

福島第一原子力発電所
廃炉検討委員会セッション
個別セッション(C-1)

原子炉圧力容器／格納容器の構造健全性

平成27年9月11日

国際廃炉研究開発機構 (IRID)

高守 謙郎

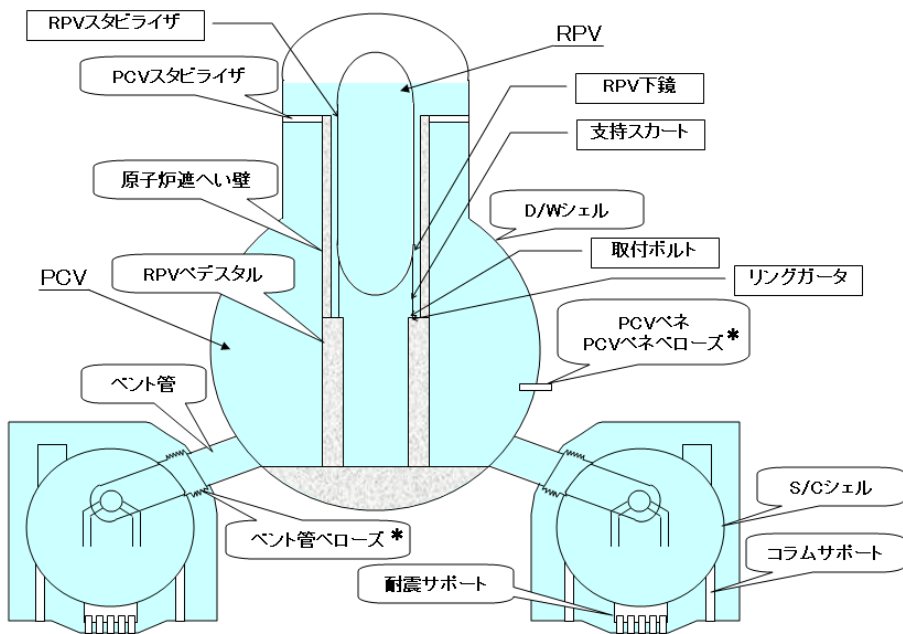
本報告は、平成25年度及び26年度廃炉・汚染水対策事業費補助金(資源エネルギー庁)において
IRIDが補助事業者となりその組合員が実施した成果の一部を含んでいます

- 1. 目的**
- 2. 実施概要**
- 3. 腐食評価**
- 4. 構造健全性試験評価**
- 5. ここまでのまとめ**
- 6. 主な課題**
- 7. 今後の実施事項**

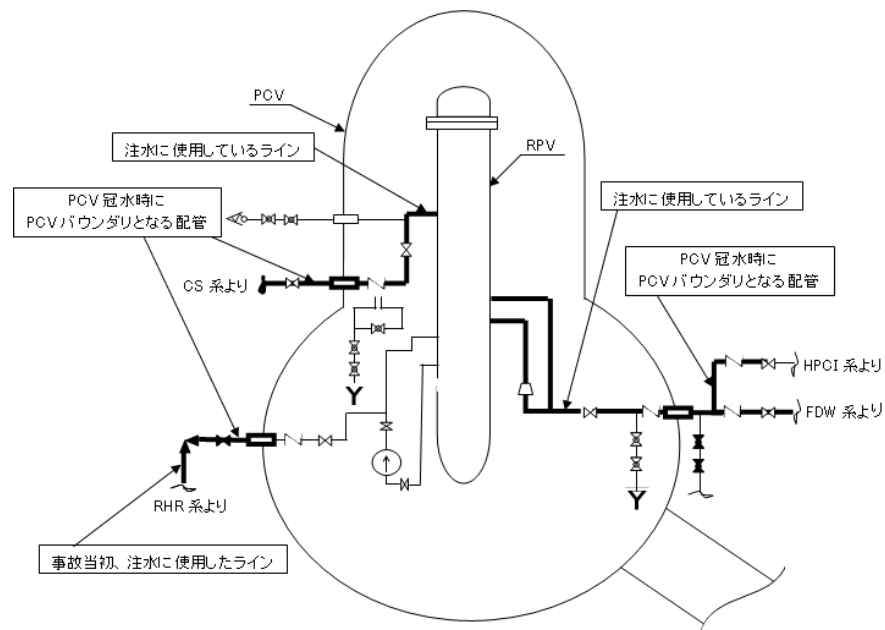
1. 目的

燃料取り出し等廃炉作業を通じ、格納容器等の構造維持を確実にすること

- 原子炉圧力容器 (RPV) / 原子炉格納容器 (PCV) の構造健全性を評価する。
 - ・ 燃料デブリ落下の影響や将来にわたる腐食による経年劣化を考慮した耐震強度評価
 - ・ 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。
- 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検討を行う。



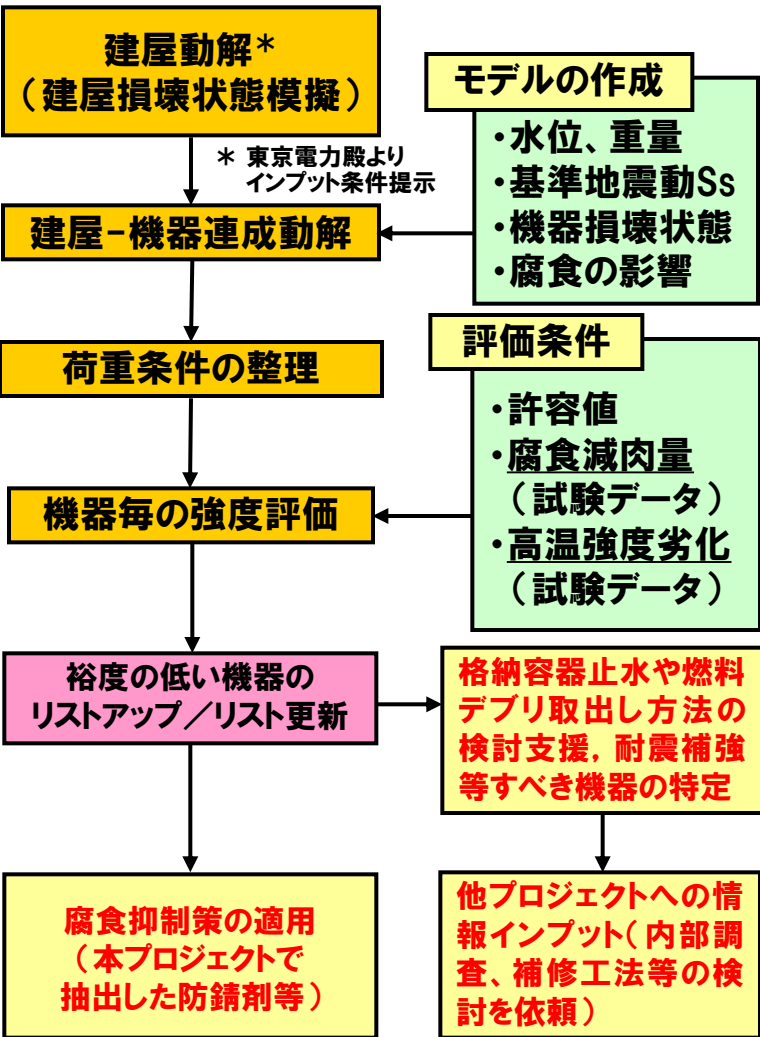
原子炉格納容器概念図



原子炉圧力容器への注水等配管の概念図

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				
プラント /ケース	1F-1	1F-2	1F-3	
現況 (想定)	 ○ 現状想定 ・建屋損傷 ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・ペント管内:満水 ・真空破壊管内:満水 ・トラス室水位 :OP3680	 ○ 現状想定 ・建屋健全 ・D/W水位:約0.6m ・S/C内:OP3100 ・ペント管内:底部流水 ・トラス室水位 :OP3200	 ○ 現状想定 (事故後約3年) ・建屋損傷 ・D/W水位:約6.5m ・S/C内:満水 ・ペント管内:満水 ・トラス室水位 :OP3200	
部分 冠水 他	 ○ トラス室水位制御 ・建屋損傷 ・オベフロ階付加設備 :約5100t ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・ペント管内:満水 ・真空破壊管内:満水 ・トラス室水位 :OP-300	 ○ PCV部分冠水 ・オベフロ階付加設備 :約5500t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約5m ・S/C内: コンクリート OP1900 ・ペント管内:補修考慮 ・トラス室水位 :OP-300	 ○ PCV部分冠水 ・オベフロ階付加設備 :約3900t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約6.5m ・S/C内: コンクリート OP1900 ・ペント管内:補修考慮 ・トラス室水位 :OP-300	
冠水 S/C 補強 他	 ○ S/C補強 ・建屋損傷 ・オベフロ階付加設備 :約5100t ・D/W水位:約0.3m ・S/C内: コンクリート OP3570 ・ペント管内:空気 ・真空破壊管内:空気 ・トラス室水位 :OP-300, コンクリート OP-485	 ○ PCV冠水 ・オベフロ階付加設備 :約5500t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約35m ・S/C内: コンクリート OP1900 ・ペント管内:補修考慮 ・トラス室水位 :OP-300	 ○ PCV冠水 ・オベフロ階付加設備 :約3900t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約35m ・S/C内: コンクリート OP1900 ・ペント管内:補修考慮 ・トラス室水位 :OP-300	

1～3号機の現状及びPCV冠水までに想定されるプラント状態
(現状及び将来の止水方法や冠水レベルの仮定と評価)

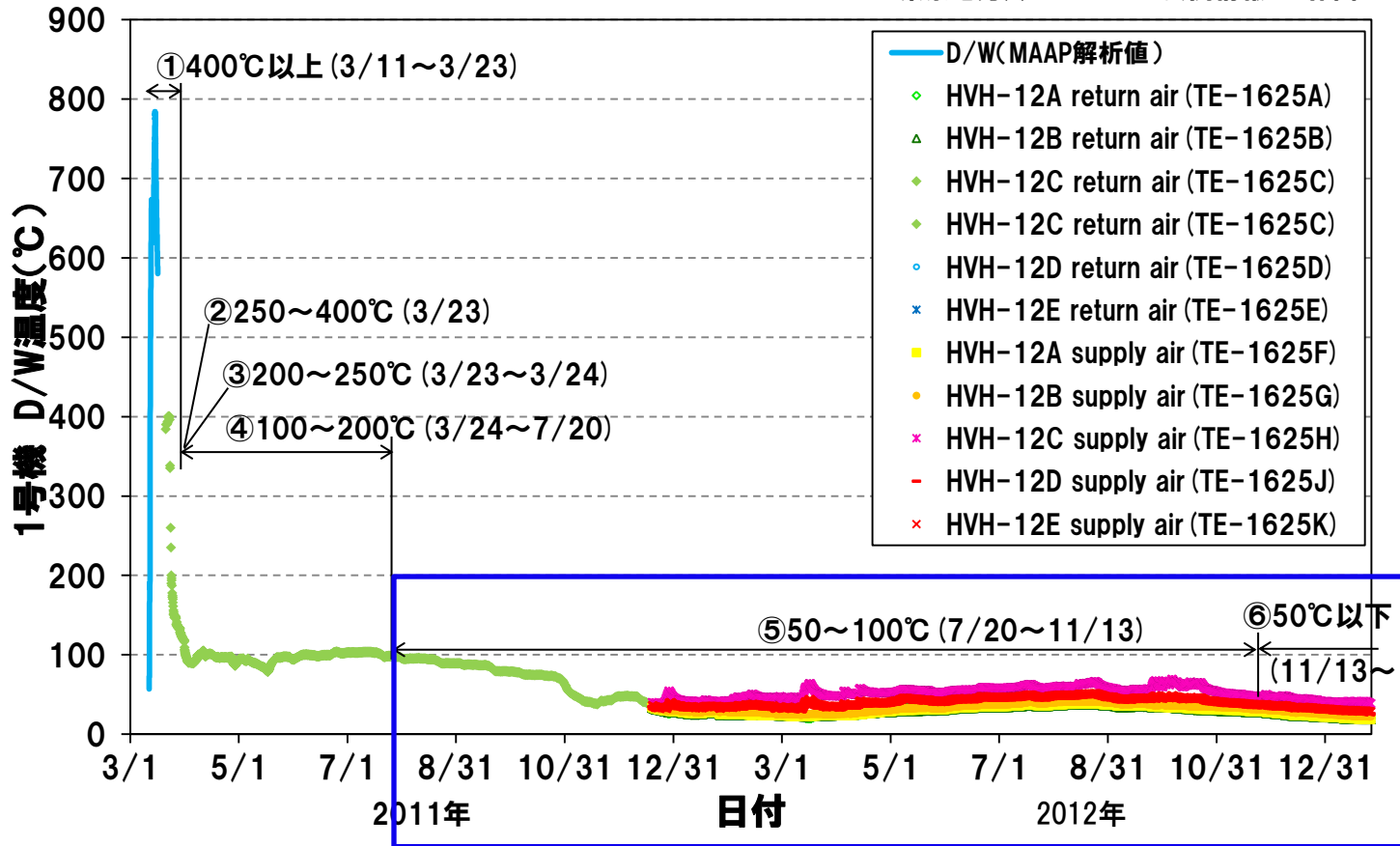
1F: 福島第一原子力発電所

腐食減肉量等を考慮した耐震強度評価(機器余寿命評価)の概略フロー(例)

3.1 腐食評価に考慮すべきパラメータ(例:温度履歴)

● PCV実機温度区分の分類(例)

東京電力(株)ホームページ公開情報より作図



- 腐食試験データを基に推定減肉量を算出
- その他の期間は文献データ及び電力中央研究所提供データより推定減肉量を算出

震災以降の温度履歴(1号機PCV(D/W)の例)

震災以降の温度履歴を①400°C以上、②250~400°C、③200~250°C、④100~200°C、⑤50~100°C、⑥50°C以下の6つの温度期間に分類し、PCV腐食減肉量を評価する。

3. 2 腐食評価に考慮すべき主要パラメータ

環境面の主要パラメータ

温度

- 腐食速度に影響 (80℃付近が最大)
- 1F: 事故直後は高温、徐々に冷却

溶存酸素(DO)

- 腐食速度に影響(中性環境では最重要因子)
- 1F: 注水への窒素バブリング、PCV窒素封入

pH

- 腐食形態に影響
- 1F: ほぼ中性。ほう素注入の影響

海水成分、照射、ほう素、塗膜劣化、異種金属接触

- 1F特有の外乱要因として実機条件を考慮した影響評価を実施

流速

- 腐食速度・形態に影響
- 1F: 注水配管の寿命評価

材料面の主要パラメータ

鋼種 (炭素鋼 (PCV)、低合金鋼 (RPV))

金属組織 (母材, 溶接部, 熱履歴)

腐食劣化

3.3 腐食試験計画




- ・まず、PCV, 配管等の事故時及び長期的腐食減肉量予測評価を行う
- ・事故直後から燃料取出しまでの全期間を網羅的に腐食評価できる試験条件を策定

(1) (2) (3)

腐食影響因子 (環境面)	温度:100℃以上	温度:50~100℃以下	温度:50℃以下
温度	○ (100~288℃)	○ (80℃)	○ (50℃)
溶存酸素濃度 (DO)	○ (温度が高く(大気圧) 脱気状態と推定 (脱気状態(大気飽和)))	○ (大気開放(大気飽和))	○ (大気開放(大気飽和))
海水濃度	○ (海水注水)	○ (希釈海水)	○ (希釈海水)
pH	○ (中性もしくは酸性(ほう酸 の効果による))	○ (中性もしくは酸性(ほう酸 の効果による))	○ (中性もしくは酸性(ほう酸 の効果による))
ほう素	○ (臨界防止(ほう酸又は五 ほう酸ナトリウム))	○ (臨界防止(ほう酸又は五 ほう酸ナトリウム))	○ (臨界防止(ほう酸又は五 ほう酸ナトリウム))
照射	○ (海水注水)	○ (希釈海水)	○ (希釈海水)
腐食抑制策 (防錆剤、窒素脱気)	—	—	○ (希釈海水)
防錆剤+照射	—	—	○ (希釈海水)

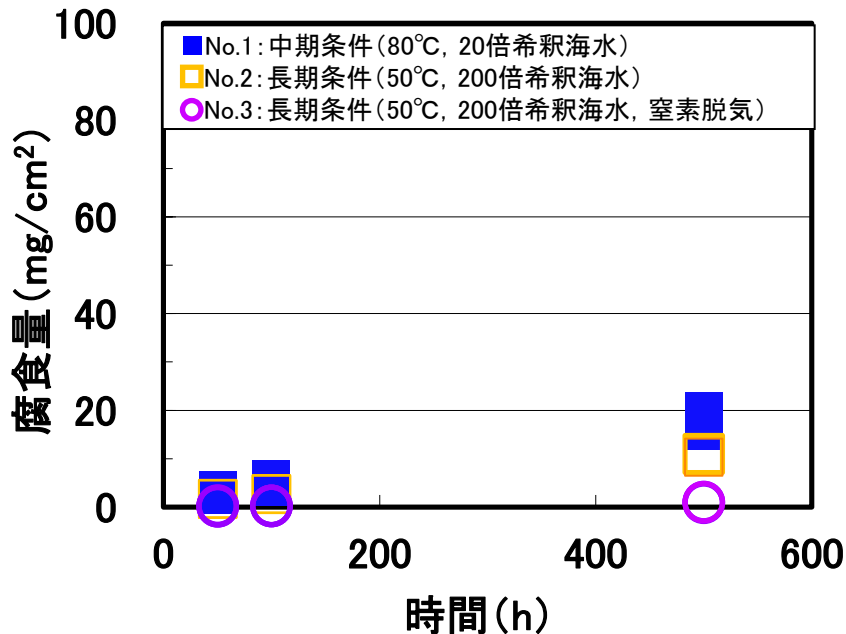
- 既存研究データから腐食影響因子を抽出
- シビアアクシデント以降の事故履歴データに基づき、事故後のプラント状態を分類

- (1) 事故直後の高温の期間
(短期)
- (2) 冷温停止状態到達までの
中温の期間(中期)
- (3) 冷温停止後の低温の期間
(長期)

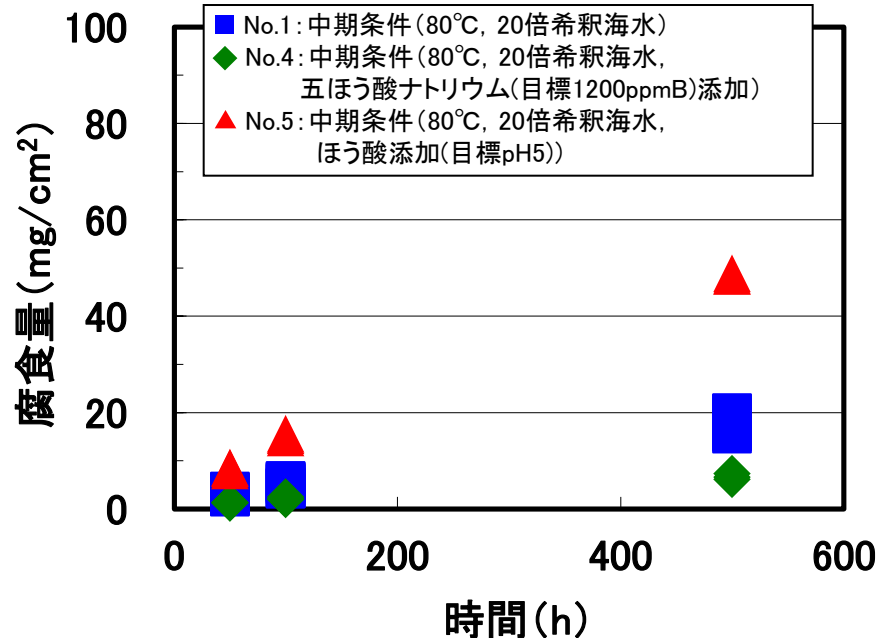
-  : IRID実施(東芝、日立GE、三菱重工)にて試験を実施
-  : 電力中央研究所にて試験を実施(技術協力)
-  : 日本原子力研究開発機構にて試験を実施(技術協力)

3.4 腐食試験結果

● PCV材(炭素鋼SGV480) 腐食量算出結果(例)



腐食量算出結果(1)(試験No.1、2、3)



腐食量算出結果(2)(試験No.1、4、5)

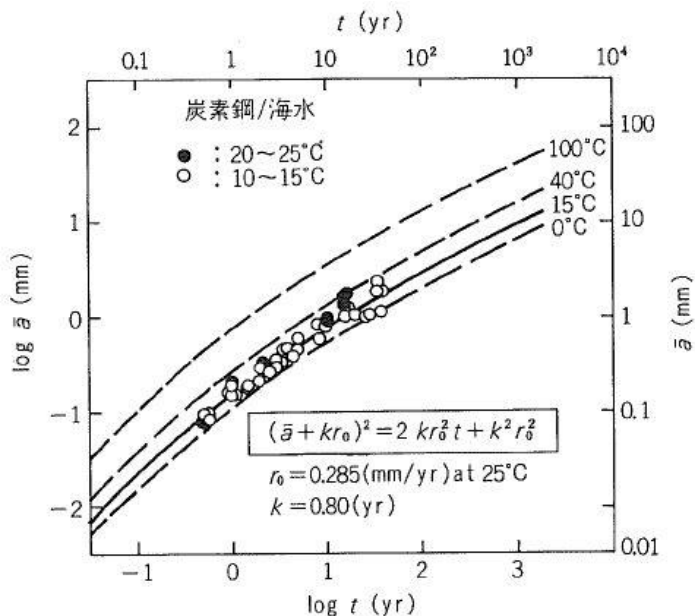
- ・温度および塩化物イオン濃度の低下により、腐食量が小さくなることが確認された。
- ・窒素脱気による腐食抑制効果が確認された。
- ・五ほう酸ナトリウム添加による腐食量の減少とほう酸添加による腐食量の増加が確認された。

3.5 腐食減肉の推定-1

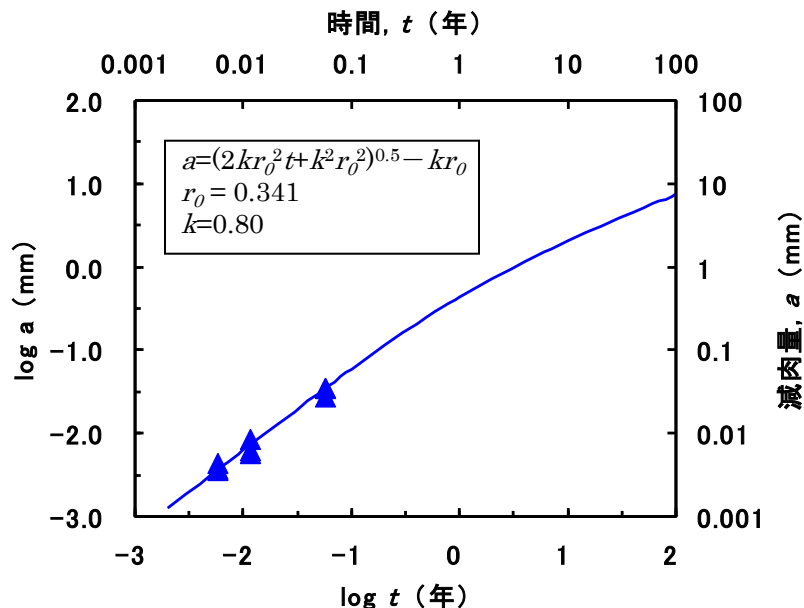
● 腐食速度の検討（100℃以下の期間(⑤50～100℃以下、⑥50℃以下)）

一般に中性自然海水環境における炭素鋼の腐食進行は溶存酸素拡散支配であり、時間の経過と共に腐食速度は時間の経過と共に減少することが知られている*)。腐食進展速度式モデルの一例として、式(1)のように減肉量が時間の1/2乗に比例するモデルがあり、炭素鋼／自然海水系の文献データを式(1)で整理した場合、速度定数kを0.80としたモデルとデータが良く一致している*)。

$$(a + kr_0)^2 = 2kr_0^2 t + k^2 r_0^2 \quad \dots(1) \quad \begin{array}{l} a: \text{減肉量(mm)}, t: \text{時間(y)} \\ r_0: \text{初期速度(mm/y)}, k: \text{速度定数(y)} \end{array}$$



炭素鋼／海水系の平均腐食進展*)



試験データの放物線則近似結果(No.1の例)

式(1)を用いて試験データを近似した曲線(1/2乗則モデル)で減肉量を算出する

3.6 腐食減肉の推定-2

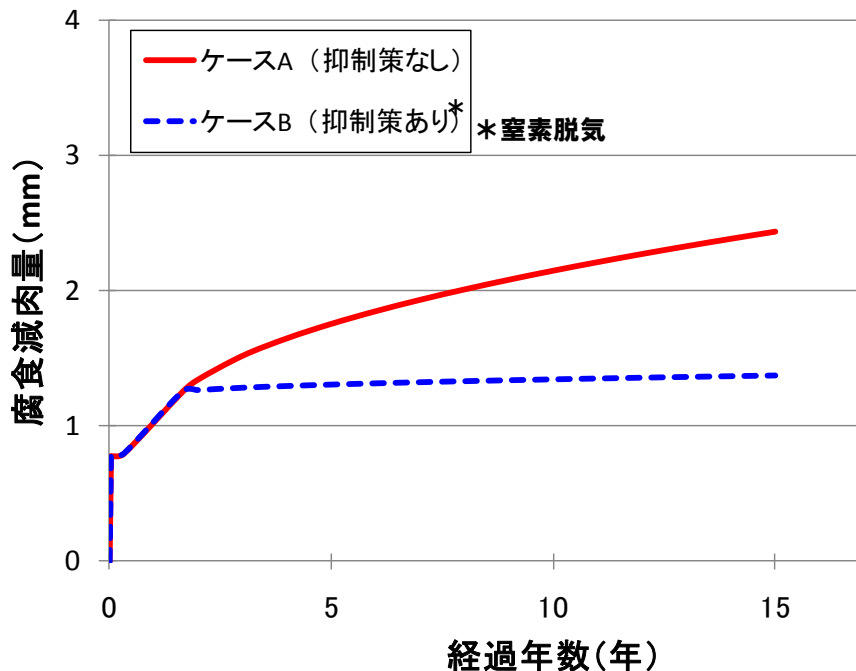
PCV設備(炭素鋼SGV480)の減肉量算出に用いる腐食速度(例)

条件	震災直後の高温期間				冷温停止状態到達までの 中温の期間	冷温停止後の低温の期 間
	①400°C以上 ¹⁾	②250~ 400°C	③200~ 250°C	④100~ 200°C	⑤50~100°C	⑥50°C以下
ケースA (抑制策なし)	$a=(10^u \times 3600 \times t)^{0.5} \times 10$ a: 減肉量(mm)、 t: 酸化時間(h)、 u: 鋼種係数(炭素鋼 の場合、 $u = -9.93 \times (1/T \times 10^3) + 1.03$ T: 酸化温度(K)	0.36mm/y	0.22mm/y	0.06mm/y	$a=(2kr_0^2t+k^2r_0^2)^{0.5}-kr_0$ a: 減肉量(mm) t: 時間(year) k: 速度定数 (k=0.8) r ₀ : 初期速度 (r ₀ =0.303)	$a=(2kr_0^2t+k^2r_0^2)^{0.5}-kr_0$
ケースB (抑制策あり(窒素脱気))						$a=(2kr_0^2t+k^2r_0^2)^{0.5}-kr_0$ a: 減肉量(mm) t: 時間(year) k: 速度定数 (k=0.8) r ₀ : 初期速度 (r ₀ =0.030)

- ①の期間は、高温蒸気環境であると仮定し、高温酸化によるスケール成長挙動式¹⁾を適用。
- ②~④の期間は、高温海水環境中腐食試験を基に算出した腐食速度を適用。
- ⑤、⑥の期間は、本事業で実施した腐食試験データを基に算出した腐食速度を適用。

3.7 腐食減肉の推定-4

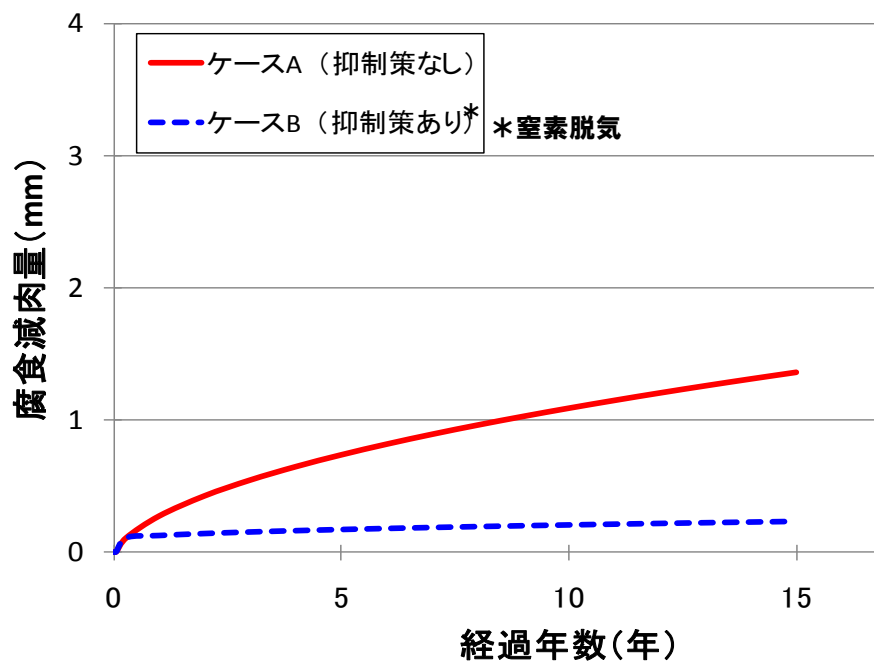
● 推定減肉量の算出(1号機PCV(例))



推定減肉量の推移(1号機PCV(D/W)の例)

D/Wの推定減肉量(1号機の例) 単位:mm

ケース	5年	10年	15年
ケースA(抑制策なし)	1.76	2.15	2.44
ケースB(抑制策あり)	1.31	1.35	1.37



推定減肉量の推移(1号機PCV(S/C)の例)

S/Cの推定減肉量(1号機の例) 単位:mm

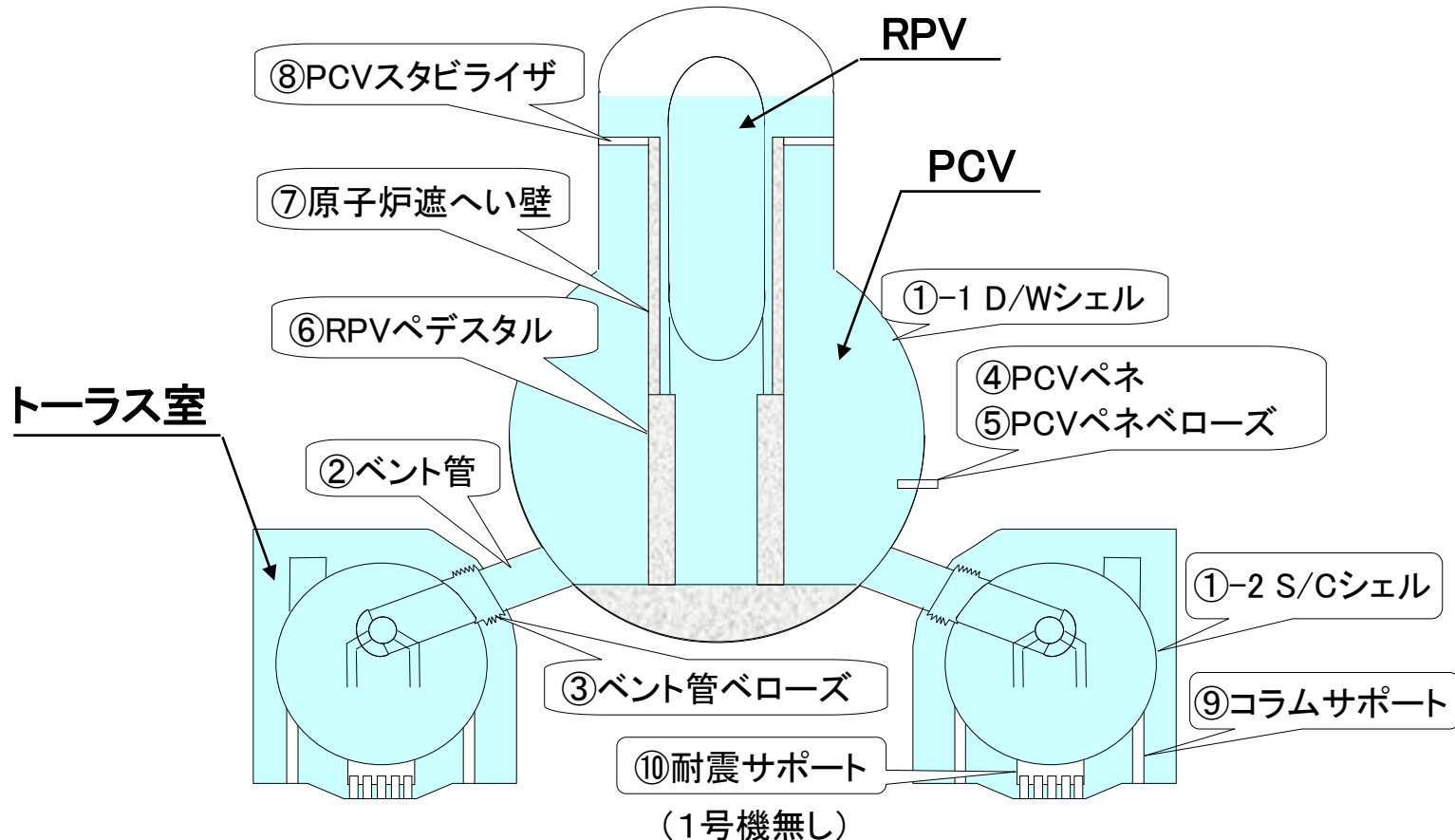
ケース	5年	10年	15年
ケースA(抑制策なし)	0.74	1.09	1.36
ケースB(抑制策あり)	0.18	0.21	0.24

推定減肉量は、いずれもケースBの方が大きく低減される結果となった。(2/3号機も同様)

4.1 構造健全性試評価-1

● 評価設備の選定(PCV(例))

腐食減肉によって構造強度が低下した場合の「PCVバウンダリ機能喪失」及び「PCV支持機能喪失」への影響を考慮し、下図の①～⑩を選定した。



PCV評価対象設備

4.2 構造健全性試評価-2

● 試評価方針

(1) 評価部位の選定

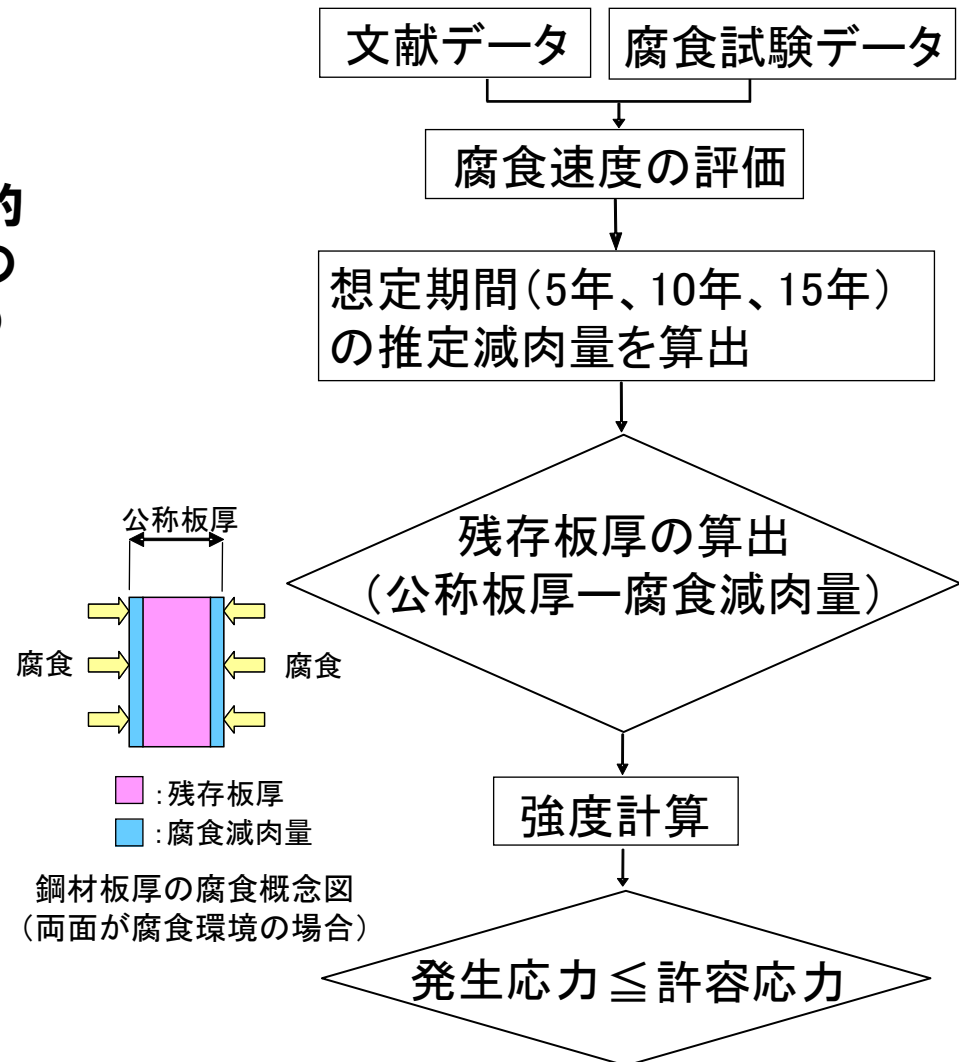
健全な状態(腐食発生前)で裕度が比較的小さい部分を代表として選定。2、3号機の形状はほぼ同様であるため、3号機のものとした。

(2) 推定減肉量

震災後5年、10年、15年を想定して文献データおよび腐食試験データにより算出した。

(3) 応力評価

(2)を考慮し、公称板厚から減肉させた状態でPCV及びトラス室冠水状態を想定した基準地震動Ss波(建屋健全モデル)に対する一次応力を試評価した。許容値は、JSME* 発電用原子力設備規格 設計・建設規格等の供用状態Ds(50℃)を用いた。



1~3号機PCVの試評価概略フロー(例)

4.3 構造健全性試評価-3

評価結果(1号機)

評価設備: 図1参照

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

1号機 ドライウェル推定減肉量(片面) (mm)

事故後	10年	15年
推定減肉量	2.15	2.44

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
推定減肉量	1.09	1.36

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)

評価ケース	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
25-1	124	423	3.41
25-2	140	423	3.02
25-3	128	423	3.30

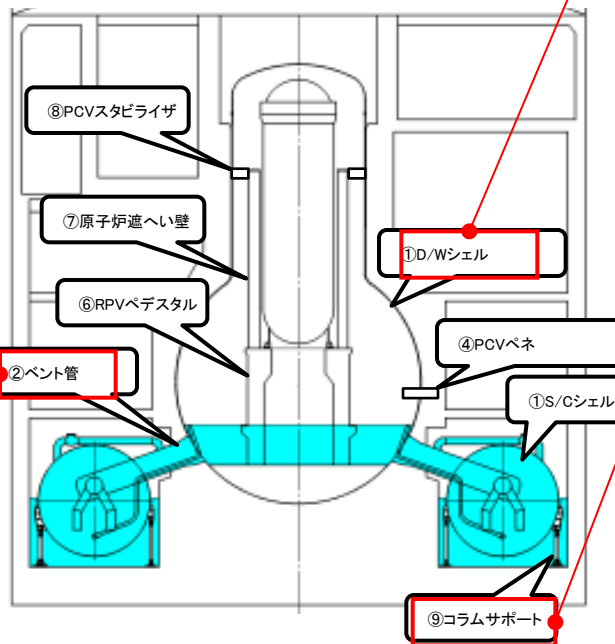
<評価ケースについて>

ケース25-1: 腐食10年後相当
 ケース25-2: 腐食15年後相当
 ケース25-3: 腐食15年後相当

評価結果:

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

評価ケース	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
25-1	117	423	3.61
25-2	142	423	2.97
25-3	144	423	2.93



⑨ 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

評価ケース	組合せ応力 (圧縮+曲げ) $\sigma_c / f_c + \sigma_b / f_b$	許容値	裕度
25-1	1.083	1	0.92
25-2	0.946	1	1.05
25-3	2.354	1	0.42

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)

図1 評価設備(例: ケース25-1)

PCVバウンダリ機能の評価部位は発生応力が許容値を下回ったが、S/C支持構造物は上回るケースがあった。これらについては、詳細評価や補強対策の検討を進め、今後の方針を判断していく。

5. ここまでのまとめ

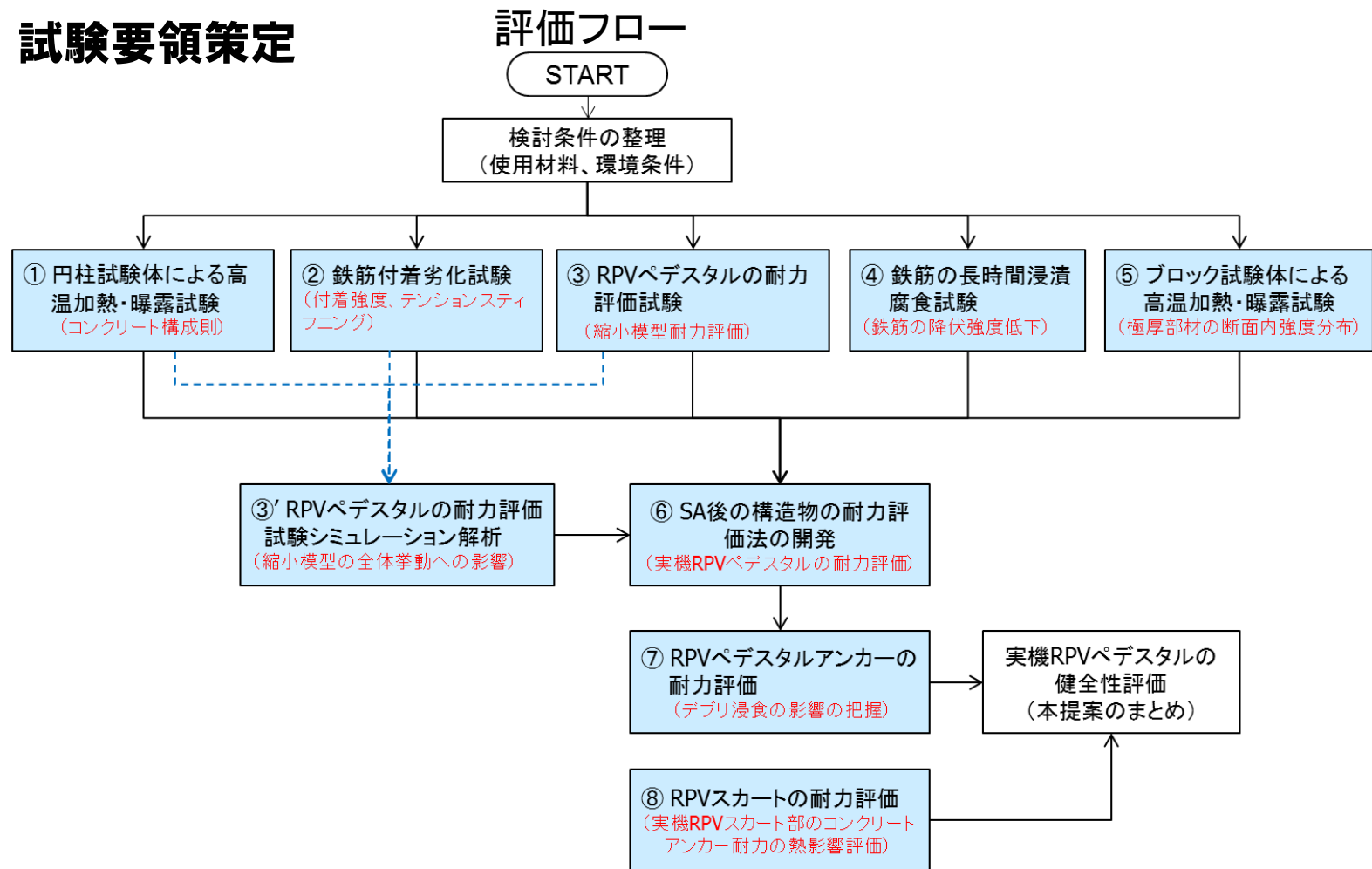
- PCVならびにS/Cの事故直後から15年後先までの腐食減肉を評価した。腐食抑制方策(防錆剤等)により今後の腐食量を抑制できる余地がある。
- 15年後までのPCVの構造健全性を試評価した。一部で詳細評価や補強の検討が必要な部分があった。

6. 主な課題（今後の実施事項）

- 鉄筋コンクリート製RPVペDESTALの詳細評価：事故時の浸食や今後の劣化
 - ・コンクリートの強度、物質(酸素、水)移動特性評価
 - ・コンクリート鉄筋の腐食挙動評価(長期腐食挙動、局部腐食の影響)
 - ・高温燃料デブリ落下を考慮したコンクリート溶融反応(浸食範囲、温度分布、強度低下等)に関する基礎知見の整備
- PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価
- 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
- 長期の腐食減肉量の予測の高度化と腐食抑制策の開発
- 40年後までの健全性評価

7.1 今後の実施事項 ペDESTALの侵食影響評価-1

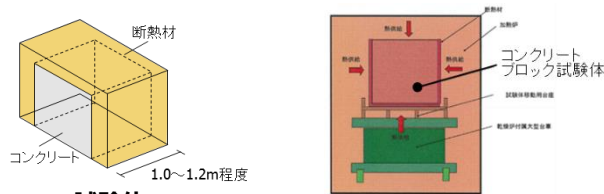
● 試験要領策定



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/スカートの耐力評価と合わせて実機RPVペDESTALの健全性を評価する。

7.2 今後の実施事項 ペDESTALの侵食影響評価-2

ブロック試験体による高温加熱・曝露試験イメージ

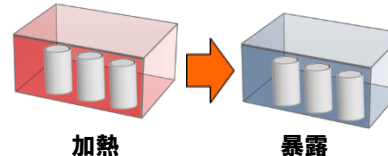


試験体

加熱炉による全体加熱

強度分布、水分量、XRD等の計測を実施

円柱供試体による高温加熱・曝露試験イメージ

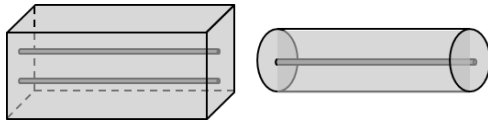


加熱

曝露

強度回復状況把握、強度試験を実施

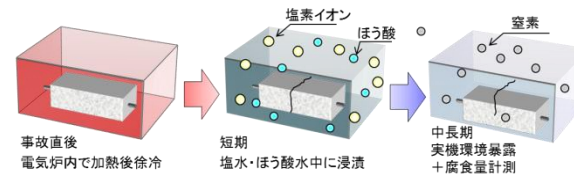
鉄筋付着劣化試験イメージ



試験体

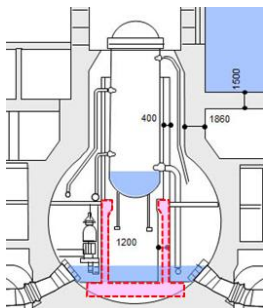
加熱・水中曝露後、両引き試験を実施

鉄筋長時間浸漬腐食試験イメージ

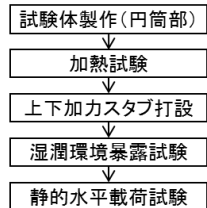


べき乗則に基づく腐食量予測精度向上

RPVペDESTALの耐力評価試験イメージ



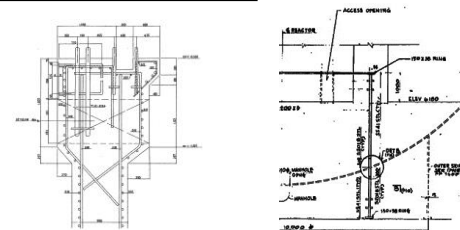
試験体モデル化範囲



試験フロー

縮小モデルによる静的加力試験(加熱・曝露後)を実施、荷重-ひずみ曲線を取得

RPVスカート、RPVペDESTALアンカーの耐力評価解析イメージ



試験体モデル化範囲

耐力評価に資する局部解析を実施

燃料デブリによる侵食を考慮した想定断面での暫定的な評価を実施

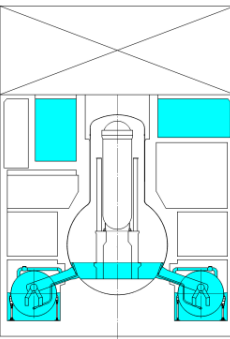
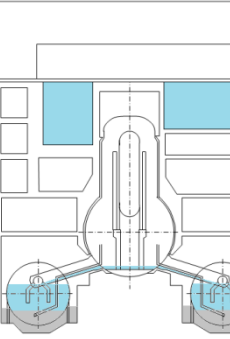
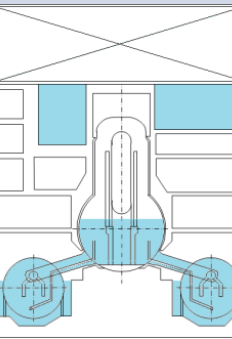
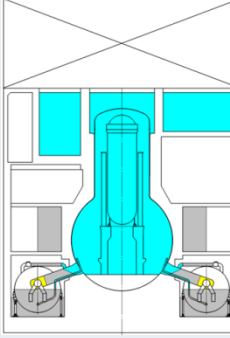
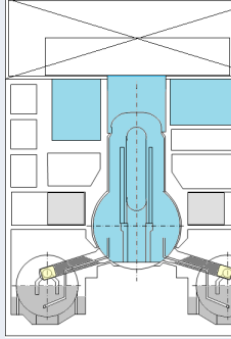


基準値を満足する欠損率を算定

7.3 今後の実施事項 燃料デブリ取出し冠水工法の成立性評価-1

止水(モルタル充填他)、補強工事、水位レベル等に応じた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 <ul style="list-style-type: none"> (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 <ul style="list-style-type: none"> (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 <ul style="list-style-type: none"> (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:ウエル満水 ・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 <ul style="list-style-type: none"> (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:ウエル満水(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 <ul style="list-style-type: none"> (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

7.4 今後の実施事項 燃料デブリ取出し冠水工法の成立性評価-2

地震応答解析例(PCV内水位完全冠水モデル(H26-2)の地震荷重の算定)

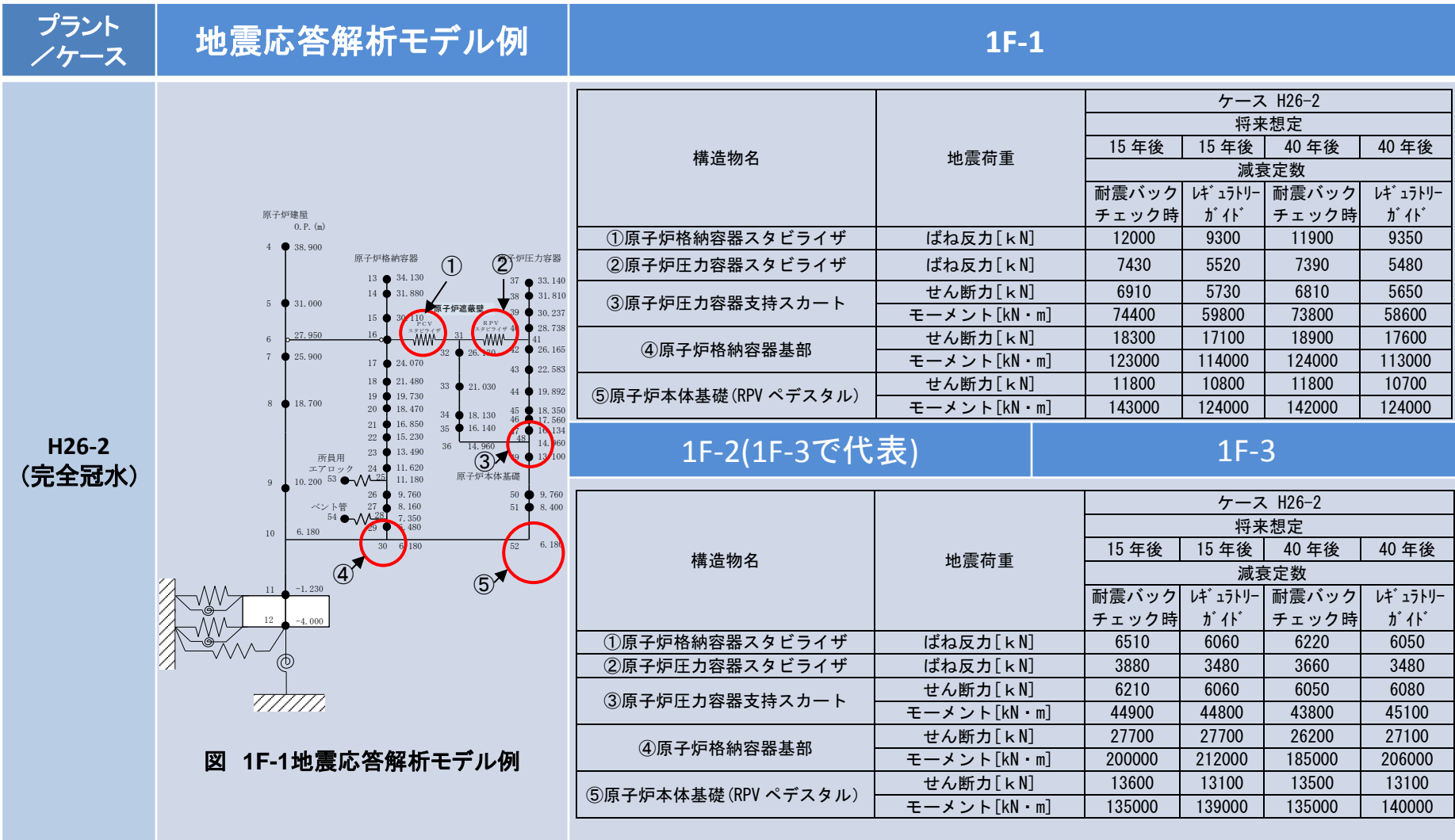


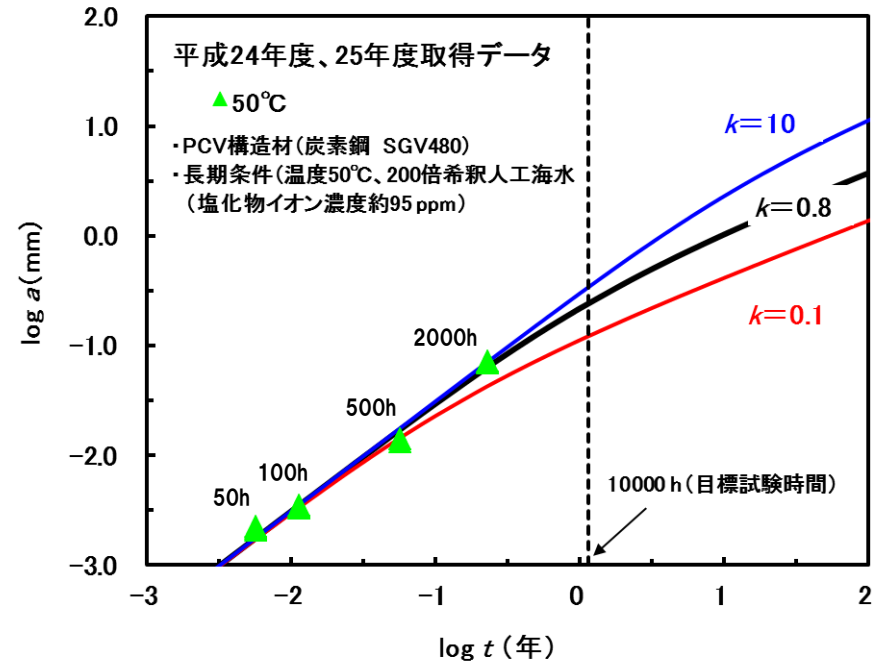
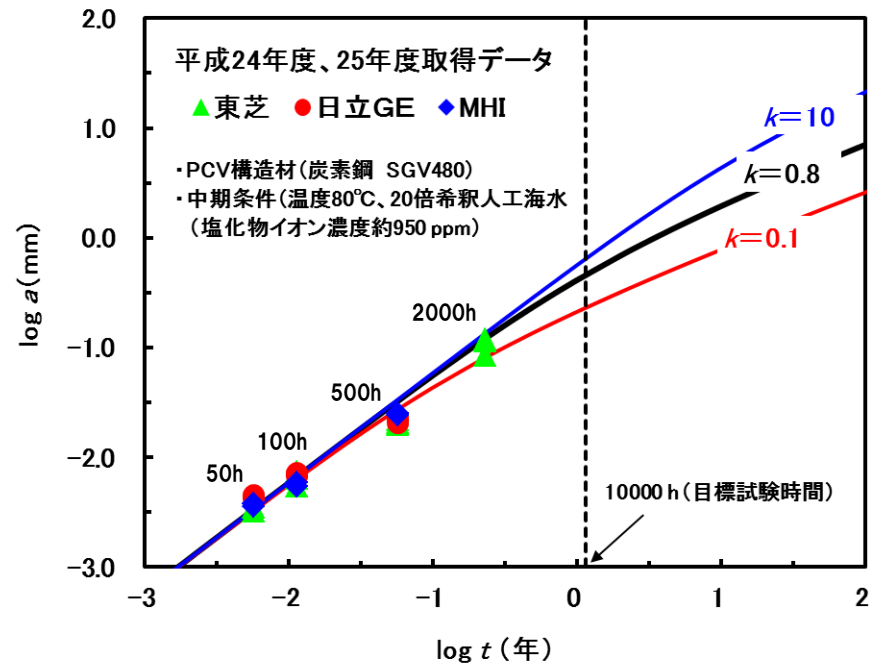
図 1F-1地震応答解析モデル例

7.5 今後の実施事項 長期の腐食減肉量の予測の高度化

10000hの腐食試験データ取得により、数十年の腐食評価制度を向上させる

- 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。
- これまで500h及び2000hの試験を実施してきたが、さらに長時間(10000h程度まで)の腐食試験データを取得する。
- PCV構造材(炭素鋼SGV480)に対し、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。



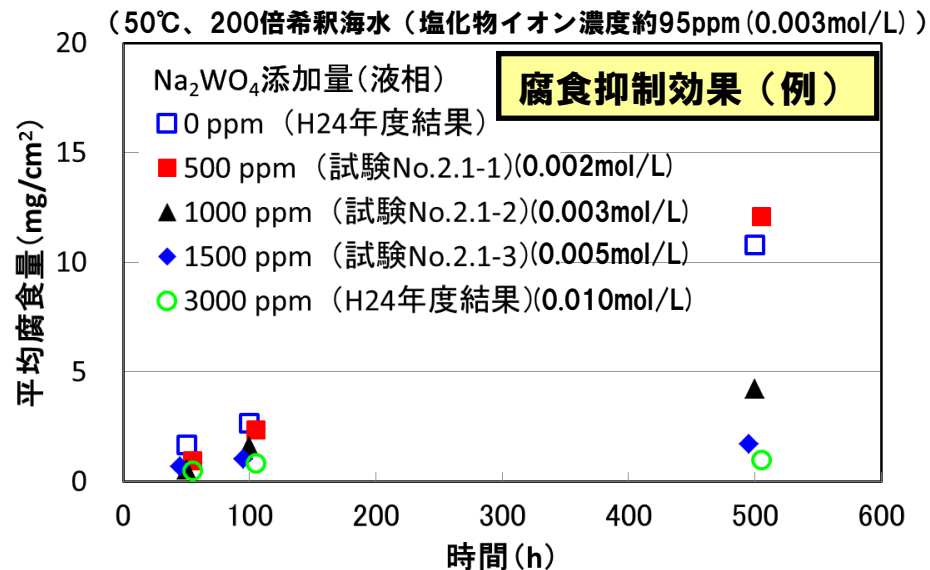
1)腐食防食協会, 金属の腐食・防食Q&A コロージョン110番, 丸善, p.11(1988).

7.6 今後の実施事項 実機適用可能な腐食抑制剤の選定

各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

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($\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16}$)



- 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、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、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)

End of presentation

Other slides

5. 平成26-27年度全体実施計画

(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(日本原子力研究開発機構分)

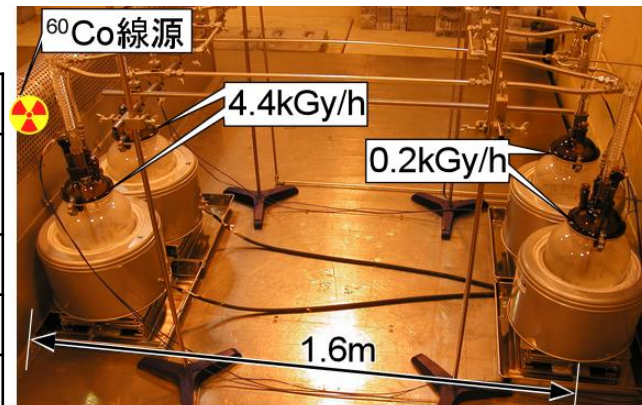
目的：ガンマ線照射環境下における各種防錆剤の腐食抑制効果の確認を行う。

試験内容：

- ① 防錆剤（5種）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

防錆剤を用いる試験の計画

照射下試験条件



No.	摘要
Run 1	五ホウ酸ナトリウム、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、硝酸ナトリウム混合モリブデン酸ナトリウムの防錆剤について順次試験を実施
Run 2	
Run 3	
Run 4	
Run 5	
Run 6 & 7	良好な防錆効果が得られた条件での試験
Run 8	予備

試験温度	50℃
試験溶液	希釈人工海水 2レベル
試験時間	500時間
濃度	3レベル
線量率	2レベル

工程表

ガンマ線照射下腐食試験の状況

	H26年度					H27年度							
	9	10	12	1	3	4	6	7	9	10	12	1	3
照射下防錆剤添加腐食試験			Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6		Run 7	Run 8		報告書作成
			水質分析／錆・沈殿物分析				水質分析／錆・沈殿物分析						

5. 平成26-27年度全体実施計画

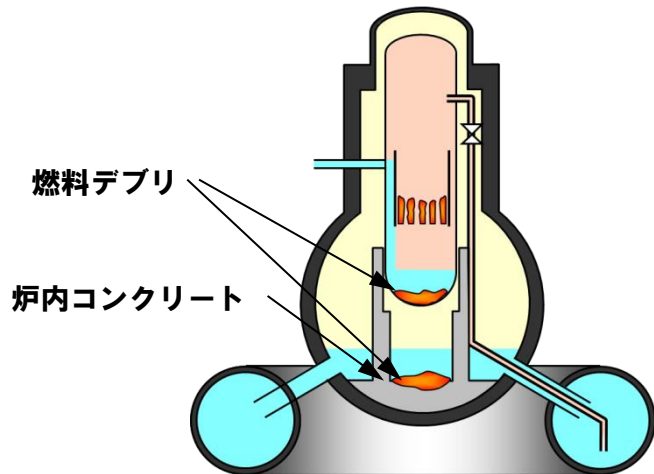
(4)長期の腐食減肉量の予測の高度化(日本原子力研究開発機構分)

1) 溶出成分の腐食影響の文献調査 (H26年度)

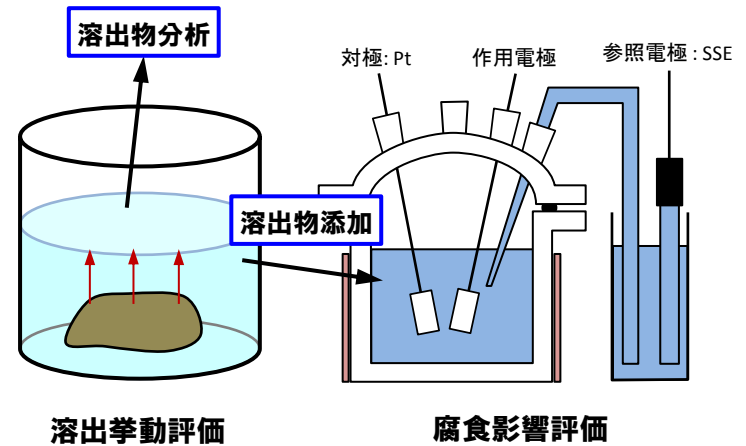
燃料デブリ及び炉内コンクリートからの溶出成分等が腐食に及ぼす影響について、文献等により調査し、影響が懸念される成分の有無について調べる。

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。



腐食影響が懸念される成分がある場合



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

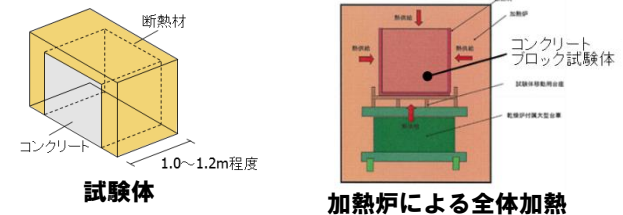
溶出挙動・腐食影響評価

- ・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

5. 平成26-27年度全体実施計画

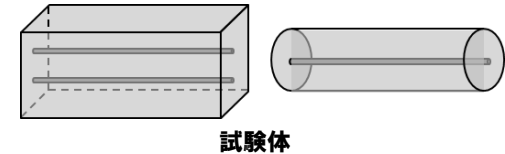
(5) ペDESTALの侵食影響評価(東芝、日立GE分)

① ブロック試験体による高温加熱・曝露試験イメージ



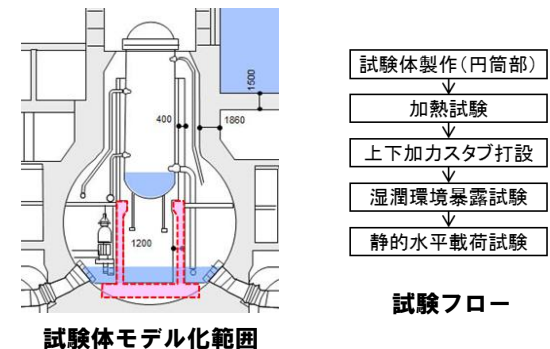
強度分布、水分量、XRD等の計測を実施

② 鉄筋付着劣化試験イメージ



加熱・水中曝露後、両引き試験を実施

③ RPVペDESTALの耐力評価試験イメージ

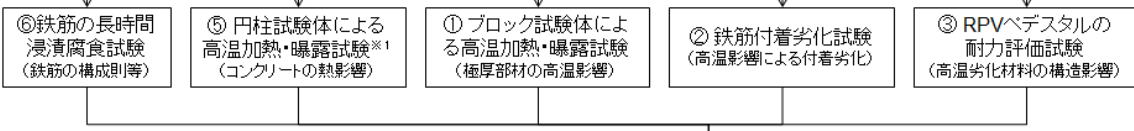


縮小モデルによる静的加力試験(加熱・曝露後)を実施、荷重-ひずみ曲線を取得

START

検討条件の整理
(使用材料、環境条件)

④ SA後の構造物の
耐力評価法の開発
(実験結果に基づく解析評価)

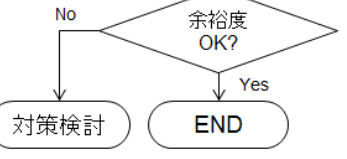


3D-FEMによる
全体系の健全性評価

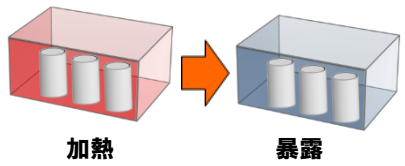
健全性評価

⑦ RPVスカート
の耐力評価
(スカート支持部の耐力評価)

⑧ RPVペDESTAL
アンカーの耐力評価
(アンカーボルトの耐力評価)

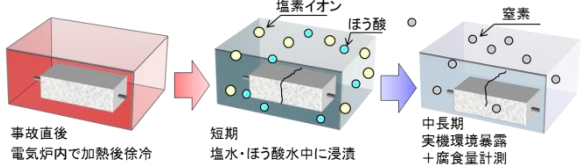


⑤ 円柱供試体による 高温加熱・曝露試験イメージ



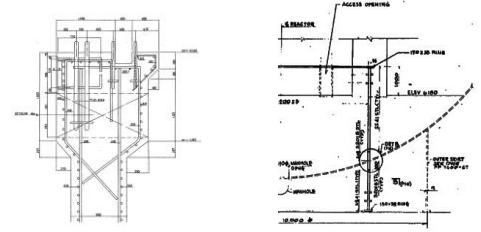
強度回復状況把握、強度試験を実施

⑥ 鉄筋長時間浸漬腐食試験イメージ



べき乗則に基づく腐食量予測精度向上

⑦⑧ RPVスカート、RPVペDESTALアンカー の耐力評価解析イメージ



試験体モデル化範囲

耐力評価に資する局部解析を実施

④の評価手法により燃料デブリによる侵食を考慮した想定断面での暫定的な評価を実施

基準値を満足する欠損率を算定

6. 平成26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(案)

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)	大気飽和	濃度 ①、②、③	液相
	19ppm (1,000倍希釈)	大気飽和	濃度 ①、②、③	液相
	1.9ppm (10,000倍希釈)	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)

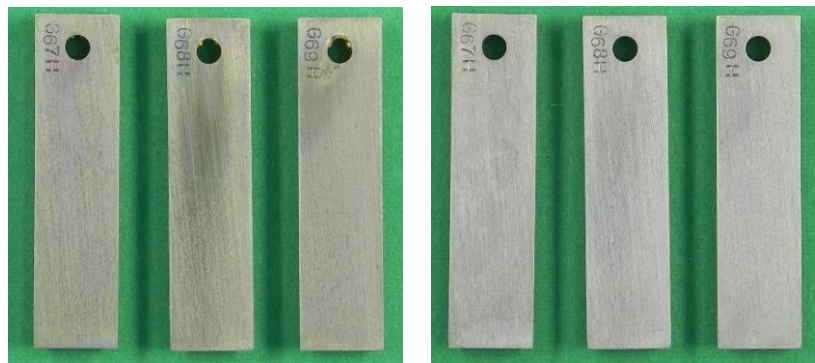
※ 防錆剤添加濃度を3水準で変化させ、腐食形態を調査し、局部腐食が発生しない防錆剤添加濃度(最適濃度)を確認する。

6. 平成26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

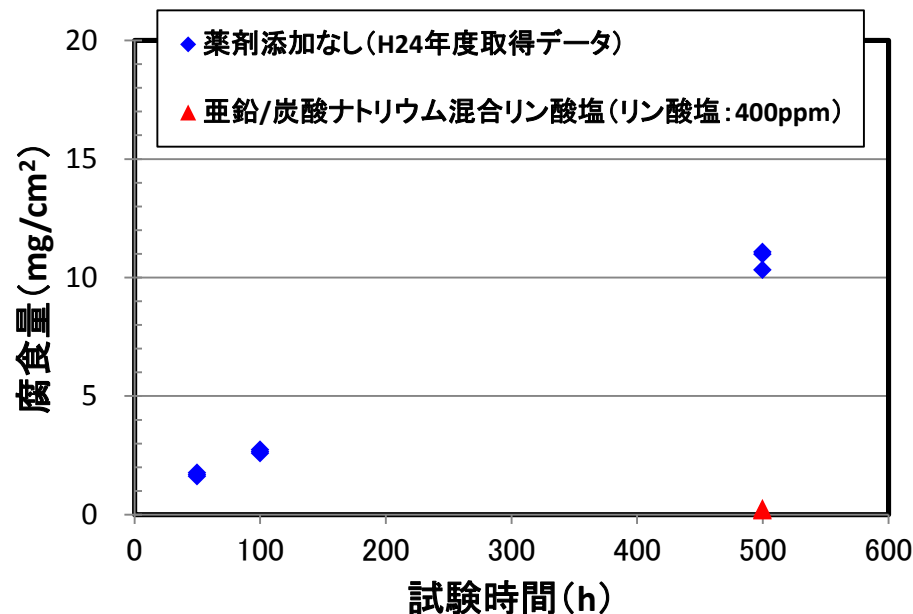
● 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩添加試験結果(日立GE分)



(a) 酸洗前

(b) 酸洗後

(1) 試験片外観観察結果



(2) 腐食量比較結果

50℃、200倍希釈人工海水、リン酸塩:400ppmの例

- ・試験片全体に防錆剤による皮膜と考えられる薄い着色が確認された。
- ・重量変化から評価した腐食量は、ほぼ認められなかった。

6. 平成26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(三菱重工業分)

原子炉注水配管等の健全性評価(H26~27年度の計画)

実施内容について、関係機関および外部評価委員と協議を重ねた結果、現状決定している。内容は以下の通り。

- ・500時間4Run、2000時間1Runの計5Runを2年間で実施。
- ・外部評価委員のコメントにより、海水が淡水で希釈された水質における腐食挙動を評価する(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する(Run2)。
- ・Run3以降は防錆剤添加条件を中心に実施する(内容は東芝、日立GEが実施している静置試験の結果から決定)

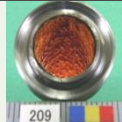
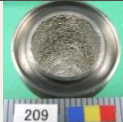

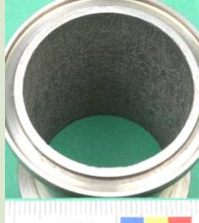


Run	試験媒体材料	温度	溶存酸素濃度	海水濃度	防錆剤	流速	試験時間	目的	
H26	1	STPT410	30℃	1.0ppm	淡水希釈模擬 (Cl: 7ppm)	添加無し	1.7m/s	100h, 500h, 2000h	淡水希釈の影響 確認
							0.23m/s	100h, 500h, 2000h	
							0.05m/s	100h, 500h, 2000h	
H26	2	STPT410	30℃	7.5ppm	1000倍希釈 (Cl: 19ppm)	添加無し	1.7m/s	50h, 100h, 500h	防錆剤添加条件 のベースデータ
							0.23m/s	50h, 100h, 500h	
							0.05m/s	50h, 100h, 500h	
H27	3	STPT410	30℃	7.5ppm	1000倍希釈 (Cl: 19ppm)	タングステン 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	
H27	4	STPT410	30℃	7.5ppm	1000倍希釈 (Cl: 19ppm)	代替防錆剤	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	
H27	5	STPT410	30℃	1.0ppm	未定	未定	1.7m/s	50h, 100h, 500h	防錆剤の効果 or さらに低Cl条件
							0.23m/s	50h, 100h, 500h	
							0.05m/s	50h, 100h, 500h	

6. 平成26年度事業成果

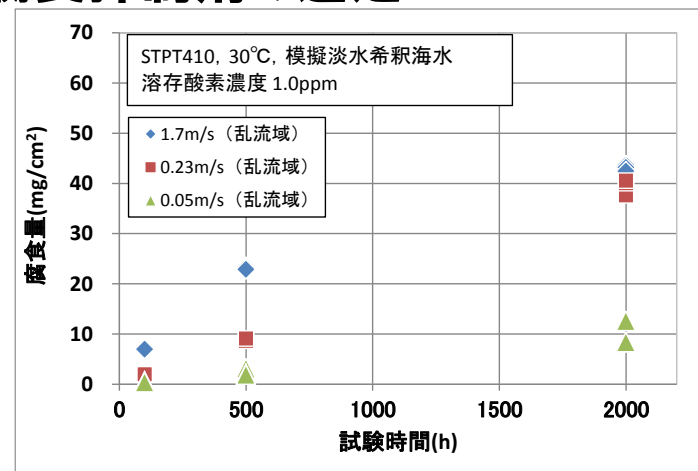
(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(a) 各種防錆剤の腐食抑制効果の確認

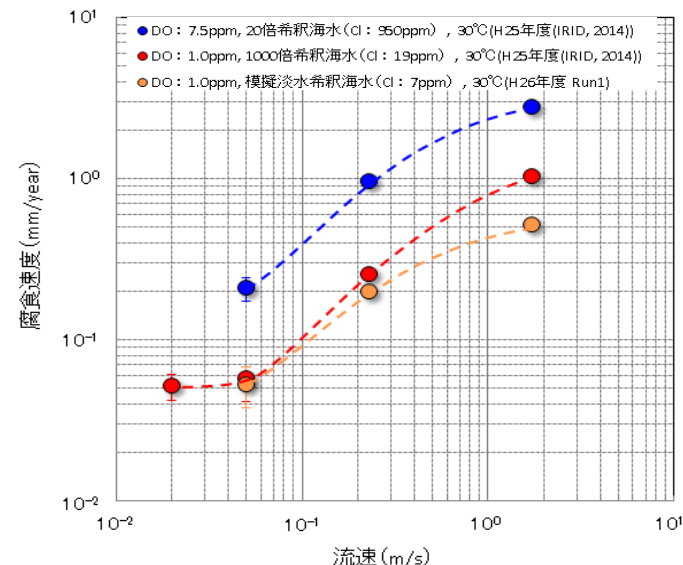
● 試験結果(三菱重工業分)

流速	試験後外観写真 (模擬淡水希釈海水, 2000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。



腐食量の経時変化



腐食速度の流速依存性(水質の影響)

6. 平成26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。

試験内容:

- 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

ガンマ線照射下防錆剤添加腐食試験

No.	摘要
Run 1	五ホウ酸ナトリウム($\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16}$) 1000倍希釈人工海水
Run 2	五ホウ酸ナトリウム($\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16}$) 200倍希釈人工海水
Run 3	モリブデン酸ナトリウム(Na_2MoO_4)
Run 4	亜硝酸ナトリウム(NaNO_2)等の
Run 5	候補材を選定(3種類)して実施
Run 6&7	防錆剤を途中添加
Run 8	予備

照射試験条件

材質	炭素鋼(PCV)
試験温度	50°C
試験溶液	200(1000)倍 希釈人工海水
試験時間	500時間
防錆剤濃度	3レベル
線量率	2レベル (4k, 0.2kGy/h)



ガンマ線照射下腐食試験の状況

工程表

	H26年度					H27年度								
	9	10	12	1	3	4	6	7	9	10	12	1	3	
照射下防錆剤添加腐食試験		Run 1		Run 2		Run 3	Run 4	Run 5	Run 6		Run 7	Run 8		報告書作成
		水質分析				水質分析								
		錆・沈殿物分析				錆・沈殿物分析								

6. 平成26年度事業成果

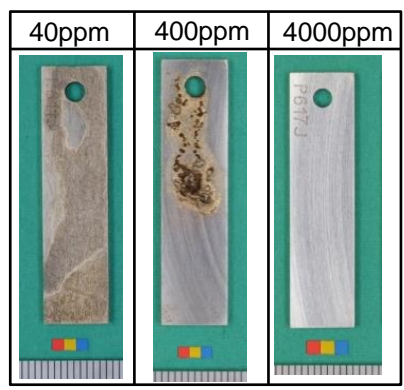
(3) 腐食抑制策の開発 ① 実機適用性のある腐食抑制剤の選定

(b) 腐食抑制効果の阻害因子(γ線照射等)の影響の確認

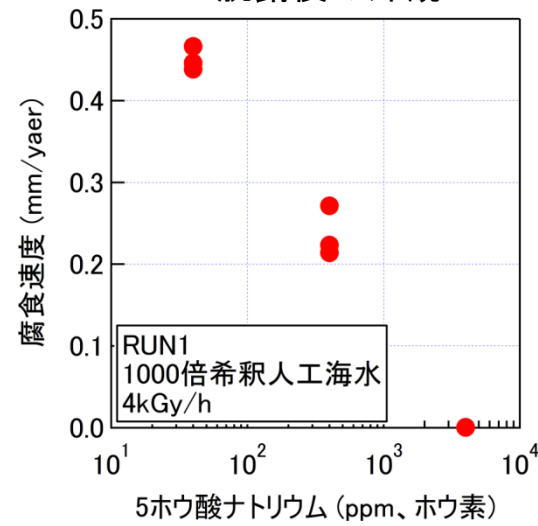
● 試験結果(日本原子力研究開発機構分)

実施内容: 防錆剤として五ホウ酸ナトリウムを用いた場合のガンマ線照射下における腐食試験(50°C)を実施した。

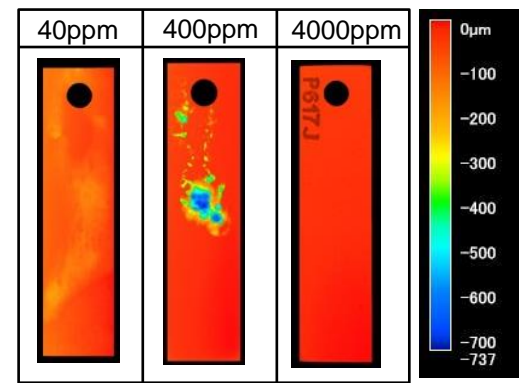
試験結果: ガンマ線照射下において200倍希釈海水および1000倍希釈海水ともに、ホウ酸濃度で40ppmは全面腐食形態となり、400ppmは局部腐食形態、4,000ppmは不動態化し腐食が抑制されることが明らかとなった。この腐食形態は吸収線量率の増加(200 Gy/h, 4 kGy/h) に依存しない事が明らかとなった。



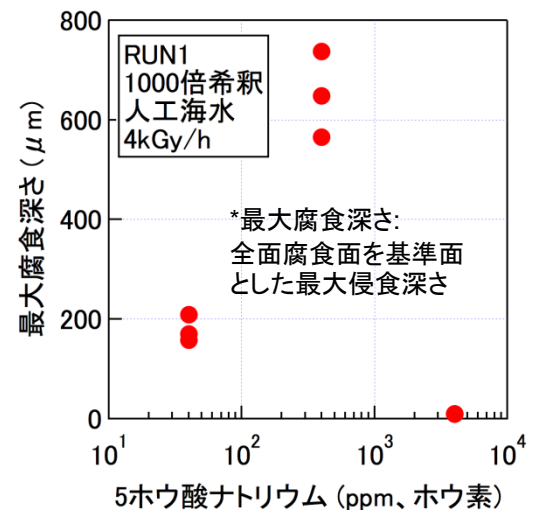
脱錆後の外観



ガンマ線照射下の炭素鋼の腐食速度



腐食深さ分布



最大腐食深さと防錆剤濃度

6. 平成26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(γ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)

ガンマ線照射前後の水質分析結果 (腐食試験片有り)

水質分析 (線量: 4kGy/h)			1000倍希釈人工海水 五ホウ酸ナトリウム (Na ₂ B ₁₀ O ₁₆) [B: 40 ppm]		1000倍希釈人工海水 五ホウ酸ナトリウム (Na ₂ B ₁₀ O ₁₆) [B: 400 ppm]		1000倍希釈人工海水 五ホウ酸ナトリウム (Na ₂ B ₁₀ O ₁₆) [B: 4,000 ppm]	
分析項目	分析方法	単位	照射前	照射後	照射前	照射後	照射前	照射後
pH	ガラス電極		8.7	8.4	8.7	8.7	8.2	8.2
ほう素	ICP 発光分析法	mg/L	3.8E+01	5.1E+01	3.8E+02	3.8E+02	3.9E+03	4.1E+03
ほう酸イオン	キャピラリー電気泳動法	mg/L	2.0E+02	2.4E+02	2.3E+03	2.4E+03	2.2E+04	2.3E+04
2価鉄	容量法	mg/L	<10	<10	<10	<10	<10	<10
塩素酸イオン	イオンクロマトグラフ法	mg/L	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06

(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: 防錆剤として五ホウ酸ナトリウムを用いた場合のガンマ線照射下における水質変化から副次的悪影響の評価した。

試験結果: ガンマ線照射下においても五ホウ酸ナトリウムは分解して他の化学種に変化する事はなく、主にホウ酸イオン(H₂BO₃⁻)として安定存在する事が明らかとなった。

6. 平成26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(案)

- ・ 防錆剤の種類及び最適濃度が決定する平成27年度に試験開始予定。
- ・ 防錆剤による水処理設備等の機能上への悪影響の有無の評価についても平成27年度に実施予定。

温度	塩化物イオン濃度	溶存酸素濃度	防錆剤* 添加濃度	ほう素 添加	中性子 吸収材	廃棄物	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	あり	なし	なし	液相
	19ppm (1,000倍希釈)	大気飽和	最適濃度	あり	あり	なし	なし	液相
						あり		
				なし	なし	なし	あり	液相
	1.9ppm (10,000倍希釈)	大気飽和	最適濃度	あり	あり	なし	なし	液相
						あり		

pH:中性、照射:なし、試験時間:50h, 100h, 500hr 試験マトリックスは必要に応じて見直しを検討す

※ 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。

6. 平成26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

● 試験要領策定と試験実施状況(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(案)

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)	大気飽和	液相
50℃※	95ppm (200倍希釈)		

pH:中性、照射:なし、試験時間:最大10,000hr

※ 防錆剤や淡水条件での試験についても実施。



・ 10,000hの長時間腐食試験に着手した。
(3月末時点で3,000h程度経過)

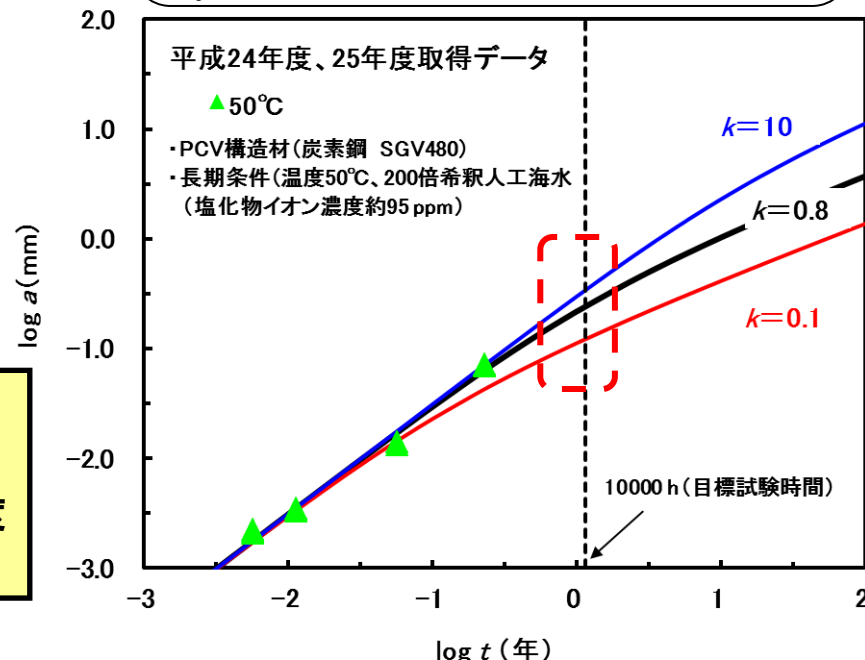
長時間腐食試験の状況

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文献調査(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、文献等により調査し、影響が懸念される成分の有無について調べる。

調査文献:

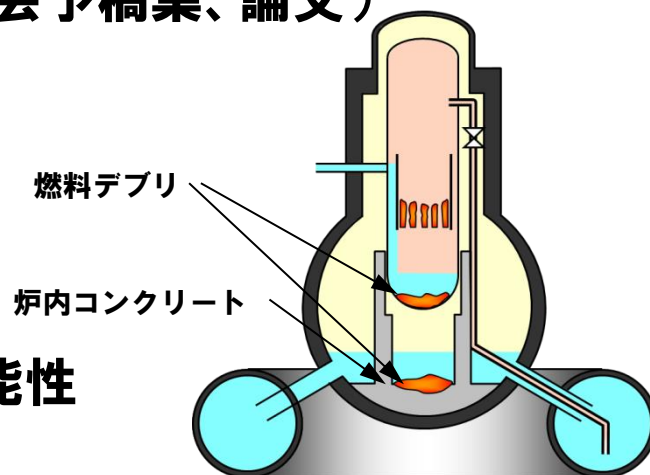
- ✓ 実燃料や模擬燃料等からの溶出試験結果報告
(学会予稿集、JAEA報告書、欧州超ウラン元素研究所(ITU)年報)
- ✓ 1F1・1F2原子炉建屋コンクリートの分析結果(廃炉推進対策会議資料)
- ✓ コンクリート劣化等に関する試験結果報告(学会予稿集、論文)

溶出成分の調査結果:

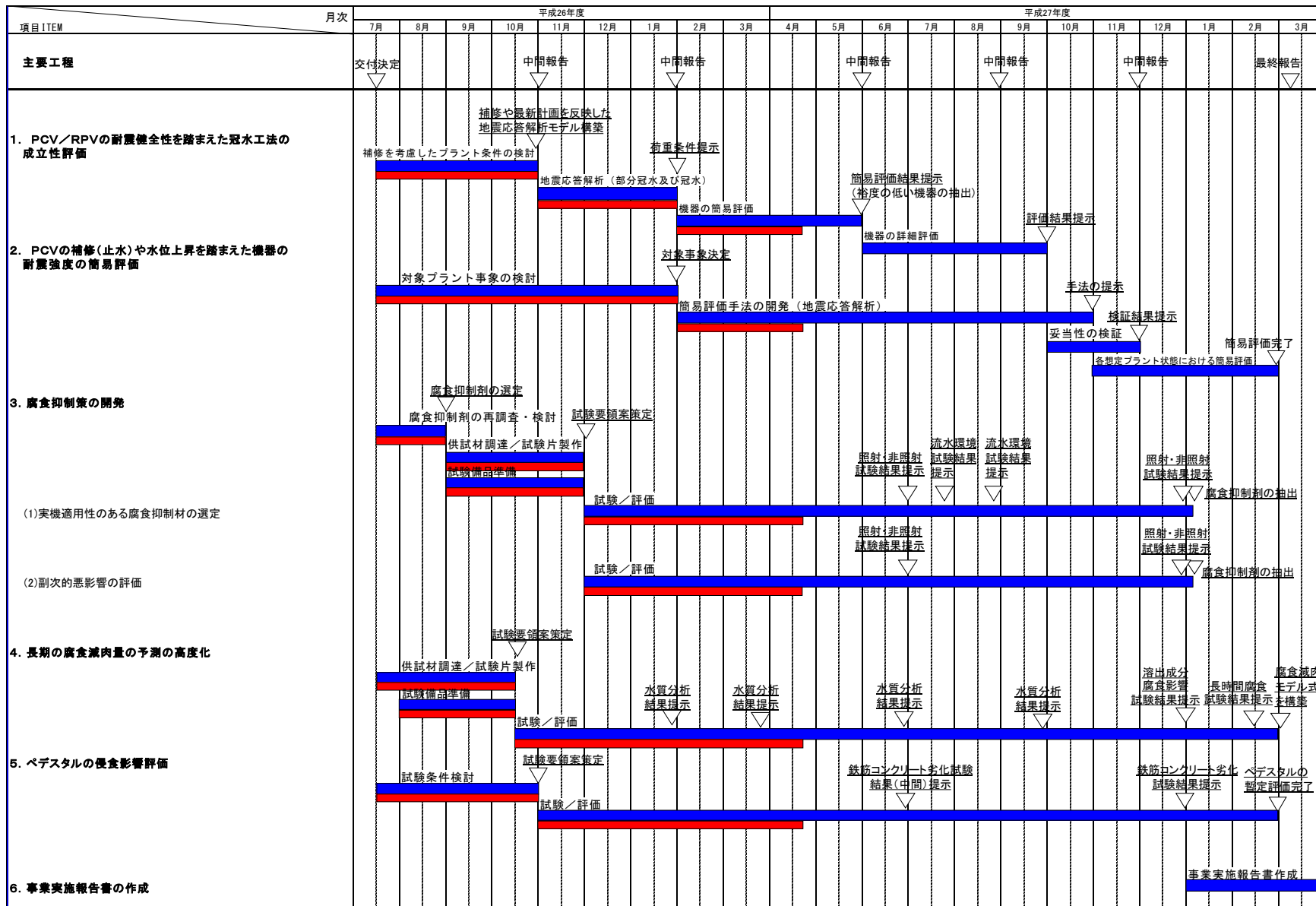
- ✓ 燃料デブリからの溶出
Csが最も多く、次いでCd, Mo, Sr, Tc、
少量のU, Ru, Rhが溶出の可能性
- ✓ コンクリートからの溶出
Caが最も多く、次いでSi, Fe, Alが溶出の可能性

結果:

燃料デブリ及びコンクリートから溶出する可能性を調査したが、腐食影響については不明であり、引き続き調査を行う。



7. 平成26-27年度進捗状況(実施工程と実績)



7. 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	実施中			
	評価結果提示	2015年9月下旬	—			
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	実施中			
	検証結果提示	2015年11月下旬	—			
	簡易評価完了	2016年2月下旬	—			
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剤の選定	照射・非照射試験結果提示	2015年6月下旬	実施中			
	流水環境試験結果提示	2015年7月下旬	実施中			
	流水環境試験結果提示	2015年8月下旬	—			
	照射・非照射試験結果提示	2015年12月下旬	—			
	腐食抑制剤の抽出	2016年1月上旬	—			
(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	実施中			
	照射・非照射試験結果提示	2015年12月下旬	—			
	腐食抑制剤の抽出	2016年1月上旬	—			
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	実施中			
	水質分析結果提示	2015年9月下旬	—			
	溶出成分腐食影響試験結果提示	2015年12月下旬	—			
	長時間腐食試験結果提示	2016年2月中旬	—			
	腐食減肉モデル式を構築	2016年2月下旬	—			
5. ベ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	実施中			
	鉄筋コンクリート劣化試験結果提示	2015年12月下旬	—			
	ベDESTALの暫定評価完了	2016年2月下旬	—			
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	—			

8. 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
補修などの最新計画プラント状態を反映した耐震強度評価条件を策定し、そのモデル作成と地震応答解析を実施した。
- (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因子を抽出した。
- (3) 腐食抑制策の開発
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防錆剤がこれまでに確認されていないため、新規にリン酸塩等の防錆剤候補を選定し、放射線照射下を含む防錆効果の確認試験を開始した。また、淡水条件でのループ試験を開始した。
- (4) 長期の腐食減肉量の予測の高度化
腐食減肉量の予測精度向上のため、長時間(10,000時間目標)の腐食試験を開始した。また、溶出成分の腐食影響に関する文献調査を実施した。
- (5) ペDESTALの侵食影響評価
高温加熱・水中暴露条件下でのコンクリートや鉄筋の材料基礎試験、実機RPVペDESTALの厚さ模擬ブロック試験実施のための試験体を製作した。
(現在養生中)

9. 今後の課題

【ホウ酸注入による鋼材やコンクリートへの長期健全性に及ぼす影響】

- ・今後、再臨界防止のため炉内へのホウ酸注入が実施される可能性があり、臨界管理プロジェクトにて、ホウ酸の種類、濃度などの最適条件が検討されている。ホウ酸による鋼材(PCV)への局部腐食の発生やコンクリート(RPVペデスタル)への影響有無が懸念されており、臨界管理プロジェクトと連携し、ホウ酸注入による機器の長期健全性を評価しておく必要がある。

【腐食抑制システムの開発時期の見直し】

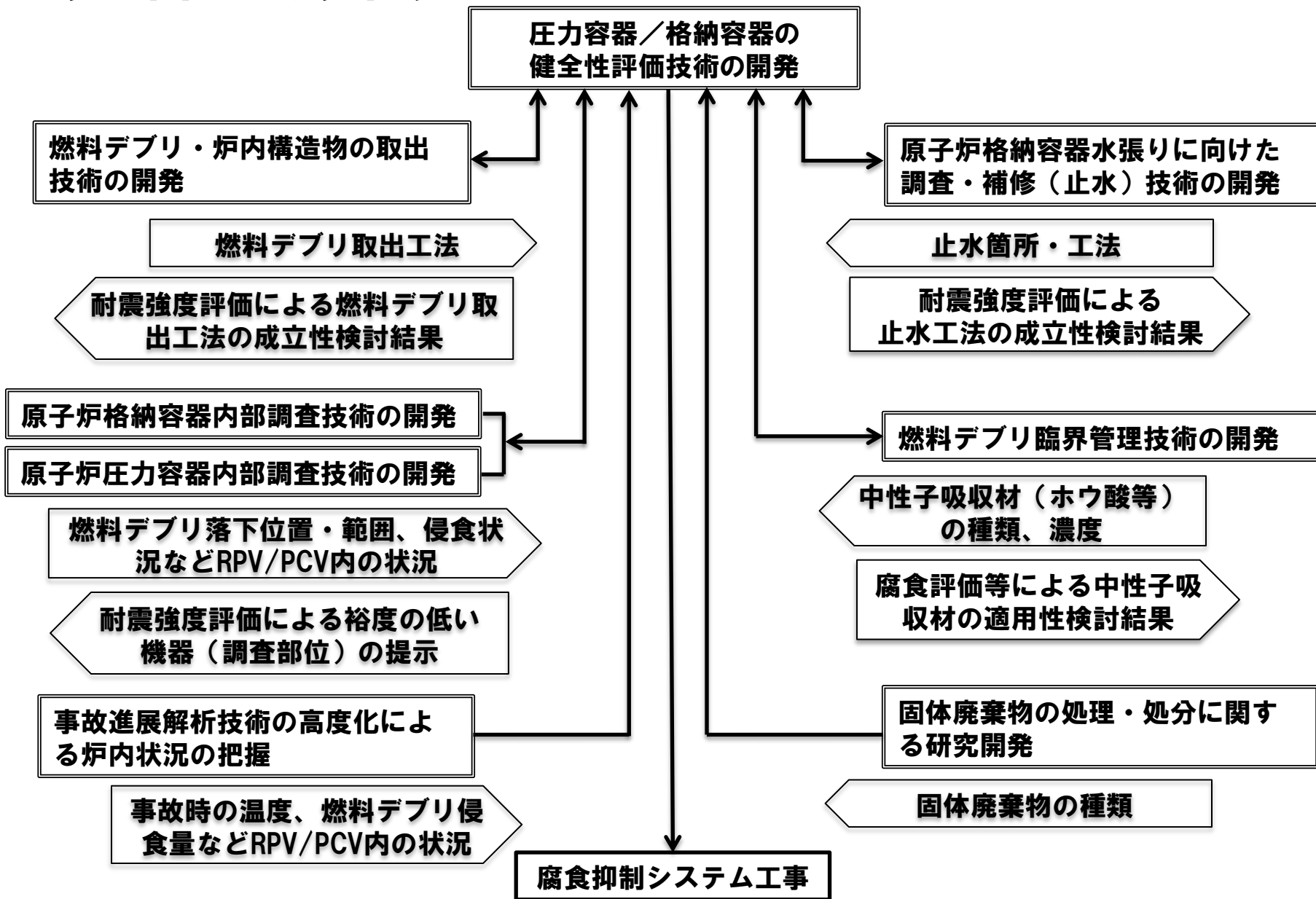
- ・腐食や劣化に対する新たな課題やそれに伴う機器健全性に対する詳細評価が必要となっており、

課題解決状況に応じた腐食抑制システムの開発時期の適宜見直しが必要である。

【余寿命評価の精度向上のため必要とされる実測パラメータの取得】

- ・腐食減肉速度の精度を向上させるため、温度やPCV滞留水サンプリングによる水質データを今後も確実に取得する必要がある。溶存酸素や流速の計測、PCV内壁の塗料サンプリングによる分析、燃料デブリ落下位置・範囲、侵食状況の調査等を行うことにより、さらなる余寿命評価の精度向上が期待できる。(必要項目・期待される成果の整理を行った上で、他の研究開発プロジェクト(格納容器内部調査技術の開発等)や東京電力の現場作業の実施内容への反映を関係箇所と協働で検討する。)

参考図 他研究開発プロジェクトとの関係



補足 研究開発の運営等

(a)中長期的視点での人材育成

関連技術の学会や分科会、セミナー等にて、大学、研究機関や関連企業等に所属する若手を対象に実施計画や技術課題を紹介することにより、関心を持ってもらう啓発活動を実施する。また、東北大学との連携協力協定の締結などにより人材育成を進めていく。

(b)国内外の叡智の結集

各種国際機関(IAEA、OECD/NEA)、米、仏、英等との関係の維持・拡大を通じ、国際的かつ専門的な知見・経験を取り入れられる仕組みとする。本技術開発に適用できる優れた技術を見出し、研究協力等により積極的に技術導入を行なう。具体的には、鉄筋コンクリート製であるRPVペDESTALの構造健全性評価について、この分野において技術力が高く、実績のある鹿島建設株式会社と研究協力を行っていく。

(c)外部委員会の設置・運営等

本技術開発の外部委員会として「使用済燃料・PCV/RPVの健全性評価に関する専門部会」(部会長 渡邊 豊 東北大学大学院教授)を設置し、進め方についてのレビュー、成果の妥当性を検証する。

(d)廃炉作業や他の研究開発との連携

「東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」の各プロジェクト間の関連を考慮し、得られた成果が廃炉作業や他の研究開発にどのように寄与するのか整理し、関連プロジェクトと共有する。

(e)事業の報告

事業の実実施計画、進捗状況、事業成果等について、原則として四半期毎に報告するとともに、事業終了時には、事業実施報告書を作成・提出する。

(f)情報発信の充実

実施内容、成果などについては、適宜、国の廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議等を通じて報告・公開する。

補足 目標達成を判断する指標の設定

実施項目	目標達成を判断する指標
(1)PCV/RPVの耐震健全性を踏まえた冠水工法の成立性評価	<p>H25年度に実施された評価ケースのうち、H25-2及びH25-3の2ケースを元に、補強(補修)及び新たなプラント情報を考慮した地震応答解析が実施され、機器の評価が実施されていること。</p> <p>相対的に裕度が低い機器に対し、有限要素解析等による詳細評価が実施され、PCV冠水工法の成立性が確認されていること。</p> <p>システム全体系としてPCV冠水に必要な機能を満足するかが検討されていること。</p> <p>詳細評価で裕度を満足できなかった機器に対して、更なる補強対策の必要性をPCV補修技術の開発実施者へフィードバックできていること。</p>
(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	<p>各号機毎に地震応答解析が必要数実施され、入力条件による相違が及ぼす影響を分析・評価した各質点の荷重負担率等が整理され、簡易評価手法が開発されていること。</p> <p>手法の妥当性が検証されていること。</p> <p>RPV/PCV関連設備における冠水バウンダリ機能や支持機能を構成する機器の簡易評価が実施されていること。</p> <p>各号機に対してPCV冠水工法の成立性が前項(1)の評価と合わせて確認されていること。</p> <p>燃料デブリ・炉内構造物の取り出し技術の開発の実施者からの情報をフィードバックできていること。</p> <p>格納容器漏えい箇所調査・補修技術の開発の実施者からの情報をフィードバックできていること。</p>
(3)腐食抑制策の開発	<p>燃料取出し時にPCVが開放された場合に、腐食対策として適用可能な(副次的悪影響もない)腐食抑制剤(防錆剤)を抽出できていること。</p> <p>燃料デブリ臨界管理技術の開発の実施者からの情報をフィードバックできていること。</p> <p>廃棄物処理処分技術の開発の実施者からの情報をフィードバックできていること。</p>
(4)長期の腐食減肉量の予測の高度化	<p>目標最大試験時間を10000hとした長浸漬時間の腐食試験データを取得されていること。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構築されていること。</p>
(5)ペDESTALの侵食影響評価	<p>普通コンクリート、フライアッシュコンクリート共に耐震強度評価が実施できる下記の基礎データ取得試験・解析が実施されていること。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・円柱供試体による高温加熱・環境暴露試験 ・実際のペDESTALの部材厚さを考慮したブロック試験体による高温加熱・環境暴露試験 ・RPVペDESTALの縮小モデル耐力評価試験 ・鉄筋付着劣化試験 ・長時間浸漬腐食試験 ・RPVスカート(基礎ボルト)部の耐力評価解析 ・ペDESTAL基部の耐力評価解析 <p>事故後のペDESTALの破損挙動を予測した耐震強度評価手法が構築されていること。</p> <p>構築した評価手法により燃料デブリによる侵食等を考慮した想定断面欠損での暫定的な評価が実施され、今後の燃料取出しまでに必要なRPV支持機能維持を評価するためのデータに資する情報が整備されていること。</p>

発表内容

1. 本事業の目的
2. 構造健全性評価の流れと腐食試験の位置付け
3. プラントデータの調査
4. 腐食評価における主要パラメータと1Fでの状況
5. 腐食試験計画
6. 腐食試験結果
7. 推定減肉量評価
8. 構造健全性試験評価
9. 事業工程
10. 基礎基盤研究課題

5. 腐食試験計画(3/3)

● 試験手順

試験片製作

- 供試材:SGV480, SQV2A
- 試験前の試験片重量測定

腐食試験

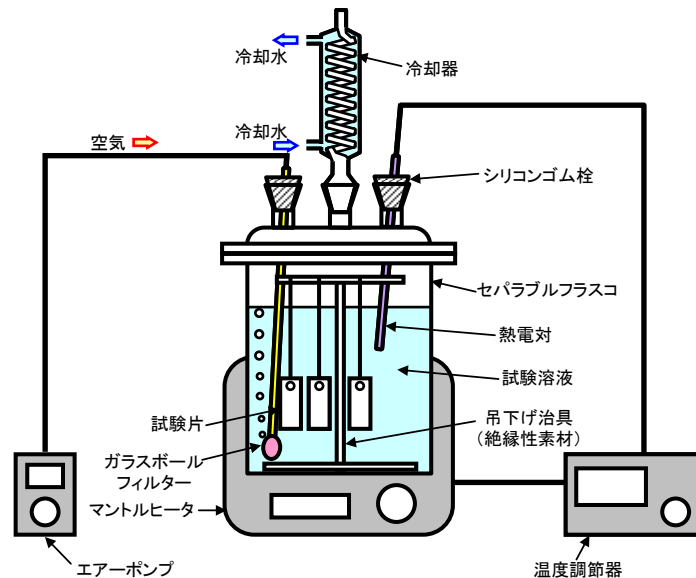
- 浸漬試験(目標比液量:40ml/cm²)
- 大気バブリング(目標流量10ml/min)
- 試験時間3条件(50, 100, 500h)

分析

- 外観観察 ・水分析(Cl⁻濃度、ph、DO等)
- 腐食生成物酸洗除去
- 試験後の試験片重量測定

腐食量評価

- 試験前後の試験片重量変化をもとに腐食量*を算出



腐食試験装置模式図



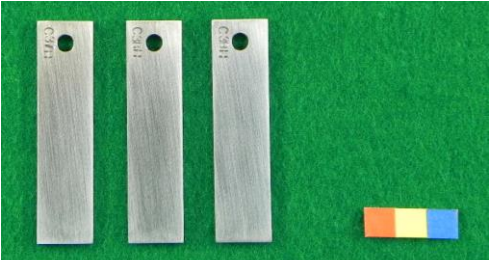








腐食試験状況

6. 腐食試験結果(1/3)

● PCV材(炭素鋼SGV480) 試験片外観観察結果(例)

色見本

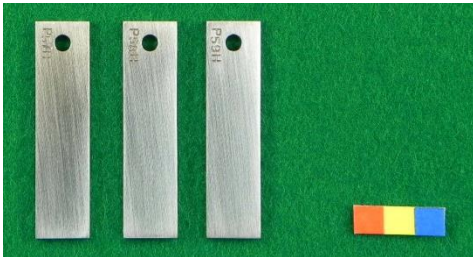

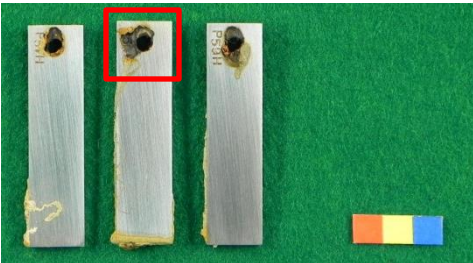

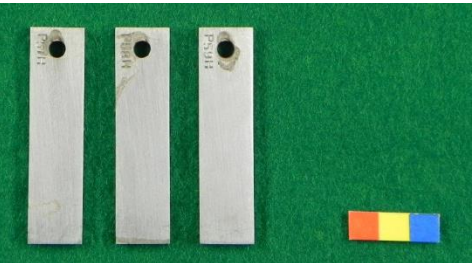
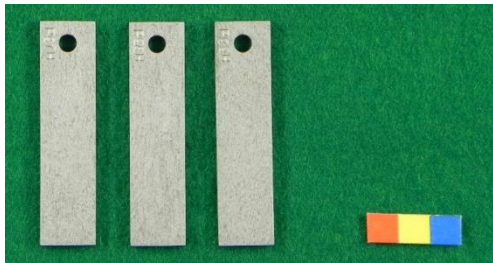
	試験No.1 80°C、20倍希釈海水、 500h	試験No.2 50°C、200倍希釈海水、500h	試験No.3 50°C、200倍希釈海水、 500h、窒素脱気
試験前			
試験後 (酸洗前)			
試験後 (酸洗後)			

窒素脱気条件では試験片全体に薄いさびが確認されたが、窒素脱気なしの条件と比較すると軽微であった。

6. 腐食試験結果(2/3)

● PCV材(炭素鋼SGV480) 試験片外観観察結果(例)

 :色見本

	試験No.4 80°C、20倍希釈海水、500h、 五ほう酸ナトリウム添加	試験No.5 80°C、20倍希釈海水、500h、ほ う酸添加
試験前		
試験後 (酸洗前)		
試験後 (酸洗後)		



拡大写真

五ほう酸ナトリウムを添加した条件では、一部で局所的な腐食が確認された。

7. 推定減肉量評価(3/5)

● 腐食速度の検討 (100℃以下の期間(⑤50~100℃以下、⑥50℃以下))

⑤の期間にNo.1中期条件、⑥の期間にNo.2長期条件を用いて評価(ケースA)。

また、実機においては既に窒素*による溶存酸素の低減状態が期待されることから、ケースとして⑥の期間に関してNo.3窒素脱気条件の試験データを用いて評価した(ケースB)。

*:注水水源タンクでの窒素バブリング(2011年4月12日開始)
RPV/PCV窒素封入(2011年内に順次開始)

No.	温度	海水濃度*	pH	ほう素	DO濃度	備考
1	80℃	20倍希釈	中性	なし	大気飽和	中期条件
2	50℃	200倍希釈	中性	なし	大気飽和	長期条件
3	50℃	200倍希釈	中性	なし	窒素脱気	長期条件
4	80℃	20倍希釈	中性	五ほう酸ナトリウム (目標1200ppmB)	大気飽和	中期条件
5	80℃	20倍希釈	酸性	ほう酸 (目標pH5)	大気飽和	中期条件

⑤の期間の評価

⑥の期間の評価

⑥の期間の評価

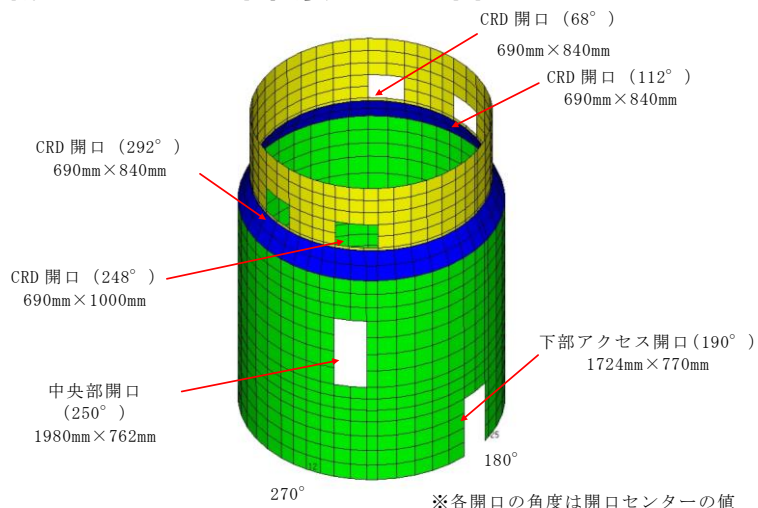
ほう素注入が一時的かつ短期間であることを考慮し、No.4及びNo.5の試験データを用いた評価は対象外とした。

8. 構造健全性試評価(4/4)

健全性試評価(1号機RPVペデスタル(例))

高温及び鉄筋腐食による劣化を考慮したRPVペデスタルモデルのFEM応力解析

■1号機PRVペデスタル有限要素モデル図



■鉄筋腐食を考慮した配筋量

腐食量予測解析結果のうち最も厳しい、ひび割れ有の15年後の腐食による断面減少を考慮した配筋量を設定

■材料物性

熱影響評価試験結果のうち800℃加熱後水中曝露(91日)の値から高温劣化を考慮した材料物性を設定

■固定荷重

- RPV本体及び熱遮へい壁の重量を、付加重量としてペデスタル頂部に与える。
- モデル化した部分の重量は、ペデスタル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

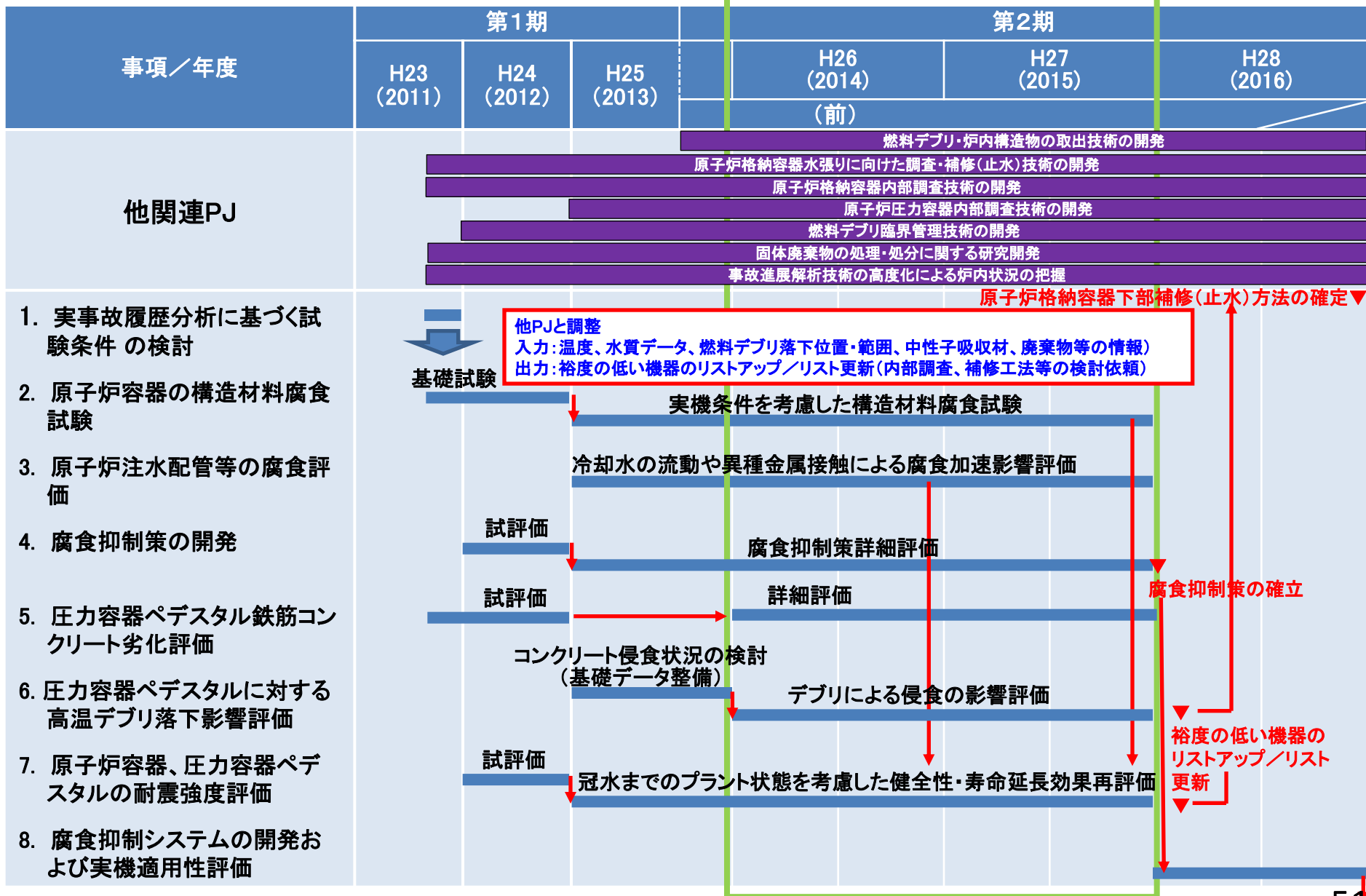
- PCV冠水時におけるSs地震に対する建屋機器連成地震応答解析結果に基づく地震荷重を考慮する。
- 水平方向地震荷重は、せん断力と曲げモーメントを作用させる。
- 鉛直方向地震荷重は、震度として解析モデルに一律に作用させる。

評価項目	発生応力・ひずみ	評価基準
コンクリートひずみ	465×10^{-6}	3000×10^{-6}
鉄筋ひずみ	895×10^{-6}	5000×10^{-6}
面外せん断力	1237 N/mm	1336 N/mm

•PCV冠水時地震荷重で1F-1ペデスタルに発生する応力およびひずみは、いずれも評価基準を超えない。

3. 全体工程

全体工程からみた今回の実施範囲



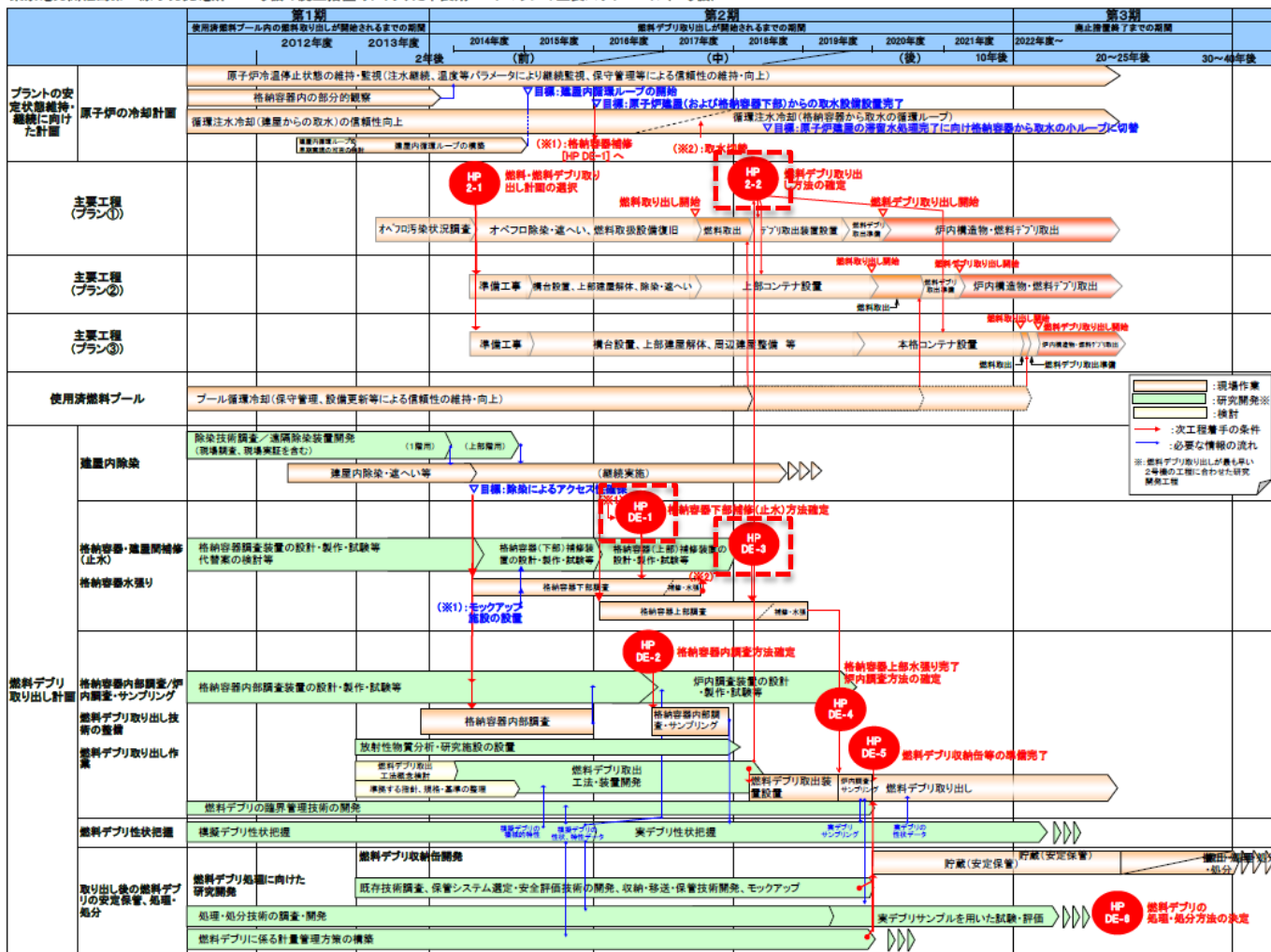
原子炉格納容器下部補修(止水)方法の確定

腐食抑制策の確立

裕度の低い機器のリストアップ/リスト更新

4. 中長期ロードマップにおける位置付け

東京電力浜福島第一原子力発電所1~4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップの主要スケジュール(2号機)



判断ポイント	時期	内容
DE-1	2016年度	格納容器下部補修(止水)方法の確定
DE-3	2018年度	格納容器上部補修(止水)方法の確定
2-2	2018年度	燃料デブリ取り出し方法の確定

5. 平成26-27年度全体実施計画

(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冠水工法の成立性評価フロー

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

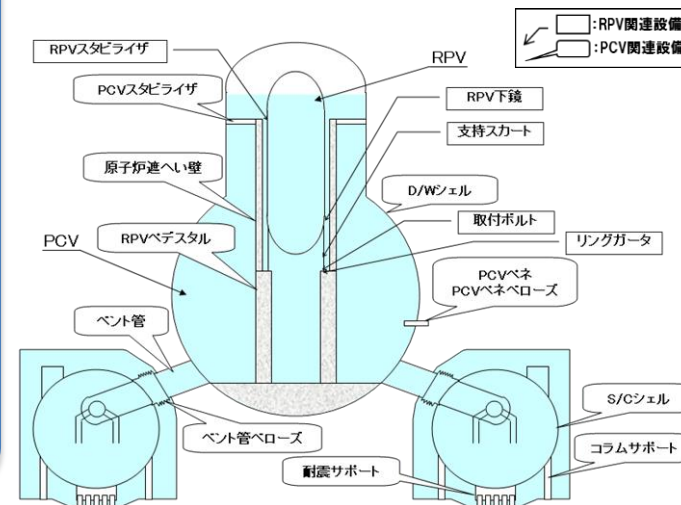
④裕度が低い機器の詳細評価

【詳細評価手法】

- ・有限要素法等による実機を模擬した評価
- ・判定基準(許容値等の設定):原子力関連の規格・基準による許容値体系に囚われず、機器に要求される機能維持が達成できるような基準を設定

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 ・建屋損傷 ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・高気圧室側中心:満水 ・トラス室水位 ・OP:9680 	<ul style="list-style-type: none"> ○現状健全 ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:OP1100 ・ベント管内:原部流水 ・トラス室水位 ・OP:12200 	<ul style="list-style-type: none"> ○現状想定(事故後13年) ・建屋損傷 ・D/W水位:約8.5m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・トラス室水位 ・OP:3200
H25-2	<ul style="list-style-type: none"> ○トラス室水板制御 ・建屋損傷 ・オフフロ階付加設備:約5100t ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・高気圧室側中心:満水 ・トラス室水位 ・OP:300 	<ul style="list-style-type: none"> ○PCV部分冠水 ・オフフロ階付加設備:約5500t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約5m ・S/C内: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 ・オフフロ階付加設備:約3900t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約8.5m ・S/C内: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補強 ・建屋損傷 ・オフフロ階付加設備:約5100t ・D/W水位:約3.3m ・S/C内:OP3570 ・ベント管内:空気 ・高気圧室側中心:満水 ・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 ・オフフロ階付加設備:約5500t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約35m ・S/C内: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 ・オフフロ階付加設備:約3900t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約35m ・S/C内:OP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位 ・OP:300



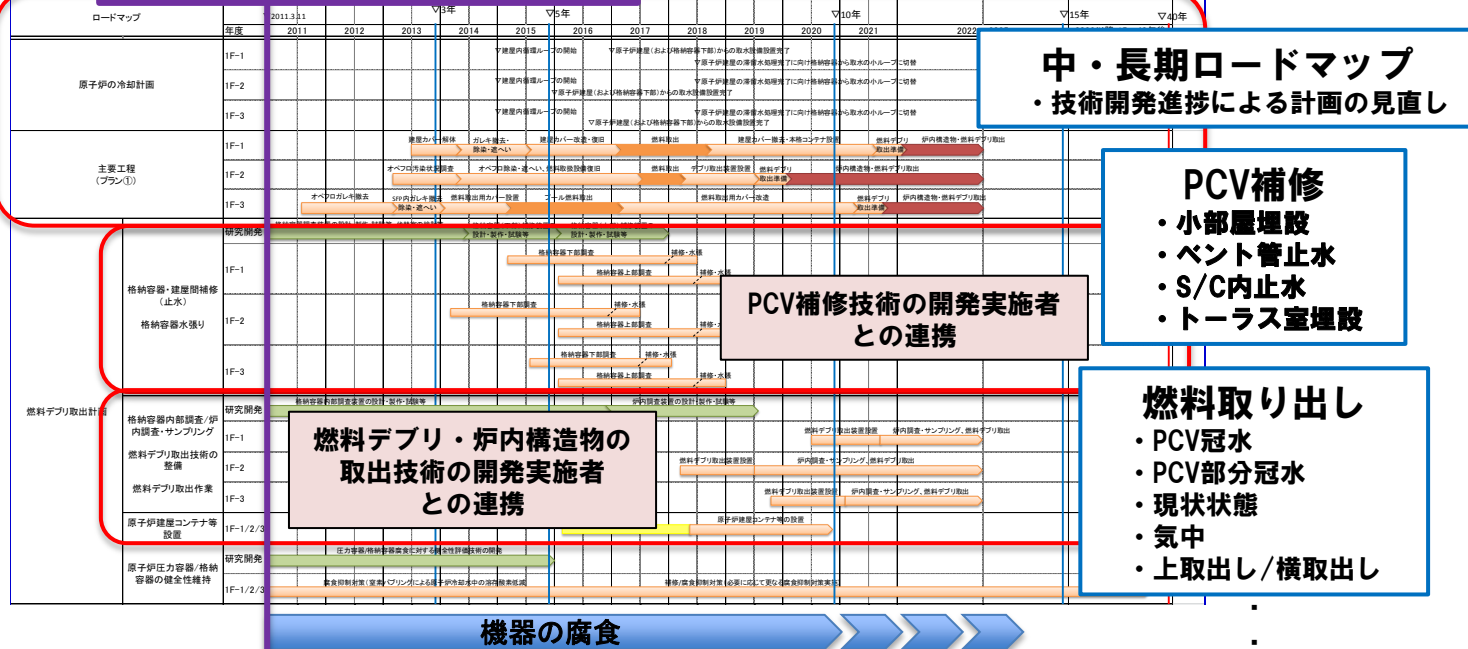
評価対象設備(例)

※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。

5. 平成26-27年度全体実施計画

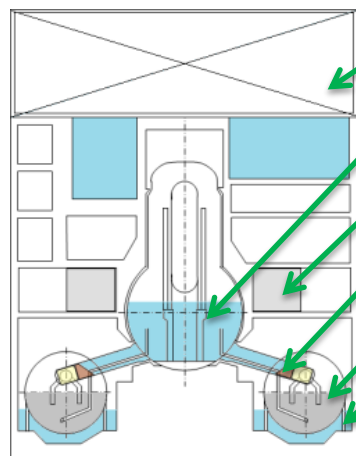
(2) PCVの補修(止水)や水位上昇を踏まえた機器の耐震強度の簡易評価 (東芝、日立GE分)

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

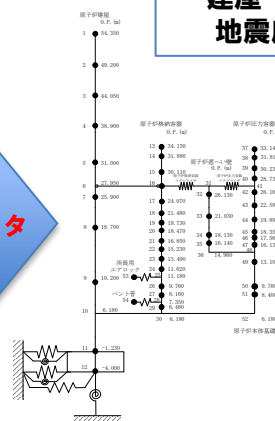
これらの状態と地震の組み合わせによる機器の評価が簡易的に実施できる手法を開発する



- 建屋状態
- 燃料取出し設備
- PCV内水位
- 小部屋埋設
- ベント管内補修
- S/C内止水
- トーラス室埋設
- 機器の腐食

パラメータ

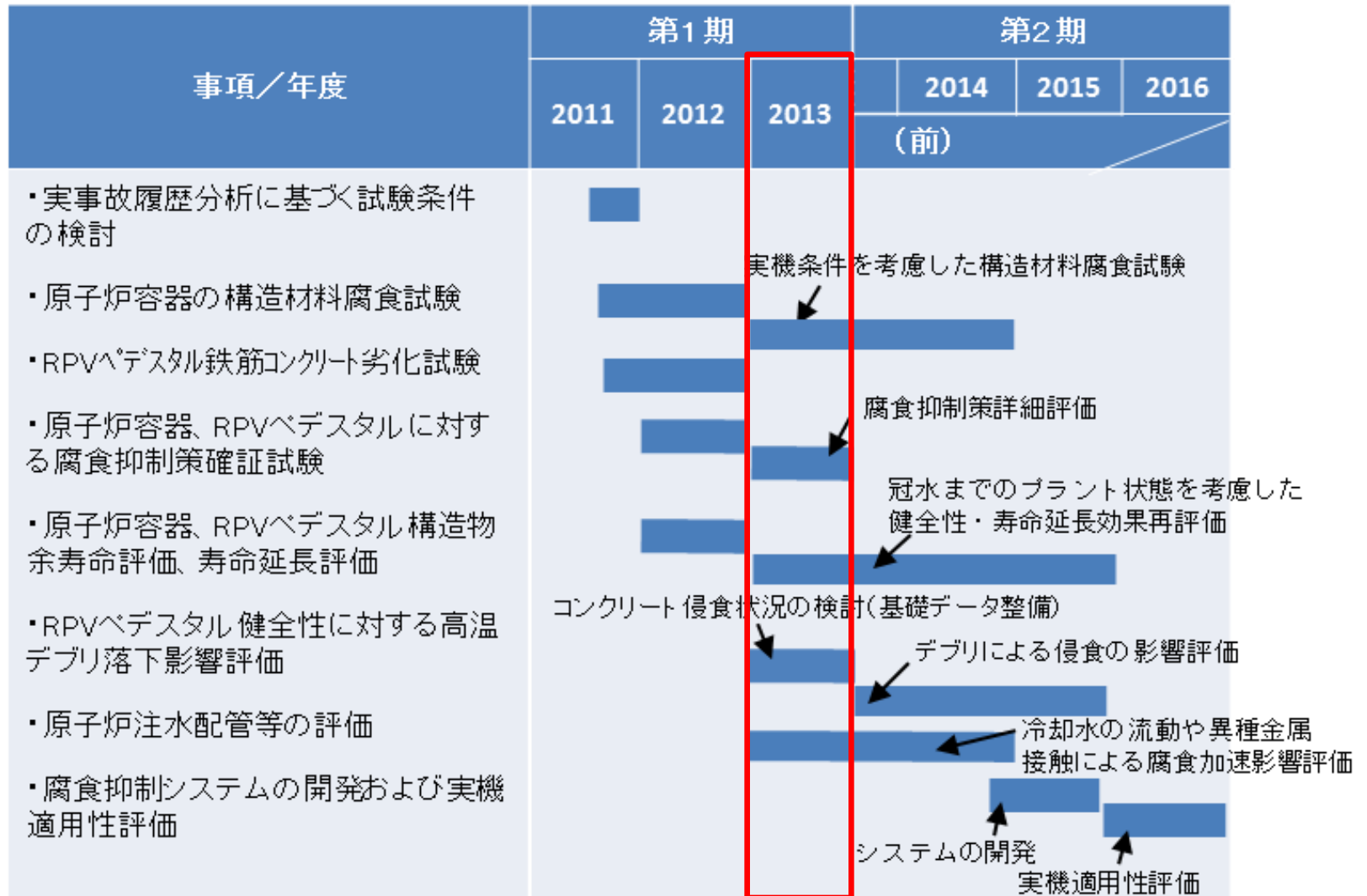
建屋-機器連成地震応答解析



複数のパラメータ組合せにより感度解析を実施し、各質点での地震荷重負担率を整理

求められるプラント状態での機器の簡易評価

9. 事業工程



10. 基礎基盤研究課題(1/2)

● バウンダリ維持機能に基づく寿命評価

ー PCVシェルにおける炭素鋼の不均一腐食により、ピンホール

が発生する可能性、進展予測

(PCV内面は結露水が流れており、流れの影響による不均一腐食が促進される可能性はないか?)

● 腐食促進リスク

- ー 気液界面での腐食挙動や、炭素鋼の不均一腐食など、腐食メカニズムに立脚した検討
- ー 短期間試験データによる長期間寿命予測の信頼性確保
(劣化機構論に基づいた寿命予測手法の開発)
- ー 実機水質環境の変遷を考慮した腐食挙動評価
- ー 過酷な現場環境を考慮した有効な腐食抑制剤の開発と防食効果の確認

10. 基礎基盤研究課題(2/2)

- 鉄筋コンクリート製RPVペデスタル評価
 - ー コンクリートの強度、物質(酸素、水)移動特性評価
 - ー コンクリート鉄筋の腐食挙動評価(長期腐食挙動、局部腐食の影響)
 - ー 高温燃料デブリ落下を考慮したコンクリート溶融反応(浸食範囲、温度分布、強度低下等)に関する基礎知見の整備
- 終局強度評価
 - ー 許容値 S_u を超えた場合、どうなるのか。
 - ー モックアップ破壊試験
 - ー 弾塑性(大変形)解析
- 高線量下・遠隔で実施可能な材料強度・欠陥の非破壊検査技術
 - ー コンクリート圧縮強度(シュミットハンマー等)
 - ー ひび割れや内在欠陥の検出(コンクリート、鋼材)
 - ー 肉厚測定技術

6. 平成26年度事業成果

(5) ペDESTALの侵食影響評価

● 試験要領策定(東芝、日立GE分)

試験要領例：③RPVペDESTALの耐力評価試験

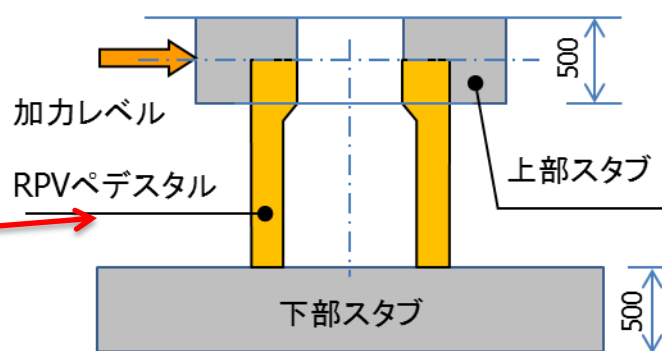
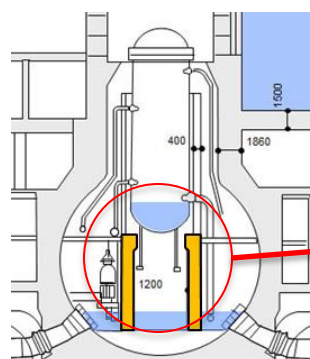
- 高温によるコンクリート劣化が構造体の耐力や破壊性状に及ぼす影響を把握するために、RPVペDESTAL縮小模型を製作し、加熱・水中曝露後、耐力試験を行う。
- 縮小模型の実験・解析結果を実機サイズ円筒形状に展開できるように、相似則に基づいて、応力度とひずみの関係が縮小模型と実機で1:1に対応するように設計する。

③縮小模型試験 ケース(案)

	常温	加熱後水中曝露温度	
		400℃	800℃
普通コンクリート	Case AMN0	Case AMN1	Case AMN2

相似則

相似比	n
長さ	1/n
面積	1/n ²
体積	1/n ³
変位	1/n
応力度	1
ひずみ	1
せん断力	1/n ²
モーメント	1/n ³



1F-1 RPVペDESTAL


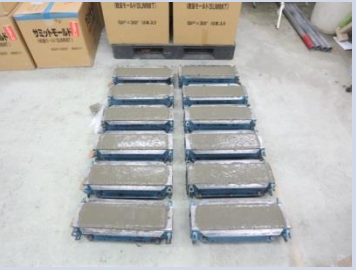
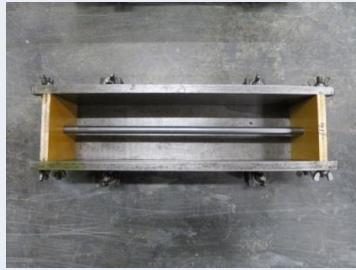

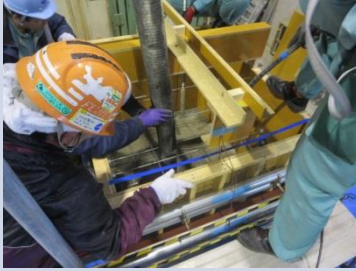

(1F-1の普通コンクリートを対象としている。
材料の影響は円柱試験体による試験で把握)

縮小模型の概要

6. 平成26年度事業成果

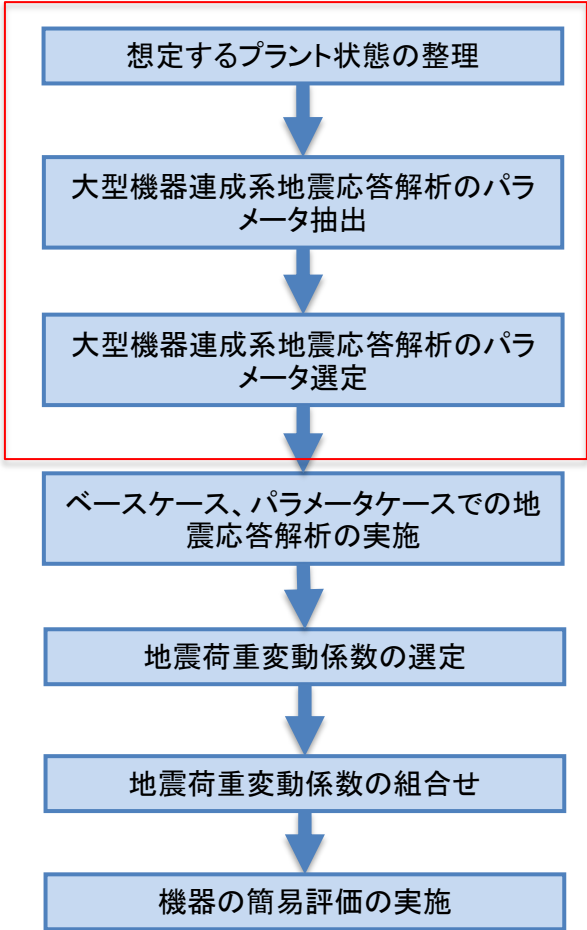
(5)ペDESTALの侵食影響評価

● 試験体製作（東芝、日立GE分）

試験項目 (実施済みの項目のみ)	品質管理試験項目および試験結果	打設状態		養生状況
①円柱試験体による高温加熱暴露試験(普通コン、FAコン)	<ul style="list-style-type: none"> ・スランプ: JIS A1101 練上がり直後, 管理値: $15 \pm 2.5\text{cm}$ ・空気量: JIS A1128 練上がり直後, 管理値: $4.5 \pm 1.5\%$ ・コンクリート温度: JIS A1156 練上がり直後のコンクリート温度 <p style="text-align: center;">品質管理試験結果: ○</p>	 <p>図 FAコンクリート円柱試験体</p>	 <p>図 FAコンクリート曲げ試験体</p>	<p>20°C恒温室内にて材齢7日まで養生後、所定材齢(5~6か月)まで30°C恒温室内にて封緘養生中</p>
④鉄筋の長時間浸漬腐食試験	<ul style="list-style-type: none"> ・スランプ: JIS A1101 練上がり直後, 管理値: $15 \pm 2.5\text{cm}$ ・空気量: JIS A1128 練上がり直後, 管理値: $4.5 \pm 1.5\%$ ・コンクリート温度: JIS A1156 練上がり直後のコンクリート温度 <p style="text-align: center;">品質管理試験結果: ○</p>	 <p>図 試験体型枠</p>	 <p>図 試験体打設状況</p>	<p>20°C恒温室内にて、28日間(ひび割れ導入時まで)封緘養生中</p>
⑤ブロック試験体による高温加熱・暴露試験	<ul style="list-style-type: none"> ・スランプ: JIS A1101 打設場所*, 管理値: $15 \pm 2.5\text{cm}$ ・空気量: JIS A1128 打設場所, 管理値: $4.5 \pm 1.5\%$ ・コンクリート温度: JIS A1156 打設場所でのコンクリート温度 (*物量の関係で製造場所からアジテータ車で打設場所に運搬) <p style="text-align: center;">品質管理試験結果: ○</p>	 <p>図 ポンプ車筒先の打設状況</p>	 <p>図 ブロック試験体の打設終了状況</p>	<p>5か月間屋内封緘養生中</p>

7. 4 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-2

簡易評価の実施フロー



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

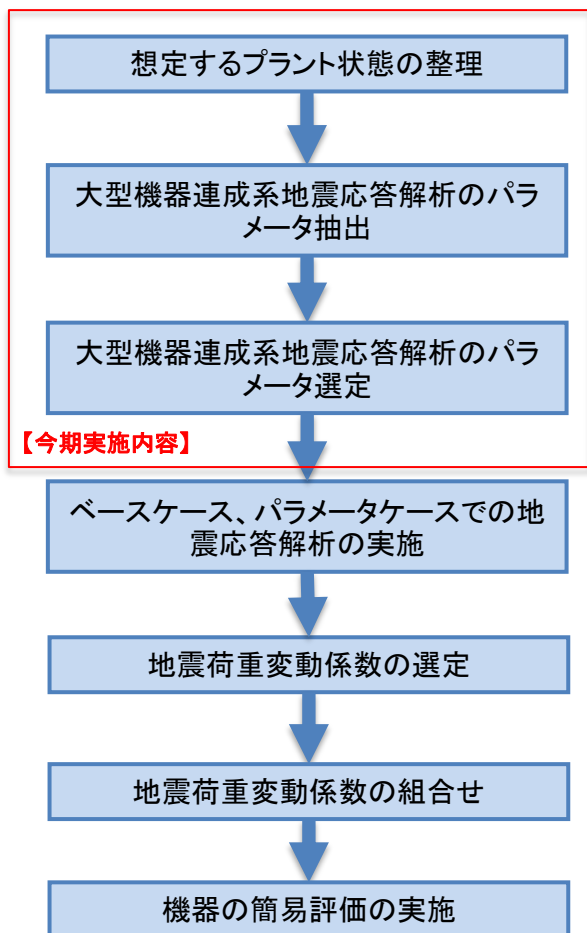
プラント状態		地震応答解析におけるパラメータ		
		モデル変更	重量変更	剛性変更
建屋状態	建屋損壊の有無	○		
	オペフロ階の状況		○	
	小部屋内コンクリート充填		○	
	トラス室内コンクリート充填		○	
	デブリ取出し工法(上取出し/横取出し)*		○	○
原子炉格納容器状態	D/W内水位		○	
	S/C内水位		○	
	S/C内コンクリート充填		○	
	デブリ堆積		○	
	ベント管閉止	変更なし		
	腐食による機器の減肉			○
	RPVペDESTAL状態			○
	真空破壊管補修(1F-1のみ)	変更なし		
原子炉圧力容器状態	炉心燃料及び炉内構造物		○	
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

* デブリ取出し工法では重量と剛性がパラメータになると仮定

6. 平成26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)

簡易評価の実施フロー



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		○	
	デブリ取出し工法(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		○	
	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			○

* デブリ取出し工法では重量と剛性がパラメータになると仮定

腐食評価 プラントデータと長期的曝露環境

1～3号機RPV/PCVの温度、イベント等の調査

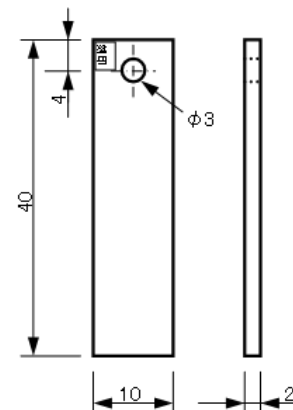
東京電力(株)ホームページ公開情報より整理

時系列	2011/3/11～ 温度不明時期	3/20頃～ /温度測定復帰初期	～7月頃 /東電工程Step1	～12月 /東電工程Step2	2012/1～
	①温度不明 (MAAP解析結果)	②測定復帰初期	③100～200℃	④50～100℃	⑤50℃以下
	短期条件		中期条件		
温度 (3号機 PCV (例))					
水質	海水注入開始 2011/3/13頃	淡水注入切替 2011/3/25頃	水源タンクへの 窒素ガスバブリング: 4/12 水処理設備処理水の 利用開始: 6/27	—	1号機PCV滞留水 Cl: 19ppm 2012/10/12
窒素封入	—	—	PCV窒素封入 (1F-1: 4/7, 1F-2: 6/28, 1F-3: 7/14)	RPV窒素封入 (1F-1: 11/30, 1F-2: 12/1, 1F-3: 11/30)	—
その他	ほう素注入 (1F-1: 3/12 1F-3: 3/13)	ほう素注入 (1F-2: 3/26)	ほう素注入 (1F-3: 5/15)	ほう素注入 (1F-2: 11/2 1F-3: 9/16)	—

腐食試験計画

● 試験条件

- 材 料: PCV材(炭素鋼SGV480)、
RPV材(低合金鋼SQV2A)
- 環 境: 中期条件(80℃、20倍希釈海水)、
長期条件(50℃、200倍希釈海水)
- 浸漬時間: 50, 100, 500h



腐食試験片形状

● 試験マトリックス

No	温度	海水濃度*	pH	ほう素	DO濃度	試験時間	備考
1	80℃	20倍希釈	中性	なし	大気飽和	50h, 100h, 500h	中期条件
2	50℃	200倍希釈	中性	なし	大気飽和	50h, 100h, 500h	長期条件
3	50℃	200倍希釈	中性	なし	窒素脱気	50h, 100h, 500h	長期条件
4	80℃	20倍希釈	中性	五ほう酸ナトリウム (目標1200ppmB)	大気飽和	50h, 100h, 500h	中期条件
5	80℃	20倍希釈	酸性	ほう酸(目標pH5)	大気飽和	50h, 100h, 500h	中期条件

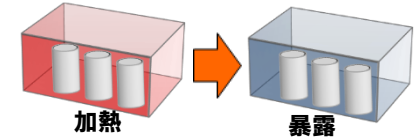
*20倍希釈:Cl⁻濃度約950ppm、200倍希釈:Cl⁻濃度約95ppm

7.2 今後の実施事項 ペDESTALの侵食影響評価-2

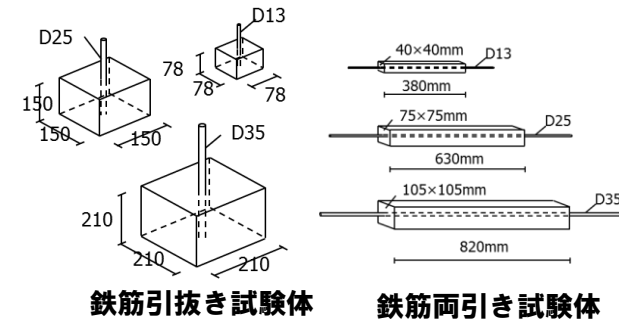
● 試験要領策定

	試験/評価項目	目的	試験/解析ケース	補足
①	円柱試験体による高温加熱・暴露試験	高温加熱後の水中暴露による強度性状の把握し、コンクリート構成則を設定	圧縮:78ケース 曲げ:3ケース 割裂:49ケース	普通コンクリート及びFAコンクリートそれぞれで同数実施
②	鉄筋付着劣化試験	高温によるコンクリート劣化や海水による鉄筋腐食が鉄筋付着強度とテンションスチーピング性状に及ぼす影響評価	引抜き:39ケース 両引き:39ケース 圧縮:42ケース 割裂:6ケース	普通コンクリート
③	RPVペDESTALの耐力評価試験	高温によるコンクリート劣化による構造体の耐力や破壊性状に及ぼす影響の把握	3ケース	普通コンクリート
③'	RPVペDESTALの耐力評価試験シミュレーション解析	縮小モデルのシミュレーション解析を実施し、設定したコンクリート構成則や解析方法の妥当性を確認	3ケース	普通コンクリート
④	鉄筋の長時間浸漬腐食試験	長期間浸漬データ取得による腐食量予測精度を向上	60ケース	普通コンクリート
⑤	ブロック試験体による高温加熱・暴露試験	実機寸法効果(厚さ)を考慮した断面内強度分布の把握	3ケース	普通コンクリート及びFAコンクリートそれぞれで同数実施
⑥	SA後の構造物の耐力評価法の開発	①～⑤の試験結果を反映し実機RPVペDESTALの耐力評価手法を開発する	3ケース	普通コンクリート及びFAコンクリートそれぞれで同数実施
⑦	RPVペDESTALアンカーの耐力評価	デブリ浸食がRPVペDESTALの耐力に及ぼす影響評価	2ケース	普通コンクリート
⑧	RPVスカート部の耐力評価	RPVペDESTAL頂部におけるスカート部の健全性確認	2ケース	普通コンクリート
まとめ	実機RPVペDESTALの健全性評価	⑥～⑧の結果から実機RPVペDESTALの構造物全体としての健全性を評価	—	—

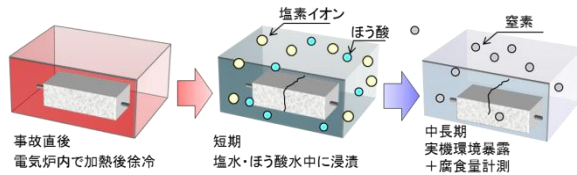
① 円柱供試体による高温加熱・暴露試験



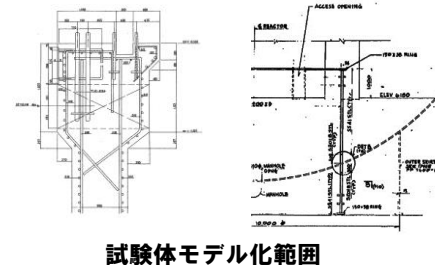
② 鉄筋付着劣化試験



④ 鉄筋長時間浸漬腐食試験

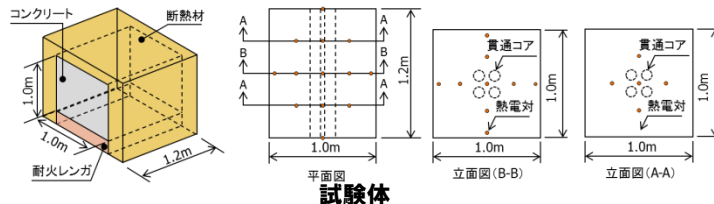


⑦⑧ RPVペDESTALアンカー、RPVスカートの耐力評価解析



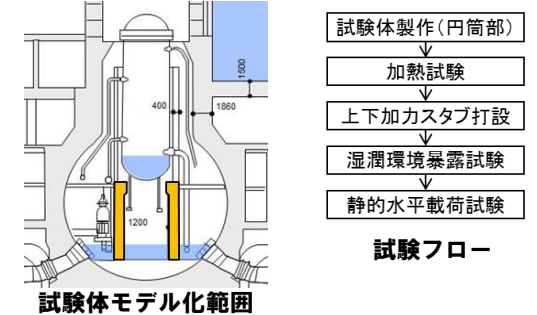
試験体モデル化範囲

⑤ ブロック試験体による高温加熱・暴露試験



試験体

③ RPVペDESTALの耐力評価試験



③' RPVペDESTALの耐力評価試験シミュレーション解析

基準値を満足する欠損率を算定

⑥の評価手法により燃料デブリによる侵食を考慮した想定断面での暫定的な評価を実施