

**廃炉・汚染水対策事業費補助金**

**圧力容器／格納容器の腐食抑制技術の開発**

**成果報告**

**平成29年7月**

**技術研究組合 国際廃炉研究開発機構**

# 目次

---

1. 目的
2. 1F RPV/PCV機器の腐食対策方針
3. 全体工程
4. 中長期ロードマップにおける位置付け
5. 平成28年度進捗状況(実施工程と実績)
6. 防錆剤の開発状況のまとめ(平成27年度までの成果)
7. 防錆剤の開発に関する課題
8. 公募要領の実施内容と課題との対応
9. 平成28年度全体計画
10. 平成28年度事業成果
11. 全体のまとめ
12. 他研究開発プロジェクトとの関係
13. 平成28年度実施体制

# 1. 目的

- 事故発生後、海水に曝された圧力容器(RPV)／格納容器(PCV)の機器に対し、燃料デブリ取り出しまでの長期間、構造材料の腐食の進行を防ぎ、健全性を維持するための腐食抑制技術の実機適用性を評価・開発し、円滑な廃炉作業に資する。
- 事故直後から実施されている注水の脱気処理やPCV内の窒素封入により、RPV/PCVの腐食はある程度抑制されていると考えられるものの、燃料デブリ取り出し時にはPCV内は大気開放状態になることも考えられることから、窒素封入に代わる腐食抑制技術(防錆剤)を確立する。

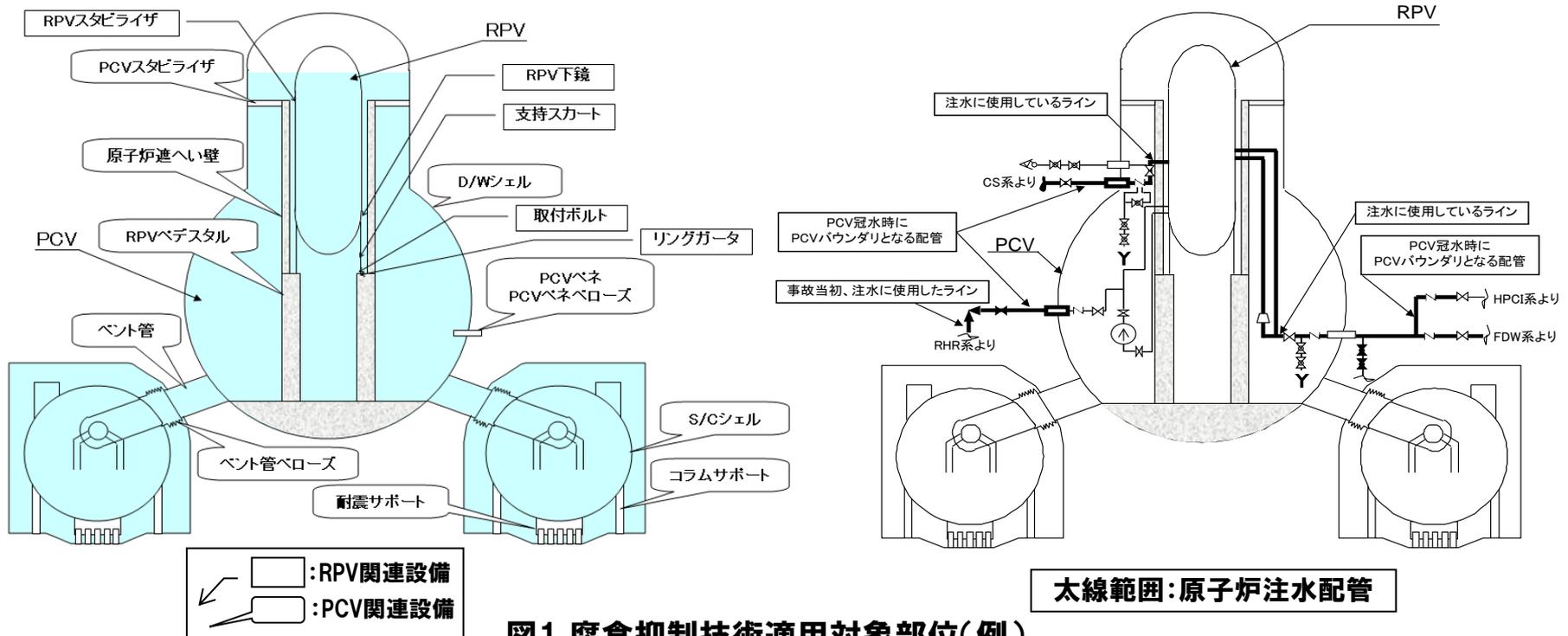
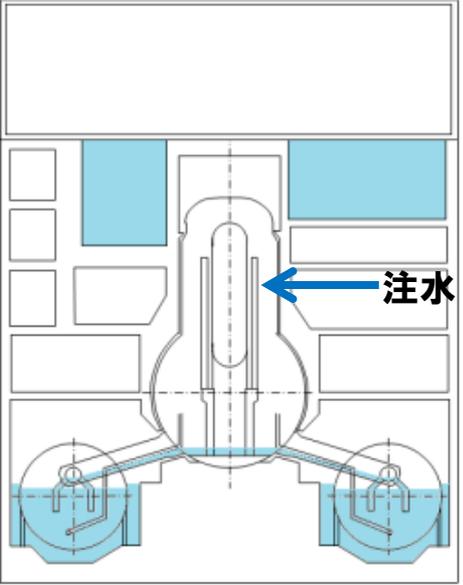
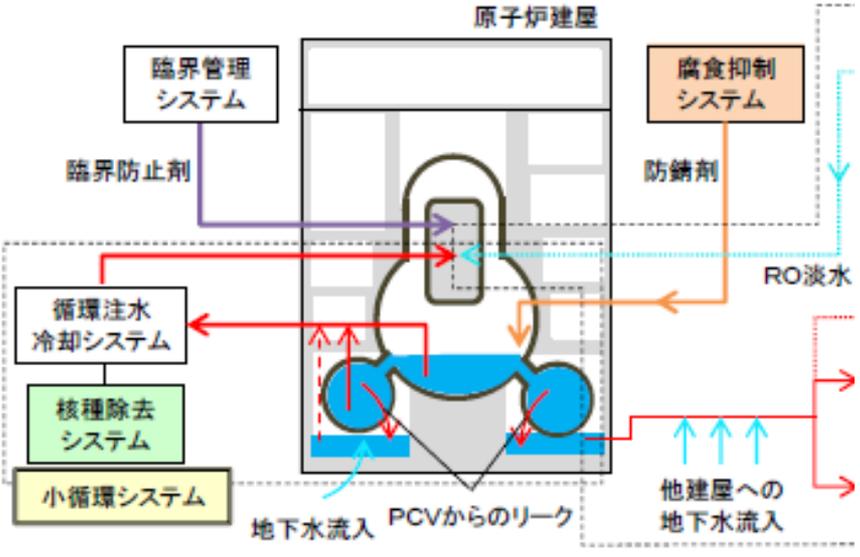


図1 腐食抑制技術適用対象部位(例)

## 2. 1F RPV/PCV機器の腐食対策方針

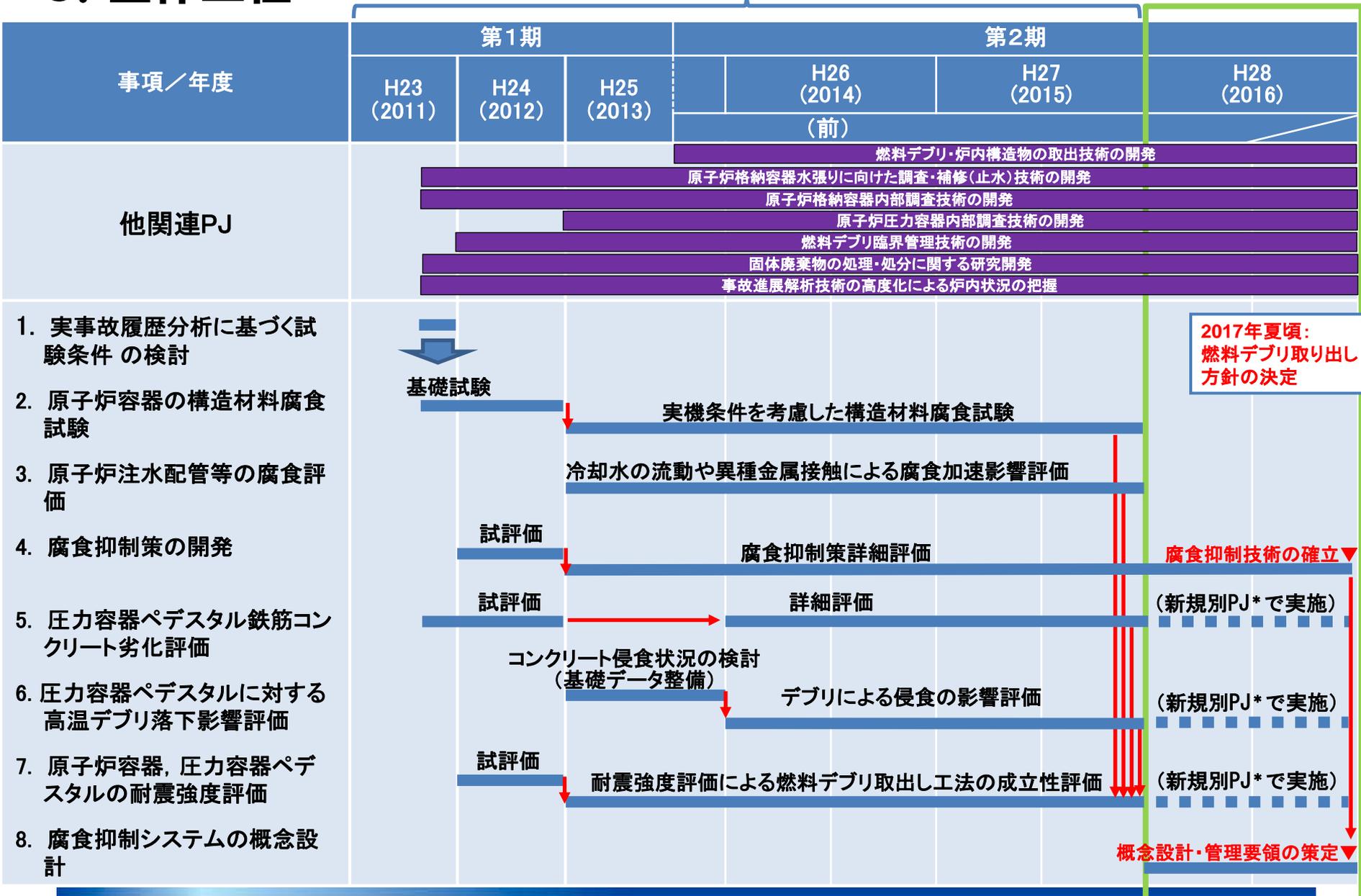
- 現在は、窒素封入による溶存酸素除去により機器の腐食を抑制
- デブリ取り出し時の環境変化(窒素封入→大気開放)に備えた腐食抑制策が必要  
→国プロで腐食抑制策(防錆剤)を検討

段階	現在	燃料デブリ取り出し時(想定)	
想定 プラント状態			
冷却方法	注水	小循環ループ	
雰囲気	窒素封入	大気開放	
酸素除去	○	×	
五ホウ酸ナトリウム	—	開発課題 (本PJで開発中)	あり
防錆剤(水中)	—	全面腐食・局部腐食対策	局部腐食対策
防錆剤(気中)	—	今後の開発(必要に応じ) (1F PCV内特有の湿潤環境で水滴による流れ等ある気中状態での腐食対策)	

# 3. 全体工程

「圧力容器／格納容器の健全性評価技術の開発」での実施範囲

今回の実施範囲

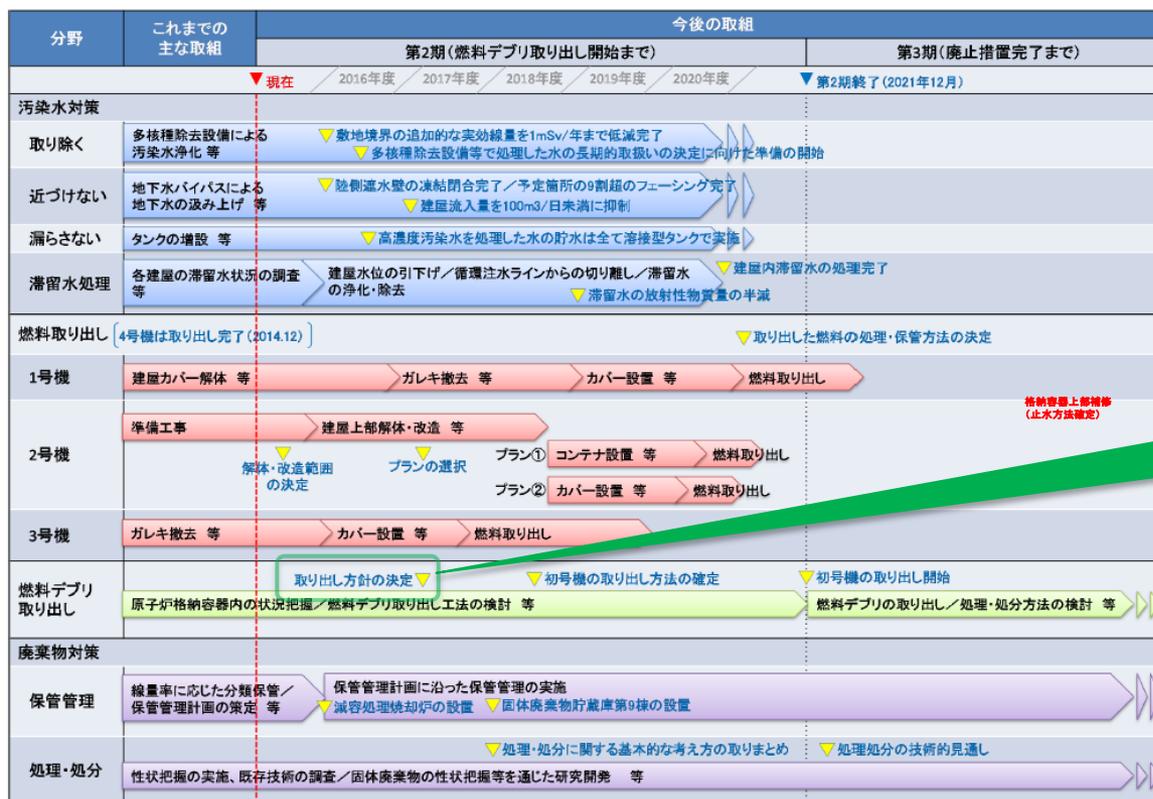


# 4. 中長期ロードマップにおける位置付け

- 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、腐食抑制技術を開発し、長期間、RPV/PCV機器の腐食減肉を抑制することで、RPV/PCV機器の耐震健全性の維持を図り、燃料デブリ取り出し工法の成立性を確保する。

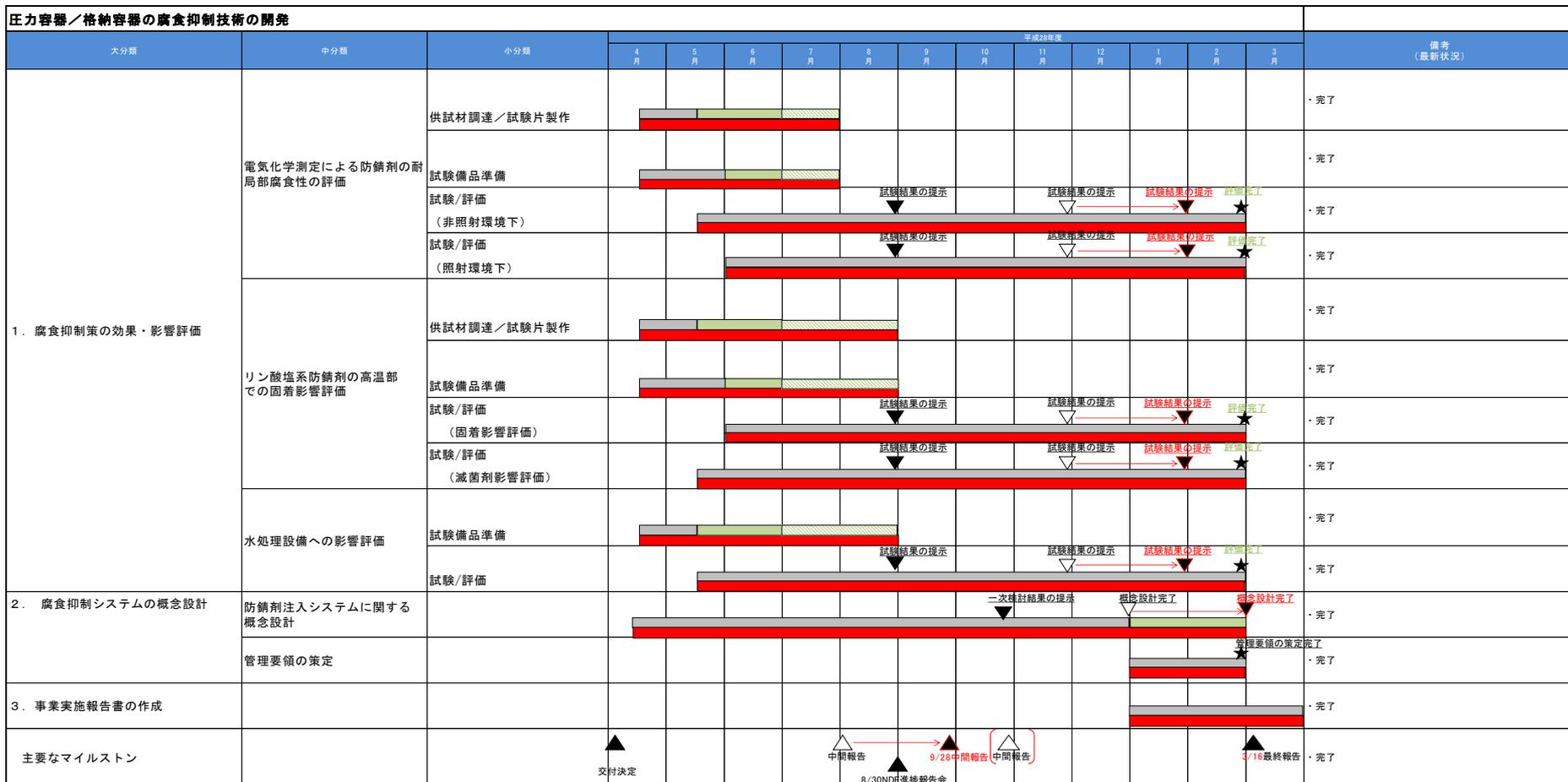
東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた主要な目標工程

2015年6月



燃料デブリ取り出し方針の決定

# 5. 平成28年度進捗状況(実施工程と実績)



## 6. 防錆剤の開発状況のまとめ(平成27年度までの成果)

- 腐食現象には様々な環境因子が影響するため、小循環冷却方法、臨界管理手法、水処理方法などが明確に定まっていない段階で防錆剤を一つに絞り込んでしまうと、実機適用時の環境変化に対応できなくなる恐れがある。そのため、不確実性が大きい現状では、少なくとも「現時点での実機には適用可能」で、かつ「特性(腐食抑制メカニズム)の異なる」防錆剤を複数準備しておきたい。
- 防錆剤メーカーへのヒアリングや文献等をもとに選定した以下の防錆剤について、現状の1F特有の環境条件(温度、水質、照射、流速など)を考慮した500時間の浸漬試験(スクリーニング試験)による防錆効果の確認を行い、防錆剤候補の絞り込みを実施した。  
(不動態化し腐食が抑制される濃度①、②の条件を確認)

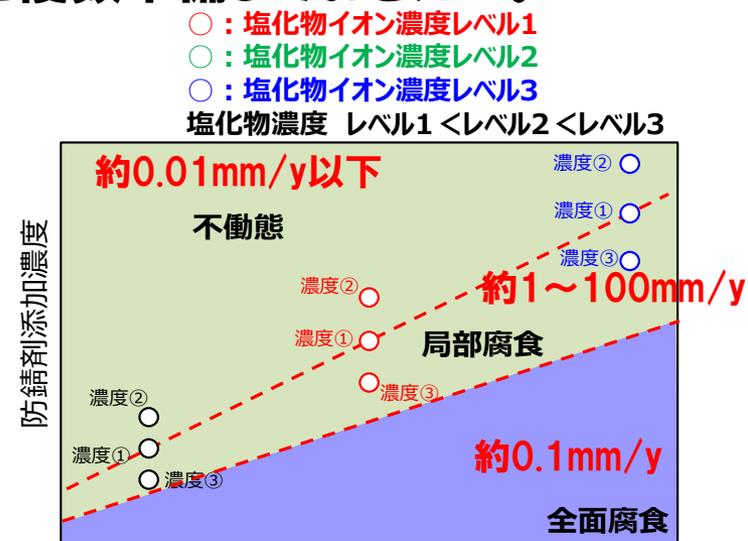


図2 炭素鋼(PCV材)の塩化物イオン濃度と防錆剤添加濃度に関する腐食形態のイメージ図

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		メタバナジウム酸ナトリウム
					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

# 6. 防錆剤の開発状況のまとめ(平成27年度までの成果)

## ●平成27年度 防錆剤の絞り込み結果

□:選定した防錆剤

□:平成28年度実施範囲

防錆剤	タンクステン酸 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

## 7. 防錆剤の開発に関する課題

**課題①** すきま腐食などの局部腐食による漏えいを起こさない防錆剤の選定が必要である。

- 500時間の浸漬試験ではその判断はできないため、時間によらない局部腐食の発生・進展可能性の評価が必要となる。
- 今年度絞り込んだ防錆剤について、電気化学的測定等による局部腐食の発生・進展可能性有無の評価を実施したうえで、現時点で実機適用可能な防錆剤を選定する。（「適用性の序列」を明確にする。）

**課題②** リン酸塩系防錆剤について、燃料デブリを想定した高温部での析出／固着による性能劣化の有無について懸念されるため、固着影響試験の実施が必要である。

**課題③** 平成27年度の結果から水処理設備への機能影響が一部認められていることから、詳細評価を実施し、実機への適用性をさらに検討する必要がある。

**課題④** 防錆剤注入システムに関する概念設計を行うとともに、管理要領を策定しておく必要がある。

## 8. 公募要領の実施内容と課題との対応

### (1) 腐食抑制策の効果・影響評価

腐食試験の結果に基づき選定された防錆剤を添加した溶液中で構造材料の電気化学的な測定を行う。非照射およびガンマ線照射下での腐食試験を行い、局所的な腐食の発生および進展の可能性有無の評価を実施する。その結果から実機適用可能な防錆剤を選定する。(課題①に対応)

また、燃料デブリでは崩壊熱による発熱があることから、発熱部に防錆剤が到達した場合の性能劣化を想定する。それをもとに、リン酸塩系防錆剤の析出量の温度依存性データ等を取得し、固着影響の評価を行う。(課題②に対応)

さらに、SARRY, MRRS(ALPS)等の汚染水浄化設備への影響等を踏まえ、防錆剤を使用した場合の既存水処理システムへの全体的な影響評価、防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価、小循環水処理ループを想定した評価等を行う。

(課題③に対応)

### (2) 腐食抑制システムの概念設計(その1)他核種除去設備への影響

各影響評価の検討をもとに、腐食抑制策を実機に適用する腐食抑制システムの概念設計を行うとともに、管理要領の策定を行う。その際、「燃料デブリ臨界管理技術の開発」の研究開発で検討される臨界防止技術との連携を図りながら、腐食抑制システムの検討を行う。(課題④に対応)

# 9. 平成28年度全体計画

すきま腐食発生評価試験

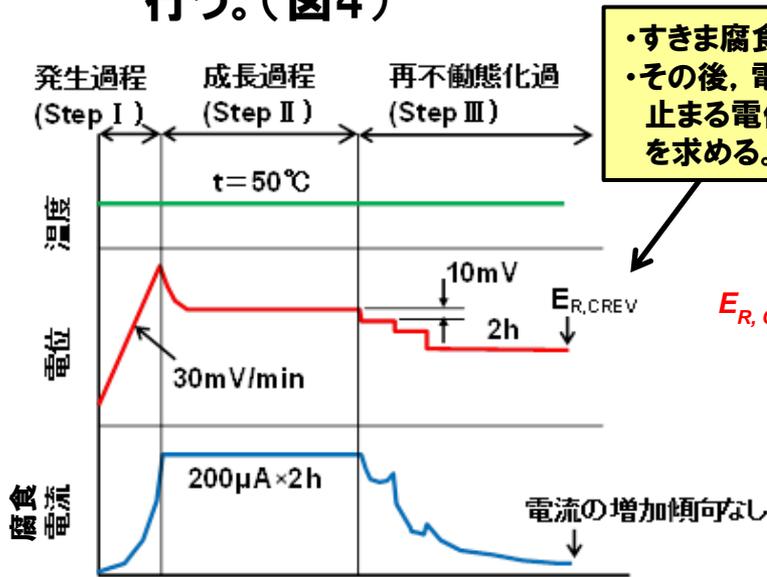
## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価(課題①に対応)

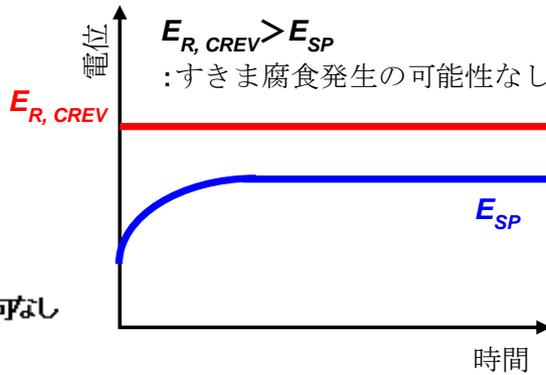
●不働態化した材料のひとつであるステンレス鋼に対するすきま腐食の発生可能性有無の評価の指標として、腐食すきま再不働態化電位( $E_{R,CREV}$ )があり、その測定方法が規格化されている(JIS G 0592)。(図3)

今回、炭素鋼(PCV材)への適用にあたり、すきま腐食の「発生過程(Step I)」および「成長過程(Step II)」において、必要に応じ一部条件変更を検討し、防錆剤による $E_{R,CREV}$ を取得する。

● $E_{R,CREV}$ と同環境において別途測定される自然電位( $E_{SP}$ )との比較を行い、すきま腐食発生の可能性有無を評価する。なお、 $E_{SP}$ については、ガンマ線照射による影響を受けるため、ガンマ線照射環境下(2条件)で $E_{SP}$ を取得し、同様の評価を行う。(図4)



・すきま腐食を発生させ、成長させる。  
 ・その後、電位を段階的に下げ、腐食の成長が止まる電位、すなわち、発生限界電位( $E_{R,CREV}$ )を求める。



・ $E_{R,CREV}$ と自然電位( $E_{SP}$ )を比較し、すきま腐食発生の可能性有無を評価する。

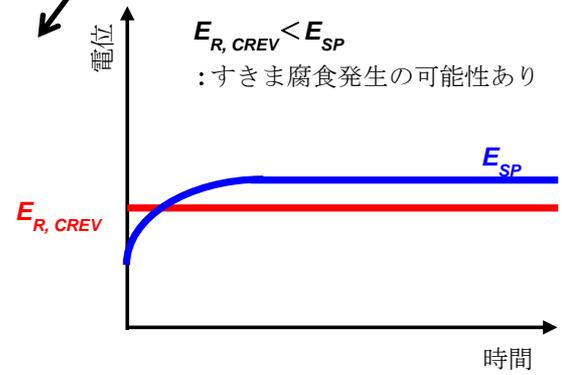


図3 JIS G 0592によるすきま再不働態化電位( $E_{R,CREV}$ )測定方法の模式図

図4 すきま腐食発生の可能性有無判断の模式図

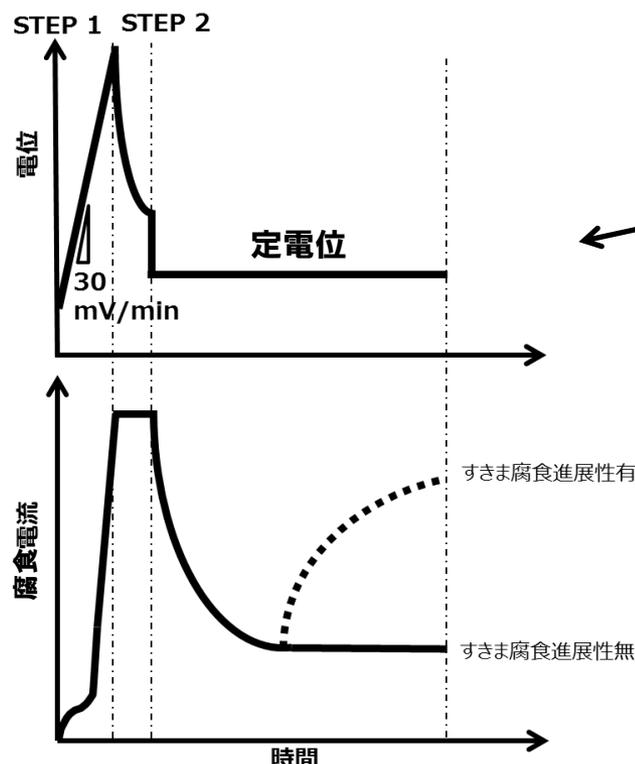
# 9. 平成28年度全体計画

## すきま腐食進展評価試験

### (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

#### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価(課題①に対応)

- すきま腐食の進展可能性有無の評価方法として、定電位すきま腐食試験がある。  
 $E_{R,CREV}$ と同様の手順ですきま腐食を発生させたのち、任意の電位で一定時間保持し、その間の電流値の時間減衰挙動からすきま腐食の進展性を評価する。定電位すきま腐食試験による腐食深さに対するガンマ線照射による影響有無を確認するため、ガンマ線照射環境下(2条件)で同様の評価を行う。(図5)



- すきま腐食を発生させ、成長させる。
- その後、各条件のEsp測定結果に基づく所定の電位で一定に保持し、すきま腐食進展の可能性有無を評価する。

図5 定電位すきま腐食試験によるすきま腐食進展の可能性有無判断の模式図(例)

## 9. 平成28年度全体計画

### (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

#### ②リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価(課題②に対応)

- 1Fでは、燃料デブリによる崩壊熱による発熱があることから、発熱部に防錆剤が到達した場合の性能劣化が懸念されるため、リン酸塩系防錆剤(亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩および亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩)の析出量の温度依存性データ等を取得し、固着影響の評価を行う。

#### (例1) バッチ試験(図6)

##### <試験条件>

- ・水温:50~80℃
- ・1000倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約19ppm)又は10000倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約1.9ppm)
- ・防錆剤濃度:2条件

##### <試験方法>

- 1) 希釈人工海水を入れた耐熱瓶に防錆剤を添加し、所定濃度に調製する。
- 2) 密閉し振とうする。
- 3) 所定温度に保持した恒温槽に静置する。
- 4) 所定の時間後に耐熱瓶を取り出し、上澄水をフィルターにてろ過する。
- 5) スケール因子(防錆剤由来の成分)を濃度測定する。

##### <評価項目>

- ・試験前後のスケール因子の濃度を比較することで、固着影響の有無を評価する。



図6 バッチ試験(例1)のイメージ

# 9. 平成28年度全体計画

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ② リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価(課題②に対応)

#### (例2) 通水試験(図7)

##### <試験条件>

- 水温: 65°C
- 流速: 0.03~0.49m/s
- 1000倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約19ppm) 又は 10000倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約1.9ppm)
- 防錆剤濃度: 2条件

##### <試験方法>

- 1) 所定濃度に希釈した人工海水に防錆剤を所定濃度添加し、試験溶液を作製する。
- 2) 試験装置の循環水槽に試験溶液を投入し、冷却水とする。
- 3) 熱負荷部分(テストチューブ)の内部に温水、外部に冷却水を通水し、所定の試験温度および流速で温水、冷却水を循環させる。
- 4) 所定の時間後にテストチューブを取り出し、テストチューブ表面の付着物量を評価する。
- 5) 試験溶液の一部をフィルターにてろ過し、ろ過水に対して成分濃度測定を行う。

##### <評価項目>

- 付着物量を評価することで固着影響の有無を評価する。
- 試験前後のスケール因子の濃度を比較することで、固着影響の有無を評価する。

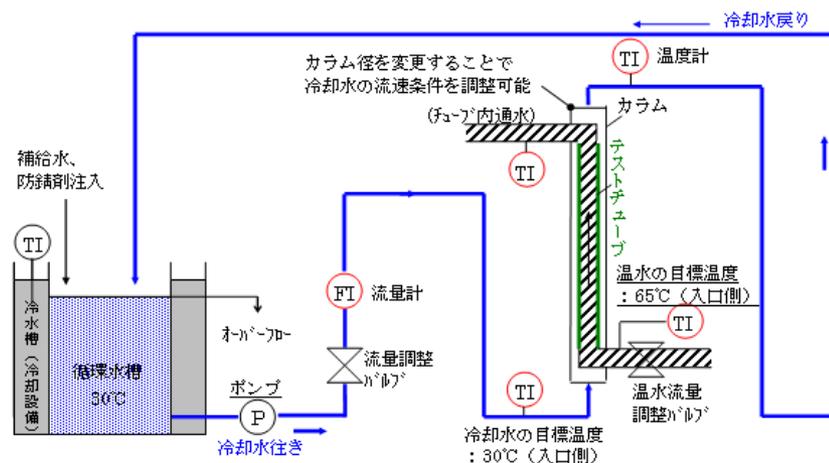


図7 通水試験(例2)のループ概略図(例)

## 9. 平成28年度全体計画

### (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

#### ② リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価(課題②に対応)

- リン酸塩系防錆剤は、場合によっては、リン酸イオンが微生物の栄養源となり、微生物の増殖や防錆剤成分の消費されることも想定されるため、今後1Fへの適用にあたっては、滅菌剤との併用も考えられる。そこで、リン酸塩系防錆剤に滅菌剤を併用した場合の炭素鋼(PCV材)への腐食影響有無について、試験等による確認を行っておく。

# 9. 平成28年度全体計画

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ③ 水処理設備への影響評価(課題③に対応)

●平成27年度の結果から、4種類の防錆剤は、いずれも少なからず水処理設備への阻害影響が確認されたが、水処理設備全体の影響評価となっていない。

(既存水処理設備への全体的な影響評価)

●平成27年度の性能評価における塩分・防錆剤濃度はデブリ取り出し時に想定される滞留水のマスバランス評価をベースにしており、防錆剤が全て下流側に流出する事を想定して評価した。しかし、小循環ループに移行した際は下流設備に流出するPCV内滞留水は少なく、地下水等により希釈されると想定される。そこで防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価が求められる。

(防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価)

表1 平成27年度の防錆剤による水処理設備への影響評価結果のまとめ

防錆剤	防錆剤濃度	既設多核種		増設多核種		高性能多核種	SARRY™	淡水化
		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※3	吸着塔工程※3	RO処理工程
A タング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(FeCl<sub>3</sub>添加)+炭酸塩沈殿工程

※2: 炭酸塩沈殿工程 (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+NaOH)

※3: 対象核種はCs、Sr、Sb、I

# 9. 平成28年度全体計画

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ③ 水処理設備への影響評価(課題③に対応)

●平成27年度で抽出された防錆剤の1つに五ホウ酸ナトリウムがある。これは防錆効果だけでなく臨界防止の観点からも極めて重要なものであるが、一方で五ホウ酸ナトリウムが混在すると、多核種除去設備の炭酸塩沈殿工程でのSr沈殿が阻害され(図7)、さらに吸着カラム試験でもSrが早期に破過する傾向が明らかになった(図9)。将来の小循環での水処理に向けて処理水中にホウ素が含まれる場合の処理システムの検討を行う必要がある。

(処理水中に防錆剤が含まれる場合の水処理システムの検討)

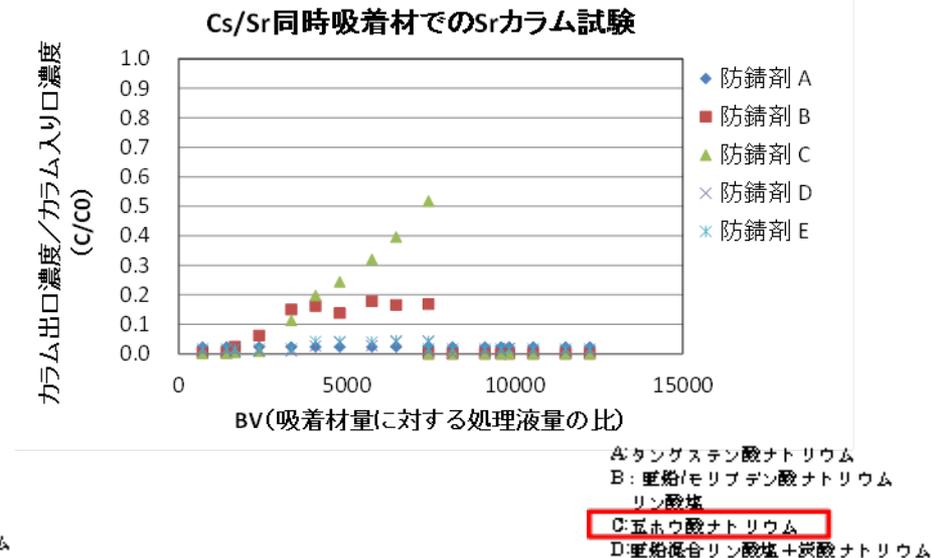
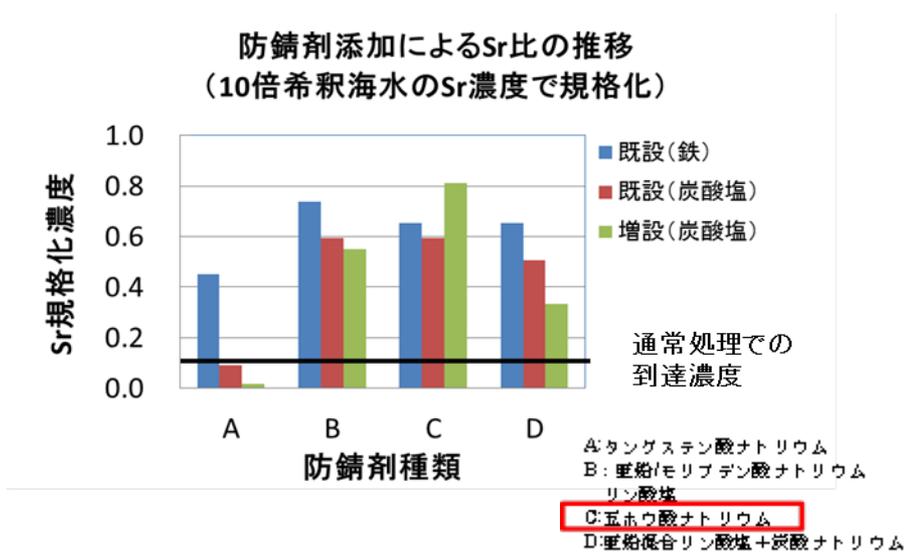


図8 (既存/増設)多核種除去設備前処理工程でのSr濃度

図9 増設多核種除去設備想定水質を用いたSr吸着試験

## 9. 平成28年度全体計画

### (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

#### ③ 水処理設備への影響評価(課題③に対応)

##### 1) 既存水処理設備への全体的な影響評価

###### (その1): 東芝分

● 多核種除去設備を想定し前処理工程への影響, 薬液使用量への影響, 炭酸塩沈殿工程でのコバルト除去性能への影響を評価する。

- ◆ 前処理工程について, 濃縮によりろ過工程への影響が懸念されるため, 濃縮スラリーの粘性評価を行う。濃縮時を想定し10倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約1900ppm)にカルシウムおよびマグネシウムを添加し, 所定濃度の防錆剤を添加する。
- ◆ 前処理工程における薬液使用量の増加量評価を行う。前述の前処理工程を模擬した試験における炭酸塩沈殿作成時の使用薬液量をもとに評価する。さらに, 吸着工程における薬液使用量の増加量評価を行う。前述の前処理工程を模擬した試験において生成される前処理水を中和する際の使用薬液量より評価する。
- ◆ 炭酸塩沈殿工程におけるコバルト除去性能への防錆剤添加影響評価として, 10倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度約1900ppm)を基本とし, 所定濃度の防錆剤を添加し, コバルトを添加した溶液について炭酸塩沈殿操作を施し, 除去性能を評価する。

## 9. 平成28年度全体計画

### (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

#### ③ 水処理設備への影響評価(課題③に対応)

##### 1) 既存水処理設備への全体的な影響評価

(その2): 日立GE分

●平成27年度に未評価であった核種(重金属(代表としてコバルト)およびルテニウム)の除去性能への影響を評価する。また、複数の核種の除去性能に対する複合的影響を評価する。

- ◆ 重金属の除去性能への防錆剤添加影響評価として、10倍希釈人工海水および100倍希釈人工海水(塩化物イオン濃度1900ppmおよび190ppm)に所定濃度の防錆剤およびコバルトを添加した溶液を用いた重金属吸着材に対する浸漬試験を行い、重金属除去性能を評価する。
- ◆ ルテニウムの除去性能への防錆剤添加影響評価として、10倍希釈人工海水および100倍希釈人工海水に所定濃度の防錆剤およびルテニウムを添加した溶液を用いた吸着材のルテニウム除去性能確認試験を行い、ルテニウム除去性能を評価する。
- ◆ 複数の核種の除去性能に対する複合的影響評価として、10倍希釈人工海水に所定濃度の防錆剤および主要核種を添加した溶液を用いた複数吸着材の核種除去性能確認試験を行い、核種除去性能を評価する。

## 9. 平成28年度全体計画

### (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

#### ③ 水処理設備への影響評価(課題③に対応)

### 2) 防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価

#### (その1): 東芝分

- 平成27年度の性能評価における塩分・防錆剤濃度はデブリ取り出し時に想定される滞留水のマスバランス評価をベースにしており、防錆剤が全て下流側に流出する事を想定して評価した。しかし、小循環ループに移行した際は下流設備に流出するPCV内滞留水は少なく、地下水等により希釈されると想定される。
- そこで平成27年度に吸着性能への影響が認められた防錆剤を対象に、平成27年度と同一の吸着材で塩分・防錆剤濃度を低下させた濃度条件での防錆剤濃度の吸着影響を評価する。
- なお、ヨウ素などは汚染水中の存在形態が複数あることが知られている。また、多核種除去装置において、ヨウ素酸イオンとアンチモン酸イオンのような複数の形態、核種を同時に吸着する吸着材を使用している。そのため複数の対象元素を溶解した試験水を用いた吸着試験を行う。また、平成27年度には評価していない吸着材についても必要に応じ影響評価を行う。

## 9. 平成28年度全体計画

### (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

#### ③ 水処理設備への影響評価(課題③に対応)

#### 2) 防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価

##### (その2): 日立GE分

- 平成27年度の性能評価における塩分・防錆剤濃度はデブリ取り出し時に想定される滞留水のマスバランス評価をベースにしており、防錆剤が全て下流側に流出する事を想定して評価した。しかし、小循環ループに移行した際は下流設備に流出するPCV内滞留水は少なく、地下水等により希釈されると想定される。
- そこで平成27年度に吸着性能への影響が認められた防錆剤を対象に、平成27年度と同一の吸着材で防錆剤濃度を低下させた濃度条件での核種除去性能を評価する。
  - ◆ 10倍希釈人工海水に所定濃度(平成27年度の1/10)\*の防錆剤および主要核種を添加した溶液を用いた各吸着材の核種除去性能確認試験を行う。(※平成27年度の1/100は、1/10で影響があると判断した場合に行う。)

## 9. 平成28年度全体計画

### (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

#### ③ 水処理設備への影響評価(課題③に対応)

#### 3) 処理水中に防錆剤が含まれる場合の水処理システムの検討

##### (その1): 東芝分

- 平成27年度の試験の知見として、特に処理水中にホウ素が含まれる場合に、Cs/Sr同時吸着材のSrの吸着能が低下することが明らかになっている。SrはCsと並ぶ重要核種であるため、ホウ素存在下にてSrの吸着除去を行う場合のSr除去性能を評価する。

##### <試験条件>

- ・対象水質: 模擬汚染水(海水希釈倍率は別途調整)+ 防錆剤
- ・対象元素: Sr
- ・吸着材 : Cs/Sr同時吸着材, 追加選定のSr吸着材
- ・濃度条件: Sr:トレーサーを添加
- ・試験方法: バッチ試験
- ・ホウ素濃度: 平成27年度設定値, 添加なし

##### <評価方法>

- ・Srの濃度分析を実施する。その結果からホウ素等が混入していてもSrの吸着能を有する吸着材を選定する。

## 9. 平成28年度全体計画

### (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

#### ③ 水処理設備への影響評価(課題③に対応)

#### 3) 処理水中に防錆剤が含まれる場合の水処理システムの検討

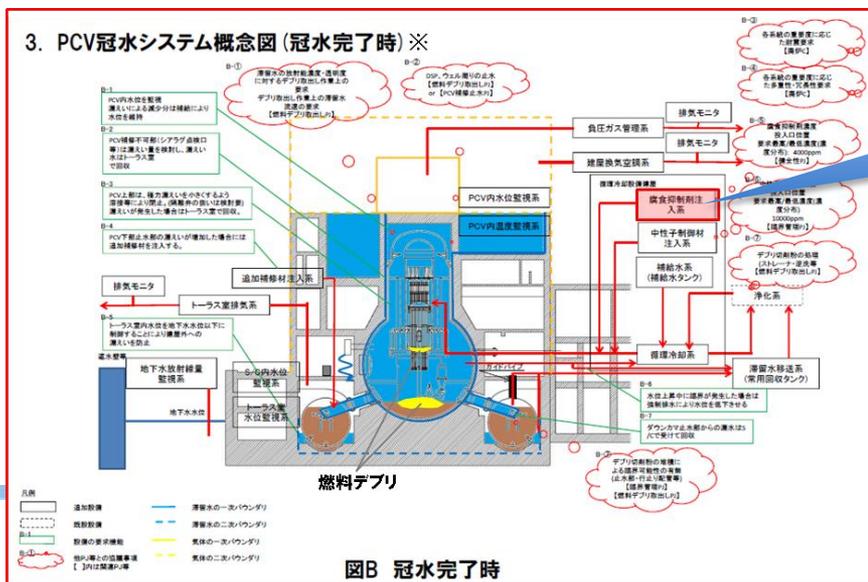
##### (その2): 日立GE分

- 平成27年度の成果で、淡水化装置(RO膜)で添加した五ホウ酸ナトリウム中の8割のホウ素がRO濃縮水に移行することを確認している。ほとんどの五ホウ酸ナトリウムが多核種除去設備側へと流入することになるため、平成27年度の成果、前記1)項, 2)項の結果および3)項のその1の「ホウ素存在下のSr除去性能評価」に基づいてホウ素除去システムの必要性検討を行う。
- 前記1)項, 2)項の結果および3)項のその1の評価を基に、水処理設備に影響を与える防錆剤濃度について検討すると共に、ホウ素除去を必要と評価した場合は、システム導入に対する課題抽出を行う。

# 9. 平成28年度全体計画

## (2) 腐食抑制システムの概念設計(課題④に対応)

- 各影響評価の検討をもとに選定した防錆剤(腐食抑制策)を実機に適用するための腐食抑制システムの概念設計を行う。防錆剤を効果的に使用するためには、1Fにおいても一般産業界での使用方法と同様、循環式での適用が望ましい。防錆効果が実機RPV/PCV内で確実に得られるためのシステム検討を行うとともに、これまでの研究開発成果をもとに、防錆剤の適用濃度や適用時の防錆剤成分の管理値や水質基準など、防錆効果を維持するための管理要領をまとめる。
- 小循環水処理ループの防錆剤濃度や水質を測定することや、水サンプリングを実施することも含めた管理方法を検討し、システムの概念設計を行う。(下図)
- それら検討にあたっては、1Fの安全、確実、合理的、迅速、及び現場志向を考慮したものとする。さらに、「燃料デブリ臨界管理技術の開発」の研究開発で検討される臨界防止技術との連携を図りながら、腐食抑制システムの検討を行う。



腐食抑制剤  
注入系

※ IRID止水補修技術PJより(例)

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 試験条件の検討

- ・ 絞り込んだ防錆剤4種に関し、昨年度までの本PJおよび他PJの腐食試験結果や文献データに基づき、五ホウ酸ナトリウムと防錆剤濃度による腐食形態の関係を整理。
- ・ 腐食試験において局部腐食が発生しない領域(不動態領域)の溶液条件において電気化学的に耐局部腐食性を評価。
- ・ 評価方法

#### (i) 局部腐食発生評価

⇒ 自然電位測定 ( $E_{SP}$ )

腐食すきま再不動態化電位 ( $E_{R, CREV}$ ) 測定

#### (ii) 局部腐食進展評価

⇒ 定電位すきま腐食試験

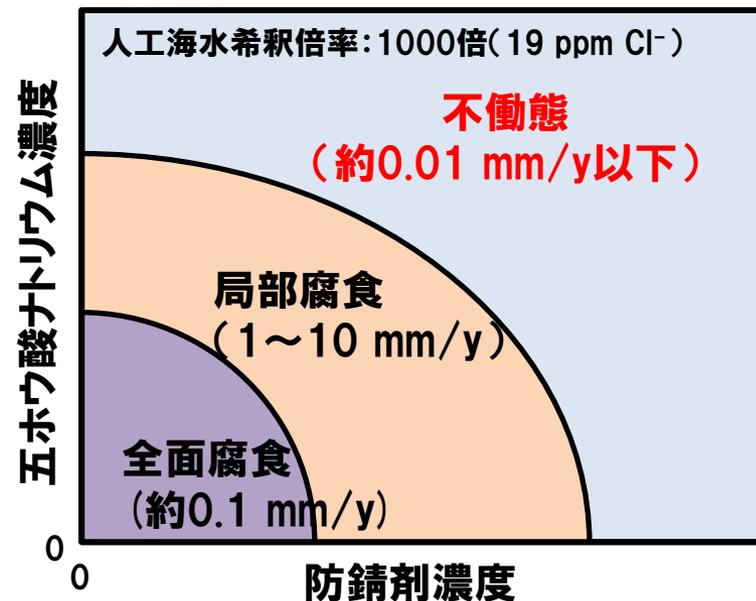


図20 防錆剤および五ホウ酸ナトリウムの添加濃度による腐食形態のイメージ図  
(昨年度までの本PJおよび他PJの腐食試験結果および文献データを基に作図)

#### 概略試験マトリックス

温度	塩化物イオン濃度(ppm)	防錆剤 <sup>注1</sup> 添加	五ホウ酸ナトリウム添加	線量率
50℃	19 <sup>注2</sup> (1000倍希釈人工海水)	あり	なし	0(非照射), 0.2, 4 kGy/h
		なし	あり	
		あり	あり	

注1 亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩, 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩, タングステン酸ナトリウム

注2 自然電位( $E_{SP}$ )測定では一部の条件において塩化物イオン濃度0 ppm(純水)中における測定も実施

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 電気化学測定要領

$E_{R, CREV}$ : 腐食すきま再不働態化電位

$E_{SP}$ : 自然電位

#### ◆ 旗型試験片( $E_{SP}$ 測定)

寸法: 60L×24W×3T mm  
表面仕上げ: #600研磨

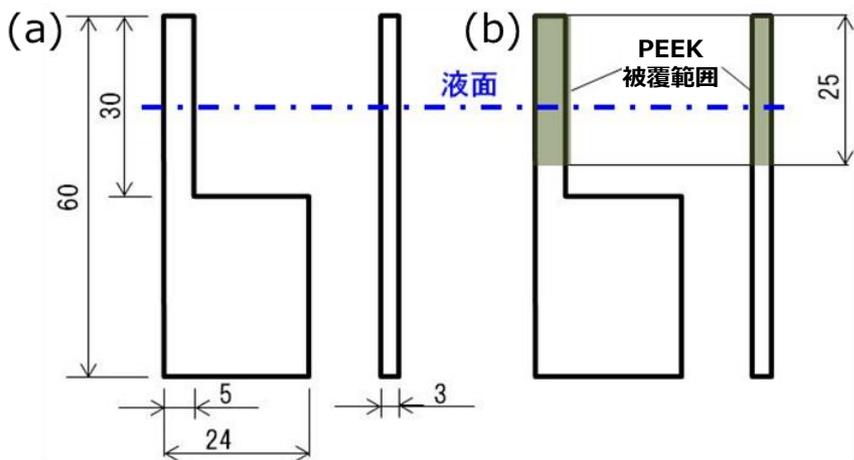


図23 旗型試験片概略図

(a) 非照射試験用, (b) 照射試験用

#### ◆ すきま腐食試験片

( $E_{R, CREV}$ , 定電位すきま腐食試験)

JIS G 0592 試験片 準用  
寸法: 60L×24W×3T mm  
表面仕上げ: #600研磨

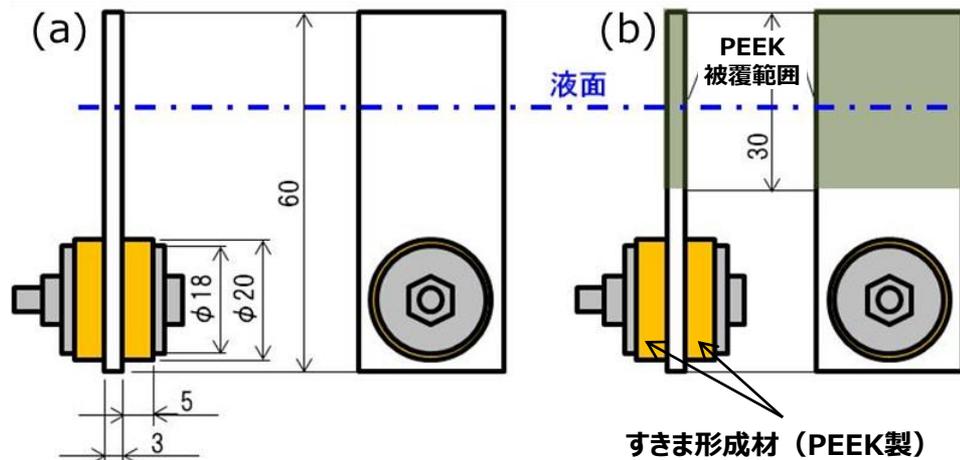


図22 すきま腐食試験片概略図

(a) 非照射試験用, (b) 照射試験用

注1: 照射環境下における測定時は試験片上部をPEEKで被覆

注2: 非照射環境下における測定時も水線部での腐食が顕著な場合は被覆

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 電気化学測定要領

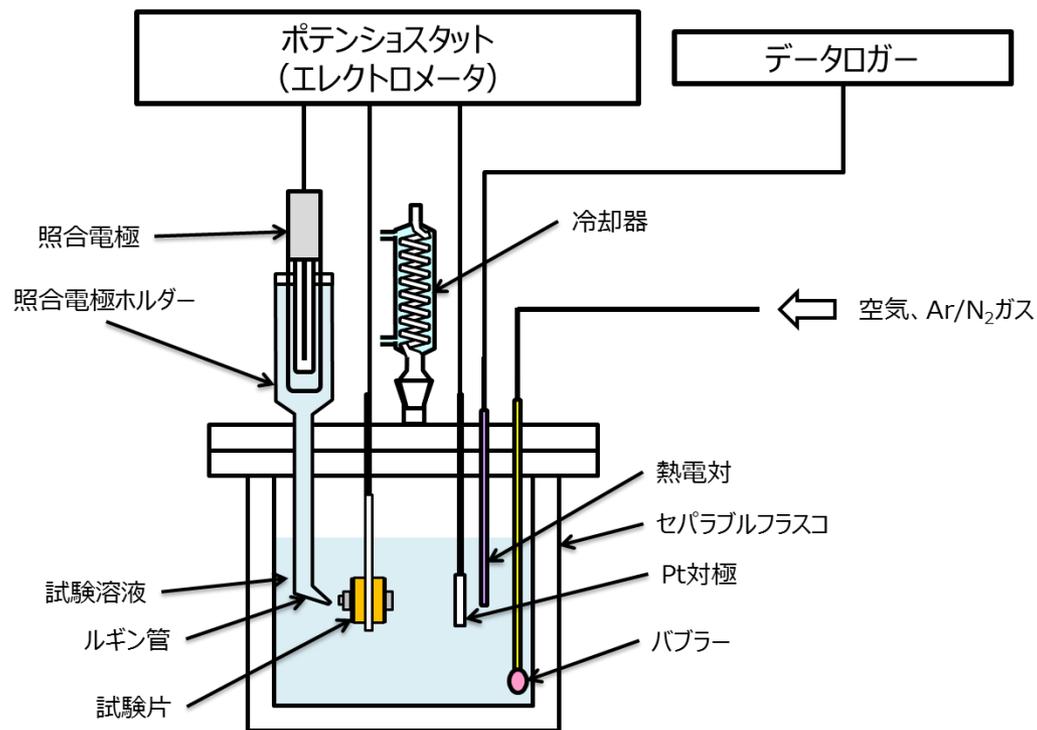


図23 電気化学測定装置の構成例(照射)

- 3電極(試料極(試験片), 対極, 照合電極)式の電気化学測定装置を用いて測定を実施した。
- 自然電位( $E_{SP}$ )測定の際は, 対極は設置せず, 試料極および照合電極の2電極にて測定を実施した。
- 照合電極にはダブルジャンクション型のAg/AgCl(飽和KCl)電極(SSE)を用いた。

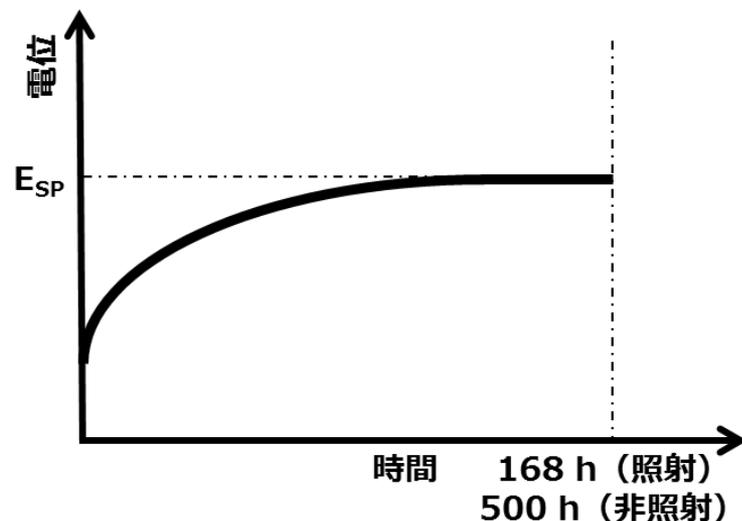


図24  $E_{SP}$ 測定手順の模式図

- 自然電位( $E_{SP}$ )測定の実験時間は, 外部評価委員のコメントおよび既往の測定例を基に非照射は500 h, 照射は168 hと設定した。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 電気化学測定要領

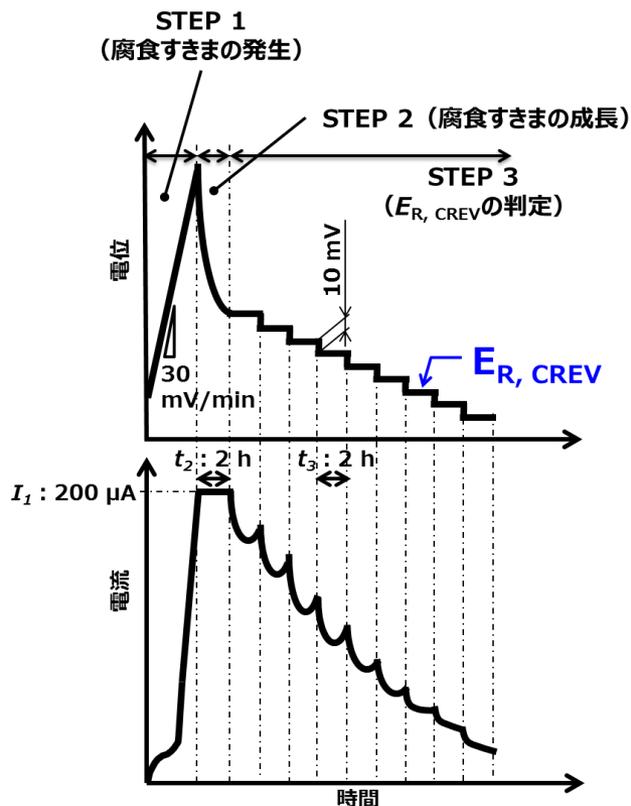


図25  $E_{R, CREV}$ 測定手順の模式図

- 腐食すきま再不動態化電位の測定手順は、JIS G 0592「ステンレス鋼の腐食すきま再不動態化電位測定方法」に準じて行う。

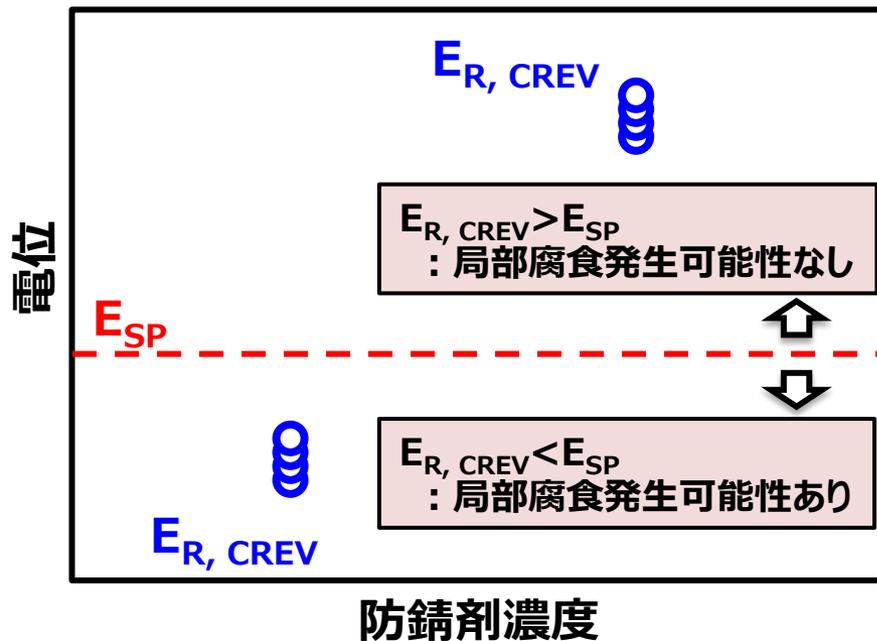


図26 局部腐食発生可能性有無判断の模式図

- $E_{R, CREV}$ と $E_{SP}$ を比較し、局部腐食発生の可能性有無を評価する。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 電気化学測定要領

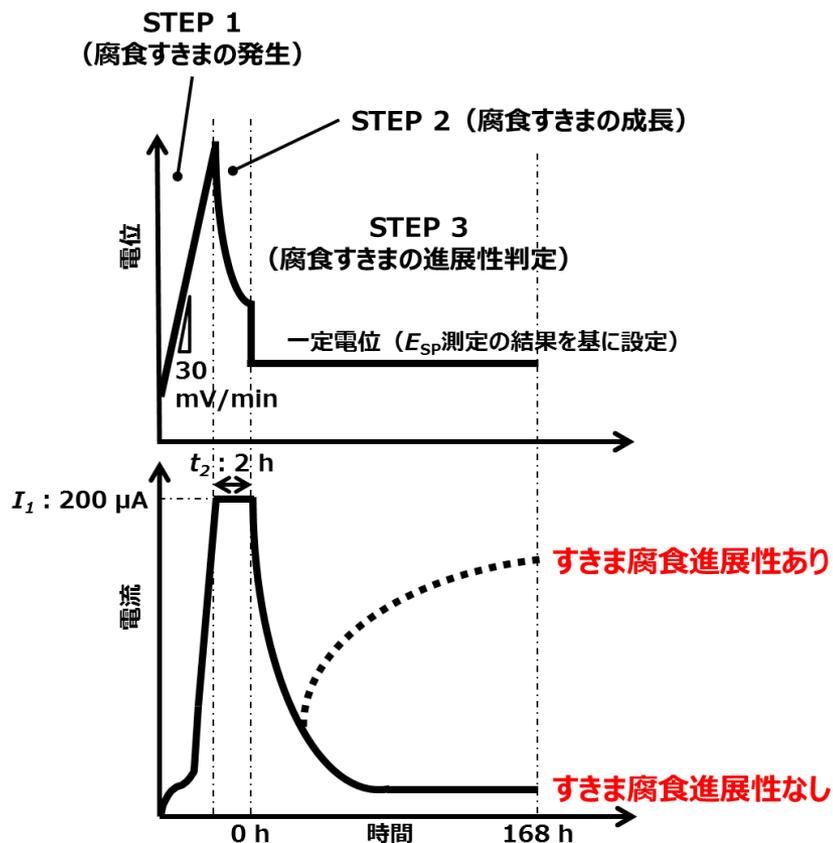


図27 定電位すきま腐食試験手順の模式図

- 定電位すきま腐食試験におけるSTEP1および2は腐食すきま再不働態化電位測定の手順に準じた電流および電位印加条件とする。
- STEP3の設定電位は、 $E_{SP}$ 測定および $E_{R, CREV}$ 測定の結果に基づき決定する。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 照射環境下における電気化学測定実施状況

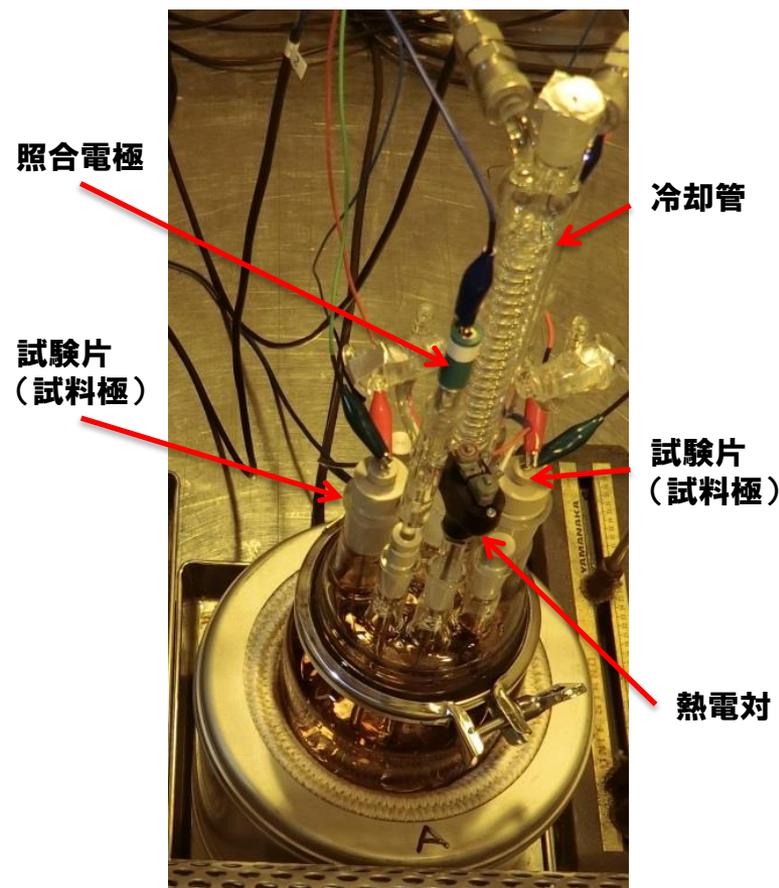
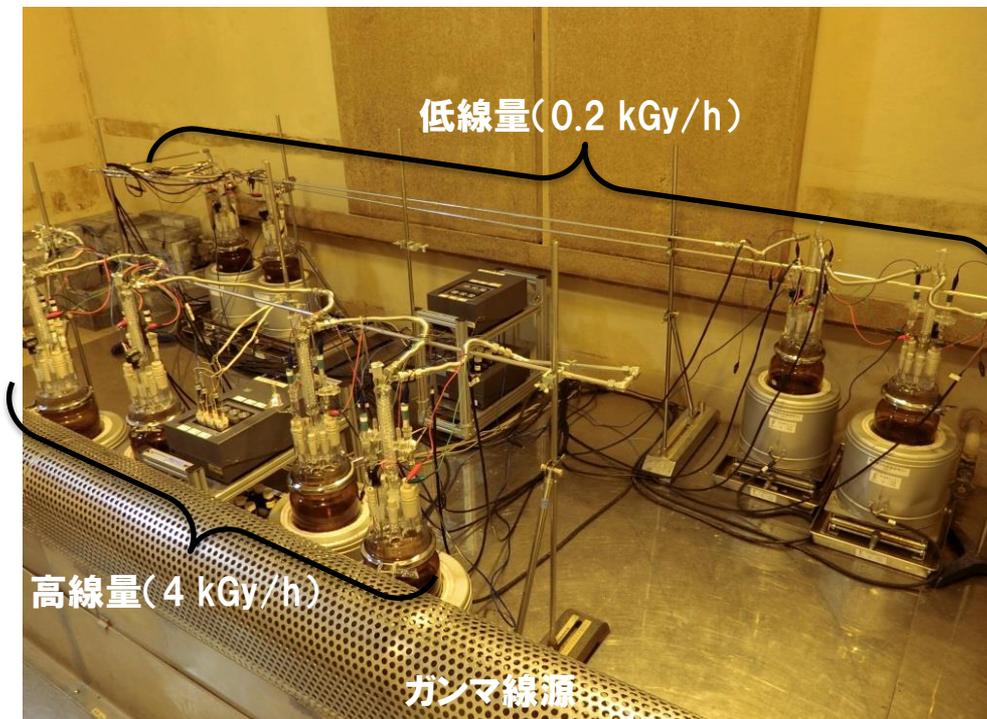


図28 試験実施状況

(国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所)

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 自然電位( $E_{sp}$ )測定結果(その1) 測定例: 東芝分

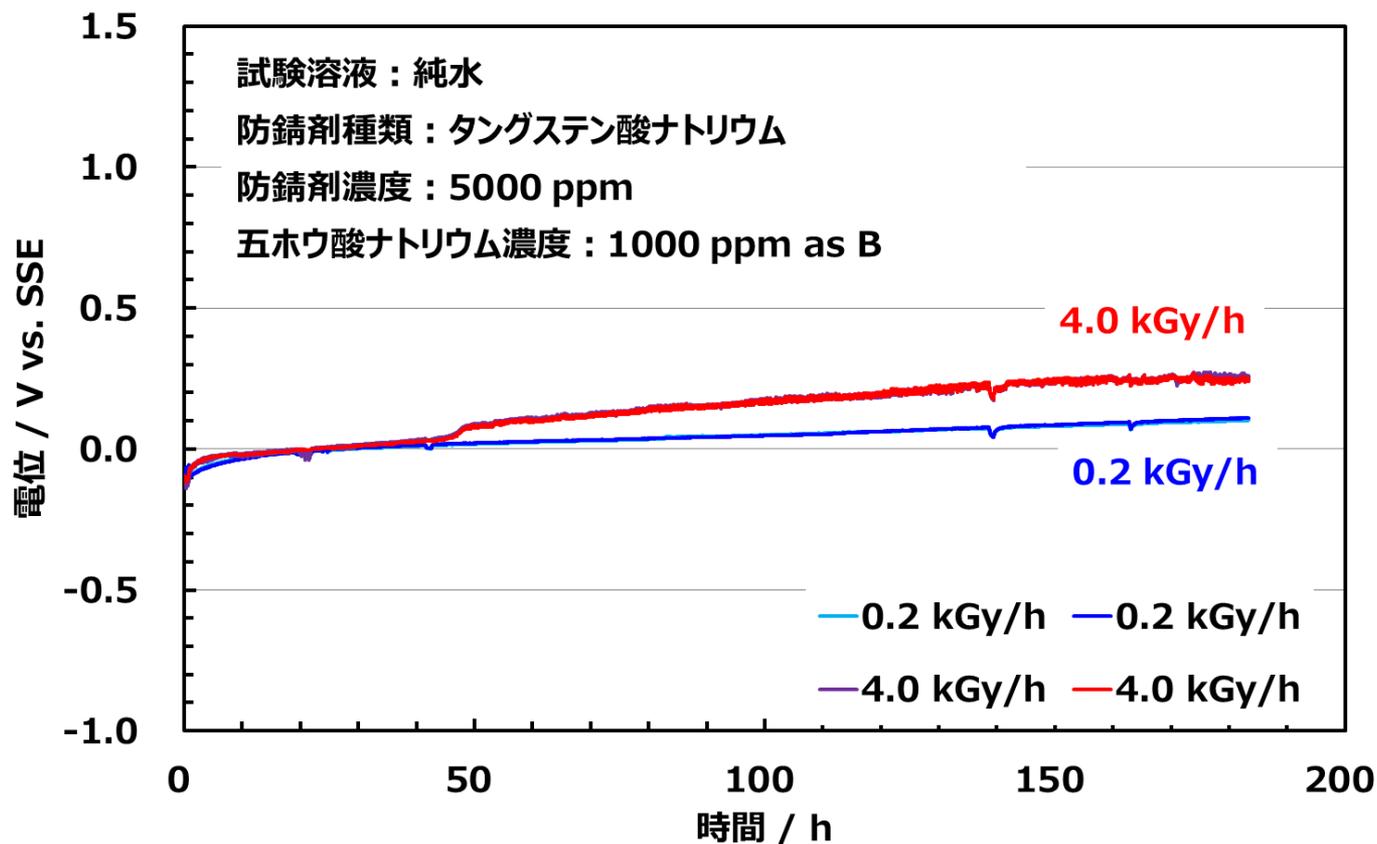


図29 照射環境下における自然電位 ( $E_{sp}$ ) の測定例

- 自然電位の経時変化から、測定終了前1 hの平均値を $E_{sp}$ として評価した。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 自然電位 ( $E_{sp}$ ) 測定結果(その2) 測定例: 日立GE分

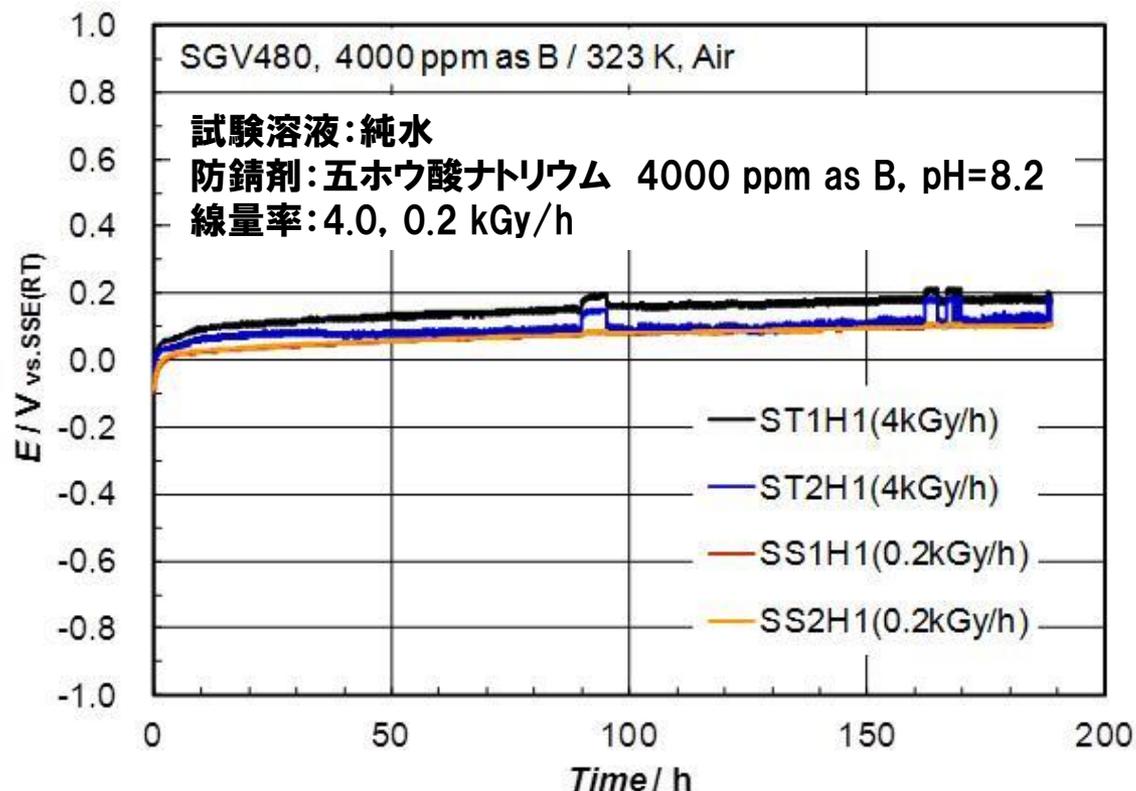


図30 照射環境下における自然電位 ( $E_{sp}$ ) の測定例

- 自然電位の経時変化から、測定終了前1hの平均値を $E_{sp}$ として評価した。

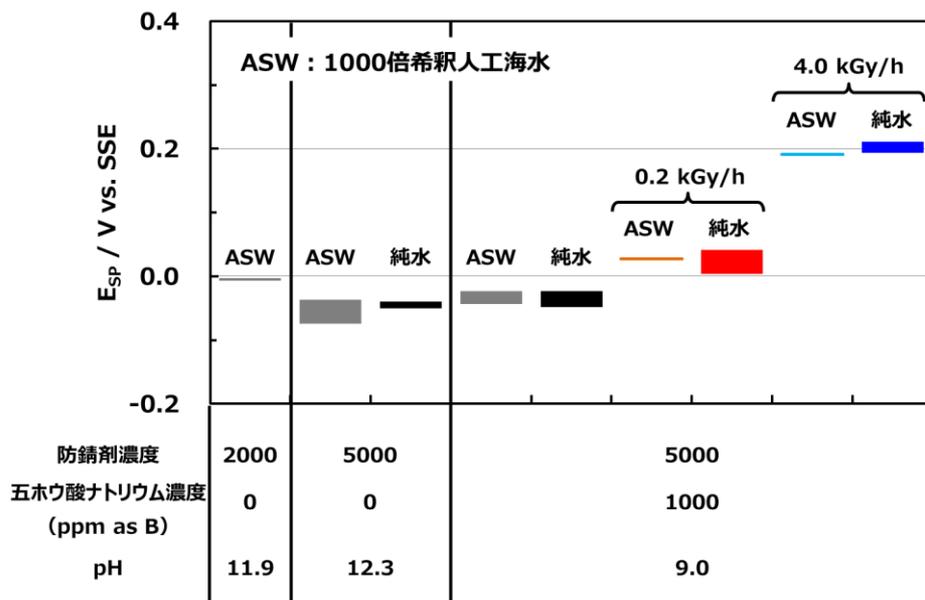
# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 自然電位( $E_{SP}$ )測定結果まとめ(その1): 東芝分

##### 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩



##### タングステン酸ナトリウム

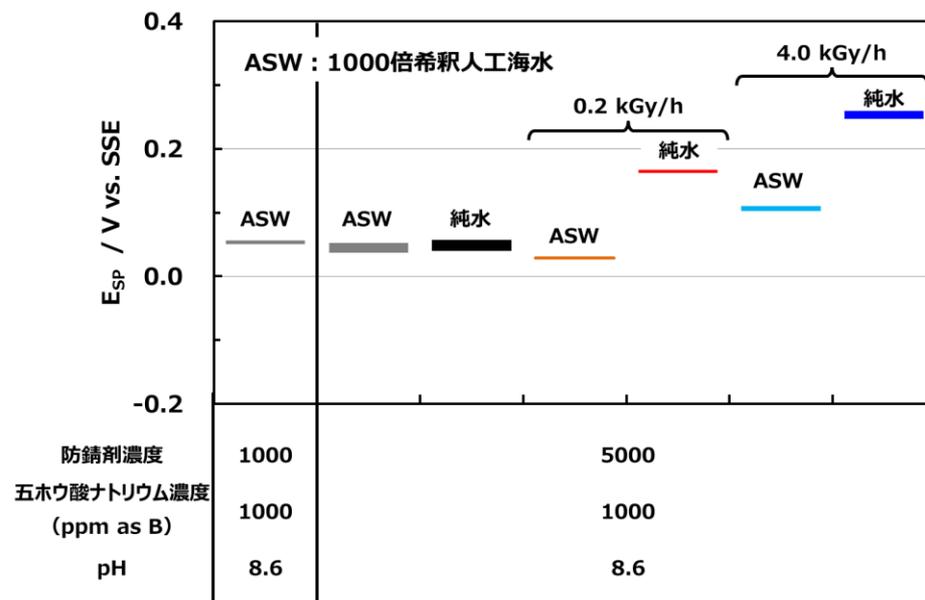


図31 自然電位( $E_{SP}$ )測定結果まとめ

- $E_{SP}$ は防錆剤の種類により変化するが、防錆剤濃度および五ホウ酸ナトリウム添加の有無にはほとんど影響されなことが分かった。また、照射線量の増加に伴い、 $E_{SP}$ は高くなる傾向が認められた。
- 防錆剤の種類ごとに最も高い $E_{SP}$  (4.0 kGy/hの時の $E_{SP}$ )を $E_{R, CREV}$ との比較に用い、局部腐食発生可能性を評価した。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 自然電位 ( $E_{sp}$ ) 測定結果まとめ(その2): 日立GE分

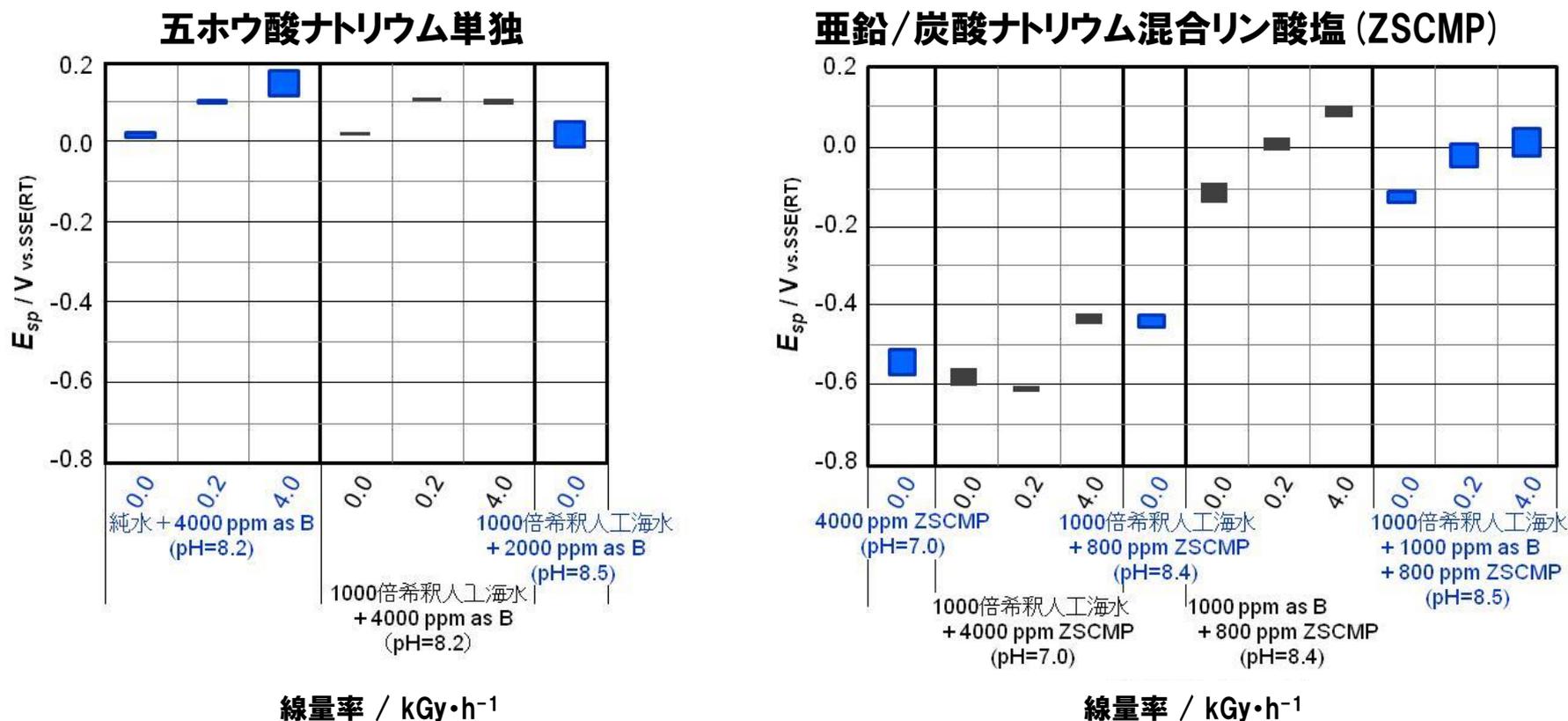


図33 自然電位( $E_{sp}$ )測定結果まとめ

- 五ホウ酸ナトリウムでは、 $E_{sp}$ への添加濃度依存性は小さかった。
- 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩単独系の $E_{sp}$ は、 $-0.4V$  vs. SSE以下の値を示した。
- 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩への五ホウ酸ナトリウム添加に伴い、 $E_{sp}$ が高くなる傾向が認められた。
- 五ホウ酸ナトリウム単独・複合添加系では線量率の増加に伴い $E_{sp}$ が高くなる傾向が認められた。
- $E_{sp}$ と $E_{R, CREV}$ との比較により局部腐食発生可能性を評価した。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 腐食すきま再不働態化電位( $E_{R, CREV}$ )測定結果(その1) 測定例: 東芝分

- ・試験溶液: 1000倍希釈人工海水
- ・防錆剤種類: タングステン酸ナトリウム
- ・防錆剤濃度: 5000 ppm
- ・五ホウ酸ナトリウム濃度: 1000 ppm as B
- ・線量率: 4.0 kGy/h

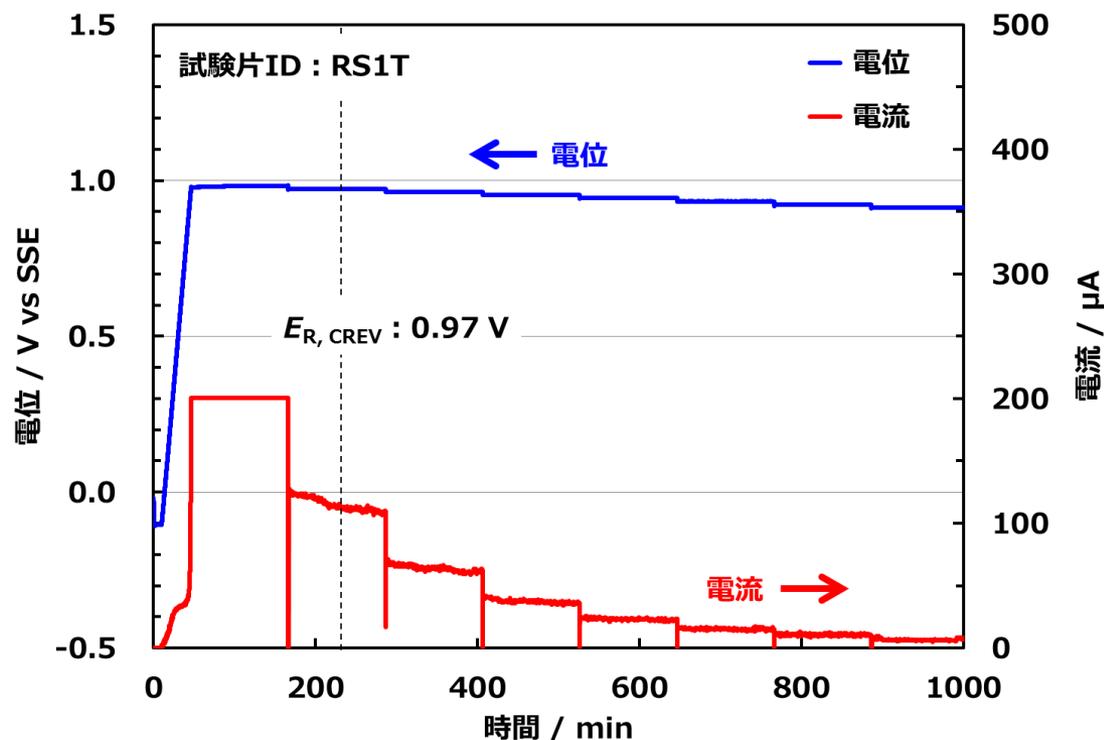


図33 照射環境下における $E_{R, CREV}$ の測定例

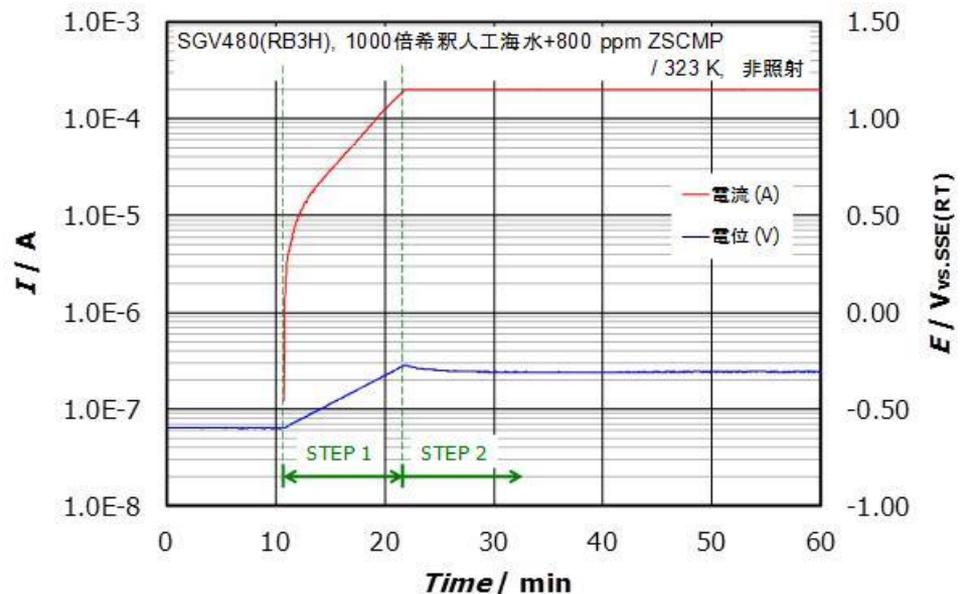
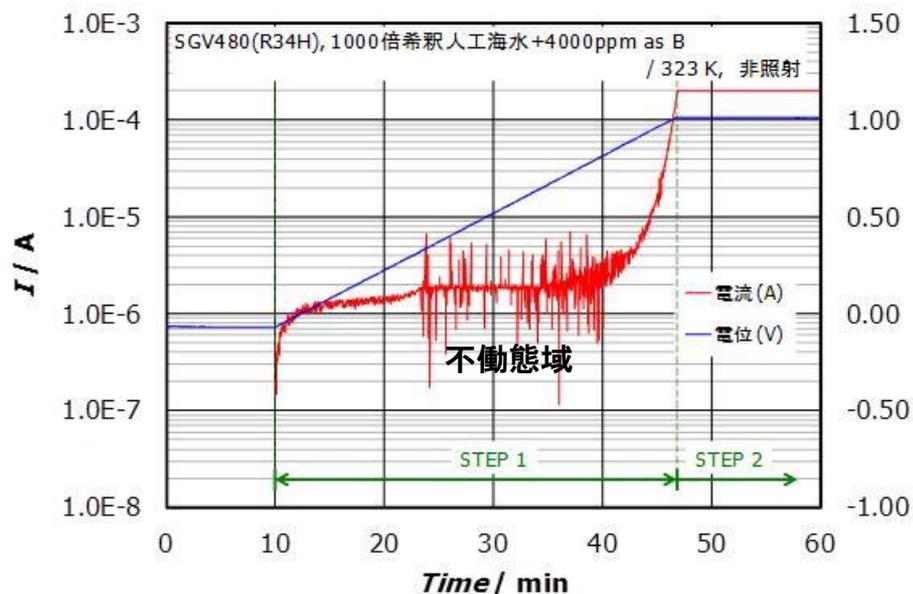
- STEP3において電流が増加しなくなる最も高い(貴な)電位を $E_{R, CREV}$ として評価した。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 腐食すきま再不動態化電位 ( $E_{R,CREV}$ ) (その2) (1) 不動態化挙動の発現確認: 日立GE分



試験溶液: 1000倍希釈人工海水  
防錆剤: 五ホウ酸ナトリウム 4000 ppm as B, pH=8.3  
線量率: 0.0 kGy/h (非照射)

試験溶液: 1000倍希釈人工海水  
防錆剤: 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩 (ZSCMP) 800 ppm, pH=7.3  
線量率: 0.0 kGy/h (非照射)

図34 非照射環境下における $E_{R,CREV}$ の測定例

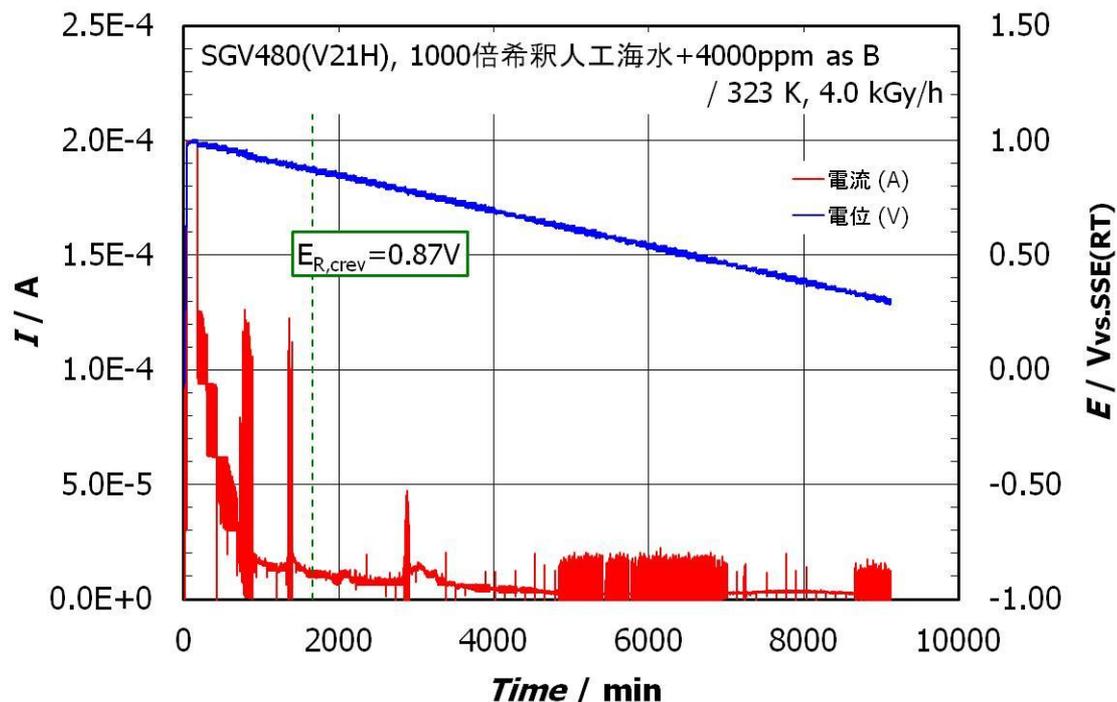
- アノード分極(STEP1)条件において、防錆剤の種類により電流停滞領域(不動態域)が発現する場合(左図)と発現しない場合(右図)とを確認した。
- 不動態域が発現しなかった測定では、不動態化しなかったと評価し、 $E_{R,CREV}$ の評価対象外とした。(例: 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩 800ppm)。
- 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩においては、炭素鋼上に沈殿皮膜が形成し防錆効果が発現するため、不動態化に伴う局部腐食は発生しないと考えられる。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 腐食すきま再不動態化電位 ( $E_{R,CREV}$ ) 測定結果(その2) (2) 測定例: 日立GE分



試験溶液: 1000倍希釈人工海水  
防錆剤: 五ホウ酸ナトリウム 4000 ppm as B, pH=8.1  
線量率: 4.0 kGy/h

図35 照射環境下における $E_{R,CREV}$ の測定例

- STEP3において電流が増加しなくなる最も高い(貴な)電位を $E_{R,CREV}$ として評価した。

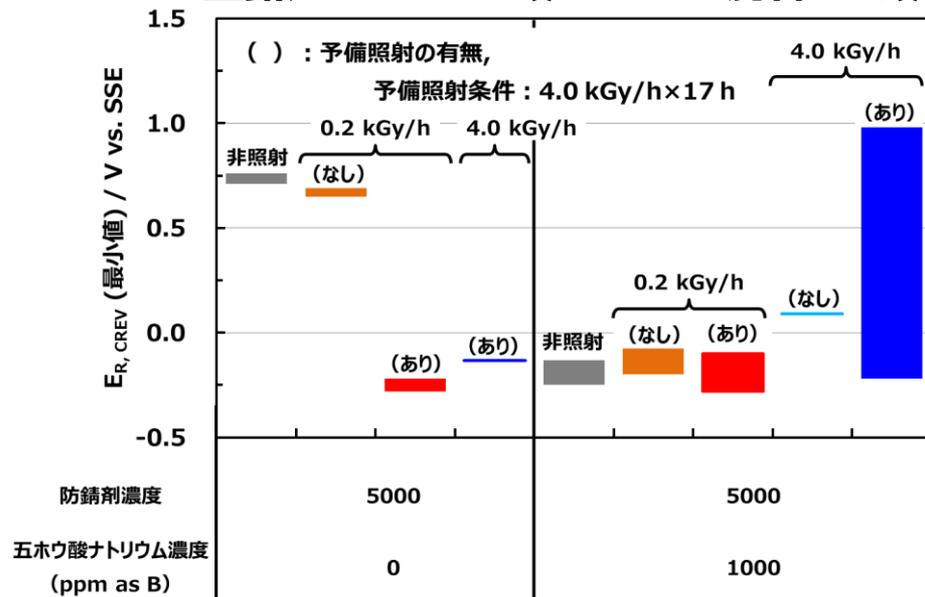
# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 腐食すきま再不動態化電位( $E_{R, CREV}$ )測定結果まとめ(その1): 東芝分

亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩



タングステン酸ナトリウム

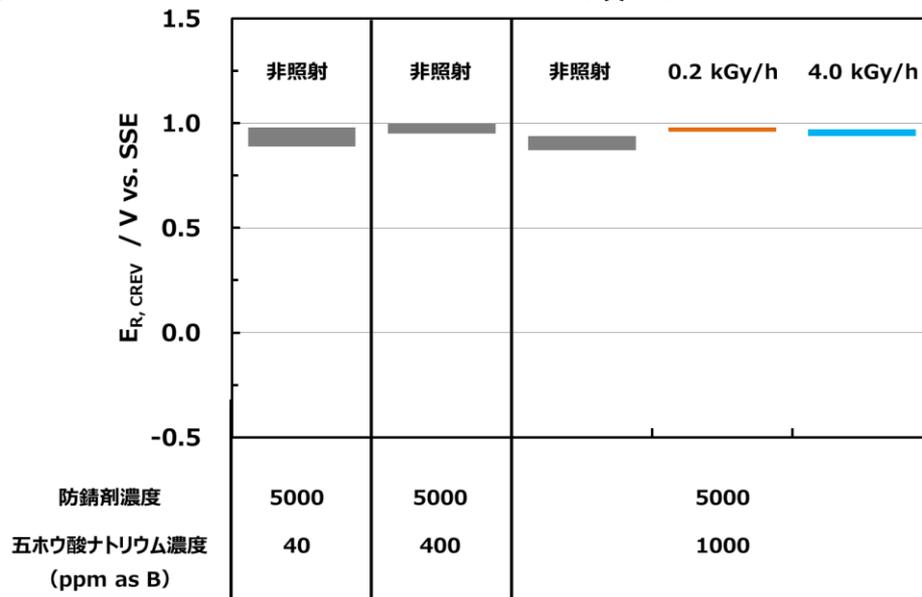


図36 腐食すきま再不動態化電位測定結果まとめ

- 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩は、単独添加での非照射および0.2 kGy/h(予備照射なし)では高い $E_{R, CREV}$ を示した。しかし、高線量での予備照射および高線量下での測定(予備照射無)もしくは五ホウ酸ナトリウムとの複合添加により $E_{R, CREV}$ が低下した。
- タングステン酸ナトリウムは五ホウ酸ナトリウムとの複合添加により、非照射および照射のいずれの環境下においても高い $E_{R, CREV}$ を示した。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ①電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性評価

### ●腐食すきま再不動態化電位( $E_{R,CREV}$ )測定結果まとめ(その2):日立GE分

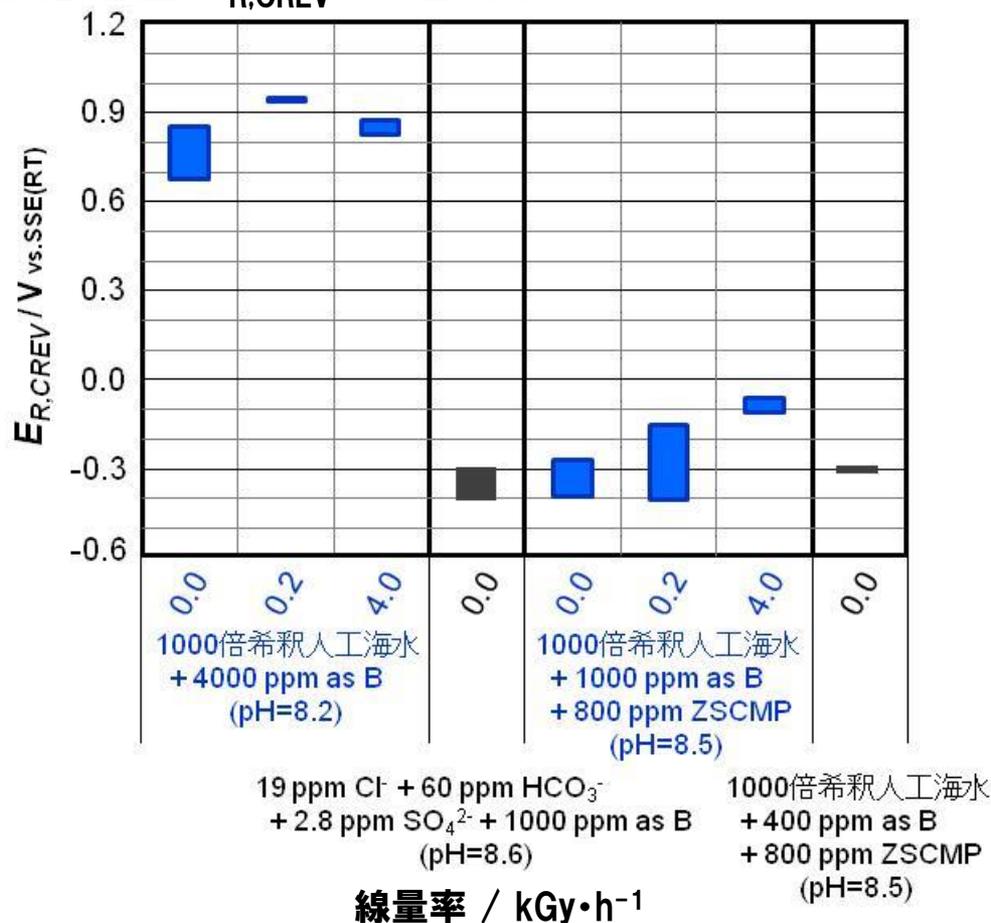


図37 腐食すきま再不動態化電位( $E_{R,CREV}$ )の測定結果まとめ

- 五ホウ酸ナトリウム 4000ppm as B条件の $E_{R,CREV}$ は、0.6V以上の値を示した。
- 五ホウ酸ナトリウム 1000ppm as B以下、もしくは、五ホウ酸ナトリウム 1000ppm as Bに亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩(ZSCMP) 800ppmを複合添加した条件では、0.0V以下の値を示した。
- 五ホウ酸ナトリウム+ZSCMP複合系では線量率の増加に伴い $E_{R,CREV}$ が高くなる傾向が認められた。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 局部腐食の発生評価結果(その1): 東芝分

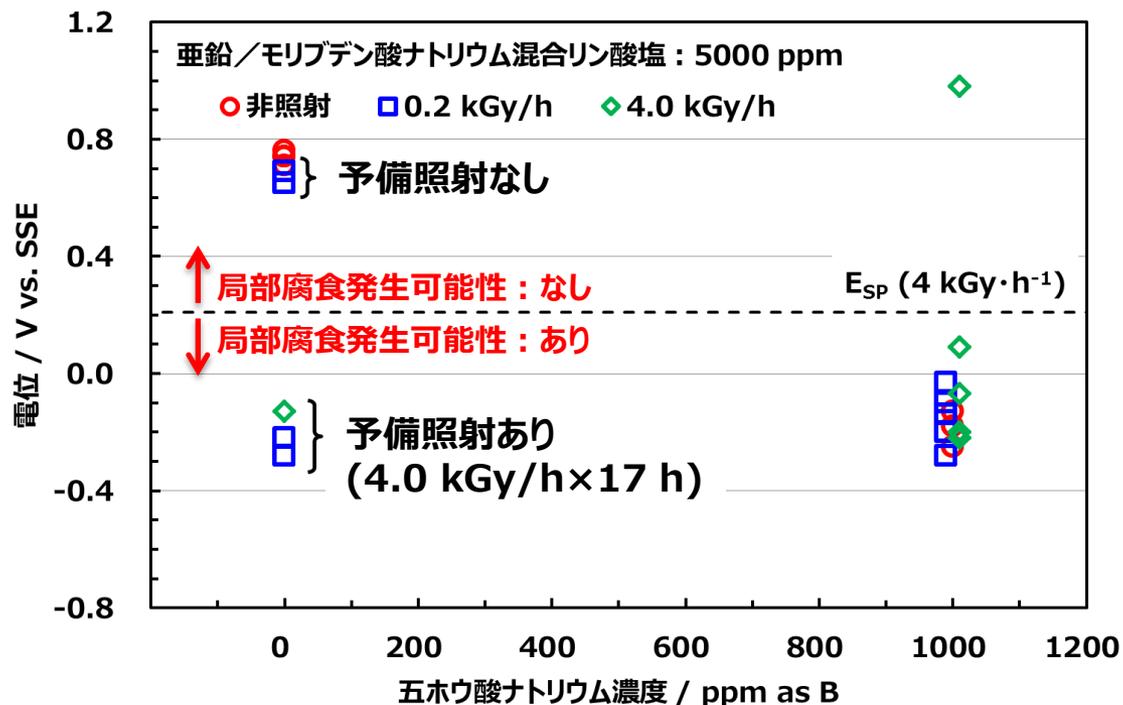


図38 局部腐食発生評価結果(亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩)

- 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩は、防錆剤単独添加条件での非照射および0.2 kGy/h(予備照射無)において局部腐食発生の可能性がないことが分かった。
- 一方、予備照射および高線量下での測定(予備照射無)もしくは五ホウ酸ナトリウムにより局部腐食発生の可能性があることが分かった。局部腐食の発生可能性ありとなった条件では、試験後の溶液pHが11以下に低下していたことから、pHを11以上に保つことで局部腐食が発生しなくなる可能性があると考えられる。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 局部腐食の発生評価結果(その1): 東芝分

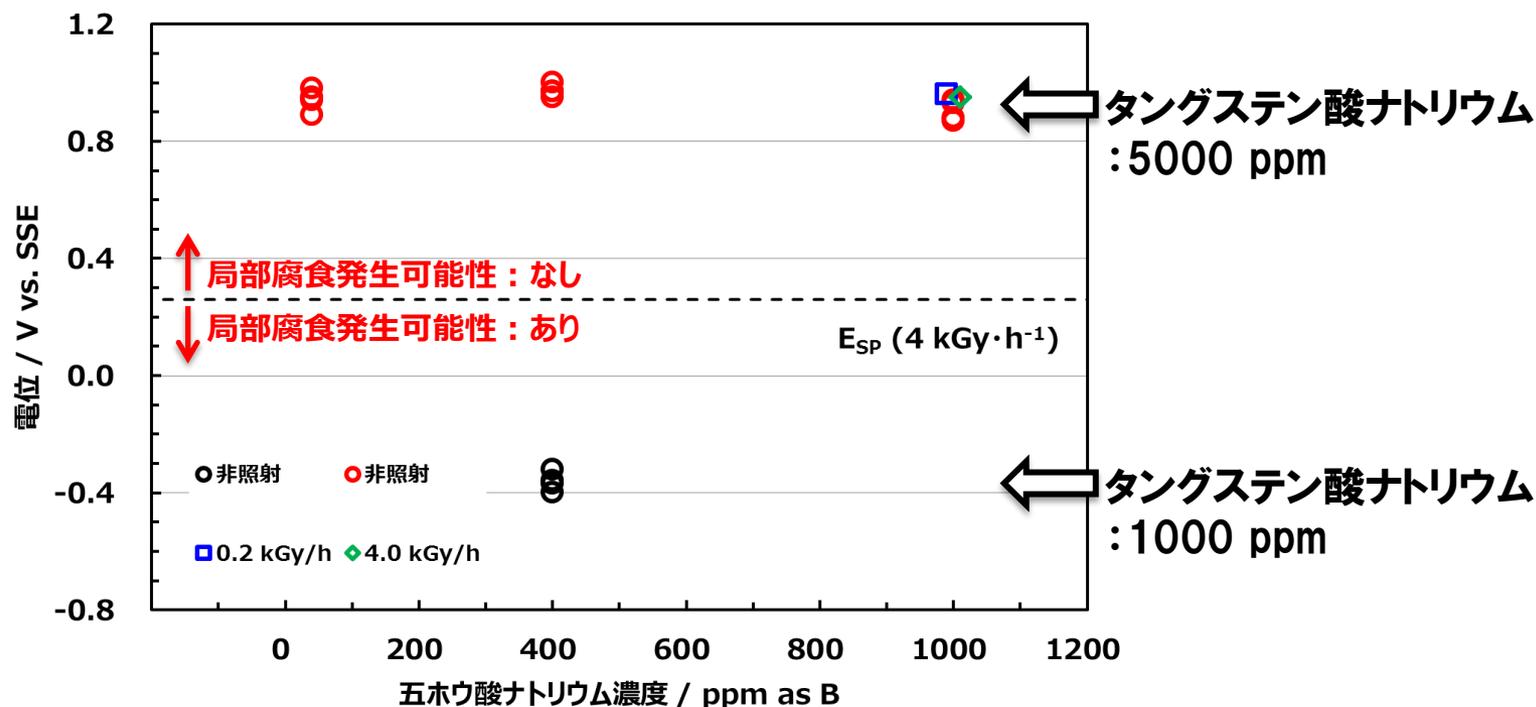


図39 局部腐食発生評価結果(タングステン酸ナトリウム)

- タングステン酸ナトリウムは5000 ppmの濃度で五ホウ酸ナトリウムと複合添加することにより、非照射および照射のいずれにおいても局部腐食発生の可能性がないことが分かった。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 局部腐食の発生評価結果(その2): 日立GE分

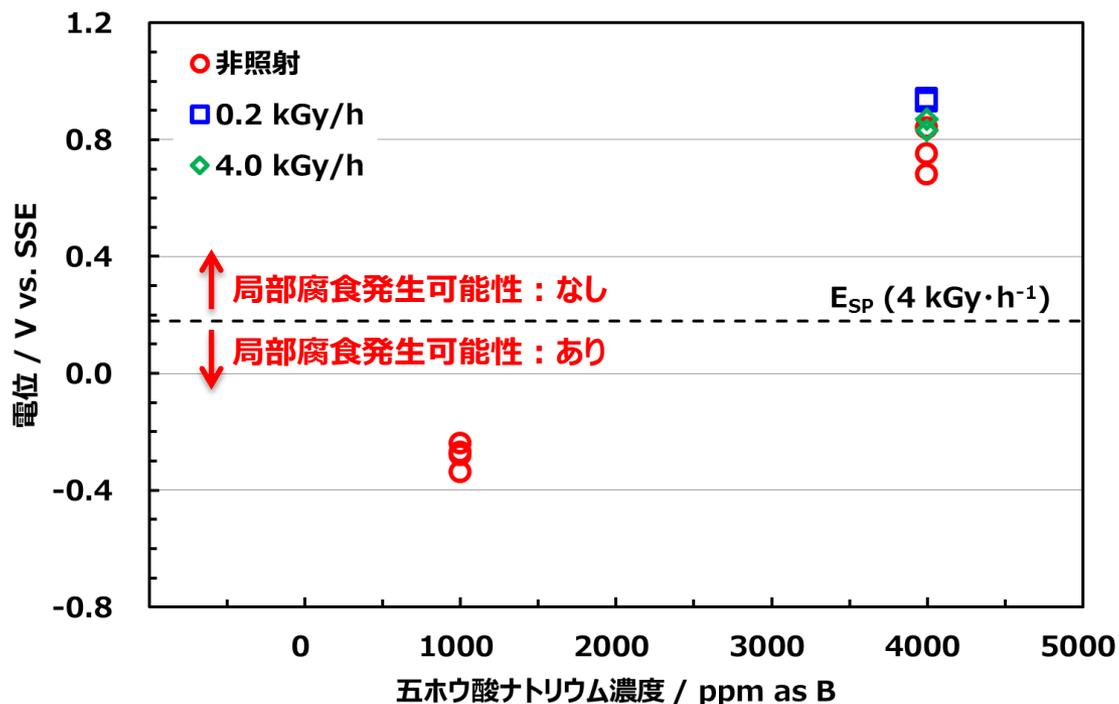


図40 局部腐食発生評価結果(五ホウ酸ナトリウム単独添加)

- 五ホウ酸ナトリウム 4000ppm as B単独添加条件では、非照射および照射条件のいずれにおいても局部腐食発生の可能性がないことが分かった。
- 五ホウ酸ナトリウム 1000ppm as Bの単独添加、非照射の条件では、局部腐食発生する可能性があることが分かった。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 局部腐食の発生評価結果(その2): 日立GE分

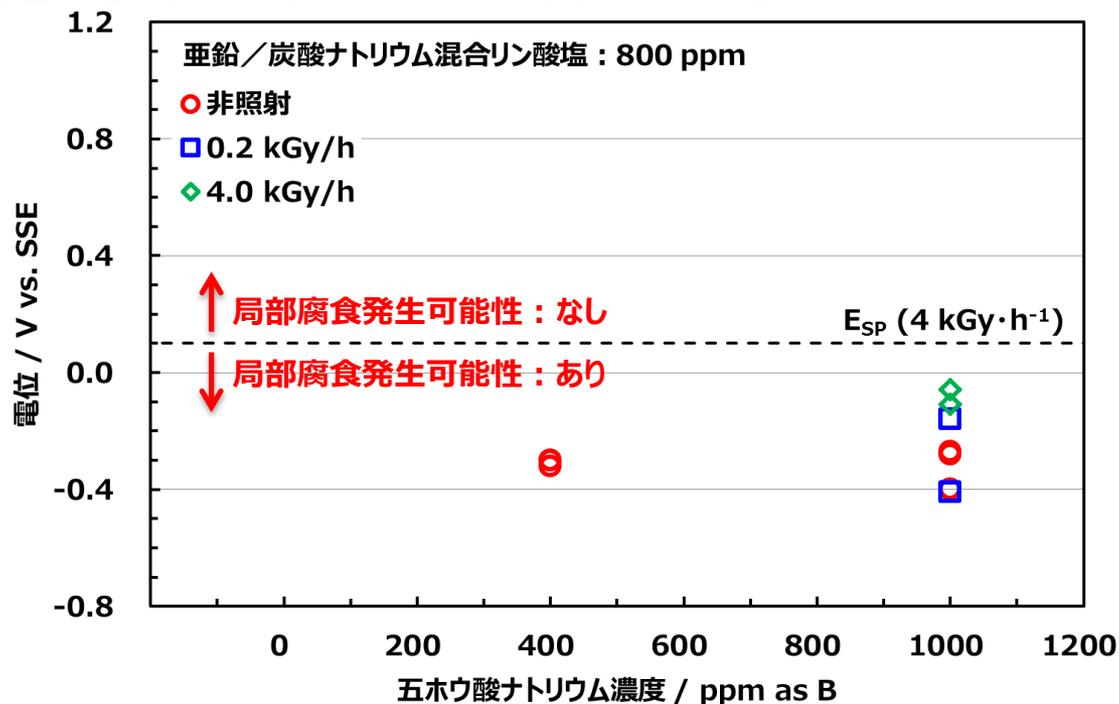


図43 局部腐食発生評価結果(亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩 (ZSCMP) )

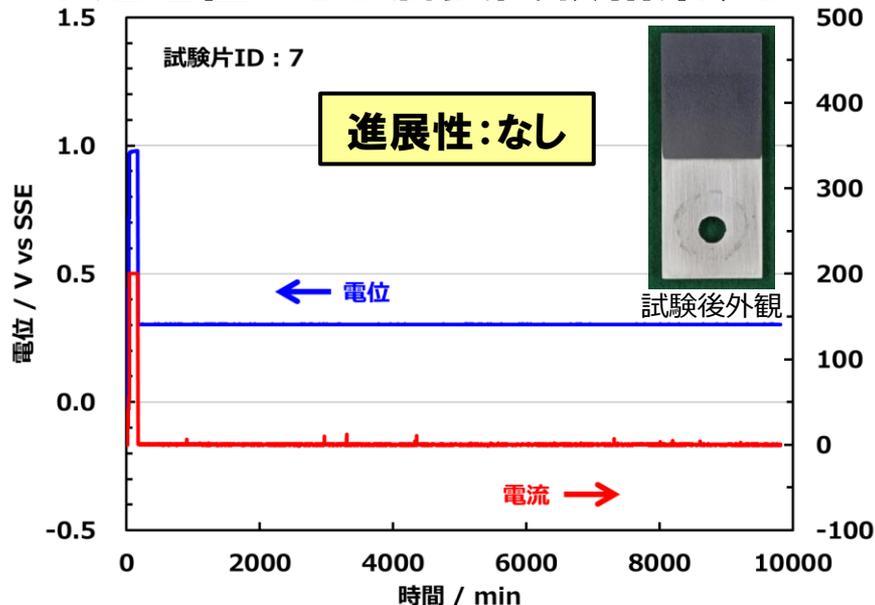
- 五ホウ酸ナトリウムとZSCMPの複合添加条件では、非照射および照射条件のいずれにおいても局部腐食発生の可能性があることが分かった。

# 10. 平成28年度事業成果

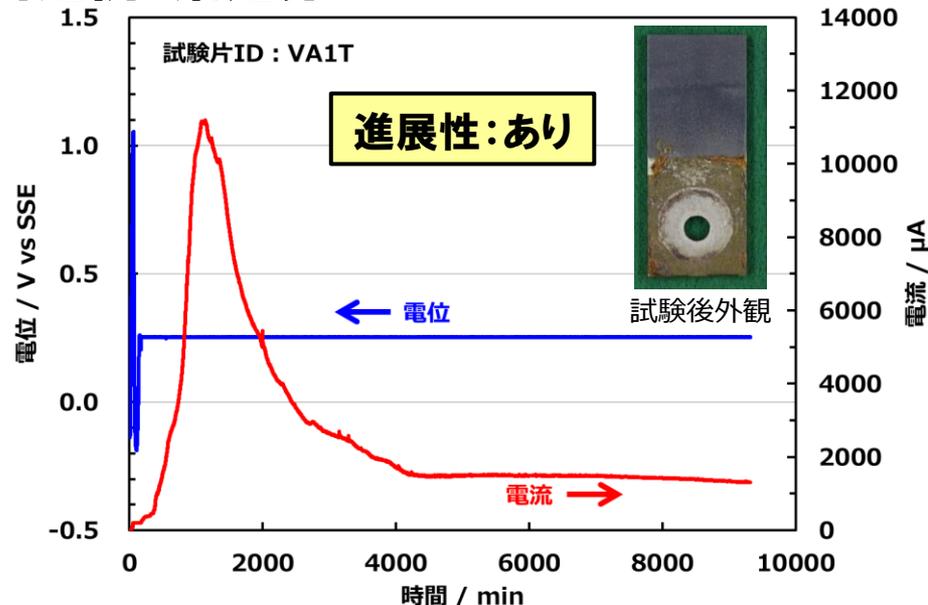
## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 定電位すきま腐食試験結果(その1) 測定例: 東芝分



試験溶液: 1000倍希釈人工海水  
防錆剤種類: タングステン酸ナトリウム  
防錆剤濃度: 5000 ppm  
五ホウ酸ナトリウム濃度: 1000 ppm as B  
線量率: 4.0 kGy/h  
設定電位: 0.3 V vs. SSE( $E_{\text{Sp}}$ 相当)



試験溶液: 1000倍希釈人工海水  
防錆剤種類: 亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩  
防錆剤濃度: 5000 ppm  
五ホウ酸ナトリウム濃度: 1000 ppm as B  
線量率: 4.0 kGy/h  
設定電位: 0.25 V vs. SSE( $E_{\text{Sp}}$ 相当)

図42 照射環境下における定電位すき間腐食試験の測定例

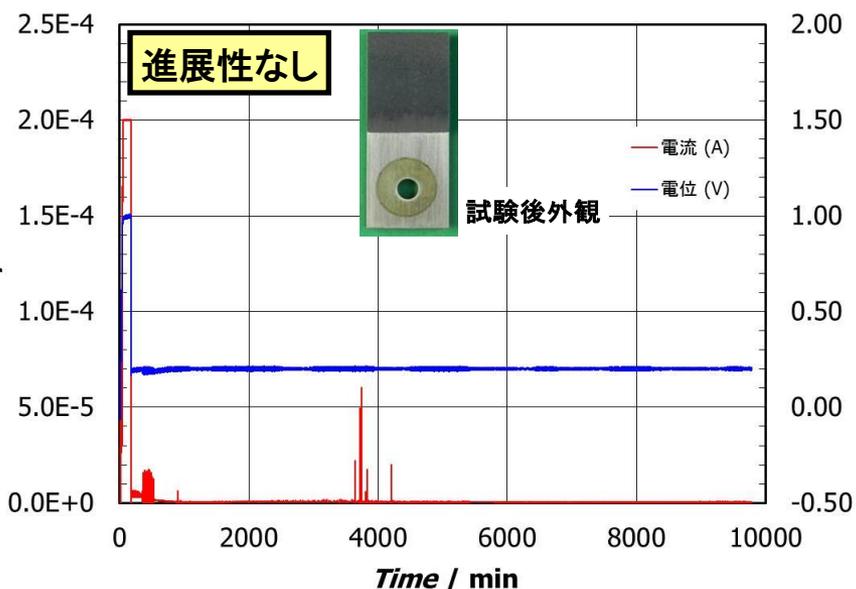
- 定電位保持時(STEP3)の電流の経時変化において、電流が不動態維持電流( $<10 \mu\text{A}$ )程度に減衰した場合は進展性なし(左図)、電流が不動態維持電流以上で定常になった場合は進展性あり(右図)と評価した。

# 10. 平成28年度事業成果

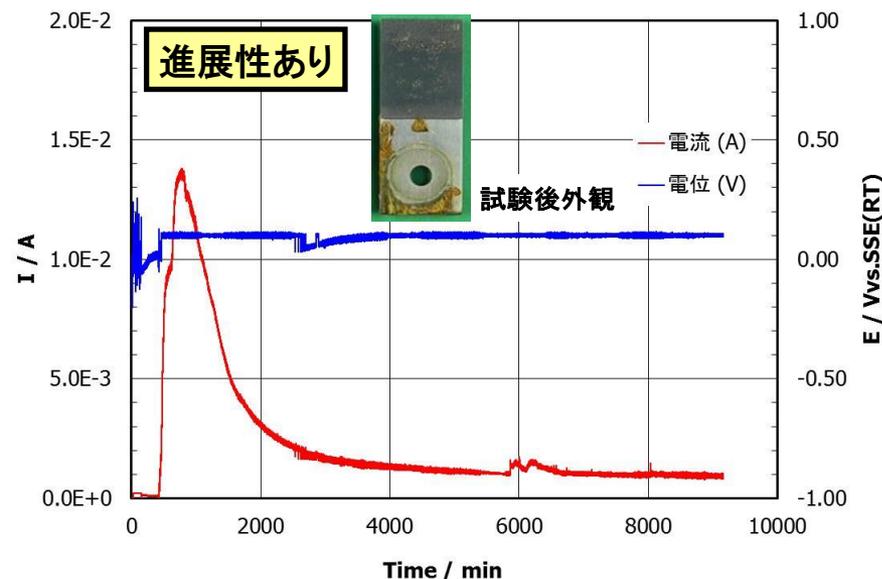
## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 定電位すきま腐試験結果(その2) 測定例: 日立GE分



試験溶液: 1000倍希釈人工海水  
防錆剤: 五ホウ酸ナトリウム4000 ppm as B, pH=8.2  
線量率: 4.0 kGy/h  
設定電位: 0.2 V vs. SSE( $E_{sp}$ 相当)



試験溶液: 1000倍希釈人工海水  
防錆剤: 五ホウ酸ナトリウム 1000 ppm as B  
+ 亜鉛炭酸ナトリウム混合リン酸塩800ppm, pH=8.5  
線量率: 4.0 kGy/h  
設定電位: 0.1 V vs. SSE( $E_{sp}$ 相当)

図43 照射環境下における定電位すき間腐食試験の測定例

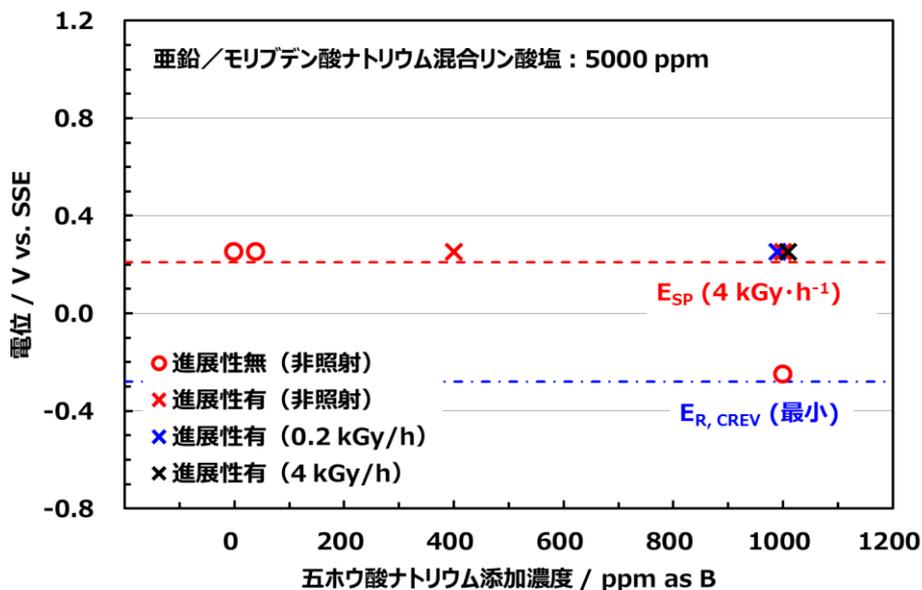
- 定電位保持(STEP 3)条件での電流の経時変化において、電流が不働態維持電流( $<10 \mu A$ )以下に減衰する条件では、進展性なし(左図), 電流が不働態維持電流以上を維持する条件では、進展性あり(右図)と評価した。

# 10. 平成28年度事業成果

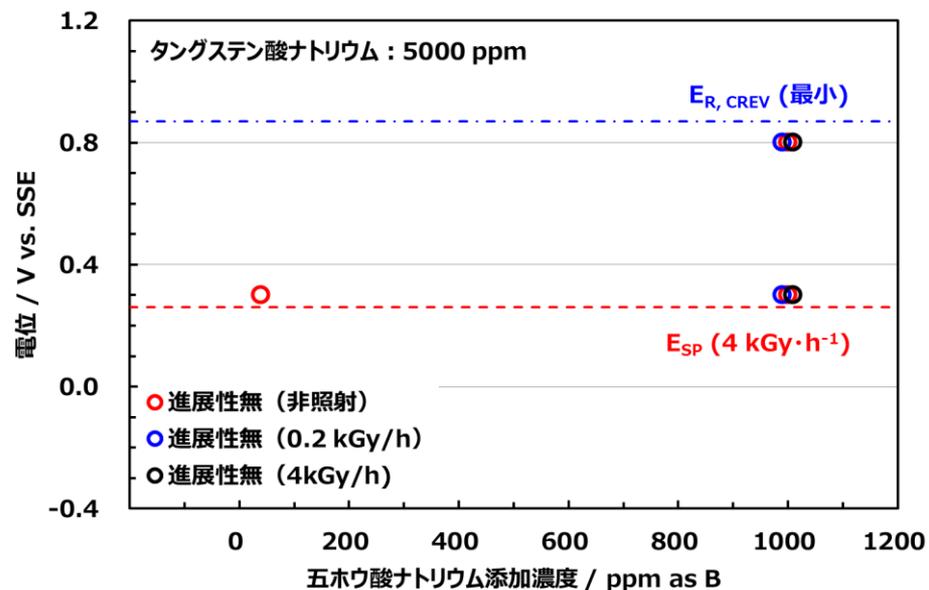
## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ● 局部腐食の進展評価結果(その1): 東芝分



(a) 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩



(b) タングステン酸ナトリウム

図44 局部腐食進展評価結果

- 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩は、防錆剤単独添加および五ホウ酸ナトリウム40 ppm as Bとの複合添加条件、照射下 $E_{SP}$ 相当の電位において局部腐食の進展性がなかった。五ホウ酸ナトリウムの添加濃度の増加に伴い、局部腐食の進展性が発現した。
- タングステン酸ナトリウム5000 ppmに五ホウ酸ナトリウムを複合添加することにより、非照射および照射のいずれにおいても照射下ESP相当の電位で局部腐食の進展性がなかった。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ●まとめ

防錆剤種類	防錆剤濃度	人工海水希釈倍率 (Cl <sup>-</sup> 濃度)	五ホウ酸ナトリウムとの複合	耐局部腐食性	
				発生評価 ○:発生可能性なし ×:発生可能性あり	進展性 ○:発生可能性なし ×:発生可能性あり
五ホウ酸ナトリウム	4000 ppm as B	1000倍 (19 ppm)	—	○	○
タングステン酸 ナトリウム	5000 ppm	1000倍 (19 ppm)	複合添加 (>40 ppm as B)	○	○
亜鉛／炭酸ナトリウム混合 リン酸塩	4000 ppm	1000倍 (19 ppm)	単独添加	対象外*	対象外*
	800 ppm	1000倍 (19 ppm)	複合添加 (<40 ppm as B)	対象外*	対象外*
	800 ppm	1000倍 (19 ppm)	複合添加 (>400 ppm as B)	×	×
亜鉛／モリブデン酸 ナトリウム混合リン酸塩	5000 ppm	1000倍 (19 ppm)	単独添加	○***	○***
	5000 ppm	1000倍 (19 ppm)	複合添加 (>400 ppm as B)	×	×

注1：沈殿皮膜型防錆剤であり不働態化しないため、評価対象外、注2：低線量率（0.2 kGy/h）において発生可能性なし

注3：非照射において進展可能性なし

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ① 電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価

#### ●まとめ

#### 【五ホウ酸ナトリウム】

五ホウ酸ナトリウム単独添加条件において、添加濃度1000 ppm as Bでは局部腐食の発生可能性あったが、4000 ppm as Bでは照射、非照射いずれの環境下でも局部腐食の発生可能性がなく、高い耐局部腐食性を示すことが分かった。

#### 【亜鉛／モリブデン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では、単独添加の非照射もしくは0.2 kGy/hにおいて高い耐局部腐食性を示すことが分かった。一方、五ホウ酸ナトリウムとの複合添加もしくは4.0 kGy/hの照射により耐局部腐食性が低下することが分かった。試験後の溶液分析の結果、耐局部腐食性の低下はpHの低下に起因している可能性があることから、pHの低下を抑制することで高耐局部腐食性を維持できることも考えられる。

#### 【亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩】

沈殿皮膜型防錆剤の一種である亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩は、単独添加もしくは40 ppm as Bの五ホウ酸ナトリウムとの複合添加では不働態化しないことから、局部腐食発生可能性の評価対象外とした。400 ppm as B以上の五ホウ酸ナトリウムと複合添加した亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩は、五ホウ酸ナトリウムの作用により不働態化し、局部腐食の発生可能性があることが分かった。

#### 【タングステン酸ナトリウム】

五ホウ酸ナトリウムとの複合添加により、照射および非照射いずれの環境下においても局部腐食の発生可能性および進展性がなく、高い耐局部腐食性を示すことが分かった。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ② リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

#### ● リン酸塩系防錆剤 バッチ試験

##### 目的:

所定の高温における防錆剤成分の固着影響の有無を評価する。

##### 試験方法:

- 1) 希釈人工海水を入れた耐熱瓶に防錆剤を添加し、所定濃度に調製する。
- 2) 密閉し振とう後、所定の高温に保持した恒温槽に静置する。
- 3) 24時間保持後に耐熱瓶を取り出し、上澄水をフィルターにてろ過する。
- 4) ろ過物および試験溶液の成分分析を行う。



図45 バッチ試験イメージ

表2 概略試験マトリックス

防錆剤	塩化物イオン濃度 (ppm)	防錆剤濃度 (ppm)	温度 (°C)	試験時間 (時間)
亜鉛／モリブデン酸 ナトリウム混合リン酸塩 <sup>注1</sup> 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩	19 (1000倍希釈人工海水) 1.9 (10000倍希釈人工海水)	400～ 5000	50 65 80	24

注1 通常の防錆剤に加え、照射後の溶液の成分分析結果を考慮し、有機リン化合物からオルトリン酸への置換率が50%の防錆剤も使用

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ② リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

#### ● 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩 バッチ試験：東芝分

##### 試験結果：

・試験後の試験溶液中に沈殿物は認められなかった。

・試験溶液の上澄水をフィルターにてろ過したろ過水の成分濃度測定の結果、防錆剤の主要成分(P, Zn, Mo)の濃度は、試験前後で変化は認められなかった。

・pH, その他の分析対象成分の分析の結果、試験前後で変化は認められなかった。

・フィルターろ過物の定性分析の結果、防錆剤の主要成分のうち、ZnおよびMoは検出されず、Pもほぼ全ての試験条件において検出されなかった。



(耐熱瓶外観)



(耐熱瓶底部)

図46 バッチ試験後外観観察(例)

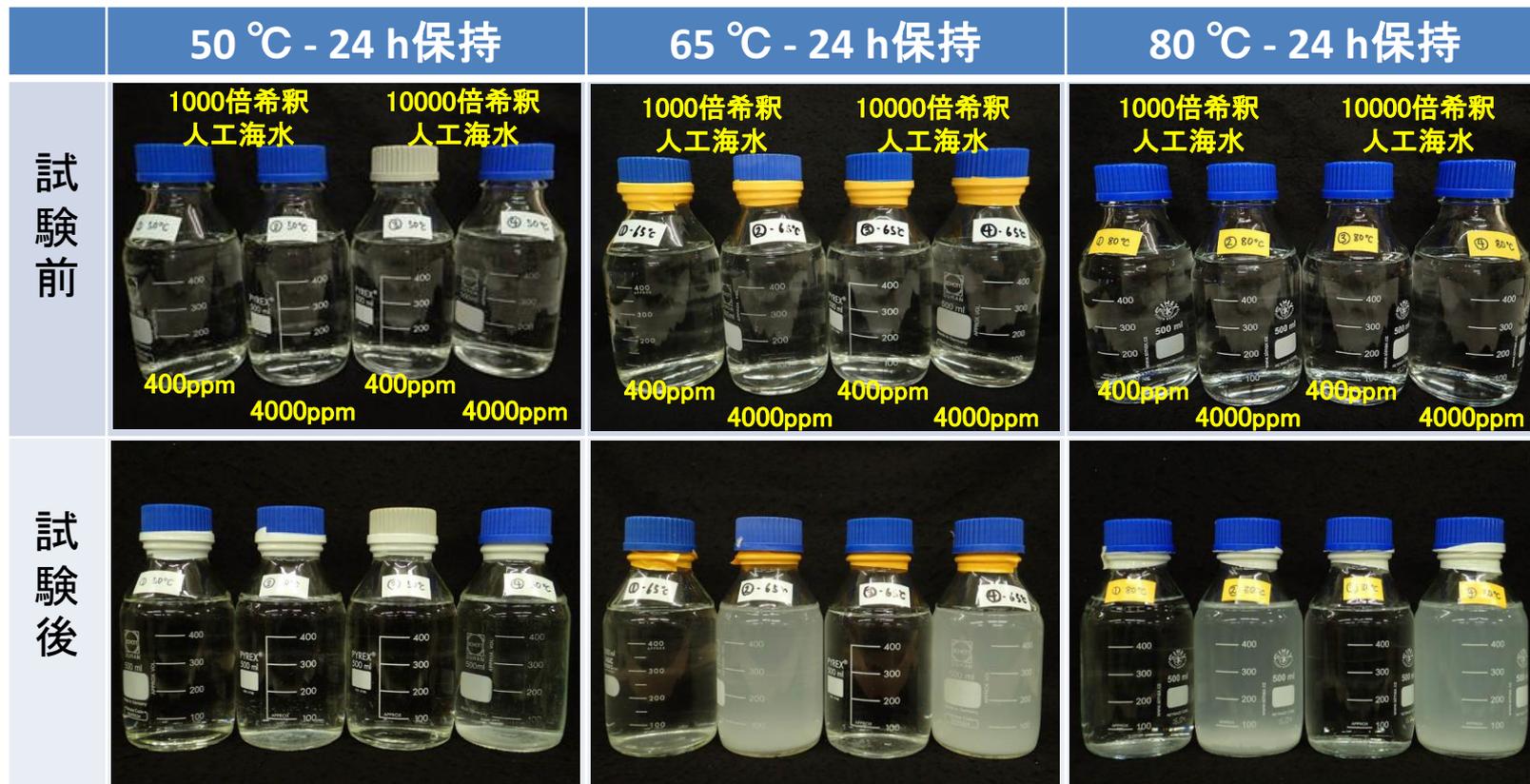
亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩 3000ppm  
(1000倍希釈海水, 50℃)

バッチ試験の結果、亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩は白色生成物などの発生はなく、高温での固着影響は認められなかった。

# 10. 平成28年度事業成果

(1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ②リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

●亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩(ZSCMP)バッチ試験結果:日立GE分



- ZSCMP 4000ppm, 65°C/80°Cに24h高温保持することにより白濁確認。
- 白濁物質の成分元素として防錆剤主成分であるZnおよびPを検出。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ② リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

#### ● リン酸塩系防錆剤 通水試験

##### 目的:

防錆剤を含む試験溶液が高温部に接触した場合の防錆剤成分の析出量を評価する。

##### 試験方法:

- 1) 希釈人工海水と防錆剤を混合し所定の濃度の試験溶液を調製する。
- 2) 熱負荷部分(テストチューブ)の内部に温水, 外部に試験溶液を冷却水として通水し, 所定の試験温度および流速で温水, 冷却水を循環させる。
- 3) 所定の時間後, テストチューブ表面の付着物量を評価する。
- 4) 試験溶液の一部をフィルターにてろ過し, ろ過水に対して成分濃度分析を行う。

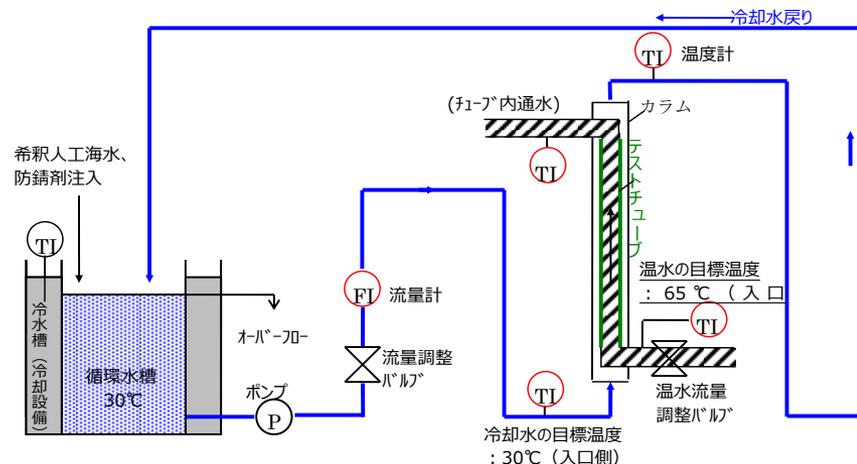


図47 試験装置構成例

表3 概略試験マトリックス

防錆剤	塩化物イオン濃度 (ppm)	防錆剤濃度 (ppm)	温度 (°C)	流速 (m/s)	試験時間 (時間)
亜鉛/モリブデン酸 ナトリウム混合リン酸塩 <sup>注1</sup>	19 (1000倍希釈人工海水)	400~	65	0.02 ~ 0.50	168 720 (一部)
亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩	1.9 (10000倍希釈人工海水)	5000			

注1 通常の防錆剤に加え, 照射後の溶液の成分分析結果を考慮し, 有機リン化合物からオルトリン酸への置換率が50%の防錆剤も使用

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ② リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

#### ● 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩 通水試験：東芝分

##### 試験結果：

・試験後のテストチューブの接液部に付着物は認められなかった。

・試験溶液の一部をフィルターにてろ過したろ過水の成分濃度測定の結果、防錆剤の主要成分(P, Zn, Mo)の濃度は、試験前後で顕著な変化は認められなかった。

・pH, その他の分析対象成分の分析の結果、試験前後で変化は認められなかった。

・フィルターろ過物の定性分析の結果、防錆剤の主要成分(P, Zn, Mo)は検出されなかった。

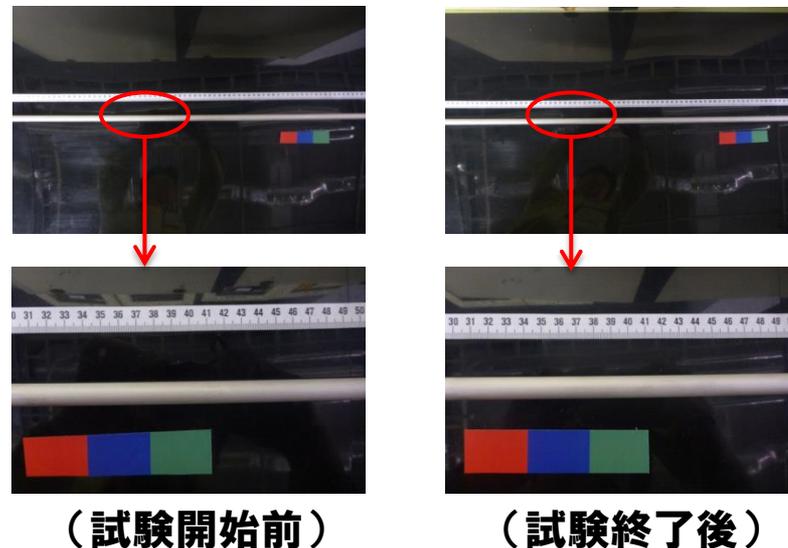


図48 通水試験テストチューブ外観観察(例)  
亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩 3000ppm  
(1000倍希釈海水, 65°C, 流速0.03m/s)

通水試験の結果、亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩は白色生成物などの付着はなく、高温での固着影響は認められなかった。

# 10. 平成28年度事業成果

(1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ②リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

●亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩(ZSCMP)通水試験結果(1):日立GE分

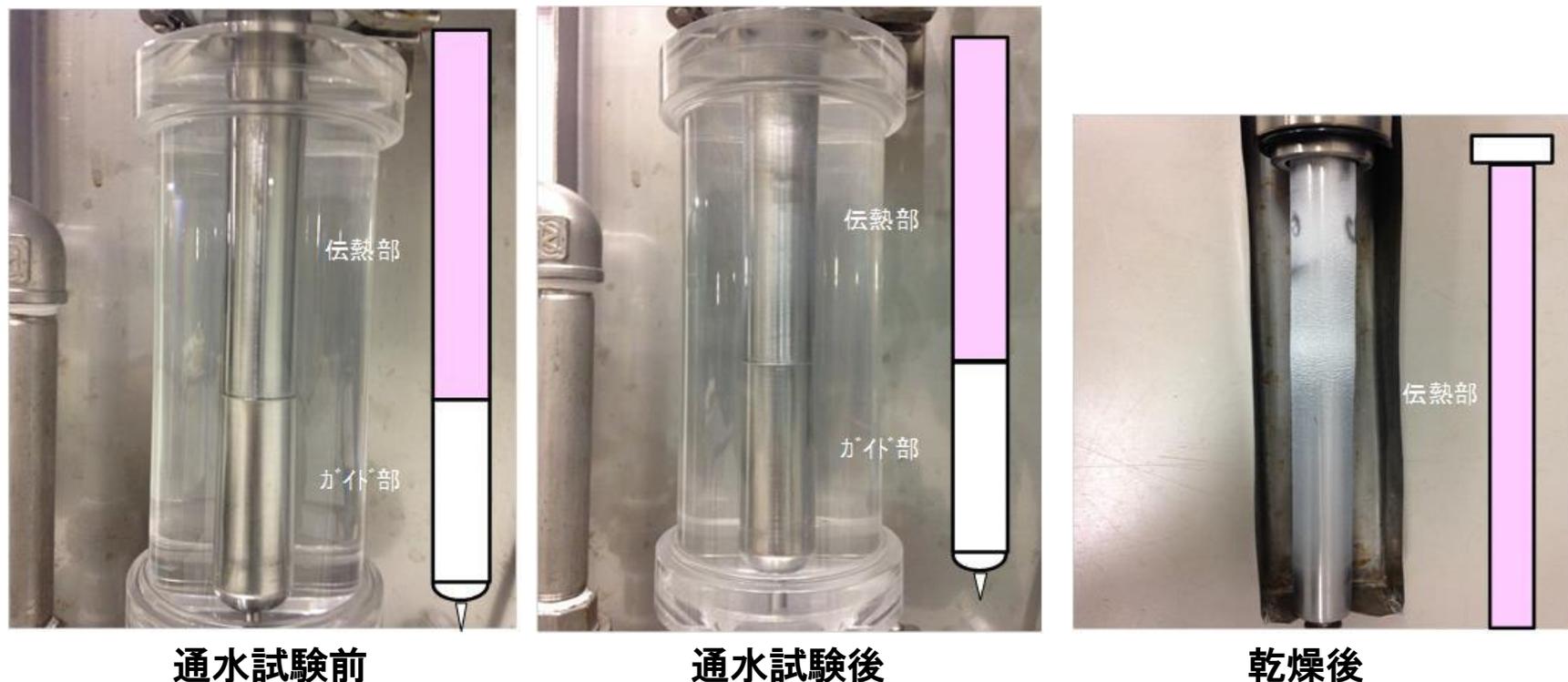


図49 管肉温度65°C, 168h通水試験前後の伝熱管の外観写真(例)  
ZSCMP 4000 ppm, 流速0.02 m·s<sup>-1</sup>

- ・試験中は明確なスケールの付着は確認できなかったが、伝熱部乾燥後に白色スケールの付着を確認。

# 10. 平成28年度事業成果

(1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ②リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

## ●亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩(ZSCMP)通水試験結果(2):日立GE分

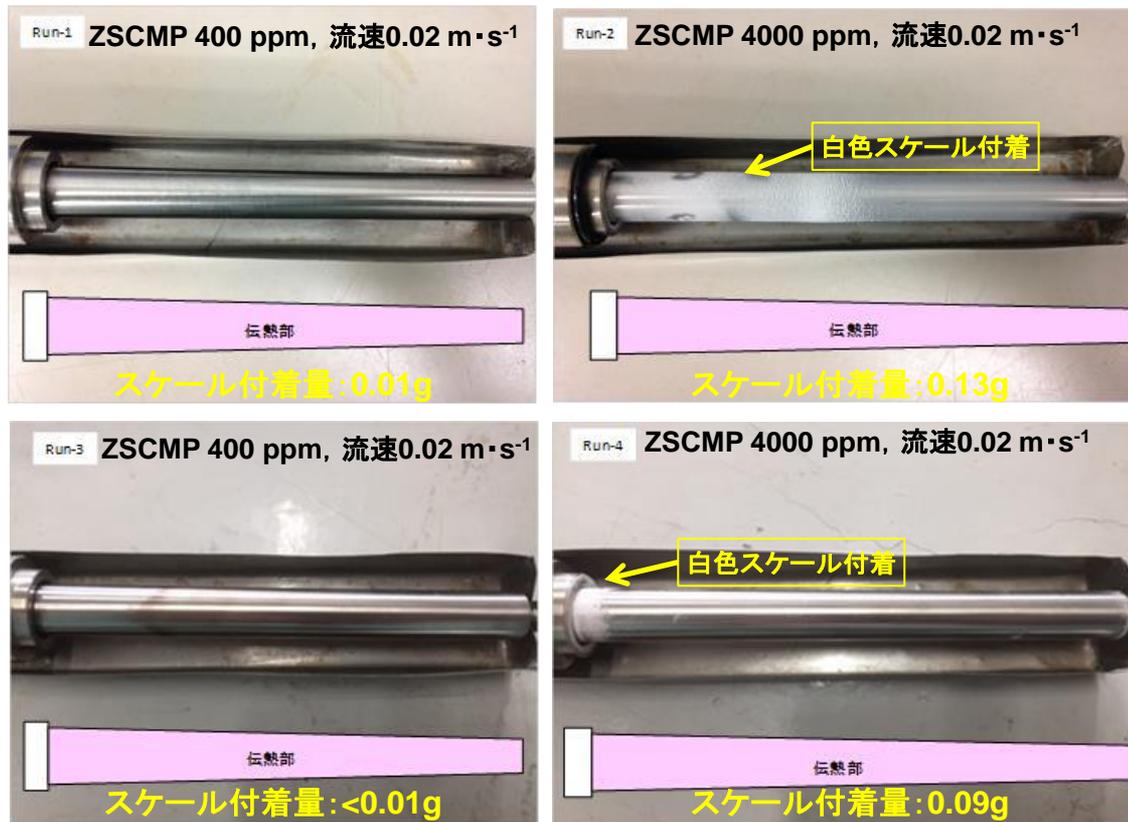


図50 管肉温度65°C, 168h通水試験後の伝熱管の外観写真

- ・ ZSCMP 4000ppm, 65°Cに168h通水試験により白色スケール確認。
- ・ 低流速条件の方がスケール量が多い傾向。
- ・ スケール成分と溶液分析結果はバッチ試験と同様の傾向。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ② リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

#### ● リン酸塩系防錆剤に対する滅菌剤の影響評価試験

##### 目的:

防錆剤と滅菌剤を複合添加した場合に炭素鋼の腐食に及ぼす影響を評価する。

##### 試験方法:

- 1) 希釈人工海水に防錆剤および滅菌剤を所定濃度添加し、試験溶液を作製する。
- 2) 試験片を試験容器に設置し、試験温度に昇温後、所定時間静置する。一部錆び付き試験片に対しても試験を行う。
- 3) 試験後、試験片を試験容器から取出し、外観観察を行う。腐食生成物を除去した後に重量測定を行う。

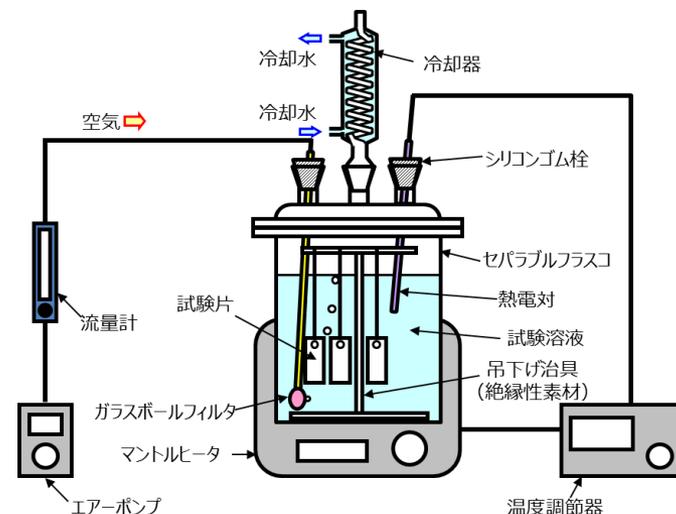


図51 試験装置構成例

表4 概略試験マトリックス

防錆剤	塩化物イオン濃度 (ppm)	防錆剤濃度 (ppm)	温度 (°C)	滅菌剤濃度 (ppm)	試験時間 (時間)
亜鉛／モリブデン酸 ナトリウム混合リン酸塩 <sup>注1</sup>	19 (1000倍希釈人工海水)	3,000	50	50	500
亜鉛／炭酸ナトリウム 混合リン酸塩 <sup>注2</sup>	1.9 (10000倍希釈人工海水)	4,000		500	

注1 有機窒素ハロゲン系滅菌剤を添加

注2 無機塩素系滅菌剤を添加

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ② リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

#### ● 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩に対する滅菌剤の影響評価試験：東芝分

##### 試験結果：

・防錆剤および滅菌剤を添加した溶液中の腐食試験の結果、試験前後で試験片表面は金属光沢を呈し、腐食生成物の発生は認められなかった。

・錆び付き試験片による防錆剤および滅菌剤を添加した溶液中の腐食試験の結果、外観上の変化はほぼ認められず、試験前後の腐食量も同程度であり、腐食の進行は認められなかった。

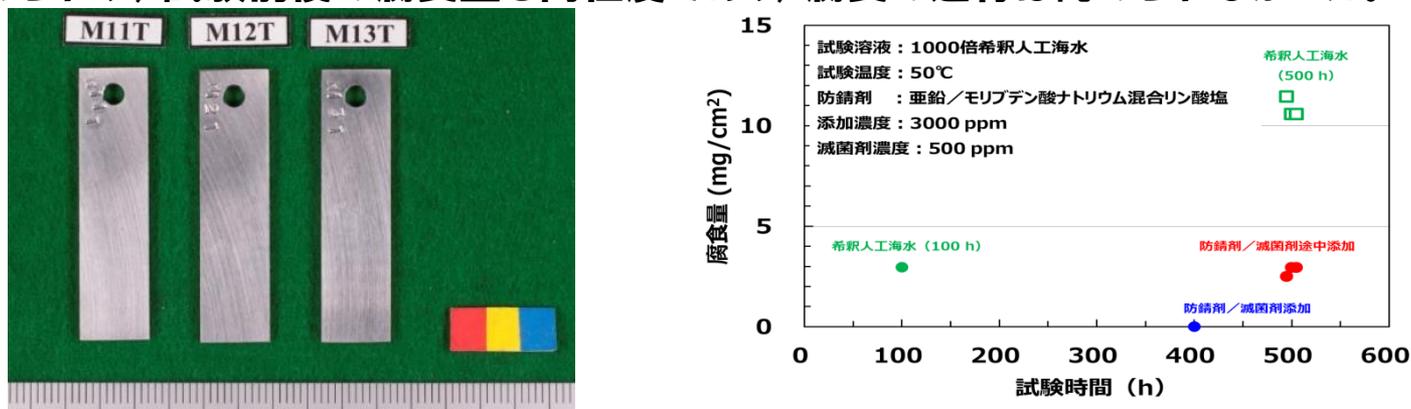


図52 防錆剤および滅菌剤添加溶液中での腐食試験後外観観察(例)と腐食量評価結果  
亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩3000 ppm, 滅菌剤500 ppm  
(1000倍希釈海水, 50℃)

炭素鋼の研磨面および腐食生成物に覆われた面いずれに対しても、亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩と滅菌剤の併用による腐食抑制効果への影響は認められなかった。

# 10. 平成28年度事業成果

(1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ②リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価

●亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩(ZSCMP)に対する滅菌剤影響評価:日立GE分

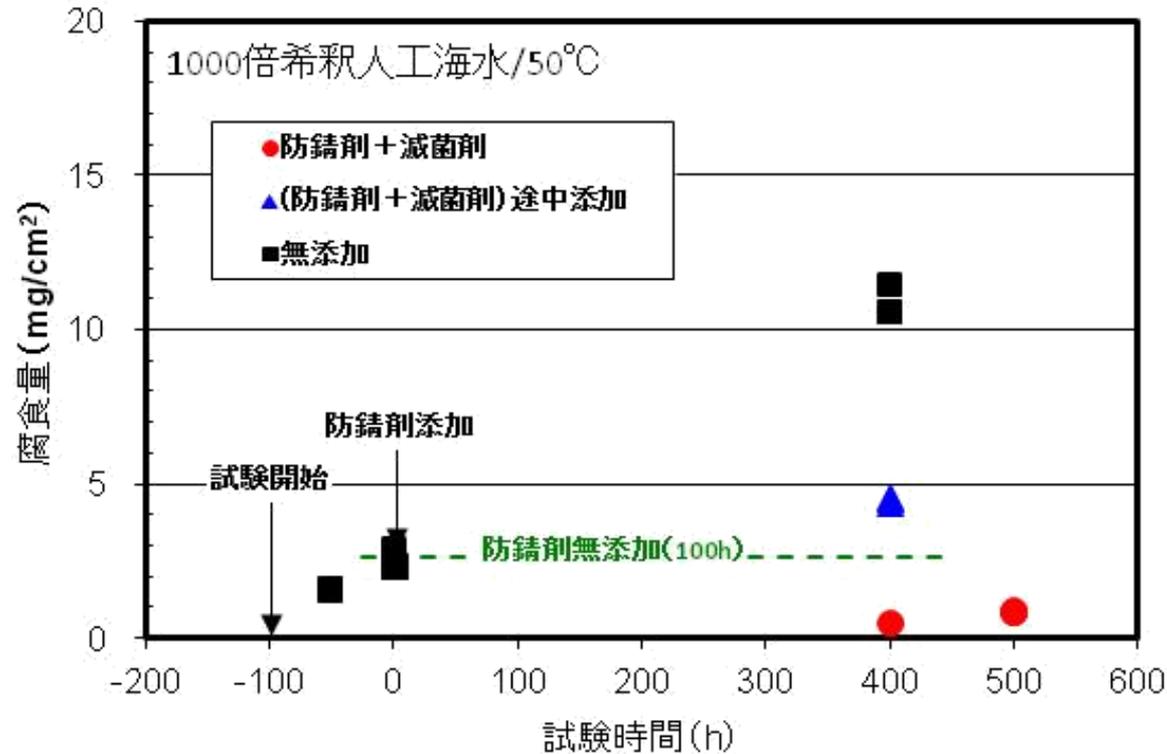


図53 防錆剤および滅菌剤途中添加試験結果

防錆剤:亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩 4000 ppm

滅菌剤:無機塩素系滅菌剤 50 ppm

- ・ 防錆剤および滅菌剤を途中添加した場合、無添加の場合と比較して腐食量が大きく低下した。(腐食生成物に覆われた炭素鋼に対しても腐食抑制効果を確認)

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 1) 試験要領の策定

4種類の防錆剤に対し、以下の観点で水処理設備(SARRY™, 既設/増設/高性能多核種除去設備)への影響評価を行った。

- ・既存水処理設備への全体的な影響評価

平成27年度に防錆剤による影響が評価されていない機能について、影響有無を確認する。

- ・防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価

防錆剤濃度が低下した場合の、吸着による核種除去機能への影響傾向を確認する。

- ・処理水中に防錆剤が含まれる場合の水処理システムの検討

防錆剤を含む液に対する核種除去、防錆剤成分除去を検討する。

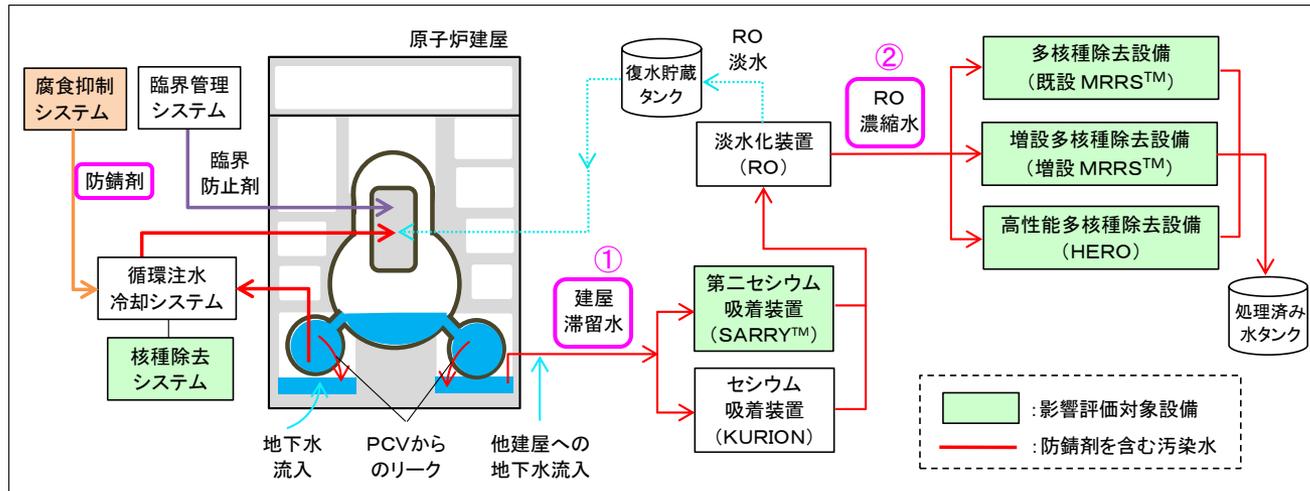


図54 デブリ取出し時に想定される水処理システム

### <防錆剤および濃度設定>

①建屋滞留水/②RO濃縮水

A) タングステン酸ナトリウム:

①1500ppm/②3000ppm

B) 亜鉛/モリブデン酸ナトリウム

混合リン酸塩:

①3500ppm/②7000ppm

C) 五ホウ酸ナトリウム(ホウ素濃度):

①6000ppm/②10000ppm

D) 亜鉛/炭酸ナトリウム混合

リン酸塩:

①400ppm/②800ppm

# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 2)影響評価結果 (その1):東芝分

<目的>SARRY™, MRRS™の機能への防錆剤影響を評価する

○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

○MRRS™ :多核種除去設備(通称:ALPS)

Cs, Sr, アンチモン, ヨウ素を含む主要な62核種を処理  
前処理による吸着阻害成分除去後に吸着処理を実施

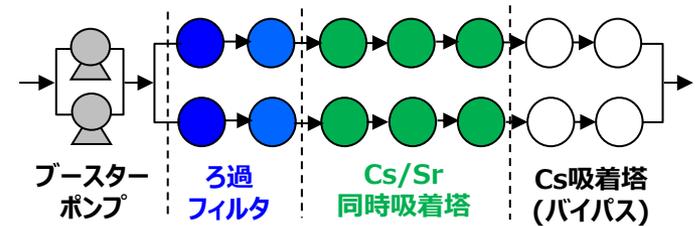


図55 SARRY™の概略構成図

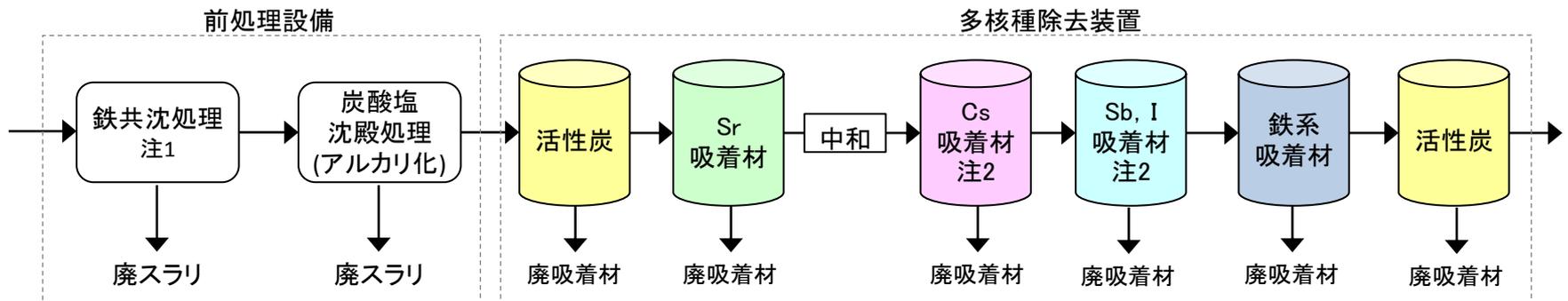


図56 MRRS™の概略処理フロー

注1:既設MRRS™のみ設置

注2:上図は増設MRRS™の構成。既設MRRS™では、Cs吸着材とSb・I吸着材の順番が逆。

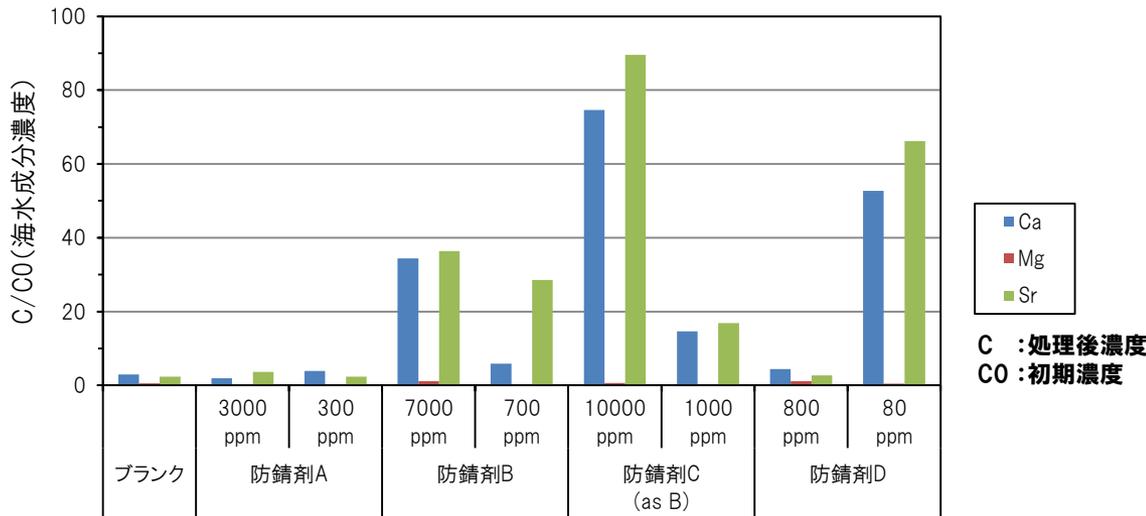
# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 2)影響評価結果 (その1):東芝分

#### i)既存水処理設備への全体的な影響評価

#### ●炭酸塩沈殿工程の吸着阻害成分除去性能への防錆剤濃度依存性評価



防錆剤B・C・Dが添加されることで海水由来の吸着阻害成分(Ca, Mg, Sr)の除去性能が低下



防錆剤B・C・Dは下流の吸着工程におけるSr吸着性能に影響を与える可能性がある

防錆剤	吸着阻害成分除去性能への影響
A タングステン酸ナトリウム	○
B 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	△
C 五ホウ酸ナトリウム	△
D 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩	△

○:影響はほとんどない △:防錆剤濃度1/10でも影響あり

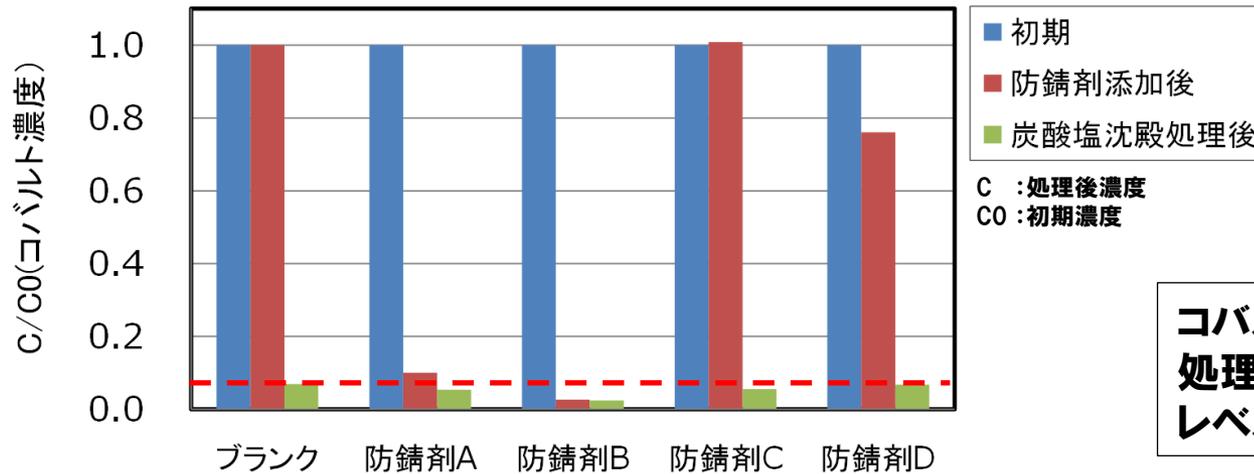
# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 2) 影響評価結果 (その1): 東芝分

#### i) 既存水処理設備への全体的な影響評価

#### ● 炭酸塩沈殿工程のコバルト除去性能への防錆剤影響評価



コバルト濃度は炭酸塩沈殿処理後にブランク条件と同レベルまで低下



防錆剤添加による炭酸塩沈殿工程におけるコバルト除去性能への影響はほとんどない

防錆剤	添加濃度 (ppm)	コバルト除去性能への影響
A タングステン酸ナトリウム	3,000	○
B 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	7,000	○
C 五ホウ酸ナトリウム	10,000 (as B)	○
D 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩	800	○

○: 影響はほとんどない △: 防錆剤濃度1/10でも影響あり

# 10. 平成28年度事業成果

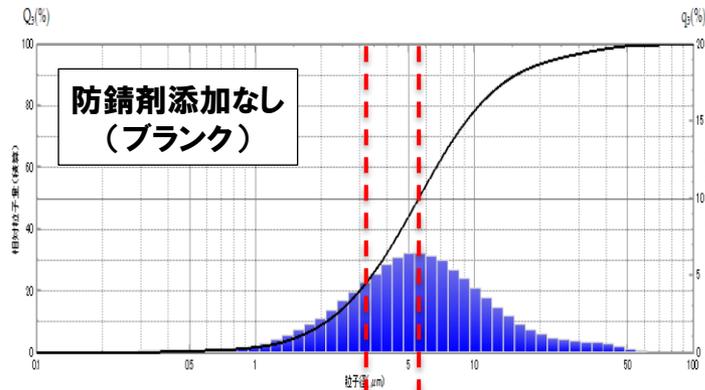
## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 2) 影響評価結果 (その1): 東芝分

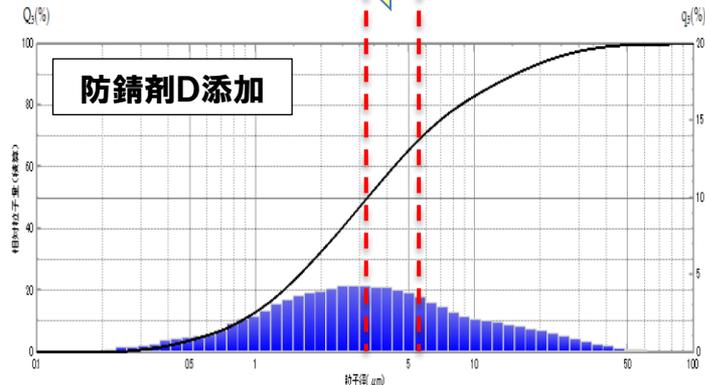
#### i) 既存水処理設備への全体的な影響評価

#### ● 炭酸塩スラリ濃縮時の影響評価

##### A) 濃縮スラリの粒径分布

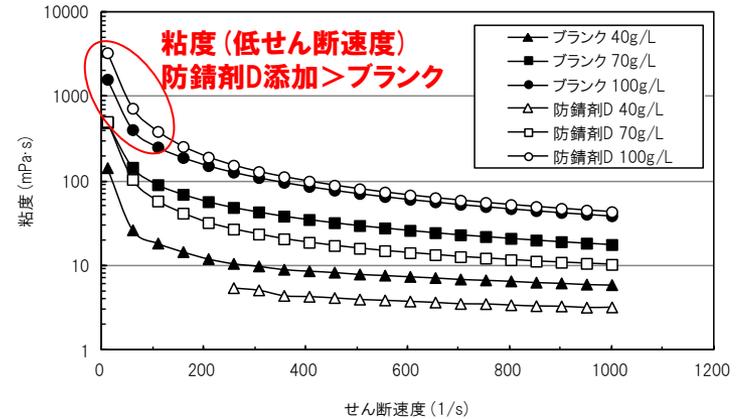


メディアン径 防錆剤D添加: 3.2 μm ← ブランク: 5.5 μm



昨年度評価結果より、炭酸塩沈殿処理時にスラリへ防錆剤成分が移行する可能性の高い防錆剤D (亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩) について、800ppm添加した場合の濃縮影響を評価

##### B) 濃縮スラリの粘度評価



炭酸塩スラリ濃縮時の亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩の影響として以下を確認。

- ・小粒径化
- ・低せん断速度領域での粘度上昇

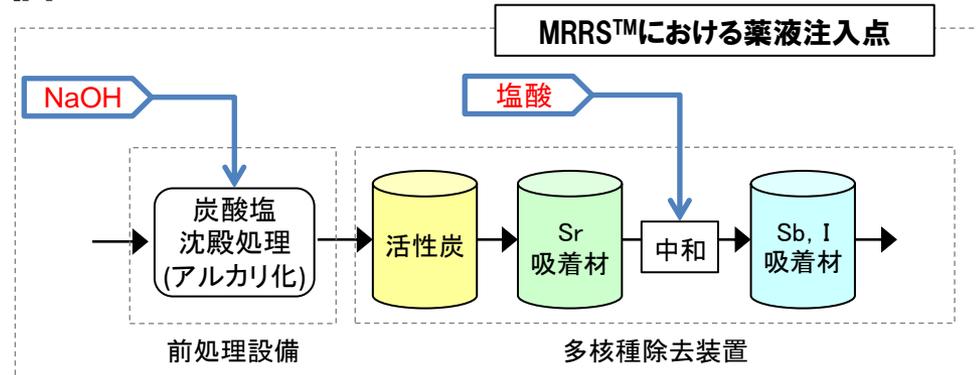
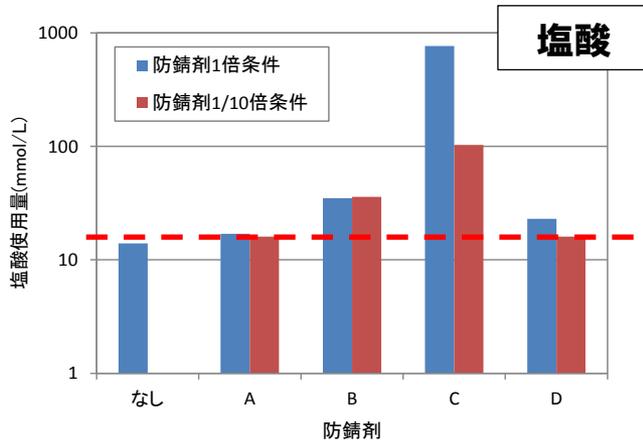
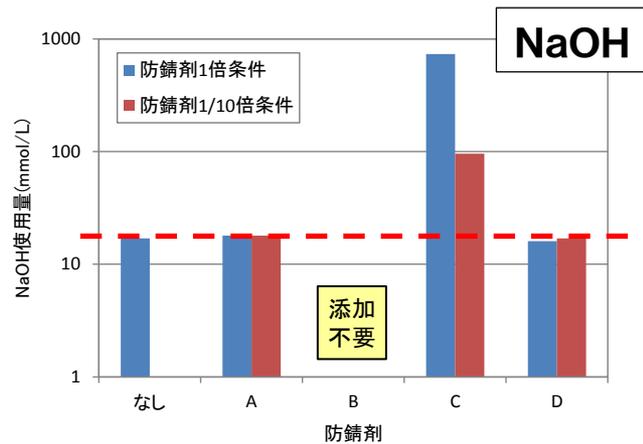
# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 2) 影響評価結果 (その1): 東芝分

#### i) 既存水処理設備への全体的な影響評価

#### ● 薬液使用量への影響評価



防錆剤	添加濃度 (ppm)		薬液使用量への影響
	1倍	1/10倍	
A タングステン酸ナトリウム	3,000	300	○
B 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	7,000	700	△
C 五ホウ酸ナトリウム	10,000	1,000	×
D 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩	800	80	○

- : 影響はほとんどない
- △: 防錆剤濃度1/10でも軽微な影響あり
- ×: 防錆剤濃度1/10でも影響が大きい

**五ホウ酸ナトリウム(防錆剤C)の緩衝作用が薬液使用量に大きな影響を与える**

# 10. 平成28年度事業成果

(1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

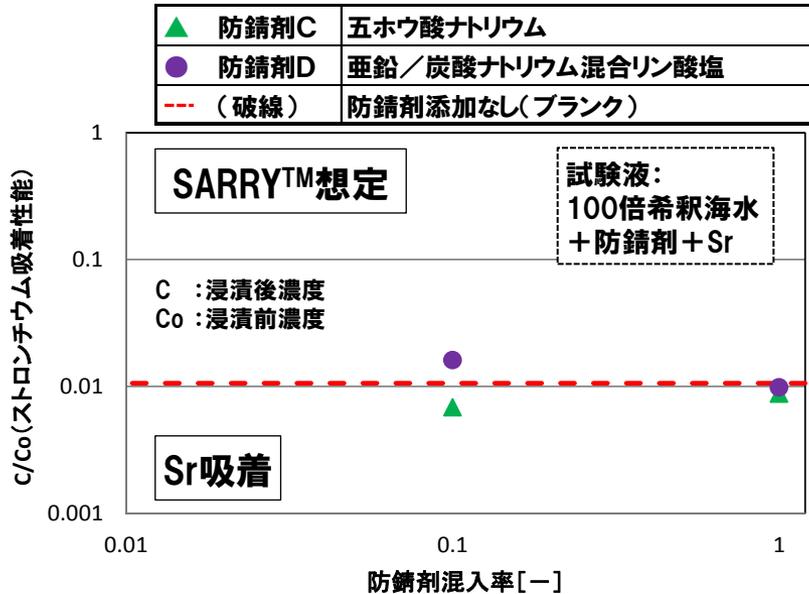
2)影響評価結果 (その1):東芝分

ii)防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価

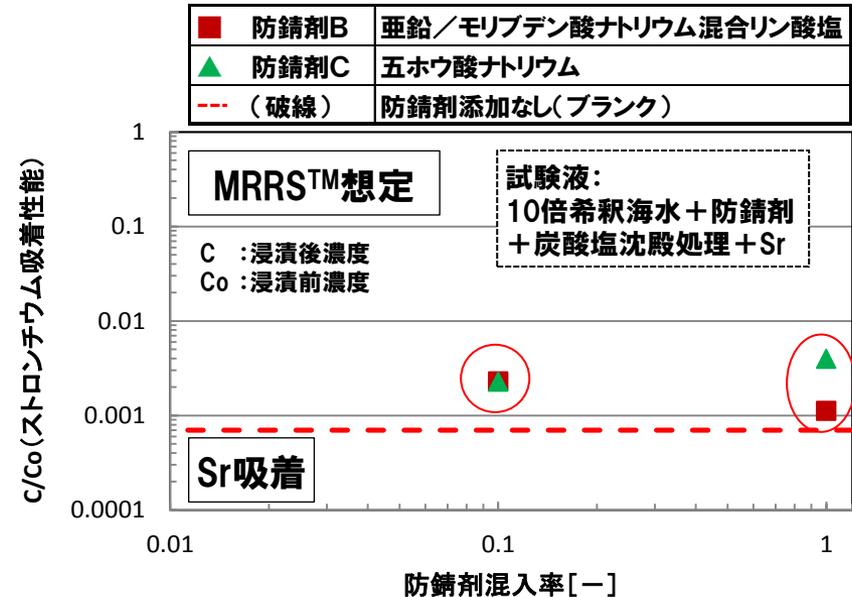
●ストロンチウム吸着性能への影響評価

昨年度評価にて影響を認めた防錆剤を対象に濃度依存性を  
バッチ試験により評価。

防錆剤	混入率1 (ppm)	
	SARRY™想定	MRRS™想定
A タングステン酸ナトリウム	1,500	3,000
B 亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸	3,500	7,000
C 五ホウ酸ナトリウム	6,000 (as B)	10,000 (as B)
D 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩	400	800



ストロンチウム吸着への影響はほとんどない



亜鉛/モリブデン酸ナトリウムと五ホウ酸ナトリウムについて、混入率を0.1した場合においてもストロンチウム吸着への軽微な影響を確認

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 2) 影響評価結果 (その1): 東芝分

#### ii) 防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価

#### ● アンチモン吸着性能への影響評価

アンチモン吸着への防錆剤濃度影響

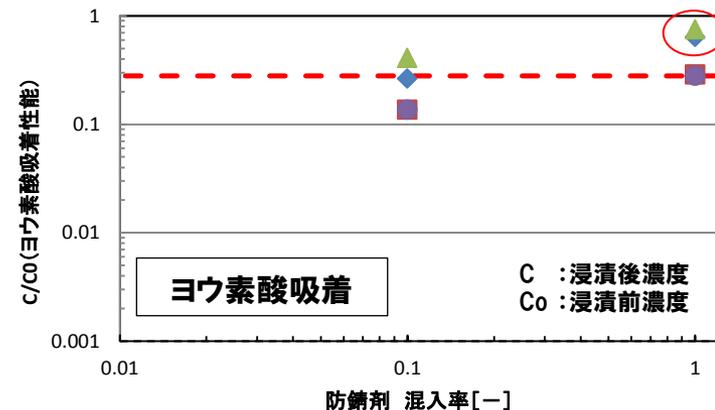
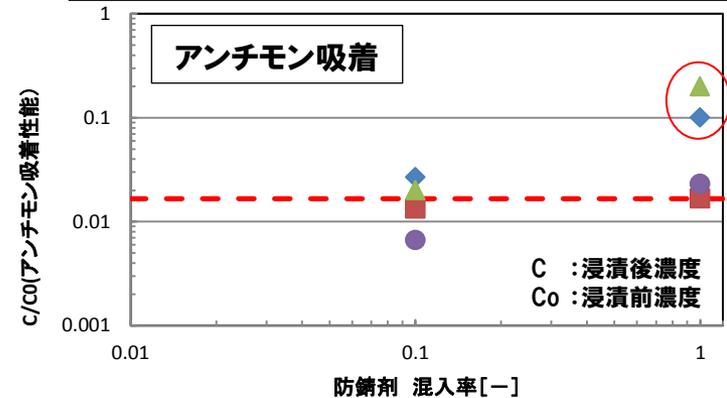


- 五ホウ酸ナトリウムおよびタングステン酸ナトリウムは、高濃度にて防錆剤影響があるが、濃度の低下とともに影響低減
- 同様の化学形態(オキソ酸)をとるヨウ素酸吸着の複合影響はほとんどない

試験液:  
10倍希釈海水+防錆剤+炭酸塩沈殿処理+評価対象核種

防錆剤		混入率1 (ppm)
A	タングステン酸ナトリウム	3,000
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	7,000
C	五ホウ酸ナトリウム	10,000 (as B)
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩	800

アンチモン・ヨウ素共存時の防錆剤影響



# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 2) 影響評価結果 (その1): 東芝分

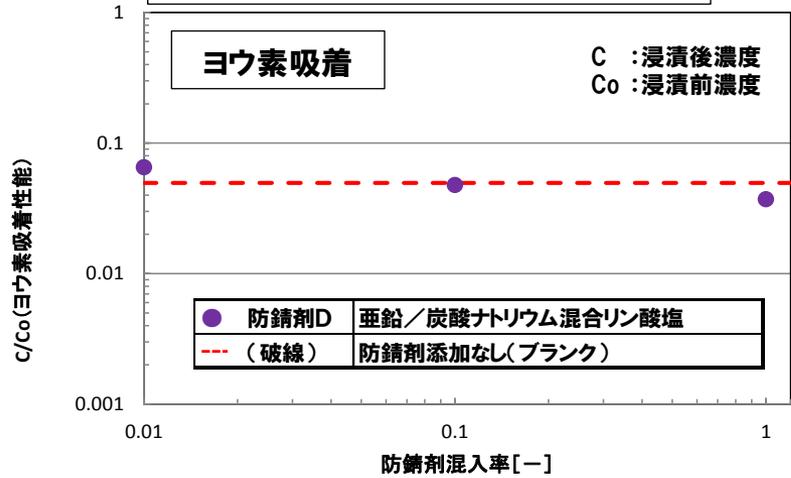
#### ii) 防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価

試験液:  
10倍希釈海水+防錆剤+炭酸塩沈殿処理+評価対象核種

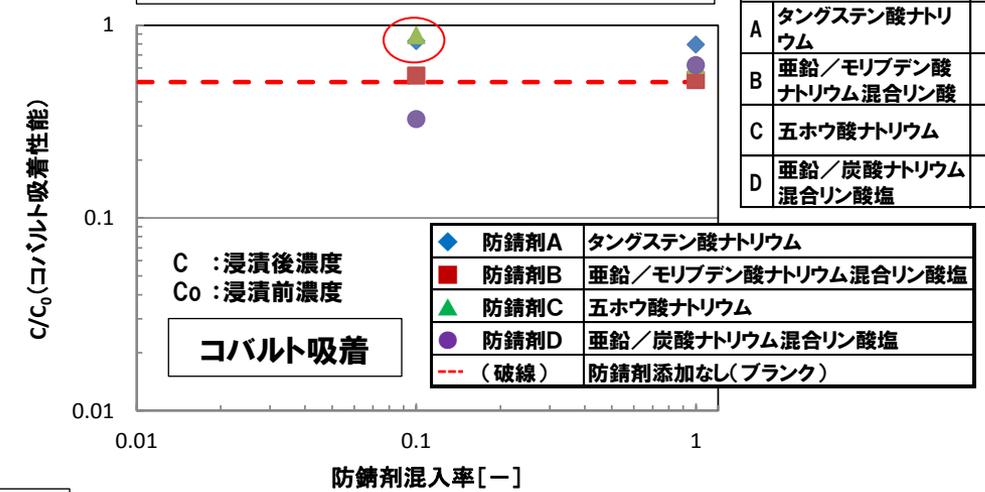
#### ● ヨウ素吸着性能, コバルト吸着性能への防錆剤影響評価

昨年度評価にて影響を認めた防錆剤を対象に濃度依存性をバッチ試験により評価。

ヨウ素吸着への防錆剤濃度影響



コバルト吸着への防錆剤濃度影響



防錆剤	混入率1 (ppm)	
A	タングステン酸ナトリウム	3,000
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	7,000
C	五ホウ酸ナトリウム	10,000 (as B)
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩	800

ヨウ素イオン(I<sup>-</sup>)吸着への影響はほとんどない



ヨウ素イオンおよびヨウ素酸イオンに対する吸着影響評価より、**ヨウ素除去に影響する防錆剤はタングステン酸ナトリウムと五ホウ酸ナトリウム**

**タングステン酸ナトリウムと五ホウ酸ナトリウム**について、混入率を0.1した場合においても吸着影響が認められた。

ただし、評価対象の鉄系吸着材はコバルト吸着専用ではないため、詳細評価が必要。

# 10. 平成28年度事業成果

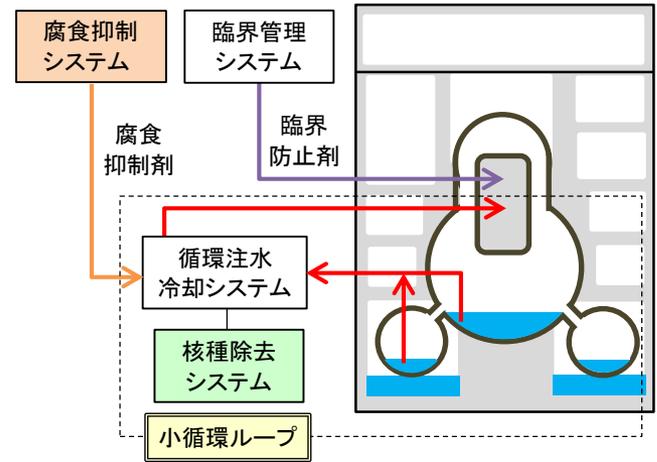
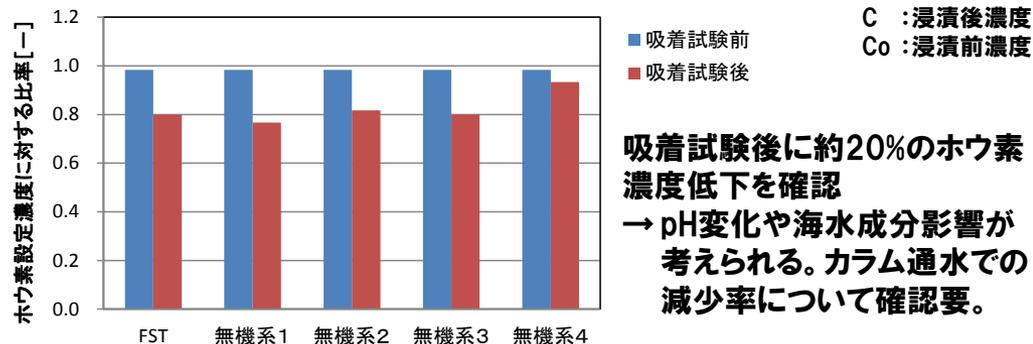
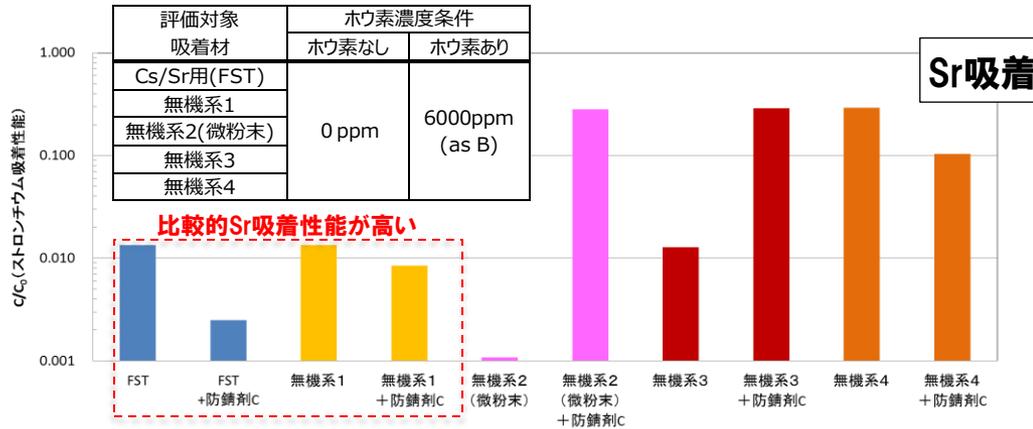
## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 2) 影響評価結果 (その1): 東芝分

#### iii) 処理水中に防錆剤が含まれる場合の水処理システムの検討

#### ● ホウ素溶液中からストロンチウムを除去するための吸着材選定

小循環ループ中のホウ素を含む溶液からストロンチウムを除去するための吸着材をバッチ試験によりスクリーニング評価した。



ホウ素影響が小さく、かつ比較的高いストロンチウム吸着性能の吸着材候補として、**FST**および**無機系吸着材1**を選定。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 2)影響評価結果 (その1):東芝分

#### iv)実機適用に向けた課題

水処理設備にて高濃度の防錆剤を含む溶液を処理する場合、吸着材交換頻度の増大、防錆剤成分由来の沈殿物生成、薬液使用量増加による廃棄物発生量の増加が懸念される。そのため、事前に防錆剤成分濃度を低減させることで、実機適用が可能となる。

廃棄物発生量が増加する項目	廃棄物発生量への影響			
	防錆剤A	防錆剤B	防錆剤C	防錆剤D
	タングステン酸ナトリウム	亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	五ホウ酸ナトリウム	亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩
Sr吸着材	—	▲	▲	▲
アンチモン吸着材①注1	▲	—	▲	—
アンチモン吸着材②注2	▲	—	●	—
鉄系吸着材注3	▲	—	▲	—
防錆剤成分由来の沈殿	▲	▲	—	▲
薬液使用量	—	▲	●	—

凡例) ●:廃棄物発生量が大幅に増加する可能性がある  
 ▲:廃棄物発生量が増加する可能性がある  
 —:廃棄物発生量はほとんど増加しない

注1:アンチモン除去用吸着材  
 注2:ヨウ素酸除去用吸着材  
 注3:コバルト等の除去用吸着材

# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 2)影響評価結果 (その1):東芝分

#### v)まとめ

水処理設備にて高濃度の防錆剤を含む溶液を処理する場合、4種類いずれの防錆剤についても機能影響がある。そのため、事前に防錆剤成分濃度を低減させることで、実機適用が可能となる。

SARRY™・MRRS™への防錆剤影響評価結果

防錆剤	腐食抑制用防錆剤濃度 (ppm)	SARRY™	MRRS™						
		吸着	前処理+吸着				pH調整		
		ストロンチウム	ストロンチウム	アンチモン	ヨウ素	コバルト	NaOH使用量	塩酸使用量	
A	タングステン酸ナトリウム	1,500	◎	◎	○	○	△	◎	◎
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	3,500	◎	△	◎	◎	◎	◎	△
C	五ホウ酸ナトリウム	6,000 (as B)	◎	△	○	○	△	△	△
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩	400	◎	△	◎	◎	◎	◎	◎

- 凡例) ◎:防錆剤濃度がPCV水添加濃度でも機能影響はほとんどない  
 ○:防錆剤濃度がPCV水添加濃度の1/10~1/100で機能影響はほとんどなくなる  
 △:防錆剤濃度がPCV水添加濃度の1/10~1/100でも機能影響が見られる  
 地下水による希釈、事前除去等にて濃度低下させることで機能影響はなくなる

# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 3)影響評価結果（その2）:日立GE分

H27年度の成果では、高性能多核種除去設備(HERO)の核種吸着性能に対して防錆剤は影響を与えると評価した。H28年度は、確認された核種吸着性能の課題に対して検討した。

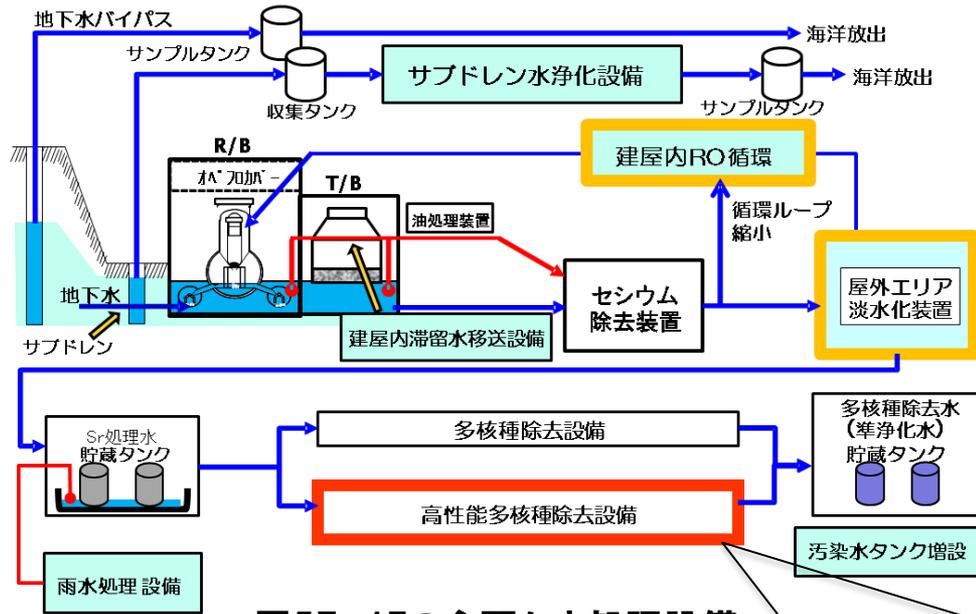
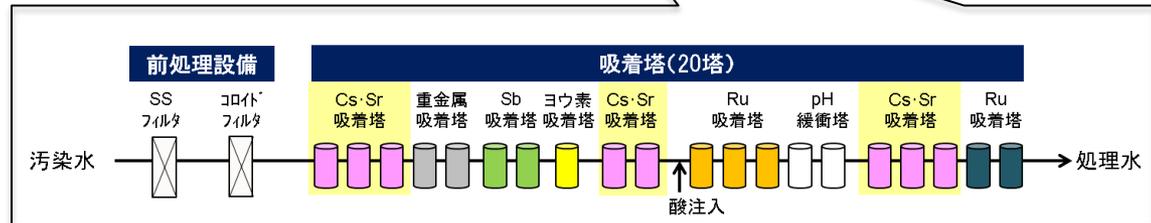


図57 1Fの主要な水処理設備

<HEROの機器構成>  
フィルタと吸着塔により構成。(pH調整あり。)



# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 3)影響評価結果 (その2):日立GE分

H28年度の評価項目を表5に示す。

表5 平成28年度の防錆剤の水処理設備への影響評価項目

No.	評価項目	評価内容
1	既存水処理設備への全体影響評価	(1) 昨年度評価していなかった吸着材(重金属吸着材, Ru吸着材)の核種吸着性能への影響確認 (2) HEROで使用する吸着材を連結した通水試験による核種 吸着性能への複合影響確認
2	防錆剤濃度に対する吸着性能への影響評価	(1) 実態を考慮した防錆剤濃度 <sup>注1</sup> による吸着材の吸着性能への影響確認 (2) 実態を考慮した防錆剤濃度 <sup>注1</sup> によるpH調整に必要な試薬量への影響確認
3	処理水中に防錆剤が含まれる場合の水処理システムの検討	(1) 大循環ループでの五ホウ酸ナトリウムの処理についての検討 (2) 小循環ループでの五ホウ酸ナトリウムの処理について検討

注1:表6参照のこと。

表6 各防錆剤の濃度条件

防錆剤	種類	濃度 (ppm)		
		条件 1 (H27年度と同じ)	実態を考慮した濃度	
			条件 2 (条件 1 の1/10)	条件 3 (条件 1 の1/100)
A	タングステン酸ナトリウム	3000	300	30
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	7000	700	70
C	五ホウ酸ナトリウム	10000 <sup>注2</sup>	1000 <sup>注2</sup>	100 <sup>注2</sup>
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩	800	80	8

注2:ホウ素B濃度換算。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 3)影響評価結果 (その2):日立GE分

#### —事前確認— 試験水の作製(析出物の生成確認)

試験で使用する模擬水(試験水=各防錆剤を添加した希釈海水)を目視確認し、析出物が確認された試験水については昨年度と同様にその上澄み水を試験に使用することにした。

**⇒防錆剤AおよびBを添加した10倍希釈海水では、防錆剤濃度が表6の条件2までは析出物が生成する可能性がある。また、Srはその析出物とともに共存している。**

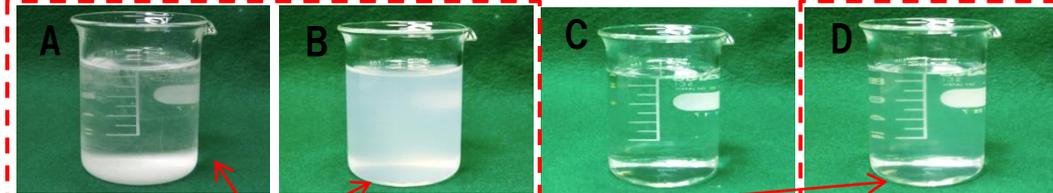
(防錆剤濃度が表6の条件3以下または100倍希釈海水では析出物は確認されなかった。また、Sr以外の核種の析出はほとんど確認されなかった。)

防錆剤濃度:表6の条件1 (10倍希釈海水)

種類	名称
A	タングステン酸ナトリウム
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩
C	五ホウ酸ナトリウム
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩



防錆剤なし

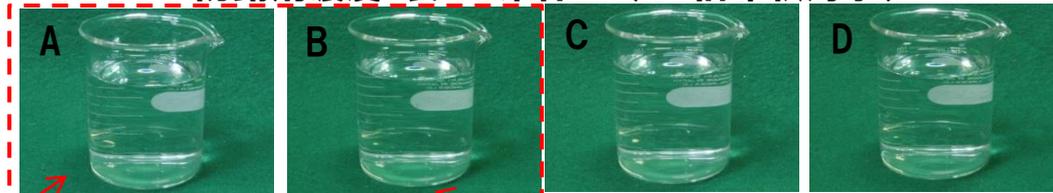


白濁している。

#### 各防錆剤を添加した試験水中のSr析出割合

防錆剤種類	作製水中のSr析出割合 (%)	
	表6の条件1	表6の条件2
A	96	4
B	35	2
C	0	1 <sup>注1</sup>
D	15	0

防錆剤濃度:表6の条件2 (10倍希釈海水)



透明。(ただし、Srの析出が見られる。)

黄色みがかっている。

# 10. 平成28年度事業成果

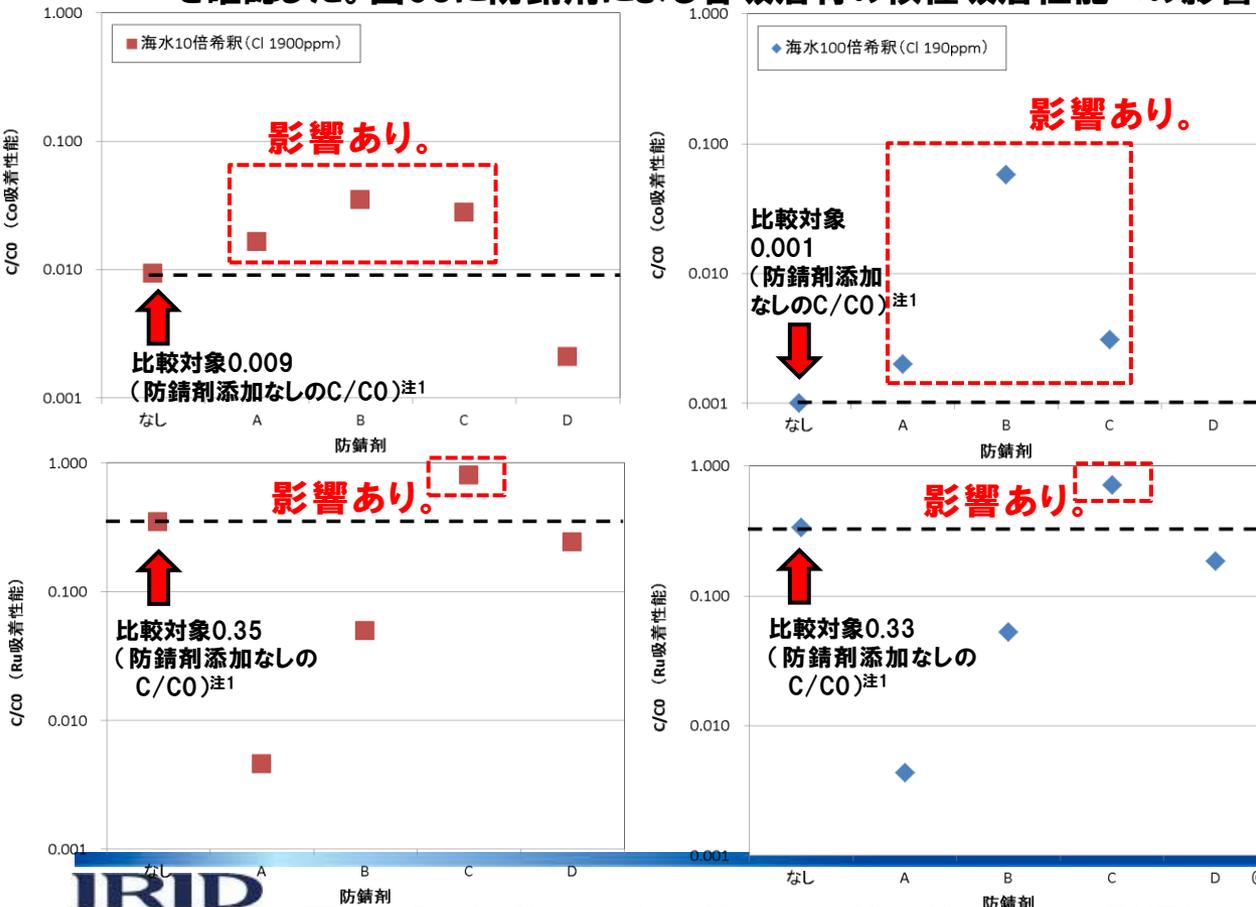
## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 3) 影響評価結果 (その2) : 日立GE分

#### i) 既存水処理設備への全体的な影響評価(1/2)

#### (1) 未評価核種吸着性能への影響評価

昨年度評価していなかった吸着材(重金属吸着材およびRu吸着材)の核種(CoおよびRu)吸着性能への影響を確認した。図58に防錆剤による各吸着材の核種吸着性能への影響を示す。



種類	名称
A	タングステン酸ナトリウム
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩
C	五ホウ酸ナトリウム
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩

#### <試験条件>

試験水のCl濃度: 1900ppm(10倍希釈海水), 190ppm(100倍希釈海水)  
 試験水の防錆剤濃度: 表6の条件1  
 浸漬期間: 7日間

C0: 浸漬前の試験水中のCo濃度  
 C: 浸漬後の試験水中のCo濃度

注1: この値以上である場合, Co吸着性能が低下する方向に影響を与えることになる。

**⇒防錆剤D以外の防錆剤は, 重金属吸着材のCo吸着性能に影響を与える。**

**⇒防錆剤Cは, Ru吸着材のRu吸着性能に影響を与える。**

図58 防錆剤による各吸着材の核種吸着性能への影響(7日間浸漬試験結果)

# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 3)影響評価結果 (その2):日立GE分

#### i) 既存水処理設備への全体的な影響評価(2/2)

#### (2) 核種吸着性能に対する複合影響評価

各防錆剤を添加した試験水を用いたHEROで使用する複数の吸着材の連結カラム試験を実施し、防錆剤による核種吸着性能への影響を確認した。表7に防錆剤による核種吸着性能への複合影響(各防錆剤を添加した試験水ごとの通水30日目の核種吸着性能C/C0)を示す。

**⇒いずれの防錆剤も核種吸着性能に影響を与える。**

表7 防錆剤による核種吸着性能への複合影響(各防錆剤を添加した試験水を用いた連結カラム試験結果)

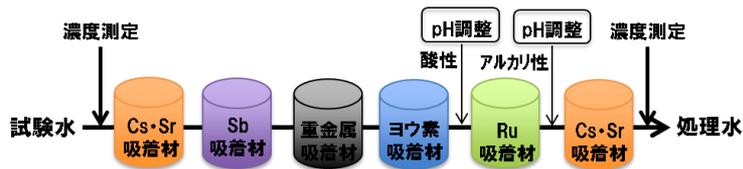
核種	通水30日目のC/C0					評価
	防錆剤なし	防錆剤A	防錆剤B	防錆剤C	防錆剤D	
Sr	0.034	0.260	0.053	0.360	1.000	防錆剤B以外は影響を与える。
Cs	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	影響なし。
Sb	0.003	0.560	0.660	0.067	0.130	いずれの防錆剤も影響を与える。
ヨウ素	0.320	0.260	0.240	0.350	0.410	影響なし。
Co	0.099	0.069	0.081	0.500	1.000	防錆剤Cおよび防錆剤Dは影響を与える。
Ru	0.003	0.110	0.017	0.005	0.010	防錆剤Aおよび防錆剤Bは影響を与える。

C0: 通水前の試験水中の核種濃度

C : 通水後のカラム出口水中の核種濃度

赤字: 防錆剤添加なしの場合のC/C0よりも一桁以上高い値 (核種吸着性能の低下)を示す。

種類	名称
A	タングステン酸ナトリウム
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩
C	五ホウ酸ナトリウム
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩



#### <試験条件>

試験水のCl濃度: 1900ppm (10倍希釈海水)

試験水の防錆剤濃度: 表6の条件2

通水期間: 30日 (SV15:実機と同じ)

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 3) 影響評価結果 (その2) : 日立GE分

#### ii) 防錆剤濃度による核種吸着性能への影響評価(1/4)

##### (1) 浸漬試験による影響評価

浸漬試験により、防錆剤濃度ごとの核種吸着性能への影響を確認した。図59に浸漬試験の結果を示す。

種類	名称
A	タングステン酸ナトリウム
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩
C	五ホウ酸ナトリウム
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩

<試験条件>

試験水のCl濃度: 1900ppm (10倍希釈海水)

試験水の防錆剤濃度: 表6の条件2, 条件3

(参考で条件1の結果も記載。)

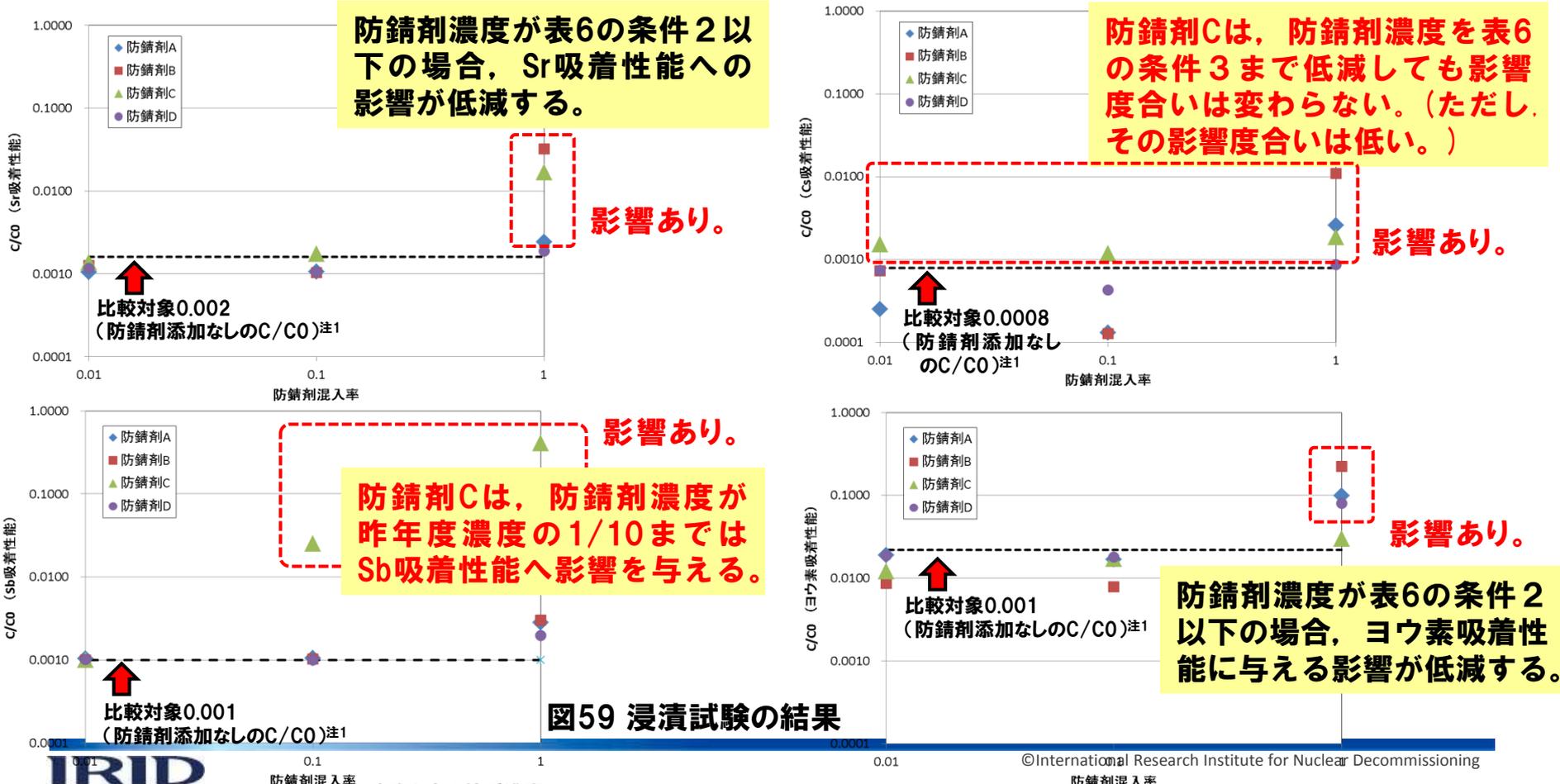


図59 浸漬試験の結果

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 3) 影響評価結果 (その2) : 日立GE分

#### ii) 防錆剤濃度による核種吸着性能への影響評価(2/4)

##### (2) カラム試験による影響評価

カラム試験により防錆剤濃度ごとの核種吸着性能への影響を評価した。表8に、カラム試験結果として通水30日目(または10日目)のCsおよびSrのC/C0を示す。

(今回は、代表としてCs・Sr同時吸着材のカラム試験を実施した。)

⇒防錆剤Bは、その濃度が条件2(防錆剤混合率0.1)以下になれば影響が低減する。

防錆剤CおよびDは、その濃度が条件3(防錆剤混合率0.01)以下になれば影響が低減する。

種類	名称
A	タングステン酸ナトリウム
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩
C	五ホウ酸ナトリウム
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩

#### <試験条件>

試験水のCl濃度: 1900ppm (10倍希釈海水)

試験水の防錆剤濃度: 表6の条件2, 条件3

(参考として条件1の結果を記載する。)

表8 防錆剤によるCsおよびSrの吸着性能への影響(各防錆剤を添加した試験水を用いた連結カラム試験結果)

防錆剤濃度	核種	通水30日目のC/C0 (通水10日目のC/C0)					評価
		防錆剤なし	防錆剤A	防錆剤B	防錆剤C	防錆剤D	
表6の条件1	Sr	1.000 (0.100)	0.100	1.000	1.000 (0.69)	1.000 (0.72)	<Cs吸着性能について> 防錆剤Bは、その濃度が条件2以下になれば、防錆剤なしのC/C0と同等。
	Cs	0.001-0.100	0.001	1.000	0.001	0.001	
表6の条件2	Sr	—	0.410	0.230	0.084 (0.25)	1.000 (0.77)	<Sr吸着性能について> どの防錆剤も、通水30日目のC/C0は防錆剤なしのC/C0と同等。 ただし防錆剤CおよびDは、条件3以下になれば通水10日目のC/C0が防錆剤なしのC/C0と同等以下になる。
	Cs	—	0.001	0.037	0.001	0.005	
表6の条件3	Sr	—	1.000	1.000	0.069	1.000	
	Cs	—	0.001	0.001	0.017	0.002	

C0: 通水前の試験水中の核種濃度

C : 通水後のカラム出口水中の核種濃度

※Srについては、通水30日目のC/C0が防錆剤なしのC/C0 (1.000) と同等でも、通水10日目のC/C0が防錆剤なしのC/C0 (0.100) より大きな値であれば記載する。

赤字: 防錆剤添加なしの場合のC/C0よりも一桁以上高い値 (核種吸着性能の低下)を示す。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 3) 影響評価結果 (その2) : 日立GE分

#### ii) 防錆剤濃度による核種吸着性能への影響評価(3/4)

#### (3) 核種吸着性能への影響まとめ

これまでの試験結果を基に、各防錆剤によるHEROで使用する吸着塔の核種吸着性能への影響を吸着塔の交換頻度を考慮して整理した。表9に、整理表を示す。

⇒表9に示すように、**いずれの防錆剤も、その濃度を低減しないと核種吸着性能に影響を与える。**

**特に、防錆剤Aは、その濃度を低減しても交換頻度が高い上位2種類の吸着塔(Ru吸着塔およびCs・Sr同時吸着塔)の核種吸着性能に影響を与える。**

表9 交換頻度を考慮した吸着塔の核種吸着性能へ影響

	No.	吸着塔	防錆剤			
			防錆剤A タングステン酸ナトリウム	防錆剤B 亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	防錆剤C 五ホウ酸ナトリウム	防錆剤D 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩
交換頻度 高↑ ↓ 低	1	Ru吸着塔	△	△	○	○
	2	Cs・Sr同時吸着塔	△	○	△	△
	3	ヨウ素吸着塔	○	○	○	○
	4	Sb吸着塔	△	△	△	△
	5	重金属吸着塔	○	○	△	△

■ : 交換頻度が高い吸着塔

○ : 防錆剤濃度を低減すれば影響がない。

△ : 防錆剤濃度を低減しても影響がある。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 3)影響評価結果 (その2):日立GE分

#### ii) 防錆剤濃度による核種吸着性能への影響評価(4/4)

#### (2) pH調整に対する影響評価

異なる濃度の防錆剤を添加した10倍希釈海水による酸滴定試験を実施し、pH調整に必要な試薬量への影響評価を行った。表10に各防錆剤の濃度ごとのpH3.5に調整するために必要なHCl量を示す。

⇒防錆剤C以外は、その濃度が条件3(防錆剤混合率0.1)以下になれば影響がほぼ無い。

**防錆剤Cは、その濃度が条件3(防錆剤混合率0.1)以下になっても試薬量は防錆剤なしのときより4倍必要になる。**

表10 防錆剤によるpH調整に必要な試薬量への影響 (pH3.5に調整する酸滴定試験)

No.	防錆剤 種類 名称		防錆剤濃度条件											
			(参考) 表6の条件1				表6の条件2				表6の条件3			
			pH		0.1mol/L HCl 滴定量 <sup>注1</sup>	防錆剤 なしとの 比	pH		0.1mol/L HCl 滴定量 <sup>注1</sup>	防錆剤 なしとの 比	pH		0.1mol/L HCl 滴定量 <sup>注1</sup>	防錆剤 なしとの 比
			滴定前	滴定後			滴定前	滴定後			滴定前	滴定後		
1	-	なし	6.95	3.50	0.73	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	A	タングステン酸ナトリウム	7.20	3.50	14.7	20.1	6.67	3.50	1.1	1.5	—	—	—	—
3	B	亜鉛／モリブデン酸 ナトリウム混合リン酸塩	11.85	3.50	23.8	32.5	11.05	3.50	3.0	4.0	—	—	—	—
4	C	五ホウ酸ナトリウム	7.45	3.50	176.0	241.1	8.32	3.50	20.8	28.5	8.25	3.50	2.7	3.7
5	D	亜鉛／炭酸ナトリウム 混合リン酸塩	6.90	3.50	2.05	2.8	6.88	3.50	0.64	0.9	—	—	—	—

注1: 廃液100ml換算: ml

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 3) 影響評価結果 (その2) : 日立GE分

#### iii) 実機適用に向けた課題抽出

実際に防錆剤を注入する際、HEROが正常運転するための課題を抽出した。

- (1) どの防錆剤も、HEROの核種吸着性能およびpH調整処理に影響を与える可能性があるため、その濃度を低減できる防錆剤除去システムの検討は必要である。
- (2) 水処理設備の性能に与える影響が最も大きかった防錆剤A以外の防錆剤に対し、水処理設備への影響度合いをより比較するためには、Ru, CsおよびSr以外の燃料デブリ取出し後に重要となる核種が明確になった時点でその核種を除去する吸着塔の性能影響有無を考慮することが望ましい。
- (3) 五ホウ酸ナトリウムは、上記(イ)で検討する除去システムを導入してもHEROのHCl溶液注入量が従来より増加する可能性があるため、HCl溶液注入ラインの増強についての検討が望まれる。
- (4) 防錆剤注入により析出物が発生する可能性があるため、この析出物によるフィルタのSSおよびコロイド成分除去性能影響について検討する必要がある。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 3) 影響評価結果 (その2): 日立GE分

#### iv) 処理水中に防錆剤が含まれる場合の水処理システムの検討

##### (1) 水処理設備に影響を与える防錆剤濃度の検討

いずれの防錆剤も、その濃度を表2の条件3以下に低減しなければHEROの核種吸着性能およびpH調整に影響を与える可能性がある。

##### (2) ホウ素除去システム導入に対する課題

HEROを正常運転するため、ホウ素除去システムの必要性の検討の結果、必要であると評価したため、その導入に対する課題を抽出した。

(I) ホウ素除去システムは、五ホウ酸ナトリウムが水処理設備に影響を与えないために水処理設備の上流に導入することが望ましい。

(II) 燃料デブリ取り出し時にも現状と同様、トーラス室への地下水流入が継続すると想定される。そのため、トーラス室から地下水を取水し、水処理設備に移送することになる。このことからトーラス室から取水される地下水が水処理設備に移送される前に水処理設備の上流にホウ素除去システムを導入することが望ましい。

(III) 導入したシステムでホウ素を除去した後、汚染水の水質が変化している可能性があるため、システムの下流側の水処理設備への影響確認が必要である。

(IV) ホウ素除去システムの下流にサンプリングラインを設け、水処理設備の性能低下抑制のためのホウ素濃度管理が重要となる。

##### (3) PCV循環ループに対する課題

PCV循環ループの線量低減のために核種除去システムが必要になった場合、いずれの防錆剤も既存技術での核種除去性能に影響を与えるため、その影響を考慮した核種除去システムを検討する必要がある。

# 10. 平成28年度事業成果

## (1)腐食抑制策の効果・影響の評価 ③水処理設備への影響評価

### 3)影響評価結果（その2）：日立GE分

#### v) 高性能多核種除去設備への影響評価

これまでの評価結果をまとめたものを表11に示す。

表11 防錆剤による高性能多核種除去設備への影響

No.	確認項目		防錆剤種類			
			防錆剤A: タングステン酸ナトリウム	防錆剤B: 亜鉛／モリブデン酸 ナトリウム混合リン酸塩	防錆剤C: 五ホウ酸ナトリウム	防錆剤D: 亜鉛／炭酸ナトリウム 混合リン酸塩
1	核種 吸着 性能 へ の 影 響	Cs・Sr同時吸着材の Cs吸着性能	○	△	○	○
2		Cs・Sr同時吸着材の Sr吸着性能	△	△	△	△
3		Sb吸着材の Sb吸着性能	△	△	△	△
4		ヨウ素吸着材の ヨウ素吸着性能	○	○	○	○
5		重金属吸着材の Co吸着性能	○	○	△	△
6		Ru吸着材の Ru吸着性能	△	△	○	○
7	酸調整への影響 <sup>注1</sup>		○	○	△	◎
8	析出物の発生有無 (フィルタへの影響)		△	△	◎	○

◎：防錆剤濃度が表2の条件1でも影響がない。

○：防錆剤濃度を表2の条件2(条件1の10分の1)以下に低減しなければ実機運転に影響を与える可能性がある。

△：防錆剤濃度を表2の条件3(条件1の100分の1)以下に低減しなければ実機運転に影響を与える可能性がある。

注1：防錆剤なしの試験水をpH3.5に調整するために必要なHCl溶液添加量の10倍以上である場合は実機運転に影響を与える可能性があるとして評

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価 ③ 水処理設備への影響評価

### 4) 影響評価結果まとめ

- 4種類の防錆剤ともに水処理設備の機能への影響があることを確認した。
- 水処理設備にて高濃度の防錆剤を含む液を処理する場合には、事前に濃度低減させることで実機へ適用可能となる。
- 防錆剤の事前除去要否、必要濃度低減率等については、デブリ取出しPJ、PCV止水PJ等の検討結果を踏まえて総合的な検討が必要となる。

表12 水処理設備への影響評価結果

防錆剤	腐食抑制用防錆剤濃度 (ppm)	SARRY™	淡水化	既設/増設多核種		高性能多核種	
		吸着工程	RO処理工程	前処理工程	吸着工程	吸着工程	
A	タングステン酸ナトリウム	1,500	○	○	○	(△)	△
B	亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩	3,500	(○)	○	△	(△)	△
C	五ホウ酸ナトリウム	6,000 (as B)	(○)	○	△	(△)	△
D	亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩	400	(○)	○	△	(△)	△

○: 腐食抑制用防錆剤濃度にて影響はほとんどない

△: 腐食抑制用防錆剤濃度の1/100にしなければ実機運転に影響を与える可能性あり

( ): バッチ試験による吸着評価結果。カラム試験による吸着評価結果は( )なし表記

# 10. 平成28年度事業成果

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

### ④ 腐食抑制策(防錆剤)の選定結果

防錆剤	五ホウ酸ナトリウム	タンクステン酸ナトリウム	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	
防食皮膜 (メカニズム)	酸化皮膜型	酸化皮膜型	沈殿皮膜型	酸化皮膜 + 沈殿皮膜型	
防錆効果	非照射	○注1)	△ (斑点状の腐食)	○	○
	照射	○	△ (斑点状の腐食)	○	○
	流水環境	○注2)	△ (斑点状の腐食)	○	○
	錆び面	○注1)	△ (腐食速度は低下するものの停止はせず)	△ (腐食速度は低下するものの停止はせず)	○
	耐局部腐食性	○	—	— (沈殿皮膜型のため評価不能)	△ (4kGy/hの照射で $E_{R,CREV} < E_{SP}$ となる)
副次的影響	高温固着影響	—	—	△ (65℃以上で白色生成物が発生)	○
	五ホウ酸ナトリウムとの複合影響	—	○ (五ホウ酸ナトリウムとの併用により腐食が抑制)	×	×
	水処理設備への機能影響	△	△	△	△
(希釈・除去等により、処理対象水中の防錆剤濃度がPCV内投入時よりも低下していることが必要)					
総合評価	○ (再臨界防止剤としても適用、 $B \geq 4000$ ppmが必要)	○ (五ホウ酸ナトリウムとの併用が必須)	○ (単独で使用。投入時に燃料デブリの表面温度が50℃以下であることの確認が必要)	○ (単独で使用。投入時にRPV/PCV内の線量率の確認が必要。線量率によってはその適用性の確認が必要)	

○:条件付きで可 △:懸念あり ×:厳しい

注1):東京電力殿自社データ

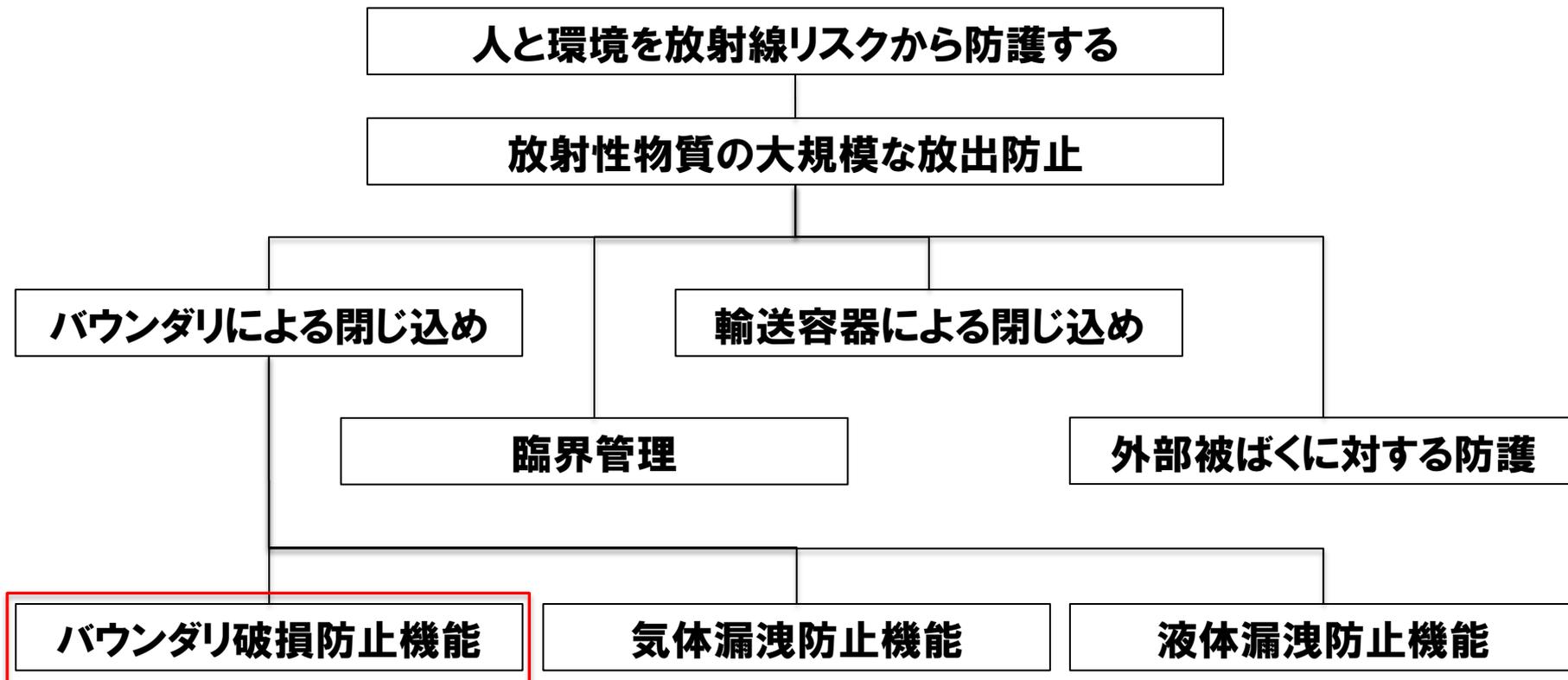
注2):電中研殿自社データ

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ① システム概念

- 安全要求に基づきシステムの設置目的と機能要求を整理



⇒バウンダリへの防錆剤注入機能(腐食抑制機能)を有するシステムの設置が有効

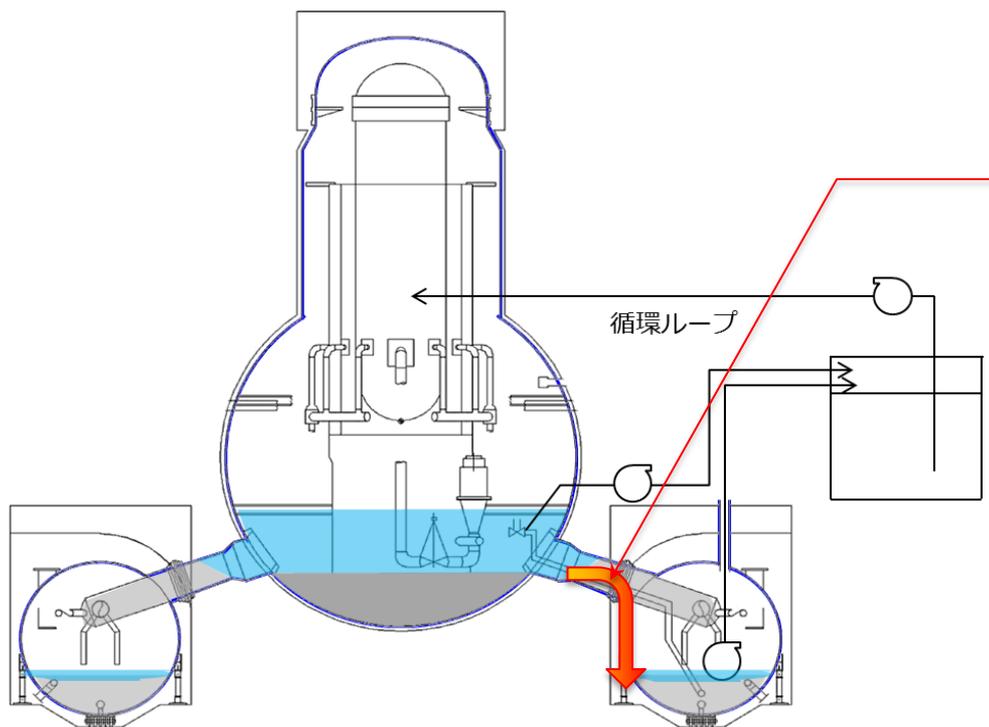
# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ① システム概念

#### ● 燃料デブリ取り出し時の腐食抑制範囲，条件を策定

- ・材料腐食の進行が特に懸念されるのは液相部と接する範囲
- ・D/W, S/Cおよび循環ループの機器・配管を腐食抑制の対象範囲とする



PCVからトラス室への水の漏洩の有無はシステム構成に影響するが、PCV補修・止水の成立性は未確認のため、漏洩無し・有りの両ケースを検討

・PCVからトラス室への水漏洩が無いと想定  
→②腐食抑制システムの概念設計(その1)

・PCVからトラス室への水漏洩があると想定  
→③腐食抑制システムの概念設計(その2)

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ① システム概念

#### ● 候補剤ごとの水質目標を設定

No.	防錆剤	目標濃度	管理基準	持込状態
1	タングステン酸ナトリウム	5000ppm以上	W:3200ppm以上	固体
2	亜鉛/炭酸ナトリウム 混合リン酸塩	4000ppm以上	Zn:200ppm以上 全リン酸:1000ppm以上	液体
3	亜鉛/モリブデン酸 ナトリウム混合リン酸塩	5000ppm以上	Mo:65ppm以上	液体
4	五ホウ酸ナトリウム <sup>注1</sup>	4000ppm以上 (B濃度)	B:4000ppm以上	固体

注1 臨界管理プロジェクトにおける五ホウ酸ナトリウム管理濃度は6000～7000ppm

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ① システム概念

#### ● 防錆剤の注入時期を設定

##### (i) 燃料デブリ取り出し作業開始前

###### ・ PCV初期水張り

PCV保有水量は非常に大きく、PCV水位上昇後の防錆剤注入により必要な防錆剤濃度を確保するのは、防錆剤注入量およびPCVからの排水量(水処理設備による処理量)が増加するため望ましくない。従って、PCV補修後のPCV水位を上昇させる初期水張りの段階で、防錆剤入り処理水を注入することを想定する。

###### ・ RPVサンプリング期間中水質維持

「原子炉圧力容器内部調査技術の開発」の事業でRPV内燃料デブリのサンプリングが計画されており、PCV内負圧管理移行前に防錆剤の注入が要求される可能性がある。もしサンプリングを実施する場合は、その実施期間中、防錆剤の注入を行うことを想定する。

##### (ii) 燃料デブリ取り出し作業期間中

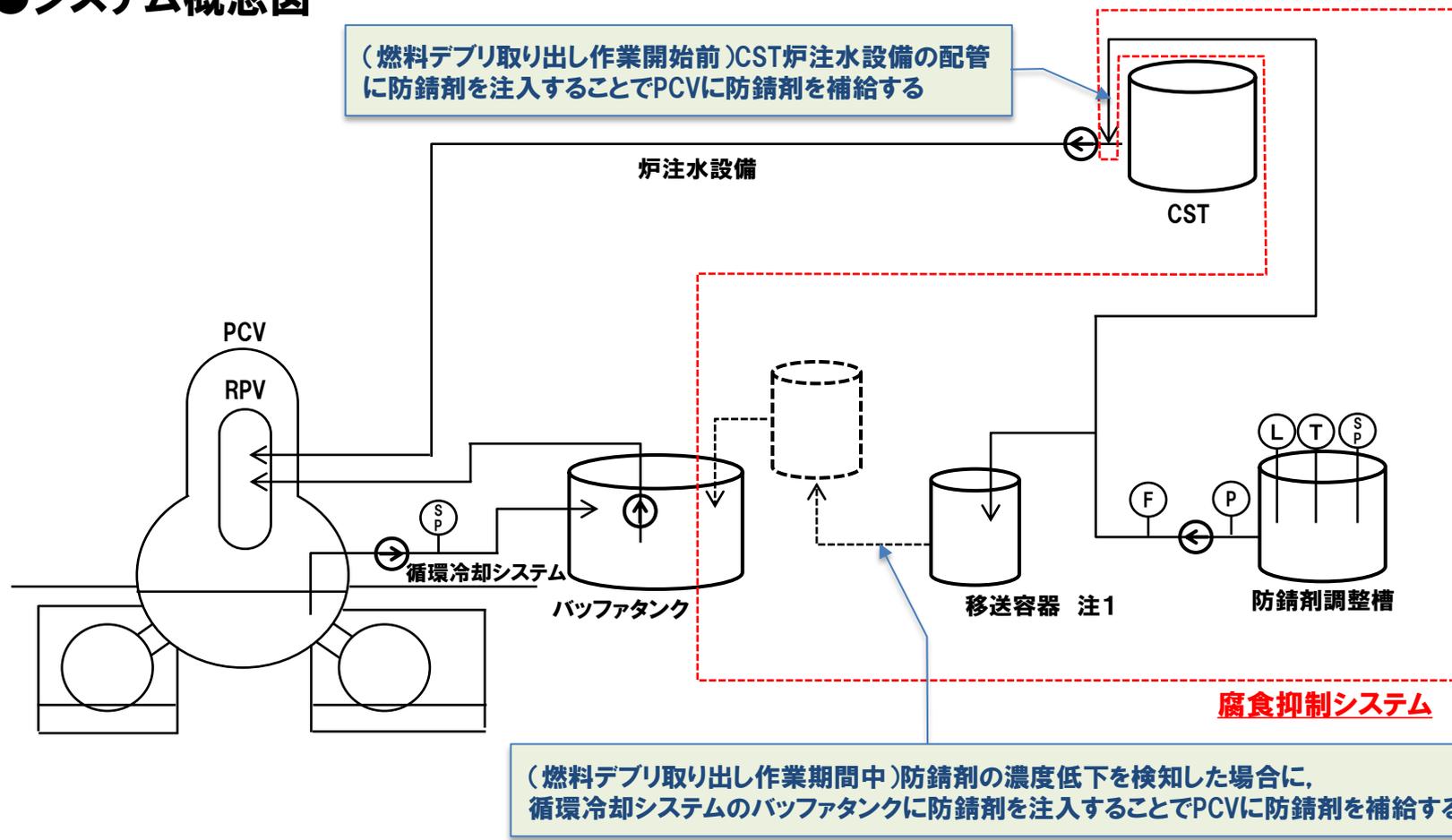
燃料デブリ取り出し期間中、デブリ加工用水の流入やPCV保有水の排水等によりPCV内の防錆剤濃度が低下すると考えられる。PCV保有水内の防錆剤濃度低下を検知した際に、腐食抑制システムにより、防錆剤の注入を行うことを想定する。

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ② 腐食抑制システムの概念設計(その1:PCVの水漏洩無し)

#### ● システム概念図



注1:PCV内の放射性物質が建屋外に拡散するリスクを減少させるため、専用の移送容器を介した防錆剤注入を行う

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ② 腐食抑制システムの概念設計(その1:PCVの水漏洩無し)

#### ● 設計方針

- 防錆剤注入ポンプの容量は、PCV初期水張り時にCST炉注水設備に注入する防錆剤量に対して十分な量を供給できるよう設定する。
- 防錆剤調整槽の容量は、PCV初期水張り時にCST炉注水設備に注入する防錆剤量に対して十分な量を供給できるよう設定する。
- 防錆剤移送容器は、1回の補給でPCVの防錆剤濃度を管理基準値まで上昇させることが可能な容量として設定する。
- 防錆剤の供給状態確認のため、防錆剤移送ライン上で流量、圧力を監視する。
- 防錆剤の調整のため、防錆剤調整槽は温度調整装置、攪拌装置、水位計を備えた設計とする。また、サンプリング等により調整槽の水質を確認可能な設計とする。
- 防錆剤の濃度監視のため、サンプリング等によりバウンダリ保有水の水質を確認可能な設計とする。

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ② 腐食抑制システムの概念設計(その1:PCVの水漏洩無し)

#### ● 課題

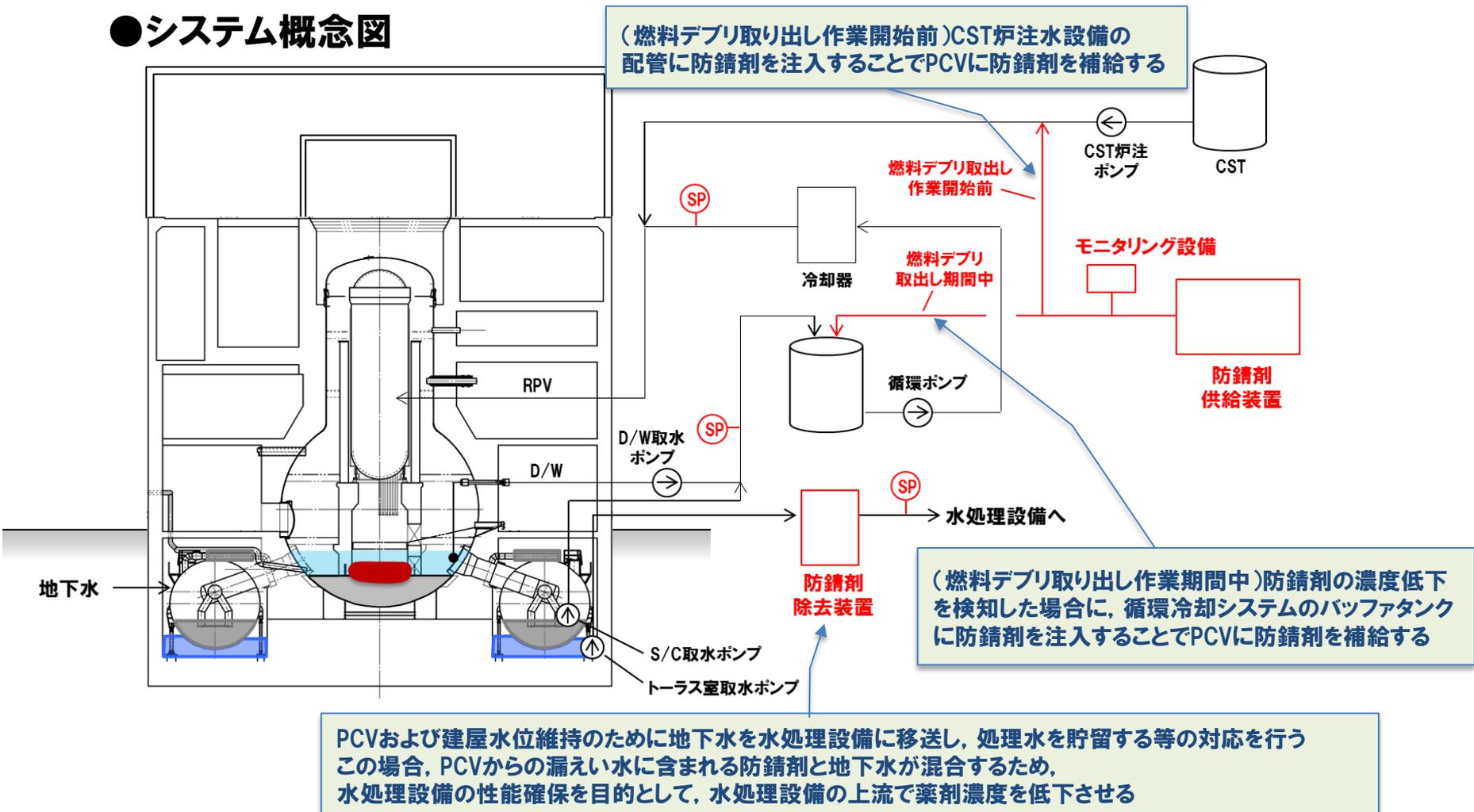
項目	課題
補助設備用の配置スペース	<p>循環冷却システムは放射性物質を閉じ込めるバウンダリの一部として、ポンプ、タンク等の機器をセル内に設置する方針である。</p> <p>移送容器を介して防錆剤を注入するには揚重機等の遠隔操作の補助設備が必要であり、配置スペースが増大することが懸念される。</p>
モニタリング設備の導入	<p>デブリ取り出し作業中、循環冷却システムの設置個所近傍は高線量環境であると考えられるため、バウンダリ保有水の水質を確認する場合は、作業員の被ばく量低減が課題となる。</p> <p>作業員の被ばく低減方法として遠隔監視可能なモニタリング設備の導入が考えられるが、現有技術をデブリ取り出し時の高線量環境下で適用できるか未確認のため、開発・試験等が必要となる。</p>

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ③ 腐食抑制システムの概念設計(その2:PCVの水漏洩有り)

#### ● システム概念図



# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ③ 腐食抑制システムの概念設計(その2:PCVの水漏洩有り)

#### ● 設計方針

- バッファタンクで補給水と混合することにより防錆剤濃度が低下するため、バッファタンクに防錆剤を供給することで、冷却水中の濃度を一定に維持する。
- 水処理設備の上流に薬剤濃度を低下させる設備を設ける。薬剤濃度の低下方法としては、除去(ワンスルー)、回収(リサイクル)の手法がある。
- 腐食抑制システムとして、(a) PCV内の水質、(b) RPV注水の水質、(c) 水処理設備の入口水質、(d) 放出水の水質を監視する設備を設ける。
- 燃料デブリ取出し作業開始前における防錆剤の注入点は、系統の流量／圧力が安定し、かつ薬液が長期間滞留することによって水質が変化するリスクが低い箇所として、CSTポンプ下流とする。燃料デブリ取出し作業中における防錆剤の注入点は、燃料デブリ切削粉を含む水が防錆剤供給装置の逆流によることを確実に防止する観点で、循環ループ中のバッファタンクとする。
- 薬剤を貯留する容器や配管などの破損により防錆剤の漏洩を想定し、漏洩検知設備および漏洩拡大防止対策(堰など)を設ける。
- 防錆剤の濃度管理については、短期的な機能喪失により安全機能が阻害されるものではないため、腐食抑制システムについては、設備の多重化を必須としない。但し、臨界管理や漏洩リスク低減の要求により多重化される可能性はある。

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ③ 腐食抑制システムの概念設計(その2:PCVの水漏洩有り)

No.	項目	課題
(i)	防錆剤の除去／補充によるコスト増大	トーラス室からの取水の管理方法として、「除去／補充」を採用する場合には、PCVからの漏洩量次第で、多量の薬剤を補充する必要となりコストが莫大となる可能性がある。
(ii)	防錆剤の回収／再利用によるコスト、配置スペース増大	トーラス室からの取水の管理方法として、「回収／再利用(五ホウ酸ナトリウム使用時)」を採用する場合には、ホウ酸濃度調整装置の大型化によりコスト、配置スペースが増加する可能性がある。
(iii)	PCV取水の水処理によるコスト、配置スペース増大	PCV内の溶解性放射性物質濃度低減の要求から、PCVからの取水を水処理設備に移送する場合には、トーラス室からの取水と同様の処理が必要となるため、課題(i)(ii)の影響が増加する可能性がある。
(iv)	防錆剤の除去要求による設備大型化、廃棄物増加	防錆剤によっては、水処理設備の性能担保のために求められる除去性能以上に、放出基準を満足するために高い除去性能が必要となる可能性がある。この場合、水処理設備上流の防錆剤除去設備の性能向上または水処理設備の下流への設備追加が必要となるため、更なる設備の大型化や廃棄物増加の懸念がある。

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ④ 管理要領の策定

#### 1) 防錆剤の投入要否の判断基準

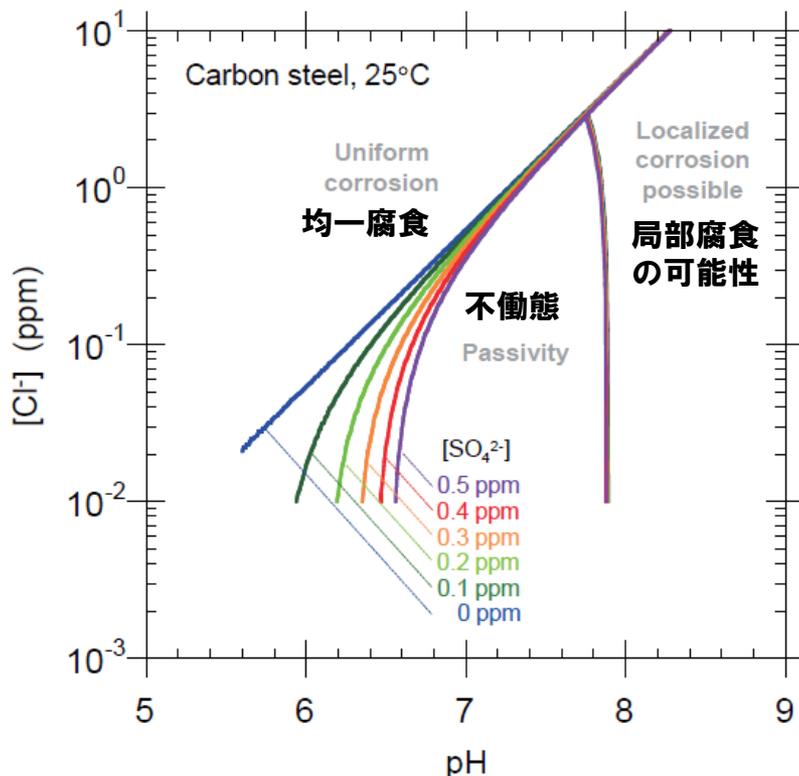


図60 低電気伝導率環境下での水質データから推定される炭素鋼の腐食形態<sup>1)</sup>

表 13 防錆剤の投入要否の判断基準  
(PCV内が窒素封入など腐食対策未実施で、再臨界防止剤の五ホウ酸ナトリウムも注入されていない場合)

PCV滞留水の水質	機器評価 <sup>注1</sup>	防錆剤の投入
図60において、 不動態 (Passivity) 領域にある場合	—	不要
図60において、 均一腐食 (Uniform Corrosion) 領域あるいは 局部腐食の可能性 (Localized Corrosion Possible) 領域にある場合	問題なし	不要
	問題あり	要

注1: その環境で推定される腐食速度が、PCV炭素鋼機器の耐震強度上の問題や漏えい等の問題を生じるものか否かを評価

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ④ 管理要領の策定

#### 2) 防錆剤の運用方法

表 14 防錆剤の運用方法

再臨界防止剤の五ホウ酸ナトリウムの注入	
有り	無し
<p><u>I. <math>B \geq 4000\text{ppm}</math>の場合,</u> <u>防錆剤の投入無し</u></p> <p>(備考) ・水線部での腐食に対するリスクが大きいと判断される場合には、タングステン酸ナトリウムとの併用を検討することが望ましい。</p>	<p><u>Ⅲ. リン酸塩系防錆剤(亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩)を投入</u></p> <p>(備考) ・リン酸塩系防錆剤のうち、局部腐食発生リスクのない沈殿皮膜型である当防錆剤を優先度高とする。 ・高温固着影響を考慮し、実機投入時に燃料デブリの表面温度が<math>50^{\circ}\text{C}</math>以下であることの確認が必要。(50<math>^{\circ}\text{C}</math>より高温となる場合、高温固着影響のないⅣの条件を採用。)</p>
<p><u>Ⅱ. <math>B &lt; 4000\text{ppm}</math>の場合,</u> <u>タングステン酸ナトリウムを投入</u></p>	<p><u>Ⅳ. リン酸塩系防錆剤(亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩)を投入</u></p> <p>(備考) ・実機投入時のRPV/PCV内の線量率の確認が必要。 (4kGy/hにおいて<math>E_{R,CREV} &lt; E_{SP}</math>となるため) ・線量率によっては、事前にその適用性の確認試験等を行い、使用可否を判断すること。</p>

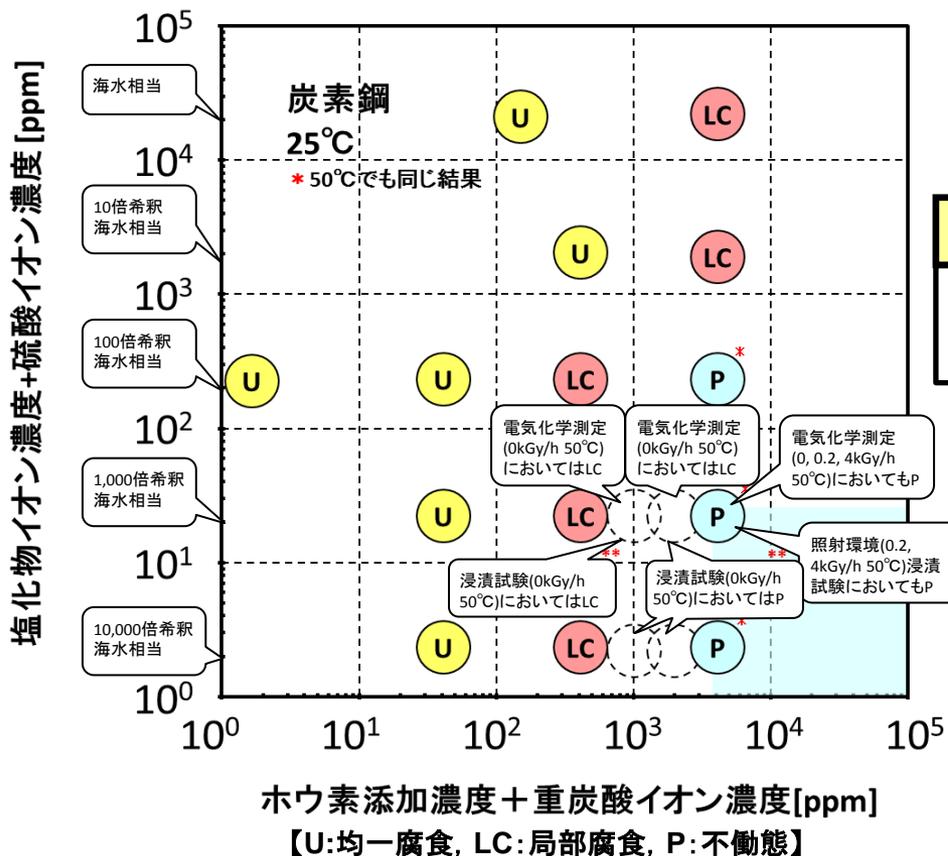
# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ④ 管理要領の策定

#### 3) 水質濃度管理基準

- I. 再臨界防止剤の五ホウ酸ナトリウムの注入有り (B ≧ 4000ppm), 防錆剤の投入無し



- ・プロット点は全て公開データ(深谷ほか, 2014)<sup>1)</sup>による浸漬試験結果
- ・本PJの結果(50°C)を吹き出しにて反映 (\*\*:「燃料デブリ臨界管理技術の開発」PJの結果)

#### 水質濃度管理

の領域：  
臨界防止剤の五ホウ酸ナトリウムが腐食抑制を兼ねる

B	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	その他
≧4000	≦20	≦3	・温度: ≦50°C ・HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : B ≧ 4000ppmにより十分に不働態化しているため, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 濃度の規定は行わないが, 測定により確認しておくことが望ましい ・Bが4000ppmを下回ったら, 五ホウ酸ナトリウムを添加するか, IIの処置を行う

図61 希釈人工海水と五ホウ酸ナトリウム溶液中での炭素鋼の腐食形態図(公開データ(深谷ほか, 2014)<sup>1)</sup>をもとに作成)

# 10. 平成28年度事業成果

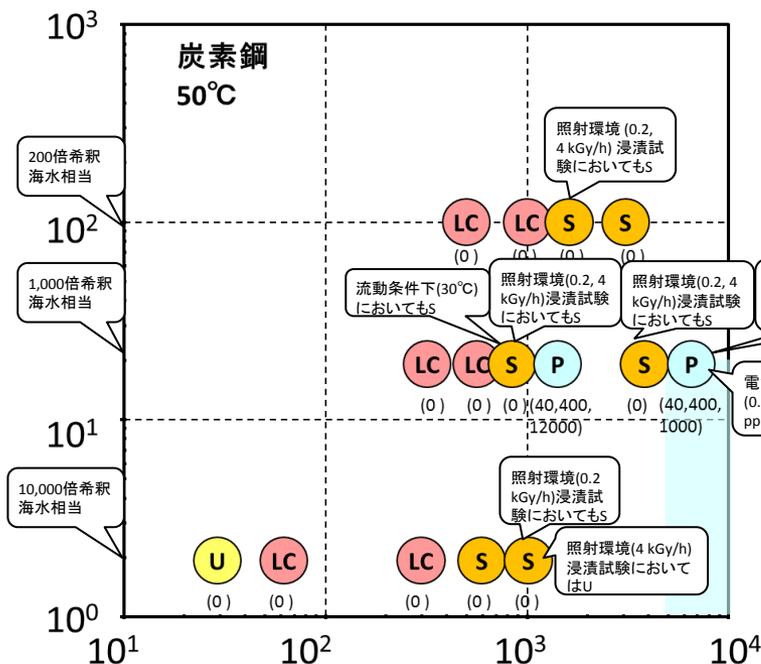
## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ④ 管理要領の策定

#### 3) 水質濃度管理基準

- II. 再臨界防止剤の五ホウ酸ナトリウムの注入有り (B < 4000 ppm), タングステン酸ナトリウムを投入

塩化物イオン濃度+硫酸イオン濃度 [ppm]



・プロット点は全て本PJの漬試験結果  
 ・本PJのその他の結果を吹き出しにて反映

**水質濃度管理**

の領域：  
 臨界防止剤の五ホウ酸ナトリウムとの併用で腐食抑制可能

(ppm)

Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> (投入時)	W	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	その他
≥ 5000	≥ 3200	≤ 20	≤ 3	・温度: ≤ 50°C ・HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> ≥ 5000ppm とBとの複合により十分に不動態化しているため、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 濃度の規定は行わないが、測定により確認しておくことが望ましい ・Wが3200ppmを下回ったら、Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> を添加する

タングステン酸ナトリウム添加濃度+重炭酸イオン濃度 [ppm]

【U:均一腐食, LC:局部腐食, S:斑点状の腐食, P:不動態】

( )の数値は五ホウ酸ナトリウム濃度 ([ppm]as B)

図62 希釈人工海水と五ホウ酸ナトリウム／タングステン酸ナトリウム溶液中での炭素鋼の腐食形態図

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

### ④ 管理要領の策定

#### 3) 水質濃度管理基準

● Ⅲ. 再臨界防止剤の五ホウ酸ナトリウムの注入無し、リン酸塩系防錆剤(亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩)を投入

\* 図中の縦軸は、防錆剤添加前の水質濃度

- 非照射
- ▲ : 腐食あり(無添加より腐食量大)
  - : 軽微な腐食あり(無添加より腐食量小)
  - : 腐食なし(沈殿皮膜による防食)
- 照射
- : 軽微な腐食あり(無添加より腐食量小)
  - : 腐食なし(沈殿皮膜による防食)

**水質濃度管理**

の領域：  
亜鉛／炭酸ナトリウム  
混合リン酸塩単独で  
腐食抑制可能

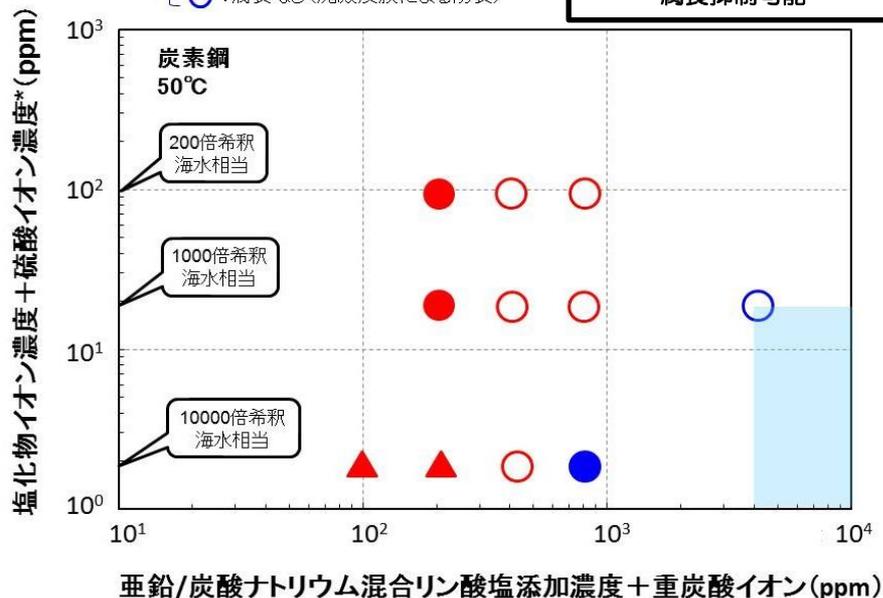


図63 希釈人工海水と亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩溶液中での炭素鋼の腐食形態図

ZSCMP <sup>注1</sup> (投入時)	Zn	全リン酸	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	その他
≥ 4000	≥ 200	≥ 1000	≤ 3	(ppm) ・温度: ≤ 50°C (50°Cより高温環境で固着の可能性あり) ・HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : ZSCMP ≥ 4000ppm調製時に, NaHCO <sub>3</sub> もしくはNa <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> によりpHをpH7.0~7.5に調整する。このため, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 濃度の規定は行わないが, 測定により確認しておくことが望ましい。 ・Znが200ppmを下回ったら, ZSCMP用塩化亜鉛水溶液を添加する。 ・全リン酸が1000ppmを下回ったら, ZSCMP用重合リン酸水溶液を添加する。 ・運用上のpH範囲はpH6.0~8.0とし, この範囲から逸脱した場合には, NaHCO <sub>3</sub> もしくはNa <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> によりpHを調整する。(望ましくは, pH7.0~7.5に調整する。) ・防錆剤添加前のCl <sup>-</sup> 濃度は, 20ppm以下に管理する。

注1: 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩

(ZSCMP: Zinc / Sodium Carbonate Mixed Phosphate)

# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

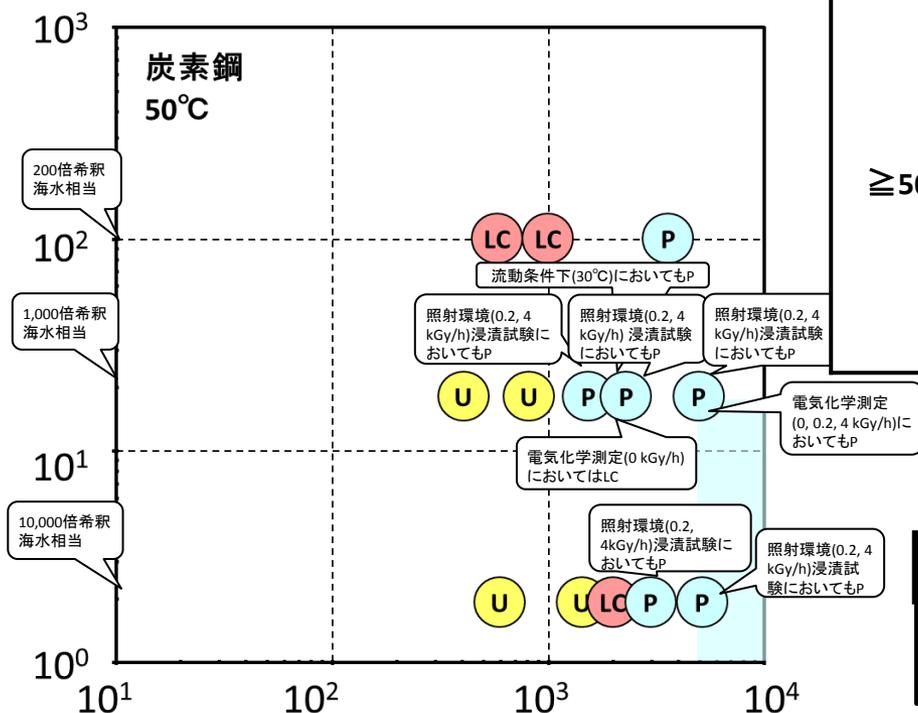
### ④ 管理要領の策定

#### 3) 水質濃度管理基準

### ● IV. 再臨界防止剤の五ホウ酸ナトリウムの注入無し、リン酸塩系防錆剤(亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩)を投入 (ppm)

・プロット点は全て本PJの漬試験結果  
 ・本PJのその他の結果を吹き出しにて反映

塩化物イオン濃度+硫酸イオン濃度 [ppm]



ZSMMP注1 (投入時)	Mo	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	その他
≥ 5000	≥ 65	≤ 20	≤ 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>温度: ≤ 50°C</li> <li>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: ZSMMP ≥ 5000ppmにより十分に不働態化しているため、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の規定は行わないが、測定により確認しておくことが望ましい</li> <li>Moが65ppmを下回ったら、ZSMMPを添加する</li> <li>pHが10を下回ったら、NaOH等でpH調整を行う</li> </ul>

注1: 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩 (ZSMMP: Zinc / Sodium Molybdate Mixed Phosphate)

**水質濃度管理**

の領域:  
 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩単独で腐食抑制可能

亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩添加濃度+重炭酸イオン濃度 [ppm]

【U:均一腐食, LC:局部腐食, P:不働態】

図64 希釈人工海水と亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩溶液中での炭素鋼の腐食形態図

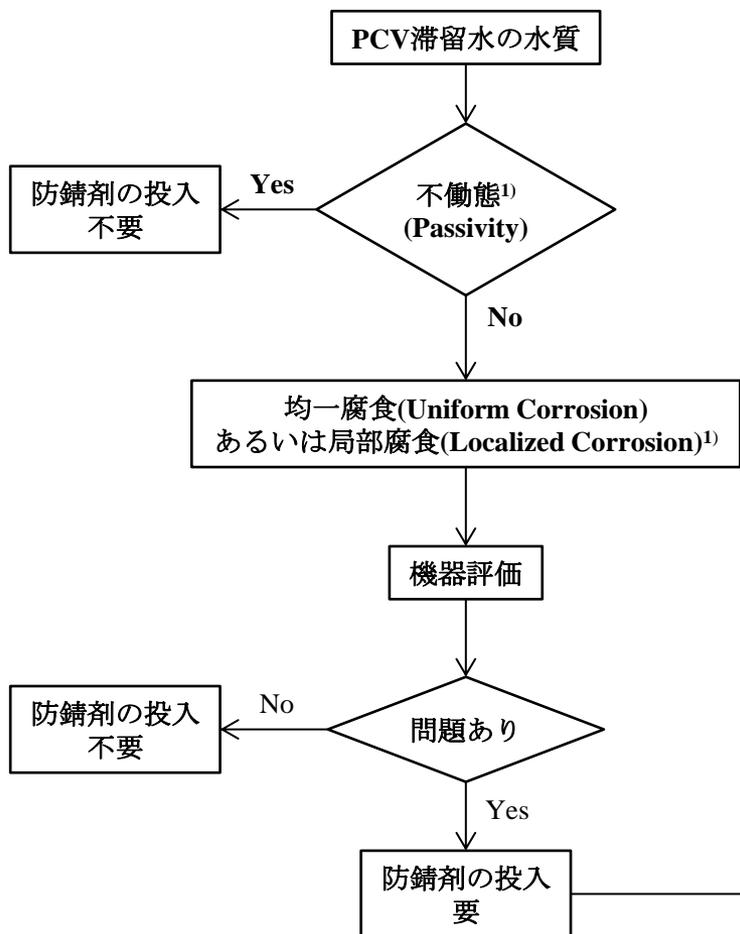
# 10. 平成28年度事業成果

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

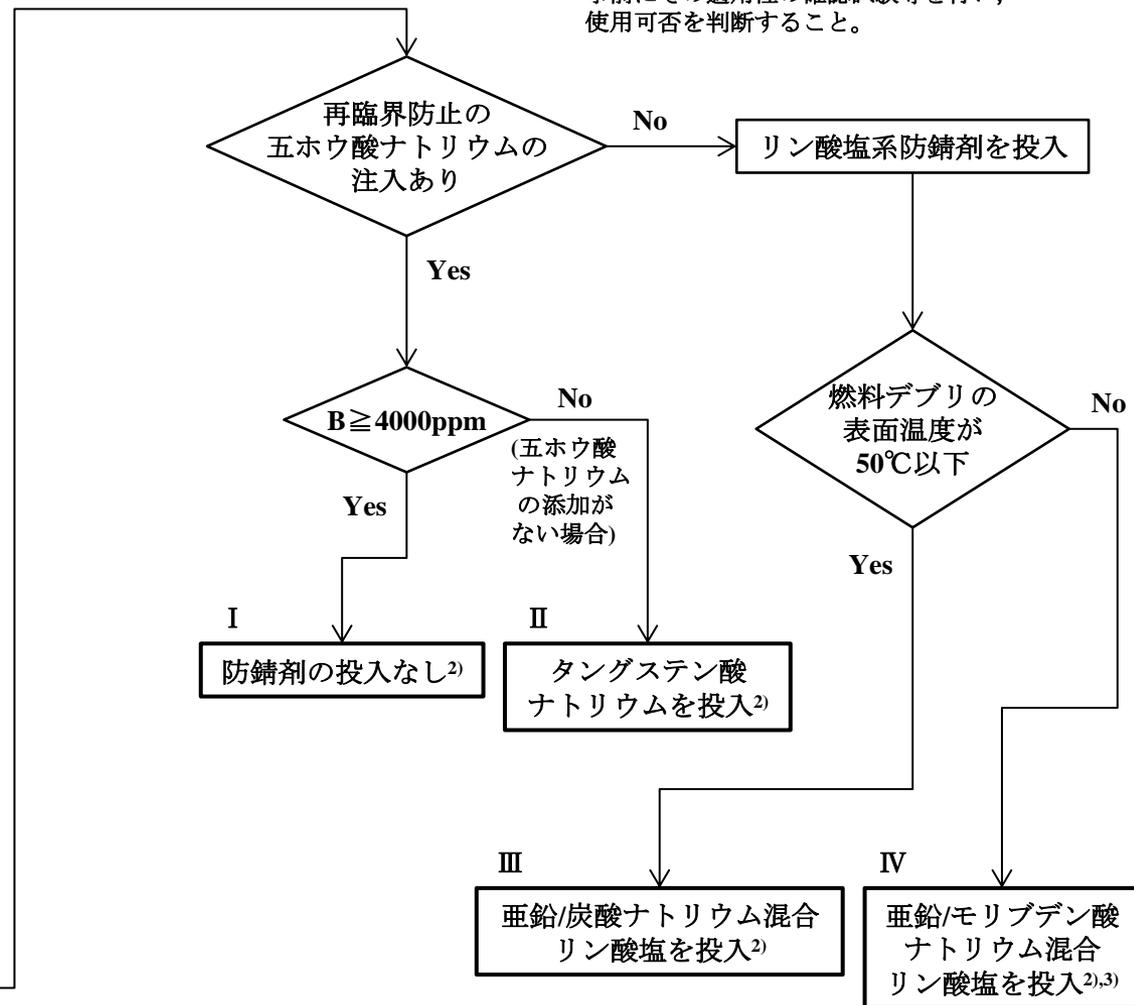
### ④ 管理要領の策定

#### 4) まとめ

#### ● 防錆剤の管理フロー



- 1) 図60参照
- 2) 水質濃度管理基準表 P98-P101参照
- 3) ・実機投入時のRPV/PCV内の線量率の確認が必要。  
(4kGy/hにおいて $E_{R,CREV} < E_{SP}$ となるため)  
・線量率によっては、事前にその適用性の確認試験等を行い、使用可否を判断すること。



# 11. 全体のまとめ

## (1) 腐食抑制策の効果・影響の評価

前年度までの成果ならびに、本年度実施した電気化学測定による防錆剤の耐局部腐食性の評価、リン酸塩系防錆剤の高温部での固着影響評価及び水処理設備への影響評価結果より、現状、以下の4種の防錆剤を1Fへ適用可能な腐食抑制策として選定した。なお、いずれの防錆剤においても、水処理設備への機能影響を鑑み、希釈・除去等により、処理対象水中の防錆剤濃度がPCV内投入時よりも低下していることが必要である。

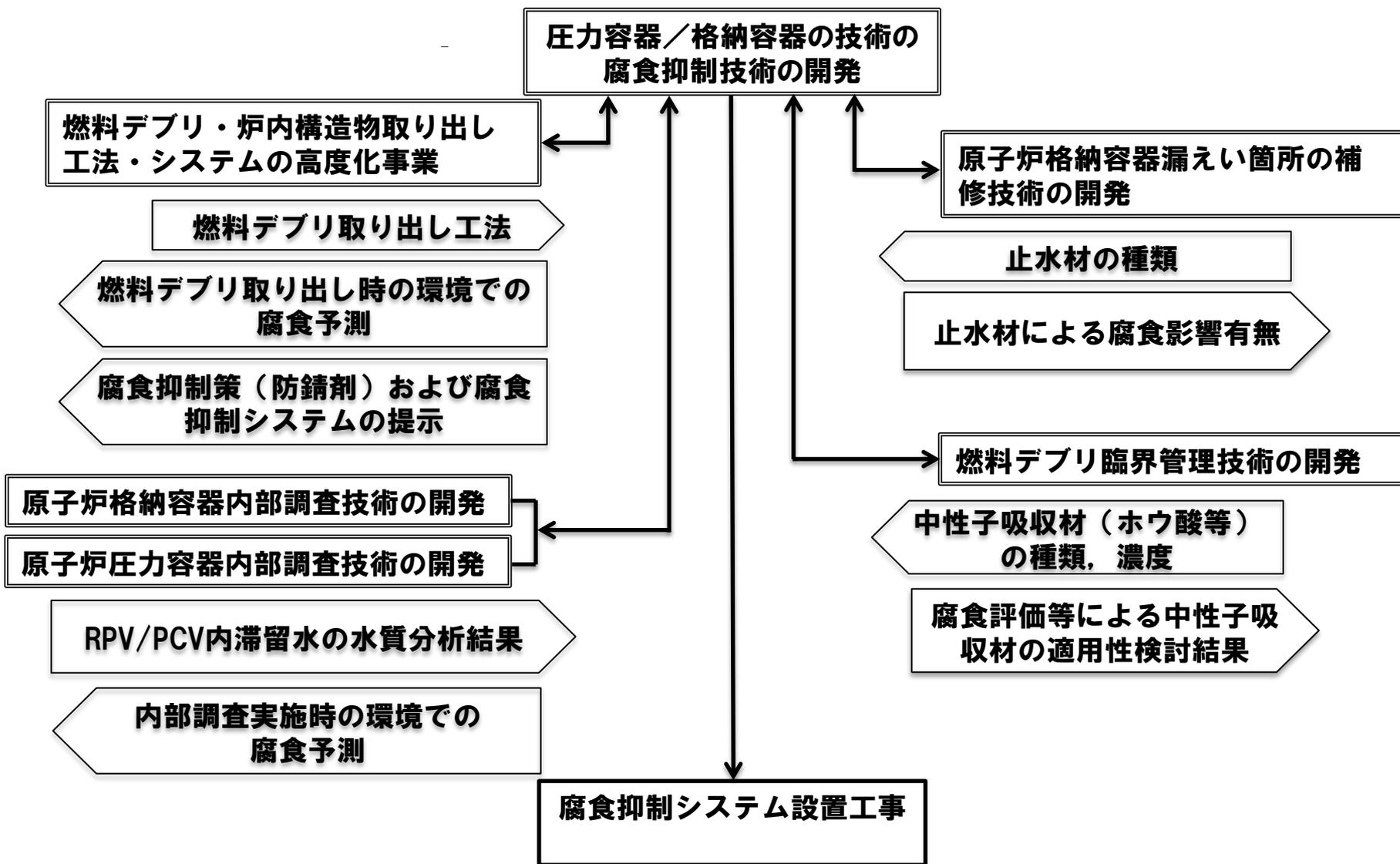
- 再臨界防止剤としても適用される**五ホウ酸ナトリウム**は、 $B \geq 4000\text{ppm}$ の場合、腐食抑制策として適用可とした。
- タングステン酸ナトリウム**は、五ホウ酸ナトリウムと併用することで腐食を抑制できることから、五ホウ酸ナトリウム( $B < 4000\text{ppm}$ の場合)との併用により適用可とした。
- 亜鉛／炭酸ナトリウム混合リン酸塩**は、五ホウ酸ナトリウムとの併用により耐食性が低下するため、単独で使用する事、また、 $65^\circ\text{C}$ 以上で白色生成物が発生し $50^\circ\text{C}$ 以下で発生しなかったため、投入時に燃料デブリの表面温度が $50^\circ\text{C}$ 以下であることを確認することで腐食抑制策として適用可とした。
- 亜鉛／モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩**は、五ホウ酸ナトリウムとの併用により耐食性が低下するため、単独で使用する事、また、 $4\text{kGy/h}$ の照射で $E_{R,CREV} < E_{Sp}$ となるため、投入時にRPV/PCV内の線量率を確認し、線量率によってはその適用性の確認を行うことで腐食抑制策として適用可とした。

# 11. 全体のまとめ

## (2) 腐食抑制システムの概念設計

- 選定した防錆剤(腐食抑制策)を実機に適用するための腐食抑制システムの概念設計(PCVの水漏洩有り/無し)を行った。
- 防錆剤の管理要領として、防錆剤の投入要否の判断基準、運用方法、水質濃度管理基準を策定した。

# 12. 他研究開発プロジェクトとの関係



# 13. 平成28年度実施体制

