

日本原子力学会水化学部会 2024年奨励賞 受賞論文紹介

浜岡 5 号機海水混入事象による腐食影響とその対応について

Response to the Seawater Contamination Event at Hamaoka Unit 5 and the Effects of Corrosion by Seawater

論文 : Nuclear Technology (12 Aug 2024)

DOI : 10.1080/00295450.2024.2368960

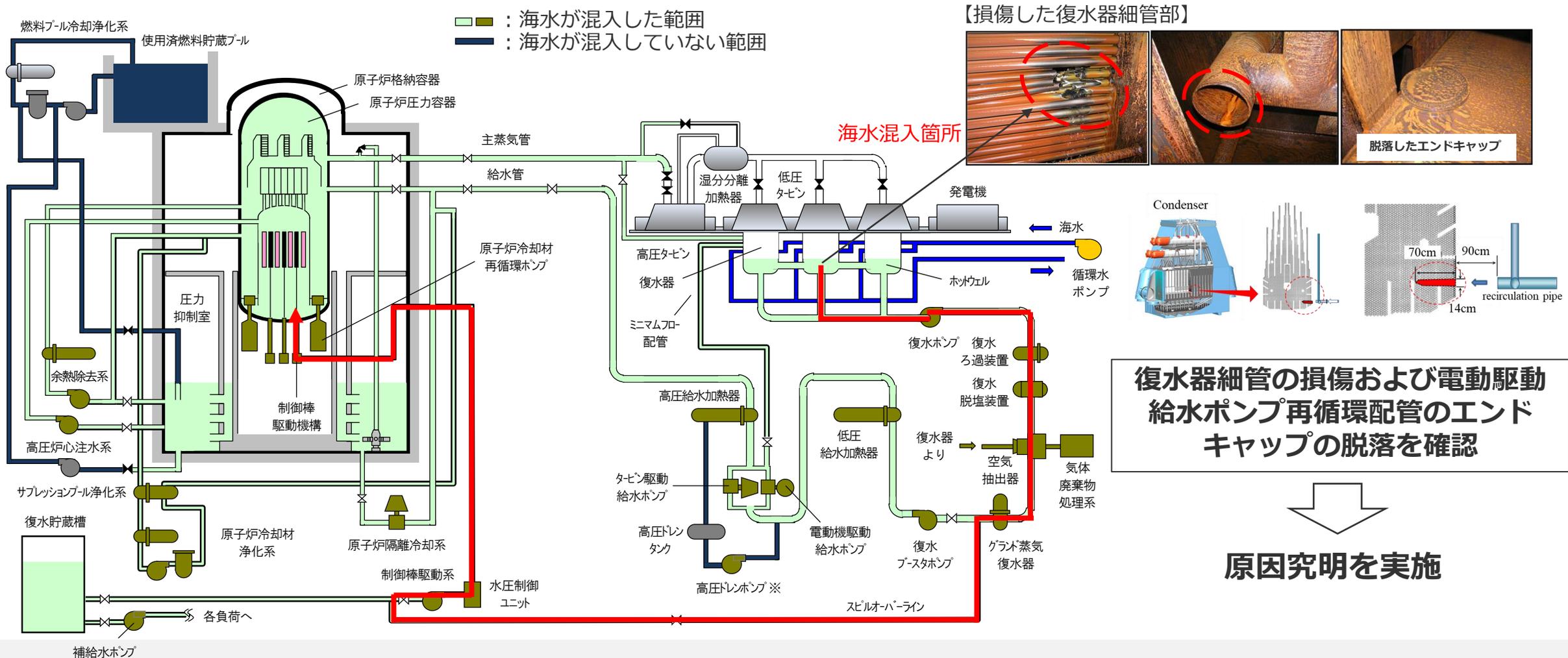
中部電力株式会社 大村 幸一郎

2025年3月11日

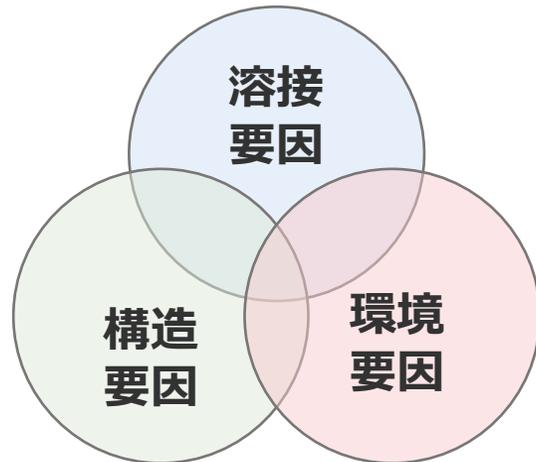
日立GEニュークリアエナジー

浜岡原子力発電所5号機における海水混入事象の概要

➤ 2011年5月14日、浜岡原子力発電所5号機は発電を停止し、その後の原子炉減圧操作中に復水器の細管損傷により原子炉施設内に約400トンの海水が流入した。

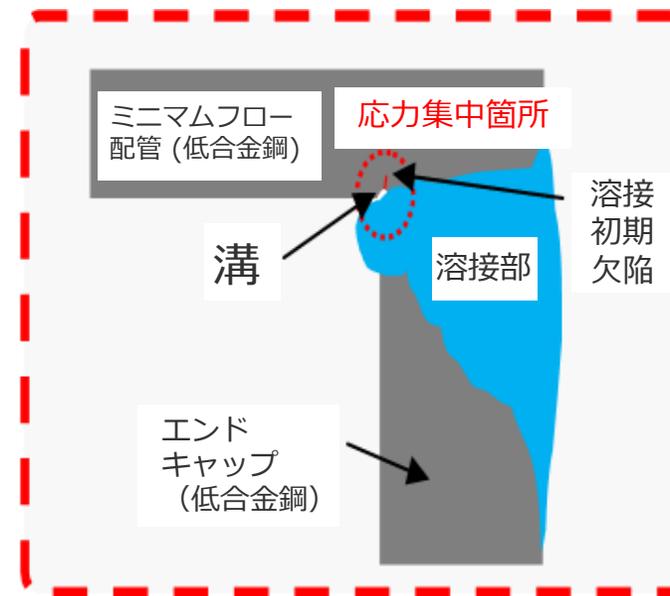
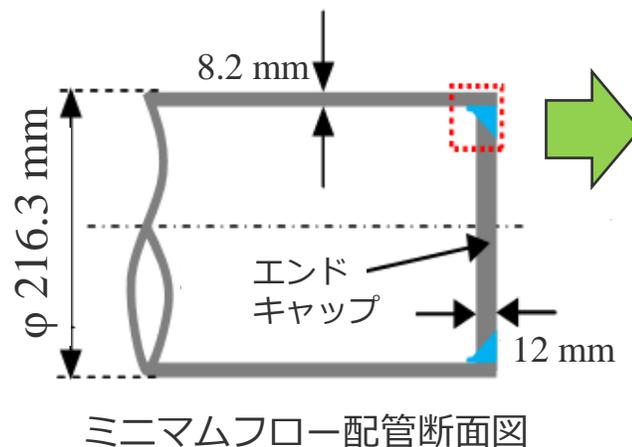
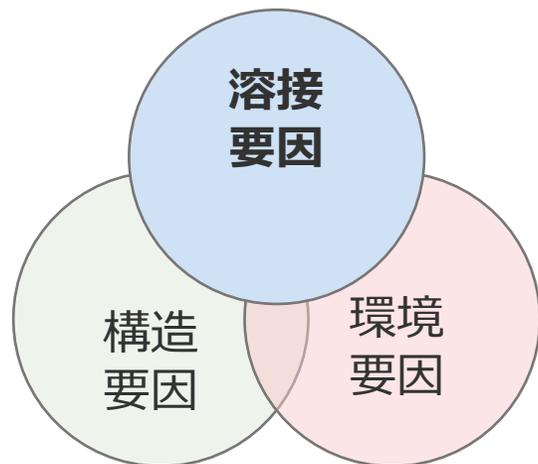


3つ要因の複合により発生したと推定



海水混入の原因究明（溶接要因）

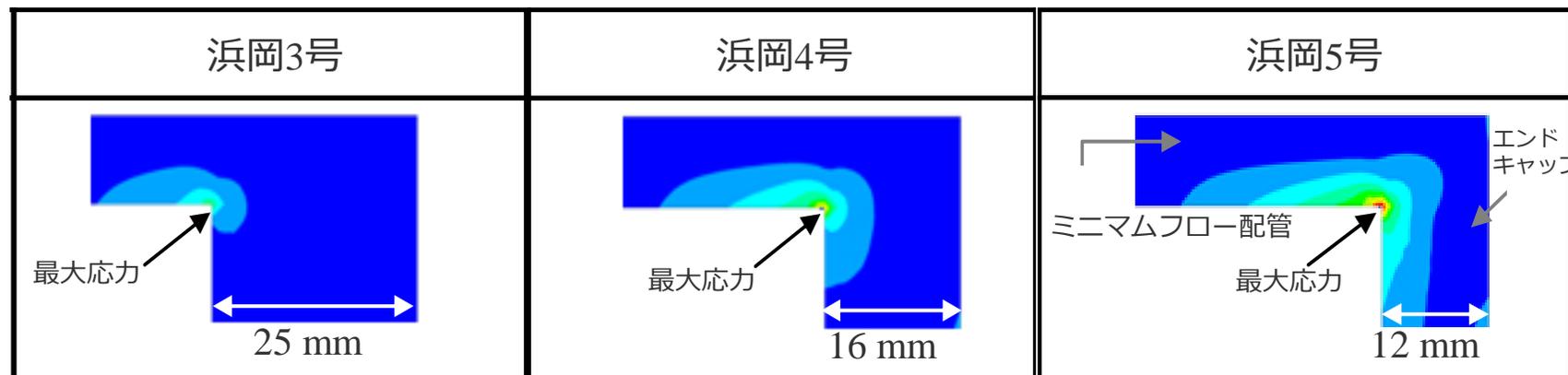
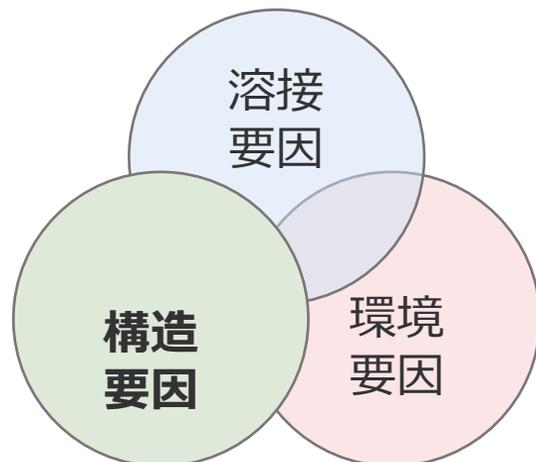
3つ要因の複合により発生したと推定



- エンドキャップ部とミニマムフロー配管との溶接部に溶接部先端に溝が発生しやすい溶接構造である平板差し込み構造を採用
- 破断面の観察結果等から溝部に応力が集中し深さ、約1.7~2.2mmの溶接初期欠陥の発生を確認

海水混入の原因究明（構造要因）

3つ要因の複合により発生したと推定

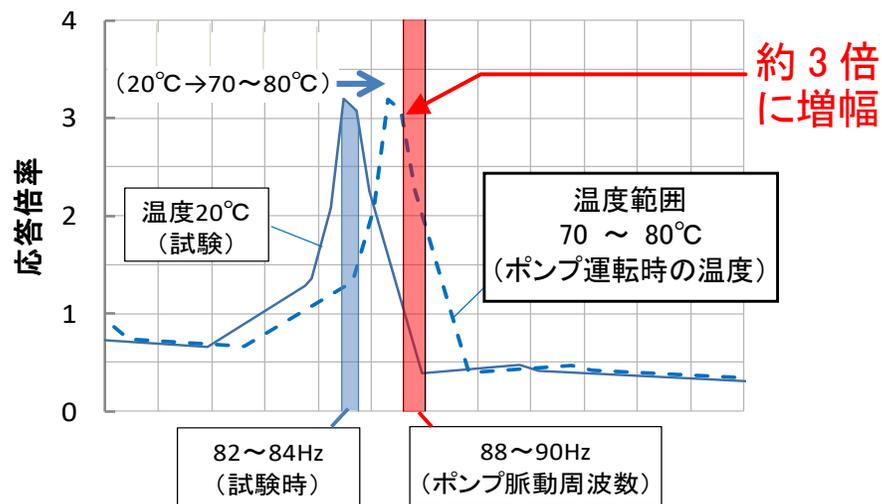
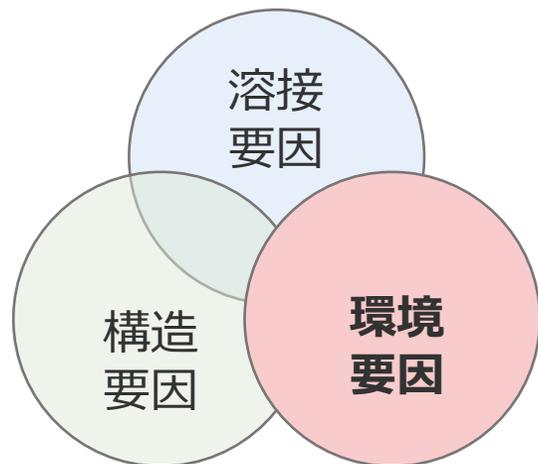


ミニマムフロー配管のエンドキャップ近傍における応力解析

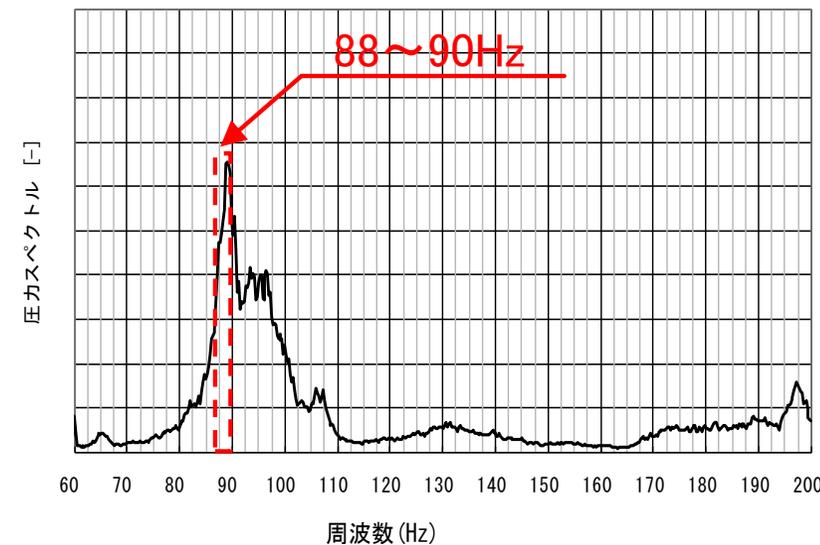
- 5号機のエンドキャップは合理化のために3・4号機に比べ薄いものを採用していた
- エンドキャップ部に加わる応力を解析した結果、ミニマムフロー配管内に同じ圧力である約0.3MPaを加えた場合、エンドキャップの厚みを薄くするほど、当該部に発生する応力が増加する傾向であることを確認

海水混入の原因究明（環境要因）

3つ要因の複合により発生したと推定



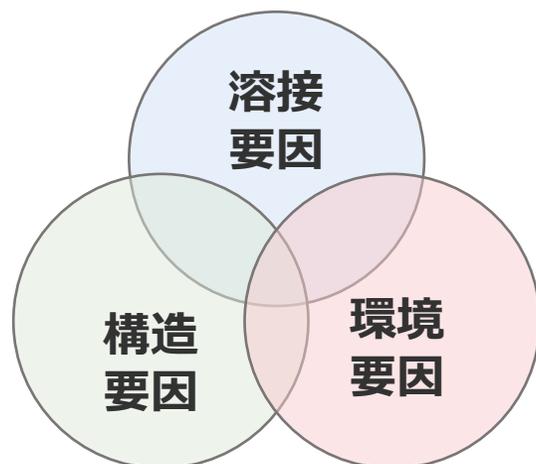
実機模擬音響試験モデルによる周波数と応答倍率



実機ポンプ出口における脈動周波数

- 実機を模擬した音響試験の結果から、電動駆動給水ポンプ出口の脈動周波数とミニマムフローライン配管内を流れる水の共鳴周波数が一致することで、エンドキャップ部の圧力変動は約3倍（約80Mpa）に増幅することを確認

3つ要因の複合により発生したと推定



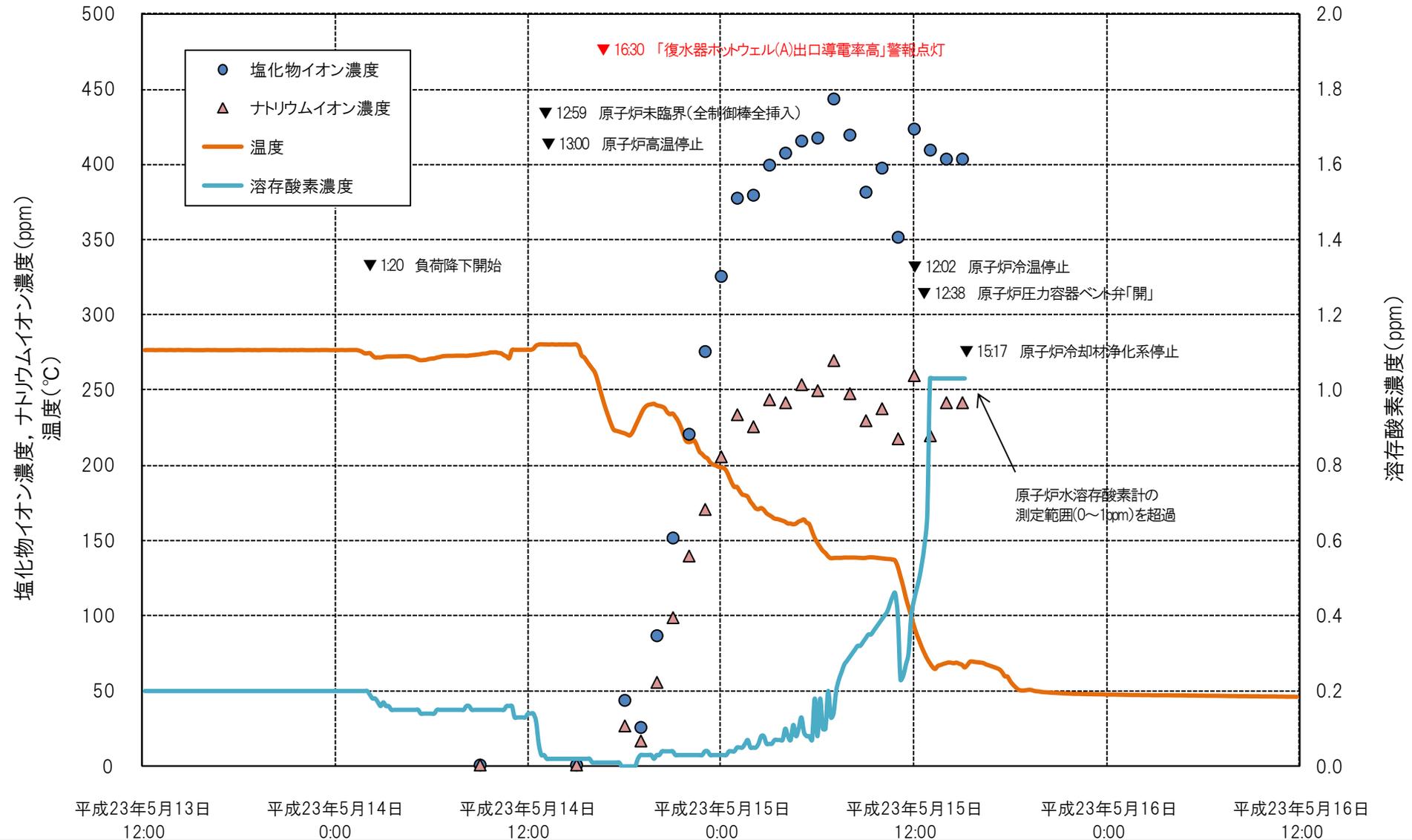
損傷した細管を詳細に調査した結果
以下のメカニズムが連続して発生したと推定

- ①エンドキャップ部の脱落に伴うミニマムフロー配管からの噴流（36 m/sec）が細管に衝突
- ②細管外面へ局所的に高い応力が加わり変形
- ③細管内面にき裂が発生し・進展
- ④き裂の貫通により細管内面へも応力が加わり細管が破断

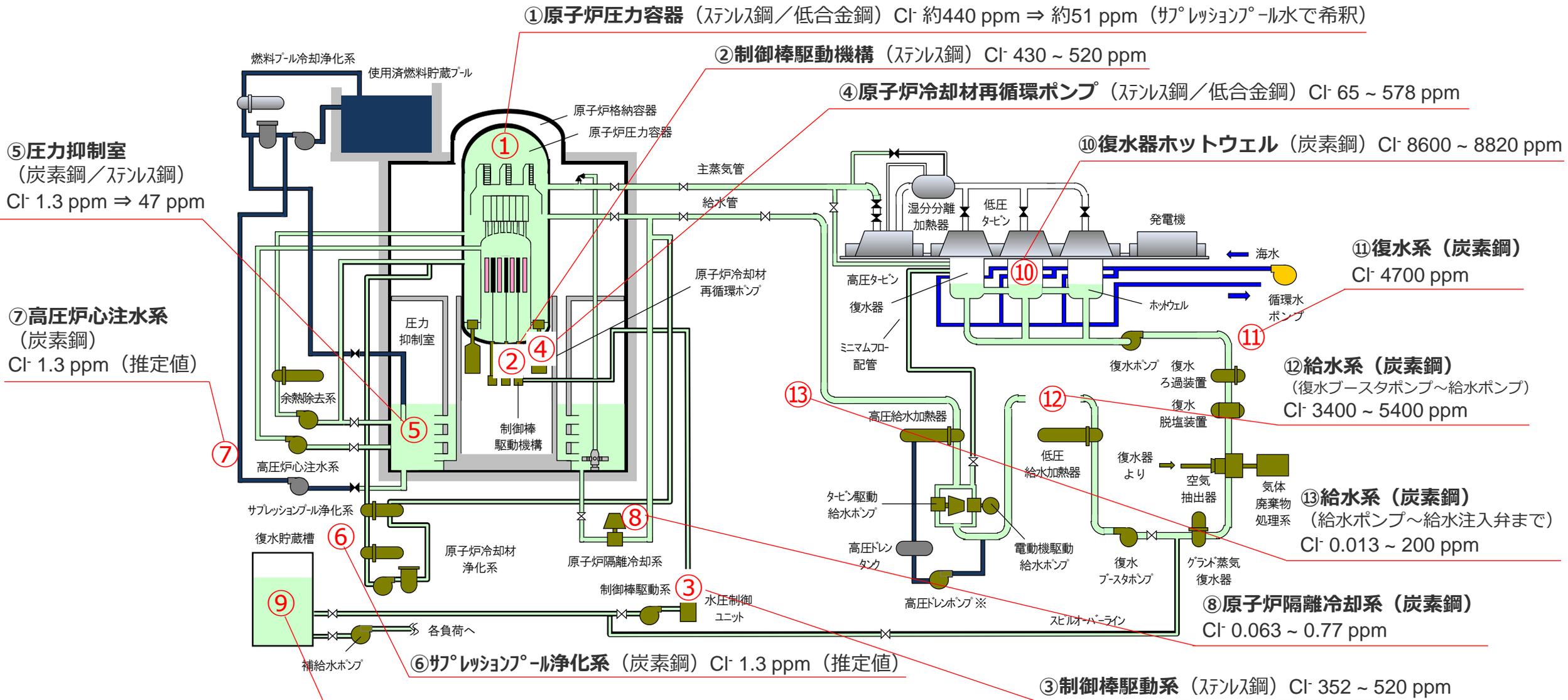
【対策】

- ・ エンドキャップ部の構造を平板差し込み溶接構造から一体ヘッド構造に変更
- ・ ミニマムフローライン配管との溶接施工方法を突き合わせ溶接に変更（溶接部に応力が集中しない構造）
- ・ 溶接・環境・構造要因が一致する類似の箇所についても同様に対策を実施

海水混入事象発生直後のパラメータ変化

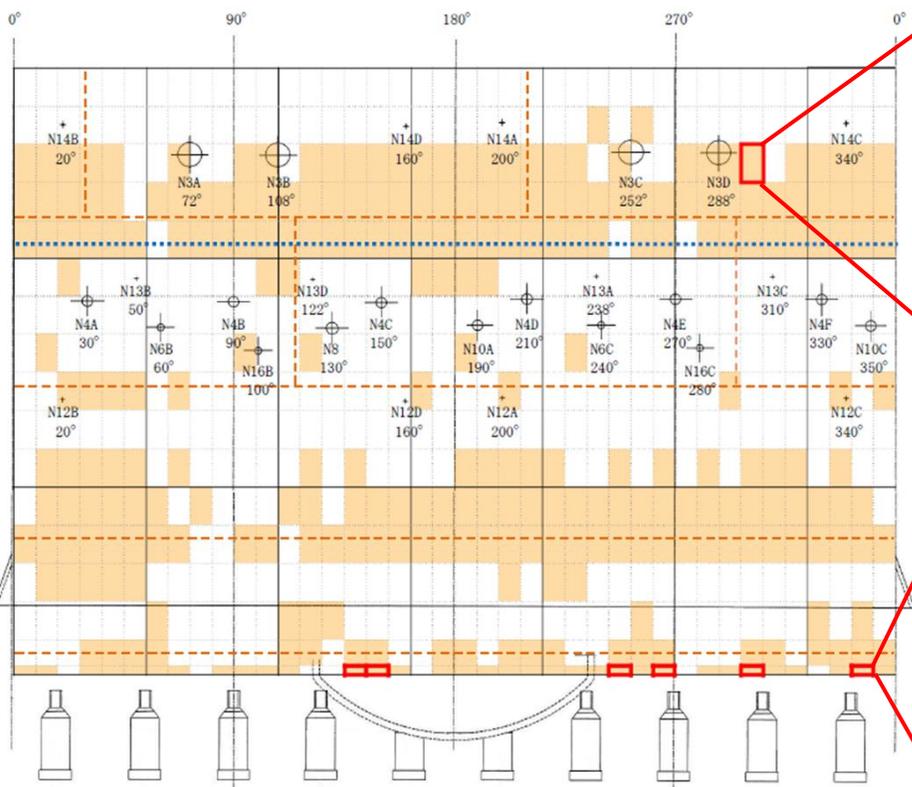


海水混入直後の水質



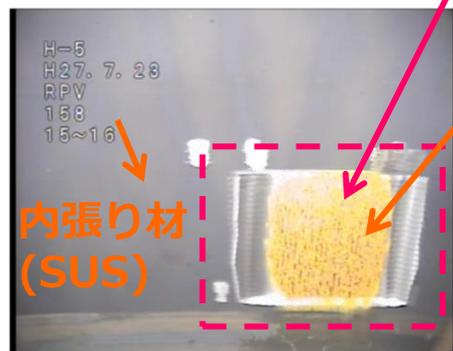
浜岡5号海水混入による機器の腐食（圧力容器壁面）

原子炉圧力容器上部（ガイドロッドブラケット近傍）



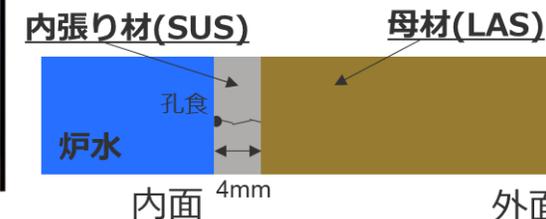
孔食は内張り材
内部に留まっていた
(孔食深さ約0.3mm)

原子炉圧力容器下部（H9溶接線近傍）



研磨箇所
(100mm×100mm)

母材
(LAS:低合金鋼)

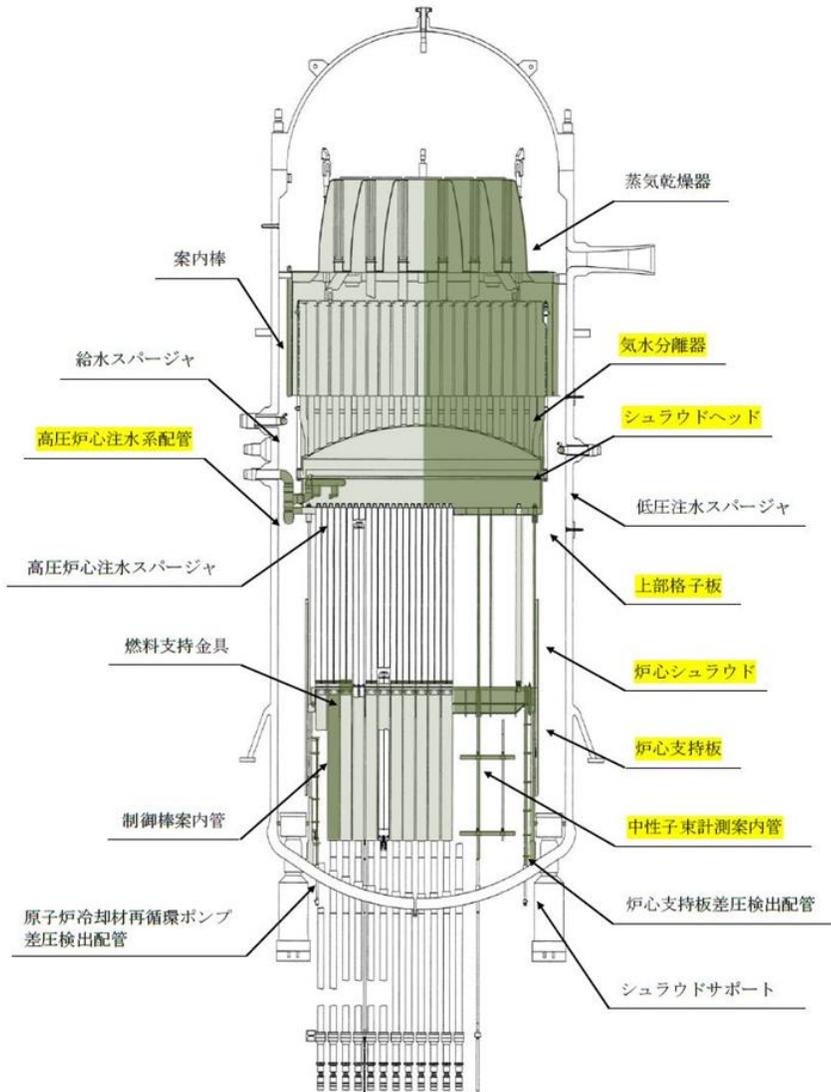


- 一部の孔食は内張り材と母材の境界の溶接溶け込み部に到達していた（深さ4mm）
- 炉外からの超音波探傷検査の結果、圧力容器母材に有意な指示は確認されなかった

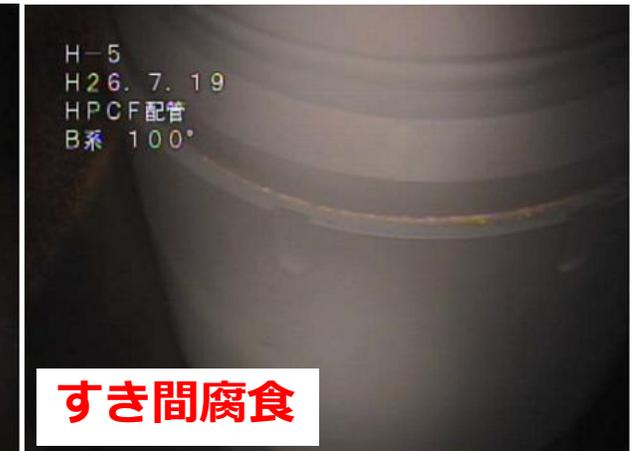
⇒孔食発生メカニズムの特定と再稼働時の腐食の影響評価や孔食の処置方法検討が課題

浜岡5号海水混入による機器の腐食（炉内構造物）

浄化とともに設備の点検を実施



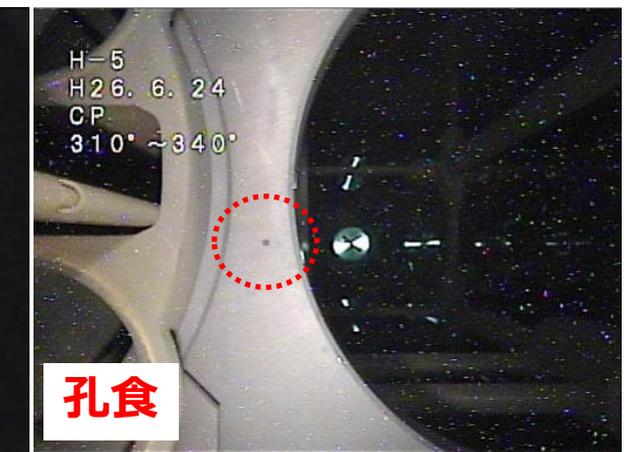
上部格子板 フランジ部



高圧炉心注水系配管



中性子束計測案内管



炉心支持板

点検結果（原子炉内）

	材料※	点検結果
圧力容器内面	炭素鋼（母材）-SUS308（内張り材）	内張り材に孔食を確認 炉外UTを実施した結果、 母材には有意な指示は確認されなかった
炉心支持板	SUS316、SUS316L、XM-19	軽微な孔食 （鉄クラッドの堆積によるものと推定） すき間腐食 （制御棒案内管間 腐食深さ：0.4mm）
炉水注水系配管	SUS316L、SUSF316L	軽微な孔食、すき間入口部近傍に腐食
気水分離機	SUS316L、SCS19A	軽微な孔食、すき間入口部近傍に腐食
シュラウドヘッド	SUS316L、SCS19A	軽微な孔食、すき間入口部近傍に腐食
上部格子板	SUS316L、SUSF316L、XM-19	すき間入口部近傍に腐食
中性子計測案内管	SUS316L、NCF600	すき間入口部近傍に腐食
炉心シュラウド	SUS316L	すき間入口部近傍に腐食
原子炉冷却材循環ポンプ貫通孔	内張り材： ステンレス溶接金属、高ニッケル合金溶接金属	すき間腐食（腐食深さ：0.35mm）
監視試験片支持ブラケット	SUS316L	すき間腐食（腐食深さ：0.14mm）

※最大温度 : 250℃
最大Cl-濃度 : 450 ppm

圧力容器内面の孔食以外は軽微な腐食であったが点検・取替が難しい箇所も存在

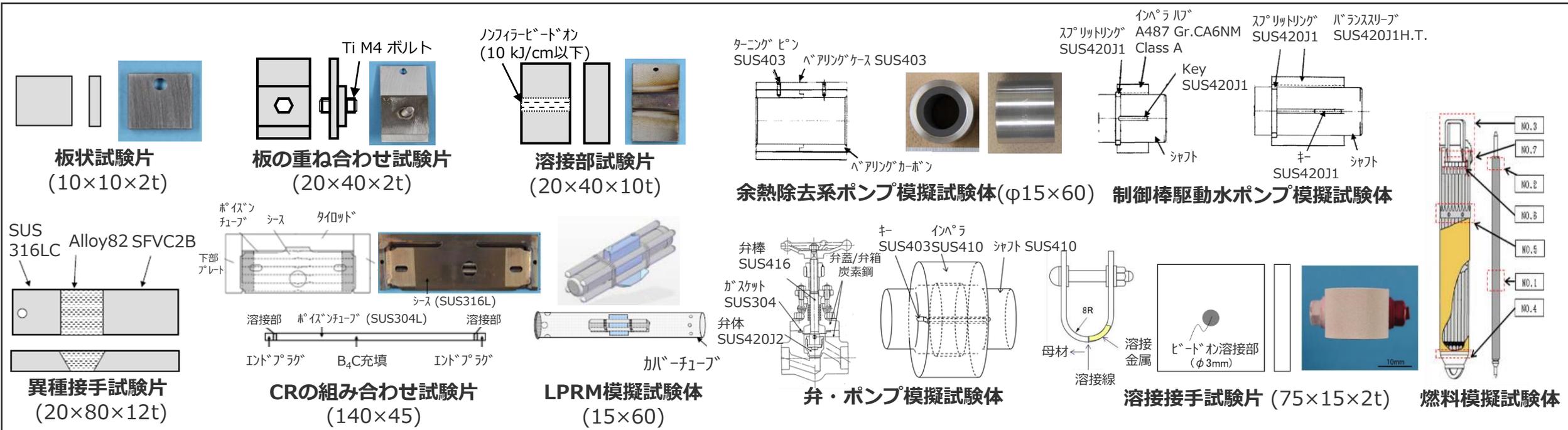
点検結果（原子炉外）

	温度 [°C]	Cl濃度 [ppm]	材料	点検結果
余熱除去ポンプ	140	450	SUS420J1- シャフト	軽微な腐食
余熱除去熱交換器	140	450	—	—
弁(CST-HCU 戻り入口)	53	5400	SUS403 弁棒 SUS420J2 パッキンハメ輪	局部腐食 深さ 3.71mm 局部腐食 深さ 0.19mm
制御棒駆動機構	250	520	窒化部品、ロータ等	塩分残存可能性
配管	35	503	炭素鋼／ステンレス	付着物多／—
計装系（LPRM）	250	450	ステンレスワイヤ	絶縁抵抗低下
溶接部				
・復水貯蔵槽	45	503	SUS304	クラッド—孔食
・復水回収ポンプ再循環配管	—	6000	STPG370（母材） —STPT410（溶接部）	ガルバニ—孔食
・塩分除去装置	—	16000	SUS304	クラッド—孔食
・制御棒駆動機構 スプルーオーバー配管	40	5340	SUS304—SUS308L	クラッド—孔食
制御棒	240	450	TP304L, SUS316L, SCS19A	変色
給復水系	35	5400	SUS403, SUS420J2 etc…	白色付着物

炉外の機器については点検により問題なく使用するか取替を行うことで健全性を確保

- ◆海水が混入したことにより設備の多くで腐食による減肉・変色・腐食生成物の堆積などが確認された
- ◆原子炉施設内の塩化物イオン濃度は浄化により低下し、機器・設備レベルの健全性評価も進んでいるが、原子炉内については取替が困難な箇所も多く、再稼働時におけるプラント全体健全性評価が課題として残されており、現在も設備健全性評価に向けた知見の拡充を行っている
- ◆周辺設備において材料がステンレスの場合オーステナイト系のSUS304系・SUS316系以外の材料で局部腐食が多く、炭素鋼の場合は大きな減肉はないものの、腐食生成物が多く発生し、配管などに堆積していることが多かった
- ◆周辺設備については点検可能部分がほとんどであり、機器の洗浄や取替により健全性を確保することが可能

実機環境模擬試験体 (代表例)



板状試験片 (10×10×2t)

板の重ね合わせ試験片 (20×40×2t)
Ti M4 ボルト

溶接部試験片 (20×40×10t)
レーザービード加工 (10 kJ/cm以下)

異種接手試験片 (20×80×12t)
SUS 316LC Alloy82 SFVC2B

CRの組み合わせ試験片 (140×45)
ポイストン チューブ シース タロケット
下部プレート
溶接部 ポイストンチューブ (SUS304L) シース (SUS316L) 溶接部
イントプラグ B₄C充填 イントプラグ

LPRM模擬試験体 (15×60)
カバートューブ

弁・ポンプ模擬試験体
ターニングピン SUS403 ハブリングケース SUS403
ハブリングカーボン
インペラ A487 Gr.CA6NM Class A
スプリットリング SUS420J1 シャフト
Key SUS420J1
スプリットリング SUS420J1 バランススリーブ SUS420J1H.T.
シャフト

弁・ポンプ模擬試験体
弁棒 SUS416 弁蓋/弁箱 炭素鋼
インペラ SUS403SUS410 シャフト SUS410
ガスケット SUS304
弁体 SUS420J2

溶接接手試験片 (75×15×2t)
母材 溶接線 溶接金属
8R
ビード加工溶接部 (φ3mm)

燃料模擬試験体
NO.3
NO.7
NO.2
NO.8
NO.5
NO.1
NO.4

各模擬試験体において海水混入時の環境などの数条件で模擬試験を実施し、
実機の腐食状況と比較を行った

模擬試験結果（海水混入時の環境模擬）

	試験後の腐食状態（炉水環境）	試験後の腐食状態（パージ水環境）	実機との比較
板状試験片（全面腐食－孔食）	SCS19A-局部腐食（腐食深さ：60μm） SA-533（B1）－全面腐食	炭素鋼－全面腐食	SCS19A－軽微な孔食 （炉内構造物）
板の重ね合わせ試験片 （全面腐食－すき間腐食）	SUS403, SUS304, SUS316L, XM-19, X-750, NCF600－局部腐食（数十μm）	SUS403, SUS304, SUS316 局部腐食 STPT－全面腐食	Cl ⁻ 濃度が大きい 系統機器で局部腐食 （腐食深さ：数十μm）
溶接部試験片（溶接部－SCC）	SCC発生せず	SCC発生せず	－
組合せ試験片 異種接手試験片 （RPVサーマルスリーブ）	SFVC2B－全面腐食 （境界部の腐食無し）	－	－
制御棒模擬試験体 （孔食、すき間腐食、SCC）	－	SUS304Lホウ素添加材－ 局部腐食	表面変色のみ
熱交換器模擬試験体 （すき間腐食）	SFVC2B－全面腐食	－	全面腐食
核計装模擬試験体 （すき間腐食）	SRNM XM-19 窒化－全面腐食 LPRM SUS304 窒化－全面腐食	－	窒化材料－全面腐食
LPRM模擬試験体 （すき間腐食）	SUS304L－局部腐食	－	MIケーブル（SUS304L） －局部腐食
制御棒駆動機構模擬試験体 （すき間腐食）	XM-19 窒化材料, SUS630, SUS440－局部腐食	－	窒化材料全面腐食
原子炉冷却材再循環ポンプ模擬 試験体（すき間腐食）	－	SUS316L, F6NM, Y309L－局部腐食	各部位に局部腐食有

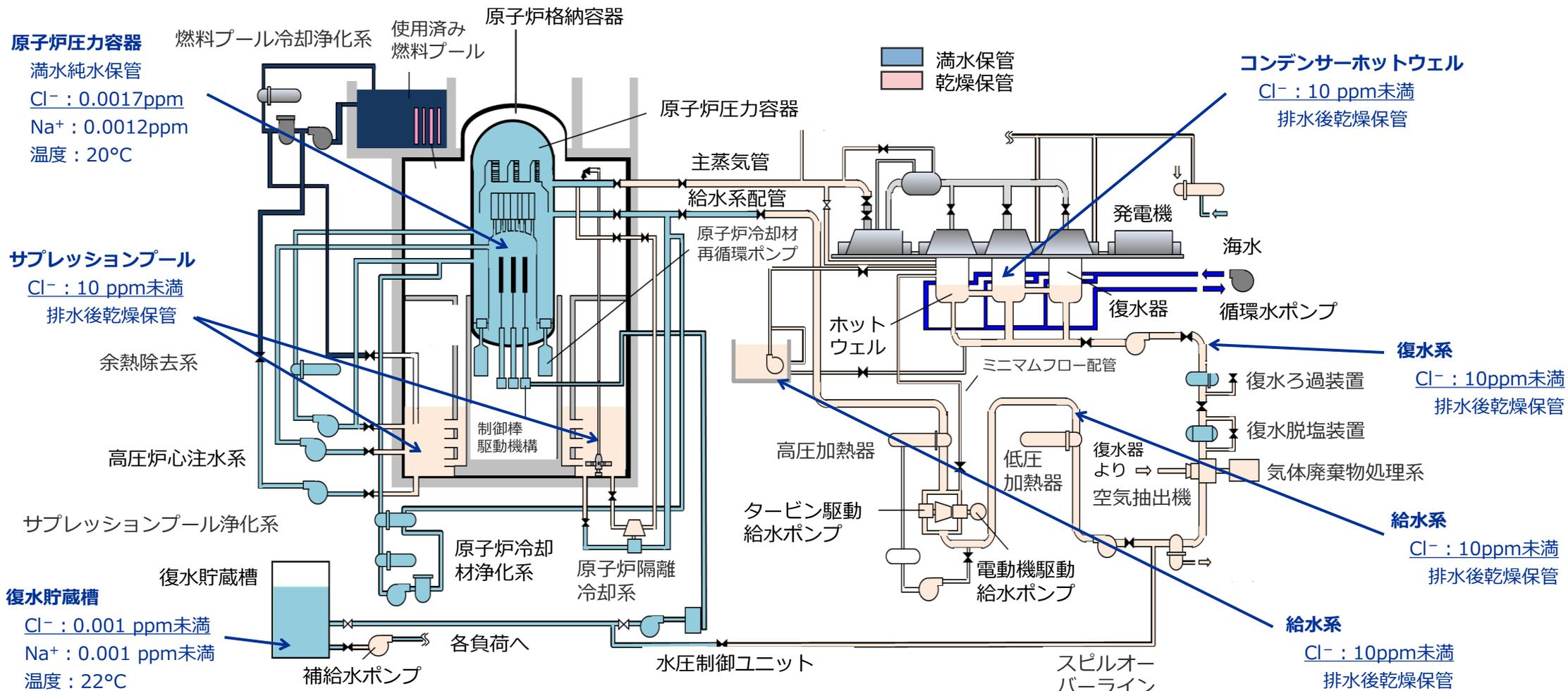
模擬試験結果（海水混入直後から水質改善までの環境模擬）

	各系統の条件模擬	実機との比較
原子炉設備	余熱除去系,制御棒駆動系,補給水系を想定した環境条件	
板の重ね合わせ試験片 (すき間腐食)	SUS304,SUS316L以外の材料全てで局部腐食（腐食深さ：数百μm） 炭素鋼-全面腐食	マルテンサイト系ステンレスでの腐食が多い
平板試験 (孔食-余熱除去系 C系模擬)	炭素鋼-全面腐食	全面腐食を手入力で除去
余熱除去ポンプ模擬試験 (孔食、すき間腐食)	ベアリングケース SUS403-局部腐食（腐食深さ：1050μm）	ベアリング-シャフト部に 局部腐食（腐食深さ：300μm）
制御棒駆動水ポンプ模擬試験 (孔食、すき間腐食)	SUS420J1-2ツ割リング局部腐食（腐食深さ：数百μm）	軽微な付着物
タービン設備	復水・給水系と復水器廻りを想定した環境条件	
板の重ね合わせ試験 (すき間腐食)	SUS403,SUS630,SCS19A-局部腐食（腐食深さ：数百μm） SUS304,FC250では局部腐食は確認されず	ポンプや弁に付着物多
溶接継手試験 (SCC,腐食)	SUS304,SUS403溶接部-クラックなし	クラックなし
組み合わせ試験 (孔食、すき間腐食)	局部腐食なし	配管・ポンプ・弁などに付着物多

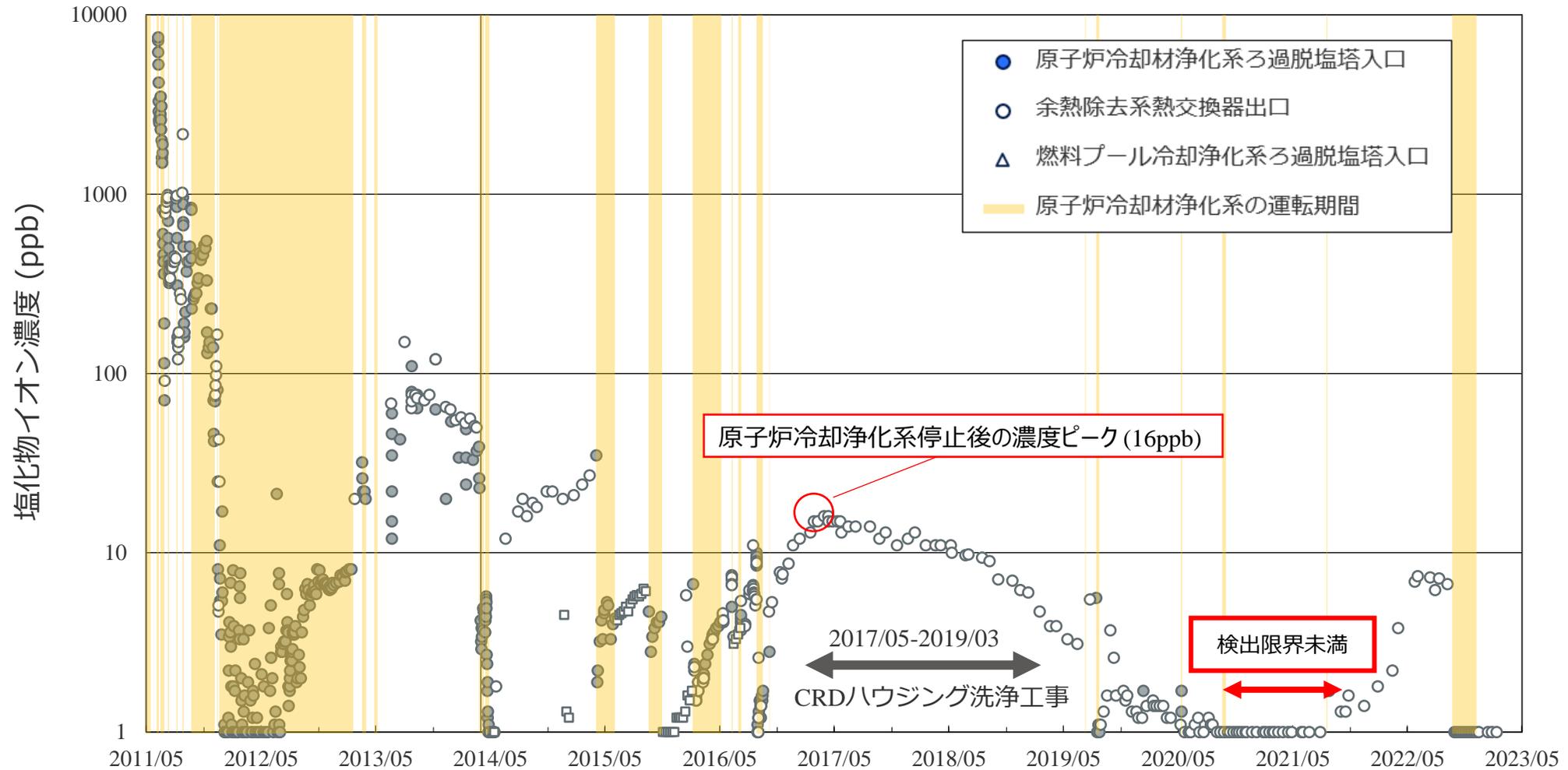
- ◆実機と同じ材料を用いた試験片や、実機機器形状を模擬した試験体を用いた海水混入環境および水質改善環境での模擬試験を実施した
- ◆実機の腐食状態を確認できた箇所については概ね一致したが、実機で点検が困難である箇所については確認ができていない

現在までの水質変化

- ・ 原子炉冷却材浄化系による水質浄化や制御棒駆動系からの脱塩水注入などにより原子炉水を浄化
- ・ 取替工事・手入れなどにより周辺設備の浄化

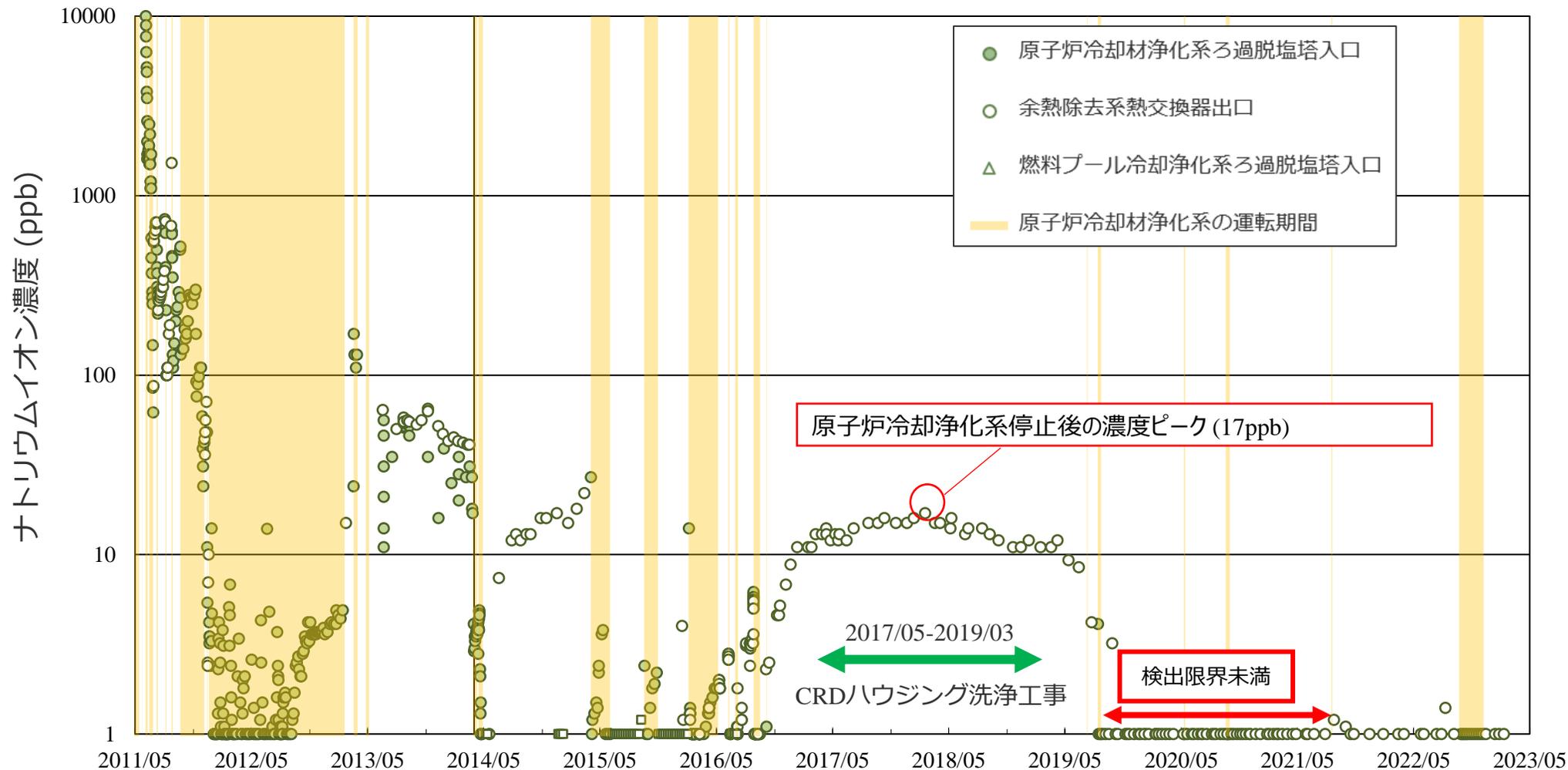


原子炉内の塩化物イオン濃度の推移



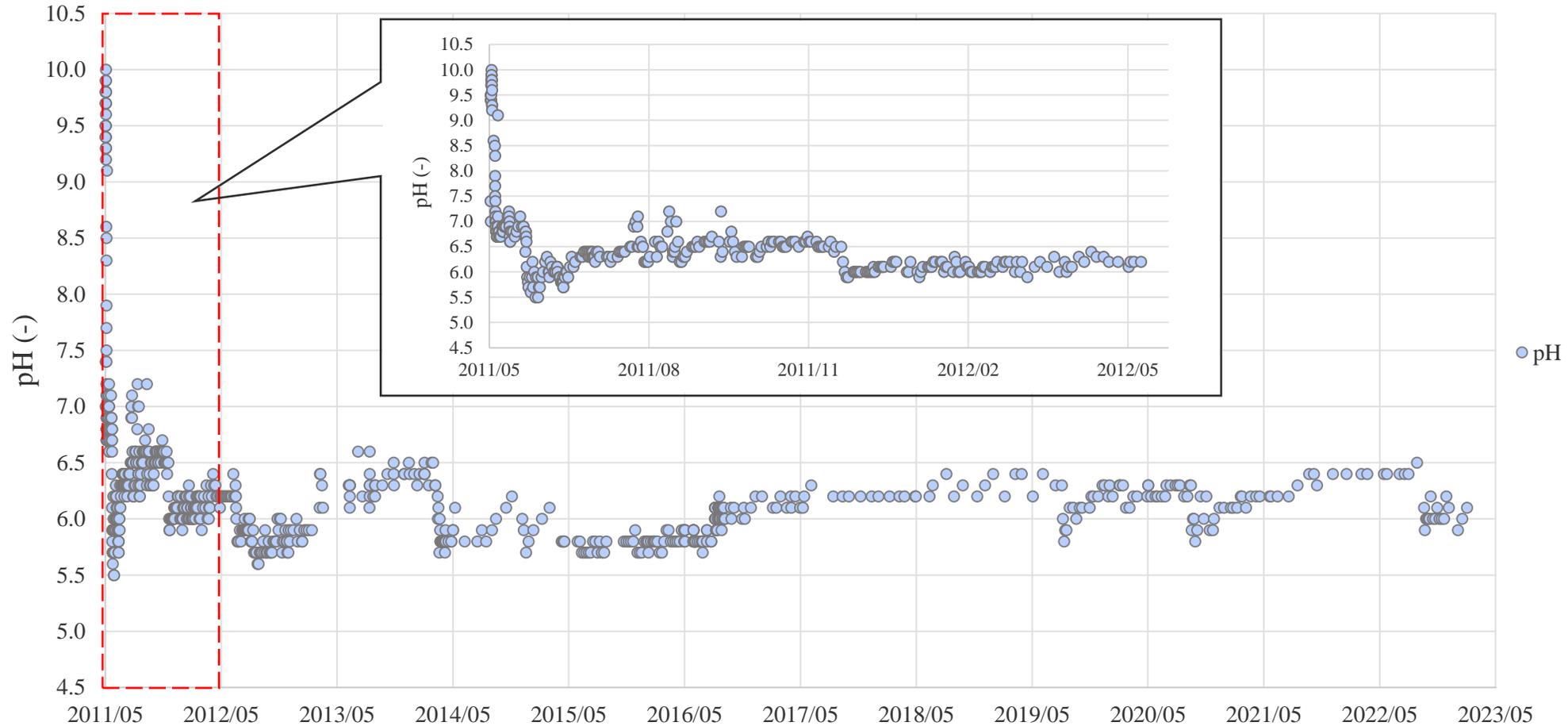
腐食の要因になる塩化物イオン濃度は定期的に浄化系を運転をすることで減少しているが、浄化運転後に塩化物イオン濃度が上昇することがある

原子炉内のナトリウムイオン濃度の推移



概ね塩化物イオンと同じ濃度の推移となっているが、洗浄工事以降大きな濃度上昇は確認されていない

原子炉内のpHの推移



pHは事象発生後の浄化により中性よりにシフトし、以降は概ね安定している

今後の課題・方針

対象	材質	劣化メカニズム	保管対策	再稼働に向けた 浄化基準策定の検討	再稼働に向けた 浄化方法検討	継続的な点検 手法の検討
原子炉圧力 容器	母材 ：低合金鋼 内張り材 ：ステンレス鋼 溶接金属 or 高ニッケル合金 溶接金属	内張り材孔食 発生条件調査 ↓ 孔食再現試験 ↓ メカニズムの特定 ↓ 対応方針の検討	水質監視	再稼働時の腐食の進展有無 などの影響を考慮した水質基準	他の浄化方法 超音波加振など ×原子炉冷却材サイ ン循環ポンプを用い た炉水昇温 ×化学洗浄 ×脱気	外面 UTなど
	炉内構造物	ステンレス鋼				孔食・すき間腐食
機器	ステンレス鋼	孔食・すき間腐食	強制乾燥保管	水質基準検討	分解手入れ	VT VT不可範囲手法
	炭素鋼	全面腐食				分解手入れ
配管	ステンレス鋼	孔食・すき間腐食	満水保管部の水質確認	水質基準検討	脱塩水置換 脱塩水置換 ジェット洗浄 化学洗浄	RT/UT
	炭素鋼	全面腐食	保管状況確認点検			

- ◆浜岡 5 号機に海水が混入したことにより設備の多くで腐食による減肉・変色・腐食生成物の堆積などが確認されたが、周辺設備については点検による洗浄や取替により健全性を確保することができた
- ◆原子炉施設内の塩化物イオン濃度は浄化により低下し、機器・設備レベルの健全性評価も進んでいるが、原子炉内については取替が困難な箇所も多く、再稼働時におけるプラント全体健全性評価が課題として残されており、現在も設備健全性評価に向けた知見の拡充を行っている

具体的な課題

- ◆内張り材の腐食メカニズムを解明
- ◆再稼働後の塩化物イオン濃度の基準策定と浄化方法の検討
- ◆再稼働に向けた内張り材の処置方法の検討
- ◆再稼働後の継続点検を見据えた非破壊検査技術の検討



CHUBU
Electric Power