

自主事業

「原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発
(X-6ペネトレーションを用いた内部詳細調査技術の現場実証)」

令和6年度最終報告

令和7年6月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

目次

1. 本事業の背景・目的
2. 本事業の位置付け
3. 実施体制とスケジュール
4. 実施内容、成果
 - 4.1 アクセス・調査装置
 - 4.2 その他付帯設備
 - 4.3 燃料デブリ回収装置
 - 4.4 現場実証
 - 4.5 その他
5. まとめと今後の予定

1. 本事業の背景・目的

【背景】

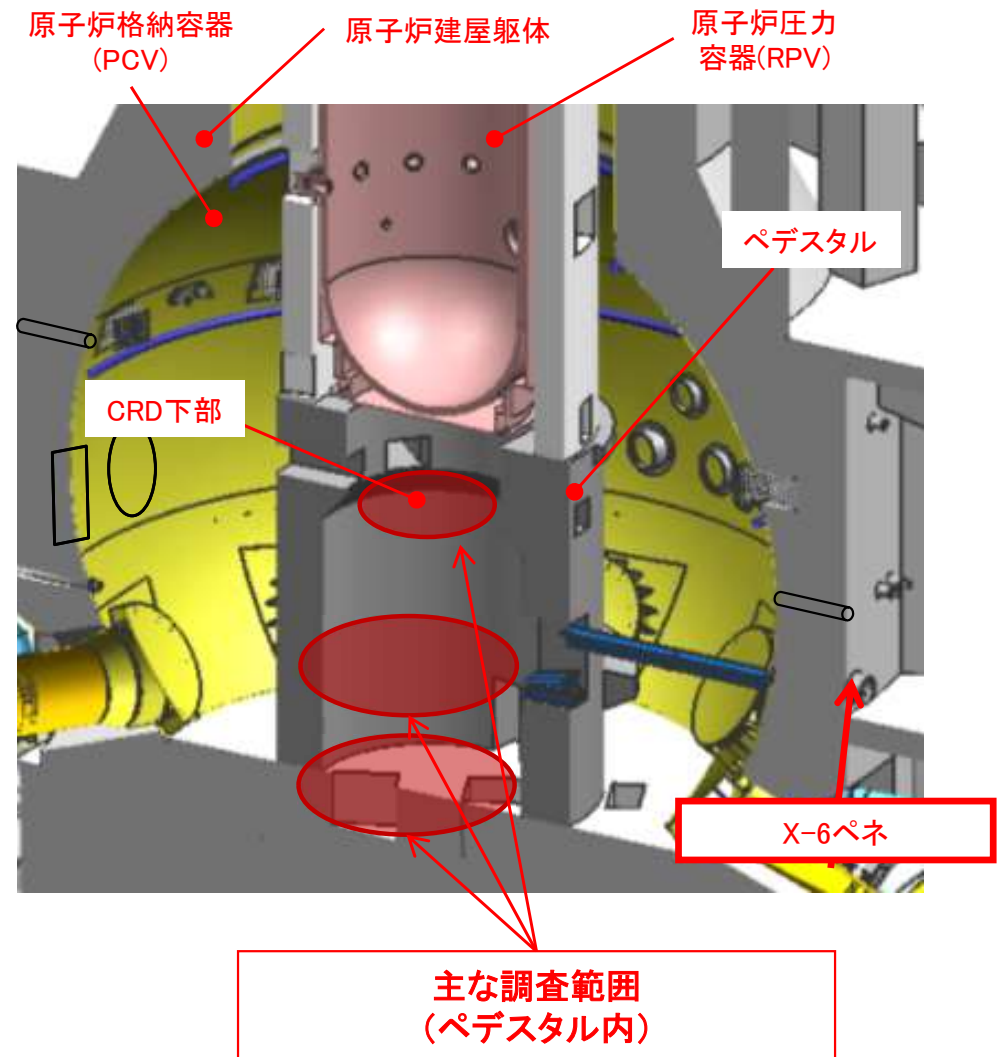
平成30年1月に実施された2号機のPCV内部調査の結果、ペDESTAL内の底部全体に、小石状・粘土状に見える堆積物が確認されている。

また、燃料集合体の一部が底部に落下しており、その周辺に確認された堆積物は燃料デブリと推定されている。



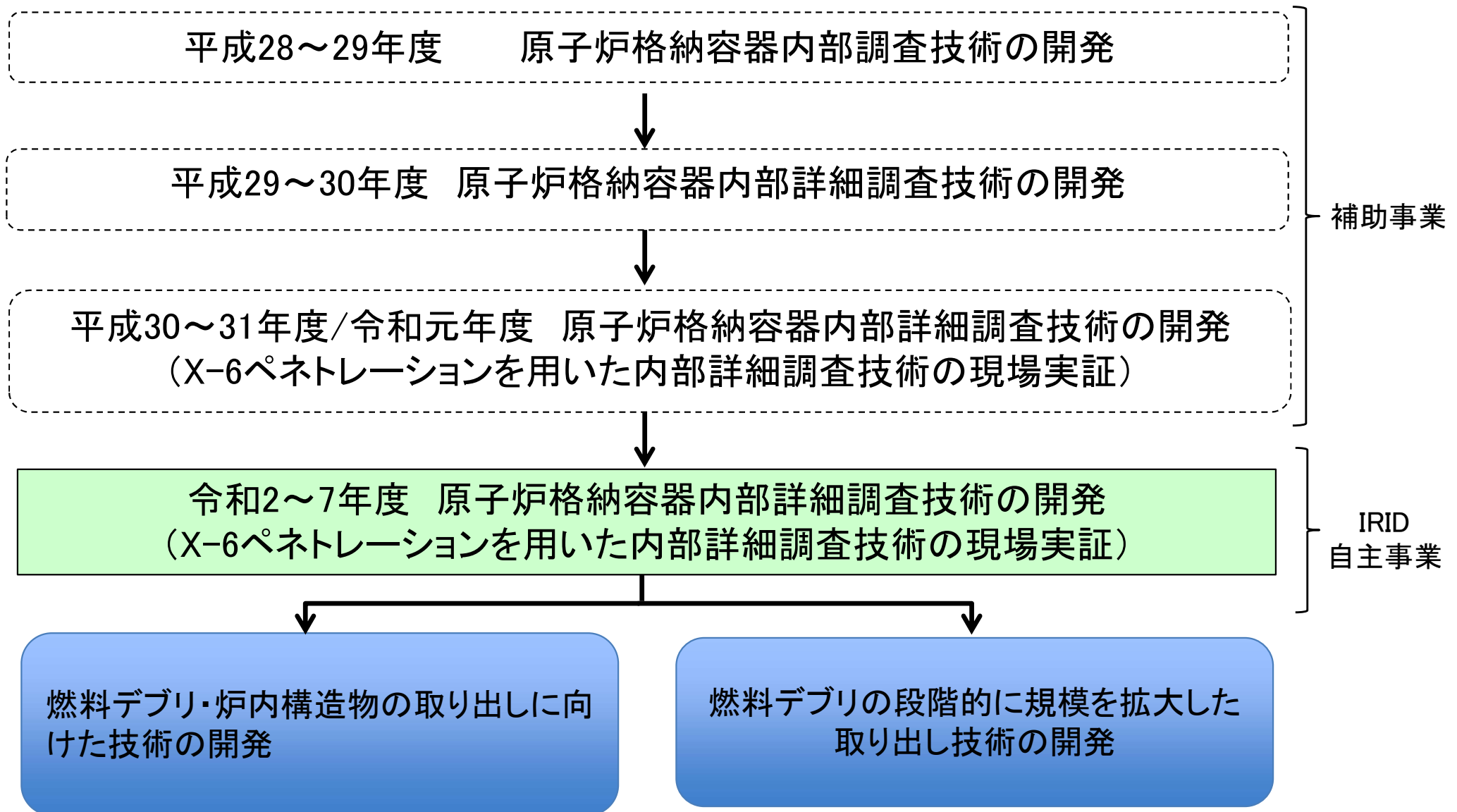
【目的】

アクセス・調査装置及び調査技術を、従来のPCV内部調査と同じX-6ペネトレーションに、より大きな直径の開口部を設けてPCV内部に投入し、詳細調査を実施することで当該開発技術が有効であることを確認する。また、燃料デブリ回収装置を搭載し、PCV内部の堆積物を回収し、当該開発技術の有効性を確認する。

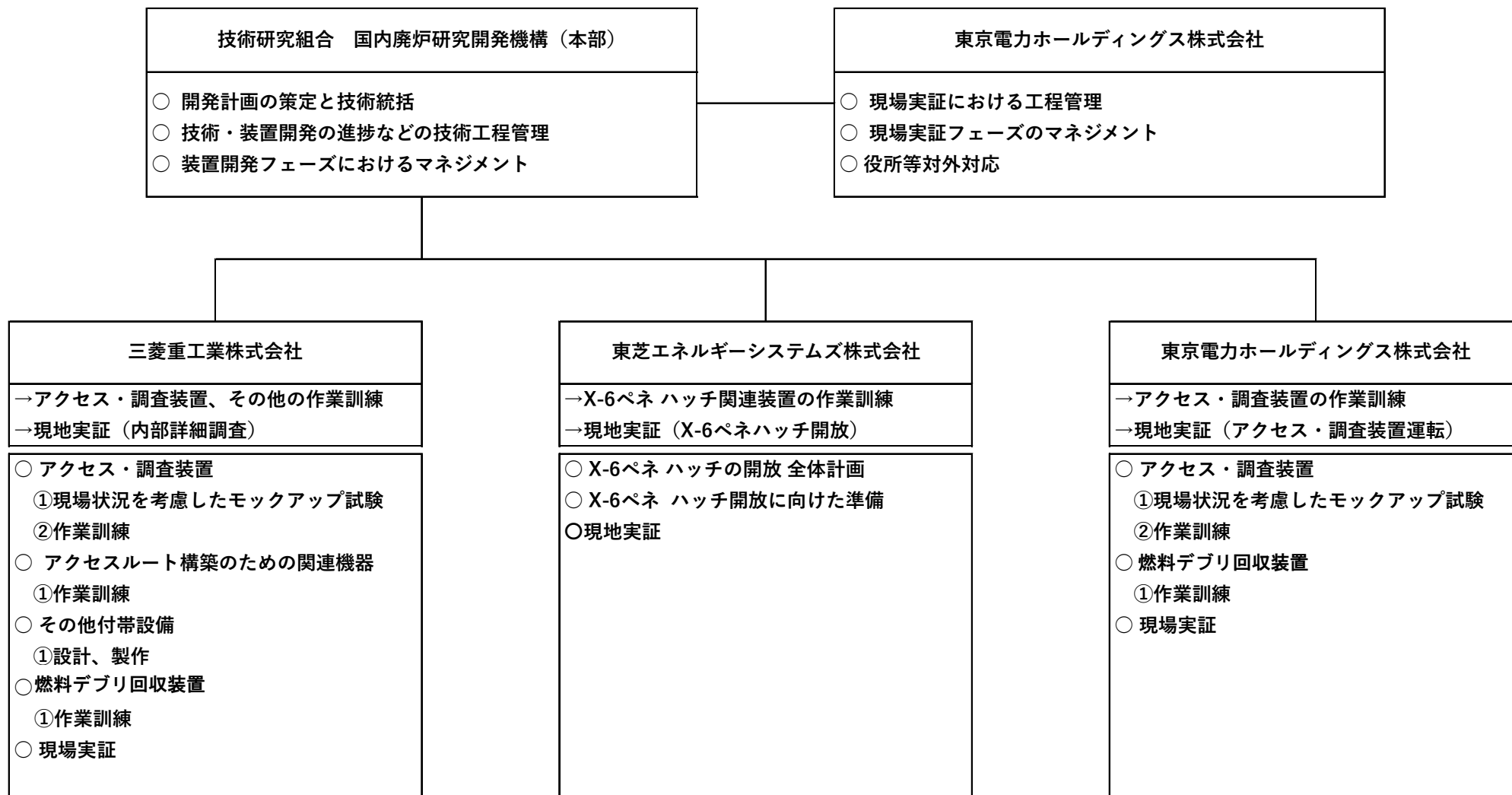


【 PCV断面図と調査対象部位の概要 】

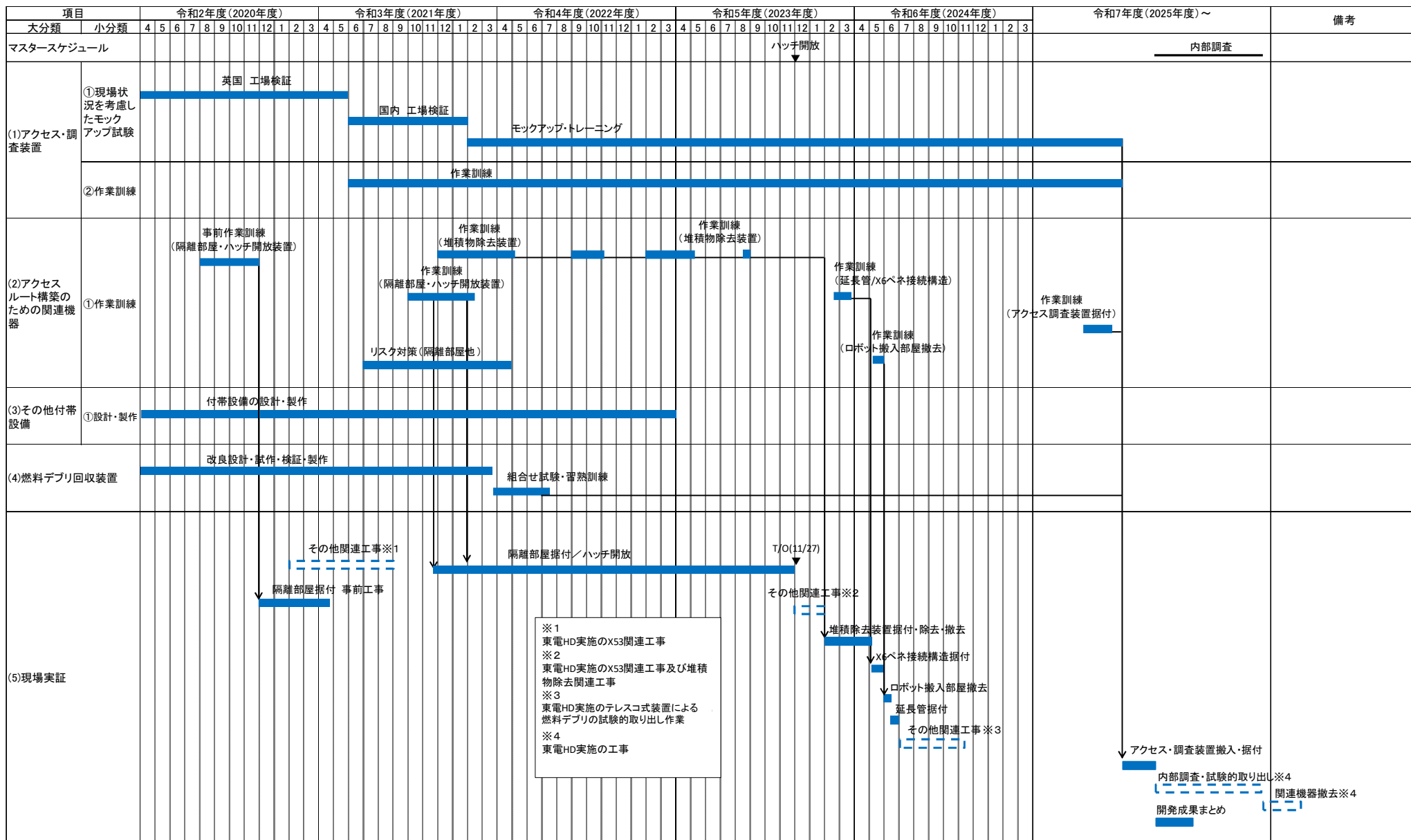
2. 本事業の位置付け



3. 実施体制とスケジュール: 実施体制



3. 実施体制とスケジュール:スケジュール



4. 実施内容、成果

4.1 アクセス・調査装置

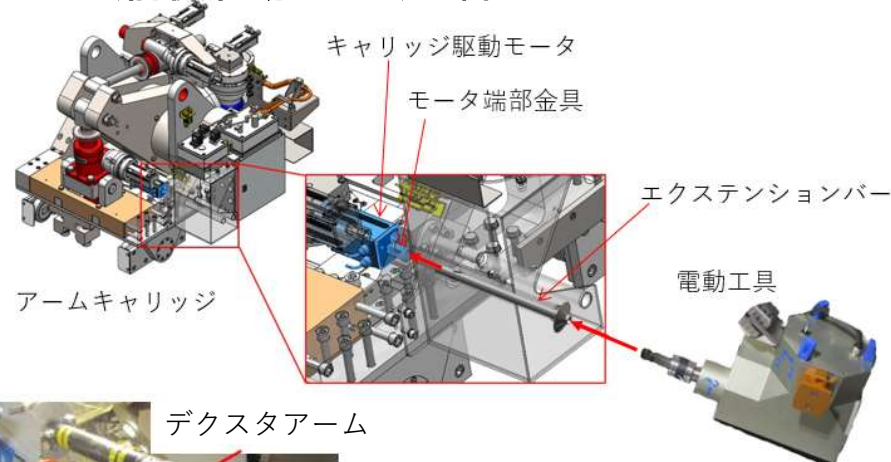
(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験

(a)非常時回収試験 a.キャリッジ故障想定試験

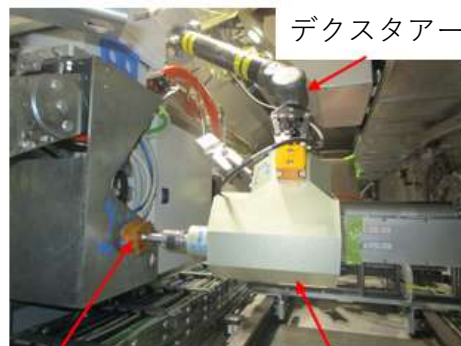
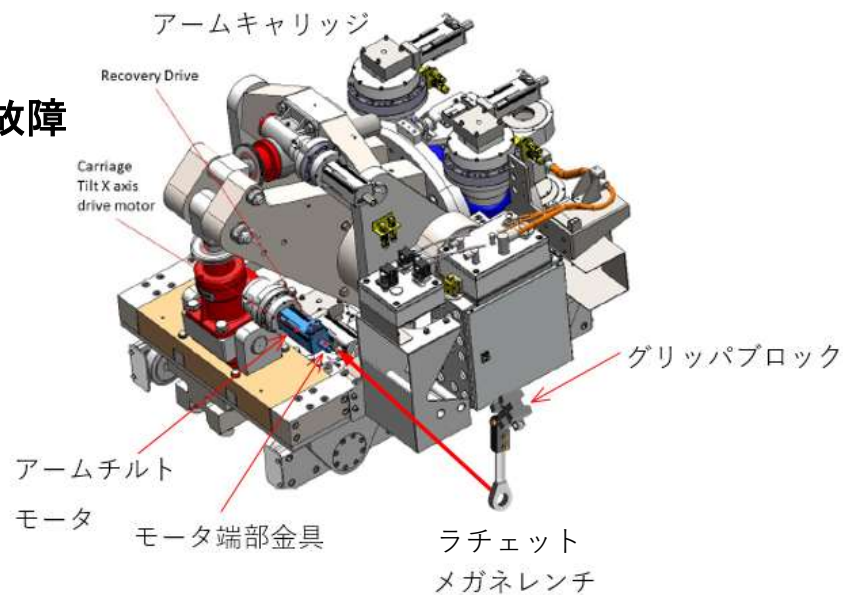
- ・PCV内へのアーム挿入時にアームキャリッジ走行モータ又はチルトモータが故障した場合を想定した試験をそれぞれ実施した。
- ・モータ故障時は、双腕マニピュレータ(以降、デクスタ)を遠隔操作しモータ端部金具に治具/工具をはめ込み、モータ軸を回転させて駆動する。

試験結果

走行モータ(前後駆動モータ)故障

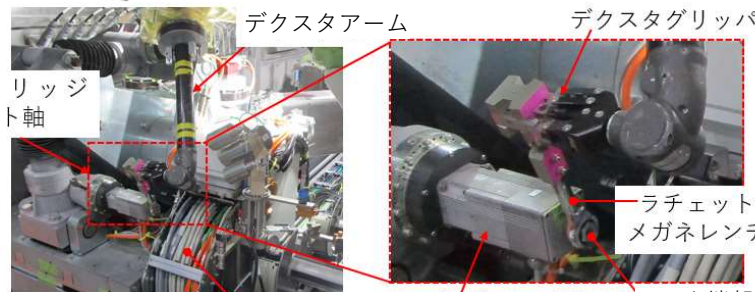


チルトモータ故障



モータ軸を電動工具によって回転させ、キャリッジ走行が可能なことを確認

エクステンションバー 電動工具



ラチェットメガネレンチをモータ軸にはめ込んで回転させ、キャリッジのチルト動作が可能なことを確認

E-Chain チルトモータ モータ端部金具

4.1 アクセス・調査装置

(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験

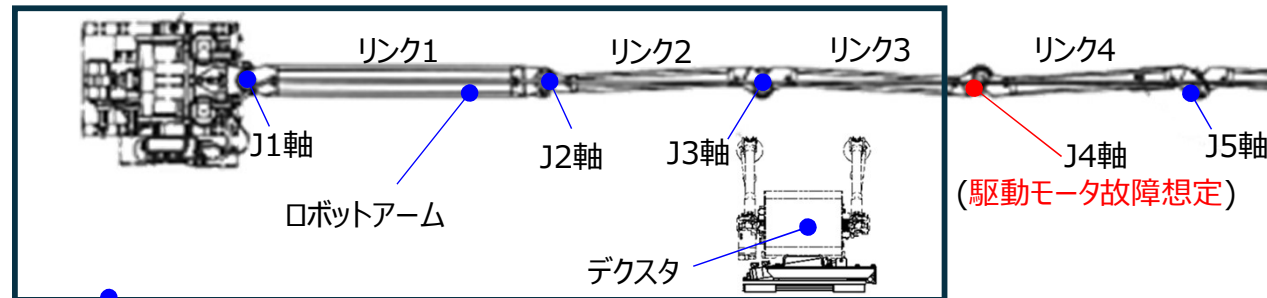
(a) 非常時回収試験 b. リンク故障想定試験

- ・PCV内へのアーム展開時にリンク関節部のモータ故障を想定した試験を実施した。
- ・モータ故障後は、関節部を開放(フリー)とし、アームを折り畳んで回収する。

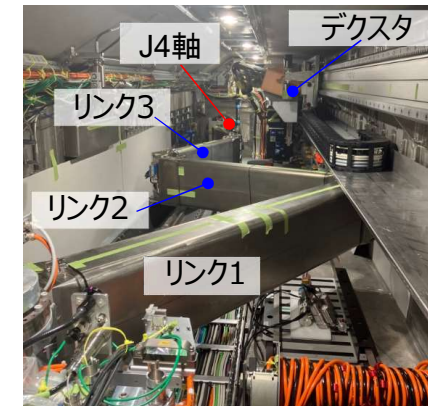
	クラッチ非搭載軸 (J1～J3軸)	クラッチ搭載軸 (J4～J7軸)
関節部の開放手段	デクスタにて開放	遠隔操作でクラッチを作動して開放
アーム(リンク)の折り畳み、 回収手段	健全なモータとデクスタにてリンク部分を折りたたんで回収	

試験結果(代表例)

リンク部(J4軸駆動モータ)故障を想定した非常時回収試験



エンクロージャ



回収状況 (リンク折りたたみ途中)

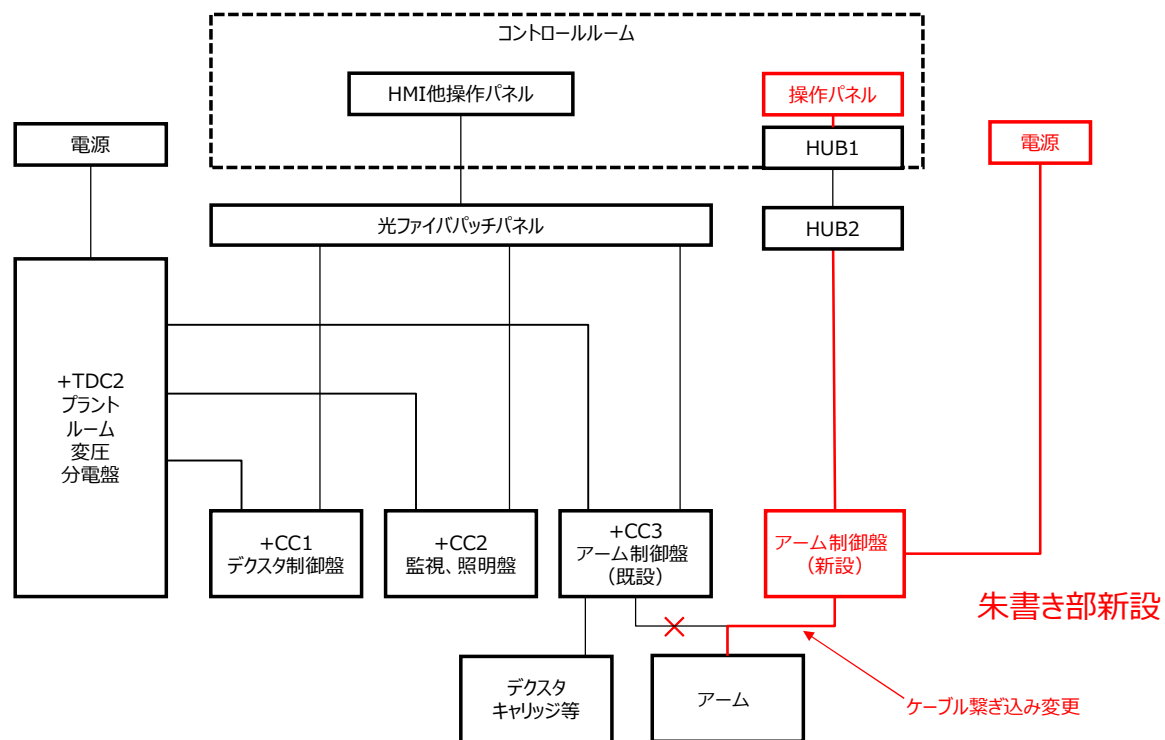
- ・関節部を開放し、健全な軸の遠隔操作及びデクスタによるリンク部の引き込み(折りたたみ)により、エンクロージャ内へのアーム回収が可能なることを試験で確認。

4.1 アクセス・調査装置

(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験

(b)アーム位置精度等の向上 a.盤の設置、各軸動作確認

- ・現地で制御盤にトラブルが発生したときなどに速やかに対処して復旧できるよう、リスク低減の一環として制御システムを改良した。
- ・改良対象はアームのみとし、デクスタの制御はデクスタキャリッジを含めて既存の制御盤をそのまま適用する。
- ・改良したシステムでは、アーム先端の位置精度の向上を目的として、モータの制御方法を出力軸レゾルバ制御からモータ軸レゾルバ制御に変更している。
- ・制御盤の試運転により制御パラメータを調整し、各軸の動作を確認した。



制御盤のシステム構成



アーム制御盤

4.1 アクセス・調査装置

(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験

(b)アーム位置精度等の向上 b.性能評価

- ・改良前後の比較評価を行った。
- ・評価項目は下表のとおり。

項目	評価ポイント	比較内容
性能	位置決め精度、再現性	<ul style="list-style-type: none"> ● アーム展開時の位置再現性を計測し比較する ● 各Move(アーム動作の各ステップ)において、基準線とアーム先端のずれ量をレーザーで計測する、再現性を確認するため3往復実施する ● 実機と基準線、実機とVR表示について計測する
	HP位置の再現性	<ul style="list-style-type: none"> ● アームをHP(ホームポジション)に戻した際の位置再現性を計測し、比較する ● マスタリング治具を嵌合させて、メカ的なゼロ位置となっているか確認する
	誤動作	<ul style="list-style-type: none"> ● 運転の支障となるソフトのバグの有無と発生頻度を比較する
	動作速度	<ul style="list-style-type: none"> ● HPからPose2(全展開姿勢)までの動作時間を比較する
	操作性	<ul style="list-style-type: none"> ● オペレータに対するマンマシンI/Fの親和性(使い勝手)を比較する
ロバスト性 (トラブル対応)	設計思想の把握、技術の透明性	<ul style="list-style-type: none"> ● 想定外のトラブルに迅速に対応できるよう、電気ハード、ソフトの設計思想をどこまで把握できているか、ブラックボックスの程度を比較する
	盤内部品の入手性	<ul style="list-style-type: none"> ● 盤故障時に迅速に対応できるよう、部品の入手性を比較する
リスク	新システム導入による新たなエラー	<ul style="list-style-type: none"> ● 改良後の制御システムで新たなエラーが発生しないか検証する、特に以下のポイントを確認する <ul style="list-style-type: none"> ・ モータ軸レゾルバ制御による影響 ・ 既設盤(デクスタ制御部)とのインターロックによる影響
ランニングコスト	SV派遣コスト	<ul style="list-style-type: none"> ● 今後の楢葉検証、現地工事で必要となるコスト(SV(技術サポートエンジニア)派遣コスト(人・日))について比較する

4.1 アクセス・調査装置

- (1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験
- (b)アーム位置精度等の向上 b.性能評価

■ 性能（位置決め精度、再現性）

改良後	実アームと基準線のずれ	実アームとVRのずれ**	改良前	実アームと基準線のずれ	実アームとVRのずれ	評価
POSE2 (全展開)	4mm (n=3)	0mm	POSE2 (全展開)	75mm (n=8)	60mm (n=8)	改良により性能向上
最大ズレ	15mm (n=3)	6mm (ペネ内)	最大ズレ	92mm (n=8)	98mm (n=8)	

**補正することによりずれを極小化 “n”は試験回数

■ 性能（HP位置の再現性）

改良後	治具の嵌合可否	嵌合不可時移動量	治具の嵌合可否	嵌合不可時移動量	改良前	治具の嵌合可否	嵌合不可時移動量	評価
Y1	○	1回目 -	○	2回目 -	Y1	○	-	改良により性能向上
Y2	×	16**	×	0.4	Y2	×	47	
Y3	○	-	○	-	Y3	×	-51	
Y4	×	4	×	1	Y4	×	1	
Y5	○	-	○	-	Y5	×	-60	
Y6	○	-	×	2	Y6	×	-1	
TY	○	-	○	-	TY	×	-9	

※治具嵌合しないが、10mu以下でありキャリブレーションすることにより運用の問題なし

※※出力軸レゾルバ値（減速機等を介さない位置に設置したレゾルバの値）は再現している（誤差2mu）。

モータレゾルバのズレはY2軸駆動部の機械的な経年劣化が原因と推定され、今後のメンテナンスで確認予定。

移動量の単位は、mu(μ-メートル)

1mu=360/65536≒0.0055°

4.1 アクセス・調査装置

- (1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験
- (b)アーム位置精度等の向上 b.性能評価

■ 性能（誤動作）

改良後	内容	改良前	内容	評価
バグ	動作時にバグの発生なし	バグ	3軸動作時に1軸が動作しなくなるバグは未解決（Pose2展開時に数回）。その他運転に大きな支障とならない軽微なバグあり	バグが改善

■ 性能（動作速度）

改良後	内容	改良前	内容	評価
速度	HPからPose2まで61分	速度	HPからPose2まで62分	同等

■ 性能（操作性）

改良後	内容	改良前	内容	評価
操作性	改良前と同等	操作性	大きな問題なく操作可能	同等

4.1 アクセス・調査装置

- (1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験
 (b)アーム位置精度等の向上 b.性能評価

■ ロバスト性

改良後	内容	改良前	内容	評価
設計思想の把握、技術の透明性	ハード、ソフト共国内製であり、技術的なブラックボックスの部分はない	設計思想の把握、技術の透明性	供給メーカーからある程度の情報は開示されているが、設計思想が不明な点（ブラックボックス）あり	改良によりロバスト性が向上
部品入手性	部品は国内製であり、迅速に入手できる	部品入手性	制御盤の一部の部品（スロットとドライバ）は生産中止で入手不可	

■ リスク

改良後	内容	改良前	内容	評価
モータ軸レゾルバ制御	モータ軸レゾルバ制御に問題なし	モータ軸レゾルバ制御	出力軸レゾルバで制御しており問題なし	改良によりリスクが低下
インターロック	問題となるエラー無し	インターロック	動作不可となる大きなインターロックエラーはなし	
その他	問題となるエラー、バグ無し	その他	問題となるエラー、バグ無し（ただし、軽微なバグは残存）	

■ ランニングコスト（1か月あたりのコストを比較）

改良後	内容	改良前	内容	評価
SV派遣 (人・日)	0.3人×20日/月=6人・日/月	SV派遣 (人・日)	1.5人×20日/月=30人・日/月	改良によりコストが低下

4.1 アクセス・調査装置

- (1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験
- (b)アーム位置精度等の向上 b.性能評価

■ アームの制御システム改良により位置精度等の向上が図れた

項目	評価ポイント	評価
性能	位置決め精度	性能向上
	HP位置の再現性	性能向上
	誤動作	バグが改善
	動作速度	同等
	操作性	同等
ロバスト性 (トラブル対応)	設計思想の把握、技術の透明性	ロバスト性が向上
	部品の入手性	リスクが低下
リスク	新システム導入による新たなエラー	リスクが低下
ランニングコスト	SV派遣コスト (人・日)	コストが低下

4.1 アクセス・調査装置

- (1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験 (c) ワンスルー試験 a. VTセンサ※搭載条件

試験条件

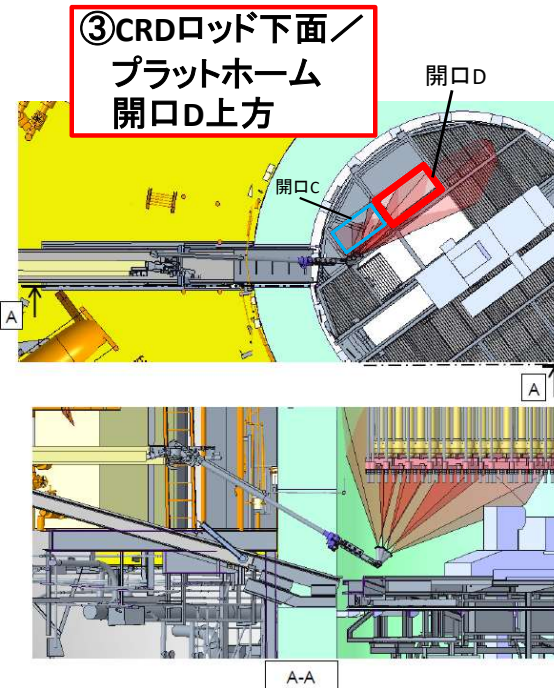
- 耐放射線性カメラの視野およびVR表示の情報に基づき、各関節動作指令値を調整しながら、遠隔操作でのアクセスを実施した(アームをペDESTAL内部まで動作させ、画像を取得した)。

試験結果

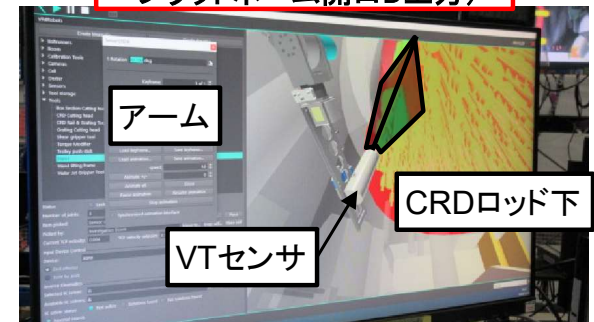
- プラットホーム上部(CRD開口、CRDロッド下面等)やペDESTAL底部の鮮明な画像が得られた。代表例としてCRDロッド下面の取得画像を下図に示す。

分類	撮像対象	搭載センサ
プラットフォーム (PF)上部	① CRD開口入口／端子箱	近・中距離用
	② CRDロッド下面／PF開口C上方	
	③ CRDロッド下面／PF開口D上方	
	④ CRDロッド下面／スリット開口上方	
	⑤ CRDロッド下面／CRD交換機上方	
ペDESTAL底部	⑥ 中心近傍	遠距離用
	⑦ 作業員開口	

代表例



VTセンサによる取得画像 (③CRDロッド下面／プラットフォーム開口D上方)



VRによる姿勢検討

※映像取得用カメラ ; 以下同様

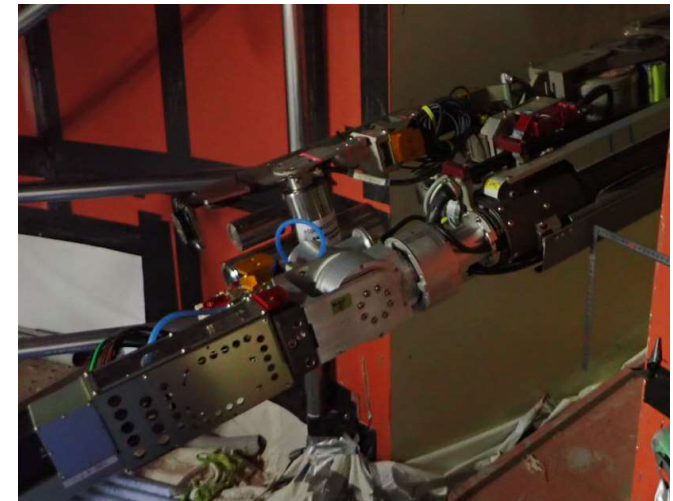
4.1 アクセス・調査装置

- (1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験
 (c) ワンスルー試験 b. レーザスキャナ搭載条件

試験条件

- AWJ切断後のCRD吊り治具、ペDESTAL開口、プラットフォーム開口および中間架台部のレーザスキャンを実施。その後、スキャン結果を基にしたペDESTAL底部までのアクセスをフル遠隔操作で実施。
- 環境：PCV内炉注水を模擬した散水条件。
- スキャン位置：レーザスキャナ搭載カメラ視野を基に、アーム(主にワンド)軸値を調整。
- スキャン対象：下表のとおり。

No.	スキャン対象	スキャナ仕様	スキャン回数※
1	CRD吊り治具	下向き	3回
2	ペDESTAL開口全般	下向き	8回
3	ペDESTAL開口上面	上向き	4回
4	ペDESTAL開口端子箱	上向き	1回
5	プラットフォーム開口 (内、CRD交換機部分)	下向き	6回 (2回)
6	中間架台	下向き	4回



※輪郭形状を得た最終的な有効スキャン数

4.1 アクセス・調査装置

- (1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験
- (c) ワンスルー試験 b. レーザスキャナ搭載条件

試験結果

- 障害物とアームのクリアランスについて、実測値とスキャン結果(点群データ)を用いたVR上の値を比較した結果を下表に、代表図を次葉に示す。
- VRシミュレーションとカメラの視野により、フル遠隔アクセスが可能なことを確認。
- ☞ 1F現地でも同様に、取得した点群データに基づくVRシミュレーションとカメラ視野を活用する運用とする。ペDESTAL底部までのアームアクセス見通しは得られたが、更なる誤差低減を検討していく。

アクセス箇所 (障害物)	アーム姿勢	障害物とアームのクリアランス		誤差
		実測 ^注	VR表示	
ペDESTAL開口	開口通過時	60 mm	17 mm [※]	43 mm
プラットフォーム開口	開口通過時	80 mm	77 mm	3 mm
中間架台	開口通過時	270 mm	125 mm	145 mm
ペDESTAL開口	底部アクセス時	65 mm	10 mm [※]	55 mm
プラットフォーム開口	底部アクセス時	40 mm	86 mm	46 mm
CRD交換機	底部アクセス時	50 mm	118 mm	68 mm
中間架台	底部アクセス時	240 mm	0 mm [※]	240 mm

代表例(次葉参照)

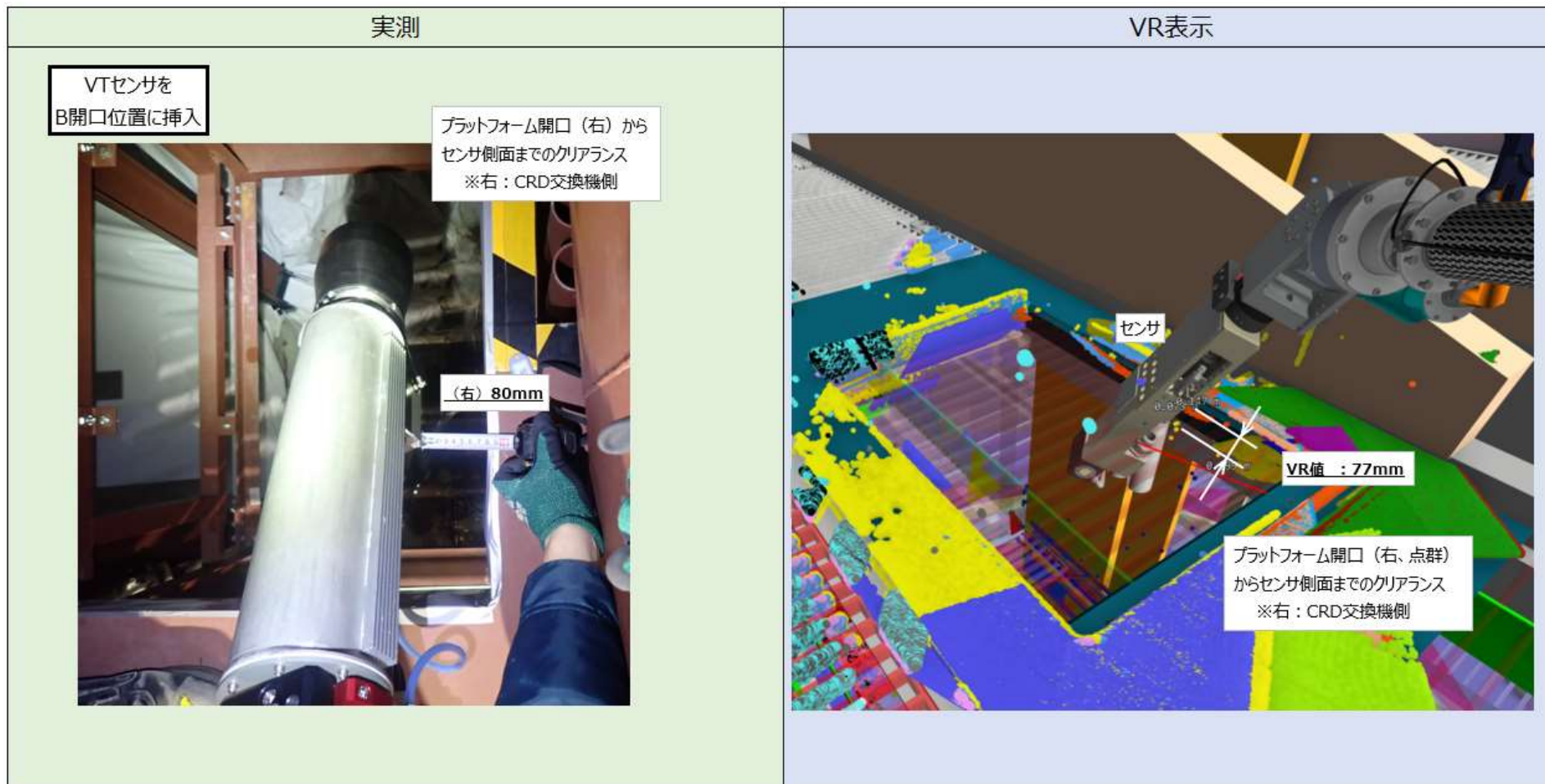
※ VR上では隙間が狭かったが、カメラで隙間が視認できた(アーム通過可能と判断できた)

注: 運転時に運転員には、クリアランス実測値は知らされていない。

4.1 アクセス・調査装置

- (1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験
- (c) ワンスルー試験 b. レーザスキャナ搭載条件

代表例：プラットフォーム開口へのアームアクセス



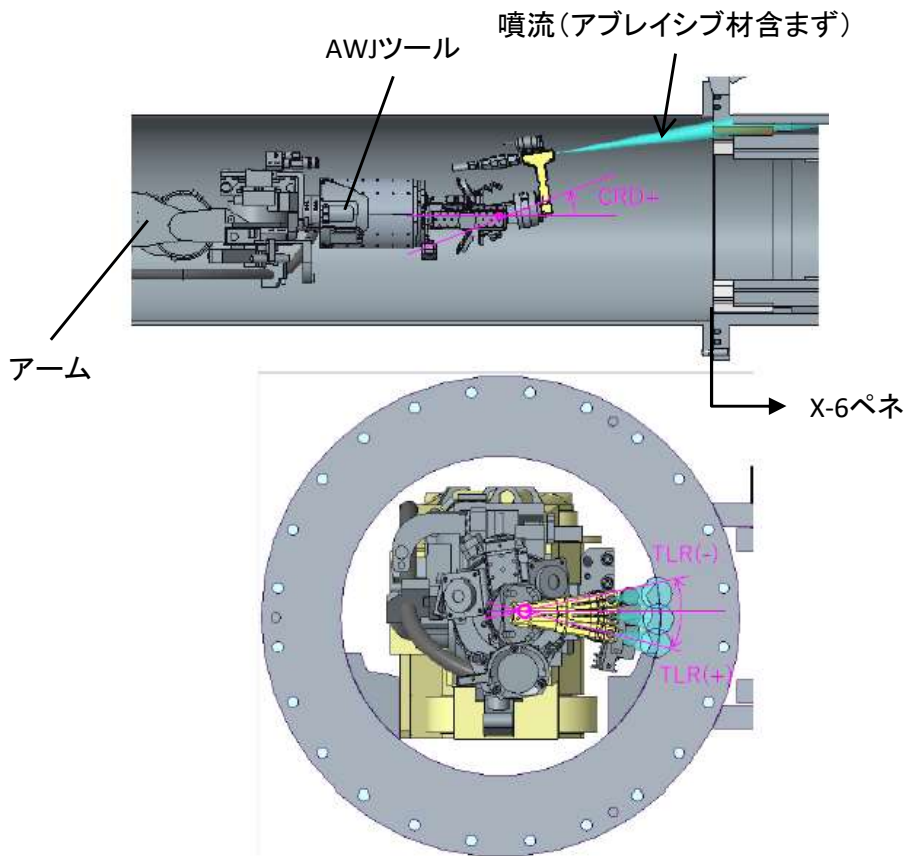
4.1 アクセス・調査装置

(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験

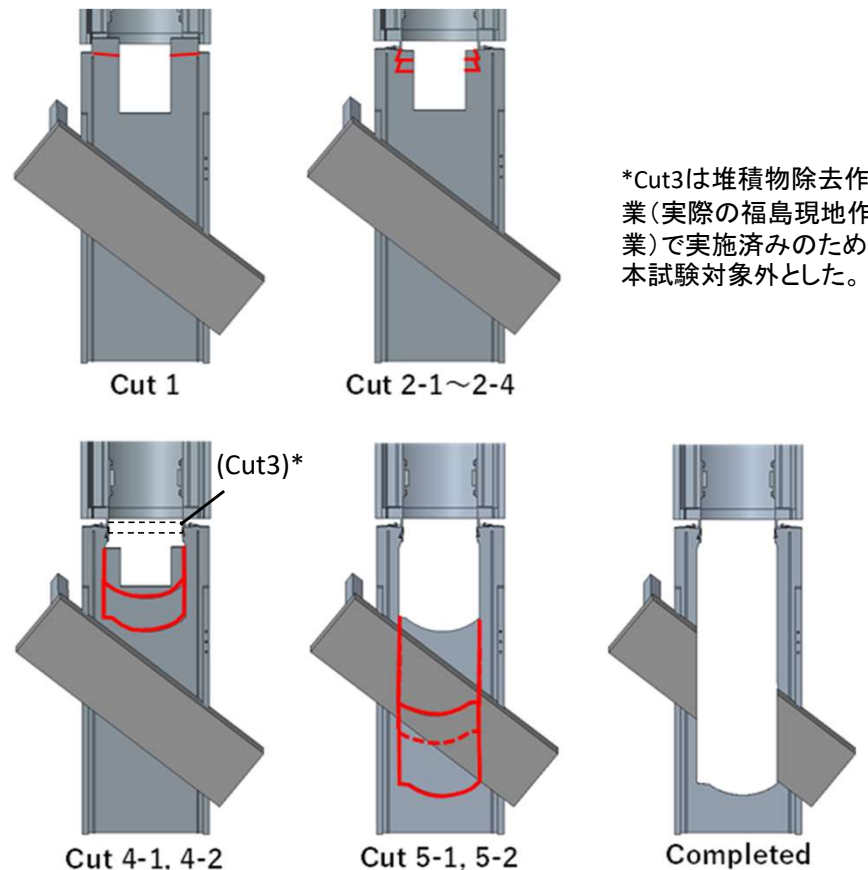
(c) ワンスルー試験 c. AWJ搭載条件

試験条件

- アームをエンクロージャに組み込んだ状態でAWJツールをアームに搭載し、遠隔操作により、アクセスルート構築のワンスルー試験を実施した。
- 下図に示す、除去/切断計画をもとに、X-6ペネ入口の堆積物(残留分)の除去、CRDレールの切断/除去を実施した。



X-6ペネ入口の堆積物(残留分)除去計画(概要)



*Cut3は堆積物除去作業(実際の福島現地作業)で実施済みのため、本試験対象外とした。

CRDレール切断計画(概要)

4.1 アクセス・調査装置

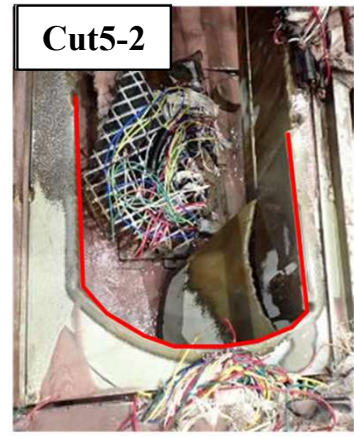
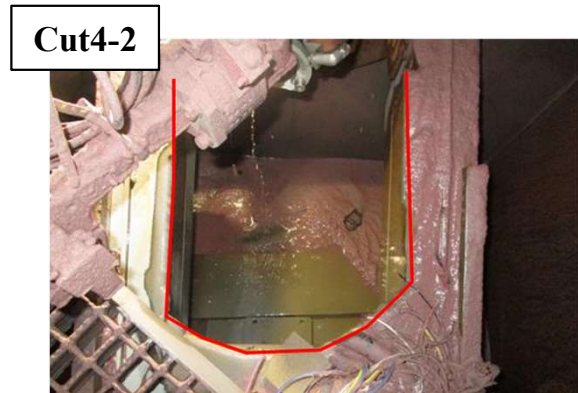
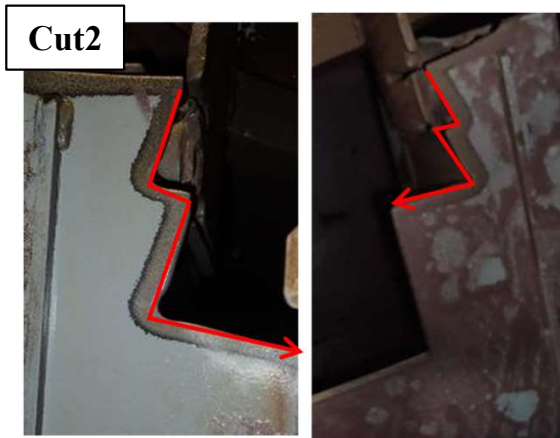
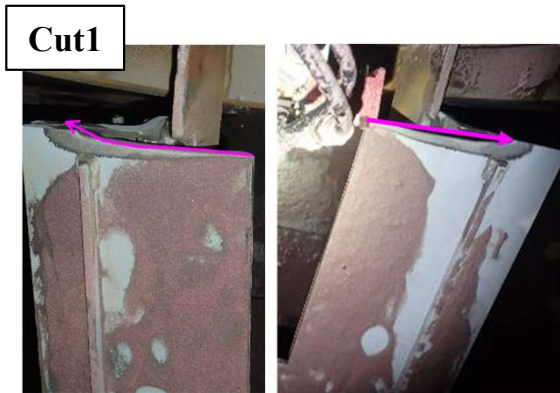
(1)現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験
(c)ワンスルー試験 c. AWJ搭載条件

試験結果

➤ 下図に示すように、X-6ペネ入口の堆積物は、問題なく除去することができ、CRDレールも計画通りに切断/除去することができた。



堆積物除去前後(上図:前、下図:後)



CRDレール切断結果

4.1 アクセス・調査装置

(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (ii) デクスタの作業性検証試験

(a) ワンド／外部ケーブル(センサ用)の取付け

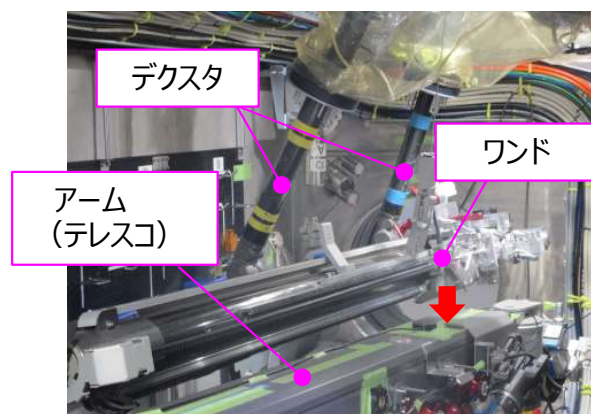
試験条件

- 令和5年度までに実施したダミーアームを用いたモックアップ試験結果および改良結果を踏まえ、令和6年度は、実機アームを使用してワンド取付／取外しおよび外部ケーブル(センサ用)の取付／取外しの一連の作業性を確認した。

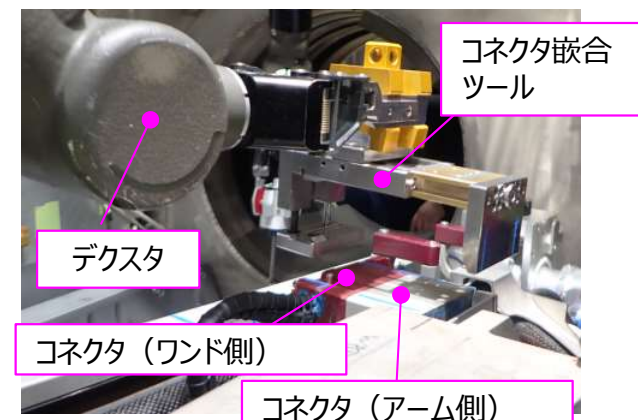
試験結果

実機アームを使用して試験を実施し、以下の作業が遠隔で実施可能なことを確認した。

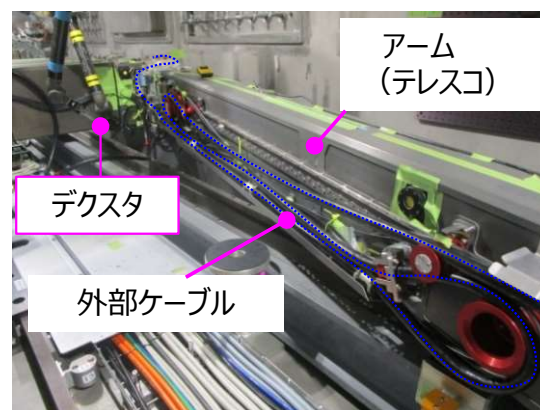
- ワンドの取付／取外し
 - ① ワンド本体の取付／取外し
 - ② ワンド動力コネクタの嵌合／離脱
- 外部ケーブル(センサ用)の取付／取外し
 - ① 外部ケーブルの取付／取外し
 - ② コネクタの嵌合／離脱



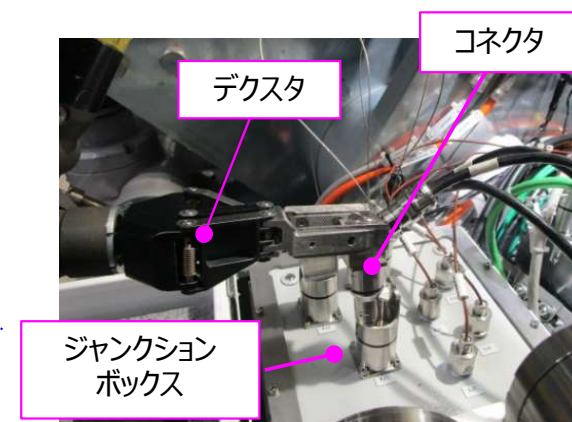
ワンドの取付／取外し作業



ワンド動力コネクタの嵌合／離脱作業



外部ケーブルの取付／取外し作業

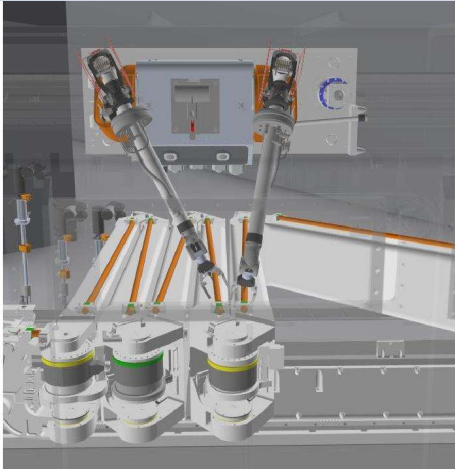
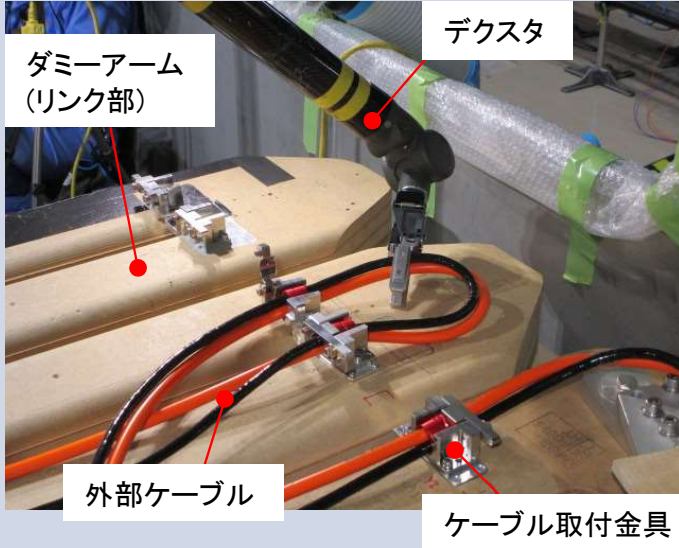
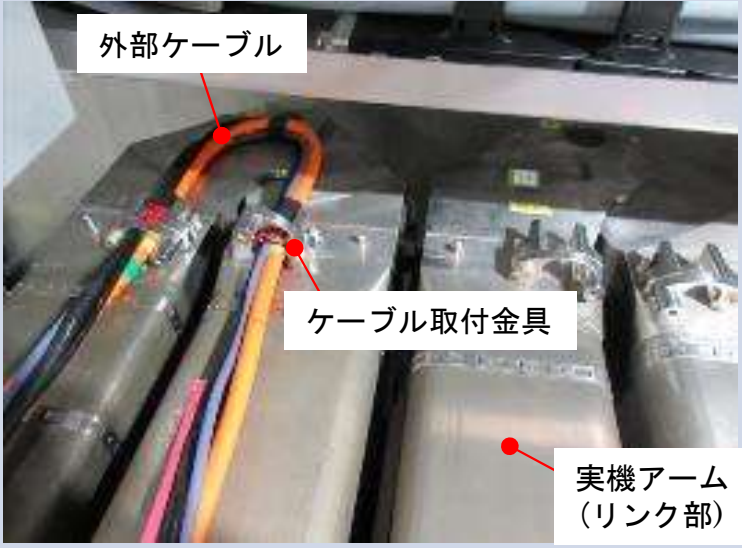


コネクタの嵌合／離脱作業

4.1 アクセス・調査装置

(1)現場状況を考慮したモックアップ試験 (ii)デクスタの作業性検証試験

(b)ツール用外部ケーブル取付/取外し

検証項目	檜葉モックアップ試験(令和5年度) 検証結果/要改善事項	檜葉モックアップ(令和6年度) 試験結果
<p>ツール用外部ケーブルの実機アームへの取付/取外し</p> 	<p>・ツール用外部ケーブルのダミーアームへの取付/取外しの作業性を確認。改善点として外部ケーブルの取付金具とカラーの構造変更を抽出し、構造変更した取付金具とカラーを使用してダミーアームで作業可能な見通しを得た。</p>  <p>デクスタ ダミーアーム(リンク部) 外部ケーブル ケーブル取付金具</p>	<p>・ダミーアームで検証した外部ケーブルの取付金具とカラーを実機アームにそのまま移設して、実機アームへの取付/取外しの作業性を確認し、問題なく作業できること、外部ケーブル敷設後の浮き上がりなどもないことを確認した。</p>  <p>外部ケーブル ケーブル取付金具 実機アーム(リンク部)</p>

4.1 アクセス・調査装置

(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (ii) デクスタの作業性検証試験

(c) アームマスタリング

➤ アームマスタリング(アームの初期位置の確認/修正作業)は、予め設置したボールスタッドへの校正治具の嵌合により実施する。既存の校正治具では、デクスタによるマスタリングが困難であったため、下図に示す改良を加え、検証を実施した。その結果、デクスタが校正治具をボールスタッド上に設置し、アーム収縮動作で校正治具を嵌合させるマスタリングが可能であることを確認した。

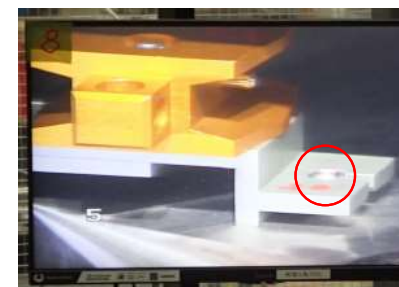
ボールスタッド



アームに設置されたボールスタッド



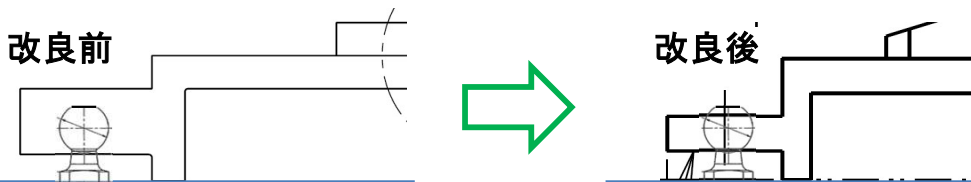
アーム
➡
J2閉じ



(a) ジョイント2 (J2) のマスタリング

改良前

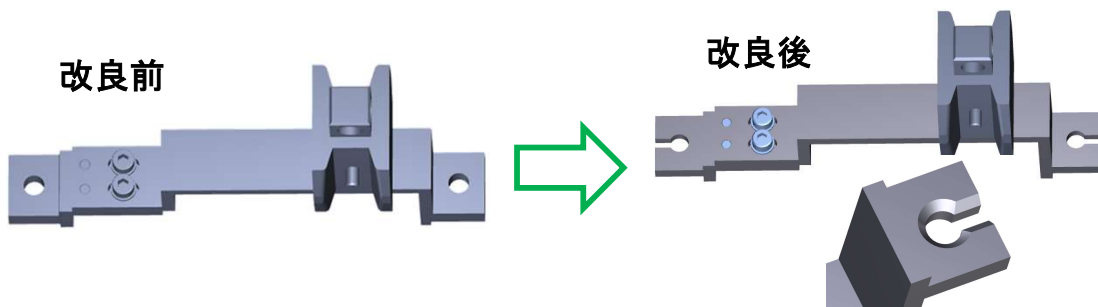
改良後



(a) 嵌合識別(ボールスタッド頭)

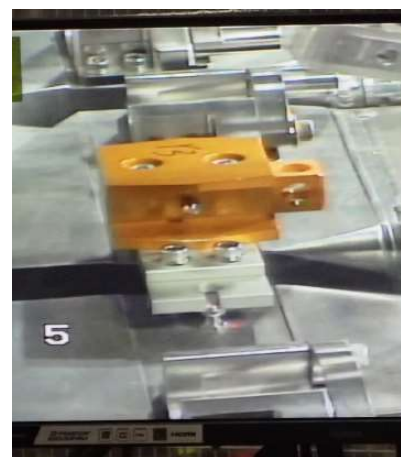
改良前

改良後

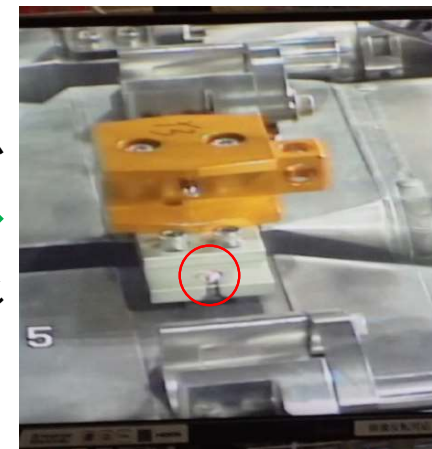


(b) スリットによるスタッドの誘導

マスタリング治具の改良



アーム
➡
J4閉じ



(b) ジョイント4 (J4) のマスタリング

マスタリング作業検証結果

4.1 アクセス・調査装置

(1)現場状況を考慮したモックアップ試験 (ii)デクスタの作業性検証試験

(d)輸送治具の取外し

試験条件

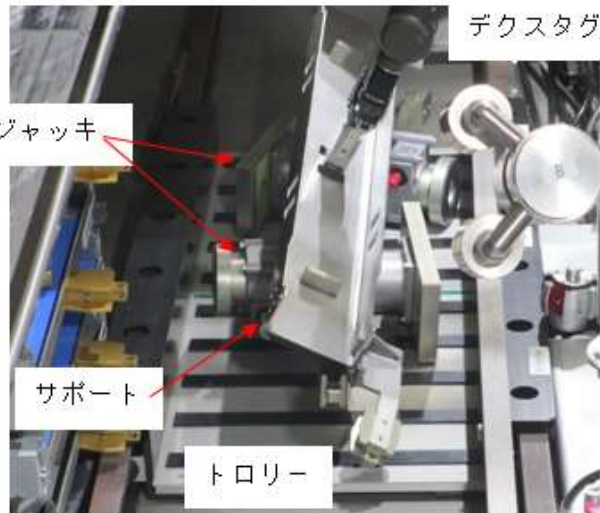
- ・エンクロージャ輸送時にアームリンク部を支持するために設置する輸送治具をデクスタの遠隔操作によって取外し、DPTEポート*から搬出できることを確認する。

*エンクロージャ側面の物品搬入出ポート

試験結果



ジャッキの下降操作



固定治具の移動



固定治具の搬出(人手による)

注: 隔離弁が開く前のため、搬出は作業員にて実施

輸送治具の取外し、DPTEポートまでの搬送をデクスタの遠隔操作により実施し、DPTEポートから治具の搬出が問題なく実施可能であることが確認できた。

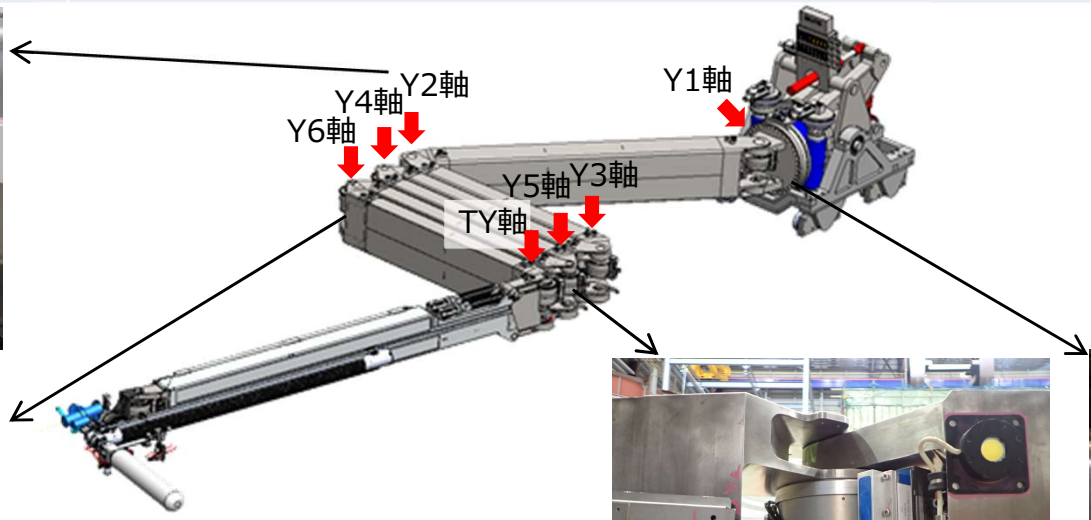
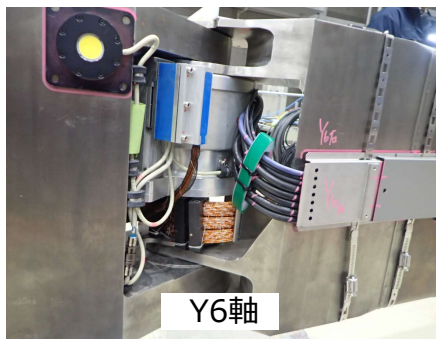
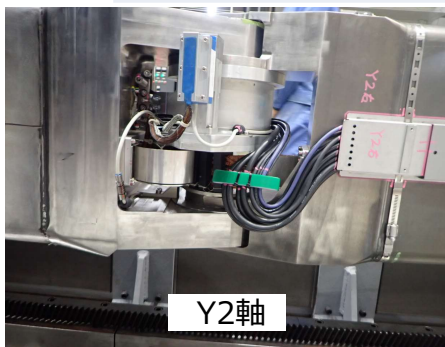
4.1 アクセス・調査装置

(1)現場状況を考慮したモックアップ試験 (iii)調査装置の保守 アームメンテナンス

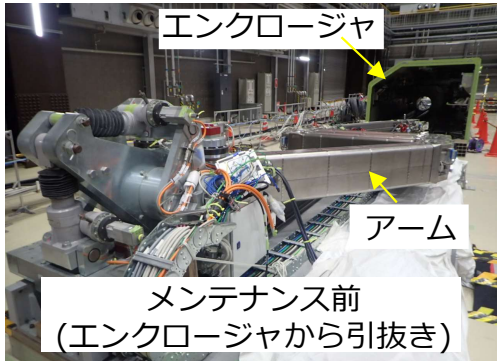
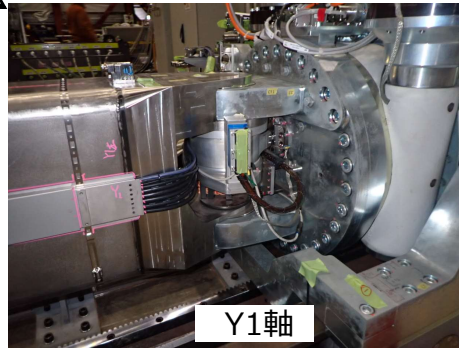
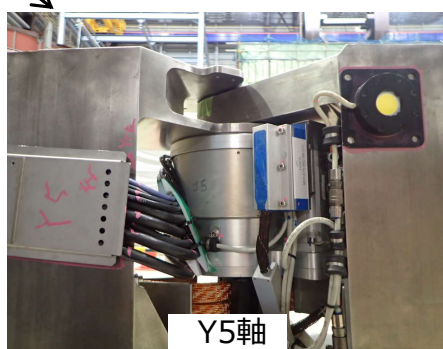
概要

➤ アームのメンテナンスを実施中。主な内容は以下のとおり。

対象部位	メンテナンス概要
<ul style="list-style-type: none"> ・キャリッジ ・リンク部 ・テレスコ ・リスト ・ワンド 	<ul style="list-style-type: none"> ・駆動機構の組立状態の確認（分解調査） ・モータ交換、動作データ取得 ・出力レゾルバアセンブリの確認（分解調査） ・給脂、シール等交換 ・損傷パーツの交換（必要に応じ）
<ul style="list-style-type: none"> ・内部ケーブル 	<ul style="list-style-type: none"> ・内部ケーブル（コネクタ含む）交換



リンク部の主なメンテナンス箇所 (Y1~Y6、TY軸)



4.1 アクセス・調査装置

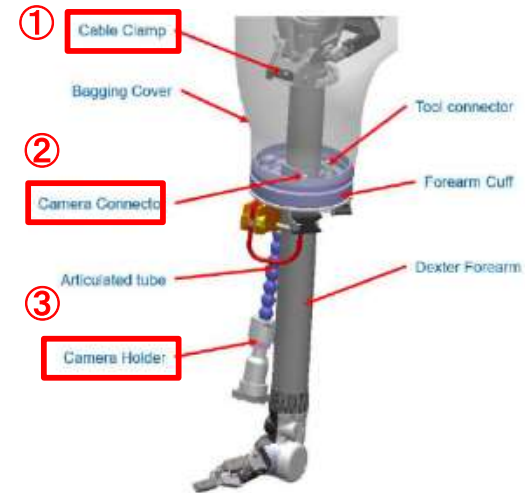
(1)現場状況を考慮したモックアップ試験 (iii)調査装置の保守 デクスタメンテナンス

概要

➤ デクスタのメンテナンスを実施した。主な作業内容は次のとおり。

主な実施内容

- 1)アームカメラ及びツールパワーケーブルの断線対策
 - ① 肘関節サポートのタイトフィット
→ 構造見直し(ルースフィット)
 - ② 前腕コネクタ部へのケーブル曲げ負荷
→ ベンドリリーフおよびサポートの追加
 - ③ 共通：カメラホルダの重量大
→ PEEK樹脂に変更し軽量化
- 2)作動ワイヤの交換及び再伸張：ワイヤ張力を改善。
今後、作動確認予定



- 3)チューニング作業：操作感(抵抗、振動の程度)を改善させるため、チューニング実施中。

左腕 作動ワイヤ張力			右腕 作動ワイヤ張力		
軸	メンテ前	メンテ後	軸	メンテ前	メンテ後
4軸A	200 gf	550 gf	4軸A	200 gf	550 gf
4軸B	200 gf	550 gf	4軸B	225 gf	550 gf
5軸A	200 gf	550 gf	5軸A	300 gf	550 gf
5軸B	350 gf	550 gf	5軸B	300 gf	550 gf
6軸A	225 gf	550 gf	6軸A	300 gf	550 gf
6軸B	225 gf	550 gf	6軸B	300 gf	550 gf

- ・所定の変位を与えた際の張力を計測。
- ・グリッパ(7軸A)は、大きな張力が生じないため測定対象外。



操作感の確認状況

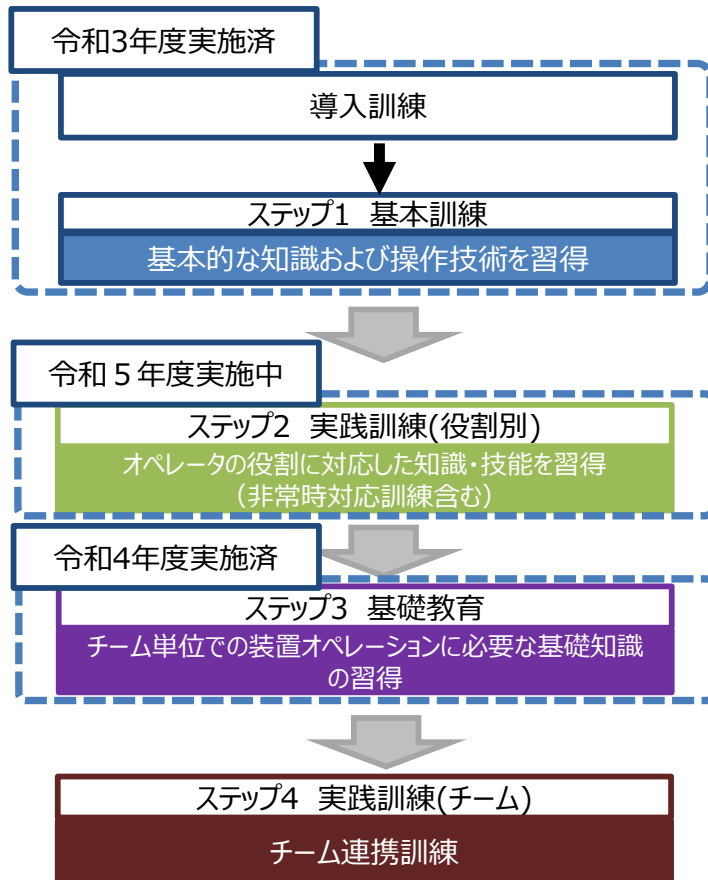
4.1 アクセス・調査装置

(2) 作業訓練

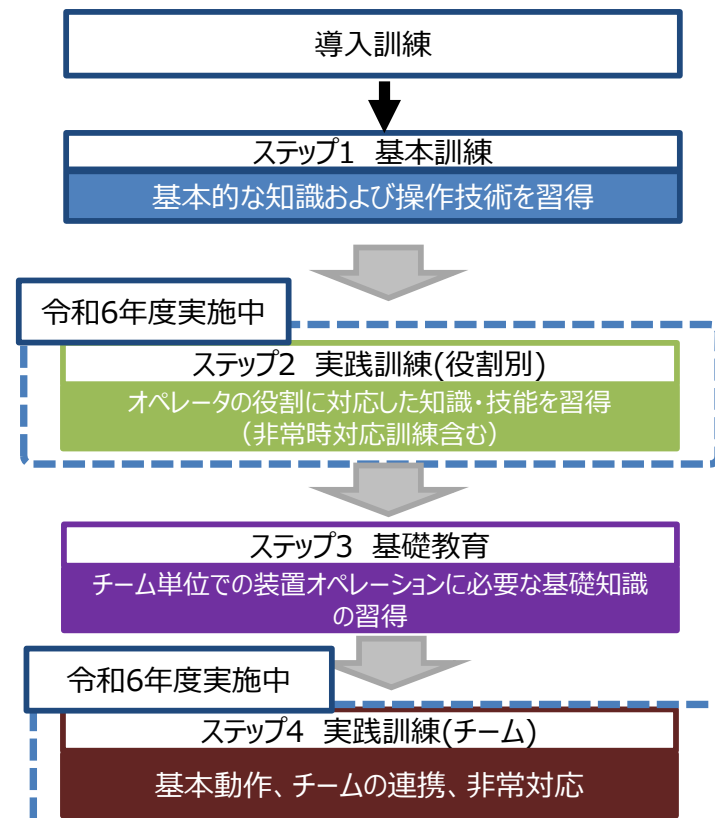
i. 作業訓練プログラム見直し、及び作業訓練実績

- ▶ 作業訓練プログラムの進行について、訓練状況を踏まえ、オペレータのニーズを聴き取り、見直しを行い、それに沿ったステップ2 実践訓練(役割別)、ステップ4 実践訓練(チーム)を継続実施中。(ステップ1、3は既に完了しており、令和6年度は、ステップ2、4を実施。令和7年度はステップ2、4を継続実施予定)

【令和5年度計画】



【令和6年度見直し後の計画】



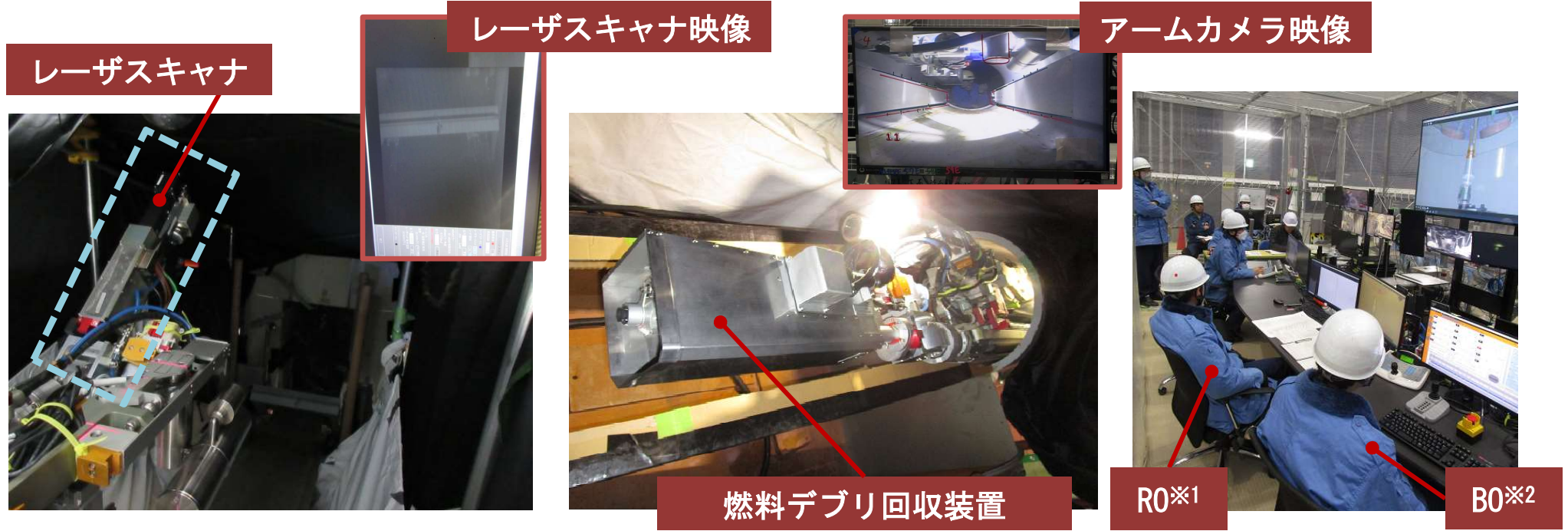
4.1 アクセス・調査装置

(2) 作業訓練

ii. 実践訓練(役割別)の結果

BO※2の訓練

- アーム単体検証を通じた実践訓練(役割別)のうち、アームアクセス試験、フル遠隔試験、およびレーザスキャナ、VTセンサ、燃料デブリ回収装置、AWJツールによるワンスルー検証を通じて、アクセスルートの構築、ティーチ&リピートファイルの作成実行および現場状況に応じた同ファイルの編集作業を習熟した。
- ワンスルー検証を通じた実践訓練(役割別)は、令和7年度も継続実施予定。



レーザスキャナ試験を通じた訓練状況 (オペレーション)

燃料デブリ回収装置試験を通じた訓練状況 (オペレーション)

フル遠隔試験を通じた訓練状況 (オペレーション)

※1 RO : オペレータリーダー

※2 BO : ブーム (アーム) オペレータ

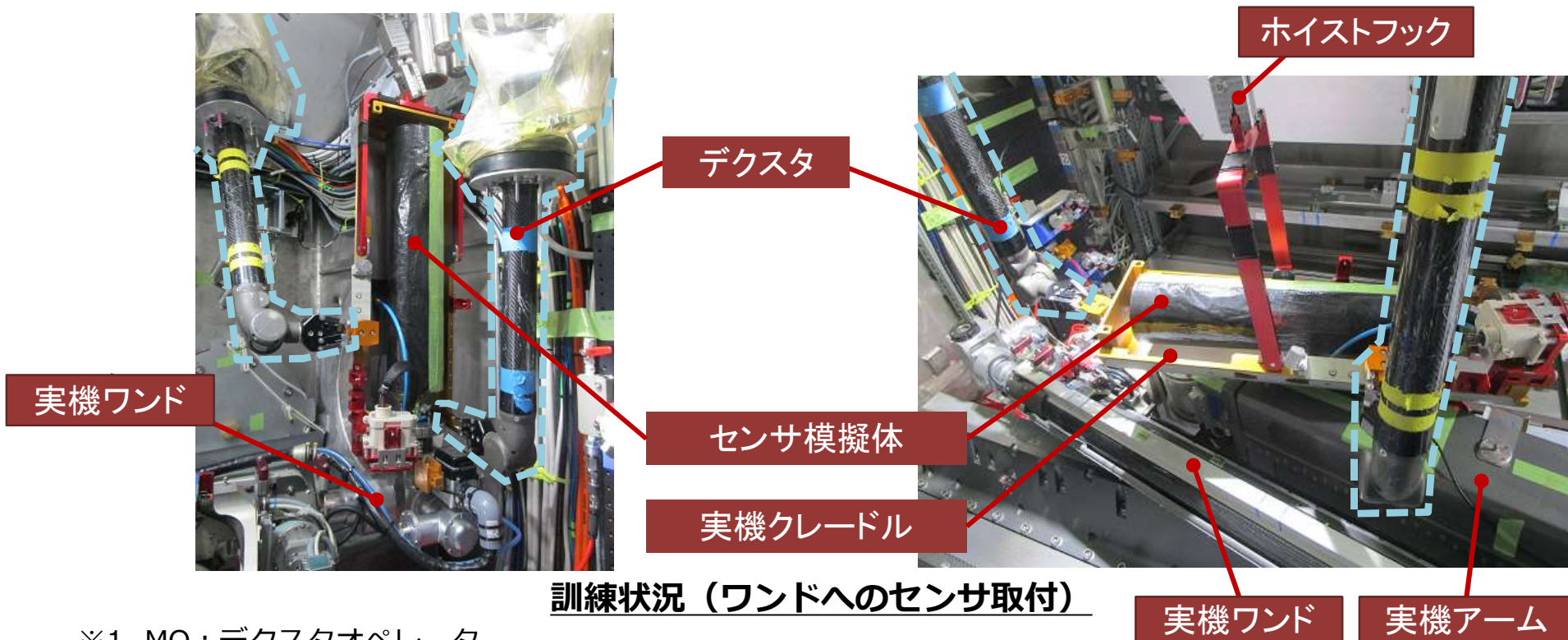
4.1 アクセス・調査装置

(2) 作業訓練

iii. 実践訓練(役割別)の結果

MO※1、カメラオペレータの訓練

- 実機アームとの組合せ検証を通じた実践訓練(役割別)により、デクスタによる各種付属設備&取扱い操作およびこれに伴う視野確保のためのカメラ操作を習熟した。
- 実践訓練(役割別)を通して得られた知見・手順等について、オペレーション手順書として纏めており、令和7年度も継続して実践訓練(役割別)を実施し、結果を反映していく予定。
- アームに付属するカメラの操作訓練は、アームアクセス試験時のアームの取扱い操作に合わせて、令和7年度も継続して実施する予定。



訓練状況 (ワンドへのセンサ取付)

※1 MO : デクスタオペレータ

4.2 その他付帯設備

(1)設計、製作

i. 系統計画

他工事での現地状況等を踏まえ、右下の表に示す見直しを実施した。

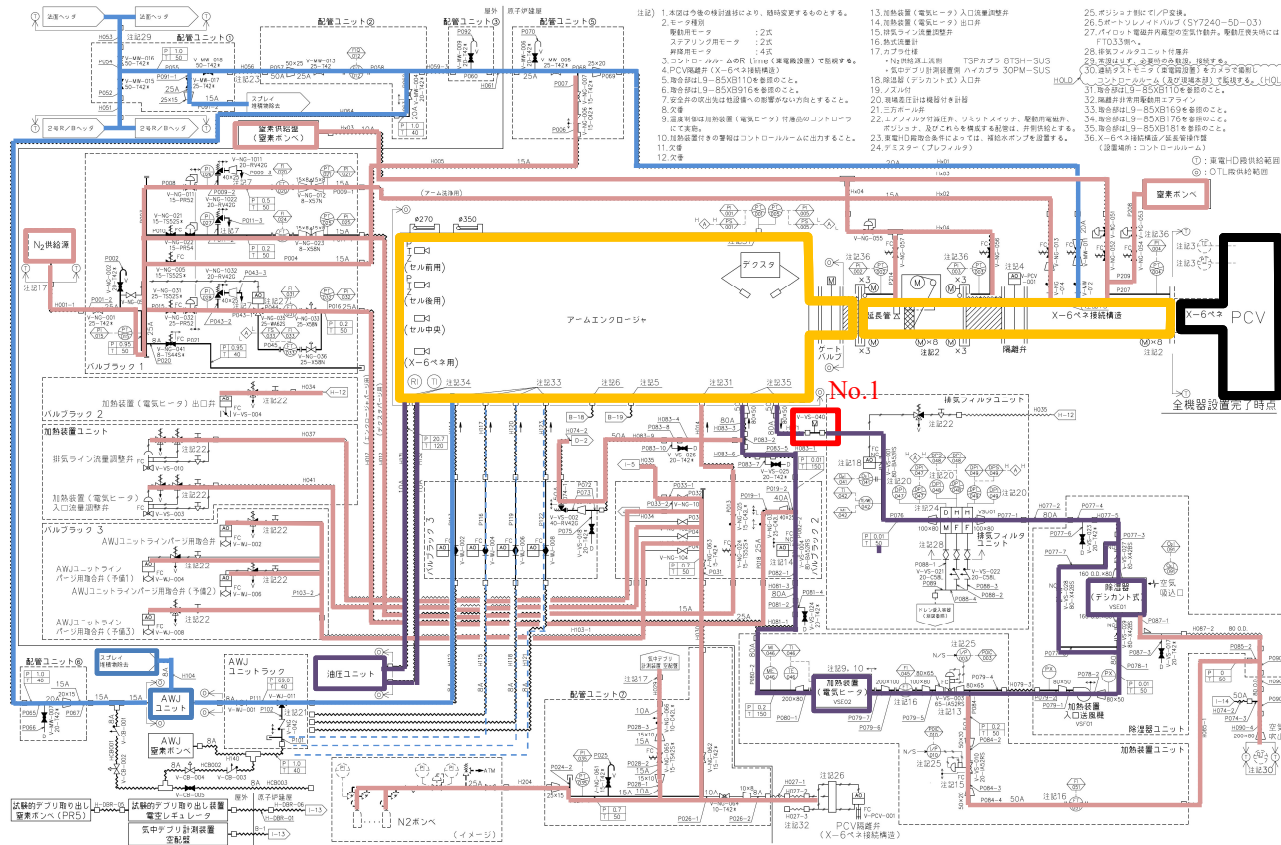
ii. 現地配置計画

令和6年度は工事の現地進捗を踏まえ、各作業段階における設置物等の工事実績反映や、現地の作業状況を踏まえた配置計画の見直し等を行った。

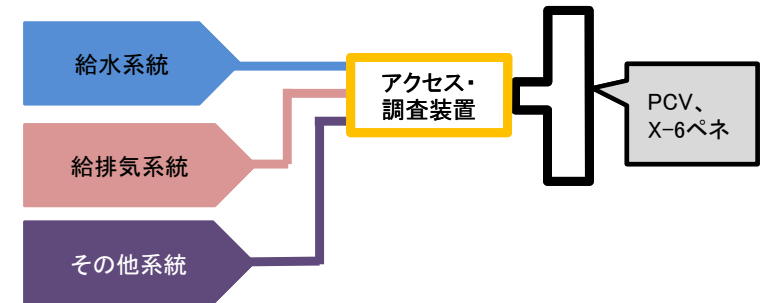
iii. 製作状況

付帯設備の機器については真空安全弁追加に伴い、改造作業を実施した。

・実機の系統計画



・系統イメージ



【主要構成系統】

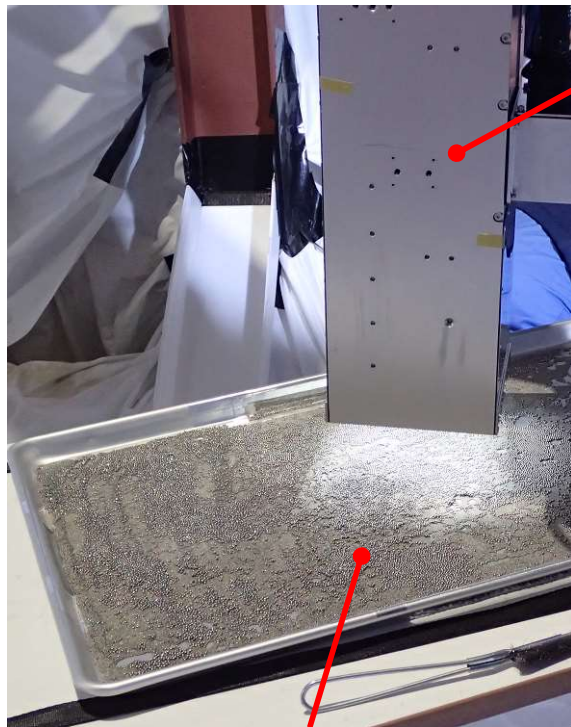
- AWJユニットへの水供給系統
- X-6ペネ接続構造フランジ部のシール確認用窒素の供給系統
- エンクロージャ内のデスクタへの窒素パージ系統
- 空気作動弁への窒素供給系統
- 窒素(空気)の排気系統
- エンクロージャ除湿循環系統

表 系統図の主な見直し内容

No	令和5年度からの 変更内容	変更理由
1	真空安全弁追加	負圧運転時の運転員の誤操作によるエンクロージャ破損防止のため

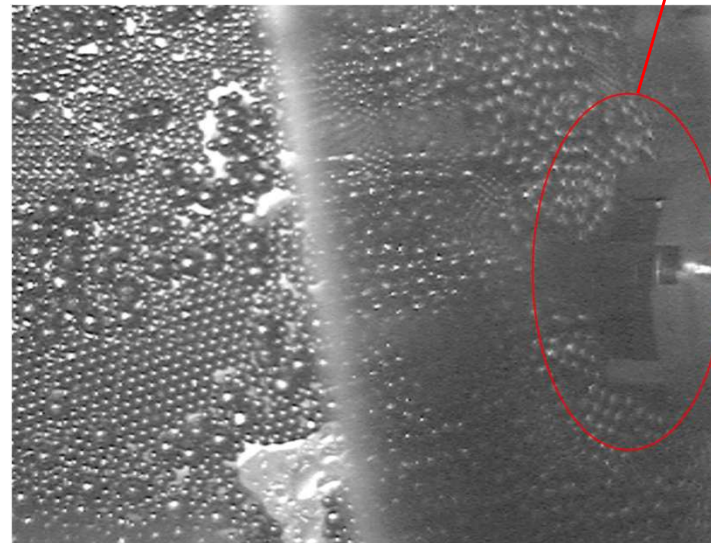
4.3 燃料デブリ回収装置

- アームをエンクロージャに組み込んだ状態で、燃料デブリ回収装置をアームに搭載し、アームを展開して、PCV内のペDESTAL下部からデブリを取出すモックアップ試験(ワンスルー試験)を実施した。
- 金(かな)ブラシ型のデブリ回収装置を用いて、VR及び装置に搭載したカメラを用いた遠隔操作により、模擬燃料デブリを0.436[g]採取することができた。
- デブリを回収する際の最終的な位置合わせは、焦点距離を50mmに設定した装置付属のカメラで問題なく実施することができた。



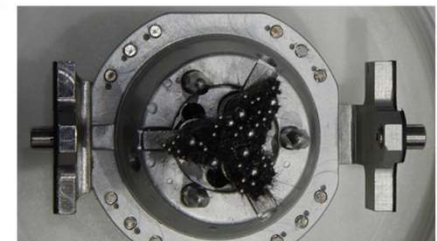
模擬燃料デブリ(模擬PCV底面)

デブリ回収装置(金ブラシ型)



コントロールルームでの装置カメラ視野

金ブラシ



採取された模擬デブリ

4.4 現場実証

(1) 現地据付、準備作業

(i) 堆積物除去

2号機西側ヤードに、プラントルーム②を設置し、令和4年度設置済みのケーブルまでの電路を追設し結線した。AWJ施工のために、給水タンク、ろ過水供給ユニットを設置し、ケーブル、ホースを2号機西側ヤードから2号機R/B建屋(原子炉建屋)内に入線させた。

堆積物除去装置を、神戸工場より輸送し、1F構内へ搬入を行った。搬入用スキッドの開梱を実施し、テントハウスにて装置の受け入れ状態確認およびリークチェックを実施し合格。

2号機R/B建屋前へ搬送を行い、大物搬入口より堆積物除去装置を搬入し、2号機R/B建屋内南西エリアを經由し、北西エリアまで手運搬による搬送を行った。その後装置走行用のケーブルを結線したうえでロボット搬入部屋内に移動を行い、X-6ペネトレーションへ接続を行った。

【2号西側ヤード】



【テントハウス】



【2号機R/B建屋内】



4.4 現場実証

(1) 現地据付、準備作業

(i) 堆積物除去

堆積物除去装置をX-6ペネトレーションへ接続後、内部状態の確認を行った。

事前試射によるPCV内のダスト濃度の確認を実施したのちに高圧水洗浄ノズルを用いて、残留する堆積物洗浄を実施した。

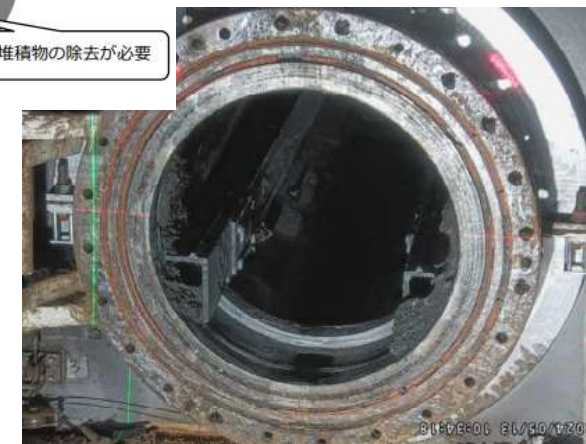
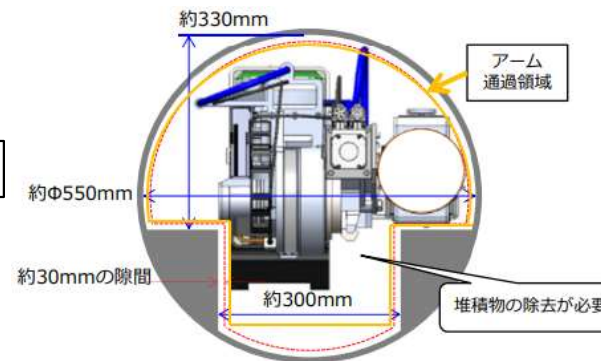
AWJによるレールガイド等構造物とケーブルの切断、ドーザツールとWJによる堆積物とケーブル切断片のPCV内への押込み、洗浄・流し込み除去を後続工事に影響がない状態まで行った。施工開始後にアブレイシブ材供給ホースの閉塞事象が発生したため、ホース取替のトレーニングを行った上で取替作業を実施した。また、ダスト濃度の上昇がないことから、切断期間の途中でスプレイの噴射を取り止めた。

【X-6ペネトレーション内面の堆積物残留状態】



【高圧水洗浄完了時のCRDレール天板上の状態】

【ロボットアーム型アクセス・調査装置の通過性】



【装置後退後X-6ペネ状況】

4.4 現場実証

(1) 現地据付、準備作業

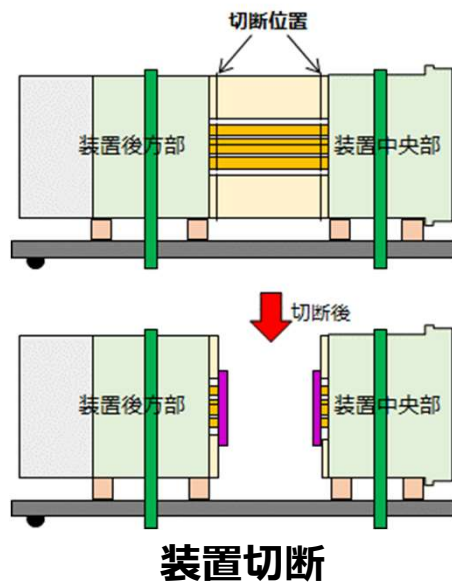
(i) 堆積物除去

堆積物除去終了後、X-6ペネフランジの把持を解除して堆積物除去装置を後退させ、気密扉を閉止して隔離部屋の気密に問題ないことを確認した。装置は鉛遮へいを取り付けた上で養生し、2号機R/B建屋内の大物搬入口前まで運搬し、2号機R/B建屋外へ搬出後、構内仮置き場所まで運搬を実施した。

その他付帯機器及びケーブル・ホースは結露水回収装置を残して撤去し、2号機R/B建屋外に搬出した。屋外西側ヤードに設置したプラントルーム②・ポンプユニット他機器及びケーブル・ホースも貯水タンク他一部機器を残して撤去した。

堆積物除去装置の除却については、装置前方部に残留した洗浄水を廃棄出来ない為、後方部を切り離す作業を実施した。切り離れた後方部は更に切断し6m³コンテナに収納し東電HD殿へ引き渡した。

今後装置前方部を専用容器に収納し2号機R/B建屋に保管する予定である。



6m³コンテナ収納



装置前方部仮置き

4.4 現場実証

(1) 現地据付、準備作業

(ii) X-6ペネ接続構造設置

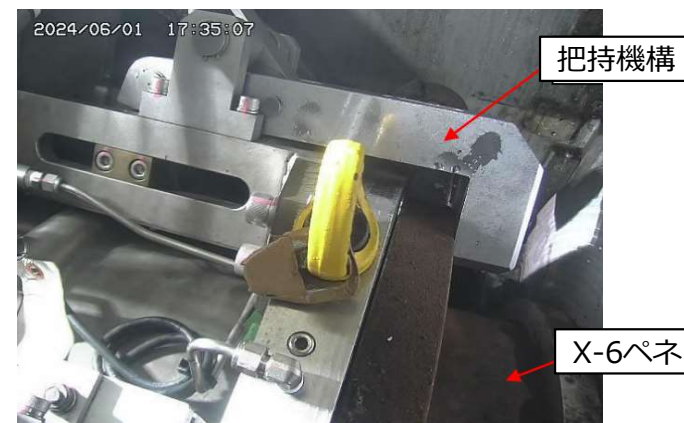
- 令和6年5月より接続構造設置工事に着手。5月17日に1F構内のテントハウスにて装置の気密確認を実施し、合格。
- 5月27日に2号機R/B建屋前へ搬送を行い、大物搬入口よりX-6ペネ接続構造装置を搬入。R/B建屋内運搬を実施し、6月1日にX-6ペネへの把持を完了。
- 6月1日にX-6ペネトレーションと装置の接続部分の漏洩確認をもって接続を完了。



X-6ペネ接続構造装置 気密確認



2号機内運搬状況



接続構造把持

4.4 現場実証

(1) 現地据付、準備作業

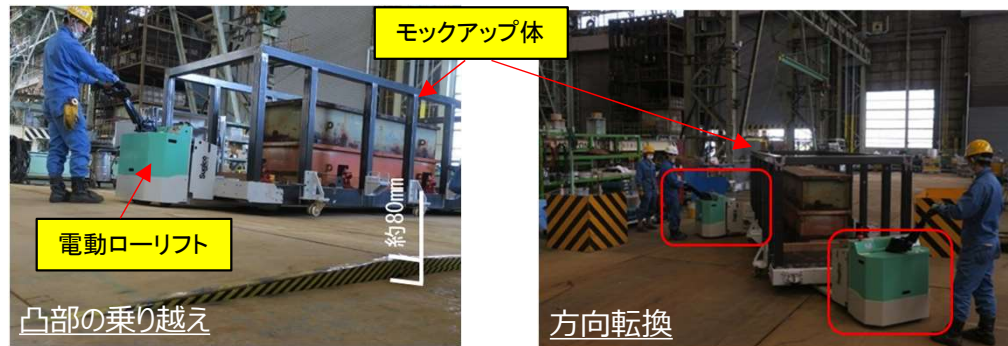
(iii) ロボット搬入部屋の撤去(1/2)

X-6ペネにアクセスするために設置したロボット搬入部屋は、バウンダリとなるX-6接続構造の設置後に次工程作業の延長管を取り付ける前に撤去が必要である。

以下に令和6年度に行ったロボット搬入部屋撤去に関する実施内容を示す。

【操作性確認試験】

- 作業の効率化を図るため、電動ローリフトを用いたロボット搬入部屋の搬送方法の変更を行い、操作性確認試験を行った。
- 試験は、ロボット搬入部屋の寸法(全高を除く)、および重量を模擬したモックアップ体を用いて実施した。



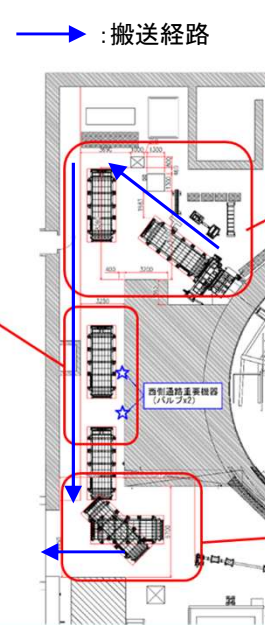
操作性確認試験の実施状況

【作業員習熟訓練】

- 電動ローリフトを用いたロボット搬入部屋搬送作業の作業員習熟訓練を実施した。
- 訓練では、重要設備、他設備との干渉回避確認のために、R/B内各エリアの寸法を模擬した搬送経路を設定して搬送性の確認を行った。



電動ローリフト



作業員習熟訓練の実施状況

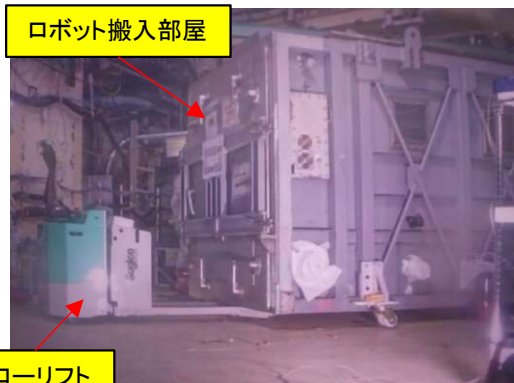
4.4 現場実証

(1) 現地据付、準備作業

(iii) ロボット搬入部屋の撤去(2/2)

【ロボット搬入部屋の撤去】

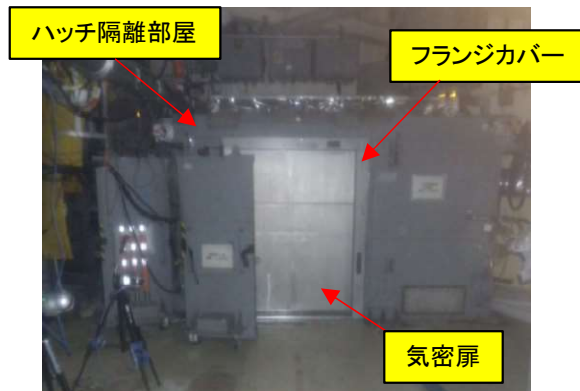
➤ X-6ペネ接続構造設置完了後、ハッチ隔離部屋からロボット搬入部屋を取り外した後、R/B建屋から搬出して保管場所のジャバラテントに移送し、計画工程内で作業を完了した。(令和6年6月)



北西エアロック側



ハッチ隔離部屋側



取外し後のハッチ隔離部屋
(フランジカバーを取付け)

ハッチ隔離部屋からロボット搬入部屋を取外し (R/B北西エア)



大物搬入口に仮置き



養生後トラック積込み



ジャバラテントへの移送・設置

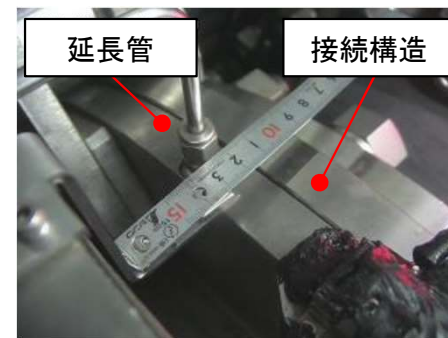
ロボット搬入部屋の撤去作業状況

4.4 現場実証

(1) 現地据付、準備作業

(iv) 延長管・追設遮蔽板設置

- 令和6年6月より延長管・追設遮蔽板設置工事に着手。6月11日に1F構内のテントハウスにて、延長管装置の気密確認を実施し合格。
- 6月17日に延長管装置、6月21日に追設遮蔽板を2号機R/B建屋前へ搬送を行い、大物搬入口より搬入。R/B建屋内運搬を実施し、6月26日にX-6ペネ接続構造装置後方フランジへの把持を完了。また、同日に追設遮蔽板装置の設置を完了。
- 6月26日にX-6ペネ接続構造装置後方フランジと延長管装置の接続部分の漏洩確認をもって、接続を完了。



追設遮蔽板装置遠隔運搬

延長管把持



延長管装置 気密確認

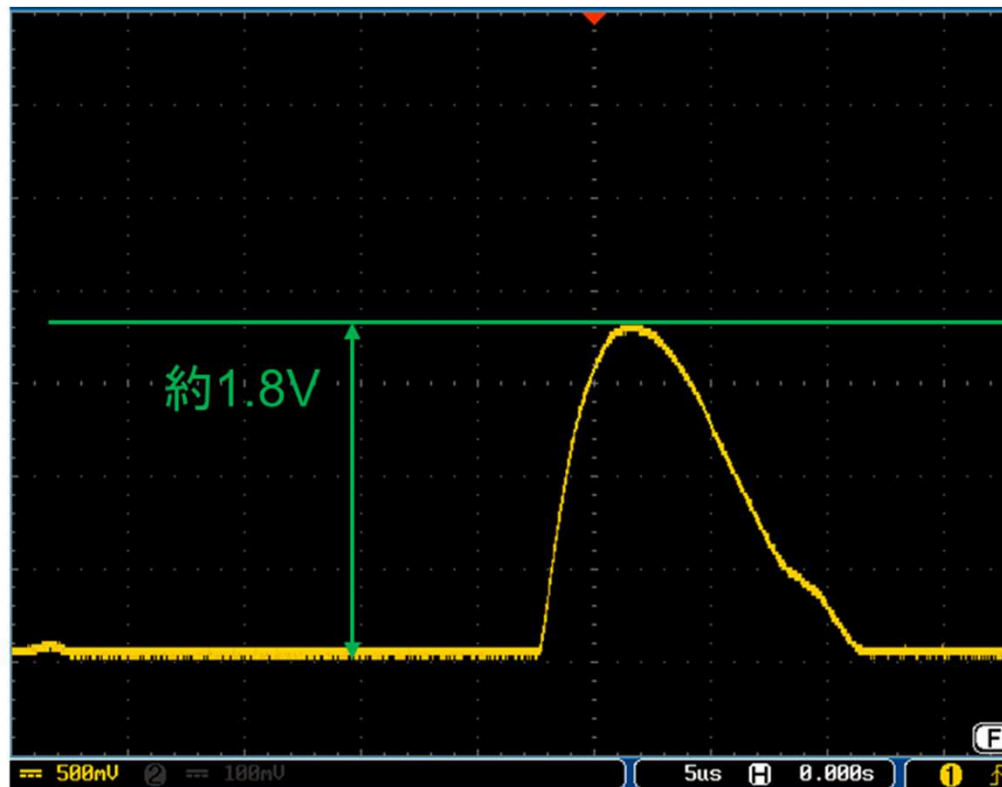
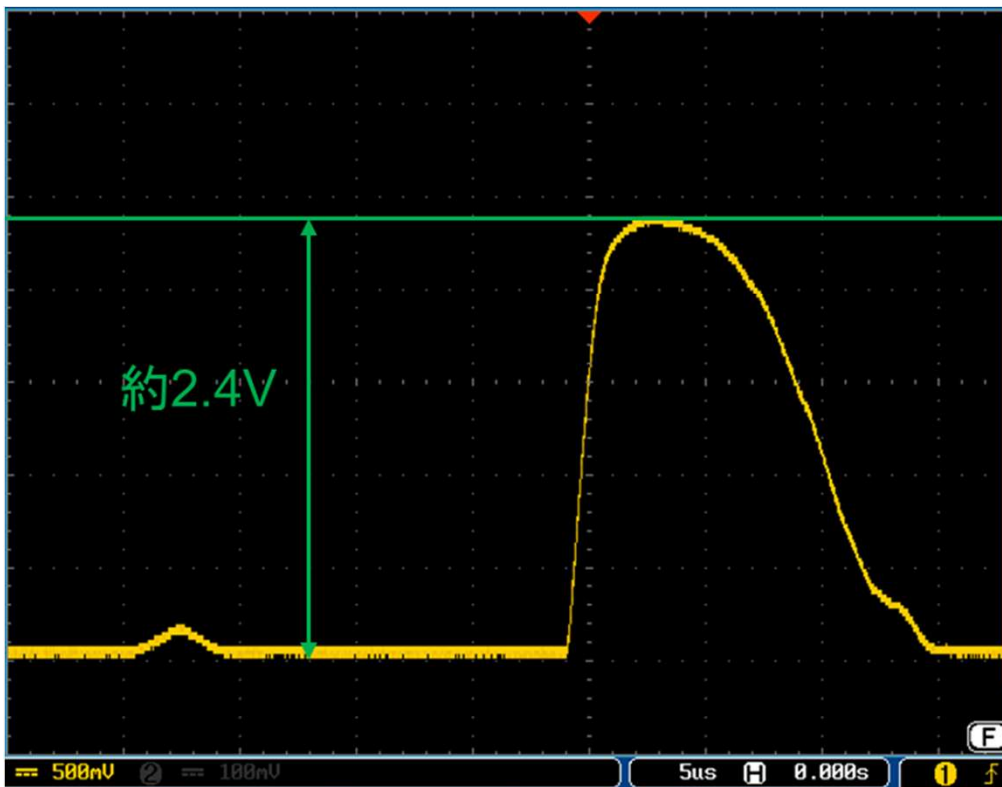
延長管装置運搬

追設遮蔽板装置設置

4.5 その他

(1) 中性子センサの検討

中性子によるパルス波形の確認(試験装置構成の見直し)



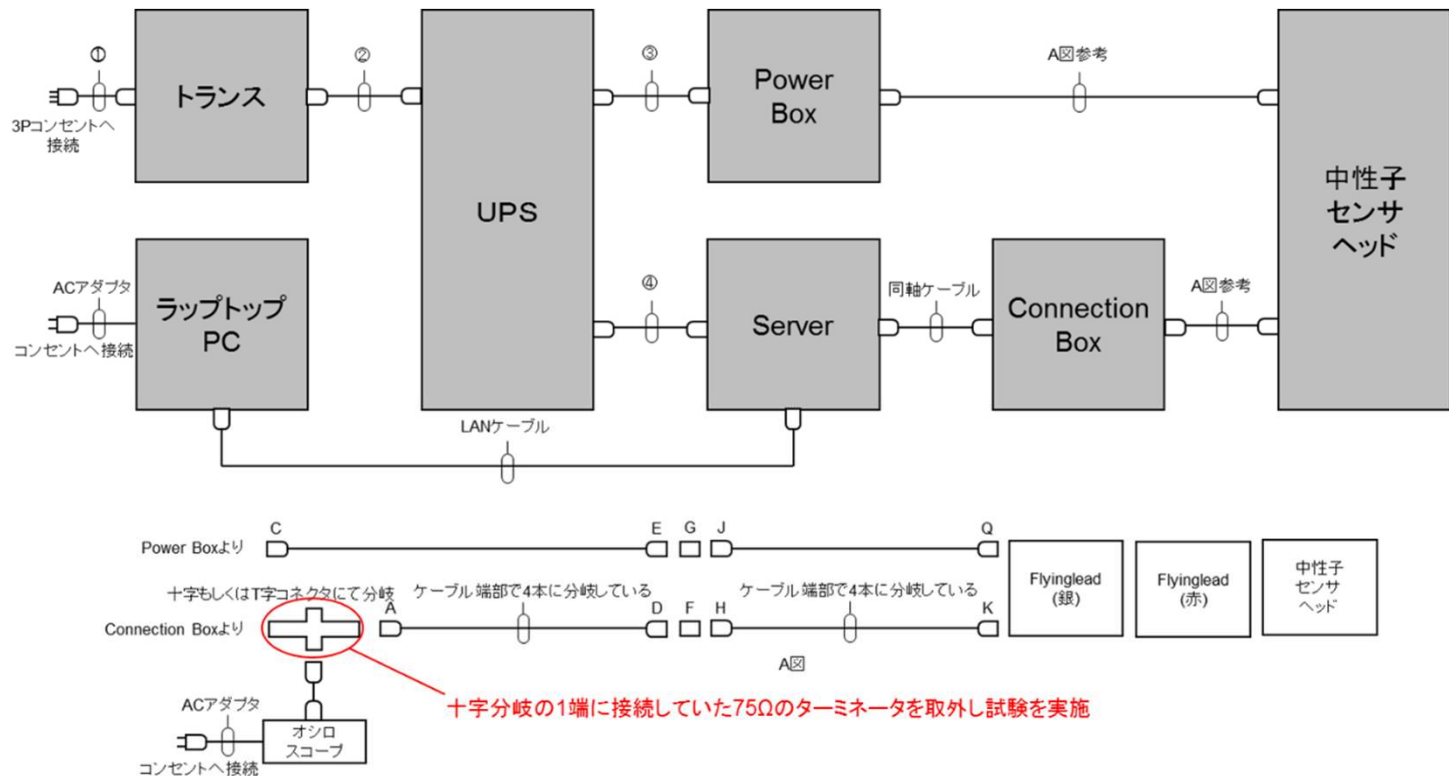
オシロスコープにて取得した中性子によるパルス波形

名古屋大学での試験結果を受け、試験装置の構成を見直し令和5年度に引き続きパルス波形の取得を実施した結果、令和5年度の想定通り約2V程度の波形を確認することができたため、試験装置の構成に問題があったと断定できた。試験装置構成の見直し内容については次ページに示す。

4.5 その他

(1) 中性子センサの検討

中性子によるパルス波形の確認(試験装置構成の見直し)

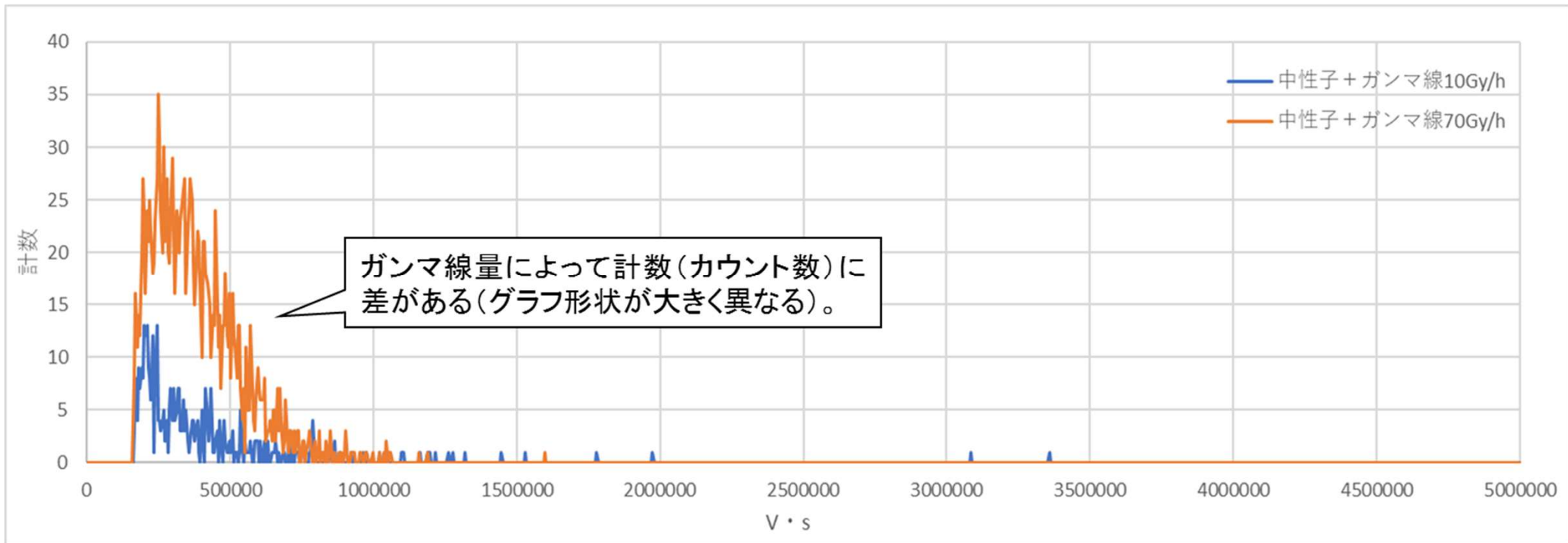


令和5年度に実施した試験における装置構成の変更箇所は上記の図の通り(検出システム側にターミネータが取りついていることを確認したため、オシロスコープとの信号分岐点に取り付けていたターミネータを取り外して再試験を実施。検出システム側ターミネータは Connection Boxに内蔵)。当該箇所に余分な抵抗が入っていたことによって、パルス波形の電圧が減少していたが、当該ターミネータを取り外したことによって、前ページに記載の通り、想定通り2V程度のパルス波を確認できた。

4.5 その他

(1) 中性子センサの検討

中性子とガンマ線の弁別について(以下スペクトルは令和5年度成果)

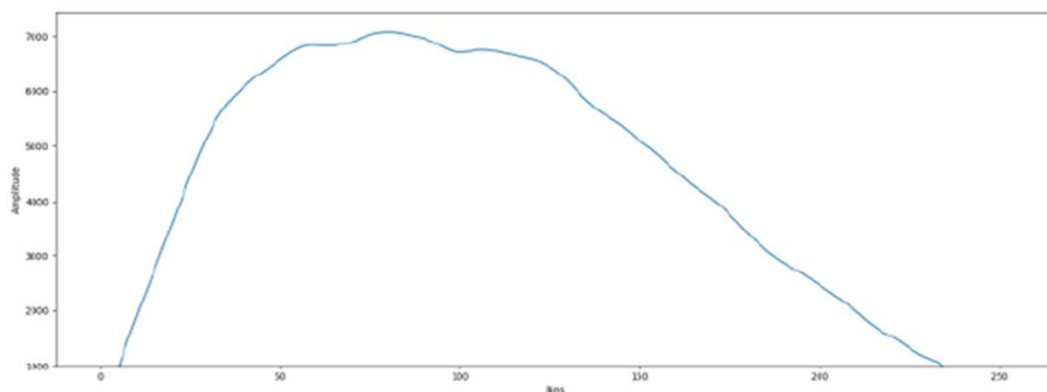


令和5年度報告の上記スペクトルについて、本スペクトルは中性子とガンマ線を弁別する前の状態の結果であったことが判明した。実際はシステム(サーバ)に保管されているパルス波形を確認することで、中性子によるものとガンマ線によるものとを弁別できることを確認した。同様の再試験を検討していたが、上記の通り弁別できることを確認したため、実施しないこととした。分析方法を次ページに記載する。

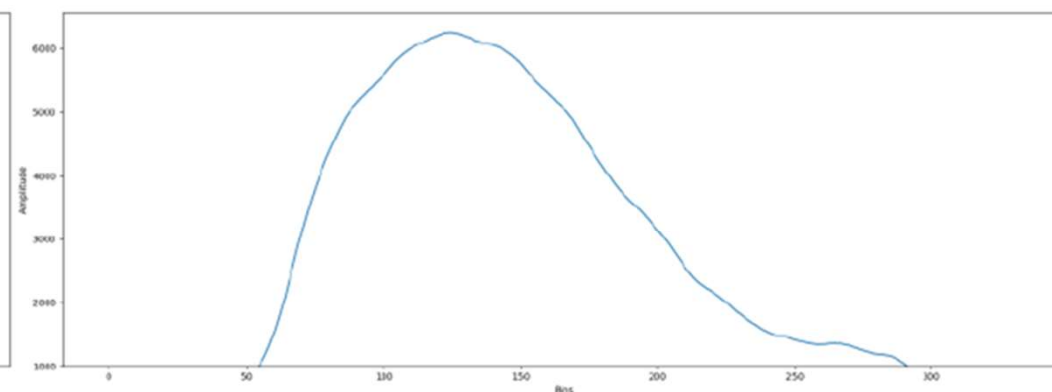
4.5 その他

(1) 中性子センサの検討

中性子とガンマ線の弁別について



中性子によるパルス波形



その他のパルス波形

上図は中性子検出器にて取得したパルス波形である(左図: 中性子のパルス波形、右図: その他(ガンマ線等)による波形)。中性子による波形は以下の特徴を持つ。

- ・大きな立上り(傾き)
- ・中央が平坦
- ・緩やかな立下り(傾き)

これらの波形データは検出システム内に保管されており、保管されている波形データのうち上記の特徴を持つ波形データを選別・カウントすることで中性子とそれ以外の波形を弁別できることがわかった。

4.5 その他

(2)ガンマセンサの検討


ガンマセンサは、令和5年度までに単体での作動試験およびアームに接続した状態での作動試験等をJAEAの櫛葉遠隔技術開発センター(以下、「JAEA櫛葉」という)にて実施済み。その結果を踏まえ、保守用ガンマセンサ※をガンマセンサと同仕様とすべく、保守用ガンマセンサとコネクタを接続するケーブルの短尺化等を行い、JAEA櫛葉にて動作確認試験を実施した。

また、照射試験に使用するための試験用制御盤や、福島第一原子力発電所へ輸送後に動作試験を実施するための試験用中継器等を製作し、JAEA櫛葉にて動作確認を実施した。

その上で、保守用ガンマセンサおよびガンマセンサについて照射試験を実施した。

※ガンマセンサに保守が必要になった際に使用することを想定したセンサ






ガンマセンサの検討項目と結果(1/3)

大項目	項目	概要及び結果
保守用ガンマセンサの動作確認試験	操作PCより操作し、基本動作の確認を実施する。	<p>保守用ガンマセンサを用いて、操作PCのユーザインタフェース上からの動作指示によって放射線測定等の基本動作が実施できることを確認した。</p> 

4.5 その他

(2)ガンマセンサの検討

ガンマセンサの検討項目と結果(2/3)

大項目	項目	概要及び結果
<p>試験用制御盤および試験用中継器の動作確認試験</p>	<p>照射試験にて試験時に使用するため試験用制御盤を製作。1F輸送後に動作確認を行うための試験用中継器を製作。これらの動作確認をJAEA櫛葉にて実施。</p>	<p>既設制御盤および中継器にて動作を確認した上で、それぞれを試験用に入れ替えて動作することを確認した。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">    </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <p>試験用制御盤（サーバPCと制御装置）</p> <p>試験用中継器</p> </div>
<p>リモート電源断装置の動作確認試験</p>	<p>ガンマセンサをアームに接続する際には中継器とセンサの電源をON/OFFする必要がある。この操作をコントロールルーム内より実施できる装置を製作し、その動作確認をJAEA櫛葉で実施。</p>	<p>コントロールルーム内に設置する下記装置より、制御盤側制御装置を通して中継器とセンサの電源をON/OFFできることを確認した。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <p>コントロールルーム内設置装置</p> <p>制御盤側制御装置</p> </div>

4.5 その他

(2) ガンマセンサの検討

ガンマセンサの検討項目と結果(3/3)

大項目	項目	概要及び結果
照射試験	<p>保守用ガンマセンサについて、英国輸送後に放射線測定機能が健全であることを確認するために実施。</p> <p>保守用ガンマセンサおよびガンマセンサを使用し、ガンマ線照射施設にて測定を実施し線源のある方向が判断できるかを確認。</p>	<p>国内の照射施設にて放射線測定試験を実施した。</p> <p>放射線測定結果から求めた2次元的な放射線線量率分布(どの方向からの放射線線量が多いかを示す分布であり、横軸は水平位置(センサ回転角度)、縦軸は鉛直位置を示す)を図示した。</p> <p>本試験結果については妥当性等を確認中。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="981 612 1541 1031"> <p>ガンマセンサ</p> <p>線源位置</p> <p>熱電対</p> <p>線量計</p> </div> <div data-bbox="1585 628 2085 1031"> <p>センサ回転角度[°]</p> <p>90 45 0 315 270 225 180 135 90</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">照射試験風景</p> <p style="text-align: center;">放射線線量率分布(例)</p>

5. まとめと今後の予定

(1) 令和6年度の成果まとめ

○アクセス・調査装置:

- ・アームの制御システムの改良、実規模モックアップ設備を使用したワンスルー試験等を実施し現地適用性を確認できた
- ・また、調査用アーム及びデクスタの作業訓練を実施し、操作の習熟を図った

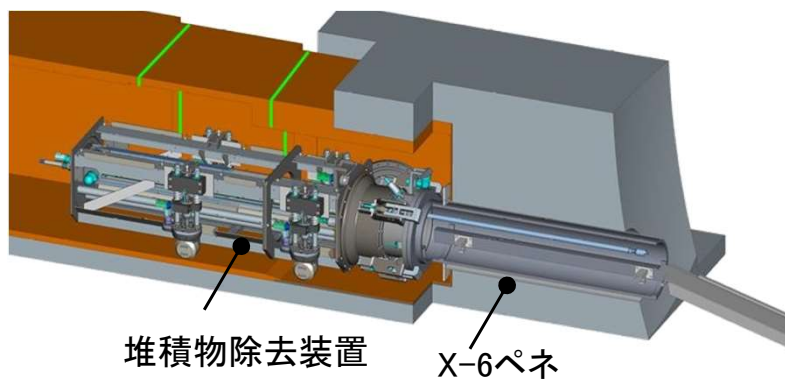
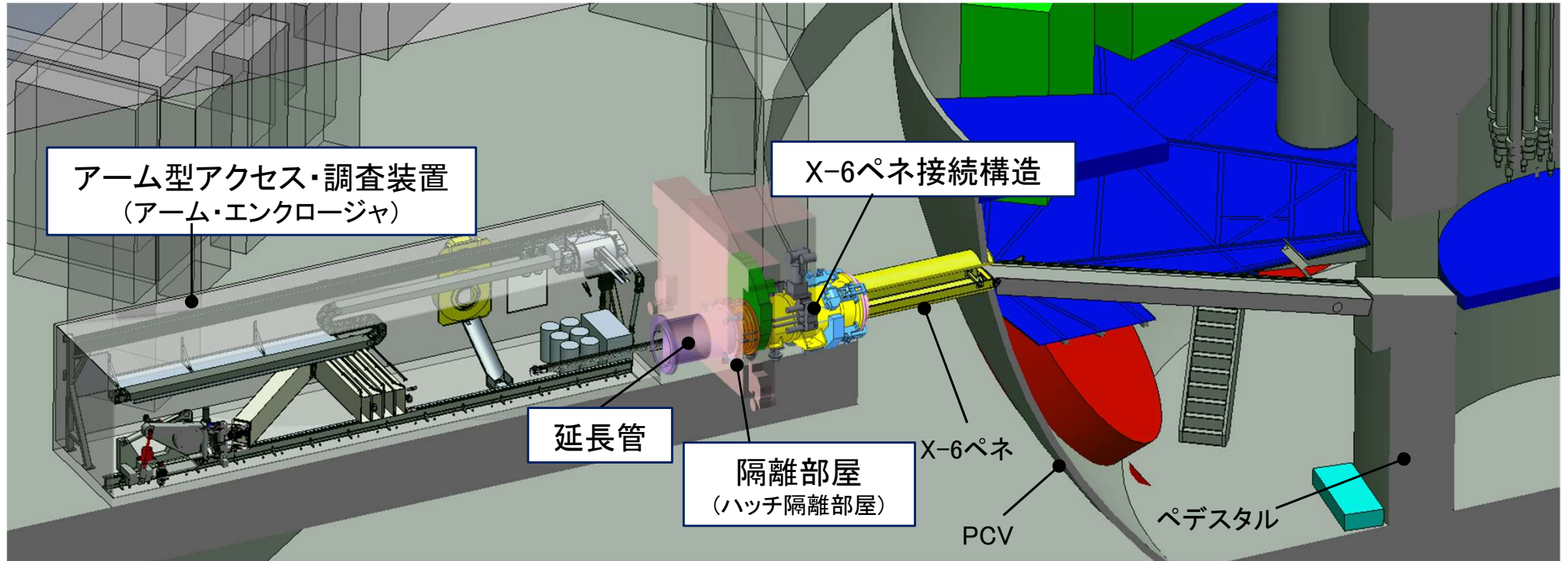
○現場実証:

- ・堆積物除去装置を用いてX-6ペネ内の堆積物除去作業を完了した
- ・X-6ペネ接続構造、延長管設置を完了した
- ・ロボット搬入部屋撤去を完了した

(2) 令和7年度の予定

- ・アクセス・調査装置について、装置のメンテナンス、作動確認等を経て福島第一原子力発電所へ出荷する
- ・福島第一原子力発電所に出荷後、装置の搬送、据付、試運転を経て内部詳細調査につなげる

補足資料

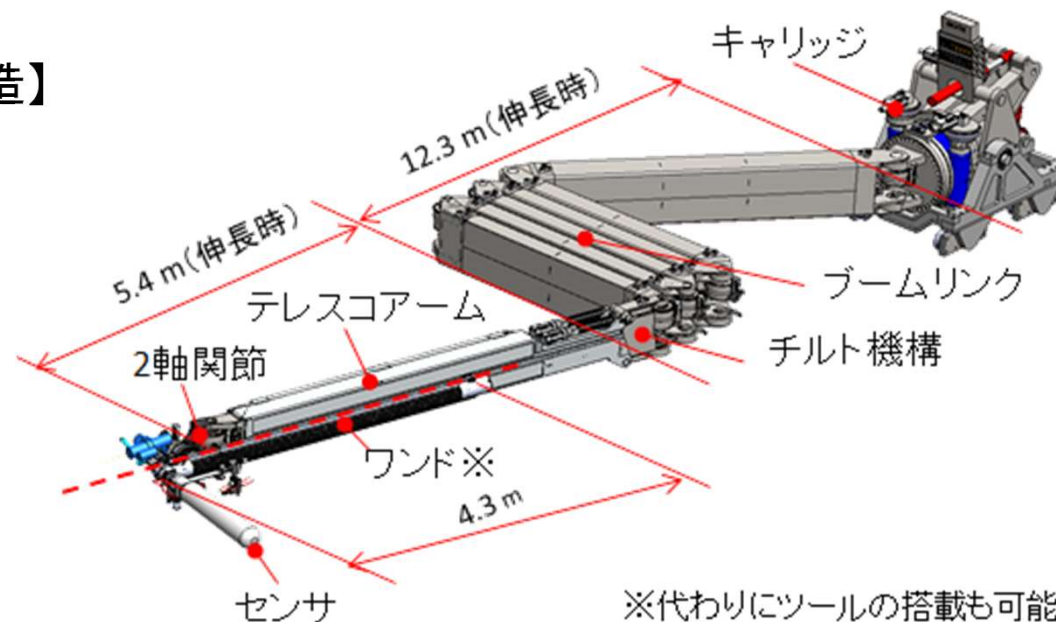


装置	主目的
アーム型アクセス・調査装置	PCV内部のデータ取得(センサ搭載)、障害物撤去(ツール搭載)
X-6ペネ接続構造	PCVバウンダリ構築及びアーム通過性確保(隔離弁搭載)
延長管	遮蔽及びアーム通過性確保
隔離部屋	X-6ペネ蓋開放時(X-6ペネ接続構造設置前)のPCVバウンダリ構築、遮蔽
堆積物除去装置	X-6ペネ内の堆積物等の除去

アクセス・調査装置

【アーム型装置(以下、アーム)の仕様と構造】

- ✓ 搭載可能センサ 10 kg以下
- ✓ 搭載工具 切断・把持ツール、AWJツール
- ✓ アーム長 約18 m(ワンドを除く)
- ✓ 押付け力 400 N
- ✓ 耐放射線性 累積線量 1 MGy
- ✓ 付属設備
カメラ、照明



【アームエンクロージャの仕様と構造】

- ✓ 外板 天井及び側板 厚さ10 mm
底板 厚さ25 mm
- ✓ 質量 約30トン
- ✓ 主要材質 ステンレス鋼
- ✓ 設計圧力 -5~+10 kPaG
- ✓ 付属設備
デクスタ、仕切弁、カメラ、照明 等

