#### IRIDシンポジウム

### 1F廃炉ロボット研究開発の状況

令和4年12月

国際廃炉研究開発機構(IRID)

この成果は、経済産業省/廃炉汚染水対策事業費補助金の活用により得られたものです。 無断複製・転載禁止 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構



#### 目次

- 1. はじめに
- 2. 今までに開発したロボット
- 3. 現在開発しているロボット
- 4. 今後開発を検討しているロボット(遠隔技術)

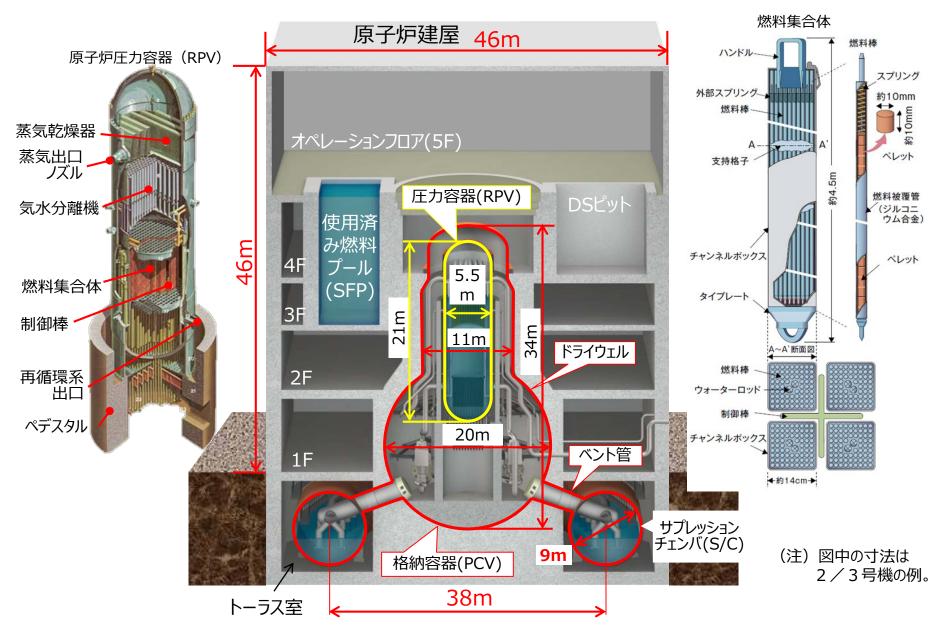
5. PCV内部詳細調査・試験的燃料デブリ取り出し作業の状況(アーム型アクセス・調査装置)

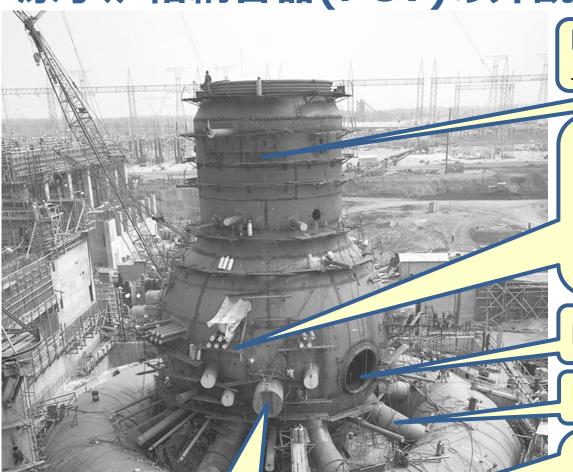
### 目次

- 1. はじめに
- 2. 今までに開発したロボット
- 3. 現在開発しているロボット
- 4. 今後開発を検討しているロボット(遠隔技術)

5. PCV内部詳細調査・試験的燃料デブリ取り出し作業の状況(アーム型アクセス・調査装置)







「**ドライウェル(D/W)**」: S/Cより 上部のPCV

#### 「PCV貫通部(ペネトレーション:

ペネ)」: 配管貫通部、電気配 線貫通部等

1号機 約150か所,2号機 約200か所,3号機 約190か所

「機器ハッチ」: 大型機器の搬出入口

「ベント管」: D/WとS/Cの連絡配管

#### 「サプレッションチェンバ(S/C)」:

事故が起きた時に発生した蒸気を S/C内の水で凝縮し、PCVの圧力の 上昇を抑える。

「Browns Ferry Unit 1 under construction 1966.Sep.」
Tennessee Valley Authority – TVA's 75th Anniversary webpage

「エアロック」: 人の出入口



### 課題

ゴール: 燃料デブリを取り出し、工学的に安定した環境で保管する



燃料デブリの所在・性状を明らかにしなければならない



燃料デブリが存在する原子 炉格納容器(PCV)、原子炉圧 力容器(RPV)内部は高線量 率環境のため人は立ち入れ ない



遠隔調査技術=調査ロボットが必要



燃料デブリ取り出しロボットが必要

#### 同時に考えるべき課題

放射性ダストの閉じ込め、未臨界状態の維持、燃料デブリの冷却、火災・水素爆発防止、 作業時の被ばく低減

### ロボット開発における課題

#### ■ 高線量率環境への対応

制御装置はPCV外に設置 耐放射線性の高い測定器、カメラの採用 または 交換容易な設計

■ PCVバウンダリーの確保(放射性ダストの閉じ込め) 小型ロボット、隔離弁・シール室設置

#### ■ ケーブルマネジメント

小型のロボット≠バッテリ 分厚いコンクリートに囲まれているPCV≠無線 干渉物との引っ掛かり回避、軽量ケーブル<ロボット牽引力 ロボット放置時の処置

#### ■ オペレーション

操作容易性 自己位置の認識、俯瞰カメラ、後部カメラ 実機モックアップ試験、徹底した訓練

### 目次

- 1. はじめに
- 2. 今までに開発したロボット
- 3. 現在開発しているロボット
- 4. 今後開発を検討しているロボット(遠隔技術)

5. PCV内部詳細調査・試験的燃料デブリ取り出し作業の状況(アーム型アクセス・調査装置)

### 原子炉格納容器内部のロボット等による調査

#### ペデスタル外側の調査(1号機)

ペデスタル内側の調査(2号機)

○形状変化型ロボット (B2調査)

○クローラ型遠隔調査ロボット(A2調査)

後方カメラ&照明

調査時



I型(ガイドパイプ通過時)

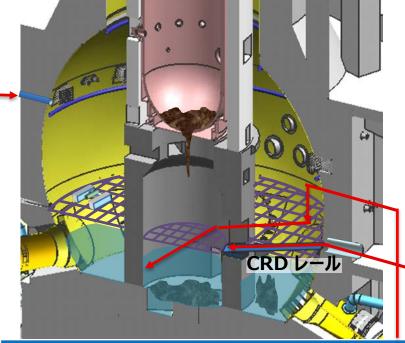




コ型(平面走行時)

計測用カメラ

LED



#### ペデスタル内側の調査(3号機)





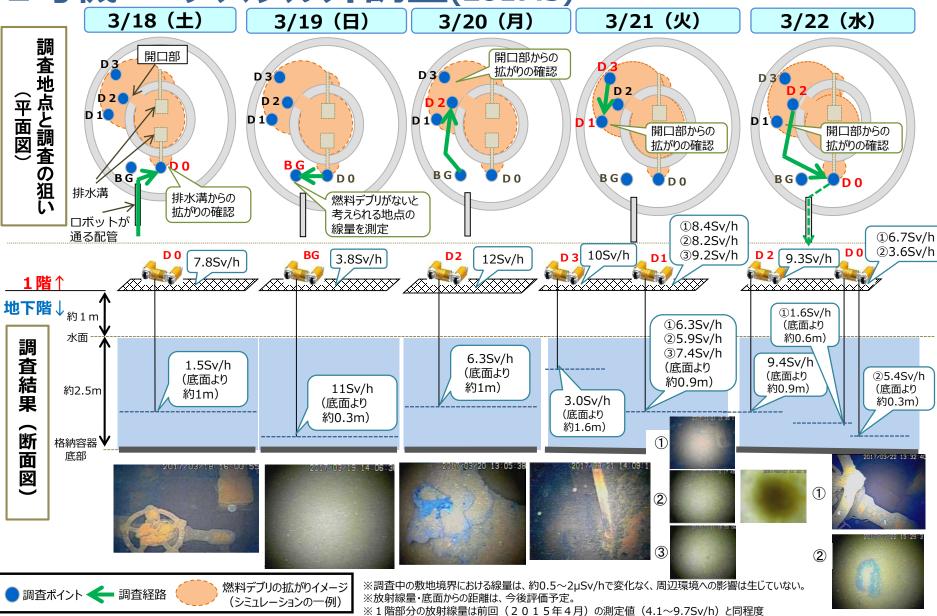
○テレスコピック型調査装置

前方カメラ&照明

)水中遊泳型ロボット



**No.11** 



### 原子炉格納容器内部のロボット等による調査

#### ペデスタル外側の調査(1号機)

ペデスタル内側の調査(2号機)

○形状変化型ロボット (B2調査)

○クローラ型遠隔調査ロボット(A2調査)

後方カメラ&照明

(A2′調査)

調査時



I型(ガイドパイプ通過時)

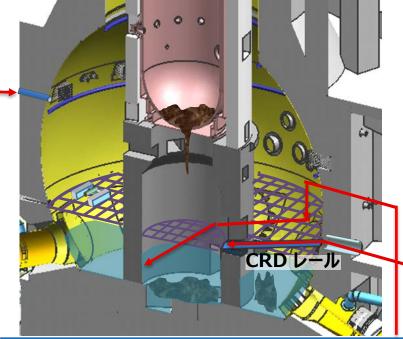




コ型(平面走行時)

計測用カメラ

LED



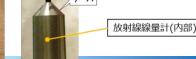
#### ペデスタル内側の調査(3号機)



○テレスコピック型調査装置

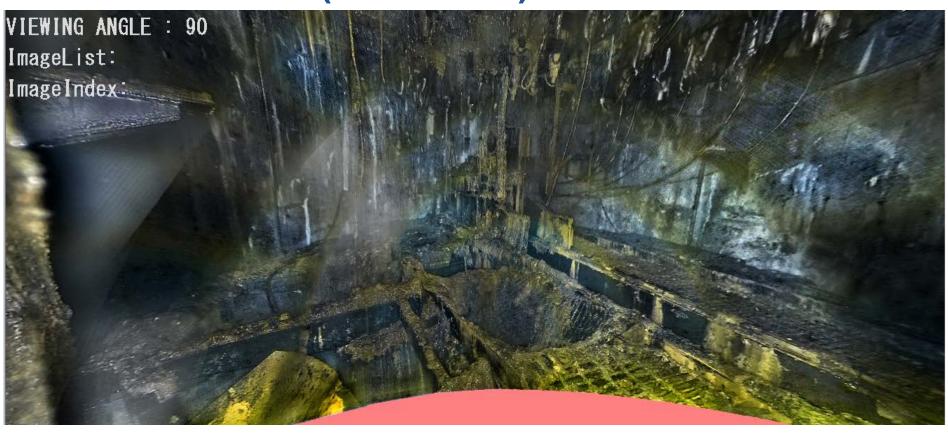
前方カメラ&照明

)水中遊泳型ロボット

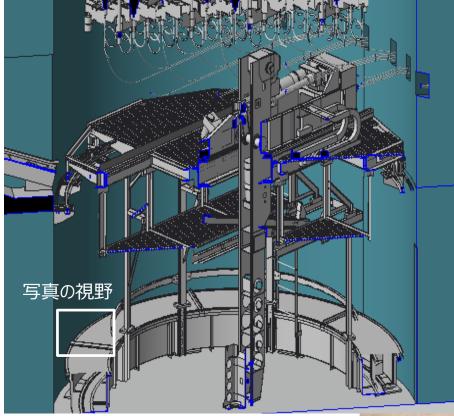


# 2号機 ペデスタル内上部調査(A2調査 2017.1~2)

## ペデスタル内 上部 (画像処理後)



# 2号機 ペデスタル内下部調査(A2'調査 2018.1)



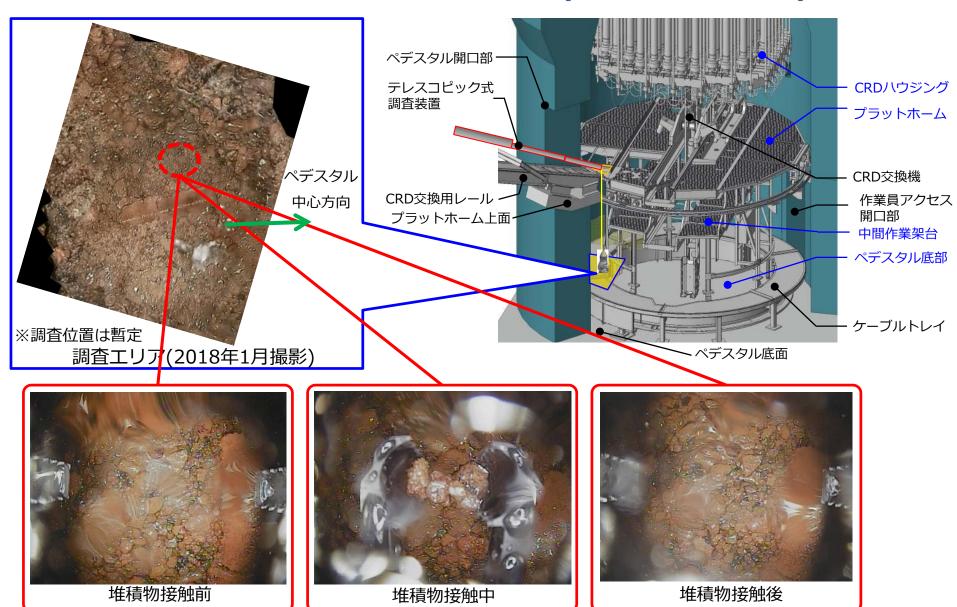
2号機格納容器内底部 (鳥瞰イメージ)

画像:2号機格納容器内底部, ペデスタル内 内壁付近



### 2号機 ペデスタル内下部調査(A2"調査 2019.2)

No.15



出典:東電HD HP

### 原子炉格納容器内部のロボット等による調査

#### ペデスタル外側の調査(1号機)

ペデスタル内側の調査(2号機)

○形状変化型ロボット (B2調査)

○クローラ型遠隔調査ロボット(A2調査)

後方カメラ&照明

調査時



I型(ガイドパイプ通過時)

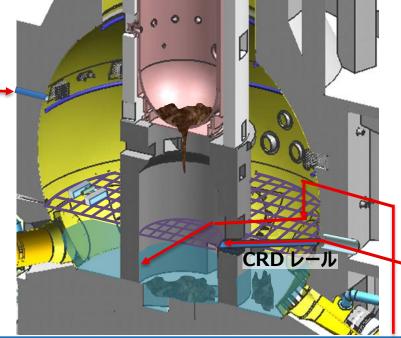




コ型(平面走行時)

計測用カメラ

LED



#### ペデスタル内側の調査(3号機)



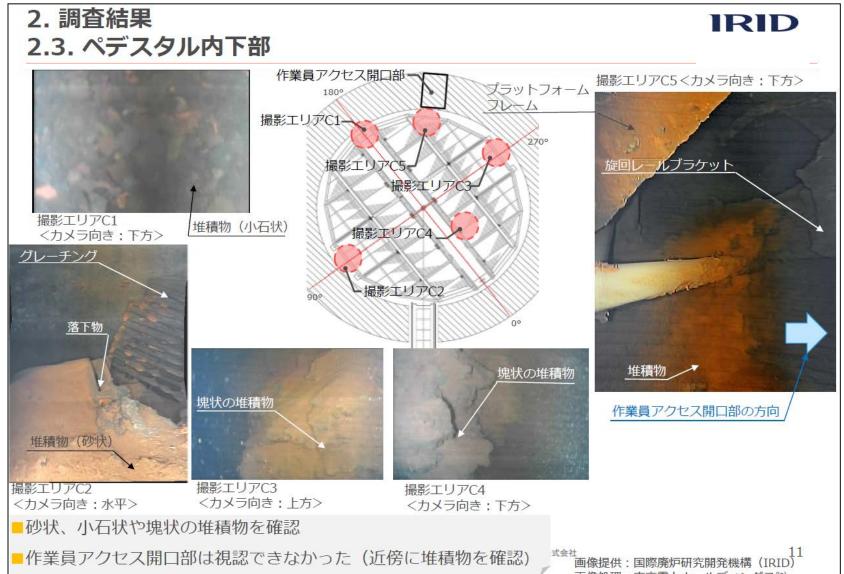


○テレスコピック型調査装置

前方カメラ&照明

)水中遊泳型ロボット

### 3号機 格納容器内調查結果



「3号機原子炉格納容器内部調査について(2017年11月30日 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第48回)報告資料)」より抜粋

### 目次

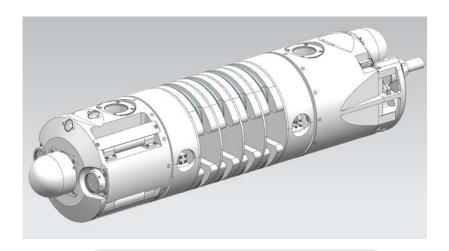
- 1. はじめに
- 2. 今までに開発したロボット
- 3. 現在開発しているロボット
- 4. 今後開発を検討しているロボット(遠隔技術)

5. PCV内部詳細調査・試験的燃料デブリ取り出し作業の状況(アーム型アクセス・調査装置)

### ボート型アクセス装置

■格納容器内の水の上を航行して、広範囲に移動可能な

ボート型アクセス装置を製作中

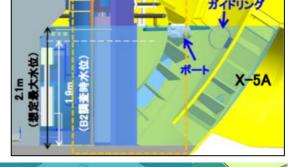


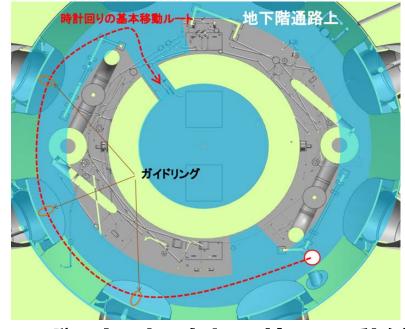
#### ガイドリング取付用の例

直径: Ø 25cm長さ:約1.1m

• 推力:25N以上

ボート型アクセス装置外観

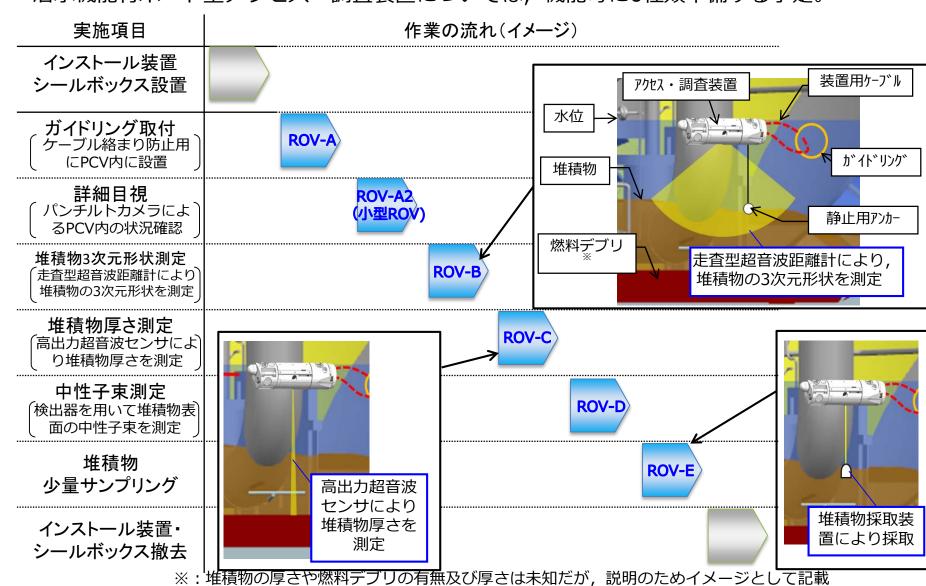




ボート型アクセス装置の動線



### **No.20** 1号機:ボート型アクセス装置(X-2ペネからのPCV内部調査) 潜水機能付ボート型アクセス・調査装置については、機能毎に6種類準備する予定。



# 1号機:ボート型アクセス装置



# 1号機:ボート型アクセス装置(2022年2月調査)22



ガイドリング設置状況



ペデスタル開口部付近



PLR配管付近

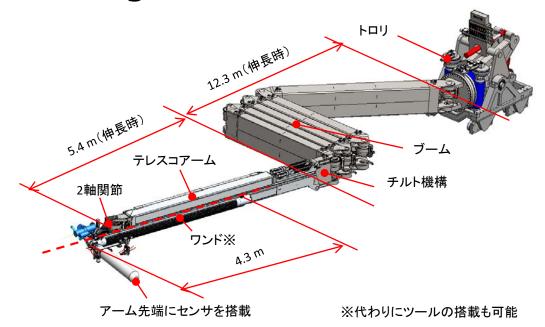


ペデスタル開口部内部



### アーム型アクセス・調査装置

- ■制御棒駆動機構メンテナンス用の格納容器貫通部(X-6ペネ)を通じて広範囲にアクセス可能なアーム型アクセス・調査装置を開発中
  - ▼ アーム全長約22 m
  - 10 kgまでの調査装置を搭載可能

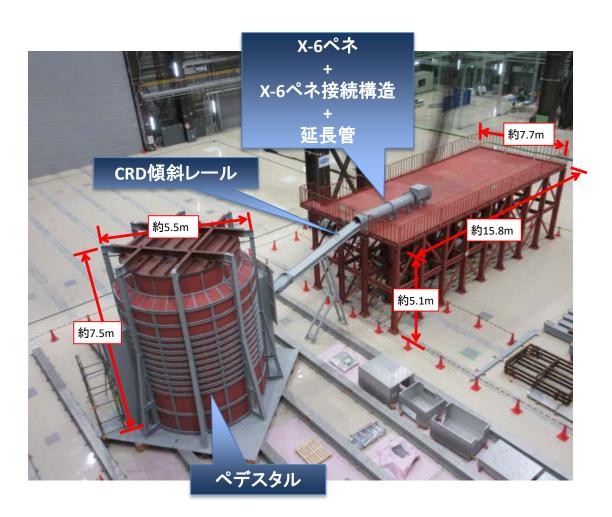


アーム型アクセス・調査装置



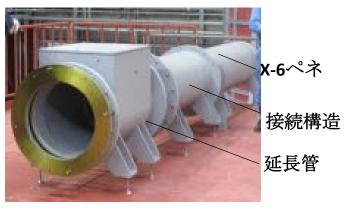
**CRD** 

#### モックアップ設備の据付(JAEA楢葉遠隔技術開発センター)





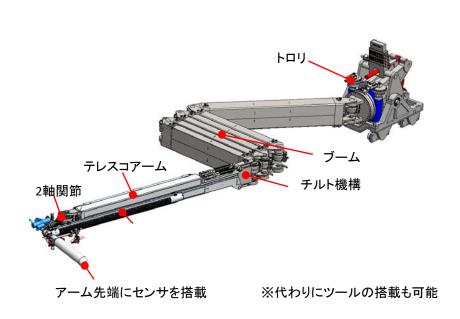
ペデスタル内部の様子



X-6ペネ(接続構造+延長管接続後) の様子

### 燃料デブリ 試験的取り出し

#### アーム型アクセス・調査装置先端に極細線金ブラシ方式回収装置等を装着

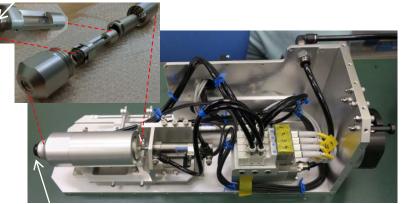


アーム型アクセス・調査装置



ブラシ 極細線金ブラシ方式回収装置

#### 真空採血管



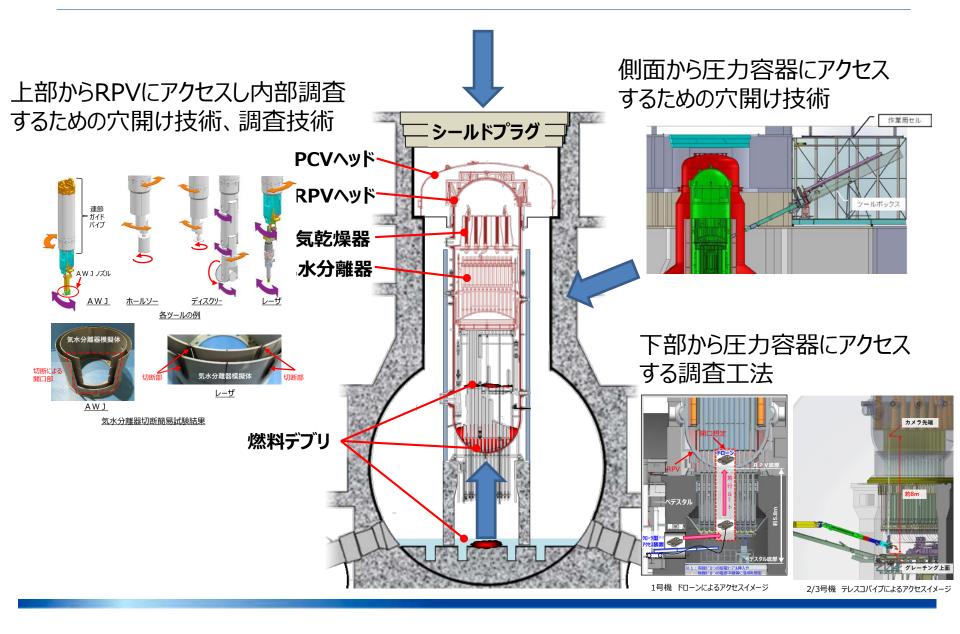
<sup>吸込口</sup> 真空容器方式回収装置

#### 目次

- 1. はじめに
- 2. 今までに開発したロボット
- 3. 現在開発しているロボット
- 4. 今後開発を検討しているロボット(遠隔技術)

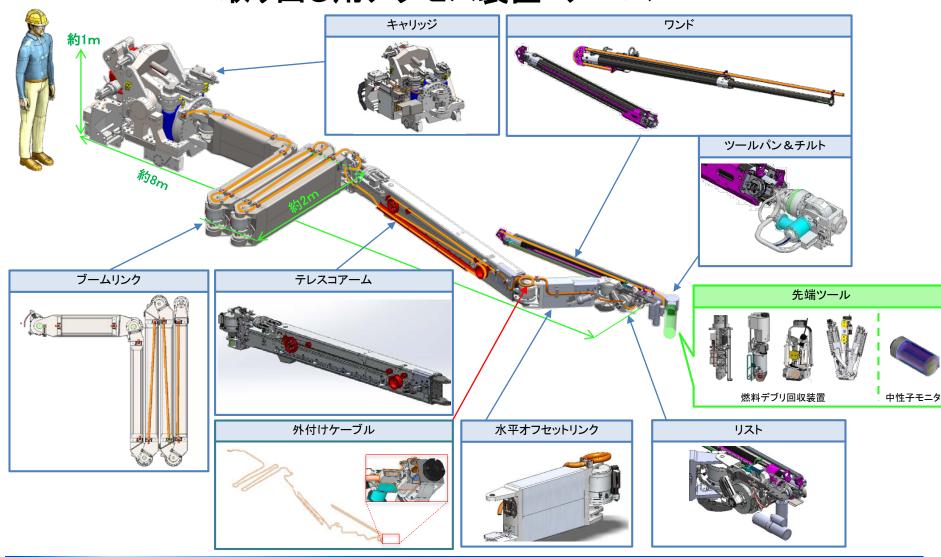
5. PCV内部詳細調査・試験的燃料デブリ取り出し作業の状況(アーム型アクセス・調査装置)

### RPV内部調查技術



### 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し

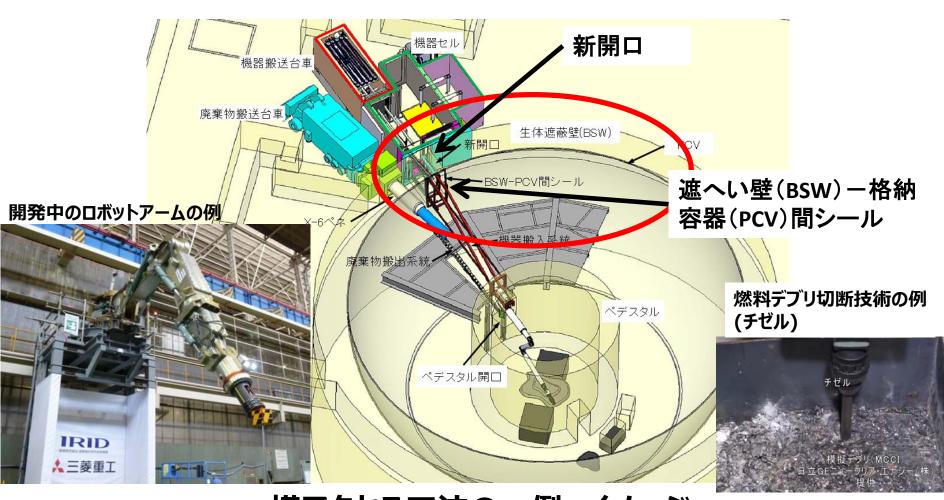
#### 取り出し用アクセス装置 アーム





### 【横アクセス工法】デブリ取り出しに係る技術

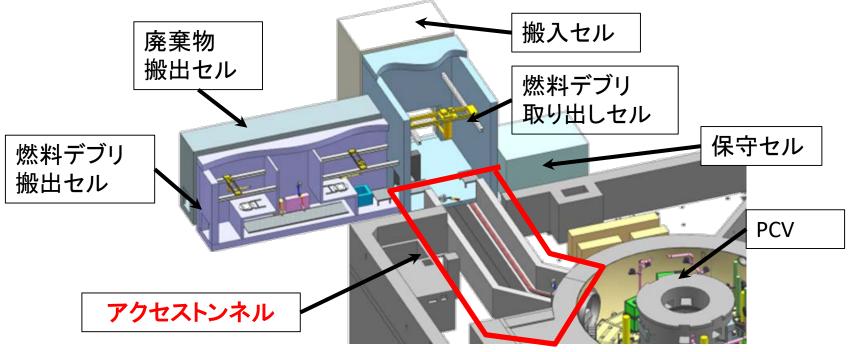
■デブリ取り出しの工法を実現するための要素技術を開発中



横アクセス工法の一例 イメージ

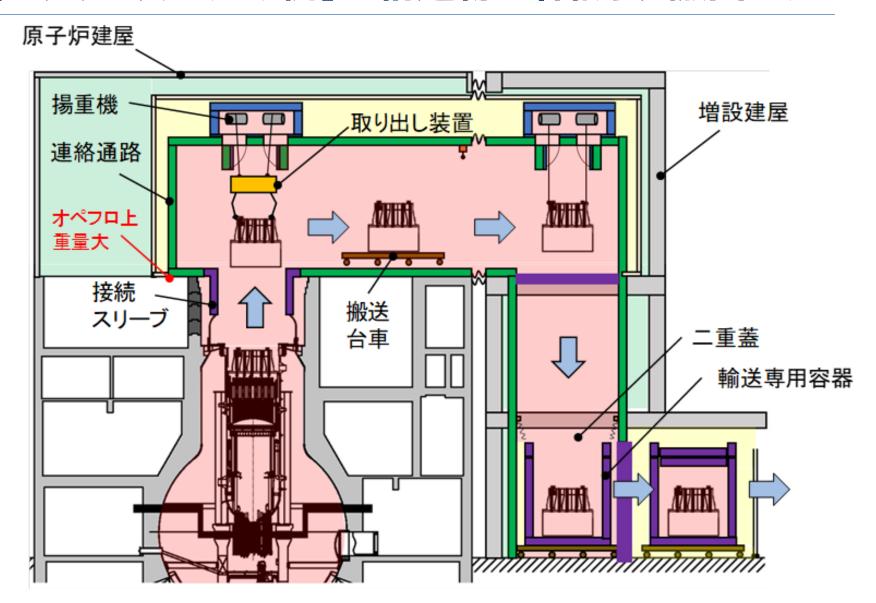
### 【横アクセス工法】トンネル施工技術

- アクセストンネル工法では、**重量物のトンネル(約800トン)を**原子炉建屋外から**精密な位置制御で送り出し、格納容器へ接続**させる必要有
- 橋梁等の工事で実績がある重量物送り出し工法を応用し、**狭隘 部に曲がった形状の重量物トンネルを送り出す技術**を開発中



アクセストンネル工法の配置イメージ

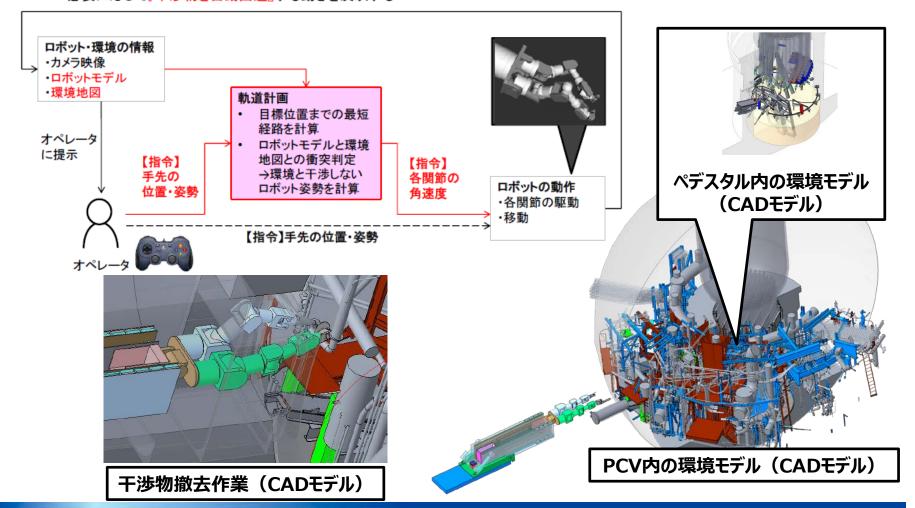
# 【上アクセス工法の例】: 構造物一体撤去・搬出工法



#### インターフェース管理/構成マネジメントシステムの開発

視界不良かつ狭隘環境において、ロボットを遠隔操作するオペレータの作業負荷を軽減し、操作の効率化を図れる制御手法を開発する

オペレータの遠隔操作(マニビュレータの手先操作)によるロボット動作を基本とし、 必要に応じて『干渉物を自動回避』する動きを反映する



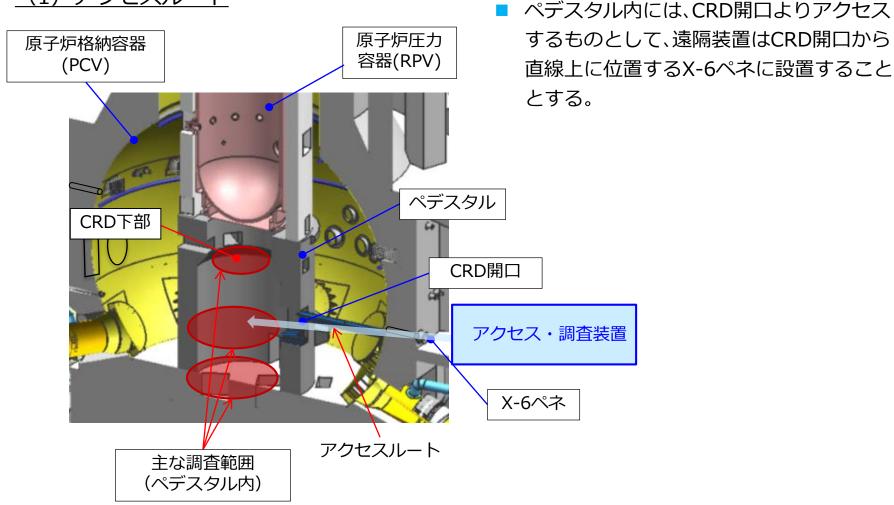
### 目次

- 1. はじめに
- 2. 今までに開発したロボット
- 3. 現在開発しているロボット
- 4. 今後開発を検討しているロボット(遠隔技術)

5. PCV内部詳細調査・試験的燃料デブリ取り出し作業の状況(アーム型アクセス・調査装置)

#### 5-1.目的

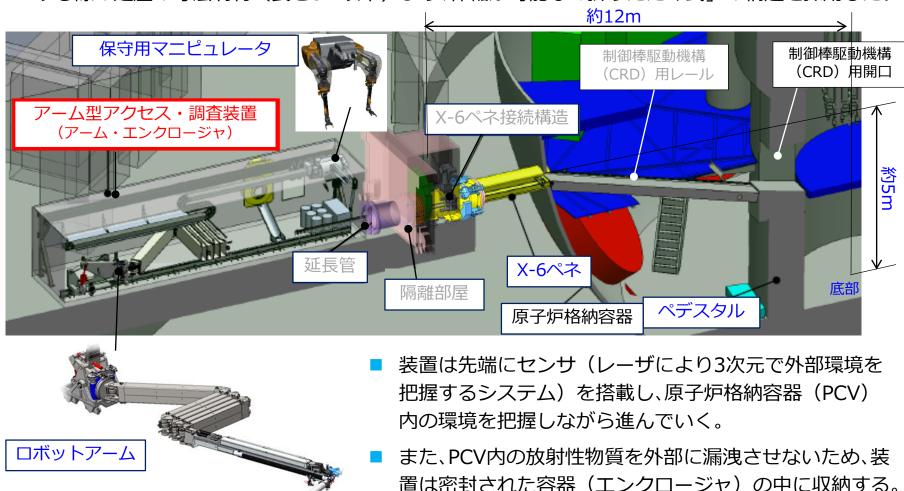
#### <u>(1) アクセスルート</u>

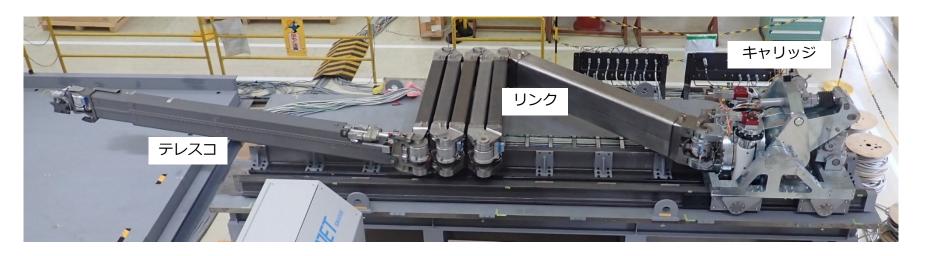




#### 5-2.設備概要

ペデスタル底部は、X-6ペネ入口から前方に12m、下方5mに位置するが、装置を当該部まで搬出入する際の建屋の寸法制約(長さ8m以下)より、伸縮が可能な「折りたたみ式」の構造を採用した。







【機能】センサ及びツールを搭載してPCV内にアクセスし、 アクセスルートの構築と内部の調査を行う

■ 全長:約18 m(ワンドを除く)

■ 質量: 4.6ton

主要材料:ステンレス鋼、アルミ

搭載可能センサ:ガンマセンサ、レーザスキャナ

中性子センサ、カメラ

■ 搭載工具:切断・把持ツール、ウォータージェット切断ツール

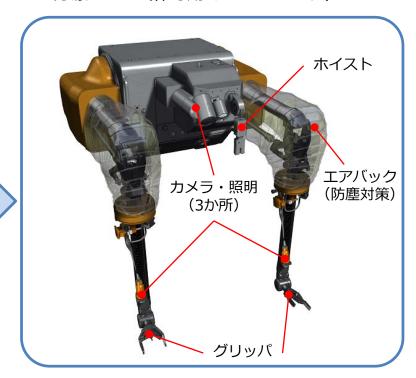
■ その他搭載設備:カメラ、照明

■ 累積線量:1 MGy

#### 操作アーム(コントロールルーム)



#### 現場アーム (保守用マニュピレータ)



- 英国メーカで開発されたマニピュレータ
- コントロールルームに設置された操作用アームをオペレータがコントロールし、エンクロージャ内のデクスターを操作する

遠隔 制御

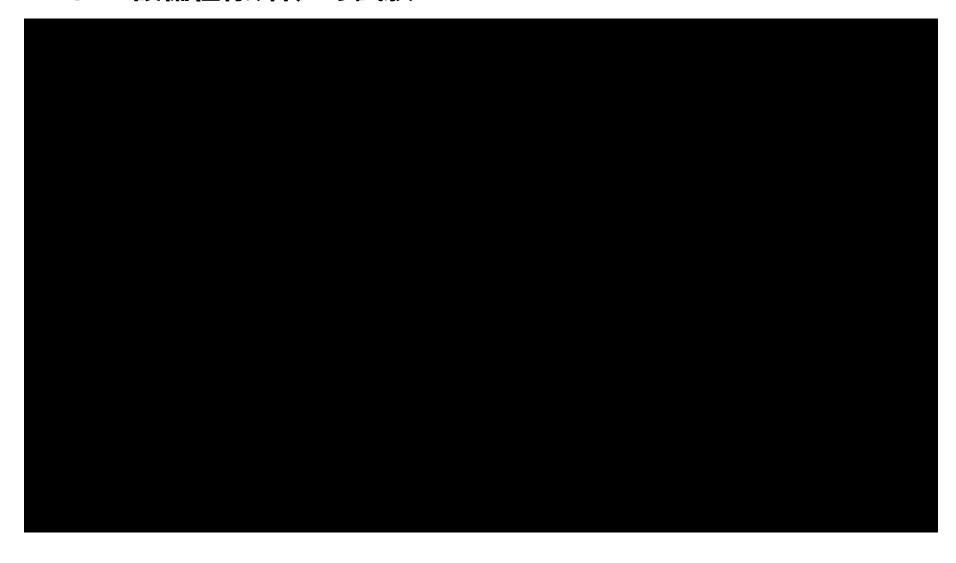
■ オペレータは複数のモニタを確認しながら操作

# 5-3.開発項目

試験項目		英国	神戸	楢葉
バウンダリ漏洩確認		0	0	
X6ペネの通過性		$\triangle$	$\triangle$	0
X6ペネ出口の障害物の撤去(CRDレール)			$\triangle$	0
VRシステムによる干渉回避				0
アーム位置の校正			0	
ペデスタル内側下部の調査	レーザスキャナ			0
	γセンサ			0
	VTセンサ			0
	中性子センサ			0
PCV内障害物の撤去(グレーチング)				0
ペデスタル内側上部の調査				0
試験的取出し				0
センサ・ツールとアームの接続		$\triangle$	$\triangle$	0
外部ケーブルのアームへの取付/取外し		$\triangle$	$\triangle$	0
センサ・ツールの搬入出			0	
アーム固定治具の取外し				0
アームカメラ/照明の遠隔メンテナンス		$\triangle$	$\triangle$	0
エンクロージャのカメラ/照明の遠隔メンテナンス		0	0	
保守用マニピュレータによるアームのリカバリー			$\triangle$	0
アームの強制引き抜き				0
	バウンダリ漏洩確認 (6ペネの通過性 (6ペネ出口の障害物の撤去 /Rシステムによる干渉回避 アーム位置の校正 ペデスタル内側下部の調査 とCV内障害物の撤去(グレーペデスタル内側上部の調査 試験的取出し センサ・ツールとアームの接 アームカメラ/照明の遠隔メンアームカメラ/照明の遠隔メンエンクロージャのカメラ/照明	(でウンダリ漏洩確認) (6ペネの通過性) (6ペネ出口の障害物の撤去(CRDレール) (Rシステムによる干渉回避) アーム位置の校正  ペデスタル内側下部の調査  やでフタル内側下部の調査 (でレーチング) ペデスタル内側上部の調査 (試験的取出し) センサ・ツールとアームの接続 (外部ケーブルのアームへの取付/取外し) センサ・ツールの搬入出 アーム固定治具の取外し アームカメラ/照明の遠隔メンテナンス エンクロージャのカメラ/照明の遠隔メンテナンス 呆守用マニピュレータによるアームのリカバリー	(「ウンダリ漏洩確認	<ul> <li>バウンダリ漏洩確認</li> <li>〈6ペネの通過性</li> <li>〈6ペネ出口の障害物の撤去 (CRDレール)</li> <li>〈月システムによる干渉回避</li> <li>アーム位置の校正</li> <li>ペデスタル内側下部の調査</li> <li>ペデスタル内側下部の調査</li> <li>ペデスタル内側上部の調査</li> <li>試験的取出し</li> <li>センサ・ツールとアームの接続</li> <li>ペト部ケーブルのアームへの取付/取外し</li> <li>センサ・ツールの搬入出</li> <li>アーム固定治具の取外し</li> <li>アームカメラ/照明の遠隔メンテナンス</li> <li>エンクロージャのカメラ/照明の遠隔メンテナンス</li> <li>スロージャのカメラ/照明の遠隔メンテナンス</li> <li>スロージャのカメラ/照明の遠隔メンテナンス</li> <li>スロージャのカメラ/照明の遠隔メンテナンス</li> <li>スロージャのカメラ/照明の遠隔メンテナンス</li> </ul>

△:予備試験、○:本試験

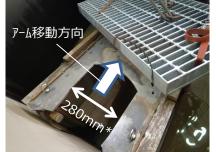






■ アーム試験状況:AWJによるCRDレール切断



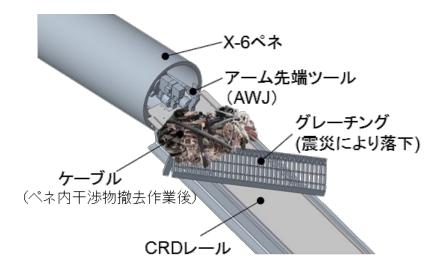


\*通過部のアーム幅:最大250mm

- CRDレールをAWJにより切断し、アーム通過性確保の見通しを確認
- CRDレール(ピン含む)は、ほぼ1パスで切断することが可能
- グレーチングについては、厚肉のため1パスで切断できなかったが、 複数回のAWJ噴射により切断可能な見通し、今後検証予定。

- アーム試験状況:AWJによるケーブル除去
- 堆積物除去により、CRDレール上にはケーブルが残置するため、AWJによる除去試験を実施。
- 結果、アームの通過に問題ない物量まで除去は可能な見通しであるが、作業に時間を要する(約30時間)ため、作業時間短縮の観点で、切断順序、AWJ噴射方向等の見直しを今後実施する。



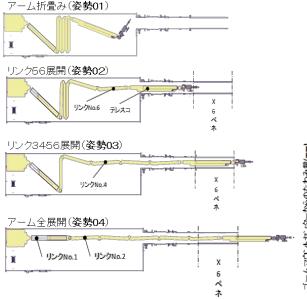






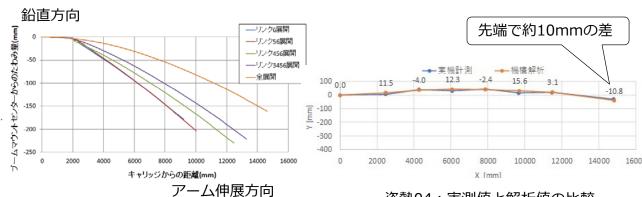
試験前 試験後 AWJ噴射によりケーブルを切断・除去できることを確認

- アーム試験状況:たわみ量計測
- アームの複数の姿勢で、たわみ量を計測。解析結果とほぼ一致することを確認した。



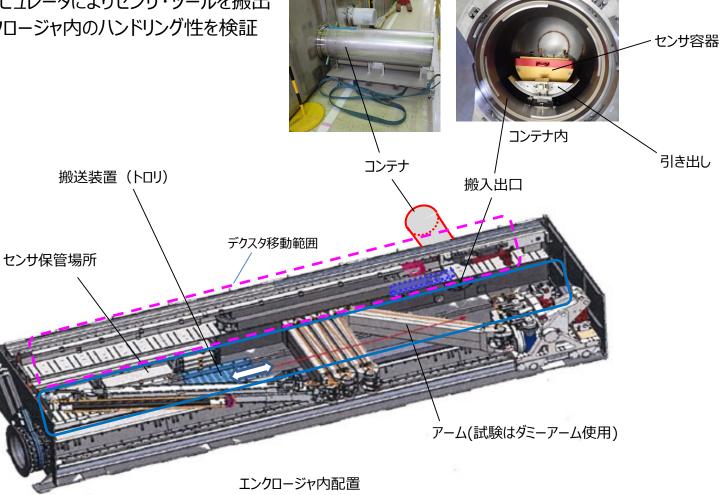






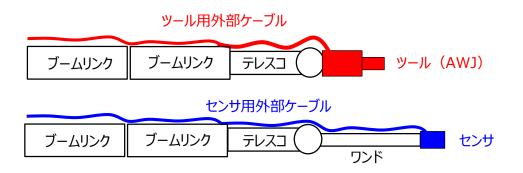
姿勢04:実測値と解析値の比較

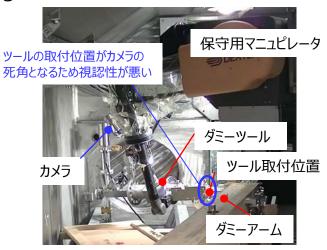
- 保守用マニピュレータ試験状況:センサ、ツールの脱着、搬出入
- 保守用マニピュレータによりセンサ・ツールを搬出 入してエンクロージャ内のハンドリング性を検証 した



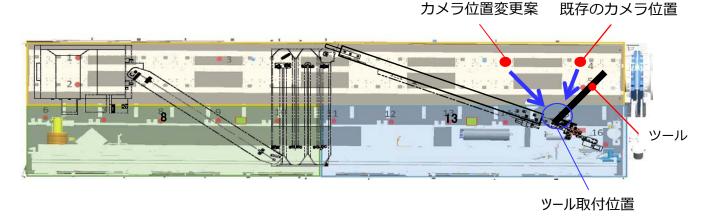
■ 保守用マニピュレータ試験状況:センサ、ツールの脱着、搬出入

センサの取付は問題なく作業可能であったが、カメラの死角となる 姿勢があり、カメラの位置変更を今後検討する。



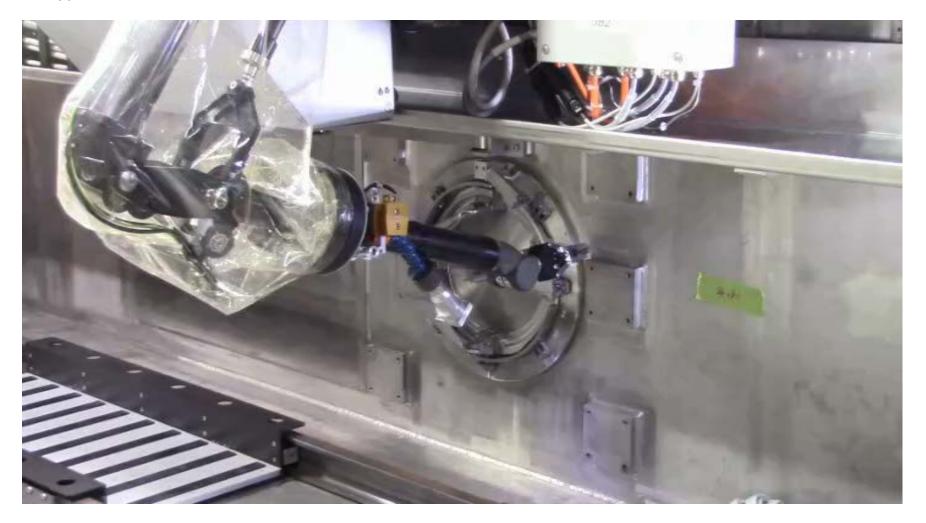


ツールとアームの接続

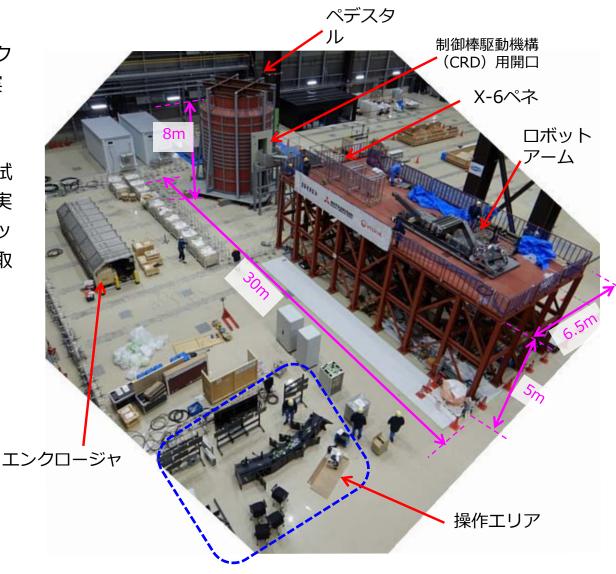




■ 保守用マニピュレータ試験状況:センサ、ツールの搬出入



- JAEA殿楢葉遠隔技術センターに PCV内部を実寸で模擬したモック アップを設置して、検証試験を実 施中
- ペデスタル内部へのアクセスや試験のデブリ取り出し等の試験を実施(前半は、右写真の通りロボットアームをエンクロージャから取出して単体試験を実施)
- 本設備を用いてオペレータのト レーニングも実施予定



アーム試験状況:モックアップアクセス



■ 極細線金ブラシ方式回収装置状況

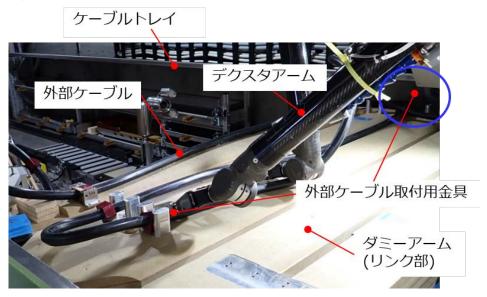


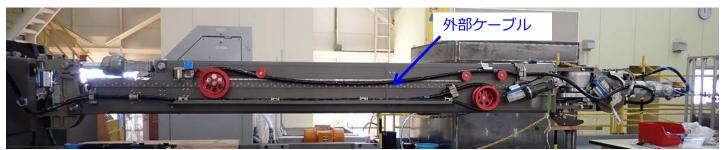


- 保守用マニピュレータ試験状況:外部ケーブル交換
  - ケーブル交換作業は可能であったが、ケーブルトレイ付近の狭隘部では取付金具の位置の見直しを今後検討する。また交換時間の短縮を目的とした作業性の向上を今後検討する。



リンク上面の外部ケーブル

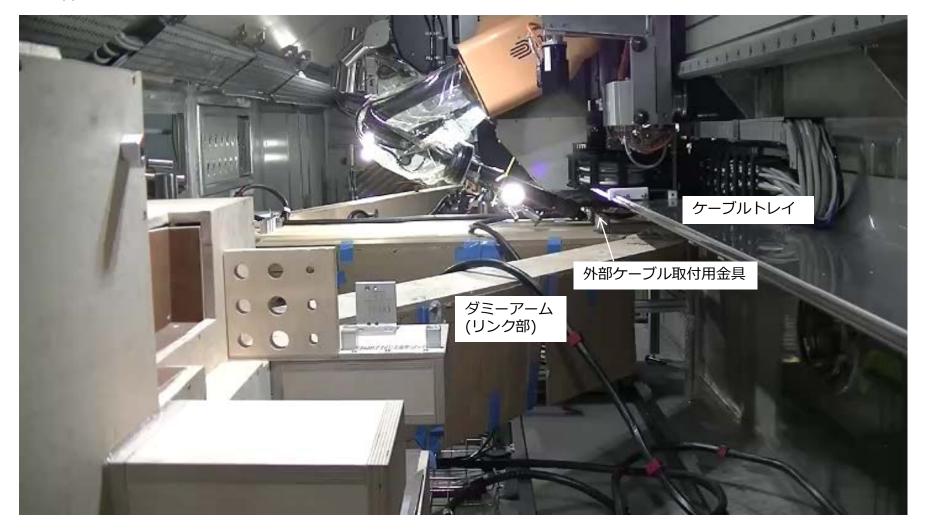




テレスコ側面の外部ケーブル



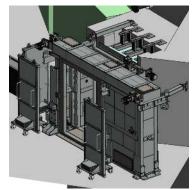
■ 保守用マニピュレータ試験状況:外部ケーブル交換



- X-6ペネ開放時のバウンダリとなる隔離部屋を設置し、PCV内の気体が外部に漏れ出て周辺環境へ影響を与えないよう作業する。
- これまでの作業と同様に、PCV内の気体が外部に漏れ出て周辺環境へ影響を与えていないことを確認 するため、作業中はダストモニタによるダスト測定を行い、作業中のダスト濃度を監視する予定。



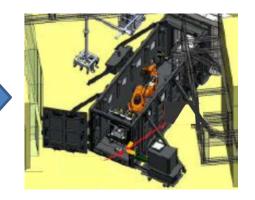
隔離部屋①の設置



隔離部屋②の設置



隔離部屋③の設置 ※ロボットアーム設置前 まで使用



ハッチ開放装置の 隔離部屋③への搬入



<u>ハッチ開放装置による</u> X-6ペネハッチ開放



#### 【作業員習熟訓練】

現場実証に向けて、現場を模擬し、実際の作業手順に従った作業員習熟訓練を工場で実施した。



ペネ磨き(磨き装置設置中)



敷き鉄板の設置(敷き鉄板設置中)



ステージ内隔離部屋(搬送中)



ハッチ隔離部屋設置(位置調整中)



ブーツ設置(ブーツ搬送装置(設置中)



ロボット搬入部屋設置(搬送中)



ハッチ開放装置設置(搬入中)



ペネハッチのボルト・ナット取外し



堆積物回収容器の回収



#### 【現場実証】

福島第一原子力発電所第2号機において、現場実証の準備工事を2021年11月15日から開始した。 現在、ハッチ開放に向けた現場実証作業を実施中。

#### 【進捗状況】

- X-6ペネ隔離機構と敷き鉄板を撤去した際、床面の凹凸が確認されたためこの除去作業を実施した。
- X-6ペネ配管の磨き作業を実施後、敷き鉄板を設置した。
- ステージ内隔離部屋、ハッチ隔離部屋をX-6ペネ位置に搬入、設置した。
- その後、確認されたリーク箇所及びガイドローラの曲がり(2022年3月地震影響)に対し対応中。



床面凹凸部除去後の清掃



ペネ磨きの実施状況



敷き鉄板の取付け状態



ステージ内隔離部屋の設置作業



ステージ内隔離部屋設置状態



ハッチ隔離部屋設置状態 (気密扉開)

#### 5-6 現場側進捗(アクセスルート構築のための関連機器)

現場作業の進捗状況(隔離部屋①リーク対策)

- X-6ペネハッチは内部調査・試験的取り出し装置を接続することから、90°以上開く必要がある。そのため把手が箱型ゴム部へ干渉するリスクを考慮し検討。
  - ⇒検討した結果、金属製平板への交換及びX-6ペネハッチの把手切断を行う。 並行して隔離部屋の再製作も検討中

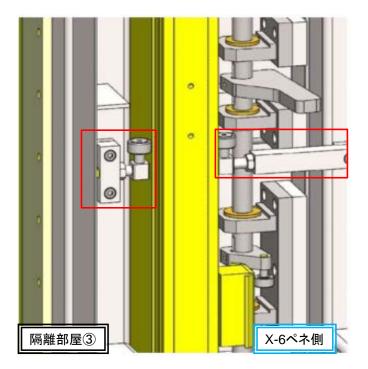
対策	A	В	С	D
	現行仕様の箱型ゴムに 交換	箱型ゴムの2重化	金属製の箱へ変更	フランジ把手撤去 (金属平板への交換)
説明				金属板把手切断
X – 6 ペネハッチ 開時の箱型ゴム部 損傷リスク		二重化によりゴム部が厚くなるため、ハッチ扉を90°開放する途中段階において、箱型ゴムとハッチ扉の把手との間に干渉が生じる可能性がある	金属製の箱ではハッチ 扉によって外側へ押し 込まれた場合に外側へ 逃げることが出来ない ため,ハッチ扉を90° 開放出来ない可能性が ある	干渉リスクなし

#### 5-6 現場側進捗(アクセスルート構築のための関連機器)

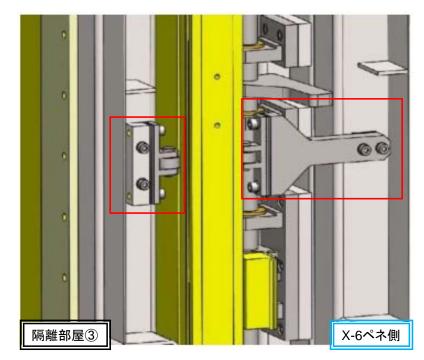
現場作業の進捗状況(隔離部屋②対策 ガイドローラの構造変更)

■ 2022年3月の地震で確認されたガイドローラのズレの再発防止対策として、 ガイドローラの構造変更を実施。

現状



対策後



ご清聴ありがとう ございました