

研究成果報告

IRIDの研究開発の状況

令和元年 8月1日

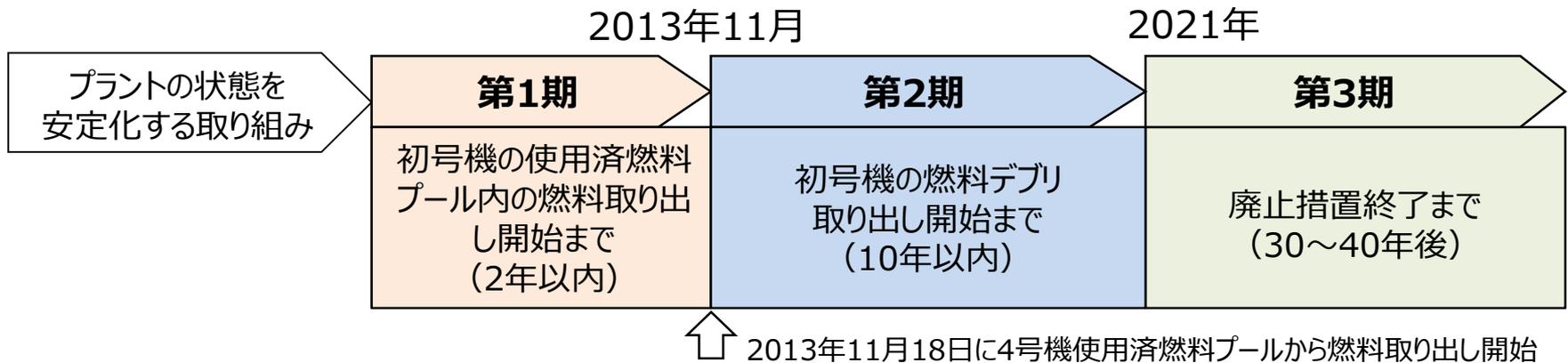
国際廃炉研究開発機構 (IRID)
高守 謙郎

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

燃料デブリ取り出しへの期待

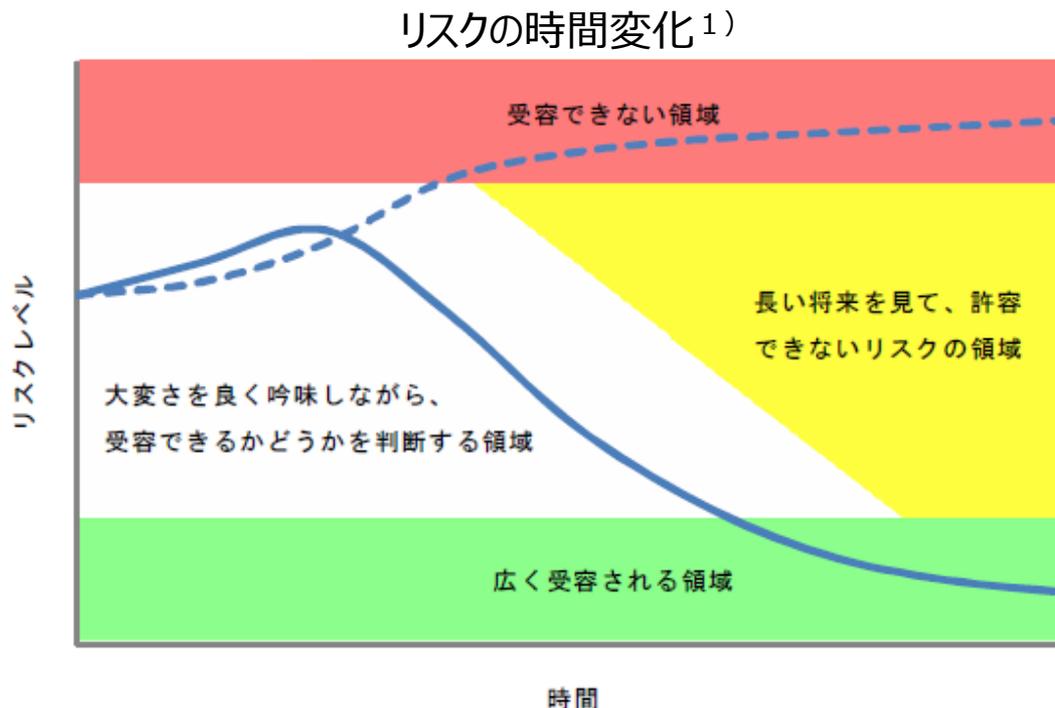
- 「福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」¹⁾
燃料デブリ取り出しから廃止措置終了までの実行期間を30~40年程度
- NDF戦略プラン²⁾
暫定措置により一定の安定状態を維持している状況にあり、このような状況を**抜本的に改善**して、より安定的な状態に持ち込む
安全かつ速やかに取り出す：**安全、確実、合理的、迅速、現場指向**
- 措置を講ずべき事項³⁾
溶融した燃料の取り出し・保管を含む廃止措置をできるだけ早期に完了、特定原子力施設全体のリスクの低減と最適化，廃炉に向けたプロセスの安全性の確保・・・



1) 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議，東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ
2) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構，東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2017
3) 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所に設置される特定原子力施設に対する「措置を講ずべき事項」

安全かつ速やかに

- 燃料デブリ取り出し作業によって一時的に増加するリスクが受容範囲内：
安全要求事項とその達成
- 最新の原子力安全基準に沿って建設された施設に貯蔵できるまでの時間：
例えば、スループット



(略) リスク低減措置を実施する場合には、リスクレベルが一時的に増加する可能性があるものの、周到な準備と万全の管理によって、受容できない領域に入らないようにすることが可能である。このように、受容又は許容できない領域に入ることなく、リスクレベルを十分に下げることを目指すべきである(実線)。 M. Weightman, "The Regulation of Decommissioning and Associated Waste Management" 第1回福島廃炉国際フォーラム(2016年4月)。

[ref. 1) 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2017]

燃料デブリ取出しに必要な技術開発の例

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

5. デブリを取り出す

4. PCV水位の制御

3. PCVからの漏えいを止める

1. 建屋内の線量を下げる

2. デブリの状態を知る

3,4. 漏えいを止め、循環冷却を確立する

- PCV補修・止水技術の開発
- PCV補修・止水実規模試験

5. デブリを安全に取り出す

- 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、安全に保管する

- デブリ収納・移送・保管技術の開発

バックグラウンド:遠隔作業への期待

<廃炉措置>

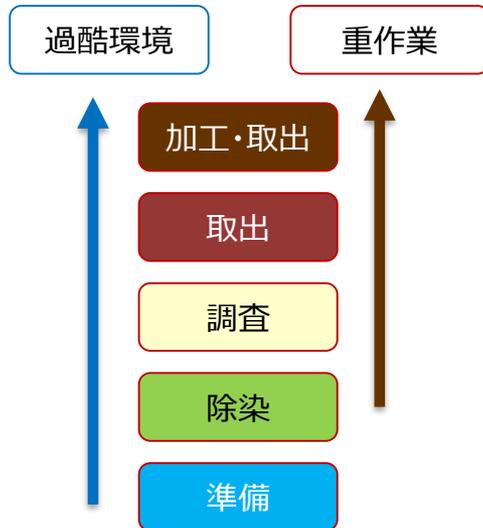
- 人が近づけない高放射線環境
- 安全最優先で着実な調査や作業

<技術のポイント>

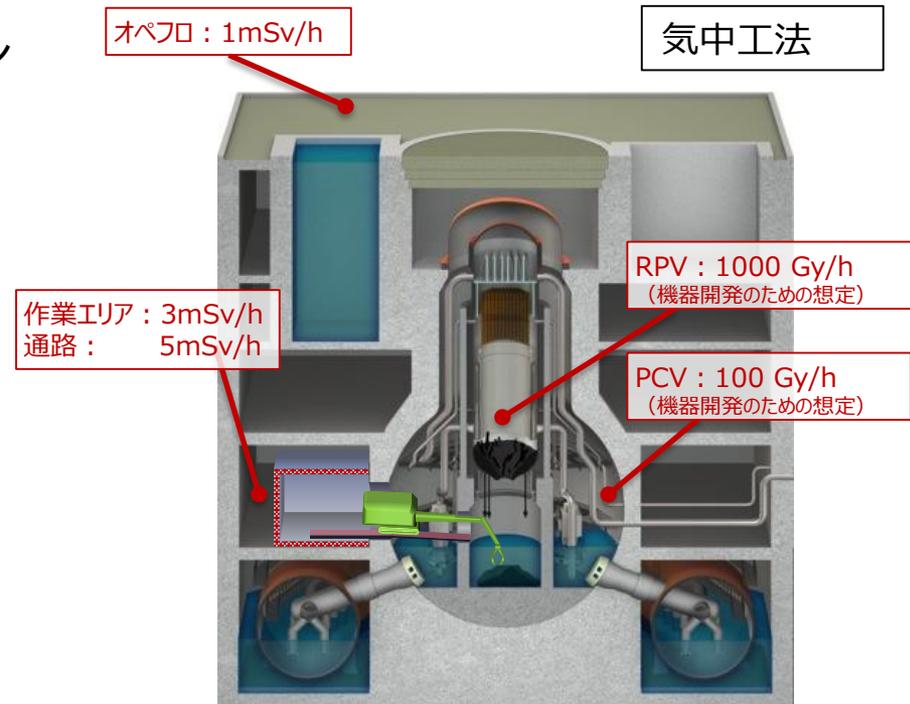
- 高線量率環境への対応
- バウンダリの確保
- ケーブルマネジメント, オペレーション
- 作業速度

<課題の難しさ>

- 実際の内部状況が不明で手探りの状況
- アクセスできる空間や使えるリソースの制約
- あらゆる事態を想定した対処の検討
- 進捗状況によって廃炉措置全体の構想の変化

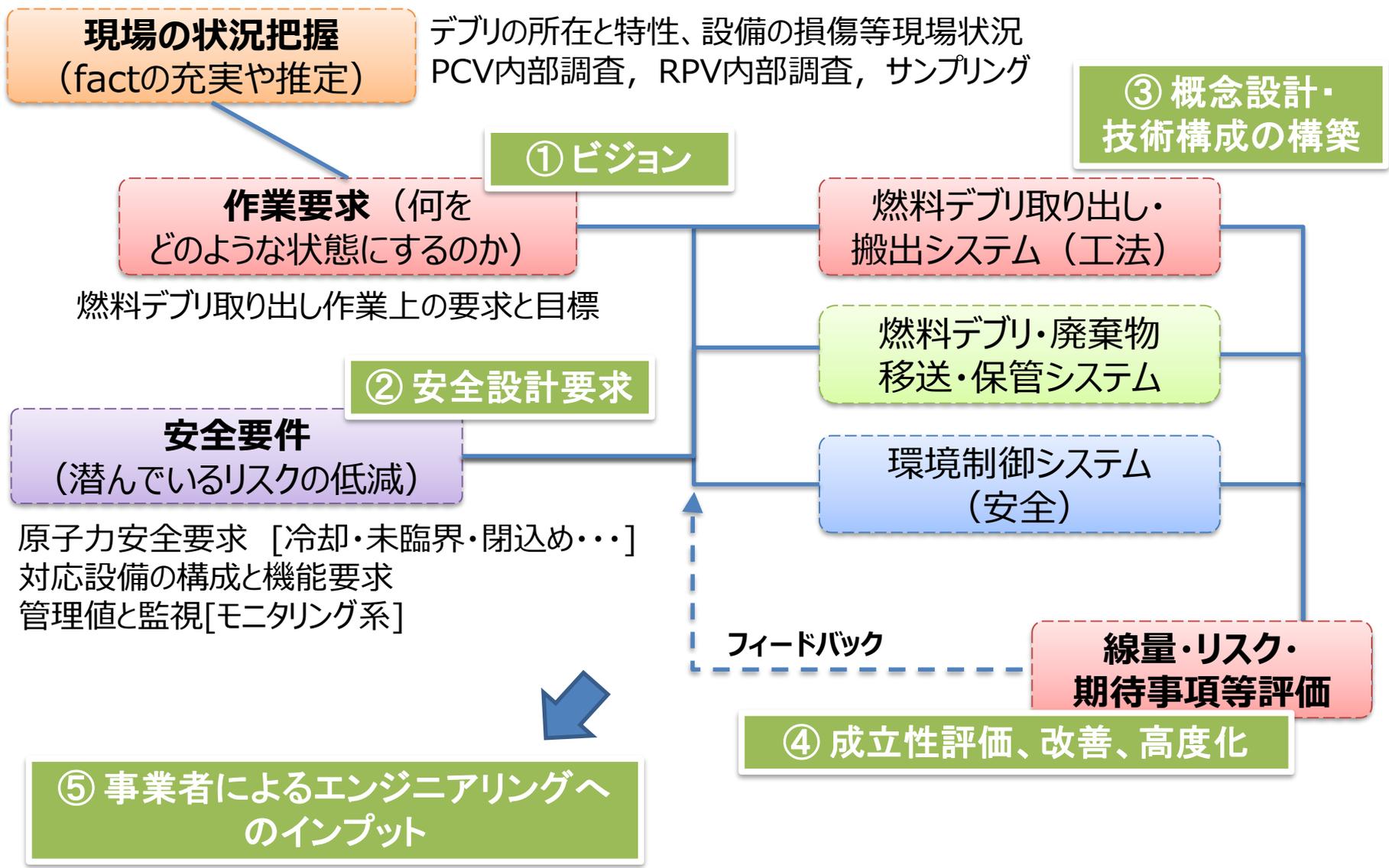


遠隔作業への期待



作業環境の推定

設計プロセスフロー 概要



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

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

燃料デブリ・
炉内構造物取出
臨界管理
技術

2019.3終了

燃料デブリ・
炉内構造物取出
基盤技術

2019.3終了

<デブリ取り出し>

燃料デブリ・
炉内構造物取出
基盤技術
**小型中性子
検出器**

2018.9終了

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

2019.3終了

PCV詳細調査
X-6th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

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

燃料デブリ・
炉内構造物
取出技術
開発

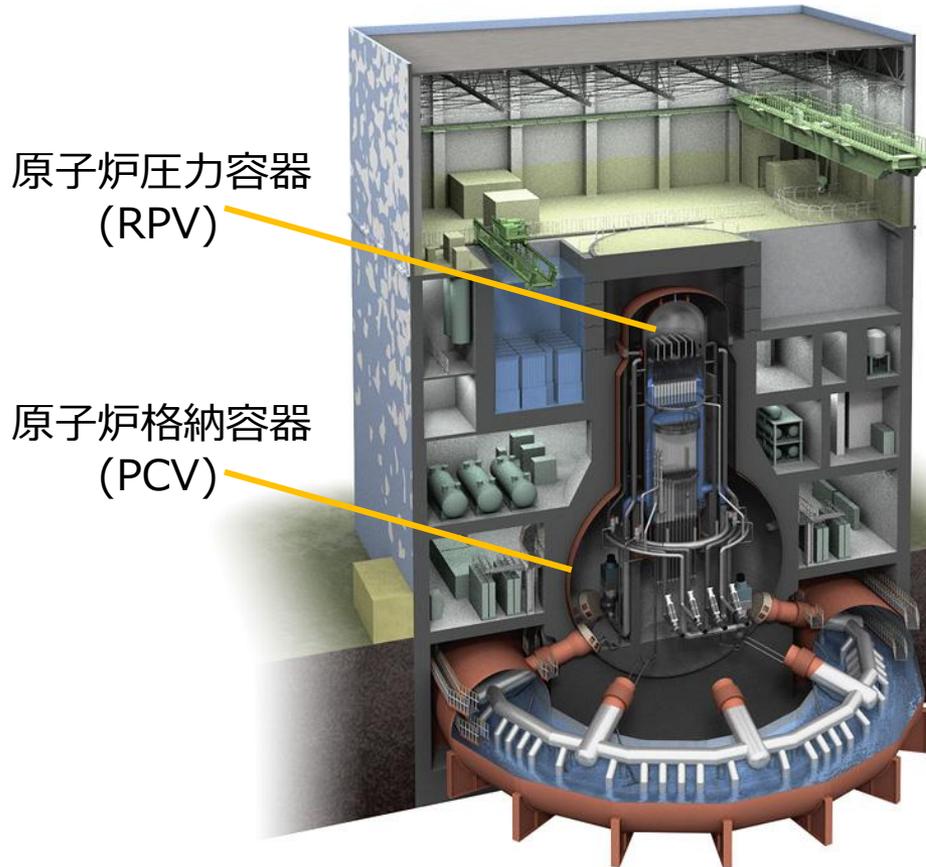
燃料デブリ・
炉内構造物取出
ダスト集塵
システム

燃料デブリ
収納・移送
・**保管**技術

原子炉格納容器（PCV）内部調査の 実績と開発中の技術

燃料デブリの調査, Factの充実

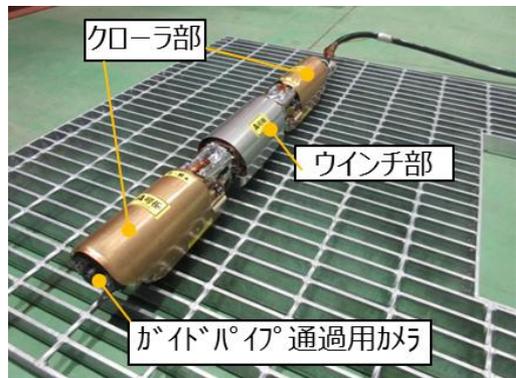
- 燃料デブリ取出しの設計を支援する情報の収集
安全設計、アクセス・搬出経路、切削・回収・移送技術構成の検討を支援
- 燃料デブリの所在、構造物の損傷状況、干渉物や作業空間・環境



- 格納容器内部調査
 - ✓ 映像、線量率
 - ✓ デブリの特定、分布・堆積状態
- デブリサンプリング
 - ✓ 核燃料・吸収材濃度
 - ✓ 切削、飛散特性
 - ✓ 放射能濃度、線量率
- 原子炉圧力容器内部調査
格納容器内部調査と同じ

原子炉格納容器内部のロボット等による調査

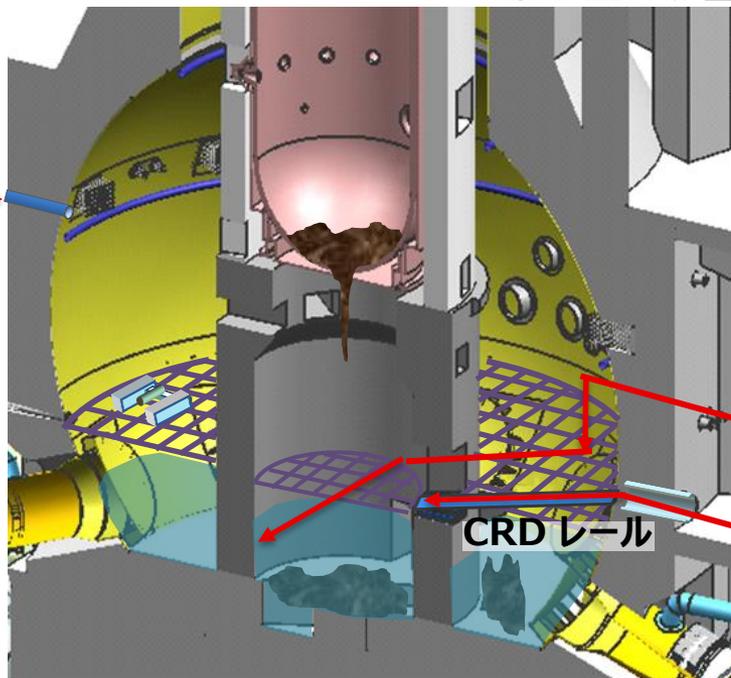
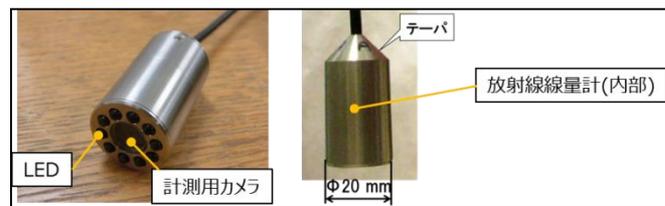
ペDESTル外側の調査（1号機）



I型(ガイドパイプ通過時)



II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）

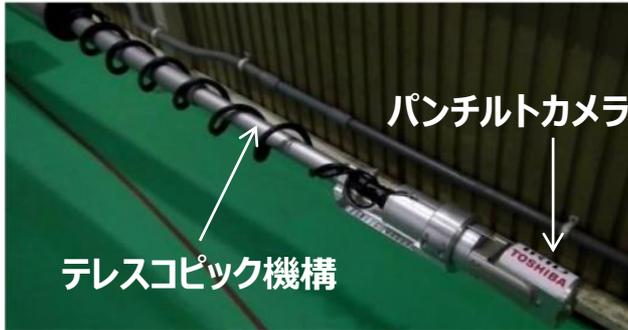


ペDESTル内側の調査（3号機）



○水中遊泳型ロボット

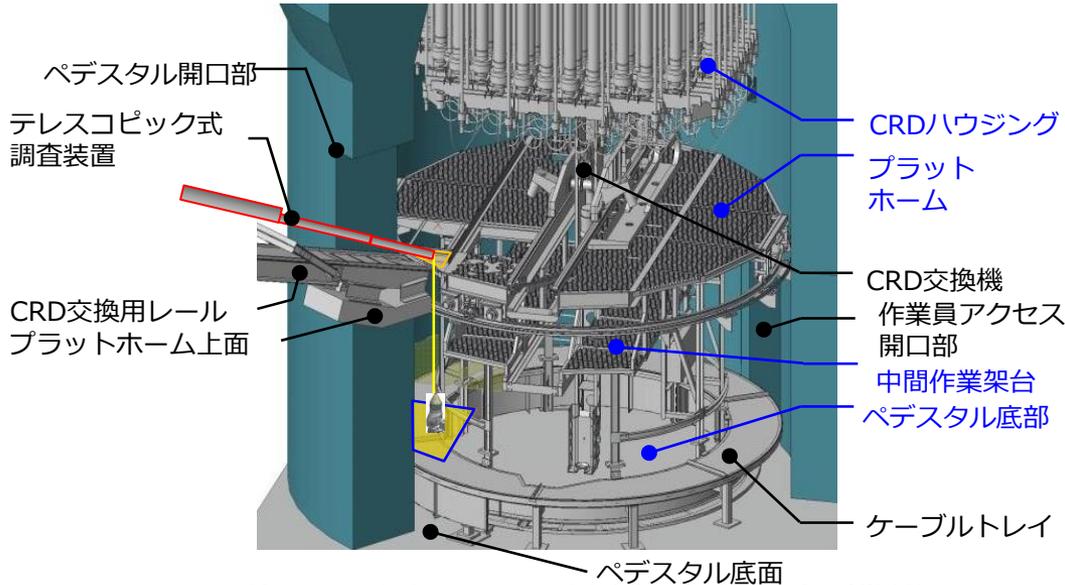
これまでの調査結果：2号機



テレスコピック機構付きパンチルトカメラ



ペDESTAL内 上部 (画像処理後)



釣り下げ式カメラ, 接触 (つかみ) 機構

- ・ペDESTAL内部の損傷状況と堆積物を確認。
- ・ペDESTAL下部での堆積物及びその可動性を調査。

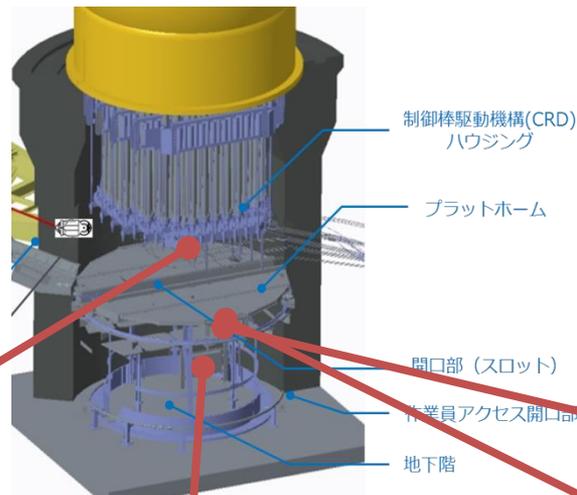


ペDESTAL内 下部



堆積物接触中

これまでの調査結果：3号機



水中ROV



No.16



No.17



No.18



No.19

- ・水中ROVを格納容器内部に投入し、ペDESTアル内部を調査。
- ・ペDESTアル下部や、ペDESTアル内構造物上に溶融物固化物を確認。

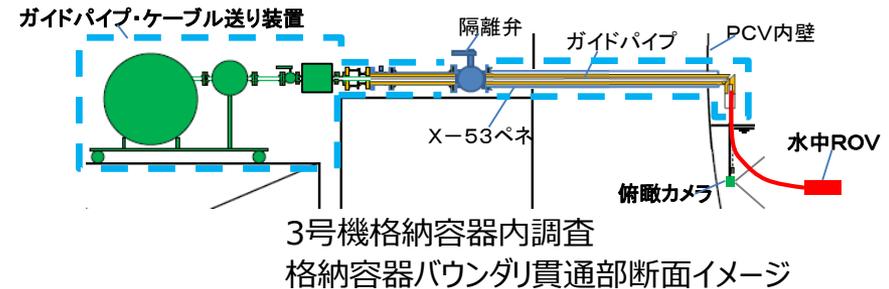
遠隔作業設計／検討要件のふりかえり（高度化の方向性）

■バウンダリ boundary

- 汚染拡大防止：隔離機能：隔離弁、シール機能
- 機器の出入、採取物・撤去物の搬出

■ロボット robot, carrier

- 到達範囲とサイズ
- ペイロード、測定機器、作業機器
 - 精度 precision
 - ・ 自己位置、移動先位置決め、振動、作業精度
 - 運転 operation
 - ・ 操作／操作支援、視野、照明、所要時間、回収
 - ・ 訓練、モックアップ
 - ケーブル cable management
 - ・ 重量、比重、可撓性、巻取り／放出
 - ・ 動力、通信（距離制限）、ノイズ



3号機格納容器内調査の様子
（後方カメラ視界）

■耐放射線性 radiation proof

- 放射線劣化（累積線量）：半導体機器劣化、シール劣化、（遮蔽）
- ノイズ：通信、測定、分解能

□ 遠隔機器類の耐放射線仕様等さまざまな要求事項への対応に成功

湿潤、暗闇、通信環境、予期せぬ障害物、自己位置、サイズ制約 etc

□ 獲得したノウハウ

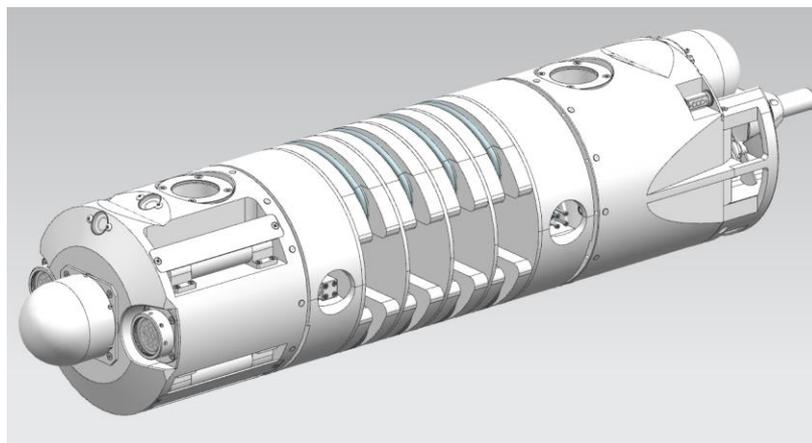
バウンダリ（放射性物質閉じ込め）の構築とロボットの投入・操縦・回収

開発中の格納容器内調査技術

- これまでの調査は、画像取得が中心（100mm径装置）
- 小型ロボットの活用により、基本的な技術構成・ノウハウを獲得
 - 格納容器への投入・回収（バウンダリの構築）
 - 高放射線下での比較的短時間の活動（映像・線量率）
 - 遠隔操作（オペレーション、干渉物回避、自己位置確認） 等
- より多くの情報取得のため、より大型なアクセス装置を開発中
 - より大きなバウンダリの構築
 - 積載能力の向上（**様々な測定機器**、サンプル回収、軽作業）
 - 到達範囲の拡張（推進力増大、マニピュレーター、長尺化）
 - ボート型アクセス装置（水中）
 - アーム型アクセス装置（気中）

ボート型アクセス装置

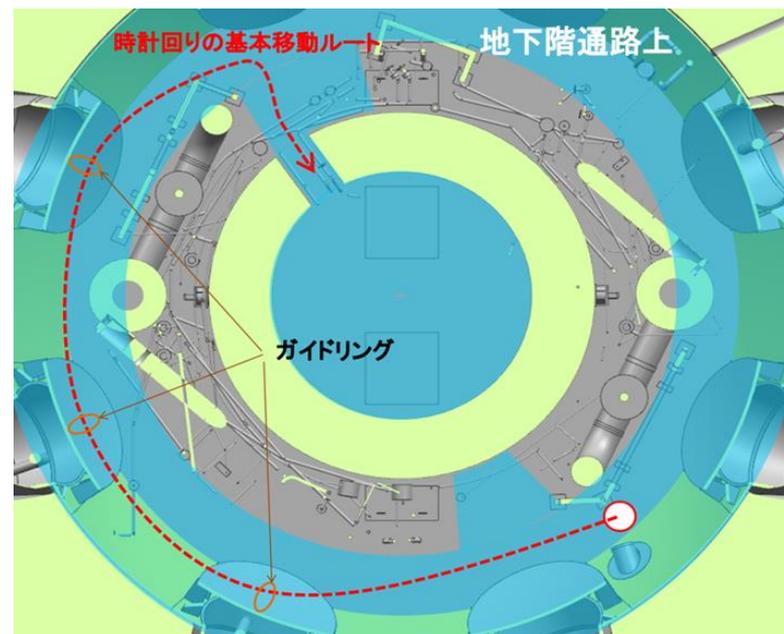
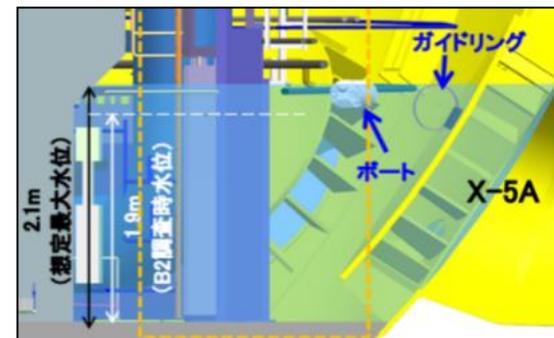
- 格納容器内の水の上を航行して、広範囲に移動可能なボート型アクセス装置を製作中



ガイドリング取付用の例

- 直径：φ25cm
- 長さ：約1.1m
- 推力：25N以上

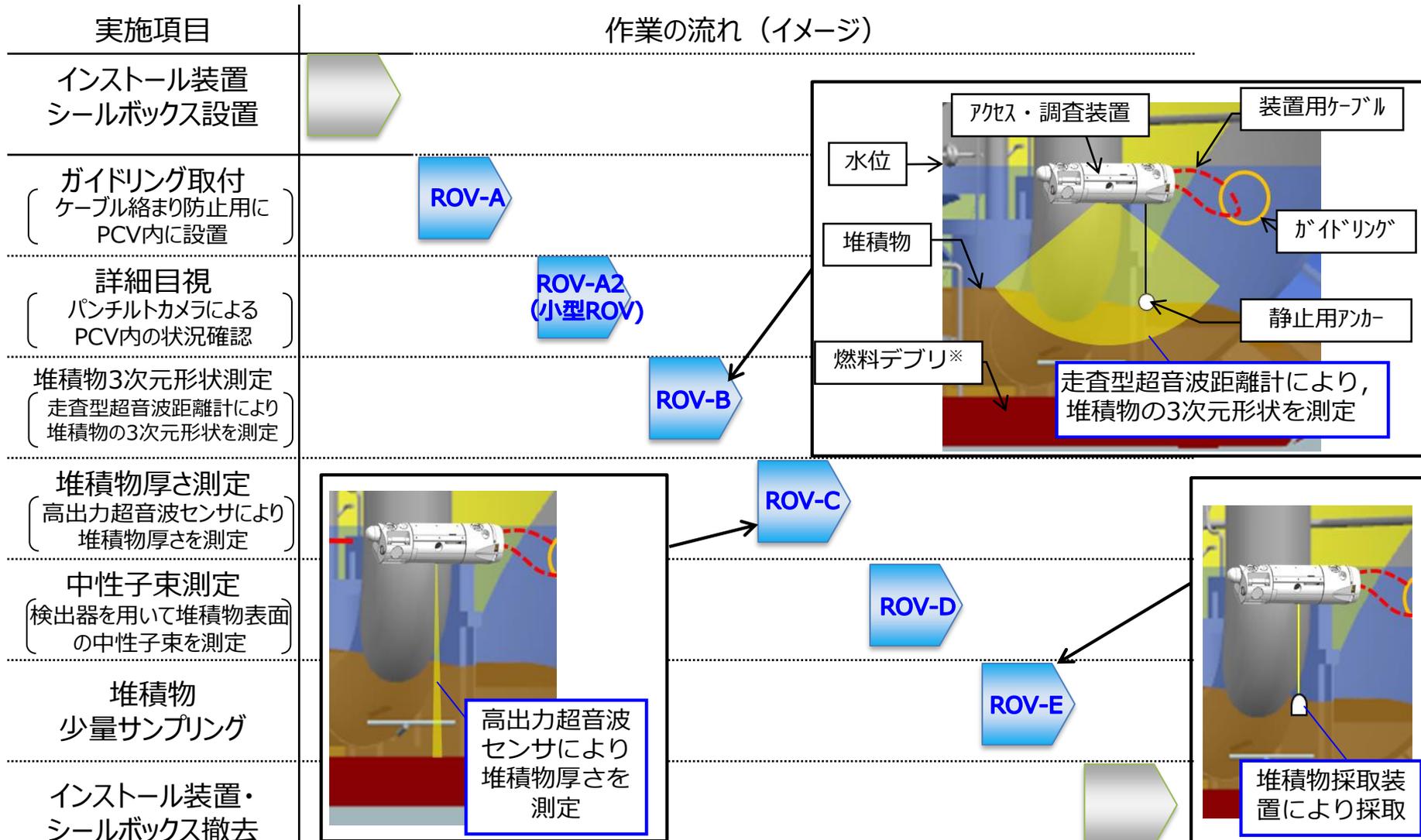
ボート型アクセス装置外観



ボート型アクセス装置の動線

ボート型アクセス装置 実施内容案

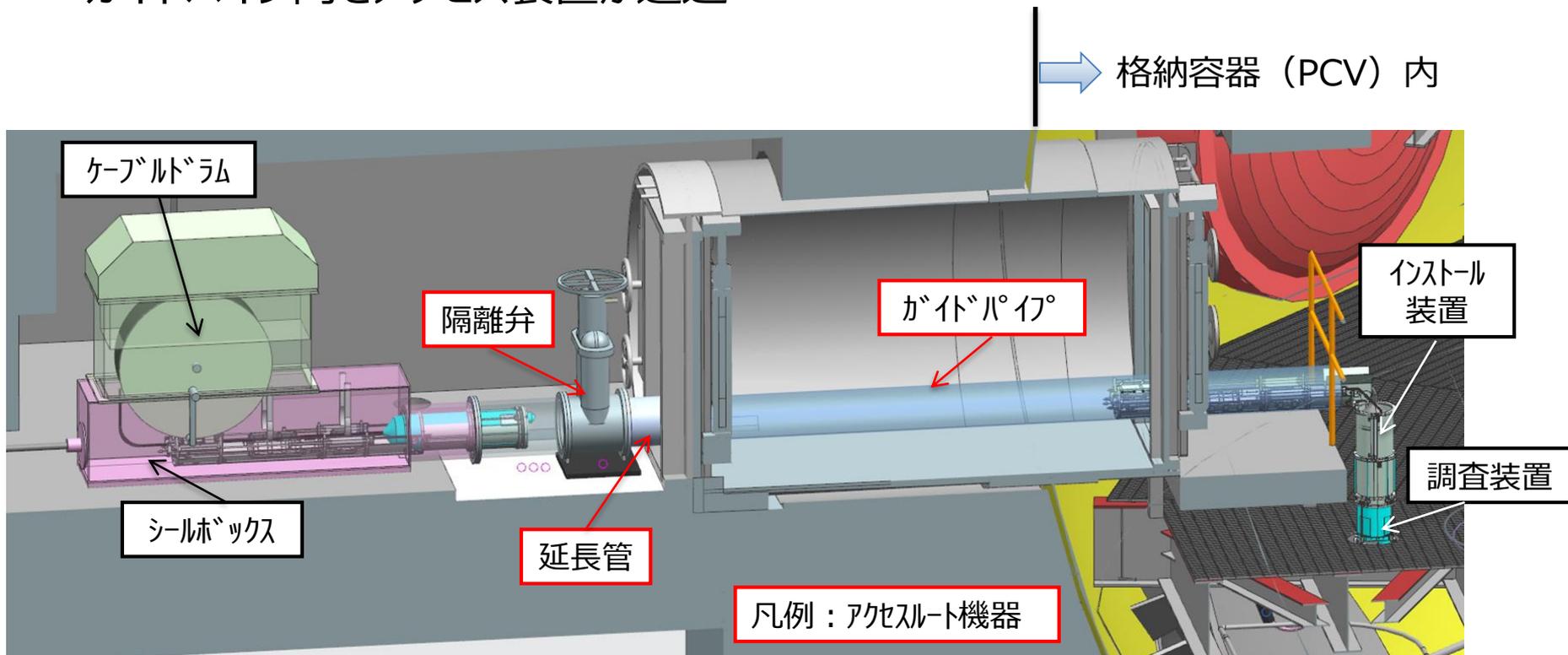
- 潜水機能付ボート型アクセス・調査装置は機能毎に6種類準備する予定。



※：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

ボート型アクセス装置 PCVバウンダリの構成

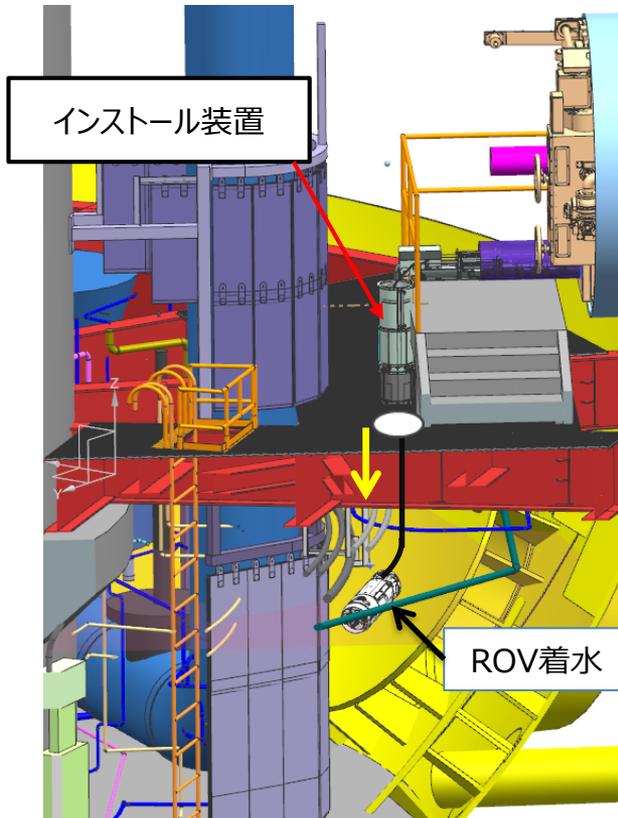
- パーソナルエアロック（定期検査時の作業員通路，2重扉）を貫通するガイドパイプ
- 原子炉建屋側（PCV外）にシールボックスとケーブルドラムを設置
- ガイドパイプ内をアクセス装置が通過



格納容器 (PCV) バウンダリの構成(案)

ボート型アクセス装置 PCV内への投入

- ROV（ボート型アクセス装置）のPCV地下階搬入出は、インストール装置を用いて遠隔自動で行う。



格納容器（PCV）内のような

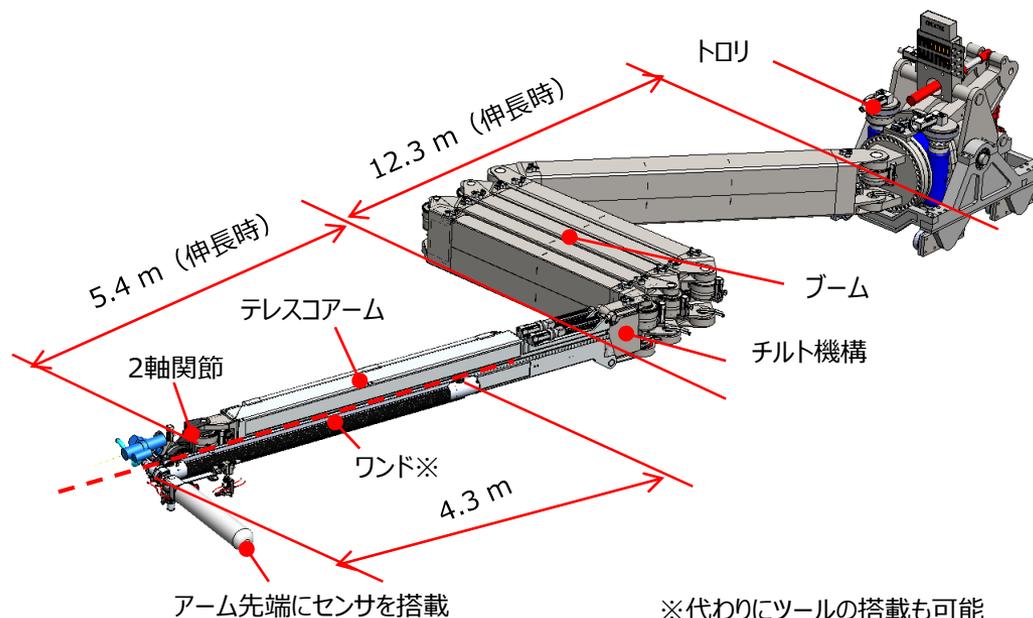
ボート型アクセス装置 モックアップ試験の様子

1号機と同サイズで再現したモックアップ試験場での
「詳細目視用ROV (ROV-A2)」のPCVへの
インストール模擬試験

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

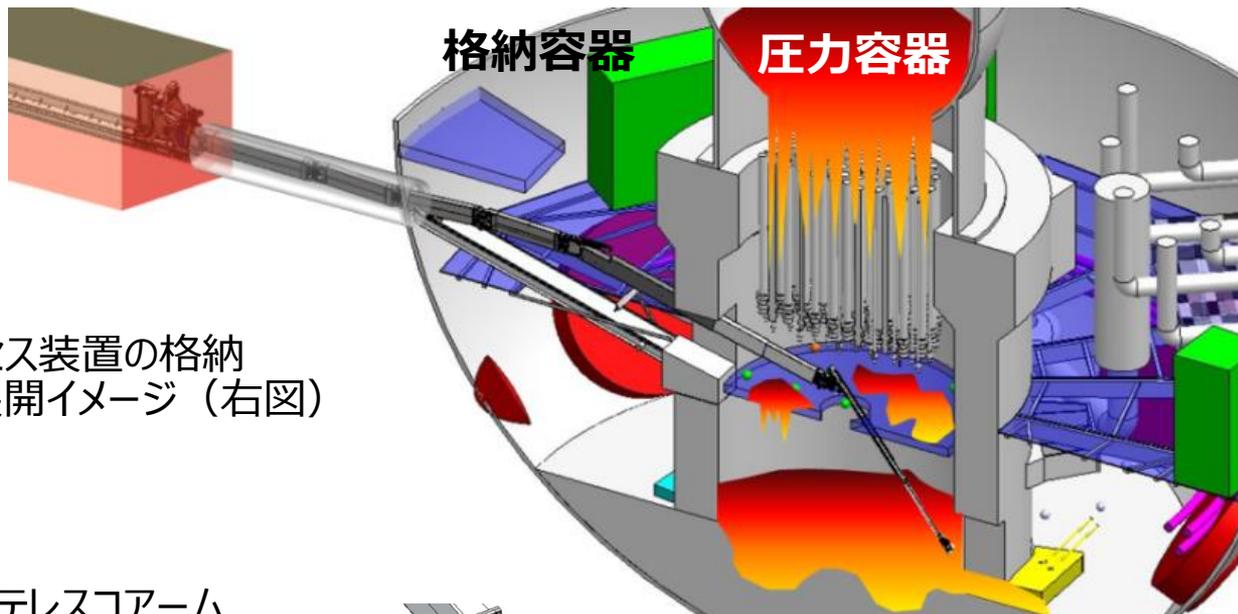
- アーム全長約22 m
- 10 kgまでのさまざまな調査装置を搭載可能



アーム型アクセス装置

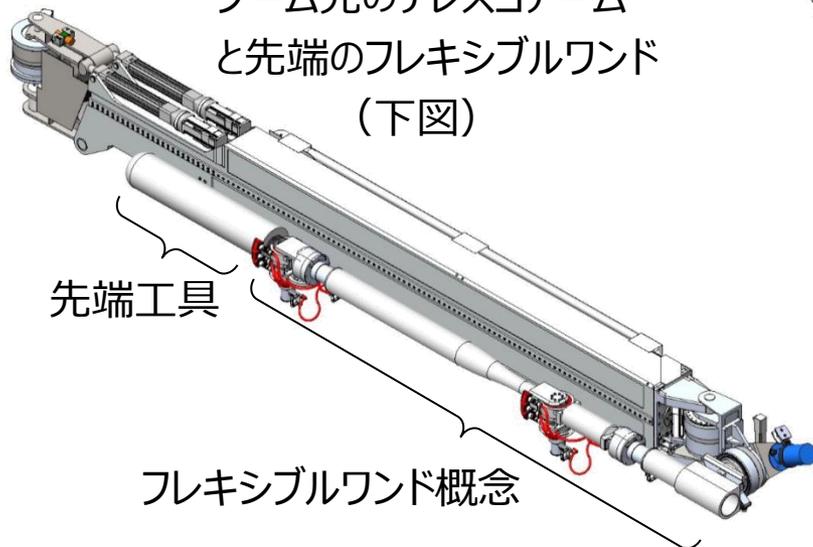
アクセス装置（サンプリング用アームの検討例）

エンクロージャー
（格納容器外）



アーム型アクセス装置の格納
容器内への展開イメージ（右図）

ブーム先のテレスコプアーム
と先端のフレキシブルワンド
（下図）

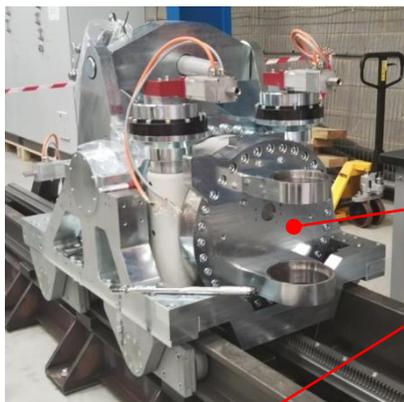


ブーム先のテレスコプアームと先端の
フレキシブルワンド：
ソナー装備の場合（左図）

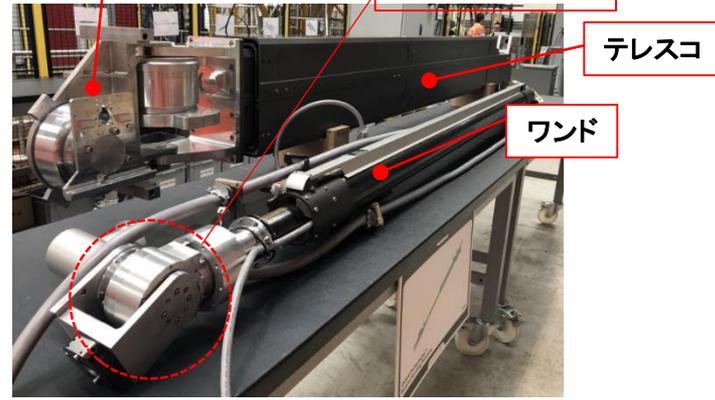
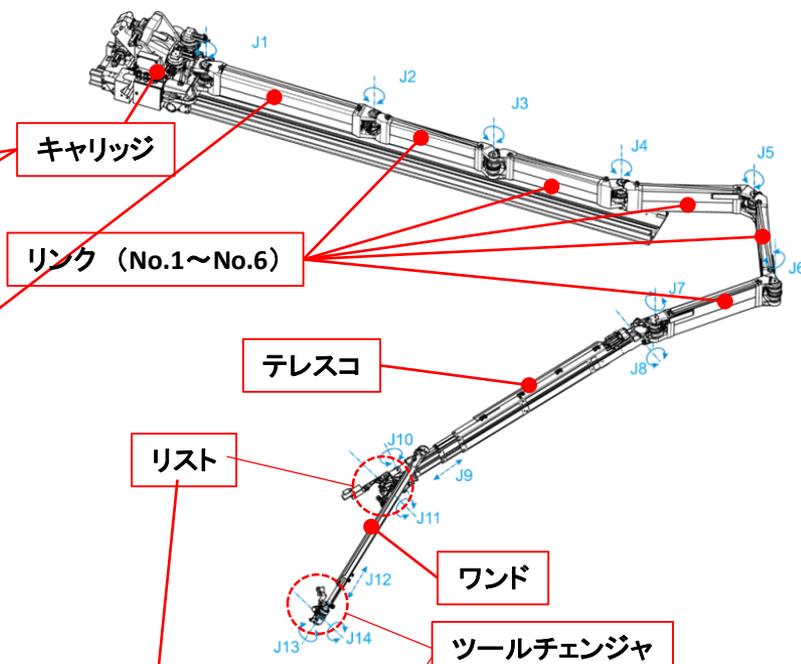
動作概念（5軸、伸長機能なし）

アーム型アクセス装置（CGイメージ）

アクセス装置（製作状況）



キャリッジにリンク（No.1）を搭載

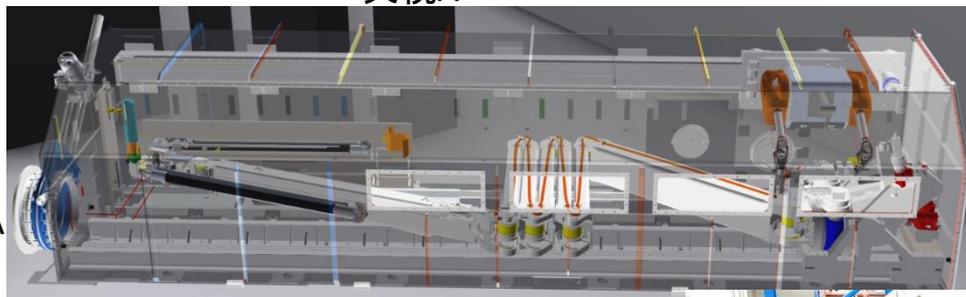
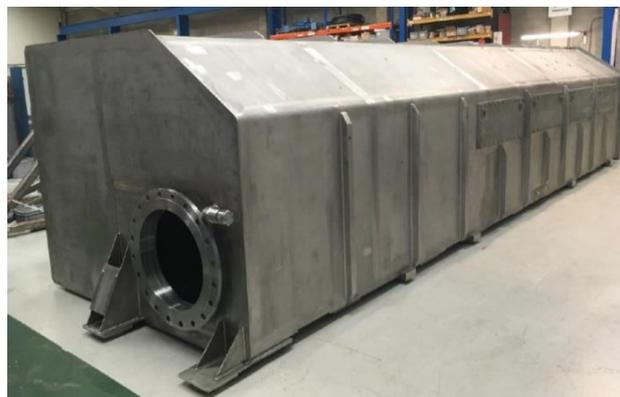


アームの製作と組立ての様子

アクセス装置（製作状況）



矢視A



矢視A

← 矢視B



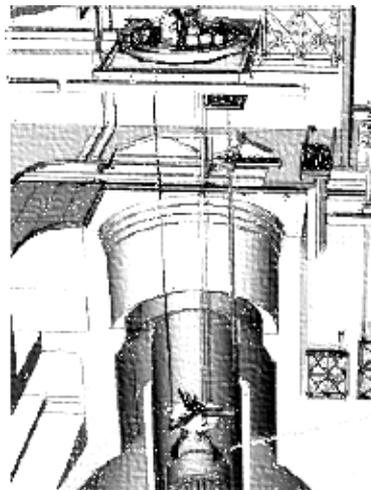
矢視B



矢視B

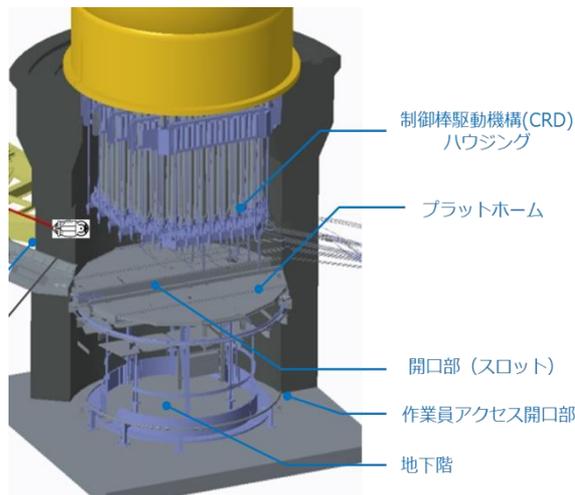
エンクロージャーの製作と組立ての様子

燃料デブリ取り出し工法の開発



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

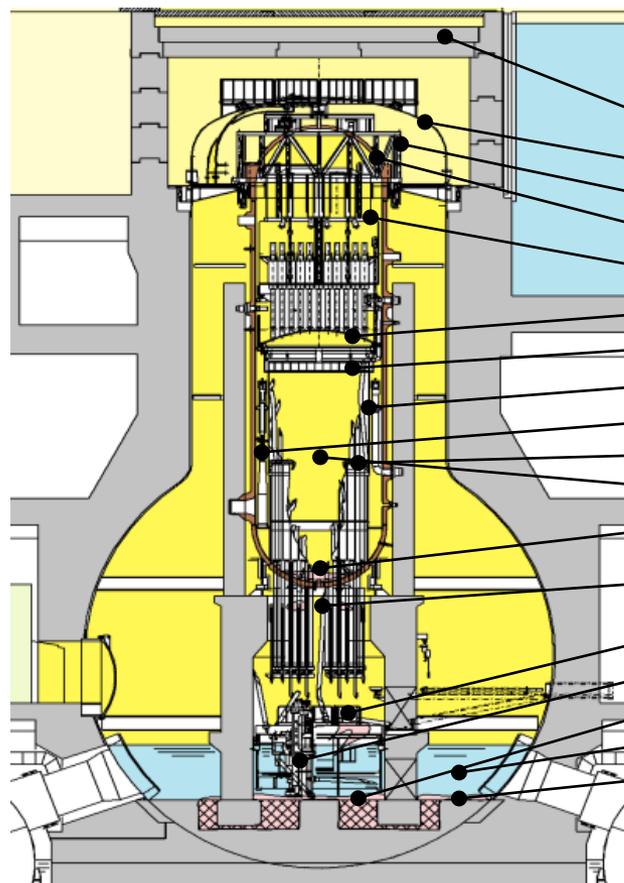


2号機格納容器内底部,
ペDESTAL内 内壁付近

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

燃料デブリの取り出し 安全要件とシステムの例

放射性物質の閉じ込め

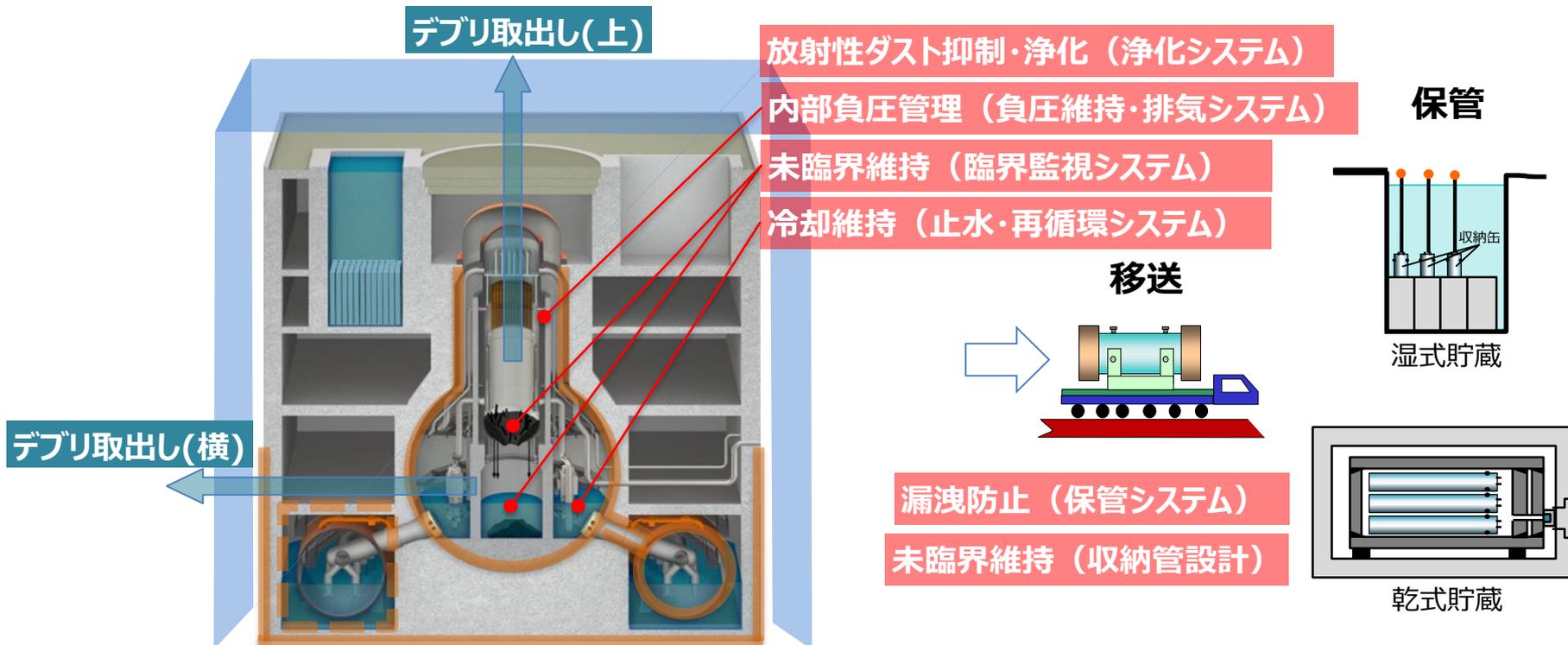
- 気体中／液体中の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止
- 移送容器による放射性物質の漏洩防止

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

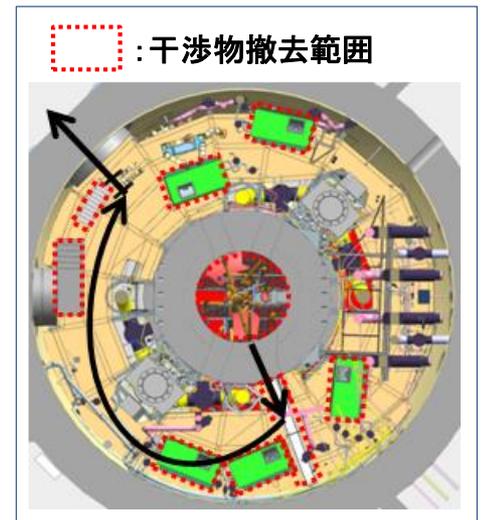
一般要求等

- 水素濃度管理
- 火災・爆発の防止
- 状態監視・モニタリング

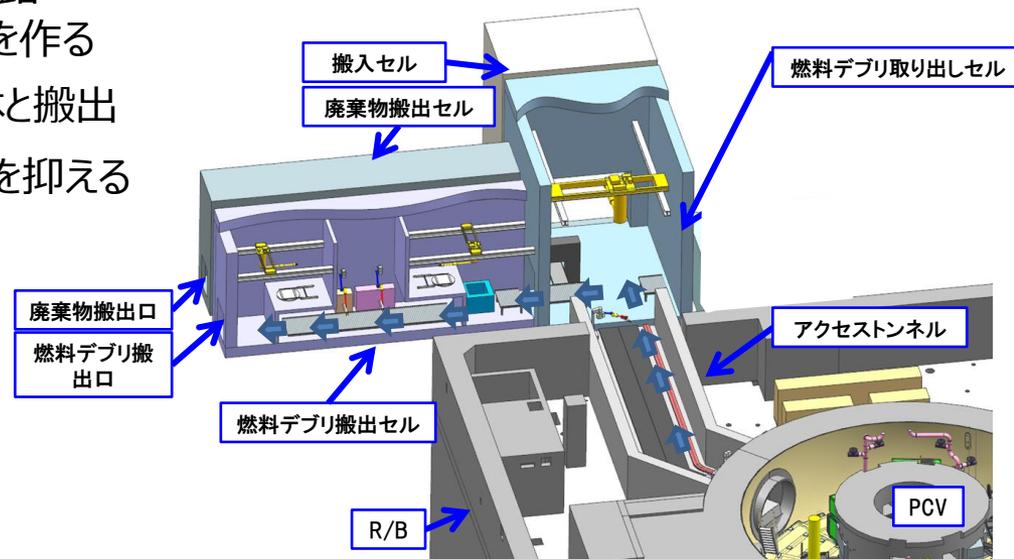


技術開発のアウトライン

- **作業環境の確立** 作業線量低減がデブリ取出し実現のキーポイント
 - 線源撤去, 遮蔽, 汚染除去, 漏洩リスク低減
- **安全システムの設置** 作業員や環境への影響を小さくする
 - 安全要件をみたす環境制御系統の概念を確立 (汚染拡大防止、未臨界維持 他)
- **アクセス経路の構築** 遠隔作業機器や燃料デブリの搬出入
 - 機器ハッチ (大型開口) の開放と連絡トンネル
 - 格納容器への新たな開口の設置
- **干渉物の撤去** 格納容器内での移動経路・燃料デブリ搬出経路を作る
 - 遠隔操作による機器や構造材の解体と搬出
- **燃料デブリの切削・回収** ダストの発生を抑える
 - 切削装置、回収装置
- **燃料デブリや汚染廃棄物の搬出と保管** より確実な管理された保管状態
 - 収納缶、移送・保管設備



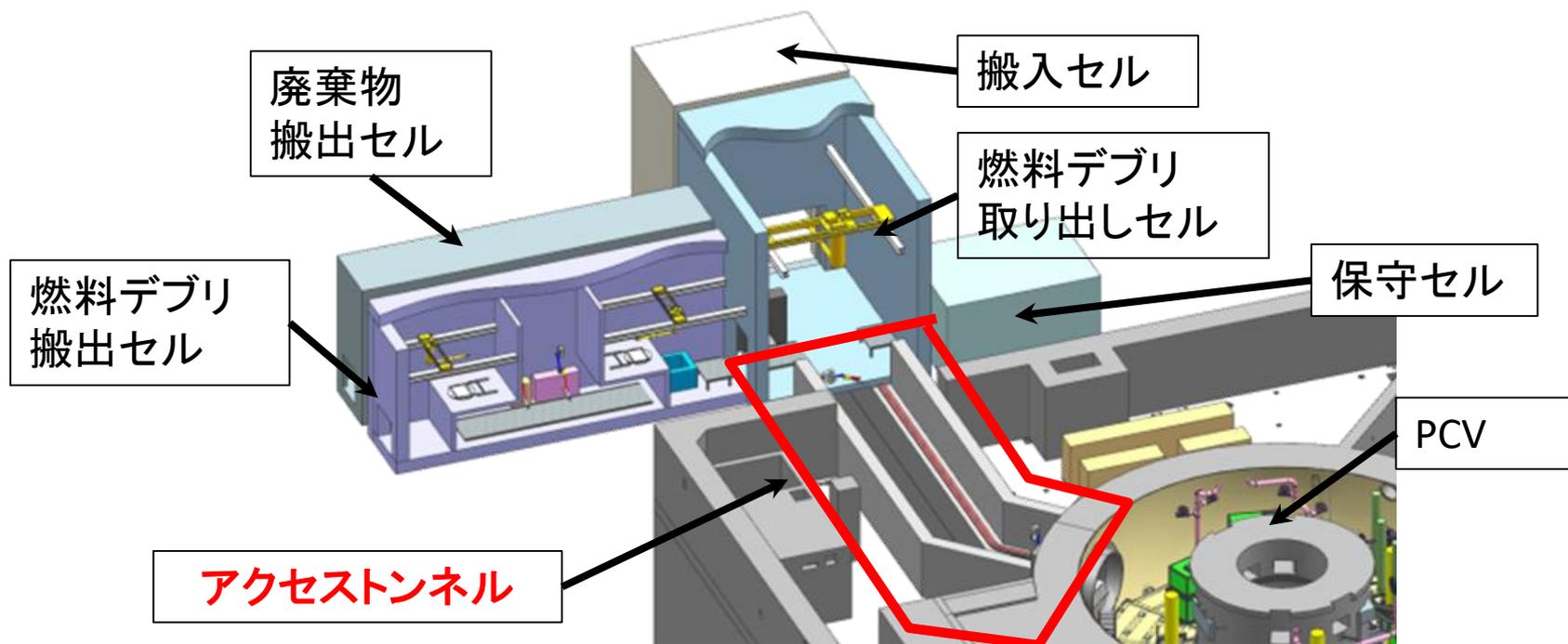
格納容器内干渉物撤去対象例



アクセス経路や搬出経路例

アクセス経路の構築例 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**
- 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

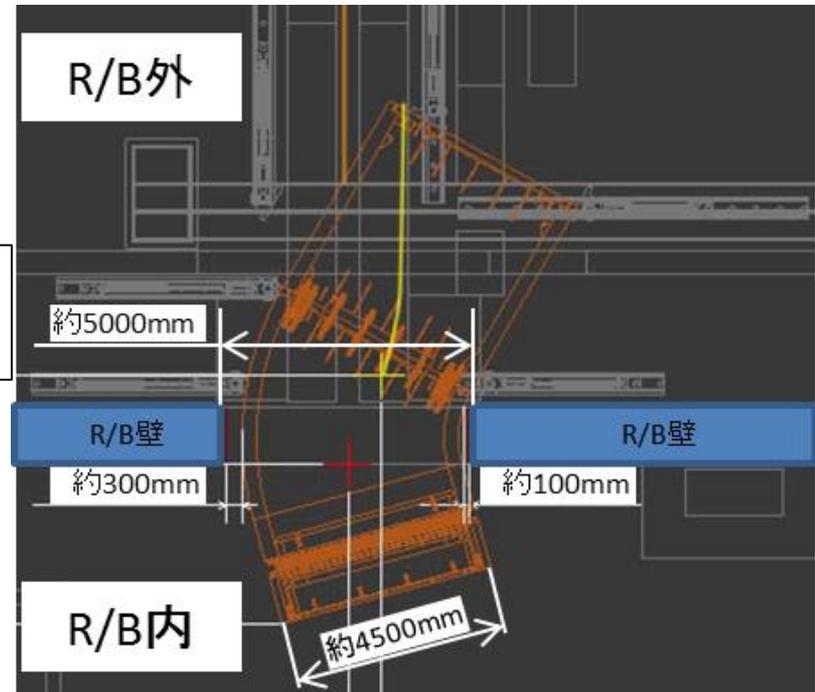
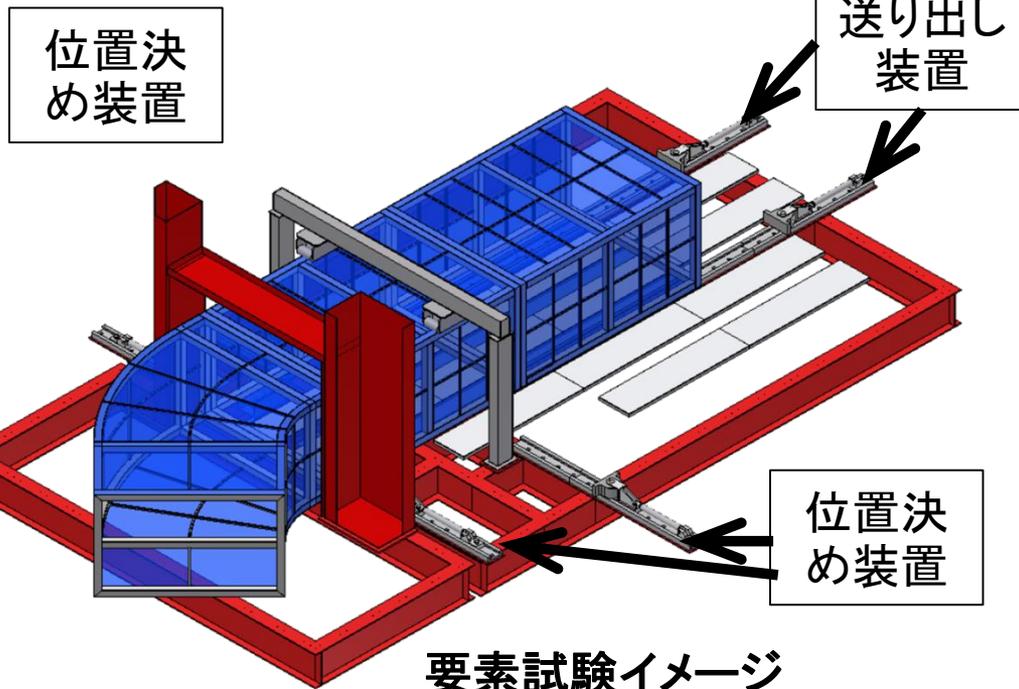


アクセストンネル工法の配置イメージ

トンネル施工技術の要素試験



送り出し工法の例



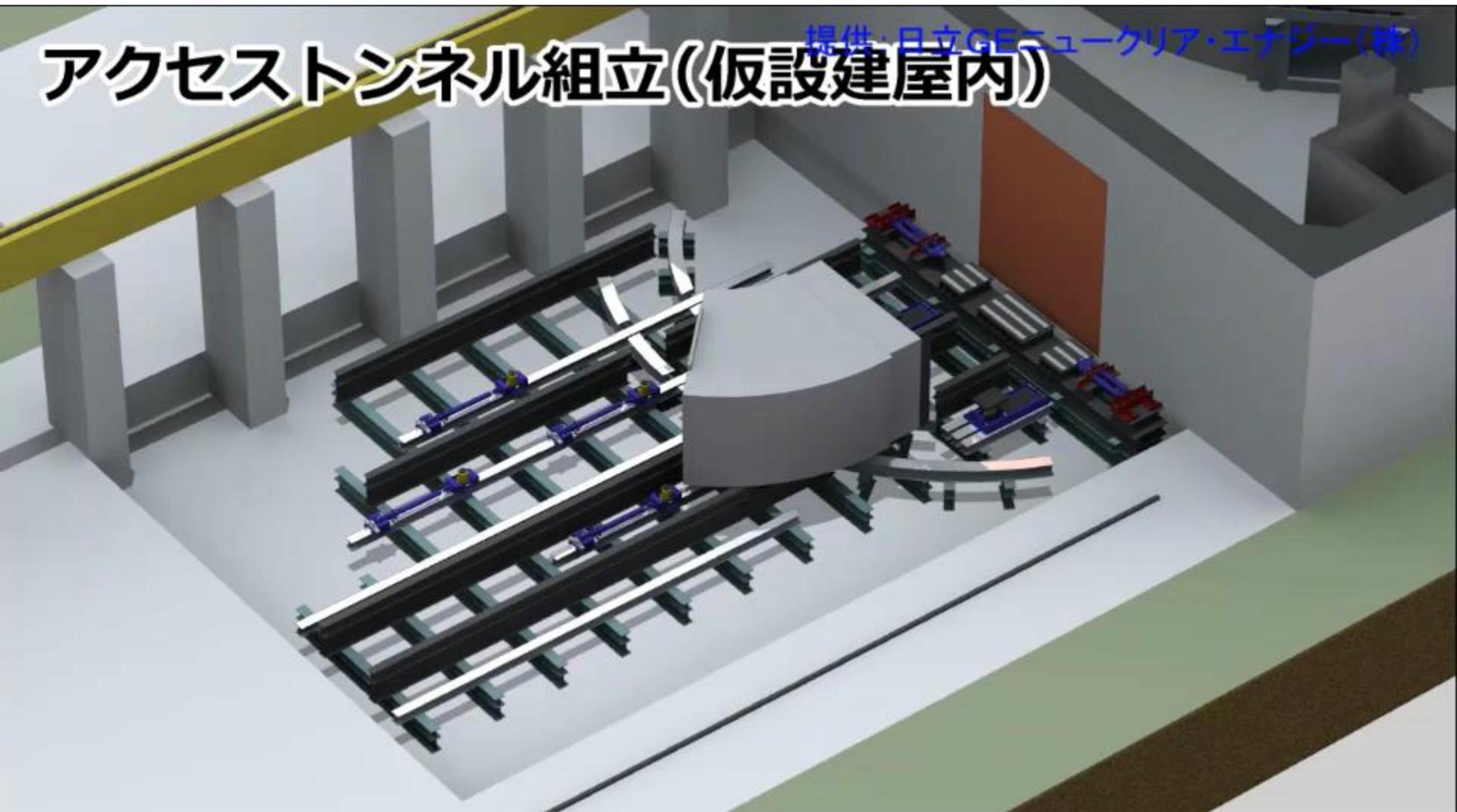
狭隘作業のイメージ

*R/B: 原子炉建屋

トンネル施工技術の要素試験

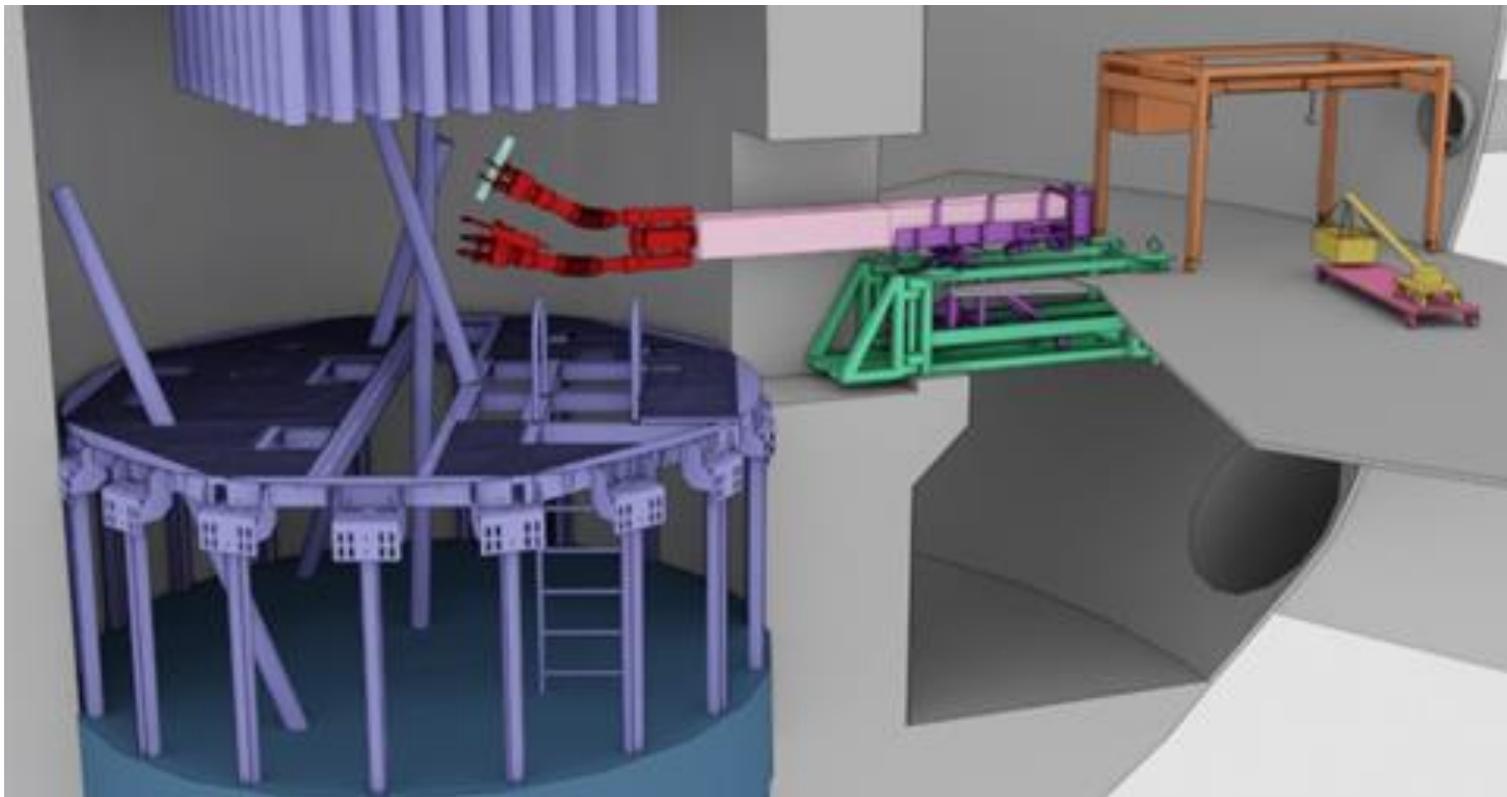
アクセストンネル組立(仮設建屋内)

提供・日立GEニュークリア・エナジー(株)



干渉物撤去技術

- これまでの内部調査でペDESTAL内には大量のがれきが散乱している状況が明らかになりつつある
- これら干渉物の撤去技術を開発中



干渉物撤去の要素試験イメージ

ペDESTAL内干渉物撤去 要素試験の様子

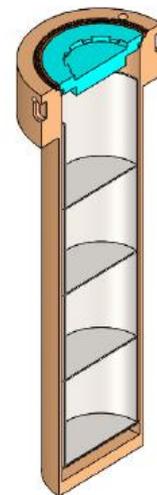
提供：日立GEニュークリア・エナジー(株)

ペデ外試験

ユーティリティーの設定・接続

収納缶、移送、保管

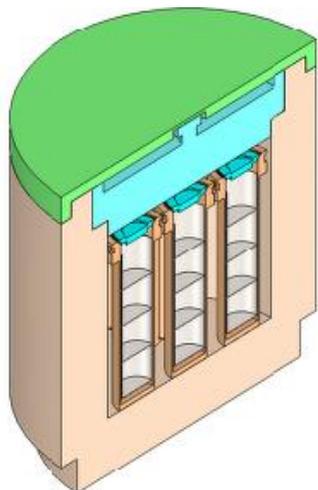
- 格納容器内から回収した燃料デブリを安全に保管する
- 収納缶（キャニスタ）への格納
 - 安全要件からの設計要求
 - 構造強度や耐食性を高めるステンレス製
- 保管設備への移送と保管
 - 遮蔽
 - 水素対策
 - バウンダリ、環境設備



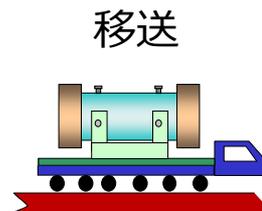
キャニスタの設計要求

- 未臨界維持
 - 形状による担保（直径）
 - 量による制限（最少臨界量）
 - 減速材の制限（水分）【乾燥】
- 水素発生抑制
 - 水分の除去【乾燥】
- 漏えい防止
- 冷却

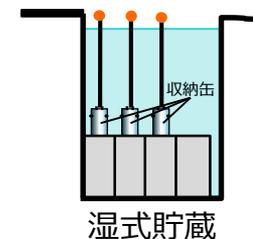
キャニスタ（収納管）



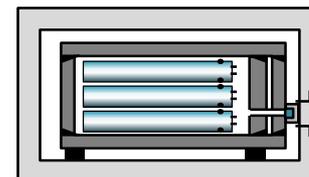
移送カスク イメージ



燃料デブリ保管



湿式貯蔵

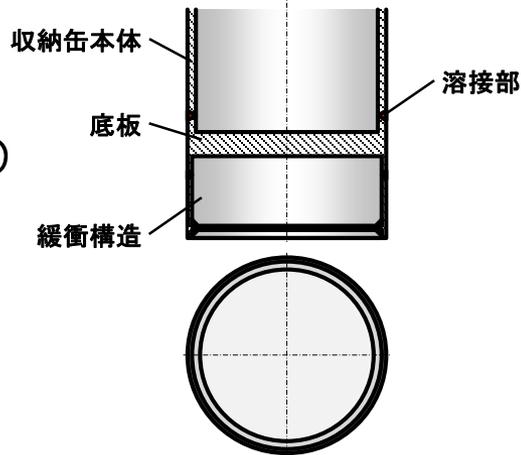


乾式貯蔵

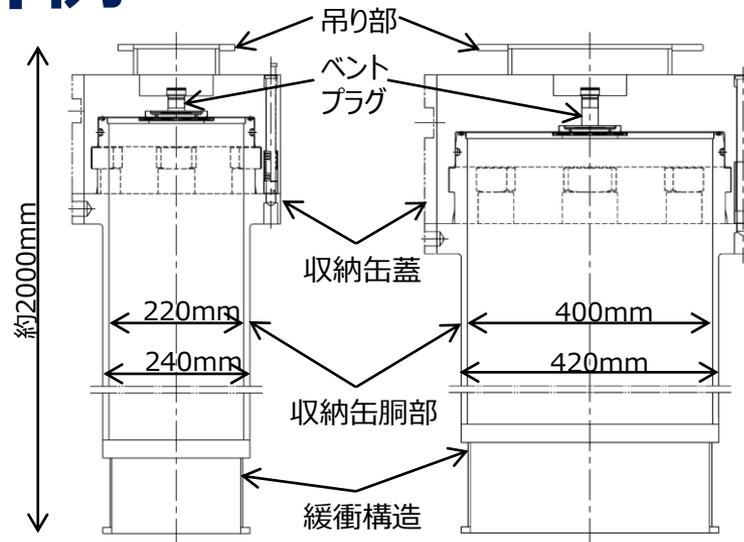
収納缶の設計例

- 構造と健全性
- 衝撃試験

例えば取り扱い中の
転倒、落下等における
構造維持の確認



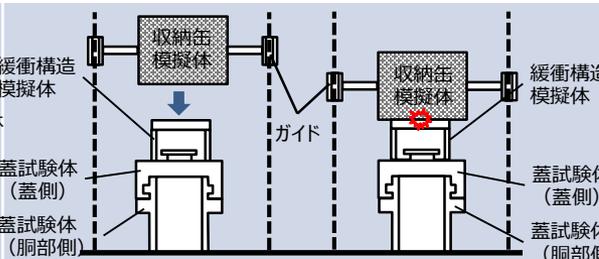
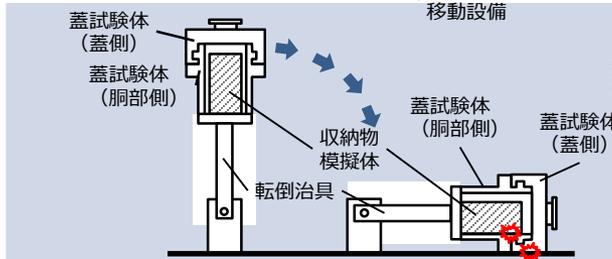
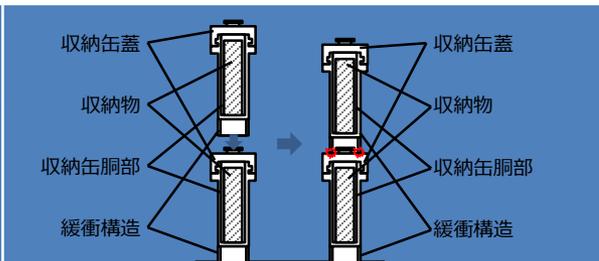
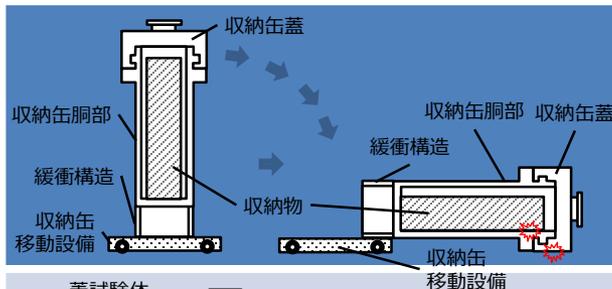
下部緩衝構造例



①内径220 mmの例

②内径400 mmの例

簡易取付構造蓋収納缶の例



構造試験例

収納管の設計（蓋の衝撃試験①）

- 燃料デブリや汚染廃棄物の搬出と保管

収納管の設計（蓋の衝撃試験②）

- 燃料デブリや汚染廃棄物の搬出と保管

まとめ

- 高汚染の高線量の格納容器内にロボットを投入し調査（遠隔操作・回収）に成功し、ノウハウを高めてきた。
- さらなる詳細調査のため大型の調査ロボットの開発を進めている。
- デブリ取り出し作業に潜むハザードを検討し、安全要件を設定してリスク低減を図る安全システムの概念設計を行ってきた。
- デブリ取り出しのアクセス経路、干渉物撤去、デブリ切削・回収、搬出・保管の概念を検討した。
- これらを実現する技術構成と遠隔機器の開発を進めている。
- すべての成果はエンジニアリングへ提供されてゆく。
- 効率的かつ長期間にわたる確実な燃料デブリ取り出し作業の実現のためにさらなる技術開発が必要である。

End of Presentation

ペDESTアル内干渉物撤去 要素試験の様子

