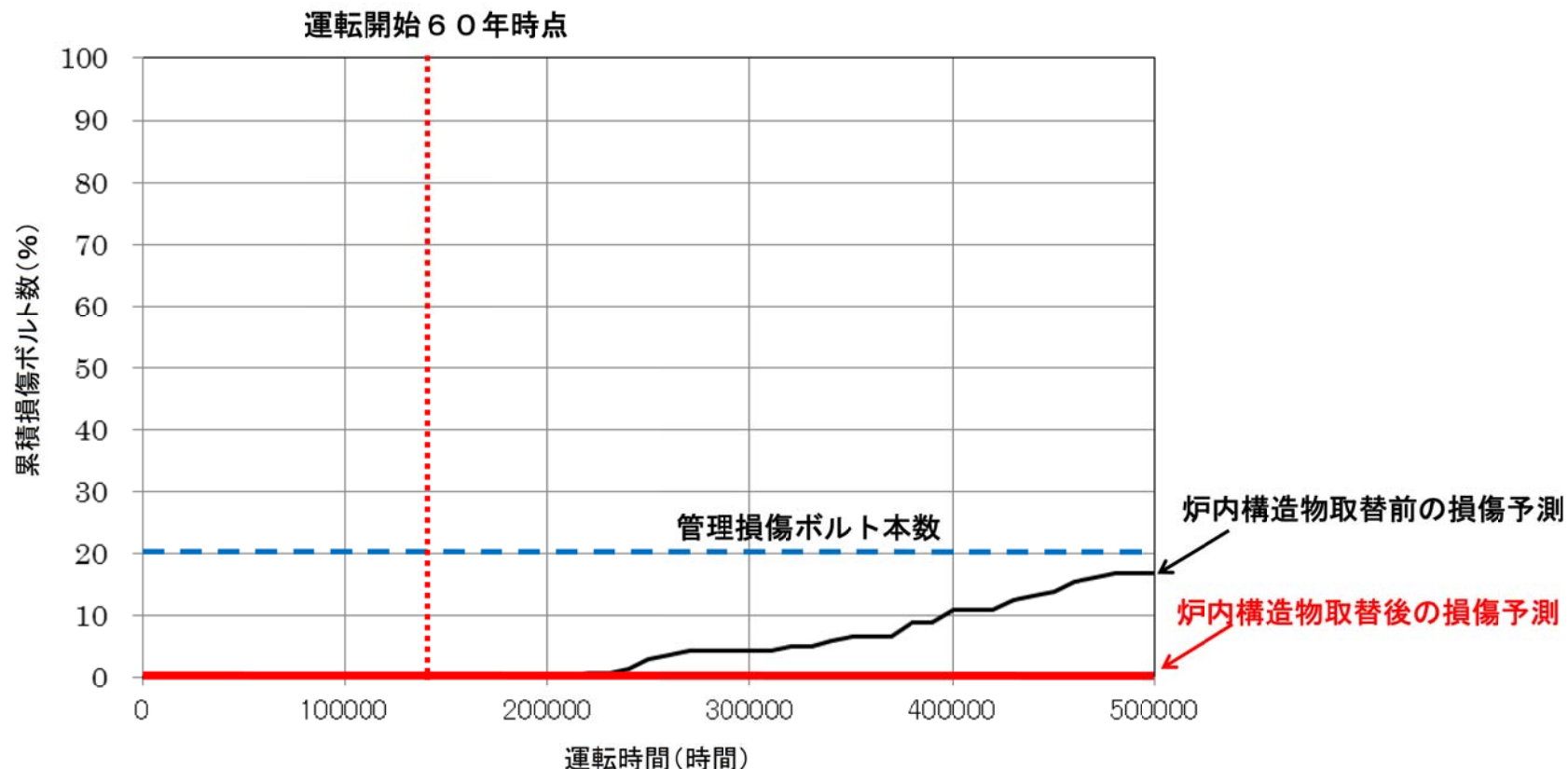


図3 バッフルフォーマボルトの累積損傷本数の予測

## 5. 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。

## 6. 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結果、及び、最も厳しいバッフルフォーマボルトの損傷発生予測の結果、運転開始60年時点で損傷が発生しないと評価していることから、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性はないと考える。

## 7. 高経年化への対応

炉内構造物の照射誘起型応力腐食割れに対しては、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。

## 8. 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」(以下、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。

延長しようとする期間における要求事項との対比

評価対象事象 又は評価事項	要求事項	健全性評価結果
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。	「4. 2 照射誘起型応力腐食割れの損傷予測評価」に示すとおり、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は発生しないと評価した。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、環境温度の比較から、照射誘起型応力腐食割れは発生しないと評価した。

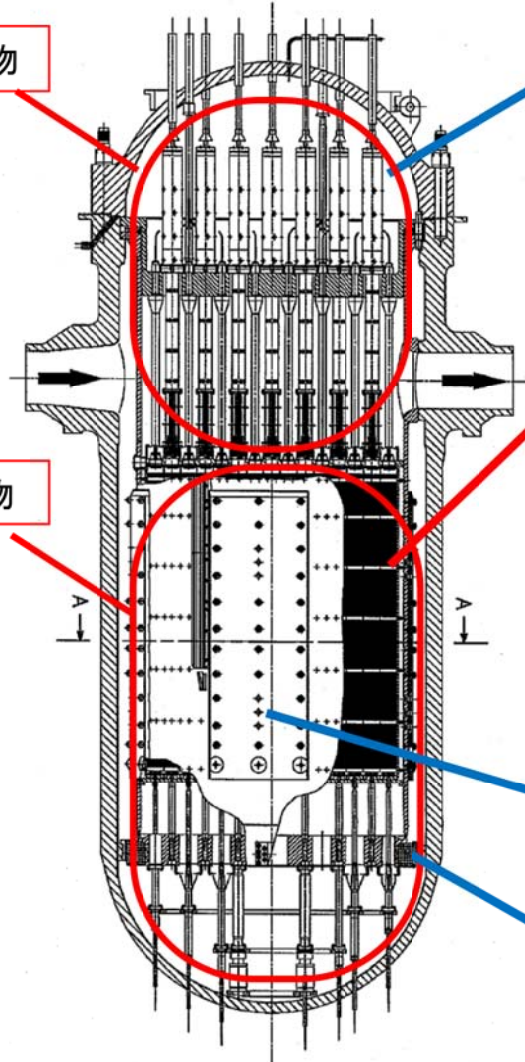
## ○美浜3号炉の炉内構造物の取替について

### 取替範囲

- ・炉心構造物一式の取替えを実施

上部炉心構造物

下部炉心構造物

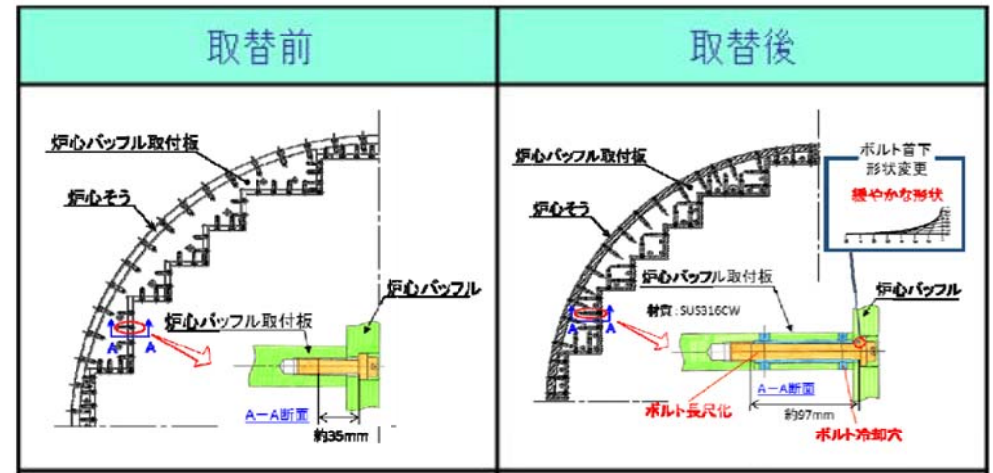


### 主な改善内容

- 上部炉心構造物の構造変更
  - ・構造の合理化として、上部炉心支持板を最新プラントと同様の円筒胴付鋼製円板へ変更。

### ○バップル構造の変更

- ・角バップルの採用、バップルフォーマボルトの長尺化、ボルト首下形状の変更等による発生応力の低減、ボルト冷却穴の設置により環境温度を下げる改善を行い、耐照射誘起型応力腐食割れ性を向上。



### ○熱遮蔽材の構造変更

- ・構造の合理化として、円筒型から最新プラントと同様の分割型の熱遮蔽材へ変更。

### ○ラジアルサポートの構造変更

- ・ラジアルサポートの大型化を行うことで耐震性を向上。

## ○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

バッフ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

バッフ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フ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

バッフ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。