

福島第一原子力発電所の廃炉と IRIDの研究開発の状況

2018年5月29日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

石橋 英雄

※本資料内の研究成果は、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。

I .福島第一原子力発電所の廃炉の状況

II .IRIDの廃炉研究開発の状況

1 . IRIDの事業概要

2 .研究開発の状況

(燃料デブリ取出しに係る主な研究開発)

2-1.総合的な炉内状況把握

2-2.燃料デブリ検知 (ミュオン調査)

2-3.原子炉格納容器 (PCV) 内部調査

2-4.PCV補修・止水技術

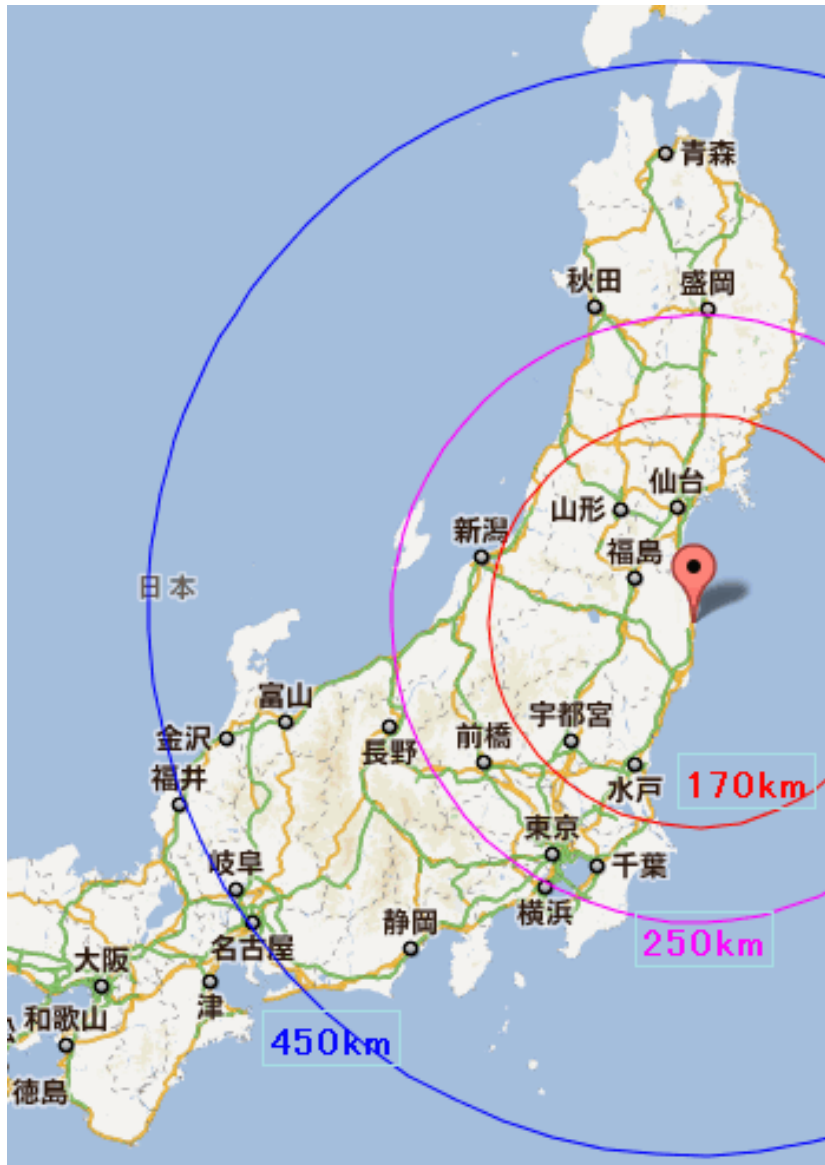
2-5.燃料デブリ取り出し技術

2-6.燃料デブリ収納・移送・保管技術

3 . まとめ

I .福島第一原子力発電所の廃炉の状況

福島第一原子力発電所の立地地点と発電所概観（3.11事故以前）

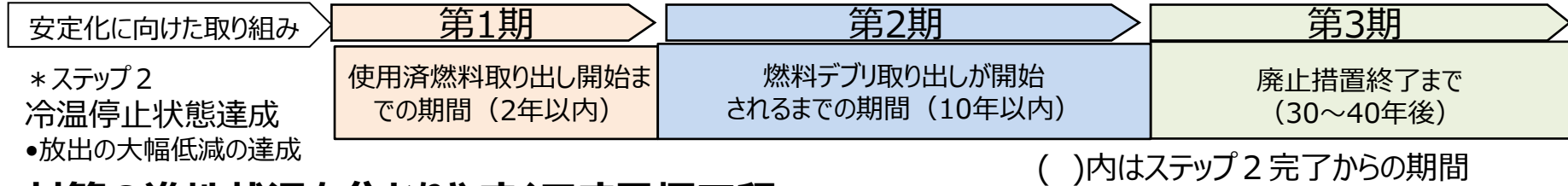


政府の福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた中長期ロードマップ

2011年12月
【ステップ2*完了】

2013年11月
(4号機燃料取り出し開始)

2021年12月



対策の進捗状況を分かりやすく示す目標工程

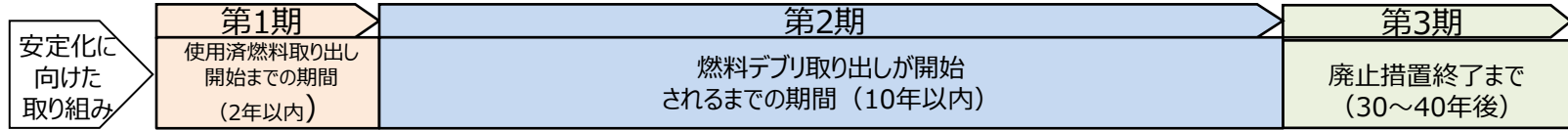
| | | |
|-----------|-------------------------------------|----------|
| 汚染水対策 | 汚染水発生量を150m ³ /日程度に抑制 | 2020年内 |
| | 浄化設備等により浄化処理した水の貯水を全て溶接型タンクで実施 | 2018年度 |
| 滞留水処理 | ①1, 2号機間及び3, 4号機間の連結部の切り離し | 2018年内 |
| | ②建屋内滞留水中の放射性物質の量を2014年度末の1/10程度まで減少 | 2018年度 |
| | ③建屋内滞留水処理完了 | 2020年内 |
| 燃料取り出し | ①1号機燃料取り出しの開始 | 2023年度目途 |
| | ②2号機燃料取り出しの開始 | 2023年度目途 |
| | ③3号機燃料取り出しの開始 | 2018年度中頃 |
| 燃料デブリ取り出し | ①初号機の燃料デブリ取り出し方法の確定 | 2019年度 |
| | ②初号機の燃料デブリ取り出しの開始 | 2021年内 |
| 廃棄物対策 | 処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見通し | 2021年度頃 |

—廃止措置等に向けた中長期ロードマップと主な対策の進捗状況—

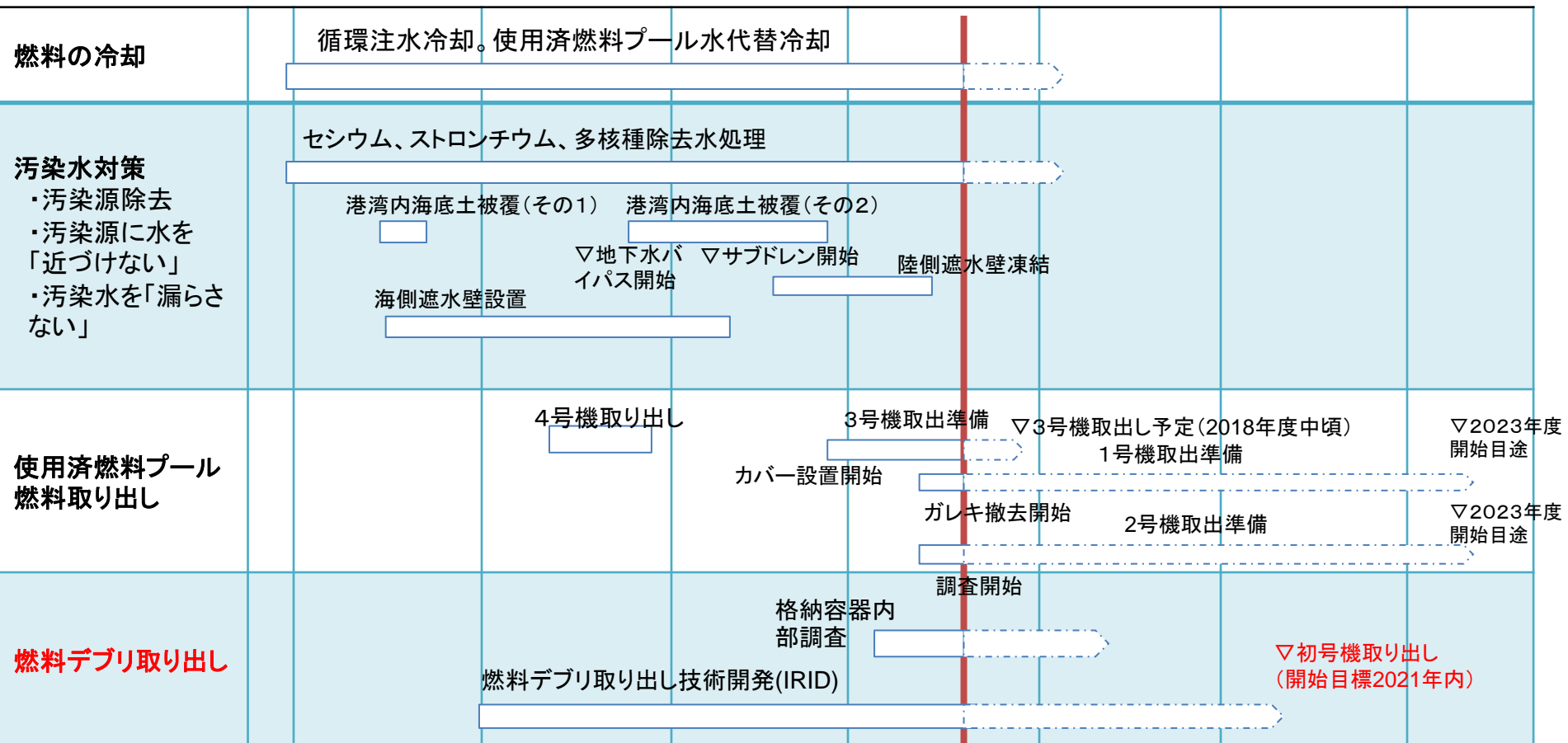
2011年12月
【ステップ2＊完了】

2013年11月
(4号機燃料取り出し開始)

2021年12月



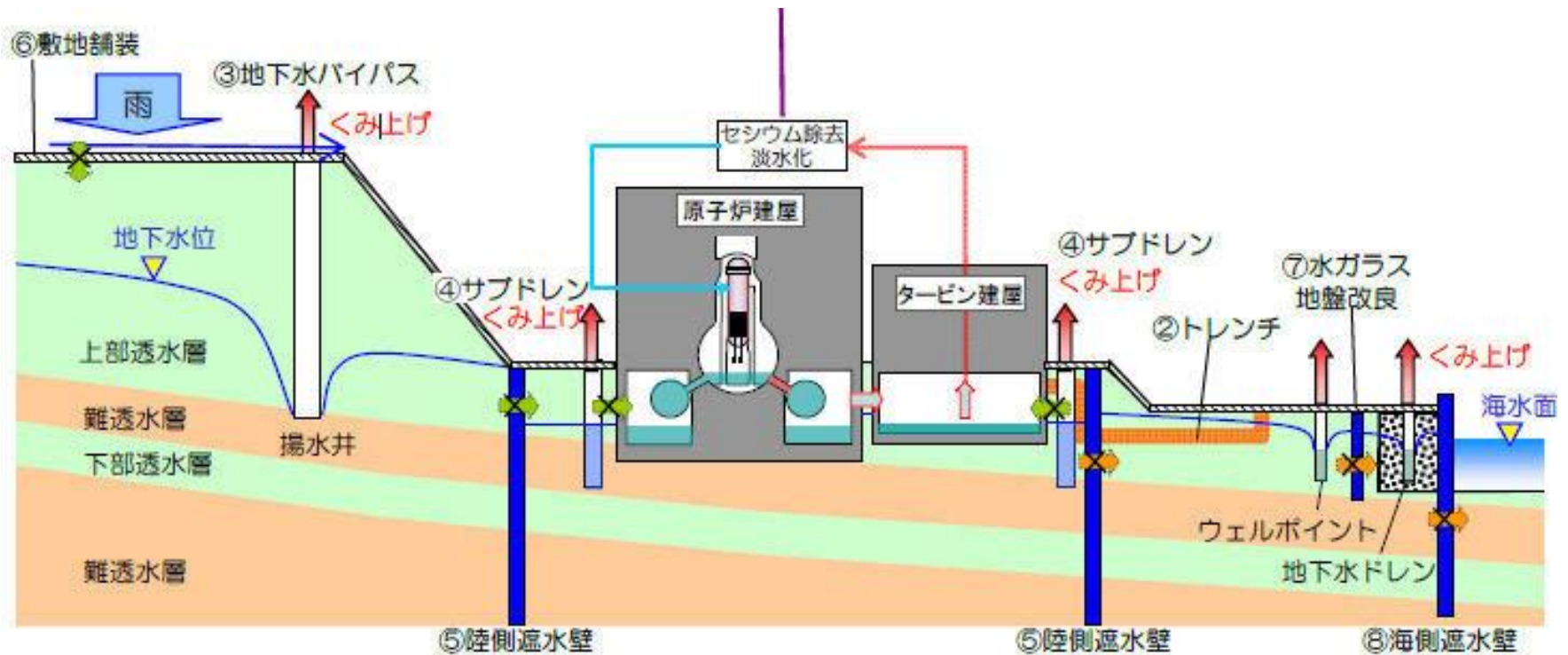
2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023



※進捗工程図は厳密なものではありません

福島第一原子力発電所の廃炉の状況

— 参考 : 汚染水対策 —



福島第一原子力発電所の廃炉の状況

—「福島第一原子力発電所は、今」～あの日から明日へ～ (Ver,2017.12)—



171228_01j.wmv

II .IRIDの研究開発の状況

1.IRIDの事業概要

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**（2017年10月1日現在、役員を除く）

• **独立行政法人：2法人**

（独）日本原子力研究開発機構（JAEA）、（独）産業技術総合研究所（AIST）

• **メーカー等：4社**

東芝エネルギーシステムズ(株)、日立GE ニュークリア・エナジー(株)、三菱重工業(株)、(株)アトックス

• **電力会社等：12社**

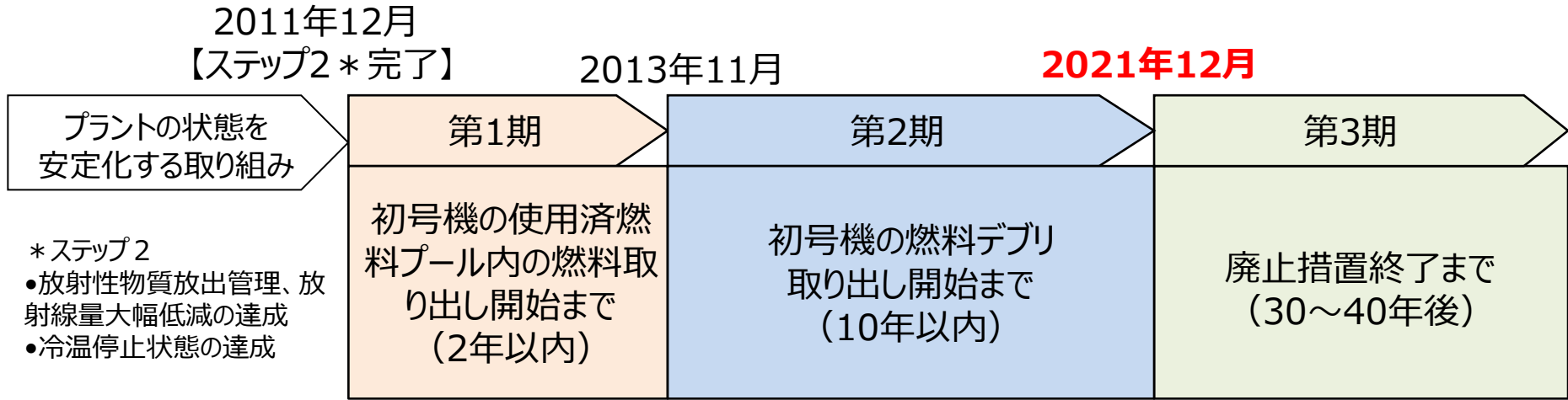
北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)

オールジャパン体制

■ **事業費**

| 年度 | 2013年度 (8月～) | 2014年度 | 2015年度 | 2016年度 | 2017年度 (見込み) |
|-----|-----------------|--------|--------|--------|-----------------|
| 事業費 | 約46億円 | 約120億円 | 約148億円 | 約143億円 | 約154億円 |

(参考) 中長期ロードマップ (政府・東電で策定) の概要



*ステップ2
 ●放射性物質放出管理、放射線量大幅低減の達成
 ●冷温停止状態の達成

()内はステップ2完了からの期間

↑
 2013年11月18日に**4号機**使用済燃料プールから燃料取り出し開始、
2016年12月22日取り出し完了

○中長期ロードマップは、**2017年9月26日**に**2年ぶりに改訂**された。

○目標工程(マイルストーン)の明確化 ○**ステップ・バイ・ステップ**※のアプローチ

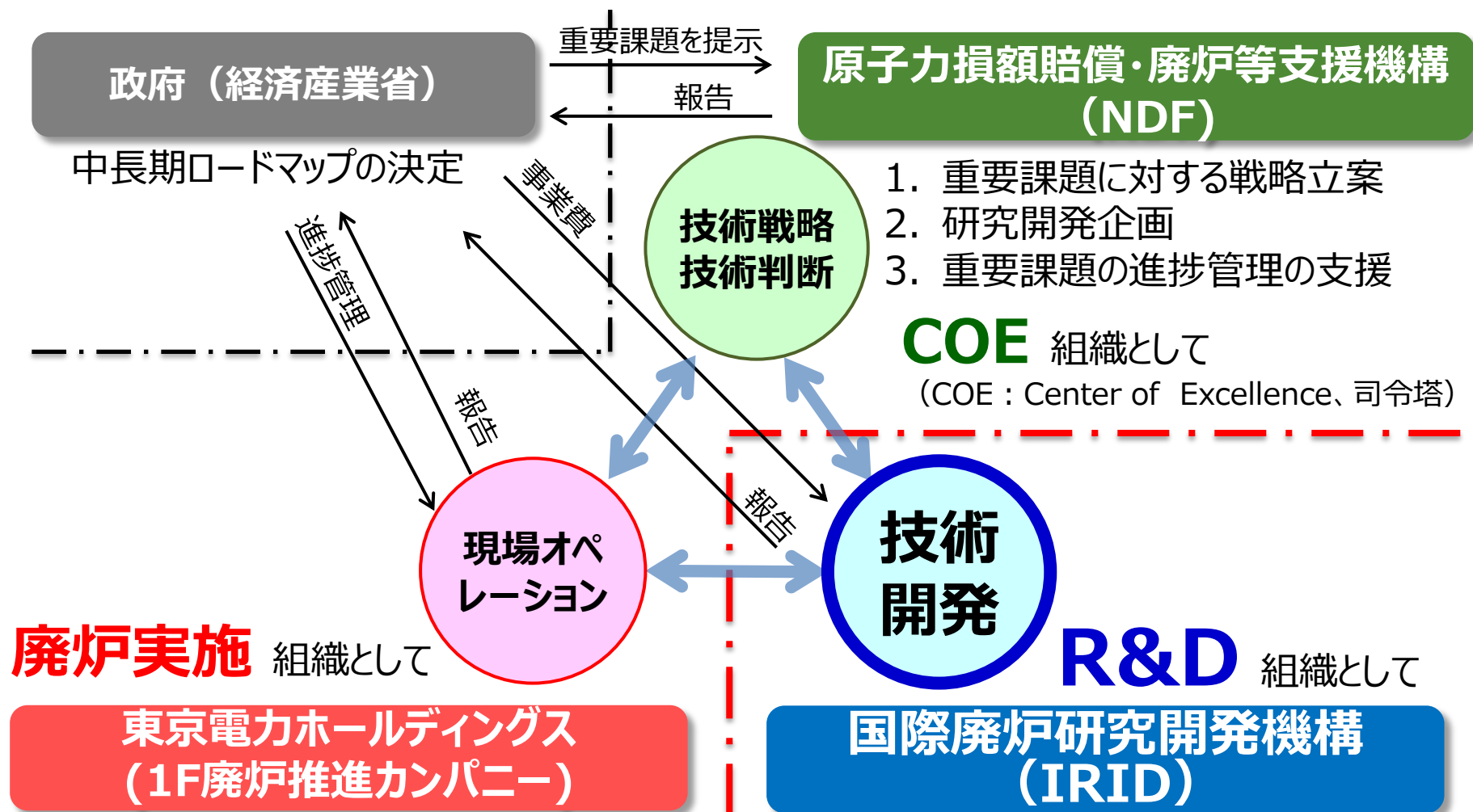
【燃料デブリ取り出し】

- ・号機毎の燃料デブリ取り出し方針の決定 2017年夏決定 → **気中・横取り出し**を中心に
- ・**初号機**の燃料デブリ取り出し**方法の確定** 2018年度上半期 → **2019年度**
- ・**初号機**の燃料デブリ取り出しの**開始** 2021年内 → **変更無し**

※ 現時点での最新情報に基づき廃炉の方向性を決定するものの、その後得られていく新たな情報や現場での経験を踏まえてその方向性を微修正していく、段階的かつ柔軟なアプローチ方法 (小規模から段階的に取出していく)。

IRIDの役割

- ▶ 4者（政府、NDF、東京電力、IRID）が連携して1F廃炉を推進。
- ▶ **IRIDは技術開発の実施者（R&D組織）**として貢献。



IRIDの事業内容

▶ IRID事業の3本柱



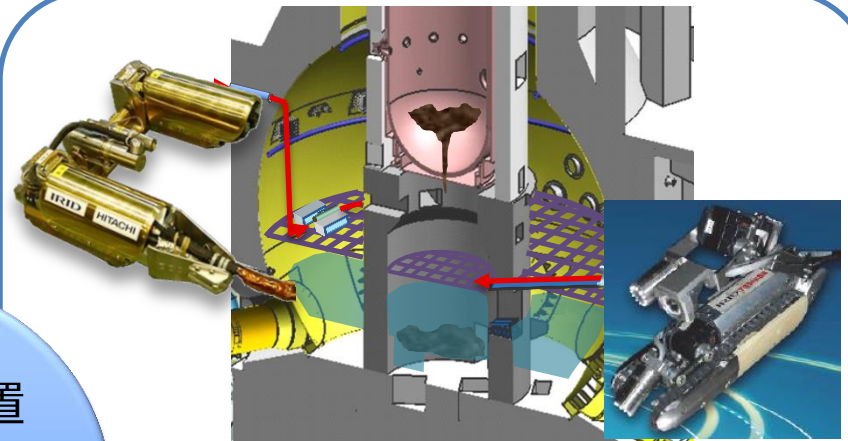
国際顧問との会議

1. 廃止措置
に関する
研究開発
を行います。

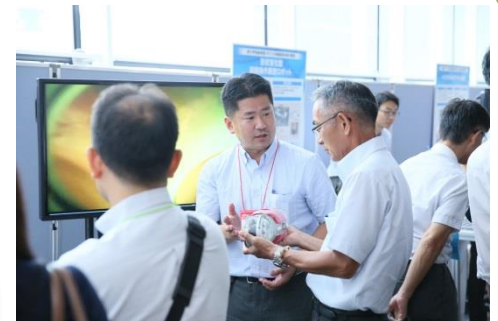
2. 廃止措置
に関する
**国際、国内
関係機関と
の協力**を推
進します。

IRID

3. 研究開発
に関する
人材育成
に取り組めます。



格納容器内部調査ロボットの開発

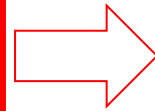


「IRIDシンポジウム2017」
でのロボットのデモ

IRIDの研究開発スコープ

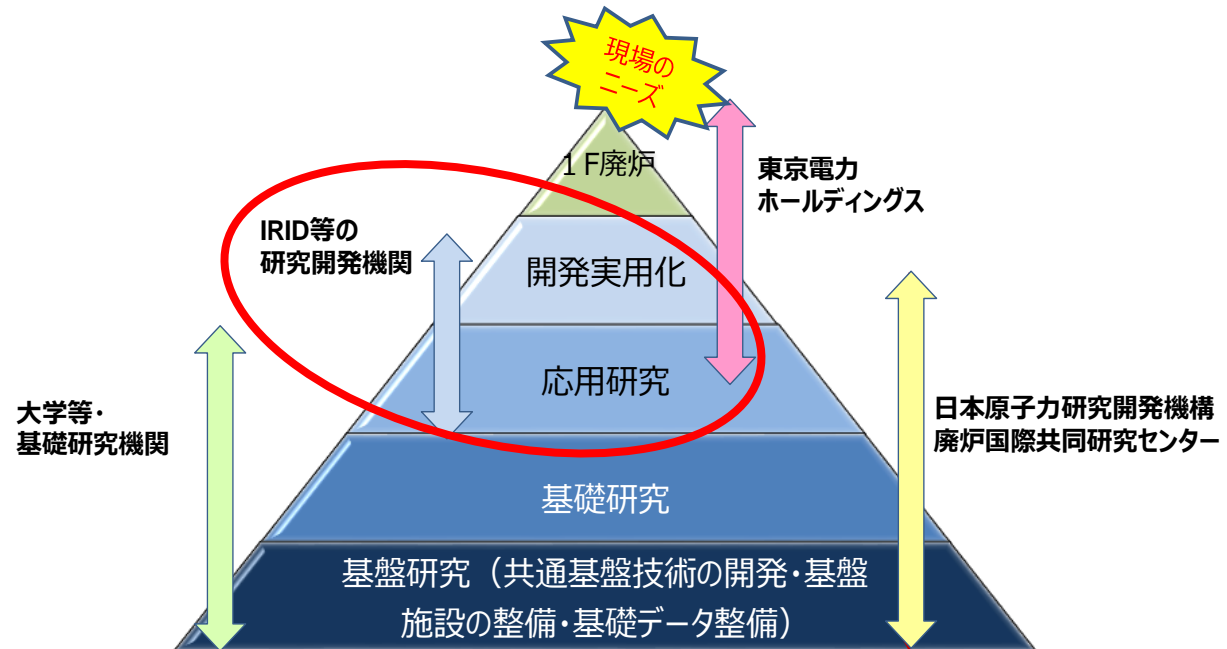
廃炉事業

- 原子炉の冷温停止状態の継続
- 滞留水処理（汚染水対策）
- 発電所全体の放射線量低減・汚染拡大防止
- 使用済燃料プールからの燃料取り出し
- 燃料デブリ取り出し
- 固体廃棄物の保管・管理と処理・処分に向けた計画
- 原子炉施設の廃止措置計画



IRIDはこの分野のR&Dを担当

研究開発の全体像

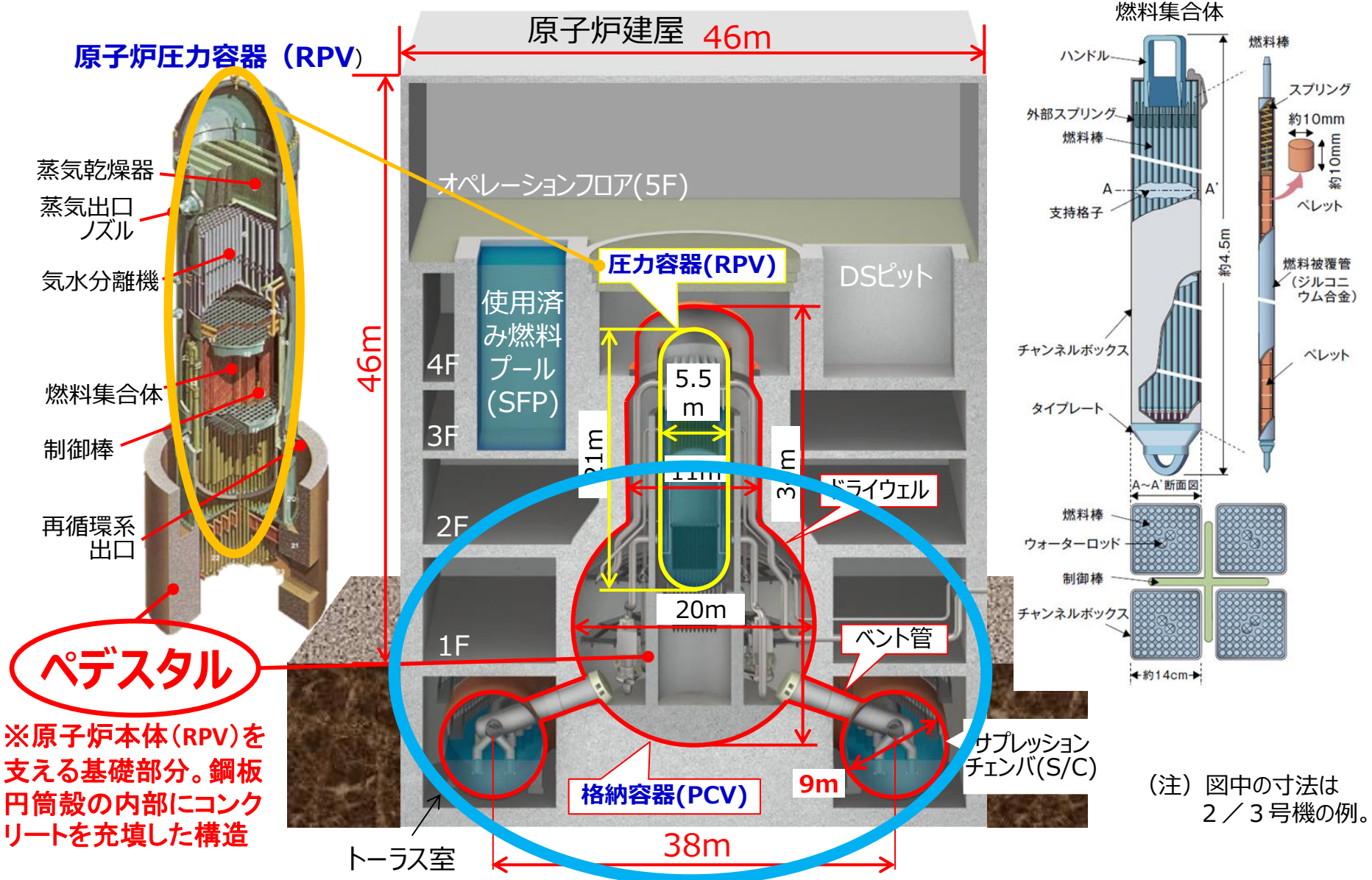


出所: NDF 技術戦略プラン2017

【参 考】

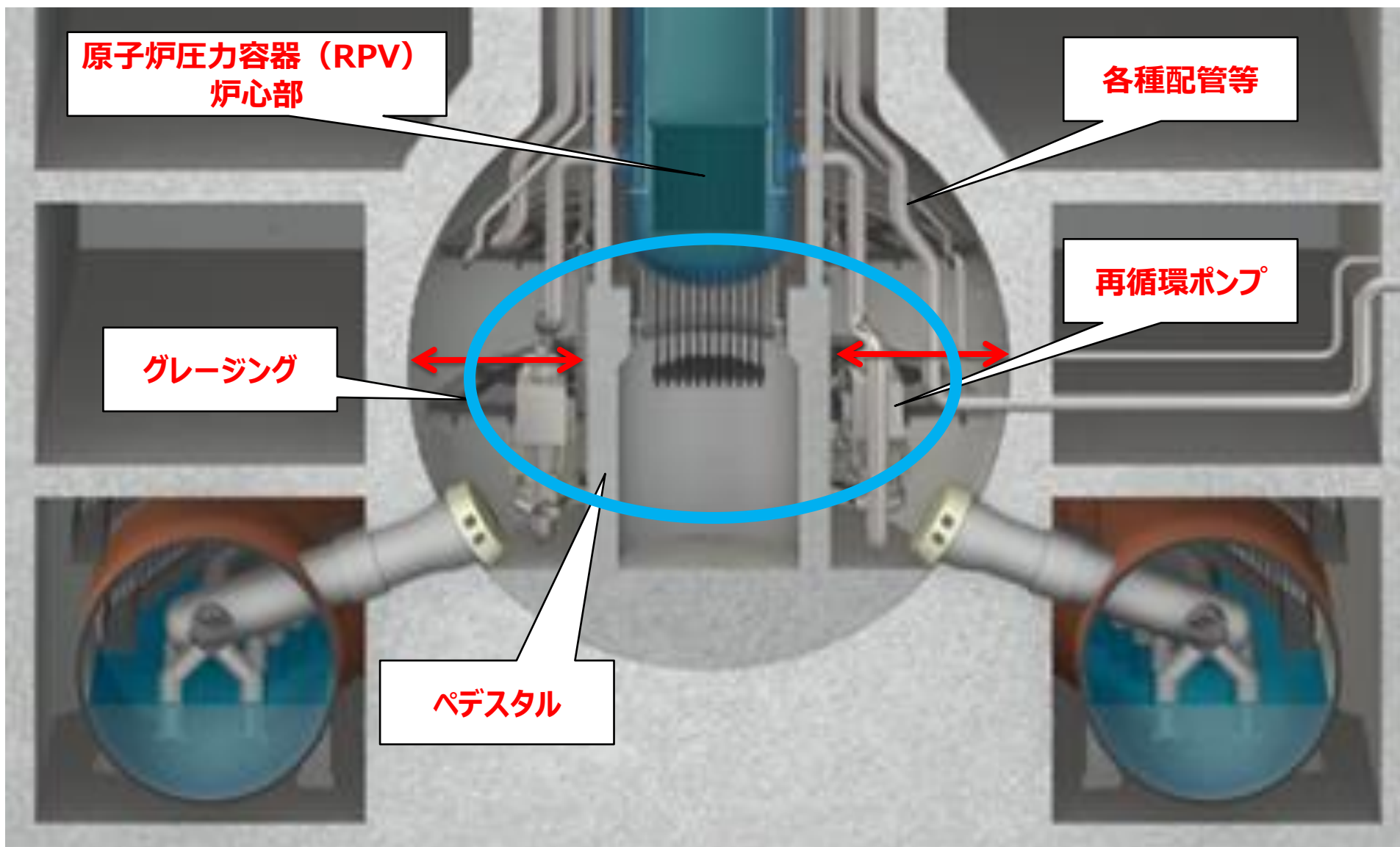
原子力設備用語等の解説

沸騰水型原子炉 (BWR) の構造物と名称

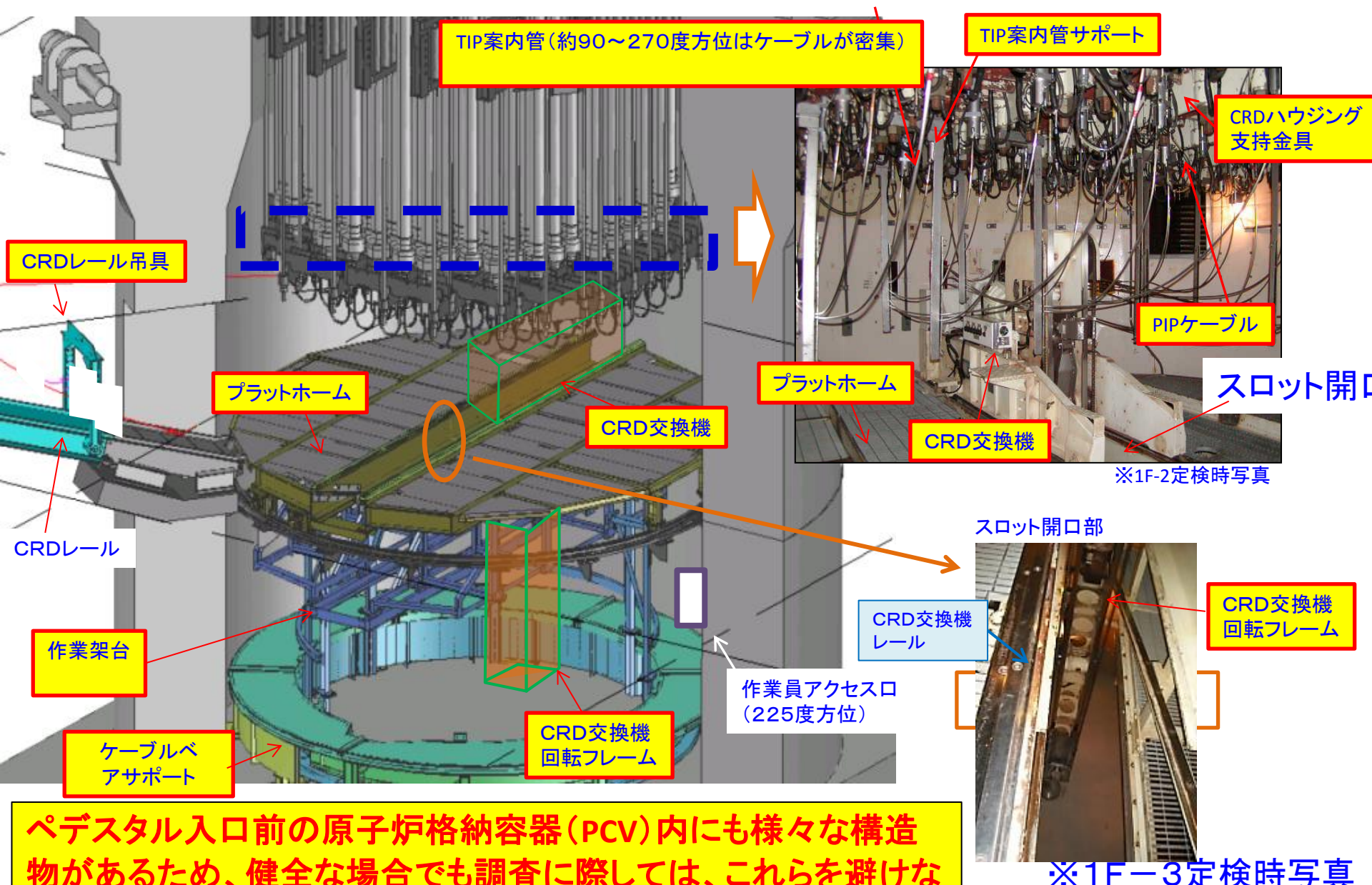


※原子炉本体(RPV)を支える基礎部分。鋼板円筒殻の内部にコンクリートを充填した構造

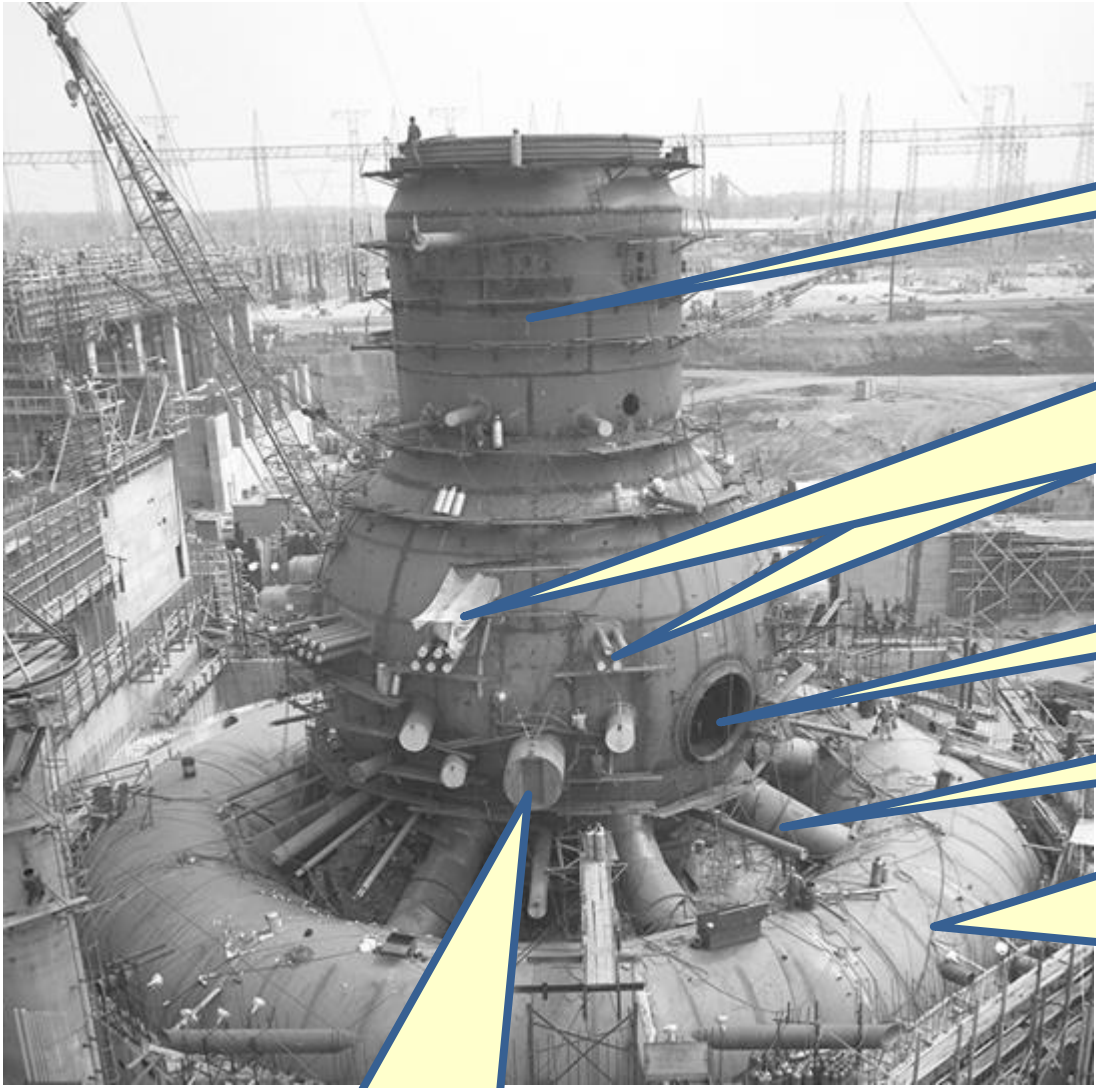
原子炉格納容器（PCV）～ペDESTAL周外辺部



原子炉圧力容器 (RPV) 直下のペDESTAL内の機器・構造物



原子炉格納容器（PCV）の外観（建設時写真）



「ドライウェル（D/W）」：S/Cより上部のPCV

「原子炉格納容器貫通部」：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

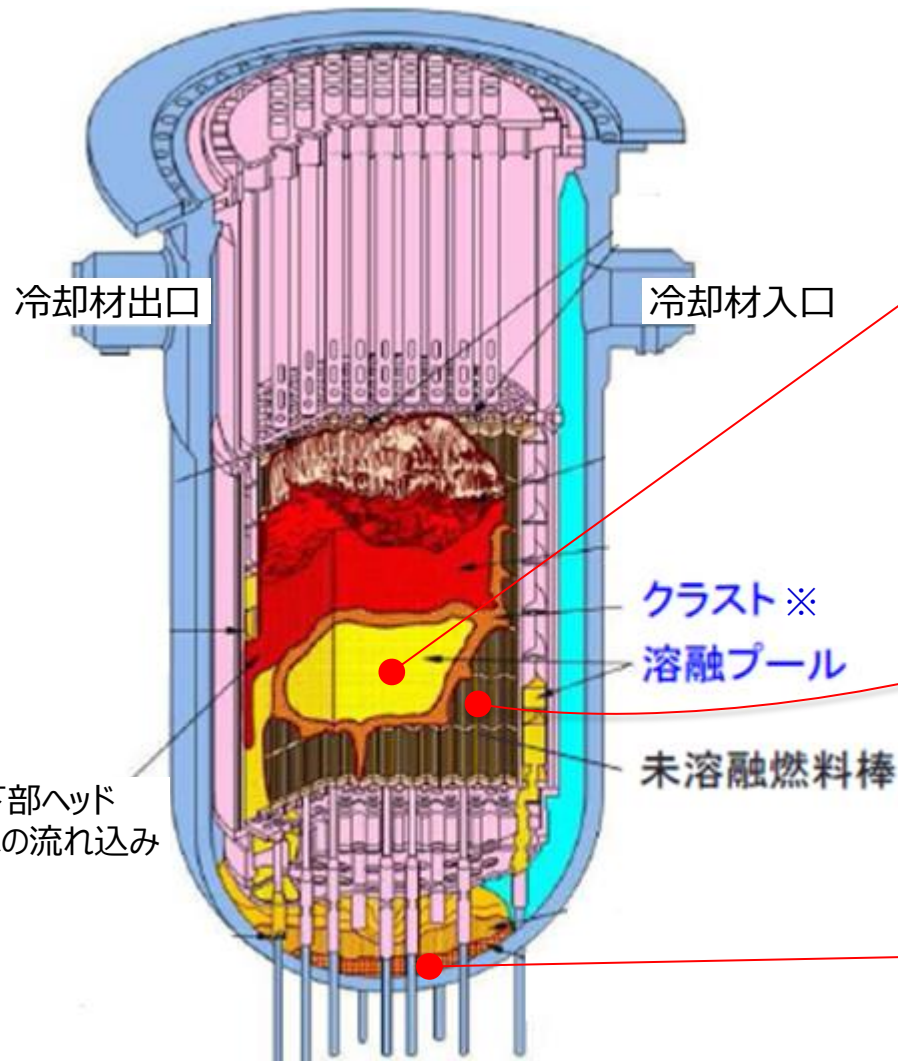
「ベント管」：D/WとS/Cの連絡配管

「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。

「エアロック」：人の出入口

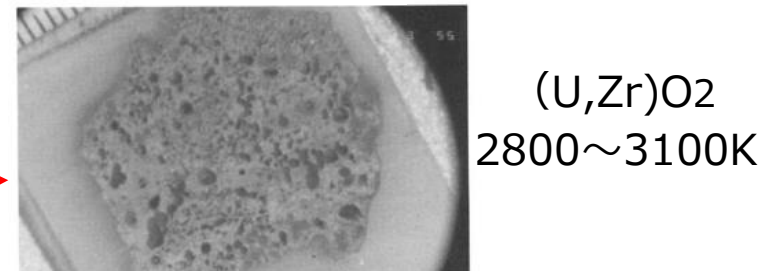
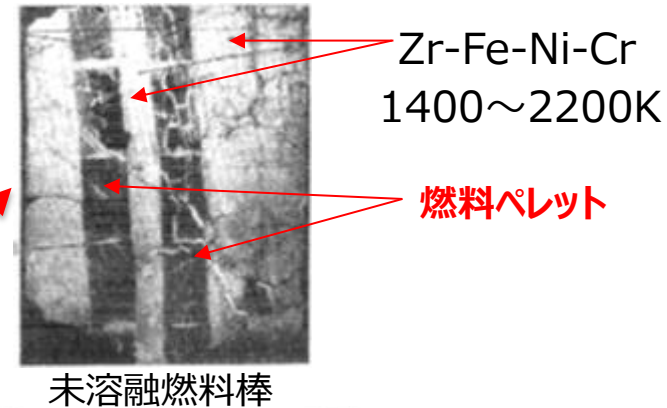
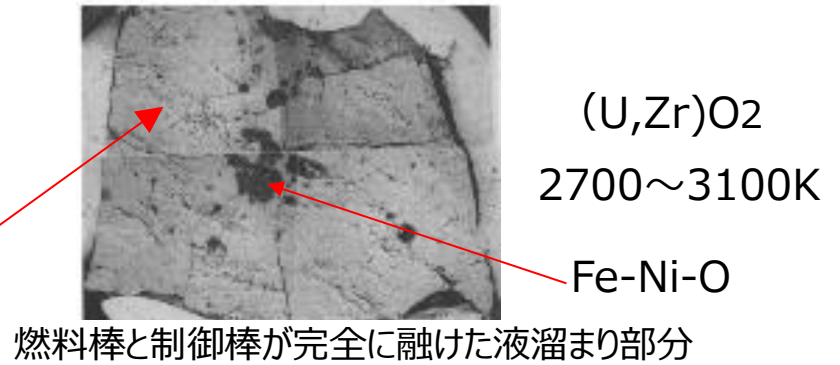
「Browns Ferry Unit 1 under construction 1966.Sep.」
Tennessee Valley Authority – TVA’s 75th Anniversary webpage

「燃料デブリ」って何？ (TMI-2デブリの概要)



R.K. McCardell, Nucl. Eng. Des. 118(1990) 441

※ 溶融プール表面の殻状の層 (緻密な組織で硬い)



溶融プールから下部ヘッドに回り込んで固化

U : ウラン、Zr : ジルコニウム、Fe : 鉄、Ni : ニッケル、Cr : クロム

※ T M I : Three-Mile Island原子力発電所

「燃料デブリ」って何？（1Fデブリの推定）

溶融進展後に予想される燃料デブリの生成箇所および材料

ルースデブリ層



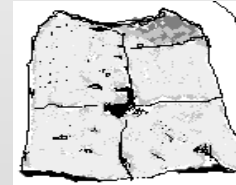
燃料片や溶融燃料が急冷され、粒子化

- ・ UO_2
- ・ $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ 等

溶融・固化した炉心



上部/下部クラスト：
溶融燃料が比較的早く冷却されてできる塊



再溶融固化層：
溶融燃料がゆっくり冷却されてできる塊

- ・ $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ (Uリッチ相/Zrリッチ相)
- ・SUS-Zry合金
- ・Zr/Feホウ化物 等

下部プレナム/制御棒ハウジング



制御棒案内管に溶融燃料等が付着

- ・SUS
- ・ $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ 等

格納容器床面



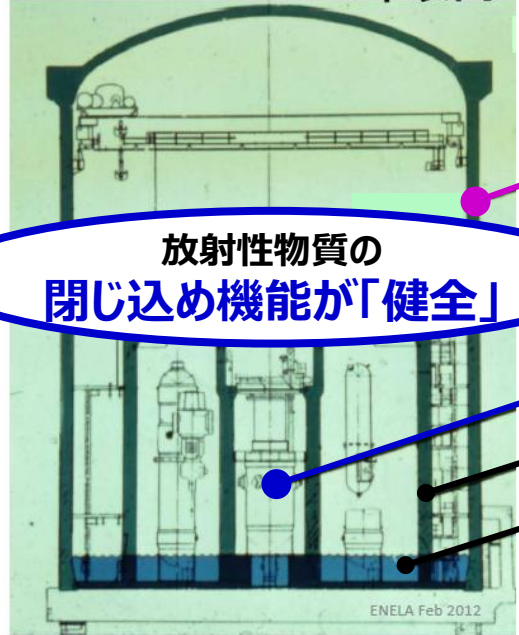
MCCI生成物

- ・ $(\text{U,Zr})\text{O}_2$
- ・ジルコン 等

※MCCI : Molten Core Concrete Interaction
溶融炉心・コンクリート相互作用

福島第一の場合の難しさはどこか～TMIとの比較～

TMI-2



原子炉建屋
(格納容器)

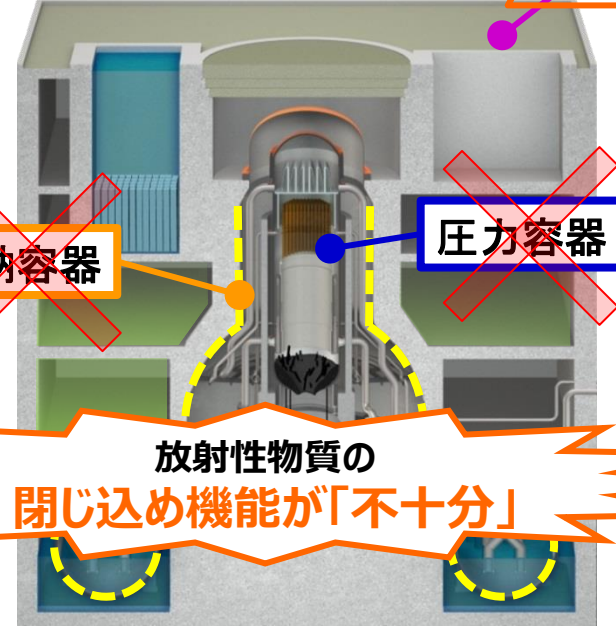
圧力容器

遮へい壁
汚染水

放射性物質の
閉じ込め機能が「健全」

1F-1,2,3

原子炉建屋



~~格納容器~~

~~圧力容器~~

放射性物質の
閉じ込め機能が「不十分」

約133トン

デブリ総量

約880トン (3基)

ほぼ原子炉圧力容器
(PRV) 内、一部が配管内

デブリの拡がり

ペDESTAL底部に落下、
底部コンクリートを浸食

(最上階作業フロア線量)
除染・遮蔽後※ :約1mSv/h

放射線量

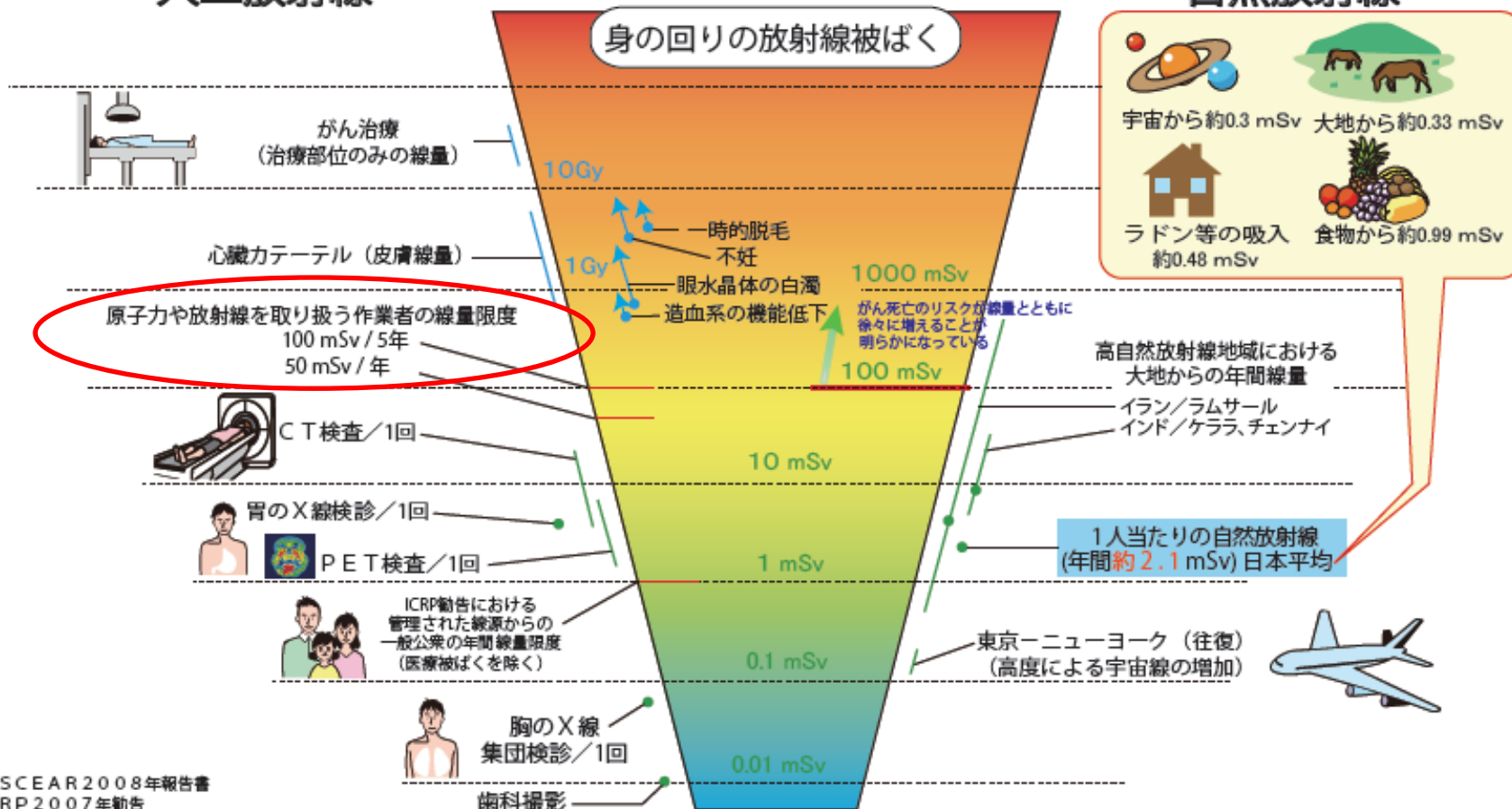
(最上階作業フロア線量)
現在:数十～数百mSv/h

※ : 事故直後は数十mSv/h

(参考)放射線被ばく早見図

人工放射線

自然放射線



・ UNSCEAR 2008年報告書
 ・ ICRP 2007年勧告
 ・ 日本放射線技術会医療被ばくガイドライン
 ・ 新版 生活環境放射線 (国民線量の算定)
 などにより、故医研が作成(2013年5月)

【ご注意】
 1) 数値は有効数字などを考慮した概数です。
 2) 目盛(点線)は対数表示になっています。目盛がひとつ上がる度に10倍となります。
 3) この図は、引用している情報が更新された場合変更される場合があります。

【線量の単位】
 各臓器・組織における吸収線量: Gy (グレイ)
 放射線から臓器・組織の各部位において単位重量あたりにどれくらいのエネルギーを受けたのかを表す物理的な量。
 実効線量: mSv (ミリシーベルト)
 臓器・組織の各部位で受けた線量を、がんや遺伝性影響の感受性について重み付けをして全身で足し合わせた量で、放射線防護に用いる線量。
 各部位に均等に、ガンマ線 1 Gy の吸収線量を全身に受けた場合、実効線量で1000 mSvに相当する。

独立行政法人 **NIRS**
放射線医学総合研究所
<http://www.nirs.go.jp>
 Ver.130502

IRIDの研究開発プロジェクトとその目的

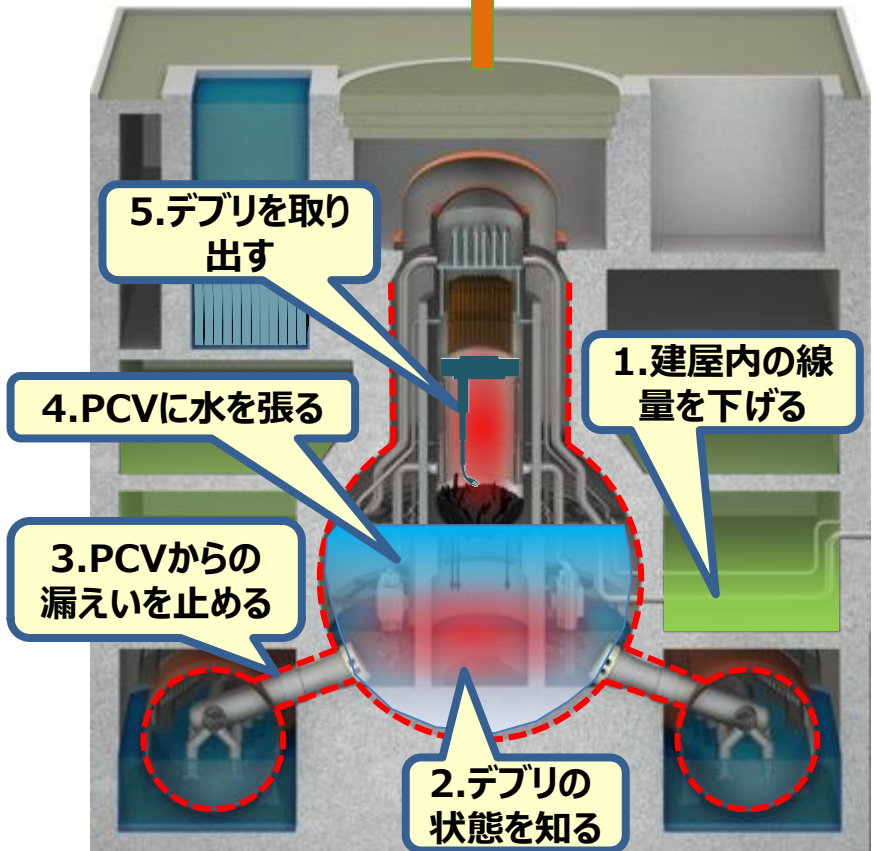
1. 建屋内の線量を下げる

- 遠隔除染装置の開発

2. デブリの状態を知る

- ◎ 間接的に知る
 - 解析による炉内状況把握
 - 宇宙線ミュオンを利用した透視
- ◎ 直接的に知る
 - PCV内部調査、RPV内部調査

6. デブリを収納・移送・保管する



3,4. PCVの漏えいを止める、水を張る

- PCV補修・止水技術の開発
- PCV補修・止水実規模試験

5. デブリを取り出す

- デブリ取り出し基盤技術の開発
- デブリ取り出し工法・システムの開発
- 臨界管理技術の開発

6. デブリを運びだし、保管する

- デブリ収納・移送・保管技術の開発

2. 研究開発の進捗状況

(燃料デブリ取出しに係る主な研究開発)

2-1. 総合的な炉内状況把握

2-2. 燃料デブリ検知 (ミュオン調査)

2-3. 原子炉格納容器 (PCV) 内部調査

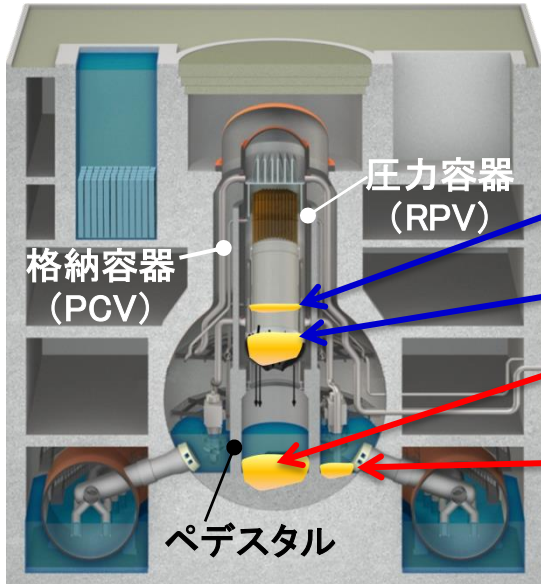
2-4. 原子炉格納容器 (PCV) 補修・止水技術

2-5. 燃料デブリ取り出し技術

2-6. 燃料デブリ収納・移送・保管技術

2-1.総合的な原子炉内の状況把握

原子炉建屋 (R/B)



 : 原子炉圧力容器(RPV)内
 : RPV外 (単位: トン)

| | 1号機 | 2号機 | 3号機 |
|-----------|------|------|------|
| 場所 | 代表値※ | 代表値※ | 代表値※ |
| 炉心部 | 0 | 0 | 0 |
| 原子炉圧力容器底部 | 15 | 42 | 21 |
| ペDESTAL内側 | 157 | 146 | 213 |
| ペDESTAL外側 | 107 | 49 | 130 |
| 合計値 | 279 | 237 | 364 |

「代表値」: 現時点において最も確からしい値。

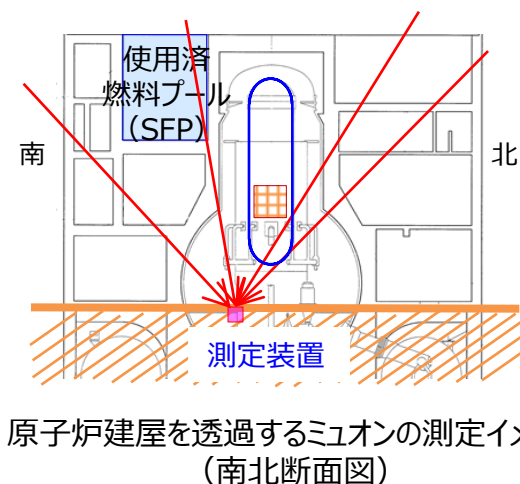
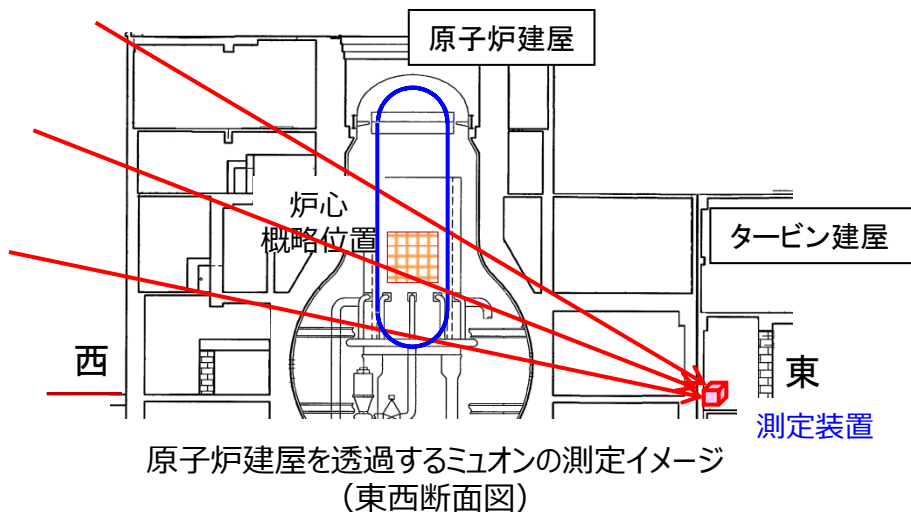
「推定重量」: 燃料+溶融・凝固した構造材 (コンクリート成分を含む)

- ▶ **コード解析結果及び実機調査データ** (温度データ、**ミュオン測定**、**原子炉格納容器 (PCV) 内部調査**等) を総合的に分析・評価。

ペDESTAL底部のデブリが多い (80%以上)

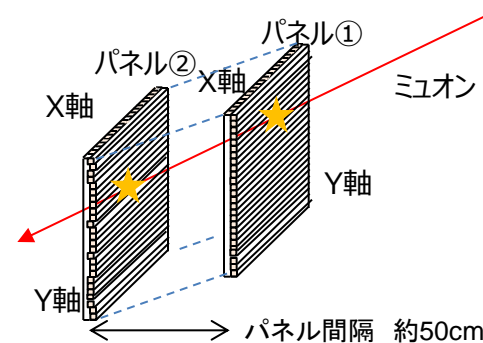
2-2. ミュオン調査結果（透過法）

- ミュオンは、宇宙から飛来する放射線が大気と衝突する過程で発生する二次的な宇宙線。エネルギーが高く、物質を透過しやすい。
- 原子炉建屋を透過するミュオン数を測定し、その透過率から原子炉压力容器内の燃料デブリ分布をレントゲン写真のように撮影。（高密度の物質ほど透過しにくく、暗い影になる）



<ミュオン透過法測定装置の計測原理（イメージ）>

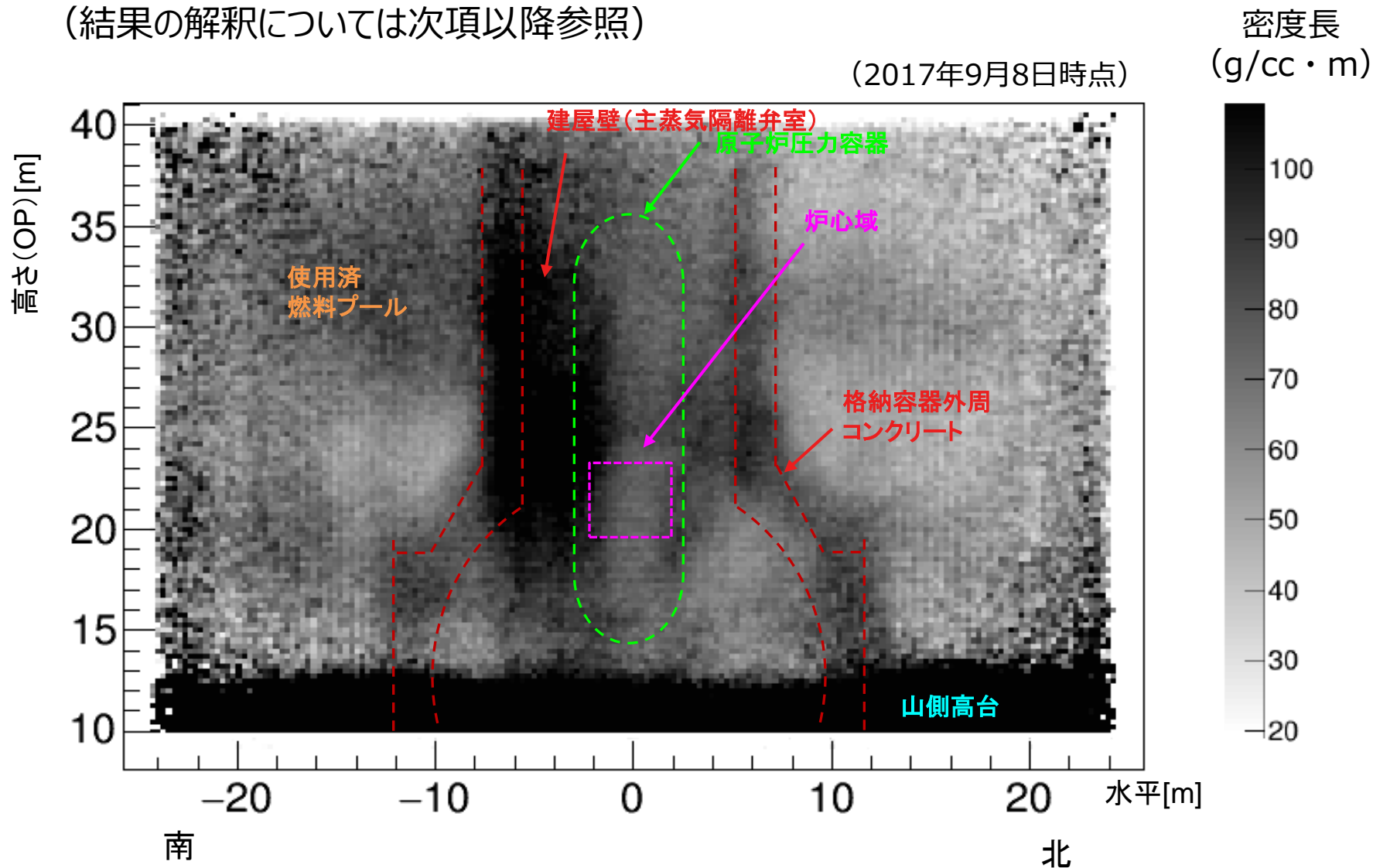
上空から飛来するミュオンを装置内部に配置した2枚のパネル検出器（プラスチックシンチレータ）で検知し、通過したパネルの座標からミュオンの軌跡を算出。



3号機・ミュオン透過法測定結果

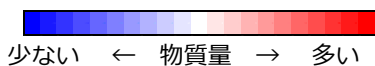
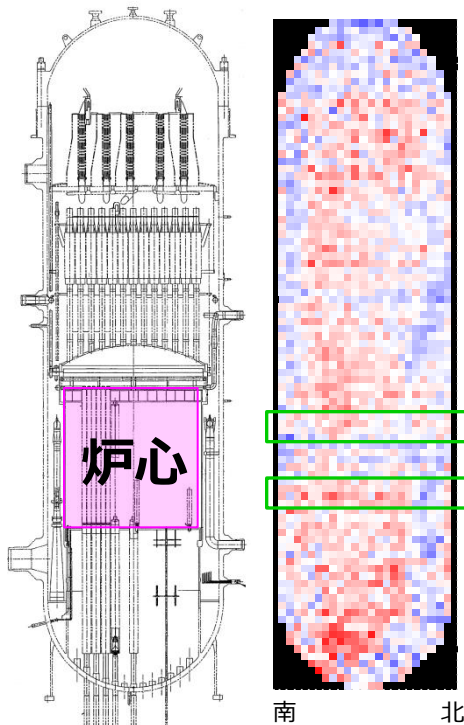
- ミュオン透過法測定により3号機の物質分布を評価した結果は以下の通り。
(結果の解釈については次項以降参照)

(2017年9月8日時点)

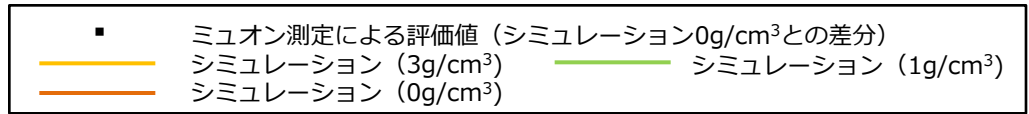


原子炉压力容器内の物質質量分布 (①炉心域)

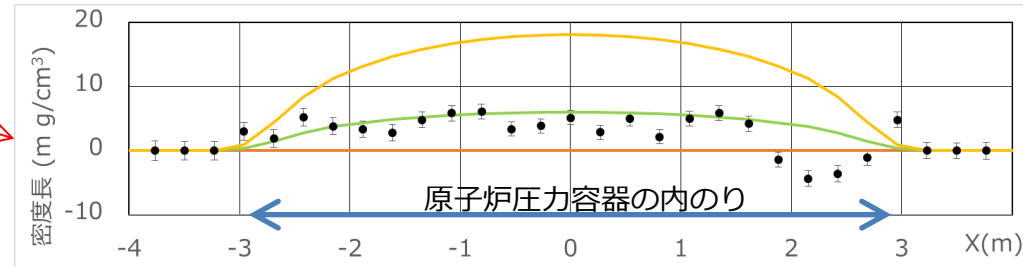
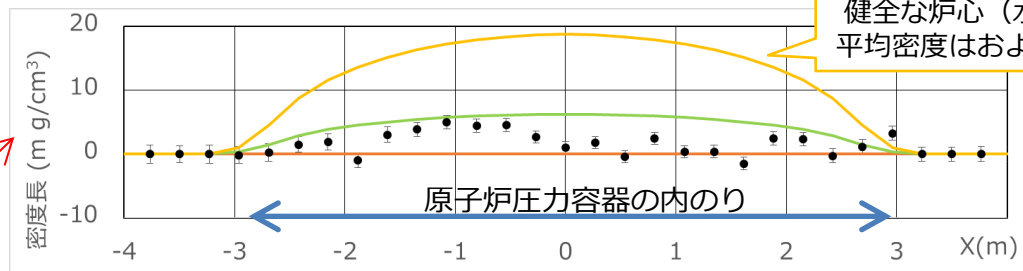
- 測定結果から原子炉建屋の壁や床, 压力容器などの構造物の物質質量を、シミュレーションに基づき除去
- 压力容器内のりが、一様な密度をもつ仮想的な物質で満たされている場合のシミュレーション結果と比較し、燃料の有無を推定



原子炉压力容器の内りの物質質量分布
(容器内壁より内側の領域)

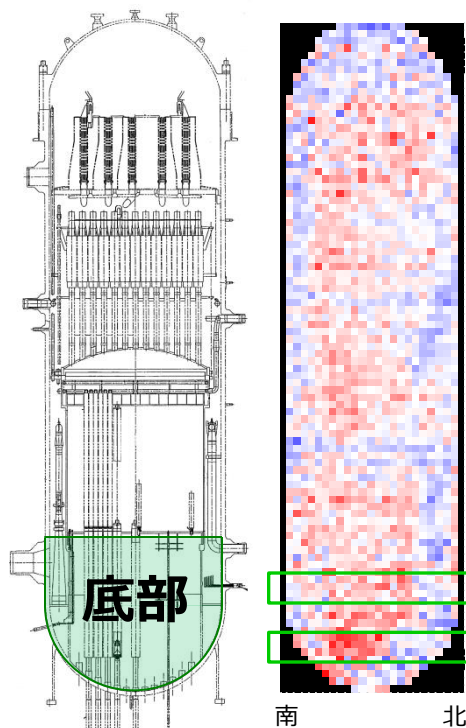


(エラーバーは偶然誤差のみを記載)

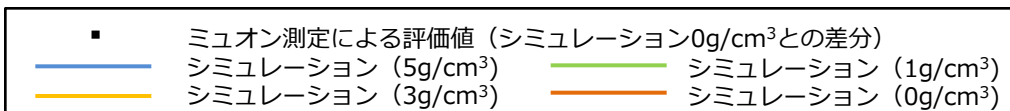


- 炉心域の物質質量は、概ね平均密度1g/cm³以下で分布しており、**物質質量が大きく減少**。

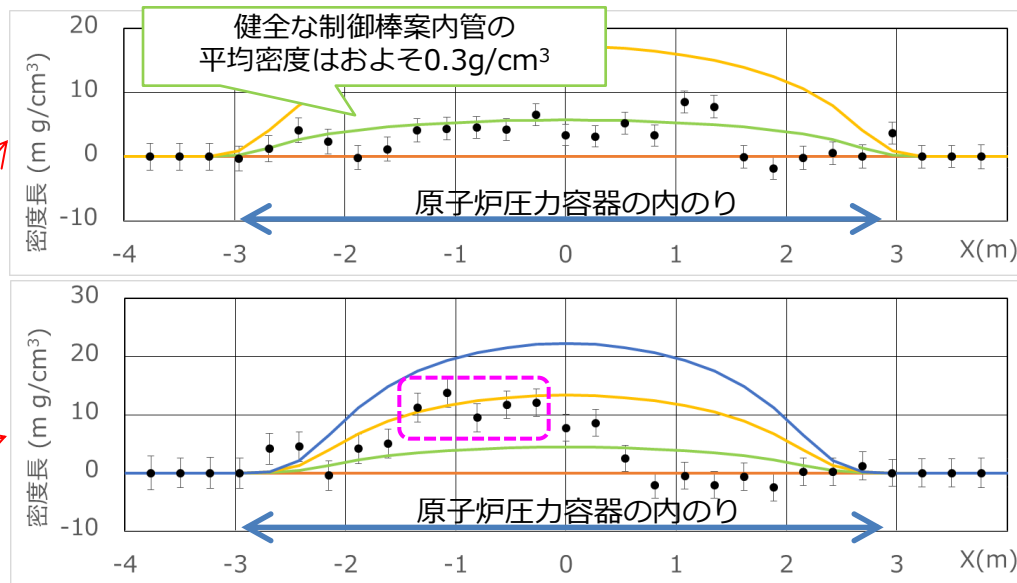
原子炉压力容器内の物質分布 (②原子炉压力容器底部)



原子炉压力容器の内りの物質分布
(容器内壁より内側の領域)



(エラーバーは統計的な誤差 (偶然誤差) のみを記載)



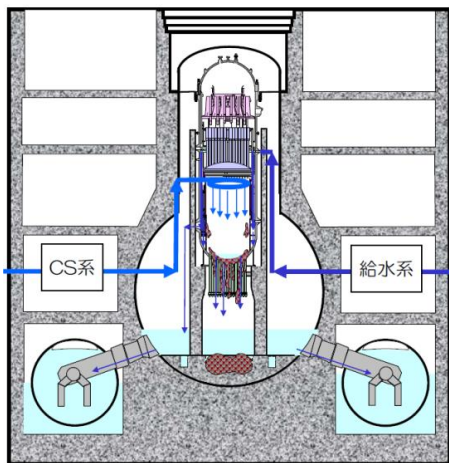
■ 原子炉压力容器底部 (底部ヘッド付近) は、場所によって通常よりも多い物質が存在することを確認。

2-3.原子炉格納容器（PCV）内部調査

PCV内部調査の目的

- 燃料デブリ取り出しに向けて、**原子炉格納容器（PCV）内の燃料デブリの位置、状況を調査**する
- 原子炉圧力容器（RPV）を支持する**ペダスタル等の状況を確認**する

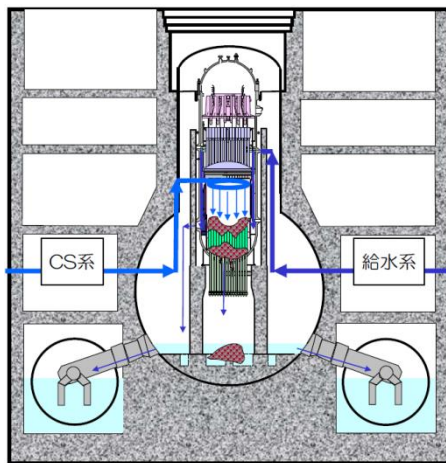
調査および調査装置の開発方針



1号機

- ・溶融燃料は、ほぼ全量がRPV下部プレナムへ落下、**炉心部には殆ど燃料が存在せず**

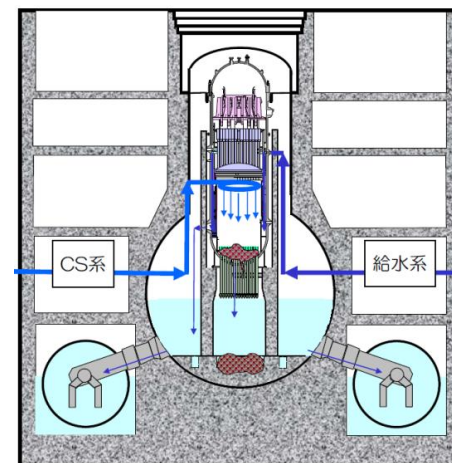
- ・燃料デブリの**ペダスタル外側までの拡散の可能性**から、ペダスタル外側の調査を優先



2号機

- ・溶融した燃料のうち、一部は下部プレナムまたはPCVペダスタルへ落下、**燃料の一部は炉心部に残存**と推測

- ・ペダスタル外側までの拡散の可能性低く、ペダスタル内側の調査を優先
- ・**3号機はPCV内の水位高く**、1・2号機で使用予定の貫通部が水没の可能性あり、別方式の検討要



3号機

号機毎に開発した遠隔操作調査ロボット

ペDESTル外側の調査（1号機）

○形状変化型ロボット

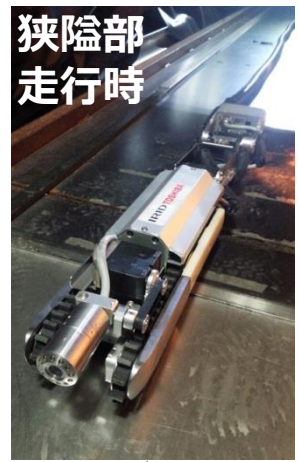


変形

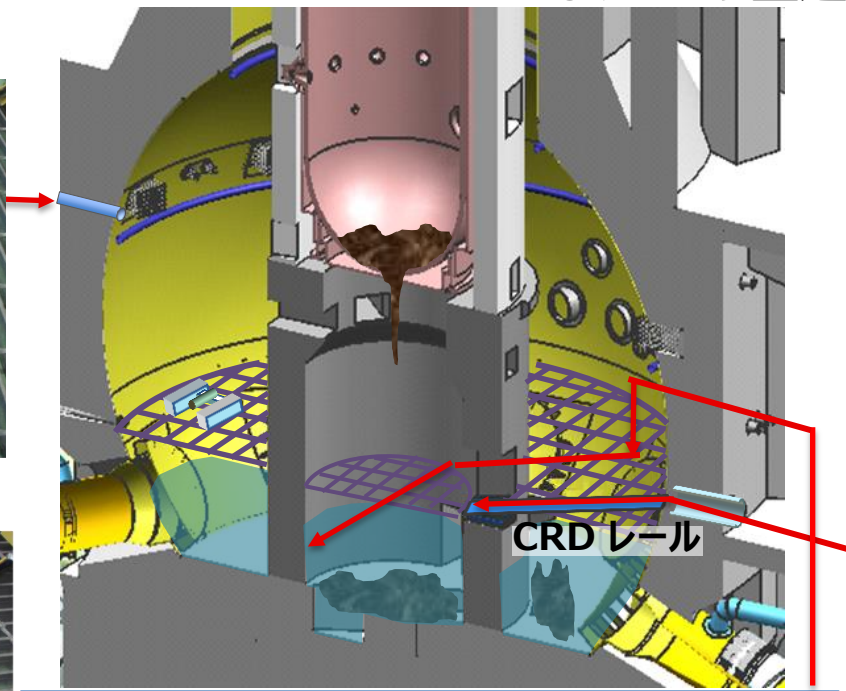
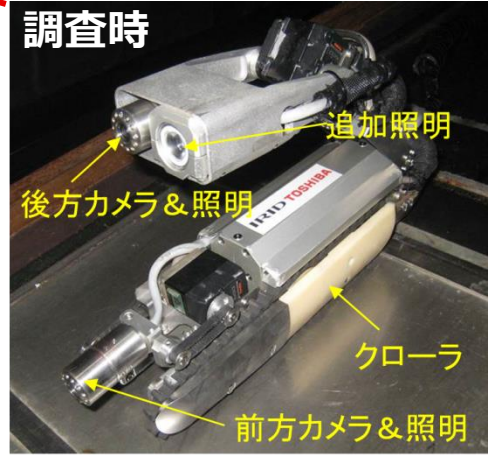


ペDESTル内側の調査（2号機）

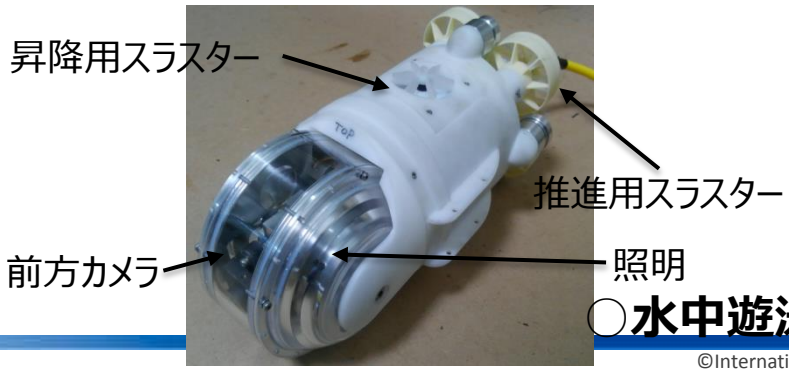
○クローラ型遠隔調査ロボット



変形



ペDESTル内側の調査（3号機）

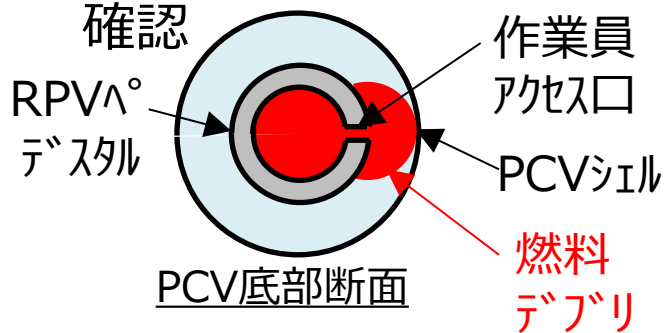


○水中游泳型ロボット

1号機：ペデスタル外部調査

【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】

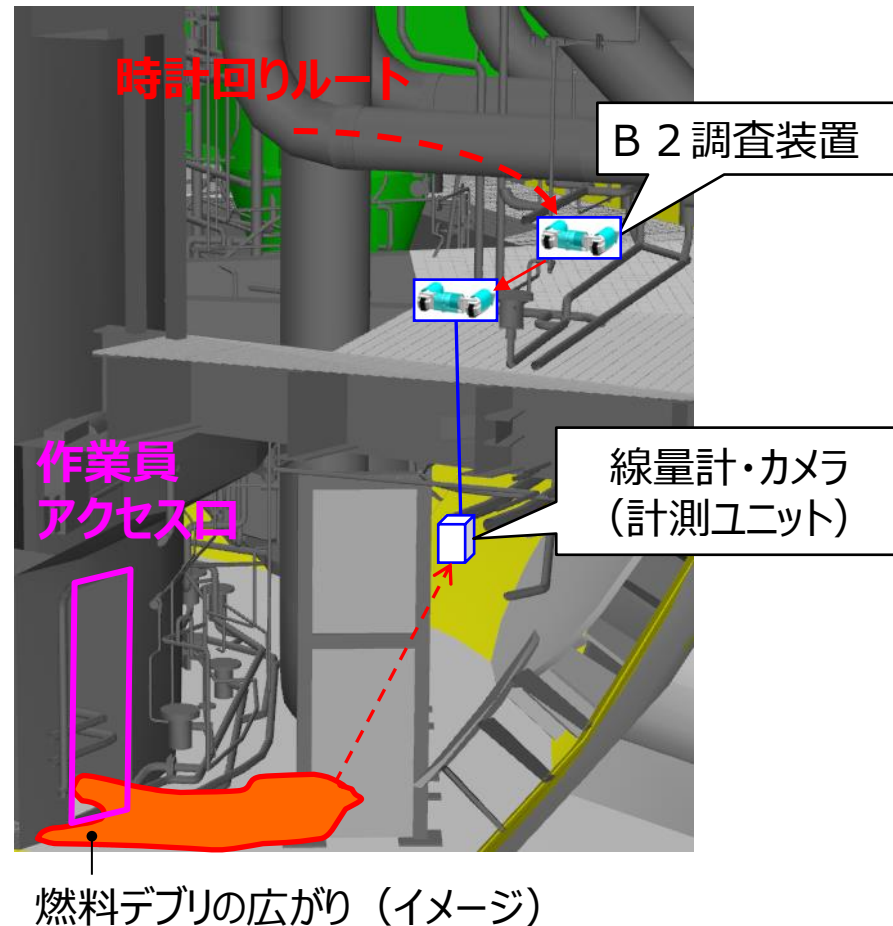
- ・ 降下ポイントの高さ方向の**線量率分布**
- ・ 地下階床面の**近接映像**

↓ 組合せ評価

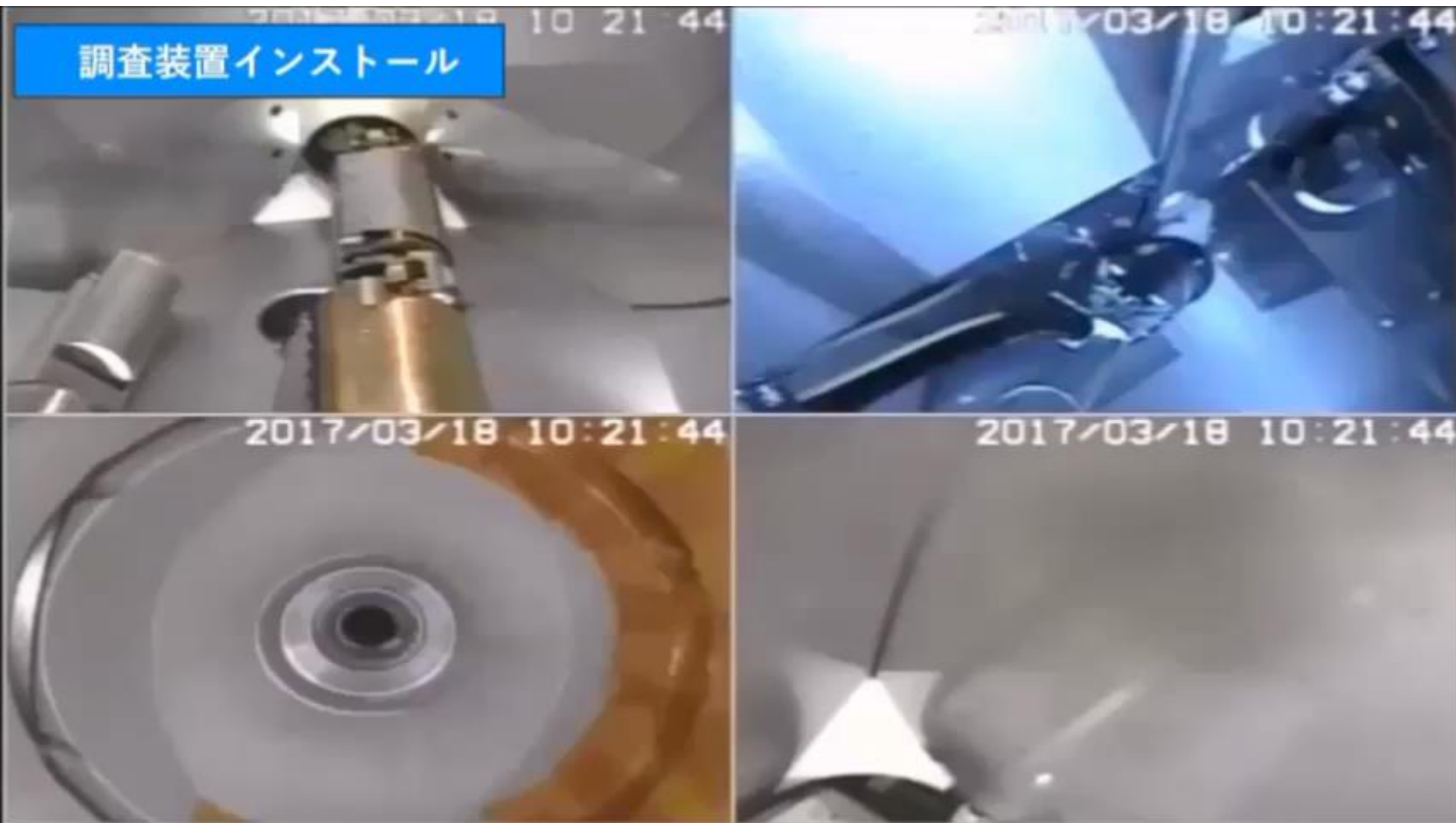
①、②を判定

【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：ペデスタル外部調査（動画）



1号機：各調査ポイントの放射線量と画像

3/18 (土)

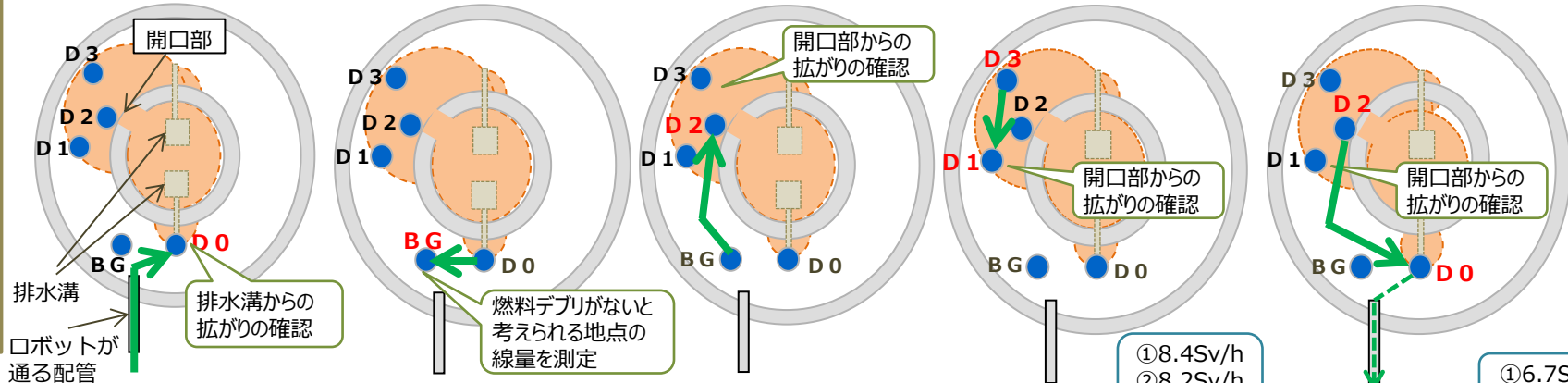
3/19 (日)

3/20 (月)

3/21 (火)

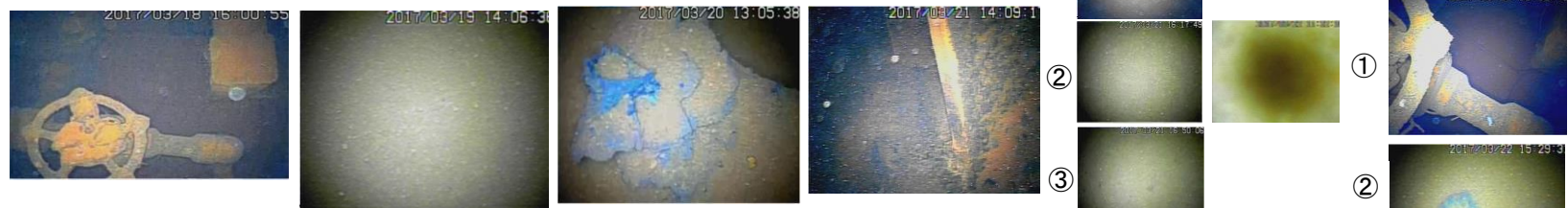
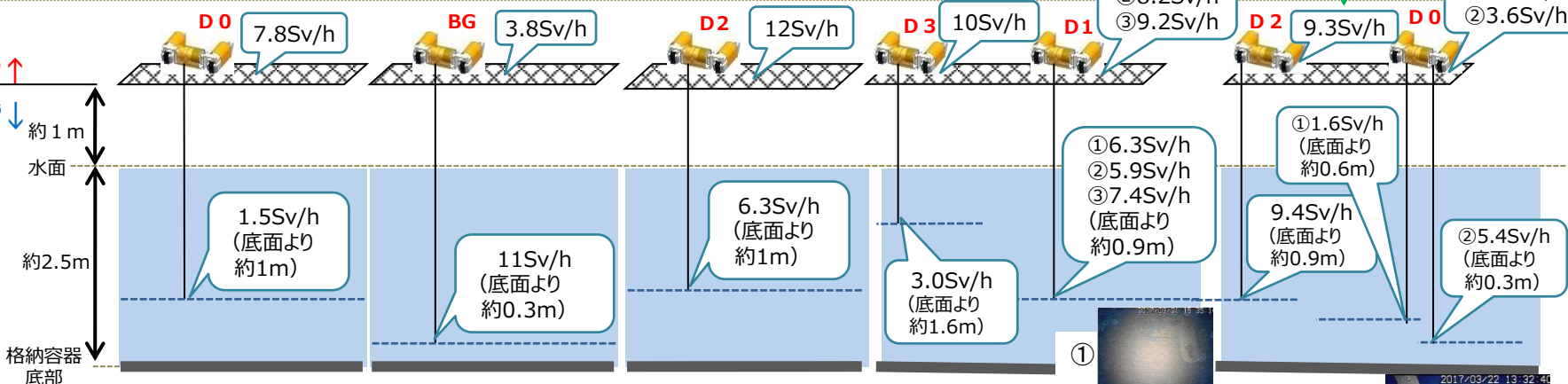
3/22 (水)

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：ペデスタル内・上部調査

【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. ペデスタル内事前確認

2017年1月30日実施

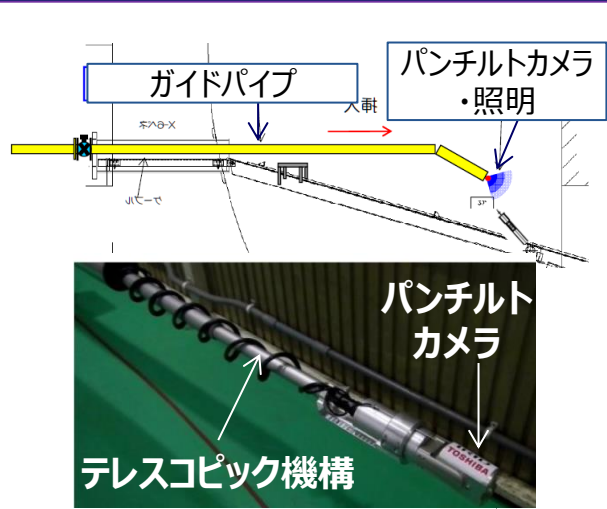
2. レール上堆積物除去

2月9日実施

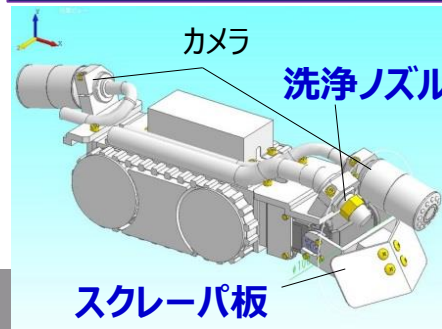
3. A2調査

2月16日実施

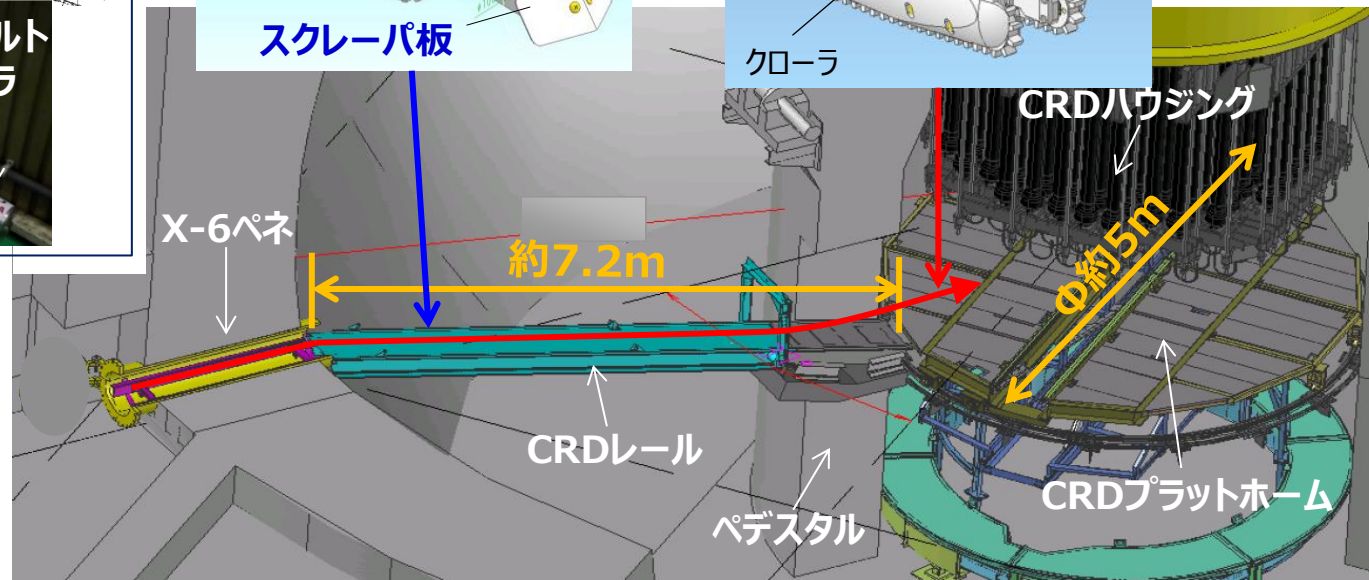
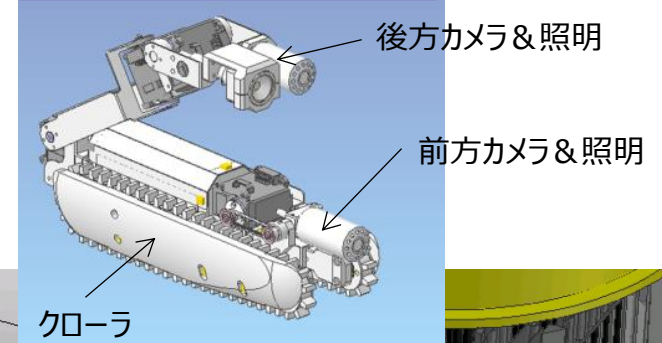
1. 事前確認装置



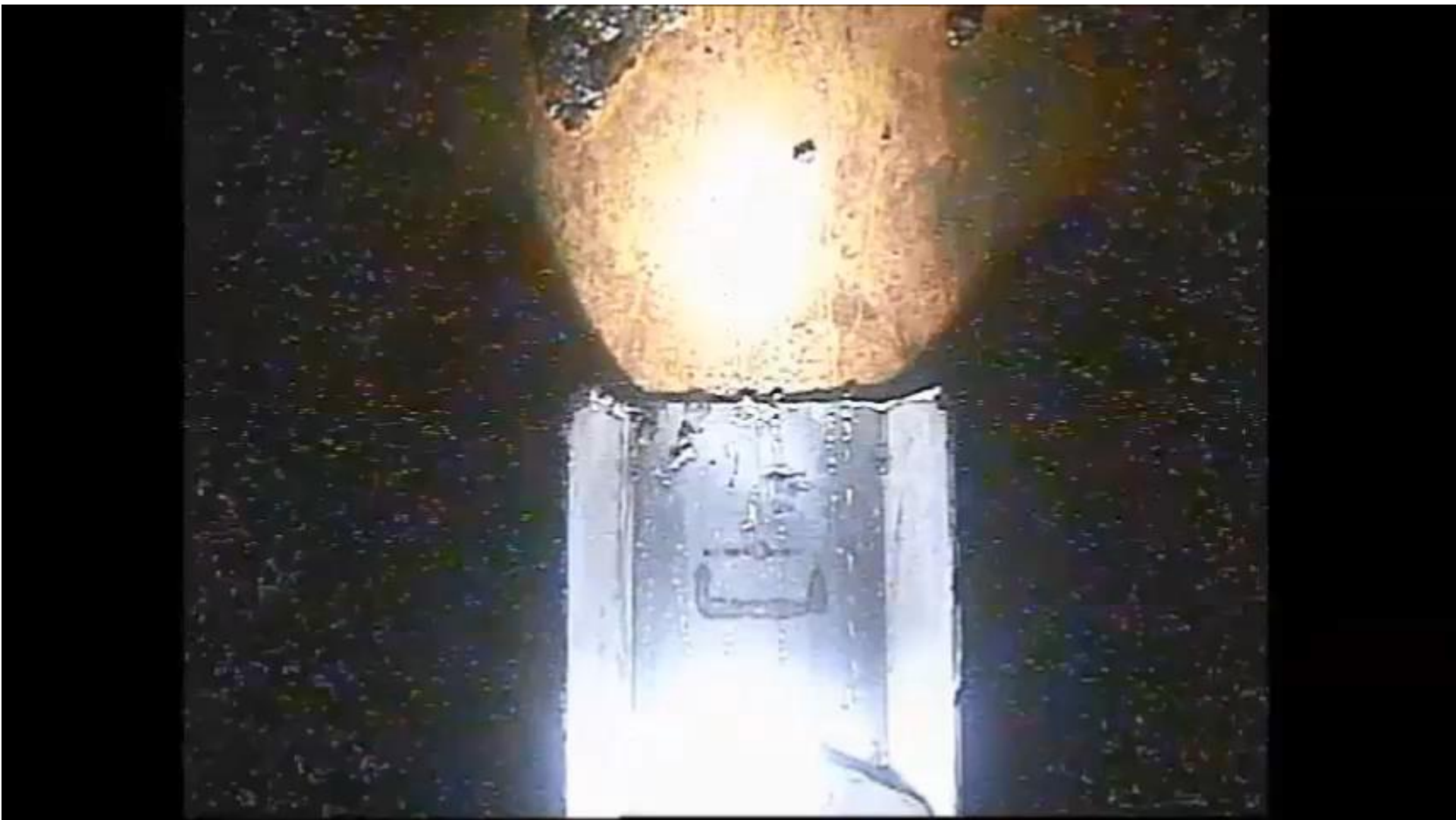
2. 堆積物除去装置



3. A2調査装置

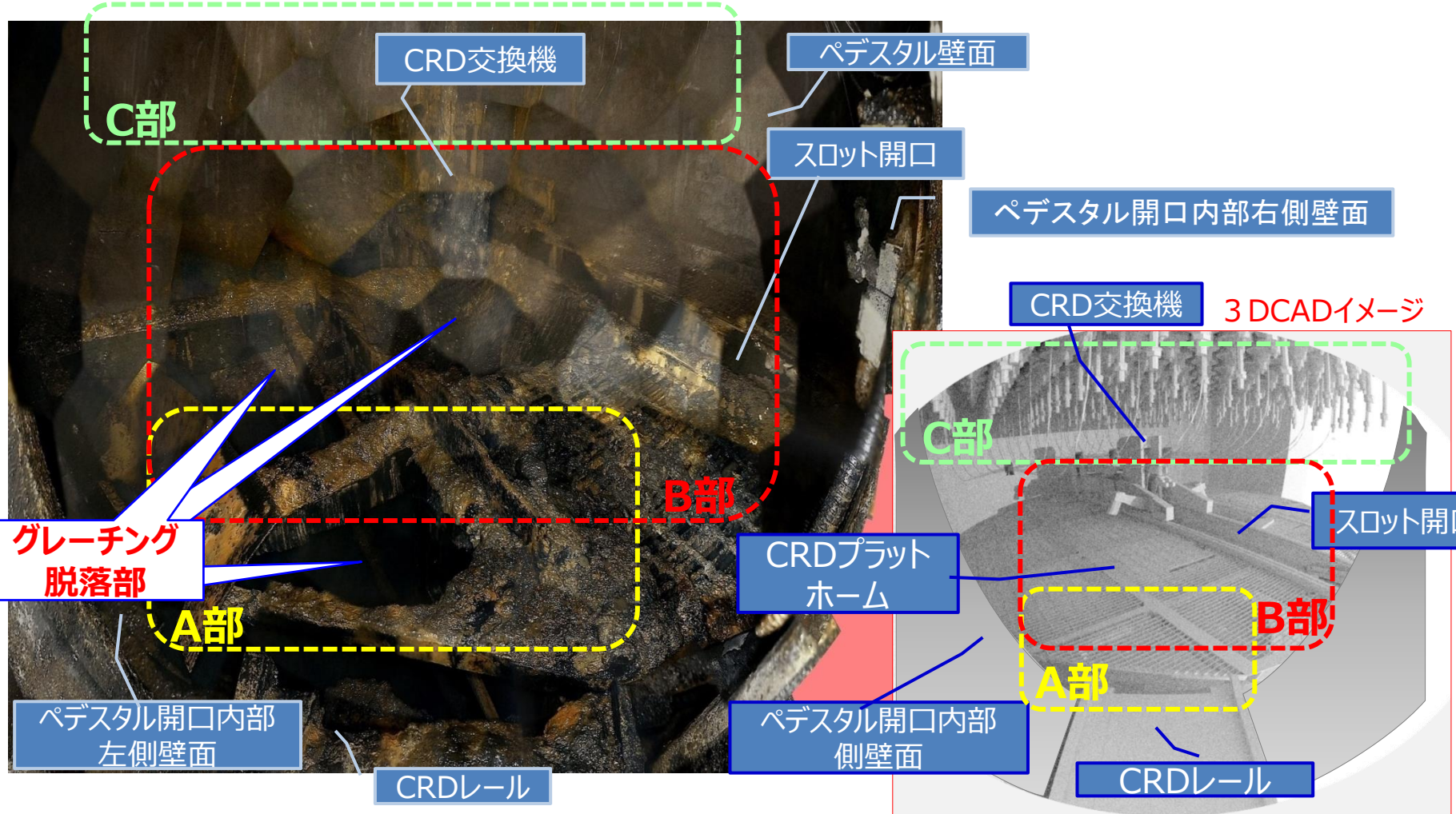


2号機・堆積物除去&ペデスタル内調査（動画）



2号機：ペDESTAL内調査結果

調査日：2017年1月30日



▶ CRDプラットフォームの**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。

※上記画像は、東電HDにて鮮明化した画像をもとに画質改善したものを全天球化

2号機：ペDESTAL内下部調査

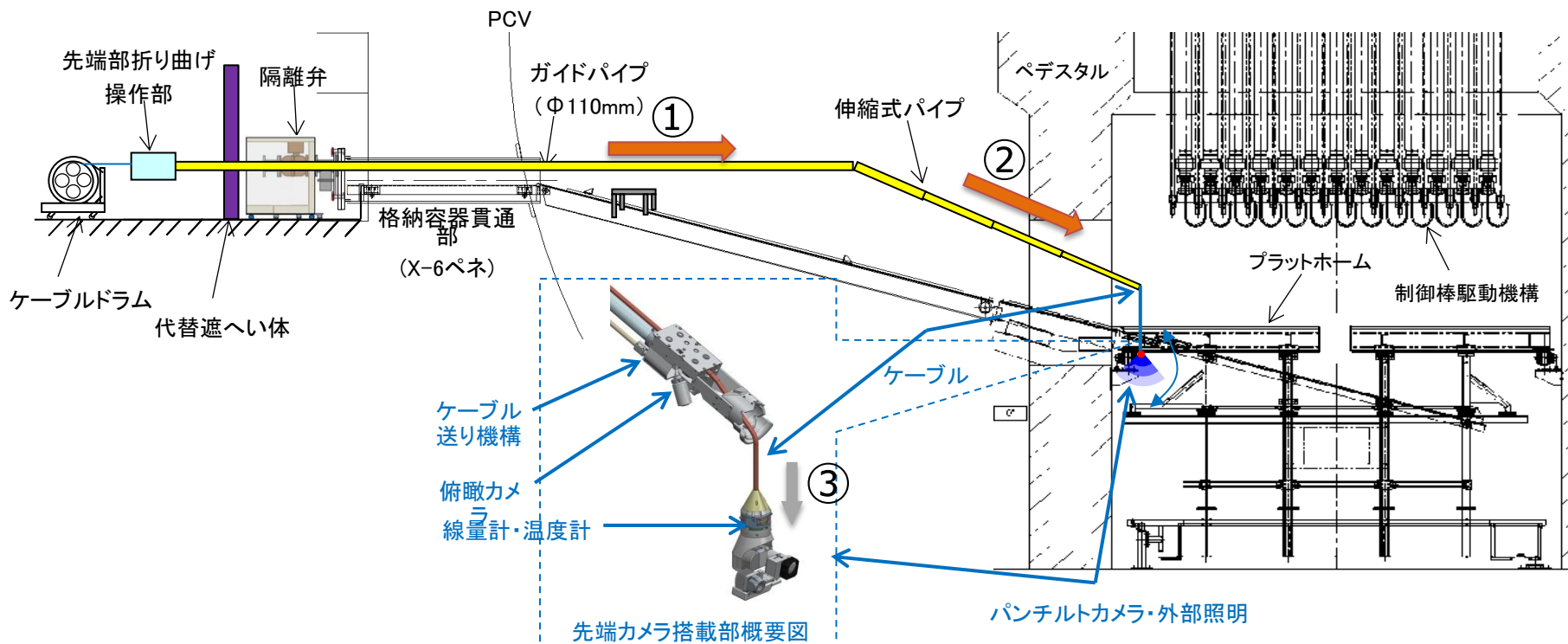
調査日：2018年1月19日

■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

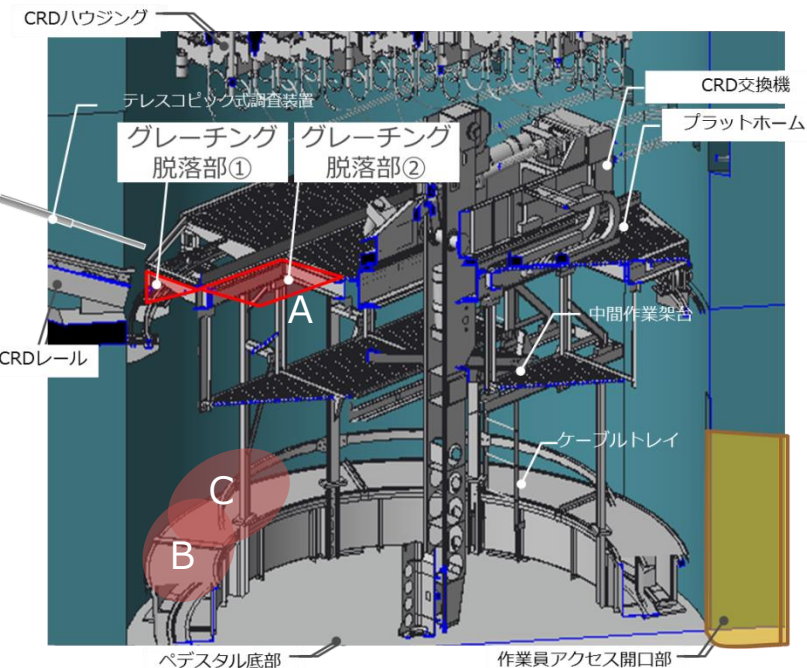


2号機：ペデスタル内下部調査結果（動画）



2号機：ペDESTAL内調査結果（1/4）

調査日：1/19



- ペDESTAL底部の全体に、小石状・粘土状に見える堆積物を確認
- 燃料集合体の一部（上部タイププレート）がペDESTAL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



撮影場所A グレーチング脱落部②



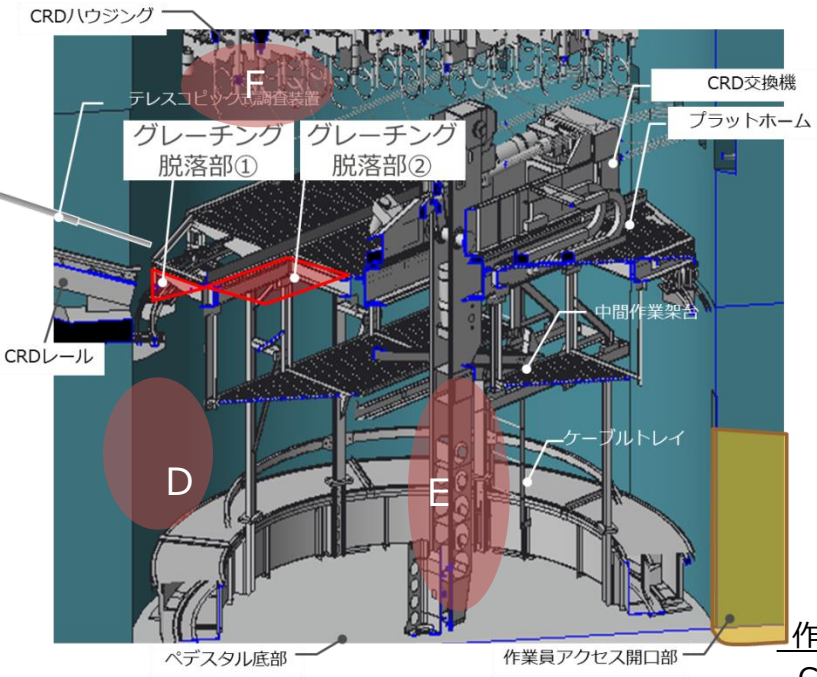
撮影場所B ペDESTAL底部



撮影場所C ペDESTAL底部

2号機：ペデスタル内調査結果（2/4）

調査日：1/19



- ペデスタル内壁面には、大きな損傷は確認されず
- ペデスタル内の既設構造物（CRD交換機）については大きな損傷は確認されず
- CRDハウジングサポートは、2017年1～2月の調査と同様、大きな損傷は確認されず



PAN -167 TILT +088

撮影場所D ペデスタル内壁面



PAN -048 TILT +089

撮影場所E CRD交換機

CRDハウジング支持金具サポートバー
CRDハウジング支持金具ハンガーロッド
PIPケーブル



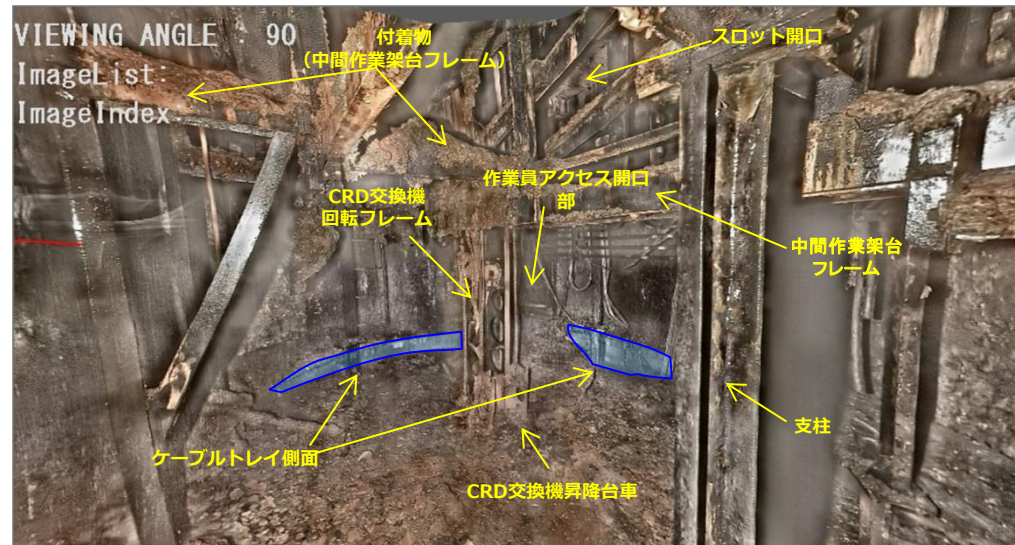
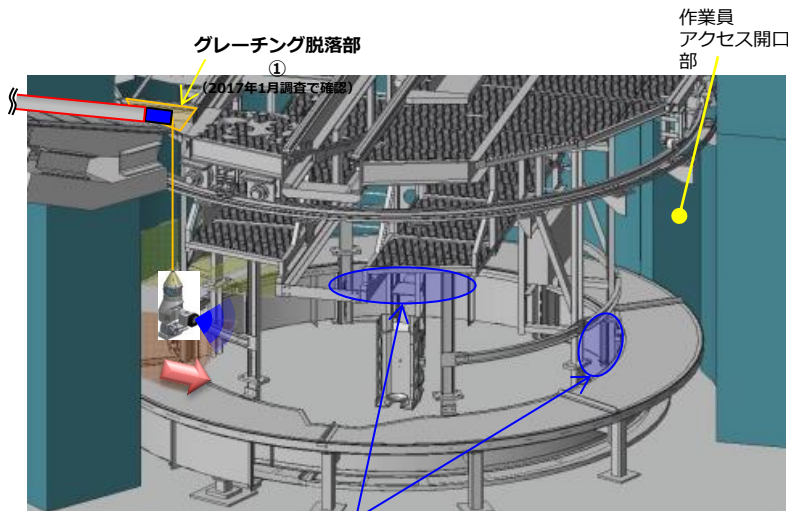
PAN -069 TILT +078

撮影場所F CRDハウジングサポート

2号機：ペデスタル内調査結果 (3/4)

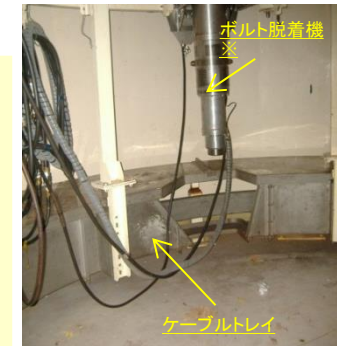
調査日1/19

○ 構造物の状況・堆積物の分布状況



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。

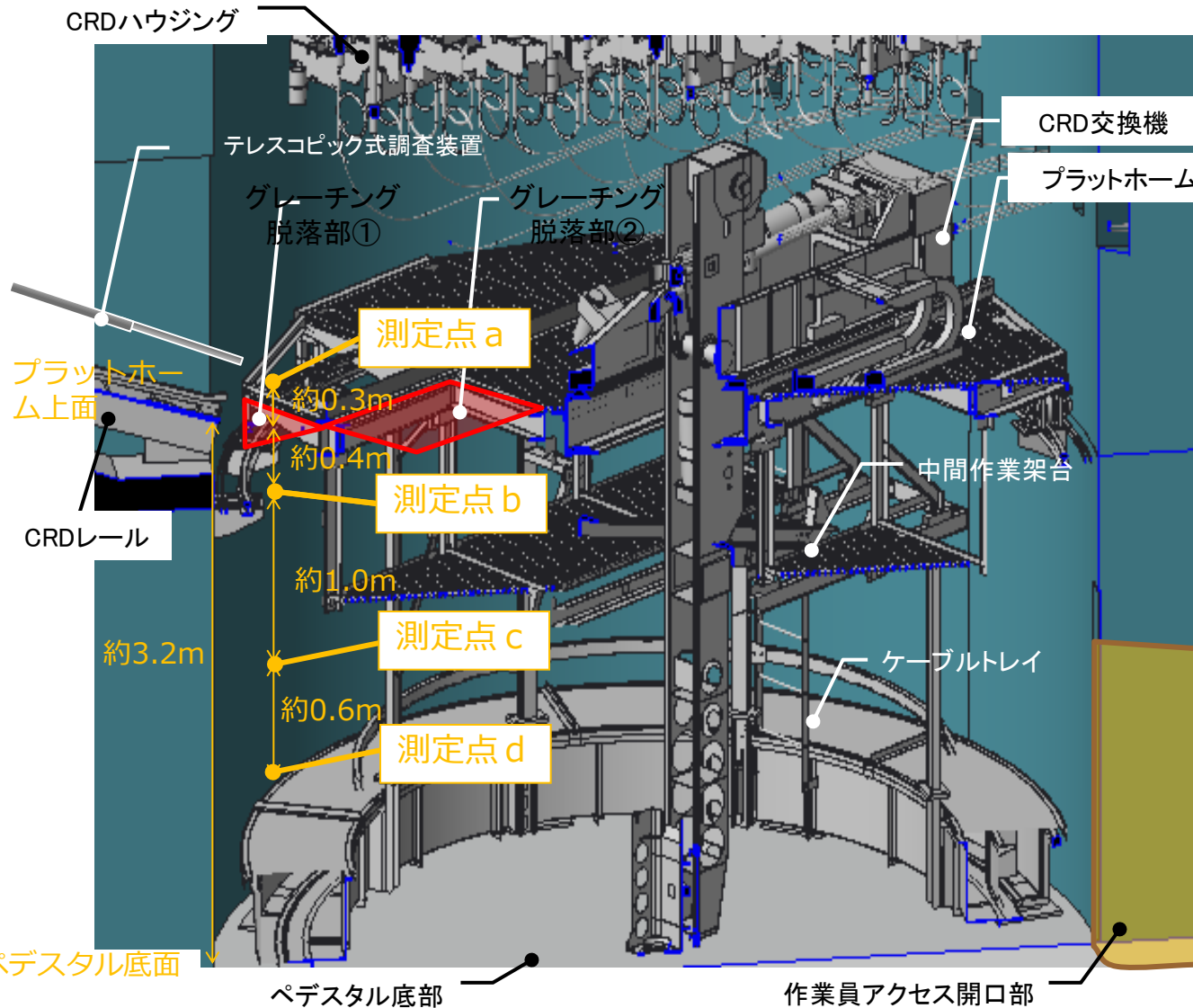


(参考) 2号機定検時
※運転時には上記構造物はPCV内より撤去

画像提供及び画像処理：国際廃炉研究開発機構 (IRID)

2号機：ペデスタル内調査結果（4/4）

調査日：1/19



| 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%

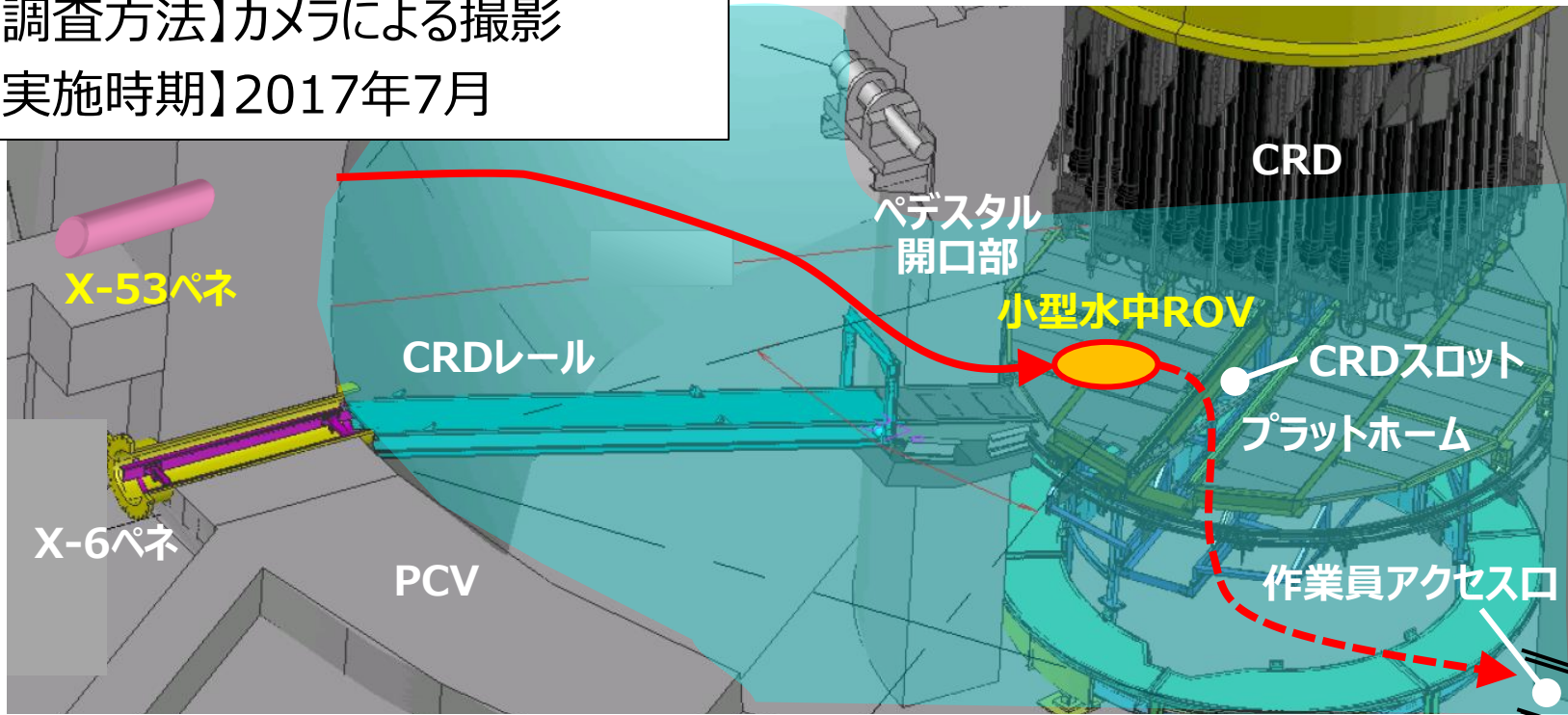
温度計±0.5°C

※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

3号機：ペDESTAL内部調査

【調査方法】カメラによる撮影

【実施時期】2017年7月



- ① **配管貫通部 (X-53ペネ)** からアクセスしペDESTAL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DESTAL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DESTAL底部デブリ**の堆積状況や作業員アクセス口から**ペDESTAL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）



昇降用スラスタ

推進用スラスタ

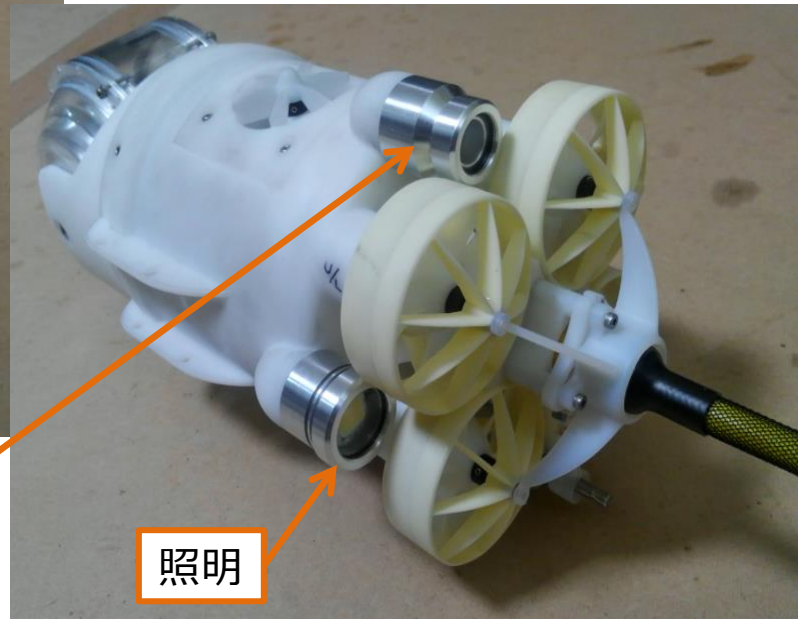
中性浮力ケーブル

| 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:フルモックアップ試験(動画)



3号機：水中ROV撮影映像（動画）

隔離弁 開



3号機：CRDレール入口から内部プラットフォーム上

<カメラ向き：上方>

CRDハウジングサポート
サポートバー

端子箱

CRDハウジングサポート
ハンガーロッド

CRDハウジングサポート
サポートバー



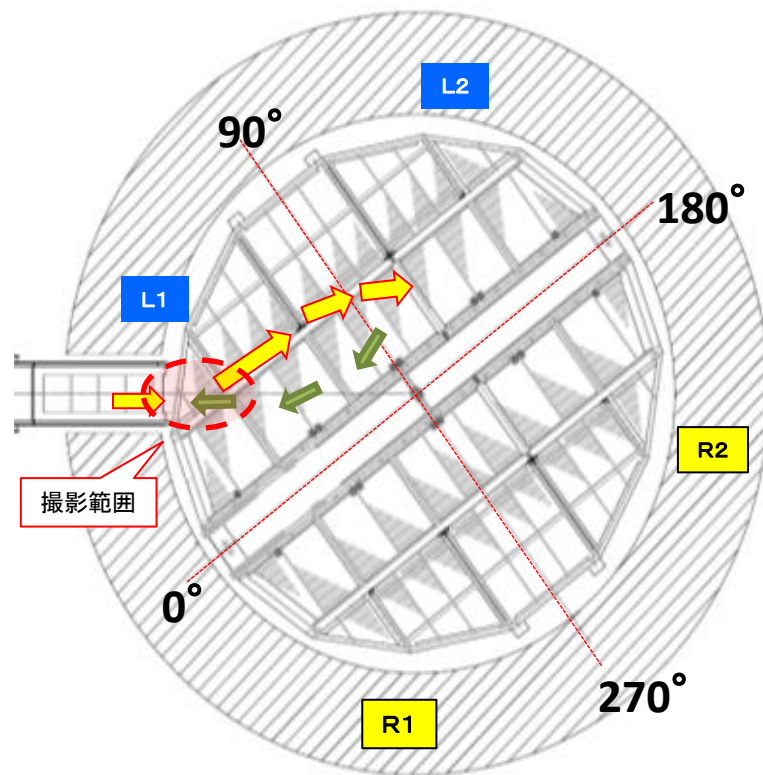
[[参考)撮影日時：7月19日7:01:33]

<カメラ向き：下方>

CRD交換機
作業架台



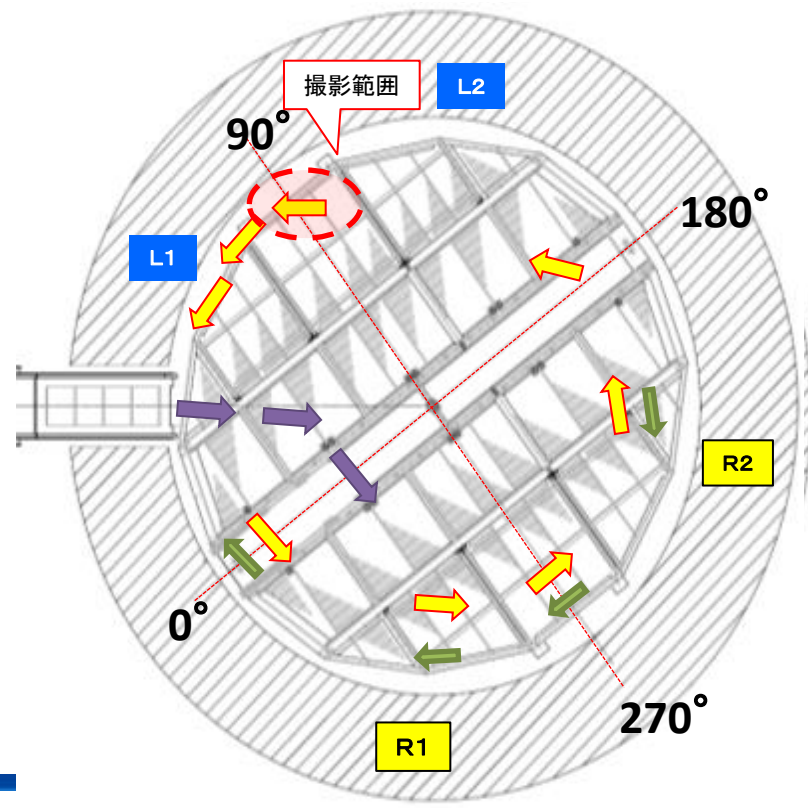
[[参考)撮影日時：7月19日7:02:29]



3号機：ペデスタル内部の外周部等

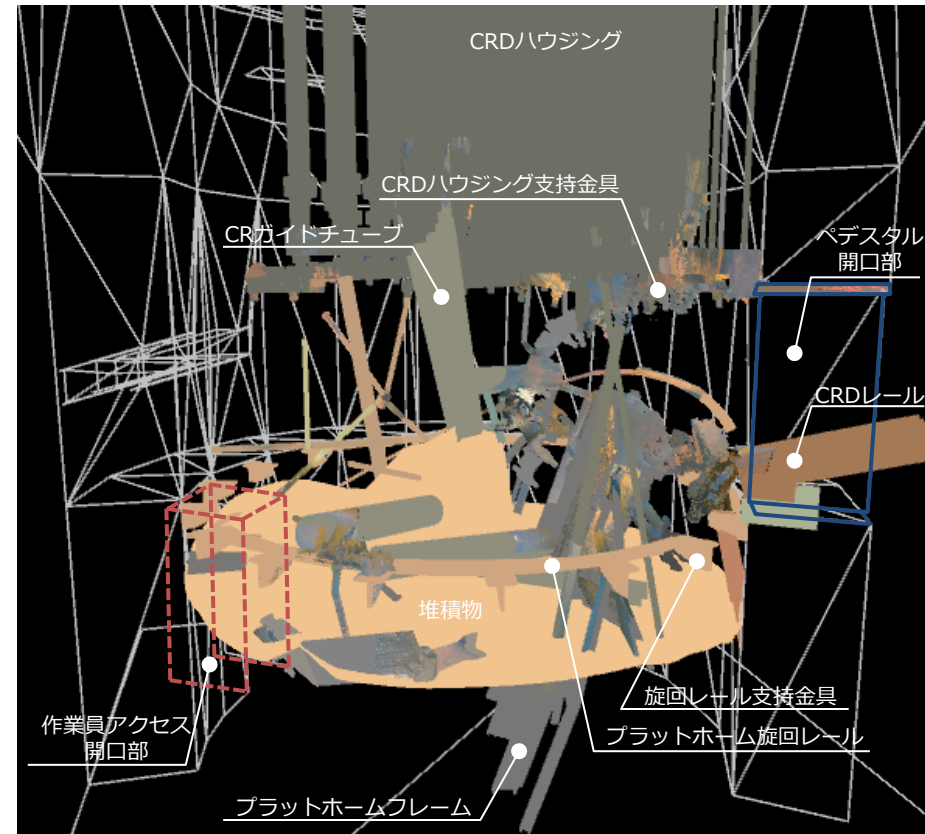
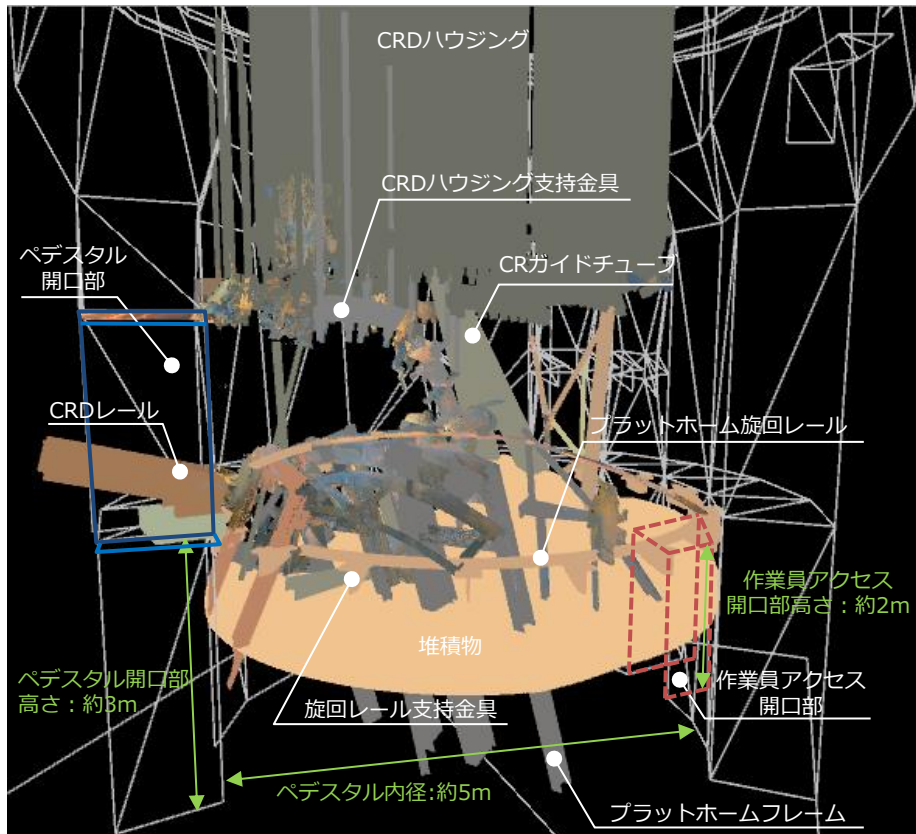


プラットフォームのグレーチング



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



- プラットホ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
- 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

画像作成：東芝エネルギーシステムズ(株)

これまでの内部調査結果から得られた知見と それを踏まえた今後の展開（調査計画等）

■ 獲得したノウハウ、教訓と課題

- **バウンダリの確保**、ケーブルマネジメント、確実な回収、耐放射線を考慮した機器、PCV外準備作業、遠隔操作、**モックアップ訓練の効果** 等
- 走破性、干渉物（損傷機器）への対応、堆積物、**自己位置確認**、ロボットサイズ、機能拡張、貫通部口径の拡大 等

■ 1号機

- 原子炉格納容器（PCV）内のペDESTAL外部調査の結果、底部から約 1 mの高さの水中に砂のような堆積物（燃料デブリかどうかは不明）を確認
- 堆積物の下に燃料デブリがある可能性もあるが、放射線量データからはその判断ができていない
- 燃料デブリにのみ存在する可能性が高い中性子を計測する方法を検討し、そのための小型中性子検出器を開発中
- 調査方法としては、水位が約 1 mあること等を踏まえ、船型ロボットを開発中

■ 2号機 ※制御棒駆動機構（CRD）をPCVの外に運び出すための貫通部「X-6ペネトレーション（X-6ペネ）」のこと

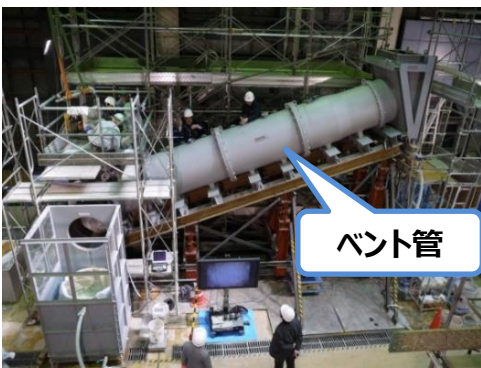
- アクセスルートを最も構築しやすい状況。X-6ペネ※の扉に小さな穴を開けて内部調査を行い、燃料デブリとみられる物体を確認（'18年 1月）
- 現在、X-6ペネからPCV内部にアクセスするロボットアームを開発中

■ 3号機

- PCV内部の水位が約 6 mあり、X-6ペネが使えないため、詳細調査方針を検討中

2-4.原子炉格納容器（PCV） 補修・止水技術

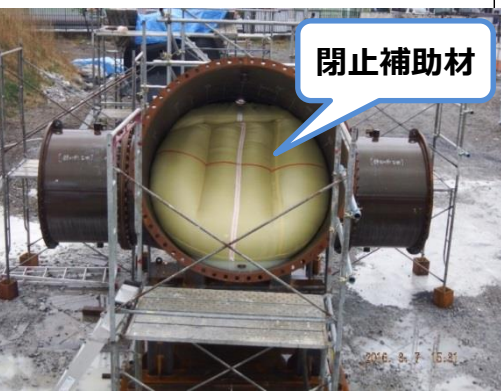
ベント管止水試験



ベント管

1 / 2スケール試験体で止水性能を確認（工場）

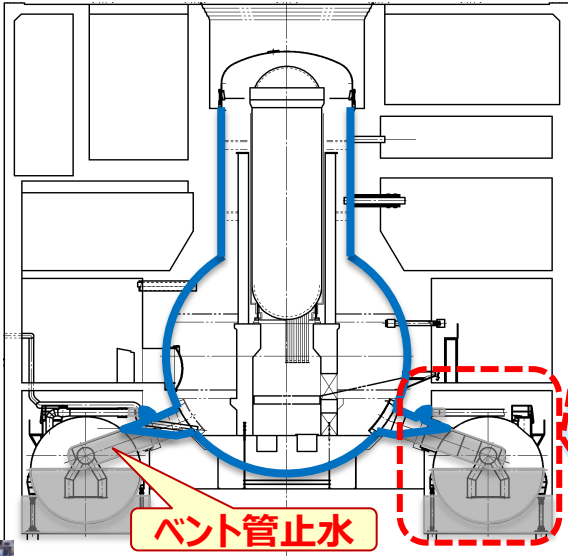
閉止補助材止水試験



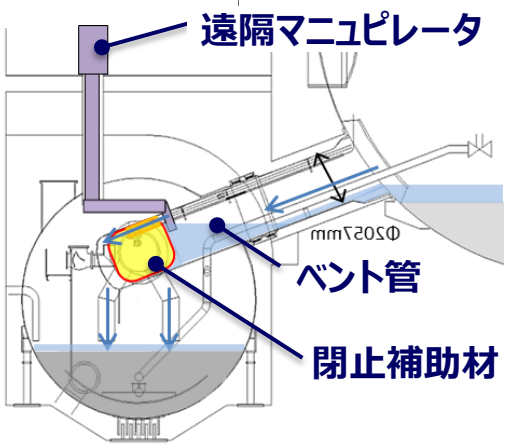
閉止補助材

1 / 1スケール試験体で閉止補助材の止水性能を確認（屋外）

— : 補修・止水範囲



ベント管止水



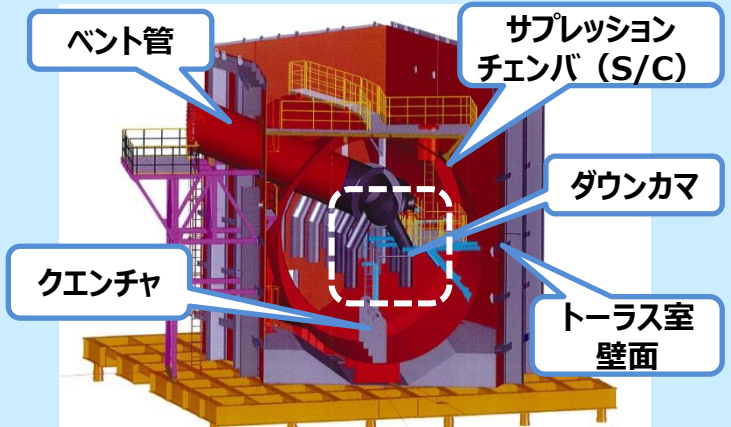
遠隔マニピレータ

mmφ2050
ベント管

閉止補助材

実規模試験体を用いた試験

実規模試験体（1/8セクター）



ベント管

サプレッション
チェンバ（S/C）

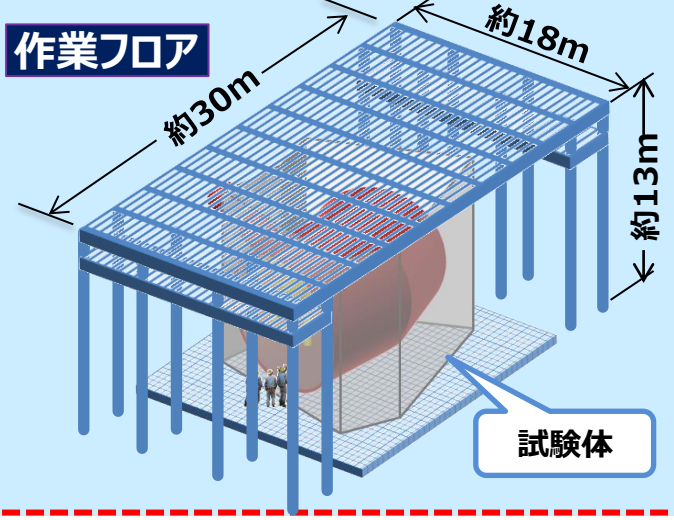
ダウンカマ

クエンチャ

トラス室
壁面

楢葉遠隔技術開発センター内に建設

作業フロア



約30m

約18m

約13m

試験体

2-5.燃料デブリ取り出し技術

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

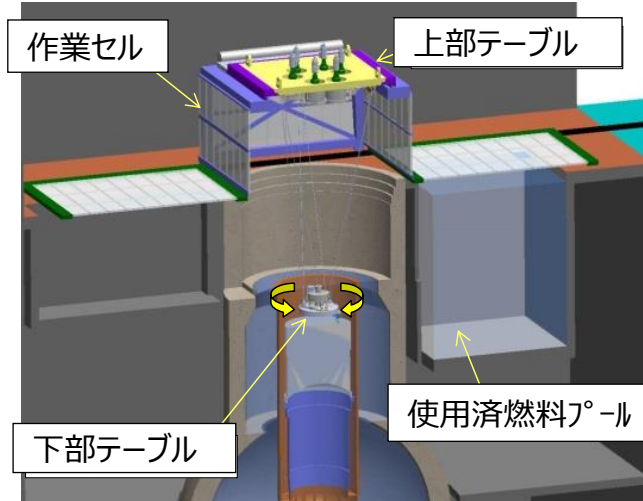
基盤技術の開発



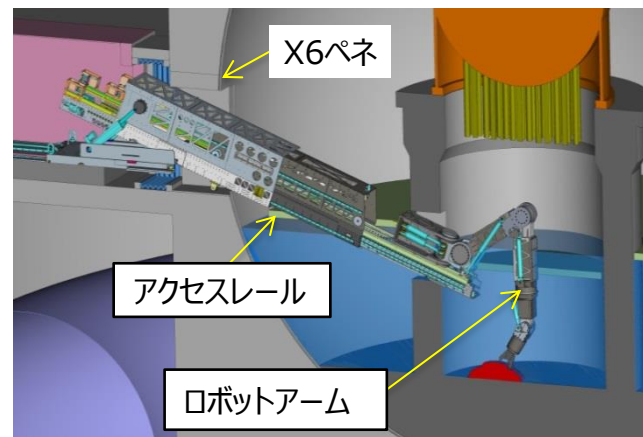
ロボットアーム



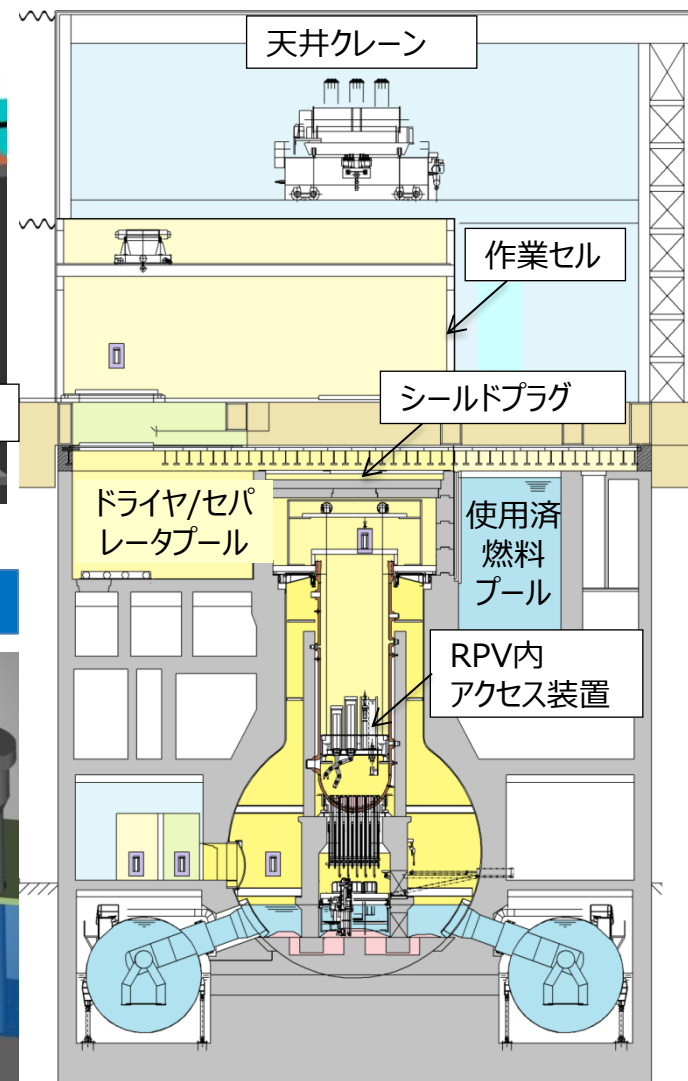
冠水-上アクセス工法（概念）



横アクセス工法（概念）

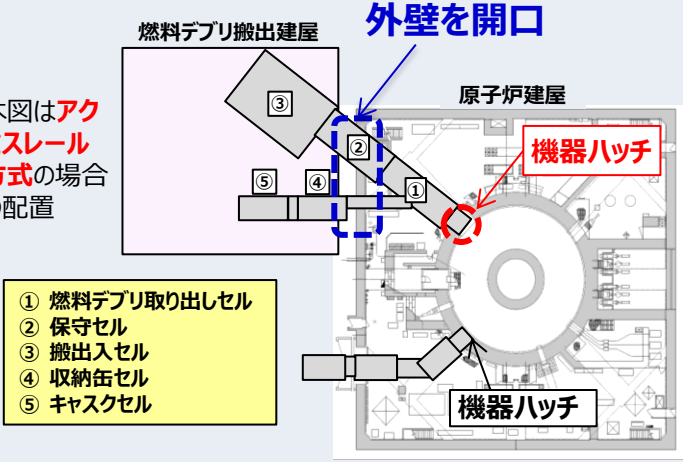
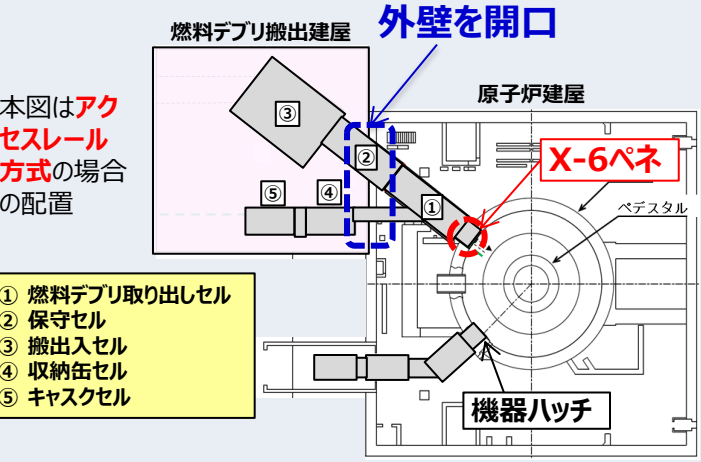
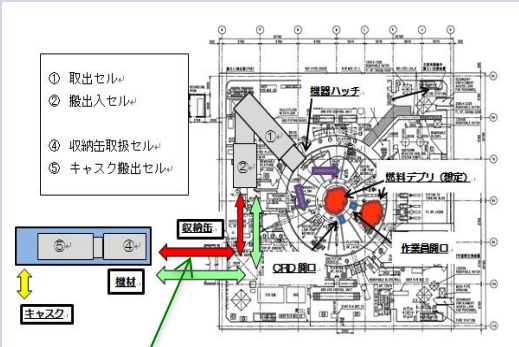
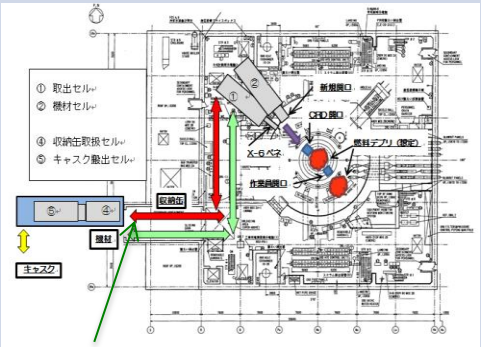


気中-上アクセス工法（概念）



横アクセス工法～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 搬出入セル 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

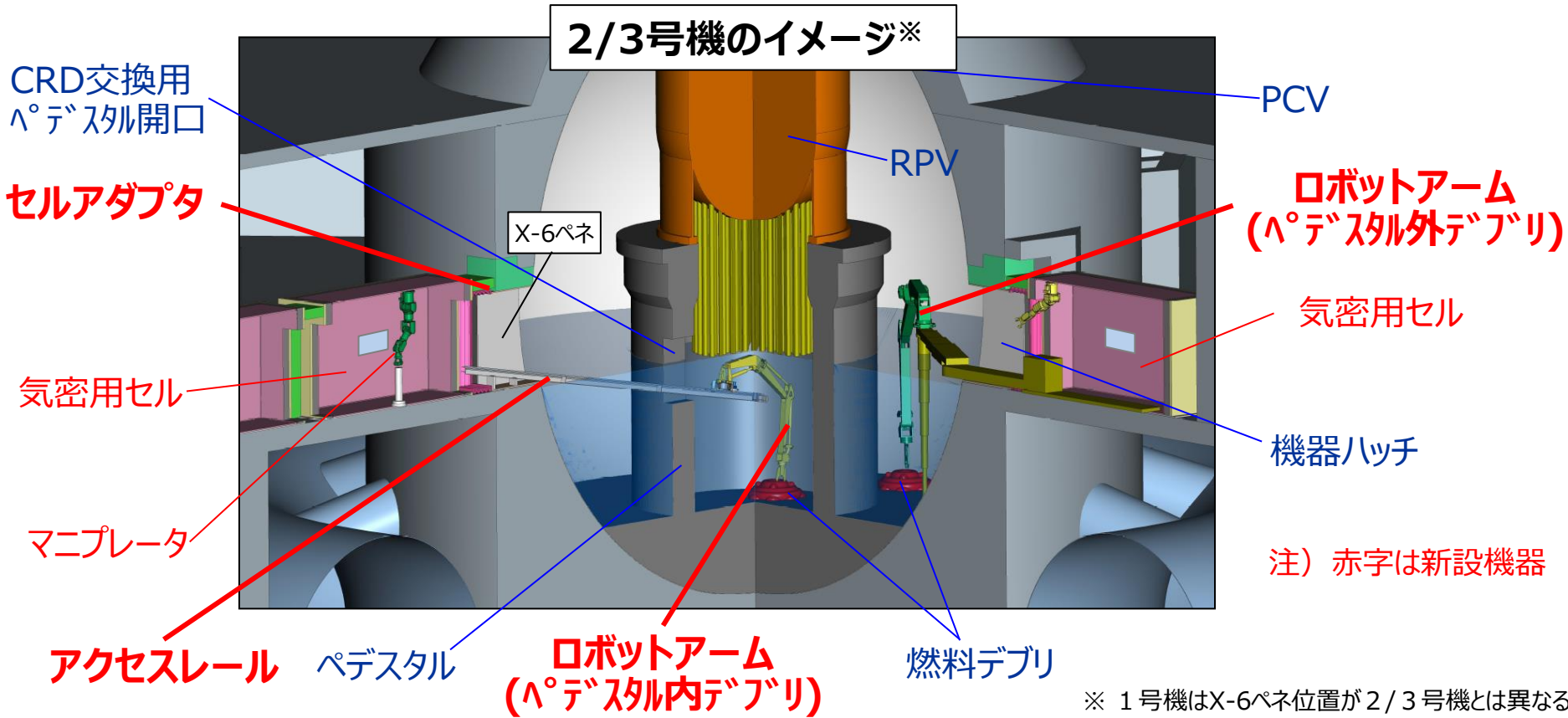
気中－横アクセス工法の概念設計状況

- 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」方式取出しイメージ

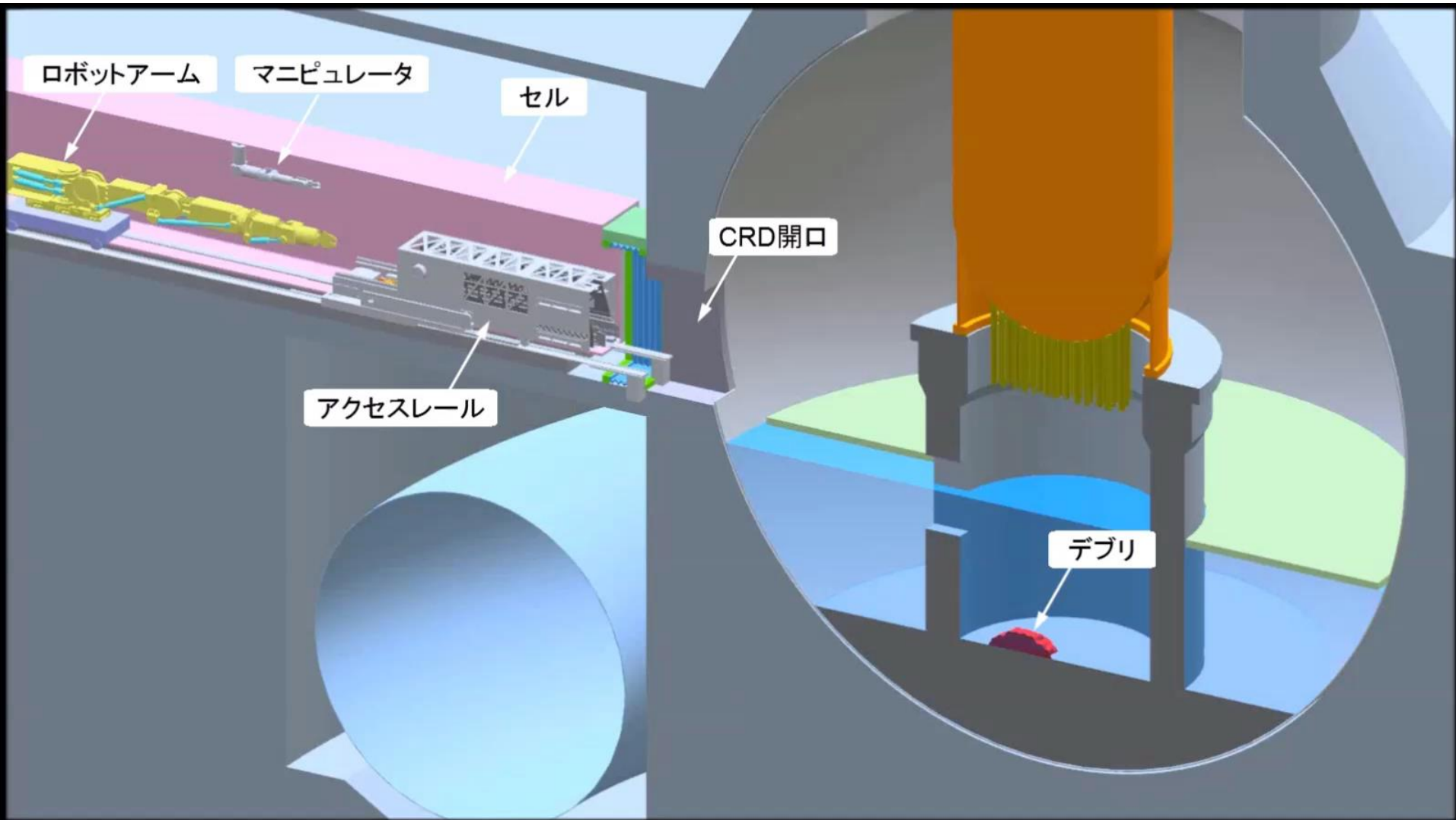
デブリ搬出方法

- 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号機はX-6ペネ位置が2/3号機とは異なる

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）

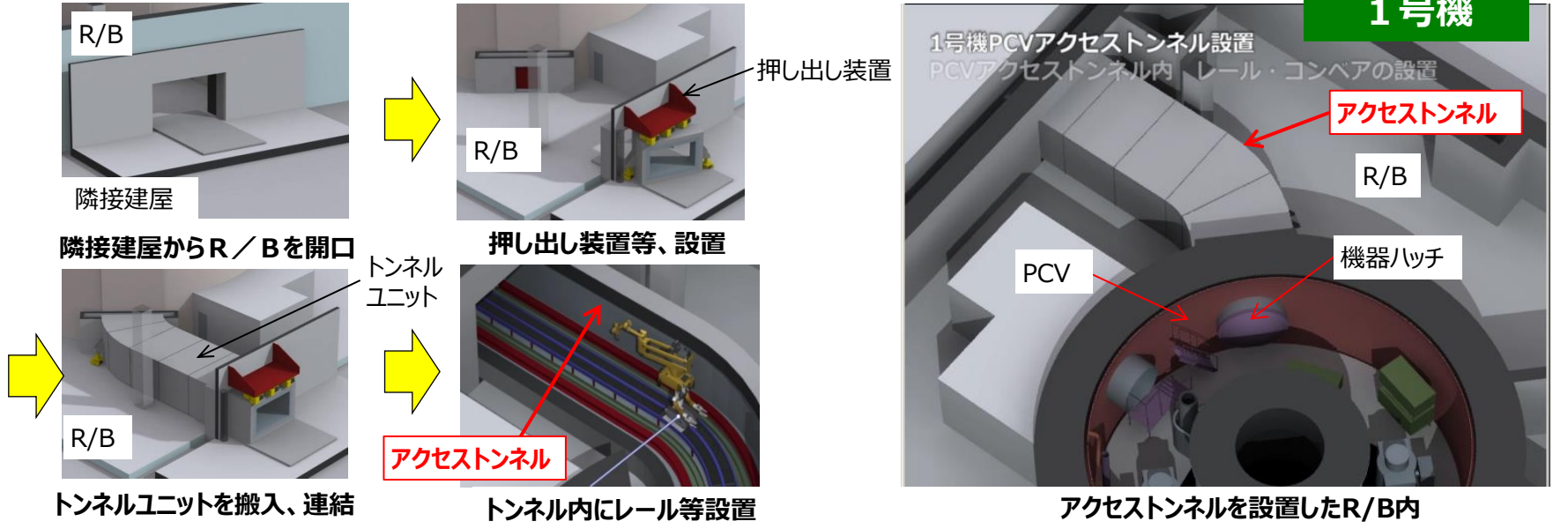


① ロボット・アームの工場モックアップ（動画）

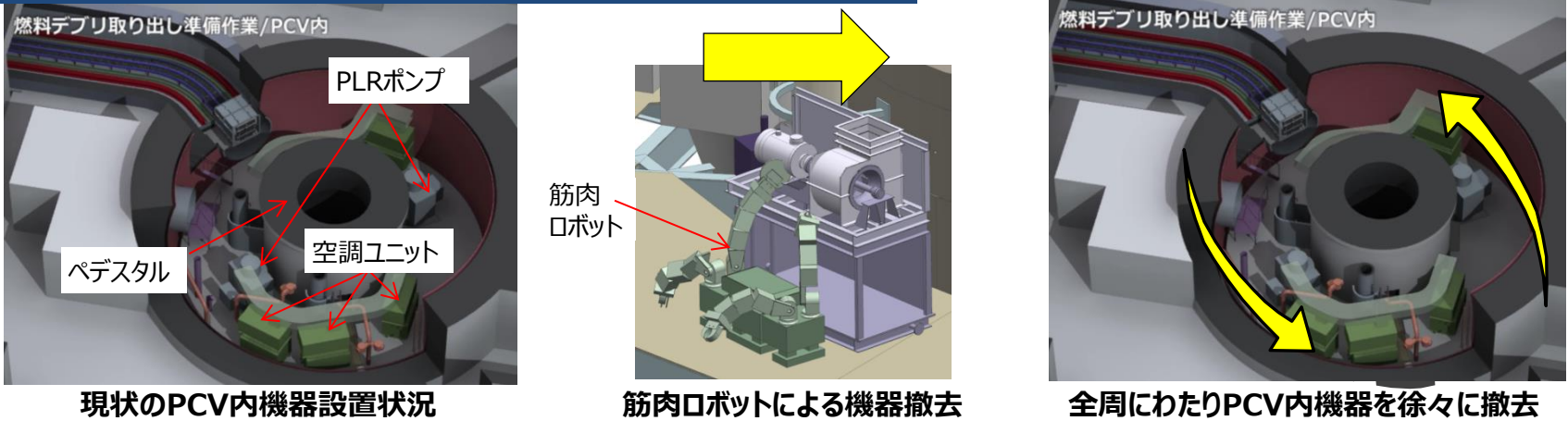


② アクセス「トンネル」方式～トンネル構築～

隣接建屋・アクセストンネル構築

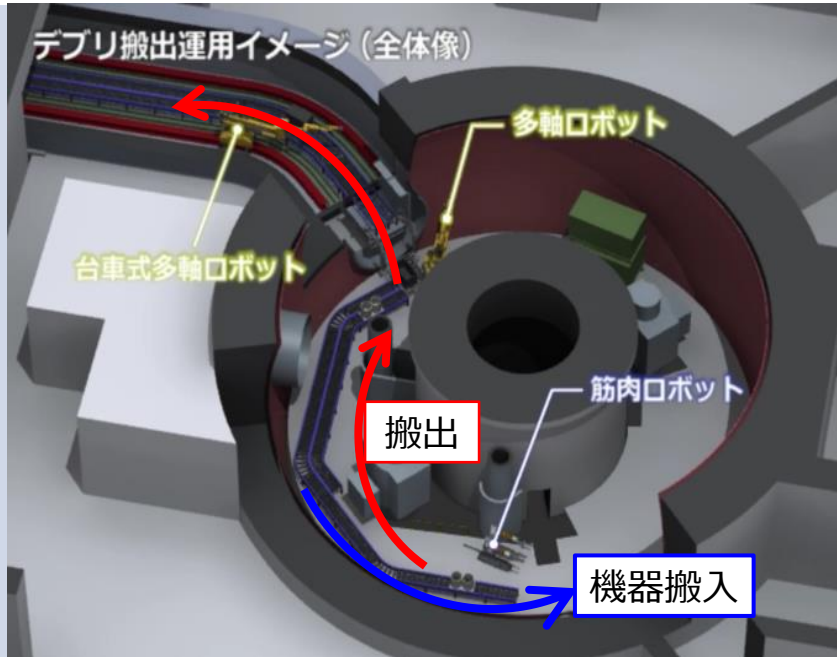


原子炉格納容器 (PCV) 内環境構築 (障害物撤去)

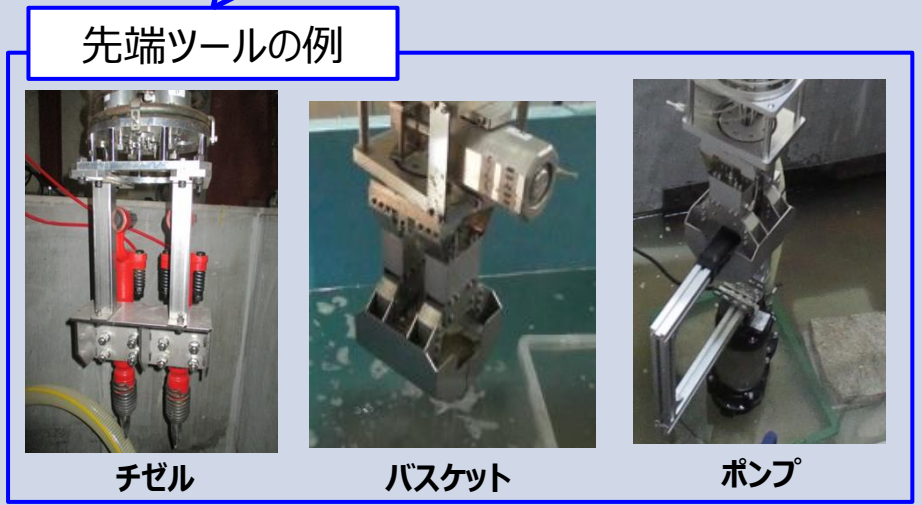
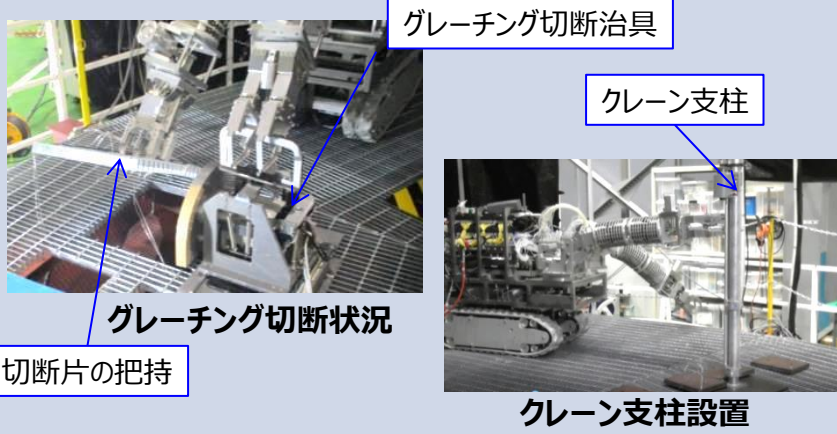
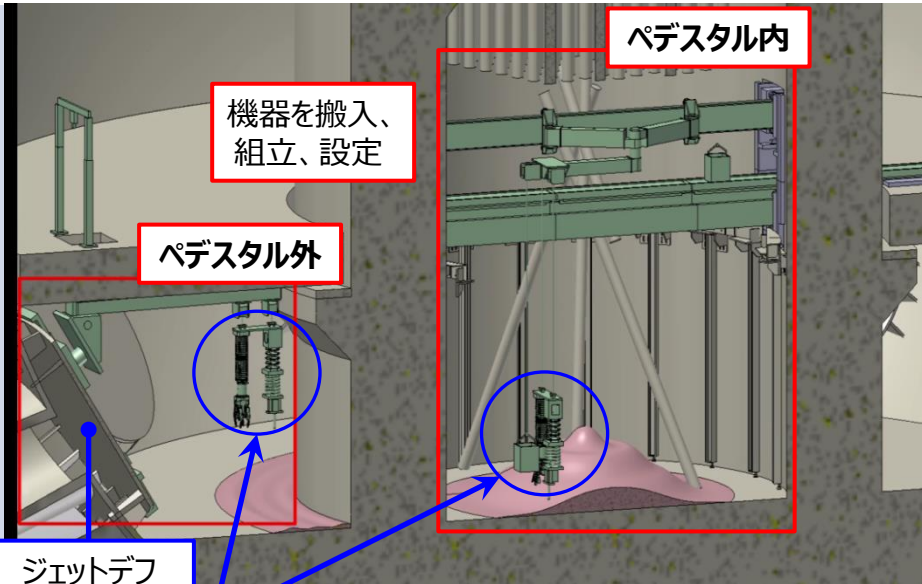


② アクセス「トンネル」方式～デブリ搬出～

デブリの搬出（イメージ）



ペDESTAL内外デブリの回収（イメージ）



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。

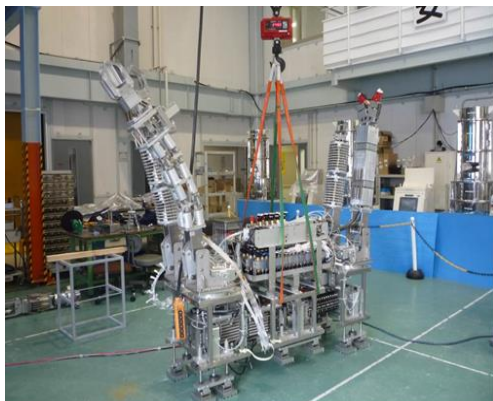
試作機 タイプⅠ

寸法：全長1800mm

幅630mm

高さ1000mm

重量：約690 k g



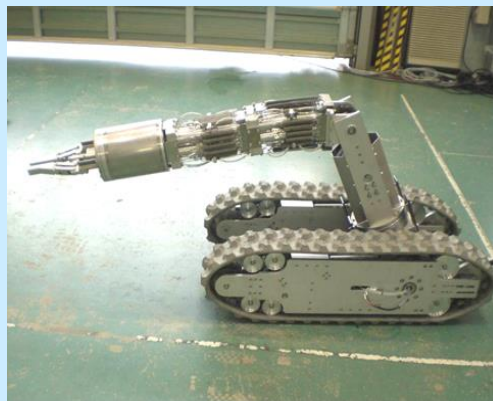
試作機 タイプⅡ

寸法：全長2750mm

幅590mm

高さ350mm（胴部）

重量：約220 k g



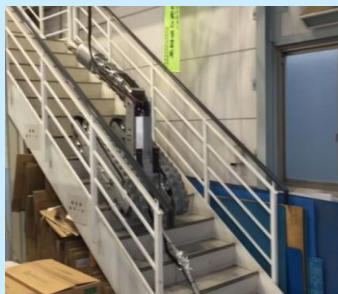
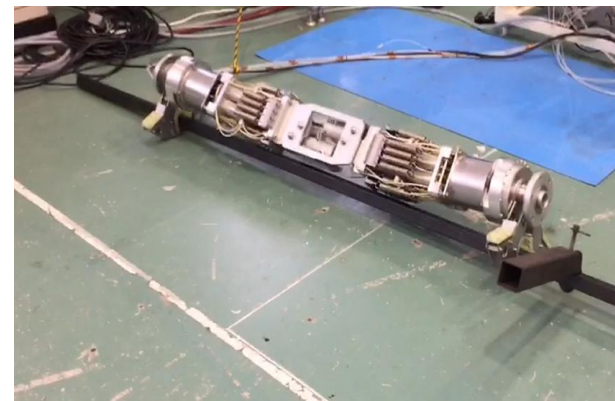
試作機 タイプⅢ

寸法：全長1635mm

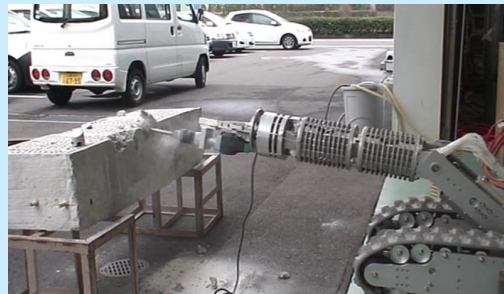
幅430mm

高さ185mm（胴部）

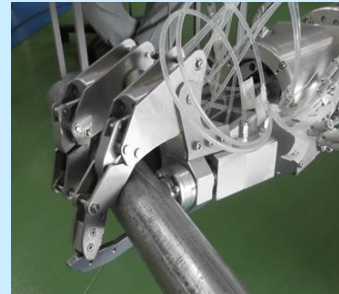
重量：約64 k g



階段走行試験



コンクリート破砕試験



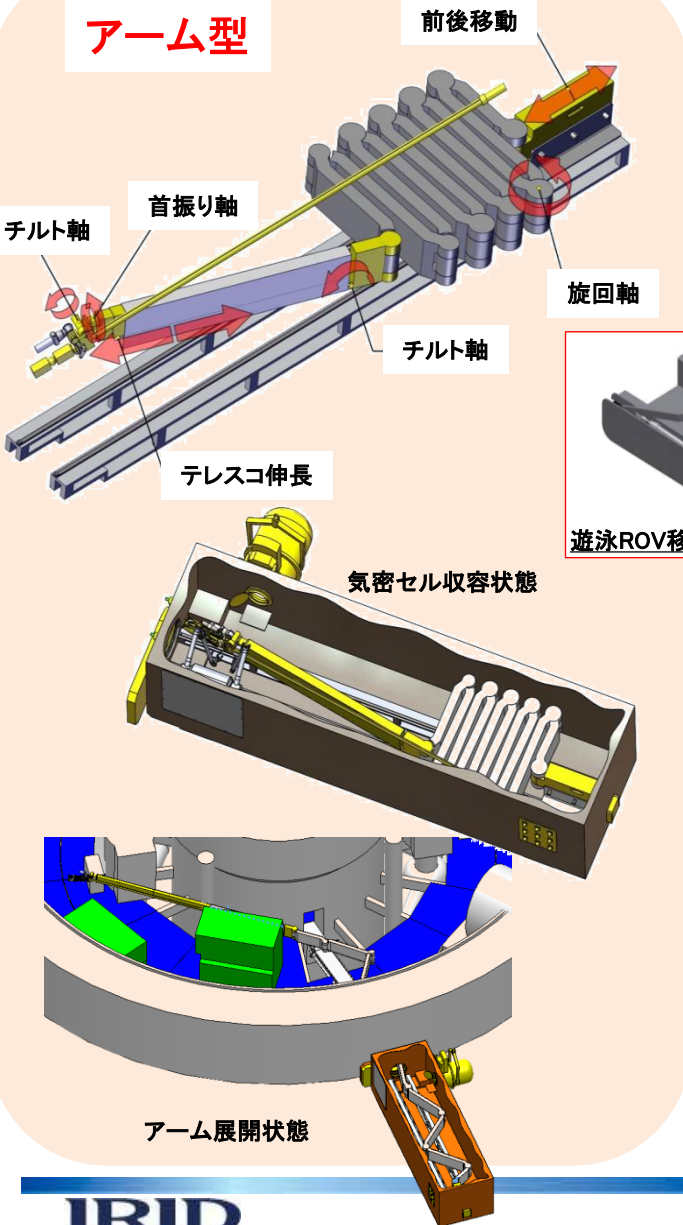
把持動作



模擬バルブ開閉

燃料デブリへのアクセス装置の検討例

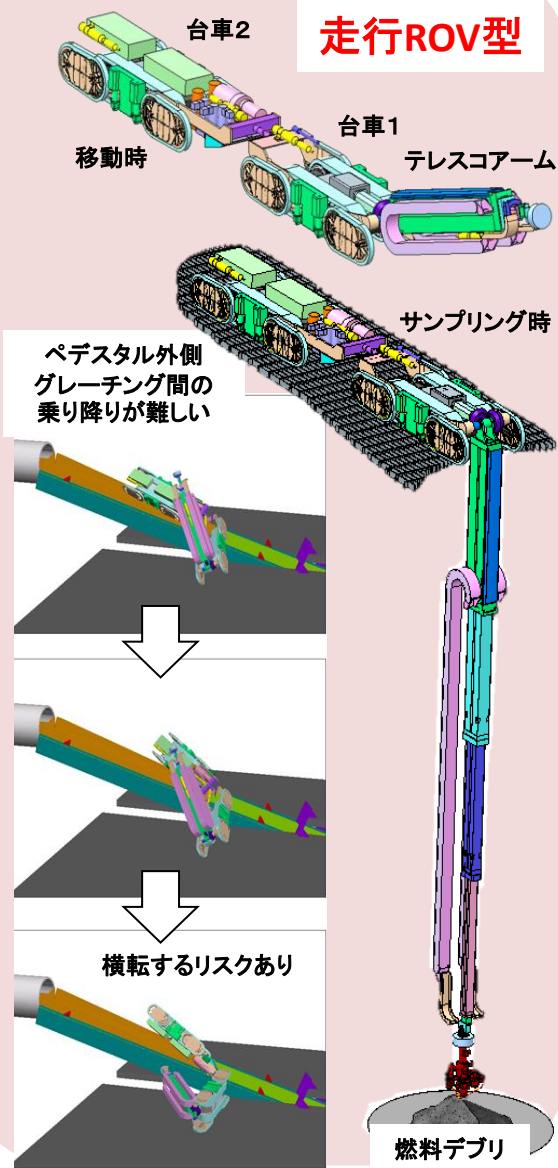
アーム型



遊泳ROV型

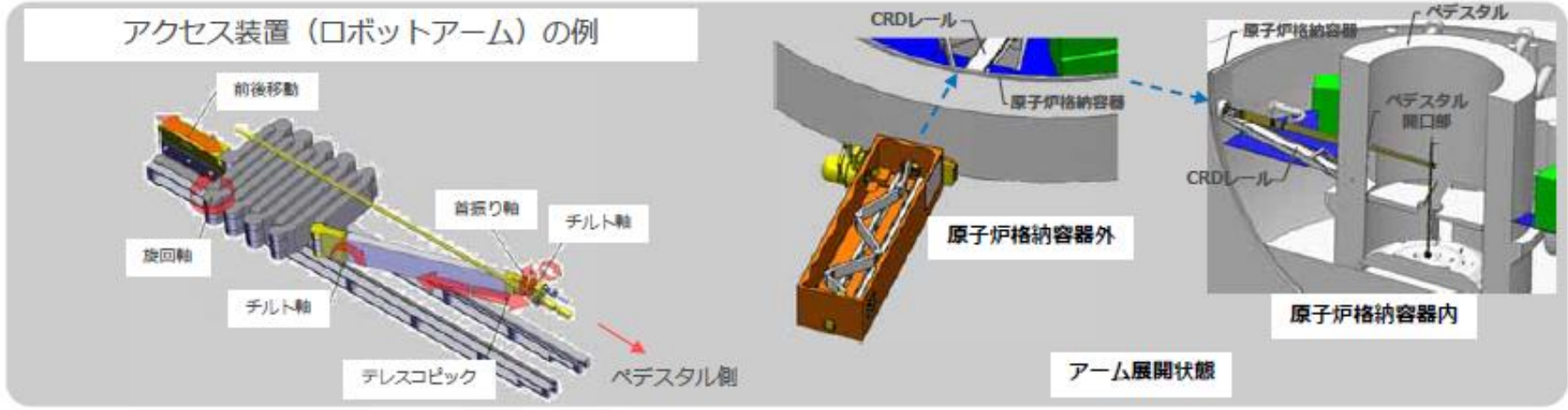
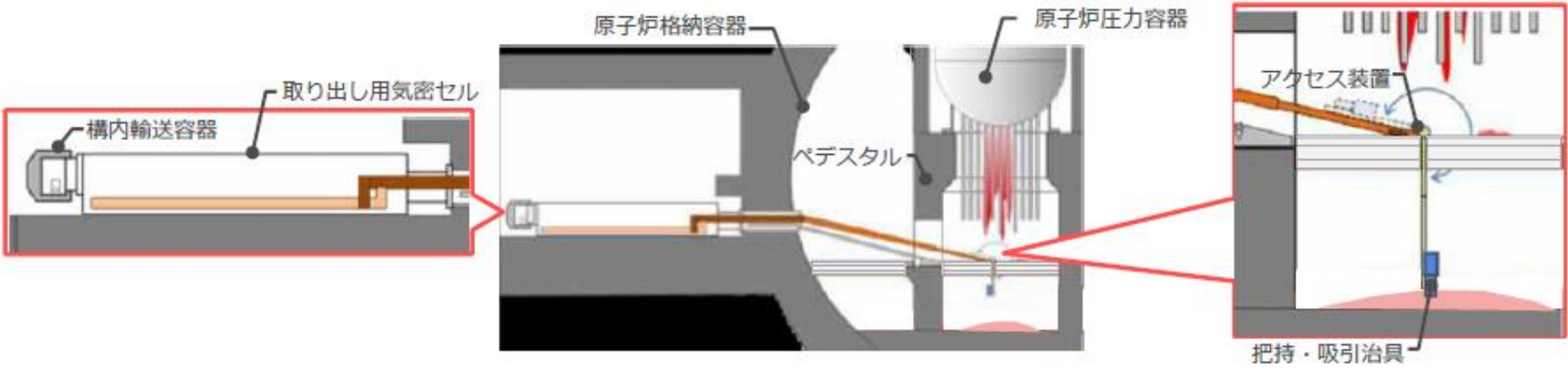


走行ROV型



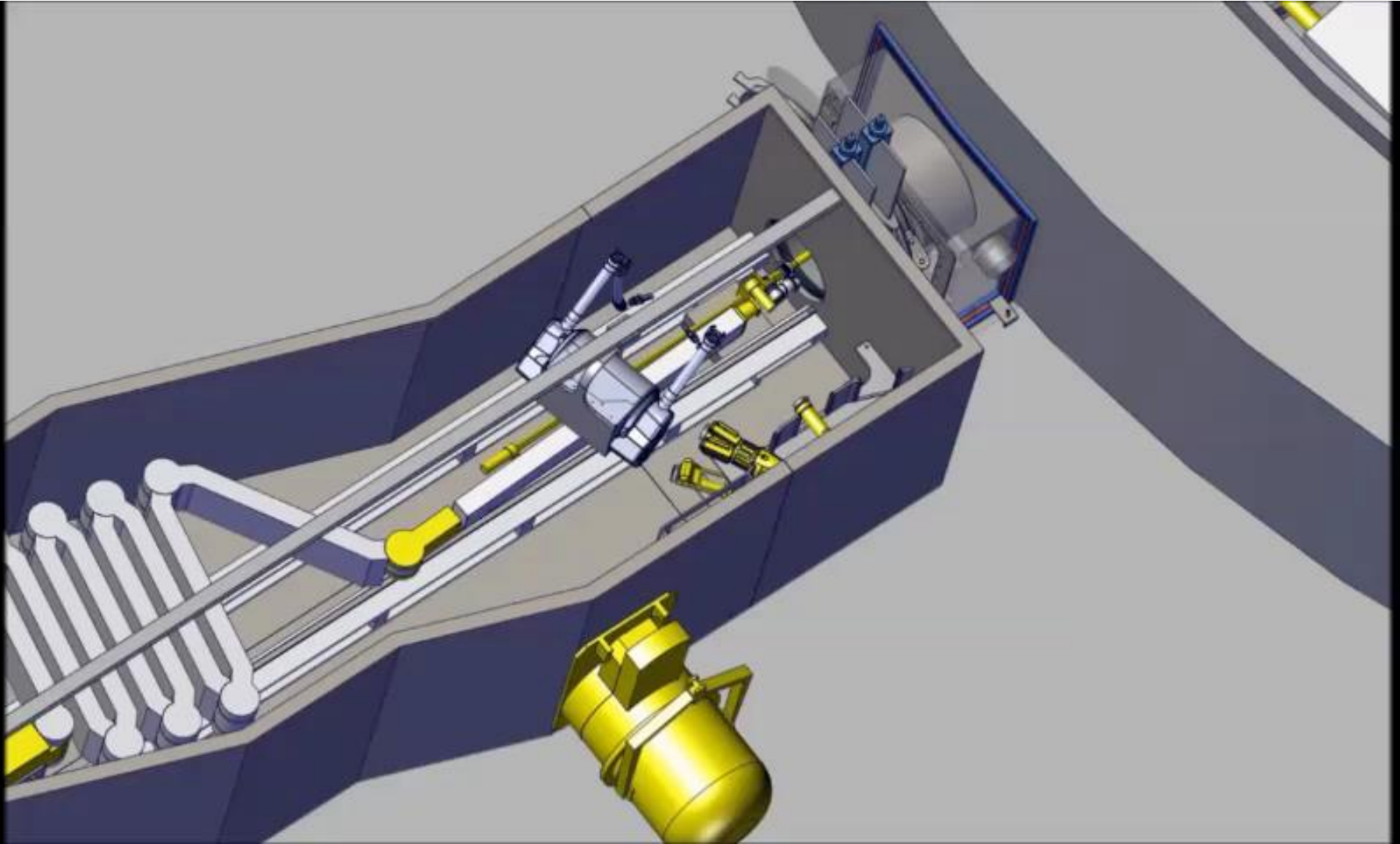
初期段階の燃料デブリ取出し方法(イメージ)

- 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

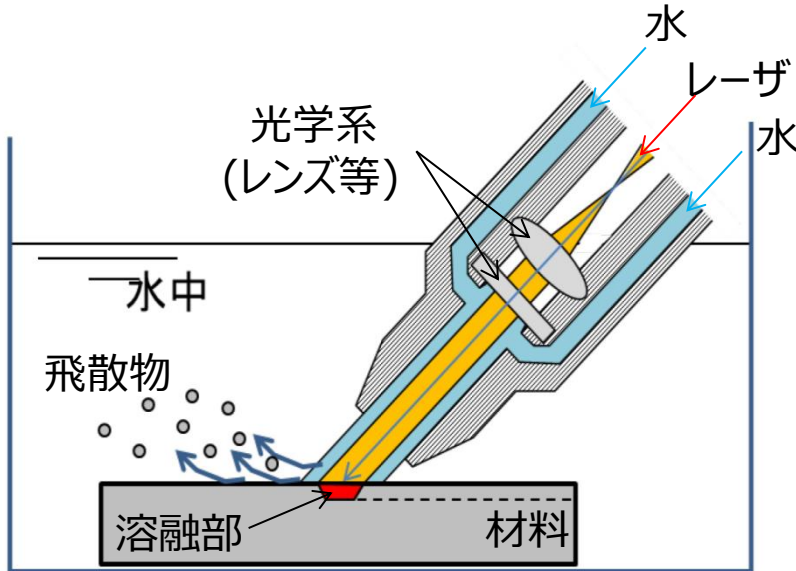
初期段階の燃料デブリ取出し方法(イメージ)動画



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**



レーザはつり加工概略図

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)

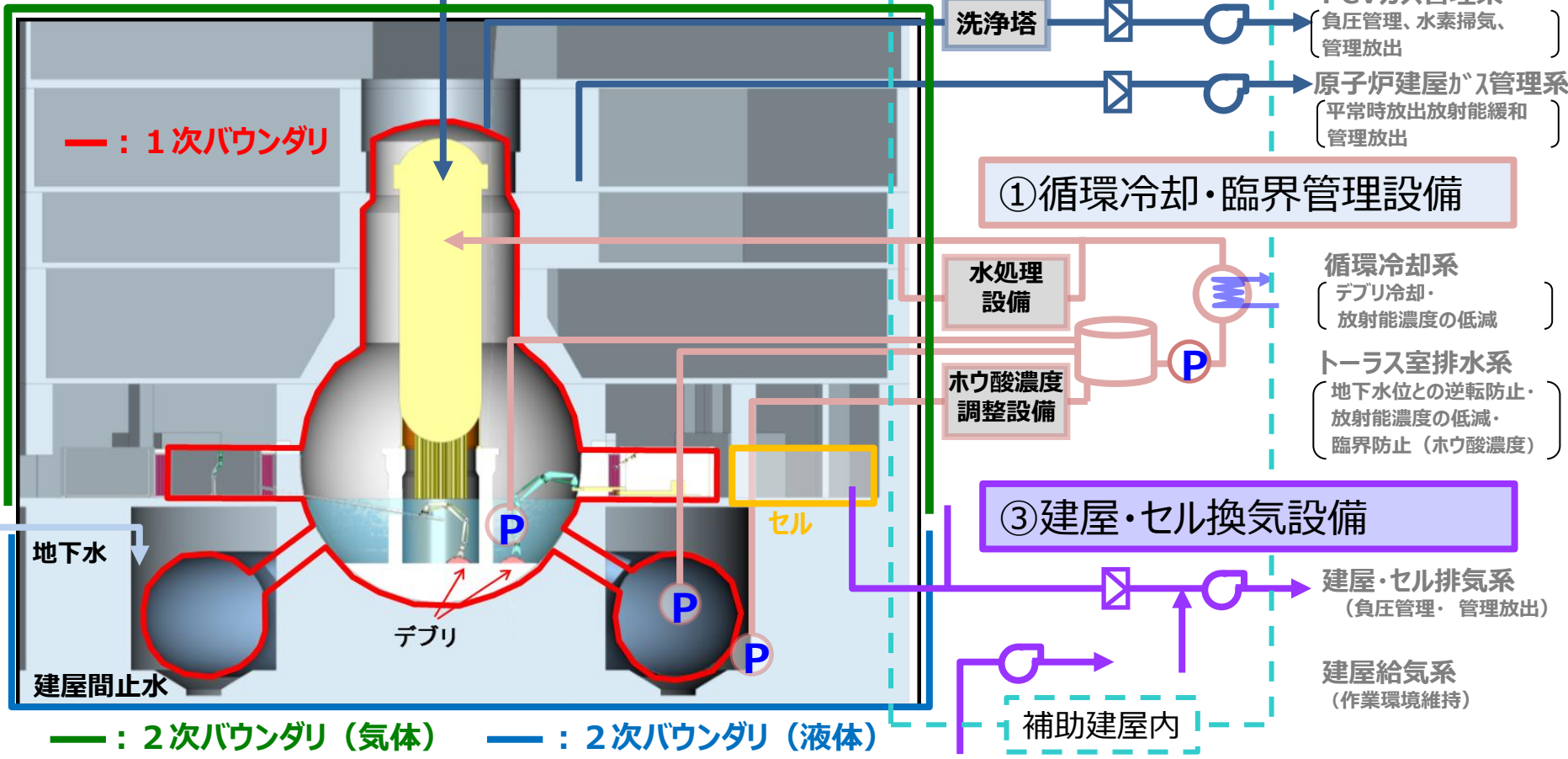
レーザーガウジング切削試験(動画)



気中 - 横アクセス工法の概念設計状況 安全系システム

必要な安全機能

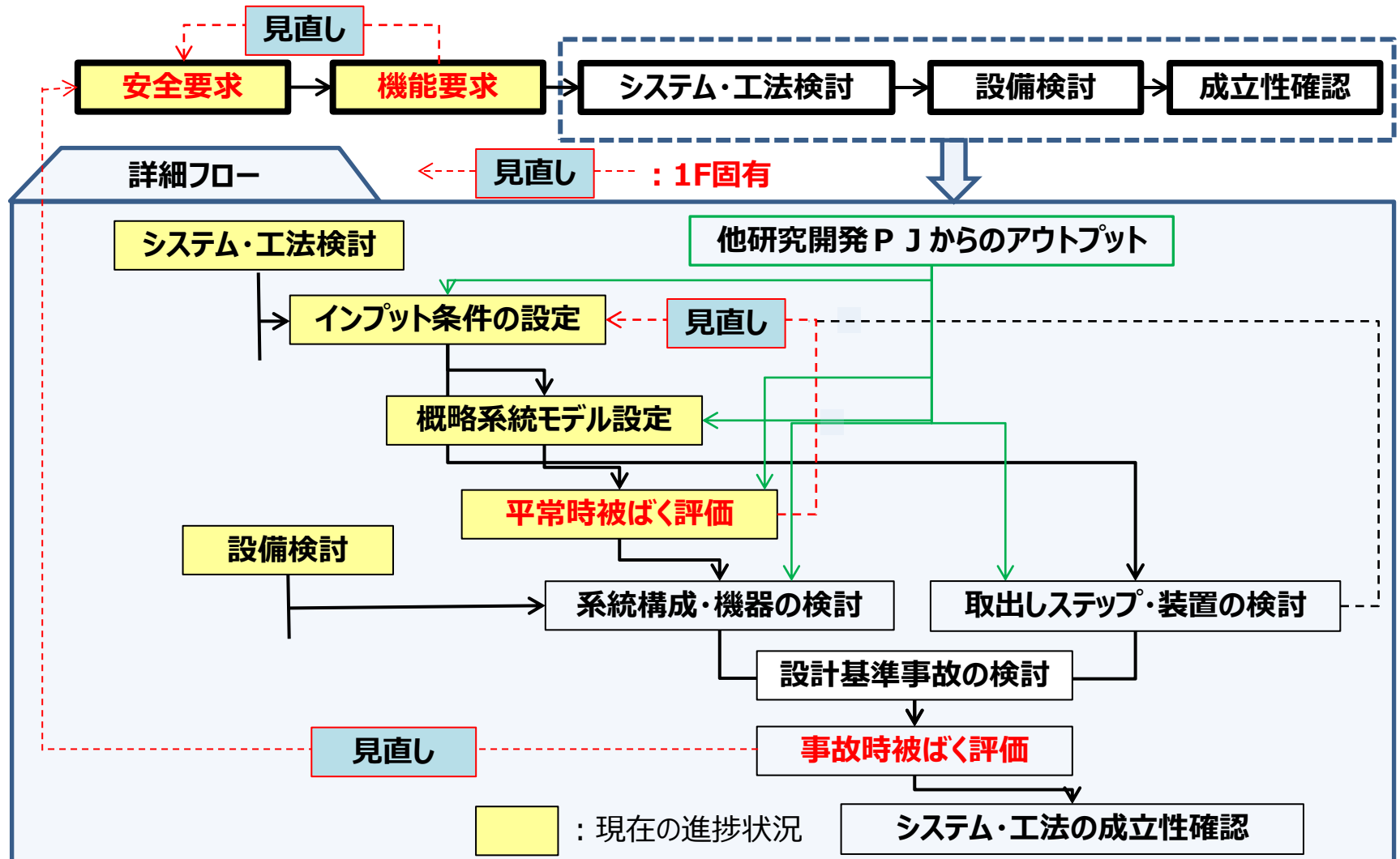
1. 冷却
2. 閉じ込め (負圧, トーラス室水位制御)
3. 不活性化 (火災・爆発防護)
4. 未臨界



— : 1次バウンダリ
 — : 2次バウンダリ (気体) — : 2次バウンダリ (液体)

検討の進め方：手順 システムの設計可能性を検討する

- 安全要求の設定（仮定）にスループットからの機能要求を加えてゆく
- **安全要求は基本的には不変**であるが、現状**内在するリスクや作業リスク（作業線量）の想定・評価によっては見直し**があり得る

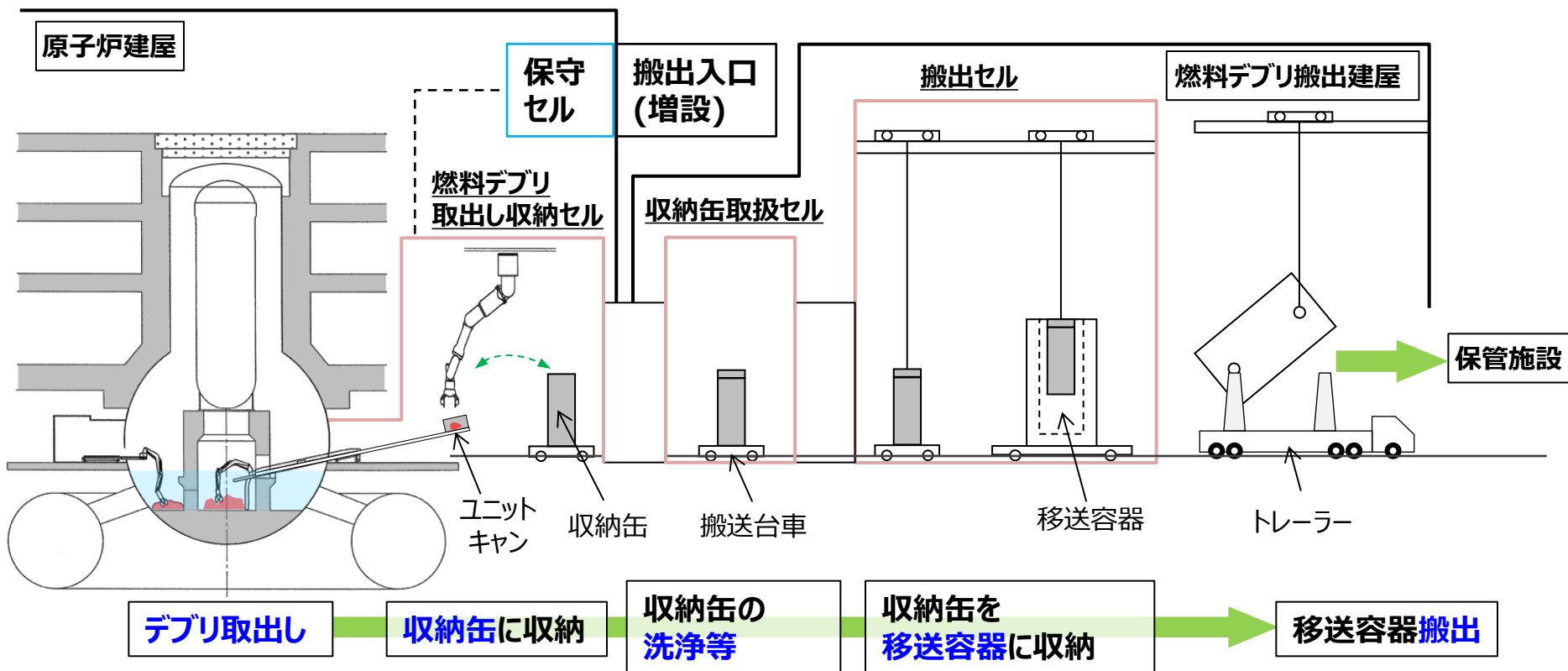


2-6.燃料デブリ収納・移送・保管技術

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）



まとめ

- ▶ 福島復興の一丁目一番地は、1 F 廃炉の完遂。
- ▶ 廃炉作業を**安全第一**に進めていくための技術の研究開発はこれからが正念場。
- ▶ これを「**ステップ・バイ・ステップ**」で**着実に進めていく**ためには、**現場を良く知る**ことが**第一歩**。
- ▶ しかし、放射線量の高い1 F 現場では調査をするにも被ばくを伴う。**現場情報が限られた中で**、現場に速やかに適用できる研究開発を進めていくことが**必要**。
- ▶ したがって、現場の状況変化に柔軟に対応できる「**ロボ****スト**」な研究開発を進めていくことが**重要**で、最初から**最適化**を求め過ぎないことが**肝要**。

※ステップ・バイ・ステップ：現時点での最新情報に基づき廃炉の方向性を決定するものの、その後得られていく新たな情報や現場での経験を踏まえてその方向性を微修正していく、段階的かつ柔軟なアプローチ方法（小規模から段階的に取出していく）。

※ロボスト：多少の不確定要素があってもうまくいくこと。

ご清聴ありがとうございました。