

平成25年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金

圧力容器／格納容器の健全性評価技術の開発

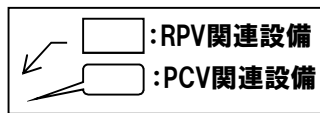
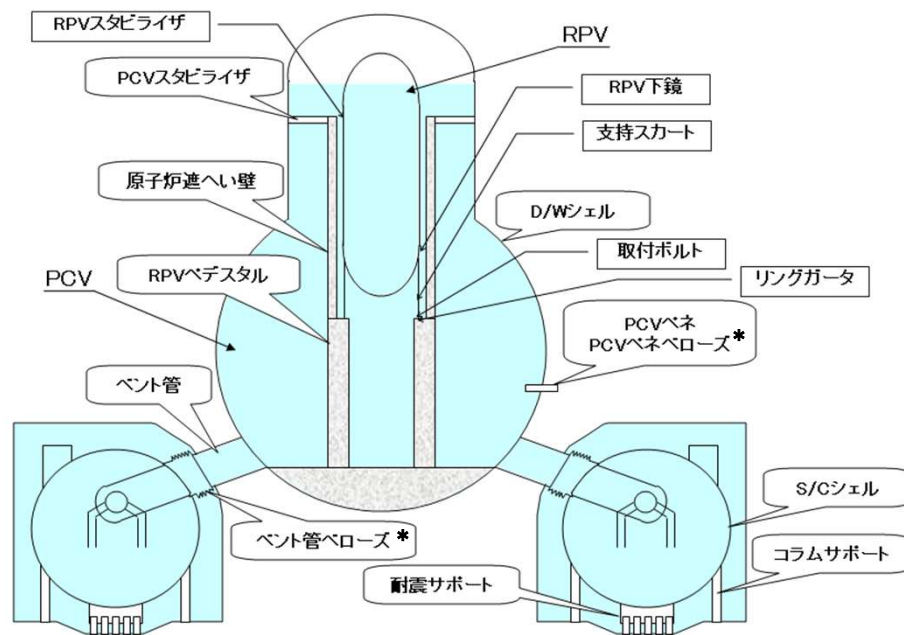
2015年度最終報告

2016年3月22日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

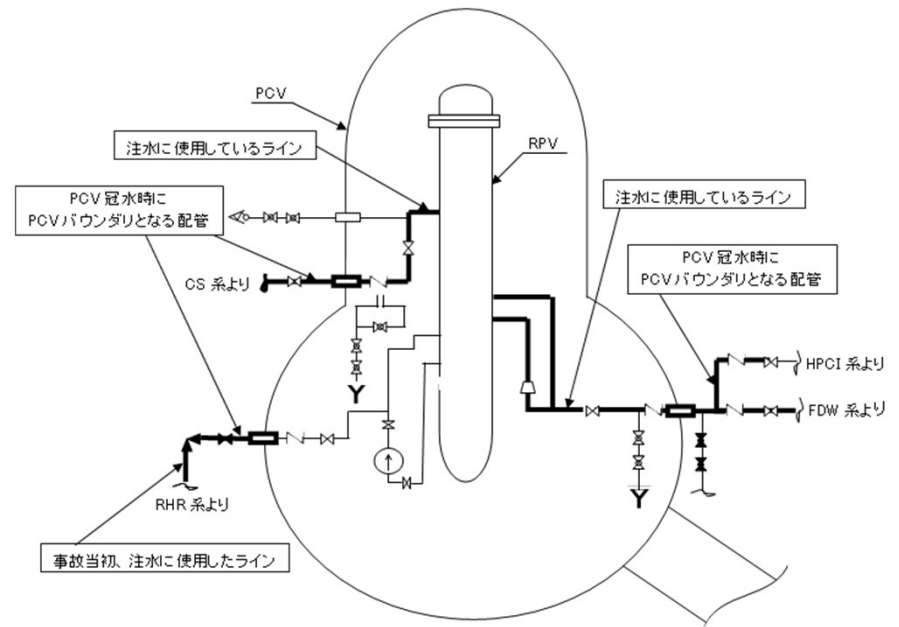
1. 目的

- 今後想定される廃炉作業の各プロセスについて、腐食による経年劣化や燃料デブリ落下の影響を考慮した耐震強度評価に基づき、RPV/PCVの構造健全性を評価し、燃料デブリ取り出しやPCVの補修(止水)等の工法成立性を評価する。
- 燃料デブリ取り出しまでの長期間の経年劣化に伴うリスク低減のための腐食抑制策の開発を行う。



RPV: 原子炉圧力容器
PCV: 原子炉格納容器

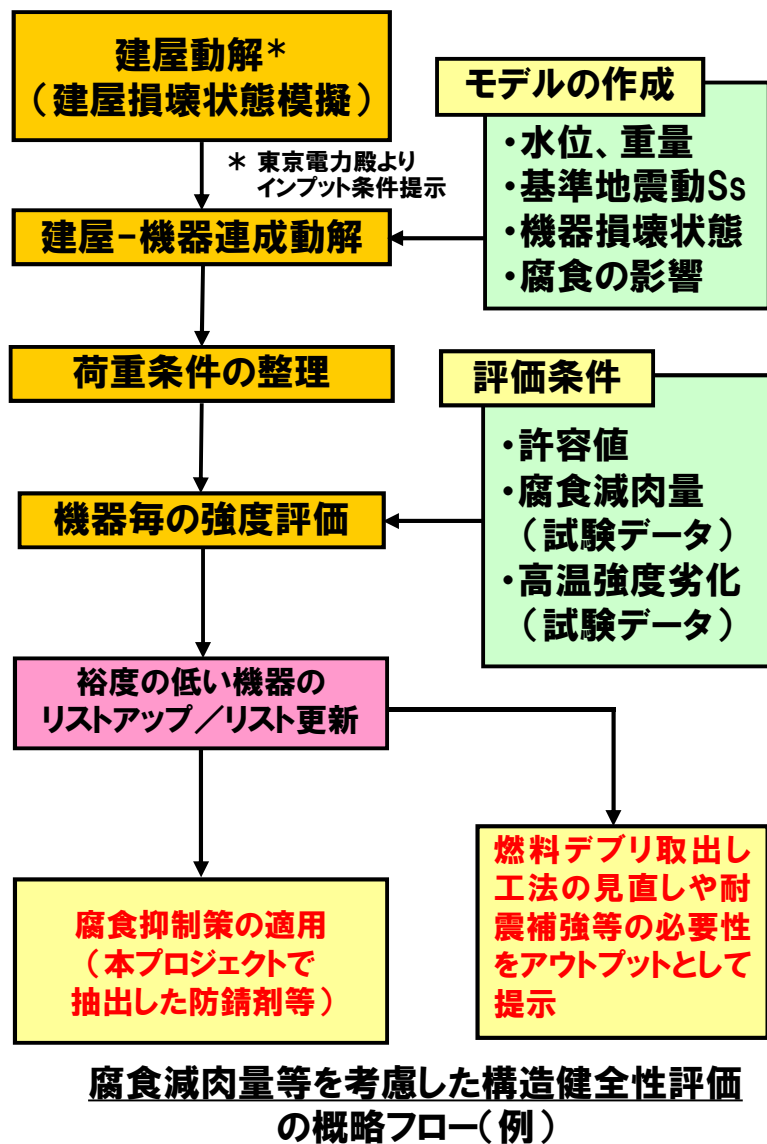
* 当該材質はステンレス鋼であり、すでにSCCによるひびが発生している可能性があるため、補修もしくは冠水バウンダリから除外される工法を検討中であり、評価対象外とする。



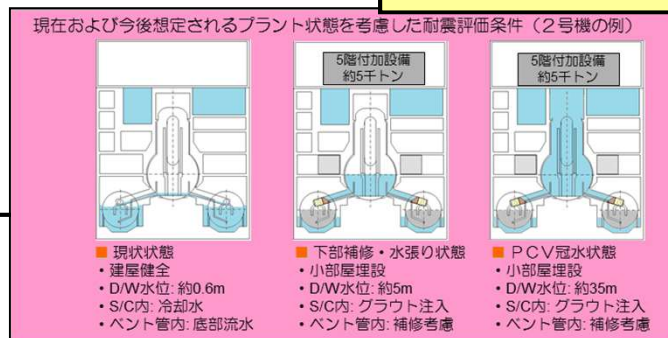
太線範囲: 原子炉注水配管

健全性評価(余寿命評価)対象部位(例)

2. 実施概要



プラント状態の想定



評価方針:

① 評価設備・部位の選定

腐食減肉によって構造強度が低下した場合の「RPV内注水漏えい」、「PCVバウンダリ機能喪失」および「RPV・PCV支持機能喪失」への影響を考慮して選定。各機器が健全な状態(腐食発生前)の既存評価で裕度が小さい部位を代表として評価。

② 腐食減肉量の算出

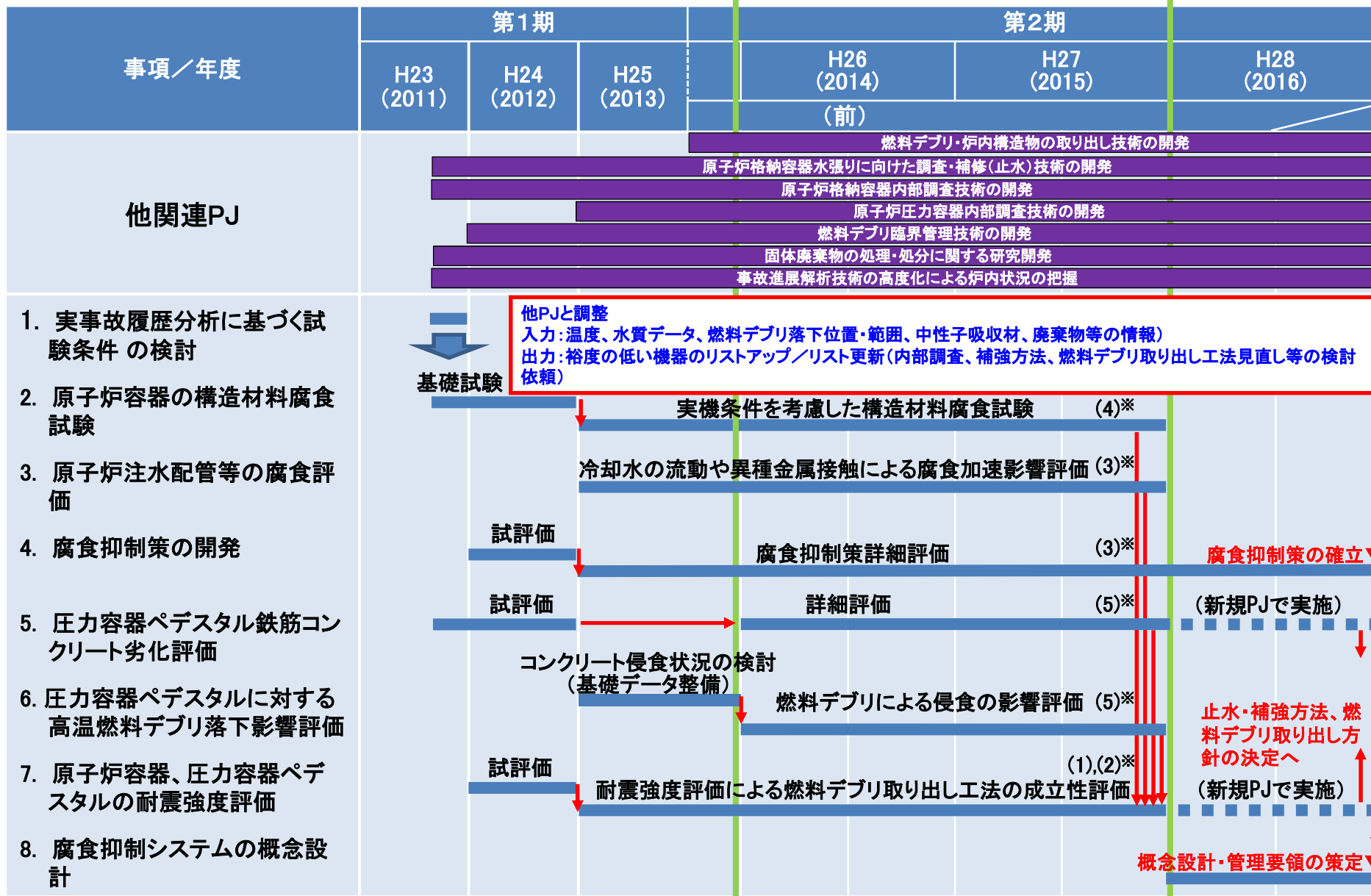
震災から燃料取り出しまで10年、15年、40年を想定して試験結果より算出。

③ 応力評価

②の腐食減肉量を考慮して、一次応力を評価。許容値はJSME設計・建設規格等の供用状態 D_s (温度 50°C)。

3. 全体工程

全体工程からみた今回の実施範囲



※ 交付申請書にある以下の項目に対応:

- (1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価
- (2) PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価
- (3) 腐食抑制策の開発
- (4) 長期の腐食減肉量の予測の高度化
- (5) ペDESTALの侵食影響評価

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

4. 中長期ロードマップにおける位置付け

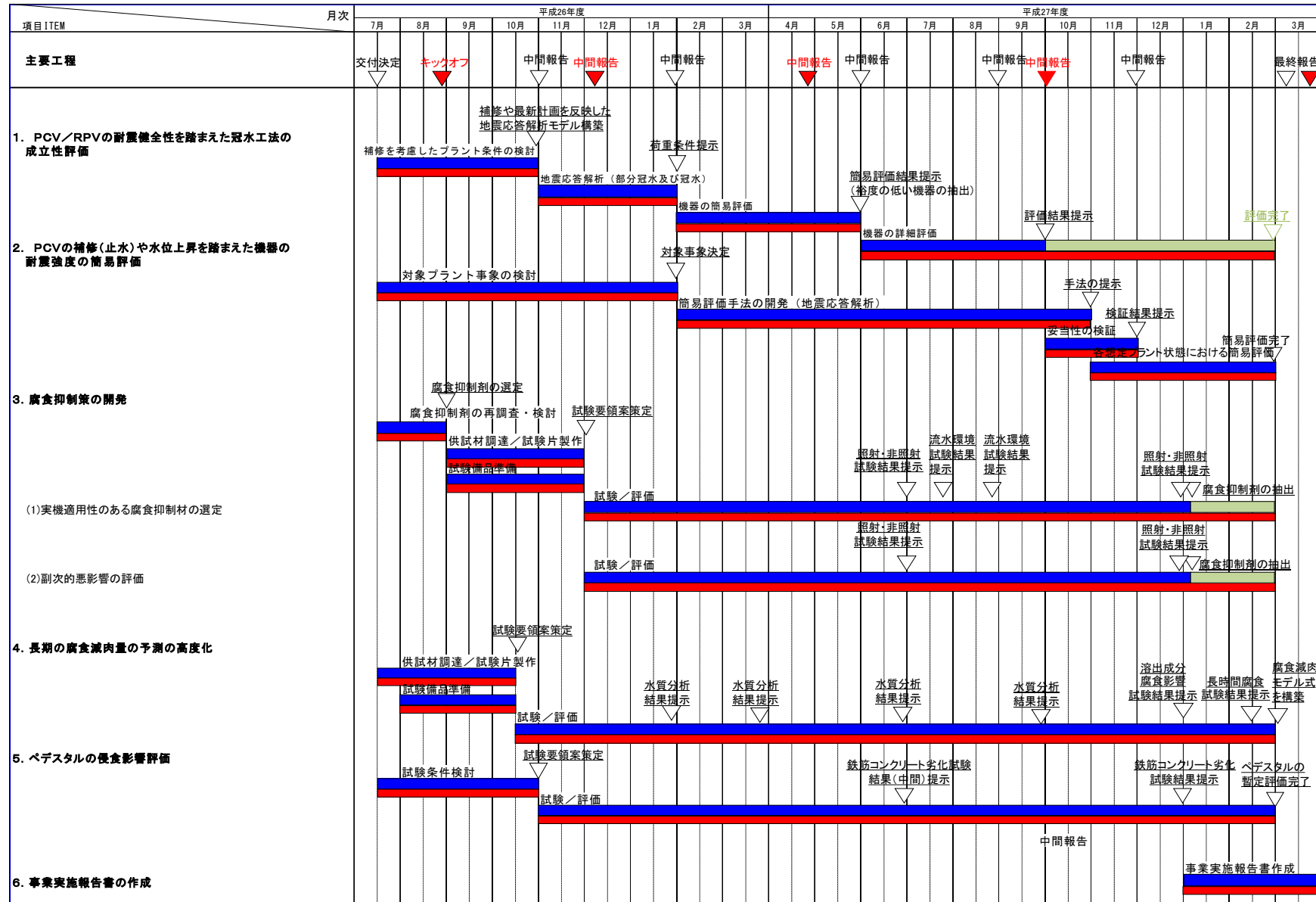
- 燃料デブリ取り出しに向けた環境整備の一環
- 2017年度の燃料デブリ取り出し方針の決定に向け、RPV/PCV機器の耐震強度評価による構造健全性の確認により、燃料デブリ取り出し工法の成立性を評価

東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた主要な目標工程 2015年6月

分野	これまでの主な取組	今後の取組				
		第2期(燃料デブリ取り出し開始まで)			第3期(廃止措置完了まで)	
		2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度
		▼現在		▼第2期終了(2021年12月)		
汚染水対策						
取り除く	多核種除去設備による汚染水浄化等	▼敷地境界の追加的な実効線量を1mSv/年まで低減完了 ▼多核種除去設備等で処理した水の長期的取扱いの決定に向けた準備の開始				
近づけない	地下水バイパスによる地下水の汲み上げ等	▼地割運水壁の凍結閉合完了/予定箇所の9割超のフェーシング完了 ▼建屋流入量を100m3/日未満に抑制				
漏らさない	タンクの増設等	▼高濃度汚染水を処理した水の貯水は全て溶接型タンクで実施				
滞留水処理	各建屋の滞留水状況の調査等	建屋水位の引下げ/循環注水ラインからの切り離し/滞留水の浄化・除去			▼建屋内滞留水の処理完了 ▼滞留水の放射性物質量の半減	
燃料取り出し (4号機は取り出し完了(2014.12))						
1号機	建屋カバー解体等	ガレキ撤去等	カバー設置等	燃料取り出し		
2号機	準備工事	建屋上部解体・改造等	燃料取り出し	格納容器上部補修(止水方法確定)		
	解体・改造範囲の決定	プランの選択	プラン① コンテナ設置等	燃料取り出し		
			プラン② カバー設置等	燃料取り出し		
3号機	ガレキ撤去等	カバー設置等	燃料取り出し			
燃料デブリ取り出し	原子格納容器内の状況把握/燃料デブリ取り出し工法の検討等	取り出し方針の決定	初号機の取り出し方法の確定	初号機の取り出し開始		
		燃料デブリの取り出し/処理・処分方法の検討等				
廃棄物対策						
保管管理	線量率に応じた分類保管/保管管理計画の策定等	保管管理計画に沿った保管管理の実施 ▼減容処理焼却炉の設置 ▼固体廃棄物貯蔵庫第9棟の設置				
処理・処分	▼処理・処分に関する基本的な考え方の取りまとめ					▼処理処分の技術的見通し
		性状把握の実施、既存技術の調査/固体廃棄物の性状把握等を通じた研究開発等				

燃料デブリ取り出し方針の決定

5. 平成26-27年度進捗状況(実施工程と実績)



5. 平成26-27年度進捗状況(技術開発の進捗状況)

実施内容	当期におけるマイルストーン		達成状況	要因	対応策	備考
	アウトプット	計画時期				
1. PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価	補修や最新計画を反映した地震応答解析モデル構築	2014年10月下旬	終了			
	荷重条件提示	2015年1月下旬	終了			
	簡易評価結果提示(裕度の低い機器の抽出)	2015年5月下旬	終了			
	評価結果提示	2015年9月下旬	終了			
2. PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価	対象事象決定	2015年1月下旬	終了			
	手法の提示	2015年10月下旬	終了			
	検証結果提示	2015年11月下旬	終了			
	簡易評価完了	2016年2月下旬	終了			
3. 腐食抑制策の開発	腐食抑制剤の選定	2014年8月下旬	終了			
	試験要領案策定	2014年11月下旬	終了			
(1)実機適用性のある腐食抑制材の選定	照射・非照射試験結果提示	2015年6月下旬	終了			
	流水環境試験結果提示	2015年7月下旬	終了			
	流水環境試験結果提示	2015年8月下旬	終了			
	照射・非照射試験結果提示	2015年12月下旬	終了			
	腐食抑制剤の抽出	2016年1月上旬	終了			
(2)副次的悪影響の評価	照射・非照射試験結果提示	2015年6月下旬	終了			
	照射・非照射試験結果提示	2015年12月下旬	終了			
	腐食抑制剤の抽出	2016年1月上旬	終了			
4. 長期の腐食減肉量の予測の高度化	試験要領案策定	2014年10月中旬	終了			
	水質分析結果提示	2015年1月下旬	終了			
	水質分析結果提示	2015年3月下旬	終了			
	水質分析結果提示	2015年6月下旬	終了			
	水質分析結果提示	2015年9月下旬	終了			
	溶出成分腐食影響試験結果提示	2015年12月下旬	終了			
	長時間腐食試験結果提示	2016年2月中旬	終了			
	腐食減肉モデル式を構築	2016年2月下旬	終了			
5. ペDESTALの浸食影響評価	試験要領案策定	2014年10月下旬	終了			
	鉄筋コンクリート劣化試験結果(中間)提示	2015年6月下旬	終了			
	鉄筋コンクリート劣化試験結果提示	2015年12月下旬	終了			
	ペDESTALの暫定評価完了	2016年2月下旬	終了			
6. 事業実施報告書の作成	事業実施報告書作成	2016年3月下旬	終了			

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

◆全体実施計画

PCV冠水工法の成立性評価フロー

【完了】

①H25年度の機器評価で裕度が確保できなかった機器の補修(補強)対策を整理

【裕度が確保出来なかった、または低かった機器】

- ・1F-1: コラムサポート
- ・1F-2/3: 原子炉遮へい壁、コラムサポート、耐震サポート

PCV補修技術の開発実施者との協議

②補修(補強)や燃料取り出し設備等の新たなプラント情報を追加した地震応答解析モデル(建屋-機器連成)の構築、解析の実施

【地震応答解析の条件】

- ・H25年度のH25-2及びH25-3をベースとした2ケース
- ・基準地震動Ss(従来Ss:最大加速度600Gal)
- ・原子炉建屋地震応答解析モデル:H25年度使用したモデルを流用

③算定された荷重条件による機器の耐震評価

【評価対象設備】

- ・PCV冠水バウンダリ及び注水冷却設備の機能維持に関わる機器
- ・PCV補修技術の開発で補修対象箇所としている機器は除外

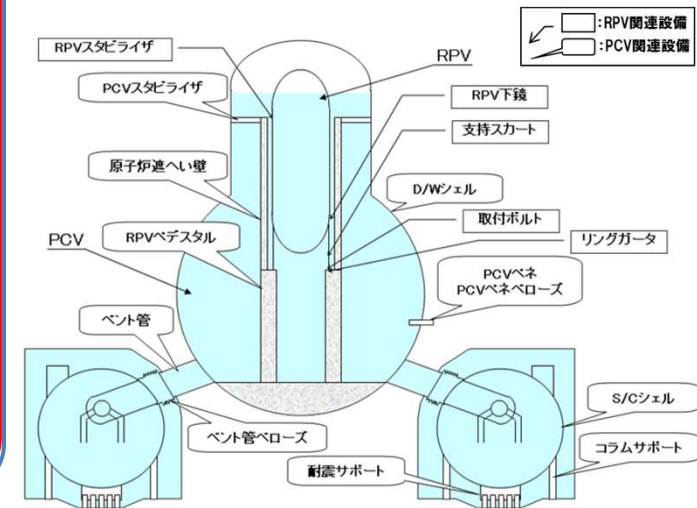
④裕度が低い機器の詳細評価

【詳細評価手法】

- ・有限要素法等による実機を模擬した評価

H25年度に実施された地震応答解析ケース

プラント/ケース	1F-1	1F-2	1F-3
H25-1	<ul style="list-style-type: none"> ○現状想定 ・建屋健全 ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・再空排気管内:満水 ・トラス室水位 ・OP3680 	<ul style="list-style-type: none"> ○現状想定 ・建屋健全 ・D/W水位:約0.6m ・S/C内:OP1100 ・ベント管内:底部流水 ・トラス室水位 ・OP3200 	<ul style="list-style-type: none"> ○現状想定 ・(事故後約3年) ・建屋健全 ・D/W水位:約6.5m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・トラス室水位 ・OP3200
H25-2	<ul style="list-style-type: none"> ○1-ラス室水位制御 ・オベフロ層付加設備 ・約5100 ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・再空排気管内:満水 ・トラス室水位 ・OP-300 	<ul style="list-style-type: none"> ○PCV部分冠水 ・オベフロ層付加設備 ・約5500 ・小部屋埋設 ・D/W水位:約5m ・S/C内: ・コンクリート:OP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位 ・OP-300 	<ul style="list-style-type: none"> ○PCV部分冠水 ・オベフロ層付加設備 ・約5000 ・小部屋埋設 ・D/W水位:約6.5m ・S/C内: ・コンクリート:OP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位 ・OP-300
H25-3	<ul style="list-style-type: none"> ○S/C補修 ・建屋健全 ・オベフロ層付加設備 ・約5100 ・D/W水位:約3.3m ・S/C内: ・コンクリート:OP3570 ・ベント管内:空気 ・再空排気管内:空気 ・トラス室水位 ・OP-300 ・コンクリート:OP-485 	<ul style="list-style-type: none"> ○PCV冠水 ・オベフロ層付加設備 ・約5500 ・小部屋埋設 ・D/W水位:約35m ・S/C内: ・コンクリート:OP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位 ・OP-300 	<ul style="list-style-type: none"> ○PCV冠水 ・オベフロ層付加設備 ・約5000 ・小部屋埋設 ・D/W水位:約35m ・S/C内: ・コンクリート:OP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位 ・OP-300



評価対象設備(例)

※詳細評価により裕度を満足できなかった場合は、更なる補強対策の必要性をPCV補修の技術開発実施者へフィードバックを行う。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

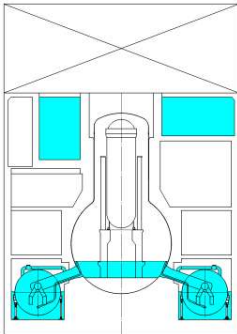
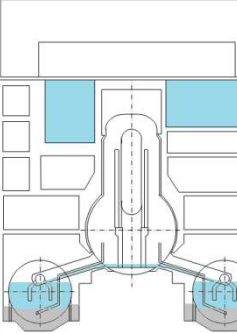
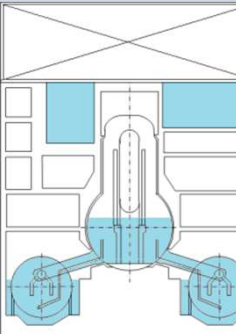
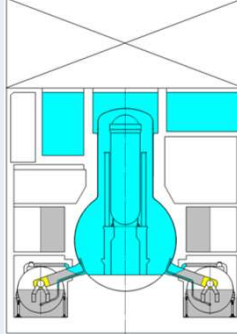
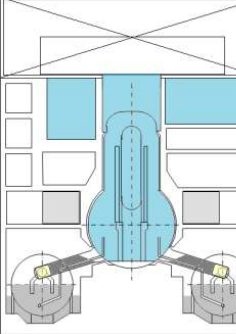
1) 補修や最新計画を反映した地震応答解析モデル構築

◆各プラント毎に燃料デブリ取り出し想定プラント状態2ケースを設定:PCV補修検討状況を考慮

⇒完全冠水モデル:優先して検討、気中(現状水位)モデル:冠水以外の状態による評価を念頭に設定

◆地震応答解析による荷重から各機器の強度評価の実施:パラメータ解析による評価部位の影響分析

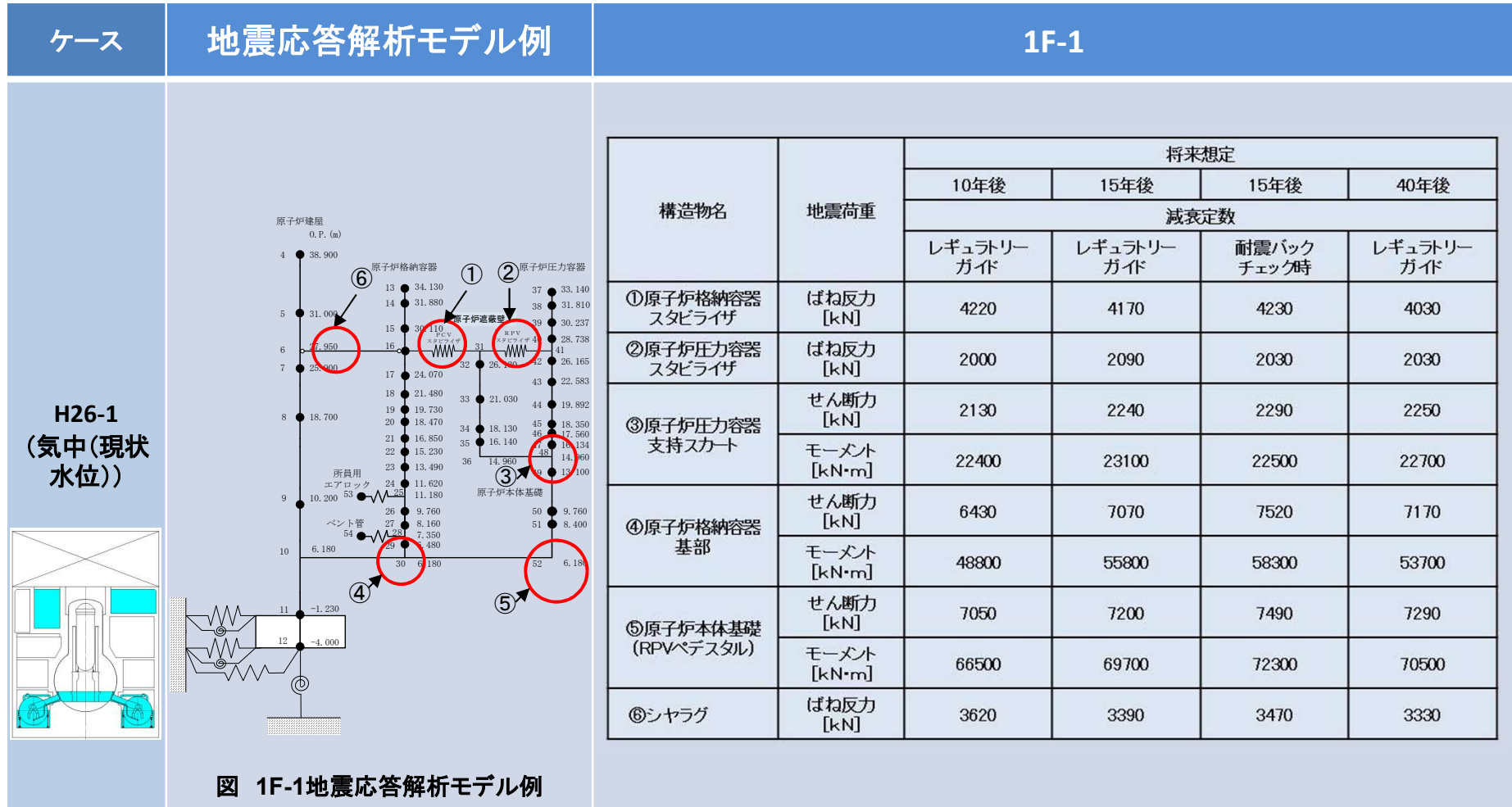
⇒PCV内水位(完全、部分冠水)、腐食減肉(15年後、40年後)、減衰定数(建設条件、合理的減衰)

プラント /ケース	1F-1	1F-2	1F-3
H26-1 (気中(現状 水位))	 <ul style="list-style-type: none"> ・将来想定:パラメータ(10年後、15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・トラス室:OP3680 ・ベント管内:満水 ・真空破壊管内:満水 ・オペフロ階付加設備:パラメータ(なし、約5100t、約6100t) ・小部屋埋設:なし ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラーガイト) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss 	 <ul style="list-style-type: none"> ・将来想定:パラメータ(15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:約0.6m ・S/C内:コンクリートOP-1050水位OP3100 ・トラス室:コンクリート(コラムサポート上部ピン位置:OP.-100) ・ベント管内:下部流水 ・オペフロ階付加設備:約4710t ・小部屋埋設:なし ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラーガイト) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss 	 <ul style="list-style-type: none"> ・将来想定:パラメータ(10年後、15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:約6.5m ・S/C内:満水 ・トラス室:OP.3200 ・ベント管内:満水 ・オペフロ階付加設備:パラメータ(なし、約4710t) ・小部屋埋設:なし ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラーガイト) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss
H26-2 (完全冠水)	 <ul style="list-style-type: none"> ・将来想定:パラメータ(15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:ウェル満水 ・S/C内:コンクリートOP.3570 ・トラス室:コンクリート(コラムサポート上部ピン位置:OP.2140) ・ベント管内:補修考慮 ・真空破壊管内:補修考慮 ・オペフロ階付加設備:約6100t ・小部屋埋設:有り ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラーガイト) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss 	<p>1F-3で代表</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・将来想定:パラメータ(15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:ウェル満水(約35m,OP39920) ・S/C内:コンクリートOP1900 ・トラス室:コンクリート(コラムサポート上部ピン位置:OP.-100) ・ベント管内:補修考慮 ・オペフロ階付加設備:約4710t ・小部屋埋設:有り ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラーガイト) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

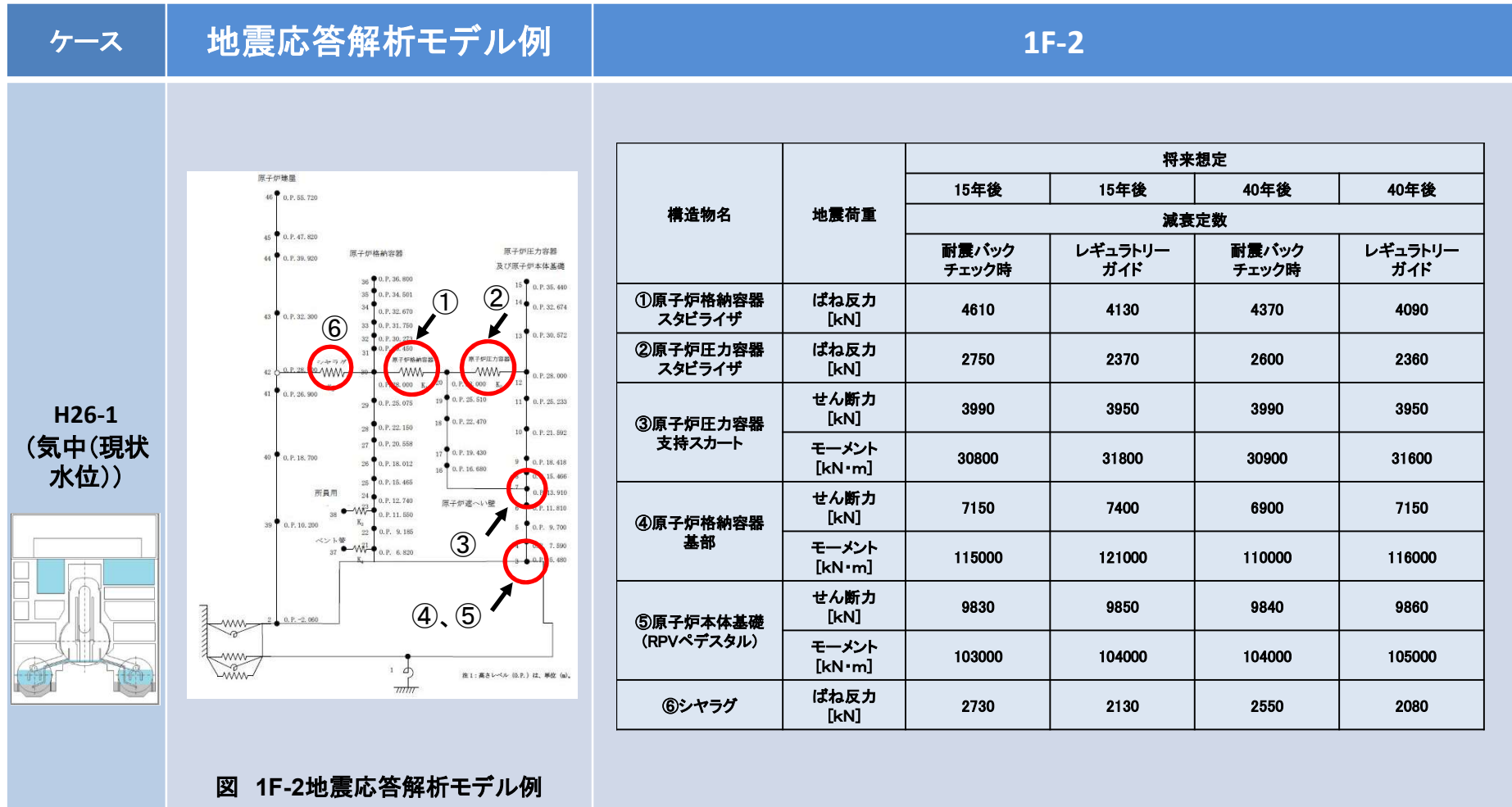
2) 地震応答解析結果(気中(現状水位)H26-1の地震荷重の算定結果:1F-1



6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

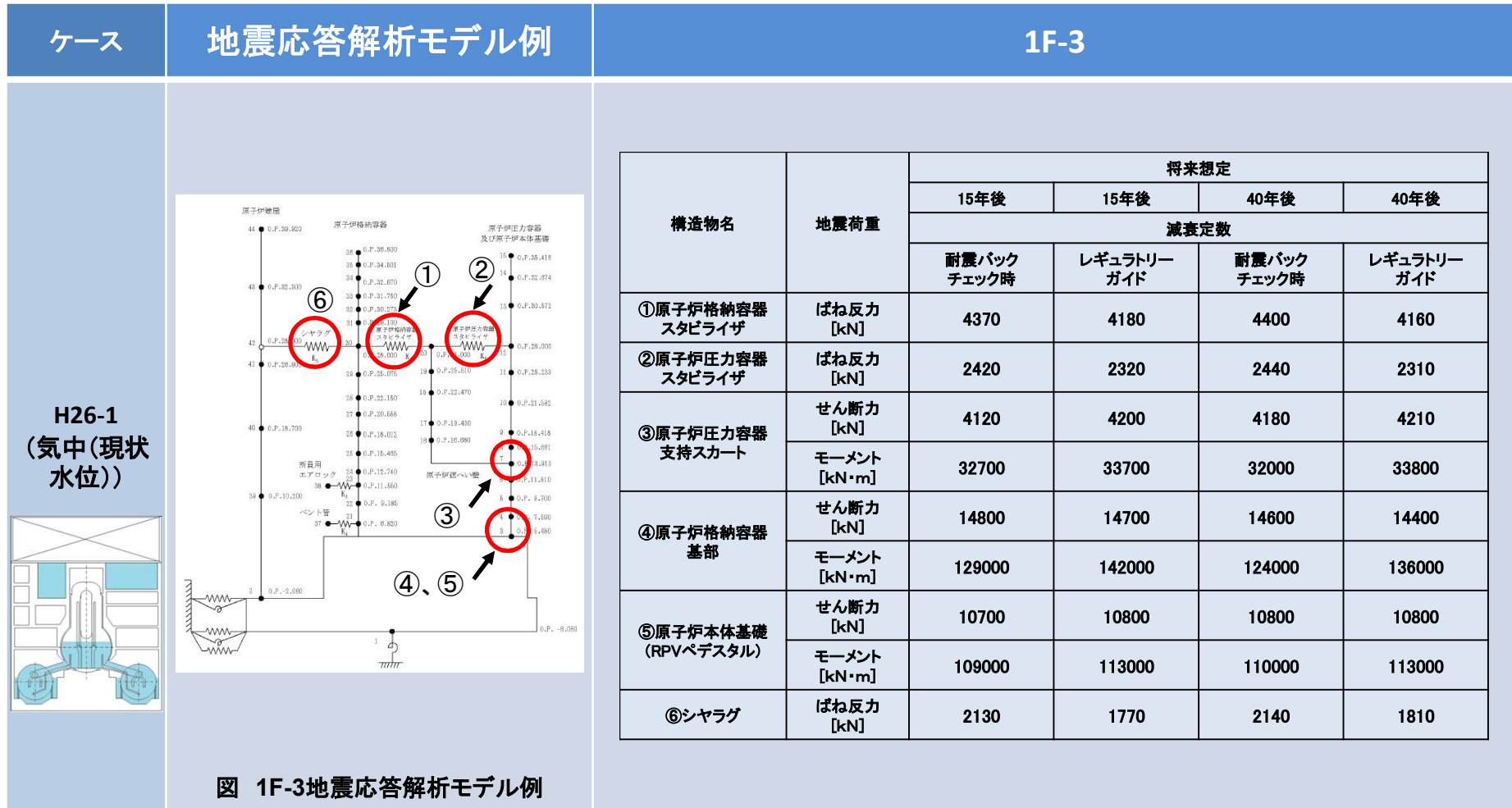
3) 地震応答解析結果(気中(現状水位)H26-1の地震荷重の算定結果: 1F-2)



6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

4) 地震応答解析結果(気中(現状水位)H26-1の地震荷重の算定結果:1F-3)



6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

5)地震応答解析結果(PCV内水位完全冠水モデル(H26-2)の地震荷重の算定結果)

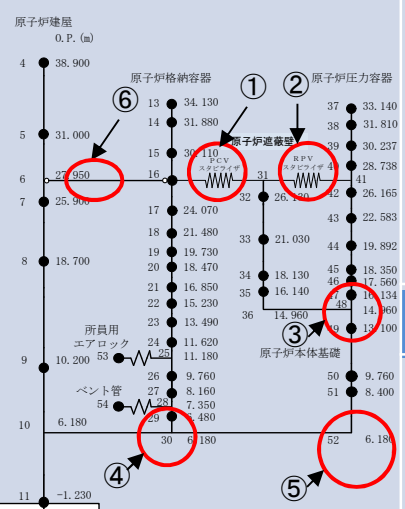
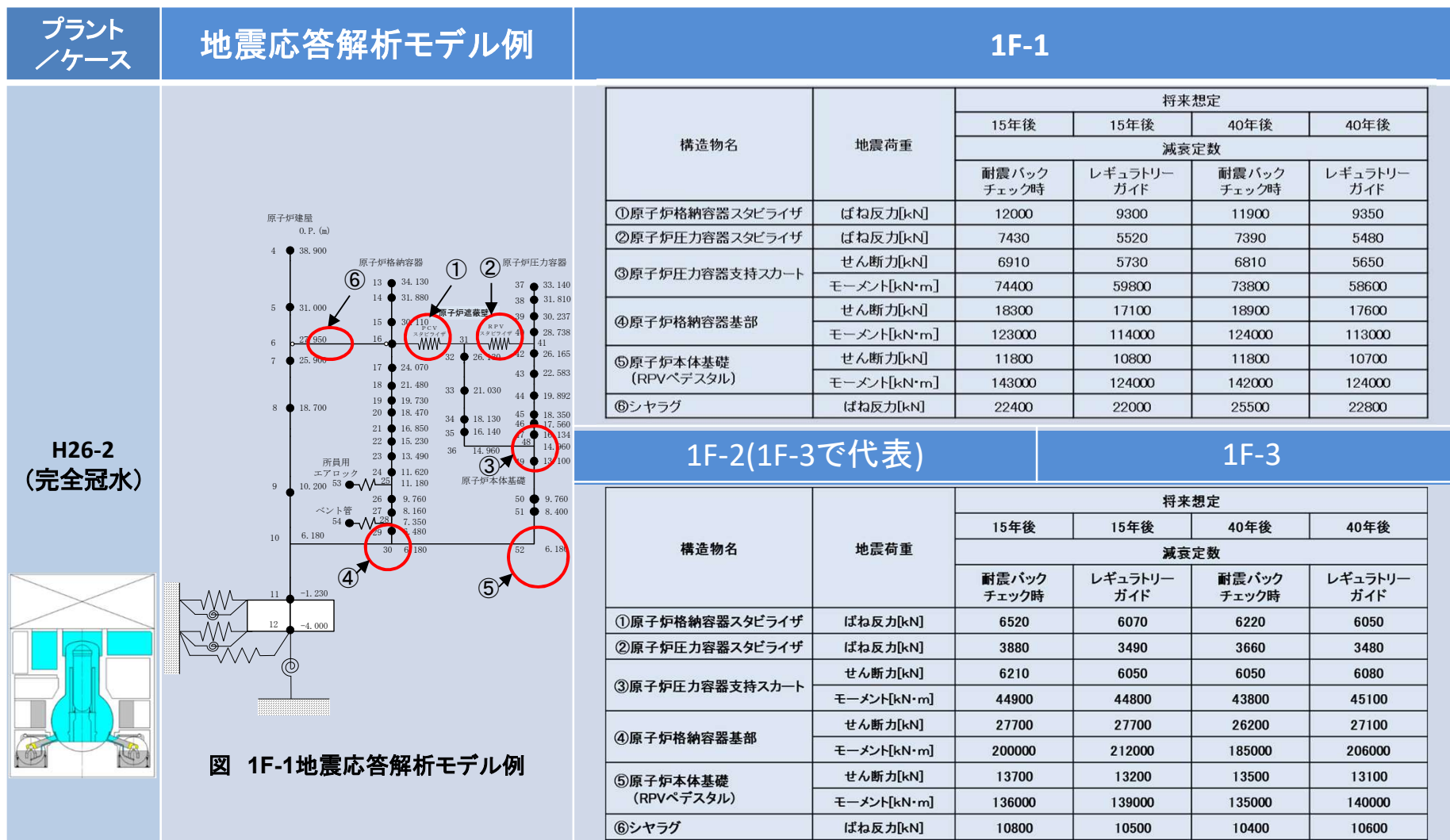


図 1F-1地震応答解析モデル例

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

6) RPV構造健全性評価結果まとめ表(1F-1)

表 RPV機器評価結果(1号機)



H26-1(気中(現状水位))																
		腐食年数(年)			10			15			15			40		
		減衰			RG			RG			設計用			RG		
		オベフロ階付加設備			-			5100 [ton]			6100 [ton]			6100 [ton]		
対称機器	評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度			
RPV支持スカート	RPV支持スカート※1	0.184	1	5.43	0.191	1	5.23	0.189	1	5.29	0.199	1	5.02			
下部鏡板	下部鏡板	191	540	2.82	216	540	2.50	230	540	2.34	229	540	2.35			
RPVスタビライザ	引張棒	162	520	3.20	166	520	3.13	165	520	3.15	172	520	3.02			
取付ボルト	ボルト	33	416	12.60	38	416	10.94	39	416	10.66	40	416	10.40			
リングガーダ	上部フランジ	17	253	14.88	21	253	12.04	21	253	12.04	22	253	11.50			
アンカーボルト	ボルト	26	225	8.65	29	225	7.75	29	225	7.75	30	225	7.50			
H26-2(完全水位)																
		腐食年数(年)			15			15			40			40		
		減衰			RG			設計用			RG			設計用		
		オベフロ階付加設備			6100 [ton]			6100 [ton]			6100 [ton]			6100 [ton]		
対称機器	評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度			
RPV支持スカート	RPV支持スカート※1	0.373	1	2.68	0.446	1	2.24	0.386	1	2.59	0.465	1	2.15			
下部鏡板	下部鏡板	219	540	2.46	230	540	2.34	229	540	2.35	240	540	2.25			
RPVスタビライザ	引張棒	363	520	1.43	446	520	1.16	378	520	1.37	465	520	1.11			
取付ボルト	ボルト	137	416	3.03	178	416	2.33	141	416	2.95	186	416	2.23			
リングガーダ	上部フランジ	76	253	3.32	99	253	2.55	81	253	3.12	108	253	2.34			
アンカーボルト	ボルト	95	225	2.36	122	225	1.84	98	225	2.29	128	225	1.75			

※1: JEAC4601-2008に基づく座屈評価 (座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$) を示す。

RPVスタビライザについては、引張棒の実強度を調査し、許容値を満足することを確認した。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

7) RPV構造健全性評価結果(1F-1 評価ケースH26-1)

評価設備: 左図参照
 評価条件: 耐震条件 - S_s波
 評価温度 - 50°C
 供用状態 - D_s
 腐食減肉量 - 右記表参照

腐食年数 (年)	減肉量一片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.86	3.40
15	1.80	2.44
10	1.49	2.15

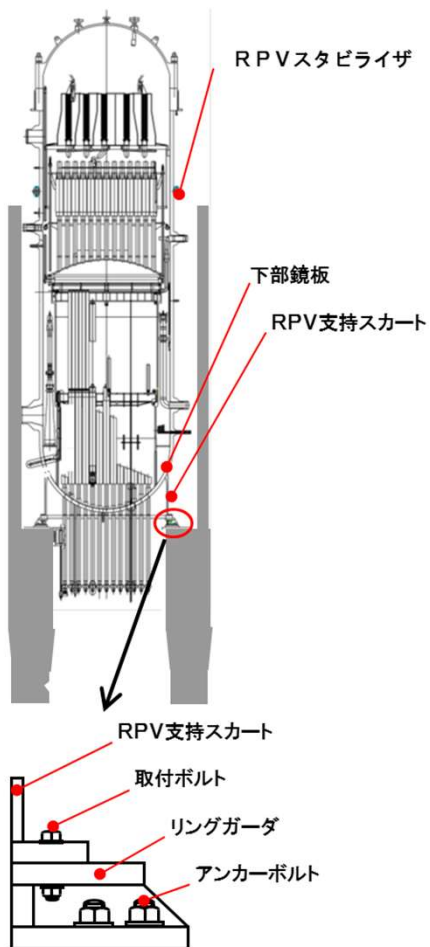


図. 評価対象部位

RPV支持スカート(圧縮)

腐食年数 (年)	座屈評価値 (-)		許容値 (-)	裕度		
	設計用	RG		設計用	RG	
40	0.189	0.199	1	5.02	5.43	
15	0.189	0.191		5.29		5.23
10	0.184	0.184		5.29		5.23

※: 座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$
 (出展: JEAC4601-2008)

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度		
	設計用	RG		設計用	RG	
40	165	172	520	3.02	3.20	
15	165	166		3.15		3.13
10	165	162		3.15		3.13

リングガーダ上部フランジ(曲げ)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度		
	設計用	RG		設計用	RG	
40	21	22	253	11.50	14.88	
15	21	21		12.04		12.04
10	17	17		12.04		12.04

下部鏡板(一次応力)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度		
	設計用	RG		設計用	RG	
40	230	229	540	2.34	2.82	
15	230	216		2.35		2.50
10	191	191		2.34		2.50

※: 本表の応力強さは工認記載の応力強さを基に
 プラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

取付ボルト-ボルト(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度		
	設計用	RG		設計用	RG	
40	39	40	416	10.66	12.60	
15	39	38		10.40		10.94
10	33	33		10.66		10.94

アンカーボルト-ボルト(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度		
	設計用	RG		設計用	RG	
40	29	30	225	7.75	8.65	
15	29	29		7.50		7.75
10	26	26		7.75		7.75

設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド): 鋼製減衰4%

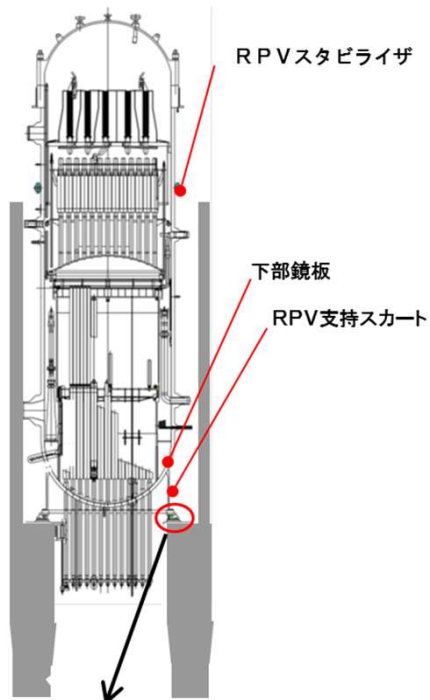
6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

8) RPV構造健全性評価結果(1F-1 評価ケースH26-2)

評価設備: 左図参照
 評価条件: 耐震条件 - Ss波
 評価温度 - 50°C
 供用状態 - Ds
 腐食減肉量 - 右記表参照

腐食年数 (年)	減肉量一片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.86	3.40
15	1.80	2.44
10	1.49	2.15



RPV支持スカート(圧縮)

腐食年数 (年)	座屈評価値 (-)		許容値 (-)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	0.465	0.386	1	2.15	2.59
15	0.446	0.373		2.24	2.68

※: 座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$
 (出展: JEAC4601-2008)

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	465	378	520	1.11	1.37
15	446	363		1.16	1.43

リングガーダー上部フランジ(曲げ)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	108	81	253	2.34	3.12
15	99	76		2.55	3.32

下部鏡板(一次応力)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	240	229	540	2.25	2.35
15	230	219		2.34	2.46

※: 本表の応力強さは工認記載の応力強さを基に
 プラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

取付ボルト-ボルト(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	186	141	416	2.23	2.95
15	178	137		2.33	3.03

アンカーボルト-ボルト(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	128	98	225	1.75	2.29
15	122	95		1.84	2.36

図. 評価対象部位

設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド): 鋼製減衰4%

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

9) RPV構造健全性評価結果まとめ表(1F-2)

表 RPV機器評価結果(2号機)

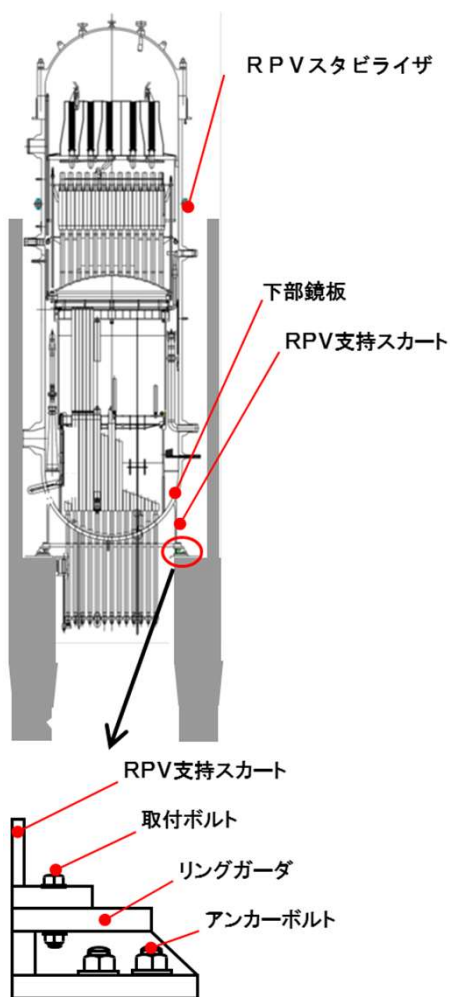
		H26-1(氣中(現状水位))												
		15			15			40			40			
		減衰			設計用			レギュラトリーガイド			設計用			
		オペフロ階付加設備			4710 [ton]			4710 [ton]			4710 [ton]			4710 [ton]
対称機器	評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	
RPV支持スカート	RPV支持スカート(※1)	0.148	1	6.75	0.146	1	6.84	0.153	1	6.53	0.152	1	6.57	
下部鏡板	下部鏡板	120	540	4.50	125	540	4.32	124	540	4.35	129	540	4.18	
RPVスタビライザ	引張棒	158	348	2.20	166	348	2.09	165	348	2.10	170	348	2.04	
取付ボルト	ボルト	31	505	16.29	30	505	16.83	32	505	15.78	31	505	16.29	
リングガーダ	上部フランジ	28	253	9.03	28	253	9.03	30	253	8.43	29	253	8.72	
アンカーボルト	ボルト	14	225	16.07	13	225	17.30	14	225	16.07	13	225	17.30	
		H26-2(完全水位)												
3号機で完全水位のプラント状態を代表する。														

※1: JEAC4601-2008に基づく座屈評価 (座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$) を示す。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

10) RPV構造健全性評価結果(1F-2 評価ケースH26-1)



評価設備: 左図参照
 評価条件: 耐震条件—Ss波
 評価温度—50℃
 供用状態—Ds
 腐食減肉量—右記表参照

腐食年数 (年)	減肉量一片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.90	2.61
15	1.82	1.64

RPV支持スカート(圧縮)

腐食年数 (年)	座屈評価値 (-)		許容値 (-)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	0.152	0.153	1	6.57	6.53
15	0.146	0.148		6.84	6.75

※: 座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$
 (出展: JEAC4601-2008)

下部鏡板(一次応力)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	129	124	540	4.18	4.35
15	125	120		4.32	4.50

※: 本表の応力強さは工認記載の応力強さを基にプラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	170	165	348	2.04	2.10
15	166	158		2.09	2.20

取付ボルトーボルト(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	31	32	505	16.29	15.78
15	30	31		16.83	16.29

リングガーダー上部フランジ(曲げ)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	29	30	253	8.72	8.43
15	28	28		9.03	9.03

アンカーボルトーボルト(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	13	14	225	17.30	16.07
15	13	14		17.30	16.07

図. 評価対象部位

建設時設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド): 鋼製減衰4%

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

11) RPV構造健全性評価結果まとめ表(1F-3)

表 RPV機器評価結果(3号機)

		H26-1(氣中(現状水位))																	
		廣食年数(年)			10			15			15			40			40		
		減衰			レギュラトリーガイド			レギュラトリーガイド			設計用			レギュラトリーガイド			設計用		
		オペフロ階付加設備			なし			4710 [ton]			4710 [ton]			4710 [ton]			4710 [ton]		
対称機器	評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度			
RPV支持スカート	RPV支持スカート※1	0.115	1	8.69	0.131	1	7.63	0.129	1	7.75	0.136	1	7.35	0.133	1	7.51			
下部鏡板	下部鏡板	148	540	3.64	149	540	3.62	156	540	3.46	154	540	3.50	161	540	3.35			
RPVスタビライザ	引張棒	176	634	3.60	192	634	3.30	194	634	3.26	202	634	3.13	205	634	3.09			
取付ボルト	ボルト	15	505	33.66	31	505	16.29	30	505	16.83	33	505	15.30	29	505	17.41			
リングガーダ	上部フランジ	12	253	21.08	23	253	11.00	23	253	11.00	25	253	10.12	22	253	11.50			
アンカーボルト	ボルト	7	225	32.14	13	225	17.30	13	225	17.30	14	225	16.07	13	225	17.30			
		H26-2(完全水位)																	
		廣食年数(年)			-			15			15			40			40		
		減衰			-			レギュラトリーガイド			設計用			レギュラトリーガイド			設計用		
		オペフロ階付加設備			-			4710 [ton]			4710 [ton]			4710 [ton]			4710 [ton]		
対称機器	評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度			
RPV支持スカート	RPV支持スカート※1	-	-	-	0.163	1	6.13	0.164	1	6.09	0.170	1	5.88	0.168	1	5.95			
下部鏡板	下部鏡板	-	-	-	142	540	3.80	149	540	3.62	147	540	3.67	154	540	3.50			
RPVスタビライザ	引張棒	-	-	-	217	634	2.92	226	634	2.80	228	634	2.78	232	634	2.73			
取付ボルト	ボルト	-	-	-	74	505	6.82	76	505	6.64	79	505	6.39	78	505	6.47			
リングガーダ	上部フランジ	-	-	-	55	253	4.60	57	253	4.43	59	253	4.28	58	253	4.36			
アンカーボルト	ボルト	-	-	-	33	225	6.81	34	225	6.61	35	225	6.42	34	225	6.61			



※1: JEAC4601-2008に基づく座屈評価 (座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$) を示す。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

12) RPV構造健全性評価結果(1F-3 評価ケースH26-1)

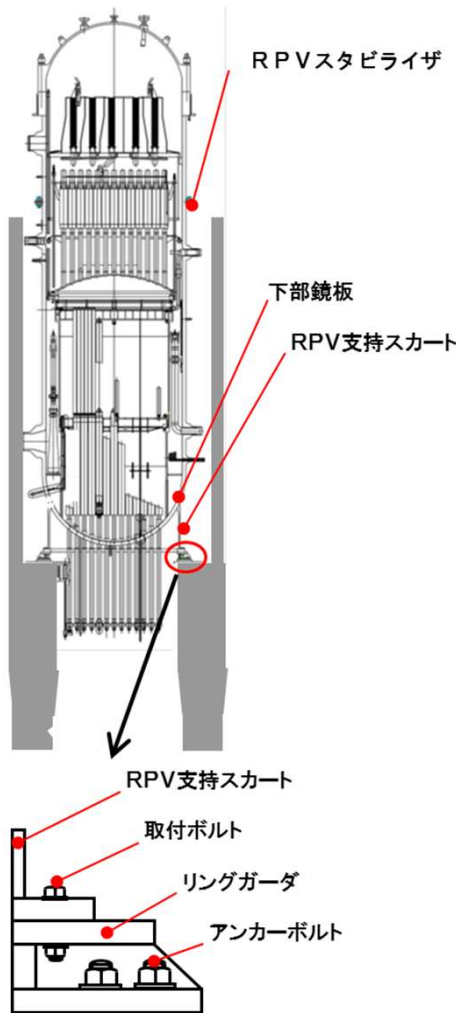


図. 評価対象部位



評価設備: 左図参照
 評価条件: 耐震条件 - Ss波
 評価温度 - 50°C
 供用状態 - Ds
 腐食減肉量 - 右記表参照

RPV支持スカート(圧縮)

腐食年数(年)	座屈評価値 (-)		許容値 (-)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	0.133	0.136	1	7.51	7.35
15	0.129	0.131		7.75	7.63
10	-	0.115		-	8.69

※: 座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$
 (出展: JEAC4601-2008)

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食年数(年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	205	202	634	3.09	3.13
15	194	192		3.26	3.30
10	-	176		-	3.60

リングガーダー上部フランジ(曲げ)

腐食年数(年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	22	25	253	11.50	10.12
15	23	23		11.00	11.00
10	-	12		-	21.08

腐食年数(年)	減肉量一片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.97	2.57
15	1.89	1.61
10	1.57	1.32

下部鏡板(一次応力)

腐食年数(年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	161	154	540	3.35	3.50
15	156	149		3.46	3.62
10	-	148		-	3.64

※: 本表の応力強さは工認記載の応力強さを基に
 プラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

取付ボルト-ボルト(引張)

腐食年数(年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	29	33	505	17.41	15.30
15	30	31		16.83	16.29
10	-	15		-	33.66

アンカーボルト-ボルト(引張)

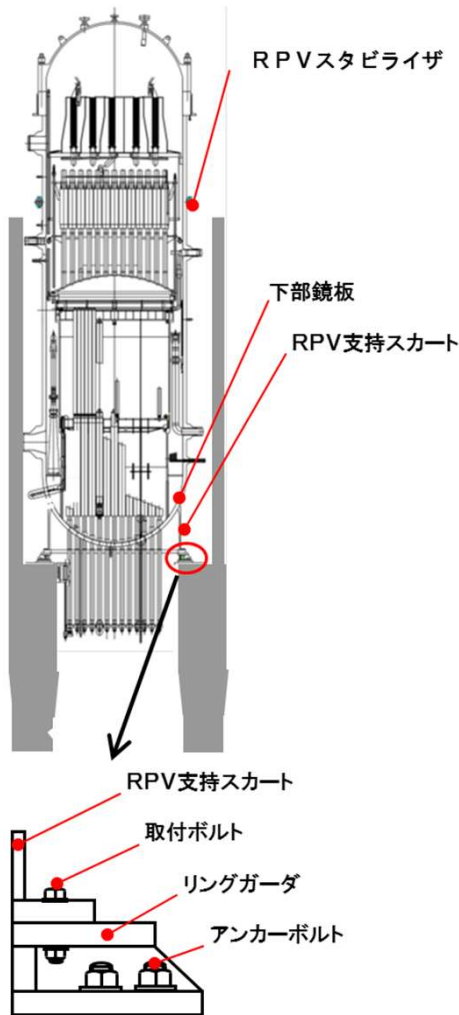
腐食年数(年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	13	14	225	17.30	16.07
15	13	13		17.30	17.30
10	-	7		-	32.14

建設時設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド): 鋼製減衰4%

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

13) RPV構造健全性評価結果(1F-3 評価ケースH26-2)



評価設備: 左図参照
 評価条件: 耐震条件 - Ss波
 評価温度 - 50°C
 供用状態 - Ds
 腐食減肉量 - 右記表参照

腐食年数 (年)	減肉量一片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.97	2.57
15	1.89	1.61

RPV支持スカート(圧縮)

腐食年数 (年)	座屈評価値 (-)		許容値 (-)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	0.168	0.170	1	5.95	5.88
15	0.164	0.163		6.09	6.13

※: 座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$
 (出展: JEAC4601-2008)

下部鏡板(一次応力)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	154	147	540	3.50	3.67
15	149	142		3.62	3.80

※: 本表の応力強さは工認記載の応力強さを基にプラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	232	228	634	2.73	2.78
15	226	217		2.80	2.92

取付ボルト-ボルト(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	78	79	505	6.47	6.39
15	76	74		6.64	6.82

リングガーダー上部フランジ(曲げ)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	58	59	253	4.36	4.28
15	57	55		4.43	4.60

アンカーボルト-ボルト(引張)

腐食年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40	34	35	225	6.61	6.42
15	34	33		6.61	6.81

図. 評価対象部位

建設時設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド): 鋼製減衰4%

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

14) PCV構造健全性評価結果まとめ表(1F-1)

対象機器	H26-1(気中(現状水位))												H26-2(完全冠水)												
	10年後			15年後						40年後			15年後						40年後						
	RG			RG			設計用			RG			RG			設計用			RG			設計用			
	なし			5100 ton			6100 ton			6100 ton			6100 ton			6100 ton			6100 ton			6100 ton			
評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	
①-1 PCV(D/Wシェル)	サンドクッション部	122	423	3.46	140	423	3.02	143	423	2.95	167	423	2.53	264	423	1.60	274	423	1.54	325	423	1.30	343	423	1.23
①-1 PCV(S/Cシェル)	一般部	180	282	1.56	174	282	1.62	201	282	1.40	246	282	1.14	27	282	10.44	27	282	10.44	34	282	8.29	34	282	8.29
②ベント管	ベント管とDW間の 接合部	111	423	3.81	128	423	3.30	142	423	2.97	171	423	2.47	276	423	1.53	289	423	1.46	375	423	1.12	395	423	1.07
③PCVベネ<機器ハッチ>	補強板と格納容器胴 との接合部	47	423	9.00	48	423	8.81	52	423	8.13	57	423	7.42	180	423	2.35	186	423	2.27	203	423	2.08	212	423	1.99
④原子炉遮蔽壁	胴基部	111	235	2.11	123	235	1.91	127	235	1.85	168	235	1.39	179	235	1.31	212	235	1.10	243 *1	235 (394)	0.96 (1.62)	282 *1	235 (394)	0.83 (1.39)
⑤PCVスタビライザ<シアラグ>	シアラグ取付部	107	423	3.95	104	423	4.06	105	423	4.02	118	423	3.58	140 *2	423	3.02	156 *2	423	2.71	165 *2	423	2.56	184 *2	423	2.29
⑥コラムサポート	外側コラムサポート	応答低減係数0.35 1.256	1	0.79	1.052	1	0.95	1.337	1	0.74	1.139	1	0.87	S/C脚部補強により評価範囲外											
		応答低減係数1.0	1	0.27	3.006	1	0.33	3.820	1	0.26	3.255	1	0.30												

注) 許容値は、設計・建設規格より、供用状態Dsにおける温度50°Cの値とする。

コラムサポートの応力強さは、組合せ応力(圧縮+曲げ) $\sigma_c/f_c + \sigma_b/f_b$ とし、許容値(f_c および f_b)は常温でF値をSu値として評価(圧縮に対してはF値を1.2Syとした)

* 1: 供用状態Dsの許容値を上回るが、許容値に()内のSu値を用いた場合、許容値を下回る。

* 2: シアラグについてはH26-2において発生値が許容値を超えているため、三次元FEM解析による評価を実施した。

S/C脚部補強を想定した場合、H26-2(完全冠水)のすべてのケースで、発生値が許容値以内であることがわかった。
H26-1(気中(現状水位))のすべてのケースにおいて、コラムサポートでは発生値が許容値を超えているため、S/C脚部補強を実施することが望ましいが、汚染水の建屋外への漏えい抑制の観点から、S/C脚部補強なしでの詳細評価を追加実施した。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

15) PCV構造健全性評価結果(1F-1 評価ケースH26-1)

評価設備: 図参照

評価条件:
 ・耐震条件 : Ss波
 ・評価温度 : 50°C
 ・供用状態 : Ds
 ・腐食減肉量 : 右記表参照

評価結果:

⑤ PCVスタビライザ(シアラグ)(評価部位:シアラグ取付部)
 一次応力評価結果

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	107	423	-	3.95
15	105	104	423	4.02	4.06
40	-	118	423	-	3.58

④ 原子炉遮へい壁(評価部位:胴基部)
 一次応力評価結果

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	111	235	-	2.11
15	127	123	235	1.85	1.91
40	-	168	235	-	1.39

② ベント管(評価部位:ベント管とD/W胴の接合部)
 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	111	423	-	3.81
15	142	128	423	2.97	3.30
40	-	171	423	-	2.47

1号機 ドライウェル推定減肉量(片面)(mm)

事故後	10年	15年	40年
推定減肉量	2.15	2.44	3.40

1号機 サプレッションチェンバ
 推定減肉量(片面)(mm)

事故後	10年	15年	40年
推定減肉量	1.09	1.36	2.30

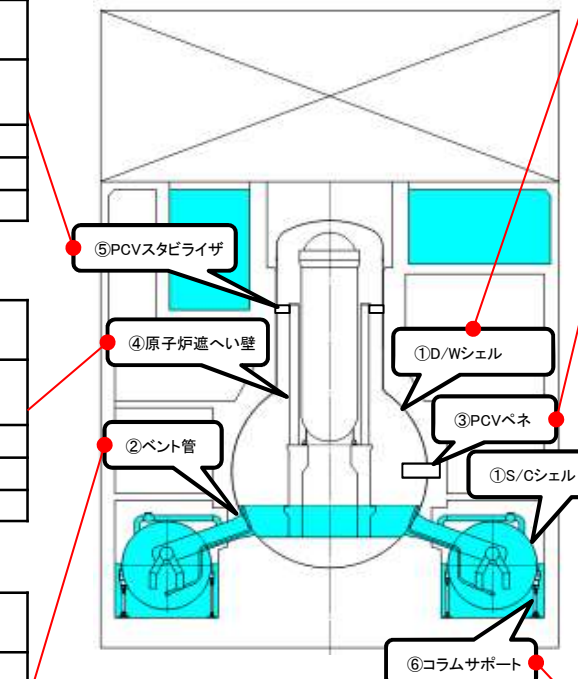


図 評価設備(ケースH26-1)

①-1 D/Wシェル(評価部位:サンドクッション部)
 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	122	423	-	3.46
15	143	140	423	2.95	3.02
40	-	167	423	-	2.53

③ PCVペネ<機器ハッチ>(評価部位:補強板と格納容器胴との接合部)
 一次応力評価結果

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	47	423	-	9.00
15	52	48	423	8.13	8.81
40	-	57	423	-	7.42

① S/Cシェル(評価部位:一般部)
 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	180	282	-	1.56
15	201	174	282	1.40	1.62
40	-	246	282	-	1.14

⑥ コラムサポート(評価部位:外側コラムサポート)
 一次応力評価結果(応答低減係数を1.0としたもの)

腐食年数(年)	組合せ応力(圧縮+曲げ) $\sigma_c/f_c + \sigma_b/f_b$		許容値	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	3.589	1	-	0.27
15	3.820	3.006	1	0.26	0.33
40	-	3.255	1	-	0.30

注:コラムサポートの許容値(f_c 及び f_b)は常温でF値をSu値とし評価(圧縮に対してはF値を1.2Sy値とした)

注)建設時設計用:鋼製減衰1% RG(レギュラトリガイド):鋼製減衰4%

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

16) PCV構造健全性評価結果(1F-1 評価ケースH26-2)

評価設備: 図参照

評価条件: 耐震条件 : Ss波
 評価温度 : 50°C
 供用状態 : Ds
 腐食減肉量 : 右記表参照

評価結果:

⑤ PCVスタビライザ(シアラグ)(評価部位:シアラグ取付部) 一次応力評価結果

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
15	156*	140*	423	2.71	3.02
40	184*	165*	423	2.29	2.56

注*: 三次元FEM解析による評価結果

④ 原子炉遮へい壁(評価部位: 胴基部) 一次応力評価結果

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
15	212	179	235	1.10	1.31
40	282*	243*	235 (394)	0.83 (1.39)	0.96 (1.62)

注*: 許容値に()内のSu値を用いた場合、許容値を下回る。

② ベント管(評価部位: ベント管とD/W胴の接合部) 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
15	289	276	423	1.46	1.53
40	395	375	423	1.07	1.12

1号機 ドライウエル

推定減肉量(片面)(mm)		
事故後	15年	40年
推定減肉量	2.44	3.40

1号機 サプレッションチェンバ

推定減肉量(片面)(mm)		
事故後	15年	40年
推定減肉量	1.36	2.30

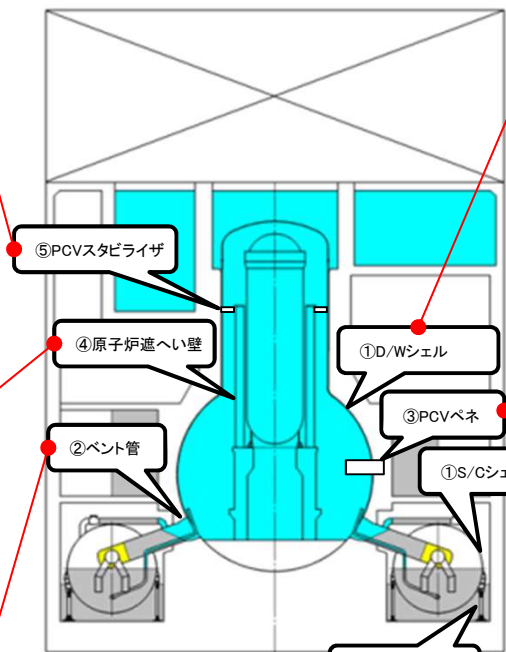


図 評価設備(ケースH26-2)

①-1 D/Wシェル(評価部位: サンドクッション部) 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
15	274	264	423	1.54	1.60
40	343	325	423	1.23	1.30

③ PCVペネ<機器ハッチ>(評価部位: 補強板と格納容器胴との接合部) 一次応力評価結果

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
15	186	180	423	2.27	2.35
40	212	203	423	1.99	2.08

① S/Cシェル(評価部位: 一般部) 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食年数(年)	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
15	27	27	282	10.44	10.44
40	34	34	282	8.29	8.29

⑥コラムサポート : S/C脚部補強により、評価対象外

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

注)建設時設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリガイド): 鋼製減衰4%

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

17) PCV構造健全性評価 詳細評価概要 (1F-1)

- 準用規格
- ① JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程
 - ② JSME SNC1-2005 発電用原子力設備規格 設計・建設規格
 - ③ JSME SNA1-2012 発電用原子力設備規格 維持規格
(添付E-16 2倍勾配法を準用し、2倍勾配点を崩壊限界とする。)
 - ④ JSME S NX2-2014 発電用原子力設備規格 シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン
(BWR鋼製格納容器編) 弾塑性解析の解が収束しなくなる直前の状態をもって崩壊限界とみなす。

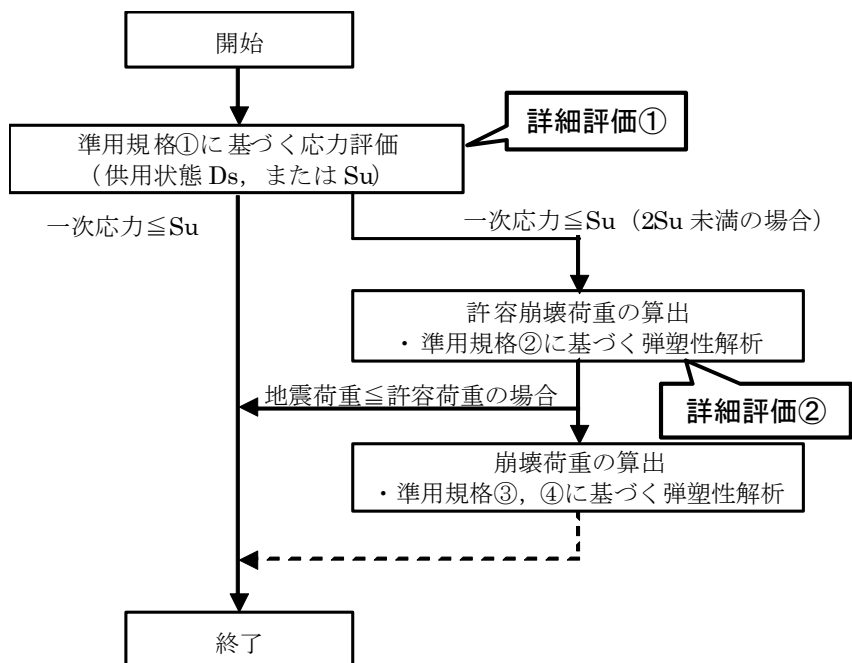


図 詳細評価解析手順

S/C脚部補強なしで実現可能性を確認するため、評価ケースとして、「S/C内水抜き(気中)」、「S/C内埋設量低減」および「気中工法にベント管止水、SC内充填を実施した場合」の3ケース(次頁参照)を選定し、詳細評価を実施した。
詳細評価は左図のフローに基づき実施した。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

18) PCV構造健全性評価結果(1F-1 詳細評価①)

S/C脚部補強の実施を想定していたが、汚染水の建屋外への漏えい抑制の観点から、S/C脚部補強なしの評価ケースとして3ケースを選定し、詳細評価を実施した。詳細評価①では「JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程」を準用した弾性解析による応力評価を実施した。

対象機器	S/C内水抜き(気中)			S/C内埋設量低減			気中工法にベント管止水、SC内充填を実施した場合					
	15年後	設計用	6100 ton	15年後	40年後	設計用	6100 ton	15年後	設計用	6100 ton		
評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
②ベント管	-	-	-	311	423	1.36	422	423	1.00	140	423	3.02
⑥コラムサポート	0.767	1	1.30	2.019 (1.465)	1	0.49 (0.68)	2.114 (1.535)	1	0.47 (0.65)	1.917 (1.394)	1	0.52 (0.71)

注)・許容値は、設計・建設規格より、供用状態Dsにおける温度50°Cの値とする。

・コラムサポートの応力強さは、組合せ応力(圧縮+曲げ) $\sigma_c/f_c + \sigma_b/f_b$ とした。()内は許容値(f_c 及び f_b)に常温でF値をSu値として評価(圧縮に対してはF値を1.2Syとした)した値。

「S/C内水抜き(気中)」については、発生値が許容値以内であることがわかった。「S/C内埋設量低減」および「気中工法にベント管止水、SC内充填を実施した場合」のケースにおいてはDs値およびSu値を超えていることがわかった。ここでSu値を超えたケースについて、コラムサポートの変形挙動を把握するため、次頁に述べる弾塑性解析を実施した。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

19) PCV構造健全性評価結果(1F-1 詳細評価②)

詳細評価①において許容値を満足しなかったケースについて、「JSME SNC1-2005 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」を準用した弾塑性解析を実施し評価した。

コラムサポートは、クラスMC支持構造物であるが、JSME設計・建設規格の炉心支持構造物の規定であるCSS-3160を準用して、極限解析(弾塑性解析)による評価を実施した。

応力—ひずみ曲線は弾完全塑性体とし、降伏応力を $\min(2.3S_m, 0.7S_u)$ とした。

崩壊荷重 P_c 及び許容荷重 P_{cr} は、JSME設計・建設規格のCSS-3160を準用して定めた。

崩壊荷重 P_c は、荷重—変位量の曲線(弾塑性解析結果)において、弾性範囲の荷重軸に対する2倍の勾配の直線を求め、この直線と荷重—変位曲線の交点を崩壊荷重 P_c と定義した。

許容荷重 P_{cr} は、崩壊荷重 P_c に0.9を乗じた値とした。

対象機器	S/C内埋設量低減				気中工法にベント管止水、SC内充填を実施した場合								
	15年後		40年後		15年後								
腐食年数	15年後		40年後		15年後								
減衰定数	設計用		設計用		設計用								
オペフロ階付加設備	6100 ton		6100 ton		6100 ton								
評価部位	地震荷重*1 水平震度 (G)	弾塑性解析結果 水平震度(G) 崩壊荷重 P_c (2倍勾配点)	許容荷重*2 P_{cr} (G)	裕度	地震荷重*1 水平震度 (G)	弾塑性解析結果 水平震度(G) 崩壊荷重 P_c (2倍勾配点)	許容荷重*2 P_{cr} (G)	裕度	地震荷重*1 水平震度 (G)	弾塑性解析結果 水平震度(G) 崩壊荷重 P_c (2倍勾配点)	許容荷重*2 P_{cr} (G)	裕度	
◎コラムサポート	外側コラムサポート	1.71	2.30	2.07	1.21	1.70	2.17	1.95	1.15	1.61	2.30	2.07	1.29

注記: * 1) 水平震度は、S/C系解析モデルで固有値解析を実施し、床応答スペクトルから得られた加速度を示す。
* 2) 許容荷重 P_{cr} は、崩壊荷重 P_c に0.9を乗じた値を示す。

詳細評価②の結果、「S/C内埋設量低減」および「気中工法にベント管止水、SC内充填を実施した場合」のすべてのケースにおいて、許容荷重以内であることがわかった。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

PCV構造健全性評価 2倍勾配法図

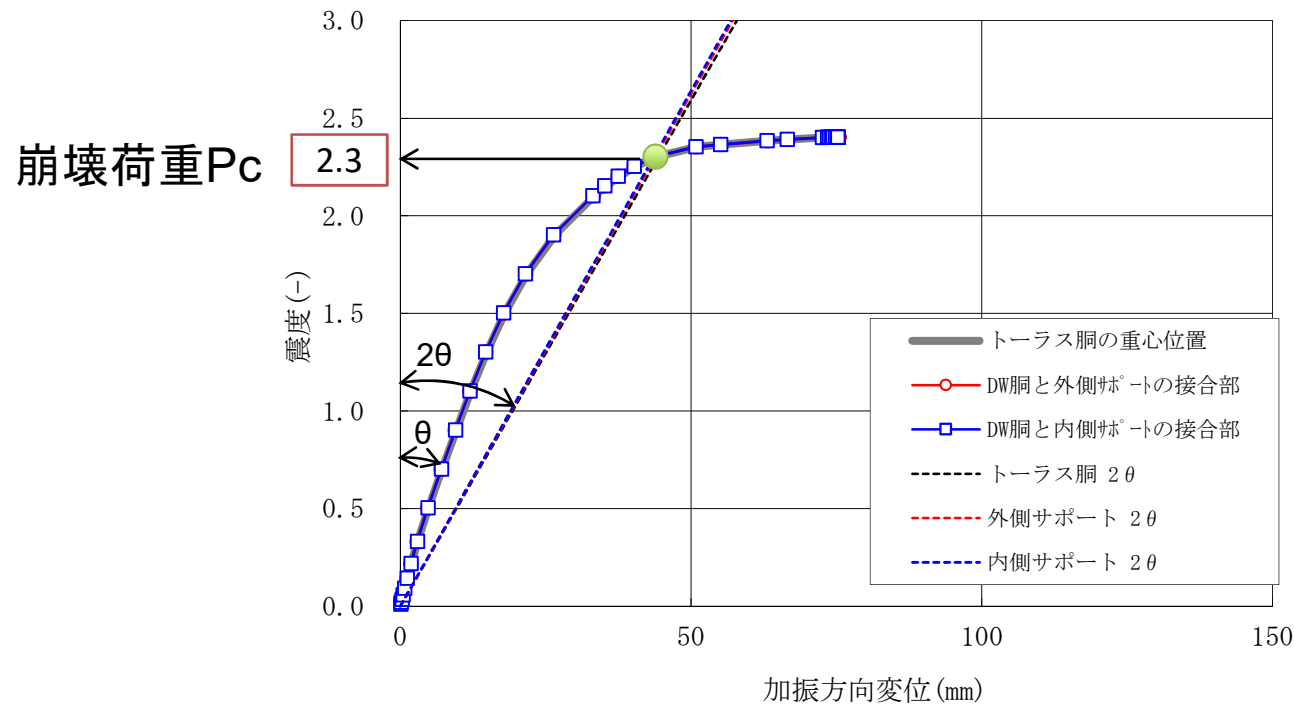


図 2倍勾配法による崩壊荷重

ケース:S/C内埋設量低減 腐食年数:15年後 減衰定数:設計用 オペフロ階付加設備:6100ton

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

20) PCV構造健全性評価結果まとめ表(1F-2)

表 PCV構造物評価結果(2号機)

対象機器	H26-1(気中(現状水位))	H26-2(完全冠水)																							
		15年後相当												40年後相当											
		レギュトリーガイド (コンクリート7%, 鋼材4%)			設計用 (コンクリート5%, 鋼材1%)			レギュトリーガイド (コンクリート7%, 鋼材4%)			設計用 (コンクリート5%, 鋼材1%)			レギュトリーガイド (コンクリート7%, 鋼材4%)			設計用 (コンクリート5%, 鋼材1%)			レギュトリーガイド (コンクリート7%, 鋼材4%)			設計用 (コンクリート5%, 鋼材1%)		
		4710 ton			4710 ton			4710 ton			4710 ton			4710 ton			4710 ton			4710 ton			4710 ton		
評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	
①-1 PCV(D/Wシェル)	サンドクッション部	76	424	5.57	74	424	5.72	79	424	5.36	78	424	5.43	185	424	2.29	183	424	2.31	196	424	2.16	192 ^{*1}	424	2.20
①-2 PCV(S/Gシェル)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
② ベント管	ベント管とD/W胴の接合部	143	424	2.96	151	424	2.80	145	424	2.92	153	424	2.77	263	424	1.61	266	424	1.59	265	424	1.60	268	424	1.58
③ PCVベネ(機器ハッチ)	ドライウェル球形取付部	48	424	8.83	48	424	8.83	53	424	8.00	53	424	8.00	139	424	3.05	142	424	2.98	153	424	2.77	155	424	2.73
④ 原子炉遮蔽壁	基部	74	235	3.17	77	235	3.05	122	235	1.92	125	235	1.88	96	235	2.44	104	235	2.25	158	235	1.48	168	235	1.39
⑤ PCVスタビライザ(シアラグ)	ドライウェル本体 *2:ガゼットプレート溶接部	103	282	2.73	104	282	2.71	116	282	2.43	117	282	2.41	55 ^{*2}	146	2.65	59 ^{*2}	146	2.47	60 ^{*2}	146	2.43	61 ^{*2}	146	2.39
⑥ コラムサポート	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⑦ 耐震サポート	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

S/C脚部補強を想定した場合、H26-1(気中(現状水位))のすべてのケースで発生値は許容値以内であることがわかった。

1F-3で代表して評価

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

21) PCV構造健全性評価結果(1F-2 評価ケースH26-1)

評価設備: 図参照

- 評価条件:
- 耐震条件: Ss波
 - 評価温度: 50℃
 - 供用状態: Ds
 - 腐食減肉量: 右記表参照

評価結果:

⑤PCVスタビライザ(シアラグ) (ドライウェル本体)
一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	117	116	282	2.41	2.43
15年	104	103	282	2.71	2.73

①-1 PCV(D/Wシェル) (サンドクッション部)
一次応力評価結果

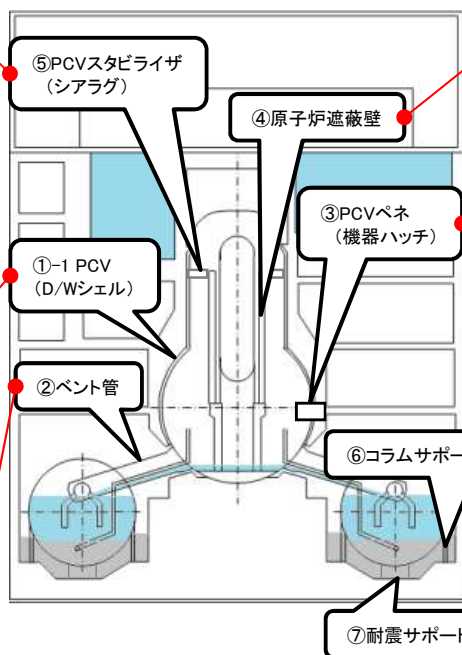
腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	78	79	424	5.43	5.36
15年	74	76	424	5.72	5.57

②ベント管 (ベント管とD/W胴の接合部)
一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	153	145	424	2.77	2.92
15年	151	143	424	2.80	2.96

2号機 推定減肉量(片面) (mm)

機器	腐食年数(年)	
	15	40
D/W	1.64	2.61
S/C	1.50	2.45



④原子炉遮蔽壁(基部)
一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	125	122	235	1.88	1.92
15年	77	74	235	3.05	3.17

③PCVペネ(機器ハッチ) (ドライウェル球形取付部)
一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	53	53	424	8.00	8.00
15年	48	48	424	8.83	8.83

⑥コラムサポート : S/C脚部補強により、評価対象外

⑦耐震サポート : S/C脚部補強により、評価対象外

図 評価設備(ケースH26-1)

設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド): 鋼製減衰4%

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

22) PCV構造健全性評価結果まとめ表(1F-3)

表 PCV構造物評価結果(3号機)

対象機器	H26-1(気中(現状水位))		H26-2(完全冠水)																									
	10年後相当		15年後相当		15年後相当		40年後相当		40年後相当																			
	レギュラリーガイド (コンクリート系、鋼材系)		レギュラリーガイド (コンクリート系、鋼材系)		レギュラリーガイド (コンクリート系、鋼材系)		レギュラリーガイド (コンクリート系、鋼材系)		レギュラリーガイド (コンクリート系、鋼材系)																			
減衰定数	なし		4710 ton		4710 ton		4710 ton		4710 ton																			
オベフロ陪付加設備	なし		4710 ton		4710 ton		4710 ton		4710 ton																			
評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度							
①-1 PCV(D/Wシェル)	サンドクッション部 *1:球形部	92	424	4.60	92	424	4.60	90	424	4.71	98	424	4.32	95	424	4.46	185	424	2.29	183	424	2.31	196	424	2.16	192 ^{*1}	424	2.20
①-2 PCV(S/Cシェル)	補強リング	318	424	1.33	325	424	1.30	397	424	1.06	368	424	1.15	447 ^{*3}	424 (471)	0.94 (1.05)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
② ベント管	ベント管とD/W側の接合部	190	424	2.23	189	424	2.24	209	424	2.02	199	424	2.13	216	424	1.96	263	424	1.61	266	424	1.59	265	424	1.60	268	424	1.58
③ PCVベネ(機器ハッチ)	ドライウェル球形取付部	30	424	14.13	31	424	13.67	31	424	13.67	34	424	12.47	34	424	12.47	139	424	3.05	142	424	2.98	153	424	2.77	155	424	2.73
④ 原子炉遮蔽壁	基部	65	235	3.61	74	235	3.17	77	235	3.05	120	235	1.95	125	235	1.88	96	235	2.44	104	235	2.25	158	235	1.48	168	235	1.39
⑤ PCVスタビライザ(シアラグ)	ドライウェル補強板 *2:ガセットプレート溶接部	87	282	3.24	87	282	3.24	87	282	3.24	87	282	3.24	87	282	3.24	55 ^{*2}	146	2.65	59 ^{*2}	146	2.47	60 ^{*2}	146	2.43	61 ^{*2}	146	2.39
⑥ コラムサポート	クレビス	374	467	1.24	380	467	1.22	477 ^{*3}	467 (490)	0.97 (1.02)	406	467	1.15	507	467 (490)	0.92 (0.96)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑦ 耐震サポート	ラグプレート	247	351	1.42	250	351	1.40	402	351 (400)	0.87 (0.99)	264	351	1.32	419	351 (400)	0.83 (0.95)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*3: 供用状態Dsの許容値を上回るが、許容値に()内のSu値を用いた場合、許容値を下回る

S/C脚部補強を想定した場合、H26-2(完全冠水)のすべてのケースで発生値は許容値以内であることがわかった。
 H26-1(気中(現状水位))のふたつのケースで耐震サポート、ひとつのケースでコラムサポートが発生値が許容値を超えているため、詳細評価を追加実施した。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

23) PCV構造健全性評価結果(1F-3 評価ケースH26-1)

評価結果:

⑤PCVスタビライザ(シアラグ) (ドライウェル補強板) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	87	87	282	3.24	3.24
15年	87	87	282	3.24	3.24
10年	-	87	282	-	3.24

①-1 PCV(D/Wシェル) (サンドクッション部) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	95	98	424	4.46	4.32
15年	90	92	424	4.71	4.60
10年	-	92	424	-	4.87

②ベント管 (ベント管とD/W胴の接合部) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	216	199	424	1.96	2.13
15年	209	189	424	2.02	2.24
10年	-	190	424	-	2.23

⑦耐震サポート (ラグプレート) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	419*1	264	351 (400)	0.83 (0.95)	1.32
15年	402*1	250	351 (400)	0.87 (0.99)	1.40
10年	-	247	351	-	1.42

評価設備: 図参照

評価条件: 耐震条件: Ss波
評価温度: 50°C
供用状態: Ds
腐食減肉量: 右記表参照

3号機 推定減肉量(片面) (mm)

機器	腐食年数(年)		
	10	15	40
D/W	1.32	1.61	2.57
S/C	1.01	1.28	2.22

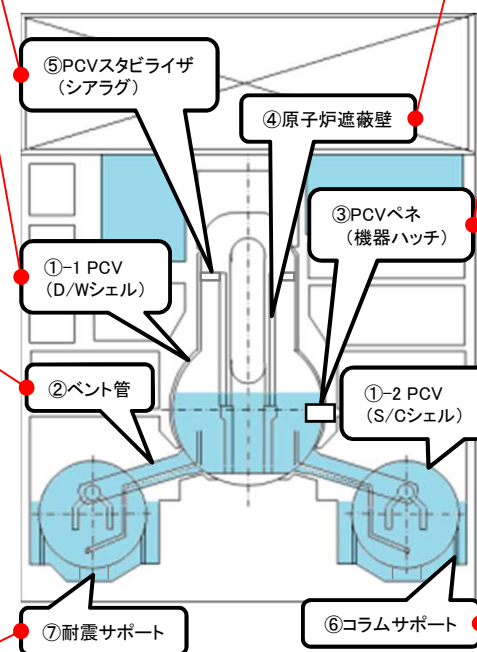


図 評価設備(ケースH26-1)

④原子炉遮蔽壁(基部) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	125	120	235	1.88	1.95
15年	77	74	235	3.05	3.17
10年	-	65	235	-	3.61

③PCVペネ(機器ハッチ) (ドライウェル球形取付部) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	34	34	424	12.47	12.47
15年	31	31	424	13.67	13.67
10年	-	30	424	-	14.13

①-2 PCV (S/Cシェル) (補強リング) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	447*2	368	424 (471)	0.94 (1.05)	1.15
15年	397	325	424	1.06	1.30
10年	-	318	424	-	1.33

⑥コラムサポート(クレビス) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	507*1	406	467 (490)	0.92 (0.96)	1.15
15年	477*2	380	467 (490)	0.97 (1.02)	1.22
10年	-	374	467	-	1.24

注*1: 許容値に()内のSu値を用いた場合においても、許容値を上回る。
注*2: 許容値に()内のSu値を用いた場合、許容値を下回る。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

24) PCV構造健全性評価結果(1F-3 評価ケースH26-2)

評価設備: 図参照

評価条件: ・耐震条件: Ss波
 ・評価温度: 50°C

評価結果: ・供用状態: Ds
 ・腐食減肉量: 右記表参照

3号機 推定減肉量(片面) (mm)

機器	腐食年数(年)	
	15	40
D/W	1.61	2.57
S/C	1.28	2.22

⑤PCVスタビライザ(シアラグ) (ガセットプレート溶接部) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	61	60	146	2.39	2.43
15年	59	55	146	2.47	2.65

①-1 PCV(D/Wシェル) (サンドクッション部、*: 球形部) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	192*	196	424	2.20	2.16
15年	183	185	424	2.31	2.29

②ベント管 (ベント管とD/W胴の接合部) 一次応力評価結果

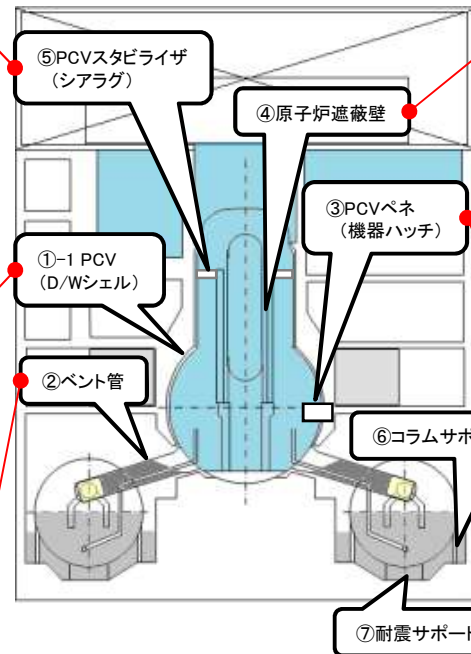
腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	268	265	424	1.58	1.60
15年	266	263	424	1.59	1.61

④原子炉遮蔽壁(基部) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	168	158	235	1.39	1.48
15年	104	96	235	2.25	2.44

③PCVペネ(機器ハッチ) (ドライウェル球形取付部) 一次応力評価結果

腐食年数	応力強さ(MPa)		許容値(MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	155	153	424	2.73	2.77
15年	142	139	424	2.98	3.05



⑥コラムサポート : S/C脚部補強により、評価対象外

⑦耐震サポート : S/C脚部補強により、評価対象外

図 評価設備(ケースH26-2)

設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド): 鋼製減衰4%

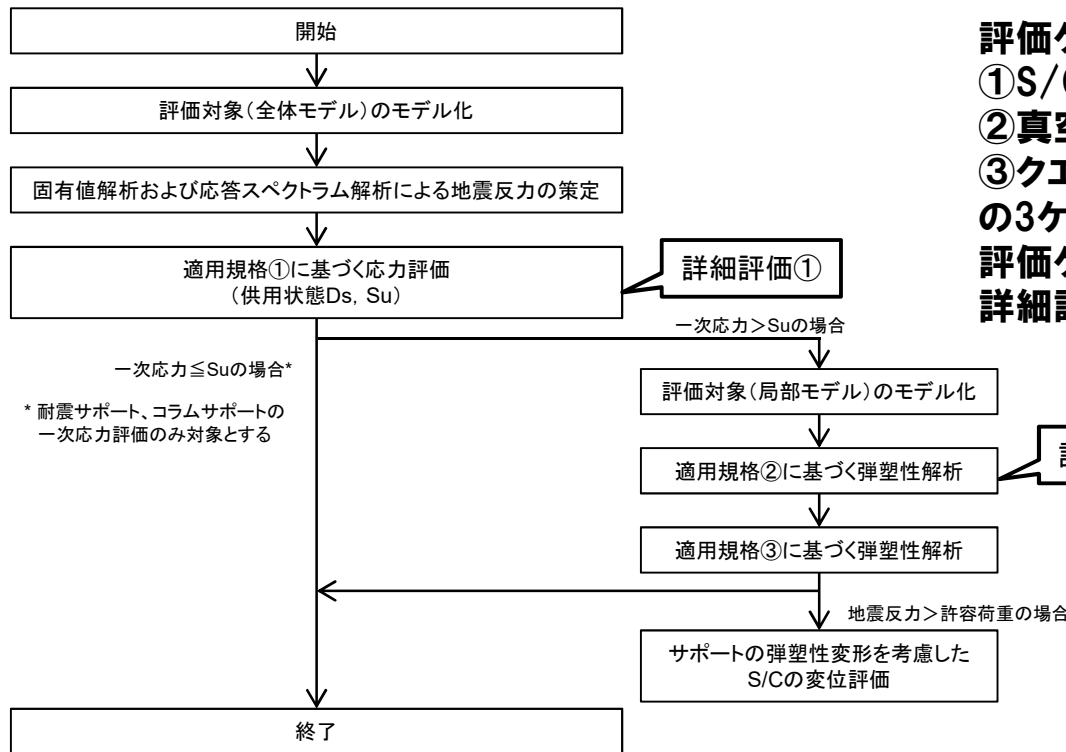
6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

25) PCV構造健全性評価 詳細評価概要 (1F-2/3)

適用規格

- ① JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程
- ② JSME S NC1-2005 発電用原子力設備規格 設計・建設規格
- ③ JSME S NA1-2012 発電用原子力設備規格 維持規格
- ④ JSME S NX2-2014 発電用原子力設備規格 シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン(BWR鋼製格納容器編)
- ⑤ JSME S NJ1-2012 発電用原子力設備規格 材料規格



評価ケースとして、

① S/C満水, 脚部補強なし

② 真空破壊ライン, ダウンコマ止水を実施した場合

③ クエンチャ, ストレーナ止水を実施した場合

の3ケースを選定し, 詳細評価を実施した。

評価ケースについては次頁を参照。

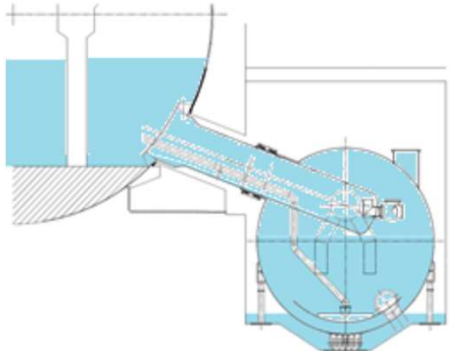
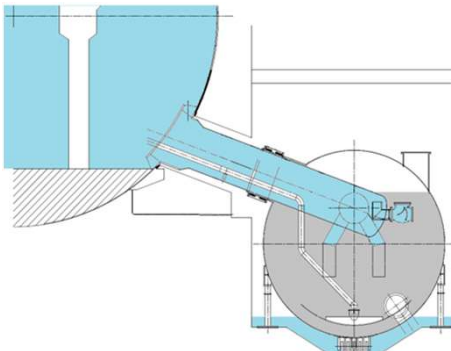
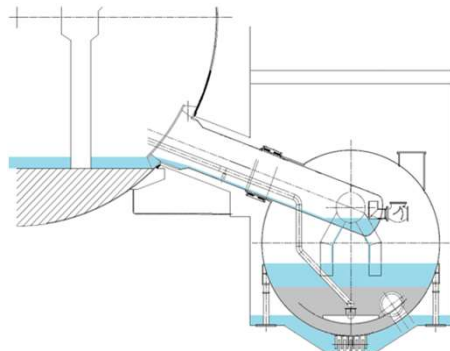
詳細評価は左図のフローに基づき実施した。

図 詳細評価解析手順

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

26) PCV構造健全性評価 詳細評価 評価ケース(1F-2/3)

対象プラント	1F-3	1F-2	1F-2
評価ケース	① 	② 	③ 
D/W水位	O.P.12000	O.P.39920 (満水)	O.P.6080
S/C水位	満水	コンクリートO.P.4400	コンクリートO.P.-1050 水O.P.3100
コンクリート重量 (S/C内)	0 (ton)	12622 (ton)	1772 (ton)
トーラス室水位	O.P.-1300	O.P.-1300	O.P.-1300
事故後の腐食年数	40年	40年	40年
PCV下部止水	なし	真空破壊ライン, ダウンコマ止水	クエンチャ, ストレーナ止水
S/C脚部補強	なし	なし	なし
建屋の減衰定数	設計用の値 ・コンクリート5% ・鋼材1%	設計用の値 ・コンクリート5% ・鋼材1%	設計用の値 ・コンクリート5% ・鋼材1%

評価ケース①: 現在の状態(評価ケースH26-1と同条件) (現在の状態でS/C脚部補強なし。2/3号機のうち水位の高い3号機で代表)

評価ケース②: ダウンコマ止水を行いPCVを冠水した状態 (PCVを冠水した状態でS/C脚部補強なし。2/3号機はほぼ同構造のため2号機で代表)

評価ケース③: かけ流し状態 (かけ流しでストレーナのみ止水, S/C脚部補強なし。2/3号機はほぼ同構造のため2号機で代表)

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

27) PCV構造健全性評価結果(1F-2/3 詳細評価① 応答スペクトラム解析)

対象機器	評価ケース① 3号機 S/C満水、脚部補強なし			評価ケース② 2号機 真空破壊ライン、ダウンカム止水			評価ケース③ 2号機 クエンチャ、ストレーナ止水			
	腐食年数(年)	40年			40年			40年		
	減衰定数	設計用 (コンクリート5%、鋼材1%)			設計用 (コンクリート5%、鋼材1%)			設計用 (コンクリート5%、鋼材1%)		
	オペフロ階付加設備	4710 ton			4710 ton			4710 ton		
	評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
①-2 PCV(S/Cシェル)	補強リング	447 ^{※3}	424 (471)	0.94 (1.05)	590	424 (471)	0.71 (0.79)	335	424	1.26
② ベント管	ベント管とD/W側の接合部	216	424	1.96	271	424	1.56	—	—	—
⑥ コラムサポート	クレビス	507	467 (490)	0.92 (0.96)	1065	467 (490)	0.43 (0.46)	437	467	1.06
⑦ 耐震サポート	ラグプレートピン部(ケース①) シアピン(ケース②, ③)	419	351 (400)	0.83 (0.95)	993	351 (400)	0.35 (0.40)	440	351 (400)	0.79 (0.90)

*3: 供用状態Dsの許容値を上回るが、許容値に()内のSu値を用いた場合、許容値を下回る

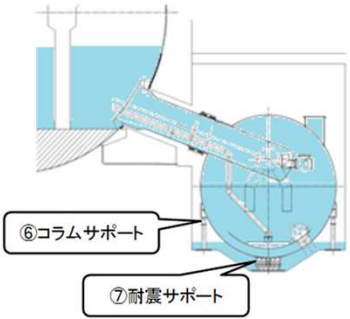
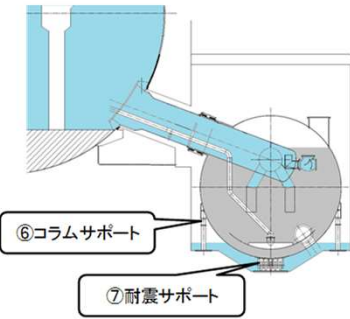
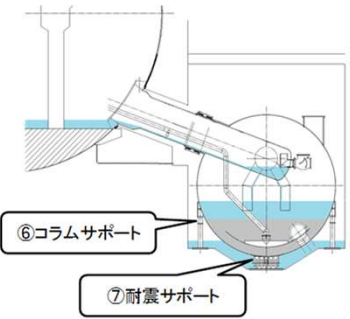
すべての評価ケースで発生値が許容値を超えることがわかった。
 詳細評価解析フローに従い、Su値を超えた全ケースについて次頁に述べる弾塑性解析を実施した。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

28) PCV構造健全性評価結果(1F-2/3 詳細評価② 弾塑性解析 局部モデル評価)

表 詳細評価② 弾塑性解析 局部モデル評価結果

対象機器		評価ケース① 3号機		評価ケース② 2号機		評価ケース③ 2号機	
		S/O満水、脚部補強なし		真空破壊ライン、ダウンカム止水		クエンチャ、ストレーナ止水	
							
	腐食年数(年)	40年		40年		40年	
	減衰定数	設計用 (コンクリート5%、鋼材1%)		設計用 (コンクリート5%、鋼材1%)		設計用 (コンクリート5%、鋼材1%)	
	オペフロ階付加設備	4710 ton		4710 ton		4710 ton	
	応力-ひずみ特性	地震荷重 (N)	許容荷重 (N)	地震荷重 (N)	許容荷重 (N)	地震荷重 (N)	許容荷重 (N)
⑥ コラムサポート	弾完全塑性体	5.16×10^6	3.94×10^6	1.07×10^7	4.05×10^6	4.38×10^6	4.05×10^6
	ひずみ硬化考慮	5.16×10^6	3.60×10^6	1.07×10^7	3.60×10^6	4.38×10^6	3.60×10^6
⑦ 耐震サポート	弾完全塑性体	2.23×10^7	1.74×10^7	4.34×10^7	1.96×10^7	1.93×10^7	1.96×10^7
	ひずみ硬化考慮	2.23×10^7	1.46×10^7	4.34×10^7	1.57×10^7	1.93×10^7	1.57×10^7

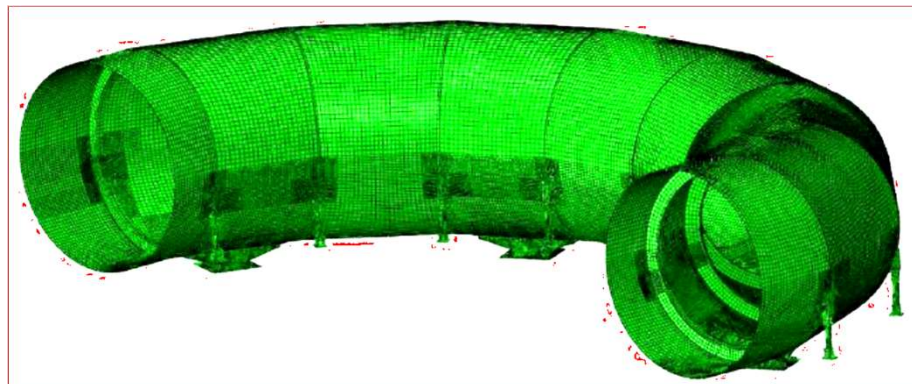
局部モデル評価において許容値を満足しなかったケースのうち、
評価ケース③について全体モデルを用いた弾塑性解析による評価を行った。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

29) PCV構造健全性評価結果(1F-2/3 詳細評価② 弾塑性解析 全体モデル評価)

- ・評価モデル S/Cの1/2セクタを模擬し、局部モデル評価で構築した支持構造物評価モデルを配置
- ・評価手法 全体モデルに水平方向加速度を作用させ、耐震サポート部の変位が局部モデル評価で得られた許容変位に到達する震度を崩壊荷重とした。
- ・評価結果 全体モデルの崩壊震度は3.26(G)となり、地震荷重1.61(G)を上回ることが確認された。



弾塑性解析 モデル図
(S/C+コラムサポート+耐震サポート)

表 詳細評価② 弾塑性解析 全体モデル評価結果

対象機器	評価ケース③ 2号機 クエンチャ、ストレナ止水	
腐食年数(年)	40年	
減衰定数	設計用 (コンクリート5%、鋼材1%)	
オペフロ磨付加設備	4710 ton	
応力-ひずみ特性	地震荷重 (G)	崩壊震度 (G)
①-2 PCV(S/Cシェル) +⑥コラムサポート +⑦耐震サポート	弾完全塑性体 —	—
ひずみ硬化考慮	1.61	3.26

全体モデルの崩壊震度は3.26(G)となり、地震荷重1.61(G)を上回ることがわかった。
ストレナ止水のケース(評価ケース③)では許容値を満足することを確認した。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

30) RPVペデスタル構造健全性評価結果まとめ表(1F-1)

(*1)レギュラリガイドより、(*2)建設時設計値より

建屋連成 地震応答解析 ケース	腐食減肉 条件	減衰定数 (コンク リート /鋼材)	軸力・モーメントに対する評価								せん断力に対する評価			
			上向き軸力/ 下向き軸力 (kN)	鉄筋の 最大 引張 応力度 (N/mm ²)	許容 応力度 (N/mm ²)	判定	コンクリート の 最大 圧縮 応力度 (N/mm ²)	許容 応力度 (N/mm ²)	判定	脚部 せん断力 (kN)	許容値 (kN)		判定	
											脚部 モーメント (kN・m)	Q _{a1} (kN)		Q _{a2} (kN)
H26-1 (気中 (現状水位))	a)	10年後相当	7%/4%(*1)	15,481 / 25,259	41.0	293	○	3.3	12.3	○	7,050	10,327	9,208	○
				66,500										
	b)	15年後相当	7%/4%(*1)	15,481 / 25,259	43.2	293	○	3.5	12.3	○	7,200	10,327	8,880	○
				69,700										
c)	15年後相当	5%/1%(*2)	15,481 / 25,259	44.7	293	○	3.7	12.3	○	7,490	10,327	8,880	○	
			72,300											
d)	40年後相当	7%/4%(*1)	15,481 / 25,259	44.8	293	○	3.7	12.3	○	7,290	10,327	7,235	○	
			70,500											
H26-2 (完全冠水)	a)	15年後相当	7%/4%(*1)	15,481 / 25,259	74.5	293	○	6.4	12.3	○	10,800	10,327	8,880 12,607*	※1
				124,000										
	b)	15年後相当	5%/1%(*2)	15,481 / 25,259	85.2	293	○	7.4	12.3	○	11,800	10,327	8,880 12,607*	※1
				143,000										
c)	40年後相当	7%/4%(*1)	15,481 / 25,259	77.4	293	○	6.7	12.3	○	10,700	10,327	7,235 10,273*	※2	
			124,000											
d)	40年後相当	5%/1%(*2)	15,481 / 25,259	88.0	293	○	7.7	12.3	○	11,800	10,327	7,235 10,273*	※2	
			142,000											

(*1)鉄筋に引張強さを想定した場合、(※1)鉄筋に引張強さを想定すれば○
(※2)鉄筋に引張強さを想定してもNG。今年度の腐食試験結果に基づいて鉄筋の腐食量を見直し、再評価する

完全冠水時のRPVペデスタルにおいて、脚部せん断力が許容値を上回ったため、(5)項(P134,135)にて追加検討を行った結果、許容値を下回り、健全であることを確認した。

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

31) RPVペデスタル構造健全性評価結果まとめ表(1F-2)

(*1)レギュラリガイドより、(*2)建設時設計値より

建屋連成 地震応答解析 ケース	腐食減肉 条件	減衰定数 (コンク リート /鋼材)	軸力・モーメントに対する評価							せん断力に対する評価			
			上向き軸力/ 下向き軸力 (kN)	鉄筋の 最大 引張 応力度 (N/mm ²)	許容 応力度 (N/mm ²)	判定	コンクリート の 最大 圧縮 応力度 (N/mm ²)	許容 応力度 (N/mm ²)	判定	脚部 せん断力 (kN)	許容値 (kN)		判定
			脚部 モーメント (kN・m)								Q _{a1} (kN)	Q _{a2} (kN)	
H26-1 (氣中 現状水位)	a) 15年後 相当	7%/4%(*1)	18,802 / 30,678	70.7	345	○	5.6	15.6	○	9,850	10,582	27,546	○
			104,000										
	b) 15年後 相当	5%/1%(*2)	18,802 / 30,678	70.1	345	○	5.5	15.6	○	9,830	10,582	27,546	○
			103,000										
	c) 40年後 相当	7%/4%(*1)	18,802 / 30,678	73.8	345	○	5.9	15.6	○	9,860	10,582	23,232	○
			105,000										
	d) 40年後 相当	5%/1%(*2)	18,802 / 30,678	73.2	345	○	5.9	15.6	○	9,840	10,582	23,232	○
			104,000										

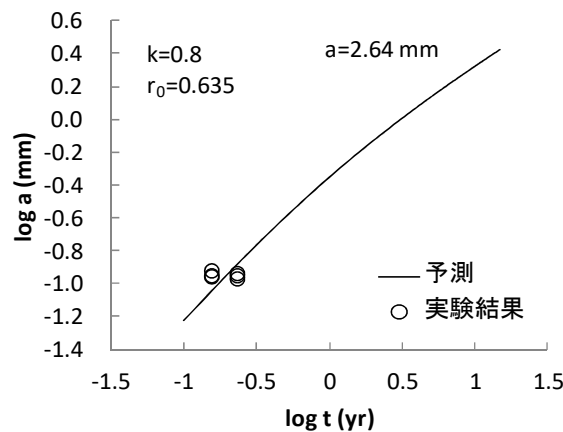


図 べき乗則を用いた腐食進行予測
(2012年度の成果)

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

32) RPVペデスタル構造健全性評価結果まとめ表(1F-3)

(*1)レギュラリガイドより、(*2)建設時設計値より

建屋連成 地震応答解析 ケース	腐食減肉 条件	減衰定数 (コンクリート /鋼材)	軸力・モーメントに対する評価								せん断力に対する評価			
			上向き軸力/ 下向き軸力 (kN)	鉄筋の 最大 引張 応力度 (N/mm ²)	許容 応力度 (N/mm ²)	判定	コンクリート の 最大 圧縮 応力度 (N/mm ²)	許容 応力度 (N/mm ²)	判定	脚部 せん断力 (kN)	許容値 (kN)		判定	
											脚部 モーメント (kN・m)	Q _{a1} (kN)		Q _{a2} (kN)
H26-1 (気中 現状水位)	a)	10年後 相当	7%/4%(*1)	18,984 / 30,976	72.3	345	○	5.7	15.6	○	10,700	10,582	28,542	○
				107,000										
	b)	10年後 相当	5%/1%(*2)	18,984 / 30,976	69.7	345	○	5.5	15.6	○	10,800	10,582	28,542	○
					103,000									
	c)	15年後 相当	7%/4%(*1)	18,984 / 30,976	76.7	345	○	6.1	15.6	○	10,800	10,582	27,214	○
					113,000									
d)	15年後 相当	5%/1%(*2)	18,984 / 30,976	74.1	345	○	5.9	15.6	○	10,700	10,582	27,214	○	
				109,000										
e)	40年後 相当	7%/4%(*1)	18,984 / 30,976	79.3	345	○	6.4	15.6	○	10,800	10,582	23,232	○	
				113,000										
f)	40年後 相当	5%/1%(*2)	18,984 / 30,976	77.2	345	○	6.2	15.6	○	10,800	10,582	23,232	○	
				110,000										
H26-2 (完全冠水)	a)	15年後 相当	7%/4%(*1)	18,984 / 30,976	93.2	345	○	7.5	15.6	○	13,200	10,582	27,214	○
				139,000										
	b)	15年後 相当	5%/1%(*2)	18,984 / 30,976	91.3	345	○	7.3	15.6	○	13,700	10,582	27,214	○
					136,000									
c)	40年後 相当	7%/4%(*1)	18,984 / 30,976	97.3	345	○	7.9	15.6	○	13,100	10,582	23,232	○	
				140,000										
d)	40年後 相当	5%/1%(*2)	18,984 / 30,976	94.0	345	○	7.6	15.6	○	13,500	10,582	23,232	○	
				135,000										

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

33) 配管耐震評価結果(1F-1)

(1) 評価モデルの選定

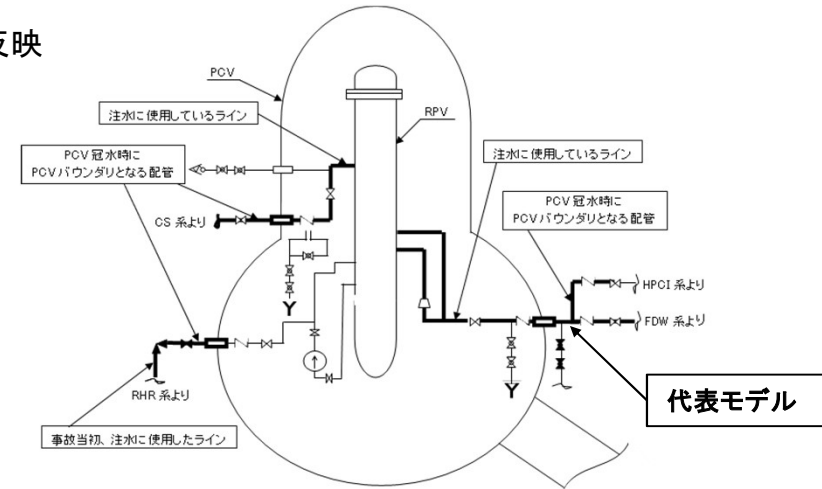
- ・H25年度評価モデルを基にH26年度の耐震および減肉条件とを反映
 - 評価対象は原子炉注水に使用されている配管
 - Ss地震時において最低でも1系統の健全性を確保することを前提
 - 裕度の高いFDW系を選定

(2) 評価条件

- ・圧力 : 1.0MPa
- ・温度 : 50°C(PCV内)、40°C(PCV外)
- ・地震 : H26-1, H26-2, およびT/B Ss
(T/Bは事故前の状態でのSs地震動の床応答スペクトルを使用)
- ・減肉 :
 - 注水が流れる配管を同一の減肉量で一様に減肉
 - 注水が流れない配管は減肉無しで仮定

(3) 評価方法

- ・評価は供用状態Dsの一次応力に着目
- ・評価は10年、15年および40年後の想定板厚対して配管解析を実施。



太線範囲: 原子炉注水配管

表 1F-1 腐食減肉量 (単位:mm)

腐食年数	大口径配管 (FDW-T-101)	小口径配管 (1B-FDW-43a)
10年後	0.74	2.66
15年後	0.79	2.91
40年後	0.96	3.78

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

34) 配管耐震評価結果(1F-1)

(4) 評価結果

注水に使用している大口径管の評価は、全てのケースにおいて一次応力は許容応力内におさまっている。小口径配管では、地震動H26-1と地震動H26-2の評価ケースのうち40年後相当腐食減肉条件で許容値を超える結果となり、地震動TB-1の評価ケースは10年、15年、および40年のすべてのケースにおいて一次応力値が許容値を上回る結果となった。

表 1F-1 評価結果 (大口径配管)

ケース	腐食年数	減衰定数	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
H26-1	10年後	RG	130	418	3.21
H26-1	15年後	RG	122	418	3.42
H26-1	15年後	設計用	123	418	3.39
H26-1	40年後	RG	124	418	3.37
H26-2	15年後	RG	127	418	3.29
H26-2	15年後	設計用	127	418	3.29
H26-2	40年後	RG	128	418	3.26
H26-2	40年後	設計用	128	418	3.26
TB-1	10年後	設計用	172	418	2.43
TB-1	15年後	設計用	172	418	2.43
TB-1	40年後	設計用	172	418	2.43

表 1F-1 評価結果 (小口径配管)

ケース	腐食年数	減衰定数	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
H26-1	10年後	RG	233	366	1.57
H26-1	15年後	RG	281	366	1.30
H26-1	15年後	設計用	289	366	1.26
H26-1	40年後	RG	487	366	0.75
H26-2	15年後	RG	281	366	1.30
H26-2	15年後	設計用	290	366	1.26
H26-2	40年後	RG	485	366	0.75
H26-2	40年後	設計用	494	366	0.74
TB-1	10年後	設計用	368	366	0.99
TB-1	15年後	設計用	452	366	0.80
TB-1	40年後	設計用	790	366	0.46

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

35) 配管耐震評価結果(1F-2、1F-3)

(1) 評価モデルの選定

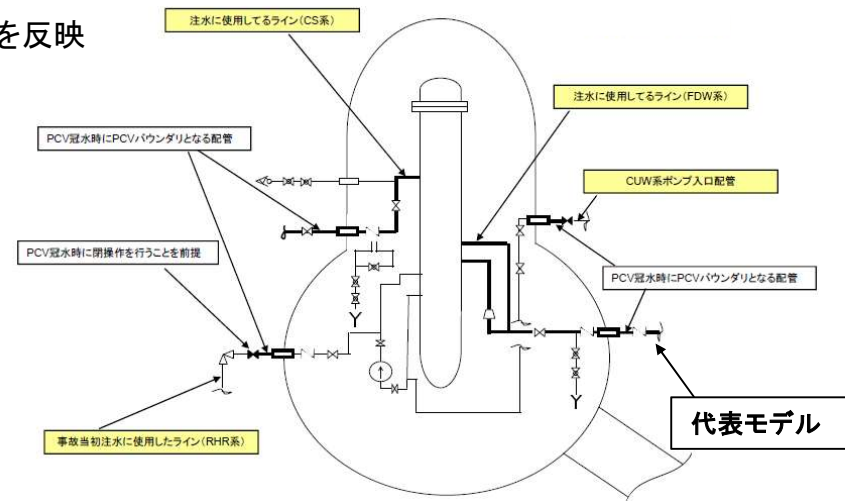
- ・H25年度評価モデルを基にH26年度の耐震および減肉条件とを反映
 - 評価対象は原子炉注水に使用されている配管
 - Ss地震時において最低でも1系統の健全性を確保することを前提
 - 裕度の高いFDW系を選定

(2) 評価条件

- ・圧力 : 1.0MPa
- ・温度 : 50°C(PCV内)、40°C(PCV外)
- ・地震 : H26-1, H26-2, およびT/B Ss
(T/Bは事故前の状態でのSs地震動の床応答スペクトルを使用)
- ・減肉 :
 - 注水が流れる配管を同一の減肉量で一様に減肉
 - 注水が流れない配管は減肉無しで仮定

(3) 評価方法

- ・評価は供用状態Dsの一次応力に着目
- ・評価は15年および40年後の想定板厚対して配管解析を実施。



太線範囲: 原子炉注水配管

表 1F-2/3 腐食減肉量 (単位:mm)

腐食年数	1F-2大口径配管 (FDW-I)	1F-3大口径配管 (FDW-IV)
15年後	2.0	2.0
40年後	2.2	2.2

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

36) 配管耐震評価結果(1F-2、1F-3)

(4) 評価結果

注水に使用している大口徑管の評価は、全てのケースにおいて一次応力は許容応力内におさまっており、発生応力の許容応力に対する裕度は1.5~2倍程度確保出来ている。

表 1F-2 評価結果 (大口徑配管)

NO	ケース	腐食年数	減衰定数	FDW-I (大口徑)		
				応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
1	H26-1	15年後	設計値	190	369	1.94
2	H26-1	40年後	設計値	190	369	1.94
3	H26-2 *	15年後	設計値	185	369	1.99
4	H26-2 *	40年後	設計値	185	369	1.99
5	TB-1	15年後	設計値	212	369	1.74
6	TB-1	40年後	設計値	213	369	1.73

表 1F-3 評価結果 (大口徑配管)

NO	ケース	腐食年数	減衰定数	FDW-IV (大口徑)		
				応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
1	H26-1	15年後	設計値	216	432	2.00
2	H26-1	40年後	設計値	218	432	1.98
3	H26-2	15年後	設計値	219	432	1.97
4	H26-2	40年後	設計値	221	432	1.95
5	TB-1	15年後	設計値	236	369	1.56
6	TB-1	40年後	設計値	237	369	1.55

注記

* : 1F-3で代表とする

6. 平成26-27年度事業成果

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価(東芝、日立GE分)

- まとめ

- ・RPV

1, 2, 3号機ともに発生応力は許容値を下回り、健全であることを確認した。なお、1号機のRPVスタビライザ引張棒については、実強度を調査し、許容値を満足することを確認した。

- ・PCV

1号機のコラムサポートについては発生値が許容値を超えているため、S/C脚部補強を実施することが望ましい。しかし、汚染水の建屋外への漏えい抑制の観点から、S/C脚部補強なしでの評価ケースを追加して詳細評価を実施し、評価したケースにおいては、許容値を満足することを確認した。

2, 3号機のコラムサポート及び耐震サポートについては発生値が許容値を超えているため、S/C脚部補強を実施することが望ましい。しかし、汚染水の建屋外への漏えい抑制の観点から、S/C脚部補強なしでの評価ケースを追加して詳細評価を実施した。ダウンコマ止水のケースでは許容値を満足しなかったが、ストレーナ止水のケースでは許容値を満足することを確認した。

- ・RPVペDESTAL

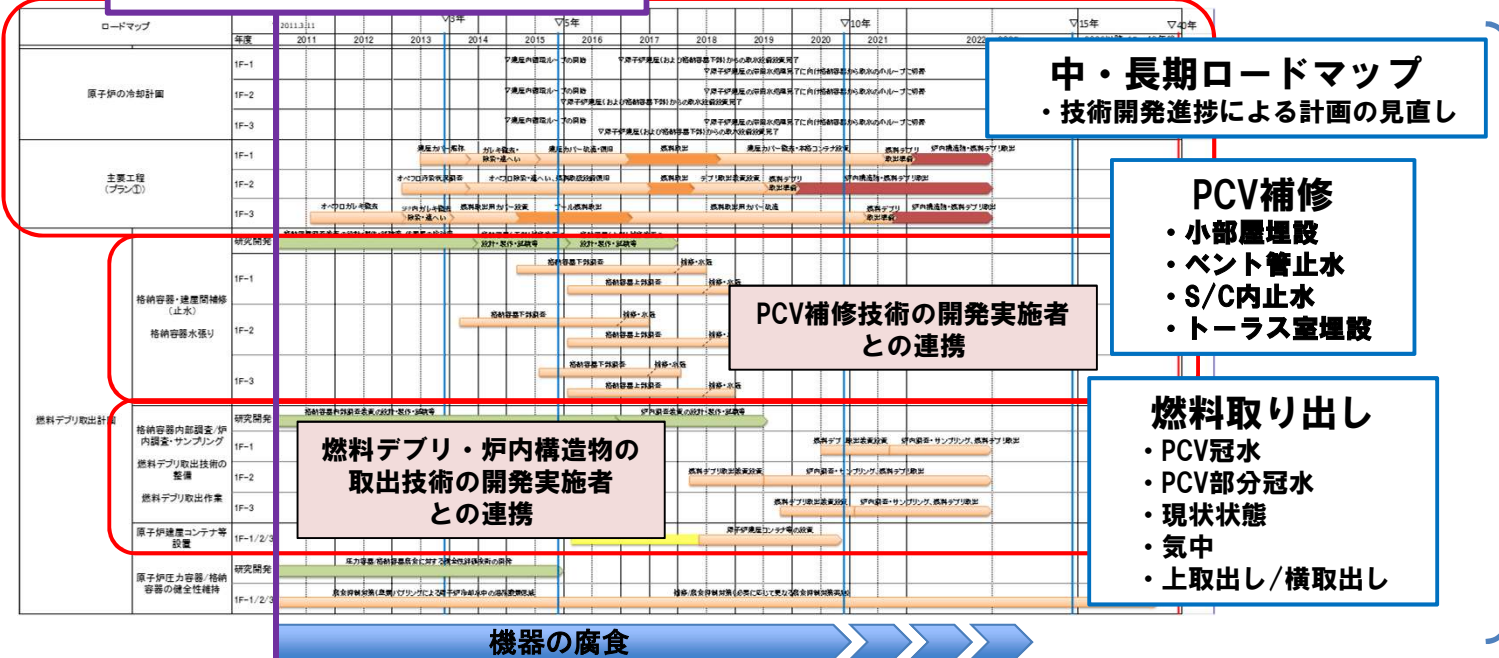
1, 2, 3号機ともに発生応力は許容値を下回り、健全であることを確認した。

6. 平成26-27年度事業成果

(2)PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価 (東芝、日立GE分)

◆全体実施計画

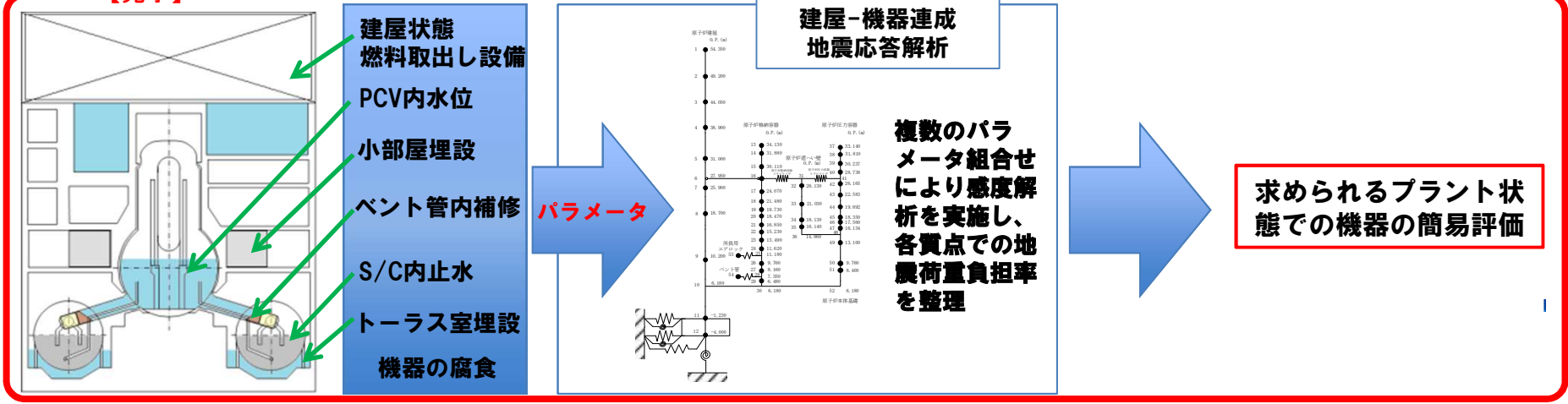
事故後のプラント状態の変化



事故後40年間までの長期工程を考慮すると、様々なプラント状態が考えられる。

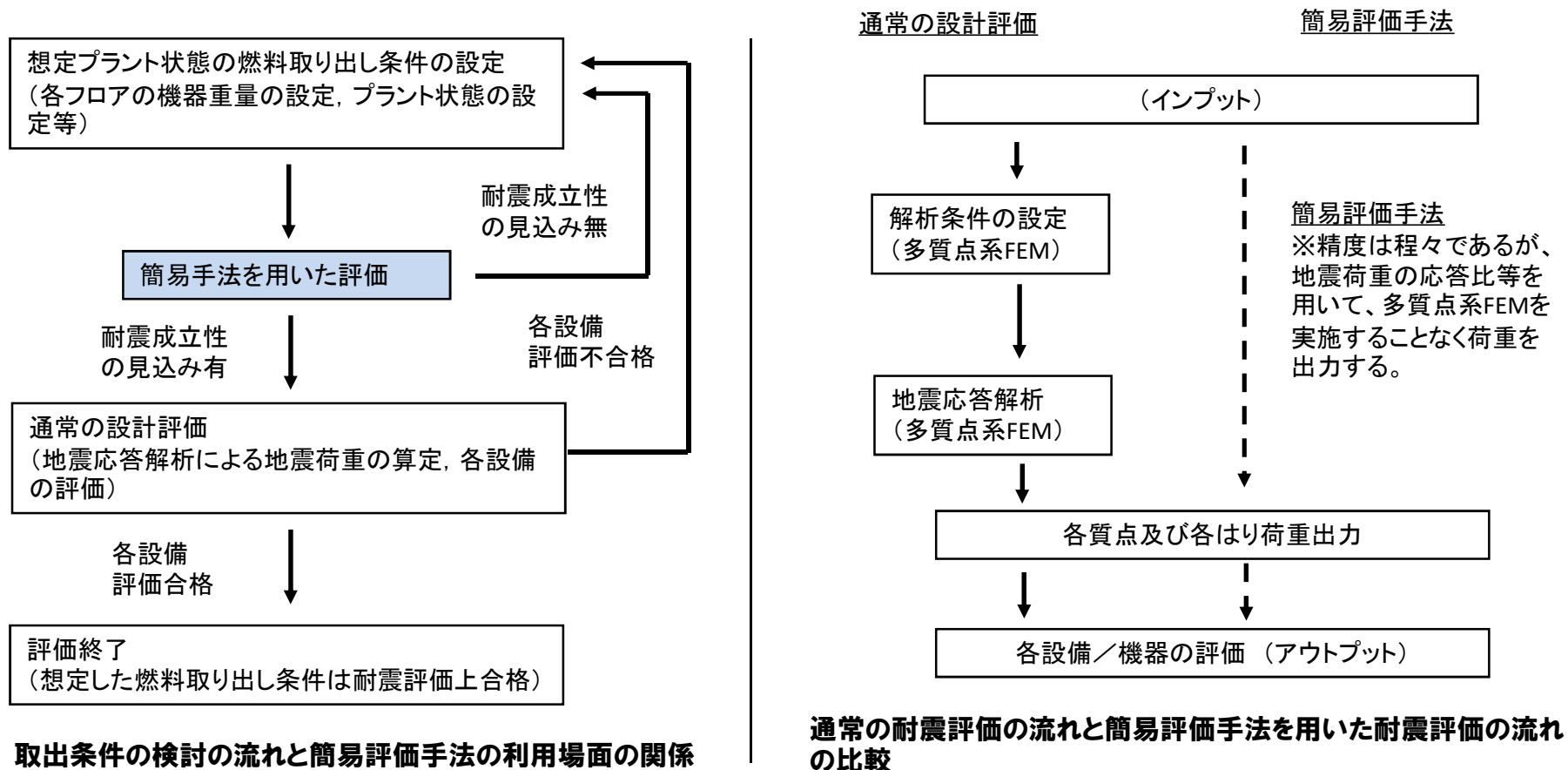
これらの状態と地震の組み合わせによる機器の評価が簡易的に実施できる手法を開発する

【完了】



6. 平成26-27年度事業成果

(2) PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価 (東芝、日立GE分)



取出条件の検討の流れと簡易評価手法の利用場面の関係

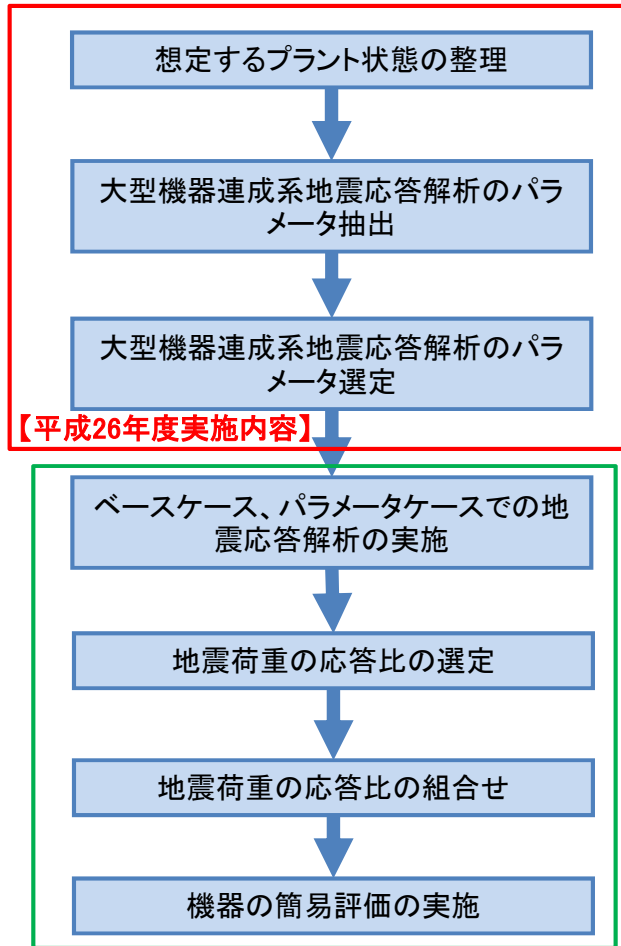
- ✓ 将来のプラント状態における燃料取出条件の見通しを迅速に得ることを目的に、RPV/PCVの耐震強度評価を簡易的に実施する手法を開発する。
- ✓ 地震応答への影響を分析・評価して発生荷重の倍率を整理し、プラントの想定状態が変化した場合でも、その入力に対して地震荷重がすぐに算定される手法を開発する。

6. 平成26-27年度事業成果

(2) PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価

(東芝、日立GE分)

簡易評価手法の開発の実施フロー



【平成26年度実施内容】

【平成27年度実施内容】

想定されるプラント状態と地震応答解析におけるパラメータの関係

プラント状態		地震応答解析におけるパラメータ		
		モデル変更	重量変更	剛性変更
建屋状態	建屋損壊の有無	○		
	オペフロ階の状況		○	
	小部屋内コンクリート充填		○	
	トラス室内コンクリート充填		○	
	燃料デブリ取り出し工法(上取出し/横取出し)*		○	○
原子炉格納容器状態	D/W内水位		○	
	S/C内水位		○	
	S/C内コンクリート充填		○	
	燃料デブリ堆積		○	
	ベント管閉止	変更なし		
	腐食による機器の減肉			○
	RPVペDESTAL状態			○
真空破壊管補修(1F-1のみ)	変更なし			
原子炉圧力容器状態	炉心燃料及び炉内構造物		○	
	腐食による機器の減肉			○

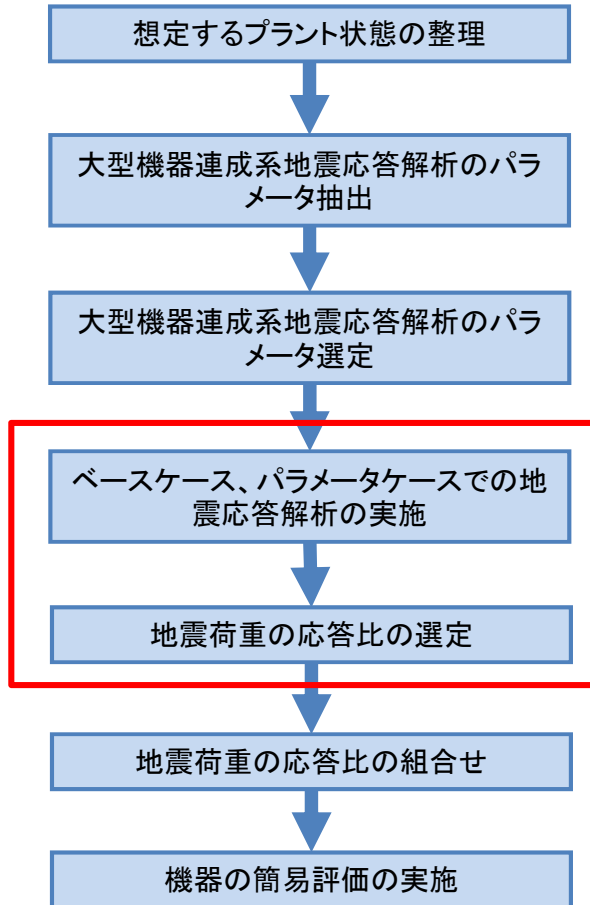
* 燃料デブリ取り出し工法では重量と剛性がパラメータになると仮定

✓ 今後の廃炉工程次第で大きく変動する可能性があり、かつ、耐震評価結果にも影響する因子を抽出した。

6. 平成26-27年度事業成果

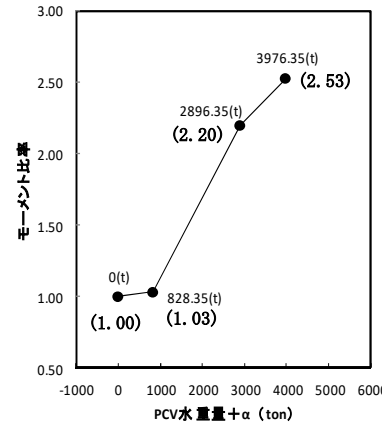
(2)PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価 (東芝、日立GE分)

簡易評価手法の開発の実施フロー

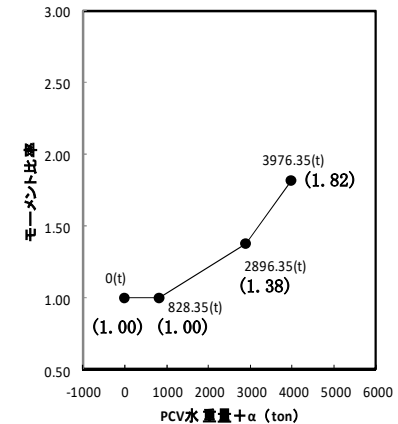


プラント状態		地震応答解析におけるパラメータ		
		モデル変更	重量変更	剛性変更
原子炉格納容器状態	D/W内水位		○	

DW水位なし/O.P.9.080m/TAFレベル/満水の4水準



PCV基部のモーメント比率(地震荷重の応答比)
水平方向(NSEW包絡)



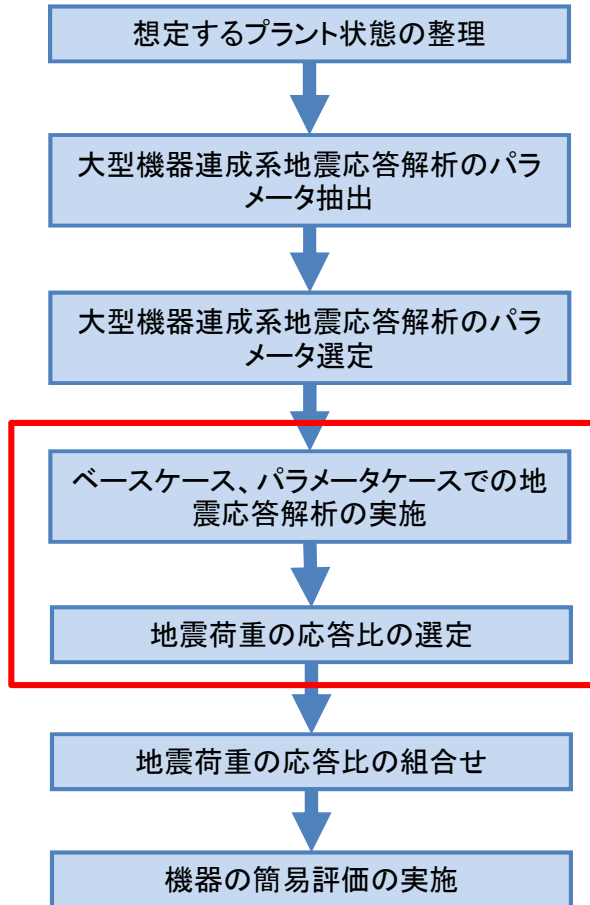
RSW基部のモーメント比率(地震荷重の応答比)
水平方向(NSEW包絡)

- ✓ 抽出したパラメータのうち、単因子を変化させて、地震応答への影響を評価した。アウトプットの一例として、D/W水位をパラメータとした場合の、代表的な部位の地震応答の比率を図示した(上図は1F-1の例)。
- ✓ 地震応答に影響のあるパラメータは以下の4つであることがわかった。・オペフロ階の重量、・D/W水位、・腐食年数、・RPVペDESTALの剛性比。本4つのパラメータを簡易評価手法で用いることとする。また、地震動の影響を考慮するため、入力地震動を1.5倍した場合(900gal相当)の応答比も本手法で用いることとする。

6. 平成26-27年度事業成果

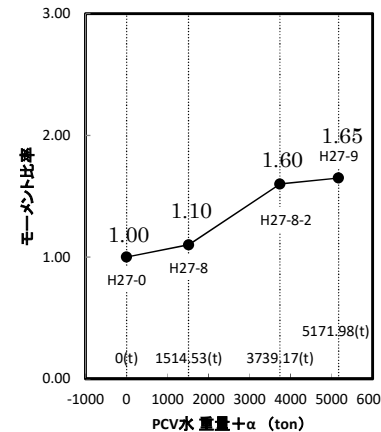
(2) PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価 (東芝、日立GE分)

簡易評価手法の開発の実施フロー

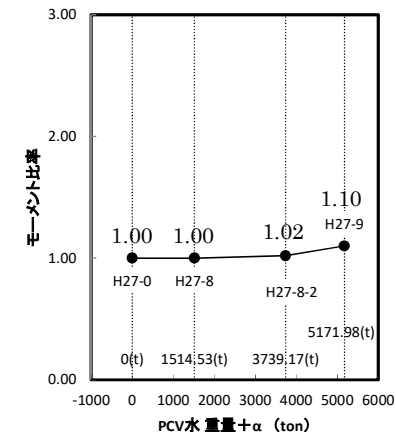


プラント状態		地震応答解析におけるパラメータ		
		モデル変更	重量変更	剛性変更
原子炉格納容器状態	D/W内水位		○	

DW水位なし/O.P.12.0m/TAFレベル/満水の4水準



PCV基部のモーメント比率(地震荷重の応答比)
水平方向(NSEW包絡)



RSW基部のモーメント比率(地震荷重の応答比)
水平方向(NSEW包絡)

- ✓ 抽出したパラメータのうち、単因子を変化させて、地震応答への影響を評価した。アウトプットの一例として、D/W水位をパラメータとした場合の、代表的な部位の地震応答の比率を図示した(上図は1F-3の例)。
- ✓ 地震応答に影響のあるパラメータは以下の4つであることがわかった。・オペフロ階の重量、・D/W水位、・腐食年数、・RPVペDESTALの剛性比。本4つのパラメータを簡易評価手法で用いることとする。また、地震動の影響を考慮するため、入力地震動を1.5倍した場合(900gal相当)の応答比も本手法で用いることとする。

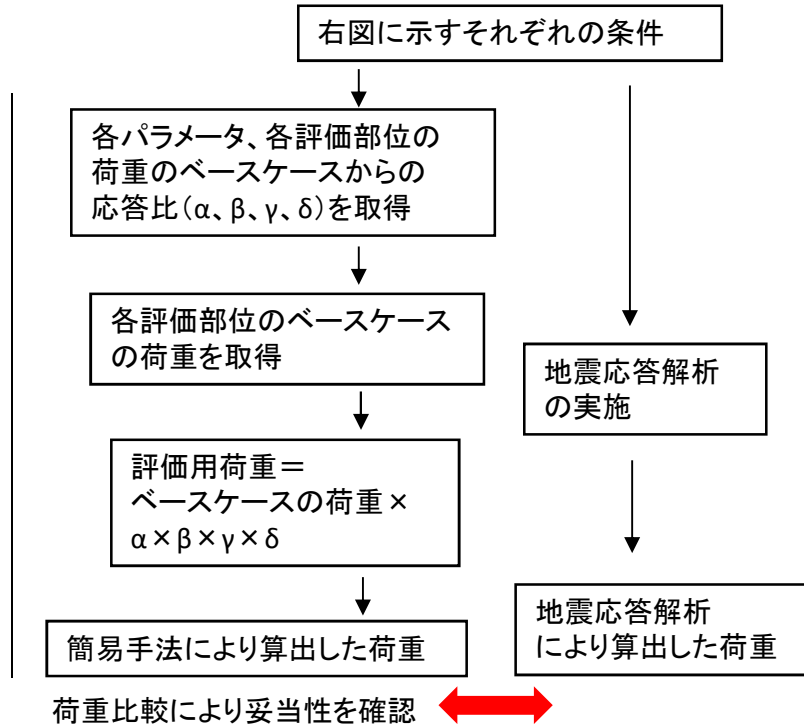
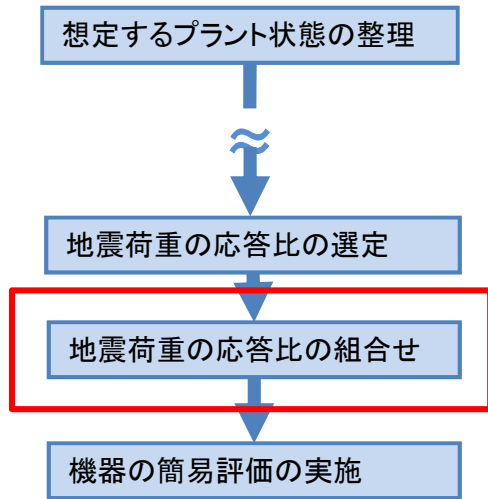
6. 平成26-27年度事業成果

(2)PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価 (東芝、日立GE分)

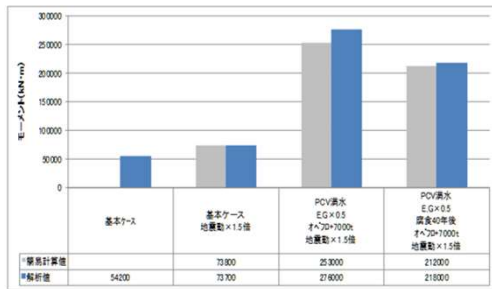
地震荷重の応答比を組合せた場合の妥当性確認の流れ

妥当性確認を実施した条件

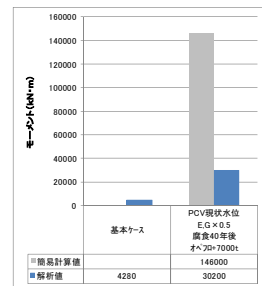
簡易評価手法の開発の実施フロー



No.	PCV内 水重量	貯水 割合	貯水 剛性(E, G)	地震 追加重量	地震動
基本	なし	なし	E, G	なし	600gal
1	なし	なし	E, G×0.5	なし	600gal
2	なし	なし	E, G×0.5	+7000 t	600gal
3	なし	なし	E, G	+7000 t	600gal
4	なし	40年	E, G	なし	600gal
5	なし	40年	E, G×0.5	なし	600gal
6	なし	40年	E, G	+7000 t	600gal
7	なし	40年	E, G×0.5	+7000 t	600gal
8	現状水位2.9m	なし	E, G	なし	600gal
9	現状水位2.9m	なし	E, G×0.5	なし	600gal
10	現状水位2.9m	40年	E, G	なし	600gal
11	現状水位2.9m	40年	E, G×0.5	なし	600gal
12	現状水位2.9m	なし	E, G	+7000 t	600gal
13	現状水位2.9m	なし	E, G×0.5	+7000 t	600gal
14	現状水位2.9m	40年	E, G	+7000 t	600gal
15	現状水位2.9m	40年	E, G×0.5	+7000 t	600gal
16	満水	なし	E, G	なし	600gal
17	満水	なし	E, G×0.5	なし	600gal
18	満水	40年	E, G	なし	600gal
19	満水	40年	E, G×0.5	なし	600gal
20	満水	なし	E, G	+7000 t	600gal
21	満水	なし	E, G×0.5	+7000 t	600gal
22	満水	40年	E, G	+7000 t	600gal
23	満水	40年	E, G×0.5	+7000 t	600gal
24	なし	なし	E, G	なし	900gal
25	満水	なし	E, G×0.5	+7000 t	900gal
26	満水	40年	E, G×0.5	+7000 t	900gal



妥当性確認の例: PCV基部 モーメント



妥当性確認の例: RSW基部 モーメント

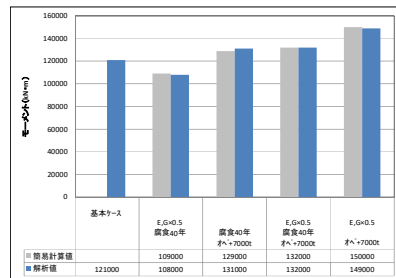
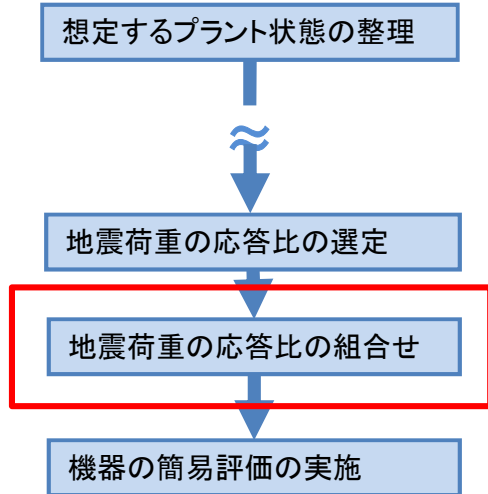
- ✓ 簡易評価手法により算出した荷重値と地震応答解析を用いて算出した荷重値を比較した。(1)で実施している強度評価に使用する荷重算定位置に対して比較したところ、一部を除き概ね一致した。(本頁は1F-1の例)。
- ✓ 水平方向加振の場合、両手法の算定値が大きく異なる箇所は、原子炉遮へい壁(RSW)である。パラメータの変動によって、固有周期及び刺激係数が変化している。RSWは固有周期の変化に大きく影響する部位であり、差が大きくなったものと考えられる。

6. 平成26-27年度事業成果

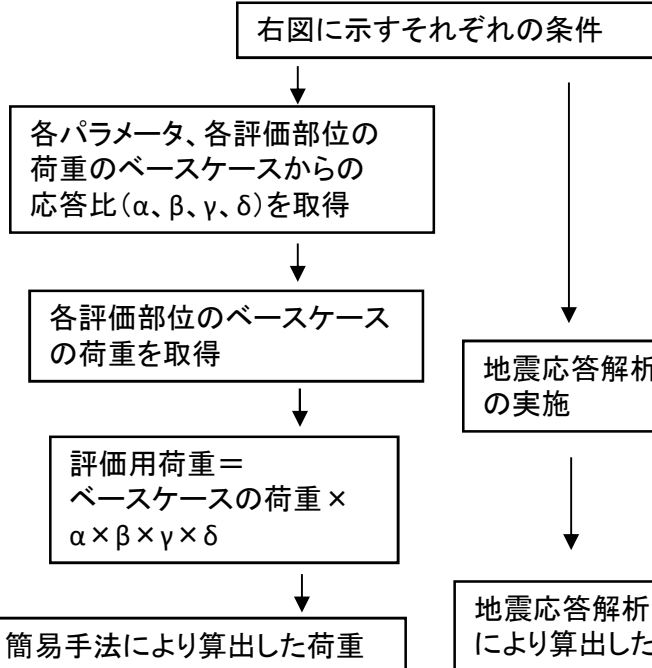
(2)PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価 (東芝、日立GE分)

地震荷重の応答比を組合せた場合の妥当性確認の流れ

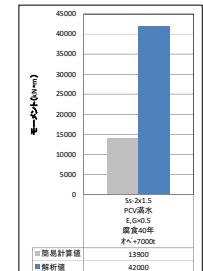
簡易評価手法の開発の実施フロー



妥当性確認の例: PCV基部 モーメント



荷重比較により妥当性を確認



妥当性確認の例: RSW基部 モーメント

妥当性確認を実施した条件

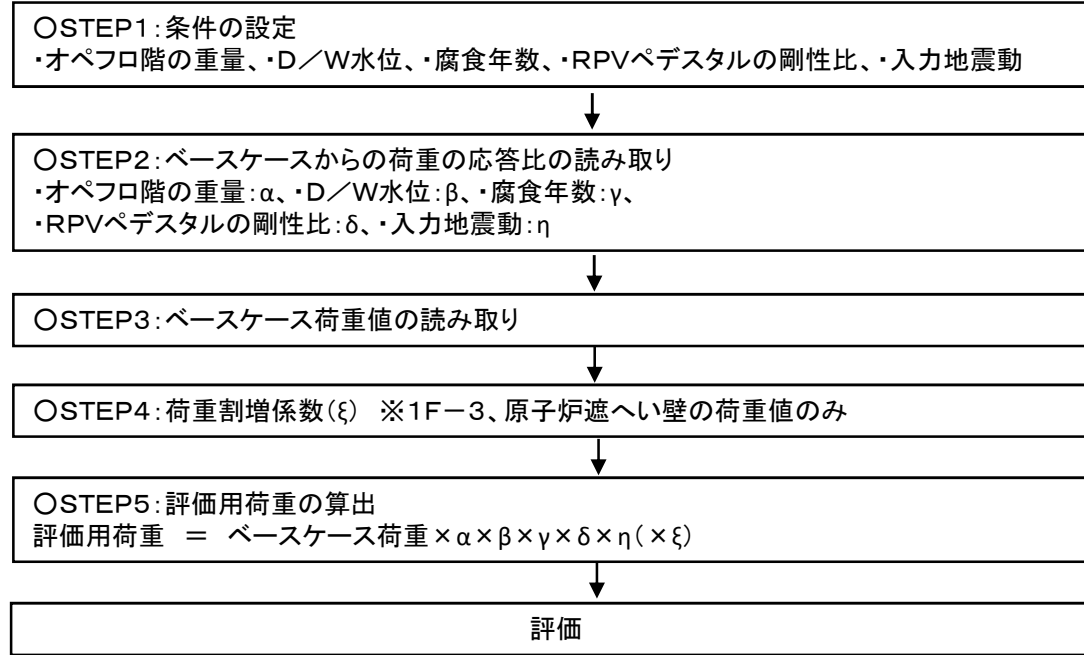
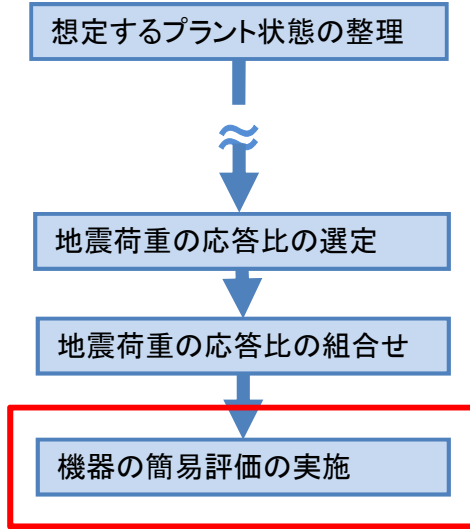
ケース	PCV内水重量	腐食	RPVベダスタル剛性 (E.G)	R/Bオベフロ追加重量	入力地震動の倍数
基本	なし	なし	E.G	なし	1.0倍
1	なし	なし	E.G×0.5倍	なし	1.0倍
2	なし	なし	E.G×0.5倍	+7000ton	1.0倍
3	なし	なし	E.G	+7000ton	1.0倍
4	なし	40年	E.G	なし	1.0倍
5	なし	40年	E.G×0.5倍	なし	1.0倍
6	なし	40年	E.G	+7000ton	1.0倍
7	なし	40年	E.G×0.5倍	+7000ton	1.0倍
8	0.P.12.000m	なし	E.G	なし	1.0倍
9	0.P.12.000m	なし	E.G×0.5倍	なし	1.0倍
10	0.P.12.000m	40年	E.G	なし	1.0倍
11	0.P.12.000m	40年	E.G×0.5倍	なし	1.0倍
12	0.P.12.000m	なし	E.G	+7000ton	1.0倍
13	0.P.12.000m	なし	E.G×0.5倍	+7000ton	1.0倍
14	0.P.12.000m	40年	E.G	+7000ton	1.0倍
15	0.P.12.000m	40年	E.G×0.5倍	+7000ton	1.0倍
16	漏水	なし	E.G	なし	1.0倍
17	漏水	なし	E.G×0.5倍	なし	1.0倍
18	漏水	40年	E.G	なし	1.0倍
19	漏水	40年	E.G×0.5倍	なし	1.0倍
20	漏水	なし	E.G	+7000ton	1.0倍
21	漏水	なし	E.G×0.5倍	+7000ton	1.0倍
22	漏水	40年	E.G	+7000ton	1.0倍
23	漏水	40年	E.G×0.5倍	+7000ton	1.0倍
24	なし	なし	E.G	なし	1.5倍
25	漏水	なし	E.G×0.5倍	+7000ton	1.5倍
26	漏水	40年	E.G×0.5倍	+7000ton	1.5倍

- ✓ 簡易評価手法により算出した荷重値と地震応答解析を用いて算定した荷重値を比較した。(1)で実施している強度評価に使用する荷重算定位置に対して比較したところ、一部を除き概ね一致した。(本頁は1F-3の例)。
- ✓ 水平方向加振の場合、両手法の算定値が大きく異なる箇所は、原子炉遮へい壁(RSW)である。パラメータの変動によって、固有周期及び刺激係数が変化している。RSWは固有周期の変化に大きく影響する部位であり、差が大きくなったものと考えられる。なお、1F-3は簡易評価手法が荷重を小さく見積っているため荷重割増係数を新たに導入する。

6. 平成26-27年度事業成果

(2)PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価 (東芝、日立GE分)

簡易評価手法の開発の実施フロー



簡易評価手法を用いた評価例(報告書4.2.6から一部抜粋)
※1F-1/1F-3の評価条件は報告書4.2.6に示す

(a) 1F-1の例

評価部位	簡易値	目安荷重	評価結果	
PCV基部	せん断力 (kN)	10165	18140	○
	モーメント (kN・m)	84114	135861	○

(b) 1F-3の例

評価部位	簡易値	目安荷重	評価結果	
PCV基部	せん断力 (kN)	18172	40898	○
	モーメント (kN・m)	203591	607590	○

構築した簡易評価手法の流れ

- ✓ 将来のプラント状態における燃料取出条件の見通しを迅速に得るために、PCVの水位状態や補修(止水)工法の条件等の様々な組み合わせを想定し、それぞれの組み合わせについて、RPV/PCVの耐震強度評価を簡易的に実施する手法を開発した。
- ✓ 簡易手法でRSW等の固有周期の変化が地震応答に大きく影響する場合は、評価部位によっては適用性に注意が必要である。また、入力地震動の周波数特性が変化する場合や、入力地震動の増大に伴う建屋等の塑性化程度が変化する場合等の、応答の非線形性が強くなる場合は、適用性に注意が必要である。
- ✓ また、1F-1、1F-3それぞれでプラント状態を一つ想定し、構築した手法を用いて簡易評価を実施した。

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発

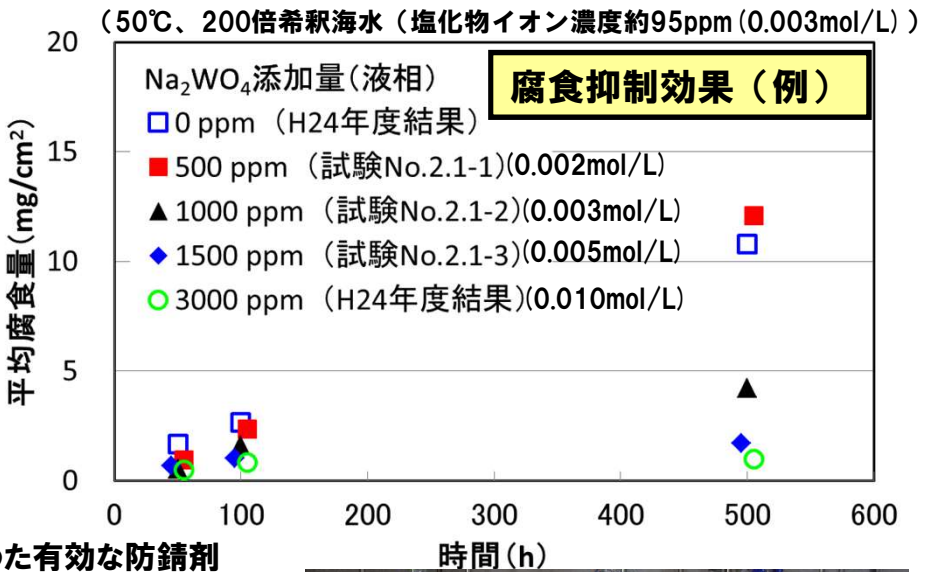
① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認(東芝、日立GE、三菱重工業分)

● 全体実施計画

本事業においてこれまでに抽出された防錆剤候補

No.	防錆剤
1	モリブデン酸ナトリウム(Na_2MoO_4)
2	亜硝酸ナトリウム(NaNO_2)
3	タングステン酸ナトリウム(Na_2WO_4)
4	硝酸ナトリウム混合モリブデン酸ナトリウム ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{NaNO}_3$)
5	五ホウ酸ナトリウム($\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16}$)



- ・上記防錆剤に加え、気相側にも防錆効果を示す気化性防錆剤を含めた有効な防錆剤の再調査と選定を行い、それら防錆剤に対する腐食抑制効果の確認を行う。
- ・対象材は、PCV構造材(炭素鋼SGV480)及び原子炉注水配管材(炭素鋼STPT410)とする。PCV構造材に対する試験条件は、平成25年度に実施した腐食抑制策確認試験の試験条件と同様に、現状及び今後のプラント状態として設定した長期条件(温度50℃、200倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約95ppm))を基本条件とする。
- ・防錆剤の腐食抑制効果は、塩化物イオン濃度に影響することが考えられることから、PCV滞留水の分析結果による塩化物イオン濃度を考慮した条件(1000倍及び10000倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約19及び1.9ppm))での腐食抑制効果の確認を実施する。
- ・原子炉注水配管材を対象とした試験については、平成25年度に製作した注水配管腐食試験装置を使用し、平成25年度と同等の流動条件下において、防錆剤の腐食抑制効果を確認する。



腐食試験状況(例)

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 防錆剤の選定(東芝、日立GE分)

これまで本事業においては一般の冷却水系で使用されている代表的な防錆剤を中心に無機酸化皮膜型防錆剤(タングステン酸ナトリウム、モリブデン酸ナトリウム、亜硝酸ナトリウムなど)の効果を検討してきたが、放射線や塩分などの1F特有の要因により、安全に実機適用できるものが現状では確認されていないため、防錆剤メーカーからのヒアリングや文献等をもとに、新規防錆剤候補の追加調査を行い、リン酸塩(亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩、亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩)、メタバナジン酸ナトリウムを選定した。各防錆剤について、防錆効果の詳細確認のほか、放射線分解による悪影響や水処理設備の機能上への悪影響などの副次的悪影響の有無を本プロジェクトにて確認する。 : 新規防錆剤候補

防錆剤	タングステン酸ナトリウム	モリブデン酸ナトリウム	五ホウ酸ナトリウム	亜硝酸ナトリウム	リン酸塩		メタバナジン酸ナトリウム
					亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	
本PJでの防錆効果確認試験実績	あり	あり	あり	あり	なし 本PJで確認要	なし 本PJで確認要	なし 本PJで確認要
防食皮膜の種類	酸化皮膜型	酸化皮膜型	酸化皮膜型	酸化皮膜型	沈殿皮膜型	酸化皮膜+沈殿皮膜型	酸化皮膜型
防錆効果発現に必要な投入量	中	大	大	小	小	中	不明

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 試験要領策定(東芝、日立GE分)

概略試験マトリックス

温度	塩化物イオン濃度	溶存酸素濃度	防錆剤※添加濃度	気液環境
50℃	95ppm (200倍 希釈人工海水)	大気飽和	濃度 ①、②、③	液相
	19ppm (1,000倍 希釈人工海水)	大気飽和	濃度 ①、②、③	液相
	1.9ppm (10,000倍 希釈人工海水)	大気飽和	濃度 ①、②、③	液相



pH:中性、照射:なし、試験時間:500hrを基本とし、一部50h, 100hでも実施

腐食試験状況(例)

※ 防錆剤添加濃度を3水準で変化させ、腐食量および腐食形態を調査し、局部腐食が発生しない防錆剤添加濃度(最適濃度)を確認する。

IRID (参考) PCV滞留水の水質分析結果による塩化物イオン濃度 ©International Research Institute for Nuclear Decommissioning


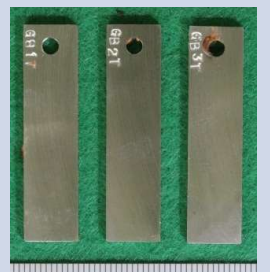







・1号機:19ppm(H24/10/12採取) ・2号機:2.9ppm(H25/8/7採取)

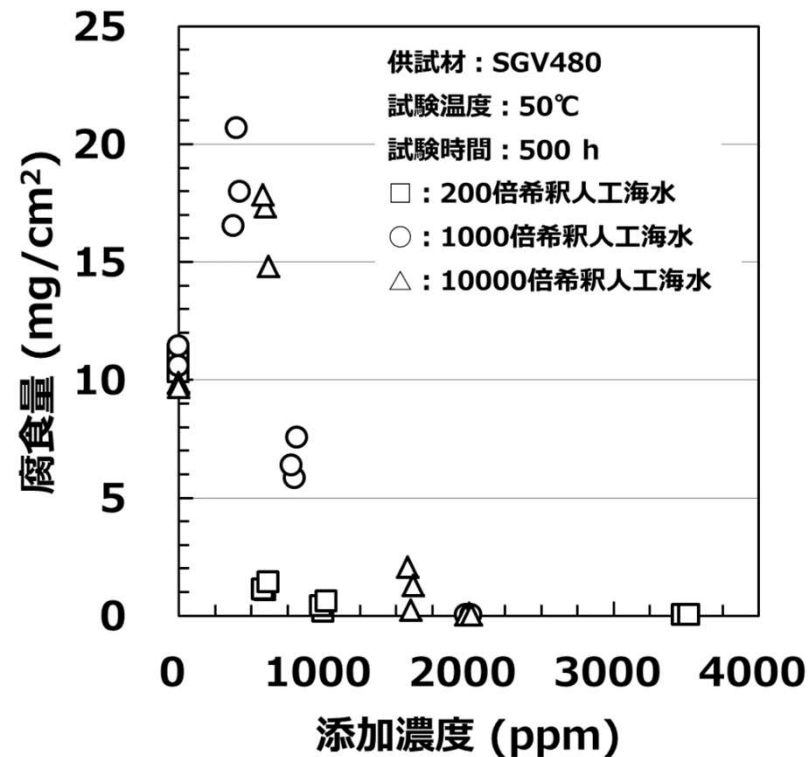
6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ①実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

●亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩添加試験結果(東芝分)

	全面腐食又は局部腐食	腐食なし	
200倍希釈人工海水 (95ppmCl ⁻)	 <p>600 ppm (PO₄:11ppm,Zn:3ppm,Mo:8ppm)</p>	 <p>1000 ppm (PO₄:18ppm,Zn:5ppm,Mo:13ppm)</p>	 <p>3500 ppm (PO₄:63ppm,Zn:18ppm,Mo:46ppm)</p>
1000倍希釈人工海水 (19ppmCl ⁻)	 <p>400 ppm (PO₄:7ppm,Zn:2ppm,Mo:5ppm)</p>	 <p>800 ppm (PO₄:14ppm,Zn:4ppm,Mo:10ppm)</p>	 <p>2000 ppm (PO₄:36ppm,Zn:10ppm,Mo:26ppm)</p>
10000倍希釈人工海水 (1.9ppmCl ⁻)	 <p>600 ppm (PO₄:11ppm,Zn:3ppm,Mo:8ppm)</p>	 <p>1600 ppm (PO₄:29ppm,Zn:8ppm,Mo:21ppm)</p>	 <p>2000 ppm* (PO₄:36ppm,Zn:10ppm,Mo:26ppm)</p>



・200倍希釈海水条件では3500ppm、1000倍及び10000倍希釈海水条件では2000ppmの添加にて、試験片は金属光沢を呈し、腐食量もほぼ0mg/cm²となった。(炭素鋼に対する腐食抑制効果を確認)

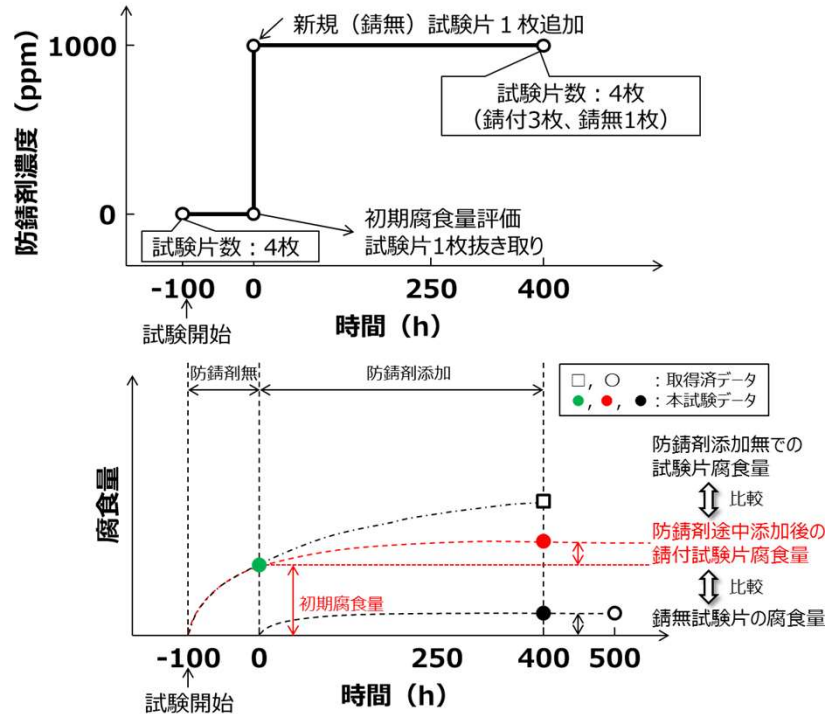
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning
各写真下部の数値は防錆剤添加濃度
* 右端の試験片のみ吊下げ穴近傍1箇所にて軽微な腐食発生あり

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

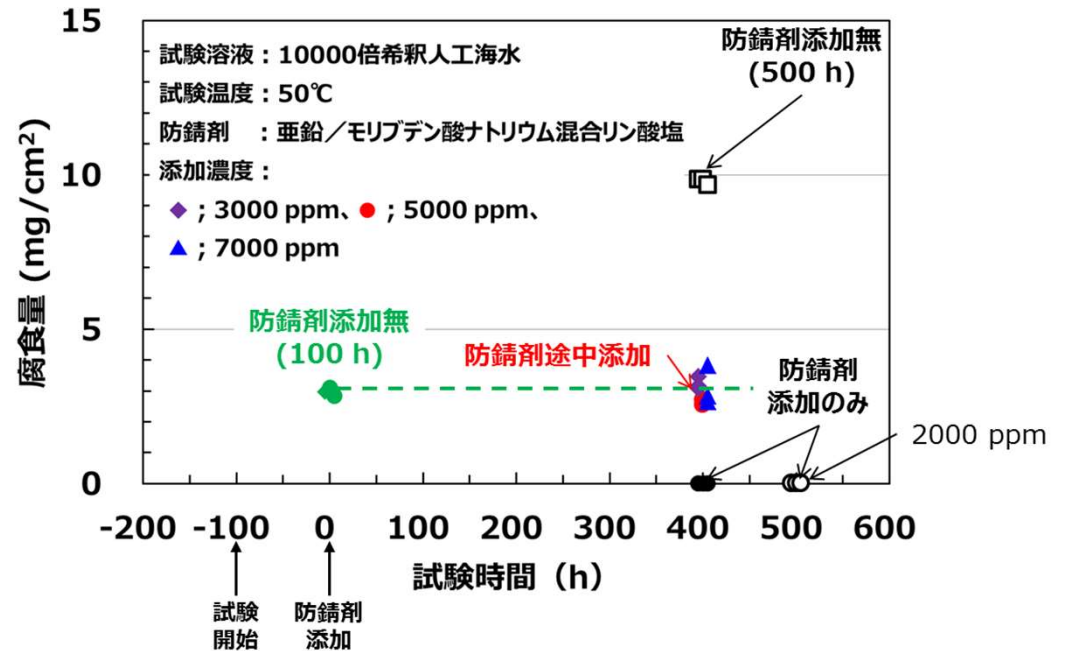
(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩途中添加試験結果(東芝分)



防錆剤途中添加試験方法

(防錆剤添加濃度1000ppmの場合)



・亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩を3000 ppm以上添加した場合、添加後400 h(総試験時間500 h)後の腐食量(◆, ●, ▲)は、防錆剤なし100 h(●)の腐食量と同程度であった。
(腐食生成物に覆われた炭素鋼に対する腐食抑制効果を確認)

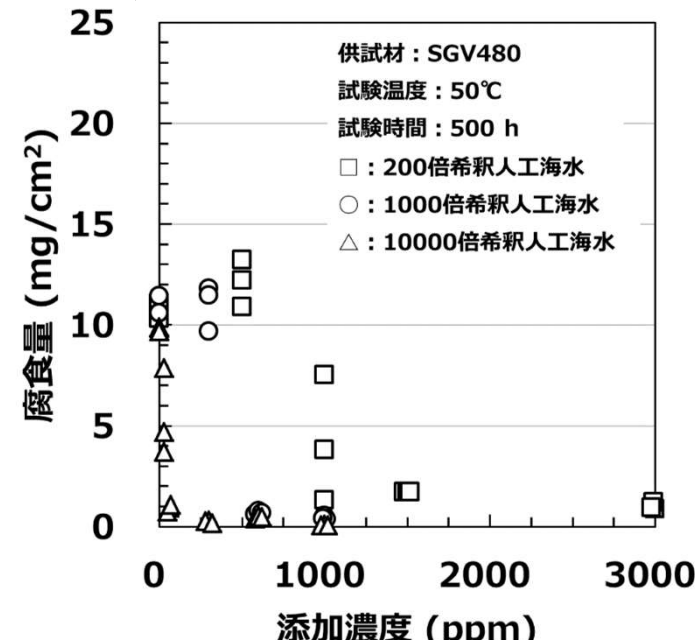
6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● タングステン酸ナトリウム添加試験結果(東芝分)

	局部腐食		斑点状の腐食	
200倍希釈人工海水 (95ppmCl ⁻)				
1000倍希釈人工海水 (19ppmCl ⁻)				
10000倍希釈人工海水 (1.9ppmCl ⁻)				



・200倍希釈海水条件では1500ppm以上、1000倍希釈海水条件では1000ppm及び10000倍希釈海水条件では600ppm以上の添加にて、局部腐食の発生は抑制され、微細な斑点状の腐食形態となることにより、腐食量が大きく減少した。(炭素鋼に対する腐食抑制効果を確認)

5. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

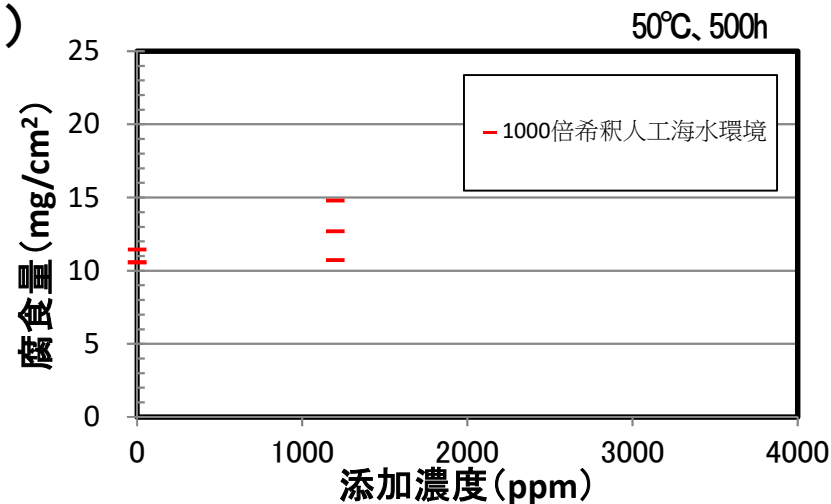
(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

●モリブデン酸ナトリウム添加試験結果(日立GE分)

1000倍希釈人工海水



1200ppm添加



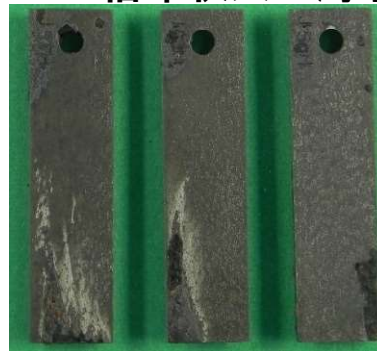
●メタバナジン酸ナトリウム添加試験結果(日立GE分)

200倍希釈人工海水

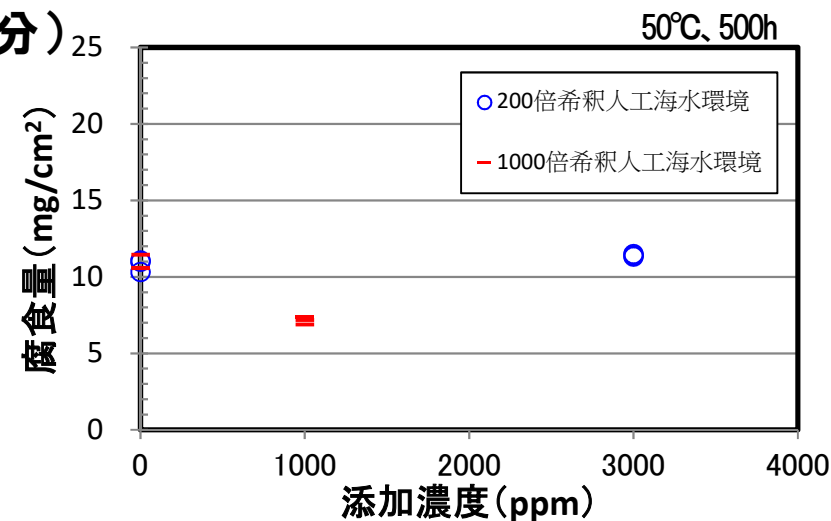


3000ppm添加

1000倍希釈人工海水



1000ppm添加



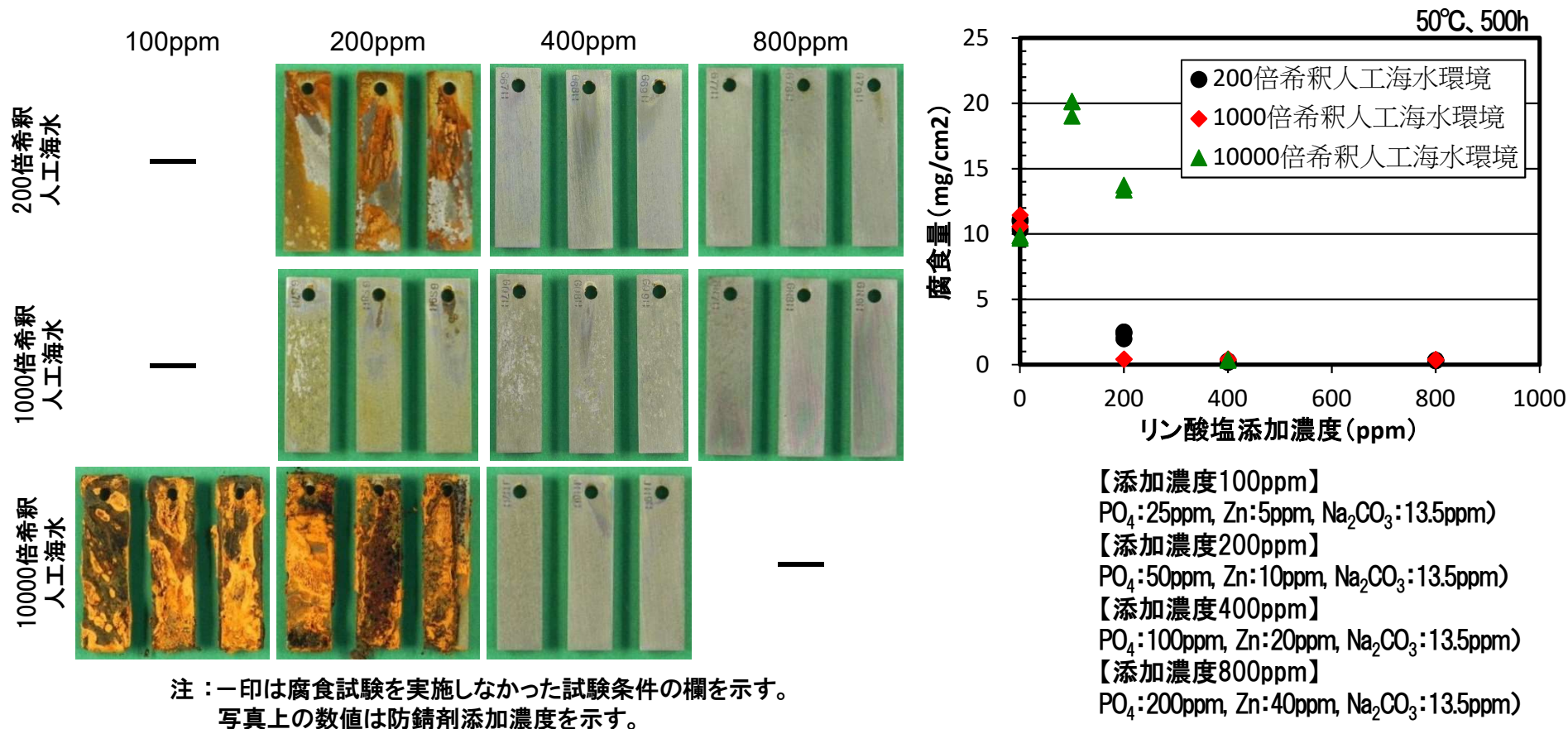
- ・1000倍希釈人工海水環境では、1200ppm添加しても顕著な抑制効果は確認されなかった。(モリブデン酸ナトリウム)
- ・200倍希釈人工海水環境では3000ppm、1000倍希釈人工海水環境では1000ppm添加しても顕著な抑制効果は確認されなかった。(メタバナジン酸ナトリウム)

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩添加試験結果(日立GE分)



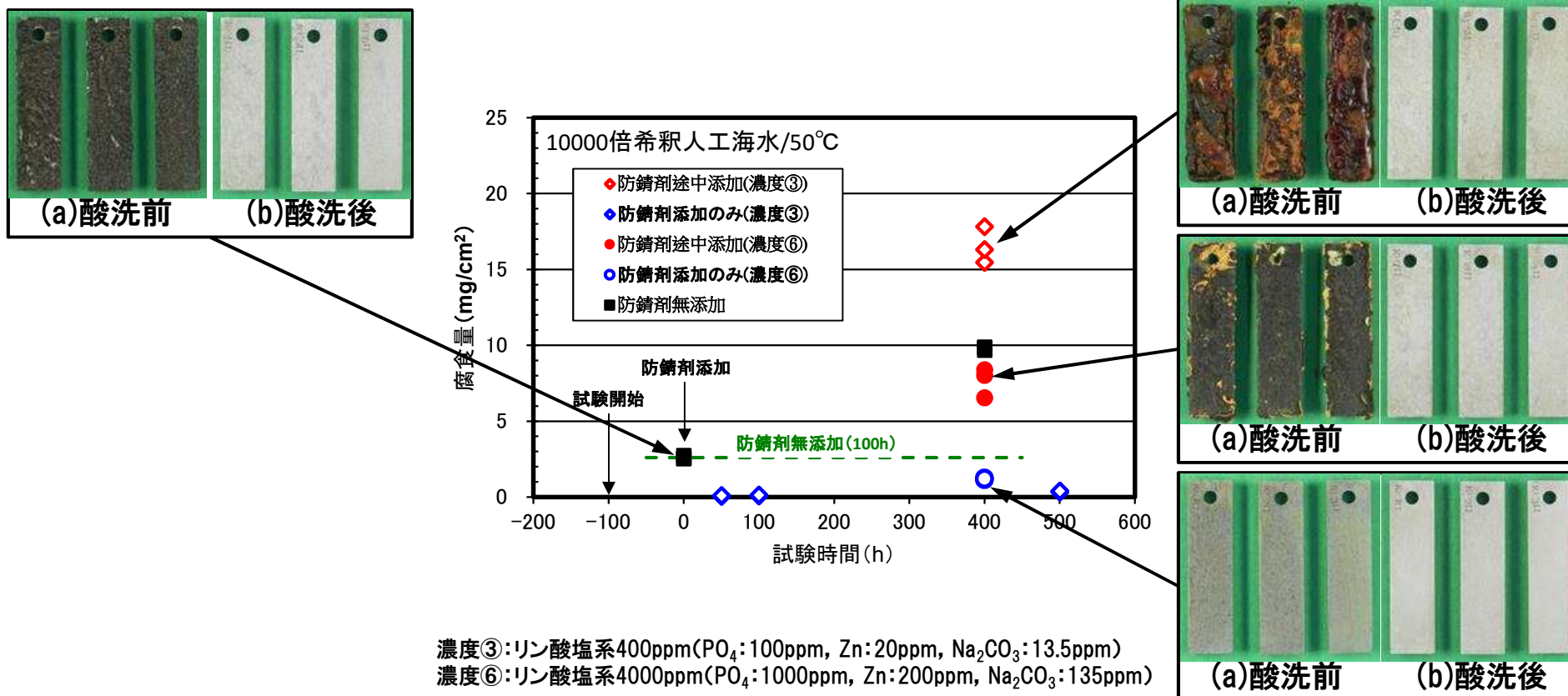
・いずれの環境においても400ppm以上添加することにより腐食量が大きく低減し、腐食抑制効果が確認された。

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩途中添加試験結果(日立GE分)



腐食生成物に覆われた炭素鋼表面に対して、400ppmを添加した条件では、腐食抑制効果は認められなかったが、4000ppmを添加した条件では、腐食抑制効果が認められた。

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 実施内容(三菱重工業分)

原子炉注水配管等の健全性評価

- ・500時間5Run、2000時間1Runの計6Runを2年間で実施。
- ・淡水で希釈された海水中での腐食挙動を評価した(Run1)。
- ・防錆剤添加条件のベースとなる小循環ループ移行後の想定水質での防錆剤添加無しのデータを取得した(Run2)。
- ・Run3～6以降は防錆剤の流水下での腐食抑制効果の確認試験を実施した。

試験マトリックス




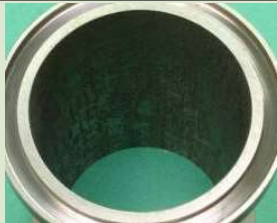

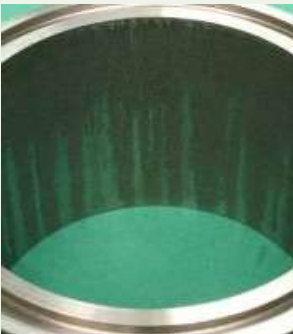
Run	供試体材料	温度	溶存酸素濃度	海水濃度	防錆剤	流速	試験時間	目的	
H26年度	1	STPT410	30℃	1.0ppm	淡水希釈模擬 (Cl: 7ppm)	添加無し	1.7m/s	100h, 500h, 2000h	淡水希釈の影響確認
							0.23m/s	100h, 500h, 2000h	
							0.05m/s	100h, 500h, 2000h	
	2	STPT410	30℃	7.5ppm	1000倍希釈 (Cl: 19ppm)	添加無し	1.7m/s	50h, 100h, 500h	防錆剤無添加条件 (ベースデータ)
							0.23m/s	50h, 100h, 500h	
							0.05m/s	50h, 100h, 500h	
H27年度	3	STPT410	30℃	7.5ppm	1000倍希釈 (Cl: 19ppm)	タンゲステン 酸ナトリウム	1.7m/s	50h, 100h, 500h	防錆剤の効果 確認
							0.23m/s	50h, 100h, 500h	
							0.05m/s	50h, 100h, 500h	
4	STPT410	30℃	7.5ppm	1000倍希釈 (Cl: 19ppm)	亜鉛/炭酸ナ トリウム混合 リン酸塩系	1.7m/s	50h, 100h, 500h	防錆剤の効果 確認	
						0.23m/s	50h, 100h, 500h		
						0.05m/s	50h, 100h, 500h		
5	STPT410	30℃	7.5ppm	1000倍希釈 (Cl: 19ppm)	亜鉛/モリブ デン酸塩混合 リン酸塩系	1.7m/s	50h, 100h, 500h	防錆剤の効果 確認	
						0.23m/s	50h, 100h, 500h		
						0.05m/s	50h, 100h, 500h		
6	STPT410	30℃	7.5ppm	10000倍希釈 (Cl: 1.9ppm)	亜鉛/モリブ デン酸塩混合 リン酸塩系	1.7m/s	・100h無添加	腐食した面への 防錆剤の効果 確認	
						0.23m/s	・100h無添加→400h添加		
						0.05m/s	・500h添加		

6. 平成26-27年度事業成果

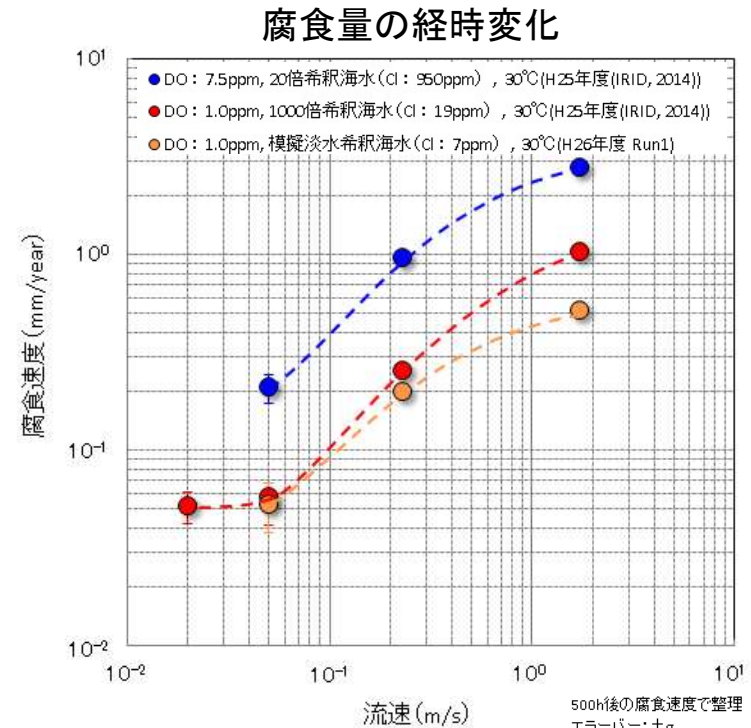
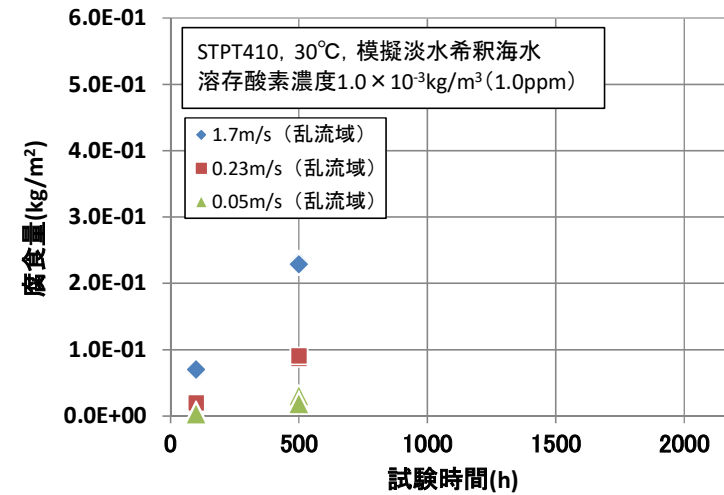
(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 試験結果(三菱重工業分) (Run1)

流速	試験後外観写真 (模擬淡水希釈海水, 500時間)	
	脱スケール前	脱スケール後
1.7m/s (乱流)		
0.23m/s (乱流)		
0.05m/s (乱流)		

- 試験後および酸洗後の外観から全面腐食と判断され、不動態化および局部腐食と見なせる箇所は存在しなかった。
- 流速が大きいほど腐食速度が大きい傾向を示した。
- DO濃度が同条件の平成25年度の1000倍希釈海水中のデータと比較してわずかに腐食速度が低かった。





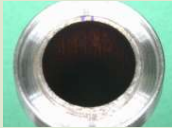

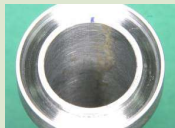










腐食速度の流速依存性(水質の影響)

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 試験結果(三菱重工業分) (Run2~6)

腐食抑制剤 流速	無添加	亜硝酸塩 (H25年度実施)	タングステン酸塩	亜鉛/炭酸塩 混合リン酸塩	亜鉛/モリブデン 酸塩混合リン酸塩
1.7m/s (乱流)					
0.23m/s (乱流)					
0.05m/s (乱流)					

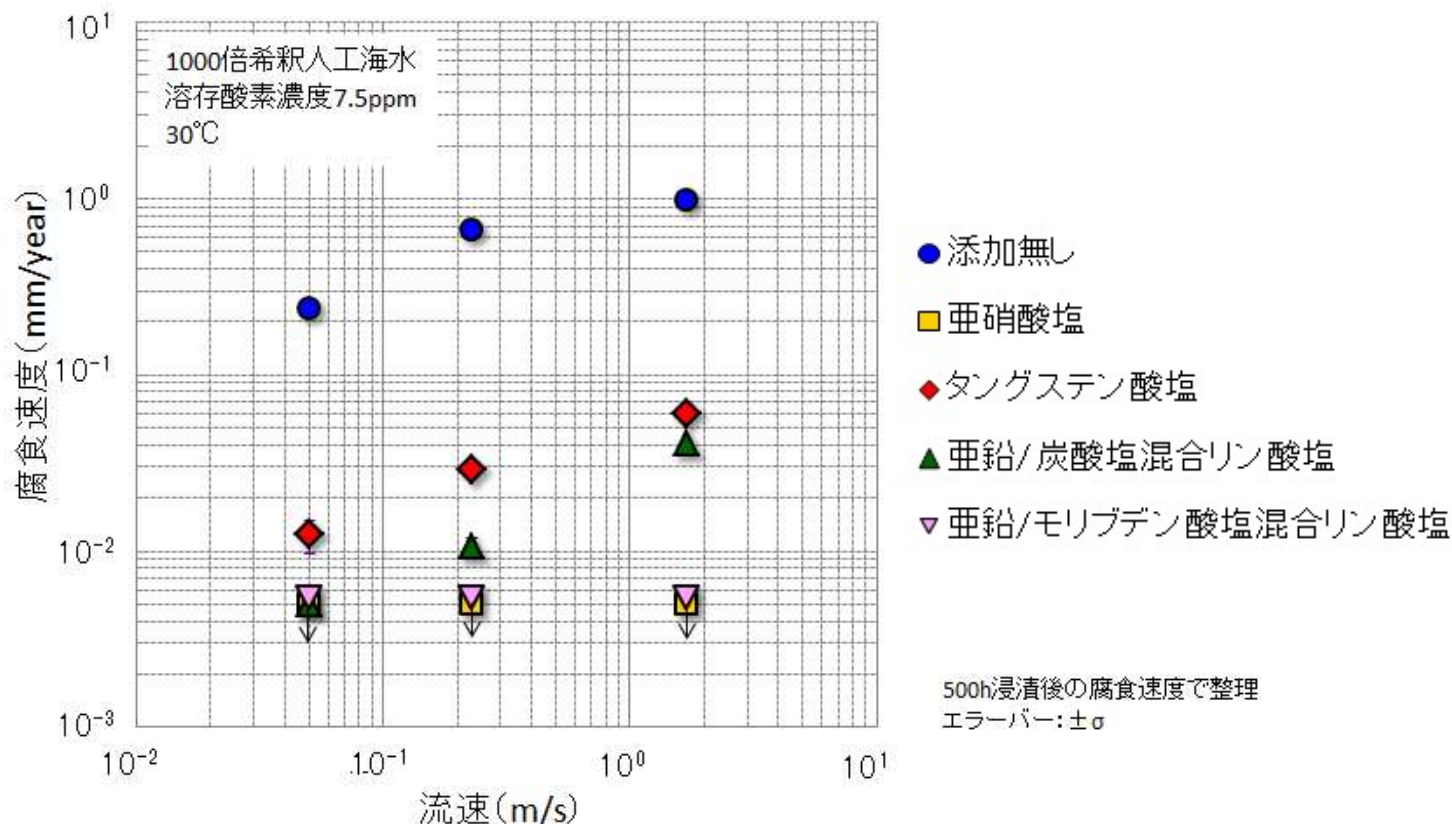
- 無添加条件では著しい腐食が認められ、腐食生成物(錆)が厚く堆積していた。
- 腐食抑制剤添加条件ではいずれも顕著な腐食生成物の堆積は認められず、特に亜硝酸塩および亜鉛/モリブデン酸塩混合リン酸塩では試験前と同様、金属光沢を有していた。⁶⁶

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 試験結果(三菱重工業分) (Run2~6)



流水環境における腐食速度に対する腐食抑制剤添加の効果

- 無添加条件と比較して腐食抑制剤添加条件では1桁以上腐食速度の低下が認められた。
- 特に亜硝酸塩および亜鉛/モリブデン酸塩混合リン酸塩添加条件では腐食減量が検出下限以下であり、いずれの流速においても有意な腐食減肉は認められなかった。

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(b) 腐食抑制効果の阻害因子(γ線照射等)の影響の確認

● 全体実施計画及び試験要領策定(日本原子力研究開発機構分)

目的: ガンマ線照射環境下における各種防錆剤の腐食抑制効果の確認を行う。

① 防錆剤の放射線分解特性及び反応生成物(錆・沈殿等)の調査

② 照射下防錆剤添加腐食試験による防錆剤の効果の確認

材質	炭素鋼(PCV)
試験温度	50℃
試験溶液	希釈人工海水
試験時間	500時間
線量率	0.2k, 4kGy/h

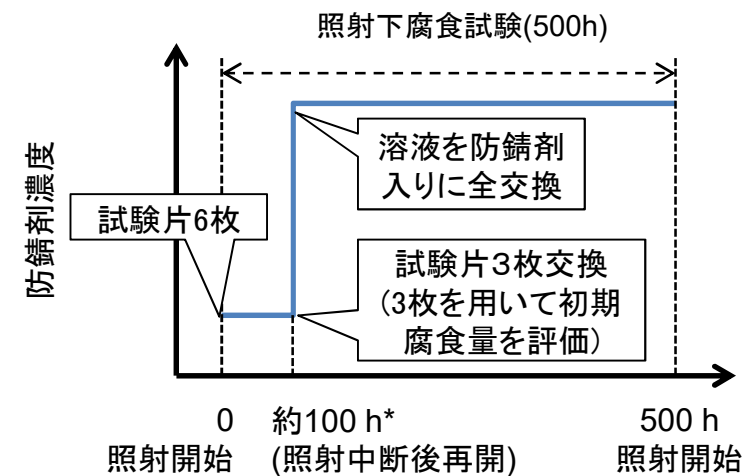
ガンマ線照射下防錆剤添加腐食試験条件一覧

防錆剤種類	防錆剤濃度 (ppm)	成分組成	人工海水希釈率 ✓:実施/○:未実施			備考	
			200倍	1000倍	1万倍		
五ホウ酸ナトリウム	濃度①	40	B: 40 ppm	✓	✓	-	Run1/2
	濃度②	400	B: 400 ppm	✓	✓	-	Run1/2
	濃度③	4000	B: 4000 ppm	✓	✓	-	Run1/2
タングステン酸ナトリウム	濃度⑤	1000	Na ₂ WO ₄ : 1000 ppm	-	✓	✓	Run4
	濃度⑥	1500	Na ₂ WO ₄ : 1500 ppm	✓	-	-	Run4
	濃度⑧	5000	Na ₂ WO ₄ : 5000 ppm	-	✓	-	Run8
亜鉛/炭酸ナトリウム 混合リン酸塩	濃度③	400*	PO ₄ : 100 ppm, Zn: 20 ppm, Na ₂ CO ₃ : 13.5 ppm	✓	✓	-	Run3
	濃度④	800*	PO ₄ : 200 ppm, Zn: 40 ppm, Na ₂ CO ₃ : 13.5 ppm	-	✓	✓	Run3
※: リン酸亜鉛系防錆剤濃度として	濃度⑤	2000*	PO ₄ : 500 ppm, Zn: 100 ppm, Na ₂ CO ₃ : 13.5 ppm	-	✓	-	Run7
	濃度⑥	4000*	PO ₄ : 1000 ppm, Zn: 200 ppm, Na ₂ CO ₃ : 13.5 ppm	-	✓	✓	Run7/8
亜鉛/モリブデン酸ナトリウム 混合リン酸塩	濃度⑤	1600	PO ₄ : 29 ppm, Zn: 8 ppm, Mo: 21 ppm, 溶質成分: 304 ppm	-	✓	-	Run6
			PO ₄ : 36 ppm, Zn: 10 ppm, Mo: 26 ppm, 溶質成分: 380 ppm	-	✓	-	Run5
	濃度⑦	3000	PO ₄ : 54 ppm, Zn: 15 ppm, Mo: 39 ppm, 溶質成分: 570 ppm	-	-	✓	Run6
			PO ₄ : 90 ppm, Zn: 25 ppm, Mo: 65 ppm, 溶質成分: 950 ppm	-	✓	✓	Run6/8

途中添加(100h後)試験



ガンマ線照射下腐食試験の状況



途中添加試験の試験手順

6. 平成26-27年度事業成果

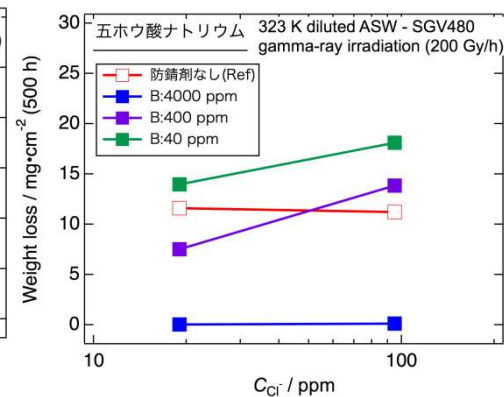
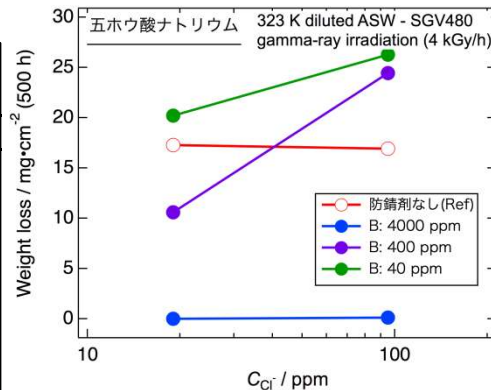
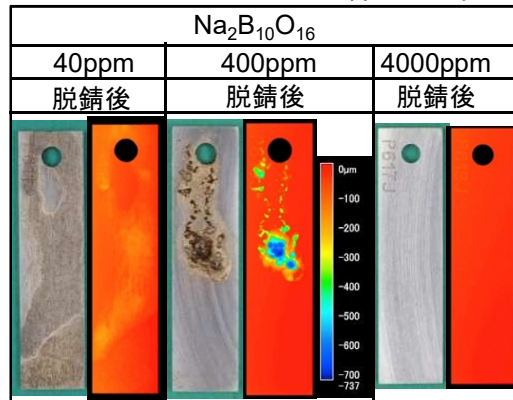
(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(b) 腐食抑制効果の阻害因子(γ線照射等)の影響の確認

● 試験結果(連続試験)

五ホウ酸ナトリウム

外観&段差, 1000倍希釈(CI:19ppm), 4kGy/h



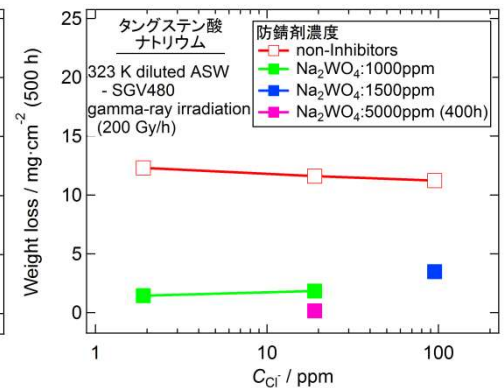
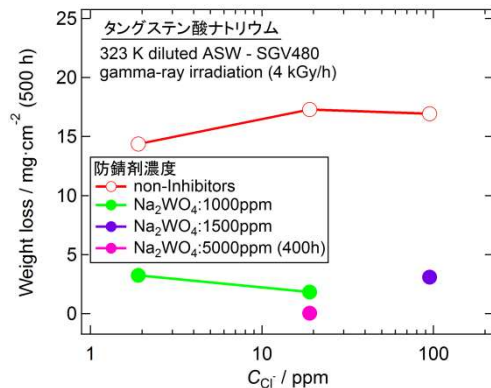
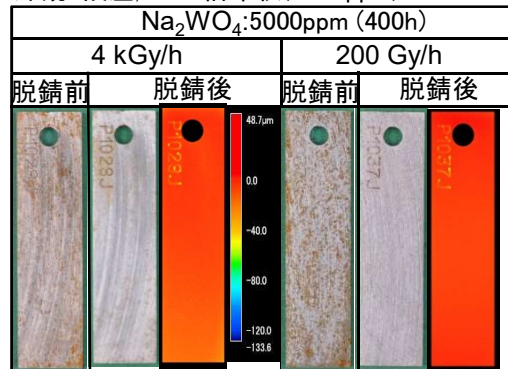
照射腐食試験後の腐食量

五ホウ酸ナトリウム:

- ✓ 防錆剤濃度の影響
 - 40ppmは全面腐食
 - 400ppmは局部腐食
 - 4,000ppmは不動態化により腐食量は、ほぼゼロ
- ✓ 腐食形態は線量率に依存しない

タングステン酸ナトリウム

外観&段差, 1000倍希釈(CI:19ppm)



照射腐食試験後の腐食量

タングステン酸ナトリウム

- ✓ 腐食量は低下
- ✓ 斑点状の腐食が発生
- ✓ 防錆剤濃度の影響
 - 吊り下げ部で局部腐食発生(Na₂WO₄: 1500ppm以下)
 - 腐食量はほぼゼロ(Na₂WO₄: 5000ppm)
- ✓ 腐食形態は線量率に依存しない

6. 平成26-27年度事業成果

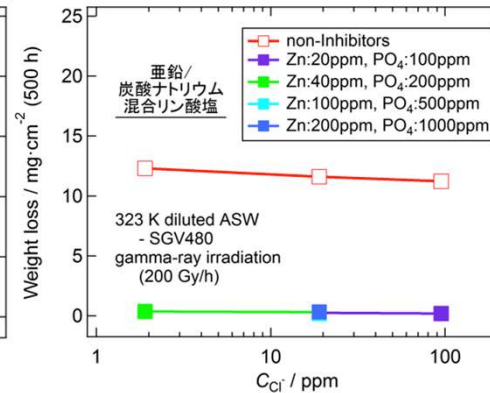
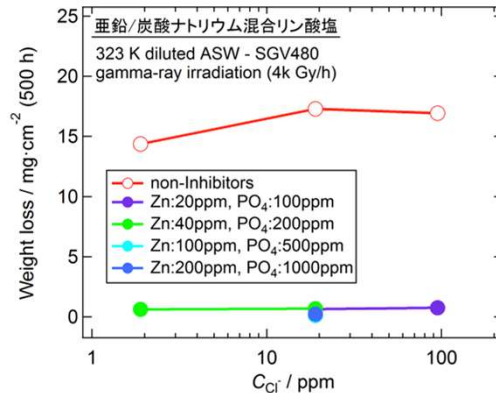
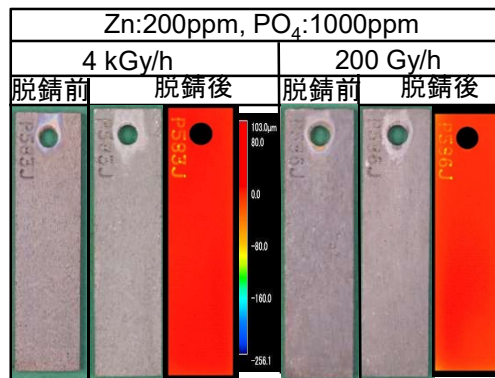
(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(b) 腐食抑制効果の阻害因子(γ線照射等)の影響の確認

● 試験結果(連続試験)

亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩

外観&段差, 1000倍希釈(CI:19ppm)



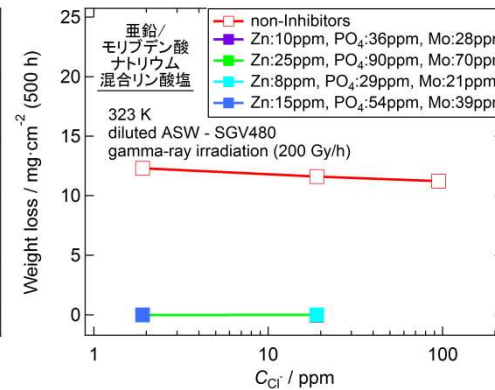
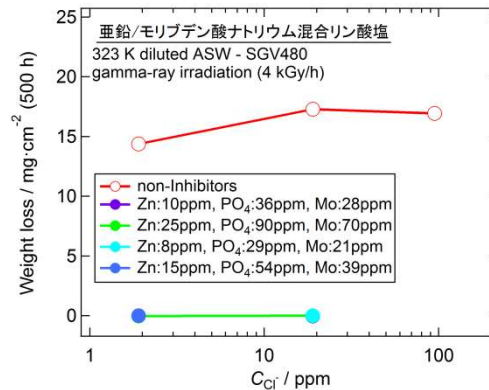
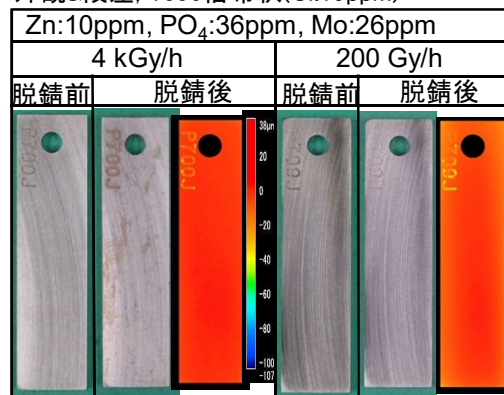
照射腐食試験後の腐食量

亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩:

- ✓ 腐食量は、ほぼゼロ
- ✓ 表面形態は線量率に依存しない

亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩

外観&段差, 1000倍希釈(CI:19ppm)



照射腐食試験後の腐食量

亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩:

- ✓ 腐食量は、ほぼゼロ
- ✓ 金属光沢が保たれた
- ✓ 表面形態は線量率に依存しない

6. 平成26-27年度事業成果

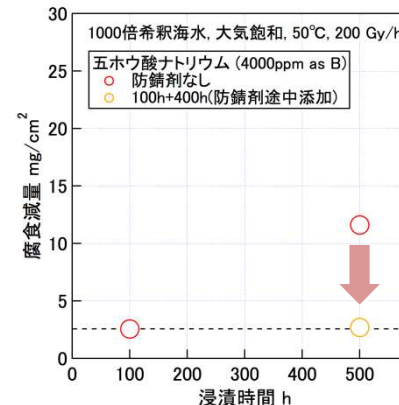
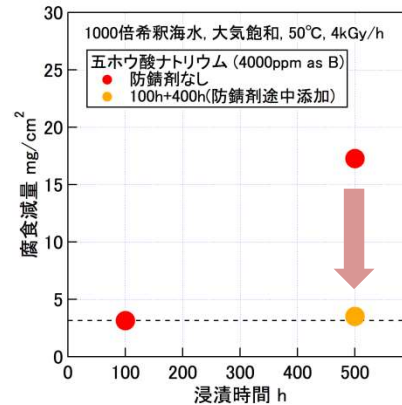
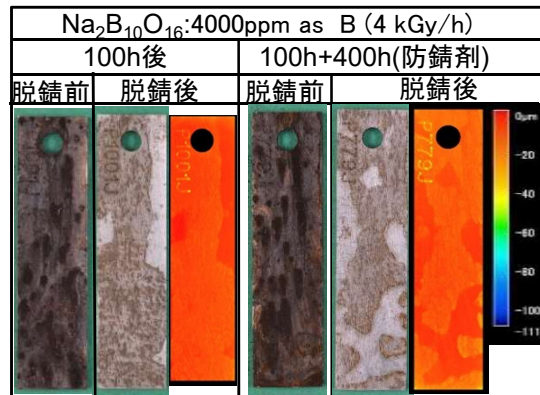
(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(b) 腐食抑制効果の阻害因子(γ線照射等)の影響の確認

● 試験結果 (途中添加 [100h後] 試験)

五ホウ酸ナトリウム

外観&段差, 1000倍希釈(Cl:19ppm)



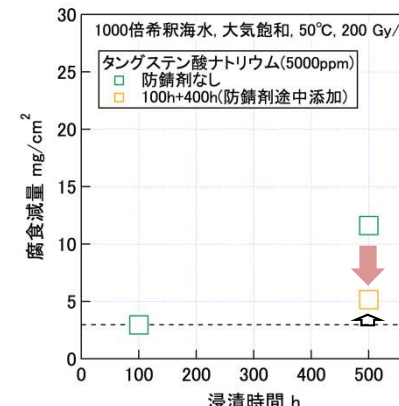
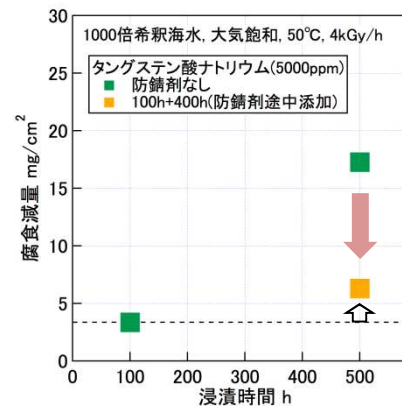
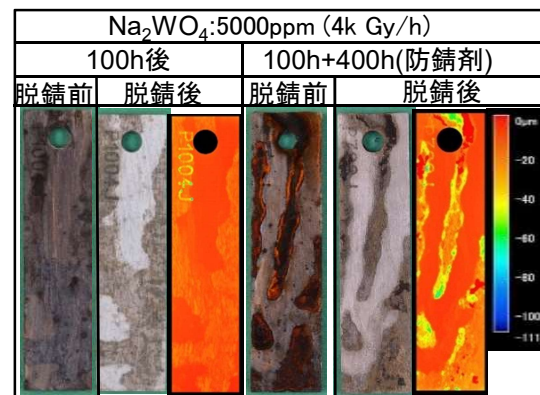
照射腐食試験後の腐食量

五ホウ酸ナトリウム

✓ 途中添加により腐食停止

タングステン酸ナトリウム

外観&段差, 1000倍希釈(Cl:19ppm)



照射腐食試験後の腐食量

タングステン酸ナトリウム

- ✓ 途中添加により腐食量減少
- ✓ 添加後も腐食減量は微増
- ✓ 途中添加により腐食は完全に停止せず

6. 平成26-27年度事業成果

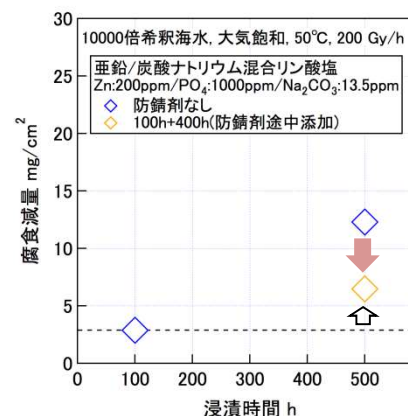
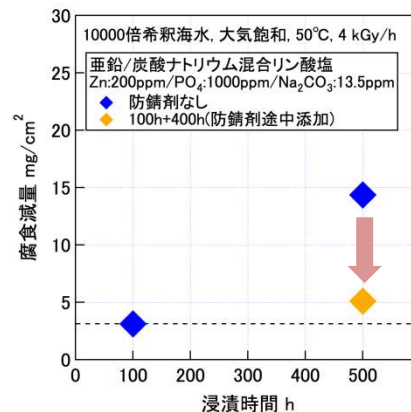
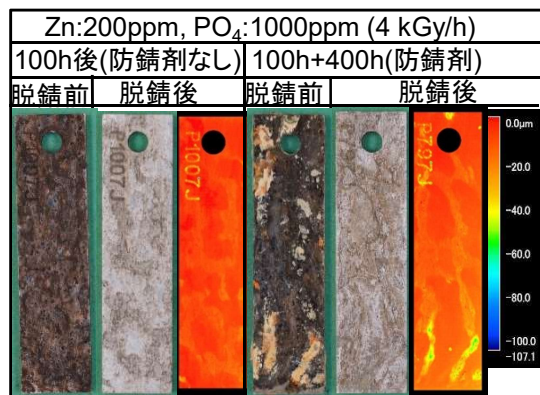
(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(b) 腐食抑制効果の阻害因子(γ線照射等)の影響の確認

● 試験結果 (途中添加 [100h後] 試験)

亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩

外観&段差, 10000倍希釈(Cl:1.9ppm)



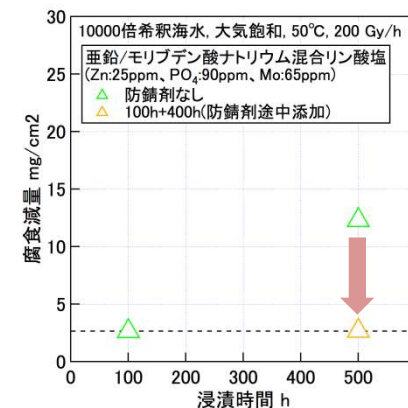
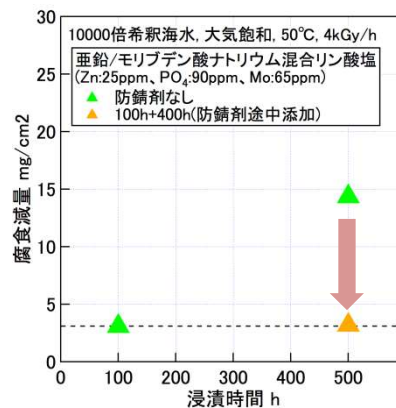
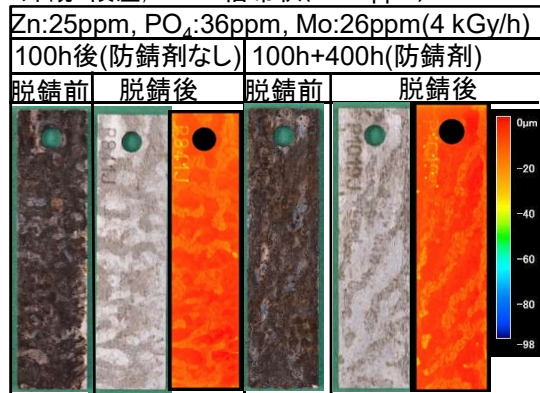
亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩

- ✓ 途中添加により腐食量減少
- ✓ 添加後も腐食減量は微増
- ✓ 途中添加により腐食は完全に停止せず

照射腐食試験後の腐食量

亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩

外観&段差, 10000倍希釈(Cl:1.9ppm)



亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩

- ✓ 途中添加により腐食停止

照射腐食試験後の腐食量

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(b) 腐食抑制効果の阻害因子(γ線照射等)の影響の確認

まとめ

	平均腐食量	表面形態 添加濃度 影響	線量率 依存性 [4k,200Gy/h]	希釈倍率 依存性 [200-10000倍]	途中添加 [なし100h]+ [添加400h]	溶液中 錆/残渣
五ホウ酸 ナトリウム [4000ppm as B]	○ ゼロ	○ 差異なし	○ 差異なし	○ 差異なし	○ 停止	なし
タングステン酸 ナトリウム	△ 低下	△ 添加量低で 局部腐食	○ 差異なし	△ Cl高で腐食 深さ大	△ 速度低下 (腐食停止せず)	なし
亜鉛/炭酸 ナトリウム 混合リン酸塩	○ ゼロ	○ 差異なし	○ 差異なし	○ 差異なし	△ 速度低下 (腐食停止せず)	高濃度で濁り
亜鉛/ モリブデン酸 ナトリウム 混合リン酸塩	○ ゼロ	○ 差異なし	○ 差異なし	○ 差異なし	○ 停止	なし

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発

② 副次的悪影響の評価(東芝、日立GE、日本原子力研究開発機構分)

● 全体実施計画

- 各種防錆剤の放射線分解有無の確認のため、照射量(照射強度、時間)をパラメータとしたγ線照射試験を実施し、試験後の水質分析等により、腐食への悪影響を及ぼす有害物生成の有無や、冷却水系統の閉塞に至るような沈殿物生成の有無を確認する。
- 各種防錆剤に対し、単純型汚染水処理システム、多核種除去装置、逆浸透膜型淡水化装置等の汚染水浄化設備をはじめ、関連する他設備に対する機能上の悪影響が生じないかを評価する。(一部、試験を実施)
- 各種防錆剤について、再臨界防止のため注入されるホウ素、脱酸や滅菌効果のため注入されるヒドラジンなどの複数の添加剤による防錆効果への悪影響の有無を確認する(検討に当たっては、「燃料デブリ臨界管理技術の開発」や「固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発」プロジェクト等の実施者と十分な連携を図る)。対象材は、PCV構造材(炭素鋼SGV480)とする。PCV構造材に対する試験条件は、昨年度と同様、現状及び今後のプラント状態として設定した長期条件(温度50℃、200倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約95ppm))を基本条件とする。
- 防錆剤の腐食抑制効果は、塩化物イオン濃度に影響することが考えられることから、PCV滞留水の分析結果による塩化物イオン濃度を考慮した条件(1000倍及び10000倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約19及び1.9ppm))での腐食抑制効果の確認を実施する。

6. 平成26-27年度事業成果

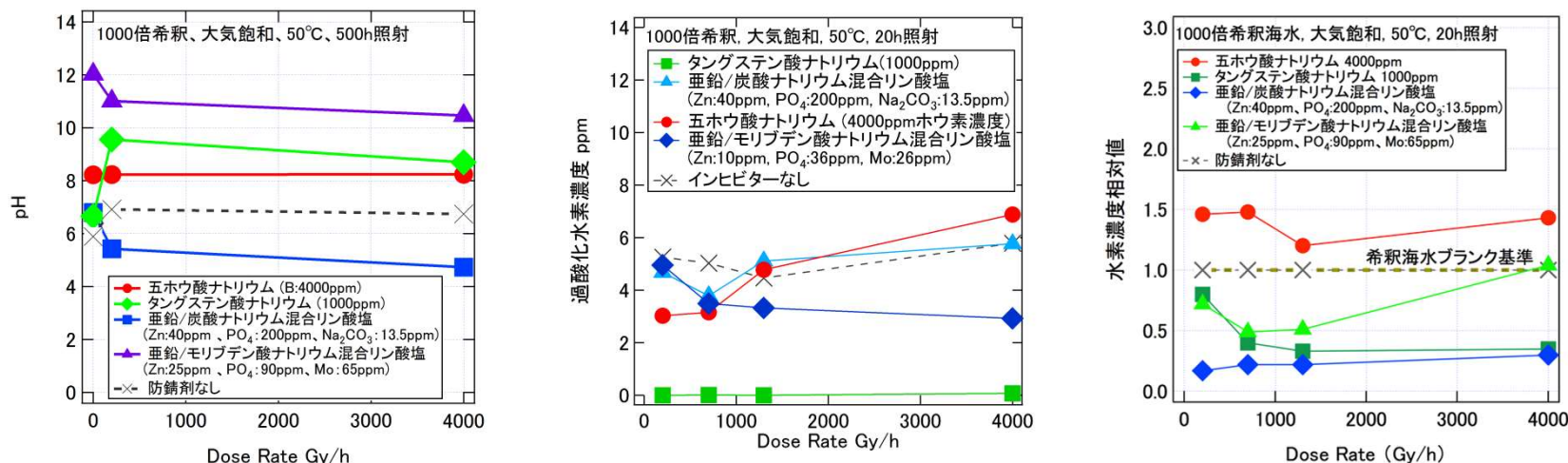
(3) 腐食抑制策の開発 ② 副次的悪影響の評価

(a) 腐食抑制効果の阻害因子(ガンマ線照射等)の影響の確認

● 試験要領策定及び試験結果(日本原子力研究開発機構分)

(1) 腐食抑制効果の阻害因子(ガンマ線照射等)の影響確認

実施内容: ガンマ線照射下における水質変化から副次的悪影響を評価した。



防錆剤	五ホウ酸ナトリウム	タングステン酸ナトリウム	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩
溶液変化*	影響なし	pH: 上昇 WO ₃ : 減少	pH: 低下 PO ₄ ³⁻ : 増加 Zn ²⁺ : 増加	pH: 低下 PO ₄ ³⁻ : 減少 Zn ²⁺ : 減少
H ₂ O ₂ 発生量**	低下(低線量側)	低下	低下(低線量側)	低下(高線量側)
水素発生量**	若干増加	低下(高線量側)	低下	低下(低線量側)

*腐食試験前後での溶液分析結果より **試験片なし溶液照射試験より

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ② 副次的悪影響の評価

(b) 腐食抑制策の複合影響の確認

● 試験要領策定(東芝/日立GE分)

概略試験マトリックス

温度	塩化物イオン濃度	溶存酸素濃度	防錆剤* 添加濃度	ホウ素 添加**	ヒドラジン	気液環境
50℃	95ppm (200倍希釈)	大気飽和	最適濃度	あり	なし	液相
	19ppm (1000倍希釈)	大気飽和	最適濃度	あり	なし	液相
				なし	あり	液相
	1.9ppm (10000倍希釈)	大気飽和	最適濃度	あり	なし	液相

pH:中性、照射:なし、試験時間:50h, 100h, 500hr

※ 防錆剤の種類、濃度については、前出の確認試験の結果より決定する。

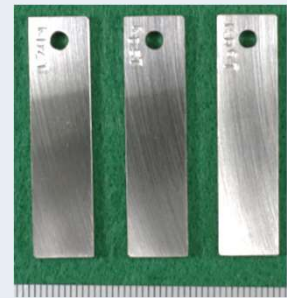
※※ホウ素添加濃度は、五ホウ酸ナトリウムの添加により、40, 400, 12000ppmとする。(12000ppmは臨界管理PJからの情報による最大濃度。ホウ素濃度が低い場合(40, 400ppm)には、炭素鋼は不働態化せず、全面腐食や局部腐食が発生することが明らかとなっているため、防錆剤とホウ素の複合による防錆効果を確認。)

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ② 副次的悪影響の評価

(b) 腐食抑制策の複合影響の確認

● 防錆剤に対するホウ素添加試験結果(東芝分)

		40 ppm as B	400 ppm as B	12000 ppm as B
1000倍希釈人工海水 (19 ppmCl ⁻)	タングステン酸ナトリウム, 1000 ppm			
	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩, 2000 ppm			
10000倍希釈人工海水 (19 ppmCl ⁻)	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩, 2000 ppm			

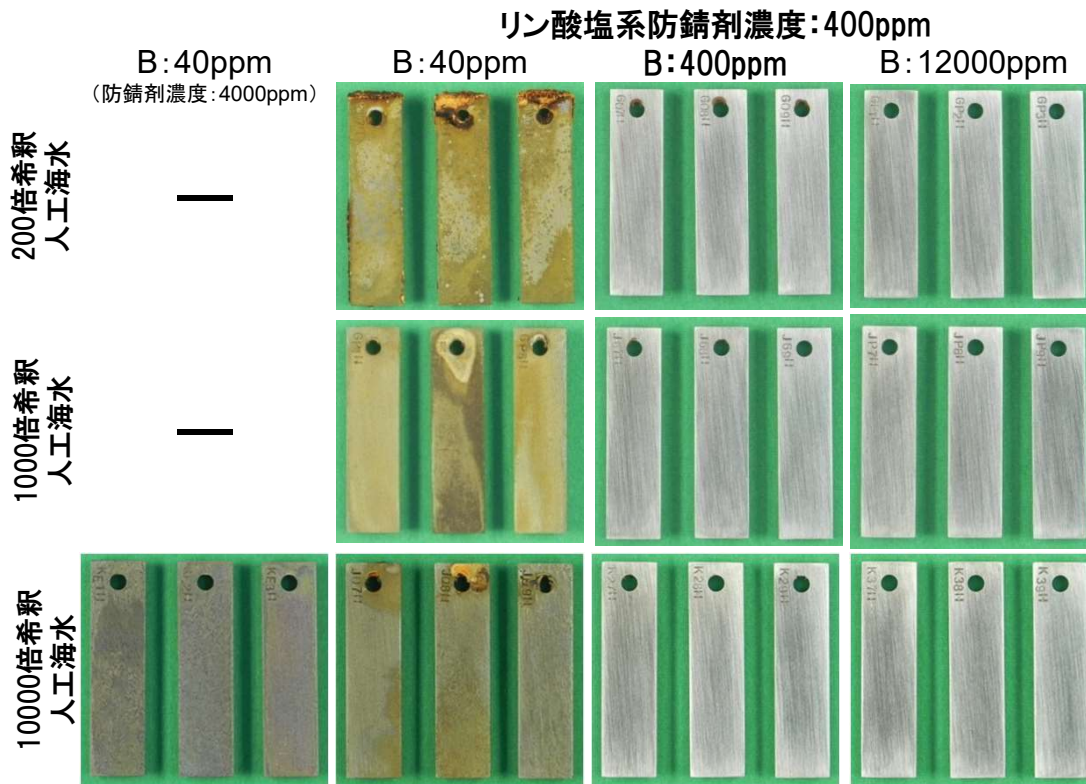
・タングステン酸ナトリウムまたは亜鉛/モリブデン酸ナトリウムに五ホウ酸ナトリウムを複合添加しても腐食の発生は認められなかった。(五ホウ酸ナトリウム添加による副次的悪影響がないことを確認。)

6. 平成26-27年度事業成果

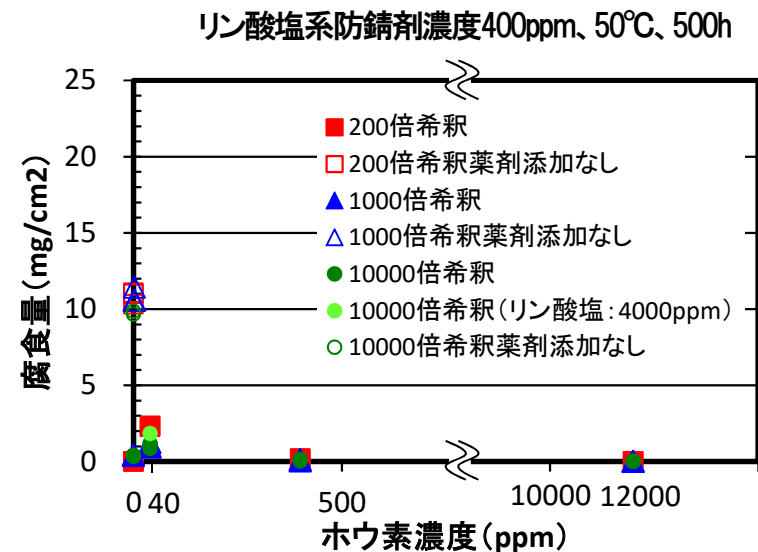
(3) 腐食抑制策の開発 ② 副次的悪影響の評価

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩に対するホウ素添加試験結果(日立GE分)



注：—印は腐食試験を実施しなかった試験条件の欄を示す。
写真上の数値は防錆剤添加濃度を示す。



【添加濃度400ppm】
PO₄:100ppm, Zn:20ppm, Na₂CO₃:13.5ppm)
【添加濃度4000ppm】
PO₄:1000ppm, Zn:200ppm, Na₂CO₃:135ppm)

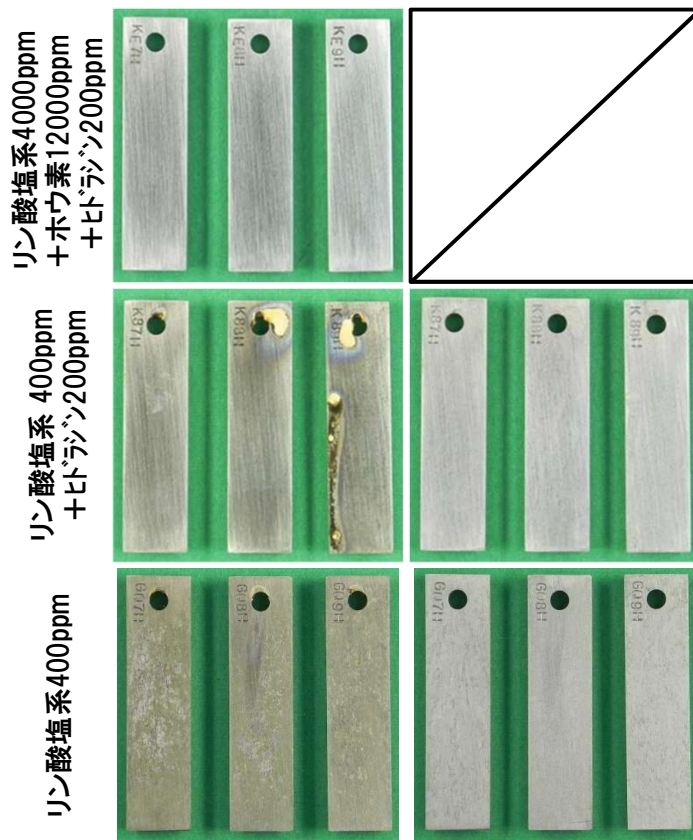
- ・ほう素40ppmでは防錆剤による腐食抑制効果が確認された。
- ・ほう素400ppm以上ではほとんど腐食は認められず、悪影響は確認されなかった。

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ② 副次的悪影響の評価

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

● 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩に対するヒドラジン添加試験結果(日立GE分)



☐: 腐食なしのため酸洗実施せず

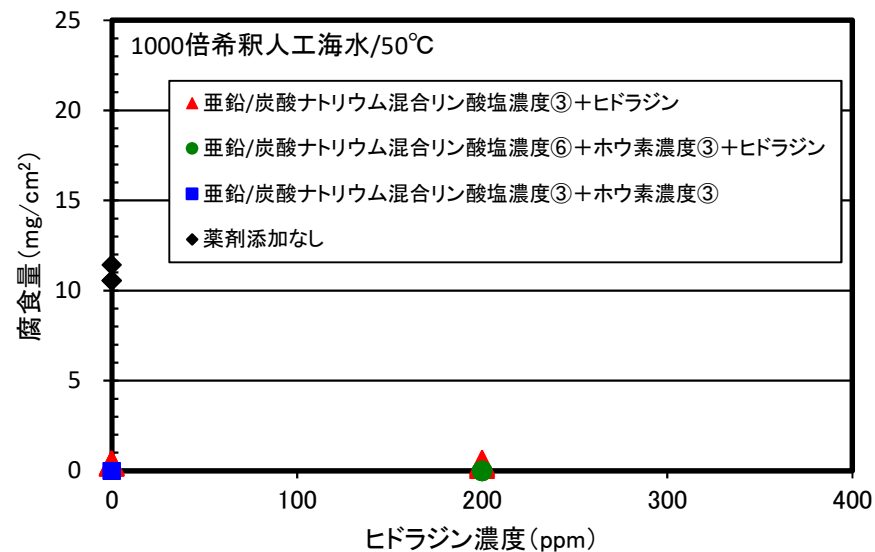


図 腐食量に及ぼすヒドラジン濃度の影響

リン酸塩系防錆剤

濃度③:リン酸塩系400ppm(PO_4 :100ppm, Zn:20ppm, Na_2CO_3 :13.5ppm)

濃度⑥:リン酸塩系4000ppm(PO_4 :1000ppm, Zn:200ppm, Na_2CO_3 :135ppm)

- ・ヒドラジン200ppm添加した場合、局所的に軽微な腐食が確認された。
- ・ホウ素12000ppmとヒドラジン200ppm添加した場合、腐食は完全に抑制された。

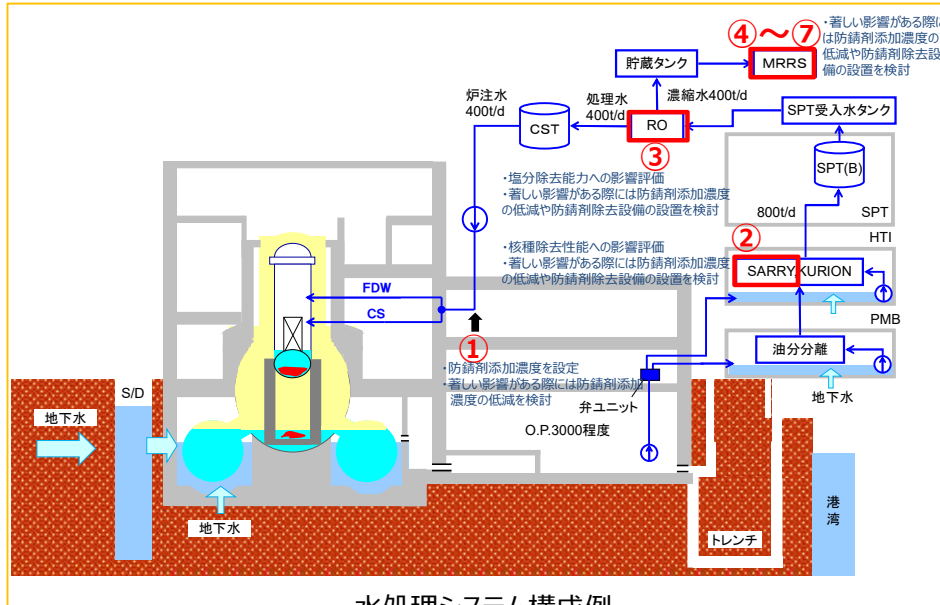
6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ② 副次的悪影響の評価

(c) 水処理設備への影響評価

● 試験要領策定(東芝/日立GE分)

・各種防錆剤に対し、単純型汚染水処理システム（SARRY）、多核種除去装置（MRRS（ALPS））、逆浸透膜型淡水化装置（RO）等の汚染水浄化設備に対する機能上の悪影響が生じないかを評価する。



水処理システム構成例

① 防錆剤添加量

本プロジェクトでの腐食試験で得られた成果をもとに、**防錆剤添加濃度を設定**。

- 1) タングステン酸ナトリウム：1500ppm
- 2) 亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩：3500ppm
- 3) 五ホウ酸ナトリウム：6000ppm：臨界管理PJからの濃度（最小濃度）
- 4) 亜鉛混合リン酸塩+炭酸ナトリウム：400ppm

② SARRYにおける吸着材への影響評価

SARRYで使用されているSr/Cs同時吸着剤を対象にバッチ試験ならびにコールドカラム試験を実施し、**核種除去性能に及ぼす防錆剤の影響**を評価する。

③ 淡水化設備における塩分除去能力への影響評価

簡易的な淡水化装置（RO装置）を用いて、**塩分除去能力に及ぼす防錆剤の影響**を評価する。

④ 多核種除去設備（MRRS）前処理工程による防錆剤濃度への影響評価

既設/増設多核種除去設備（MRRS）では、前処理工程（鉄共沈工程、炭酸塩沈殿工程）により、液中の防錆剤濃度が低下する可能性がある。そこで、試験により**前処理工程による防錆剤濃度の変化**を評価する。また、廃スラッジ量の評価を行う。

⑤ 粘性評価

既設/増設MRRSではクロスフローフィルタ（CFF）が使用されている。防錆剤を添加した溶液の粘度を測定し、**防錆剤由来沈殿物がろ過特性に与える影響**を評価する。

⑥ 多核種除去設備における吸着材への影響評価

多核種除去設備（既設/増設/高性能MRRS）での、ヨウ化物イオン用吸着材、ヨウ素酸/アンチモン用吸着材、アンチモン吸着材、ヨウ素吸着材を対象に、バッチ試験ならびにコールドカラム試験を実施し、**核種除去性能に及ぼす防錆剤の影響**を評価する。なお、多核種除去設備（高性能MRRS）では塩酸等によるpHコントロールが行われており、防錆剤によるpHコントロール性への影響を評価する。

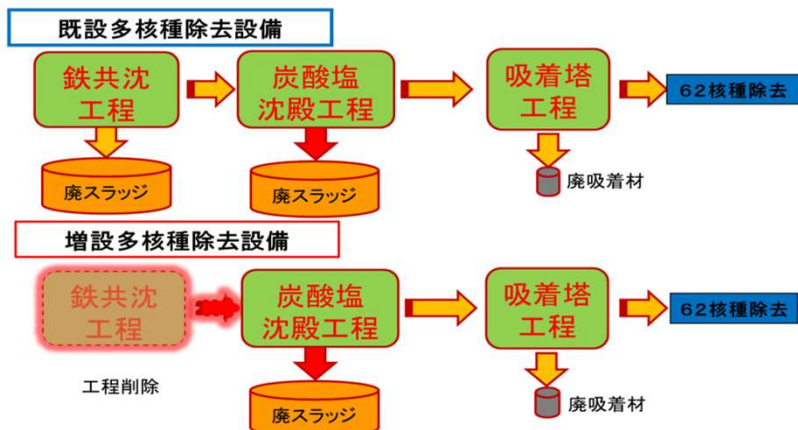
⑦ 多核種除去設備における活性炭による防錆剤濃度変化の評価

多核種除去設備（既設MRRS）では活性炭が使用されており、**活性炭による防錆剤吸着試験**を実施し、**防錆剤成分の濃度変化**を確認する。

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発② 副次的悪影響評価 (c) 水処理設備影響評価(東芝分)

目的: 東芝汚染水処理プロセスMRRS™、SARRY™への防錆材添加影響評価



東芝多核種処理システムMRRS™

MRRS™ : 多核種処理システム(通称:ALPS)
(主要なCs、Sr、I、Sbを含む62核種を処理)

SARRY™: 単純型汚染水処理システム
(第二セシウム吸着装置:CsとSrの同時吸着処理を実施)

表1 MRRS処理水による影響評価(概要)

	防錆材	防錆材濃度	既設MRRS™		増設MRRS™		SARRY™
			前処理工程※1	吸着塔工程	前処理工程※2	吸着塔工程※3	吸着塔工程
A	タンゲステン酸ナトリウム	3000 ppm	○	○	○	△	○
B	亜鉛／モリブデン酸ナトリウム 混合リン酸塩	7000 ppm	△	△	△	△	△
C	五ホウ酸ナトリウム	10000 ppm (as B)	△	△	△	△	△
D	亜鉛混合リン酸塩＋炭酸ナトリウム	800 ppm	△	△	△	△	△
E	添加材なし(ブランク)	—	—	—	—	—	—

影響度小:○ 影響度中:△ 影響度大:×

※1: 鉄共沈(FeCl₃添加)＋炭酸塩沈殿工程
 ※2: 炭酸塩沈殿工程 (Na₂CO₃＋NaOH)
 ※3: 対象核種はCs、Sr、Sb、I



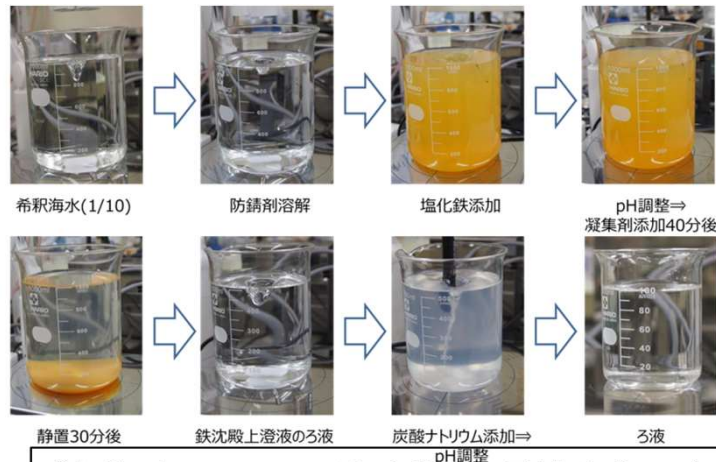
単純型汚染水処理システムSARRY™

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発②副次的悪影響評価 (c) 水処理設備影響評価(東芝分)

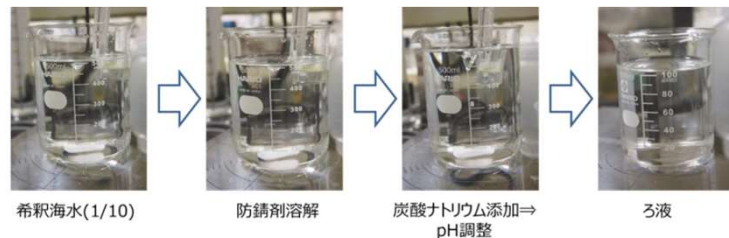
●前処理工程での防錆材成分 (五ホウ酸Na添加時の状況を例示)

五ホウ酸Na
(既設MRRSTM鉄共沈工程)



鉄共沈のスラッジは難ろ過性となった

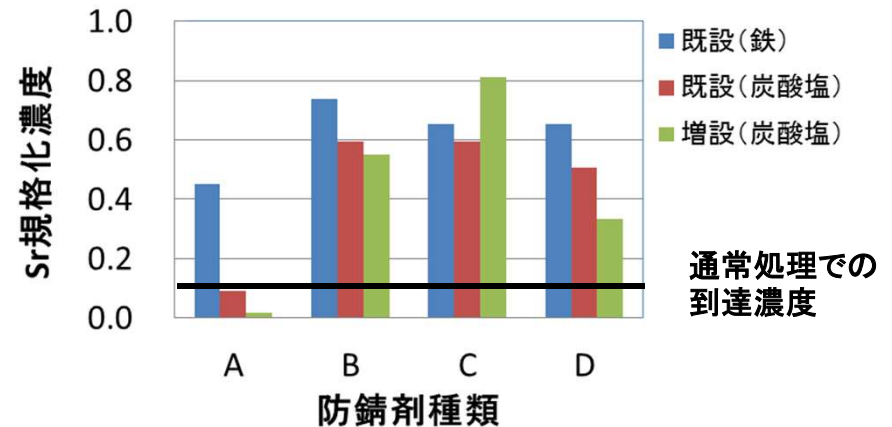
五ホウ酸Na (炭酸塩沈殿工程)



沈殿が生じないためSr濃度が低下しない
調整用NaOHが処理液の12%(v/v)も必要

●前処理工程でのSr防錆材成分の推移

防錆剤添加によるSr比の推移
(10倍希釈海水のSr濃度で規格化)



防錆材添加による前処理工程でのSr濃度の推移

防錆材 (Antirust Material)	防錆材成分 (Antirust Material Component)	炭酸塩沈殿後のSr (Sr after carbonate salt precipitation)
A	タングステン酸ナトリウム (Sodium tungstate)	○: 初期濃度の10%以下 (Below 10% of initial concentration)
B	亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩 (Zinc/Molybdenum sodium phosphate)	△: 初期濃度の60%程度 (About 60% of initial concentration)
C	五ホウ酸ナトリウム (Sodium borate)	△: 初期濃度の80%程度 (About 80% of initial concentration)
D	亜鉛混合リン酸塩＋炭酸ナトリウム (Zinc phosphate + sodium carbonate)	△: 初期濃度の30%程度 (About 30% of initial concentration)
E	添加材なし(ブランク) (No additive)	○: 初期濃度の10%以下 (Below 10% of initial concentration)

6. 平成26-27年度事業成果

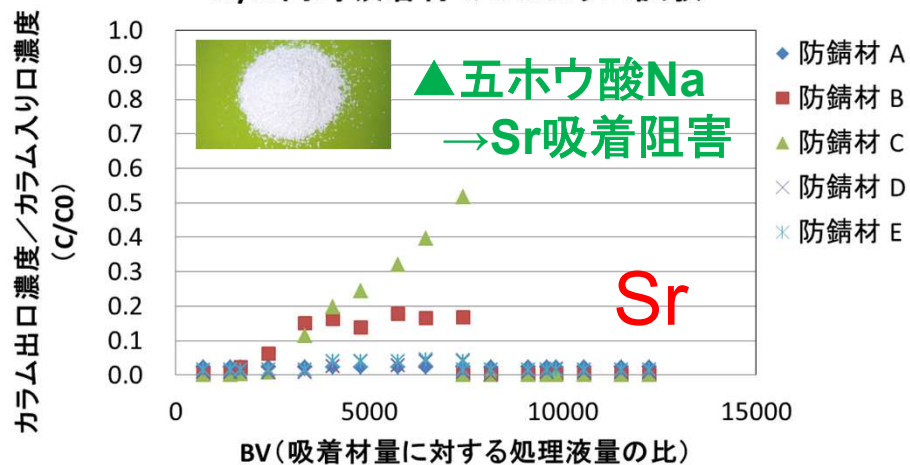
(3) 腐食抑制策の開発② 副次的悪影響評価 (c) 水処理設備影響評価(東芝分)

● 吸着塔工程でのCs/Sr吸着試験状

Cs/Sr同時吸着材でのCsカラム試験



Cs/Sr同時吸着材でのSrカラム試験



● カラム試験条件・方法

吸着材: Cs/Sr同時吸着材
(東芝開発品(FST))

吸着剤: 10ml

試験液: 増設MRRSTM炭酸塩沈殿水

Cs/Sr濃度: Cs:0.5ppm Sr:海水成分

通水速度: 10/h

● 防錆材添加影響評価のまとめ

・防錆材は汚染水処理に一定の影響を及ぼす。→2016年度に詳細評価

● 五ホウ酸Naを含む場合の処理システム

- ・Sr吸着阻害影響あるが、Cs影響は軽微
 - ・前処理での水質調整や廃液量増加が課題
 - ・ホウ素は臨界管理でも重要である。
- 専用の水処理システム検討が必要である。

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ② 副次的悪影響の評価 (c) 水処理設備への影響評価

● 逆浸透膜型淡水化装置への影響評価(日立GE分)

① 試験内容

- ・簡易的なRO装置(図1参照。)を用いて、処理水および濃縮廃液のClイオン濃度、防錆剤成分濃度、導電率およびpHを確認する。
(五ホウ酸ナトリウムは、Cl濃度500ppm時のベッセル圧力も測定。*1)
- *1: RO膜は、圧力が塩分除去性能に影響を与える性質を持っている。そこで、臨界管理でも使用が検討されている五ホウ酸ナトリウムを添加した試験液でのRO膜に対するベッセル圧力を測定することとした。

② 試験パラメータ

- ・防錆剤種類、塩素濃度 (表1参照。)
- 【防錆剤種類(濃度条件含む。)]
- A: タングステン酸ナトリウム(1500ppm)
- B: 亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩(3500ppm)
- C: 五ホウ酸ナトリウム(ホウ素濃度: 6000ppm)
- D: 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩(400ppm)

③ 淡水化設備への影響評価試験結果

Cl除去性能：
どの防錆剤もCl-に対する阻止率は、防錆剤なしの阻止率と同等。
⇒Cl除去性能に対する影響なし。

防錆剤成分除去：
防錆剤の主成分は、8割以上が除去される。

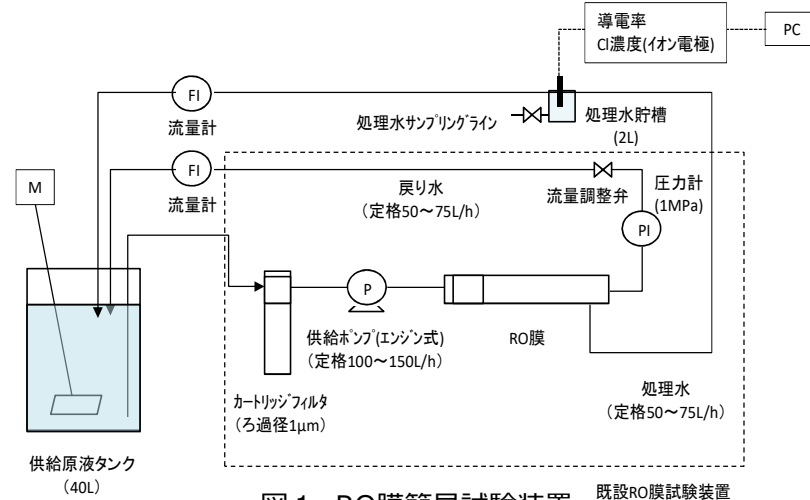


図1 RO膜簡易試験装置

表1 逆浸透膜型淡水化装置への影響評価試験結果

ケース No.	防錆剤	海水希釈		処理時間 h	阻止率(%)*2				導電率		pH		
		希釈倍率	Cl ppm		Cl ⁻	防錆剤成分			供給水	処理水	供給水	処理水	
1	なし	40	500	1	98					169	3.8	6.8	6.3
2	なし	200	100	1	99					36.3	3.9	6.1	5.9
3	A	200	100	1	100			100		146	0.5	7.0	7.2
4	B	200	100	1	100		100	100	100	185	6.4	11.4	10.4
5	C	40	500	1	99	82				802	13.6	7.9	7.2
6	C	40	500	72	99	82				799	13.0	8.0	7.0
7	C	200	100	1	99	82				688	12.4	8.0	7.3
8	D	200	100	1	100		100	100		55.3	0.3	6.9	7.0

*2: 阻止率(%)
=(供給液中の濃度-処理水中の濃度)÷
供給液中の濃度×100

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 ② 副次的悪影響の評価 (c) 水処理設備への影響評価

● 高性能多核種除去装置への影響評価(日立GE分)

核種除去：
どの防錆剤も、いずれかの核種除去性能に多少の影響を及ぼす。

pHコントロール性：
どの防錆剤も、pH調整用の薬剤添加量は増加する。

① 試験内容

- 1) バッチ試験およびカラム試験
(吸着材の核種除去性能に及ぼす防錆剤の影響を評価する。)
- 2) pH滴定試験
(pHコントロール性に及ぼす防錆剤の影響を評価する。)

表1 高性能多核種除去装置への影響評価試験パラメータ

No.	項目	内容
1	吸着材 ^{*1}	Cs・Sr同時吸着材、Sb吸着材、ヨウ素吸着材
2	対象核種 ^{*2}	Sr、Cs、Sb、I
3	希釈海水濃度 ^{*3}	10倍希釈(Cl:2000ppm)、100倍希釈(Cl:200ppm)
4	バッチ試験での浸漬期間	7日間
5	カラム試験での通水期間	寿命が評価可能となるまで。(最大60日)

② 試験パラメータ

表1参照。(各防錆剤は、表2参照。)

③ 高性能多核種除去装置への影響評価試験結果

*1：カラム試験は、Cs・Sr同時吸着材のみ。*2：カラム試験は、SrおよびCsのみ。*3：カラム試験は、10倍希釈のみ。

凡例 ○：影響なし。△：影響あり。×：影響が大きい。

表2 高性能多核種除去装置への影響評価試験結果

No.	確認項目	防錆剤			
		タンゲステン酸ナトリウム A	亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩 B	五ホウ酸ナトリウム C	亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩 D
1	Cs・Sr同時吸着材のCs吸着性能への影響	△ バッチ試験より、Cs吸着性能の低下を確認。	△ バッチ試験・カラム試験より、Cl濃度が高い場合、Cs吸着性能の低下を確認。	△ バッチ試験より、Cl濃度が高い場合、Cs吸着性能の低下を確認。	△ バッチ試験より、Cs吸着性能の低下を確認。
2	Cs・Sr同時吸着材のSr吸着性能への影響	△ 析出物が生成し、Srが共沈する。バッチ試験より、Sr吸着性能の低下の可能性を確認。	△ 析出物が生成し、Srが共沈する。バッチ試験より、Sr吸着性能の低下を確認。	× カラム試験より、Sr吸着性能の低下が顕著であることを確認。また、バッチ試験により、Cl濃度が高い方が影響が大きいことを確認。	△ 析出物が生成し、Srが共沈する。カラム試験より、Sr吸着性能の低下を確認。
3	Sb吸着材への影響	△ バッチ試験より、Sb吸着性能の低下を確認。	△ バッチ試験より、Sb吸着性能の低下を確認。	× バッチ試験より、Sb吸着性能の低下が顕著であることを確認。	△ バッチ試験より、Sb吸着性能の低下がわずかにあることを確認。
4	ヨウ素吸着材への影響	△ バッチ試験より、Cl濃度が高い場合、ヨウ素吸着性能の低下を確認。	△ バッチ試験より、Cl濃度が高い場合、ヨウ素吸着性能の低下を確認。	△ バッチ試験より、Cl濃度が低い場合は、ヨウ素吸着性能の低下がわずかにあることを確認。	△ バッチ試験より、Cl濃度にかかわらずヨウ素吸着性能の低下を確認。
5	pH (防錆剤なし：中性)	○	△ pH12付近。水酸化物が析出しやすい環境。	○ pH緩衝作用がある。	○
6	酸調整への影響 (防錆剤なし：pH3.5調整時0.1mol/L HCl=80mL)	△ pH3.5調整時0.1mol/L HCl=1500mL	△ pH3.5調整時0.1mol/L HCl=2400mL	× pH3.5調整時0.1mol/L HCl=17,500mL	△ pH3.5調整時0.1mol/L HCl=210mL

6. 平成26-27年度事業成果

(3) 腐食抑制策の開発 (まとめ: 防錆剤の絞込み結果)

 : 選定した防錆剤

防錆剤	タングステン酸 ナトリウム	モリブデン酸 ナトリウム	五ホウ酸 ナトリウム	亜硝酸 ナトリウム	リン酸塩		メタバナジン 酸ナトリウム	
					亜鉛/炭酸ナ トリウム混合 リン酸塩	亜鉛/モリブデ ン酸ナトリウム混 合リン酸塩		
防食皮膜 (メカニズム)	酸化皮膜型	酸化皮膜型	酸化皮膜型	酸化皮膜型	沈殿皮膜型	酸化皮膜+ 沈殿皮膜型	酸化皮膜型	
防錆効果	非照射	○	×	○*	○	○	×	
	照射	△ (要増量)	—	○	×*	△ (要増量)	—	
	流水環境	○	—	○*	○	○	—	
	錆び面	△ (要増量)	—	○*	○*	△ (要増量)	○	—
	耐局部 腐食性	(H28年度 実施予定)	—	○*	—	(H28年度 実施予定)	(H28年度 実施予定)	—
副次的 影響	五ホウ酸ナ トリウムとの 複合影響	○	—	—	—	○	○	—
	水処理 設備への 機能影響	△ (H28年度詳細 評価実施予定)	—	△ (H28年度詳細 評価実施予定)	—	△ (H28年度詳細 評価実施予定)	△ (H28年度詳細 評価実施予定)	—
総合評価 (H27年度)	○	×	○	×	○	○	×	

○:条件付で可 △:懸念あり ×:厳しい *:東京電力殿自社データ

6. 平成26-27年度事業成果

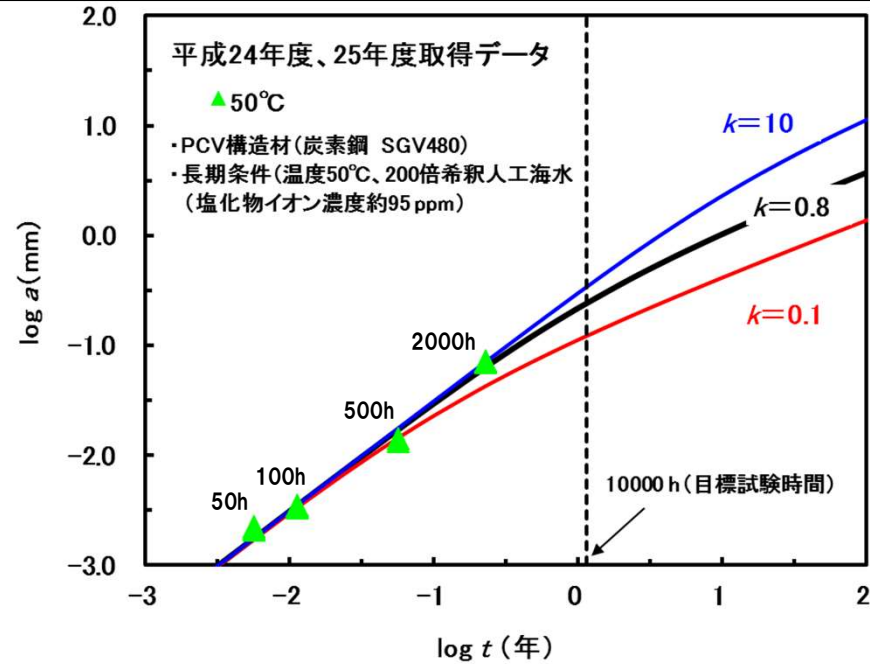
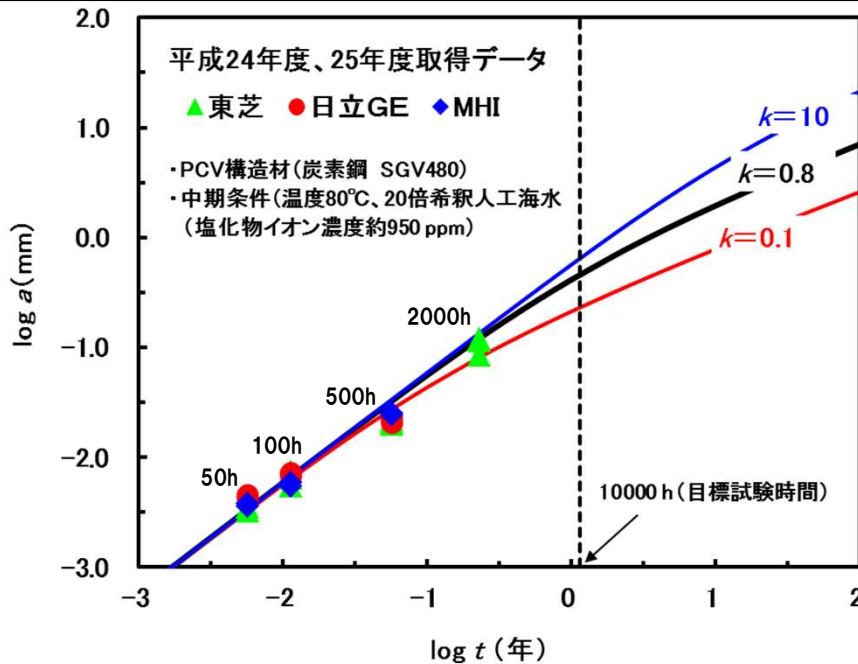
(4) 長期の腐食減肉量の予測の高度化(東芝、日立GE、三菱重工業分)

● 全体実施計画

- 前年度までに実施したRPV材(低合金鋼SQV2A)およびPCV材(炭素鋼SGV480)の腐食減肉量の算出は、(1)式で示される放物線則を用いて近似した¹⁾。

$$(a+kr_0)^2=2kr_0^2t+k^2r_0^2 \quad (1)$$

- ここで、 a は平均侵食深さ(腐食減肉量)(mm)、 t は時間(年)、 r_0 は初期速度(mm/年)および k は速度定数(年)である。
- 速度定数 k を文献値にある0.8で一定とし、平成24年度に実施した500hまでの試験結果のみを用いて評価した場合と平成25年度に実施した2000hの試験結果を考慮した場合で、明瞭な差異は認められなかったため、より長時間(10000h程度まで)の腐食試験データの取得が必要とされる。
 - 平成26年度～平成27年度にかけて、目標最大試験時間を10000hとした長浸漬時間の試験を実施する。対象材は、上述の試験と同様、PCV構造材(炭素鋼SGV480)とする。試験条件は、平成25年度に実施した中期条件(温度80℃、20倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約950ppm))及び長期条件(温度50℃、200倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約95ppm))を基本条件とする。
 - また、実機RPV/PCV内への注水の水質条件により近づけた腐食試験データを取得し、前年度までに取得した結果との比較評価を行う。対象材は、PCV構造材(炭素鋼SGV480)及び原子炉注水配管材(炭素鋼STPT410)とする。



10000hの腐食試験データ取得により、kの依存性が明確となり、腐食減肉量予測モデル式が精緻化する。

1) 腐食防食協会, 金属の腐食・防食Q&A コロージョン110番, 丸善, p.11(1988).

6. 平成26-27年度事業成果

(4) 長期の腐食減肉量の予測の高度化 ① 長浸漬時間の腐食試験

● 試験要領策定(東芝、日立GE分)

腐食減肉量予測に使用している1/2乗則モデルについて、
長時間試験データを用いることにより高精度化を図る。

概略試験マトリックス

温度	塩化物イオン濃度	溶存酸素濃度	気液環境
80℃	950ppm (20倍希釈人工海水)	大気飽和	液相
50℃※	95ppm (200倍希釈人工海水)		

pH:中性、照射:なし、試験時間:最大10000hr

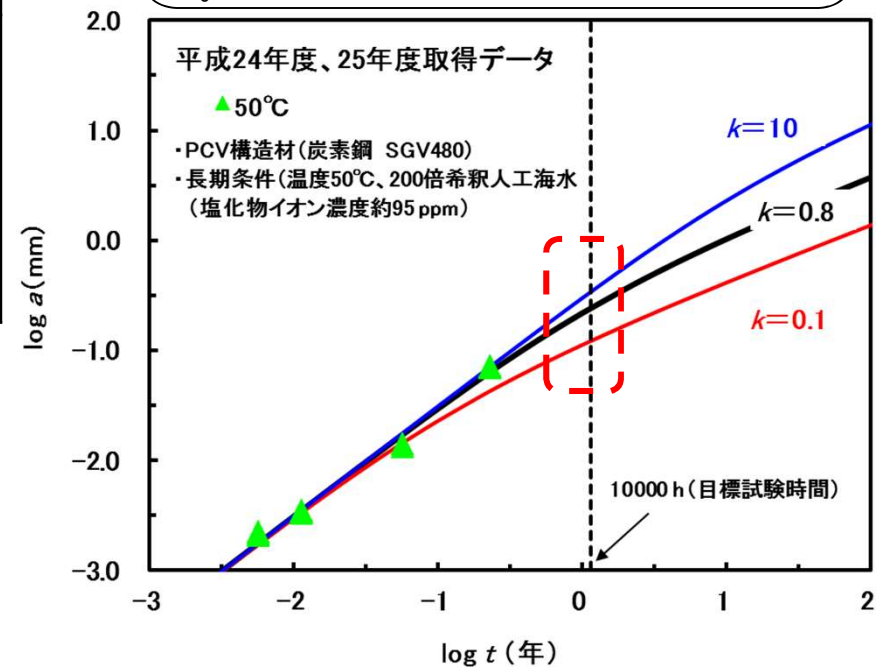
※ 防錆剤や淡水条件での試験についても実施。

1/2乗則モデル※ ※

$$a = (2kr_0^2t + k^2r_0^2)^{0.5} - kr_0$$

a: 腐食減肉量(mm) t: 時間(y)

r₀: 初期速度(mm/y) k: 速度定数(y)


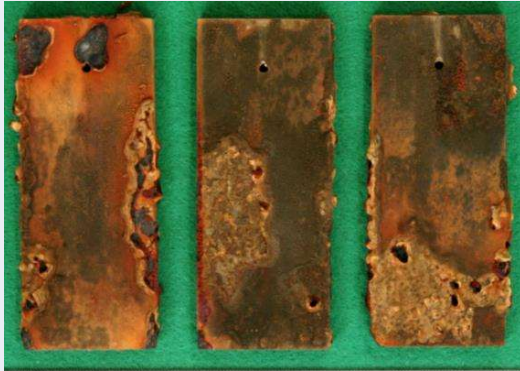


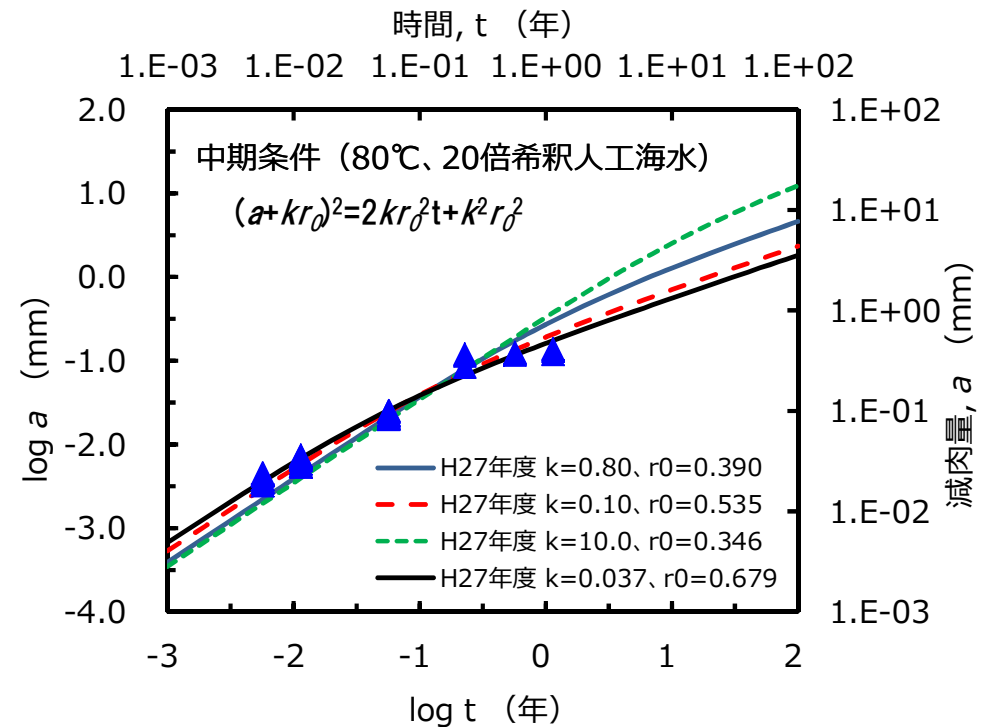
腐食減肉量の時間依存性

6. 平成26-27年度事業成果

(4) 長期の腐食減肉量の予測の高度化 ① 長浸漬時間の腐食試験

● 炭素鋼の長時間(10000h)腐食試験結果(東芝分)

人工海水希釈率	1000倍希釈
試験温度	80 °C
試験時間	試験片外観
5000 h	
10000 h	



- ・80°C、20倍希釈人工海水条件における長期腐食試験の結果、長時間側では腐食の進展が抑制された。
- ・これは、内層に形成した黒色の腐食生成物により、炭素鋼の腐食が抑制されたためであると考えられる。
- ・速度定数k=0.036とした予測式と良い相関関係にある

6. 平成26-27年度事業成果

(4) 長期の腐食減肉量の予測の高度化 ① 長浸漬時間の腐食試験

● 最長10000h (50°C、200倍希釈人工海水) 腐食試験結果 (日立GE分)

◇ 外観観察結果 (防錆剤なし)

◇ 腐食量の経時変化

(1) 5000h浸せき後



(a) 酸洗前



(b) 酸洗後

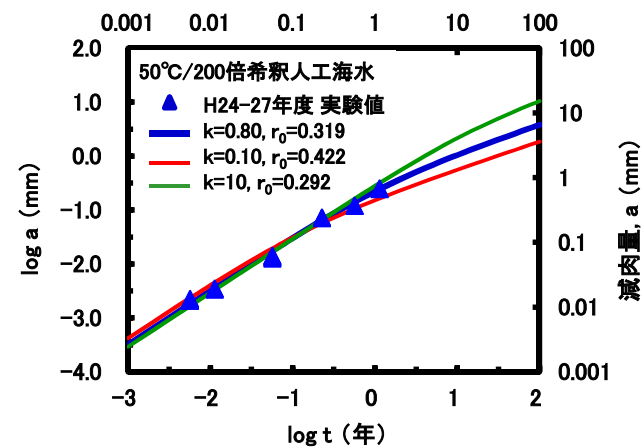
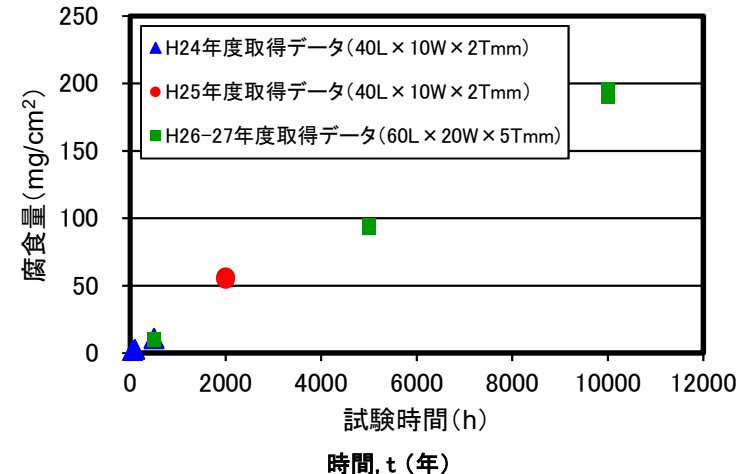
(2) 10000h浸せき後



(a) 酸洗前



(b) 酸洗後



・ 速度定数 $k=0.8$ とした予測式と良い相関関係にある。

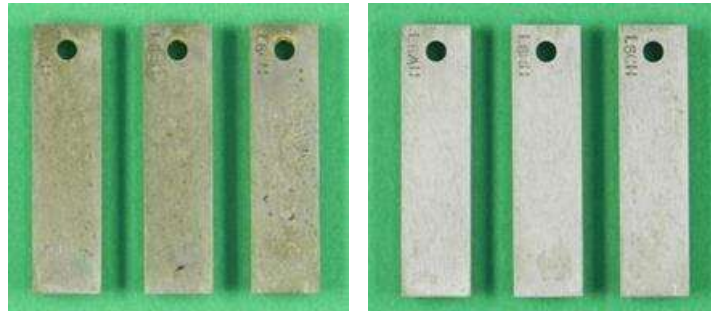
6. 平成26-27年度事業成果

(4) 長期の腐食減肉量の予測の高度化 ① 長浸漬時間の腐食試験

● 最長5000h (50℃、1000倍希釈人工海水) 腐食試験結果 (日立GE分)

◇ 外観観察結果(リン酸塩系防錆剤400ppm) ◇ 腐食量の経時変化

(1) 2000h浸せき後



(a) 酸洗前

(b) 酸洗後

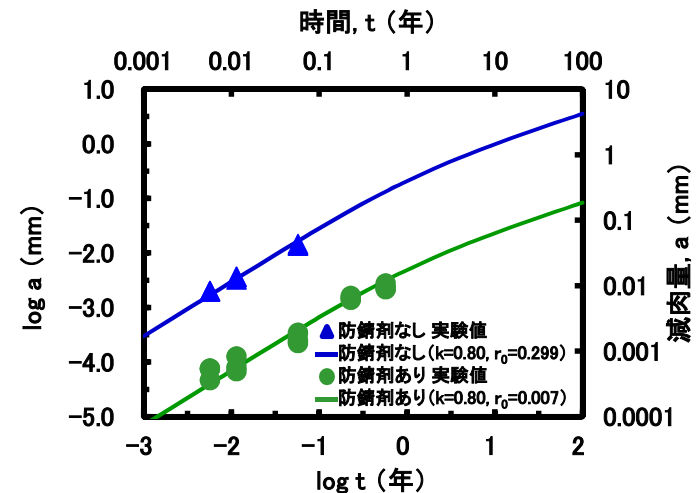
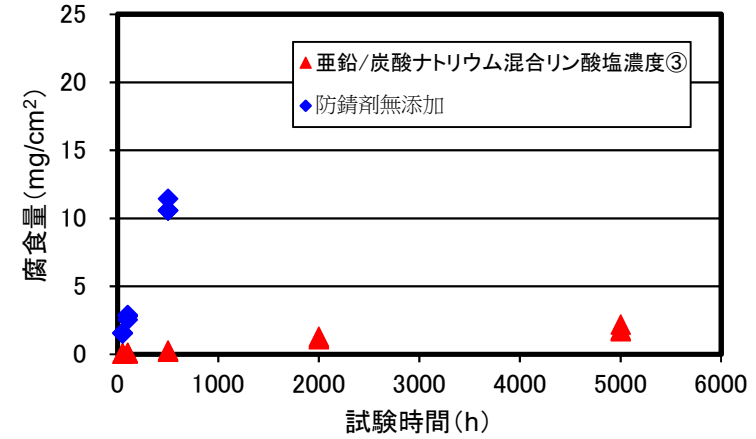
(2) 5000h浸せき後



(a) 酸洗前

(b) 酸洗後

亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩400ppm (PO₄:100ppm, Zn:20ppm, Na₂CO₃:13.5ppm)



・ 速度定数k=0.8とした予測式と良い相関関係にある。

6. 平成26-27年度全体実施計画

(4)長期の腐食減肉量の予測の高度化(日本原子力研究開発機構分)

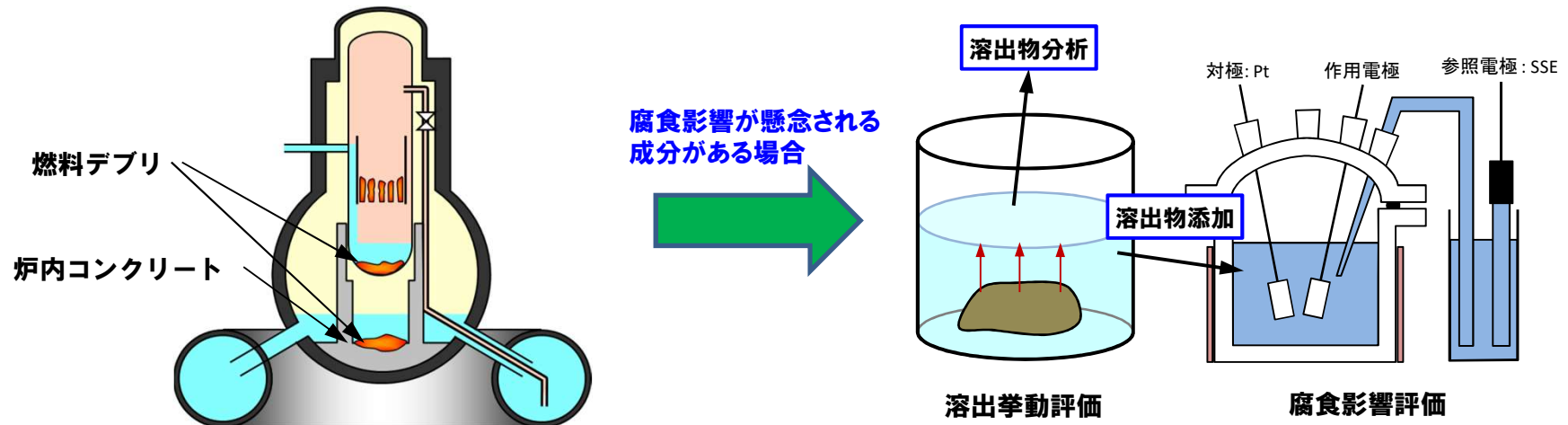
● 全体実施計画

1) 溶出成分の腐食影響の文献調査 (H26年度)

燃料デブリ及び炉内コンクリートからの溶出成分等が腐食に及ぼす影響について、文献等により調査し、影響が懸念される成分の有無について調べる。

2) 溶出挙動及び腐食影響の基礎的試験 (H27年度)

腐食への影響が懸念される成分が見いだされた場合、溶出挙動の評価試験と、溶出成分による腐食影響について、電気化学試験等による基礎的検討を行う。



溶出成分の調査 (文献情報等から)

- ・燃料デブリから: Cs, Cd, Mo, Ba等
- ・コンクリートから: Ca, Si, Fe, Al等

溶出挙動・腐食影響評価

- ・模擬燃料デブリ等からの溶出挙動試験
- ・電気化学試験による腐食影響評価

6. 平成26-27年度事業成果

(4)長期の腐食減肉量の予測の高度化 ②溶出成分の腐食影響評価

● 溶出成分の腐食影響の調査(日本原子力研究開発機構分)

燃料デブリ及び炉内コンクリートからの溶出成分等が腐食に及ぼす影響について文献等により調査

①文献調査結果:

- ✓ 実燃料、模擬燃料、TMI-2デブリ等からの溶出試験結果、1F1・1F2原子炉建屋コンクリートの分析結果等の文献を調査
- ✓ 燃料デブリからはCsが最も多く、以下Cd, Mo, Sr, Tc及び少量のU, Ru, Rhが溶出する可能性
- ✓ コンクリートからはCaが最も多く、次いでSi, Fe, Alが溶出する可能性
- ✓ 文献調査の結果、腐食への影響が懸念される成分は見出されなかったため、試験を取り止め、文献調査の継続と計算等による考察を行うこととした。

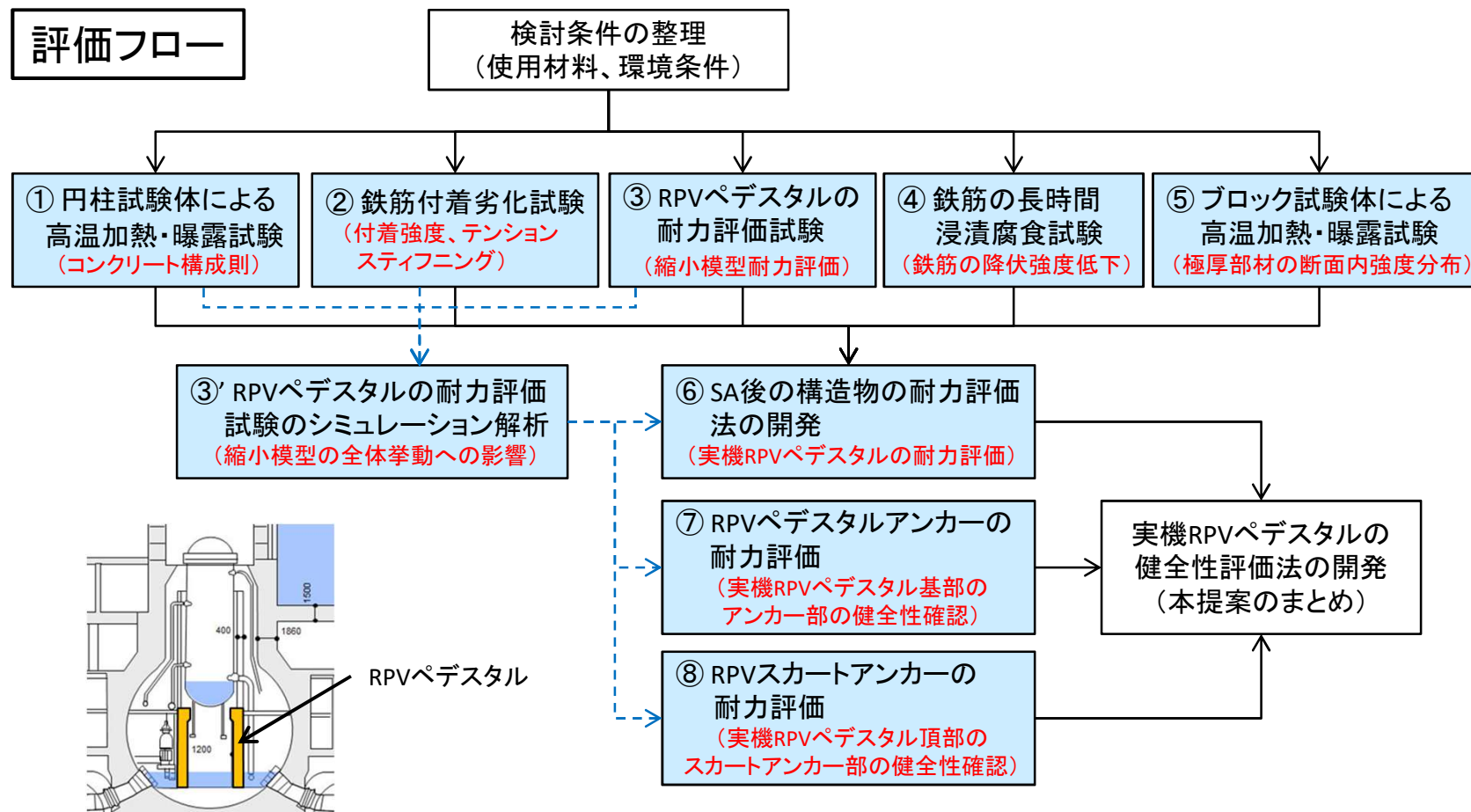
②考察結果:

- ✓ 最も溶出しやすいと考えられるCsとCaの腐食影響について計算解析により検討した結果、鉄の腐食に及ぼす影響はほとんどないことがわかった。また、事故直後以降の汚染水中濃度の分析結果から、Cs等の溶出量は少なく、腐食への影響は小さいと考えられる。
- ✓ その他の成分については、CsやCaよりも溶出量が少ないと考えられ、腐食の影響は小さいと考えられる。

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

● 全体実施計画(東芝、日立GE分)



①～⑤の試験及び解析にて、高温によるコンクリート劣化及び海水による腐食影響を個別に確認し、⑥SA時のRPVペDESTALの耐力評価法に開発に反映する。その後、⑦及び⑧のRPVペDESTALアンカー/スカートアンカーの耐力評価と合わせて実機RPVペDESTALの健全性を評価する。

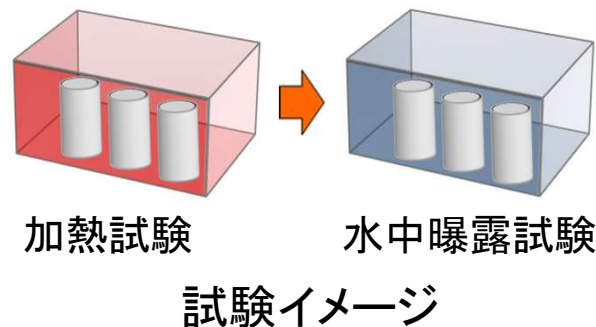
6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

① 円柱試験体による高温加熱暴露試験

- 2012年度に実施した材料試験の試験条件を拡張して、普通コンクリートおよびFAコンクリートの材料試験を行い、高温加熱後の水中曝露による強度性状を把握する。
- 成果は、縮小模型のシミュレーション解析や実機RPVペDESTALの耐力評価におけるコンクリートの構成則に反映する。
- 加熱温度は、100、200、400、600、800および1000℃とする。下表に試験ケースを示す。
- コントロール試験(材齢のみ対応)、加熱冷却後、加熱後気中・水中曝露後等の試験条件を設定する。ホウ酸のコンクリート影響についても、ケースを絞って実施する。
- 含水率が強度に及ぼす影響を把握するために、加熱冷却後気中での試験に加えて、試験体に十分に水分を吸収させて行う試験(加熱冷却後(水中))を実施する。
- 加熱・曝露期間中の材齢による強度変化をできるだけ小さくするために、通常よりも高い温度でコンクリートを養生する。(養生条件:30℃封緘、5~6カ月間)
- 約1年(養生、加熱、水中曝露期間)の試験期間を確保する。

試験ケース(普通コンクリート、FAコンクリート共通)



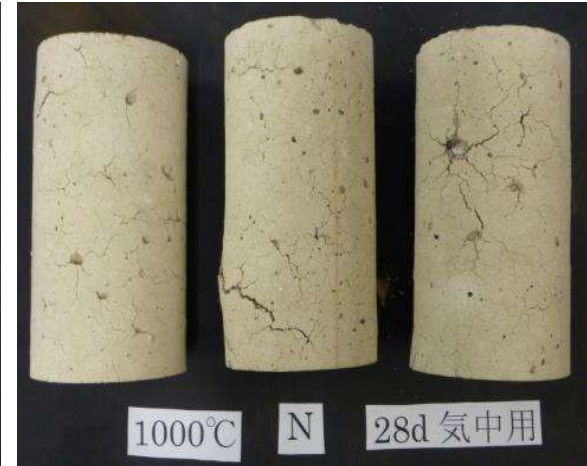
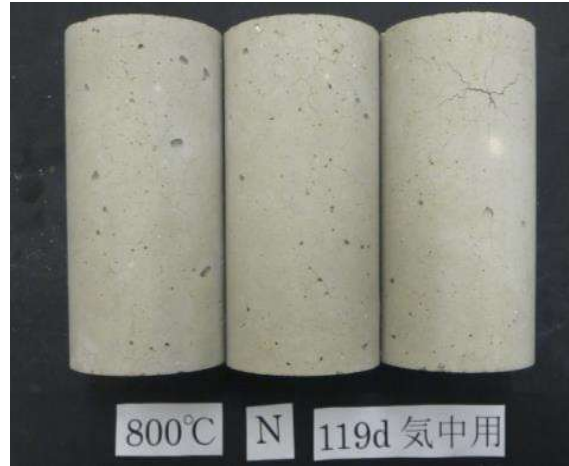
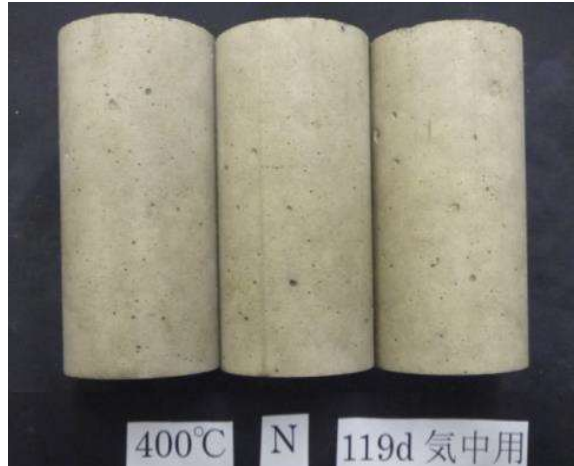
	常温	100℃	200℃	400℃	600℃	800℃	1000℃
コントロール試験	●	△	△	△	△	△	△
加熱冷却後(気中)	△	●	●	●	●	●	●
加熱冷却後(水中)	△	●	●	●	●	●	●
気中曝露	●	●	●	●	●	●	●
水中曝露	●	●	●	●	●	●	●
ホウ酸影響	●	△	△	●	△	●	●

6. 平成26-27年度事業成果

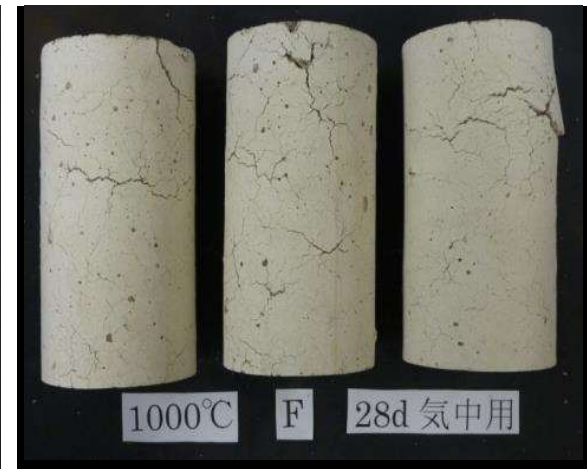
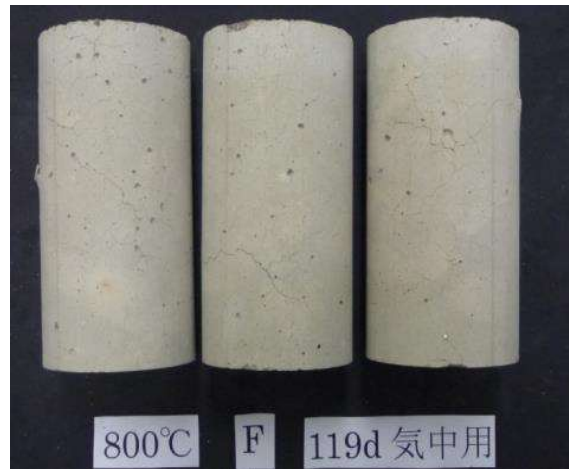
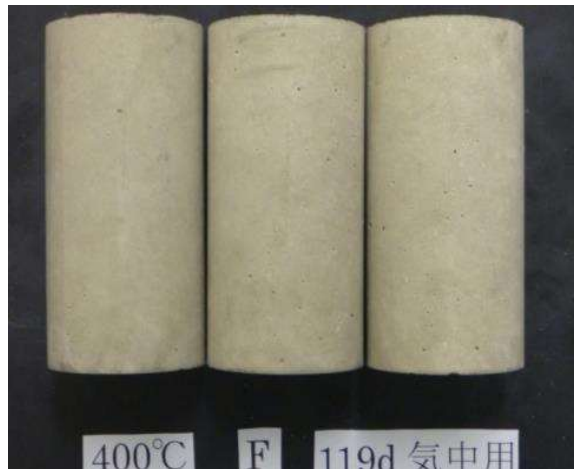
(5) ペDESTALの侵食影響評価

① 円柱試験体による高温加熱暴露試験

普通コンクリート



FAコンクリート



400°C加熱冷却後

800°C加熱冷却後

1000°C加熱冷却後

800°C加熱試験体におけるポップアウトや、1000°C加熱試験体の骨材の膨張については、分析中である。

6. 平成26-27年度事業成果

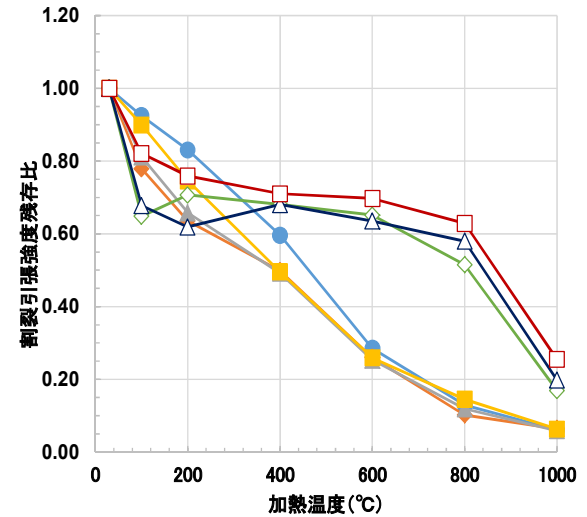
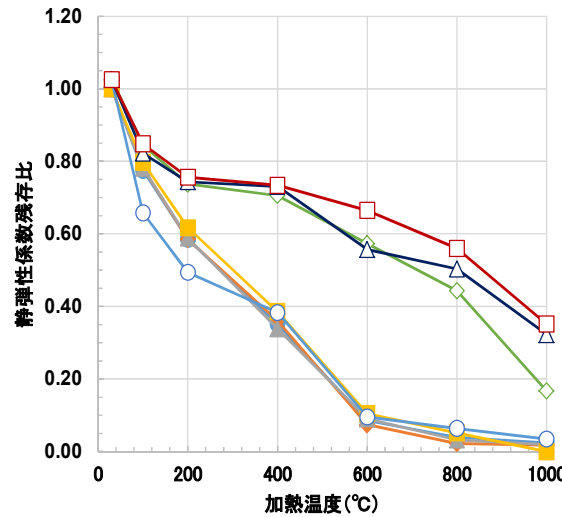
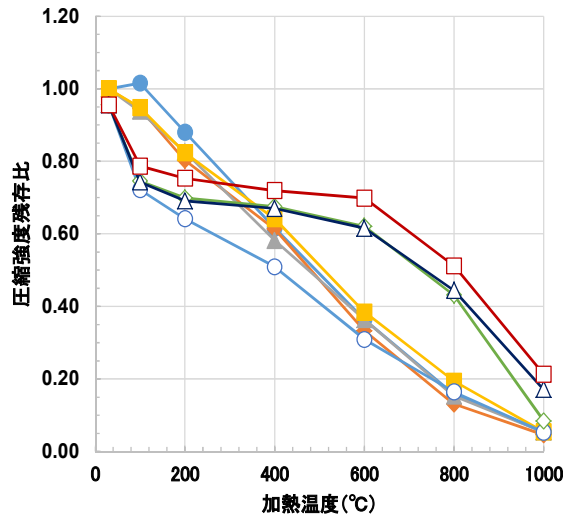
(5) ペDESTALの侵食影響評価

① 円柱試験体による高温加熱暴露試験

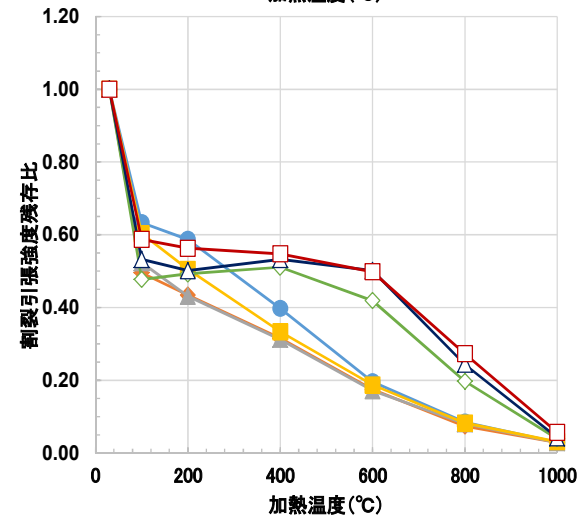
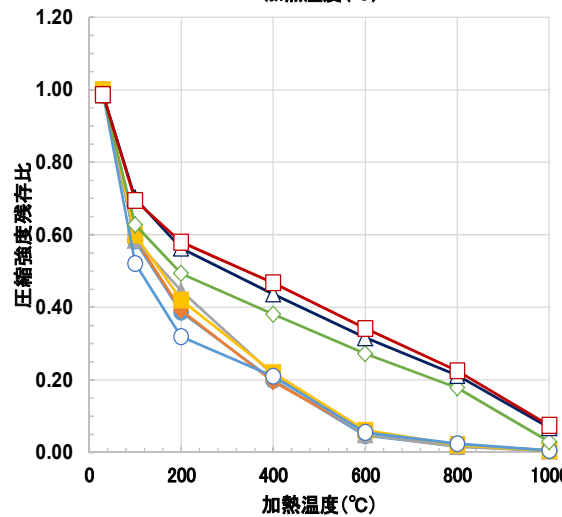
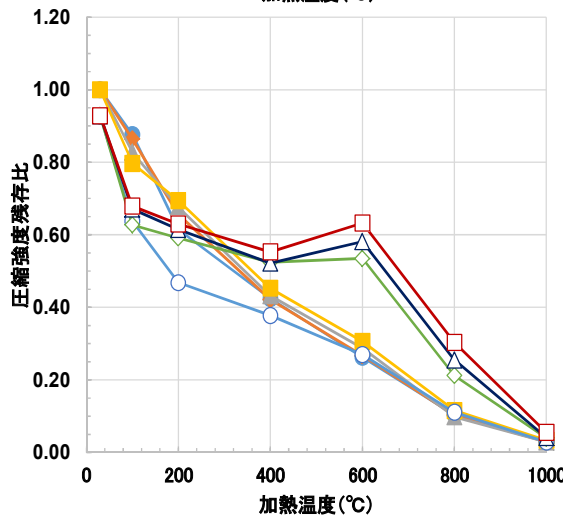
凡例:

- 気中1日
- ◆ 気中28日
- ▲ 気中56日
- 気中119日
- 水中1日
- ◇ 水中28日
- △ 水中56日
- 水中119日

普通コンクリート



FAコンクリート



圧縮強度

静弾性係数

割裂引張強度

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

① 円柱試験体による高温加熱暴露試験

- 普通コンクリートの600・800°Cの水準では、気中曝露と比較して、水中曝露によりかなりの**強度回復の傾向**が見られるが、1000°Cの水準では、強度回復傾向は小さい。
- 普通コンクリートと比較すると、FAコンクリートは高温加熱による強度低下の割合が大きく、水中浸漬による強度回復の程度も小さい。
- 100・200°Cの水準では、水中曝露による含水によって、強度低下が著しい。**加熱**により強度が増加した試験体を、その後の**水中浸漬**したために、大きな強度差が発生したと考えられる。
- 高温加熱によりセメントペーストから生成された**ビーライト**(セメントの主成分)が、水中浸漬により**再水和**したことが強度回復の原因と考えられる。
- 五ホウ酸ナトリウム水溶液の浸漬により強度・静弾性係数の若干の増加が確認できたので、再臨界防止のために添加する**ホウ酸**により、**強度・静弾性係数が低下する可能性は考えにくい**。
- 石英の含有率に基づく高温加熱劣化メカニズムに基づいて骨材を選定し、コンクリートの高温加熱・水中曝露試験を行った結果、**異なる骨材を用いてもコンクリートの高温特性に大きな変化を及ぼさないことを確認した**。

6. 平成26-27年度事業成果

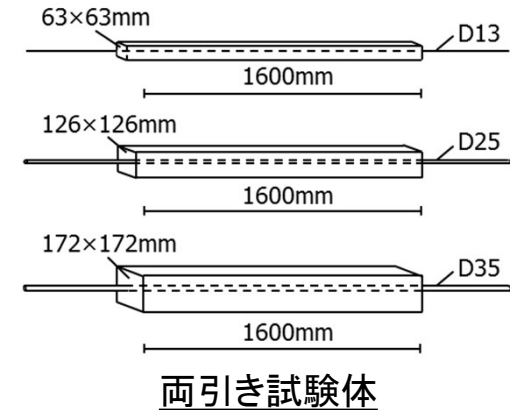
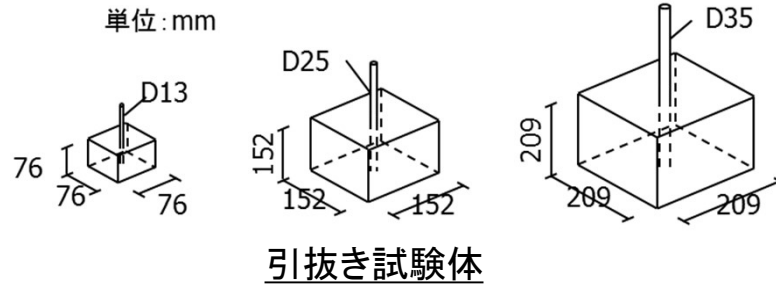
(5) ペDESTALの侵食影響評価

② 鉄筋付着劣化試験

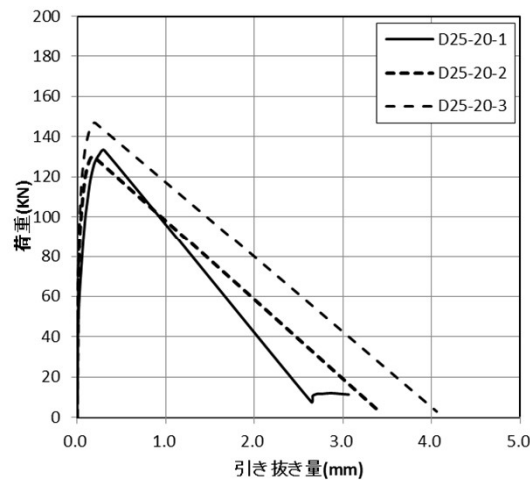
- 鉄筋コンクリートにおいて、高温加熱や水中曝露、鉄筋腐食が、鉄筋の付着強度やテンションステイフニング特性に及ぼす影響を把握するために、鉄筋の引抜き試験と鉄筋の両引き試験を実施する。

■ 試験パラメータ

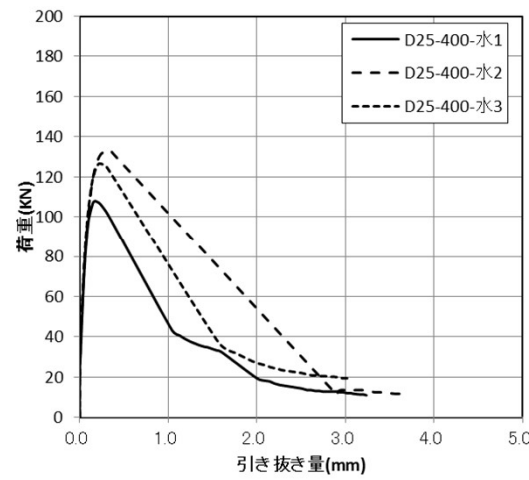
- 鉄筋径: D13、D25、D35
- 温度: 常温、400°C、800°C
- 曝露: 真水、海水



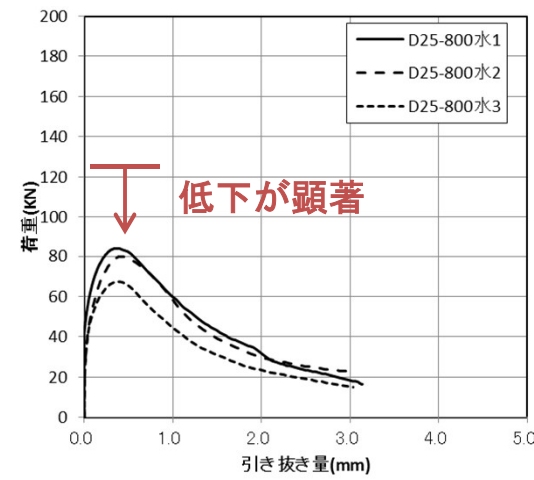
- 引抜き試験結果の例(鉄筋径: D25)



常温(加熱なし)



400°C加熱後水中曝露



800°C加熱後水中曝露

6. 平成26-27年度事業成果

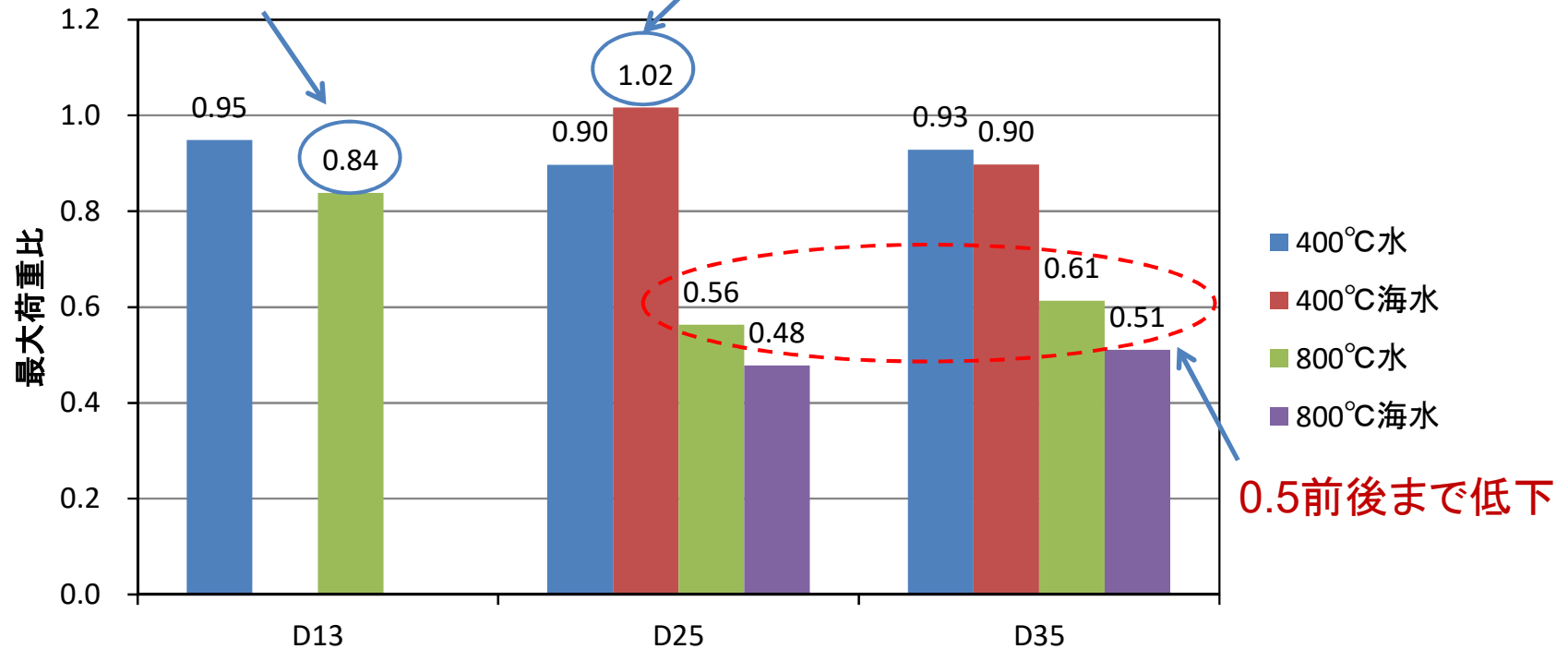
(5) ペDESTALの侵食影響評価

② 鉄筋付着劣化試験

- 引抜き試験結果の比較

粗骨材最大粒径が小さいことが影響した可能性

腐食により付着強度が増加した可能性



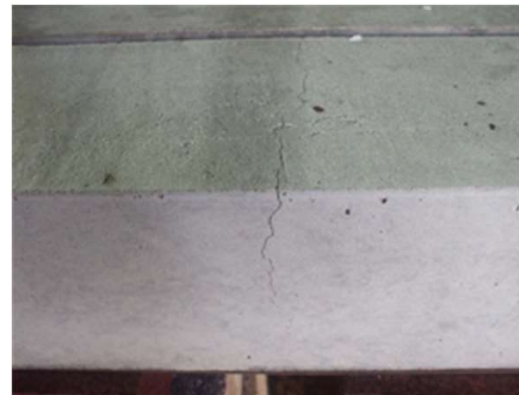
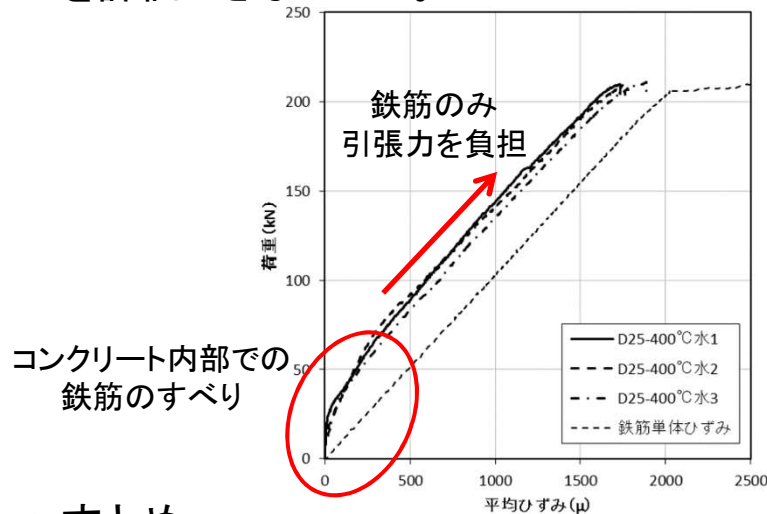
加熱なしを1.0としたときの最大荷重の比

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

② 鉄筋付着劣化試験

- 両引き試験結果
- 高温加熱時に生じたひび割れのためにコンクリートは引張力を負担できず、テンションスティフニングを評価できなかった。



- まとめ
- 引抜き試験の結果、400°Cで加熱した試験体の引抜き荷重は、加熱しなかった試験体と比較して0.9倍以上であった。800°Cで加熱したD25、D35試験体の引抜き荷重は、加熱しなかった試験体と比較して0.5~0.6倍となった。加熱直後ではより低下していたと考えられるが、水中曝露または海水曝露により強度が回復した可能性が考えられる。
- 両引き試験用の試験体を高温加熱したところ、400°Cでは鉄筋に直交方向に複数のひび割れが生じ、800°Cではコンクリートに細かいひび割れが多数生じた。高温加熱時に生じたひび割れのためにコンクリートは引張力を負担できず、テンションスティフニングを評価できなかった。

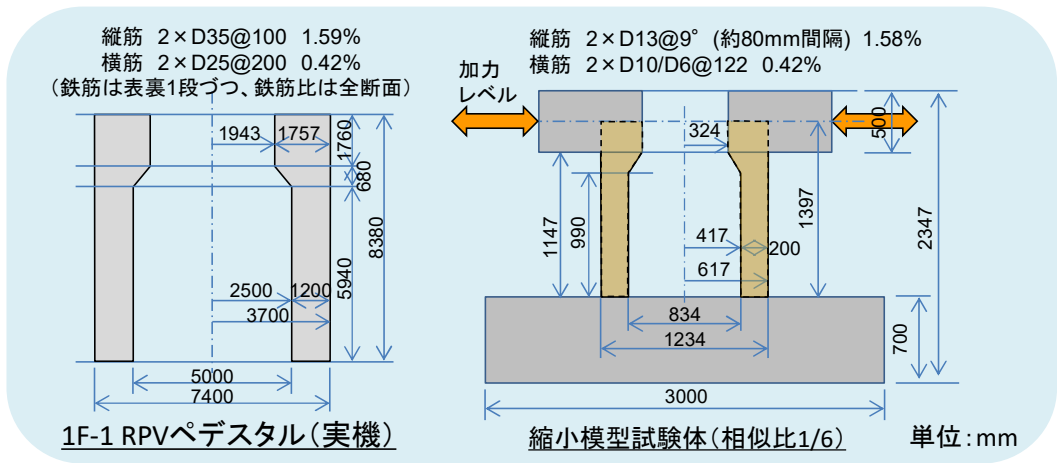
6. 平成26-27年度事業成果

(5)ペDESTALの侵食影響評価

③RPVペDESTALの耐力評価試験

試験概要

- 高温によるコンクリート劣化が構造体の耐力や破壊性状に及ぼす影響を把握するために、RPVペDESTAL縮小模型を製作し、加熱・水中曝露後、耐力試験を行う。
- 相似比1/6で縮小模型を製作し、RPVペDESTALの厚さは200mm、高さは1397mmとなる。

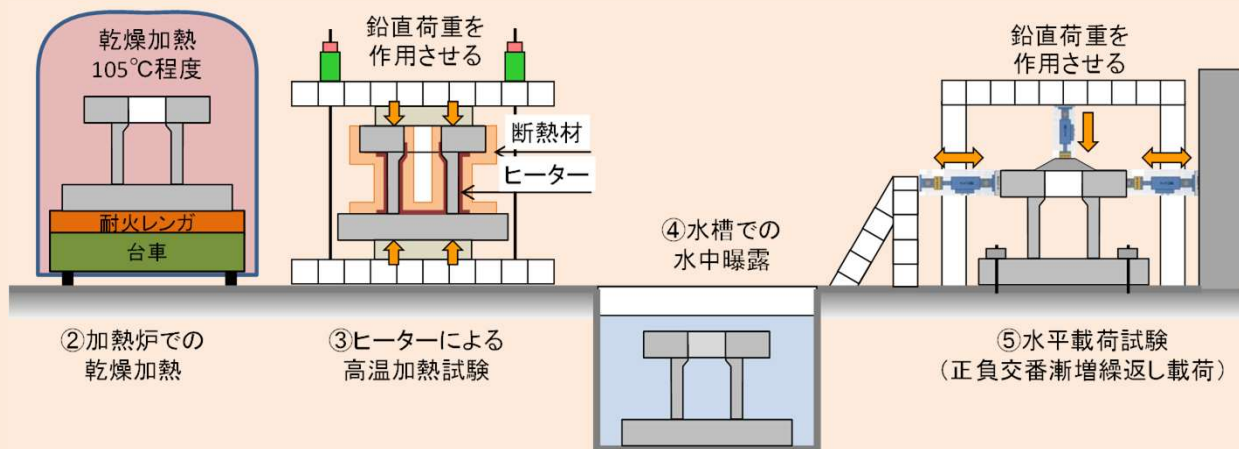


縮小模型試験ケース(3体)と実施内容

	温度条件	実施内容
コントロール試験	常温	①→⑤
加熱後水中曝露	400°C	①→②→③(400°C)→④→⑤
	800°C	①→②→③(800°C)→④→⑤

■試験フロー

- ①試験体製作+2ヶ月間屋内養生
- ②加熱炉での乾燥加熱 (105°C程度)
- ③ヒーターによる高温加熱試験 (400°C、800°C)
- ④水槽での水中曝露
- ⑤水平載荷試験 (正負交番漸増繰返し載荷)

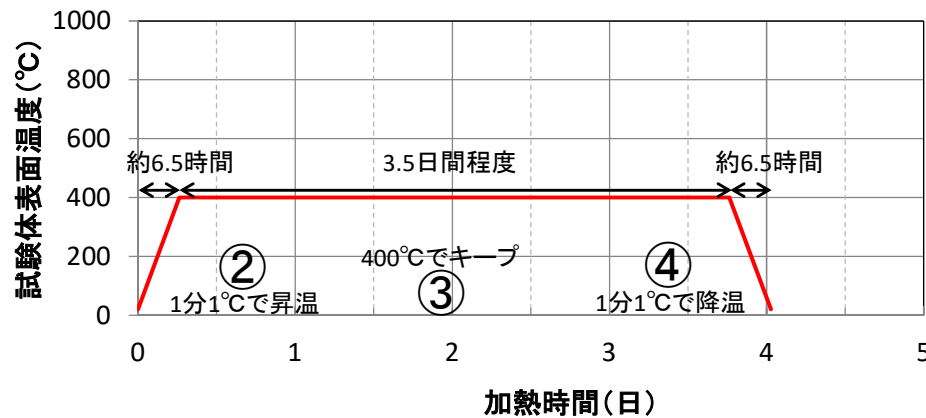
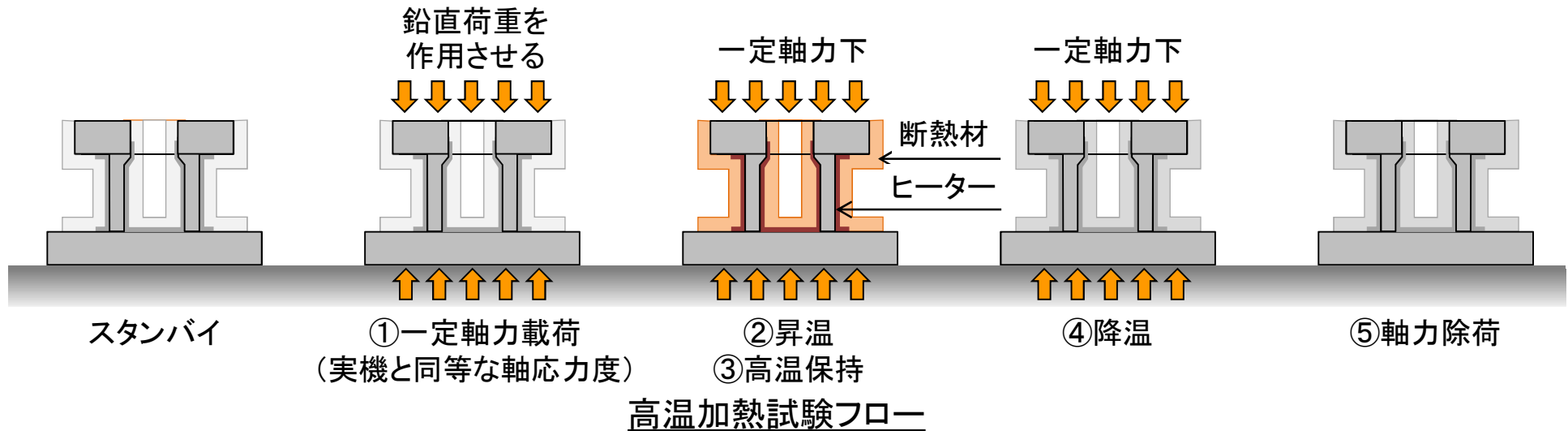


6. 平成26-27年度事業成果

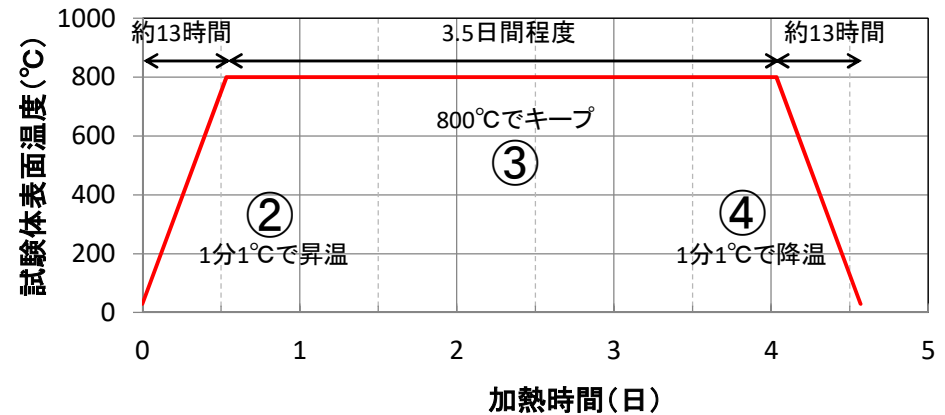
(5) ペDESTALの侵食影響評価

高温加熱試験方法

③ RPVペDESTALの耐力評価試験



加熱温度履歴(400°C試験体の場合)



加熱温度履歴(800°C試験体の場合)

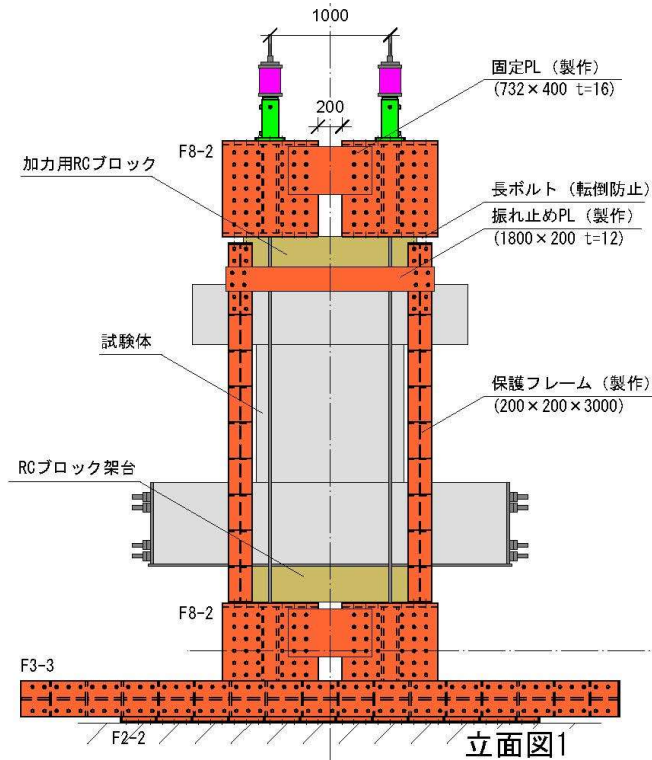
6. 平成26-27年度事業成果

(5)ペDESTALの侵食影響評価

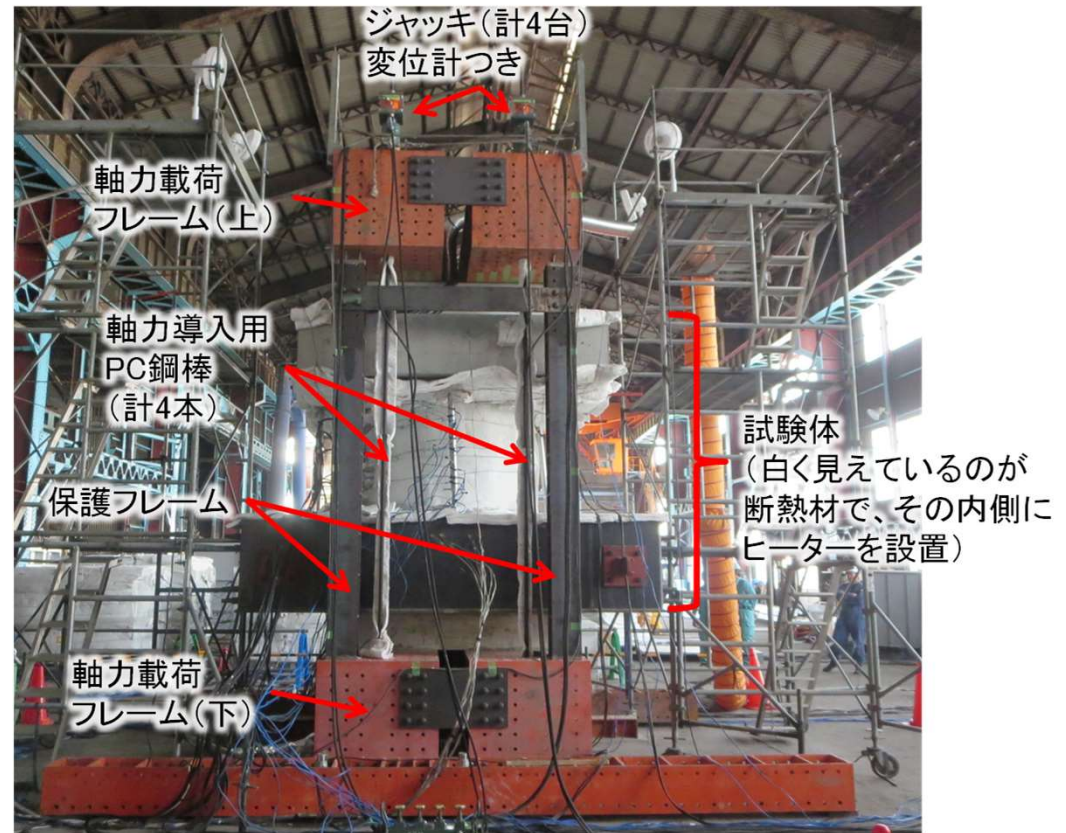
高温加熱試験方法

③RPVペDESTALの耐力評価試験

- 試験体の上下に設置した鉄骨梁をPC鋼棒でつなぎ、4台のジャッキによりバランス良く試験体に軸力を導入する。
- 試験体の円筒部に均等に軸力が作用するように、また、試験体の熱が加力装置やジャッキに伝導することを避けるため、鉄骨梁と試験体の間にRC加力ブロックを設置する。



軸力载荷装置

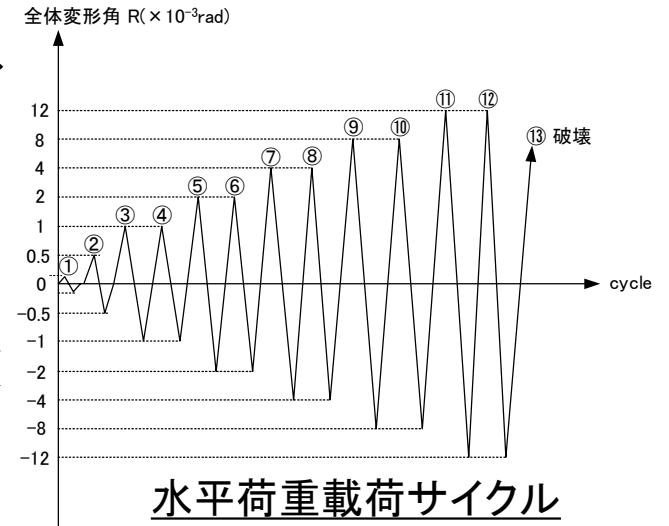
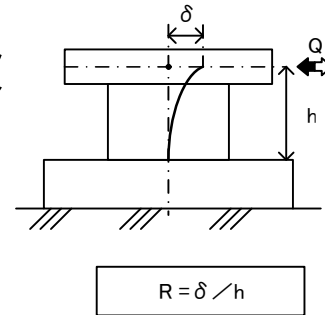


6. 平成26-27年度事業成果

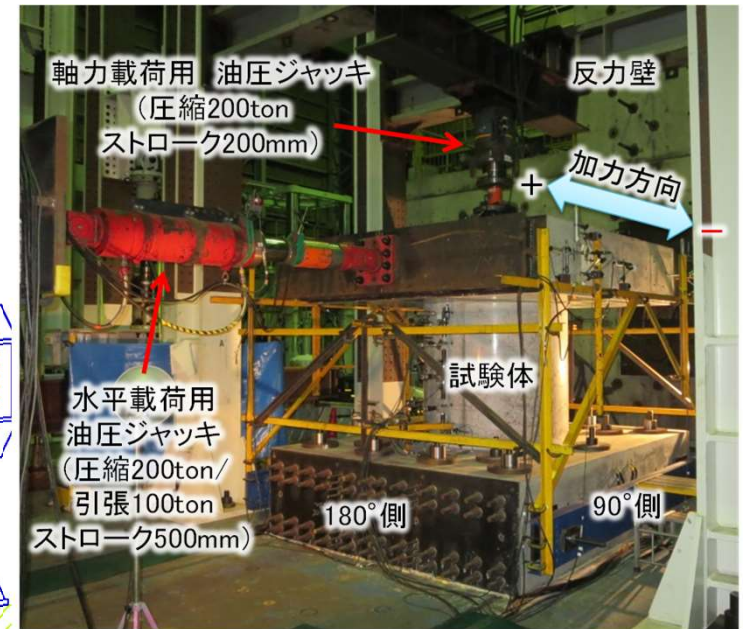
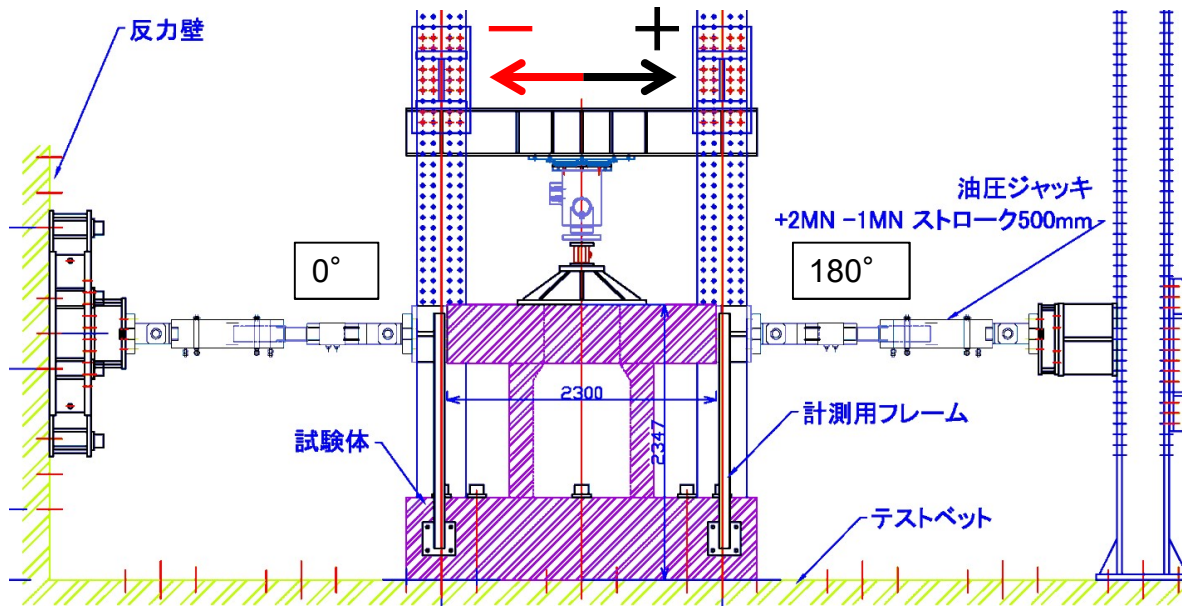
(5) ペDESTALの侵食影響評価

③ RPVペDESTALの耐力評価試験

- 一定軸力を作用させた状態で、水平載荷を実施する。水平載荷は、左右の2台のジャッキによる正負交番漸増繰返し載荷とする。



サイクル	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
水平荷重Q or $R = \frac{\delta}{h}$	100kN	$\frac{0.5}{1000}$	$\frac{1}{1000}$	$\frac{2}{1000}$	$\frac{4}{1000}$	$\frac{8}{1000}$	$\frac{12}{1000}$	$\frac{20}{1000}$					

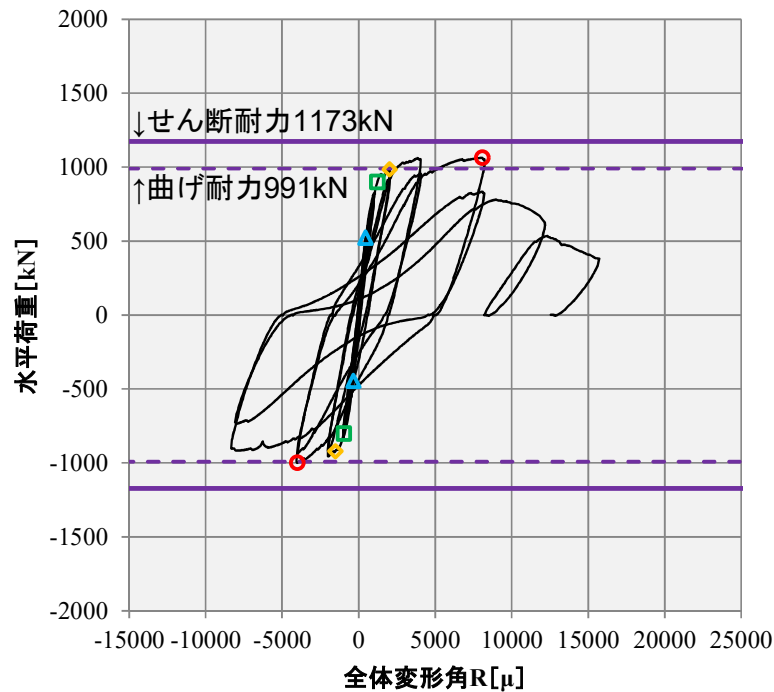


6. 平成26-27年度事業成果

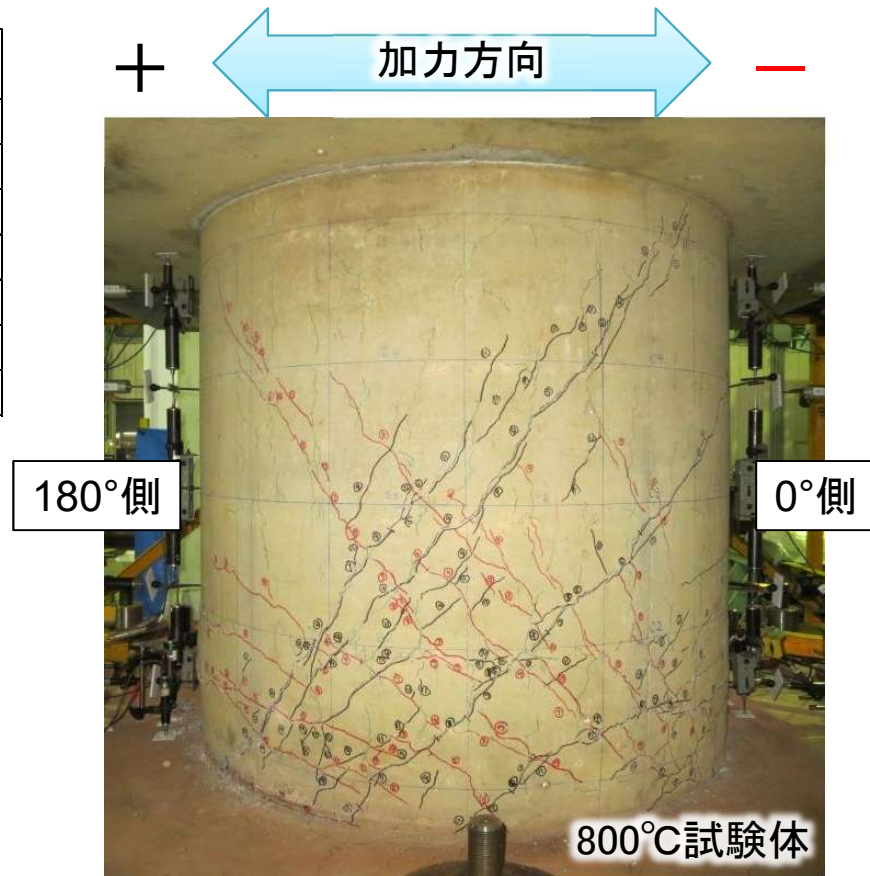
(5) ペDESTALの侵食影響評価

③ RPVペDESTALの耐力評価試験

サイクル	事象
Q=100kN	-
R=0.5/1000	曲げひび割れ発生 ▲
R=1/1000	-
R=2/1000	縦筋引張降伏開始 □ セン断ひび割れ発生 ◆
R=4/1000	負側最大耐力(-1000kN) ○
R=8/1000	正側最大耐力(1064kN) ○
R=12/1000	残留変位12mm程度



水平載荷試験結果 (例: 800°C試験体)



全体変形角R=12/1000後のひび割れ状況
(試験体90°側)
黒線: 正方向載荷時発生ひび割れ
赤線: 負方向載荷時発生ひび割れ

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

800°C試験体の鉄筋の酸化皮膜

③RPVペDESTALの耐力評価試験

- 800°C試験体から取り出した鉄筋の表面に厚さ1mm未満の酸化皮膜が生成されていた。
- 計測の結果、鉄筋表面からの減肉量は0.37～0.41mmと鉄筋径に関わらずほぼ一定であった。実機の鉄筋はD25、D35と縮小模型の鉄筋D6～D13より太径であるため、相対的に減少率は低くなるが、高温加熱時間は84時間(縮小模型)、280時間(実機)と異なる。
- 鉄筋断面積の減少は構造体の挙動や耐力に影響を与えるため、腐食減肉量の把握は重要である。また、コンクリート中という一定量の水分が存在する一方、酸素の供給が制限される環境の中における高温時の鉄筋の腐食については、さらなる検討が必要である。



鉄筋径	加熱温度	重量 [g]	長さ [mm]	断面積 ^{*3} [mm ²]	直径 ^{*3} [mm]	鉄筋表面からの減肉量 [mm]
D13	非加熱 ^{*1}	563.3	599.8	119.64 (1.00)	12.34 (1.00)	0.37
	800°C ^{*2}	494.3	596.0	105.64 (0.88)	11.60 (0.94)	
D10	非加熱 ^{*1}	313.9	598.8	66.78 (1.00)	9.22 (1.00)	0.41
	800°C ^{*2}	266.9	613.8	55.39 (0.83)	8.40 (0.91)	
D6	非加熱 ^{*1}	142.2	599.6	30.21 (1.00)	6.20 (1.00)	0.37
	800°C ^{*2}	109.7	597.3	23.39 (0.77)	5.46 (0.88)	

*1: 引張試験用の予備の鉄筋

*2: 縮小模型試験体から水平載荷試験後に取り出した鉄筋

*3: 鉄の比重7.85として重量および長さより算出

* 括弧内の値は常温に対する800°Cの比を示す。

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

まとめ

③RPVペDESTALの耐力評価試験

- 400°C、800°C試験体ともに、所定の温度と時間の高温加熱を実施した。両試験体とも、試験の間、軸力を一定に保持していた。
- その後、水槽での約2ヶ月間の水中浸漬の後、水平載荷試験を実施した。
- 水平載荷試験では、いずれの試験体も、曲げひび割れ、せん断ひび割れが発生し、増大、伸展するとともに、縦筋が降伏して曲げ降伏となり、最大耐力を迎えた後は曲げによる圧縮力を受ける円筒部脚部において表面のコンクリートが剥落するとともに、円筒部に生じているせん断ひび割れが大きく開いて荷重が低下した。いずれの試験体も破壊モードは、曲げ降伏後のせん断破壊であった。また、水平載荷試験の間、いずれの試験体も鉛直荷重を安定して保持していた。
- いずれの試験体についても、既往の評価式により最大耐力を精度良く評価できている。
- 800°C試験体の鉄筋では高温腐食による断面積の減少が確認された。鉄筋径と加熱時間が縮小模型と実機で異なり、また、コンクリート中という一定量の水分が存在する一方、酸素の供給が制限される環境の中における高温時の鉄筋の腐食については、さらなる検討が必要と考えられる。

6. 平成26-27年度事業成果

(5)ペDESTALの侵食影響評価

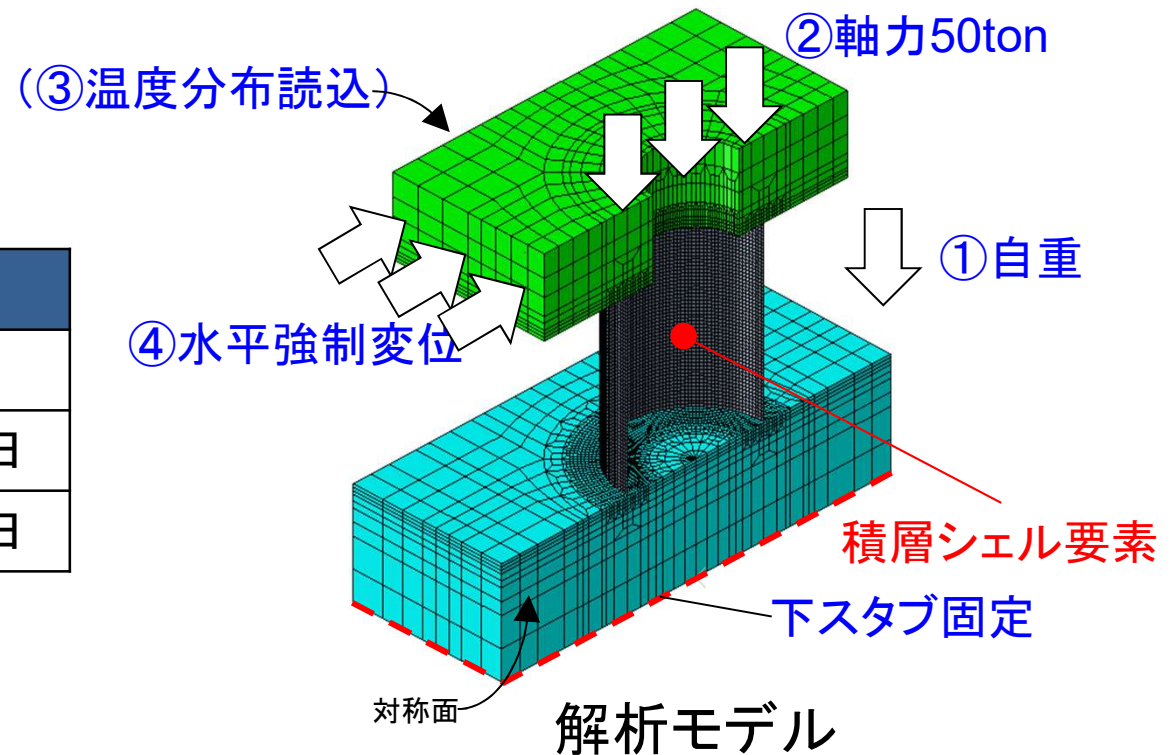
解析方針

③RPVペDESTALの耐力評価試験

- **高温加熱**および**水中浸漬**を経たコンクリート・鉄筋の材料物性を考慮し、円柱試験・鉄筋腐食試験などの結果を解析の構成則として取り込んだ水平載荷試験のシミュレーション解析を実施することによって、解析手法とモデル化方法の適用性を確認し、FEM解析による評価手法を構築する。

解析ケース

対象試験体	温度条件
常温試験体	常温
400°C試験体	400°C-3.5日
800°C試験体	800°C-3.5日

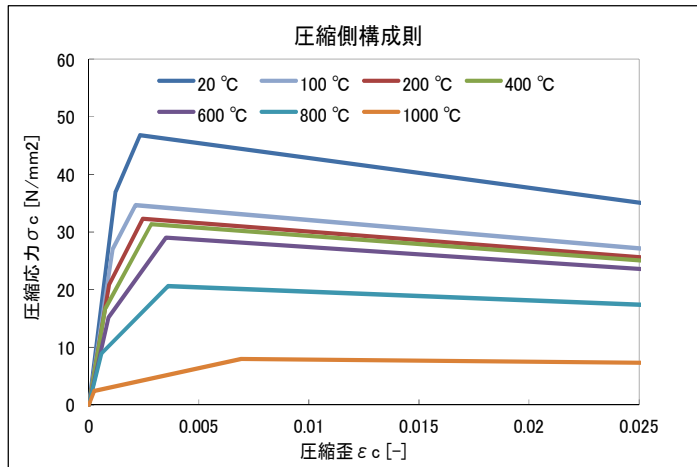


6. 平成26-27年度事業成果

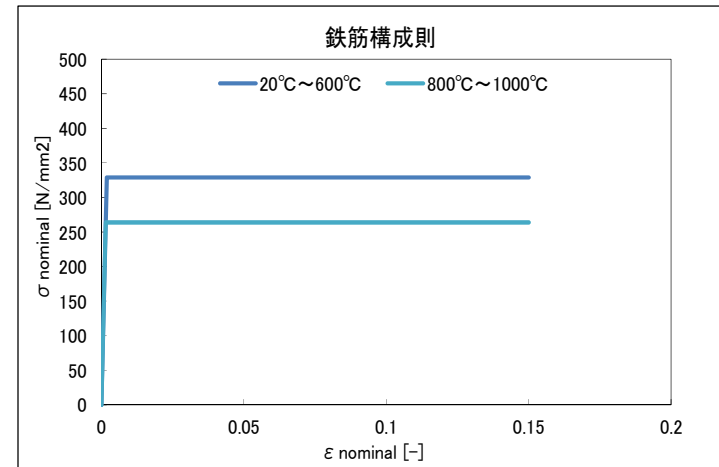
(5) ペDESTALの侵食影響評価

③ RPVペDESTALの耐力評価試験

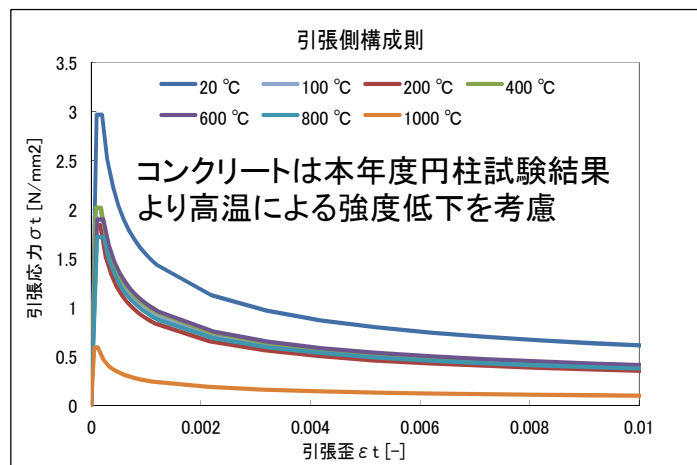
材料構成則



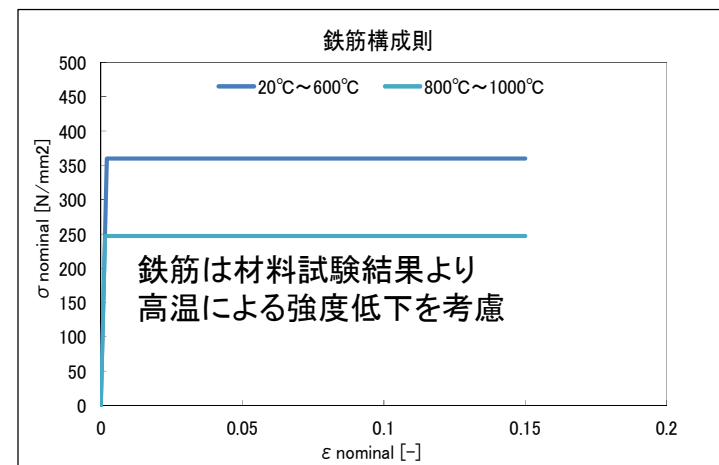
コンクリートS-S特性(圧縮側)



鉄筋S-S特性(D13)



コンクリートS-S特性(引張側)



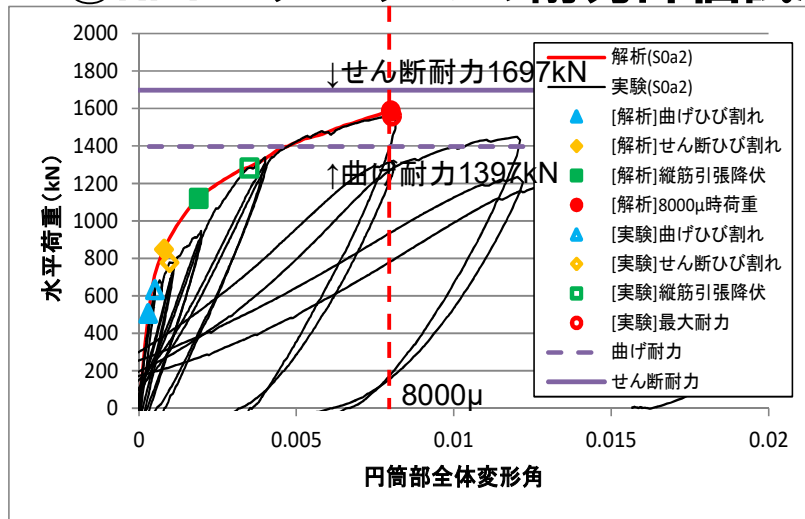
鉄筋S-S特性(D6とD10の平均)

6. 平成26-27年度事業成果

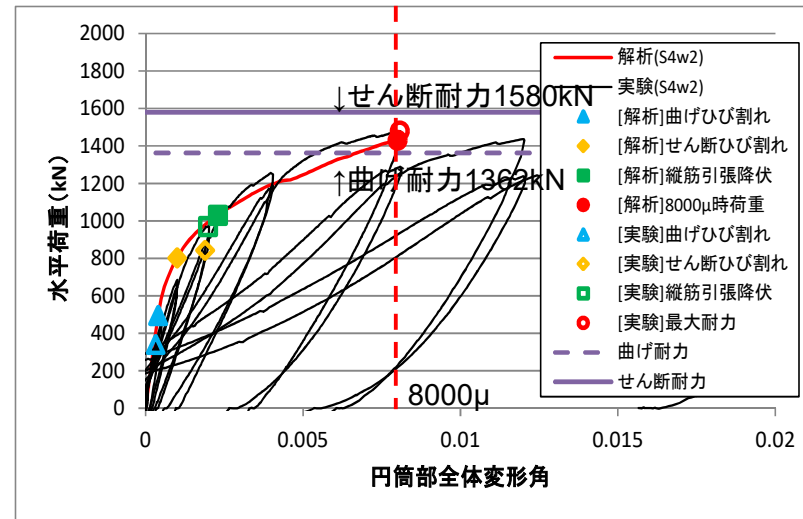
(5) ペDESTALの侵食影響評価

③RPVペDESTALの耐力評価試験

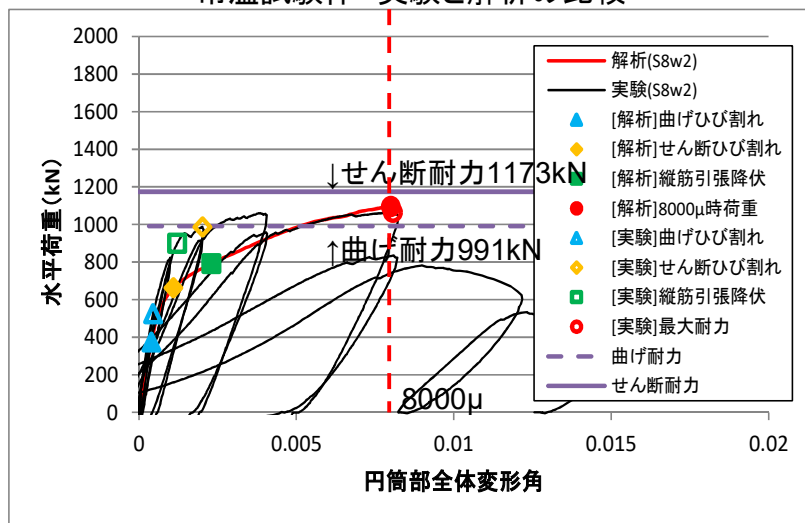
解析結果(まとめ)



常温試験体 実験と解析の比較



400°C試験体 実験と解析の比較



800°C試験体 実験と解析の比較

- 常温および400°C試験体の荷重変形のスケルトンカーブについて、初期剛性、最大耐力および発生イベントは、実験と解析で概ね一致している。また、800°C試験体について、初期剛性およびその後の剛性が解析の方が実験と比べてやや小さく推移しているが、最大耐力は、実験と解析で概ね一致している。
- 以上より、本年度円柱試験の結果を解析の材料構成則に取り込むことで、円筒部全体変形角8000μ程度までは、実験を概ねシミュレーションできるFEM解析手法を確立できた。

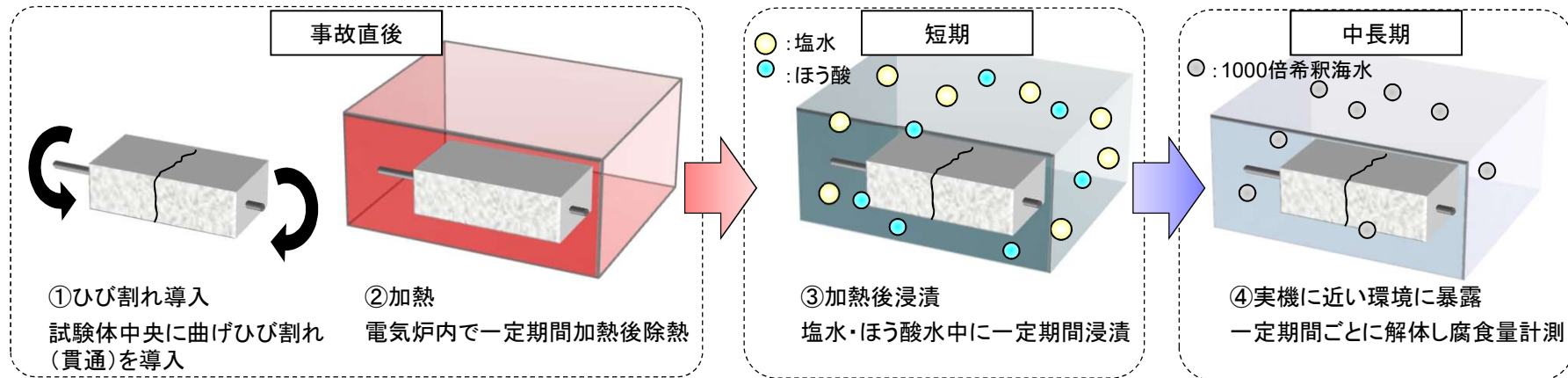
6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

④ 鉄筋の長時間浸漬腐食試験

● 試験概要

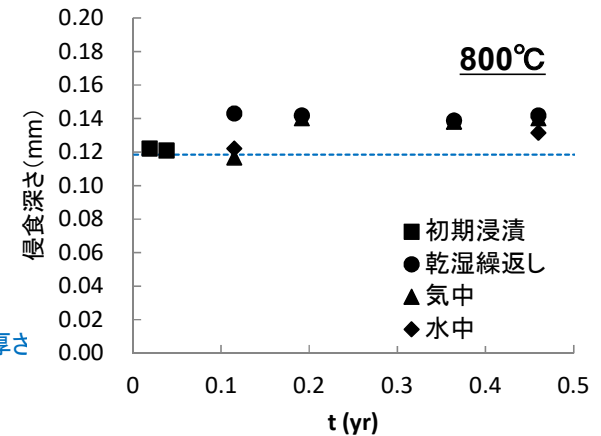
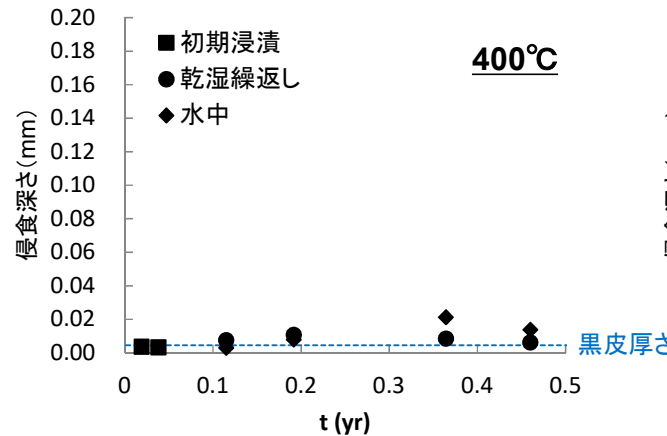
今後想定される廃炉作業の各プロセスについて、腐食による経年劣化や燃料デブリ落下の影響を考慮した耐震強度評価に基づき、RPV/PCVの構造健全性を評価し、燃料デブリ取り出しやPCVの補修(止水)等の工法成立性を耐震強度の観点から検討する。



● 試験結果：腐食減量の例(ひび割れなし)

試験ケース(*ひび割れなし、あり)

	常温	400°C	800°C
加熱なし	●*		
気中曝露			●*
水中曝露		●*	●*
乾湿繰返し	●*	●*	●*



6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

④ 鉄筋の長時間浸漬腐食試験

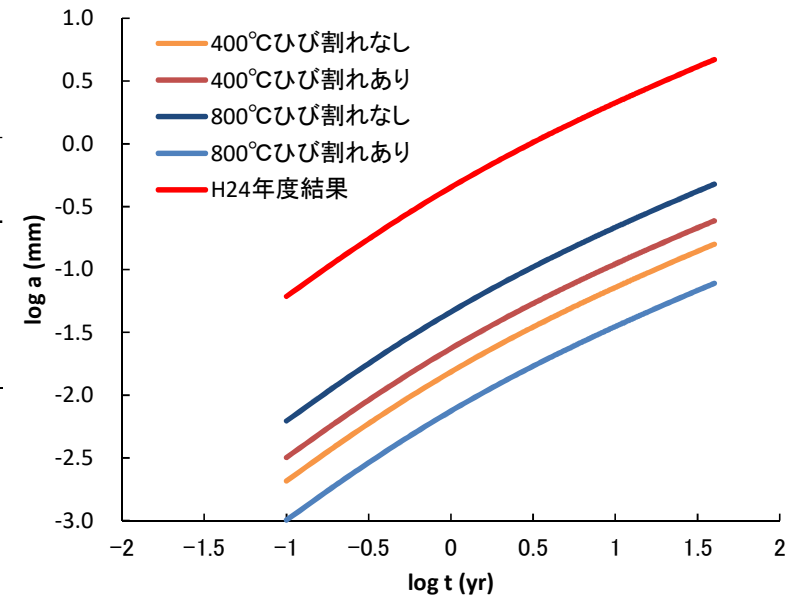
● べき乗則を用いた40年後の侵食深さ

加熱条件	ひび割れ有無	40年後の侵食深さ(mm)		平成24年度の結果にもとづく 40年後の侵食深さ(mm)
		酸化皮膜含む	酸化皮膜除く	
400℃	ひび割れなし	0.16	0.16	最大値: 4.68 最小値: 4.14
	ひび割れあり	0.25	0.24	
800℃	ひび割れなし	0.60	0.48	
	ひび割れあり	0.20	0.08	

◆ べき乗則

$$(a + kr_0)^2 = 2kr_0^2 t + k^2 r_0^2$$

ただし、 $k=0.8$



● まとめ

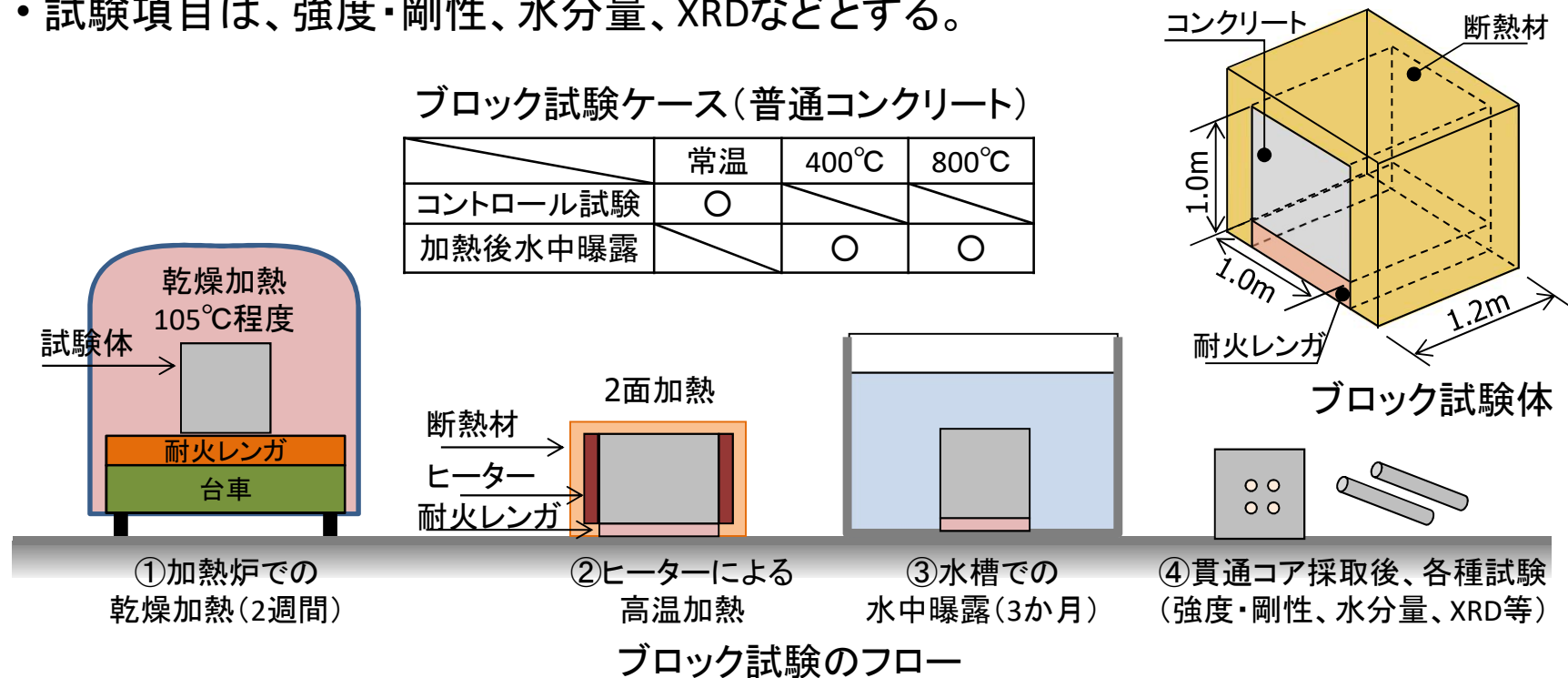
- ・高温加熱した試験体から取り出した鉄筋の黒皮除去後の質量減少率と、初期浸漬2週後の質量減少率はほぼ同じであった。
- ・曝露後5カ月までの結果では、800℃加熱でひび割れなしの条件の試験体から取り出した鉄筋の腐食減量率が最も大きかった。
- ・通常の鉄筋が有する黒皮に比べ、800℃で加熱した鉄筋は黒皮が容易に剥がれる傾向が見られた。
- ・べき乗則を使って40年後の侵食深さを予測した結果、最も腐食が進んだものでも0.6mm(酸化皮膜を除いた場合は0.48mm)であった。これは平成24年の結果を使った予測4.14~4.68mmと比べて大幅に小さい値となった。

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑤ ブロック試験体による高温加熱・暴露試験

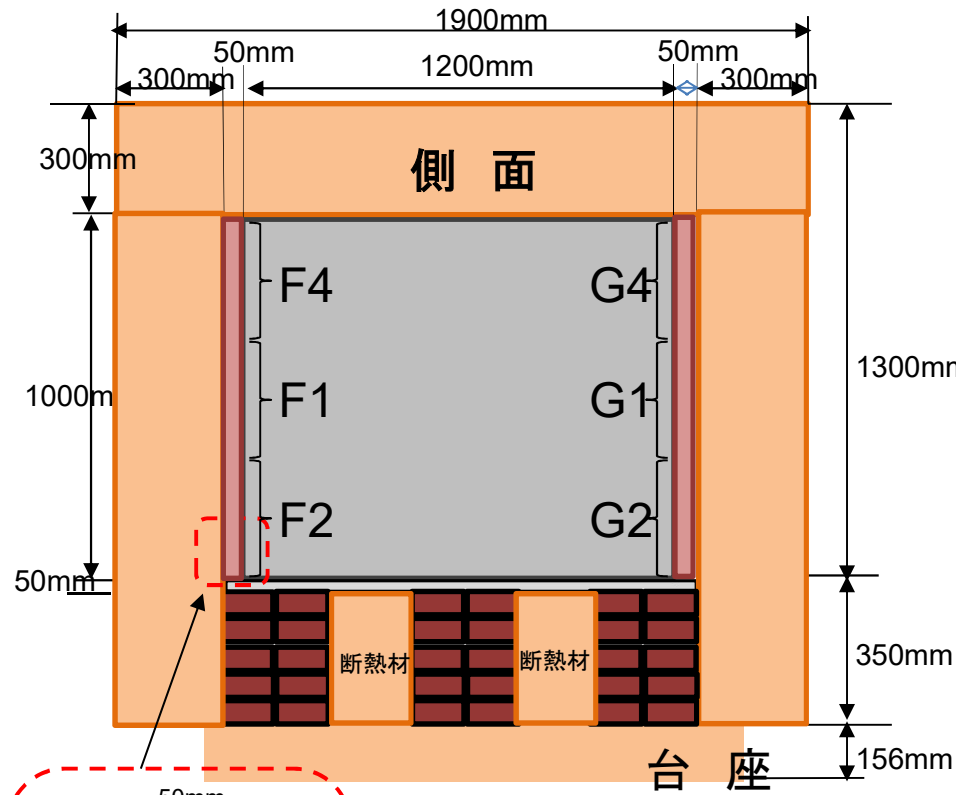
- 極厚部材について、コンクリートの加熱による強度低下や水中曝露による強度回復に関する断面内分布を把握するために、ブロックの加熱試験および水中曝露試験を行い、実物とシリンダー試験体における強度性状の違いを把握する。
- 試験体サイズは1.0×1.0×1.2mとする。(1.2mは、1F-1RPVペDESTAL厚さに対応)
- 高温加熱炉でD/W温度履歴を模擬した加熱を行い、水中曝露後にコアを取得する。
- 試験項目は、強度・剛性、水分量、XRDなどとする。



6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

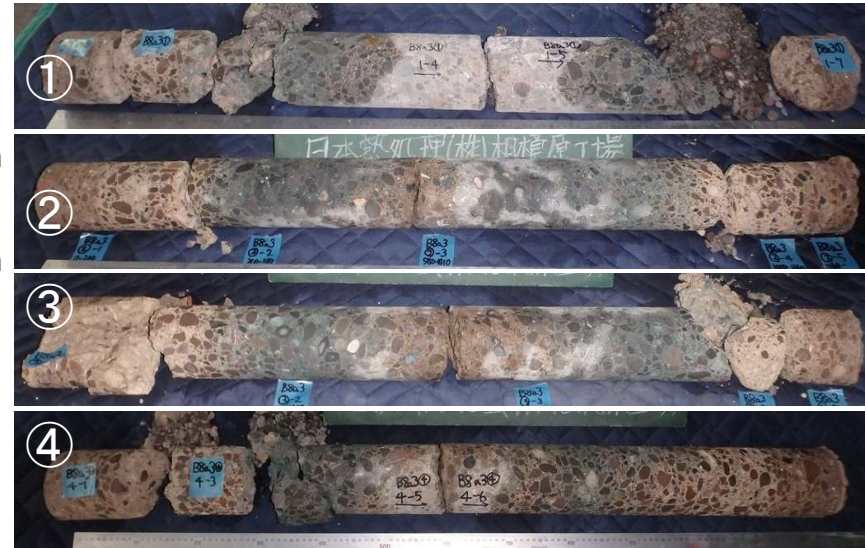
⑤ ブロック試験体による高温加熱・暴露試験



- ・ブロック試験体の2面に厚さ50mmの加熱ヒーターを設置
- ・加熱ヒーター外側に厚さ300mmで断熱材を設置
- ・ヒーターは6区画に分けてコントロール



コア抜き状況
(手前:800°C試験体、奥:400°C試験体)



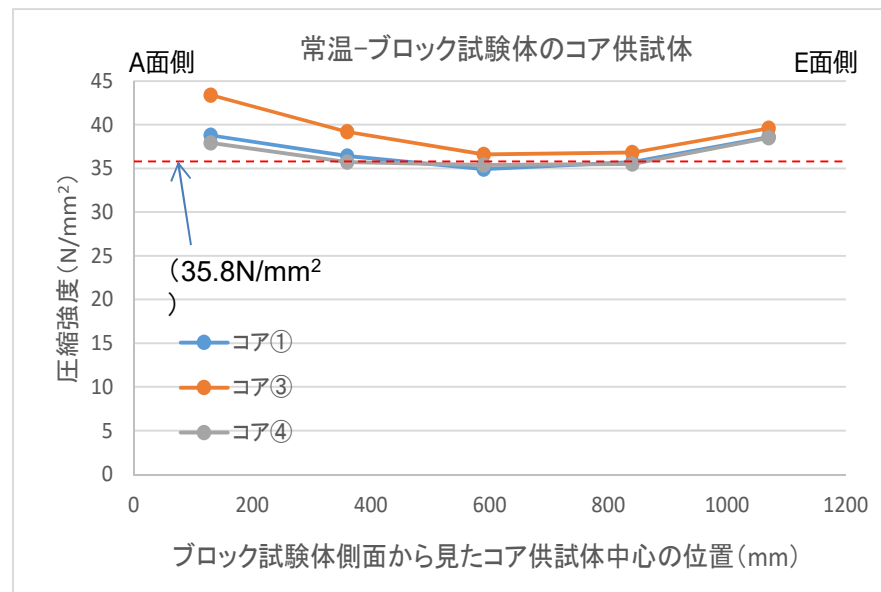
コア試験体(800°C)

6. 平成26-27年度事業成果

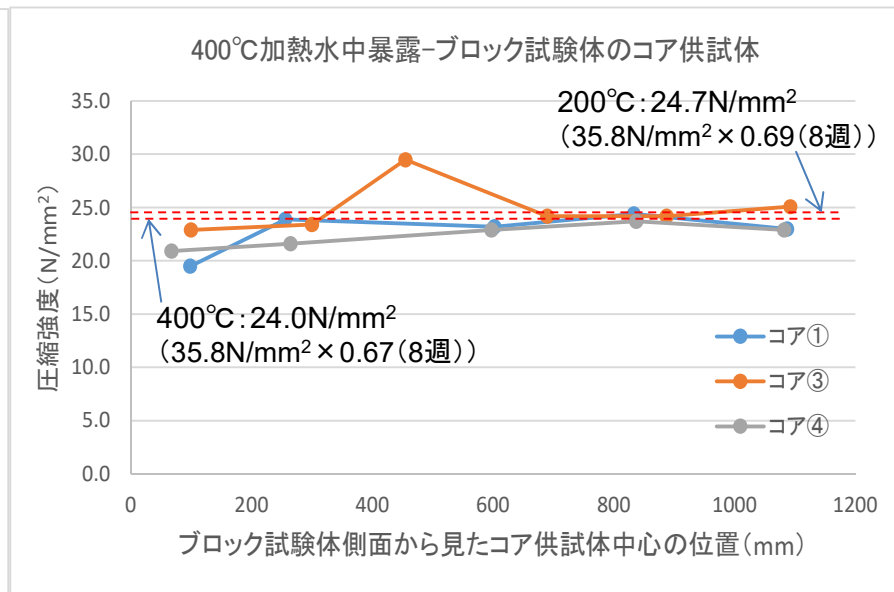
(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑤ ブロック試験体による高温加熱・暴露試験

- 常温ブロック試験体の強度分布は、断面中央で小さめの値となっている。
- 400°Cブロック試験体では、ブロックと同一調合の円柱試験体の強度に、高温加熱・水中曝露試験結果による強度残存率を乗じた値に対応している。



常温ブロック試験体の強度分布



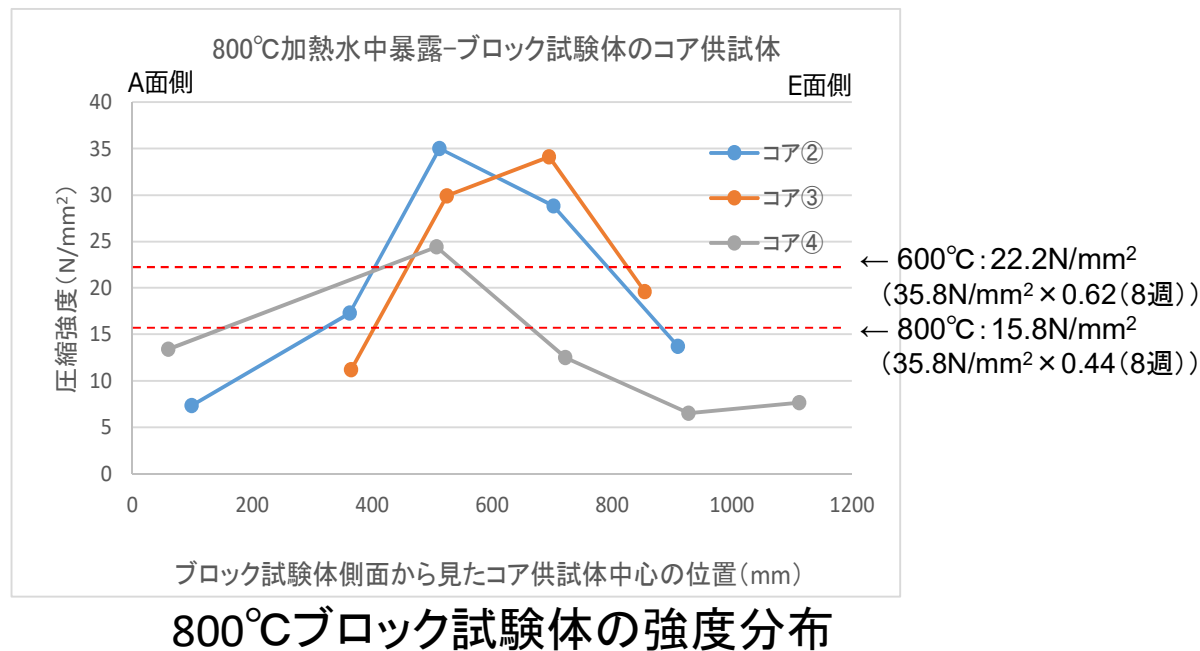
400°Cブロック試験体の強度分布

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑤ ブロック試験体による高温加熱・暴露試験

- 800°Cブロック試験体の表層部コアには多くのひび割れが発生したために、コア試験体強度は円柱試験体よりも低かったが、断面中央部ではコア試験体強度が円柱試験体の強度を上回る結果を得た。
- 表層と中央部では強度差はあるものの、ブロック試験体における平均的な強度分布は円柱試験体の温度-強度低下の関係により評価できると考えられる。



6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑤ ブロック試験体による高温加熱・暴露試験

- 断面中心温度は、400°C加熱で120時間後250°C程度、800°C加熱では280時間後600°C程度であり、事前の温度分布解析結果とよい対応を示した。
- 高温加熱後、400°C試験体(0.5mm程度)および800°C試験体(2.2mm程度)には、**加熱面・非加熱面とも縦方向および横方向のひび割れ**が見られた。
- 400°C試験体の断面内強度分布は、円柱試験体の**高温加熱・水中曝露試験による強度残存率**に対応している。
- 800°C試験体の表層と中央部では強度差はあるが、ブロック試験体断面の平均的な強度分布は、**円柱試験体の高温加熱・水中曝露試験による強度残存率**により評価できると考えられる。
- 低強度は加熱によるひび割れの影響と考えられるが、高強度は、**ブロック内部の拘束状態の中で再水和**したことが考えられる。
- すなわち、鉛直荷重を作用させた状態で高温加熱していれば、800°C試験体のひび割れはかなり低減できて、**拘束が小さい表層付近は円柱試験体と同程度の強度**となり、**拘束の大きいブロック内部では円柱試験体よりも高い強度**となった可能性がある。

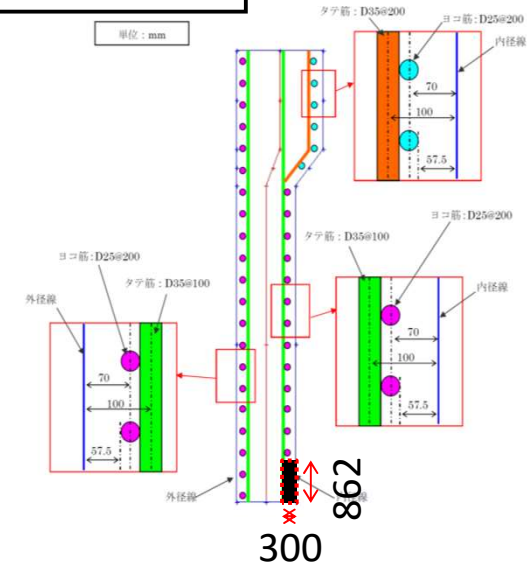
6. 平成26-27年度事業成果

(5)ペDESTALの侵食影響評価

⑥SA後の構造物の耐力評価法の開発

- ・縮小模型試験のシミュレーション解析により確立されたFEM解析手法を基本として、SA後の構造物の耐力評価法を開発し、下表に示す実機の1F-1および1F-3を対象として健全性評価を実施する。
- ・デブリによる侵食を考慮したケースでは、右図に示す範囲のコンクリートと鉄筋が無いものとして評価する。

解析方針



1F1デブリ侵食考慮範囲(全周)

SA後の構造物を対象とした解析ケース(◎:実機条件)

解析ケース	対象号機	温度条件	荷重条件 (M、Qは脚部での値)	デブリによる侵食	備考
No.2-1	1F-1	常温	H26-2 d) M:142,000kN・m Q:11,800kN 完全冠水、腐食40年後、建設時設計値減衰	なし	レファレンス
No.2-2		400℃-120時間			参考ケース
◎ No.2-3		800℃-280時間			実機条件
◎ No.2-4					あり
No.2-5	1F-3	常温	H26-2 d) M:135,000kN・m Q:13,500kN 完全冠水、腐食40年後、建設時設計値減衰	なし	レファレンス
◎ No.2-6		400℃-120時間			実機条件
No.2-7		800℃-280時間			参考ケース

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

材料構成則

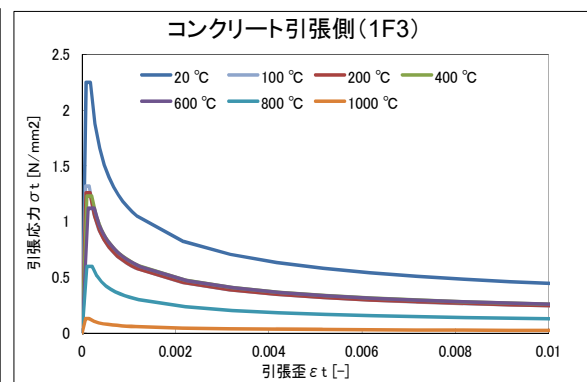
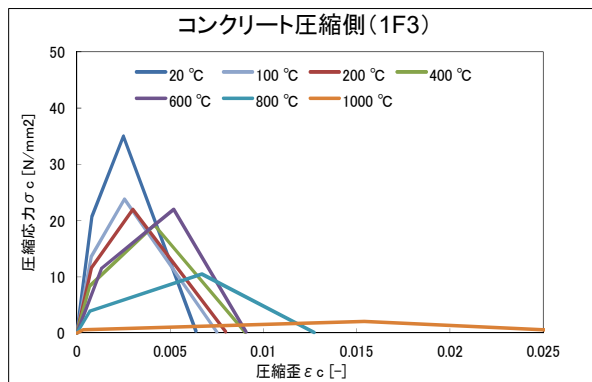
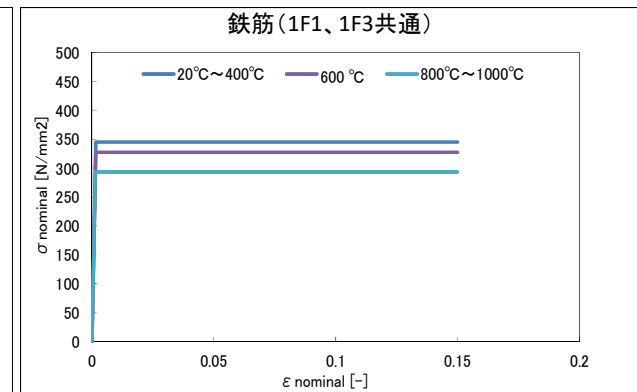
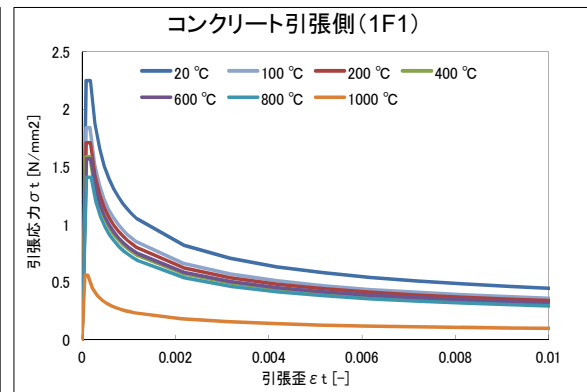
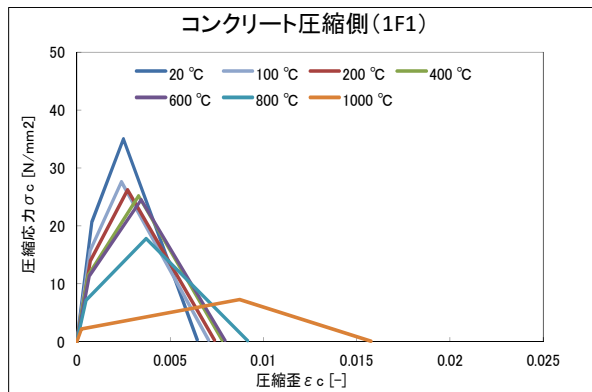
⑥ SA後の構造物の耐力評価法の開発

1F-1の解析で用いる材料物性

部位	使用材料	ヤング係数* (N/mm ²)	圧縮強度* (N/mm ²)	引張強度* (N/mm ²)
コンクリート (800°C)	Fc225	1.43 × 10 ⁴ (0.56)	17.8 (0.51)	1.41 (0.63)
鉄筋 (800°C)	SD35	2.05 × 10 ⁵ (1.00)	293 (0.85)	293 (0.85)

1F-3の解析で用いる材料物性

部位	使用材料	ヤング係数* (N/mm ²)	圧縮強度* (N/mm ²)	引張強度* (N/mm ²)
コンクリート (400°C)	Fc225	1.20 × 10 ⁴ (0.47)	19.2 (0.55)	1.23 (0.55)
鉄筋 (400°C)	SD35	2.05 × 10 ⁵ (1.00)	345 (1.00)	345 (1.00)



コンクリートは本年度円柱試験結果より、鉄筋は既往の知見*より、高温による強度低下を考慮

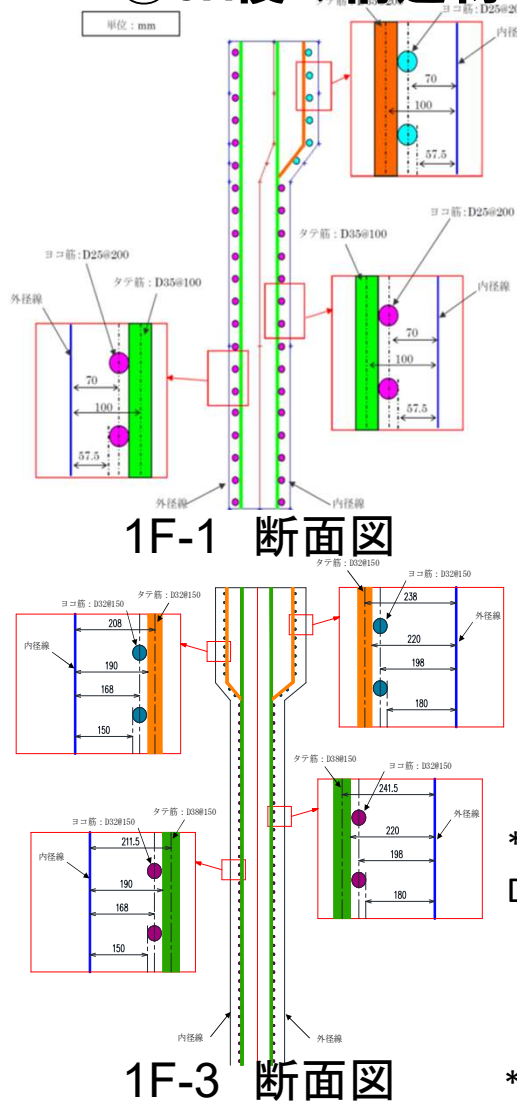
*構造材料の耐火性ハンドブック(日本建築学会)

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペデスタルの侵食影響評価

鉄筋腐食のモデル化

⑥ SA後の構造物の耐力評価法の開発



腐食による断面減少を考慮した配筋量(一般部)

		ひび割れ	腐食前	高温酸化後*1	長期腐食後*2 (40年後)
1F-1	タテ筋	無	1.59% (2-D35@100)	1.44% [0.91]	1.31% [0.83]
	ヨコ筋	無	0.42% (2-D25@200)	0.36% [0.88]	0.32% [0.78]
1F-3	タテ筋	無	1.53% (2-D38@150)	—	1.49% [0.98]
	ヨコ筋	無	1.06% (2-D32@150)	—	1.03% [0.98]

[]は腐食前に対する比を示す。

*1: 高温酸化量は既往の式で算定(1F-1: 800°C-280h、1F-3: 400°C-120hを想定)

$$D = \{10^u \times 3600 \times t\}^{0.5} \times 10$$

$$u = -9.93 \times (1/T \times 10^3) + 1.03$$

D: 腐食量(mm)、t: 酸化時間(h)、u: 鋼種係数、T: 酸化温度(K)

出典: ポイラ燃焼ガスによる高温腐食事例とその対策(2012、テクノシステム)

*2: 長期腐食量は本年度の鉄筋の長期浸漬腐食試験より算定(4ヶ月目までの結果)

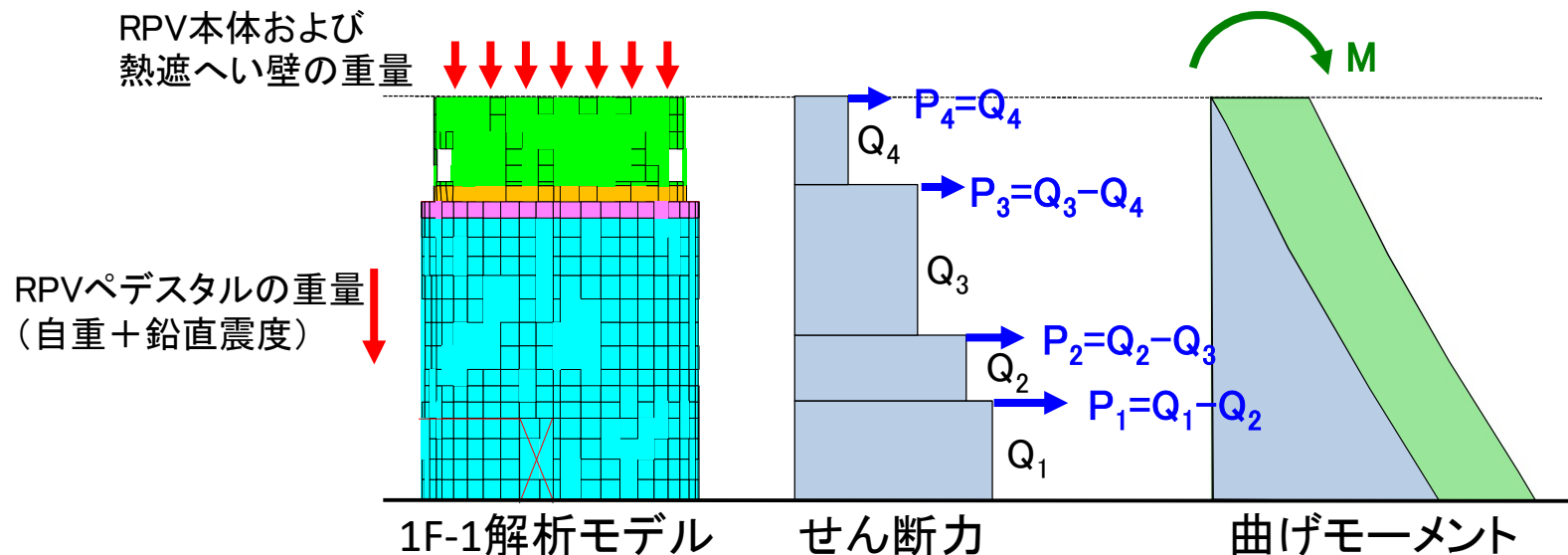
6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

荷重

⑥ SA後の構造物の耐力評価法の開発

- 固定荷重
 - ・RPV本体および熱遮へい壁の重量を、付加重量としてペDESTAL頂部に与える。
 - ・モデル化した部分の重量は、ペDESTAL本体の自重を単位体積重量として各要素ごとに与える。
- 地震荷重
 - ・Ss地震に対する建屋機器連成地震応答解析結果に基づく地震荷重を考慮する。
 - ・水平方向地震荷重は、せん断力と曲げモーメントを作用させる。
 - ・鉛直方向地震荷重は、震度として解析モデルに一律に作用させる。



6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

評価結果まとめ

⑥ SA後の構造物の耐力評価法の開発

検討結果まとめ

ケース	号機	デブリ侵食	評価項目	発生応力・ひずみ(A)	評価基準値(B)	A/B
No.2-3	1F-1	なし	コンクリートひずみ	535 μ	3000 μ	0.18
			鉄筋ひずみ	789 μ	5000 μ	0.16
			面外せん断力	561 N/mm	1771 N/mm	0.32
No.2-4		あり	コンクリートひずみ	938 μ	3000 μ	0.31
			鉄筋ひずみ	1435 μ	5000 μ	0.29
			面外せん断力	391 N/mm	700 N/mm	0.56
No.2-6	1F-3	なし	コンクリートひずみ	745 μ	3000 μ	0.25
			鉄筋ひずみ	830 μ	5000 μ	0.17
			面外せん断力	485 N/mm	1626 N/mm	0.30

- コンクリートの高温による材料劣化、鉄筋の降伏点低下、鉄筋の高温酸化腐食および長期腐食による断面積減少などの劣化要因を考慮することで、SA後の構造物の健全性を評価できる解析手法を開発した。
- 上記の解析手法を用いて、1F-1および1F-3について、地震力の大きいケースの解析を実施し、実機で想定される800°Cおよび400°Cの温度劣化を考慮した場合、コンクリート・鉄筋の発生ひずみ、面外せん断力を評価項目として、いずれも評価基準値内に収まることを確認した。

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑦ RPVペDESTALアンカーの耐力評価

<目的>

RPVペDESTALアンカー(RPVペDESTAL基部)について、事故時の高温状態と海水注入による鉄筋腐食による劣化を考慮した場合の構造安全性を評価する。

<評価フロー>

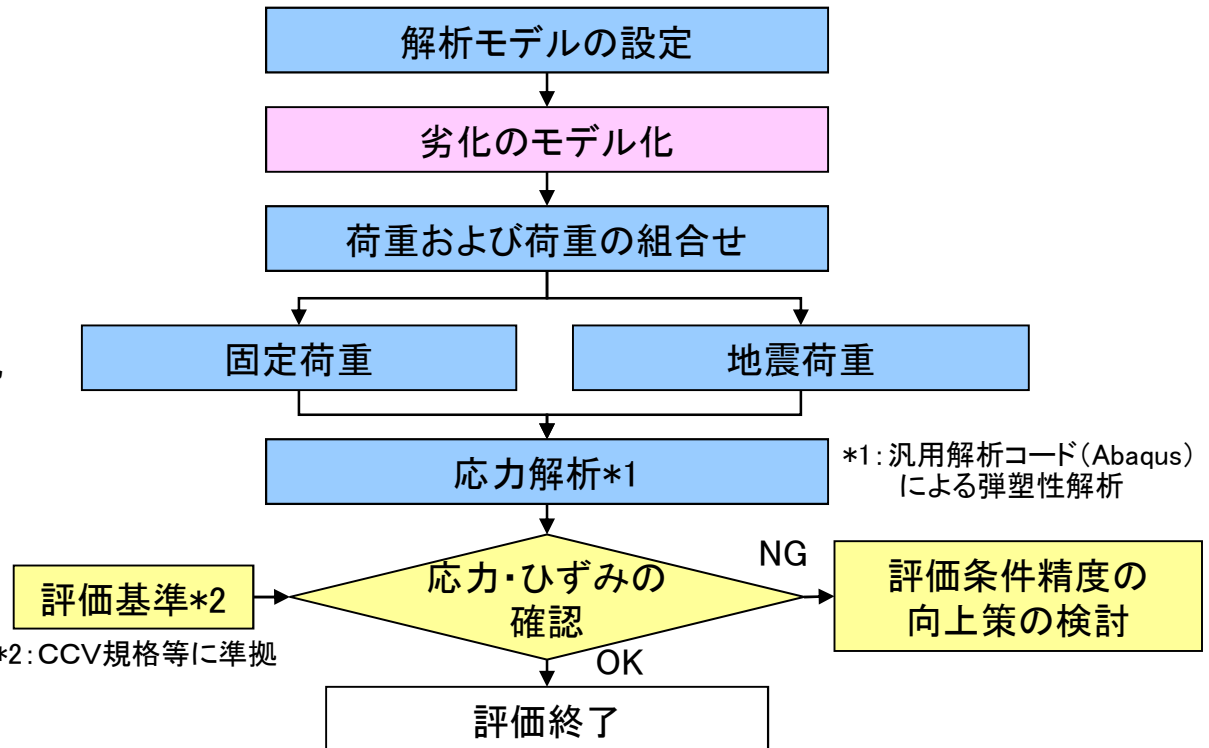
想定される劣化事象をモデルに組込んだ3次元FEMによる弾塑性解析を実施し、地震時に発生する応力・ひずみを求め、CCV規格等*1に基づく評価基準値との比較を行い、基準地震動Ssに対するRPVペDESTALの健全性を評価する。

*1: 日本機械学会「発電用原子力設備規格
コンクリート製原子炉格納容器規格」

*2: CCV規格等に準拠

解析ケース

解析ケース	温度条件	荷重条件	備考
Case1	常温	長期軸力+ 引き抜き荷重	参照ケース
Case2	800°C -280時間		実機条件

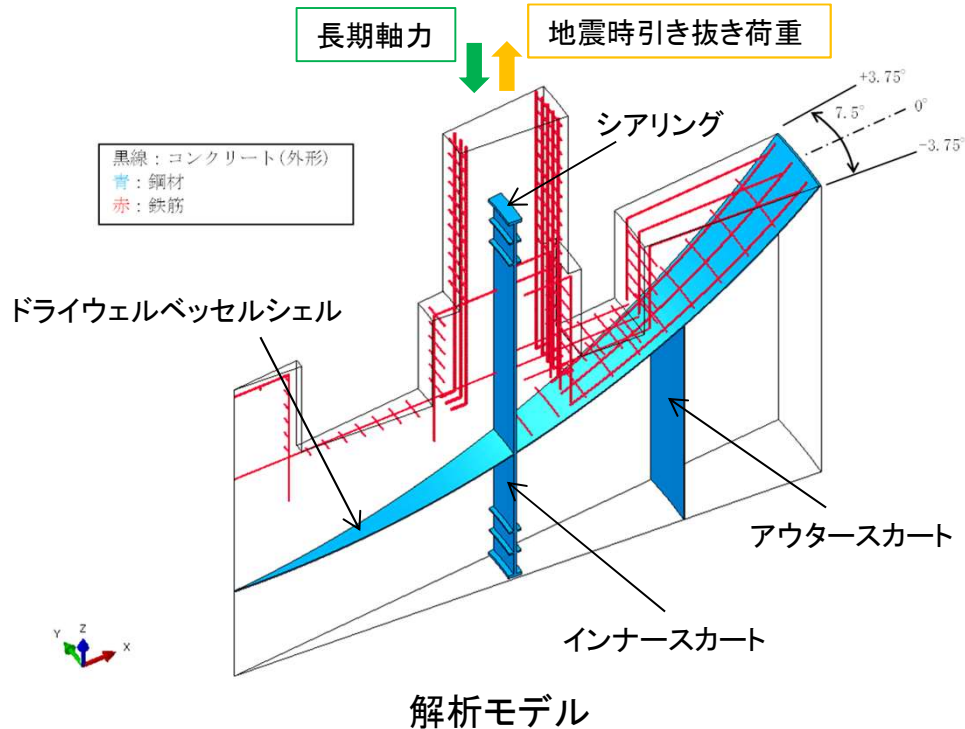


*1: 汎用解析コード(Abaqus)による弾塑性解析

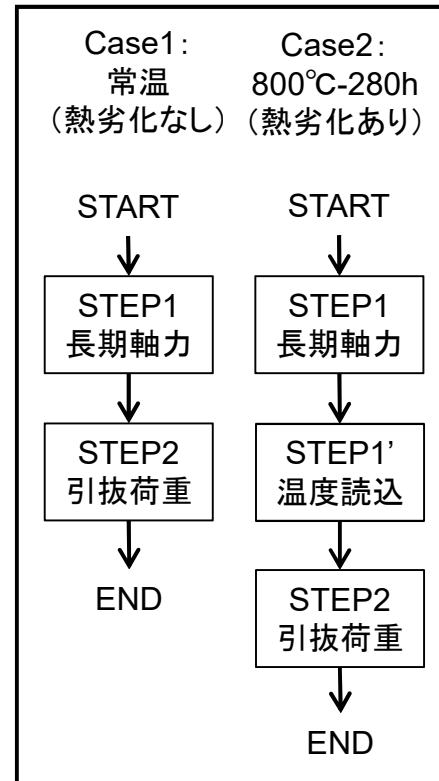
6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

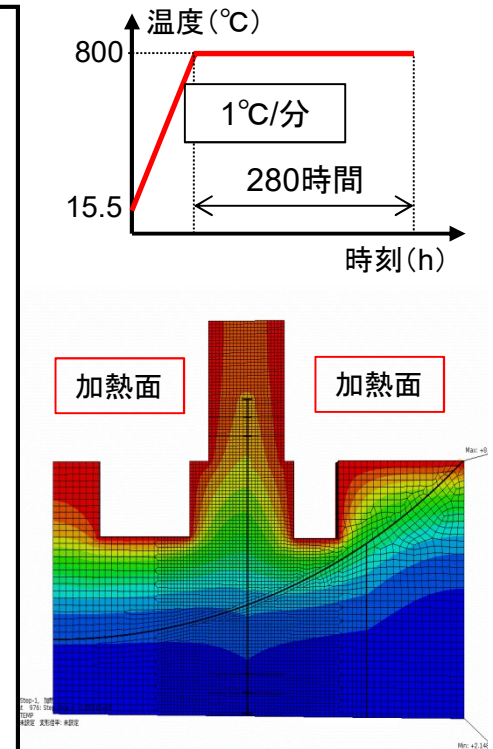
⑦ RPVペDESTALアンカーの耐力評価



解析条件



伝熱解析



- ・周期対称性を考慮した7.5° ケーキカットモデル
- ・コンクリートの要素サイズは円筒部で50mm角
- ・コンクリート-鉄筋: 完全付着
- ・コンクリート-鋼材: 摩擦なし
- ・各種材料試験の結果より、熱劣化の影響を材料条件に反映
- ・鉄筋は腐食による劣化を考慮し、断面積を減量

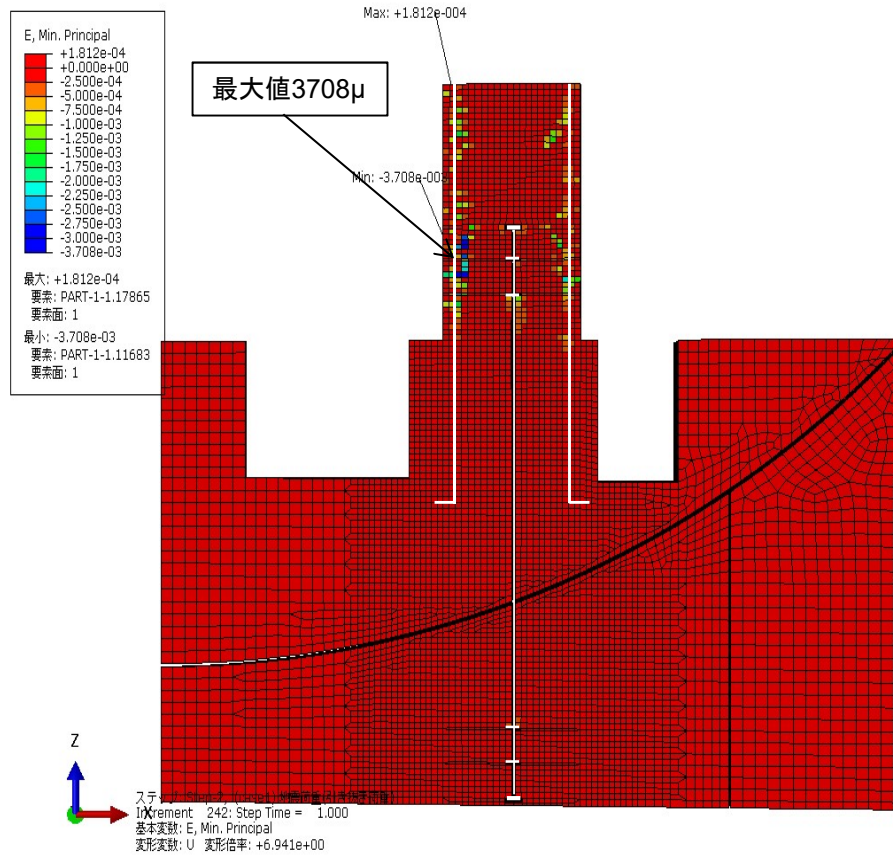
使用した要素タイプ

材料	要素タイプ
コンクリート	低減積分ソリッド
鉄筋	トラス
鋼材	完全積分ソリッド

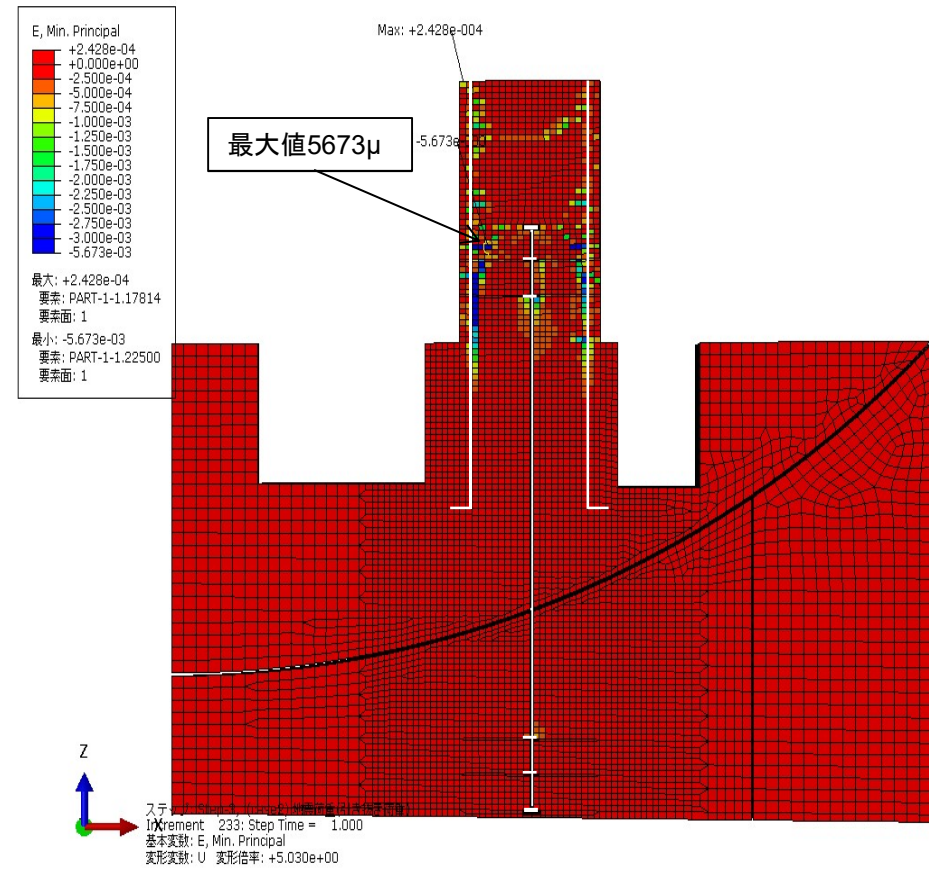
6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑦ RPVペDESTALアンカーの耐力評価



Case1: 常温



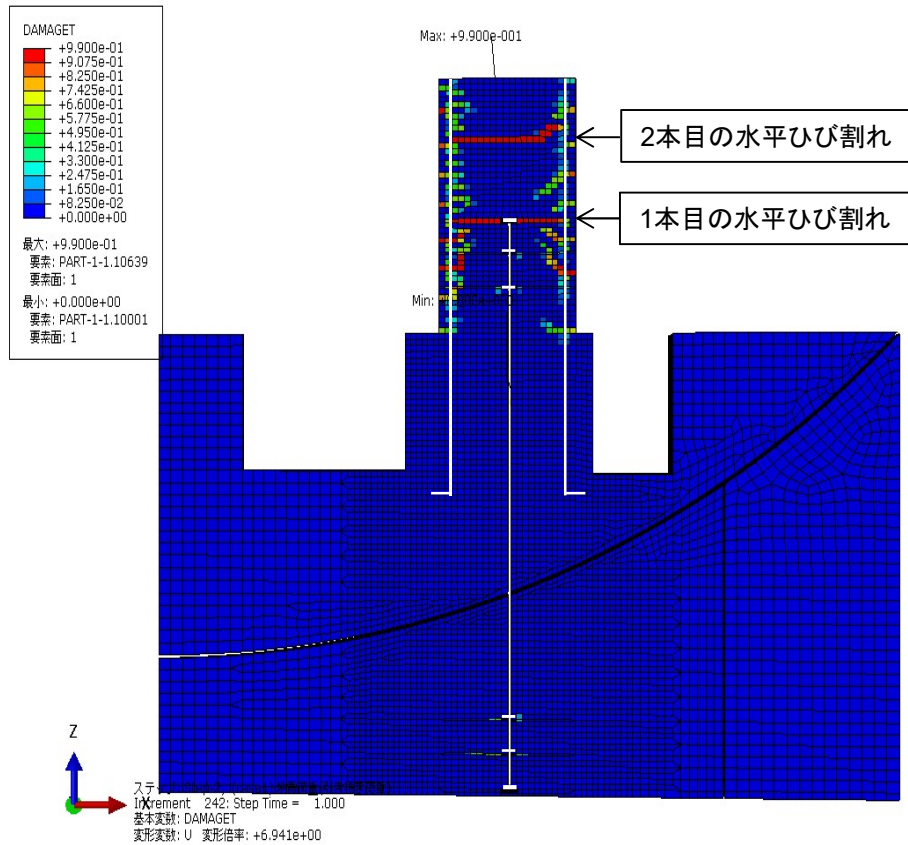
Case2: 800°C-280時間

コンクリートの最小主ひずみコンター(正值が引張、負値が圧縮を示す)

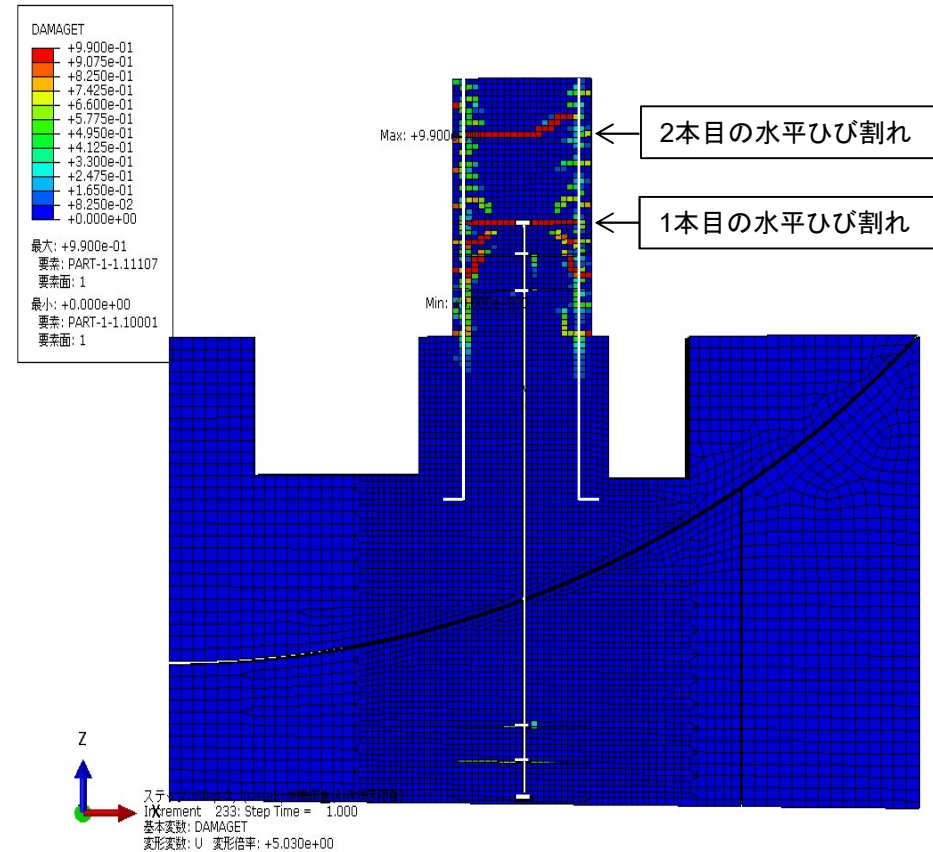
6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑦ RPVペDESTALアンカーの耐力評価



Case1: 常温



Case2: 800°C-280時間

コンクリートの引張側損傷値コンター (=0: 無損傷、=1: 破壊を意味する)

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑦ RPVペDESTALアンカーの耐力評価

ひずみ最大値とCCV評価基準値の比較

ケース	評価項目	ひずみ	評価基準値*1	検定比
Case1 常温	コンクリートの圧縮ひずみ	3708 μ	3000 μ	1.24
	鉄筋の軸ひずみ	1027 μ	5000 μ	0.21
Case2 800°C-280時間	コンクリートの圧縮ひずみ	5673 μ	3000 μ	1.90
	鉄筋の軸ひずみ	1380 μ	5000 μ	0.28

*1: 荷重状態IV (CCVの安全設計上想定される異常な事態)における許容ひずみ

- (1) コンクリートの圧縮ひずみ(最小主ひずみ)最大値は、評価基準値3000[μ]を上回った。これは鉄筋の支圧による局所的な塑性変形によるものであり、地震力は鉄筋からコンクリートへ流れているため、ペDESTAL基部の構造健全性に与える影響は小さいと考えられる。
- (2) 鉄筋の軸ひずみ最大値はペDESTAL鉛直筋で発生したが、評価基準値5000[μ]を十分に下回っており、応答は弾性範囲に収まった。また同様に、いずれの鋼材についても降伏は生じなかった。

Case2の方がコンクリート・鉄筋・鋼材の損傷は進展しているが、両ケースの解析結果の差異はさほど大きくないため、熱劣化の影響は小さいといえる。

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑧ RPVスカートアンカーの耐力評価

<目的>

RPVスカートアンカー(RPVペDESTAL頂部)について、事故時の高温状態と海水注入による鉄筋腐食による劣化を考慮した場合の構造安全性を評価する。

<評価フロー>

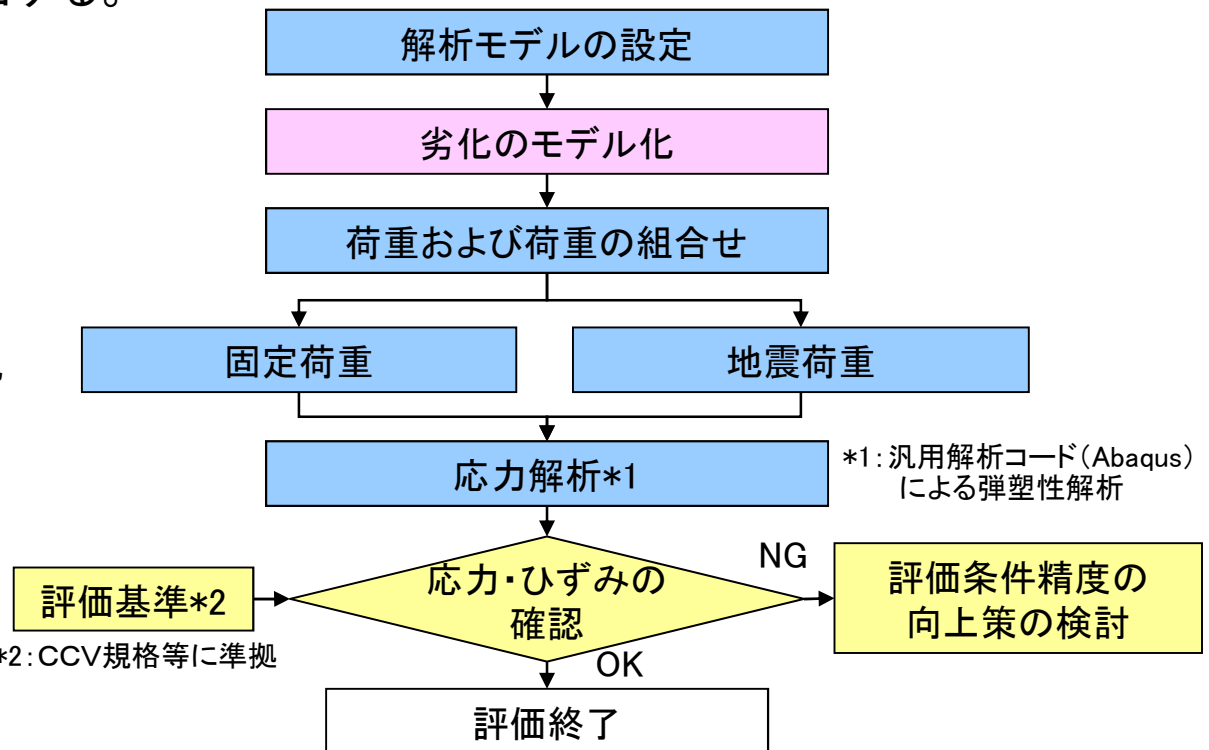
想定される劣化事象をモデルに組込んだ3次元FEMによる弾塑性解析を実施し、地震時に発生する応力・ひずみを求め、CCV規格等*1に基づく評価基準値との比較を行い、基準地震動Ssに対するRPVスカートアンカーの健全性を評価する。

*1: 日本機械学会「発電用原子力設備規格
コンクリート製原子炉格納容器規格」

*2: CCV規格等に準拠

解析ケース

解析ケース	温度条件	荷重条件	備考
Case1	常温	長期軸力+ 地震時引抜荷重	参照ケース
Case2	800℃ -280時間		実機条件



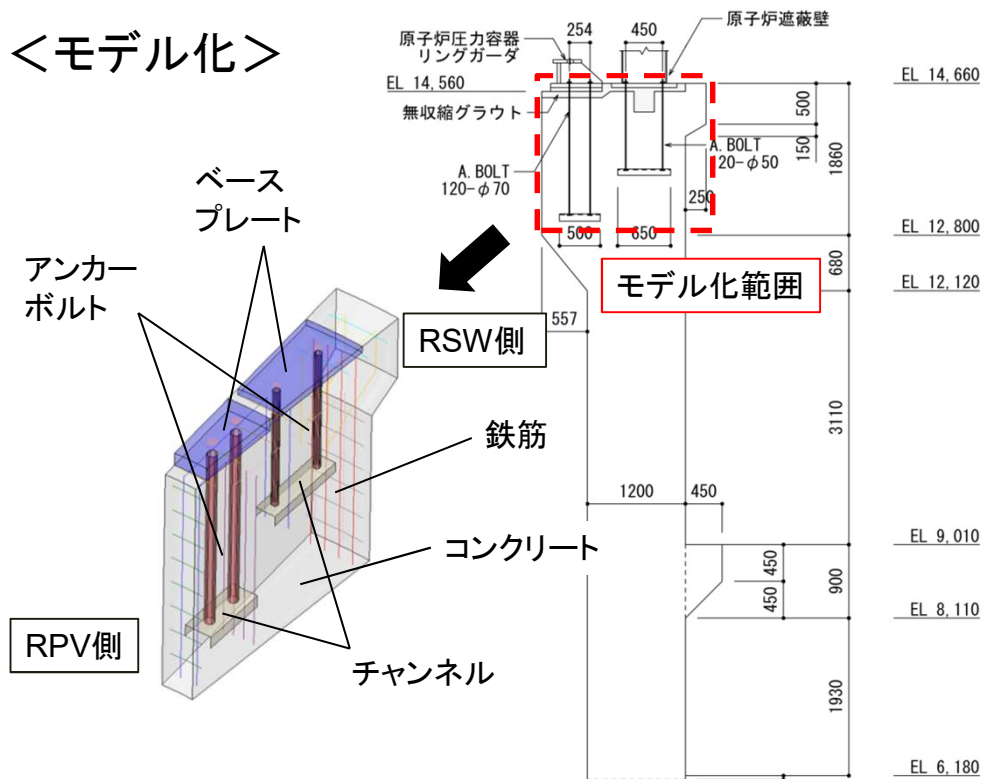
*1: 汎用解析コード(Abaqus)による弾塑性解析

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

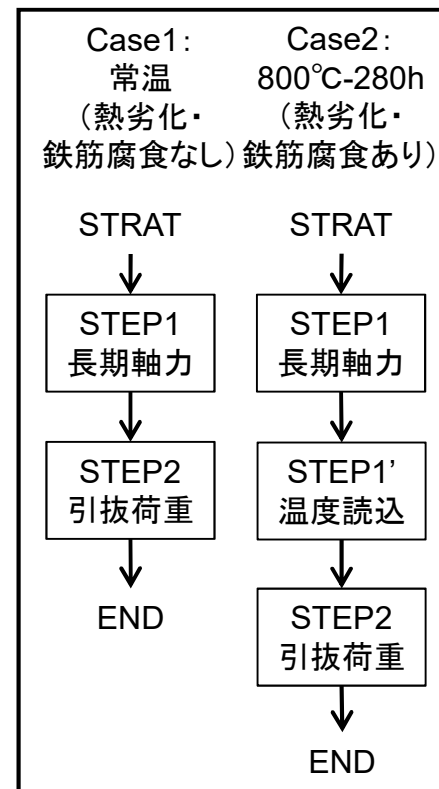
⑧ RPVスカートアンカーの耐力評価

<モデル化>



- ・周期対称性を適用したケーキカットモデル(7°)
- ・コンクリートとアンカーボルトはソリッド要素
- ・鉄筋はトラス要素(コンクリート内に埋め込む)
- ・チャンネルはシェル要素
- ・ベースプレートは剛体としてモデル化
- ・鉄筋は腐食による劣化を考慮し、断面積を減量。

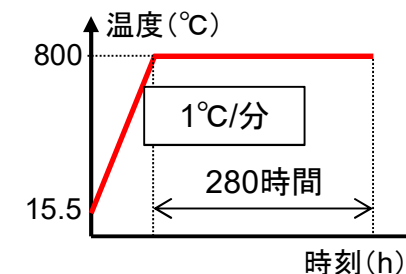
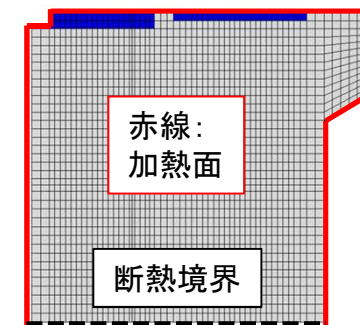
<解析条件>



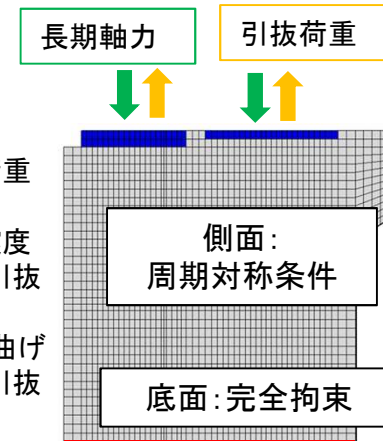
【材料条件】
各種材料試験の結果を用いて熱劣化の影響を σ - ϵ 関係に反映

引抜荷重
||
鉛直震度による引抜
+
地震時曲げによる引抜

伝熱解析



応力解析

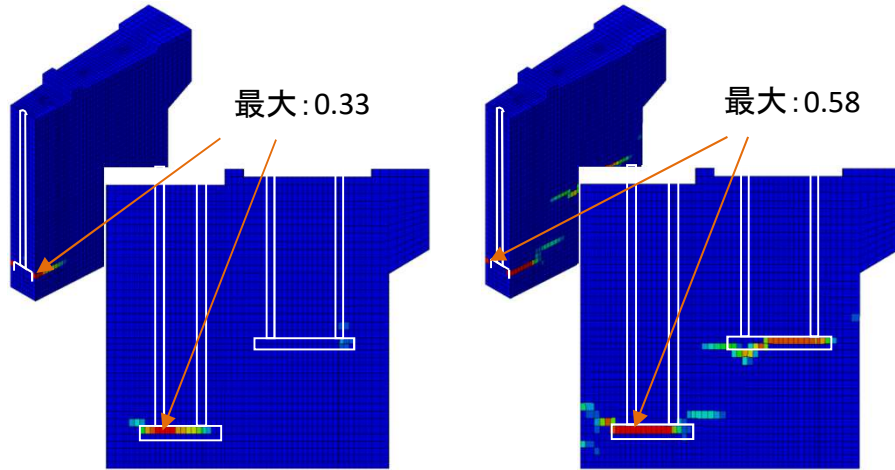


6. 平成26-27年度事業成果

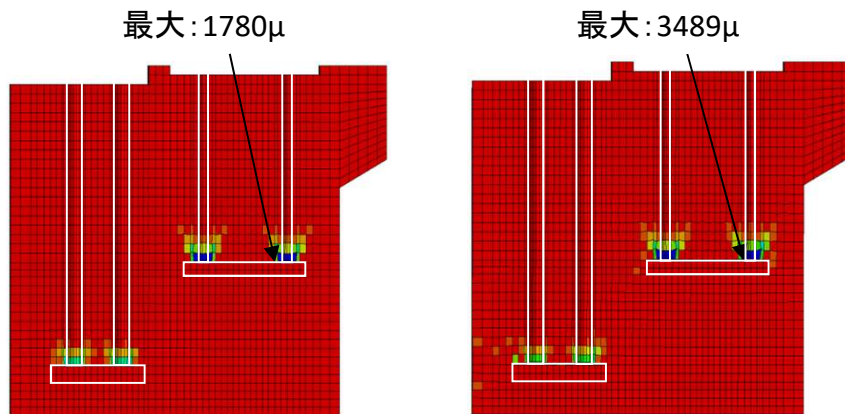
(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑧ RPVスカートアンカーの耐力評価

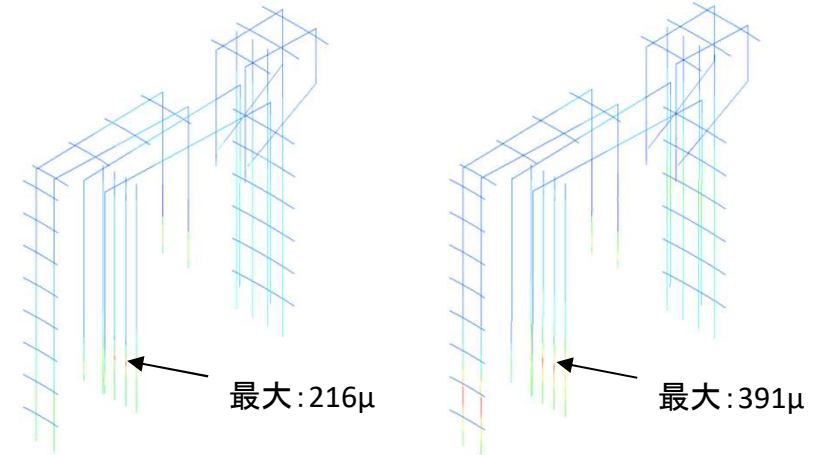
左: 常温ケース、右: 800°C-280hケース



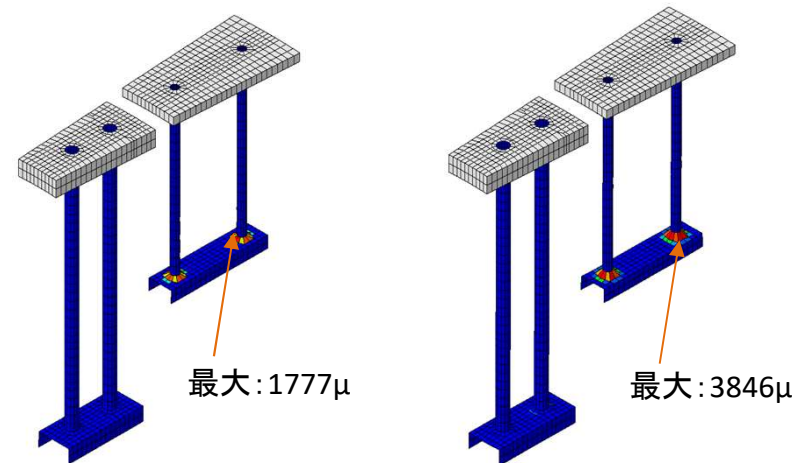
コンクリート引張側損傷値 (0で無損傷、1で破壊)



コンクリート圧縮ひずみ (評価基準値: 3000μ)



鉄筋軸ひずみ (評価基準値: 5000μ)



鋼材引張ひずみ

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑧ RPVスカートアンカーの耐力評価

コンクリート及び鉄筋のひずみと評価基準値との比較

ケース	評価項目	ひずみ(A)	評価基準値(B) ^{*1}	A/B
Case1 常温	コンクリートひずみ	1780 μ	3000 μ	0.60
	鉄筋ひずみ	216 μ	5000 μ	0.05
Case2 800°C-280時間	コンクリートひずみ	3489 μ	3000 μ	1.17
	鉄筋ひずみ	391 μ	5000 μ	0.08

*1: 荷重状態IV (CCVの安全設計上想定される異常な事態)における許容ひずみ

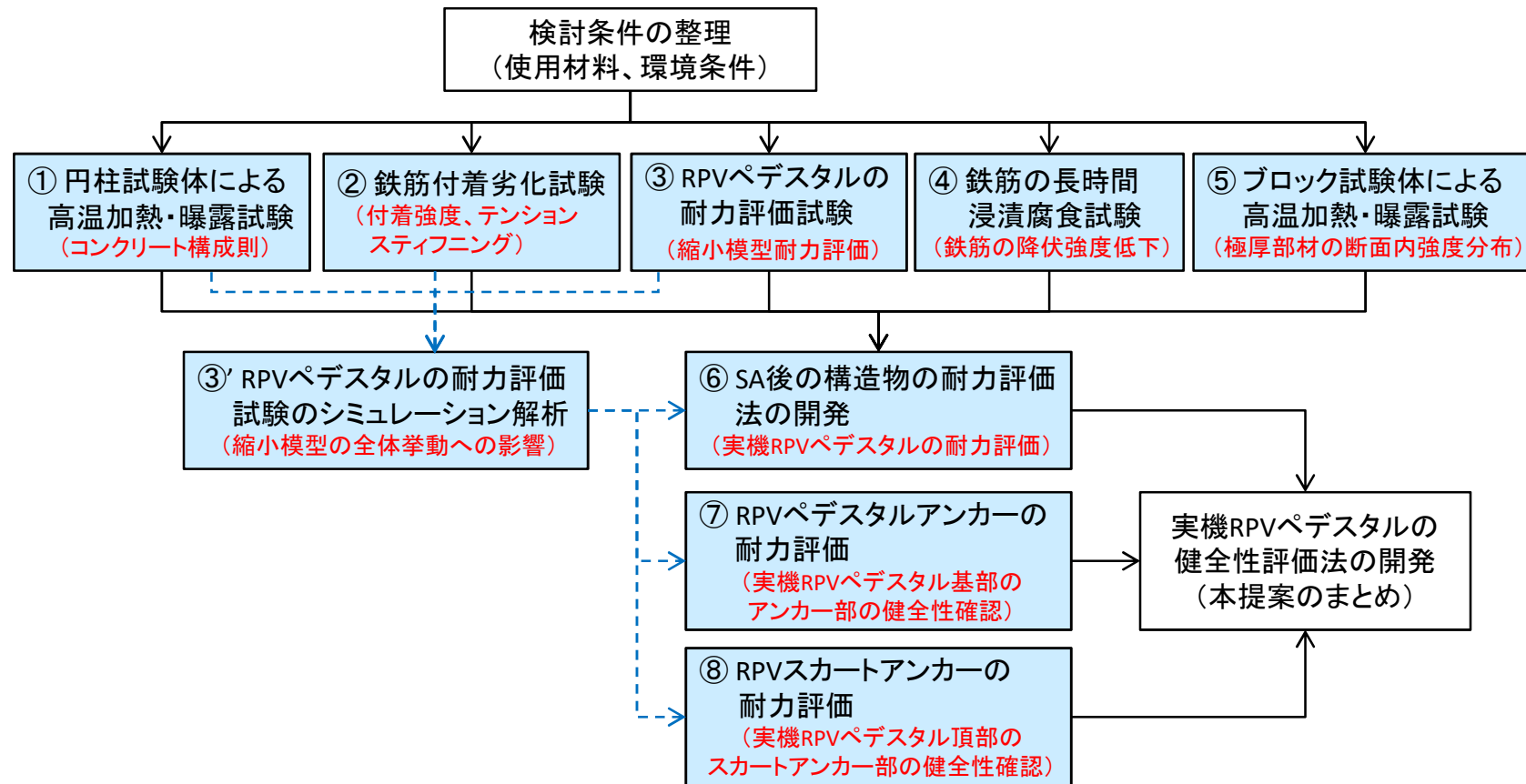
- (1) コンクリートについて、チャンネルにより押し上げ方向に変形するコンクリートに引っ張られ、チャンネルのコの字断面の角部付近のコンクリート要素でひび割れが進展する。また、熱劣化によるヤング係数及び圧縮強度の低下により変形が進むため、Case2で圧縮ひずみが基準値を超える。ただし、これはチャンネル支圧による局所的な塑性変形によるものであり、周辺のコンクリートへと荷重が流れているため、RPVスカートアンカーの構造健全性に及ぼす影響は小さい。
- (2) 鉄筋はいずれのケースでも基準値を大きく下回り、弾性範囲に収まっている。
- (3) 鋼材はいずれのケースでもアンカーボルトとチャンネルの接合部で降伏する。また、熱劣化により降伏点が低下することで変形が進んでいる。

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

⑨ RPVペDESTAL健全性評価

- 下記の検討フローに沿って検討を行い、現状の実機RPVペDESTALの健全性を評価できる**解析モデルを構築**するとともに、**今回の検討で設定した条件**(材料、温度、地震力など)に対して、1F-1号機~3号機のRPVペDESTALは**40年の長期間に渡って構造的に健全である**ことを確認した。



6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

[追加検討] NGとなったケースの検討

付録：簡易評価

- 1F-1の簡易評価において、一部NGとなったH26-2(完全冠水)のせん断力に対する検討について、下記の条件を考慮して追加の検討を実施する。
- ①鉄筋の短期許容応力度として、告示に基づき降伏点を1.1倍し、温度による降伏点低下を考慮した値を用いる。

$$345\text{N/mm}^2 \times 1.1 \times 0.85 = 322\text{N/mm}^2$$

- ②既往の高温酸化腐食の式、および本年度の鉄筋長期腐食試験の結果から、15年後、40年後の配筋量を算定する。腐食減肉量は以下の通りであり、配筋量を下表に示す。

$$15\text{年後} : [\text{高温酸化}]0.775\text{mm} + [\text{長期腐食}]0.28\text{mm} = 1.055\text{mm}$$

$$40\text{年後} : [\text{高温酸化}]0.775\text{mm} + [\text{長期腐食}]0.48\text{mm} = 1.255\text{mm}$$

号機		腐食前	15年後 ^{*1}	40年後 ^{*1}
1F-1	タテ筋	1.59% (2-D35@100)	1.39% (0.88)	1.36% (0.86)
	ヨコ筋	0.42% (2-D25@200)	0.35% (0.84)	0.34% (0.81)

*1:()内は、工認図書に記載の配筋量(腐食前)に対する比

6. 平成26-27年度事業成果

(5) ペデスタルの侵食影響評価

[追加検討] 検討結果

付録：簡易評価

・ 検討結果を下表に示す。

ケース	壁厚 T (m)	断面積 A (m ²)	形状 係数 α	評価 時点	配筋 上段:タテ筋 下段:ヨコ筋 (at=cm ² /m) (P:%)	せん断力	許容せん断力		応力比	判定	
						Q (kN)	Q _{a1} (kN)	Q _{a2} (kN)	Q/max(Q _{a1} ,Q _{a2})		
H26-2 a)	1.20	22.45	2	15年後	at=83.4 Pg=1.39	10800	9990	43373	0.25	○	
					at=21.0 Ps=0.35			12650	0.86	○	
at=83.4 Pg=1.39					11800	43373		0.28	○		
at=21.0 Ps=0.35						12650		0.94	○		
H26-2 b)				40年後	at=81.6 Pg=1.36	10700	9990	43373	0.25	○	
					at=20.4 Ps=0.34			12289	0.88	○	
H26-2 c)					at=81.6 Pg=1.36	11800		9990	43373	0.28	○
					at=20.4 Ps=0.34				12289	0.97	○
H26-2 d)											

*1:コンクリートの許容せん断応力度 : 0.89 N/mm² (= 1.5 × F_c'/30)

*2:鉄筋の許容応力度 : 322N/mm² (=σ_y)

鉄筋の降伏点を1.1倍し、かつ今年度の鉄筋長期腐食試験の結果を用いれば、評価判定はOKとなる。

7. まとめ

(1) PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価

・1号機のコラムサポート、2、3号機のコラムサポート及び耐震サポートが耐震強度上、厳しい結果となった。これらについては、S/C脚部補強により対応していくことが望ましいが、汚染水の建屋外への漏えい抑制等の観点から、S/C脚部補強なしでの耐震性に関する弾塑性解析による詳細評価を追加実施した。1号機のコラムサポートについては、今回の評価ケースにおいて、許容値を満足することを確認した。2、3号機のコラムサポート及び耐震サポートについては、ダウンカマ止水のケースでは許容値を満足しなかったが、ストレナ止水のケースでは許容値を満足することを確認した。

(2) PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価

・今後の廃炉工程次第で大きく変動する可能性があり、かつ地震応答解析に影響するパラメータ(D/W水位など)を抽出・選定し、パラメータケースでの地震応答解析により、各質点の発生荷重の倍率等を整理した。さらに、各パラメータによる影響を分析・評価して、地震応答解析に影響が大きいパラメータを抽出し、そのパラメータの各質点の発生荷重の倍率等を組合せることにより、機器の耐震強度の簡易評価手法を開発した。

7. まとめ

(3) 腐食抑制策の開発

- ・防錆効果の確認試験や副次的悪影響の評価試験を実施し、1Fへ適用可能な防錆剤候補として、タングステン酸ナトリウム、五ホウ酸ナトリウム、亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩及び亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩の4種に絞り込んだ。

(4) 長期の腐食減肉量の予測の高度化

- ・長時間(10000h)の腐食試験を実施し、燃料デブリ取出しまでの長期間の腐食減肉量を予測できるモデル式を精緻化した。
- ・燃料デブリや炉内コンクリートからの溶出成分による腐食影響について調査し、その影響は小さいことを確認した。

(5) ペDESTALの侵食影響評価

- ・円柱試験体、鉄筋付着劣化試験体、縮小模型試験体、鉄筋腐食試験体及びブロック試験体の各試験体を製作し、高温加熱・気中／水中暴露試験を実施し、コンクリート強度や鉄筋腐食データを取得した。
- ・取得したデータをもとに、実機RPVペDESTALの健全性を評価できる解析モデルを構築するとともに、今回の検討で設定した条件(材料、温度、地震力、デブリ侵食など)では、1～3号機ともに40年の長期間、健全であることを確認した。

8. 今後の課題

【廃炉に適用する新しい規格・基準の策定】

- ・これまでの本事業における強度計算では、簡易的かつ保守的にプラント建設時の工認計算方法を採用しており、その発生応力に対する許容値(判定基準)として、原子力の規格・基準に基づく通常の許容値体系を適用し、その許容値を超える場合には、実力値として設計引張強さ(Su値)を用いている。その判定基準として、現行の原子力関連の規格・基準類による許容値体系に囚われず、特定原子力施設としての機器に要求される機能維持を確保可能かという観点で設定することを検討するため、今後、事業者と協議し、専門部会(有識者による新しい部会の立上げを含め)を活用しながら評価体系の仕組みを提示し、規制庁殿と折衝していく必要がある。

【検査・補修・補強方策】

- ・本プロジェクト成果をもとに、検査・補修・補強方策をアウトプットするためには、機器設計や構造の専門家の増強やプロジェクトの新設も含めた体制の見直しに関する検討が必要である。

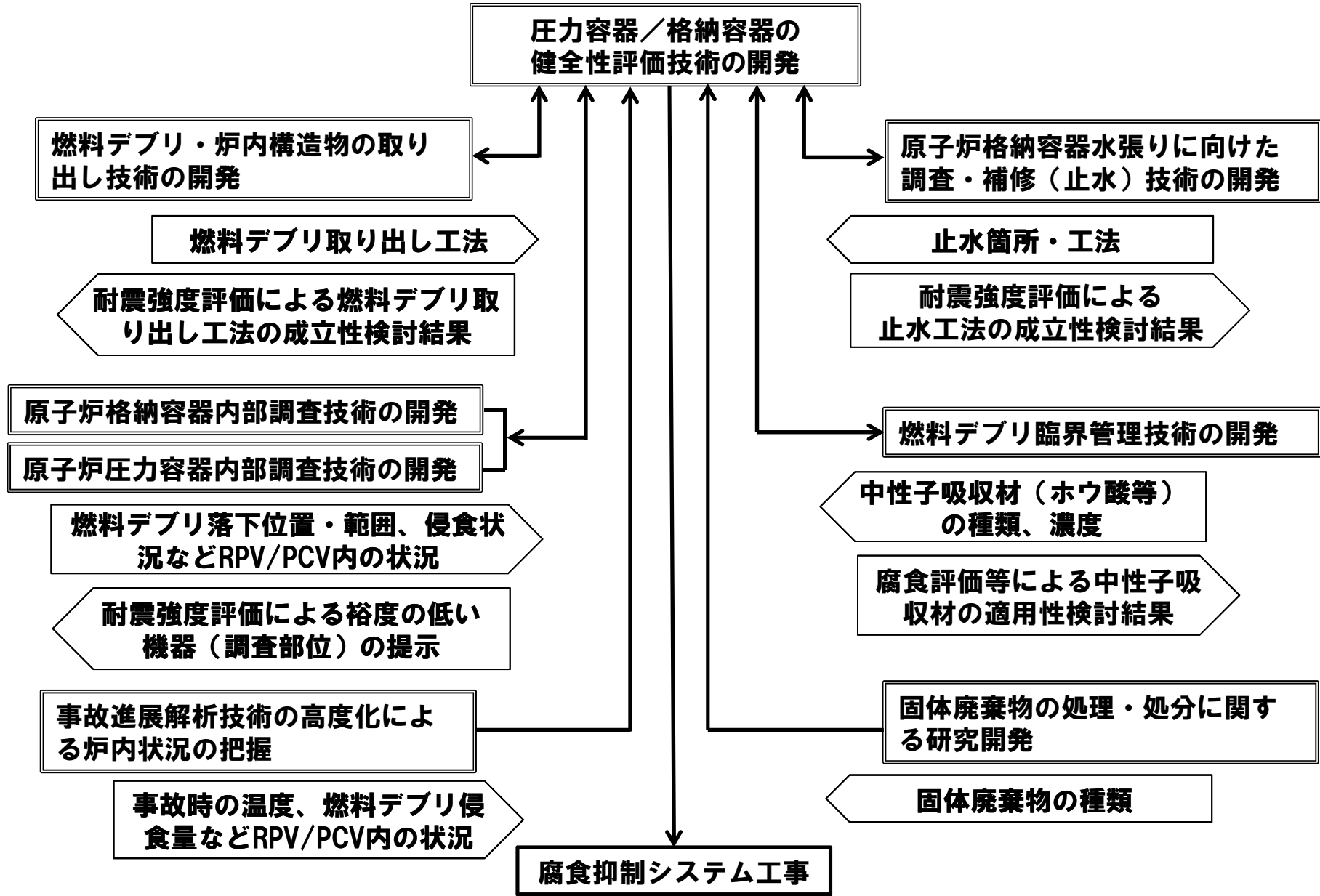
【安全シナリオの構築】

- ・大規模地震時の圧力容器／格納容器内の重要機器の安全シナリオを構築し、その影響を防止・抑制する対策を評価する手法の開発が必要である。

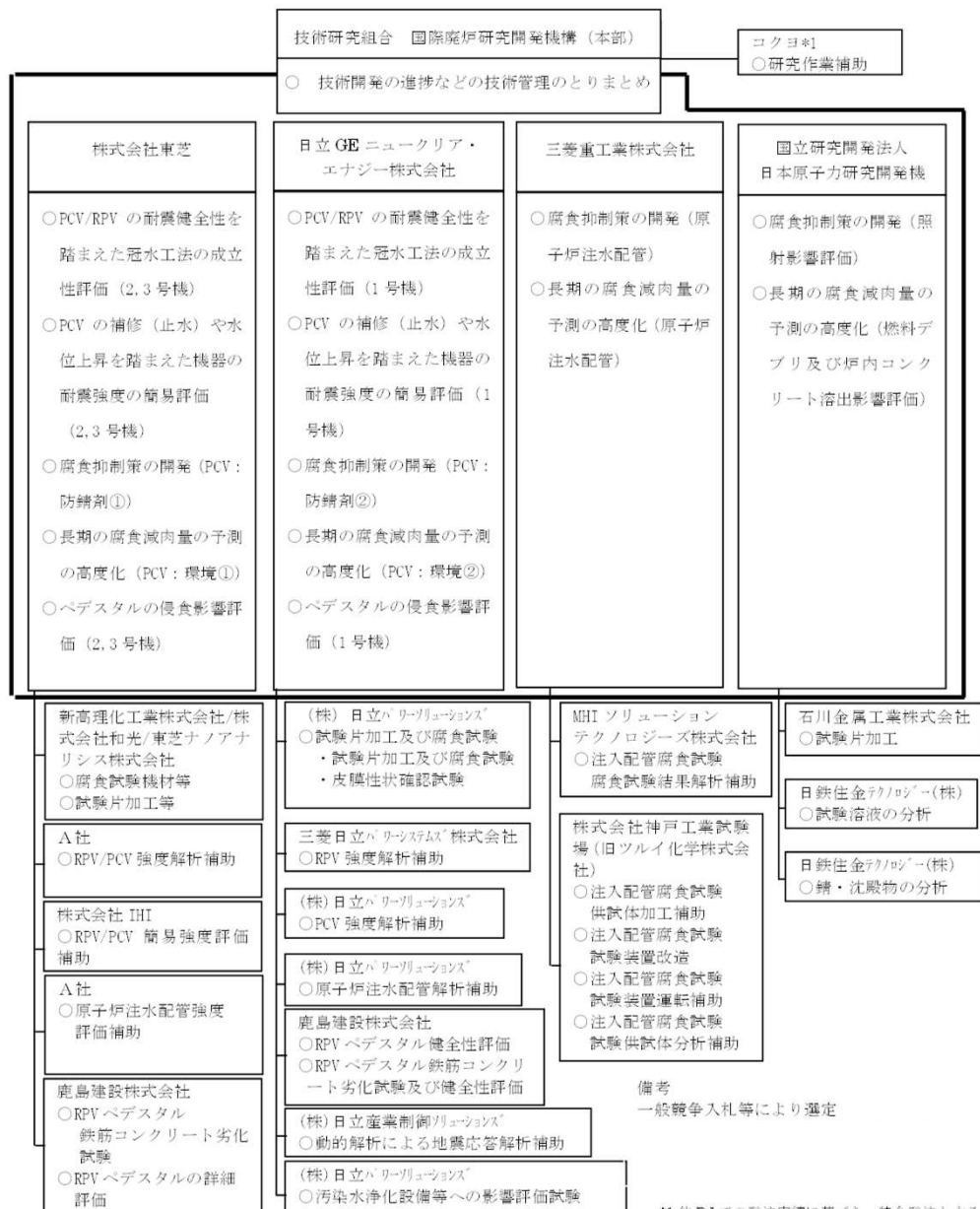
【腐食抑制策の開発】

- ・1Fに適用可能な腐食抑制策(防錆剤の種類、添加濃度など)と、そのシステムの概念設計及び管理要領を平成28年度までに提示する計画である。現場のあらゆる状態を想定し、防錆剤適用による悪影響(水処理設備の機能影響や廃棄物量の増加など)のないことも確認し、現場適用への見通しを立てていく計画である。

参考図 他研究開発プロジェクトとの関係



補足 実施体制



*1 他PJでの発注実績に基づき、特命発注とする。