

平成25年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金
原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発

完了報告

平成28年3月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

— 目次 —

1. 研究目的
2. 研究体制
3. 研究工程
4. 実施内容
 - 4.1 高所用除染装置の開発
 - 4.2 上部階用除染装置の開発
 - 4.3 地下階除染の概念検討
5. その他実施事項等について
 - 5.1 大学研究室との連携
6. 研究開発の運営など
7. 研究成果のまとめと今後の展開

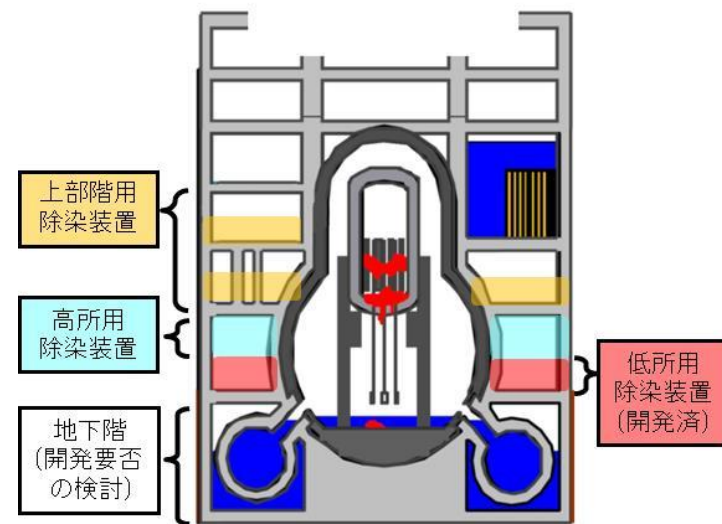
1. 研究目的

【背景】

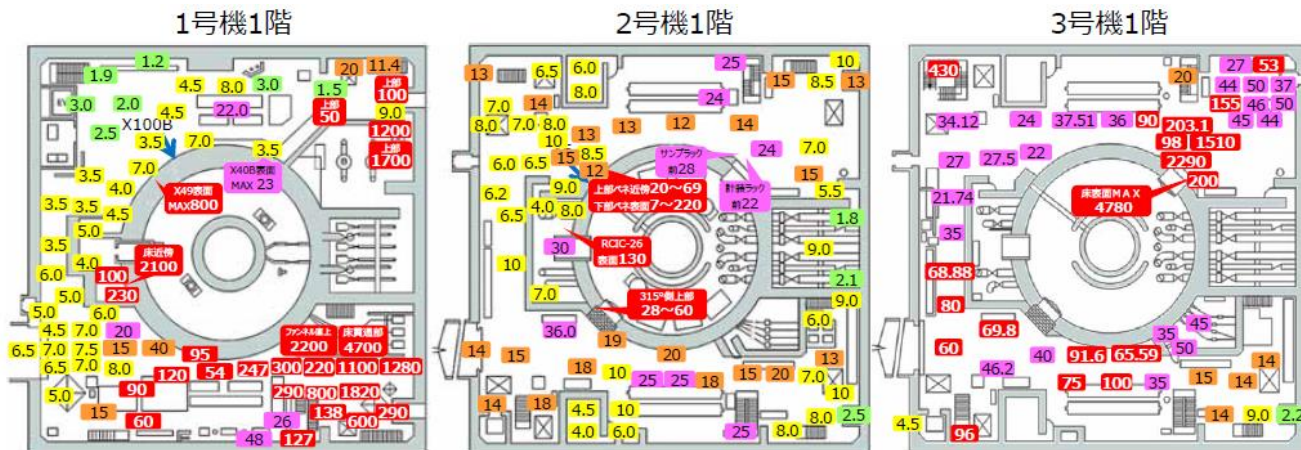
福島第一原子力発電所1～3号機の原子炉建屋内は高線量下にあり、「燃料デブリ取出しに向けた原子炉建屋内の作業を円滑に進めるためには、「除染」、「遮蔽」および線源となっている「機器の撤去」等を組合せ、原子炉建屋内の空間線量率を低減することが重要です。

【目標】

- ・PCV調査、補修等の作業を円滑に行うために重要となる遠隔除染技術を確立する。
- ・(地下階の滞留水が低下した場合を想定し)地下階除染の技術課題を整理する。



除染装置の開発状況



3mSv/h 以下 3mSv/h～10mSv/h 10mSv/h～20mSv/h 20mSv/h～50mSv/h 50mSv/h 以上

「建屋内の空間線量率について」
東京電力 H25.3.22
を参考に作成

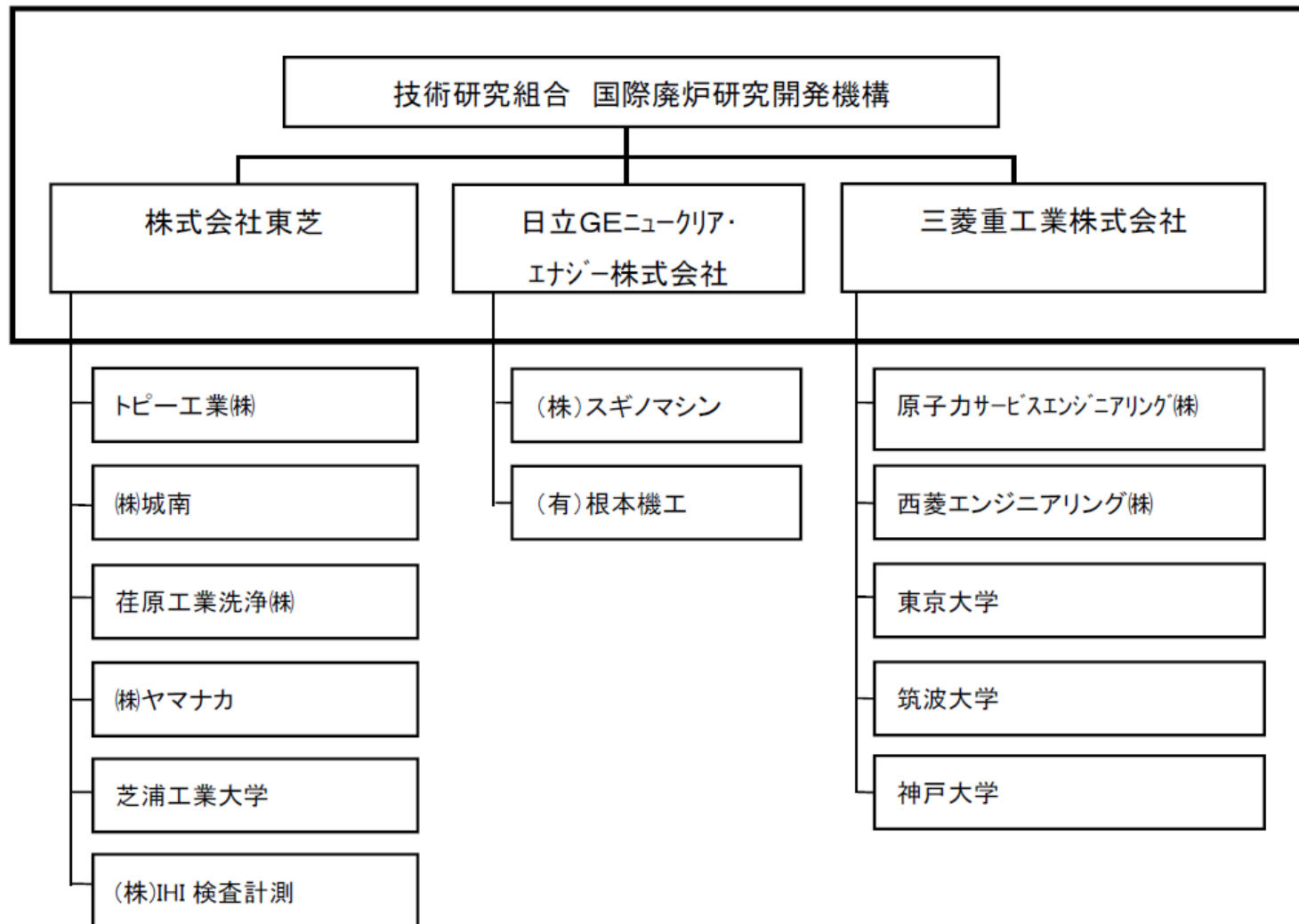
＜環境改善目標＞
作業エリア: 3 mSv/h
アクセスルート: 5 mSv/h

* 従事者の線量限度:
1年間で50mSv 5年間で100mSv

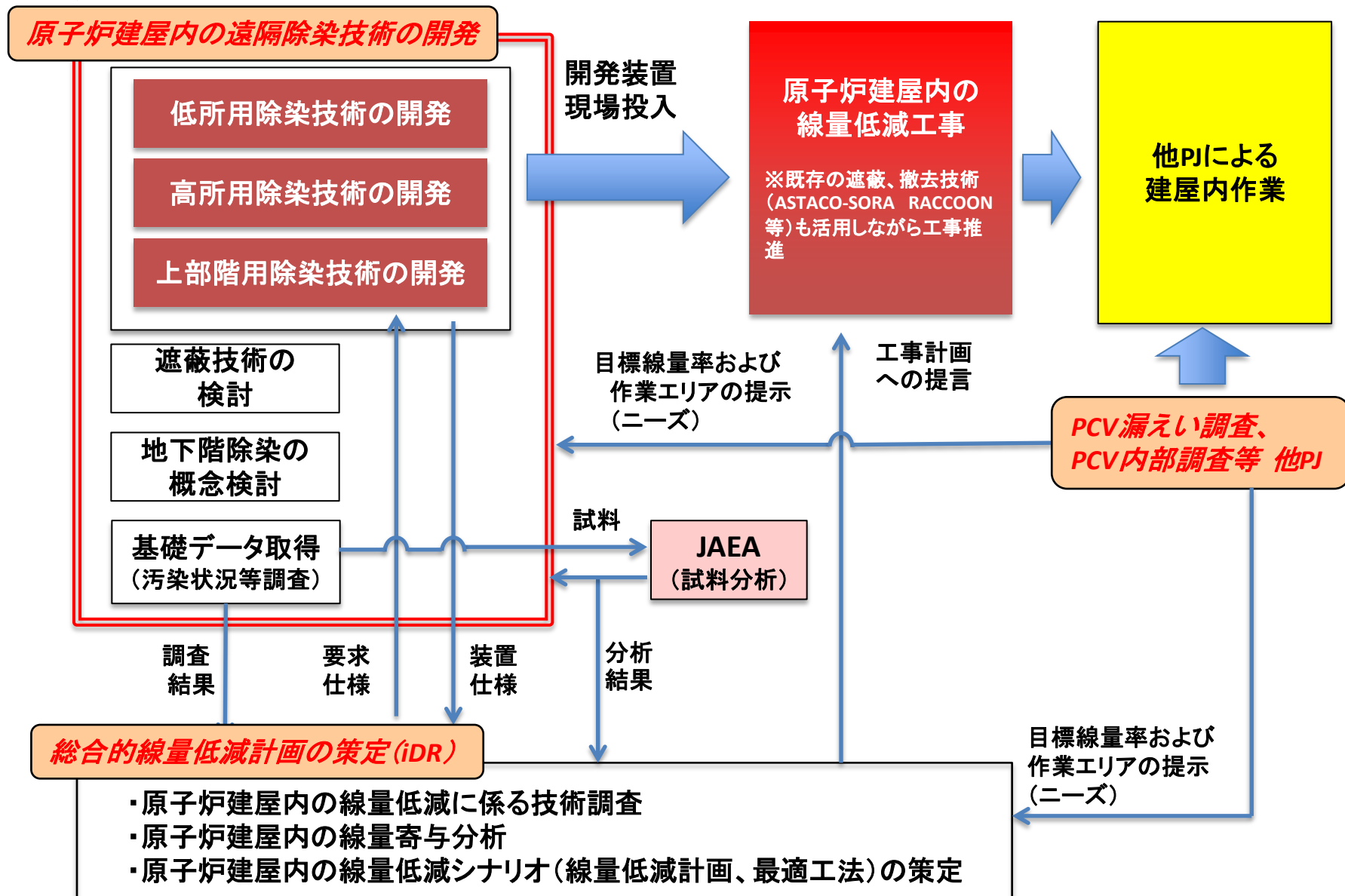
1～3号機の空間線量率 【高所用／上部階用除染装置 開発開始時点】

2. 研究体制(1/2)

IRIDによる全体計画の策定と技術統括、技術開発の進捗などの技術管理のもと、東芝、日立GEニュークリア・エナジー及び三菱重工業は、IRIDの一員として連携し本研究に取り組んだ。

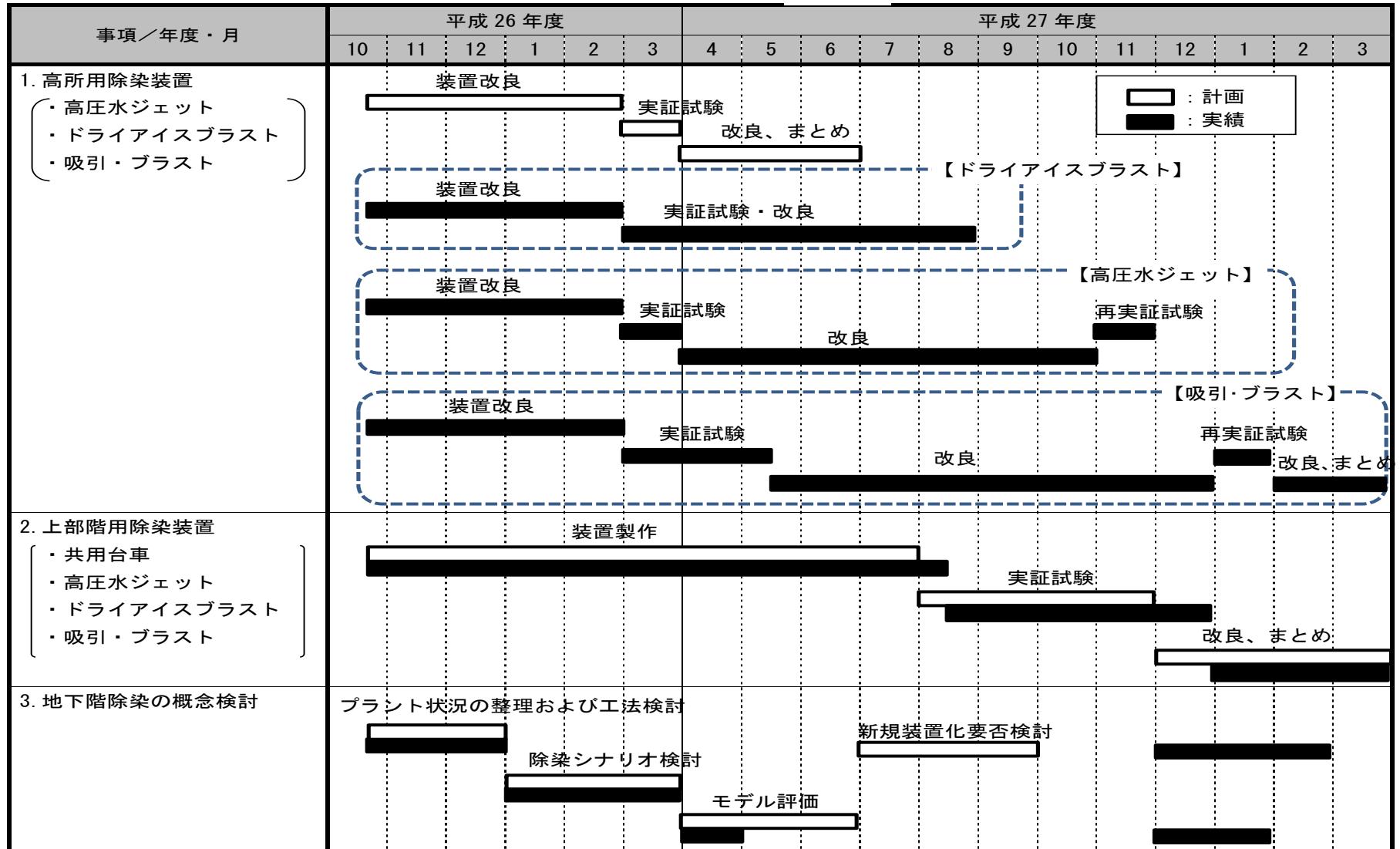


2. 研究体制(2/2) -除染プロジェクトと他プロジェクトの関係図-



3. 研究工程

本研究は平成26年10月より開始。平成27年度に完了。



4. 実施内容(全般)

(1) 高所用除染装置の開発

フェーズ2(平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術開発費補助金「原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発」)では、装置の設計、要素部分の製作・試験を実施した。

本研究では、当該成果を踏まえ装置改良を行い、モックアップを用いた実証試験により実機適用性を確認する。

(2) 上部階用除染装置の開発

フェーズ2(平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術開発費補助金「原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発」)では、装置の設計を行った。

本研究では、課題と対応方針を踏まえて装置の製作を行い、モックアップを用いた実証試験により実機適用性を確認する。

(3) 地下階除染の概念検討

地下階でのダスト封止対策や必要に応じた地下階での除染作業に資するアクセス技術などの概念検討を行い、除染装置の新規開発要否について判断を行う。

4.1 高所用除染装置の開発(1/9) -装置概要-

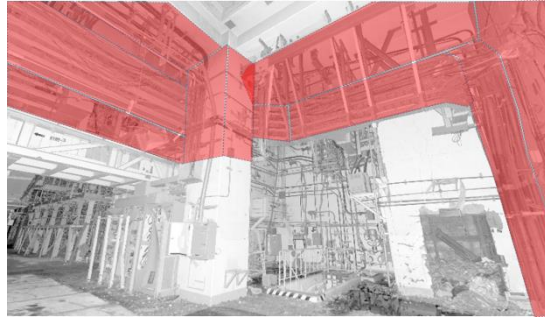
高圧水ジェット除染装置(日立GE)

除染対象	構造物(ダクト・ケーブルトレイ、配管)
汚染対象	遊離性汚染

<特徴>
散水方式のため複雑な形状や比較的広範囲に対応可能。テレスコピックアームを狭隘部に垂直挿入し、散水除染が可能。



【除染対象イメージ】



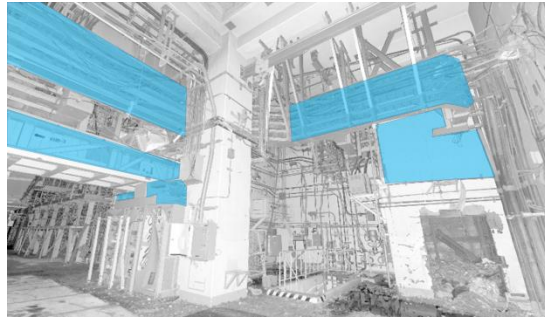
<開発のポイント>

- ① 複雑な除染対象 / 多様な汚染形態
⇒ 複数技術の組合せでカバー
- ② 狭隘な除染対象・アクセスルート
⇒ 転倒防止等の安全性能を確保した上で小型化
・視認性・障害物回避性の確保

ドライアイスブラスト除染装置(東芝)

除染対象	構造物(ダクト・ケーブルトレイ、配管)
汚染対象	遊離性、固着性汚染

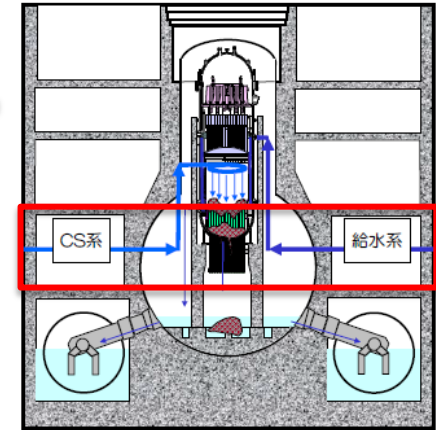
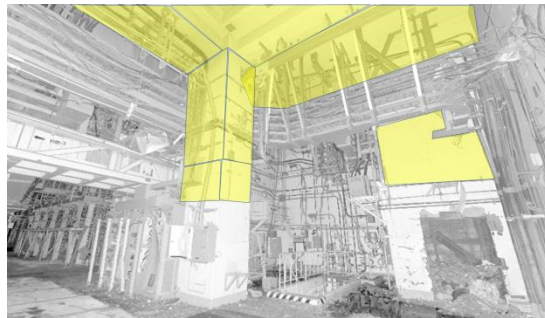
<特徴>
媒体にドライアイスを使用しており廃棄物が少ない。通路側からアームを狭隘部(ケーブルトレイ等)に挿入可能。



吸引・ブラスト除染装置(三菱)

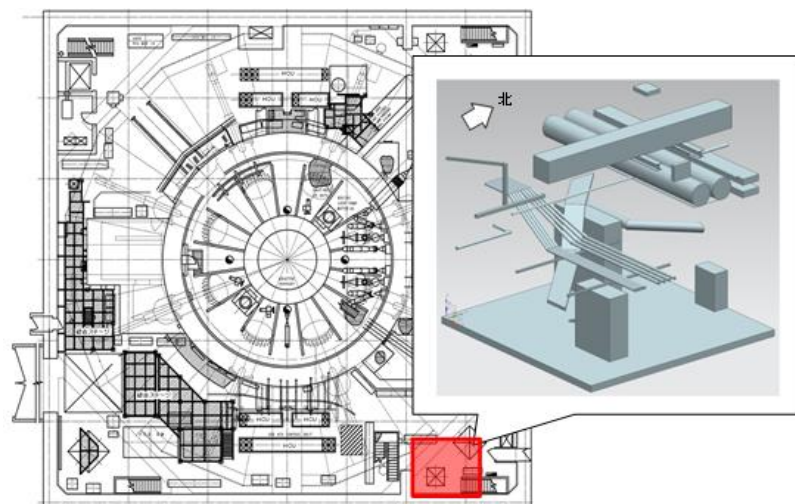
ブラスト	除染対象	躯体(天井・壁面)
	汚染対象	浸透性
吸引	除染対象	構造物(ダクト・ケーブルトレイ)
	汚染対象	遊離性

<特徴>
媒体にスチールブラスト(リサイクル化)を使用。ブラスト除染は建屋躯体が対象だが、モード切替で吸引のみの運用も可能(吸引除染は構造物が対象)

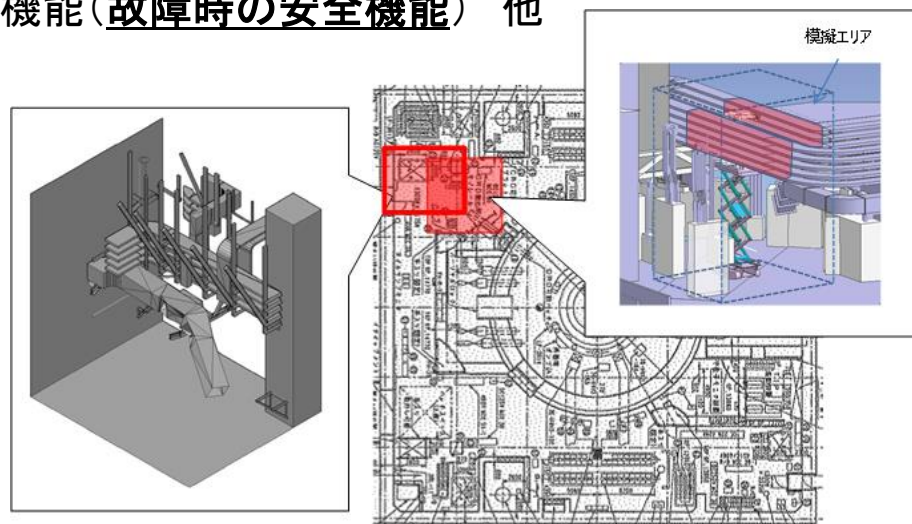


4.1 高所用除染装置の開発(2/9) -実施内容-

- ◆ 平成25年度までのフェーズ2(平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術開発費補助金「原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発」)では、装置の設計、要素部分の製作・試験を実施した。
- ◆ 本研究(平成26～27年度)では、上記の成果を踏まえ装置改良を行い、モックアップを用いた実証試験により実機適用性を確認する。
- ◆ 実証試験では、以下の要求仕様(性能)について確認、評価を行う。
 - ・目標線量率(作業エリア3mSv/h、アクセスエリア5mSv/h)を踏まえた**除染性能**
 - ・除染時に使用する水やブラスト材等を飛散させずに回収する機能(**除染媒体の回収機能**)
 - ・走行性、除染動作性(**遠隔操作性**)
 - ・作業台車と除染ユニットを組み合わせた状態での操作性(**付帯機器との連携性**)
 - ・故障時の機器回収性、転倒防止能力、安全機能(**故障時の安全機能**) 他



実証試験モックアップイメージ(1号南東)



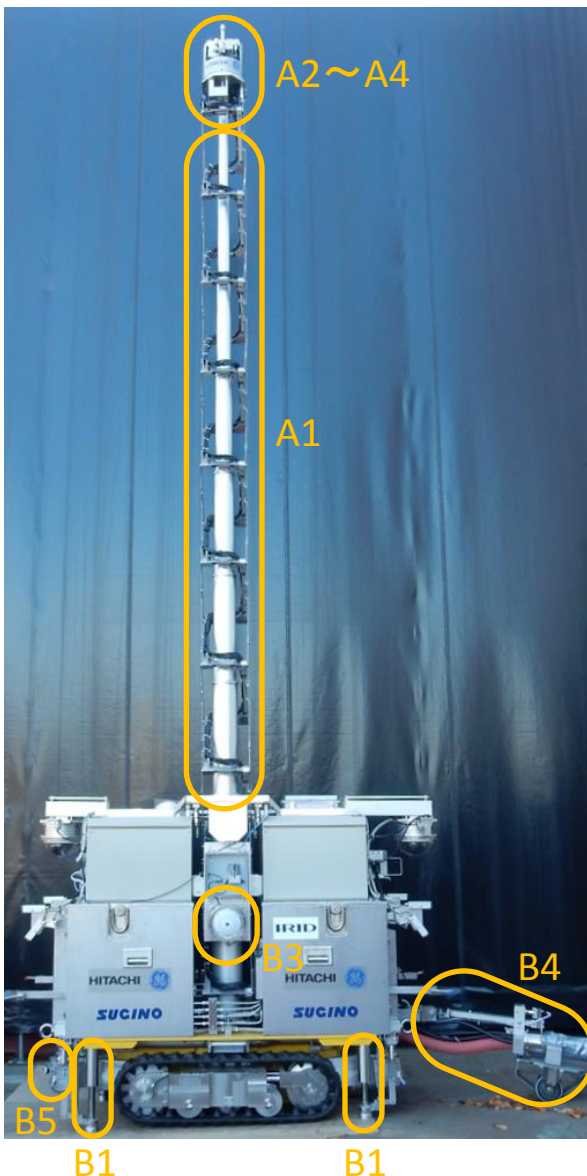
実証試験モックアップイメージ(3号北西)

4.1 高所用除染装置の開発(3/9) -実証試験結果-

モックアップを用いて平成27年3月より実証試験を開始した。試験の結果、改良が必要と評価された項目については、改良を行い再度試験を実施した(～平成28年1月)。全ての項目について目標を達成することを確認した。

	内容	目標	結果		
			吸引・ブラスト	ドライアイス ブラスト	高圧水 ジェット
1.	除染性能	DF5を満足する除染性能を達成すること。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 塗装有: 0.1mm～0.4mm/塗装無: 1mm～3mmの研削量[ブラスト] ➢ それぞれが対象とする模擬汚染に対し除去率80%以上[ドライアイス/高圧水] 	○	○	○
2.	除染媒体の回収機能	除染媒体を回収できること。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 回収率98～99%[ブラスト] ➢ 回収率90%以上[ドライアイス] ➢ 吸引後に床面に残存する除染水が床勾配有る環境で水深10mm以下、床勾配無しで水深1mm以下を達成すること。[高圧水] 	○	○	○
3.	遠隔操作性(走行性・除染動作)	<ul style="list-style-type: none"> ・作業台車と除染ユニット(ホース・ケーブル等含む)を組み合わせた状態で、遠隔操作により実機を模擬したアクセス通路及び段差(50mm)を走行できること。 ・各装置について遠隔で以下の除染動作が行えること。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ アームが高さ6m程度に到達し除染動作を行えること。[吸引・ブラスト] ➢ 高さ8mまでの機器・配管の表面ドライアイスを噴射できること。[ドライアイス] ➢ アームが高さ6mに到達し、高さ8mの天井に高圧水を噴射できること。[高圧水] 	○	○	○
4.	付帯機器との連携性	<ul style="list-style-type: none"> ・作業台車と除染ユニット(ホース・ケーブル等含む)を組み合わせた状態で、遠隔操作により除染の一連の作業ができること。 	○	○	○
5.	故障時の安全機能	<ul style="list-style-type: none"> ・主電源(バッテリー)断時に外部電源により復旧できること。[吸引・ブラスト/ドライアイス] ・主通信(有線)不通時にバックアップ通信(無線)に切替わること。 ・異常動作時に非常停止が行えること。 ・故障時に装置を回収する機能があること。(他機器の使用も可とする) 	○	○	○
6.	その他必要と思われる事項	<ul style="list-style-type: none"> ・スロープ走行できること。 ・砂利道(2～3cm)を遠隔走行できること。 ・構造物に対し、除染動作できること。[吸引・ブラスト] 	○	○	○

4.1 高所用除染装置の開発(4/9) -高圧水ジェット装置の改良-



ノズルヘッド部およびアームの改良

- [A1]アーム下降時間短縮(約11分→約6分)(駆動水吸引ポンプ追加)
- [A2]小型カメラの死角およびノイズ改善(配置見直し、シールド処理)
- [A3]エアノズルの風量増による水滴除去性改善
- [A4]ノズルヘッド部へのコネクタ追加による交換作業性の向上(*)

移動台車の製作

- [B1]アウトリガの採用による高所除染時の移動台車の水平保持および高圧水噴射時の位置ずれ防止
- [B2]故障時の移動台車回収機能
- [B3]左右側面監視用カメラ(2台)の追加による視認性の向上(*)
- [B4]ケーブル・ホース固定用ジョイントおよびキャスタの追加によるケーブル・ホース取扱性の向上(*)
- [B5]吸引ヘッドをナイロンブラシ製からゴム製へ変更し、吸引ヘッドの汚染を低減(*)

制御装置の製作

- [C1]制御盤、制御ボックスおよび操作ユニットの製作
- [C2]移動台車操作用モニタの大型化(32インチ)および巻取りリール用モニタの追加による遠隔操作性の向上(*)

巻取りリールの製作

- [D1]ケーブル・ホースを巻き取る巻取りリールの製作

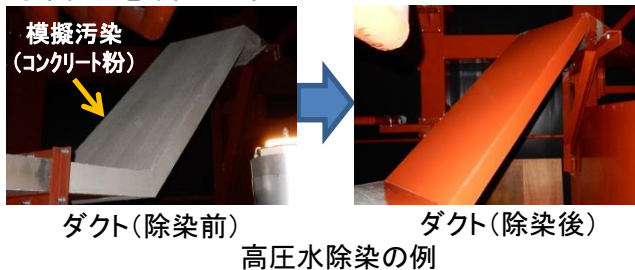
* : 実証試験後に実施した改良内容

4.1 高所用除染装置の開発(5/9) - 高圧水ジェット装置の実証試験状況-

本事業(フェーズ3)では、装置改良および実機を模擬したモックアップ準備を行い、H27.3に実証試験を実施した。試験結果を踏まえた再改良を行った後、H27.11~12に再実証試験を実施し、現地に適用できる見通しを得た。

除染性能／除染媒体の回収機能

移動台車(アウトリガ採用)および高所構造物モックアップを用いて高圧水除染試験を行い、配管・ダクト・ケーブルトレイ・コンクリート・盤について目標除去率80%以上を達成。また、改良により、吸引ヘッドの汚染低減を確認した。



ダクト(除染前) ダクト(除染後)
高圧水除染の例



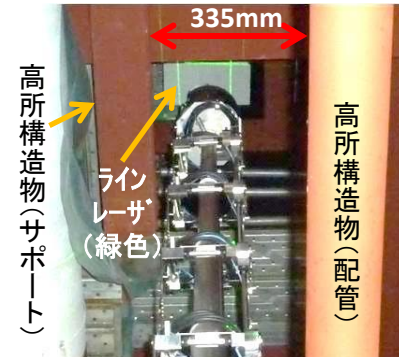
吸引ヘッド(改良前) 吸引ヘッド(改良後)

遠隔操作性



W7m x D7m x H8m
高所構造物モックアップ
(試験中は外周に遮光シート設置)

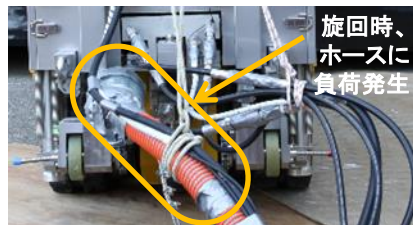
1号機南東エリアの高所構造物(ダクト、配管、ケーブルトレイ)および盤を模擬したモックアップにて、アクセス・走行・除染・帰還の一連の作業性について確認した。



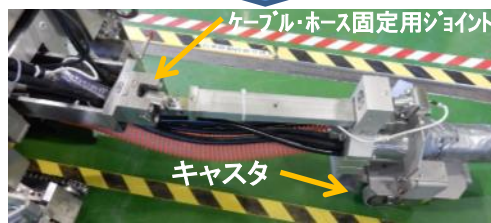
高所構造物(サポート) 高所構造物(配管)
ラインレーザーによる移動台車の位置決め

遠隔操作性／付帯機器との連携性

実機を模擬したアクセス通路・段差(50mm)を遠隔操作にて走行できることを確認。巻取りリールと連携して、アクセス・走行・除染・帰還の一連の作業が問題なく出来ることを確認。また、改良により、視認性、ケーブル・ホース取扱性、遠隔操作性が向上したことを確認した。



ケーブル・ホース接続部(改良前)

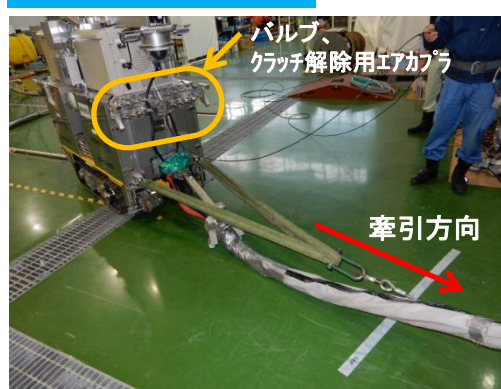


ケーブル・ホース接続部(改良後)



段差乗越え

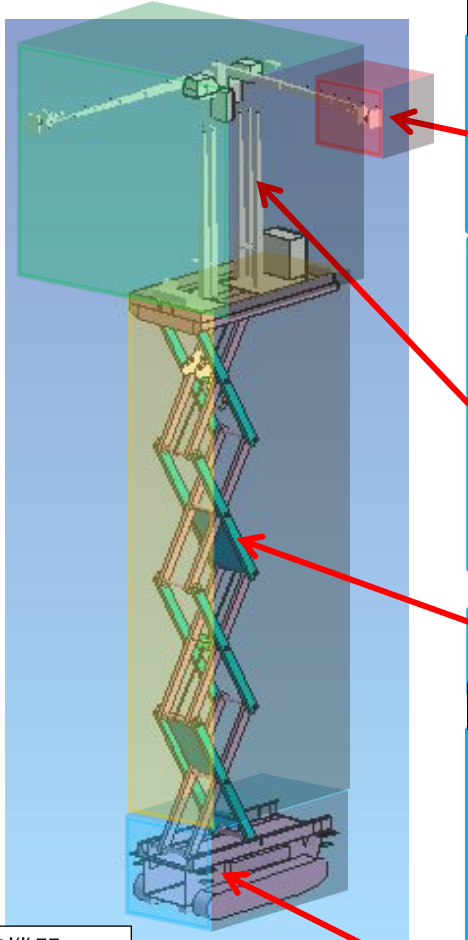
故障時の安全機能



非常時の移動台車牽引回収

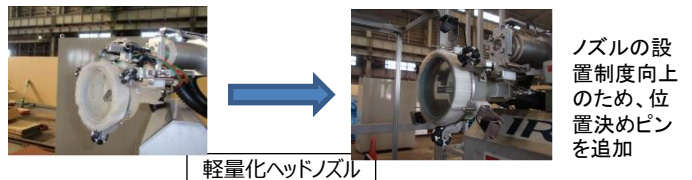
バルブからの駆動水の排出によるアーム下降、アウトリガ収納により、移動台車を走行状態に戻せることを確認した。また、エア供給によりクローラのクラッチ解除を行い、非常時の牽引回収が可能であることを確認した。

4.1 高所用除染装置の開発(6/9) -ドライアイスブラスト装置の改良-

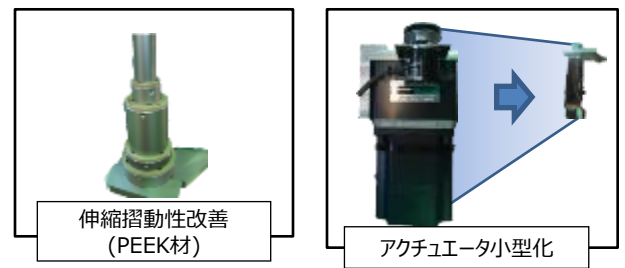


作業ユニット

- 吸引機能向上 (A)**
吸引ノズルの小型・軽量化
専用手首機能を追加
- 除染対象視認性改善 (B)**
各アームの手先に小型カメラ、LEDマーカを追加



- アーム操作性向上 (C)**
機構改良により伸縮位置制御性を向上
アクチュエータ、制御盤、雲台の小型化
部品形状変更、各部のカバーの追加
- アーム視認性向上 (D)**
昇降台車上にアーム視認用カメラを搭載
- 昇降機構視認性向上 (E)**
上方の干渉物確認用カメラ・照明を追加
レーザレンジファインダによる3Dスキャン機能追加

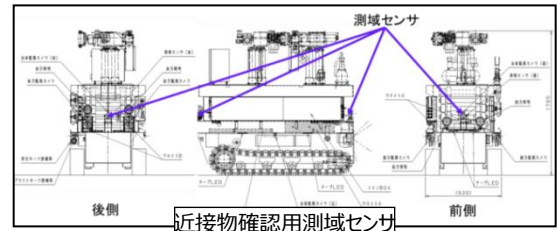
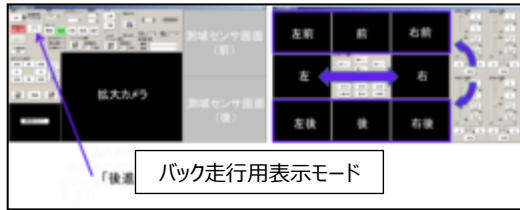
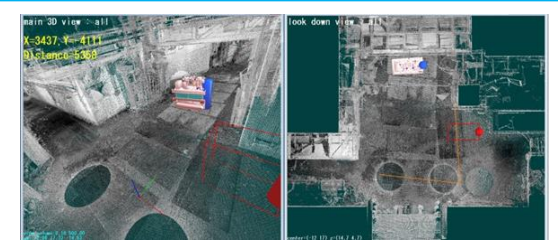


昇降ユニット

- 昇降位置決め操作性向上 (F)**
油圧系に絞り弁を追加

走行ユニット

- 台車位置決め操作性向上 (G)**
低速駆動制御、速度制御機能を追加
位置認識用カメラ、画像処理・表示機能の追加
- 移動時視認性向上 (H)**
バック走行時等の操作画面上的カメラ映像配置の変更
- 狭隘部走行性向上 (I)**
走行ユニットの改造により幅をスリム化
走行時近接物確認用測域センサを搭載



周辺機器

- 装置回収作業性向上 (J)**
ハンドパレットに補助輪を追加し、2～3名の作業員で牽引できるようにした。



4.1 高所用除染装置の開発(7/9) -ドライアイスブラスト装置の実証試験状況-

本事業(フェーズ3)では、フェーズ2で抽出された課題の改善を行い、H27.3~8にかけて実施した実証試験を実施した。そこで抽出された課題について更なる改良を行い実機適用性を向上させた。

除染性能

- 模擬汚染として付着させた塩化セシウムの98%を回収できていることを確認した。
- 噴射したドライアイスの92%を回収できていることを確認した。



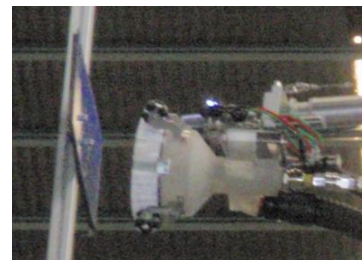
壁面洗浄用ノズル

初期付着量 9600 μg

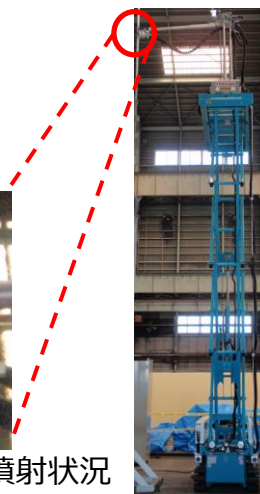
除染対象箇所残留量	28 μg	除去効率	99 %
アクリル板(壁面)	136 μg		
壁面	34 μg		
アクリル板への飛散量	19 μg		
総残留量	217 μg	除去効率	98 %
回収量	9383 μg	回収率	98 %
		CO2回収率	85-98 %

遠隔操作性(除染動作)

高所構造物モックアップを用い、除染作業性試験を実施。高さ8mの位置においてドライアイスを噴射し、模擬汚染を剥離できることを確認した。(C)、(D)、(E)、(F)



高所モックアップ 高さ8 m高さでのドライアイス噴射状況



遠隔操作性(走行性)

状況に応じた適用速度(0.8-7.5m/min)に可変でき、それぞれの速度においてスムーズに走行できることを確認スロープ、段差、砂利道走行をスムーズに走行できることを確認した。



坂道走行(14°)



段差走行:50mm



砂利道走行

故障時の安全機能

一連の非常時回収試験を実施し、有人作業が可能な短い時間で台車を回収できることを確認した。

空気圧解除



油圧解除



台車けん引



4.1 高所用除染装置の開発(8/9) -吸引・ブラスト除染装置の改良-

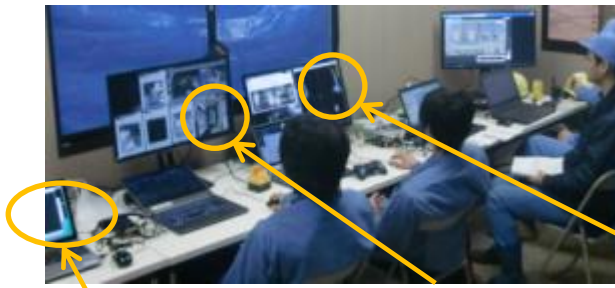
本事業(フェーズ3)ではフェーズ2で抽出された課題の改善を行うとともに、実証試験の結果を踏まえ更なる改良を行い実機適用性を向上させた。(* は大学委託研究)



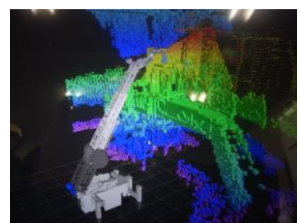
多自由度アームの同期制御*
9軸アームの同期制御により可動範囲および干渉回避性を向上(H26~H27)

ホースリール小型化
ホースリールの設計を見直し、全体寸法を小型化。狭隘部などの走行性を向上(H26)

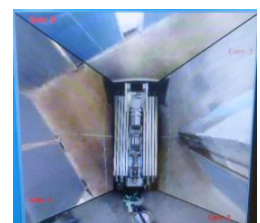
キャスター台車固定
ケーブル引回し治具の固定方法改善(H26)



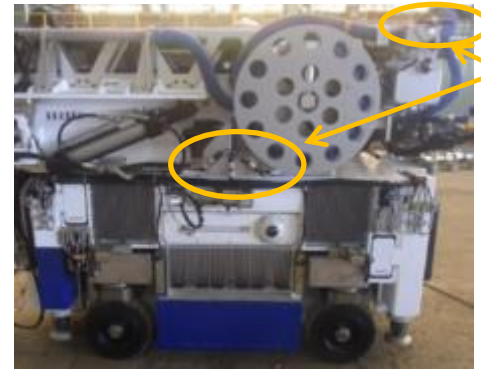
3D測域センサによるマッピング*
リアルタイムで周辺情報をマッピング。走行及び作業時の監視能力が向上(H26~H27)



疑似俯瞰画像*
装置改良による寸法・カメラ位置の変更など踏まえ最新化(H26~H27)



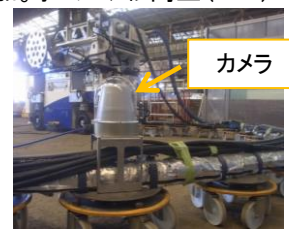
故障時回収の遠隔化
非常用操作系の追設、ケーブルの延長などにより、故障時における梯子ユニット、アウトリガ収納などを遠隔でできるようにした。(H27)



レーザーマーカ搭載
レーザーマーカにより走行及び作業時の干渉回避性を向上(H27)



全体監視カメラの追加
作業台車の全体映像を監視するためのカメラをキャスター台車に追加。オペレーション向上(H27)



4.1 高所用除染装置の開発(9/9) -吸引・ブラスト装置の実証試験状況-

- ◆ 本事業(フェーズ3)では、フェーズ2の成果を基に装置の改良を行い、実証試験(H27.3~5)で実機適用性を確認。
- ◆ 実証試験で抽出された課題については更なる改良を行った上で、再実証試験(H28.1)により所期の目標を満足することを確認。実機適用の見通しを得た。

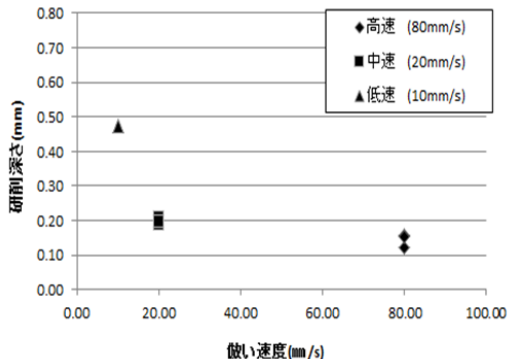
除染性能

試験体に対しブラスト除染を行い、DF5を満足する研削量(塗装有:0.1~0.4mm/無塗装:1~3mm)が得られることを確認した。

⇒ **目標達成**



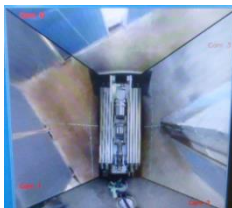
ブラスト後(20mm/sec)の試験体



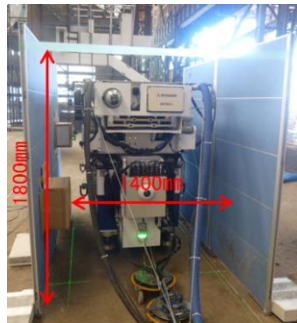
遠隔操作性(走行性)

実機の各走行環境(狭隘、コーナー、段差、スロープ、砂利)に対する走行性能を確認した。

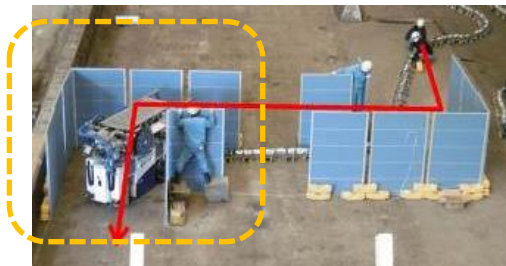
⇒ **目標達成**。(測域センサ、レーザーマーカ等により走行時の視認性が向上したことを確認できた。)



コーナー旋回時の疑似俯瞰画像



狭隘部走行の様子



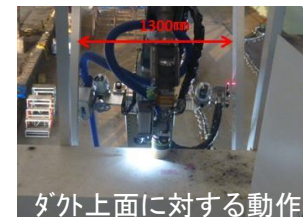
コーナー部走行の様子

遠隔操作性(除染動作)

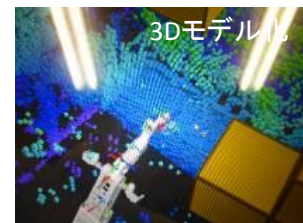
建屋躯体(天井・壁面)および構造物に対する除染作業性を確認した。
⇒ **目標達成**。(高さ約6~8m高の除染作業が可能。9軸アーム同期制御により除染範囲が拡大すると共に測域センサ、レーザーマーカ等によりアクセス性が向上したことを確認できた。)



モックアップ



ダクト上面に対する動作



3Dモデル化

故障時の安全機能

電源・通信のバックアップ、転倒防止、故障時回収が問題なくできることを確認した。

⇒ **目標達成**。(故障時回収ではユニット収納を遠隔化することにより故障時回収にかかる時間を大幅に短縮できた。)



電動ウィンチにより牽引回収する様子

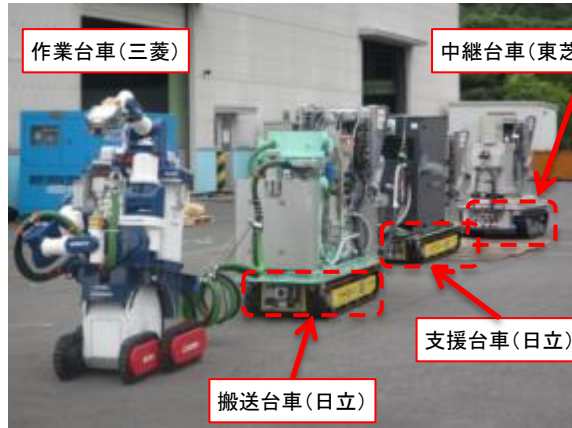


4.2 上部階用除染装置の開発(1/6) -装置概要-

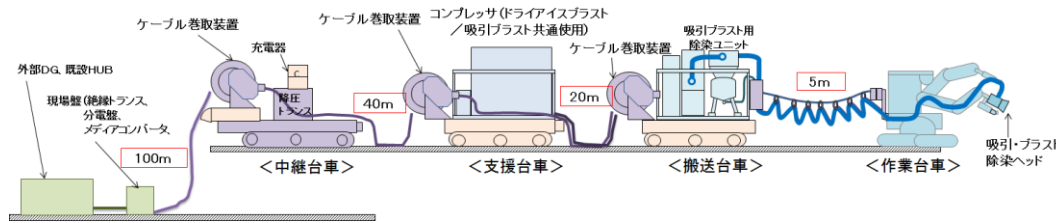
上部階用除染装置の概要

除染対象	2・3階の床面及び壁面(高さ約2m)
除染方法	吸引、ブラスト、ドライアイスブラスト、 高圧水ジェットの4技術*
上部階アクセス方法	昇降リフト(実機で手配)で機器搬入口より進入
非常時装備	非常用電源および通信装備

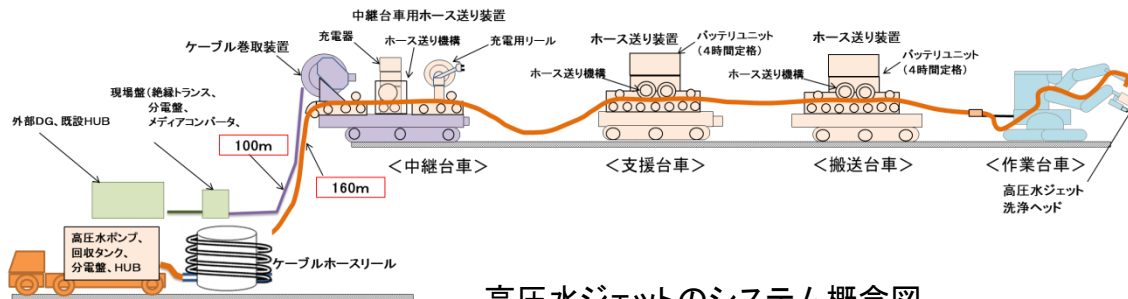
* 台車は**共用化**を図りメーカーで分担開発し、適用する除染方法に応じて除染ユニットを交換する。



吸引・ブラストユニットを搭載した装置



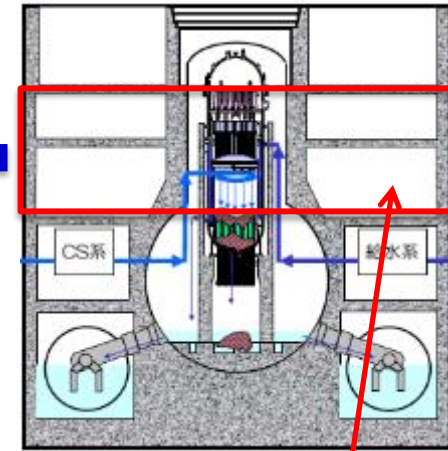
吸引、ブラスト、ドライアイスブラストのシステム概念図



高圧水ジェットのシステム概念図

<開発のポイント>

- ①昇降設備に搭載可能な寸法・重量とする必要あり
⇒ **台車・除染ユニットの小型化**
(複数台化/連結方式採用)
- ②各除染装置が適用できる共通のアクセスシステムが合理的
⇒ **台車を共用化**
(台車/ユニット毎に各社分担)



2・3階で作業(PCV調査・補修等)を円滑に行うため、アクセスエリアの線量低減が重要

4.2 上部階用除染装置の開発(2/6) -実証試験計画-

- ◆ フェーズ2(平成25年度実施)では、装置の設計を行った。
- ◆ 本研究(平成26~27年度)では、上記での課題と対応方針を踏まえて装置の製作を行い、モックアップを用いた実証試験により実機適用性を確認する。
- ◆ 実証試験では、以下の性能について確認を行う。

【除染装置に求められる性能】

- ・目標線量率(作業エリア3mSv/h以下、アクセスエリア5mSv/h以下)を踏まえた**除染性能**
- ・除染に使用する水やブラスト材等を飛散させずに回収する機能(**除染媒体の回収機能**)
- ・走行性、除染動作性(**遠隔操作性**)
- ・**附帯機器等との連携性**
- ・故障時の機器回収性、転倒防止能力、安全機能(**故障時の安全機能**)

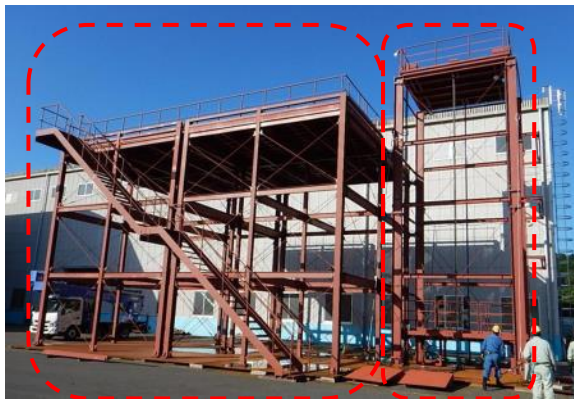
【上部階特有事項】(上部階アクセス性)

- ・上部階との往復には汎用の昇降作業台を使用
- ・上部階との往復に要する時間を極力短縮
- ・上部階の構造躯体、機器配置の中で動作



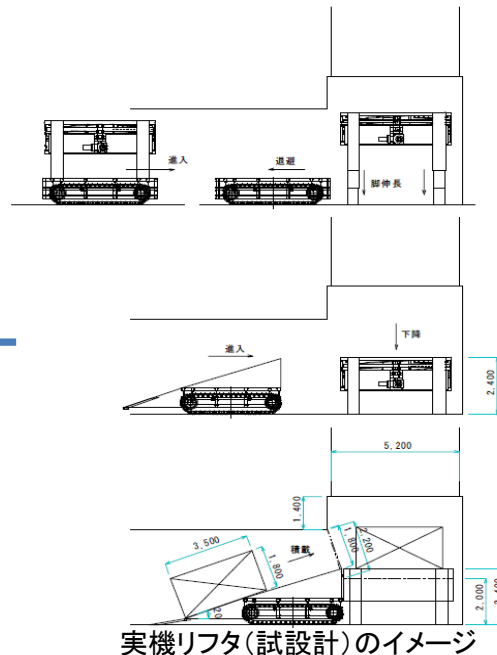
■ モックアップ

昇降設備は実機向けに基本検討したリフトとおおむね同程度の基本スペックのものを用意。



架台
(幅13.6m × 奥行き8m × 高さ8.5m)

試験用昇降設備



	実機向け (試設計)	試験用昇降 設備 (M/U)
ステージ面積	2.4m × 4.5m	同左
可搬重量	3t	同左
昇降高さ	17.5m (3階相当)	8.5m (2階相当)
昇降速度	6.3分	同左
昇降方式	パンタグラフ (走行機構・昇 降機構分離)	

4.2 上部階用除染装置の開発(3/6) -実証試験結果-

本研究で開発した上部階用除染装置について、実機を模擬した試験により福島第一原子力発電所での投入時に要求される性能を確認・評価した。

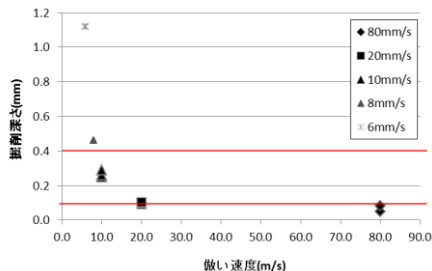
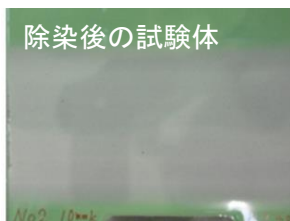
	内容	目標	結果		
			ブラストシステム		高圧水システム
			吸引・ブラスト	ドライアイスブラスト	
1.	除染性能	DF5を満足する除染性能を達成すること。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 0.1mm~0.4mmの研削 [ブラスト] ➢ それぞれが対象とする模擬汚染に対し除去率80%以上[吸引/ドライアイス/高圧水] 	○	○	○
2.	除染媒体の回収機能	除染媒体を回収出来ること。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 回収率98~99%[ブラスト] ➢ 回収率90%以上[ドライアイス] ➢ 除染ヘッド移動後に、流れ落ちる水滴状の水が無いこと。[高圧水] 	○	○	○
3.	遠隔操作性(走行性・除染動作・上部階アクセス性)	<ul style="list-style-type: none"> ・共用台車、各除染ユニットを連結した状態で、遠隔操作により正常に走行し、上部階への昇降が行えること。【上部階アクセス性試験の条件は以下のとおり】 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 上部階往復にかかる時間は往復1時間以内で実施できること。 ➢ 実機昇降設備(搭載寸法、搭載重量等)を模擬したモックアップを用いること。 ・作業台車と除染ユニット(ホース・ケーブル等含む)を組み合わせた状態で、遠隔操作により実機を模擬したアクセス通路及び段差(50mm)を走行できること。 ・各除染ヘッドと作業台車を組み合わせ、床面及び壁面(高さ約2m)に対し、遠隔操作により除染動作(位置設定、做い動作)が正常にできること。 	○		○
4.	附帯機器との連携性	<ul style="list-style-type: none"> ・作業台車と除染装置を組み合わせた状態で、遠隔操作により除染の一連の作業を連携して実施できること。 	○		○
5.	故障時の安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・電源断時に装置設計どおりにバックアップ電源等の供給が行えること。 ・通信異常時に外部無線機の活用により通信の回復が行えること。 ・異常動作時に非常停止が行えること。 	○		○
6.	その他必要な事項	<ul style="list-style-type: none"> ・実機を模擬した凹み部および砂利に対して、遠隔操作により走行できること。 ・狭隘/角部への除染施工性を確認すること。 	○		○

4.2 上部階用除染装置の開発(4/6) -ブラストシステムの実証試験状況-

ブラストシステム(吸引・ブラスト除染ユニットを搭載)において、モックアップを用いて各種試験を実施し各項目についてモックアップを用いて各種試験を実施し各項目について目標を達成したことを確認し、実機適用の見通しを得た。

除染性能

試験体(塗装有)に対しブラスト除染を行い、目標の除染性能(0.1~0.4mm)が得られたことを確認した。



吸引除染の場合、粉塵をほぼ100%除去できることを確認した。



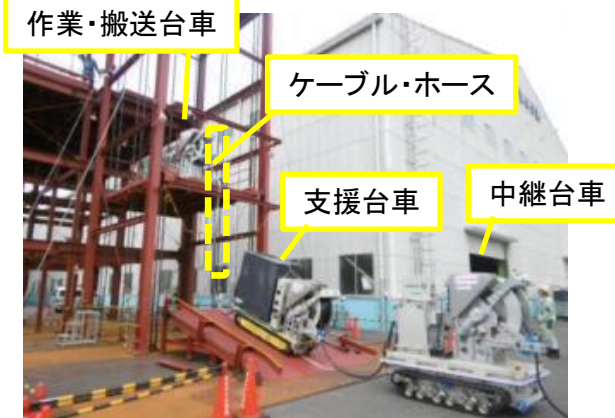
遠隔操作性(走行性)



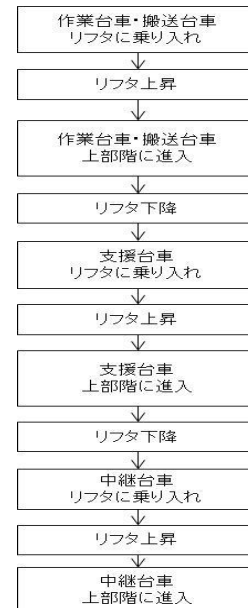
実機を模擬した走行ルート(狭隘・コーナー・段差・砂利)に対し、4両連結した状態で遠隔走行できることを確認した。

遠隔操作性(上部階アクセス性)

実機リフトを模擬したM/U設備を用いて、上部階へアクセスできることおよび往復1時間以内でアクセス・帰還できることを確認した。



<アクセス手順>



故障時の安全機能

電源・通信のバックアップ、故障時の対応など安全機能に係る試験を行い、実機で想定される非常時において対応できることを確認した。



4.2 上部階用除染装置の開発(5/6) -ブラストシステムの実証試験状況-

ブラストシステム(ドライアイスブラストユニットを搭載)において、回収率(CO₂)評価、除染性能評価、除染動作評価を実施し、目標仕様の達成を確認した。

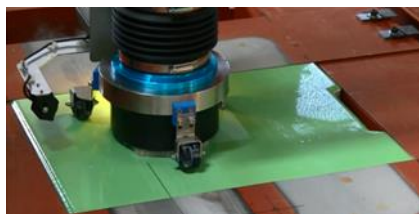
除染媒体の回収機能

回収率(CO₂)評価



垂直壁面に設置した鉄板へドライアイス除染作業を行い、CO₂回収率を測定した。

目標仕様**90%**以上の回収率を確認
 高さ2000~1670mm:**95.7~91.4%**
 高さ1500~1060mm:**90.3%**
 高さ 800~ 360mm:**94.2%**



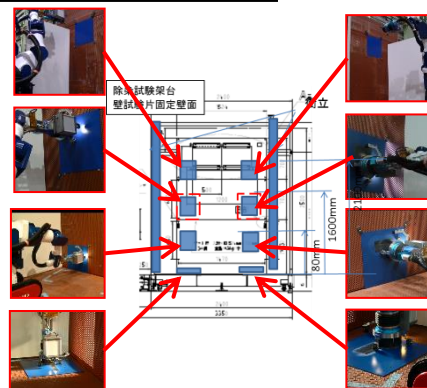
模擬汚染物質(CsCl)を塗布したコンクリート片を床面設置し、除染作業を後の模擬汚染物の残留量と拡散量から除去量の割合として除去率を評価した。

目標仕様の除去率**80%**以上を確認した。

ヘッド速度30mm/s : Cs除去率**91.5%** (CO₂回収率94.4%)
 ヘッド速度40mm/s : Cs除去率**87.3%** (CO₂回収率91.0%)
 ヘッド速度15mm/s : Cs除去率**91.0%** (CO₂回収率95.0%)

遠隔操作性(除染動作)

除染動作評価



左右に衝立を設置し、除染動作を行った際の、障害物と除染範囲の距離を測定した。

ドライアイスブラストシステムに特有な問題は無く、除染作業が可能であることを確認した。

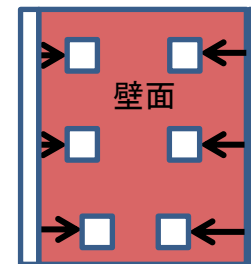
上段:左衝立から**310mm**まで除染

中段:左衝立から**345mm**まで除染

下段:左衝立から**320mm**まで除染

床左端:壁面から**200mm**まで除染

床左端:左衝立から**186mm**まで除染



上段:右衝立から**440mm**まで除染

中段:右衝立から**438mm**まで除染

下段:右衝立から**455mm**まで除染

床右端:壁面から**270mm**まで除染

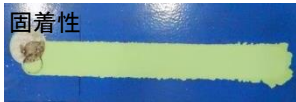
床右端:右衝立から**390mm**まで除染

4.2 上部階用除染装置の開発(6/6)-高圧水システムの実証試験状況-

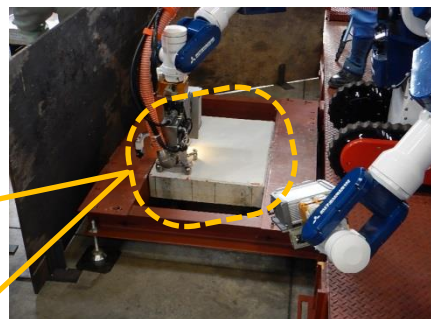
高圧水システムにおいて、モックアップを用いて各種試験を実施し各項目について目標を達成したことを確認し、実機適用の見通しを得た。

除染性能

- ・模擬試験体(遊離性)で除染性能試験を行い、目標(除去率80%以上)を達成。また、参考試験により、固着性・浸透性汚染にも適用可能であることを確認。



除染後の試験片



遠隔操作性(上部階アクセス性)



実機リフトを模擬したM/U設備を用いて、上部階へアクセスできることおよび往復1時間以内でアクセス・帰還できることを確認。

遠隔操作性(走行性)



実機を模した走行ルート(狭隘部・コーナー部・段差・砂利・暗所)で4両連結した状態で走行できることを確認。

故障時の安全機能



電源・通信異常、各台車故障ケースでの復旧・回収試験を実施し、遠隔で復旧・帰還および、台車故障時回収が出来ることを確認。

4.3 地下階除染の検討(1/2)

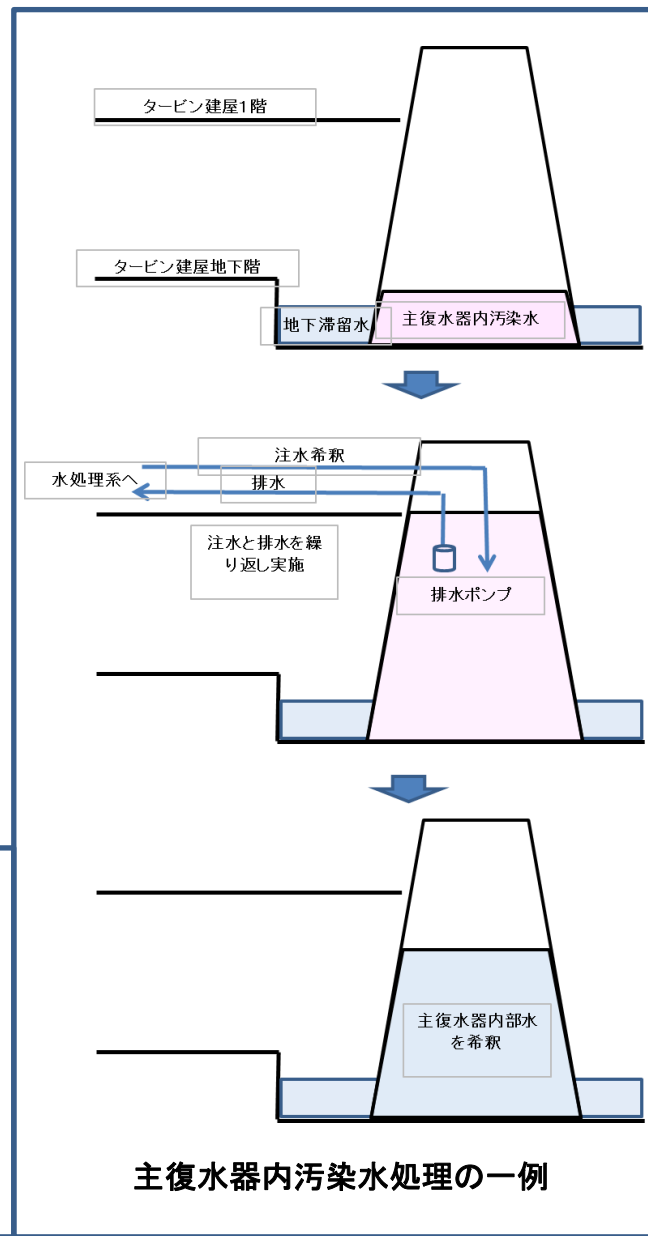
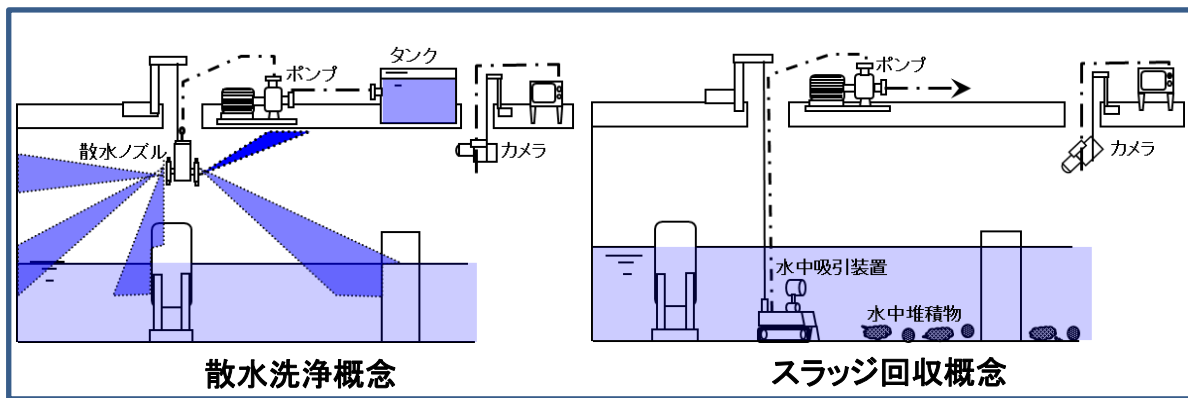
タービン建屋地下階

これまで地下滞留水の低下にあわせた喫水面(壁面、機器側面)の散水洗浄、底部スラッジ回収、床面洗浄の概念検討を実施した。この結果、既存技術の組合せで実施できることを確認した。

さらに、新たに確認された線源として、主復水器及び接続配管内に残存する高濃度汚染水(初期滞留水)の処理について以下の概念検討を実施した。

- ・注水希釈+排水の繰り返し
- ・主復水器側面下部に穴を開け、地下滞留水と連通させる。

実施にあたっては、主復水器内の構造の再確認が必要であるが、既存技術の組合せで実施できることを確認した。

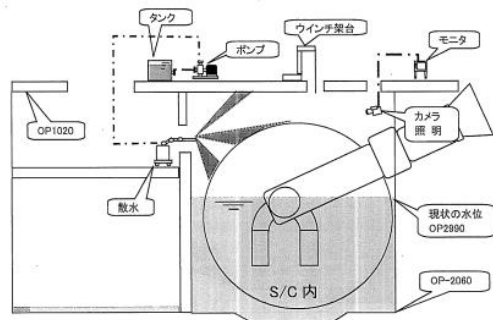


主復水器内汚染水処理の一例

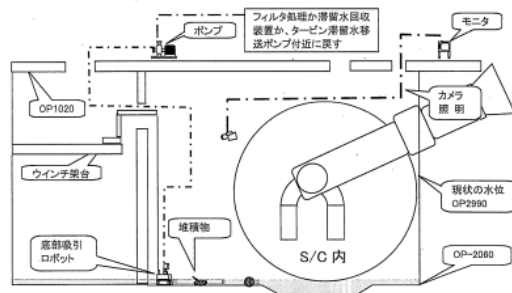
4.3 地下階除染の検討(2/2)

原子炉建屋地下階

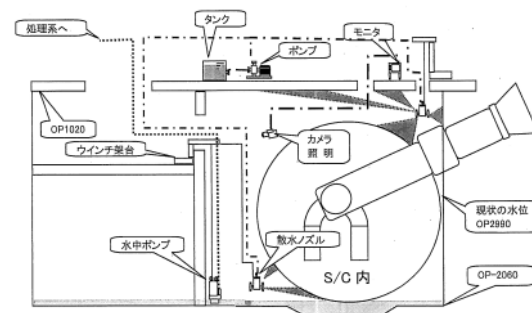
原子炉建屋地下階の除染概念検討として、まずタービン建屋で検討した除染方法を原子炉建屋に展開した場合の検討を行った。トラス室へのアクセス箇所を原子炉建屋1階通路部床面および三角コーナー地下中間階壁面に穴をあけて実施する方法について検討した。(三角コーナー地下中間階は既存の扉を使用することも可能)また、トラス室からのダスト拡散抑制対策としては、アクセス箇所の閉止で対応可能である。



散水洗浄(排水前)の概念



トラス室底部スラッジ回収及び排水の概念



散水洗浄(排水後)の概念

概念検討の結果、ダストの拡散抑制対策およびアクセス箇所からの散水洗浄、底部スラッジ回収は、いずれも既存技術で対応可能であることを確認した。

トラス室内の止水、補修作業は、遠隔操作で実施する計画であり、トラス室内への作業者の立ち入りの有無およびトラス室内の排水後の環境(線量率、機器の汚染状況、ホットスポットの有無等)が不明確である。トラス室内への作業者の立ち入りニーズが出た時点で、改めてトラス室内の環境の確認および新たな装置の開発要否について検討が必要である。

5.1 大学研究室との連携(1/2) -吸引・ブラスト除染装置のロボット操作性向上-

技術的課題

- ロボットに搭載している通常カメラの情報のみでロボットを操作することは、ロボット周囲の状況を把握しにくく、操作しにくい。
- 多関節マニピュレータを狭い場所で用いる場合、周囲と干渉無く動かすことは、操作が複雑で難しい。

解決方法

これらの対応技術の知識豊富な大学研究室に検討を委託した。

周辺把握1【東京大 山下研究室】

- ロボットに搭載した複数のカメラ画像を補正し、ロボットを上空から見下ろすような画像（疑似俯瞰画像）を表示させ周囲状況をわかり易く表示
- カメラの種類や取付け位置・方向の変更に柔軟に対応できるように、画像補正量を簡単に調整できる技術を開発

周辺把握2【筑波大 坪内研究室】

- カメラやレーザセンサによる3次元計測情報をロボット周囲にマッピングし、判り易く表示させるシステムを開発
- ロボットへの適用性を考慮し、通信速度が遅い場合にも柔軟に対応できるように、必要な解像度の静止画や動画を適宜選択できるシステムを開発

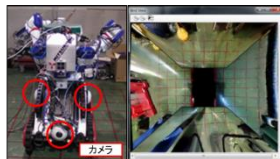
操作性向上【神戸大 横小路研究室】

- 多自由度のマニピュレータは障害物回避や狭隘空間へのアプローチが有利な反面、操作が複雑である
- 操作の複雑化を低減すべく、直感的にセルフモーション*の運動指令ができる、判り易い操作インターフェースを開発

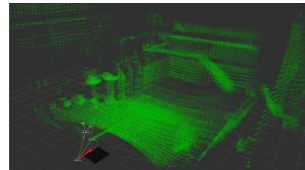
* : マニピュレータの手先とベースを固定した状態で全体の形を変化させる動作



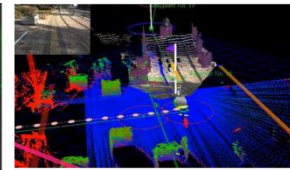
Super Giraffeの疑似俯瞰画像



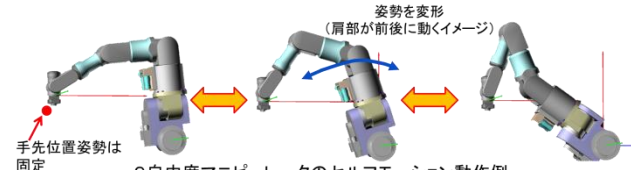
MEISTeRの疑似俯瞰画像



Super Giraffe で取得したデータの3Dマッピング画面（開発中）



3Dセンサ情報やカメラ映像を用いた周囲環境把握表示のイメージ



9自由度マニピュレータのセルフモーション動作例

5.1 大学研究室との連携(2/2) -複数台車の協調移動制御システムの研究開発-

技術的課題

- 複数の台車で構成される除染システムにおいて、遠隔操作者の省人化のための台車走行や台車間の位置を調整する協調移動制御システムを開発する。

解決の取組

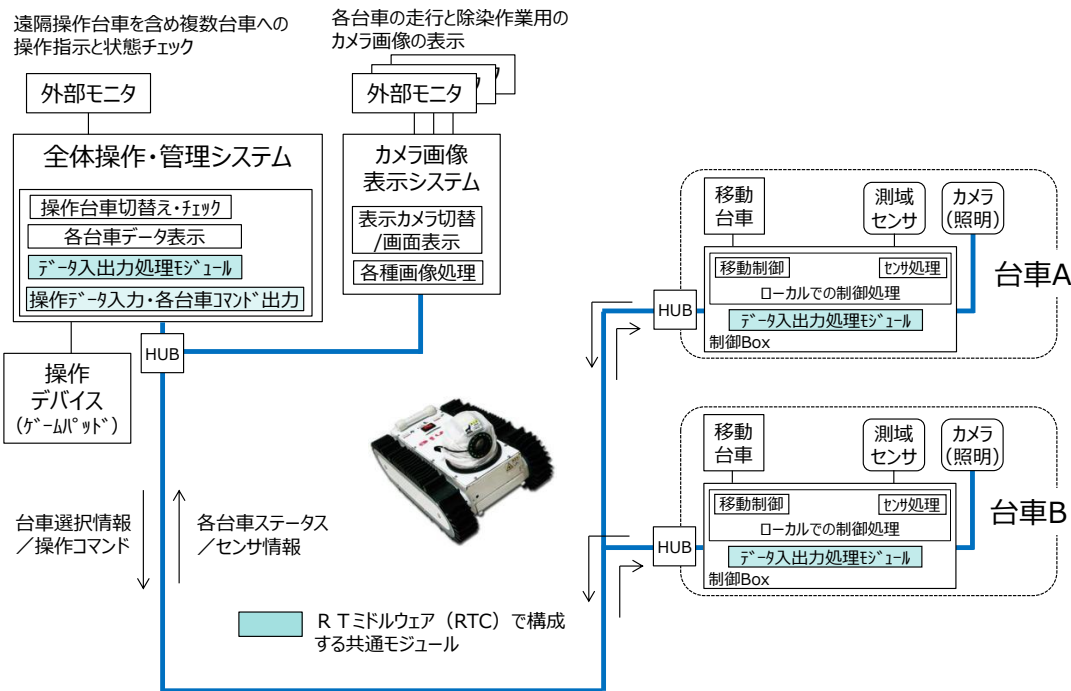
複数台ロボットの移動制御に関する研究を専門とする芝浦工業大学松日楽研究室に検討を委託した。

開発のポイント

➤ RTミドルウェアの利用

・ネットワーク上に接続された複数の制御機器で構成されるシステムで、特定の機器間でのデータ通信処理を容易に行う仕組み(ネットワークを意識せず構築)

・機器間での入出力データ(ステータス/センサ情報、コマンド/操作情報)の共通化を図り、システム操作系全体の汎用性・拡張性を高める。



複数移動台車の協調移動制御システム構成

6. 研究開発の運営など

(1) 中長期視点での人材育成

- ・若手技術者や研究者に、メーカ、外部の研究機関、大学などとの交流を積極的に実施した。
- ・IRIDにて実施する除染合同会議や事業成果報告会などでの成果発表、討議を経験させることで技術レベルの向上と技術伝達を実施した。
- ・MRI(三菱総合研究所)の報告会および事前のIRID幹部への報告を通じて、若手技術者や研究者の技術レベルの向上を図った。

(2) 国内外の叡智の結集

IRID国際連携チームと情報交換を行い国内外の叡智の結集に関連する情報提供・情報収集を行った。大学(神戸大学、筑波大学、東京大学、芝浦工業大学)と連携し研究を実施した。

(3) 情報発信の充実

- ・高所用／上部階用除染装置のモックアップ実証試験の状況を積極的にメディアに公開した。(上部階用除染装置のメディア公開では、報道機関22社36名が出席し、IRID、東京電力、三菱重工、東芝、日立GEニュークリア・エナジーが取材に応じ、テレビ、新聞、雑誌で取り上げられた。)
- ・IRIDシンポジウムでは、遠隔除染装置と大学への委託研究のパネルを作成し、シンポジウム参加者に研究成果を説明した。
- ・IRIDのホームページには、研究開発進捗状況、モックアップ実証試験映像、メディア公開資料等、積極的に研究開発に係る情報を掲載した。

(4) 外部委員会の設置・運営など

- ・IRIDにおいて設置している燃料デブリ取出しに関する機器開発・遠隔技術に関する専門部会(専門部会長:浅間一 東京大学大学院工学系研究科教授)を平成27年1月9日に開催し除染装置の開発に関する技術的な助言を受け、結果を当該研究開発の推進に役立てた。
- ・専門部会の委員、IRID幹部、東京電力、資源エネルギー庁、NDFに高所用除染装置および上部階用除染装置のモックアップ実証試験を視察いただき、コメントをいただいた。

7. 研究成果のまとめと今後の展開(1/2)

- 本研究(平成26～27年度)における成果は以下のとおりである。
 - ①高所用除染装置の開発を完了、実証試験により実機での適用性を確認した。
 - ②上部階用除染装置の開発を完了、実証試験により実機での適用性を確認した。
 - ③地下階の除染はタービン建屋については既存技術の組合せで対応可能であることを確認できた。
- 平成23年12月に開始された先の2事業と合わせ、本プロジェクト全体として低所用、高所用、上部階用の除染装置の開発が一通り完了した。開発した装置は実機環境及び工事工程などを踏まえつつ適宜投入を図っていく。

装置		開発状況	適用実績(予定)	備考
低所	吸引・ブラスト除染装置	開発完了	・1号機1階南西エリア除染(実証) ・3号機1階南西、北西エリア吸引除染	作業ロボットは以下にも転用した。 ・コアサンプリング (2号機オペフロ/1号機1階南東エリア) ・ガレキ撤去(3号機南西エリア)
	ドライアイスブラスト除染装置	開発完了	・2号機1階南西エリア除染(実証) ・3号機1階南西エリア高所除染	3号機への適用実績は除染ユニットを高所用装置と組合せ実機適用した。
	高圧水ジェット除染装置	開発完了	1号機1階南西エリア除染(実証)	
高所	吸引・ブラスト除染装置	開発完了	検討中 (時期未定)	
	ドライアイスブラスト除染装置	開発完了	3号機1階南西エリア高所除染	高所用と低所用ドライアイスブラスト除染装置を用いて、高所の線量率測定、吸引除染、ドライアイスブラスト除染を実施した。
	高圧水ジェット除染装置	開発完了	検討中 (H28年度9月以降)	
階 上部	上部階用除染装置	開発完了	検討中 (H28年度以降)	用途に応じ、除染ユニットを使い分ける。

7. 研究成果のまとめと今後の展開(2/2)

- 本プロジェクトでは、現場状況が不明な中で現場調査を実施、採取試料をJAEAへ輸送して分析、開発装置を現場に投入など、他のプロジェクトに先駆けた役割を果たしてきた。これらの成果はこれからのプロジェクトに資するものである。
- 最先端技術の導入のため大学への委託研究を実施し、その成果を開発装置に適用した。このような活動は本プロジェクト終了後も継続して実施する。
- 開発した技術は除染装置に限定されないものも多数あり、これからのプロジェクトの開発装置等にも積極的に取り入れていく。(例: マニピュレータ制御技術、自己位置認識技術、疑似俯瞰技術、複数台車の協調移動制御技術、等)
- 発生した不具合事象等は組合員全体で情報共有し、関係者全体の技術力向上を図っていく。