



令和5年度廃炉人材育成研修 R6.2.7～R6.2.9

廃炉研究開発の状況 (廃炉・汚染水対策事業)

講師

国際廃炉研究開発機構

奥住 直明

主催：日本原子力研究開発機構

目次

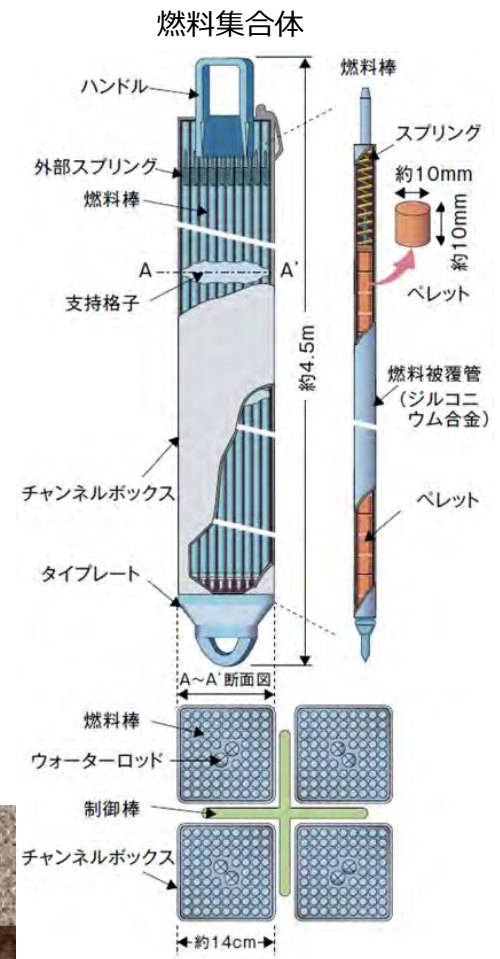
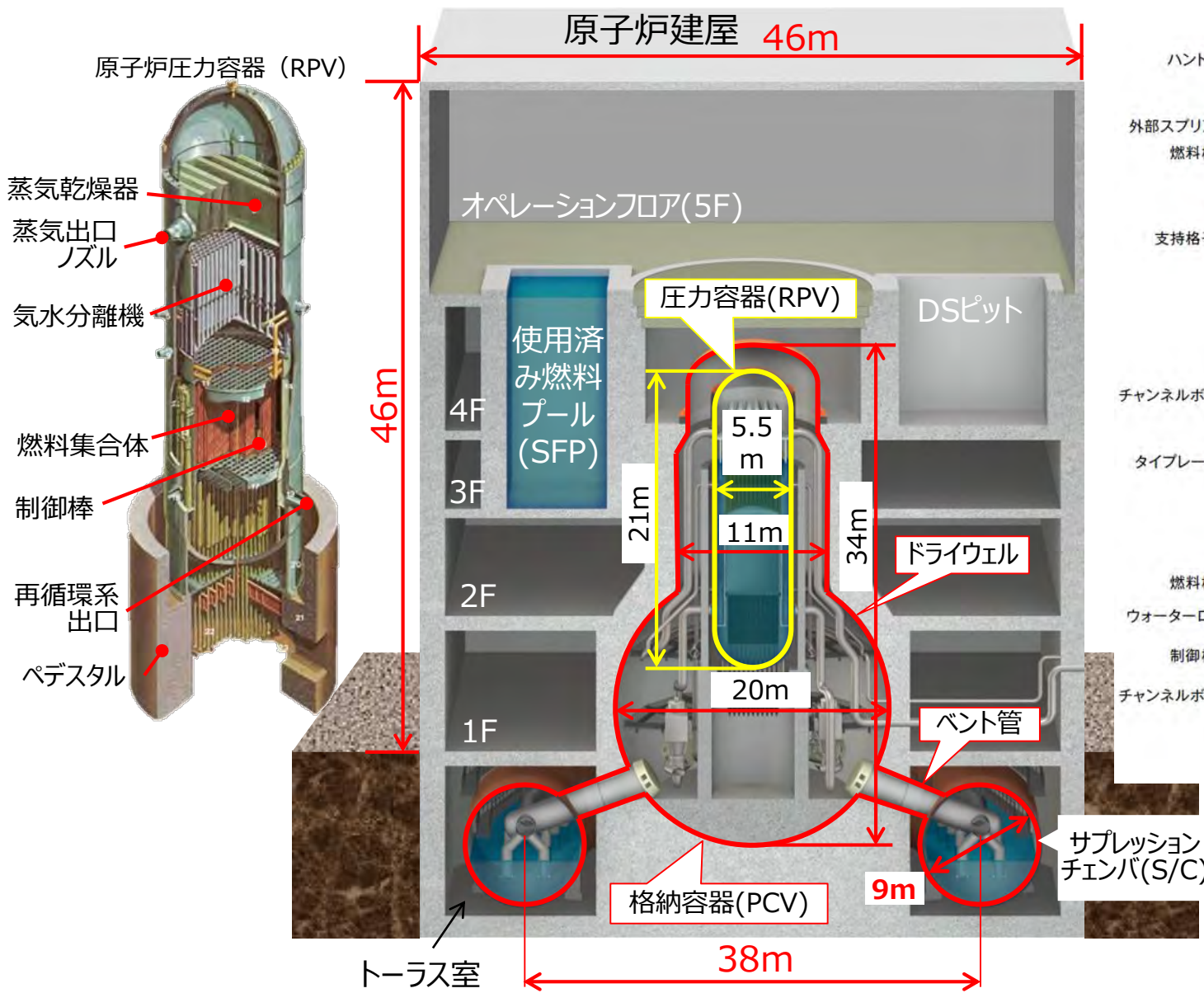
1. はじめに
2. 遠隔除染技術開発
3. 原子炉格納容器補修技術開発
4. 原子炉格納容器内部調査技術開発
 - (1)既に終了した調査
 - (2)今後計画している調査
5. 燃料デブリ取り出し技術開発
6. 燃料デブリ取出しにおける安全設計の検討

目 次

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

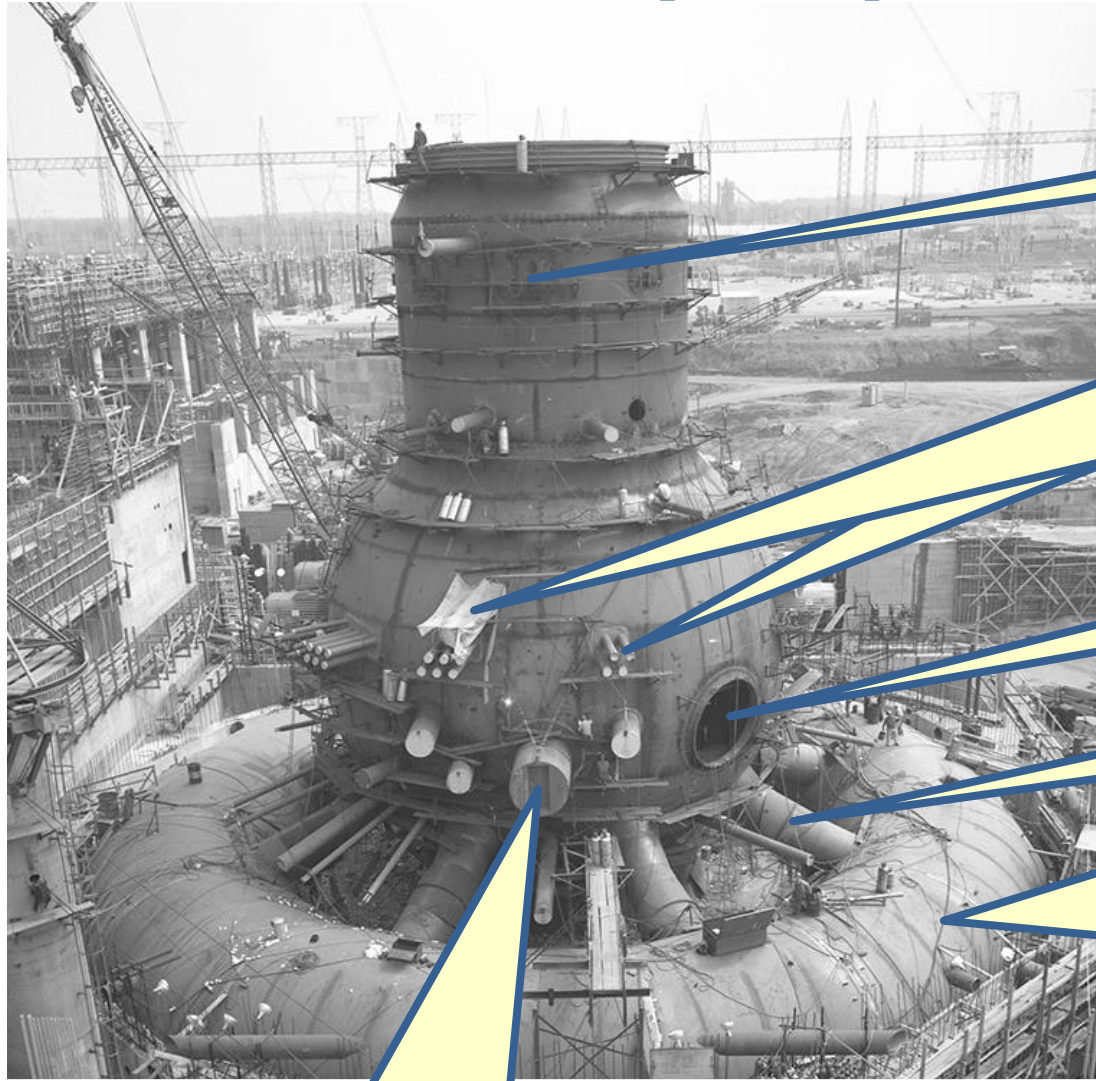
IRID紹介ビデオ

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

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

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

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

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

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

PCV漏えい箇所の
補修・止水及び実規模試験

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>

<直接的調査>

RPV内燃料デブリ検知技術・評価

総合的な炉内状況把握の高度化

PCV詳細調査技術

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

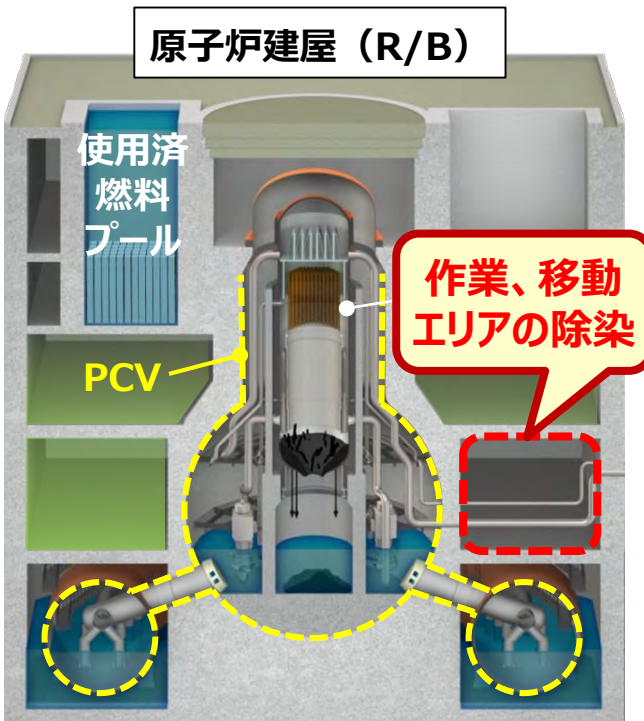
目 次

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

遠隔除染技術

開発のニーズ

R/B内の線量が高く容易に人が近づけない。**作業場所の環境改善（線量低減）**が必要。



低所(床,下部壁面)用



吸引/ブラスト

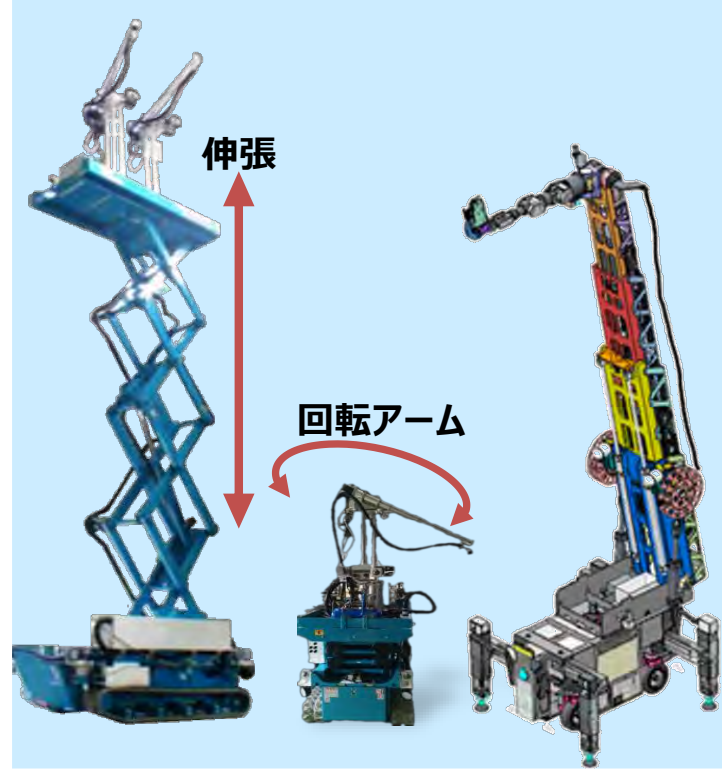


高圧水噴射

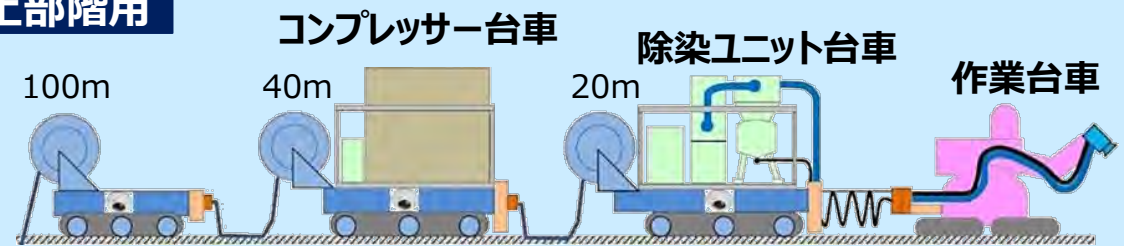


ドライアイスブラスト

高所用



上部階用



遠隔除染技術

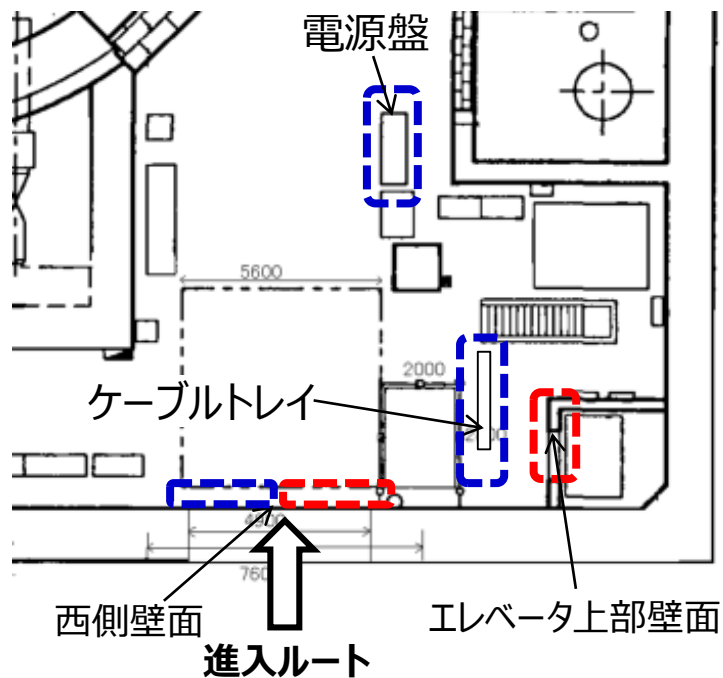
現場への適用（3号機）

2016年1月～2016年2月に
3号機R/B 1階で吸引
 除染及びドライアイスブ
 ラスト除染を実施。



コンテナから搬出する場面

□□ : 吸引 □□ : ドライアイス



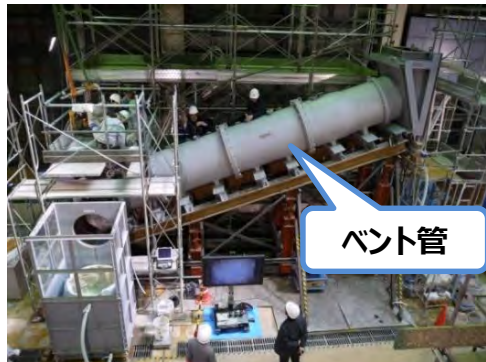
3号機R/B内への進入風景

目 次

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

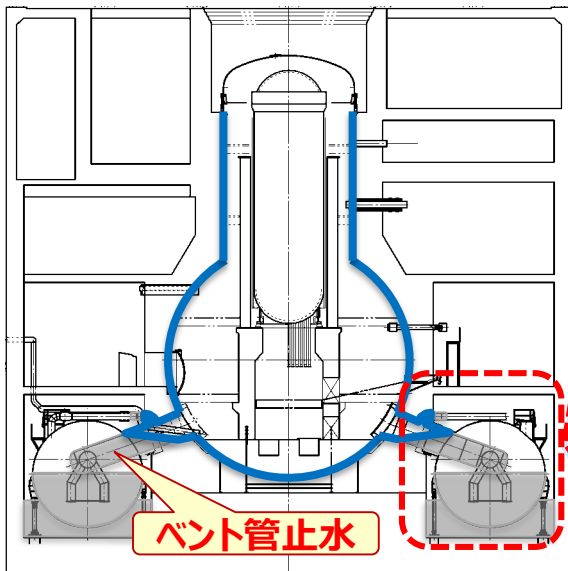
原子炉格納容器(PCV)補修・止水技術

ベント管止水試験



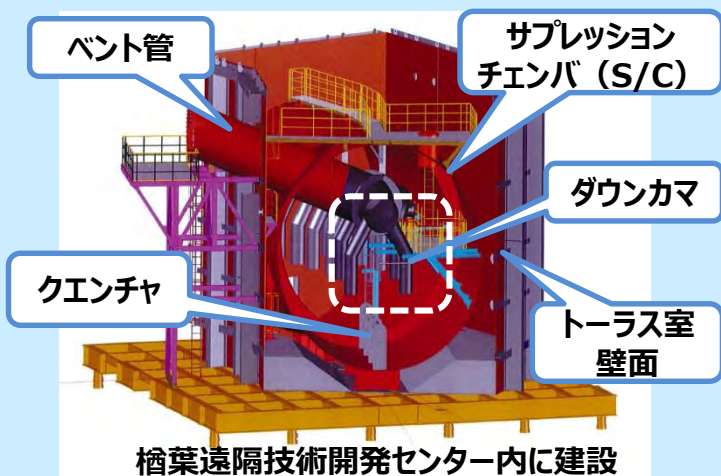
1 / 2スケール試験体で止水性能を確認 (工場)

— : 補修・止水範囲

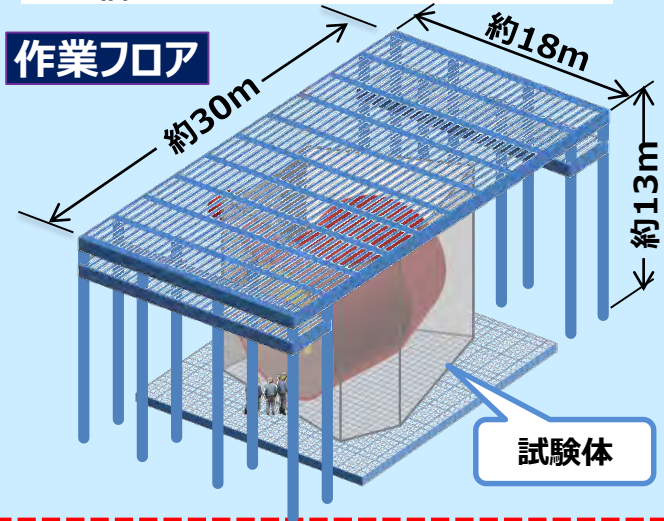


実規模試験体を用いた試験

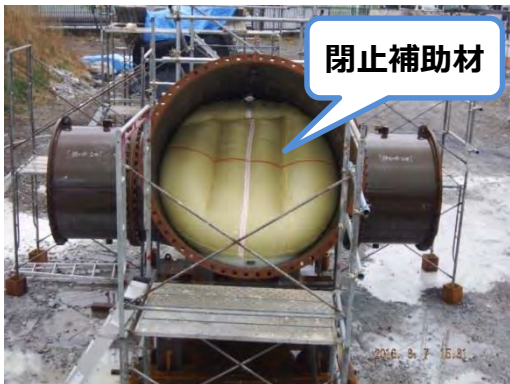
実規模試験体 (1/8セクター)



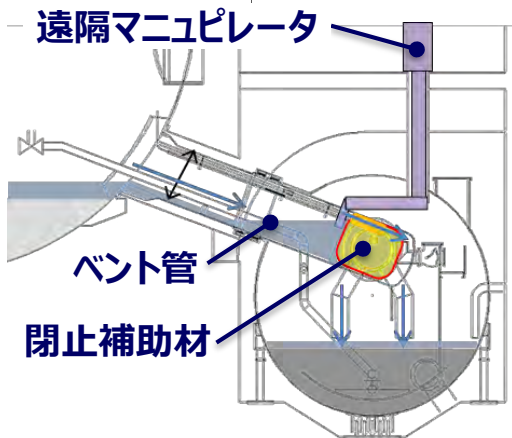
作業フロア



閉止補助材止水試験



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



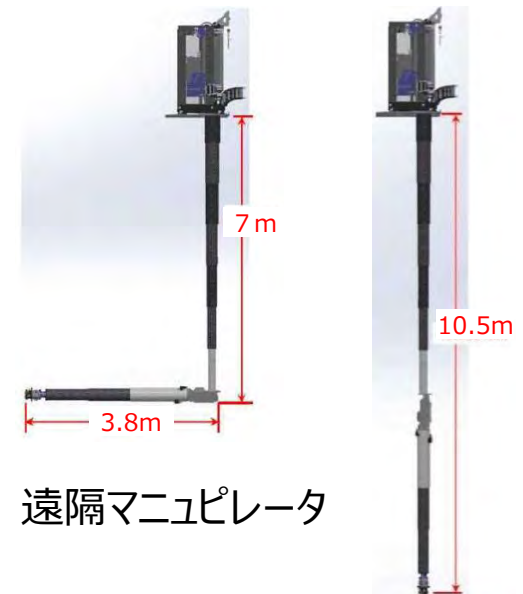
試験体外観



試験体内部 (S/C内部)



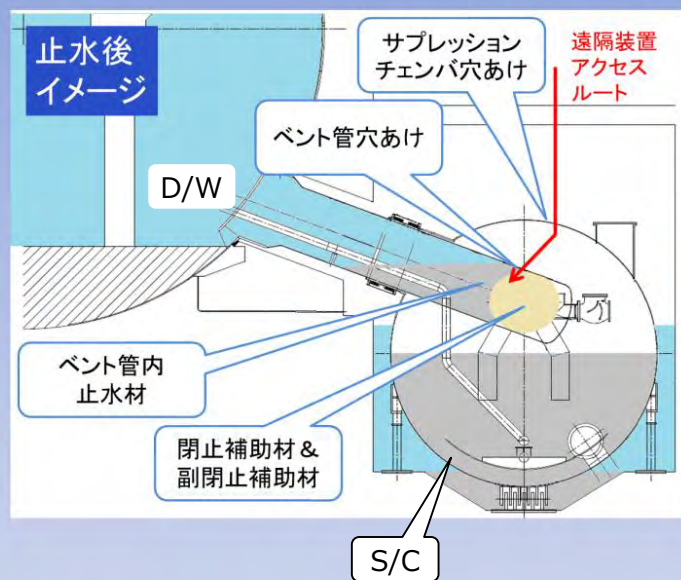
S/C脚部補強施工性確認試験



遠隔マニピレータ

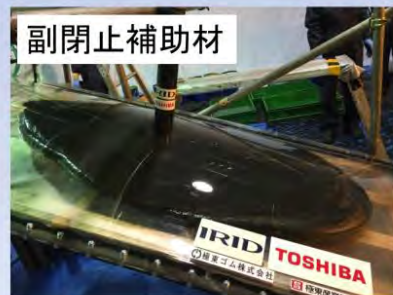
ベント管止水技術

- 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。



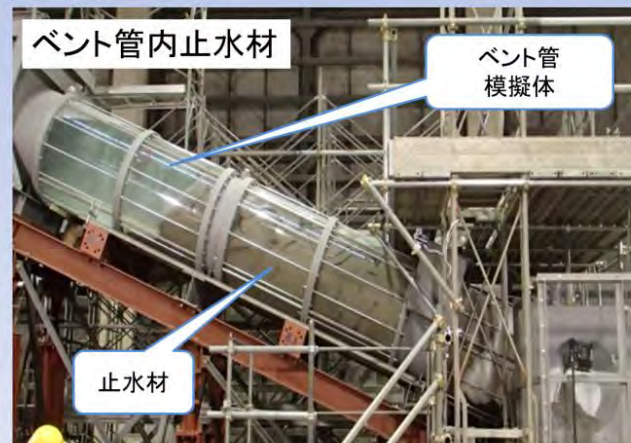
【候補材】

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



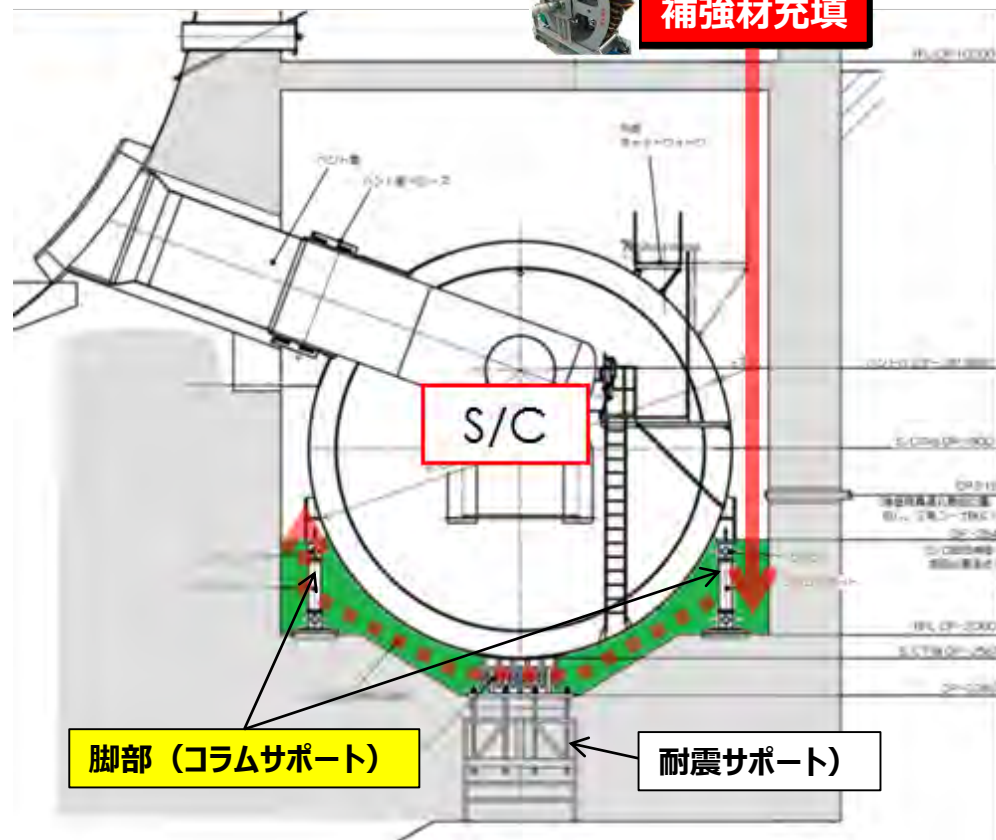
【候補材】水中不分離性モルタル

2・3号機

充填装置



補強材充填

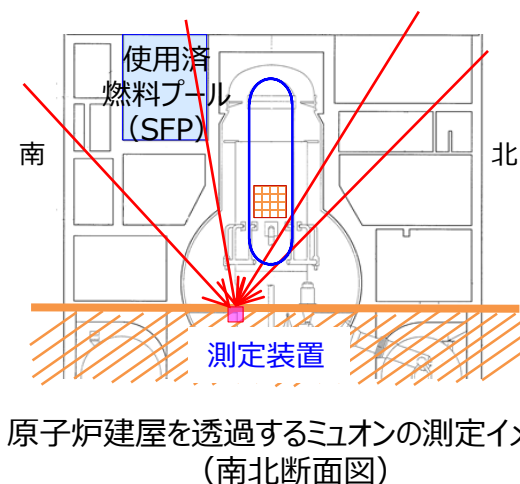
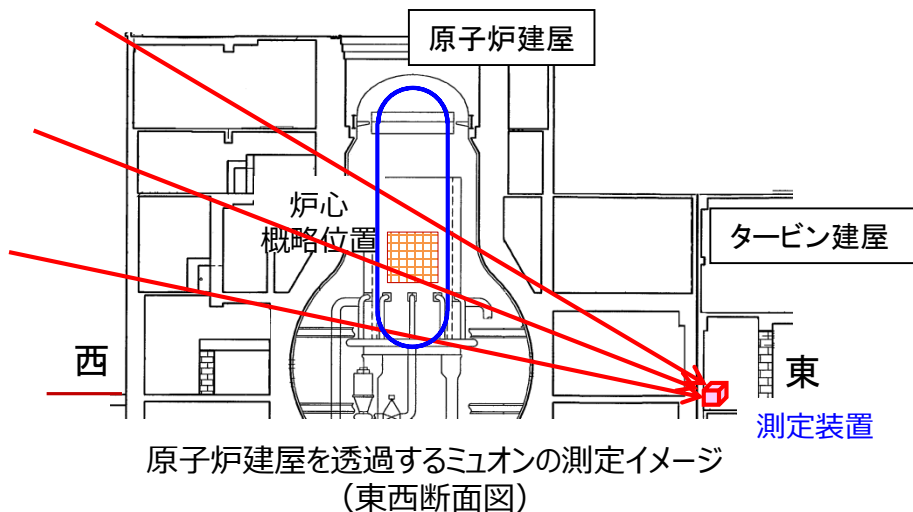


目 次

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

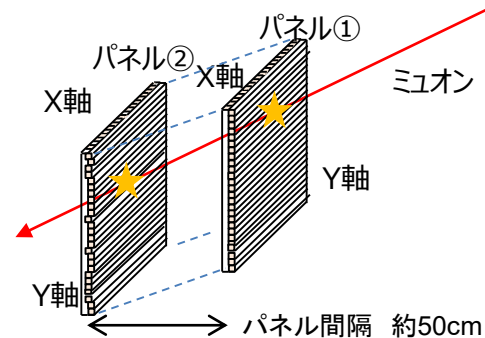
ミュオン透過法による測定

- 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）>

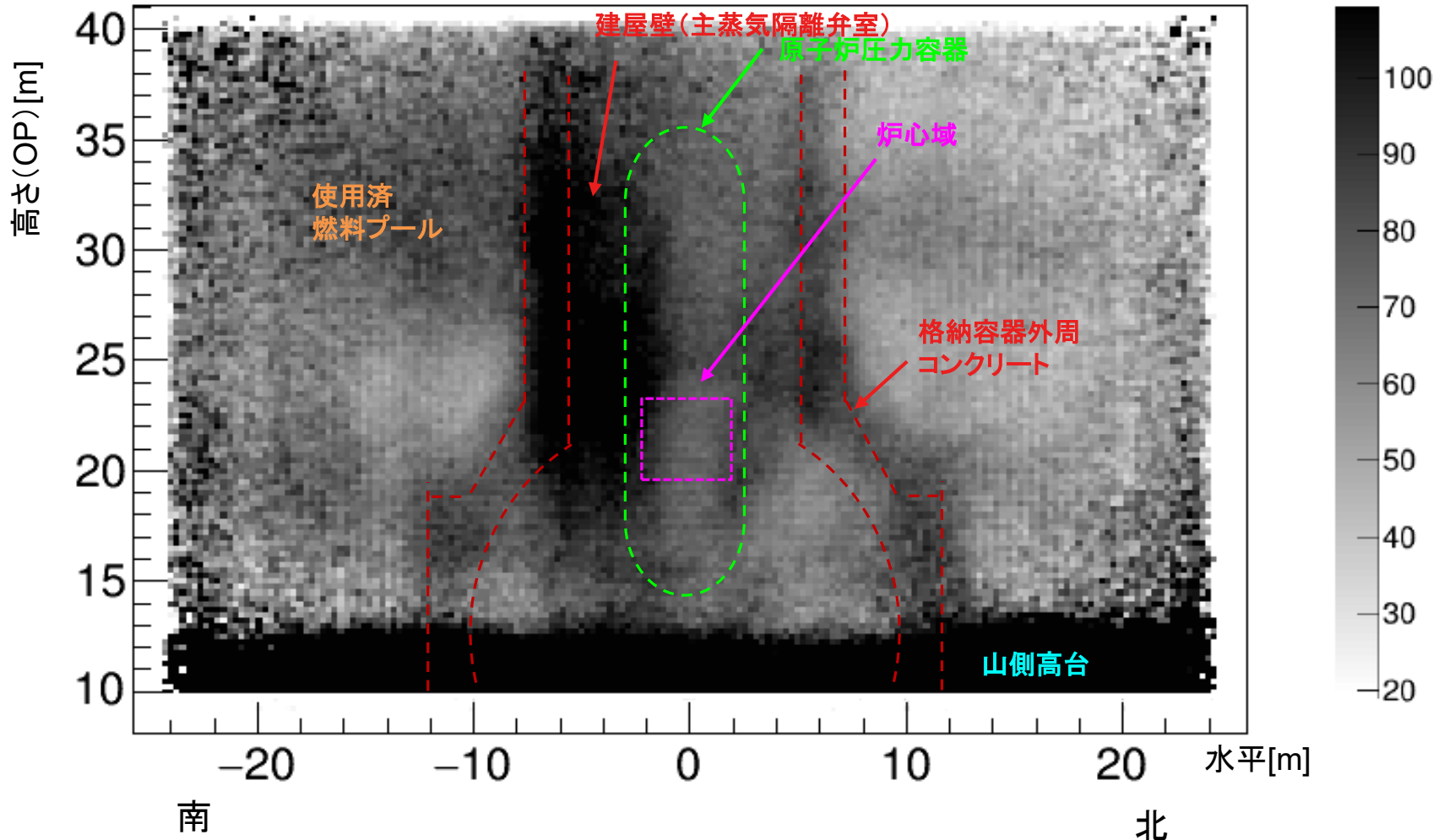
上空から飛来するミュオンを装置内部に配置した2枚のパネル検出器（プラスチックシンチレータ）で検知し、通過したパネルの座標からミュオンの軌跡を算出。



3号機ミュオン透過法測定結果

(2017年9月8日時点)

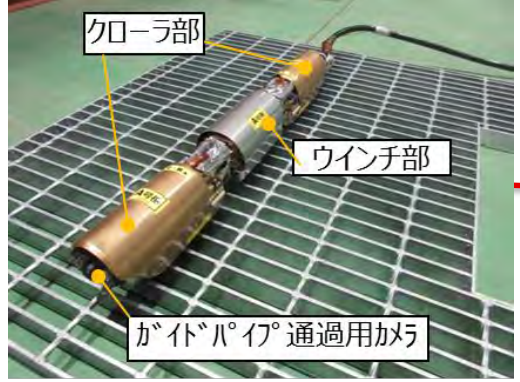
密度長
(g/cc・m)



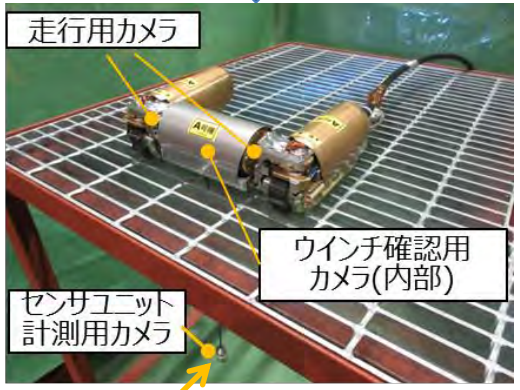
原子炉格納容器内部のロボット等による調査

ペDESTル外側の調査 (1号機)

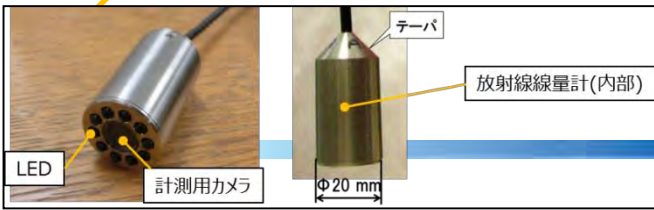
○形状変化型ロボット (B2調査)



I型(ガイドパイプ通過時)
 ↓変形
 ↓

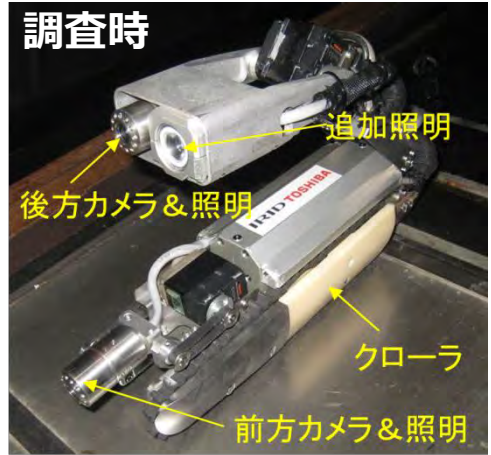
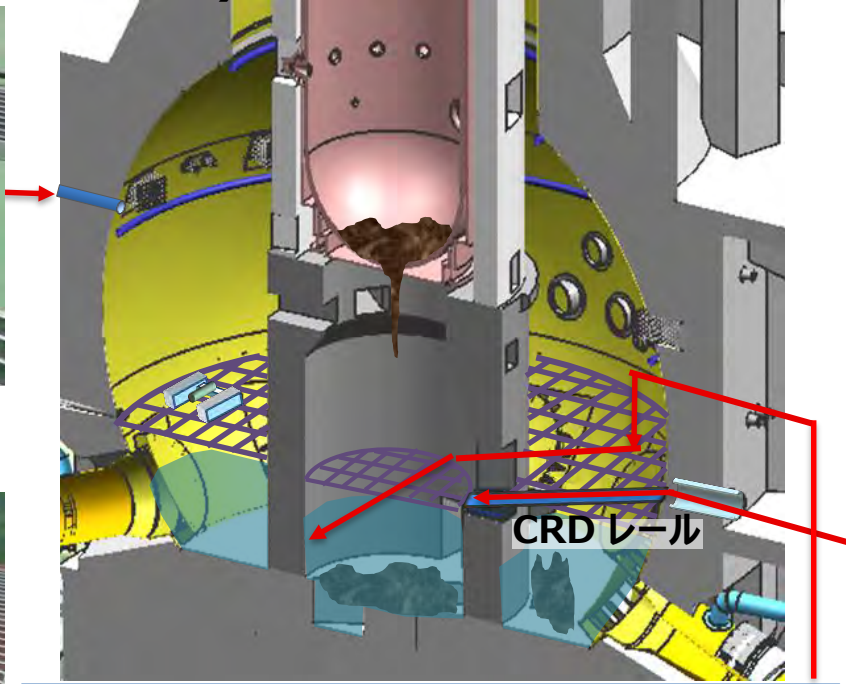


II型(平面走行時)



ペDESTル内側の調査 (2号機)

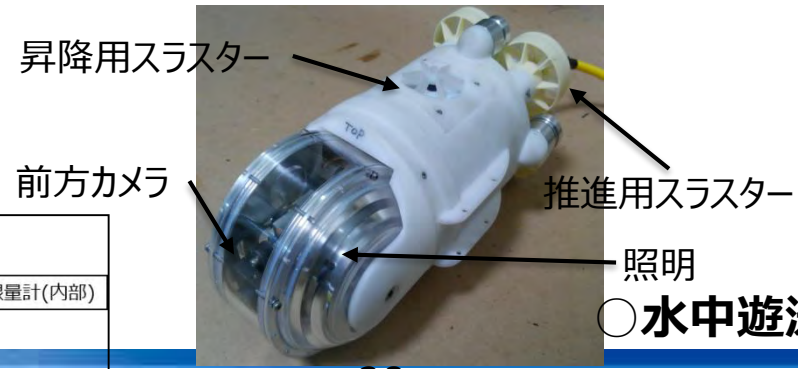
○クローラ型遠隔調査ロボット (A2調査)



○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

1号機 ペDESTAL外調査(2017.3)

3/18 (土)

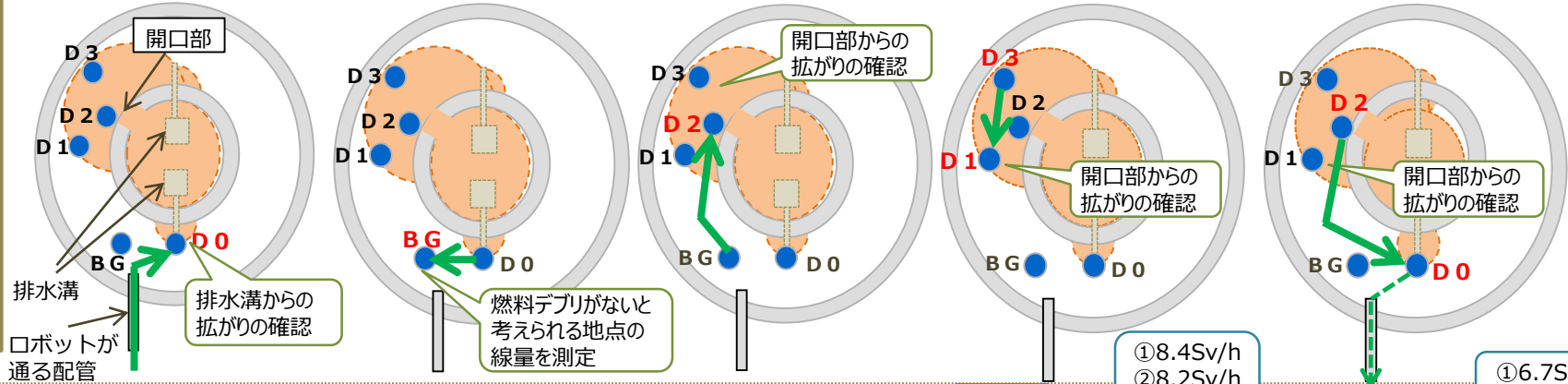
3/19 (日)

3/20 (月)

3/21 (火)

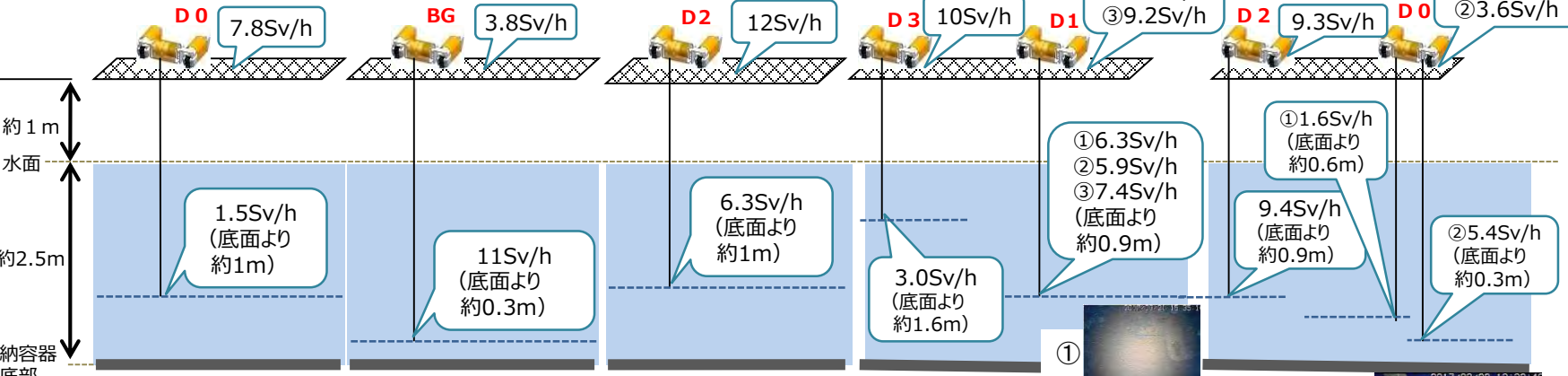
3/22 (水)

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

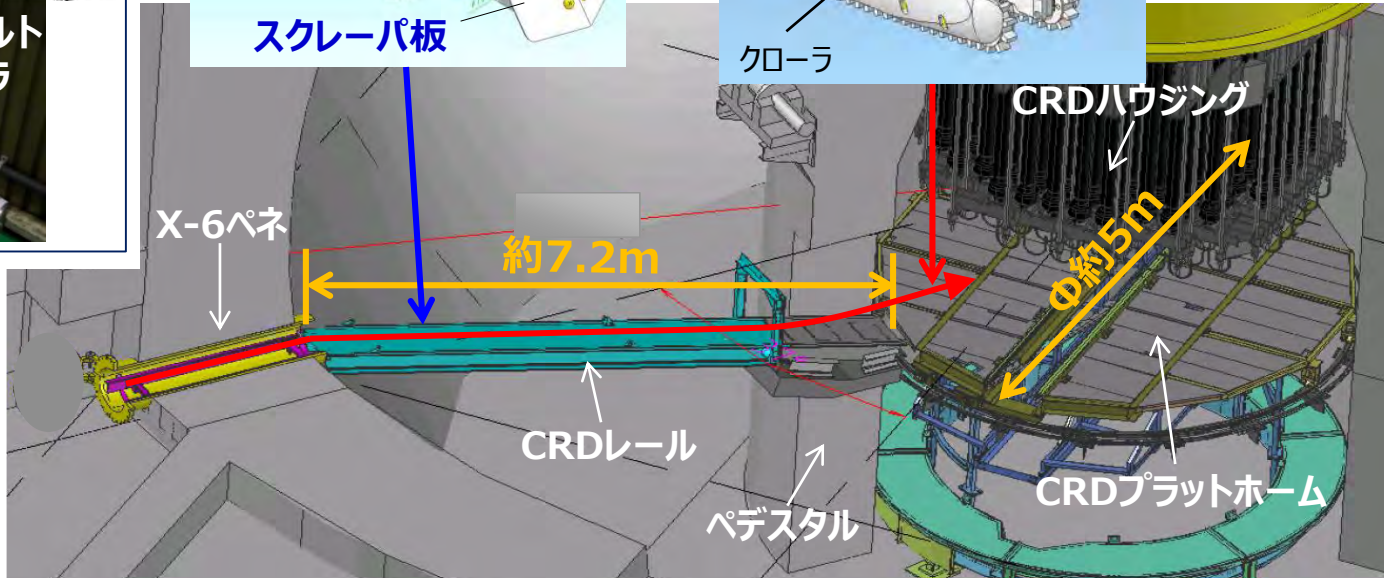
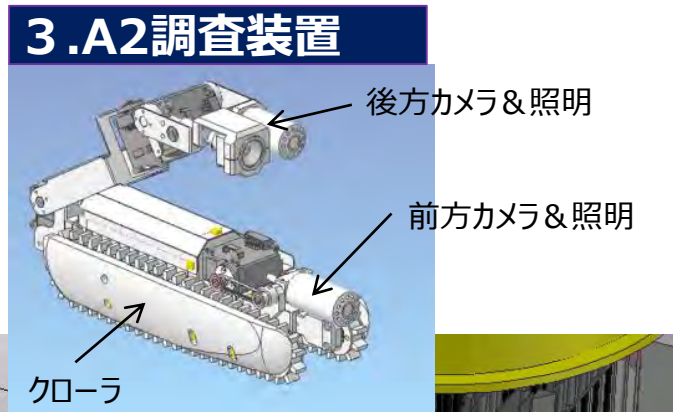
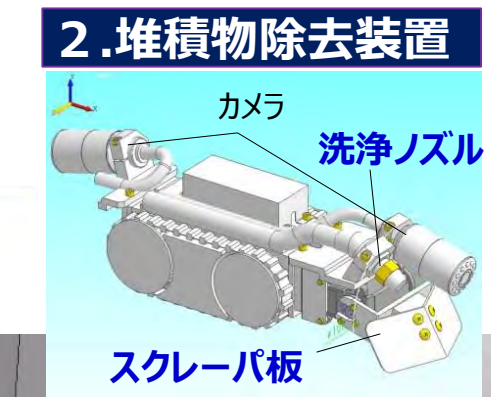
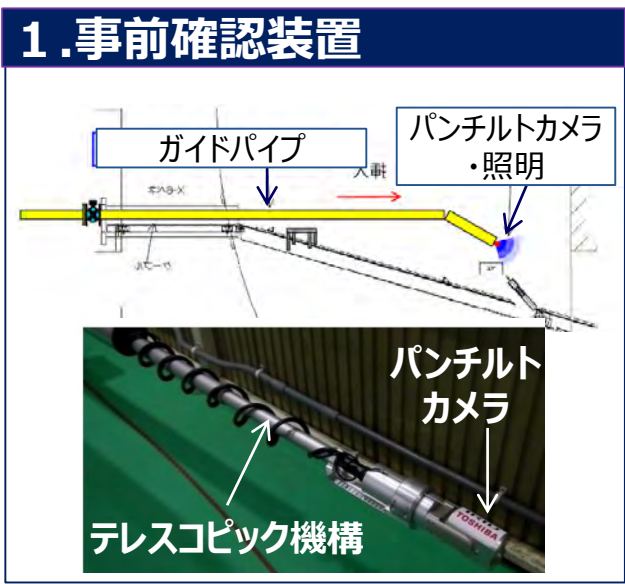
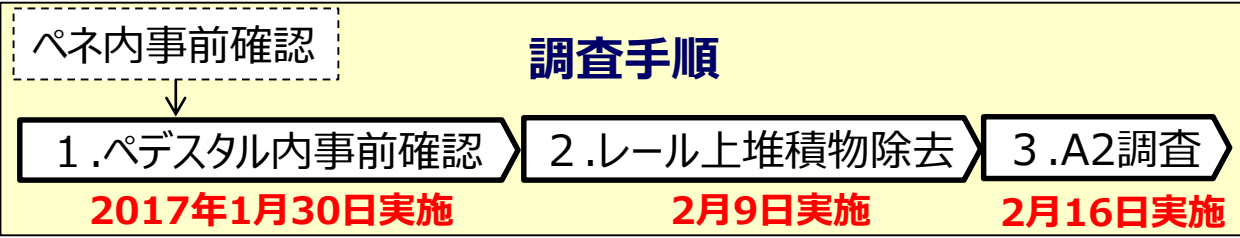
2号機 ペDESTAL内上部調査(A2調査 2017.1~2)

【調査方法】

- カメラによる撮影

【実施時期】

- 2017年1~2月



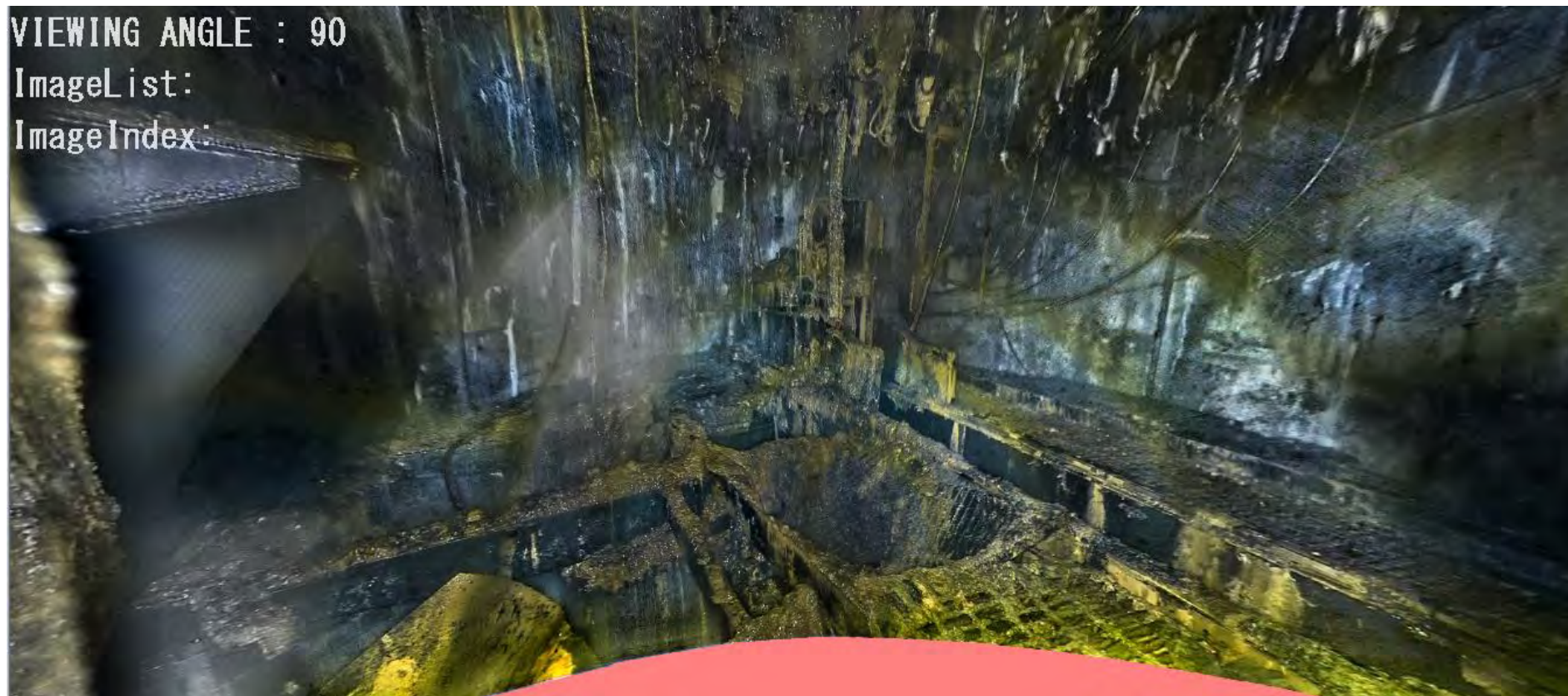
2号機 ペデスタル内上部調査(A2調査 2017.1~2)

ペデスタル内 上部 (画像処理後)

VIEWING ANGLE : 90

ImageList:

ImageIndex:



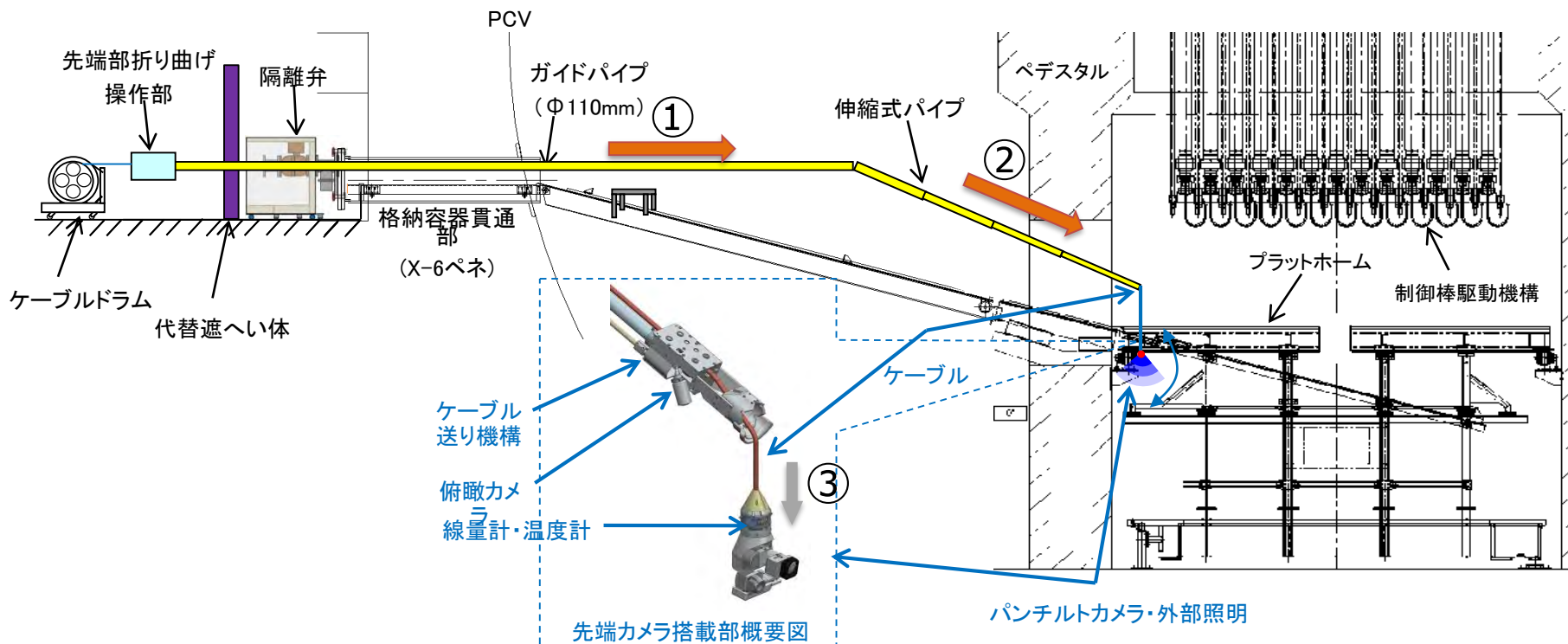
2号機 ペDESTAL内下部調査(A2'調査 2018.1)

■調査内容

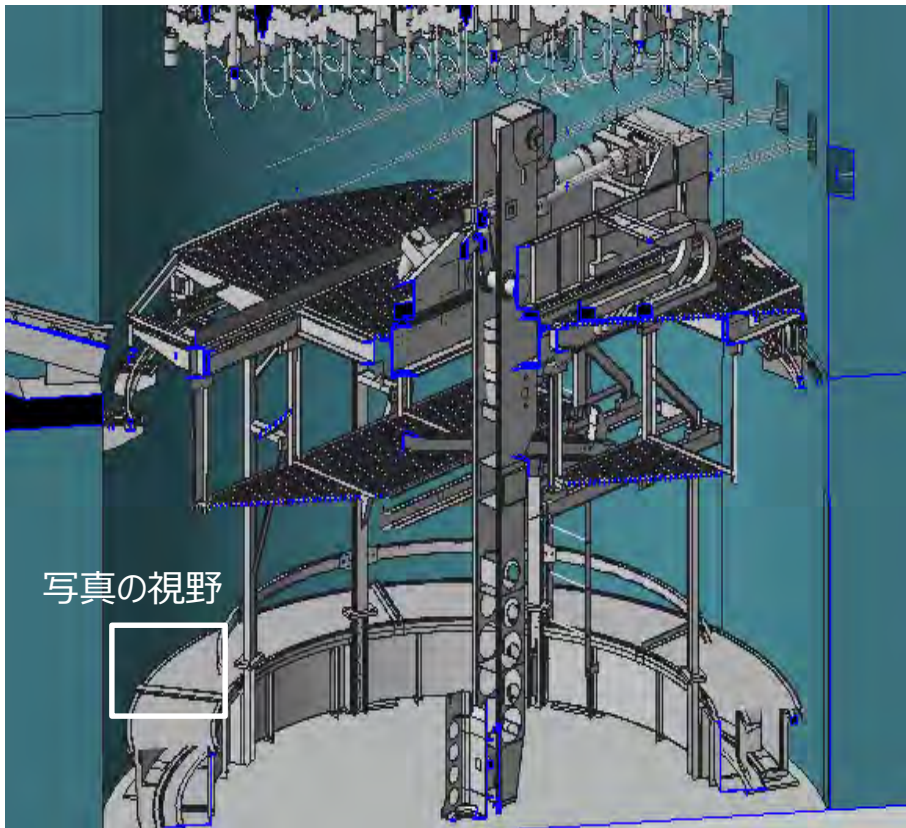
プラットホーム下の状況確認

■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DESTAL内下部調査(A2'調査 2018.1)



写真の視野

2号機格納容器内底部
(鳥瞰イメージ)

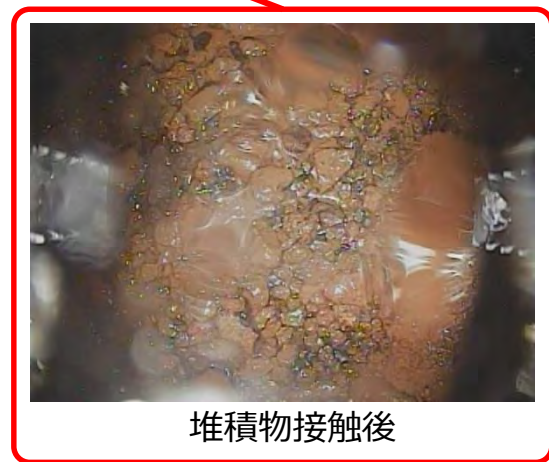
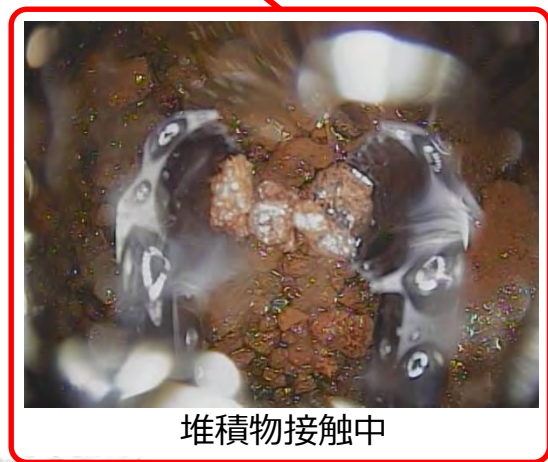
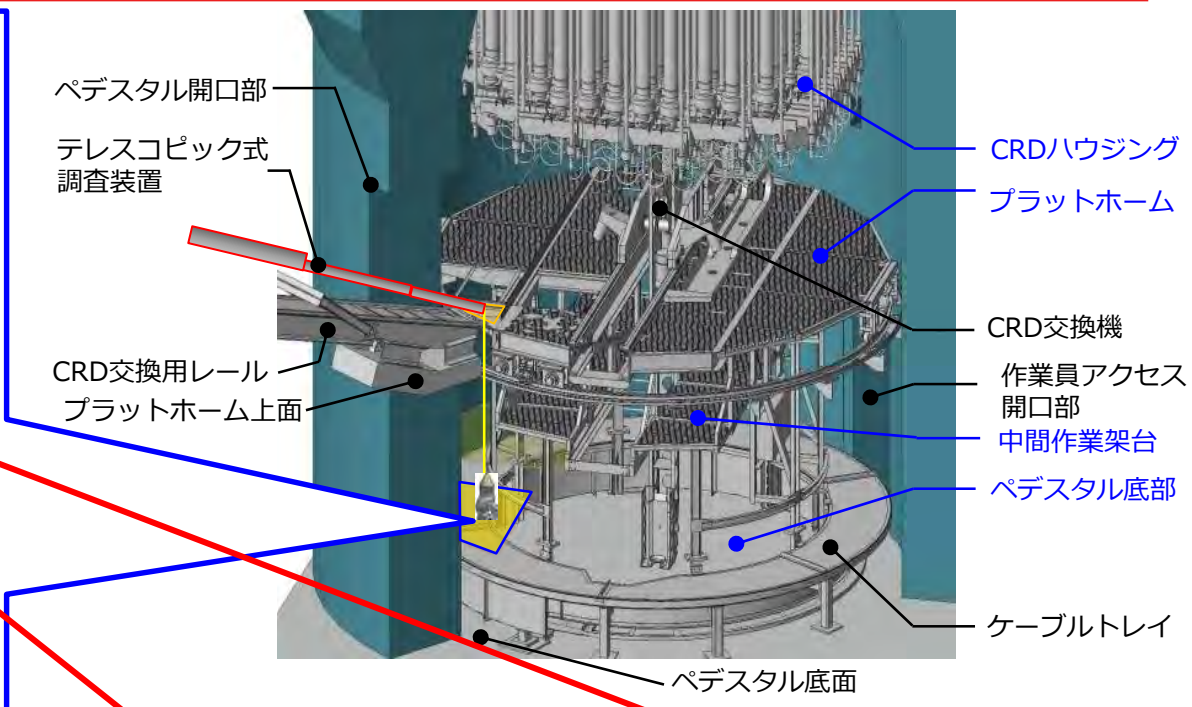
画像：2号機格納容器内底部，
ペDESTAL内 内壁付近



PAN -087

TILT +071

2号機 ペDESTAL内下部調査(A2"調査 2019.2)TEPCO



3号機格納容器内調査 水中ROV



昇降用スラスタ

前方カメラ

照明

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



後方カメラ

照明

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
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

0°
90°
180°
270°

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

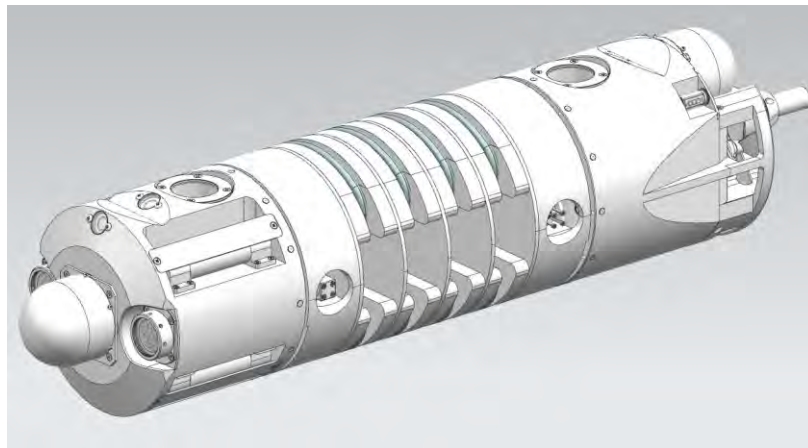
■砂状、小石状や塊状の堆積物を確認
■作業員アクセス開口部は視認できなかった（近傍に堆積物を確認）

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

ボート型アクセス装置

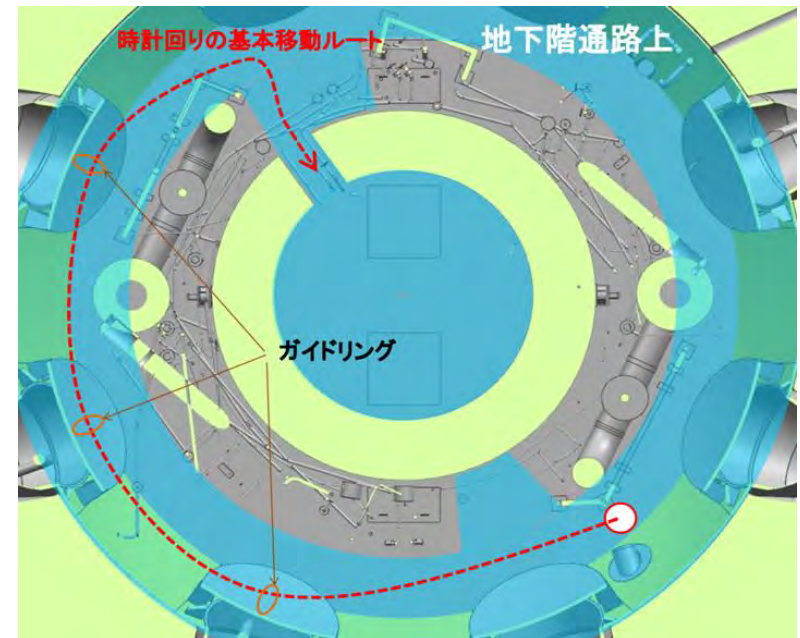
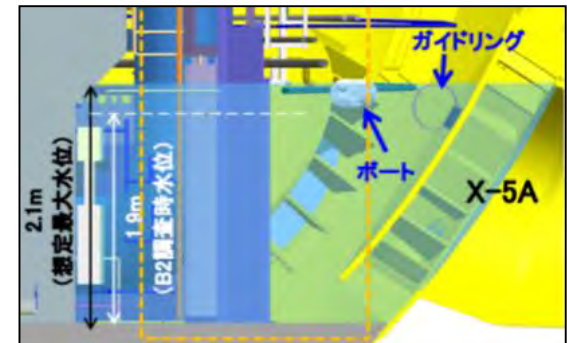
- 格納容器内の水の上を航行して、広範囲に移動可能なボート型アクセス装置を製作



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

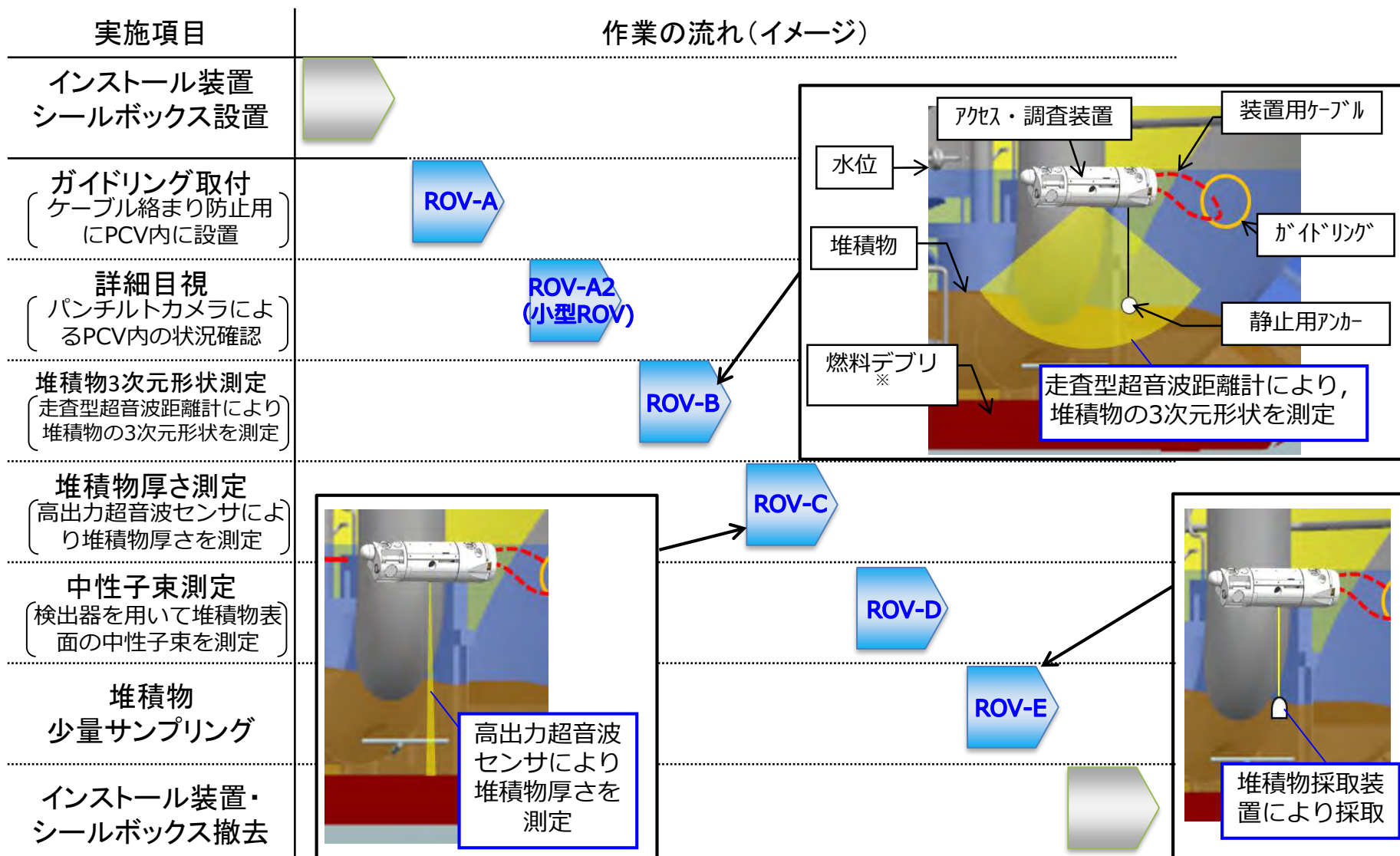
ボート型アクセス装置外観



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

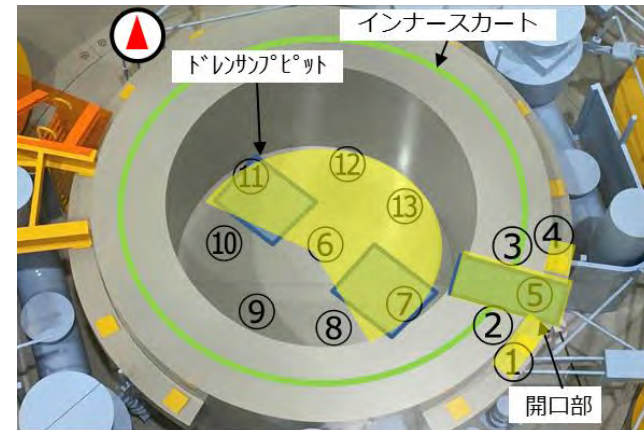


※：堆積物の厚さや燃料デブリの有無及び厚さは未知だが、説明のためイメージとして記載

1号機：ボート型アクセス装置

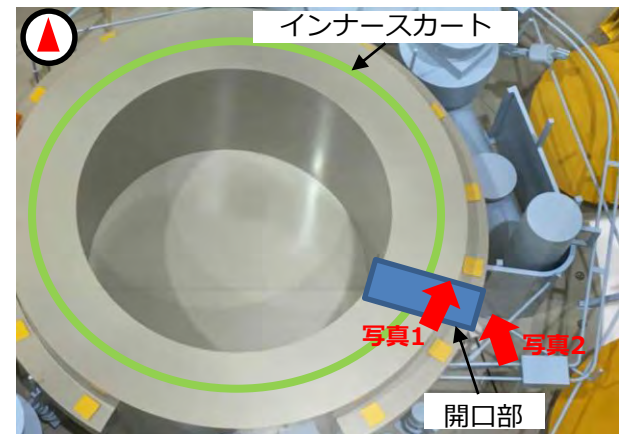


【参考】ペDESTAL開口部から撮影した映像のパノラマ画像



【参考】ペDESTAL開口部右側のコンクリート残存(1/2)

- ペDESTAL外部から見えているコンクリート残存の可能性の高い部分（事故前に設置されたボルトの締結状態が確認できる。）について、2023/3の調査にて、ペDESTAL壁内部でも対応する部分を確認した
- ペDESTALの外壁開口部右側におけるコンクリートの消失は限定的と考えられる
- 確認された外側の鉄筋は、開口部右7本、左11本。耐震評価においては、開口部とあわせ、角度にして64°に相当するとして設定



ROVフレームの映り込み

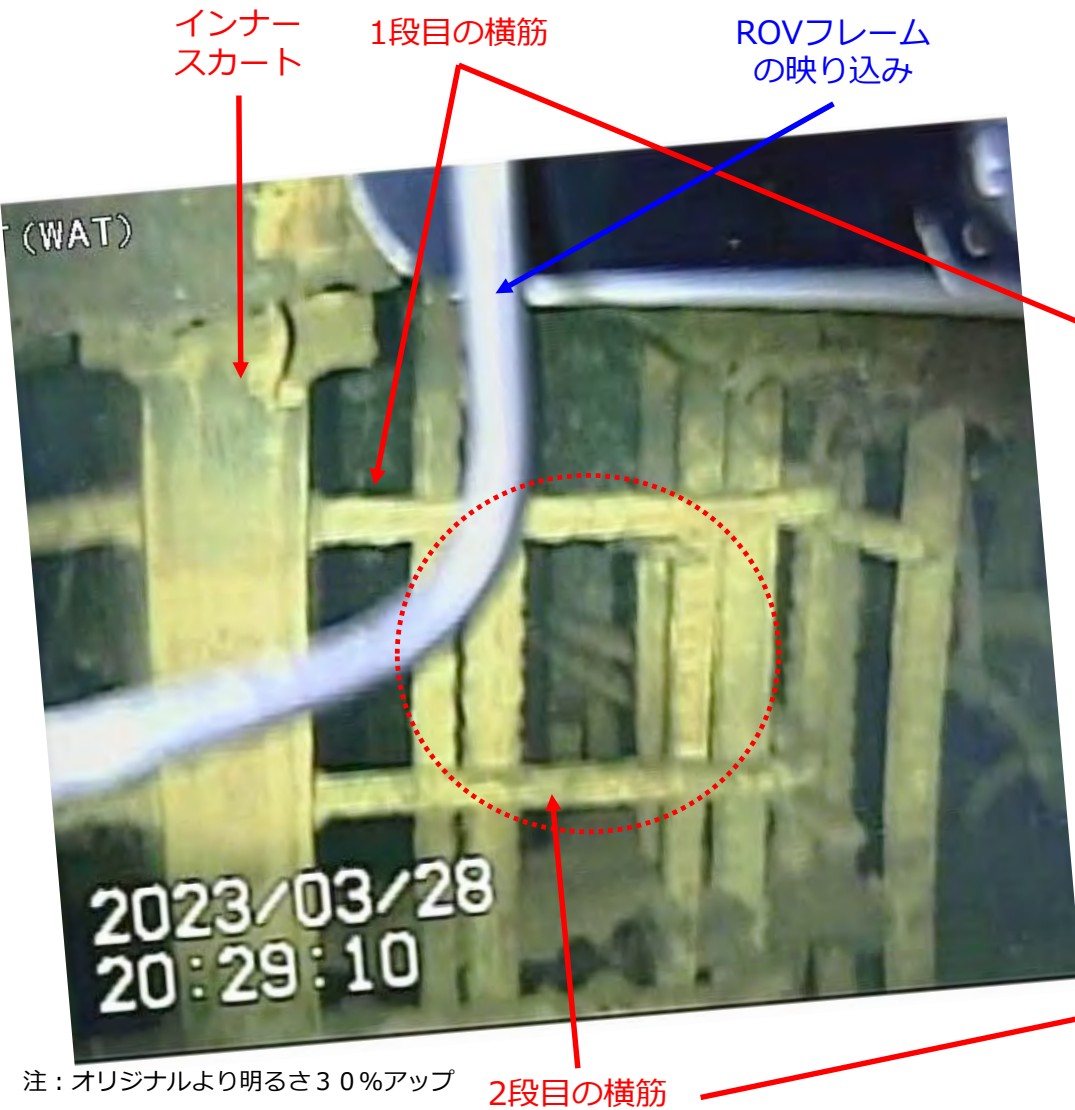


写真1. ペDESTAL開口部内から見えているコンクリート残存部

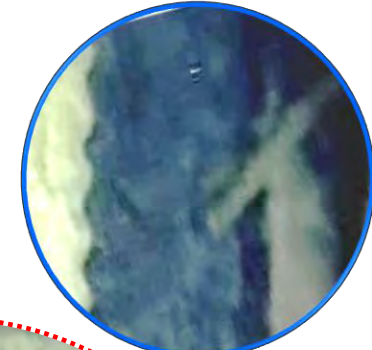


写真2. ペDESTAL外部から見えているコンクリート残存部

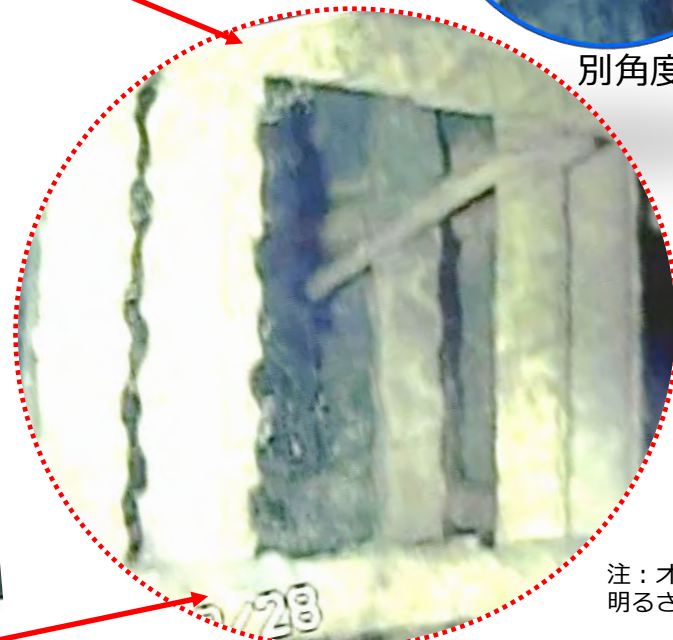
【参考】ペDESTAL開口部右側のコンクリート残存（2/2）



注：オリジナルより明るさ50%アップ



別角度から撮影



注：オリジナルより明るさ50%アップ

左写真赤丸部を別角度から撮影

図2 残存部の別角度からの映像

画像処理：東京電力ホールディングス(株) 34

図1 開口部右側ペDESTAL外壁の残存部

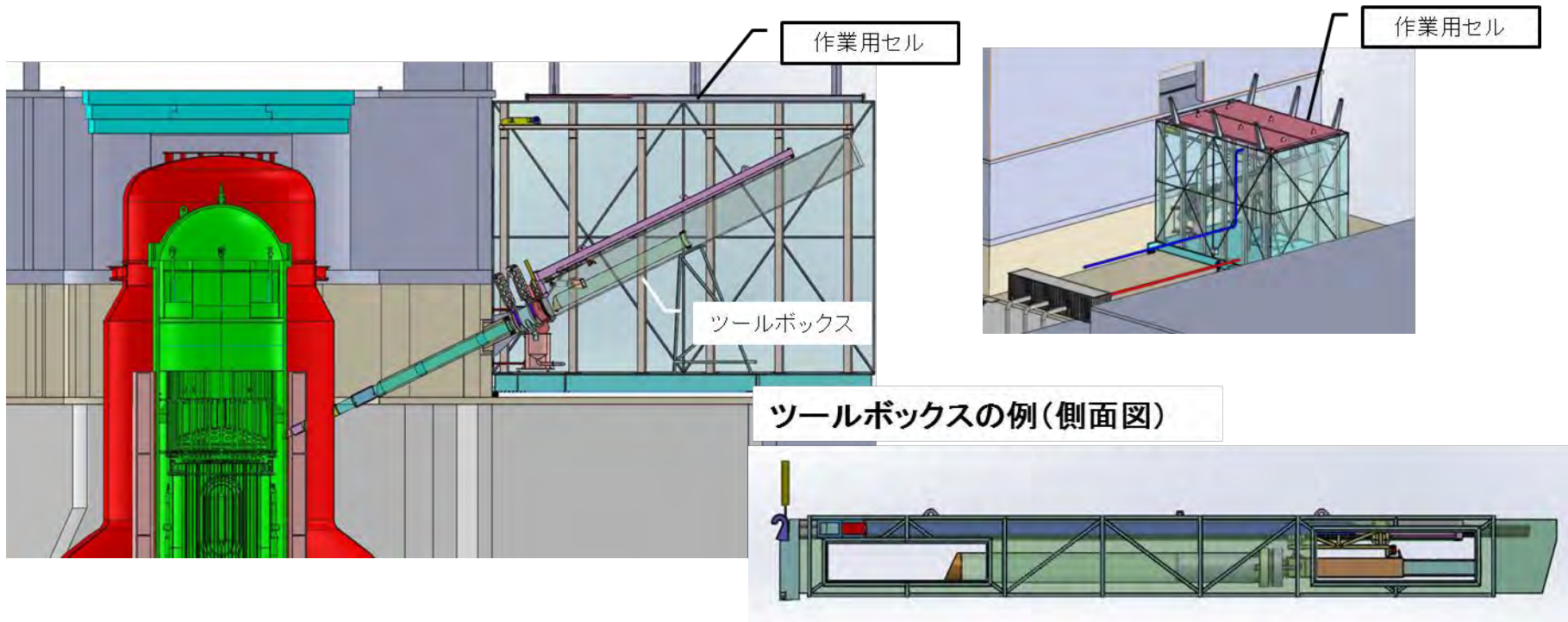
注：オリジナルより明るさ30%アップ

目 次

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

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

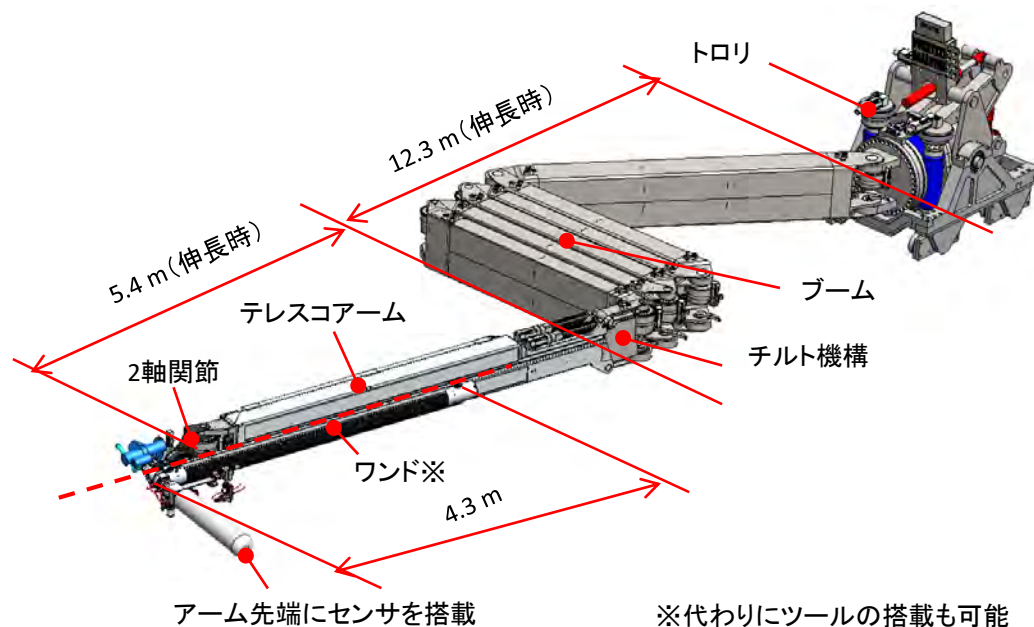
目 次

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

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

- アーム全長約22 m
- 10 kgまでの調査装置を搭載可能



※代わりにツールの搭載も可能

アーム型アクセス装置

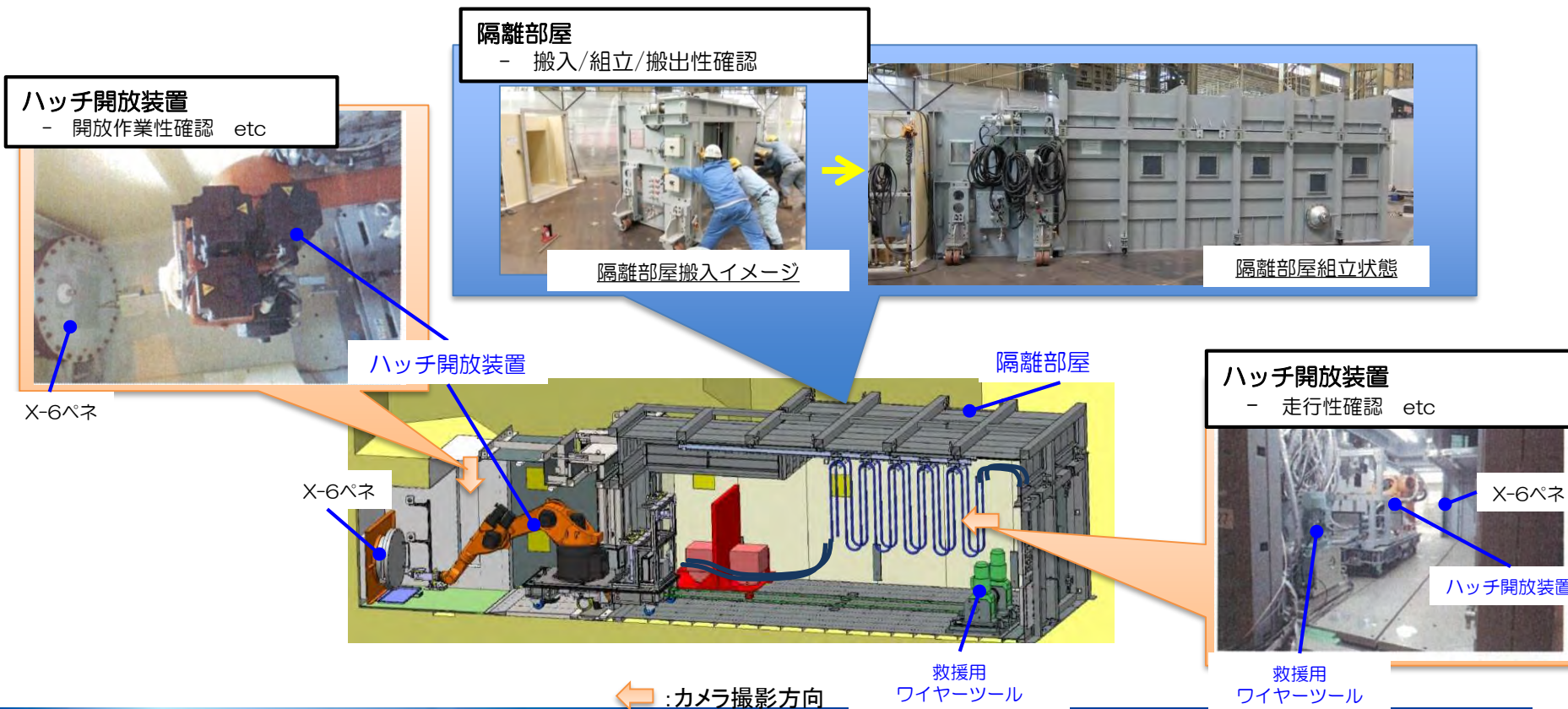
格納容器貫通部ハッチ開放

■ 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

✓ ハッチ開放時の閉じ込め機能

✓ 遠隔でのハッチ開放



2-2. 現場作業の進捗状況 (X-6ペネハッチ開放)

- X-6ペネハッチの除去対象ボルト全24本の除去が完了したことから、ハッチ開放作業を実施。
- フックツールを使用し、ハッチを約10度開いた状態で、ハッチ全開放に干渉するハッチの把手を切断。
- 把手切断後、ハッチ全開放 (約90度開放) を実施。全開放後、ダストの上昇等、異常がないことを確認。



X-6ペネハッチ開放作業中



X-6ペネハッチ開放後(約10度)



X-6ペネハッチ開放後(約90度)
※ペネを右から見た状況



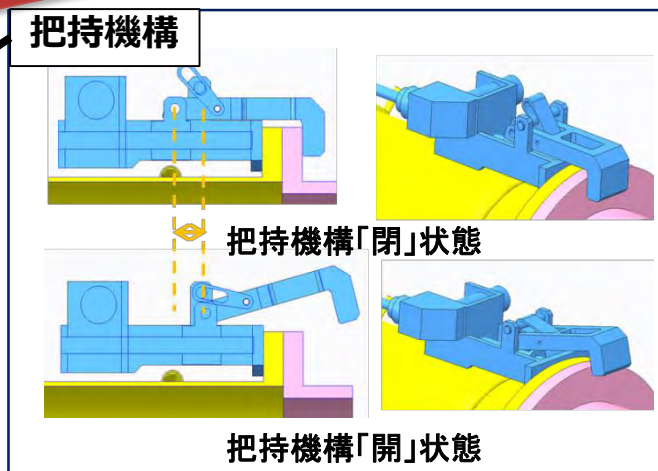
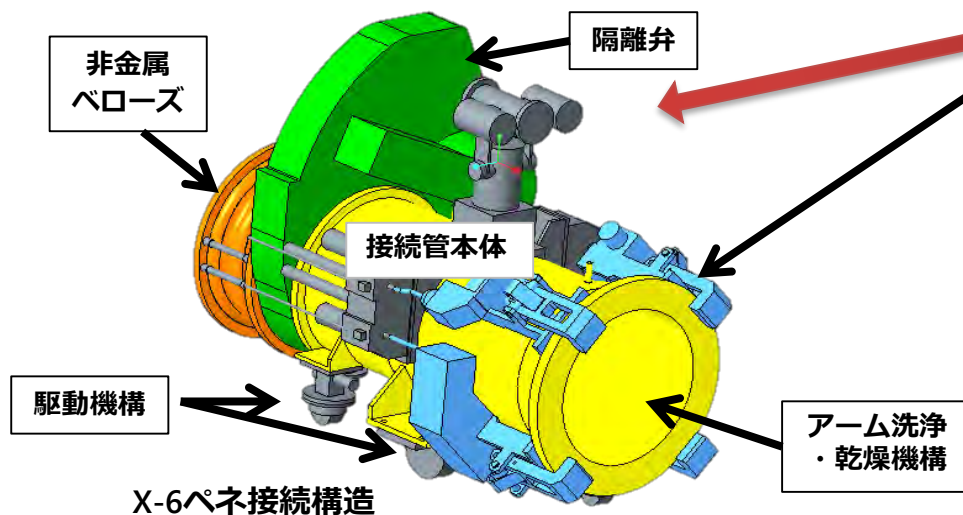
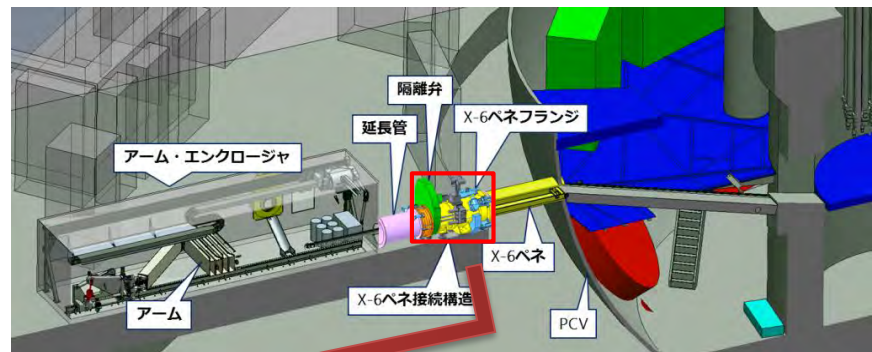
X-6ペネハッチ開放後(約90度)
※ペネを正面から見た状況

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

- ✓ 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

アーム型アクセス装置(動画)

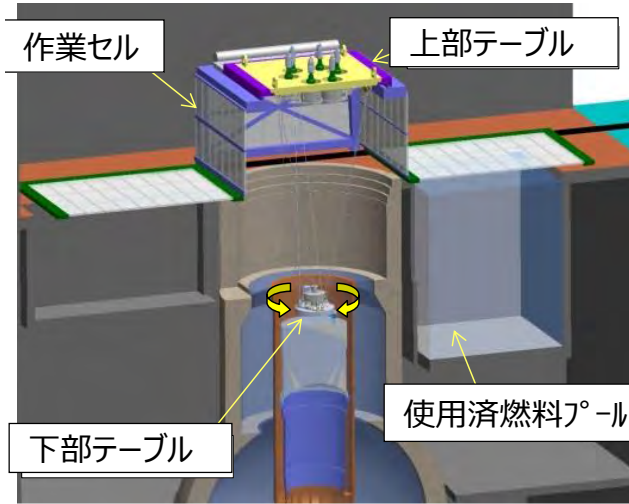


デブリ取り出し工法

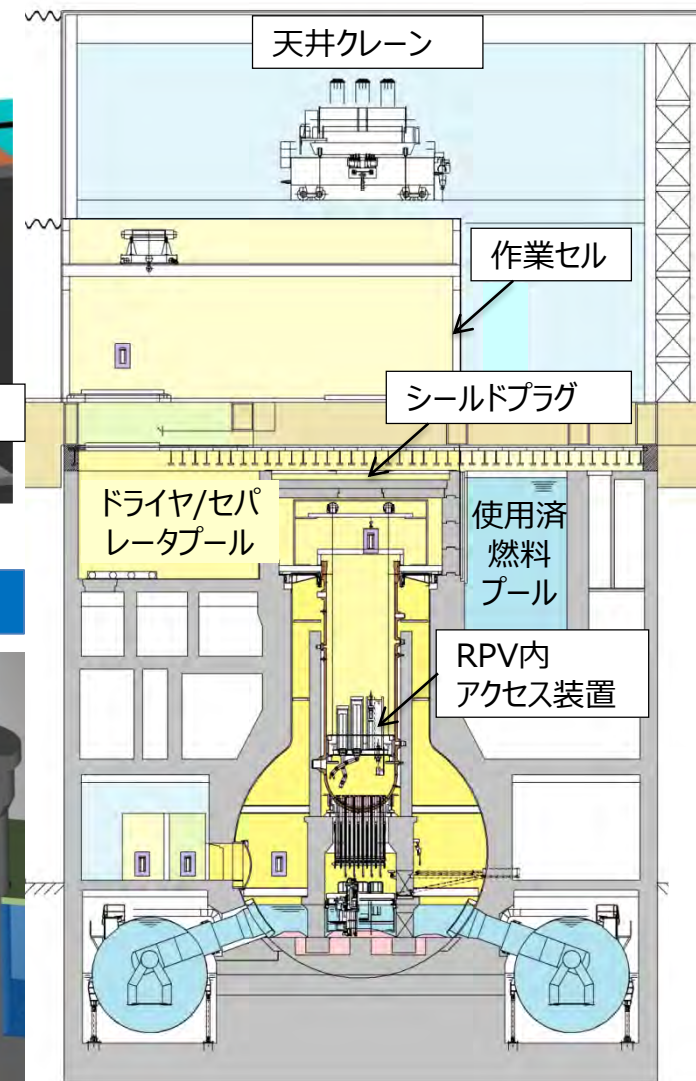
技術的課題

- **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

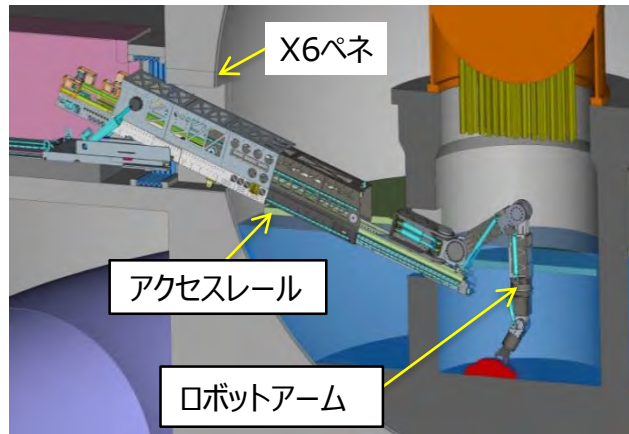
冠水-上アクセス工法（概念）



気中-上アクセス工法（概念）

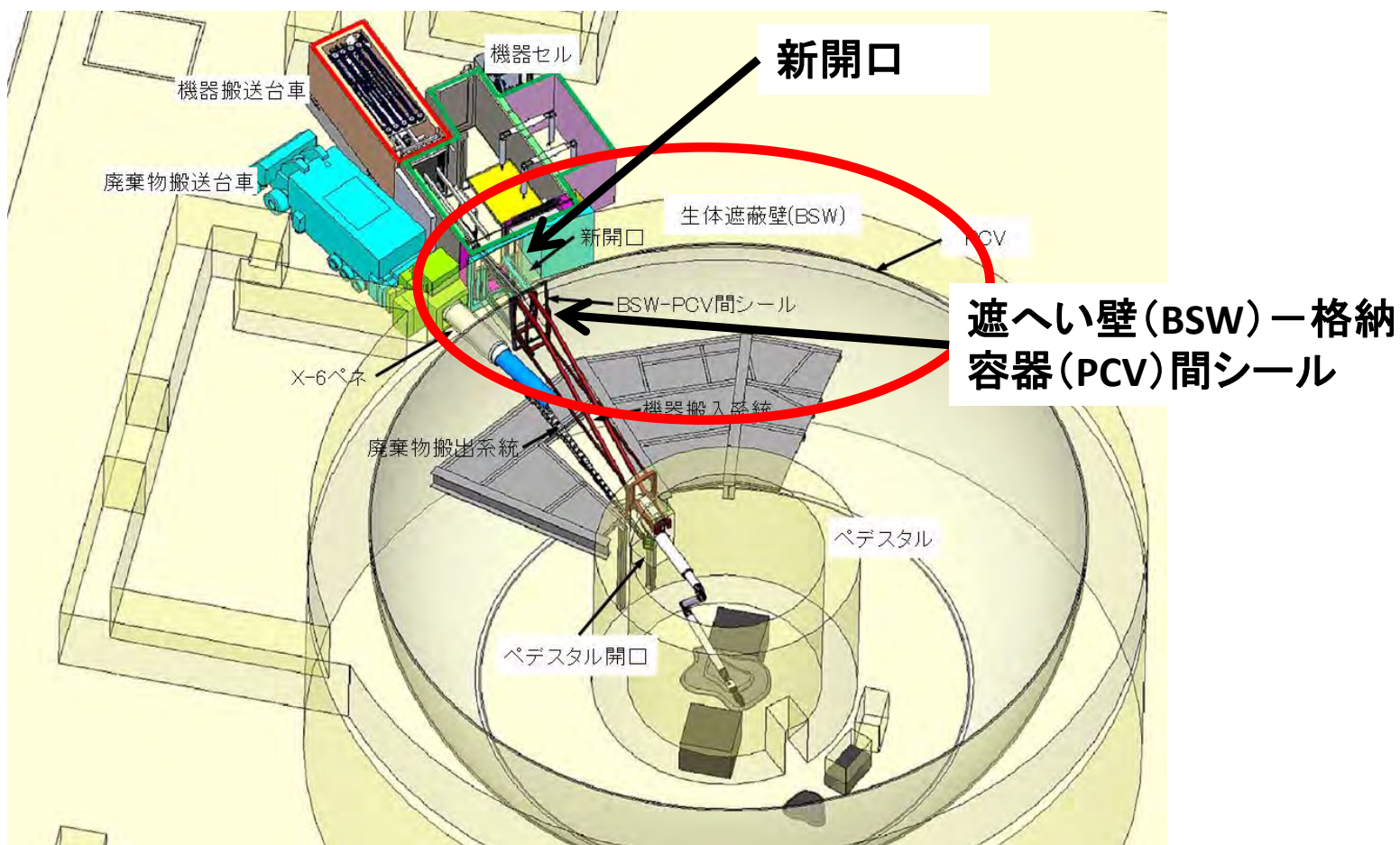


気中-横アクセス工法（概念）



【横アクセス工法】デブリ取り出しに係る技術

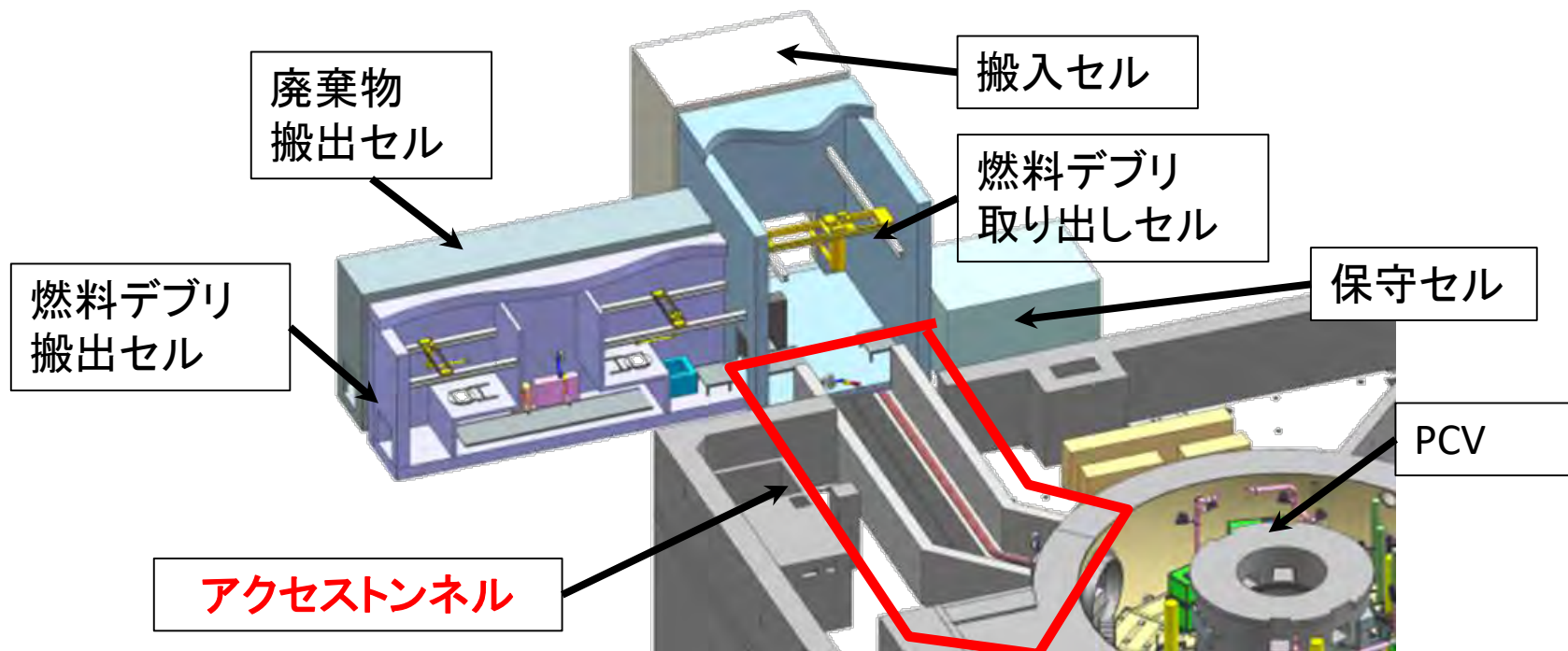
- デブリ取り出しの工法を実現するための要素技術を開発中



横アクセス工法の一例 イメージ

【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

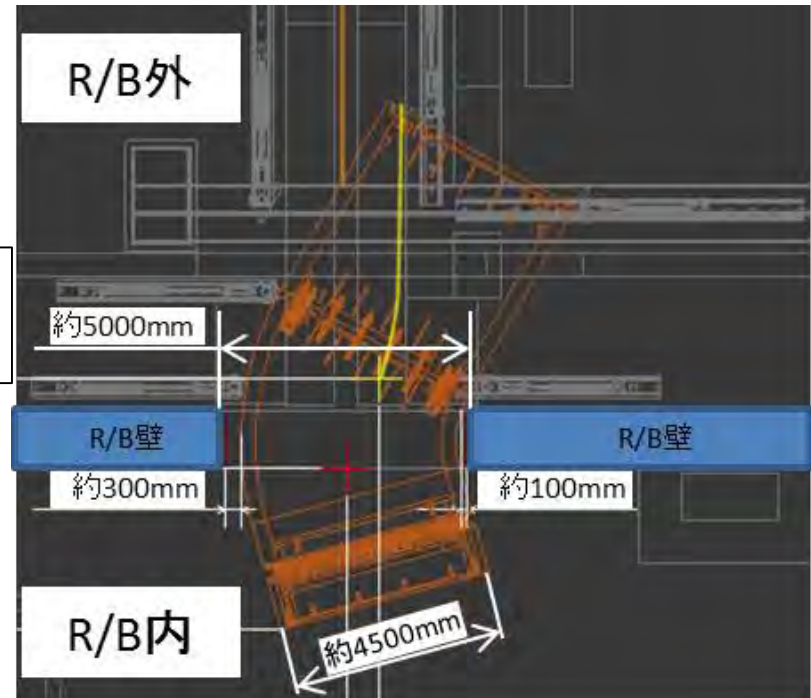
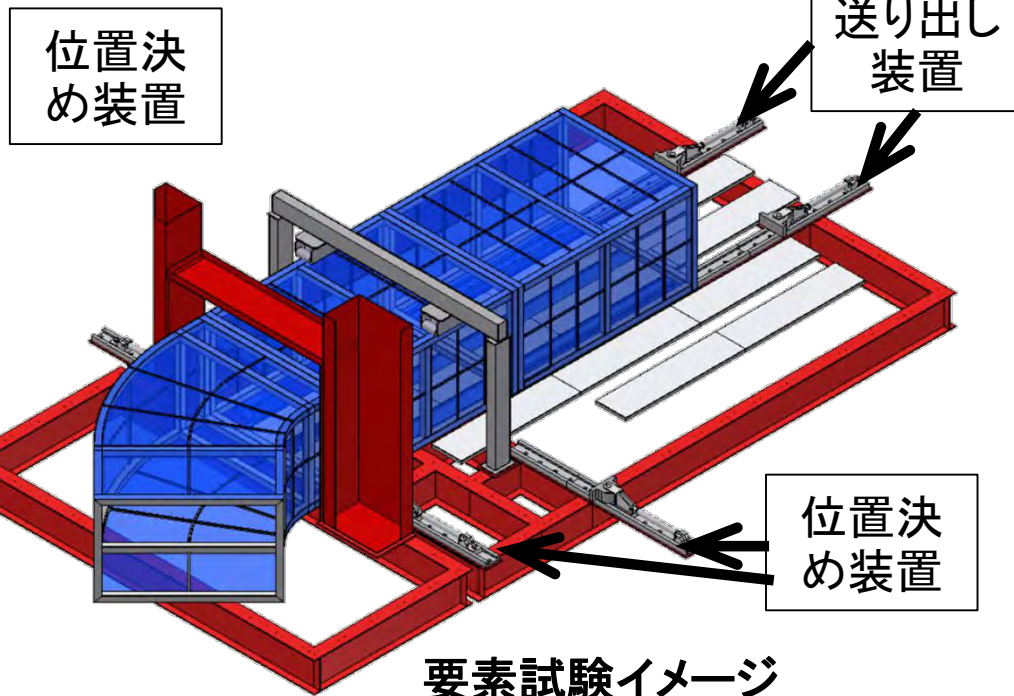


アクセストンネル工法の配置イメージ

トンネル施工技術の要素試験



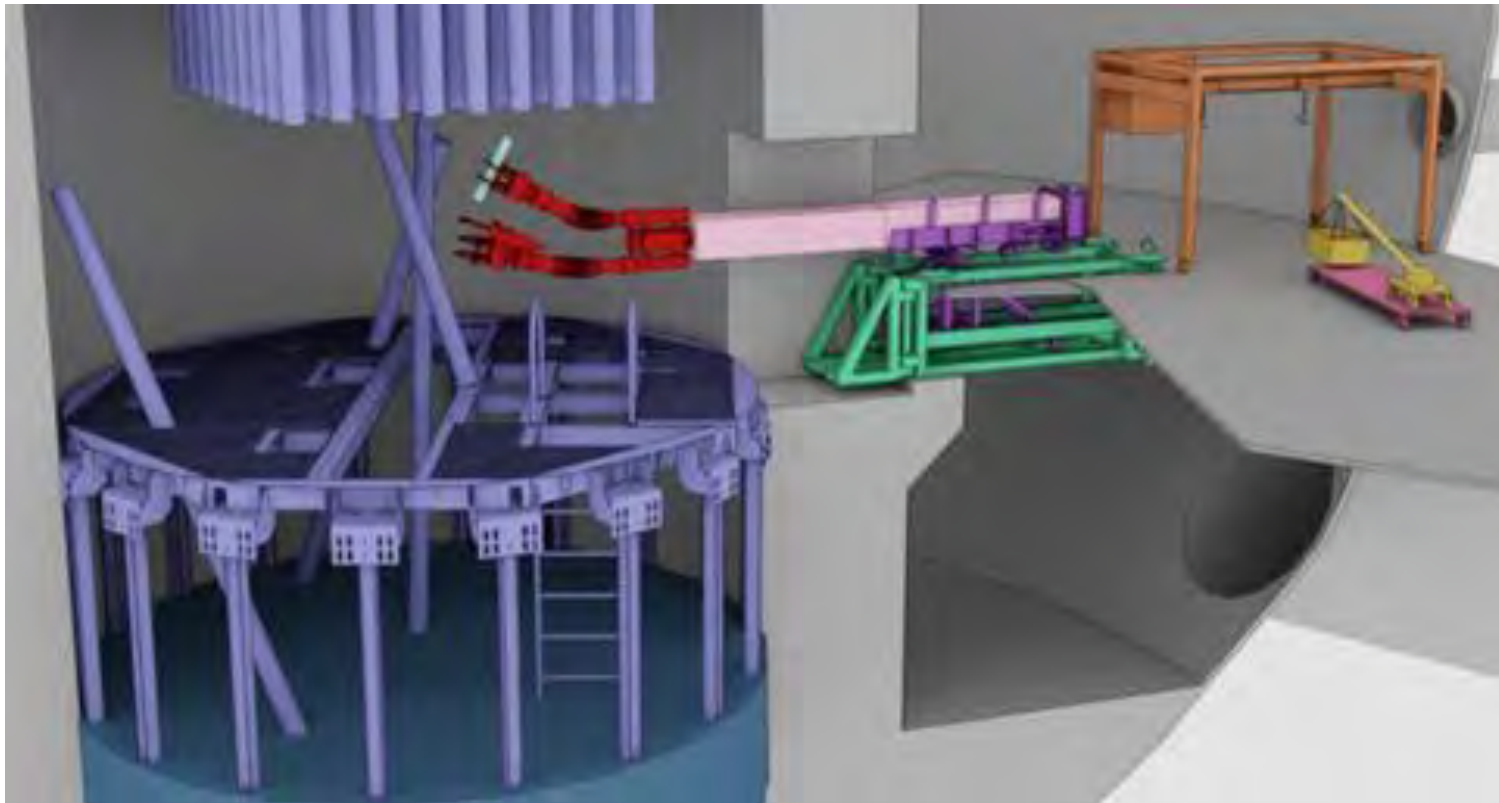
送り出し工法の例



*R/B: 原子炉建屋

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



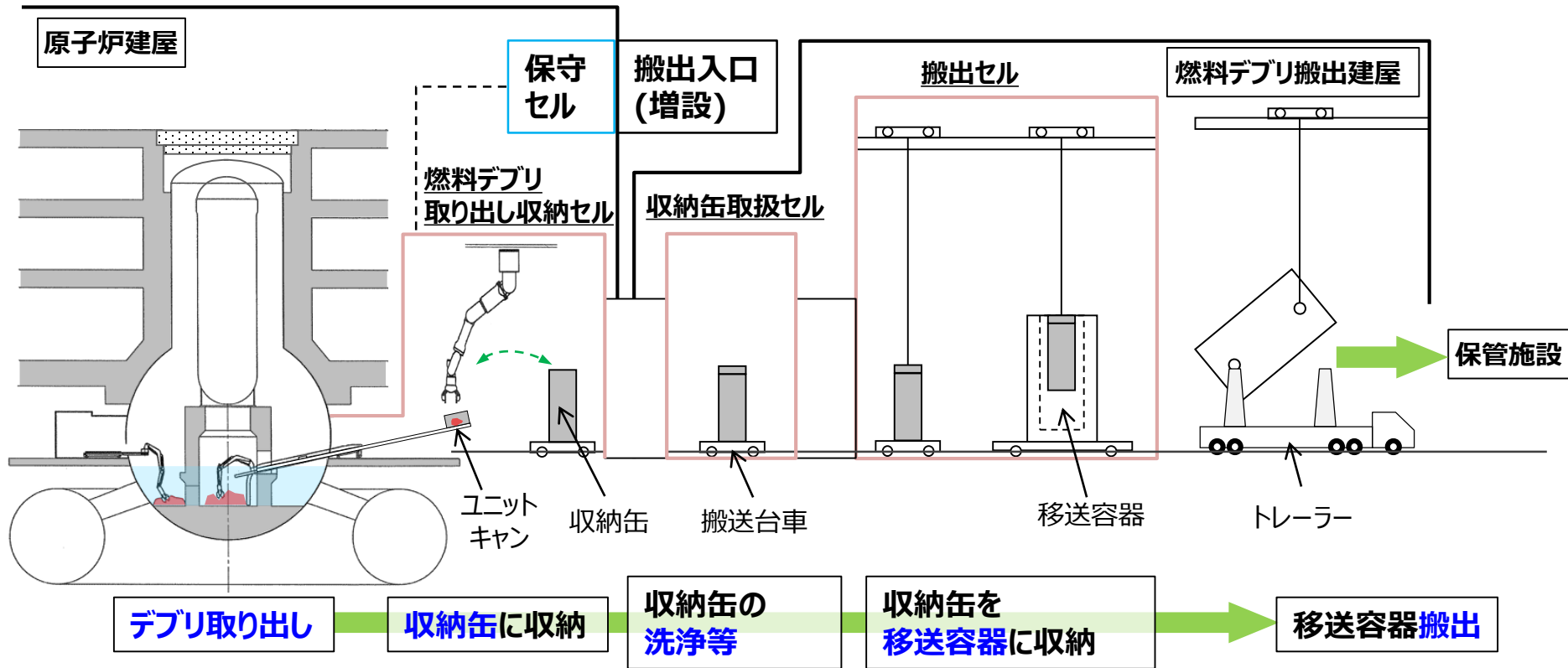
干渉物撤去の要素試験イメージ

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. 遠隔除染技術開発
3. 原子炉格納容器補修技術開発
4. 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
5. 燃料デブリ取り出し技術開発
- 6. 燃料デブリ取出しにおける安全設計の検討**

デブリ取り出し時の安全確保

検討を必要とするリスク

1. 冷却

・・・事故後時間が経過しており、崩壊熱は減少しているが、一定の冷却は必要であり、その機能を喪失するリスク。

2. 閉じ込め

・・・デブリの切削、はつり等を行う際に発生するダストを環境に放出してしまうリスク。

3. 火災・爆発 (不活性化)

・・・デブリの切削、はつり等を行う際に発火するリスク、水素爆発を発生させるリスク。

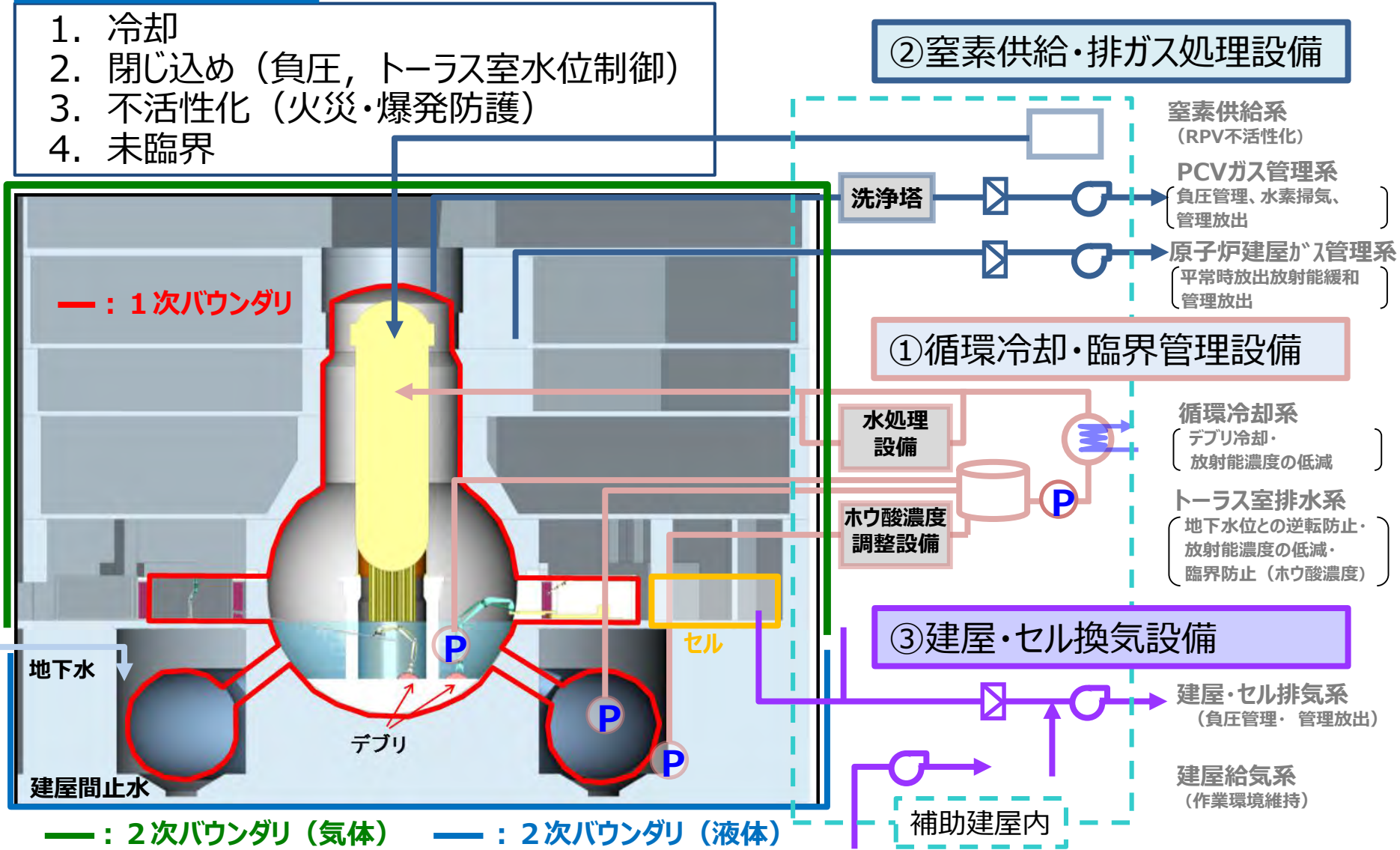
4. 臨界

・・・デブリ取り出しに伴う形状変化により臨界となるリスク。

デブリ取り出し時の安全確保

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

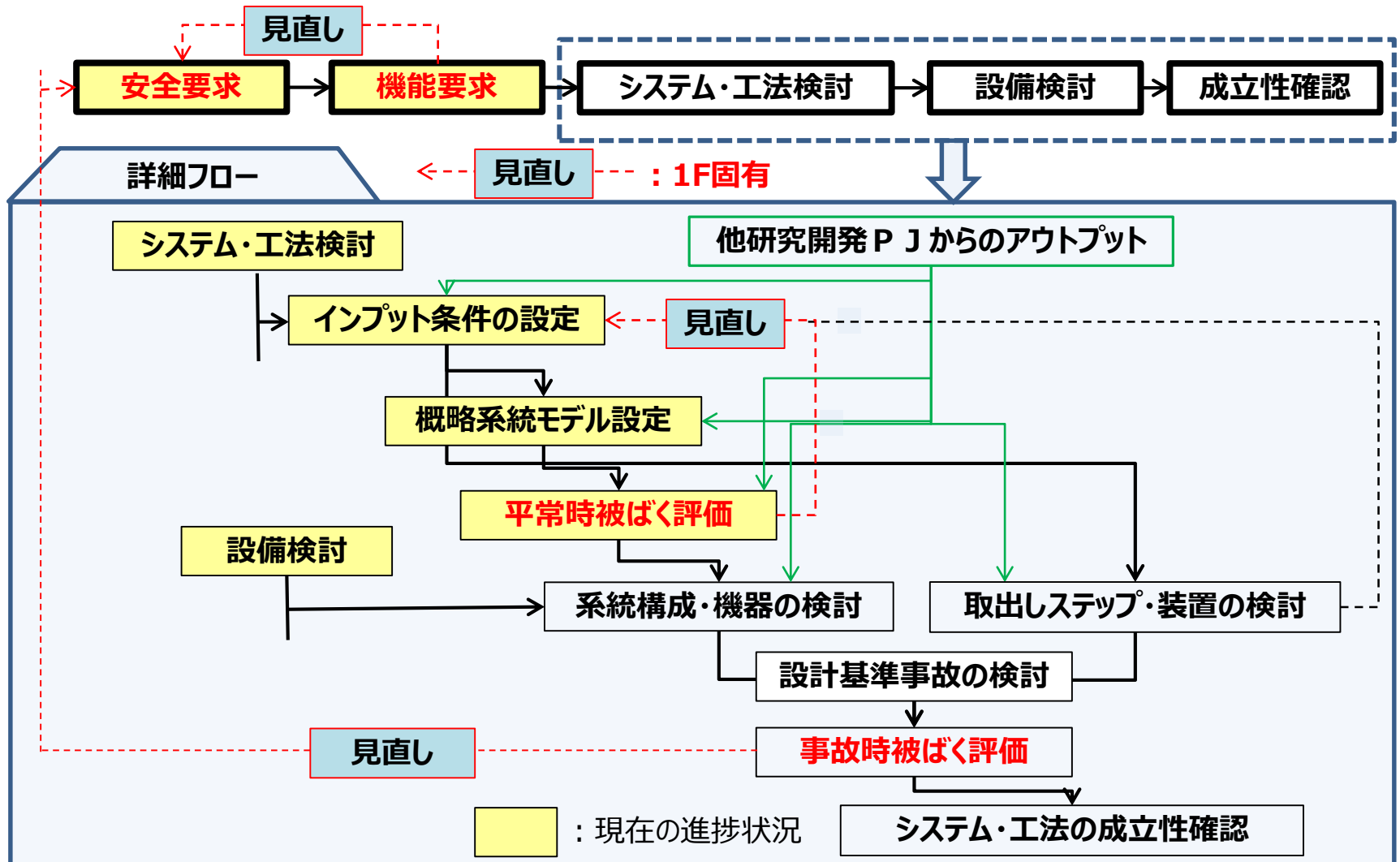


— : 2次バウンダリ (気体)

— : 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

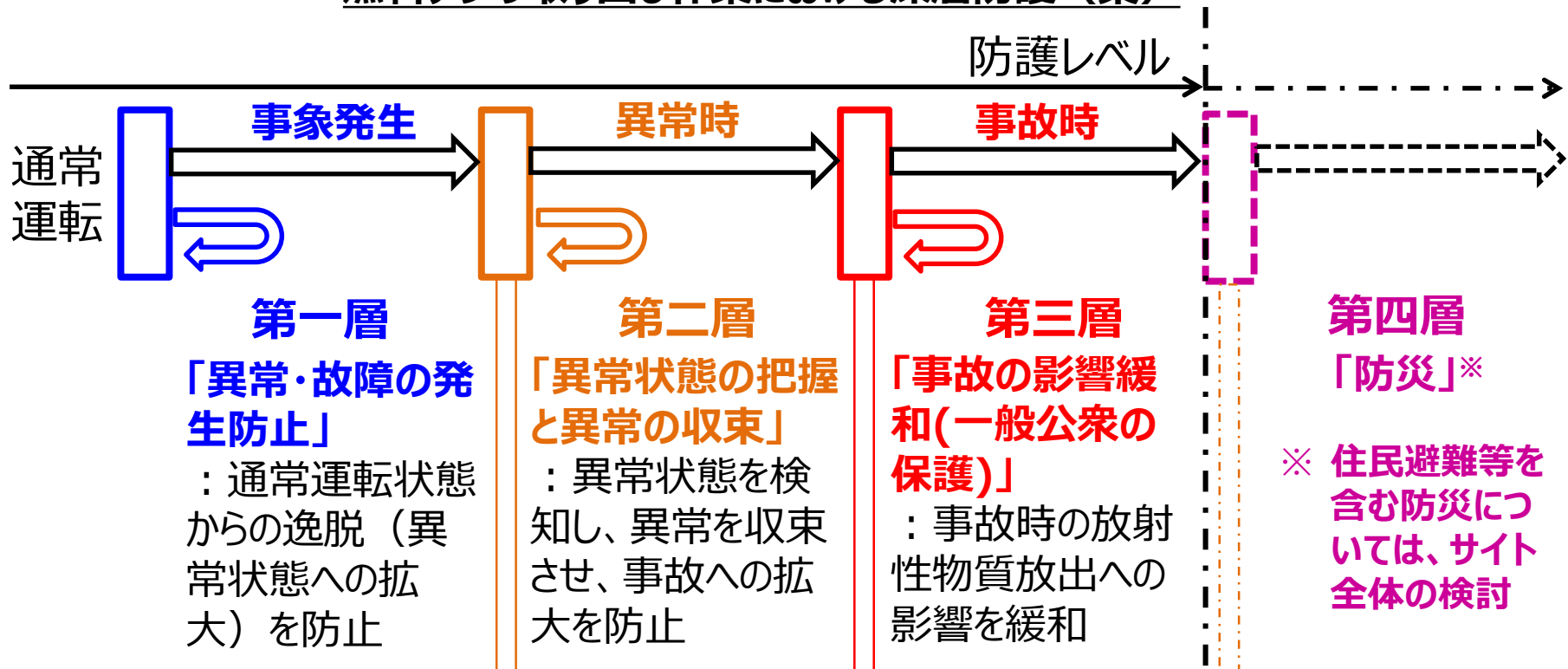
- 安全要求の設定（仮定）にスループットからの機能要求を加えてゆく
- 安全要求は基本的には不変であるが、現状内在するリスクや作業リスク（作業線量）の想定・評価によっては見直しがあり得る



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