

第8回 福島第一廃炉国際フォーラム

福島第一における燃料デブリ取り出しに向けた取り組み

2024年8月26日

飯塚 直人

東京電力ホールディングス（株）

福島第一廃炉推進カンパニー

廃炉技術担当

はじめに



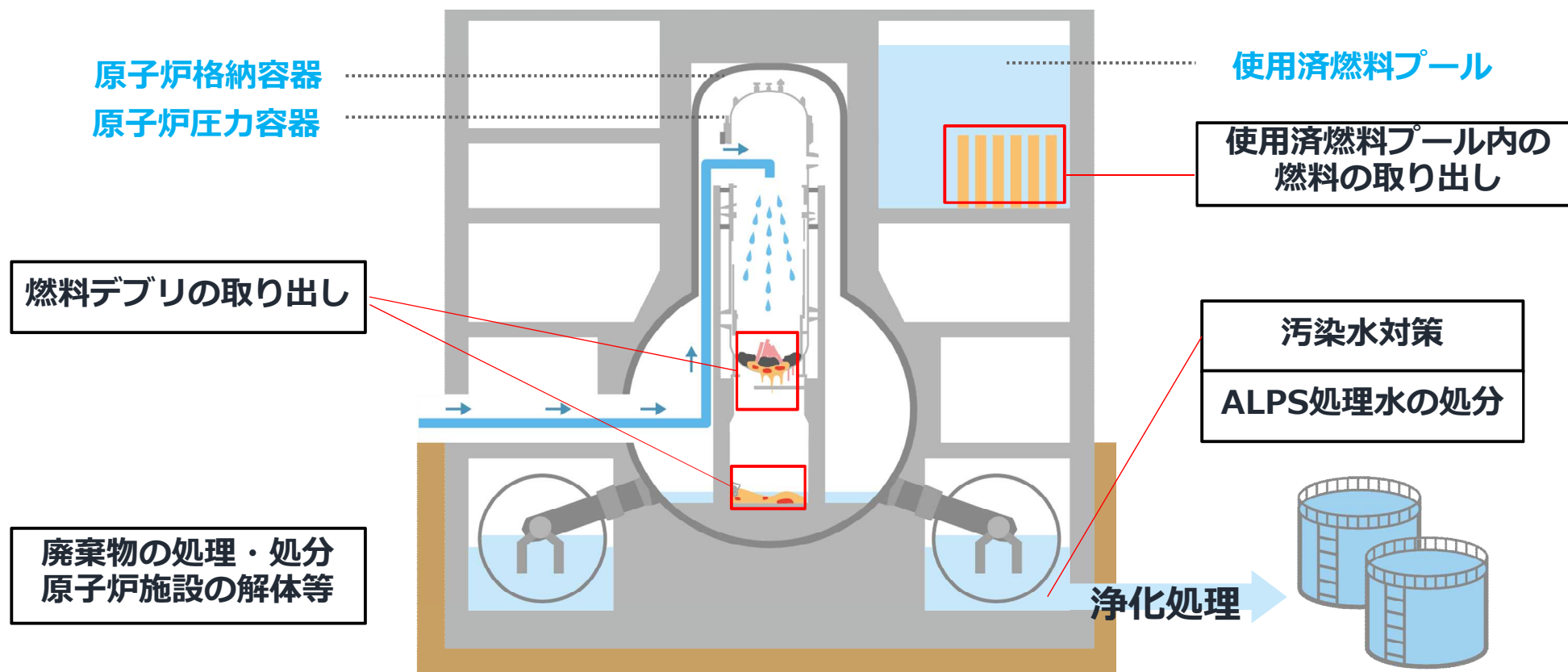
号機	1	2	3	4	5	6
3/11当日の運転状況	●	●	●	—	—	—
炉心溶融	●	●	●	—	—	—
水素爆発	●	—	●	●	—	—



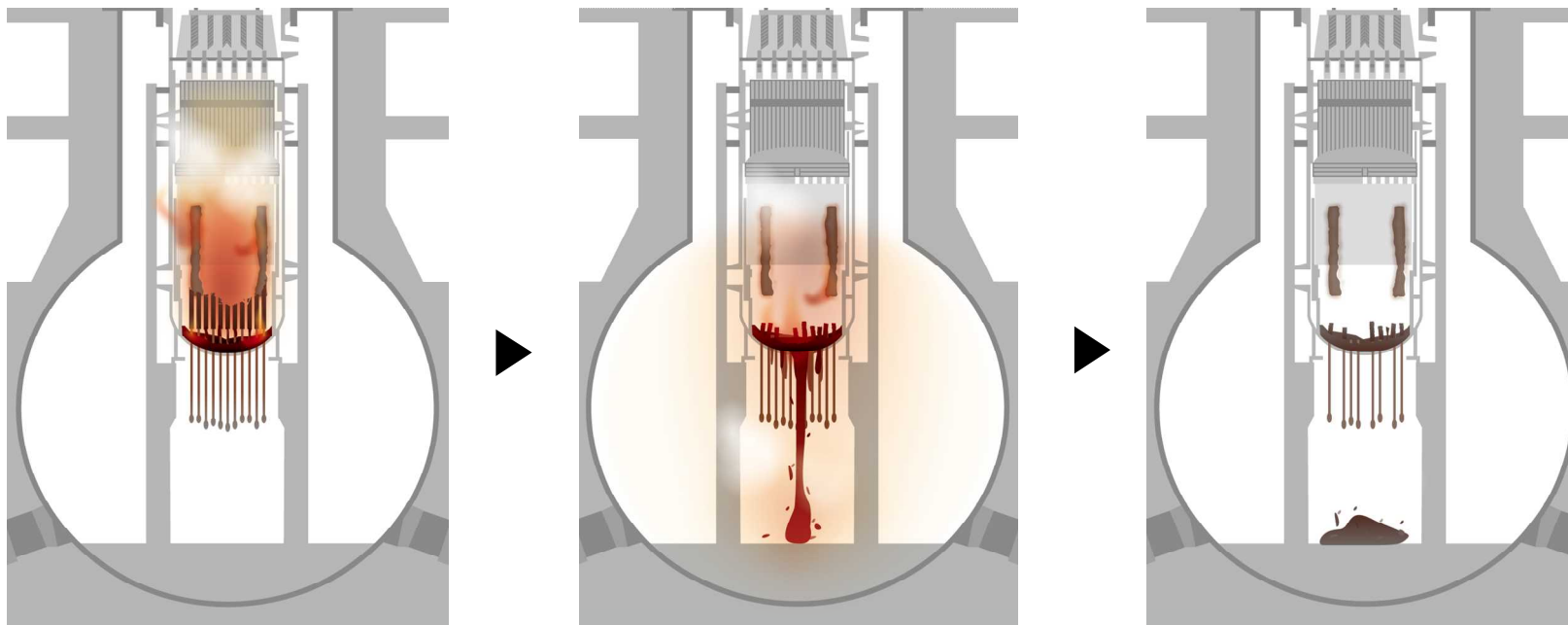
2011年12月以降、1～3号機は冷温停止状態



■ 廃炉は地域の皆さまや環境への放射性物質によるリスクを低減するための作業



- 事故によりプラントが冷却機能を喪失した結果、炉心が損傷・溶融し、溶けた燃料がさまざまな構造物と混じりながら冷えて固まったもの





炉内状況把握に向けた取り組み

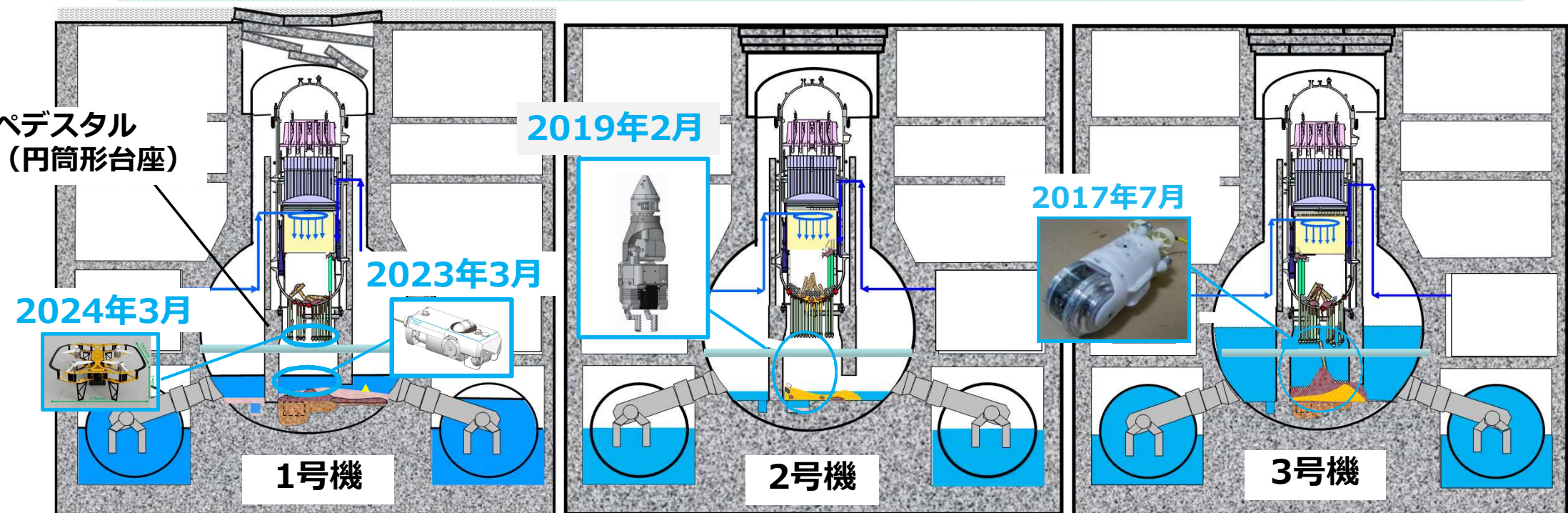
炉内調査がなぜ必要か

- 燃料デブリを取出すためには、原子炉格納容器内（PCV）の調査を実施し、燃料デブリ及び周辺構造物の状況を把握することが必要。しかし、PCV内は高線量であり、人の接近は不可能
→ロボットを用いた遠隔装置によるPCV内部調査、解析コードを用いた事故進展の把握、ミュオン調査を実施

ロボット調査

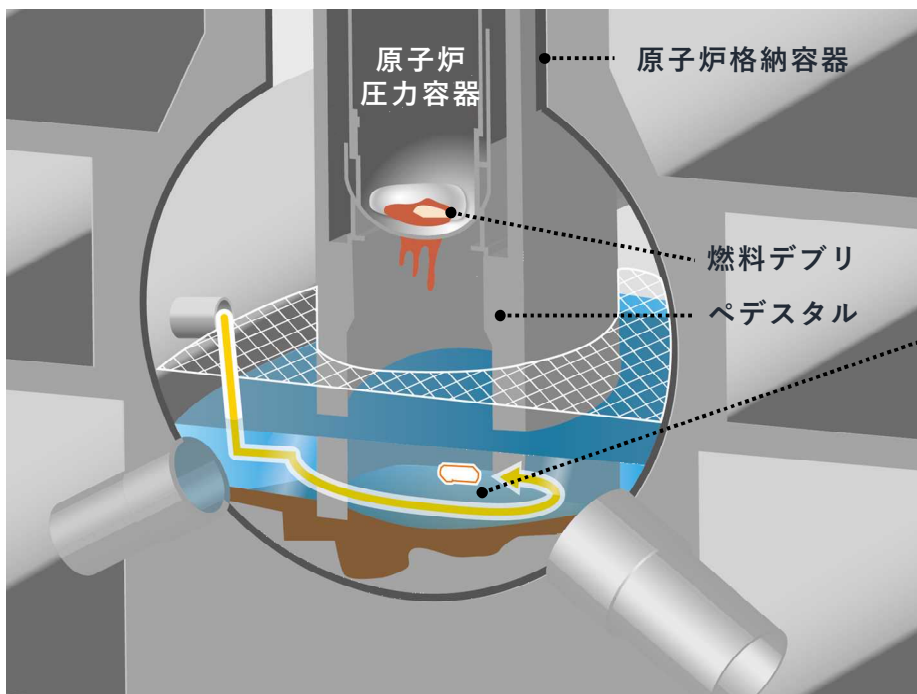
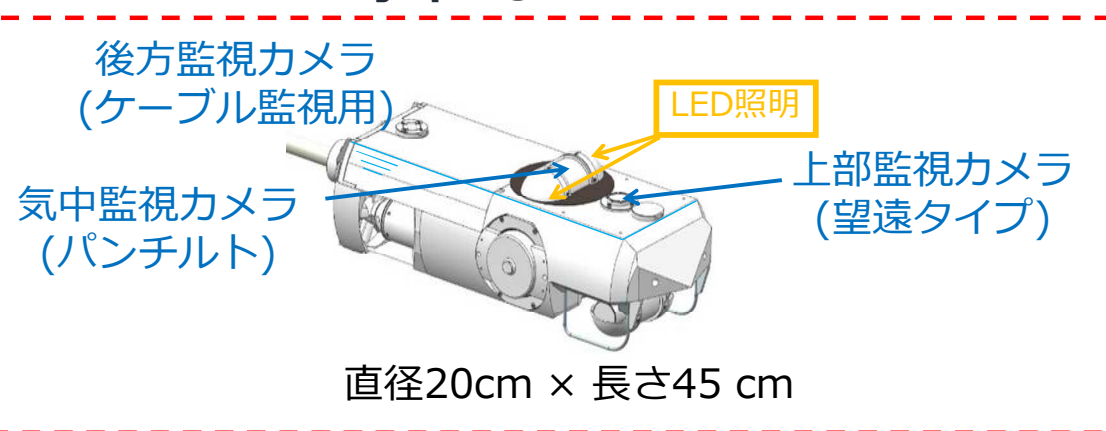
事故進展解析

ミュオン調査



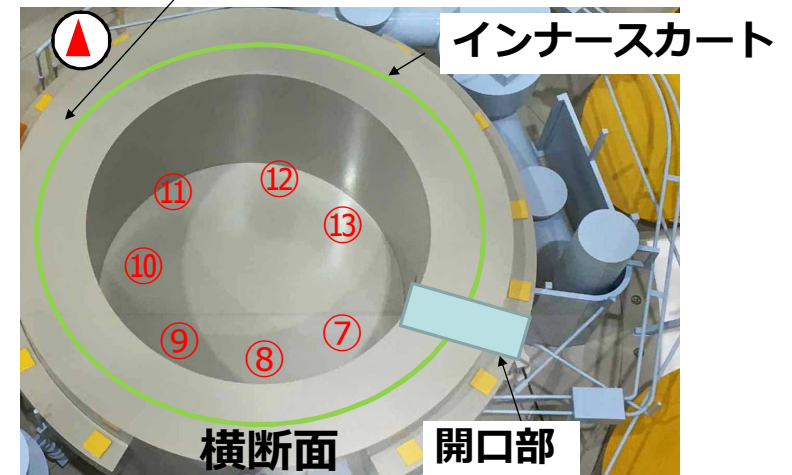
- 主にカメラを用いた目視調査を実施、ペDESTAL内並びにペDESTAL開口部についての情報取得を実施
- 調査によって得られる新たな情報を基に事故解析やペDESTAL健全性の評価を追加実施

水中ROV



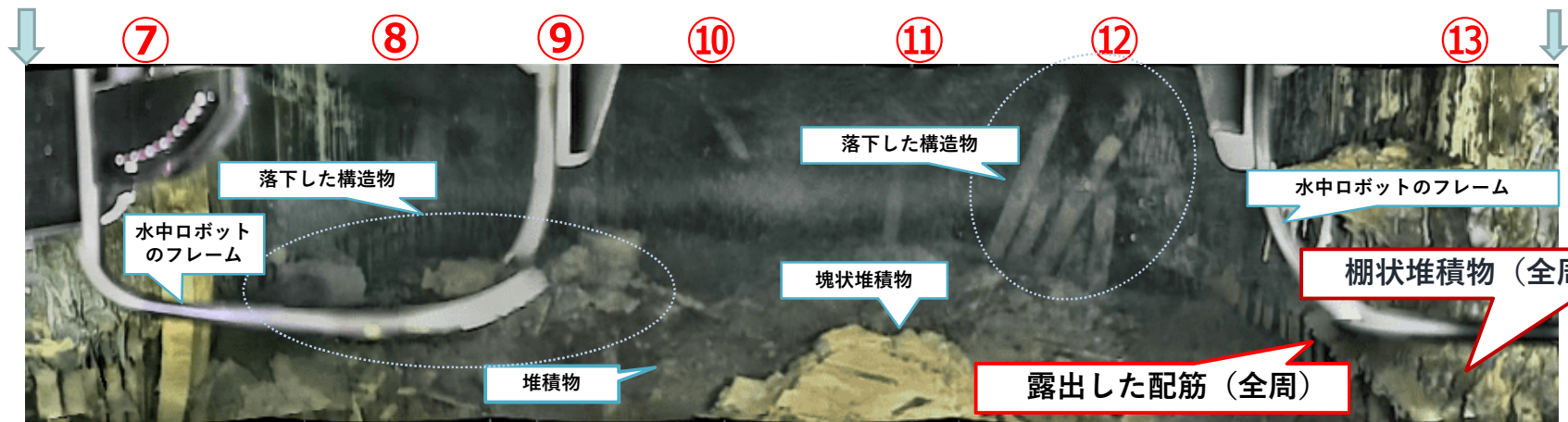
- ペDESTAL内側は、床面より1 m程度の高さに棚状堆積物があり、その下部では、コンクリートが全周にわたって消失し、鉄筋が露出
- 床面全体にわたり高さ1 m未満の堆積物があり上部の構造物の一部が落下していることを確認

ペDESTAL(台座)

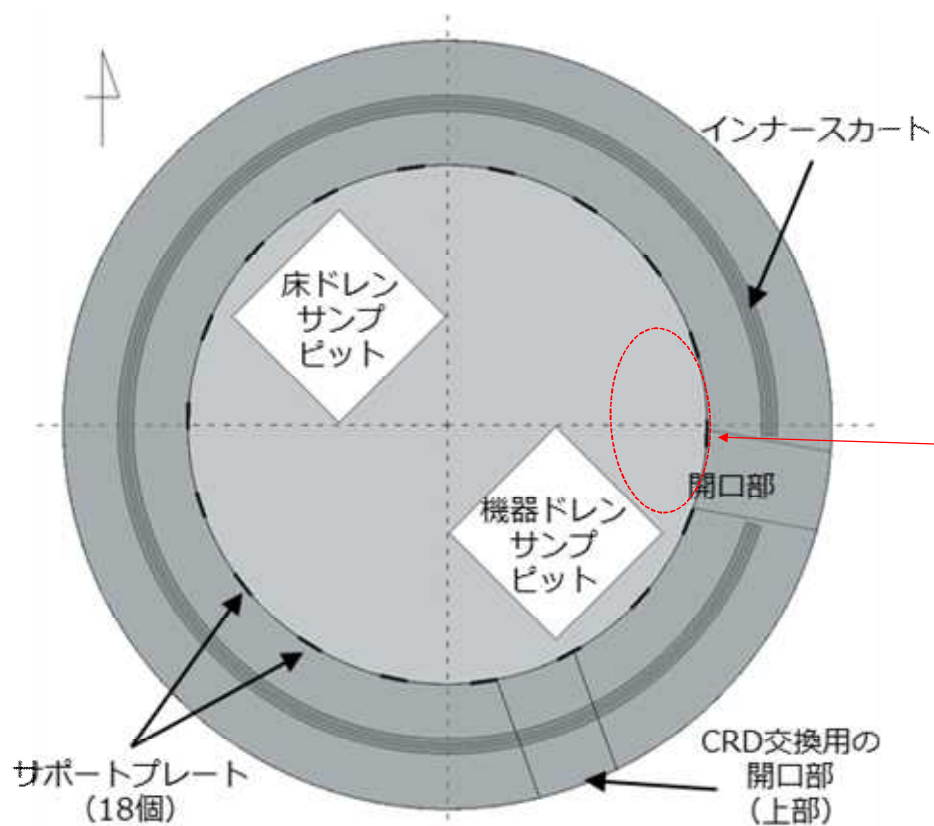


開口部左側

開口部右側



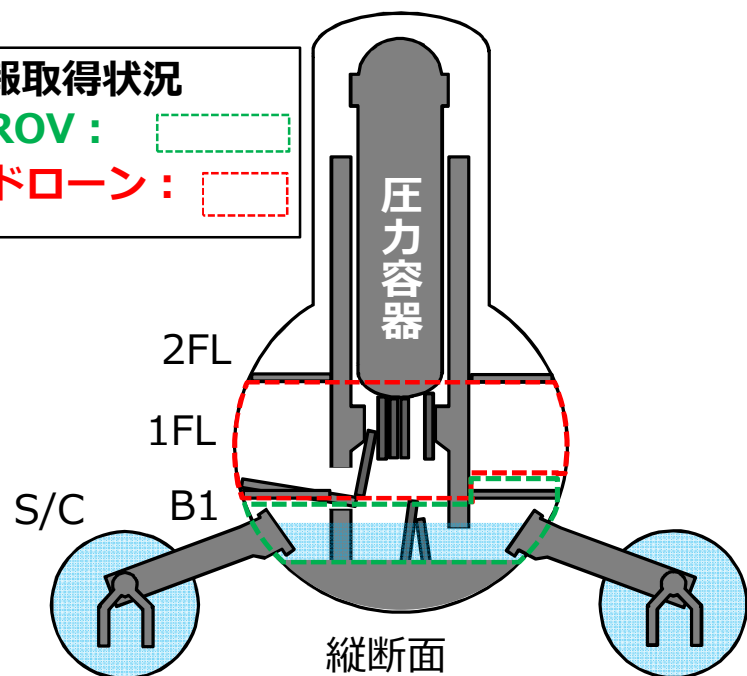
■ペDESTアル下部においてはコンクリートが喪失し、鉄筋が露出していたが、上部は原形をほぼ保っていることを確認



- 燃料デブリ取り出しに向け、1号機PCV内部の全体像を把握するために、地下階に加えて、1階フロアの調査も実施

■ 情報取得状況

水中ROV :
 小型ドローン :



小型ドローン



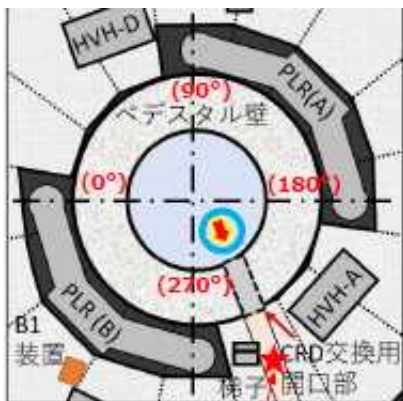
用途：カメラによる映像撮影
 寸法：191×179×54[mm]
 重量：185[g](バッテリー込)
 飛行時間：
 約8分(調査は5分×4機で実施)
 搭載機器：
 照明(90lm(45lm×2)、
 超高感度カメラ(正面のみ)

無線中継用ヘビ型ロボット

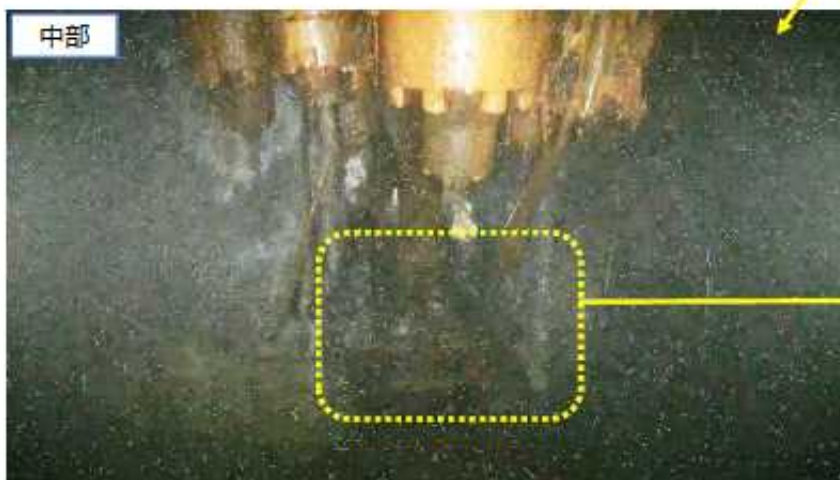


用途：無線中継器の運搬+
 線量測定
 寸法：
 2,900×180×165[mm]
 重量：約25[kg]
 搭載機器：
 ドローン用無線中継器、
 CMOSカメラ×2
 線量計

1号機内部（1階気中部）調査(2024年3月)～ペDESTAL内撮影画像①～

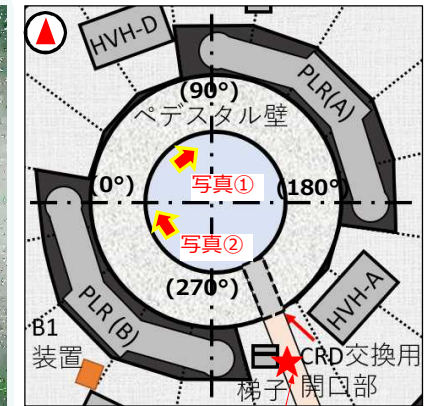


1号機PCV内1FL ペDESTAL内拡大概略図



CRD交換用レール

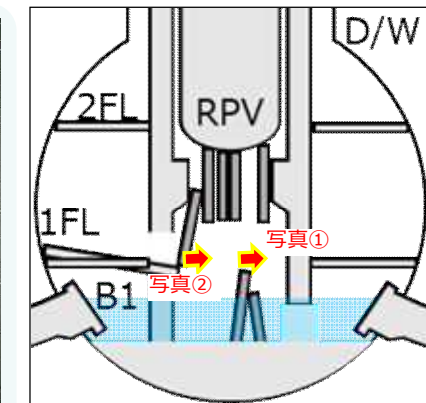
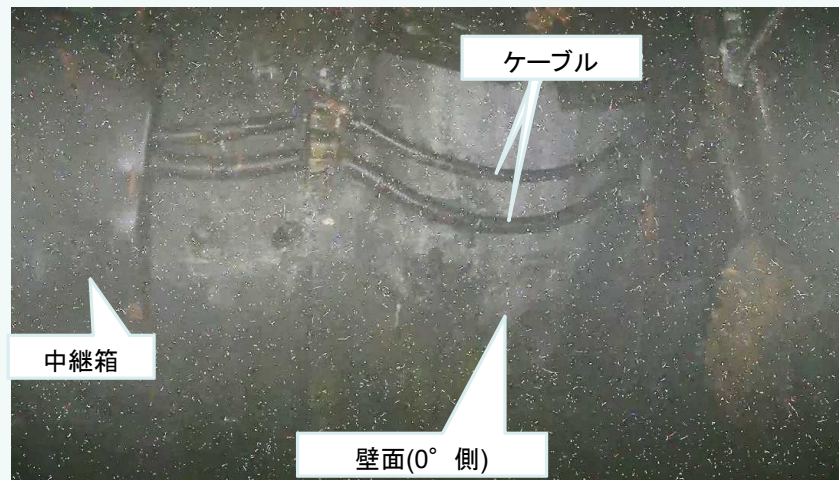
■ **写真①**：ペDESTAL内90°側のペDESTAL壁面の様子。一部変色がみられるものの、著しい損傷は確認されず、コンクリートが残存している。なお、当該壁面には、震災前より既設設備はないため、機器は確認されていない。



ヘビ型ロボット待機位置

1号機PCV内1FL 拡大図(概略)

■ **写真②**：ペDESTAL内0°側のペDESTAL壁面の様子。写真①と同様に一部変色があるが、著しい損傷は無く、コンクリートが残存している。また、ケーブルの中継箱等が確認されており、変色及び変形していると推定。



1号機PCV内縦断面図(概略)

画像処理：東京電力ホールディングス(株)

- 既設建造物の状態や、環境情報については調査が進んでいるため、今後は堆積物の分布の全容把握および、組成分析に注力していく
- 特に未調査であるRPV内部、ベント管内の状態確認とD/W B1、ペDESTAL内の堆積物の採取・分析を優先して実施



【環境情報】

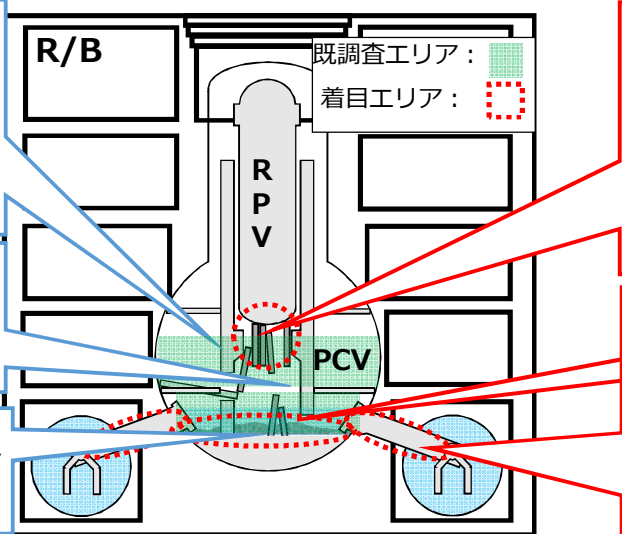
- ・空間線量
最大約10Gy/hで、5Gy/h以下のエリアも多い
- ・PCV水位
D/W底面から約2mあったが、現在水位低下を進めている
- ・暗所、湿潤環境で霧がある

【建造物の状態】

CRD関連機器が複数個所で脱落している。ペDESTAL内側基部のコンクリートが床面より1mの範囲で全周にわたり消失し、鉄筋が露出

【堆積物の状況】

ペDESTAL内だけでなく、ペDESTAL外にも堆積物が移行。D/W底部から約1~0.1mの高さ



【RPV内部調査】

- 小型ドローンによるRPV底部調査
 - ・RPV底部に小型ドローンが侵入できる十分な穴が確認された場合に調査を実施

RPV底部 穴

調査イメージ

■ RPV内部調査(小型ドローン調査以外)

- ・他号機のRPV内部調査の結果を踏まえて、今後調査工法について検討していく
- 既設配管からのアクセス
- RPV底部の損傷箇所からのアクセス
- RPV上部からのアクセス

【堆積物採取・分析調査】

- 小型ドローンによる堆積物の採取
 - ・小型ドローンに採取治具を取り付け、D/W B1, ペDESTAL内外の堆積物を採取し、その組成について分析する

堆積物 PCV底部

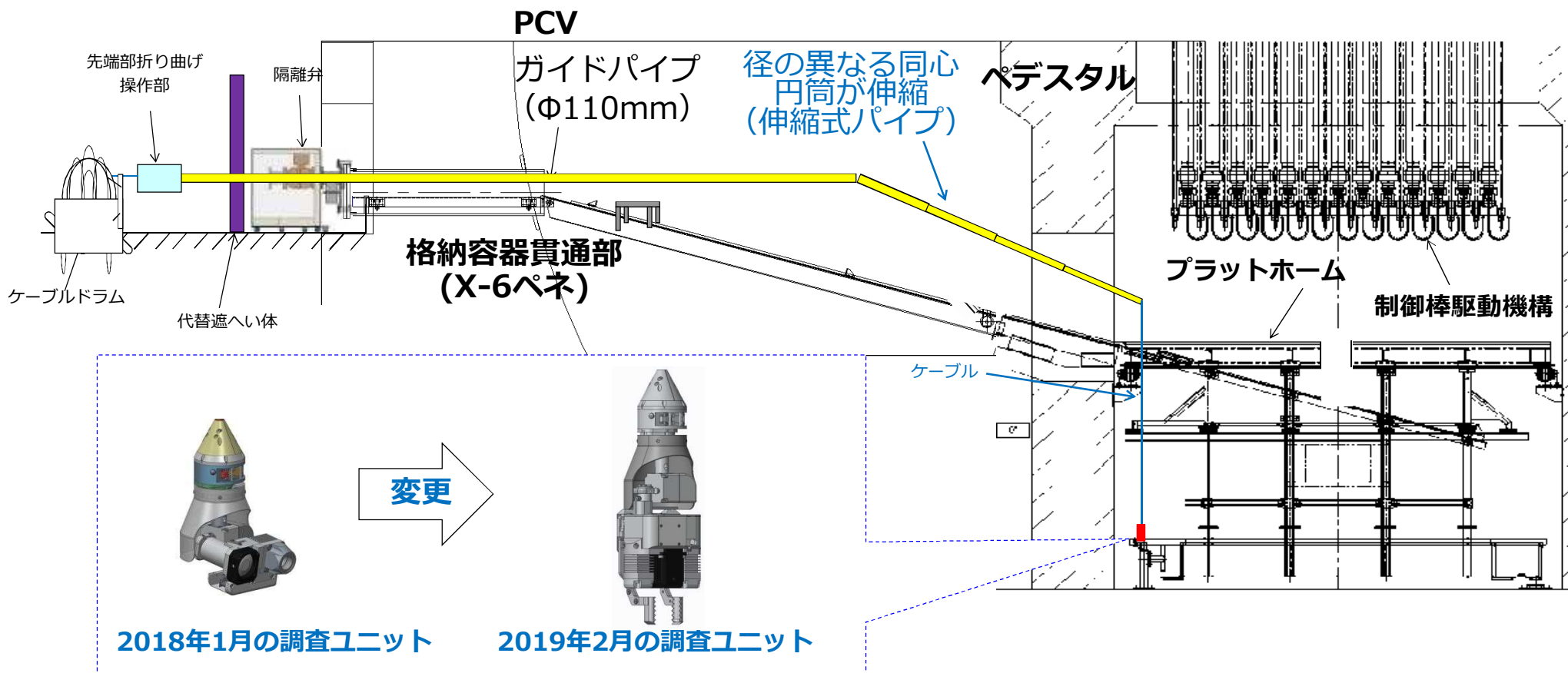
調査イメージ

【ベント管内調査】

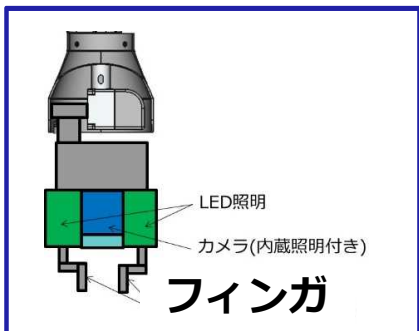
- 小型ドローンによるベント管内調査
 - ・小型ドローンを活用し、D/Wからベント管内に侵入・調査する。課題は、PCV水位低下と無線の中継手段

調査イメージ

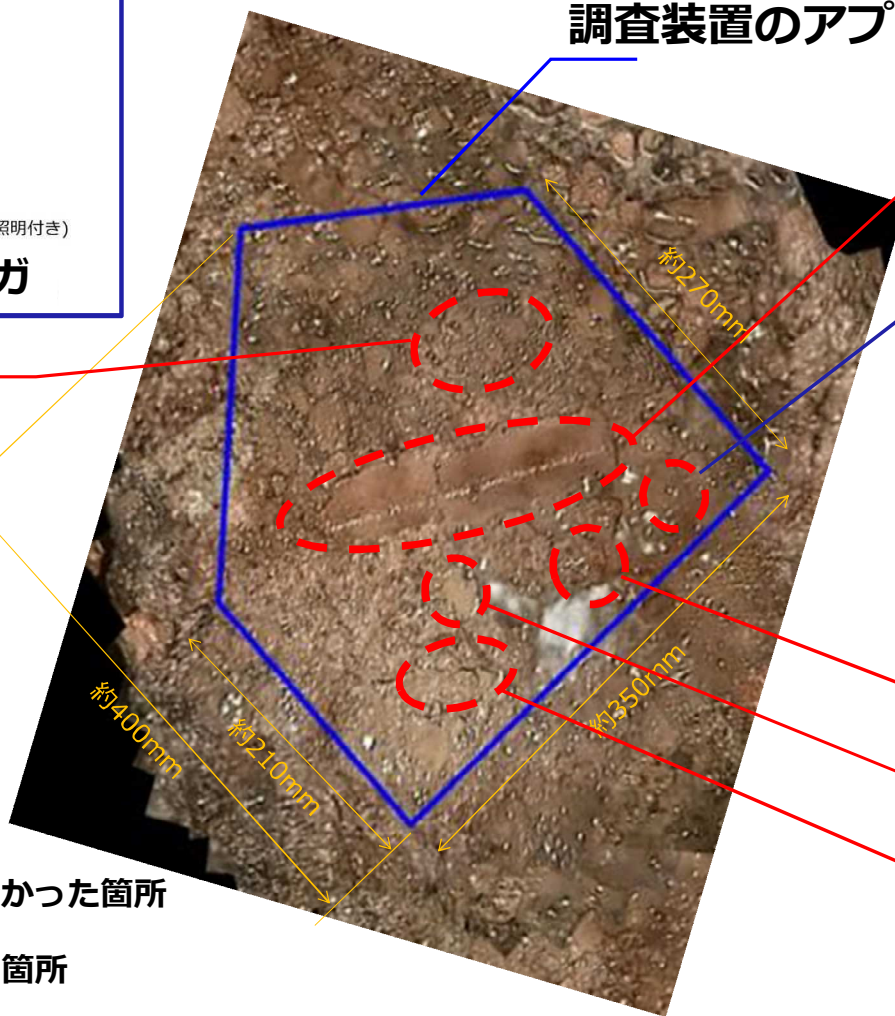
■2018年1月に使用した調査ユニットを変更し、堆積物をつまめるか、固着しているかを確認



調査装置の先端部



調査装置のアプローチ可能範囲



No. 2

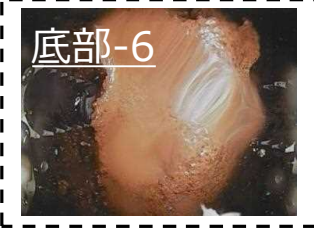
No. 6

No. 3

No. 4

No. 1

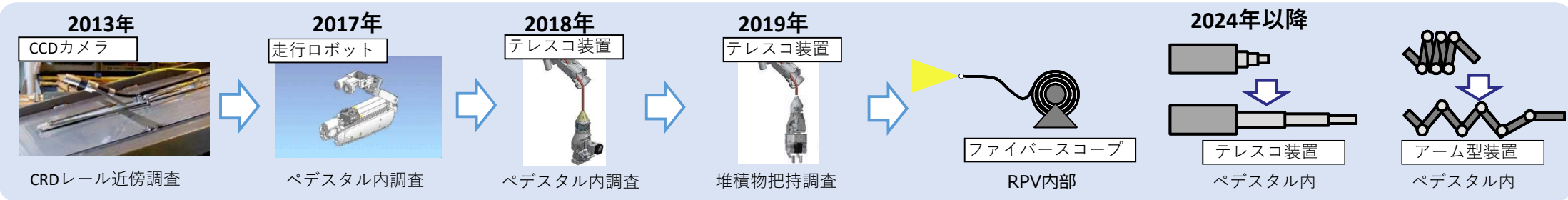
No. 5



: 動かせなかった箇所
 : 動かした箇所

画像提供及び画像処理：国際廃炉研究開発機構（IRID）

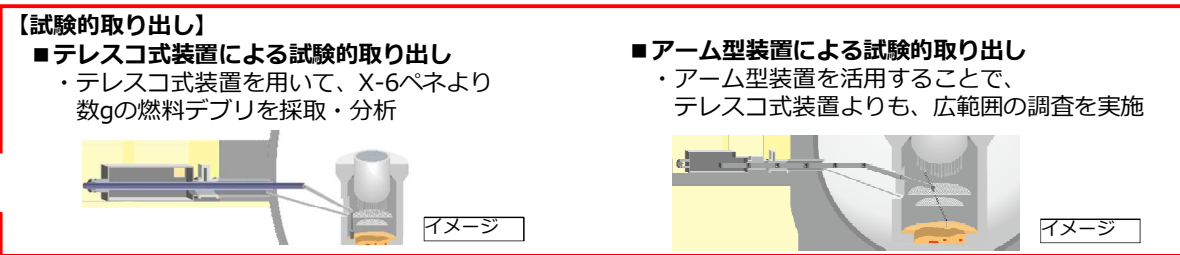
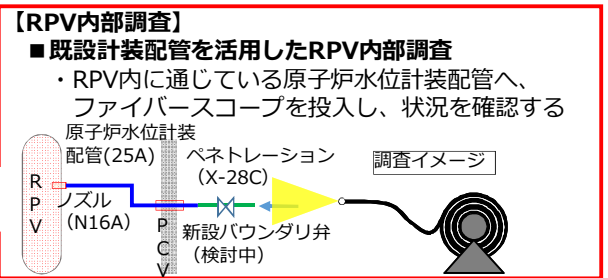
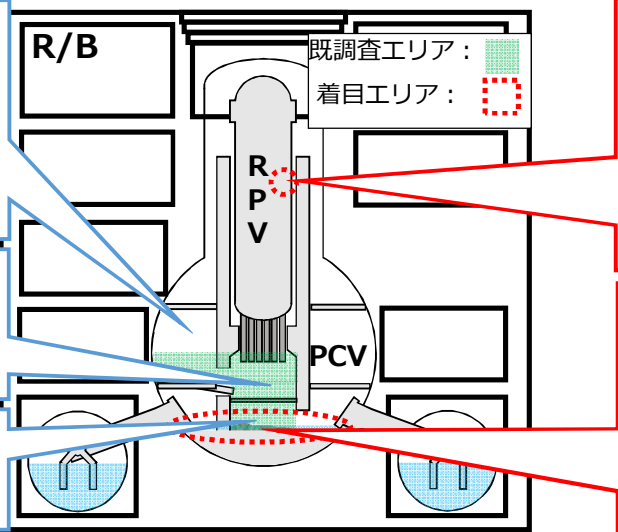
- 今後はアーム型装置による試験的取り出しと詳細な内部調査を進めて行く
- 1～3号機の中で初めてとなるRPV内部調査の実施に向け計画を進める



【環境情報】
 ・空間線量
 最大70～80Gy/h程度、
 ペDESTAL内約10Gy/h
 ・PCV水位
 他号機と比較すると最も水位が
 低く、D/W底部付近である。
 ・暗所、湿潤環境で霧がある

【構造物の状態】
 変色は確認されるものの、目立った
 損傷は少ない。ペDESTAL内のプ
 ラットフォームの一部が脱落し、堆
 積物が付着している。

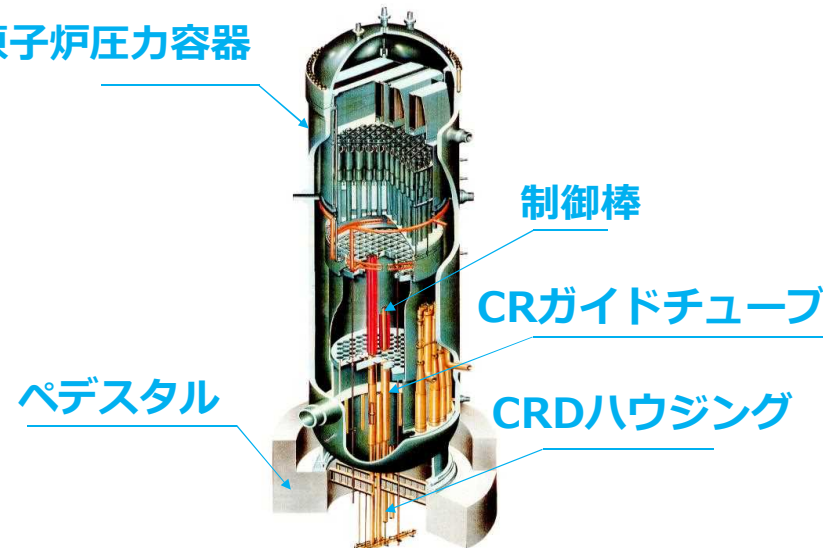
【堆積物の状況】
 ペDESTAL内底部に少量の堆積物が
 ある。



3号機原子炉格納容器内部調査 (2017年7月)

- 複数の構造物の損傷や、溶融物が凝固したと思われるものが構造物に付着していることを確認
- ペDESTAL内の複数箇所です砂状、小石状、塊状の堆積物があること確認
- 炉内構造物と推定される構造物 (CRガイドチューブ等) が落下していることを確認
- CRDハウジングの高さ、間隔がばらばらになっている箇所を確認

原子炉圧力容器



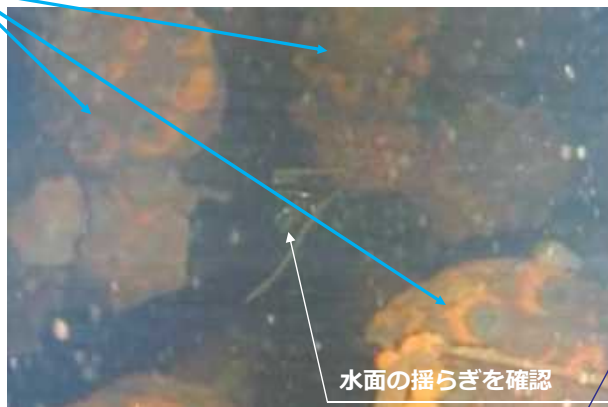
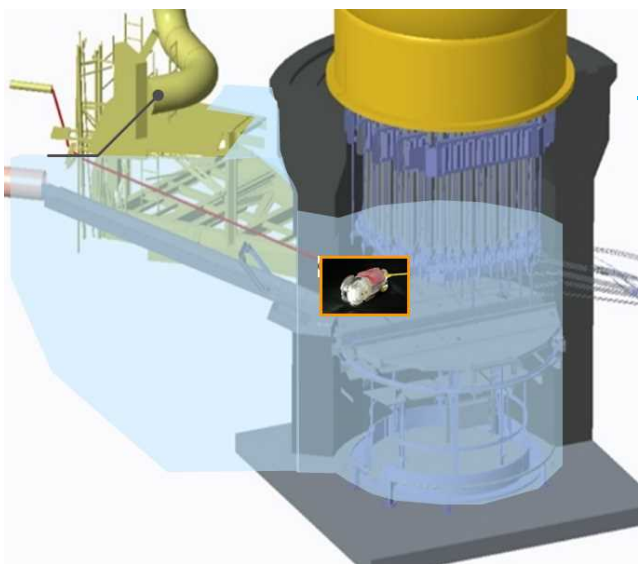
制御棒

CRガイドチューブ

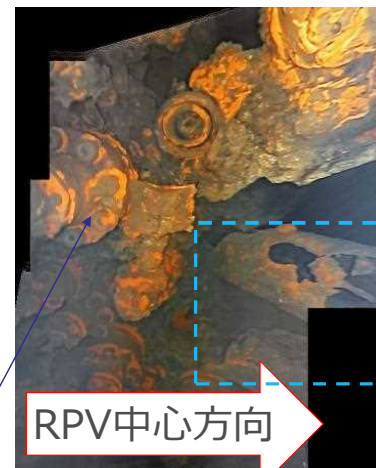
ペDESTAL

CRDハウジング

隣接するCRDフランジ面のレベルや間隔が異なっている



水面の揺らぎを確認

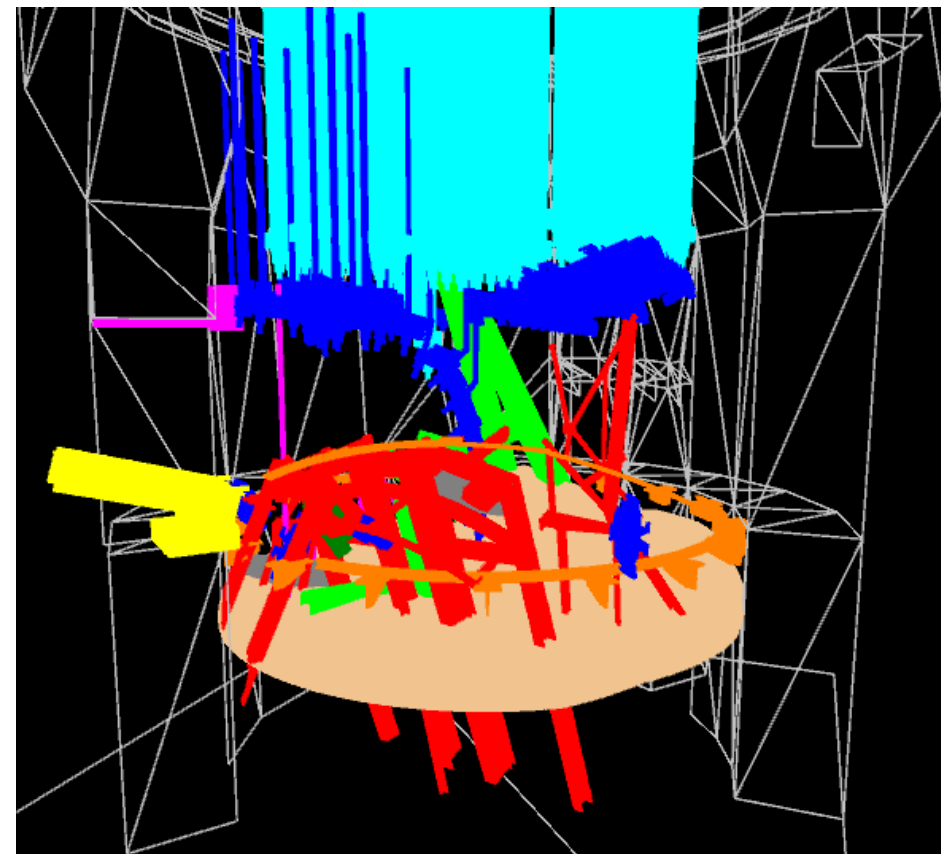
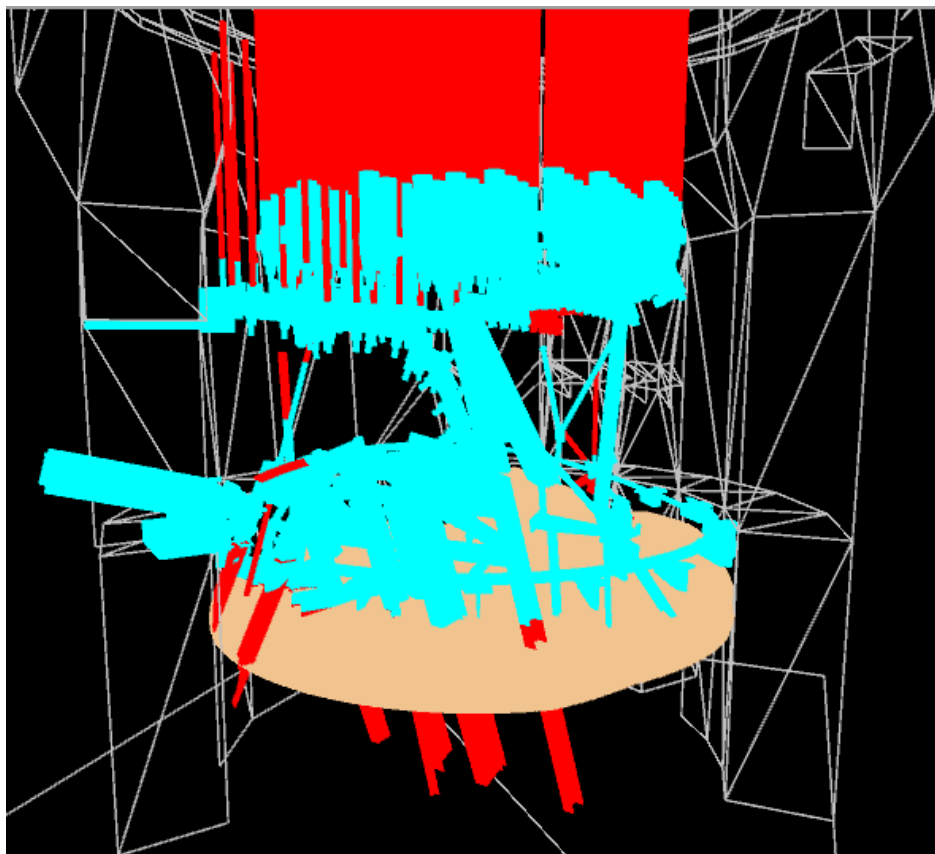


円筒状の構造物 (CRガイドチューブと推定)



RPV中心方向

CRDハウジングフランジ



■ : 映像を確認した
構造物

■ : 映像を確認できなかった
構造物

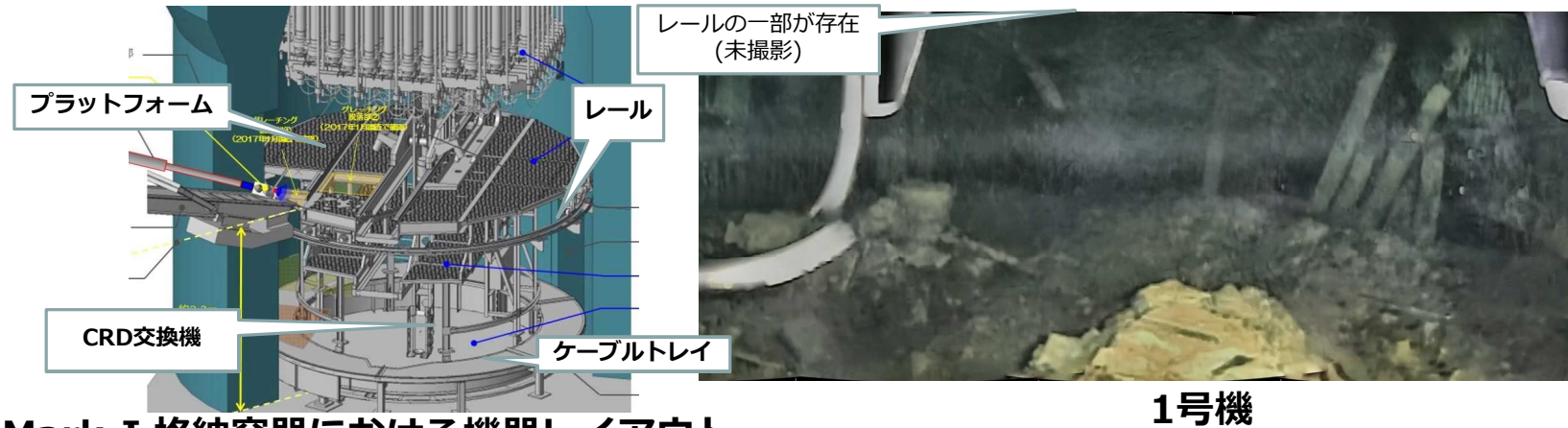
(設計情報から推定)

- : プラットホーム、架台等の構造物
- : CRガイドチューブ
- : プラットホーム旋回モータ
- : CRD交換レール
- : CRDハウジング支持金具
- : プラットホーム旋回レール, 支持金具
- : CRDハウジング
- : 端子箱, 電線管, パイプ
- : グレーチング

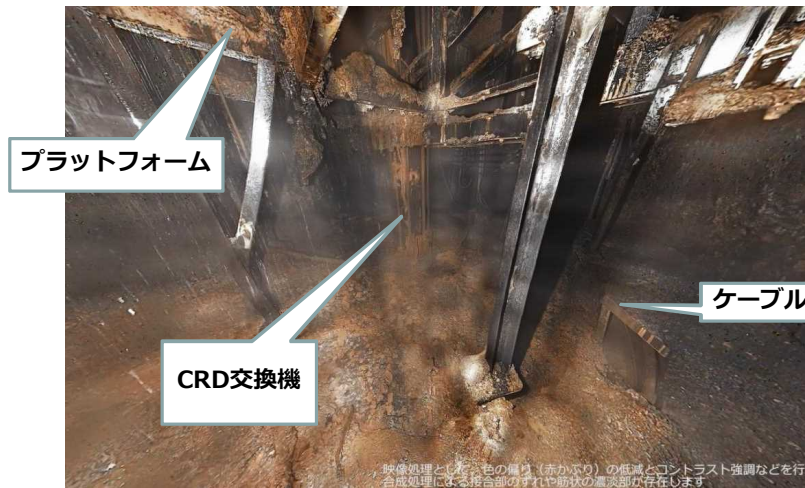
映像作成: 東芝エネルギーシステムズ(株)

内部調査の結果から得られた1～3号機ペデスタル内の比較

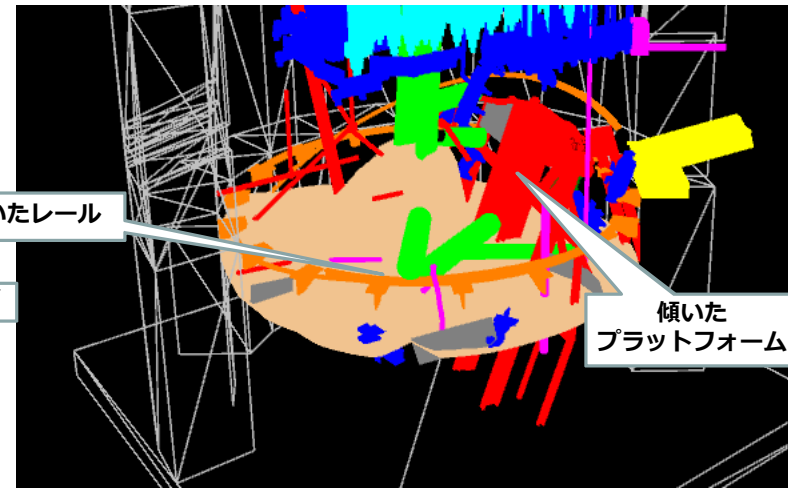
ペデスタル内の損傷の程度: 1号機 > 3号機 > 2号機



Mark-I 格納容器における機器レイアウト



2号機



3号機

今後の3号機内部調査の着目点

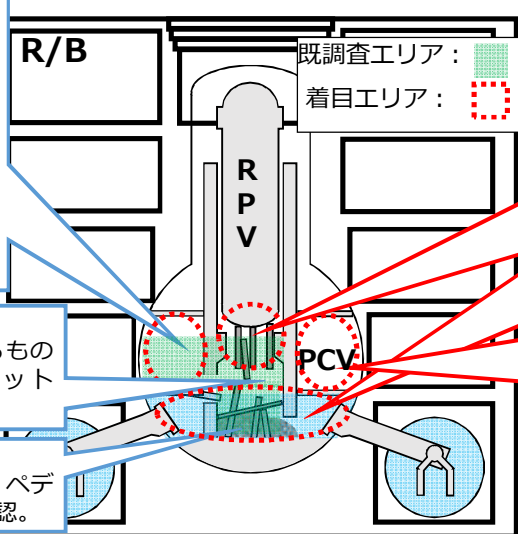
- 主にペDESTAL内の調査が進んでおり、今後はペDESTAL内以外の状況確認や、堆積物の組成分析に注力していく
- 特に未調査であるペDESTAL外、RPV内部の状態確認と、ペDESTAL内の堆積物の採取・分析を優先して実施



【環境情報】
 ・空間線量
 最大約1Gy/h。
 調査範囲がX-53ペネ周辺のみのため、今後拡充していく
 ・PCV水位
 他号機と比較すると最も水位が高く、1FLグレーチングの高さまでである。
 ・暗所、湿潤環境で霧がある

【構造物の状態】
 1号機よりは構造物の形を残しているものの、CRDハウジングの脱落やプラットフォームの変形が確認されている。

【堆積物の状況】
 ペDESTAL内に大量の堆積物がある。ペDESTAL外への流出状況については未確認。



【RPV内部調査】
 ■ 調査工法の検討
 ・他号機のRPV内部調査の結果を踏まえて、今後調査工法について検討していく

- 既設配管からのアクセス
- RPV底部の損傷箇所からのアクセス
- RPV上部からのアクセス

【ペDESTAL外堆積物流出状況調査】
 ■ ファイバースコープ調査
 ・移動式炉内計装系のペネトレーションからファイバースコープを投入し、ペDESTAL人員開口からの堆積物の流出状況を確認する

調査イメージ

【ペDESTAL内外調査】
 ■ X-53からのマイクロドローン調査
 ・マイクロドローンによりペDESTAL内外の映像を取得する

X-53

PCV壁

マイクロドローン

調査イメージ

■ 改良型小型ドローン調査
 ・改良型小型ドローンを投入可能なペネを整備後、ペDESTAL内外の情報取得する

X-53

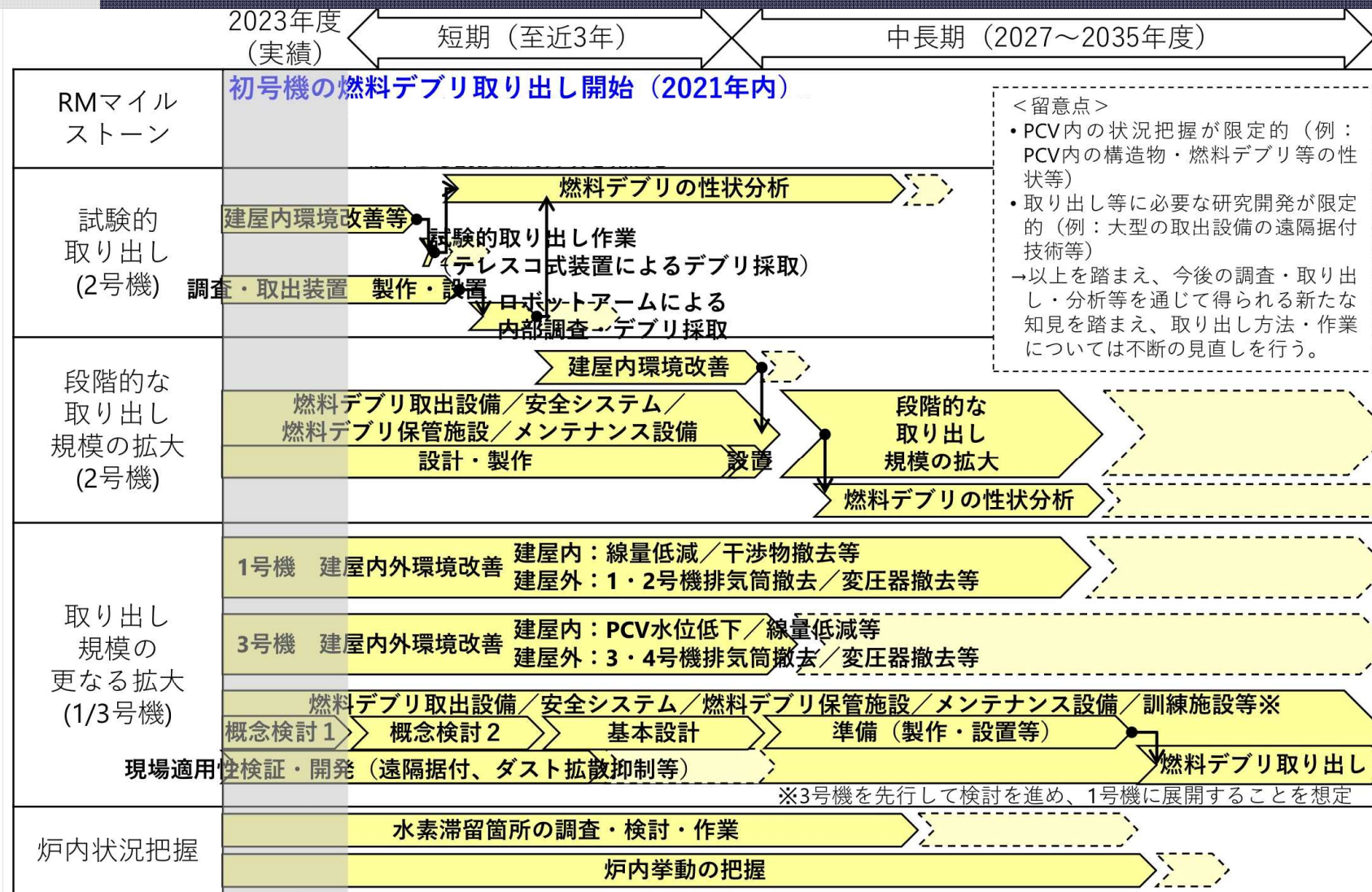
X-6, X-2 等々

A photograph showing two workers in blue uniforms and yellow hard hats standing in a laboratory or industrial setting. They are looking at a large document or blueprint. The background features a large piece of machinery with a long horizontal shaft and various cables. The floor is light-colored and has some equipment and materials scattered on it.

2号機試験的取り出し

IRID has contributed to some work shown here

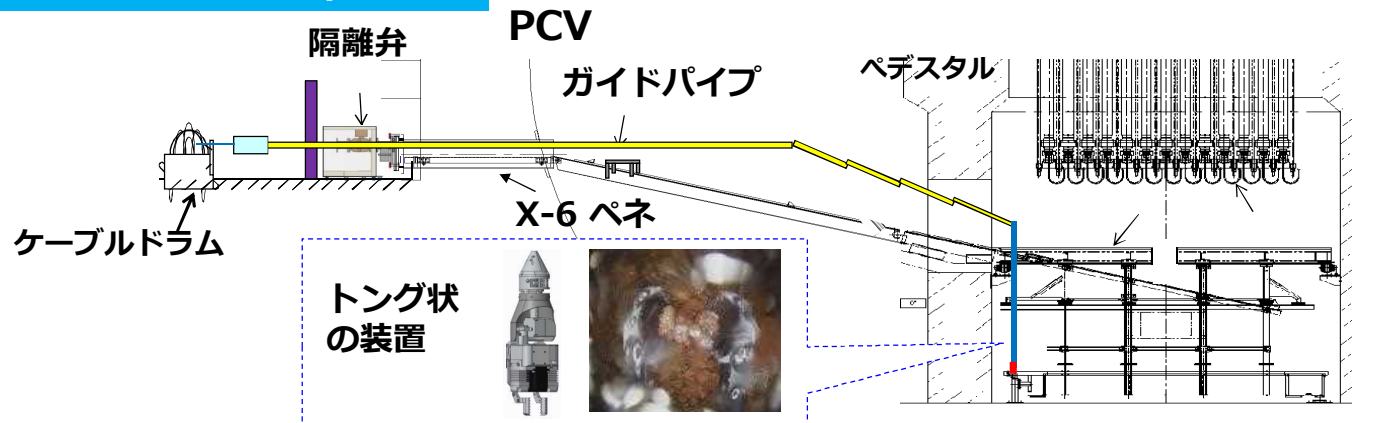
廃炉中長期実行プラン2024(燃料デブリ取り出し)



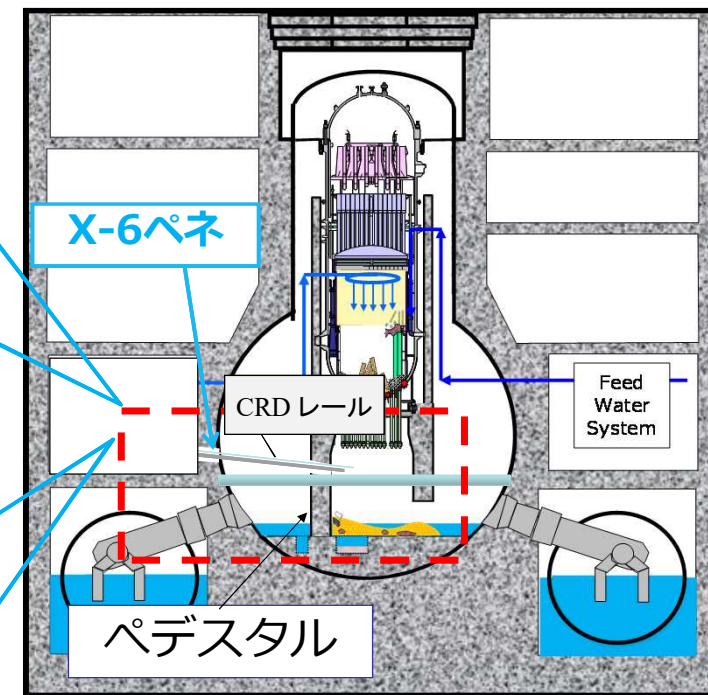
2号機における燃料デブリの試験的取り出し

- 2019年の内部調査時に使用したのと同じアクセスルートを用いて取り出し装置を挿入
- 装置先端に回収器具を取り付け、数gの燃料デブリを取り出し予定

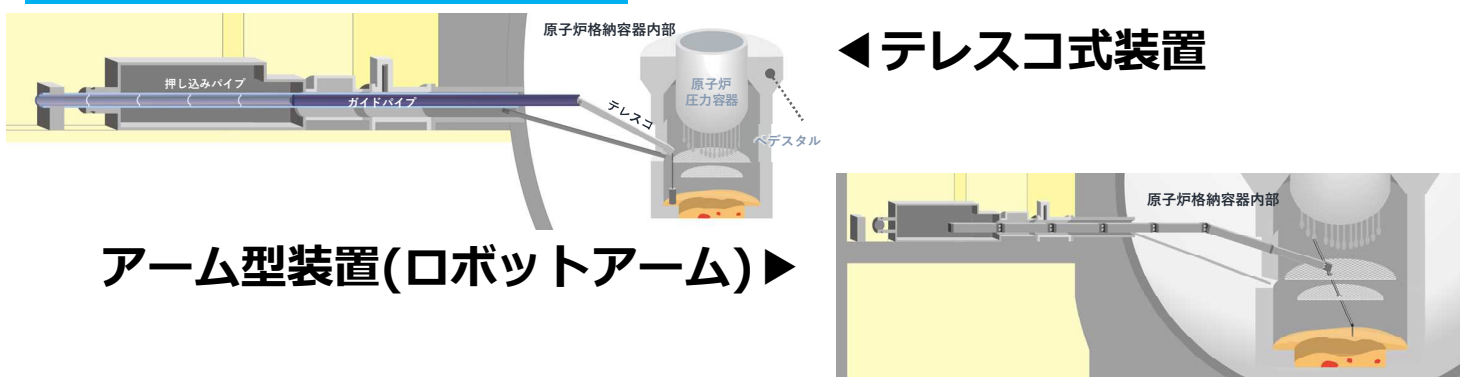
接触調査 (2019年2月)



2号機



燃料デブリの試験的出し

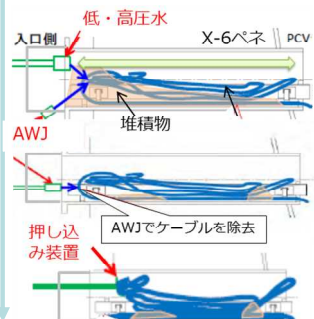


1. 隔離部屋設置

2. X-6ペネハッチ開放

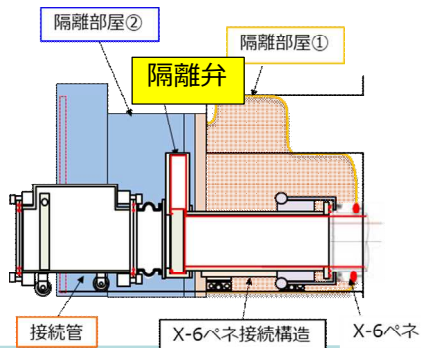
3. X-6ペネ内堆積物除去

X-6ペネ内部にある堆積物・ケーブル類を除去する

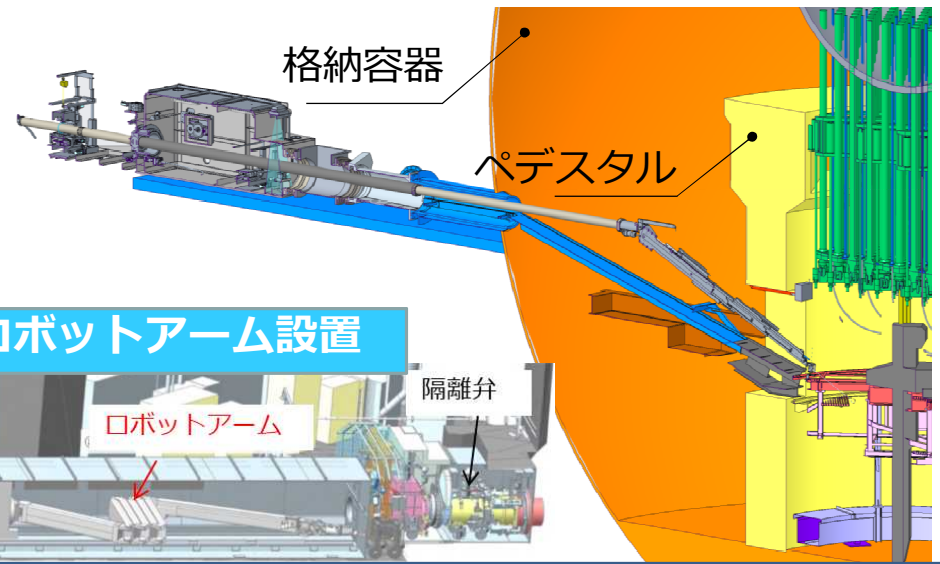


- 【低・高圧水】で堆積物の押込
- 【AWJ】でケーブル除去
- 【押し込み装置】でケーブルを押込

4. X-6ペネ接続構造及び接続管設置

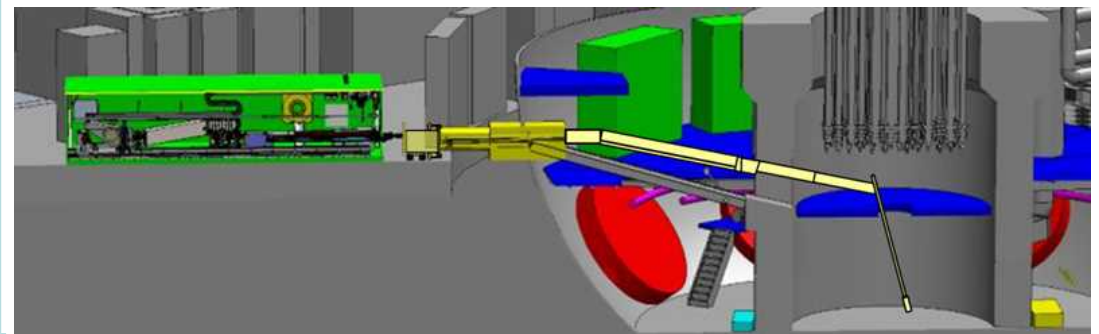


5. テレスコ式装置設置
6. 試験的取り出し作業

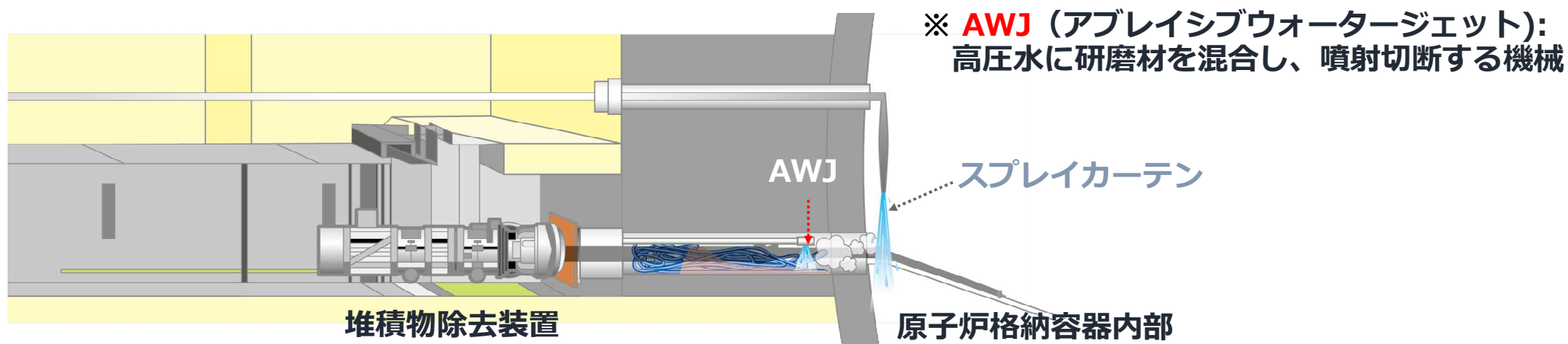


7. ロボットアーム設置

8. ロボットアームによる内部調査・デブリ採取



- 試験的取り出し装置の通過スペースを確保するため、堆積物除去装置を設置し、低圧水、高圧水による堆積物の押し込みやAWJによるケーブル切断などを繰り返し実施し、堆積物の除去を完了（2024年5月）



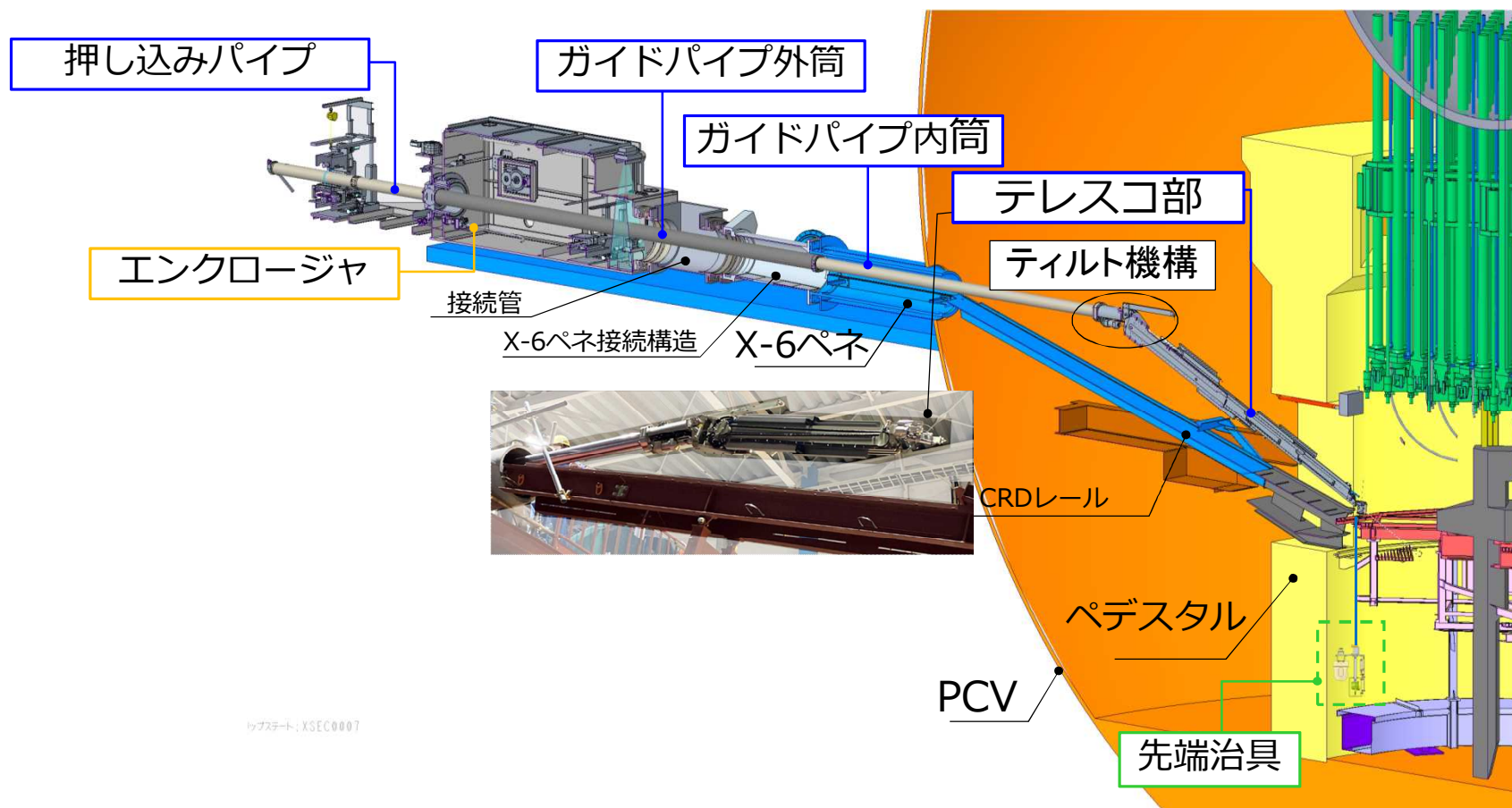
X-6ペネ 蓋の開放

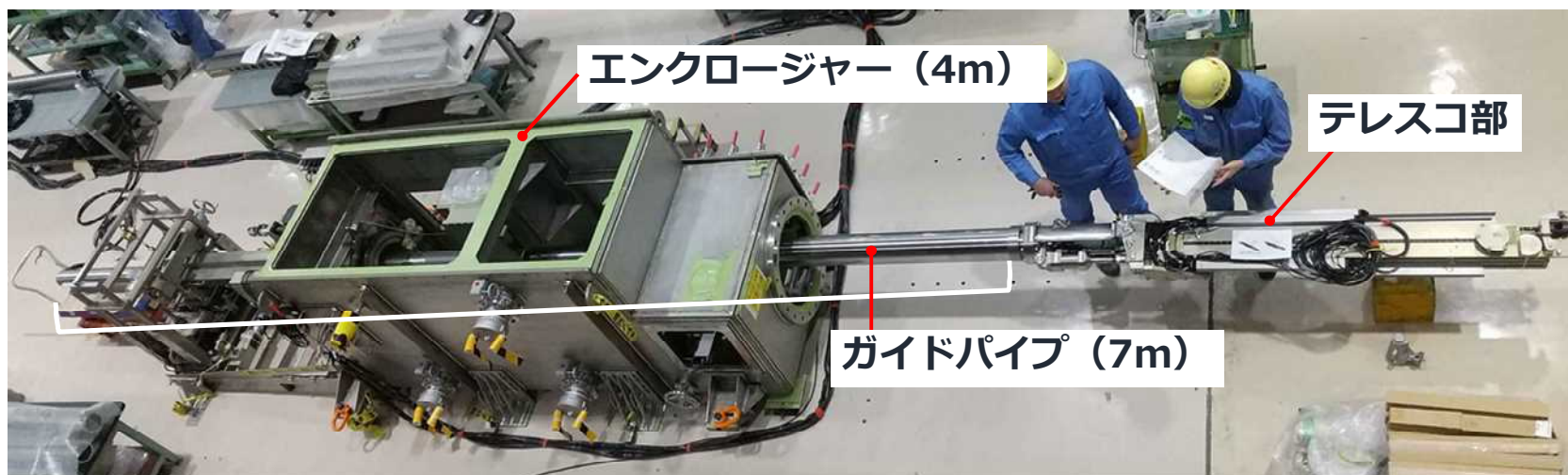


堆積物の除去 完了



- 押し込みパイプを送り出すことでガイドパイプを進ませ、その後、テイル機構を利用しテレスコ部をペDESTAL内に挿入。テレスコ部より治具を吊り下ろし、燃料デブリを採取





- 7月19日に、テレスコ式装置の外観確認作業や搬入準備が整ったことから、テレスコ式装置の2号機原子炉建屋への搬入作業を実施
- 7月24日からテレスコ式装置のX-6ペネ接続構造/接続管への接続作業を開始し、7月25日、取り付けが完了



作業状況

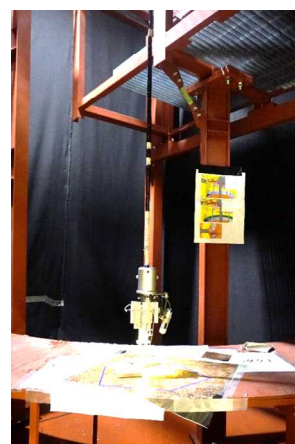
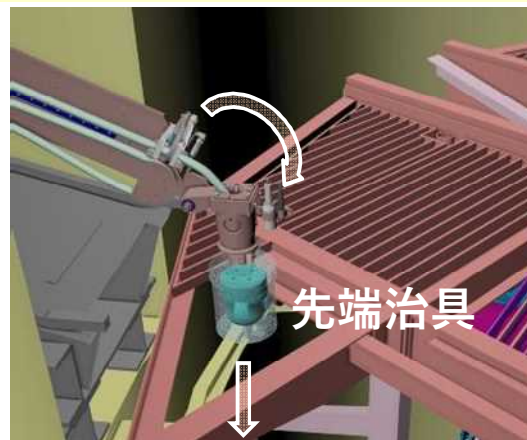
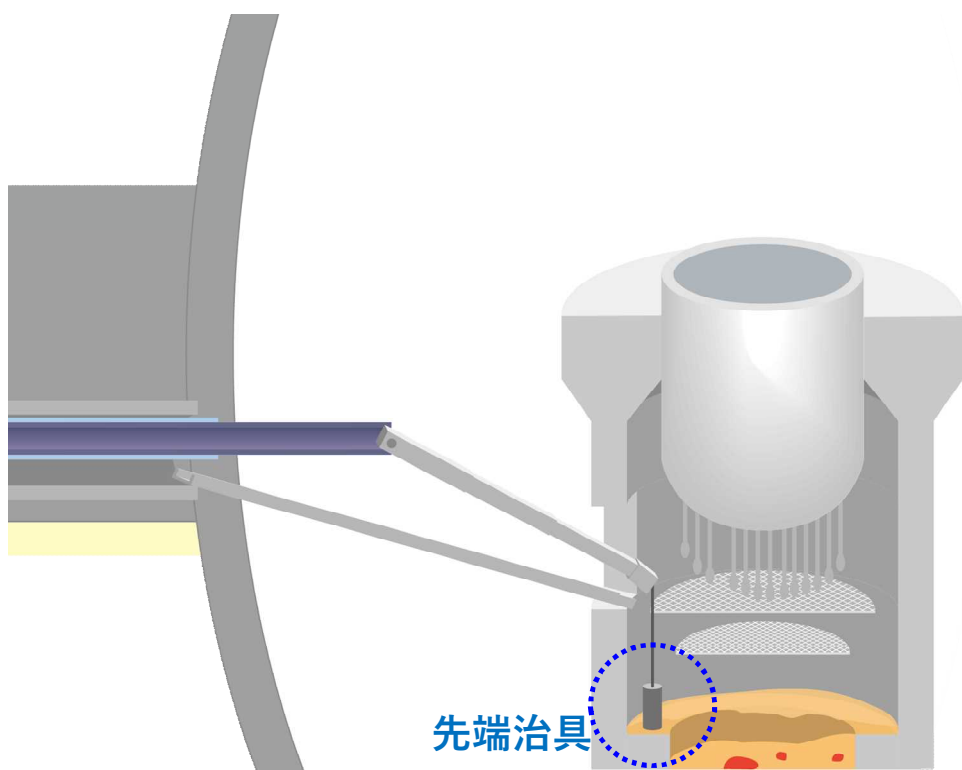
テレスコ式装置とX-6ペネ接続構造/接続管の接続作業完了
(接続部分を上から見た様子)

接続管側

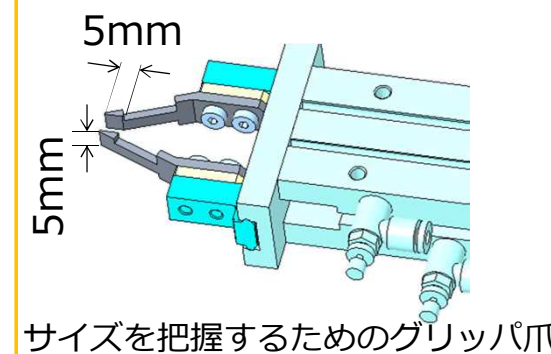
テレスコ式
装置側

福島第一原子力発電所構内：2号機原子炉建屋内
(撮影日：2024年7月25日)

- 先端治具（グリッパ方式）をペDESTAL底部に向けて吊り降ろし、燃料デブリ3g以下を採取
- カメラを用いて、採取する燃料デブリの大きさを判定



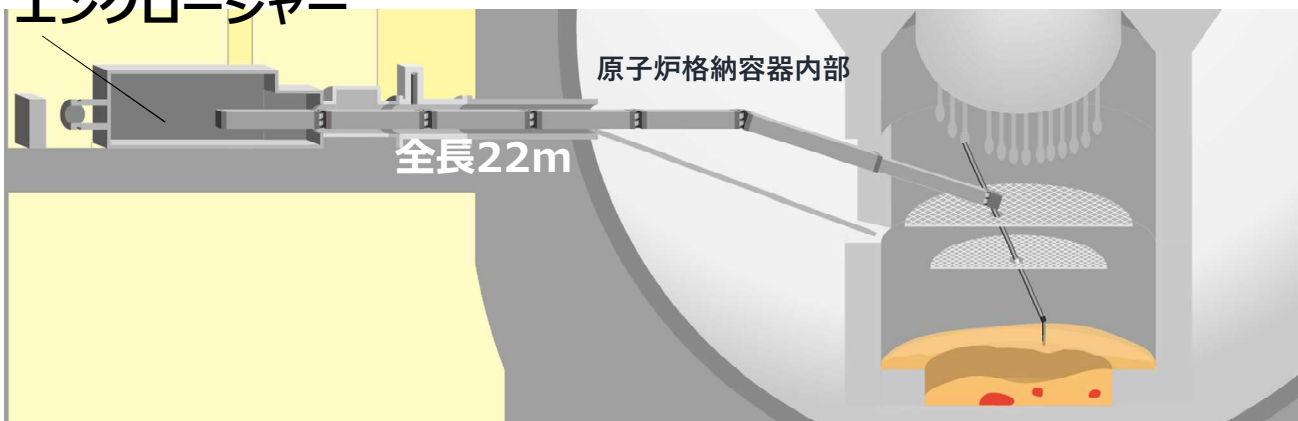
先端治具（グリッパ式）



- X-6ペネ等の狭い部分を通過させるため、精緻な運転制御性を有し、伸縮が可能な折りたたみ式の構造を採用
- エンクロージャーの中に設置される双腕マニピュレーターが回収された燃料デブリを容器に移し替える等の作業を遠隔操作で実施予定

ペDESTAL内に伸展時(全長22m)

エンクロージャー



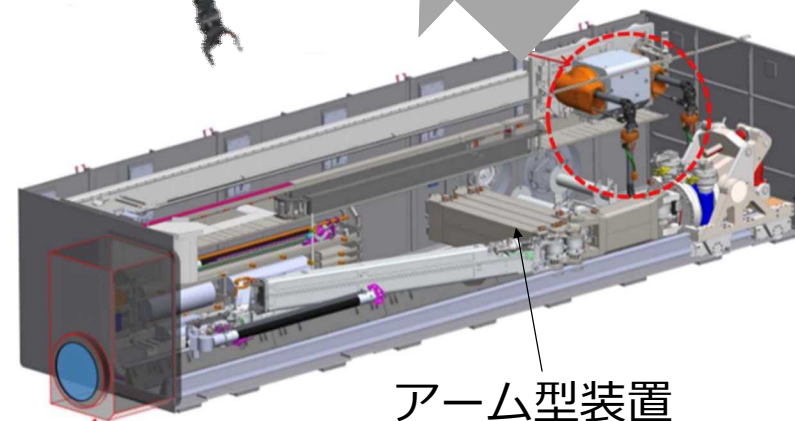
折りたたみ時の状態(エンクロージャー内)



双腕マニピュレーター



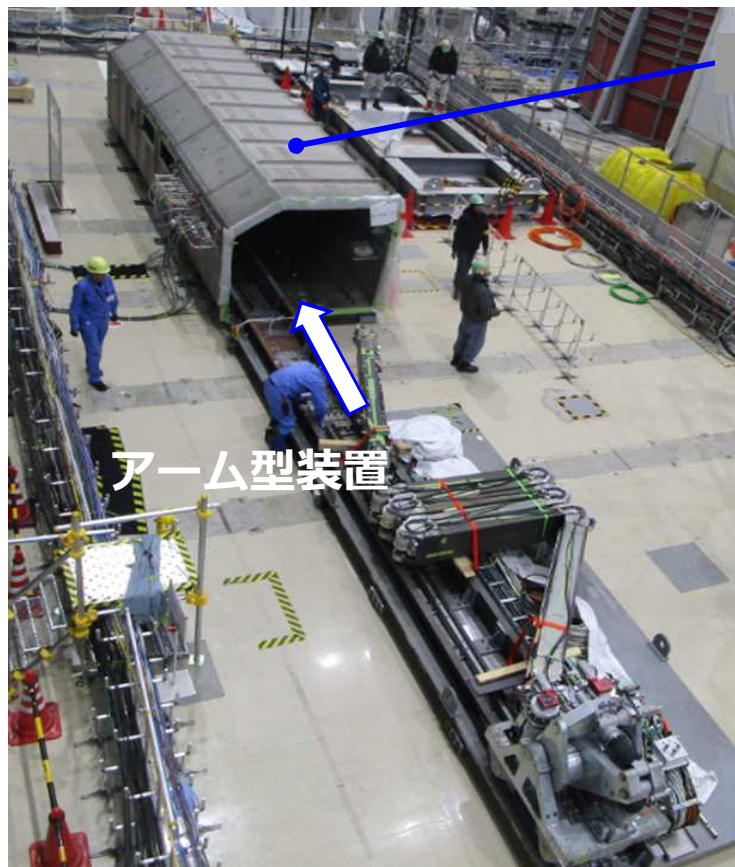
エンクロージャーの中で、人間の手作業の代行を遠隔操作で実施



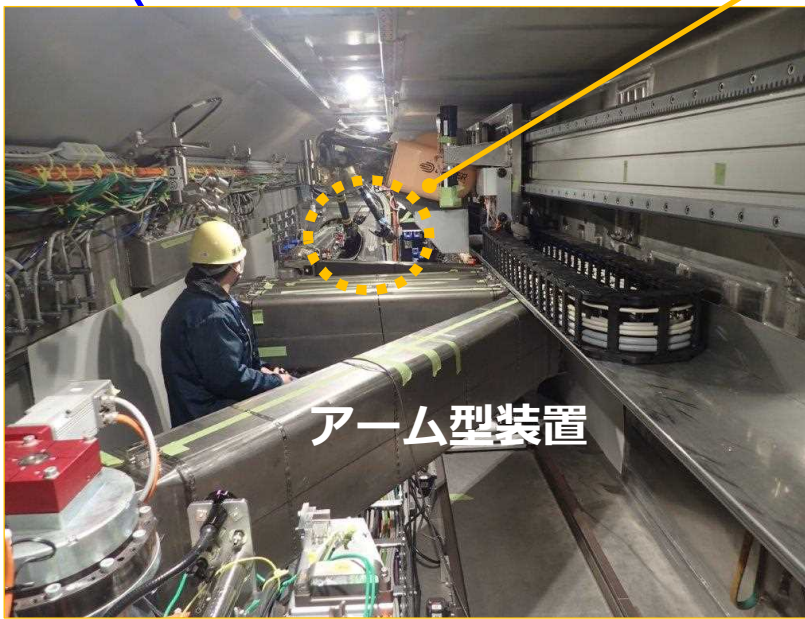
アーム型装置

アーム型試験的取り出し装置の試験状況

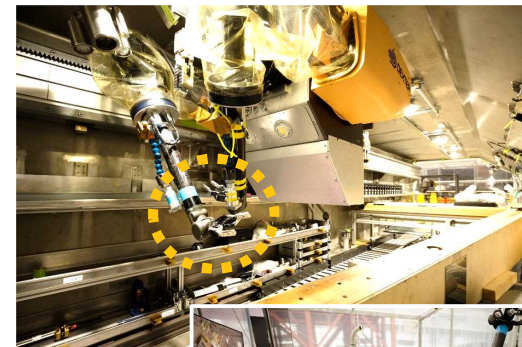
- 楢葉モックアップ施設を用いて、現場を模擬したモックアップ試験を実施
- エンクロージャ内へのアームの組み込みが完了し、エンクロージャ内での双腕マニピュレータの操作試験を実施



エンクロージャ
(アーム型試験的取り出し装置を格納)



双腕マニピュレータ
人間の手と似た動作



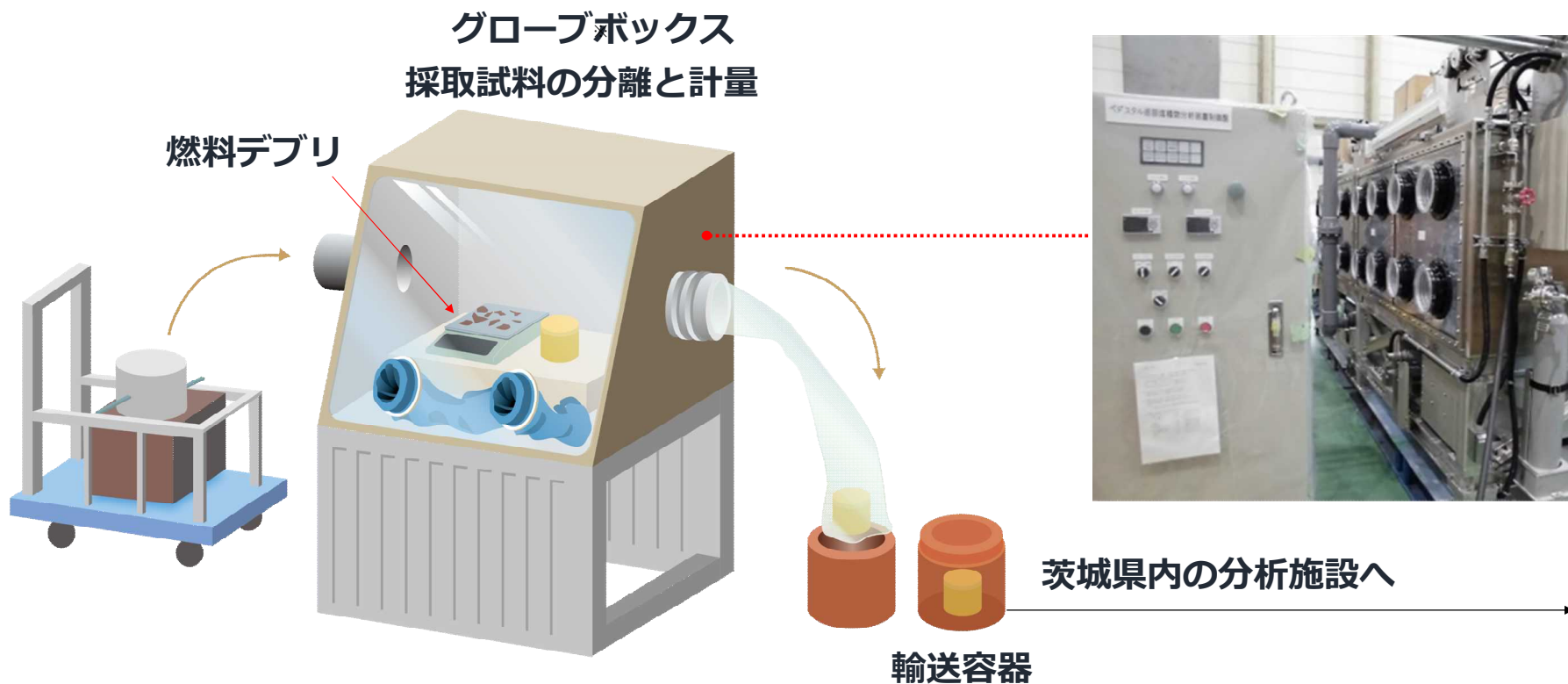
放射性物質などを取り扱う際に遠隔操作





燃料デブリの性状分析

- 試験的に取り出した燃料デブリ（最大数g程度）は、輸送容器に入れ、茨城県内の分析施設へ輸送し、性状の分析等を実施

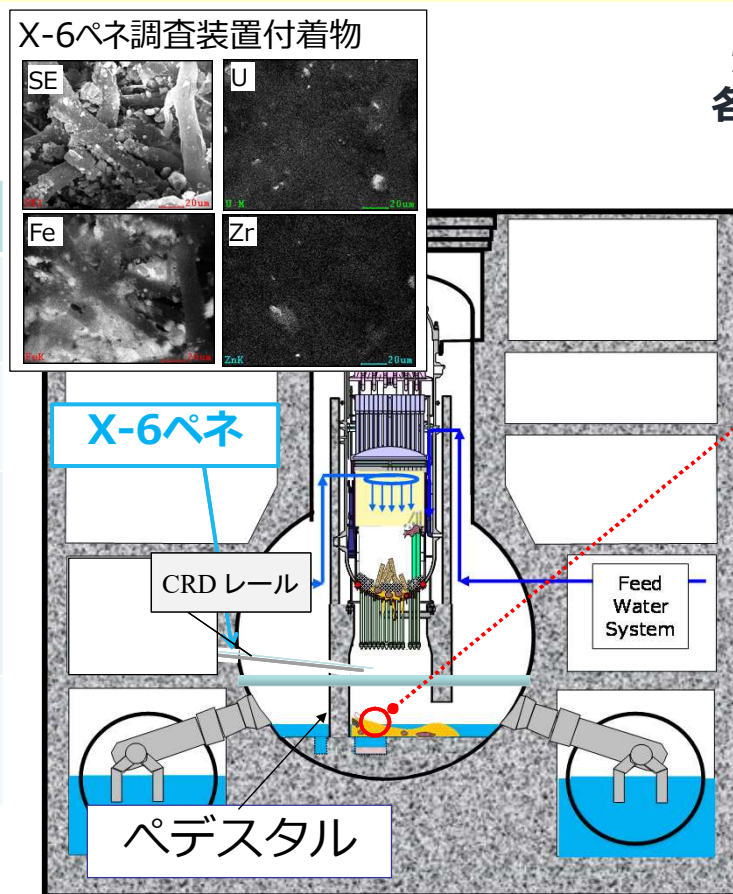


※グローブボックス：放射性物質を閉じ込めるステンレス及び樹脂製の密閉容器

- 分析施設では組成分析、放射線分析、局所的な性状を把握する分析を実施
- 燃料デブリの性状の把握は、燃料デブリ取り出し、保管、事故進展などを検討する上で重要

主な分析項目

分析種別	分析方法	得られる情報
組成	ICP-AES ICP-MS	ウラン含有率、構造材含有率、同位体比
元素分布	SEM-EDX SEM-WDX	化合物の存在状況
放射能濃度	γ、αスペクトロメーター	揮発しやすいCsの含有状況 難揮発のEu、Cmの存在
結晶構造	TEM電子線回折	燃料デブリが経験した温度や雰囲気条件推定



燃料デブリの位置的分布を各種調査や解析を元に推定。その性状は不明な点も多い

燃料デブリを詳細に分析



採取箇所周辺の燃料デブリの性状理解



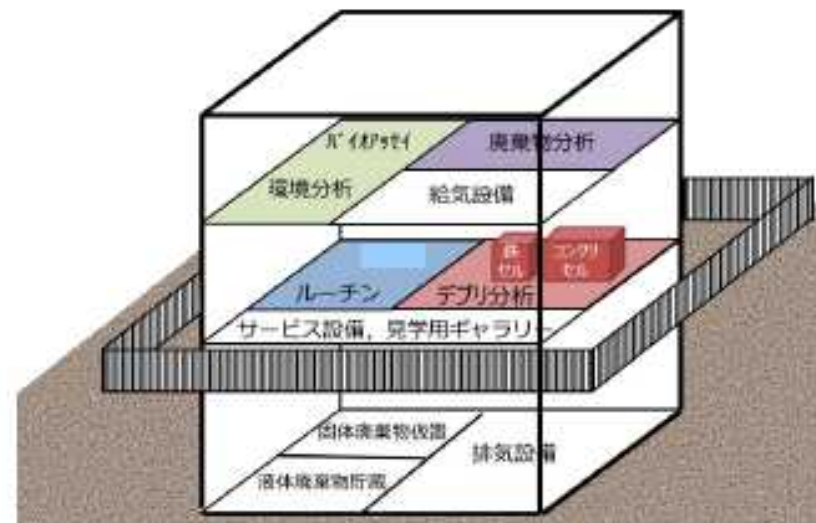
分析の取り組みを継続しより広範囲の理解

- JAEA第2棟が2026年の運用開始を目指して準備中
- 東京電力の総合分析施設は2020年代後半の建設を予定

JAEA 大熊分析・研究センター



東京電力 総合分析施設(イメージ)



ご清聴有難うございました

TEPCO

