

(一社)日本原子力産業協会
輸送・貯蔵専門調査会 第119回(2022-5)定例会合

福島第一原子力発電所 廃炉研究開発の現状

令和5年2月14日

国際廃炉研究開発機構 (IRID)
奥住直明

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

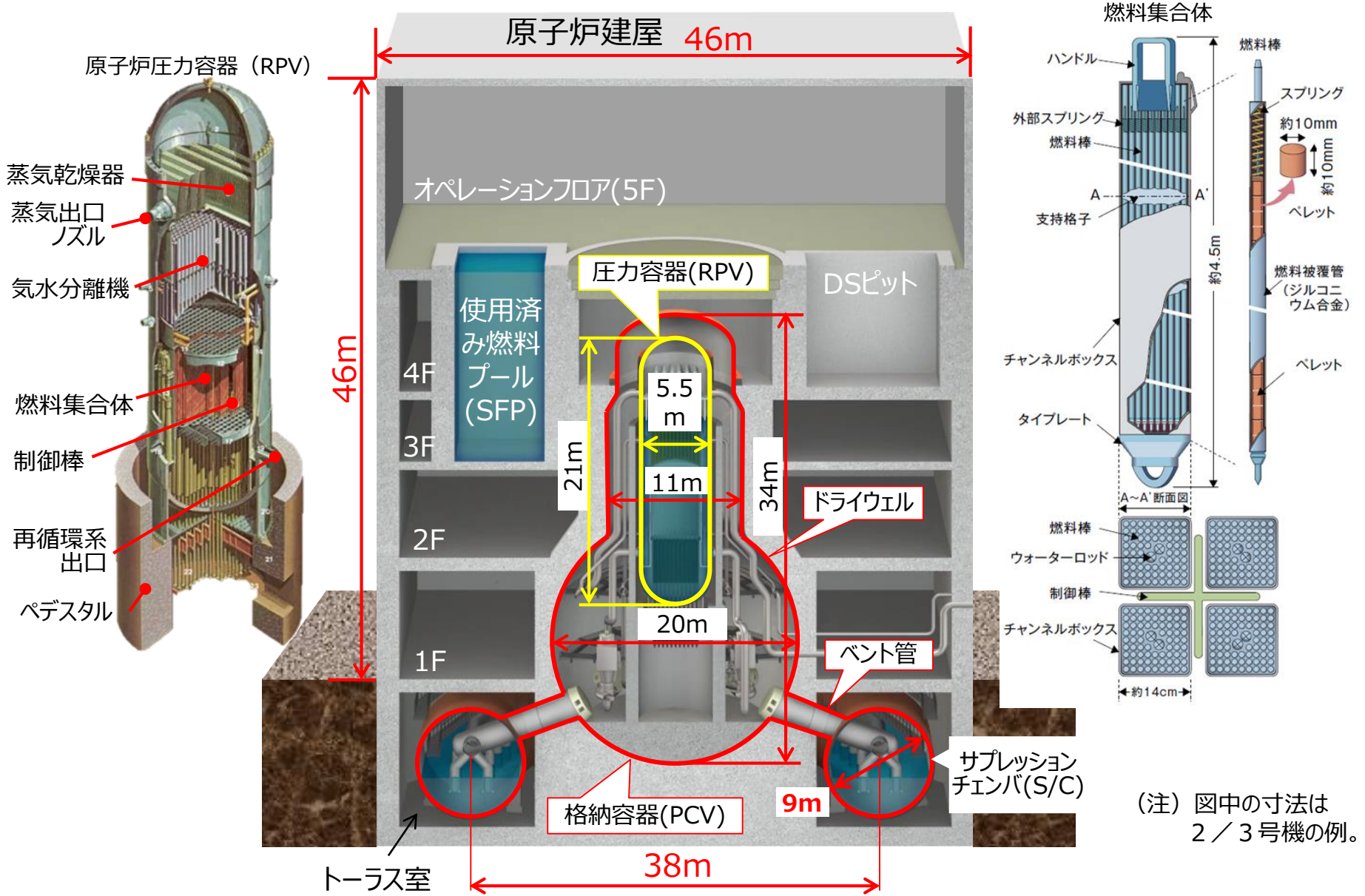
1. はじめに
2. 原子炉格納容器内部調査技術開発
 - (1)既に終了した調査
 - (2)今後計画している調査
3. 燃料デブリ取り出し技術開発

目 次

1. はじめに
2. 原子炉格納容器内部調査技術開発
 - (1)既に終了した調査
 - (2)今後計画している調査
3. 燃料デブリ取り出し技術開発

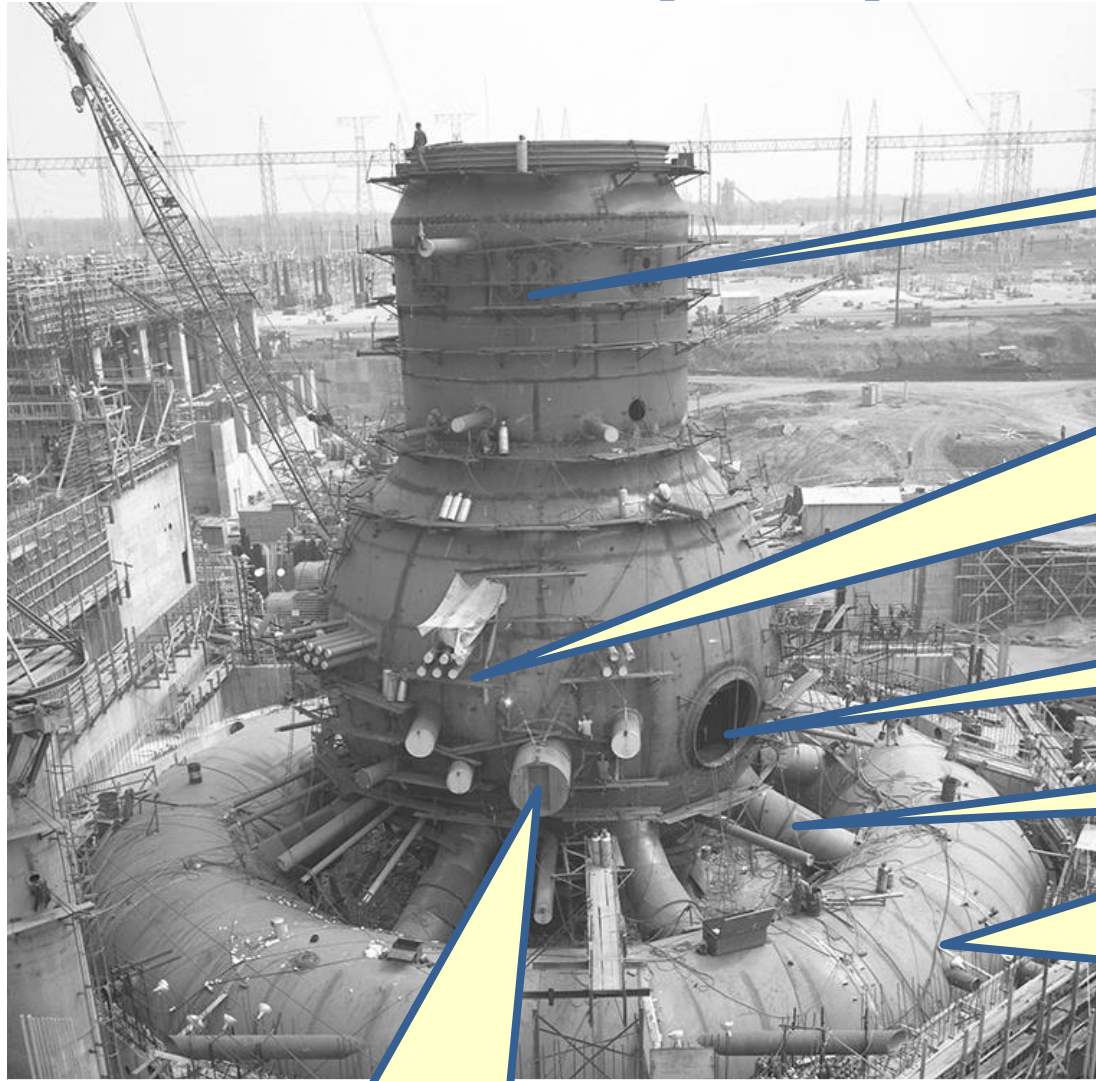
IRID紹介ビデオ

沸騰水型原子力発電所の構造



(注) 図中の寸法は 2 / 3号機の例。

原子炉格納容器(PCV)の外観 (建設写真)



「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。

「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

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り出した燃料集合体の長期健全性評価 2016.3終了

3. 廃棄物対策に係る研究開発

固体廃棄物の
先行的処理手法
技術
2019.3終了

固体廃棄物の
処理・処分
技術

2. 燃料デブリ取り出しに係る研究開発

除染・線量低減技術

R/B内の
遠隔除染
技術

2016.3終了

燃料デブリ取り出し技術

燃料デブリ・炉内構造物取出 臨界管理・基盤技術 小型中性子検出器

2019.3終了

燃料デブリ・
炉内構造物
取り出し技術・工法
開発

燃料デブリ・
炉内構造物取出
ダスト集塵
システム

燃料デブリ
収納・移送
・保管技術

燃料デブリ取り出し
安全システム
の開発

環境整備技術

<安定状態の確保>

RPV/PCVの
腐食抑制・耐震性評価

2018.3終了

PCV漏えい箇所の
補修・止水及び実規模試験

2018.3終了

PCV内水循環技術 実規模試験

2019.3終了

内部調査・分析技術

<間接的調査>

<直接的調査>

RPV内燃料デブリ検知技術・評価

2018.3終了

総合的な炉内状況把握の高度化

2018.3終了

PCV詳細調査技術

2019.3終了

RPV
内部調査
技術

PCV詳細調査
X-6 α ネ
実証 (自主)

PCV詳細調査
堆積物
実証 (自主)

燃料
デブリ性状
把握・分析

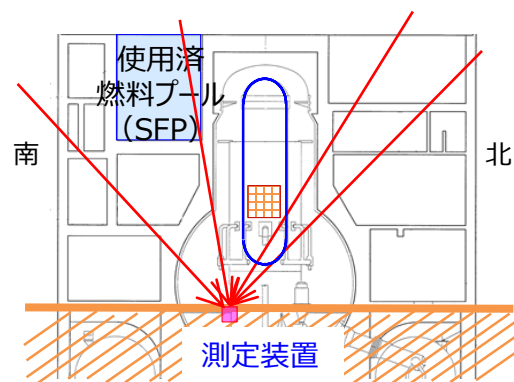
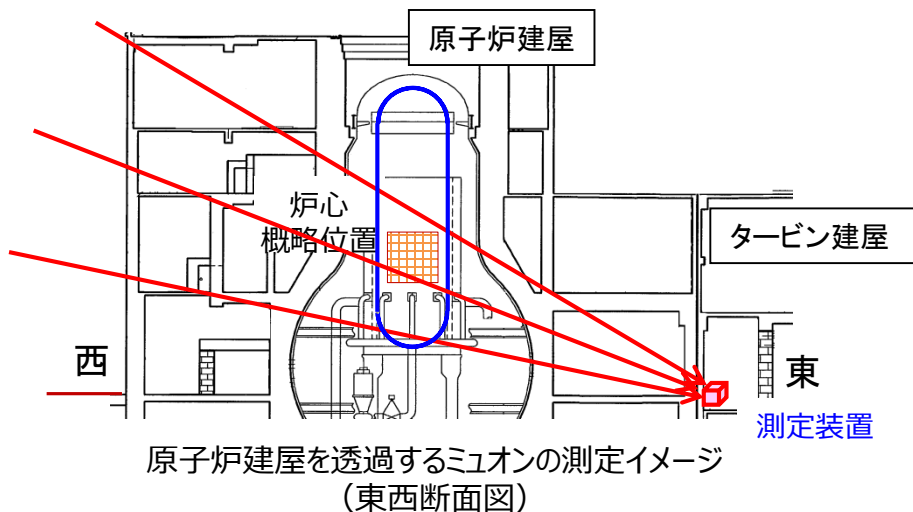
燃料デブリ
サフリング・
規模拡大
技術

目 次

1. はじめに
2. **原子炉格納容器内部調査技術開発**
 - (1)既に終了した調査**
 - (2)今後計画している調査
3. 燃料デブリ取り出し技術開発

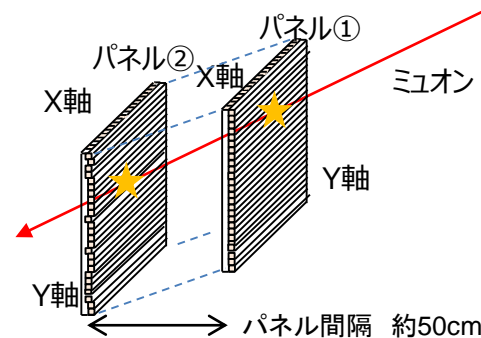
ミュオン透過法による測定

- 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)>

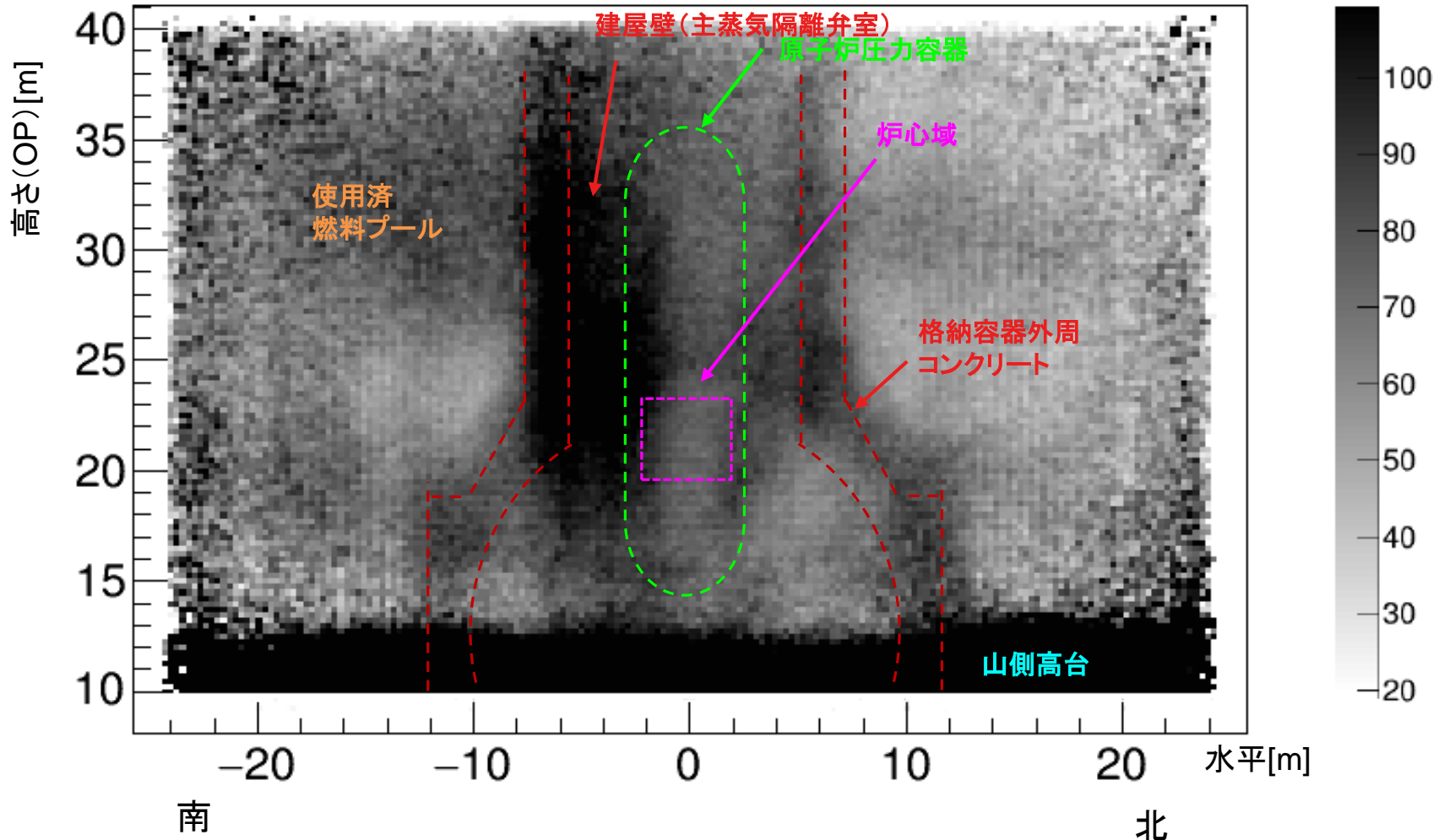
上空から飛来するミュオンを装置内部に配置した2枚のパネル検出器 (プラスチックシンチレータ) で検知し、通過したパネルの座標からミュオンの軌跡を算出。



3号機ミュオン透過法測定結果

(2017年9月8日時点)

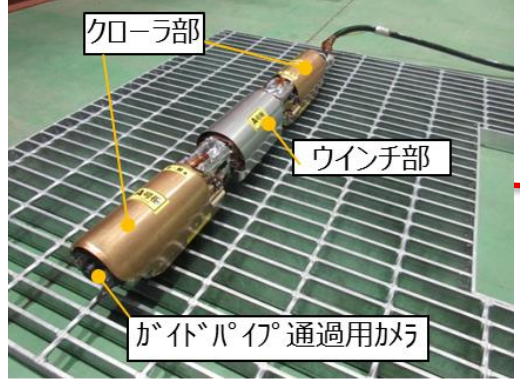
密度長
(g/cc・m)



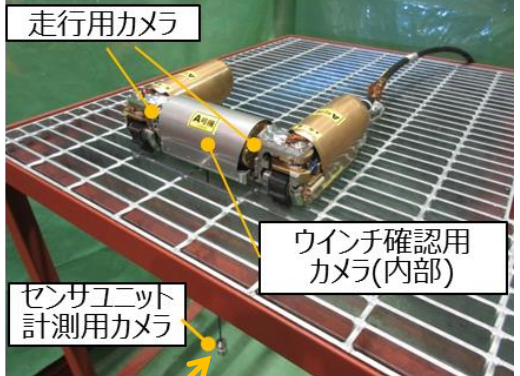
原子炉格納容器内部のロボット等による調査

ペDESTル外側の調査 (1号機)

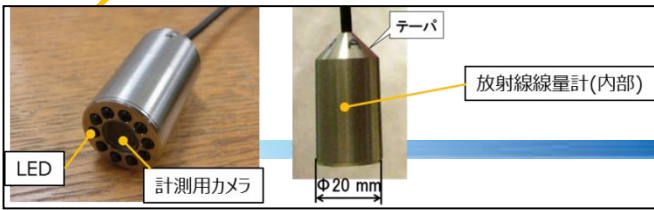
○形状変化型ロボット (B2調査)



I型(ガイドパイプ通過時)
 ↓変形
 ↓

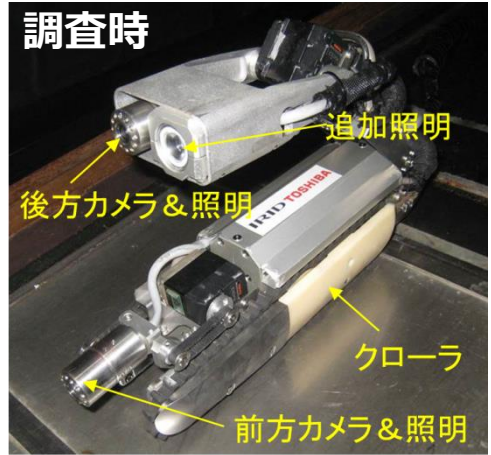
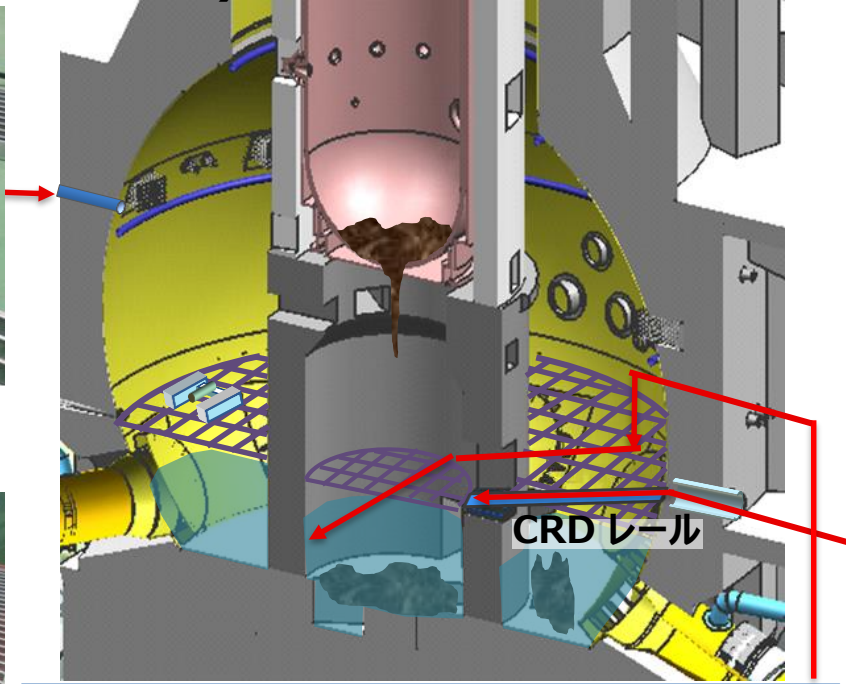


コ型(平面走行時)



ペDESTル内側の調査 (2号機)

○クローラ型遠隔調査ロボット (A2調査)



○釣りざお型調査装置 (A2'調査)



ペDESTル内側の調査 (3号機)



○水中遊泳型ロボット

1号機 ペDESTAL外調査(2017.3)

3/18 (土)

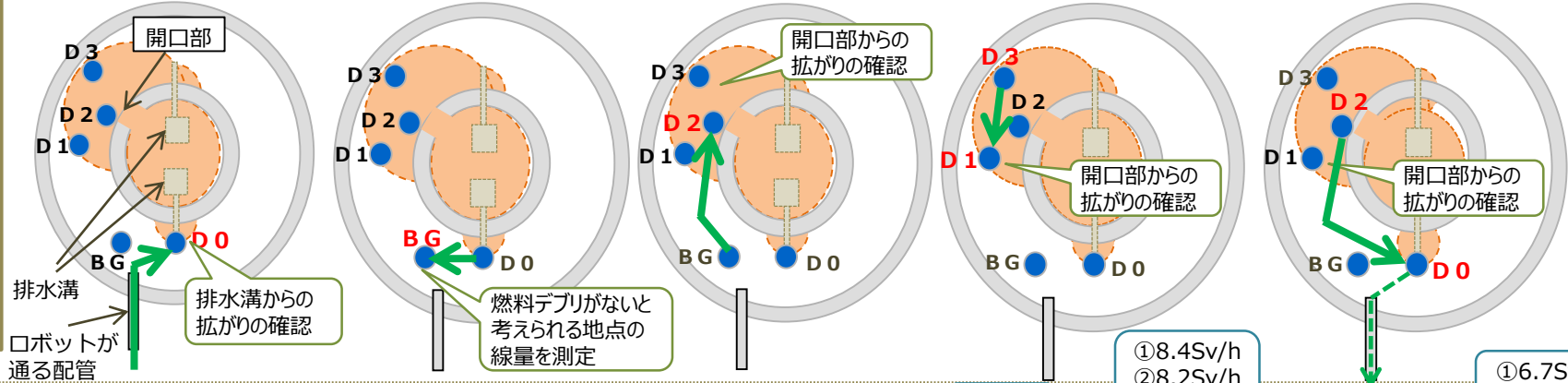
3/19 (日)

3/20 (月)

3/21 (火)

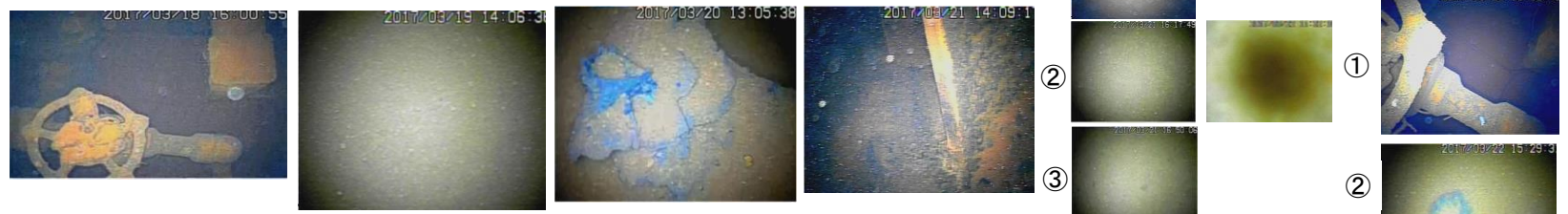
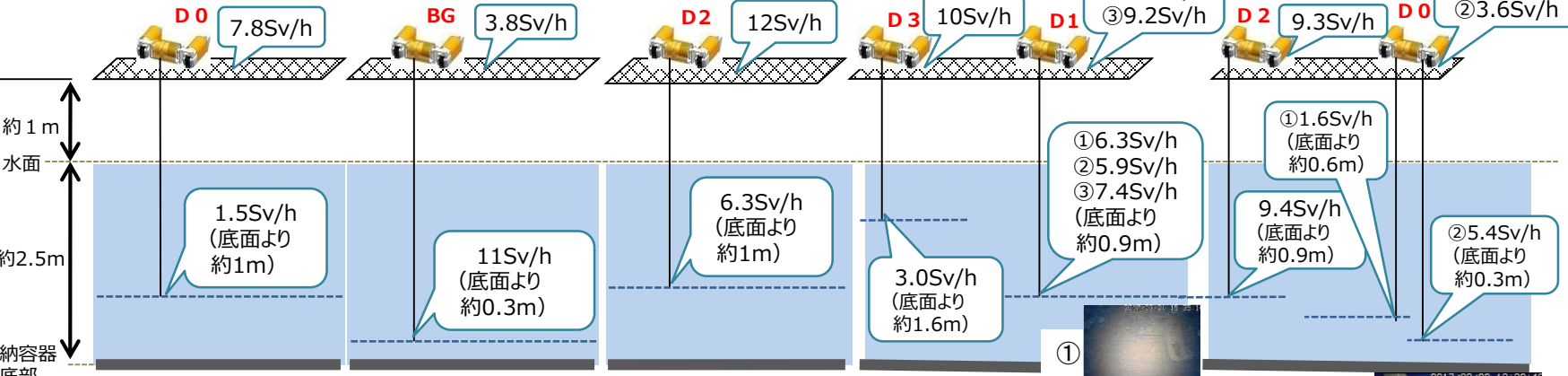
3/22 (水)

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)



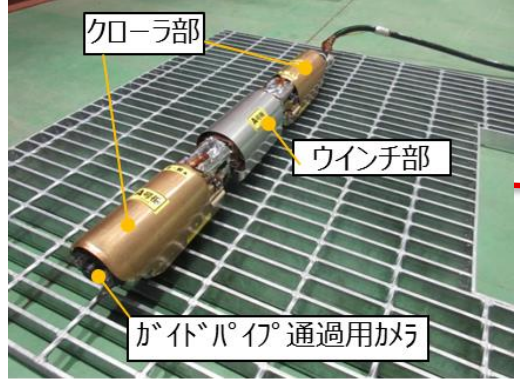
● 調査ポイント ← 調査経路 ○ 燃料デブリの拡がりイメージ (シミュレーションの一例)

※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

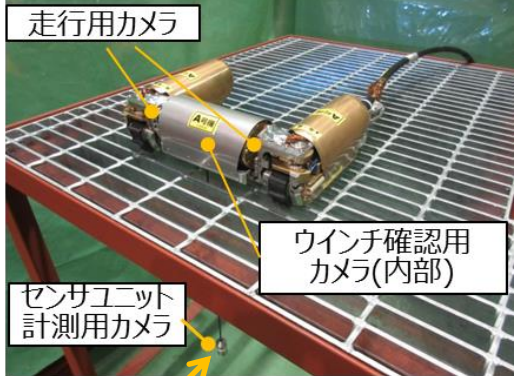
原子炉格納容器内部のロボット等による調査

ペDESTル外側の調査 (1号機)

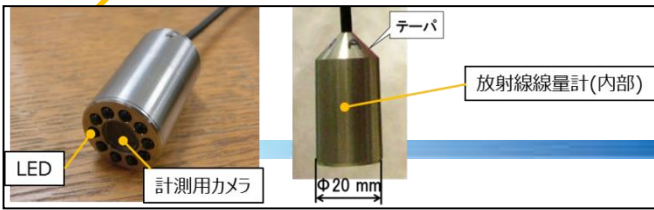
○形状変化型ロボット (B2調査)



I型(ガイドパイプ通過時)
 ↓変形
 ↑

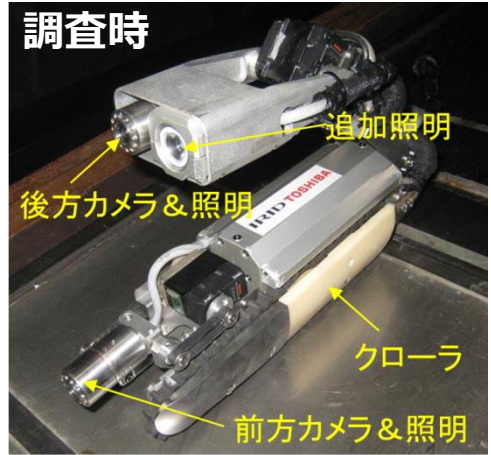
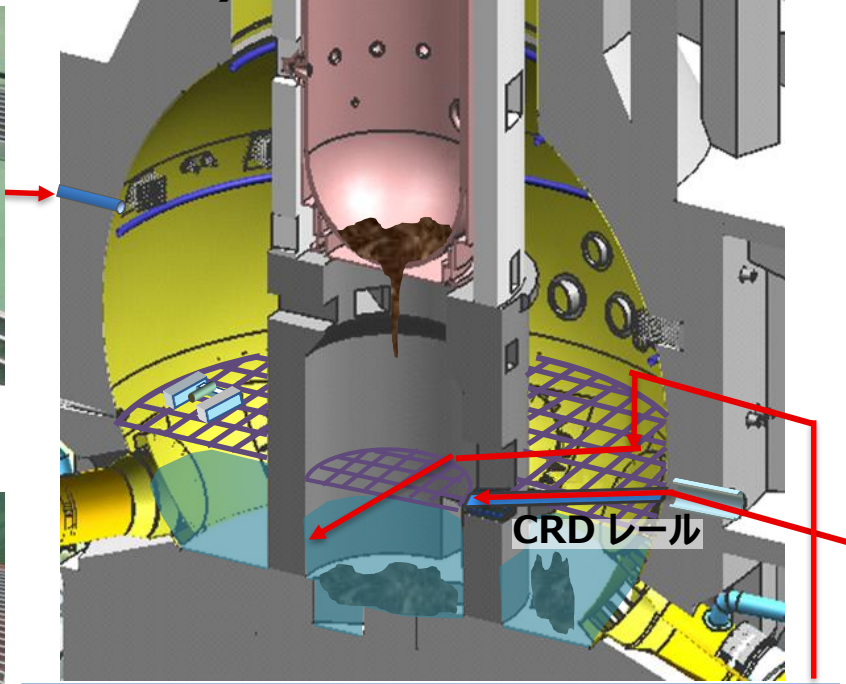


コ型(平面走行時)

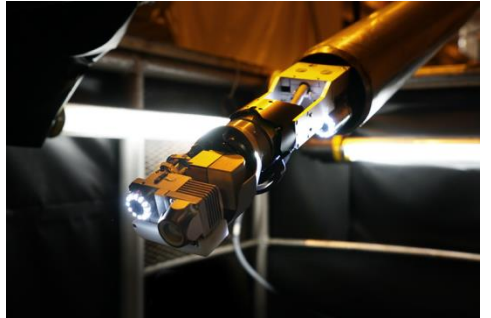


ペDESTル内側の調査 (2号機)

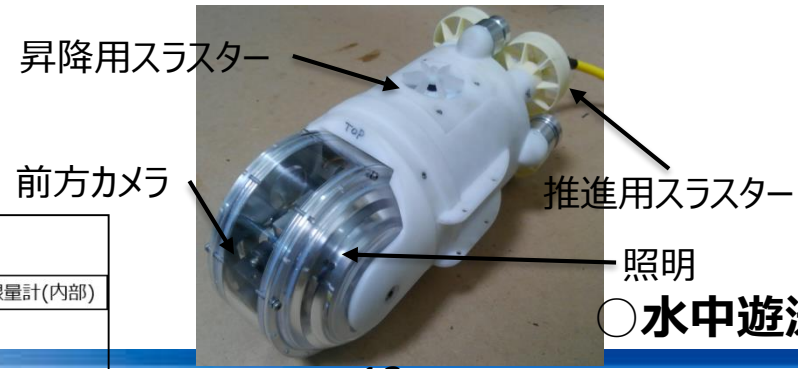
○クローラ型遠隔調査ロボット (A2調査)



○釣りざお型調査装置 (A2'調査)



ペDESTル内側の調査 (3号機)



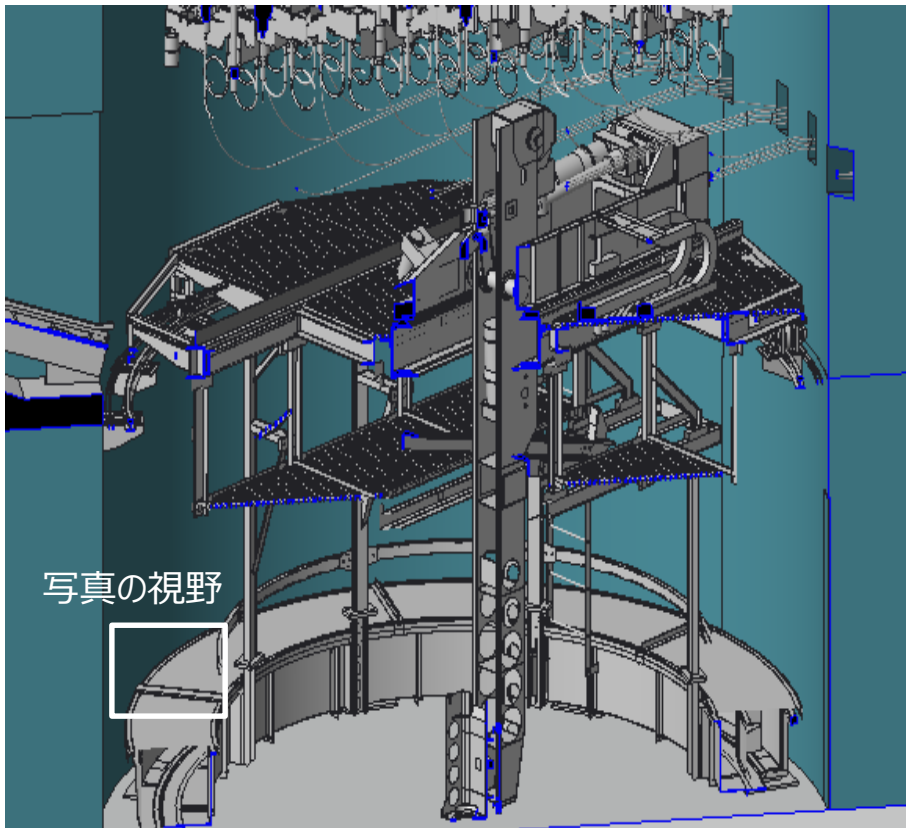
○水中遊泳型ロボット

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DESTAL内下部調査(A2'調査 2018.1)

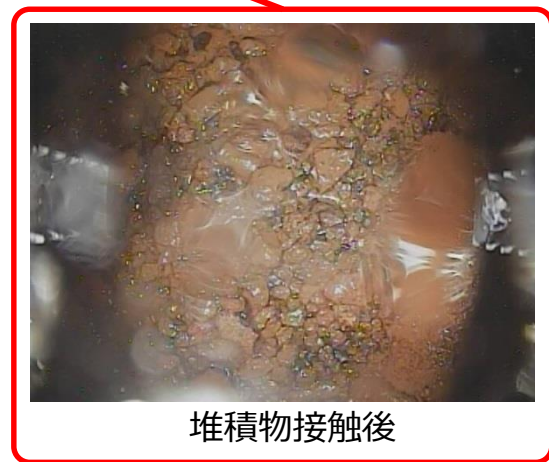
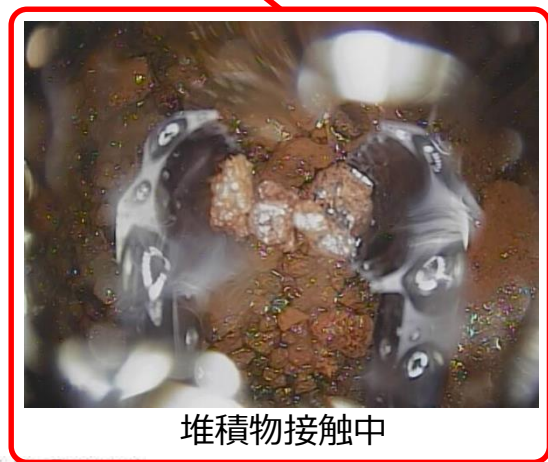
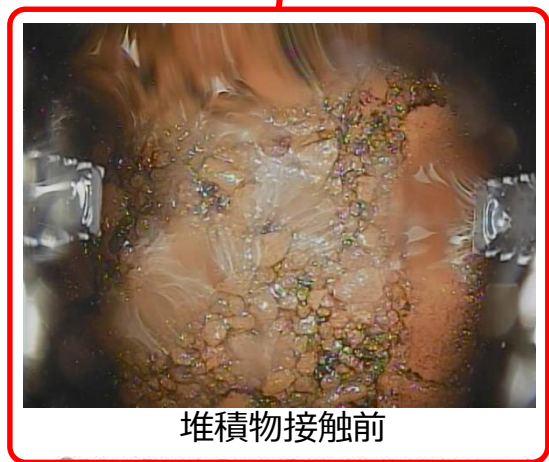
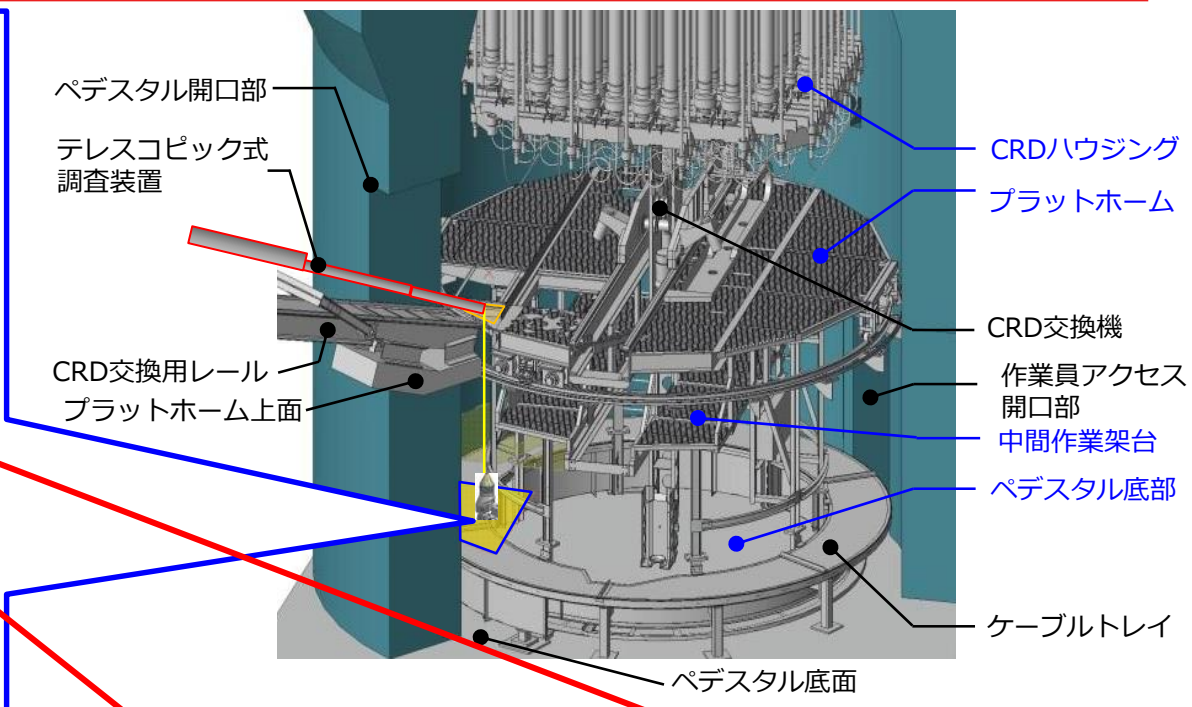


2号機格納容器内底部
(鳥瞰イメージ)

画像：2号機格納容器内底部,
ペDESTAL内 内壁付近



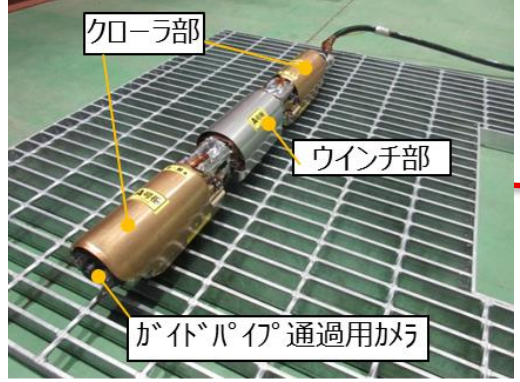
2号機 ペDESTAL内下部調査(A2"調査 2019.2)TEPCO



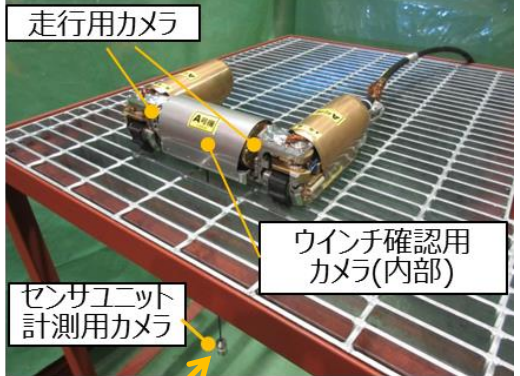
原子炉格納容器内部のロボット等による調査

ペDESTル外側の調査 (1号機)

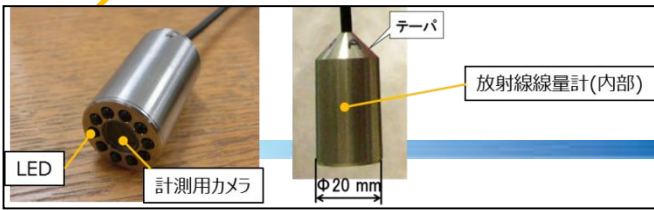
○形状変化型ロボット (B2調査)



I型(ガイドパイプ通過時)
 ↓変形
 ↓

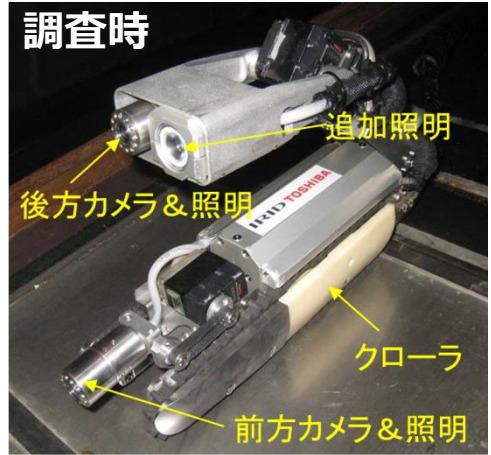
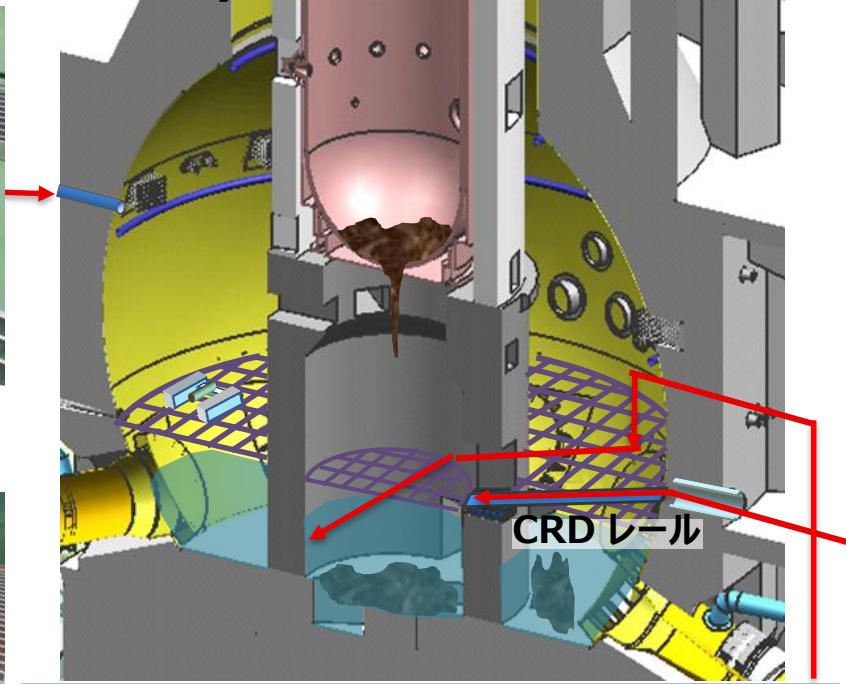


コ型(平面走行時)

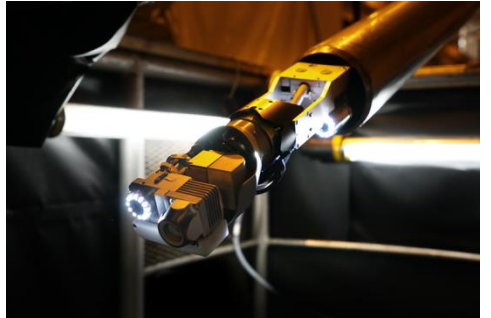


ペDESTル内側の調査 (2号機)

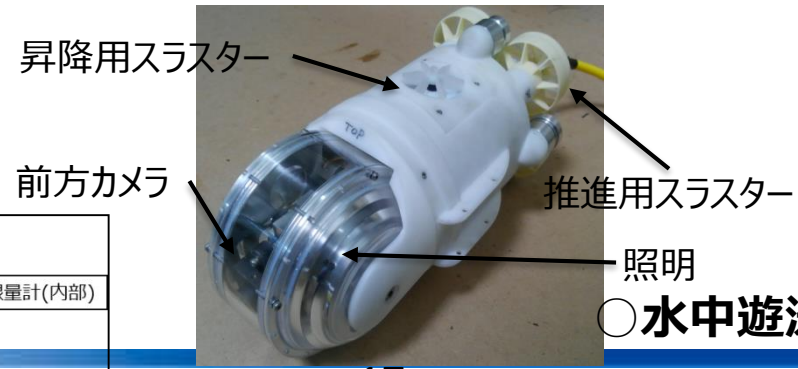
○クローラ型遠隔調査ロボット (A2調査)



○釣りざお型調査装置 (A2'調査)



ペDESTル内側の調査 (3号機)



○水中遊泳型ロボット

3号機 格納容器内調査結果

2. 調査結果

2.3. ペDESTAL内下部



作業員アクセス開口部
180°
プラットフォーム フレーム
撮影エリアC1
撮影エリアC5
撮影エリアC3
撮影エリアC4
撮影エリアC2
90°
0°

撮影エリアC1
<カメラ向き：下方>
堆積物 (小石状)

撮影エリアC2
<カメラ向き：水平>
グレーチング
落下物
堆積物 (砂状)

撮影エリアC3
<カメラ向き：上方>
塊状の堆積物

撮影エリアC4
<カメラ向き：下方>
塊状の堆積物

撮影エリアC5 <カメラ向き：下方>
回転レールブラケット
堆積物
作業員アクセス開口部の方向

■ 砂状、小石状や塊状の堆積物を確認
■ 作業員アクセス開口部は視認できなかった (近傍に堆積物を確認)

株式会社 画像提供：国際廃炉研究開発機構 (IRID) 11

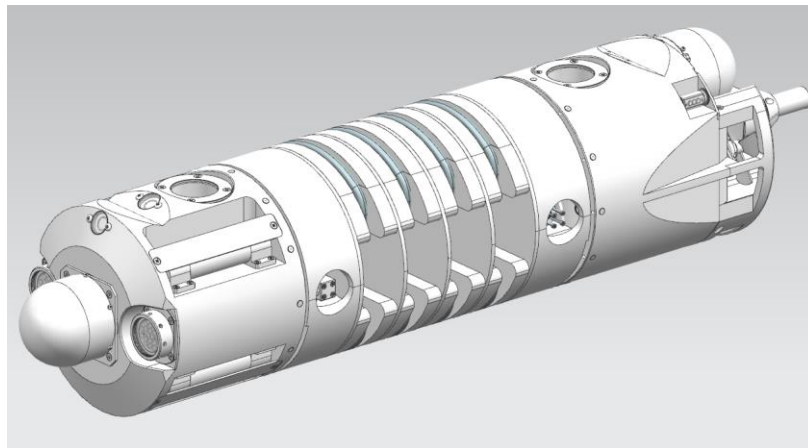
「3号機原子炉格納容器内部調査について(2017年11月30日 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第48回)報告資料)」より抜粋

目 次

1. はじめに
- 2. 原子炉格納容器内部調査技術開発**
 - (1)既に終了した調査
 - (2)今後計画している調査**
3. 燃料デブリ取り出し技術開発

ボート型アクセス装置

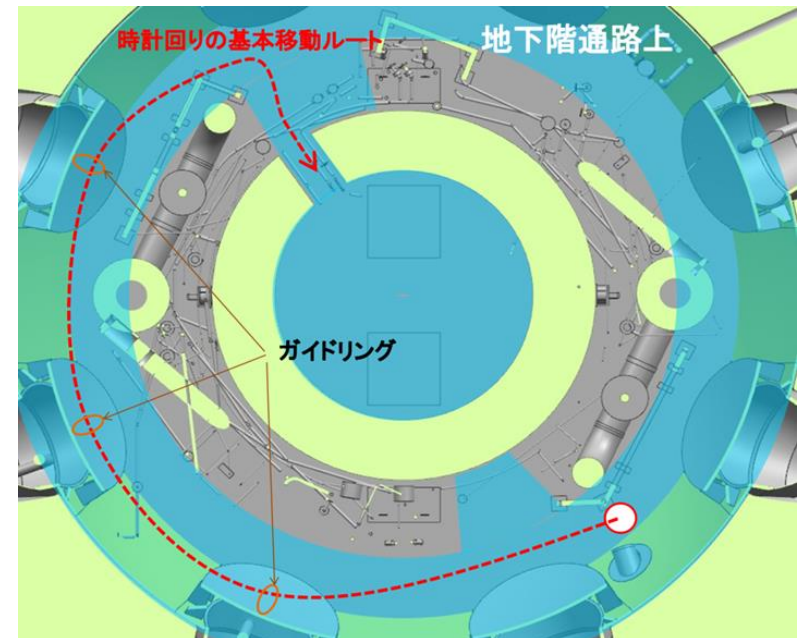
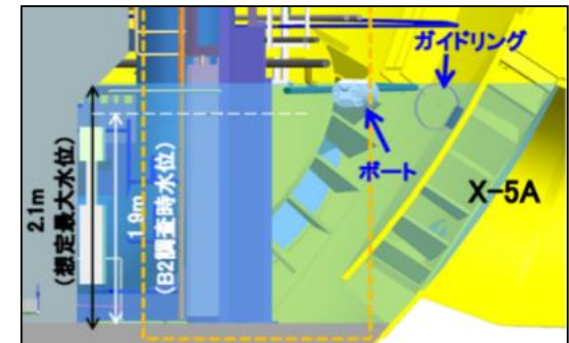
- 格納容器内の水の上を航行して、広範囲に移動可能なボート型アクセス装置を製作中



ガイドリング取付用の例

- 直径: $\phi 25\text{cm}$
- 長さ: 約1.1m
- 推力: 25N以上

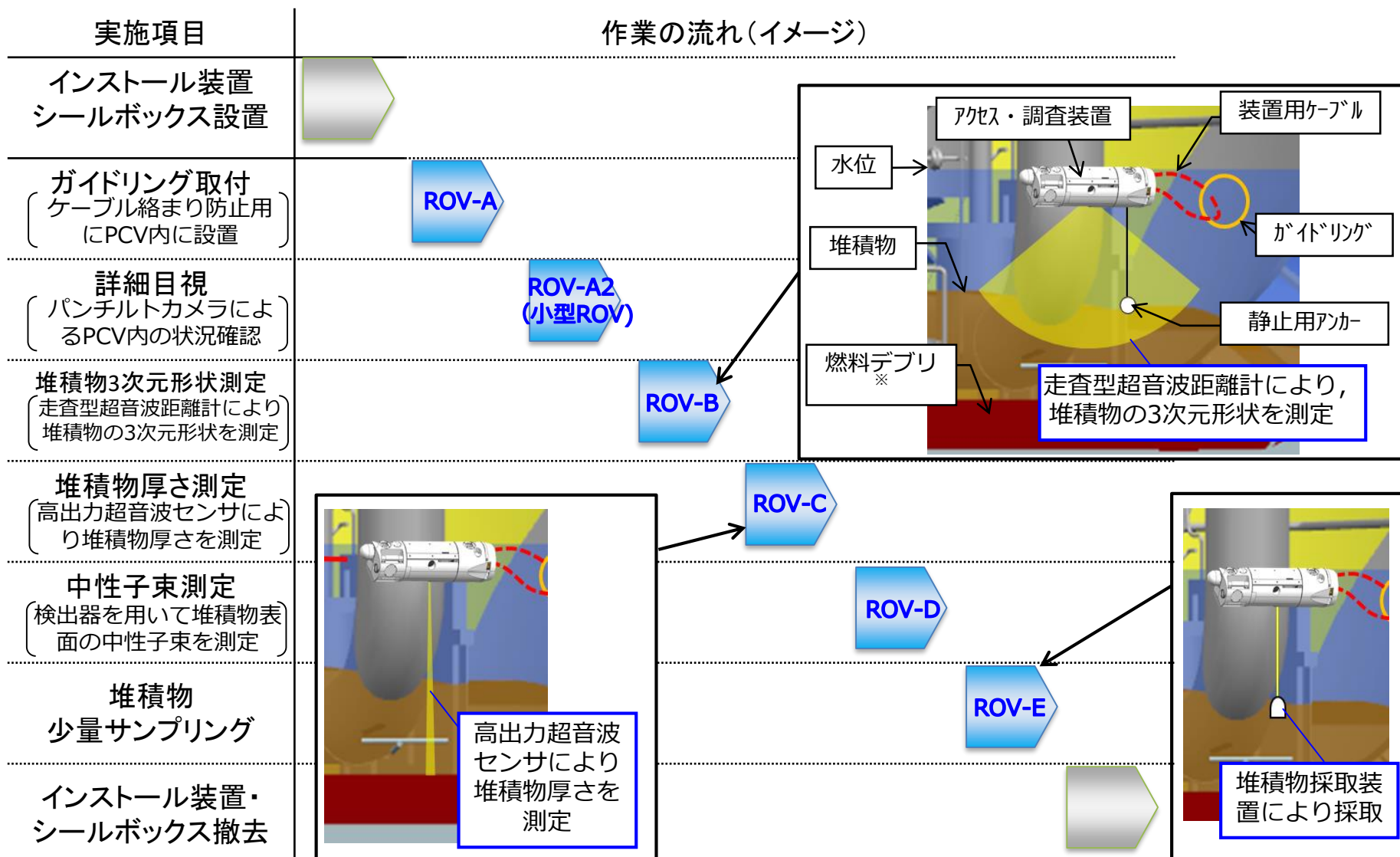
ボート型アクセス装置外観



ボート型アクセス装置の動線

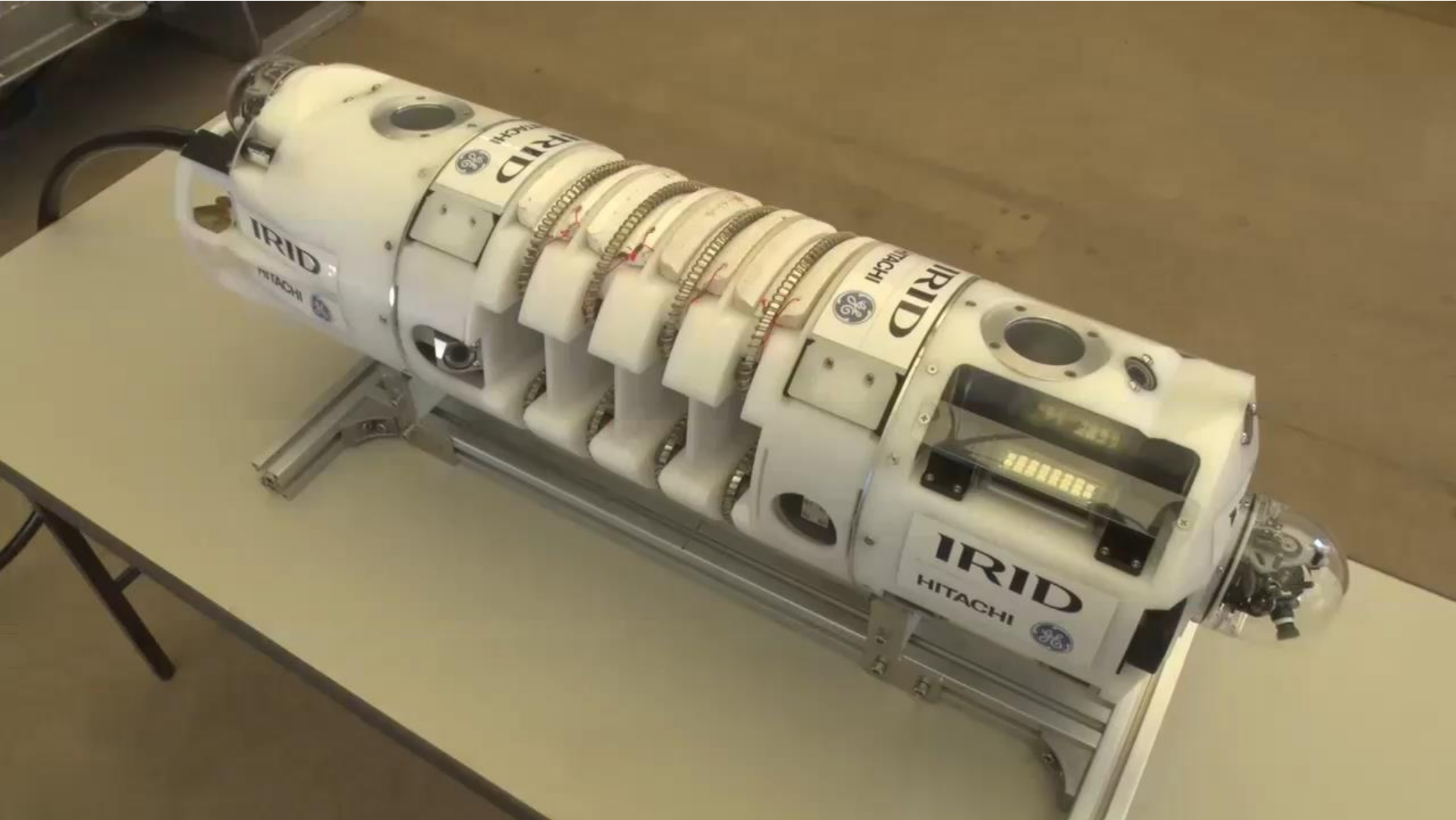
1号機：ボート型アクセス装置(X-2ペネからのPCV内部調査)

■ 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。



※：堆積物の厚さや燃料デブリの有無及び厚さは未知だが、説明のためイメージとして記載

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)



ガイドリング設置状況



PLR配管付近



ペDESTル開口部付近

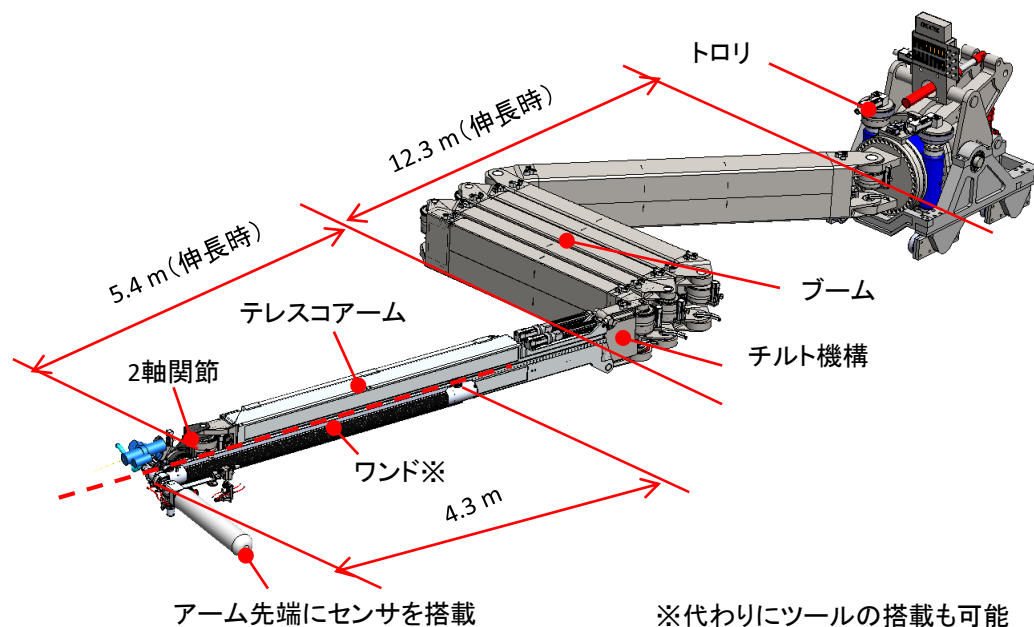


ペDESTル開口部内部

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

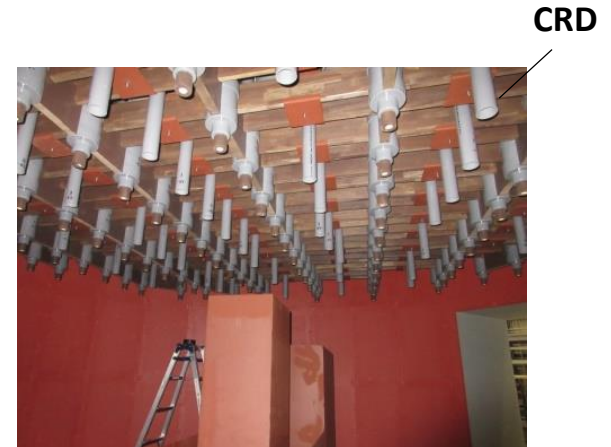
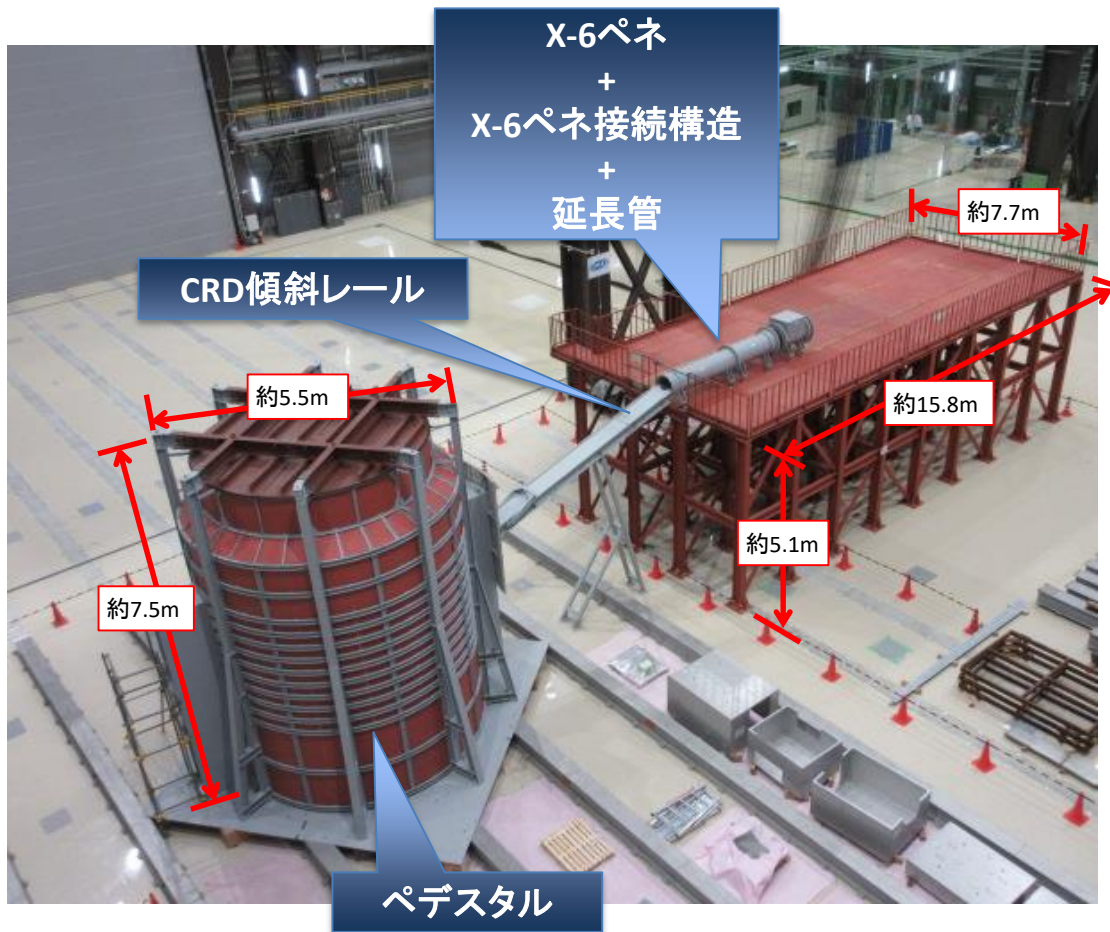


アーム型アクセス装置

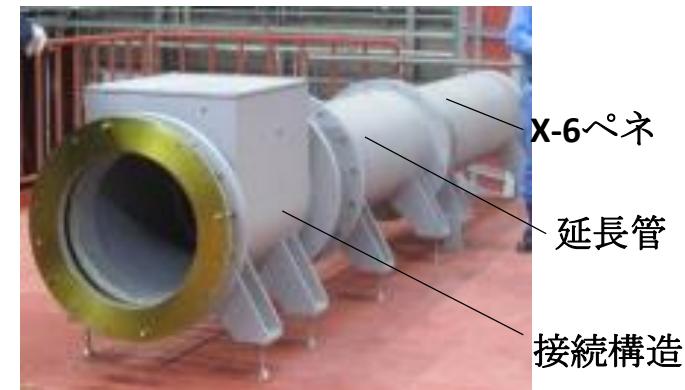
アーム型アクセス装置(動画) Video; Arm access device



モックアップ設備の据付 (JAEA 櫛葉遠隔技術開発センター)



ペDESTAL内部の様子



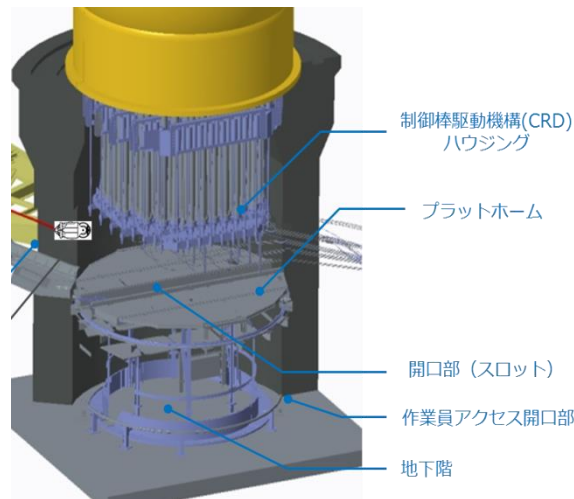
X-6ペネ (接続構造+延長管接続後) の様子

目 次

1. はじめに
2. 原子炉格納容器内部調査技術開発
 - (1)既に終了した調査
 - (2)今後計画している調査
- 3. 燃料デブリ取り出し技術開発**

何を取り出さなければならないのか

- 燃料デブリ, **MCCI** (Molten Core Concrete Interaction, 溶融炉心コンクリート相互作用)
- 炉心燃料域以下 (上部格子板含む) の構造物
- ペDESTAL内構造物
- アクセス・搬出経路の干渉物 等



3号機格納容器内
ペDESTAL内

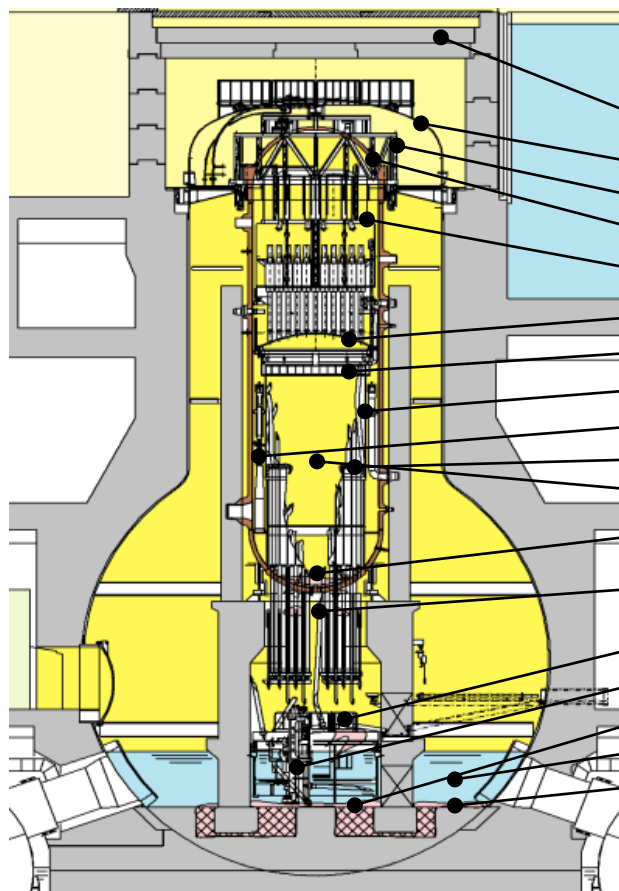


2号機格納容器内底部,
ペDESTAL内 内壁付近

TOSHIBA PITCH -011 TILT -073

燃料デブリ取り出し作業の排出物想定

- 燃料デブリ（扱い）として取り出す量の想定：数百トン
- 構造材と溶融凝固した燃料の分離・分別は可能か（当座、燃料デブリ扱い）
- アクセス（搬出）経路に介在する構造物の解体撤去（廃棄物）

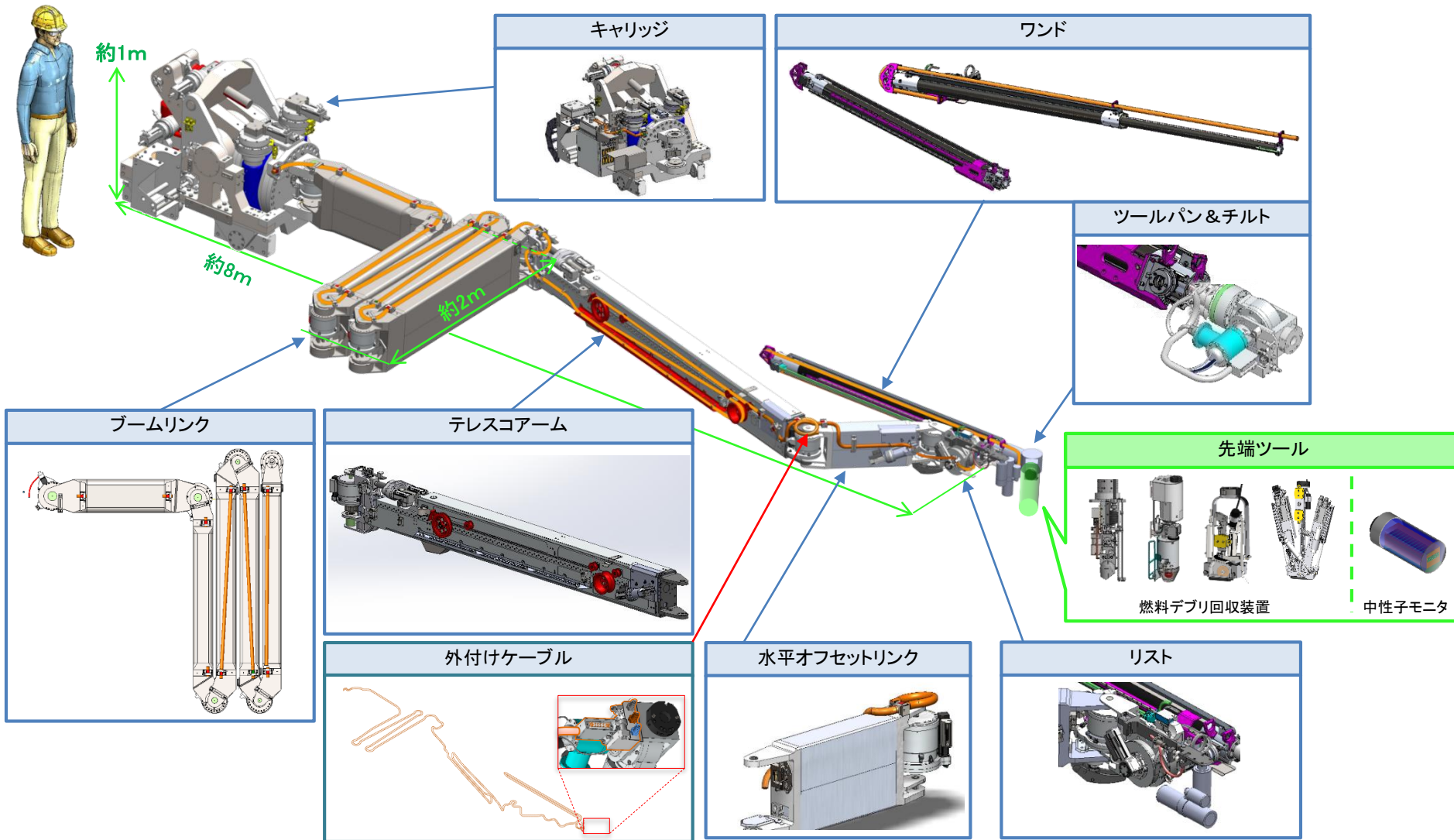


排出物の想定・分類例

No.	排出物	分類
1	シールドプラグ	廃棄物
2	PCVヘッド	廃棄物
3	RPV保温材	廃棄物
4	RPVヘッド	廃棄物
5	蒸気乾燥器	廃棄物
6	シュラウドヘッド	廃棄物
7	上部格子板	燃料デブリ
8	シュラウド	燃料デブリ
9	ジェットポンプ	燃料デブリ
-	炉心支持板	燃料デブリ
10	炉心部燃料デブリ	燃料デブリ
11	RPV底部燃料デブリ	燃料デブリ
12	RPV下部/CRDハウジングに付着した燃料デブリ	燃料デブリ
13	ペDESTAL内部構造物	燃料デブリ
14	CRD交換機	燃料デブリ
15	ペDESTAL内部燃料デブリ	燃料デブリ
16	ペDESTAL外部構造物	廃棄物
17	ペDESTAL外部燃料デブリ	燃料デブリ

燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し Increasing the scale of retrieval

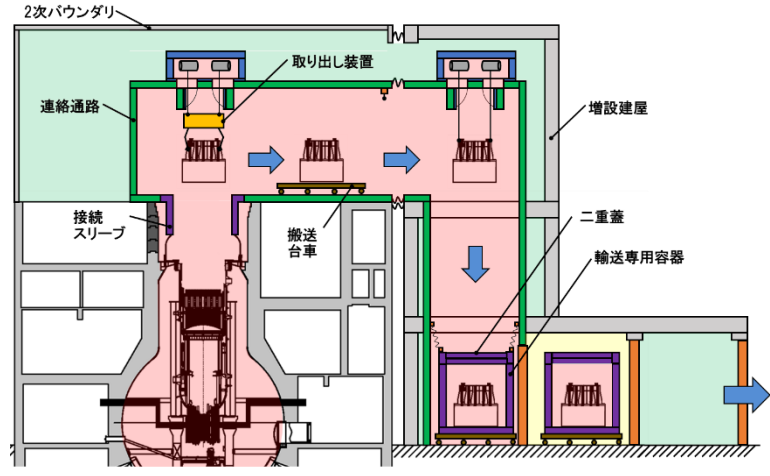
Advanced arm system , heavier loads, various tools and sensors



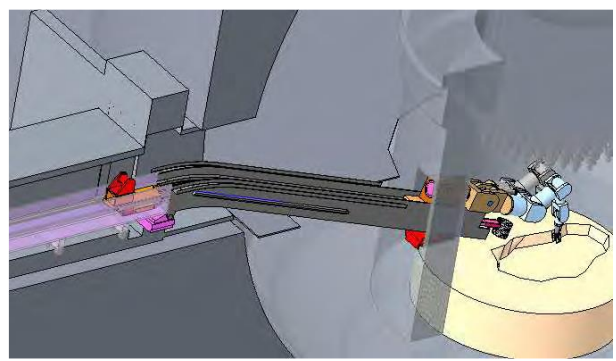
大規模燃料デブリ取り出し技術の開発

取り出し規模の更なる拡大
大型設備を導入し本格的な作業を実施。

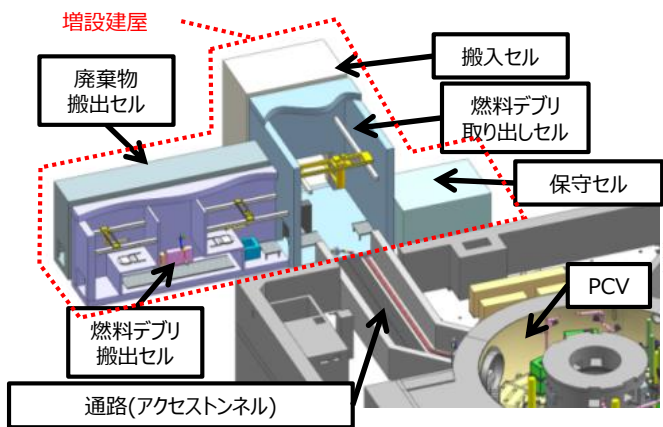
- 横取り出し3工法、上取り出し2工法を開発中
- デブリ取り扱い量は徐々に増加させ、最大300kg/日を目指す
- NDFは3号機（横取り出し）を先行的検討号機とすることが適切と評価
- 規模を拡大したデブリ取り出しまでに獲得した技術・ノウハウ・組織体制、経験・教訓が設計、調達、建設、運用に活用されることを期待。



構造物一括撤去・搬出



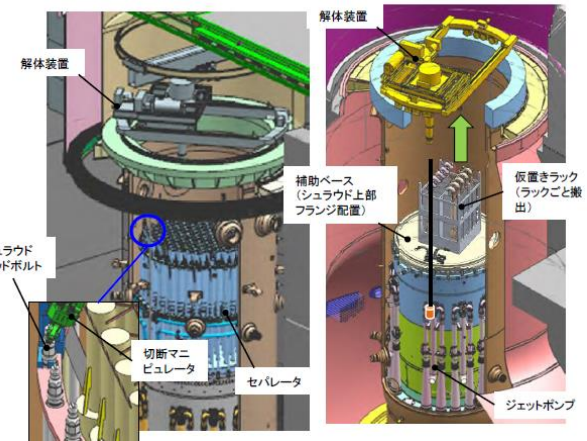
アクセスレール方式



アクセストンネル方式

セパレータ取り出し概念

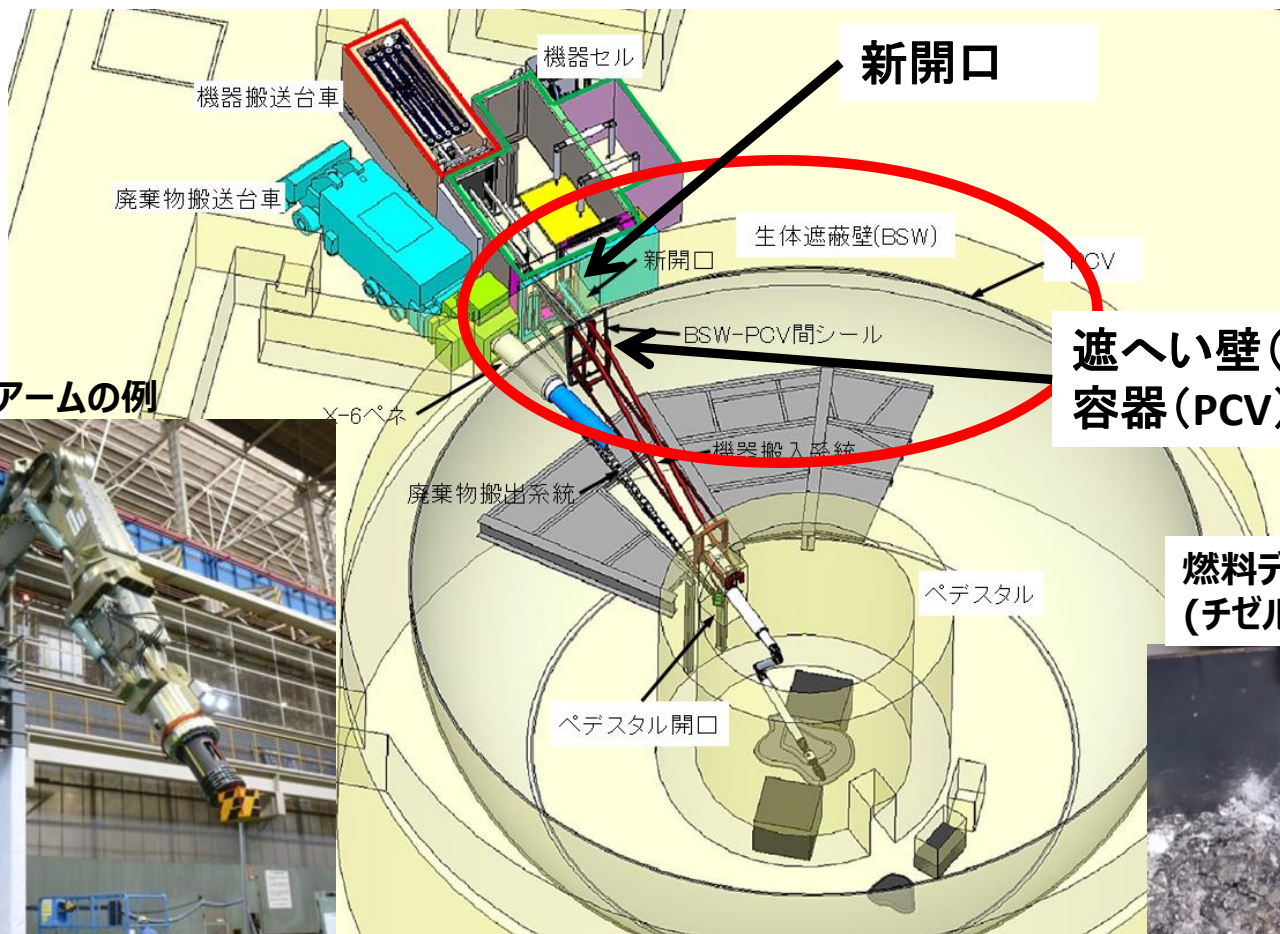
ジェットポンプ取り出し概念



炉内構造物撤去工法の開発

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



開発中のロボットアームの例



遮へい壁 (BSW) - 格納容器 (PCV) 間シール

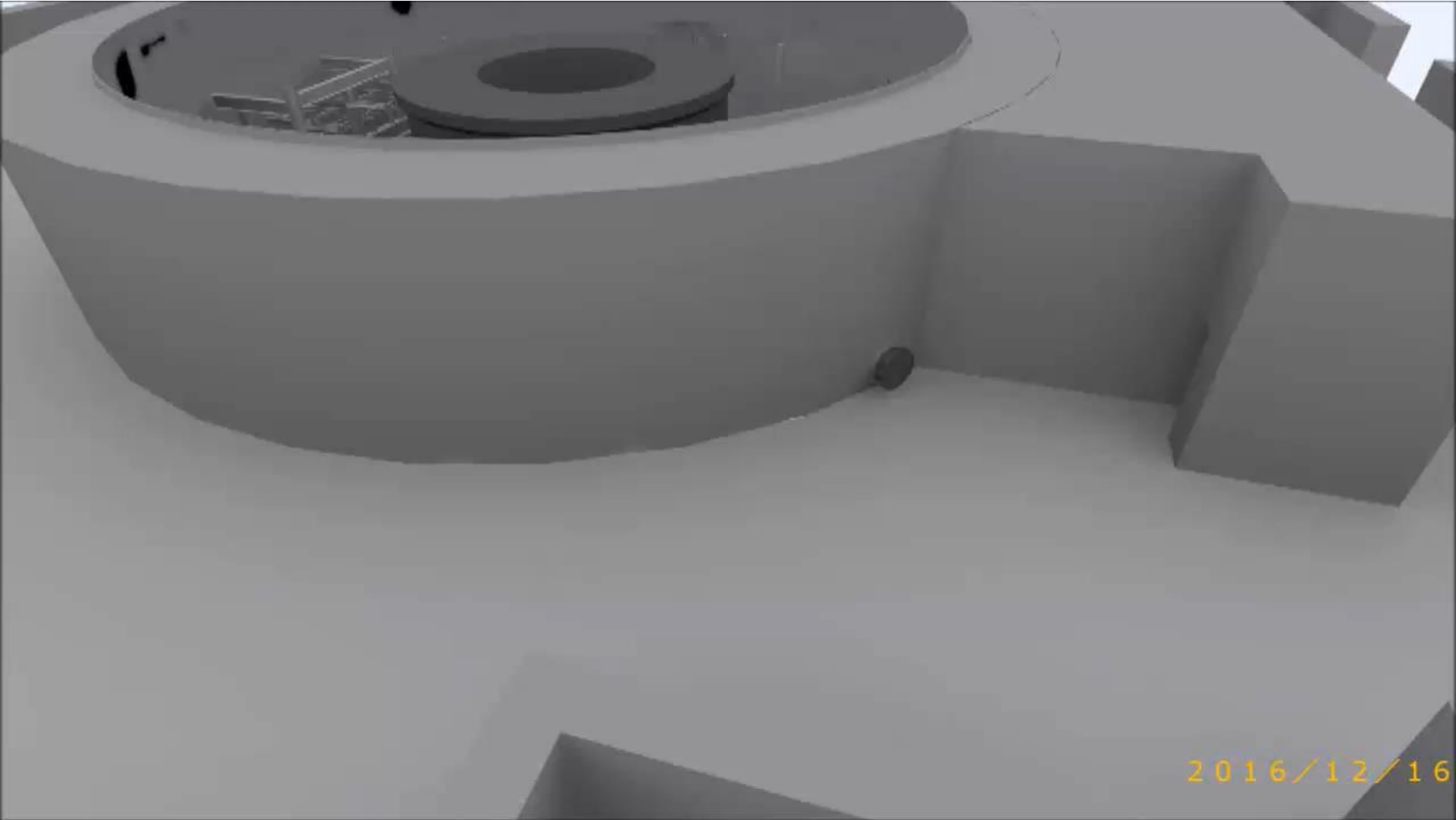
燃料デブリ切断技術の例 (チゼル)



横アクセス工法の一例 イメージ

穴開け～シール設置 取り出し工法への適用イメージ

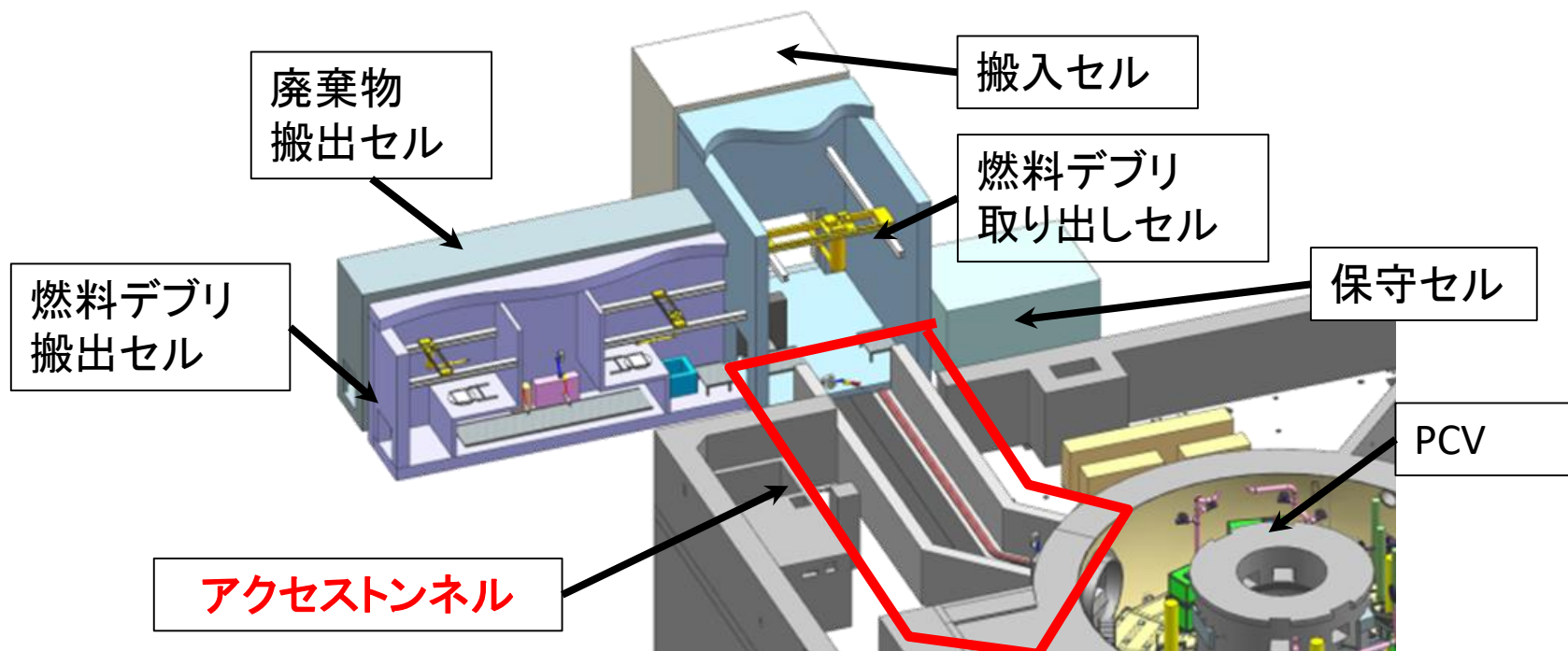
Example of Horizontal Access Route/ Debris Retrieval



2016/12/16

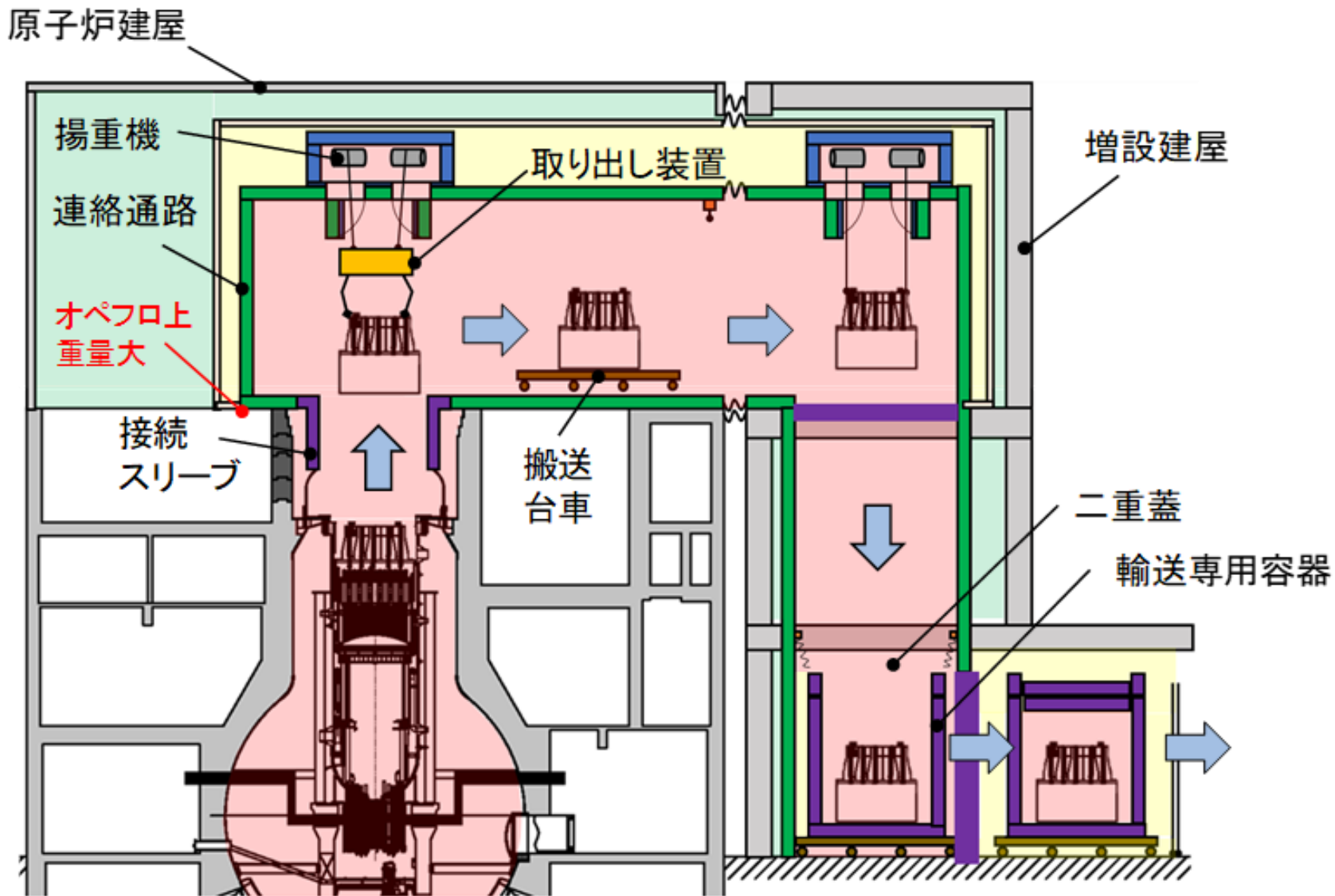
【横アクセス工法】トンネル施工技術

- 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 Top Entry/access :large structure retrieval



燃料デブリの取り出し 安全要求

放射性物質の閉じ込め

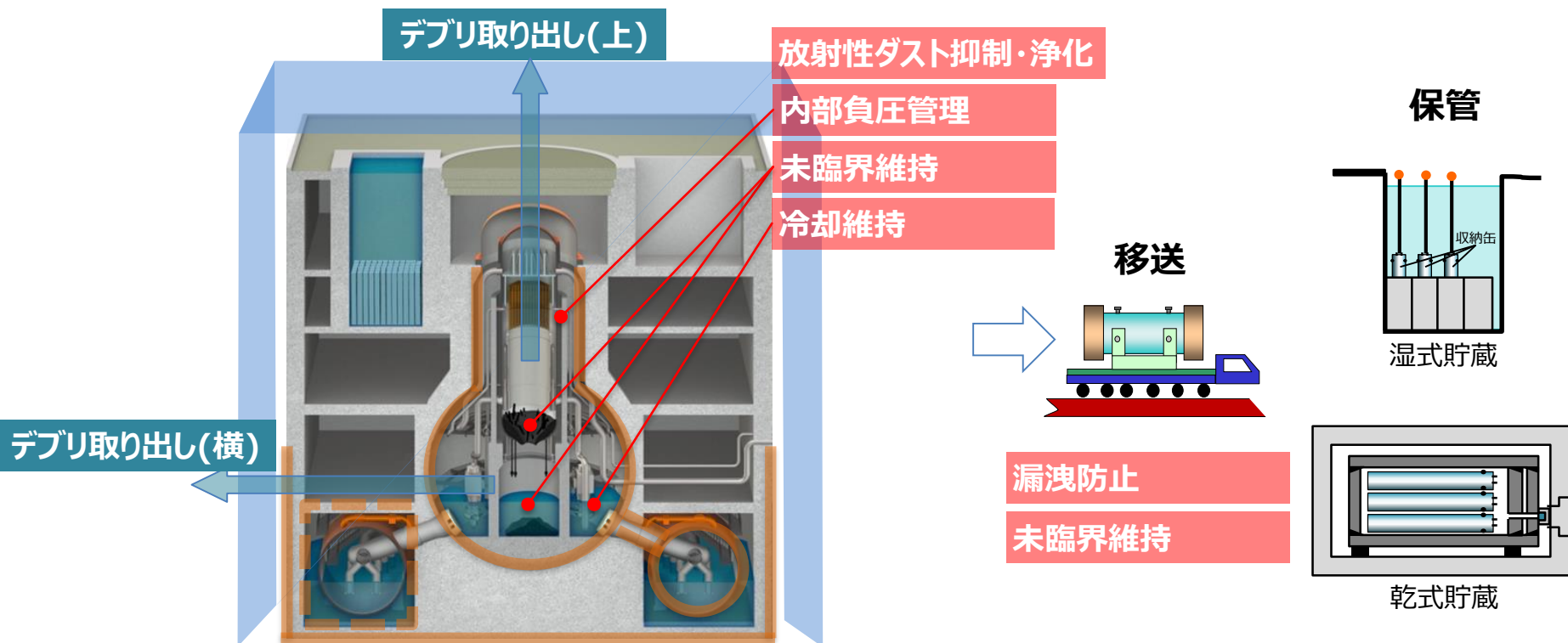
- 気体中／液体中の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止
- 移送容器による放射性物質の漏洩防止

放射性物質の追加生成の防止

- 核反応による異常な放射性物質の生成防止
- 燃料デブリの異常な温度上昇による放出防止
- 燃料デブリ、構造物の切削による異常な拡散の防止

一般要求等

- 火災・爆発の防止
- 状態監視・モニタリング

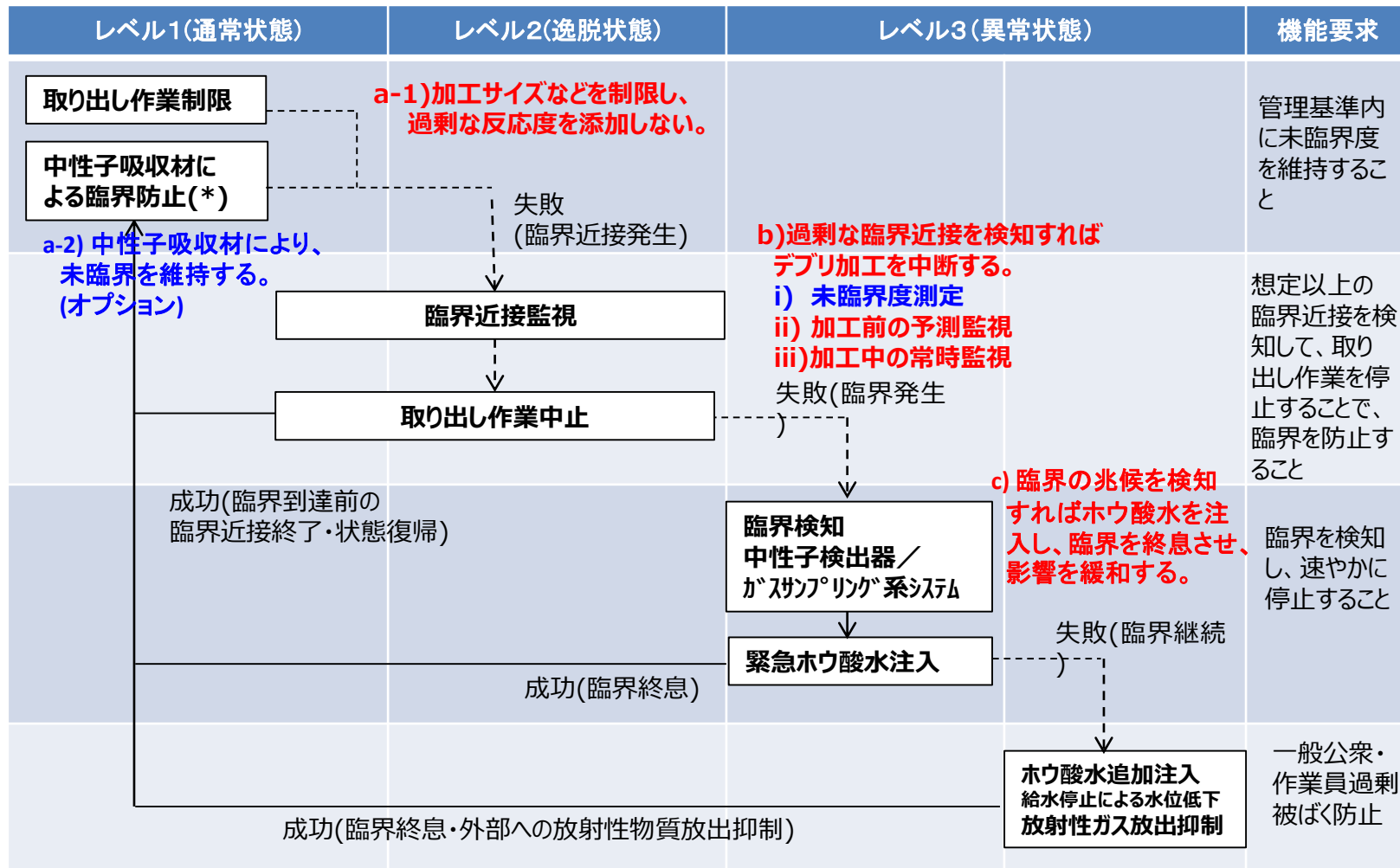


臨界管理（デブリ取り出し作業時の未臨界維持）

段階的取り出し時の臨界管理方法

(参考)大規模取り出し時の臨界管理方法

青字は、大規模取り出し時から追加されるもの



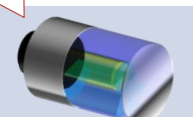
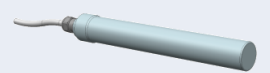
* 吸収材（溶解性/非溶解性）はオプション

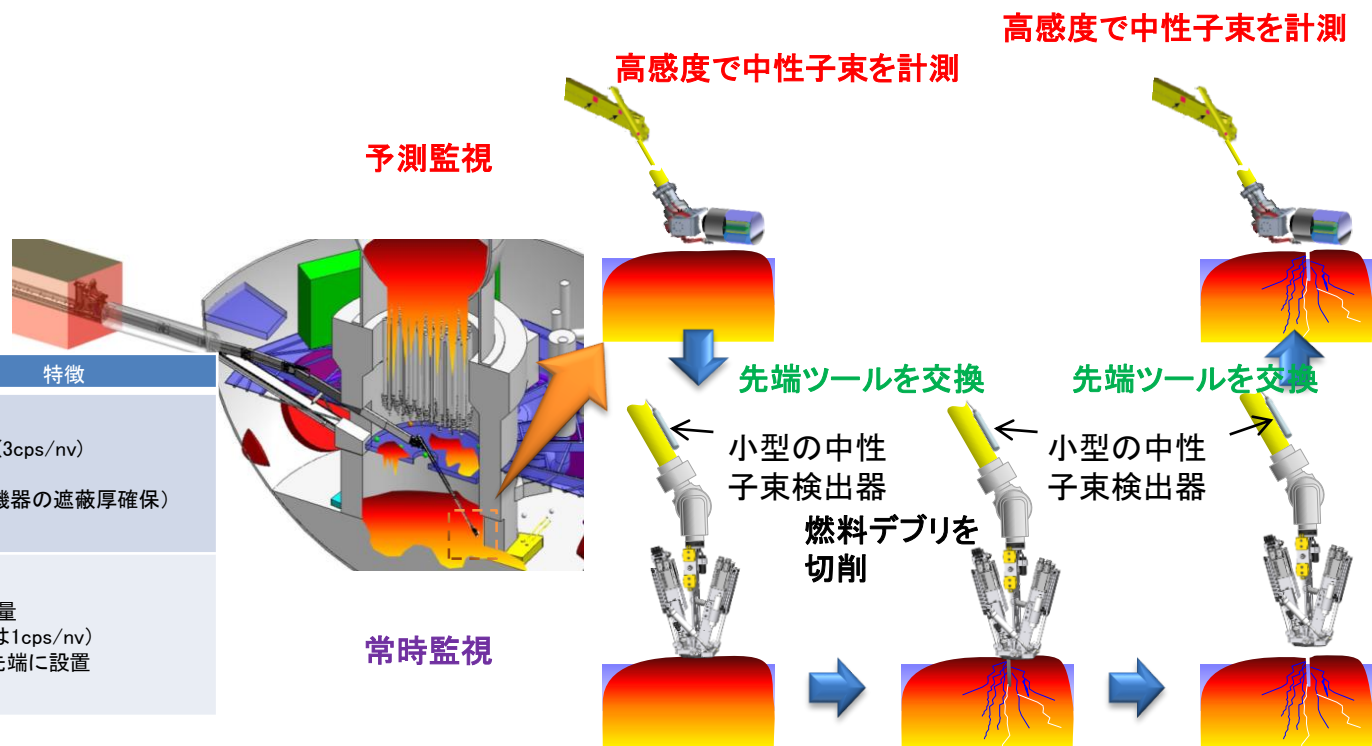
臨界管理（デブリ取り出し作業時の未臨界維持）

デブリ取り出し作業時の未臨界度確認シナリオ例

- ✓ 円柱状燃料デブリなどの燃料デブリ切削時における臨界安全を確保するため、予測監視と常時監視の組合せによる中性子監視の方法を検討。感度要求を予測監視3cps/nv, 常時監視1cps/nvに設定した。
- ✓ 常時監視向けの小型SiC半導体型検出器による中性子モニタを検討した。直径30mm×長さ300mmで感度1cps/nvを達成できる見通しを得た。

PCV内部詳細調査用の中性子検出器と異なり、コリメータが臨界監視用に最適化される。

	装置概念	特徴
予測監視	 Φ140 × 500mmL, 20kg以下	・高感度(3cps/nv) ・長寿命 （電子機器の遮蔽厚確保）
常時監視	 Φ30 × 300mmL, 300~1000g	・小型軽量 （感度は1cps/nv） ・ワンド先端に設置



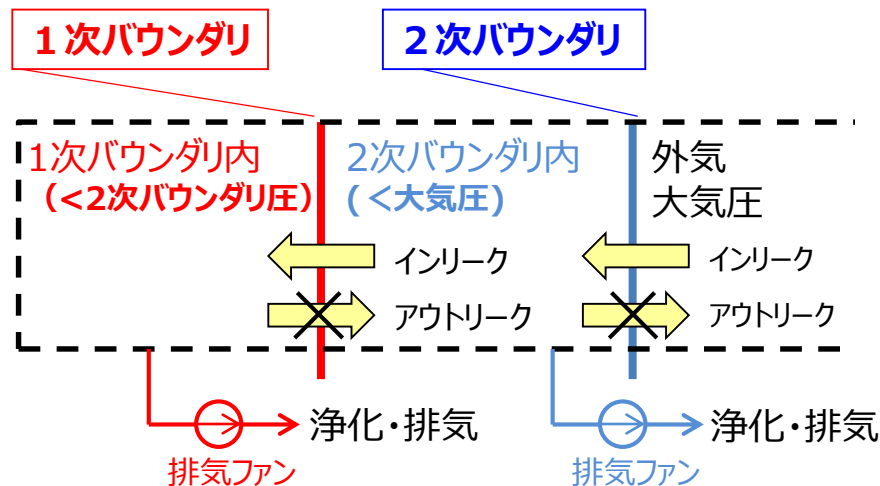
【今後の計画】

- ✓ 次年度も引き続き、関連PJの進捗や現地の状況を反映しながらシナリオを更新する。

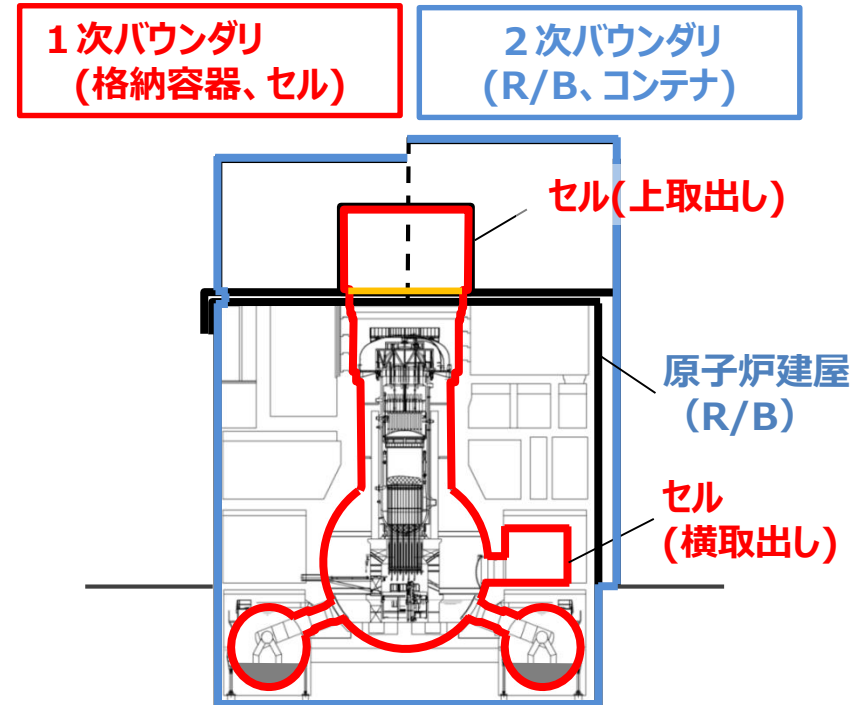
気相バウンダリ再構築

動的バウンダリによる 発生した放射性ダストの閉じ込め

- PCV損傷部の補修を可能な範囲で実施
- 排気ファンによりPCV及びR/B内の圧力を負圧に維持
- 負圧維持（作業中常時）
- 多重化（1次/2次バウンダリ）の検討
- 排気の浄化



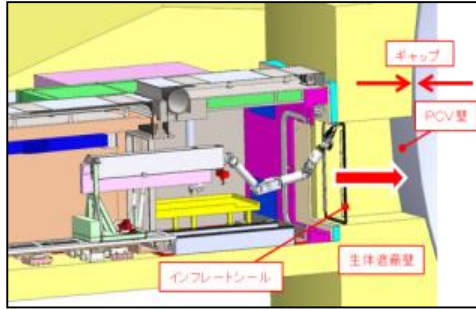
負圧勾配システムの検討



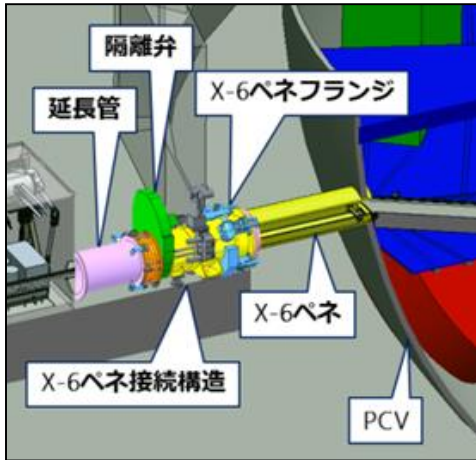
気相バウンダリのイメージ

気相バウンダリ再構築

PCV開口部削減・シール： ・新規開口と漏えい抑制



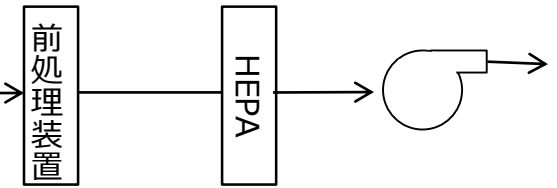
新規開口／作業セルシール方法
(インフレートシールの場合)



X-6貫通部接続構造

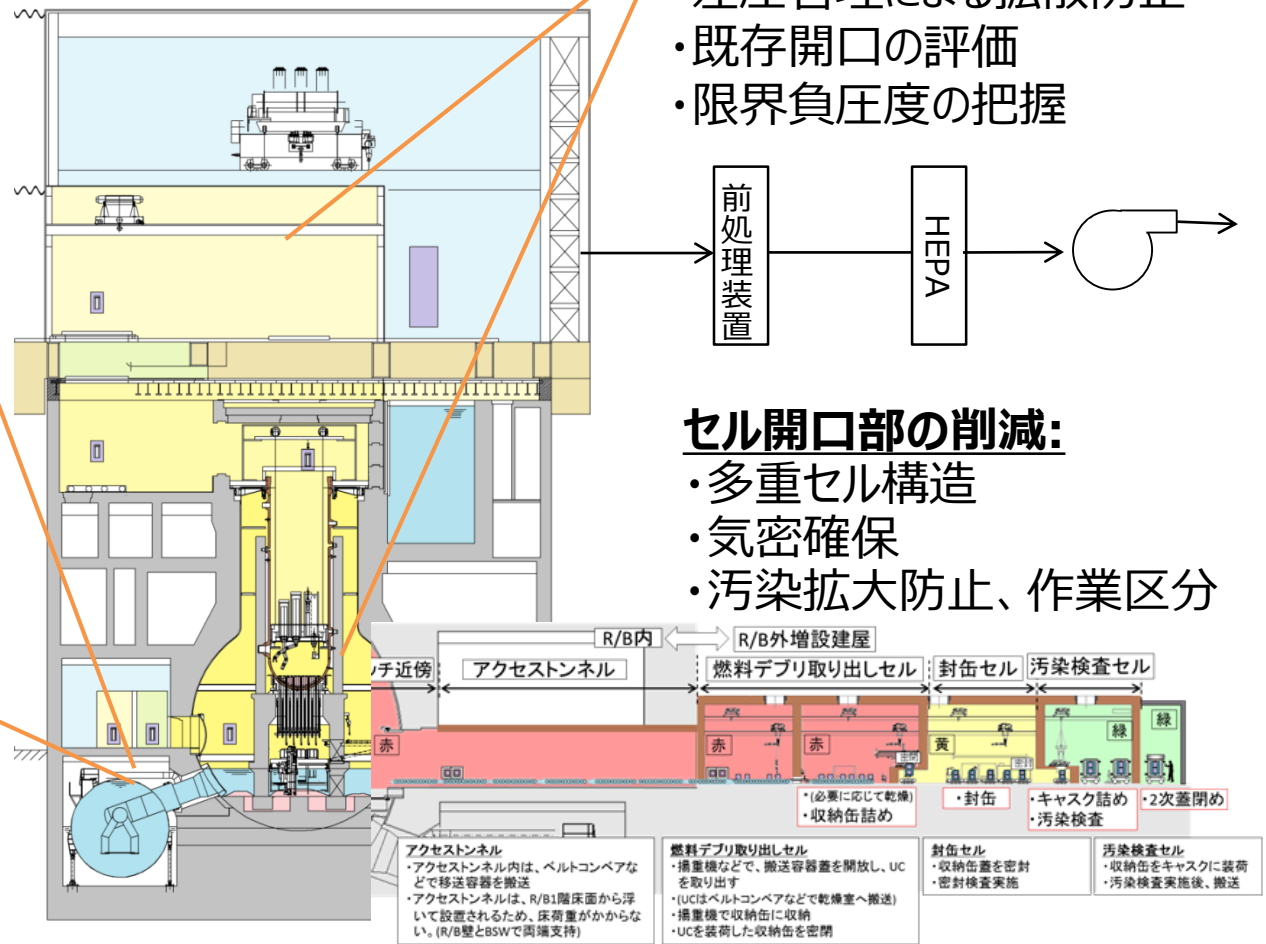
空調系による負圧維持：

- ・差圧管理による拡散防止
- ・既存開口の評価
- ・限界負圧度の把握



セル開口部の削減：

- ・多重セル構造
- ・気密確保
- ・汚染拡大防止、作業区分



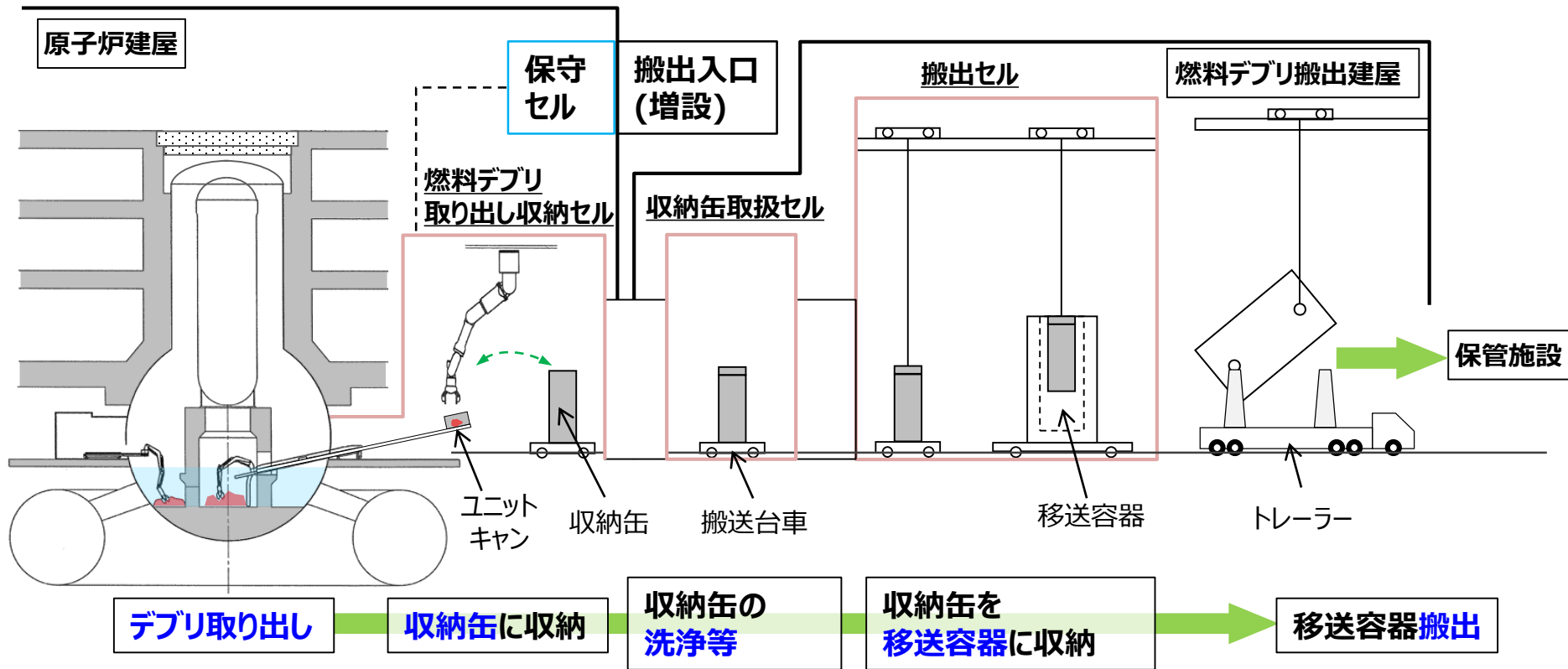
デブリ取出し／機器搬入・デブリ搬出経路

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）



End of presentation