

日本原子力学会 2015年秋の大会
福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション
「福島第一原子力発電所の中長期戦略と研究開発」
個別セッションC 構造健全性

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

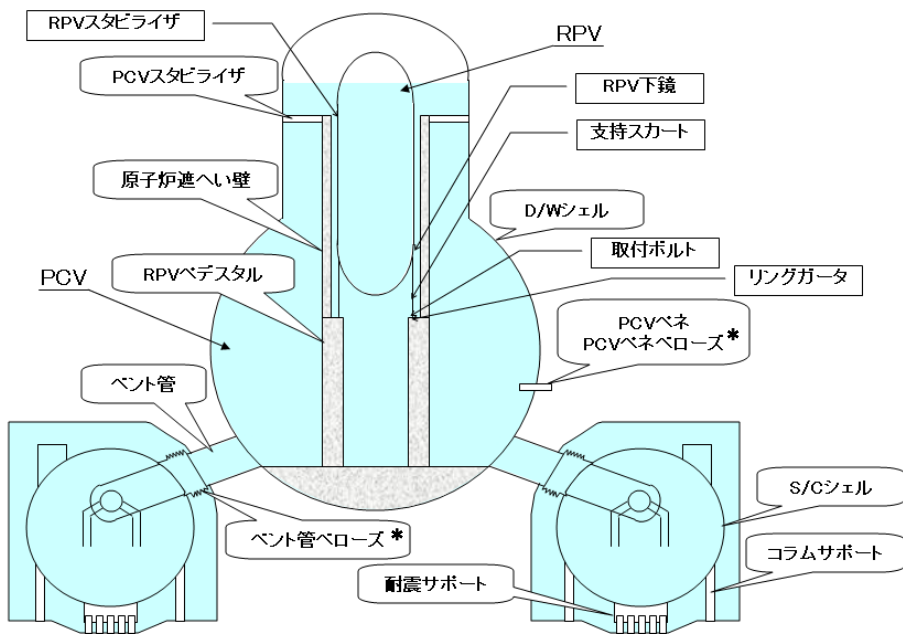
- 1. 目的**
- 2. 実施概要**
- 3. 腐食評価**
- 4. 構造健全性試験評価**
- 5. ここまでのまとめ**
- 6. 主な課題**
- 7. 今後の実施事項**

おことわり: 本報告における、すべての数値(推定値、評価値とも)やプラント構成は試験評価のために設定または評価されたものであって、今後、予告なく変更される可能性があります。

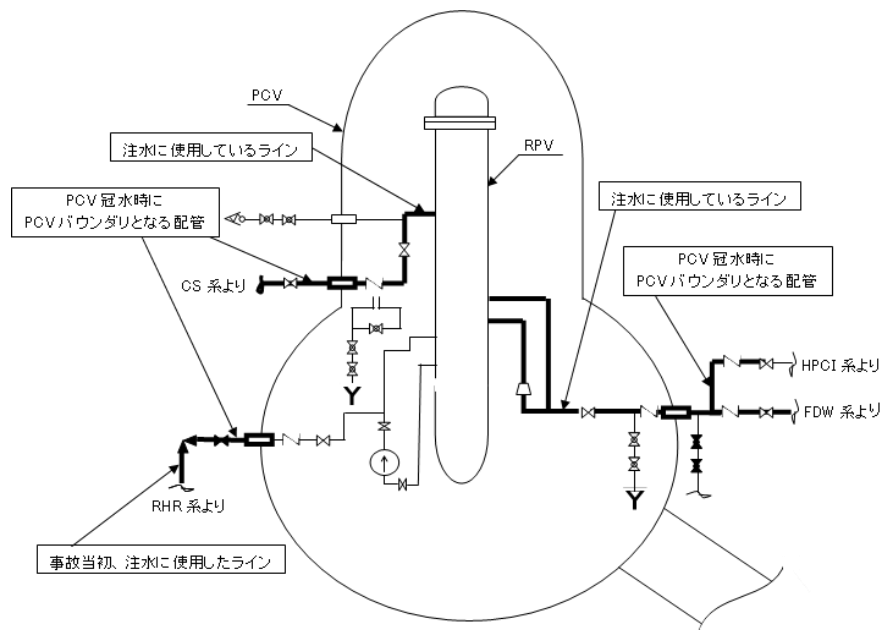
1. 目的

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。



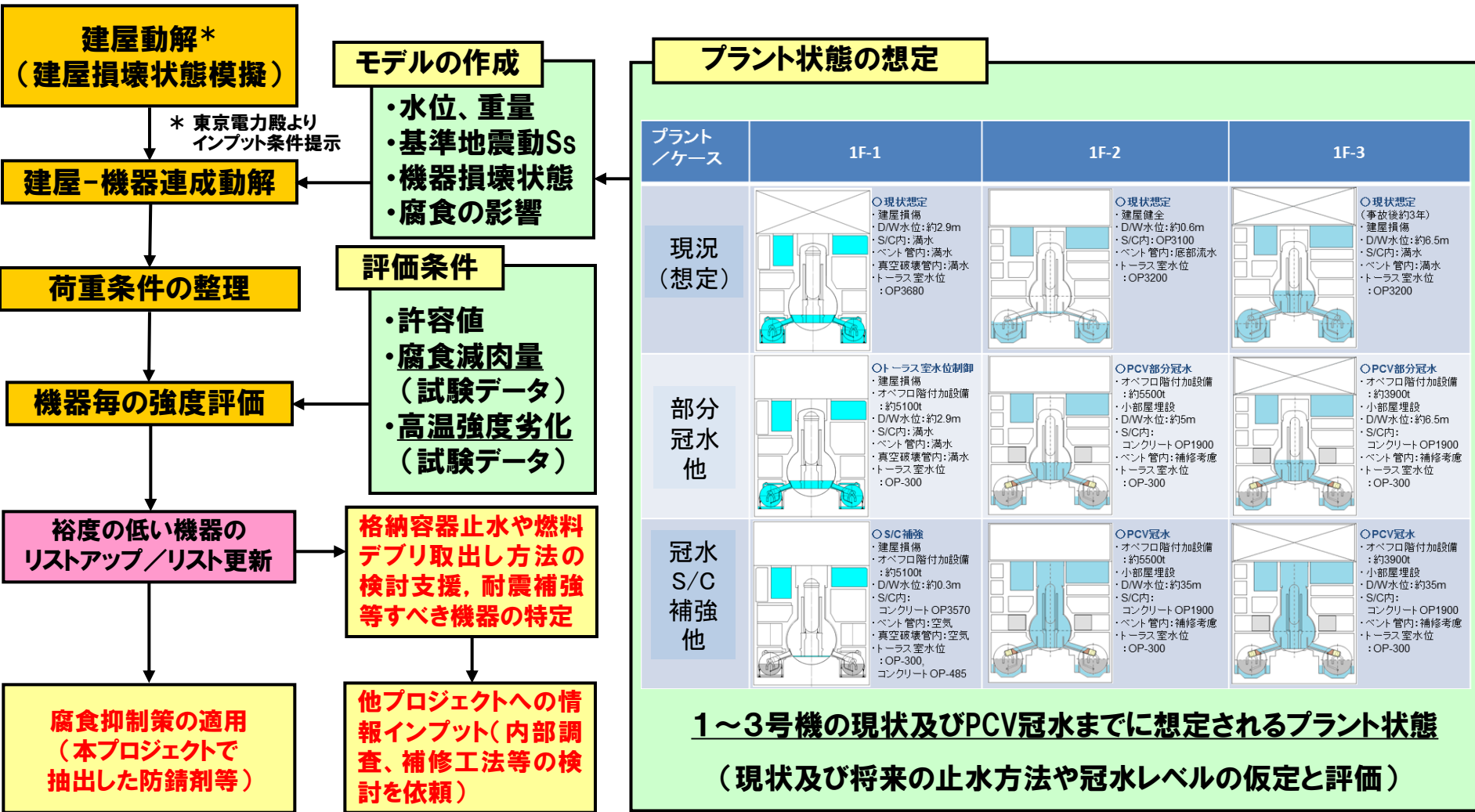
原子炉格納容器概念図



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



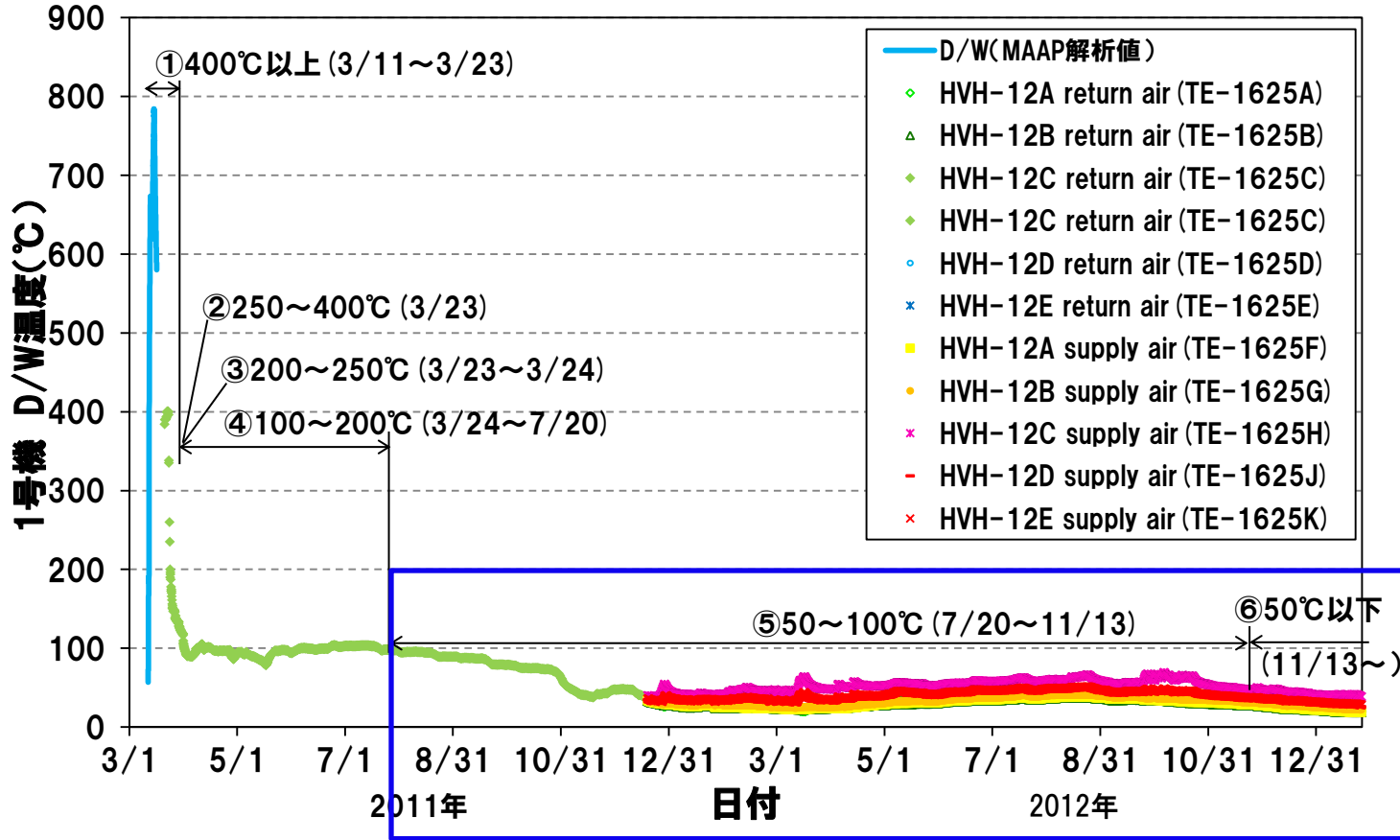
1F: 福島第一原子力発電所

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)

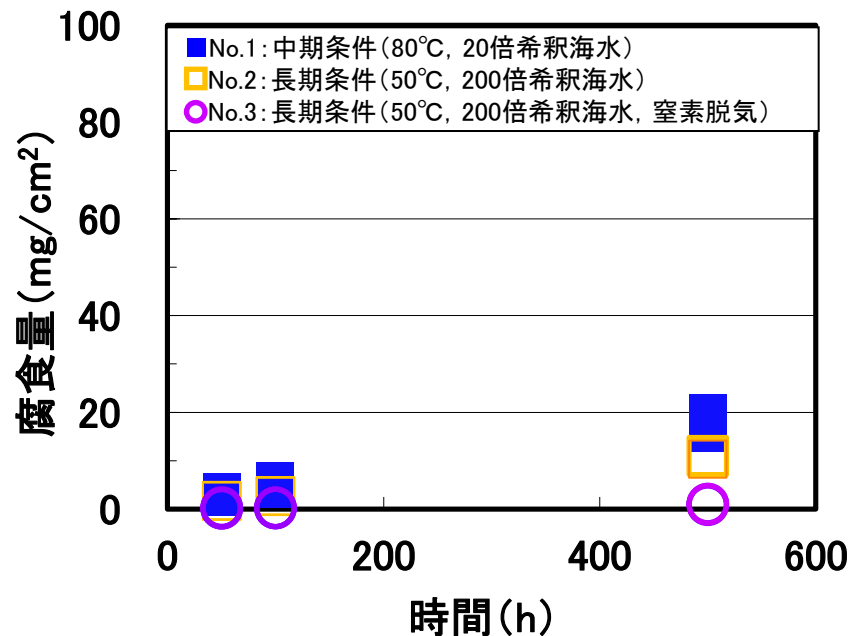
 : IRID実施(東芝、日立GE、三菱重工)にて試験を実施

 : 電力中央研究所にて試験を実施(技術協力)

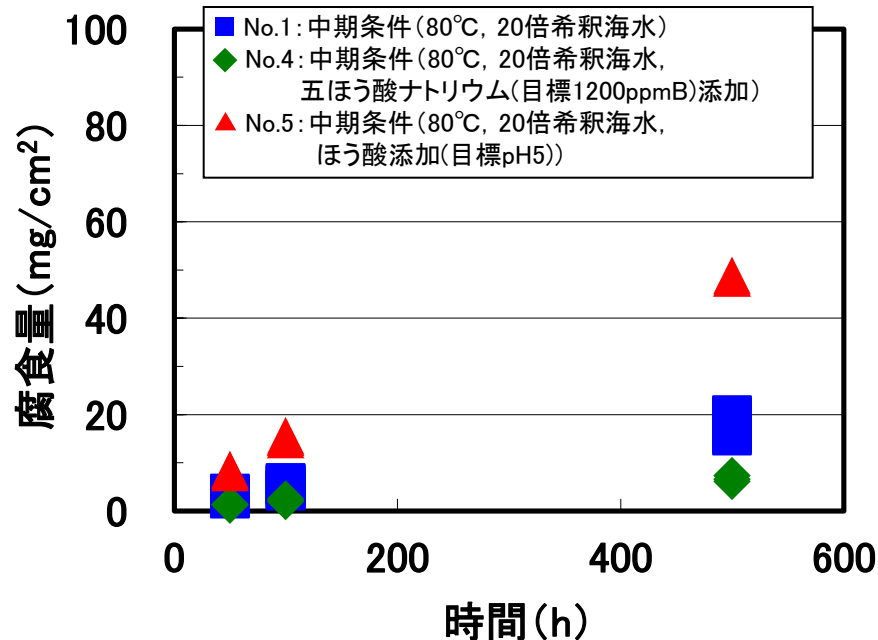
 : 日本原子力研究開発機構にて試験を実施(技術協力)

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)

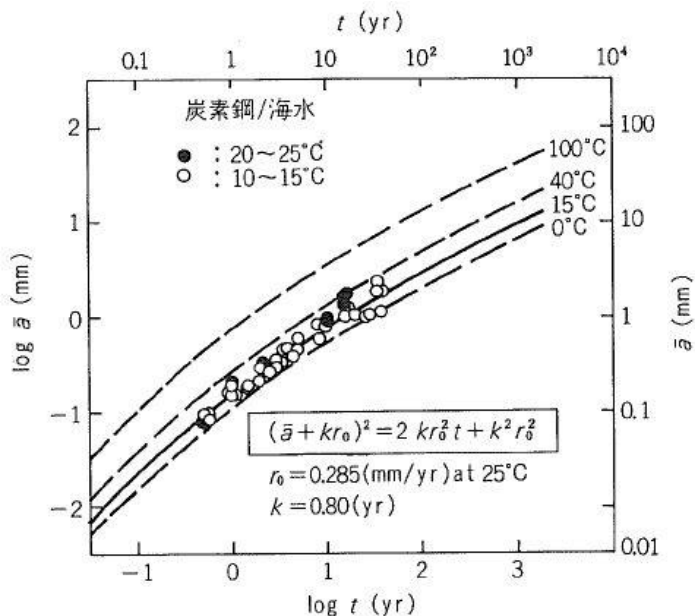
- 温度および塩化物イオン濃度の低下により、腐食量が小さくなることが確認された。
- 窒素脱気による腐食抑制効果が確認された。
- 五ほう酸ナトリウム添加による腐食量の減少とほう酸添加による腐食量の増加が確認された。

3.5 腐食減肉の推定-1

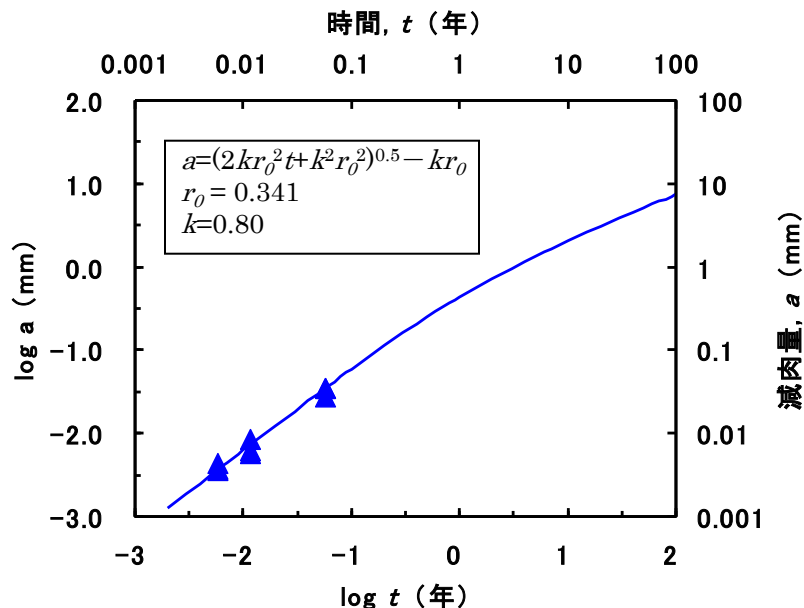
● 腐食速度の検討（100℃以下の期間(⑤50～100℃以下、⑥50℃以下)）

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

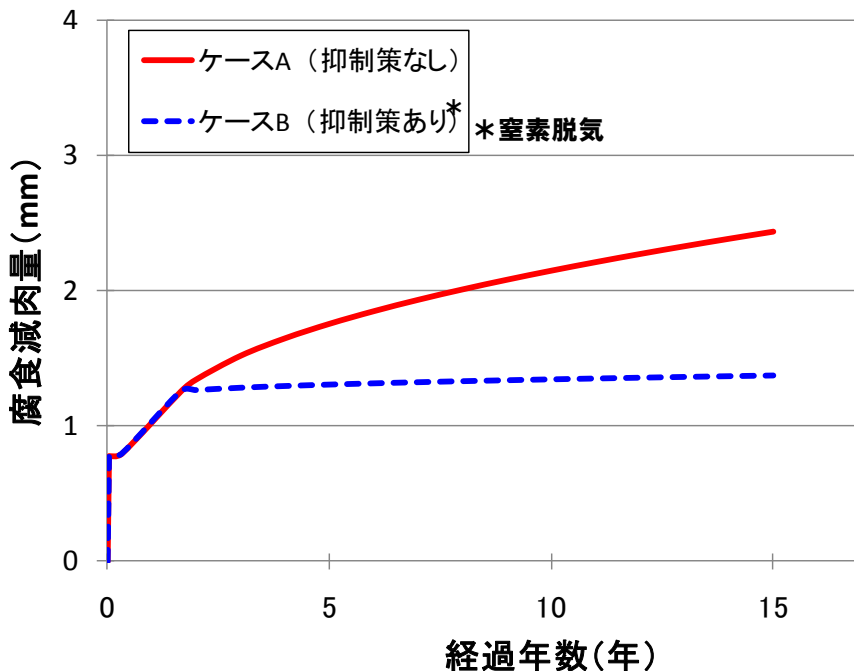
PCV設備(炭素鋼SGV480)の減肉量算出に用いる腐食速度(例)

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

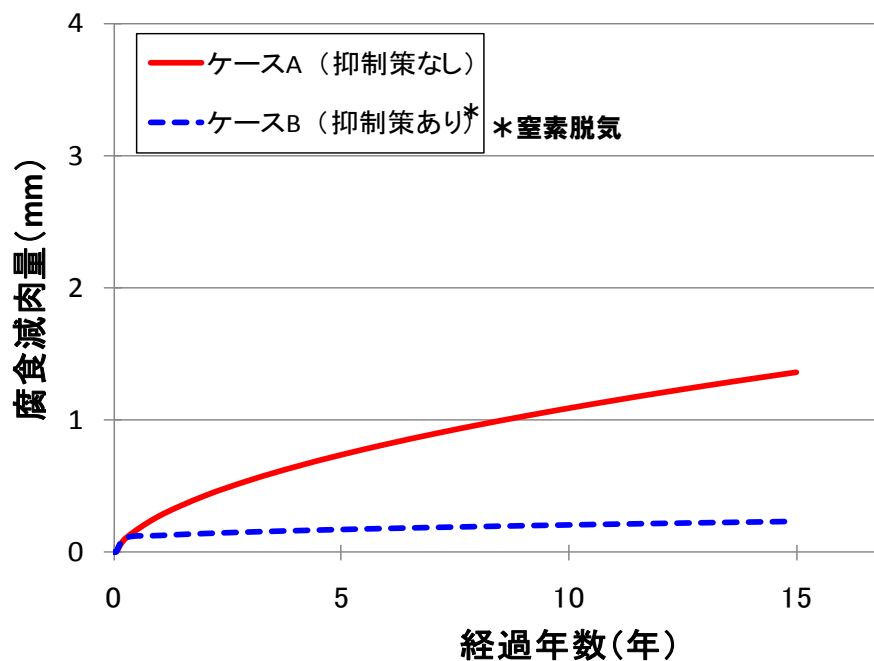
● 推定減肉量の算出(1号機PCV(例))



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

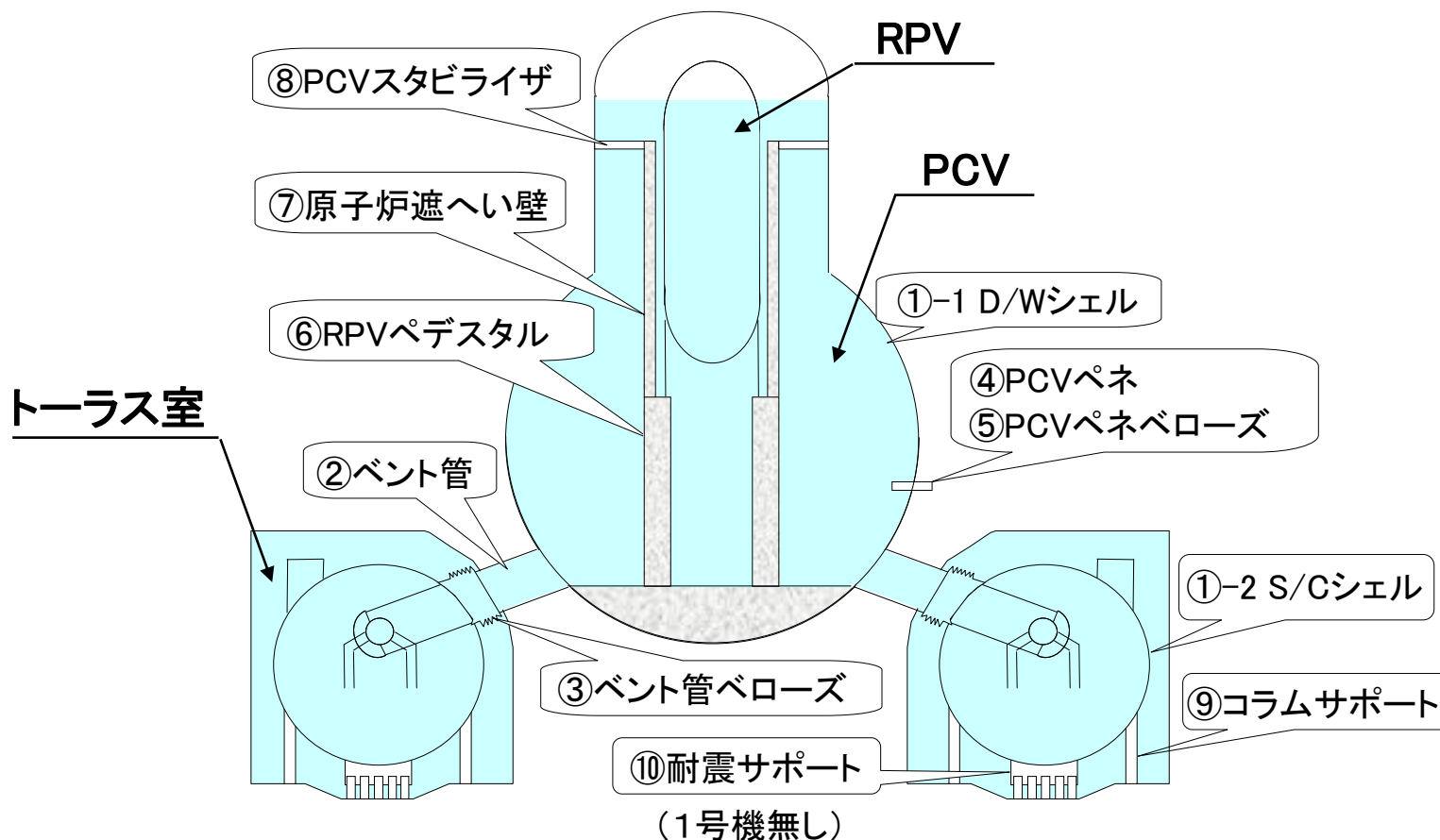
ケース	5年	10年	15年
ケースA(抑制策なし)	0.74	1.09	1.36
ケースB(抑制策あり)	0.18	0.21	0.24

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

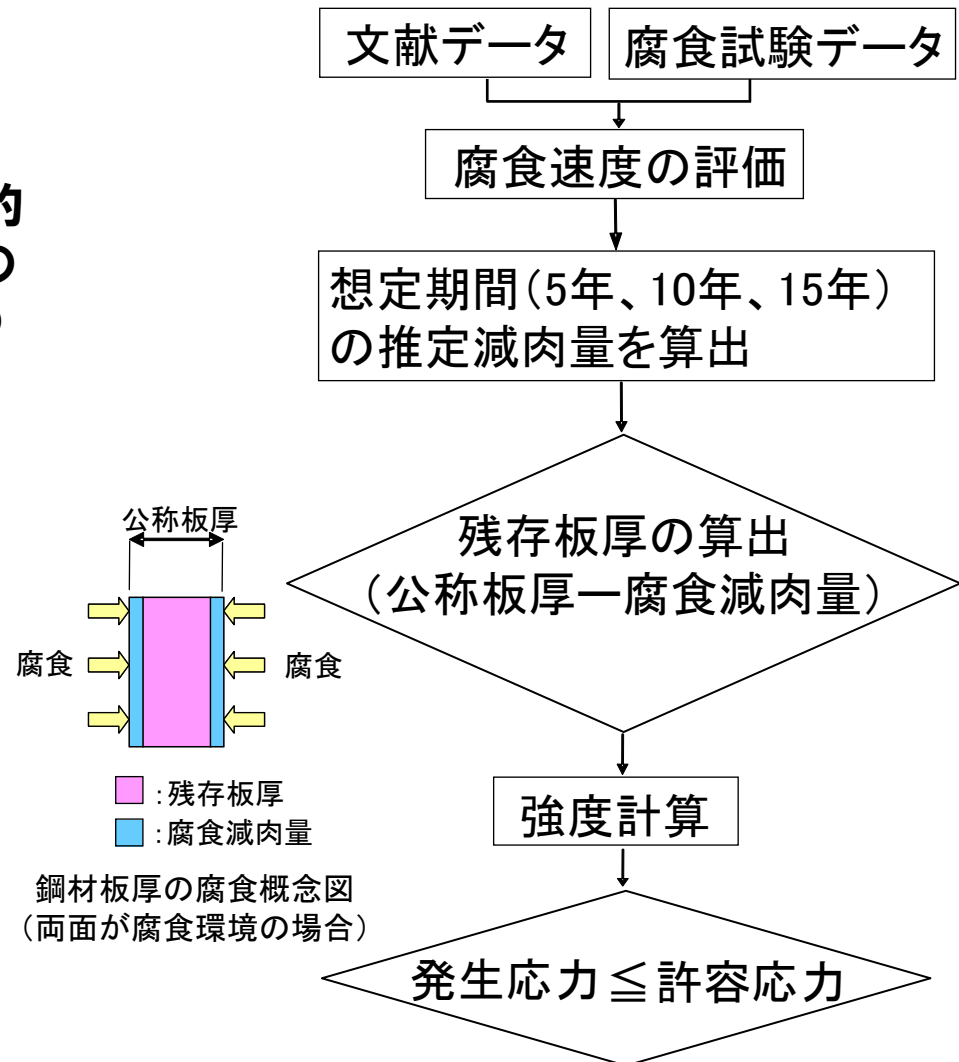
健全な状態(腐食発生前)で裕度が比較的小さい部分を代表として選定。2、3号機の形状はほぼ同様であるため、3号機のものとした。

(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)

5. ここまでのまとめ

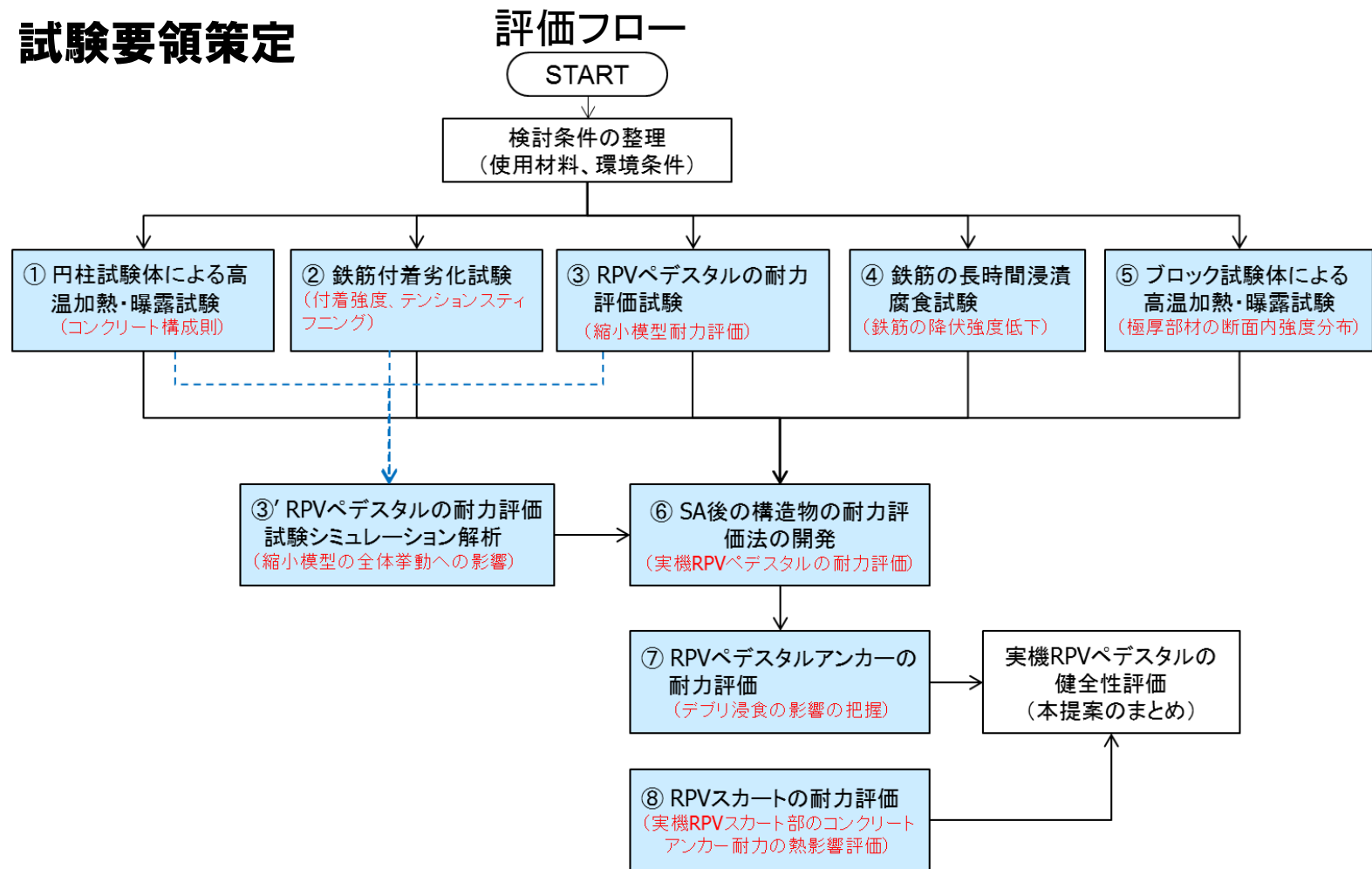
- PCVならびにS/Cの事故直後から15年後先までの腐食減肉を評価した。腐食抑制方策(防錆剤等)により今後の腐食量を抑制できる余地がある。
- 15年後までのPCVの構造健全性を試評価した。一部想定ケースで詳細評価や補強の検討が必要なものがあつた。

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

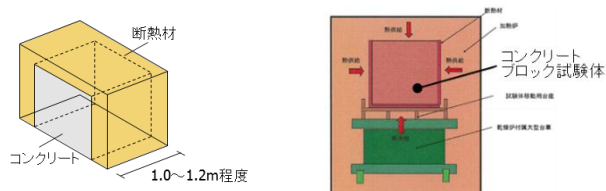
● 試験要領策定



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

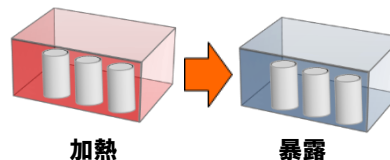


試験体

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

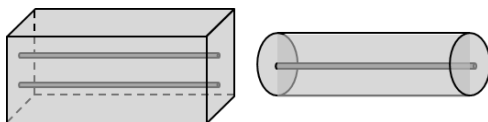


加熱

曝露

強度回復状況把握、強度試験を実施

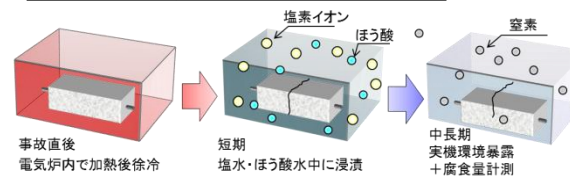
鉄筋付着劣化試験イメージ



試験体

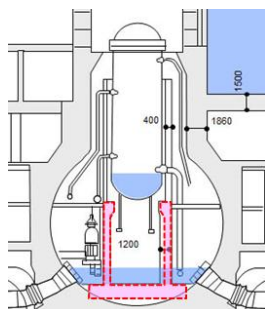
加熱・水中曝露後、両引き試験を実施

鉄筋長時間浸漬腐食試験イメージ

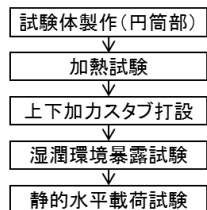


べき乗則に基づく腐食量予測精度向上

RPVペDESTALの耐力評価試験イメージ



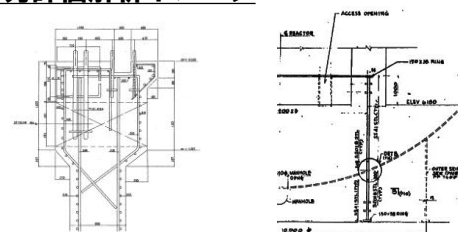
試験体モデル化範囲



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

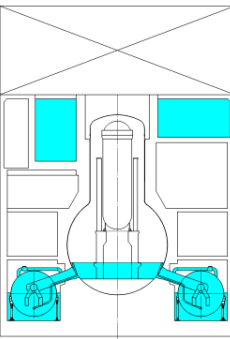
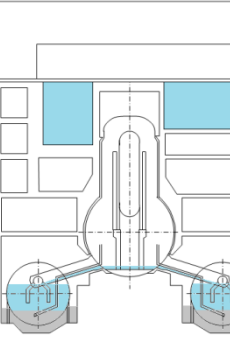
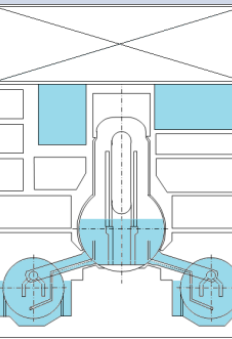
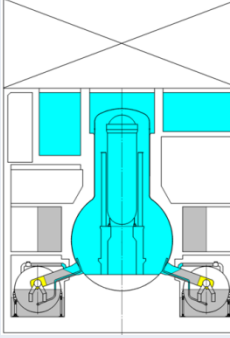
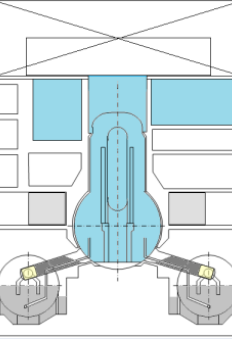
燃料デブリによる侵食を考慮した想定断面での暫定的な評価を実施

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 (例)

- ◆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%(レギュトリーガイド) (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%(レギュトリーガイド) (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%(レギュトリーガイド) (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%(レギュトリーガイド) (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%(レギュトリーガイド) (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 燃料デブリ取り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)

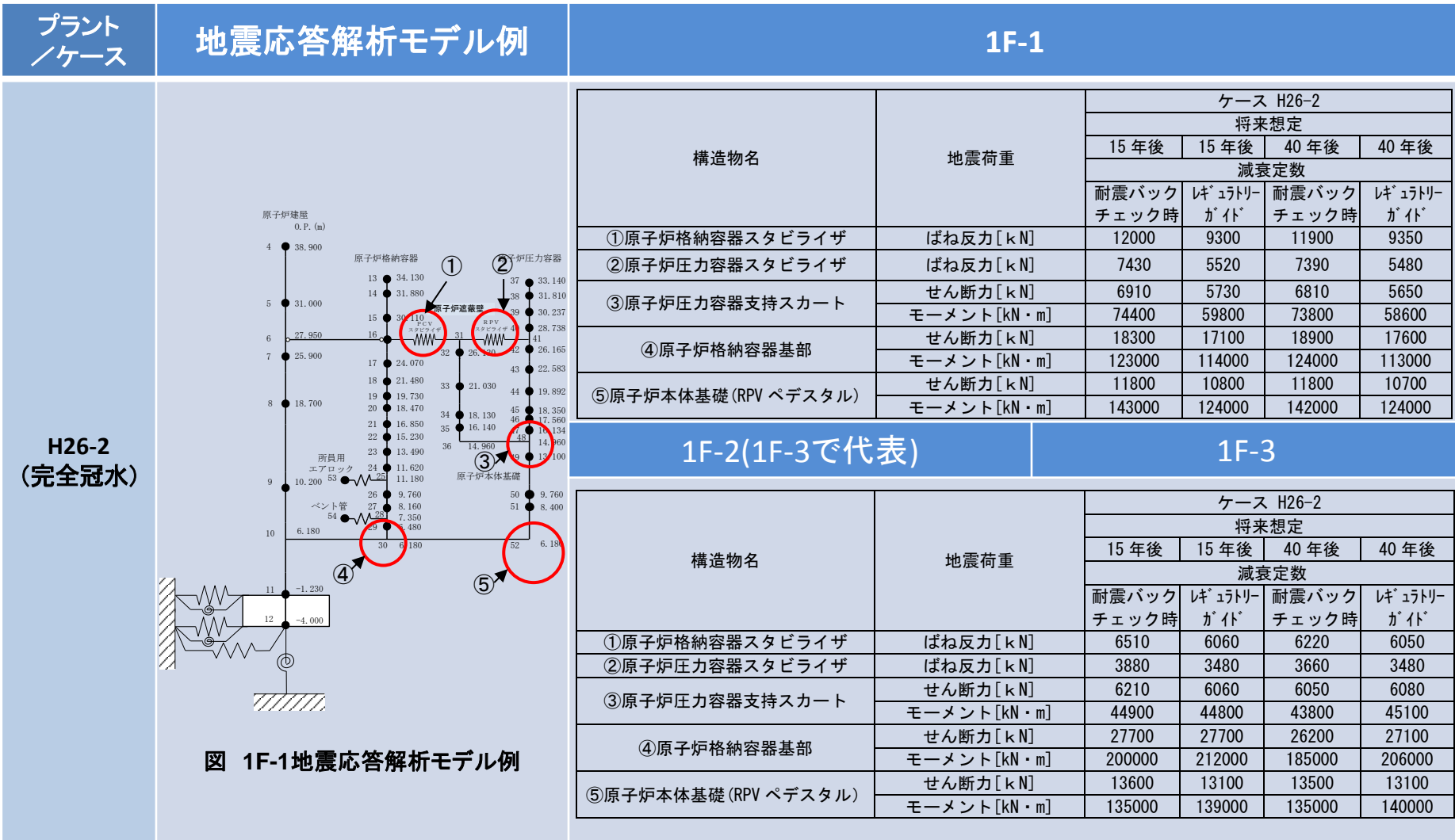


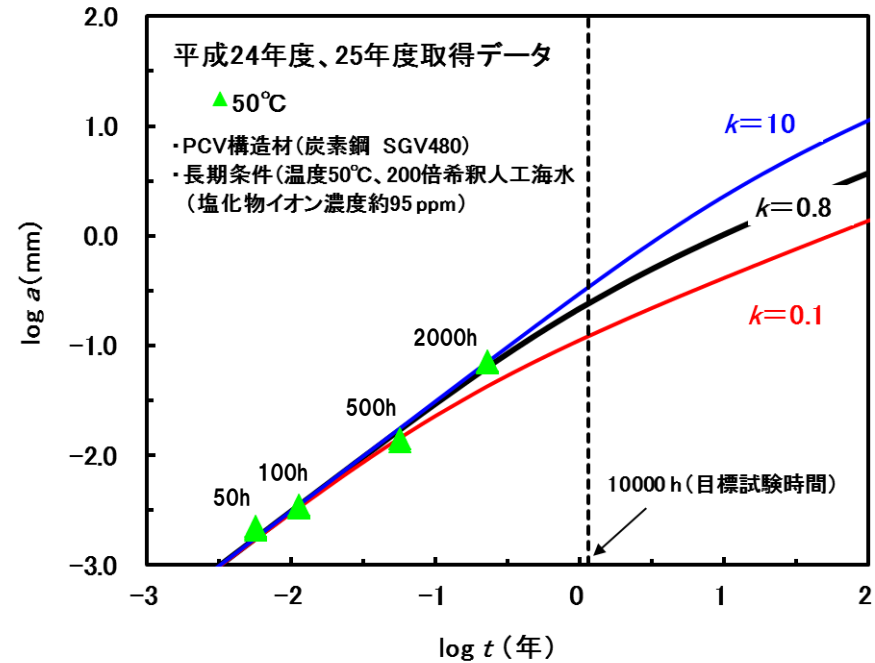
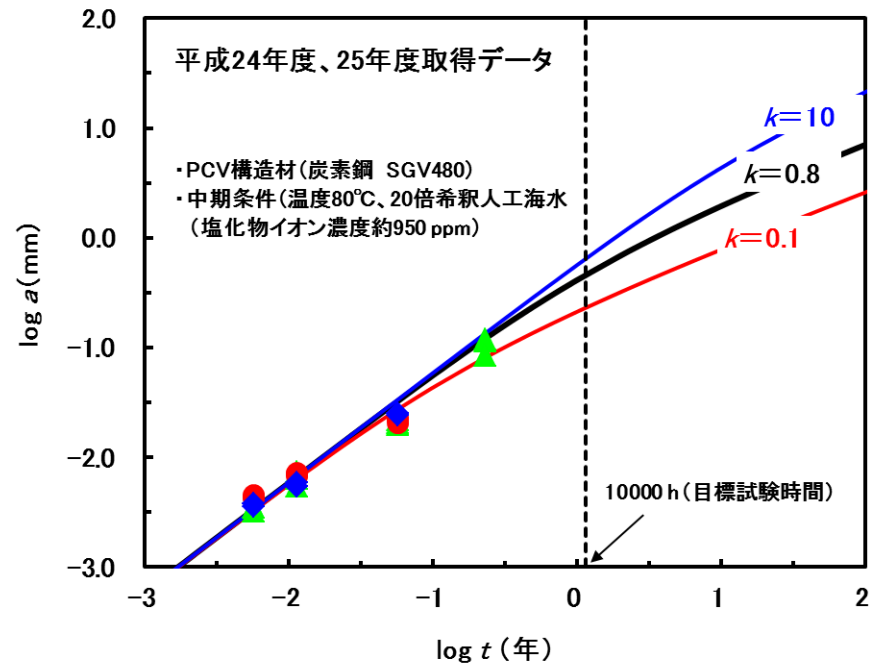
図 1F-1地震応答解析モデル例

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)、r₀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。



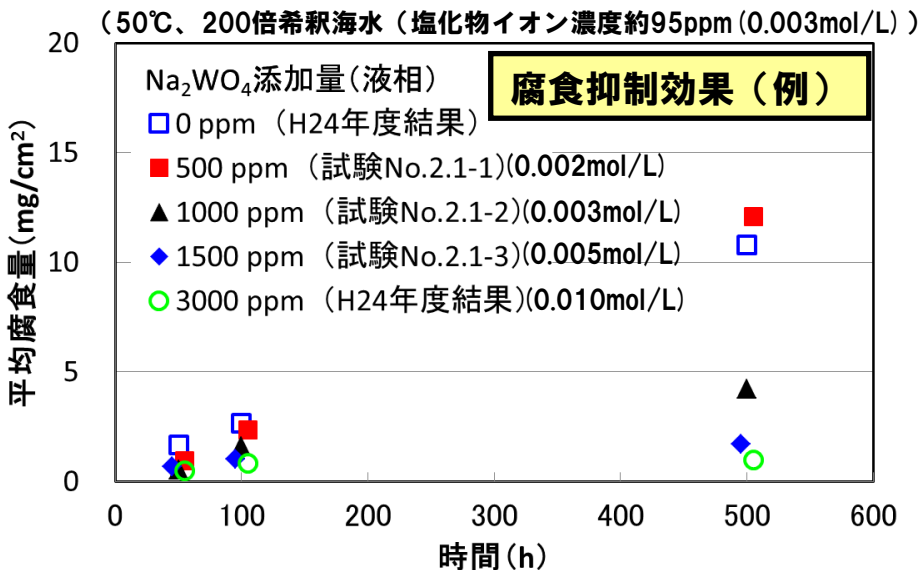
1)腐食防食協会, 金属の腐食・防食Q&A コロージョン110番, 丸善, p.11(1988).

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