

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5年度最終報告

令和6年7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 アクセスルート構築のための関連機器
 - 4.3 その他付帯設備
 - 4.4 燃料デブリ回収装置
 - 4.5 現場実証
 - 4.6 その他
5. まとめと今後の予定

1. 本事業の背景・目的

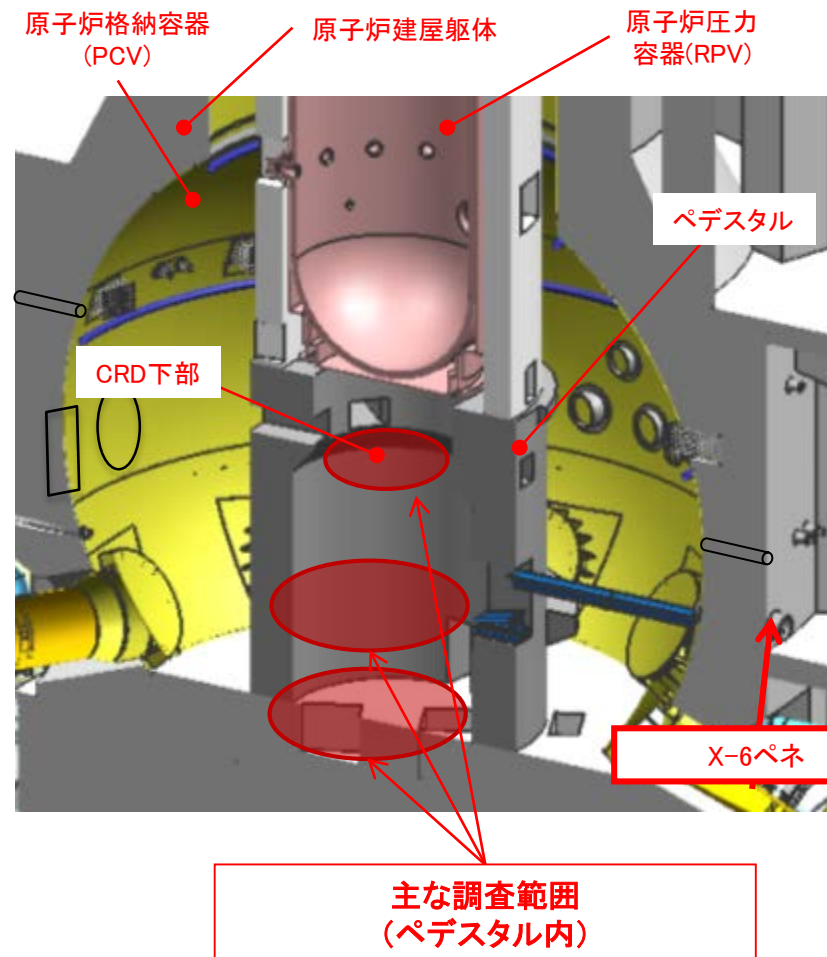
【背景】

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

※本報告書は、着色部 の令和5年度成果を報告するものです。

平成28～29年度 原子炉格納容器内部調査技術の開発

平成29～30年度 原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発

平成30～31年度/令和元年度 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2～6年度 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)

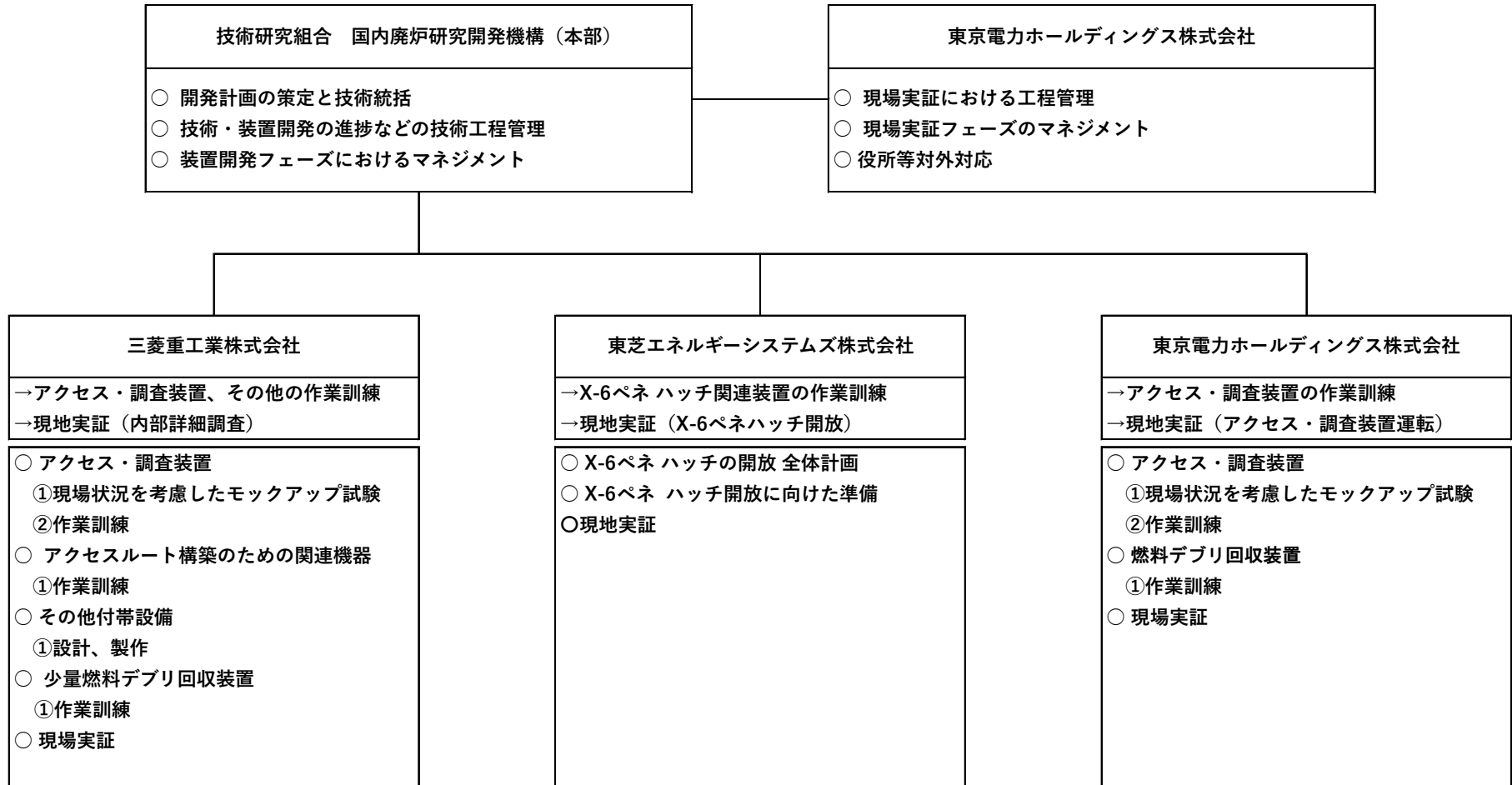
燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けた技術の開発

燃料デブリの段階的に規模を拡大した
取り出し技術の開発

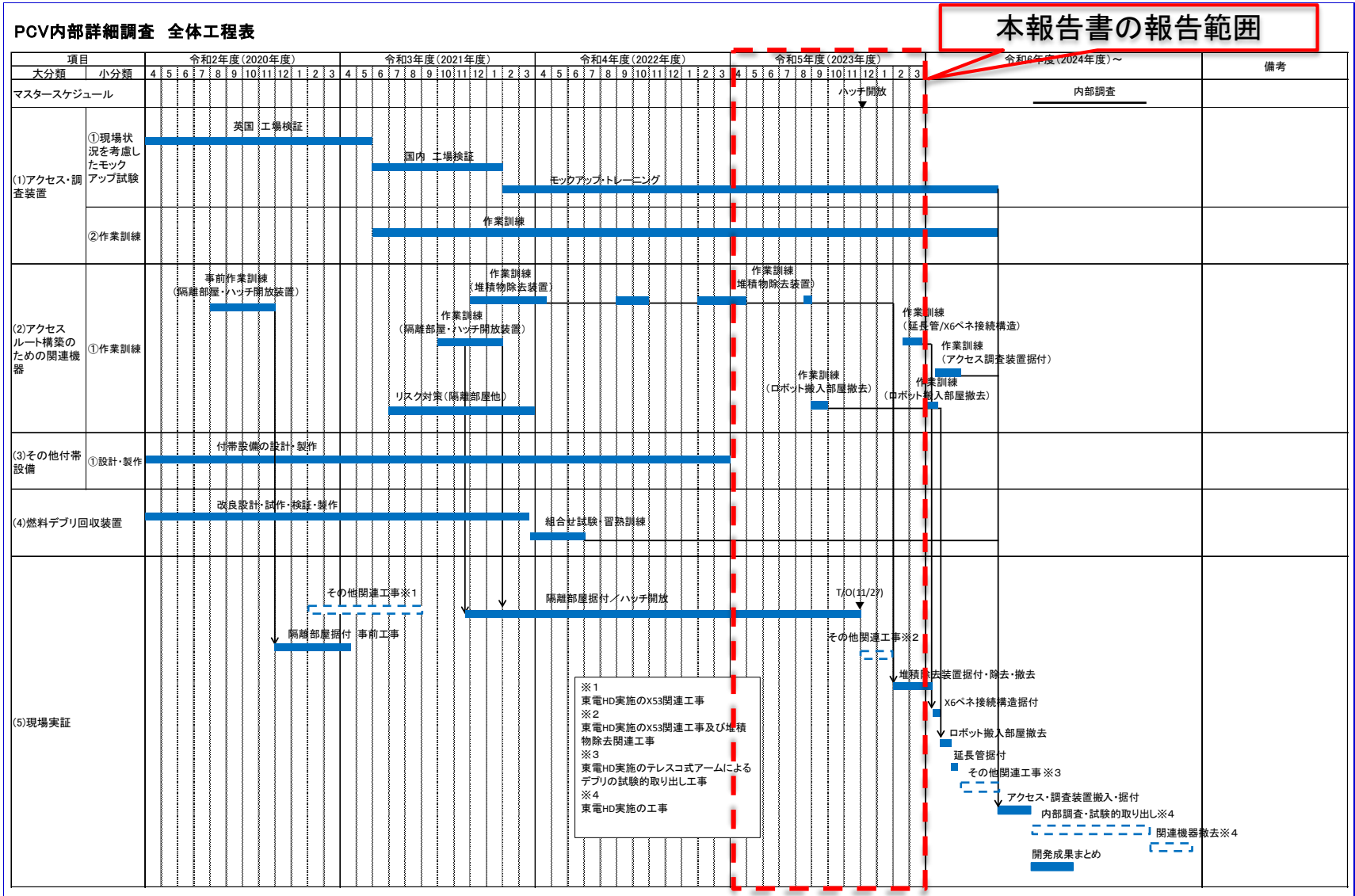
補助事業

IRID
自主事業

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

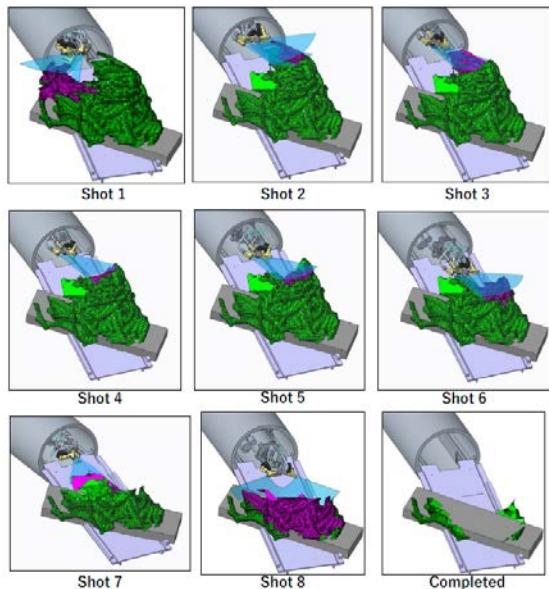
4.1 アクセス・調査装置

(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

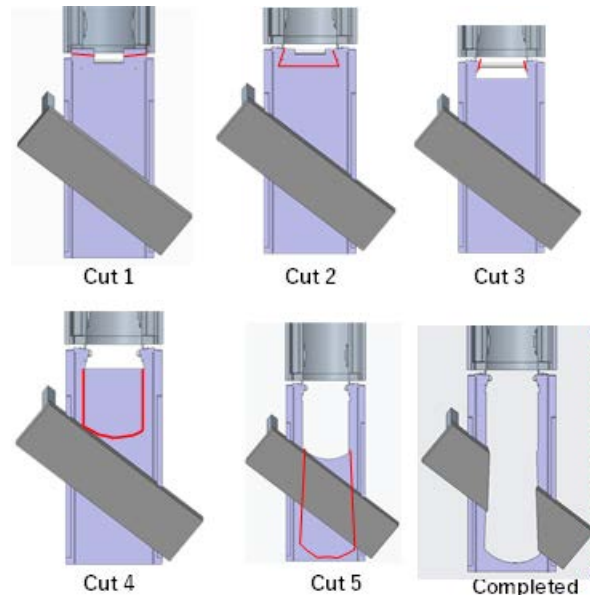
(a) AWJ切断試験

目的

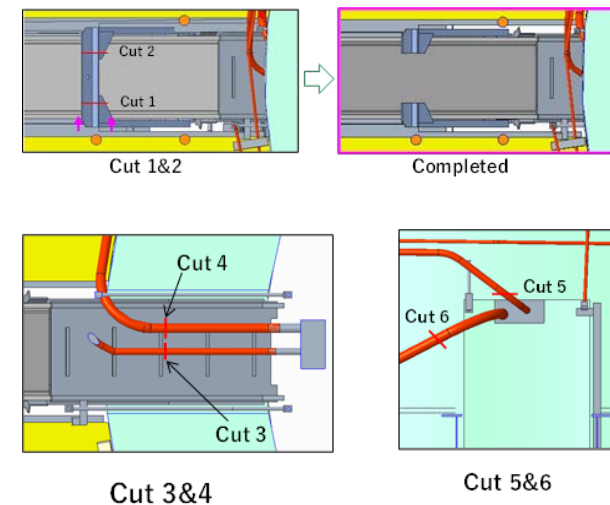
- 本プロジェクトでは、AWJ(アブレイシブウォータージェット)により、残置ケーブル、CRDレーン、吊上げ治具及び電線管(障害物)を切断・除去して、アームがPCV内にアクセスするルート(アクセスルート)を構築する計画である。
- 現地でのアクセスルート構築のためには、現地作業の前に、AWJによる障害物の切断・除去の実施可否の確認、切断手順の確認及び適正化が必要である。
- 現地作業に先立って、現地を想定したアクセスルート構築のためのAWJ切断試験を櫛葉遠隔技術開発センターにて実施した。



残置ケーブル除去手順



CRDレーン切断手順



吊上げ治具切断手順

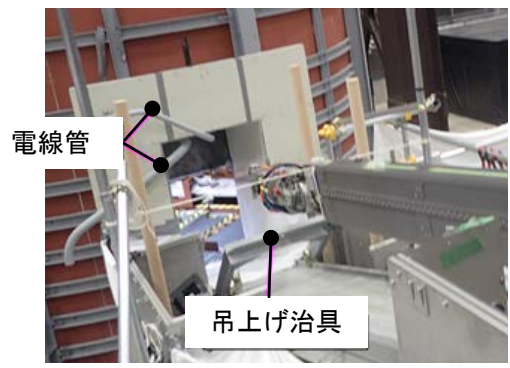
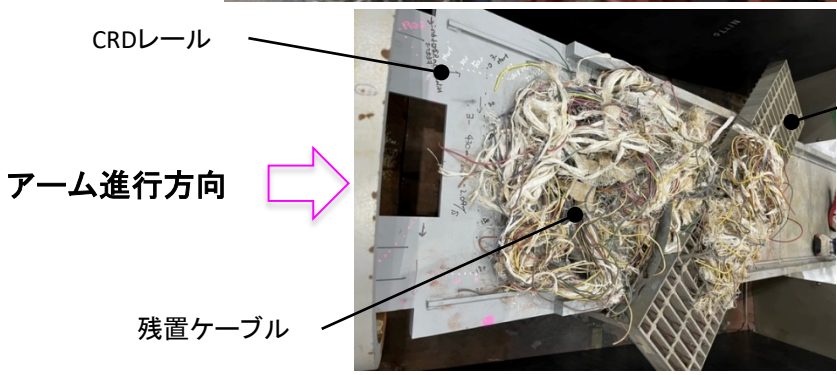
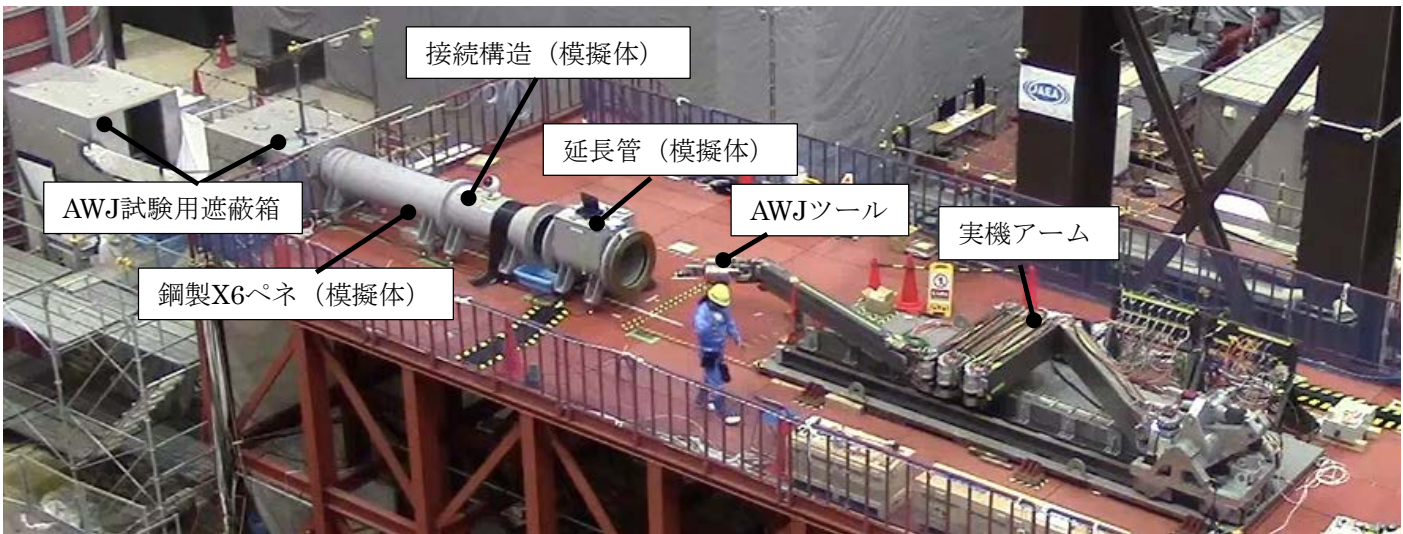
4.1 アクセス・調査装置

(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) AWJ切断試験

試験設備及び供試体の概要

- 延長管、接続構造及びX6ペネは模擬体を使用。実機アームに実機AWJツールを搭載して試験を実施した(下図)。
- 砥粒の飛散防止のため、CRDレール、残置ケーブル及び吊上げ治具はAWJ試験用遮蔽箱内に設置した(下図参照)。



4.1 アクセス・調査装置

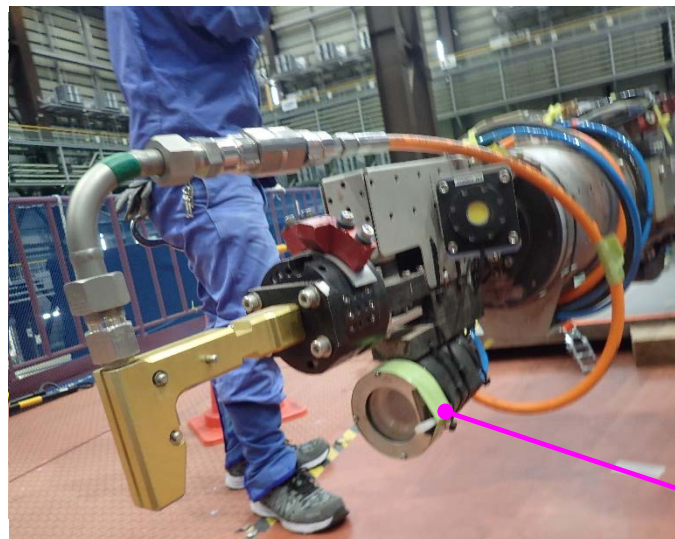
(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i) アームの検証試験

(a) AWJ切断試験

試験条件

- AWJユニットの運用条件は下表の通りである。
- 現地でのアクセスルート構築を想定し、AWJユニットはコントロールルームから遠隔操作し、AWJによる切断開始位置の設定(位置決め)には、アーム先端及びノズル先端の耐放射線性カメラを利用する(作業員の誘導なし)。
- カメラ視野が得られない範囲の切断は実施しない。カメラ視野が得られるようにツール軸等を移動させる。
- 延長管カメラを用いて、アームとX6ペネ及び残置ケーブルとの干渉を確認する(作業員の確認なし)。
- CRDレール、吊り治具及び電線管等の切断確認も上記のカメラを用いて遠隔で実施する。

項目	条件
水圧	650 [bar]
砥粒	GMAガーネット #120 Classic Cut
砥粒混合率	13[%]
流量	4[L/min]
水	工業用水を利用



耐放射線性カメラ

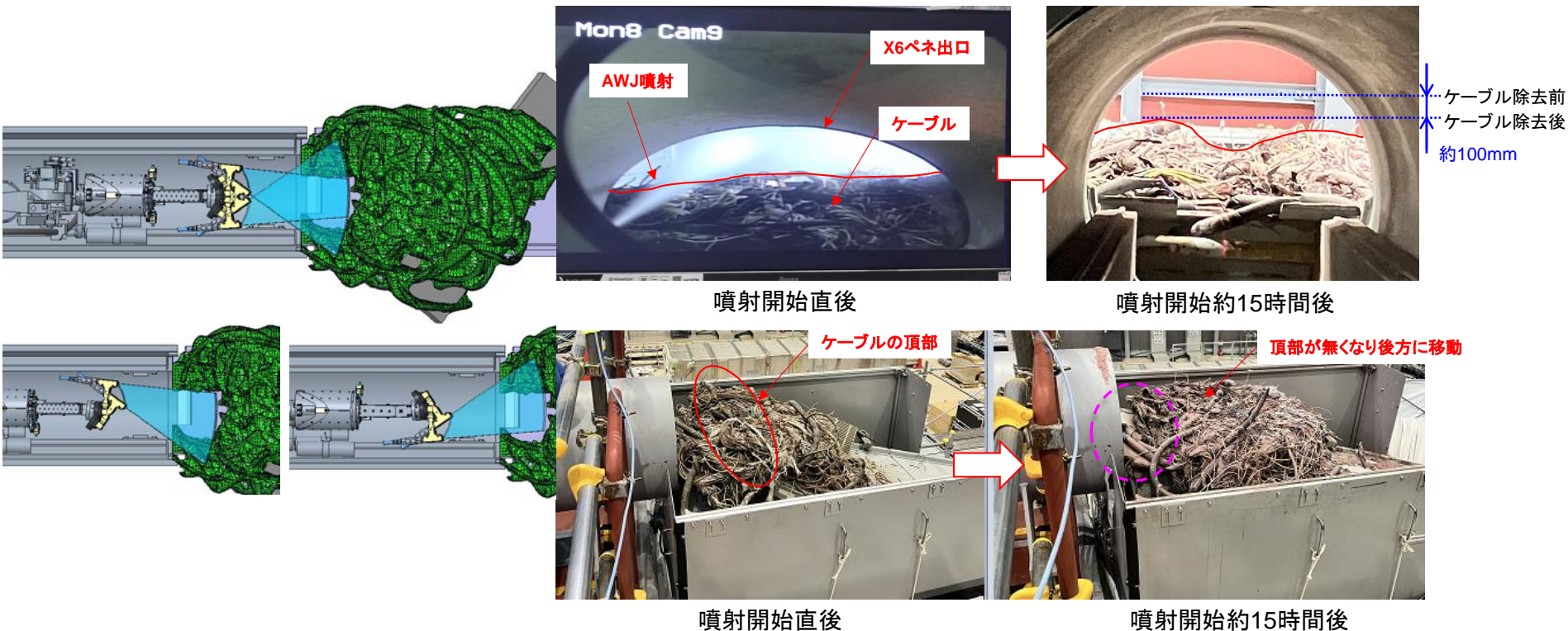
4.1 アクセス・調査装置

(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) AWJ切断試験

試験結果まとめ

- 残置ケーブル除去の試験結果を下図に示す。AWJ15時間の噴射により、X6ペネ出口にて残置ケーブルで隠れていたCRDレールが現れ、ツールのノズル部を挿入できることを確認した。なお、本試験では残置ケーブル堆積量を保守的に設定した。



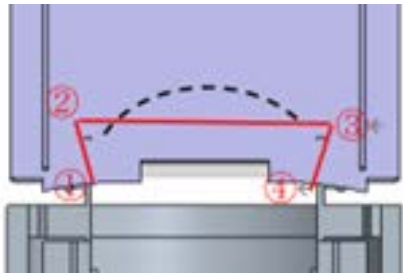
4.1 アクセス・調査装置

(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i) アームの検証試験

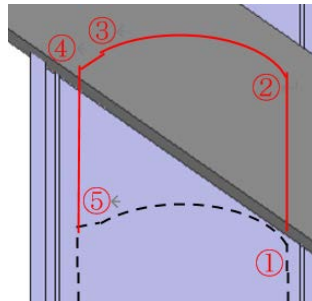
(a) AWJ切断試験

試験結果まとめ

- CRDレール切断の試験結果を下図に示す。同図に示すように、ほぼ計画通りにCRDレールを切断することができた。ただし、Cut4及びCut5ではカメラ視野の確保及びカメラと切断対象との干渉から2つに分割する必要があった。また、グレーチング切断(Cut5)ではAWJ噴射時間が35時間程度要した。



Cut2切断(計画)



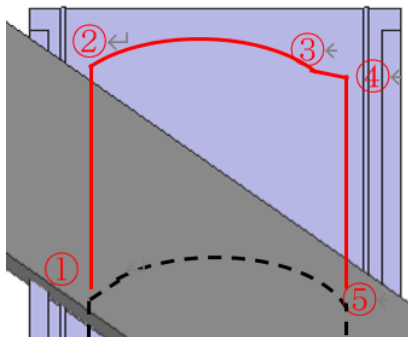
Cut5-1切断(計画)



Cut2完了時



Cut5-1完了時



Cut4-2切断(計画)

Cut5-2切断(計画)



Cut4-2完了時

Cut5-2完了時

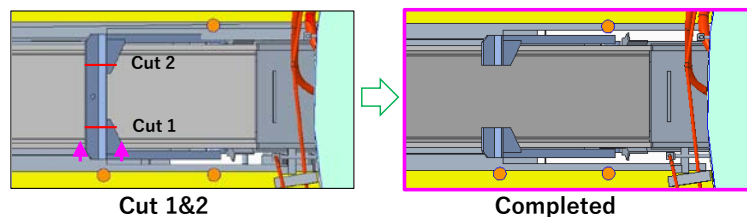
4.1 アクセス・調査装置

(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) AWJ切断試験

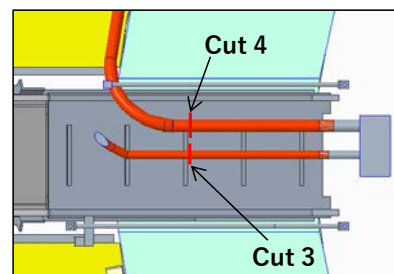
試験結果まとめ

- 吊上げ治具及び電線管の切断試験結果を下図に示す。同図に示すように、計画通りに切断することができた。また、切断時及び切断確認のカメラ視野も問題ないことを確認した。
- ただし、現状の電線管の切断方法では、AWJ噴射によりペDESTAL開口部を損傷させるため、その影響を把握する必要がある。(次の(b)項参照)

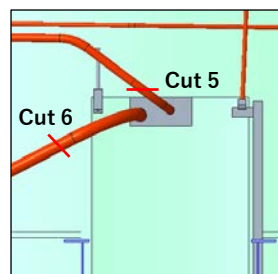


Cut1切断時(カメラ視野)

Cut6切断時(カメラ視野)



Cut 3&4



Cut 5&6



Cut2完了時



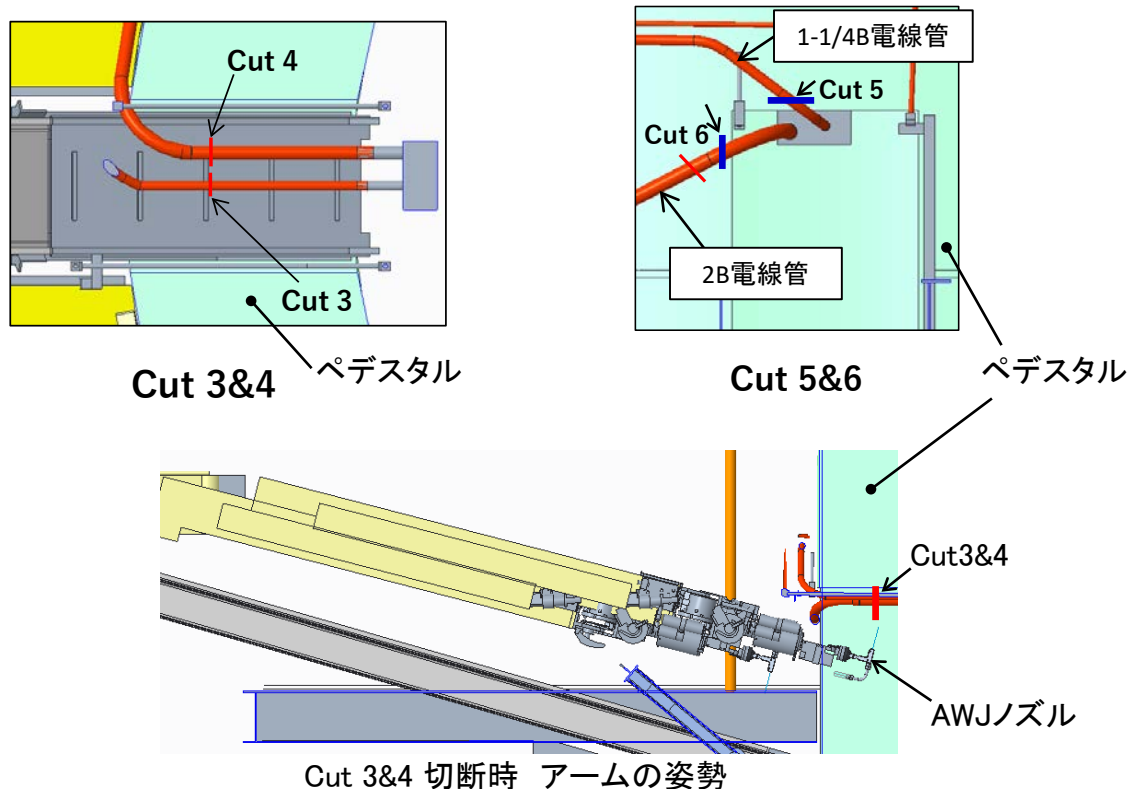
Cut6完了時

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)ペDESTAL 損傷影響評価

目的

- アームのアクセスルート確保の観点から、AWJ(アブレイシブウォータージェット)を用いて障害物を切断する計画
- ペDESTAL 壁近傍の電線管も切断対象となっている(下図のCut3~6)
- 電線管切断に伴い、電線管の背面のペDESTAL 壁にAWJの一部が噴射される
- ペDESTAL 壁の健全性評価(別途実施)に資するため、AWJ試験を実施して損傷データを取得する

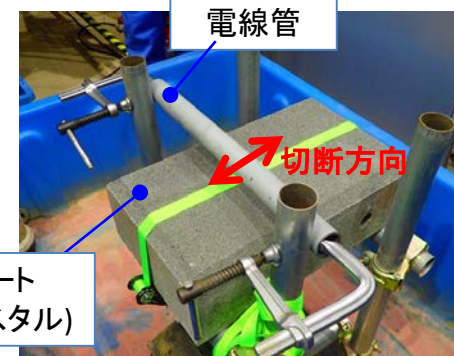


4.1 アクセス・調査装置

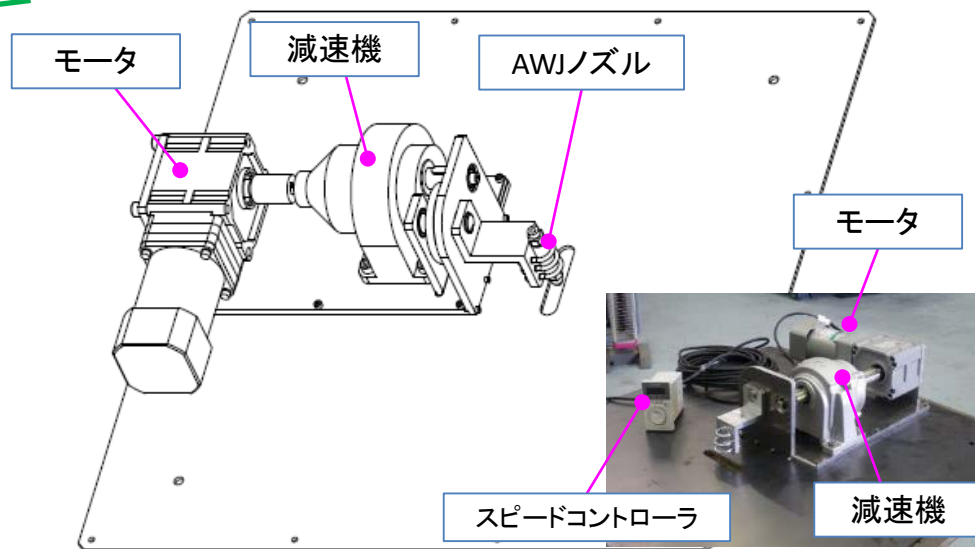
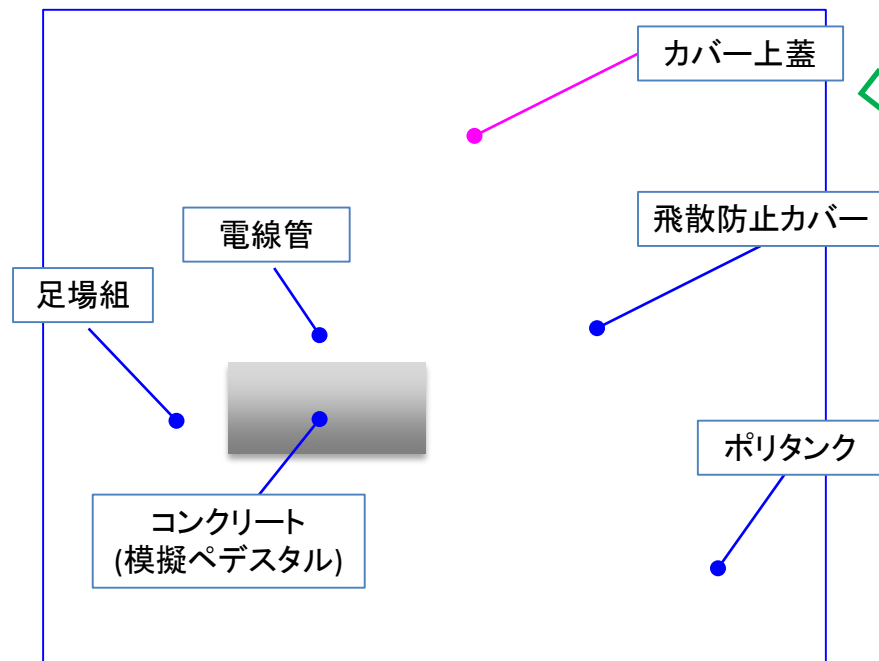
- (1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験
(b)ペDESTAL損傷影響評価

試験装置の概要

- 電線管、コンクリート(ペDESTALを模擬)を使用
- ノズルからAWJを電線管に噴射・切断し、切断後にコンクリート損傷範囲を確認する



コンクリート、電線管設置状況



カバー上蓋にノズル回転装置を設置

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) ペDESTAL 損傷影響評価

試験条件、パラメータ

- ・AWJ噴射条件 : 実機条件と同様に水圧650[bar]とした(流量は4[l/min]及び砥粒(ガーネット)含有率13%wt)
- ・電線管のサイズ : 1-1/4B(外径43.5mm) or 2B(外径63.5mm)
- ・コンクリート強度 : 事故後の2号機で想定される強度を踏まえ、設計基準強度(F_c)が 18N/mm^2 のブロック(500x300xH150)を使用した。比較評価のため、 $F_c=24\text{N/mm}^2$ のブロック(180/205xH250xL600)も使用した。また、鉄筋条件での試験も実施した(鉄筋設置時は、コンクリートブロックは設置しない(鉄筋損傷評価にとって保守的)な条件とした)
- ・切断速度 : 0.02(1.1deg/min) or 0.05(2.75deg/min)

試験ケース名	電線管サイズ	コンクリート	切断速度	備考
Case 1	1-1/4B	無筋C($F_c=18$)	0.02	コンクリート強度の基本ケース
Case 2	2B	無筋C($F_c=18$)	0.02	
Case 3	2B	無筋C($F_c=18$)	0.02	AWJの噴射起点を端部ではなく中央に変更(参考ケース)
Case 4	2B	無筋C($F_c=18$)	0.05	切断速度の影響評価
Case 5	2B	無筋C($F_c=24$)	0.02	コンクリート強度の影響評価
Case 6	2B	鉄筋(D38)	0.02	鉄筋のケースの基本ケース
Case 7	2B	鉄筋(D38)	0.05	切断速度の影響評価

4.1 アクセス・調査装置

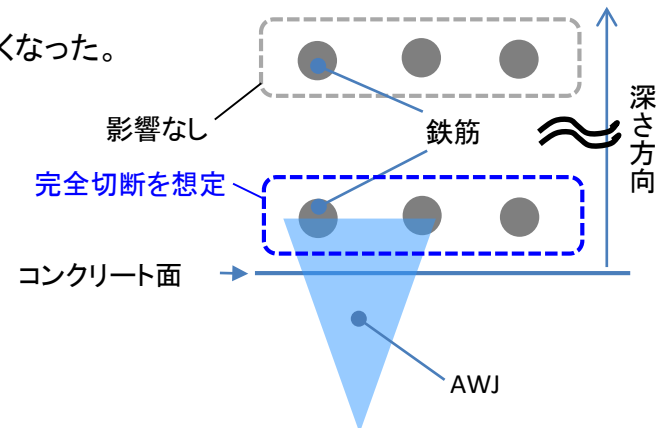
(1) 現場状況を考慮したモックアップ試験 (i)アームの検証試験 (b)ペDESTAL 損傷影響評価

試験結果まとめ

- Case3は、AWJの噴射起点を電線管端部から中央に変更したものであり、損傷が大きくなった。よって、実機切断は、これまでと同様に電線管端部からの切断とする。
- 切断速度を0.02から0.05に向上させると、コンクリートや鉄筋の損傷深さが浅くなる
- 鉄筋は損傷したものの、完全切断には至らなかった
- 以上の結果を踏まえ、ペDESTALの健全性評価の条件は下記を提案する。
 - ・コンクリート損傷深さ : 140mm (Case2の結果)
 - ・鉄筋の損傷深さ : 深さ方向の1列分が完全切断 (保守側想定: 右図参照)

引き続き、切断速度の追加試験を実施し、ペDESTAL 損傷範囲の最小化を図る予定。

試験ケース名	電線管サイズ	コンクリート	切断速度	損傷深さ
Case 1	1-1/4B	無筋C (Fc=18)	0.02	125mm
Case 2	2B	無筋C (Fc=18)	0.02	140mm
Case 3	2B	無筋C (Fc=18)	0.02 (AWJの噴射起点を中央に変更)	150mm以上 (参考ケース)
Case 4	2B	無筋C (Fc=18)	0.05	60mm
Case 5	2B	無筋C (Fc=24)	0.02	65mm
Case 6	2B	鉄筋 (D38)	0.02	20mm (鉄筋)
Case 7	2B	鉄筋 (D38)	0.05	5mm (鉄筋)

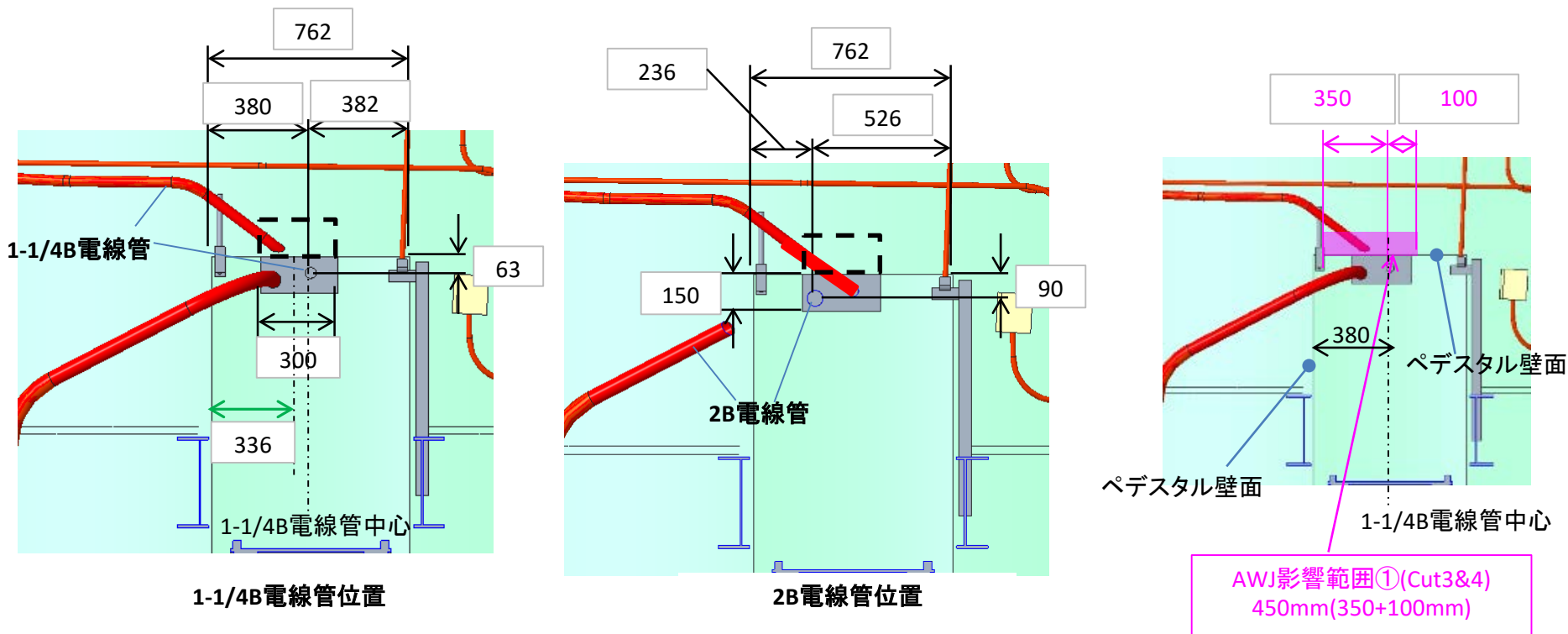


4.1 アクセス・調査装置

- (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) ペDESTAL 損傷影響評価

ペDESTAL 健全性評価のためのAWJ損傷範囲条件(案)

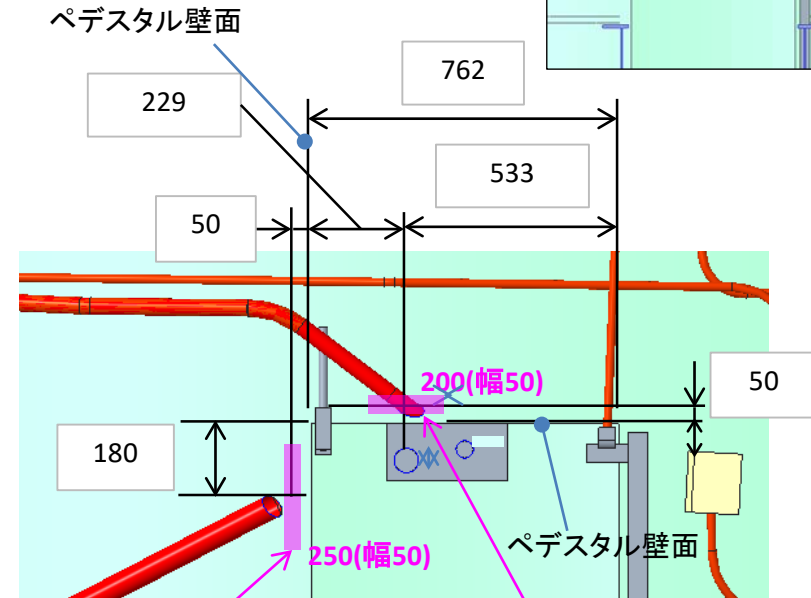
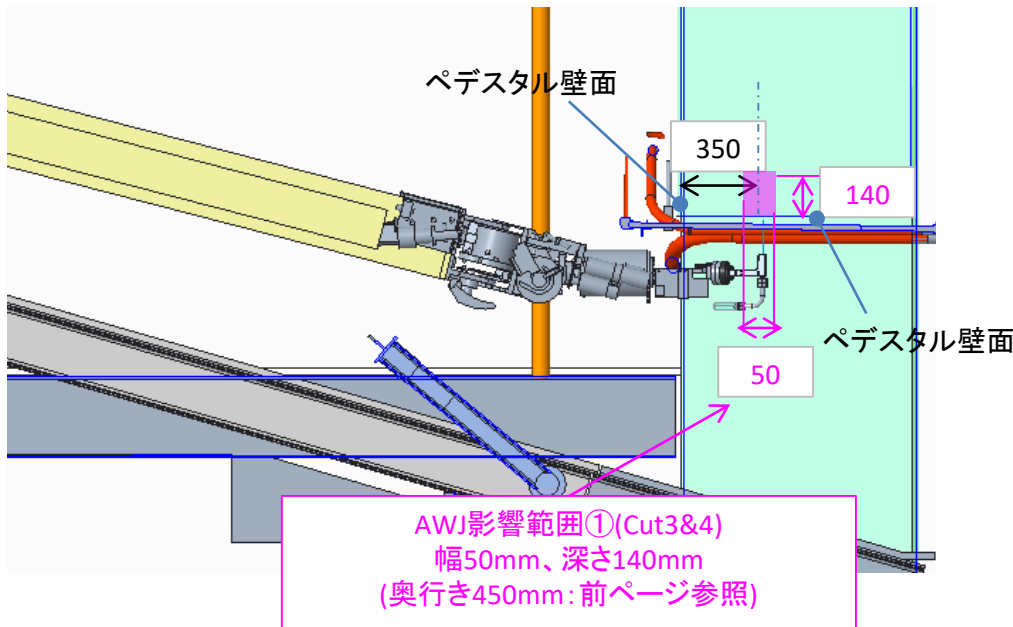
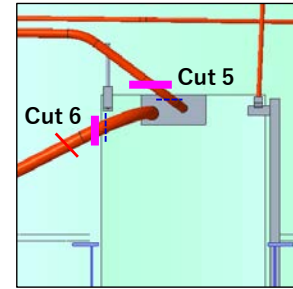
AWJ試験結果を踏まえ、ペDESTAL 健全性評価のAWJ損傷範囲条件案を以下に示す。



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)ペDESTAL 損傷影響評価

ペDESTAL 健全性評価のためのAWJ 損傷範囲条件(案)



AWJ 影響範囲②(Cut5)
縦幅50mm、横200mm、深さ140mm

- ・コンクリート 損傷深さ : 140mm
- ・鉄筋の 損傷範囲 : 140mm 深さにある鉄筋は破断(機能喪失)

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)ペDESTALへのアクセス試験 1)VR精度確認試験

【試験条件】

アームの機能/適用性を見極めるため、重要かつ技術的ハードルが高い、「プラットフォーム開口(狭隘部)を通過しペDESTAL底部へのアームのアクセス」に着目した試験を実施。

【結果概要】

以下のステップ①～④を実施。狭隘部であるプラットフォーム等の通過に関し、VRにてアーム干渉の有無を判断可能な精度があることを確認(次頁参照)。これにより、VRを使用してペDESTAL底部までアームがアクセス可能であることを確認できた。

<試験概略フロー>

ステップ①

- ・ペDESTAL底部までのアームアクセス
- ・T&RF*の作成

ステップ②

アームにレーザスキャナを搭載し、アーム周辺の障害物の位置・形状データ(点群データ)取得

ステップ③

アームのVRシステム*へ点群データの反映

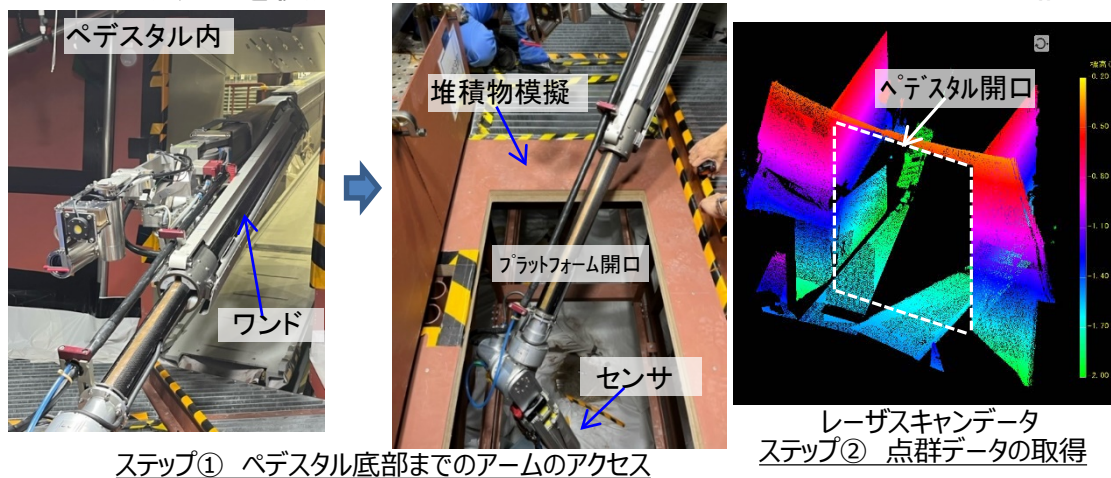
ステップ④

T&RF及び、VRとカメラによるペDESTAL底部へのアクセス

*Teach and Repeat File:アーム各軸の動作を設定したファイル

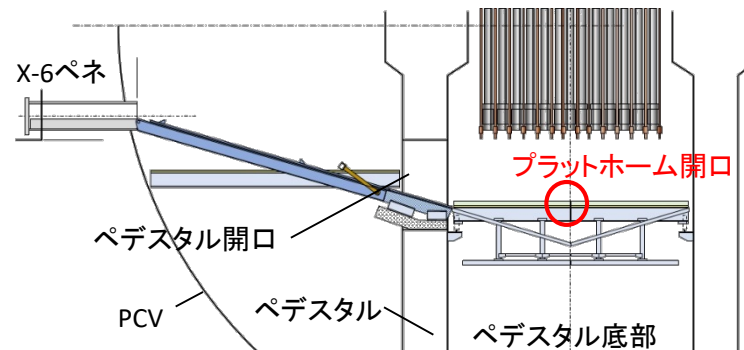
*VRシステム: Virtual Reality System。アーム周辺構造物の点群データを反映し、アームの干渉回避チェックが可能。

- ・VR精度の把握
- ・カメラ視認性の確認



ステップ① ペDESTAL底部までのアームのアクセス

レーザスキャンデータ
ステップ② 点群データの取得

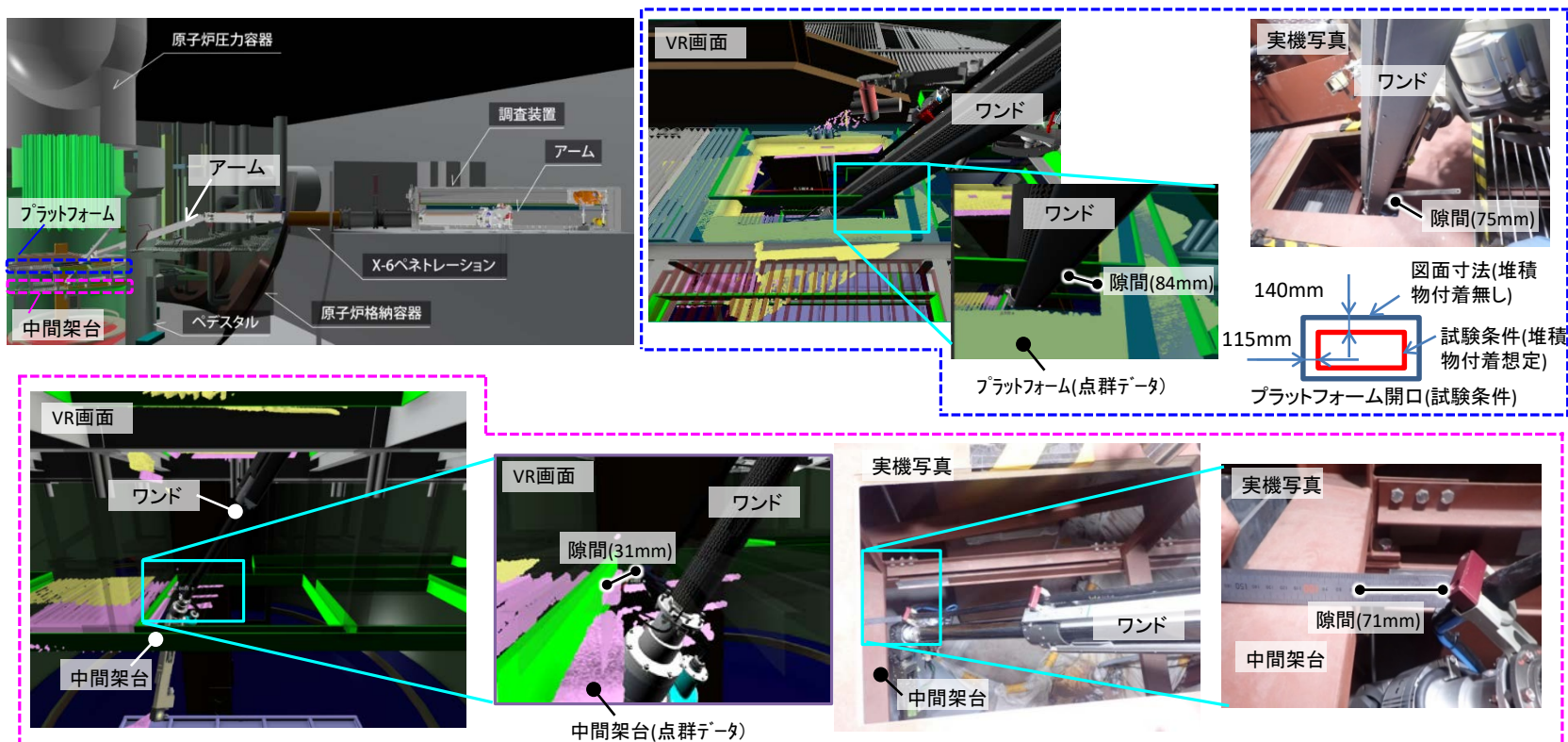


4.1 アクセス・調査装置

(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)ペDESTALへのアクセス試験 1)VR精度確認試験

【試験結果】狭隘部であるプラットフォームや中間架台等の通過に関し、アーム干渉の有無を判断可能なVR精度を有しており、VRを使用してペDESTAL底部までアームがアクセス可能であることを確認できた。

部位(狭隘部)	VR上の隙間	実測隙間	誤差	評価
プラットフォーム	84mm	75mm	9mm < 隙間75mm	VRにて干渉回避可能
中間架台	31mm	71mm	40mm < 隙間71mm	VRにて干渉回避可能



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)ペDESTALへのアクセス試験 2)フル遠隔アクセス試験

【目的/位置づけ】

これまでの試験では、遠隔操作によるアーム運転を実施しているが、作業員がアーム位置を現場で直接目視確認して必要に応じて運転員に声掛けを行っている。本試験では、1F現地の状況を考慮し、作業員から運転員への声掛けを排除した完全フル遠隔の試験を行う。

【試験条件】

項目	試験条件
装置	アーム単体、ワンド及びレーザスキャナ搭載条件
アクセスルート	アームの折り畳み状態(ホームポジション)から、延長管/X-6ペネ接続構造/X-6ペネ⇒ペDESTAL内部⇒プラットフォーム開口⇒ペDESTAL底部までのルート(往復)
X-6ペネ設置位置	進行方向左側に30mm、高さ方向に+30mmオフセット(現地据付精度等によるズレを保守側に想定。オフセット量については運転員に周知しない)
作業員の声掛け	無し(運転員はアームに搭載しているカメラ映像、VR表示に基づいてフル遠隔操作を行う)

【運転方針】

場所	運転方針
ホームポジション～X-6ペネ通過	カメラ映像による運転。アーム位置は予め作成したセル画とカメラ視野により判断する。
X-6ペネ通過後～ペDESTAL底部	VR表示とカメラ映像による運転。

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)ペDESTALへのアクセス試験 2)フル遠隔アクセス試験

【試験結果】

ホームポジション～X-6ペネ通過

・カメラ映像とセル画に基づきフル遠隔操作でアームを運転した。X-6ペネは通過できたが、X-6ペネ通過時にアームとX-6ペネの干渉(軽微な接触)が数回発生した。また、復路においては、アーム進行方向が後方側となるが、カメラ視野が不足しており、カメラの追加が必要であることが分かった。

①モニターでセル画と実機とのズレを確認

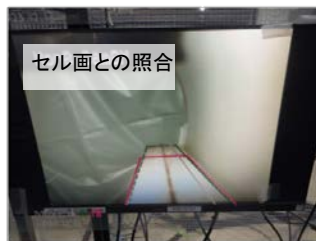
ズレ判定
ズレ無
ズレ有

②カメラ映像とセル画を頼りにアーム位置を微修正し、ズレを解消

(必要に応じ)VRでのシミュレーション

③次のアーム動作(アームを前進)

運転フロー



X-6ペネ内面とケーブル支持金具が接触

プラットフォーム

ワンド

ペDESTAL底部へのアクセス
(干渉なし)

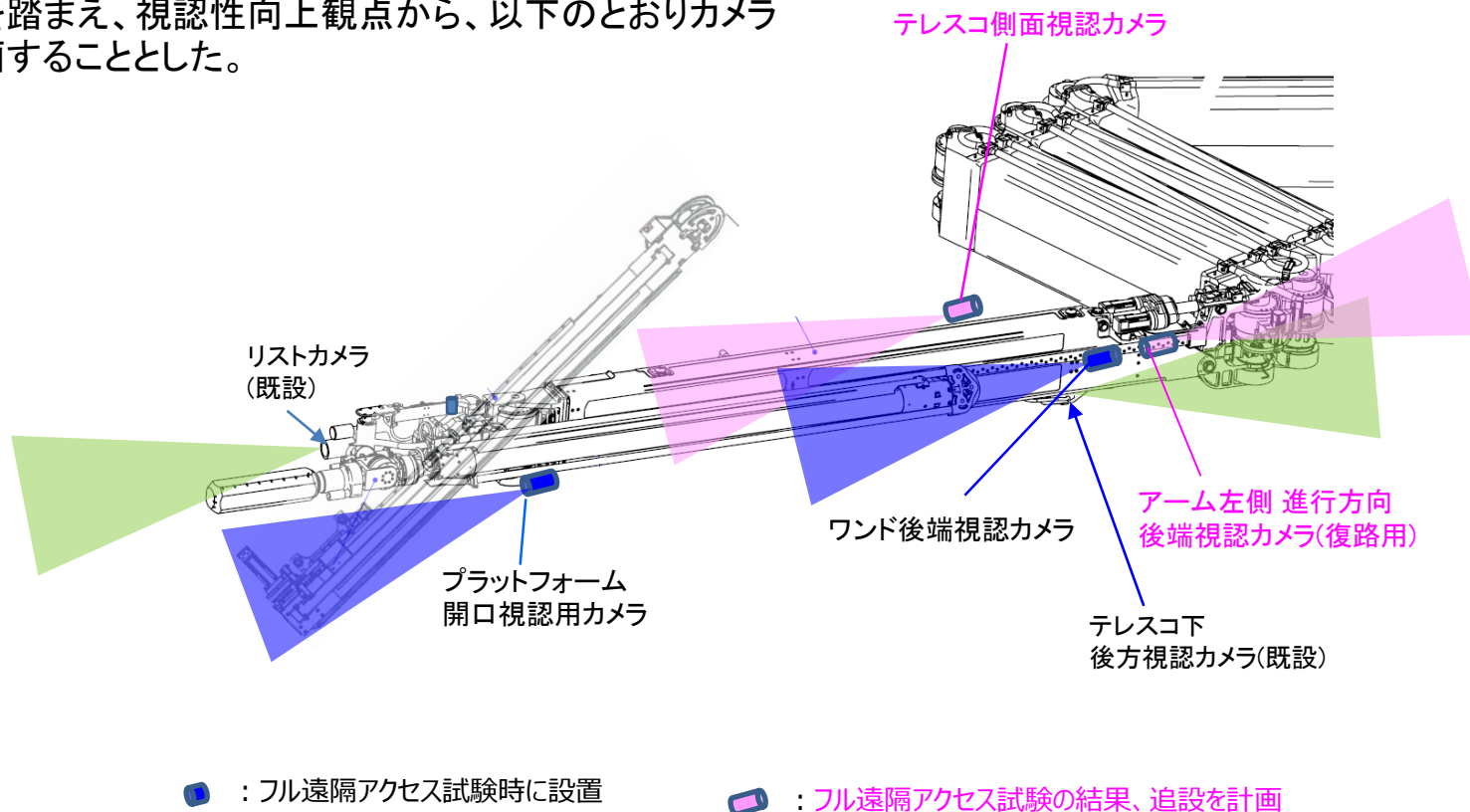
X-6ペネ通過後～ペDESTAL底部

・VR表示及びカメラ映像に基づきフル遠隔操作でアームを運転し、障害物との干渉無くペDESTAL底部までアクセスできた。また、復路においても同様に問題なく運転できた。

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 (i)アームの検証試験
(c)ペDESTALへのアクセス試験 2)フル遠隔アクセス試験

試験結果を踏まえ、視認性向上観点から、以下のとおりカメラ追設を計画することとした。



カメラ追設計画

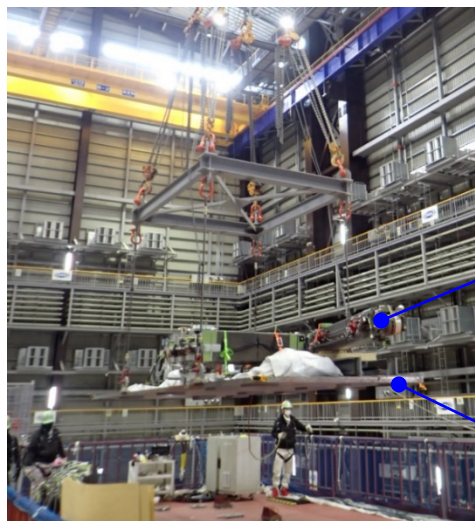
4.1 アクセス・調査装置

(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 (d) アームの組込み

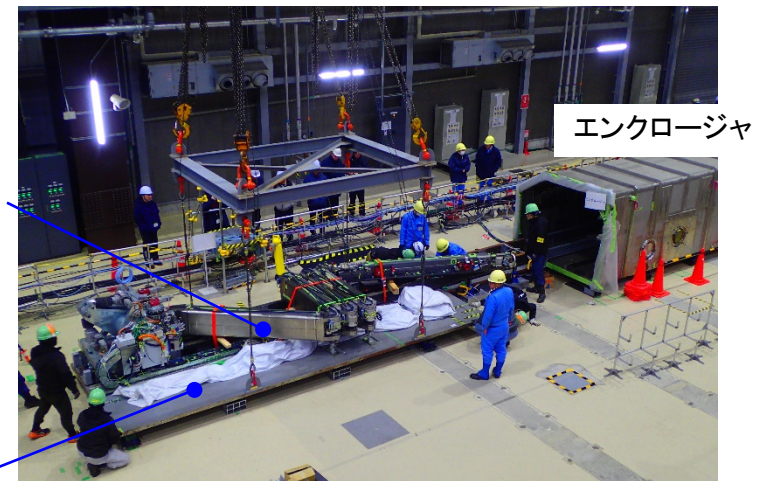
- これまでアーム単体で試験を実施してきたが、エンクロージャにアームを組込んだ状態での試験を実施するため、エンクロージャ内へのアーム組込を実施。



エンクロージャの準備作業状況



モックアップ架台から吊上げ

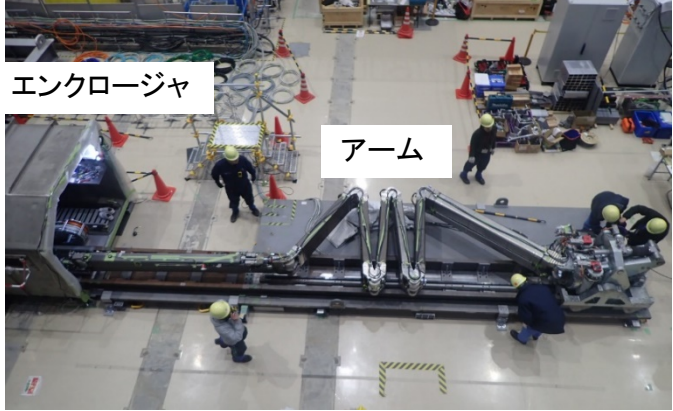


床上エンクロージャ後に仮置き

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

(d) アームの組込み



アーム組込み前の変形完了状態



アームの組込み作業状況



アームの組込み作業状況

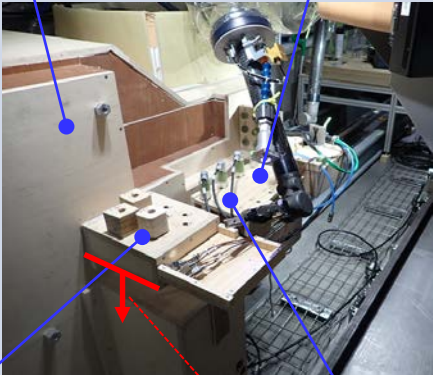
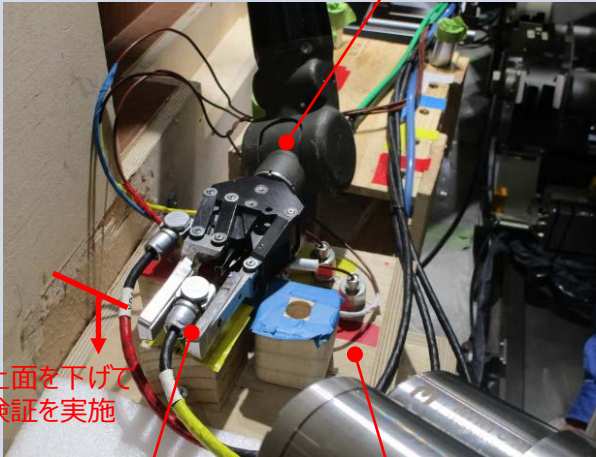


アーム組込み完了状態

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) センサ用外部ケーブル取付／取外し

検証項目	櫛葉モックアップ試験(令和4年度)の 検証結果/要改善事項	櫛葉モックアップ(令和5年度) 試験結果
バイパスジャンクションボックスへのコネクタの取り付け	<p>・バイパスジャンクションボックス／PSCBへの取付けの作業性を確認し、作業可能な見通しを得た。</p> <p>・課題として、バイパスジャンクションボックスを下げた方が作業性がよいこと等を確認。(実機改良の可否を踏まえて改善)</p> <div data-bbox="608 696 1197 1256">  </div>	<p>・バイパスジャンクションボックスの台座構造の見直しを模擬した(上面を下げた)モックアップ設備により作業性の検証を実施。作業性が改善され、問題なく作業できることを確認した。</p> <p>・実機アームの改造を次頁のとおり実施。</p> <div data-bbox="1255 668 1901 1263">  </div> <p>モックアップ設備により改善効果を確認。</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

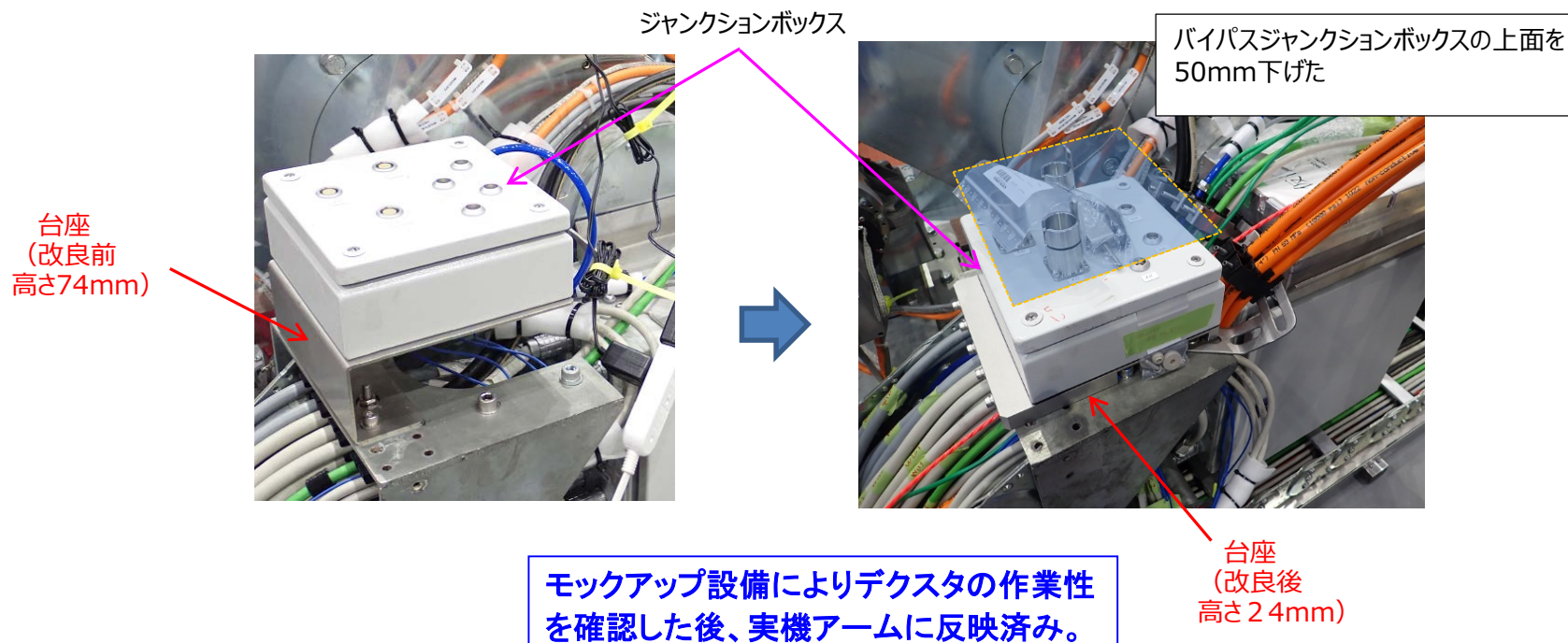
(a) センサ用外部ケーブル取付／取外し

改良点

・実機アームのジャンクションボックスの取付部の台座構造を見直して、ジャンクションボックスの設置高さを50mm下げ、ジャンクションボックス上方の作業スペースを拡大した

試験結果

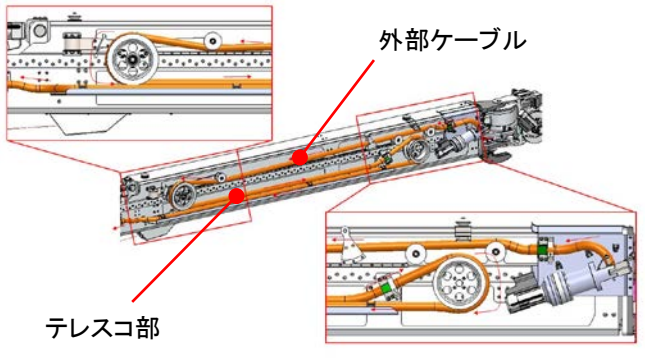
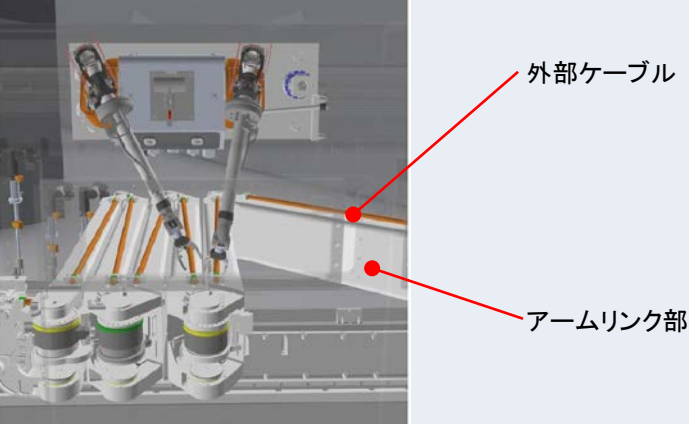
・デクスタの可動領域の上限以下でコネクタ勘合作業のための十分な高さが確保され、コネクタの取付時の作業性が改善した



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 (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	要改善事項	櫛葉モックアップ試験結果
<p>外部ケーブルのテレスコへの取付</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・デクスタによる取付け／取外しは可能であるものの、嵌合する取付金具とケーブルカラーの形状が台形であるため、向きを合わせる必要があった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・外部ケーブルの取付金具とカラーの嵌合形状を円錐台に変更し、テレスコへの取付けにあたり、向き合わせが不要となることを確認した。 (詳細は次頁)
<p>外部ケーブルのリンクへの取付</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期設計ではデクスタがケーブルトレイと干渉するため、ケーブルトレイ下の取付金具に外部ケーブルの取付け不可であった。 ・取付金具の構造を変更することで取付金具へのアクセスが可能となり、リンクへの取付け／取外しが可能となったが、取付向きを合わせる必要があった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・外部ケーブルの取付金具とカラーの嵌合形状を円錐台に変更し、リンクへの取付けにあたり、向き合わせが不要となることを確認した。 (詳細は次頁)

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

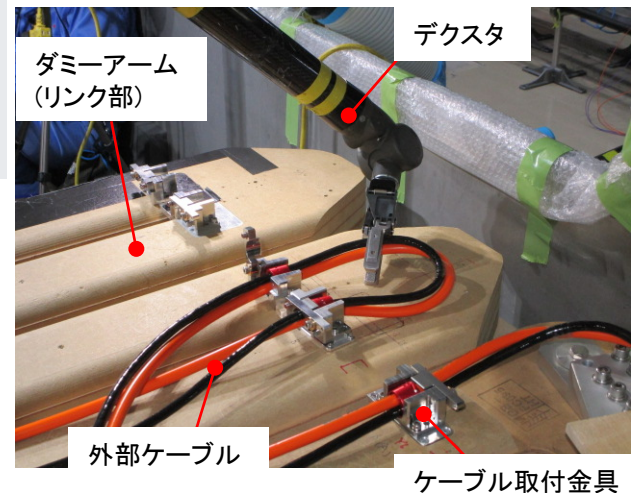
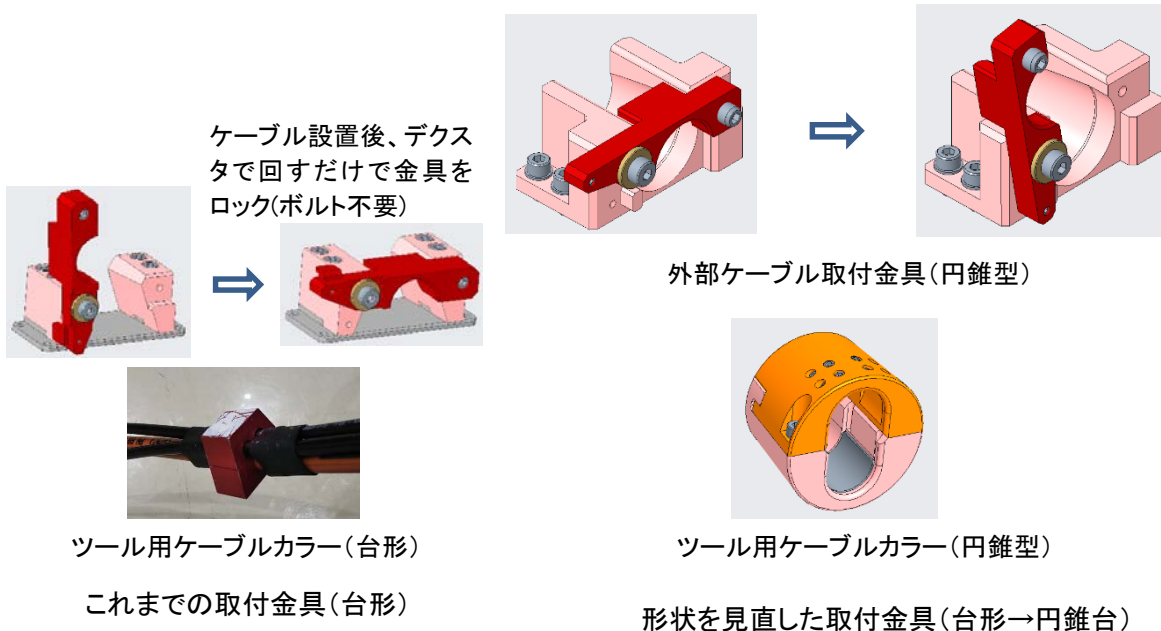
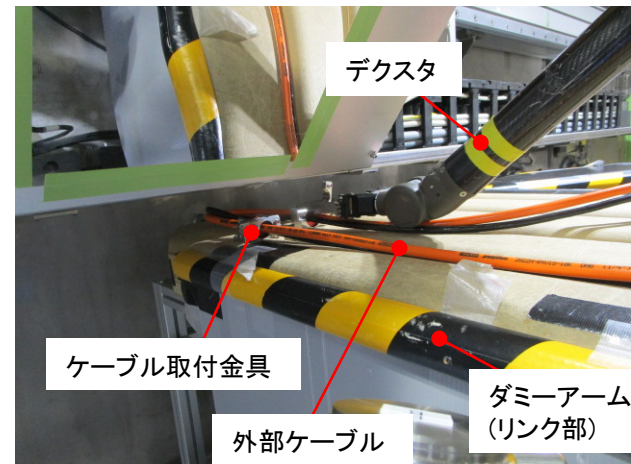
(b)ツール用外部ケーブル取付/取外し

着眼点

・ケーブルカラーの形状見直し(台形→円錐台)

台形のケーブルカラーを取付金具に差し込むためには、向きを合わせる必要があり、ケーブルが固くてねじりにくいことから、取付けに時間を要した。

また、ケーブルカラーに角があると取付作業時に周囲の構造物と引掛かりやすいことから、ケーブルカラーの形状を円錐台に変更した。



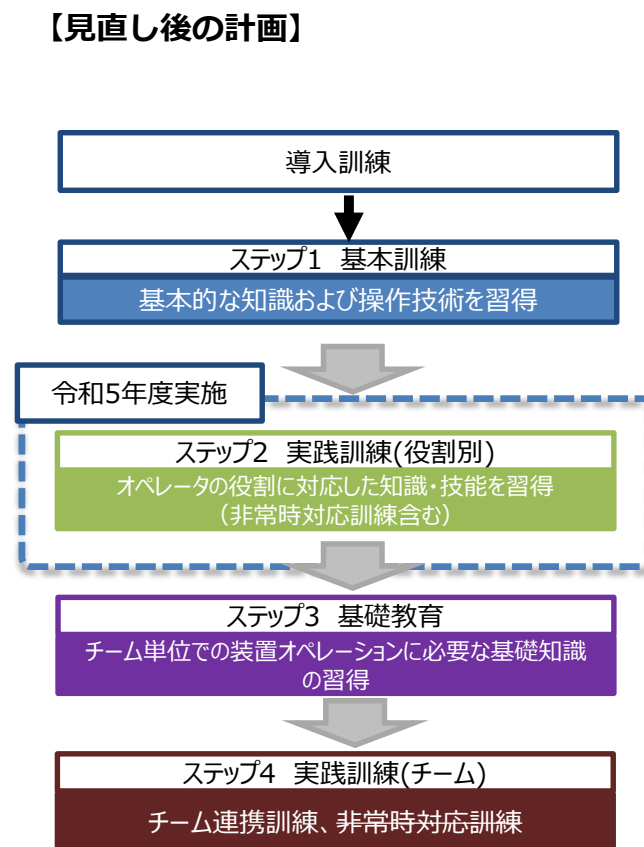
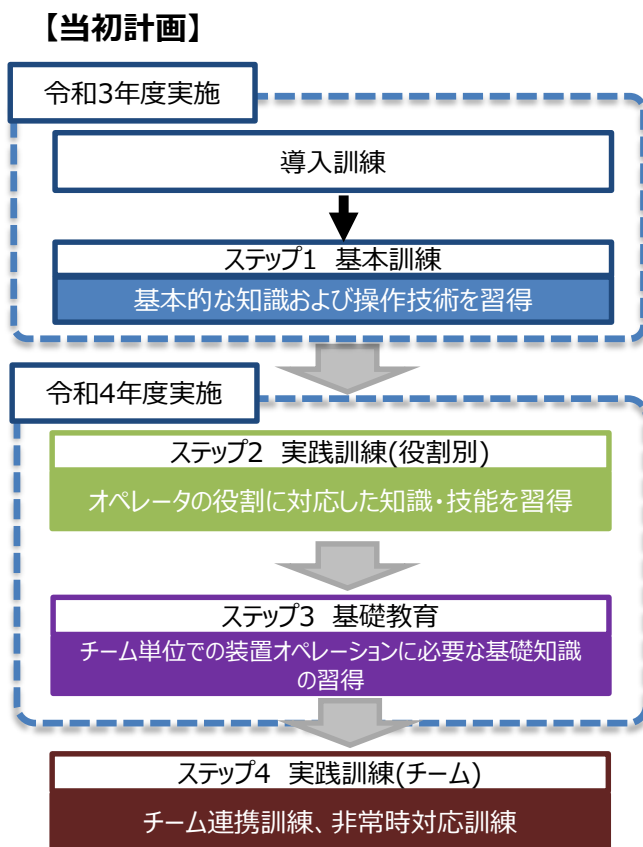
ツール用外部ケーブルのリンク部への取付け

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、それに沿った実践訓練を継続実施中。(本年度は、ステップ2を実施し、来年度はステップ2、4を実施予定)



4.1 アクセス・調査装置

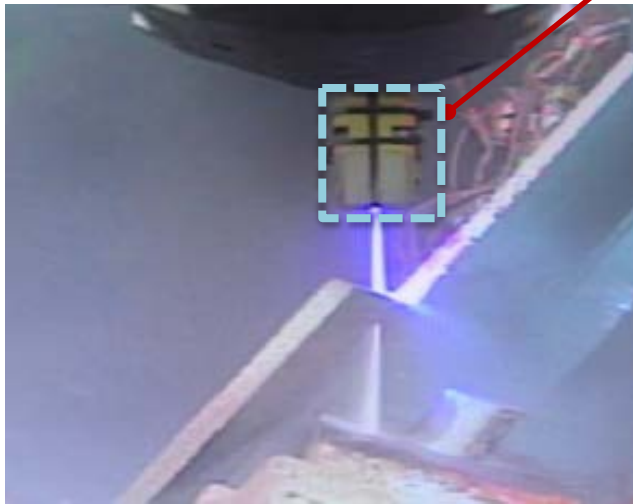
(2) 作業訓練

ii. 実践訓練の結果

BO※2の訓練

- ブーム単体検証を通じた実践訓練のうち、AWJ切断試験、ブームアクセス試験、フル遠隔試験を通じて、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。
- ブーム単体検証及びワンスルー検証を通じた実践訓練は、令和6年度も継続実施予定。

AWJツールノズルホルダ



AWJ切断試験を通じた
訓練状況（オペレーション）

ブームカメラ映像



ブームアクセス試験を通じた
訓練状況（セル画作成）

RO※1

BO※2



フル遠隔試験を通じた
訓練状況（オペレーション）

※1 RO：オペレーター

※2 BO：ブームオペレーター

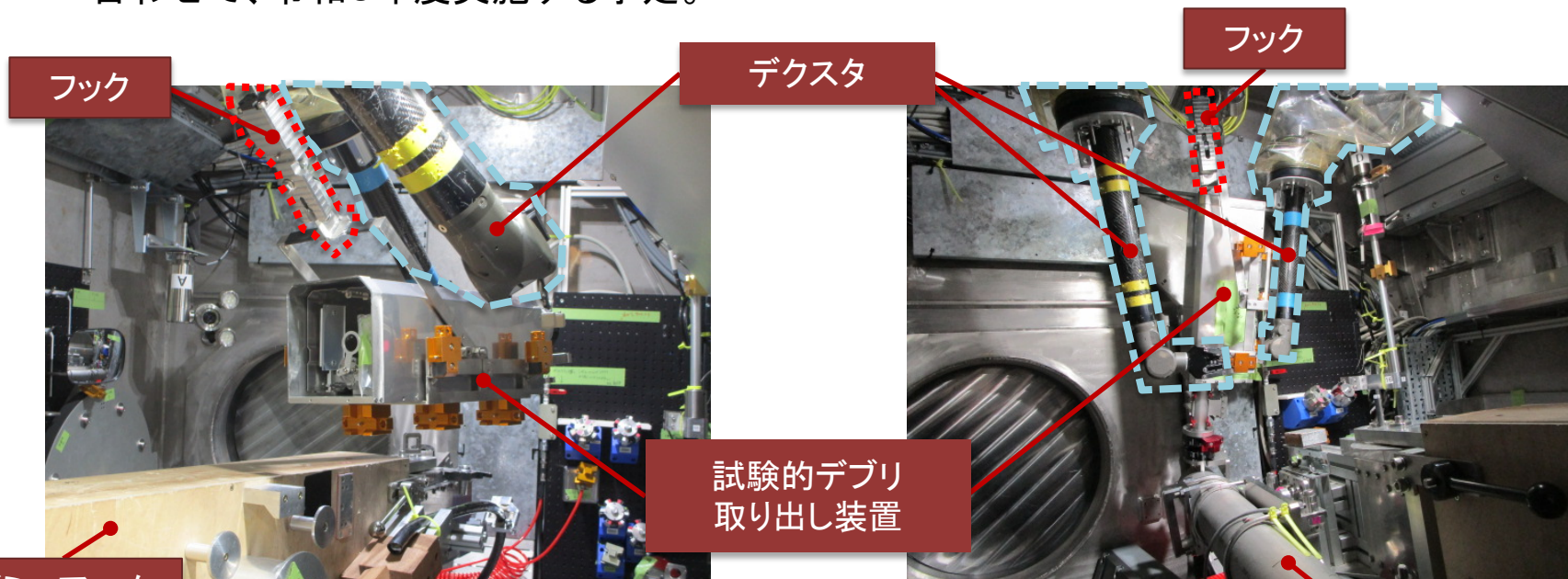
4.1 アクセス・調査装置

(2) 作業訓練

iii. 実践訓練の結果

MO※1、カメラオペレータの訓練

- デクスタ単体検証を通じた実践訓練により、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。
- 訓練を通して得られた知見・手順等については、オペレーション手順書として纏めており、現場実証に向けて来年度も継続して訓練を実施し、その結果を反映していく予定。
- ブームに付属するカメラの操作訓練は、ブームアクセス試験時のブームの取扱い操作に合わせて、令和6年度実施する予定。



訓練状況（試験的デブリ取り出し装置）

※1 MO：デクスタオペレータ

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

i. 訓練計画

アクセスルート構築のための関連機器は、令和4年度にJAEA櫛葉遠隔技術開発センターにおいてフルスケールモックアップを用いた検証・ワンスルー試験を実施。

エンクロージャ付帯設備のケーブル・ホース類について、ケーブルの敷設アレンジメントならびにケーブルラックの配置・形状、フックの設置箇所などについて、敷設図面へのフィードバックを完了。

令和5年度は、令和4年度の検証において課題となっていたエンクロージャ付帯設備のケーブル・ホースを敷設する順序やケーブルの束ね方(グルーピング)、治具活用による作業員の削減など施工面の詳細について、事前にビジネスパートナーと机上検討を実施した上で、JAEA 櫛葉遠隔技術開発センターにおいて、ケーブル敷設周辺エリアの実物大モックアップを用いたケーブル敷設検証を実施。

- ・検証項目① 代替となる治具の活用による敷設作業員の削減
- ・検証項目② ケーブル・ホース約180本の束ね方(グルーピング)、各束の敷設順序最適化
- ・検証項目③ ケーブル敷設ルート改善による作業の効率化 【アーム・エンクロージャ周り】
- ・検証項目④ ケーブルの離隔、整線の最適化 【水密扉近傍のケーブル交差部】

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

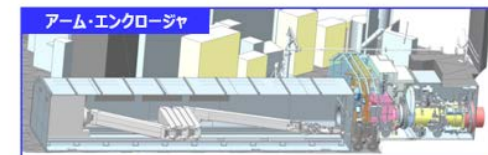
ii. 付帯設備ケーブル・ホース敷設工事概要

原子炉建屋内外に敷設する約300本の内、180本は高線量下の原子炉建屋内でケーブル・ホースを損傷させる事なく、限られた作業時間内で、安全に敷設する必要がある。

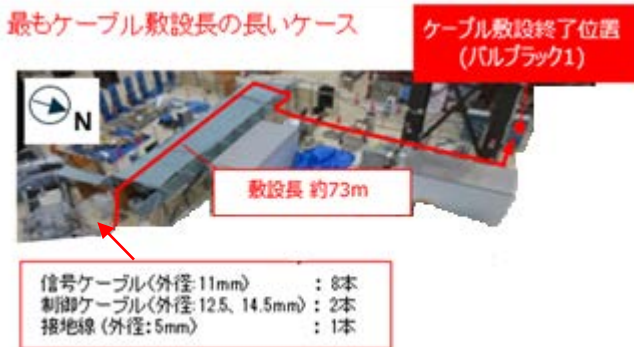
- 高線量下での作業時間：約15分 (①)
- 既設ケーブルが入り乱れる中での作業 (②)
- 離隔距離を踏まえた整線作業 (③)
- 長距離のケーブル敷設 (④)

凡例 ※ () 内は数量

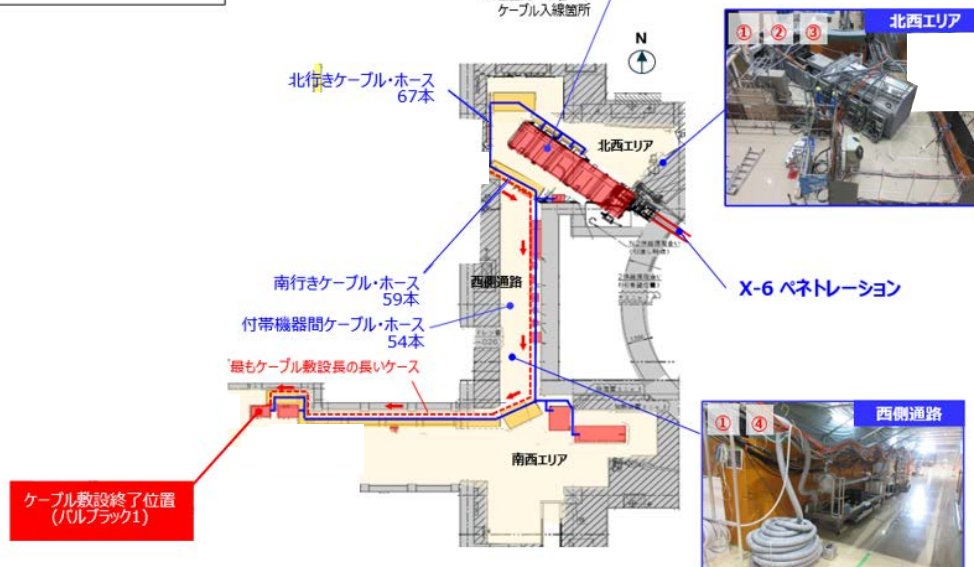
	アーム型装置及び付帯機器 (12基)
	ケーブルラック (14基)
	敷設ケーブル・ホース (180本) 動力、信号、制御、ホース



※建屋内への唯一のケーブル入線箇所



※今回敷設したケーブル、ホース類について、R/B建屋外から水密扉を介したケーブル、ホース入線の敷設ルートに問題ない事を確認済



福島第一原子力発電所 2号機原子炉建屋内

※写真は2022年JAEA構築フルモックアップ検証時

付帯設備ケーブル・ホース敷設工事概要

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

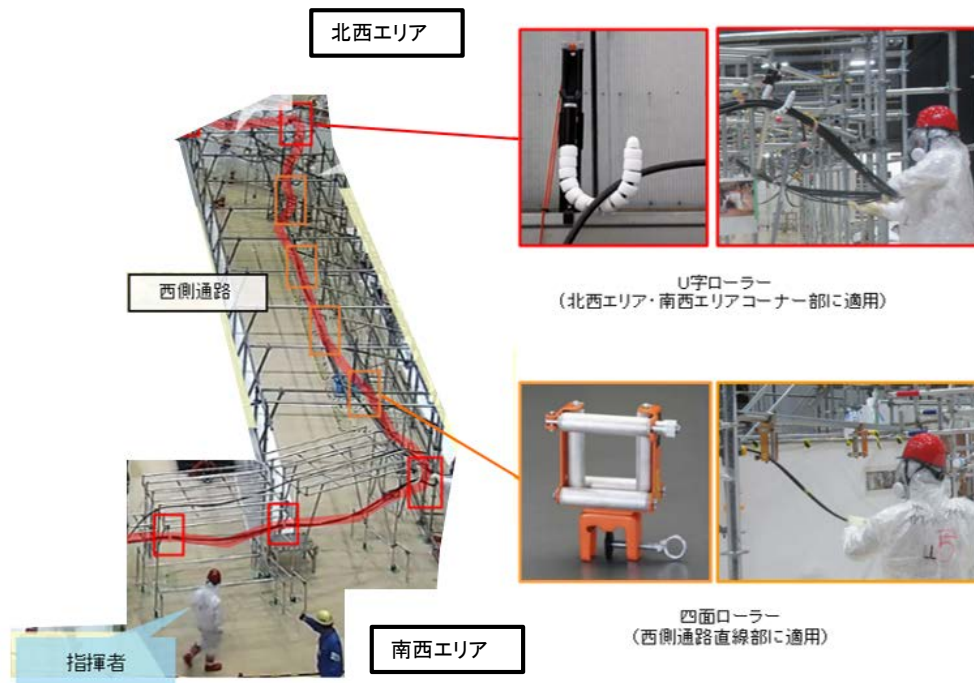
(1) 作業訓練

iii. 訓練結果(被ばく低減及び品質維持検証)

検証項目① 代替となる治具の活用による敷設作業員の削減

ケーブルを引き回す作業員の代替として、ケーブルローラーの適用を検証。
 ⇒ 事前検討時の目論見通り作業員の削減(被ばく低減)が可能である事を確認。
 ⇒ 敷設作業時のケーブルにかかる負荷低減(品質維持)にも寄与する事を確認。

ローラー適用により、敷設作業員削減



4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

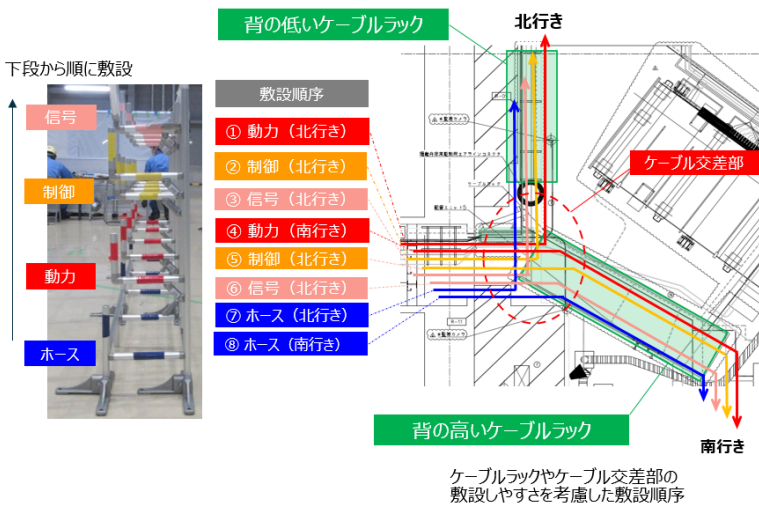
iii. 訓練結果(被ばく低減及び品質維持検証)

検証項目②ケーブル・ホース約180本の束ね方(グルーピング)と各束の敷設順序の最適化検討

計画的かつ効率的に敷設作業を行い、被ばく低減につなげるべく、敷設に最適なケーブル束の見極め、ならびにケーブルラックやケーブル交差部での敷設のしやすさを考慮した敷設順序を検討。

⇒ 日・作業班毎のスケジュールに落とし込み、成立性を確認。

ケーブルのグルーピングにより180本⇒72束 (▲60%)



RB建屋内ケーブル・ホース敷設 (3日目)										
作業班	管種	管径	種類	数(本)	束	人員・時間			被ばく量 (mSv)	
						作業員 (人)	時間 (sec)	作業員	放射	
4班	バルブラック1	プラントルーム⑥	信号	1	○	9	2	594	4.10	0.02
			信号	1						
			信号	1						
			信号	1						
			信号	1						
			信号	1						
			信号	1						

日・作業班毎の敷設スケジュール

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

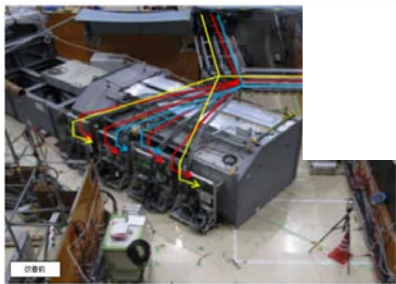
iii. 訓練結果(被ばく低減及び品質維持検証)

検証項目③ ケーブル敷設ルート改善による敷設作業の効率化

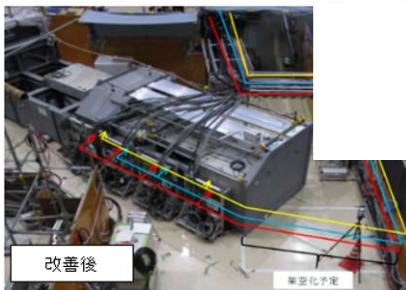
事前検討を行った新たなケーブルルートについて敷設検証を実施。

⇒ 改善前と比較し、ケーブル敷設位置が低くなった事、ケーブルラックの設置によりケーブル離隔作業が容易となった事、コネクタ接続時のアクセス性改善等作業性改善の効果を確認。

ケーブル敷設ルート改善 ⇒ 作業性改善



ケーブル敷設ルート改善前



ケーブル敷設ルート改善後



ケーブル接続先

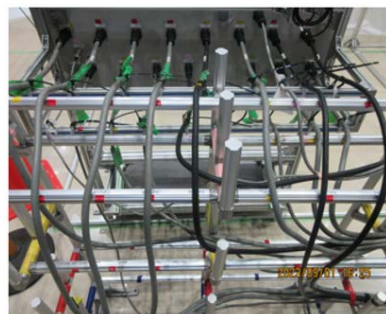
ケーブルラック追設

ケーブルラック追設

新ルートのケーブル敷設検証状況



コネクタ接続時のアクセス性確認



ケーブルラック追設



4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

iii. 訓練結果(被ばく低減及び品質維持検証)

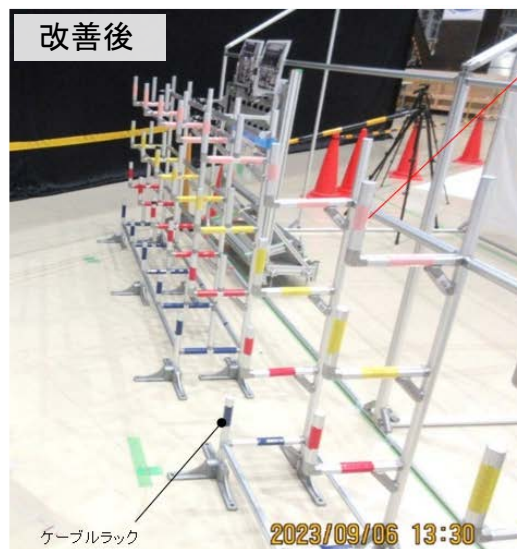
検証項目④ ケーブルの離隔、整線の最適化

ケーブル敷設箇所全般にケーブルラックを適用し、離隔・整線を実施。

⇒ 床面でのケーブル踏み付け等のリスクを排除(品質維持)

ケーブルラック及びケーブルの双方にケーブル種別を表す色識別を実施。

⇒ 敷設作業時に敷設位置に迷う事や、敷設間違いによる手戻りを防止し
作業員の無駄な被ばくを排除。



ケーブルラック、ケーブル双方に種別を表す色識別

敷設するケーブル束



令和4年 JAEA櫛葉検証時

今回の敷設検証

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

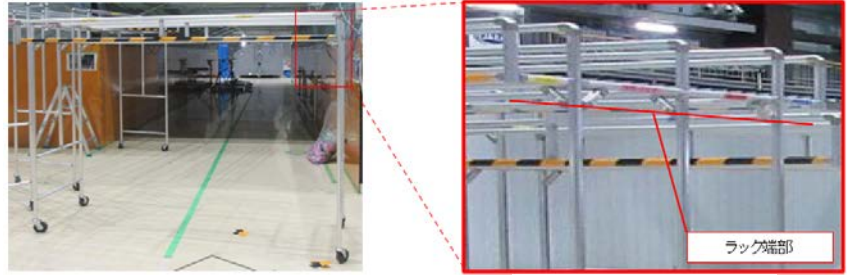
iii. 訓練結果(被ばく低減及び品質維持検証)

検証項目④ ケーブルの離隔、整線の最適化

ケーブルラックの改善として、端部に長短の差をつけ、ケーブルの垂れ下がりの起点をケーブル種別毎に変える事で離隔距離を確保。

⇒ ケーブルの混線がなくなる事により、敷設作業時のケーブルへの無理な引っ張りを回避し品質維持に寄与できる事を確認。

改善前

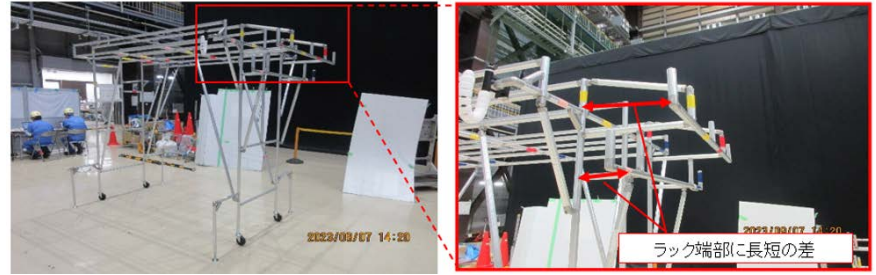


ケーブルラック

ケーブルラック端部

ラック端部

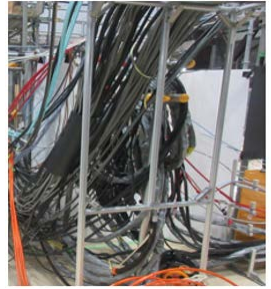
改善後



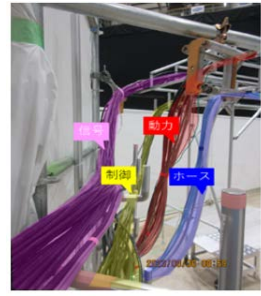
ケーブルラック

ケーブルラック端部

ラック端部に長短の差



ケーブル敷設状態



ケーブル敷設状態

異種ケーブルを離隔

令和4年 JAEA櫛葉検証時

今回の敷設検証

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

iv. 訓練結果まとめ及び今後の予定

『被ばく低減』

2号機原子炉建屋内(高線量、狭隘部、暗所)でのケーブル・ホース敷設作業について実物大のモックアップを用いて成立性の検証を行い、『被ばく低減』の大きな成果目途(683→384人・mSv)を得た。

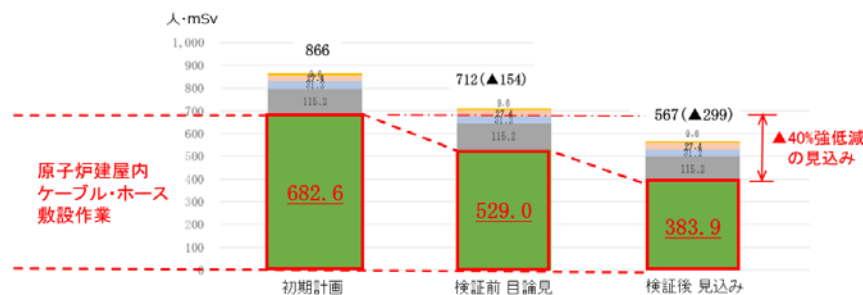
『品質維持』

ケーブルローラー適用による敷設時のケーブルへの負荷低減、ケーブルラックを使用しでのケーブル敷設・整線・離隔により、ケーブル踏み付け防止、混線した状態での敷設作業によるケーブル損傷を回避、品質維持に寄与する事を確認。

今回のモックアップ検証結果をトレーニング計画へフィードバックし、現地前トレーニングにて作業員の習熟を図り、現地工事に臨む予定。

		作業者 (人)	指揮者 (人)	放管 (人)	班数 (班)	ケーブル (本数)	被ばく (人・mSv)
1日 目	建屋外⇒エンクロ (動力・制御)	60 (120)	21 (16)	21 (16)	7 (8)	43 (30)	55.4 (113.8)
2日 目	建屋外⇒エンクロ(信号) 建屋外⇒付帯設備(動力)	69 (120)	24 (16)	24 (16)	8 (8)	35 (30)	73.9 (113.8)
3日 目	建屋外⇒付帯設備 (制御・信号)	62 (120)	21 (16)	21 (16)	7 (8)	33 (30)	65.2 (113.8)
4日 目	建屋外⇒付帯設備(信号) 建屋外⇒ホース 建屋内機器間のケーブル	56 (120)	24 (16)	24 (16)	8 (8)	41 (30)	58.6 (113.8)
5日 目	建屋内機器間のホース	77 (120)	21 (16)	21 (16)	7 (8)	14 (30)	67.0 (113.8)
6日 目	建屋内機器間のホース	71 (120)	21 (16)	21 (16)	7 (8)	13 (29)	63.8 (113.8)
	計	395 (720)	132 (96)	132 (96)	44 (48)	179 (179)	383.9 (529.0)

地人工と想定被ばく量(見込み) ※()内は敷設検証前の計画値



付帯機器・ケーブル敷設の被ばく量推移

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

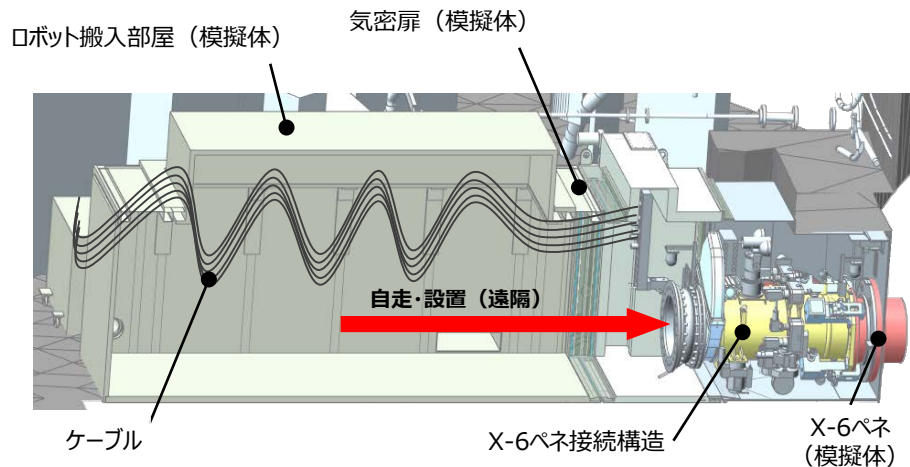
(1) 作業訓練

v. 現地トレーニングの実施

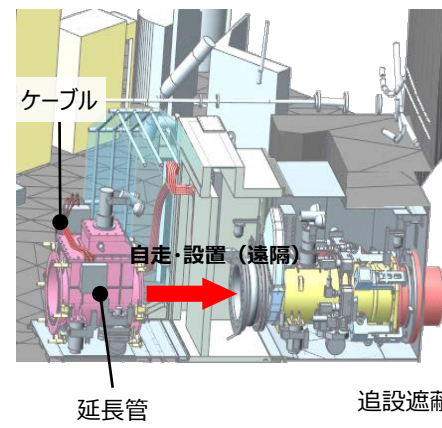
X-6ペネ接続構造・延長管、追設遮蔽板 現地トレーニング

アクセスルート構築関連機器の内、令和6年5月現地工事着手のX-6ペネへの接続構造・延長管、追設遮蔽板据付について、JAEA櫛葉遠隔技術開発センターにおいて、令和6年1月～3月にかけて作業員の習熟トレーニングを実施。

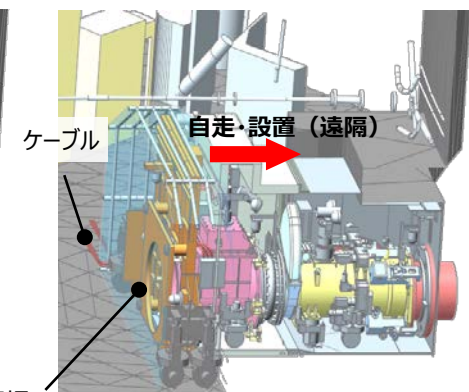
これまでの検証で手順を確立した上で、今回のトレーニングでは『①実寸大のモックアップを準備』、『②実際の放管保護具を着用』、『③現地工事要領書を事前に作成』、『④現地で使う実際使用する機材を準備』、『⑤現地で実際に工事する人を招集』、『⑥先行工事の戦訓集を反映』の6項目を実施。トレーニングでは、詳細手割を作成し、被ばく低減の見込みを得ることを目的とした。



① X-6ペネ接続構造の設置



② 延長管の設置



③ 追設遮蔽板の設置

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

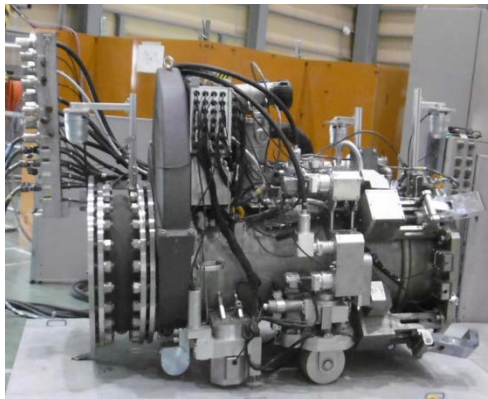
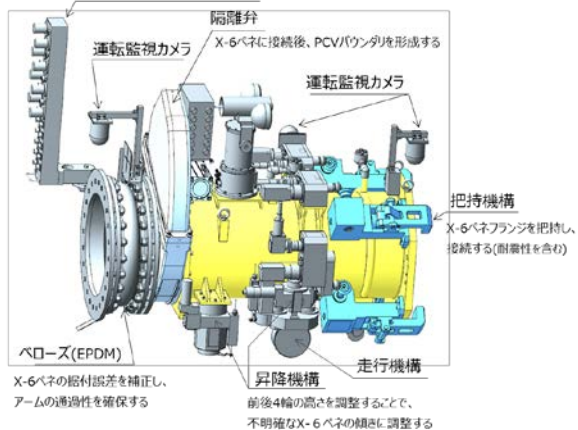
(1) 作業訓練

v. 現地トレーニングの実施

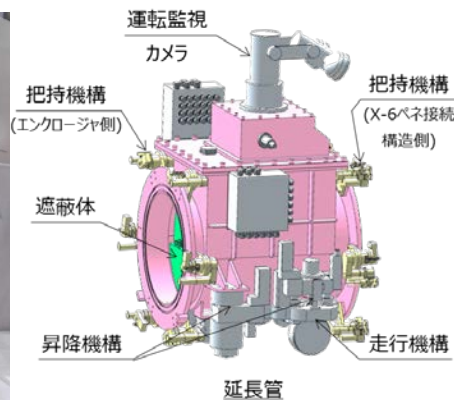
接続構造・延長管・追設遮蔽板、閉止蓋フランジは実機を使用。

① X-6ペネ接続構造

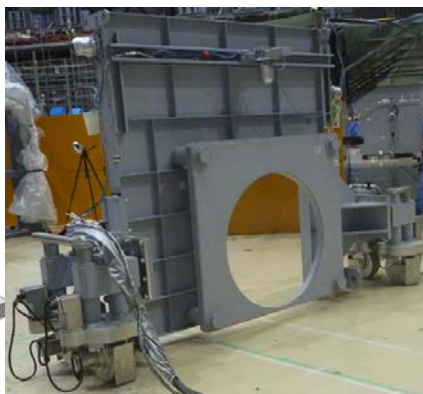
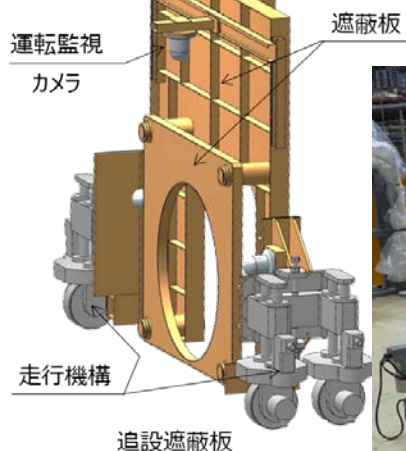
ケーブルマネジメント機構



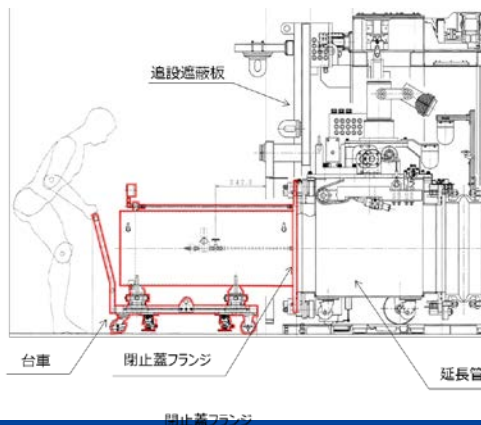
② 延長管



③ 追設遮蔽板



④ 閉止蓋フランジ



4.2 アクセスルート構築のための関連機器

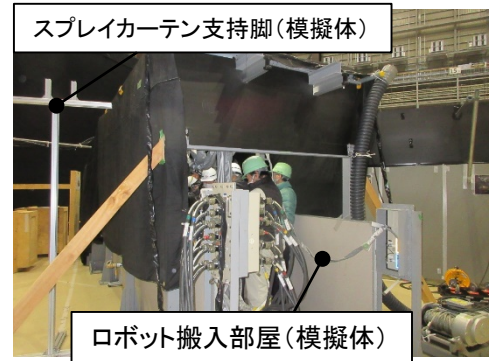
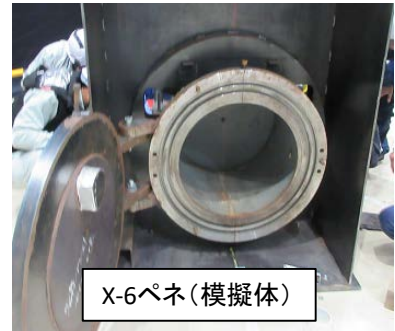
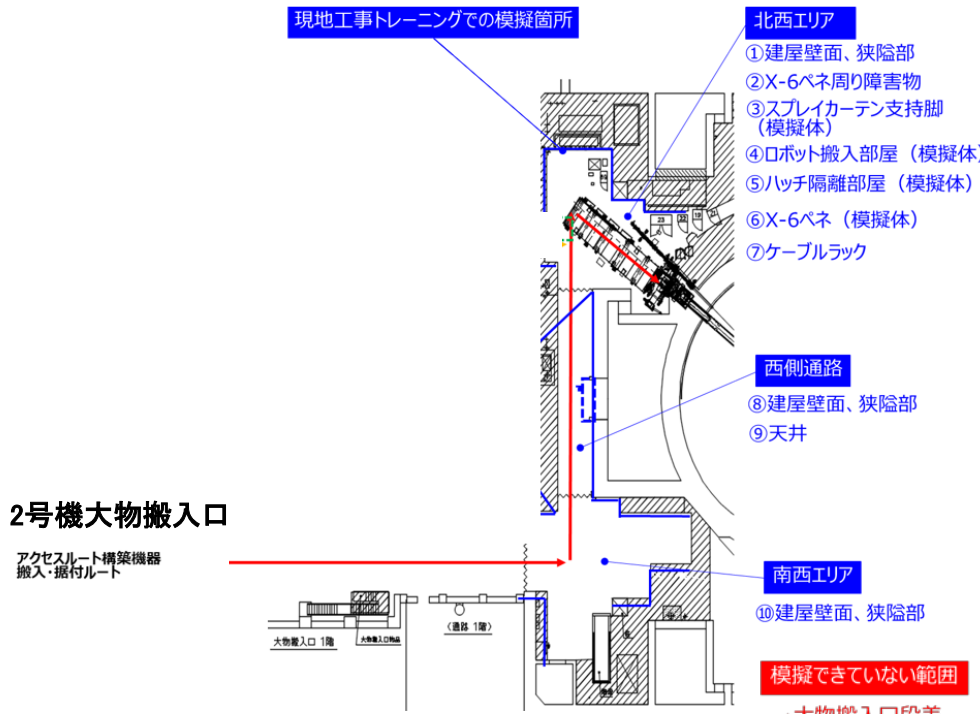
1/1スケールで実施
装備はR装備

(1) 作業訓練

v. 現地トレーニングの実施

トレーニング模擬は1/1スケールで実施。

トレーニング時の保護具については、現地と同等の装備を着用して実施。



模擬できていない範囲

- ・大物搬入口段差
- ・床面状態
- ・床ファンネル、ハッチ
- ・現地作業環境 (線量・明るさ)

※機材搬入は、2号屋外ヤードから大物搬入口を介して建屋内に実施する。今回検証を行った接続構造・延長管・追設遮蔽板関連機材は、手持ちあるいはフォークリフトにより大物搬入口内へ搬入される計画であり、計画通りトレーニングを完了した。

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

V. 現地トレーニングの実施

詳細手割を作成し、全行程に誰が何をするのか明確化

No.	要領書 番号・ 区分	作業ステップ	作業概要	次工程移行の判定条件	客先立会	作業場所	備考
3	6-4	<ul style="list-style-type: none"> ロボ部屋内停止位置 1mマーキング 気密扉微開位置マーキング 	<ul style="list-style-type: none"> ロボ部屋内に装置停止位置マーキングを行う。 ①AとEは靴カバーを装着し、ロボ部屋内の気密扉から接続構造停止位置 1mの床面マーキングを行う。(搬入口から入域) ロボ部屋内、気密扉「微開」位置マーキングを行う。 ②AとEは靴カバーを装着し、気密扉「微開」位置、230mmの床面マーキングを行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ロボット搬入部屋内の床面に、気密扉端から1mの位置にマーキングが完了して、カメラ映像が操作盤から確認出来ること。 気密扉「微開」位置のマーキングが完了すること。 	無	R/B内	
4	7-1	中継盤・収納盤－接続構造 ケーブル接続 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">敷設のみ</div>	<ul style="list-style-type: none"> 中継盤・カメラ機器収納盤～ケーブルマネージメント機構間のケーブルを接続する。 ①Aの合図でBとCがケーブルが収納されているメッシュカゴ①を南西エリアから北西エリアへDの誘導で運搬しフットストッパーをロックする。 ②Bがケーブルを確認して引き出しAとCとDで動力ケーブル*2本を敷設する。 ③Bがケーブルを確認して引き出しAとCとDでカメラケーブル*1本とLANケーブル*1本を敷設する。 ④Aの合図でBとCとDでケーブル整線を行う。ケーブル端部ではなくジッパーチューブ端部に合せる。 ⑤BとCとDはケーブル端部、養生袋の上に置く。 ⑥メッシュカゴを北西エリアから南西エリアへAとDで運搬し片付。 		無	R/B内	※ケーブル結線後のWチェック(接続場所確認)は作業中に実施する (確実に接続されているかの確認は作業後に実施)
5	6-1	中継盤・収納盤－接続構造ケーブル接続	<ul style="list-style-type: none"> 中継盤・収納盤～接続構造間のケーブル接続を実施する ①作業員A・Bが盤側の結線を行う。 ②作業員C・Dが装置側の結線を行う。 ③ルートを確認しながら結線後、作業員A・Bで盤側作業員C・Dで装置側の整線を行う。 ④作業員Dはウィンチ用のフックが掛けられていることの確認を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 以下の自走用ケーブルを敷設し、コネクタ接続が完了すること。 ①カメラ機器収納盤～ケーブルマネージメント機構：4本 ②中継盤～ケーブルマネージメント機構：9本 lanケーブルが負荷の無い状態で固縛されていること ケーブルの束がケーブルマネージメントの取手に固定されていること 	無	R/B内	※ケーブル結線後のWチェック(接続場所確認)は作業中に実施する (確実に接続されているかの確認は作業後に実施) No.2 作業ステップ完了時のチェックポイント写真集

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

v. 現地トレーニングの実施

『作業手順の確立』

現地工事に向けて、よりよくした改善事項を追加

事象	原因	対策	実施状況
メッシュパネル内に保管していた6束（ロボット購入部屋内側用3本、外側用3本）のケーブルのうち、ロボット搬入部屋の外側に敷設するケーブル1本を取り出し搬入すべきところ、誤って内側に敷設するケーブル1本を取り出し敷設した。	ケーブルに外側用と内側用と明記されていなかった（ケーブルの色分けのみで識別されていた） 作業員の色分けに関する認識不足	外側と内側のタグの表示を実施 作業員への本事象の周知と表示見直しに関する再教育	3/6に実施済 3/7朝礼、TBM時に周知済。また現地作業要領書にも注意事項を追加し、現地工事時にも、改めて周知徹底する

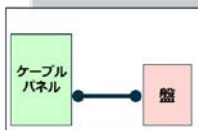


外側敷設ケーブル（黒色テープ）

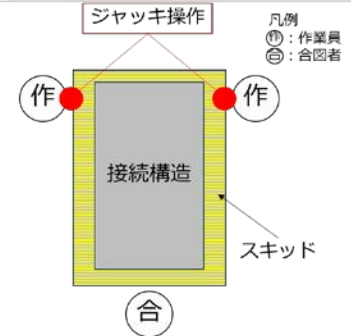


内側敷設ケーブル（灰色テープ）

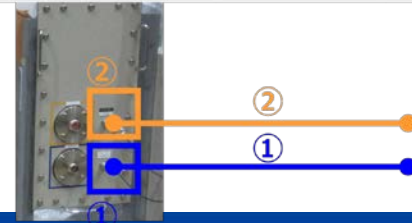
事象	原因	対策	実施状況
コネクタパネル側と盤側のケーブルの向きを間違えて敷設した	コネクタ側/盤側と、大きく表示していたにも関わらず、表示を見ずに、作業実施 ケーブルの向きに関する認識不足	作業員への本事象の周知と表示見直しに関する再教育	3/7朝礼、TBM時に周知済。また現地作業要領書にも注意事項を追加し、現地工事時にも、改めて周知徹底する
ケーブルの向きに関する認識不足	作業開始前に、当該作業の手順や注意事項の周知徹底		
1人作業（ダブルチェックができない環境）	2人作業によるダブルチェックを行う		
正しく接続できず、違和感を感じたにもかかわらず、作業を止めたにもかかわらず、作業を止めたままだった	正しい状態と、正しくない状態を認知できるだけの技量が身につけていなかった（「間違えている」との確証がもてなかった）	追加トレーニングにより技量を向上することで、どの作業においても、作業完了状態に確証が持てるようにする	3/8からの追加トレーニングにて習熟度を向上
違和感を感じつつも、作業責任者に情報伝達しなかった	違和感を感じた際、作業責任者に情報伝達しなかった	作業終了時、作業責任者/ボウシが、作業員に対し、正しく作業完了できたが、確認をする 違和感を感じた際は、即作業を停止し、関係者と協議する文化を醸成する。	3/7朝礼、TBM時に周知済。また現地作業要領書にも注意事項を追加し、現地工事時にも、改めて周知徹底する



事象	原因	対策	実施状況
スキッドに載せた接続構造を設備後、作業員2人でジャッキダウンする際、下降するタイミングにばらつきが生じていた。	現場班長からの声掛けが実施できていなかった。 作業員も、班長からの指示がない中で、作業（1名のみ）を開始した。	作業責任者・現場班長・作業員の役割分担を明確にし、3Wayコミュニケーションを徹底する。	3/7朝礼、TBM時に周知済。また現地作業要領書にも注意事項を追加し、現地工事時にも、改めて周知徹底する



事象	原因	対策	実施状況
ロボット搬入部屋のコネクタパネルにある2カ所の差し込み口（上・下）に対し、上下間違えてケーブルを敷設した	コネクタ/ケーブルそれぞれに、番号タグをつけていたが（上：②、下：①）ケーブル側には、他タグもついており、番号を認識できなかった（上側のケーブルに、①と、1・2・3・・・の別番号タグがついていた）	誤解を招く他のタグは除去し、コネクタ/ケーブルそれぞれに、番号タグのみを残す。（上：②、下：①）	3/6に実施済
上下が逆になって接続しているケーブルであること及びその影響度に対して理解度・危機感が低かった。	上記的対策に含ませて、特に影響度の高い作業に関しては作業責任者から注意喚起を徹底する。		3/7朝礼、TBM時に周知済。また現地作業要領書にも注意事項を追加し、現地工事時にも、改めて周知徹底する



4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(1) 作業訓練

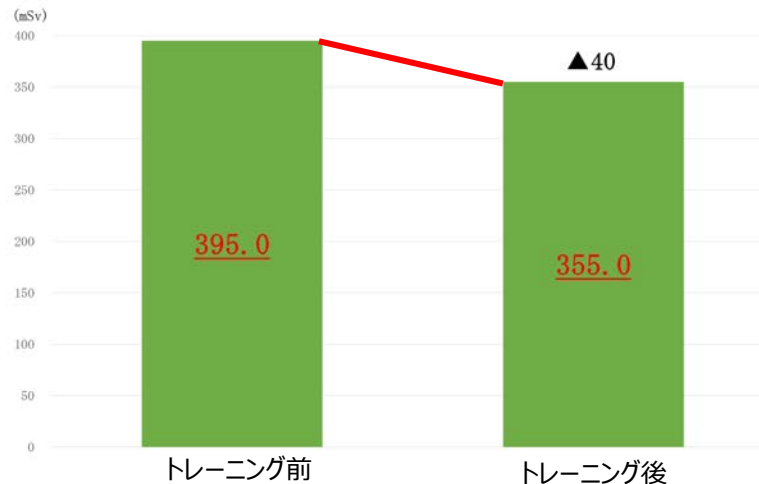
v. 現地トレーニングの実施

『被ばく低減』

今回、X-6ペネ接続構造、延長管、追設遮蔽板の設置及び撤去に関するトレーニングを完了した。これまでのモックアップ検証で抽出した改善事項の手順への織り込み、最新の要領に基づいたトレーニングにより作業員の習熟を図り、当初工事計画通り、実施可能である事を確認した。

また、トレーニング結果に基づき、現地工事被ばく計画の見直しを実施した。作業手順の改善、作業員の習熟による作業時間短縮により、当初計画に対し▲10%低減達成の見込みの結果を得た。(395人・mSv → 355人・mSv)

先行工事(堆積物除去工事)からの水平展開(トレーニング時の客先コメント、現地工事での対応実績等)を現地工事要領書に反映し、万全の準備を整えることができた。



4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(2) X-6ペネ ハッチの開放(1/7)

【令和5年度の進捗状況】

- 福島第一原子力発電所第2号機において、ロボット搬入部屋を設置後、ハッチ開放装置によりボルト・ナットを除去し、X-6ペネハッチの開放を行った。
- ハッチ開放後、ペネフランジ面の清掃、隔離部屋内の清掃、ハッチ開放装置の撤去、片付け等を実施し、次工程作業(X-6ペネ内の堆積物除去)への現場引き渡しを行った。(2023年11月27日)
- 以下に令和5年度の主な実施内容を示す。



ハッチ開放後の状態

【ロボット搬入部屋の設置】

- ハッチ隔離部屋設置後、ロボット搬入部屋をR/B北西エリアに搬入し、付帯機器である救援用巻取装置、回収ボックス、カメラ装置等を設置した後、ロボット搬入部屋を設置し、隔離部屋全体の漏えい確認試験を実施した。



ロボット搬入部屋の搬入



救援用巻取り装置の設置

【ハッチ開放装置の設置】

- ハッチ開放装置をR/B北西エリアに搬入し、ケーブルやホースの整線後、ロボット搬入部屋内に設置した。その後、動作確認を行って正常に動作することを確認した。



ハッチ開放装置のR/B内搬入



ハッチ開放装置ケーブル接続



ロボット搬入部屋内への設置

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(2) X-6ペネ ハッチの開放(2/7)

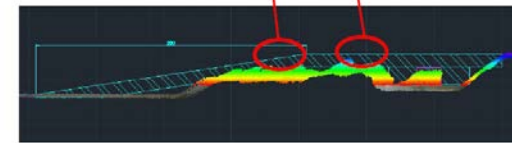
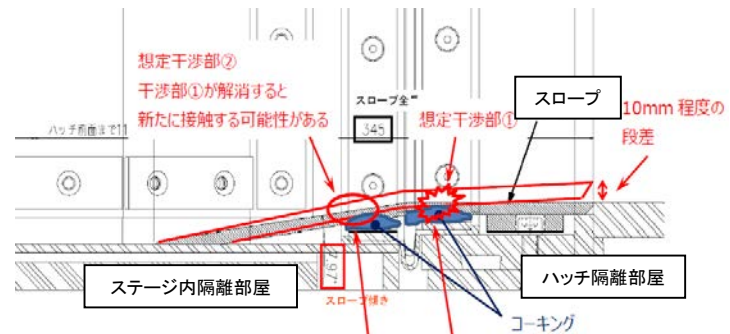
【スロープ設置と浮き上がり事象対応】

➤ ハッチ開放装置にて隔離部屋内にスロープ*を設置した際、スロープがコーキング材**と干渉して浮き上がり、段差が生じる事象が発生した。

* 装置走行時に隔離部屋間の段差を吸収するためのスロープ

** ステージ内隔離部屋とハッチ隔離部屋のベローズ近傍からの発泡事象対策として現地で追加塗布したもの。

➤ 対策として、追加で開発したマルチツールをハッチ開放装置に取り付け、干渉しているコーキング材を除去した。



スロープ設置後の浮き上がり状態 (断面図)

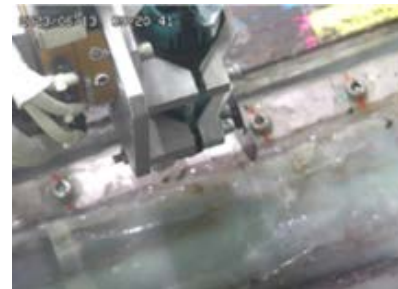


水平面の横切断

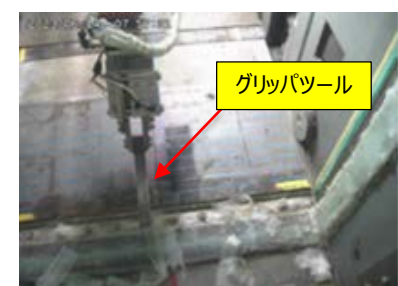


傾斜面の横切断

マルチツールによるコーキング材の切断



縦切断

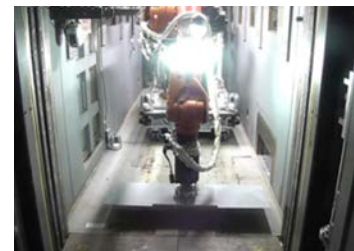


グリッパツールによる切断したコーキング破片の回収

➤ コーキング材の除去後、3D計測を行ってスロープが干渉しないことを確認し、ハッチ開放装置によるスロープの再設置を行った。



スロープ設置面の清掃



ハッチ開放装置によるスロープ設置



スロープ設置状態

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

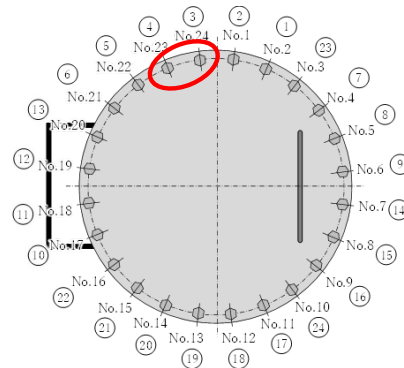
(2) X-6ペネ ハッチの開放(3/7)

【ハッチのボルトナット締結解除】

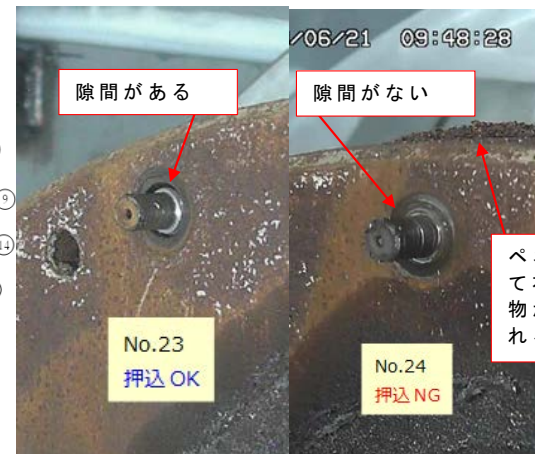
- ハッチを開放するため、ハッチ開放装置に取り付けたホールソーを用いてペネハッチのボルト・ナット(24本)の締結を解除した。その後、残ったボルトを押込み棒で除去しようとしたところ、約半数のボルトが異物の付着により固着して取り外せない事象が発生した。



ホールソーによるナット除去加工



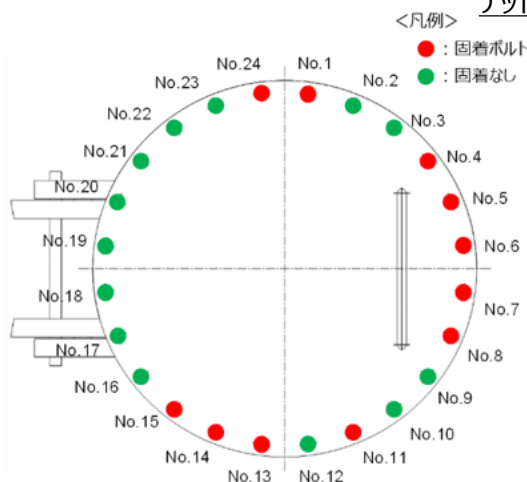
丸数字は締結解除(切削)の順序を示す。



ナット除去後の固着ボルトの状況



押込み棒によるボルト押込み



固着していたボルト位置

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(2) X-6ペネ ハッチの開放(4/7)

【ハッチのボルト固着事象対応】

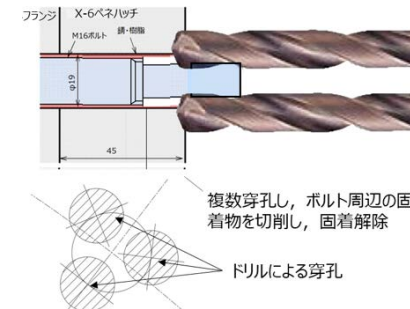
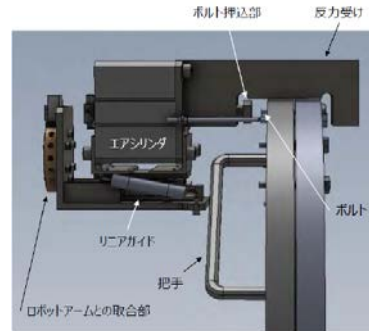
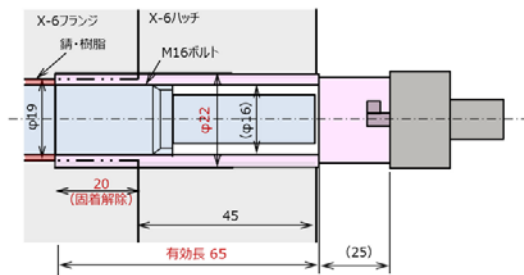
➤ ボルト固着事象の対策として追加で以下の固着解除ツールを開発し、これらを用いて固着ボルトの除去を行った。

- ・長尺ホールソーによる固着部の追加加工
- ・エアシリンダ押し込み治具によるボルトの押し込み
- ・ドリル切削によるボルト／付着物の固着解除

固着ボルト No.	長尺ホールソー	エアシリンダ押し込み治具	ドリル切削
1	×	×	○
4	×	×	○
5	×	×	○
6	×	×	○
7	×	×	○
8	○	—	—
11	○	—	—
13	×	×	○
14	×	×	○
15	×	○	—
24	×	×	○

<凡例>
 ○：撤去できた
 ×：撤去できなかった
 —：未実施

対策の適用結果



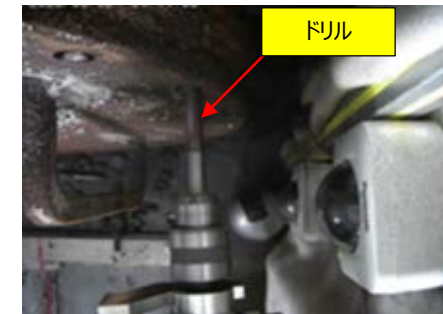
長尺ホールソー



長尺ホールソーによる追加加工



エアシリンダ押し込み治具による押し込み



ドリル切削による固着解除

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(2) X-6ペネ ハッチの開放(5/7)

【ハッチの開放】

- すべてのボルトを除去後、ハッチ開放装置に取り付けたフックツールをハッチ把手に引掛けてハッチを微開した後、ハッチ把手を切断した。その後、フックツールを使ってハッチを90度以上開放した。



フックツールのハッチへの引っ掛け



ハッチ微開状態



ハッチ開放中



ハッチ全開直前



90度ハッチ開放完了



ペネ内の状態

ハッチ開放装置によるハッチ開放状況

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

(2) X-6ペネ ハッチの開放(6/7)

【フランジ表面清掃】

- ハッチ開放後、レーザ清掃装置およびバフツールによりフランジ表面の清掃を行った。フランジ表面には固着した付着物が想定以上に付いており、これを完全に除去することはできなかった。



付着物除去前のフランジ表面

【固着した付着物除去対応】

- 対策として、追加で以下の付着物除去ツールを開発し、付着物の除去および最終的な表面仕上げを行った。
 - ・タガネツール
 - ・フラットドリル
 - ・ペタディスク
 - ・カップホイール



レーザ清掃装置 照射前



レーザ清掃装置 照射中

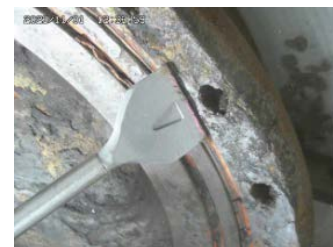


バフツール 清掃中 1



バフツール 清掃中 2

レーザ清掃装置およびバフツールによる表面清掃



タガネ (ケレン棒) 付着物除去中



フラットドリル 付着物除去中



ペタディスク 付着物除去中



カップホイール 付着物除去中

付着物除去ツールによる表面清掃

4.2 アクセスルート構築のための関連機器

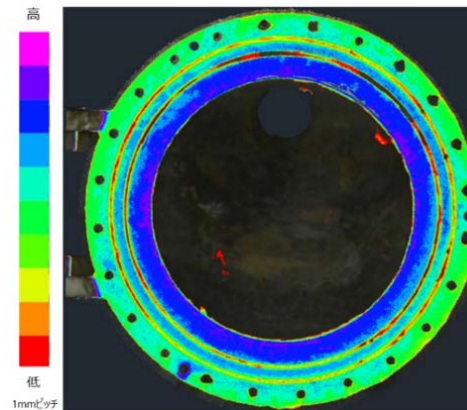
(2) X-6ペネ ハッチの開放(7/7)

【付着物除去後のフランジ表面確認】

- 付着物除去後のフランジ表面の平坦度を目視およびレーザ計測装置、レーザスキャンにより確認した。



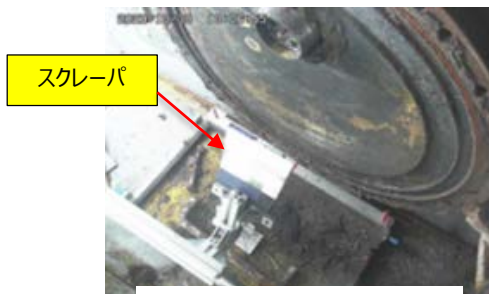
付着物除去後のフランジ表面



レーザスキャンによるフランジ表面の平坦度確認

【ハッチ裏面の清掃】

- スクレーパツールにより、ハッチ裏面についた付着物の清掃除去を実施した。



ハッチ裏面の付着物除去

【隔離部屋の床面清掃とハッチ開放装置の撤去】

- クリーナツールにより、隔離部屋床面の清掃を実施した。
- ハッチ開放装置をロボット搬入部屋から搬出し、次工程への引き渡しを行った。



隔離部屋床面清掃状況



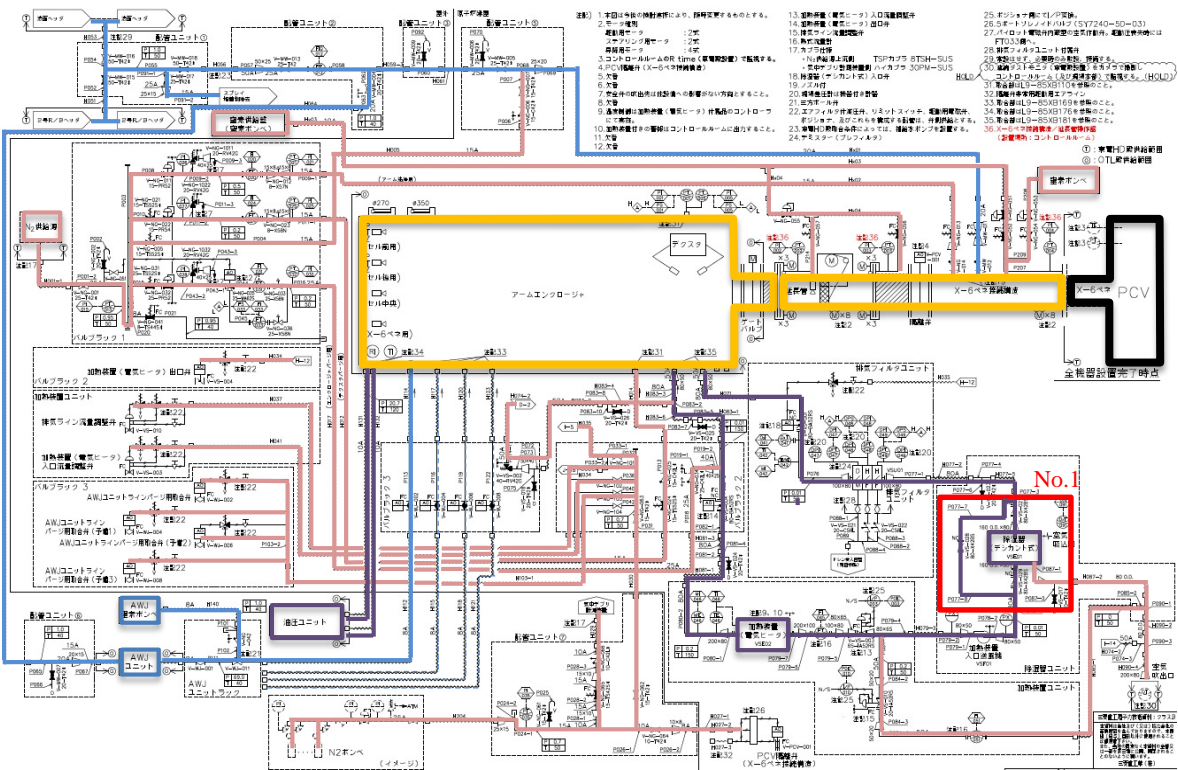
4.3 その他付帯設備

(1) 設計、製作

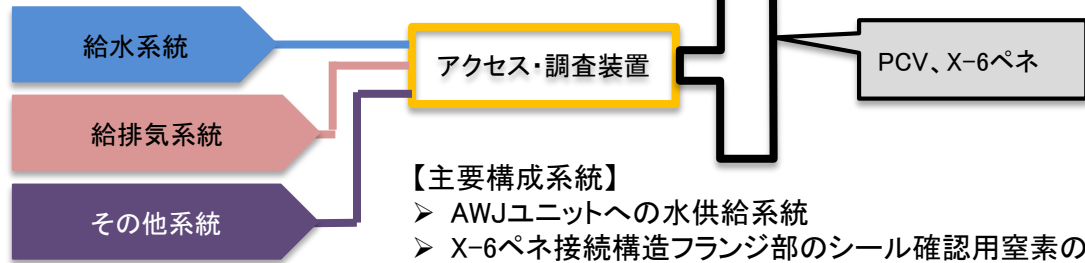
i. 系統計画

現地での配置/敷設計画を鑑みて
系統計画の主に右下の表に示す
見直しを実施した。

・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クス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

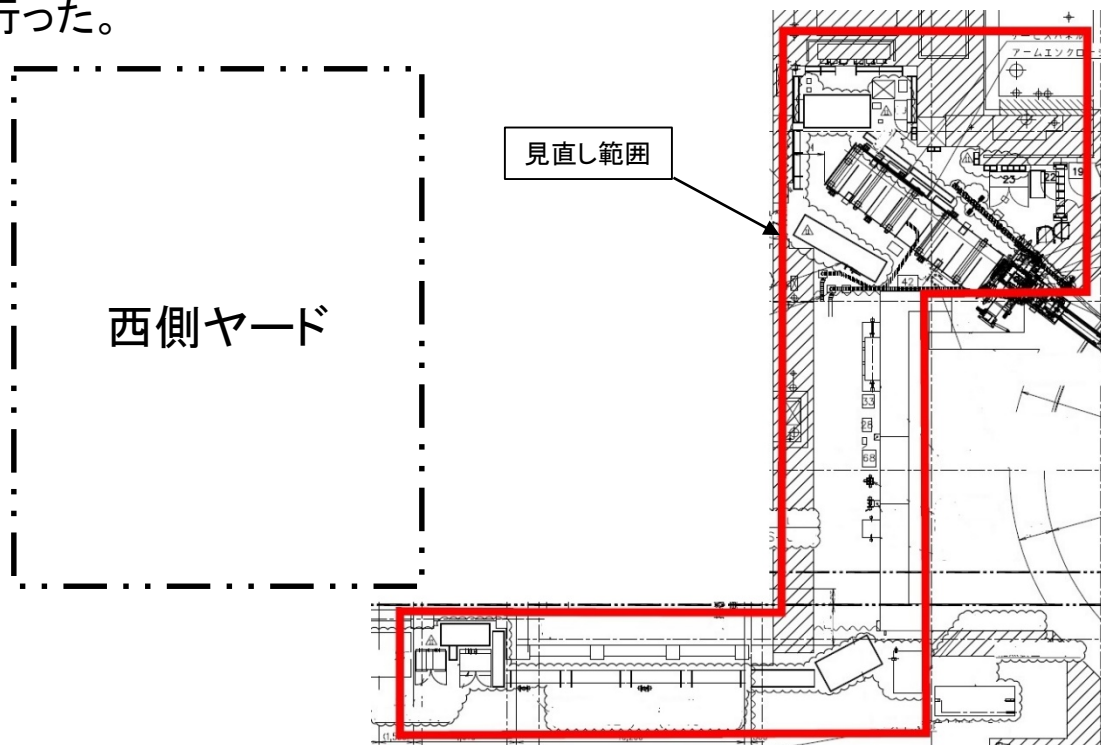
No	令和4年度からの 変更内容	変更理由
1	除湿器をバイパスする ラインを追加	系統内減圧時の運転操 作性向上のため

4.3 その他付帯設備

(1) 設計、製作

ii. 現地配置計画

・令和5年度に実施した付帯設備 ケーブル・ホース敷設 要素試験検証結果を踏まえ、敷設作業性を向上させるためにケーブル・ホースの敷設ルート見直しやケーブルラックの改良等を行った。



iii. 製作状況

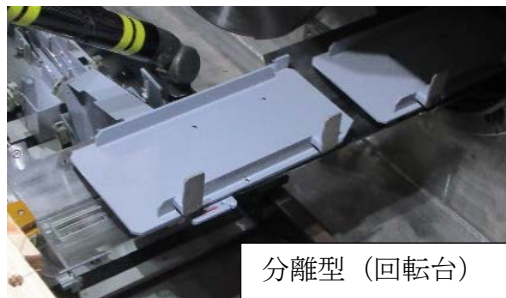
・付帯設備の機器については系統設計の見直しに伴い、改造作業を実施した。

4.4 燃料デブリ回収装置

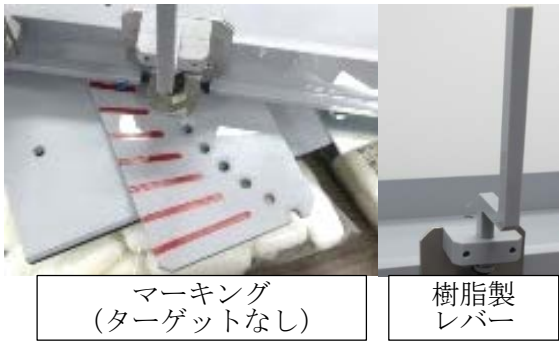
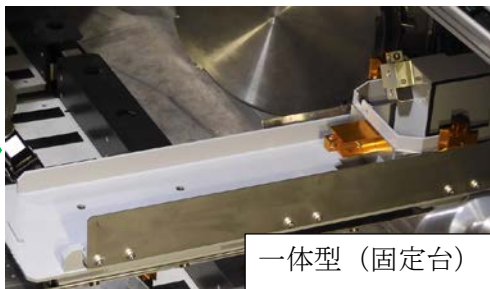
(1) デクスタ作業検証

目的

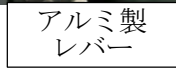
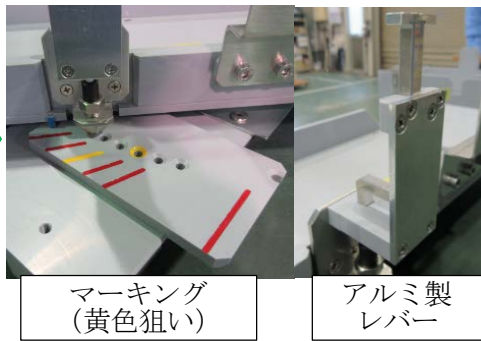
- 燃料デブリ回収作業のうち、エンクロージャ内でデクスタが実施する作業検証をこれまで実施し、一連の作業がデクスタで実施であることを確認した。
- DPTEポート350から燃料デブリ回収装置及び治工具を搬入/搬出する作業及び廃棄物を回収する作業は、治工具及び廃棄物回収容器を改良することで、デクスタ作業を効率化できる。
- そこで、治工具及び廃棄物回収容器を改良し(下図参照)、それにより、デクスタの作業効率向上の確認するための検証試験を実施した。



改良



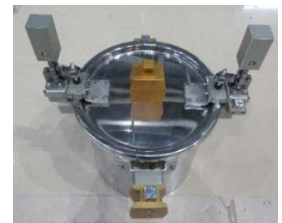
改良



治工具の改良(上:固定テーブル一体化、下:ターンテーブル)



改良



ボルトロック式

レバーロック式

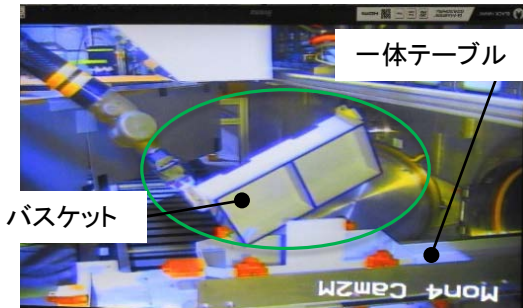
廃棄物回収容器の改良

4.4 燃料デブリ回収装置

(1) デクスタ作業検証

検証結果

- 治工具搬入用の引出しのターンテーブルを廃止し、固定式一体テーブルすることで、ターンテーブルに関連する作業工数を減らすことができ作業効率が向上した。
- 装置搬入用の引出しのターンテーブルは、回転させてレバーで固定する形式であるが、目標とする回転角に回転させ、容易にロックできることを確認した。
- レバーロック式の廃棄物回収容器により、ボルト固定方式より作業効率が向上することを確認した。



治工具の取り扱い性確認(上:一体テーブル、下:ターンテーブル)

廃棄物回収容器の取り扱い性確認

4.4 燃料デブリ回収装置

(2) DPTEコンテナ270取り扱い性改善

目的

- 燃料デブリ回収作業のうち、エンクロージャ外で作業員が実施するDPTEコンテナ270の取付け/取外し作業の時間(被ばく量)低減のために、取付ハンドルを改良した(下図参照)。

検証結果

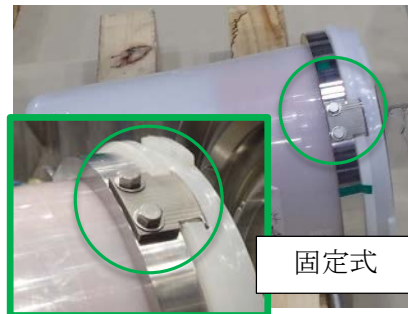
- DPTEコンテナ270の取付け/取外しに要する時間は、それぞれ30秒以下であり、作業員(胸部)とデブリとの距離は、500mm以上は確保できる見込みであることを確認した。

短両ハンドル

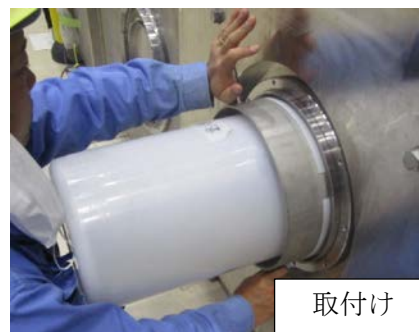


改良

長片ハンドル



DPTEコンテナ270の改良



取付け



改良



取付け

ロック



ロック

DPTEコンテナ270取り扱い性確認

4.4 燃料デブリ回収装置

(3) 模擬燃料デブリ(異径混合)の回収試験

目的

- 試験的燃料デブリ回収では、燃料デブリを1g程度採取する計画である。これまで、鉛球で燃料デブリを模擬して回収試験を実施しており、鉛玉の粒径は各試験で同一径であった(単一粒径 $R=0.35\text{mm}$ 、 1mm 及び 2mm)。
- 本試験では、異径混合の模擬燃料デブリ($R=0.35\text{mm}:1\text{mm}:2\text{mm}$ の重量混合比が $1:1:1$)の回収試験を実施し、1g程度が回収できるか確認することが目的である。
- 試験条件及び試験装置を下図に示す。

試験条件

項目	条件
温度	室温
雰囲気	大気
気圧	大気圧
表面状態	ウェット
設置面	フラット(シャーレ)
繰り返し数	N=3(各装置)
装置	ブラシ方式及び真空管方式

試験装置

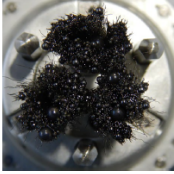

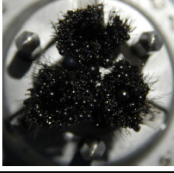
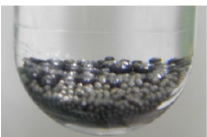
4.4 燃料デブリ回収装置

(3) 模擬燃料デブリ(異径混合)の回収試験

試験結果

- 試験の結果、模擬デブリの採取量は、最大0.67[g]であり、計画値の1g程度であった(必要量は0.5g)。よって、デブリ回収の計画は本試験結果を受けて変更する必要はない。
- 極細線金ブラシ方式の回収装置では、全種の粒径の模擬デブリを回収することができた。
- 真空容器方式の回収装置では、粒径2mmの模擬デブリを回収することはできなかった。真空容器方式の装置は、砂状のデブリ回収に適している。

装置		回収量(g) (乾燥後)	回収個数		
			Φ0.35	Φ1.0	Φ2.0
極細線金ブラシ方式	1回目	0.648	275	71	5
	2回目	0.651	152	65	6
	3回目	0.529	208	45	5
	平均	0.609	—	—	—
真空容器方式	1回目	0.502	非計測 ^{注1)}	36	0
	2回目	0.435	非計測	19	0
	3回目	0.670	非計測	29	0
	平均	0.536	—	—	—

	ブラシアダプタ		真空吸引管
	試験後 鉛球回収状態(ブラシ先端視)		試験後 鉛球回収状態(吸引管底部)
1回目		1回目	
2回目		2回目	
3回目		3回目	

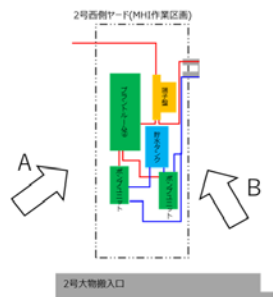
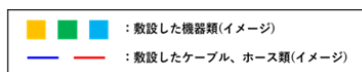
4.5 現場実証

(1) 現地据付・準備作業

令和5年度のPCV内部調査にて実施した現場作業に係る作業計画及び実施内容を整理。
令和5年度内ではPCV内部詳細調査に向けたアクセスルート構築工事に着手し、
堆積物除去装置の据え付け、堆積物除去装置を用いたX-6ペネ内の堆積物除去作業を実施。

i. 堆積物除去工事に向けた準備

- ✓ 2号機西側ヤードに、工事実施準備として変圧器、分電盤および接続盤の入ったプラントルーム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を実施。
- ✓ 堆積物除去のためのAWJ(アブレイシブウォータージェット)施工のために、給水タンク、ろ過水共有ユニットを設置。
- ✓ 建屋設備である窒素供給バルブ、ろ過水供給バルブとの接続を行い、供給が可能な状態となった。
- ✓ 堆積物除去作業に必要なケーブル・ホースを2号機西側ヤードから2号機R/B建屋内に入線。



2号館西側ヤード配置



A視 作業前状況



B視 作業後状況



A視 作業後状況

4.5 現場実証

(1) 現地据付・準備作業

ii. 堆積物除去装置の搬入、装置漏洩確認

- ✓ 工事に使用する堆積物除去装置を、令和6年1月18日に三菱重工神戸工場より輸送し、1F構内へ搬入を実施。
- ✓ 搬入用スキッドの開梱を実施し、テントハウスにて保管。
- ✓ 令和6年2月8日に、保管中の装置の受け入れ状態確認およびリークチェックに合格。
- ✓ 2号機搬入に向けてスキッド上に設置。



納入時の状況



2号機内搬入のためのスキッドへの設置状態



堆積物除去装置リークチェック



4.5 現場実証

(1) 現地据付・準備作業

iii. 堆積物除去装置のR/B建屋への搬入、X-6ペネへ接続

- ✓ 令和6年2月12日に、2号機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。
- ✓ 搬入は大物搬入口へ搬入用の敷鉄板を敷設し、敷鉄板は搬入後に撤去。
- ✓ 大物搬入口から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実施。
- ✓ その後、装置走行用のケーブルを結線した上で、ロボット搬入部屋内に移動を行い、ロボット搬入部屋の壁面に設置しているコネクタパネルを介して装置作動のためのケーブル・ホースの結線を実施後、X-6ペネトレーションへ水圧シリンダを用いた接続を実施。
- ✓ X-6ペネトレーションと装置の接続部分の機密性を確保するために、2重リングによるシール機能を有しており、この漏洩確認を以って接続を完了。



大物搬入口からの搬入作業



2号機内運搬状況



装置作動用の
ケーブル・ホースの結線



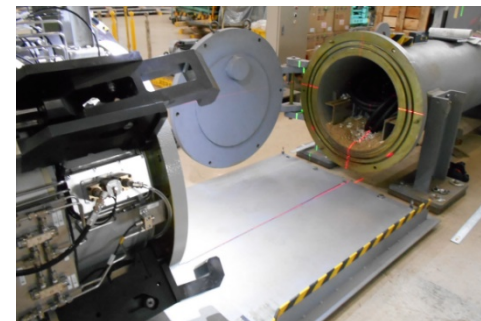
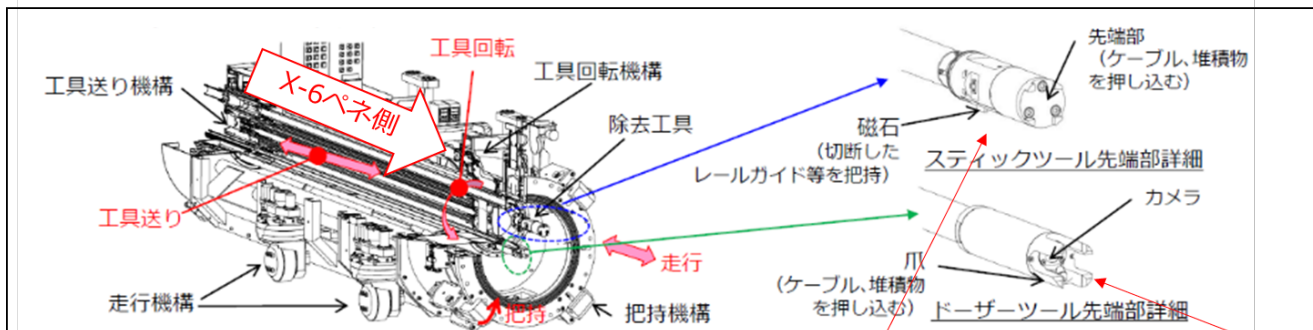
ロボット搬入部屋内へ
の移送状況

4.5 現場実証

(1) 現地据付・準備作業

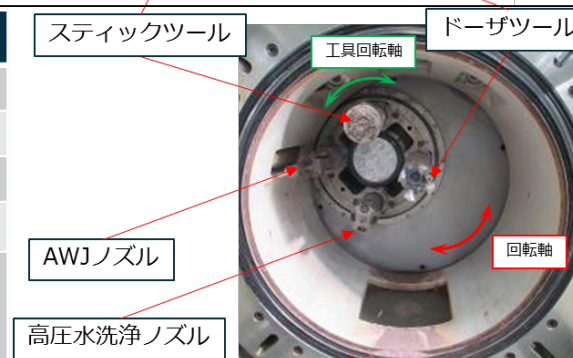
iv. 堆積物除去作業

- ✓ 堆積物除去装置をX-6ペネトレーションへ接続後、内部状態の確認を実施。



神戸工場での装置と
X-6ペネトレーションの接続状態

項目	仕様
寸法、質量、材質	約1000W×約4100L×約1200H (mm)
	約3.0t
	SUS304、SS400、アルミ合金
機能	X-6ペネ内の堆積物除去、構造物除去
除去工具	<ul style="list-style-type: none"> ・AWJ 圧力245MPa、流量4ℓ/分 ・高圧水洗浄 圧力30MPa、流量60ℓ/分 ・ドーザ(カメラ搭載) ・スティックツール(磁石)



堆積物除去装置の概要情報及び高圧水洗浄完了時のX-6ペネ内面状態



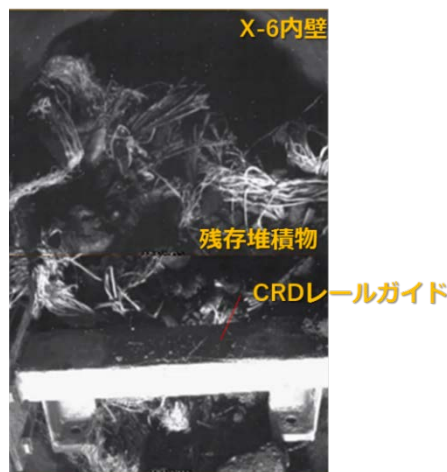
X-6ペネトレーション内面の
堆積物残留状態

4.5 現場実証

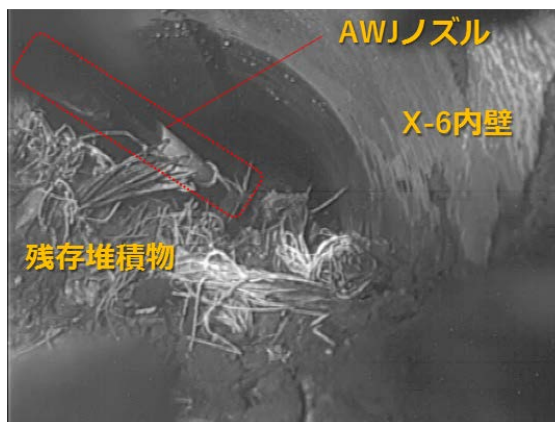
(1) 現地据付・準備作業

iv. 堆積物除去作業

- ✓ 堆積物残留状態であるX-6ペネトレーション内面に対して、堆積物除去装置の高圧水洗浄ノズルを用いて、残留する堆積物洗浄を実施。
- ✓ 洗浄は、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施工。
- ✓ 高圧水洗浄を実施した後に、AWJ(アブレイシブウォータージェット)により、X-6ペネトレーション内に残存するケーブル及びCRDレールガイド等の干渉物を切断・除去する作業に移行。
- ✓ 令和6年3月14日(報告書執筆時点)では、AWJを開始するにあたって、洗浄作業によるPCV内のダストの挙動を把握するために、AWJの試射(計8回:試射時間は1分~5分)を実施。
- ✓ 令和6年度も堆積物除去作業を継続し、作業完了後、接続構造体設置作業へ移行する計画。



高圧水洗浄完了時のX-6ペネ内面状態



AWJ試射時のX-6ペネ内面状態

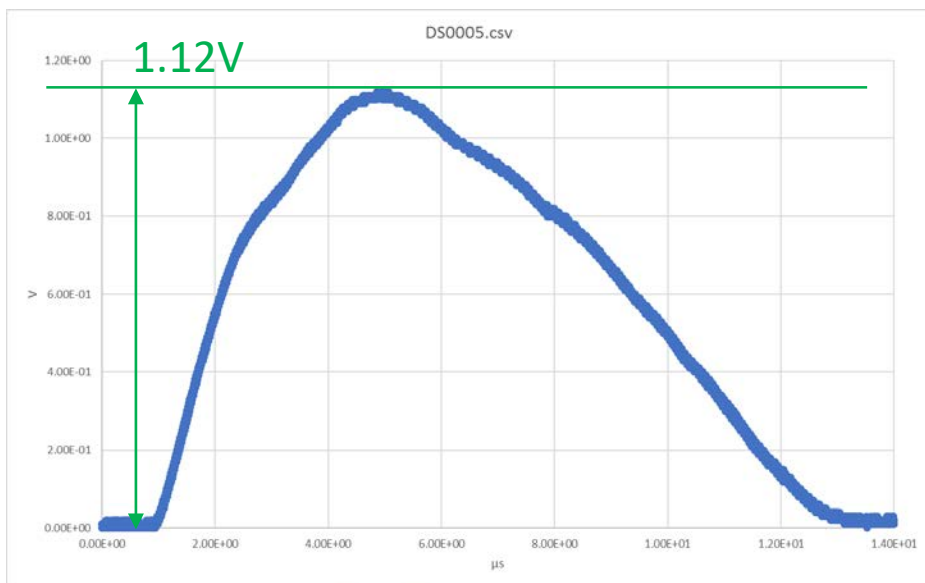
4.6 その他

(1) 中性子センサの検討

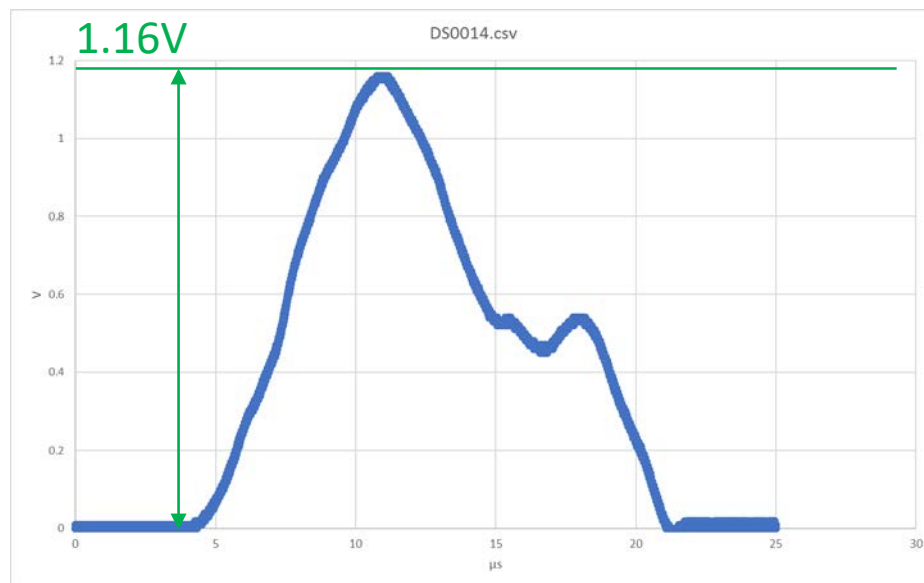
国内(名古屋大学)での検証試験について(パルス波形の確認)

【試験概要】

- ガンマ線環境下にて中性子によるパルス波形を確認し、波形に異常がないこと(波高2V程度)の確認を実施。



ガンマ線照射無し



ガンマ線照射有り

中性子によるパルス波の波高は、これまでの実績より2V程度と予測していたが、試験時は1V程度しかなかった。試験装置構成上、信号の分岐に問題があった可能性があり再試験を実施することとした。

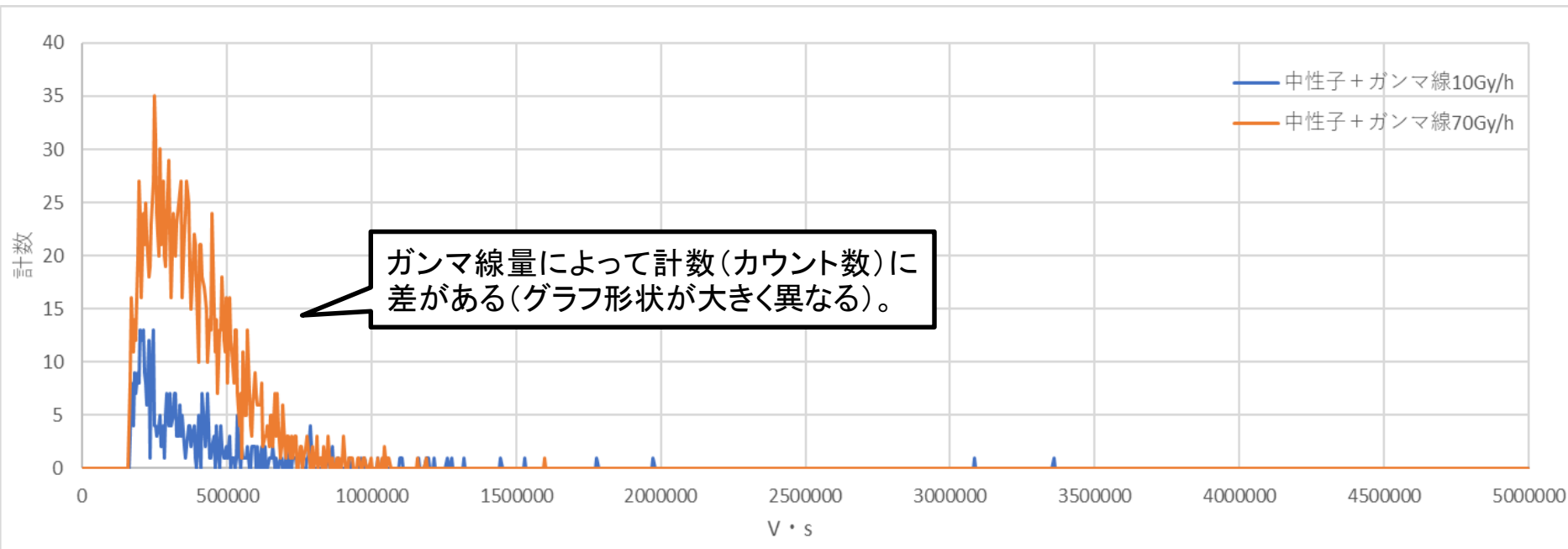
4.6 その他

(1) 中性子センサの検討

国内(名古屋大学)での検証試験について(スペクトルの確認)

【試験概要】

- 中性子とガンマ線を同時に照射し、信号を識別できることを確認する。



ガンマ線量を変化させ中性子検出システムで中性子線を測定した結果、計数(カウント数)がガンマ線量に依存していることを確認した(中性子とガンマ線を問題なく識別できていれば、ガンマ線量を変化させても計数は変化しない)が、上記スペクトル取得時にシステム(サーバ)には各パルスを全て蓄積しており、別ツールを用いることで中性子による信号とガンマ線を含むノイズとを識別できることを確認した。

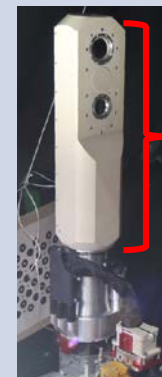
4.6 その他

(2) ガンマセンサの検討

ガンマセンサは、令和4年度に実施したJAEAの櫛葉遠隔技術開発センター（以下、「JAEA櫛葉」という）での単体での作動試験およびアーム型アクセス装置（以下、「アーム」という）に接続した状態での作動試験等を行っており、その結果を踏まえた改善作業等を英国で実施した。その後、JAEA櫛葉にて、輸送後の作動確認を実施し、問題なく動作する事を確認した。

ガンマセンサの検討項目と結果(1/2)

大項目	項目	概要及び結果
令和4年度JAEA櫛葉試験を踏まえた改善	操作PCのユーザーインターフェース追加 ① ガンマセンサ回転機能の統合 ② 測定時の設定パラメータの簡略化 ③ データダウンロード機能の追加	① 照射試験やX-6ペネ通過前に実施予定のガンマセンサ本体の回転角度調整を容易に行える機能を追加し動作することを確認した ② 設定間違い防止のための測定精度選択機能変更を実施し（測定精度High、Normal、Lowの選択式に変更）、動作することを確認した ③ 測定データへのアクセス性向上のためユーザーインターフェース上に測定データへのアクセス機能を追加し、動作することを確認した
	ガンマセンサの測定時間改善	<ul style="list-style-type: none"> 放射線測定時間（測定精度Normal）について、開発段階でのみ使用するプログラムの削除等を実施 測定時間が約180分→約120分に短縮することを確認した



ガンマセンサ
本体回転部

4.6 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(2/2)

大項目	項目	概要及び結果
令和4年度JAEA櫛葉試験を踏まえた改善	<p>ガンマセンサの点検・部品交換対応</p> <p>令和3年より英国および日本にて試験等を長期にわたり実施してきたため、内部部品の経年劣化等が懸念されたことから、点検および消耗した部品の交換等を実施。合わせてガンマセンサ本体とコネクタをつなぐフライングリードの長さ調整作業を実施</p>	<ul style="list-style-type: none"> 部品交換等を実施し、問題なく作動する事を確認した  <p>調整</p> <p>フライングリード</p>  <p>アームとの組合せ確認</p>
中継器(PSCB-W)の不具合対応	<p>ガンマセンサのカメラの画質改良のためにPSCB-Wを開放した際にPSCB-Wが起動しない状態となったため、画質改良作業と並行して原因調査を実施。ボードの故障位置を特定し、ボードを交換して復旧を実施</p>	<ul style="list-style-type: none"> アームと組み合わせた作動確認を実施し、問題なく動作する事を確認した  <p>アームとの組合せ試験状況</p>
JAEA櫛葉での作動確認試験	<p>英国での対応後、ガンマセンサ本体及びPSCB-WをJAEA櫛葉へ輸送し、輸送後の作業確認試験等を実施して問題ないことを確認</p>	

5. まとめと今後の予定

(1) 令和5年度の成果まとめ

○アクセス・調査装置:

- ・AWJツールによる試験を実施し、アームの障害物が切断できることを確認した。
- ・ペDESTAL底部までのアームアクセス試験を実施。狭隘部であるプラットフォームや中間架台等の通過に関し、VRを使用してペDESTAL底部までアームがアクセス可能であることを確認できた。
- ・ケーブル・ホース類の敷設に関し、敷設順序や束ね方、ケーブルローラー活用等を考慮した検証試験を実施し、今後の現地作業に向けて作業員の被ばく量低減や工事品質の向上を図ることができた。

○X-6ペネハッチの開放:

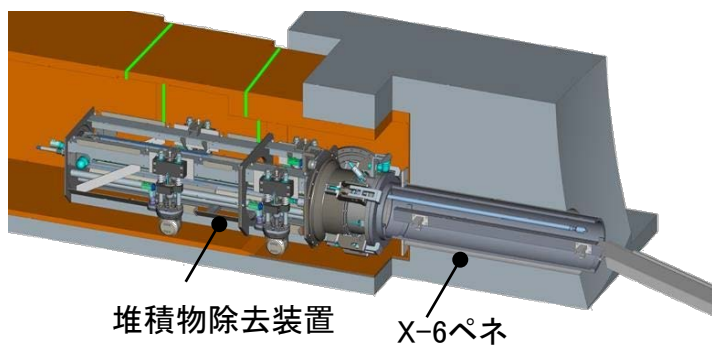
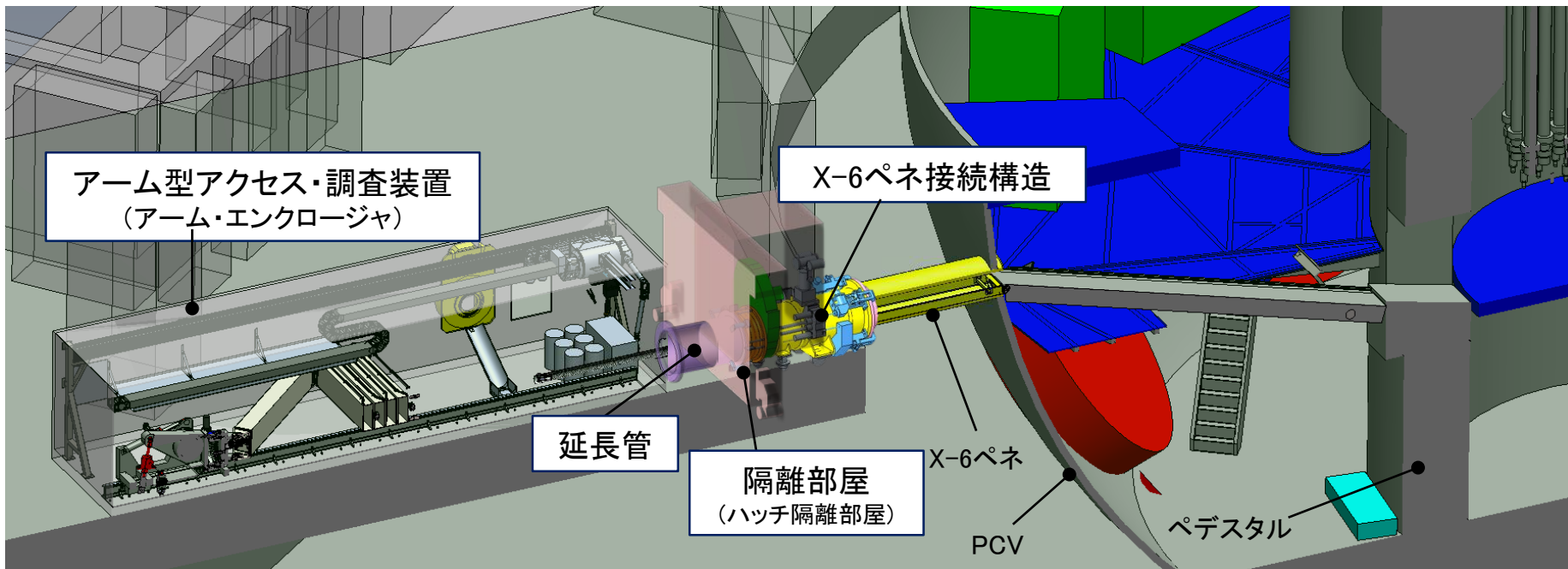
- ・ロボット搬入部屋の設置、ハッチ開放装置の搬入を実施した。
- ・X-6ペネ蓋のボルト固着対応を完了し、ハッチ開放を完了した。
- ・ハッチ開放後、フランジ面の付着物の除去および最終的な表面仕上げを行った。

(2) 令和6年度の予定

- ・アクセス・調査装置については、引き続き檜葉モックアップ試験/トレーニングを実施後、現場実証を開始する。
- ・アクセスルート構築については、X-6ペネ内の堆積物除去を継続し、X-6ペネ接続構造、延長管の設置を行う。

補足資料

開発対象

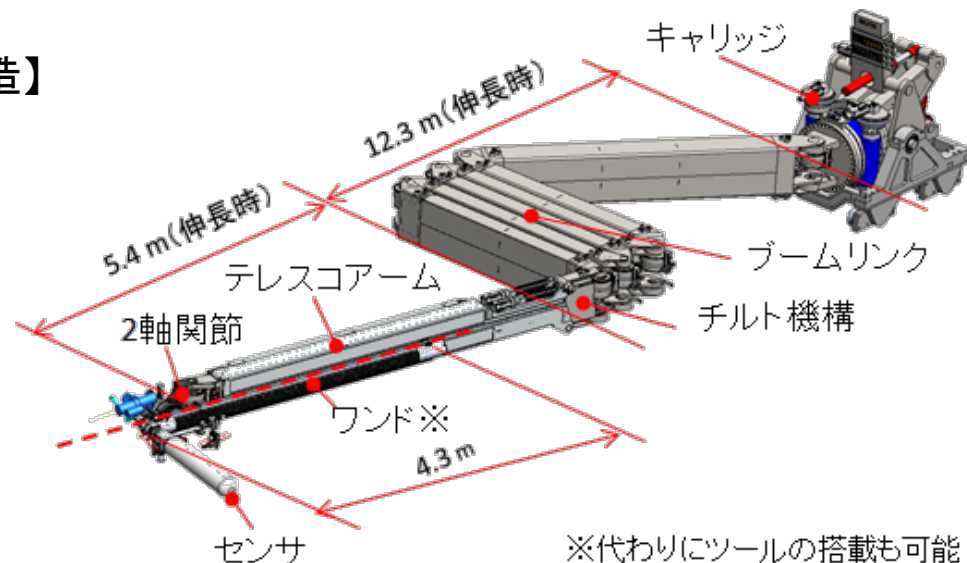


装置	主目的
アーム型アクセス・調査装置	PCV内部のデータ取得(センサ搭載)、障害物撤去(ツール搭載)
X-6ペネ接続構造	PCVバウンダリ構築及びアーム通過性確保(隔離弁搭載)
延長管	遮蔽及びアーム通過性確保
隔離部屋	X-6ペネ蓋開放時(X-6ペネ接続構造設置前)のPCVバウンダリ構築、遮蔽
堆積物除去装置	X-6ペネ内の堆積物等の除去

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
- ✓ 位置決め精度 ± 100 mm
- ✓ 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 $-5 \sim +10$ kPaG
- ✓ 付属設備
デクスタ、仕切弁、カメラ、照明 等

