

**令和4年度開始廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金
（原子炉建屋内の環境改善のための技術開発
（サブプレッションチェンバ脚部の電気防食による腐食抑制技術の開発））**

2022年度最終報告

2023年7月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構（IRID）

1. 本事業の概要

- (1) 本事業の背景
- (2) 本PJの実施内容
- (3) 体制について
- (4) 工程関係、他事業との関連性

2. 本事業の具体的な実施内容

- (1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討
- (2) 実機適用性評価のための基礎試験
- (3) HPの評価

3. まとめ

4. 課題、TRL達成度、期待される効果

- (1) 課題
- (2) TRL達成度、期待される効果

添付資料

1. 本事業の概要

1. 本事業の概要

(1) 研究の必要性及び本事業の内容

過去の廃炉・汚染水対策事業*1,*2で実施した腐食減肉量を考慮した耐震健全性評価(下図)により、サプレッションチェンバ(S/C)脚部(コラムサポート及び耐震サポート)*3が、耐震強度上、厳しい部位であることが分かっている。S/C内の水抜きが今後進むことに伴う重量減により、S/C脚部は耐震強度上、有利に働いていくものと考えられるが、今後の廃炉作業の状況や机上での耐震評価結果には不確実な部分も含まれることから、長期間にわたる廃炉作業を鑑みると、S/C脚部の耐震強度上のさらなる対策と裕度確保が望まれる。新たな対策のひとつとして、本PJではS/C脚部に対する腐食減肉量抑制のため、水中、高線量の過酷環境を踏まえた、外部電源方式による電気防食工法の実機適用のための開発を行う。

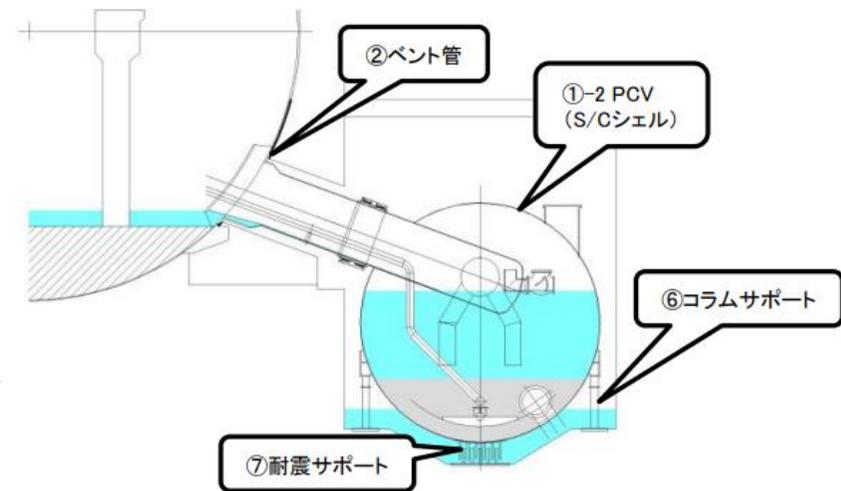


図 S/C脚部の耐震健全性評価ケース*2
(2,3号機の例)

*1 平成25年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(压力容器/格納容器の健全性評価技術の開発)」

*2 平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(压力容器/格納容器の耐震性・影響評価手法の開発)」

*3 腐食対策の優先度が高いS/C脚部を電気防食の対象とするが、配管など今後の調査等で腐食対策が必要となる部位があれば、必要に応じ別途計画する

1. 本事業の概要

(2) 本PJの実施内容

実施内容① 電気防食設備の実機適用性の概念検討

S/C脚部に電気防食を適用する場合には、その装置の電極をS/C脚部の近傍に設置する必要がある。一方で、1号機から3号機のS/Cが設置されているトラス室には放射性物質濃度が高い汚染水が滞留しており、人が近づくのは極めて困難な状況である。

本事業においては、このような実機条件の環境条件を調査・検討した上で、現地において実現可能であり、防食効果を得ることが可能な電気防食装置の電極の設置場所を検討する。また、外部電源方式の電源装置の配置場所や電極とつながるケーブルの敷設についての検討を行う。その上で、放射線量が非常に高い環境において合理的で実施可能な施工方法の検討を行う。

1. 本事業の概要

(2) 本PJの実施内容

実施内容② 実機適用性評価のための基礎試験

S/C脚部の電気防食工法に関する基礎試験を行い、1F環境における水質及び防食対象の状態により変動する防食効果及び防食効果範囲を確認する。合わせて有限要素法(FEM)解析も実施し、試験結果と比較し、1F環境での妥当な解析条件を確認する。また、FEMによるS/C脚部に対する実機シミュレーション解析を行い、実機での防食効果を確認する。

電気防食時の水素発生量は、防食時の電流密度から保守的な計算が可能であり、電気防食時の高強度鋼に水素脆化の影響が出る電位の閾値について知見がある。試験により、電気防食施工時の電位と電流密度の相関性を示す分極曲線を取得した上で、実機シミュレーション解析を行い、実機での水素発生の影響を確認する。

1. 本事業の概要

(2) 本PJの実施内容

実施内容③ HP*の評価

実施内容①、②の結果をもとに、現地設置や技術的な成立性が見込まれる(HPクリア)かどうかを判断し、本事業成果の他機器への適用可能性評価を検討。HPクリアと判断された場合、次期開発にて、S/C脚部を取り入れた大型試験体を用いた腐食抑制効果検証試験に進む計画とする。

<実機適用への着眼点(HP)>

交付申請書記載の実機適用
への着眼点(HP)

実施内容① 電気防食設備の実機適用性の概念検討

- ・S/C脚部の足元近傍に電極を配置することは可能か。
- ・直流電源装置は配置可能か。
- ・電極と装置間に接続ケーブルを引くことが可能か。
- ・排流端子は設置可能か。

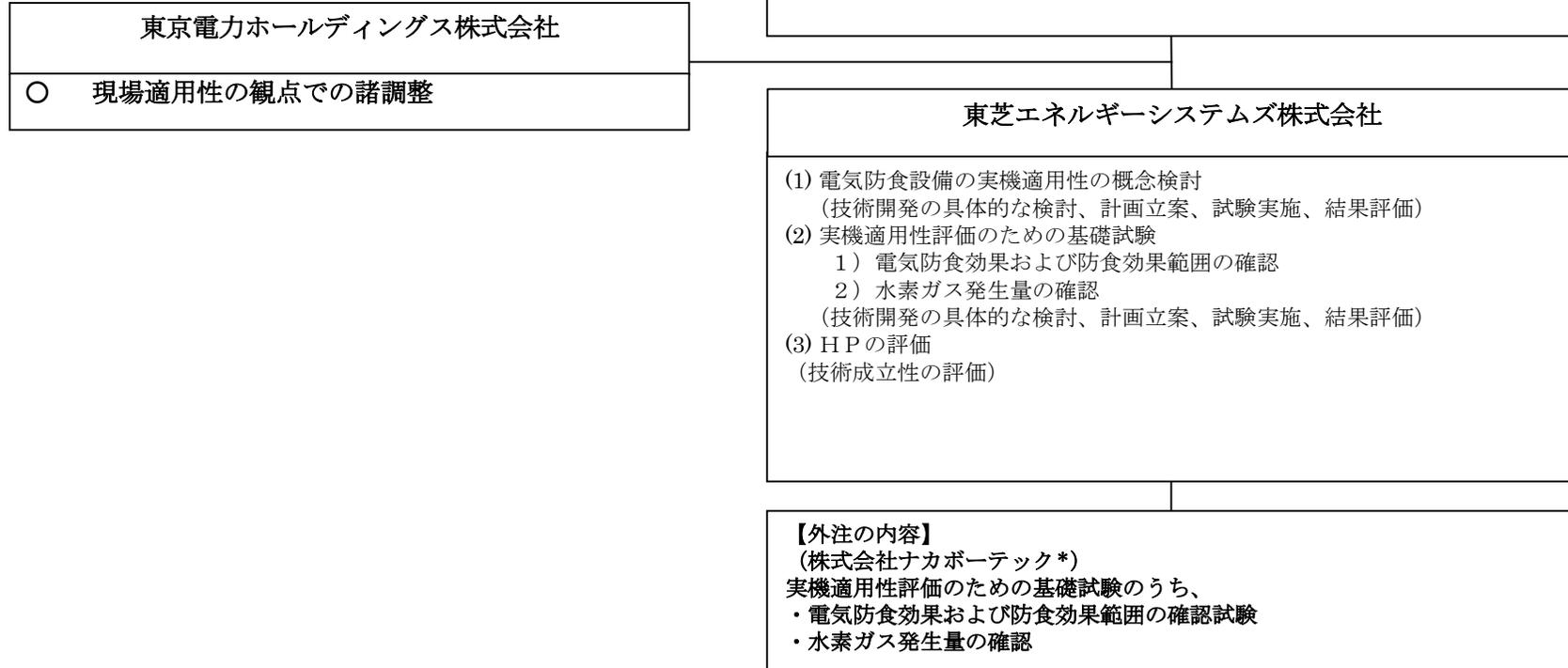
実施内容② 実機適用性評価のための基礎試験

- ・現実的な電極の設置位置や数量で、S/C脚部(防食対象物)の防食電位が $-800\text{mV vs Ag/AgCl [sw]}$ (海水塩化銀電極基準)以下となることが可能か。 $-800\text{mV vs Ag/AgCl [sw]}$ を上回る場合、S/C脚部に及ぼす腐食の影響を考慮し、必要に応じて課題整理を行う。
- ・防食効果が得られる条件での水素発生量をどのくらいに抑えられるか。必要に応じ水素発生対策(発生した水素の回収方法など)も検討する。
- ・2023年度以降に実施すべき腐食抑制効果検証試験の計画書を作成する。

* HP ; ホールドポイント

1. 本事業の概要

(3) 体制について



*株式会社ナカボーテックは原子力プラントでの電気防食の実績がある。また、震災後の1Fにおける適用実績も豊富であり、1F環境条件を踏まえた電気防食に精通している。

原子力プラントへの電気防食工法の実績があり、専門家を擁する外注先と連携し、試験／解析を進める。

1. 本事業の概要

(4) 工程関係、他事業との関連性

【凡例】

■ (青) : 計画 ■ (赤) : 実績

■ ■ ■ (青) : 必要に応じて検討内容を見直し

— — (青) : 必要に応じ試験・解析の準備

大分類	小分類	実施事業者 (外注先、試験場 がある場合は併)	令和4年度(2022年度)											備考 (最新状況)		
			5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月			
主要なマイルストーン				試験計画 報告会						中間報告					最終報告	
(1)電気防食設備の 実機適用性の概念検 討	①. 電極・ケーブル・直流電源装置 設置方法の概念検討	○東芝ESS 外注先：なし	[計画: 5月~11月] [実績: 5月~11月]											①概念検討完了		
	②.概念検討結果整理/課題抽出		[計画: 9月~12月] [実績: 9月~12月]											②課題整理抽出完了		
(2)実機適用性評価 のための基礎試験	①.電気防食効果および防食効果範囲 の確認	○東芝ESS 外注先：株式会社 ナカポーテック	[計画: 5月~6月] [実績: 5月~6月]											①a. 基礎試験条件検討完了		
	a.基礎試験条件の検討		[計画: 6月~7月] [実績: 6月~7月]													
	b.基礎試験		[計画: 7月~12月] [実績: 7月~12月]											①b.電気化学試験完了		
	c.FEM解析による電気防食効果評価	[計画: 7月~12月] [実績: 7月~12月]											①c.3D解析完了			
	②水素ガス発生量の確認	[計画: 6月~12月] [実績: 6月~12月]											②a.報告完了			
	a.既存知見による調査	[計画: 6月~12月] [実績: 6月~12月]											②b.分極曲線取得完了			
(3)HPの評価	①.実現可能性の評価	○東芝ESS 外注先：なし	[計画: 10月~12月] [実績: 10月~12月]											①評価完了		
	②.2023年度試験計画検討		[計画: 10月~12月] [実績: 10月~12月]											②試験計画検討完了		
	③.まとめ		[計画: 10月~12月] [実績: 10月~12月]											③報告書修正/コメント対応完了		
			[計画: 10月~12月] [実績: 10月~12月]													

1. 本事業の概要

(4) 工程関係、他事業との関連性

ID	要求側事業	提供側事業	必要となる時期	インプット情報	情報の用途	アウトプット情報	備考
1	電気防食PJ	デブ取PJ	令和4年9月	・作業性に影響する干渉物や追加設置設備に関する情報	・電気防食設備の実機適用性の概念検討のうち、現地での施工手順書の作成	・現地施工手順	必要となる時期以外にも適宜情報交換を行う
2	電気防食PJ	安全PJ	令和4年9月	・電気防食効果に影響するトラス室内の水質に関する情報	・実機適用性評価のための基礎試験のうち、電気防食効果および防食効果範囲の確認や水素ガス発生量の確認試験の水質条件の設定	・基礎試験時水質条件	必要となる時期以外にも適宜情報交換を行う
3	電気防食PJ	監視PJ	令和4年9月	・腐食に対する監視範囲等の検討結果に関する情報	・電気防食設備の実機適用性の概念検討のうち、現地での施工手順書の作成	・現地施工手順	必要となる時期以外にも適宜情報交換を行う
4	デブ取PJ 安全PJ 監視PJ	電気防食PJ	令和5年3月	・S/C脚部への電気防食の現地設置や技術的な成立性	・各PJの検討に資する現地での電気防食の施工手順書や腐食抑制・監視方法などを提供	・現地電気防食施工手順 ・腐食抑制・監視手法	必要となる時期以外にも適宜情報交換を行う

注記)

電気防食 PJ : 原子炉建屋内の環境改善のための技術開発 (サブプレッションチェンバ脚部の電気防食による腐食抑制技術の開発)

デブ取 PJ : 燃料デブリの取り出し工法の開発

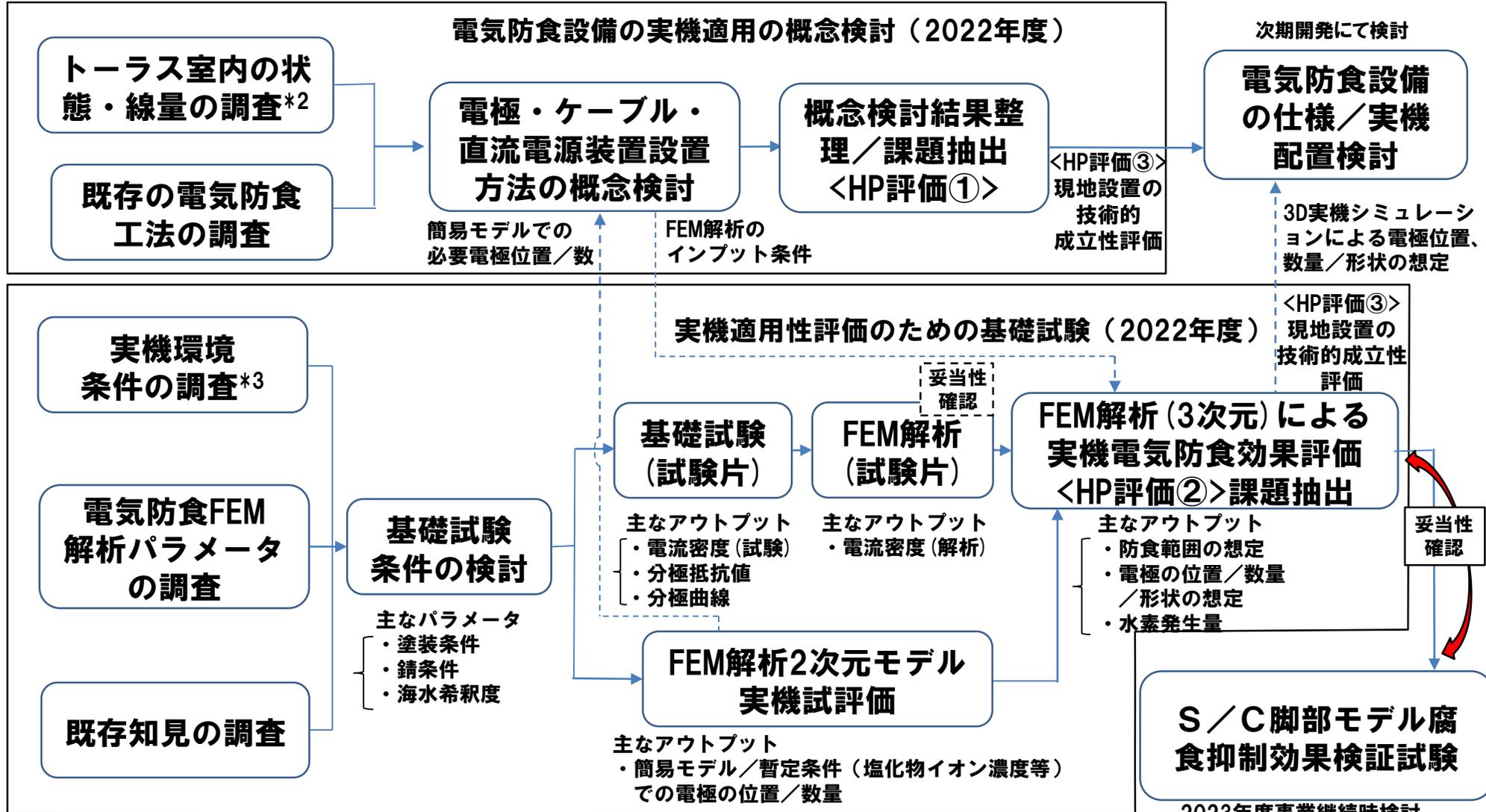
安全 PJ : 安全システムの開発

監視 PJ : 福島第一原子力発電所廃止措置統合管理のための支援技術の開発 (原子炉格納容器内の連続的な監視システムの開発)

2. 本事業の具体的な実施内容

2. 本事業の具体的な実施内容

本研究のPJ推進フロー(2022年度*1)



*1 進捗に応じて副案も検討する

*2 キャットウォークの状態、トラス室の線量等

*3 S/C外面脚部の溶液、耐震/コラムサポート表面状態、放射線量等

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

S/C脚部の防食効果が期待できる電極の設置位置について、電極、ケーブル及び直流電源装置の設置方法の概念検討を行い、現地設置の実現可能性を評価する。

排流端子の設置位置は、S/C脚部と導通がとれる箇所
(1箇所)であればどこでもよい。
(導通がとれているかは設置後に確認可能)

(補足) 各号機のS/C脚部の有無

- ・1号機: コラムサポートのみ
(耐震サポート無し)
- ・2号機: コラムサポート、
耐震サポート有
- ・3号機: コラムサポート、
耐震サポート有

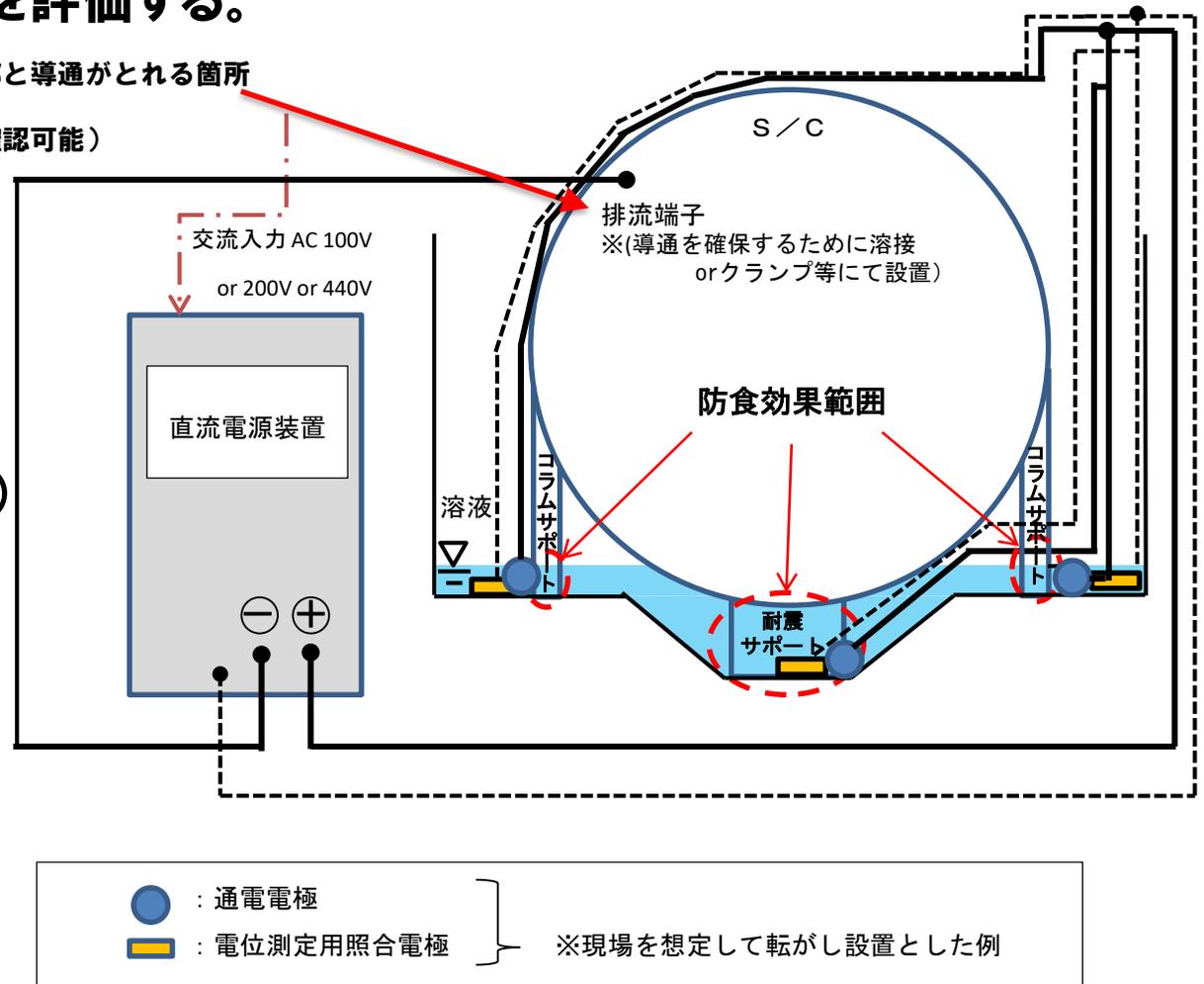


図 S/C脚部を対象とした外部電源方式による電気防食設備配置の概念検討(例)

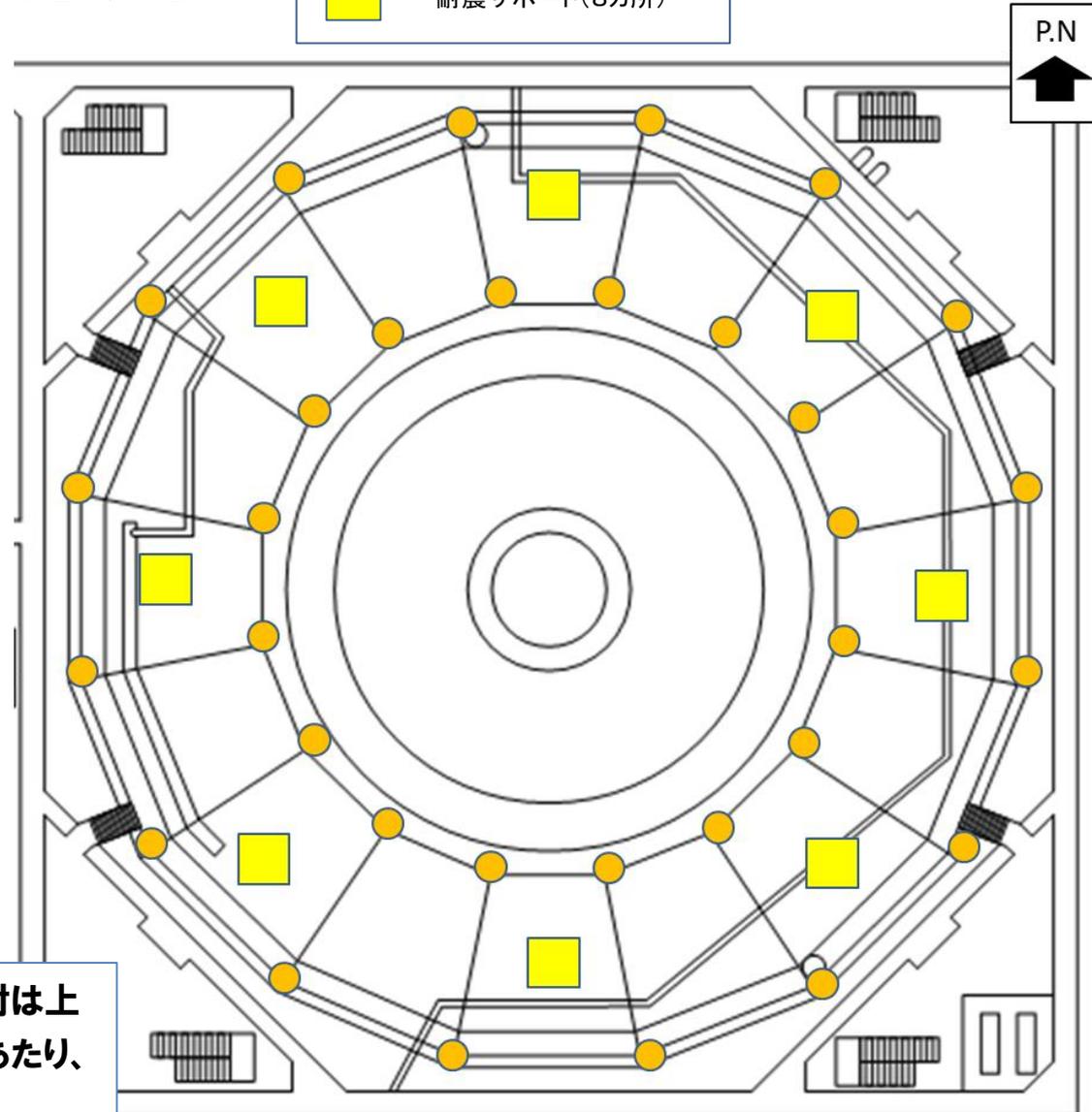
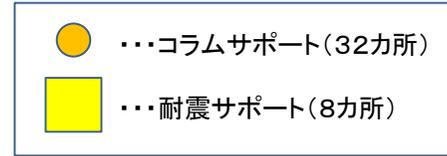
2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

○電極設置位置について

S/C脚部の防食効果が期待できる電極の設置位置として、電気防食設備メーカーより下記の見解を得ている。

- ・電極からの防食効果範囲次第だが、効果の确实性の観点からすべての脚部に電極を設置することが望ましい。
- ・試験および解析の結果次第だが、溶液の抵抗値が高い場合はコラムサポート・耐震サポートの直ぐ横(0.5m程度)に近接させる必要があると想定。
- ・電極やケーブルの仕様策定にあたっては、後述のFEM解析評価結果を基に検討や設計が必要。



電極、ケーブル及び直流電源装置の設置方法の概念検討は上記(下線部)を条件に検討する。なお、概念検討の実施にあたり、電極、ケーブル及び直流電源装置の仕様は無いものの、これら機器の装置構成は変わらないため検討には影響しない。

図 S/C脚部電極を設置するコラムサポート及び耐震サポートの配置図
注記：一部関係のない設備の配置図を含んでいる。各サポートは独立している

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

○トラス室内の空間線量について

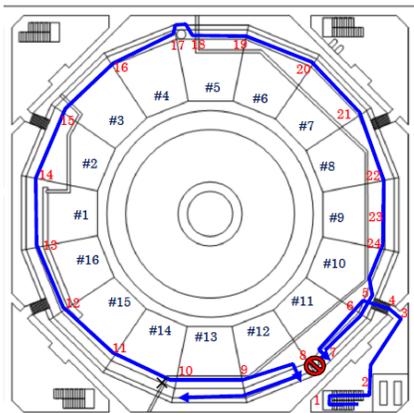
トラス室内は高線量環境であり、特に3号機が高い傾向にあるため(※)、3号機を代表号機として検討を進める。なお、人が近接するのは困難な状況のため、電極及びケーブル設置方法の概念検討にあたっては、「遠隔」による設置方法を検討する。

※3号機:100~360mSv/h(*1)、2号機:40~88mSv/h(*2)、1号機:北西エリア S/C上部:220mSv/h(*3)

◇3号機

【参考】トラス室雰囲気線量 (2012年7月計測)

2012年7月の遠隔操作装置によるトラス室内の線量測定結果。



計測ポイント

トラス室雰囲気線量
過去の計測結果 (2012年7月計測)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
線量値 (mSv/h)	4	18	46	100	190	173	154	125
No.	9	10	11	12	13	14	15	16
線量値 (mSv/h)	176	230	192	158	176	180	179	186
No.	17	18	19	20	21	22	23	24
線量値 (mSv/h)	234	360	169	158	164	186	240	193

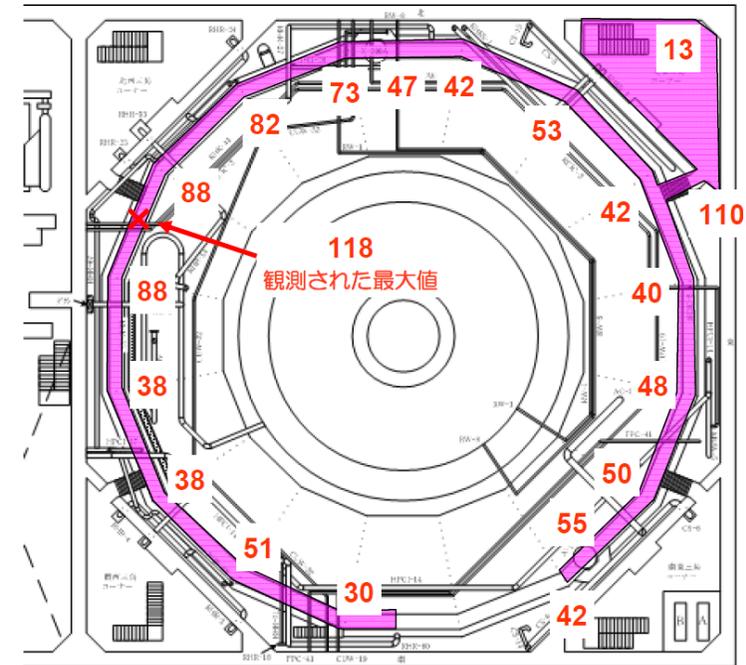
(出典)

*1: 3号機原子炉建屋トラス室における3Dレーザスキャン計測の実施結果について (2016年 2月25日 東電殿発行)

*2: 2号機原子炉建屋地下階トラス室内調査 (2012年4月23日 東電殿発行)

*3: 福島第一原子力発電所 1号機トラス室調査(1日目)について (2013年2月20日 東電殿発行)

◇2号機



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

○最終的な成果のイメージ

◆実機環境条件の調査・検討

- ・トラス室内へのアクセス性に関する調査・検討結果

◆設置方法の概念検討(*1)

- ・電極及びケーブルルートのケーススタディ
- ・電極及びケーブル設置方法の概念
- ・直流電源装置の設置方法の概念
- ・排流端子の設置方法の概念

◆実現可能性の評価

- ・電極及びケーブル設置にあたっての課題・対応案の成立性(*2)
- ・直流電源装置の設置にあたっての課題・対応案の成立性(*2)
- ・排流端子の設置にあたっての課題・対応案の成立性(*2)

*1: S/C脚部に耐震サポートとコラムサポートがあり電極の設置必要数が多いこと、またトラス室内の線量が比較的高い3号機を代表号機として検討する。なお、設置方法の概念検討では下記を行う。

- ・設置手順の検討
- ・設置方法の検討としてイメージ図(2次元の概念図)の作成。

なお、イメージ図の作成が困難な場合、文書による表現に代えさせて頂く可能性がある。

*2: 成立性の評価については、「大、中、小」等による評価を行う。1、2号機の評価については、3号機の課題・対応策・評価を行った後、3号機と比較して条件が緩和される内容(1号機は電極の設置必要数が少ないこと、2号機はトラス室内の線量が低いこと)での成立性の評価を行う。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆実機環境条件の調査・検討

・トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その1)

(検討内容)

- ・ トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討として、R/B1階から地下階三角コーナーを經由し、S/C上部にある外側キャットウォークまでのアクセス性を確認した。

(検討条件)

下記を条件に検討した。

- ・ S/C脚部に耐震サポートとコラムサポートがあり電極の設置必要数が多いこと、またトラス室内の線量が比較的高い3号機を代表号機として検討した。
- ・ トラス室内は高線量環境であり、人が近接するのは困難な状況のため、電極及びケーブル設置方法の概念検討では「遠隔」による設置方法を検討する。よって、アクセス性に関する調査・検討にあたっては、離れた場所から操作可能な装置(以下、遠隔装置)が通過出来るか確認した。
- ・ 遠隔装置の外形サイズは、震災後、トラス室内に遠隔で立ち入った実績のある装置のサイズ(*1)を仮定として用いた。

*1:装置外観写真・サイズは次葉参照

2. 本事業の具体的な実施内容

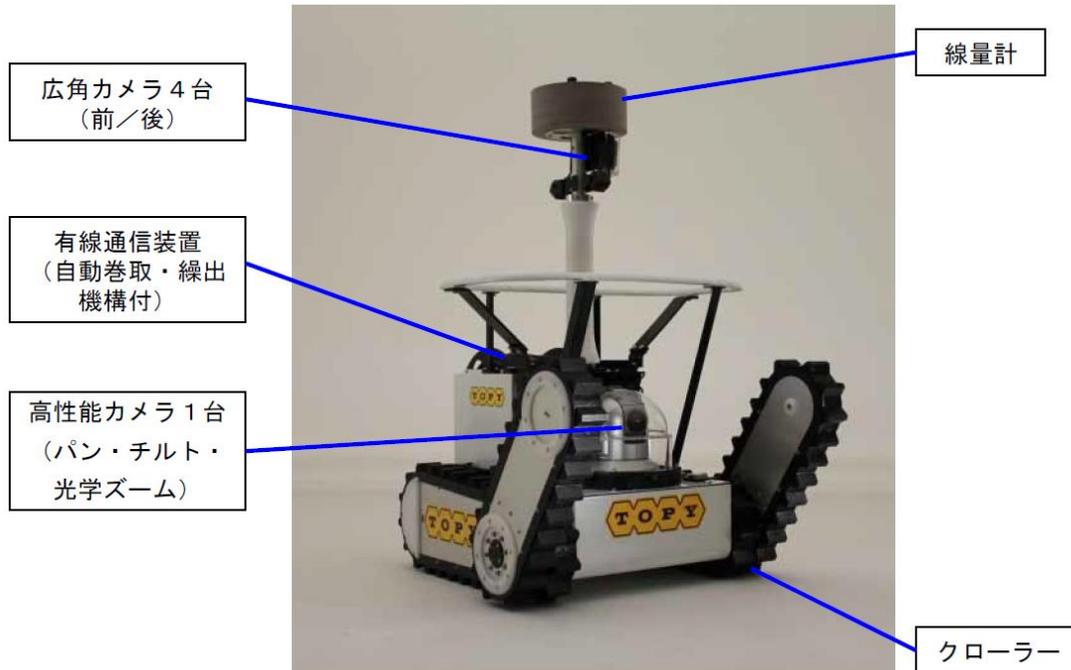
(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆実機環境条件の調査・検討

・トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その1)

(検討条件 続き)

*1:装置外観写真・サイズ(*a)



【仕様】

全長	: 505mm (フリッパー伸長時 755mm)
全幅	: 510mm
全高	: 830mm (クローラー部 約165mm)
総重量	: 45kg
昇降段差	: 蹴上235mm (最大)
昇降角	: 45° (最大)
稼働時間	: 5時間 (バッテリー)
走行速度	: 約2 km/h (最高)
有線	: 400m光ファイバー

その他機能

- ・転倒防止機能付き

(補足)本装置の用途について

- ・遠隔による目視調査、線量調査に使用。

(出典)

*a: 東電殿HP 主に地下階で活用実績のあるロボット

https://www.tepco.co.jp/decommision/principles/technology/robot/robot_under/index-j.html

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

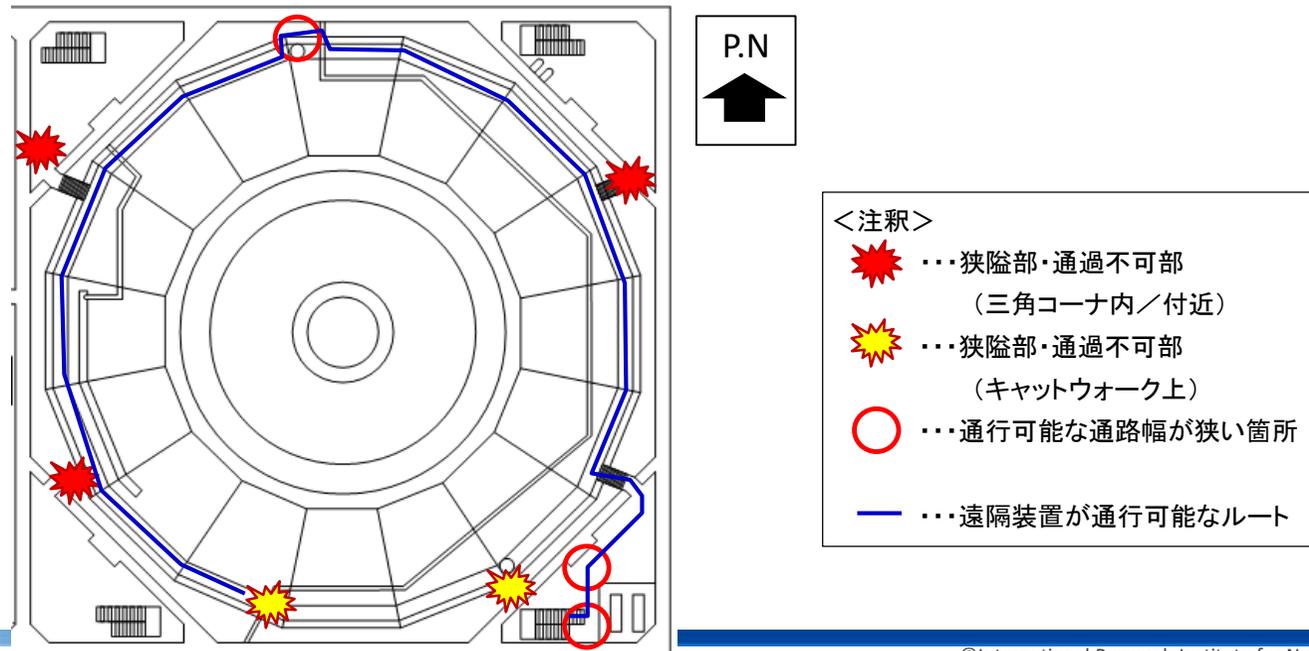
◆実機環境条件の調査・検討

・トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その1)

(調査・検討結果)

R/B1階 各三角コーナーからキャットウォークまでのアクセス性を確認した結果、下記であることを確認した。

- ・ R/B1階からキャットウォークまでのアクセス可能なルートは南東三角コーナーのみ。ただし、三角コーナーの一部は狭隘部があり、遠隔装置が通過する際は注意が必要。
- ・ キャットウォーク上にアクセス出来ない箇所がある。
- ・ 北側マンホール周辺の通路は既設配管と手摺との間隔が狭く、通行可能だが、通路幅が狭い。



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆実機環境条件の調査・検討

- ・トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その2)

(検討内容)

- ・外側キャットウォークからS/C脚部までのアクセス性を確認した。

(検討条件)

下記を条件に検討した。

- ・S/C脚部に耐震サポートとコラムサポートがあり電極の設置必要数が多いこと、またトラス室内の線量が比較的高い3号機を代表号機として検討した。
- ・トラス室内は高線量環境であり、人が近接するのは困難な状況のため、電極及びケーブル設置方法の概念検討では「遠隔」による設置方法を検討する。よって、S/C脚部までのアクセス性に関する調査・検討にあたっては、離れた場所から操作可能な装置(以下、遠隔装置2)をキャットウォークから吊下げてS/C脚部まで到達出来るか確認した。
- ・キャットウォークからS/C脚部までの遠隔装置の外形サイズは、震災後、S/C下部の調査で実績のある装置のサイズ(*1)を仮定として用いた。
- ・遠隔装置2はS/C脚部近辺(直上)のキャットウォークから遠隔装置を用いて吊下げられた後、S/C表面を沿いながら脚部近辺に近づき、電極を設置するものと仮定した。(*1)

*1:装置外観写真・サイズ及び電極の設置イメージは次葉参照

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

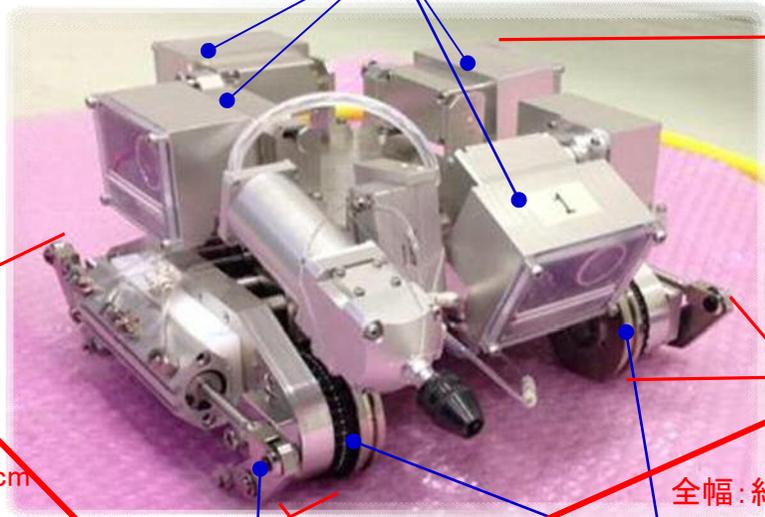
◆実機環境条件の調査・検討

・トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その2)

(検討条件 続き)

・遠隔装置2 外観写真・サイズ(*a)

調査カメラ&照明



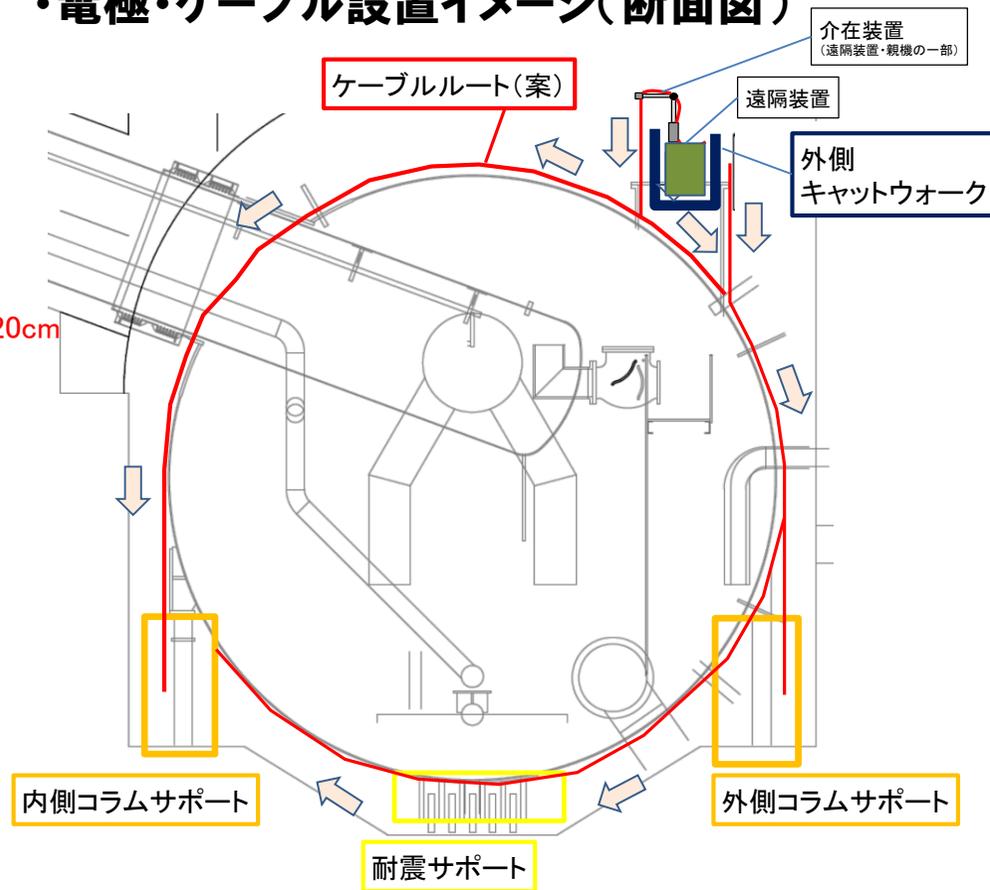
全幅: 約30cm

全高: 約20cm

エア駆動
車輪着脱機構

マグネット車輪

・電極・ケーブル設置イメージ(断面図)



介在装置
(遠隔装置・親機の一部)

遠隔装置

外側
キャットウォーク

内側コラムサポート

耐震サポート

外側コラムサポート

(補足)本装置の用途について
マグネットを用いてS/C表面に張り付き、S/C表面の目視調査に使用。

(出典)

*a: 平成25年度「格納容器漏えい箇所特定技術・補修技術開発」(調査の部)より

2. 本事業の具体的な実施内容

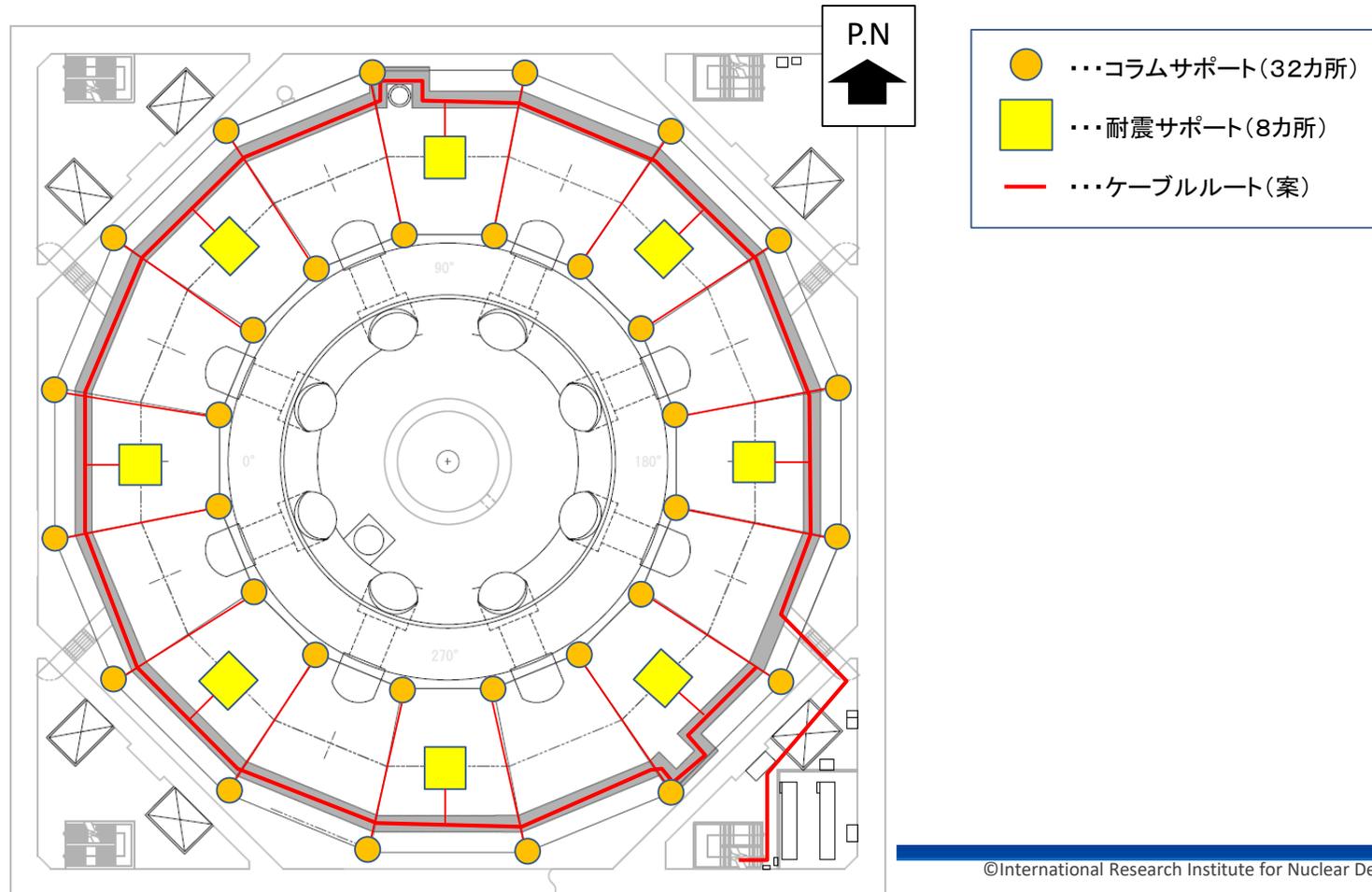
(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 実機環境条件の調査・検討

・ トーラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その2)

(検討条件 続き)

・ 電極・ケーブル設置イメージ(上面図)



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

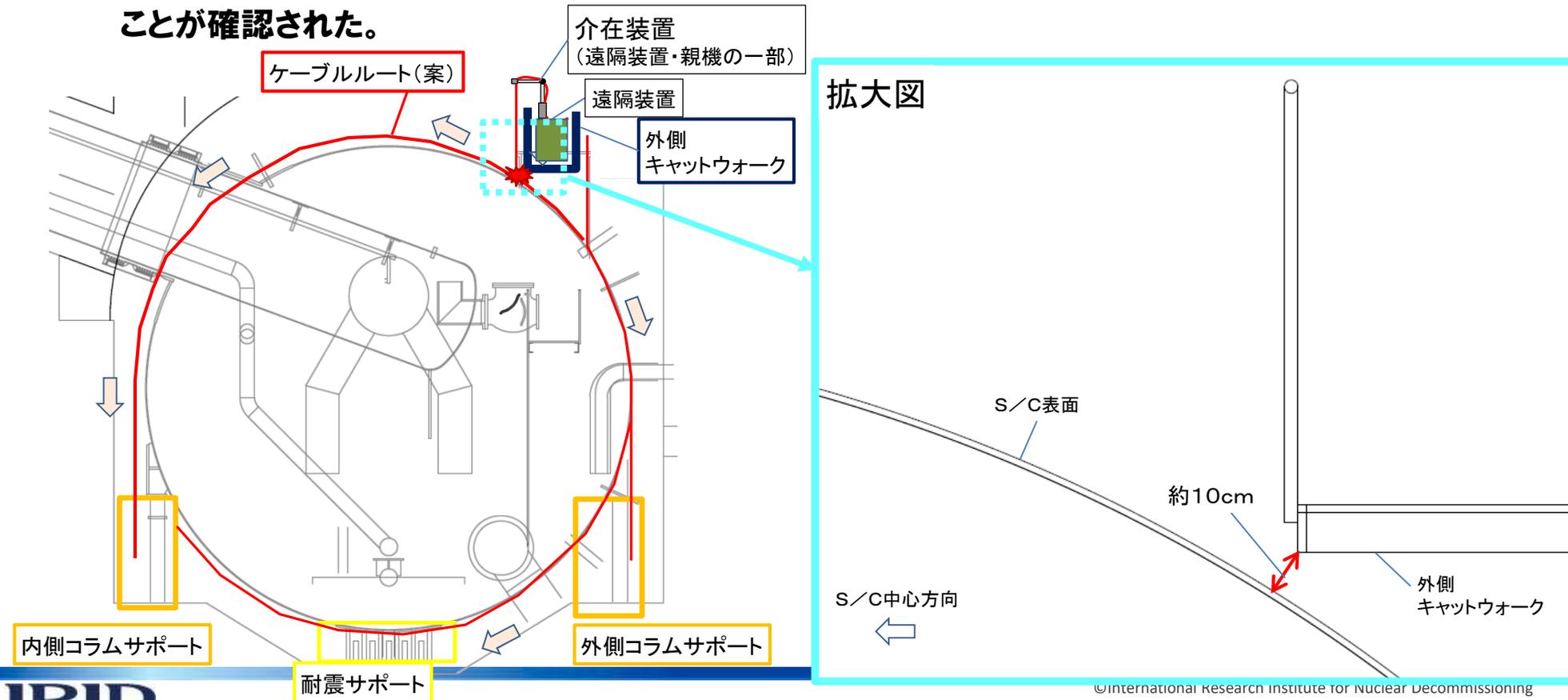
◆実機環境条件の調査・検討

・トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その2)

(調査・検討結果)

キャットウォークからS/C脚部へのアクセス性を確認した結果、下記であることを確認した。

- ・キャットウォークとS/Cとの隙間は全周にわたって約10cmと狭く、遠隔装置2では通過出来ないことが確認された。



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

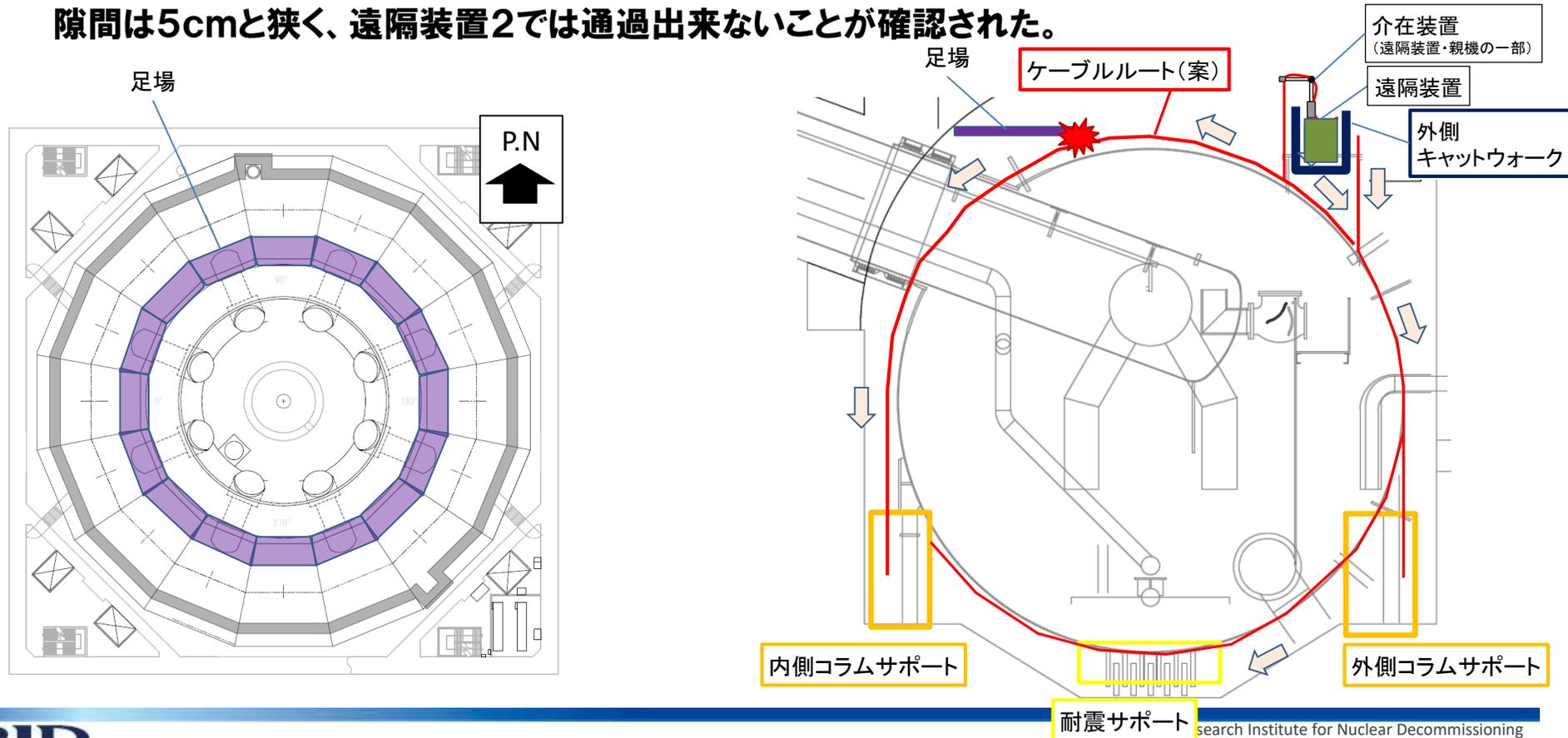
◆実機環境条件の調査・検討

・トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その2)

(調査・検討結果)

キャットウォークからS/C脚部へのアクセス性を確認した結果、下記であることを確認した。

- ・キャットウォークの内側には全周にわたって足場が設置されており、当該の足場からS/C表面までの隙間は5cmと狭く、遠隔装置2では通過出来ないことが確認された。



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆実機環境条件の調査・検討

・トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その2)

(調査・検討結果 まとめ)

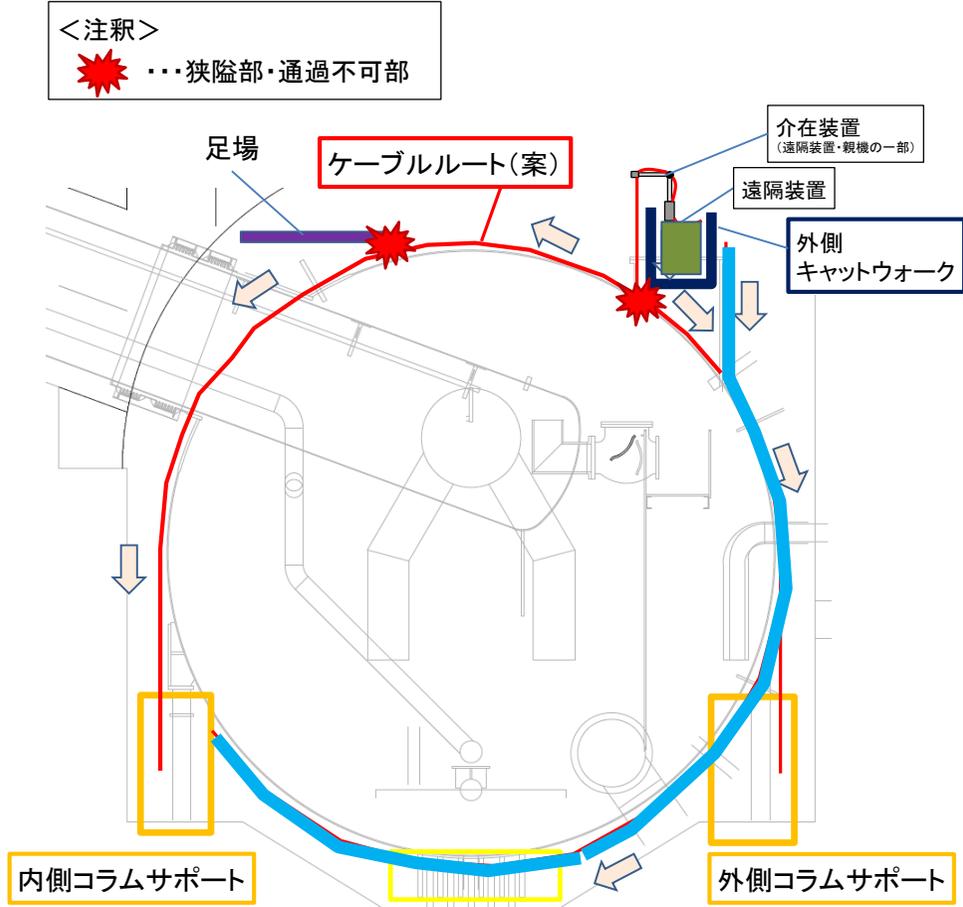
キャットウォークからS/C脚部へのアクセス性を確認した結果、下記であることを確認した。

・キャットウォークとS/Cとの隙間は全周にわたって約10cmと狭く、遠隔装置2では通過出来ないことが確認された。

・キャットウォークの内側には全周にわたって足場が設置されており、当該の足場からS/C表面までの隙間は5cmと狭く、遠隔装置2では通過出来ないことが確認された。



以上のことから、キャットウォークからS/C脚部までのアクセスルートはキャットウォークの外側からS/Cへ吊り降ろし、S/Cの下部を通るルート(右図 青線ルート)のみであることが確認された。よって、このルート上のアクセス性について確認した(次葉以降に「その2」としてまとめる)。



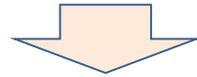
2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

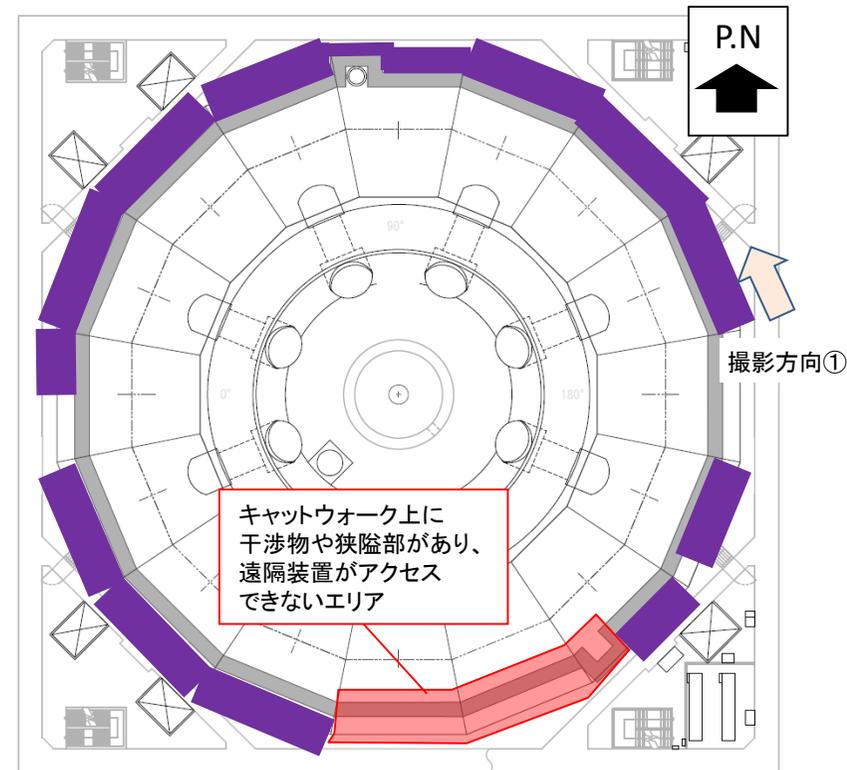
◆実機環境条件の調査・検討

・トラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討(その2) (調査・検討結果(その2))

キャットウォークからS/C脚部へのアクセス性を確認した結果、ほとんどのエリアにおいて、キャットウォーク近傍には既設構造物があり、遠隔装置2をS/Cへ吊下げることが困難であることが確認された。



電極設置において、キャットウォークを用いるアクセスルートは2か所に限られており、既設構造物の干渉が障害となることが分かった(課題)。外側キャットウォーク自体または外側キャットウォーク外側の干渉物を撤去してアクセスルートを増やす案も考えられる。既設構造物の特定、撤去可否検討が必要になる。また、大型の干渉物撤去となる可能性がある。



■ … 遠隔装置2をS/Cへ吊下げることが出来ないエリア

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・アクセスルートのケーススタディ

(検討内容)

・S/C脚部に電極を設置するにあたり、考えられるケーブルルートとルートごとの評価を行い、比較的最適と考えられるアクセスルートを選定した。

(検討条件)

下記を条件に検討した。

・S/C脚部に耐震サポートとコラムサポートがあり電極の設置必要数が多いこと、またトールス室内の線量が比較的高い3号機を代表号機として検討した。

・建屋の床、壁には配筋が通っているが、ケーススタディでは全ての床、壁は配筋ごと穴あけ可能であるものとして検討した。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

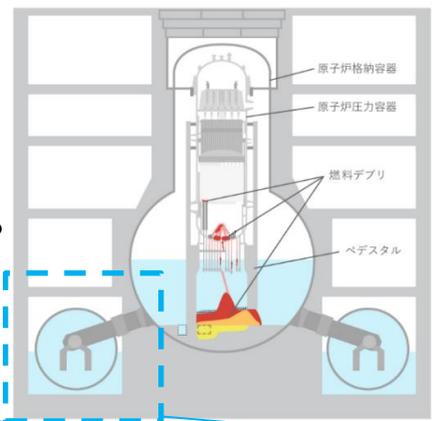
◆ 設置方法の概念検討

・アクセスルートのケーススタディ (アクセス方法 ケーススタディ)

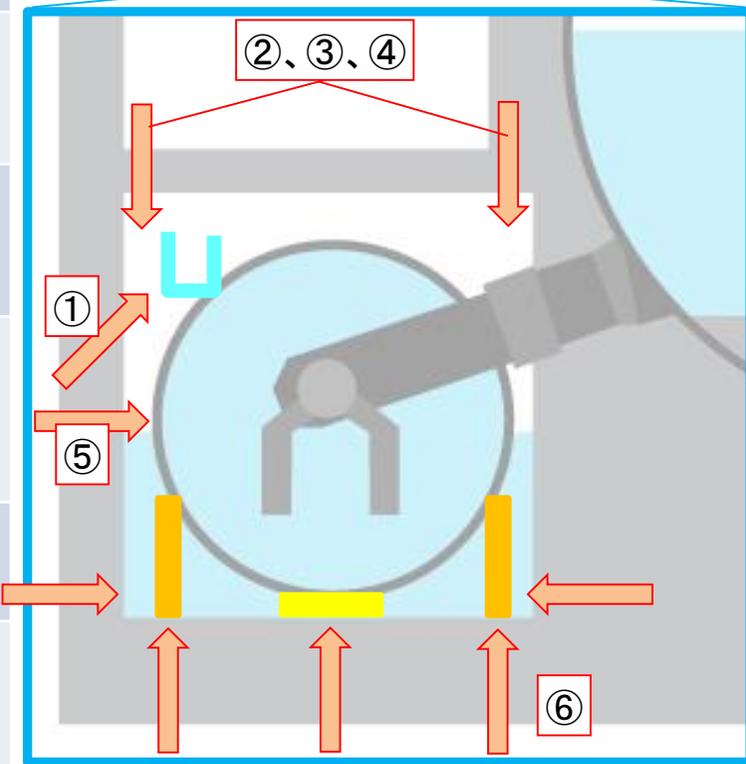
S/C脚部アクセスルートは以下が考えられる。ルート案と評価を示す。

建屋断面イメージ図

- <注釈>
- …コラムサポート
 - …耐震サポート
 - …外側キャットウォーク



No.	アクセスルート案	評価
①	R/B1階から三角コーナーを経由して、キャットウォークから電極・ケーブルを吊下げて設置する。	電極やケーブルを設置するルートがあり、他案と比較して現実的。ただし、キャットウォーク近傍には既設構造物があり、電極の設置が困難。
②	電極を設置したい箇所の直上のR/B1階フロア面を穴あけして、電極・ケーブルを吊下げて設置する。	電極を設置したい場所に対して、R/B1階の既設構造物が干渉し、穴あけ可能な場所が少なく(次葉参照)、仮に穴をあけても、ケーブル吊下げのみで全ての位置に電極設置することは困難。
③	電極を設置したい箇所の直上のR/B1階フロア面を穴あけして、キャットウォークからの介助を行いながら、電極・ケーブルを吊下げて設置する。	同上。
④	キャットウォーク近傍に向けてR/B1階フロア面を穴あけして、キャットウォークから電極・ケーブルを吊下げて設置する。	電極を設置したい場所に対して、R/B1階の既設構造物が干渉し、穴あけ可能な場所が少ない上(次葉参照)、キャットウォーク上でのケーブルを介助する必要があり、作業内容がNo.1+床面穴あけとなり、作業ボリュームがNo.1と比較して大。
⑤	三角コーナーからトラス室方向へ穴あけして、その穴から電極・ケーブルを吊下げて設置する。	電極を設置したい場所に対して、三角コーナーはS/C全周に面してないため、穴を開けても全ての位置に電極設置することは困難。
⑥	R/B基礎、もしくはトラス室の壁から穴あけして、電極を設置する。	R/Bの広い範囲で基礎、土壌の掘削作業が必要であり現実的でない。また基礎部や壁に穴をあけると、トラス室に溜まった滞留水が抜けて、電気防食が出来なくなる可能性がある。





2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・アクセスルートのカースタディ

(アクセスルート カースタディ 続き)

※No.②、③、④ 補足

本図はS/Cとキャットウォークのある地下階へ電極・ケーブルを吊り下げる場合に、R/B1階の穴開け可能なエリアを赤枠で示したものである。電極を設置したい場所に対して、R/B1階の既設構造物が干渉するため、穴あけして電極を設置できる場所が少ない。

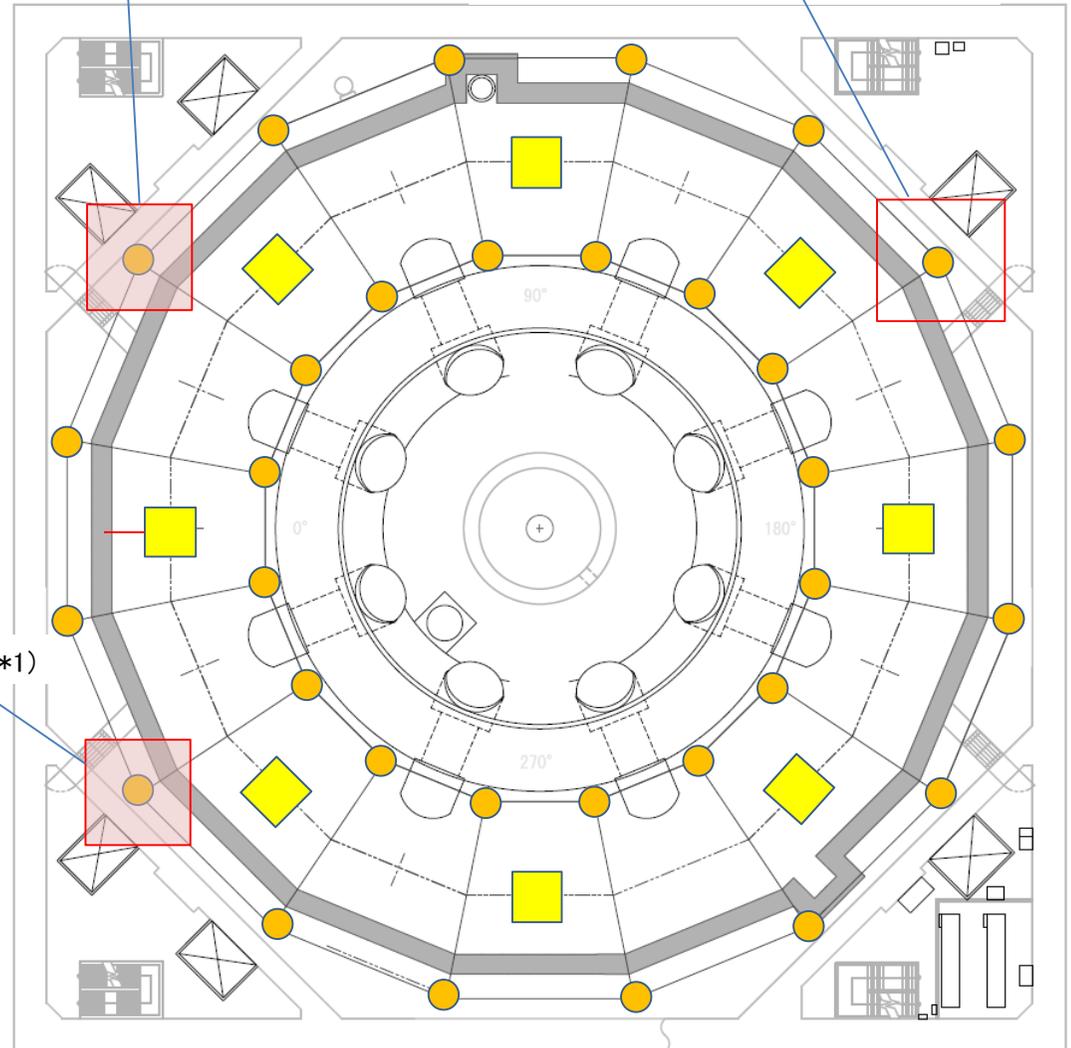
R/B1階の線量 4msV/h (*1)

R/B1階は高線量エリア(40msV/h (*1))
のため、穴あけ作業不可

R/B1階の線量 7.5msV/h (*1)

<注釈>

- …コラムサポート
- …耐震サポート
- …外側キャットウォーク
- …穴あけ可能エリア



(出典)*1: 建屋内の空間線量率について(2022年2月4日 東電殿発行)

地下階トラス室のS/Cイメージ図

2. 本事業の具体的な実施内容

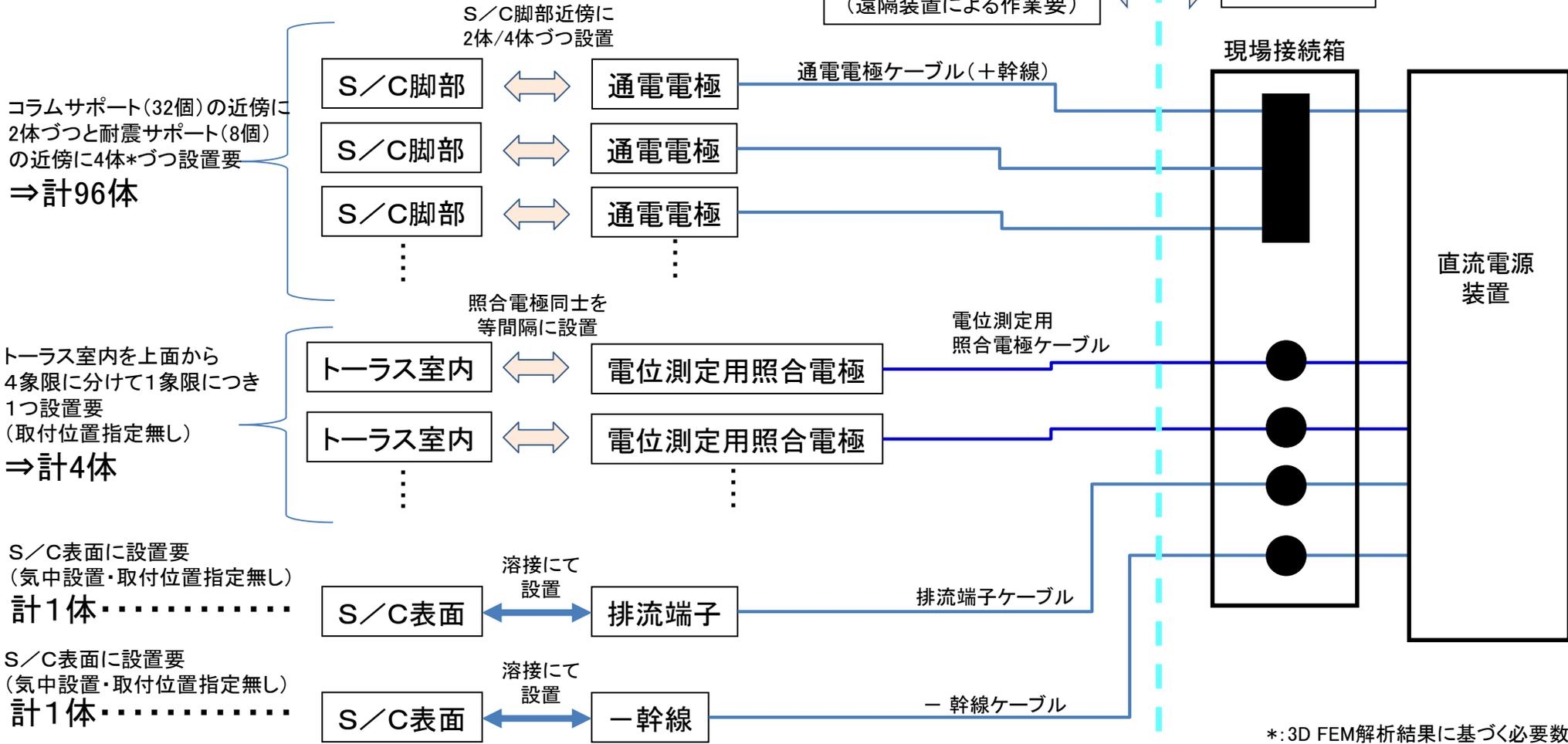
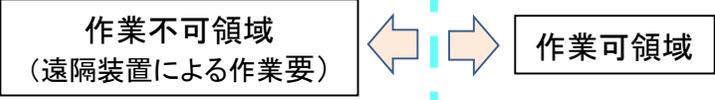
(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・電極及びケーブル設置方法の概念

(電極、ケーブル、直流電源装置、排流端子の機器構成)

電極含む端子・ケーブル共に計102本必要。



*: 3D FEM解析結果に基づく必要数

2. 本事業の具体的な実施内容

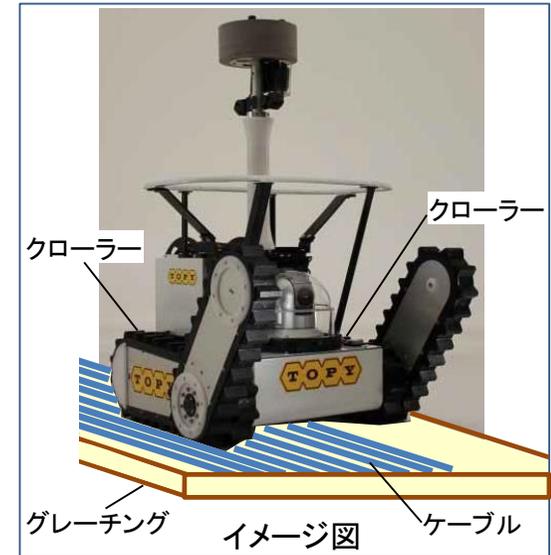
(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・電極及びケーブル設置方法の概念

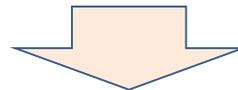
(キャットウォークまでのケーブルルートについて)

- ・前述のとおりのとおり端子・ケーブル共に計102本必要。
- ・電気防食メーカーが使用している一般的なケーブル径はφ5mm。
- ・遠隔装置が走行するキャットウォークの通路幅は90cm。
- ・キャットウォーク上を走行する遠隔装置の想定幅は約50cm。



・キャットウォークまでのアクセス性があると考えられる南東三角コーナー1か所からケーブルを引き回すと、ケーブルの占有幅は $102\text{本} \times 5\text{mm} = 51\text{cm}$ となり、キャットウォークの通路幅(90cm)の半分以上を占める。

・キャットウォーク上の半分のスペースにケーブルが敷設された場合、遠隔装置の足回りである左右のクローラーの設置面がそれぞれケーブルとグレーチングとに分かれることで(右上イメージ図参照)、クローラーの接触抵抗に大きな差が生じ、走行出来ない(ケーブル上をクローラーが滑ってしまい、真っすぐ走行出来ない)。



これを防ぐには、キャットウォークへのケーブルルートを1か所ではなく、複数設けることで、キャットウォーク上に敷設されるケーブル本数を減らす(分散する)必要がある。

2. 本事業の具体的な実施内容

・電極及びケーブル設置方法の概念

(キャットウォークまでのケーブルルートについて)

キャットウォークへのケーブルルートを南東三角コーナー1か所から何か所分ける必要があるか概略計算した。

(計算条件)

- ・ケーブル径はφ5mm(想定値)とした。
- ・ケーブルはキャットウォーク上に平積みとし、ケーブルの上にケーブルを敷設する(段積み)ケースは無いものとした。※ケーブルを敷設しながら段積みすることは非常に難しいため。
- ・キャットウォークの通路幅は90cm、遠隔装置の想定幅は50cmとした。
- ・遠隔装置の走行時の余裕は左右に3cmずつ設ける。

(計算結果)

遠隔装置がキャットウォークの真ん中を通過する場合の空きスペースは、
 $(90\text{cm} - 50\text{cm}) \div 2 - 3\text{cm} = 17\text{cm}$

ケーブルを敷設する際の占有幅を17cmに抑えるためには、
 $102\text{本} \times 5\text{mm} = 51\text{cm} \div 17\text{cm} = 3\text{か所}$

⇒キャットウォークへのケーブルルートを南東三角コーナー1か所から3か所に分ける必要がある。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・電極及びケーブル設置方法の概念

(キャットウォークまでのケーブルルートについて)

キャットウォークへのケーブルルートを南東三角コーナーに加え、2か所追加するルートとして、下記が考えられる。

No.	追加ルート	干渉物	干渉物に対する対応案
1	北西三角コーナー	RHR遮蔽箱	作業員により、遠隔装置を持ち上げ、RHR遮蔽箱の上を通過させる。 ※1F-2ベント管調査にて実績のある方法
2	北東三角コーナー	扉、配管、構造材	当該の干渉物を切断、撤去
3	南西三角コーナー	1.RHR遮蔽箱 2.瓦礫(震災時に発生)	1.作業員により、遠隔装置を持ち上げ、RHR遮蔽箱の上を通過させる(No.1と同じ)。 2.当該の干渉物を切断、撤去
4	1階面から穴あけしてアクセス	コンクリート、配筋の穴あけ要	・当該の干渉物を切断、撤去 ・安全対策として1階に落下防止柵等を設置

⇒既存設備の切断、撤去作業等が不要であることから、追加ルートは北西三角コーナー、南西三角コーナー(No.1、3)が最適と考えられる。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 電極及びケーブル設置方法の概念

(キャットウォークから脚部までのケーブルルートについて)

前述の「トラス室内へのアクセス性に関する調査検討結果」において、遠隔装置2で脚部までアクセス出来るルートは2か所のため、ここをケーブルルートとした場合、キャットウォーク上にケーブルが集中し、遠隔装置が走行出来ないリスクがある(*1)。

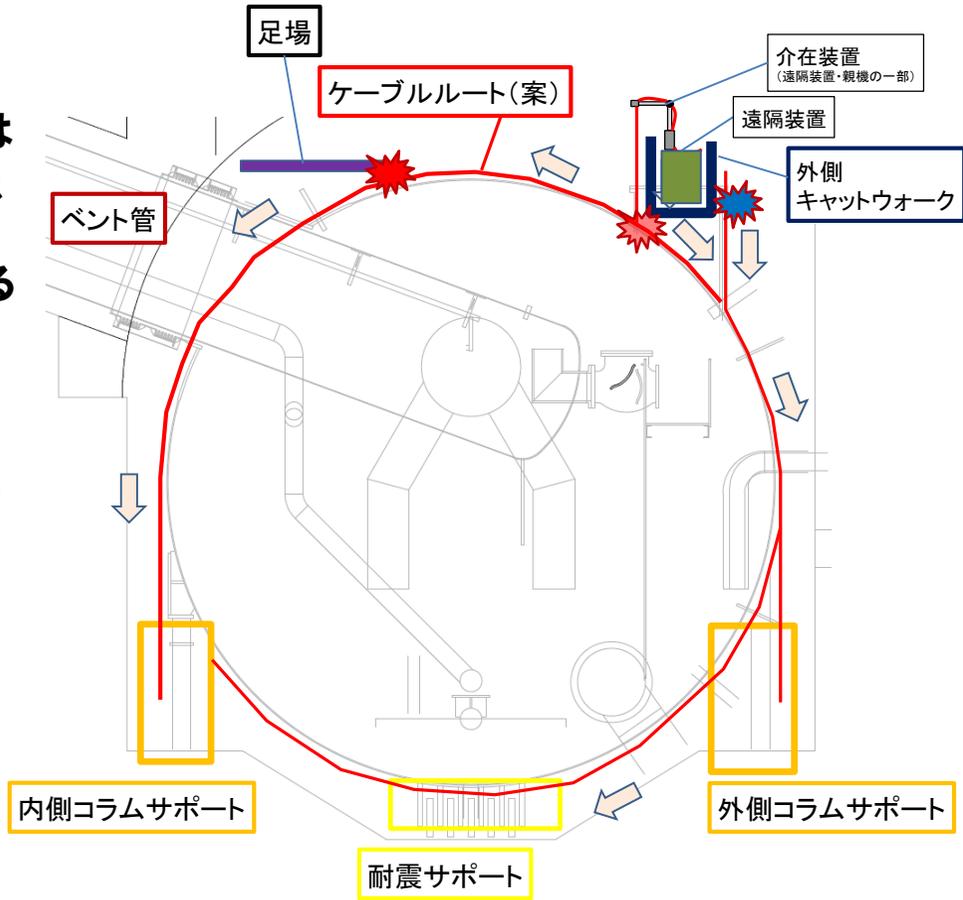
一方、狭隘部・通過不可部①のうち、ベント管側は遠隔装置2の干渉物となる既設構造物が「足場」以外は少ないことを確認した。

干渉物である「足場」の下を遠隔装置2が通過することが出来れば、S/C脚部へアクセス出来る可能性がある。

以上のことから、電極及びケーブル設置方法の概念では、遠隔調査装置2の全高を低く改造し、足場の下を通過出来ることを条件に検討する。

<注釈>

-  ...狭隘部・通過不可部①
-  ...狭隘部・通過不可部②
2か所吊り下げ可能なルートあり



*1: 前述の「キャットウォークまでのケーブルルートについて」参照

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・電極及びケーブル設置方法の概念

(検討条件)

下記を条件に検討した。

- ・S/C脚部に耐震サポートとコラムサポートがあり電極の設置必要数が多いこと、またトラス室内の線量が比較的高い3号機を代表号機として検討した。
- ・S/C脚部の防食効果が期待できる電極の設置位置として、2次元FEM解析結果から、すべての脚部に電極を2か所ずつ設置が必要との見解を得ている。そのため、概念検討ではすべての脚部に電極を2か所設置するものとして検討した(*1)。ただし、耐震サポートについては3次元FEM解析結果から、電極を4か所ずつ設置するものとして検討した。
- ・前述の電極やケーブルの設置条件ルートのケーススタディより、ケーブルルートはR/B1階から北西、南西及び南東三角コーナーそれぞれを經由して、設置するものとして検討した。
- ・前述の「キャットウォークから脚部までのケーブルルートについて」より、遠隔調査装置2の全高を低く設計し(*2)、足場の下を通過出来ることを条件に検討する(*1)。
- ・トラス室内は高線量環境であり、人が近接するのは困難な状況のため、電極及びケーブル設置方法の概念検討では「遠隔」による設置方法を検討した。
- ・遠隔装置の外形サイズは、震災後、トラス室内に遠隔で立ち入った実績のある装置サイズ(*2)を仮定として用いた。
- ・遠隔装置2はS/C脚部近辺(直上)のキャットウォークから遠隔装置を用いて吊下げられた後、S/C表面を沿いながら脚部近辺に近づき、電極を設置するものと仮定した。

*1:電極・ケーブルの設置イメージは次葉参照

*2:装置外観写真・サイズは次々葉参照

2. 本事業の具体的な実施内容

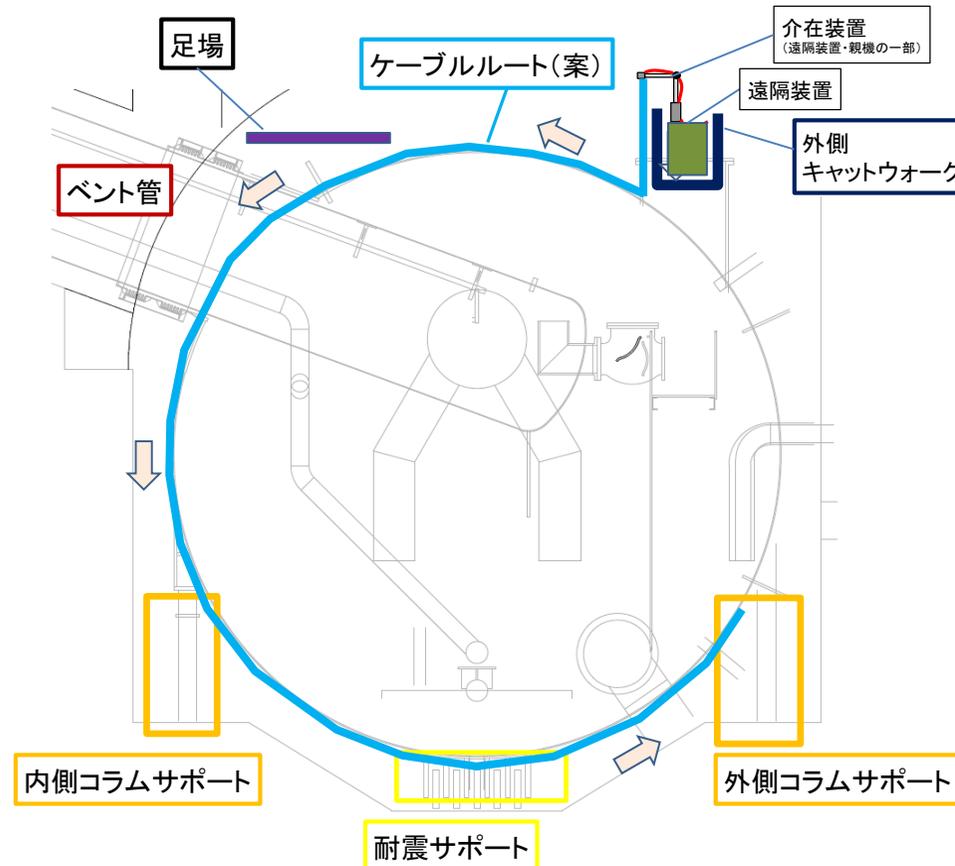
(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 実機環境条件の調査・検討

・ 電極及びケーブル設置方法の概念

(検討条件 続き)

電極・ケーブル設置イメージ(断面図)



2. 本事業の具体的な実施内容

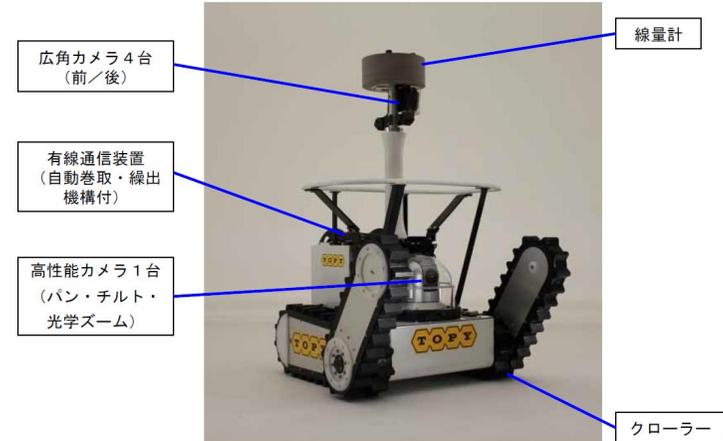
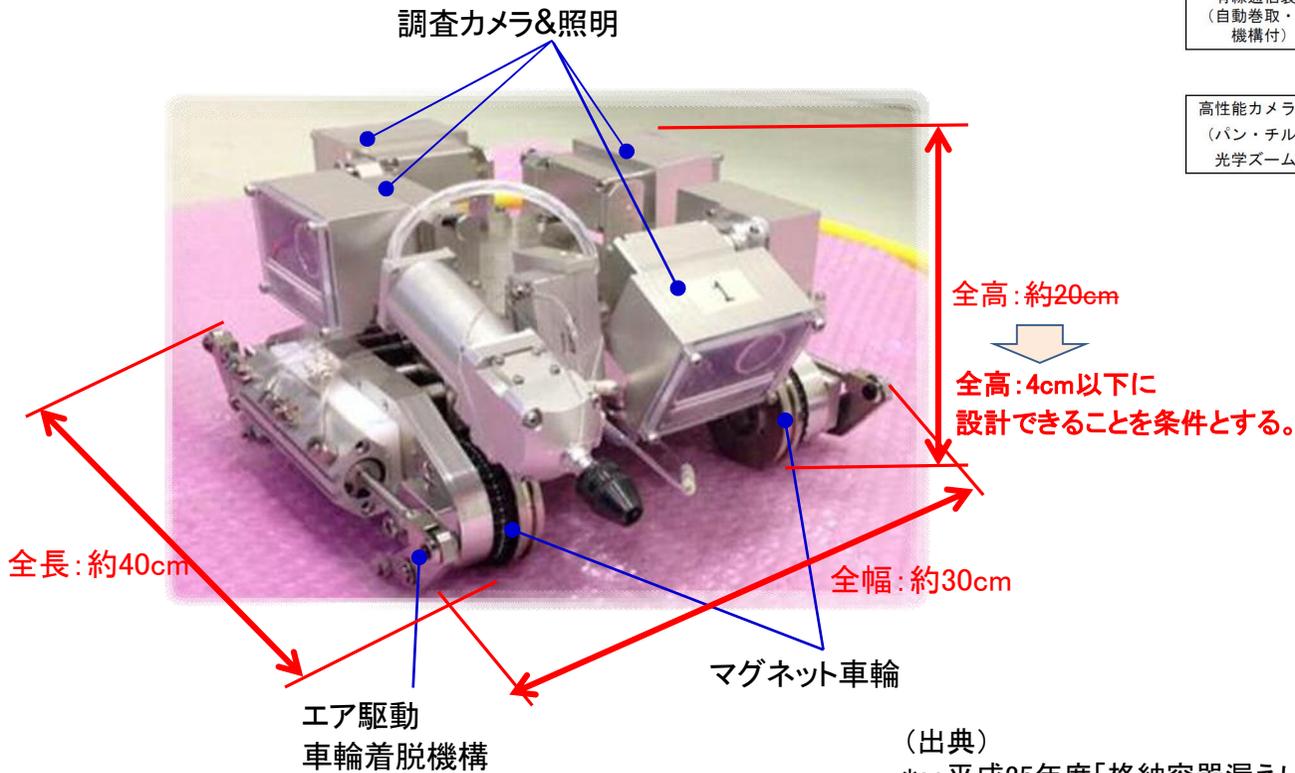
(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆実機環境条件の調査・検討

・電極及びケーブル設置方法の概念

(検討条件 続き)

・遠隔装置2 外観写真・サイズ(*a)



【仕様】

全長	: 505mm (フリップ-伸長時 755mm)
全幅	: 510mm
全高	: 830mm (クローラー部 約165mm)
総重量	: 45kg
昇降段差	: 蹴上235mm (最大)
昇降角	: 45° (最大)
稼働時間	: 5時間 (バッテリー)
走行速度	: 約2 km/h (最高)
有線	: 400m光ファイバー

その他機能
・転倒防止機能付き

(補足)本装置の用途について
・遠隔による目視調査、線量調査に使用

(補足)本装置の用途について
マグネットを用いてS/C表面に張り付き、S/C表面の目視調査に使用。

(出典)

*a: 平成25年度「格納容器漏えい箇所特定技術・補修技術開発」(調査の部)より

*b: 東電殿HP 主に地下階で活用実績のあるロボット

https://www.tepco.co.jp/decommission/principles/technology/robot/robot_under/index-j.html

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・電極及びケーブル設置方法の概念

(設置手順)

電極及びケーブルの設置方法について検討・確認した結果、設置手順は以下とした。

手順①-a: 電極をS/C脚部近傍に設置する。

手順①-b: ケーブルを直流電源装置まで敷設する。

※手順①-a、手順①-bを繰り返す。

(電極1つにつきケーブル1本のため、100回繰り返す)

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

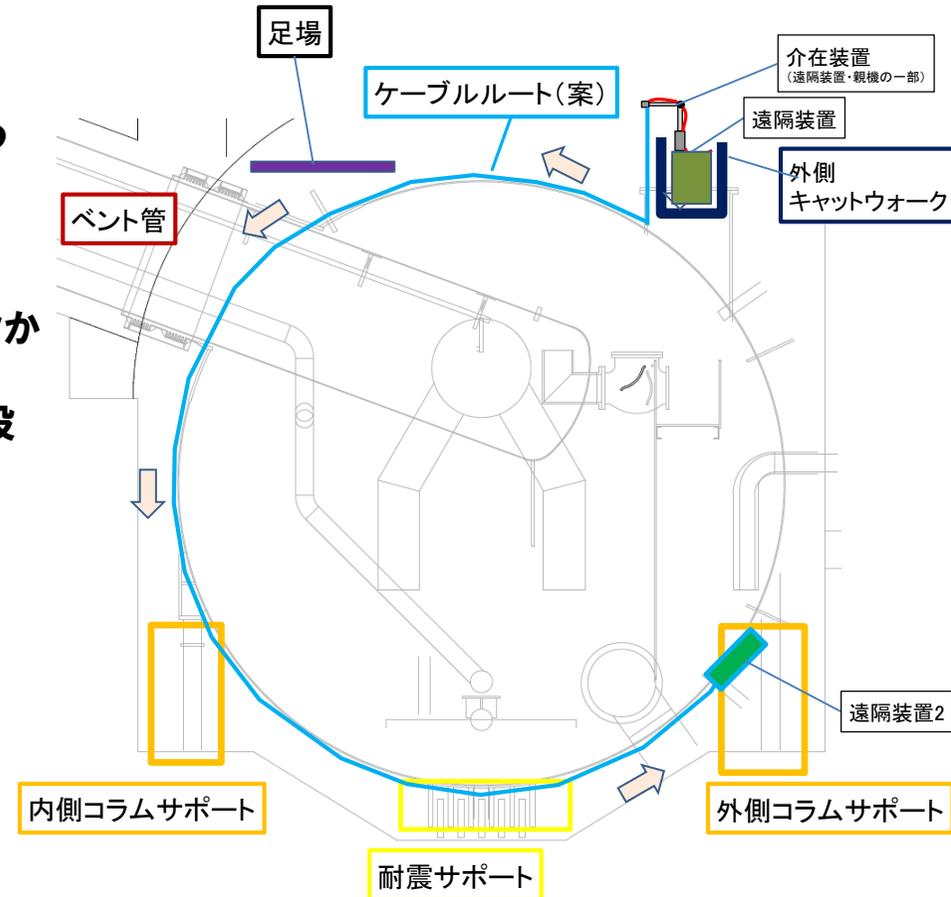
◆ 設置方法の概念検討

・ 電極及びケーブル設置方法の概念

(設置方法)

手順①-a: 電極をS/C脚部近傍に設置する

- i. 遠隔装置2に電極・ケーブルを取り付ける。
- ii. 遠隔装置をキャットウォークまで移動させる。
- iii. 介在装置を用い遠隔装置2をキャットウォークから吊下げる。
- iv. 遠隔装置2を用い電極をS/C脚部近傍に設置する。
- v. 電極を遠隔装置2から外す。
- vi. 介在装置を用い遠隔装置2を回収する。



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 電極及びケーブル設置方法の概念

(設置方法) ※第2案(足場の上を走行する案)

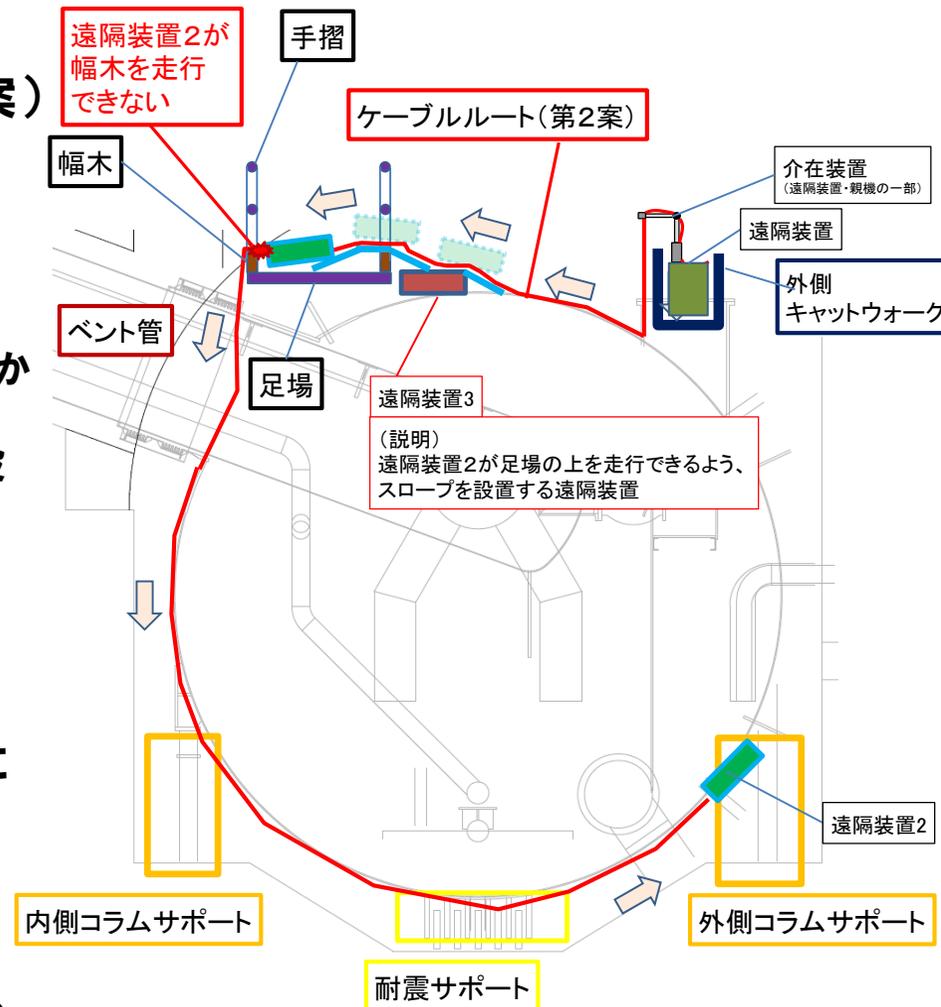
手順①-a: 電極をS/C脚部近傍に設置する

- i. 遠隔装置2に電極・ケーブルを取り付ける。
- ii. 遠隔装置をキャットウォークまで移動させる。
- iii. 介在装置を用い遠隔装置2をキャットウォークから吊下げる。
- iv. 遠隔装置2を用い電極をS/C脚部近傍に設置する。
- v. 電極を遠隔装置2から外す。
- vi. 介在装置を用い遠隔装置2を回収する。

ただし、足場の両側に幅木(*1)があり、仮に遠隔装置3を用いても幅木の上を遠隔装置2が走行するのは困難。仮に片方の幅木の上を走行できたとしても、もう一方の幅木を走行できないことから、第2案は実施不可。

またケーブルが幅木に点当たりしながら擦れてしまうため、ケーブル断線等のリスクがある。

*1: 作業員が足場から滑り落ちないようにするために設けた板状の安全柵の一部



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・電極及びケーブル設置方法の概念

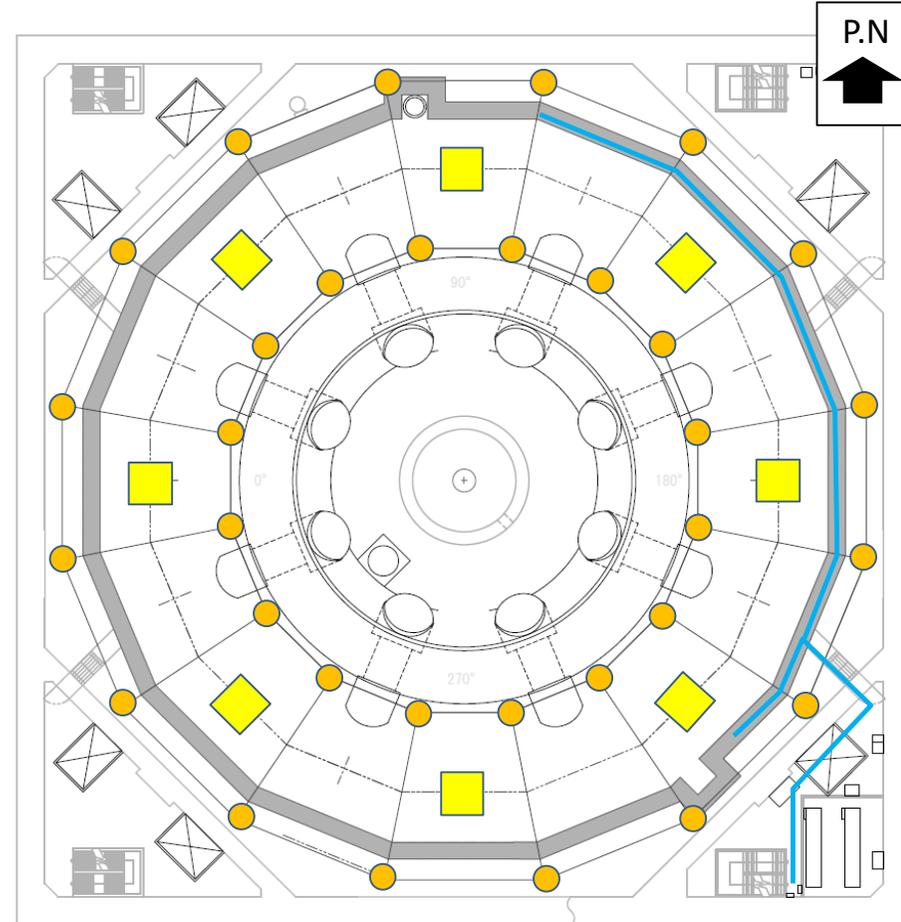
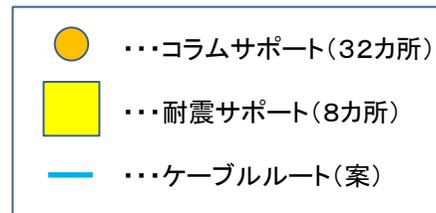
(設置方法)

手順①-b: ケーブルを直流電源装置まで敷設。

- i. 手順①-a終了後、遠隔装置から電極用ケーブルを繰り出しながら三角コーナーまで移動させる。
- ii. 三角コーナーから直流電源装置まで人力でケーブルを敷設する。

(補足)

右図は南東三角コーナーからアクセスした場合のルート図。



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・電極及びケーブル設置方法の概念

(まとめ)

電極及びケーブルの設置方法について検討した結果、設置手順は以下とした。

手順①-a: 電極をS/C脚部近傍に設置する。

手順①-b: ケーブルを直流電源装置まで敷設する。

設置にあたっての主な課題は以下が考えられる。

- ・ 電極、ケーブルの開発
- ・ 遠隔装置／介在装置の開発
- ・ 遠隔装置2の開発
- ・ 遠隔装置2と電極との着脱機構の開発

なお、外側キャットウォーク自体、外側キャットウォーク外側干渉物、足場の撤去によるアクセス案の課題は以下が考えられる。

- ・ 既設構造物の特定、撤去可否、撤去方法の検討、撤去装置の開発

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 直流電源装置の設置方法の概念

(検討条件)

下記を条件に検討した。

- ・ S/C脚部に耐震サポートとコラムサポートがあり電極の設置必要数が多いこと、またトーラス室内の線量が比較的高い3号機を代表号機として検討した。
- ・ 前述の「トーラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討」より、アクセス性があるR/B地下階 南東三角コーナーよりメインケーブルが敷設されるものとして検討した(直流電源装置の設置場所は南東三角コーナーに近い場所を検討した)。
- ・ 直流電源を取扱うため、作業員の感電等のリスクを考慮し、直流電源装置の設置場所は屋内に設置されるものとして検討した。
- ・ 直流電源装置は作業員による操作や電極の出力確認など、定期的に作業員がアクセスすることが想定されるため、R/BもしくはT/B内の低線量エリアに設置するものとして検討した。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

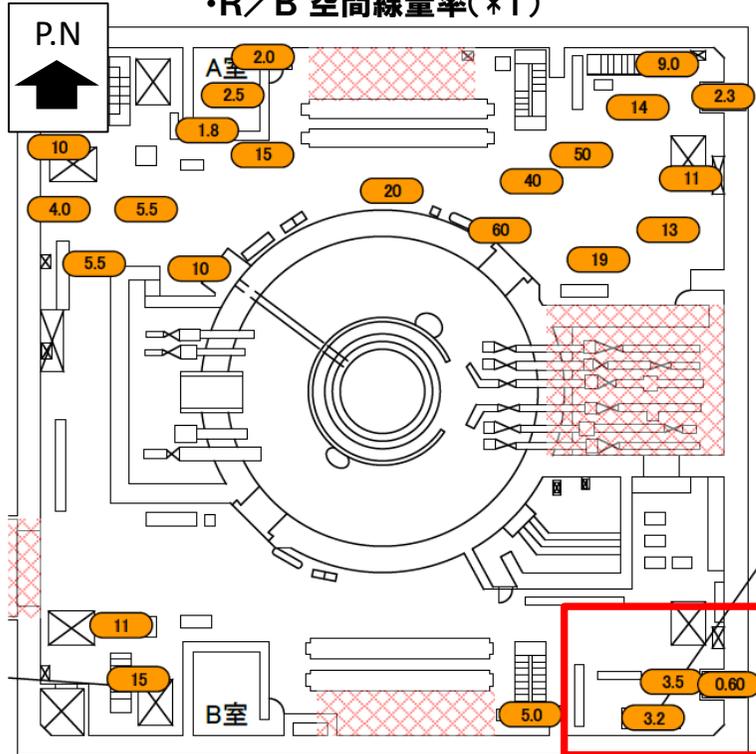
◆ 設置方法の概念検討

・ 直流電源装置の設置方法の概念

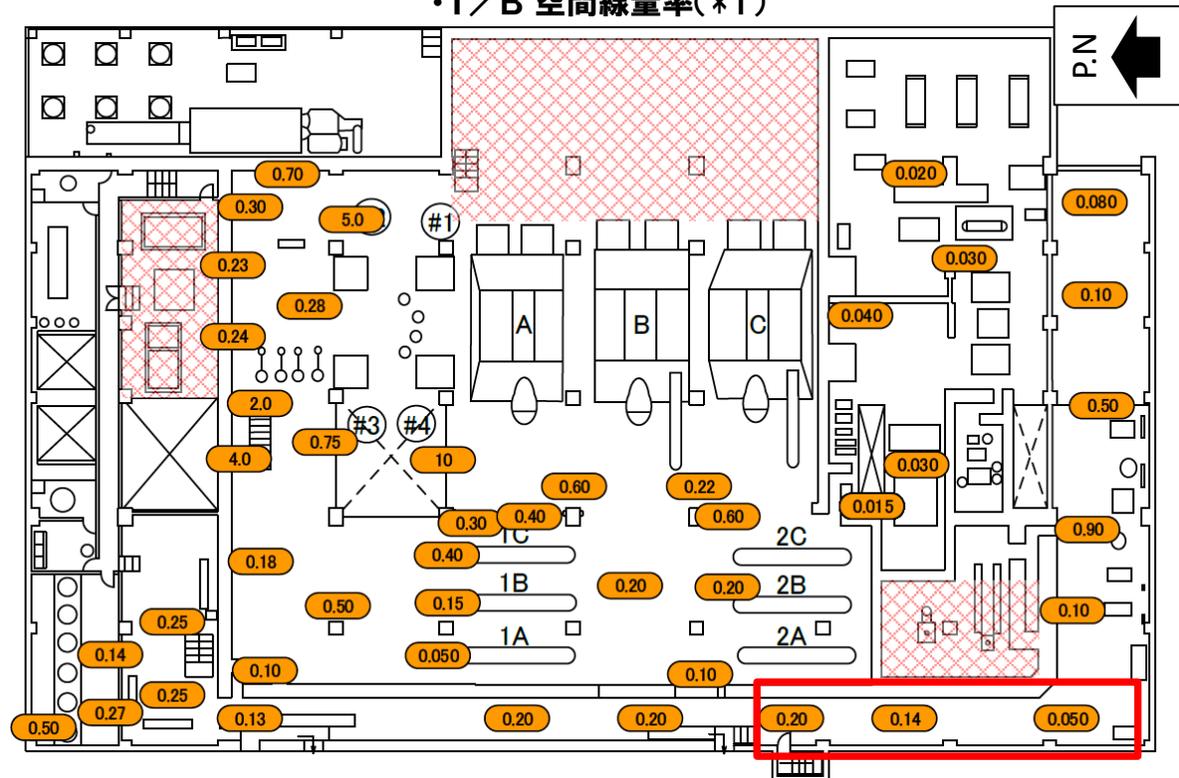
(設置場所候補エリア)

前述の検討条件より、R/B地下階 南東三角コーナーに近く、かつR/BもしくはT/B内の低線量エリアとして、下記の赤枠エリアが考えられる。

・R/B 空間線量率(*1)



・T/B 空間線量率(*1)



(出典)*1: 建屋内の空間線量率について(2020年4月3日 東電殿発行)

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 直流電源装置の設置方法の概念

(設置手順)

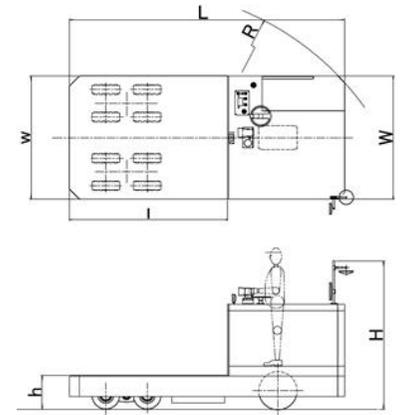
手順②-a: 直流電源装置を揚重機に載せて、当該箇所まで搬送、据え付ける。なお、T/B大物搬入口から設置場所までは低線量のため、設置作業は人力で行う。

(設置方法)

- i. 直流電源装置を揚重機の荷台に載せる。
- ii. 揚重機を設置場所まで移動させる。
- iii. 単管パイプ等で檣を組み、直流電源装置を持ち上げて、荷降ろす。
- iv. 直流電源装置を据え付ける。



直流電源装置 搬送時のイメージ



外形図

型 式	最大積載荷重 (kg)	台車外形寸法			荷台寸法 (mm)			最小旋回半径 (mm)(R)	走行速度 (m/min)
		長さ(L)	巾(W)	高さ(H)	長さ(l)	巾(w)	高さ(h)		
SLA-010	10,000	4,000	1,800	2,200	2,300	1,800	500	4,500	50
SLA-020	20,000	4,400	2,000	2,300	2,400	2,000	500	4,800	40
SLA-030	30,000	4,600	2,200	2,500	2,500	2,200	600	5,000	30

揚重機一例(出典:佐野車輛製作所 SLA搭乗バッテリー台車)

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 直流電源装置の設置方法の概念

(まとめ)

直流電源装置の設置方法について検討した結果、設置手順は以下とした。

手順②-a: 直流電源装置を揚重機に載せて、当該箇所まで搬送、据え付ける。なお、T/B大物搬入口から設置場所までは低線量のため、設置作業は人力で行う。

なお、直流電源装置の設置にあたっては低線量エリアでの作業となるため、課題は無いと考えられる。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 排流端子の設置方法の概念

(検討条件)

下記を条件に検討した。

- ・ S/C脚部に耐震サポートとコラムサポートがあり電極の設置必要数が多いこと、またトラス室内の線量が比較的高い3号機を代表号機として検討した。
- ・ 排流端子はS/Cに1箇所設置するものとして検討した。
- ・ 直流電源装置とS/Cが1か所(設置場所の指定無し)導通していれば排流端子の機能を満足するため、端子自体の形状に指定は無いものとして検討した。
- ・ 前述の電極及びケーブルルートのケーススタディより、排流端子のケーブルルートはR/B1階から三角コーナーを経由して、キャットウォークから排流端子を吊下げて設置するものとして検討した。
- ・ 排流端子は南東三角コーナーに近く、かつキャットウォークに近いS/C上部の表面に設置するものとして検討した(*1)。
- ・ トラス室内は高線量環境であり、人が近接するのは困難な状況のため、電極及びケーブル設置方法の概念検討では「遠隔」による設置方法を検討した。
- ・ 遠隔装置の外形サイズは、震災後、トラス室内に遠隔で立ち入った実績のある装置サイズ(*2)を仮定として用いた。

*1:排流端子の設置場所は次葉参照。

*2:装置外観写真・サイズは次葉参照。

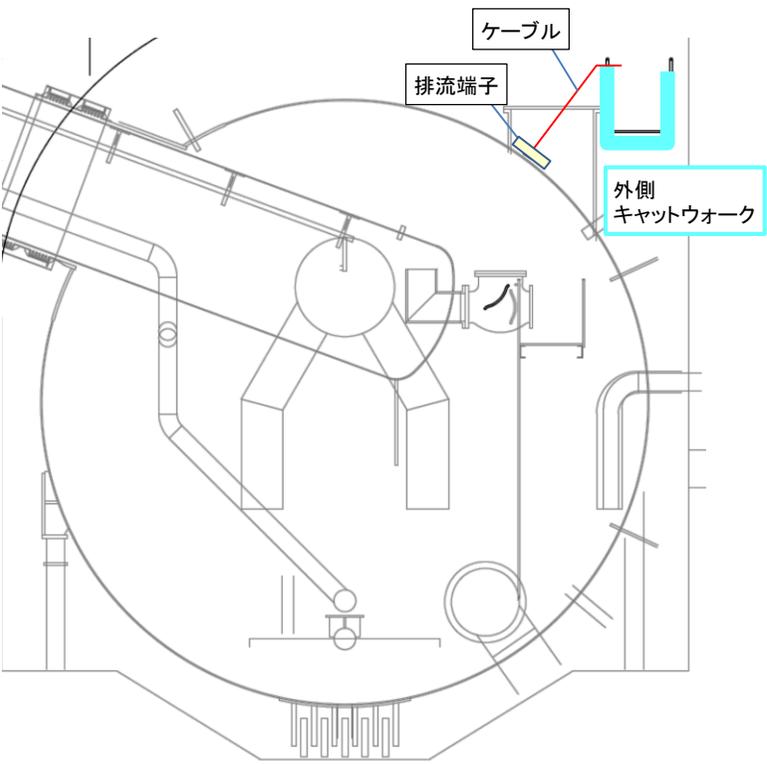
2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

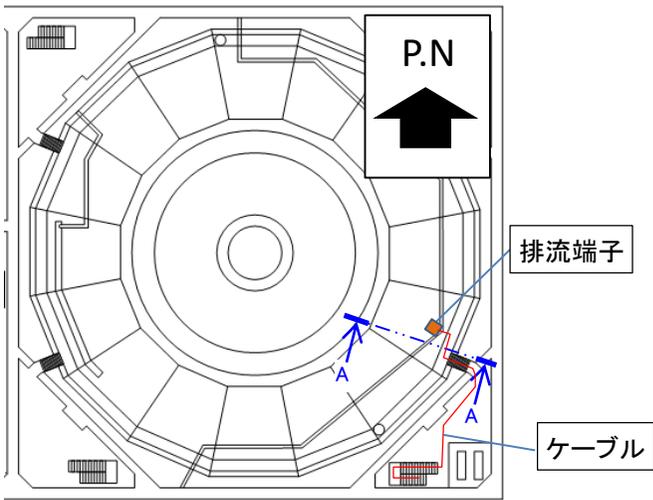
◆ 設置方法の概念検討

・ 排流端子の設置方法の概念 (検討条件 続き)

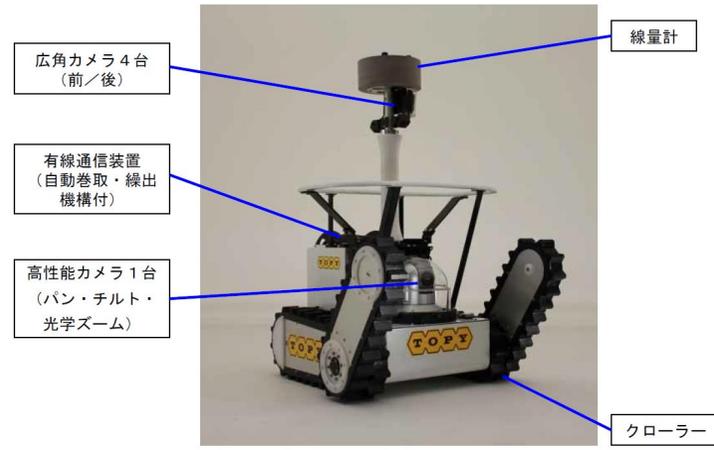
*1: 排流端子設置イメージ



A-A矢視



*2: 装置外観写真・サイズ(*a)



【仕様】	
全長	: 505mm (フリッパー伸長時 755mm)
全幅	: 510mm
全高	: 830mm (クローラー部 約165mm)
総重量	: 45kg
昇降段差	: 蹴上235mm (最大)
昇降角	: 45° (最大)
稼働時間	: 5時間 (バッテリー)
走行速度	: 約2km/h (最高)
有線	: 400m光ファイバー
その他機能 ・ 転倒防止機能付き	

(出典)

*a: 東電殿HP 主に地下階で活用実績のあるロボット

https://www.tepco.co.jp/decommission/principles/technology/robot/robot_under/index-j.html

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 排流端子の設置方法の概念

(排流端子の設置方法)

排流端子の設置方法として以下のパターンが考えられる。
設置方法案と評価を示す。

No.	設置方法案	評価
①	接着剤、両面テープ等による設置	排流端子の設置作業は容易で短期的に仮止めに活用可能(溶接時の熱により溶剤が溶け出すなどのリスク有)。ただし、長期的な観点では、トーラス室内は高線量環境下のため、放射性脆化により接着力が落ちて排流端子が落下する可能性がある。
②	永久磁石による設置	排流端子の設置作業は容易で短期的に仮止めに活用可能。ただし、長期的な観点では、トーラス室内は高線量環境下のため、放射性脆化により磁力が落ちて排流端子が落下する可能性がある。
③	電磁石による設置 (直流電源装置から電磁石へ給電を想定)	有線のため、排流端子の設置作業は②より難しくなる。長期的な観点では停電が発生した際、磁力が無くなり、排流端子が落下する可能性がある。
④	クリップ等による設置	S/C表面は滑らかでクリップ等を挟める箇所は無いため、取付不可。
⑤	溶接による設置	排流端子の設置作業が困難だが、放射性や停電の影響を受けにくく、排流端子の設置後に落下する可能性が低い。

上記から、排流端子の設置方法の概念はNo.⑤溶接による設置について検討を行うこととした。
また、溶接時の仮止めとしてNo.②永久磁石を活用する。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 排流端子の設置方法の概念

(設置手順)

排流端子の設置方法や設置後のS/C表面の補修について検討・確認した結果、設置手順は以下とした。

手順③-a: S/C表面の排流端子設置箇所の塗装を除去する。

手順③-b: 永久磁石を用い排流端子をS/Cと仮止めする。

手順③-c: ケーブルを直流電源装置まで敷設する。

手順③-d: 排流端子をS/Cに溶接する。

手順③-e: S/C表面と排流端子に補修塗装する。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

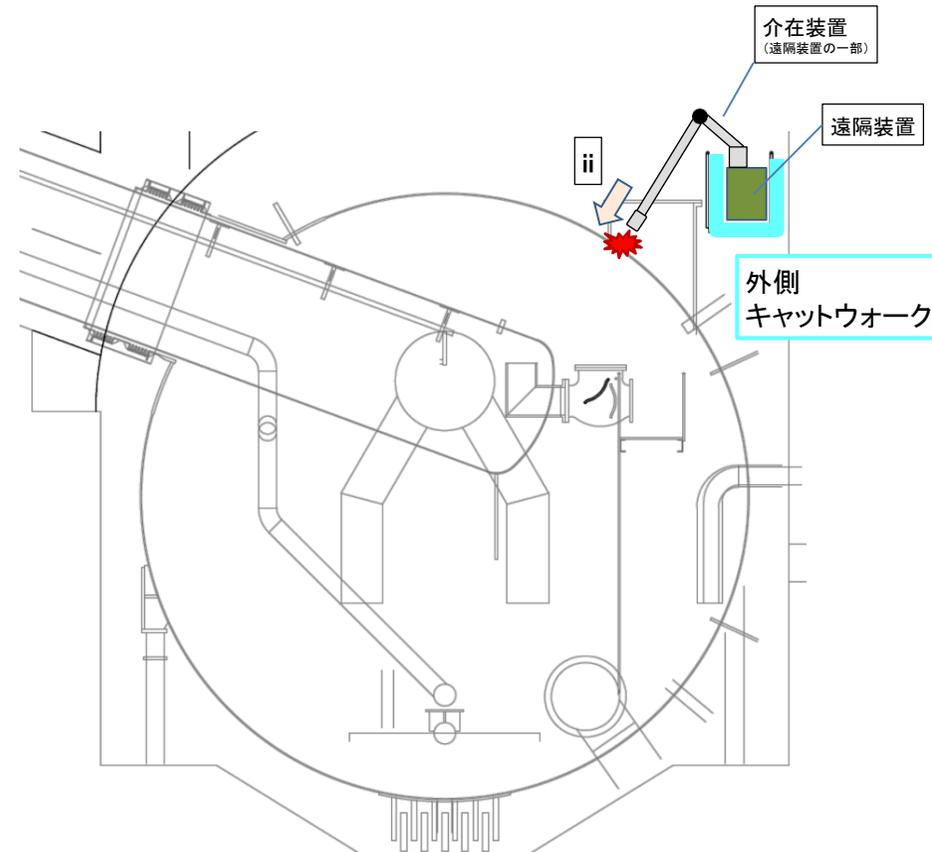
・ 排流端子の設置方法の概念

(設置方法)

手順③-a: S/C表面の排流端子設置箇所の塗装を除去する。

・ 設置方法

- i. 遠隔装置をキャットウォークまで移動させる。
- ii. ブラスト機能を搭載した介在装置を用い、S/C表面の排流端子設置箇所の塗装を除去する。



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 排流端子の設置方法の概念

(設置方法)

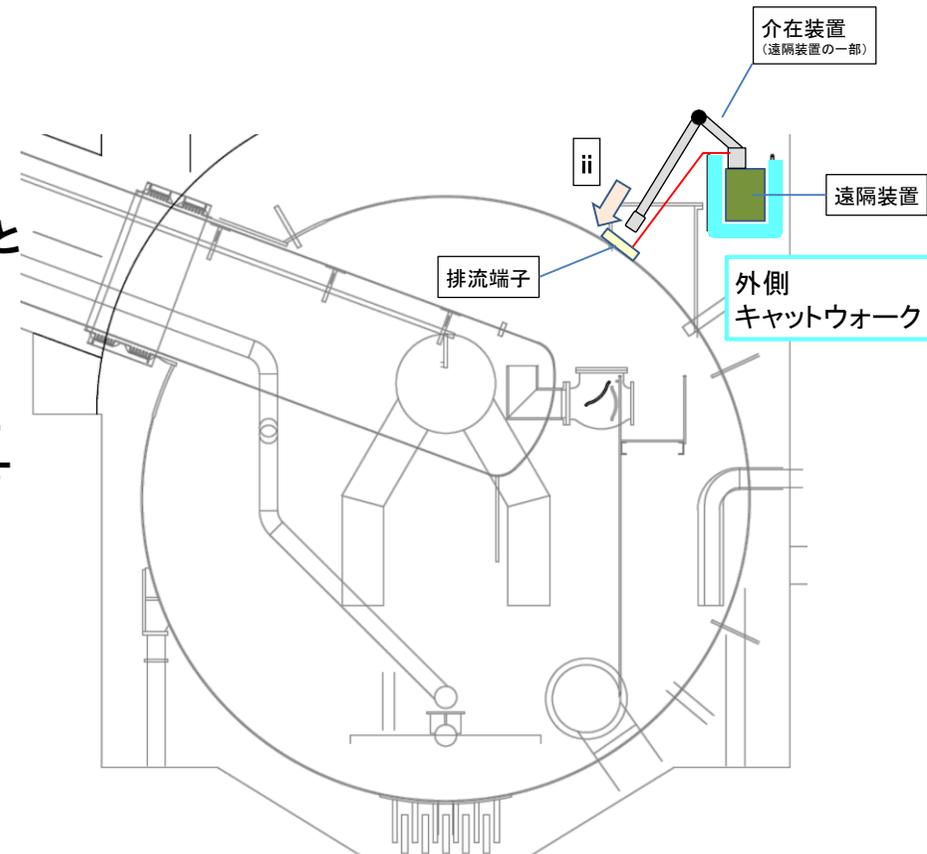
手順③-b: 永久磁石を用い排流端子をS/Cと仮止めする。

・ 設置方法

- i. 遠隔装置をキャットウォークまで移動させる。
- ii. 介在装置を用い排流端子を永久磁石でS/Cと仮止めする。

(補足)

遠隔での取り付け作業を簡素化するため、排流端子は永久磁石を備えたブラケットと一体のものを製作するものとして上記設置方法を検討した。



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

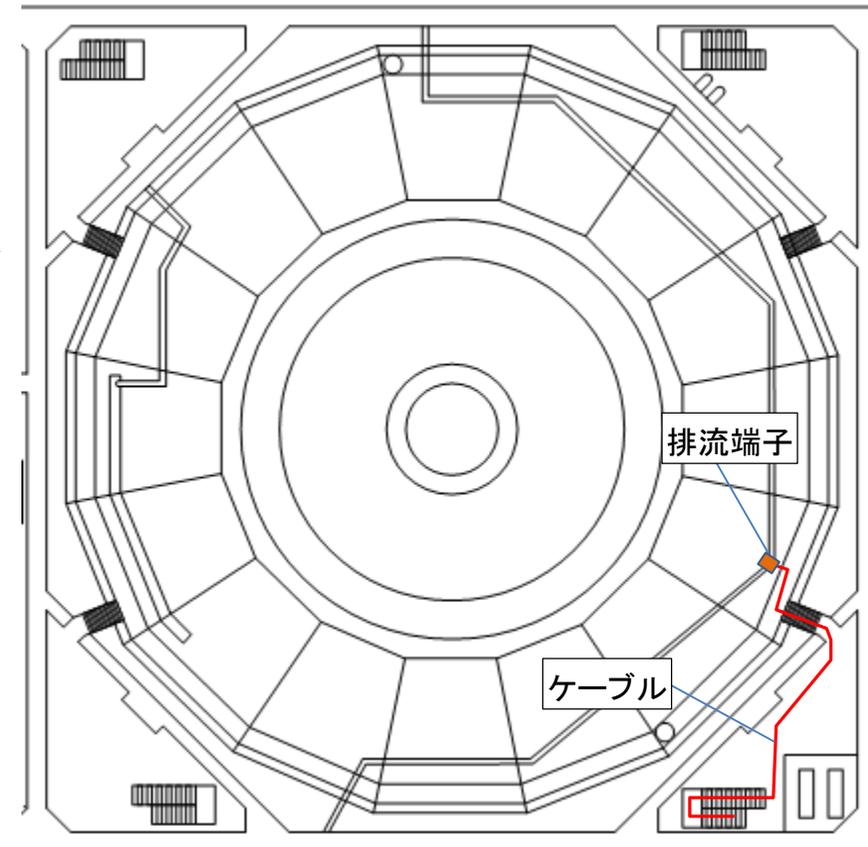
・ 排流端子の設置方法の概念

(設置方法)

手順③-c: ケーブルを直流電源装置まで敷設する。

・ 設置方法

- i. 手順③-b終了後、遠隔装置から排流端子用ケーブルを繰り出しながら南東三角コーナーまで移動させる。
- ii. 南東三角コーナーから直流電源装置まで人力でケーブルを敷設する。
- iii. 敷設後、S/Cとの導通を確認する。



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

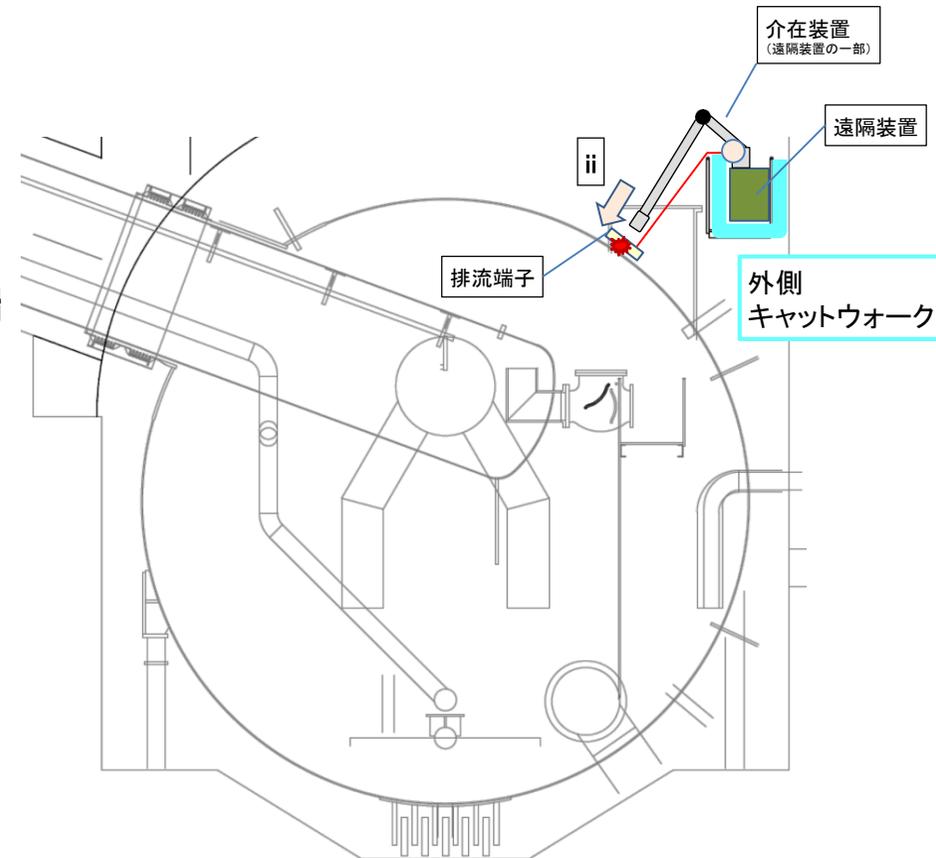
・ 排流端子の設置方法の概念

(設置方法)

手順③-d: 排流端子をS/Cに溶接する。

・ 設置方法

- i. 遠隔装置をキャットウォークまで移動させる。
- ii. 溶接機能を搭載した介在装置を用い排流端子をS/Cに溶接する。



(写真出典)

*1: 福島第一原子力発電所 3号機原子炉建屋地下階トラス室内調査の結果について(2012年7月12日 東電殿発行)

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

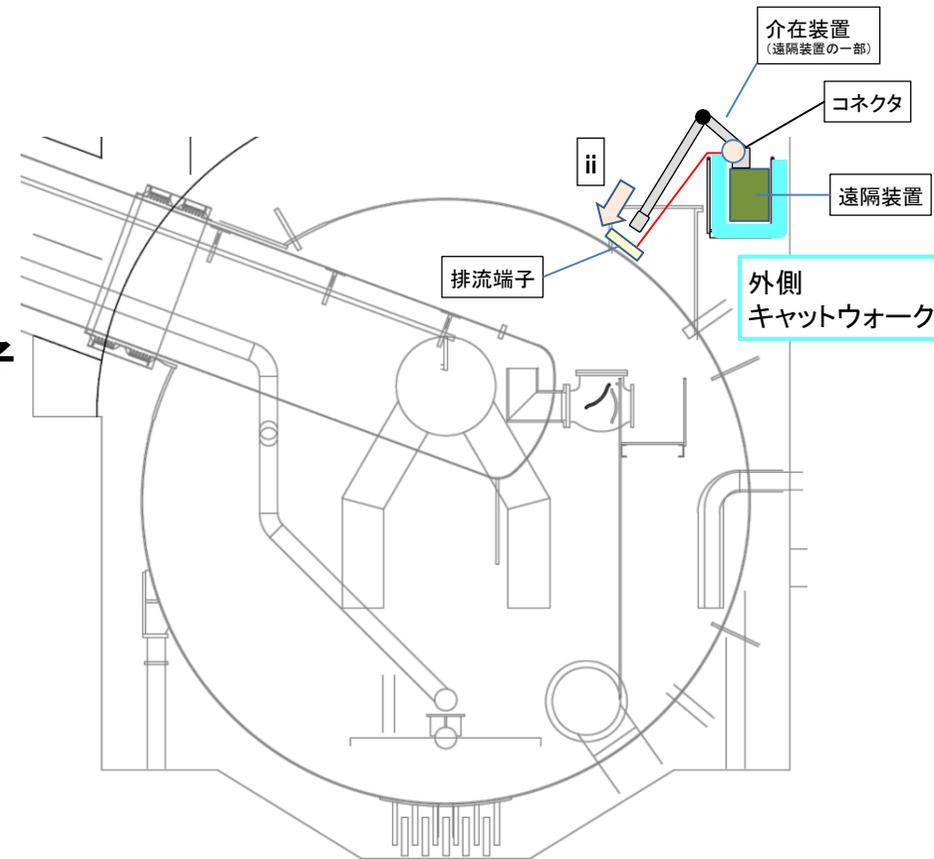
・ 排流端子の設置方法の概念

(設置方法)

手順③-e: S/C表面と排流端子に補修塗装する。

・ 設置方法

- i. 遠隔装置をキャットウォークまで移動させる。
- ii. 塗布機能を搭載した介在装置を用い排流端子及びS/Cに補修塗装する。



2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 設置方法の概念検討

・ 排流端子の設置方法の概念

(まとめ)

排流端子の設置方法や設置後のS/C表面の補修について検討した結果、設置手順は以下とした。

手順③-a: S/C表面の排流端子設置箇所の塗装を除去する。

手順③-b: 永久磁石を用い排流端子をS/Cと仮止めする。

手順③-c: ケーブルを直流電源装置まで敷設する。

手順③-d: 排流端子をS/Cに溶接する。

手順③-e: S/C表面と排流端子に補修塗装する。

設置にあたっての主な課題は以下が考えられる。

- ・ 遠隔装置／介在装置の開発
- ・ 遠隔での塗装除去装置の開発、遠隔装置に搭載可能な小型化
- ・ 排流端子の開発(永久磁石との一体構造)
- ・ 遠隔での溶接装置の開発、遠隔装置に搭載可能な小型化
- ・ 遠隔での塗装装置の開発、遠隔装置に搭載可能な小型化

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 実現可能性の評価

(評価内容)

- ・S/C脚部に耐震サポートとコラムサポートがあり電極の設置必要数が多いこと、またトラス室内の線量が比較的高い3号機を代表号機として検討した。
- ・設置方法の概念検討のうち、「電極及びケーブル設置方法の概念」及び「排流端子の設置方法の概念」で検討した設置方法ごとに課題と対応策を検討した(*1)。
- ・実現可能性の評価は「大、中、小」等による評価として、対応策に関する解決見込みを以下の基準で評価した。

×: 物理的に成り立たない

▲: 新規開発要。さらに、類似装置を提供するメーカー無し(*2)

△: 新規開発要だが、既存技術の応用等で実現の可能性あり(*2)

○: 既存技術の活用等で実現の可能性あり

*1: 設置方法の概念検討のうち、「直流電源装置の設置方法の概念」については低線量エリアで人力による作業が可能であり課題は無いことから、実現可能性はあるものとして本評価から除外した。

*2: 新規開発は一から開発を行うのではなく、当該技術と類似した技術を保有するメーカーで開発を行うのが一般的のため、本評価ではメーカーの有無≒実現可能性として評価とした。
なお、既存技術のメーカー調査は、IRID開発品および市販品を対象とした。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 実現可能性の評価

・電極及びケーブル設置にあたっての課題・対応案の成立性 (課題、対応策及び評価)

No. (*1)	設置 手順	課題・対応策	評価	補足
①-a	電極をS/C脚部近傍に設置する。	○電極の開発 ・電極の小型化(直径2cm以下、全長20cm以下) ・耐放射線性	△ ○	電極の材料は耐放射線性がある材料を用いているため問題無し。
		○電極用ケーブルの開発 ・細く柔らかいケーブル(ケーブル外径5mm以下、最小曲げR30mm以下)(*) ・防水性(**) ・耐放射線性	△ ○ ○	既存のケーブルは防水性があるため、問題無し。 ケーブルの材料は耐放射線性がある材料を用いているため問題無し。
		○電極用ケーブルリールの開発 ・遠隔装置に搭載可能な小型化 ・防滴性(***)	△ △	
		○遠隔装置2の開発 ・装置の小型化(全高:10cm以下) ・遠隔装置に搭載可能な小型化 ・遠隔装置との着脱装置の開発 ・電極との着脱装置の開発 ・耐放射線性 ・防水性(**)	▲ △ △ △ ○ △	既存技術ではクローラー部のみで全高が10cm超。 予備機を複数台準備することで、耐放射線の要求を回避。
		○遠隔装置2用ケーブルの開発 ・細く柔らかいケーブル(****) ・防水性(**) ・耐放射線性	△ △ ○	予備機を複数台準備することで、耐放射線の要求を回避。
		○遠隔装置2用ケーブルリールの開発 ・遠隔装置に搭載可能な小型化 ・防滴性(***)	△ △	

*: ケーブルリールへの収納性やケーブル敷設のために必要。
 **: 電極設置箇所は水没しているために必要。
 ***: トーラス室内は一部水没しており、湿度が高いと考えられるために必要。
 ****: ケーブルリールへの収納性のために必要。

*1: 設置方法の概念検討のうち「電極及びケーブル設置方法の概念」参照。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 実現可能性の評価

・電極及びケーブル設置にあたっての課題・対応案の成立性 (課題、対応策及び評価)

No. (*1)	設置 手順	課題・対応策	評価	補足
①-a	電極をS/C脚部近傍に設置する。	○遠隔装置の開発 ・装置の小型化(全長:50cm、全幅:50cm以下(*))	▲	遠隔装置(グレーチングや階段を走行可能なフリッパー付き小型クローラー)は生産中止 同上 同上
		・グレーチング上を走行可能な足回り ・階段の上り下りが可能な足回り ・遠隔装置・子機との着脱装置の開発 ・防湿性(**) ・耐放射線性	▲ ▲ △ △ ○	
		○遠隔装置用ケーブルの開発 ・細く柔らかいケーブル(***) ・防湿性(**) ・耐放射線性	△ △ ○	
		○遠隔装置用ケーブルリールの開発 ・遠隔装置に搭載可能な小型化 ・防湿性(**) ・耐放射線性	△ △ ○	
		○介在装置の開発 ・電極・ケーブルの着脱装置の開発 ・ロボットアームの開発 ・耐放射線性 ・防滴性(****)	△ △ ○ △	
①-b	ケーブルを直流電源装置まで敷設する。	-(上記に含まれる)	-	

*: 下記を走行・通過するために必要。
 ・R/B1階から三角コーナーまでの階段
 ・CRDポンプの手前のエリア。
 ・三角コーナーとキャットウォークとのアクセス用階段
 ・キャットウォーク
 **: トーラス室内は一部水没しており、湿度が高いと考えられるために必要。
 ***: ケーブルリールへの収納性やケーブル敷設のために必要。
 ****: 電極設置後、滞留水で濡れた子機を回収するために必要。

*1: 設置方法の概念検討のうち「電極及びケーブル設置方法の概念」参照。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 実現可能性の評価

・ 排流端子設置にあたっての課題・対応案の成立性 (課題、対応策及び評価)

No. (*1)	設置 手順	課題・対応策	評 価	補 足
③-a	S/C表面の排流端子設置箇所の塗装を除去する。	<ul style="list-style-type: none"> ○ 遠隔プラスト装置の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔でのプラスト方法の開発 ・ 遠隔装置／介在装置に搭載可能な小型化 ○ 介在装置の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔装置に搭載可能なロボットアームの小型化 ・ 耐放射線性 	<ul style="list-style-type: none"> △ ▲ △ ○ 	<p>遠隔装置(全長:50cm、全幅:50cm以下)に収まる小型装置はない。</p> <p>予備機を複数台準備することで、耐放射線の要求を回避。</p>
③-b	永久磁石を用い排流端子をS/Cと仮止めする。	<ul style="list-style-type: none"> ○ 排流端子の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 耐放射線性 ・ 遠隔での溶接性(溶接し易さ)を考慮した構造 ・ 永久磁石を備えた構造 ○ 排流端子用ケーブルの開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 耐放射線性 ・ 細く柔らかいケーブル(*) ・ 防湿性(**) ○ 排流端子用ケーブルリールの開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔装置に搭載可能な小型化 ○ 介在装置の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔装置に搭載可能なロボットアームの小型化 ・ 耐放射線性 	<ul style="list-style-type: none"> ○ △ △ ○ △ ○ △ △ ○ 	<p>既存の電極材料は耐放射線性がある材料を用いているため問題無し。</p> <p>既存の電極材料は耐放射線性がある材料を用いているため問題無し。</p> <p>既存のケーブルは防湿性があるため、問題無し。</p> <p>予備機を複数台準備することで、耐放射線の要求を回避。</p>
③-c	ケーブルを直流電源装置まで敷設する。	—(上記に含まれる)	—	—

*: ケーブルリールへの収納性やケーブル敷設のために必要。

** : トーラス室内は一部水没しており、湿度が高いと考えられるために必要。

*1: 設置方法の概念検討のうち「電極及びケーブル設置方法の概念」参照。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 実現可能性の評価

・ 排流端子設置にあたっての課題・対応案の成立性 (課題、対応策及び評価)

No. (*1)	設置 手順	課題・対応策	評価	補足
③-d	排流端子をS/Cに溶接する。	<ul style="list-style-type: none"> ○ 溶接方法の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔での溶接方法の開発 ・ 遠隔装置／介在装置に搭載可能な小型化 ・ 耐放射線性 ○ 介在装置の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔装置に搭載可能なロボットアームの小型化 ・ 耐放射線性 	<ul style="list-style-type: none"> △ ○ ○ △ ○ 	<p>予備機を複数台準備することで、耐放射性の要求を回避。</p> <p>予備機を複数台準備することで、耐放射性の要求を回避。</p>
③-e	S/C表面と排流端子に補修塗装する。	<ul style="list-style-type: none"> ○ 塗布方法の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔での塗布方法の開発 ・ 遠隔装置／介在装置に搭載可能な小型化 ・ 耐放射線性 ○ 介在装置の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔装置に搭載可能なロボットアームの小型化 ・ 耐放射線性 	<ul style="list-style-type: none"> △ △ ○ △ ○ 	<p>予備機を複数台準備することで、耐放射性の要求を回避。</p> <p>予備機を複数台準備することで、耐放射性の要求を回避。</p>

*1: 設置方法の概念検討のうち「電極及びケーブル設置方法の概念」参照。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

◆ 実現可能性の評価

・ 実機適用の着眼点(HP)

電極及びケーブル、排流端子の設置にあたっての成立性評価結果を基に、HP評価を行う。電極及びケーブル、排流端子の設置における開発課題の成立性評価に一つでも課題が残ると設置手順として成立しないものと評価する。

以上のことから実機適用の着眼点(HP)の結果は以下とした。

- ・ S/C脚部の脚元近傍に電極を配置することが可能か。 …▲
- ・ 直流電源装置は配置可能か。 …○
- ・ 電極と装置間に接続ケーブルを引くことが可能か。 …▲
- ・ 排流端子は設置可能か。 …▲

評価基準

×: 物理的に成立しない

▲: 新規開発要。さらに、類似装置を有するメーカー無し

△: 新規開発要だが、既存技術の応用等で実現の可能性あり

○: 既存技術の活用等で実現の可能性あり

よって、現地設置に関する実現可能性としては、新規技術開発が必要であるためすぐに実機適用することは難しいと評価した。

2. 本事業の具体的な実施内容

(1) 電気防食設備の実機適用性の概念検討

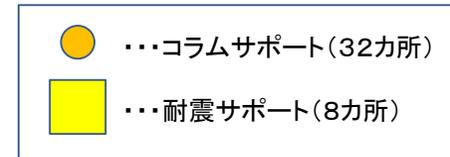
◆実現可能性の評価

(1号機、2号機の成立性評価)

3号機と比較して条件が緩和される内容(1号機は電極の設置必要数が少ないこと、2号機はトラス室内の線量が低いこと)での成立性の評価結果を以下に示す。

(1号機)

3号機と比較して耐震サポートが無いいため、電極/端子の設置個数が70体(102体-32体)に減るものの、S/C脚部全周にわたって電極を設置する必要があるため、成立性評価は3号機と変わらないと考える。



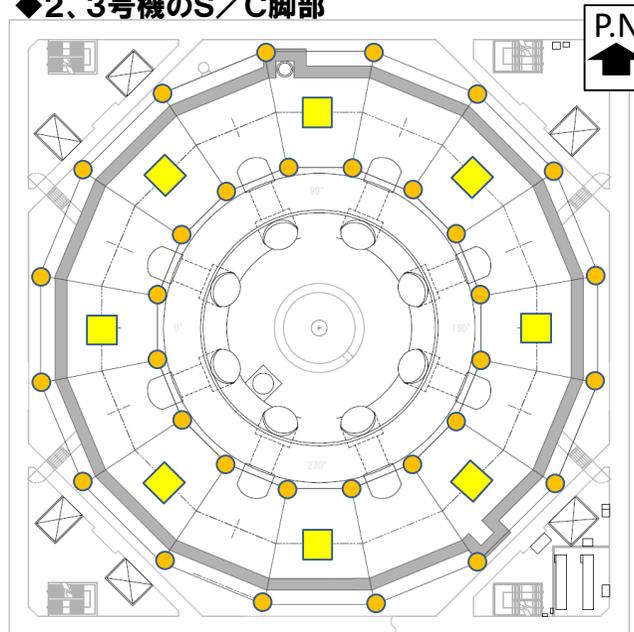
(2号機)

2号機トラス室内は3号機に比べ線量が低いものの、40~88mSv/hと人が近接するのは困難な状況は3号機と同じであることから、成立性は3号機と変わらないと考える。

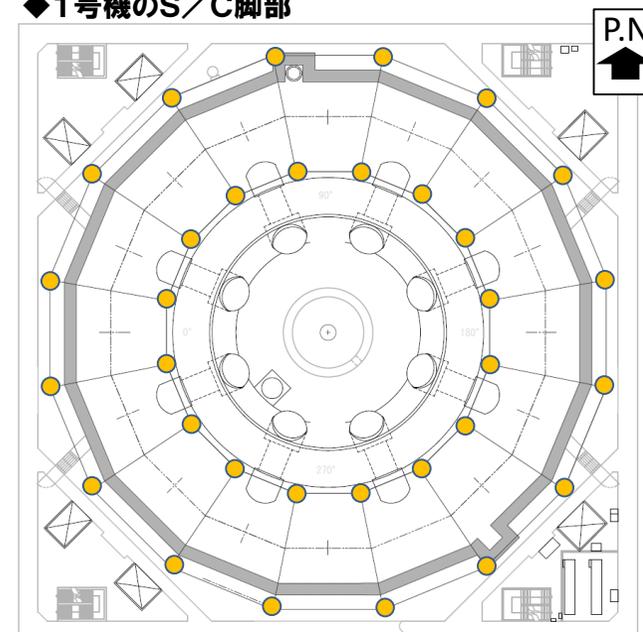


以上のことから、1、2号機の成立性評価は3号機と同じと考える。

◆2、3号機のS/C脚部



◆1号機のS/C脚部



2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

◆電気防食工法概要

- 電気防食工法の施工対象は、1F 1～3号機のS/Cのコラムサポート及び2号機と3号機の耐震サポートである。1Fで想定される環境条件が及ぼす電気防食工法への影響を把握する必要がある。
- 電気防食は、防食電流を供給し水没部の腐食反応を停止させる方法である。通電電極(アノード)と防食対象(カソード)の抵抗である分極抵抗値*、そして溶液の抵抗である溶液の抵抗値**に影響を受ける。分極抵抗は防食対象の表面状態と、溶液の抵抗値は水質と主に関係する。
- 防食効果を得るには、防食対象部位に防食電位を印加する必要があり、分極抵抗値、溶液の抵抗値、通電電極と防食対象との距離等が影響する

* 防食電流の流れやすさの指標 本資料では防食電位 (-0.8V SSE (飽和銀/塩化銀電極) 付近でのカソード分極曲線の勾配を分極抵抗と呼称する。また、塗装部位の塗膜の抵抗についても分極抵抗という表現を用いる。

** 溶液中の電気の流れにくさ

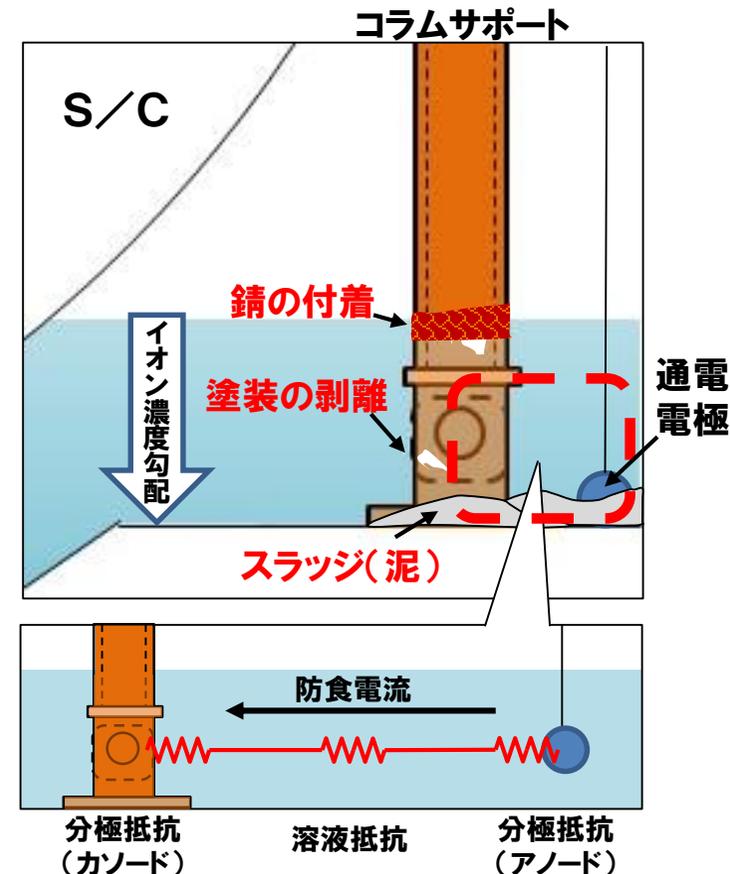


図 S/C脚部コラムサポートの想定される状態及び電気防食概念図

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○外部電源方式での腐食抑制のメカニズム

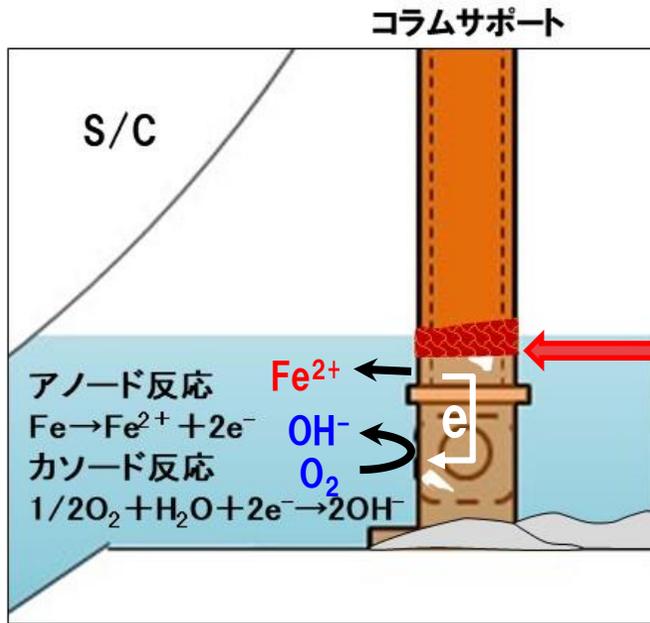


図1 電気防食無の場合（中性）

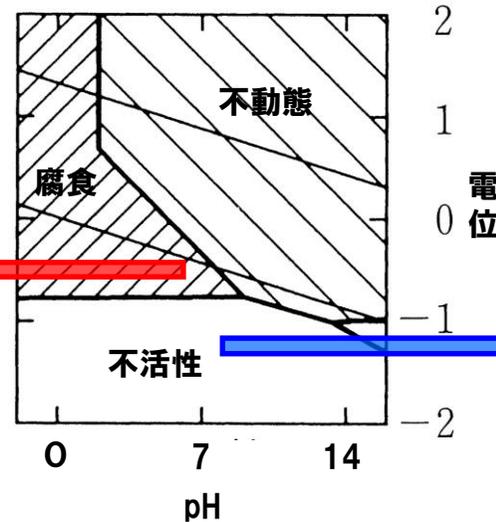


図2 腐食形態図(Fe、25°C)¹⁾

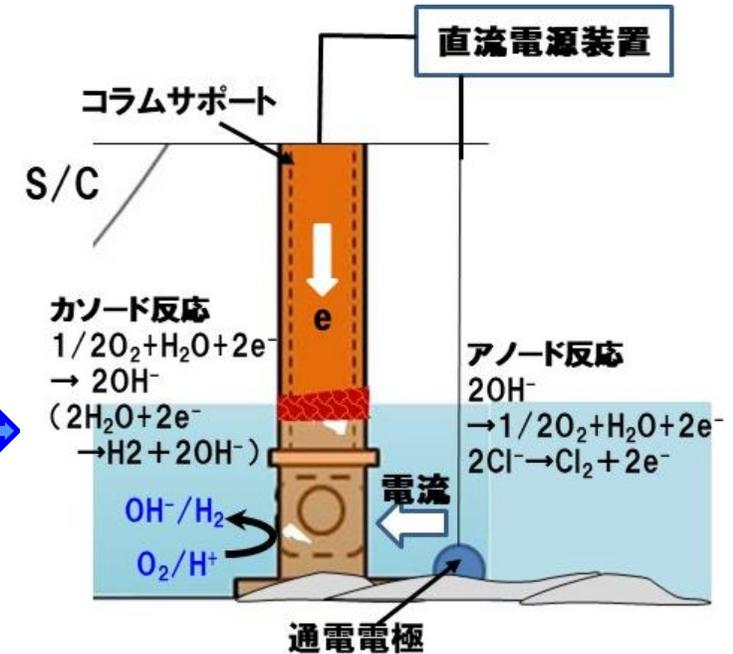


図3 電気防食の場合

- ◆水中に浸漬したコラムサポートは基本的に図1に示したような反応式が生じ腐食が進行
- ◆図1の状態は、図2に示す腐食域に相当しており、 Fe^{2+} が溶出しやすい状態
- ◆カソード防食、外部電源方式により、強制的に、図2中の不活性域まで、電位を下げる。
この領域はFeで安定しやすいので、腐食を抑制

1) 腐食防食ハンドブック 腐食防食学会編 丸善(株)発行

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○1Fで想定される電気防食の電流に対する抵抗因子(溶液の抵抗や分極抵抗に相当)

- ・水のイオン種およびその濃度
- ・スラッジ
- ・鍍
- ・塗装
- ・水の放射線分解

○電気防食によるその他影響

- ・気液界面の腐食
- ・水素発生
- ・経時変化に伴う電位変動

以上の項目に対して、試験もしくは机上検討で、電気防食工法への影響評価を行う

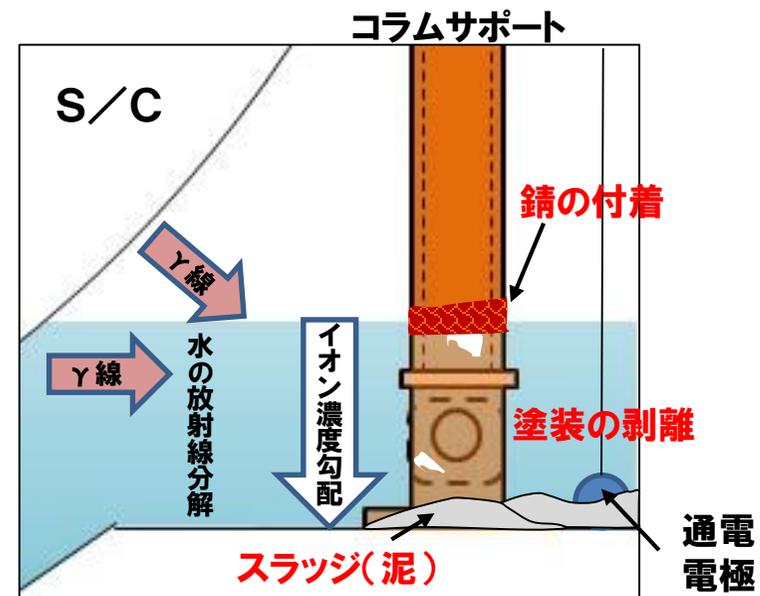


図 電気防食の電流に対する抵抗因子

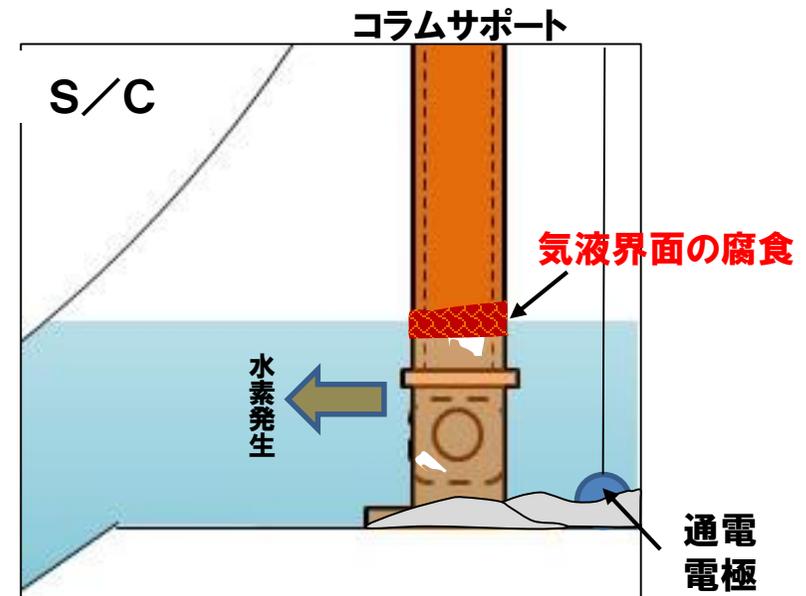


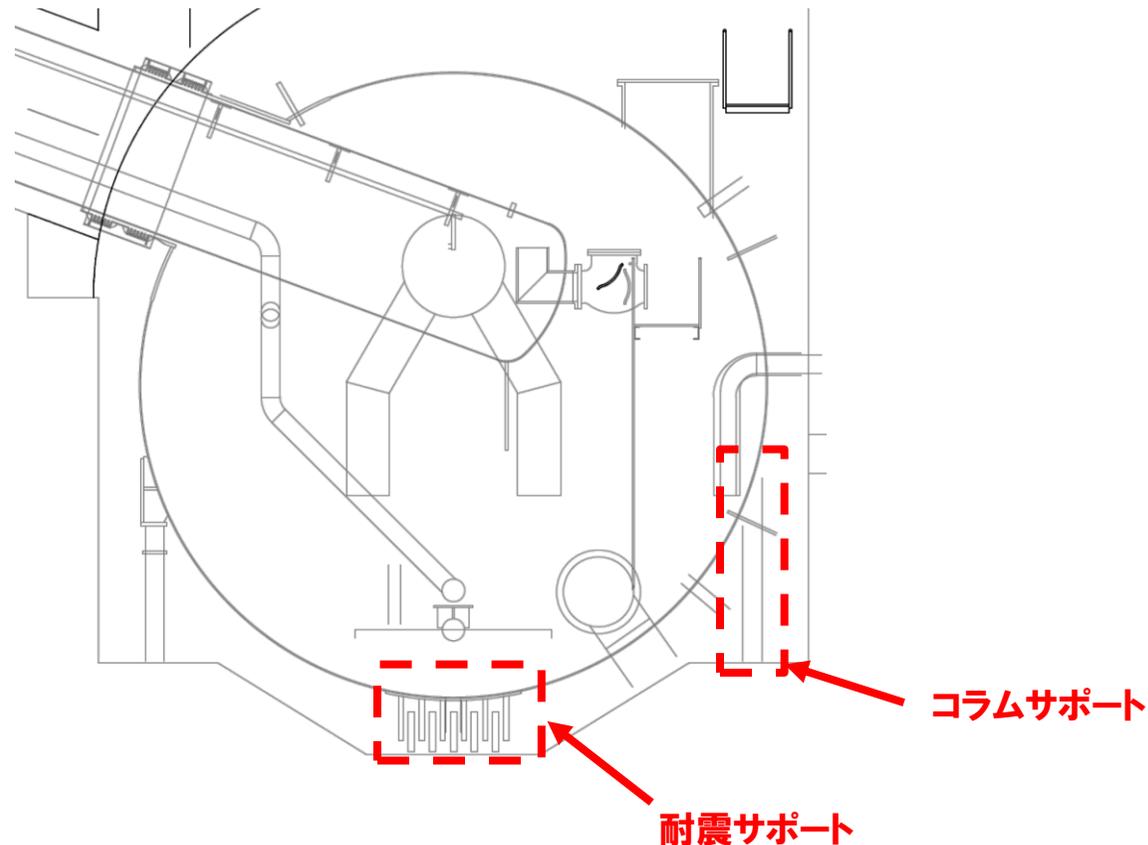
図 電気防食によるその他影響

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○福島第一原子力発電所5号機(1F-5)トラス室内調査結果報告

- ・耐震サポート／コラムサポートの塗装の状態及び導通有無の目視確認を実施
- ・コラムサポート部の間隙が塗装されておらず、塗装による絶縁が無いことを確認



1F-5 S/C周辺模式図

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

本事業では1F特有の環境条件を考慮する必要がある。滞留水の水質だけでなく、電気防食の効果に影響を及ぼすパラメータについて抽出し、試験／机上検討にて影響評価を行う。

・塗装の劣化・剥離／錆の付着

当該部位は塗装されており、現時点での塗装の劣化状態や残存状態、錆の付着状態は不明で絶縁物となりうるのか定かではない。さらに塗装の劣化や剥離、錆の付着による分極抵抗への影響は既存知見がない。

・スラッジの影響／溶液の塩化物イオン濃度勾配

S／C脚部近傍にはスラッジが堆積している可能性があり、これらは溶液の浸透に影響を与える。また、溶液中の塩化物イオンは深さ方向に濃度勾配があると推測されるため、溶液の抵抗値に影響すると考えられる。

溶液抵抗は、電流の流れやすさに大きく影響することから、1FのS／C付近のイオン種濃度の調査、および過去の研究知見等より、インプット条件の値を検討する。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

・放射線影響

1F S/C脚部の周辺は γ 線環境下にある。 γ 線は水の放射線分解を発生させ、過酸化水素(H_2O_2)を生成させる。 H_2O_2 は高酸化環境に導くため、防食電位を達成するために必要な電流値を大きくする可能性がある。2022年度は材料照射による評価は行わないものの、 γ 線による水の放射線分解時に発生する H_2O_2 の分極抵抗に対する影響を評価する。また、高線量下での直流電流方式の電気防食の知見がないため、電気防食工法における放射線のその他の影響について、既存知見調査／机上検討を行う。

・気液界面／気相の腐食

1F S/Cの水面低下に伴い、一部材料が気相と液相の界面に晒されている状態である。電気防食は液相に対する防食技術であり、気液界面は対象外となる。ただし、電気防食を適用することで、気液界面の腐食が加速しないことを確認する必要がある。気液界面への影響を調査するために、溶液に半浸漬した試験片を用いた基礎試験を実施する。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

・水素発生

外部電源方式は電位のモニタリング制御が可能である。水素発生量が増加し始める閾値となる電位と、本事業における防食電位の目標値には差があることから、水素発生が引き起こされる電位に到達する可能性は低い。コラムサポートや耐震サポートに水素脆化が発生する防食電位となる場合には、電気防食設備配置の再検討を行う。

・経時的な影響評価検討

溶液や防食対象の状態は、電気防食工法適用時期や通電に伴う溶液中のイオン濃度変化などの影響、また燃料デブリ取り出しや取水工事の影響を受けると考えられる。外部電源方式においては、電位をモニタリング制御することにより、溶液の抵抗値の経時的変化に対応可能である。

上記以外にも、電気防食による防食対象以外の機器への副次的な影響について、机上検討による影響評価を行う。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○電気防食工法 1F特有の環境要因について

○:影響有り △:僅かに影響 ×:影響無し

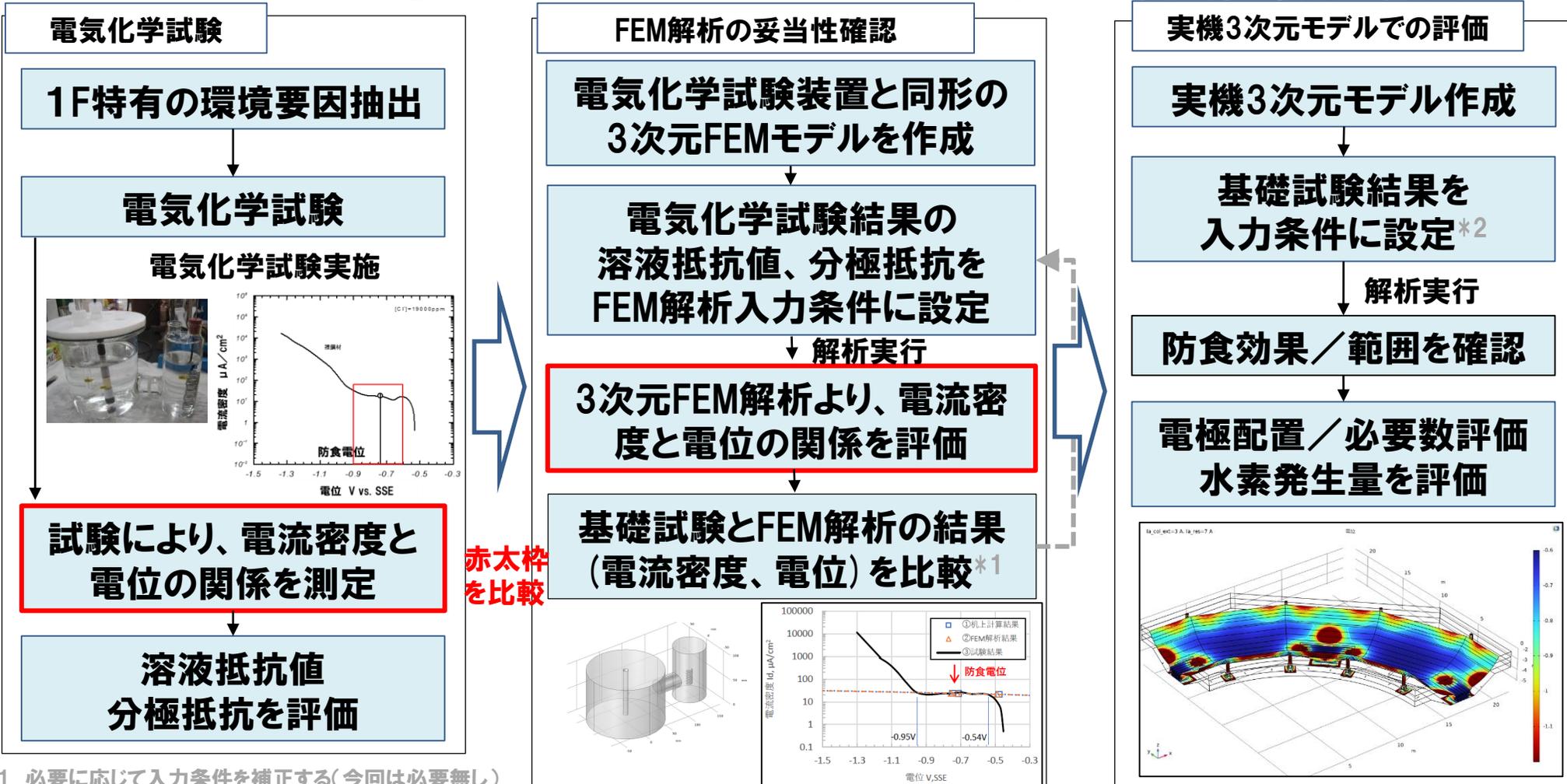
本PJで考慮すべき 環境要因	電気防食工法への影響度		既存知見での 対応可否	データ取得、検討または 対策方法
	溶液の抵抗値	分極抵抗値		
塗装の劣化／剥離	×	○	否	試験による値の取得が必要
錆の付着	×	△	否	試験による値の取得が必要
スラッジの影響	×	○	可	既存知見より入力値を検討
溶液の濃度勾配	○	×	可	基礎試験／FEM解析にて検討
放射線影響	×	△	可	既存知見および模擬試験による検討
気液界面／ 気相部の腐食	×	×	否	電気防食の対象外、影響の有無は確認要
水素発生	×	×	可	分極曲線及び既存知見での検討
経時的な影響	×	×	可	電位モニタリングで制御

- ・電気防食工法は溶液の抵抗値及び分極抵抗値により防食効果・範囲が左右される。既存知見が無く、溶液の抵抗値／分極抵抗値への影響が大きい環境要因については基礎試験を行い評価する。
- ・気液界面や水素発生は、解析条件には関係しないものの、確認が必要であるため、基礎試験を実施する。
- ・進捗に応じて新たな環境要因や副次的影響が抽出された場合、対応案を検討する。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

実機S/C脚部形状モデルでの評価のために、以下の流れで電気化学試験および試験片FEM解析を行い、3次元モデルに入力するパラメータの導出および妥当性確認を行う。



*1 必要に応じて入力条件を補正する(今回は必要無し)

*2 必要に応じてFEM解析にて確認した補正係数を導入(今回は必要無し)

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

◆ (2)における最終的な成果のイメージ

○基礎試験

- ・溶液の濃度勾配の電気防食効果への影響
- ・塗装、事故による塗装の劣化の電気防食効果への影響
- ・過酸化水素の電気防食効果への影響
- ・鍍付着の電気防食効果への影響
- ・電気防食の気液界面の腐食に及ぼす影響
- ・分極曲線測定による水素発生電位の評価

○FEM解析による電気防食効果評価*

- ・2次元モデルによる電極配置／数量概算評価
- ・3次元モデルによる最適電極配置／数量評価
- ・3次元モデルによる水素発生量評価

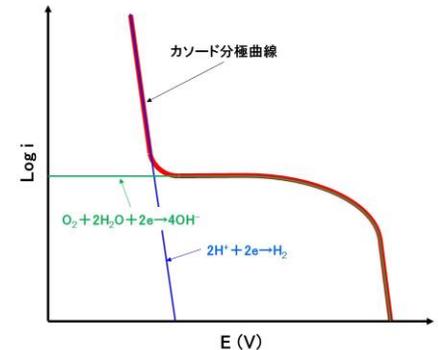


図 カソード分極曲線の模式図

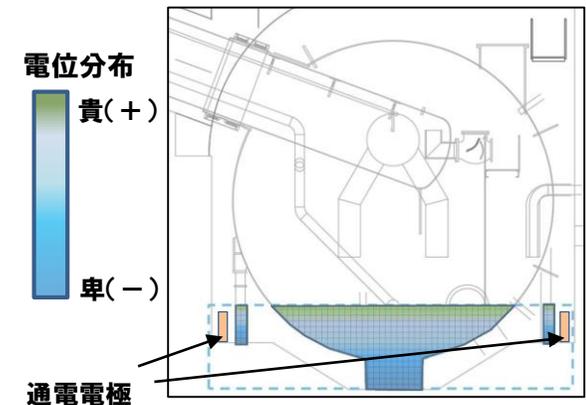


図 3次元FEM解析電極配置／数量イメージ**

* 目標値は海水環境で実績がある防食電位 -550mV SHE (標準水素電極基準)とする。

なお、基礎試験条件検討及び基礎試験検討によっては防食電位の基準の変更有

**3次元モデルにて電位分布、取得した分極曲線及び文献調査の結果により水素発生量の評価を行う。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

○1F S/Cの構成材料

- ・耐震サポートの耐震評価上裕度が無い箇所に適用されている鋼材を選定。
- ・調査結果より、耐震サポート／コラムサポートの耐震評価上裕度が低い箇所に使用される鋼種間での分極抵抗値に差異は無いと推測される。影響有無の確認のためにS/C脚部で使用される異鋼種を比較材として選定。

○1F S/Cの塗装材

- ・建設時の塗料及び補修塗装工事の仕様を調査し、基礎試験用に以下の塗装材を選定

塗料①:国内メーカー代替塗料

塗料②:補修塗装用塗料

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○Cl⁻濃度設定理由について

過去のトーラス室内の滞留水の分析結果は以下の通り。

<2019年度のトーラス室の滞留水分析結果¹⁾>

- ・Cl⁻濃度:1100ppm(2号機のコラムサポート基礎部付近)
- ・Cl⁻濃度:100ppm(滞留水の水面近傍)
- ・Cl⁻濃度:23000ppm(2号機耐震サポート近傍)

トーラス室内の滞留水は今後、R/B地下階床面部に設置されている移送ポンプを用いた水の汲み出しと、Cl⁻濃度が低い炉注水とサブドレンから汲み上げた地下水の混合水の流入により水質が変化していくと推測される。上記の滞留水分析結果や、地下水等の他の分析結果を併せて考慮すると、電気防食施工時期にトーラス室のCl⁻濃度は100ppmを超える可能性は低い。

<溶液のCl⁻濃度の検討結果>

- ・以上より、基礎試験条件／解析評価はCl⁻濃度:100ppmを電気防食施工時の目標値と想定し実施する。
- ・溶液の一部濃度が高い箇所を保守的に評価するために1000ppmでFEM解析を実施する。
- ・滞留水の水面近傍は採取箇所毎のCl⁻濃度の差異及び、今後の経時的変化を考慮し、10ppmで解析条件を設定する。

1) 特定原子力施設監視・評価検討会(第72回) 建屋滞留水処理の進捗状況について(2019年6月)

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

①溶液の抵抗率測定試験 目的および試験方法

目的:塩化物イオン濃度と溶液の抵抗値の関係を評価

試験方法:HORIBA製の電気伝導率計を用いて測定(電気伝導率は溶液抵抗の逆数)

溶液抵抗率測定試験条件

Cl ⁻ 濃度	測定数	取得データ
10ppm	1	溶液抵抗値
100ppm	1	
1000ppm	1	
19000ppm	1	



測定例

事故直後の滞留水は平成24年度補助事業「圧力容器/格納容器の耐震性・影響評価手法の開発」より、19000ppm(海水濃度)と想定し、溶液の抵抗値と塩化物イオン濃度の関係性及び試験結果の比較評価のために複数の濃度条件を設定

溶液の抵抗:溶液中の電流の流れやすさの指標

溶液の抵抗が高い:電流が流れにくい。過防食に注意が必要

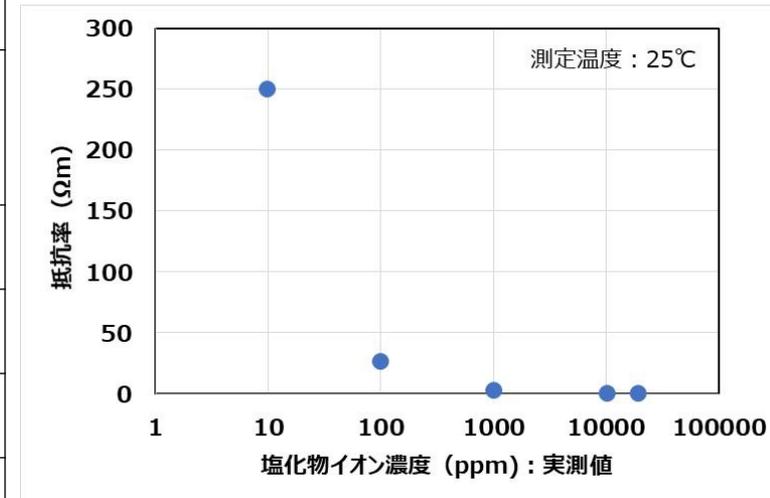
溶液の抵抗が低い:電流が流れやすい。電位分布がよくなり、電気防食に有利

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

① 溶液の抵抗率測定試験 **試験結果**

理論値	実測値			【参考】
塩化物イオン濃度 [ppm]	塩化物イオン濃度 [ppm]	水温 [°C]	抵抗率 [$\Omega \cdot m$]	2D試解析 仮定した抵抗率 [$\Omega \cdot m$]
10	9.8	25	250	246
100	100	25	26.5	26.2
1000	1000	25	2.94	2.80
10000	10100	25	0.35	—
19000	19100	25	0.20	—



塩化物イオン濃度と溶液抵抗の関係

- 塩化物イオン (Cl^-) 濃度上昇とともに抵抗率が低下することを確認。
 - Cl^- 濃度 10、100、1000ppm の場合、2Dシミュレーション解析に使用した溶液抵抗率と測定値はほぼ同等であることを確認
- ⇒ 得られた溶液の抵抗値 [$\Omega \cdot m$] を3次元シミュレーション解析のパラメータに適用

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

②塗装及び塩化物イオン濃度の影響確認試験 目的および試験方法

目的:分極抵抗値への塗装有無の影響を評価 解析への反映を検討

試験方法:

図1に測定装置概念図を示す。
ポテンショスタットを用いて電位を強制的に掃引し、その時の電流変化を測定する。今回はカソード分極抵抗を算出するため、測定は腐食電位以下の卑な電位範囲で行う。電流密度は測定電流値／試験面積で算出する。

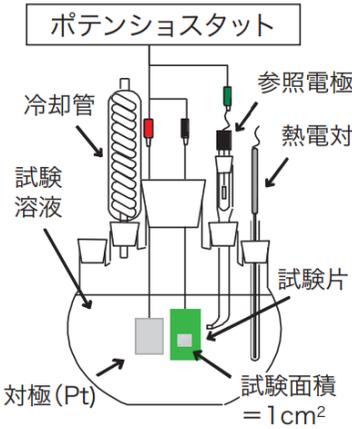


図1 測定装置概念図²⁾

赤枠範囲の電位と電流密度の相関図を取得

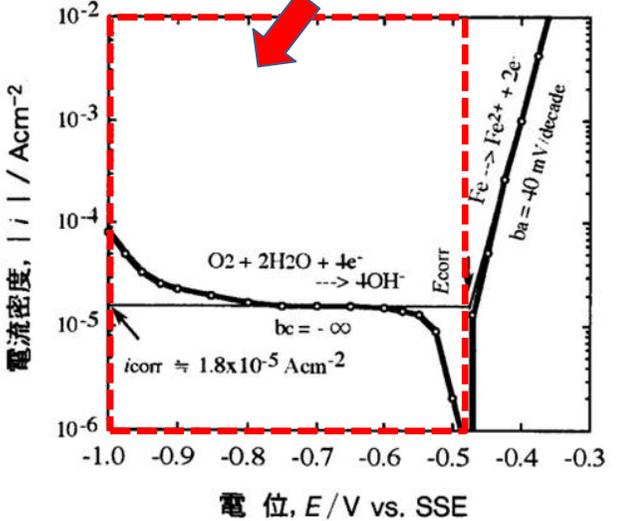


図2 0.5M-NaCl水溶液中での炭素鋼の分極曲線 (25°C、SSE)¹⁾

試験条件

塗装有無	Cl-濃度(ppm)	測定数	取得データ
塗装無	100、19000	3	カソード分極抵抗値
塗装有(塗料①*)			
塗装有(塗料②*)			

*塗料①建設時塗料の代替 塗料②補修塗装用塗料

1) 西方、Electrochemistry、67 巻、8 号、879-883(1999)
2) 橋本、技術ノート「こべるにくす」、No.49(2019)

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

②塗装及び塩化物イオン濃度の影響確認試験 評価方法

分極抵抗値を求め、その値より電流の流れやすさを評価

○分極抵抗値の求め方

カソード分極曲線を取得(試験方法は前頁参照)
基本的に、防食電位*を通る範囲の防食電位
±50mVの測定データを一次回帰式で近似。
今回は防食電位時の分極抵抗値を算出した。

(* -746mV vs. SSE (-800mV vs. Ag/AgCl [sw]))

○分極抵抗の算出式

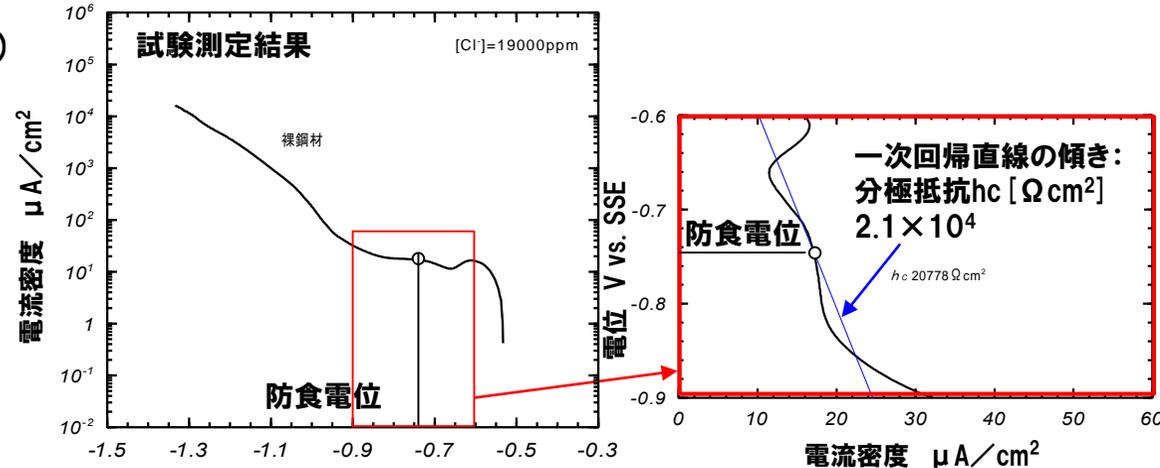
一次回帰直線 $E_c = -hc \times I + E_c^0$

E_c : 近似曲線の電位 [Vvs.SSE]

hc : 分極抵抗

I : 電流密度(A/cm²)

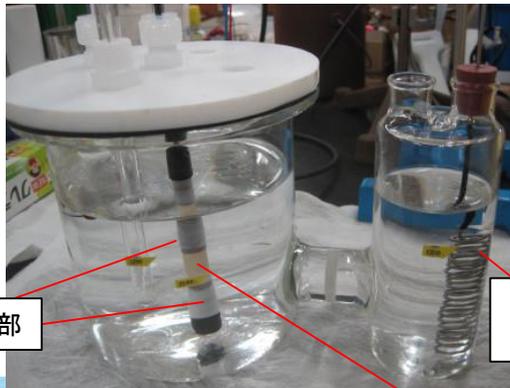
E_c^0 : 近似曲線上の見かけの自然電位 [Vvs.SSE]



カソード分極極線図例

電位掃引速度: 10mV/min

データサンプリング間隔: 10秒ごとに取得(1分間に6点)



絶縁部

電極
(アノード)

試験装置例

試験片供試面(カソード面)

分極抵抗: 防食対象の電位変化のしやすさの指標

分極抵抗が高い: 分極しやすい。少ない電流で防食電位を達成
でき電気防食に有利

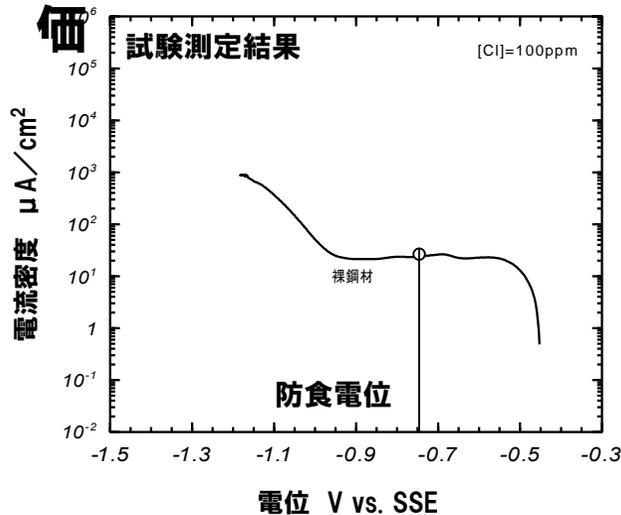
分極抵抗が低い: 分極しにくい。電流を多く必要とし、電気防食
には不利

2. 本事業の具体的な実施内容

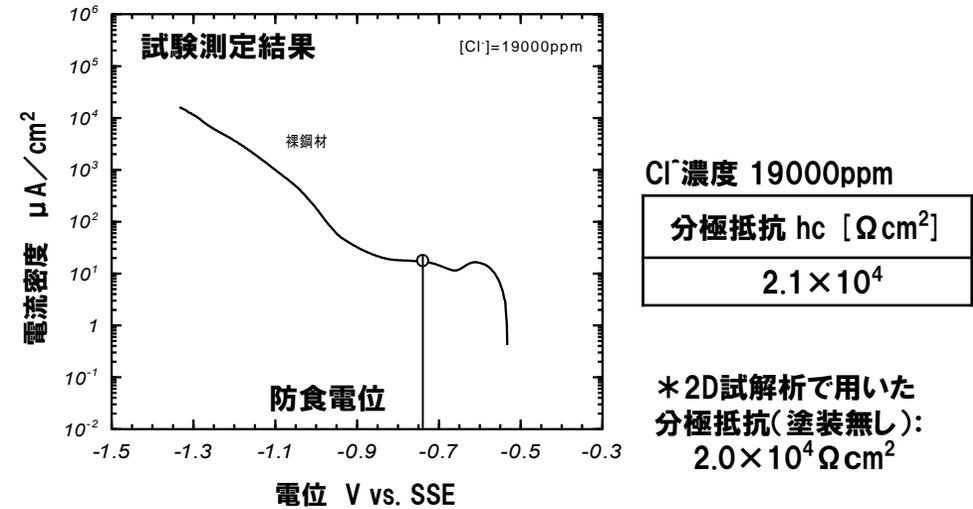
(2) 実機適用性評価のための基礎試験

② 塗装及び塩化物イオン濃度の影響確認試験 試験結果その1

今後の滞留水想定水質における実機S/C脚部の鋼材のカソード分極抵抗を試験評



電位と電流密度の関係(Cl⁻100ppm)



電位と電流密度の関係(Cl⁻19000ppm)

- 塗装無し鋼材の場合、Cl⁻濃度が低いと分極抵抗は大きくなった。
- Cl⁻濃度19000ppm塗装無し鋼材の分極抵抗値と2D解析入力条件は同等であることを確認。
- 防食電位付近の分極抵抗は、いずれも 10^4 オーダー以上であった。文献値(*1)から算出した分極抵抗値が 10^4 オーダー(防食電流密度: 0.1 Am^{-2} と仮定、自然電位: $-0.6 \text{ V (Ag/AgCl [sw])}$ 、防食電位: $-0.8 \text{ V (Ag/AgCl [sw])}$)から算出)であることから、今回の試験結果は妥当な値と考えられる。

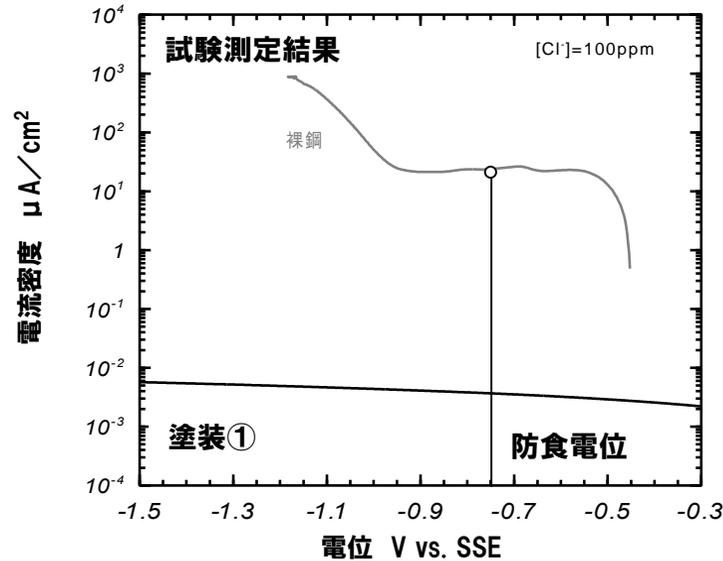
*1 社団法人ダム・堰施設技術協会、ダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル編)2011年改訂

2. 本事業の具体的な実施内容

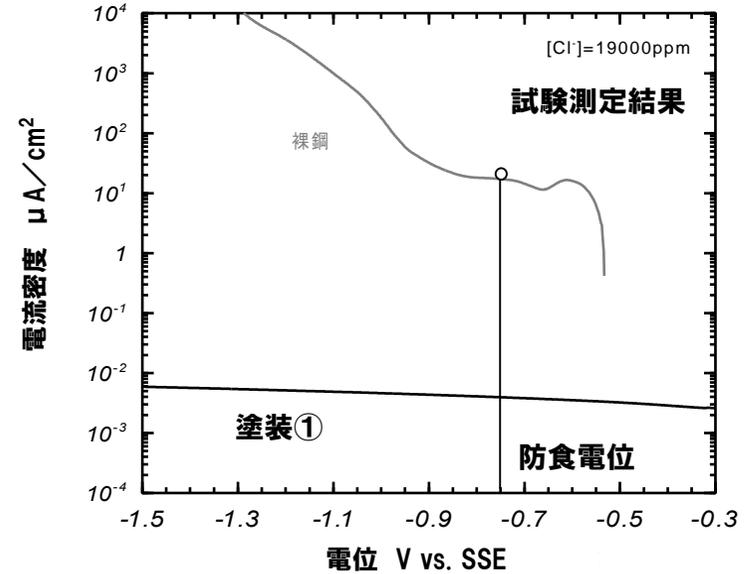
(2) 実機適用性評価のための基礎試験

② 塗装及び塩化物イオン濃度の影響確認試験 **試験結果その2**

塗装①を付与した試験片のカソード分極曲線測定例と分極抵抗値



電位と電流密度の関係(Cl-100ppm)



#試験片番号 電位と電流密度の関係(Cl-19000ppm)

Cl-濃度 [ppm]	分極抵抗 [Ωcm^2]		
	# 29	# 30	# 31
100	3.5×10^8	4.4×10^8	4.6×10^8
	# 26	# 27	# 28
19000	3.6×10^8	3.6×10^8	4.1×10^8

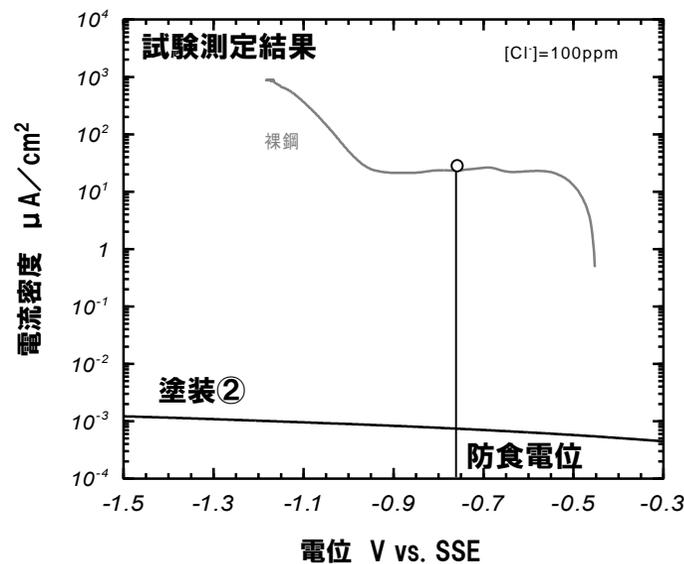
• 塗装①はCl-濃度に関わらず、分極抵抗 $10^8 [\Omega \text{cm}^2]$ であり、健全な塗装は、絶縁性が高い。

2. 本事業の具体的な実施内容

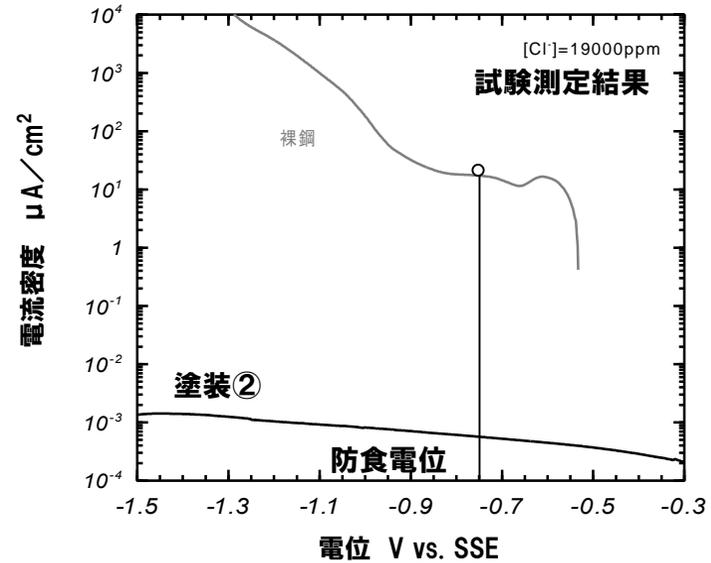
(2) 実機適用性評価のための基礎試験

② 塗装及び塩化物イオン濃度の影響確認試験 **試験結果その3**

塗装②を付与した試験片のカソード分極曲線と分極抵抗値(代表例)



電位と電流密度の関係(Cl-100ppm)



電位と電流密度の関係(Cl-19000ppm)

#試験片番号

Cl-濃度 [ppm]	分極抵抗 [$\Omega \text{ cm}^2$]		
	# 52	# 53	# 54
100	1.5×10^9	1.7×10^9	1.6×10^9
19000	# 49	# 50	# 51
	1.2×10^9	1.6×10^9	1.2×10^9

• 塗装②もCl-濃度に関わらず、分極抵抗 $10^9 [\Omega \text{ cm}^2]$ であり、健全な塗装は、絶縁性が高い。

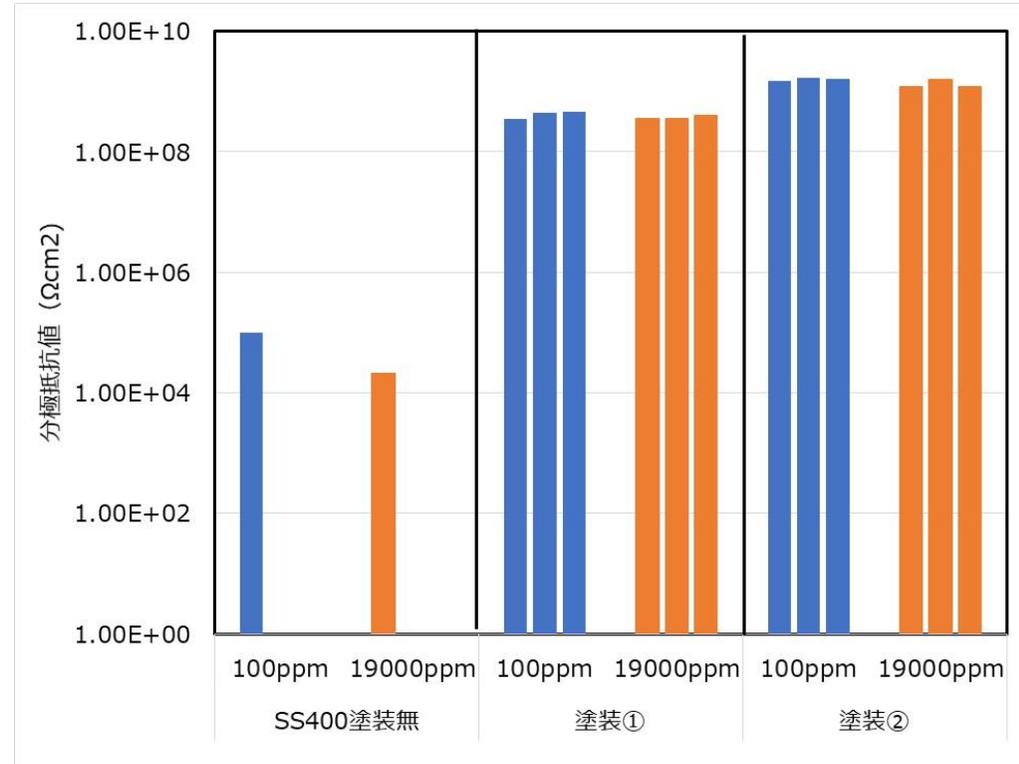
2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

② 塗装及び塩化物イオン濃度の影響確認試験 評価とまとめ

塗装②を付与した試験片のカソード分極曲線と分極抵抗値

- 塗装無の場合の分極抵抗値はCl⁻濃度が19000ppmから100ppmになると、5倍になることが分かった。
- これはCl⁻濃度:100ppmのときの防食電位に必要な電流値が、19000ppmの1/5になることを示す。
- 分極抵抗に対する濃度の影響は、Cl⁻だけでなく、人工海水に含まれる他のイオンの影響も考えられる。
- 塗装有の分極抵抗値は、塗装無SS400よりも、 $10^3 \sim 10^4$ 大きくなる。
- 塗装は絶縁性が高く、バルク水を遮断する機能も有するので、分極抵抗値は大きくなる。



塗装有無による分極抵抗値の比較

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

③ 加熱による塗装劣化の影響 目的、試験条件

目的：事故による塗装の変化を熱処理により模擬して、分極抵抗への影響を評価

- ・熱処理温度／時間は、MAAP解析結果*より設定
- ・熱処理温度：180℃、熱処理時間：100hで前処理を行う。

試験条件(加熱による劣化影響)

前処理			分極抵抗測定		取得データ
塗装有無	熱処理温度	熱処理時間	Cl ⁻ 濃度	測定数	カソード 分極抵抗値
有	180℃	100h	19000ppm	3	

*：平成26年度補正予算 事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

④ 浸漬による塗装劣化の影響 目的、試験条件

目的: 事故による塗装の変化を熱処理／長時間の浸漬により模擬して、分極抵抗への影響を評価

- ・前処理1については、試験③と同様に設定、
- ・MAAP解析*より、S/C内部は事故後、水温50℃以下の状況が長期間継続していることを確認、前処理2の条件を設定した。

試験条件(浸漬による塗装劣化影響)

前処理1			前処理2(前処理1の後実施)		分極抵抗測定		取得データ
塗装有無	熱処理温度	熱処理時間	耐湿試験温度	耐湿試験時間(h)	塩化物イオン濃度	測定数	カソード分極抵抗値
有	180℃	100h	50℃	100	19000 ppm	3	
				500		3	

*:平成26年度補正予算 事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化

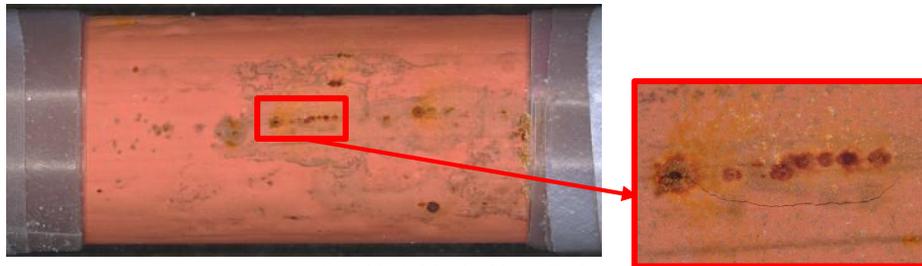
2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

③④ 加熱／浸漬による塗装劣化影響確認試験 劣化試験結果

処理項目	塗料①国内メーカー代替塗料 (建設時塗料の代替塗料) 処理後の試験片表面の状態	塗料②補修塗装用塗料 (補修塗装工事の塗料) 処理後の試験片表面の状態
加熱のみ (加熱温度:180℃)	・塗装色変化あり ・割れ、ピンホール等みられず	・塗装色変化あり ・割れ、ピンホール等みられず
加熱＋浸漬100h (浸漬温度:50℃)	浸漬100h用試験片(#35～37) 3/3本 発錆あり	浸漬100h用試験片(#58～60) 1/3本 発錆あり*
加熱＋浸漬500h (浸漬温度:50℃)	浸漬500h用試験片(#38～40) 3/3本 発錆あり	浸漬500h用試験片(#61～63) 発錆なし

#試験片番号



国内メーカー代替塗料 加熱＋浸漬500h処理後



補修塗装用塗料 加熱＋浸漬500h処理後

- ・塗料①の場合、試験条件の範囲では、浸漬時間による発錆に大きな差はない
- ・塗料②は外観での発錆等は認められず、建設時塗料の代替塗料
(鉛丹ペイント同等材)よりも劣化しにくい(*:塗装の初期性状による発錆と推定)

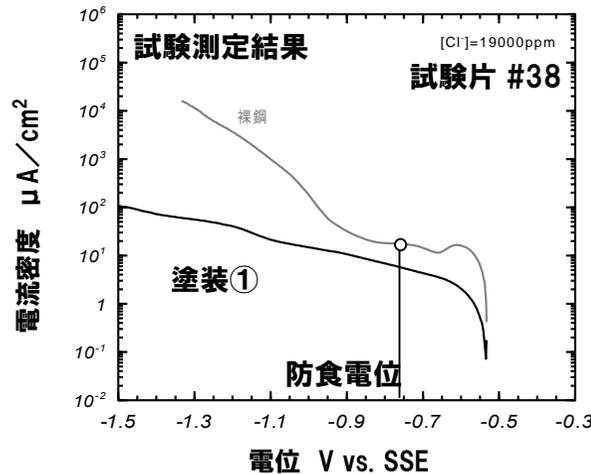
2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

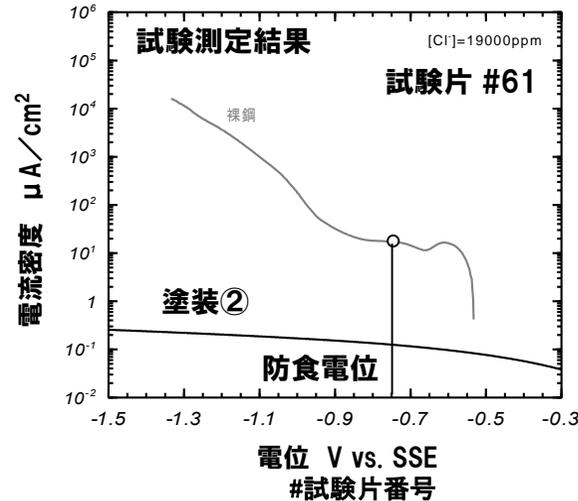
④ 浸漬による塗装劣化の影響確認試験 分極抵抗測定結果その1

試験・評価方法は②と同じ(カソード分極曲線取得後、分極抵抗値を算出、評価)

塗装①国内メーカー代替塗料、塗装②補修塗装用塗料の結果を示す。



電位と電流密度の関係
(Cl⁻19000ppm、塗装①
加熱+浸漬500h)



電位と電流密度の関係
(Cl⁻19000ppm、塗装②
加熱+浸漬500h)

塗装種類	Cl ⁻ 濃度[ppm]	分極抵抗 [Ωcm^2]		
塗装①	19000	# 38	# 39	# 40
		3.9×10^4	4.7×10^4	2.5×10^4
塗装②		# 61	# 62	# 63
		5.3×10^6	3.1×10^6	7×10^6

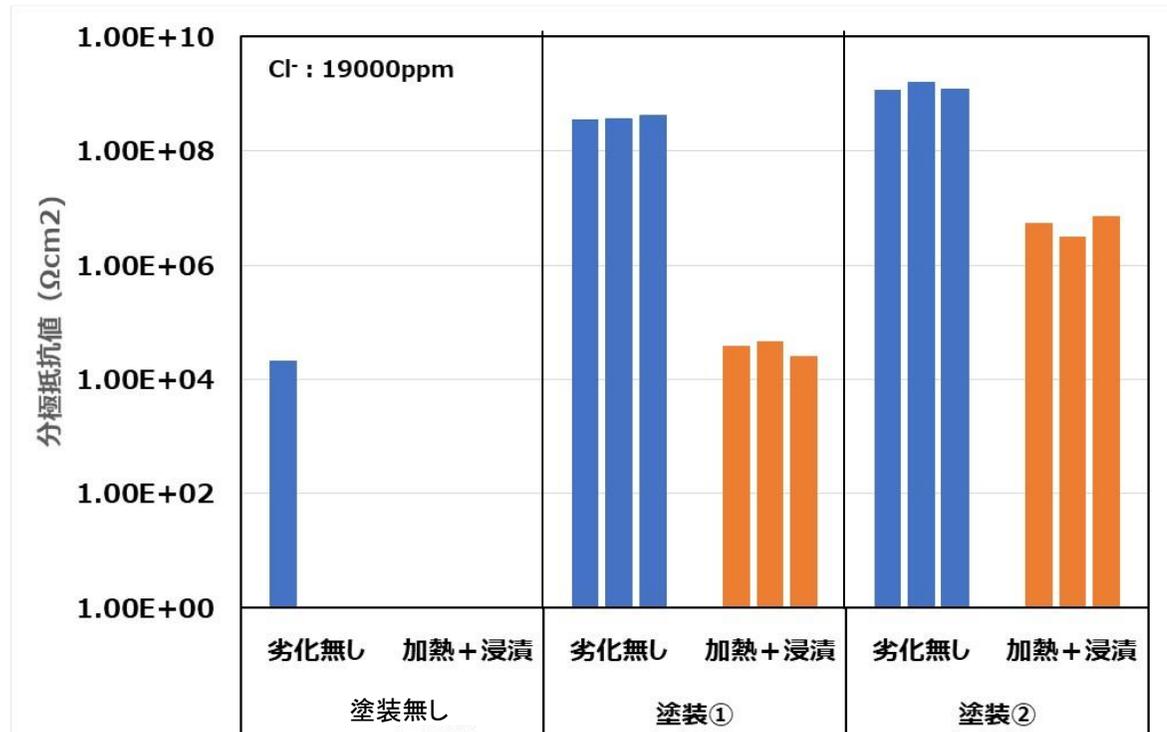
・加熱+浸漬後の外観結果からもわかるとおり、防食電位における電流密度は塗装②よりも塗装①のほうが大きい。塗膜の劣化が関与していると考えられる。

・塗装時の分極抵抗値 [Ωcm^2] : 塗装① $3.5 \sim 4.6 \times 10^8$ 塗装② $1.5 \sim 1.6 \times 10^9$

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

④ 浸漬による塗装劣化の影響確認試験 分極抵抗測定結果その2



加熱+浸漬有無による分極抵抗値の比較

- ・劣化した塗装①の分極抵抗値は塗装無しの値に近い値（約 $2 \times 10^4 \Omega \text{cm}^2$ ）となった。
- ・健全な塗装の分極抵抗値に対して、劣化した塗装①の分極抵抗値は $1/10^4$ 、塗装②は $1/10^2$ となった。塗装としての機能は低下していることが伺える

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

④ 浸漬による塗装劣化の影響確認試験 **まとめ**

塗料①、②の電気化学試験結果より以下を確認。

- ・塗装は、加熱＋浸漬によって分極抵抗が低下傾向になることを確認した。
- ・塗料①(建設時塗料の代替塗料)の場合、加熱後、浸漬することで、塗装無しの分極抵抗に近い値となる。
- ・塗料②(補修塗装工事の塗料)の場合、加熱後、浸漬することで、健全な塗装時の文教抵抗値の1/100になることが分かった。
- ・塗料②は目視で発錆等は確認できなかったものの、分極抵抗値の低下を考慮すると、加熱＋浸漬によって、劣化が進行することが示唆された。

上記の結果より、塗装劣化を解析で考慮する場合は、以下方針とする。

- ・塗装①の場合: 防食対象表面の分極抵抗値に塗装がない場合の分極抵抗値を用いる
- ・塗装②の場合: 防食対象表面の分極抵抗値に塗装がない場合の分極抵抗値の100倍程度の値を用いる

なお、実機の塗装が剥離していたり、浮いている場合は、塗装は劣化していることが想定されるので、塗装がない場合の分極抵抗を適用する。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

⑤放射線分解で発生するH₂O₂の影響確認試験 目的、試験・評価方法

目的:分極抵抗値に対する H₂O₂の影響を評価

試験・評価方法:②と同じ(カソード分極曲線取得後、分極抵抗値を算出、評価)
ただし、本試験はカソード分極曲線取得時に測定用溶液にH₂O₂を1.2ppm添加して測定を実施

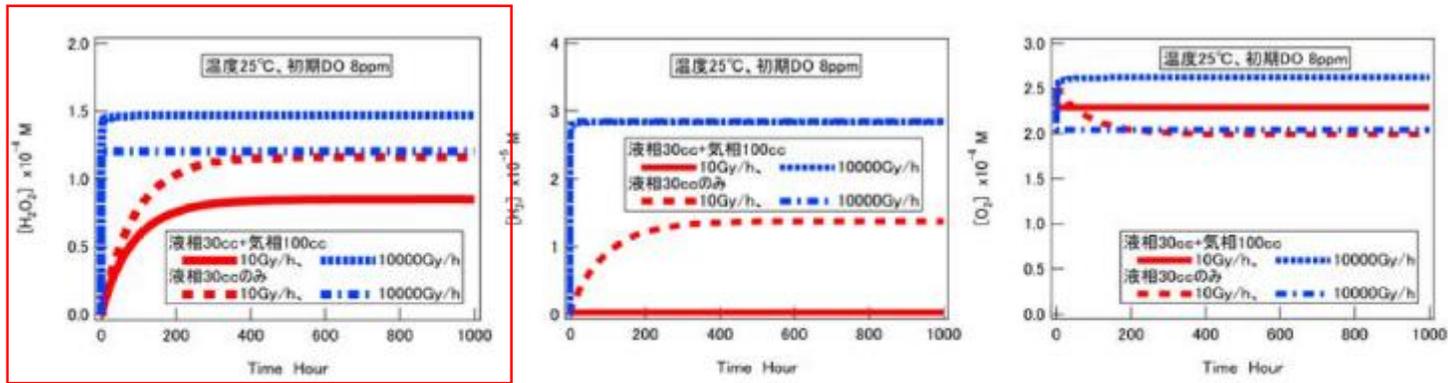


Fig.4 Elliot らの反応セットを用いた、水の放射線分解解析結果

(初期 DO 濃度 8 ppm、気相酸素 20%)

試験条件(放射線の影響:過酸化水素)

塗装有無	塩化物イオン濃度	H ₂ O ₂ 濃度	測定数	取得データ
無	100ppm	1.2ppm	3	カソード分極抵抗値
有			3	

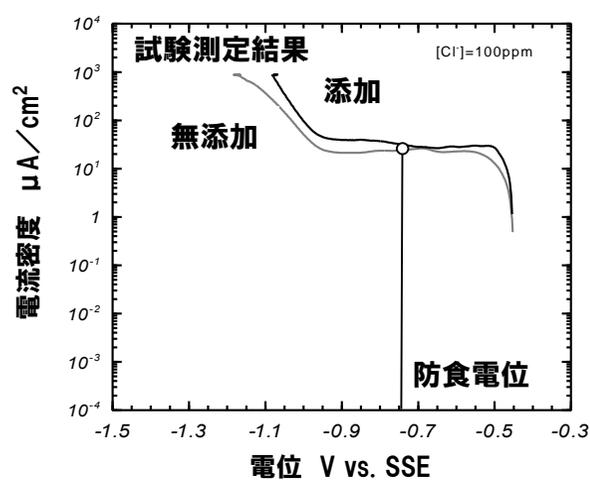
【参考】放射線環境下での腐食データベース(受託研究), 日本原子力研究開発機構 (2021/6)

・文献より、10Gy/hの環境下でH₂O₂が液相のみで約1.2ppm。トラス室の放射線量約0.3Gy/hに対して、保守的な条件として1.2ppmのH₂O₂濃度を設定

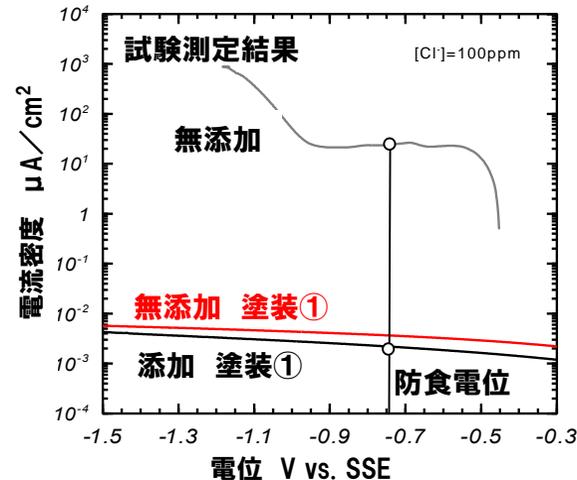
2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

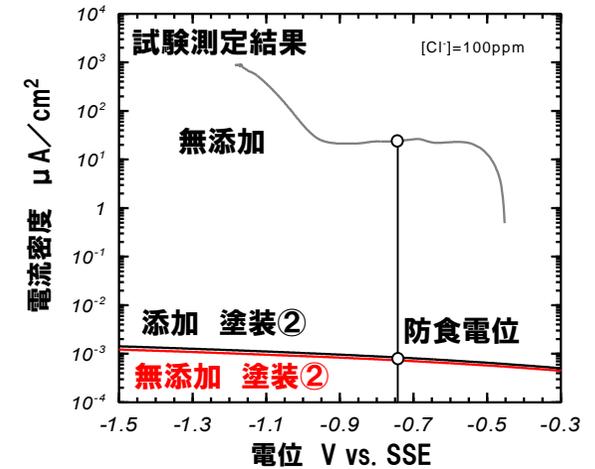
⑤ 放射線分解で発生する H_2O_2 の影響確認試験 試験結果その1



塗装無 電位/電流密度測定結果例



塗装① 電位/電流密度測定結果例



塗装② 電位/電流密度測定結果例

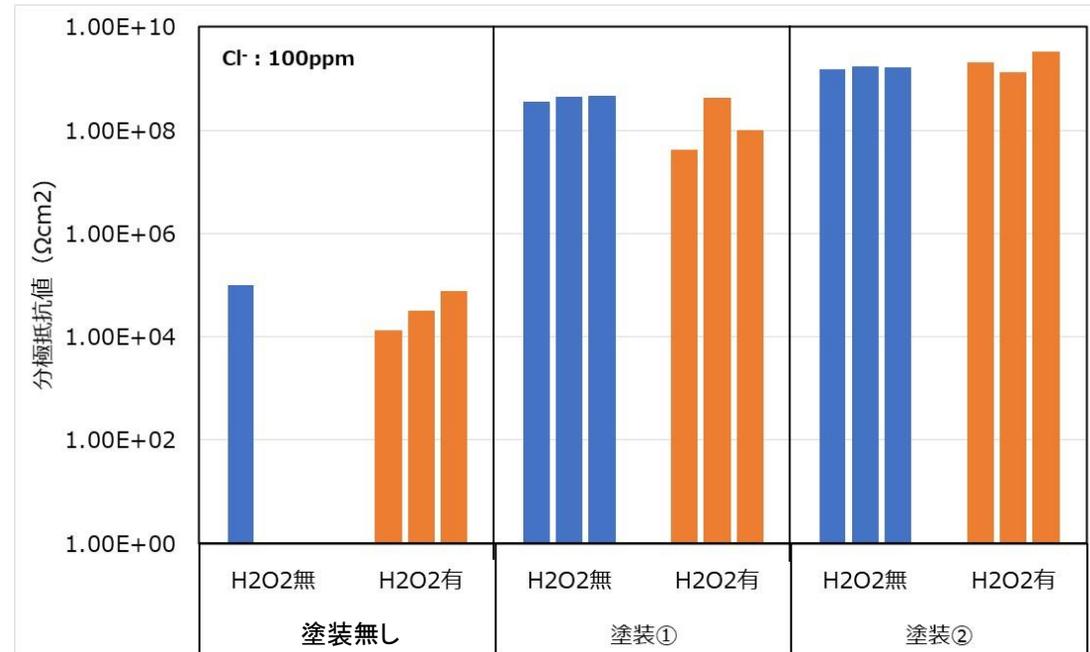
- 塗装無の場合、 H_2O_2 添加により電流密度がわずかに大きくなった。
- 塗装有の場合は、 H_2O_2 添加による明確な電流密度の変化は認められなかった。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

⑤ 放射線分解で発生する H_2O_2 の影響確認試験 試験結果その2

	Cl ⁻ 濃度 [ppm]	H ₂ O ₂ [ppm]	分極抵抗 [Ω cm ²]
塗装無	100	1.2	1.3×10^4
			3.1×10^4
			7.5×10^4
塗料①	100	1.2	4.0×10^7
			4.2×10^8
			9.7×10^7
塗料②	100	1.2	2.0×10^9
			1.3×10^9
			3.2×10^9



H₂O₂添加有無による分極抵抗値の比較

塗装条件によらず過酸化水素添加による分極抵抗の顕著な変化は認められなかった。
⇒次ステップとして、放射線環境下での検証・確認が必要

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

⑥ 錆の影響確認試験 目的および錆付着方法

目的：分極抵抗値に対する錆付着の影響を検討

付着方法：複合サイクル試験を用いて試験片に錆を付着

複合サイクル試験：試験片に対して、塩水噴霧→乾燥→湿潤(これを1サイクル)を繰り返すことで腐食させる試験方法。



図 複合サイクル試験装置と試験片吊り下げ状態例

目標錆付着割合	サイクル数	試験後拡大写真例	錆付着割合測定結果*
30～70%	23		50%前後
100%	79		100%

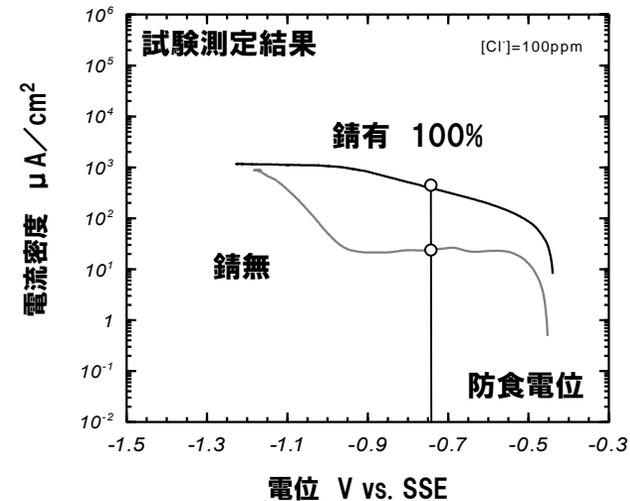
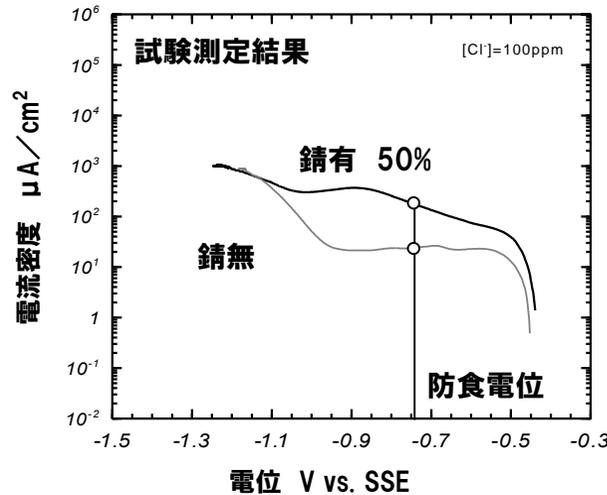
* マイクロスコープを用いて、半面を観察・測定にて算出

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

⑥ 鍍の影響確認試験 試験・評価方法、試験結果その1

試験・評価方法：②と同じ(カソード分極曲線取得後、分極抵抗値を算出、評価)



#試験片番号

電位と電流密度の関係(Cl-100ppm、鍍割合50%)

電位と電流密度の関係(Cl-100ppm、鍍割合100%)

鍍割合	Cl-濃度[ppm]	分極抵抗 [Ωcm^2]		
		# 74	# 75	# 76
50%	100	8.5×10^2	5.3×10^2	3.3×10^2
100%		# 85	# 86	# 88
		2.9×10^2	5.3×10^2	2.0×10^2

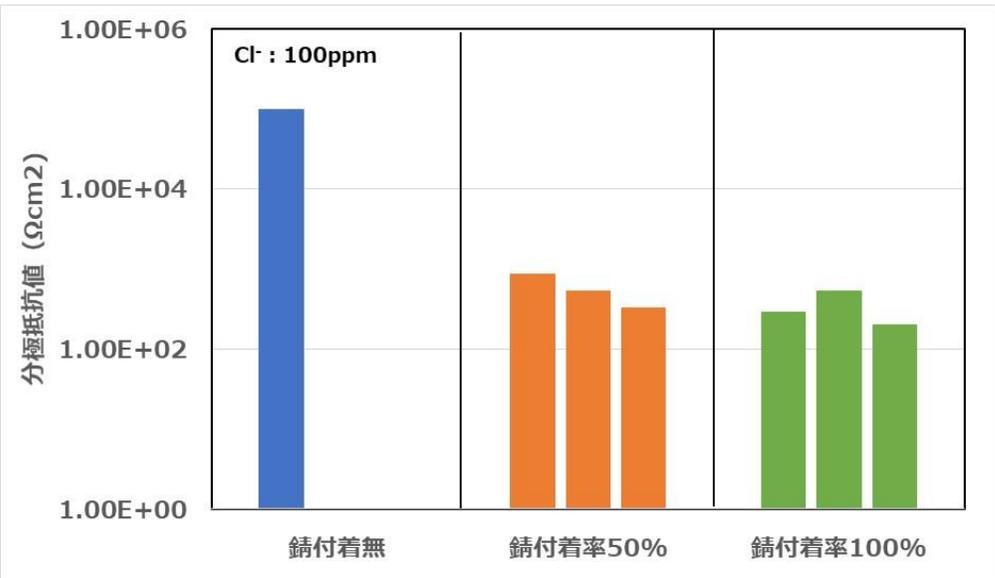
- ・防食電位における電流密度は鍍割合50%よりも100%方が大きかった。
- ・防食電位における鍍有の電流密度は鍍無よりも大きくなった。

・Cl-濃度:100ppm、鍍無・無塗装の分極抵抗値 [Ωcm^2] : 塗装① 1.0×10^5

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

⑥ 鋳の影響確認試験 試験・評価方法、試験結果その2



- 分極抵抗値は鋳付着によって低下した。
- 鋳割合50%よりも100%の方が小さかった。この傾向は電流密度と同じであった。

電気防食初期、鋳は安定したFe₃O₄に変化するために還元電流が必要となる。今回の分極抵抗値の低下はその現象を捉えたと考えられる。

表1は、海岸護岸での電気防食に関する実験にて、水位による電流密度の変位を調査したものである。日数経過による潮位間の電流密度の低下は顕著で、鋳形態が安定化したのち、電流値は低く安定することが分かる。

複合サイクル試験で鋳を形成した場合、一般的に乾燥過程で電気化学的に活性なFe(OH)が生成するものの、カソード防食環境下ではすぐにFe₃O₄に変化するため、鋳の影響が出るのはごく初期と考えられる。

従って、電気防食初期は鋳の還元反応のために、必要電流が多くなることを考慮する必要があるものの、長期的には鋳の影響は出にくいものと推察される。

鋳有無による分極抵抗値の比較

位置	実験初期			実験終期 (5ヶ月後)		
	干潮終	満潮初	満潮終	干潮終	満潮初	満潮終
潮位間		1250 }	250 }		275 }	38 }
		1400	300		475	
海水中上部	123 }	200 }	100 }	63 }	63 }	81 }
	175	250	150	81	88	94
海水中下部	56 }	125 }	56 }	31 }	38 }	63 }
	100	190	88	56	63	75

単位 mA/m²

表1 電気防食実施時の電流密度の変化(1)

(1) 港湾技術研究所資料

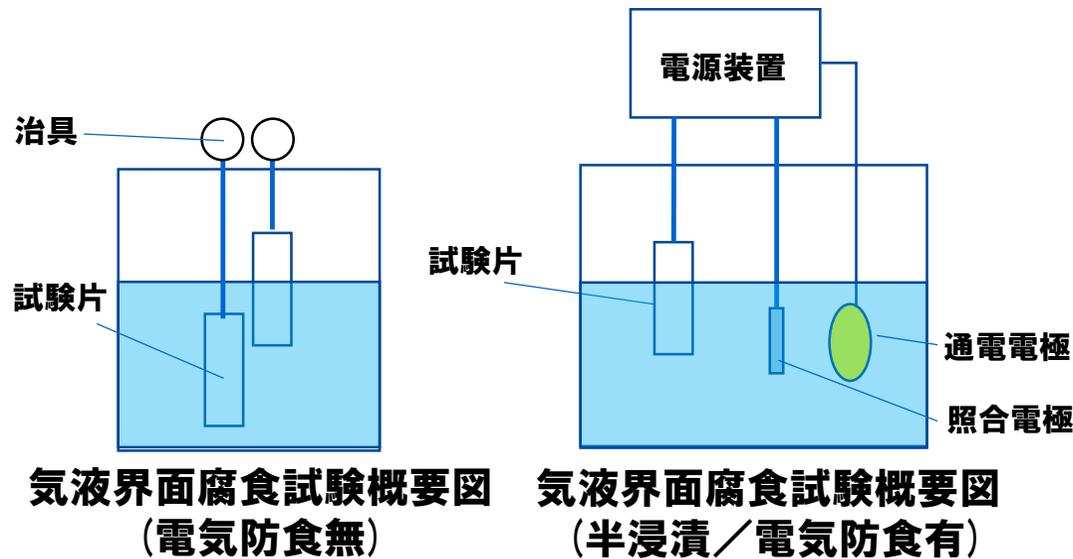
2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

⑦ 気液界面の影響確認試験 目的と試験方法

目的：電気防食が気液界面の腐食に対して加速など影響がないことを確認する。

浸漬状態	電気防食	浸漬時間	塩化物イオン濃度	測定数
全浸漬	無	500h	100ppm	3
	有			3
半浸漬	無	500h	100ppm	3
	有			3



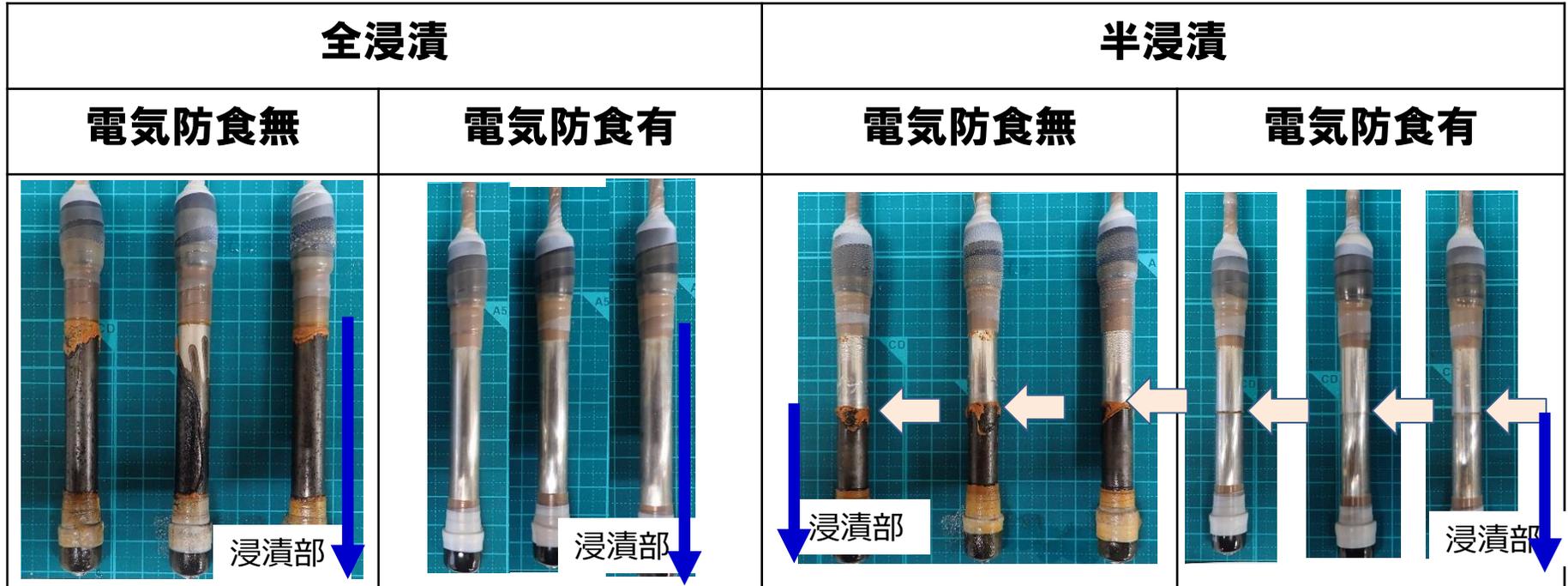
・気液界面試験のマトリクス／試験概要および試験装置の外観を示す。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

⑦ 気液界面の影響確認試験 試験結果

← 気液界面



- ・電気防食無の試験片は全浸漬、半浸漬ともに錆の発生を確認した。
錆は、外層が赤錆、内層が黒錆となるため、この黒色は内層の錆であると推定される。試験槽底には、錆が沈殿しているため、外層の赤さびは生成しては剥離しを繰り返していたと推定される。
- ・電気防食有の試験片は錆の発生はほとんどなく、試験槽の底に沈殿も認められなかった。
- ・気液界面に対しても、腐食が加速している傾向は認められなかった。

以上より、水位変動が安定しているS/Cトラス室環境において、電気防食は液相と気相の境界部分についても防食効果があることを確認

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

⑧水素発生量評価試験 目的、試験方法、評価方法

目的:水素発生が顕著になる電位を測定し、過防食電位の閾値設定に反映する

試験方法:試験方法は②と同じ(カソード分極曲線)

評価方法:

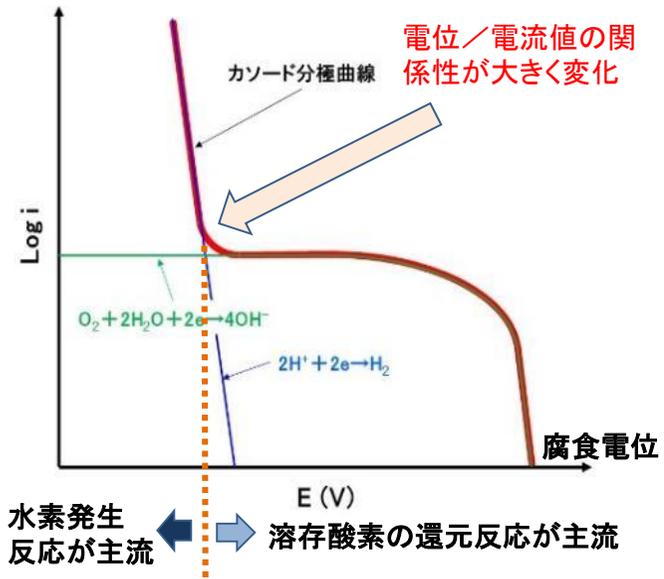


図 アウトプットイメージ
カソード分極曲線図例

カソード分極曲線を取得すると、プラトー領域から電流が急激に立ち上がる電位がある。

左図に示すように、腐食電位からプラトー領域は、溶存酸素の還元反応が大きく関わっており、急激に電流密度が立ち上がる領域は水素発生反応の影響があると考えられる。

それぞれの反応の傾きの交点を水素発生の影響が顕著になる電位とみなして、閾値となる電位を求める。
水素発生反応主流領域に入る場合は、得られた電流値、カソード反応式($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$)とファラデーの法則($n=It/zF$, n:物質質量、I:電流、t:時間、z:価数 F:ファラデー定数)を用いて、水素発生量を算出する。

試験条件(水素発生量評価)

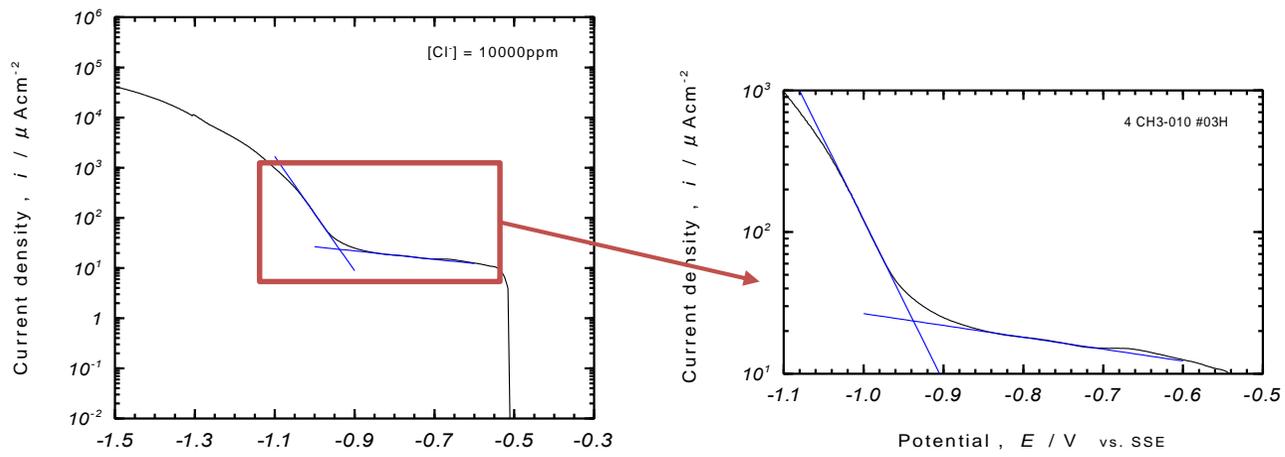
Cl ⁻ 濃度	測定数	取得データ
10000ppm	3	分極曲線

・導電率が低い条件で試験実施した場合、IRドロップの可能性が考えられるため、Cl⁻濃度を10000ppmとする。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

⑧水素発生量評価試験 試験結果(電気化学測定時Cl⁻濃度:10000ppm)



水素発生電位測定結果例

試験片 番号	水素発生の影響が顕著 となる電位(V vs.SSE)	換算 (V vs. Ag/AgCl/sw)
#03H	-0.938	-0.992
#04H	-0.946	-1.000
#05H	-0.918	-0.962

・水素発生電位は従来の知見とほぼ同等であった

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○ 基礎試験結果まとめ(1/2)

① 溶液の抵抗率測定試験

- ・ 溶液の塩化物イオン濃度と抵抗率の相関性を確認
- ・ Cl⁻濃度10、100、1000ppmの時、溶液の抵抗率は2Dシミュレーション解析のインプット条件とほぼ同等であることを確認

② 塗装及び塩化物イオン濃度の影響確認試験

- ・ Cl⁻濃度100ppmでの塗装無し鋼材の防食電位付近での分極抵抗は19000ppmの5倍
- ・ Cl⁻濃度19000ppm塗装無し鋼材の分極抵抗値と2D試解析時入力条件値は同等を確認

③④ 加熱／浸漬による塗装劣化影響確認試験

- ・ 塗装によって、分極抵抗は大きくなる。→絶縁性は高い。
- ・ 加熱＋浸漬によって分極抵抗値は低下する。
- ・ 劣化を目視確認できなくても、塗装劣化は進行している場合があり、それは分極抵抗値を下げる可能性がある。

⑤ 放射線分解で発生するH₂O₂の影響確認試験

- ・ 塗装無の場合、H₂O₂添加により分極抵抗値は小さくなる傾向を示した。
- ・ 塗装①の分極抵抗値は、H₂O₂添加によって小さくなる傾向を示した。
- ・ 塗装②の分極抵抗値は、H₂O₂添加による変化は認められなかった。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○ 基礎試験結果まとめ(2/2)

⑥ 鍍の影響確認試験

鍍有の分極抵抗値は、鍍無しの鋼材より1/100以下となることが分かった。
→ 防食初期の電流が大きくなる可能性を示唆

⑦ 気液界面の影響確認試験

・ 電気防食はS/C脚部の気液界面の防食に有効であることを確認

⑧ 水素発生量評価試験

・ 水素発生電位は従来の知見とほぼ同等であった。

基礎試験で得られた結果より、3次元FEM解析に以下を反映

○ 溶液の抵抗値は後述の2D解析結果と試験結果がほぼ同等であることを確認

⇒ 3次元FEM解析の溶液抵抗値に電気化学試験結果の値を適用

○ 分極抵抗値に大きく影響を及ぼす環境因子は塗装・鍍であることを確認

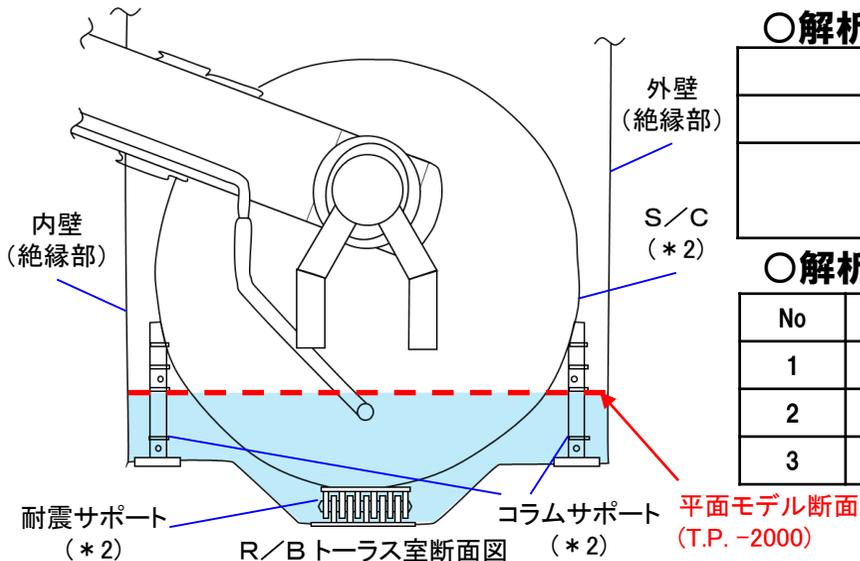
⇒ 3次元FEM解析の分極抵抗値に、塗装劣化(加熱、浸漬)と鍍付着を模擬した2条件を適用

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

○2次元モデルによるFEM解析

- ・簡易的な電極数量や配置の想定のために2次元モデルでのFEM解析を実施。
- ・解析ソフトはモデリング／メッシュ作成／解析までを主にCOMSOL Multiphysicsで実施。
- ・解析モデルは平面モデルとコラムサポートと耐震サポートを縦断する断面モデルを作成。
- ・平面モデルの水位は1F 1～3号機のR/B水位低下計画案*1より、2022年度の1F建屋の滞留水と地下水水位のT.P. -2000を選定した。今後建屋内の水位は低下させる計画であり、T.P. -2000での解析結果は水位が低下した場合でも適用性がある。
- ・各サポートに電極を1体または2体配置した場合について検討。
- ・電極位置：コラムサポートから30cm～100cm(電極各1体)と50cm(電極各2体)位置に設置、耐震サポートから水平距離72cmに設置を仮定して解析を実施。



○解析ソフト

項目	製品名	ソフトウェアメーカー
解析ソフト	COMSOL Multiphysics@	COMSOL Inc.(米国)
モデリングソフト	COMSOL Multiphysics@	COMSOL Inc.(米国)
	AutoCAD@ (※一部)	Autodesk Inc.(米国)

○解析モデル

No	解析モデル	備考
1	平面モデル1	T.P. -2000/各サポートに電極1個配置
2	平面モデル2	T.P. -2000/各サポートに電極2個配置
3	断面モデル	コラムサポートと耐震サポートを縦断する断面

*1 建屋滞留水処理等の進捗状況について(東京電力HD、2022年3月)

*2 S/C、コラムサポート、耐震サポートの材質を同じと設定

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

2次元モデルによるFEM解析

○FEM解析の解析パラメータ条件

- ・滞留水のカソード自然電位は $-0.6\text{V Ag/AgCl [sw]}$ と仮定し、防食対象が腐食の進行が停止する目標の防食電位： $-0.8\text{V Ag/AgCl [sw]}$ を満たすよう電極配置を検討した。
- ・各塩化物イオンの時の抵抗率及び塗装の剥離率時のカソード分極抵抗は仮定値である。

解析パラメータ

項目	単位	入力値
電気抵抗率	$\Omega \cdot \text{cm}$	①24600 ②2620 ③280
カソード分極抵抗	$\Omega \cdot \text{m}^2$	①2 ②2.67 ③4 ④8

入力条件および解析上の目標電位

項目	単位	入力値
カソード自然電位	$\Omega \cdot \text{cm}$	$-0.6\text{ V Ag/AgCl [sw]}$
カソード防食電位(目標)	$\Omega \cdot \text{m}^2$	$-0.8\text{ V Ag/AgCl [sw]}$ 以下

抵抗率設定

塩化物イオン濃度 [Cl ⁻] (ppm)	抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
10	24600
100	2620
1000	280

カソード分極抵抗設定

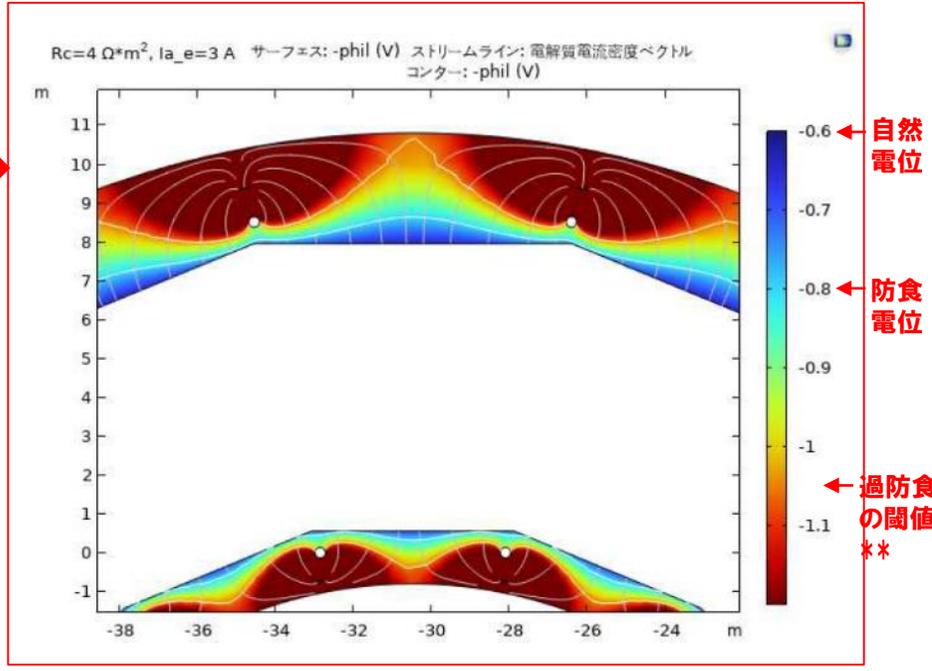
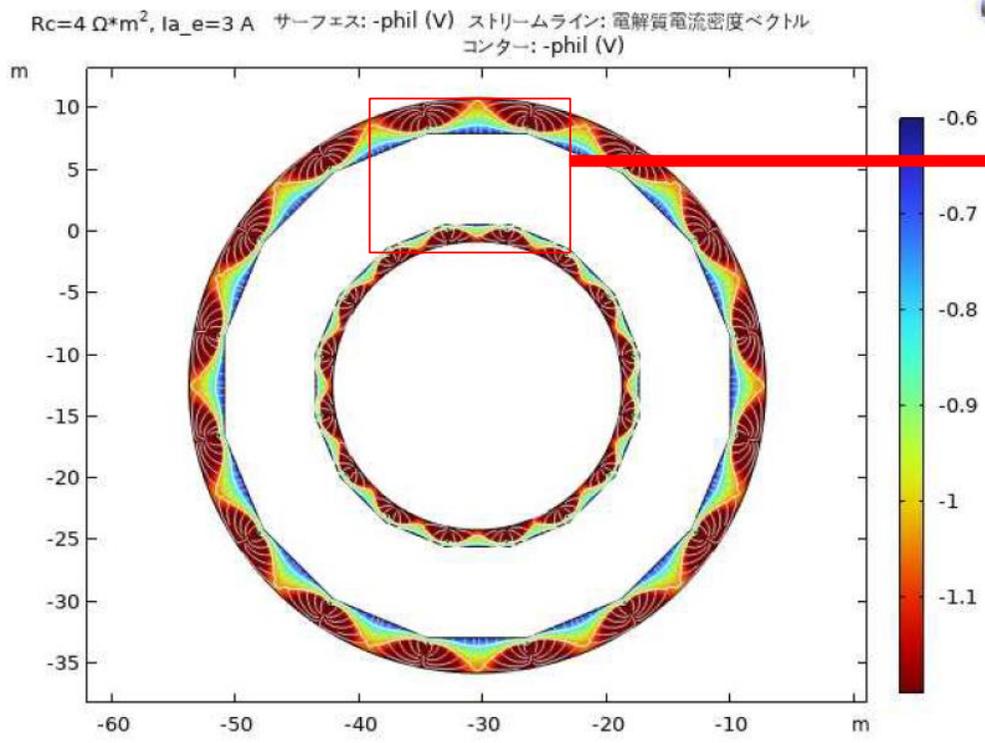
塗装剥離率 (%)	カソード分極抵抗 ($\Omega \cdot \text{m}^2$)
100	2
75	2.67
50	4
25	8

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

○2次元平面モデル(電極1つの場合) 塩化物イオン濃度100ppm*での解析結果

カソード分極抵抗	出力電流	コラムサポート電位		S/C電位
		最卑値	最貴値	最卑値
Ωm^2	A	V	V	V
4	3	-1.638	-0.856	-0.822



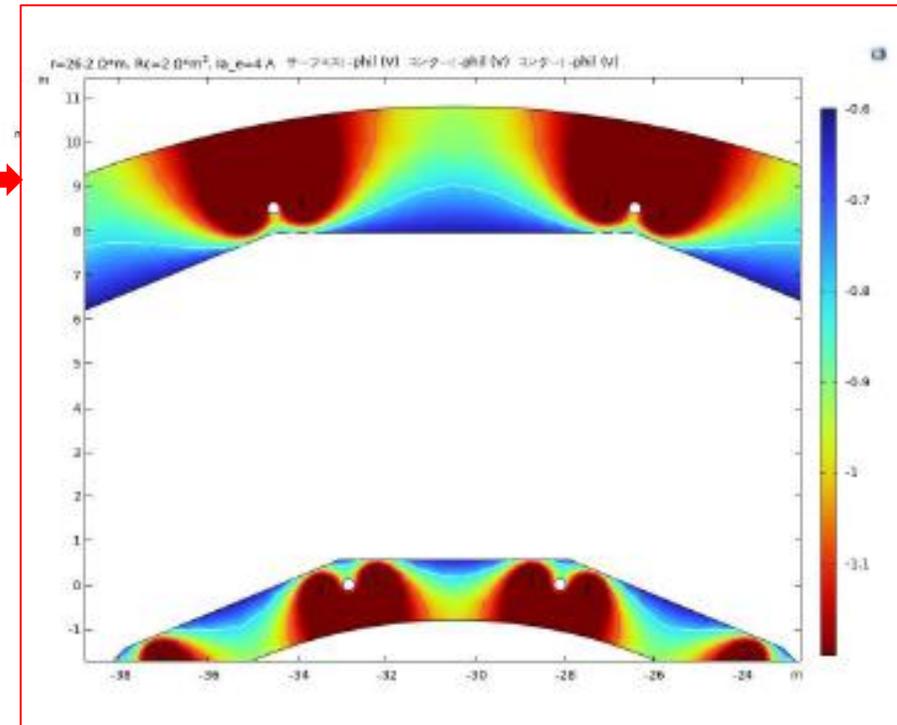
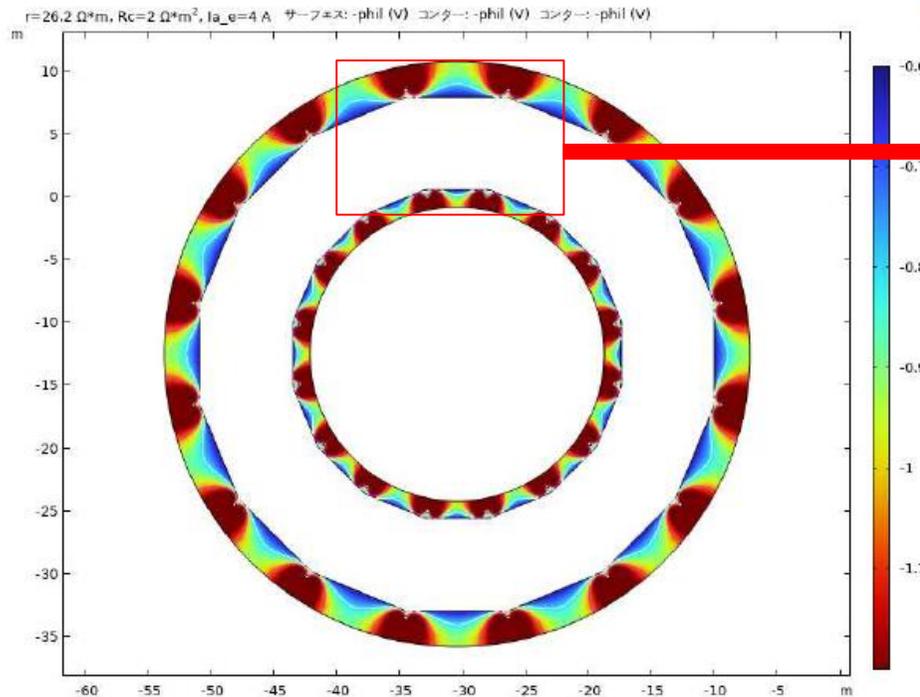
・コラムサポート1つに対して通電電極1つのみ設置した場合、コラムサポートの一部が -1.6V Ag/AgCl [sw] という卑な電位となり、過防食となることを確認した。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○2次元平面モデル(電極2つの場合) 塩化物イオン濃度100ppmでの解析結果

カソード分極抵抗	出力電流	コラムサポート電位		s/c電位
		最卑値	最貴値	最卑値
$\Omega \text{ m}^2$	A	V	V	V
2	外側3.2, 内側3.8	-1.045	-0.805	-0.968



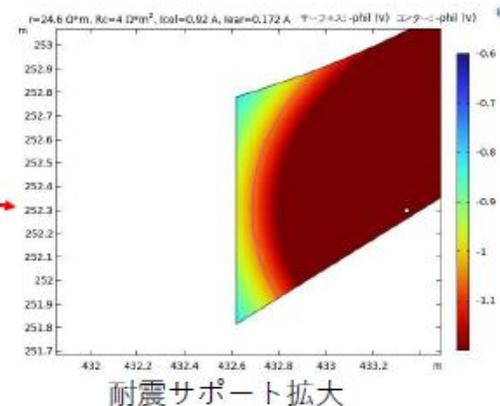
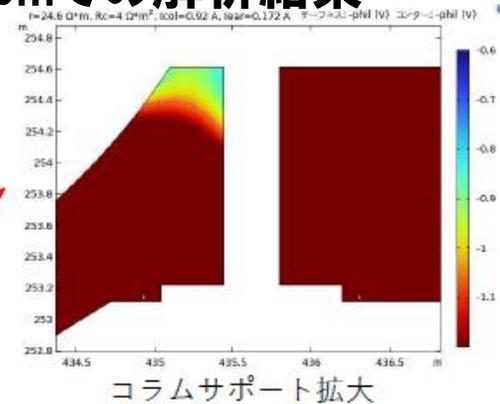
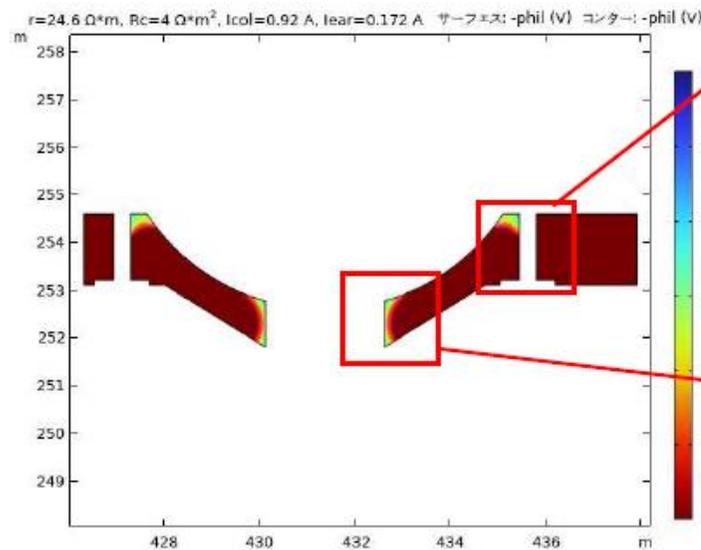
- ・コラムサポート1つに対して通電電極2つを設置した場合、分極抵抗値の値や電流の調整の方法にもよるが、過防食となる電位を避けられることを確認した。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○2次元断面モデル 塩化物イオン濃度100ppmでの解析結果

	コラムサポート	耐震サポート	S/C
最卑値 [V]	-9.212	-0.963	-2.163
最貴値 [V]	-0.805	-0.800	-



- 電極設置数の検討のために、各サポートに電極を2つ設置したケースで解析を実施した。
- ・床面に電極を設置する場合、コラムサポートの高い部分(支柱)を防食電位にしようとする、過防食となってしまうことを確認した。
 - ・耐震サポートについては床面に設置した場合でも電位の最卑値と最貴値がコラムサポート程大きくなり、高さ方向は比較的均一に防食出来ることを確認した。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○ 2DモデルでのFEM解析結果まとめ

- ・塩化物イオン濃度が低い(溶液抵抗が高い)ほど、過防食となることを確認した。
- ・塩化物イオン濃度10ppmの場合は過防食とならずに、S/C脚部全体を防食をすることが困難であるが、塩化物イオン濃度100ppm以上の場合は分極抵抗、電極配置次第で過防食を避けることが可能であることを確認した。
- ・分極抵抗値等にもよるが、各脚部の直ぐ横(0.5m程度)に通電電極を2つ設置することで防食できる目途を得た。本仕様を(1)電気防食設備の実機適用性の概念検討のインプットとする。
- ・2DモデルでのFEM解析は必要電極数の試評価である。基礎試験実施後、防食電位に係る実機評価を3次元FEMモデルにてFEM解析を行う。

平面モデル1(電極1本)

カソード分極抵抗 ($\Omega \cdot m^2$)	塩化物イオン濃度 (ppm)		
	10	100	1000
2	△	△	△
2.67	△	△	△
4	△	△	○
8	△	△	○

平面モデル2(電極2本)

カソード分極抵抗 ($\Omega \cdot m^2$)	塩化物イオン濃度 (ppm)		
	10	100	1000
2	△	△	○
2.67	△	△	○
4	△	△	○
8	△	○	○

断面モデル

カソード分極抵抗 ($\Omega \cdot m^2$)	塩化物イオン濃度 (ppm)		
	10	100	1000
2	△	△	□
2.67	△	□	□
4	△	□	□
8	△	□	□

凡例

- : 防食対象全体が防食電位～過防食電位に収まる
- △ : 防食対象全体が防食電位を満足するが過防食電位を超える箇所がある
- : 防食対象全体が防食電位を満足して耐震サポートは過防食電位以内に収まるがコラムサポートに過防食電位を超える箇所がある

防食電位 : $-0.8V$ (Ag/AgCl/[sw])
 過防食電位 : $-1.05V$ (Ag/AgCl/[sw])

2. 本事業の具体的な実施内容

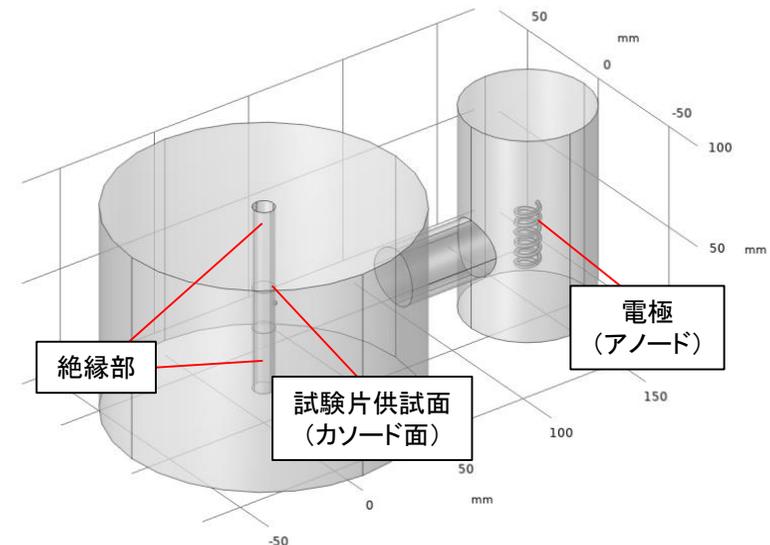
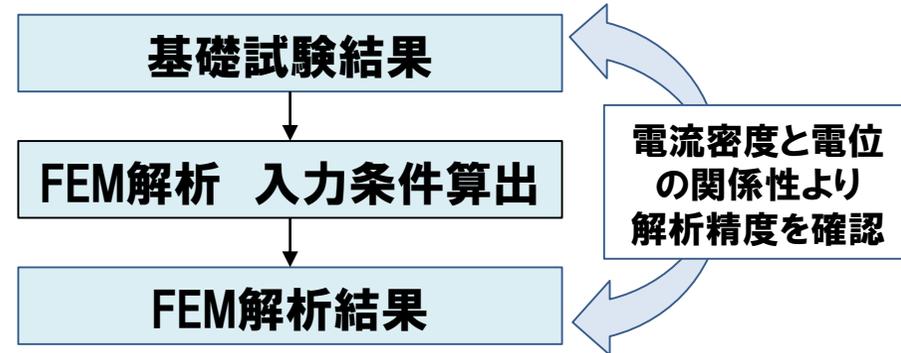
(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○FEM解析の妥当性確認(1/3)

FEM解析による電気防食における電位評価について、試験結果と解析結果を比較して解析の妥当性を確認した。

○解析の妥当性確認の方法

- 試験結果から算出した溶液の抵抗および分極抵抗を用いて、3次元試験モデルに対するFEM解析を実施
- 電流値と電位の関係について、試験結果と解析結果を比較することでFEM解析の妥当性を検証
- 妥当性確認のために使用したFEM解析モデルは、電気化学試験の水槽、電極、試験片供試体を模擬
- 溶液のCl⁻濃度100ppmおよび19000ppmの条件で解析を実施

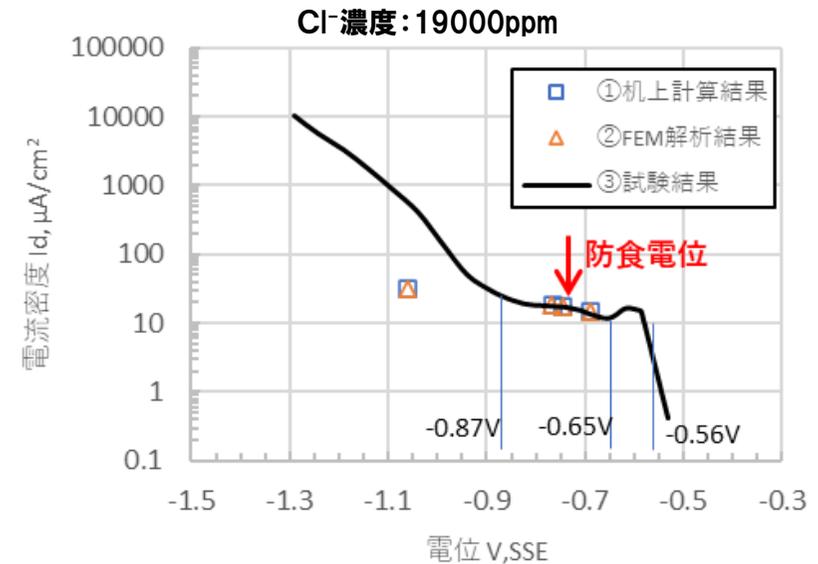
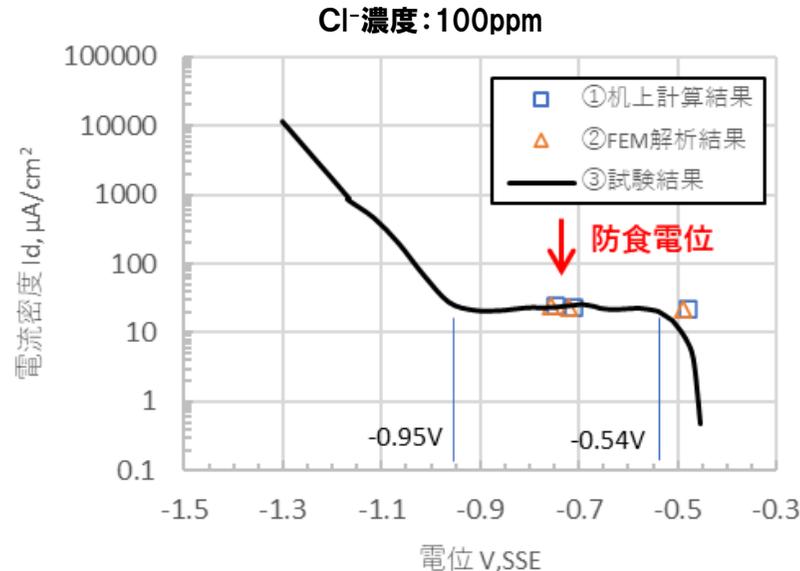


妥当性確認のためのFEM解析モデル

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○FEM解析の妥当性確認(2/3) FEM解析結果



- Cl⁻濃度: 100ppm、19000ppm(海水相当)の両方のケースで以下を確認した。
- 目標とする防食電位: -0.746V (SSE) *付近ではFEM解析結果(凡例②)と基礎試験結果(凡例③)は同等であり、FEM解析により妥当な電位を評価できると考えられる。
- 100ppm: -0.95V (SSE) 、19000ppm: -0.87V (SSE) より卑側の電位では、電位の解析結果は試験結果より卑側となった。解析で得られた電位分布を用いて水素発生量評価などを行う場合、実機(試験結果)より低い電流密度で任意の電位に到達するため、3次元解析では実機よりも卑側の電位分布の結果が出力される傾向になり、安全側の評価となると考えられる。
- 100ppm: -0.54V (SSE) 、19000ppm: -0.56V (SSE) より貴側の電位では解析結果と試験結果は整合していないが、防食施工時の想定電位から外れているため影響はないと考えられる

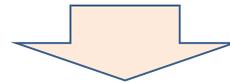
2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○FEM解析の妥当性確認(3/3)

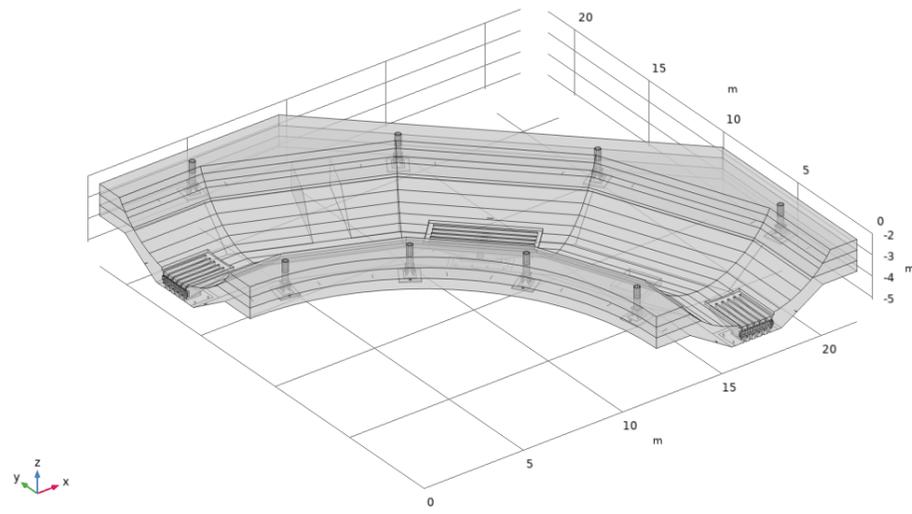
○まとめ

- ・目標とする防食電位付近の電位をFEM解析を用いて評価することは妥当である。
- ・水素発生反応が主流になる領域の電位においては試験結果とFEM解析結果に乖離があるものの、水素発生量評価に対しては安全側の評価となる。

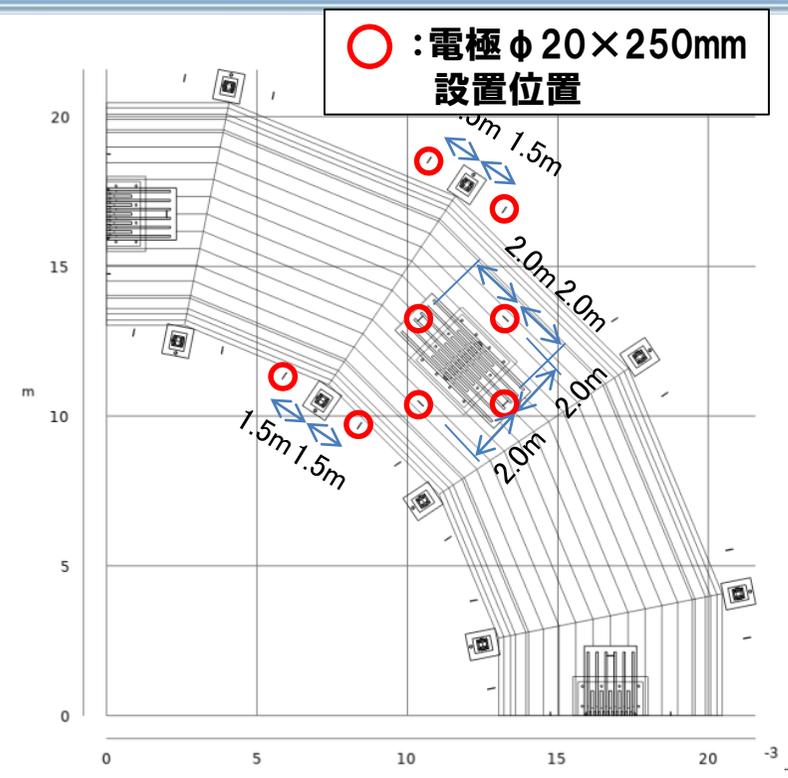


試験結果の溶液の抵抗値および分極抵抗値をそのままFEM解析の入力条件とする。

2. 本事業の具体的な実施内容
 (2) 実機適用性評価のための基礎試験
 ○ 3次元FEM解析の解析条件(1/2)



3次元FEM解析モデル(水位:T.P. -2000)



3D解析 電極配置案

○ 3次元FEM解析の概要

- 実機S/Cの対称性を考慮し3次元FEM解析モデルは実機S/Cサイズの1/4モデルの解析とする。1/4モデルでもS/C全体(1/1モデル)の解析と同等の評価が可能である。
 解析インプット: 溶液の抵抗率、分極抵抗、通電電極の本数/位置
 解析アウトプット: 防食電位分布、防食に必要な通電電極の本数/位置
- 防食電位の解析結果に応じて、通電電極の本数/位置を調整し、必要な電極数・位置を評価する。また、得られた防食電位分布を用いて水素発生量評価を実施する。
- 特に耐震裕度の低い部位において防食電位に到達することを目標とする。
- 耐震サポートは防食効果確保のため各脚に電極4本設置することを基本ケースとした。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○3次元FEM解析の解析条件(2/2)

3次元解析条件は実機の状態を想定し、以下を選定。

- ・溶液抵抗：電気防食施工時を想定し一様なCl⁻濃度およびCl⁻濃度勾配有の2条件
- ・分極抵抗：塗装劣化を想定した場合と塗装が劣化・剥離して錆が発生し場合の2条件
- ・以上に加えて電極本数を半減させた場合の全5条件の3次元FEM解析を実施

水質条件、 通電電極配置案	水位 T.P. (mm)	塩化物イオン濃度 [Cl ⁻] (ppm)	溶液の抵抗率 (Ω・cm)	分極抵抗 (Ω・cm ²)	
				(中程度の条件)	(低い条件)
Cl ⁻ 濃度一定、 各脚に通電電極 2つ設置	—	100	No.2の 100ppm結果を 適用	<u>塗装①</u> 加熱+浸漬(500h)	塗装無 +錆割合100% (No.6#88結果を適 用)
Cl ⁻ 濃度勾配有、 各脚に通電電極 2つ設置	-2000 ~ -2500	10	No.2の 10ppm結果を 適用	<u>塗装①</u> 加熱+浸漬(500h)	塗装無 +錆割合100% (No.6#88結果を一部 に適用)
	-2500 ~ -3000	100	No.2の 100ppm結果を 適用		
	-3000 ~	1000	No.2の 1000ppm結果を適用		
Cl ⁻ 濃度一定、 通電電極本数半減	—	100	No.2の 100ppm結果を 適用	<u>塗装①</u> 加熱+浸漬(500h)	

下線赤枠の条件の解析結果を報告する。分極抵抗が低い条件は、実機では想定されない複合サイクル試験による錆を前提としていることから、本資料では解析結果を省略する。

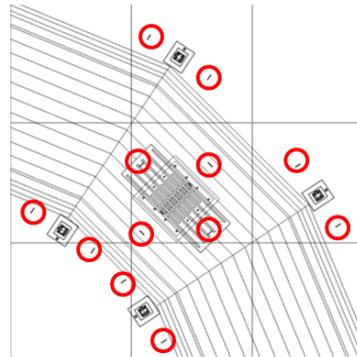
2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

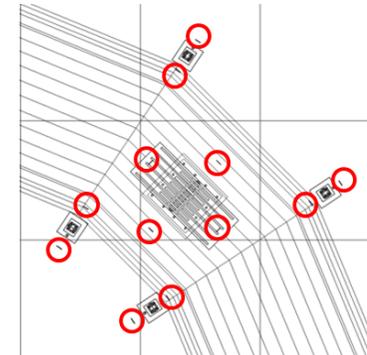
○3次元FEM解析における電極配置(全4パターン)

- 最適な電極配置を確認するため、Cl⁻濃度一定のケースで4つの電極配置を試解析・比較し傾向を確認した。なお、耐震サポートについては電気防食効果確保の観点から、コラムサポートの2倍の数の電極を設置して解析を実施した。

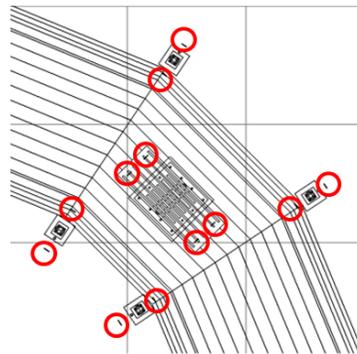
配置①
コラム2本：左右
耐震4本：前後左右



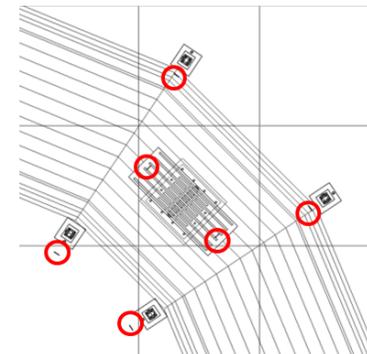
配置②
コラム2本：前後
耐震4本：前後左右



配置③
コラム2本：前後
耐震4本：左右2列ずつ



配置④ ※電極数半分
コラム1本：前
耐震2本：左右



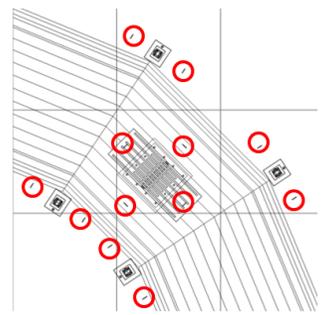
2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

○3次元FEM解析の解析結果(電極配置①)

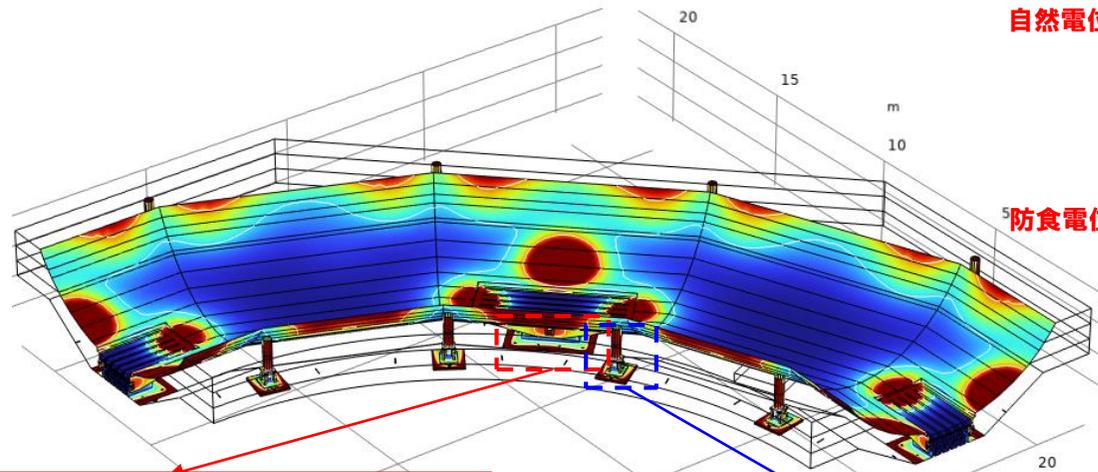
電極配置①(コラムサポート左右、耐震サポート四方に電極設置)の解析結果

配置①
 コラム2本:左右
 耐震4本:前後左右



la_col_ext=3 A, la_res=7 A

電位

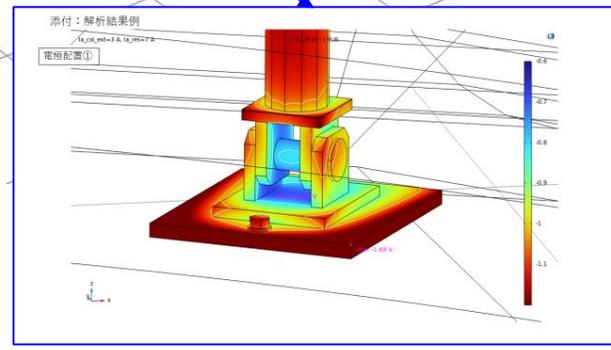
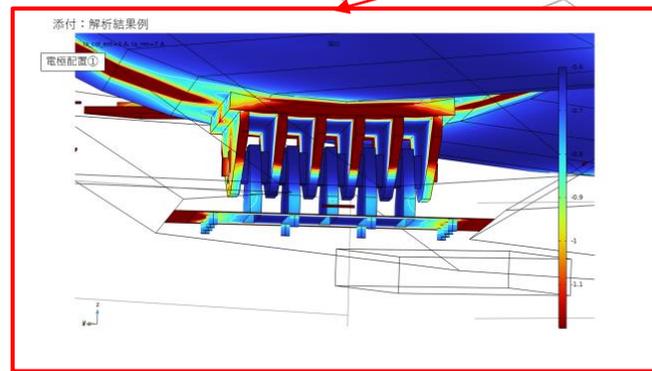
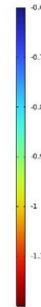
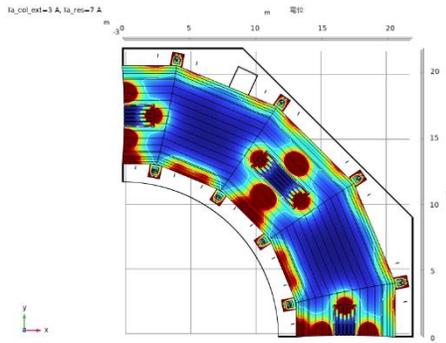


電位分布 (V)

自然電位 → -0.6

5防食電位 → -0.8

← 過防食の閾値 -1



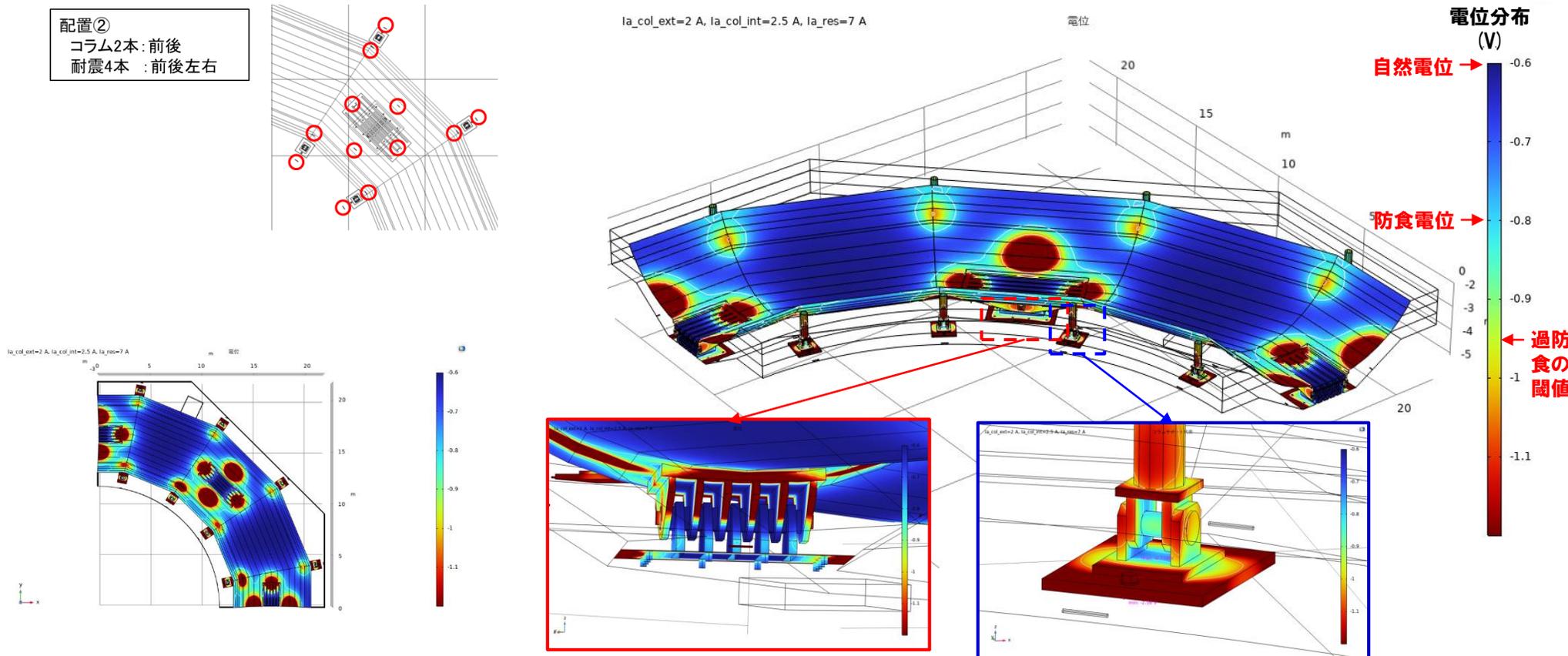
- 防食優先部に対して防食を達成出来ていることを確認した。
- 耐震サポートのラグプレート隙間奥は、電流が到達しにくく電位を変化させることができなかった。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○ 3次元FEM解析の解析結果(電極配置②)

電極配置②(コラムサポート前後、耐震サポート四方に電極設置)の解析結果



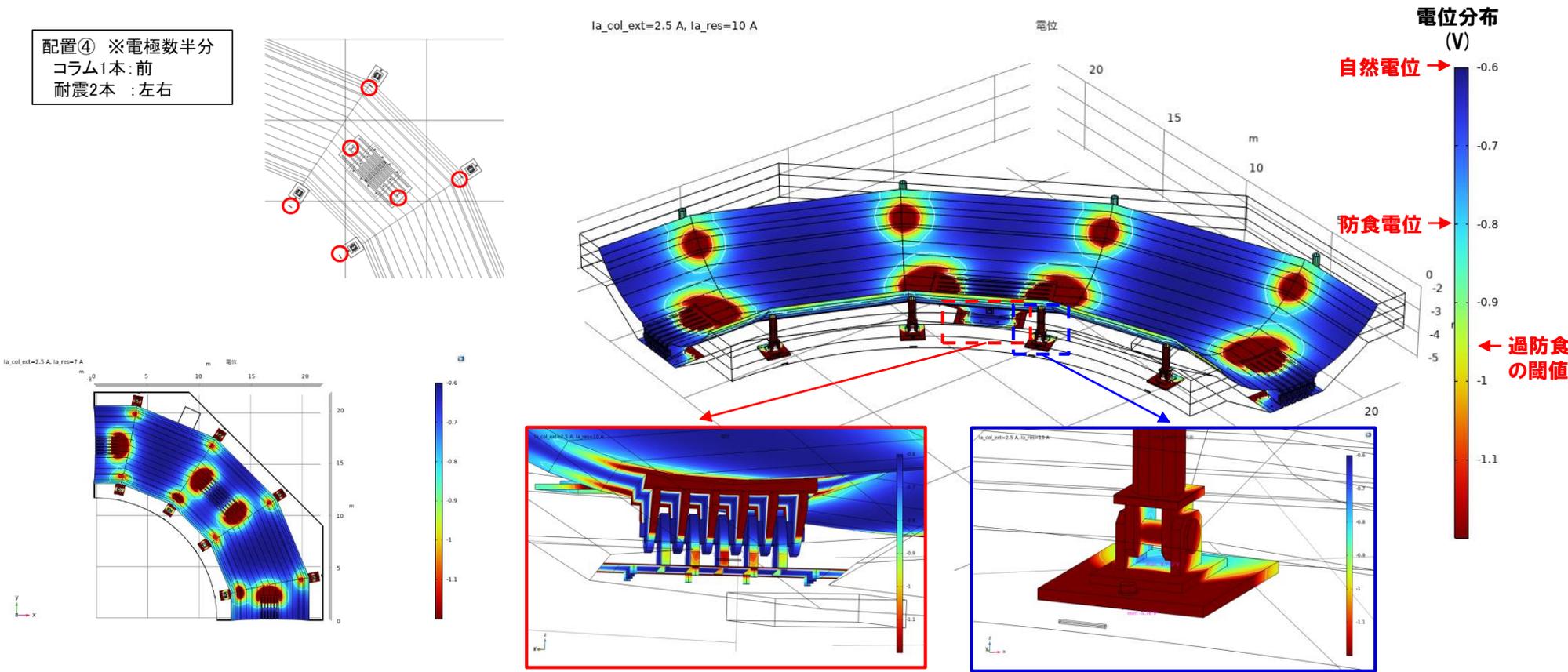
- 防食優先部に対して防食を達成出来ていることを確認した。
- コラムサポート クレビス部の内側に電流が流れやすいことを確認した。
- 耐震サポートのラグプレート隙間奥は、電流が到達しにくく電位を変化させることができなかった。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

○3次元FEM解析の解析結果(電極配置④)

電極配置④(コラムサポート前、耐震サポート左右に電極設置)の解析結果

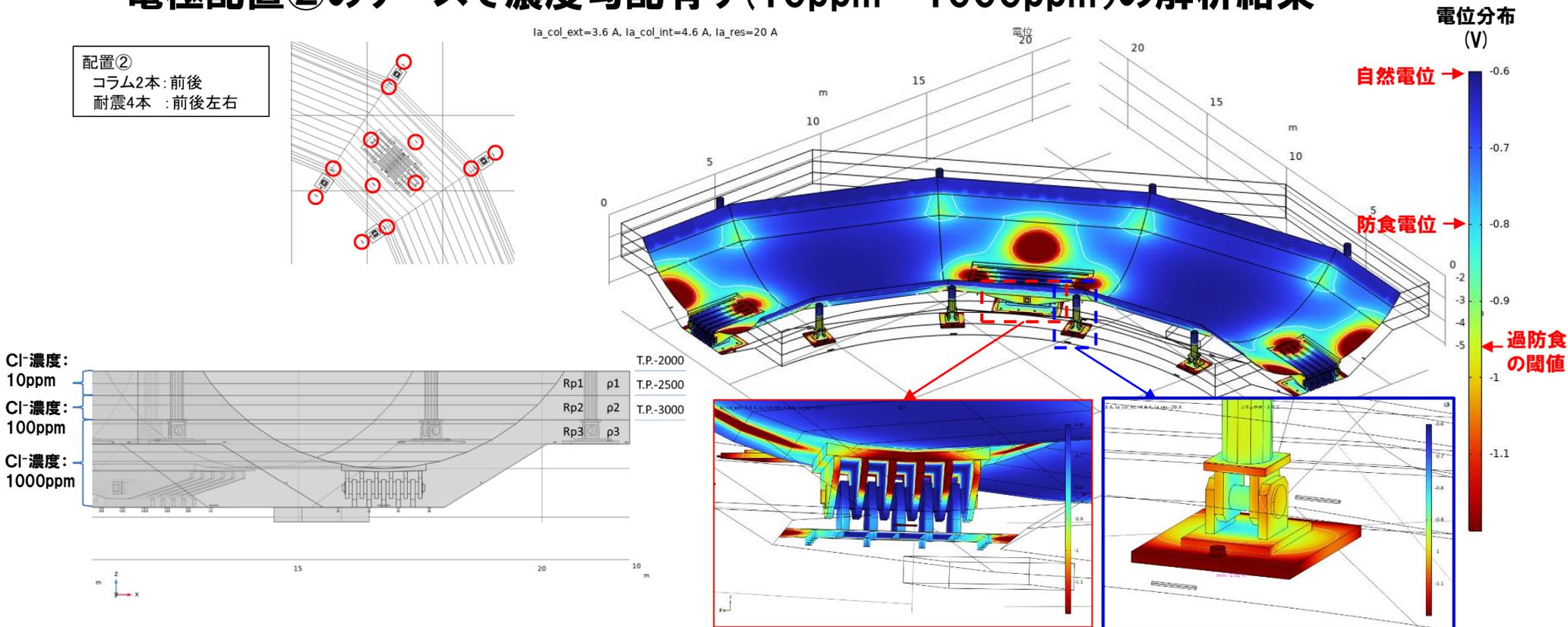


・サポートの電極を設置していない面をカバーできず、通電電極を設置している側の面が過防食になる様子を確認した。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○3次元FEM解析の解析結果(環境などの異なる条件の影響解析結果)
電極配置②のケースで濃度勾配有り(10ppm~1000ppm)の解析結果



- Cl⁻濃度1000ppmの位置にあるコラムサポートクレビス部の防食が達成可能であり、Cl⁻濃度が100ppm均一の場合に比べて、コラムサポートクレビス部の過防食の回避が可能で、電位分布がよい傾向であることを確認した。
- 耐震サポートのラグプレート外面は防食可能だが、Cl⁻濃度1000ppmでもラグプレート隙間奥の電位を殆ど変化させることは出来なかった。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

○3次元FEM解析結果 まとめ(1/3)

<総括>

- ・配置②(各コラムサポートの前後に電極配置、各耐震サポートの四方に電極設置)が最も電位分布が良好。耐震評価上、特に裕度が低いコラムサポート基礎部のクレビスおよび耐震サポートのラグプレートシアピン外側等の防食優先部位について、防食を達成する通電電極配置を設定した。
- ・電極数半分(配置④)の場合はサポートの電極を設置していない面をカバーできず、電位分布が悪くなるため、今回想定している水質・分極抵抗ではコラムサポートに2体、耐震サポートに4体の電極が必要であると考えられる。

<コラムサポート用電極>

- ・コラムサポートの前後に配置するパターンが最も電位分布が良く、防食優先度の高いクレビス部の内側へ電流が入りやすかった。
- ・高張力鋼であるクレビス部シアピンの外側一部が過防食となる可能性がある。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○3次元FEM解析結果 まとめ(2/3)

<耐震サポート用電極>

- ・耐震サポートの前後左右に配置するパターンが最も電位分布が良かった。
- ・想定している水質／分極抵抗の場合、耐震サポートには最低4体の通電電極が必要。
- ・狭隘部であるラグプレート隙間奥は、電流が到達しにくく電位を変化させることができなかった。
- ・高張力鋼であるアンカーボルトは通電電極に近く、一部が過防食となる可能性がある。

電位分布の配置序列

評価対象	優 ←	→ 劣
コラムサポート	配置② 配置③	配置① 配置④
耐震サポート	配置① 配置②	配置③ 配置④
総合	配置②	配置① 配置③ 配置④

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○3次元FEM解析結果 まとめ(3/3)

<濃度勾配の影響評価結果>

- ・Cl⁻濃度が均一：100ppmの場合に比べて、濃度勾配がある場合の方が防食優先部を良く防食できている傾向であった。理由として、コラムサポートの防食優先部および耐震サポートがCl⁻濃度1000ppmの層に位置しているため、Cl⁻濃度が均一：100ppmの場合に比べて電位が変化しやすいためである。
- ・Cl⁻濃度1000ppmであっても、耐震サポートのラグプレート隙間奥は電位が変化しにくかった。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○水素発生評価

⑧水素発生量評価試験及び3次元FEM解析結果をもとに、水素発生量を評価した。

- ・水素発生量評価試験より、水素発生電位の閾値は⑧水素発生量評価結果の
平均値：-0.988 (V vs.Ag/AgCl [sw]) とした。
- ・3次元FEM解析より水素発生電位の閾値を超える部位の面積と流入電流を求めた。
- ・流入電流が全て水の電気分解による水素ガス発生に寄与すると仮定し、(1)式を用いて水素発生量を算出した。
- ・表中の解析条件では標準状態で0.495mol/h (約11L/h) の水素ガスが発生する。

$$V_{H_2}(L/h) = \frac{1}{2} \times \frac{I(A) \times 3600(C/hr)}{96500(C/mol)} \dots (1)$$

表 水素発生量評価

解析条件			水素発生評価		
溶液抵抗値	分極抵抗	電極配置	面積 (m ²)	流入電流I (A)	水素発生量 (mol/h)
Cl ⁻ 濃度: 100ppm	塗装① 加熱+浸漬 (500h)	②	60.0	6.63	0.495

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

○ 滞留水内のS/C脚部以外の機器設備への電気防食による影響評価

- ・ 電気防食による防食対象以外の機器への副次的な影響評価として、トーラス室内にある機器(停止中の系統を含む)について想定される影響を下表に整理した。
- ・ S/C脚部以外の機器設備毎に対応の必要性を以下の基準で評価した。
 - : 下表で想定される影響が起きる可能性が無い、または極めて低い。
 - △ : 調査結果では下表で想定される影響が起きる可能性は低いと判断されたが、電気防食実施前に現場状況を元にした検討が必要である。
 - ▲ : 下表で想定される影響が起きる可能性がある。
- ・ なお、電気防食工法の実機適用に向けては、通電電極と機器設備との距離、位置関係等の要因を踏まえて副次的影響評価を見直す必要があるため、系統毎に整理した。

項目	影響の概要
S/C脚部以外の機器設備へ電流が流入	<ul style="list-style-type: none"> ・ S/C脚部以外からの水素発生の可能性 ・ 周辺電子機器の破損の可能性 ・ 加熱による水温上昇の可能性 ・ 感電の危険性
防食設備が滞留水に及ぼす影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ 滞留水のpHや導電率の変化
防食設備投入による作業エリア減少	<ul style="list-style-type: none"> ・ キャットウォークの通行可能幅減少 ・ 今後のトーラス室内監視の際の視認性悪化 ・ 今後投入する遠隔装置の稼働可能領域の減少

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

○滞留水内のS/C脚部以外の機器設備への電気防食による影響評価

設備	電気防食による 影響評価	補足
配管	▲	一部配管はコラムサポート基礎部近傍に設置されており、電気防食の影響を受ける可能性がある。
配管サポート／架台	▲	配管を支持するサポートおよび計器類等の架台。配管の箇所によってはトラス室内の滞留水に近い箇所にあるため、電気防食の影響を受ける可能性有り。
バルブ	▲	配管の各所に存在するバルブ、配管の箇所によってはトラス室内の滞留水に近い箇所にあるため、電気防食の影響を受ける可能性有り。
階段	▲	トラス室に設置された階段、トラス室床面に繋がる階段もあるため、電気防食効果の影響をうけることが想定される。
温度検出器	○	検出部は高所の配管部に設置されている。
レベルスイッチ	▲	配管展開されており、母管近傍にレベルスイッチがある。冠水確認用のレベルスイッチがあり、影響確認が必要。また、S/C内部からトラス室にかけて検出配管があり、電気防食の影響を受ける可能性がある。
スタンション	▲	S/C内に設置されているものがある。
温度指示計	○	指示計は母管に直付けされているが、バイメタル式であり、トラス室外との繋がりはないと考えられる。
電磁弁	○	バルブはトラス室内の高所に設置されている。
電線管	○	電線管はトラス室内から三角コーナにかけて敷設されている。
ケーブルトレイ ／トレイサポート	○	ケーブルを保護するトレイおよびそのサポートであり、高所に設置されている。
その他	▲	電気防食設備によるキャットウォークの通行可能幅減少、トラス室内の視認性悪化、今後投入する遠隔装置の稼働可能領域の減少の可能性がある。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

◆課題の整理

注:赤字が電気防食効果評価として対応が必要と考えられる項目である。

分類	課題	対応案
分極抵抗、 溶液抵抗	複合サイクル試験による錆はもろく、分極抵抗が過度に低い。浸漬している実機に発生する錆はより安定した錆となり、分極抵抗が高い可能性がある。	1Fを想定した溶液中に炭素鋼を長時間(500時間以上)浸漬させて錆を生成させる。その後、電気防食を行い、その間の電流値の変化を測定する。同様な試験を複合サイクルで生成した錆試験片でも行い、比較評価することで、錆生成状態の違いを明確にする。また、実機の錆の特徴確認のために実機調査を行う。
	塗装の長期的劣化による分極抵抗への影響についての追加検討の必要性	塗装の事故時劣化と同様に、長期的劣化も裸鋼材相当の分極抵抗に近づくと推定される。追加検討の必要なし。
	実機表面状態(塗装、錆)が一様でない。	実際の電気防食の適用対象物の表面状態は一様ではなく、塗装剥離や部分的に補修塗装されたものに適用され、防食効果をもたらしている。表面が一様でない状態において、塗装が剥離して電流が必要な部分に電流が入ることになり、電位はおおよそ均一化されるため、特に問題とならない。
	実機で想定される局所的な抵抗変化への対応	・S/Cで90°毎に回路別にした装置設計を想定しており、場所毎の制御で対応する。他に想定すべき局所的な抵抗変化の要素が無い場合は実機調査により確認する。
	保温材及び保温材落下物による影響が不明	保温材中に滞留水が浸水する場合、電気防食効果はあると考えられる。ただし、保温材カバーにより遮断される場合、防食効果は及ばないため、実機調査を行い、確認する。
放射線影響	分極抵抗測定方法が一般的でない(微小電位範囲、交流法測定)。	今回の測定方法は直流法で測定したものであり、防食電位の分極抵抗値として、防食電位-746mVvs.SSE(海水銀塩化銀電極基準では-800mV)を中心に前後±50mVの範囲の測定データを最小二乗近似した一次近似直線の傾きから算出した。一般的な分極抵抗の測定に比べて、測定精度は下がる可能性はあるものの、解析のインプットとなる防食電位での分極抵抗値を評価できていると考えている。なお、防食電位付近の分極曲線の傾きは小さく、交流法で測定しても分極抵抗を測定することはできない。
	放射線環境が防食電流に及ぼす影響が不明である(本事業では、過酸化水素添加の分極曲線を取得)。 放射線環境が水の還元反応に及ぼす影響が不明である(水素発生電位への影響を確認する必要がある)。 放射線環境がアノード溶解に及ぼす影響が不明である(最適防食電位を確認する必要がある)。	放射線環境下での検証確認試験としてカソード分極、アノード分極曲線の測定を行う。課題としては、ガンマ線照射条件によっては測定可能な施設を選定する必要がある。また、アノード分極曲線測定は脱気環境下で試験を行うが、放射線分解で酸素や過酸化水素が発生するので測定時に脱気条件を維持することが困難であり、試験方法の検討も必要である。
FEM解析	耐震サポート隙間部に電流が届かない。電極を増やしても、塩化物イオン濃度1000ppmでも電流が届かない。	・塩化物イオン濃度19000ppmであれば耐震サポート隙間奥まで防食電位以下にできる見込みである。 ・滞留水の導電率を上げる対策の適用性を検討する。
	一般的な最適防食範囲より高電位で電気防食してしまう場合	既存知見及び本事業にて確認した過防食の閾値と、防食電位との間の電位を最適防食電位範囲としている。本事業で設定した電位の範囲内であれば腐食速度を0に漸近させた上で、過防食による水素発生量を低減可能であると考えている。
	電極/サポートの距離と電気防食効果の関係が不明	電気防食効果と距離の関係については既に明確化されており、特に追加検討の必要性はない。本事業で得られた電極/サポートの距離の関係性に近づけるために棒状の電極を防食対象に対して電流発生面を向けて設置する必要があるため、電極の治具設計等で電極の位置・向きを適切に配置するための検討を行う必要がある。
	水位・水質低下した場合への対応方針	参照電極による電位モニタリングで電流を制御するため問題ない。
	参照電極設置位置による電位分布評価が必要	参照電極設置位置は、コラムサポートや耐震サポートに対する通電電極配置と同じであり、本FEM解析結果と同じ電位分布になる。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

◆課題の整理

注:赤字が電気防食効果評価として対応が必要と考えられる項目である。

分類	課題	対応案
水素対策	防食電位卑側の領域において、電流密度と電位の関係が試験と解析とで乖離があり、水素発生量を過大評価してしまう。	水素発生量及び水素ガス対策の状況に応じて検討が必要
	過防食電位と水素脆化の程度が不明	想定される測定方法は以下 ・所定時間での電気防食を行い、そのときに吸収される水素量を測定する。また、吸収させた材料の引張試験を行い延性および強度を評価する。 過防食範囲内にある材料に対して、想定される水素発生量をもとに水素吸収試験を行う。吸収させる水素濃度は発生量をもとに設定する。吸収方法は加圧式、電気化学方式等を用い、試験片の形状は引張試験片とする。吸収後は引張試験を行い、強度および延性の変化を評価する。
	トラス室内に水素だまりが発生する可能性がある。	・トラス室内状態調査(干渉物、キャットウォークの状態、天井の状態(くぼみなど)等) ・流動解析による換気状態の確認 ・水素逃がし構造の検討
電気防食装置	電気防食装置 並列回路での成立性	S/C 90° 毎に回路分けをした装置設計を想定している。
	電極が金属面に転がった場合への影響が不明	電極が防食対象金属と接触した場合は短絡するため、電極は防食対象と接触しない設置方法にする必要がある。電極に穴あきの保護筒をつけ、防食対象金属と接触して短絡しない構造にすることを想定している。
	電極が想定外位置に転がった場合への対応が不明	参照電極による電位モニタリングで電流を制御するため問題ない。
	直流電源装置のメンテナンス性	一般的な電気防食設備の耐用性は約20年と想定しており、約20年はメンテナンスフリーと想定。電気防食設備設置のための装置を含めたメンテナンス性を検討を今後の課題とする。
	電極やケーブルの放射線影響検証	電極・ケーブルともに、3号機のトラス室の線量(約400mSv/h)を想定した場合、耐放射線性に強い材料を用いれば物性値の低下は大きな問題にはならないと推察される。
	逆接続の防止策検討	照合電極で電位測定して電流制御を行う予定であり、腐食の促進は防止することが可能。その他の防止策については今後の検討課題とする。
	滞留水流速の影響が不明	流速環境下では溶存酸素の供給が増加するため必要な防食電流が増加すると考えられる。ただし0.5m/s以下程度であれば、静止とみなして問題ない。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

◆ 課題の整理

注:赤字が電気防食効果評価として対応が必要と考えられる項目である。

分類	課題	対応案
その他	電位と腐食量の関係が不明である(防食電位以上の場合の防食効果の確認が必要)。	手法としては以下2件あり。 ・アノード分極曲線(脱気)を測定し、各電位での腐食量を算出し、相関性を評価する。2日程度での測定が可能だが腐食生成物の寄与などは含まないため精度は低い可能性はある。 ・溶存酸素濃度を制御することで電位を制御。その中に対象となる材料の試験片を設置し腐食量から腐食速度を導く。設定する電位は腐食電位から防食電位の範囲より抽出するか、対処となる材料に対して定電位を強制的に負荷したまま浸漬させる。この時の試験時間は1000時間以上となり、これによって対象材料の腐食量と電位の関係を導く。
	5号機の構造からは2,3号機も導通があるものと推定されるが、実機の導通状況が不明	2号機、3号機のS/C実機で測定を実施する。
	錆付き面に対する気液界面への電気防食効果が不明である。	錆無しの気液界面試験結果より、水があれば電気防食効果がある。気液界面の錆部に浸水する場合、電気防食効果はあると考えられる。
	塩素ガスが発生する可能性がある。	トーラス室は密閉系ではないため天井付近に滞留するガスでなければ問題ない。
	耐震評価条件が実態と異なっている。	最新条件での再評価を反映している。
	その他の防食方法の適用性	pHコントロール: 一般的にpHを10以上に制御した場合不動態被膜を形成し、耐食性が向上するとされている。過去の事業において、pH11に制御したPCV材、RPV材ともに局部腐食が発生し、不動態被膜が破壊された事例があり、S/C脚部への効果の有効性を検討する必要がある。 水位低下: 腐食は水の存在によって生じるため、水位を低下させて腐食を抑制する手法も想定できるが、湿分がある状態では水膜が生成する可能性があり、水に触れているのと同様もしくはそれ以上になる可能性がある。水位低下とともに乾燥させるもしくは湿分による水膜の生成しないような対策が必要である。 電解質注入: 電気防食をより効果的に適用するためには良好な手法。電解質として注入する薬液の選定、電気防食が適用されない範囲がないような防食設計、電気防食の効果を付与できない場所が生じた時の対策を検討する必要がある。
電気防食設備稼働後の減肉モニタリングまたは加速因子モニタリングが必要	実機調査方法の検討を行う。	

基礎試験より、得られた課題を整理した。対応案として、放射線環境下での検証試験、錆の長期的影響評価、耐震サポート隙間部に対する防食工法検討、電位と腐食量及び水素脆化との関係評価等が抽出された。

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

◆ 実現可能性の評価

- 現実的な電極の設置位置や数量で、S/C脚部(防食対象物)の防食電位が800mV vs Ag/AgCl [sw] 以下となることが可能か。800mV vs Ag/AgCl [sw] を上回る場合、S/C脚部に及ぼす腐食の影響を考慮し、必要に応じて課題整理を行う。
 - Clイオン濃度一定(100ppm)、S/C及び脚部表面の分極抵抗値一定の条件では、コラムサポート1箇所に対して2体の電極、耐震サポート1箇所に対して4体の電極を各脚部50cm横に配置することで、均一な表面状態を仮定すると大部分を防食電位に維持できるものの、耐震サポートの一部が防食電位に到達しないため、防食工法の追加検討が必要であることが分かった。
- 防食効果が得られる条件での水素発生量をどのくらいに抑えられるか。必要に応じ水素発生対策(発生した水素の回収方法など)も検討する。
 - 大部分で防食状態を成立する条件において水素発生量0.495mol/hrを試算した。
- 次期開発における腐食抑制効果検証試験の計画書を作成する。
 - 放射線環境下での検証試験、錆の長期的影響評価、耐震サポート隙間部に対する防食工法検討に係る試験計画を作成。

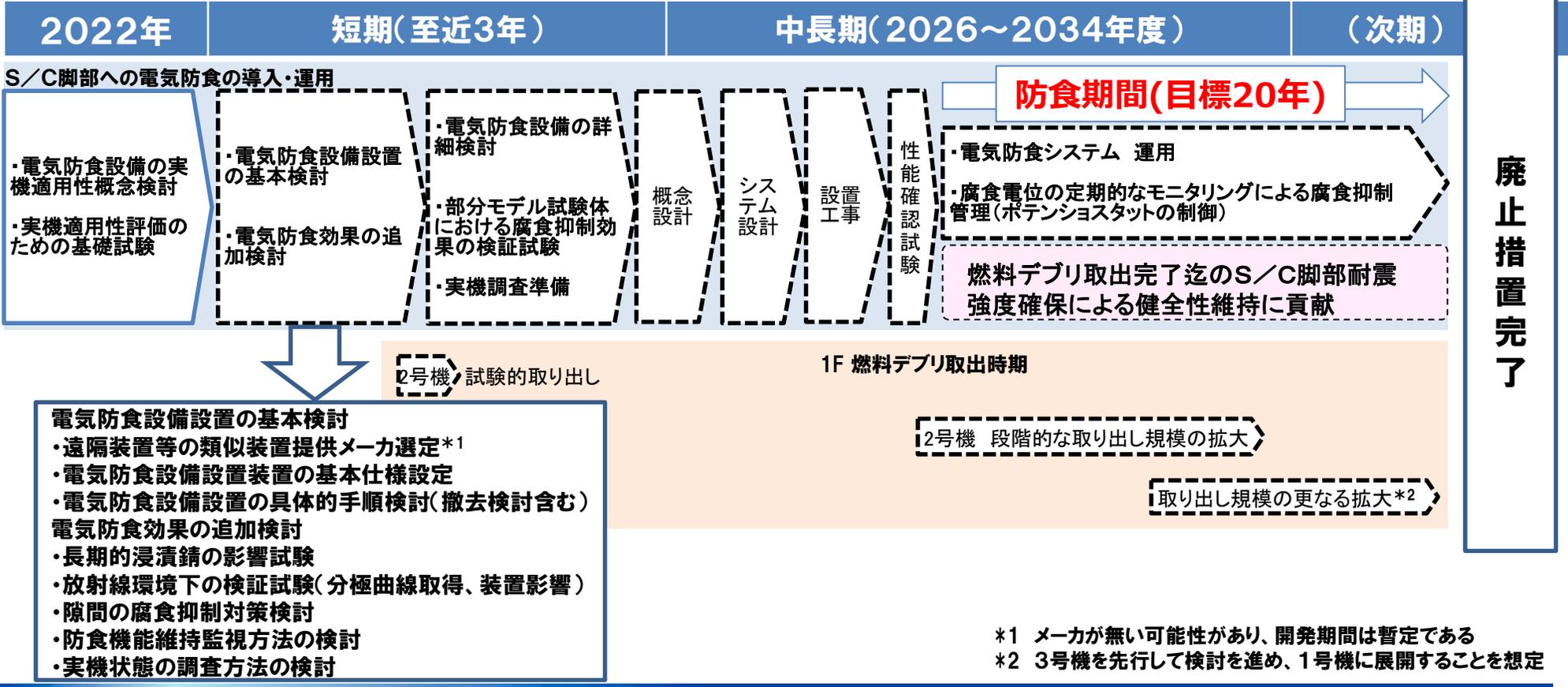
2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

◆ 次期開発における試験計画

実機適用の成立性を示すために、電気防食設備設置の基本検討、防食効果評価の追加検討に取り組む必要があり、実規模大型検証試験はその後の実施とする。

以下に実機適用に向けた全体スケジュール案を示す。なおトラス室内部の状況確認や干渉物撤去に係る課題が解決している前提とした。



廃止措置完了

2. 本事業の具体的な実施内容

(2)実機適用性評価のための基礎試験

◆次期開発における試験計画

次ステップの工程(案)を以下に示す。電気防食設備設置の基本検討及び電気防食効果の追加検討を行う。

実施項目	初年度工程表(案)											
	1ヶ月	2ヶ月	3ヶ月	4ヶ月	5ヶ月	6ヶ月	7ヶ月	8ヶ月	9ヶ月	10ヶ月	11ヶ月	12ヶ月
1. 電気防食設備設置の基本検討												成果とりまとめ ▽
遠隔装置等の類似装置提供 メーカー選定(※)												遠隔装置・介在装置の 提供可能メーカーの整理 ▽
電気防食設備設置装置の基本仕様設定												電極・ケーブル等の 装置の仕様整理 ▽
電気防食設備設置の具体的 手順検討(撤去検討含む)												電気防食設備の 設置手順報告 ▽

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

◆ 次期開発における試験計画

実施項目	初年度工程表(案)												
	1ヶ月	2ヶ月	3ヶ月	4ヶ月	5ヶ月	6ヶ月	7ヶ月	8ヶ月	9ヶ月	10ヶ月	11ヶ月	12ヶ月	
2. 電気防食効果の追加検討												成果とりまとめ ▽	
長期的浸漬錆の影響試験	[Progress Bar]											長期浸漬錆の状態および分極抵抗試験結果報告 ▽	
放射線環境下の検証試験	[Progress Bar]											・放射線環境下での検証試験結果報告 ・炭素鋼アノード溶解への放射線影響報告 ▽	
隙間の腐食抑制対策検討							[Progress Bar]						外部電源方式以外の手法の適用等による隙間部の腐食対策方法について報告 ▽
防食機能維持監視方法の検討				[Progress Bar]									照合電極等を含む電気防食設備の防食機能維持のための監視方法案の策定 ▽
実機状態の調査方法の検討				[Progress Bar]									錆・塗装の状態確認のための実機調査方法方針の策定 ▽

2. 本事業の具体的な実施内容

(2) 実機適用性評価のための基礎試験

◆ 得られた成果

- 1F環境での特有の環境要因抽出
: トーラス室滞留水状況を想定し整理した。
- 電気防食効果評価フローを構築(試験／解析)
: 電気化学試験と3次元FEM解析モデルにより防食効果の予測評価手法・手順を構築した。
- 3次元解析モデルによる電気防食効果評価
: 特異な形状であるS/Cについて、3次元FEM解析モデルで電気防食効果を予測評価した。
- 水素発生量評価
: FEM解析の結果得られた電位／電流密度から水素発生量を評価した。

2. 本事業の具体的な実施内容

(3) HPの評価(実機適用に向けた着眼点の評価)

実施内容① 電気防食設備の実機適用性の概念検討

- S/C脚部の脚元近傍に電極を配置することが可能か。
→S/Cキャットウォークまでの経路、キャットウォーク上、キャットウォークから防食対象である耐震サポート、コラムサポートへの経路上に多くの狭隘部、障害物が存在。遠隔装置等の小型化/干渉物撤去が必要※(TRL2)
- 直流電源装置は配置可能か。
→既存技術の活用等で実現できる見込み(TRL3)
- 電極と装置間に接続ケーブルを引くことが可能か。
→※に同じ(TRL2)
- 排流端子は設置可能か。
→キャットウォークを走行する遠隔装置のサイズを踏まえた小型ブラスト装置が必要(TRL2)

2. 本事業の具体的な実施内容

(3) HPの評価(実機適用に向けた着眼点の評価)

実施内容②実機適用性評価のための基礎試験

- 現実的な電極の設置位置や数量で、S/C脚部(防食対象物)の防食電位が800mV vs Ag/AgCl [sw] 以下となることが可能か。800mV vs Ag/AgCl [sw] を上回る場合、S/C脚部に及ぼす腐食の影響を考慮し、必要に応じて課題整理を行う。
 - Clイオン濃度一定(100ppm)、S/C及び脚部表面の分極抵抗値一定の条件では、コラムサポート1箇所に対して2体の電極、耐震サポート1箇所に対して4体の電極を各脚部50cm横に配置することで、均一な表面状態を仮定すると大部分を防食電位に維持できるものの、耐震サポートの一部が防食電位に到達しないため、防食工法の追加検討が必要であることが分かった。(TRL2)
- 防食効果が得られる条件での水素発生量をどのくらいに抑えられるか。必要に応じ水素発生対策(発生した水素の回収方法など)も検討する。
 - 大部分で防食状態を成立する条件において水素発生量0.495mol/hrを試算した。(TRL3)
- 次期開発における腐食抑制効果検証試験の計画書を作成する。
 - 放射線環境下での検証試験、鍍の長期的影響評価、耐震サポート隙間部に対する防食工法検討に係る試験計画を作成。

2. 本事業の具体的な実施内容

(3) HPの評価(実機適用に向けた着眼点の評価)

実施内容③実機適用に向けた着眼点の評価

- **実機適用性の概念検討および基礎試験の結果をみて、現地設置や技術的な成立性が見込まれる(HPクリア)かどうか**
 - **現地設置の観点では遠隔装置小型化等の新規技術開発や、障害物／構造物の撤去とその可能性の検討が必要であり、今後調査が進むことにより現場状況が明らかになった段階で再度検討する必要がある。また、防食効果の観点では基礎試験より効果の及ばない部位への対策案が必要であり、必要な電極数が多く、遠隔設置を困難にさせている。実機適用の成立性に向けて新たに解決必要な課題が明らかになった。(TRL2)**

- **1F S/C脚部以外への腐食想定される部位に対する電気防食工法展開の検討**
 - **本事業で構築した電気防食工法の以下検討手順については、必要電極数や設置位置ならびに防食効果の検討への適用に有効であると考えられる。**
 - ① **基礎試験の実施による腐食対策に及ぼす特定要因の影響確認**
 - ② **基礎試験モデルでの解析での妥当性確認実施**
 - ③ **3次元モデルでシミュレーション評価を実施**
 - **溶液中のCl⁻濃度、対象材料とその表面の塗装等の状態、電気化学的特性の関係について得た知見は、他プラントや他機器の腐食対策に活用可能な場合がある。**

3. まとめ

(1)電気防食1F S/C脚部適用への課題

◆施工性

- ・現地において実現可能な電気防食装置を遠隔操作で設置する方法が未策定
- ・外部電源方式の電源装置の配置や電極を繋ぐケーブルルートが未策定

◆防食の成立条件

- ・防食効果と防食設備の適用範囲の検討が必要
- ・放射線環境下での電気防食工法の知見が無い
- ・塗装や錆が及ぼす電気防食工法への影響確認が必要

(2)実施内容

電気防食1F適用の課題解決のため、以下を実施

- ・S/C脚部における電気防食設備の設置方法の概念検討(2.(1))
- ・基礎試験による1F特有環境因子の電気防食効果への影響評価およびFEM解析による電極配置と電極数の検討(2.(2))

(3) 検討結果と考察

◆ 電気防食設備の実機適用性の概念検討

S/C脚部の防食効果が期待できる電極の設置方法を検討した。

- 1号機～3号機のトラス室内線量を確認し、特に線量が高い傾向である3号機を代表号機として検討を行った。
- アクセスルートとして、R/B1階から三角コーナーを経由して、キャットウォークから電極およびケーブルを吊り下げて設置する案が現実的であると評価した。
- 3号機では、南東三角コーナーのみアクセス可能と考えられる。なお、三角コーナーの一部に狭隘部があり、キャットウォーク上に通行不可部及び狭隘部があり、遠隔装置が通過する際は注意が必要。ケーブル敷設を考慮して、北西三角コーナーおよび南西三角コーナーからのルートを追加する案を選定した。

(3) 検討結果と考察

◆ 電気防食設備の実機適用性の概念検討(続き)

S/C脚部の防食効果が期待できる電極の設置方法を検討した。

・外側キャットウォークからS/C脚部までのアクセスとして、干渉物が少ないベント管側からのルートを選定した。遠隔装置2の全高を低く改造できることを条件として、遠隔装置2がS/C外表面を沿いながら脚部周辺に近づき、電極を設置するものとして、電極及びケーブルの設置手順を立案し、遠隔装置及び遠隔装置2の小型化等の開発課題を抽出した。

・直流電源装置の設置手順を立案し、課題が無いことを確認した。
排流端子の設置手順を立案し、遠隔ブラスト装置の小型化等の開発課題を抽出した。

・現地設置に関する実現可能性として、新規技術開発が必要であるためすぐに実機適用することは難しいと評価した。

(3) 検討結果と考察

◆基礎試験

1Fで想定される電気防食の電流に対する抵抗因子について電気化学試験での影響評価を実施し、以下を確認した。

- ・1Fにて想定される環境における、防食工法に対する抵抗因子(溶液の濃度勾配、塗装の劣化、過酸化水素(放射線影響)、鍍)の影響を評価した。
- ・溶液の濃度勾配として、塩化物イオン濃度と溶液の抵抗率の関係を取得して、S/Cの3次元FEM解析の入力条件に使用した。
- ・分極抵抗への塗装、事故時の加熱による塗装劣化、事故時の加熱・浸漬による塗装劣化の影響を評価した。塗装劣化を解析で考慮する際、建設時塗料の場合、防食対象表面の分極抵抗に塗装がない場合の分極抵抗を用いる方針とした。
- ・水の放射線分解で発生する H_2O_2 の分極抵抗への影響を評価した。 H_2O_2 添加による分極抵抗の顕著な変化はなかった。放射線環境下での検証が求められる。
- ・分極抵抗への鍍の影響を評価した。鍍付着によって分極抵抗値は低下した。電気防食初期は鍍の還元反応のために、必要電流が多くなることを考慮する必要がある。
- ・気液界面への電気防食の影響を評価した。気液界面の腐食の加速は認められず、水位変動が安定しているS/Cトラス室環境において、電気防食は気液界面への防食効果があることを確認した。

(3) 検討結果と考察

◆ 2DモデルでのFEM解析

通電電極の必要設置数を解析的に検討し、防食電位を満足し、過防食を避けるには S/C脚部の耐震サポート、コラムサポートに対してそれぞれ2本ずつ設置する必要があることを見出した。

◆ FEM解析の妥当性確認

各抵抗因子について電気化学試験で得られた測定結果を3次元FEM解析の入力条件に用いることの妥当性確認を行った。

- ・防食電位付近での電気化学試験およびFEM解析による電流密度と電位の関係性は同等である。一方で、防食電位から離れた卑側の電位領域ではFEM解析と試験結果と電流密度に乖離があるものの、FEM解析結果を用いた水素発生量評価においては安全側に評価できる傾向である。
- ・防食電位付近での電流密度と電位の妥当性確認ができたため、電気化学試験結果で得られた溶液抵抗値と分極抵抗値をもとにFEM解析の入力条件として使用することの妥当性を確認できた。

(3) 検討結果と考察

◆ 3次元FEM解析

実機S/Cサイズの1/4モデルを用い、電気防食による電位分布を評価し必要な電極配置・数の詳細を評価した。

- 建設時の塗料が劣化し、Cl⁻濃度100ppmの条件では、各コラムサポートに対して電極は内外に2本ずつ設置が必要であることが分かった。一方、各耐震サポートに内外左右4本の電極を設置するのが防食対策に有利であるが、耐震サポート内部のボルト部まで防食電位を確保するのは困難であることがわかった。また、高強度鋼製である耐震サポートのアンカーボルトは通電電極設置位置に近く、水素脆化が懸念される過防食領域になりやすい。すべての防食対象領域を防食電位に調整するのは困難であることが分かった。
- 補修塗装の補修塗装用塗料の分極抵抗値は建設時の塗料に比べて高いため、建設時の塗料より必要な防食電流が低いと推定される。
- 錆が付着した場合、防食対象表面の分極抵抗値は低くなり、非常に大きな防食電流が必要となり、電気防食装置が非現実的となった。ただし、S/C全面に本試験で模擬したもろい錆の生成は起こらないと想定され、解析結果より少ない電流で防食が可能と考えられる。
- Cl⁻濃度1000ppmの場合、溶液の抵抗値は100ppmより低く、防食電流は多くなるものの、過防食となる範囲は小さくなると推定される。

3. まとめ

(4)実機適用性の評価結果

実機への外部電源方式による電気防食工法適用に向けては、本事業で抽出された以下の課題の解決が必要であると評価した。

- ・電気防食設備を遠隔操作で設置するために、S/C周辺の環境調査と設置方法の検討を行った結果、現地設置の観点では遠隔装置小型化等の新規技術開発や、障害物／構造物の撤去とその可能性の検討が必要であることが確認された。今後調査が進むことにより現場状況が明らかになった段階で再度検討する必要がある。
- ・防食効果の観点では、コラムサポート1箇所に対して2体の電極、耐震サポート1箇所に対して4体の電極を配置することで、均一な表面状態を仮定すると大部分を防食電位に維持できるものの、耐震サポートの一部が防食電位に到達しないことが分かった。効果の及ばない部位への対策案が必要であり、必要な電極数が多く、遠隔設置を困難にさせている。
- ・2023年度以降の試験計画として、電気防食設備設置の基本検討、電気防食効果の追加検討を実施することで抽出された課題解決を図る。

3. まとめ

(5)事業実施体への申し送り事項

本事業により抽出された課題の内、実機適用に向けて解決すべき項目を以下に記載する。

対象	申し送り事項の概要
電気防食設備の基本検討	照合電極・ケーブル等の電気防食設備の交換が必要となることを想定し、装置の保全方法、機能維持のための監視方法、装置のメンテナンス性を検討の検討が必要
	電気防食設備のうち、ケーブルは単なる通電経路であるものの他に、電位測定用のケーブルがある。放射線等のノイズの影響を受けにくいケーブルの選定／検証が必要
	通電電極(アノード)側で分極が起きないか確認が必要
	本事業で防食対象から1.5mの箇所に方向を指定した上で、96体の通電電極の設置が必要という要求仕様を明らかにした。以上を踏まえて、通電電極の仕様策定が必要
	実機施工を念頭に、電極・ケーブルの敷設の詳細な手順を含めた成立性検討が必要
	本事業において抽出された遠隔装置への要求仕様をもとに、電気防食設備の基本検討において、装置に必要な仕様の詳細検討が必要
	遠隔装置／介在装置の運搬・機能上の関係の更なる具体化と、遠隔装置／介在装置が操作不能、スタックした場合の対応方針について事前検討が必要
電気防食効果の追加検討	放射線環境下での検証試験の実施と過酸化水素以外の放射線影響がないことの確認が必要カソードの分極抵抗は炭素鋼のアノード溶解反応の電解銅抵抗であるため、炭素鋼のアノード溶解反応に対して放射線影響があるか、確認が必要
	コラムサポート、耐震サポートのすき間部の防食について、外部電源方式による電気防食以外の腐食対策を含めた検討が必要
	通電前に長期間浸漬した錆の状態確認、分極抵抗を測定することと、塗装、錆付着状況確認のための実機調査の方針の検討が必要

4. 課題、TRL達成度、期待される効果

(1) 課題

○電気防食設備の実機適用性の概念検討

- ・電極及びケーブルの設置にあたっての主な課題をNo.42に記載
- ・排流端子の設置にあたっての主な課題をNo.57に記載

○実機適用性評価のための基礎試験

放射線環境下での影響評価、錆の長期的影響評価、耐震サポート隙間部に対する防食工法検討を抽出。

○OHPの評価

実機適用の成立性を示すために、電気防食設備設置の基本検討、防食効果評価の追加検討に取り組む必要があり、実規模大型検証試験はその後の実施となる

4. 課題、TRL達成度、期待される効果

(2)TRL達成度と期待される効果

No.	実施項目	具体的目標（判断基準）
1	電気防食設備の実機適用性の概念検討	<ul style="list-style-type: none"> ➢ S/C脚部の脚元近傍に電極を配置(転がし配置)することが可能か。 ➢ 直流電源装置は配置可能か。 ➢ 電極と装置間に接続ケーブルを引くことが可能か。 ➢ 排流端子は設置可能か。 (終了時目標TRL:レベル3)
2	実機適用性評価のための基礎試験 1)電気防食効果および防食効果範囲の確認 2)水素ガス発生量の確認	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 電極とS/C脚部(防食対象物)との距離が現実的な範囲で防食効果が得られるか。得られる場合、電極の必要設置位置や数量の目安を提示する。 ➢ 防食効果が得られる条件での水素発生量をどのくらいに抑えられるか。必要に応じ、水素発生対策(発生した水素の回収方法など)も検討する。 ➢ 2023年度以降に実施を計画する腐食抑制効果検証試験(交付申請書添付資料)の計画書を作成する。 (終了時目標TRL:レベル3)
3	HPの評価	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 1、2の結果をみて、現地設置や技術的な成立性が見込まれる(HPクリア)かどうかを判断する。 (終了時目標TRL:レベル3)

○目標達成により得られる効果

- ・1F S/C脚部における電気防食工法成立性の明確化
- ・電気防食設備の詳細仕様検討及び実機モデル検証試験(TRL:レベル4)開発への着手
- ・1F S/C脚部以外への腐食想定される部位に対する電気防食工法展開の検討

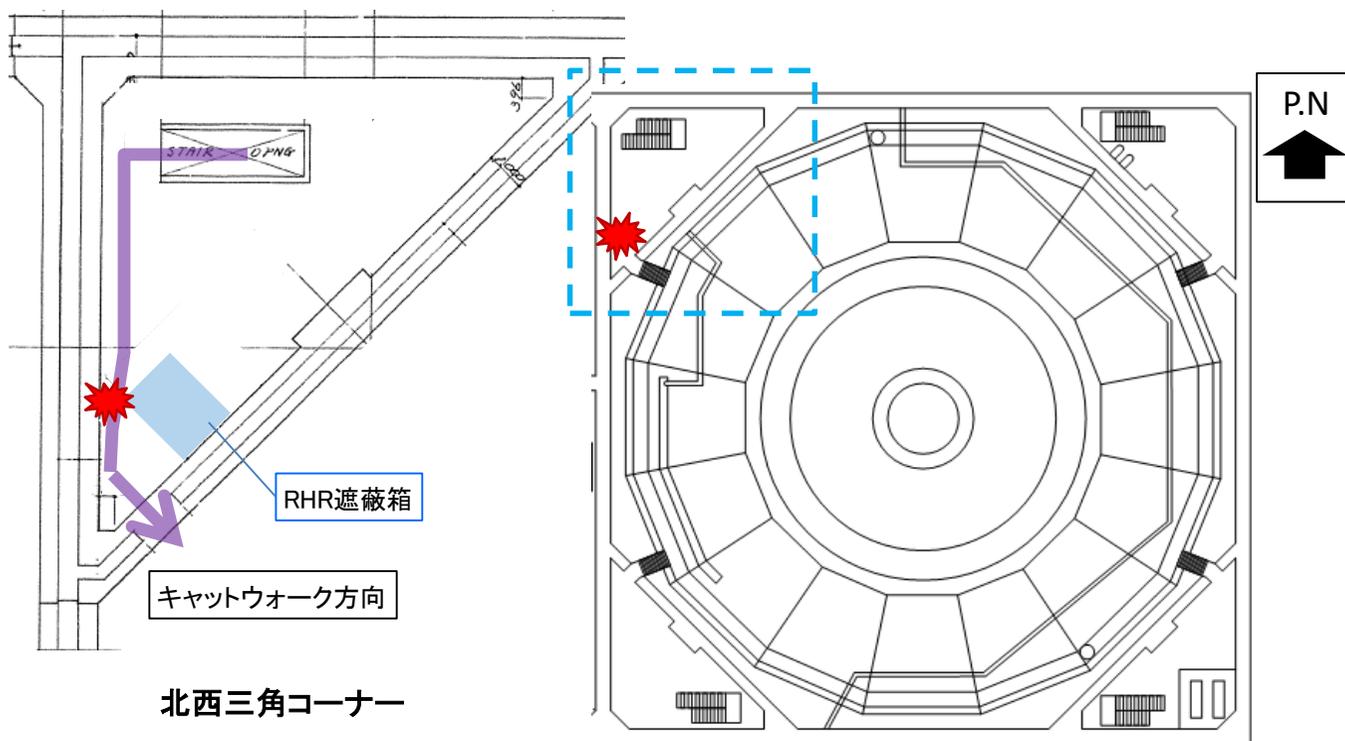
添付資料

1. トーラス室内キャットウォークへのアクセス性に関する調査・検討
2. 文献調査状況報告
3. TRLの定義

(調査・検討結果)

R/B1階 北西三角コーナーからキャットウォークまでのアクセス性を確認した結果、下記であることを確認した。

- ・ 北西三角コーナーのRHR遮蔽箱と建屋壁との間が狭隘部となり、遠隔装置が通過出来ない。



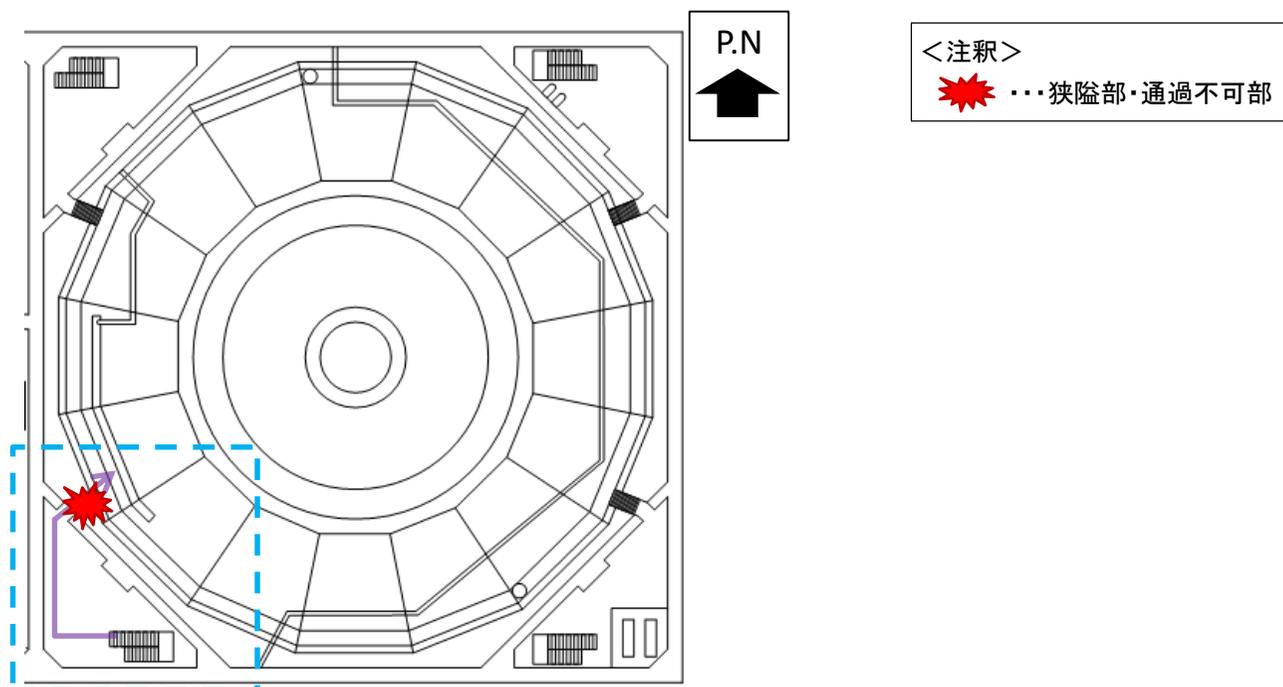
<注釈>

★ …狭隘部・通過不可部

(調査・検討結果 続き)

R/B1階 南西三角コーナーからキャットウォークまでのアクセス性を確認した結果、下記であることを確認した。

- 南西三角コーナーからキャットウォークへのアクセス用階段に障害物(瓦礫)があり、遠隔装置が通過出来ない。



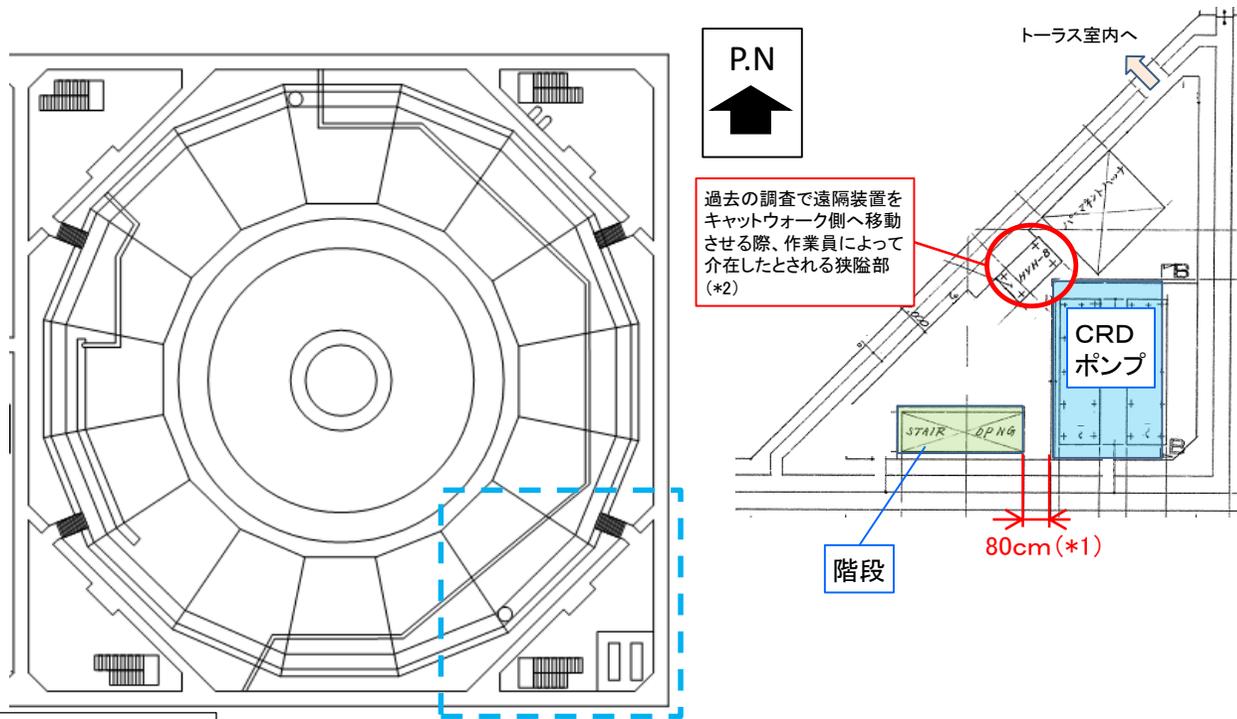
(出典)

*1: 福島第一原子力発電所 3号機原子炉建屋地下階トーラス室内調査の結果について(2012年7月12日 東電殿発行)

(調査・検討結果 続き)

R/B1階 南東三角コーナーからキャットウォークまでのアクセス性を確認した結果、下記であることを確認したものの、アクセス性はあることを確認した。

- ・ 階段とCRDポンプとの間隔が狭く(*1)、遠隔装置が階段から降りた後に回頭、通過する際は注意が必要。
- ・ 過去の調査で遠隔装置をキャットウォーク側へ移動させる際、作業員によって介在(運搬)したとされる狭隘部があり(*2)、通過する際は注意が必要。
- ・ トーラス室内の水位を測る常設の水位計があり、遠隔装置が通過する際は当該の水位計やケーブルに当たらないよう注意が必要。



<注釈>



...狭隘部・通過不可部

(出典)

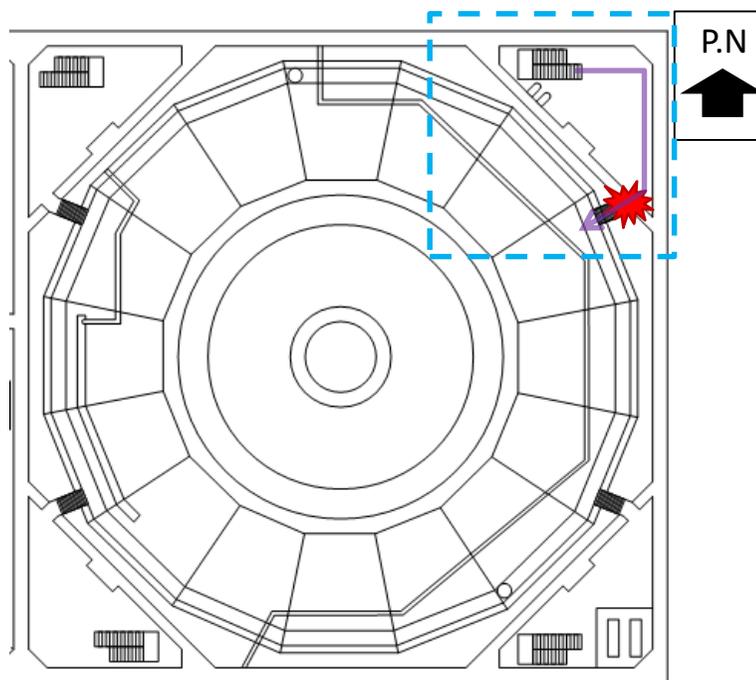
*1: 福島原子力発電所3号機本館建物新設工事 中地下階スラブ躯体図(鹿島建設(株)殿発行 SR-124 Rev.0)

*2: 福島第一原子力発電所 3号機原子炉建屋地下階 トーラス室内調査の計画について(2012年7月10 東電殿発行)

(調査・検討結果 続き)

R/B1階 北東三角コーナーからキャットウォークまでのアクセス性を確認した結果、下記であることを確認した。

- ・ 北東三角コーナーとキャットウォーク間の扉が変形し、開かないためアクセス不可。
- ・ 北東三角コーナーとキャットウォーク間の扉の近傍に障害物があり、遠隔装置が通過出来ない。



<注釈>

 ... 狭隘部・通過不可部

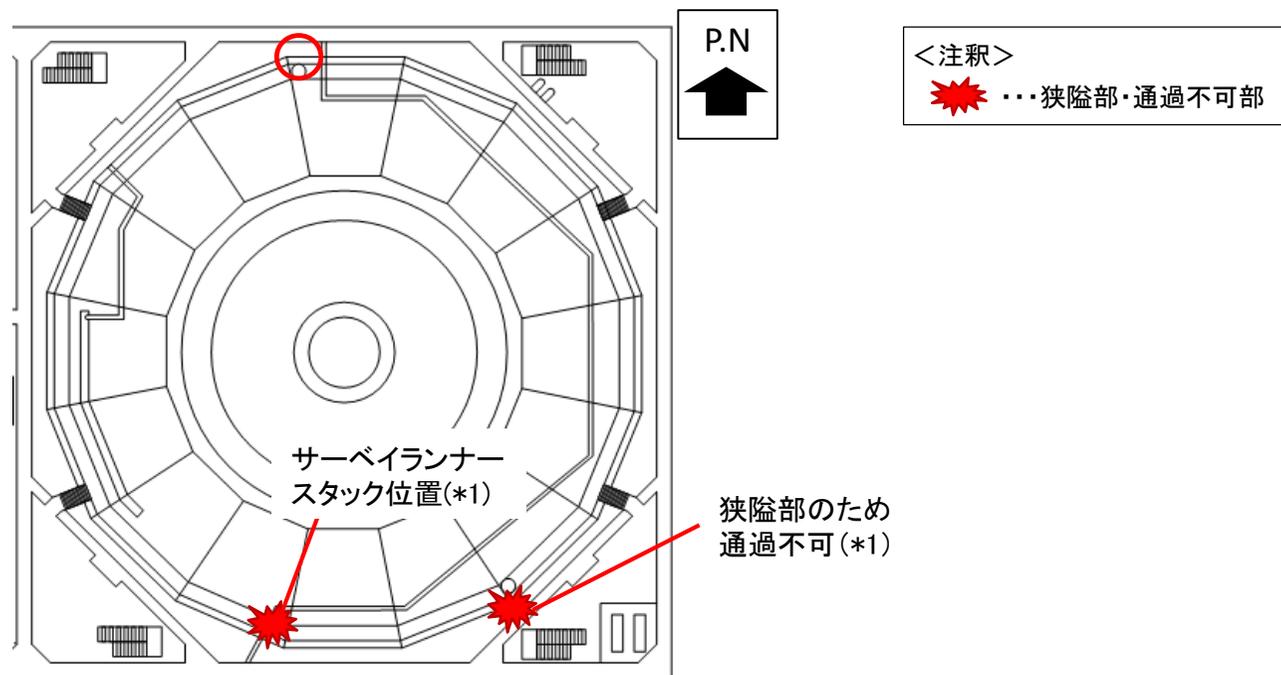
(出典)

*1: トーラス室現場調査について (2012年3月28日 東電殿発行)

(調査・検討結果 続き)

キャットウォーク上のアクセス性を確認した結果、下記であることを確認した。

- 過去の調査で使用されたサーベイランナーがキャットウォーク上にスタックしているため、キャットウォークの一部が通過出来ない。また、震災後、トーラス室内に遠隔で立ち入った装置が過去の調査にて、狭隘部のため通過出来なかった箇所がある(*1)。
- 北側マンホール周辺の通路は既設配管と手摺との間隔が狭いことが確認されている。



(出典)

*1: 福島第一原子力発電所 3号機原子炉建屋地下階トーラス室内調査の結果について(2012年7月12日 東電殿発行)

2. 文献調査状況報告

- 以下の1F特有の環境因子が電気防食に及ぼす影響について文献調査実施
 - 分極抵抗および溶液抵抗に関連するもの
 - 気液界面、電気防食に伴う水素発生
- 電気防食メーカーでの過去の実施例、防食マニュアル、J-STAGE等を用いて調査実施済
- 調査結果の概要を以下に示す。

項目	調査結果の概要	文献
塗装劣化/ 剥離	電気防食と塗装の併用利用事例有。塗装の欠陥面積および分散状態と防食電流密度の関係を解析で評価しており ¹⁾ 、電気防食効果は塗装欠陥形態に依存し、同じ欠陥率でも集中して大きな欠陥面積となっている場合は電気防食効果を低減させると報告。また、浸漬下の経時的な塗装劣化を分極抵抗測定により評価しており、分極抵抗は塗装の種類、浸漬環境によって異なることが報告されている ²⁾ 。	1)篠田、J.Jpn.Soc. Colour Mater., 88[7], 232-237(2015) 2)志村ら、Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.65, No.2, pp.162-169(2016)
錆の影響	炭素鋼に生成する錆のほとんどは多孔質のものであり ³⁾ 、電解液の浸透に対する抵抗になるが、完全に防ぐことはできない。従って、電気防食の効果は期待できるが、付加する電流値に影響を与える可能性はある。さび付着時に電気防食を行うと還元反応が生じるため、初期の電流値は想定よりも多く設定する必要がある ⁴⁾⁵⁾ 。	3)松島、色材、49、669-675(1976) 4)港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル(2009年版)、(財)沿岸技術研究センター 5)善ら、港湾技術研究所報告、Vol.22、No2、383-423(1983)
スラッジの影響	海泥中でも電気防食を施工した試験片には防食効果が認められことが報告されている ⁵⁾ 。その防食率は90%前後であった。対象部位のスラッジは錆や砂、金属粉が想定され、海泥に近い状態と考えられ、効果は期待できる。	5)善ら、港湾技術研究所報告、Vol.22、No2、383-423(1983)

項目	調査結果の概要	文献
溶液の塩化物イオン濃度勾配	淡水中の電気防食は海水中と異なり、溶液抵抗の降下が支配的になるため、電流が十分届かない部位が生じるため、電極等の配置には注意を要する ⁶⁾ 。本研究において対象となる部位は塩化物イオン濃度の濃度勾配が見込まれるため、最大、最小濃度での分極抵抗の違いを捉える必要がある。	6)小玉ら、防食技術、33、343-348(1984)
放射線影響	照射による水の放射線分解によって過酸化水素(H ₂ O ₂)が生成される ⁷⁾ 。H ₂ O ₂ は酸化性が強いいため、電気防食時の電流値への影響の懸念有。従って、カソード分極曲線を取得し、その電位電流変化を把握することで、その影響を評価	7)放射線環境下でのデータベース、JAEA-Review 2021-001
気液界面・気相部への影響	気相部及び気液界面は電気防食の対象外である。しかし、気液界面には水膜が生成しているため ⁸⁾ 、通電される可能性がある。電気防食による影響を試験にて評価する必要有	8)篠原、材料と環境、63、116-120(2014)
水素発生	電気防食において、水素発生は母材の脆化以外に塗装の剥離に影響するものであるため、様々なガイドラインで閾値を設定しており、試験結果も報告されている ⁹⁾¹⁰⁾ 。解析結果より過防食電位になる近辺に高強度材がある場合は、防食電位値を考慮する必要がある。	9)河川・ダム施設防食ガイドライン(案) 電気防食編、土木研究資料、平成18年7月 10)石井ら、土木学会論文集、No.532/V-30、131-140(1996)

(参考) TRLの定義

レベル	本事業に対応した定義	フェーズ
7	実用化が完了している段階。	実運用
6	現場での実証を行う段階。	フィールド実証
5	実機ベースのプロト機を製作し、工場等で模擬環境下での実証を行う段階。	模擬実証
4	開発、エンジニアリングのプロセスとして、試作レベルの機能試験を実施する段階。	実用化研究
3	従来経験を活用、組合せによる開発、エンジニアリングを進めている段階。または、従来経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき開発、エンジニアリングを進めている段階。	応用研究
2	従来経験として適用できるものがほとんど無い領域の開発、エンジニアリングを実施し、要求仕様を設定する作業をしている段階。	応用研究
1	開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。	基礎研究