

福島県環境創造センター
「原子力発電所の廃炉に関する講演会」

福島第一原子力発電所廃炉にかかわる 技術開発の現状について

平成30年9月21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. 原子炉格納容器補修技術開発
3. 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
4. 燃料デブリ取り出し技術開発
5. 燃料デブリ取出しにおける安全設計の検討

目 次

1. はじめに
2. 原子炉格納容器補修技術開発
3. 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
4. 燃料デブリ取り出し技術開発
5. 燃料デブリ取出しにおける安全設計の検討

IRID紹介ビデオ

IRID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）

• 国立研究開発法人：2 法人

日本原子力研究開発機構（JAEA）、
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)、東京電力ホールディングス(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)

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

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

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

<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-6thネ
実証

PCV詳細調査
堆積物
実証

RPV
内部調査
技術

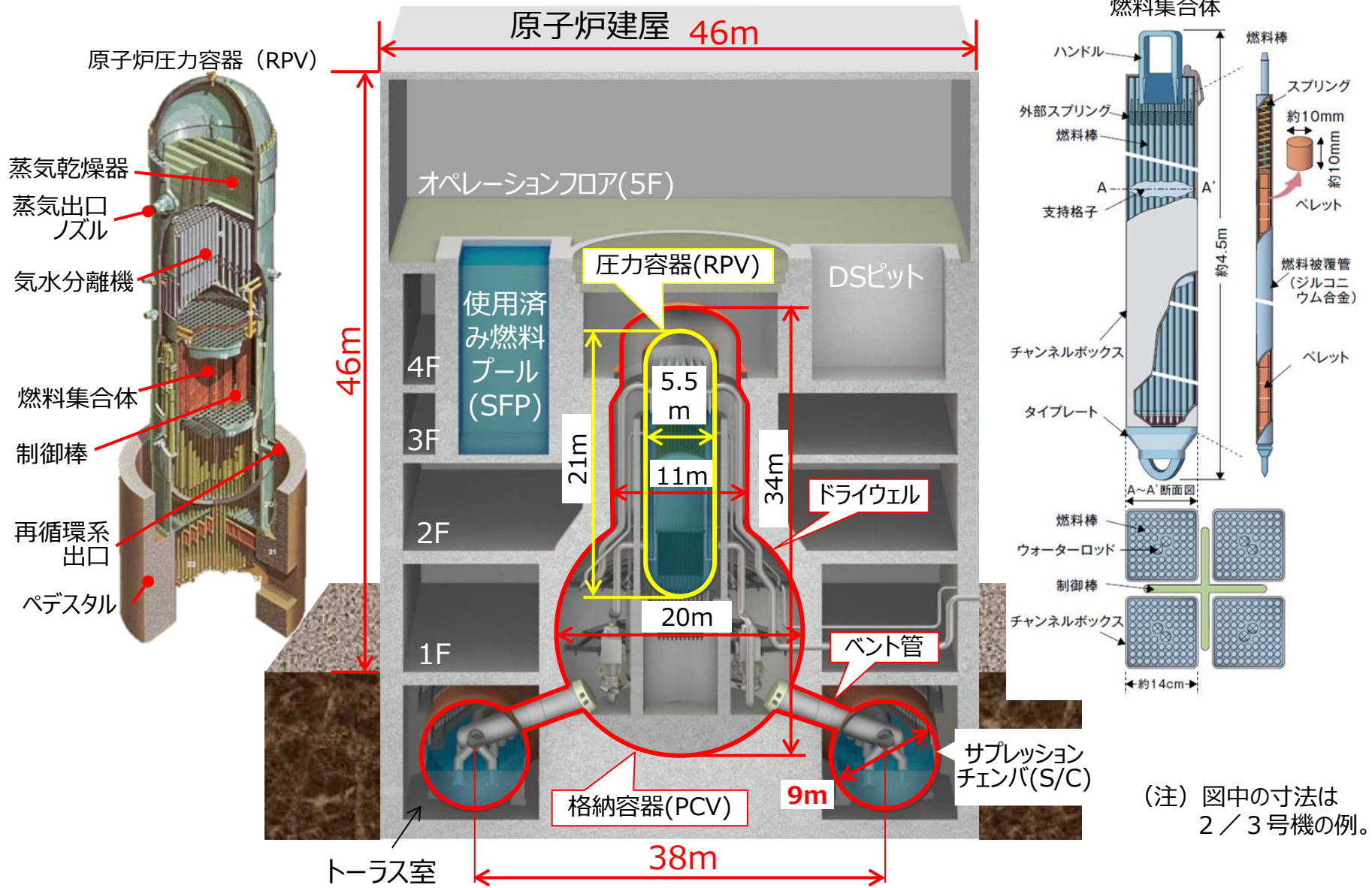
燃料デブリ
サンプリング
技術

燃料
デブリ性状
把握・分析

燃料デブリ・
炉内構造物取出
基盤技術
**小型中性子
検出器**

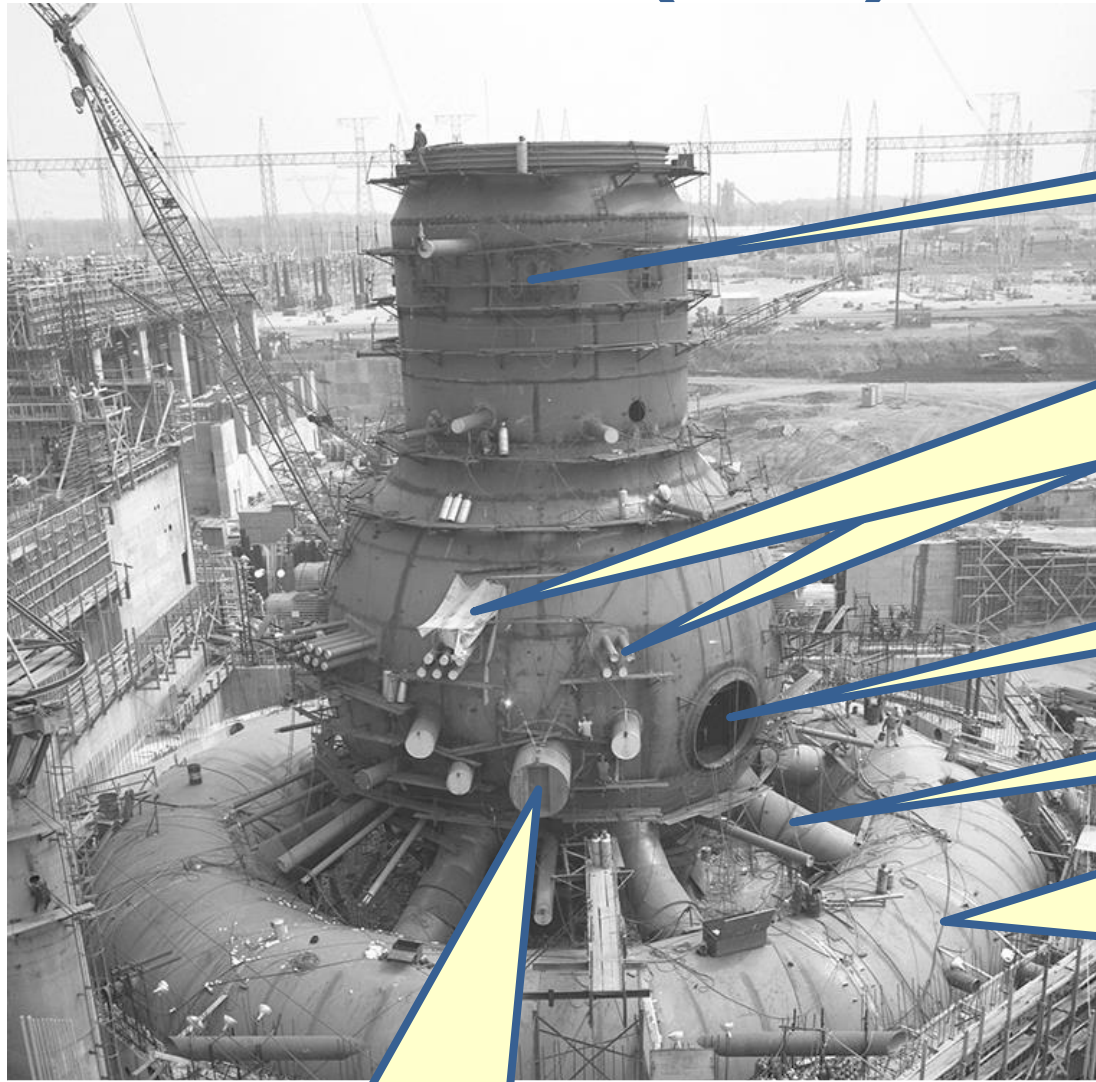
燃料デブリ
**収納・移送
・保管**技術

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」: 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

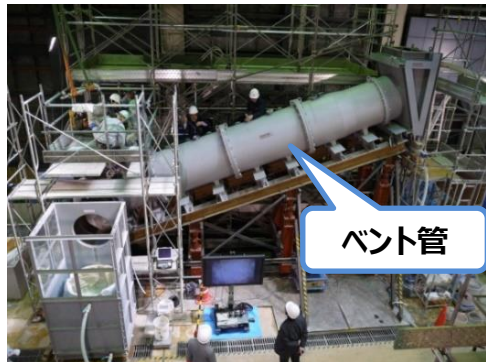
「Browns Ferry Unit 1 under construction 1966.Sep.」
Tennessee Valley Authority – TVA's 75th Anniversary webpage

目 次

1. はじめに
- 2. 原子炉格納容器補修技術開発**
3. 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
4. 燃料デブリ取り出し技術開発
5. 燃料デブリ取出しにおける安全設計の検討

原子炉格納容器(PCV)補修・止水技術

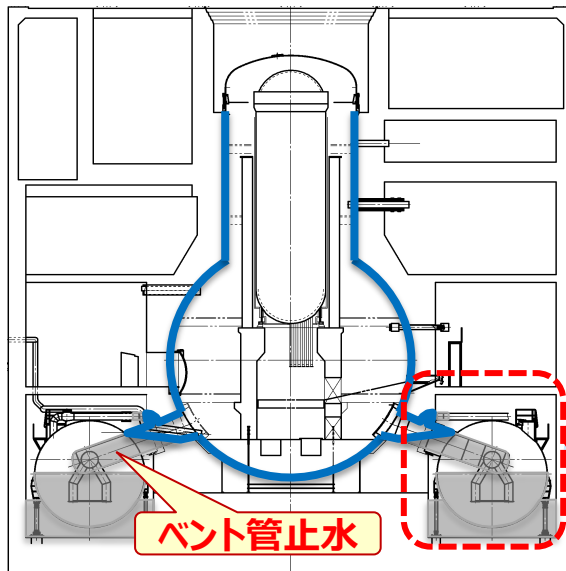
ベント管止水試験



ベント管

1 / 2 スケール試験体で
止水性能を確認 (工場)

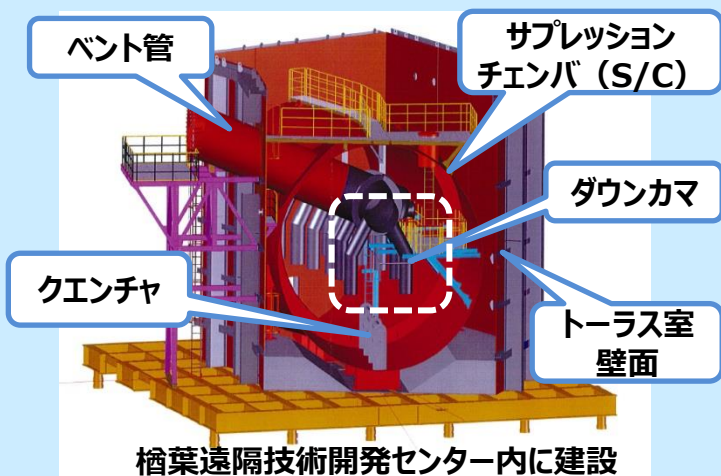
— : 補修・止水範囲



ベント管止水

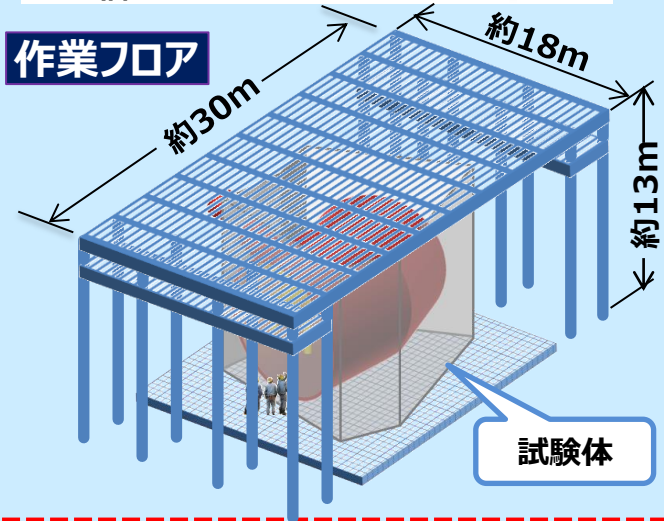
実規模試験体を用いた試験

実規模試験体 (1/8セクター)



楢葉遠隔技術開発センター内に建設

作業フロア



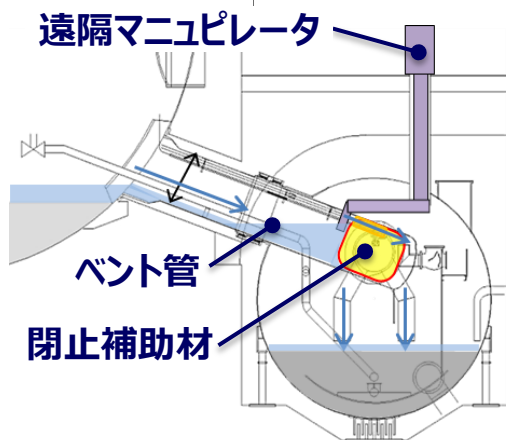
試験体

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)



実規模試験体を使った手順確認 (JAEA 楢葉遠隔技術開発センター)

目的

- 実規模試験体を使って実工事を念頭とした手順書を作成し、**実機適用性を判断**する。

主な取り組み

- 次の3つの止水工法について、施工性確認試験及び打設試験を行い手順を確認する。
 - ① ベント管止水
 - ② S/C内充填止水
 - ③ S/C脚部補強

試験期間

2016.11～2018.3



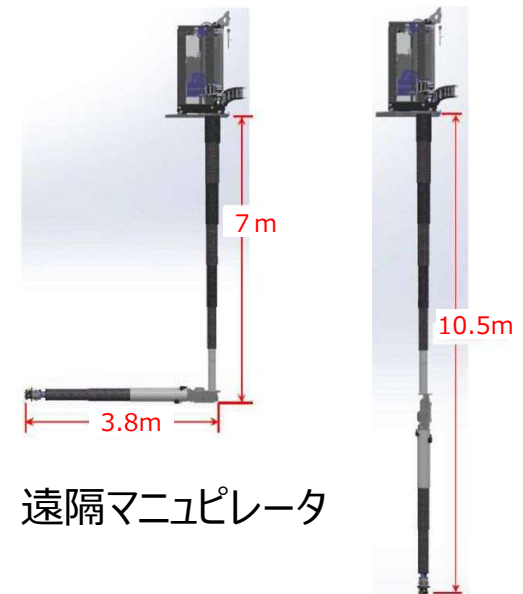
試験体外観



試験体内部 (S/C内部)



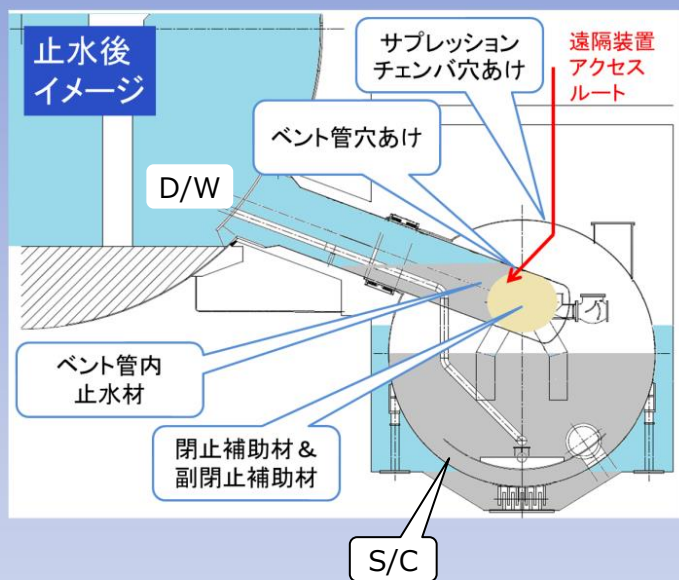
S/C脚部補強施工性確認試験



遠隔マニピレータ

ベント管止水技術

- D/WとS/Cを連結しているベント管を止水し、**D/W内を水張り**が出来る状態にすることを目的とした技術開発。

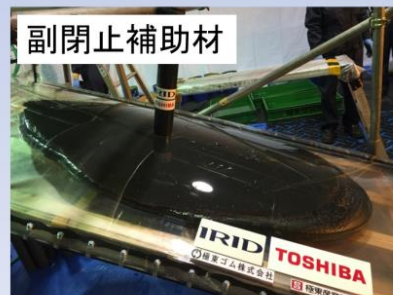


【候補材】

閉止補助材：アラミド系繊維

副閉止補助材：高耐放射性ゴム等

ベント管内止水材：セメント系材料等

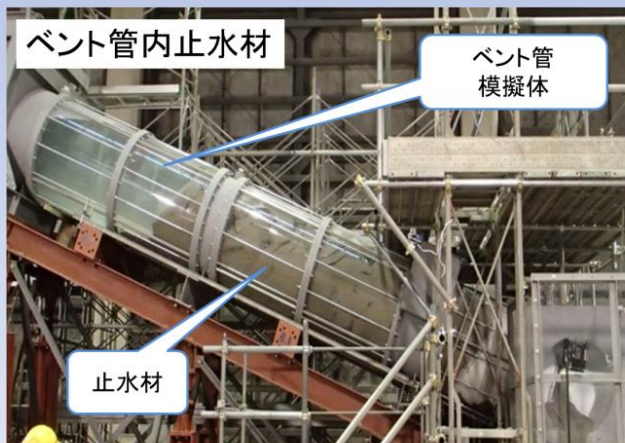


【実施手順】

① サプレッションチェンバ及びベント管へ穴あけ

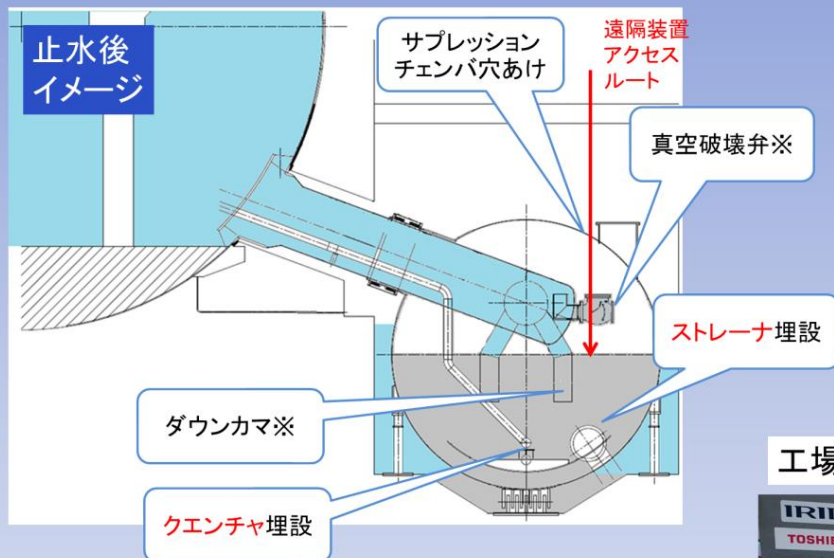
② ベント管内へ閉止補助材展開及び副閉止補助材による隙間充填

③ ベント管内に止水材を打設



S/C内充填止水技術

- S/C内外の流路となる**配管端部（クエンチャ、ストレーナ）**を止水することを目的とした技術開発。また、**ダウンカマまでを埋設**してベント管止水のバックアップとしての役割も検討中。



【実施手順】

- ①サブプレッションチェンバへ穴あけ
- ②サブプレッションチェンバ内へ止水材打設
- ③ストレーナ、クエンチャを埋設止水

※ダウンカマ、真空破壊弁を埋設止水（オプション）

工場試験（コンクリート打設中）



クエンチャ模擬

工場試験（ストレーナ埋設前）



ストレーナ模擬

【候補材】

サブプレッションチェンバ内止水材：
水中不分離性コンクリート

S/C脚部の補強技術

- S/C内充填止水により止水材の充填による重量増加が見込まれるため、S/Cを支える脚部の**耐震補強**を目的とした技術開発。

1号機

充填装置



補強材充填



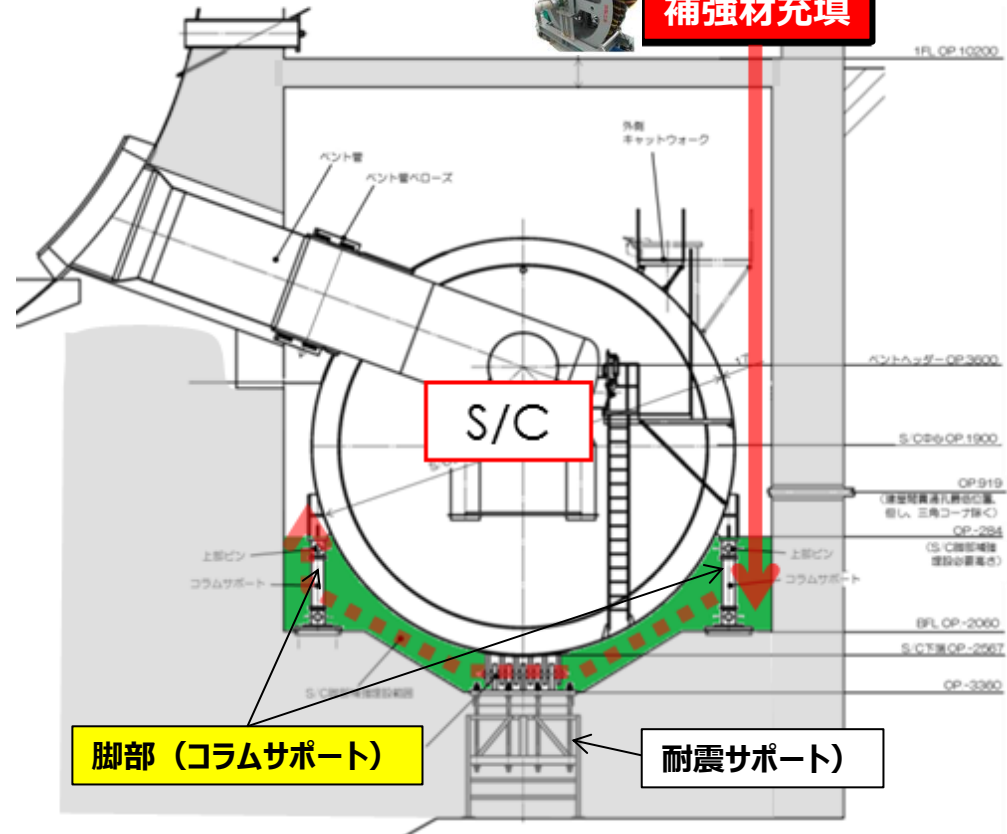
【候補材】水中不分離性モルタル

2・3号機

充填装置



補強材充填

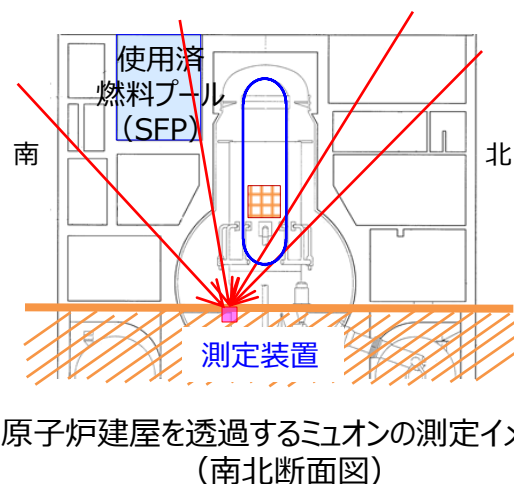
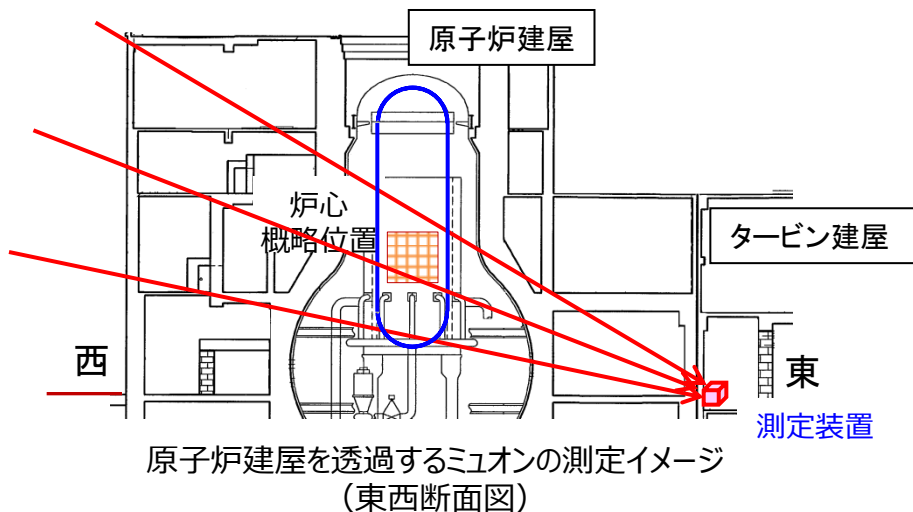


目 次

1. はじめに
2. 原子炉格納容器補修技術開発
- 3. 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
4. 燃料デブリ取り出し技術開発
5. 燃料デブリ取出しにおける安全設計の検討

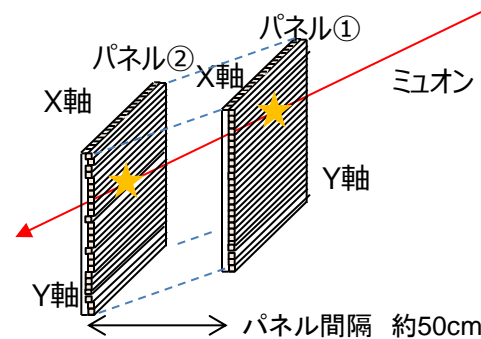
ミュオン透過法による測定

- 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)>

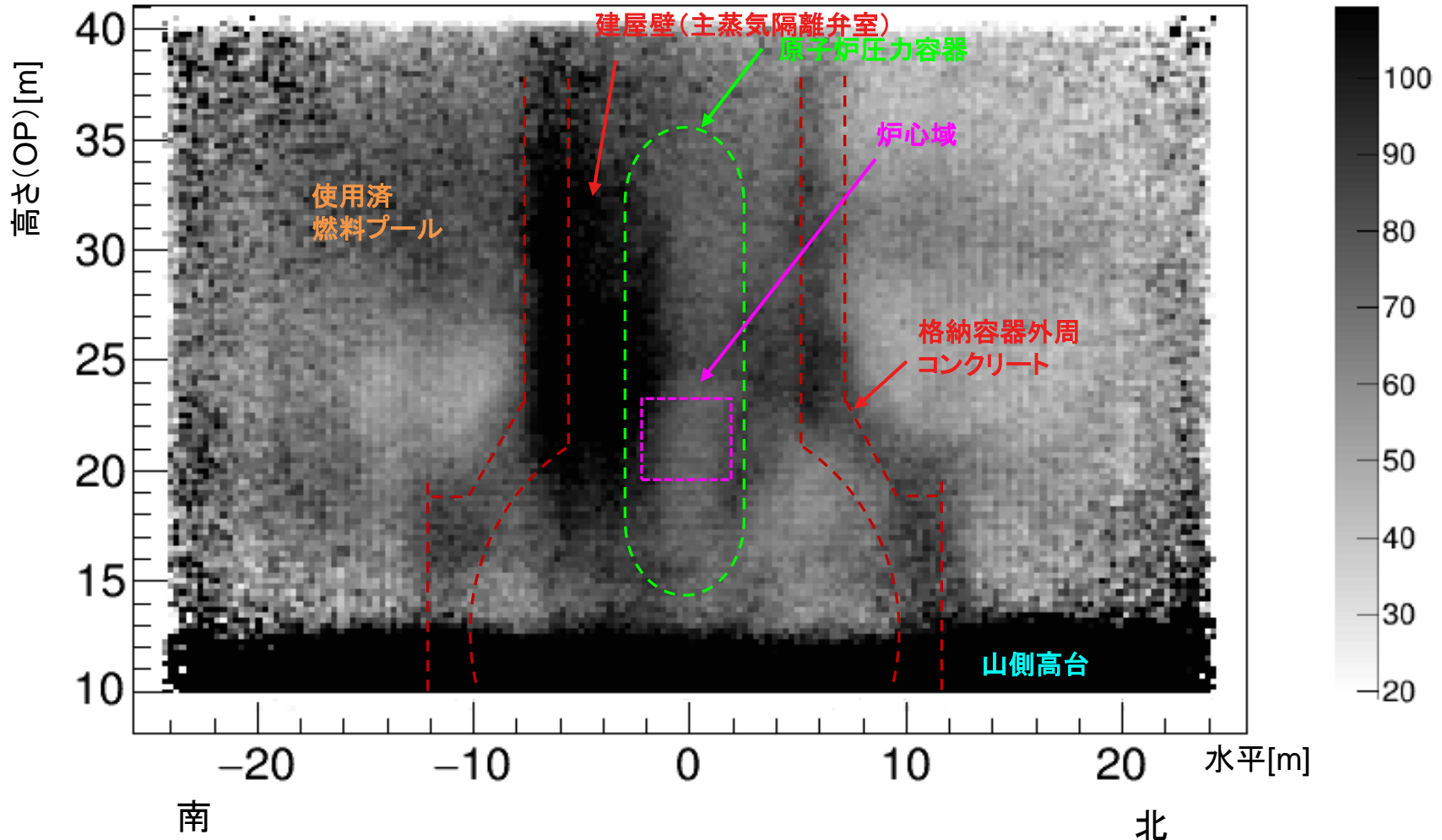
上空から飛来するミュオンを装置内部に配置した2枚のパネル検出器 (プラスチックシンチレータ) で検知し、通過したパネルの座標からミュオンの軌跡を算出。



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)



PCV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）



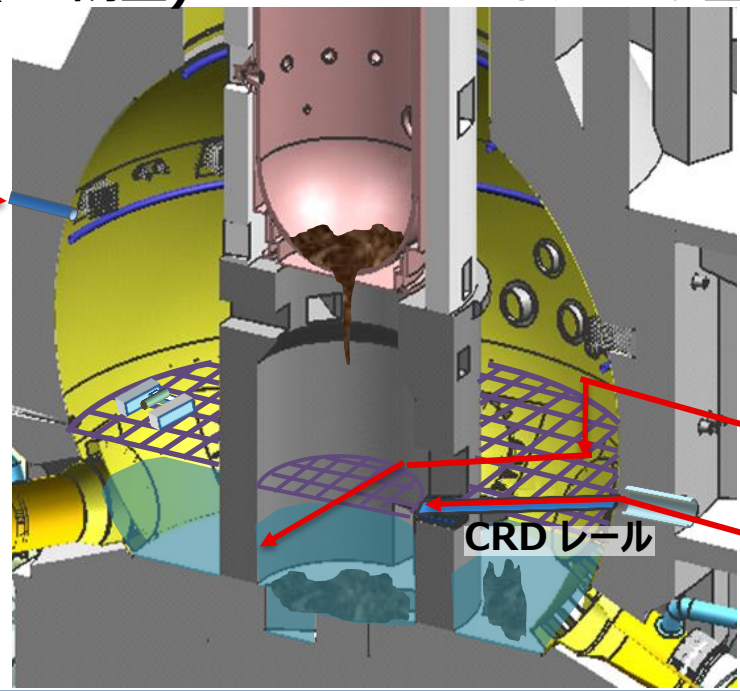
変形



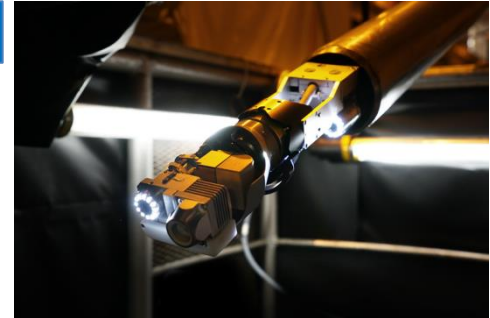
（注）上の写真はB1調査時のロボットです。

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）



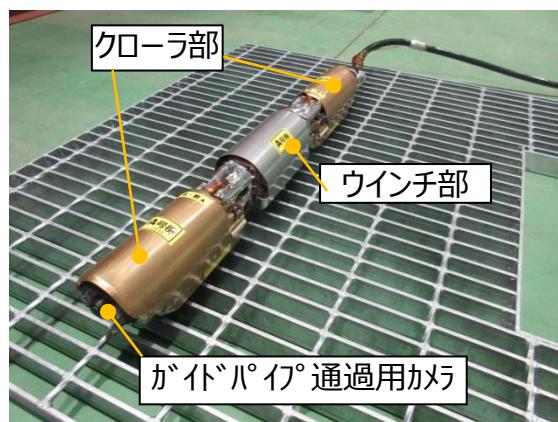
ペDESTル内側の調査（3号機）



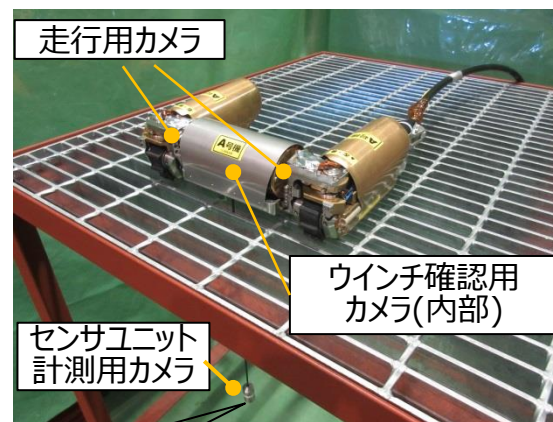
○水中遊泳型ロボット

1号機 B2 調査ロボット「PMORPH (ピーモルフ)」

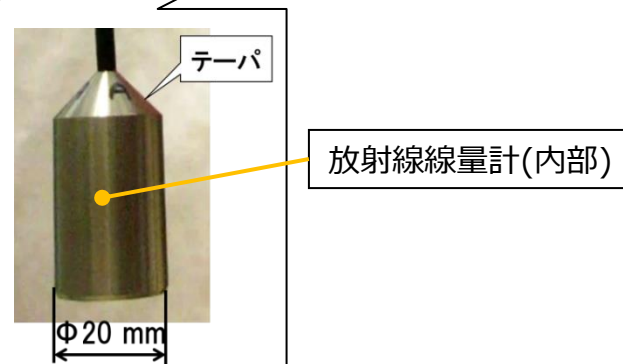
本体寸法	ガイドパイプ走行時：長さ699mm×幅72mm×高さ93mm グレーチング走行時：長さ316mm×幅286mm×高さ93mm
センサユニット寸法	幅20mm×高さ40mm ケーブル：長さ3.5m
重量	約10kg
スペック	カメラ×5、放射線線量計×1
耐放射線性	約1000Sv以上



I型(ガイドパイプ通過時)



C型(平面走行時)



1号機 B2調査（動画）

調査装置インストール



2号機ペデスタル内上部調査 (A2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

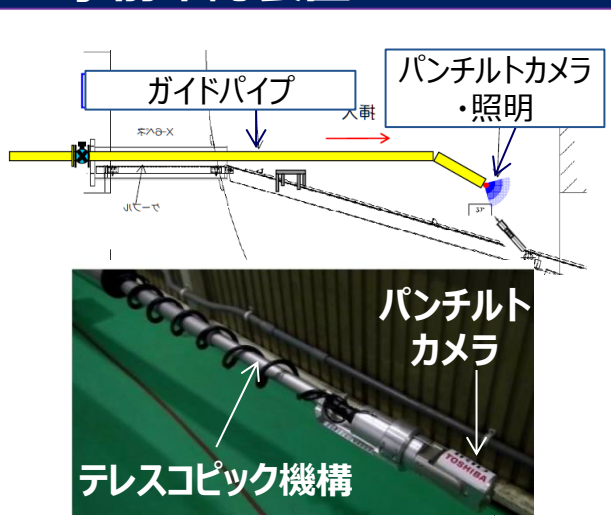
2. レール上堆積物除去

2月9日実施

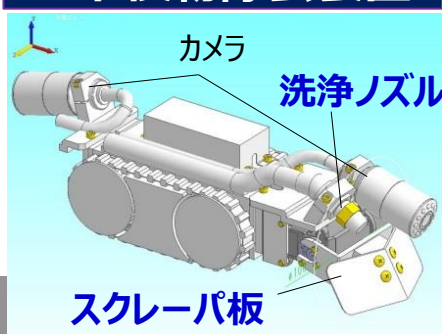
3. A2調査

2月16日実施

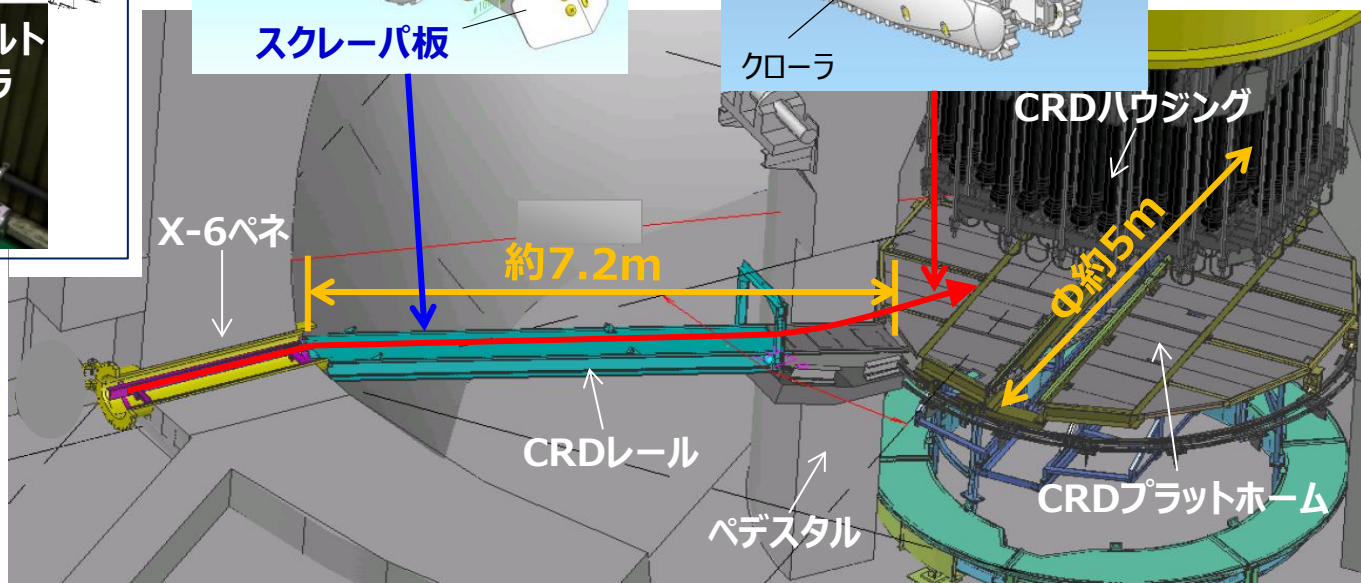
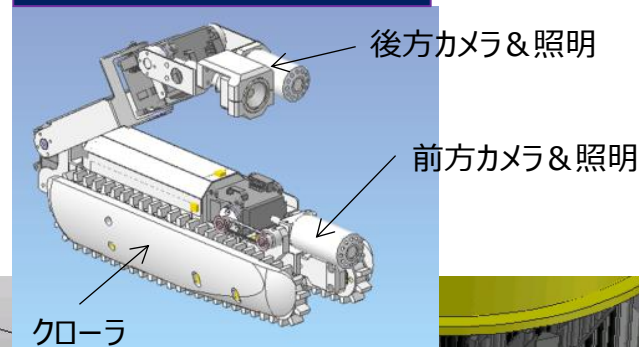
1. 事前確認装置



2. 堆積物除去装置



3. A2調査装置



2号機ペデスタル内上部調査 (A2調査)

ペデスタル内 上部 (画像処理後)

VIEWING ANGLE : 90

ImageList:

ImageIndex:



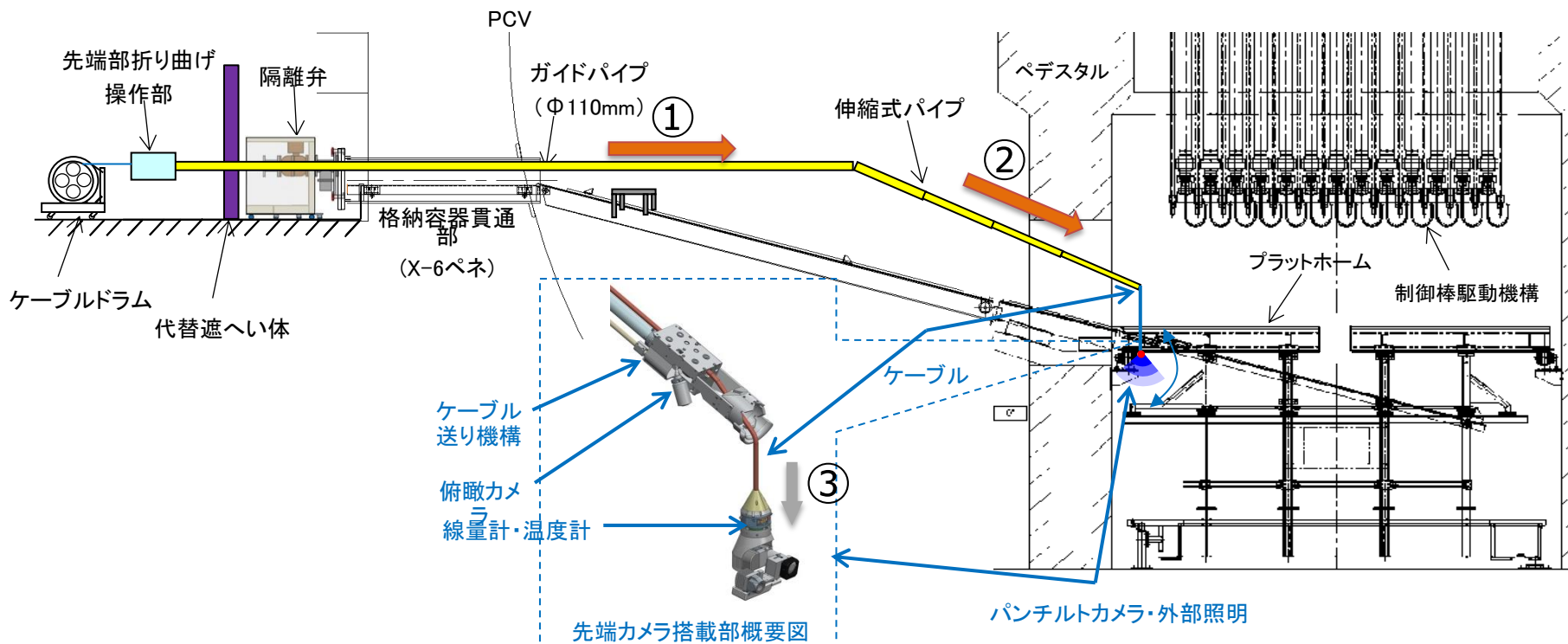
2号機ペDESTAL内下部調査 (A2'調査)

■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（A2'調査）



3号機格納容器内調査 水中ROV



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

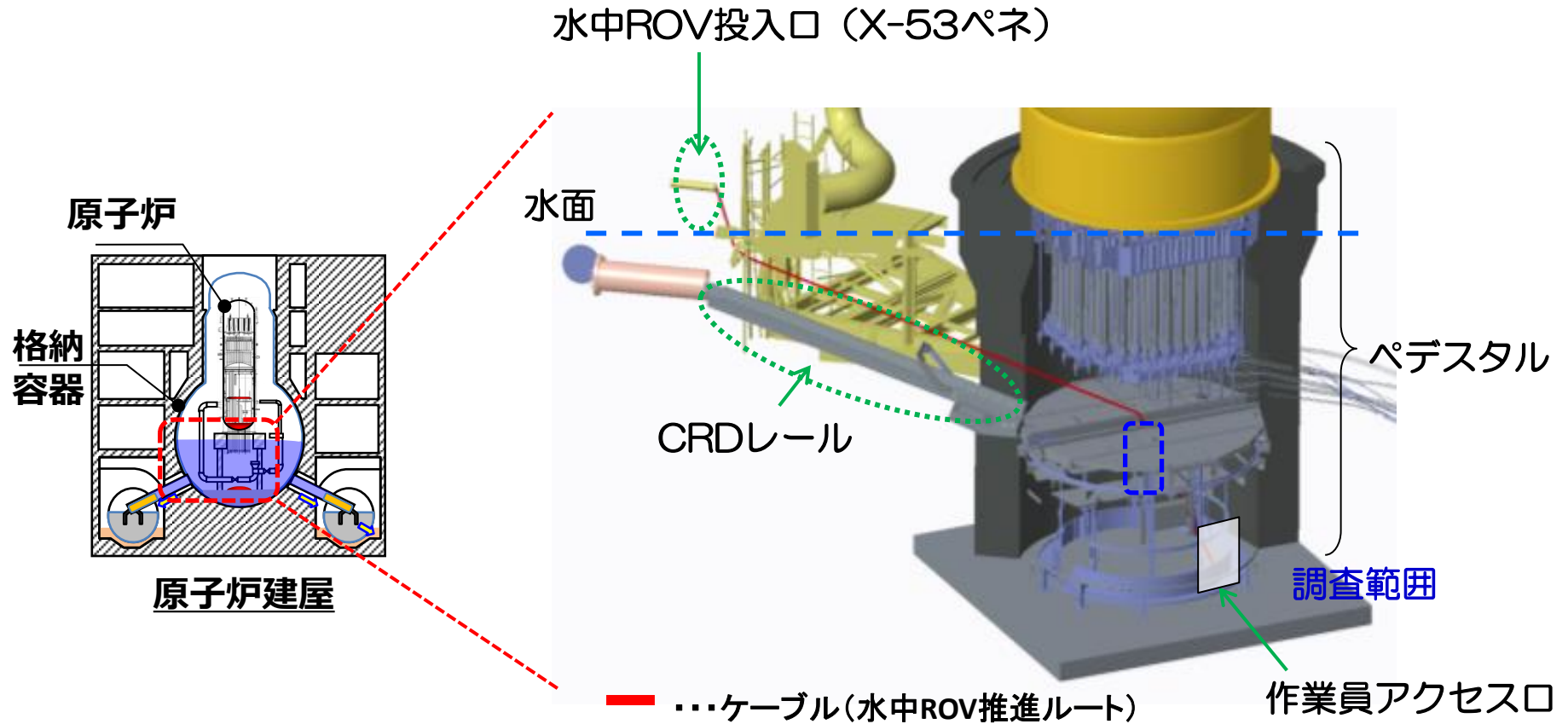
照明

後方カメラ

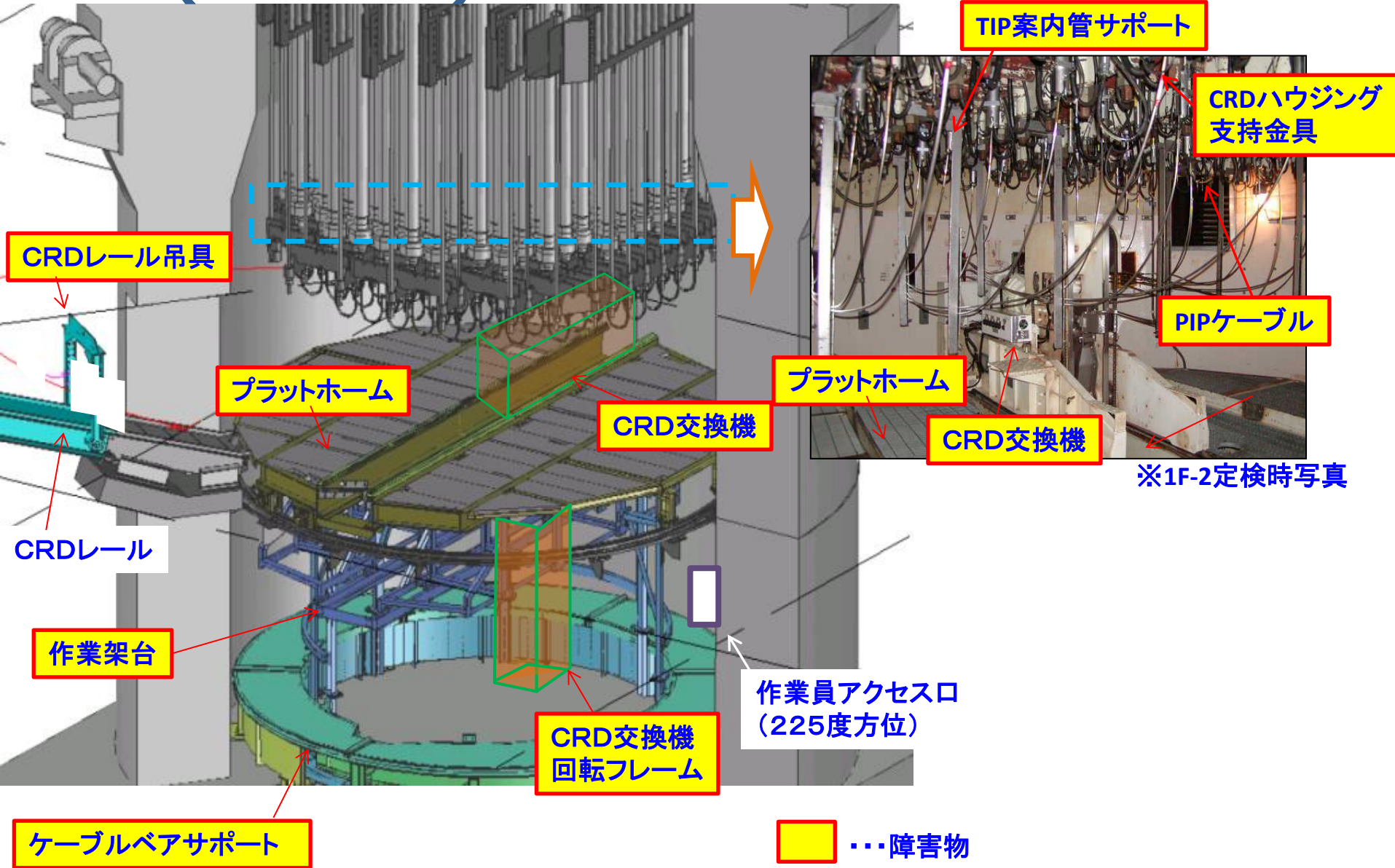
照明



3号機格納容器内調査ルート



PCV(格納容器)内構造物



3号機水中ROV撮影映像(動画)

隔離弁 開

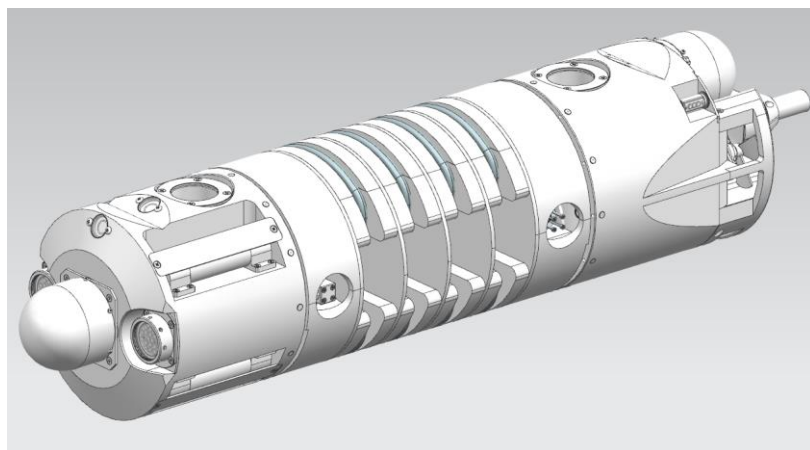


目 次

1. はじめに
2. 原子炉格納容器補修技術開発
- 3. 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**
4. 燃料デブリ取り出し技術開発
5. 燃料デブリ取出しにおける安全設計の検討

ボート型アクセス装置

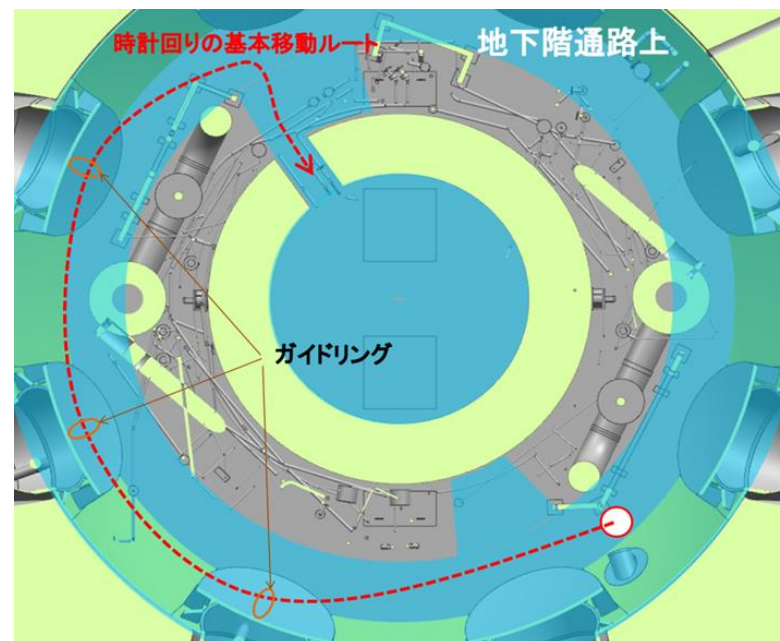
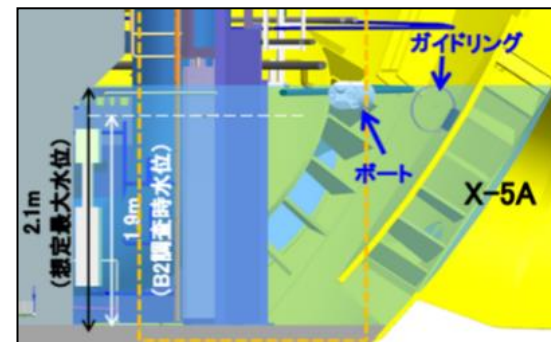
- 格納容器内の水の上を航行して、広範囲に移動可能なボート型アクセス装置を製作中



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

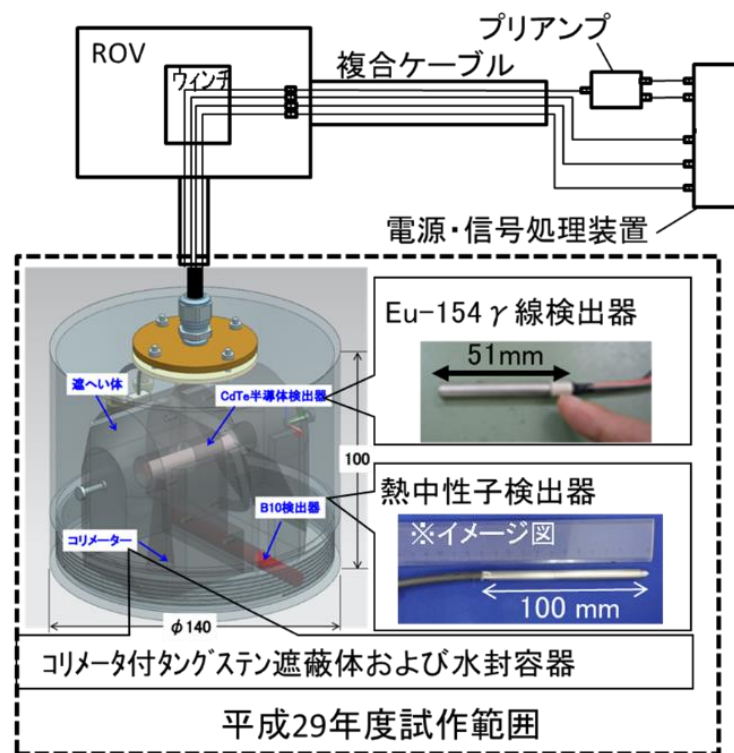
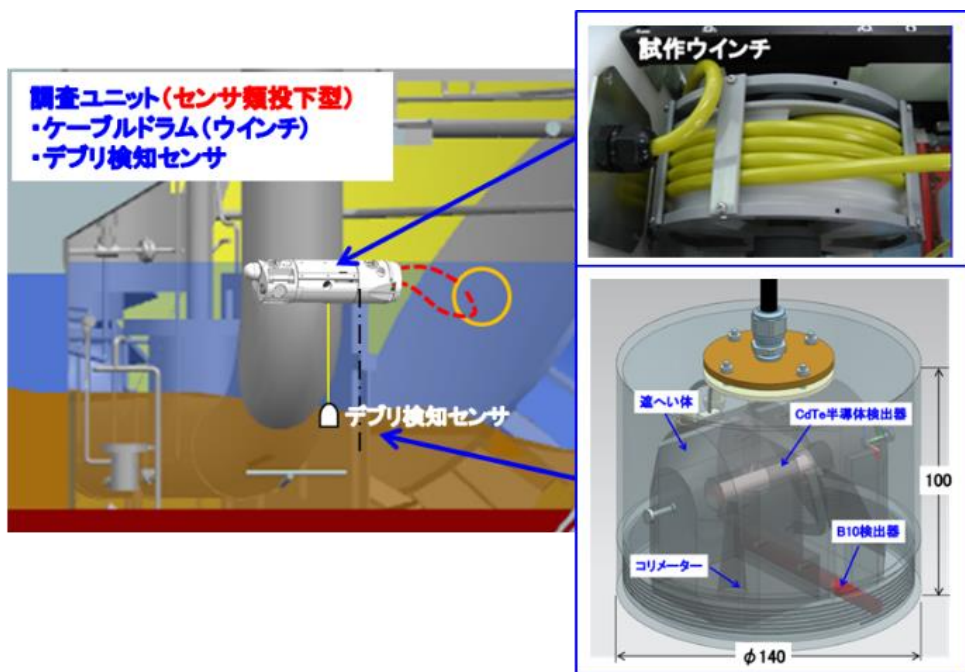
ボート型アクセス装置外観



ボート型アクセス装置の動線

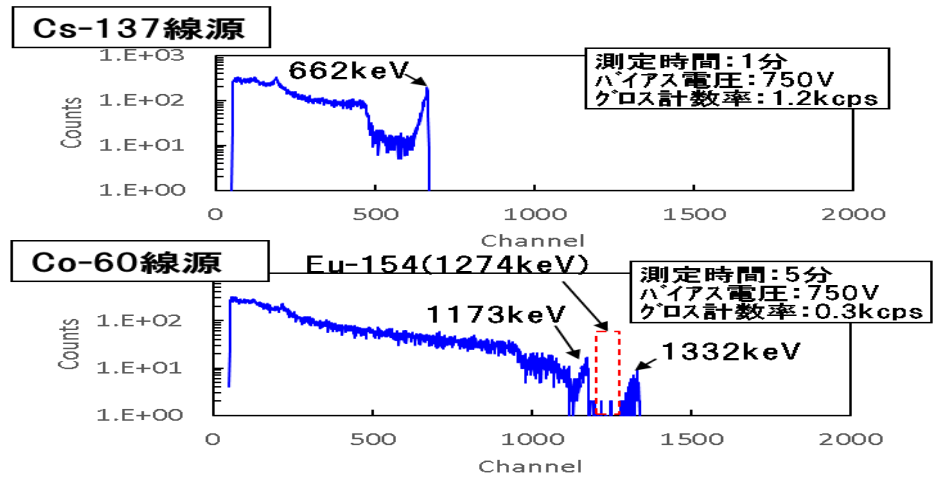
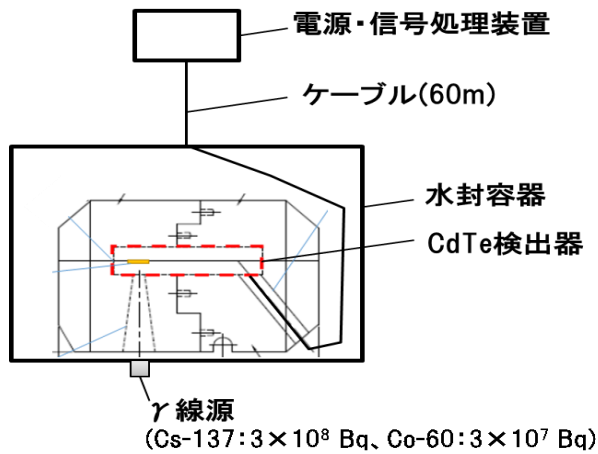
デブリ検知技術

- これまでの調査で視認した堆積物中の**燃料デブリ**を検知するための**放射線計測技術**を開発中
- **Eu-154 γ 線検出器**（CdTe半導体検出器）と**熱中性子検出器**（B10検出器）を**併用**し、確実なデブリ検知を目指す

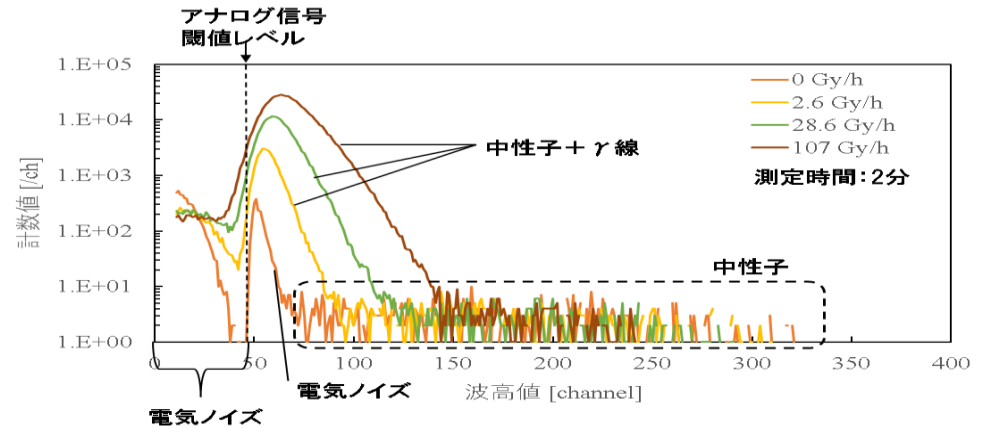
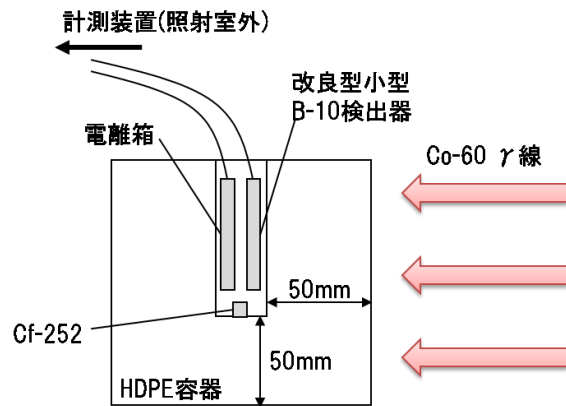


全体&システム構成イメージ

デブリ検知技術



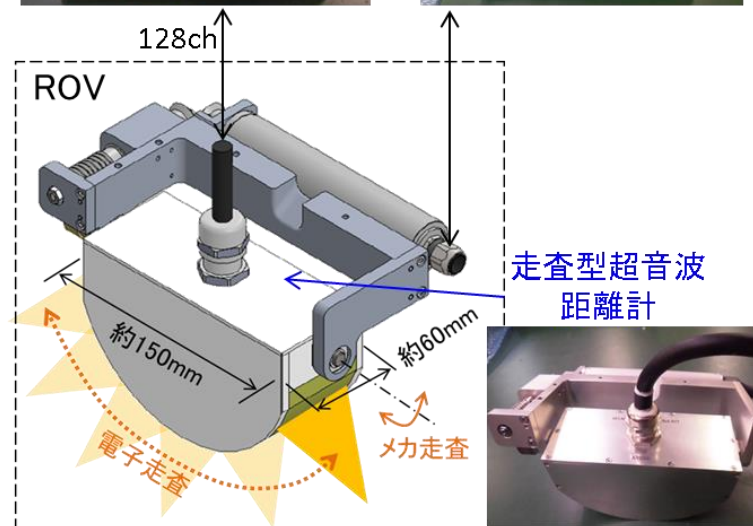
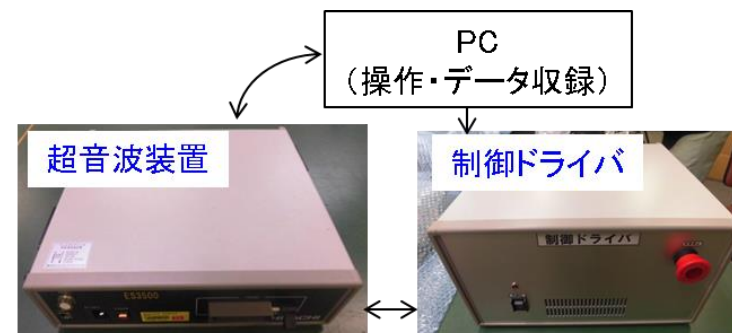
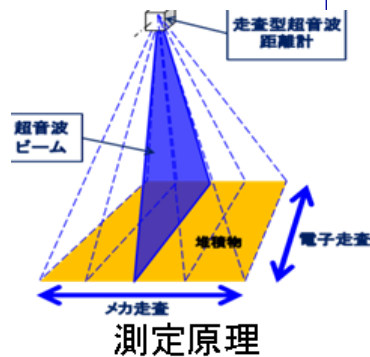
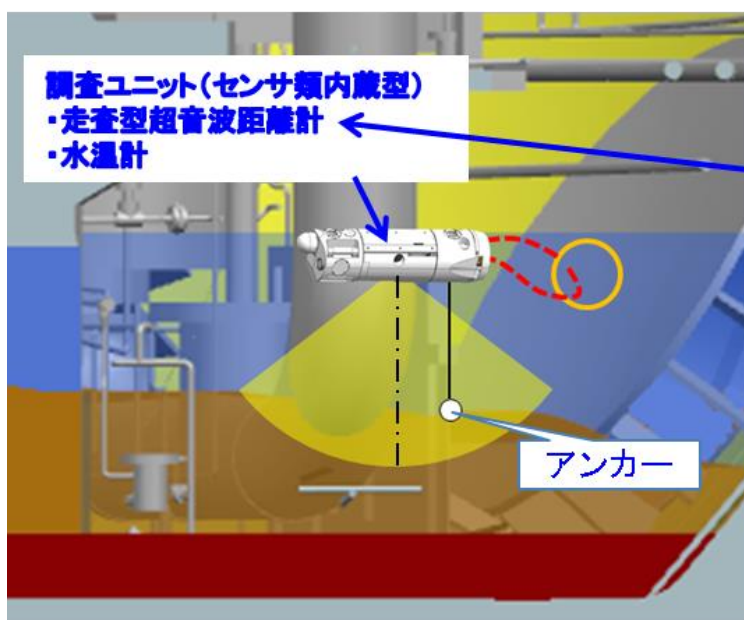
(a) CdTe半導体検出器の単体試験結果例



(b) B10検出器の単体試験結果例

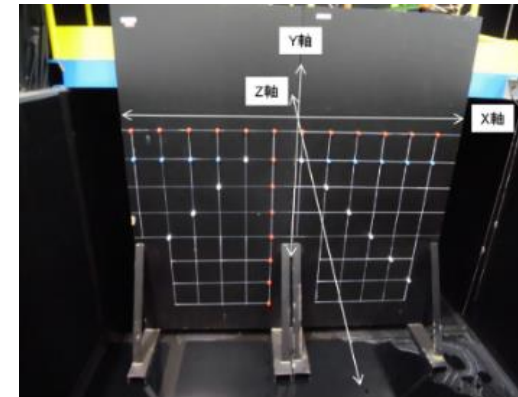
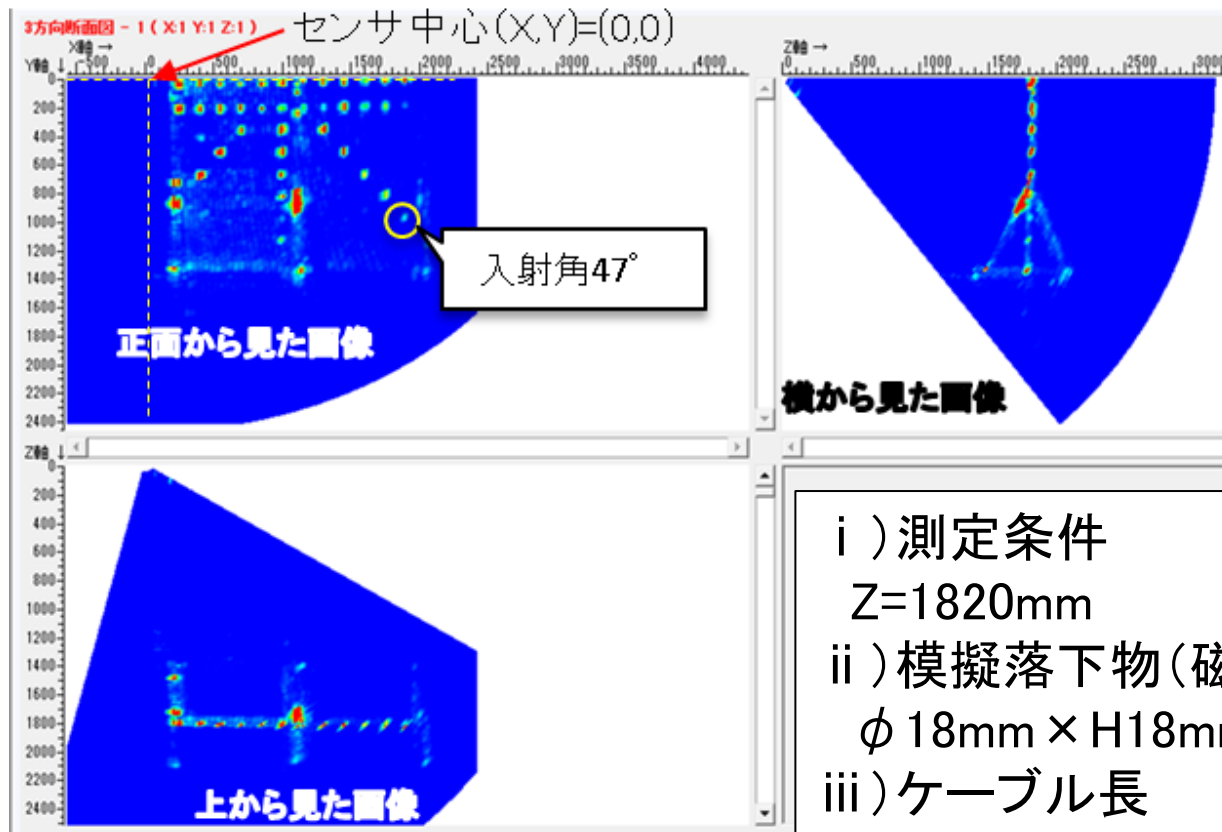
形状計測技術

■ 形状計測の技術開発 (走査型超音波距離計)



走査型超音波距離計の要素試験例

■ 形状計測の技術開発（走査型超音波距離計）



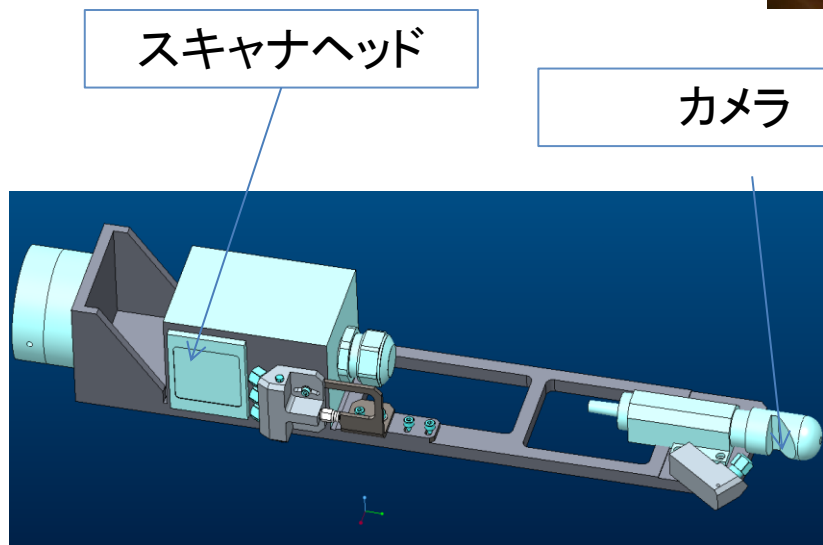
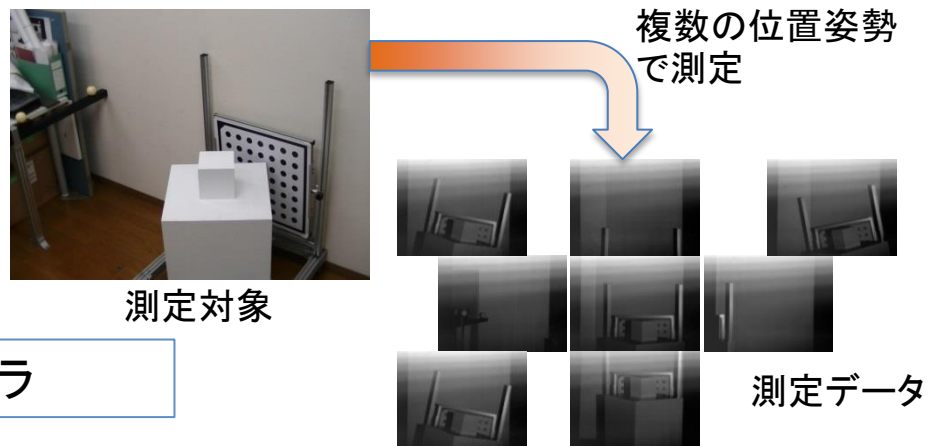
- i) 測定条件
Z=1820mm
- ii) 模擬落下物(磁石)寸法:
φ 18mm × H18mm
- iii) ケーブル長
60m(実機品と同一仕様)

検証試験の例

形状計測技術

■ 形状計測の技術開発 (レーザー光切断法)

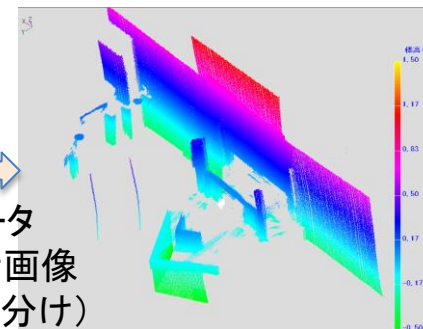
検証試験の例(点群データの重ね合わせ性検証)



センサー外観

複数データを
重ね合わせ

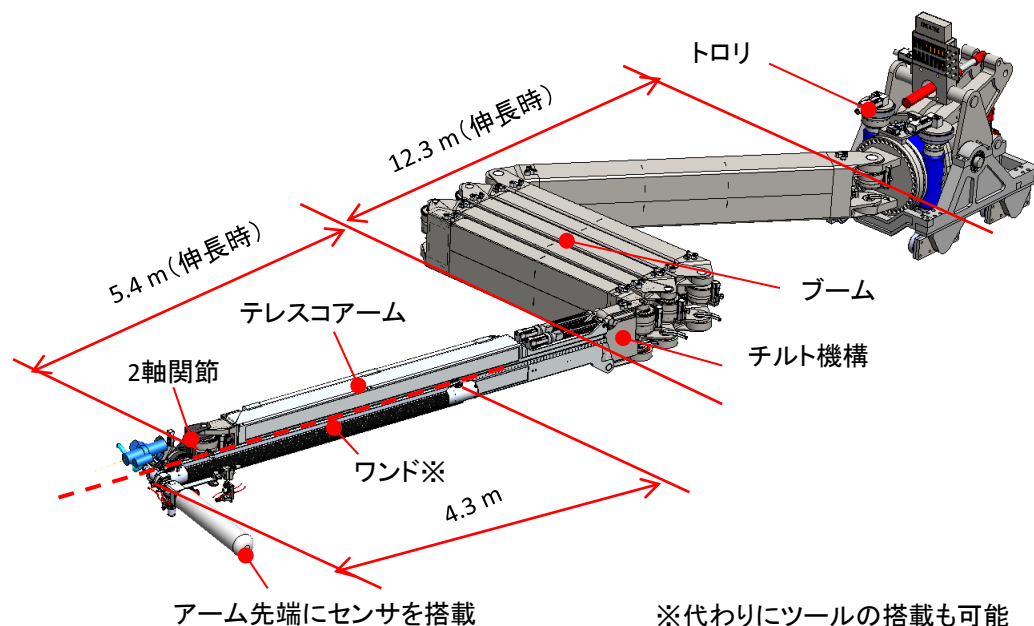
点群データ
重ね合わせ画像
(高さ方向色分け)



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

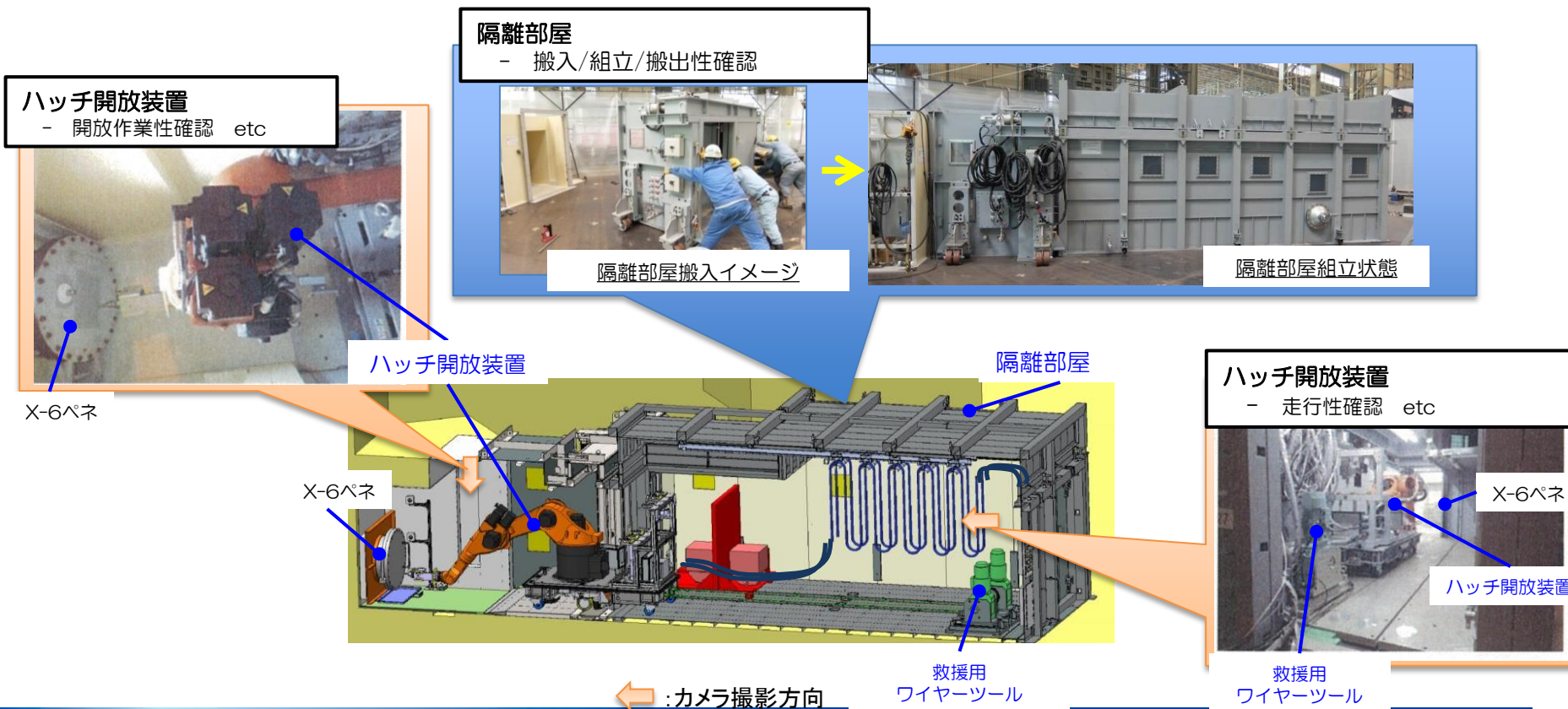
格納容器貫通部ハッチ開放

■ 格納容器貫通部（X-6ペネ）の開放

アーム型アクセス装置を投入するX-6ペネの開放技術を開発中

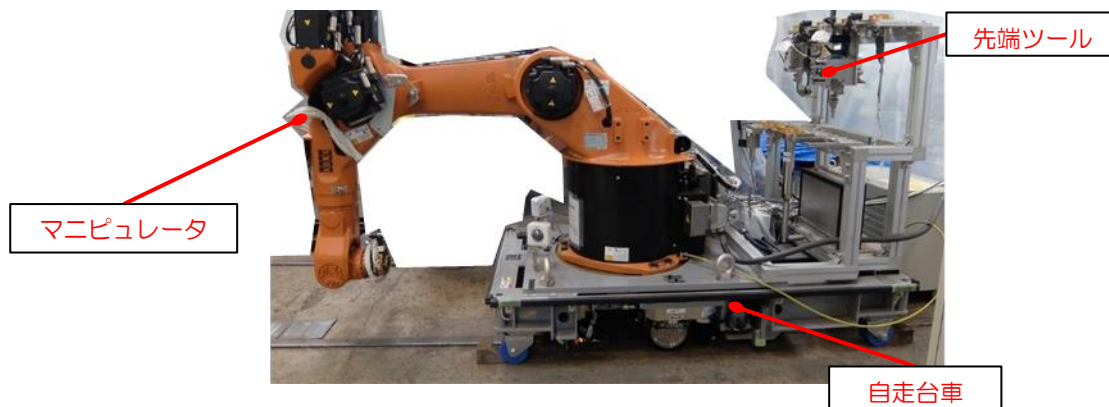
✓ ハッチ開放時の閉じ込め機能

✓ 遠隔でのハッチ開放

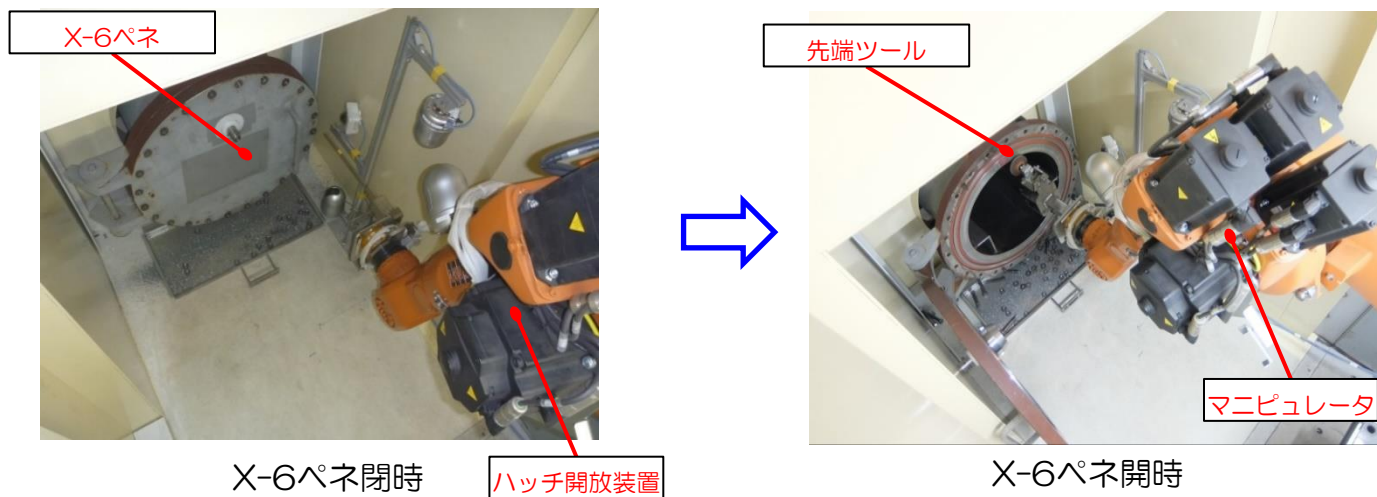


ハッチ開放装置

■ ハッチ開放装置の外観



■ ハッチ開放装置 X-6ペネ開放前後の外観

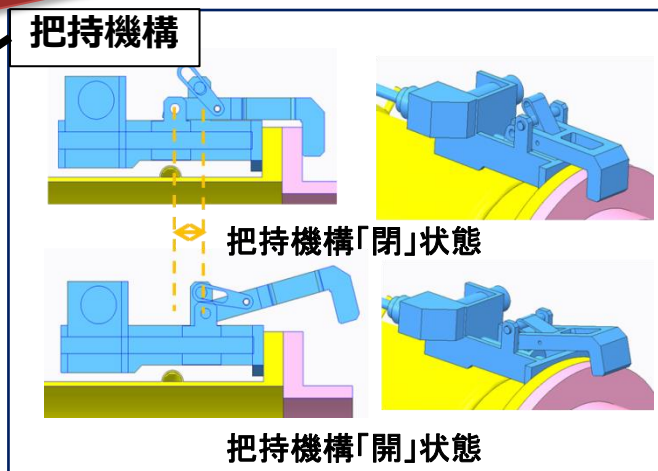
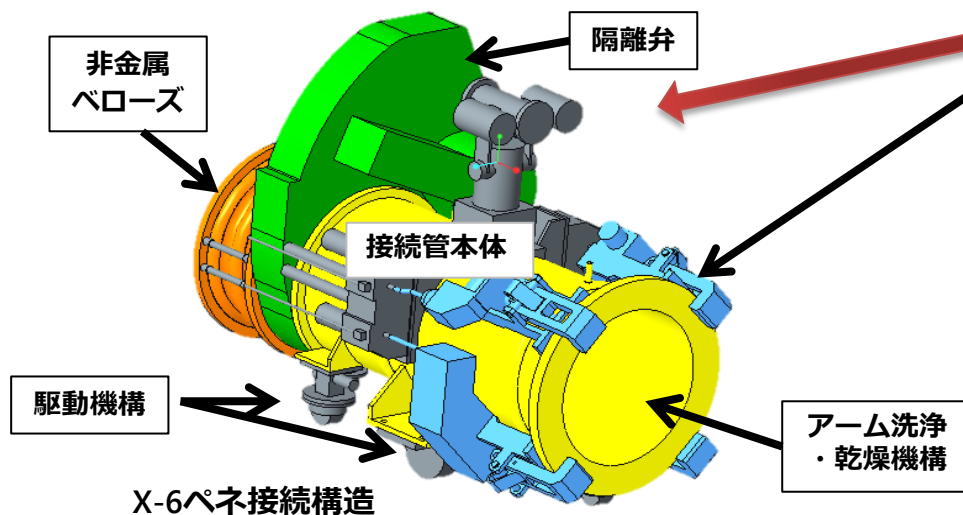
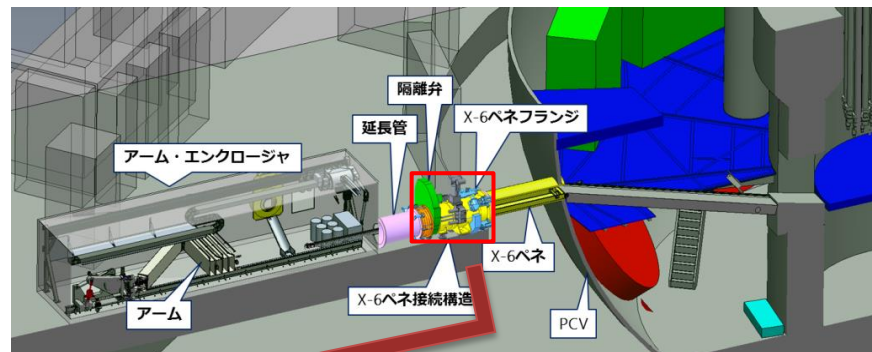


アーム型のアクセスルート

■ 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

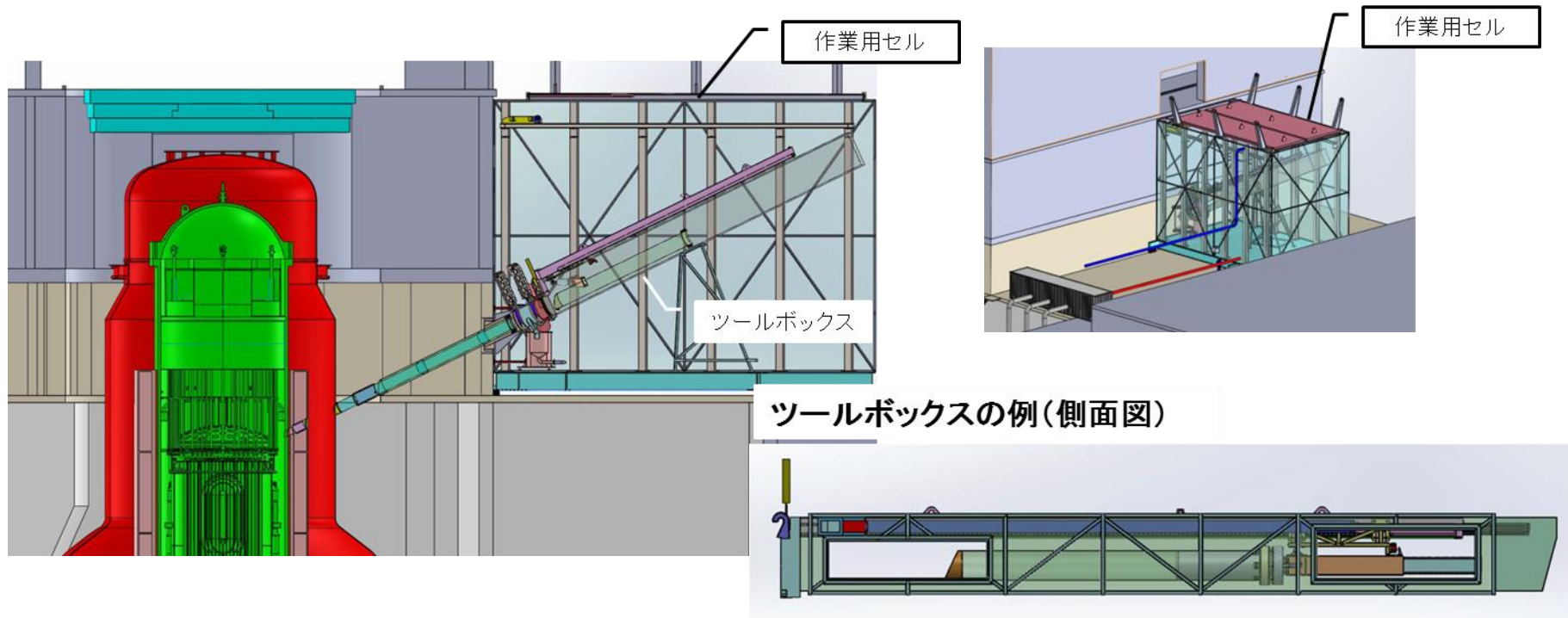
- ✓ 遠隔で既存のペネフランジに接近・取りつく機能
- ✓ 把持機構の耐震性
- ✓ 閉じ込め機能
- ✓ アーム通過性の維持



接続構造体外観

圧力容器内部調査技術

- 上部から圧力容器にアクセスし内部調査するための要素技術は、今後の装置試作に向け、あらかた検証済
- 加えて側面から圧力容器にアクセスするための要素技術を開発中



側面穴開け調査工法のイメージ

目 次

1. はじめに
2. 原子炉格納容器補修技術開発
3. 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
- 4. 燃料デブリ取り出し技術開発**
5. 燃料デブリ取出しにおける安全設計の検討

デブリ取り出し工法

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

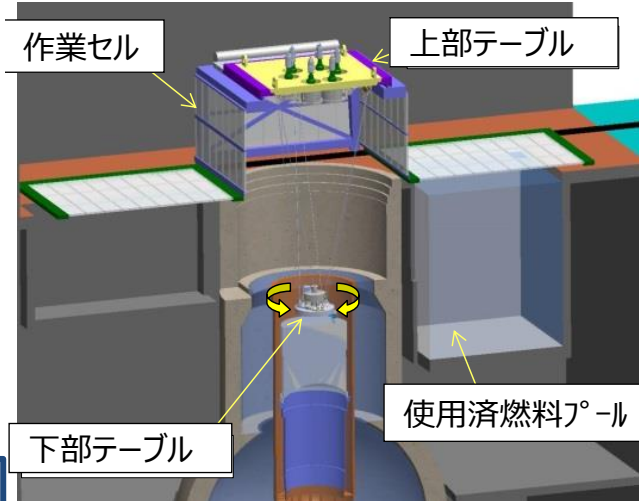
開発目的

- 主要3工法について、概念検討および工法詳細ステップ図を作成し、基盤技術開発の成果と合わせ、**工法実現性の評価**を行う。

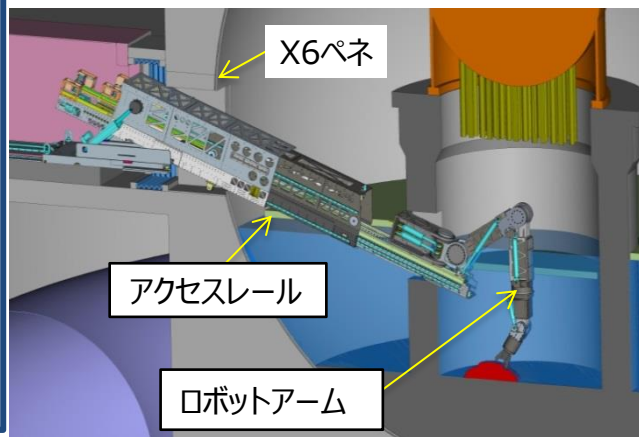
開発期間

2015.9～2017.3

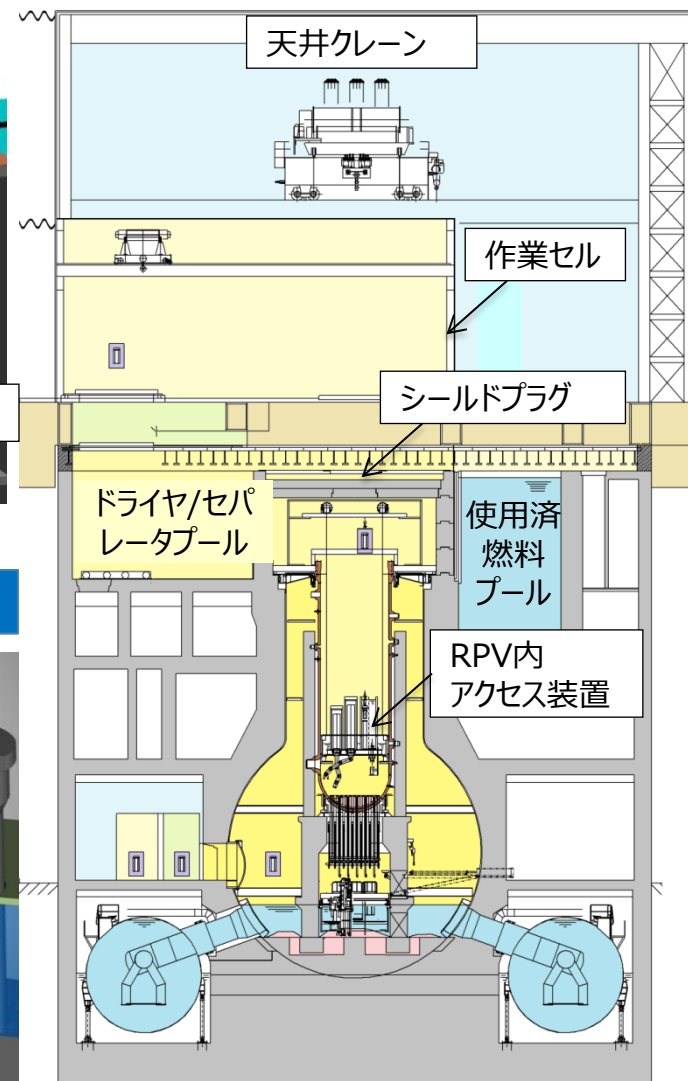
冠水-上アクセス工法（概念）



気中-横アクセス工法（概念）



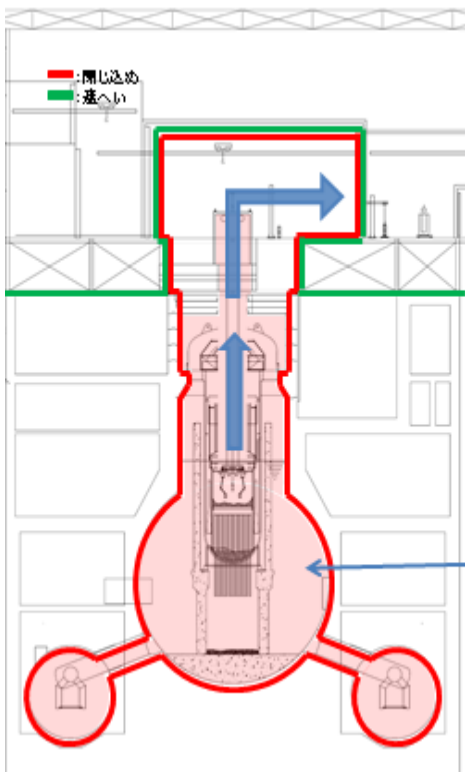
気中-上アクセス工法（概念）



上アクセス工法～デブリ搬出ルート～

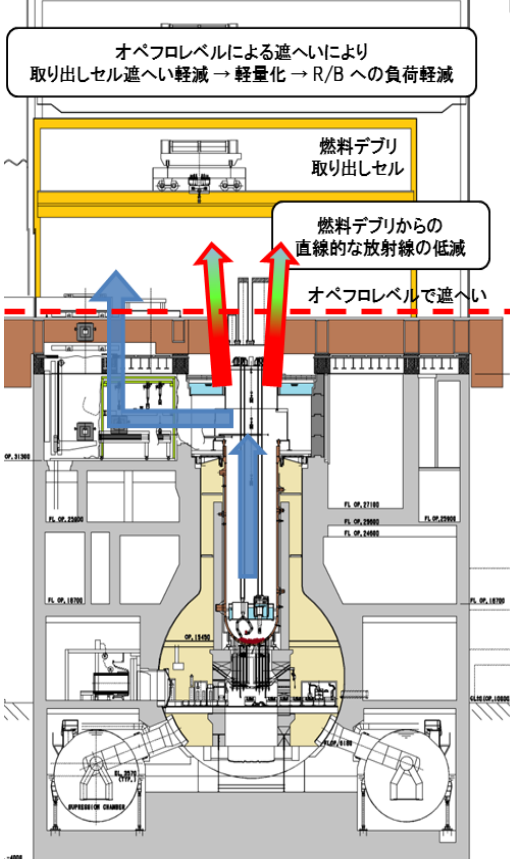
- 上アクセス工法は、閉じ込めと遮へいの要求を満足し、かつ建屋負荷を許容範囲内に収める工法として、搬出ルートを以下の**2ルート**について検討。

【ルートA】



- オペフロ上の**デブリ取り出しセル**で遮へい
 - **シンプル**な動線。
 - **非常時の対応**が比較的容易。
 - R/Bへの負荷が増大するため、セル・設備の小型化が必要。

【ルートB】



- オペフロの**シールドプラグを残して遮へい**
 - デブリからの直接線をシールドプラグで遮へい
 - ↓
 - ① **損傷したR/Bへの負荷軽減**が可能。
 - ② デブリ取り出しセルの遮へい機能を軽減可（**軽量化**）。
 - **DSPを作業スペース**（収納缶への収納など）として活用。

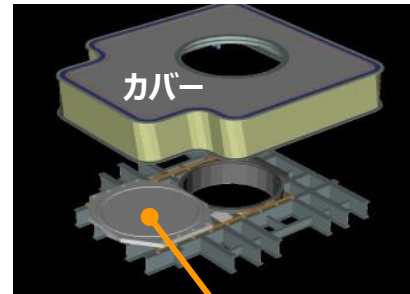
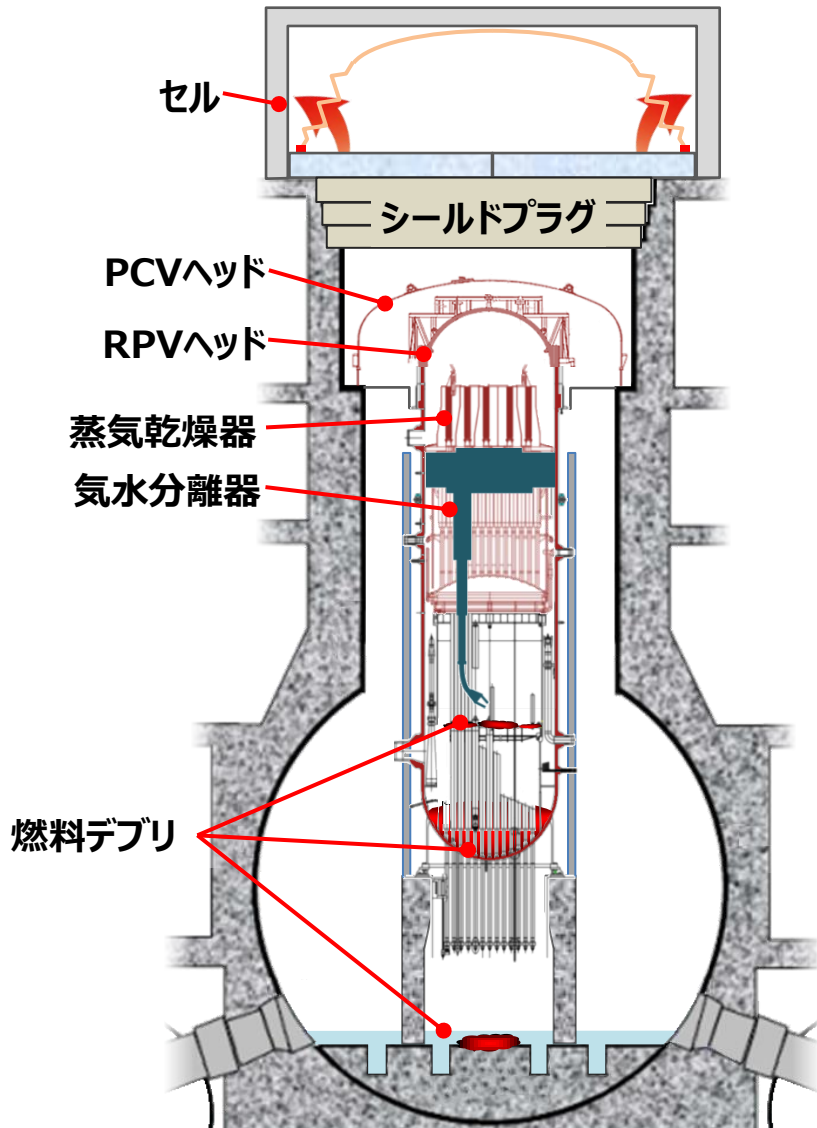
オペフロレベルによる遮へいにより
取り出しセル遮へい軽減 → 軽量化 → R/B への負荷軽減

燃料デブリ取り出しセル

燃料デブリからの直線的な放射線の低減

オペフロレベルで遮へい

上アクセス工法～デブリ取り出し方イメージ～

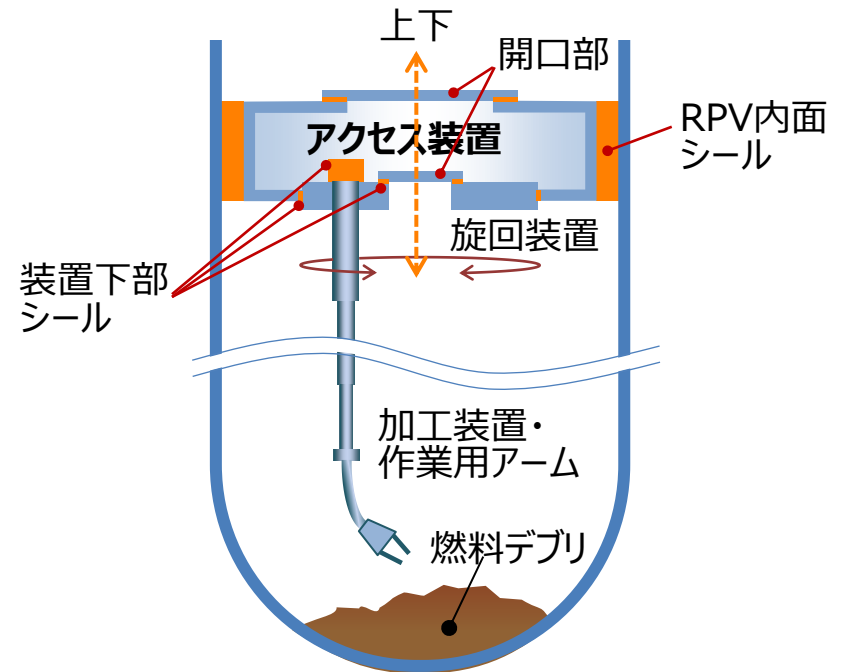


開閉式遮へいポート

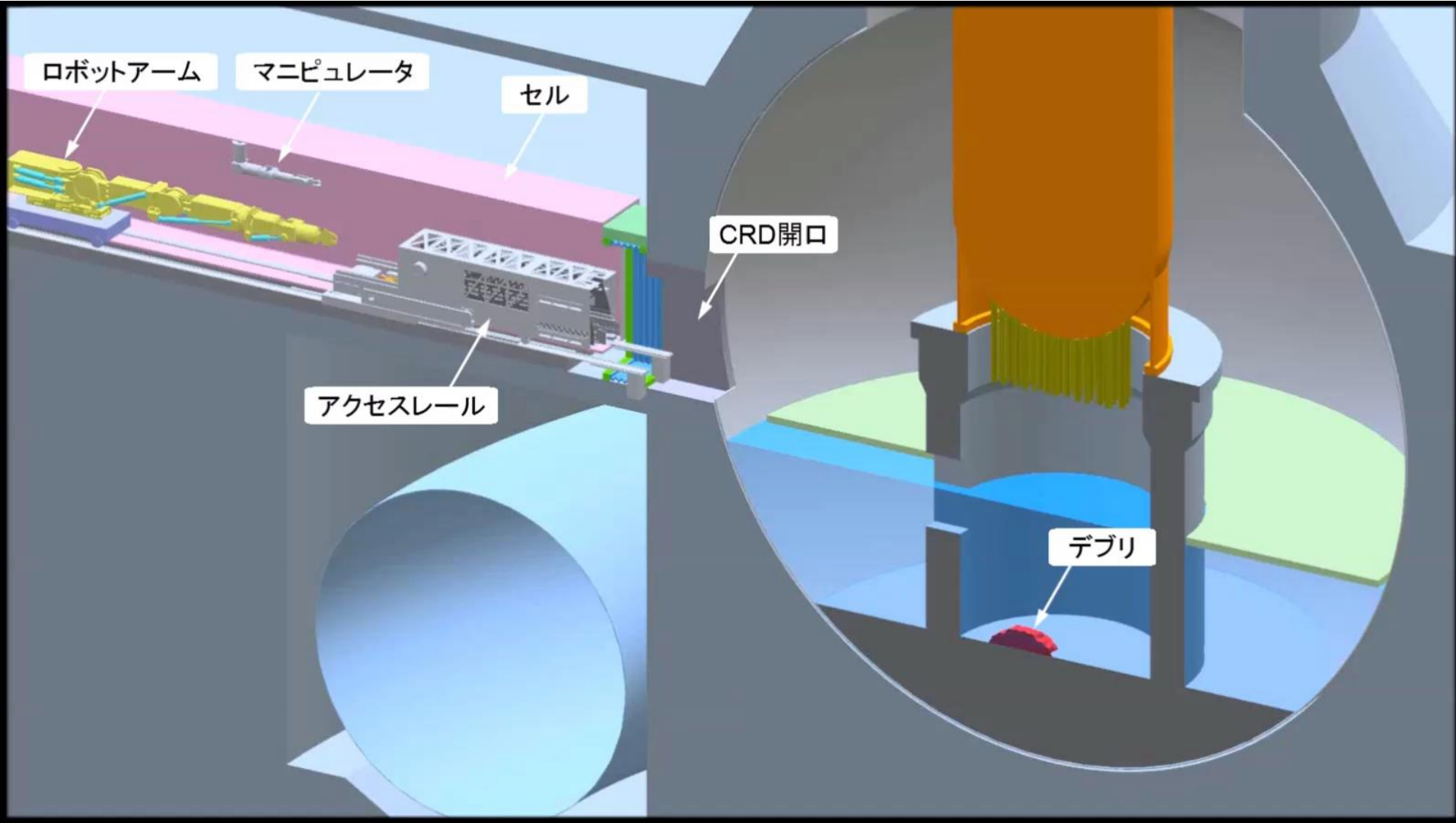


ダスト飛散防止用フィルム

RPV内アクセス装置 (イメージ)



【横アクセス工法】アクセスレール方式～取り出しイメージ～(動画)

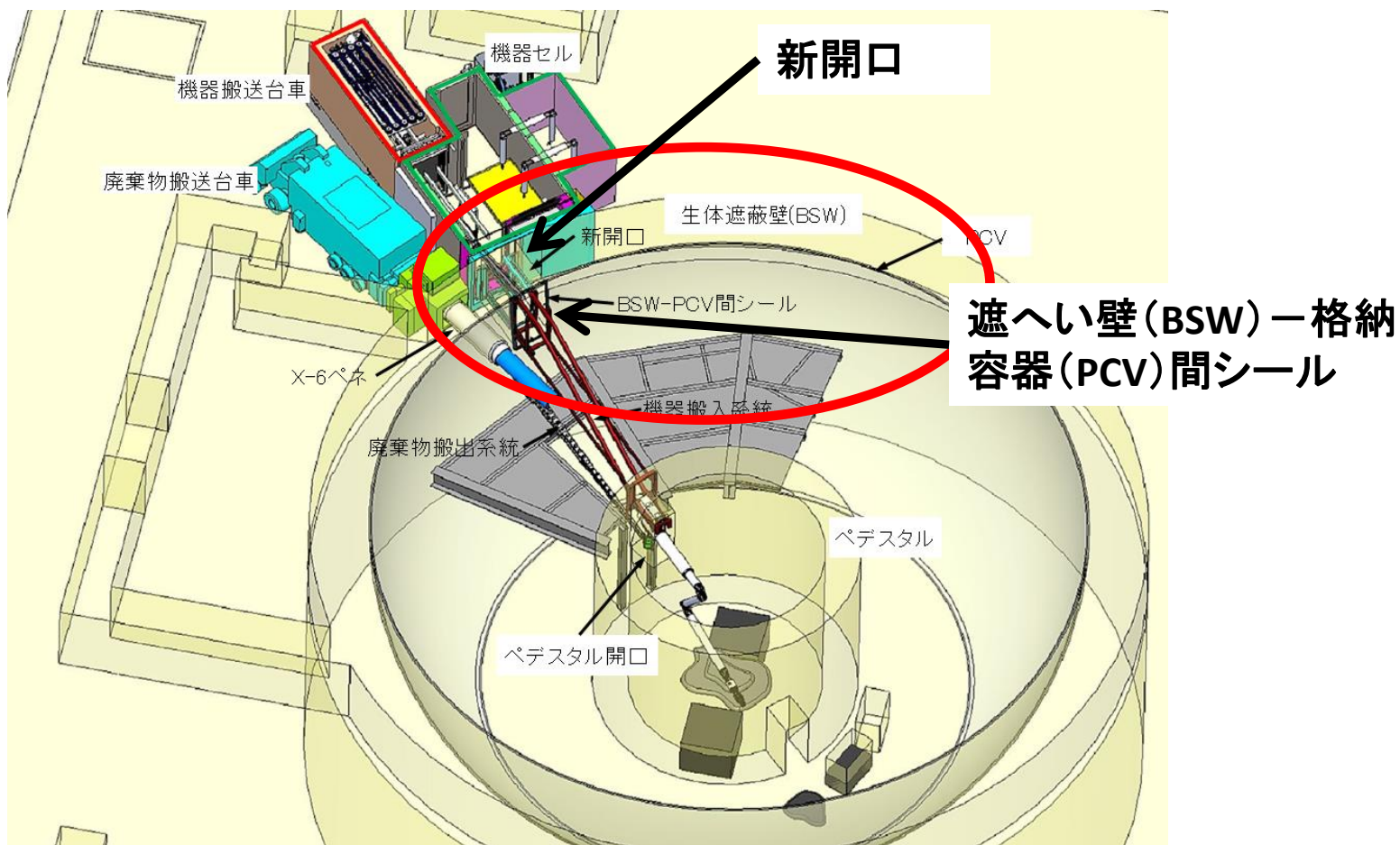


【横アクセス工法】アクセスレール方式～工場モックアップ～(動画)



【横アクセス工法】デブリ取り出しに係る技術

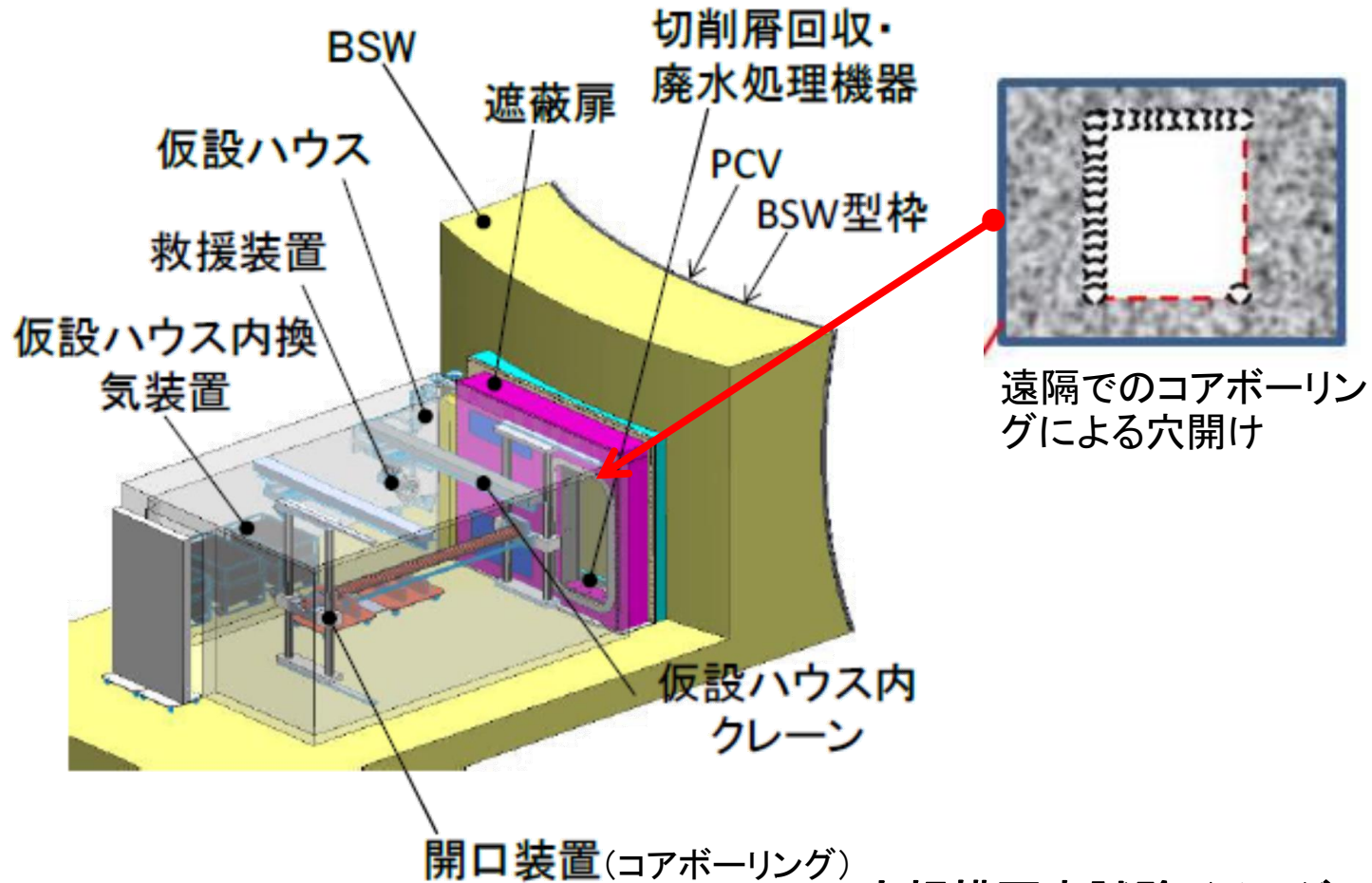
- デブリ取り出しの工法を実現するための要素技術を開発中



横アクセス工法の一例 イメージ

遮へい壁穴開け技術

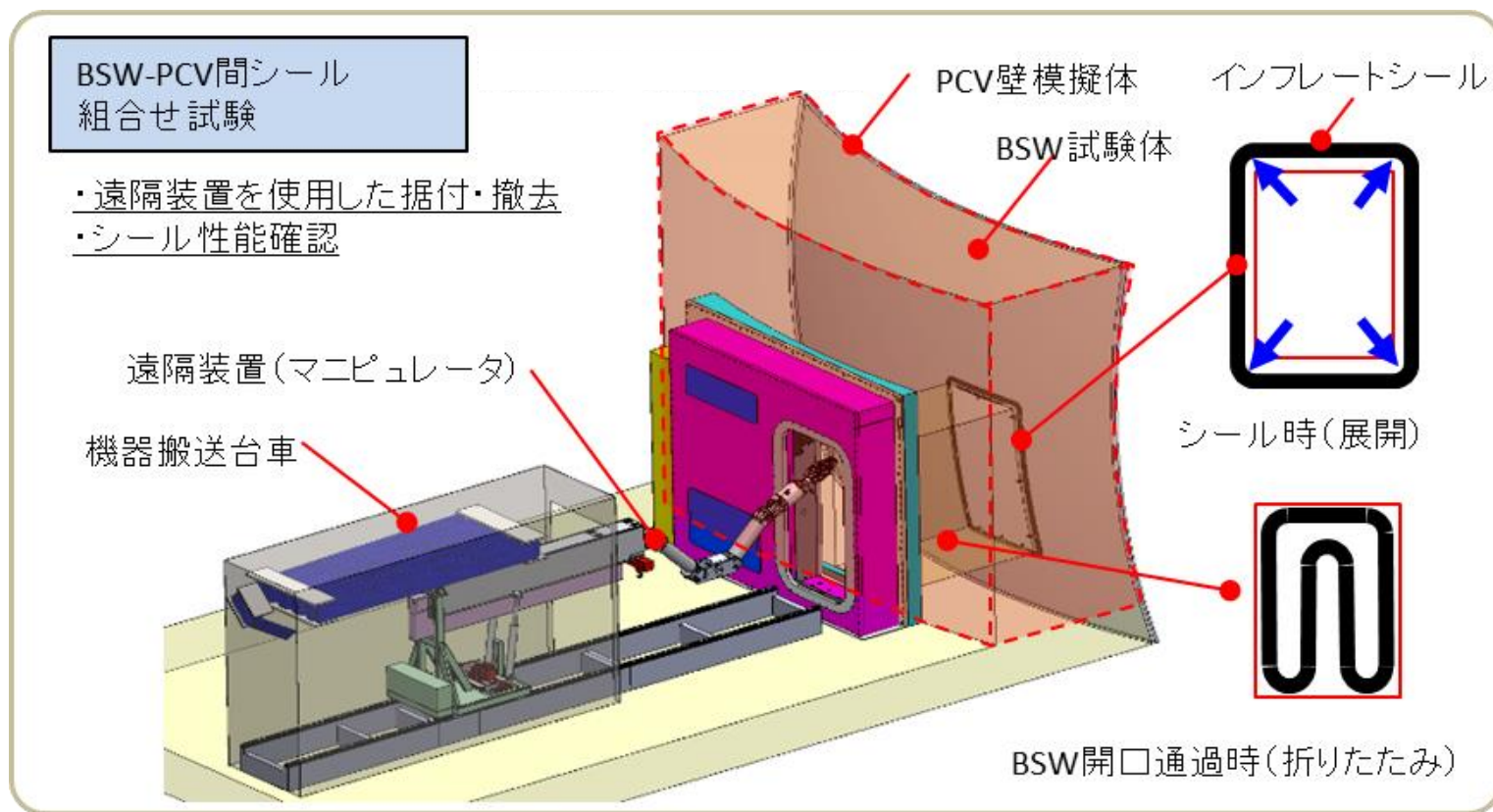
- 厚さ約 2 mの**頑健な鉄筋コンクリート製の遮へい壁**にコアボーリングを使って大きな**開口を設ける技術**を開発中



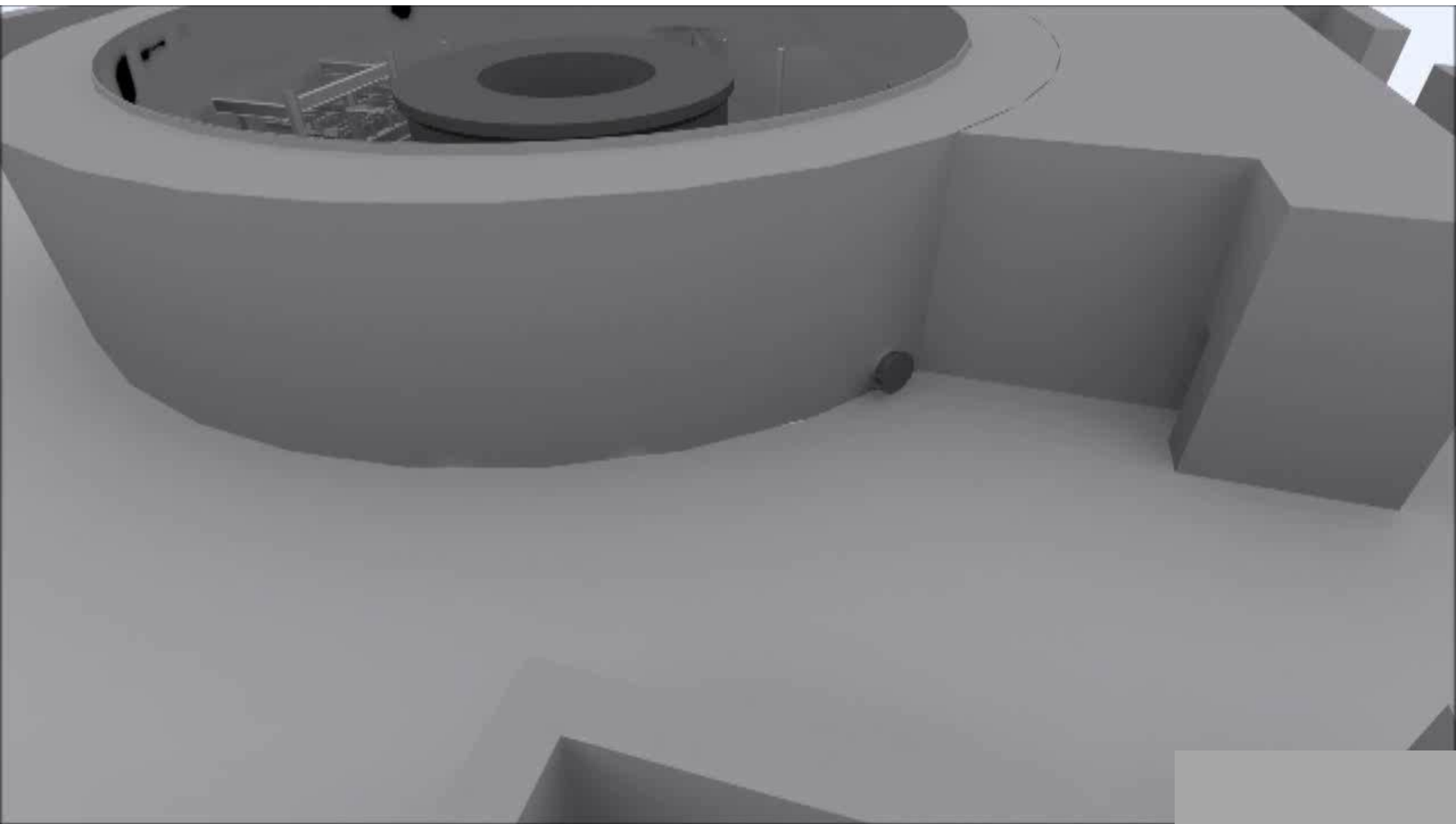
実規模要素試験イメージ

遮へい壁・格納容器間のシール技術

- 遮へい壁に穴を空けたのち、格納容器に開口を設ける際、遮へい壁と格納容器間に閉じ込めのバウンダリを構築する必要有
- **遮へい壁・格納容器間の間隙をシールする技術**を開発中

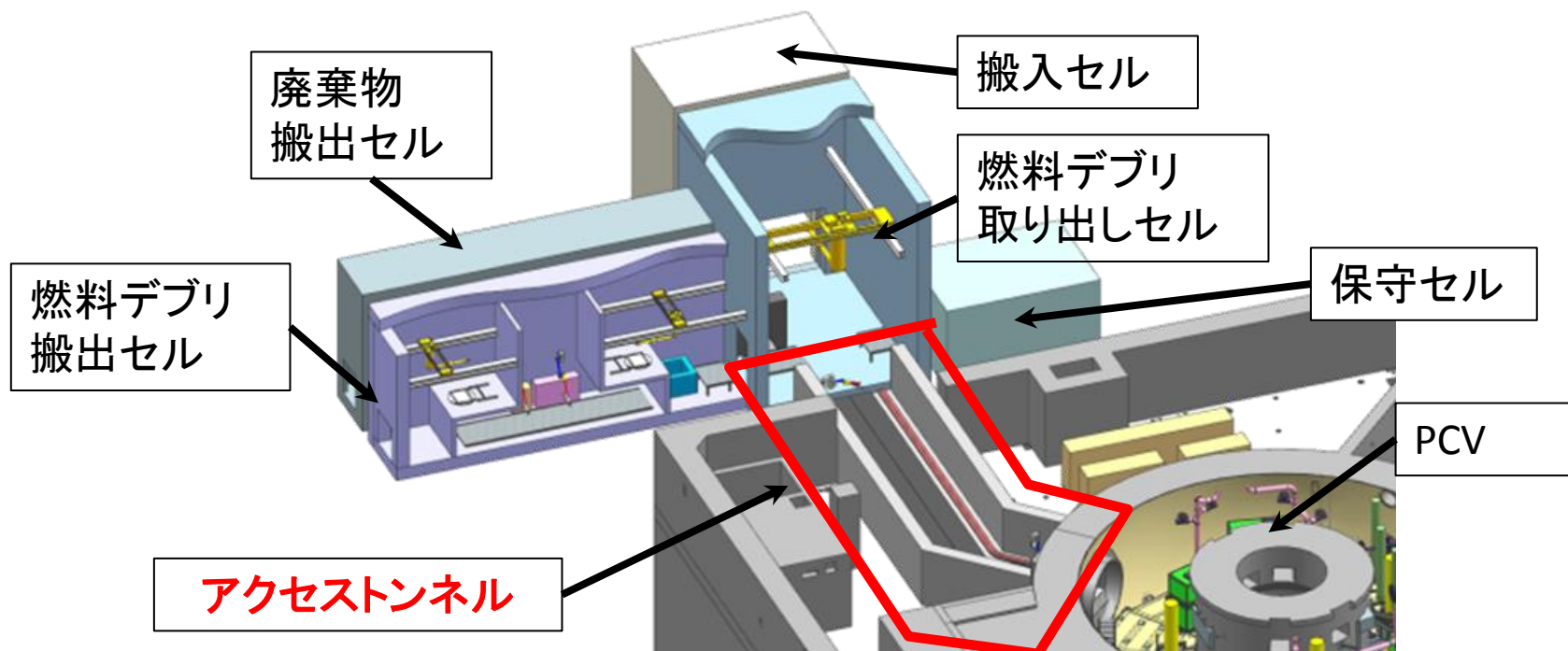


穴開け～シール設置 取り出し工法への適用イメージ



【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

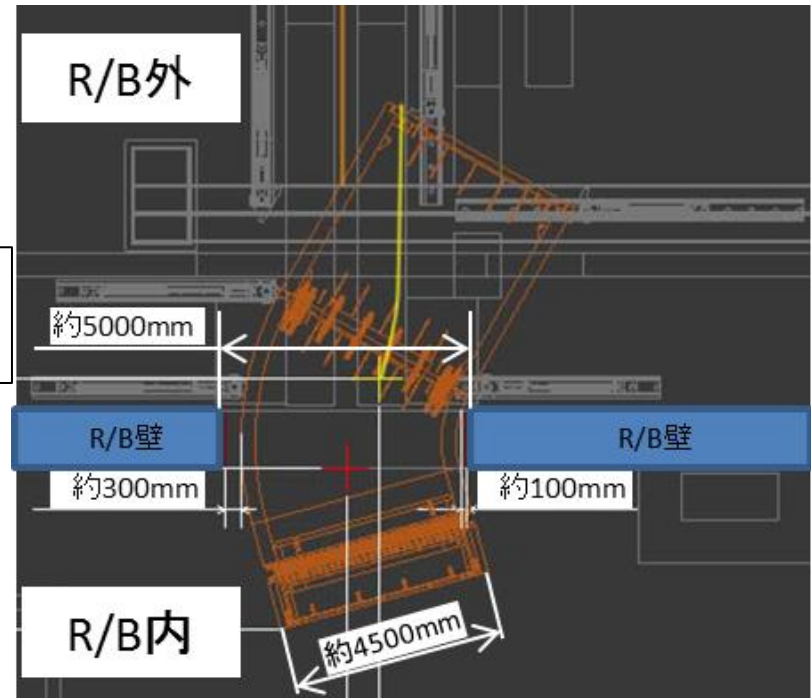
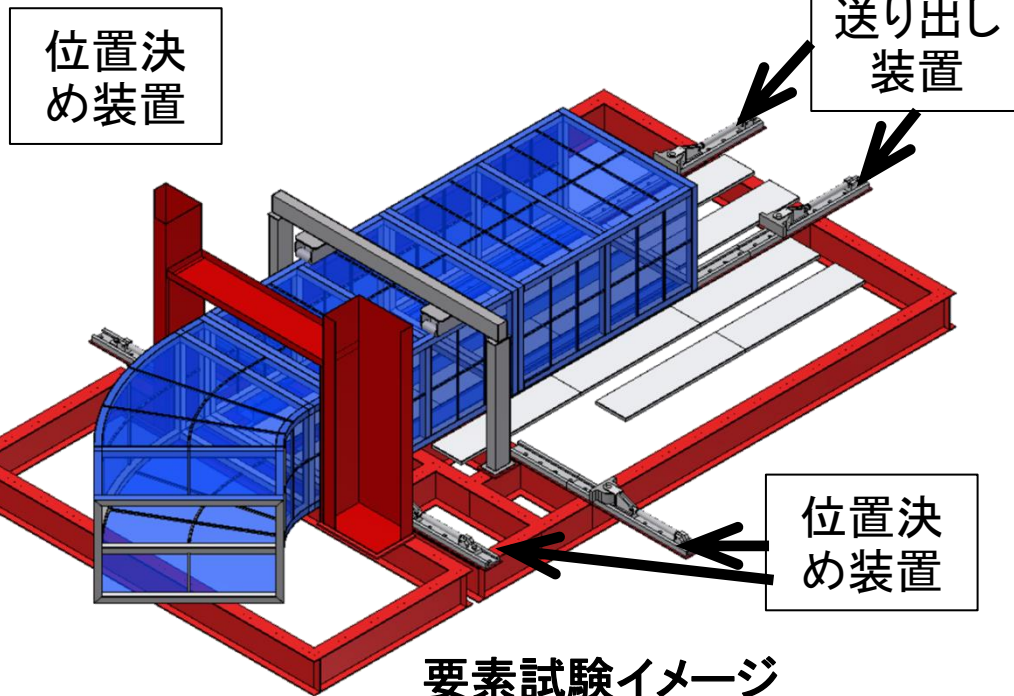


アクセストンネル工法の配置イメージ

トンネル施工技術の要素試験



送り出し工法の例



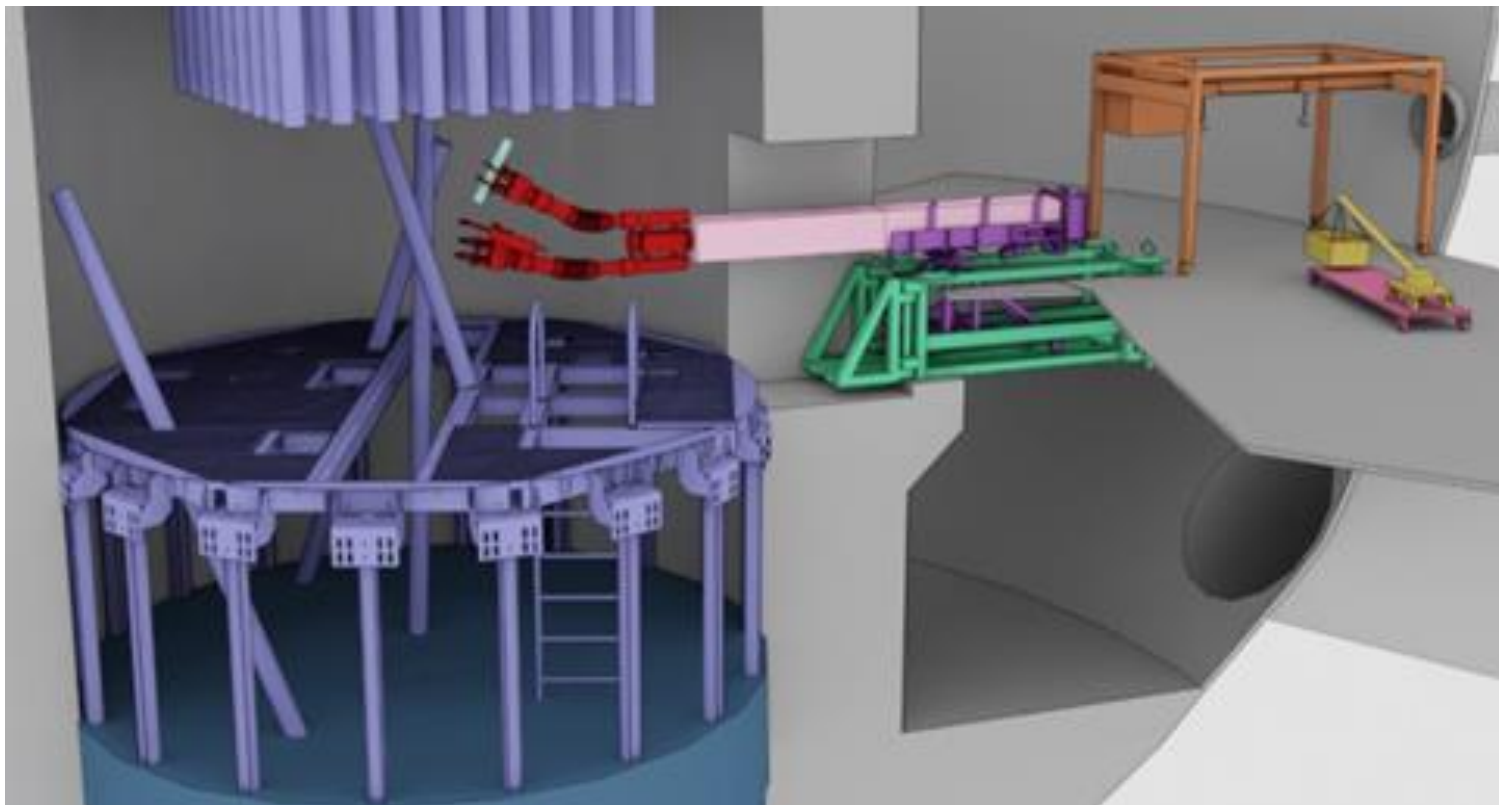
狭隘作業のイメージ

*R/B: 原子炉建屋

横 接 近 工 法
作 業 ス テ ッ プ

干渉物撤去技術

- これまでの内部調査でペDESTAL内に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DESTル内干渉物撤去 要素試験の様子

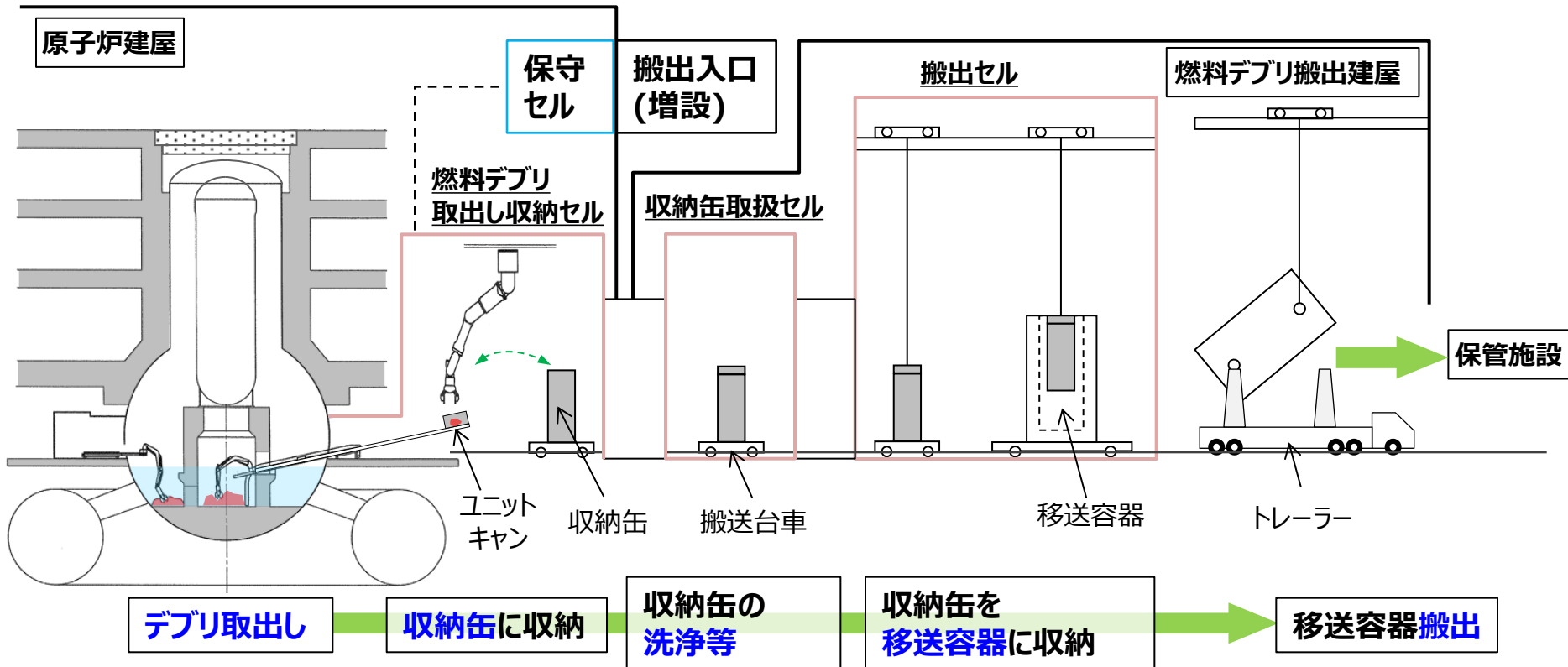


収納・移送・保管技術

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）



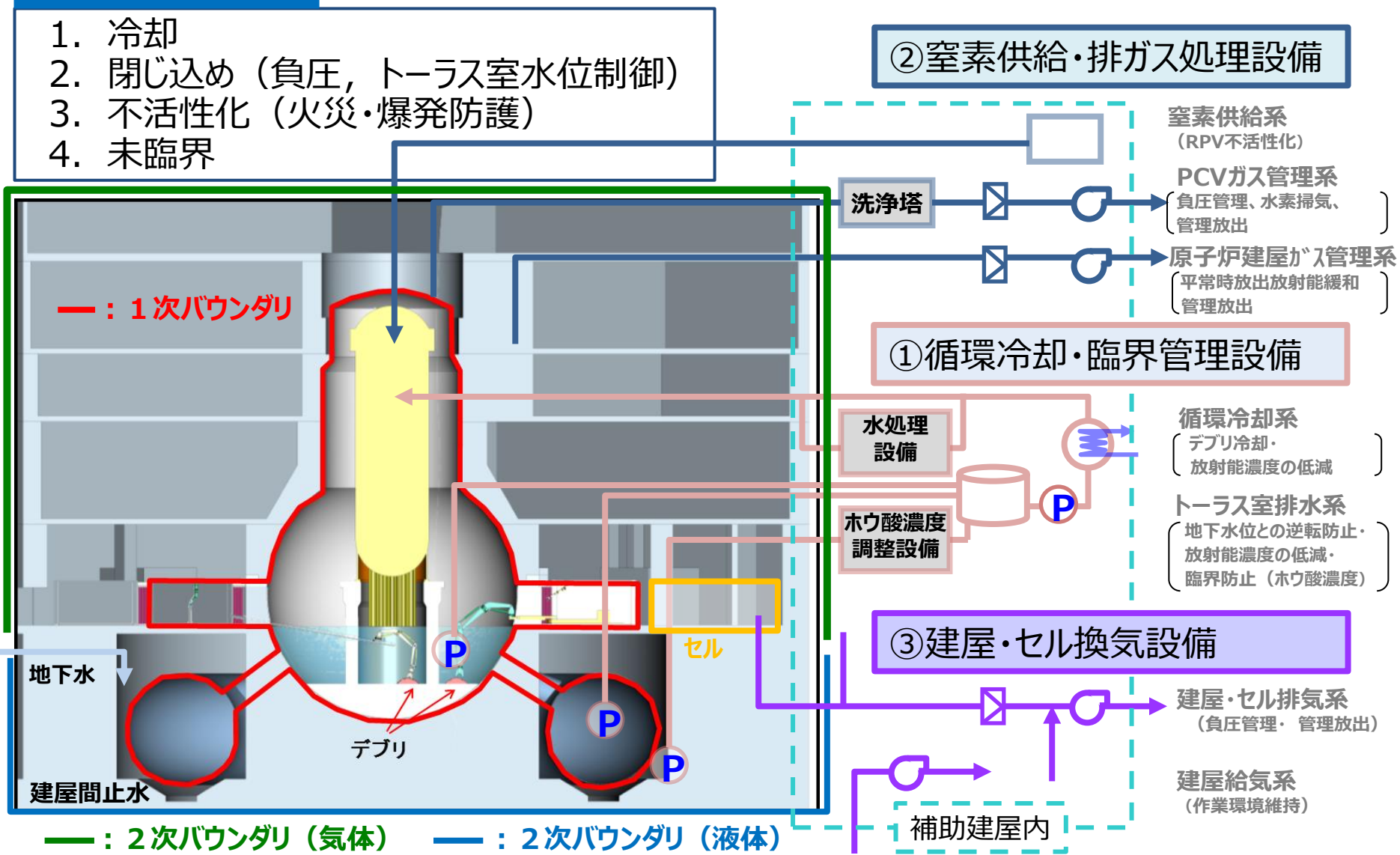
目 次

1. はじめに
2. 原子炉格納容器補修技術開発
3. 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
4. 燃料デブリ取り出し技術開発
5. **燃料デブリ取出しにおける安全設計の検討**

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

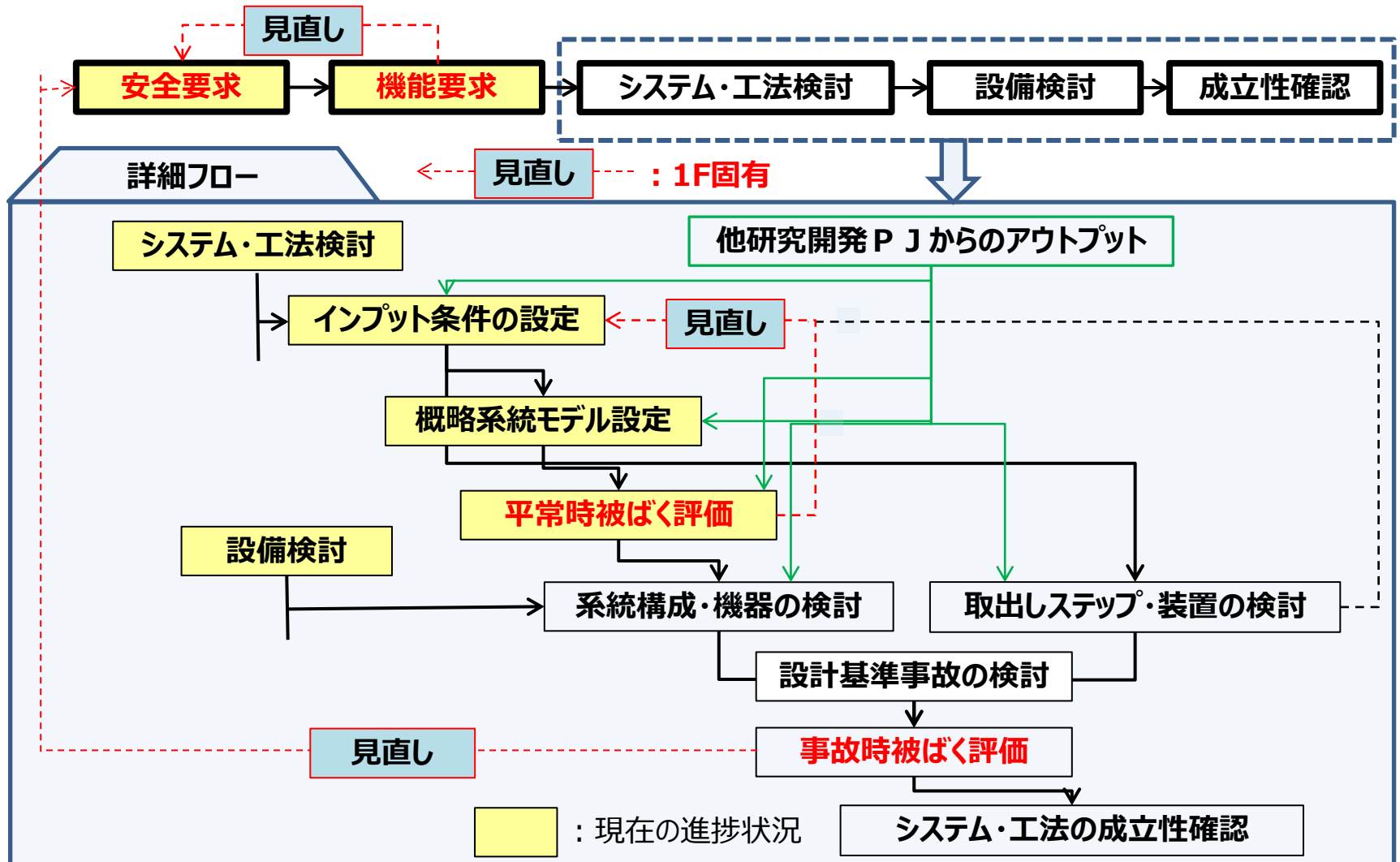


検討の進め方：背景

- 中長期ロードマップ・戦略プランの実現を支援する技術開発
 - 初号機の燃料デブリ取り出し方法の確定、ならびに燃料デブリ取り出し開始（2021）
 - 安全かつ速やかに（燃料デブリを）取り出す
 - 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・・・溶融した燃料の取出し・保管を含む廃止措置をできるだけ早期に完了する（措置を講ずべき事項）
- 工法・システムの開発
 - 概念設計がきわめて重要，・・・**ロバストな概念設計**
 - 既存のモデル、ガイドライン、具現化された要求事項・ビジョンが無い
 - 技術構成の基本は原子力発電システムではなく、不定型の燃料を取り扱う設備。（TMI-2の経験や再処理等設備構成が参照先）
 - 0から設計するのではなく、事故後の現場がスタートであること。
（高放射線環境／燃料の形態・所在が不明確。現状のリスクの上に新たに構築・運用する設備。PCV・RPV内情報の不足と今後の随時の更新。）
 - システム構成やスループットの検討にあたり、**安全要求事項の設定**が必須
- 安全の上位概念の検討に基づく燃料デブリ取り出しシステムの概念検討
 - 主要システム（循環注水冷却システム、負圧管理システム、放射性ダスト処理システム、臨界管理システム）の成立性の検討と評価。

検討の進め方：手順 システムの設計可能性を検討する

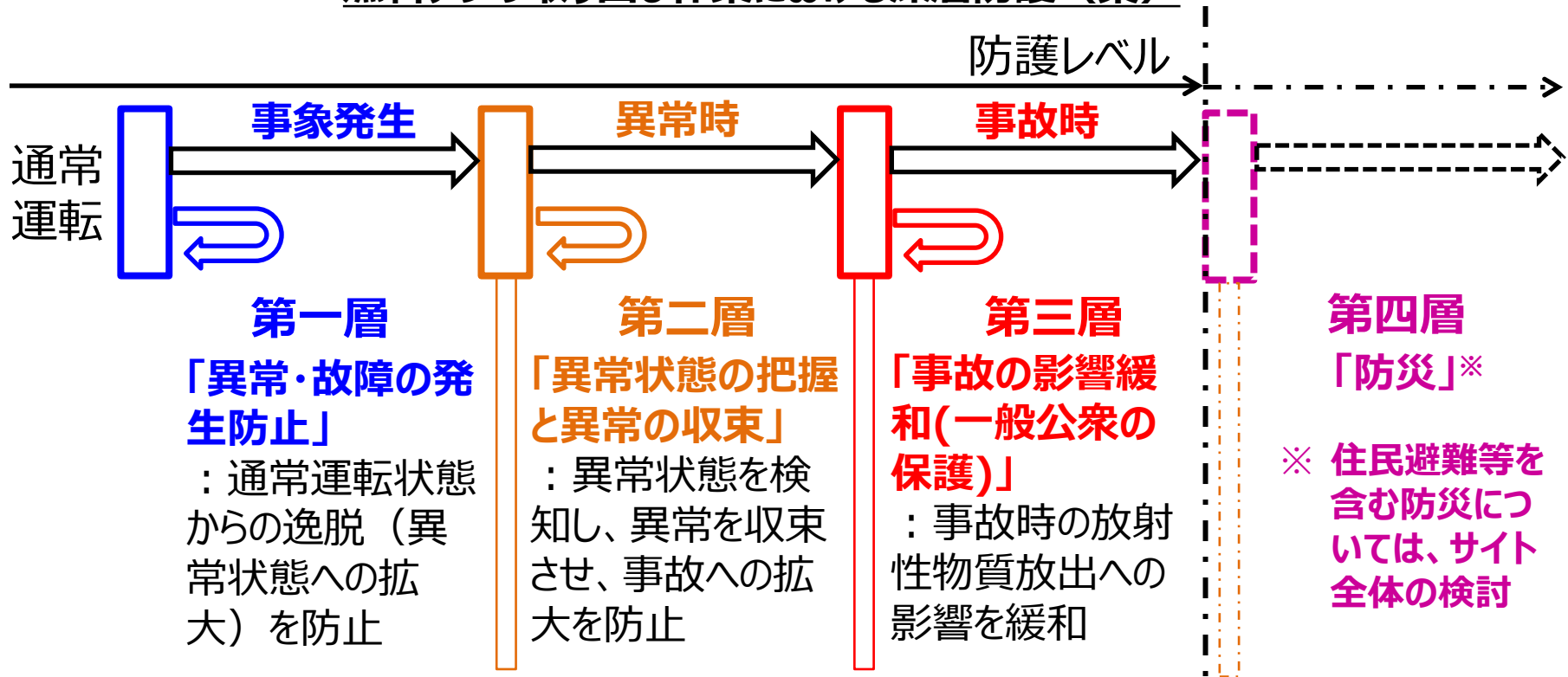
- 安全要求の設定（仮定）にスループットからの機能要求を加えてゆく
- 安全要求は基本的には不変であるが、現状内在するリスクや作業リスク（作業線量）の想定・評価によっては見直しがあり得る



深層防護の考え方（案）（1/2）

- 軽水炉の5層の深層防護にこだわらず、燃料デブリ取り出し作業としての深層防護を新たに設定。
- 具体的には、「異常・故障の発生防止」、「異常状態の把握と異常の収束」、「事故の影響緩和」の3層で深層防護を設定し、安全機能別に整理。

燃料デブリ取り出し作業における深層防護（案）



深層防護の考え方（案）(2/2)

- 福島第一の廃炉が通常炉の廃炉とは異なり、「**事故炉の廃炉（高線量下作業）を長期に亘って継続する**」という特殊性と作業に内在するハザードの終局のレベルを勘案し、深層防護の構築にあたっては以下の事項についても考慮した。

【作業員被ばく】

- 燃料デブリ取り出し作業時の作業員・一般公衆の被ばく低減効果に加えて、**設置工事に伴う作業員被ばく影響も考え**、トータルとして一般公衆・作業員被ばくの低減を目指す。

【事象の進展性】

- 機能喪失時、進展の早い事象は恒設設備で対応。**進展の遅い事象については可搬設備の活用**も考慮。

【恒設設備の頑健性】

- 事故時にその機能を期待し、進展が早い事象については「頑健性」を要求。**平常時のみ機能を期待し、機能喪失時の被ばく影響が復旧までの時間を考慮しても有意とならない場合は「頑健性」を要求しない。**

End of presentation