

令和2年度開始廃炉・汚染水対策事業費補助金 (燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模のさらなる拡大に向けた 技術の開発 (環境改善・干渉物撤去のための遠隔技術の開発))

IHI

2020年1月～2022年9月事業成果概要

2023年3月

株式会社 IHI

目次

1. 本事業の目的と実施方針

2. 情報の抽出・整理

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定

2.2 干渉物（候補）撤去範囲の設定

2.3 現場調査結果

3. 目標仕様の検討

3.1 前提条件の整理

3.2 想定撤去手順の設定

3.3 撤去作業区分と必要装置，要求機能の抽出

3.4 各要素技術の目標仕様

4. 技術調査・検討

4.1 調査方法の策定

4.2 調査結果の報告・評価

4.3 調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ

目次

5. 要素試験

5.1 適用性要素試験計画

5.2 試験結果（高所作業性の検証A）

5.3 試験結果（高所作業性の検証B）

5.4 試験結果（RHR配管の切断検証）

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

6. 撤去手順の検討

7. 仕様提案

7.1 遠隔システム構成

7.2 装置仕様

7.3 課題整理

8. 補助事業のまとめ

1. 本事業の目的と実施方針

1. 本事業の目的と実施方針

◆ 補助事業の名称

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模のさらなる拡大に向けた技術の開発
(環境改善・干渉物撤去のための遠隔技術の開発)

◆ 事業背景

- 福島第一原子力発電所における燃料デブリ取り出し作業を行うためには、原子炉建屋（以下「R/B」という。）内の搬出入動線や設置スペース、作業エリアの確保を行うための作業環境整備及び干渉物の撤去が必須である。
- R/B内は高線量環境であることから、作業員の被ばく低減、作業効率向上のために高線量下で重作業を行うパイロードが大きく、操作性・ロバスト性に優れた汎用性の高い作業支援ロボットシステムが必要となる。



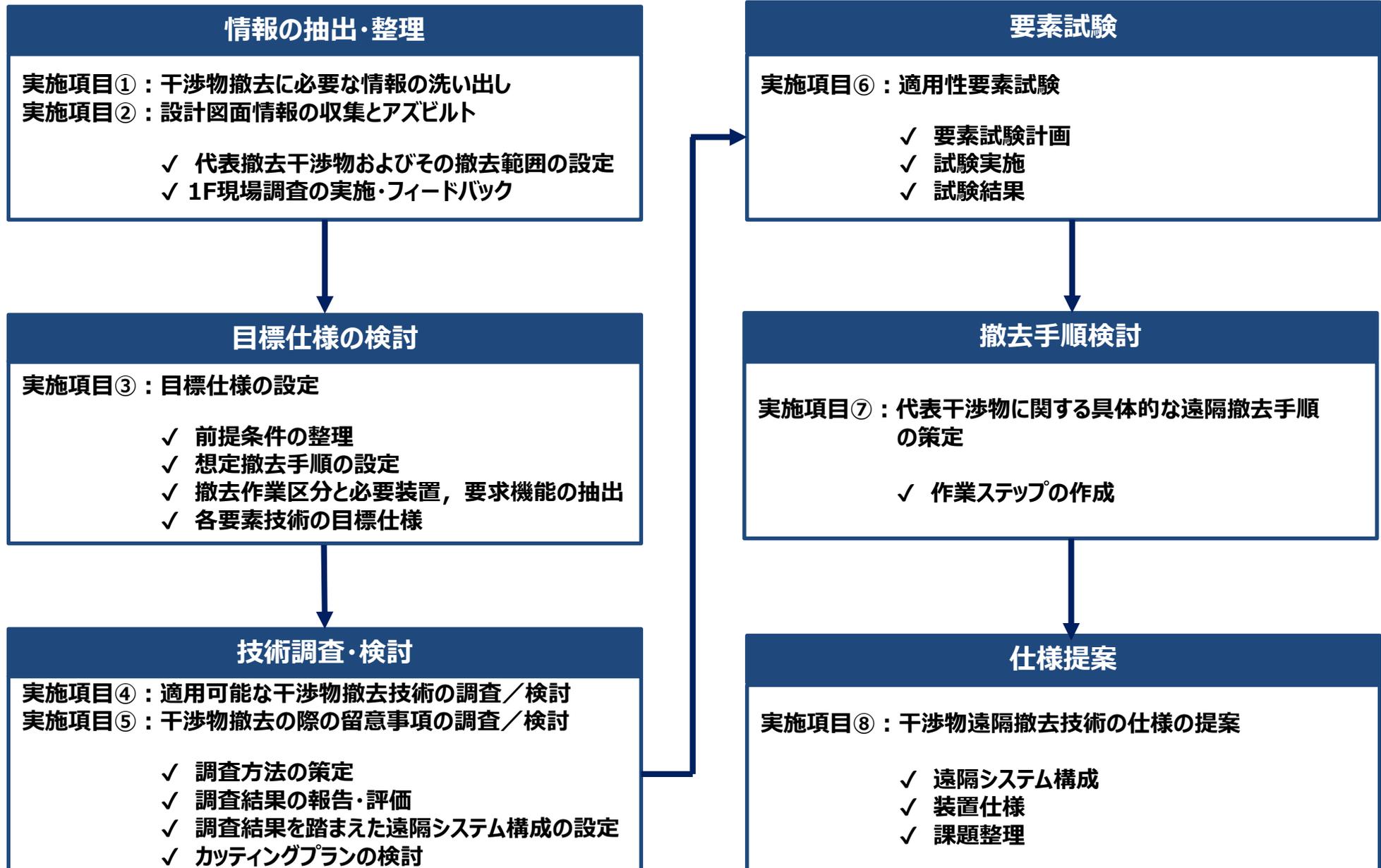
◆ 事業目的

- 実用化までの工程やコスト低減の観点から、すでに世の中にある汎用的なロボット技術を調査し、その組合せにより高線量下で重作業に適用できる拡張性を持った合理的なロボットシステムの開発を目指す。
- ユーザー（東京電力HD^(※1)）がこのロボットシステムに基づいて、具体的な撤去作業を企画できるような統合的なコンセプトの提案を本事業のゴールとする。
- ユーザー自らが遠隔技術の取得を促進できるようにするとともに、福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策を円滑に進め、我が国の科学技術水準の向上を図ることを目的として実施する。

※1：東京電力ホールディングス(株)

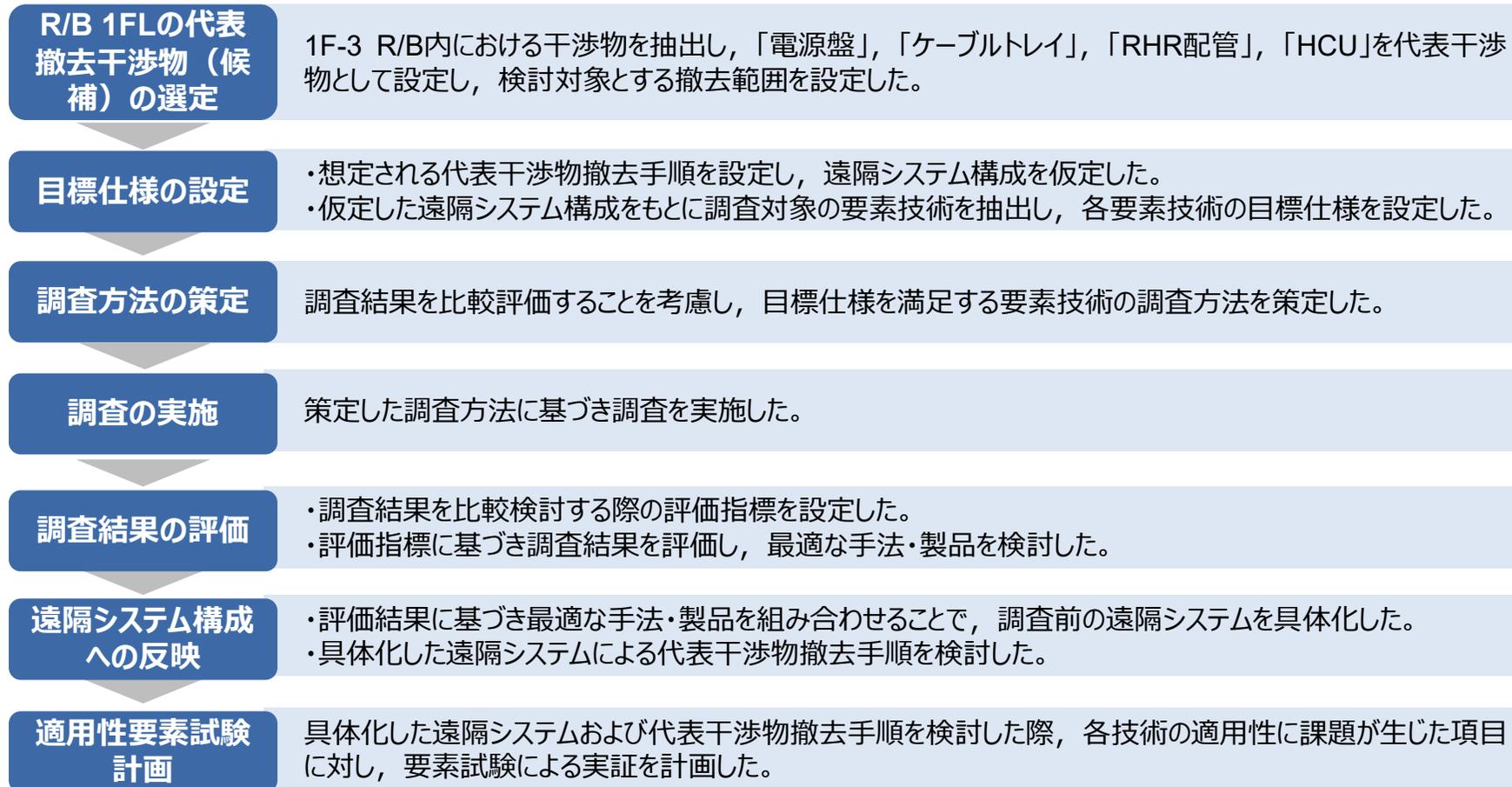
1. 本事業の目的と実施方針

◆ 実施項目および実施フロー



1. 本事業の目的と実施方針

<実施内容の概要>



▼ 次のページへ

<実施内容の概要>

適用性要素試験 の実施

要素試験計画に基づき、試験を実施した。

適用性要素試験 結果の反映

要素試験により得られた結果を遠隔システム構成へ反映する。

代表干渉物撤去 手順の策定

要素試験結果により得られた結果を基に、代表干渉物の具体的な遠隔撤去手順を策定する。

干渉物遠隔撤去 技術の仕様の 提案

要素試験結果により得られた結果を基に、遠隔システム構成や各構成機器の仕様等の1F R/B内の干渉物遠隔撤去技術の仕様を提案する。

1. 本事業の目的と実施方針

<実施体制>

補助事業者

東京電力ホールディングス株式会社

本事業では福島第一原子力発電所の現場情報および干渉物の撤去ニーズの提供、開発装置に対する現場適用性の観点での助言を実施。

株式会社IHI

原子力事業に対して60年以上の実績があり、軽水炉プラントへの豊富な建設／機器供給実績がある。福島第一原子力発電所においても豊富な工事实績があり、建屋内部の機器配置や現場状況に精通している。また、六ヶ所再処理工場の高レベル廃液ガラス固化建屋の設計・建設・試運転の経験を有し、[遠隔作業に関する総合エンジニアリング力を備えている](#)。本事業では[全体とりまとめを実施](#)。

福島地元企業（株式会社エイブル）：構造物機械式切断に関する技術開発

福島第一原子力発電所をはじめ各地の軽水炉プラントで、主に構造物切断／撤去に関する遠隔ロボット技術の実績を有する。直近では福島第一原子力発電所1,2号機排気筒の遠隔解体を実施。本事業では[遠隔による構造物の機械式切断に関する技術開発を実施](#)。

代表企業（CREATEC）：遠隔操作システムに関する技術開発

イメージング/センシング、人工知能、ロボット工学及び放射線計測の分野における能力を中核とした応用研究技術企業。本事業では干渉物撤去システムにおける[遠隔操作系（マン・マシン・インターフェイス）に関する技術開発を実施](#)。

代表企業（ONET）：系統隔離工法に関する技術開発

40年以上にわたり仏の原子力エネルギー分野の主要企業をサポートしており、原子力の保守・点検や除染・廃炉・放射性廃棄物対策等に係るエンジニアリングを有する。本事業では[配管の系統隔離工法に関する技術開発を実施](#)。

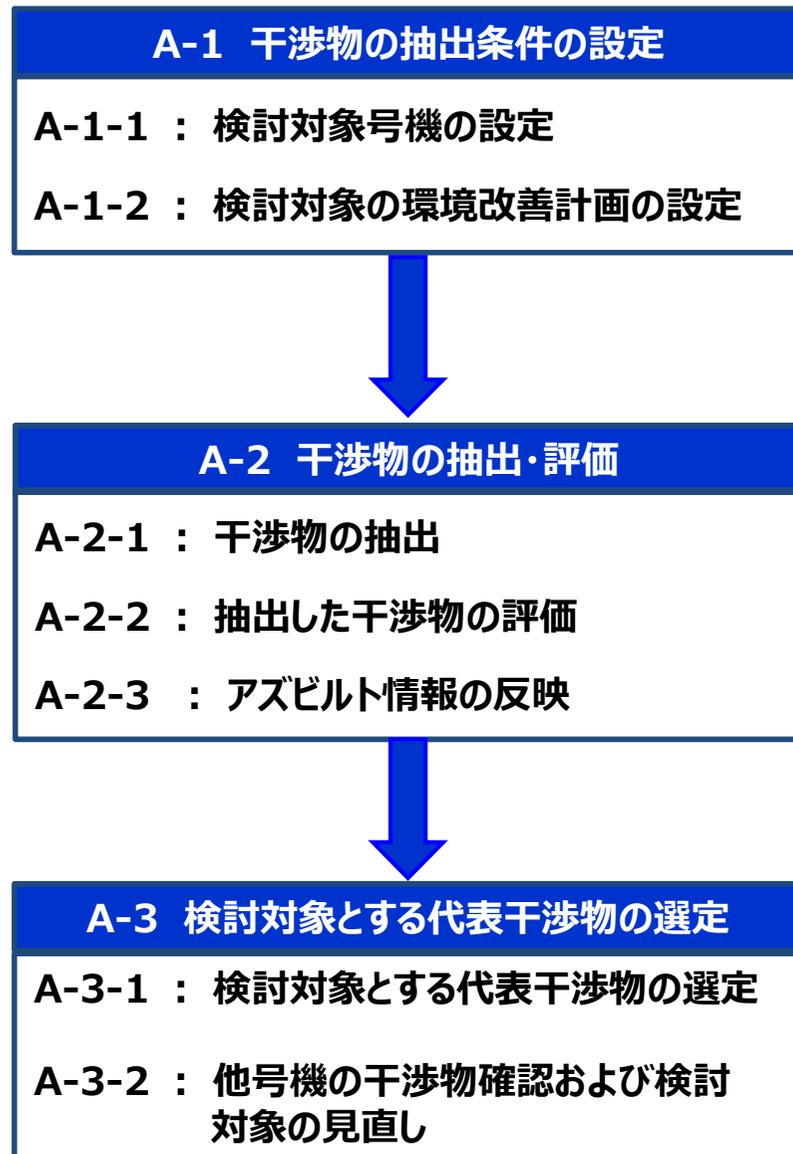
その他国内外の協力企業：技術調査/検討/要素試験

干渉物撤去システムに適用する関連技術の調査/検討および要素試験の実施

2. 情報の抽出・整理

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（代表撤去干渉物の選定に係る検討ステップ） IHI

代表撤去干渉物（候補）の選定に係る検討ステップを以下に示す。



干渉物の抽出条件の設定

【目的】

具体的な干渉物撤去の検討を進めるために、優先すべき検討号機や検討対象とする環境改善計画を明確にする。

【内容】

現行計画の「原子炉建屋内環境改善計画（東京電力HD殿）」や「廃炉のための技術戦略プラン2020（NDF殿）」により、干渉物撤去に係る検討対象号機および環境改善計画の絞り込みを行う。

干渉物の抽出・評価

【目的】

干渉物（候補）を広い範囲で抽出・評価する。

【内容】

- ・A-1項で設定した対象号機/環境改善計画を基に干渉物の抽出を行う。
- ・東電HD殿のニーズを考慮した評価指標を設定し、抽出した干渉物に対する評価を行う。また、抽出した干渉物に対して、「現場写真等によるアズビルト情報の反映」を行う。

検討対象とする代表的な干渉物の選定

【目的】

抽出した干渉物候補の中から、ロボットシステムの有効性を検討するための代表的な撤去対象を選定する。

【内容】

- ・A-2項の評価結果および東電HD殿のニーズを考慮し、検討対象とする干渉物を選定する。検討対象とする干渉物は代表性のあるものを選定し、検討対象外とした干渉物への適用性についても考慮する。
- ・他号機について、追加検討すべき特異な干渉物の有無を確認する。

A-1-1 検討対象号機の設定

(1) 現在計画されている原子炉建屋内環境改善計画の確認

⇒廃炉中長期実行プラン2020において、原子炉建屋内環境改善計画は以下のように計画されている。

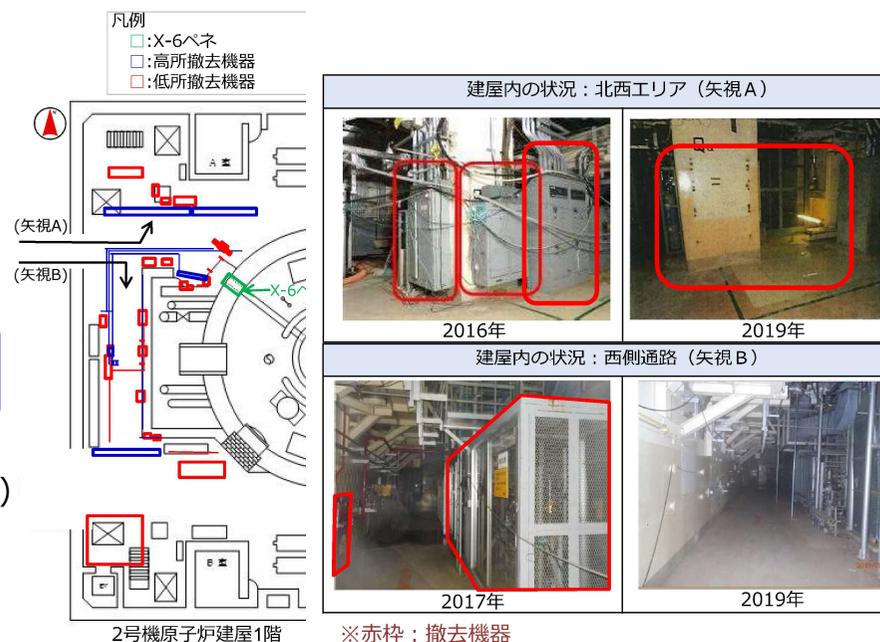
- ・2号機：1/3号機と比較して線量が低く、干渉物撤去が比較的進んでいる。さらなる線量低減が必要
- ・1/3号機：2号機と比較して線量が高く、高汚染配管などの線源の調査・撤去が計画されている。

廃炉中長期実行プラン2020における原子炉建屋内環境改善計画

燃料デブリ取り出しステージ	号機	環境改善計画
燃料デブリ取り出しの開始	2号機	作業現場である原子炉建屋1階西側エリアの放射線量（5mSv/h程度）の低減のため、放射線源の調査や撤去等を進める。
段階的な取り出し規模の拡大	2号機	原子炉建屋1階西側エリア放射線量の更なる低減を進める。
取り出し規模の更なる拡大	1/3号機	作業現場の放射線量を下げるために放射線源の調査や撤去等（特に、高汚染配管）を進めるとともに、今後の作業の障害となる設備等を撤去する。

出典：東京電力HDホームページ 2020年3月27日公表 廃炉中長期実行プラン2020より抜粋 1

図A-1-1-1 廃炉中長期プラン2020における原子炉建屋内環境改善計画（※1）



図A-1-1-2 2号機の撤去状況（※1）

⇒本事業の目的は「環境改善を目的とした干渉物撤去作業を安全かつ効率的に実施するロボットシステムを開発すること」であるため、人間系作業が困難である高線量環境をターゲットとする。

⇒対象号機の設定は空間線量の観点から2号機より1/3号機が適していると考える。

（※1）出典：廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議（第79回）公開資料 東電HD殿資料「デブリ取り出しに向けた原子炉建屋環境改善の計画」より抜粋

A-1-1 検討対象号機の設定

(2) その他情報に基づく対象号機の設定

⇒廃炉のための技術戦略プラン2020（NDF殿^(※1)）において、取り出し規模の更なる拡大の先行的検討号機として、3号機が適切であるとの評価がなされている。

Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation

東京電力ホールディングス(株) 福島第一原子力発電所の 廃炉のための技術戦略プラン2020 について

2020年10月

原子力損害賠償・廃炉等支援機構

無断複製・転載禁止 原子力損害賠償・廃炉等支援機構
©Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation

図A-1-1-3 東京電力ホールディングス（株） 福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2020について（※2）

⇒上記NDF殿の評価結果より、干渉物撤去の優先度は3号機が高いと想定する。

⇒1/2号機への展開を視野に入れつつも、3号機への適用を優先的に検討する。

(※1) NDF:原子力損害賠償・廃炉等支援機構

(※2) 出典：NDF殿資料「東京電力ホールディングス（株） 福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2020について(2020年10月)」より抜粋

3. 福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術戦略（5/12）

①燃料デブリ取り出し（5/7）

技術戦略

■ 取り出し規模の更なる拡大

✓ 3号機を先行的検討号機とすることは適切であると評価

- ・ 試験的取り出しは2号機で行っていくが、**大量の燃料デブリへのアクセスが容易**であるのは、**ペDESTAL底部に燃料デブリが多く存在している1号機と3号機**
- ・ 情報の充足状況や現場の状況を踏まえると**3号機**の方が、取り出し方法の検討等エンジニアリングを進めることになり、デブリ取り出しに早く着手し、**早く情報を取得**することが可能
- ・ ある号機を代表号機とすることで、技術的な要点や更に検討を深めていくべき項目等を**早期に得ることが可能**となり、これらの成果を**他号機に活用**することで、**1~3号機の燃料デブリ全体のリスク低減**につなげていくことが可能
- ・ 3号機で先行的な取組を進め、他号機の状況や検討結果の**再確認**を行い、その結果によっては**検討号機の見直し**を行う対応も重要
- ・ 初号機（2号機）の燃料デブリ取り出しが**途上**であっても、他号機での取り出し準備が整えば、**他号機での取り出しを開始**するなど、**全体の最適化**の観点から**柔軟に**検討すべき

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（検討対象工事の設定）

A-1-2検討対象の環境改善計画の設定

(1) 3号機で計画されている主要計画

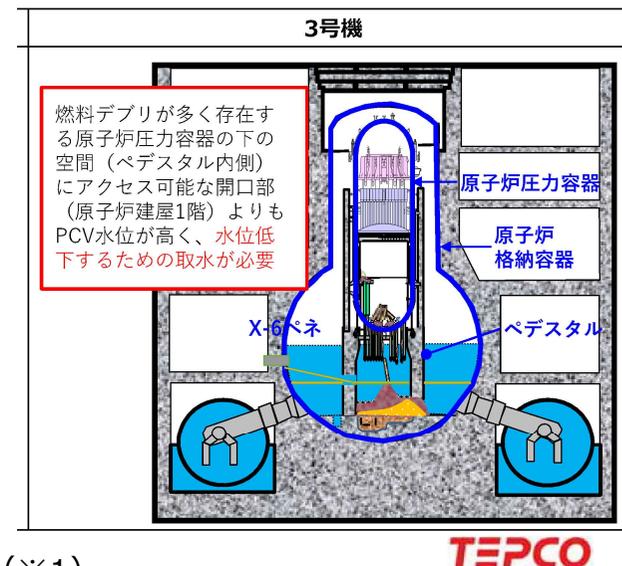
⇒廃炉中長期実行プラン2020（東電HD殿）の計画を以下に示す。

- ① 線量率低減のための放射線源の撤去（高汚染配管）
- ② 今後の作業の障害となる設備の撤去
- ③ PCV取水設備の構築による水位の低下

燃料デブリ取り出し（3/4）

12

- 建屋内環境改善として、作業現場の放射線量を下げするために放射線源の調査や撤去等（特に、高汚染配管）を進めるとともに、今後の作業の障害となる設備等を撤去する。また、3号機PCVから取水する設備を構築してPCV水位の低下を行っていく。
- 建屋外環境改善として、障害となる施設（1・2号機排気筒、3・4号機排気筒等）を撤去し、燃料デブリ取出設備等のため敷地確保を進める。
（課題）
 - 1/3号機は2号機と比較して作業現場の線量が高く、遠隔による高汚染配管の線量低減方法（撤去もしくは除染）や取出・取水等の設備の設置方法の検討



図A-1-2-1 廃炉中長期実行プラン2020（※1）

⇒上記方針に基づき、干渉物を抽出する対象計画を以下のように設定した。

- ① 線量率低減のための放射線源の撤去（高汚染配管） ⇒工事全般に必要な共通作業として、検討に加える。
- ② 今後の作業の障害となる設備の撤去 ⇒燃料デブリ取り出しに向けた設備設置計画
- ③ PCV取水設備の構築による水位の低下 ⇒PCV水位調整用取水設備設置計画

（※1）出典：東電HD殿資料「廃炉中長期実行プラン2020（2020年3月）」より抜粋

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（検討対象工事の設定）

A-1-2 検討対象の環境改善計画の設定

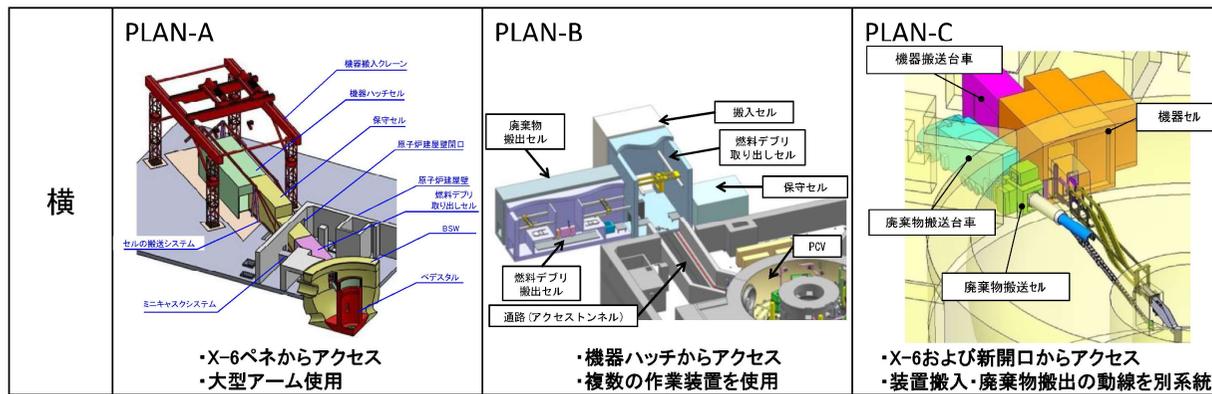
(2) 各工事における干渉物の抽出範囲（対象工事の内容）

汎用性の高いロボットシステムを開発するため、初期における干渉物の抽出は広範囲を確認すべきと考える。前項で設定した対象の環境改善計画と検討対象エリアの関係を以下に示す。

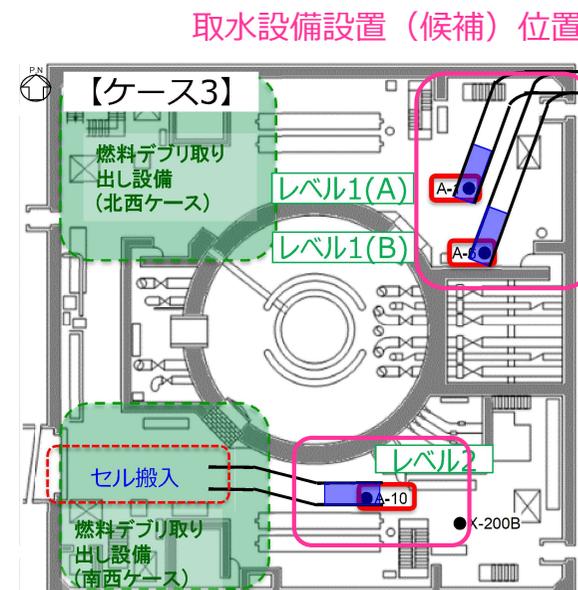
- ① 南西エリア：燃料デブリ取り出し計画（図A-1-2-2）、PCV取水設備設置計画（図A-1-2-3）
- ② 南東エリア：PCV取水設備設置計画
- ③ 北西エリア：燃料デブリ取り出し計画
- ④ 北東エリア：PCV取水設備設置計画

⇒上記に従い、全てのエリアについて干渉物の抽出を実施する。

図 検討中の工法(横アクセス:PLAN-A~C、上アクセス:ルートA、B)



図A-1-2-2 燃料デブリ取り出し工法（※1）



図A-1-2-3 PCV取水設備設置位置（※2）

(※1) 出典：IRID殿資料「平成30年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」2019年度実施分成果(2020年8月)」より抜粋

(※2) 出典：IRID殿資料「平成30年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金「原子炉格納容器内水循環システム構築技術の開発（実規模試験）」2019年度実施分最終成果(2020年8月)」より抜粋

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（環境改善計画の設定）

A-1-2検討対象の環境改善計画の設定

(3) 各計画における干渉物の抽出範囲（まとめ）

- ①南西エリア：燃料デブリ取り出し装置機器搬入ルート（Plan-A, Plan-C）
燃料デブリ取り出し装置設置エリア（Plan-B）
PCV取水設備機器搬入ルート
- ②南東エリア：PCV取水設備設置計画
- ③北西エリア：燃料デブリ取り出し装置設置エリア（Plan-A, Plan-C）
- ④北東エリア：PCV取水設備設置計画

(4) 干渉物の抽出条件

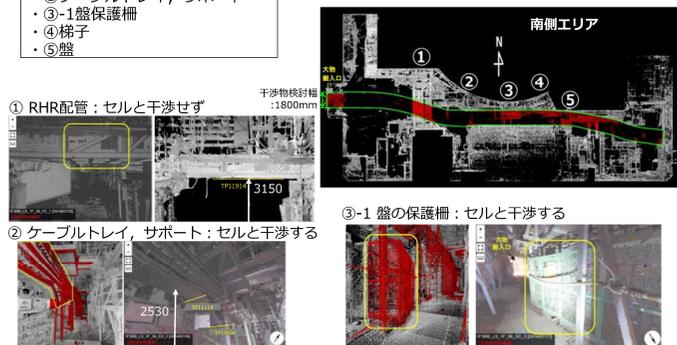
- ・コンクリート躯体の撤去は検討対象外とする。
- ・燃料デブリ取り出し装置設置エリアは、情報が不明な部分や未確定な部分も多いため、IRID(※1)殿資料の写真や平面図等を参考とし、想定により設定した。
- ・PCV取水設備設置工事はIRID殿「原子炉格納容器内水循環システム構築技術の開発（前ページ参照）」の検討条件に基づき抽出した。

(1) ① iv)-2 閉じ込めの確保の検討 No.81

■ S/C取水セルの概略配置検討結果の成立性確認のためにS/C取水セルとの干渉物検討を実施。

● 1F-3R/B南西大物搬入口から南東エリアまでのアクセスルートにおける干渉物

- ①ケーブルトレイ、サポート
- ③-1盤保護柵
- ④梯子
- ⑤盤

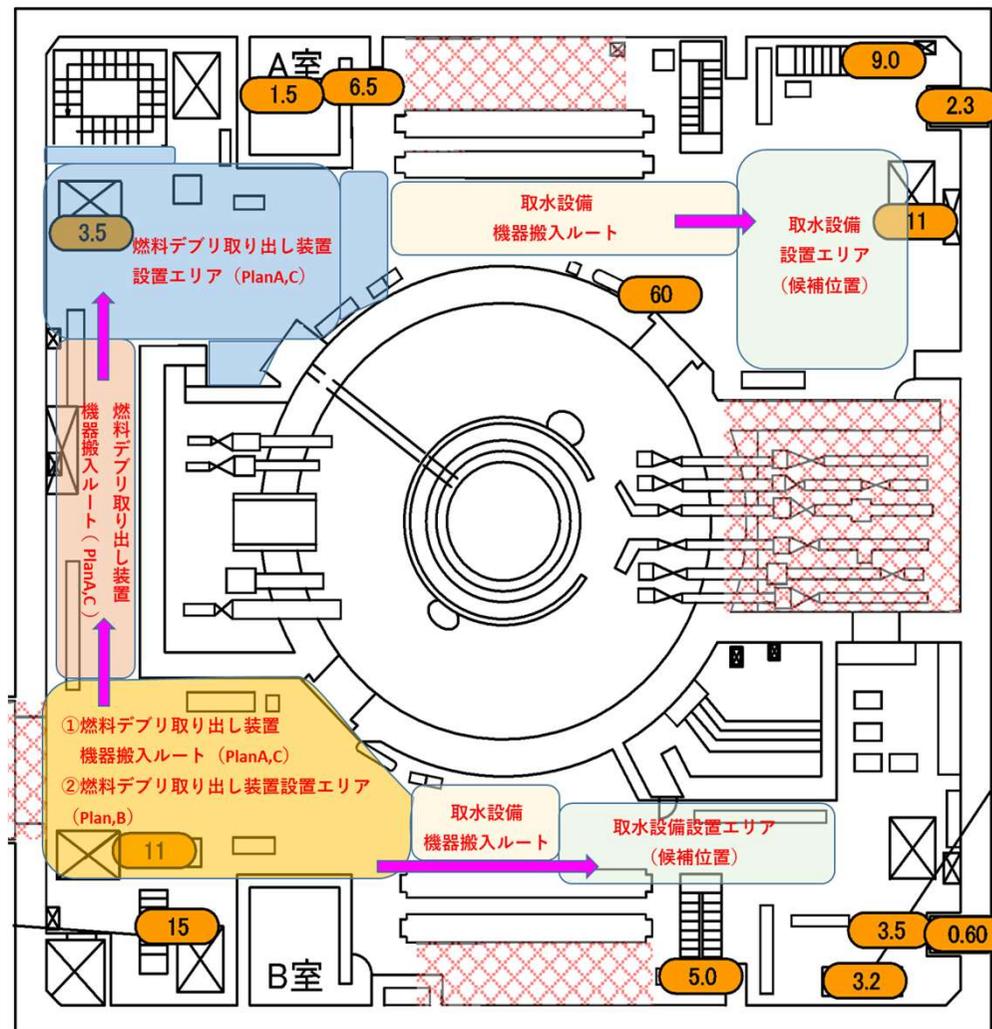


図A-1-2-4 水循環システム構築技術の開発における干渉物の抽出

(備考) 本図面は東京電力殿HPの線量率MAPを加工し、使用している。

図中のオレンジ色楕円 (15) は線量率 (mSv/h) を示す。

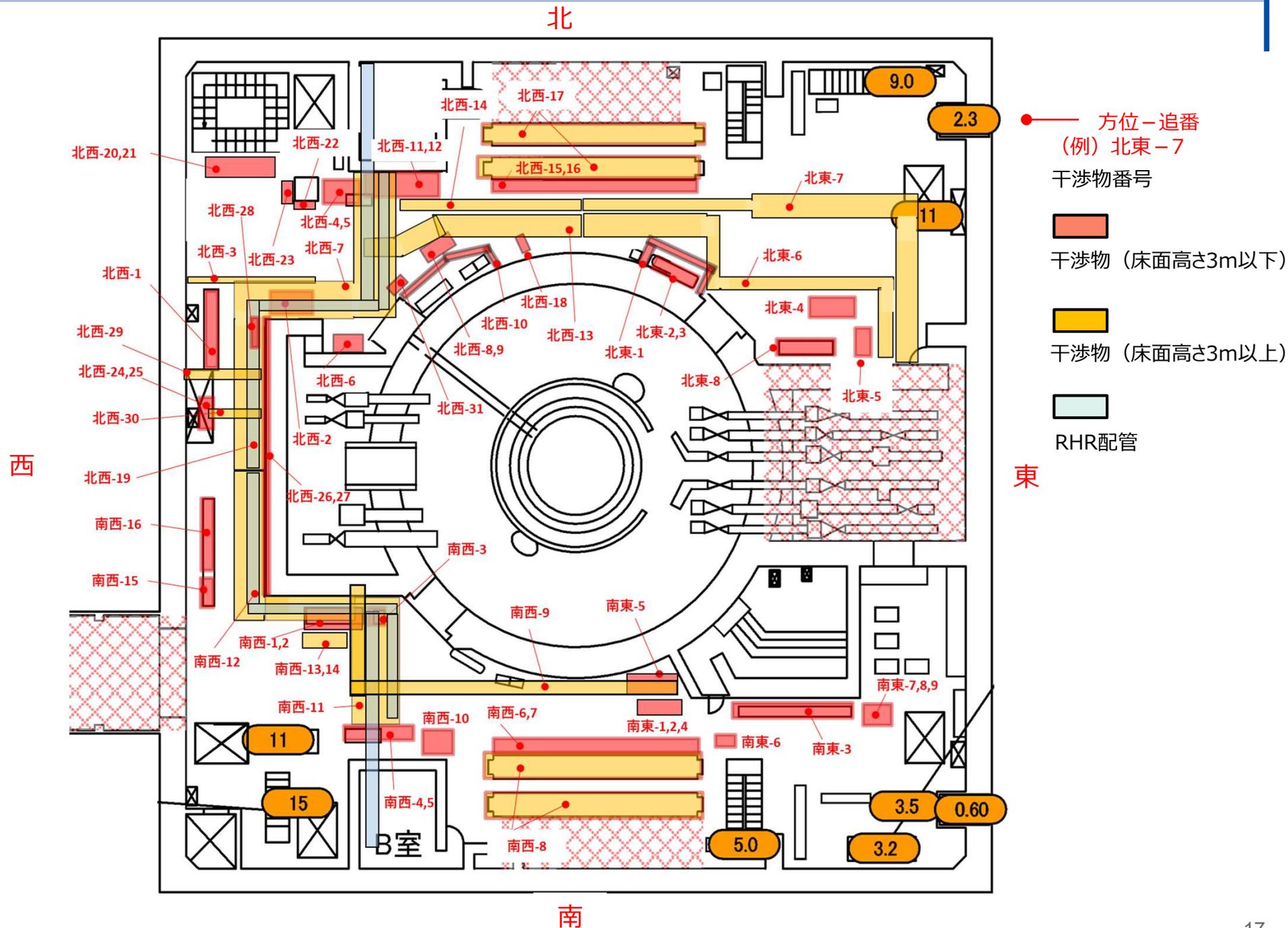
図中の赤網目模様 () は線量率の未計測部を示す。



図A-1-2-5 干渉物の抽出範囲のまとめ（3号機）

(※1) IRID:技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（干渉物の抽出結果まとめ）



2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（干渉物の評価指標の設定） IHI

A-2-2 干渉物の評価指標の設定

干渉物の撤去ニーズ（課題）を以下の通り把握した。

- ① 床面より3m以上の高い位置にある干渉物の撤去（3号機のケーブルトレイなど）
課題：具体的な撤去工法が確立できていない。
- ② PCVに接続している系統機器（配管・計装ラック）
課題：安全に撤去するための工法が確立できていない
- ③ HCU本体の撤去
課題：高い位置かつ系統隔離も必要であり、安全に撤去するための工法が確立できていない



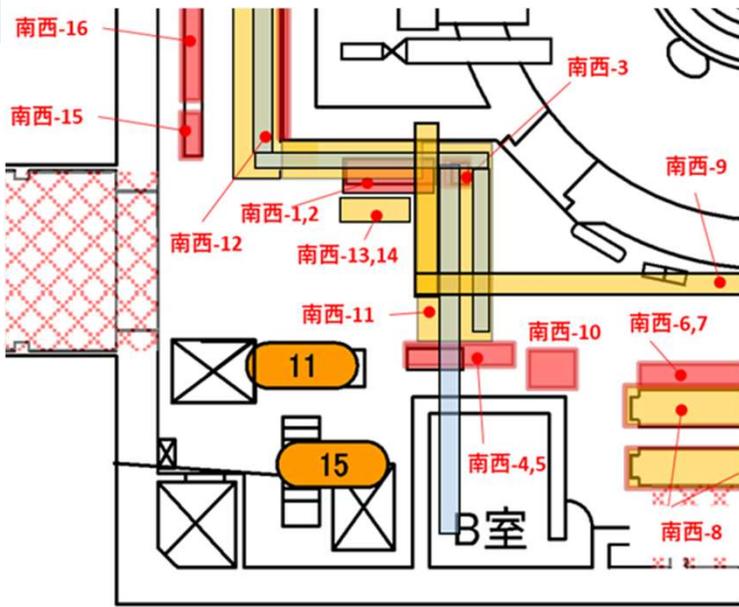
上記ニーズ（高所・PCV接続系統）を基に以下の評価指標を設定した。

①空間線量率, ②干渉物の床面高さ, ③系統隔離の必要性（※1）

⇒抽出した個別の干渉物に対し、上記指標に基づく評価を実施。

（※1）：系統内の内包水および可燃性ガスの有無は、系統隔離に含まれる評価項目と考え、撤去手順の中で具体的な検討を実施する。

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（南東エリアの干渉物抽出）

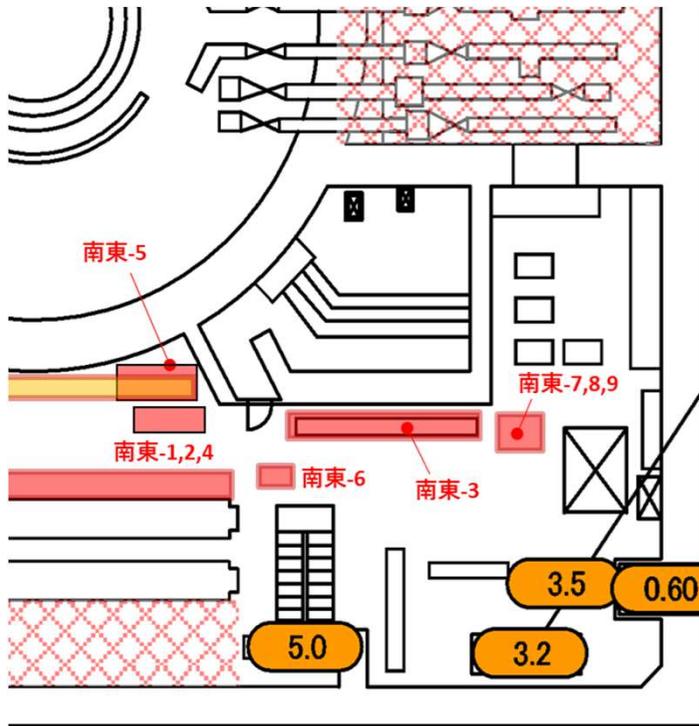


評価上難易度が高いと想定する干渉物の特徴

- ①
 - ・空間線量率および床面高さが高い（約5m）
 - ・系統隔離が必要（小口径）
 - ・撤去ニーズが高い
- ②
 - ・空間線量率および床面高さが高い（約4m～6m）
 - ・広範囲に存在（南西～南東）
 - ・既設ケーブルの撤去可否の確認が必要。
- ③
 - ・空間線量率および床面高さが高い（4.5m近傍）
 - ・広範囲に存在
 - ・系統隔離が必要（配管）
 - ・燃料デブリ取り出し装置の機器搬入ルート確保の観点で、撤去の優先度が高いと考える。

干渉物 No.	機器名称	評価指標			関連工事
		空間線量率	干渉物の床面高さ	系統隔離の有無	
		◎ : 5mSv/h以下 ○ : 5~10mSv/h △ : 10~20mSv/h × : 20mSv/h以上	○ : 1.5m以下 △ : 1.5m~3m × : 3m以上	○ : 不要 △ : 要確認 × : 必要	①共通 ②燃料デブリ取り出し ③取水設備
南西-1	盤の保護柵 (480V MCC 3A-1盤)	○	△	○	②
南西-2	480V MCC 3A-1盤	○	△	○	① ②
南西-3	原子炉格納容器漏えい率試験用計測盤	○	△	△	②
南西-4	盤の保護柵 (DC125V MCC 3B盤)	○	△	○	②
南西-5	DC125V MCC 3B盤	○	△	○	① ②
南西-6	HCU点検作業用架台	×	今後撤去予定		-
南西-7	配管 (HCU近傍)	×	○	○	③
① 南西-8	HCU本体	×	×	×	① ③
② 南西-9	ケーブルトレイ	×	×	○	① ② ③
南西-10	遮蔽体	× (想定)	×	○	③
③ 南西-11	RHR配管遮蔽体	× (想定)	×	○	②
南西-12	RHR配管	× (想定)	×	×	②
南西-13	ダクト (破損)	○	×	○	① ②
南西-14	ダクト (破損)	○	×	○	① ②
南西-15	不活性ガス系 計装ラック	△	△	×	②
南西-16	高圧注水系 (HPCI) 計装ラック	△	△	×	②

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（南東エリアの干渉物抽出）



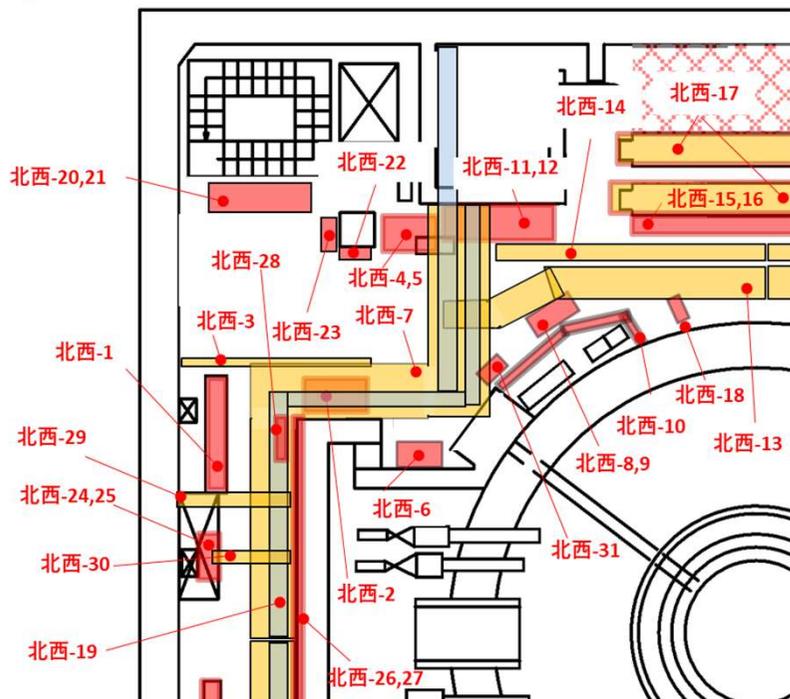
評価上難易度が高いと想定する干渉物の特徴

①

- 空間線量率および床面高さが高い
- 干渉物の大きさは比較的小さい

干渉物 No.	機器名称	評価指標			関連工事
		空間線量率	干渉物の床面高さ	系統隔離の有無	
南東-1	梯子	×	×	○	③
南東-2	アクセス架台 (サポート含む)	×	×	○	③
南東-3	480V MCC 3D盤	○	△	×	③
南東-4	ケーブルトレイ サポート鋼材	×	×	○	③
南東-5	保護柵	×	△	○	③
南東-6	スロープ	△	○	○	③
南東-7	R/Bダストモニタ 制御盤	○	△	○	③
南東-8	CRD駆動水 加熱器 制御盤	○	△	○	③
南東-9	ITV中継架台	○	△	○	③

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（北西エリアの干渉物抽出）



評価上難易度が高いと想定する干渉物の特徴

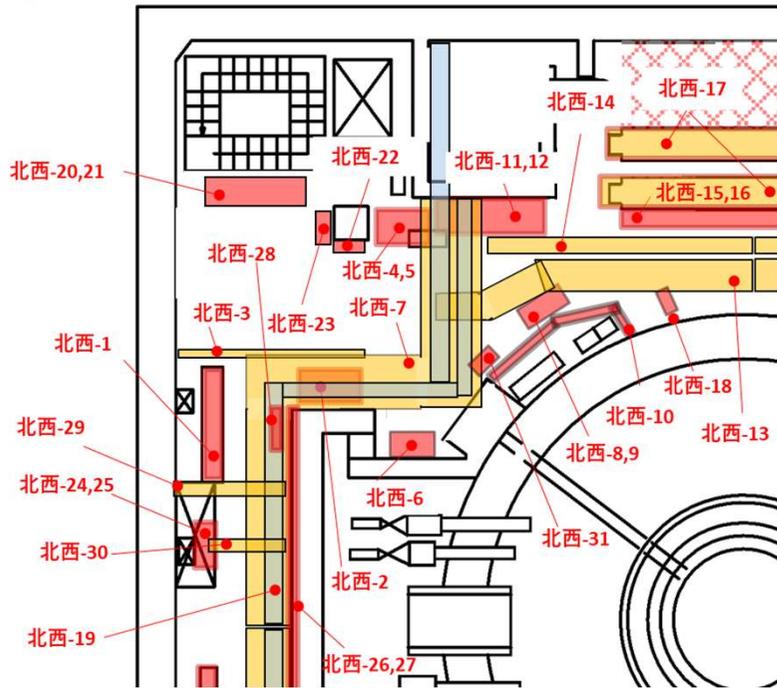
- ・空間線量率および床面高さが高い（4.5m近傍）
- ・広範囲に存在
- ・燃料デブリ取り出し装置の機器搬入ルート確保の観点で、撤去の優先度が高いと考える。

干渉物 No.	機器名称	評価指標			関連工事
		空間線量率	干渉物の床面高さ	系統隔離の有無	
		◎ : 5mSv/h以下 ○ : 5~10mSv/h △ : 10~20mSv/h × : 20mSv/h以上	○ : 1.5m以下 △ : 1.5m~3m × : 3m以上	○ : 不要 △ : 要確認 × : 必要	①共通 ②燃料デブリ取り出し ③取水設備
北西-1	RHR MCC 3A盤	◎	△	○	②
北西-2	格納容器酸素分析計ラック	◎	△	×	②
北西-3	配管	○	×	△	②
北西-4	リモコンレギュレータユニット	○	○	△	-
北西-5	DC125V MCC3A	○	△	△	-
北西-6	鋼材	○	△	○	②
北西-7	RHR配管 遮蔽体	×	×	○	②
北西-8	梯子	○	×	○	②
北西-9	アクセス架台用サポート鋼材	○	×	○	②
北西-10	保護柵	△	△	○	②
北西-11	制御盤 (CRD交換機 制御盤)	○	△	△	-
北西-12	制御盤 (CRDボルト着脱機 制御盤)	○	△	△	-

撤去済み

撤去済み

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（北西エリアの干渉物抽出）



評価上難易度が高いと想定する干渉物の特徴

- ①
- ・空間線量率および床面高さが高い（4m近傍）
 - ・北東エリアから連続的に続いており、撤去範囲が広い

- ②
- ・空間線量率および床面高さが高い（約5m）
 - ・系統隔離が必要（小口径）
 - ・撤去ニーズが高い

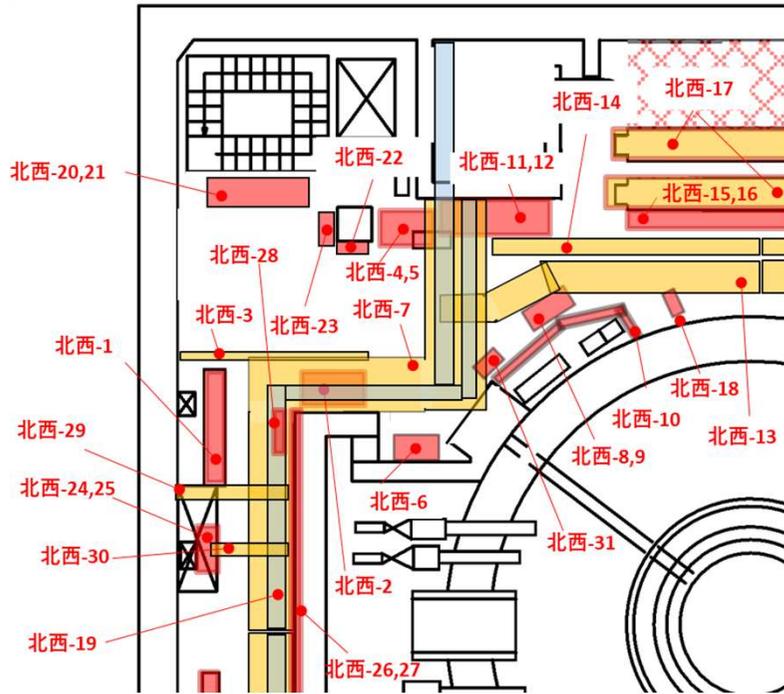
- ③
- ・空間線量率および床面高さが高い
 - ・干渉物の大きさは比較的小さい

- ④
- ・空間線量率および床面高さが高い（4.5m近傍）
 - ・広範囲に存在（北東～南東）
 - ・系統隔離が必要

- ⑤
- ・床面高さが高い
 - ・系統隔離が必要
 - ・作業スペースは広い

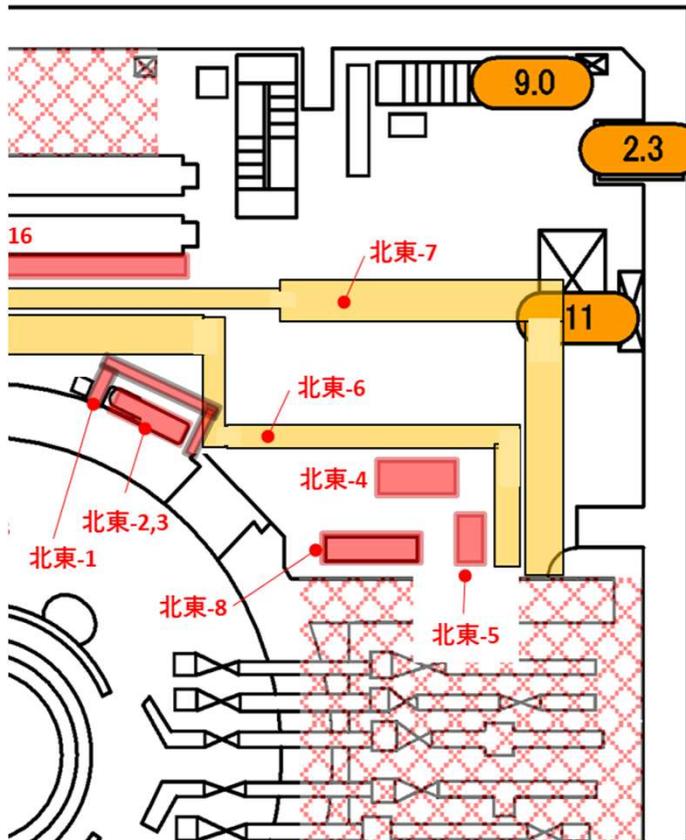
干渉物 No.	機器名称	評価指標			関連工事
		空間線量率	干渉物の床面高さ	系統隔離の有無	
		◎：5mSv/h以下 ○：5~10mSv/h △：10~20mSv/h ×：20mSv/h以上	○：1.5m以下 △：1.5m~3m ×：3m以上	○：不要 △：要確認 ×：必要	①共通 ②燃料デブリ取り出し ③取水設備
北西-13	ダクト	×	×	○	① ②
北西-14	ダクト	×	×	○	① ②
北西-15	HCU点検作業用 架台	×	撤去済み		-
北西-16	配管（HCU点検作業用架台近傍）	×	○	△	②
北西-17	HCU本体	×	×	×	① ②
北西-18	梯子	×	×	○	②
北西-19	RHR配管	× (想定)	×	×	②
北西-20	原子炉隔離時冷却系（RCIC）計装ラック	○	×	×	②
北西-21	原子炉隔離時冷却系（RCIC）計装ラック用架台	○	×	○	②
北西-22	盤	○	△	○	②
北西-23	盤	○	△	○	②

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（北西エリアの干渉物抽出）



干渉物 No.	機器名称	評価指標			関連工事
		空間線量率	干渉物の床面高さ	系統隔離の有無	
		◎ : 5mSv/h以下 ○ : 5~10mSv/h △ : 10~20mSv/h × : 20mSv/h以上	○ : 1.5m以下 △ : 1.5m~3m × : 3m以上	○ : 不要 △ : 要確認 × : 必要	①共通 ②燃料デブリ取り出し ③取水設備
北西-24	架台	○	△	△	②
北西-25	架台	○	△	○	②
北西-26	配管	○	△	△	②
北西-27	配管	○	△	△	②
北西-28	配管	○	×	△	②
北西-29	配管	○	×	△	②
北西-30	配管	○	×	△	②
北西-31	盤	△	撤去済み	撤去済	-

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（北東エリアの干渉物抽出）



干渉物 No.	機器名称	評価指標			関連工事
		空間線量率	干渉物の床面高さ	系統隔離の有無	
		◎ : 5mSv/h以下 ○ : 5~10mSv/h △ : 10~20mSv/h × : 20mSv/h以上	○ : 1.5m以下 △ : 1.5m~3m × : 3m以上	○ : 不要 △ : 要確認 × : 必要	①共通 ②燃料デブリ取り出し ③取水設備
北東-1	保護柵	×	△	○	③
北東-2	原子炉 再循環B系計測ラック	×	△	×	③
北東-3	原子炉 再循環A系計測ラック	×	△	×	③
北東-4	仮設ラック	△	撤去済み		-
北東-5	現場盤	○	×	○	③
北東-6	ダクト	×	×	○	① ③
北東-7	ダクト	×	×	○	① ③
北東-8	480V MCC3B盤	×	△	○	③

評価上難易度が高いと想定する干渉物の特徴

①

- ・空間線量率が高い
- ・系統隔離が必要

②

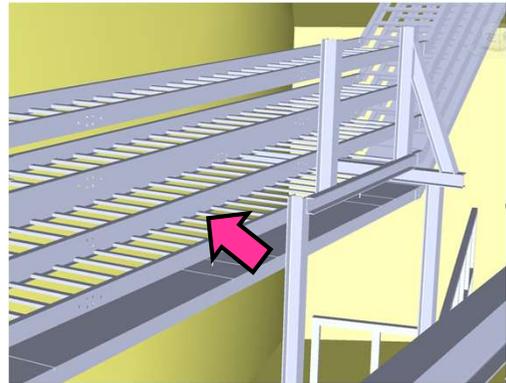
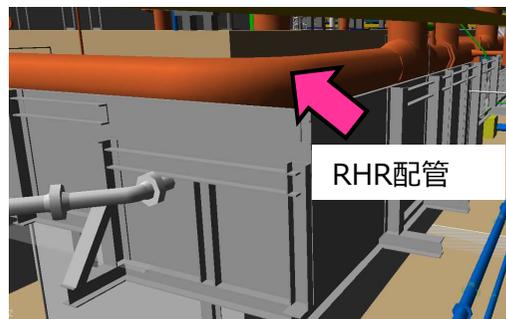
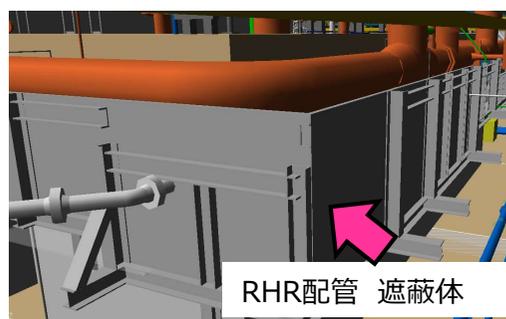
- ・空間線量率および床面高さが高い（4m近傍）
- ・北西エリアへと連続的に続いており、撤去範囲が広い

【代表干渉物の選定プロセス】

- (1) 代表干渉物の選定は、将来的に幅広い干渉物を網羅的に撤去できるような視点で選定する。
- (2) 評価指標において、Xの項目が多いものは、難易度が高い（高線量、高所、系統隔離が必要）干渉物であるため、選定の優先度が高いものであると考える。
- (3) 網羅性という観点において、①空間線量率、②干渉物の床面高さ、③系統隔離という各項目に対して最も条件が厳しい干渉物を選定する。（例：高さという観点で最も高い干渉物を選定する。）
- (4) 各項目に対する条件の厳しい干渉物を以下に示す。
 - ①：空間線量率：HCU
 - ②：干渉物の床面高さ：ケーブルトレイ
 - ③：系統隔離（※1）：RHR配管（大口径）、HCU（小口径）
（※1）系統隔離の困難さは大口径になるほど閉止が困難と想定する。一方で大口径と小口径で閉止方法が異なると想定するため大口径と小口径のいずれにおいても検討することが保守的と考える。
 - ④：その他考慮すべき指標
 - ・重量物：RHR配管、RHR配管遮蔽体
 - ・アクセスの困難さ（狭隘さ）：HCU
 - ・汎用性：電源盤など
- (5) 上記（4）の結果を基に、東電HD殿と協議し（※2）、撤去対象とする代表的な干渉物候補を表A-3-1の通り選定した。
（※2）協議事例：①ケーブルトレイとダクトの検討優先度、②HCU本体の撤去優先度、③電源盤などの撤去優先度

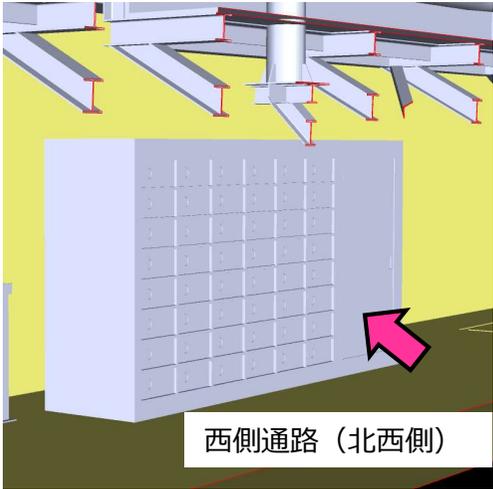
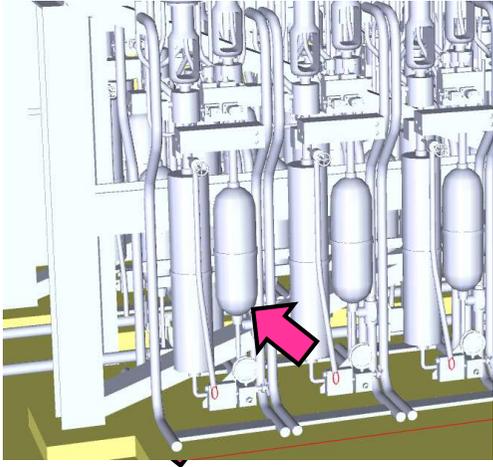
2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（代表干渉物の選定）

表A-3-1 撤去対象とする代表的な干渉物候補一覧

干渉物 No.	撤去対象とする代表干渉物候補	選定理由		形状
		空間線量率		
南西-9	ケーブルトレイ	空間線量率	・特に高線量率（HCU近傍で約 20 mSv/h以上）	
		干渉物の床面高さ	・高所の干渉物（約4m～6m）	
		系統隔離	・不要	
		特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・干渉物自体が線量を持っているため、将来的に撤去することが好ましい。（東電HD殿ガンカメラ計測結果） ・広範囲に存在（南西～南東） ・ケーブルが敷設されているため、ケーブルに対する処置も必要 ・過去に撤去実績はない。 ・類似干渉物としてダクトがあるが、ケーブルトレイの方が難易度が高いと想定するため、ダクトの検討はケーブルトレイで補完することとする。 	
南西-12 北西-19	RHR配管	空間線量率	・高線量率と想定	
		干渉物の床面高さ	・高所の干渉物（約4.5m）	
		系統隔離	・必要	
		特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・広範囲に存在（南西～北西） ・大口径，高重量（500A×S80（約300kg/m）），（600A×S100（約600kg/m）） ・配管周りに保温材が施工されていると想定 	
南西-11 北西-7	RHR配管 遮蔽体	空間線量率	・高線量率と想定	
		干渉物の床面高さ	・高所の干渉物（約4.5m）	
		系統隔離	・不要	
		特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・RHR配管の撤去に必要な ・広範囲に存在（南西～北西） ・厚板，高重量（板厚40mm） ・燃料デブリ取り出し装置の機器搬入ルート確保の観点で，撤去の優先度が高いと考える。 	

2.1 R/B 1FLの代表干渉物（候補）の選定（代表干渉物の選定）

表A-3-1 撤去対象とする代表的な干渉物候補一覧（続き）

干渉物 No.	撤去対象とする代表干渉物候補	選定理由		形状
全方位	電源盤	空間線量率	・設置場所による	 <p>西側通路（北西側）</p>
		干渉物の床面高さ	・中低所（床面高さ約3m以下）	
		系統隔離	・不要	
		特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・電源盤や計装ラックが線源の一部となっているため、撤去が必要。また、全体的に干渉物の数が多く、汎用装置の開発を行う観点からも撤去対象とする。 ・電源盤と類似する撤去物として計装ラックがあるが、計装ラック（小口径配管）の撤去検討はHCUの検討で補完することとし、本工事の検討対象は電源盤とする。 ⇒HCUは撤去難易度が高いため、HCUの撤去技術が確立されれば、計装ラックの撤去も可能であると想定する。 ・北西のHCU近傍の電源盤については、撤去作業が進められている。 	
南西-8 北西-17	HCU本体	空間線量率	・特に高線量率（約20 mSv/h 以上）	
		干渉物の床面高さ	<ul style="list-style-type: none"> ・高所の干渉物 ⇒HCUユニット：約2.6m ⇒CRD引抜挿入配管：約5m 	
		系統隔離	・必要	
		特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・小口径配管が密集して存在しており、撤去難易度が高い ・PCV内と繋がっており、PCV内の水位に注意する必要がある。 ・撤去ニーズが高い。撤去に向けた調査が計画されている。 ・北西のHCUの点検架台については、撤去作業が進められている。 	

A-3-2 他号機の干渉物確認および検討対象の見直し

【目的】

前項の検討において、撤去の優先度が高いと考えられる3号機に対して干渉物の抽出を行い、検討対象とする代表的な干渉物を選定した。検討対象とする干渉物を決定するにあたり、汎用性のある装置開発を目的に、3号機以外で追加検討すべき特異な干渉物の有無を確認し、検討対象とする干渉物の見直しを行う。

⇒2号機については、以下の理由より3号機の検討で包絡されると考えられる。

- ① 3号機とR/B内の構造が類似していることにより、干渉物の種類が類似している。
- ② 北西エリアや西側通路など3号機より干渉物撤去が進捗している。
- ③ 空間線量率が比較的低いため、人間系作業もある程度可能である。

⇒1号機については、R/B内の構造が2/3号と大きく異なるため、詳細な確認が必要と考える。

【1号機の干渉物確認】

(1) 検討対象計画の設定

⇒干渉物の抽出にあたり、具体的な計画を「PCV内部調査計画」と設定した。

(2) 干渉物の抽出結果

⇒PCV内部調査計画（他プロジェクト）において、抽出した干渉物を対象とする。

(3) 1号機特有の干渉物

⇒対象工事において、設置機器の干渉となり、かつ放射線量の高い干渉物として、① **DHC 設備**、② **AC配管** が考えられる。これらの設備に対する考え方を以下に示す。

・干渉物の高さ：DHC設備（1FL床面上に位置）、AC配管（床上高さ約2m）は3号機で検討する干渉物より低いいため、3号機の検討で包絡されると考える。

・系統隔離：3号機の検討において、小口径の系統隔離工法はHCUで、大口径の系統隔離工法はRHR配管で検討するため、3号機の検討で包絡されると考える。（他PJで系統除染が計画されており、線量が下がる予定）

⇒上記の通り主要な評価指標については、3号機で選定した代表干渉物で満足すると考える。

2.2 干渉物撤去範囲の設定 (ケーブルトレイ)

干渉物	代表撤去範囲	選定理由
南西-9 ケーブルトレイ	南東～南西エリアの直線部およびRHR配管サポート上部	撤去の優先度が高い以下の範囲とした。 ・取水部設備設置の障害となる南東エリアの平行部 ・ガンマカメラ計測結果より空間線量率に寄与する可能性が高い。

ケーブルトレイは西側通路まで続いているが、西側通路と今回の選定範囲の高さは同様であるため、本範囲で撤去可能なシステムを開発すれば、選定範囲外にも適用できる見通しである。

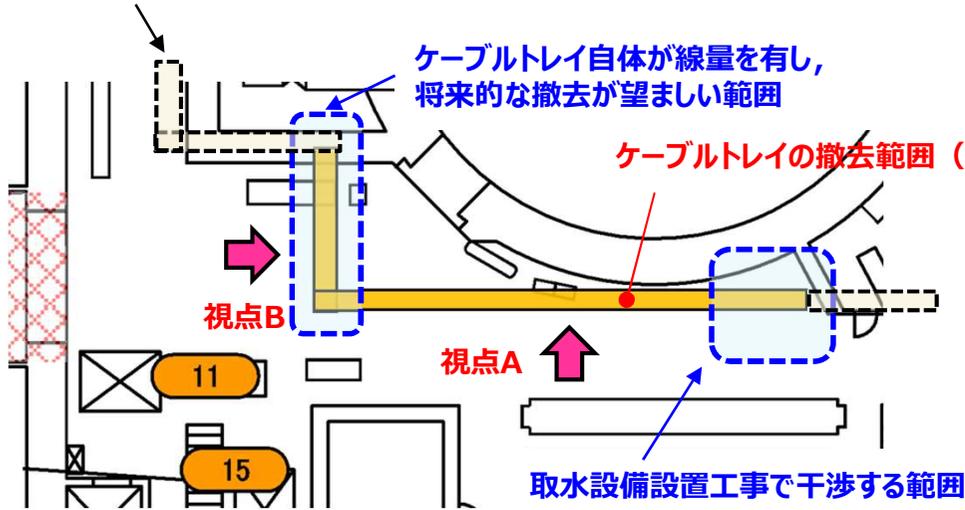


図2.2-1-1 ケーブルトレイ検討撤去範囲 (平面図)

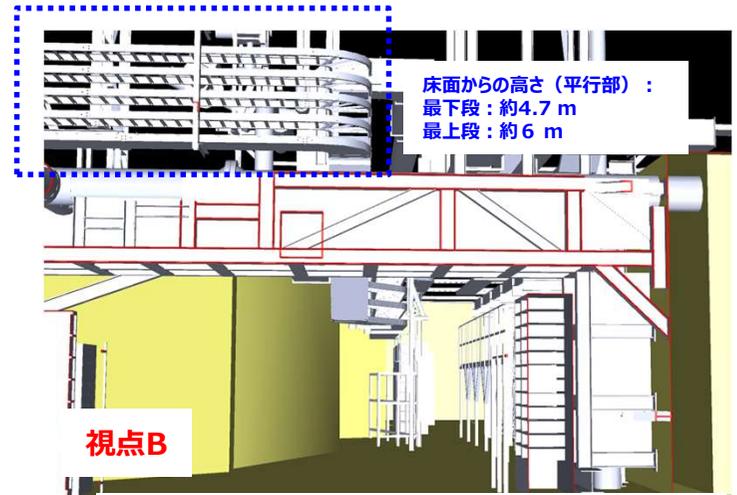


図2.2-1-3 ケーブルトレイ検討撤去範囲 (視点B)

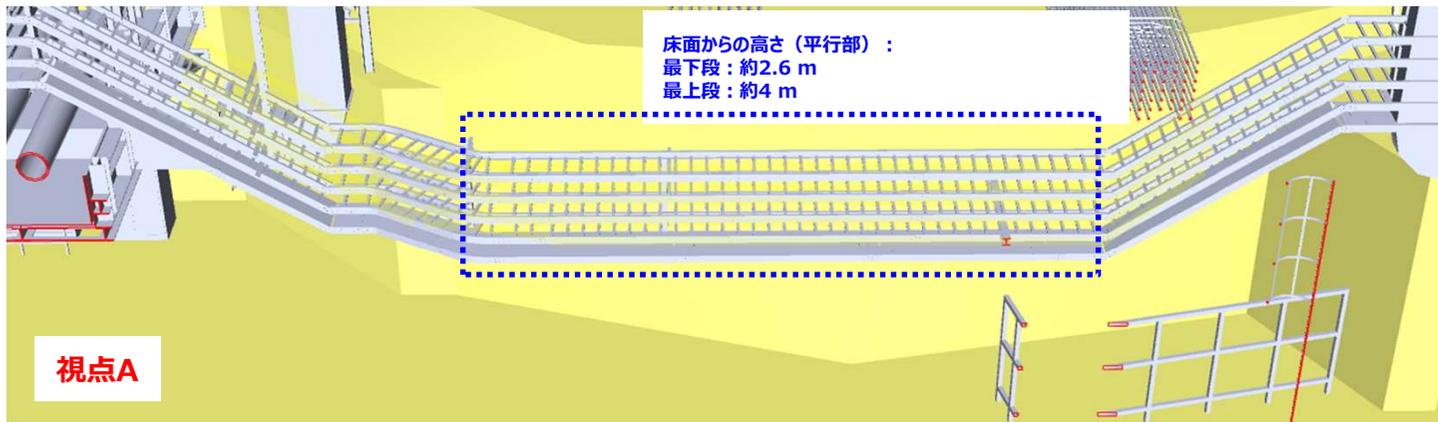


図2.2-1-2 ケーブルトレイ検討撤去範囲 (視点A)

2.2 干渉物撤去範囲の設定 (RHR配管)

干渉物	代表撤去範囲	選定理由
南西-12 北西-19 RHR配管	西側通路上の範囲 図2.2-2-1参照	<ul style="list-style-type: none"> ・西側通路は狭いため、最も干渉物撤去が困難と想定する。 ・西側通路にはパーソナルエアロック室と通じPCVと接続しているラインが2系統あるため、当該箇所の系統隔離が必要と考える。 ・系統隔離の方法は上記西側通路で検討した方法が他の箇所でも適用できると想定する。 ・各種バルブによる系統隔離手法もあるが、震災による駆動源の損傷等による起動の不確実性があるため、バルブによる閉止方法はバックアップの位置付けとし、配管単体で閉止する方法を優先し検討する。

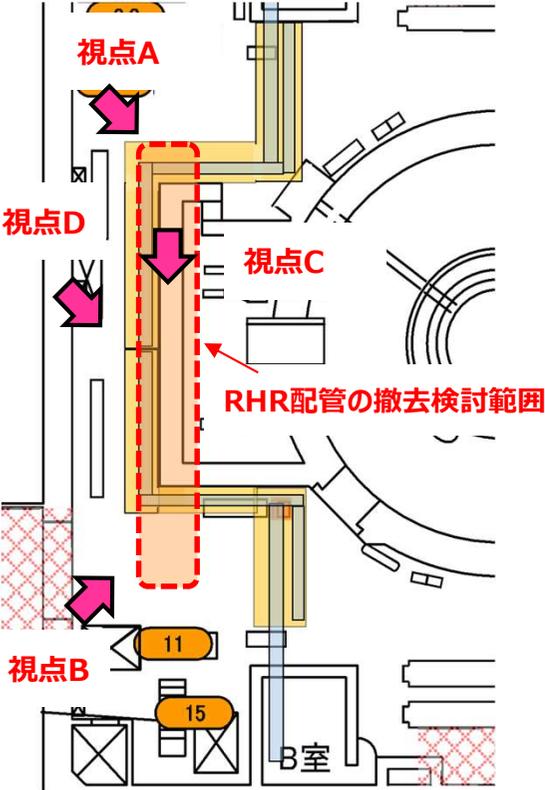


図2.2-2-1 RHR配管撤去範囲 (平面図)

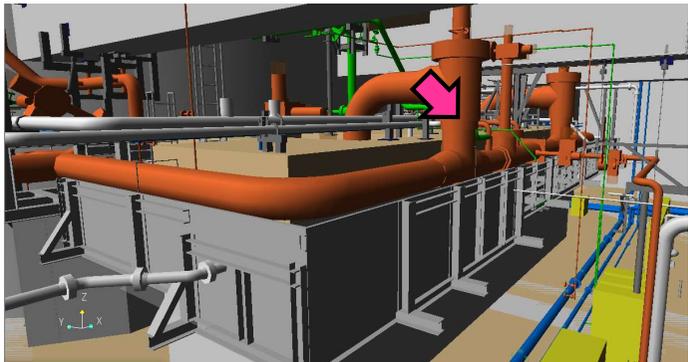


図2.2-2-2 RHR配管の写真 (視点A)

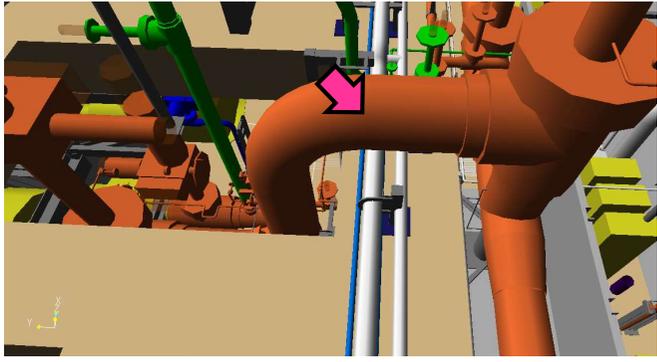


図2.2-2-4 RHR配管の写真 (視点C)

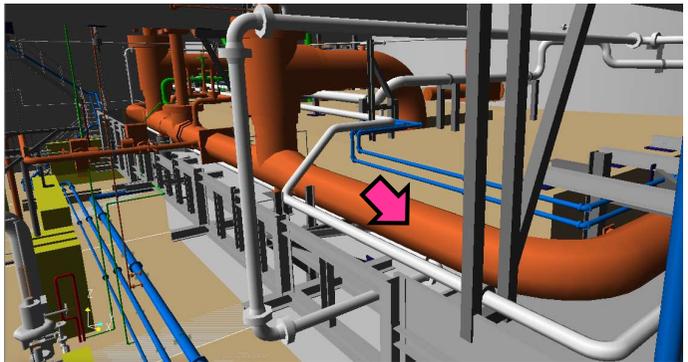


図2.2-2-3 RHR配管の写真 (視点B)

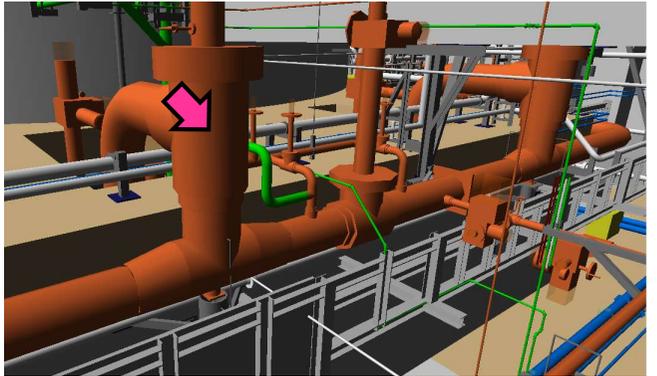


図2.2-2-5 RHR配管の写真 (視点D)

2.2 干渉物撤去範囲の設定 (RHR配管遮蔽体)

干渉物	代表撤去範囲	選定理由
南西-11 北西-7 RHR配管 遮蔽体	西側通路上の範囲 図2.2-3-1参照	・RHR配管の撤去範囲と同様とした。

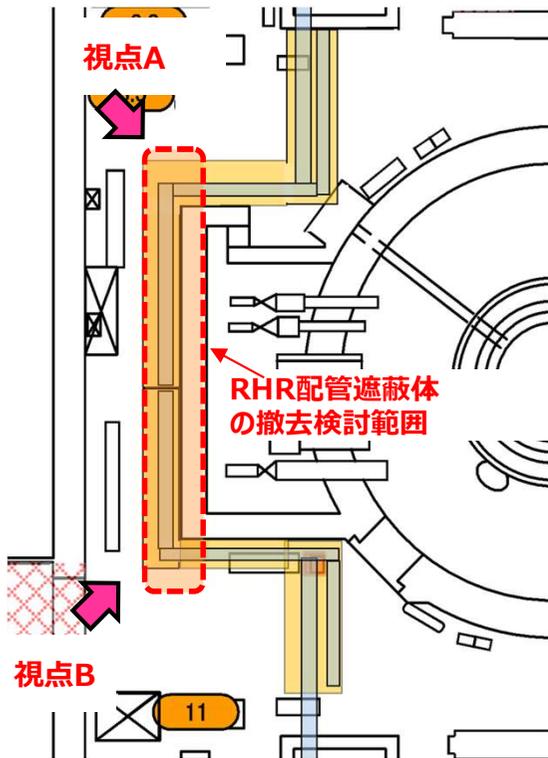


図2.2-3-1 RHR配管撤去範囲 (平面図)

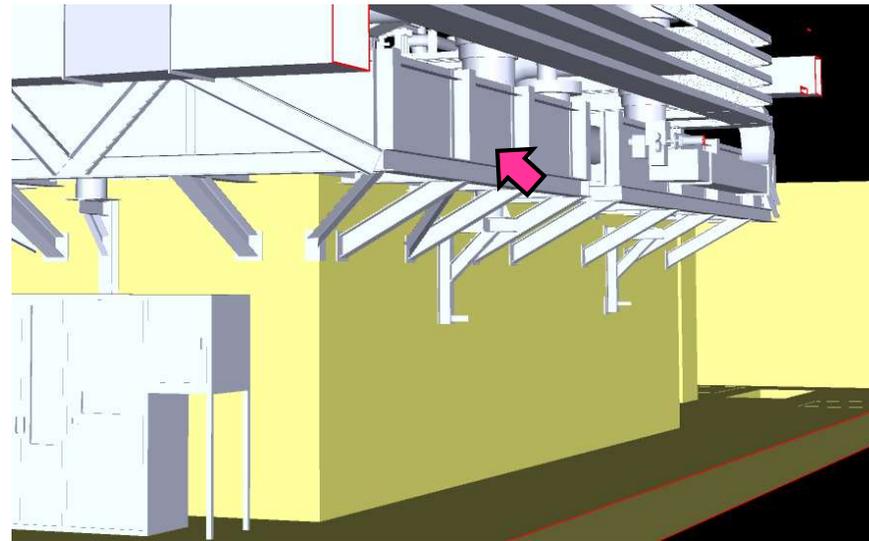


図2.2-3-2 RHR配管遮蔽体図 (視点A)

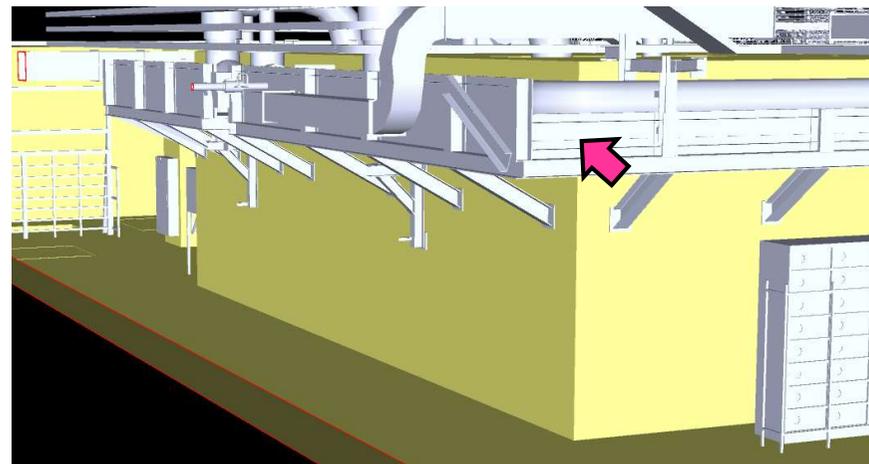


図2.2-3-3 RHR配管遮蔽体図 (視点B)

2.2 干渉物撤去範囲の設定 (電源盤)

干渉物	代表撤去範囲	選定理由
北西-1 RHR MCC 3A盤	床面と極力平滑～ 3000mm (電線管含む) (図2.2-4-1参照)	<ul style="list-style-type: none"> ・3号機の干渉物撤去計画 (東電HD殿) に基づき、北西エリアの電源盤を優先的に検討する。 ・北側HCU近辺の電源盤は撤去済みであることから、それ以外の箇所を検討対象とする。 ・アクセス性が悪い西側通路かつ比較的大きい電源盤として、RHR MCC 3A盤を選定した。 (図2.2-4-1を参照のこと)

代表的な撤去対象とする電源盤

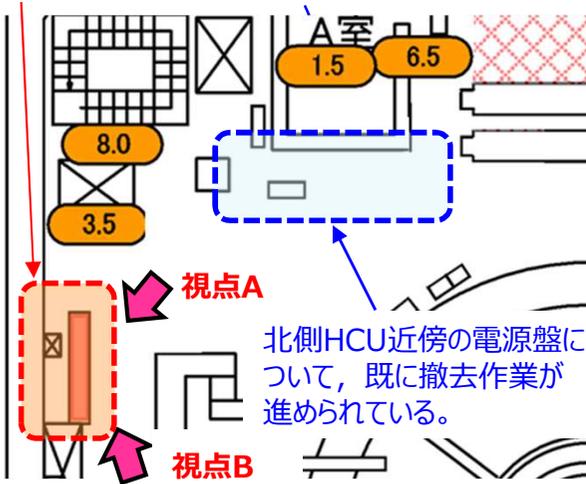


図2.2-4-1 電源盤撤去状況 (平面図)

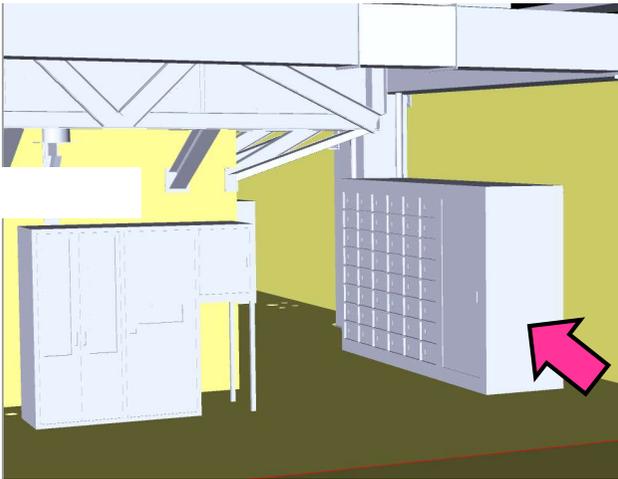


図2.2-4-2 代表電源盤の撤去 (視点A)

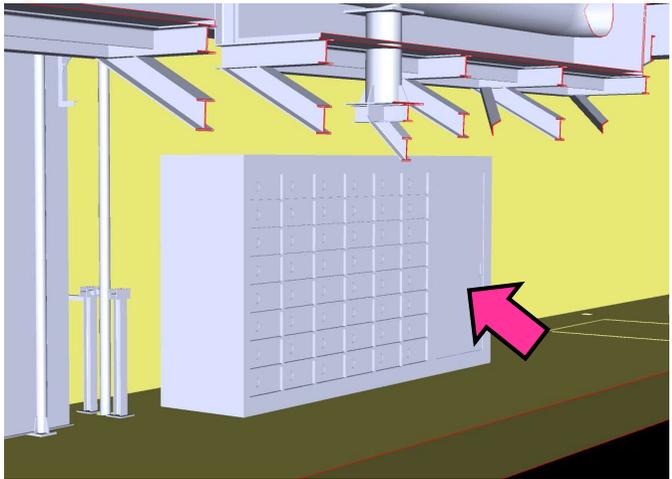


図2.2-4-3 代表電源盤の撤去 (視点B)

2.2 干渉物撤去範囲の設定 (HCU)

干渉物	代表撤去範囲	選定理由
南西-8 HCU本体	HCUユニット + CRD挿入引抜配管	<p>・HCUの撤去対象について、北側と南側を比較すると、南側はTIP室があるため、北側と比較して作業スペースが狭いことから撤去難易度が高いと想定するため、南側エリアのHCUを検討対象とする。</p> <p>・HCUの切断範囲（案）として、以下の2パターンを想定する。将来的なエリア確保の観点から撤去範囲が大きい、「HCUユニット+CRD挿入引抜配管」で検討を実施する。</p> <p>① HCUユニット+CRD挿入引抜配管 （目的：線源の撤去+将来のエリア確保）</p> <p>② HCUユニット （目的：線源の撤去）</p>

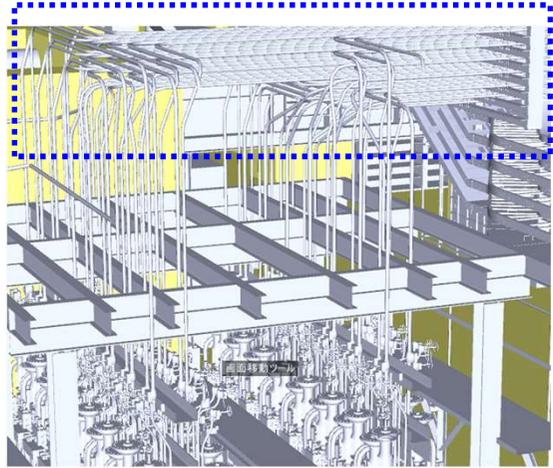


図2.2-5-3 CRD引抜挿入配管

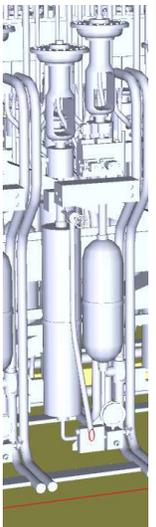


図2.2-5-4 HCUユニット

HCU点検架台については、北側は既に撤去作業が進められている。今後、南側についても撤去が進められる予定。

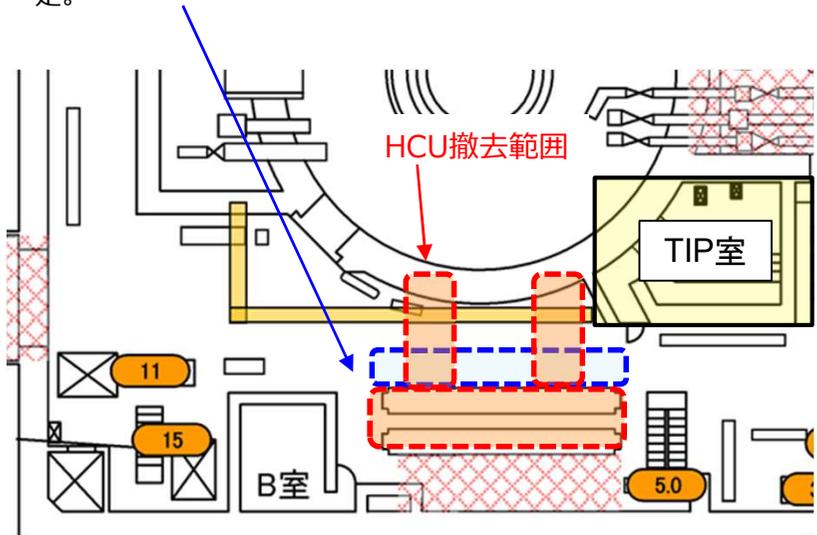


図2.2-5-1 HCU代表撤去範囲 (平面図)

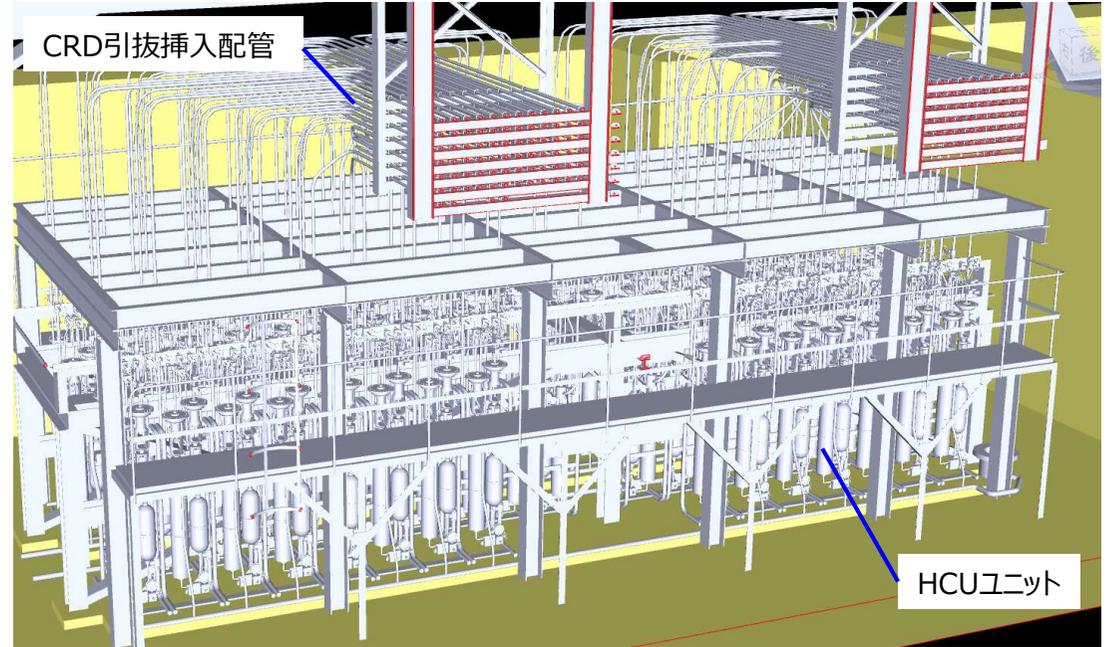


図2.2-5-2 HCUの概略図

2.3 現場調査結果（概要）

【目的】： 干渉物撤去検討に必要な現場情報を取得する。

【調査内容および調査結果】： 調査内容および調査結果を表2.3に示す。

【対象号機】： 調査ターゲットは3号機とする。（一部2号機，5号機も調査する。）

【調査方法】： 3号機は空間線量率が高く短時間で調査を行う必要があるため，調査方法は動画撮影を基本とする。

表2.3 現場調査の概要（調査内容および調査結果）

調査No.	調査対象	調査項目	調査方法	調査号機	調査結果
1	機器のアクセスルート	(1) 機器のアクセスルートに関する最新のR/B内の状況の把握	動画（写真）撮影	2号機 3号機	高所や南東側の現場情報が不足していたため，その情報を入手した。また，干渉物撤去のアクセスルート上で大きな障害となるような構造物がないことを確認した。
2	ケーブルトレイ	(1) ケーブルの敷設状態	動画（写真）撮影	3号機	情報がなかったケーブルトレイの内部状況を撮影し，ケーブルの敷設状況（多数のケーブルが敷き詰められている様子）やサポート情報（コンクリート躯体からの据え付け位置や構造）を取得した。
		(2) ケーブルトレイのサポート情報（据付位置，構造）			
3	RHR配管	(1) RHR配管周辺の空間線量率	空間線量率の測定（表面汚染の測定）	3号機	RHR配管遮蔽体内外で空間線量率に明確な差異がなかったため，RHR配管は有意な線源でないことを推測する。そのため，RHR遮蔽体を撤去しても現場の空間線量率は増加しないと考える。 RHR配管遮蔽体上部にケーブルトレイ等の構造物があり，上部から遮蔽体内部へのアクセスが困難であることが判明した。また，RHR配管に対して保温材が取り付けられていることおよび保温材の一部に損傷があることを確認した。RHR配管サポートは遮蔽体内面側は撮影できなかったが，外面側は構造情報を得られた。
	RHR配管遮蔽体	(2) 遮蔽体内部の状況	動画（写真）撮影		
		(3) RHR配管に対する保温材の取付状況			
		(4) RHR配管サポートの構造			
4	HCU	(1) CRD挿入引抜配管の周辺状況	動画（写真）撮影	5号機 3号機	情報が不足していた高所のCRD引抜配管周辺の状況を確認し，目立った損傷がないことや配管を固定しているサポート状況等を確認した。HCUユニットについては，情報がなかった高所の設置状態を確認した。また，HCUユニットの詳細構造を把握し，図面情報と大きな差異がないことを確認した。
		(2) HCUユニットの構造			

代表干渉物の選定/撤去範囲の検討結果まとめ

- ・干渉物の抽出条件として、優先的に検討する対象号機を3号機とし、検討対象とする環境改善計画を燃料デブリ取り出し計画および取水部設備設置計画と設定し、干渉物の抽出を実施した。
- ・撤去ニーズは高所、PCV接続系統の干渉物およびHCUの撤去であることを考慮し、評価指標を①空間線量率、②干渉物の床面高さ、③系統隔離の必要性に設定した。
- ・検討対象の代表干渉物を以下の通り選定した。本干渉物の撤去検討を通じて、獲得できる技術は以下の通り。
 - ①ケーブルトレイ ⇒ 高所 (6m) の干渉物撤去技術
 - ②RHR配管 ⇒ 高所 (約4.5m) , 大口径配管 (500A, 600A) , 重量物 (約300 or 600kg/m) の撤去, 残留水確認, 水素爆発防止および系統隔離技術
 - ③RHR配管遮蔽体 ⇒ 高所(約4.5m), 厚板(40mm), 重量物の干渉物撤去技術
 - ④電源盤 ⇒ 建屋通路上に多数存在する盤・計装ラック等の汎用的な干渉物撤去技術
 - ⑤HCU ⇒ 高所, 狭隘かつ小口径配管の撤去, 残留水確認, 水素爆発防止および系統隔離技術

3. 目標仕様の検討

3.1. 前提条件の整理

3-1-1. 構成機器条件

本項では遠隔装置の機器構成における条件を示す。

- 機器構成

撤去ロボットを含む遠隔機器は既存技術の組み合わせで構成し、可能な限り開発要素を少なくすること。また、後に示す撤去検討対象のみではなく、汎用的に幅広い対象物を撤去可能な仕様とすること。なお、作業ロボットを含む各遠隔機器を複数台用意することが合理的な場合は、使用目的に応じて複数用意する。

- 遠隔操作

免震重要棟またはR/B近傍の低線量エリアに設置される現場操作エリアからの遠隔操作が可能で、様々な干渉物に対応できるよう遠隔操作性に優れた構成にすること。

- 想定運用年数

8年（2024年から運用開始し、2031年の燃料デブリ取り出し開始までの使用という前提とし、8年と設定した。ただし、過酷環境下で使用されることから、劣化が想定される消耗品は保守時に交換可能な設計とする。

- 稼働要求（目安）

5時間/日、200日/年（稼働時以外はR/B内の線量が低い場所に保管されると仮定する）

3.1. 前提条件の整理

3-1-1. 構成機器条件

- 耐放射線性

 - 累積線量500Gy

 - (東電HD殿資料「デブリ取り出しに向けた原子炉建屋環境改善の計画」より、3号機R/B 1階の最大空間線量率は22mSv/hである。保守的に、作業期間中は構成機器がこの線量率環境に晒されるとすると、 $5(\text{h}) \times 200(\text{日}) \times 8(\text{年}) \times 0.022(\text{Gy}) = 176\text{Gy}$ 。

 - 保管時は5mSv/hの場所に保管するとし、 $\{19(\text{h}) \times 200(\text{日}) + 24(\text{h}) \times 165(\text{日})\} \times 8(\text{年}) \times 0.005(\text{Gy}) = 311\text{Gy}$ 。

 - 上記を合わせてあわせて487Gyとなり、約500Gyの累積線量に耐え得る仕様として設定した。

 - なお、1-3号機のR/B 1階において、1号機の南および南東エリアのみ空間線量率(630mSv/h)が大幅に高いが、本事業の極力市販品を利用する基本方針に基づき、当該エリアについては、必要範囲に耐放射線性の高い部品を使用するか、放射線劣化する消耗品は交換を行い作業を継続する方針とする。

ただし、本累積線量を確保することが合理的でない場合(※)は、対象部品を保守時に容易に交換可能な設計とする。(※上記耐放射線性を満足するために新規に技術開発が必要となる場合等)

- 防水・防塵

 - 高度な汚染が想定される(ジェット噴流による除染が必要と想定される) 範囲：IP56以上

 - 上記以外の範囲：IP54以上

- 走行機能 (IRID殿資料 H25 原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発の要素試験条件より)

 - 遠隔操作によりR/B内を走行することができ、最大50mmの段差(3号機大物搬入口付近の段差を想定) およびスロープ(傾斜14°)(3号機南東のスロープを想定)を走行できること。

- 静止・走行時の安定性

 - 干渉物の把持・切断の際、切断反力や撤去物の重量負荷を考慮し、装置重心を低くする等の静止時の安定策を施すこと。また、撤去物を把持したまま走行する場合は走行時の安定性を考慮し、上述の走行機能を撤去物を把持した状態で達成できること。

3.1. 前提条件の整理

3-1-1. 構成機器条件

- 機器外形寸法
R/B内で干渉物の撤去作業の際に建屋およびその他干渉物に接触することなく、走行・旋回が可能な寸法であること。
- 機器の保守
除染を容易にするため、養生が可能な範囲については必要に応じ作業中の養生を施す。養生が困難な機器については、除染性を考慮し外表面は可能な限り凹凸の無い構造とする。
- 故障時の回収
作業または移動中に機器が故障し、自走による帰還が困難な場合においても、低線量エリアへ機器を回収可能な手段を備えること。作業員が近づけないような高線量環境の場合は、他搬送機器等を用いた遠隔操作による回収を原則とする。また、回収作業において一時的に作業員の補助を必要とする場合は、被ばく低減のため可能な限り短時間での作業とする。
- 火災・爆発防止
火災防止の観点から熱式切断は原則使用不可とする。油圧機器を用いる場合は、火花が発生しない機械式切断方法を用いて撤去作業を行う。また、作動油に難燃性のものを用いる等、火災防止を考慮すること。電動機器を用いる場合は多少の火花の発生を許容するが、可能な範囲で火花の発生を抑えること。
- 撤去前の除染
干渉物は撤去前に周辺空間線量率の計測を行い、必要に応じて撤去前に除染を行う。
- 廃棄物の収納
撤去した干渉物は最終的に6m³コンテナに収納し保管される。干渉物撤去時はこの寸法以内に解体することを原則とする。

3.1. 前提条件の整理

3-1-2. 各干渉物における条件

(1) 電源盤の撤去条件

- 撤去の際，作業内容および切断対象の寸法，重量等に応じて把持することなく切断することは許容するが，切断片は完了時にはすべて回収すること。

(2) ケーブルトレイの撤去条件

- ケーブルは把持せずに裁断し，別途回収することを許容するが，次作業に影響のないことを前提とし，周辺の汚染拡大防止に配慮すること。
- ケーブルトレイは切断する際に落下させる場合は床面や機器に損傷を与えないよう対策をすること。
- 既設ケーブルは使用中のものは無く，全て切断可能な前提とする。

(3) RHR配管の撤去条件

- 配管周りには保温材が施工されている前提とする。（現場調査結果より）
- 撤去の際，対象物を極力落下させないように配慮する。落下させる必要がある場合には，その対象物の寸法，重量を考慮すると共に落下することにより床面や機器に損傷を与えないよう対策をすること。

(4) HCUの撤去条件

- HCUを撤去する際は，PCV内部水がHCUから逆流するリスクを防止するため，PCV内部の水位が1階床面よりも下となっている前提とする。
- 撤去の際，対象物が落下することにより床面や機器に損傷を与えないよう対策をすること。

3.2. 想定撤去手順の設定

電源盤の想定撤去手順

- ① 扉の撤去
- ② ユニットの撤去
- ③ 内部配線の撤去
- ④ 外装の撤去・電線管の撤去
- ⑤ 対象が撤去されたことを確認して完了

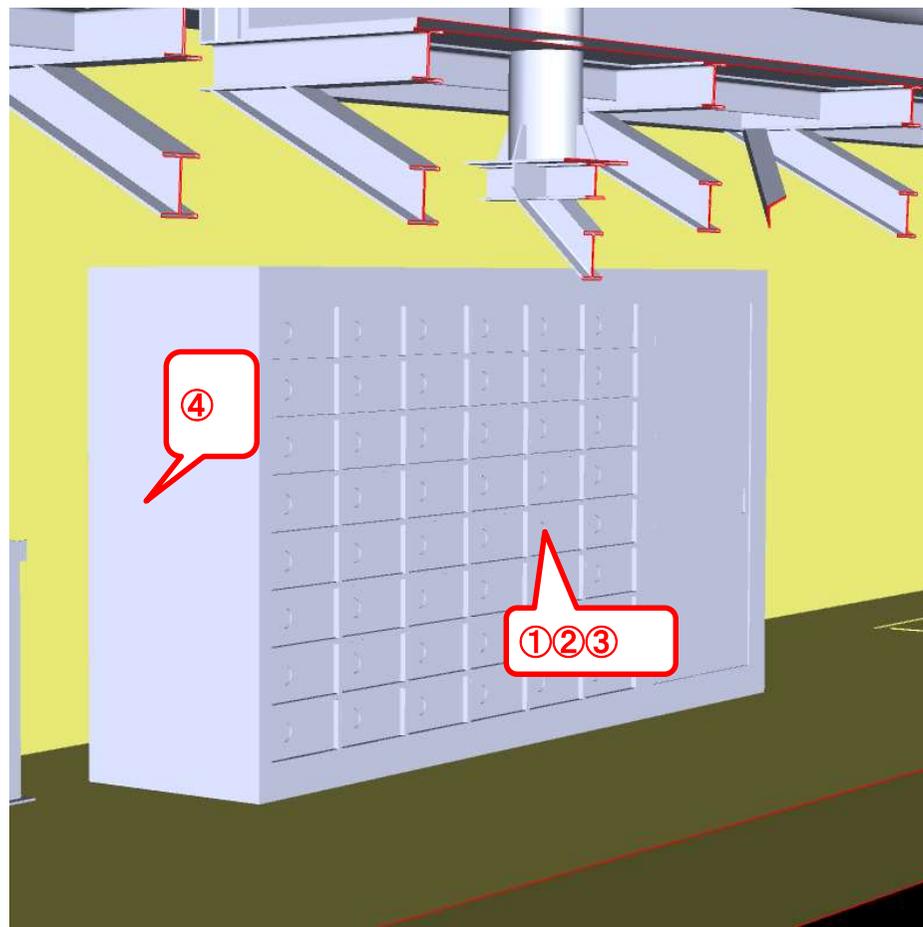


図3-2-2 電源盤の想定撤去手順

3.2. 想定撤去手順の設定

ケーブルトレイの想定撤去手順

- ① トレイから脱落しているケーブルを撤去
- ② ケーブルトレイの一部を撤去
- ③ ケーブルを一部（トレイを撤去した部分）撤去
- ④ ②③を繰り返して最下段を撤去
- ⑤ ②③④を繰り返して残り4段を撤去
- ⑥ ケーブルトレイサポートの撤去
- ⑦ 対象が撤去されたことを確認して完了

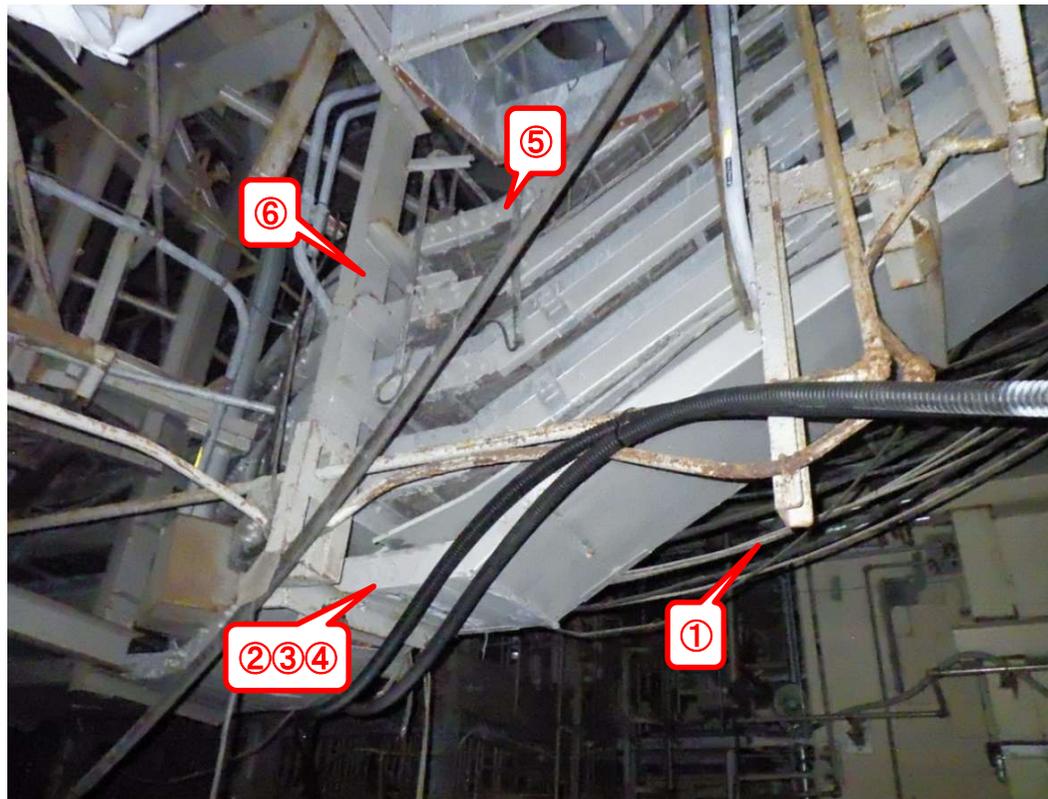


図3-2-3 ケーブルトレイの想定撤去手順

3.2. 想定撤去手順の設定

RHR配管の想定撤去手順

- ① 遮蔽鉄板, サポート (鉛直) 一部撤去
- ② 遮蔽鉄板, サポート (水平) 一部撤去
- ③ ①②を繰り返して遮蔽鉄板 + サポート全撤去
- ④ 保温材を撤去 (必要な場合)
- ⑤ RHR配管残水確認
- ⑥ 系統内の水素爆発防止処置 (必要な場合)
- ⑦ 系統内の排水
- ⑧ 配管内除染 (必要な場合)
- ⑨ 配管隔離 (充填剤注入等)
- ⑩ 隔離部分の切断
- ⑪ 切断箇所の封止 (必要な場合)
- ⑫ RHR配管一部撤去
- ⑬ RHR配管サポート一部撤去
- ⑭ ⑫⑬を繰り返してRHR配管 + サポート全撤去
- ⑮ 完了

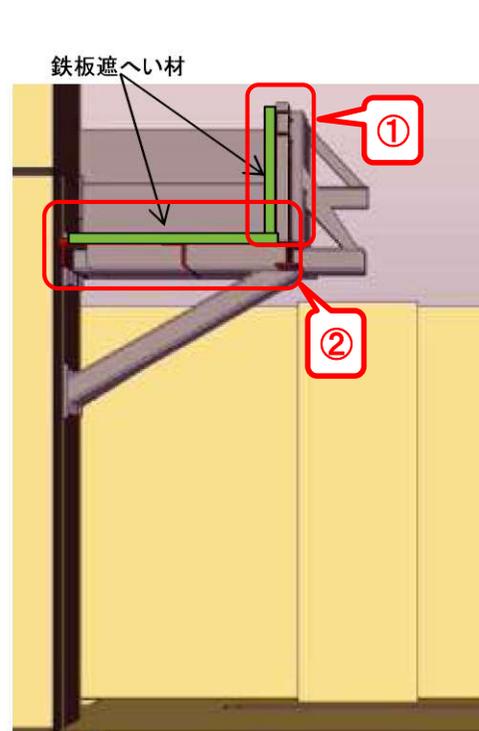


図3-2-4 RHR配管の想定撤去手順(1/3)

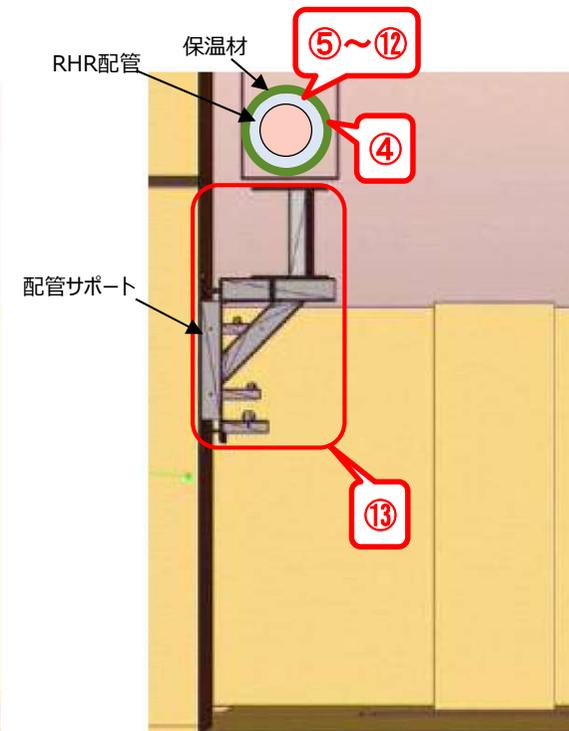


図3-2-5 RHR配管の想定撤去手順(2/3)

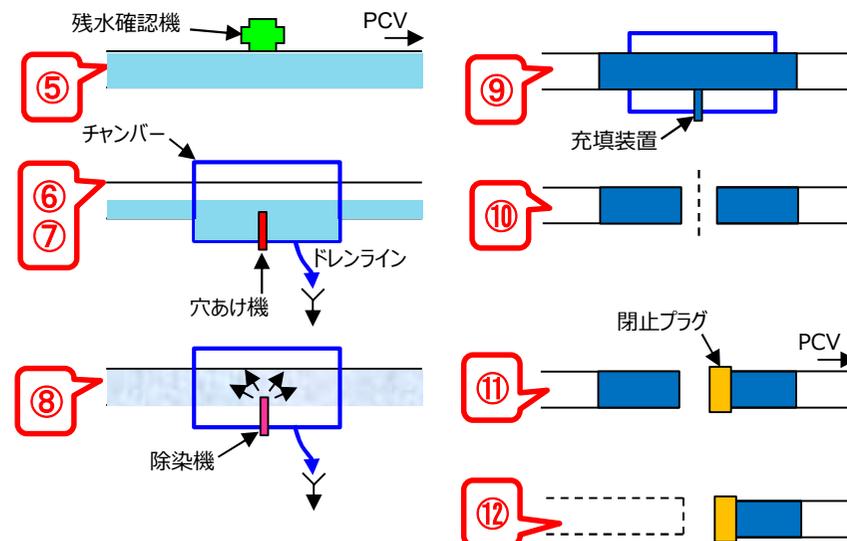


図3-2-6 RHR配管の想定撤去手順(3/3)

3.2. 想定撤去手順の設定

HCUの想定撤去手順

- ① PCV内の水位がR/B 1階床面高さよりも下であることを確認
- ② CRD挿入引抜配管内の排水
- ③ 残水確認
- ④ 系統内の水素爆発防止処置 (必要な場合)
- ⑤ 配管内除染 (必要な場合)
- ⑥ 配管隔離 (充填剤注入等)
- ⑦ 隔離部分の切断
- ⑧ 切断箇所を封止
- ⑨ 切断した配管のHCU側を撤去
- ⑩ ②～⑨を繰り返しCRD挿入引抜配管を全て系統隔離

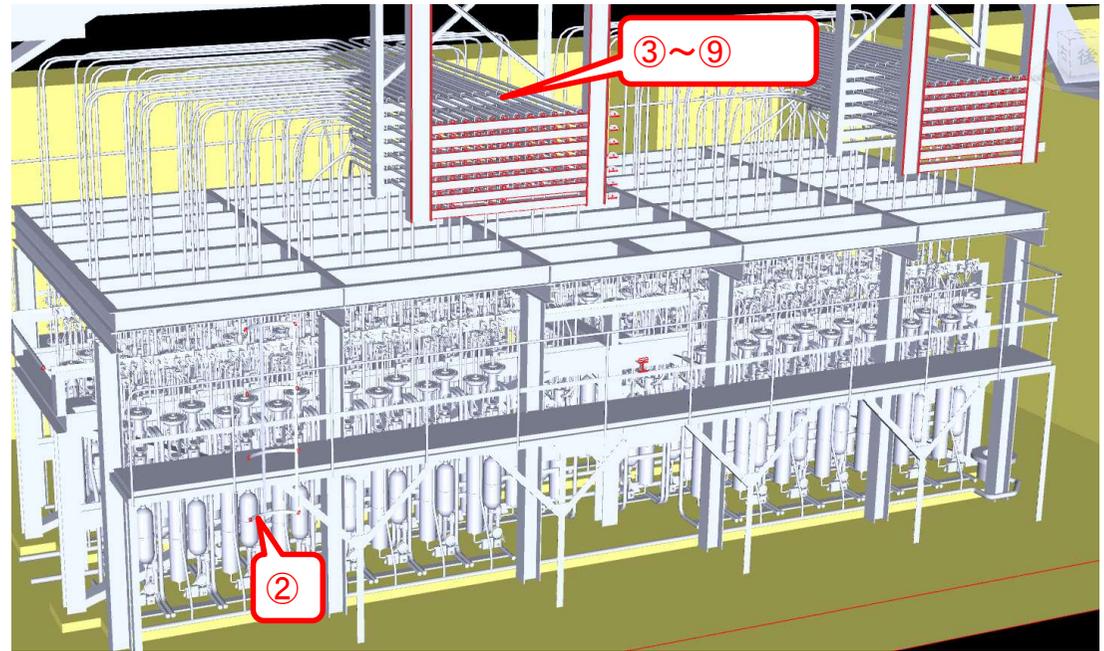


図3-2-7 HCUの想定撤去手順(1/4)

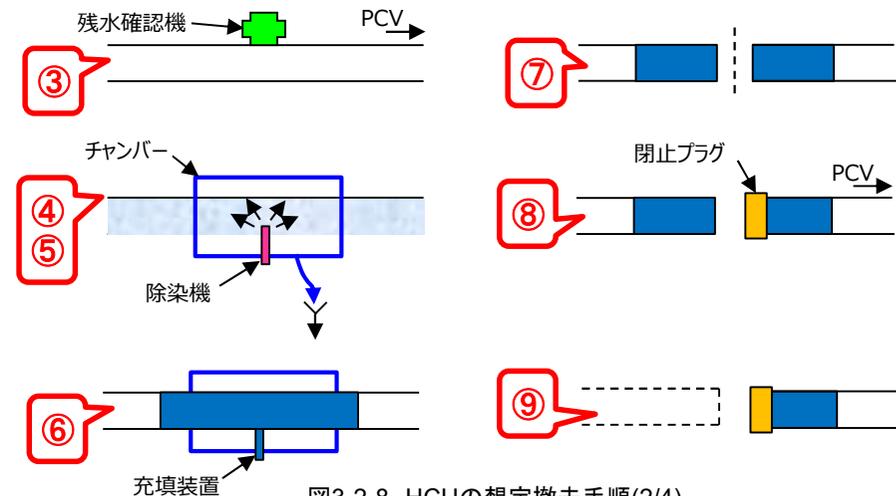


図3-2-8 HCUの想定撤去手順(2/4)

3.2. 想定撤去手順の設定

HCUの想定撤去手順

- ⑪ HCUユニットを撤去
- ⑫ ⑪を前列全体撤去するまで繰り返し
- ⑬ 中央架台を撤去
- ⑭ 後列のHCUユニットを全て撤去
- ⑮ 上部配管を撤去
- ⑯ 上部配管のサポートを撤去
- ⑰ HCU台座の平滑処理
- ⑱ 完了

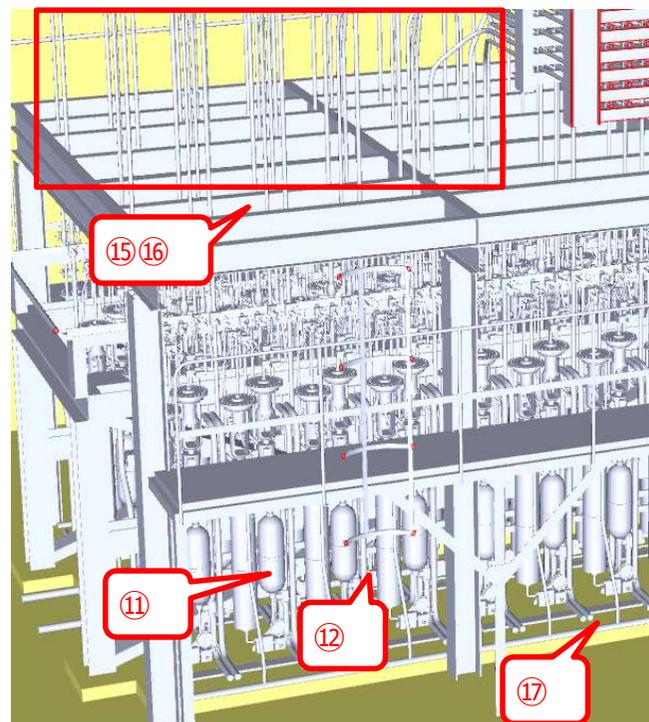


図3-2-9 HCUの想定撤去手順(3/4)

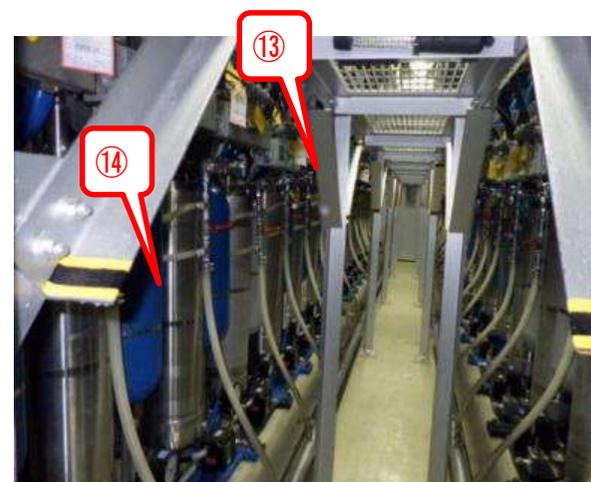


図3-2-10 HCUの想定撤去手順(4/4) (本写真は5号機のもの)

3.3. 撤去作業分類と必要装置，要求機能の抽出

撤去作業分類と必要装置，要求機能の抽出結果

- 本節では，想定撤去手順を作業項目に分類し，各作業を行うにあたり必要となる装置，その作業に対する要求機能，調査の対象とする要素技術を抽出した結果を示す。
- 表3-3-1に抽出結果を示す。

表3-3-1 (1/5) 作業項目と必要装置および要求機能

No.	作業項目		必要装置	要求機能	目標作業効率*	要素技術	備考	対象干渉物			
	大分類	小分類						電源盤	ケーブルレイ	RHR配管	HCU
1	汚染拡大防止	養生	シート養生	・ダスト，汚染水が養生面から外部へ漏洩しないこと。	-	-	作業員による設置作業	○	○	○	○
2		換気	換気装置	・非常時に作業ハウス内に作業員の立入が可能な程度まで換気が可能なこと。	-	-	作業員による設置作業	○	○	○	○
3		ハウンドリ	作業ハウス	・ダスト，汚染水が養生面から外部へ漏洩しないこと。	-	-	作業員による設置作業	○	○	○	○
4	被ばく低減	遮蔽	遮蔽板，鉛マット等	・非常時に作業員が立入可能な線量率（3mSv/h程度）に低減されること。	-	-	・作業員による作業 ・原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発 完了報告（H28 IRID殿資料）	○	○	○	○
5		除染	除染装置（ふき取り，高圧水洗浄，プラスチック，レーザアブレーション等）	・作業エリア3mSv/h，アクセスエリア5mSv/h程度の線量率を目標とすること。	-	・先端ツール	・遠隔であれば先端ツールに機能付与するのが合理的 ・原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発 完了報告（H28 IRID殿資料）	○	○	○	○
6	遠隔操作共通	作業ロボット操作	操作盤	・操作性を十分に考慮したものとする（長期間オペレータの訓練を必要としない，オペレータの負荷を極力低減する等）。	-	・マン・マシン・インターフェイス		○	○	○	○
7		作業状況，周辺状況の把握	視認システム（カメラ等）	・干渉物，干渉物周辺，装置先端，装置全体等を視認可能なこと。	-	・視認技術		○	○	○	○
8			VR	VRによりリアルタイムに実動作と連動することで視野を補うことが可能なこと。	-	・マン・マシン・インターフェイス		○	○	○	○
9		照明	照明にてカメラ視認範囲を照らし，視認性を確保できるようにすること。	-	・視認技術		○	○	○	○	
10		ケーブル送出・巻取制御	ケーブルリール	・対象装置に設置されるケーブルやホース類が当該装置の動きに合わせて追従（送出，巻取制御）が可能なこと。	-	・ケーブル・ホース ・ケーブルマネジメント手法	無線による通信も考慮する	○	○	○	○
11	調査	外観調査	視認システム（カメラ等）	・干渉物，干渉物周辺，装置先端，装置全体等を視認可能なこと。	5min/m ²	・視認技術		○	○	○	○
12		線量計測	線量率計	対象物，対象エリアの線量率計測が可能なこと。	5min/m ²	・先端ツール	先端ツールに機能付与するのが合理的	○	○	○	○
13		寸法計測	3Dスキャナ	対象物，対象エリアの3D点群データ取得が可能なこと。	5min/m ²	・先端ツール	先端ツールに機能付与するのが合理的	○	○	○	○

*過去の遠隔作業実績より目標作業効率を設定した。
本効率は要素技術のうち切断作業等の解体作業に関連する作業に対して設定し，系統隔離等の安全性を重要視する作業は設定対象外とする。

3.3. 撤去作業分類と必要装置，要求機能の抽出

表3-3-1 (2/5) 作業項目と必要装置および要求機能

No.	作業項目		必要装置	要求機能	目標作業効率*	要素技術	備考	対象干渉物			
	大分類	小分類						電源盤	ケーブルトレイ	RHR配管	HCU
14	作業位置へのアクセス	走行機能	作業ロボット (走行装置)	<ul style="list-style-type: none"> ・50mm程度の凹凸を走行可能なこと。 ・14°程度のスロープを走行可能なこと。 ・塵埃，砂利，水たまり等の路面でも走行可能なこと。 	最長75mを片道1h以内	・作業ロボット		○	○	○	○
15		昇降機能	作業ロボット (昇降装置)	<ul style="list-style-type: none"> ・6m以上の高さにアクセス可能なこと。 	10min以内	・作業ロボット		-	○ (最高約6m)	○ (最高約4.5m)	○ (最高約5.5m)
16		位置決め	作業ロボット (アーム伸縮，各軸旋回)	<ul style="list-style-type: none"> ・位置精度：±10mm以内を目標とする。 ・床面上や他構造物上の切断物にアクセス可能であること。 ・廃棄物回収容器にアクセス可能であること。 	-	・作業ロボット	各干渉物の把持・切断に必要と考えられる位置決め精度とした。CRD挿入引抜配管同士の間隔は127mmであり対象の中で最も狭隘だが，適切な視野を確保できれば±10mm程度の位置精度で十分作業可能と判断したため。	○	○	○	○
17	系統隔離作業	残水確認	残水確認装置	<ul style="list-style-type: none"> ・配管内部の残水確認ができること。 	-	<ul style="list-style-type: none"> ・系統隔離および配管内部流体の処置方法 ・先端ツール 		-	-	○	○
18		系統内の排水	配管穴あけ排水装置	<ul style="list-style-type: none"> ・配管に穴をあけることができ，内部のドレンができること。 	-	<ul style="list-style-type: none"> ・系統隔離および配管内部流体の処置方法 ・先端ツール 		-	-	○	○
19			バルブ操作装置	<ul style="list-style-type: none"> ・狭隘部に位置するバルブを操作することができ，配管内部のドレンができること。 	-	・先端ツール		-	-	-	○
20		バウンダリ構築	エンクロージャ，作業ハウス	<ul style="list-style-type: none"> ・気体漏洩率：XXvol%/h以内であること。 ・液体漏洩率：0 	-	<ul style="list-style-type: none"> ・系統隔離および配管内部流体の処置方法 	気体漏洩率は追而。	-	-	○	○
21		水素爆発防止	水素爆発防止装置	<ul style="list-style-type: none"> ・配管内部の水素濃度の確認ができ，爆発防止処置ができること。 	-	<ul style="list-style-type: none"> ・水素爆発抑制策 ・先端ツール 		-	-	○	○
22		配管内除染	配管内除染装置	<ul style="list-style-type: none"> ・配管内部を除染できること。 	-	<ul style="list-style-type: none"> ・系統隔離および配管内部流体の処置方法 ・先端ツール 		-	-	○	○
23	系統隔離	充填剤，充填剤注入装置	<ul style="list-style-type: none"> ・気体漏洩率：XXvol%/h以内であること。 ・液体漏洩率：0 	-	<ul style="list-style-type: none"> ・系統隔離および配管内部流体の処置方法 ・先端ツール 	気体漏洩率は追而。	-	-	○	○	
24	切断箇所封止	封止装置	<ul style="list-style-type: none"> ・気体漏洩率：XXvol%/h以内であること。 ・液体漏洩率：0 	-	<ul style="list-style-type: none"> ・系統隔離および配管内部流体の処置方法 ・先端ツール 	気体漏洩率は追而。	-	-	○	○	

*過去の遠隔作業実績より目標作業効率を設定した。
本効率は要素技術のうち切断作業等の解体作業に関連する作業に対して設定し，系統隔離等の安全性を重要視する作業は設定対象外とする。

3.3. 撤去作業分類と必要装置，要求機能の抽出

表3-3-1 (3/5) 作業項目と必要装置および要求機能

No.	作業項目		必要装置	要求機能	目標作業効率*	要素技術	備考	対象干渉物			
	大分類	小分類						電源盤	ケーブルトレイ	RHR配管	HCU
25	撤去作業 (切断, 把持等)	切断	先端ツール (ディスクカッター, レシプロソー等の機械式切断)	・切断対象物 (電源盤本体, 電線, 電線管, ケーブルトレイ配管サポート, RHR配管遮蔽体, RHR配管, CRD挿入引抜配管, HCU本体, HCU中央架台) を切断可能なこと。 電源盤本体: 鋼板厚さ1.6mm or 2.3mm 材質不明 (炭素鋼と仮定する) 電源盤用電線管: OD100mm, 材質不明 (炭素鋼と仮定する) 電源盤チャンネルベース: C100x50, 材質不明 (SS400と推定), 溝形鋼の半分50mmは床面に埋没。 ケーブルトレイ: 板厚1.6mm or 2.3mm, 材質SS540, SSC400 ケーブルトレイ電線: 約φ40mm RHR配管遮蔽体・配管サポート: H150x150, C150x75, 材質SS400 RHR配管遮蔽体: 板厚40mm, 材質SS400 RHR配管: 500AxS80 & 600AxS100, SUS304TP(LC) & STS410 + 保温材 CRD引抜配管: 1/2B x SCH80, 材質SUS304TP HCU本体配管: 1/2~1B, 材質不明 (ステンレスと想定) HCU中央架台: H200x200 材質不明 (SS400と想定)	電源盤本体, チャンネルベース: 15min/m 電線管: 5min/本, ケーブルトレイ (電線含む): 30min/m (各段) サポート: 各断面5min RHR配管遮蔽体: 30min/m RHR配管: 各断面30min CRD引抜配管, HCU本体配管: 5min/本 HCU中央架台: 各断面5min	・先端ツール ・作業ロボット	火災防止の観点から熱式切断は原則使用不可とする。油圧機器を用いる場合は, 火花が発生しない機械式切断方法とし, 作動油等, 火災防止を考慮すること。電動機器を用いる場合は多少の火花の発生を許容するが, 可能な範囲で火花の発生を抑えること。	○	○	○	○
26		火災防止	火気養生	・火災防止の観点から熱式切断は使用不可とし, 火花の出ない機械式切断方法を考慮すること。油圧機器を用いる場合は, 作動油等, 火災防止を考慮すること。	-	・先端ツール		○	○	○	○

*過去の遠隔作業実績より目標作業効率を設定した。
 本効率は要素技術のうち切断作業等の解体作業に関連する作業に対して設定し、系統隔離等の安全性を重要視する作業は設定対象外とする。

3.3. 撤去作業分類と必要装置，要求機能の抽出

表3-3-1 (4/5) 作業項目と必要装置および要求機能

No.	作業項目		必要装置	要求機能	目標作業効率*	要素技術	備考	対象干渉物			
	大分類	小分類						電源盤	ケーブルトレイ	RHR配管	HCU
27	把持	把持	先端ツール (グリッパ等)	<ul style="list-style-type: none"> 切断対象物 (電源盤本体, 電線, 電線管, ケーブルトレイ配管サポート, RHR配管遮蔽体, RHR配管, CRD挿入引抜配管, HCU本体, HCU中央架台) を把持, 搬送可能なこと。 電源盤本体: 鋼板厚さ1.6mm or 2.3mm 電源盤用電線管: OD100xL2000mm, 材質不明 (炭素鋼と仮定する) 電源盤チャンネルベース: C100x50, 材質不明(SS400と推定), 溝形鋼の半分50mmは床面に埋没。 ケーブルトレイ: 板厚1.6mm or 2.3mm, 材質SS540, SSC400 ケーブルトレイ電線: 約φ40mm RHR配管遮蔽体・配管サポート: H150x150, C150x75, 材質SS400 RHR配管遮蔽体: 板厚40mm, 材質SS400 RHR配管: 500AxS80 & 600AxS100, SUS304TP(LC) & STS410 + 保温材 CRD引抜配管: 1/2B x SCH80, 材質SUS304TP HCU本体配管: 1/2~1B, 材質不明(ステンレスと想定) HCU中央架台: H200x200 材質不明(SS400と想定) 切断片を把持, 搬送可能なこと。 	各把持にかかる時間: 5min以内	<ul style="list-style-type: none"> 先端ツール 作業ロボット 		○	○	○	○
28	ボルト締結解除	ボルト締結解除	インパクトレンチ	HCU用ボルト (2面幅約10mm, 20mm), 電源盤取り付けボルト(M12)を取り外し可能なこと。	-	<ul style="list-style-type: none"> 先端ツール 		○	○	○	○
29	コンクリートはつり	コンクリートはつり	コンクリートはつり装置	<ul style="list-style-type: none"> HCUの台座 (L10880xW1500xH100mm, コンクリート) および埋め金 (L5800xW75xt22mm, スタッドφ16mm) をはつり, 平坦にできること。 	2h/m ²	<ul style="list-style-type: none"> 先端ツール 		○	○	○	○
30	ダスト飛散抑制	ダスト飛散抑制	局所排気, 作業ハウス	<ul style="list-style-type: none"> 干渉物切断時のダスト飛散防止を抑制する。 	-	<ul style="list-style-type: none"> 放射性ダストの飛散防止策 先端ツール 	吸引回収だけの専用装置は非合理的	○	○	○	○
31	先端ツール交換	先端ツール交換	遠隔先端ツール交換装置	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔操作で先端ツールの交換ができること。 	30min以内	<ul style="list-style-type: none"> 作業ロボット 先端ツール 		○	○	○	○
32	工具交換	工具交換	工具交換装置	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔操作で切断工具等の消耗品の交換ができること。 	30min以内	<ul style="list-style-type: none"> 作業ロボット 先端ツール 		○	○	○	○

*過去の遠隔作業実績より目標作業効率を設定した。
本効率は要素技術のうち切断作業等の解体作業に関連する作業に対して設定し、系統隔離等の安全性を重要視する作業は設定対象外とする。

3.3. 撤去作業分類と必要装置，要求機能の抽出

表3-3-1 (5/5) 作業項目と必要装置および要求機能

No.	作業項目		必要装置	要求機能	目標作業効率*	要素技術	備考	対象干渉物			
	大分類	小分類						電源盤	ケーブルレイ	RHR配管	HCU
33	撤去物の収納～搬送	撤去物把持、搬送（廃棄物回収容器への収納）	・把持ツール（グリッパバケット） ・廃棄物回収容器	（・把持ツールは上記参照） ・廃棄物回収容器仕様：最終的に内寸L1990xW1990xH1310の廃棄物コンテナに収納するが、R/B内での仮収納（「廃棄物回収容器」と定義）には特に指定無し。	各収納にかかる時間：5min以内(ロボット昇降時間は含めない)	・作業ロボット ・先端ツール	廃棄物回収容器は廃材収納ボックスに内容物として収納することも可能。	○	○	○	○
34		廃棄物回収容器のハンドリング	・廃棄物回収容器搬送装置 ・廃棄物回収容器蓋開閉装置（把持ツール）	・廃棄物回収容器を作業場所まで搬送可能なこと。 ・廃棄物回収容器の蓋開閉が可能なこと。	廃棄物回収容器を廃棄物コンテナに収納するまでの時間：1h以内	・廃棄物回収容器等のハンドリング技術	廃棄物回収容器の蓋開閉は作業ロボットや補助ロボットで行うのが合理的	○	○	○	○
35	装置保守	使用装置の保守	・保守エリア ・保守設備	・除染を容易にするため、養生が可能な範囲については必要に応じ作業中の養生を施す。養生が困難な機器については、除染性を考慮し外表面は可能な限り凹凸の無い構造とする。 ・想定されるシステム構成機器の各種保守作業が可能なエリアサイズであること。 ・可能な限り短時間で容易に実施可能とすべく保守作業の補助設備を備えること。	-	・作業ロボット ・ロボット一時保管および保守	システム構成機器のサイズが明確になった後にエリアサイズを決定する。	○	○	○	○
36		部品交換	・保守対象装置	・部品交換頻度を減らすため、累積線量500Gyを目標として耐放射線性向上の処置を施すこと。 ・本累積線量を確保することが合理的でない場合は、保守時に容易に交換可能な設計とする。	-	・耐放射線性向上処置 ・ロボット一時保管および保守		○	○	○	○
37	装置保管	使用装置の保管	・保管エリア	・保管が必要となるシステム構成機器一式を保管可能なエリアサイズであること。	-	・ロボット一時保管および保守	システム構成機器のサイズが明確になった後にエリアサイズを決定する。	○	○	○	○

*過去の遠隔作業実績より目標作業効率を設定した。
本効率は要素技術のうち切断作業等の解体作業に関連する作業に対して設定し、系統隔離等の安全性を重要視する作業は設定対象外とする。

3.3. 撤去作業分類と必要装置，要求機能の抽出

遠隔システム構成および要素技術抽出結果

- 表3-3-1から各作業項目を行うにあたり必要となる主要装置を抽出することで，想定される遠隔システムを構成した。表3-3-2および図3-3-1に代表遠隔システム構成を示す。

表3-3-2 遠隔システム構成(代表)

主要装置	実施作業	概要
作業ロボット	作業位置へのアクセス，撤去作業，撤去物の収納～搬送	遠隔操作によりR/B内を走行して撤去対象付近にアクセスし，干渉物を撤去するロボット。先端ツールを交換することにより，様々な作業や干渉物の撤去に対応する。
先端ツール	調査，撤去作業，系統隔離作業，撤去物の収納～搬送等	作業ロボットのアーム先端に取り付けられるツールで，切断・把持・測定等の各用途に応じてそれぞれ専用のツールを用意する。
視認システム	作業状況 / 周辺状況の把握，外觀調査	作業ロボットを遠隔操作する際，操作者の作業負担の低減を目的としたカメラ・照明・俯瞰視認技術等の視認システムを，作業ロボットあるいはエリア固定の視認システムとして適用する。
ケーブルリール	ケーブル送出・巻取制御	ロボットを遠隔で操作する場合，有線にて電源供給および通信する方法と，バッテリーを搭載したロボットを無線で通信する方法の2通りが考えられる。有線にて接続する場合は，ケーブルリールを設ける。
廃棄物回収容器	撤去物の収納～搬送	撤去した干渉物を収納する容器。
操作盤	作業ロボット操作	作業ロボットを遠隔操作する際，操作者の作業負担の低減を目的とした力覚フィードバック等のマン・マシン・インターフェイスを採用した操作盤を使用する。

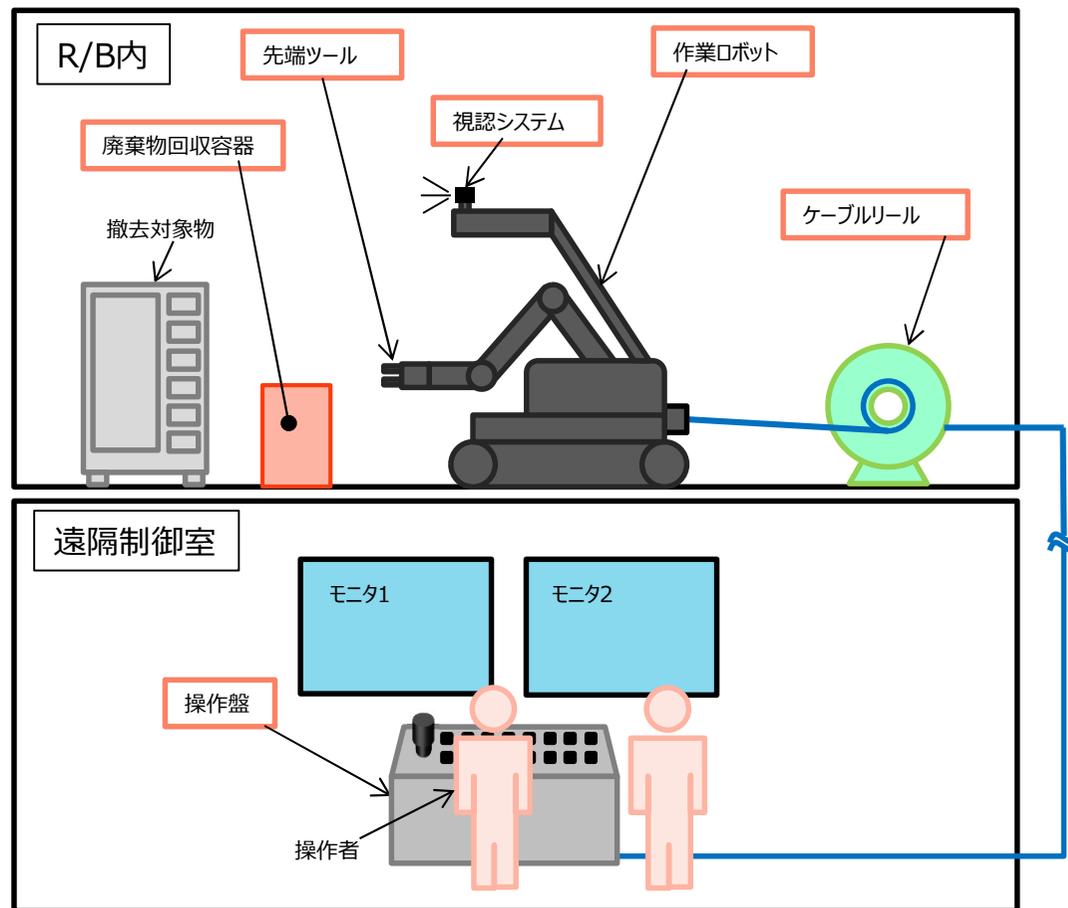


図3-3-1 遠隔システム構成

3.3. 撤去作業分類と必要装置，要求機能の抽出

調査対象要素技術の抽出結果

- 表3-3-1から抽出した主要装置および要求機能から，表3-3-3に示す要素技術を抽出した。
- 次節にてこれらの要素技術に対して目標仕様の設定を行い，ここで設定した目標仕様を満足する要素技術の調査・検討を，次実施項目として実施する。

表3-3-3 要素技術抽出結果

No.	要素技術
①	ロボット本体
②	先端ツール
③	視認技術
④	ケーブル・ホース
⑤	マン・マシン・インターフェイス
⑥	廃棄物容器等のハンドリング
⑦	耐放射線性向上処置
⑧	系統隔離および配管内部流体
⑨	放射性ダストの飛散防止策
⑩	水素爆発抑制策
⑪	ケーブルマネジメント手法
⑫	ロボット一時保管および保守

3-4. 各要素技術の目標仕様

概要

- 前節で抽出した要求機能（表3-4-1に作業ロボットの要求機能の一例を示す）を基に、各要素技術における具体的な目標仕様を設定した。ここで設定した目標仕様を満足する要素技術（および装置類）の調査・検討を、次実施項目として実施する。
- システム構成装置の仕様は過去の実績等より仮定し、各調査機関が調査可能となるレベルまで要素技術の目標仕様を具体化する。この仮定した仕様は調査結果を踏まえて適宜見直す計画としている。
- 実際の調査では目標仕様より幅広く調査を行い、可能な限り多くの候補技術を確認する。

表3-4-1 例 作業ロボットの要求機能

要素技術：作業ロボットが該当する項目のみ抽出

No.	作業項目		必要装置	要求機能	要素技術
	大分類	小分類			
14	作業位置へのアクセス	走行機能	作業ロボット（クローラー）	<ul style="list-style-type: none"> ・50mm程度の凹凸を走行可能なこと。 ・14°程度のスロープを走行可能なこと。 ・塵埃，砂利，水たまり等の路面でも走行可能なこと。 	・作業ロボット
15		昇降機能	作業ロボット（昇降装置）	<ul style="list-style-type: none"> ・6m以上の高さにアクセス可能なこと 	・作業ロボット
16		位置決め	作業ロボット（アーム伸縮，各軸旋回）	<ul style="list-style-type: none"> ・位置精度：±10mm以内を目標とする。 ・床面上や他構造物上の切断物にアクセス可能であること。 ・廃棄物回収容器にアクセス可能であること。 	・作業ロボット
29	撤去作業（切断・把持等）	先端ツール交換	遠隔先端ツール交換装置	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操作で先端ツールの交換ができること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業ロボット ・先端ツール
30		工具交換	工具交換装置	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操作で切断工具等の消耗品の交換ができること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業ロボット ・先端ツール

作業ロボットはこれらの要求機能を満たすことを目標とする。

3-4. 各要素技術の目標仕様

目標仕様の設定結果

- 前節で抽出した下記要素技術に対して、目標仕様の設定を行った。

一例として
本資料で説明

- ① ロボット本体
- ② 先端ツール
- ③ 視認技術
- ④ ケーブル・ホース
- ⑤ マン・マシン・インターフェイス
- ⑥ 廃棄物容器等のハンドリング
- ⑦ 耐放射線性向上処置
- ⑧ 系統隔離および配管内部流体
- ⑨ 放射性ダストの飛散防止策
- ⑩ 水素爆発抑制策
- ⑪ ケーブルマネジメント手法
- ⑫ ロボット一時保管および保守

3-4. 各要素技術の目標仕様

① 作業ロボットの目標仕様

- 作業ロボットの目標仕様を設定した結果を表3-4-2に示す。
- 作業ロボット1台により全ての干渉物を撤去できることが望ましいが、各目標仕様を満足するために作業ロボットを複数台用意することが合理的な場合は、使用目的に応じて複数用意する。なお、その場合においても共通部分を可能な限り設け、共用可能な仕様を考慮すること。

表3-4-2 (1/2) 作業ロボットの目標仕様

分類	項目	目標仕様	方法例	備考
操作性	遠隔操作	遠隔操作により各作業が可能なこと。	-	
	ロボット操作性	R/B内走行やアームの操作性に優れ、長期間のオペレータの訓練を必要としない。	-	⑤マン・マシン・インターフェイスの調査項目とする。
アクセス性	ロボット寸法	ロボット寸法は、以下を目標とすること。 ・走行時：□3000xH3000mm以内 ・撤去作業時（平面寸法）：W3500xL4000mm以内（アウトリガー等を用いる場合を想定）	-	走行時：3号機R/B内西側通路のRHR配管およびAC配管が未撤去の状態でも西側通路を走行・旋回できることを条件に設定。AC配管・RHR配管以外の西側通路既存構造物は、別途撤去済みの前提。 撤去作業時：撤去作業エリアの寸法制約が最も厳しい3号機R/B内の南側通路 躯体とHCUの間隔より設定。
	走行機能	・50mm程度の凹凸を走行可能なこと。 ・14°程度のスロープを走行可能なこと。 ・塵埃、砂利、水たまり等の路面でも走行可能なこと。 ・目標作業効率：最長75mを片道1時間で走行可能なこと。	クローラ等	
	アクセス高さ	以下に示す各対象へのアクセス要求より、6m以上を目標とする。 (1)高さ3mの電源盤上部電線管までアクセスできること。 (2)高さ6mのケーブルトレイまでアクセスできること。 (3)高さ4.5mのRHR配管までアクセスできること。 (4)CRD挿入引抜配管(高さ5.5m)までアクセスできること。 (5)目標作業効率：10分以内に6m以上の対象物までアクセスできること。	昇降ユニット、 伸展アーム等	
作業性	ペイロード	以下に示す各対象の取扱重量の要求より、100kg以上を目標とする。 (1)電源盤・ケーブルトレイ：100kg以上を目標とする。 (2)RHR配管：100kg以上とする。ただし、RHR配管および遮蔽体については高重量であることから、撤去効率を考慮し可能な限り高ペイロードであることが望ましい。 (3)HCU：30kg以上を目標とする。	-	(1)(2)切断効率、撤去効率を考慮し設定した。 (3)撤去配管重量10kg+把持ツール20kgとして設定した。
	アーム位置決め精度	±10mm以内を目標とする。	-	各干渉物の把持・切断に必要なと考えられる位置決め精度とした。 CRD挿入引抜配管同士の間隔は127mmであり対象の中で最も狭隘だが、適切な視野を確保できれば±10mm程度の位置精度で十分作業可能と判断したため。

3-4. 各要素技術の目標仕様

① 作業ロボットの目標仕様

表3-4-2 (2/2) 作業ロボットの目標仕様

分類	項目	目標仕様	方法例	備考
環境	耐放射線性	累積線量500Gy以上	-	環境条件に関して満足することを原則とするが、センサ等の定期的な交換するほうが合理的な部品については、必ずしも本条件を満たす必要はない。
	想定運用年数	8年	-	
	作動外気温	-8~40℃	-	
	作動湿度	100%RH (40℃)	-	
	防水, 防塵	高度な汚染が想定される(ジェット噴流による除染が必要と想定される) 範囲: IP56 上記以外の範囲: IP54	-	
安全性	火災防止	油圧機器を用いる場合は、作動油等、火災防止を考慮すること。	-	アウトリガー等
	静止・走行時の安定性	干渉物の把持・切断の際、切断反力や撤去物の重量負荷を考慮し、装置重心を低くする等の静止時の安定策を施すこと。また、撤去物を把持したまま走行する場合は走行時の安定性を考慮し、上述の走行機能を撤去物を把持した状態で達成できること。	-	
非常時	故障時の回収	作業または移動中に機器が故障し、自走による帰還が困難な場合においても、低線量エリアへ機器を回収可能な手段を備えること。作業員が近づけないような高線量環境の場合は、他搬送機器等を用いた遠隔操作による回収を原則とする。また、回収作業において一時的に作業員の補助を必要とする場合は、被ばく低減のため可能な限り短時間での作業とする。	フォークリフトによる回収等	
実施作業	先端ツール交換	遠隔操作で先端ツールの交換ができること。 ・目標作業効率: 30min	ツールチェンジャ等	
	工具交換	遠隔操作で先端ツールの切断工具等の消耗品の交換ができること。 ・目標作業効率: 30min	ツールチェンジャ等	
	廃棄物搬送	・廃棄物回収容器の把持、蓋取り付け、搬送が可能なこと。 ・目標作業効率: 1時間以内に、廃棄物回収容器を廃棄物コンテナに収納できること。	-	⑥廃棄物容器等のハンドリングの調査項目とする。
	調査	干渉物の外観、寸法、線量の測定、周囲環境の調査ができること。	-	②先端ツールの調査項目とする。
	ダスト吸引	切断時にダストが発生する場合は、ダストを吸引可能であること。	-	⑨放射性ダスト飛散防止策の調査項目とする。
	切断	干渉物を切断することができること。	-	②先端ツールの調査項目とする。
	把持(干渉物)	干渉物を把持・搬送することができること。	-	②先端ツールの調査項目とする。
	把持(切断片)	床面上の切断片を把持・搬送することができること。	-	②先端ツールの調査項目とする。
	系統隔離	配管の系統隔離ができること。	-	⑧系統隔離および配管内部流体の調査項目とする。
	水素爆発防止	水素爆発防止処置ができること。	-	⑱水素爆発防止策の調査項目とする。
	ボルト締結解除	床面上およびHCUユニットに取り付けられているボルト(2面幅約10mm, 20mm)にアクセスできること。	-	②先端ツールの調査項目とする。
	バルブ操作	狭隘部に位置するバルブにアクセスできること。	-	②先端ツールの調査項目とする。

3-4. 各要素技術の目標仕様

3章まとめ

- 遠隔操作にて代表干渉物：「電源盤」、「ケーブルトレイ」、「RHR配管」、「HCU」を撤去する場合における前提条件を整理した。
- 代表干渉物を撤去するうえで想定される撤去手順概要を設定した。
- 想定撤去手順を行うにあたり必要となる主要装置を抽出することで、想定される遠隔システムを構成した。あわせて、各作業項目における要求機能をまとめた。加えて、抽出結果を技術ごとに分類し、調査の対象とする要素技術を抽出した。
- 上記要求機能に加え、遠隔システムを仮定することで各要素技術における具体的な目標仕様を設定した。
- ここで設定した目標仕様を満足する要素技術の調査・検討を、次実施項目として実施する。

4. 技術調査・検討

4.1 調査方法の策定

＜調査方法＞

- 下表に示す12個の要素技術に対し、国内外の技術や知見の調査を実施する。
- 調査対象は原則開発が完了しており、適用実績がある技術・製品・工法とする。
- 中国、ロシアの製品については安全保障上入手困難なため、調査対象外とする。
- 候補の中で、可能な限り目標仕様を満足することができるものを抽出する。
- 調査対象とする要素技術を下表に示す。

表4-1-1 調査対象要素技術とその調査内容の概要

	要素技術	調査内容の概要
①	作業ロボット本体	1F-3 R/B内の干渉物撤去作業に適した既存遠隔ロボット製品の調査
②	先端ツール	切断・把持方法等の先端ツールに適した技術やそれを実施する製品の調査
③	視認技術	作業ロボット走行時および干渉物撤去作業の監視時に使用する視認技術や、その技術を利用した製品の調査
④	ケーブル・ホース	ロボット本体を1F-3 R/B内で運用するうえで耐放射線性や敷設性の観点で適したケーブル・ホースの製品調査
⑤	マン・マシン・インターフェイス	遠隔操作性に関するマン・マシン・インターフェイス技術に関する調査
⑥	廃棄物容器等のハンドリング	撤去廃棄物の搬出を行うための廃棄物容器等のハンドリング技術に関する調査
⑦	耐放射線性向上処置	耐放射線性向上処置方法の調査
⑧	系統隔離および配管内部流体	PCVに接続した配管を切断する際、バウンダリ確保を目的として事前に行う系統隔離工法の調査
⑨	放射性ダストの飛散防止策	干渉物を切断撤去する際発生する放射性ダストの飛散防止策の調査
⑩	水素爆発抑制策	配管内に水素が残留している場合に行う爆発抑制策の調査
⑪	ケーブルマネジメント手法	作業ロボット本体の動きに追従するケーブルマネジメント手法、または無線による操作の調査
⑫	ロボット一時保管および保守	放射線環境下で使用する機器の保守方法、周辺環境への汚染拡大防止策に関する調査

4.1 調査方法の策定

<調査結果の評価方針>

- 調査結果を評価するにあたり評価指標を設定することで、総合的な判断を行う。
- 評価指標は目標仕様の達成度に加え、NDF殿の戦略プランの5つの基本的考え方である「安全」、
「確実」、「合理的」、「迅速」、「現場指向」を考慮して設定する。評価指標の設定結果を下表に示す。
- 各調査結果に対して本表に記載の項目で評価を行い、評価結果を比較して最適な手法・製品を検討する。

表4-1-2 評価指標の設定結果

考え方分類	評価指標	評価内容
-	目標仕様達成度	各目標仕様をどの程度達成可能であるか
安全, 確実, 迅速	技術的信頼度	実績の程度, リスクの程度, 開発要素の有無などを踏まえた技術的信頼度
合理的	汎用性	特定の作業や目的に限らず, 様々な作業, 目的に適用可能な汎用性を有しているか。
現場指向	現場作業適合性	高線量下であり作業員の立入可能時間が限られるため, 遠隔操作が主軸となる本現場作業への適合性は十分であるか。作業性（作業効率）, 操作性, 保守性等の観点で評価。
合理的	関連技術との親和性	本現場作業に適用される他の関連設備（技術）との親和性は十分であるか。（対象技術・工法・製品を用いるために他関連設備（技術）の仕様が犠牲になることはないか。犠牲になるとしたらそれはどの程度か）
合理的, 迅速	入手性	コストおよび納期の観点で入手性に優れているか。
-	総合評価	上記各評価項目を総合的に判断し, 総合評価を行い, 比較対象との優劣を付ける。

4.2. 調査結果の報告・評価

<調査結果概要>

- 各要素技術における調査結果の概要を表4-2-1に示す。

表4-2-1 (1/2) 調査対象要素技術とその調査結果の概要

	要素技術	候補抽出結果概要
①	作業ロボット本体	作業ロボット完成品に加え、アームとプラットフォームそれぞれの調査を行った。アームは遠隔操作用アーム、産業用ロボット、協調ロボットを抽出した。プラットフォームはクレーン車、フォークリフト、高所作業車を抽出した。
②	先端ツール	切断・把持、その他作業の調査を行った。切断はチップソーやせん断工具等、把持はグリッパやマグネット等、その他作業としてロータリハンマーやバケットによる方法を抽出した。
③	視認技術	主要視認技術として耐放射線性カメラと汎用カメラを抽出した。視認補助技術としてリアルタイムシミュレーション、俯瞰視認技術、ステレオスコープ、3D側域センサを抽出した。
④	ケーブル・ホース	ケーブルは一般産業用ケーブル、原子力用ケーブルを抽出した。ホースは無補強ホース、補強入りホース、被覆ホースを抽出した。コネクタは遠隔コネクタ、ワンタッチコネクタを抽出した。
⑤	マン・マシン・インターフェイス	コントローラとしてジョイスティック、ゲームコントローラ、M/Sを抽出した。作業ロボット操作時の作業負荷低減を目的として、自動運転機能、両腕協調制御、フォースフィードバックを抽出した。

4.2. 調査結果の報告・評価

<調査結果概要>

表4-2-1 (2/2) 調査対象要素技術とその調査結果の概要

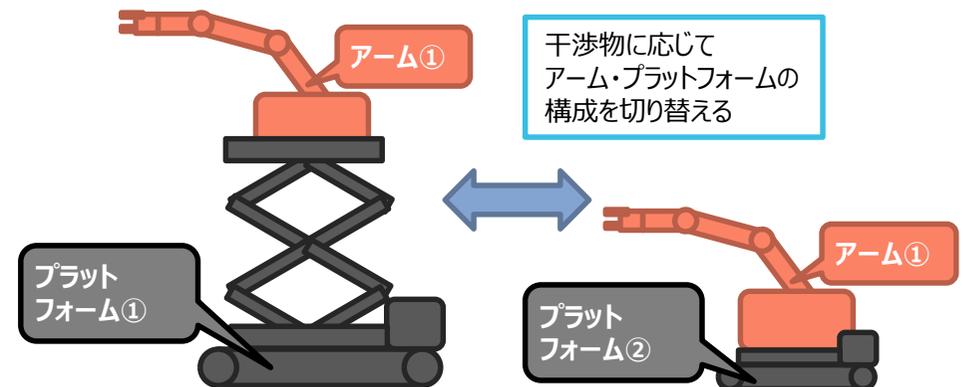
	要素技術	調査結果
⑥	廃棄物容器等のハンドリング	R/B内で使用する容器としてフレコンバッグと内容器(鋼製)を、この容器をR/B外まで搬送する方法として作業用ロボット、それ以外の方法を抽出した。
⑦	耐放射線性向上処置	耐放射線性が低い部品に対する向上処置として、部分遮蔽、線源からの距離の確保、材質変更を抽出した。
⑧	系統隔離および配管内部流体処置	残留水確認方法として超音波探査法を抽出した。系統内の排水方法としては既存ドレンラインとホットタッピングによるものを抽出した。配管内除染についてはフラッシングと化学除染を抽出した。バウンダリ構築の方法としては凍結工法、インフレイタブルバッグ法、材料充填法、圧着法を抽出した。
⑨	放射性ダストの飛散防止策	ダスト飛散防止策として作業ハウス、局所排気設備、ダスト飛散抑制材、散水、せん断による切断を抽出した。
⑩	水素爆発抑制策	水素爆発抑制策として窒素パーシ、水素検知、火花の発生を考慮した穿孔法を抽出した。
⑪	ケーブルマネジメント手法	作業ロボットをR/B内で走行させる際のケーブルマネジメント手法について調査を行い、搭載式ケーブルリール、固定式ケーブル、無線通信を抽出した。
⑫	ロボット一時保管および保守	一時保管・保守エリアおよび対象機器の設計について調査を行い、エリアに要求される設備やユーティリティ、機器の設計に関しては部品ユニット化や防水化等の方法を抽出した。

以降のページにて調査結果・評価結果を①～⑫の順に示す。

4.2. 調査結果の報告・評価

<①作業ロボット本体の調査方針>

- 作業ロボット1台により全ての干渉物を撤去できることが望ましいが、各目標仕様を満足するために作業ロボットを複数台用意することが合理的な場合は、使用目的に応じて複数用意する。なお、その場合においても共通部分を可能な限り設け、共用可能な仕様を考慮する。
- 共用可能部分を検討するため、調査に先立ち以下に示す作業ロボット構成を仮定し、最適なロボット構成の評価を行った。
 - ケースA：多機能の作業ロボット 1 台
 - ケースB：アーム+プラットフォームの組み合わせによる構成
 - ケースC：各使用目的に特化した作業ロボット複数台による構成なお、ケースBの場合は下図に示すとおり、干渉物に応じてアーム・プラットフォームの構成を切り替えることで、操作性を向上し、かつ共通部分を設けることも視野に入れ検討する。
- 上記 3 ケースを前述の評価指標で比較評価した。



ケースBの作業ロボット構成

4.2. 調査結果の報告・評価

<①作業ロボット本体の調査方針>

- 各作業ロボット構成における評価結果を表4-2-2に示す。

凡例

○：目標を達成できる見込みあり

△：条件付きで目標を達成可能な見込み

×：目標の達成は困難

表4-2-2 (1/2) 各作業ロボット構成における評価結果

	ケースA：作業ロボット1台	ケースB：アーム+プラットフォーム	ケースC：作業ロボット複数台
目標仕様 達成度	× 高さ6mまで到達し重量物の撤去を行い、かつ低所における繊細な作業を一台の作業ロボットで行うことは困難	○ 干渉物に応じてアームとプラットフォームを切り替えることで、高所にも低所にも対応させることができる	○ 複数のロボットを用意することで様々な干渉物や作業に対応可能で、目標仕様を達成することができる
技術的信 頼度	○ 作業ロボット1台のため、他のケースに比べ技術的信頼度は高い	△ アームとプラットフォームそれぞれの技術的信頼度は高いが、組み合わせることで開発要素が発生する	○ 各作業ロボットの技術的信頼度は高いが、協調作業を行う場合はリスクが発生する
汎用性	× 作業ロボット1台で様々な干渉物や作業に対する対応は困難	○ 干渉物に応じてアームとプラットフォームを切り替えることで汎用性を持たせることができる	○ 複数のロボットを用意することで様々な干渉物や作業に対応可能
現場作業 適合性	○ 作業ロボット1台であるため、保守は他と比べて容易であり、長期間の訓練も不要	△ 作業ロボット1台よりは保守の手間が増えるが、共通部分を持たせることで、複数台導入する場合よりは保守の手間と保管スペースを抑えることができる。また、アーム、プラットフォームごとの訓練が必要なため、ロボット1台よりも訓練の負担は増える	× 複数台の作業ロボットを保守する手間がかかり、保管スペースも広く必要になる。また、各作業ロボットごとに訓練が必要

4.2. 調査結果の報告・評価

<①作業ロボット本体の調査方針>

凡例

○：目標を達成できる見込みあり

△：条件付きで目標を達成可能な見込み

×：目標の達成は困難

表4-2-2 (2/2) 各作業ロボット構成における評価結果

	ケースA：作業ロボット1台	ケースB：アーム+プラットフォーム	ケースC：作業ロボット複数台
関連技術との親和性	× 作業ロボット1台で重量物の切断等を行い、かつ系統隔離等の繊細な作業を行うことは困難	○ アームとプラットフォームの組み合わせの選択肢が増えるため、ペイロードと位置精度を兼ね備えたアームを選択することができ、各工法への親和性が高い	○ 各使用目的に応じたロボットを用意するため、各工法への親和性が高い
入手性	○ 作業ロボット1台であるため入手性は高く、コストは他と比べて低くなる	△ 作業ロボット1台よりはコストが上がるが、 共通部分を持たせ、市販品を組み合わせることでコストを抑える ことは可能	× 作業ロボット複数台の導入および維持にコストがかかる
総合評価	× 作業ロボット1台で様々な干渉物や作業に対する対応は困難と考えられる	○ 使用目的に応じてアームとプラットフォームの組み合わせを変更することで、様々な作業に対応できる	× 対象に特化したロボットを複数台用いると、各ロボットの利用機会が少なく、訓練時間のほか、導入/維持にかかるコスト、保守の観点でも非効率。

アーム+プラットフォームの組み合わせが最適と評価し、**アームとプラットフォームの調査を行うこととした。**

4.2. 調査結果の報告・評価

<①作業ロボット本体の調査結果（アーム）>

- 作業ロボット構成はアーム+プラットフォームとし、プラットフォームに設置した状態で遠隔操作が可能なアームの調査を行った結果、用途別の分類では以下の3種に分類された。
 - 特定作業用ロボットアーム
 - ✓ 原子力施設向け等、特定の目的で使用することを前提としたロボットアーム
 - 産業用ロボットアーム
 - ✓ 量産工場等、汎用的に様々な用途で使用されることを前提としたロボットアーム
 - 協調ロボットアーム
 - ✓ 人が立ち入る範囲で使用することを前提とした汎用ロボット



特定作業用アーム



産業用ロボット



協調ロボット

4.2. 調査結果の報告・評価

<①作業ロボット本体の評価結果（アーム）>

- ロボットアームの評価結果を表4-2-3に示す。

凡例

○：目標を達成できる見込みあり

△：条件付きで目標を達成可能な見込み

×：目標の達成は困難

表4-2-3 (1/2) ロボットアームの評価結果

	特定作業用ロボットアーム	産業用ロボットアーム	協調ロボットアーム
目標仕様 達成度	○ ペイロード100kg程度，位置精度共に適切なものを選択可能で， 原子力施設用のアームであれば耐放射線性に優れる。	△ ペイロード100kg程度，位置精度共に適切なものを選択可能だが，一般仕様品は耐放射線性を考慮されていない。	× 人と共に作業をする前提のため干渉物との接触時等の動作に信頼性が高いが，最大でも ペイロードが25kg程度しかなく，目標仕様の達成は困難。
技術的信 頼度	△ 特定作業用のため流通量は少なく，技術的信頼度は他と比べて劣る。ただし実績豊富なものであれば信頼度は高いといえる。	○ 世の中に幅広く流通しており，生産台数が多いため技術的信頼度は高い。	○ 同左
汎用性	○ 一般的に 使用目的に応じてカスタマイズが可能 なため，様々な作業や目的に適用可能	△ 先端ツールを交換することにより様々な作業は可能であるが， カスタマイズは困難 なため，特定作業用ロボットアームと比べると汎用性は劣る。	× ペイロードが限定されることから使用可能な先端ツールも限られるため，汎用性は劣る。
現場作業 適合性	○ 原子力施設用のアームであれば 放射線下の使用を前提 としたものとなるため，遠隔操作性を含めて現場作業適合性は高い。	△ 一般産業用であり，放射線，汚染を考慮された構造ではないため保守性等は劣る。また，本来ティーチングして自動で動作させる目的が主であるため，遠隔操作性も特定作業用と比べ劣る。	△ 同左

4.2. 調査結果の報告・評価

<①作業ロボット本体の評価結果（アーム）>

凡例

○：目標を達成できる見込みあり

△：条件付きで目標を達成可能な見込み

×：目標の達成は困難

表4-2-3 (2/2) ロボットアームの評価結果

	特定作業用ロボットアーム	産業用ロボットアーム	協調ロボットアーム
関連技術との親和性	○ 一般的にペイロードに対する本体重量が軽く、プラットフォームの選択肢が増える。	△ 一般的にペイロードに対する本体重量が重く、プラットフォームが限定される。	× ペイロードが小さく、全体の作業性低下の要因となる
入手性	△ 専用設計/受注生産品につき一般産業用と比べて長納期かつ高価	○ 一般産業用途のため短納期かつ安価	○ 同左
総合評価	○ ペイロード、位置精度共に目標仕様を満たすことができ、現場適合性に優れる。しかし特定作業用のため長納期かつ高価であり、入手性に劣る。	○ ペイロード、位置精度共に目標仕様を満たすことができるが、現場適合性の点では特定作業用に劣る。ただし、入手性については特定作業用と比べ圧倒的に優れる。	× ペイロード不足で有効な作業効率が望めない

「特定作業用ロボットアーム」、「産業用ロボットアーム」いずれも干渉物撤去の目的に適用可能であり、評価結果や要素試験結果等を踏まえ、最適なアームを選択する方針とする。

4.2. 調査結果の報告・評価

<①作業ロボット本体の調査結果（プラットフォーム）>

- 作業ロボット構成はアーム＋プラットフォームとし、プラットフォームの調査を行った。
- 低所作業用は汎用クローラにアームを搭載することが可能であることから、難易度が高い高所作業のプラットフォームを中心に調査した。
- 想定される高所作業時の高さ：6mに到達可能な高所作業用の調査を行った結果、以下の3種に分類された。
 - ▶ クレーン車
 - ✓ ブームを延伸し、先端に取り付けられたフックで重量物を吊り上げることができる車両。一般的に屋外で使用されるため寸法が大きい。
 - ▶ フォークリフト
 - ✓ 先端に取り付けられたフォークを上下させることで、貨物を搬送することを目的とした車両。屋内で使用されるものも多く、一般的に寸法に対する可搬重量が高い。
 - ▶ 高所作業車
 - ✓ 人を昇降させることを目的とした車両。一般的に人が数名乗れる程度の可搬重量。



クレーン車



フォークリフト



高所作業車

4.2. 調査結果の報告・評価

<①作業ロボット本体の調査結果（プラットフォーム）>

- 調査の結果，クレーン車，高所作業車は調査した範囲では以下の観点で目標仕様の達成が困難であることがわかった。
 - アームを搭載するだけのペイロード（約2ton）と，アクセス可能高さ6mの確保が困難。
 - アクセス可能高さ6mとペイロード約2tonを確保した場合，建屋内を走行可能な寸法(□3000mm以内)に収めることが困難。
- フォークリフトに関しては，アクセス可能高さ，ペイロード，外形寸法を全て達成可能な製品を調査できた。
- 以上より，高所作業向けのプラットフォームはフォークリフトが最適と評価した。
 - 課題として，フォークリフトは静的安定性はあるものの，動的安定性（切断時の反力等）の確保が必要となることが挙げられる。
（必要に応じアウトリガーやカウンターウェイトを追加することで対応は可能）

4.2. 調査結果の報告・評価

<②先端ツールの調査結果>

- 先端ツールは、切断、把持作業と、バルブ操作等の特殊作業から先端ツールに要求される機能を抽出し、以下の項目に分類して行った。
 - 切断
 - 把持
 - 特殊作業（バルブ操作等）
- 先端ツールは作業ロボットのペイロードや取り合い形状に依存することから、前述の作業ロボットの調査結果を受け、**ツールチェンジャによる接続あるいは把持させて使用することを前提**とし、評価を行った。
- 各先端ツールは干渉物によって寸法、材質、板厚等が異なるため、**複数用意することを考慮し**、評価を行った。

4.2. 調査結果の報告・評価

＜②先端ツールの調査結果＞

- 切断はチップソーやせん断工具等、把持はグリッパやマグネット等、その他作業としてコンクリートはつりを行うロータリハンマーや、切断粉を回収するバケット等の方法を抽出した。
- 各干渉物ごとに最適な撤去方法は異なることから、先端ツールは複数用意し、各干渉物に対して適した切断ツール、把持ツール、特殊作業ツールを使用する。
- RHR配管および遮蔽体は厚板(約40mm)であることからチップソーによる切断が最適と評価したが、1F R/B内で厚板構造物の撤去実績が無いことから、切断作業性を検証する必要がある。



チップソー



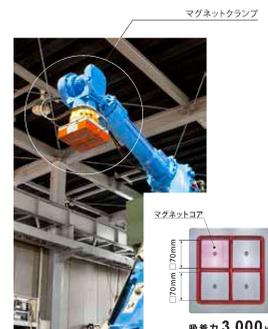
グリッパ



ロータリハンマー



せん断・圧碎工具



マグネット



バケット

4.2. 調査結果の報告・評価

<③視認技術の調査結果>

- 作業ロボット走行時や干渉物撤去作業時の遠隔操作において必須となるカメラと、視認性を補助する技術（視認補助技術）に関する調査を行った。
- カメラに関しては、先端ツール用と周辺状況監視用で小型カメラとPTZカメラを使い分け、また空間線量率により汎用品と耐放射線性を使い分けることが適切と評価した。
- 視認補助技術は「ステレオスコープ(立体視)」、「3D側域センサ(LiDAR)」、「俯瞰視認技術(アラウンドビューモニタ)」、「リアルタイムシミュレーション」を抽出した。いずれも導入により作業ロボットの操作性の向上が期待できる。
- ただし、過剰な機能は操作の煩雑化、保守作業の増加を招くことから、操作性向上に寄与する程度を実操作を模擬した要素試験により評価する必要がある。



ステレオスコープ



3D側域センサ



俯瞰視認技術

4.2. 調査結果の報告・評価

<④ケーブル・ホースの調査結果>

- ケーブル・ホースはロボット本体や付属機器の電源ケーブルや油圧・空気圧ホースに使用されるものとし、「ケーブル」、「ホース」、「コネクタ」の3種に分類して調査を行った。
- 調査結果として、以下を抽出した。
 - ケーブル : 一般産業用ケーブル, 原子力用ケーブル
 - ホース : 無補強ホース, 補強入りホース, 被覆ホース
 - コネクタ : ねじ込み式コネクタ, ワンタッチコネクタ
- ケーブルについては目標仕様の累積線量が500Gyであることから、被覆がテフロン等の耐放射線性の低い材質を除き、塩化ビニル(5000Gy程度)等の一般産業用ケーブルでも十分な耐放射線性を有する。そのため、一般的に1MGyレベルの耐放射線性を有するが入手性に難有の原子力用よりも、**一般産業用ケーブルのほうが適切と評価した。**
- ホースについては、それぞれ**耐摩耗性, 曲げ半径について一長一短であり, 使用箇所に応じて使い分けることが適切と評価した。**
- コネクタについては、高頻度で着脱を行うコネクタはワンタッチコネクタを用い、着脱頻度が少ないコネクタに関してはねじ込み式を用いる等、**使用箇所に応じて使い分けことが適切と評価した。**

4.2. 調査結果の報告・評価

<⑤マン・マシン・インターフェースの調査結果>

- 作業ロボット走行時および撤去作業時のオペレータの作業負荷低減を目的として、複数のマン・マシン・インターフェイス技術を組み合わせることを想定して調査を行った。
- マン・マシン・インターフェイスは、「コントローラ」と「視認・触覚補助技術」に分類して調査を行った。
 - ▶ コントローラに関しては、「ジョイスティック」、「ゲームコントローラ」、「M/S (Main / Secondary)」を抽出した。
 - ▶ それぞれ遠隔操作室の環境(手袋着用義務の有無, 空間広さ)や作業・訓練時間を考慮し、最適なコントローラを選択することが適切と評価した。
- 視認・触覚補助技術は「自動運転機能」、「両腕協調制御」、「フォースフィードバックまたは触覚フィードバック」を抽出した。いずれも導入により作業ロボットの操作性の向上が期待できる。
 - それぞれ導入可能であるならば組み合わせることが有効である。
 - ただし、③視認補助技術と同様、過剰な機能は操作の煩雑化、保守作業の増加を招くことから、操作性向上に寄与する程度を実操作を模擬した要素試験により評価する必要がある。



ジョイスティック



ゲームコントローラ



M/S

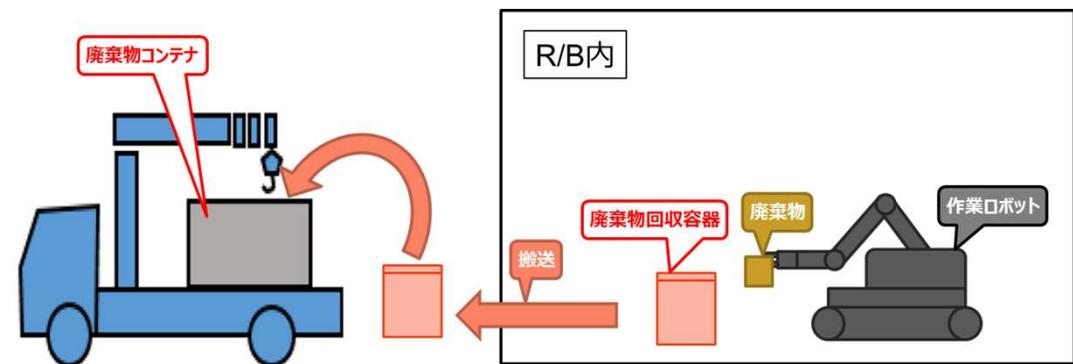
4.2. 調査結果の報告・評価

<⑥廃棄物回収容器等のハンドリング技術の調査結果>

- R/B内で撤去した干渉物は左下図に示す**廃棄物コンテナ**と呼ばれる鋼製角型容器に収容し保管される。
 - 廃棄物コンテナは約□2mとR/B通路内での取り回しが容易でないことから、R/B内では同コンテナに収納可能なサイズの仮の容器に収納し、別途廃棄物コンテナに収納するほうが合理的であると考えられる。
- このR/B内で使用する仮の容器を「**廃棄物回収容器**」と定義し、以下の項目について調査した。
 - 廃棄物回収容器の仕様
 - 建屋内における廃棄物回収容器の搬送方法



廃棄物コンテナ(東電HD殿HPより)



廃棄物回収容器の定義

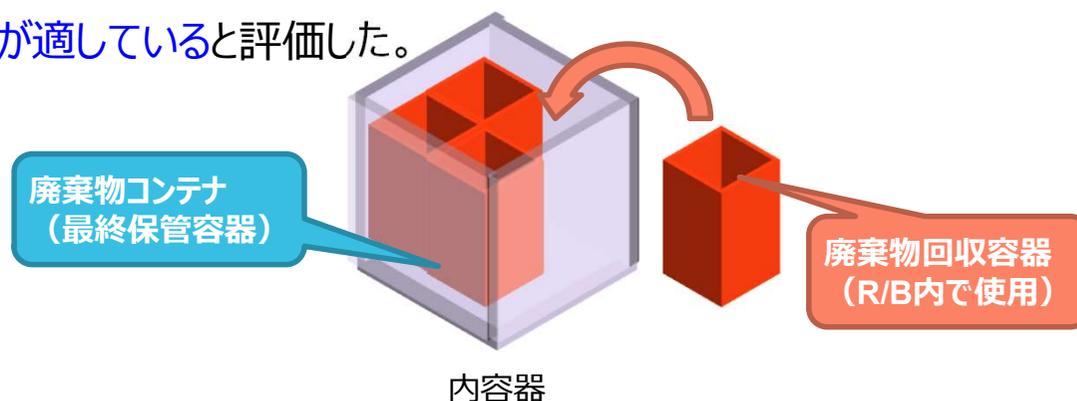
4.2. 調査結果の報告・評価

<⑥廃棄物回収容器等のハンドリング技術の調査結果（廃棄物回収容器の仕様）>

- 廃棄物回収容器の仕様について調査を行った結果、以下の2種を抽出した。
 - フレコンバッグ
 - ✓ 撤去物が鋭利な場合、破れる恐れがある。また、廃棄物コンテナの形状に最適化されていないため隙間が生じ、収納効率に劣る。また、遠隔操作上の取り扱いが困難。
 - 内容器（鋼製）
 - ✓ 鋼製のため損傷リスクが低く、廃棄物コンテナへの収納効率も高い。
- 従って、内容器（鋼製）が適していると評価した。
- 建屋内における廃棄物回収容器の搬送方法として、以下の2種を抽出した。
 - 作業ロボットによる搬送
 - 作業ロボット以外の搬送装置による搬送
- ペイロード(目標仕様100kg)の観点で作業ロボットによる搬送は困難。（少量しか搬送できない）
- プラットフォームに接続しけん引する場合、建屋内の寸法制約から建屋内通路のコーナー部等で装置取り回しが困難。
- 従って、作業ロボット以外の搬送装置による搬送が適していると評価した。



フレコンバッグ



内容器

4.2. 調査結果の報告・評価

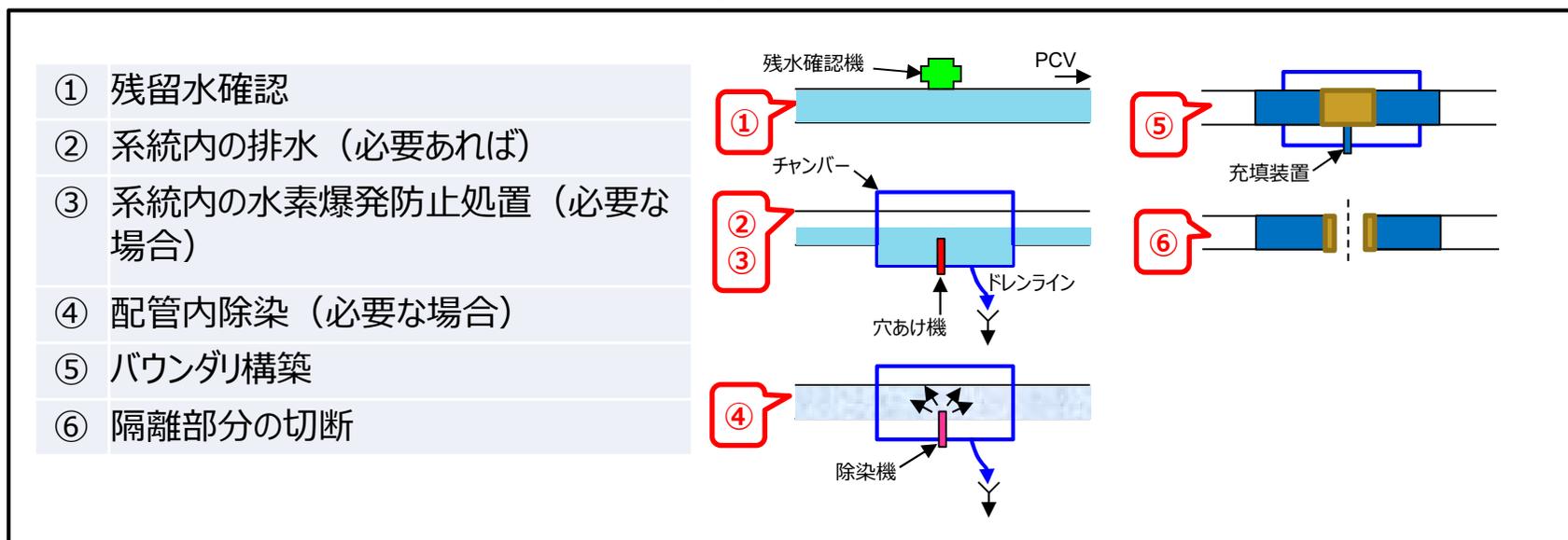
<⑦耐放射線性向上処置の調査結果>

- 一般的にロボット制御部やセンサ部は耐放射線性が低いが、本事業の目的は可能な限り既存技術を用いる方針であることから、耐放射線性が低い、あるいは考慮されていない部品に対する耐放射線性向上処置の調査を行った。
 - 対象部品は、目標仕様にて設定した累積線量500Gyを満足しないと想定される電子部品を伴う制御部、センサ部、カメラ等の部品とした。
- 以下の3種を調査結果として抽出した。
 - 部分遮蔽
 - 線源からの距離を確保
 - 材質変更
- 材質変更については、部品内の放射線に弱い材質を変更するため部品を特注する必要があるが、汎用品の利点である入手性を損ねてしまうことから、今回の使用目的に適さないと評価した。
- 「部分遮蔽」および「線源からの距離を確保」については、どちらも汎用品に対して適用可能であるため有効な方法と評価した。
 - これらの手法の選定方法については、耐放射線性向上処置対象部品の性質(機能や形状)や配置変更可否によるため、部品に応じ適切な方法を用いることが望ましい。

4.2. 調査結果の報告・評価

<⑧系統隔離工法および配管内部流体の処置の調査方針>

- 系統隔離工法および配管内部流体の処置は、大口径配管であるRHR配管(500A)と、小口径配管であるCRD挿入引抜配管(HCU)(1B, 3/4B)を対象とし、下図の想定実施作業から以下の項目に分類して調査を行った。
 - 残留水確認
 - 系統内の排水
 - 配管内除染
 - バウンダリ構築
- 汎用性や運転習熟等の観点から両配管共に共通の方法が望ましいが、配管の口径が大きく異なるため、対象とする配管口径に適した気密性能を考慮し、異なる方法も可として調査を行った。



配管の想定隔離方法 (令和3年4月27日中間報告会資料(本事業)より)

4.2. 調査結果の報告・評価

<⑧系統隔離工法および配管内部流体の処置の調査・評価結果>

- 残留水確認方法については配管外面から確認可能な方法として、超音波探査法を抽出した。本工法により残留水の有無を確認することが可能と評価した。
- 系統内の排水方法については、「ドレンラインからの排水」、「気密を確保できる工法により穿孔（ホットタッピング）により排水」を調査結果として抽出した。
 - HCUについてはドレンラインにアクセス可能なため、ドレンラインから排水が適切と評価した。
 - RHR配管についてはドレンラインへのアクセスが困難なため、ホットタッピングにより穿孔し、新しく排水ラインの構築後、排水することが適切と評価した。
- 配管内除染については、フラッシング（水洗浄）、化学除染を抽出した。
 - フラッシングは系統がシンプルではあるが除染能力が低い。化学除染は系統が複雑となり、配管に対する腐食性も考慮する必要があるが、除染能力は高い。
 - 配管の除染は、非常時に作業者の作業補助を可能とすることを目的としているため、線量測定の結果に応じて、作業上問題ない範囲の線量であれば除染を行う必要は無い。
 - 今後現場の調査が進み、除染の必要有無に応じ、最適な方法を選ぶことが望ましい。

4.2. 調査結果の報告・評価

<⑧系統隔離工法および配管内部流体の処置の調査結果>

- 系統隔離工法（バウンダリ構築）の方法について調査を行った結果，以下の各工法を抽出した。
 - 凍結工法
 - ✓ 配管にフリーズジャケットを取り付け冷却し，凍結させることでバウンダリを構築する。凍結中に配管を切断し，切断部を溶接などにより閉止する工法
 - インフレイタブルバッグ法
 - ✓ 配管に小径穿孔を行い，当該開口から堰となる拡張可能なインフレイタブルバッグを投入し，バッグ内部に発泡材を注入しバウンダリを構築する工法
 - 材料充填法
 - ✓ 配管に小径穿孔を行い，当該開口から発泡ウレタン等の発泡材を注入し，バウンダリを構築する工法
 - 圧着法
 - ✓ 配管を圧着させることでバウンダリを構築する工法



凍結工法



インフレイタブルバッグ法



材料充填法



圧着法

4.2. 調査結果の報告・評価

<⑧系統隔離工法および配管内部流体の処置の評価結果>

- 各バウンダリ構築工法の各配管への適合性と、評価結果を下表に示す。
- インフレイタブルバッグ法、材料充填法、圧着法について、適用可能な見通しであると評価した。

各バウンダリ構築工法の各配管への適合性

	凍結工法	インフレイタブルバッグ法	材料充填法	圧着法
HCU(CRD挿入・引抜配管) 3/4B, 1B	△ 小口径配管の凍結に適しているが、切断後ただちにプラグ処置が必要で、遠隔による作業ではリスクを伴う。	× 小口径配管内ではバッグが広がらない可能性がある	△ 内面形状によらず充填可能であるため、小口径の配管であれば問題なく充填可能。ただし、手順が多く、硬化時間等も考慮する必要があり、対象本数を考慮すると作業時間がかかる。	△ 気密性能と再現性（信頼性）の評価が必要であるが、圧倒的に作業性が良い。
RHR配管 500A, 600A	× 大口径配管は中心部まで凍結させることが難しく、適さない。	○ バッグが堰となることで、大口径配管内でもバウンダリを構築することが可能。	△ 大口径配管は充填材が流れてしまうため、粘度の調整等の難度があがるが、水平配管であれば可能な可能性はある。	× 大口径配管は圧着が困難。
評価結果	遠隔操作による施工が困難であり、今回の使用目的には適さない。	RHR配管の閉止に適した工法であると考えられる。	CRD挿入引抜配管の閉止は可能な見通しであるが、作業時間に難有。RHR配管への適用も可能な見込み。	気体に対しては実績がないが、作業効率が圧倒的に高く、約280本のCRD挿入引抜配管に対して適用可能な場合はメリットが大きい。

今回の使用目的は、配管径・圧力、環境いずれも各工法が過去に実施した実績と異なるため、凍結工法以外の各工法において、要求気密性能等を満足できるか検証が必要である。

4.2. 調査結果の報告・評価

<⑨放射性ダスト飛散防止策の調査結果>

- 干渉物の切断・撤去作業に伴い発生する放射性ダストは、周辺環境への汚染拡大防止、被ばく防護の観点から飛散防止策を図る必要がある。
- ダスト飛散防止策として、以下を抽出した。
 - 散水
 - ✓ 切断等の作業前に対象物表面を湿らす程度に散水し、湿式にて撤去を行うことでダストを抑える方法
 - ダスト飛散抑制材
 - ✓ 飛散抑制材を塗布することで構造物等の表面についている汚染物質を飛散抑制材に付着させる方法
 - せん断による切断
 - ✓ せん断による切断は、グラインダ等の方法と比べるとダスト発生量が少ない
 - 作業ハウス
 - ✓ 側面、天井部をシートで覆う仮設ハウス
 - 局所排気設備
 - ✓ 作業エリアで発生するダスト等を含む空気を吸気し、本体内部にあるフィルターを通し、清浄な空気を排気する装置



散水装置



ダスト飛散抑制材



せん断ツール



作業ハウス



局所排気設備

4.2. 調査結果の報告・評価

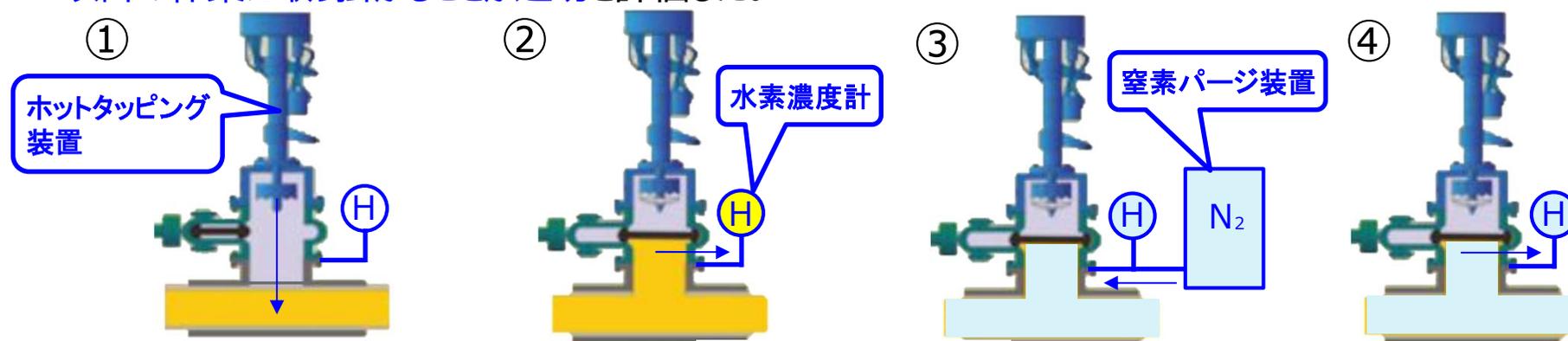
<⑨放射性ダスト飛散防止策の調査結果>

- 一般的なダスト飛散防止策である作業ハウスおよび局所排気の設置が、作業環境上問題ない場合は、それらの設置によりダスト飛散防止を図ることが望ましい。
- しかし高所での遠隔作業などそれらの設置が困難な場合は、可能な範囲で部分的にパーテーション、カバー等を設け作業環境およびその周辺を閉空間とするとともに、他のダスト飛散防止策（散水、ダスト飛散抑制材、せん断による切断等）を図る。
- ダスト自体の発生を抑制する散水、ダスト飛散抑制材、せん断による切断は、各干渉物における汚染水の回収可否、ダスト飛散抑制材の施工可否、せん断による切断可否等を考慮し、適用可能な方法を用いる。
- ダスト飛散防止策を考慮する際は、上記の各評価結果を考慮し、干渉物ごとに適切な対策を行うことが望ましい。

4.2. 調査結果の報告・評価

<⑩水素爆発抑制策の調査結果>

- 水素爆発抑制策の調査は、大口径配管であるRHR配管と、小口径配管であるCRD挿入引抜配管(HCU)を対象として行った。
- 水素爆発抑制対策として「窒素パージ」、「水素検知」、「火花の発生を考慮した穿孔」を組合せて適用する方策を抽出した。
- 以下に具体的な手順概要を示す。
 - 穿孔時の水素爆発を防止するため、火花の発生しない低速回転の穿孔方法により配管に穿孔する。この際、バウンダリを維持した状態で窒素パージシステムを追設するため、ホットタッピングにより穿孔する。
 - 新設されたシステムにより、水素濃度計にて水素濃度を計測する。
 - 窒素パージ装置により窒素パージを行う。
 - 水素濃度が燃焼濃度以下となったことを水素濃度計により確認する。
- 水素残留可能性がある配管に対しては、上記工法を組み合わせ水素爆発の危険性がないことを確認後、以降の作業に取り掛かることが適切と評価した。



水素爆発抑制策の手順

4.2. 調査結果の報告・評価

<⑫ロボット一時保管および保守の調査方針>

- ロボットを含むシステム構成機器の一時保管および保守は、原則管理区域内で実施する。一時保管、保守において配慮すべき事項を以下に示す。
 - 周辺環境へ機器由来の汚染を拡大させない対策が必要
 - 機器自身に対して、保管中の劣化防止が必要
 - 短時間で容易に保守作業が行えるよう各対象機器の設計に配慮が必要
- 上記の対策案を、以下の項目に分類して調査を行った。
 - 場所（一時保管エリア、保守エリア）
 - 対象機器設計への反映事項（一時保管、保守に配慮した設計要求事項）

4.2. 調査結果の報告・評価

<⑫ロボット一時保管および保守の調査・評価結果>

【場所（一時保管エリアおよび保守エリア）】

- 一時保管エリア，保守エリアに関して調査結果を分類すると，以下のとおりとなる。
 - R/B外で，作業エリアから近いエリア
 - 既設電源や揚重機があるエリア
 - 保管中の劣化防止策として，保管機器にはシート養生を行う
- 実績では，大物搬入口の使用制限によりR/B内の低線量エリアに保守エリアを設けている。大物搬入口が使用可能であれば，建屋外の既設電源がある建屋に空間を確保する計画となっている。
- いずれにおいても，一時保管，保守エリアに関しては1F構内の工事状況に応じて決定されるため，エリア検討時には上記を考慮して決定するのが望ましい。

【対象機器設計への反映事項（一時保管，保守に配慮した設計要求事項）】

- 一時保管，保守に配慮した設計要求事項として，以下の候補を抽出した。
 - 接続部のユニット化による部品交換性の向上
 - 防水化による除染作業の効率化
 - 折り畳み，分解，伸縮等による保管寸法の縮小化
- 上記各項目は，装置構造や主要機能に影響を及ぼさない可能な範囲で組み合わせ適用することが望ましいと考える。

4.2. 調査結果の報告・評価

＜調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ＞

- 本章の調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめを下表に示す。
- これらの調査結果を考慮し遠隔システムを構成する。

調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ

	要素技術	ロボットシステムに対する反映事項
①	作業ロボット本体	特性作業用ロボットアームまたは産業用ロボットアームと、プラットフォームによる組み合わせとする。
②	先端ツール	先端ツールは複数用意し、各干渉物に対して適した切断ツール、把持ツール、特殊作業ツールを使用する。
③	視認技術	<ul style="list-style-type: none"> ・撤去対象物および作業場所の空間線量率によりカメラを使い分ける。 ・ステレオスコープ、3D側域センサ、リアルタイムシミュレーション、俯瞰視認技術の導入により作業ロボットの操作性向上が期待できる。
④	ケーブル・ホース	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルは一般産業用ケーブルを用いる。 ・ホース、コネクタについては使用箇所に応じてそれぞれ無補強ホース、補強入りホース、被覆ホースとねじ込み式コネクタ、ワンタッチコネクタを使い分ける。
⑤	マン・マシン・インターフェイス	<ul style="list-style-type: none"> ・コントローラは作業環境、ロボット構成により適したものを使用する。 ・自動運転機能、両腕協調制御、フォースフィードバックまたは触覚フィードバックの導入により、作業ロボットの操作性向上が期待できる。
⑥	廃棄物容器等のハンドリング	<ul style="list-style-type: none"> ・R/B内では保管容器に収納可能な鋼製角形容器を用い、干渉物収納後は保管容器(廃棄物コンテナ)にそのまま投入する。 ・廃棄物回収容器は作業ロボット以外の搬送装置による搬送とする。

4.2. 調査結果の報告・評価

<調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ>

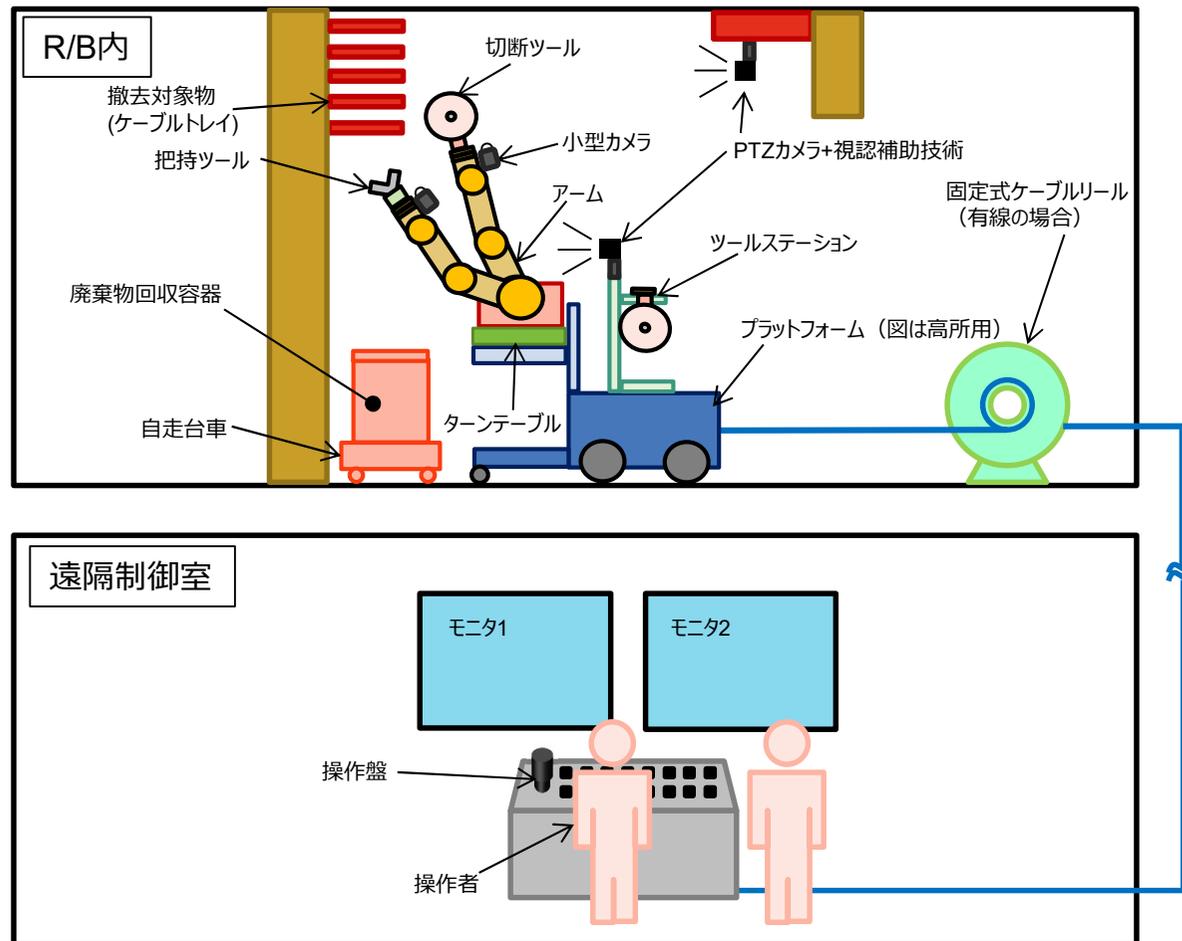
調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ

要素技術	ロボットシステムに対する反映事項
⑦ 耐放射線性向上処置	耐放射線性が低い部品は、その性質(機能や形状)や配置変更可否により、部分鉛遮蔽を施すか、線源から離れた位置に配置する。
⑧ 系統隔離工法および配管内部流体処置	<ul style="list-style-type: none"> ・残留水確認方法：超音波探傷法を適用。 ・系統内排水：ドレンラインまたはホットタッピングにより実施。 ・系統隔離工法：インフレイタブルバッグ法、圧着法、材料充填法のうち適切な方法をそれぞれRHR配管、CRD挿入引抜配管(HCU)に行い、バウンダリを構築する。
⑨ 放射性ダストの飛散防止策	可能な限り局所排気および作業ハウスを設置し、加えて散水・ダスト飛散抑制材・せん断による切断のうち適用可能な方法を用いる。
⑩ 水素爆発抑制策	窒素パーシ、水素検知、火花の発生を考慮した穿孔の組み合わせにより水素爆発を抑制する。
⑪ ケーブルマネジメント手法	環境や遠隔システム構成に応じ、バッテリー搭載が可能で無線化が可能場合は無線通信を行い、無線化が困難な場合は有線にて固定式ケーブルリールを採用する。
⑫ ロボット一時保管および保守	<ul style="list-style-type: none"> ・1F構内の工事状況に合わせ、R/B外の作業エリアまでの距離、既設電源や揚重機の有無、シート養生を考慮し保管・保守エリアを設定する。 ・機器の詳細検討時に、部品ユニット化、防水化、保管寸法の縮小化といった調査結果を反映する。

4.3 調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ

<遠隔システム構成の検討結果（遠隔システム構成の概念図）>

- 前項で示したロボットシステムに対する反映事項を考慮し，遠隔システム構成を検討した。
- 下図に遠隔システム構成の概念図を，次頁以降の表に構成要素の概要を示す。



遠隔システム構成の概念図

4.3 調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ

<遠隔システム構成の検討結果（構成要素概要）>

分類	構成要素	実施作業	概要
作業 ロボット	アーム	撤去作業	ペイロードを100kg程度有し、繊細な作業も可能なロボットアームを2基有する。ツールチェンジャにより先端ツールを交換することで様々な作業に対応する。
	プラットフォーム	作業位置へのアクセス	高所用、低所用を用意し、撤去対象物に応じてプラットフォームを切り替える。高所用はフォークリフトとし、高さ最高6mのケーブルトレイまでアームを到達可能とする。
	ターンテーブル		プラットフォームを撤去対象物に平行に配置できない場合、ターンテーブルにより双腕アームの位置を調整する。
先端 ツール	ツールステーション	先端ツールの交換	複数の先端ツールを収納可能なラックで、遠隔操作による先端ツールの交換を可能にする。
	切断ツール	切断作業	アーム先端に取り付け切断作業を行うツール。
	把持ツール	把持作業、撤去物の収納	アーム先端に取り付け把持作業を行うツール。
	特殊作業ツール	調査、撤去作業	アーム先端に取り付けボルト締結解除、コンクリートはつり、切断粉回収、線量計測等を行う専用ツール。
	水素爆発防止 & 系統隔離ツール	水素爆発防止、系統隔離作業	水素爆発防止処置および系統隔離作業を行うツール。

4.3 調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ

<遠隔システム構成の検討結果（構成要素概要）>

分類	構成要素	実施作業	概要
視認システム	小型カメラ	作業状況 / 周辺状況の把握, 外観調査	先端ツールに取り付ける小型カメラ。撤去対象物および作業場所の空間線量率により, 必要に応じ耐放射線性カメラにする。
	PTZカメラ		独立視野の確保および装置全体の監視のために設置するカメラ。作業場所の空間線量率により, 必要に応じ耐放射線性カメラにする。
	視認補助技術		リアルタイムシミュレーション, 俯瞰視認技術, ステレオスコープ, 3D側域センサ等のロボット操作者の作業負荷の低減を目的とした視認補助技術。
ケーブルマネジメント	ケーブルリール	ケーブル送出・巻取制御	有線にて接続する場合は, 固定式ケーブルリールを設ける。無線にて接続する場合は不要。
廃棄物	廃棄物回収容器	撤去物の収納～搬送	R/B内で撤去した干渉物を仮収納する容器。最終容器である廃棄物コンテナにそのまま投入可能な構造とする。また, 廃棄物回収容器は自走機能を有する台車に搭載する。
マン・マシン・インターフェイス	操作盤	作業ロボット操作	作業ロボットを遠隔操作する際, 操作者の作業負荷の低減を目的としたフォースフィードバックや触覚フィードバック等のマン・マシン・インターフェイスを採用した操作盤を使用する。

<課題抽出方法>

- 現場適用性を考慮した干渉物遠隔撤去システムの仕様を定めるため、前章で示した遠隔システム構成における現状の課題を抽出する。
- 課題の抽出は、遠隔操作による撤去作業の一連の流れである以下の分類で抽出する。
 - 作業位置へのアクセス
 - アーム遠隔操作
 - 系統隔離作業
 - 撤去作業（切断，把持等）
 - 撤去物の収納～搬送
 - 装置保守・保管
- 抽出した課題のうち、作業模擬による検証が必要な項目については、要素試験を実施する方針とする。

4.3 調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ

<課題の抽出結果>

- 課題の抽出結果を下表に示す。

分類	No.	課題	解決策	要素試験
作業位置へのアクセス	1	高所作業において、フォークリフトは静的安定性はあるものの、動的安定性（切断時の反力等）の確保が必要。	高所における切断撤去作業の要素試験を行い、動的安定性の確保が必要であれば、必要に応じアウトリガーやカウンターウェイトの追加を検討する。	要
アーム 遠隔操作	2	1F建屋内において、遠隔操作による高所での干渉物撤去作業実績が無く、2基のアームの協調制御による作業の成立性・妥当性が不明確。	要素試験により遠隔操作による高所での干渉物撤去作業を行い、システムの成立性・妥当性を実証する。	要
	3	調査結果にて作業性の向上が見込めると評価した視認補助技術やマン・マシン・インターフェイス技術の有効性確認が必要。	遠隔操作による干渉物撤去要素試験を左記の技術を用いて行うことでそれらの有効性を評価する。	要
系統隔離	4	1F建屋内において、遠隔操作による系統隔離作業実績が無く、HCUのCRD挿入・引抜配管、RHR配管の最適な系統隔離工法の検証が必要。	HCUのCRD挿入・引抜配管、RHR配管、それぞれに対するバウンダリ構築の要素試験により、シール性能等を検証する。	要
	5	上記で確立したバウンダリ構築方法が遠隔操作により行うことが可能か課題がある。	要素試験結果を踏まえ遠隔操作の系統隔離ツールを設計し、3Dモデル上（3Dシミュレーション）でアクセス性・作業性・視認性等の確認を行う。	不要

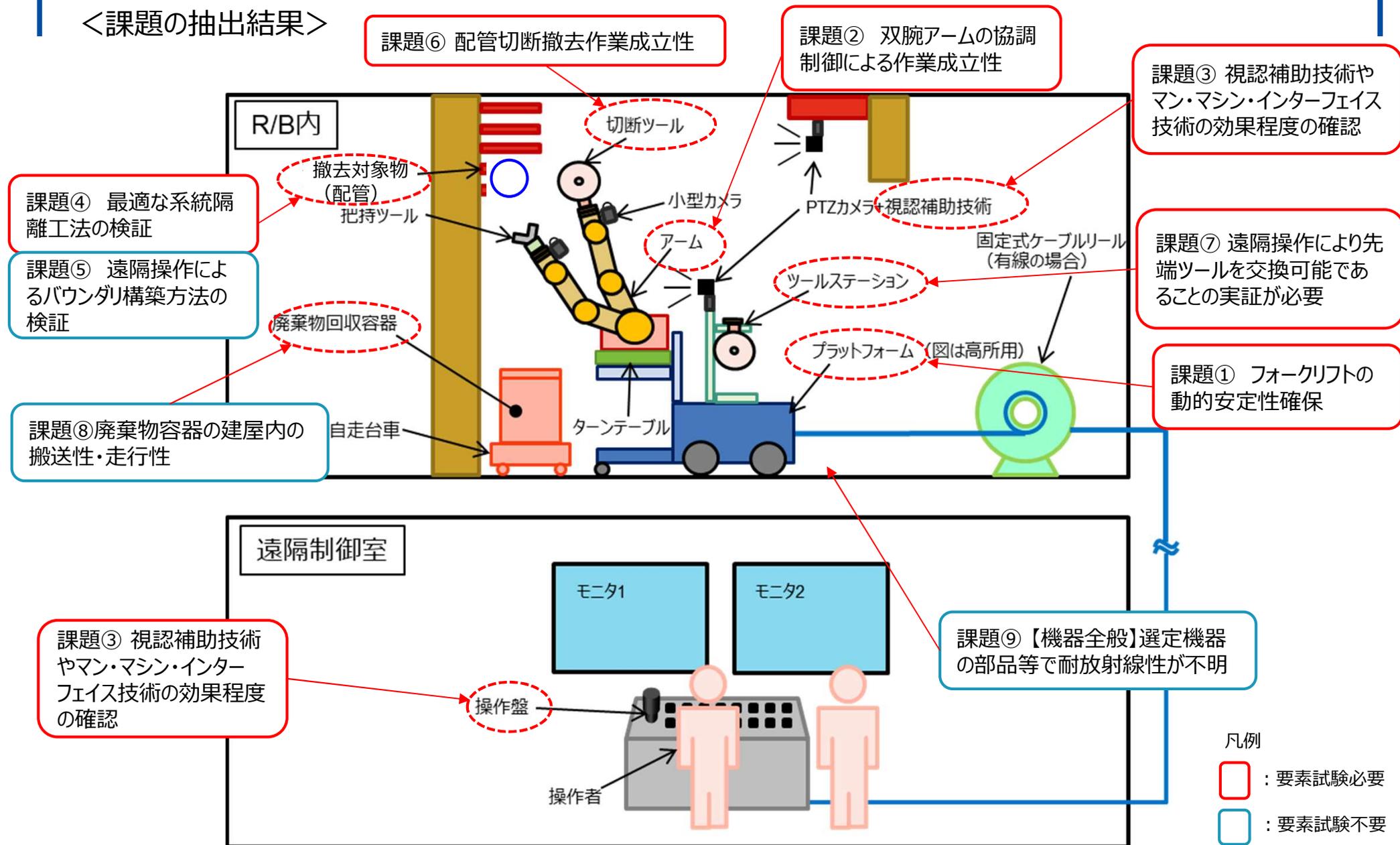
4.3 調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ

<課題の抽出結果>

分類	No.	課題	解決策	要素試験
撤去作業 (切断, 把持等)	6	1F建屋内において、遠隔操作による厚板鋼板、配管の切断・撤去実績が無く、かつ火花の発生を極力抑える要求があることから、提案した遠隔システム構成での作業の成立性・妥当性が不明確。	火花の発生の抑制を考慮し、RHR配管および遮蔽体切断撤去の要素試験を行い、成立性・妥当性を検証する。	要
	7	様々な干渉物を撤去するため先端ツールを交換するが、遠隔操作により先端ツールを交換可能であることの検証が必要。	要素試験を行い、遠隔操作により先端ツールを交換可能であることを検証する。	要
撤去物の 収納～搬送	8	廃棄物容器の建屋内の搬送性・走行性の確認が必要。	1F建屋内での実績を含む、多くの原子力施設における作業実績があることから、現時点で要素試験実施の必要は無く、今後の設計進捗によるシステム構築時の試運転で確認する。	不要
装置保守・ 保管	9	選定機器部品等で耐放射線性が不明なものがある。	必要に応じ、部分遮蔽や線源からの隔離により対策が可能であるため、現時点では照射試験は行わない。今後詳細設計が進み、かつ使用環境が明確となり耐放射線性の実証が必要になった際に照射試験を実施する方針とする。	不要

4.3 調査結果を踏まえたロボットシステムに対する反映事項のまとめ

<課題の抽出結果>



課題の説明図

5. 要素試験

5.1 適用性要素試験計画

【要素試験概要】 各要素試験の詳細は次頁以降に示す。

#	試験名称	試験概要	検証項目	対象課題#	備考
①	高所作業性 (操作性) の検証 (A)	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 提案した遠隔システム構成案にて遠隔操作による高所での干渉物撤去作業を行い、作業性、操作性の検証を行う。 ➢ 作業ロボットは、入手可能な範囲で極力実機計画仕様と同様なものとする。 ➢ 本試験では、汎用的観点から高所干渉物撤去の遠隔作業性を確認することを目的とする。そのため、対象干渉物は、汎用的なケーブルトレイ（およびケーブル）を代表として選定する。 ➢ 試験Aでは、産業用ロボットアームを用いる。 	高所での干渉物撤去時の遠隔作業性（操作性） ➢ 装置構成および制御機能の妥当性 ➢ 作業効率の妥当性 ➢ 作業時の視認性 ➢ 付加機能（※）の有用性 ※ 両腕協調制御，リアルタイムシミュレーション，衝突防止機能等	課題1 課題2 課題3 課題7	JAEA殿樫葉遠隔技術開発センターでの実施
②	高所作業性 (操作性) の検証 (B)	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 特定作業用のロボットアームを用いた，試験Aと同様の検証を行い，遠隔作業性，操作性において，試験Aで用いる産業用ロボットアームを基にした構成との比較評価を行う。 ➢ 特殊用途用ロボットアームは既存のデモ品を用いる。そのため，試験場所や設備に制約があり，試験Aとまったく同様の条件では実施が困難。そのため，最低限アームおよび先端ツールの操作において大きな差異の生じないような試験構成とする。 	➢ 上記同様 + 産業用ロボットアーム（試験A）との比較評価	課題1 課題2 課題3 課題7	国内メーカー施設で実施
③	RHR配管の 切断検証	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 高難度と想定されるRHR配管（500A）および遮蔽体の遠隔切断を行い，適した切断ツール，把持・固定方法の選定および作業手順の検証を行う。 ➢ 市販の産業用ロボットおよび複数の切断ツールを用いて，遠隔操作を模擬する。 ➢ 試験実施時期の都合により，①，②の試験とは別に行う。 ➢ RHR配管および遮蔽体は部分的に模擬したものをを用いる。 	➢ RHR配管および遮蔽体の切断に適した切断ツール，把持・固定方法の選定および作業手順の検証	課題6	JAEA殿樫葉遠隔技術開発センターで実施

5.1 適用性要素試験計画

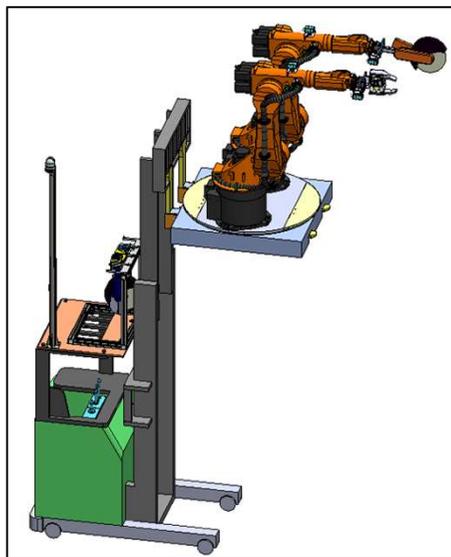
【要素試験概要】（続き）各要素試験の詳細は次頁以降に示す。

#	試験名称	試験概要	検証項目	対象課題#	備考
④	系統隔離工法の妥当性検証 (A)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 系統隔離は、重要度および技術的難易度が高いため、複数の工法に対して検証試験を行う。本試験では、大口径配管 (RHR) , 小口径配管 (HCU) それぞれに対して、以下の工法を検証する。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 大口径配管：インフレイタブルバッグ法 ✓ 小口径配管：圧着法 ➤ 本試験は各工法によるシール機能など工法の妥当性を検証するものであるため、先端ツール（治具）のみを用いた試験とし、作業ロボットによる遠隔操作は実施しない。 ➤ 試験で用いる対象配管は、RHR配管およびCRD挿入・引抜配管の部分模擬体とする。 	系統隔離工法の妥当性 <ul style="list-style-type: none"> ➤ シール性能 ➤ 信頼性（再現性） ➤ 作業効率 	課題4	海外で実施
⑤	系統隔離工法の妥当性検証 (B)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 上記試験Aとは別の系統隔離工法について、試験Aと同様の妥当性検証を行う（試験条件等も試験Aと同様）。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 大口径配管：材料充填法 ✓ 小口径配管：材料充填法 	上記同様	課題4	海外で実施

5.1 適用性要素試験計画

<試験計画・目的概要>

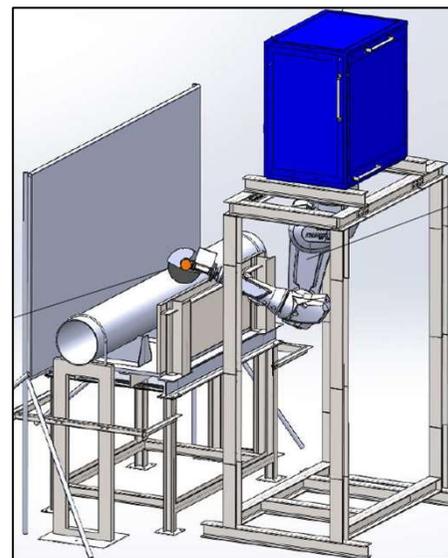
- ① 高所作業性（操作性）の検証（A）：産業用ロボットアーム使用
 - 計画した遠隔システム構成による代表的な高所干渉物に対する遠隔撤去作業性を確認する。
- ② 高所作業性（操作性）の検証（B）：特定作業用ロボットアーム使用
 - 産業用ロボットアーム(A)と特定作業用ロボットアーム(B)の作業効率の差異を確認する。
- ③ RHR配管の切断作業性検証
 - 選定した切断方法によるRHR配管，遮蔽体の切断可否，作業効率を確認する。
- ④ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法
- ⑤ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法
 - 各工法のRHR配管，CRD挿入引抜配管(HCU)に対する適合性を確認し，最適な工法を選定する。



①高所作業性(操作性)の検証(A)
試験装置



②高所作業性(操作性)の検証(B)
試験装置



③RHR配管の切断作業性検証
試験装置



④⑤系統隔離工法の妥当性検証
試験装置
(試験Aのインフレイタブルバッグ法)

5.1 適用性要素試験計画

<要素試験アウトプット>

要素試験により得られるアウトプットと、実機仕様への反映方針を下表に示す

#	試験名称	試験アウトプット	実機への反映方針
①	高所作業性（操作性）の検証（A）	1.産業用ロボットアーム(A)と特定作業用（原子力関連施設向け）ロボットアーム(B)による撤去作業効率の差異	1.要素試験により得られた撤去作業効率とロボットアーム入手性を考慮し、適切なアームを選定する
②	高所作業性（操作性）の検証（B）	2.計画した遠隔システム構成による代表的な高所干渉物に対する遠隔撤去作業性 3.遠隔操作による先端ツールの交換作業性 4.俯瞰カメラおよび視認補助機能による視認性 5.マン・マシン・インターフェイスにおける各種付加機能の有用性	2.要素試験により得られた撤去作業性に関する確認結果を実機仕様へ反映する 3.ツール交換作業性の確認結果を実機仕様へ反映する 4.カメラ配置および作業性向上の見込める視認補助機能を適用する 5.作業性向上の見込めるマン・マシン・インターフェイス付加機能を適用する
③	RHR配管の切断検証	1.選定した切断方法による対象物（RHR配管，遮蔽体）の切断可否，作業効率 2.選定した切断方法による火花の発生程度および抑制策の効果 3.遮蔽体およびRHR配管の最適な撤去手順	1.RHR配管，遮蔽体に適した切断方法を選定する 2.火花の発生抑制策を実機仕様へ反映する 3.実環境における遮蔽体およびRHR配管の撤去手順を構築する
④	系統隔離工法の妥当性検証（A）	1.大口径配管，小口径配管それぞれにおける最適な系統隔離工法	1.要素試験の結果最適と判断した工法を，実環境における系統隔離手順とし，撤去手順を構築する
⑤	系統隔離工法の妥当性検証（B）		

<目的>

- 計画した遠隔システム構成を用いて、代表的な高所干渉物に対する遠隔切断・撤去作業を行い、装置構成、両腕協調制御機能の妥当性および遠隔作業性・操作性を検証する。
- また、本試験を通じて実工事へ適用するための課題を抽出し、改善策を実機仕様へ反映する。

<主要試験構成>

- 作業ロボット
（両腕協調制御機能等搭載）
- 先端ツール
- 俯瞰カメラ
- 廃棄物回収容器・廃棄物搬送台車
- 模擬切断撤去対象物
（模擬ケーブルトレイ）

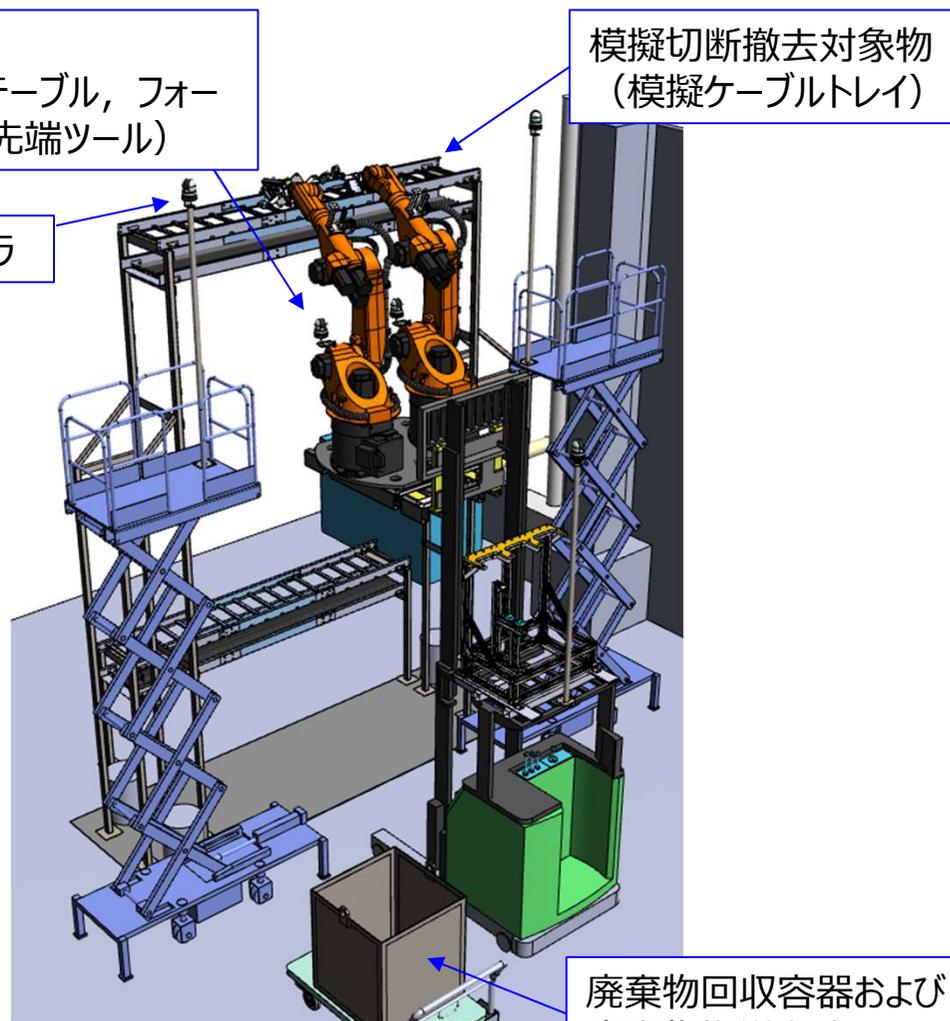
<試験実施場所>

- 国内メーカー：試験機開発／調整
- 海外メーカー：制御機能開発／調整
- 檜葉遠隔技術開発センター：ご視察

作業ロボット
（産業用ロボットx2，ターンテーブル，フォークリフト，ツールステーション，先端ツール）

模擬切断撤去対象物
（模擬ケーブルトレイ）

俯瞰カメラ



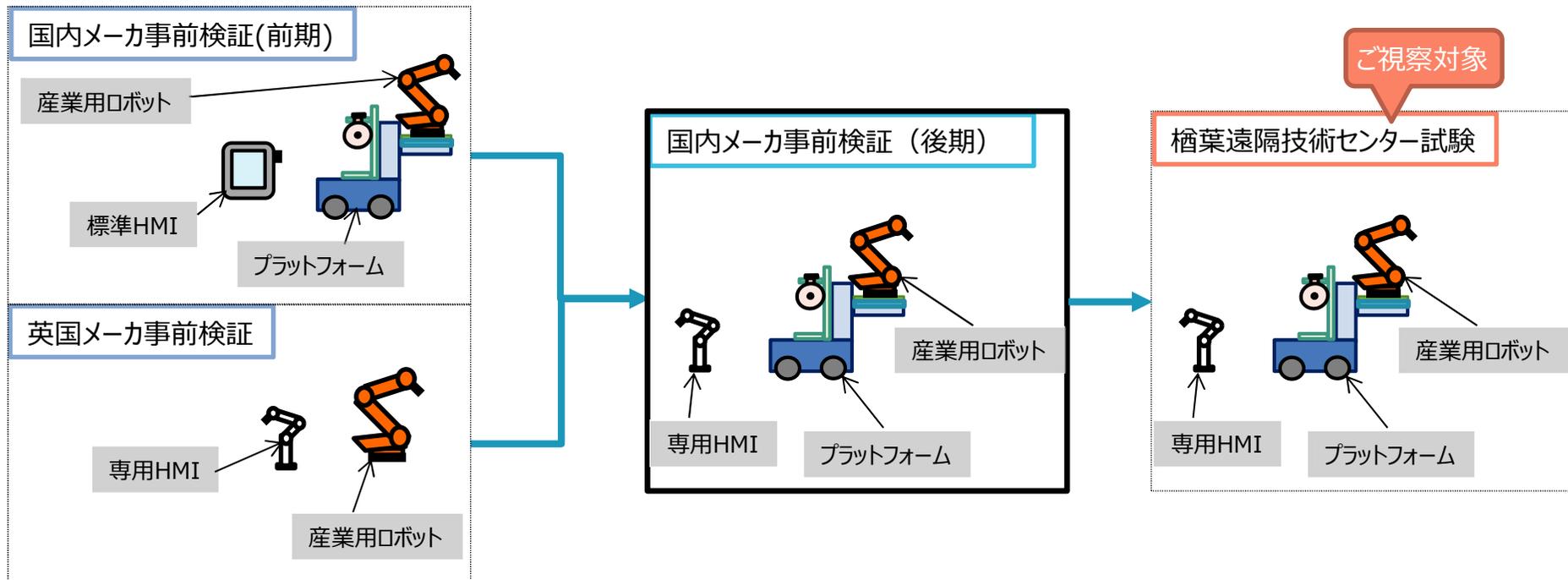
廃棄物回収容器および
廃棄物搬送台車

試験設備全体イメージ

5.2 試験結果（高所作業性の検証A）

<高所作業性の検証(A)試験の流れ>

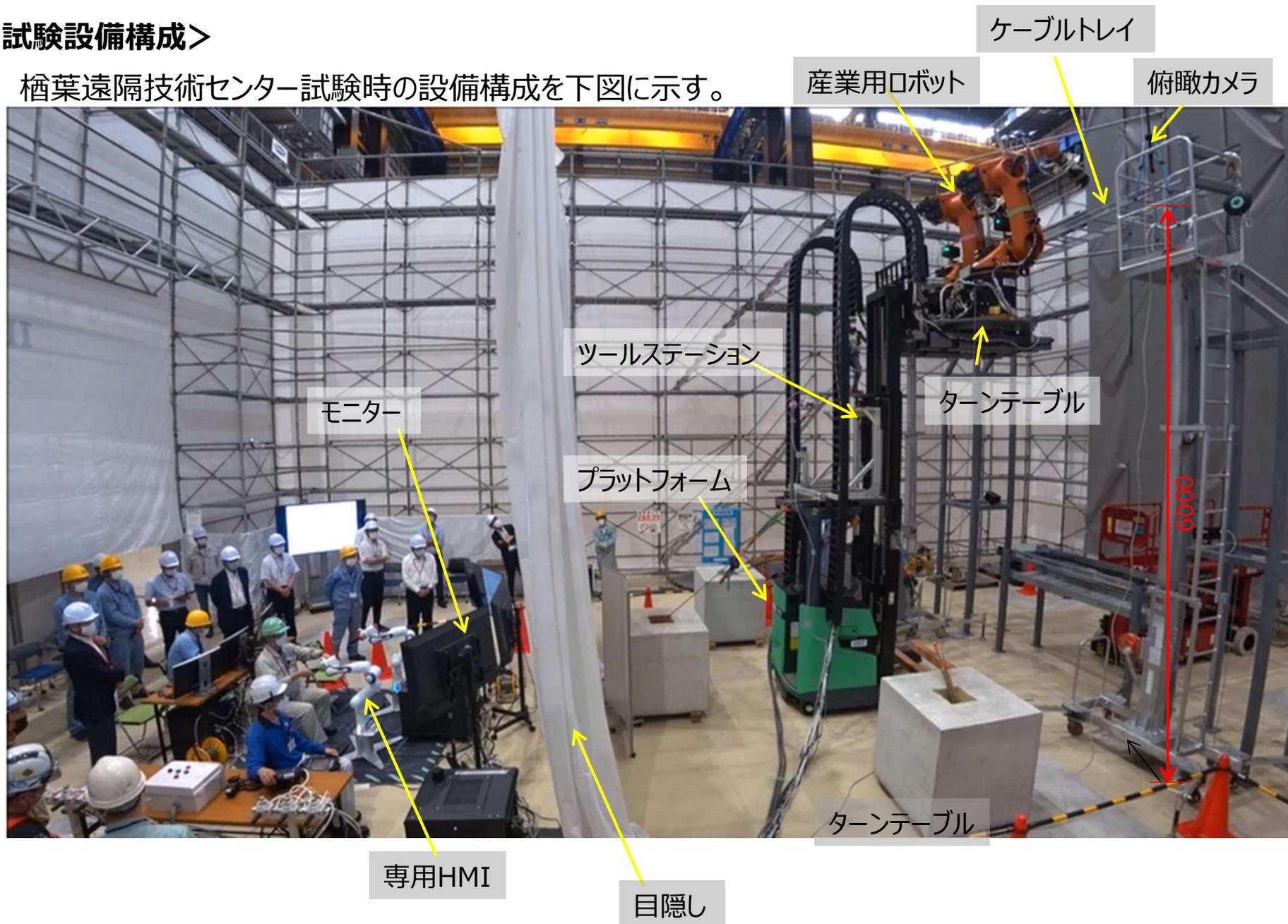
- 国内メーカー事前検証(前期)にて、プラットフォームに産業用ロボットを搭載し、標準HMIにて高所のケーブルトレイ切断作業の検証を実施済み。
- 並行して英国メーカー事前検証にて、専用HMIにて産業用ロボットの操作性検証を実施済み。
- 国内メーカー事前検証(後期)にてプラットフォームに産業用ロボットを搭載し、専用HMIにより高所のケーブルトレイ切断作業の検証を実施。
- 楢葉遠隔技術センターに移し、専用HMIを用いた高所のケーブルトレイの切断作業をご視察いただいた。



5.2 試験結果（高所作業性の検証A）

<試験設備構成>

- ・ 檜葉遠隔技術センター試験時の設備構成を下図に示す。



5.2 試験結果（高所作業性の検証A）

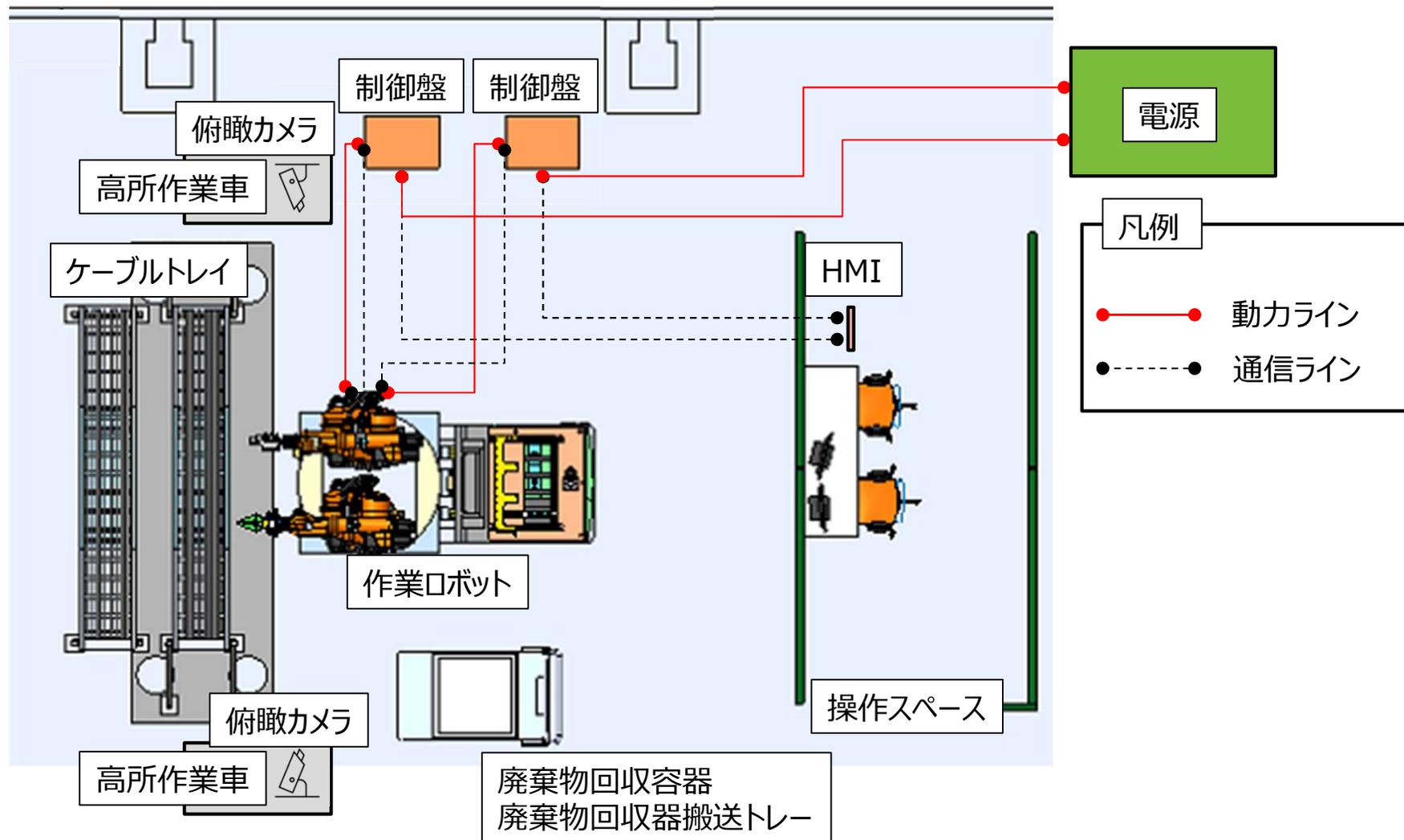
<試験設備構成（IHI提案のHMI・付加機能）>

- ・ 檜葉遠隔技術センター試験時の設備構成（操作スペース）を下図に示す



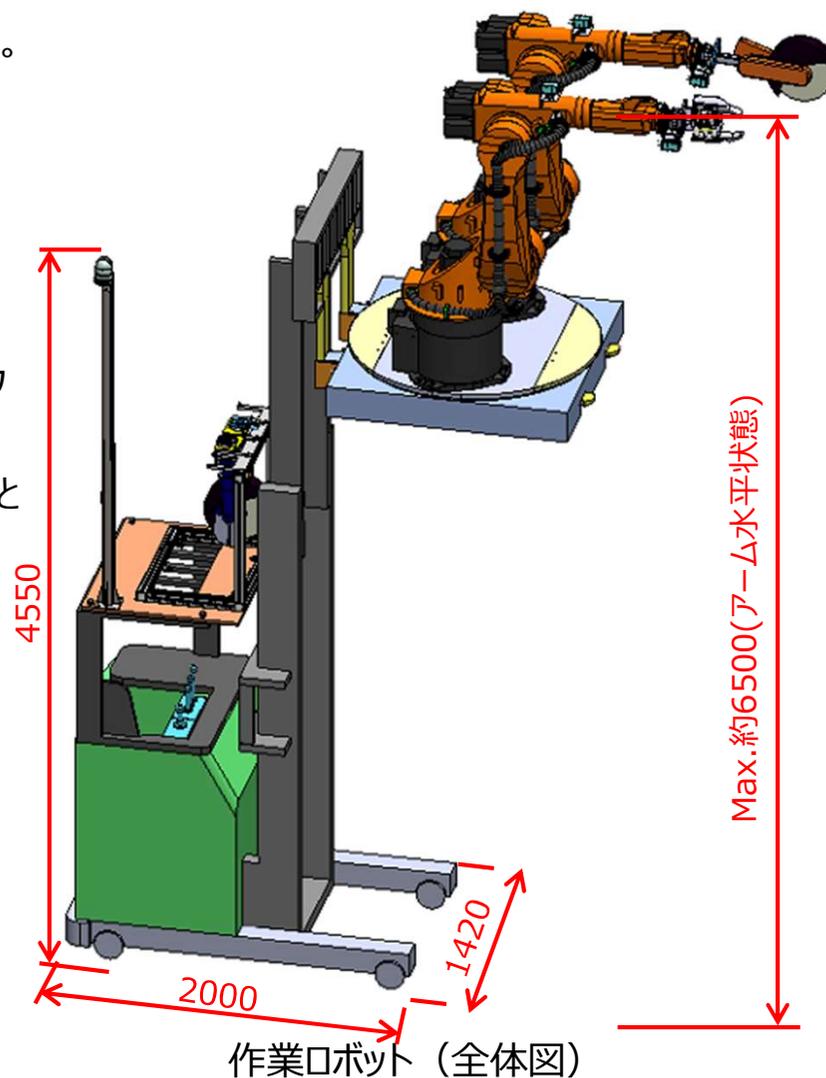
<試験設備構成>

- ・ 榎葉遠隔技術センター試験時における設備構成を下図に示す。



<作業ロボット（試験装置）>

- 先端ツールを用いて、R/B内の高所干渉物（ケーブルトレイ／ケーブル）の撤去作業を行うため試験装置に以下の構成／機能を持たせる。
 - 産業用ロボット：KUKA社製 6軸ロボット KR60-3（定格可搬重量：60kg）
 - 電動フォークリフト：TOYOTA 8FBR30
 - アーム先端部にはツールチェンジャを設け、フォークリフトに設置したツールステーションにて先端ツールの遠隔交換を可能とする
 - ロボットアーム2基のベースとしてターンテーブルを設置し、フォークリフトの向きによらずロボットアームの方向転換を可能とする
 - ロボットアームには、小型のカメラを設置し、別途設ける俯瞰カメラと合わせて作業時の視野を確保する



<ツールチェンジャ>

- 一般の産業用ロボットで広く用いられている市販のツールチェンジャを採用



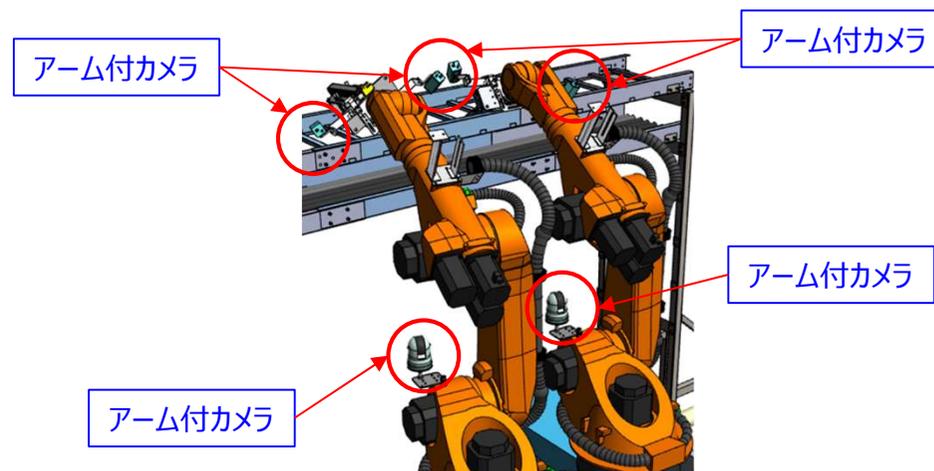
ツールチェンジャ

<先端ツール>

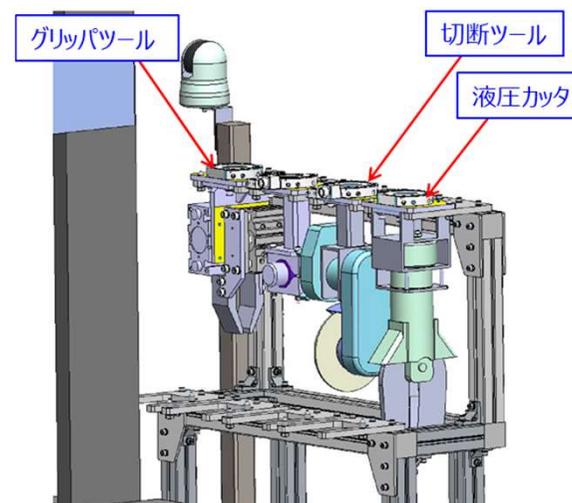
- 汎用的に利用可能な以下の先端ツールを準備する
 - ✓ グリッパツール（対象物把持・固定用）
 - ✓ 切断ツール（ディスクカッターツール，レシプロソーツール，液圧カッターツール）

<視認補助>

- 使用する先端ツールにより，必要とする視野が異なるため，複数のカメラを配置



アーム付カメラ



先端ツール例（ツールステーション上に設置）

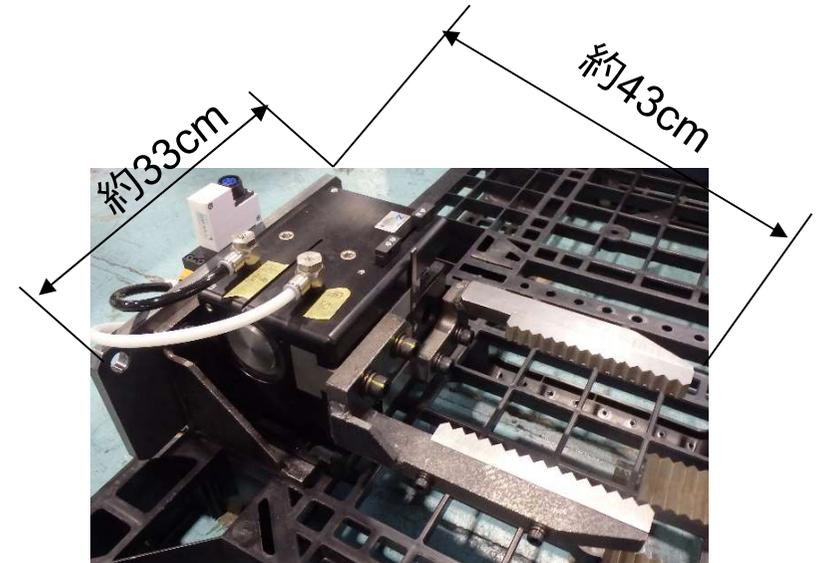
5.2 試験結果（高所作業性の検証A）

＜先端ツール＞

- ▶ 試験で使用した先端ツールを以下に示す。



レシプロソーツール



平行グリップツール



液圧カッターツール



DCツール小



DCツール大

<市販産業ロボットの機器構成>

- 市販の産業用ロボットは以下のコンポーネントで構成される。

- ▶ ロボットアーム
- ▶ ロボットコントローラ（制御盤）
- ▶ Touch Pad（HMI）
- ▶ 接続ケーブル

- ▶ Touch Padによる運転（操作）は以下の操作モードがある。

- ▶ **目視手動運転**（移動ボタン/ジョイスティック）

…ロボットアームを各軸や座標軸に合わせて、ボタンやジョイスティックで操作する機能。

- ▶ 対象物把持操作や切断時のツール送り操作等の状況に合わせて都度ロボットアームを操作する作業に適する。

- ▶ **遠隔自動運転**（Teaching/Playback）

…予め目視手動運転による操作を行い、その動作を記録し、再生する機能。

- ▶ 切断対象物近傍位置までの移動や切断物廃棄のための回収容器への移動などの長距離で時々刻々と状況が変わることのない範囲のルーティン操作に適する。



Touch Pad（産業用ロボット）

<ヒューマン・マシン・インターフェイス（以下HMI）>

- 市販の産業用ロボット用HMI(標準HMI)と試験装置に実装する専用HMIの比較概要を下表に示す。

	標準HMI	専用HMI
操作器	・Touch Pad	・協調ロボット ・補助コントローラ
操作方法	・ボタン（+, -, 十字キー） ・ジョイスティック	・M/S
操作モード	・目視手動運転が前提 ・遠隔自動運転 （Teaching/Playback）	・遠隔手動運転が前提 ・遠隔自動運転 （Teaching/Playback）
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 持ち運び可能なため、制御器から届く範囲でロボットの操作を行うことができる。 予め目視手動運転により、ロボットの動作を教示／再生することで遠隔自動運転が可能。 両手で持つことが前提の構造のため、2基のロボットを同時に操作する用途には不向き。 操作するためには専門の教育が必要で、訓練に時間を要する 	<ul style="list-style-type: none"> 協調ロボット（メインロボット）先端を動かすことで、セカンダリロボットを操作するため、感覚的な操作が可能なため、訓練時間を短くできる。 片手で操作することが可能なため、2基のロボットを同時操作する用途に適する。 付加機能により、遠隔手動運転時の操作者の負担を軽減することが可能。（干渉回避機能他）

<作業ロボット用ヒューマン・マシン・インターフェイス>

- ▶ 本試験設備に搭載するHMIは以下の操作モードと付加機能を有する。

【操作モード】

- ▶ 遠隔手動運転（M/S形式）
- ▶ 遠隔自動運転（Teaching/Playback）

【付加機能】

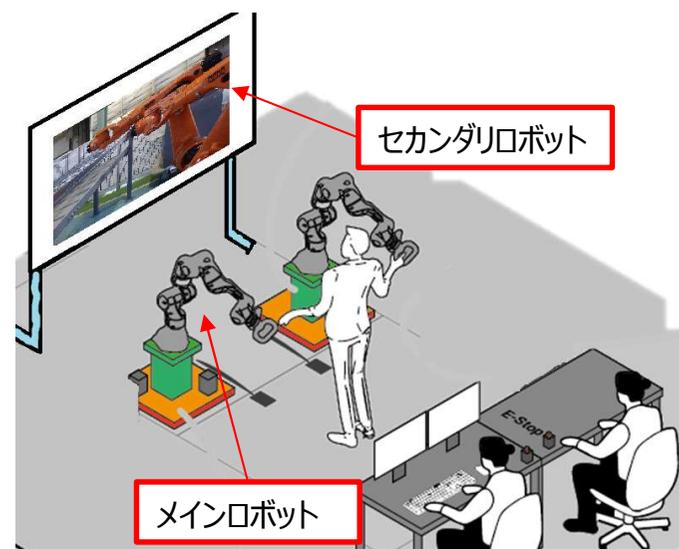
- ▶ 両腕協同制御・・・2基ロボット間の干渉防止機能
- ▶ ハプティック（触覚）コントロール・・・セカンダリロボットが対象に触れる感触を操作者に伝える機能
- ▶ リアルタイムシミュレーション・・・周辺干渉物の干渉などを3D空間上で確認する機能



メインロボット



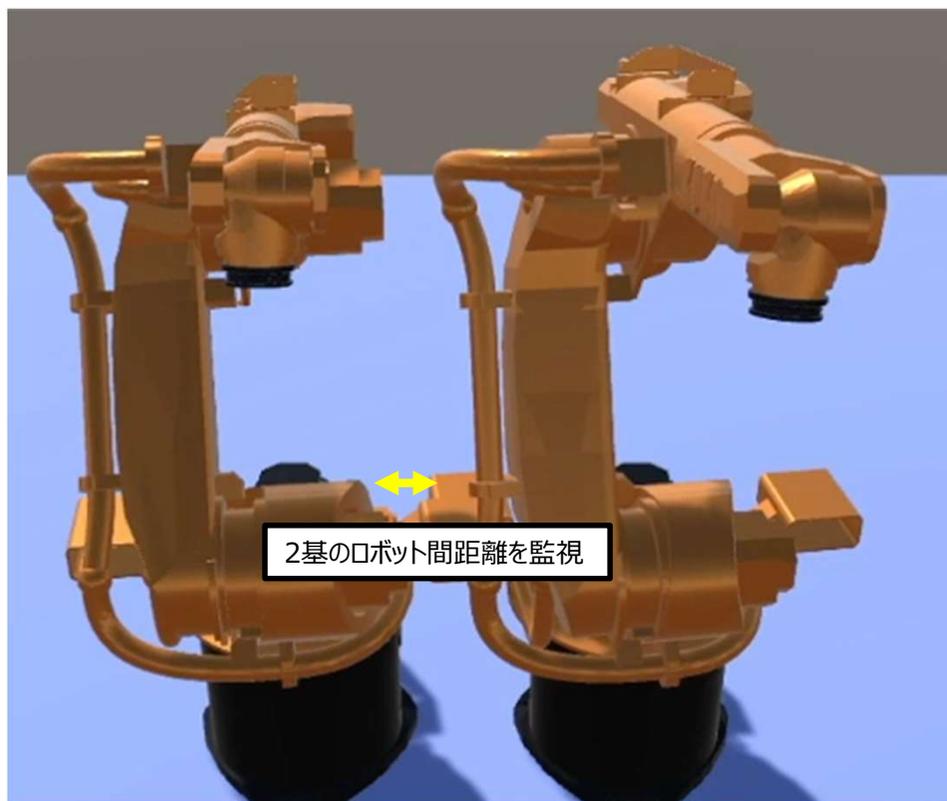
セカンダリロボット



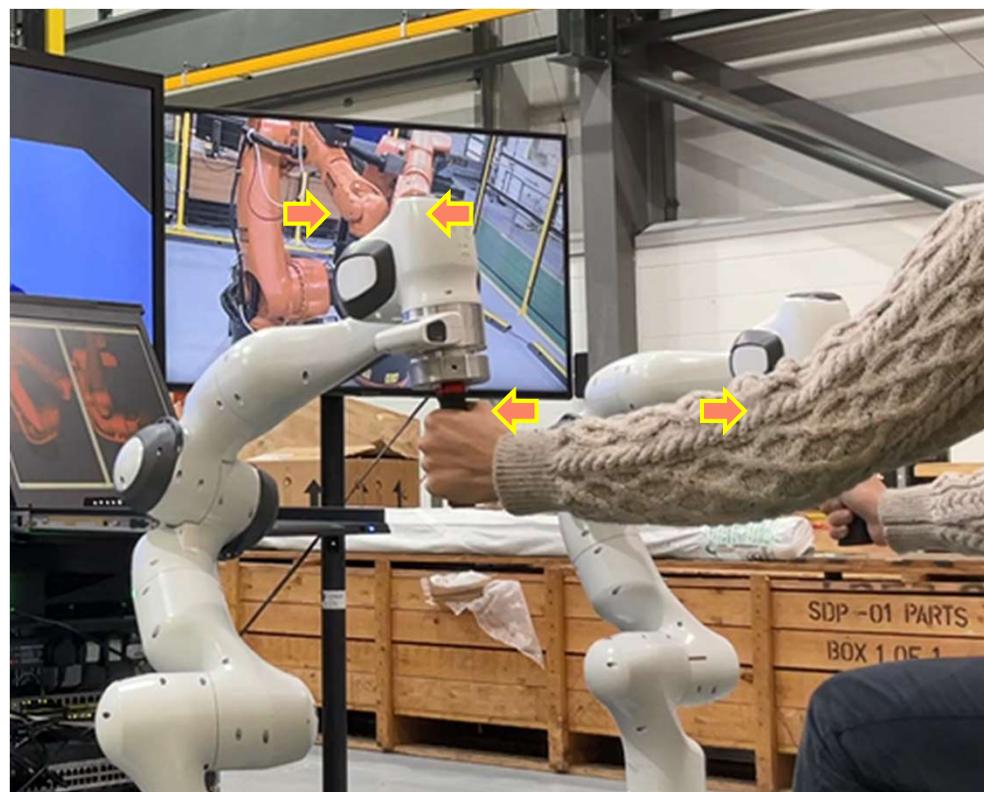
HMIイメージ（本試験設備）

<両腕協調制御>

- 操作者が2基のロボットを同時操作する際の負担軽減のため以下の機能を付加する。
 - 3D空間上で2基のロボット間の距離を監視し、ロボット同士が衝突する前に減速・停止する機能。
 - セカンダリロボットが近づくと、メインロボット側に負荷を与え、それ以上近づかないように伝える機能。



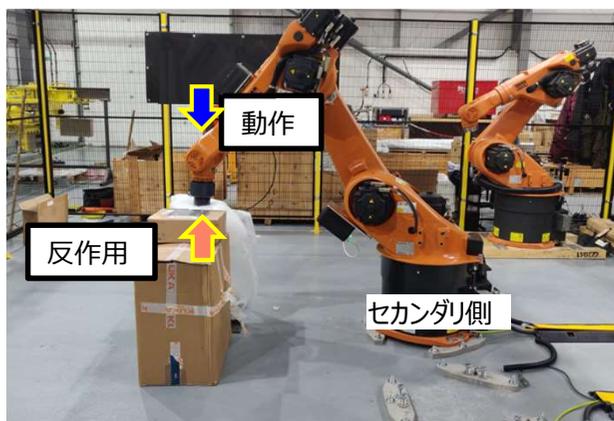
両腕協調制御による干渉防止機能（3D空間）



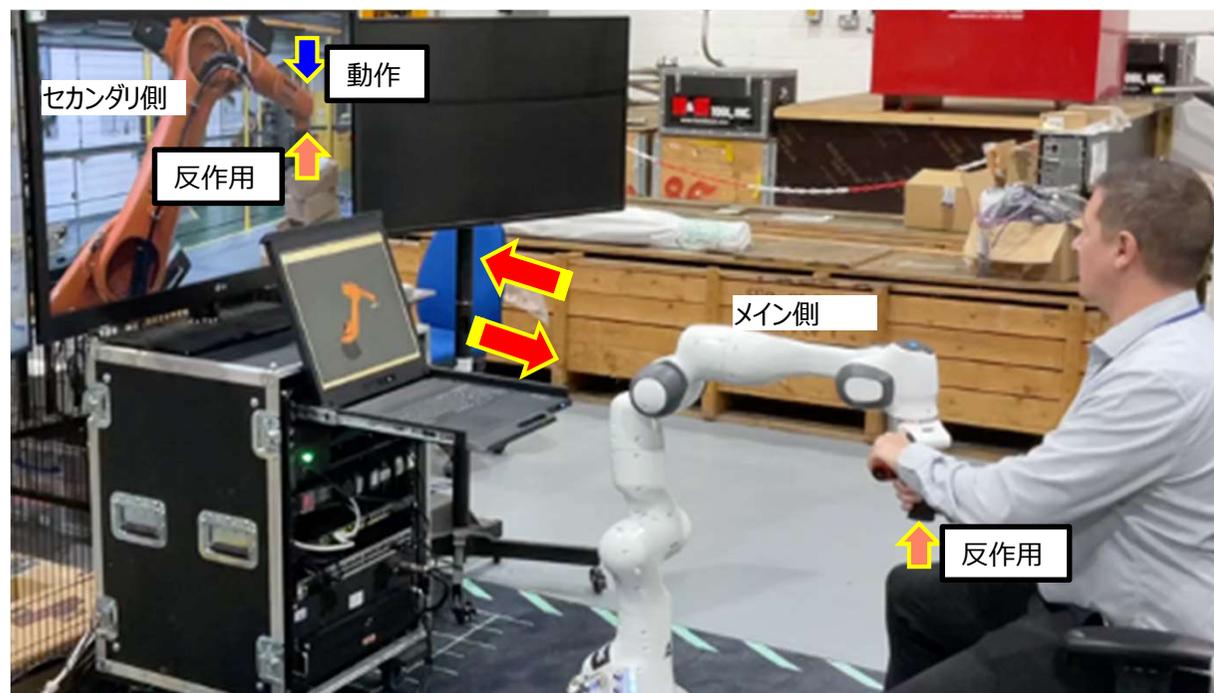
両腕協調制御による干渉防止機能（実空間）

<ハプティック（触覚）コントロール>

- セカンダリロボットの力感覚を操作者にフィードバックすることで、ロボットの操作をより感覚的にする機能を付加する。
 - セカンダリロボットで対象物に接触した際の反作用をフォースセンサにより感知し、メイン側にも負荷をかける機能。
 - メインロボットを操作して、セカンダリロボットに装着した先端ツールによる把持／切断時の状況変化（ケーブルトレイの切断中→ケーブルトレイの切断完了など）が生じた際、オペレータに伝える機能。



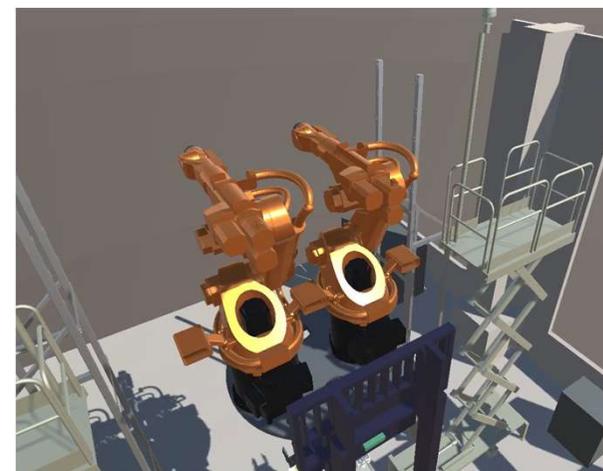
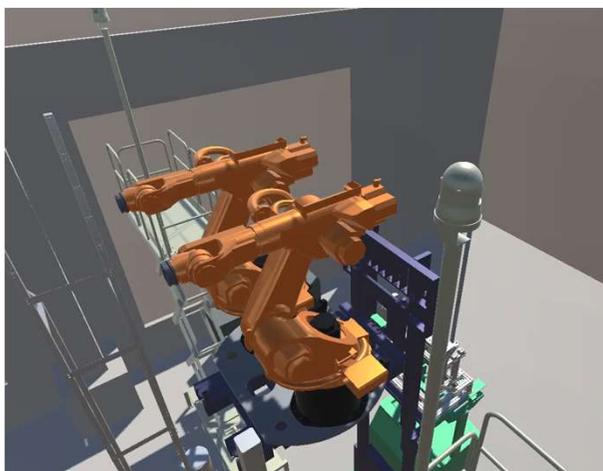
フォースセンサ



フォースフィードバック

<リアルタイムシミュレーション>

- セカンダリロボットの実空間上の動作を3D空間上に再現することで、操作者の視野性を補助する機能を付加する。
 - 実作業において、カメラによる視野が不足した場合でも、ロボットの姿勢を確認可能。
 - 周辺環境をモデリングすることで、両腕協調制御と合わせ、周辺干渉物との干渉確認が可能。
 - 周辺環境をモデリングすることで、カメラの死角となる箇所への監視が可能。（360°監視）



リアルタイムシミュレーションイメージ

<ポイントクラウド機能>

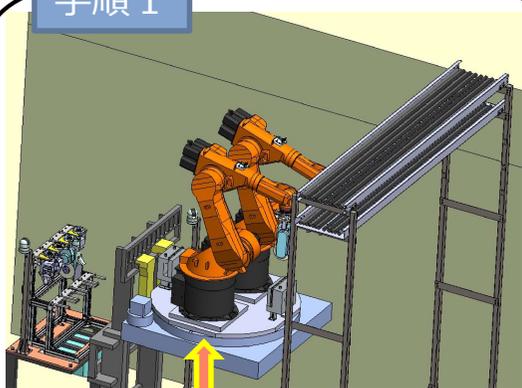
- 3D スキャナによりリアルタイムにポイントクラウドを作成し、実空間上の作業ロボットを3Dデータとして閲覧する。
- これにより、カメラの無い角度から視認が可能となる。



<試験手順概要>

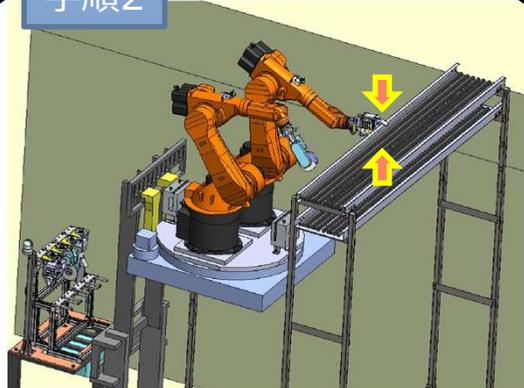
- ▶ 実機ケーブルトレイの撤去手順に基づき、試験設備を用いた一連のケーブルトレイおよびケーブルの遠隔切断・撤去作業を行い、本試験装置および付加機能の妥当性を検証する。

手順1



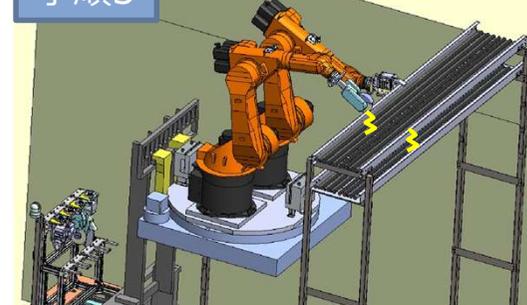
フォークリフトを上昇させる

手順2



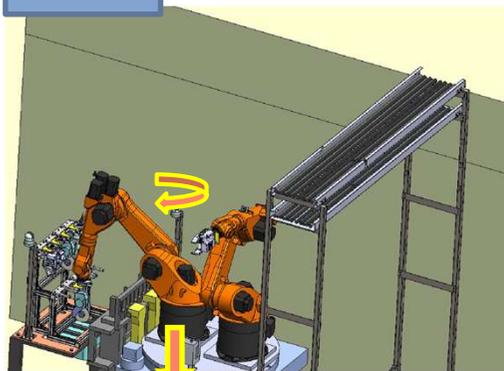
ケーブルトレイを把持する

手順3



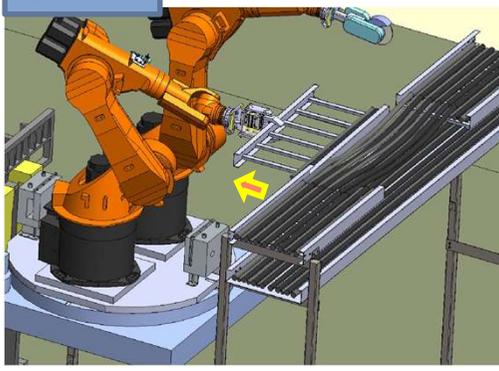
ケーブルトレイを切断する(ケーブルを先に切断するパターンも検証し、適切な手順を採用する)

手順4



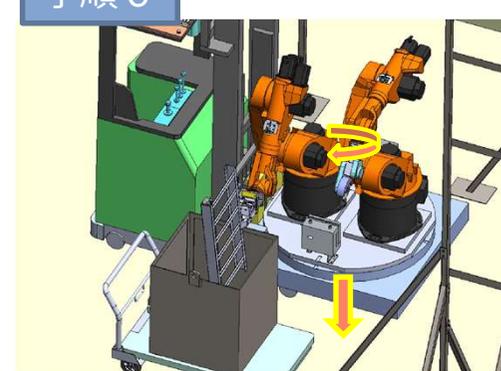
先端ツールを交換する

手順5



ケーブルトレイを撤去する

手順6



廃棄物回収容器に収納する

5.2 試験結果（高所作業性の検証A）

<主要確認項目>

#	分類	対象要素	確認項目	評価項目	判断基準*
1		・ 作業ロボット（全体）	➢ 作業ロボットの移動，対象物へのアクセスにおける安定性	動作時，作業時の振動，安定性	有意な振動等なく安定した状態で作業が可能なこと
2	装置構成および制御機能の妥当性	・ ロボットアーム ・ ターンテーブル ・ 俯瞰カメラおよび視認補助機能	➢ 2基のロボットアームおよびターンテーブルによる先端ツールの位置決め性	・ 操作性 ・ 位置決め精度 ・ 視認性	位置決めが容易であること。 （プラットフォーム操作によるアームを指定位置まで移動10分以内，アーム位置決め5分以内）
3		・ ロボットアーム ・ 先端ツール ・ 俯瞰カメラおよび視認補助機能	➢ 対象物（ケーブルトレイ，ケーブル）の切断作業性	・ 操作性 ・ 切断・把持性能 ・ 視認性	切断作業が可能かつ容易であること（30分以内に切断可能）
4		・ 作業ロボット（全体） ・ 廃棄物回収容器，搬送台車	➢ 対象物（ケーブルトレイ，ケーブル）の廃棄物回収容器への収納作業性	・ 操作性 ・ 視認性	収納作業が可能かつ容易であること（切断後，5分以内に廃棄物回収容器へ投入）
5		・ ロボットアーム ・ ツールステーション ・ 先端ツール	➢ ツールステーションでの先端ツールの交換作業性	・ 操作性 ・ 視認性	先端ツールの交換が可能かつ容易であること（30分以内に先端ツールの交換可能）
6		作業効率の妥当性	・ システム全体	➢ 一連の作業における作業性	・ 作業時間
7	作業時の視認性	・ 俯瞰カメラおよび視認補助機能	➢ 俯瞰カメラおよび視認補助機能による視認性	・ 視認性	目的とする各作業において十分な視野を確保でき，安全かつ円滑に作業が行えること
8	付加機能の有用性	・ 両腕協調制御 ・ リアルタイムシミュレーション ・ ハプティックコントロール 等	➢ 各種付加機能の有用性	・ 各機能の有用性	各種付加機能が一連の作業において有用であること

*要素試験の結果の妥当性の判断基準を示す。

カッコ内の時間は目標仕様に定めた作業効率を記載しているが，習熟や模擬度により大きく影響を受けることから，本要素試験では目安とする。

5.2 試験結果（高所作業性の検証A）

＜試験結果＞

- ケーブルトレイ撤去作業（ご視察）時の作業項目を下表に示す。

No.	作業項目
1	ツール交換位置までフォークリフトの上昇
2	遠隔自動運転によりロボットアームにレスプロツール装着
3	遠隔自動運転によりロボット上昇姿勢に移行
4	レスプロツールに電源装着（仮設設備による有人作業）
5	高所切断位置までフォークリフトの上昇
6	専用 HMI 起動
7	専用HMIによる遠隔操作でケーブルトレイを切断
7.1	1 か所目切断位置へ位置合わせ
7.2	1 か所目の切断
7.3	2 か所目切断位置へ位置合わせ
7.4	2 か所目の切断
8	専用HMIによる遠隔操作でケーブルトレイを把持
9	専用HMIによる遠隔操作でケーブルトレイを切断
9.1	3 か所目切断位置へ位置合わせ
9.2	3 か所目の切断
9.3	4 か所目切断位置へ位置合わせ
9.4	4 か所目の切断
10	専用HMIによる遠隔操作でロボット下降姿勢に移行
11	フォークリフトを廃棄物回収容器へ廃棄可能な高さまで下降
12	ターンテーブルを廃棄物回収容器方向へ回転
13	専用HMIによる遠隔操作で廃棄物回収容器へケーブルトレイを廃棄
14	ホームポジションに移行
15	ターンテーブルを正面方向に回転
	合計



1～4 ツール交換



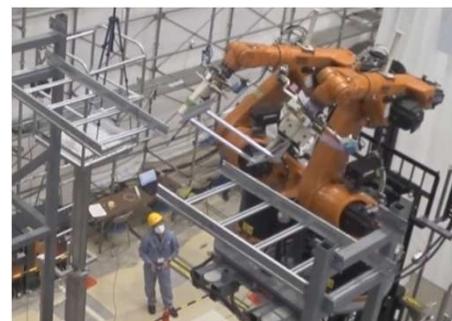
5～6 フォークリフト上昇



7 ケーブルトレイを切断



8～9 ケーブルトレイを切断



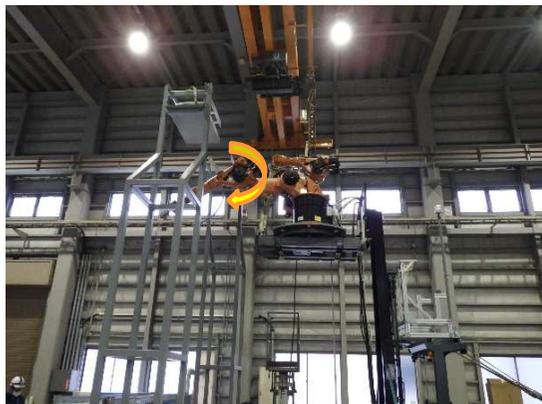
10 ロボット下降姿勢に移行



13 廃棄物回収容器へ廃棄

<1. 作業ロボットの移動，対象物へのアクセスにおける安定性>

- 高さ6mのケーブルトレイ撤去の一連の作業を行い，作業ロボットに対する振動を確認。
 - 作業ロボットに動作制限（速度，可動範囲）を設け，ウェイトを搭載することで，振動抑制可能なことを確認。
 - 試作機段階でもR/B内の高所干渉物（ケーブルトレイ／ケーブル）を撤去する姿勢での作業ロボットの安定度は計算上問題ないが，**実機においては地震の発生や想定外の干渉，振動等を考慮し，アウトリガーを設置する。**
 - 今後の実機適用に向けてアウトリガーを製作し，振動や転倒リスクを実証する。試験結果によっては，適宜ウェイトを設置することでさらなる安定性を確保する方針とする。



高所での振動確認（1基のロボットの首振り動作）



高所での振動確認（レシプロソーでの切断）

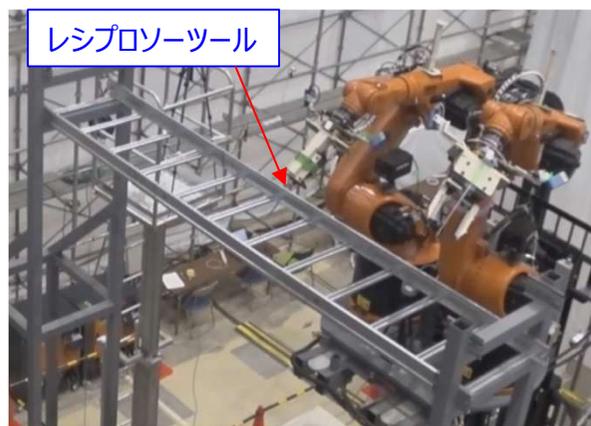
<2. 2基のロボットアームおよびターンテーブルによる先端ツールの位置決め性>

専用HMIによる遠隔操作にて、先端ツールを対象物の把持／切断位置まで移動させることが可能なことを確認。

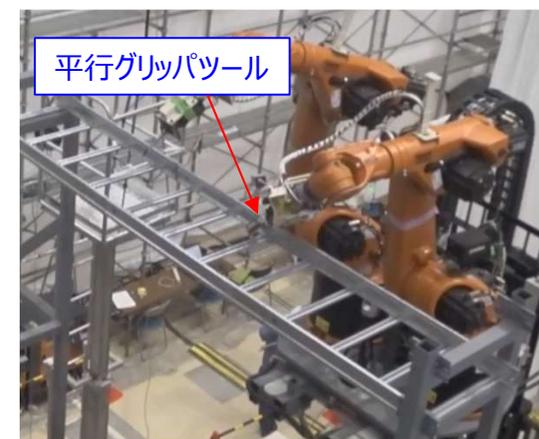
- プラットフォーム操作によるアームを指定位置まで移動目標10分以内に対し、2分で位置決め実施。（ただし、作業員によるプラットフォームの昇降動作による）
- アーム位置決め目標5分以内に対し、切断・把持共に各3分で位置決め実施。
 - ▶ 先端ツールの位置決め性については、目標作業時間を達成した。



プラットフォームの位置決め



切断位置合わせ



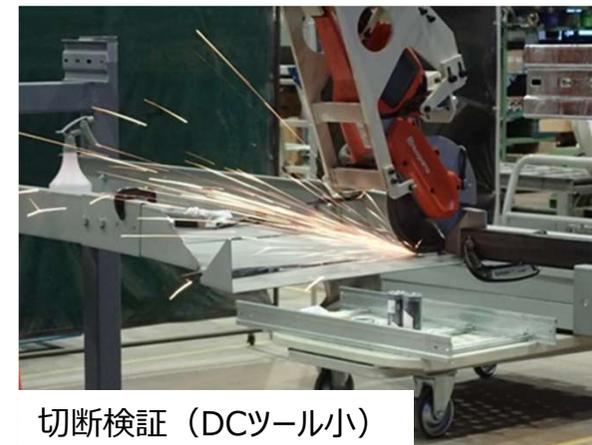
把持位置合わせ

<3. 対象物（ケーブルトレイ、ケーブル）の切断作業性>

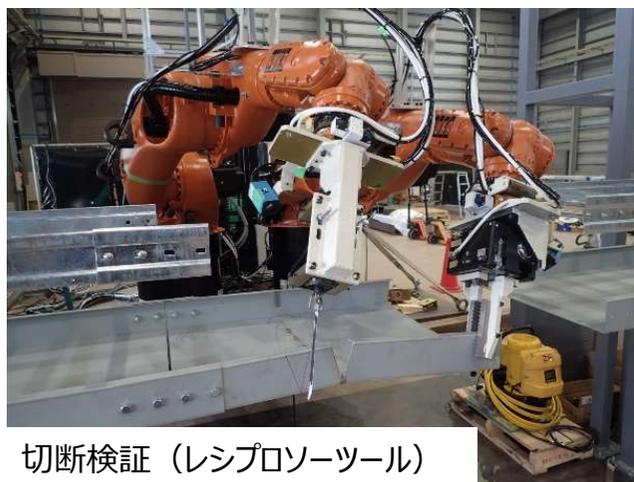
- 目視によりロボットアームを遠隔手動操作し、各切断ツールによる切断性を比較した。
- DCツールは大・小ともにケーブルトレイの切断時に火花が多く発生するため、引火リスクのあるケーブル・ケーブルトレイに対しては適切ではないと判断した。
- レシプロソーツールについては切断時の火花無しにケーブルトレイの切断が可能であった。
- 液圧カッターツールはケーブルトレイの切断は困難であったが、ケーブルの切断は他のツールに比べ容易であった。
- よって、実機ではケーブルトレイ／ケーブルの切断は以下の先端ツールを使用する方針とした。

ケーブルトレイ切断：レシプロソーツール

ケーブル切断：液圧カッターツール



切断検証（DCツール小）



切断検証（レシプロソーツール）



切断検証（液圧カッターツール）



切断検証（DCツール大）

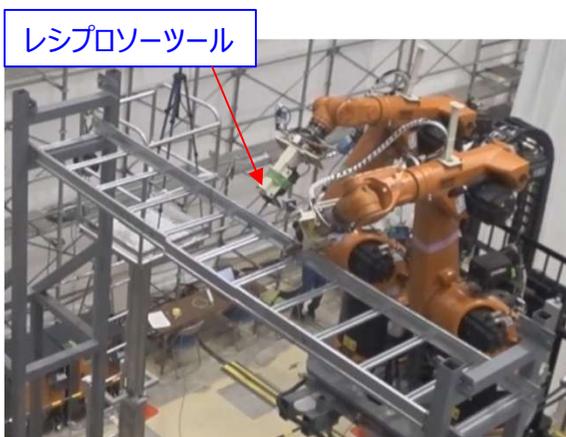
<3. 対象物（ケーブルトレイ、ケーブル）の切断作業性（つづき）>

【ケーブルトレイ】

- 専用HMIによる遠隔手動操作で、ケーブルトレイの切断を実施した。
- ケーブルトレイの撤去には4回の切断作業が必要であり、その切断合計時間は**27分(判定値:30分)**であり**目標切断時間を達成した。**
- ただし、ブレードの暴れや破損が発生する場合もあるため、今後の実機に向けた検討の中で適切なレスプロソーやブレードの選定が必要。

【ケーブル】

- 専用HMIによる遠隔手動操作で、ケーブルの切断を実施した。
- **1回の切断にかかる時間は1分程度であり、目標切断時間(30分)を達成した。**



ケーブルトレイの切断



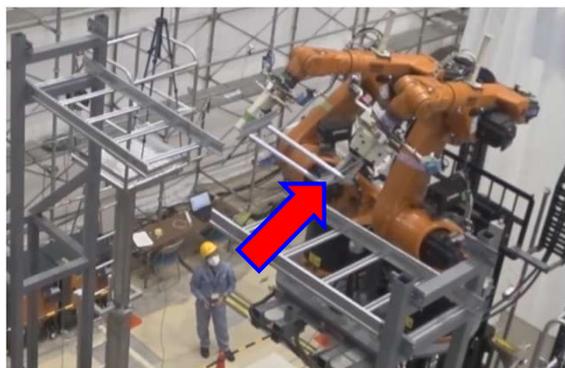
ケーブルトレイ切断時のモニタ画面



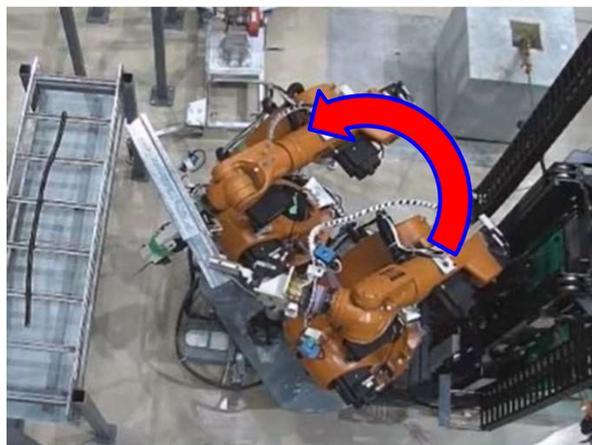
ケーブルの切断

<4. 対象物（ケーブルトレイ、ケーブル）の廃棄物回収容器への収納作業性>

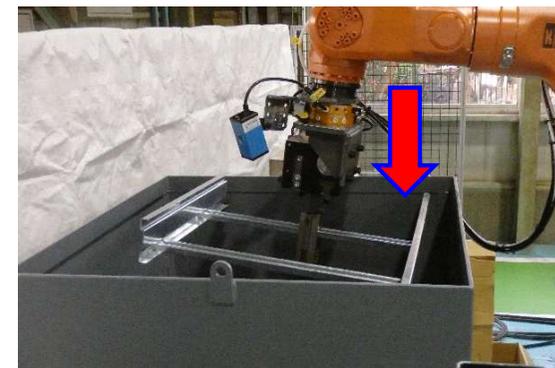
- 専用HMIによる遠隔手動操作を行い、切断後のケーブルおよびケーブルトレイを廃棄物回収容器への収納が可能であることを確認した。
- 切断後、目標5分以内に廃棄物回収容器への収納に対し、切断直後から廃棄物回収容器の収納までにかかった時間は8分であり、目標は達成できなかった。
- 8分のうち4分はケーブルトレイ切断後に下降姿勢まで移行にかかる時間。これは切断物がロボットアーム、残存ケーブルトレイとの接触を防ぐための慎重な操作が必要であり、短縮は困難。
- 従って、切断作業をより効率化することで、本作業にかかる時間をカバーする方針とする。
- なお、ターンテーブルの操作にも2分かかっているが、こちらはロボットアームの回転による廃棄も可能であり、今後の実機に向けた検討で最適な方法を検証する。



下降姿勢まで移行中



ターンテーブルによる回転中



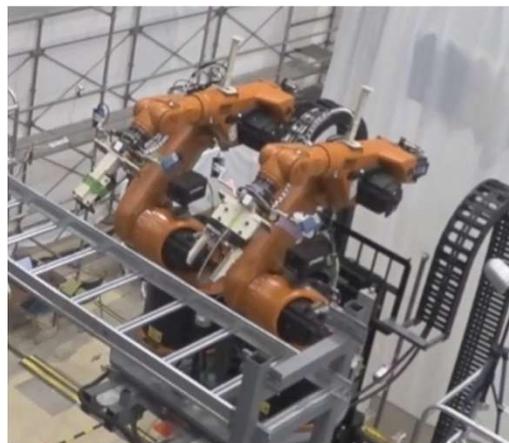
切断後対象物の廃棄物回収容器への移動

<5. ツールステーションでの先端ツールの交換作業性>

- 遠隔自動運転で先端ツールの交換姿勢 \longleftrightarrow ロボット標準姿勢(プラットフォームを昇降させるときの姿勢)に移行が可能であることを確認。
- プラットフォームの昇降を含めて10分で先端ツールの取り付けが可能であった。
- ツール取り外しも同作業で可能であることから、**目標時間30分以内に対し、20分程度でツール交換が可能であり、目標を達成した。**



教示作業(先端ツール交換時の姿勢)



ロボット標準姿勢



遠隔自動操作による先端ツールの交換

<6.一連の作業における作業性>

- ケーブルトレイ撤去の一連の作業における作業時間を下表に示す。
- 切断を除きいずれも極端に時間を要する作業はなく、他項目に対する結果も含めれば**安全かつ円滑に作業を行えた**と評価する。

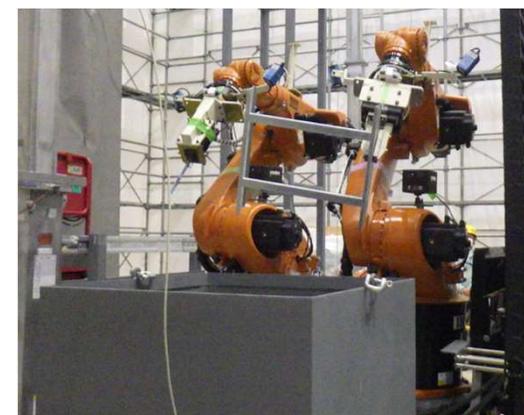
No.	作業項目	作業時間(分)
1	ツール交換位置までフォークリフトの上昇	2
2	遠隔自動運転によりロボットアームにレシプロツール装着	5
3	遠隔自動運転によりロボット上昇姿勢に移行	3
4	レシプロツールに電源装着（仮設設備による有人作業）	-
5	高所切断位置までフォークリフトの上昇	2
6	専用 HMI 起動	3
7	専用HMIによる遠隔操作でケーブルトレイを切断	-
7.1	1 か所目切断位置へ位置合わせ	3
7.2	1 か所目の切断	5
7.3	2 か所目切断位置へ位置合わせ	2
7.4	2 か所目の切断	10
8	専用HMIによる遠隔操作でケーブルトレイを把持	2
9	専用HMIによる遠隔操作でケーブルトレイを切断	-
9.1	3 か所目切断位置へ位置合わせ	2
9.2	3 か所目の切断	4
9.3	4 か所目切断位置へ位置合わせ	2
9.4	4 か所目の切断	8
10	専用HMIによる遠隔操作でロボット下降姿勢に移行	4
11	フォークリフトを廃棄物回収容器へ廃棄可能な高さまで下降	1
12	ターンテーブルを廃棄物回収容器方向へ回転	2
13	専用HMIによる遠隔操作で廃棄物回収容器へケーブルトレイを廃棄	1
14	ホームポジションに移行	1
15	ターンテーブルを正面方向に回転	2
	合計	64



1. ツール交換位置までフォークリフトの上昇



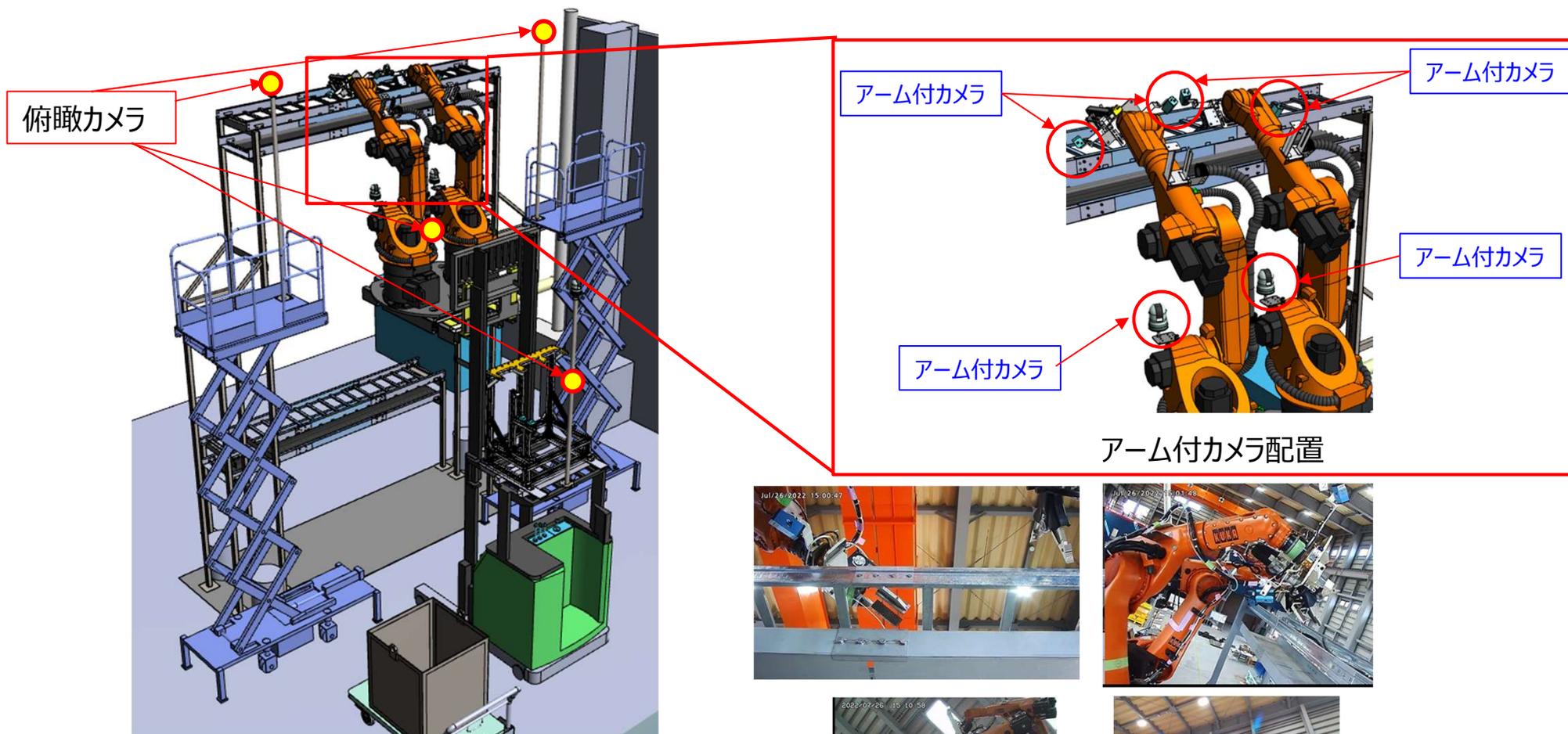
7.専用HMIによる遠隔操作でケーブルトレイを切断



13.廃棄物回収容器へケーブルトレイを廃棄

<7. 俯瞰カメラおよび視認補助機能による視認性>

- 下図に示すカメラ配置で、遠隔操作により各作業において十分な視野を確保できることを確認。



カメラ視野例

<8.付加機能の有用性>

【専用HMI】

- 専用HMIの操作性が向上したことを実証するため、専用HMIと標準HMIの操作性の比較を行った。
- 操作者は遠隔操作初心者2名と、標準HMI熟練者1名の3名で実施した。
- 切断ツールの位置合わせに対する作業性、把持作業に対する操作性、廃棄物回収容器への収納作業性の3つの作業に対する操作性の比較を行った。各操作にかかった時間以下に結果を示す。
 - 【切断ツールの位置合わせに対する作業性結果(平均)】
標準HMI：6分24秒 専用HMI：3分03秒
 - 【把持作業に対する作業性結果(平均)】
標準HMI：6分59秒 専用HMI：3分27秒
 - 【廃棄物回収容器への収納作業性結果(平均)】
標準HMI：7分45秒 専用HMI：2分27秒
- 結果として、**専用HMIにより操作にかかる時間が半分程度に向上するという結果を得られた。**



<8.付加機能の有用性>

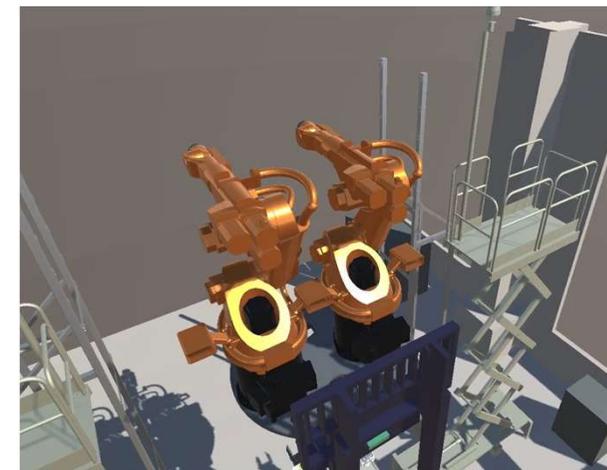
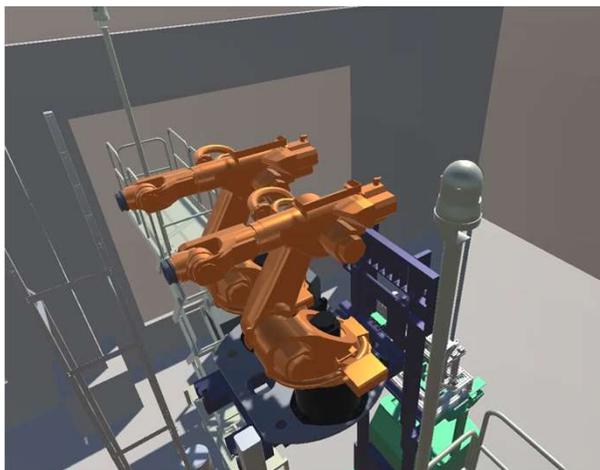
【専用HMI】

- 操作時間の比較作業後、作業時間以外の項目である視認性、操作性、持続性に関するアンケートを各操作者(3名)に対して実施した。（5点満点）
 - 【視認性(平均)】
標準HMI：2.5点 専用HMI：3.9点
 - 【操作性(平均)】
標準HMI：3.3点 専用HMI：4.1点
 - 【持続性(平均)】
標準HMI：2.7点 専用HMI：3.8点
- 結果として、視認性、操作性、持続性いずれにおいても専用HMIのほうが大幅に向上するという結果を得られた。

<8.付加機能の有用性>

【リアルタイムシミュレーション】

- リアルタイムシミュレーション機能により、ロボットアームの軸値から3Dモデル上にロボットアームの姿勢を反映することで、カメラの無い角度からの視野を得られることを確認した。
- 特に切断や把持等の位置合わせの際に本機能は有効であった。
- 従って、本機能は実機においても搭載する方針とする。

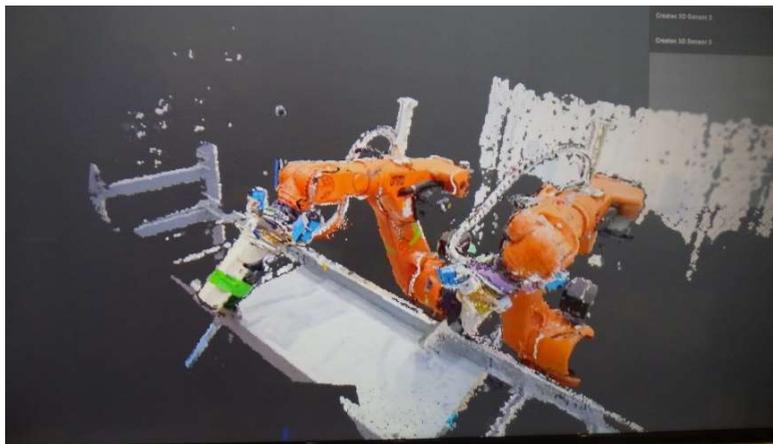


リアルタイムシミュレーションイメージ

<8.付加機能の有用性>

【ポイントクラウド機能】

- ポイントクラウド機能により、リアルタイムにポイントクラウドを作成することで、カメラの無い角度からの視野を得られることを確認した。
- ただし、複数の点群データをリアルタイムで合成するため、ハイスペックのPCを用いても遅延が生じるうえに、精度も±数mm程度となる。
- 従って、本機能は現時点において、実機では搭載しない方針とした。
 - ただし、ポイントクラウド機能は技術革新が進んでいる分野であり、今後の技術革新により本事業における使用目的を達成できる可能性がある。技術の進歩を注視し、使用見通しが立った時点で適用を検討する。

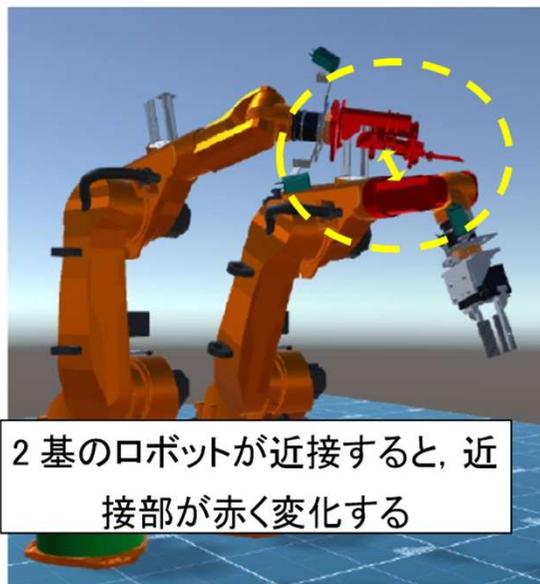


ポイントクラウド機能

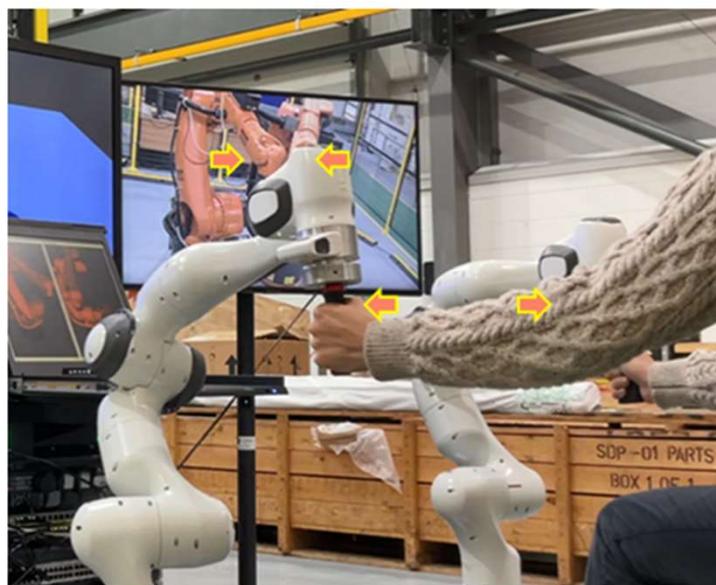
<8.付加機能の有用性>

【両腕協調制御】

- 両腕協調制御機能により、セカンダリロボット同士が近づくと3D空間上の接近部位が赤く変色し、操作者へ視覚的に警告を発することを確認した。
- さらに接近すると、メインロボットの動作に負荷を、さらに近づけると反力により近づけなくなることを確認した。
- 本機能は2基のロボットアームを操作するうえで安全上重要と判断し、実機においても適用する方針とした。



両腕協調制御による干渉防止機能（3D空間）

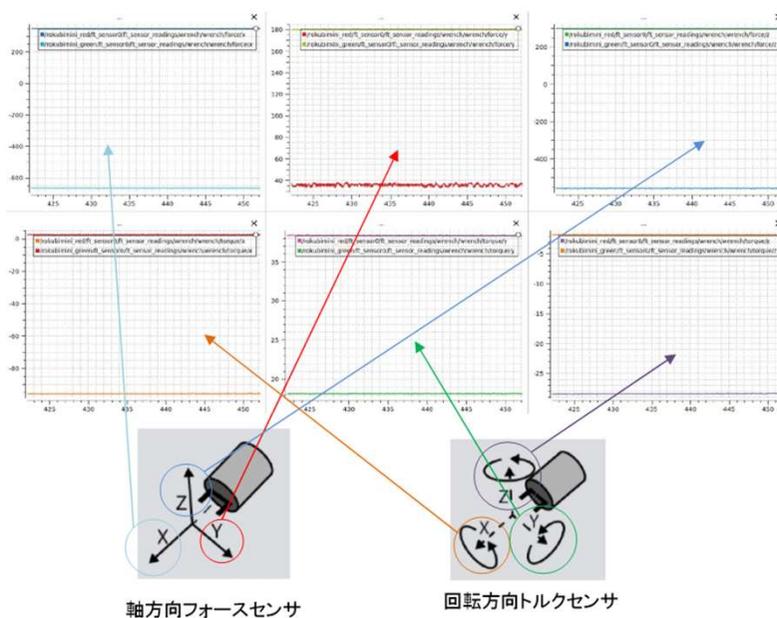


両腕協調制御による干渉防止機能（実空間）

<8.付加機能の有用性>

【ハプティック（触覚）コントロール】

- 本機能によりセカンダリロボットの力感覚を操作者にフィードバックすることで、ロボットの操作をより感覚的にできるか確認した。
- 本試験におけるHMI(協調ロボット)は操作性向上のため基本操作に負荷をかけるようにしているため、負荷の変化がわずかであり、操作性の向上に対する影響は少なかった。
- ハプティックコントロールの代わりに、ロボットアーム先端部のフォースセンサの値を視覚的に見れるようにしたところ、負荷の方向や程度が詳細に表示されるためマン・マシン・インターフェイス有効であった。
- 従って、実機においてはハプティックコントロールは採用せず、フォースセンサの値を視覚的に見れるようにする。



先端ツールフォースセンサの表示



フォースセンサ表示例

5.2 試験結果（高所作業性の検証A）

<試験結果まとめ>

#	分類	判断基準	試験結果	実機の方針
1	装置構成および制御機能の妥当性	有意な振動等なく安定した状態で作業が可能なこと	作業ロボットに動作制限（速度，可動範囲）を設け，ウェイトを搭載することで，振動抑制可能なことを確認。	実機においては地震の発生や想定外の干渉，振動等を考慮し， アウトリガーを設置する。
2		位置決めが容易であること。 （プラットフォーム操作によるアームを指定位置まで移動10分以内，アーム位置決め5分以内）	・プラットフォーム操作は2分で位置決め。 ・ 専用HMIの遠隔手動操作により，切断・把持共に各3分で位置決め。	・作業員によりプラットフォームの操作を行ったため， 被ばく線量低減のため遠隔化を検討する。
3		切断作業が可能かつ容易であること （30分以内に切断可能）	・ケーブルトレイは27分で切断。 ・ケーブルは1分程度で切断。	・今後の実機に向けた検討の中で適切なレシプロソーやブレードの選定を行う。
4		収納作業が可能かつ容易であること （切断後，5分以内に廃棄物回収容器へ投入）	切断後，8分で廃棄物回収容器へ収納。	・切断作業をより効率化することで，本作業にかかる時間をカバーする方針。
5		先端ツールの交換が可能かつ容易であること（30分以内に先端ツールの交換可能）	遠隔自動運転により， 20分程度で先端ツールの交換が可能 なことを確認。	・先端ツールの電源接続を作業員により実施しているため，遠隔で接続できるようにする。

5.2 試験結果（高所作業性の検証A）

<試験結果まとめ>

#	分類	判断基準	試験結果	実機の方針
6	作業効率の妥当性	極端に時間を要する作業がなく，安全かつ円滑に作業が行えること（目標作業時間は一連の試験手順を考慮し設定）	切断を除き極端に時間を要する作業がないことを確認。	#3の方針同様
7	作業時の視認性	目的とする各作業において十分な視野を確保でき，安全かつ円滑に作業が行えること	試験時のカメラ配置により十分な視野を確保できることを確認。	実機においては照明の配置もあわせて検討する。
8	付加機能の有用性	各種付加機能が一連の作業において有用であること	専用HMI，リアルタイムシミュレーション，両腕協調制御：有効 ポイントクラウド：有効ではない ハプティックコントロール：有効ではないが，負荷状態を視認できると有効	専用HMI，リアルタイムシミュレーション，両腕協調制御：採用 ポイントクラウド：不採用 ハプティックコントロール：負荷状態視認機能を採用

<目的>

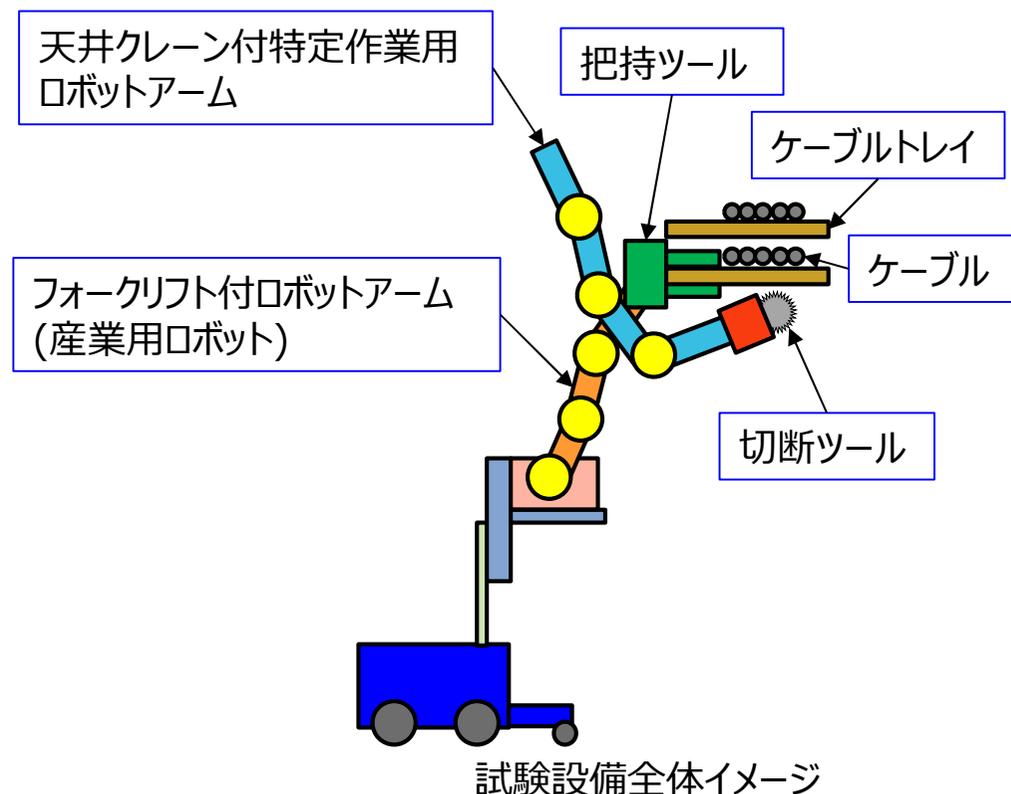
- 特定作業用（原子力関連施設向け）ロボットアームを用いた装置構成にて高所作業性（操作性）の検証（A）と同様の試験，検証を実施し，遠隔作業性，操作性において高所作業性（操作性）の検証（A）で用いる産業用ロボットアームを用いた装置構成との比較評価を行い，本作業における最適な装置構成を検討する。

<試験構成>

- 作業ロボット
 - ✓ ロボットアームは高放射性環境下での使用が可能なHWM社製特定作業用ロボット「A1000SL」を用いる。
 - ✓ 既存のデモ品を用いることから，試験場所や設備に制約があり，試験Aと同様にプラットフォーム（フォークリフト）上に2基のアームを設置することが困難。
 - ✓ そのため，ロボットアーム1基は天井クレーン付のロボットアームにて代用する（右図参照）。
 - ✓ フォークリフト付のロボットアームが故障したため，把持用ロボットアームは産業用ロボットにて代用した。（次頁参照）
- その他の試験設備は，試験Aと概ね同様の構成とする。ただし，上記のとおり試験場所の制約があることから，試験Aと同様にすることが困難なものについては，可能な範囲での対応とする。

<試験実施場所>

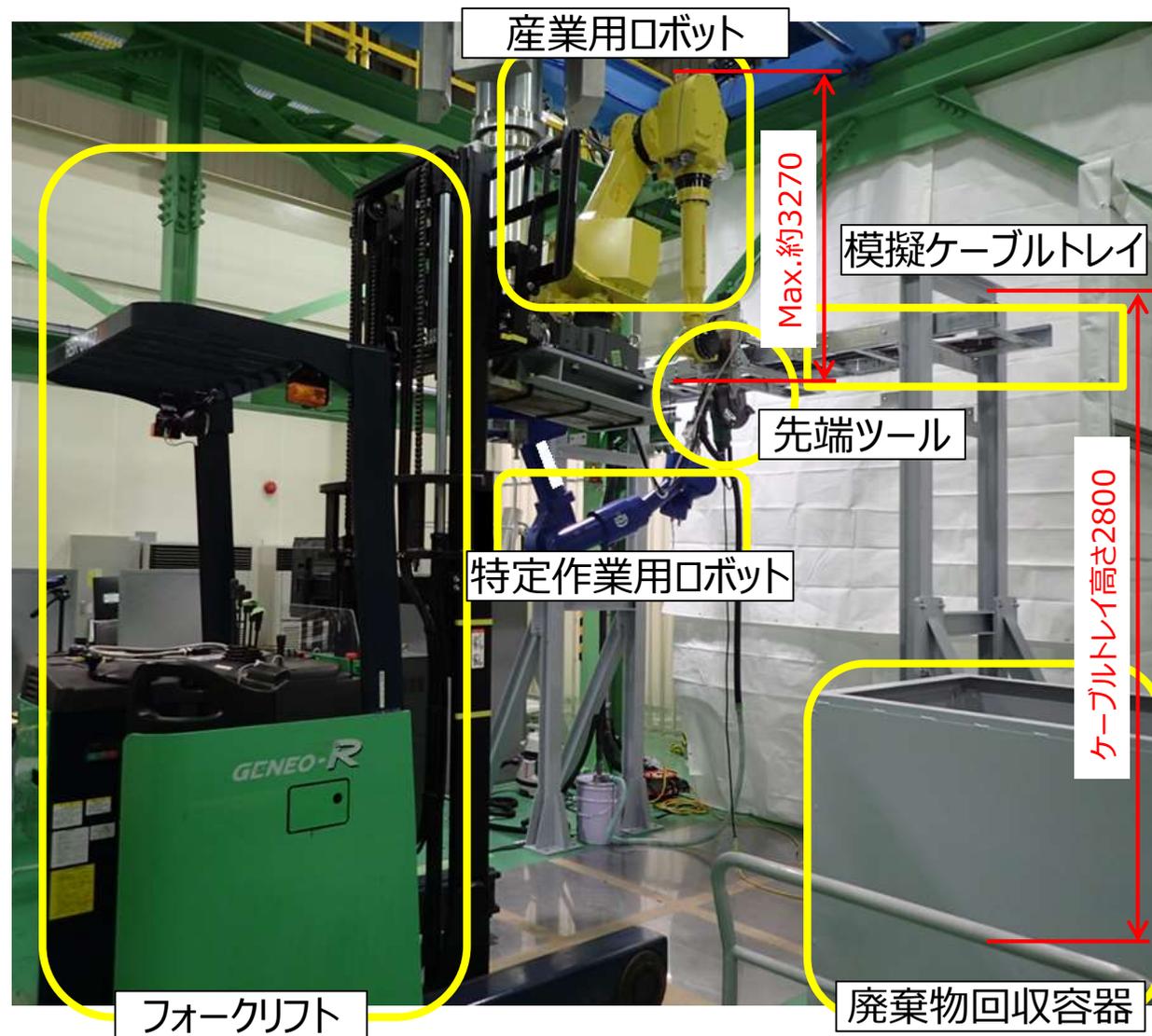
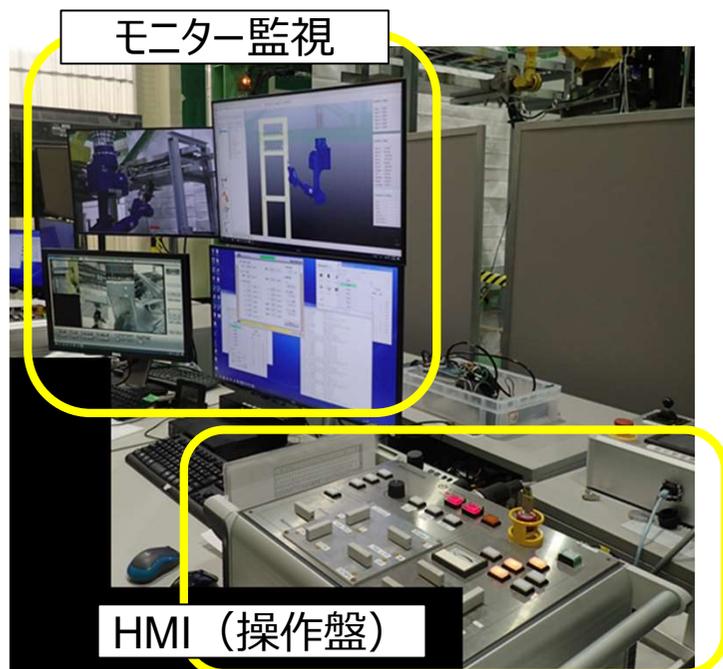
- 国内メーカー



5.3 試験結果（高所作業性の検証B）

<試験設備（試験装置）>

- 作業ロボット
（特定作業用ロボット，産業用ロボット，フォークリフト）
- 先端ツール
- 俯瞰カメラ
- 廃棄物回収容器
- 模擬切断撤去対象物
（模擬ケーブルトレイ）
- ヒューマン・マシン・インターフェイス



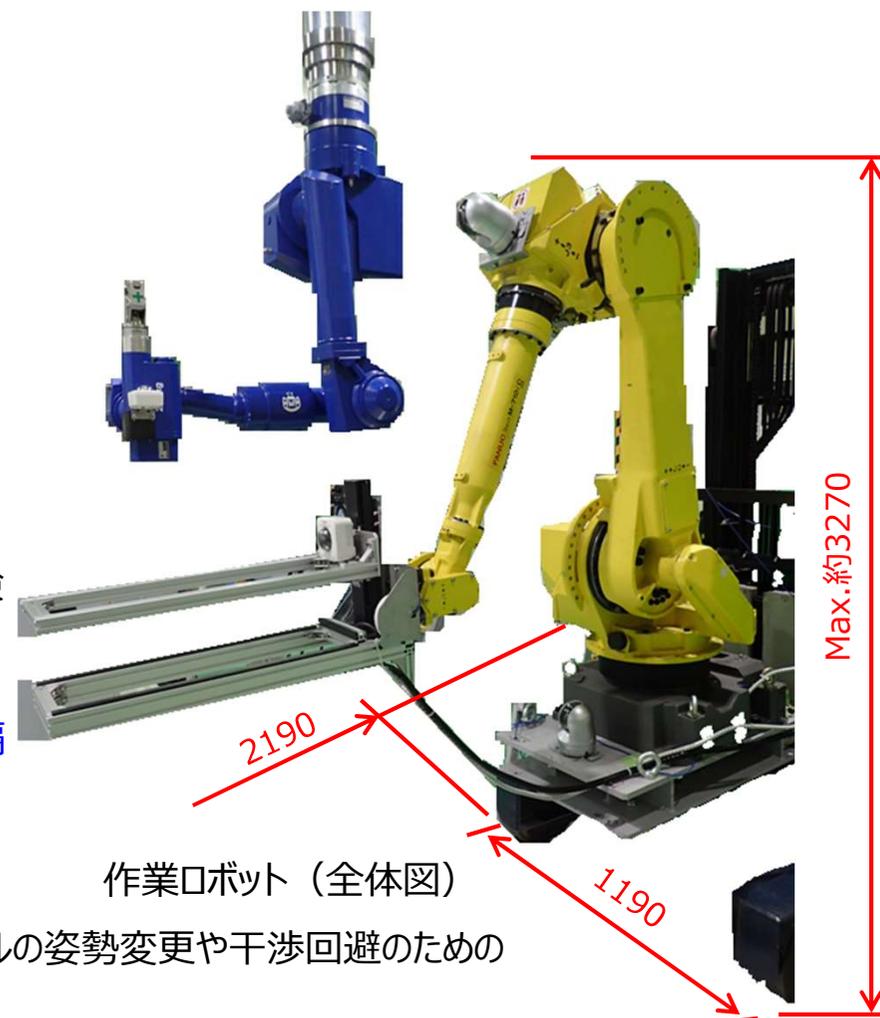
<作業ロボット>

- 特定作業用ロボット：HWM社製 6軸ロボット A1000AL-200kg（定格可搬重量：200kg）
- 産業用ロボット：FANUC社製 6軸ロボット M-710iC50（定格可搬重量：50kg）
- 電動フォークリフト：TOYOTA 8FBR25
- ロボットアームには、小型のカメラを設置し、別途設ける俯瞰カメラと合わせて作業時の視野を確保する

<作業ロボット構成補足>

- 当初計画では、把持／切断を共に特定作業用ロボットにて能力検証する予定であったが、既存のデモ品の特定作業用ロボットをフォークリフトに取り付ける過程でロボットが故障する事象が生じた。
- 本試験の主目的である特定作業用ロボット／産業用ロボットの遠隔作業性・操作性の比較をする上で、以下の理由により、特定作業用ロボット2台構成から特定作業用ロボット1台／産業用ロボット1台構成として試験を実施した。

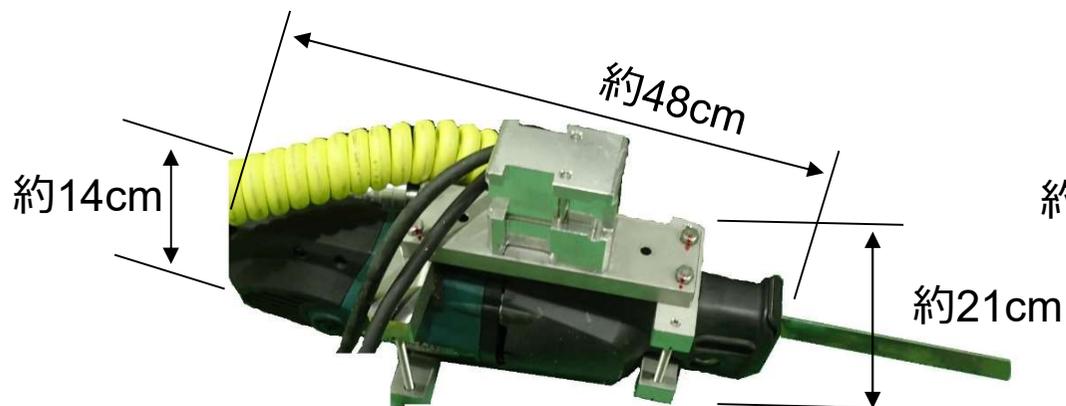
- 切断性能：対象とするケーブルトレイの形状による切断ツールの姿勢変更や干渉回避のための頻繁な操作が見込まれる。
 - 特定作業用ロボットでの確認が必須
- 把持性能：対象とするケーブルトレイに対し、把持直前の位置合わせはあるものの、切断中は操作がない
 - 位置精度／移動速度の影響が低いため、産業用ロボットにて代替する。



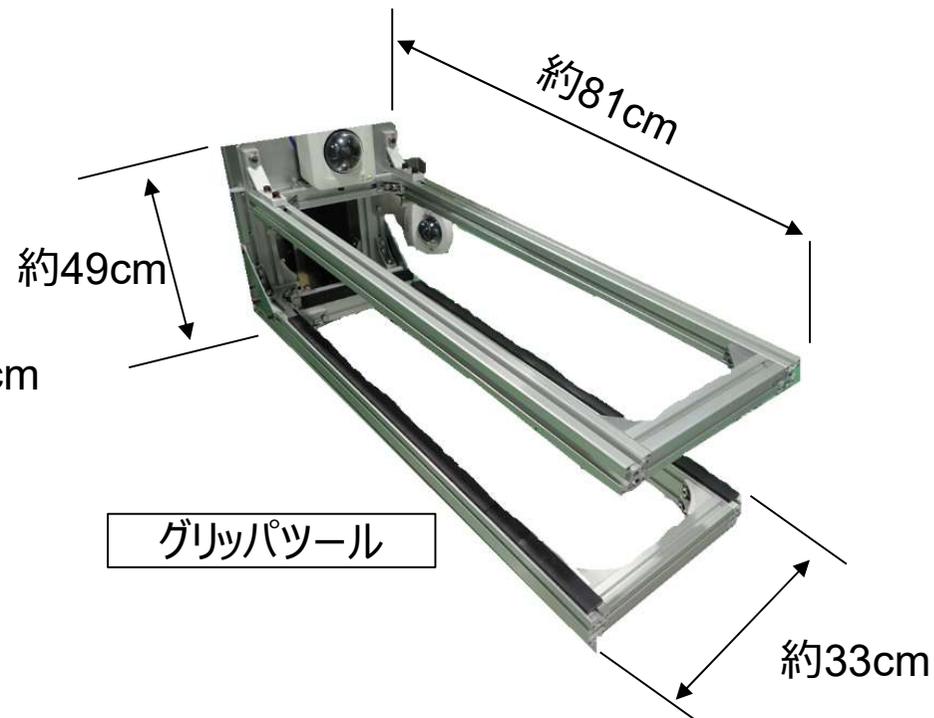
5.3 試験結果（高所作業性の検証B）

<先端ツール>

- ▶ 試験で使用した先端ツールを以下に示す。



レシプロソーツール



グリッパツール



DCツール大

<ヒューマン・マシン・インターフェイス>

- 特定作業用ロボット：HWM社製 6軸ロボット A1000AL-200kgにおけるHMIは以下の機器により構成される。
 - 専用操作箱…レバー（座標等の数値変化）やボタン操作（機能の切替）での操作。
 - Xecstick(ジョイスティック)…スティックを傾けることで、ロボットの移動方向や速度を調整する操作。
 - タッチパネル…パネル操作により、任意のプログラムを実行する。
- 専用操作箱とXecstickは、1台の特定作業用ロボットに対し、1対備わっており、作業内容に応じて操作者の判断で切り替えることができる。
- 特定作業用ロボットのHMIは以下の操作モードがある。
 - 遠隔手動運転（専用操作箱/Xecstick）
…レバーやスティック操作により、ロボットアームを各軸や座標軸に合わせて操作する機能。
 - 遠隔自動運転（タッチパネル：Goto mode）
…タッチパネル操作によりロボットアームの動きを教示、再生する機能。



専用操作箱（特定作業用ロボット）



Xecstick（特定作業用ロボット）

5.3 試験結果（高所作業性の検証B）

＜高所A試験と高所B試験設備の相違点＞

- 本試験の確認項目である制御機能，HMIの操作性の比較を行うにあたり，高所作業性の検証試験Aと試験条件の差異と，その考察を下表に示す。

項目	高所A試験	高所B試験	考察
切断用ロボットアーム	産業用ロボットアーム（上向き）	特定作業用ロボットアーム（下向き）	制御機能，HMIの操作性の検証目的においては，カメラ視野が異なるものの位置精度やアーム移動速度には影響が無いため，天地逆向きによる影響は少なく，試験として成立していると判断した。
把持用ロボットアーム	産業用ロボットアーム（上向き）	産業用ロボットアーム（上向き）	把持作業において産業用と特定作業用で異なる点は位置合わせのみである。（把持動作自体は機構を動作させるだけであり，同一）位置合わせ作業は特定作業用ロボットアームによる切断作業で検証するため，把持は産業用で代替し評価対象外としても試験として成立すると判断した。
把持装置	平行グリップツール	グリップツール	上記同様，本試験における評価の対象外とした。
プラットフォーム	フォークリフト	フォークリフト	同一。
先端ツール	レシプロソー，DCツール，液圧カッター	レシプロソー，DCツール，液圧カッター	メーカー所有の既存のツールを使用したため仕様が多少異なるが，出力等の影響が大きい箇所には差異は無く，切断工具の種類は同一であるため，操作性の比較の観点では試験として成立すると判断した。
切断対象物仕様	ケーブルトレイ+ケーブル	ケーブルトレイ+ケーブル	同一。
切断対象物高さ	最高高さ6m	最高高さ3m	試験設備の制約により，高所Bの試験は最高高さ3mで実施した。高さが異なることによる操作性への影響は，高所Aの試験で影響がないことを確認しており，試験として成立していると判断した。
切断手順	ケーブル切断->ケーブルトレイ切断	ケーブル切断->ケーブルトレイ切断	撤去手順は試験A，Bで同一であるが，ツール交換は試験Bでは実施していない。（遠隔でのツール交換実績有のため試験不要）

<主要確認項目>

#	分類	対象要素	確認項目	評価項目	判断基準
1	装置構成および制御機能の妥当性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特定作業用ロボット ・ HMI ・ 各カメラ 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 制御機能（操作モード） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各機能の有用性 	高所作業性（操作性）の検証（A）の制御機能（操作モード）との比較
2		<ul style="list-style-type: none"> ・ 特定作業用ロボット ・ HMI ・ 各カメラ 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ HMIの操作性 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各機能の有用性 	高所作業性（操作性）の検証（A）のHMIの操作性との比較

<制御機能（操作モード）の比較結果>

- 産業用ロボットアーム，特定作業用ロボットアーム共に遠隔手動運転と遠隔自動運転の機能を有する。
- 先端ツールの交換作業は，特定作業用ロボットアーム・産業用ロボットアーム共に遠隔自動運転にて実施可能。
- 作業ロボットの基本姿勢への移行作業も，同様に両ロボットアーム共に遠隔自動運転にて実施可能。
- 従って，**制御機能（操作モード）の比較**においては，**両ロボットアームで機能に差は無いことを確認した。**

#	評価項目	作業プロセス	特定作業用 ロボットアーム	産業用 ロボットアーム
1	遠隔自動操作	先端ツールの交換作業	○	○
2		作業ロボットの基本姿勢 (フォークリフト昇降姿 勢) への移行作業	○	○

<HMIの操作性比較(遠隔手動運転)>

(1) 特定作業用ロボットアーム

- 操作者により専用操作箱によるレバー／ボタン操作とジョイスティックによる操作を選択できる。ただし、いずれの操作も**感覚的ではなく、習熟には十分な訓練期間が必要**であり、今回は十分に操作に習熟した操作者が切断作業を行った。

(2) 標準制御機能の産業用ロボットアーム(標準HMI)

- 標準コントローラのボタンとジョイスティックを選択して操作するが、いずれの操作も**感覚的ではなく、習熟には相当な訓練期間が必要**。リアルタイムシミュレーションなどの視認補助技術は組み込まれていないため、遠隔操作を行うためにはカメラ視野により操作することになる。

(3) IHIの制御機能を組み込んだ産業用ロボットアーム(専用HMI)

- M/S形式のコントローラにより、操作者は直感的な操作を行うことができる。そのため、**短い訓練期間で操作を習熟することができる**。2基のロボットアームの位置関係を同時に示すリアルタイムシミュレーション機能により、カメラ視野が不足する場合でも視野を補うことができる。また、お互いの衝突を防止する両腕協調制御機能により、より安全に操作を行うことができる。

<HMIの操作性比較(遠隔手動運転)>

- 結果として、遠隔手動操作では特定作業用ロボットアームと標準制御機能の産業用ロボットアームでは特定作業用ロボットアームのHMIの方が本作業に適するが、IHIの制御機能を組み込んだ産業用ロボットアームは特定作業用ロボットアームと比較しても同等以上の操作性を有することが試験よりわかった。
- 下表に操作性の比較結果を示す。

#	評価項目	作業プロセス	特定作業用 ロボットアーム	産業用 ロボットアーム (標準制御機能)	産業用 ロボットアーム (IHI制御機能)
1	操作性	ケーブルやケーブルトレイの把持作業	○	○	◎
2		ケーブルやケーブルトレイの切断作業	◎	○	◎
3		切断したケーブルやケーブルトレイを廃棄物回収容器に収納する作業	○	○	◎
4	合理性	ロボットアーム操作の訓練期間	長期間	長期間	短期間
5	安全性	ロボットアーム同士の衝突リスク	有	有	無

5.3 試験結果（高所作業性の検証B）

<試験結果>

#	分類	判断基準	試験結果	課題
1	装置構成および制御機能の妥当性	高所作業性（操作性）の検証（A）の制御機能（操作モード）との比較	産業用ロボットアームと特定作業用ロボットアームの制御機能を比較し、産業用ロボットアームと特定作業用ロボットアームが同等の性能を有することを確認。	・特になし。
2		高所作業性（操作性）の検証（A）のHMIの操作性との比較	IHIの制御機能を組み込んだ産業用ロボットと特定作業用のHMIを比較し、IHIの制御機能を組み込んだ産業用ロボットが特定作業用ロボットと以上の性能を有することを確認	・特になし。

<まとめ>

- 産業用ロボットアーム（試験A）と同様にケーブルトレイの撤去作業を特定作業用ロボットアーム（試験B）により行い、両ロボットアームの操作性比較を行った。
- 産業用ロボットアームについては、標準制御機能では操作性に劣るため、ロボットアーム操作訓練期間が長期間となる。加えて、ロボットアーム同士の衝突リスクもある。これに対し、IHI制御機能を組み込むことで操作性が向上し、訓練期間を短くすることが可能。加えて、両腕協調制御機能によりロボットアーム同士の衝突を防ぐことで安全性も向上する。
- 特定作業用ロボットアームは遠隔操作性に優れるものの、標準制御機能の産業用ロボットアーム同様に操作習熟には長期間の訓練期間を要する。また、両腕協調制御が組み込まれていないため、衝突リスクもある。
- 以上により、操作性は以下の順序で優れていることが試験を通じて判明した。
 - IHIの制御機能を組み込んだ産業用ロボットアーム
 - 特定作業用ロボットアーム*
 - 標準制御機能の産業用ロボットアーム
- 従って、IHIの制御機能を組み込んだ産業用ロボットアームを用いて今後の検討を進めることとする。

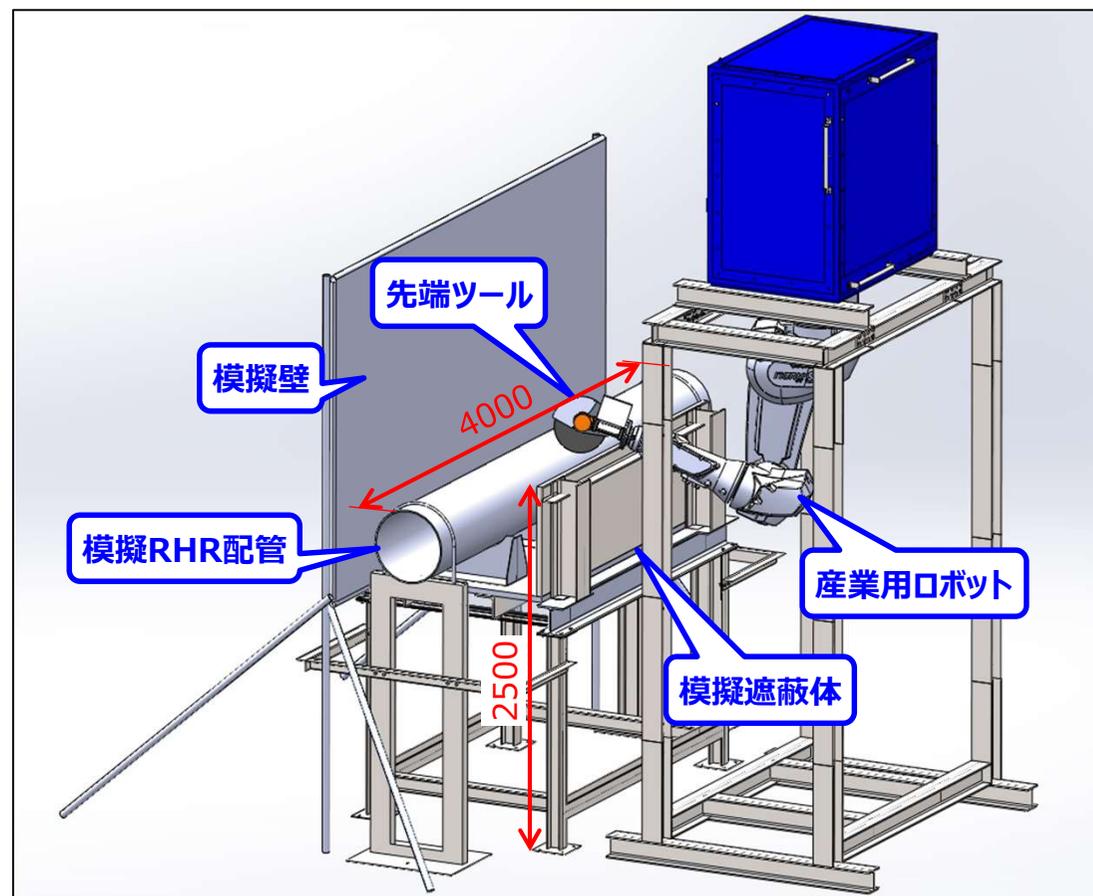
*特定作業用ロボットアームにIHIの制御機能を組み込むことも可能であるが、本ロボットアームは価格が高価かつ長納期品であり、産業用ロボットアームでも同等な作業が可能であることから、産業用ロボットアームを適用する方針とする。

<目的>

高難度と想定されるRHR配管および遮蔽体の遠隔切断を行い，適した切断ツール，把持固定方法の選定および撤去手順の検証を行う。

<主な確認項目>

- 切断方法の妥当性
- 火花の発生程度
- 把持方法の妥当性
- 一連の作業における作業時間
- カメラによる視認性
- RHR配管および遮蔽体撤去手順

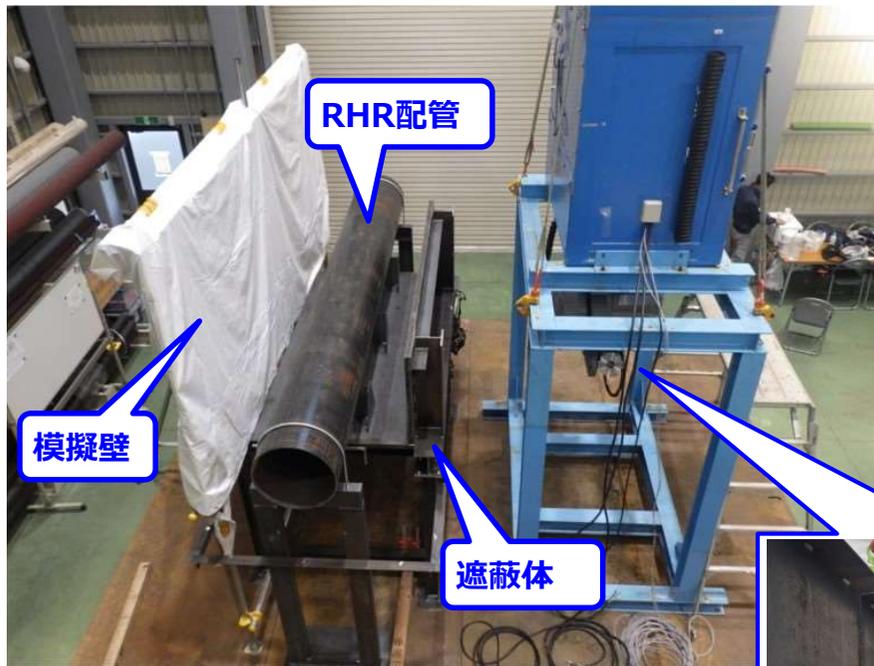


RHR配管切断試験における設備構成

5.4 試験結果（RHR配管の切断検証）

<試験場所>

- 福島地元企業施設で予備試験実施後、**楢葉遠隔技術センターにて本試験を実施した。**



地元企業施設での試験状況



楢葉遠隔技術センターでの試験状況



チップソー

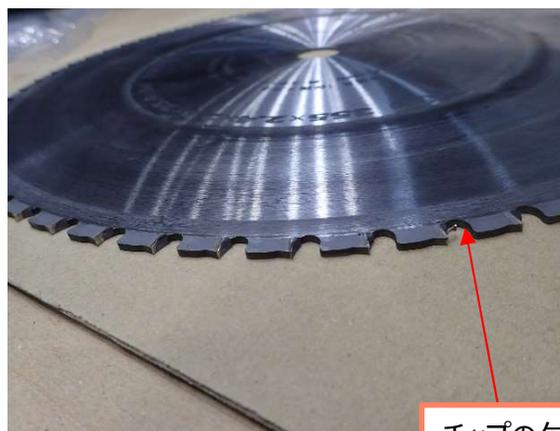
産業用
ロボット

<切断作業効率確認結果>

- チップソーにより遮蔽体(t40mm), RHR配管(t9.5mm)は切断可能であることを確認した。
- しかし、切断作業にかかる時間は、目標作業時間の5~10倍の切断作業時間を要した。
例)遮蔽体 目標作業効率：30分/m, 実績：180分/m
- 試験結果を踏まえ、以下の方針で実機にフィードバックする。
 - ブレードの摩耗により切断効率が落ちることが確認されたため、試験データに基づき累積1.5m程度でブレードを交換する方針とする。ブレード交換作業は、遠隔操作で先端ツールごと交換する方針で検討する。（なお、上記の時間にブレード交換時間は含まれていない）
 - RHR配管切断時は、配管下面切断時に配管が自重で反り、チップソーが挟み込まれ停止する事象が頻発したが、クレーンで配管を吊り上げ反りを補正することで、挟み込みを防止可能なことを確認した。実機においては、配管にジャッキを設置することで反りを解消し、切断を行う方針で検討する。
- しかしながら、機械式切断により厚板を切断する条件では目標作業効率の達成は困難と考えられる。そのため、切断には時間がかかることを前提として、段取り等の他の作業を効率化する等の方法でカバーする方針。



切断効率の悪化したブレード



ブレードの摩耗状態

チップの欠け



RHR配管下面切断時

<火花の発生状況確認結果>

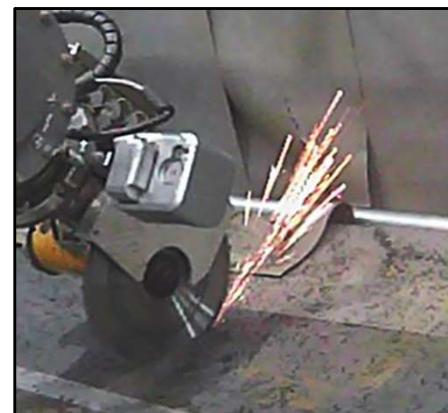
- チップソーによる切断時に発生する火花について、以下の方法により抑制が可能なことを確認。
 - 散水(300mL/分)
 - チップソーのブレード種類変更
 - チップソー回転数を落とし、1回転あたりの切り込みを大きくする
- 実機用の先端ツールとして構築する際は、回転数制御ができる機能を付与する。
- 散水については床面にまで水が滴るほどの水量であったため、別途高所作業性の検証(A, B)での火花抑制結果も踏まえ、採用する場合は現場に堰をあらかじめ設置してから切断する方針で検討する。
- 高所作業性の検証(B)で行った火花カバーによる飛散効果防止効果も踏まえ、1F現場にて適用する際は、あらかじめ周囲のケーブル等の非難燃性干渉物の有無を確認し、存在する場合は事前に養生等の処置をする。



散水前



散水中



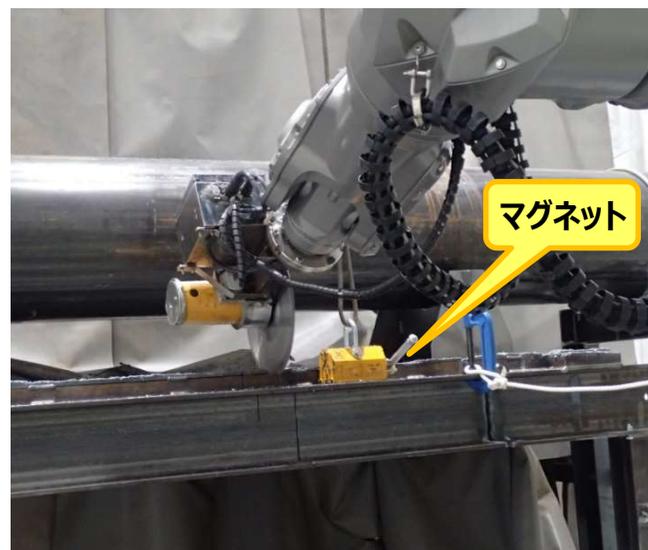
火花カバー有での切断

<把持・搬送性確認結果>

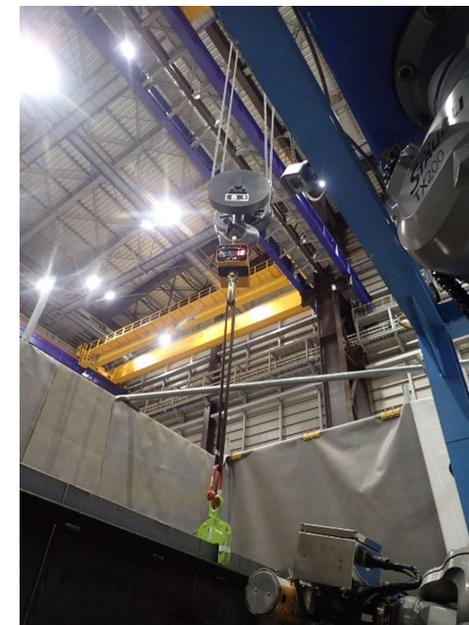
- クランプおよびマグネットにより切断後対象物の把持を行い，安定して把持・搬送が可能か確認した。
 - クランプは長尺部材も安定して把持可能だが，水平部材に対して把持が困難。
 - マグネットは水平部材や把持部がない部材も把持可能だが，長尺部材を把持する際は不安定となる。
- クランプ把持が可能な場合はクランプにより把持，困難な場合はマグネットにより把持する方針とする。マグネットにより把持する場合は，切断単位を小さくし安定して把持するようにする。



クランプによる鉛直遮蔽体の把持



マグネットによる水平遮蔽体の把持



天井クレーンによる把持の様子

5.4 試験結果（RHR配管の切断検証）

<試験結果>

#	分類	判断基準	試験結果	課題
1		有意な振動等なく安定した状態で作業が可能なこと	・通常切断時の振動は大きくないが、チップソーがキックバック(切断対象に挟まった状態)した場合には振動することを確認。	・アウトリガーの追加，把持ツール装着等の方法により転倒対策が必要。
2		火花発生の抑制される切断方法であること	・散水により火花の発生が抑制されることを確認した。 ・チップソーのブレード種類および高トルクモータを採用することで，火花の発生が抑制されることを確認した。	・高トルクモータを採用したチップソーの設計・製作が必要。 ・切断場所周辺に可燃物がある場合は，事前に養生が必要。
3	装置構成・仕様等の妥当性	切断が可能であること(配管断面30分以内遮蔽体30分/m以内)	チップソーにより切断可能なことを確認。切断にかかった時間は以下のとおり。 ・遮蔽体(t40mm)：180分/m ・遮蔽体H鋼部：30分 ・RHR配管：300分/断面	・モータ高出力化や切断作業以外の効率化により，切断効率向上が必要。
4		対象物（RHR配管，遮蔽体）の切断において，十分に安定した状態で把持・固定されること	・クランプおよびマグネットにより安定して把持可能なことを確認した。	・1F R/B内でクランプ，マグネットを使用可能な装置が必要。
5		切断後の切断対象物の搬送が可能であること	・クランプおよびマグネットにより把持した状態で搬送が可能であることを確認。	・1F R/B内でクランプ，マグネットを使用可能な装置が必要。
6	作業効率の妥当性	極端に時間を要する作業がなく，安全かつ円滑に作業が行えること（目標作業時間は一連の試験手順を考慮し設定）	No.3と同様。	No.3と同様。
7	作業時の視認性	目的とする各作業において十分な視野を確保でき，安全かつ円滑に作業が行えること	・全体俯瞰カメラ，先端ツール付カメラ，切断対象物裏側設置のカメラにて必要な視野を得られることを確認した	作業ロボットおよび俯瞰カメラ装置に加え，別途遮蔽体裏側にカメラが必要。
8	作業手順の妥当性	安全・確実かつ合理的な作業手順であること	・クランプおよびマグネットで把持することにより，安全・確実に作業できることを確認した。	・1F R/B内でクランプ，マグネットを使用可能な装置が必要。

＜試験結果を受けた今後の方針＞

- 遮蔽体(t40mm), RHR配管(t9.5mm)の切断ツールにはチップソー（ディスクカッター）を採用する。
- キックバック時の振動による転倒を防止するため、アウトリガーを追加し、加えて切断時は把持ツール装着のツールにて遮蔽体を把持することで、転倒を防止する方針とする。
- 火花の発生を抑制するため、高トルクのモータを採用し低速で切断可能なツールとする。また、切断場所周辺にケーブル等の可燃物がある場合は事前に養生するか撤去する。
- 切断自体の作業に時間がかかるため、実機においてはブレード交換頻度の最適化、モータ高出力化、配管切断時のジャッキ追加により切断効率向上を計る。
- 把持用装置としてクランプおよびマグネットを搭載可能なものを採用する。
- 貫通の確認のため切断対象物裏側にもカメラが必要であることから、事前準備作業の際、人手にてカメラをあらかじめ設置する。

＜系統隔離工法の選定について＞

- 系統隔離にはさまざまな工法が存在するため、原子炉建屋内の配管に用いるのに適していると思われるものを候補として複数選定し、要素試験を行ってそれらの妥当性の検証を行うものとする。
 - ✓ 大口径配管向け：インフレイタブルバッグ法（検証A）・材料充填法（検証B）
 - ✓ 小口径配管向け：圧着法（検証A）・材料充填法（検証B）

工法名称	工法の概要	工法の利点	工法の欠点	特に検証したい点
インフレイタブルバッグ法	配管内に袋を挿入し、充填材を注入して膨らませる	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 既に製品化されている確立した手法であり、選定した製品の設計品質に問題がなければ安定した結果を期待できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 小口径配管には向かない。 ➤ 材料充填法に比べると煩雑。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 充填材を使うという類似性のある材料充填法に対して明確な優位性があるか
圧着法	配管を外から押し潰して密着させる	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 消耗品が少ない。 ➤ 作業に要する時間が他より大幅に短い。 ➤ ホットタッピング(※)を必要としない。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 大口径配管には向かない。 ➤ 使用例としては水密が多く気密については実績に乏しい。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 十分な気密を得られるか
材料充填法	配管内に充填材を注入して固化させる	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 工程がシンプルで必要な資材の種類も少ない。 ➤ 同じ基本技術で大口径配管にも小口径配管にも対応できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 特になし。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ RHR配管（500A）に実施可能か

- 上記3つの工法はいずれも・一度閉塞を形成した後は維持のための保守作業を必要としない・閉塞工程中に配管内容物を漏えいさせない・高温を生じるなどの危険性がある作業工程がない・耐放射線性に劣る機材・資材を必要としないという条件を満たすことから、今回の用途に対する適性があると判断された。

※**ホットタッピング**：系統の運転状態を維持したまま配管等に穿孔して後の作業工程のためのポートを形成する工法。一般的な穿孔作業との違いは、系統隔離やページなどの**事前準備を必要としない**、内部流体を**外へ漏えいさせない**、内部の可燃物に**引火させる危険がない**という特性を有する点にある。

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

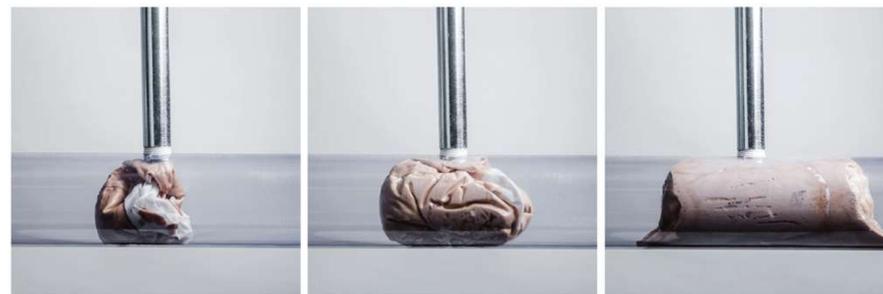
－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<目的>

- 系統隔離工法の推奨工法の一つである以下工法について，シール性能や信頼性，作業効率等に関する工法の妥当性検証を行う。
 - ✓ 大口径配管：インフレイタブルバッグ法
 - ✓ 小口径配管：圧着法

<試験構成>

- 本試験は，上記各工法のシール性能等工法の妥当性を検証することを目的とする。そのため，作業ロボットによる遠隔操作は行わず，先端ツール（専用治工具）のみを用いて要素試験を実施する。
- 試験で用いる対象配管は，RHR配管およびCRD挿入・引抜配管の部分模擬体とする。
- インフレイタブルバッグについては，対応するホットタッピングの工法とセットで確認する。



インフレイタブルバッグ法
（大口径配管の系統隔離用）



圧着法（小口径配管の系統隔離用）

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<大口徑配管（インフレイタブルバッグ法）：工法について>

- ▶ インフレイタブルバッグ法は、配管の内部に袋を挿入し、袋の中に膨張固化する充填材を充填することで袋を膨らませ、配管内を閉塞する工法。
- ▶ 袋の挿入や充填の間も配管の内外で気密を維持する必要があるという特殊な要求から、ホットタッピングによる配管への穿孔工程も含めた設計がなされている。
- ▶ 今回選定したインフレイタブルバッグは二重構造になっており、二段階に分けて充填を行うことでより高い気密性を得ることができる。また、実績と耐放射線性の観点から、バッグの材質はナイロンを、充填材は発泡ポリウレタン（二液混合式）を採用する。
- ▶ インフレイタブルバッグ法は大口徑配管への適性が高く、500A配管向けの製品が既に開発されている。このため、安定した結果を得られることが期待できる。



－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<大口徑配管（インフレイタブルバッグ法）：予備試験による知見>

- ▶ 本試験で予定しているものと同様の500A炭素鋼配管と500A配管向けインフレイタブルバッグおよび必要な治工具を準備し，バッグのメーカーが推奨する方法で閉塞を試行した。これにより以下の知見を得た。

1. メーカーが知見に乏しいと表明した配管下方からの挿入を試行した結果，特に問題なく挿入と充填を行えることが判明した。すなわち，インフレイタブルバッグ法は配管に対していかなる方向からでも実施可能である。配管下方からの挿入は高所の配管に対応しやすく，穿孔を配管内からの排水に利用できるという利点があることから，本試験では下方からの挿入を前提とする。

2. 500Aのような大型の配管に対しては膨張率が高い充填材を選定する必要があることが判明した。膨張率は低い方が固化後の組織が密になり気密を得るのに有利と考えられるが，膨張率1:3の充填材はバッグ内の空間を完全に充填することができなかった。本試験では膨張率1:10のものを使用する（第一段・第二段共通）。

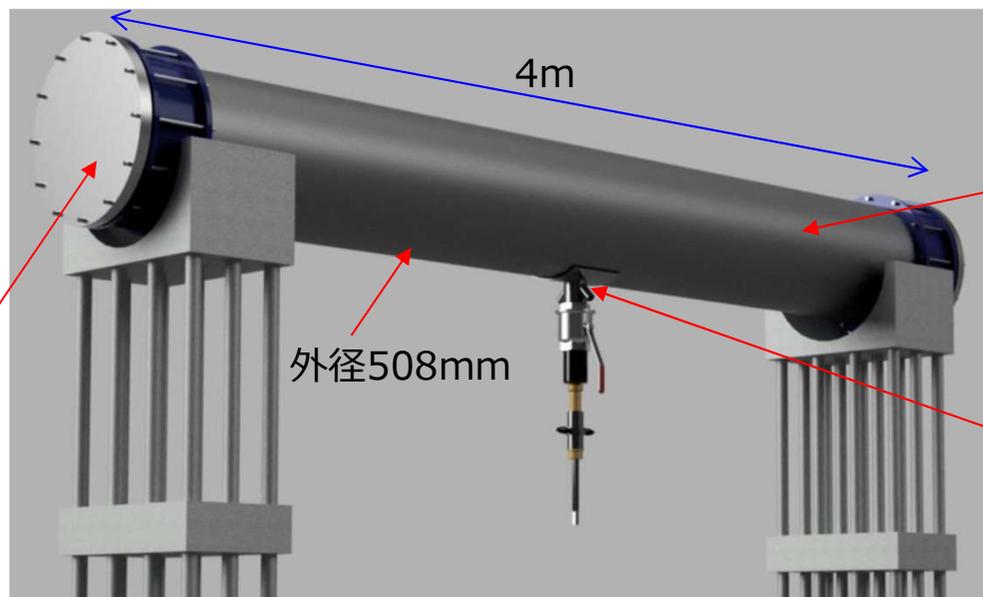
5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

＜大口径配管（インフレイタブルバッグ法）：試験要領（試験機材）＞

※表示寸法は概略。

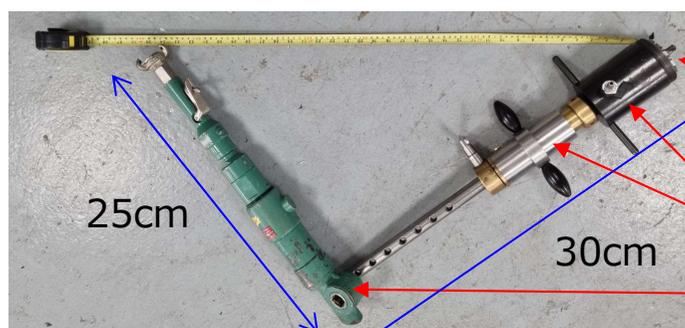
配管の両端はフランジで閉止。サーマルカメラを内部に設置する際など、必要に応じて開放する。片側には加圧用のポートを設けて気密試験に用いる。



RHR模擬配管（500A Sch20 炭素鋼管）。下方から作業できるように2m程度の高さの架台で保持する。

「サドル」と呼ばれる中空の金具（使い捨て）を配管に接着し、その穴を通して配管穿孔工具やバッグ、充填材を挿入する。サドルは工具のガイドと作業中の気密維持を担う。

大口径配管用試験設備模式図

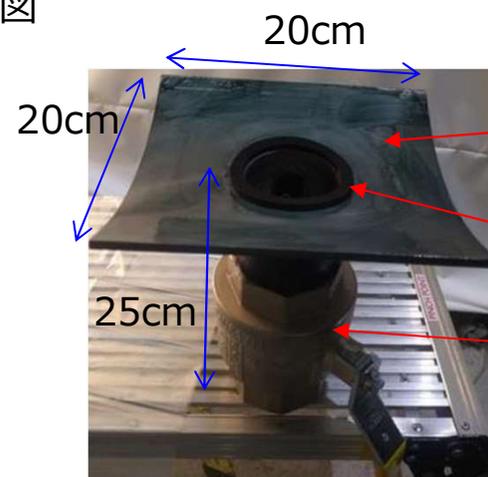


配管穿孔工具

72mmホールソウ（アタッチメント内）

専用アタッチメント
空圧モータ式
アングルドリル

※ホールソウとアングルドリルは汎用品である。試験時はドリルとアタッチメントの間にトルク計を追加した。



サドル

この面に接着剤を塗って配管に貼り付ける

ガスケット（ネオプレン）

3"フルボアボール弁

※試験用に内視鏡カメラを設置できる斜めの枝管付きのものも製作した。

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<大口徑配管（インフレイタブルバッグ法）：試験要領>

- サドルの接着面に接着剤を塗布し，リフターに据え付けて配管の下方から持ち上げ，配管の下面に接着させる。
- 配管穿孔工具をサドルから挿入し，配管を穿孔する。作業者はトルク計を監視しながら手動でドリルを送る。内視鏡カメラ・通常カメラ・サーマルカメラで加工工程を観察する。
- ドリルを抜き取り，インフレイタブルバッグを詰めたバッグ挿入筒をサドルに挿入する。
- 配管内にインフレイタブルバッグを押し込む。
- インフレイタブルバッグの第一充填ポートに充填材注入機を接続し，バッグに規定量の充填材を注入する。完全に固化するまで待機した後，第二充填ポートからも同様に注入・固化を行う。
- 配管内の片側の空間を加圧し，シール性能の確認を行う。内圧の設定は10kPaと1kPaの2つで行い，許容漏えい量は配管の体積に対して1.0vol%/hを目標とする（※）。なお，実際の試験では内部圧力の低下量を計測し，これを漏えい量に換算する。



※ 放射性物質取り扱い作業用グローブボックス（JIS Z4808:2002）：中程度の量の放射性物質を取り扱うグローブボックスの漏えい基準より

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<大口徑配管（インフレイタブルバッグ法）：試験確認項目のまとめ>

No	確認項目	確認方法	基準
1	穿孔中の高温と火花の発生	<ul style="list-style-type: none"> ➤サーマルカメラ ➤内視鏡カメラ（サドル内に搭載） ➤目視 	<ul style="list-style-type: none"> ➤火花発生なし ➤（水素発火温度：500℃）
2	穿孔作業の安定性	<ul style="list-style-type: none"> ➤目視 	<ul style="list-style-type: none"> ➤異常振動無し ➤工具のかじりなどがなく一貫したペースで最後まで穿孔できる
3	閉塞の気密性	<ul style="list-style-type: none"> ➤圧力計（閉塞の片側を大気開放，もう片側を昇圧して密閉し，その後10分間での圧力低下量を漏えい量に換算する） ➤大気圧計・気温計（換算用のデータを取得） 	<ul style="list-style-type: none"> ➤内圧10kPa(G)で漏れ率1.0vol%/h以下 ➤内圧1kPa(G)で漏れ率1.0vol%/h以下
4	閉塞の再現性	<ul style="list-style-type: none"> ➤同じ方法での閉塞を2回行い，それぞれの気密性を試験 	<ul style="list-style-type: none"> ➤2回とも基準以上の気密性を得ること
5	作業工程の安全性・合理性（全行程）	<ul style="list-style-type: none"> ➤目視 	<ul style="list-style-type: none"> ➤作業者や周囲に危険が及ぶような工程は無い ➤作業工程に視認性の問題は無い

注記：「作業中常に配管の内外で気密を維持できており，漏えいがないこと」も確認を要する点であるが，これについては直接的な確認は行わず，そのように工程が設計されていることのみ評価した。

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<大口徑配管（インフレイタブルバッグ法）：試験結果>

- ホットタッピング時に火花の発生は無いか。
⇒ 工具の動作は安定しており，火花の発生は一切観測されず，局所的な高温の発生も起こらなかった。
- 得られた閉塞は必要なシール性能を満足したか。また，再現性はあるか。
⇒ 許容漏えい量を満足し，結果に再現性があることも確認された。
- 作業工程に視認性や安全性の問題は無いか。安全・確実かつ合理的な作業手順になっているか。
⇒ 工程そのものに大きな問題は無い。ただし，現時点では遠隔作業のための治工具・工程は存在しないので，遠隔作業への適用のために作業工程の検討が必要である。

<大口徑配管（インフレイタブルバッグ法）：結論>

- 本工法はホットタッピングおよびインフレイタブルバッグのいずれの要素もRHR配管の閉塞に用いる工法として有効であるとの結論を得た。

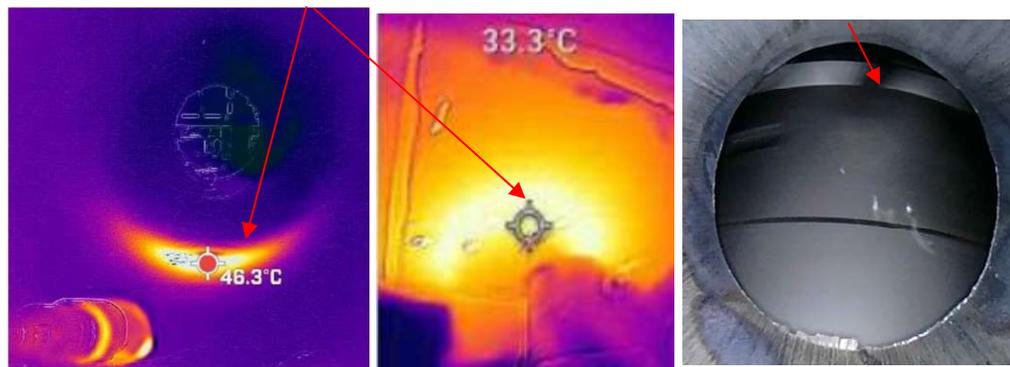
配管の内外からサーマルカメラで温度上昇を観測した。最高記録温度：104℃（セクタドリル）／62.5℃（ホールソウ本体）

サドル内に設置した内視鏡カメラで加工中の工具を観察し，火花の発生がないことを確認した。

気密試験結果（漏れ率：%vol/h）

	試験圧力	
	10kPa	1kPa
バッグA	0.7	0
バッグB	0.7	0.17

合格基準：1%vol/h
 凡例…赤：合格
 黄：不合格



配管内サーマルカメラ

外部サーマルカメラ

内視鏡カメラ

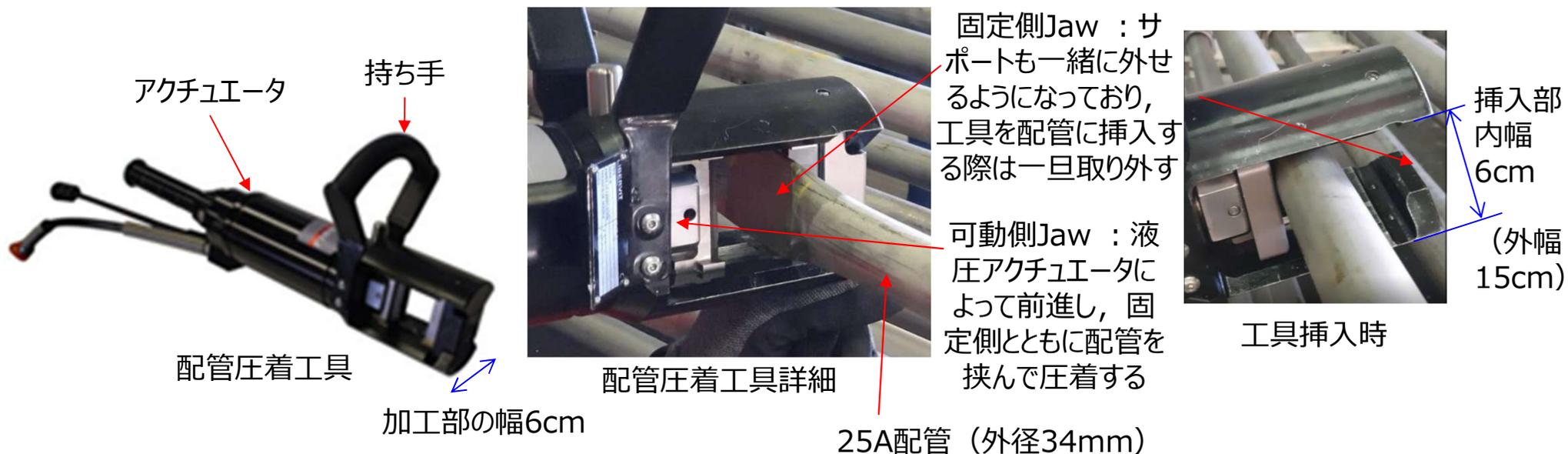
ホットタッピングの観測

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<小口径配管（圧着法）：工法について>

- 圧着法は配管を外から押し潰し，2枚の平板が密着した形状に変形させることで閉塞を作る工法。
- 今回の要素試験で採用した方法は，**液圧アクチュエータ**を搭載した手持ち式の専用工具を用い，**二つ一組の金具（Jaws）**の間に配管を挟み込んで押し潰すという手法を採る。また，金具の形状を変えて**2回圧着を行う**ことでより気密性を高めることができる。
- 圧着後の配管を切断する工程は圧着とは別の工程として扱うことができるが，今回の要素試験では同じ工具メーカーの液圧カッターによる切断を試験に組み込むこととした。
- 圧着法は配管の壁を破らないため作業中に漏えいが起こる心配がなく，加熱も行わないため配管内に可燃物があっても問題なく実施できる。**一度の圧着に要する時間はごく短いため，多数の配管を閉塞しなければならないCRD挿入引抜配管に向いている**と考えられる。



5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<小口径配管（圧着法）：予備試験による知見>

- 圧着法に用いる専用工具について調査した結果，CRD挿入引抜配管に相当する25A Sch80 SUS304配管に対する実績があるものは見当たらなかったため，有望と思われる製品(*1)を選定し，25A Sch80 SUS304配管の圧着が可能であるかを確認した。作業工程は工具メーカーの推奨に基づいて決定した。

⇒**圧着による閉塞の作成が困難であることが判明した。**メーカーの許諾を得て工具への供給液圧を70MPaから80MPaに上げたが打開できず，試験中に先端工具が破損したため能力的な限界であると判断した。そこで，**本試験では25A Sch5s, 10s, 40, 80のSUS304製配管を対象に同じ方法での圧着を行い，結果を比較することで圧着法の能力の程度を検証することとした。**

先端工具の角が配管表面に食い込んだ痕

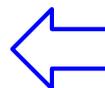


25A Sch80 SUS304配管の圧着を試みた結果

⇒明らかに変形の程度が不足しており，配管内部を閉塞することができていない

強く曲げて隅部を作ることにより高い気密を得る

本来の配管肉厚の2枚分と同等以下の厚さになるまで押し潰す



求められる形状

*1：仏Cadaracheの原子力関連施設での運用実績があり，メーカー社内試験では15A Sch80炭素鋼管の圧着に成功している（ただし今回の要素試験を前提としたものではない）。

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

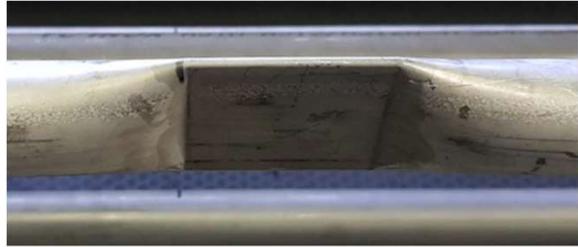
－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<小口径配管（圧着法）：試験要領>

対象となる各配管に対して以下のように試験を行う。

- 配管をサポート上に固定する。片側は完全に固定し，反対側は全く固定しないか，振れ止めとして浮かせたUボルトに通す。
- Flat Jaws (*1)を装着した工具を配管に挿入し，圧着を行う。
- 先端工具をBaffled Jaws (*2)に換装し，同じ位置で圧着を行う。
- 気密試験を行う。方法・基準は大口径配管と同じ。
- 状況に応じて追加で以下を行った後，再度気密試験を行う。
 - ・気密が不十分であれば，200mm離れた位置を同じ工程で圧着する。
 - ・気密が十分であれば，200mm離れた位置で液圧カッターを用いて切断する。

*1：Flat Jawsは配管を平らに圧着する。

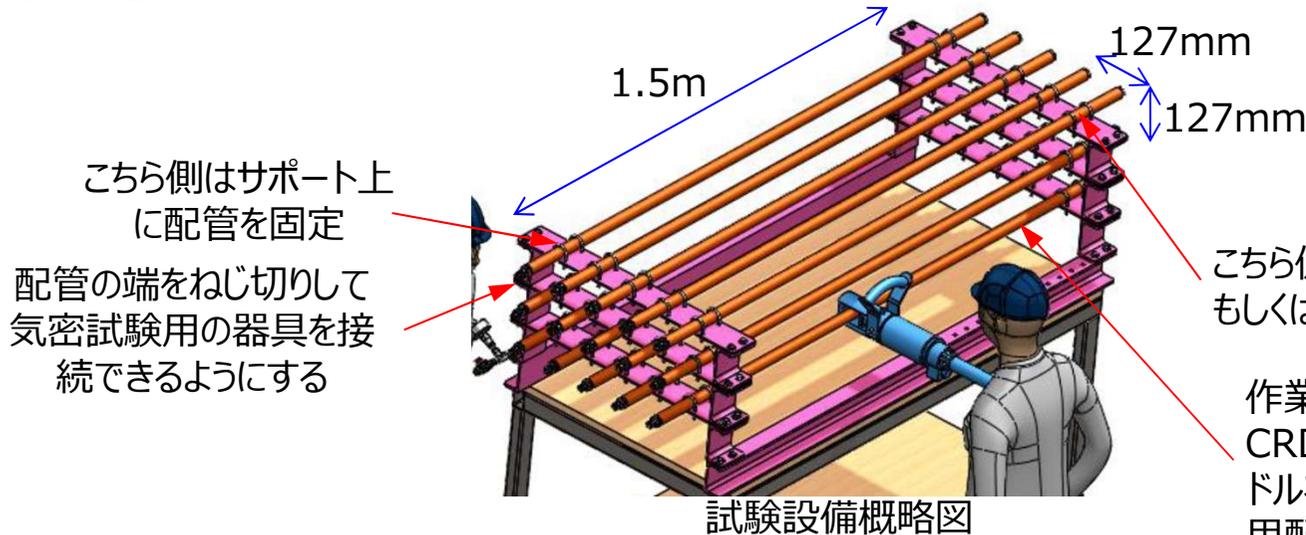


Flat Jawsで圧着された配管

*2：Baffled Jawsは平らに圧着された配管をさらにクランク状に曲げて気密性を高める。



Baffled Jawsで圧着された配管



作業性を確認するため，実際のCRD挿入引抜配管を模したバンドル状（127mm間隔）に試験用配管を配置する

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<小口径配管（圧着法）：試験確認項目のまとめ>

No	確認項目	確認方法	基準
1	閉塞の気密性	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 圧力計（閉塞の片側を大気開放，もう片側を昇圧して密閉し，その後10分間での圧力低下量を漏えい量に換算する） 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 内圧10kPa(G)で漏れ率 1.0vol%/h以下 ➤ 内圧1kPa(G)で漏れ率 1.0vol%/h以下
2	閉塞の再現性	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 同じ方法での閉塞を2回行い，それぞれの気密性を試験 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2回とも基準以上の気密性を得ること
3	対象肉厚と固定による影響	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 配管の肉厚とサポートでの固定の仕方をパラメータとして複数回の閉塞を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 気密性と再現性について結果を比較
4	作業工程の安全性・合理性（全行程）	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 目視 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 作業者や周囲に危険が及ぶような工程は無いか ➤ 作業工程に視認性の問題は無いか

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<小口径配管（圧着法）：試験結果>

- Sch10s配管において最も良好なシール性能を得られた。

⇒今回使用したBaffled JawsはSch10s配管を想定した設計であり，したがって対象の肉厚が設計値から離れるほど（厚くても薄くても）結果は悪化すると考えられる。

- Sch40以上の配管では全くシール性能を得られていない。

⇒これらは壁面が完全に密着しておらず，圧着工具による力が不足しているものと考えられる。

気密試験結果（漏れ率：%vol/h）

合格基準：1%vol/h

No.	配管肉厚	固定	圧着1か所		圧着2か所		圧着後切断	
			10kPa	1kPa	10kPa	1kPa	10kPa	1kPa
1	Sch5S	なし	10	1.6	8.9	0.5		
2	Sch5S	なし	10.5	0.8	8.8	0.8		
3	Sch5S	振れ止め	10.9	1.2	18.5	1.5		
4	Sch5S	振れ止め	13.5	1.2	11.4	1		
5	Sch10S	なし	13	1.4	9.8	0.6		
6	Sch10S	なし	2.3	0.8	2	0		
7	Sch10S	振れ止め	0.8	0			2.8	
8	Sch10S	振れ止め	0.8	N/A(*1)			17.2	
9	Sch40	なし	F		F			
10	Sch40	なし	F		F			
11	Sch40	振れ止め	F		F			
12	Sch40	振れ止め	F		F			
13	Sch80	なし	F					
14	Sch80	なし	F					

凡例…

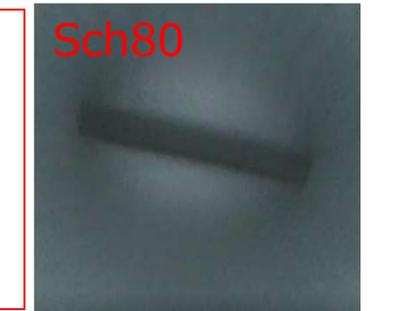
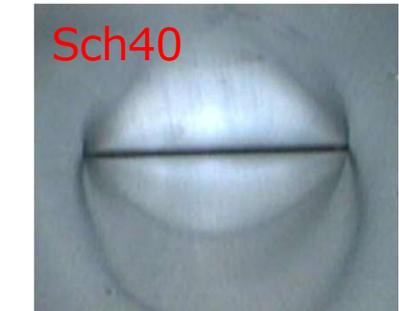
赤：合格

黄：不合格

F：圧力を10分間維持できなかった

*1:試験時の不備により結果記録できず

圧着により気密を得たものの，液圧カッターによる切断で圧着箇所が再変形し，気密を失ったと思われる



内視鏡カメラで内側から見た圧着後の配管

－ 系統隔離工法の妥当性検証（A）：インフレイタブルバッグ法，圧着法－

<小口径配管（圧着法）：試験結果>

- 得られた閉塞は必要なシール性能を満足したか。また，再現性はあるか。

⇒既存の工具で許容値を満足するシール性能を得られたのはSch5s・10s配管の一部の条件においてのみである。また，配管が振れ止めされているかどうか，加工時に工具が配管に対して正確に鉛直になっているかといった外部条件が結果に影響しており，再現性にやや難がある。

- 想定している配管群の全てに対し必要な閉塞作業を行えるか。

⇒既存の工具の寸法は間隔の狭い配管バンドルにも対応できる。しかし，切断による変形を避けるために圧着箇所と切断箇所を大きく離すようにすると残置される領域が広くなり，これはバンドル全体の閉塞と除去を行うにあたっての問題となる。

- 作業工程に視認性や安全性の問題は無いか。安全・確実かつ合理的な作業手順になっているか。

⇒ホットタッピングを必要とせず，さらに工程に要する時間が非常に短い（圧着自体は1回1分以下）という作業性の良さが確認できた。

<小口径配管（圧着法）：結論>

- 本工法をCRD挿入引抜配管に適用するには追加の開発・調査が必要であるとの結論を得た。

⇒必要事項：現在のものよりも高圧の液圧源に対応できる工具の開発

Sch80配管用のBaffled Jawsの開発

変形の少ない切断方法の調査・開発

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法 －

<目的>

- 系統隔離の推奨工法の一つである以下工法について、シール性能や信頼性、作業効率等に関する工法の妥当性検証を行う。
 - ✓ 大口径配管：材料充填法（発泡ポリウレタン）
 - ✓ 小口径配管：材料充填法（発泡ポリウレタン）

<試験構成>

- 試験Aと同様に、先端ツール（専用治工具）のみを用いた要素試験を実施する。
- 試験Aと同様に、試験で用いる対象配管はRHR配管およびCRD挿入・引抜配管の部分模擬体とする。
- 試験Aと異なり、材料充填法はホットタッピングと系統隔離の工程が直接紐づいていないので、これらの試験は別々に行う。



材料充填法
(大口径配管, 小口径配管の系統隔離用)

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法 －

<材料充填法：工法について>

- 材料充填法は配管内に膨張固化する充填材を直接充填して閉塞する工法である。
- 充填材には多くの種類があるが、今回の要素試験では広く使用されていて耐放射線性に優れる発泡ポリウレタンを採用する。発泡ポリウレタン充填材はそれぞれ異なる特質を持った様々な製品が市販されているので、要素試験では複数の製品を試験して最適なものを探ることとする。
- 発泡ポリウレタン充填材は一液式と二液式のものがある。一液式は容器から出すだけで固化が始まるので扱いが容易であるのに対し、二液式は充填の直前に樹脂と硬化剤を混合させるという手間を要するが、周囲の環境に影響されにくく、また混合比で性質を調整できる利点があることから、産業規模での利用では二液式が主流である。本試験では小口径配管向けに一液式についても試験を行った。



二液式充填材の一例。加圧タンクからそれぞれの液剤が供給され、ノズル先端の混合室で混ざり合いながら放出される。



二液式充填材の一例。袋の中でそれぞれの液剤を隔てているシールを引きはがし、手でもみ込んで二液を混ぜてから袋を切り開いて対象に流し込む。

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法－

<大口径配管（材料充填法）：予備試験による知見>

- 300Aおよび500Aの透明PVC管および炭素鋼管を用いて、充填材を内部に充填する試験を行い、以下の知見を得た。

1. 固化が早い充填材（*1）で大口径配管断面全域を覆う閉塞を作っても十分な気密を得られないことが多い。
2. 固化が遅い充填材（*1）で大口径配管の断面全域を覆う閉塞を作ろうとしても、充填材が配管内を流れて行ってしまう、完全な閉塞が作れる保証がない。

⇒大口径配管に材料充填法を用いるには固化が遅い充填材を使用する必要があるが、その場合は閉塞する領域の両端に堰を設けて充填材の流出を防ぐ必要がある。

⇒配管内に堰を設ける方法には風船などを挿入して膨らませる方法と固化の早い充填材を直接充填する方法があるが、前者の方法は500A配管では膨張中に風船が割れるなど安定しない傾向があったため、本試験では直接充填を採用する。

*1：どちらの充填材も二液式発泡ポリウレタンだが、固化が早いものは二液混合後30秒程度で流動性を失う。遅いものは5分程度。



充填材の流動性が低いために不連続な塊状になり、塊と塊の間に隙間が残りがちになる

固化の早い充填材による充填



約6.5m

固化の遅い充填材による充填の試み（300A配管）



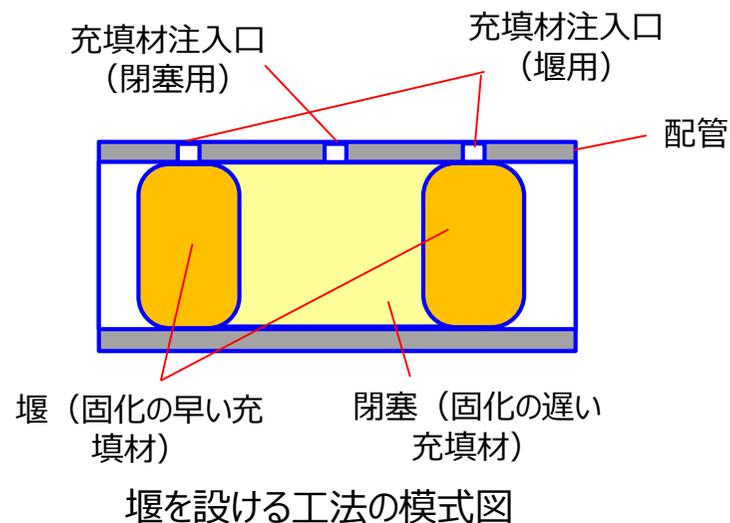
風船による堰の実験（300A配管）

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法 －

<大口径配管（材料充填法）：試験設備と内容>

- 模擬RHR配管（炭素鋼製500A Sch20配管）を単独で台上に水平に置く。配管の端にはフランジを設け、必要に応じて閉止や気密試験用機材の接続ができるようにする。
- 配管の上方に小孔を3か所開ける。間隔はおよそ300mmとする（長さ500mmの閉塞を得ることを目的とする）。両側の孔は堰を設けるのに用い、中央を閉塞に用いる。
- 堰用の穴から**固化の早い充填材のノズルを挿入し、充填材をスプレーして配管断面全体を塞ぐ堰を形成する**。両側に堰を形成した後、完全に固化するまで待つ。
- 中央の穴から**固化の遅い充填材**を流し込み、完全に固化するまで待つ。
- 気密試験を行う。試験方法は試験Aと同じ。



5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法－

<大口徑配管（材料充填法）：試験確認項目のまとめ>

No	確認項目	確認方法	基準
1	閉塞の気密性	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 圧力計（閉塞の片側を大気開放，もう片側を昇圧して密閉し，その後10分間での圧力低下量を漏えい量に換算する） 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 内圧10kPa(G)で漏れ率1.0vol%/h以下 ➤ 内圧1kPa(G)で漏れ率1.0vol%/h以下
2	閉塞の再現性	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 同じ方法での閉塞を2回行い，それぞれの気密性を試験 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2回とも基準以上の気密性を得ること
3	作業工程の安全性・合理性（全工程）	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 目視 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 作業者や周囲に危険が及ぶような工程は無いか ➤ 作業工程に視認性の問題は無いか

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法－

<大口径配管（材料充填法）：試験結果>

- 得られた閉塞は必要なシール性能を満足したか。また、再現性はあるか。

⇒ 固化の早い充填材で堰を作り、固化の遅い充填材を用いて閉塞する工法は許容漏えい量を満足し、結果に再現性があることも確認された。

気密試験結果（漏れ率：%vol/h）

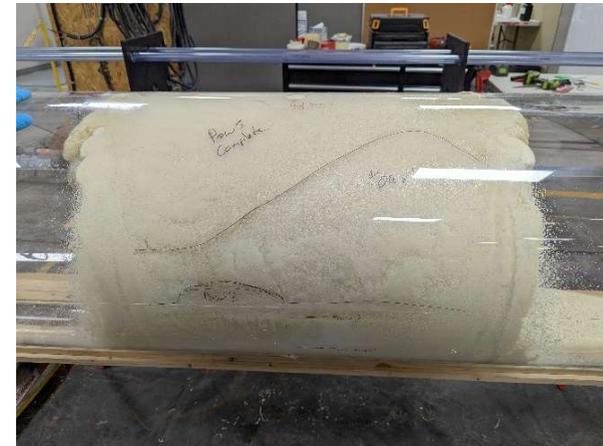
	試験圧力	
	10kPa	3kPa (*1)
配管1	0.34	0
配管2	0.30	0.19

合格基準：1%vol/h

凡例…赤：合格

黄：不合格

*1：機材の都合から1kPaではなく3kPaで実施



透明PVC管内に作成した堰と閉塞の一例（予備試験）

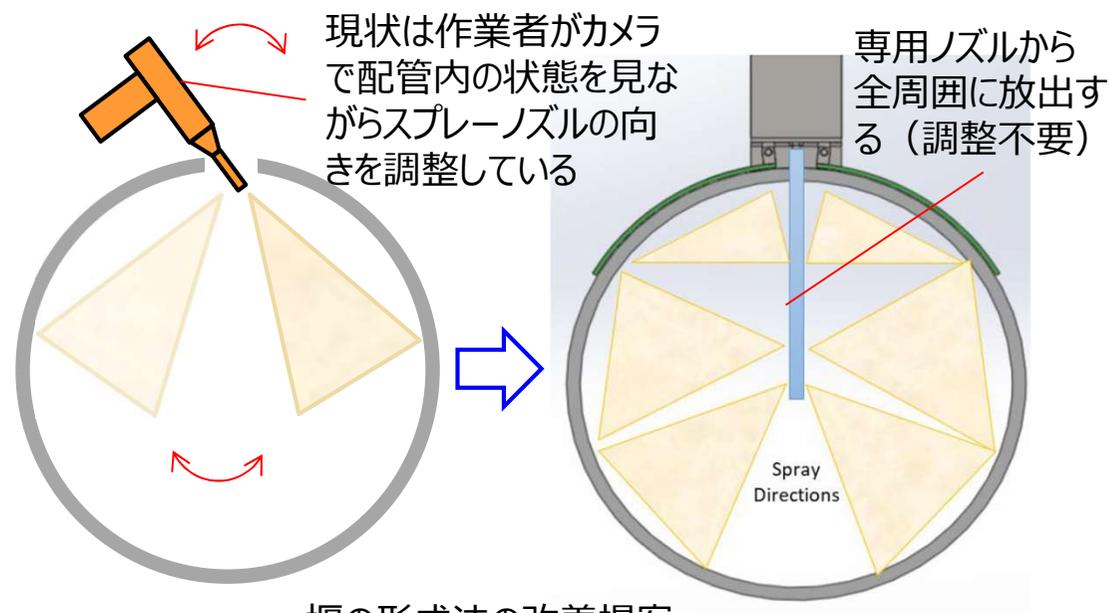
－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法－

<大口径配管（材料充填法）：試験結果>

- 作業工程に視認性や安全性の問題は無い。安全・確実かつ合理的な作業手順になっているか。
⇒現在の工法では、堰の形成は作業者が目視して調整しながら行わなければならない。配管内の視認が不可能な環境および遠隔作業への適用のために調整を必要としない作業工程を開発する必要がある。

<大口径配管：結論>

- 本工法はRHR配管の閉塞に用いる工法として有効ではあるが、実際の適用には堰の形成方法の改善が必須である。（例：右図）



堰の形成法の改善提案
(実用化には開発が必要)

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法－

<小口径配管（材料充填法）：予備試験による知見>

➤ 25A透明PVC管およびSUS管に様々な条件で充填材を注入する試験を行い、以下の知見を得た。

1. 発泡ポリウレタン充填材には一液式と二液式のものがあるが、一液式ものは小口径配管内では正常に固化しない（十分な量の空気との接触が必要）ため、使用できるのは二液式のものに限られる。

⇒本試験では、大口径配管の試験に用いたものと同じ二液式の充填材を用いる（固化が遅いものと早いものの二種）。

2. 二液式充填材は水に覆われていても発泡固化するため、配管内に水がある状態でも閉塞を作ることができる。ただし水分が多い環境では乾燥時よりも発泡による膨張の度合いが大きくなるため、得られる気密性は悪化すると予想される。

⇒本試験では、より悪い条件を模擬するため、配管内に半分程度まで水をためた状態で充填する。

3. 25A程度の配管であれば、充填材を一度注入するだけで広い範囲（3m以上）を充填することができる。従って、CRD挿入引抜配管に対しては、除去対象領域の全体を充填材で閉塞し、充填材ごと除去するのが有効であると考えられる。

⇒本試験では、除去対象領域を模擬した1.5mの配管の全体を充填材で閉塞する。

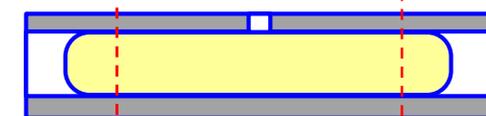


充填材がほとんど固化せず気泡ばかりになっている

一液式充填材の実験



(当初の計画：領域の両端に充填)



(今後の方針：領域全体に充填)

配管内への充填方法の変更

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

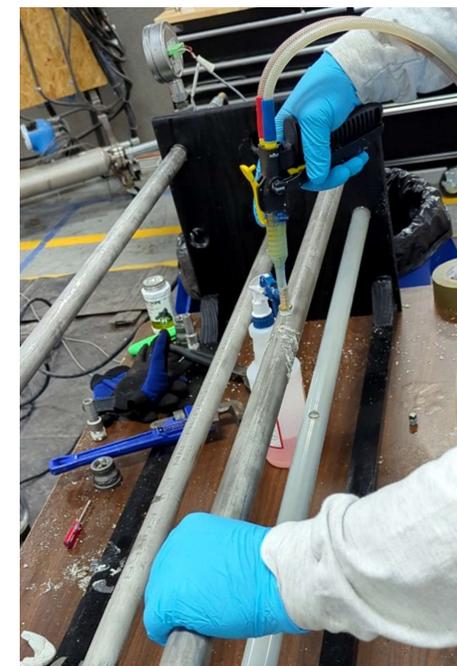
－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法 －

<小口径配管（材料充填法）：試験設備と内容>

- 試験用配管（25A Sch80 SUS304製配管，長さ1.5m *1）を単独で台上に水平に置く。配管中央の上方に小孔を開け，充填材を注入できるようにしておく。気密試験用の器具を接続できるように配管の端はねじ切りしておく。

*1：設備の都合から試験の半分はPVC管で代替した。

- 配管内に水がある状態を模擬できるように，試験用配管の両端に上に曲げたホースを取り付け，水を配管の半分程度まで流し込んでおく。
- 配管の小孔に充填材注入機のノズルをあてがい，配管全体を充填できる量の充填材を注入し，固化させる。
- 固化後，配管の片側に加圧用の器具を接続して気密試験を行う。試験は1.5mの配管全体に対して行った後，さらに長さが150mmになるように端から切り出したものに対しても行う。試験の方法・基準は試験Aと同様だが，試験期間の都合から1kPaでの試験は省略し，10kPaでの結果のみで判定した。
- 上記の試験を固化の早い充填材と遅い充填材のそれぞれを用いて行った。



小口径配管に対する充填



切り出した配管での気密試験

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法－

<小口径配管（材料充填法）：試験確認項目のまとめ>

No	確認項目	確認方法	基準
1	閉塞の気密性	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 圧力計（閉塞の片側を大気開放，もう片側を昇圧して密閉し，その後10分間での圧力低下量を漏えい量に換算する） 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 長さ150mmの閉塞により，内圧10kPa(G)で漏れ率1.0vol%/h以下 ➤ （1kPa(G)での試験は省略）
2	閉塞の再現性	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 同じ方法での閉塞を2回行い，それぞれの気密性を試験 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2回とも基準以上の気密性を得ること
3	最適な充填材の選定	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 複数種類の充填材を使用し，それぞれの気密性を試験 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 気密性と再現性について結果を比較
4	作業工程の安全性・合理性（全工程）	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 目視 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 作業者や周囲に危険が及ぶような工程は無いか ➤ 作業工程に視認性の問題は無いか

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法 －

<小口径配管（材料充填法）：試験結果>

➤ 得られた閉塞は必要なシール性能を満足したか。また、再現性はあるか。

⇒固化の早い充填材を用いることで長さ150mmの閉塞で必要なシール性能を得られることが確認され、結果に再現性があることも確認された。固化が遅い充填材は長さ1.5mの閉塞では必要なシール性を得られたものの、150mmでは同じ結果を得られなかった。

気密試験結果（漏れ率：%vol/h）

	配管 材質	充填材	試験圧力:10kPa	
			1.5m	150mm
1	PVC	急速固化	0	0
2	SUS	急速固化	0	0
3	PVC	低速固化	0.05	N/A (*1)
4	SUS	低速固化	0	F

合格基準：1%vol/h

凡例…赤：合格

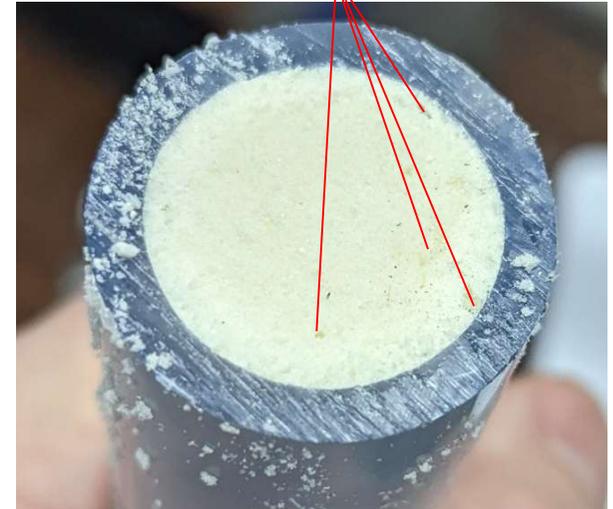
黄：不合格

F：圧力を10分間維持できなかった

*1：切断時に破損したため試験できず

⇒小口径配管への直接充填においては、**固化の早い充填材を用いた方が安定した結果を得ることができる**ことが分かった。

所々につながって大きくなった気泡が見られるが、それらも数mm以下で閉じており、全体の気密に影響を与えるには至っていない。



切断面の様子（試験No.1）

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

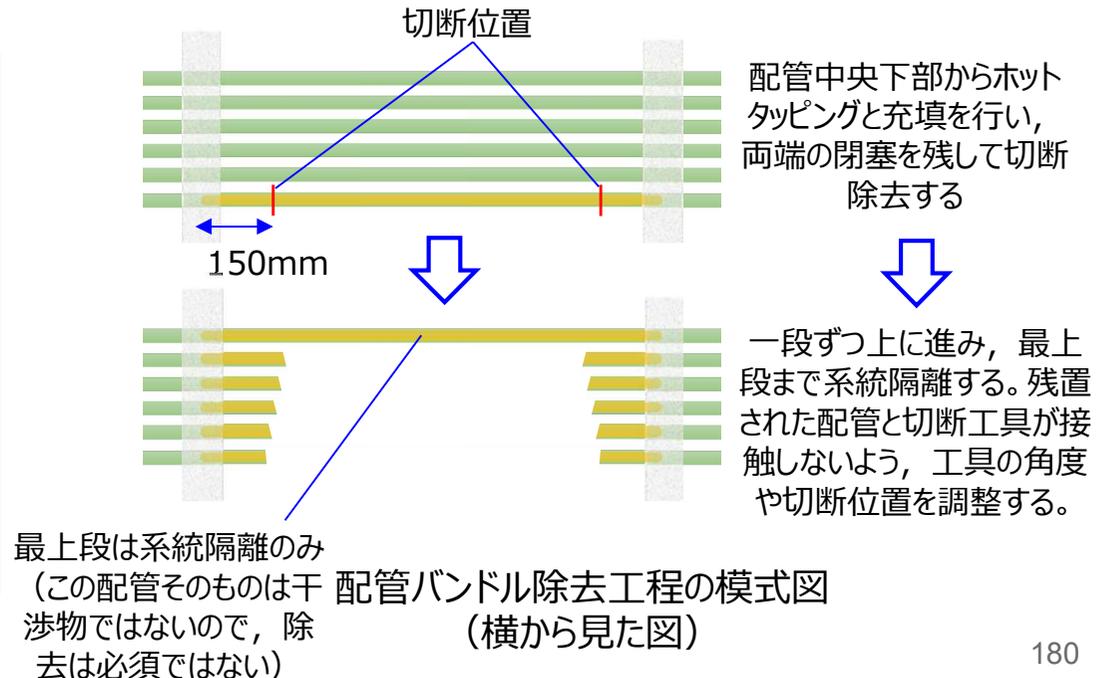
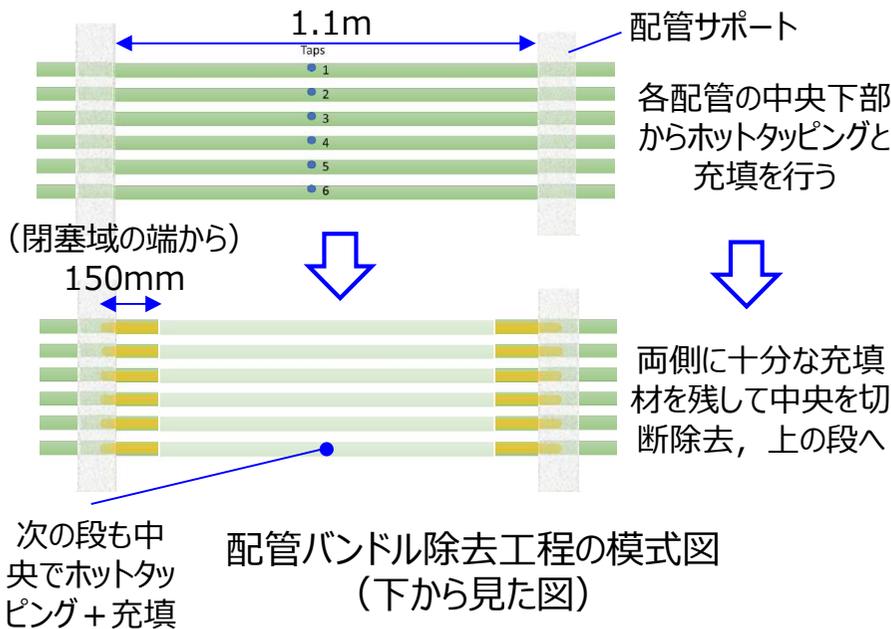
－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法－

<小口径配管（材料充填法）：試験結果>

- 想定している配管群の全てに対し必要な閉塞作業を行えるか。
⇒配管に接近させる必要があるのは充填材ノズルのみであるため、**間隔の狭いバンドルにも対応できる**。また、**除去対象領域を完全に充填してから除去できるため、残置された配管が充填作業の邪魔になる恐れがない**。
- 作業工程に視認性や安全性の問題は無いか。安全・確実かつ合理的な作業手順になっているか。
⇒作業工程はごくシンプルなものとなっており、特別な問題や危険性は無い。ただし、現時点では遠隔作業のための治工具・工程は存在しないので、**遠隔作業への適用のために作業工程の検討が必要である**。

<小口径配管：結論>

- 本工法はCRD挿入引抜配管の閉塞に用いる工法として有効であるとの結論を得た。



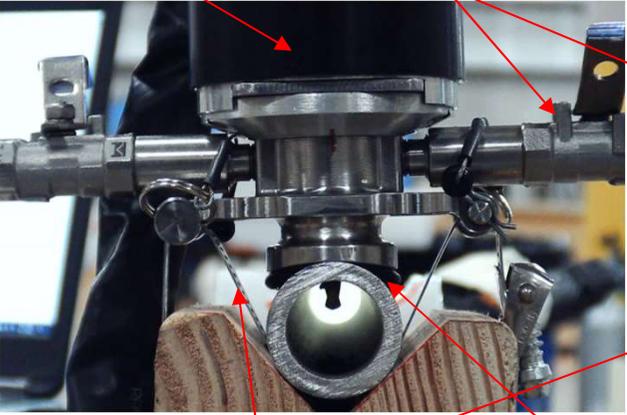
5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法－

<ホットタッピング：試験対象>

➤ メーカーから提案された以下の3種類の専用工具について試験を行う。 ※メーカーから貸与されたデモ用機材を使用

#	仮名称	対象	固定方法	先端工具	動力	高温・火花抑制策	加工後の気密の維持方法	加工後のポート
1	A-1	小口径配管	配管に回したバンドの張力	内蔵ドリルビット	内蔵電動／空圧モータ・アクチュエータ	気密を確保した工具本体内に窒素を導入可能	工具本体を配管上に残置する	工具本体のバルブ付きポート（2点）
2	A-2	大口径配管			一般回転工具（工具送り手動）			
3	B	大口径配管（本来は平面用）	真空吸着パッド	専用先端工具	内蔵空圧モータ・アクチュエータ（空圧発生器・制御装置付属）	内蔵ブローヤにより常時冷却（窒素も使用可能）	専用先端工具 ※内部シールは一回使い捨て	専用先端工具

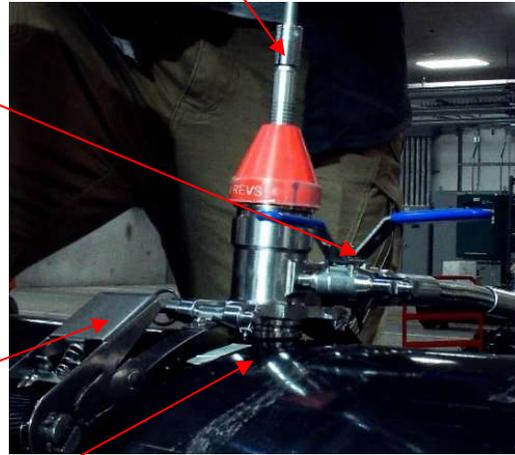


モータ・アクチュエータ付属

バルブ付きのポート（穿孔中は工具本体内部への窒素の導入にも使用）

工具A-1（小口径向け）

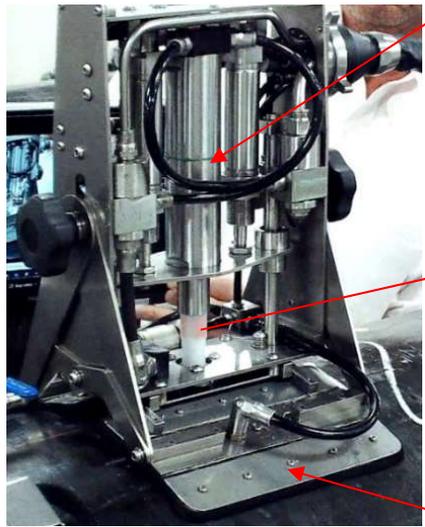
配管に回したバンドの張力で固定



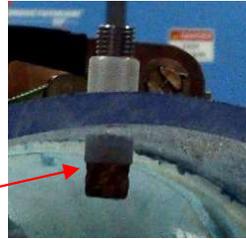
内蔵ドリルを外部の工具で回転させる軸貫通部と本体の間に気密シールあり

工具A-2（大口径向け）

シールを押し付けることで本体と配管の間の気密を維持



モータ・アクチュエータ付属



工具B先端工具

※先端工具自体がシール付きのポートとして配管に残置される。

真空吸着パッド（真空センサー付き）

工具B（大口径向け）

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法－

<ホットタッピング：試験要領と試験確認項目>

- ▶ 試験用配管（大口径は500A Sch20炭素鋼管，小口径は25A Sch80 SUS304配管）を単独で台上に水平に置き，ホットタッピング用工具をメーカーの推奨する方法で設置・作動させる。カメラおよびサーマルカメラで動作の安定性や温度上昇と火花の発生状況を確認する。

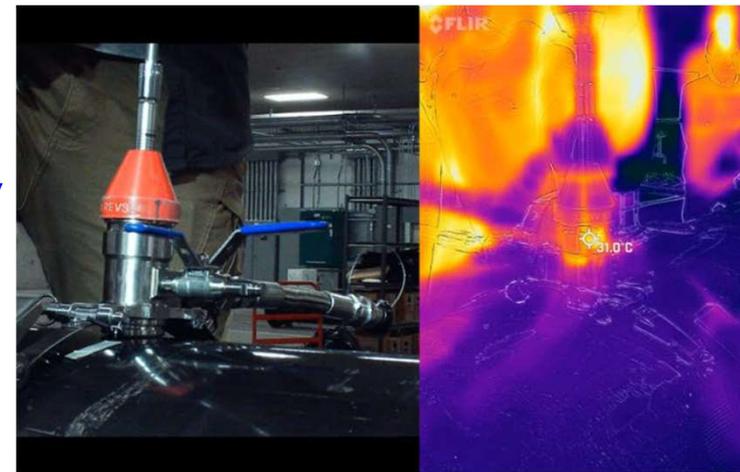
No	確認項目	確認方法	基準
1	穿孔中の高温と火花の発生	<ul style="list-style-type: none"> ▶ サーマルカメラ ▶ 目視 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 火花発生なし ▶ （水素発火温度：500℃）
2	穿孔作業の安定性	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 目視 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 異常振動無し ▶ 工具のかじりなどがなく一貫したペースで最後まで穿孔できる
3	作業工程の安全性・合理性（全行程）	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 目視 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 作業者や周囲に危険が及ぶような工程は無い ▶ 作業工程に視認性の問題は無い

注記：「作業中常に配管の内外で気密を維持できており，漏えいがないこと」も確認を要する点であるが，今回用いたのはメーカーのデモンストレーション用機材で対象配管に合わせた調整を行っていないため，確認不可とみなして項目から外した。

－ 系統隔離工法の妥当性検証（B）：材料充填法 －

<ホットタッピング：試験結果>

- ホットタッピング時に火花の発生は無いか。
⇒いずれも動作は安定しており、火花の発生は一切観測されず、局所的な高温の発生も起こらなかった。
- 作業工程に視認性や安全性の問題は無いか。安全・確実かつ合理的な作業手順になっているか。
⇒作業工程はごくシンプルであり、特別な問題や危険性は無い。特に工具A-1とBは配管への設置後はほぼ自動で穿孔を行うことができる。ただし今回の各工具は材料充填法に用いることを前提としたものではない（*1）ため、適用に当たっては工具の改造などの処置が必要。



工具A-2穿孔作業の観察
（通常カメラ／サーマルカメラ）
・記録最高温度：35℃（配管内から）／31℃（配管外から）

*1 今回の試験で使用した工具はいずれも危険物への穿孔のために開発されたもので、本来の用途での運用実績がある。

<ホットタッピング：結論>

- 提案された機材はいずれも原子炉建屋内の配管に対するホットタッピング用として有効である。ただし材料充填法に用いるには工具に充填材ノズルを追加するなど工程内容とすり合わせた設計変更が必要。

5.5 試験結果（系統隔離工法の妥当性検証）

－ 系統隔離要素試験のまとめ －

<各工法の比較>

工法名称	要素試験結果を踏まえた工法の利点	要素試験結果を踏まえた工法の欠点
インフレイタブルバッグ法	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 大口径配管に対応でき、要求を満足するシール性能を発揮する。 ▶ バッグの設計品質に問題がなければ安定した結果を得られる。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ バッグやサドルなど専用の治工具を毎回使い捨てにする必要がある。ただし、遠隔作業を前提に検討すると必ずしも他と比べて大きな問題であるとはいえない。 ▶ 小口径配管向けの開発は行われていない（既存製品の対応径は50A以上）
圧着法	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 消耗品が少ない。 ▶ 作業に要する時間が他より大幅に短い。 ▶ ホットタッピングを必要としない。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 小口径配管(*1)にしか対応できない。さらに、現状では十分なシール性能を得られるのは薄肉管のみ。CRD挿入引抜配管に用いるにはより能力が高い工具を開発する必要がある。 ▶ 工具の姿勢などに結果が影響されるため、やや不安定。 ▶ ホットタッピングが必要ない代わりに排水や窒素パージは別工程で行わなければならない。特にCRD挿入引抜配管では排水が問題になる。
材料充填法	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 工程がシンプルで必要な資材の種類も少ない。 ▶ 同じ基本技術で大口径配管にも小口径配管にも対応でき、要求を満足するシール性能を発揮する。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 大口径配管(*2)に適用する場合は堰の形成が必要。この場合工程がシンプルであるという利点を失う上、堰の形成の工程には不確実さがあり、実践に適用する前に追加の開発が必要。

*1: 今回の試験は25A配管に対して実施したが、工具メーカーによると40Aまでは実績がある。

*2: 材料充填法で堰を作らずに閉塞できる配管の限界は現状では明確ではない。100A以上に用いる場合は事前の検討が必要と推定される。

<今後の方針>

- ▶ RHR配管の系統隔離は作業性と確実性に優れるインフレイタブルバッグ法を第一候補として検討する。
- ▶ CRD挿入引抜配管の系統隔離は実現可能性の高い材料充填法を第一候補として検討する。

6. 撤去手順の検討

- 干渉物に関する具体的な遠隔撤去手順の検討手順を以下に示す。

想定撤去手順の設定

技術調査を実施するにあたり、想定される撤去手順概要を設定する。

作業項目一覧
カッティングプラン

技術調査結果を反映した遠隔システム構成にて、改めて撤去手順を検討した結果を示す。要素試験ではこれらの作業成立性を検証する。

作業ステップ概要

要素試験結果を踏まえ、作業項目一覧に対し作業内容の概要を記載した結果を示す。

作業ステップ詳細

3DCADモデルを用いた作業成立性確認を行い、各ステップにおけるイメージ図、作業内容、確認事項、使用機器、想定作業および作業の方法（遠隔／有人）を示す。

6. 撤去手順の検討

<作業ステップ概要>

- 作業ステップ概要を下表に示す。
- 本表に示す内容に対し3Dシミュレーションを行った例を以降に示す。

作業項目 (大項目)	作業項目 (小項目)	使用機器	
0. 共通作業			
1	装置搬入・設置	a 作業ロボットおよび付属機器の搬入・設置	作業ロボット, 先端ツール, ケーブルリール, 制御盤
		b 作業ロボットおよび付属機器の作業場所への搬入・設置	作業ロボット, 俯瞰カメラ, 付属機器
		c 廃棄物搬送台車および回収容器の搬入・設置	廃棄物回収容器, 廃棄物コンテナ, ユニック車, 廃棄物回収台車
		d 操作盤等操作室内必要機器の搬入・設置	操作盤, カメラモニタ等操作室内設備
2	調査	a 撤去対象物へのアクセスルートの調査	作業ロボット, 俯瞰カメラ, 3D スキャナ
		b 撤去対象物の調査	
3	除染	a ダスト吸引ツールによる堆積ダスト吸引	作業ロボット, 俯瞰カメラ, 平行グリッパ, ダスト吸引ツール
4	ダスト飛散防止処置	a 散水によるダスト飛散防止	作業ロボット, 俯瞰カメラ, 平行グリッパ, 散水ツール
		b ダスト飛散防止材の散布	
		c 局所排気装置の設置	作業ロボット, 俯瞰カメラ, 平行グリッパ, 局所排気装置
		d 作業ハウス・パーティションの設置	作業ハウス, パーティション
		e 連続ダストモニタによる監視	ダストモニタ
5	先端ツール交換	a 先端ツールの遠隔交換	作業ロボット, 俯瞰カメラ, 先端ツール
		b ツールステーション設置先端ツールの交換	作業ロボット, 俯瞰カメラ, 先端ツール
6	廃棄物回収	a 廃棄物の廃棄物回収容器への収納	作業ロボット, 俯瞰カメラ, 廃棄物搬送台車, 廃棄物回収容器
		b 廃棄物回収容器の搬出	廃棄物搬送台車, 廃棄物回収容器
		c 廃棄物コンテナの搬出	廃棄物回収容器, 廃棄物コンテナ, ユニック車, 廃棄物回収台車
7	装置撤去	a 作業ロボットおよび付属機器の撤去	作業ロボット, ケーブルリール, ケーブルガイド
		b 俯瞰カメラ等補助装置類の撤去	付属機器
		c 操作盤等操作室内必要機器の撤去	操作盤, カメラモニタ等操作室内設備

6. 撤去手順の検討

<作業ステップ概要>

作業項目 (大項目)		作業項目 (小項目)		使用機器
A. 電源盤撤去作業				
1	作業準備	a	作業準備 (O-1~4)	O-1~4参照
2	電源盤撤去	a	電源盤の切断・撤去	作業ロボット(低所用), 平行グリッパツール, レシプロソーツール
3	廃棄物回収	a	廃棄物回収 (O-6)	O-6参照
4	装置撤去	a	装置撤去 (O-7)	O-7参照
B. ケーブルトレイ撤去作業				
1	作業準備	a	作業準備 (O-1~4)	O-1~4参照
2	ケーブルトレイ撤去	a	ケーブル切断・撤去	作業ロボット(高所用), 平行グリッパツール, レシプロソーツール, 液圧カッターツール
		b	ケーブルトレイの切断・撤去	
3	廃棄物回収	a	廃棄物回収 (O-6)	O-6参照
4	装置撤去	a	装置撤去 (O-7)	O-7参照
C. RHR配管撤去作業				
1	作業準備	a	作業準備 (O-1~4)	O-1~4参照
2	RHR配管撤去	a	鉛直遮蔽体の撤去	作業ロボット(高所用), 平行グリッパツール, DCツール(小, 大), 重量物把持装置, 系統隔離治具, 液圧カッターツール, 俯瞰カメラ
		b	水平遮蔽体の撤去	
		c	保温材の撤去	
		d	配管系統隔離	
		e	RHR配管の撤去	
		f	切断箇所封止	
		g	西側通路中央部の遮蔽体の撤去	
3	廃棄物回収	a	廃棄物回収 (O-6)	O-6参照
4	装置撤去	a	装置撤去 (O-7)	O-7参照
D. HCU撤去作業				
1	作業準備	a	作業準備 (O-1~4)	O-1~4参照
2	HCU撤去	a	CRD挿入引抜配管系統隔離	作業ロボット(高所用), 平行グリッパツール, レシプロソーツール, 系統隔離治具
		b	CRD挿入引抜配管切断除去	
		c	HCUユニット部の撤去	作業ロボット(低所用), 平行グリッパツール, DCツール(小, 大), レシプロソーツール
3	廃棄物回収	a	廃棄物回収 (O-6)	O-6参照
4	装置撤去	a	装置撤去 (O-7)	O-7参照

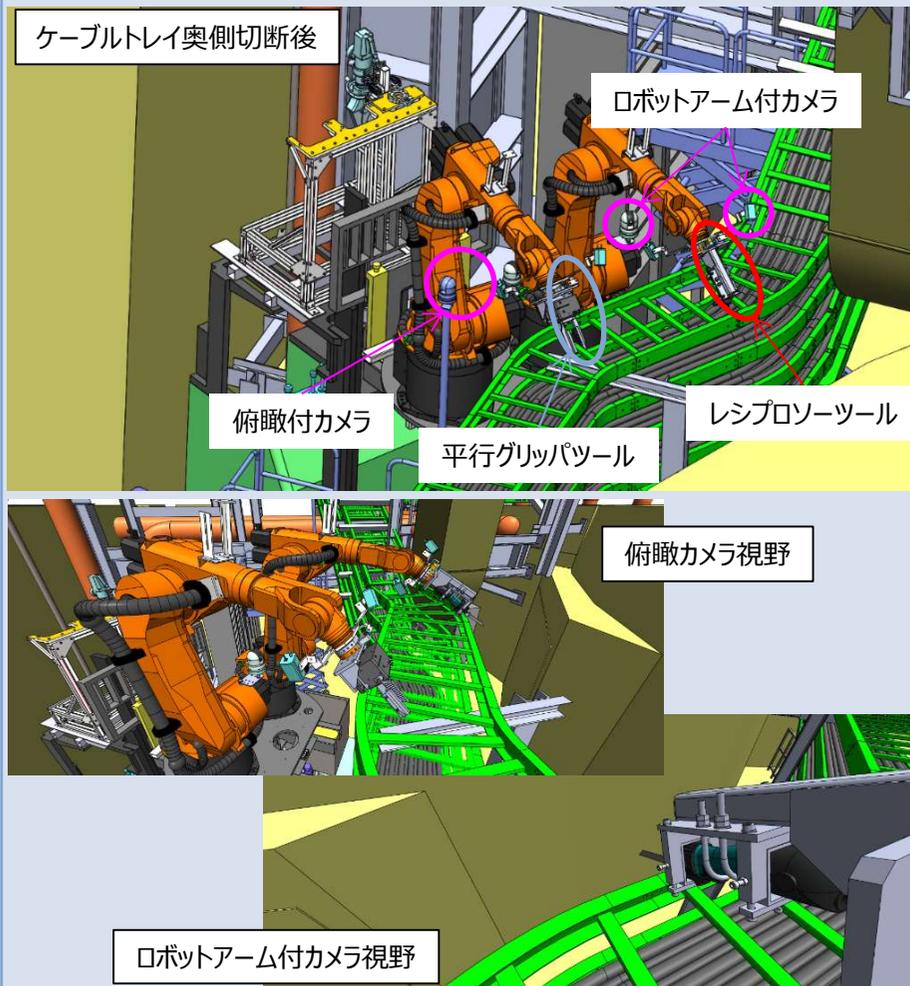
6. 撤去手順の検討

< 3Dシミュレーション結果概要 >

No. B-2-b-4(一例)

作業名 ケーブルトレイの切断撤去(ケーブルトレイ切断1)

作業イメージ



作業内容

3Dシミュレーション結果の一例として、ケーブルトレイの切断撤去を下表に示す。

- ① 遠隔手動操作により、レシプロソーツールを装着したアームを切断対象物(ケーブルトレイ)を切断できる位置に移動する。
- ② 遠隔手動操作により、レシプロソーツールでケーブルトレイを切断する。

確認事項

- ロボットアーム付カメラ、および俯瞰カメラにより切断対象物(ケーブルトレイ)の状況を確認する。
- 両腕協調制御により、作業ロボットのアームが干渉しないように確認する。
- ハプティックコントロールにより、先端ツールと切断対象物(ケーブルトレイ)との接触状況を確認する。

6. 撤去手順の検討

- 想定した作業手順をもとに技術調査を行い、その結果をもとに想定した作業が成立するかを検証するための要素試験を策定・実行した。これらの結果を作業手順の詳細化と遠隔システム構成に反映し、実機適用に向けた内容としてまとめた。
- 撤去作業手順の詳細検討において3D CADモデルを用いたシミュレーションにより遠隔システムを用いた各手順の成立性を検証した。これにより、想定している遠隔システムを用いた干渉物撤去が実現可能であるという見通しを得た。
- 専用の治工具・装置が必要となる系統隔離について、作業ステップの詳細を検討することにより、想定している治工具・装置の機能・構造に矛盾や不足がないことを確認した。同時に、作業をより容易かつ確実に実行できるようにするための設計上の課題（※）を把握した。

※RHR配管ではロボットアームによる工具操作の容易化（要求される動作正確性の低減）など、CRD挿入引抜配管では遠隔作業によるツールの消耗部品の交換作業などが課題となる。

7. 仕様提案

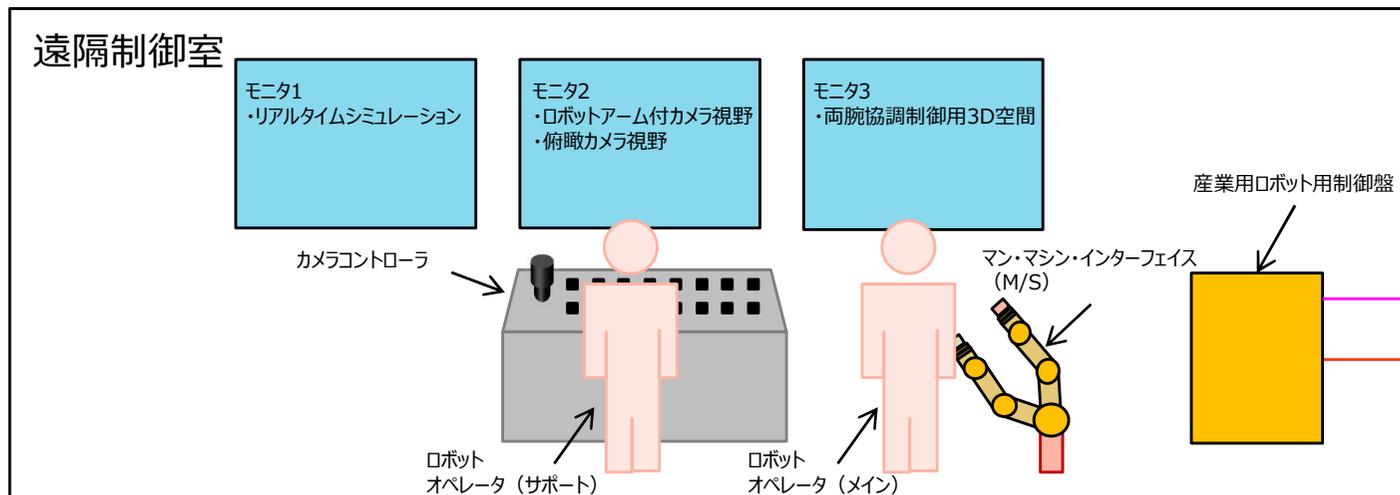
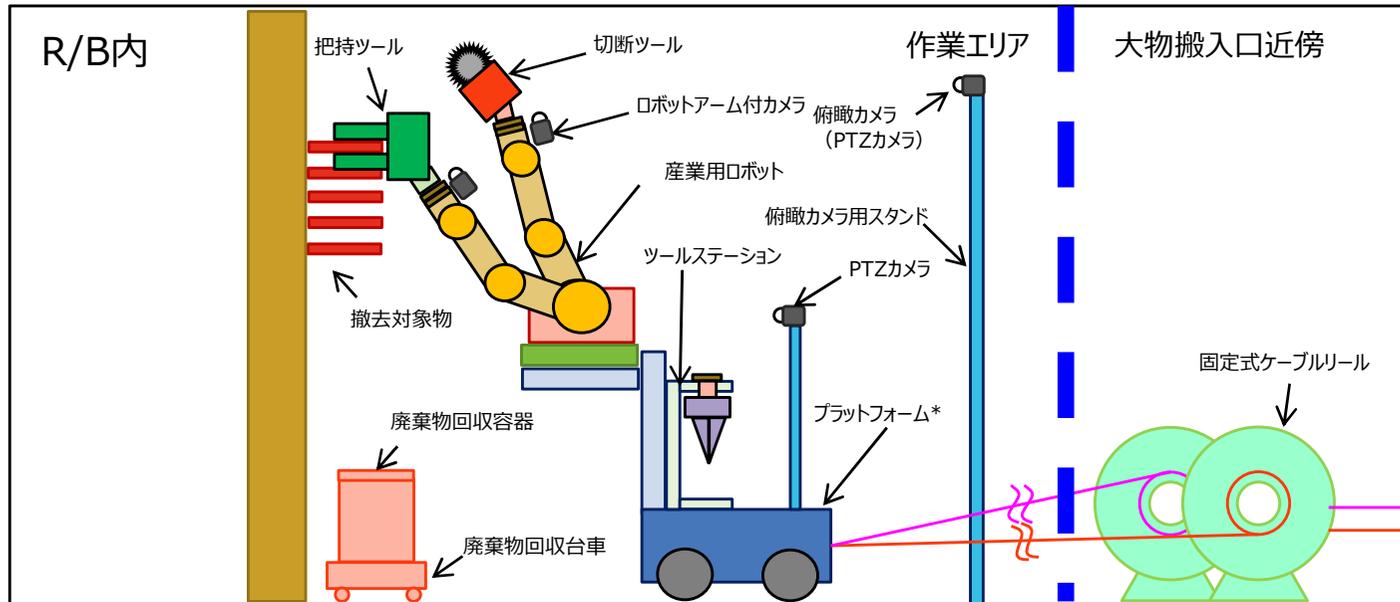
<概要>

- これまでの要素技術調査，要素試験，撤去手順検討の結果を踏まえ，R/B内環境改善・干渉物撤去用の遠隔システム構成および各構成機器の仕様を策定した。
- 本章では，下記の構成で技術仕様を提案する。
 - 遠隔システム 基本構成
 - 必要機器リスト
 - 主要機器仕様
 - ✓ 作業ロボット
 - ✓ RHR配管系統隔離装置
 - ✓ HCU CRD挿入引抜配管隔離装置

7.1 遠隔システム構成

<遠隔システム構成案>

- 要素試験結果を踏まえ決定した、本事業における最終的な遠隔システム構成を下図に示す。

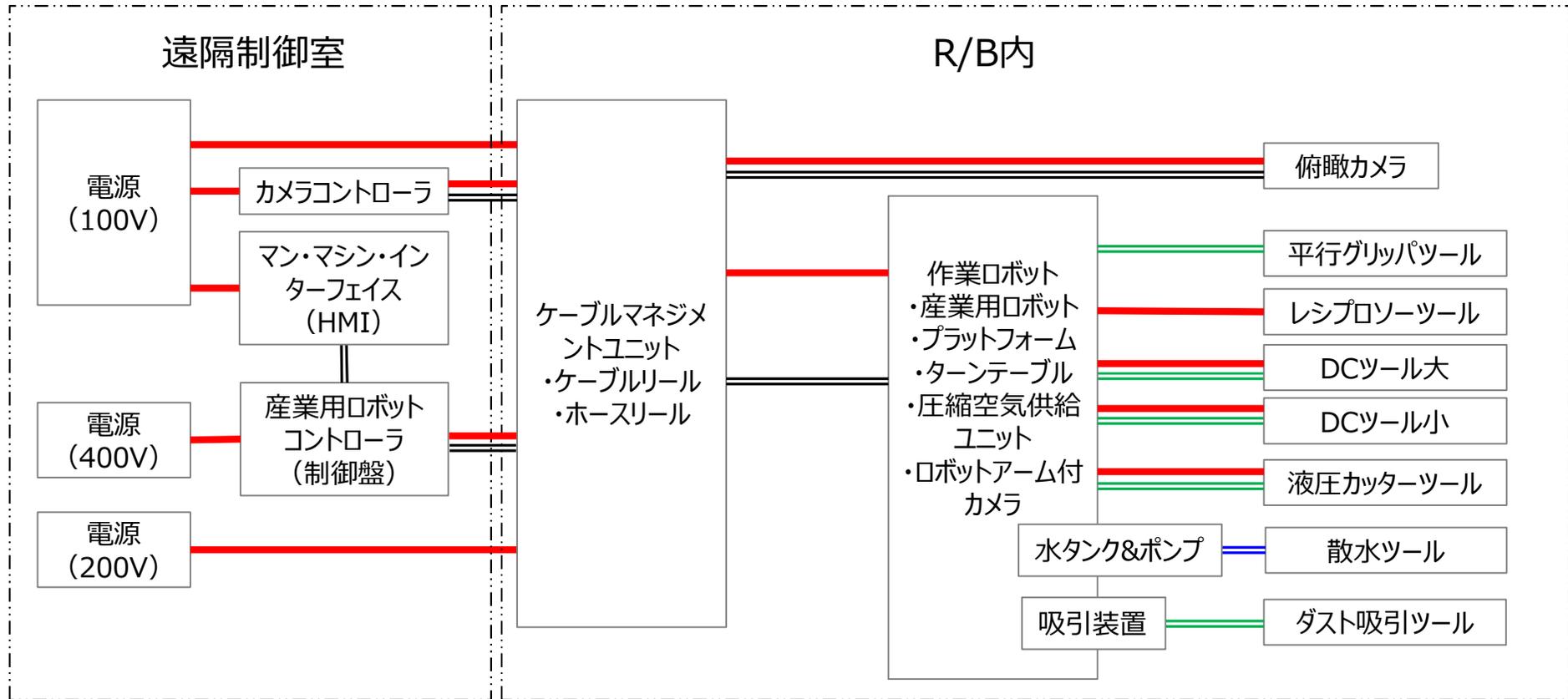


*電源盤等の低所作業においては、別途低所用のプラットフォームにアームを搭載する。

7.1 遠隔システム構成

<遠隔システム構成案>

- 前頁に示したシステム構成における，システム構成図を下に示す。
- 系統隔離作業時はシステム構成が大きく異なることから，別途システム構成を示す。



凡例

- 動カライン
- == 通信ライン
- 圧空ライン
- 洗浄水供給ライン

7.1 遠隔システム構成

<主要機器リスト>

- 遠隔システムを構成する機器の概要を下表に示す。

分類	構成要素	実施作業	概要
作業ロボット	アーム	撤去作業	産業用ロボットアームを2基有する。ツールチェンジャにより先端ツールを交換することで様々な作業に対応する。
	プラットフォーム	作業位置へのアクセス	高所用、低所用を用意し、撤去対象物に応じてプラットフォームを切り替える。高所用はフォークリフトを元にしたものとし、高さ最高6mのケーブルトレイまでアームを到達可能とする。
	ターンテーブル		プラットフォームを撤去対象物に平行に配置できない場合、ターンテーブルにより双腕アームの位置を調整する。
先端ツール	ツールステーション	先端ツールの交換	複数の先端ツールを収納可能なラックで、遠隔操作による先端ツールの交換を可能にする。
	レシプロソー ツール	切断作業	先端ツールとしてレシプロソーを搭載したツール。主にケーブルトレイ等の薄肉の干渉物の切断に使用する。
	DCツール大		先端ツールとしてφ400mmのチップソーを搭載したツール。主にRHR配管遮蔽体等の厚板の干渉物の切断に使用する。
	DCツール小		先端ツールとしてφ250mmのチップソーを搭載したツール。主にRHR配管等の厚板かつ狭隘部の干渉物の切断に使用する。
	液圧カッター ツール		先端ツールとしてせん断機を搭載したツール。主にケーブル等のせん断により切断可能な干渉物の撤去に使用する。
	平行グリッパ ツール	把持作業、撤去物の 収納	アーム先端に取り付け把持作業を行うツール。
	散水ツール	ダスト飛散防止	先端に散水ノズルを設けた、平行グリッパにより把持して使用するツール。
	ダスト吸引ツール		先端にダスト吸引用ノズルを設けた、平行グリッパにより把持して使用するツール。

7.1 遠隔システム構成

<主要機器リスト>

- 遠隔システムを構成する機器の概要を下表に示す（前頁からの継続）

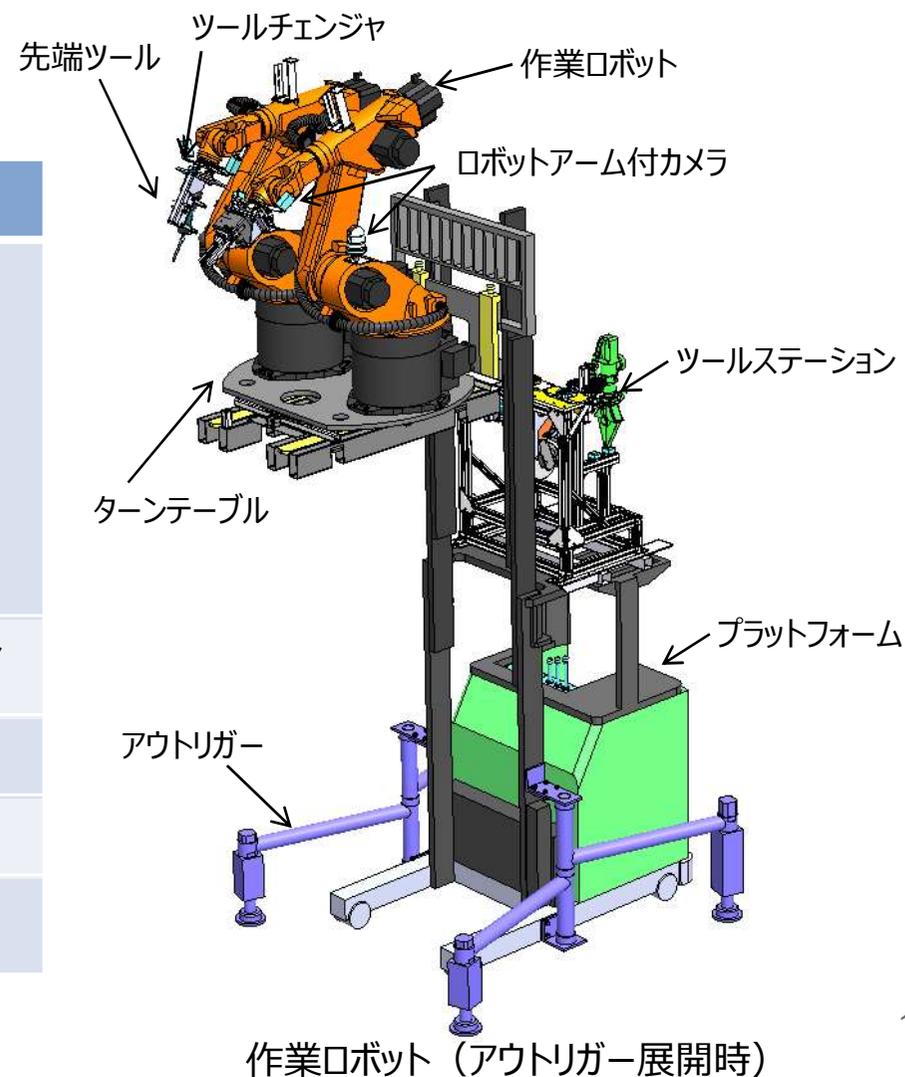
分類	構成要素	実施作業	概要
視認システム	アーム付きカメラ	作業状況 / 周辺状況の把握, 外観調査	ロボットアームに取り付ける小型カメラ。
	俯瞰カメラ		独立視野の確保および装置全体の監視のために設置するPTZ機能を有するカメラ。
	視認補助技術		リアルタイムシミュレーション, ステレオスコープ, 3D側域センサ等のロボット操作者の作業負荷の低減を目的とした視認補助技術。
ケーブルマネジメント	ケーブルリール	ケーブル送出・巻取制御	固定式ケーブルリールを大物搬入口に設置し, 作業ロボットの移動に連動してケーブルの送り出し, 巻き取り制御を行う。
廃棄物	廃棄物回収容器	撤去物の収納～搬送	R/B内で撤去した干渉物を仮収納する容器。最終容器である廃棄物コンテナにそのまま投入可能な構造とする。
	廃棄物回収台車		自走機能を有し, 廃棄物回収容器を搭載し干渉部撤去場所から大物搬入口まで遠隔操作により輸送することが可能な台車。
マン・マシン・インターフェイス	マン・マシン・インターフェイス (HMI)	作業ロボット操作	作業ロボットをM/S形式で遠隔操作する。両腕協調制御や触覚フィードバック等の機能を有する。

7.2 装置仕様

<作業ロボット仕様>

- 遠隔操作によりR/B内を走行して撤去対象付近にアクセスし、干渉物を撤去する。
- 作業ロボットは2基の産業用ロボットアームをプラットフォームに搭載し、先端ツールを交換することにより、様々な作業や干渉物の撤去に対応する。
- 撤去対象に応じてプラットフォームを高所用・低所用に切り替えることにより、様々な場所に存在する干渉物に対応することができる。
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。

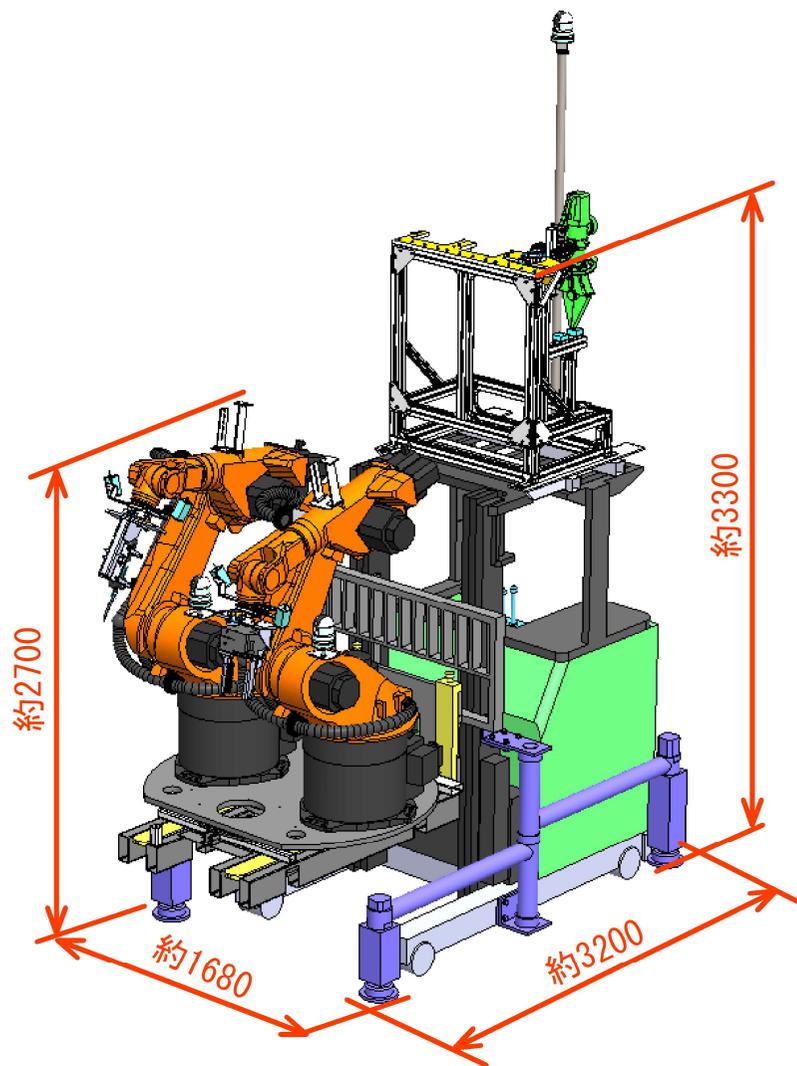
No	項目	基本仕様	備考
1	寸法	【走行時】 全長：2400mm 全幅：2100mm 全高：3300mm(俯瞰カメラ・ケーブルベア除く) 【アウトリガー展開時】 全長：3200mm 全幅：1680mm 全高：MAX.6500mm	
2	概算重量	約6230 kg	先端ツール除く
3	駆動方法	電動/圧縮空気	
4	電気	400 V, 200 V, 100 V	
5	圧縮空気	0.85 MPa 37 NL/min	



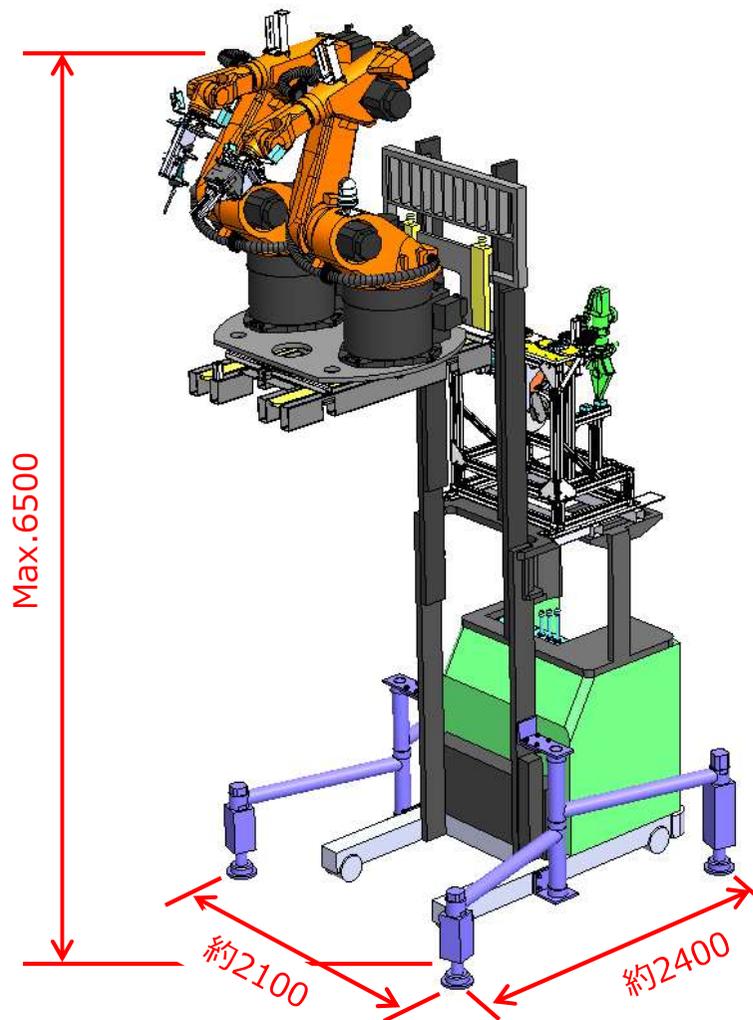
7.2 装置仕様

<作業ロボット仕様>

- 作業ロボット走行時およびアウトリガー展開時の寸法を下图に示す。



作業ロボット寸法（走行時）



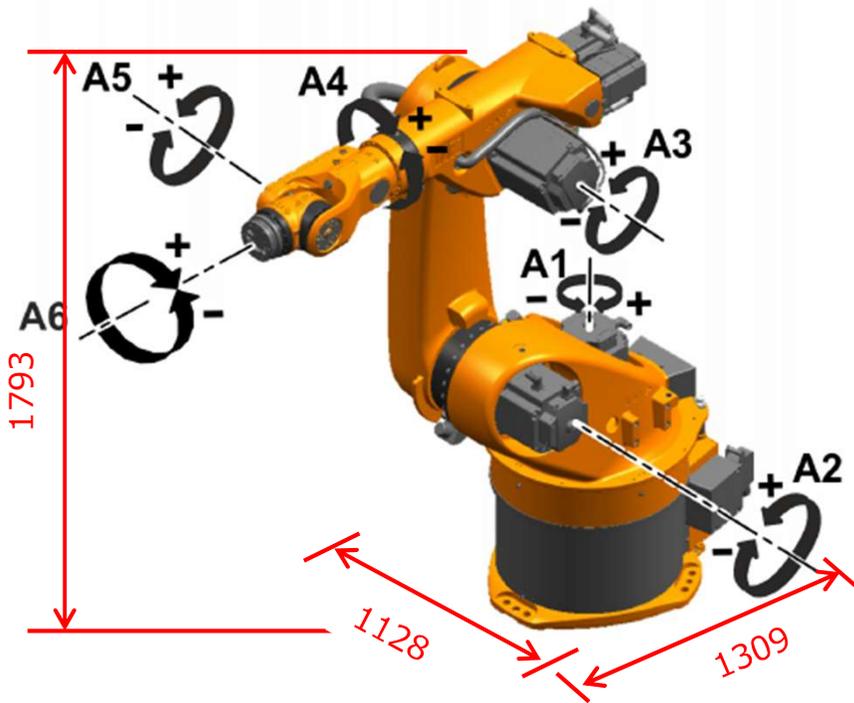
作業ロボット寸法（アウトリガー展開時）

7.2 装置仕様

＜産業用ロボット仕様＞

- 作業ロボットの構成部品として、干渉物の把持／切断／撤去作業等に用いる。
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。
- ロボットアームは保守性確保のため、次頁に示す汚染防止カバーを着装する。

No	項目	要求仕様	参考仕様	備考
1	位置の繰り返し精度 (ISO 9283)	±10mm以内	±0.06 mm	
2	重量	-	約695 kg	
3	寸法	-	全長：1309 mm 全高：1793 mm 全幅：1128 mm	
4	定格可搬重量	100kg以上	60 kg	(両腕のため、合計120kg相当)
5	最大リーチ (アクセス高さ)	6000 mm以上	2033 mm	プラットフォームとの合計で達成
6	動作範囲	-	A1 : ±185° A2 : -135°/35° A3 : -120°/158° A4 : ±350° A5 : ±119° A6 : ±350°	
7	定格可搬重量での速度	-	A1 : 128°/s A2 : 102°/s A3 : 128°/s A4 : 260°/s A5 : 245°/s A6 : 322°/s	



引用元：KUKA社「KR30-3, 60-3, KR30 L16-2 取扱説明書」

<汚染防止カバー仕様>

- 撤去作業時にロボットアームが放射性物質により汚染することを防ぐため、ロボット本体を汚染防止カバーで覆った状態で運用する
- ロボットが汚染された場合、構造・環境等の観点から除染が難しく、汚染を防止することでメンテナンス性を確保することができる。

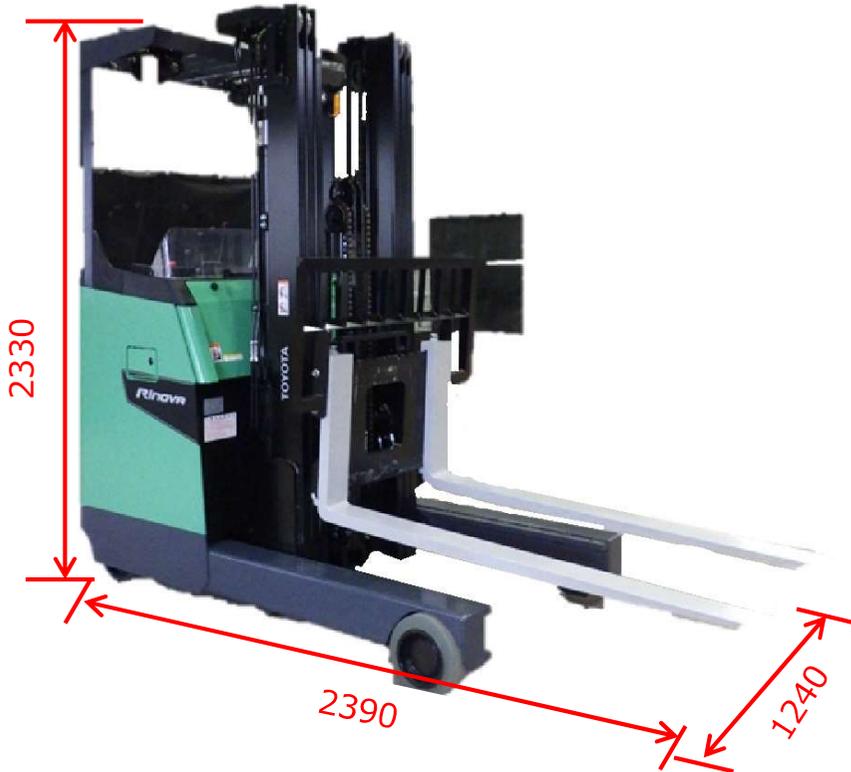


汚染防止カバーをロボットに装着した際の外観例

7.2 装置仕様

〈高所用プラットフォーム仕様〉

- 産業ロボットをR/B内で移動させ、高所位置の干渉物まで運ぶために用いる。
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。
- 産業用ロボットアームとあわせて、最大6mの高さの干渉物の撤去が可能。
- 別途開発した後付けのアクチュエータによりフォークリフトの遠隔操作を可能とする。
- 高さ6mの干渉物撤去中に発生した地震動に対し、アウトリガー無しの条件で水平震度0.2gまでロボットは転倒せずに耐えることができる。

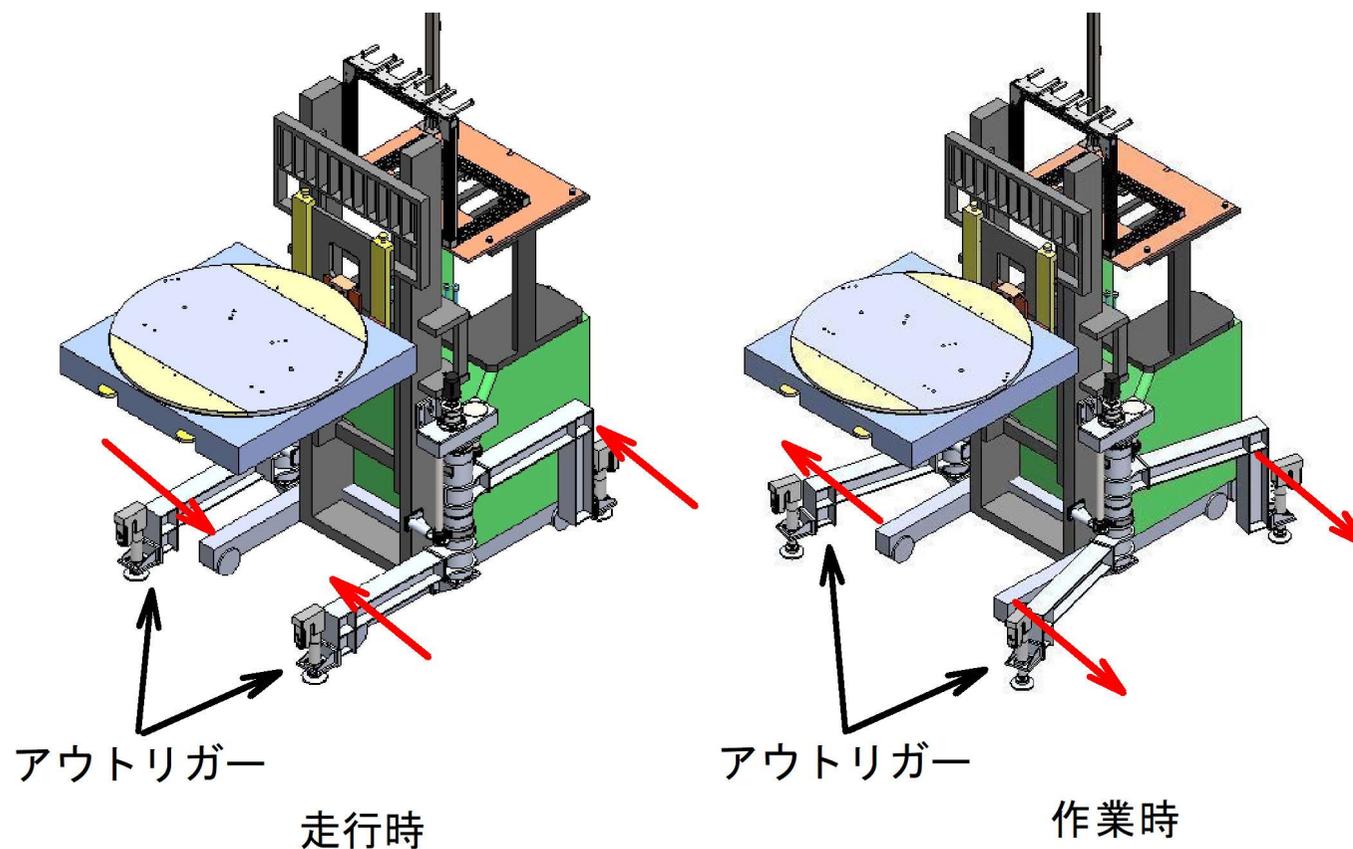


高所用プラットフォーム外形図

No	項目	要求仕様	参考仕様	備考
1	定格荷重	2000 kg以上	3000 kg	
2	寸法	寸法 □3000mm 以内	全長：2390 mm 全高：2330 mm 全幅：1240 mm	全高はヘッド ガード高さ
3	荷重低減のない 最大揚高	—	4 m	
4	重量	—	3220 kg	
5	走行速度	—	9.0 km/h	
6	走行機能	悪路走行が可能	車輪走行式であり、 極端な悪路は避ける か事前に平滑処 置しておく必要があ る	

<アウトリガー仕様>

- 高所での撤去作業時の転倒防止として使用する。
- 高さ6mの干渉物撤去中に発生した水平震度0.3g*の地震動に対し、十分に裕度を持ってロボットが転倒せずに耐えることができる。
- 原子炉建屋内での使用を考慮してアウトリガーは走行時に折り畳み、撤去作業時に展開できる構造とする。

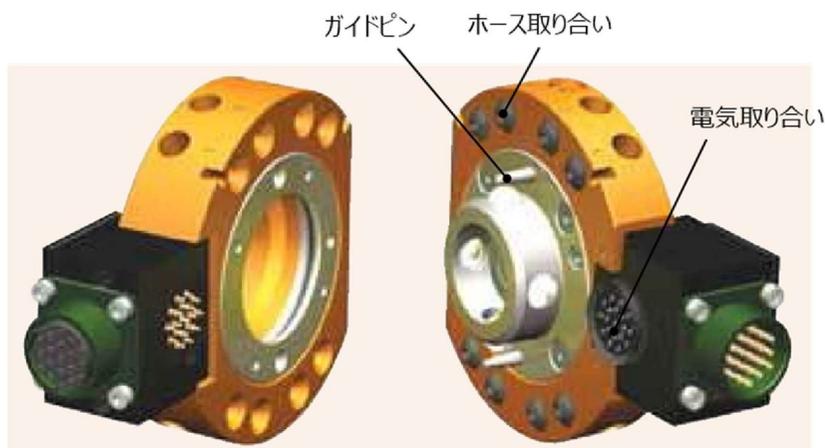


*耐震設計に幅広く使用されている値であり、関東大震災における最大加速度が0.3gであったことが由来とされている。

7.2 装置仕様

<ツールチェンジャ、ツールステーション仕様>

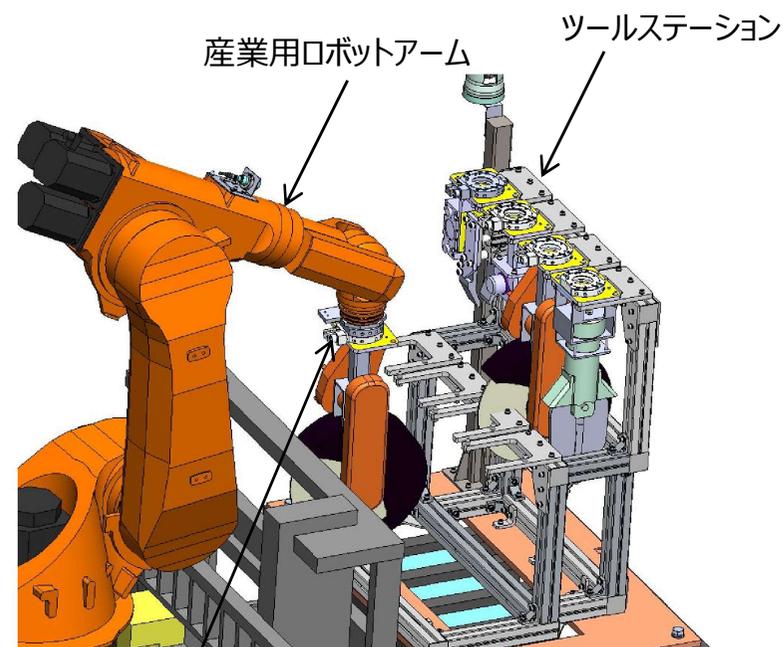
- ツールチェンジャは先端ツールとロボットアームの接続機器である。
- オスとメスの2種類を嵌合させる構造であり、圧縮空気の供給により遠隔操作で接続/解除が可能。
- メカニカルな接続に加え、電気や圧空といった系統も同時に接続可能。
- ロボット後部に設置したツールステーションに各種先端ツールを用意しておくことで、遠隔操作によりツールの脱着交換が可能。
- あらかじめツール交換の姿勢をロボットアームに教示しておくことで、遠隔自動操作によるツール交換を可能とする。



ツールチェンジャ：メス

ツールチェンジャ：オス

ツールチェンジャ外形図

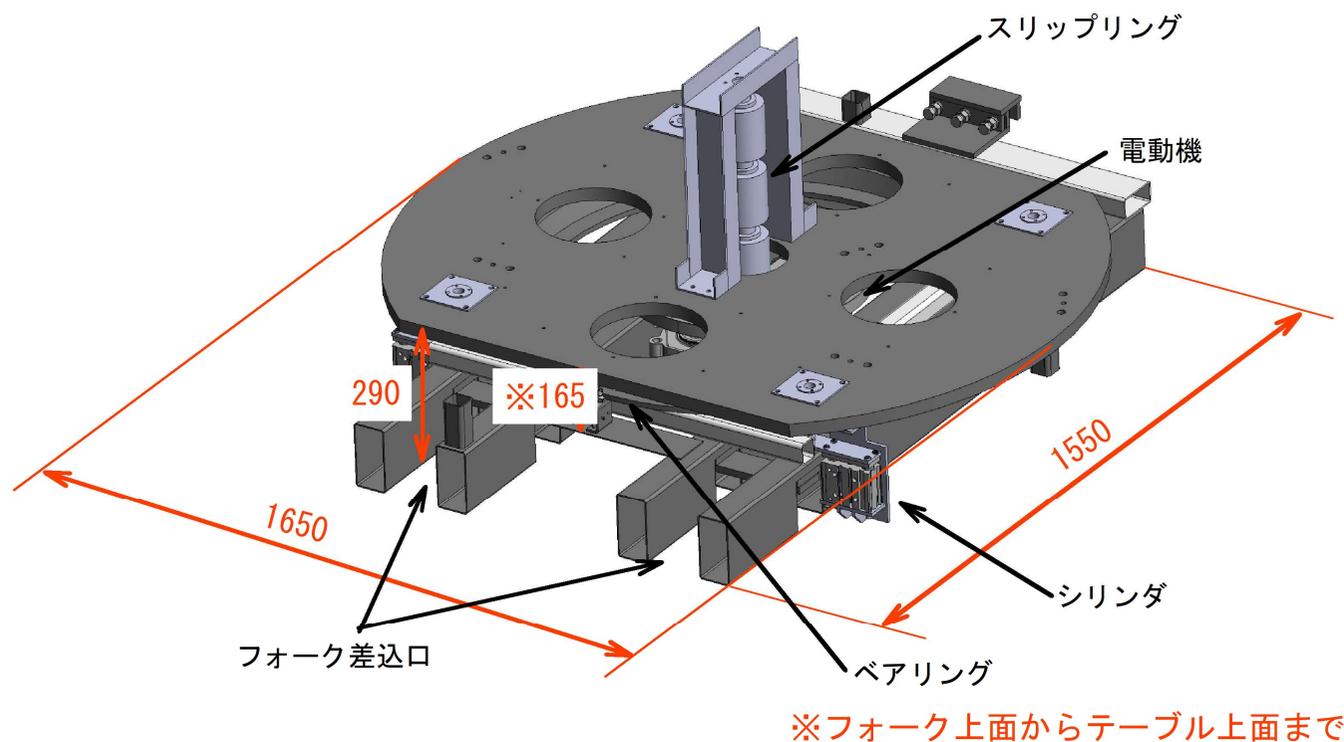


ツールチェンジャ

ツール交換のイメージ

<ターンテーブル仕様>

- ターンテーブルはプラットフォームを撤去対象物に垂直に配置できない場合に、ロボットアームの向きを調整するために使用する。
- アーム動作時等の慣性によるターンテーブルの回転を防止するため、エアシリンダにて回転方向を固定する機能を有する。
- ターンテーブルの操作は遠隔操作にて行い、リミットスイッチを設置することで任意の位置で自動停止を行うことができる。

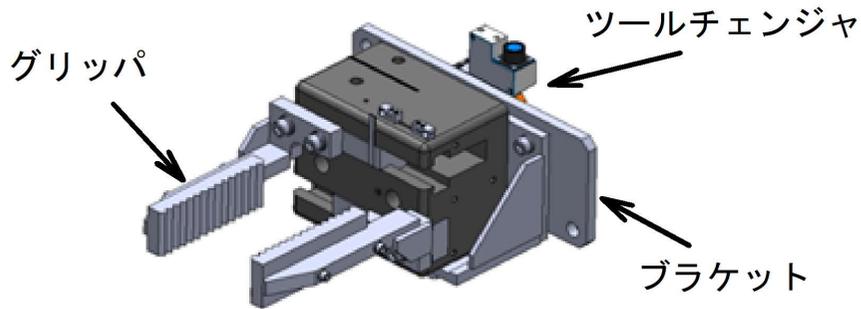


ターンテーブル外形図

7.2 装置仕様

<先端ツール仕様：平行グリッパツール>

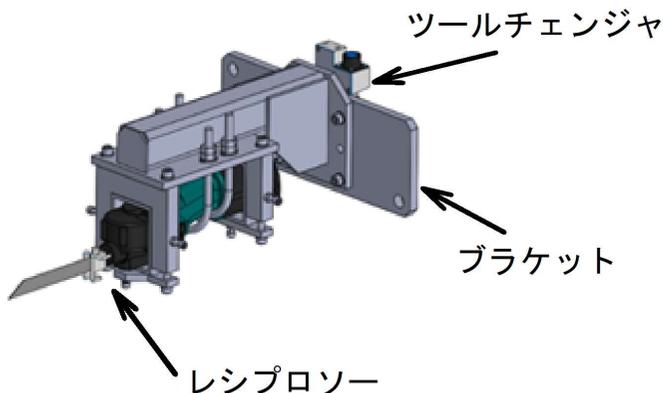
- 撤去対象物の把持や系統隔離治具などの把持に用いる。
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。



No	項目	基本仕様	備考
1	寸法	425 x 330x 195 mm	
2	重量	24 kg	
3	動力	圧縮空気	
4	把持力	1733~2600 N	

<先端ツール仕様：レシプロソーツール>

- 主にケーブルトレイ等の薄肉の干渉物の切断に用いる。
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。

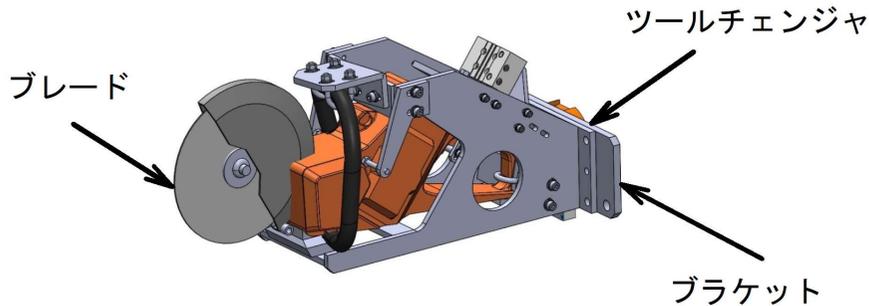


No	項目	基本仕様	備考
1	寸法	432 x 330 x 222 mm	
2	重量	13 kg	
3	動力	電動	
4	ストローク数	0~5000 回/min	

7.2 装置仕様

<先端ツール仕様：DCツール（小，大）>

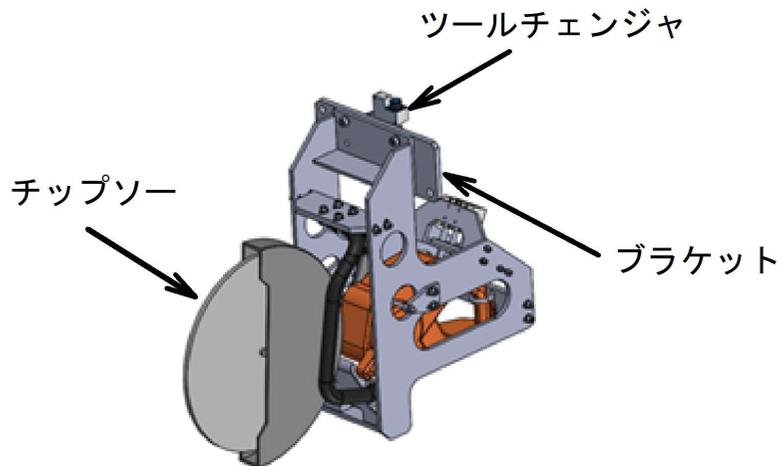
- 主にRHR配管等の厚板の干渉物の切断に使用する。
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。



DCツール（小）外形図

DCツール（小）仕様

No	項目	基本仕様	備考
1	寸法	658 x 330 x 445 mm	ブレード径 φ250mm
2	重量	35 kg	
3	動力	電動	
4	回転数	定格4775 rpm	



DCツール（大）外形図

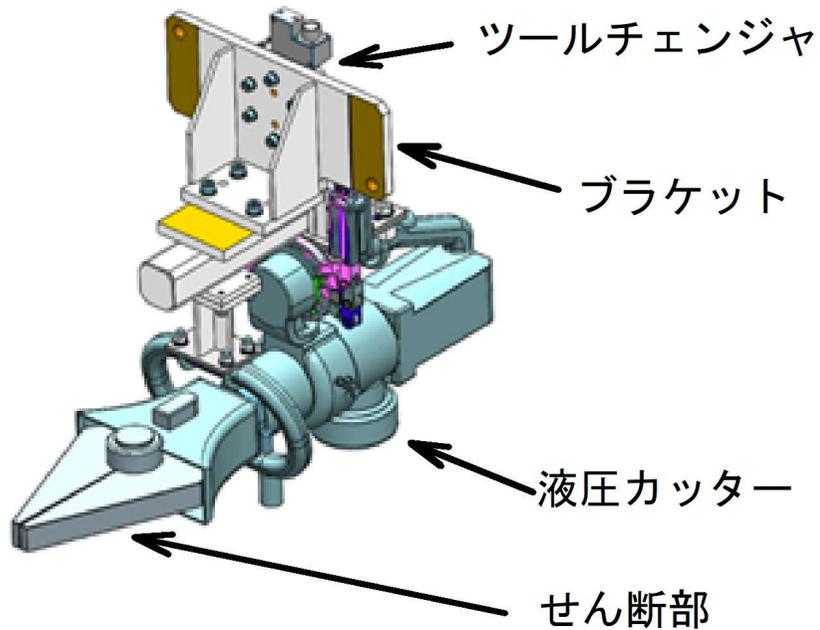
DCツール（大）仕様

No	項目	基本仕様	備考
1	寸法	840 x 330 x 650 mm	ブレード径 φ400mm
2	重量	24 kg	
3	動力	電動	
4	回転数	定格5940 rpm	

7.2 装置仕様

<先端ツール仕様：液圧カッターツール>

- 主にケーブルや薄肉小口径の配管等の切断に用いる。
- 切断時に発生する火花・ダストの飛散量が最も少ないことから、本ツールにより切断可能な干渉物は、極力本ツールを用いる方針とする。
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。



液圧カッターツール外形図

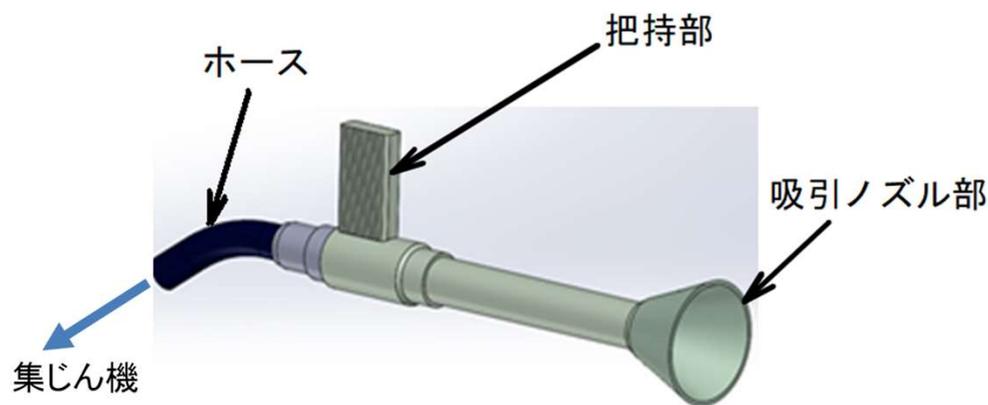
No	項目	基本仕様	備考
1	寸法	600 x 330 x 580 mm	
2	重量	30 kg	
3	動力	電動／液圧	

7.2 装置仕様

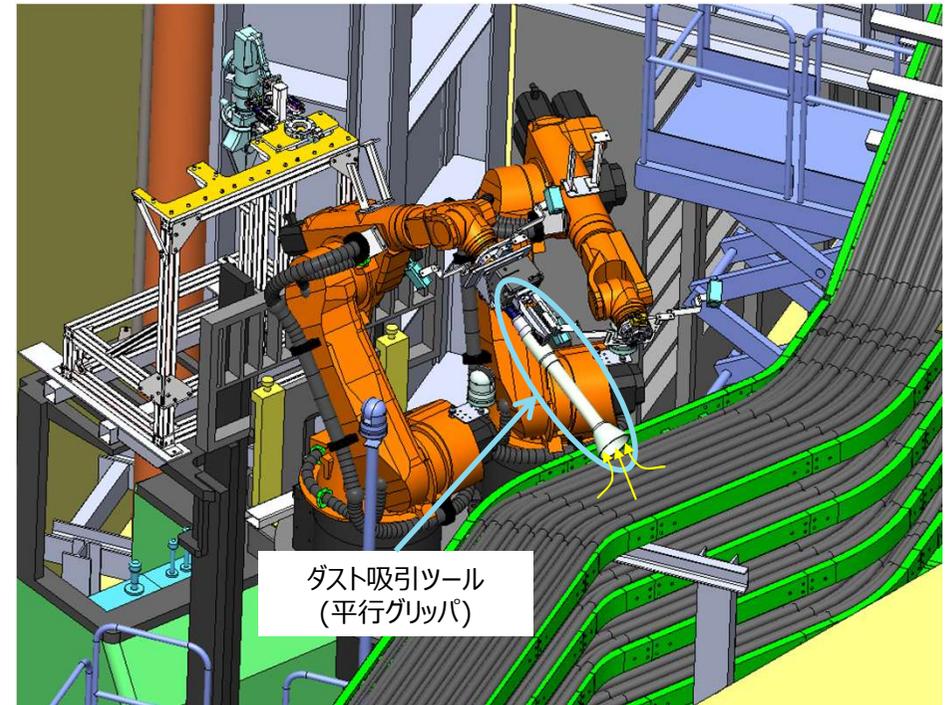
<先端ツール仕様：ダスト吸引ツール>

- ホースの先に集塵機を接続し、ダストが堆積している箇所にあてることで干渉物に体積したダストを吸引する。
- 平行グリッパにより把持して使用する。
- 切断時に発生するダストを抑制するため、ダストが堆積している干渉物は本ツールにより事前にダストの吸引を行う。
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。

No	項目	基本仕様	備考
1	寸法	630 x 220 100 mm	
2	重量	10 kg	
3	動力	エア	



ダスト吸引ツール外形図



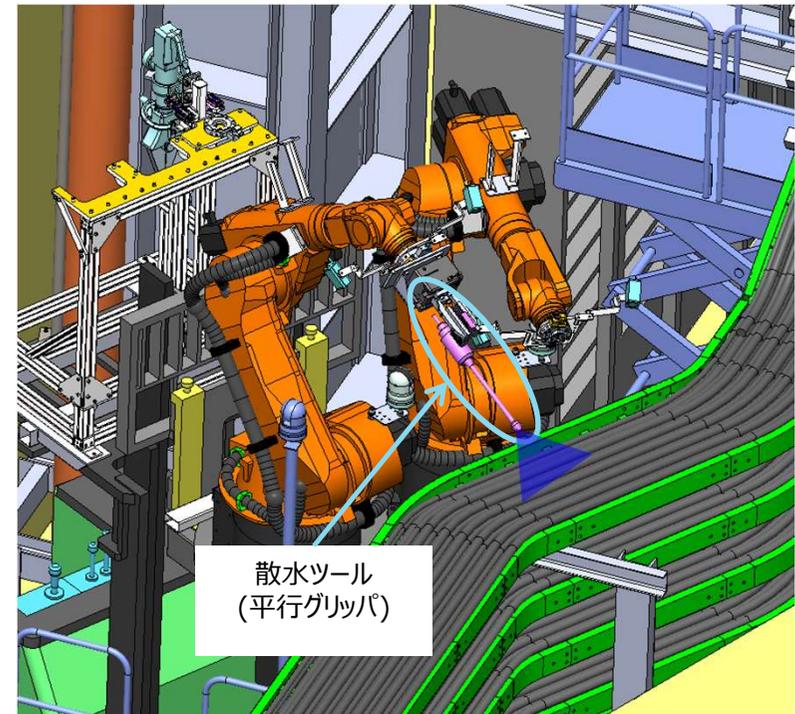
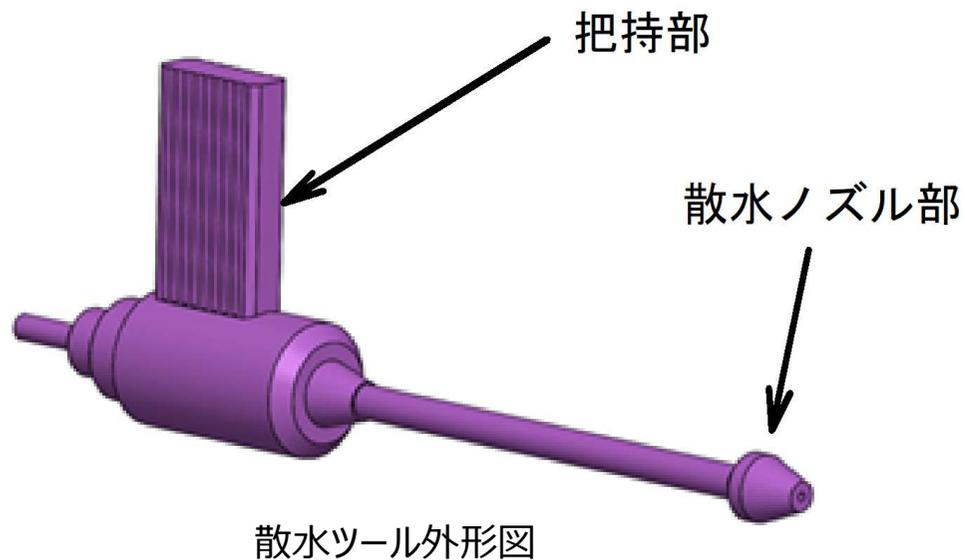
ダスト吸引ツール使用時のイメージ

7.2 装置仕様

<先端ツール仕様：散水ツール>

- 干渉物を撤去する前にあらかじめ水またはダスト飛散防止剤を散布することで、切断時に発生するダストを抑制するツール。
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。

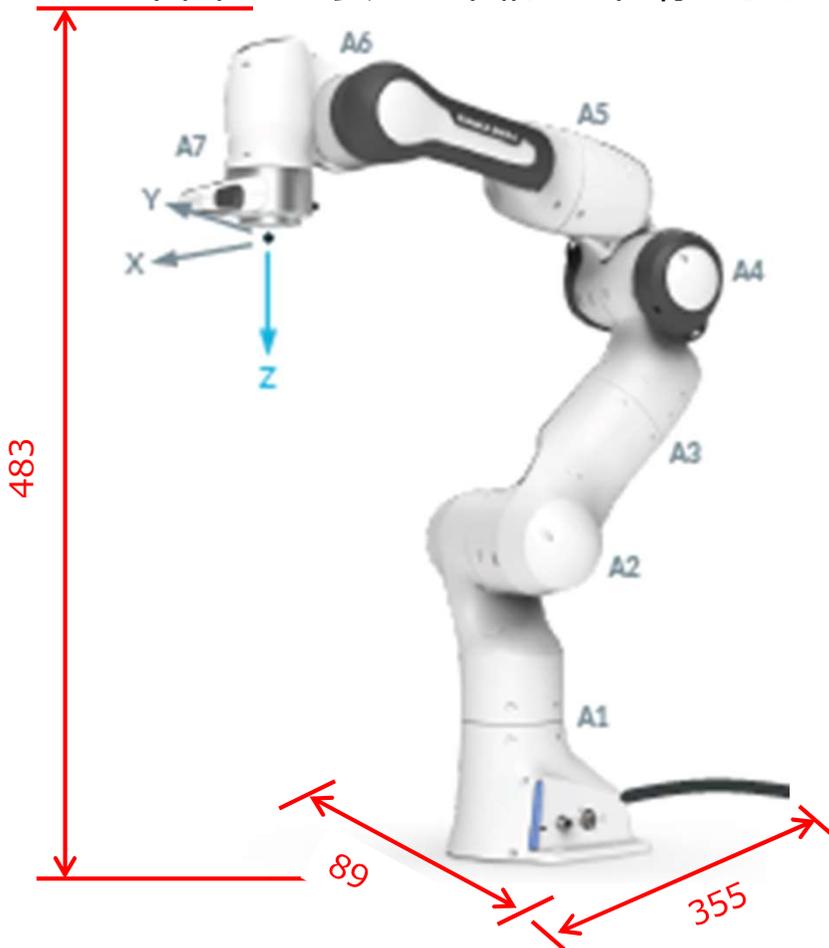
No	項目	基本仕様	備考
1	寸法	700 x 260 x 100 mm	
2	重量	11 kg	
3	使用液体	水またはダスト飛散防止剤	



7.2 装置仕様

<HMI仕様>

- 産業用ロボットアーム 2 基をM/S形式で操作する遠隔操作専用HMI。以下の機能を有する。
 - 両腕協調制御機能により、ロボット同士の接触を防止。
 - フォースコントロール機能により、セカンダリロボットの先端に負荷されている荷重を視覚的に把握可。
 - 遠隔自動運転による教示・再生機能（本機能使用時はロボットアーム標準HMIを用いる）
- 下図および表に基本構成と仕様を示す。

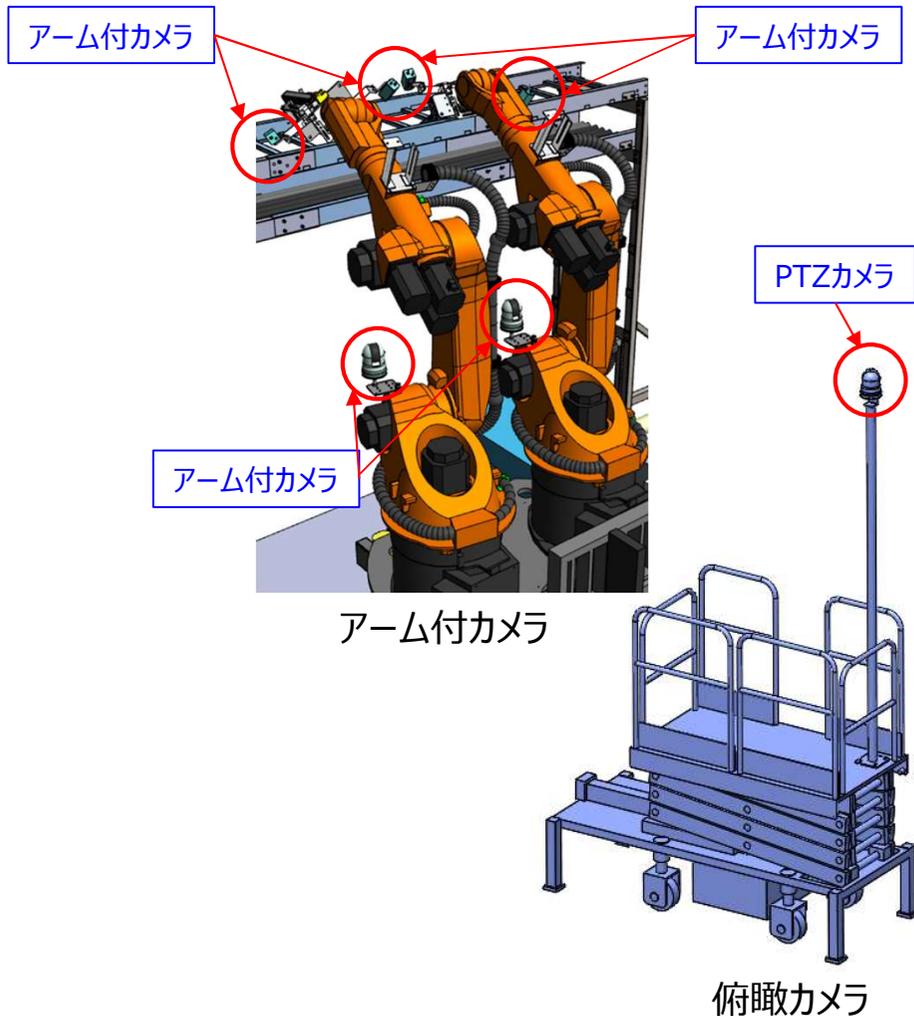


No	項目	基本仕様	備考
1	位置の繰返し精度 (ISO 9283)	±0.1 mm	
2	重量	約7 kg	
3	寸法	全長 : 355 mm 全高 : 483 mm 全幅 : 89 mm	
4	定格可搬重量	3 kg	
5	最大リーチ	855 mm	
6	動作範囲	A1, A3, A5, A7 : ±166° A2 : ±101° A4 : -176°/-4° A6 : -1°/215°	
7	先端速度	2 m/s	

7.2 装置仕様

<視認システム仕様>

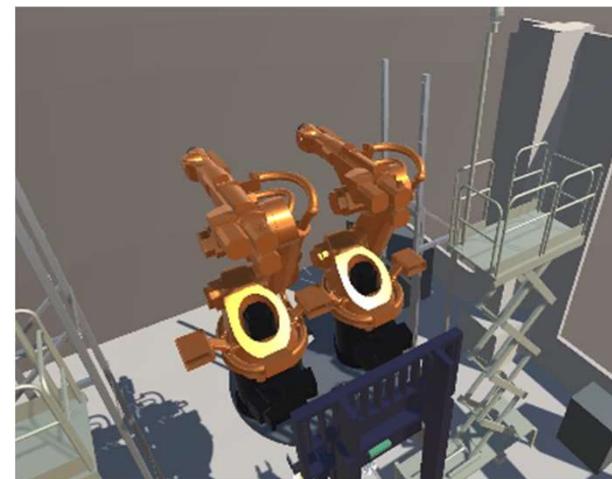
- 視認システムは作業ロボットの遠隔操作時のオペレータの視認を補助するために用いる。
- 視認システムにはアーム付きカメラ、俯瞰カメラ、視認補助技術を使用し、作業状況や周辺状況の把握、干渉物の調査に使用する。
- 下図および表にアーム付きカメラおよび俯瞰カメラの基本構成と仕様を示す。



No	項目	基本仕様	備考
1	アーム付きカメラ	焦点距離：4.88 mm 画角：5.5~61.5° 寸法：50 x 50 x 103 mm 重量：330 g	
2	俯瞰カメラ	焦点距離：4.7~84.6 mm 水平画角：3.4~56° 垂直画角：2.6~43° 寸法：Φ185 x 157 mm 重量：1100 g	

<視認システム(視認補助技術)仕様>

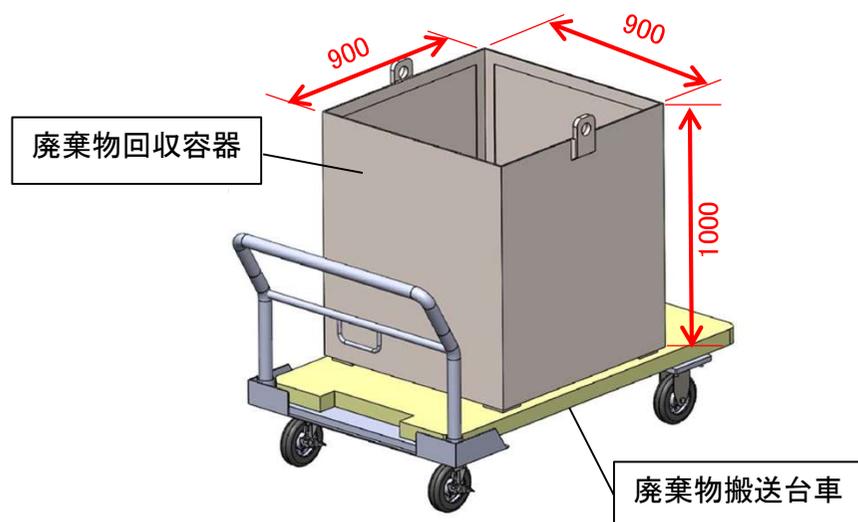
- リアルタイムシミュレーション
 - セカンダリロボットの実空間上の動作を3D空間上に再現することで、カメラの死角となる箇所の監視が可能。
 - ただし、ロボットの各軸の値から算出される姿勢を3D上に再現しているため、実際の状況は異なる可能性がある。そのため、カメラ視野に対する補助として使用する。



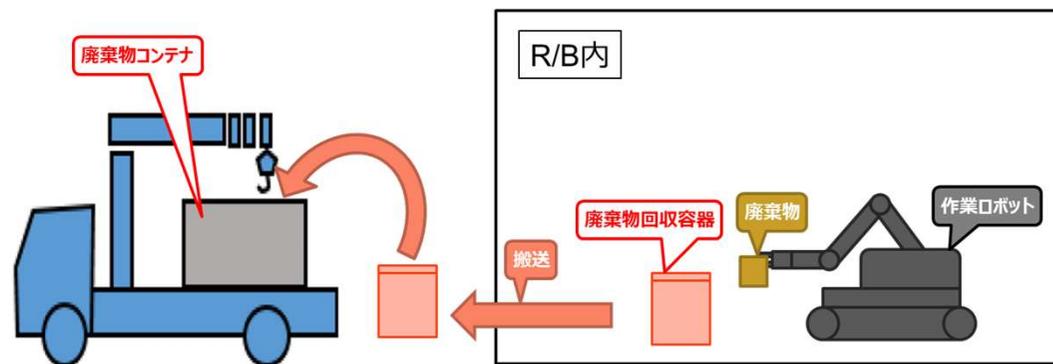
リアルタイムシミュレーション イメージ

<廃棄物回収容器仕様>

- 廃棄物回収容器はR/B内で撤去した干渉物を一時的に収納する容器であり、廃棄物搬送台車に搭載され作業員により大物搬入口と作業場所を搬送される。
- 本容器の寸法は最終容器である廃棄物コンテナの1/4の寸法となっており、そのまま内容器として廃棄物コンテナに収納することができ、収納効率に優れた設計となっている。
- 容器は鋼製とすることで鋭利な撤去物による容器の損傷を防止する。
- 廃棄物搬送台車は遠隔操作が可能な搬送装置を使用することもできるが、約0.8m³の容量を収納可能であるため搬送頻度は高くなく、加えて搬送作業は往復で10分程度であることから、作業員により搬送が適切と判断した。



廃棄物回収容器・廃棄物搬送台車外形図



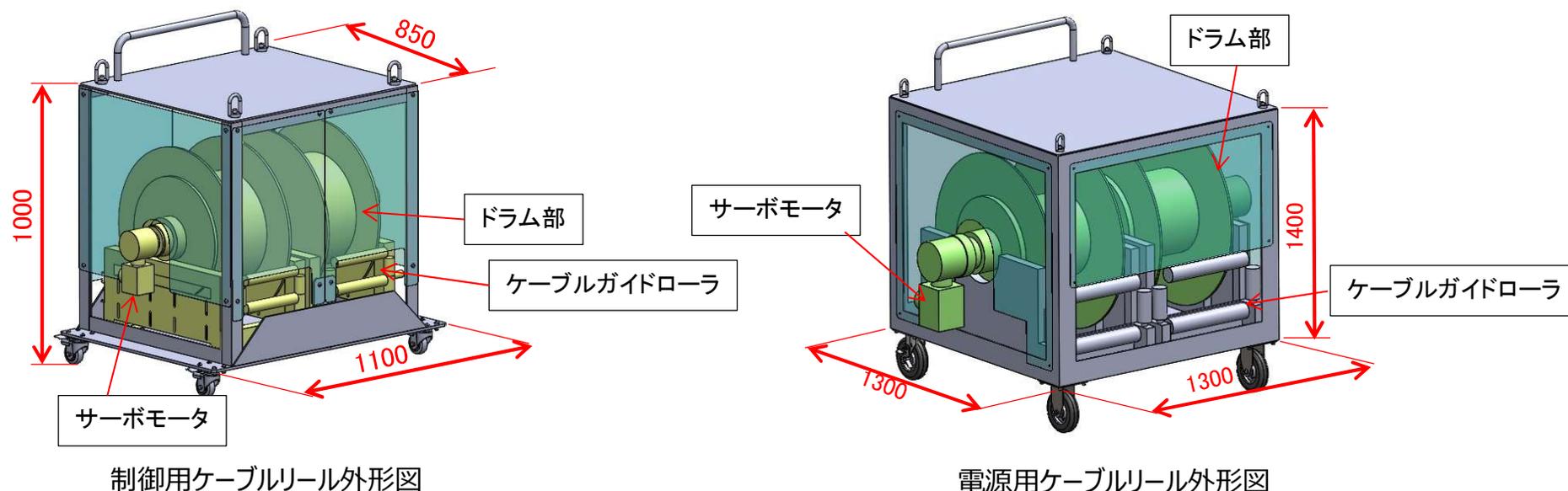
廃棄物回収容器の定義



廃棄物コンテナ(東電HD殿HPより)

<ケーブルリール仕様>

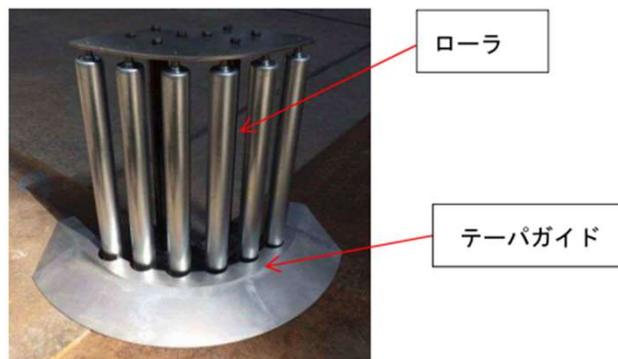
- ケーブルリールは作業ロボットを遠隔操作するために必要な電源および制御用のケーブルを、作業ロボットの走行に応じて巻き取りや送り出しを行う。R/B内のコーナー部にも対応可能とするため、ケーブルガイド(次頁)も設置する。
- 電源ケーブルによるノイズの影響を防ぐため、電源用ケーブルリールと信号用ケーブルリールの2基を用意し、ドラム寸法を小さくするため各リールにドラムを2個搭載する構造とした。
- 本ケーブルリールの駆動源はサーボモータとし、モータ出力軸にはトルクセンサを設置して、ケーブルの張力に応じて送り出し / 巻き戻しを行う。



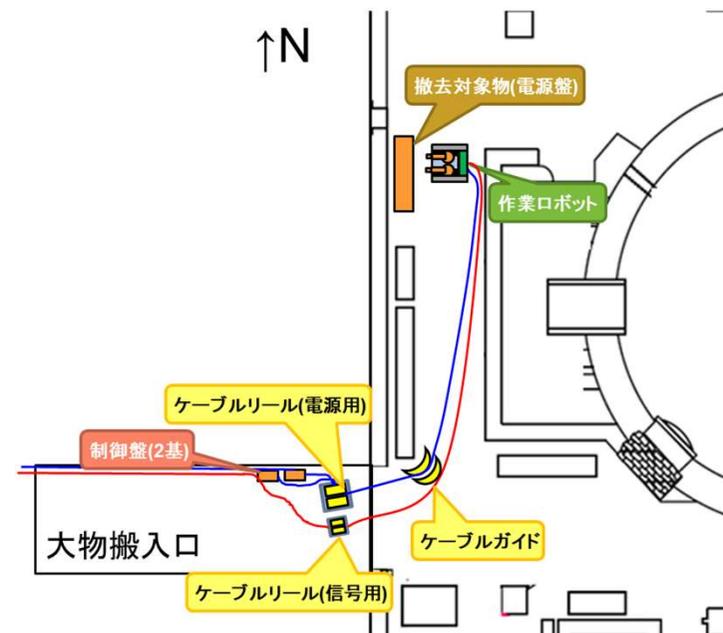
7.2 装置仕様

<ケーブルリール(ケーブルガイド)仕様>

- ケーブルガイドは人手で搬送可能な重量：約30kgとし、ローラを垂直に配置することで建屋のコーナー部におけるケーブルの取り回しを可能とする。
- ローラ底部にはテーパガイドを設け、ケーブルが必ずローラ部に掛かるようになっている。
- 建屋内にした図に示すとおり通路の角部にケーブルガイドをあらかじめアンカー固定しておくことで、作業ロボットの走行に応じたケーブルマネジメントを可能とする。



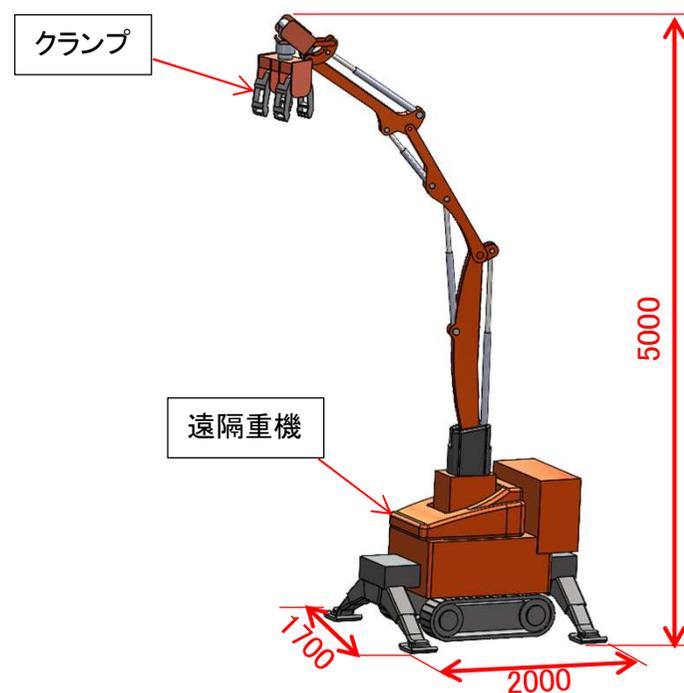
ケーブルガイド外観



ケーブルリールおよびケーブルガイド配置図

<重量物把持装置仕様>

- 重量物把持装置は、パイロードの観点で作業ロボットでは取り扱いが困難なRHR配管遮蔽体等の重量物を把持・搬送する装置である。
- 本装置は市販の遠隔重機の先端ツールを改造し、RHR配管および遮蔽体にアクセス可能な寸法にするとともに、クランプ形式による把持とマグネットによる把持が可能な仕様にする。

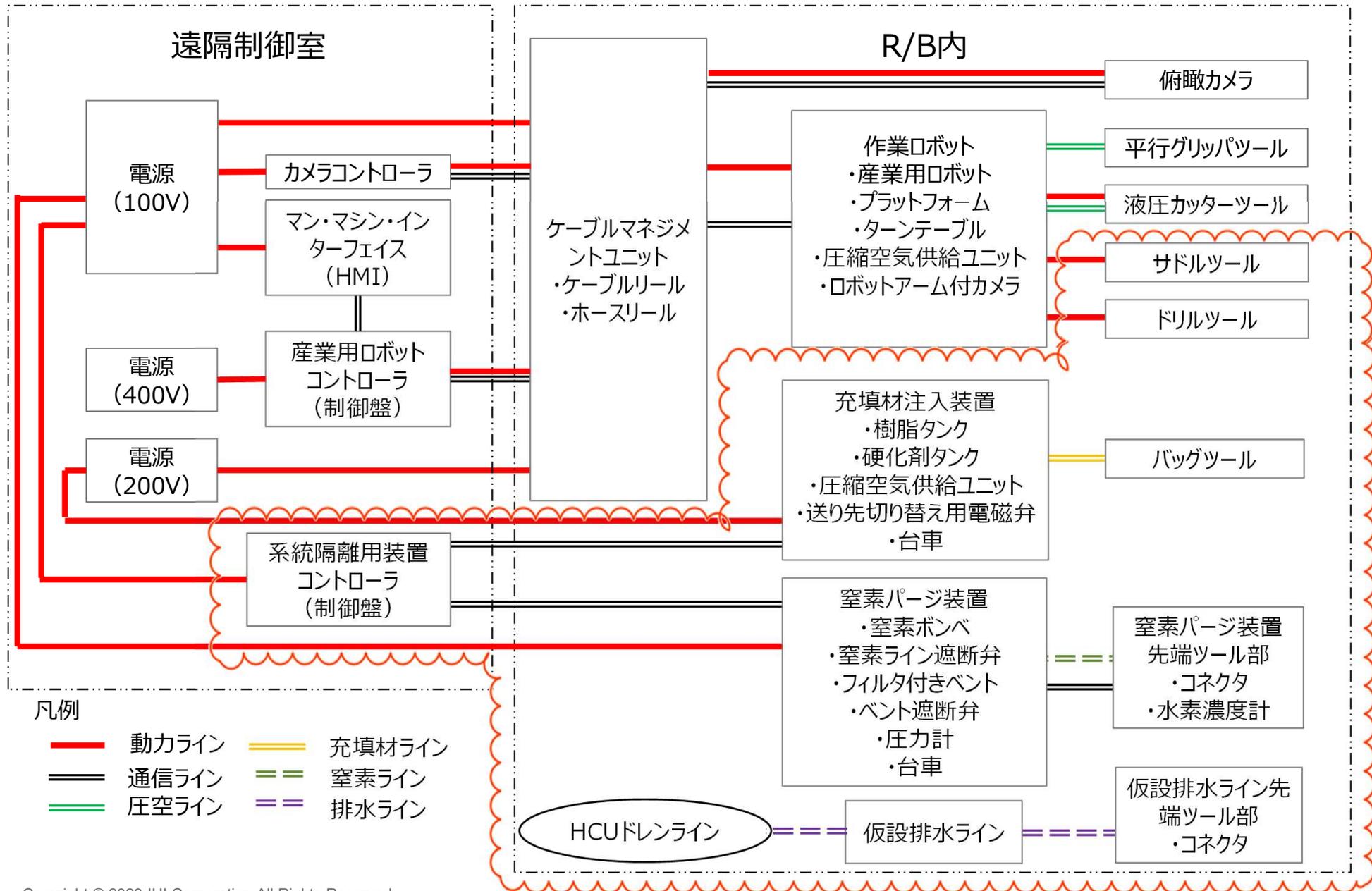


重量物把持装置外形図

7.2 装置仕様

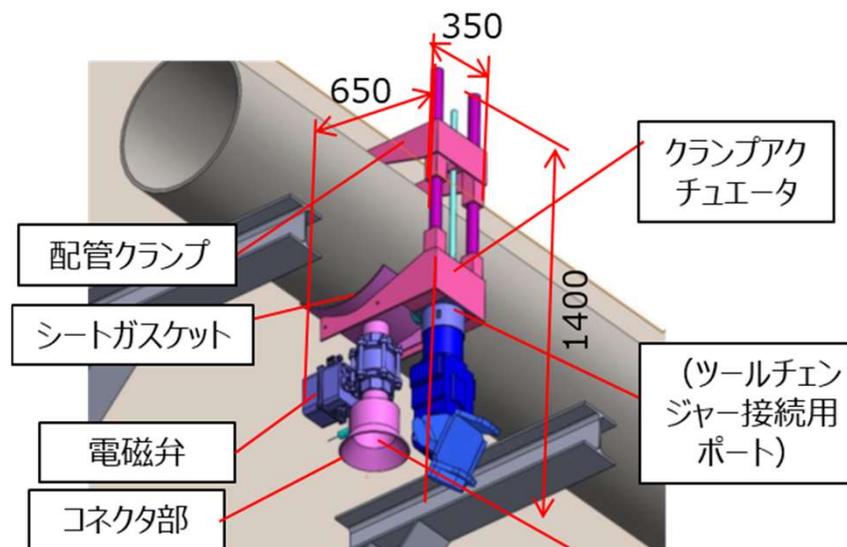
<RHR配管系統隔離装置 システム構成>

➤ 前述のシステム構成に加え，RHR配管系統隔離に関する機器を雲マークに示す。



<RHR配管系統隔離装置 サドルツール仕様>

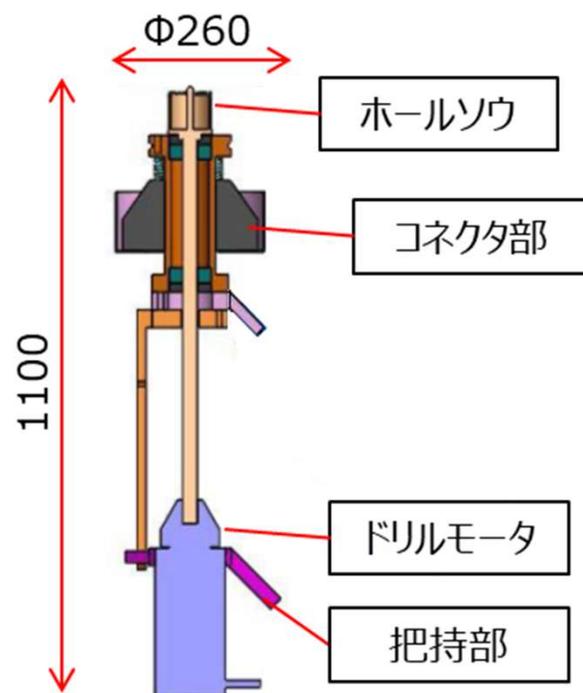
- サドルツールはインフレイタブルバッグ法におけるサドルを遠隔作業用の先端ツールとして適用したものである。
- 配管上に固定することで各作業工程中および作業工程間において配管の内外における気密を維持することができ、かつ他のツールが作業を行う際のベースとなる。
- サドルツールは配管クランプとクランプを開閉するアクチュエータ、配管表面との気密を得るためのシール（シートガスケット）、他ツールを接続するコネクタ部、工程間の気密維持のための電磁弁を有する。
- 作業ロボットのアームとはツールチェンジャにより接続する。



サドルツール外形図

<RHR配管系統隔離装置 ドリルツール仕様>

- ドリルツールはサドルツールと併用してホットタッピングを行うためのツールである。
- ドリルツールは配管に穿孔するためのホールソウ、ホールソウを回転させるドリルモータおよびサドルに接続するためのコネクタ部で構成される。
- ロボットアームの平行グリッパにて本ツールを把持し、ツールを動かすことでドリルの送りを行う。

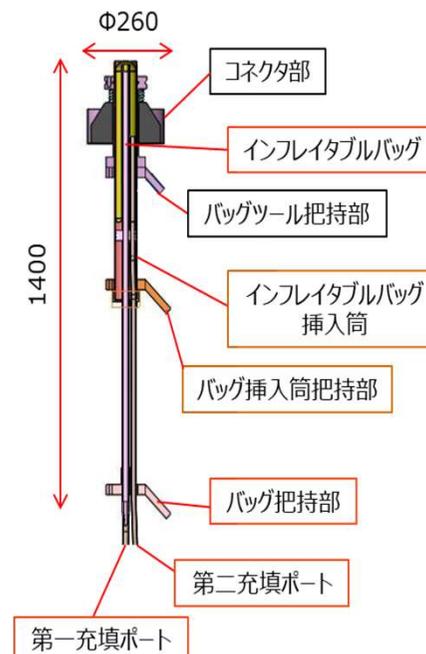


ドリルツール外形図

7.2 装置仕様

<RHR配管系統隔離装置 バッグツール仕様>

- バッグツールはサドルツールと併用してインフレイタブルバッグを配管内に挿入するためのツールである。
- ロボットアームの平行グリッパにて本ツールを把持し、ツールを動かすことでバッグの挿入を行う。
- 本ツールの使用手順を以下に示す。
 - (i) バッグツール把持部を平行グリッパツールで把持し、サドルツールコネクタ部に挿入する
 - (ii) サドルツールの電磁弁を開く
 - (iii) バッグ挿入筒把持部を平行グリッパツールでつかみ、サドル内に挿入する
 - (iv) バッグ把持部を平行グリッパツールでつかみ、RHR配管内に挿入する
 - (v) 充填材注入装置により第一充填ポートから充填材をバッグ内に充填する（鉄アレイ型となる）
 - (vi) 充填材注入装置により第二充填ポートから充填材をバッグ内に充填する（楕円形となる）

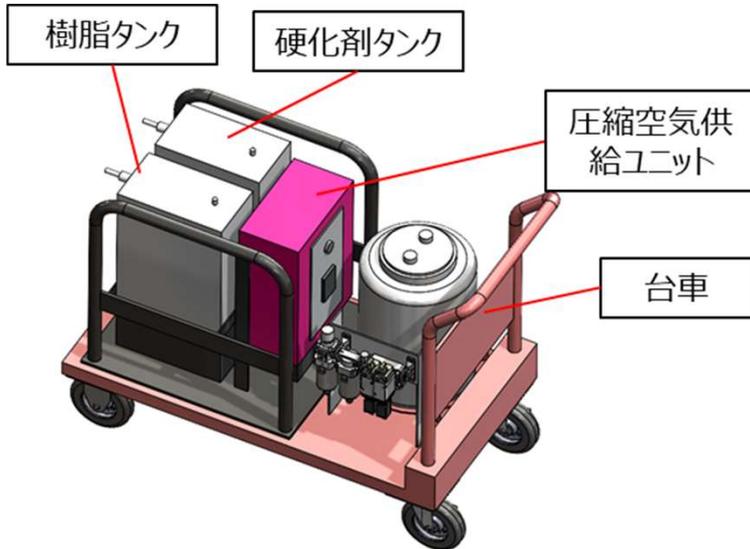


バッグツール外形図

7.2 装置仕様

<RHR配管系統隔離装置 充填材注入装置仕様>

- 充填材注入装置はインフレイタブルバッグに充填材を注入するための装置である。
- この装置は独立した台車に必要な構成機器を搭載したもので、一体となって作業エリアに搬入する。
- 充填材注入装置は樹脂タンク、硬化剤タンク、圧縮空気供給ユニット、送り先切り替え用電磁弁により構成する。圧縮空気により樹脂と硬化剤がバッグツールに送り、送り先切り替え用電磁弁により、第一充填ポートと第二充填ポートのどちらに充填材を送るかを切り替えが可能。これらの操作は遠隔操作により行う。
- インフレイタブルバッグは一回きりの仕様であるが、充填材注入装置は繰り返し使用することができる。使用後はバッグと接続しているチューブのコネクタを外すか切断し、新しいバッグを再接続する。
- 本装置はCRD挿入引抜配管に対し、材料充填法で系統隔離を行う際にも使用する。

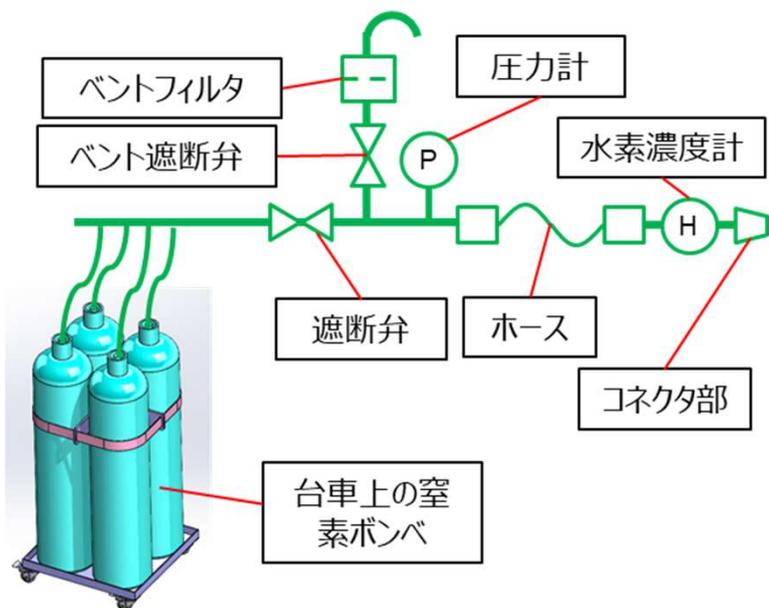


充填材注入装置外形図

No	項目	基本仕様	備考
1	構成機器	<ul style="list-style-type: none"> ・樹脂タンク ・硬化剤タンク ・圧縮空気供給ユニット ・送り先切り替え用電磁弁 ・台車 	
2	サイズ	650mm x 1400mm x 1200mm	
3	ユーティリティ	電気：200 V	
4	機能	・圧縮空気を用いて充填材（2液）を圧送し、配管内もしくはインフレイタブルバッグ内に供給する	

<RHR配管系統隔離装置 充填材注入装置仕様>

- 窒素パーシ装置はサドルツールおよび配管内に窒素を送り、サドルの気密確認や配管内の窒素パーシするための装置である。
- この装置は独立した台車に必要な構成機器を搭載したもので、一体となって作業エリアに搬入する。
- 窒素パーシ装置の構成機器は窒素ボンベと出口流路、ホース、コネクタ部である。出口流路は遮断弁、バント（バント遮断弁とバントフィルタを備える）、圧力計を備え、コネクタ部はサドルツールに装着するためのコネクタと水素濃度計を備える。圧力計は気密確認に、バントと水素濃度計は配管内の水素濃度を下げするために窒素パーシを行う際に使用する。
- 本装置はCRD挿入引抜配管に対し、材料充填法で系統隔離を行う際にも使用する。



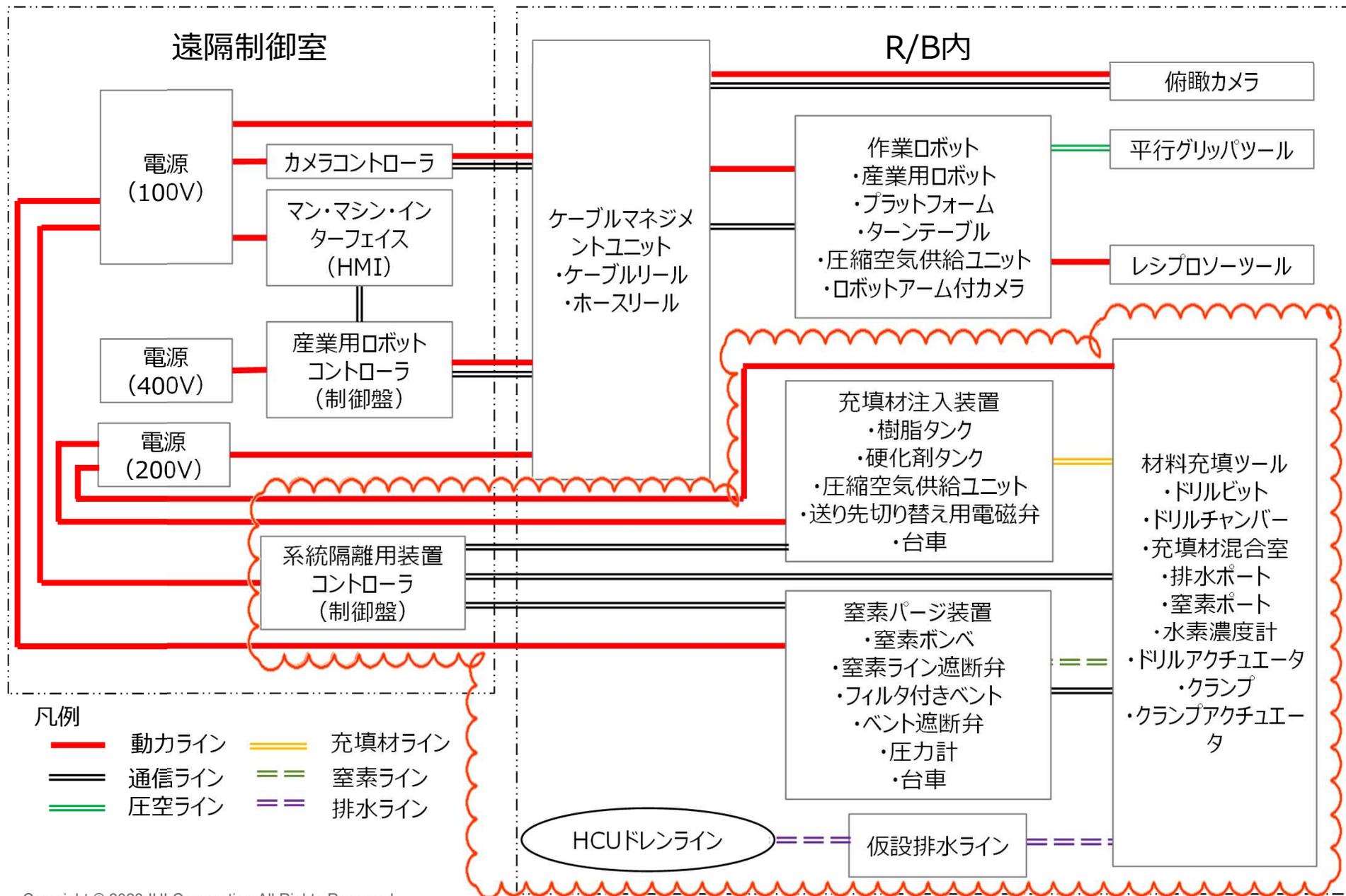
窒素パーシ装置外形図

No	項目	基本仕様	備考
1	構成機器	<ul style="list-style-type: none"> • 窒素ボンベ • 窒素ライン遮断弁 • フィルタ付きバント • バント遮断弁 • 圧力計 • 台車 	
2	サイズ	650mm x 1500mm x 800mm	
3	ユーティリティ	電気：100 V	
4	機能	<ul style="list-style-type: none"> • 配管内ないし先端ツール内に窒素を供給する。 • バントの機能と水素濃度計測の機能も有する 	

7.2 装置仕様

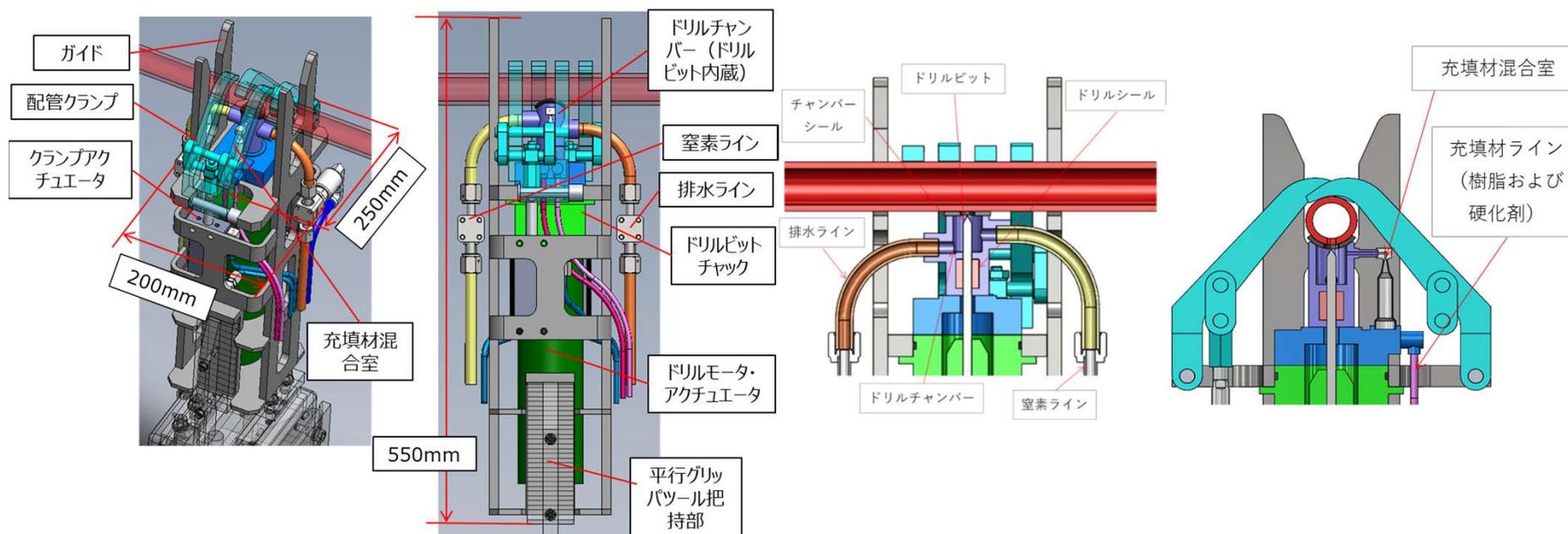
<CRD挿入引抜配管系統隔離装置 システム構成>

➤ 前述のシステム構成に加え，CRD挿入引抜配管系統隔離に関する機器を雲マークに示す。



<CRD挿入引抜配管系統隔離装置 材料充填ツール仕様>

- 材料充填ツールは材料充填法による系統隔離を行うために必要なすべての機能を集約したツールであり、配管への固定・穿孔・排水・窒素パージ・材料充填を行うことができる。
- 平行グリッパツールを装着したロボットアームにより材料充填ツールを把持し、対象配管の近傍にまで移動する。材料充填ツールはモータやアクチュエータなどを動かすための電力以外に、窒素パージのための窒素や材料充填のための充填材を外部から受け取る必要がある。そのため、後述の窒素パージ装置および充填材注入装置と接続可能とし、加えて排水を行うために仮設排水ラインとも接続可能。
- 材料充填ツールの構成機器はドリルビット、ドリルチャンバー、充填材混合室、排水ライン、窒素ライン、水素濃度計、ドリルモータ・アクチュエータ、配管クランプ、クランプアクチュエータであり、また、使い捨て部分（充填材によって配管と一緒に固化してしまう部分）を切り離すためのクイックコネクタを備える。



7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
1	共通	システム全体	不測の事態への対応	現場へのシステム設置時や作業中に発生する不測の事態に対し、その洗い出しや対策の検討が不十分。 (例：レシプロソーが途中で折れた場合の処置等)	実機適用に向けた詳細検討の中で各作業において想定されるリスクを抽出し、対策案を確立するとともに、その対策の有効性を確認する必要がある。	高
2	共通	作業ロボット	フォークリフト（プラットフォーム）の遠隔操作化	試験用試作機ではフォークリフトの移動、昇降作業は作業員が実施している。そのため、高線量エリアでの作業や作業効率、作業員の被ばく低減を考慮すると遠隔操作化が必要。	(a)プラットフォームの移動・昇降を作業員で実施するか遠隔化するかの方針について、作業時間・被ばく・コストの観点で比較検討し方針を定める。 (b)遠隔化が適切と判断された場合、下記のいずれかの方針で遠隔化を進める。 方針その1：「走行機能」および「昇降機能」の遠隔化 方針その2：「昇降機能」のみ遠隔化	中
3	共通	作業ロボット	アウトリガーの追加	撤去作業中の地震発生時や、切断反力等による装置の転倒防止対策が必要。試験用試作機では試験設備側で転倒防止対策を実施している。	・現場適用を考慮すると、アウトリガーの追加が必要であり、走行時はコンパクトに収まる工夫が必要である。 ・現場でのさらなる安全性を考慮し、移動式のウェイトをつける運用も必要に応じて検討する必要がある。	高

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
4	共通	作業ロボット	ケーブルマネジメントの追加	試験用試作機ではケーブルリールがないため、走行時には作業員によるケーブルマネジメントが必要。高線量エリアでの作業や作業効率、作業員の被ばく低減を考慮すると、R/B内で遠隔作業を行うためのケーブル送出・巻取制御を行うケーブルリールを追加する必要がある。	(a)ケーブルマネジメントを作業員が実施するか遠隔化するかの方針について、作業時間・被ばく・コストの観点で比較検討し方針を定める。 (b)遠隔化が適切と判断された場合、ケーブルリールを設計・製作する。	中
5	共通	作業ロボット	装置寸法の小型化	現状の作業ロボット(試験用試作機)は走行時でも高さが4mあり、R/B内を走行する際に既設構造物と干渉する可能性がある。	(a)現行試作機におけるR/B内の干渉確認を行い、目標とする装置サイズおよび撤去シナリオを検討する。 (b)上記の検討結果に応じ、ケーブルベアの構造最適化、ヘッドガードに置かれたツールステーションの配置見直しを行い、実機装置への反映を図る。	高
6	共通	作業ロボット	耐放射線性	選定機器部品等で耐放射線性が不明なものがある。	今後詳細設計が進み、かつ使用環境が明確となり耐放射線性の実証が必要になった際に照射試験を実施し、必要に応じ部分遮蔽や線源からの隔離により対策する。	中

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
7	共通	作業ロボット	ロボットの汚染	現場適用性の観点として、切断作業によりロボットは汚染されるため、カバー等により汚染を少なくする必要がある。カバーを用いた場合、ロボットの動きが妨げられる可能性がある。	特に汚染が懸念されるのが廃棄物に直接触れるロボットアームであるが、本事業の調査結果の中でロボットアーム専用のカバーがあることを確認している。これを用いることで動きを妨げずにロボットアームの汚染拡大防止が可能な見通しであり、今後の実機適用化の中で適合性の検討を行う。	中
8	共通	作業ロボット	ロボットアーム	高所作業性の検証試験Aで用いた産業用ロボットアーム(KR-60)は本事業の納期に間に合わせるために中古品を購入しており、現在は生産終了モデルとなっている。そのため、故障した際に同モデルの入手が困難。	実機には最新モデル(KR-70)を適用を推奨する。最新モデルを適用した場合はペイロード、重量、各軸の可動範囲の全てが向上するため、大きな問題は生じないと考えるが、ロボットアームが小型化されているので、アクセス範囲を再検証する。	低
9	共通	作業ロボット	ターンテーブル	固定用シリンダ作動時であってもターンテーブルを回転させることが可能なため、誤ってシリンダを破損させる可能性がある。	現場適用に向けて固定シリンダ作動時はターンテーブルが回転しないようなインターロックを追加する。	中

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
10	共通	作業ロボット	低所用プラットフォーム	低所用プラットフォームは高所用と比べ技術的難易度は低いと考えられることから、本事業においては概念検討のみを実施。今後、具体的な撤去対象物を設定した際に、低所プラットフォームの有効性が確認された場合は具体的な追加検討が必要。 (本事業でシステムの成立性を確認したので、将来的には現場の状況に応じて様々なプラットフォームと組み合わせることが可能。)	低所用プラットフォームを実機に適用する際は詳細検討を実施する。	低
11	共通	先端ツール	—	高所作業性の検証試験Aで使用した先端ツールはいずれも試験用試作機であり、その成立性は確認しているものの電源ケーブルを作業員が取り付けているため、現場適用の視点で改善を要する点がある。	現場適用に向けて各先端ツールの最適化を行う	高
12	共通	HMI	フォースセンサ	現状作業ロボットにはフォースセンサが取り付けられており、PCディスプレイ上で先端にかかっている力を読み取れるが、操作者がこれを直接見ることができず、カメラ操作者により値を口頭で伝えている。	操作者が視認可能な位置のディスプレイへの表示や、HMIへのフィードバック等の方法により、操作者が直接確認可能な仕様にする。	中

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
13	共通	HMI	ソフトウェア	高所作業性の検証試験Aで用いたHMIのソフトウェアは開発途中であり、実機適用にあたっては起動の容易化、各軸動作範囲最適化等の改善が必要。	HMIのソフトウェアの改善を図り、作業効率の向上を図る。	中
14	共通	視認補助技術	リアルタイムシミュレーション	リアルタイムシミュレーション機能により2基のロボットアームの姿勢を把握し、お互いの干渉防止機能を働かせることは可能であるが、プラットフォームや1F建屋内干渉物との干渉防止機能は現時点では無い。	作業ロボットの自己位置を3Dモデルと正確に合わせる必要があり、事前の建屋内マーキングまたはLIDAR等の自己位置特定機能を付与することで技術的には対応可能。その適用については、現場施工の観点およびオペレータの操作負担を天秤にかけ、検討する必要がある。	中
15	共通	視認補助技術	現場の音の入手	現場作業中の音は、切断が正常に行われていること等を把握するための重要な要素となる。試験用試作機では作業場所がすぐ近くであったため、音を遠隔操作室に伝えるシステムは作成していない。	遠隔操作室でも現場作業音が聞こえるシステムを構築する。 (技術的課題は特に無し。)	中

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
16	共通	視認補助技術	照明	本事業では最適なカメラ配置を選定するところまでは達成した一方で、暗所における視認性の検証については未確認である。そのため、実機適用化照明の配置検討が必要。	照明の配置検討を行い、暗所での視認性について確認する。	中
17	共通	視認補助技術	ポイントクラウド機能	ポイントクラウド機能によりカメラが設置されていない角度からの視野を得られるが、複数の点群データをリアルタイムで合成するため、ハイスペックのPCを用いても遅延が生じるうえに、精度も±数mm程度となり、先端ツールの位置合わせに必要な精度を満足できない。 *ポイントクラウド機能 ポイントクラウド機能は、3D スキャナによりリアルタイムにポイントクラウドを作成し、実空間上の作業ロボットを3Dデータとして閲覧することを可能にする機能。	ポイントクラウド機能は技術革新が進んでいる分野であり、今後の技術革新により本事業における使用目的を達成できる可能性がある。技術の革新を注視し、使用見通しが立った時点で適用を検討する。	低
18	共通	廃棄物回収容器	撤去物の収納～搬送	廃棄物回収容器は作業員により搬送する計画だが、被ばく線量低減のため遠隔操作化する場合、建屋内の搬送性・走行性の確認が必要。	多くの原子力施設における作業実績があることから、大きな課題はないと想定する。一方で遠隔化の具体化検討が必要である。	低

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
19	共通	ダスト対策	切断作業前のダスト発生対策	<p>干渉物の切断・撤去作業に伴い発生する放射性ダストは、切断開始前にダスト吸引および散水を実施することで、切断時のダスト飛散を抑制する方針である。</p> <p>本方針は、1Fで実績がある方法であるため、一定の効果はあるものと考えが、その具体的な効果は未検証であるため、今後、現場適用に向けた工事計画やモックアップ等で継続検討する必要がある。</p> <p>対策が不十分であると判断した際は、別途局所排気装置等を設置する方針である。なお、国の補助事業では遠隔で行うためのツールを製作していないため、その製作も必要。</p>	ダスト吸引ツール、散水ツールの設計・製作・機能検証を行う。	高
20	共通	ダスト対策	切断時に発生する切粉対策	<p>今回のケーブルトレイの切断では粉塵はほとんど出ていないが、配管切断時等、汚染された切断粉の発生が考えられる。切断粉の回収を考慮しておかなければ、汚染の拡大になってしまう。</p>	切断粉については基本的に作業員による回収を前提としているが、切断粉が汚染されていた場合は作業ロボットに装着されたダスト吸引ツールにより回収する方針とする。実機適用前にその成立性を確認する。	高
21	共通	視認補助技術	俯瞰カメラの遠隔化	<p>俯瞰カメラは試験用リフターの上に載せており、現場適用化に向けた詳細設計・製作が必要である。実機では、作業員によるカメラの移動を計画しており、その課題として、切断が進むごとにカメラ位置を移動させる必要があるため、特に西側通路など平行移動しながら撤去する場合は作業効率および被ばく線量の観点で遠隔化の考慮が必要である。</p>	俯瞰カメラの実機適用方針（人手または遠隔化するか）を決定し、その方針に基づき実機の製作が必要である。	中

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
22	ケーブルトレイ	—	撤去範囲の決定	1F R/B内ケーブルは使用中のケーブルが含まれている可能性があるため、切断前に切断可否の確認が必要となる。	東電殿にてケーブルの切断可否の検討をしていただき、必要に応じ本作業ロボットを用いて調査を実施する。	高
23	ケーブルトレイ	先端ツール	レシプロソーツール	レシプロソーによりケーブルトレイを切断可能なことは確認したが、作業効率の改善が必要。	切断効率の向上を目的とした最適なレシプロソーおよびブレードを選定する。	中
24	RHR	—	撤去範囲の決定	RHR配管および遮蔽体はR/B内の広範囲に渡り存在しており、具体的な撤去号機、範囲を決める必要がある。 例1：2号機の小規模取り出しをターゲットとして西側通路を撤去する検討。 例2：3号機の大規模取り出しをターゲットとしてX-1b近傍を撤去する検討	・RHR配管および遮蔽体の切断撤去範囲を決定する。 ・RHR配管/遮蔽体の撤去作業を実施するのにあたり、事前に撤去が必要な周辺干渉物の抽出と、その撤去可否の見通しをつける。	高
25	RHR	—	電動弁の撤去 (MO27A/B)	西側通路RHR配管上の電動弁 (MO27A/B)は重量が各約1tonあり、かつ最高部で高さ8mあることから、本事業で検討した作業ロボットでの撤去は困難。	バルブサポートを移設しアクセスルートを確保するか、将来的に十分に除染された環境で作業員により撤去する。	高

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
26	RHR	重量物把持装置	—	<p>(a)国の補助事業では天井クレーンを用いて遮蔽体等の重量物の把持を実施していた。実機適用に当たっては、天井クレーンの代用となる切断片を把持するための装置が必要。</p> <p>(b)作業ロボットに切断片を把持させることも可能であるが、切断単位が30kg程度(300x300mm)となり、撤去効率が劣る。(重量物把持装置を用いると、廃棄物回収容器に収まる寸法である700x700mmの単位で切断可能)</p>	<p>(a)実機切断方針の検討(重量物把持装置の使用または撤去装置単体での撤去とするかの運用方針を決定する必要がある。)</p> <p>(b)重量物把持装置を用いる場合は、当該装置の設計・製作を行う。</p>	高
27	RHR	先端ツール	DCツール(大, 小)	<p>(a)機械的切断方法(チップソー)により遮蔽体(t40mm)の切断が可能であることを確認した。しかし、遮蔽体(t40mm)の切断効率は180分/m程度であり、実機適用に向けた切断効率の向上が必要。</p> <p>(b)要素試験で用いたチップソーは市販品を用いており、火花対策が考慮されていないが、1F R/B内で使用するには火花発生を抑制する処置が必要。</p>	<p>(a)モータの高出力化や切断作業以外の効率化の実施。</p> <p>(b)モータの回転数制御ができる機能の追加。ただし火花の発生をゼロにすることは困難なため、火気養生や散水等の追加対策も別途検討する。</p>	高

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
28	RHR	系統隔離	材料充填法	要素試験の結果、材料充填法によりRHR配管に閉塞を形成し、十分な気密を得ることは可能であった。しかし、RHR配管へ適用するには配管内の堰の形成方法の改善は必須で、作業者による確認・調整を必要とせず、なおかつ安定した結果を得られる方法の検討が必要。	遠隔操作により堰を形成する装置の開発が必要。ただしインフレイタブルバッグにて、よりシンプルな方法で気密保持可能なことは確認されているため、インフレイタブルバッグ法を採用することを推奨する。	低
29	RHR	系統隔離	インフレイタブルバッグ法	要素試験によりインフレイタブルバック法がRHR配管に適しているとの見通しを得たが、遠隔操作により当該配管の閉塞を行う場合、詳細設計、信頼性確認が必要。	<ul style="list-style-type: none"> 人による作業と遠隔作業の分担を机上検討にて整理する。 工法の信頼性検証 系統隔離工法の遠隔操作化/機能検証 	中
30	RHR	保温材	撤去方法	RHR配管の保温材の撤去方法については、遮蔽体や配管と比べ難易度が低く撤去可能と考えられることから、国の補助事業では詳細検討の対象外としたが、実機適用にあたって詳細検討が必要。	保温材撤去方法の詳細検討の実施。	高

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
31	RHR	HMI	自動切断プログラムの確立	RHR遮蔽体の切断時，要素試験時は1m/180min程度切断に時間がかかり，自動化プログラム無しでは操作者の負担が大きい。	自動切断プログラムを作成することで，操作者がボタンを押している間は自動的にブレードが送られる等，操作者の負担軽減策を確立する。	高
32	HCU	系統隔離	圧着法のCRD挿入引抜配管への適用検討	圧着法は作業時間が圧倒的に短い(要素試験時は1本につき1分程度)という大きなメリットがあるが，市販工具で高肉厚(sch80)のCRD挿入引抜配管を圧着し気密保持が可能なものは現状存在しないため開発が必要。	・高肉厚(sch80)に対応可能な工具を開発する。ただし，材料充填法にて気密保持可能なことは確認されているため，材料充填法を採用することは問題ないと考えられる。	低
33	HCU	系統隔離	材料充填法のCRD挿入引抜配管への適用検討	材料充填法によりCRD挿入引抜配管の閉塞が可能であることは確認したが，材料の固化時間を含めると1本あたり撤去に半日～1日の時間を要する。南側HCUだけでも当該配管は約150本あることから，作業に非常に日数がかかる。	可能な限り並行作業で進める工程の検討が必要。	中

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
34	HCU	先端ツール	系統隔離ツール	要素試験により材料充填法がCRD挿入引抜配管に適しているとの見通しを得たが、作業準備から系統隔離完了までの一連作業の成立性の検証が必要と考える。また、遠隔操作により当該配管の閉塞を行う場合、詳細設計、信頼性確認が必要。	系統隔離工法に係る一連の作業の検証を行い、工法の成立性を確認した後に、遠隔操作化/機能検証を行う。	高
35	HCU	HCUユニット部	撤去方法の確立	CRD挿入引抜配管閉止後のHCUユニット部は、PCVから隔離されるため撤去難易度が大幅に下がるため、国の補助事業での詳細検討対象外としたが、撤去に際しては具体的な撤去方法の検討が必要。	HCUユニット部の撤去方法の詳細検討を実施する。	高
36	RHR / HCU 共通	系統隔離	水素爆発抑制策	ホットタッピングによりRHR配管およびCRD挿入引抜配管に対し、水素爆発の危険性のない温度で火花の発生なく穿孔可能なことを確認した。実際に水素が含まれる可能性のある配管に対してホットタッピングを適用するには、精度の良い水素濃度の評価や、事前の配管内窒素パージなど、多重の信頼性の構築が必要。	実機適用に向けて以下ステップの対応が必要である。 (a)人による作業と遠隔作業の分担を机上検討にて整理する。 (b)工法の信頼性検証 (c)系統隔離工法の遠隔操作化/機能検証	高

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
37	RHR / HCU 共通	系統隔離	系統隔離システムの構築	作業員/遠隔いずれで系統隔離を行う場合においても、具体的な対象配管の穿孔場所、加圧試験範囲、試験系統等の信頼性の確認システムの構築が必要。	左記の検討を実施する。	高
38	共通	工事計画	前提条件の確認	国の補助事業の目標は、遠隔撤去システムの開発および実機仕様の提案であるため、実機適用に向けた前提条件の再整理が必要。	<p>実機適用に向けて、以下の前提条件の整理が必要である。</p> <p>(a)現地全体工程の概要および検討必要項目の洗い出しを行い、工事の全体像を掴むとともに今後の開発に必要な事項に漏れがないことを確認する。</p> <p>(b)具体的な撤去対象物を定めるとともにその撤去範囲を確定させる。</p> <p>(c)設計条件（ロボット寸法、床面条件、環境条件、防水・防塵、耐震要求）および撤去装置の品質保証のあり方を決める。</p> <p>(d)現場の施工条件として、火気の許容程度を確認する。</p>	高

7.3 課題の整理

<課題整理および実機適用に向けた対応方針（案）>

- 本事業の実施を通じて得られた課題および実機適用に向けた対応方針（案）を以下に示す。

No.	対象	構成要素	本事業で抽出した課題		実機適用に向けた対応方針（案）	
			項目	内容	項目	優先順位
39	共通	工事計画	現地作業の成立性	国の補助事業の目標は、遠隔撤去システムの開発および実機仕様の提案であるため、現地工事に係る具体的な工事計画については、詳細な検討ができていない。現地工事計画の検討が必要である。	<p>現地工事計画を検討する。</p> <p>(a) 現地工事の成立性を確認するために、「現場の機器配置」や「事前作業準備」を検討するとともに、現地工事完了までの全体工程およびその概算費用を算出する。</p> <p>(b) 作業要領書などの具体的な現地工事計画を行う。</p>	高
40	共通	フォークリフト	法令点検	本事業で開発した遠隔撤去システムのプラットフォームは、既存のフォークリフトを採用している。一般的なフォークリフトは法令点検が定められているが、本装置は福島廃炉向けに様々な改造を行っており、通常の方法点検が適用されるのか不明確である。	福島廃炉に適用されている他PJの装置実績を確認することや、労基署等への確認を行い、装置の扱いについて明確化する。また、その調査結果に応じて保守内容の検討を行う。	高

8. 補助事業のまとめ

8. 補助事業のまとめ

◆ 事業背景

- 福島第一原子力発電所における燃料デブリ取り出し作業を行うためには、原子炉建屋（以下「R/B」という。）内の搬出入動線や設置スペース、作業エリアの確保を行うための作業環境整備及び干渉物の撤去が必須である。
- R/B内は高線量環境であることから、作業員の被ばく低減、作業効率向上のために高線量下で重作業を行うペイロードが大きく、操作性・ロバスト性に優れた汎用性の高い作業支援ロボットシステムが必要となる。

◆ 事業目的

- 実用化までの工程やコスト低減の観点から、すでに世の中にある汎用的なロボット技術を調査し、その組合せにより高線量下で重作業に適用できる拡張性を持った合理的なロボットシステムの開発を目指す。
- ユーザー（東京電力HD）がこのロボットシステムに基づいて、具体的な撤去作業を企画できるような統合的なコンセプトの提案を本事業のゴールとする。
- ユーザー自らが遠隔技術の取得を促進できるようにするとともに、福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策を円滑に進め、我が国の科学技術水準の向上を図ることを目的として実施する。

◆ 実施内容

(1) 情報の抽出・整理

汎用性の高い作業支援ロボットシステムの開発を念頭に、将来の廃炉工事計画に基づく干渉物の抽出を行い、東京電力HDの現場撤去ニーズを考慮した上で、代表撤去干渉物と撤去範囲を設定した。

(2) 目標仕様の検討

干渉物撤去システムを検討する上で、適用装置の前提条件および想定撤去手順を整理し、撤去システムに要求される以下12項目の要素技術を抽出した。そして要素技術毎に目標仕様を決定した。

- ①作業ロボット本体, ②先端ツール, ③視認技術, ④ケーブル・ホース
- ⑤マン・マシン・インターフェイス, ⑥廃棄物容器ハンドリング, ⑦耐放射線性向上処置, ⑧系統隔離技術,
- ⑨ダスト飛散防止, ⑩水素爆発抑制, ⑪ケーブルマネジメント, ⑫ロボット一時保管・保守

(3) 技術調査・検討

上記12項目の要素技術に対し、幅広く国内外の技術や知見を調査し、技術情報を取得した。

◆ 実施内容

(4) 要素試験

抽出された技術課題のうち、要素試験による検証が必要と判断された対象について、要素試験を実施した。そして、最終検証試験として、檜葉遠隔技術開発センターにて、本事業で開発した遠隔撤去システムを用いた高所での干渉物撤去検証を実施し、その成立性を確認した。

- ・ 高所作業性（操作性）の検証（A）（B）
- ・ RHR配管の切断検証
- ・ 系統隔離工法の妥当性検証（A）（B）

(5) 撤去手順検討

要素試験結果を踏まえて、カッティングプランや詳細な作業ステップを作成し、主要作業の現場施工の成立性を確認した。

(6) 仕様提案

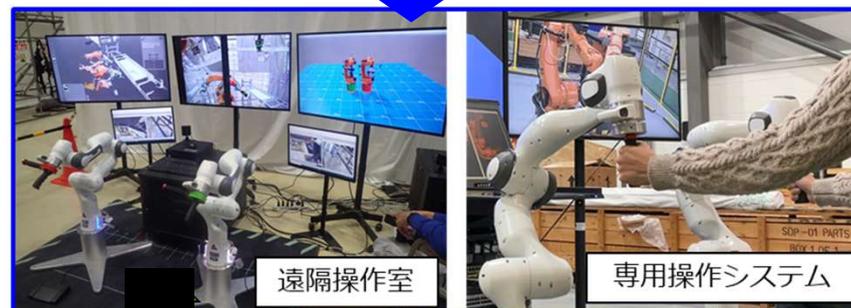
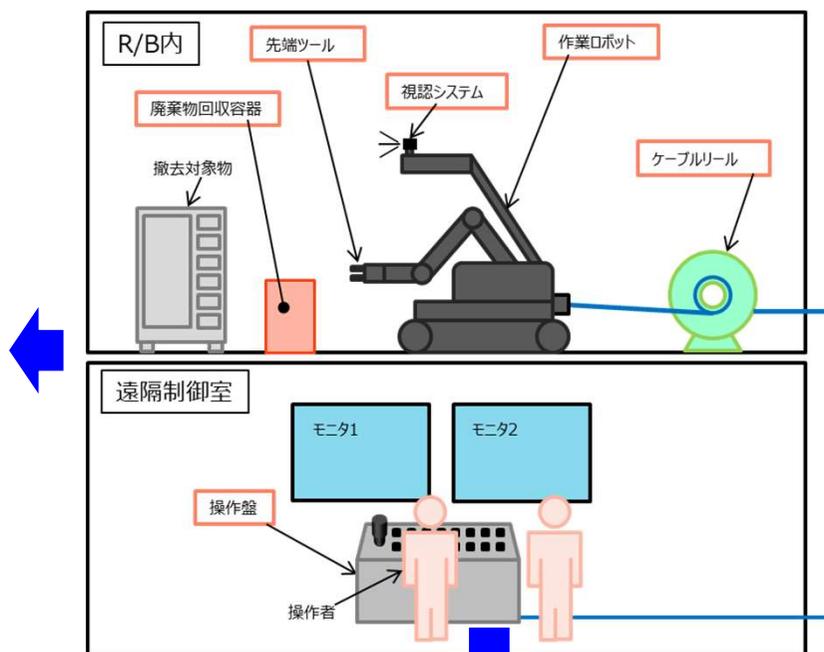
本事業の実施を通じて得られた知見・課題を基に将来実機に適用すべき遠隔撤去システムの仕様を提案した。

◆ 今後の予定

本事業で開発した遠隔撤去システムを早期に現場投入することを目的に、[東京電力HDのニーズに基づいて、必要な検討を継続し](#)、福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策に資する。



遠隔作業ロボットイメージ
(写真：高所ケーブルトレイの撤去作業)



遠隔操作室

専用操作システム

本事業の成果例

IHI

Realize your dreams

◆ 用語集

- RHR : Residual Heat Removal (System) (残留熱除去系)
- HCU : Hydraulic Control Unit (制御棒駆動水圧制御ユニット)
- PCV : Pressure Containment Vessel (圧力格納容器)
- CRD : Control Rod Drive (制御棒駆動機構)
- DHC : Drywell Humidity Control (System) (ドライウェル内除湿系)
- AC : Atmospheric Control System (不活性ガス系)
- PTZ : Panoramac・Tilt・Zoom (水平方向・垂直方向・望遠広角)