

川内原子力発電所 1, 2号炉の 劣化状況評価結果について (照射誘起型応力腐食割れについて)

2022年11月7日

目 次

1. 照射誘起型応力腐食割れについて	2
2. 評価対象機器の抽出について	3
3. 健全性評価	6
4. 現状保全	11
5. 総合評価	12
6. 高経年化への対応	13
7. まとめ	13
参考資料	14

1 照射誘起型応力腐食割れについて

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（以下「IASCC」という。）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。

IASCC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ない。なお、日本国内ではIASCCの発生が確認された事例はない。

2 評価対象機器の抽出について

【ステップ1】

材料がステンレス鋼で、IASCC感受性の発生が考えられる中性子照射量 10^{21}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。

【ステップ2】

上記の結果、抽出された機器は炉内構造物のみであったため、代表機器として炉内構造物について説明する。

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。

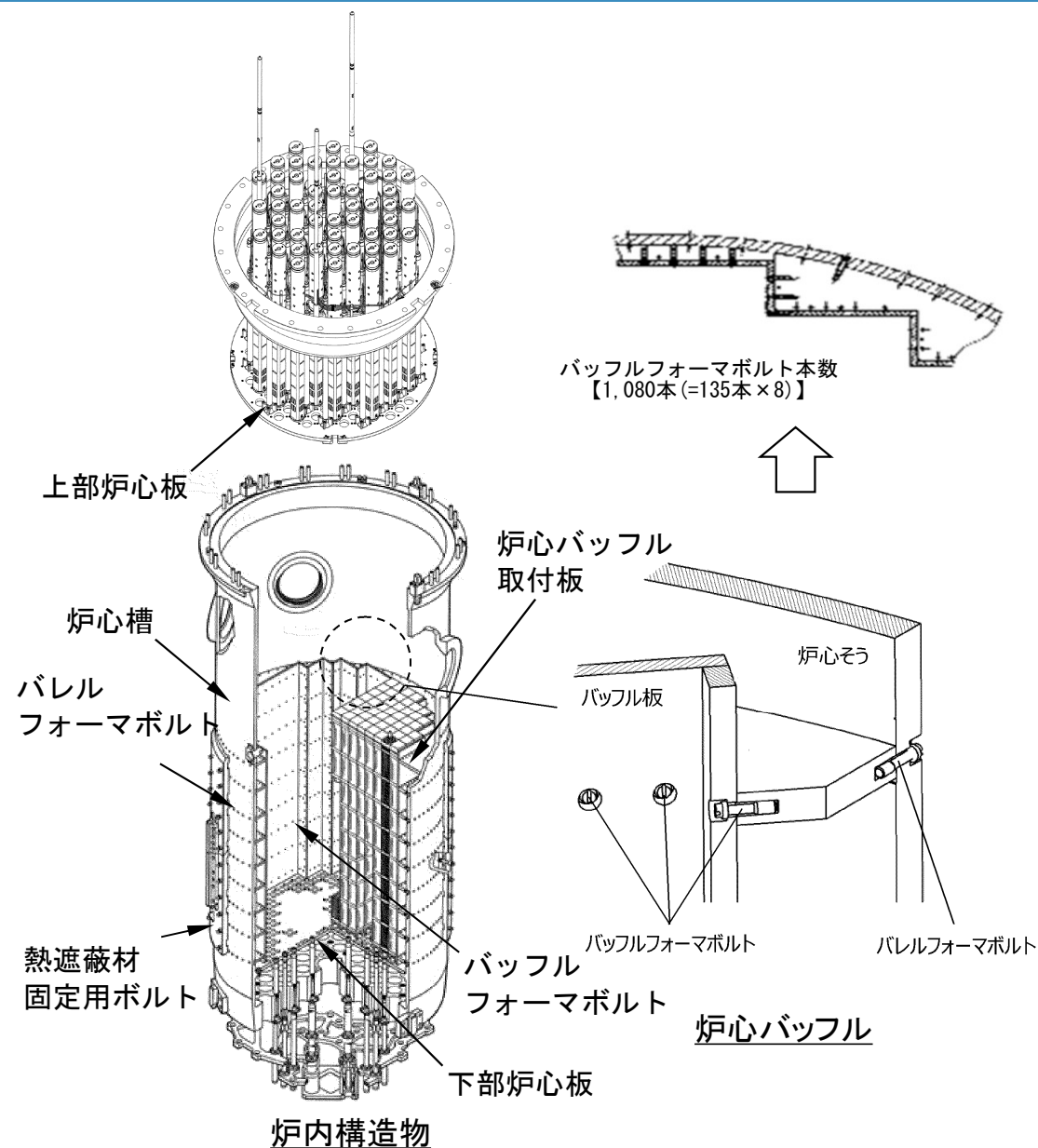


図1 炉内構造物の構造図

表1 ステンレス鋼のIASCCの可能性評価（1号機）

部位	実機条件			海外の 損傷事例	備考
	中性子照射量レベル*1 [n/cm ² :E>0.1MeV]	温度 [°C]	応力レベル*2 (応力支配因子)		
バップルフォーマボルト	約 1×10^{23}	約321	大 〔締付＋熱曲げ ＋照射スウェリング〕	有	発生の可能性有り。炉心バップルの照射スウェリングにより応力増加が生じるため、き裂発生の可能性が大きくなる。海外損傷事例もあり最も厳しい。
炉心バップル	約 1×10^{23}	約321	小 (熱応力)	無	バップルフォーマボルトよりも応力レベルが小さいため、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
炉心バップル取付板	約 1×10^{23}	約321	小 (熱応力)	無	バップルフォーマボルトよりも応力レベルが小さいため、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
バレルフォーマボルト	約 2×10^{22}	約321	大 (締付＋熱曲げ)	無	応力レベルは大きい、バップルフォーマボルトよりも中性子照射量が小さいため、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
炉心槽	約 3×10^{22}	約321	大*3 (溶接部) (溶接残留応力)	無	溶接残留応力が存在し応力レベルは大きい、バップルフォーマボルトよりも中性子照射量が小さいため、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
下部炉心板	約 9×10^{21}	約284	大 (熱応力)	無	応力レベルは大きい、バップ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、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
熱遮蔽材固定用ボルト	約 1×10^{22}	約284	大 (締付＋熱曲げ)	無	応力レベルは大きい、バップ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、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
上部炉心板 等 ステンレス鋼使用部位	約 $1 \times 10^{21} \sim 1 \times 10^{22}$	約284 ～ 321	小～中 (熱応力、締付、曲げ)	無	バップ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、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。

*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。

*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）】

*3：炉心槽溶接部の残留応力は大きい、（社）日本機械学会 維持規格（JSME S NA1-2012）にて、炉心槽溶接部応力は、IASCC発生に対し余裕があると評価されている。

表2 ステンレス鋼のIASCCの可能性評価（2号機）

部位	実機条件			海外の 損傷事例	備考
	中性子照射量レベル*1 [n/cm ² :E>0.1MeV]	温度 [°C]	応力レベル*2 (応力支配因子)		
バップルフォーマボルト	約 1×10^{23}	約321	大 〔締付＋熱曲げ ＋照射スウェリング〕	有	発生の可能性有り。炉心バップルの照射スウェリングにより応力増加が生じるため、き裂発生の可能性が大きくなる。海外損傷事例もあり最も厳しい。
炉心バップル	約 1×10^{23}	約321	小 (熱応力)	無	バップルフォーマボルトよりも応力レベルが小さいため、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
炉心バップル取付板	約 1×10^{23}	約321	小 (熱応力)	無	バップルフォーマボルトよりも応力レベルが小さいため、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
バレルフォーマボルト	約 2×10^{22}	約321	大 (締付＋熱曲げ)	無	応力レベルは大きい、バップルフォーマボルトよりも中性子照射量が小さいため、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
炉心槽	約 3×10^{22}	約321	大*3 (溶接部) (溶接残留応力)	無	溶接残留応力が存在し応力レベルは大きい、バップルフォーマボルトよりも中性子照射量が小さいため、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
下部炉心板	約 9×10^{21}	約284	大 (熱応力)	無	応力レベルは大きい、バップ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、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
熱遮蔽材固定用ボルト	約 1×10^{22}	約284	大 (締付＋熱曲げ)	無	応力レベルは大きい、バップ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、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
上部炉心板 等 ステンレス鋼使用部位	約 $1 \times 10^{21} \sim 1 \times 10^{22}$	約284 ～ 321	小～中 (熱応力、締付、曲げ)	無	バップ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、バップルフォーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。

*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。

*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）】

*3：炉心槽溶接部の残留応力は大きい、（社）日本機械学会 維持規格（JSME S NA1-2012）にて、炉心槽溶接部応力は、IASCC発生に対し余裕があると評価されている。

3 健全性評価

3.1 適用規格、評価条件

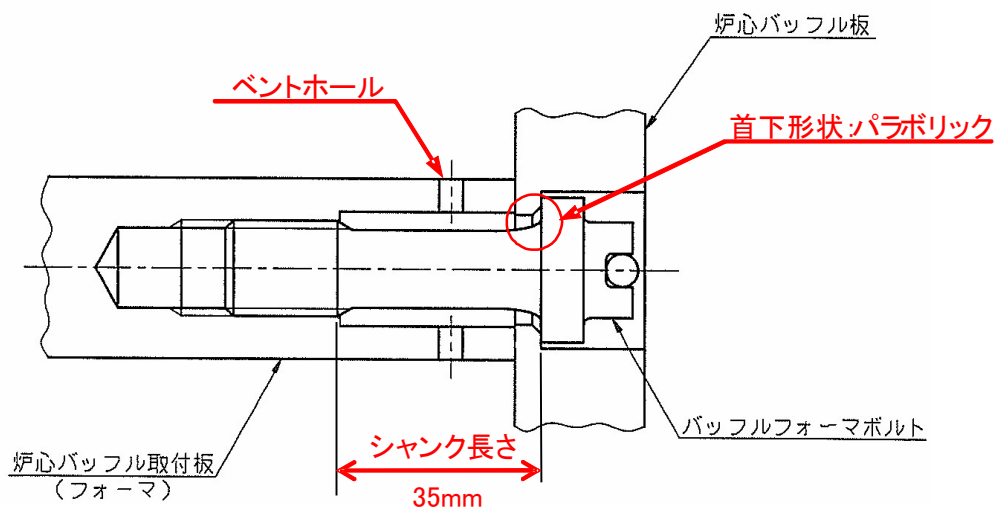
- ・ 発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1-2012) 日本機械学会
- ・ IASCC評価技術に関する報告書 (独)原子力安全基盤機構(平成21年9月)
- ・ (財) 発電設備技術検査協会「プラント長寿命化技術開発」報告書

3.2 IASCCの損傷予測評価

(1) バッフルフォーマボルトの仕様

川内1、2号炉のバッフルフォーマボルトは、応力低減等を図った改良型のボルトを採用しており、IASCC発生の可能性を低減している。

川内1、2号炉のバッフルフォーマボルト仕様を以下に示す。



項目	仕様	特長
ボルト材料	SUS316CW	機械的強度に優れる
首下形状	パラボリック	応力集中を低減
シャंक長さ	35mm	長尺化による曲げ応力を低減
ベントホールの有無	あり	除熱効果あり

(2) 発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1-2012) に基づく評価

- 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、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1では運転時間で約30年、グループ2では運転時間で約50年と評価した損傷予測曲線が示されている。
- 川内1、2号炉のバッフルフォーマボルトについては、グループ2と比較して応力低減等によりIASCCの発生可能性を低減したボルト（グループ4）を採用しているため、ボルト損傷の可能性はグループ2よりも低くなっている。
川内1、2号炉の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）に至るまでの期間を、グループ2の損傷予測曲線を用いて評価すると、運転時間で約50年と評価される。
- なお、管理損傷ボルト本数は、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する。川内1、2号炉の許容損傷ボルトパターンは7段/9段=77.8%であるため、これに3倍の余裕をとると管理損傷ボルト本数は $77.8 / 3 = 26\%$ となる。これを保守的に20%とすると、ボルト全数1080本の20%にあたる216本が管理損傷ボルト本数となる。

(3) IASCC評価技術に関する報告書に基づく評価

○新知見が反映された 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(案)に基づき評価（図2）を行った結果、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、IASCCが発生する可能性は低い（図4）。

<評価ガイド(案)に基づく評価方法>

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（図3）



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で算出したバッフルフォーマボルトの応力履歴を重ね合わせる。



③ バッフルフォーマボルトの応力履歴が割れ発生応力線図を超えた時点をIASCCの発生時間とする。

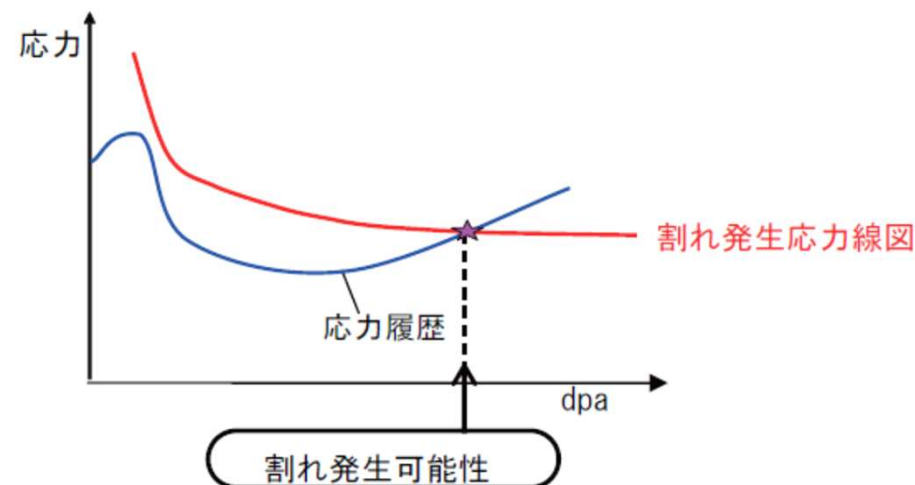


図2 割れ発生予測評価概念図

[出典：「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]

照射誘起型応力腐食割れ

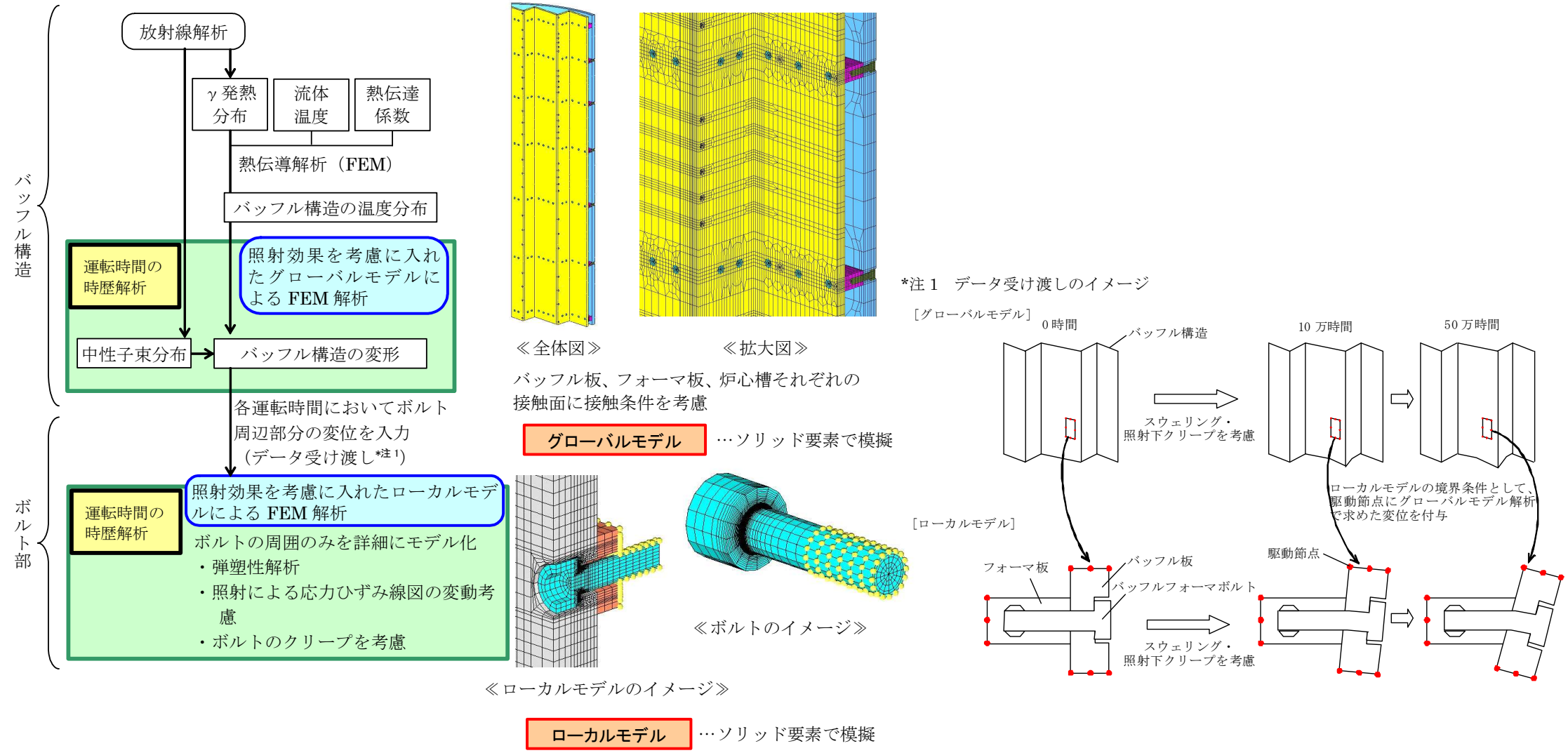


図3 バッフルフォーマボルトの応力評価手法

照射誘起型応力腐食割れ

○運転開始50万時間におけるバッフルフォーマボルトの損傷予測評価結果を図4に示す。評価の結果、運転開始60年時点（川内1号炉：約44.7万時間（51.0EFPY）、2号炉：約45.1万時間（51.5EFPY））を超える50万時間までにバッフルフォーマボルト（全数*1）の応力履歴が割れ発生応力線を超えることはなく、IASCC発生の可能性が小さいことを確認した。

なお、川内1号炉の運転開始後60年（約44.7万時間）（2号炉：約45.1万時間）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65dpaとなる。

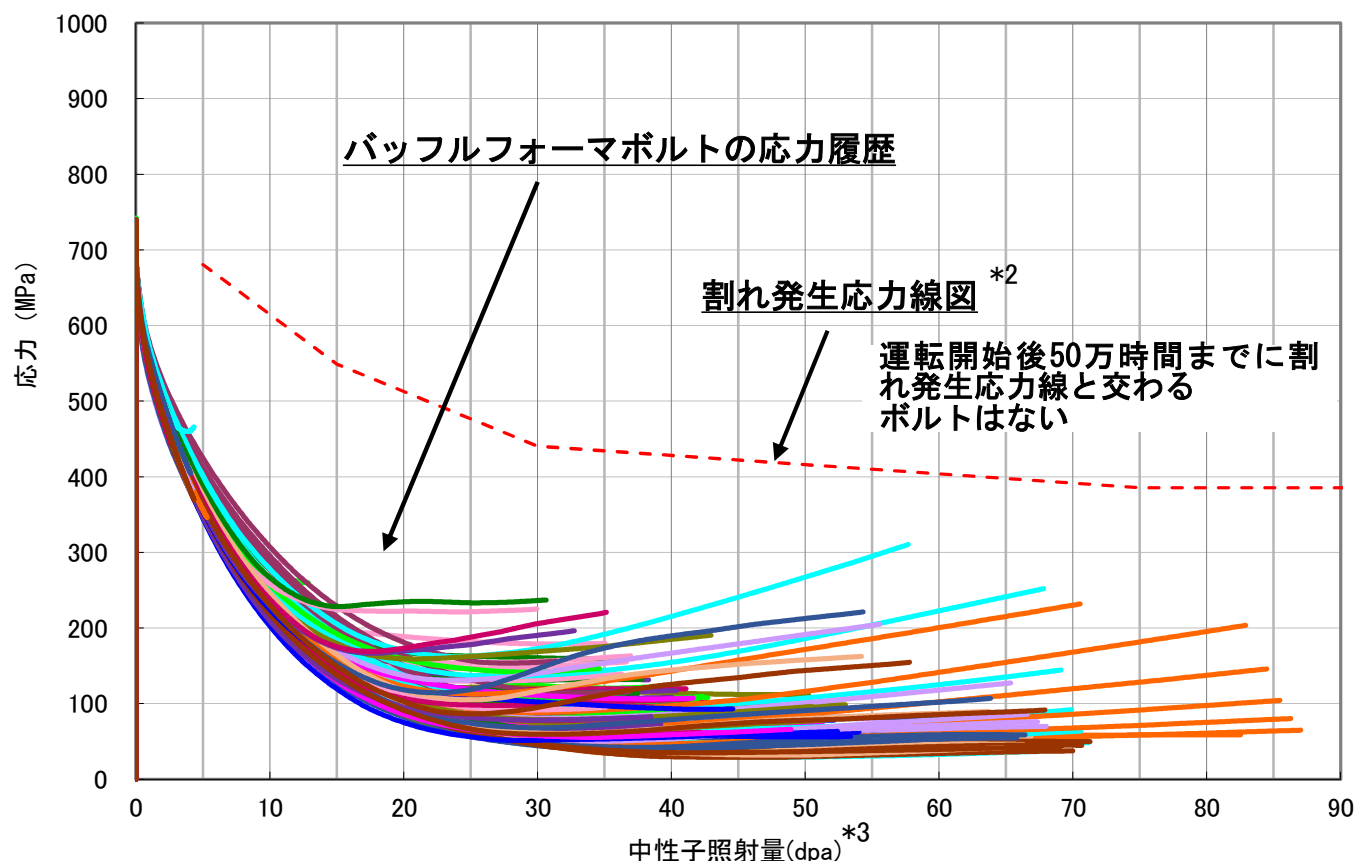


図4 バッフルフォーマボルト（全数）の応力履歴と割れ発生応力線図の重ね合わせ結果
（応力履歴は50万時間まで）

*1：全1,080本のバッフルフォーマボルトのうち、対象性を考慮した135本（=1,080÷8本）の応力履歴を算出している。
【図1参照】

*2：「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（案）において、IASCCが発生する可能性があるとして示されるしきい線を示す。

*3： $1.0 \times 10^{22} \text{n/cm}^2 = 6.5 \text{dpa}$ で換算
（評価ガイド、中性子照射量の評価より）

4 現状保全

炉内構造物については、定期的に可能な範囲について水中カメラによる目視確認(VT-3)を実施し、以下に示すとおり異常がないことを確認している。

<供用期間中検査計画および点検実績>

炉内構造物の現状保全としては、維持規格に示す下記の試験方法等に従い、供用期間中検査として目視検査(VT-3)を実施しており、これまで試験対象部位の異常(ボルト等の脱落、過大な変形等)がないことを確認している。維持規格に基づく点検内容および至近の検査実績を下表に示す。

項目番号※1 試験カテゴリ	試験部位	試験対象 (IASCC想定部位)	試験方法	頻度	至近検査結果	
					1号	2号
G1.10 G-P-1	容器内部	炉心槽 炉心バッフル 下部炉心板	VT-3※2	約3年間毎	良 2019年度 (第24回)	良 2021~2022年度 (第25回)
G1.40 G-P-1	内部取付け物	炉心バッフル 熱遮蔽材	VT-3※2	1回/7年	良 2019~2020年度 (第25回)	良 2021~2022年度 (第25回)
G1.50 G-P-2	炉心支持構造物	上部炉心板	VT-3※2	1回/7年	良 2019~2020年度 (第25回)	良 2021~2022年度 (第25回)
		炉心槽 下部炉心板			良 2019~2020年度 (第25回)	良 2021~2022年度 (第25回)

※1：維持規格2012年版、2013年追補、2014年追補の番号を示す。

※2：水中テレビカメラによる遠隔目視試験

○試験方法：水中テレビカメラによって、可視範囲に対して遠隔目視試験を行っている。その際、試験対象部の表面において18%中性灰色カード上の幅0.8mmの黒線が識別できることを確認。

○試験項目：機器の変形、心合せ不良、傾き、部品の破損、隙間の異常、ボルト締め付け部の緩み、機器表面における異常および脱落の有無を確認。

○判定基準：機器の変形、心合せ不良、傾き、部品の破損、隙間の異常、ボルト締め付け部の緩み、機器表面における異常および脱落がないこと。

5 総合評価

バッフルフォーマボルトについては、損傷予測評価により、運転開始後60年時点までに損傷が発生する可能性は低いとの結果を得た。しかしながら、維持規格による評価を行った場合、管理損傷ボルト数に至るまでの期間は運転時間で約50年と評価されるため、保全については、今後も維持規格に基づく現状保全を継続していく。

また、バッフルフォーマボルト以外の部位については、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、運転開始後60年時点までは損傷の可能性は低いと評価されていることから、IASCC発生の可能性は小さいと考える。

なお、冷温停止状態においては事象の進展が考え難いことから十分に保守的な評価であり、健全性に影響はないと考える。

IASCCに関する評価結果等から、現時点で直ちに問題となるような評価結果は確認されていないものの、今後、IASCCに起因する新たな損傷事例、炉内構造物に係る新たな損傷事例、評価条件の変更となる事例などがいないか国内外の新知見等を注視していく。

6 高経年化への対応

IASCCに対しては、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いと判断する。

7 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	技術評価結果
IASCC	○健全性評価の結果、評価対象部位においてIASCCの発生の可能性が認められる場合は、IASCC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。	「3. 健全性評価」に示すとおり、バッフルフォーマボルトについて運転開始後60年時点を想定した健全性評価を実施した結果、ボルト損傷は発生せず、IASCCの発生の可能性は小さいと評価した。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中性子照射量、応力および温度の比較から、IASCCの発生の可能性は小さいと評価した。

参考資料(照射誘起型応力腐食割れの発生要因)

IASCC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。

<材料要因>

- ・非常に高い中性子照射量を受けたステンレス鋼（中性子照射量が高いほど厳しい）（図1）

<環境要因>

- ・温度が高いほど厳しい（図2）

<応力要因>

- ・応力が高いほど厳しい（図3）

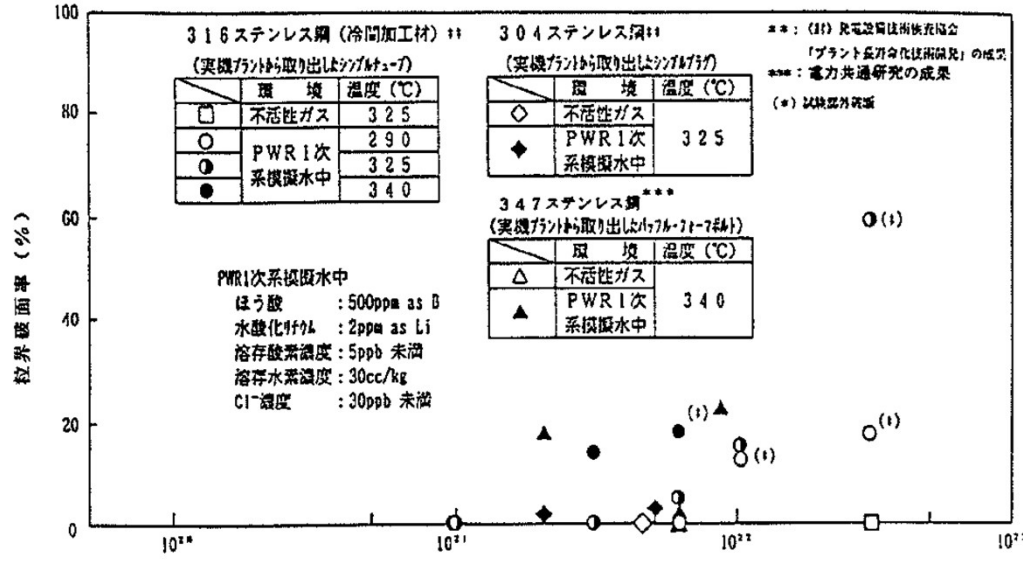


図1 粒界破面率と照射量の関係

[出典: (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]

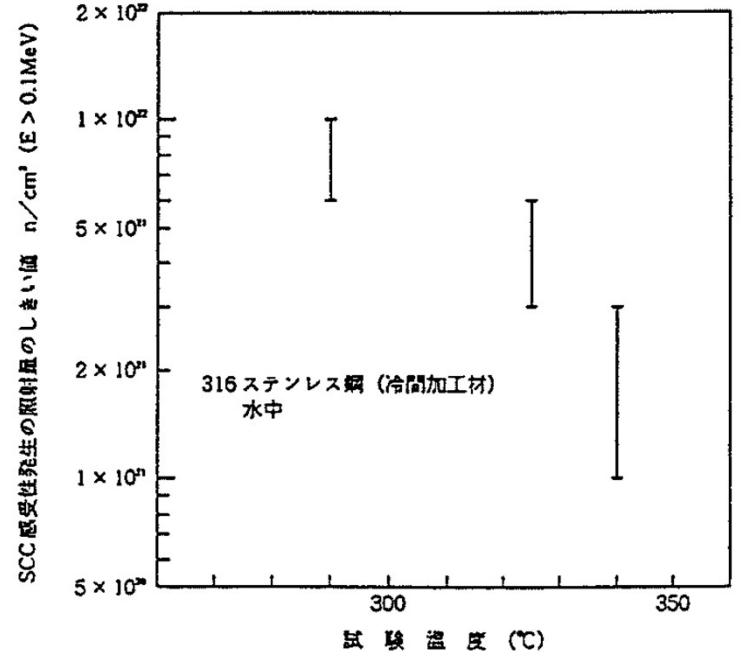


図2 応力腐食割れ (SCC) 感受性発生の中性子照射量のしきい値と試験温度の関係

[出典: (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]

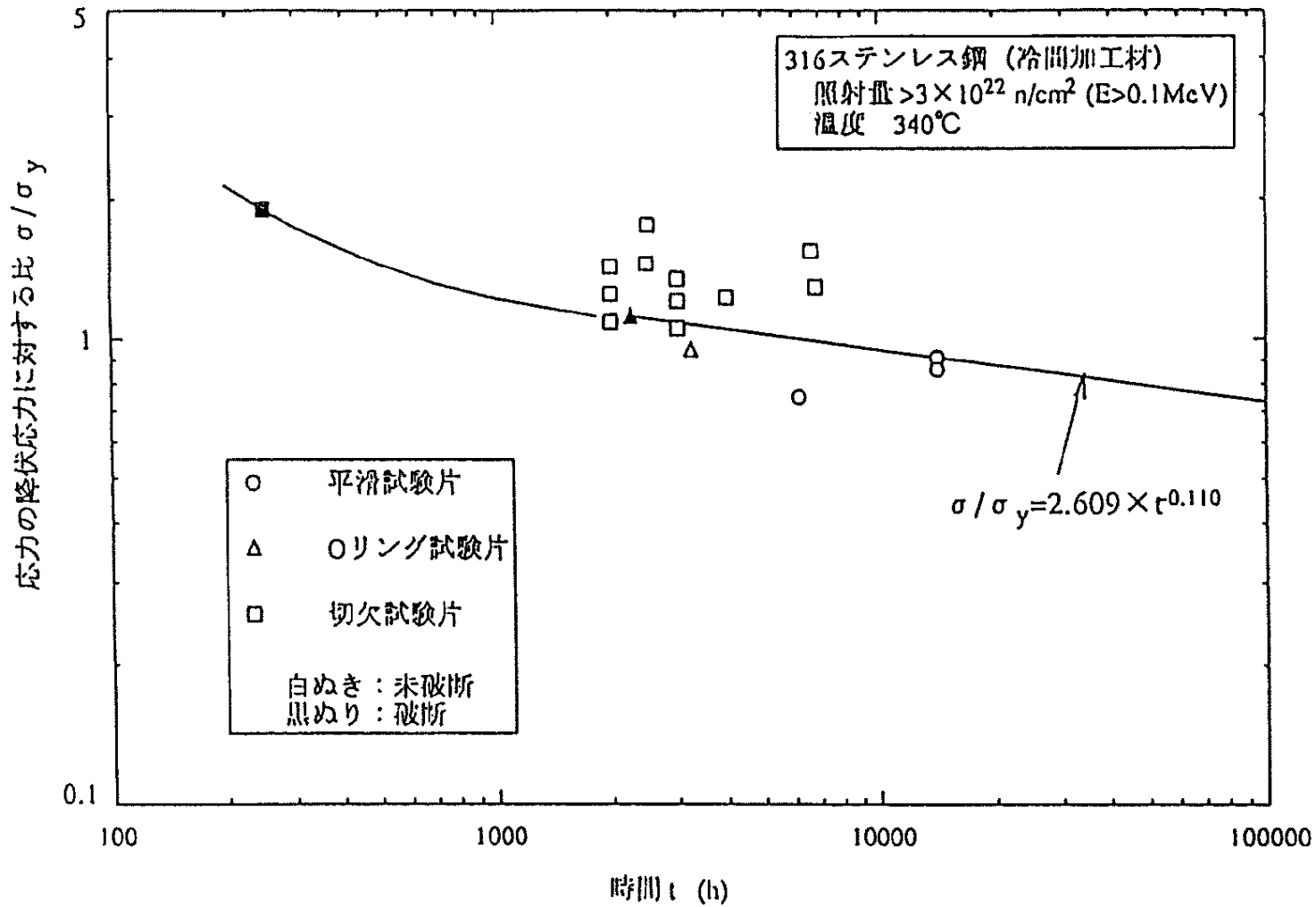


図3 定荷重応力腐食割れ試験結果のまとめ (316ステンレス鋼 (冷間加工材)、 $> 3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 、 $T=340^\circ\text{C}$)

[出典：(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]

参考資料(バッフルフォーマボルト・バッフル構造の仕様)

表 D-1 バッフルフォーマボルト・バッフル構造の仕様*

ループ数	プラント名		首下形状 ※1	シャンク 長さ※2	ボルト 材料	ボルト冷却孔 有無※3	バッフル板 厚さ※4	フォーマ板 厚さ※4	ボルト 本数
2	美浜 1/2 号機	ボルト取替前	R1	25mm	SUS347	無	29mm	38mm	624(美浜 1)
		ボルト取替後	R2	32mm	SUS316CW	無			728(美浜 2)
	泊 1/2 号機		パラボリック	35mm	SUS316CW	有(1 個/本)	22mm	32mm	800
	伊方 1 号機 玄海 1 号機	炉内構造物取替前	R1	25mm	SUS347	無	29mm	38mm	728
	伊方 2 号機 玄海 2 号機	炉内構造物取替前	パラボリック	35mm	SUS316CW	無	29mm	38mm	832
	伊方 1/2 号機 玄海 1/2 号機	炉内構造物取替後	パラボリック	86mm	SUS316CW	有(2 個/本)	22mm	30mm	560(伊方 1/玄海 1) 640(伊方 2/玄海 2)
3	高浜 1/2 号機 美浜 3 号機		R2	35mm	SUS316CW	無	29mm	38mm	1088
	高浜 3/4 号機 伊方 3 号機 川内 1/2 号機		パラボリック	35mm	SUS316CW	有(1 個/本)	22mm	35mm	1080
	泊 3 号機		パラボリック	97mm	SUS316CW	有(2 個/本)	22mm	30mm	864
4	大飯 1/2 号機		R2	64mm	SUS316CW	無	29mm	38mm	832
	大飯 3/4 号機 敦賀 2 号機 玄海 3/4 号機		パラボリック	64mm	SUS316CW	有(1 個/本)	22mm	35mm	936

(※) シャンク長さやフォーマ板厚さは位置により異なるため、代表的な寸法を示す

(※1) 首下部の応力集中係数は R2 に比べてパラボリックの方が小さい

(※2) シャンク長さが長いほど曲げ応力は低減される

(※3) ボルト冷却孔によりボルトおよび周りのフォーマ板の温度が低減される

(※4) バッフル板、フォーマ板が薄いほどγ発熱による温度上昇が低減される

表 添付 IJG-P-1-1-1 バッフルフォーマボルト仕様に基づく分類

グループ	ループ数	ボルト本数	シャンク長さ	ボルト材料 ¹⁾	首下形状	シャンク部 ベントホール の有無	燃料タイプ
グループ1	2	624	25mm	SUS347	1R	無	14×14 燃料
	2	728	25mm	SUS347	1R	無	14×14 燃料
グループ2	3	1088	35mm	SUS316 ²⁾	2R	無	15×15 燃料
	4	832	64mm	SUS316 ²⁾	2R	無	17×17 燃料
グループ3	2	832	35mm	SUS316 ²⁾	ハ°ボ°リック	無	14×14 燃料
グループ4	3	1080	35mm	SUS316 ²⁾	ハ°ボ°リック	有	17×17 燃料
	4	936	64mm	SUS316 ²⁾	ハ°ボ°リック	有	17×17 燃料
	2	800	35mm	SUS316 ²⁾	ハ°ボ°リック	有	14×14 燃料

1) 相当品含む

2) 冷間加工材含む

[出典：「発電用原子力設備規格 維持規格」日本機械学会]

○国内プラントにおいてバッフルフォーマボルトの損傷が確認された事例はないが、海外ではバッフルフォーマボルトの損傷が確認されている。例えば米国にてバッフルフォーマボルトの損傷が確認されているプラントは、いずれも炉心バッフルの内外差圧によりバッフルフォーマボルトに作用する荷重が大きくなるダウンフロー構造（炉心槽と炉心バッフルの間のバイパス流の流れが下向き）あるいは運転開始後にダウンフロー構造からアップフロー構造（バイパス流の流れが上向き）に変更したものであるのに対し、川内1、2号炉は運転開始当初からアップフロー構造である。

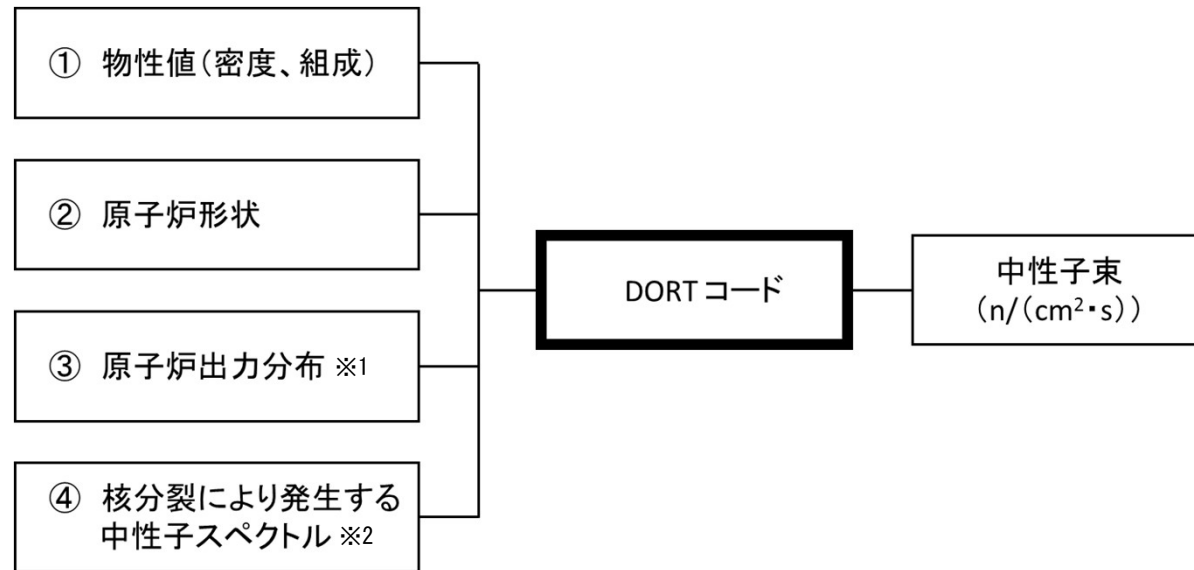
○さらに、川内1、2号炉ではボルトの首下の応力集中を低減させた形状により発生応力の低減が図られているとともに、ベントホールを有することで温度低減が図られている構造となっている。また、バッフルフォーマボルトは、ボルト頭部に溝が加工されており、ボルト締結後に溝幅より外径をやや大きく加工した回り止めピンをはめ込み回り止めピンの両端をバッフル板に溶接することで回り止めされていることから、仮にバッフルフォーマボルトが損傷した場合でもボルト頭部の炉内への脱落を防止する構造となっている。

○炉内構造物各部における現時点（申請時点）および運転開始後60年時点での中性子照射量（ $E > 0.1\text{MeV}$ ）の算出概要を以下に示す。
 また、評価対象部位について次頁の図に、現時点および現時点における60年時点の中性子照射量について次々頁の表に示す。

（1）概要

中性子照射量は、炉内構造物各部における中性子束（ $E > 0.1\text{MeV}$ ）を2次元輸送計算コード（DORT（Ver. 3.2））により算出し、これに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、入力パラメータは以下のとおりである。



※1：これまでの運転サイクルにおける原子炉出力分布の平均値を用いて原子炉熱出力に相当する分のエネルギー（中性子発生個数）を入力している。

※2：燃料（ウラン235）が核分裂により発生する中性子発生個数とエネルギー（物性値）を入力している。

(2) 評価対象部位

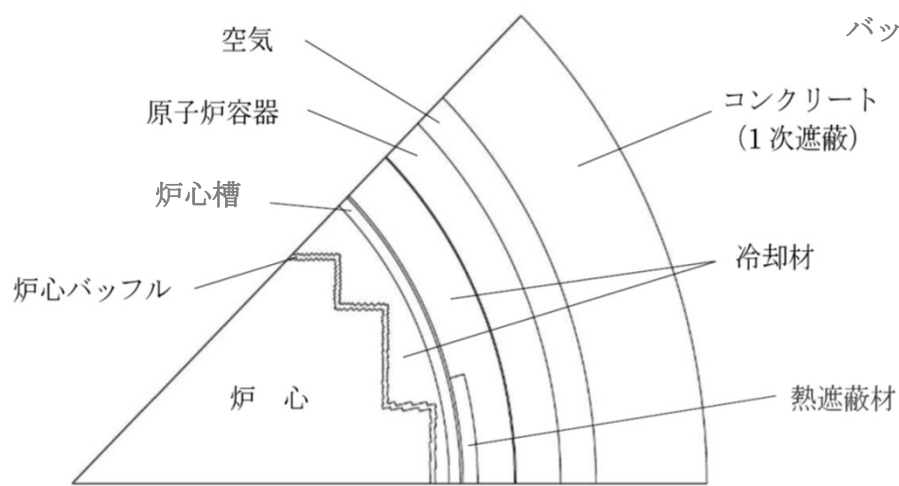


図4 評価対象部位（水平断面図）

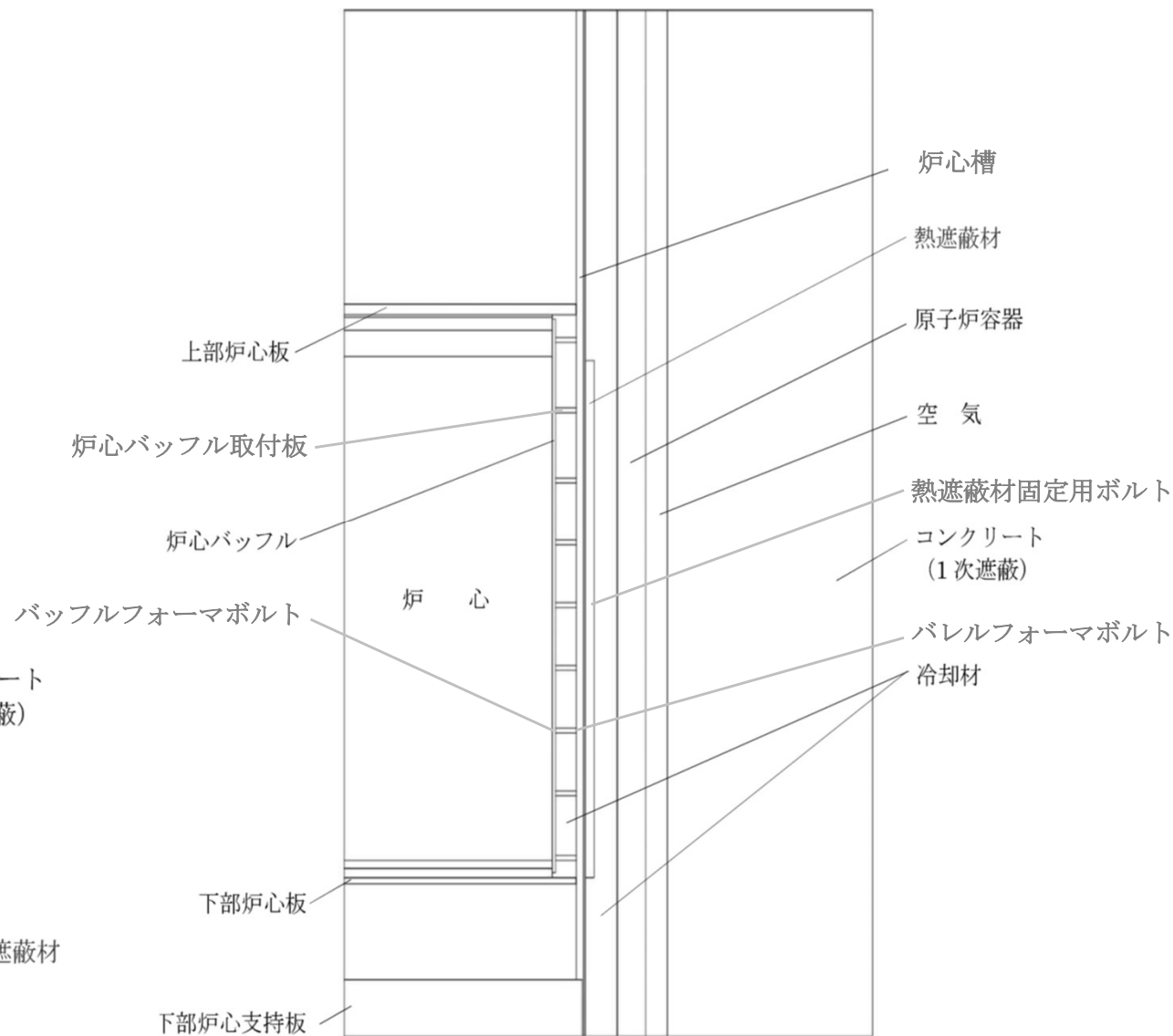


図5 評価対象部位（垂直断面図）

参考資料（炉内構造物の中性子照射量について）

（3）中性子照射量算出結果

表 1 中性子照射量算出結果

部位	中性子照射量（1号） [n/cm ² :E>0.1MeV]			中性子照射量（2号） [n/cm ² :E>0.1MeV]		
	現時点	60年時点 (現時点評価)	60年時点 (30年時評価)	現時点	60年時点 (現時点評価)	60年時点 (30年時評価)
バッフルフォーマボルト	約 6×10^{22}	約 1×10^{23}	約 1×10^{23}	約 6×10^{22}	約 1×10^{23}	約 1×10^{23}
炉心バッフル	約 6×10^{22}	約 1×10^{23}	約 1×10^{23}	約 6×10^{22}	約 1×10^{23}	約 1×10^{23}
炉心バッフル取付板	約 6×10^{22}	約 1×10^{23}	約 1×10^{23}	約 6×10^{22}	約 1×10^{23}	約 1×10^{23}
バレルフォーマボルト	約 1×10^{22}	約 2×10^{22}	約 3×10^{22}	約 1×10^{22}	約 2×10^{22}	約 3×10^{22}
炉心槽	約 1×10^{22}	約 3×10^{22}	約 4×10^{22}	約 1×10^{22}	約 3×10^{22}	約 4×10^{22}
下部炉心板	約 5×10^{21}	約 9×10^{21}	約 1×10^{22}	約 5×10^{21}	約 9×10^{21}	約 1×10^{22}
熱遮蔽材固定用ボルト	約 7×10^{21}	約 1×10^{22}	約 2×10^{22}	約 6×10^{21}	約 1×10^{22}	約 2×10^{22}
上部炉心板等 ステンレス鋼使用部位	約 8×10^{20} ～約 7×10^{21}	約 1×10^{21} ～約 1×10^{22}	約 2×10^{21} ～約 2×10^{22}	約 7×10^{20} ～約 6×10^{21}	約 1×10^{21} ～約 1×10^{22}	約 2×10^{21} ～約 2×10^{22}

- 算出した炉内構造物主要部位における中性子束に対し、運転開始から現時点までの運転時間 1号：約23.5万時間（26.8EFPY）、2号：22.7万時間（25.9EFPY）および運転開始後60年時点までの運転時間 1号：約44.7万時間（51.0EFPY）、2号：約45.1万時間（51.5EFPY）をそれぞれ乗じることで、現時点および60年運転時点の中性子照射量を算出した。
- 本解析については、類似の解析モデルの解析値と実測値との比較を行い、両者が概ね一致していることを確認することにより、本解析の妥当性を確認している。
具体的には、Reactor Dosimetry in the 21st Century (World Scientific) pp.59-66 「Three Dimensional Radiation Transport Analyses in PWR with TORT and MCNP」 2002における、サーベイランス試験片の実測放射能濃度とDORTコードによる解析結果との比較において、実測値に対する解析値の比が0.98～1.05と概ね一致しており、本解析コードが放射線束分布を適切に模擬できていることを確認している。

表2 評価部位の使用材料評価（1、2号機）

部位	材料
バッフルフォーマボルト	ASME SA-193 B-8M Class2
炉心バッフル	ASME SA-240 TYPE304
炉心バッフル取付板	ASME SA-240 TYPE304
バレルフォーマボルト	ASME SA-193 B-8M Class2
炉心槽	ASME SA-240 TYPE304 / ASME SA-182 F304
下部炉心板	ASME SA-240 TYPE304
熱遮蔽材固定用ボルト	ASME SA-479 TYPE316S
上部炉心板 等 ステンレス鋼使用部位	<ul style="list-style-type: none"> ・ ASME SA-240, 479 TYPE304 ・ ASME SA-193 B-8M Class2

表3 上部炉心板等のIASCCの可能性評価（1号機）

部位	材料	実機条件			海外の 損傷 事例	備考
		中性子照射量レベル*1 [n/cm ² :E>0.1MeV]	温 度 [°C]	応力レベル*2 (応力支配因子)		
上部炉心板	ASME SA-240 TYPE304	約1×10 ²¹	約321	小 (熱応力)	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量及び 応力レベルが小さいため、バブルフォーマボルト に比べて発生の可能性は小さい。
上部燃料集合体案内ピン	ASME SA-193 B-8M Class2	約1×10 ²¹	約321	小 (締付け)	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量及び 応力レベルが小さいため、バブルフォーマボルト に比べて発生の可能性は小さい。
下部燃料集合体案内ピン	ASME SA-193 B-8M Class2	約9×10 ²¹	約284	小 (締付け)	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、バブルフォー マボルトに比べて発生の可能性は小さい。
下部炉心支持柱	ASME SA-479 TYPE304	約5×10 ²¹	約284	中 (曲げ)	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、バブルフォー マボルトに比べて発生の可能性は小さい。
熱遮蔽材	ASME SA-240 TYPE304	約1×10 ²²	約284	小 (熱応力)	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、バブルフォー マボルトに比べて発生の可能性は小さい。

表4 上部炉心板等のIASCCの可能性評価（2号機）

部位	材料	実機条件			海外の 損傷 事例	備考
		中性子照射量レベル*1 [n/cm ² :E>0.1MeV]	温 度 [°C]	応力レベル*2 (応力支配因子)		
上部炉心板	ASME SA-240 TYPE304	約1×10 ²¹	約321	小 (熱応力)	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量及び 応力レベルが小さいため、バブルフォーマボルト に比べて発生の可能性は小さい。
上部燃料集合体案内ピン	ASME SA-193 B-8M Class2	約1×10 ²¹	約321	小 (締付け)	無	バブルフォーマボルトよりも中性子照射量及び 応力レベルが小さいため、バブルフォーマボルト に比べて発生の可能性は小さい。
下部燃料集合体案内ピン	ASME SA-193 B-8M Class2	約9×10 ²¹	約284	小 (締付け)	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、バブルフォー マボルトに比べて発生の可能性は小さい。
下部炉心支持柱	ASME SA-479 TYPE304	約5×10 ²¹	約284	中 (曲げ)	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、バブルフォー マボルトに比べて発生の可能性は小さい。
熱遮蔽材	ASME SA-240 TYPE304	約1×10 ²²	約284	小 (熱応力)	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、バブルフォー マボルトに比べて発生の可能性は小さい。

*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。

*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：≒S_y（非照射材の降伏応力） 小：<S_y（非照射材の降伏応力）】

*3：炉心槽溶接部の残留応力は大きい、(社)日本機械学会 維持規格(JSME S NA1-2012)にて、炉心槽溶接部応力は、照射誘起型応力腐食割れ発生に対し余裕があると評価されている。

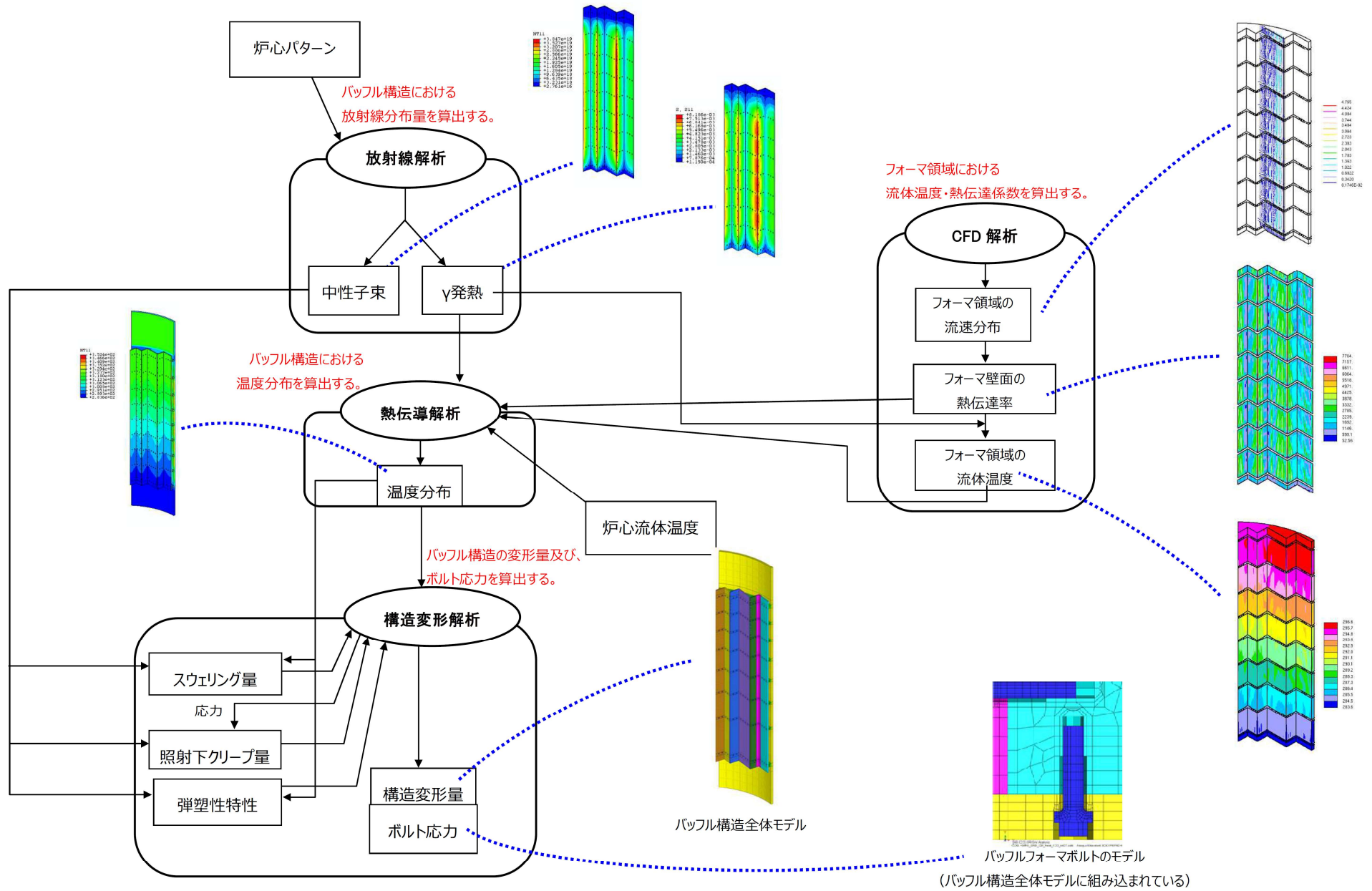


図6 応力評価手法

○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炉心の中性子放射体要素(SUS304材)から採取したデータを基に作成したdpaレート補正Foster-Flinn式(下式)を用いて評価している。本評価式は照射量、dpaレート(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。

スウェリングによる体積膨張率

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

ΔV : 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

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

dpa = 照射量 [dpa]

$\dot{d}pa$ = dpaレート [dpa/s]

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

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

- 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、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。
- 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していないが、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。

- バッフルフォーマボルト以外の部位については、中性子照射量・応力レベル・温度条件がバッフルフォーマボルトより相対的に低いレベルであるため、バッフルフォーマボルトの評価結果を基準に相対的な評価を行い、IASCCの発生の可能性は、バッフルフォーマボルトより小さいと考えている。
- バッフルフォーマボルトの健全性評価としては、原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ（IASCC）評価技術」事業で得られた最新知見を用いたボルト損傷時間の予測を行っており、この結果、1号炉の運転開始後60年時点に相当する運転時間約44.7万時間（51.0EFPY）（2号炉：約45.1万時間（51.5EFPY））までにバッフルフォーマボルトに損傷は発生しないと評価している。よって、IASCCの感受性が相対的に高いと考えられるバッフルフォーマボルトにおいてIASCCによる損傷は発生しないと評価されたことから、バッフルフォーマボルト以外においてもIASCCの発生の可能性は小さいと評価している。
- 炉心支持機能維持の観点より、比較的応力レベルの大きい炉心槽の溶接部について、維持規格に基づき、炉心槽溶接部に仮想亀裂（溶接線中心に全周亀裂）を想定した亀裂安定性評価を行った場合においても、不安定破壊は起こらないことを確認している。

<炉心槽における健全性評価>

- 中性子照射を受けることで未照射の状態に比べて破壊靱性値が低下する。
このため、維持規格に基づき、炉内構造物のうち照射量が高くかつ比較的応力の高い箇所として図7に示す炉心槽溶接部の仮想亀裂に対して破壊力学的評価（不安定破壊評価）を実施している。
- 炉心槽の評価について、評価を実施する溶接部は、下部炉心槽の上部胴-下部胴の接続部であり、燃料集合体の存在する高さ位置にあるため中性子照射量が高い部位とする。この位置にIASCCによりき裂が発生したと仮定して、き裂の安定性評価を実施する。

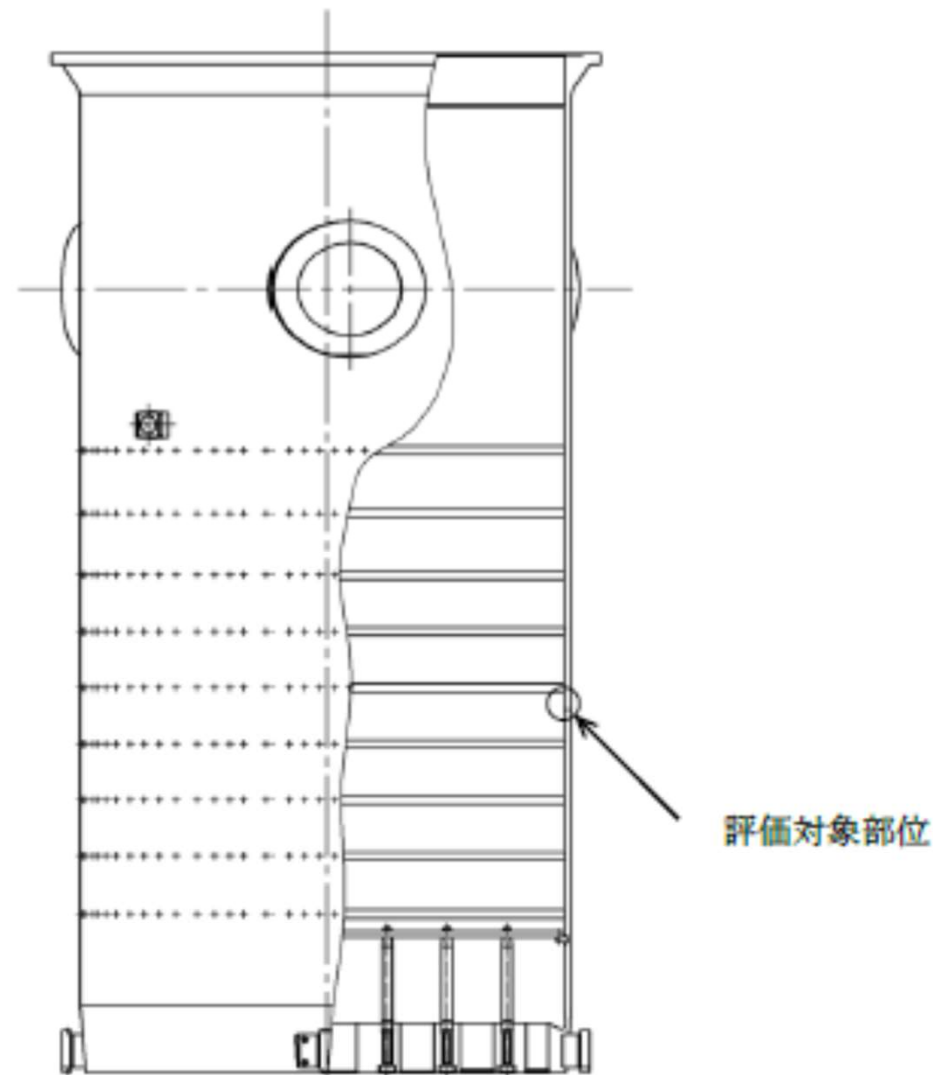


図7 評価対象の炉心槽溶接部

○評価に当たっては、維持規格（JSME S NA1-2008）添付EJG-P-3（炉心槽の欠陥評価）に基づき、残留応力分布、機械・熱応力及び地震荷重（Ss）を考慮し算出し、川内1号炉の応力拡大係数の最大値は約 $37\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、川内2号炉の最大値は約 $44\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となる。下図に参考として川内2号炉の応力拡大係数の算出結果を示す。

○また、評価に用いるステンレス鋼の破壊靱性値（ K_{IC} ）は、（財）発電設備技術検査協会の「プラント長寿命化技術開発」で得られた照射ステンレス鋼の破壊靱性値 J_{IC} 試験結果より求めた破壊靱性値 $K_{IC}=51\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ とする。

○以上より、評価にて得られた応力拡大係数の最大値（川内1号炉：約 $37\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、川内2号炉：約 $44\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ）は、破壊靱性値 $K_{IC}=51\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を下回っており、不安定破壊が発生することはないと判断できる。

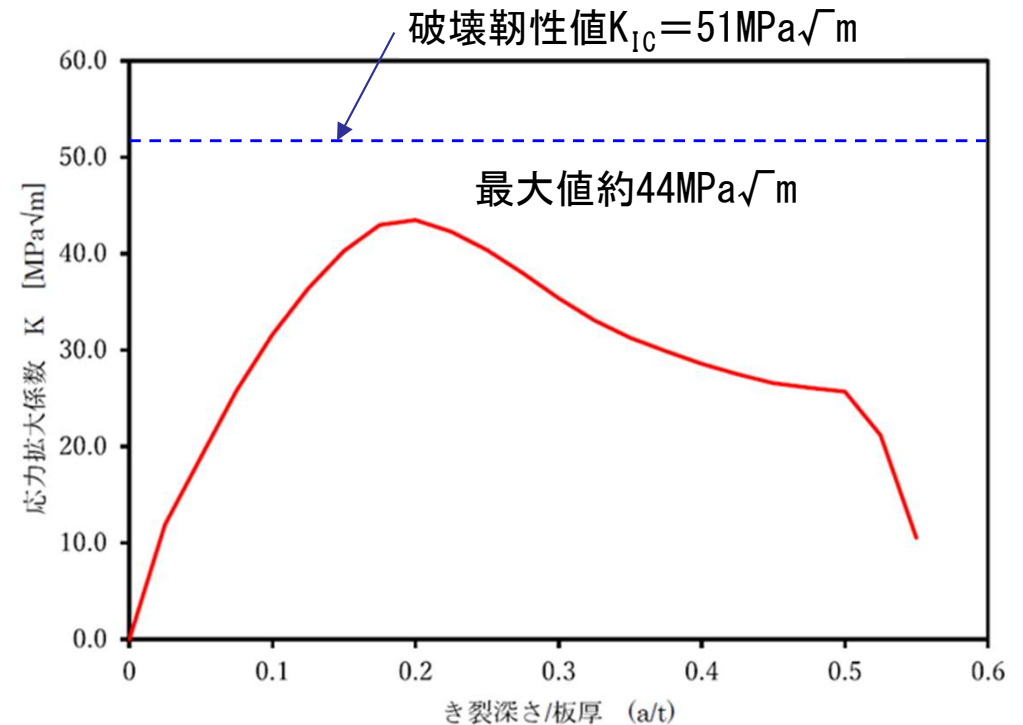


図8 応力拡大係数の算出結果（川内2号炉の例）

現状保全の内容

（１） 供用期間中検査計画および点検実績

炉内構造物の現状保全としては、維持規格に示す下記の試験方法等に従い、供用期間中検査として目視検査（VT-3）を実施しており、試験対象部位の異常（ボルト等の脱落、過大な変形等）がないことを確認している。なお、これまで異常が確認されたことはない。点検範囲の概略図を次頁以降に示す。

項目番号※ ¹ 試験カテゴリ	試験部位	試験対象 (IASCC想定部位)	試験方法	頻度
G1.10 G-P-1	容器内部	炉心槽 炉心バップル 下部炉心板	VT-3※ ²	約3年間毎
G1.40 G-P-1	内部取付け物	炉心バップル 熱遮蔽材	VT-3※ ²	1回/7年
G1.50 G-P-2	炉心支持構造物	上部炉心板	VT-3※ ²	1回/7年
		炉心槽 下部炉心板		

※1：維持規格2012年版、2013年追補、2014年追補の番号を示す。

※2：水中テレビカメラによる遠隔目視試験

可視範囲

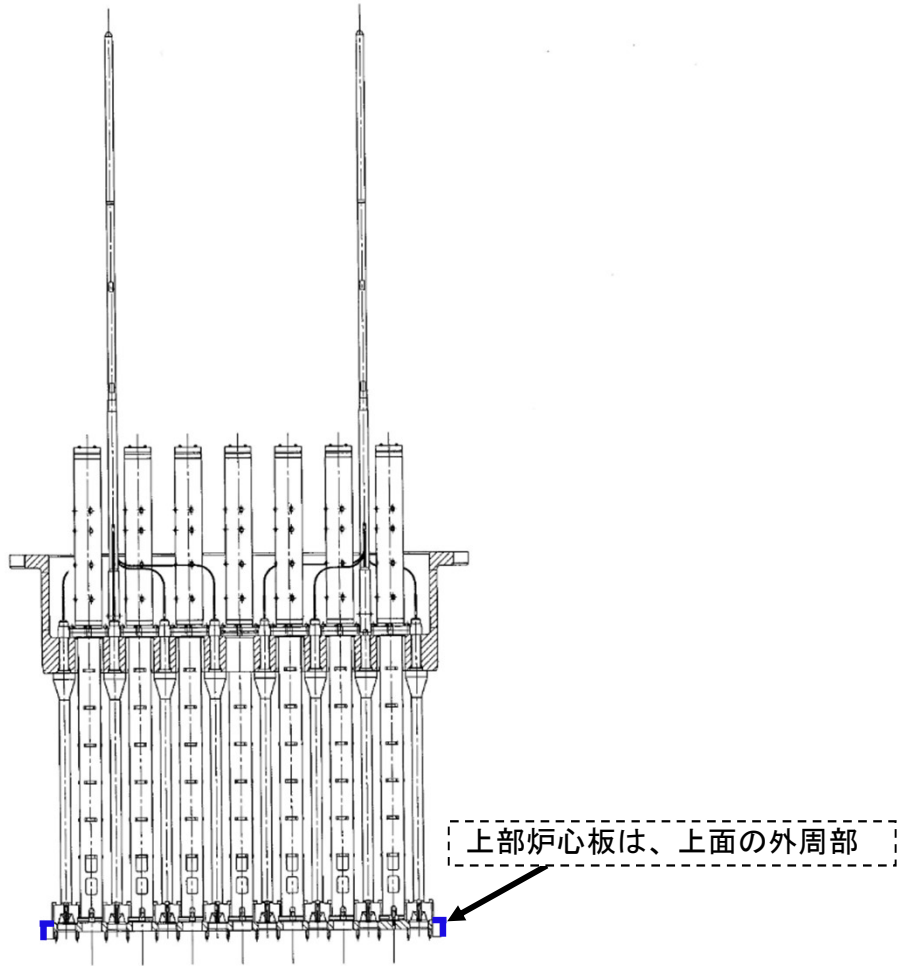


図9 炉内構造物可視範囲概略図
(上部炉内構造物構造図)

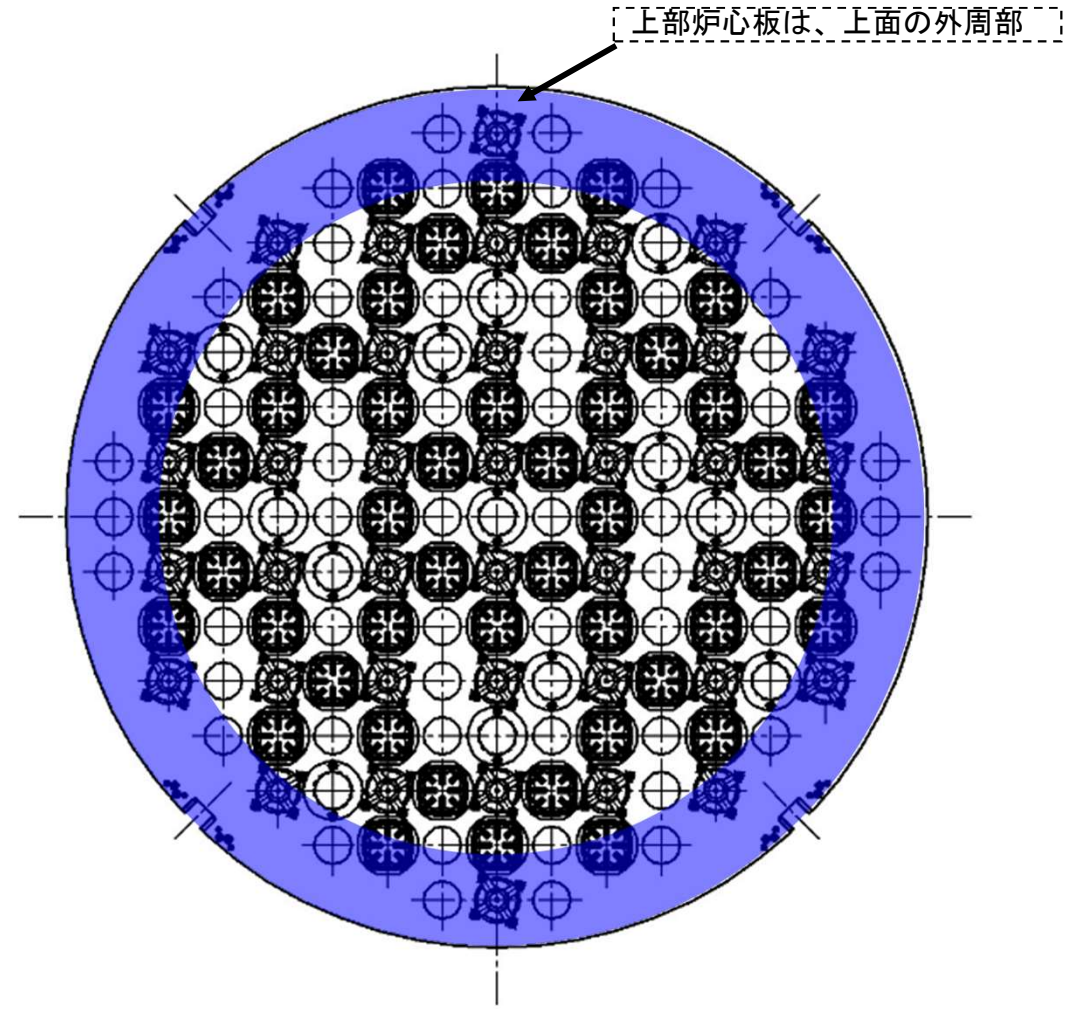


図10 炉内構造物可視範囲概略図
(上部炉心板組立図)

可視範囲

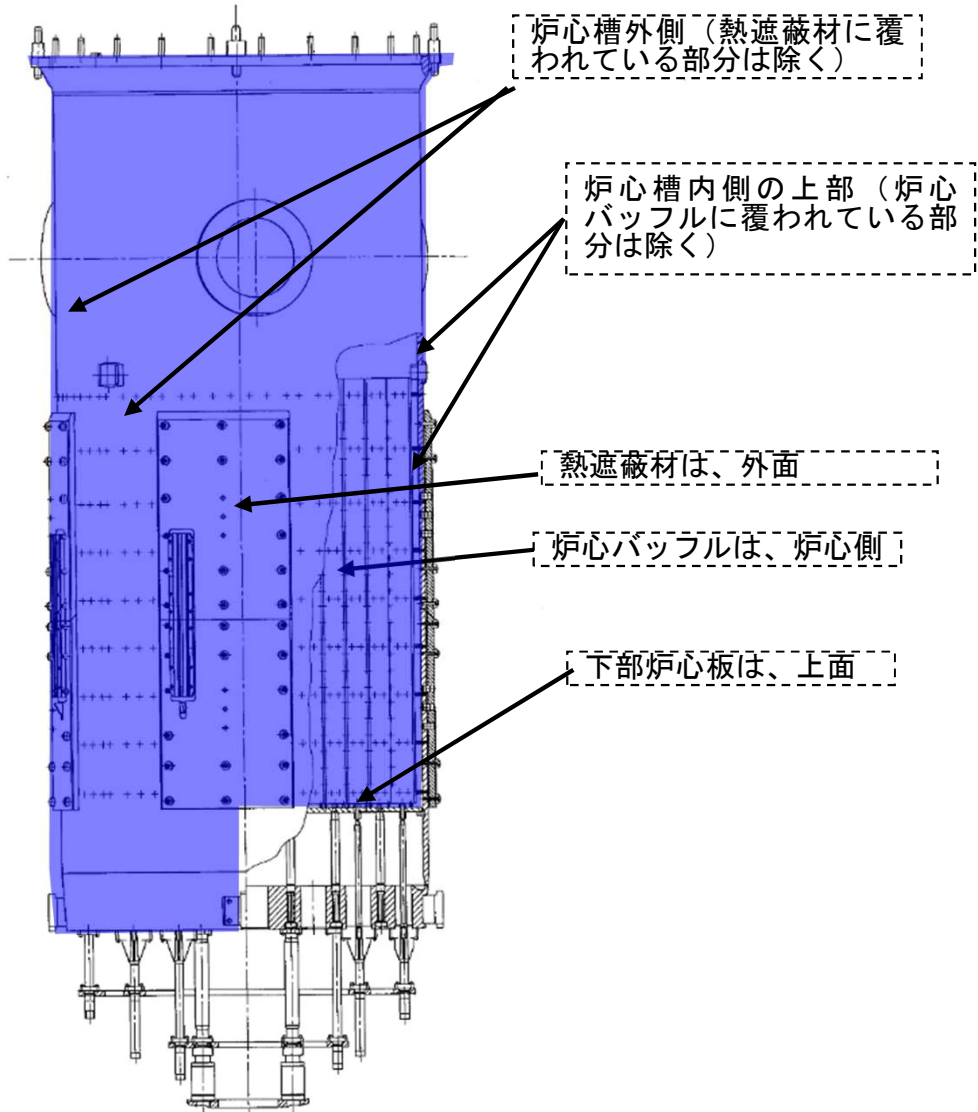


図11 炉内構造物可視範囲概略図
(下部炉内構造物構造図)

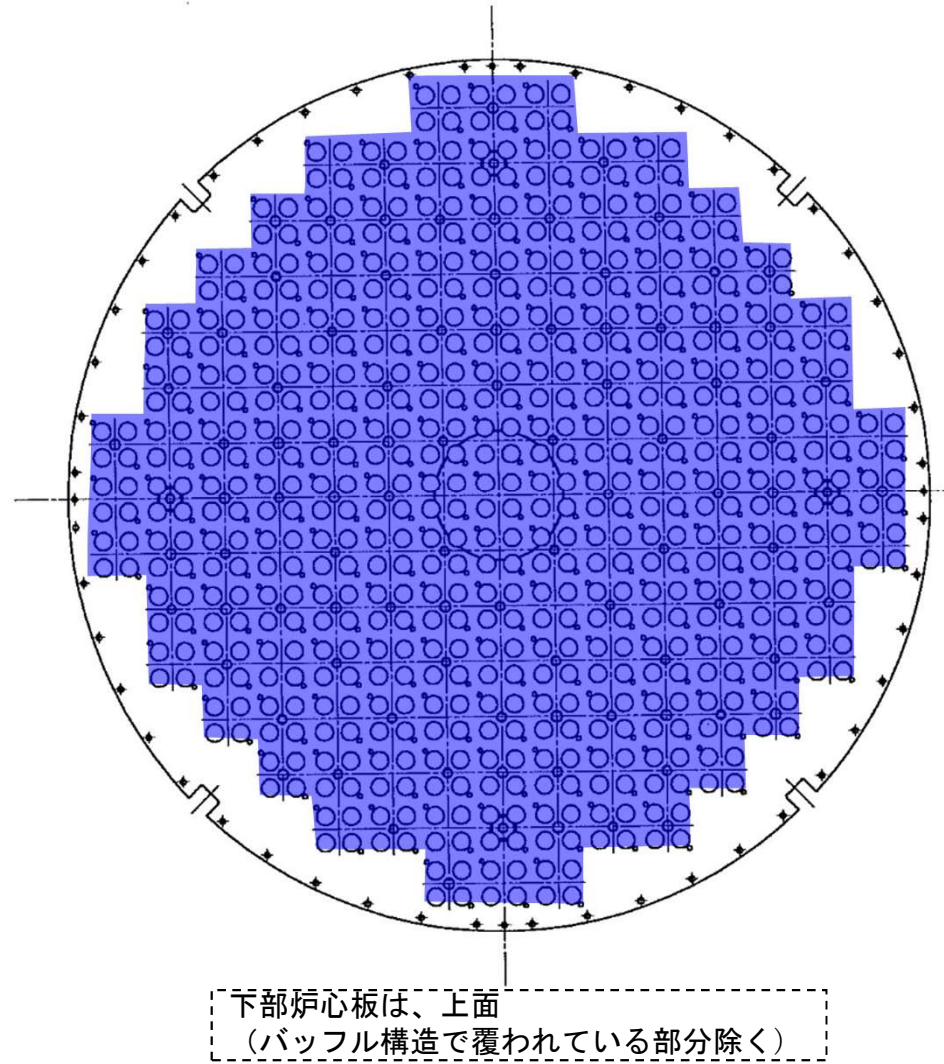


図12 炉内構造物可視範囲概略図
(下部炉心板組立図)

可視範囲

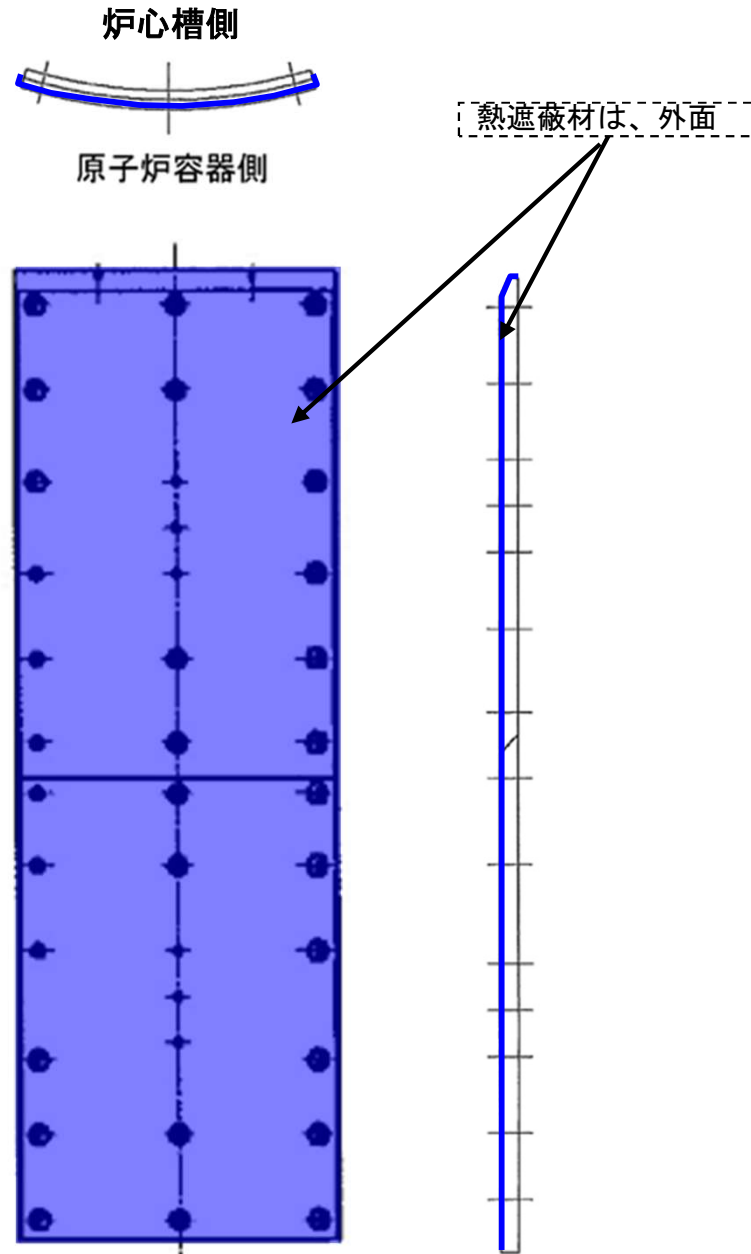


図13 炉内構造物可視範囲概略図
(熱遮蔽材組立図)

（2）バッフルフォーマボルトの保全強化内容

海外で IASCCによる損傷事例が複数報告されていることを踏まえ、当社では維持規格に基づく点検に加え、健全性確認内容の強化を図っている。

具体的には、従来、下部炉内構造物の中心に設置したカメラで点検していたものを、カメラを点検対象のバッフルフォーマボルトの正面に移動させることでより詳細に目視点検するように対応。

川内では、2号機第25回定期検査より実施しており、1号機についても、今後、実施予定。

確認内容	
従来	追加内容
○正面からズームし、回転させながら確認。	○全数のボルト頭部に異常がないか、回り止めピンを確認。 ○バッフル板同士に有意な隙間、上端・下端に有意なずれがないかを確認。

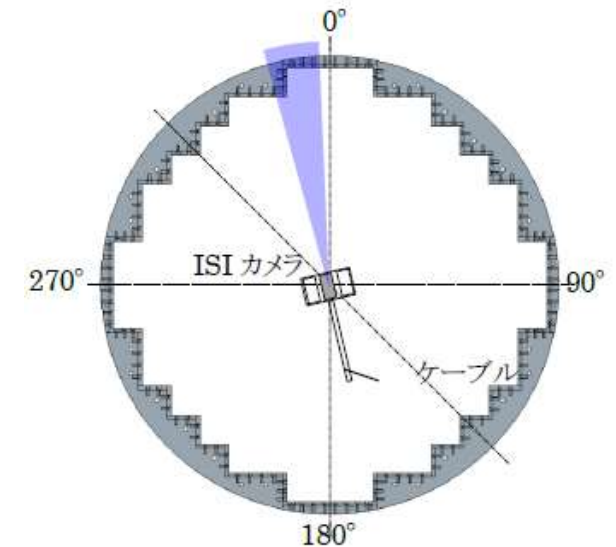


図14 従来のカメラ位置

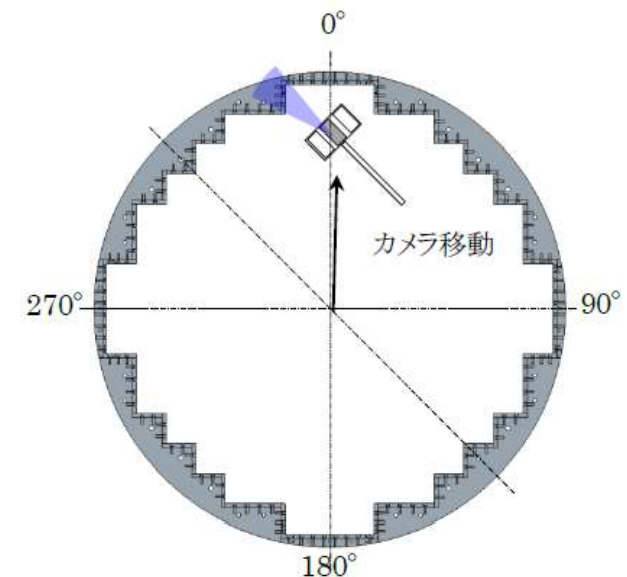


図15 強化後のカメラ位置

（3）応力腐食割れ発生の抑制

- 【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。
- 炉内構造物に使用している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が発生しにくいことが事例規格で示されている。
- 一方、中性子照射量が高い部位については、「材料」が変化することでIASCCが生じる可能性があると考えられている。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、川内1、2号炉では以下の通り、応力および温度低減に配慮した設計としている。
 - ・ 耐力に対する発生応力の比を低減するため、機械的強度に優れるSUS316CWを採用。
 - ・ バッフルフォーマボルトについて、ボルト首下部をパラボリック形状とすることで応力集中を低減。
 - ・ 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。

参考資料（現状保全の補足）

- 1次冷却材中の水質については、以下のとおり溶存酸素濃度を低く管理するなど、炉内構造物に使用しているオーステナイト系ステンレス鋼においてSCCが発生しにくい環境に管理している。

項目	管理値 〔 上段：基準値 下段：管理目標値 〕	測定頻度	測定結果 (1号)	測定結果 (2号)
pH (at 25°C)	4~11	日1回	6.9	6.5
	4.2~10.5			
電気伝導率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$ at 25°C)	1~40	日1回	25.8	25.7
	1~40			
塩化物イオン (ppm)	0.15以下	週1回	0.05未満	0.05未満
	0.05以下			
溶存酸素 (ppm)	0.10以下	週1回	0.005未満	0.005未満
	0.005以下			
溶存水素 ($\text{cm}^3\text{—STP}/\text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$)	15~50	週1回	29.7	32.8
	25~35			

基準値 : 発電所設備に影響を与える値として、保安規定の運転上の留意事項「第18条」に定める値であり、これを満足していないと判断した場合は、必要な措置を講じる値をいう。

管理目標値 : 発電所が正常な状態にあるときに達成可能な値であり、化学管理の努力目標を示す値をいう。

試料採取日 : 2022年9月12日~9月15日 (特異なデータでないことを確認している。)

参考資料（制御棒クラスタについて）

○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。制御棒クラスタの被覆管の中性子照射量等について以下に示す。

- ・被覆管の材料：SUS304相当
- ・供用期間中の最大の中性子照射量： $5 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.625 \text{eV}$)
- ・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 $5 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ 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。

表6 川内1号炉

時期	体数（体）
第6回定期検査時（1991年度）	14
第7回定期検査時（1992年度）	12
第8回定期検査時（1993年度）	12
第9回定期検査時（1995年度）	10
第17回定期検査時（2005年度）	8
第18回定期検査時（2007年度）	8
第19回定期検査時（2008年度）	8
第20回定期検査時（2009年度～2010年度）	8
第21回定期検査時（2011年度～2015年度）	8
第22回定期検査時（2016年度）	8
第25回定期検査時（2019年度～2020年度）	1

表7 川内2号炉

時期	体数（体）
第5回定期検査時（1991年度）	10
第6回定期検査時（1992年度）	10
第7回定期検査時（1994年度）	10
第8回定期検査時（1995年度）	10
第9回定期検査時（1996年度）	8
第16回定期検査時（2006年度）	8
第17回定期検査時（2007年度）	8
第18回定期検査時（2008年度）	8
第19回定期検査時（2010年度）	8
第20回定期検査時（2011年度～2015年度）	8
第21回定期検査時（2016年度）	8