

国際廃炉研究開発機構における 研究開発の状況について

2018年10月11日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

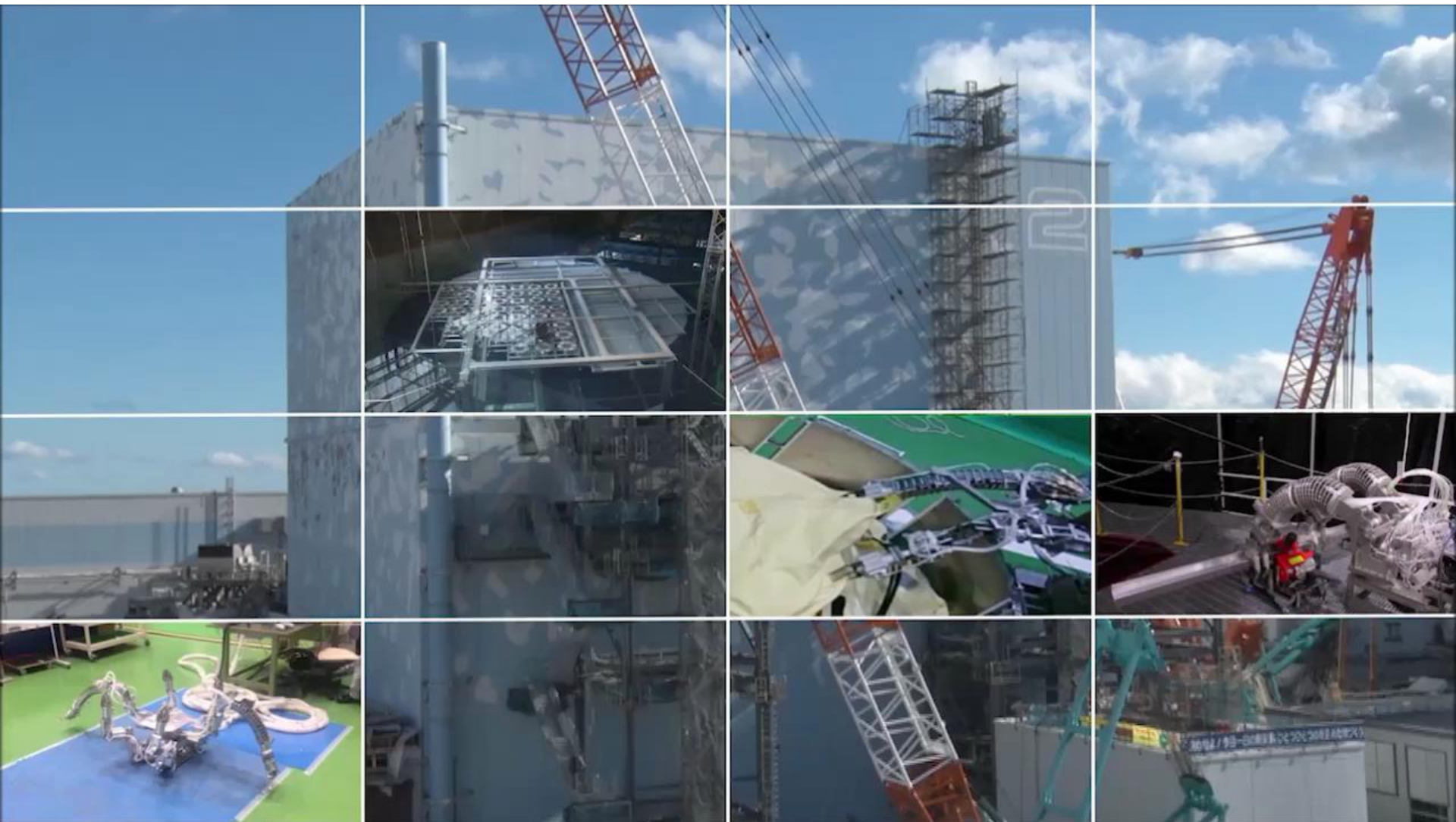
石橋 英雄

1. IRIDの事業概要（ビデオ）

2. 主な研究開発の成果・現況

- 原子炉格納容器（PCV）内部調査
- 燃料デブリ取り出し技術
- 燃料デブリ収納・移送・保管技術

3. まとめ



IRIDの概要

【理 念】 将来の廃炉技術の基盤強化を視野に、**当面の緊急課題である福島第一原子力発電所の廃炉に向けた**技術の研究開発に全力を尽くす。

- 名 称 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (略称：IRID「アイリッド」)
(International Research Institute for Nuclear Decommissioning)
- 設 立 2013年8月1日 (認可)

■ 組合員 構成員：943名 (2018年8月現在、復興庁を除く)
国立研究開発法人

オールジャパン体制

■ 事業費

年 度	2013 (8月～)	2014	2015	2016	2017	2018 (推定)
事業費 (億円)	46	120	148	143	149	172

2. 主な研究開発の成果・現況

2.0 IRIDの研究開発プロジェクト

2.1 原子炉格納容器（PCV）内部調査

2.2 燃料デブリ取り出し技術

2.3 燃料デブリ収納・移送・保管技術

2.0 IRIDの研究開発プロジェクト

1. プール燃料取り出しに係る研究開発

使用済燃料プールから取出した燃料集合体の長期健全性評価 2016.3終了

2. 燃料デブリ取り出しに係る研究開発

3. 廃棄物対策に係る研究開発

固体廃棄物の
処理・処分
技術

固体廃棄物の
先行的処理手法
技術

除染・線量低減技術

R/B内の
遠隔除染
技術

2016.3終了

<安定状態の確保>

RPV/PCVの
腐食抑制
技術

2017.3終了

RPV/PCVの
耐震性評価
手法

2018.3終了

燃料デブリ取り出し技術 <デブリ取り出し>

燃料デブリ・炉内構造物取出
臨界管理
技術

燃料デブリ・炉内構造物取出
工法・システム

燃料デブリ・炉内構造物取出
基盤技術

環境整備技術

PCV 漏えい箇所の
補修・止水
技術

2018.3終了

PCV内
水循環
技術

PCV 漏えい箇所の補修技術の
実規模試験

2018.3終了

PCV内
水循環技術
実規模試験

内部調査・分析技術

<間接的調査>

RPV内
燃料デブリ検知
技術

2016.7終了

総合的な
炉内状況把握
の高度化

2018.3終了

<直接的調査>

PCV
内部調査
技術

2018.3終了

PCV
詳細調査
技術

PCV詳細調査
X-6^ハネ
実証

PCV詳細調査
堆積物
実証

RPV
内部調査
技術

燃料デブリ
サンプリング
技術

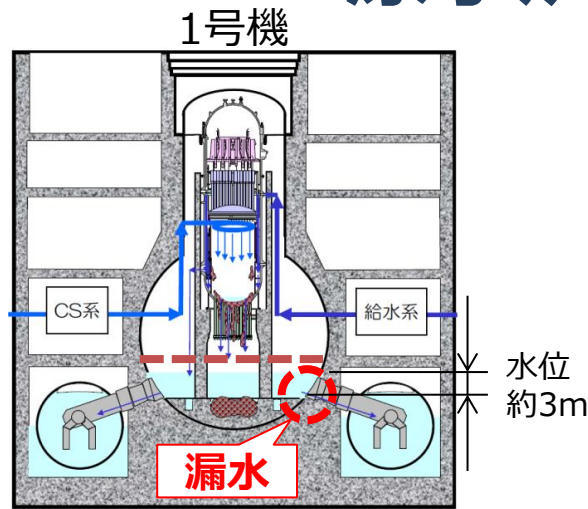
燃料
デブリ性状
把握・分析

燃料デブリ・炉内構造物取出
基盤技術
小型中性子
検出器

燃料デブリ
収納・移送
・保管技術

2.1.1 原子炉格納容器(PCV)内部調査

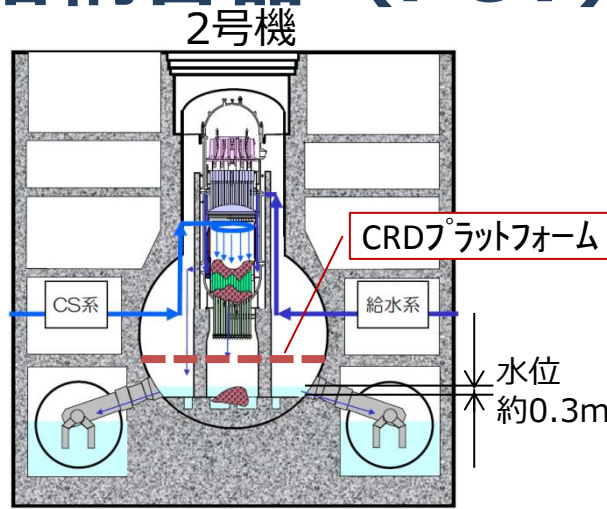
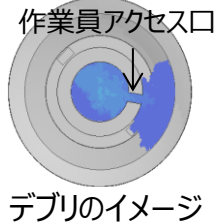
総合的な原子炉内の状況把握 ～ 原子炉格納容器 (PCV) 内部調査方針



核燃料：約69トン

デブリ量(トン)	
炉内	15トン
炉外	264トン

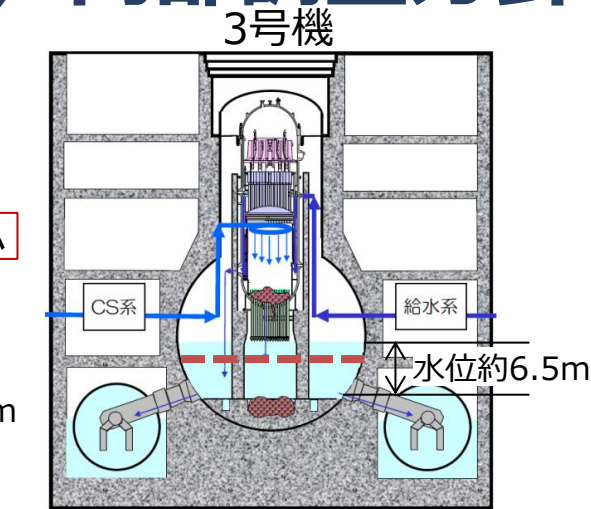
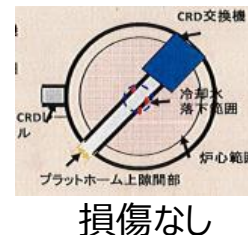
ペDESTAL外側
調査を優先(デ
ブリのシェルへ
の到達状況)



核燃料：約94トン

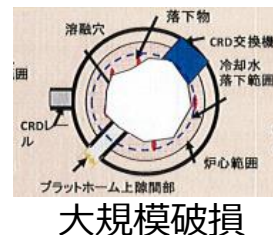
炉外のデブリ量(トン)	
解析等	195トン
ミュオン調査	0～30トン

ペDESTAL内側
調査を優先(プ
ラットフォームの
損傷状態)



核燃料：約94トン

デブリ量(トン)	
炉内	21トン
炉外	343トン



内部調査のために号機毎に開発した遠隔操作調査ロボット

ペDESTAL外側の調査（1号機）

○形状変化型ロボット

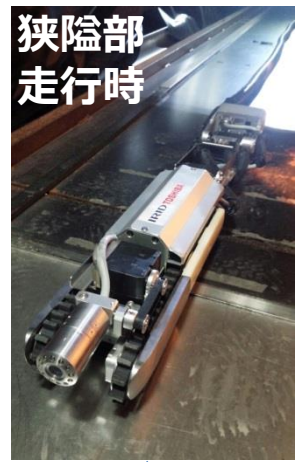


変形

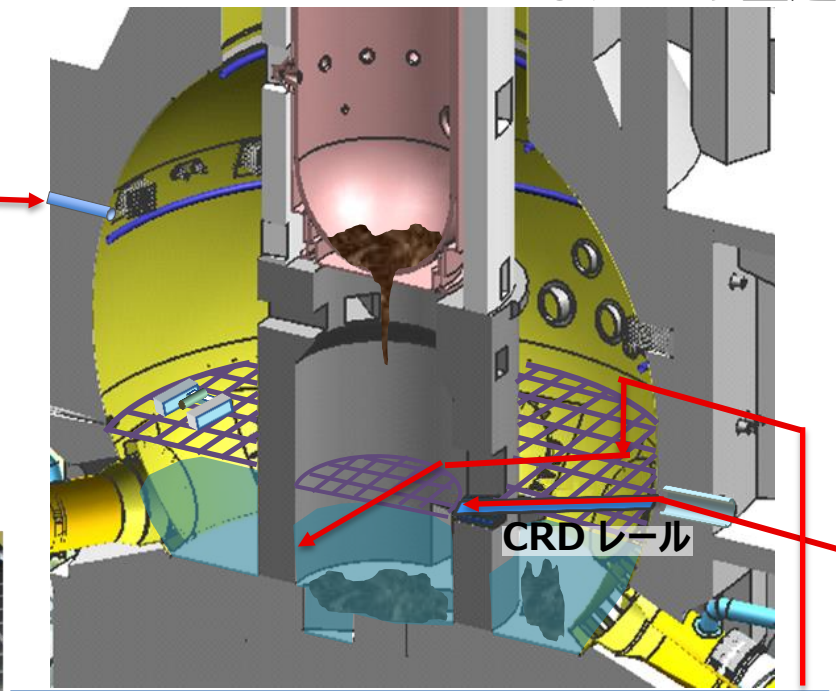
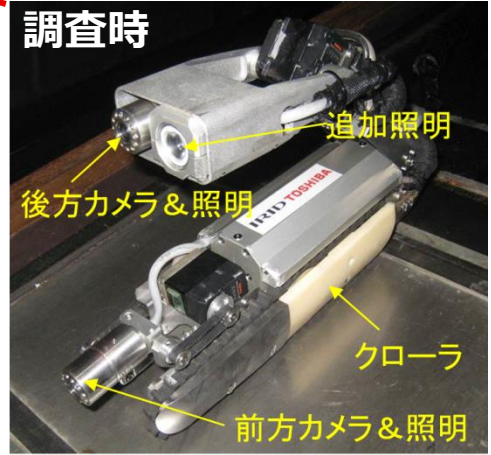


ペDESTAL内側の調査（2号機）

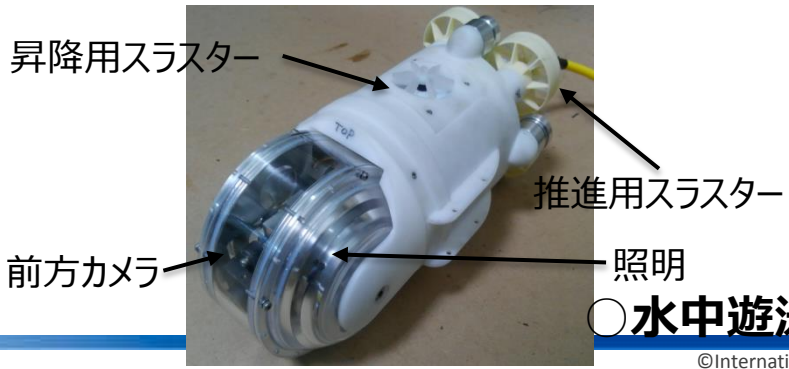
○クローラ型遠隔調査ロボット



変形



ペDESTAL内側の調査（3号機）

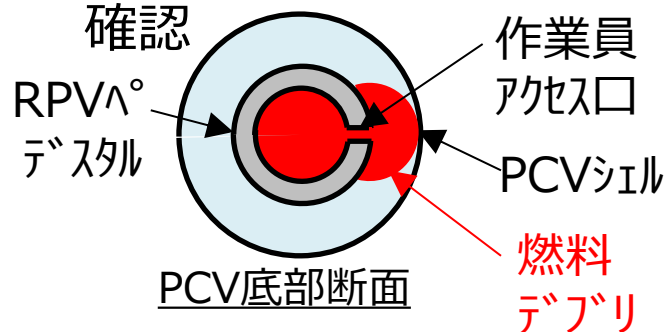


○水中游泳型ロボット

1号機：ペデスタル外部調査【2017年3月実施】

【調査目的】

- ① 燃料**デブリの広がり**状況の確認
- ② 燃料デブリの**原子炉格納容器シェルへの到達有無**の確認



【調査日】

2017年3月18～22日

【取得情報】

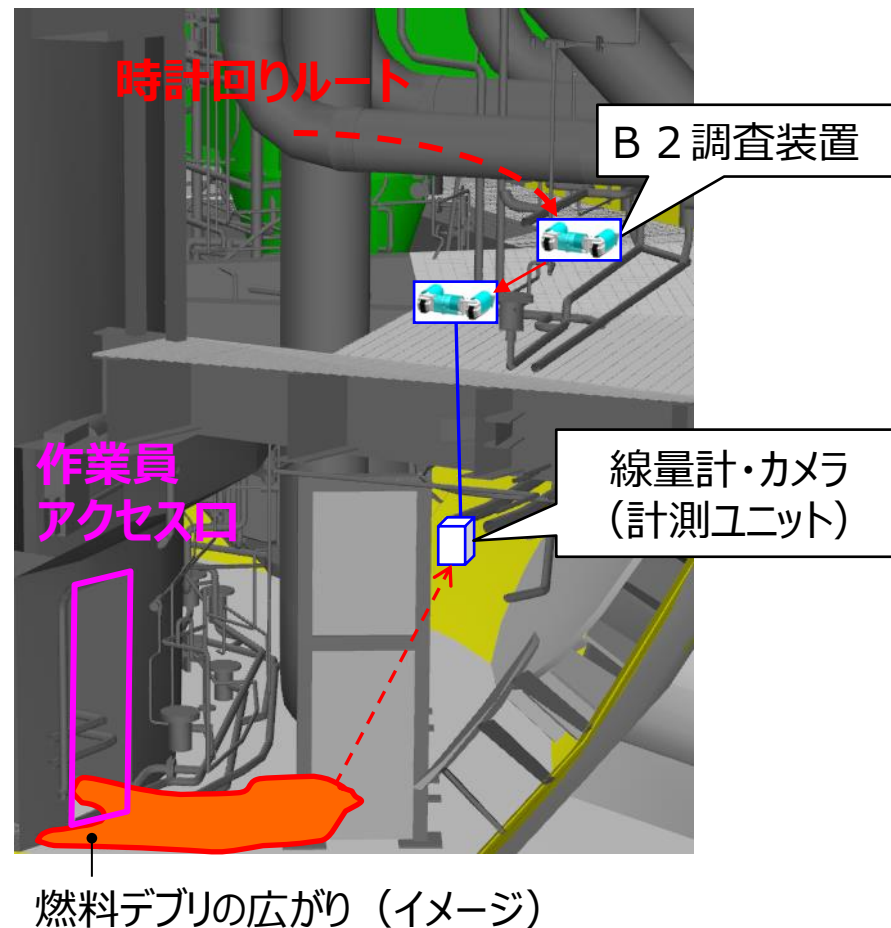
- 降下ポイントの高さ方向の**線量率分布**
- 地下階床面の**近接映像**

↓ 組合せ評価

①、②を判定

【調査工法】

B 2 調査装置が1階グレーチング上を走行。
線量計・カメラを降下させる。



1号機：各調査ポイントの放射線量と画像

3/18 (土)

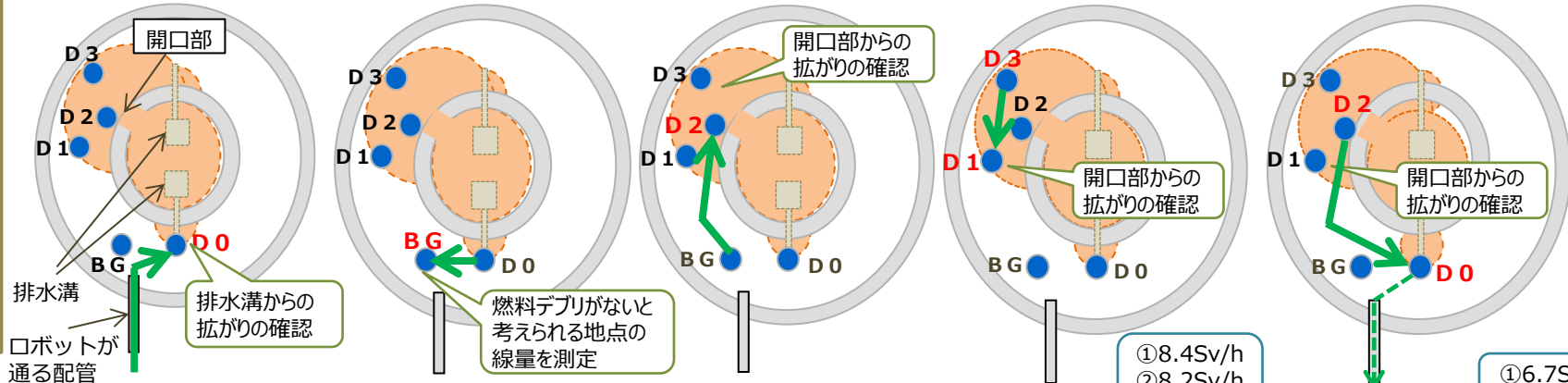
3/19 (日)

3/20 (月)

3/21 (火)

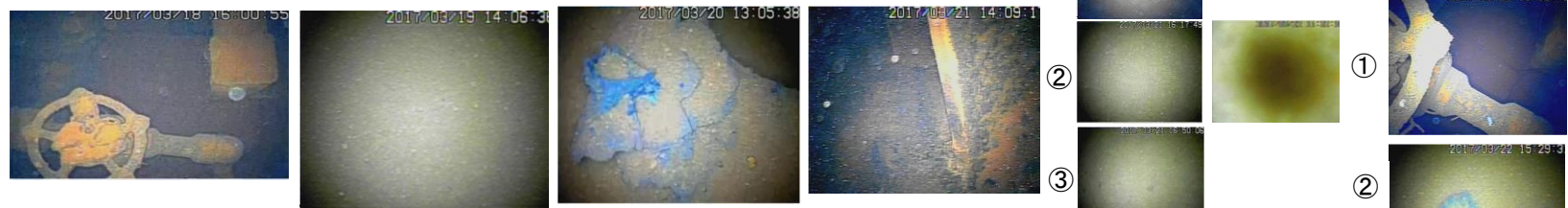
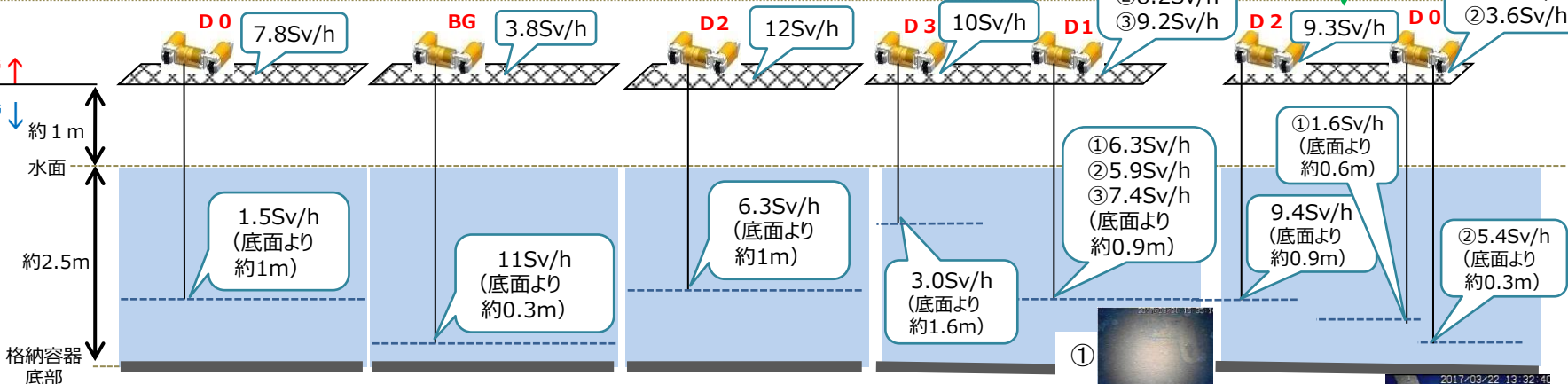
3/22 (水)

調査地点と調査の狙い
(平面図)



1階↑
地下階↓

調査結果
(断面図)



● 調査ポイント ← 調査経路 ○ 燃料デブリの拡がりイメージ (シミュレーションの一例)

※調査中の敷地境界における線量は、約0.5~2μSv/hで変化なく、周辺環境への影響は生じていない。
 ※放射線量・底面からの距離は、今後評価予定。
 ※1階部分の放射線量は前回(2015年4月)の測定値(4.1~9.7Sv/h)と同程度

2号機：ペDESTAL内・上部調査〔2017年1～2月実施〕

【調査方法】

- カメラによる撮影

【実施時期】

- 2017年1～2月

ペネ内事前確認

調査手順

1. ペDESTAL内事前確認

2017年1月30日実施

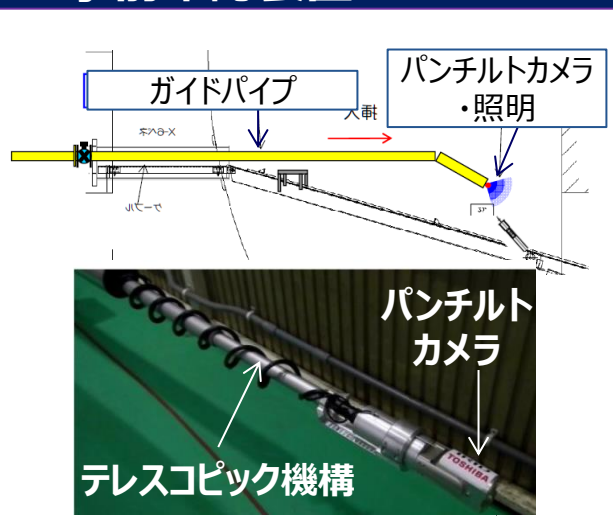
2. レール上堆積物除去

2月9日実施

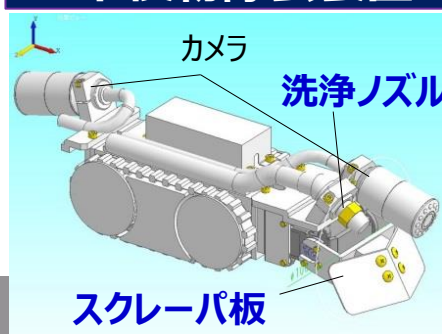
3. A2調査

2月16日実施

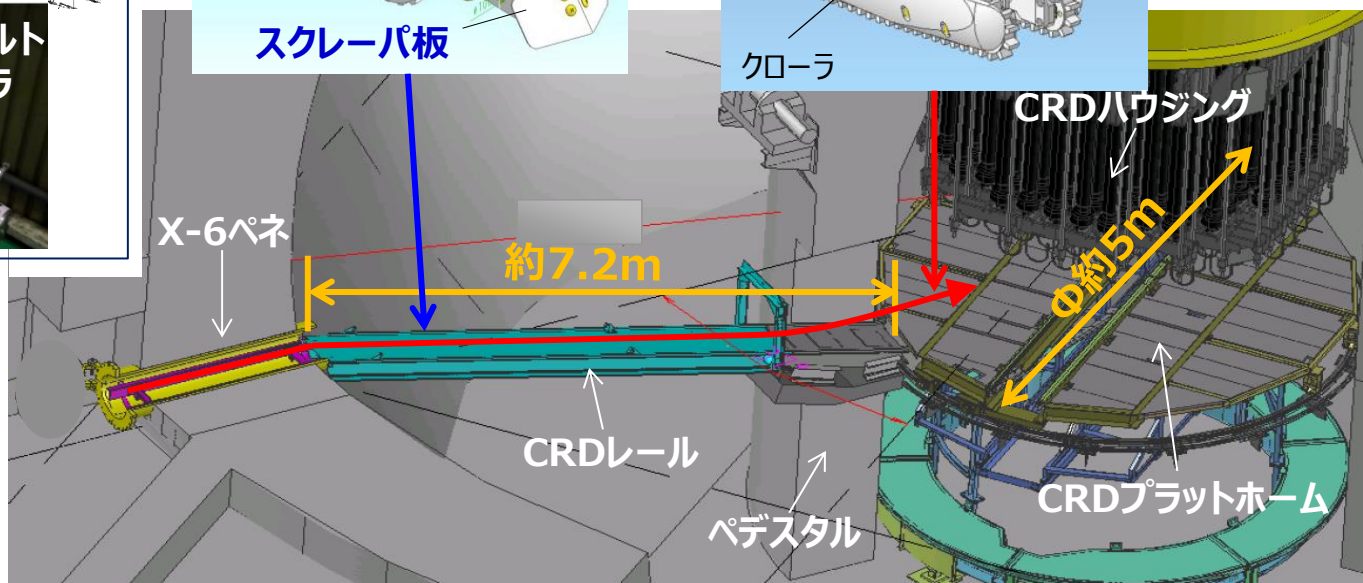
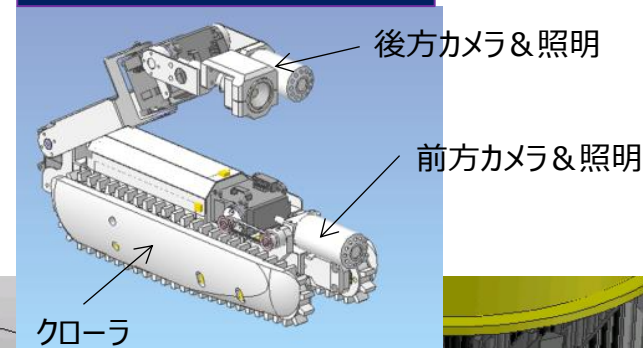
1. 事前確認装置



2. 堆積物除去装置



3. A2調査装置



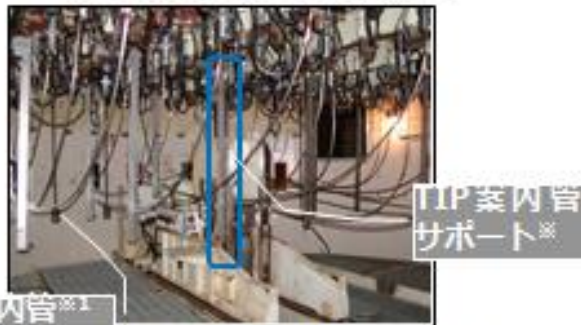
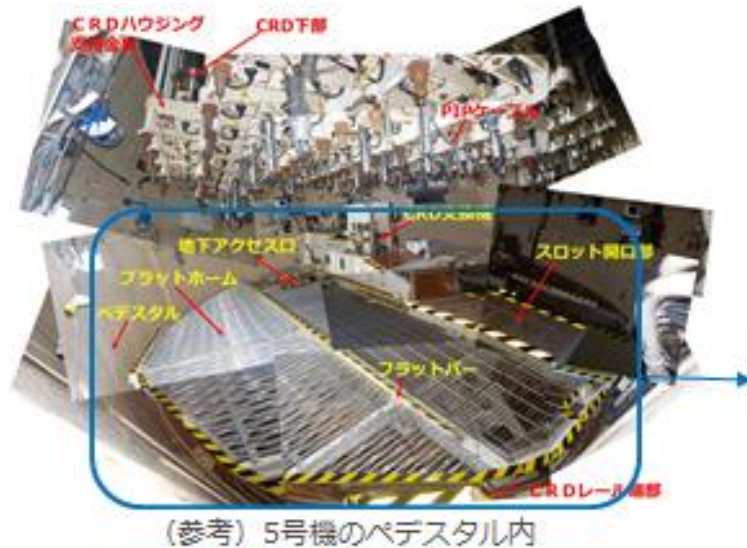
2号機：ペDESTAL内調査結果（画像処理後）

調査日：2017年1月30日、画像処理結果公表：2017年11月30日

■ 画像処理の結果、これまで見えていなかったT I P※管サポートが確認された。

※TIP (Traversing In-core Probing) : 移動式炉内計装装置。原子炉状態を核分裂で発生する中性子で監視するための装置。

※画像処理：東京電力HD



(参考) 2号機のペDESTAL内定検中写真

※5号機は点検のため、TIP案内管及びTIP案内管サポートは取り外されている



■ CRDプラットホームの**グレーチングが脱落**しているが、フレームは残存している。

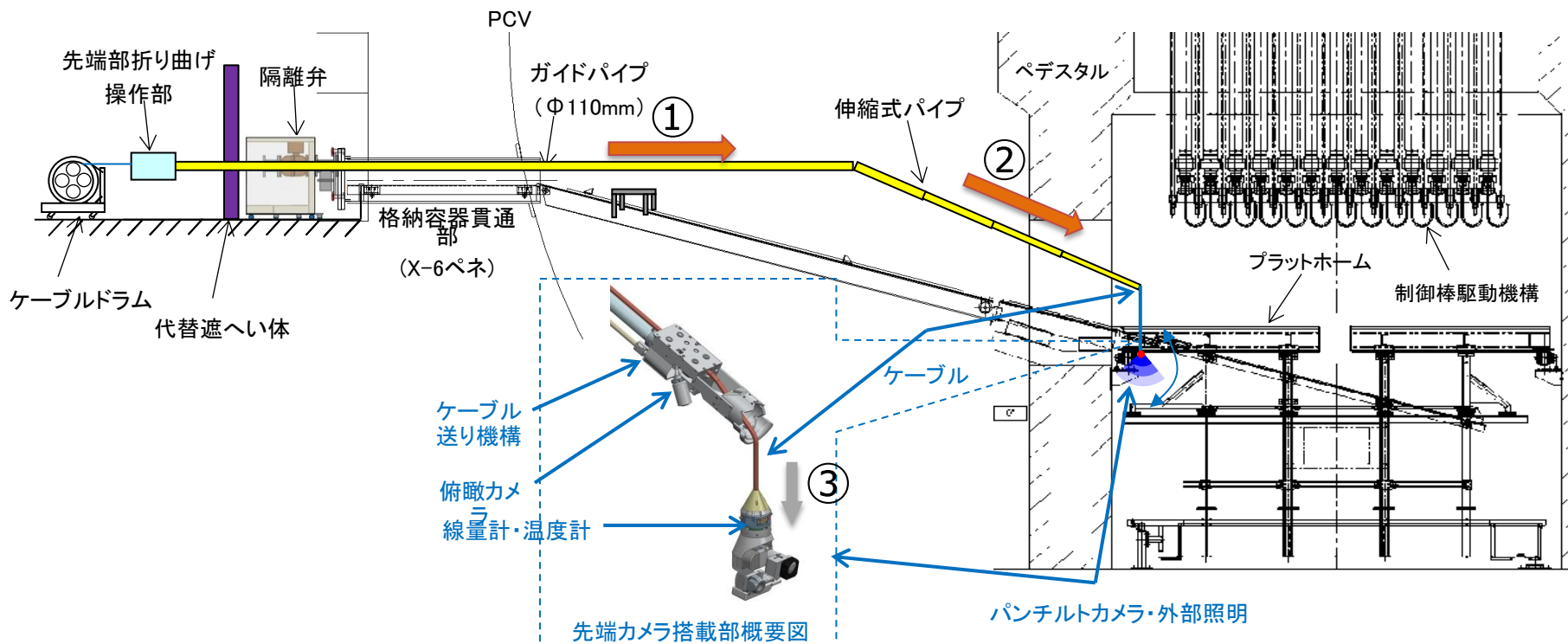
2号機：ペDESTAL内下部調査【2018年1月19日実施】

■調査内容

プラットホーム下の状況確認

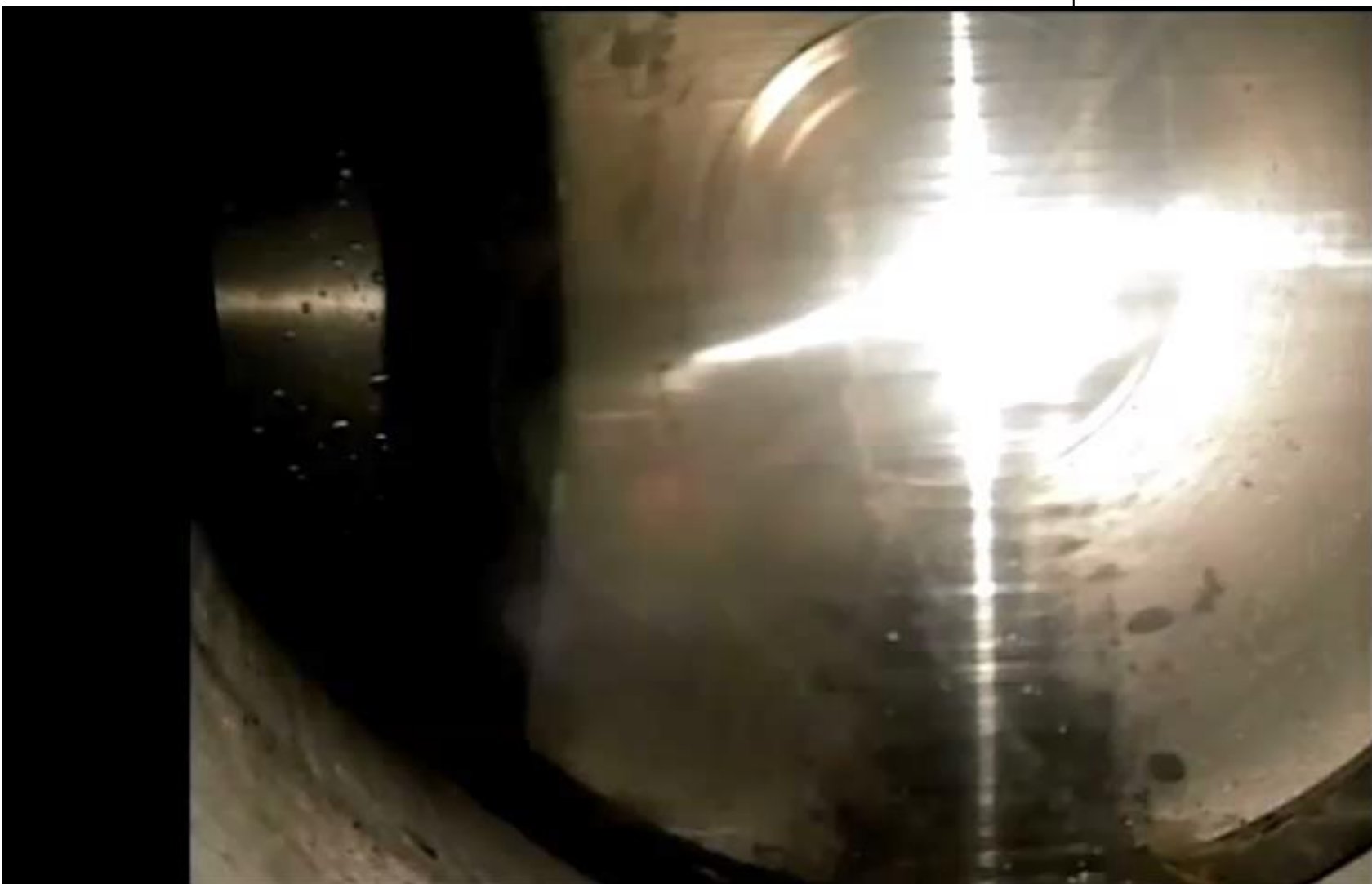
■調査手順

- ①ガイドパイプ挿入 ⇒
- ②伸縮式パイプ伸展 ⇒
- ③パンチルトカメラ吊降し ⇒
- ④調査



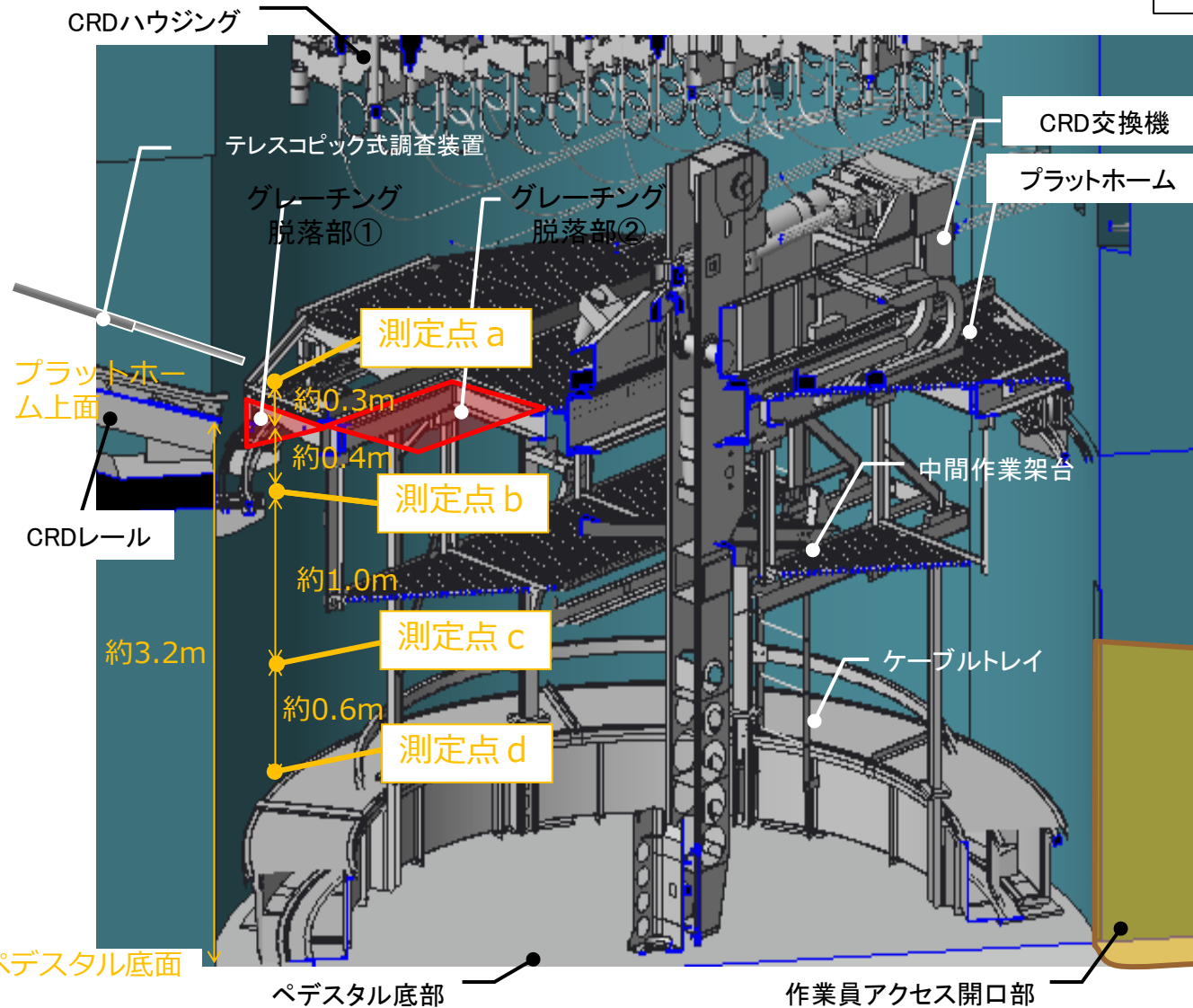
2号機：ペデスタル内下部調査結果（動画）

調査日：2018年1月19日



2号機：ペデスタル内下部調査結果：線量率と温度

調査日：2018年1月19日



測定点	線量率 ※1,2 [Gy/h]	温度※2 [°C]
a	7	21.0
b	8	21.0
c	8	21.0
d	8	21.0

【参考：ペデスタル外※3】
線量率：最大42[Gy/h]
温度：最大21.1[°C]

※1: Cs-137線源で校正

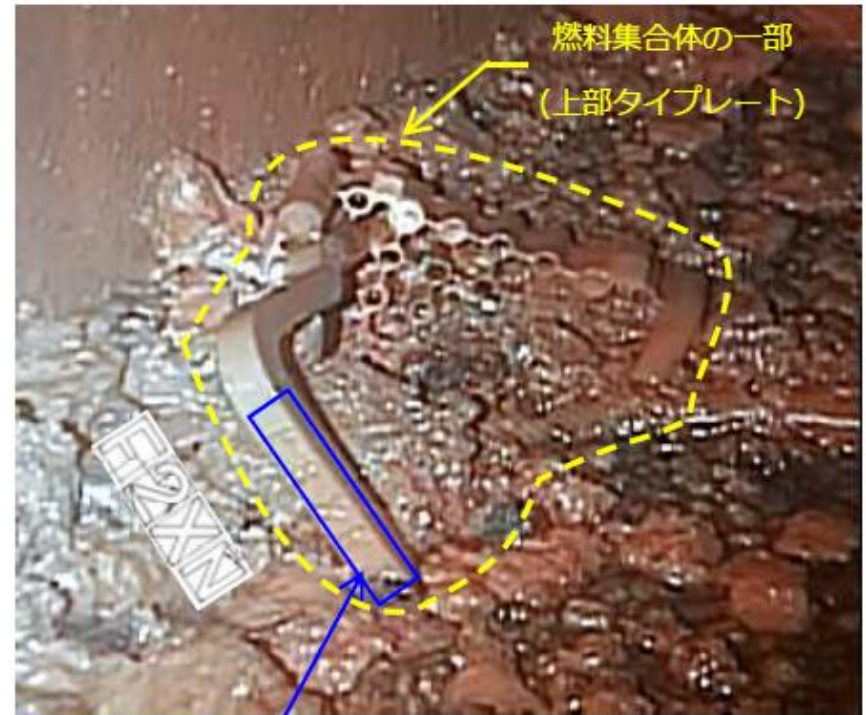
※2: 誤差: 線量計±7%
温度計±0.5°C

※3: 調査装置内に測定器が収納された状態で測定したため参考値

2号機：ペDESTAL内下部調査結果：



ペDESTAL底部の上部タイププレートの刻印文字について



- ペDESTAL底部で確認された上部タイププレートについて、燃料集合体の装荷位置を確認するため、刻印文字を確認した。
- 左から『F』『2』『X』『N』の4文字目までは特定できた。通し番号である5文字目以降は特定できなかったため、どの位置に装荷されていた燃料集合体の上部タイププレートが分からなかった。

○刻印文字

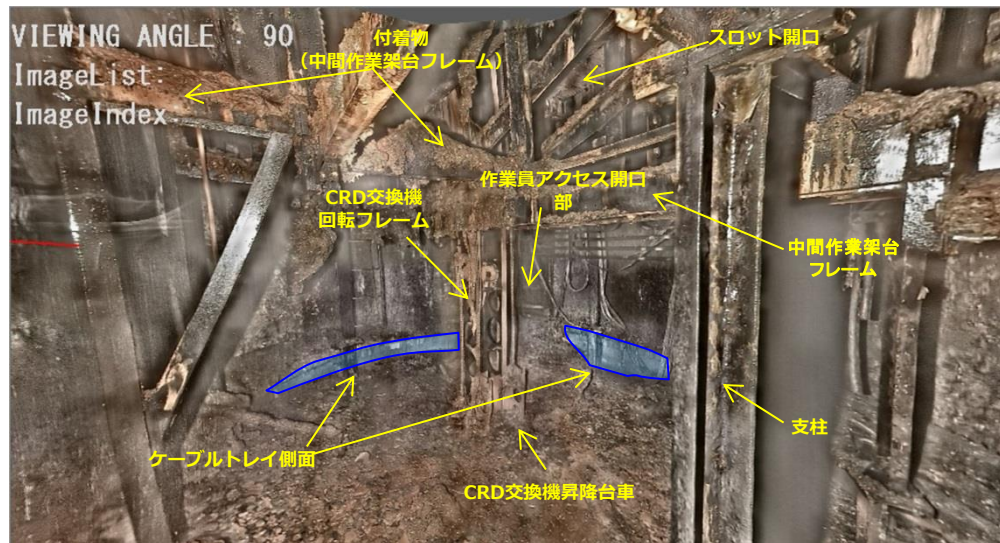
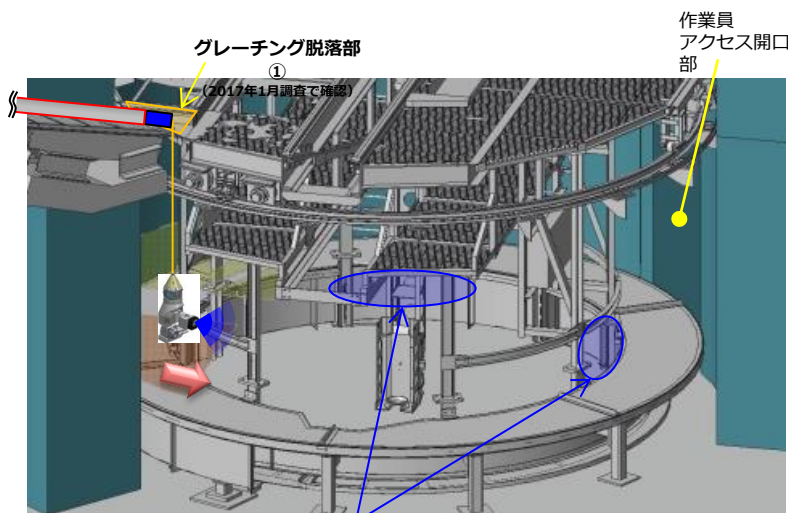
- ・ 2号機に装荷されていた燃料集合体の刻印文字数は5～8文字
- ・ 『プラント名 (F2)』 + 『購入時期 (V～AB)』
+ 『購入先略称 (N)』 + 『通し番号 (1～)』

画像処理：東京電力ホールディングス(株)

2号機：ペデスタル内下部調査結果

調査日1/19

○ 構造物の状況・堆積物の分布状況（合成パノラマ図）



ケーブルトレイ側面を確認した
範囲 → カメラ方向

- ・ CRD交換機回転フレーム、中間作業架台フレーム、支柱、ケーブルトレイ等の構造物について、大きな変形や損傷が無いことを確認した。
- ・ 小石状・粘土状に見える堆積物がペデスタル底部全体に堆積していることを確認した。
- ・ 堆積物は熔融物が固化したもののように見える一方で、ケーブルトレイ(ステンレス鋼、厚さ4mm)の変形が確認されていないことから、ケーブルトレイの上に堆積し始めた際の堆積物温度が、ケーブルトレイに熱変形を生じさせる温度ではなかった可能性がある。



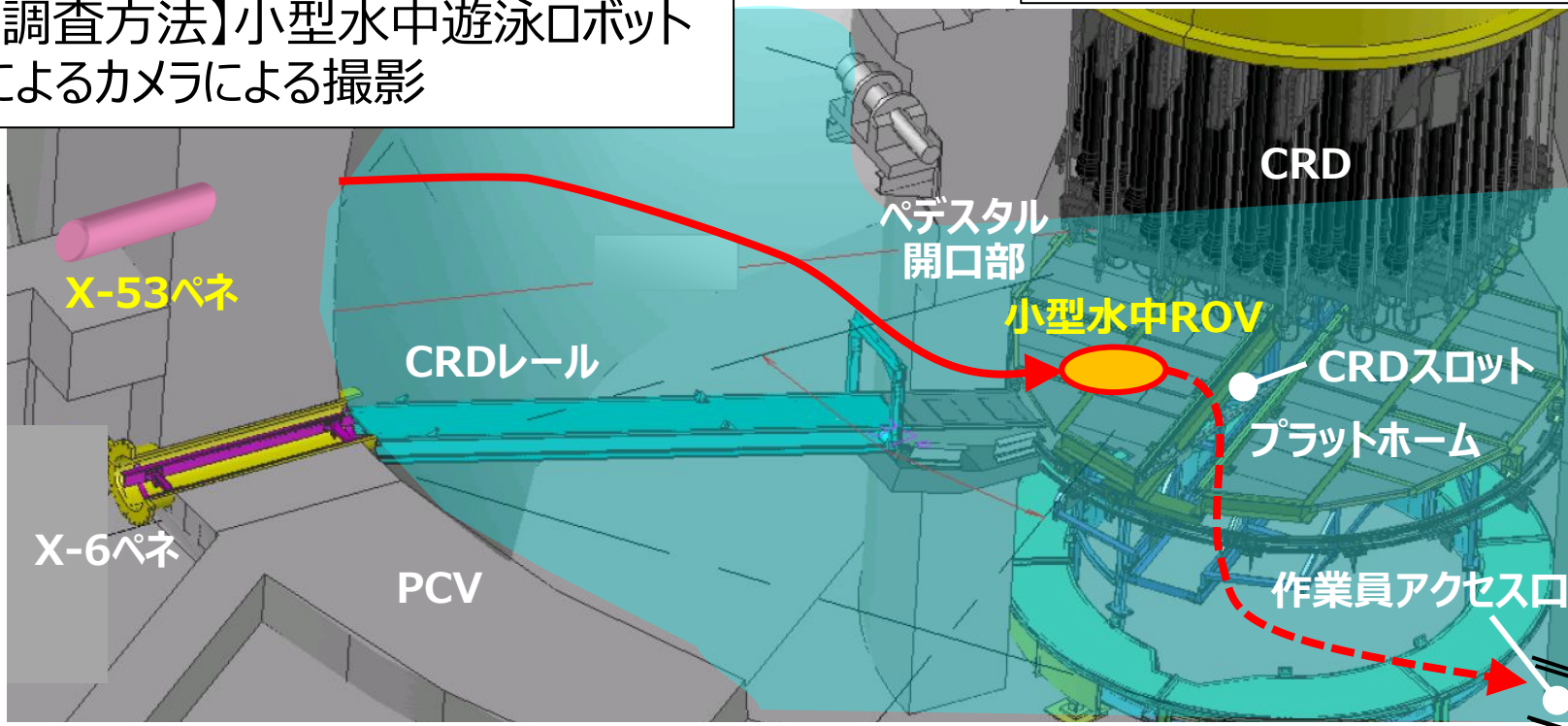
(参考) 2号機定検時
※運転時には上記構造物は
PCV内より撤去

画像提供及び画像処理：国際廃炉研究開発機構 (IRID)

3号機：ペデスタル内部調査【2017年7月実施】

調査日：2017年7月19～22日

【調査方法】小型水中遊泳ロボット
によるカメラによる撮影



- ① **配管貫通部 (X-53ペネ)** からアクセスしペデスタル内へ進入。**プラットフォーム、CRD下部**の損傷状況を確認する。
- ② ペデスタル地下階へのアクセスルートを確認する。
- ③ 地下階への進入が可能であれば、**ペデスタル底部デブリ**の堆積状況や作業員アクセス口から**ペデスタル外へのデブリの流出**状況を確認する。

3号機：調査用水中ROV外観（モックアップ機）



推進用スラスタ

中性浮力ケーブル

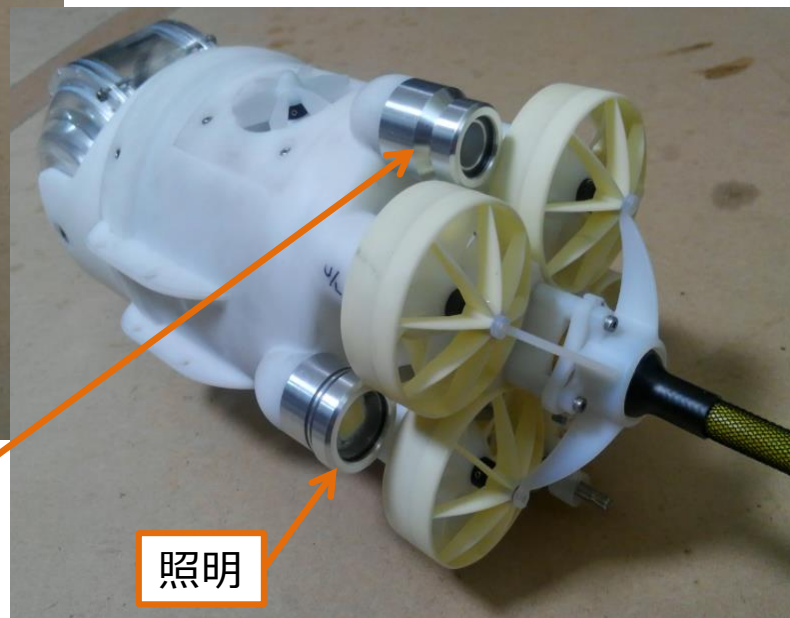
項目	仕様
外形寸法	外径：φ125mm 全長：約300mm
重量	約2000g（気中）
耐放射線性	200Gy

前方カメラ

照明

後方カメラ

照明



3号機：水中ROV撮影映像（動画）

隔離弁 開



3号機：画像取得結果（確認された構造物）



■ 外観上の特徴

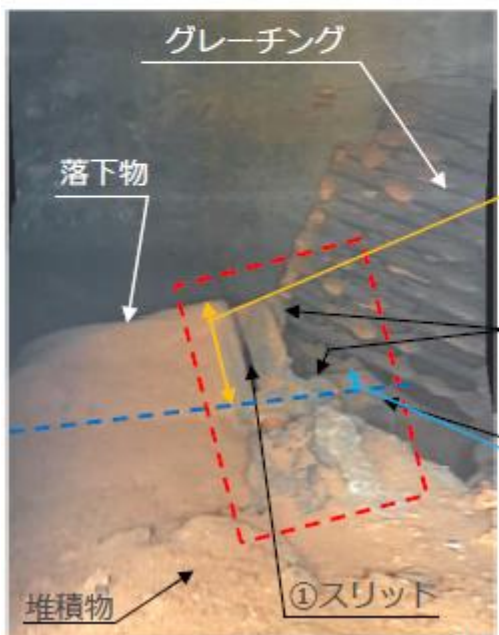
- 落下物の右端部（赤枠内）に①スリットが確認できること、②ローラーのような形状が2箇所確認できることから制御棒落下速度リミッタの可能性がある一方で、制御棒落下速度リミッタの特徴的な構造である傘型形状部は堆積物に埋まり確認ができない

■ 寸法推定

- ソケットの半径 約3cm（設計値）を基準として、落下速度リミッタと想定している部分の半径を推定した結果、設計値 約12cmに対して推定値 約13cmと概ね一致

■ 確認結果

- 最も特徴的な構造である傘型形状部が確認できなかったことから、特定には至らなかった



<カメラ向き：水平>

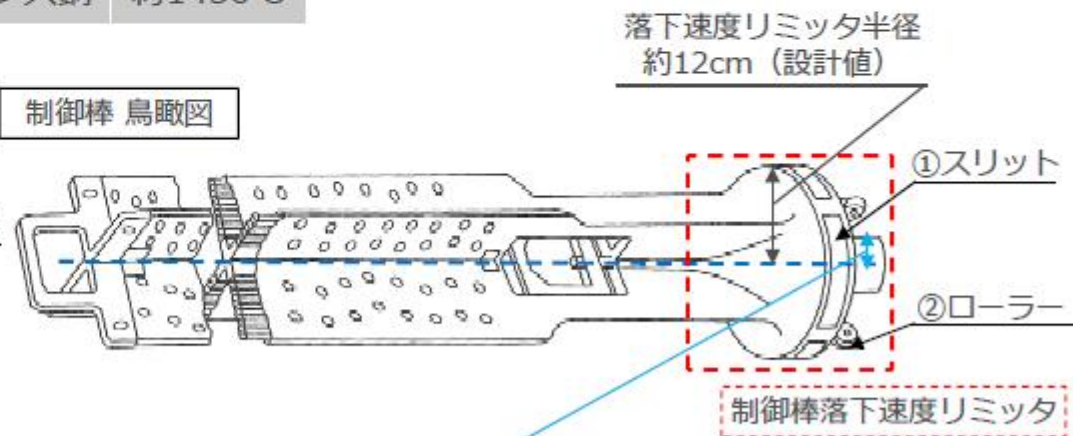
機器名	材質	融点
制御棒	ステンレス鋼	約1450℃

落下速度リミッタ半径
約13cm（推定値）

制御棒 鳥瞰図

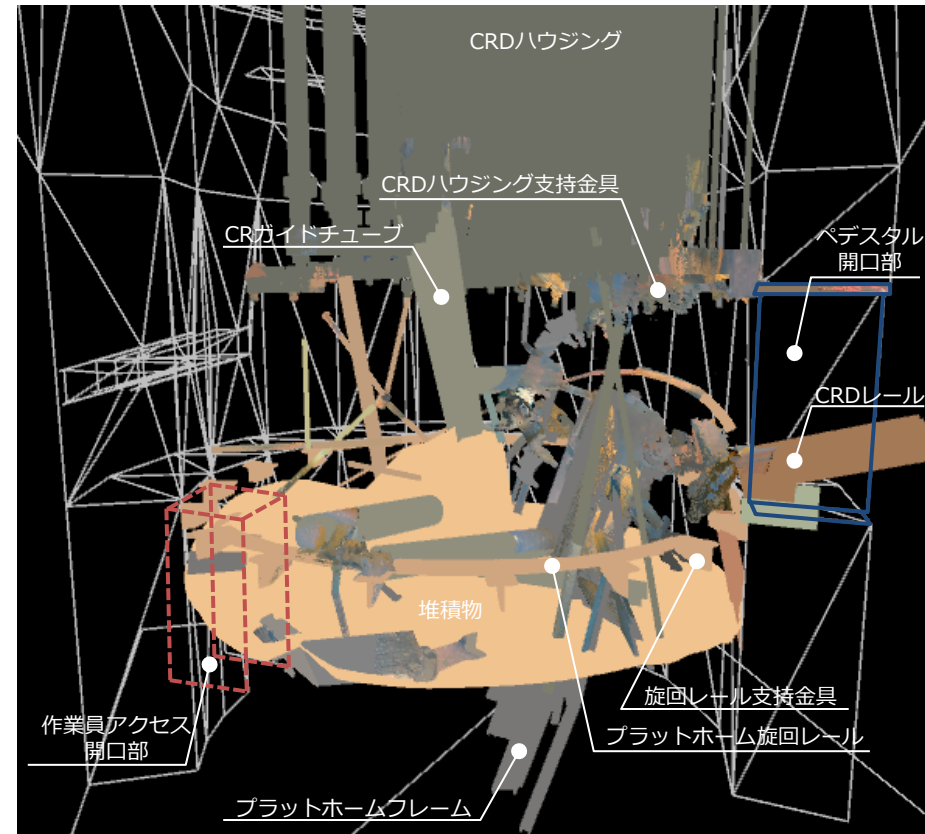
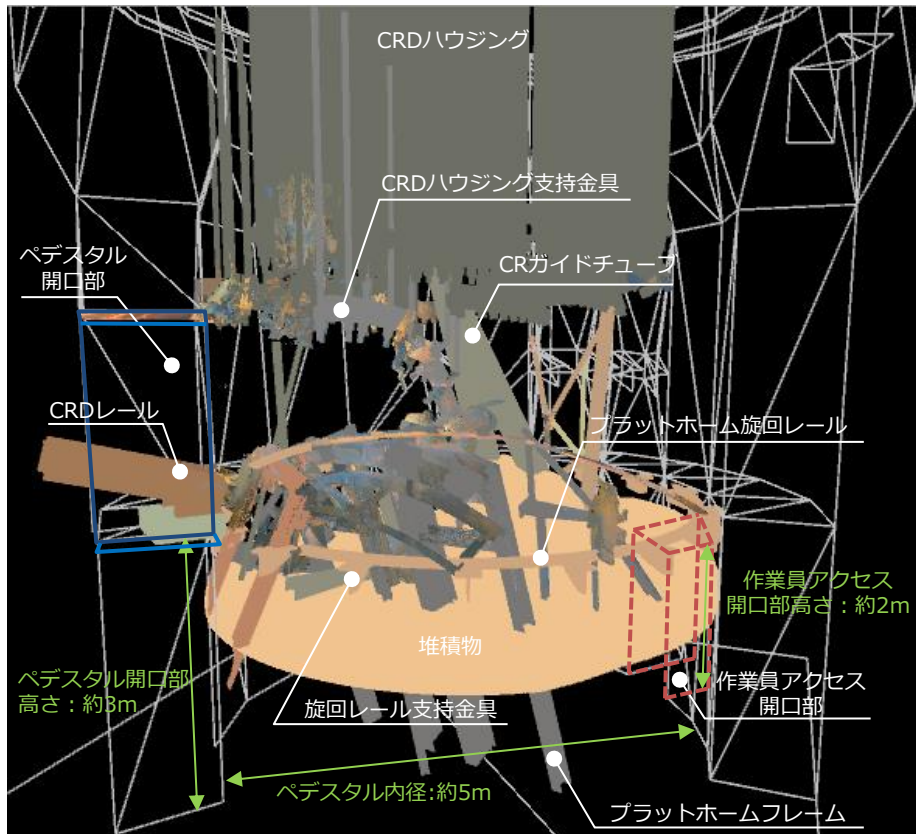
- ②ローラーのような形状
- ③筒状の構造物（ソケット部と推定）

③ソケット 半径約3cm（設計値）



3号機：映像からの三次元復元結果

調査日：2017年7月19日、復元結果公表：2018年4月26日

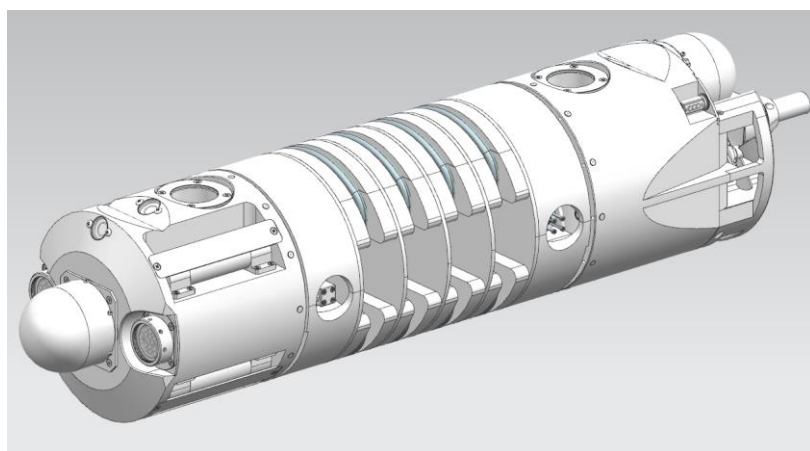


- **プラットフォームはレール上から外れ、一部が堆積物に埋まっていると推定** 画像作成：東芝エネルギーシステムズ(株)
- **堆積物は中心部付近が高くなっており、中心から離れるほど低くなっている**
- **堆積物が高くなっている原因としては、堆積物の下にCRD交換機等の構造物が存在する可能性**が考えられる
- 今後の対応としては、この成果を含め、これまでに得られた情報等を基に、更なる調査計画、燃料デブリ取り出し装置の設計や取り出し手順等、引き続き燃料デブリ取り出しの検討を進めていく

2.1.2 原子炉格納容器(PCV)内部調査 (詳細調査)

1号機：ボート型アクセス装置

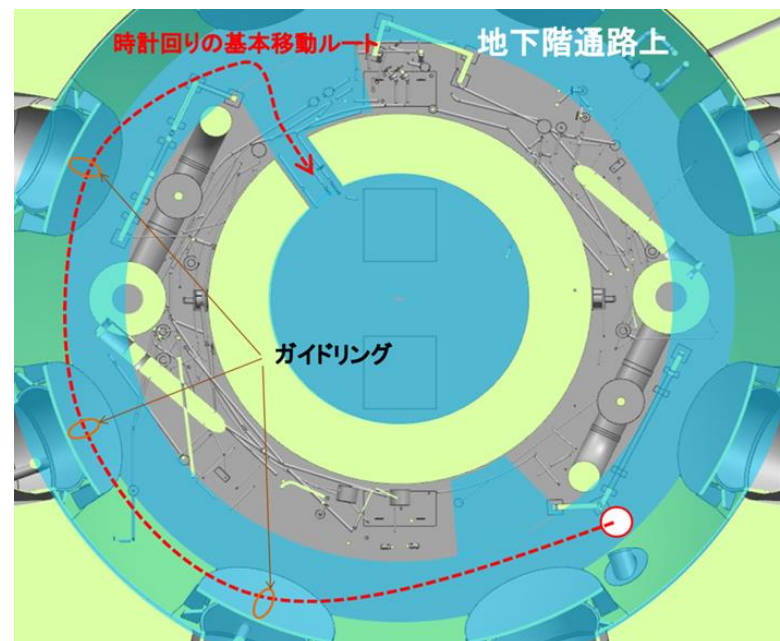
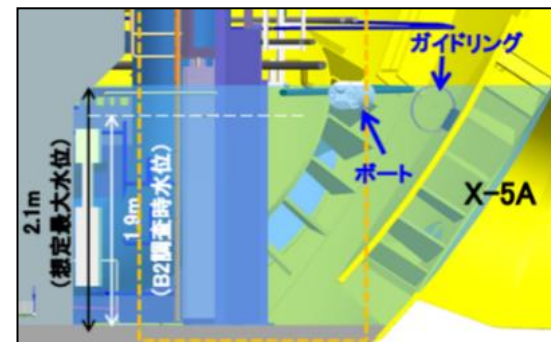
- 格納容器内の水の上を航行して、広範囲に移動可能なボート型アクセス装置を製作中



ガイドリング取付用の例

- 直径：φ25cm
- 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

実施事項・成果 – ボート型アクセス・調査装置 –

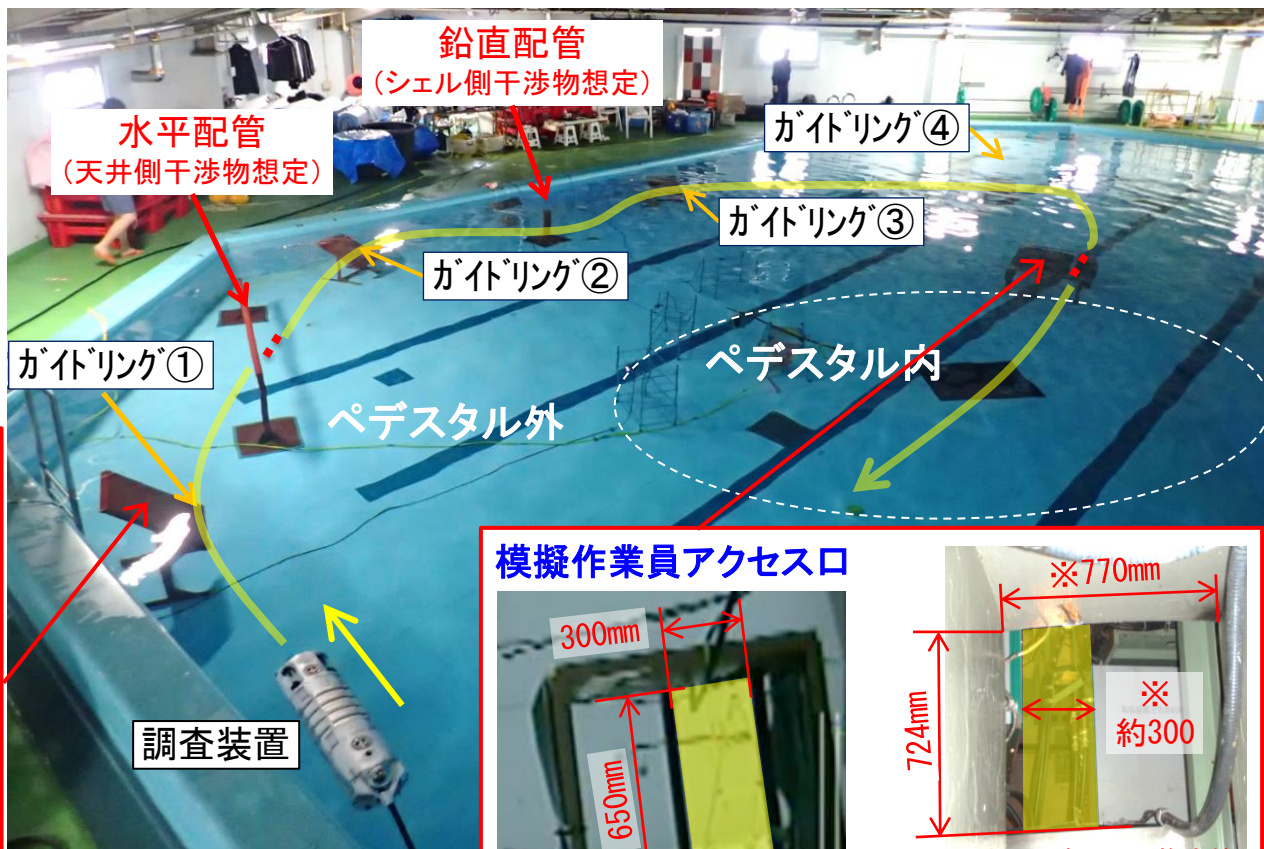
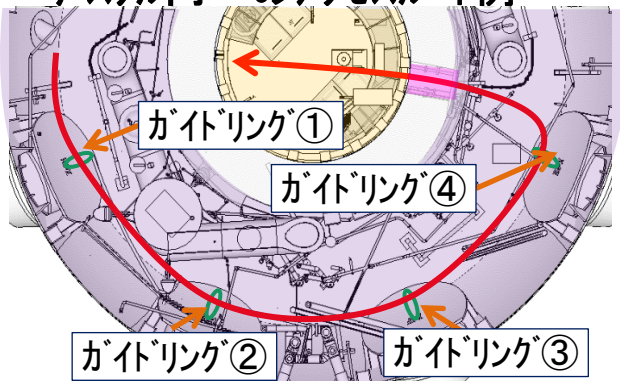
～製作・工場内検証～

【調査装置の広範囲移動とペDESTAL内進入に係る機能検証状況】

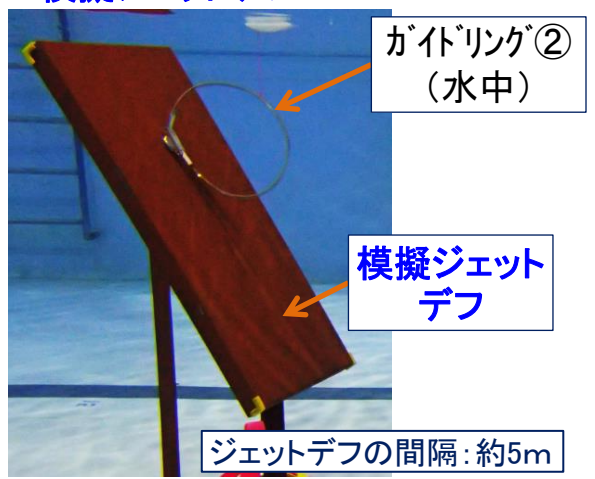
1号機PCV内地下階を模擬した空間※を搭載カメラの映像のみで調査装置を操作し、広範囲移動とペDESTAL内への進入できる見通しを確認した

※：試験設備の都合上、実機アクセスルートと左右反転した状態で試験を実施

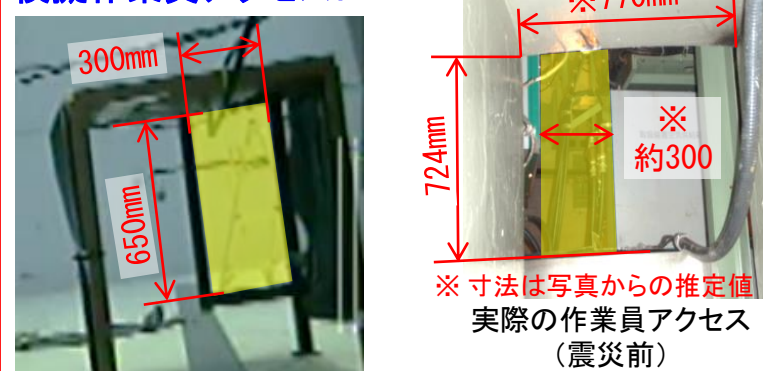
ペDESTAL内へのアクセスルート例



模擬ジェットデフ



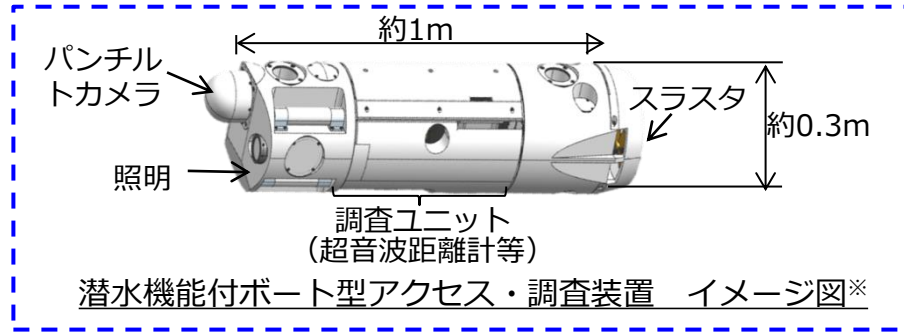
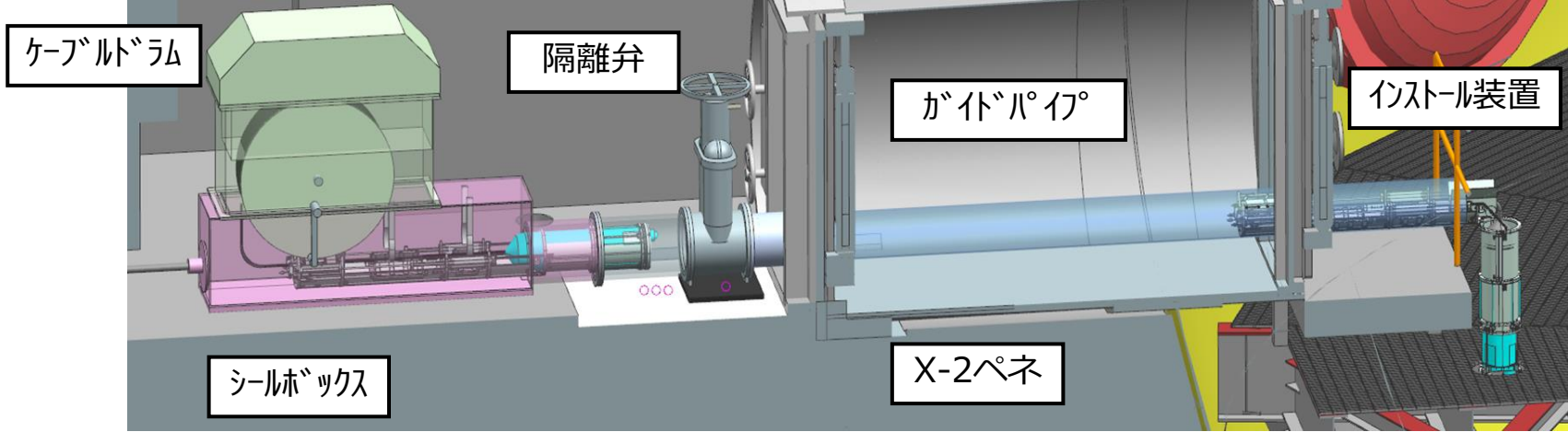
模擬作業員アクセス口



※ 寸法は写真からの推定値
実際の作業員アクセス
(震災前)

1号機 : X-2ペネからのPCV内部調査【2019年度上期予定】(1/2)

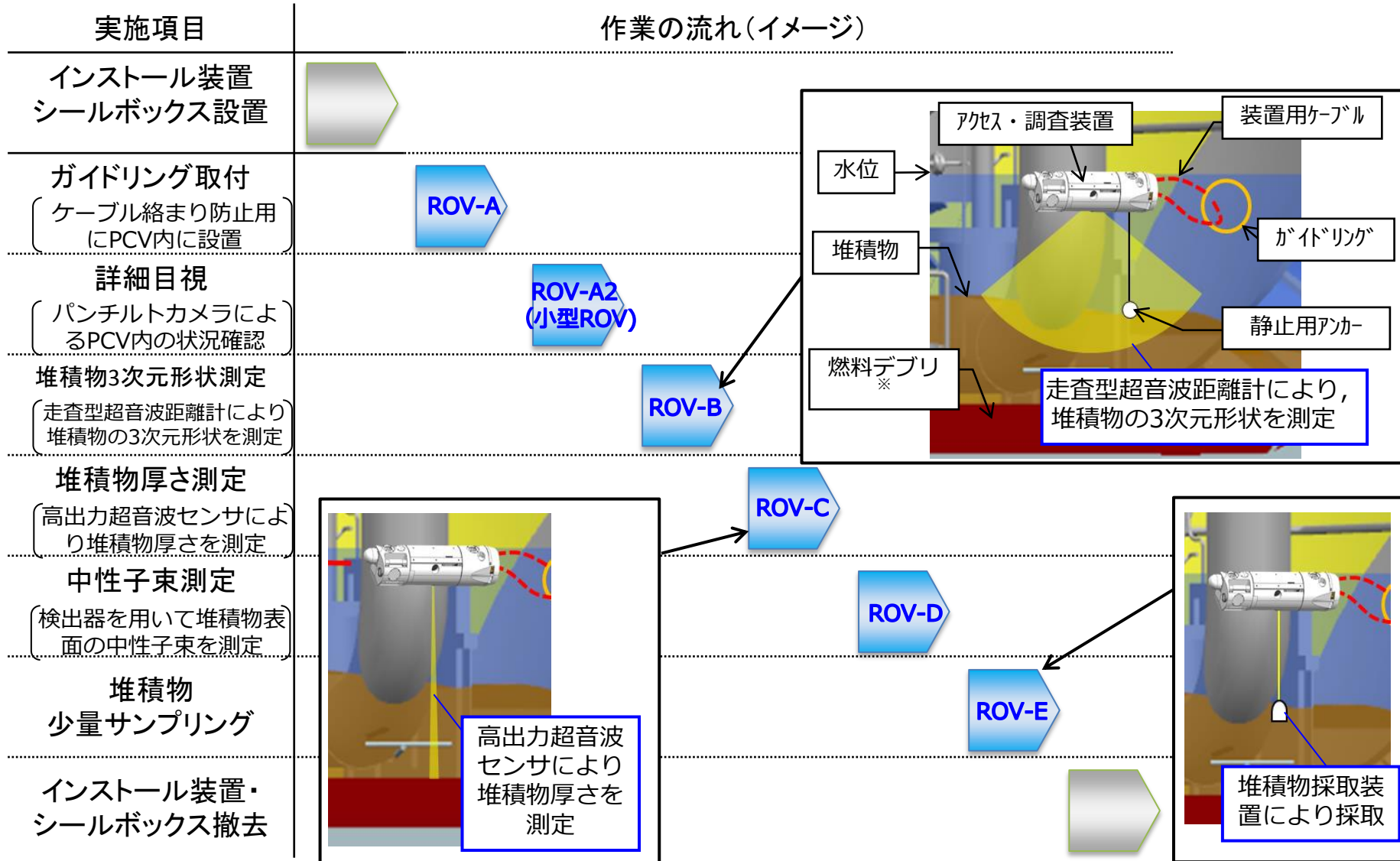
- 1号機PCV内部調査においては、主にペDESTAL外における構造物や堆積物の分布等を把握するためのアクセス・調査装置を開発中。
- 2017年3月の調査で確認された堆積物は水中にあるため、アクセス・調査装置は潜水機能付ボートを開発中。X-2ペネを穿孔して構築したアクセスルートから、調査を実施する計画。
- 従来のPCV内部調査と同様に、PCV内の気体が外部に漏れ出て周辺環境へ影響を与えていないことを確認するため、作業中はダストモニタによるダスト測定を行い、作業中のダスト濃度を監視する予定。



1号機X-2ペネからのPCV内部調査のイメージ図

1号機：X-2ペネからのPCV内部調査【2019年度上期予定】(2/2)

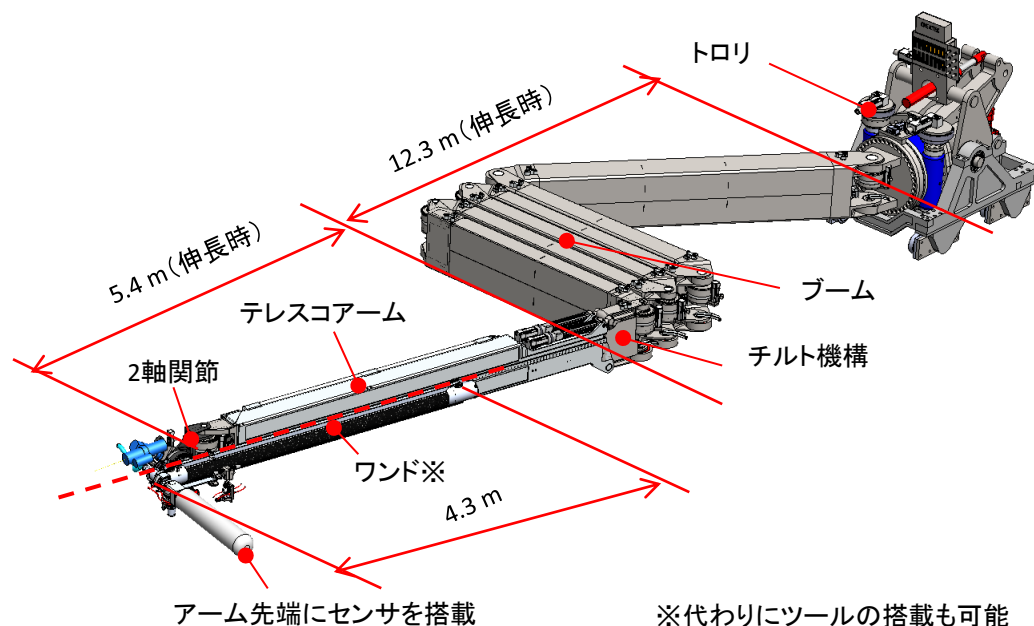
- 潜水機能付ボート型アクセス・調査装置については、機能毎に6種類準備する予定。



2号機：アーム型アクセス装置

■ 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装置を製作中

- アーム全長約22 m
- 10 kgまでの調査装置を搭載可能



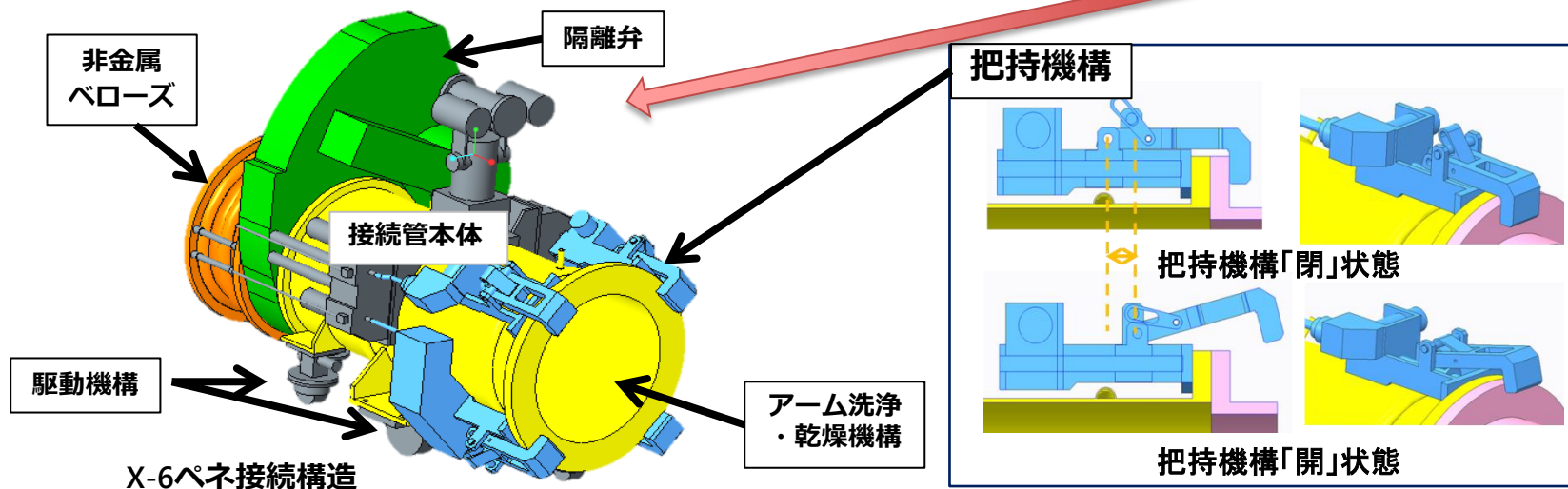
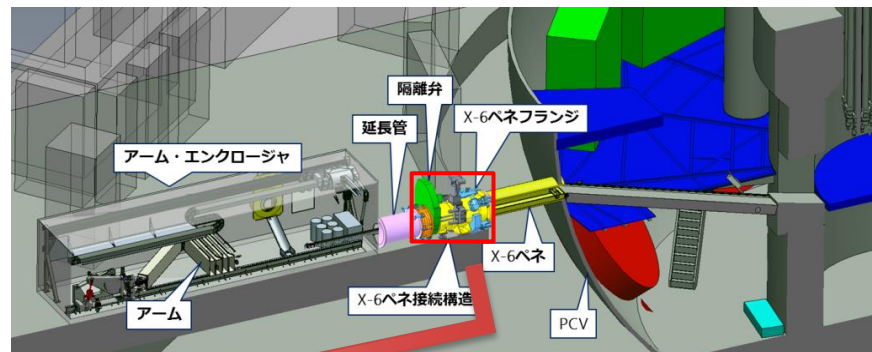
アーム型アクセス装置

アーム型のアクセスルート

■ 格納容器への接続構造体

以下の機能等を有する接続構造体を開発中

- ✓ 遠隔で既存のペネフランジに接近・取りつく機能
- ✓ 把持機構の耐震性
- ✓ 閉じ込め機能
- ✓ アーム通過性の維持



接続構造体外観

実施事項・成果 –アーム型アクセス・調査装置– ～製作・工場内検証（アームエンクロージャ）～

外側構造は概ね製作し、ポート*、各パネルには、蓋(フランジ)を今後設置予定。

*現在1箇所のポート開口であるが、更に1箇所を今後開口予定



背面パネルフランジ
サービスパネル
(ケーブル等の貫通部)

X6°ネ側フランジ



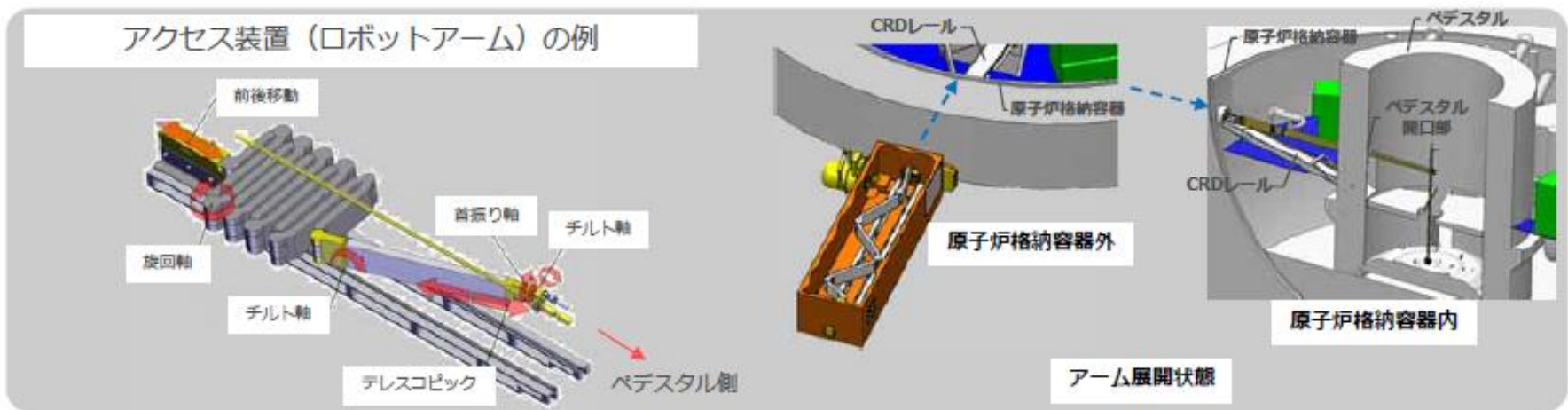
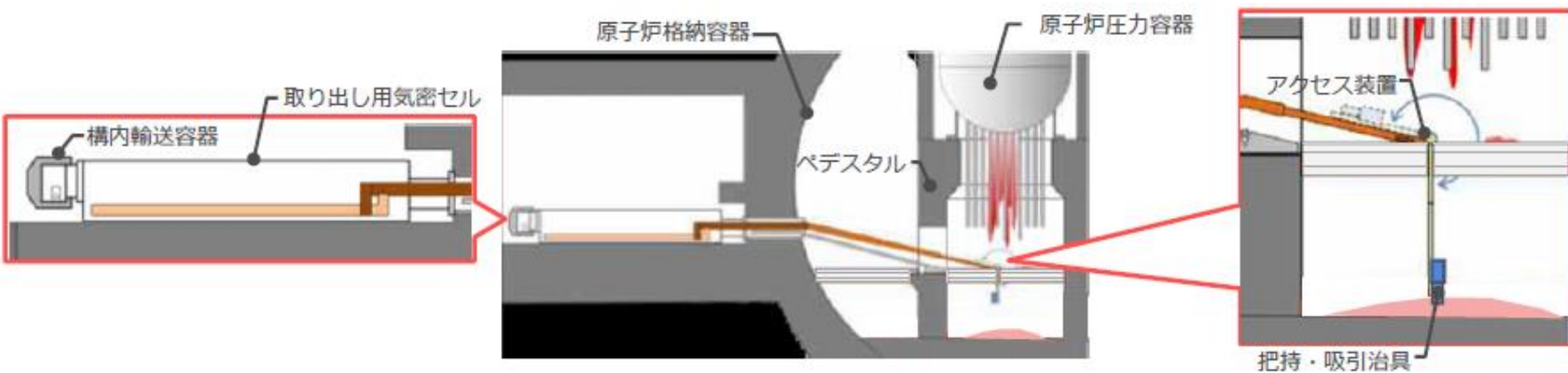
高線量物品搬出口



2.2 燃料デブリ取り出し技術

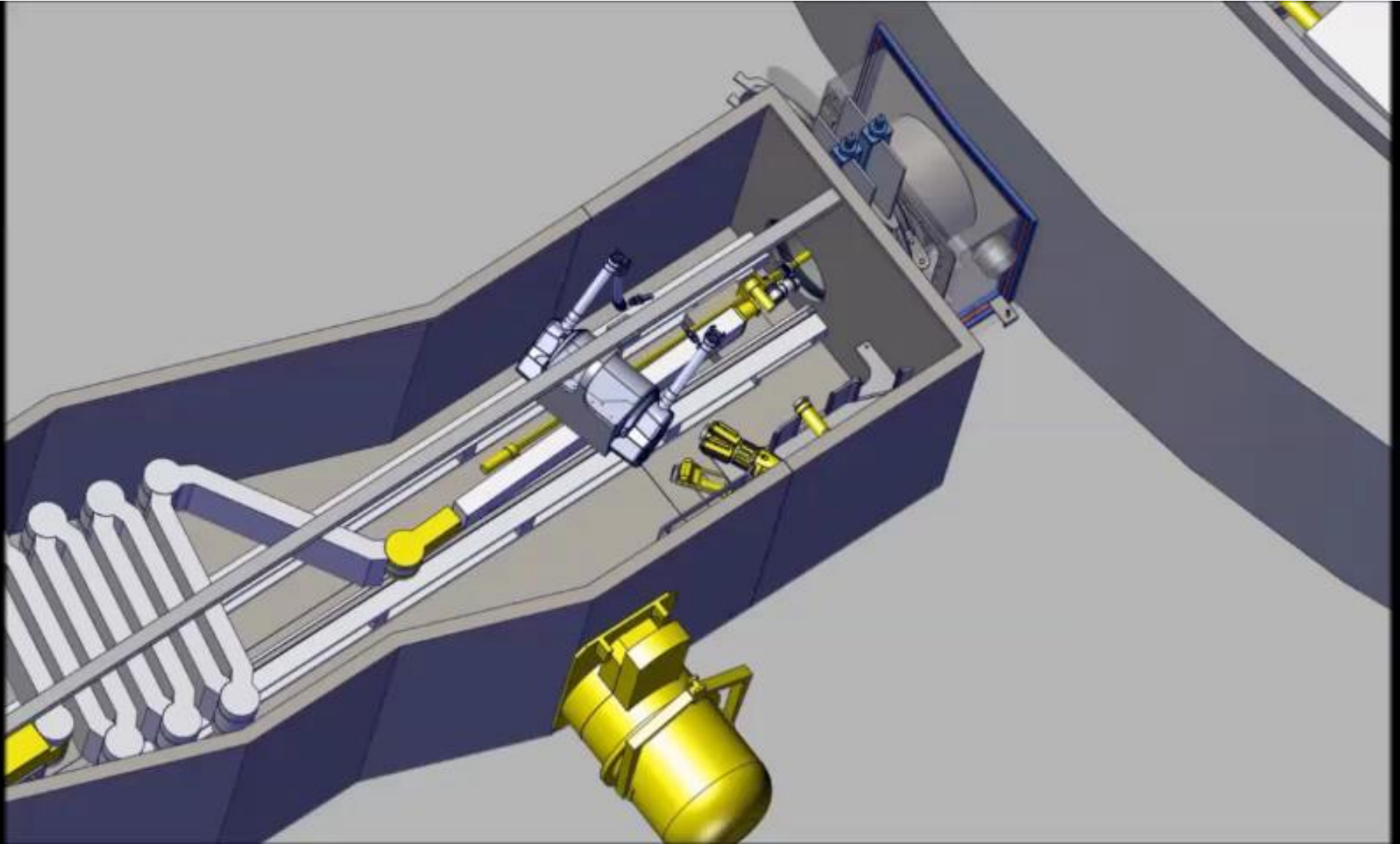
初期段階の燃料デブリ取出し方法（イメージ）

- アクセス装置を原子炉建屋 1 階の格納容器貫通孔から原子炉格納容器内に挿入し、原子炉格納容器底部にある燃料デブリを横からアクセスして取り出す。



‘17.10.31東京電力HD公表「第56回特定原子力施設監視・評価検討会・燃料デブリ取り出し作業における安全確保の考え方」より

初期段階の燃料デブリ取出し方法(イメージ・動画)



燃料デブリ取出し技術（工法概念）

技術的課題

- **放射性ダストの閉じ込め**機能の確保
- **遠隔操作**技術の確立
- **被ばく低減・汚染拡大防止**技術の確立

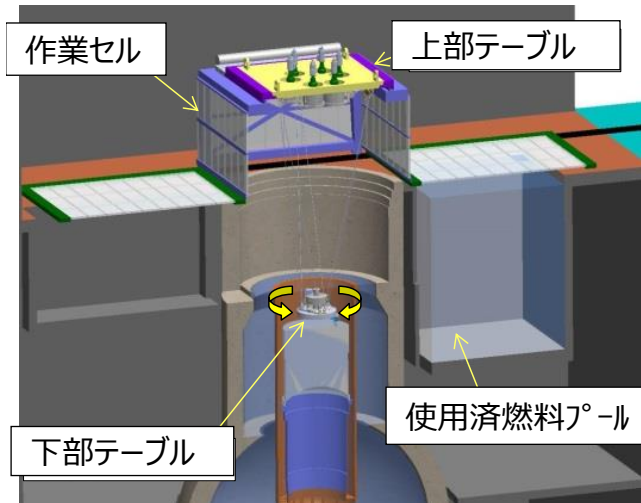
基盤技術の開発



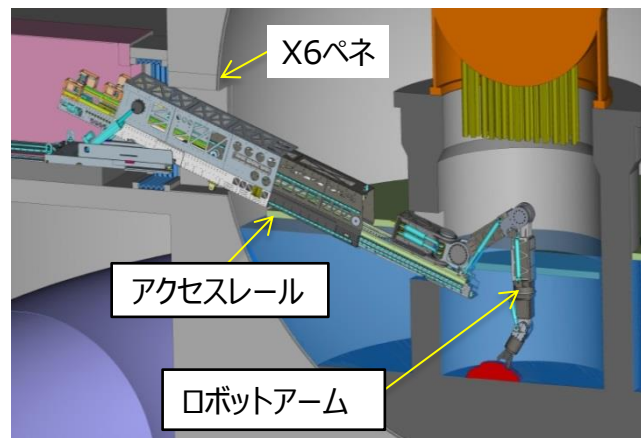
ロボットアーム



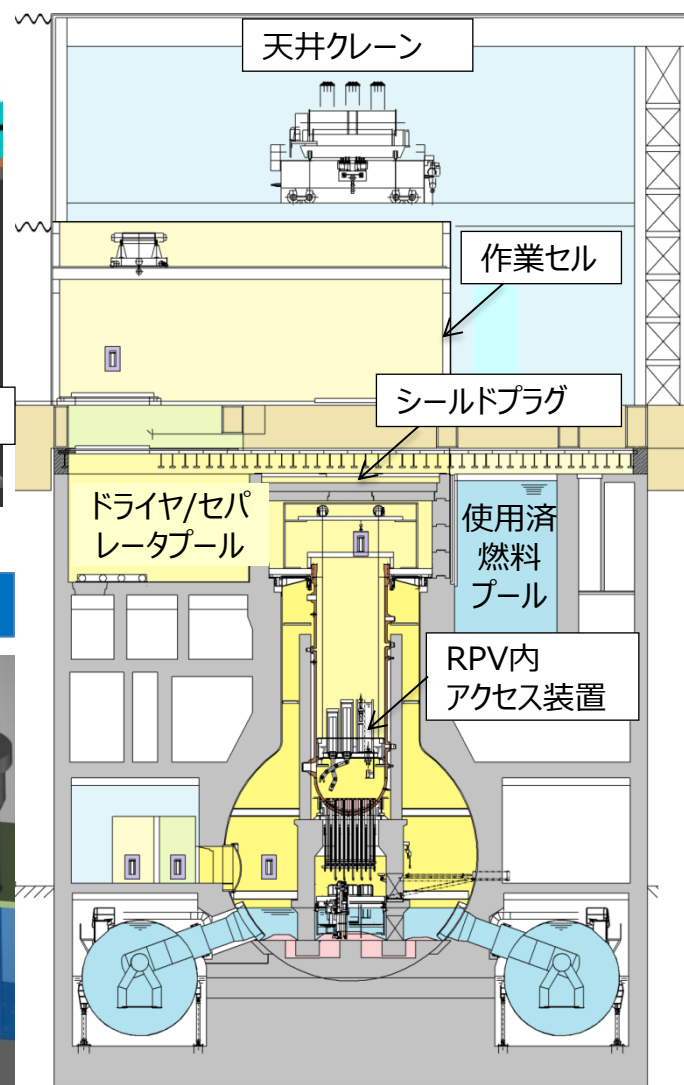
冠水-上アクセス工法



気中-横アクセス工法

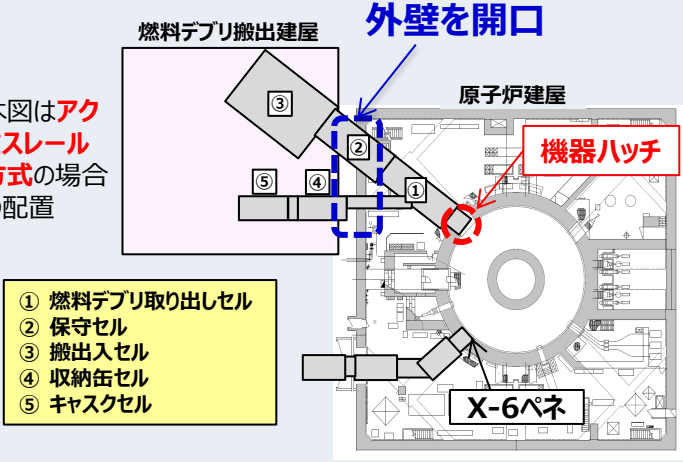
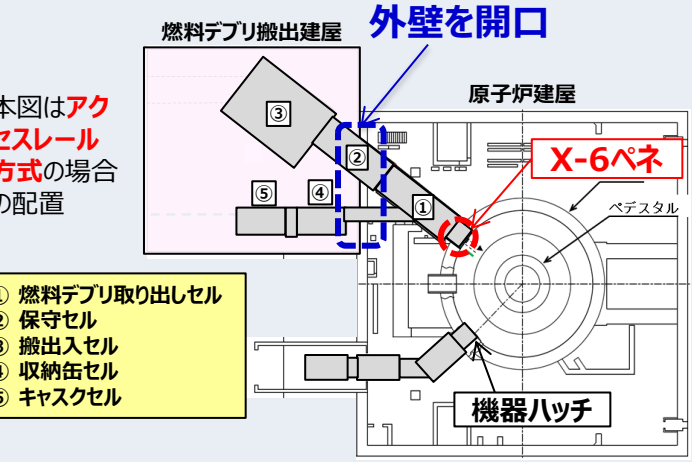
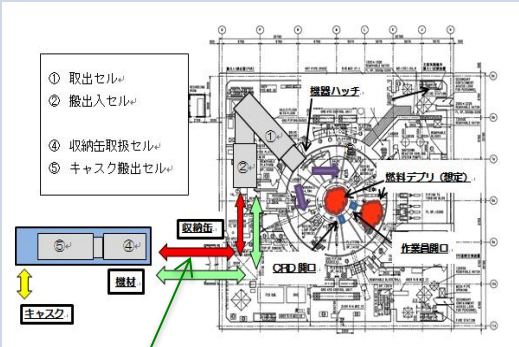
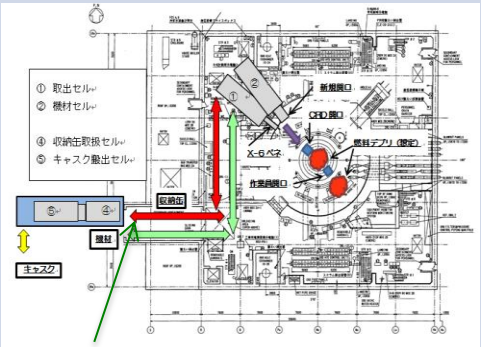


気中-上アクセス工法



横アクセス工法～燃料デブリ搬出ルート～

■ デブリ搬出ルートについて、以下の**2ケース（PLAN-A、B）**について検討。

号機	1号機	2/3号機
配置の基本的な考え方	<p>・比較的アクセスのしやすいPCV西側を使用して、デブリの搬出は「機器ハッチ」から。</p>	<p>・比較的アクセスのしやすいPCV西側を使用して、デブリの搬出は「X-6ペネ」から。</p>
<p>PLAN-A</p> <p>デブリは原子炉建屋の外壁を開口して搬出</p>	<p>※ 本図はアクセスレール方式の場合の配置</p>  <p>① 燃料デブリ取り出しセル ② 保守セル ③ 搬出入セル ④ 収納缶セル ⑤ キャスクセル</p>	<p>※ 本図はアクセスレール方式の場合の配置</p>  <p>① 燃料デブリ取り出しセル ② 保守セル ③ 搬出入セル ④ 収納缶セル ⑤ キャスクセル</p>
<p>PLAN-B</p> <p>デブリは原子炉建屋の大物搬入口から搬出</p>	 <p>① 取出セル ② 搬入セル ④ 収納缶取扱セル ⑤ キャスク搬出セル</p> <p>大物搬入口</p>	 <p>① 取出セル ② 機材セル ④ 収納缶取扱セル ⑤ キャスク搬出セル</p> <p>大物搬入口</p>

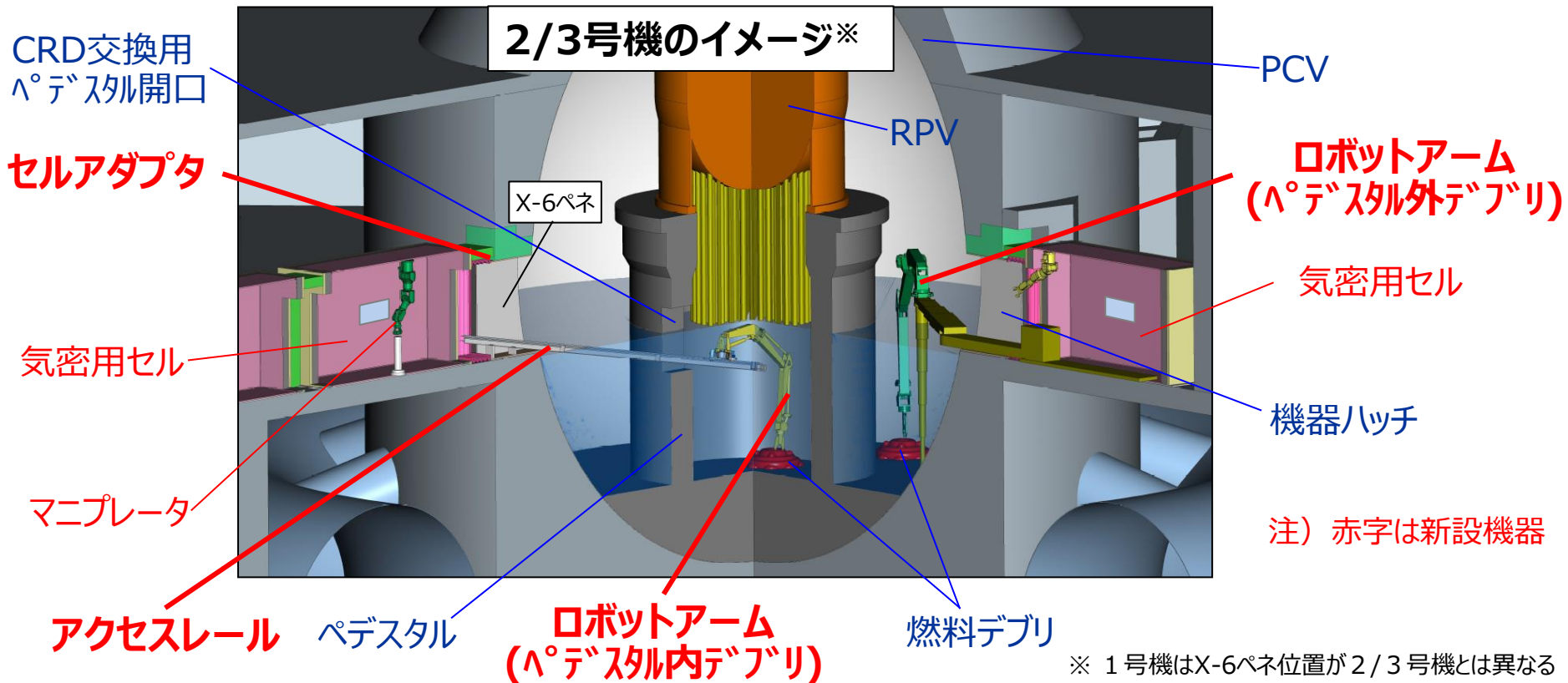
配置計画

気中－横アクセス工法の概念設計状況

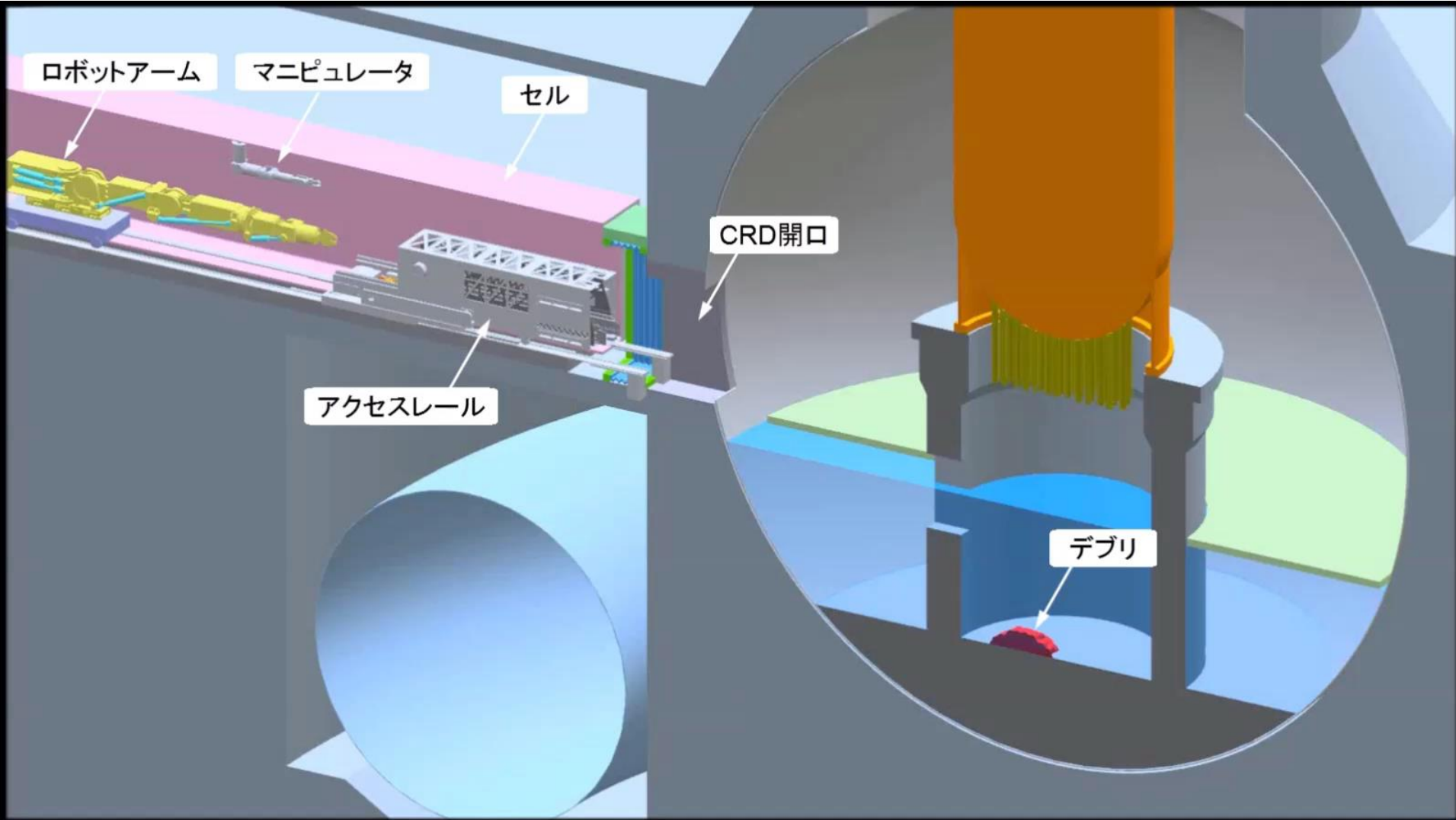
- ① アクセス「レール」方式による横取り出し工法
- ② アクセス「トンネル」方式による横取り出し工法

① アクセス「レール」方式取出し方法とイメージ

- アクセスレール、ロボットアームを収納した機密用セルを原子炉格納容器（PCV）に接続（接続部を密着させてバウンダリを確保）。
- ペDESTAL「内」デブリ⇒X-6ペネからアクセスレールをペDESTAL内に挿入、ロボットアームを使って回収。
- ペDESTAL「外」デブリ⇒機器ハッチからロボットアームを使って回収。



① アクセス「レール」方式取出し（イメージ・動画）



① アクセス「レール」の工場モックアップ（動画）



①ロボット・アームの工場モックアップ（動画）

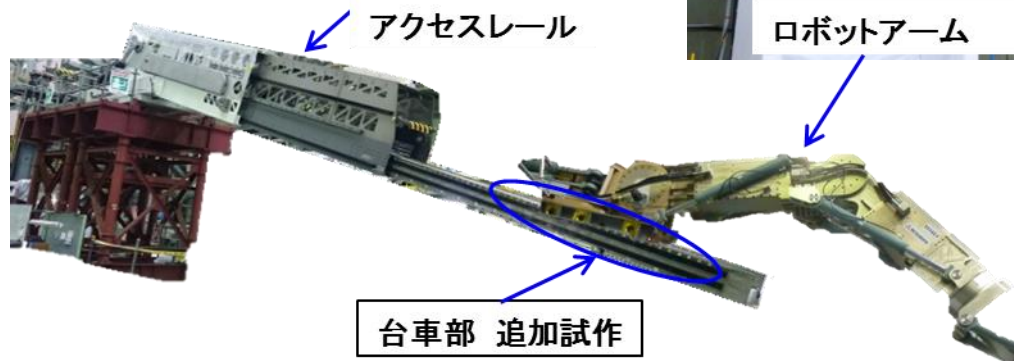


16倍速再生

① アクセス「レール」とロボット・アームの組合せ試験

- 干渉物撤去・燃料デブリ取り出しに共通の技術開発（**取り出し装置の動作確認**）

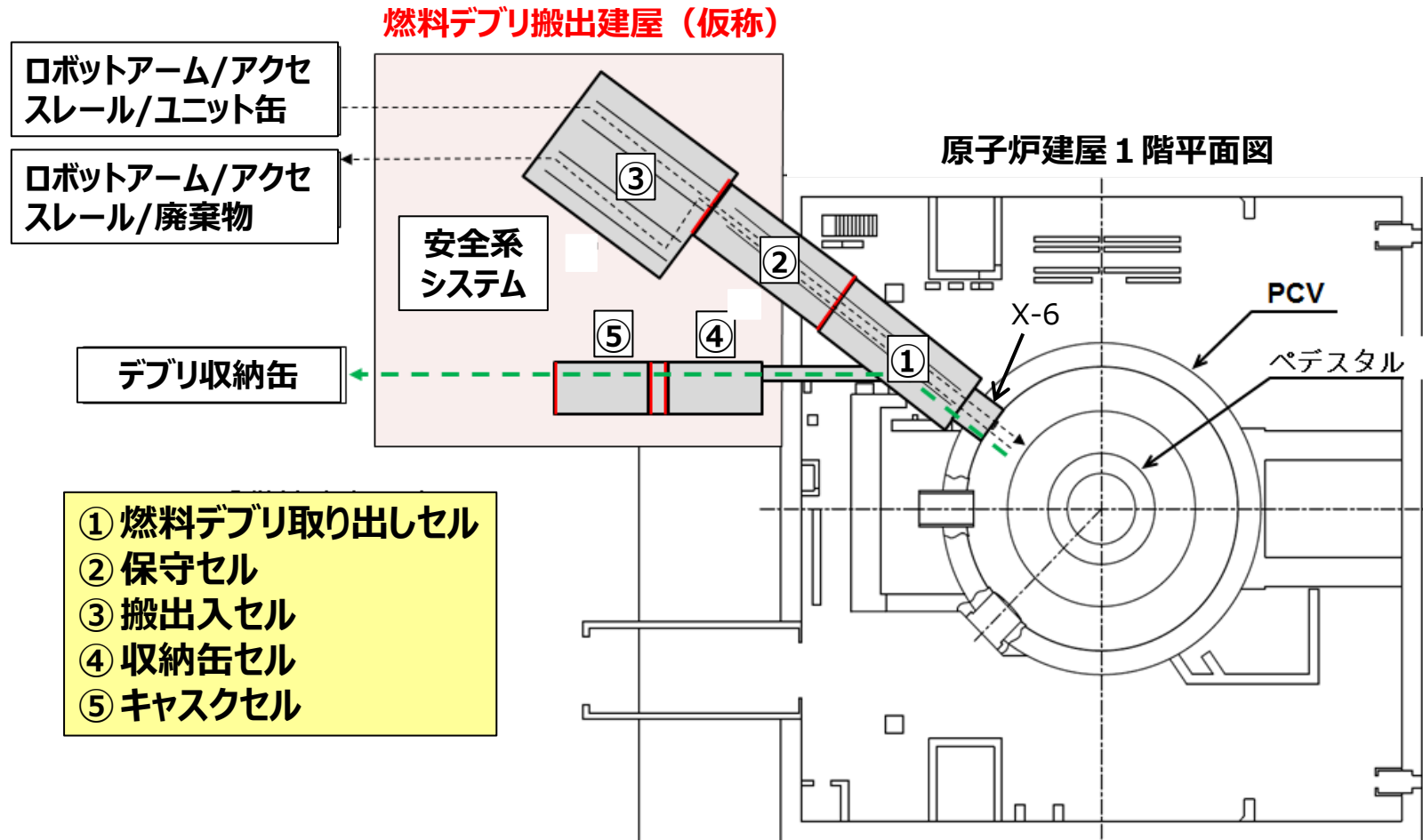
- アクセスレール・ロボットアーム（各々単体機能試験済）の**組合せ機能試験**



組合せ機能試験イメージ

① アクセス「レール」方式のレイアウト（イメージ）

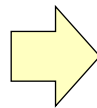
- 気密/遮へい機能を有した**複数のセルを連結**し、原子炉建屋1階フロアに設置。
- **燃料デブリ搬出建屋（仮称）**を原子炉建屋脇に増設。安全系システムも併せて収納。



② アクセス「トンネル」方式のコンセプト

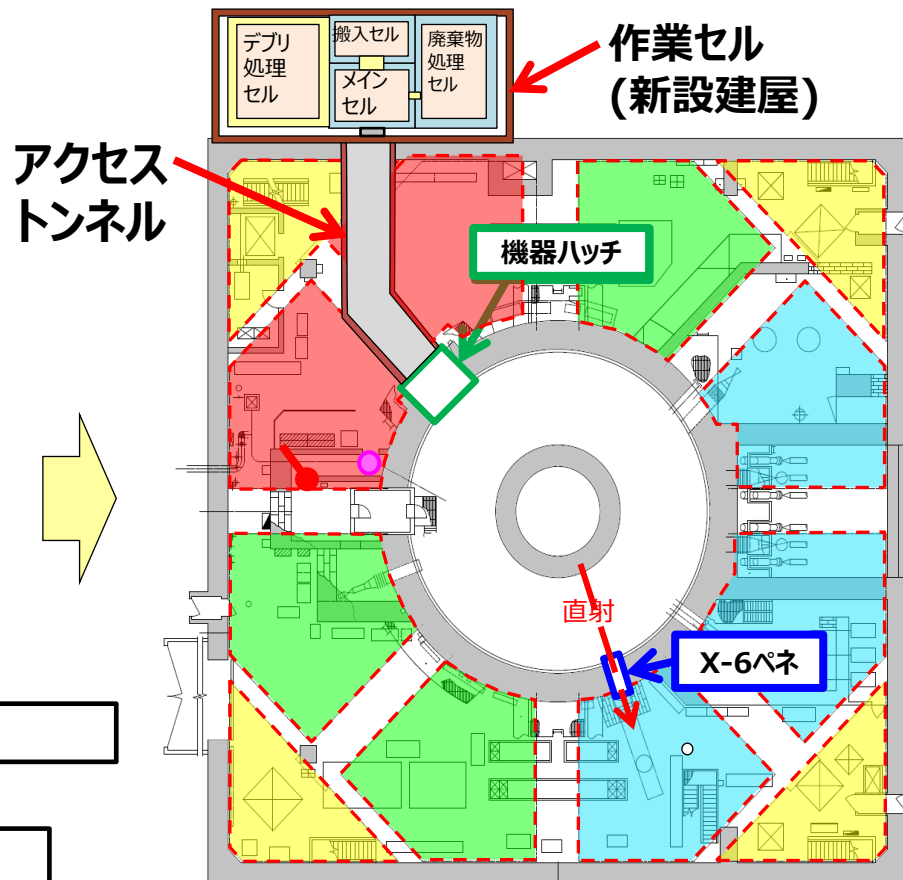
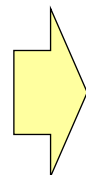
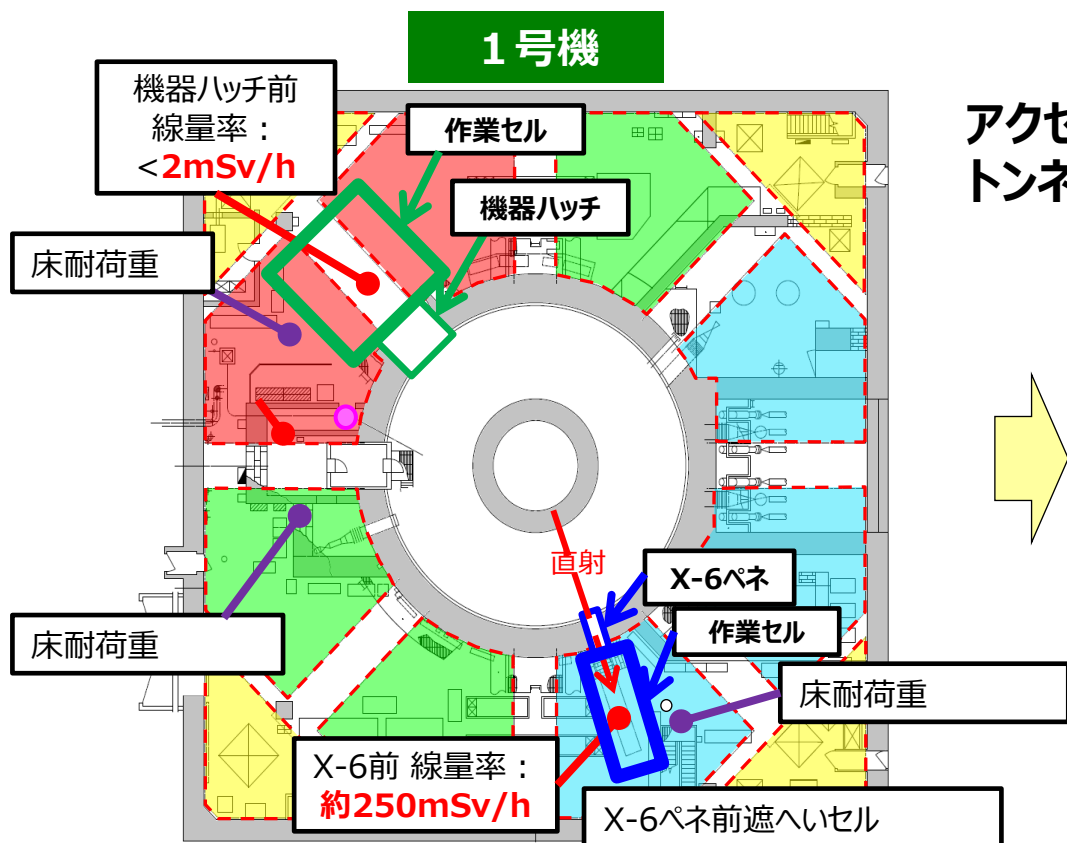
■ 1号機原子炉建屋1階の制約条件

- 周囲線量率：全エリア高い
- 床耐荷重：作業セル（遮へい重量物）設置は厳しい



■ アクセス「トンネル」方式のコンセプト

- ① 作業員の接近は新設建屋までとする
(1階フロアでの作業を最小化)
- ② 1階床への荷重負担を軽減



②アクセス「トンネル」方式取出しイメージ（4倍速動画）

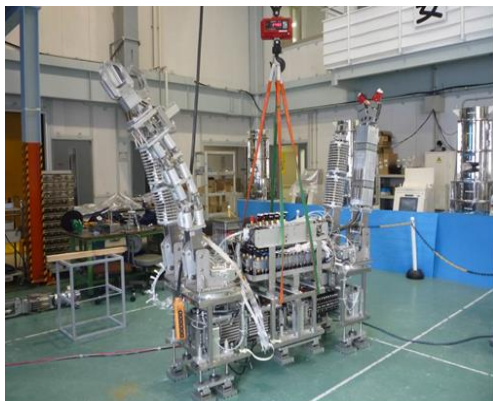
横 接 近 工 法
作 業 ス テ ッ プ

柔構造アーム「筋肉ロボット」機能確認試験

- **耐放射性、耐衝撃性に優れる柔構造アーム（愛称：「筋肉ロボット」）**の基本的な成立性および開発課題を抽出する。

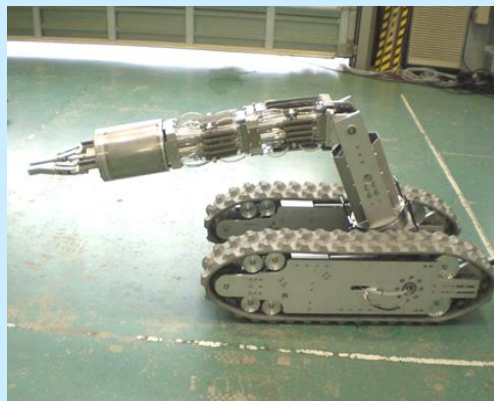
試作機 タイプⅠ

寸法：全長1800mm
幅630mm
高さ1000mm
重量：約690 k g



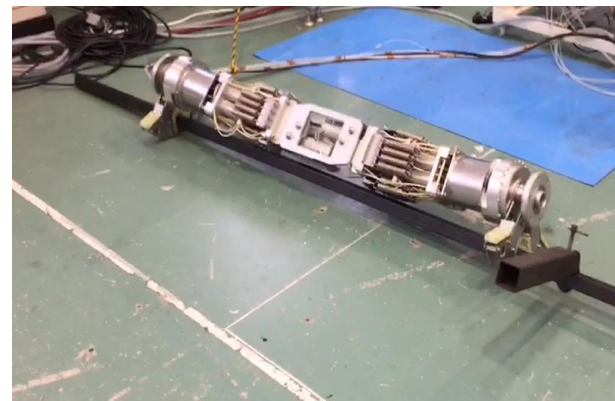
試作機 タイプⅡ

寸法：全長2750mm
幅590mm
高さ350mm（胴部）
重量：約220 k g

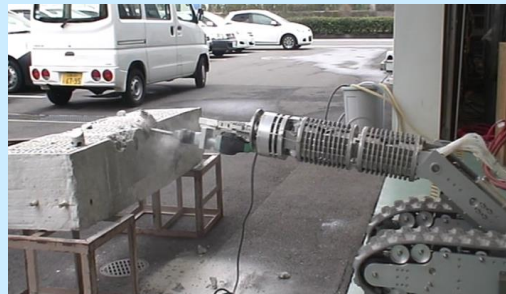


試作機 タイプⅢ

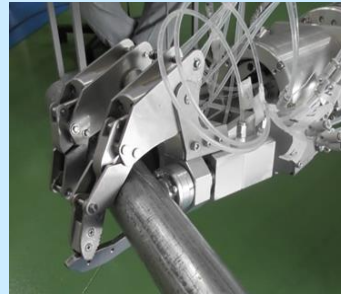
寸法：全長1635mm
幅430mm
高さ185mm（胴部）
重量：約64 k g



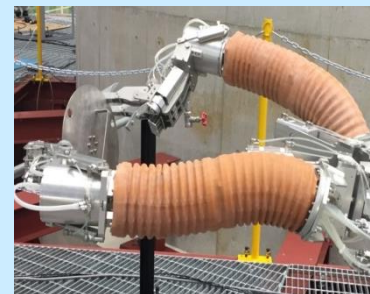
階段走行試験



コンクリート破砕試験

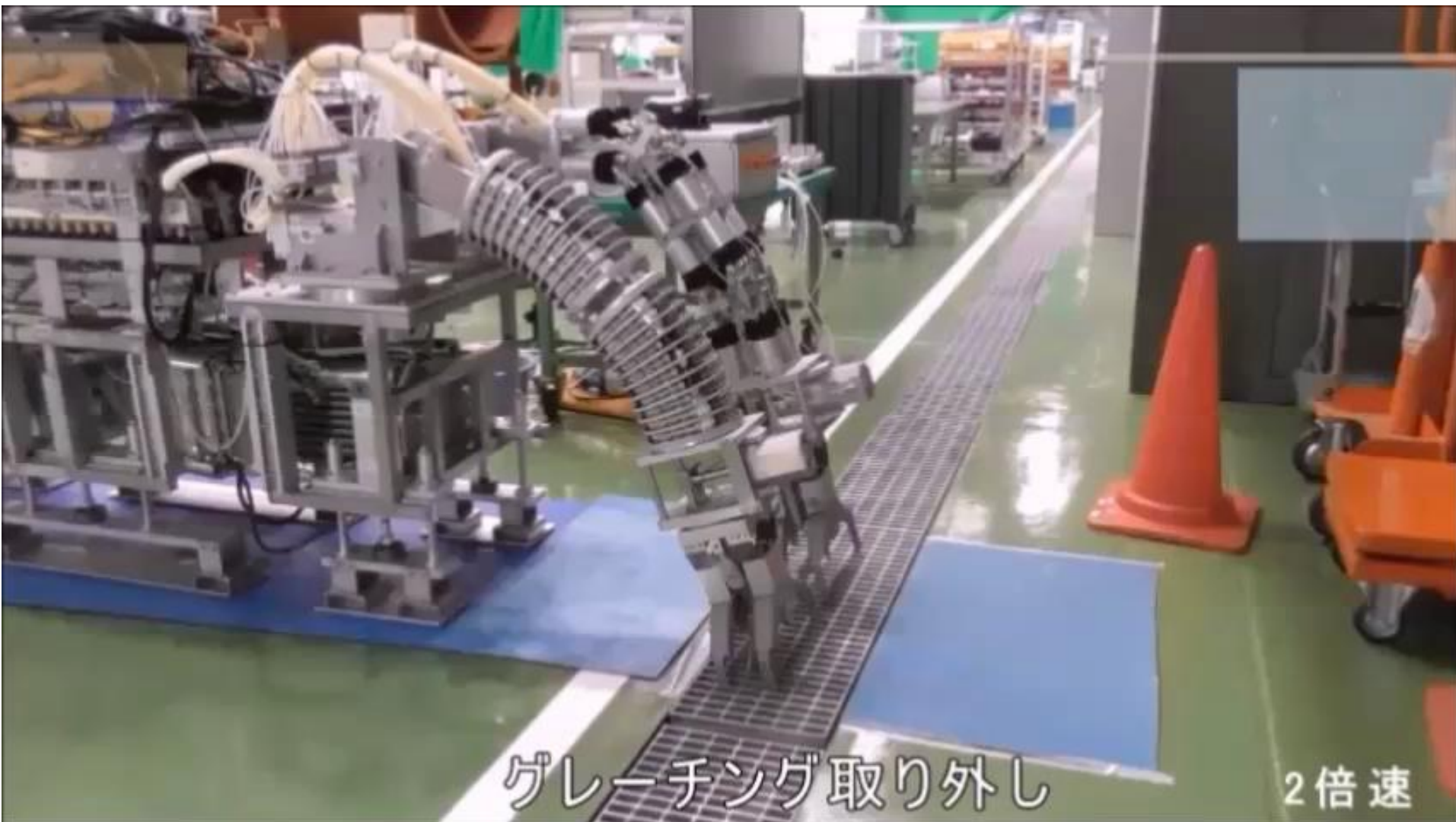


把持動作



模擬バルブ開閉

柔構造アーム「筋肉ロボット」機能確認試験（動画）



先端ツールの例



チゼル



バスケット

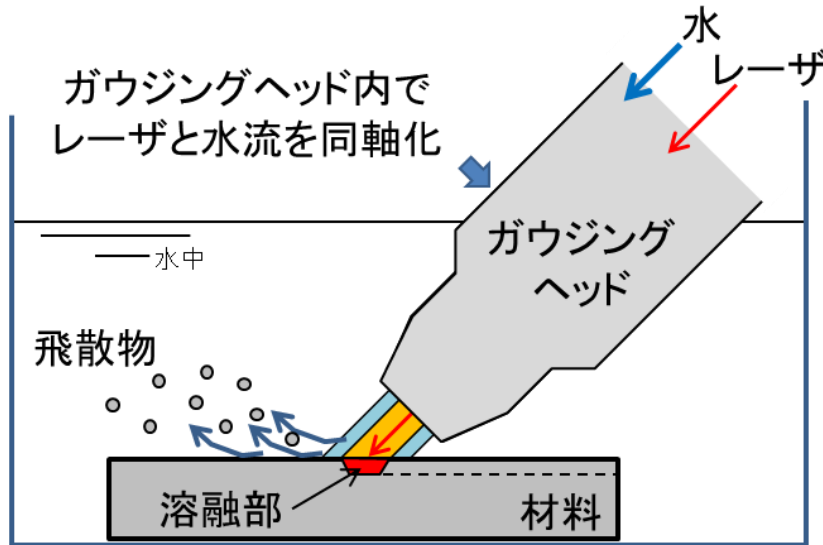


ポンプ

レーザガウジング切削試験

【レーザガウジングの原理】

- 水流にレーザを透過させて、**水流とレーザを同軸**にして材料表面に照射
- レーザ照射部を加熱、溶融させて、その**溶融物を水流で除去**



レーザガウジングの概念図

水中でのレーザはつり



H26年度試験結果

【レーザはつり加工の特徴】

- 溶融除去した材料の99%以上が水中もしくは沈殿物として水槽内に溜まり、**気中への飛散する加工屑が少ない**
- **デブリの硬さに左右されない**加工方法
- レーザが透過可能な**水流を大気中に噴出することが難しい**（現状の課題）

レーザーガウジング切削試験(動画)

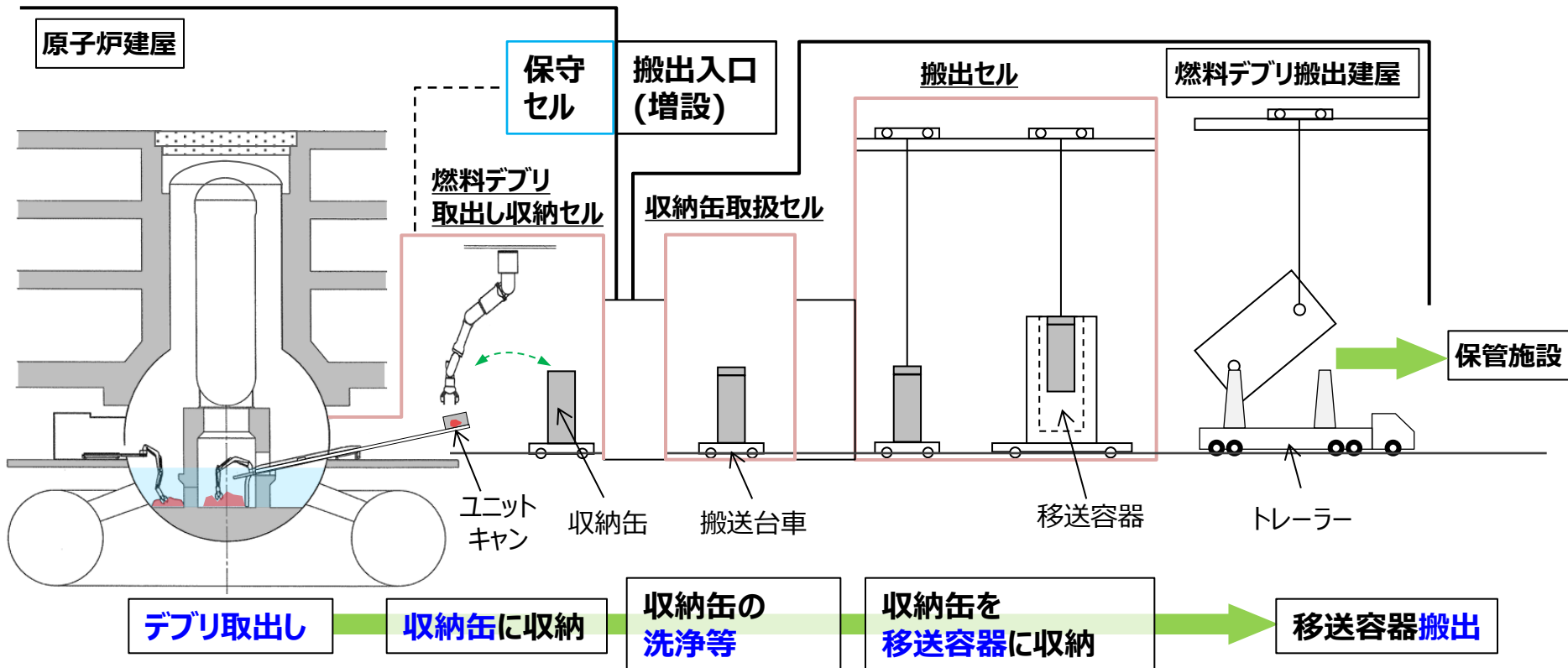


2.3 燃料デブリ収納・移送・保管技術

収納缶の設計 ⇒ 1F固有の課題に対処

- 燃焼度と濃縮度が高い→**反応度高**
- コンクリートとの溶融生成物→コンクリート中の水分の放射線分解による**水素発生**
- 海水注入、計装ケーブル他との溶融→**塩分**の影響、**不純物**の混入

移送方法（**気中-横アクセス工法**の場合：例）



3. ま と め

- ▶「福島第一の廃炉を『**安全**』に進めていくための、設計可能な技術構成プランを提供し、エンジニアリングを支援」することが、IRIDの技術開発における最大ミッション。
- ▶これまでの研究開発プロジェクトへの取り組みを通じて、原子炉格納容器（PCV）の補修技術や耐震評価技術等、廃炉のエンジニアリングに役立つ成果をあげてきた。
- ▶しかし、燃料デブリの取り出しに向けた技術開発は、まさにこれからが正念場。
- ▶これらの技術開発にあたっては、『**安全（人と環境の放射線リスクからの防護）**』をまず最初に考える。そして、「迅速」、「合理的」、「現場指向」、「確実」の基本的考え方に基づき検討を深化。
- ▶事故後の現場がスタートであり、前例がない取組みにあたっては、最初から最適化を求め過ぎず、現場の状況変化に柔軟に対応できる「**ロバスト**」な概念設計が極めて重要。※ロバスト：多少の不確定要素があってもうまくいくこと。
- ▶30～40年での廃炉を可能にする「スループット」に挑戦していく。

IRIDへのご支援とご協力を
よろしくお願いいたします。

ご清聴ありがとうございました。