

高浜発電所 1, 2号機
炉内構造物取替計画に係る
事前了解願い等について

2024年 6月 28日

高浜1,2号機 炉内構造物取替の経緯

○海外でのバッフルフォーマボルトの損傷事例

1988年にフランスのブジェー発電所2号機においてバッフルフォーマボルト損傷事例が確認され、現在に至るまで海外の複数のプラントで照射誘起型応力腐食割れ※による損傷事例が発生

当社では1990年～1997年の間で各プラントのバッフルフォーマボルトの超音波探傷検査を実施し、損傷がないことを確認

（高浜1号機：第13回（1991～1992年度）、第17回（1997年度）
高浜2号機：第11回（1990年度）、第15回（1995年度））

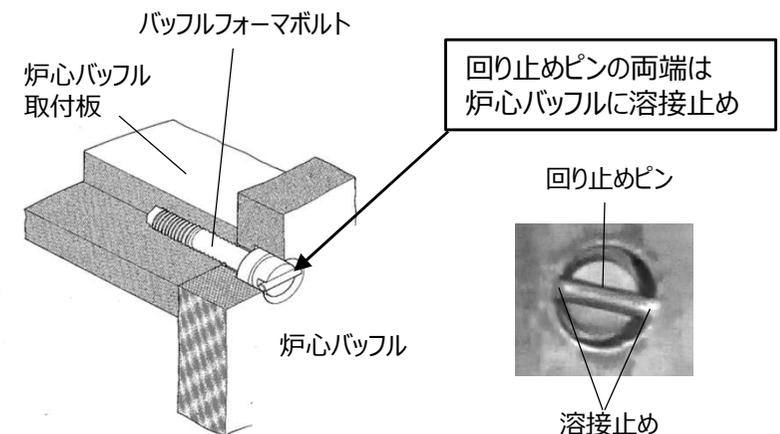
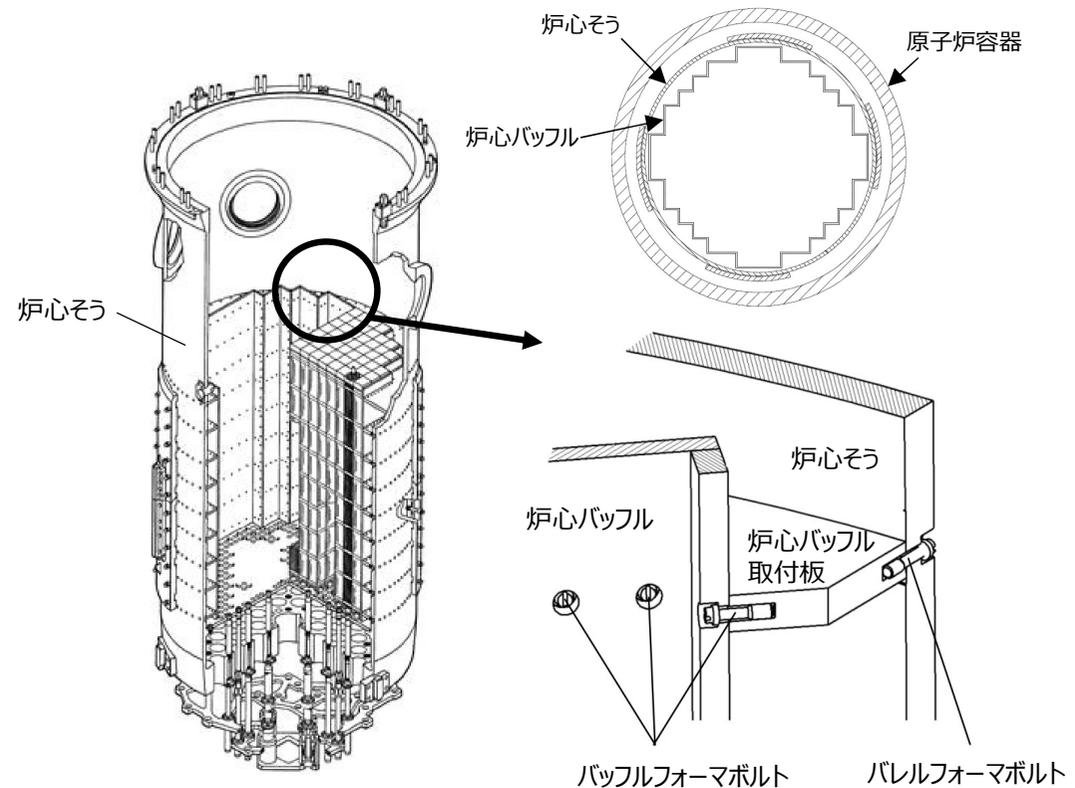
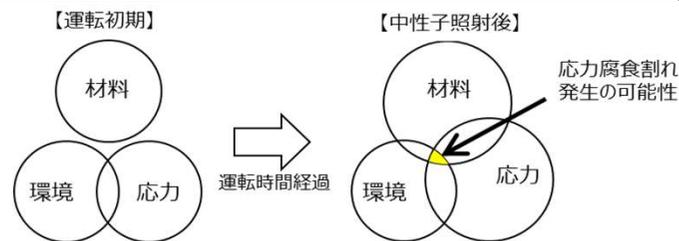
その後、定期的に水中テレビカメラによる可視範囲の目視検査を実施するとともに、県原子力安全専門委員会からの提言を踏まえ、2019年以降、定期検査毎に全ボルトの回り止めピンの脱落等がないことをカメラで確認

○今後の対応

海外で発生したバッフルフォーマボルトの照射誘起型応力腐食割れ事象に鑑み、長期的な信頼性を確保するという観点から、予防保全対策として炉内構造物一式を取り替える。

※照射誘起型応力腐食割れ（IASCC）

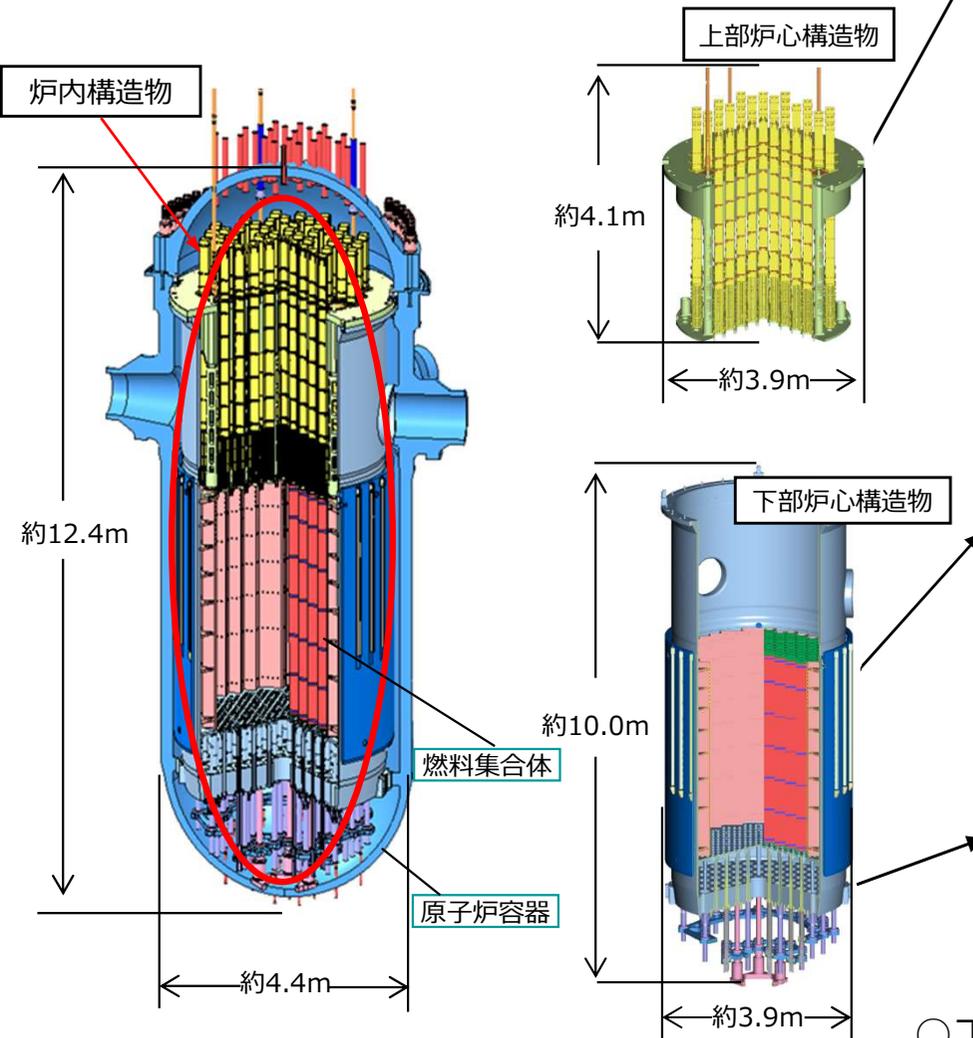
応力腐食割れは、材料、環境及び応力の3つの要因が重なると発生の可能性が生じるとされており、バッフルフォーマボルトは運転に伴って累積の中性子照射量が多くなることで材料が経年劣化し、応力腐食割れが発生する可能性がある。



高浜1,2号機 炉内構造物取替工事

○燃料集合体の支持や制御棒の案内等の機能を有する上部・下部炉心構造物一式を、先行機^{※1}で採用実績のある経年劣化対策を施した最新型のものに取り替え

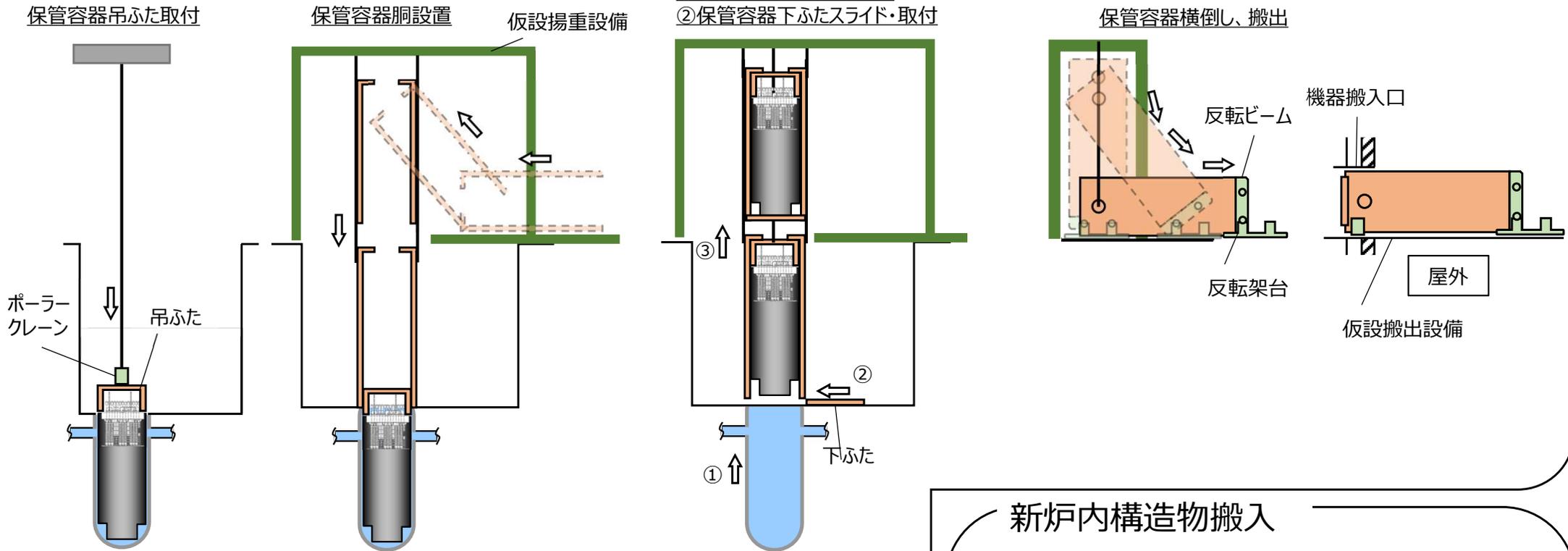
※1：伊方1,2号機、玄海1,2号機、美浜3号機



主な改良点	旧炉内構造物	新炉内構造物
(上部炉心支持板) ● 円筒胴付鋼製円板への変更により強度改善	<p>鋼製円板</p>	<p>円筒胴付鋼製円板</p>
(バブルフォームボルト) ● ボルト首下部の形状変更 (曲率半径の大きい緩やかな形状に変更) 及びボルトの柄の長尺化により応力低減 ● 炉心バブル取付板に冷却孔を設けることによりボルトの温度低減	<p>R形状</p> <p>炉心バブル取付板</p> <p>炉心バブル</p> <p>約35mm^{※2}</p>	<p>緩やかな形状</p> <p>ボルト冷却孔 (冷却材が通過)</p> <p>約97mm^{※2}</p> <p>※2：代表的な寸法を記載</p>
(ラジアルサポートキー [※]) ● キーを大型化し、耐震性を向上 ※下部炉心構造物を水平方向に拘束する	<p>下部炉心支持板</p> <p>原子炉容器</p> <p>ラジアルサポートキー</p>	<p>ラジアルサポートキーの大型化</p> <p>ボルト本数増加</p>

○工事計画：高浜1号機 2028年6月～2028年12月 (第31回定期検査)
 高浜2号機 2028年11月～2029年4月 (第31回定期検査)

旧炉内構造物搬出（1号機の例）



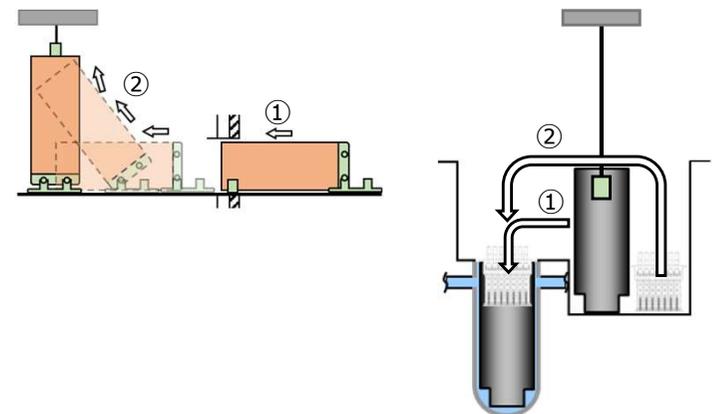
搬出工程詳細

- ・保管容器吊ふた取付：ポークレーンで保管容器吊ふたを下降させ、ボルトで吊ふたと上部・下部炉心構造物を固定する。
- ・保管容器胴設置：原子炉格納容器内に設置する仮設揚重設備を用いて保管容器胴を前工程で取り付けした吊ふたに被せるよう設置する。
- ・旧炉内構造物吊上げ、保管容器下ふたスライド・取付：①仮設揚重設備を用いて吊ふたを上昇させ、吊ふたと胴をボルトで固定する。②下ふたを遠隔操作でスライドさせ、下ふたと胴をボルトで固定する。③旧炉内構造物を収納した保管容器を上昇させる。
- ・保管容器横倒し、搬出：保管容器に反転ビームを取り付け、反転架台に載せる。仮設揚重設備で吊下ろしながら反転架台を横引きすることにより横倒しする。横倒しした保管容器は仮設搬出設備を用いて屋外に搬出する。

新炉内構造物搬入

- ①屋外から原子炉格納容器内へ
上部・下部を別々に搬入
- ②輸送容器立て起し

- キャビティフロアに吊下し後、
- ①下部炉心構造物設置
 - ②上部炉心構造物設置



高浜1,2号機 炉内構造物保管庫設置工事

【工事目的・概要】

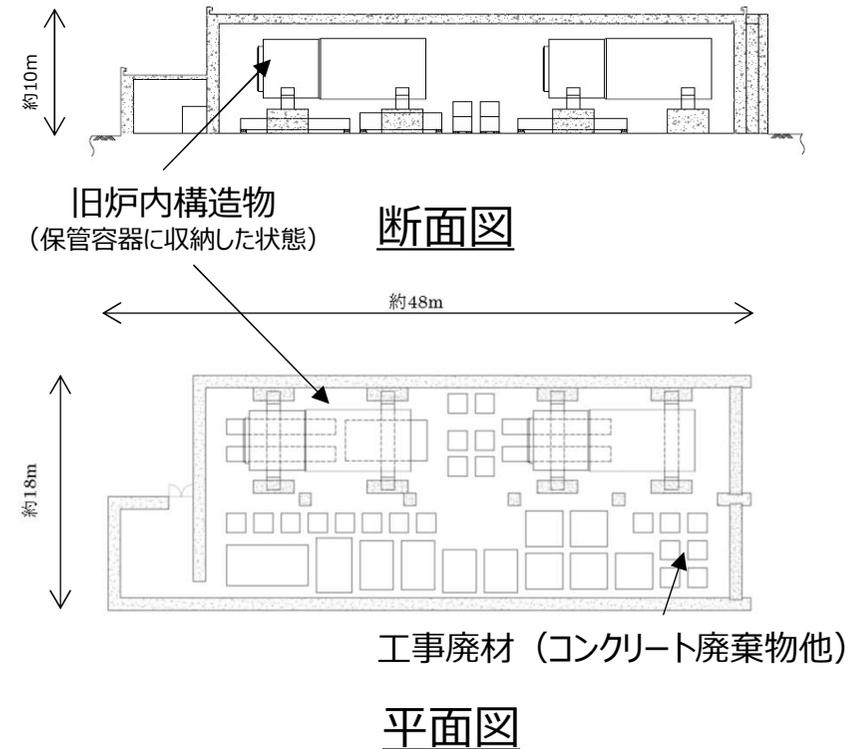
高浜1,2号機の炉内構造物の取替えに伴い、旧炉内構造物および工事廃材（コンクリート廃棄物他）を保管するための保管庫（管理区域設定）を新設する。

【保管対象物】

- ・1,2号機の旧炉内構造物
- ・工事廃材（コンクリート廃棄物他）



炉内構造物保管庫設置予定地



炉内構造物保管庫および保管状況概略図（案）

※：現在、詳細検討を進めており、数値等は変更することがある。

- 5月28日に福井県との安全協定に基づき高浜1,2号機の原子炉容器内の炉内構造物取替計画に係る事前了解願いを提出
- 今後、原子炉容器内の炉内構造物取替に係る原子炉設置変更許可申請の準備を進める
- 現在、当社は7基体制による運転を行っており、大型工事の実施を含めた保守管理を計画的に実施していくことにより、原子力発電所の一層の安全性・信頼性の向上に努めていく

発電所の状況および許認可申請の 状況について

発電所の状況（運転・定期検査の状況）

- 前回（5月17日）のご報告以降、高浜1号機が6月2日より定期検査を開始
- 現在、7基中6基が運転している

▼：実績
▽：予定

発電所	2023年度	現時点 2024年度	2025年度
美浜3号機	10/25解列▼ 第27回定期検査 1/20並列		3月 5月 第28回定期検査
	79.1%	93.0%	83.9%
大飯3号機	2/10解列▼ 第20回定期検査 4/7並列		6月 8月 第21回定期検査
	88.5%	96.1%	77.8%
大飯4号機	8/31解列▼ 第19回定期検査 10/27並列		12月 2月 第20回定期検査
	86.7%	79.0%	98.3%
高浜1号機	8/2並列 第27回定期検査	6/2解列▼ 第28回定期検査 8月	9月 12月 第29回定期検査
	66.2%	76.1%	76.6%
高浜2号機	9/20並列 第27回定期検査		11月 2月 第28回定期検査 1月 第29回定期検査
	55.2%	73.8%	81.9%
高浜3号機	9/18解列▼ 第26回定期検査 12/25並列		1月 未定 第27回定期検査
	76.6%	80.4%	未定
高浜4号機	12/16解列▼ 第25回定期検査 4/26並列		5月 未定 第26回定期検査
	74.5%	93.8%	16.1% ※定期検査：解列～並列 ※下段：設備利用率

高経年化技術評価に係る現行制度、新制度に基づく申請の状況

- 大飯3, 4号機は、30年目の高経年化技術評価について、それぞれ2021年11月24日、2022年8月24日に現行制度による認可を得ていたが、2023年12月21日に、新制度に基づく申請を行い、2024年6月26日に認可を得た。

現行制度：①運転期間の延長認可制度、②高経年化技術評価制度から構成。運転開始30、50年時点では、②に基づき高経年化技術評価を実施。運転開始40年時点では、①および②に基づき、特別点検の結果も踏まえた高経年化技術評価を実施。

新制度：①、②を組み合わせる形で統合し、運転開始30年から10年を超えない期間ごとに長期施設管理計画を策定し、認可申請することになっており、新制度が施行される2025年6月時点で30年を超えて運転しようとする場合、施行日までに認可を得る必要がある。

- 現行制度に基づき審査が行われているプラント

	運転開始日	申請日	認可期限
高浜1号機	1974年11月14日	2023年11月 2日申請	2024年11月13日

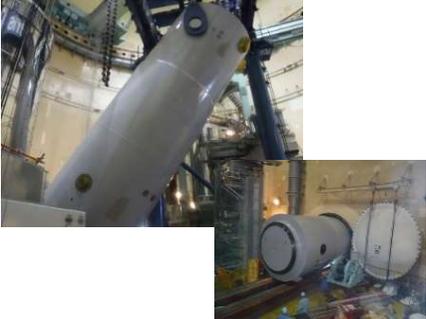
- 新制度に基づく申請予定

	運転開始日	現行制度による認可日	新制度に基づく申請予定時期
高浜2号機	1975年11月14日	2016年 6月20日	2024年 7月中旬
高浜3号機	1985年 1月17日	2024年 5月29日	2024年 8月上旬
高浜4号機	1985年 6月 5日	2024年 5月29日	2024年 8月上旬
美浜3号機	1976年12月 1日	2016年11月18日	2024年 8月下旬

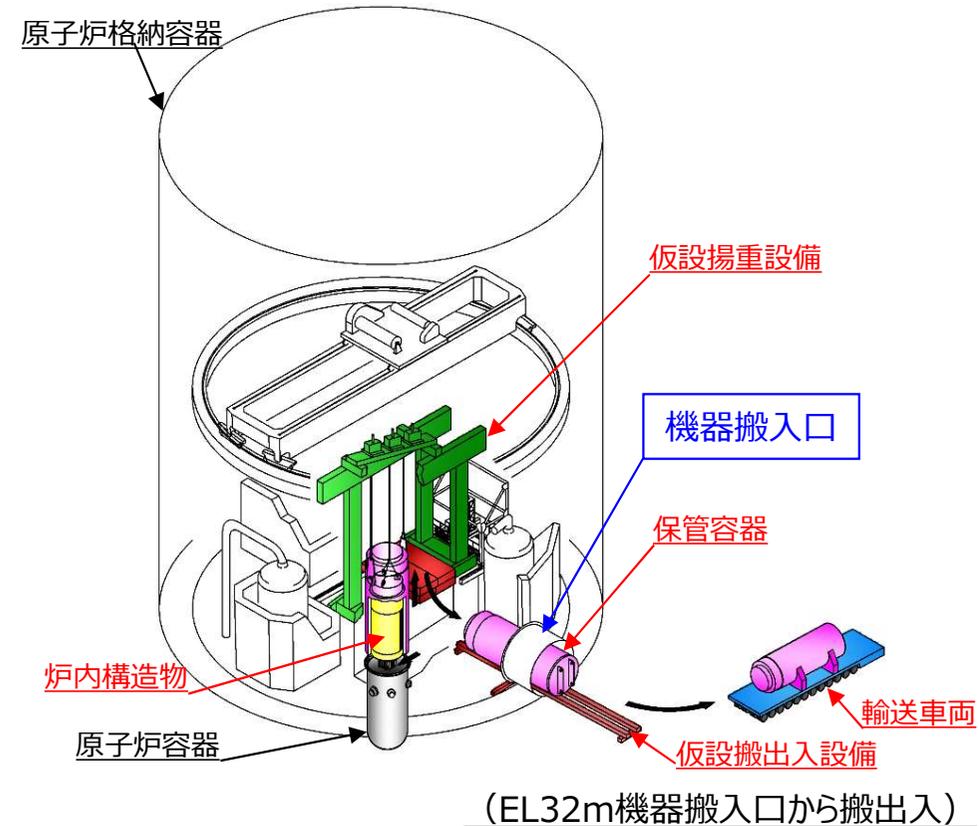
注) 高浜1号機は、現行制度認可後、速やかに新制度で申請を実施、高浜2号機は、新制度での認可後（40年目）、速やかに50年目の申請を実施

參考資料

美浜3号機 炉内構造物取替工事の状況

Step	工事内容	イメージ
1	C蒸気発生器壁撤去 (壁附随電線管等も撤去)	【旧CIをCV外へ搬出】 
2	旧炉内構造物搬出	【旧CIを保管庫へ運搬】 
3	仮設揚重設備の設置	
4	保管庫への移送及び 仮設揚重設備撤去	
5	新炉内構造物を工場から出荷	【新CIの吊り込み】 
6	新炉内構造物の搬入・据付	
7	C蒸気発生器壁復旧 (壁附随電線管等も復旧)	

美浜3号機 搬出イメージ図



【工事期間】

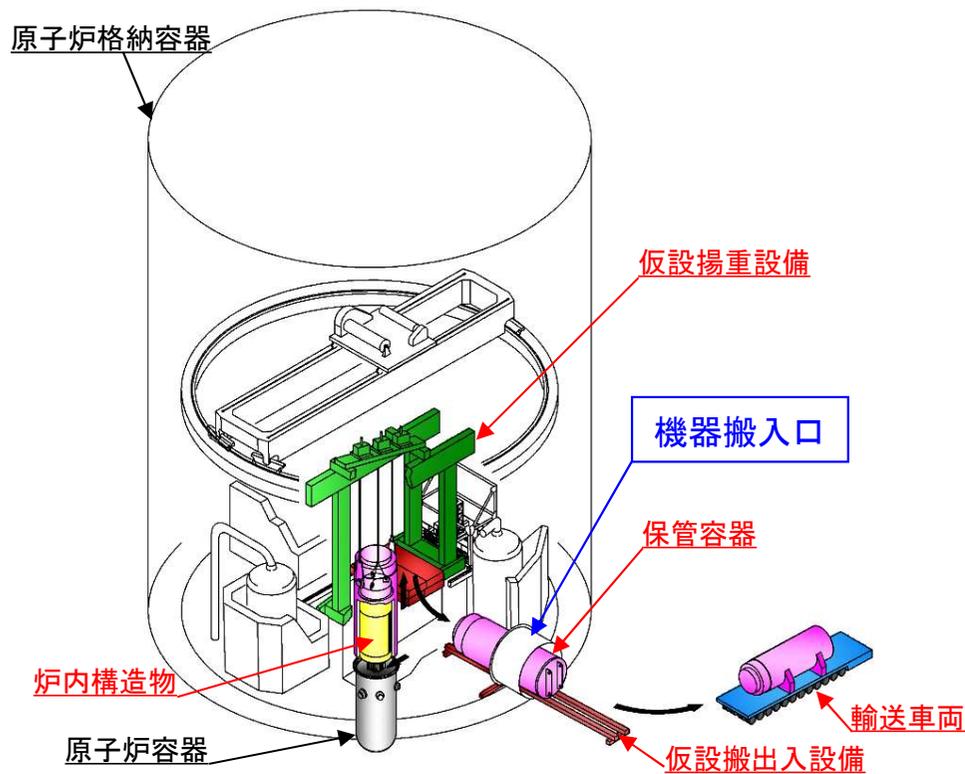
○ 2019年10月～2020年6月 (第25回定期検査)

高浜1,2号機 炉内構造物取替工事の工程

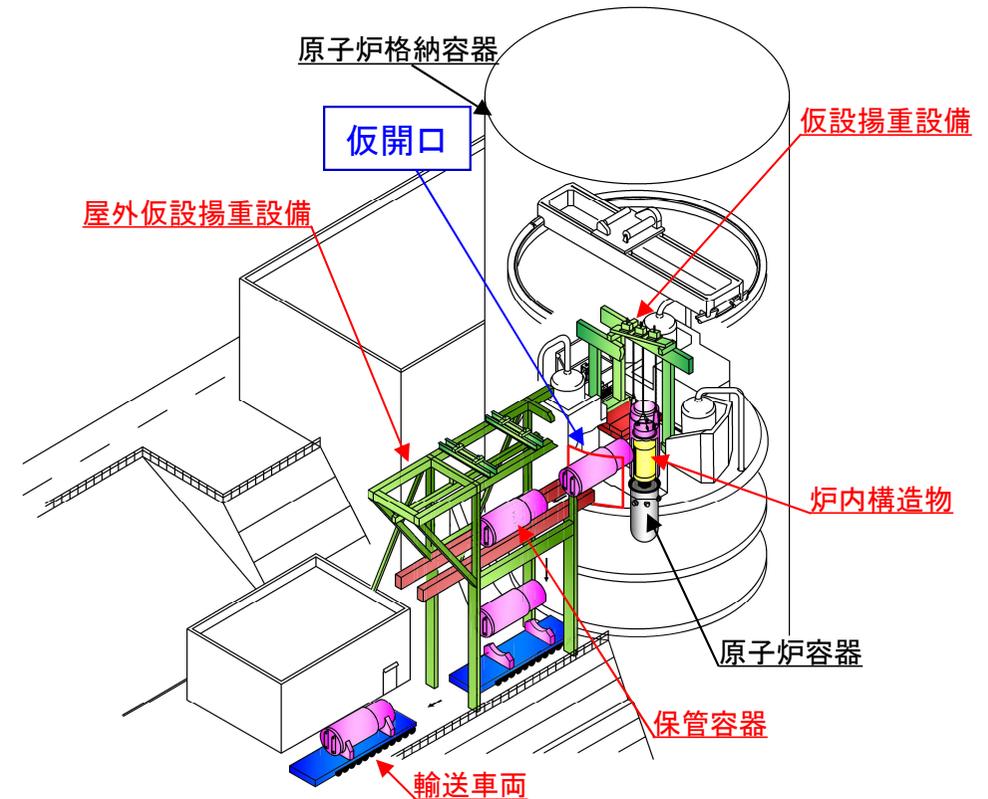
参考2

- 原子炉格納容器内に仮設の揚重設備を設置した上で、原子炉容器上部に吊り下ろした保管容器に旧炉内構造物を収めて密閉し、保管容器を横倒して、機器搬入口（2号機は仮開口）から搬出する。
- 新炉内構造物は、搬出時と同じルートで原子炉格納容器内に搬入後、既設の天井クレーン（ポーラークレーン）を用いて設置する。

高浜1号機 搬出イメージ図
(EL32m機器搬入口から搬出入)



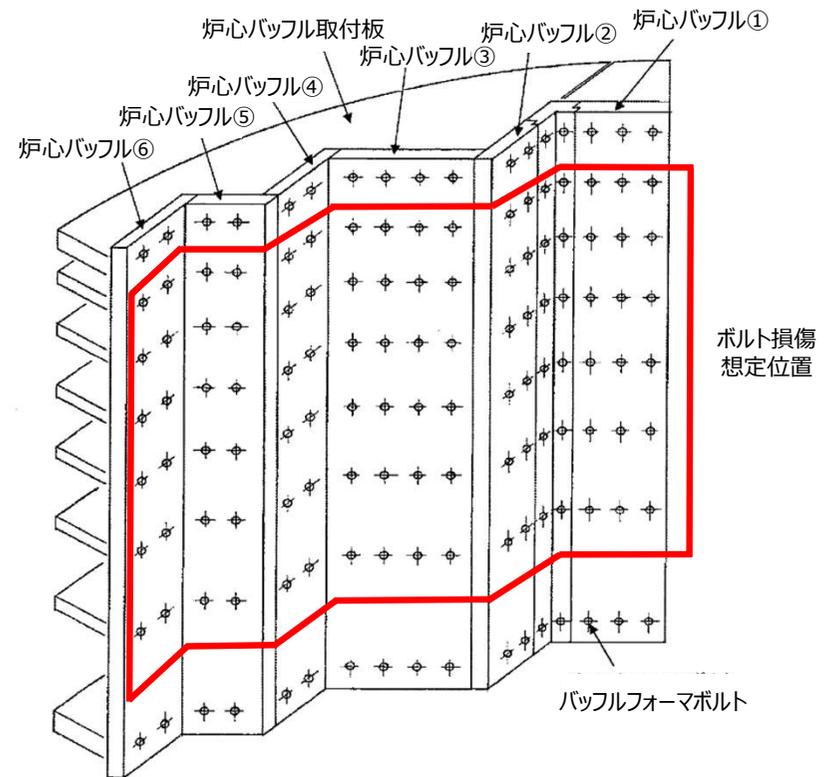
高浜2号機 搬出イメージ図
(外部遮へい壁及び原子炉格納容器に仮開口をあけて搬出入)



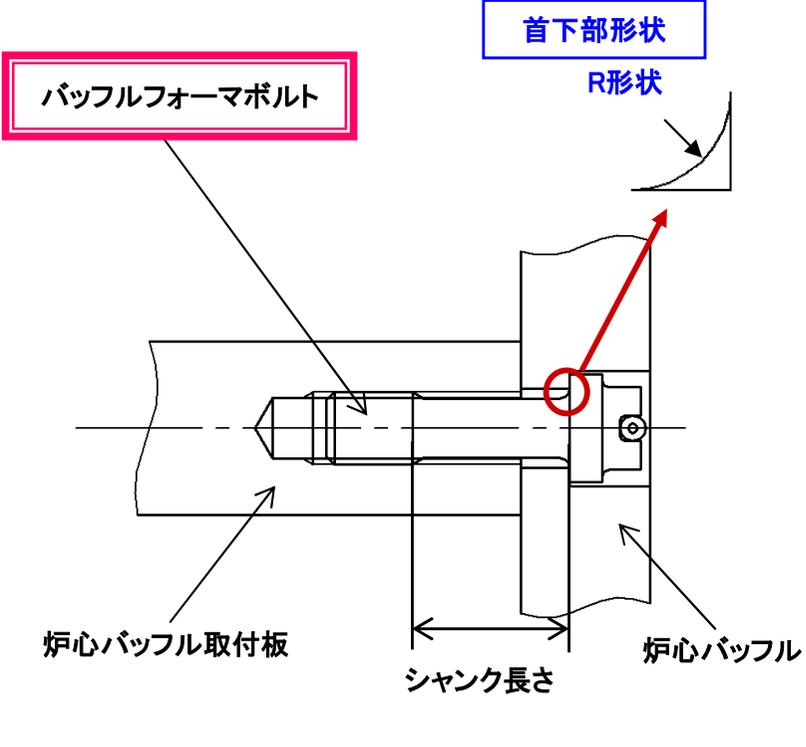
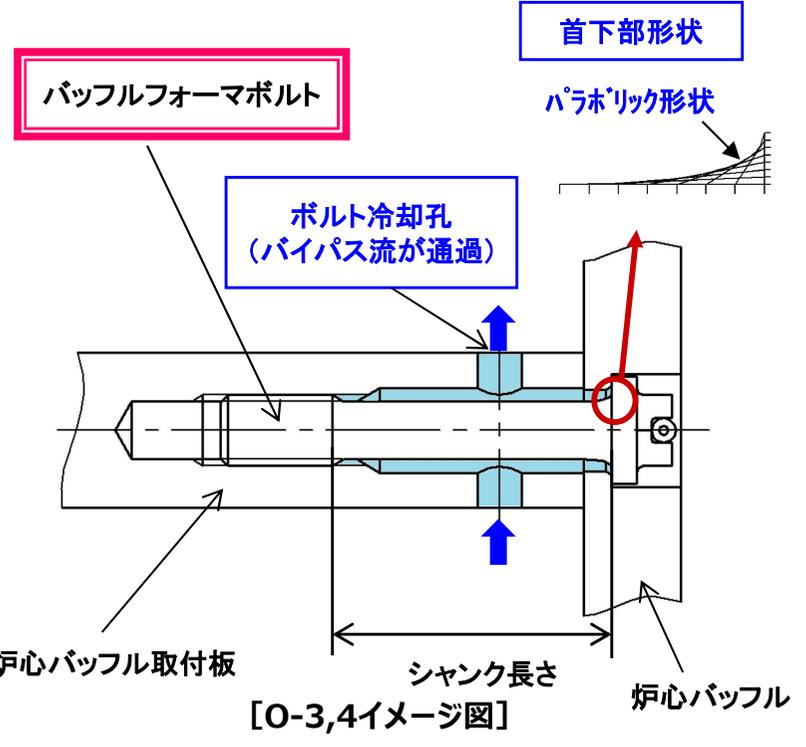
○40年目の高経年化技術評価

- バッフルフォーマボルトについては、原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術」事業で得られた最新知見を用いて評価した結果、運転開始後60年時点でのボルトの損傷本数は「日本機械学会 維持規格」に規定される管理損傷ボルト数 (全体の20%) 以下であり、安全に関わる機能を維持できる。
- 運転開始60年時点で想定される経年劣化を仮定し、耐震安全性評価を実施した結果、全8段のうち2段目～7段目のバッフルフォーマボルト (全体の3/4) が折損したと仮定して、残るバッフルフォーマボルトに生じる地震時の発生応力を算出し、許容値を上回らないことを確認した。

評価部位(バッフルフォーマボルト)と損傷想定箇所

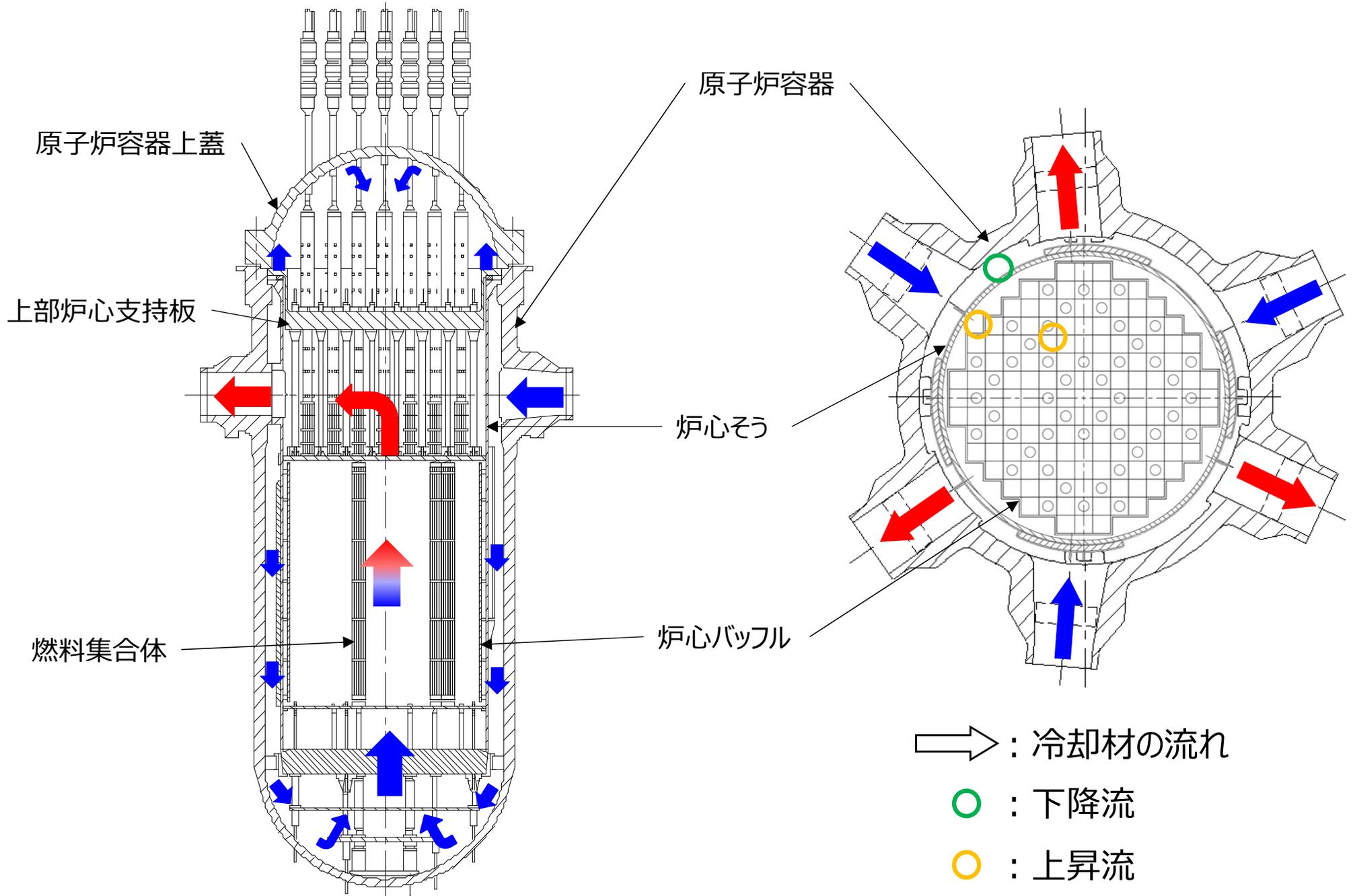


バブルフォーマボルトの比較

プラント	高浜 1, 2号機、美浜 3号機 (CIR前)	高浜 3, 4号機、大飯 3, 4号機 (標準型 3, 4ループプラント)
ボルト形状		
材質	SUS316CW	
首下部形状 曲率	R形状 R=2mm	パラボリック形状
シャंक長さ ※	35mm	T34:35mm,O34:64mm

※シャंक長さは位置により異なるため、代表的な寸法を示す。

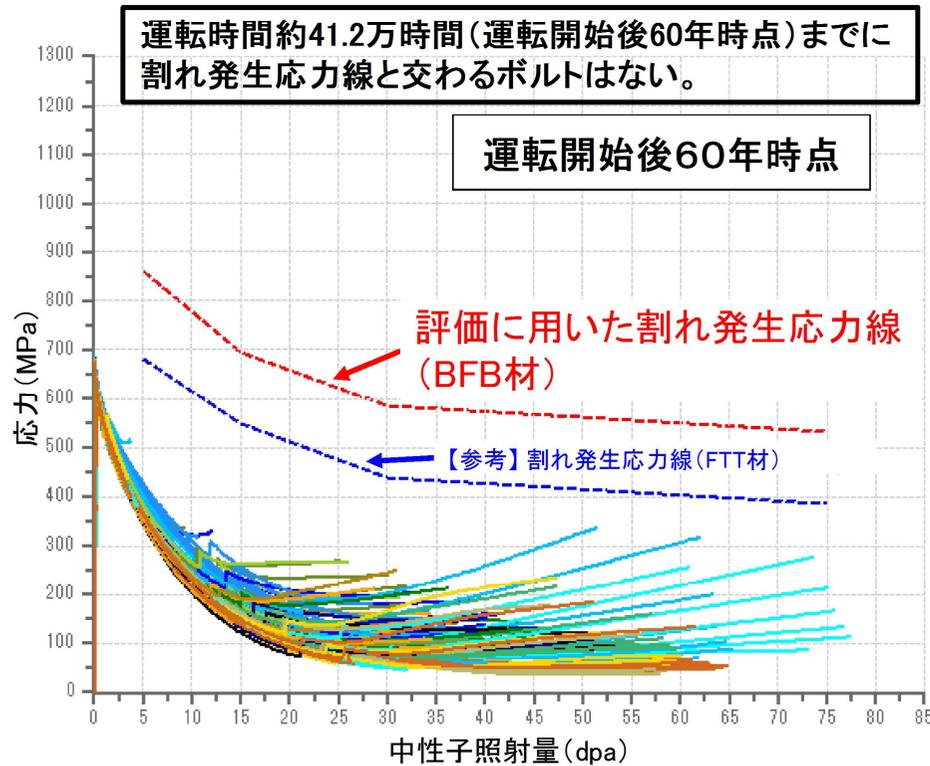
冷却材の流れについて



5. 技術評価－健全性評価(4/4)

5. 1. 3 照射誘起型応力腐食割れ(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、運転開始後60年時点(約41.2万時間(47.0EFPY)^{※1})までに**バッフルフォーマボルト(全数)^{※2}の応力履歴が割れ発生応力線^{※3}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(図3)。**

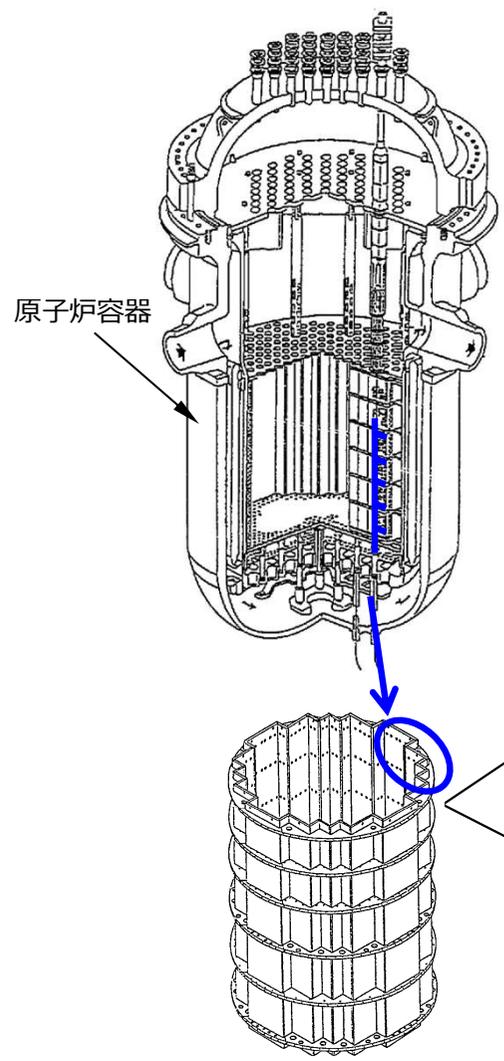


(BFB: バッフルフォーマボルトの略 FTT: フラックスシムブルチューブの略)

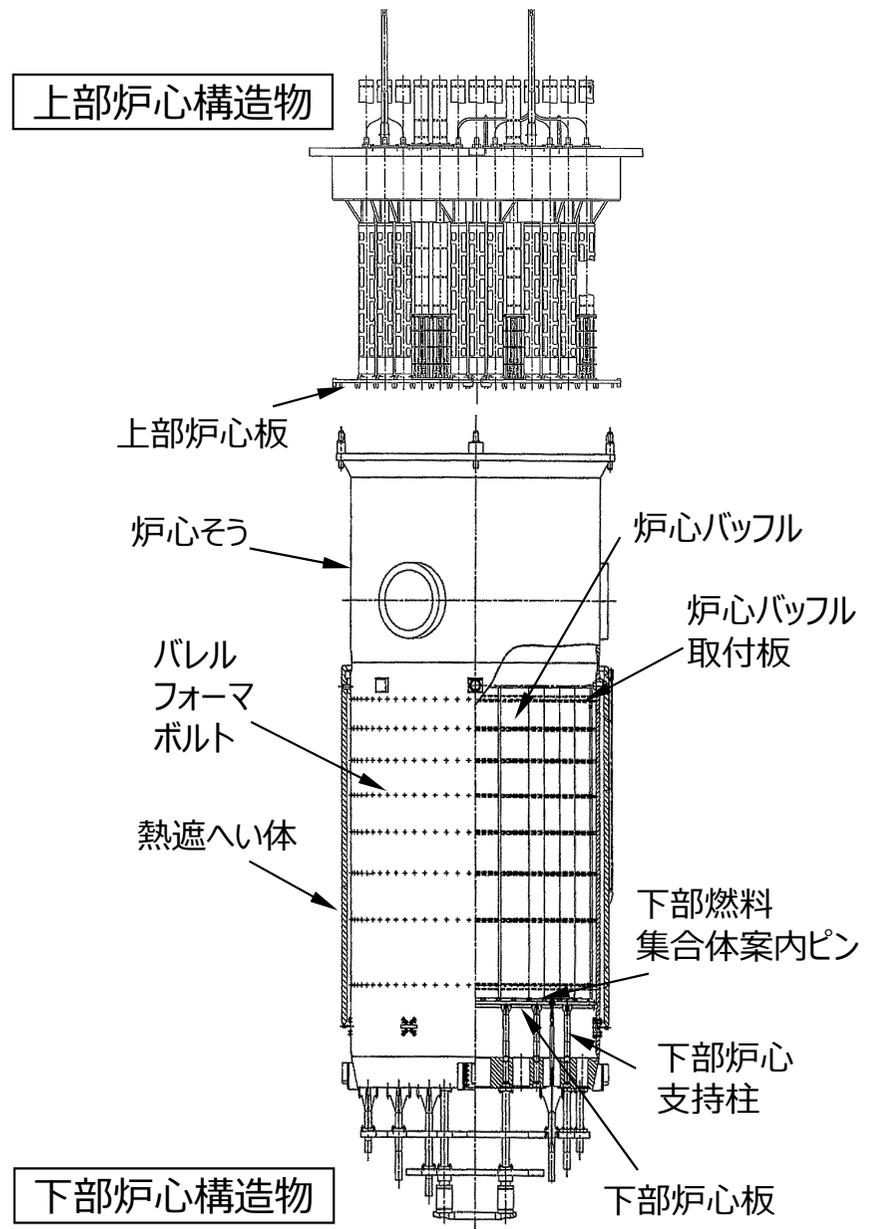
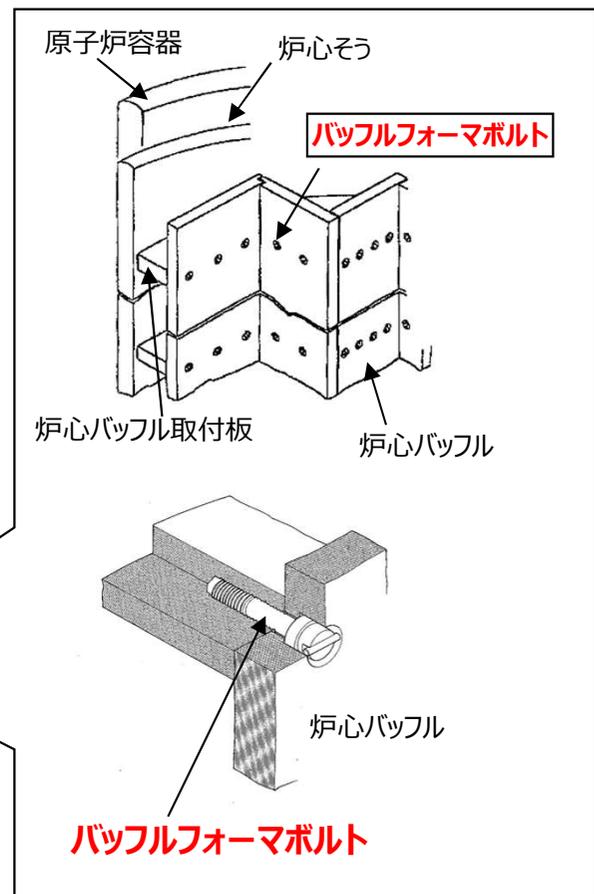
図3 バッフルフォーマボルトの応力履歴と割れ発生応力線図の重ね合わせ(応力履歴 約41.2万時間まで)

- ※1 長期停止前の2010年末までの設備利用率(3号炉:82.8%、4号炉:84.6%)に対し、今後の設備利用率を90%とする保守的な想定。
高浜3号炉と4号炉の包絡条件で60年時点のEFPYが大きい4号炉の値を用いた。(3号炉:46.9EFPY、4号炉:47.0EFPY)
また、高浜3号炉と4号炉は運転の途中段階からMOX燃料を装荷しており、MOX燃料装荷以降の中性子束は保守的に実績炉心の中性子束の1.2倍として評価した。
- ※2 炉心の対称性から1/8領域を評価領域とし、1/8領域における全ボルトの評価を実施。
- ※3 原子力安全基盤機構「平成20年度 照射誘起型応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書」のバッフルフォーマボルト材の割れ発生応力線を用いた評価。

○炉内構造物の構造

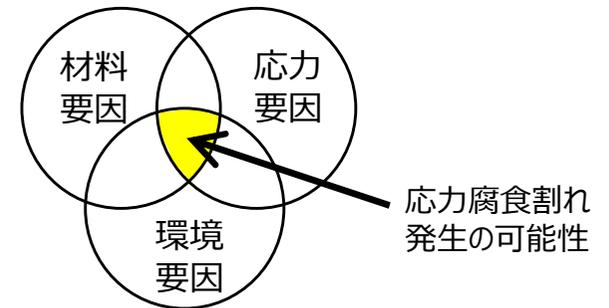


バブル構造（炉心バブル、炉心バブル取付板）



○照射誘起型応力腐食割れ（IASCC）

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、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。

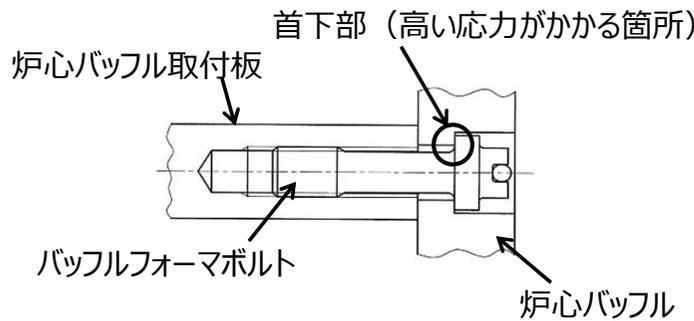


○バブルフォーマボルト

燃料集合体に1次冷却材を流すための流路を形成する炉心バブルと炉心バブル取付板を締結している。

本数：1,088本／号機
材料：SUS316CW

【バブルフォーマボルトの構造】



【バブルフォーマボルトの写真】



○当社プラントにおけるバブルフォーマボルトの取替え状況

海外における不具合事例を踏まえ、長期的信頼性確保の観点から、美浜1、2号機のバブルフォーマボルト全数について、材質等を改良したものに取替えた。

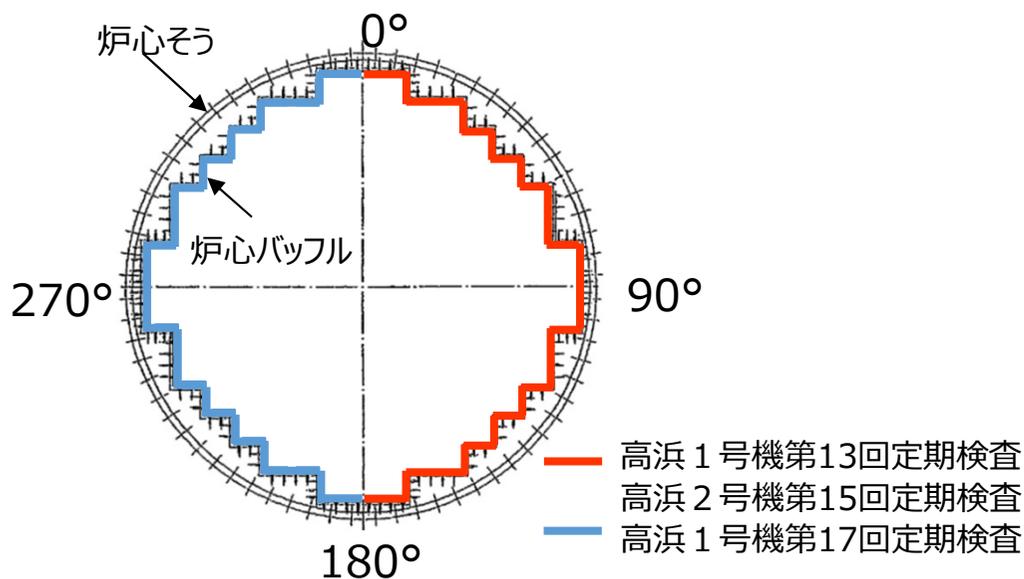
当社バブルフォーマボルト取替実績	他社 炉内構造物の取替実績
美浜1号機：2002年度 美浜2号機：2000～2001年度	伊方1号機 (2005年度)、伊方2号機(2006年度)、 玄海1号機 (2005年度)、玄海2号機 (2008年度)

○高浜1、2号機バブルフォーマボルトの健全性評価

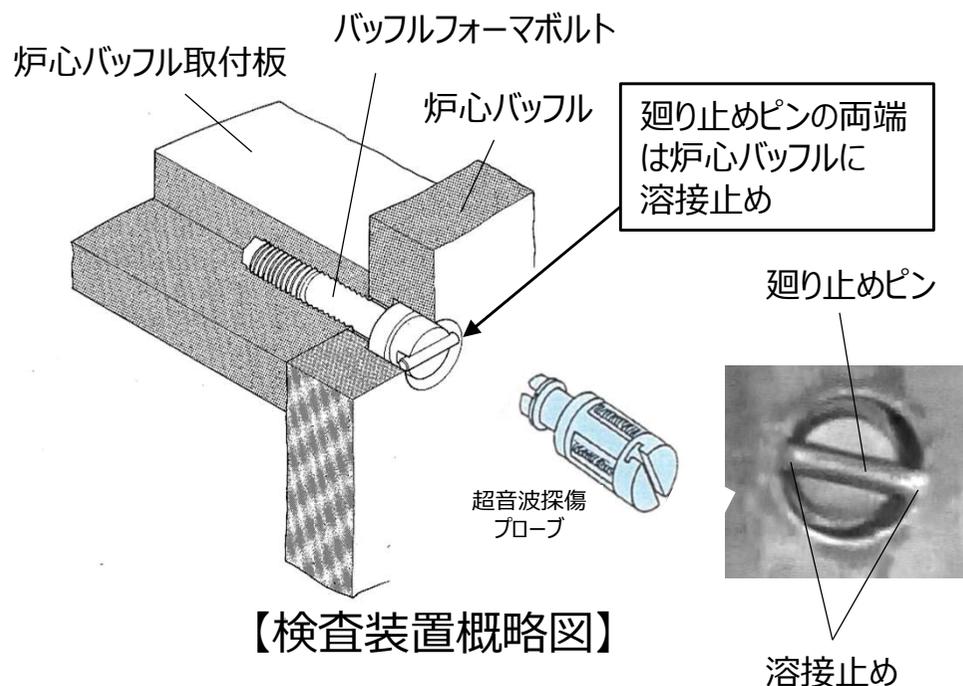
原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ（IASCC）評価技術」事業で得られた最新知見を用いて評価した結果、高浜1、2号機の運転開始後60年時点でのボルトの損傷本数は「日本機械学会 維持規格」に規定される管理損傷ボルト数（全体の20%）以下であり、安全に関わる機能を維持できることを確認。

○現状保全

- ・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、異常のないことを確認。
- ・バッフルフォーマボルトに対して、高浜1号機は第13回定期検査時(1991～1992年度)、第17回定期検査時(1997年度)に、高浜2号機は第15回定期検査時(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。



【超音波探傷検査実施範囲※】



【検査装置概略図】

※：炉心の対称性を勘案し、各定期検査でバッフルフォーマボルト全数の1/2に対して検査を実施

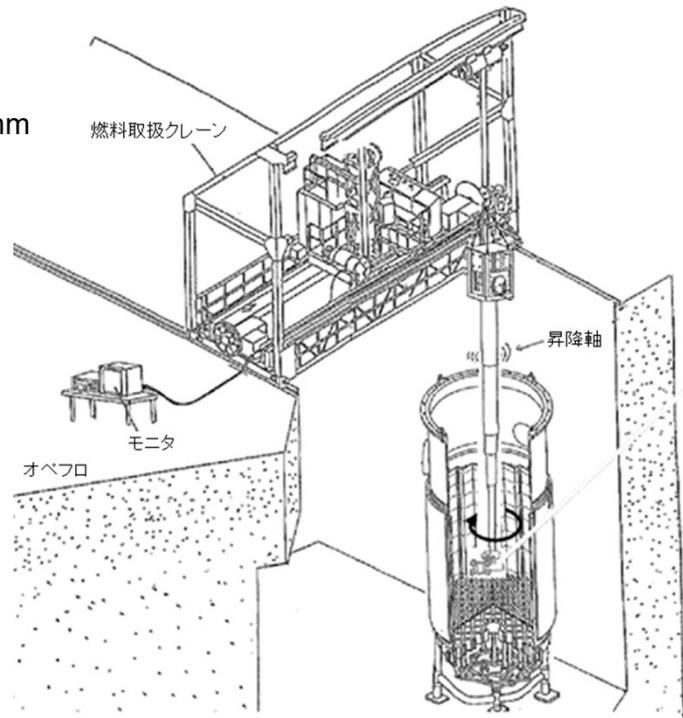
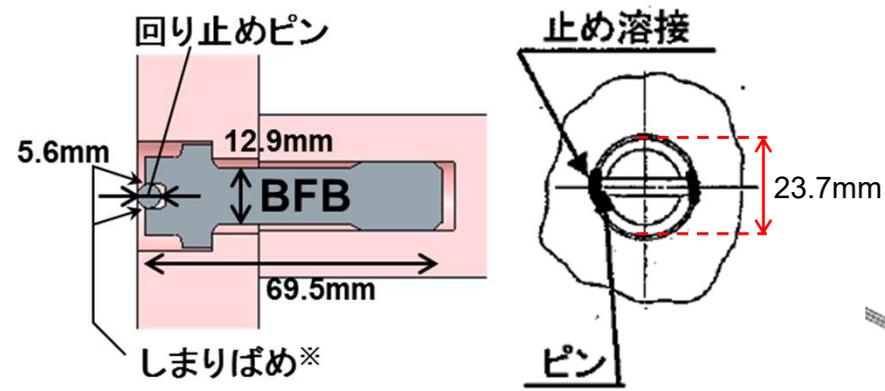
○高経年化への対応

- ・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、炉心バツフル等の過度の変形やボルト脱落など異常のないことの確認を実施していく。
- ・予防保全の観点から、今後、炉内構造物の一式取替等を計画している。

【原子力安全専門委員会の指摘（第94回：2019年3月）】
 ○次の目視点検を実施するまでの期間、本当に安全性が担保できるのかについて、データとしてまとめていただきたい。（バッフルフォーマボルトに損傷が発生していた場合、ボルトの頭部が炉内に脱落し燃料を損傷させる可能性があることから、次回定期検査までの運転期間中に脱落等が発生しないか評価を行う必要がある。）

○バッフルフォーマボルト目視点検

バッフルフォーマボルト（BFB）の頭部及び回り止めピンを水中カメラにより**全数（1088本）**点検した結果、**異常がないことを確認した。**



点検結果（例）

※炉内構造物の組立て時に、回り止めピンを取り付ける溝にその溝の幅より少し径が大きいピンを押し込んで固定する。

BFB、回り止めピン概略図

BFB頭部及び回り止めピンの至近の目視点検実績

1号機	第27回 (今停止期間)	第26回	第22回	第20回
	2020年	2009年	2004年	2001年
2号機	第27回 (今停止期間)	第25回	第22回	第21回
	2011年	2009年	2004年	2003年

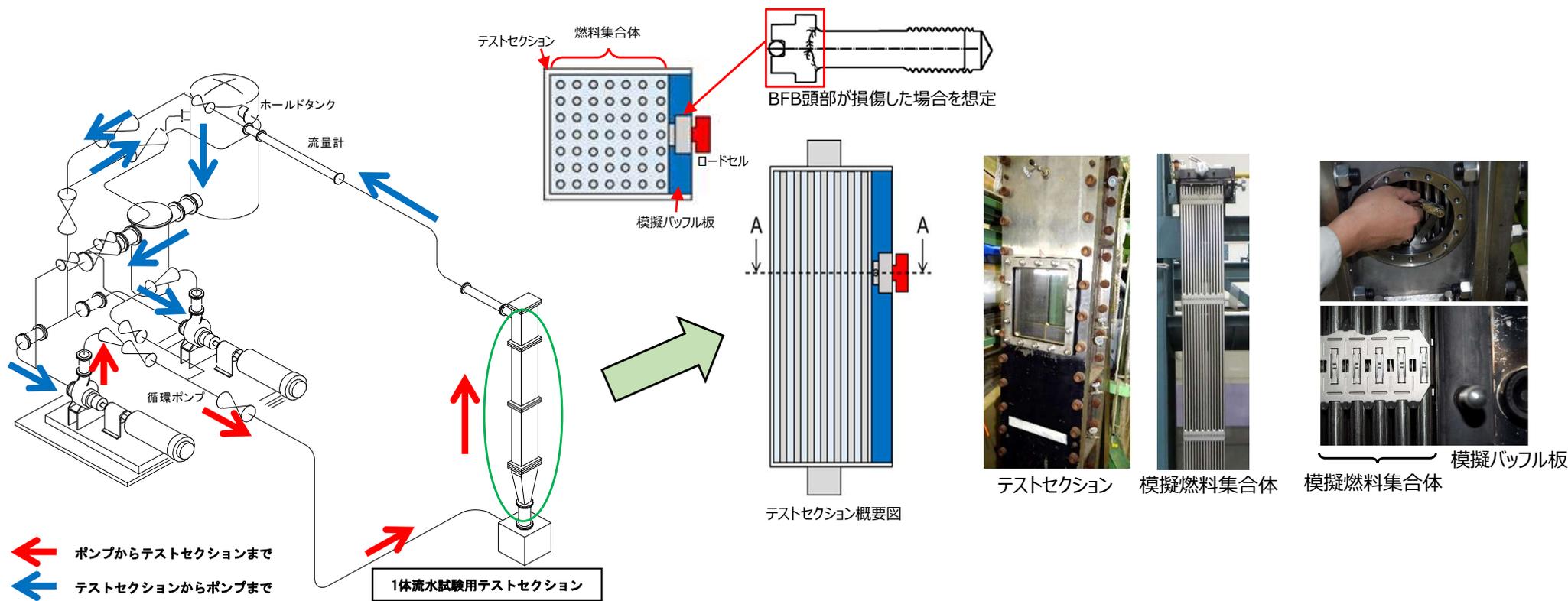
※下部炉内構造物は原子炉容器に設置したまま、BFBの点検を実施した。

BFB目視点検概略図

高浜1,2号機バッフルフォーマボルト回り止めピンの健全性評価結果

○回り止めピン健全性評価

モックアップ試験により測定した流体励振力を用いて、回り止めピンの保持力の評価及び溶接部の疲労評価を行った結果、**BFBが破断しても回り止めピンが健全であればBFBが異物になる可能性が低いことを確認した。**



■ 回り止めピンによる保持力の評価

- BFB頭部に作用する流体励振力をモックアップ試験により測定した。
- ボルト頭部と回り止めピンのしまりばめを模擬して摩擦力（保持力）を解析により求めた。

⇒流体励振力に対して保持力は十分大きく、流体励振力によりボルト頭部と回り止めピンの間に滑り・摩耗が生じる可能性は低いと考えられる。

■ 回り止めピン溶接部の疲労評価

- モックアップ試験で得られた流体励振力を用いて、回り止めピン溶接部に生じる応力を解析により求めた。
- ⇒溶接部の応力は疲労限を下回るため、疲労割れは生じないと考えられる。