

IRIDにおける燃料デブリ取り出し技術の開発

2019年4月11日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

開発計画部長

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

IRID組織概要

現時点の技術研究開発における喫緊の課題

-福島第一原子力発電所の廃炉

1. 組織名

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

International Research Institute for
Nuclear Decommissioning(IRID)

<http://www.irid.or.jp/>

2. 設立日

2013年8月1日

3. 組合員 (18 組織)

国立研究開発法人： 2法人

日本原子力研究開発機構、他

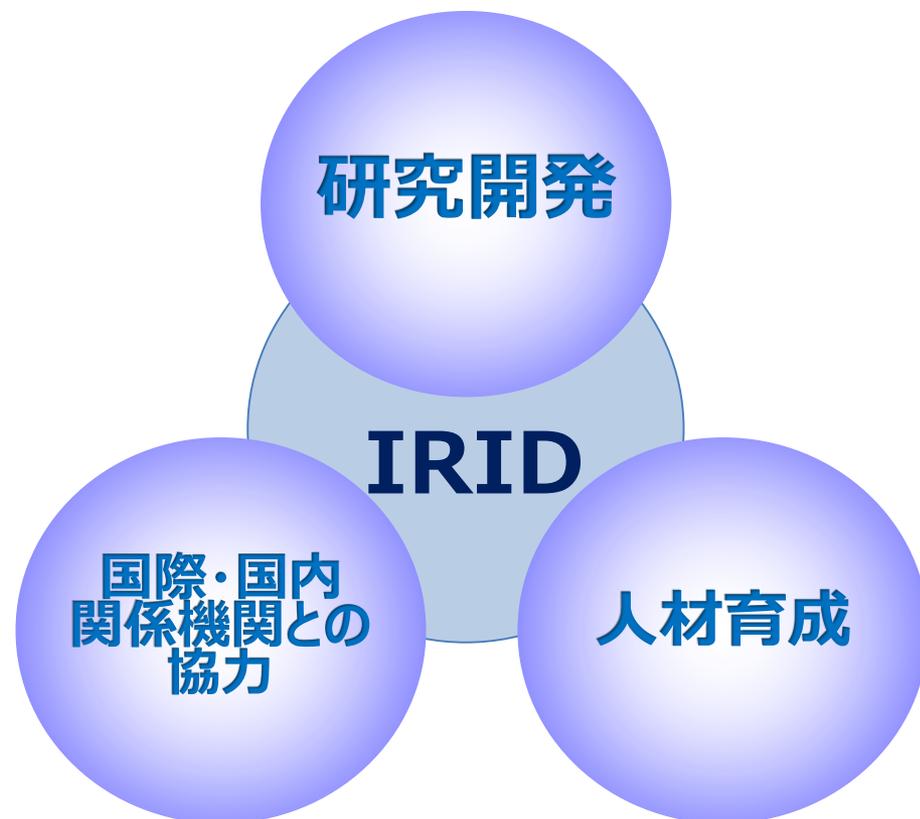
プラント・メーカー等：4社

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)他

電力会社等：12社

東京電力ホールディングス(株)他



IRID紹介ビデオ

紹介内容

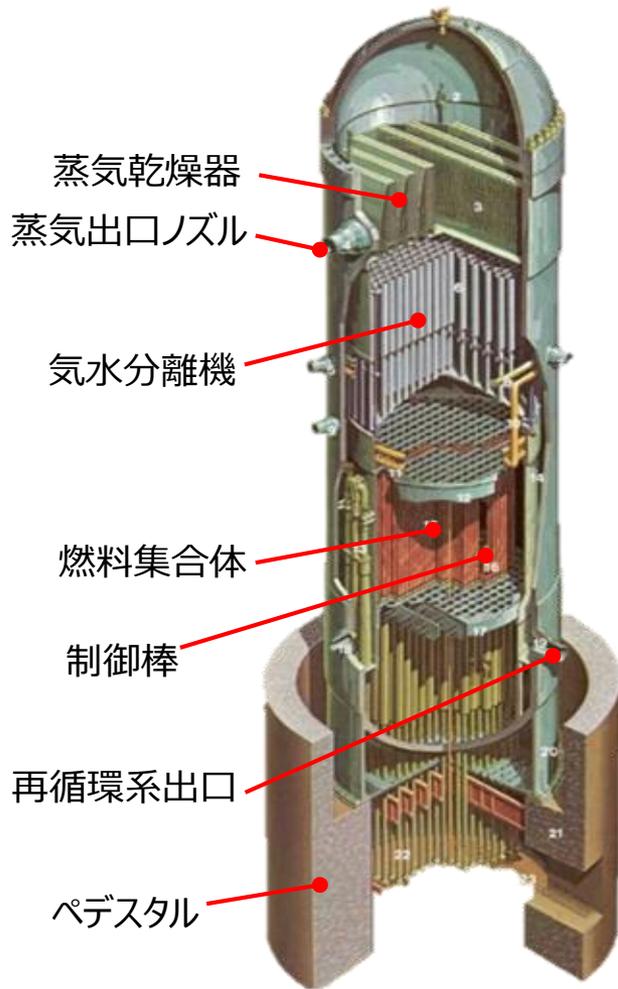
福島第一原子力発電所 1, 2, 3 号機の 燃料デブリの取り出しに関する技術開発の概要

- ① 燃料デブリの調査, Factを集める
 - ・原子炉格納容器内部調査の実績
 - ・今後の調査

- ② 燃料デブリ取り出し工法の検討, 安全から考える
 - ・バウンダリを構成する
 - ・深層防護を考える
 - ・アクセス工法の開発事例

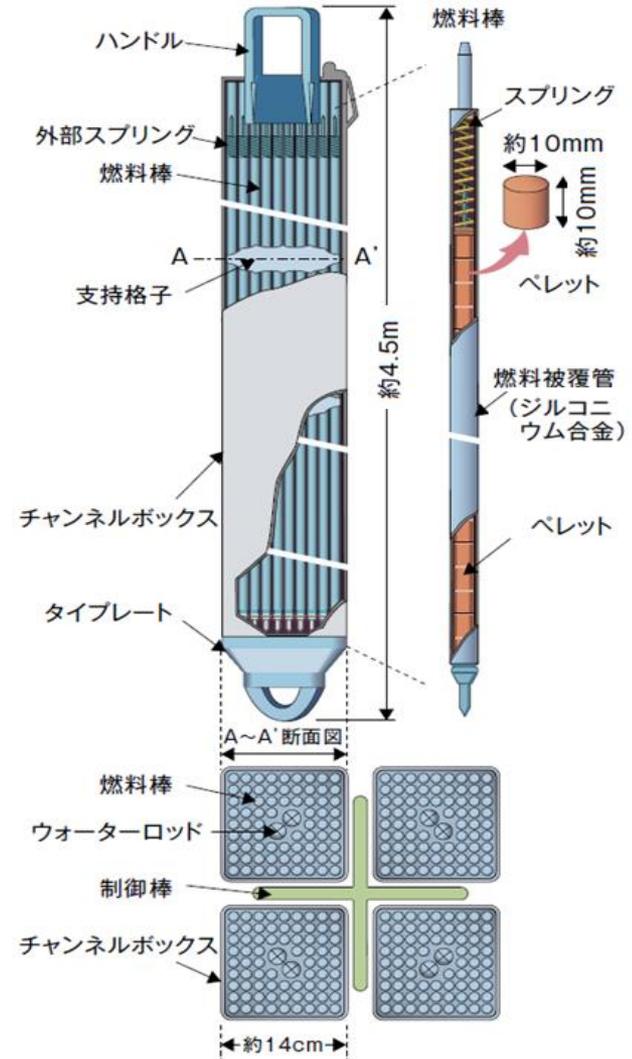
予備知識

沸騰水型原子力発電所 原子炉圧力容器と燃料集合体



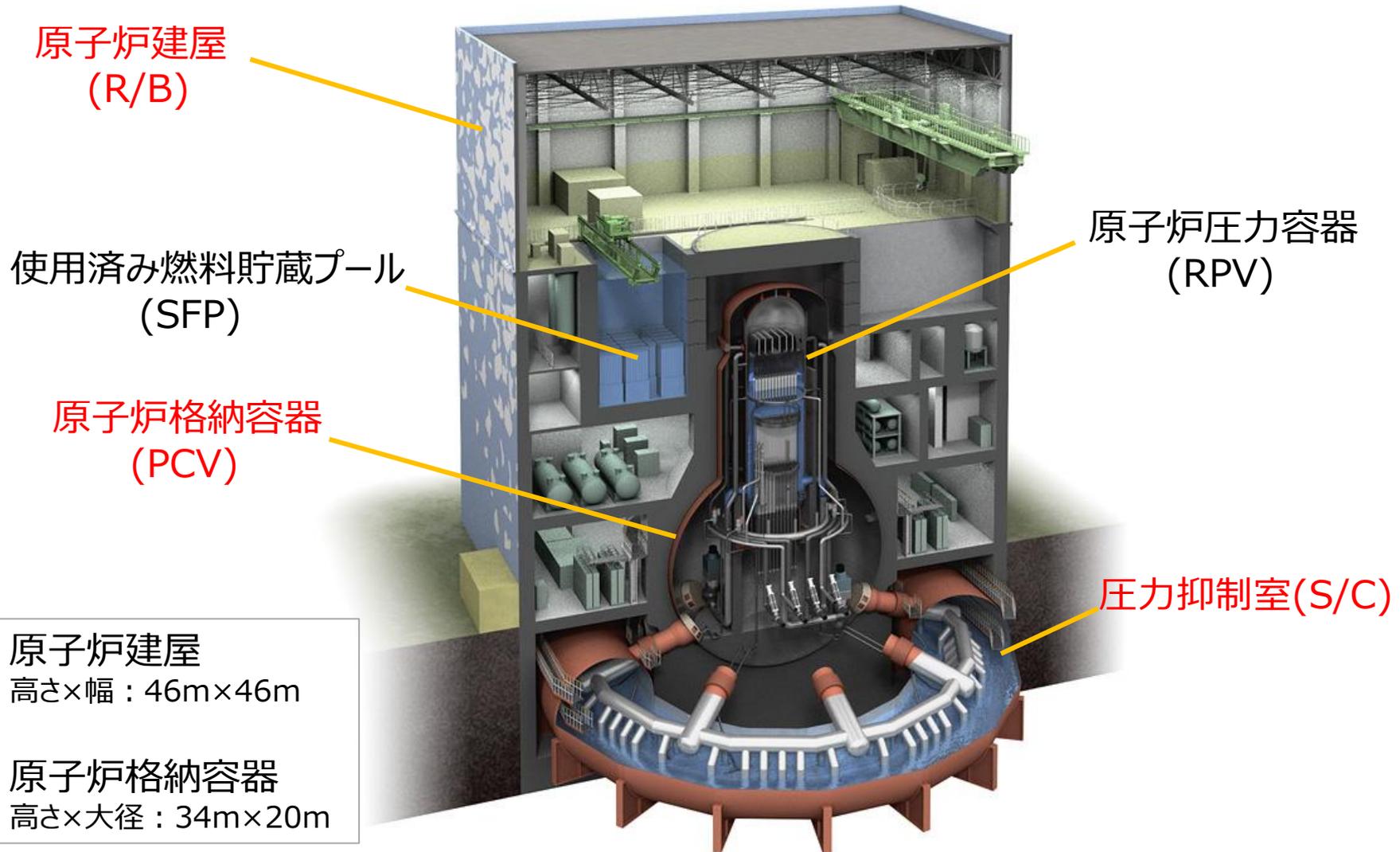
原子炉圧力容器

Reactor Pressure Vessel, RPV



燃料集合体 Fuel Assembly

沸騰水型原子力発電所 原子炉建屋



原子炉建屋イメージ

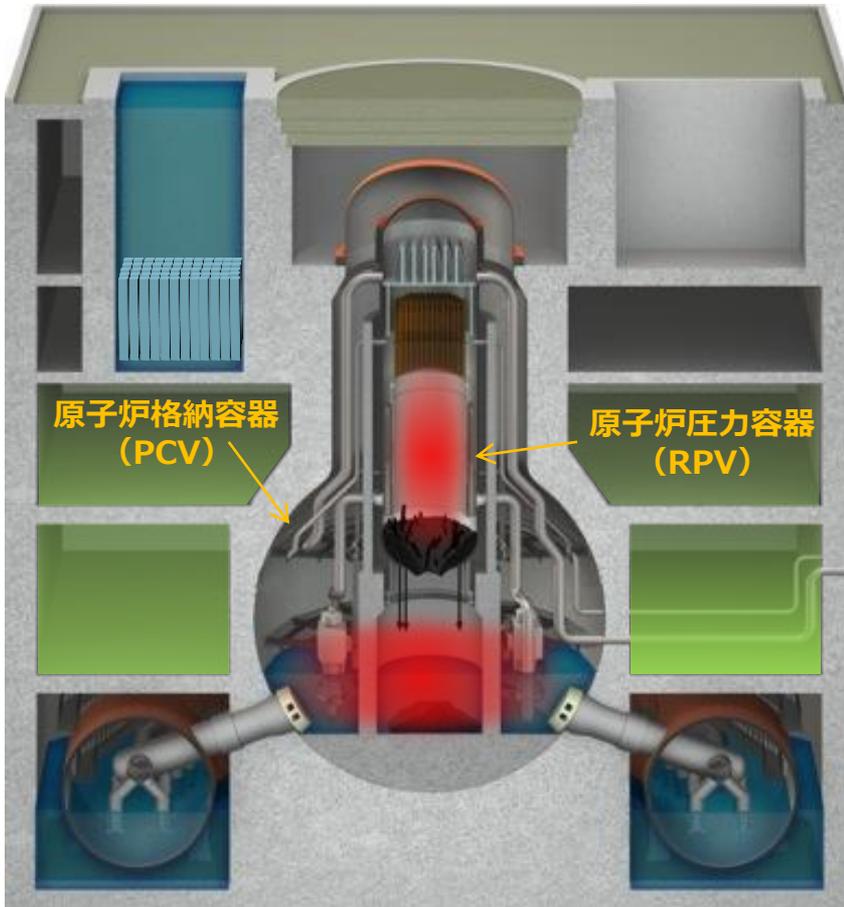
損傷・溶融した燃料はどこにあるのか

推定

- 炉心の冷却機能を喪失，核燃料の過熱（残留熱+崩壊熱），炉心を構成している燃料集合体や炉心支持構造物が高温で融解，
- 溶融した燃料や炉内構造物の一部は圧力容器の外に流出，格納容器内底部に到達，

崩壊熱

- 放射性元素の放射性崩壊の過程で放出される放射線のエネルギーが周囲の物質を加熱する。
- 放射性元素が比較的安定である核種や安定核種へと変化するに従って減少する。
- 停止直後の原子炉の炉心では1秒後で運転出力の約7%ほどの熱が新たに生じ、時間の0.2乗に比例して減少しながら1日後でも約0.6%の熱が放出される。
- 停止後7年経過した現在では高々数十kW。



原子炉建屋 (R/B) 断面イメージ

(参考) 崩壊熱

- 主要な崩壊熱寄与核種は、 ^{90}Y (29%)、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (26%)、 ^{134}Cs (9%)、 ^{137}Cs (8%)、 ^{90}Sr (6%)。
- ^{90}Y は ^{90}Sr の、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ は ^{137}Cs の放射平衡核種であることから、半減期が30年程度の ^{137}Cs と ^{90}Sr により、現在の崩壊熱は支配的に決まっている。
- Cs が84%放出されるモデル(Model2)の場合には、 $^{90}\text{Y} + ^{90}\text{Sr}$ (55%)と $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (7%)の他に、 ^{238}Pu (9%)、 ^{244}Cm (6%)、 ^{241}Am (5%)の寄与が大きい(括弧内の数値は2号機2018年時点)。
- 事故後20年以上経過すると、FP核種の寄与は相対的に小さくなり、 ^{241}Pu の崩壊により生成する ^{241}Am や ^{238}Pu の寄与が徐々に大きくなっていく。

Date	Unit	Model1	Model2	Model3	Model4
2011.3 (事故時) 単位MW	1F1	88.4	59.8(68%)	58.8(67%)	39.7(45%)
	1F2	154	104(68%)	102(66%)	68.8(45%)
	1F3	153	104(68%)	102(67%)	68.6(45%)
2018.3 (7年後) 単位kW	1F1	66.9	42.7(64%)	38.9(58%)	14.6(22%)
	1F2	83.8	52.7(63%)	47.7(57%)	16.5(20%)
	1F3	81.6	52.3(64%)	47.7(58%)	18.3(22%)
2031.3 (20年後) 単位kW	1F1	45.9	31.5(69%)	29.2(64%)	12.6(27%)
	1F2	56	37.9(68%)	35(63%)	13.8(25%)
	1F3	56	38.9(69%)	36.2(65%)	16.3(29%)

2018年での崩壊熱は
ユニット当たり数十kW程度

FP放出モデル

Model1 放出無し (線源上限設定用)

Model2 PHEBUS-FPT4試験に基づくモデル

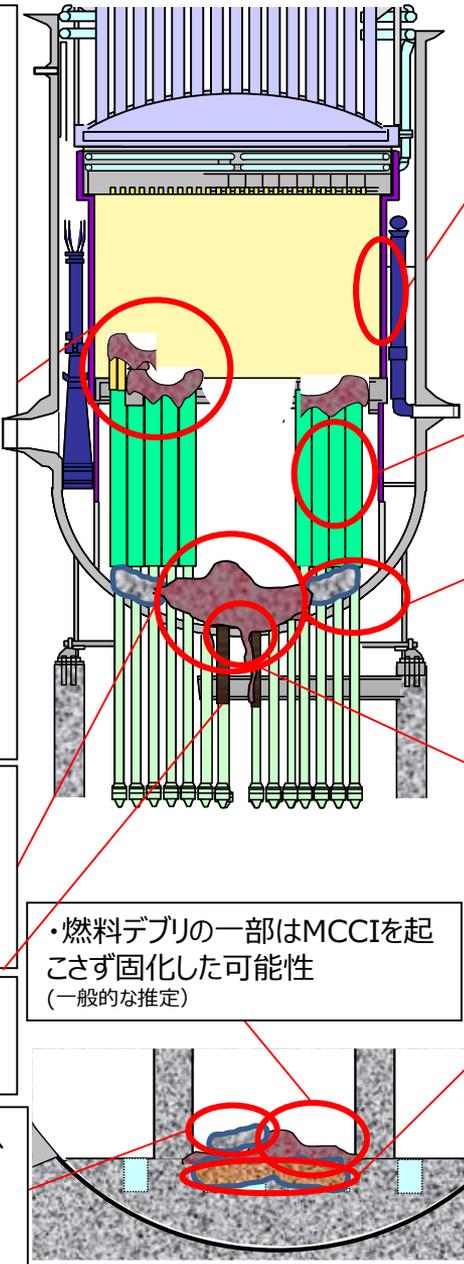
Model3 VERCORS 5試験に基づくモデル

Model4 高放出モデル(線源下限設定用)

()はModel1に対する割合

(参考) 2号機のデブリ分布・RPV・PCV状態の推定図 (例)

- ・水素発生によるPCV圧力上昇からエネルギー量を想定し、大部分の燃料が溶融したと推定 (実測・解析)
- ・CS注水時に温度低下が確認されたことから、低流量のCS注水で水がかかる炉心外周位置に燃料有と推定 (燃料支持金具、CRGTに溶融燃料が落ち込み固化した場合でも熱源として同等な挙動を示すため、詳細はデブリ位置は推定不可能) (実測)
- ・ミュオン測定の結果から、炉心外周部に燃料が存在している可能性 (実測)
- ・健全燃料があるとしても外周部に一部 (一般的な推定)
- ・溶融燃料が固化した一般的な酸化物デブリと推定 (一般的な推定)
- ・ミュオン測定にて、圧力容器底部に燃料デブリと思われる高密度物質の影を確認。下部プレナムに落下した燃料がRPV底部に残存している可能性 (実測)
- ・CRGTの破損に伴いCRD内部にデブリが侵入している可能性 (一般的な推定)
- ・PCV床に水が溜まっていた場合、粒子状デブリが形成される。
- ・粒子状デブリがある場合、淀み部にたまる可能性 (一般的な推定)



- ・FDW流量増加時にPLR系圧力上昇したことから、シュラウド外に水位が形成されている可能性 (実測)
- ・CS注水による温度低下、注水量増加時のシュラウド外水位上昇から、シュラウドの大規模損傷はないと推定 (実測)
- ・高温の燃料デブリからの熱移動が小さい場合、CRGTは溶けずに残る (一般的な推定)
- ・粒子状デブリがある場合、淀み部にたまる可能性 (一般的な推定)
- ・PCV内部調査時に外周部のCRDが確認できたことからRPVの穴は中央部と推定 (大きくない) (実測)
- ・穴から落ちたデブリの一部はCRDにへばり付くと推定 (一般的な推定)
- ・燃料デブリの一部はMCCIを起こさず固化した可能性 (一般的な推定)
- ・MCCIを起こした燃料デブリはコンクリートと混合している。
- ・PCVシェル破損の傾向は無い (サンドクッションドレンパイプからの漏えいなし) ため、MCCIは限定的と推定 (実測)

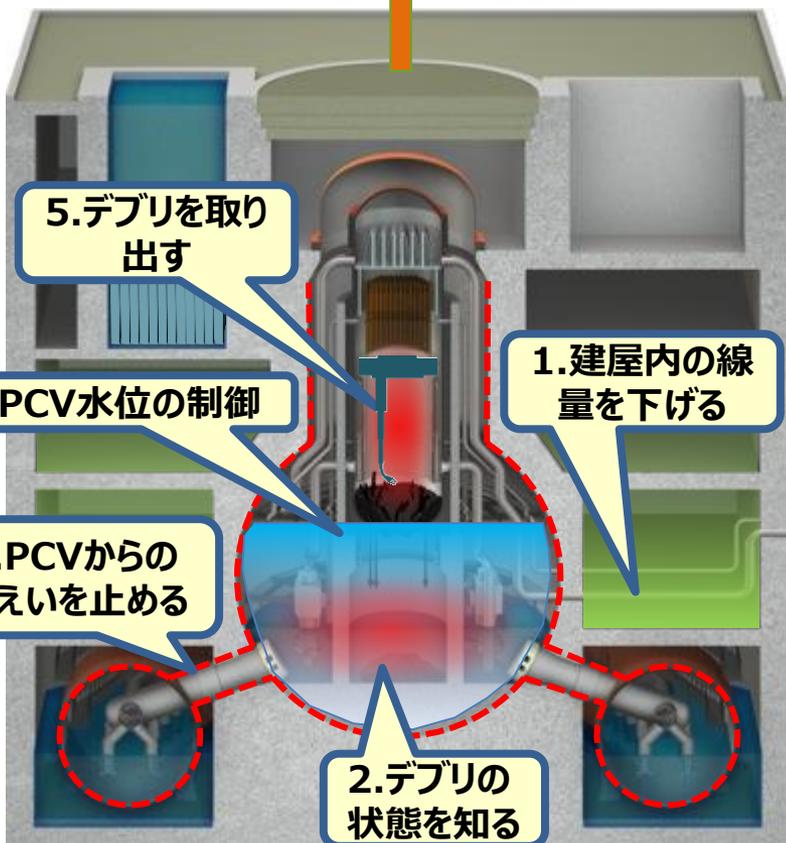
- 健全燃料
- 酸化物デブリ (多孔質)
- 粒子状デブリ
- コンクリート混合デブリ
- 健全CRGT
- 健全CRD
- CRD (内部にデブリ)
- 健全シュラウド
- バルーニング燃料※
- 酸化物デブリ※
- 重金属デブリ※
- ペレット※
- 粉状ペレット※
- 被覆管残渣※
- 溶融炉内構造物※
- 固化B4C ※
- 制御棒混合溶融物※

燃料デブリ取出しに必要な技術開発

1. 建屋内の線量を下げる

- **遠隔除染**装置の開発

6. デブリを収納・移送・保管する



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

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

技術開発の要点

バックグラウンド

- **事故後の現場がスタート**：高放射線環境，現場状況が不明確，現状のリスク
- 不定型の燃料を取り扱う設備：原子力発電システムでない
- **前例がない**：モデル、ビジョン、具現化された要求事項が無い

1. リスクの上昇を抑制する

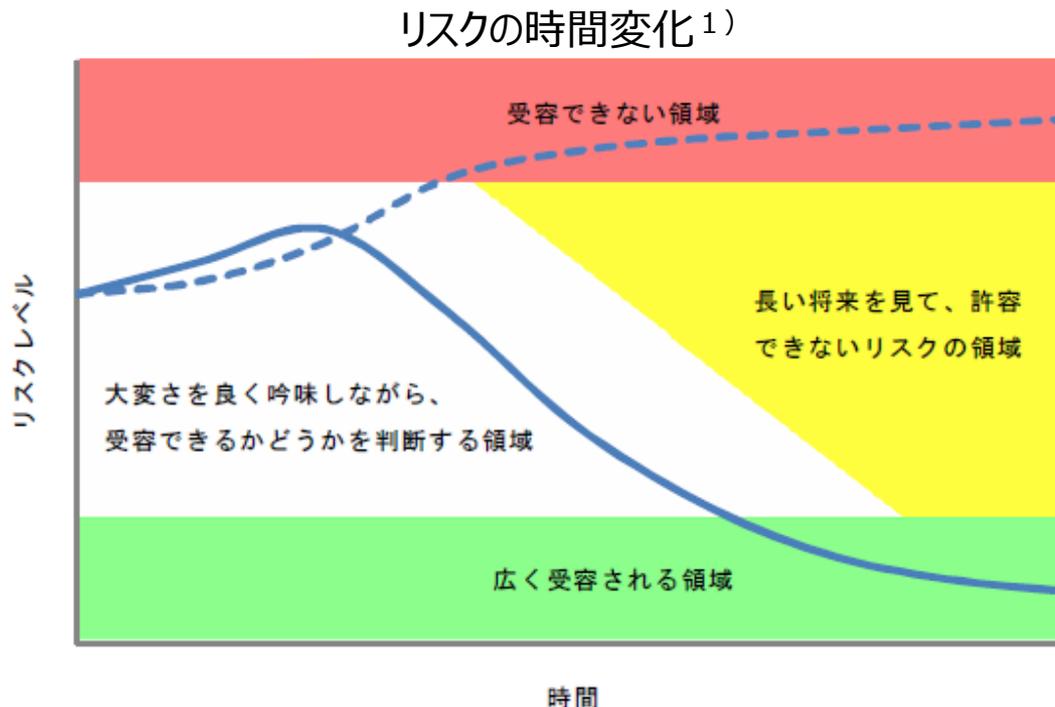
- **環境影響リスクを下げる**；安全システムの構築
- **作業線量を下げる**；遠隔機器，線量率低減，作業ステップ（量）

2. 30-40年間での廃炉を可能にする：スループットへの挑戦

- **FACTの充実**；燃料デブリ（廃棄物も）の特性・所在・量
- **シナリオの構築**；取り出し－収納－移送－保管（乾燥・移送）
- **さまざまな選択肢**；工法のバラエティ（切削・回収・保守）、作業対象と速度
- **エンジニアリングの展開**；現場への実装、効率化，合理化

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]

燃料デブリの取り出し／安全要求の考え方

放射性物質の閉じ込め

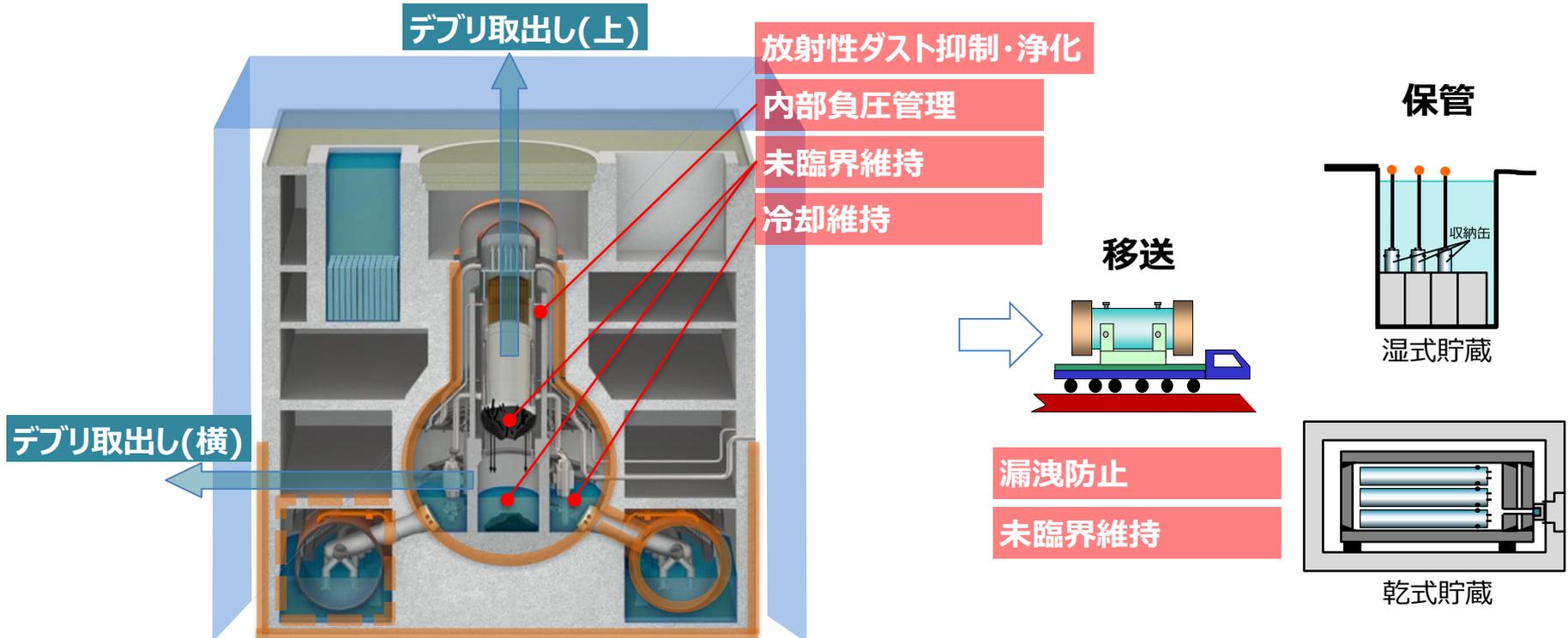
- 気体中／液体中の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止
- 移送容器による放射性物質の漏洩防止

放射性物質の追加生成の防止

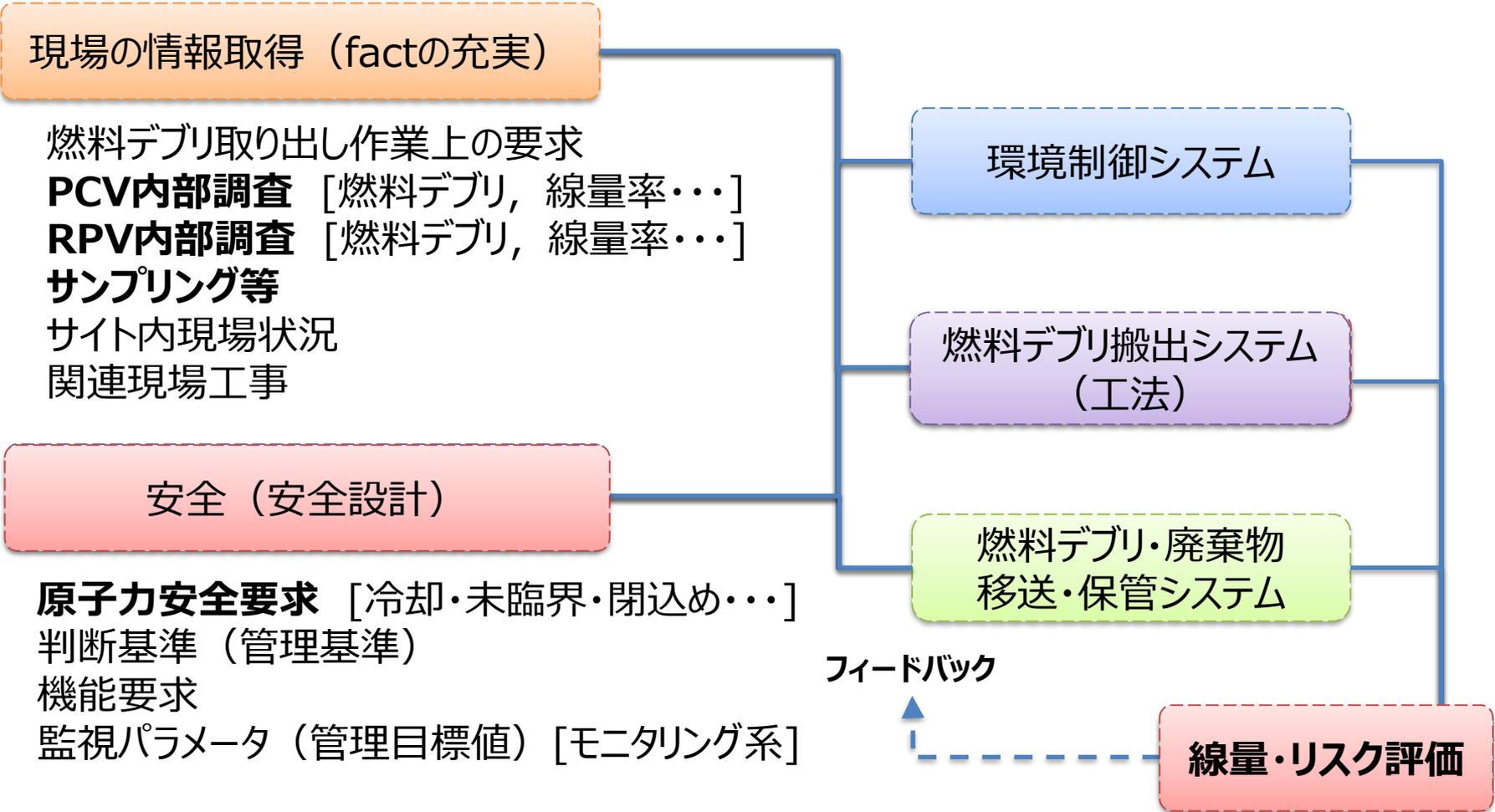
- 核反応による異常な放射性物質の生成防止
- 燃料デブリの異常な温度上昇による放出防止
- 燃料デブリ、構造物の切削による異常な拡散の防止

一般要求等

- 火災・爆発の防止
- 状態監視・モニタリング



設計プロセスフロー 概要



設計からの調査ニーズの例

デブリ取り出し設計

アクセス・搬出設計、切削工法、回収工法

- ・燃料デブリの所在：拡散範囲、分布、量
- ・硬さ、切削特性
- ・線量率分布、放射線強度

未臨界維持

未臨界維持設計

- ・燃料デブリの特性：核燃料濃度、分布、量
- ・中性子吸収剤濃度：B, Gd濃度
- ・減速材分布：水位、デブリ中の水分量

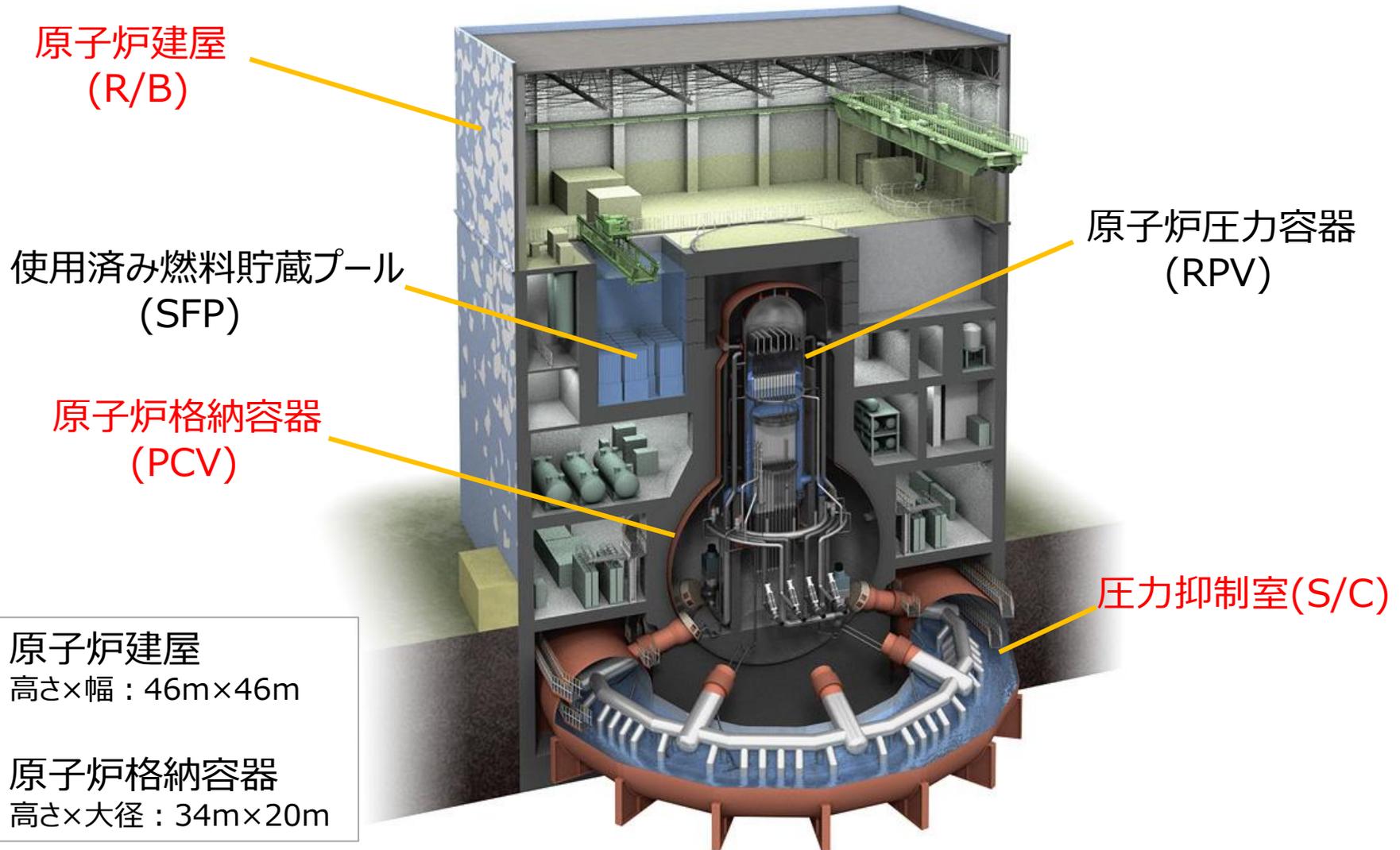
放射性ダスト抑制・浄化

漏洩抑制設計

- ・燃料デブリの特性：（加工切削）飛散性、溶解性、捕集特性、放射性物質濃度

原子炉格納容器（PCV）内部調査の実績

沸騰水型原子力発電所 原子炉建屋



原子炉建屋イメージ

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

これまでの作業 格納容器内部のロボットによる調査

ペDESTル外側の調査（1号機）

○形状変化型ロボット

ペDESTル内側の調査（2号機）

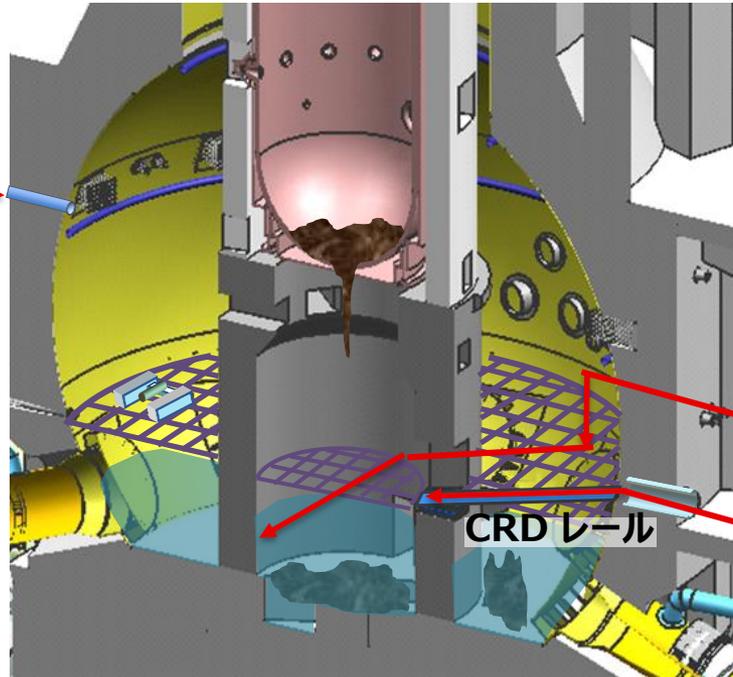
○クローラ型遠隔調査ロボット 他



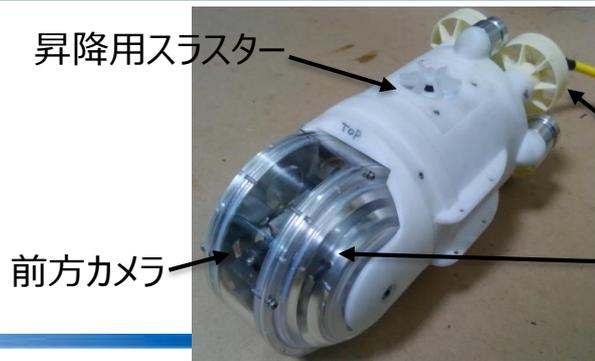
変形



(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（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

【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

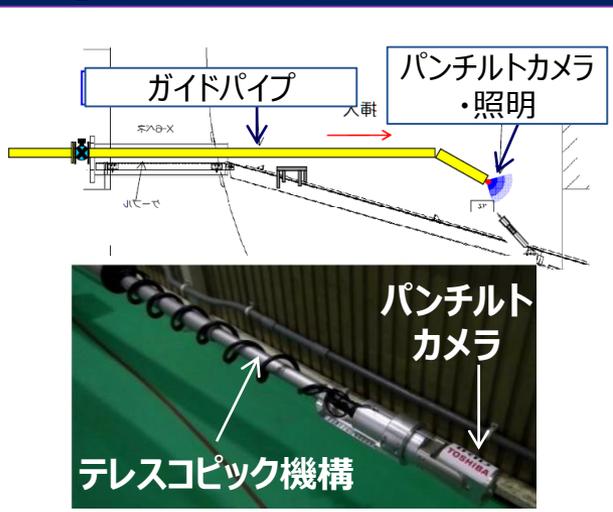
2. レール上堆積物除去

2月9日実施

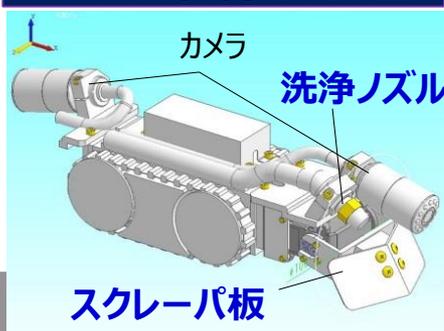
3. 調査

2月16日実施

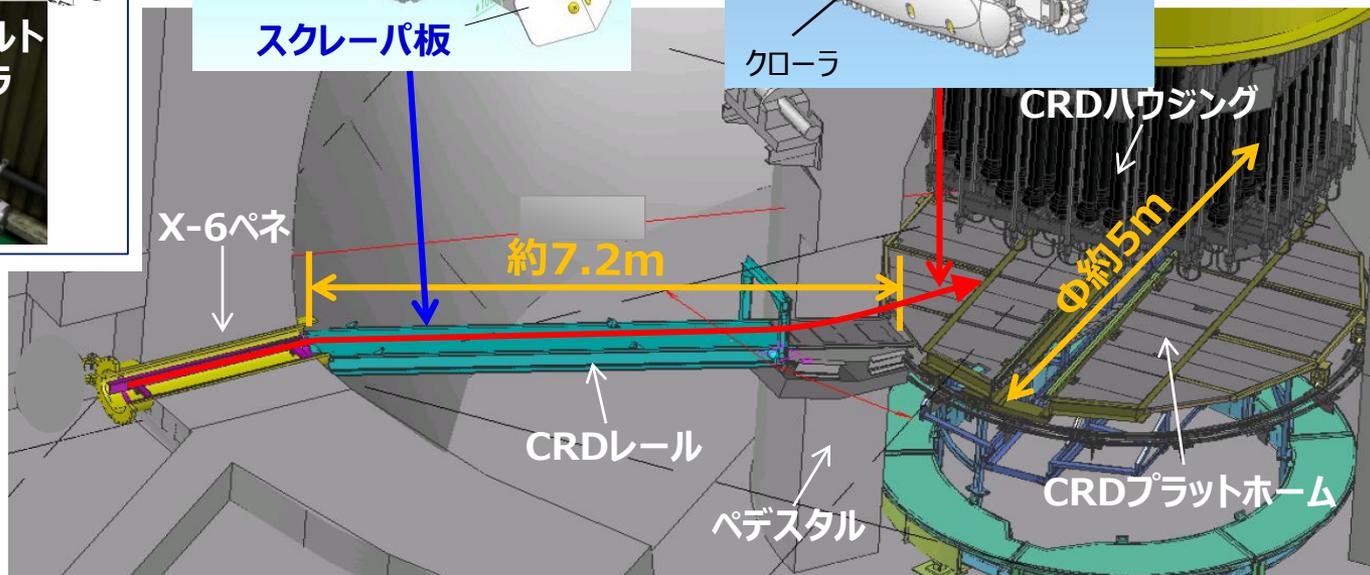
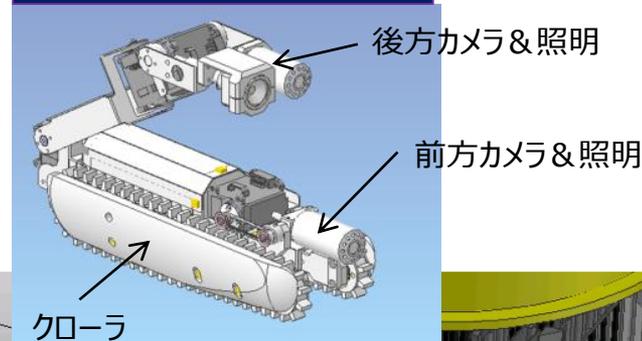
1. 事前確認装置

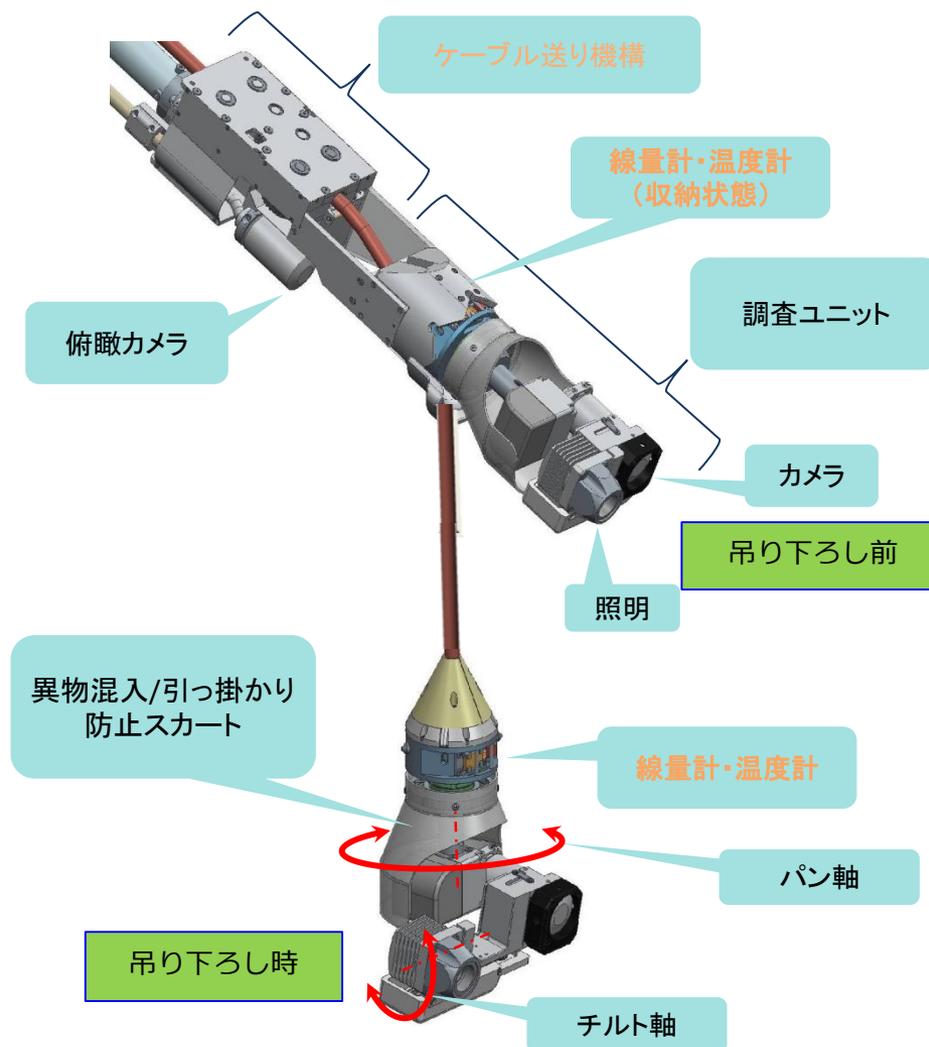


2. 堆積物除去装置



3. A2調査装置

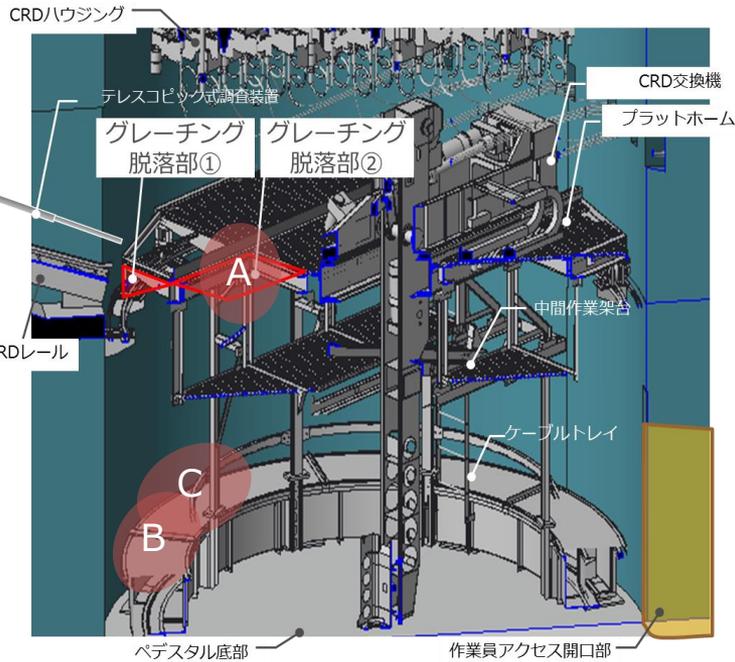




調査装置先端部概要

2号機A2'調査装置(PCV内・ペデスタル内動画)





- 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

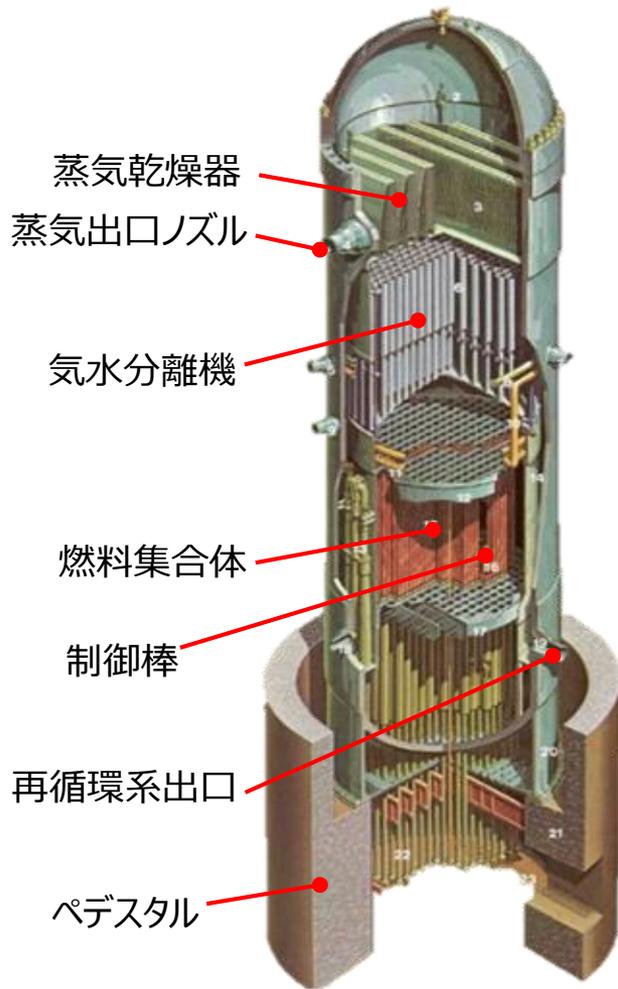


撮影場所B ペDESTAL底部



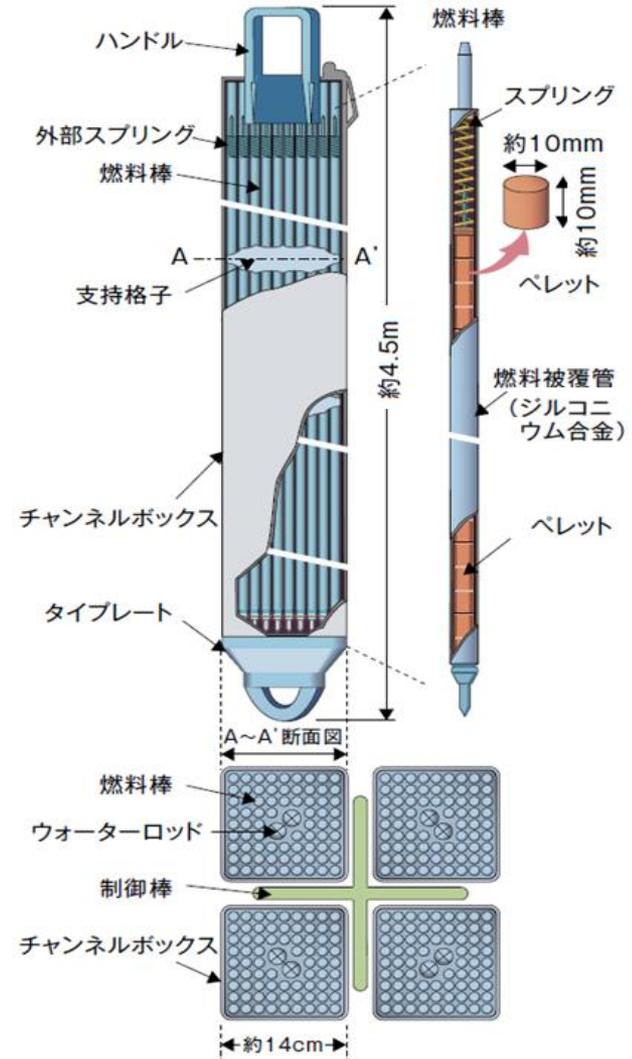
撮影場所C ペDESTAL底部

沸騰水型原子力発電所 原子炉圧力容器と燃料集合体

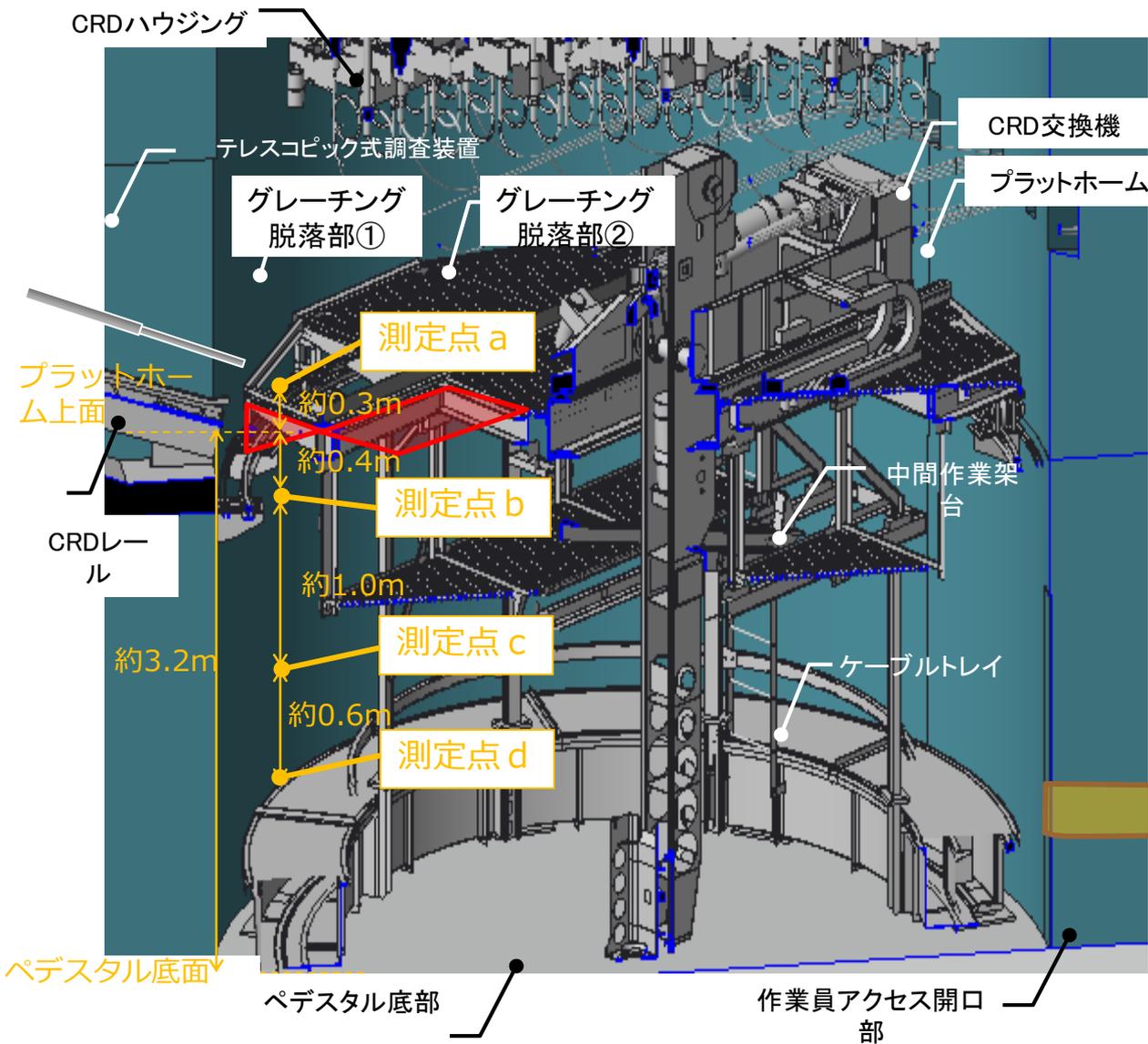


原子炉圧力容器

Reactor Pressure Vessel, RPV



燃料集合体 Fuel Assembly



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DESTAL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

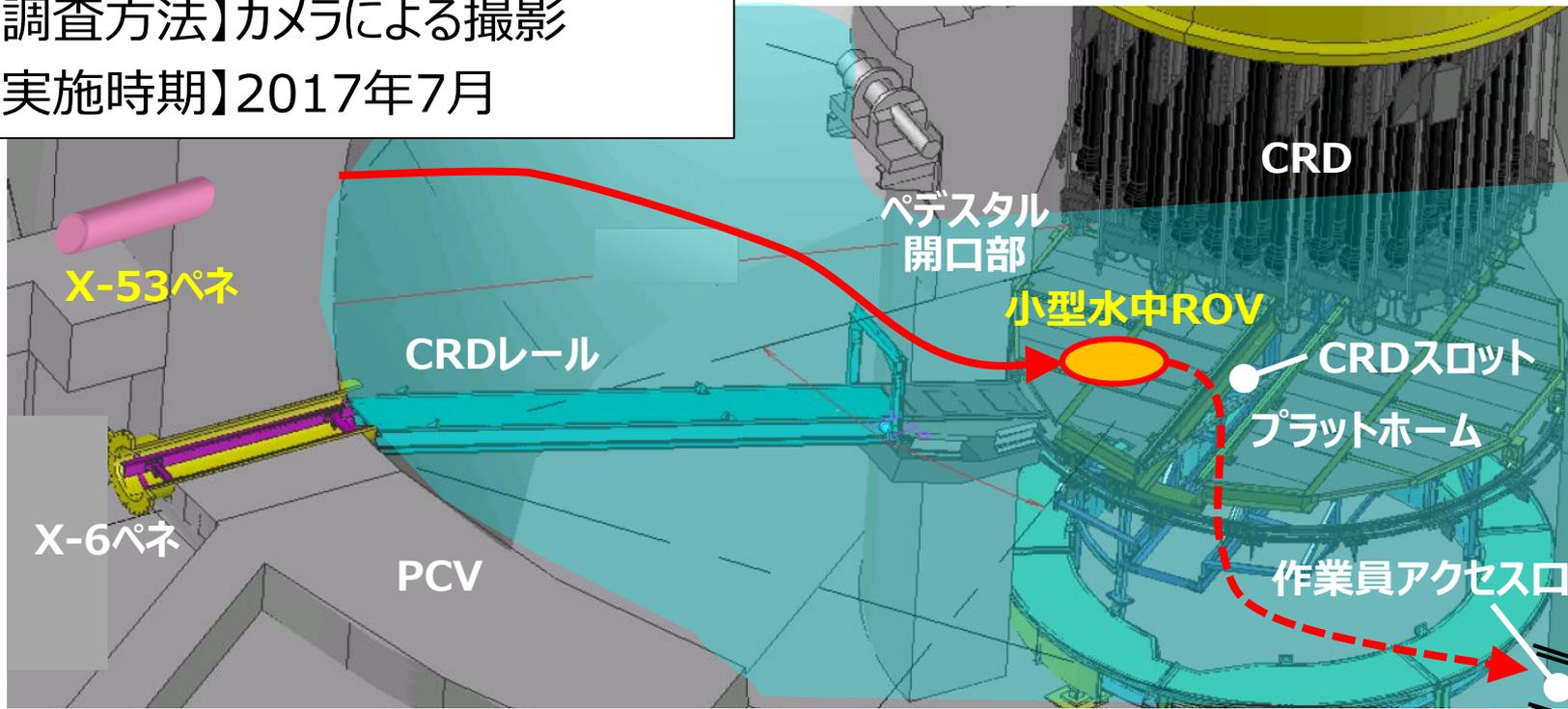
※2: 誤差: 線量計±7%
 温度計±0.5°C

※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内に侵入。**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）

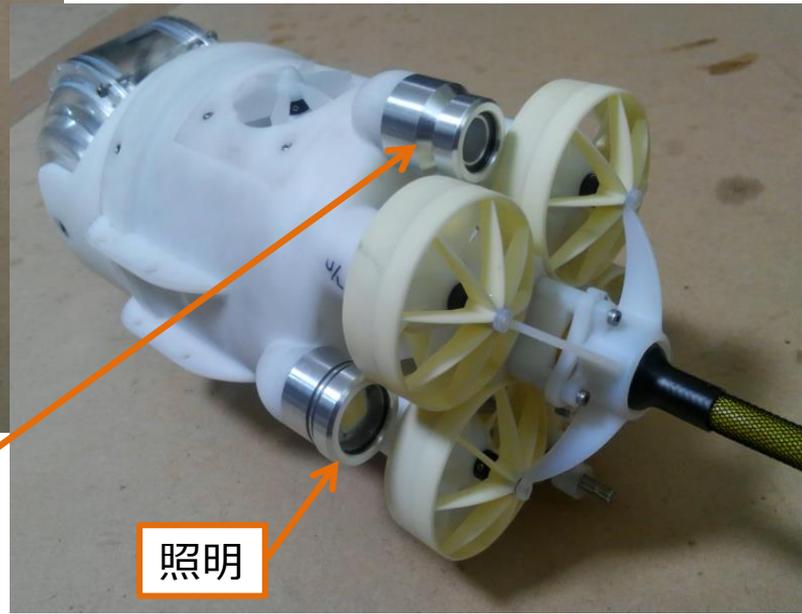


昇降用スラスタ

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

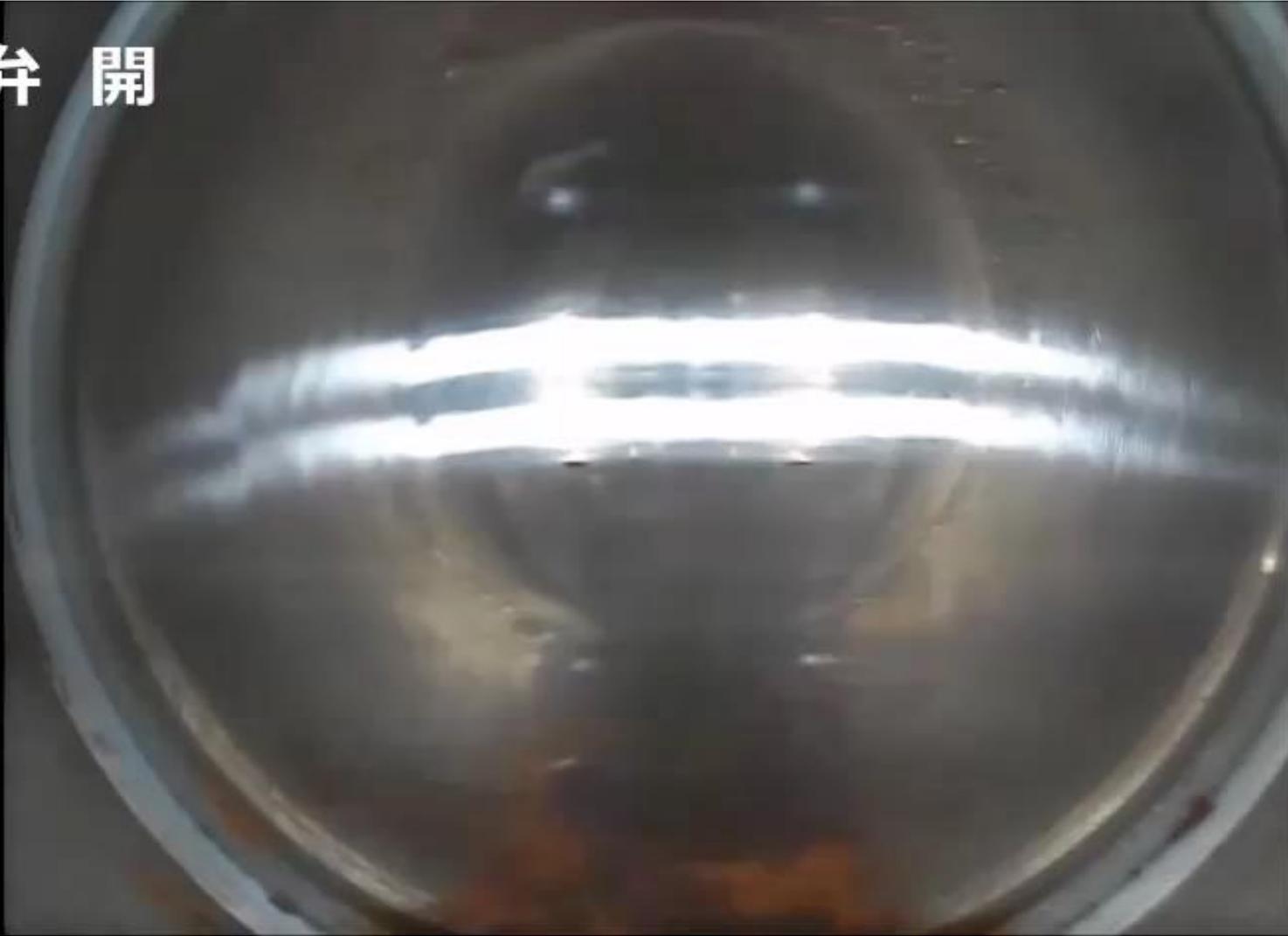
後方カメラ

照明

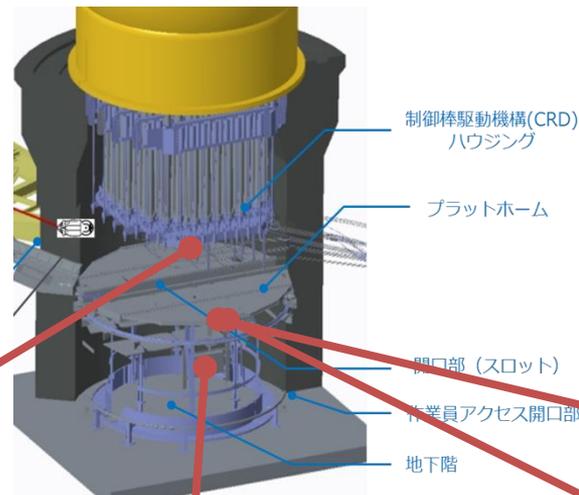
3号機フルモックアップ試験(動画)

3号機水中ROV撮影映像(動画)

隔離弁 開



画像取得結果(ペDESTAL内)



No.16



No.17



No.18



No.19

・ペDESTAL下部や、ペDESTAL内構造物上に溶融物が固化したと思われるものを確認した。

これまでの作業 格納容器内部のロボットによる調査 まとめ

■調査

● 格納容器内部調査

- 線量率分布
- 燃料デブリの分布調査
- 格納容器内設備損傷状況

◆ 1号機格納容器内 ペDESTAL外

- グレーチング上を移動し、カメラ付き線量計を水面下に投入して調査
- プラットフォーム上の状況、格納容器底面の堆積物の確認

◆ 2号機格納容器内 ペDESTAL内

- CRDレールを経由して直接ペDESTAL開口部へ侵入
- 破損状況、ペDESTAL底部の堆積物、溶融凝固物の確認

◆ 3号機格納容器内 ペDESTAL内

- 水位が高いため、遊泳ロボットを採用
- 着水後、潜水によりペDESTAL入口から内部へ
- 破損状況、ペDESTAL内の堆積物、溶融凝固物の確認

格納容器(PCV)内部のロボットによる調査 技術的課題の例

■ 高線量率環境への対応

- ～数十 Gy/h, 累積線量～数百 Gy
- 耐放射線性の高い電子機器、測定器、カメラの採用
- 照射試験による確証、測定誤差の検証

■ PCVバウンダリの確保

- ロボットサイズ<貫通口径 (走破性、搭載機器制約)
- 隔離弁の追設、シール機構、窒素加圧管理
- チャンバー内にユニット化されたケーブル送り機構、ロボット
- 現地施工の取合い、PCV外装置設置エリア作業線量率の低減

■ ケーブル, ケーブルマネジメント

- 乱巻の抑制、干渉物の回避、ロボット放置時の処置
- ケーブル重量<ロボットのけん引力 (調査範囲を制約)
- ケーブルサイズ・特性 [動力、制御、通信] (搭載機器を制約)

■ オペレーション

- (損傷) 環境に応じた走破性
- 自己位置の確認方法、俯瞰カメラ、後部カメラ、ランドマークの活用
- 徹底した訓練、実機モックアップ試験

今後の調査

これまでの作業／技術課題の達成と今後の課題

- $\Phi 100\text{mm}$ 程度の小型ロボットを既存のペネトレーションを利用し、高汚染高線量の格納容器内へ投入・回収に成功。
到達できた範囲で主に画像情報を取得。
 - **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処に成功**
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**
既存のペネトレーションを利用したロボットの投入・回収、バウンダリ構築（放射性物質閉じ込め） etc
- 今後は規模を順次拡大することで、到達範囲の拡大や機能向上を目指す。
 - **積載能力（ペイロード）の向上**
さまざまな測定機器による詳細調査、サンプルの回収 等
 - **アクセス性の向上**
格納容器に新たな開口部／バウンダリの設置・運用、小規模な作業によるアクセス経路の開拓

設計からの調査ニーズの例と今後の調査

- これまでの調査は、画像取得が中心（quick look）
- まずは、デブリ取り出し設計に必要な情報を充実すること
- 将来のサンプリング、分析への期待

デブリ取り出し設計

アクセス・搬出設計、切削工法、回収工法

- ・燃料デブリの所在：拡散範囲、分布、量
- ・硬さ、切削特性
- ・線量率分布、放射線強度

未臨界維持

未臨界維持設計

- ・燃料デブリの特性：核燃料濃度、分布、量
- ・中性子吸収剤濃度：B, Gd濃度
- ・減速材分布：水位、デブリ中の水分量

放射性ダスト抑制・浄化

漏洩抑制設計

- ・燃料デブリの特性：（加工切削）飛散性、溶解性、捕集特性、放射性物質濃度

今後の格納容器内調査

- これまでの調査は、画像取得が中心

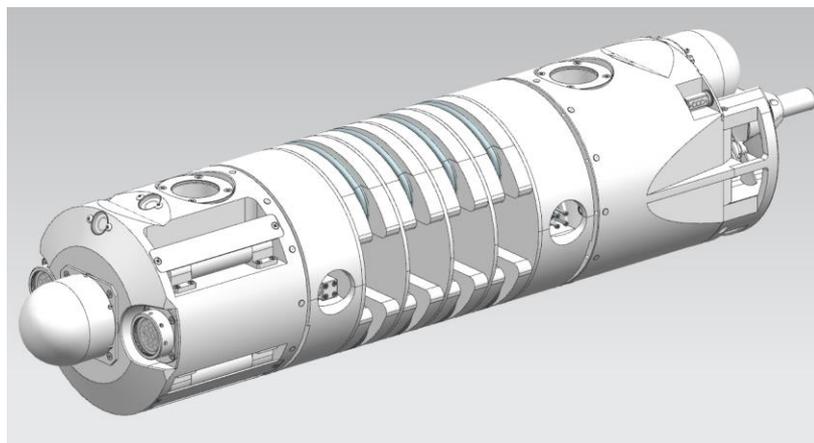
- 小型ロボットの活用により、基本的な技術構成・ノウハウを獲得
 - 格納容器への投入・回収（バウンダリの構築）
 - 高放射線下での比較的短時間の活動（映像・線量率）
 - 遠隔操作（オペレーション、干渉物回避、自己位置確認） 等

- 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

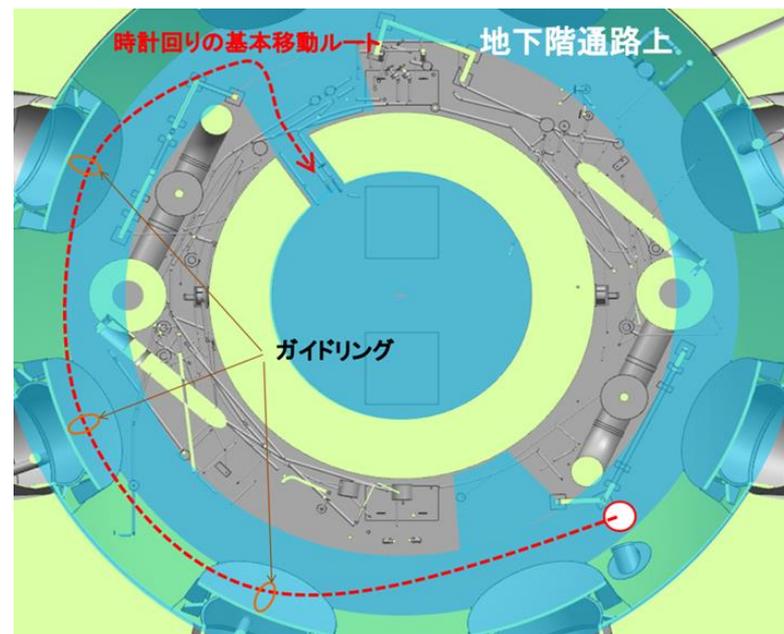
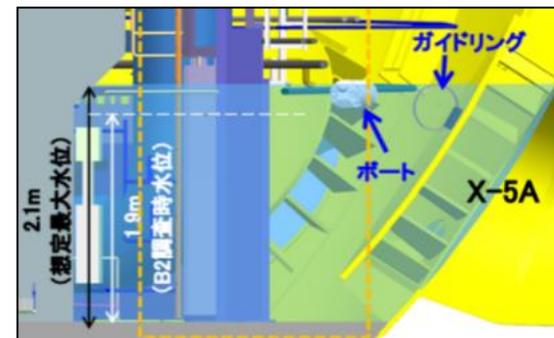
- 格納容器内の水の上を航行して、広範囲に移動可能なボート型アクセス装置を製作中



ガイドリング取付用の例

- 直径：φ25cm
- 長さ：約1.1m
- 推力：25N以上

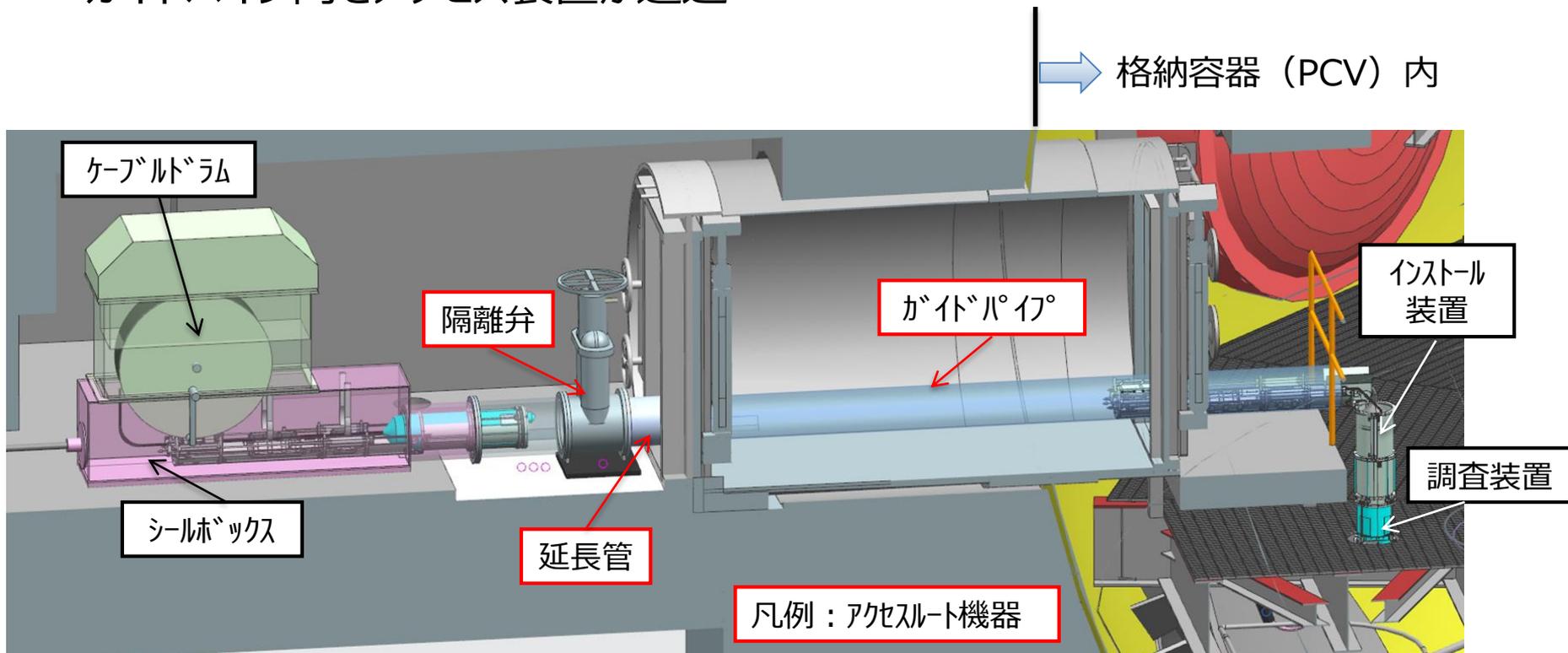
ボート型アクセス装置外観



ボート型アクセス装置の動線

ボート型アクセス装置 PCVバウンダリの構成

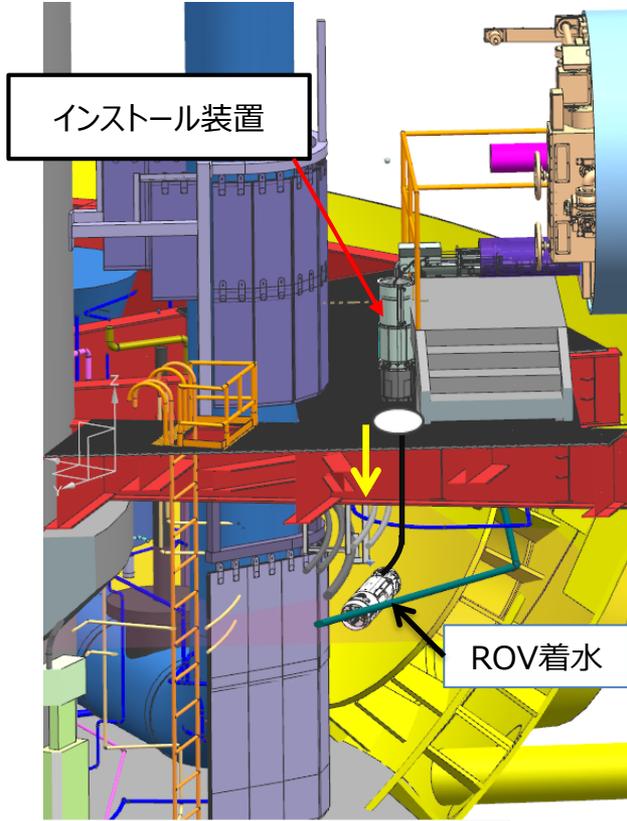
- パーソナルエアロック（定期検査時の作業員通路，2重扉）を貫通するガイドパイプ
- 原子炉建屋側（PCV外）にシールボックスとケーブルドラムを設置
- ガイドパイプ内をアクセス装置が通過



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

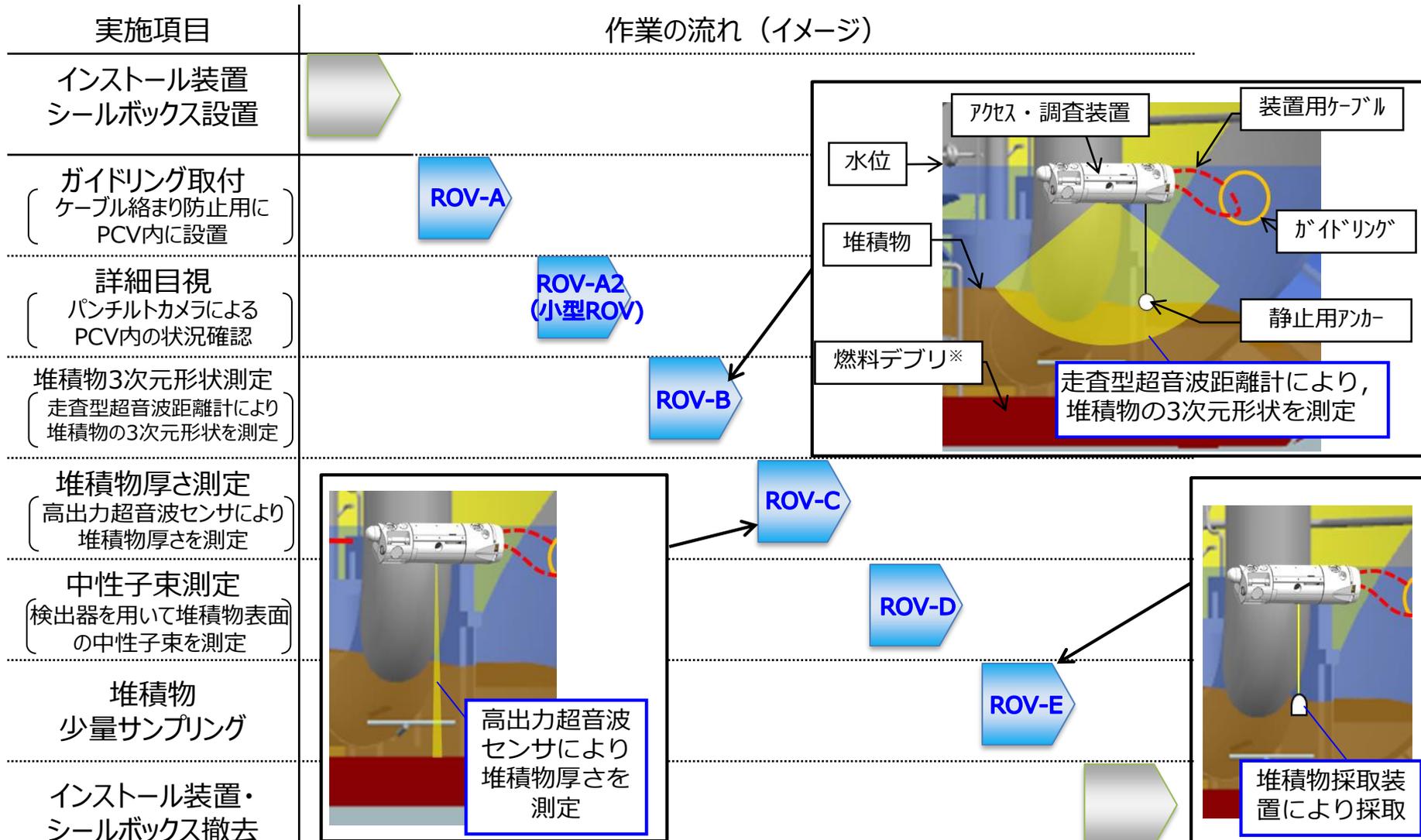
- ROV（ボート型アクセス装置）のPCV地下階搬入出は、インストール装置を用いて遠隔自動で行う。



格納容器（PCV）内のような

ボート型アクセス装置 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

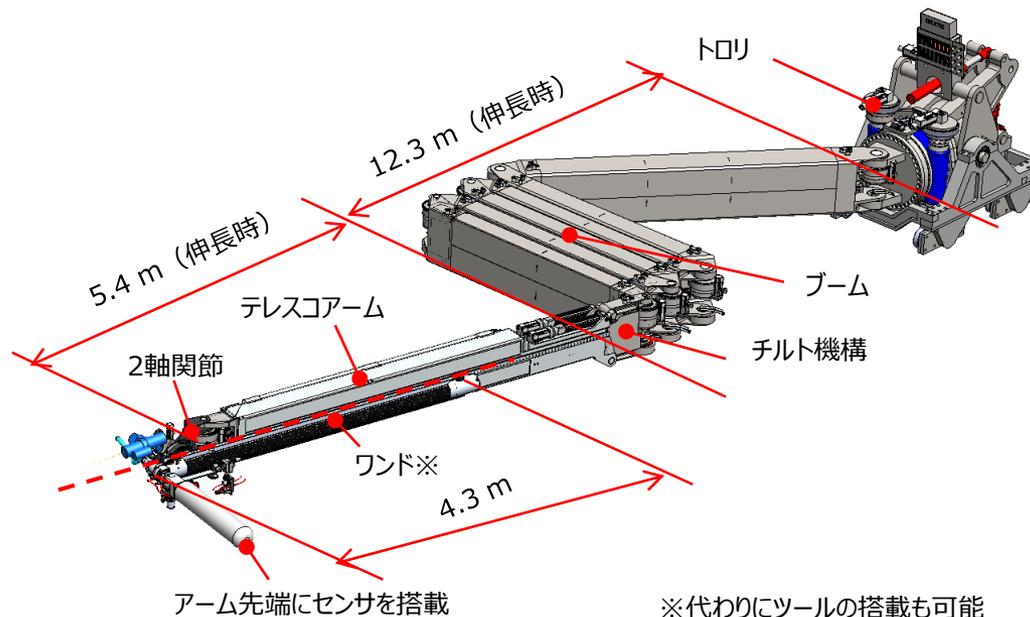
模擬格納容器内試験（モックアップ試験）

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

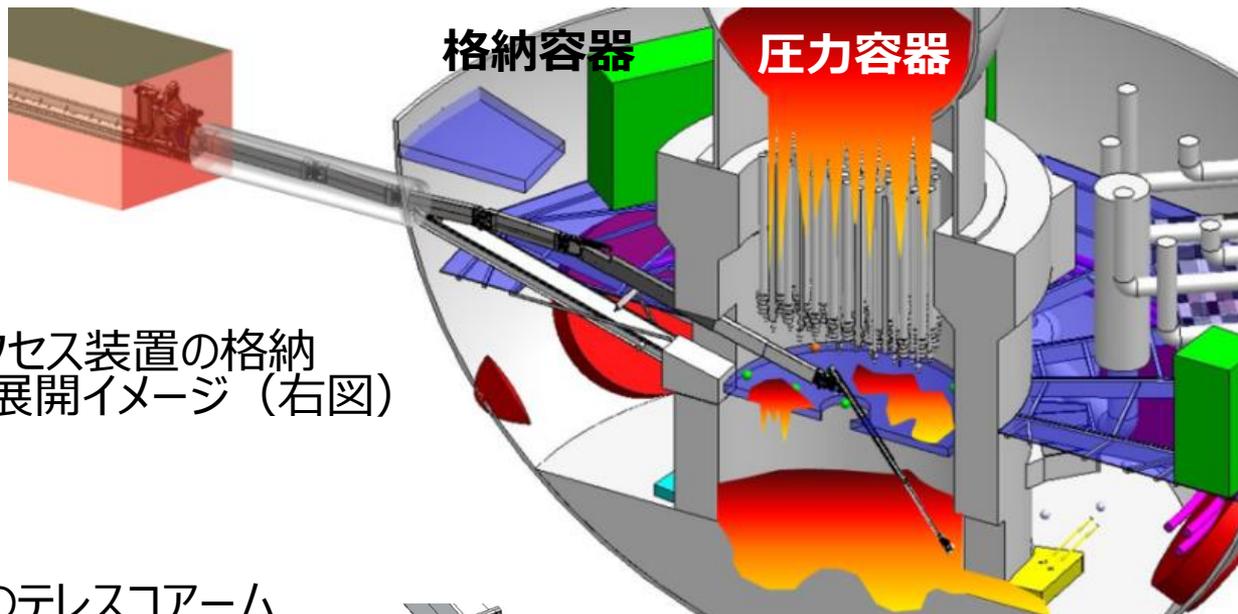
- アーム全長約22 m
- 10 kgまでの調査装置を搭載可能



アーム型アクセス装置

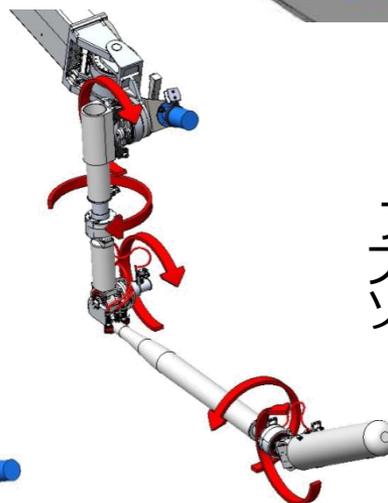
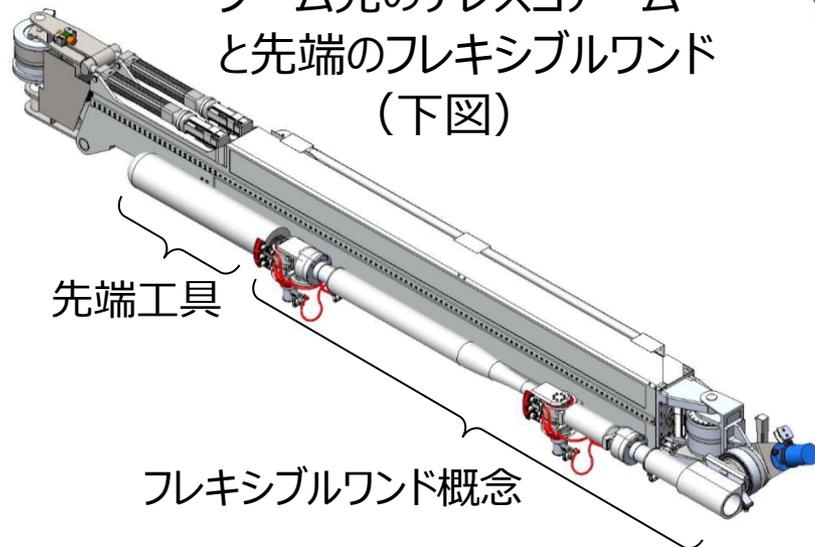
アクセス装置（サンプリング用アームの検討例）

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）

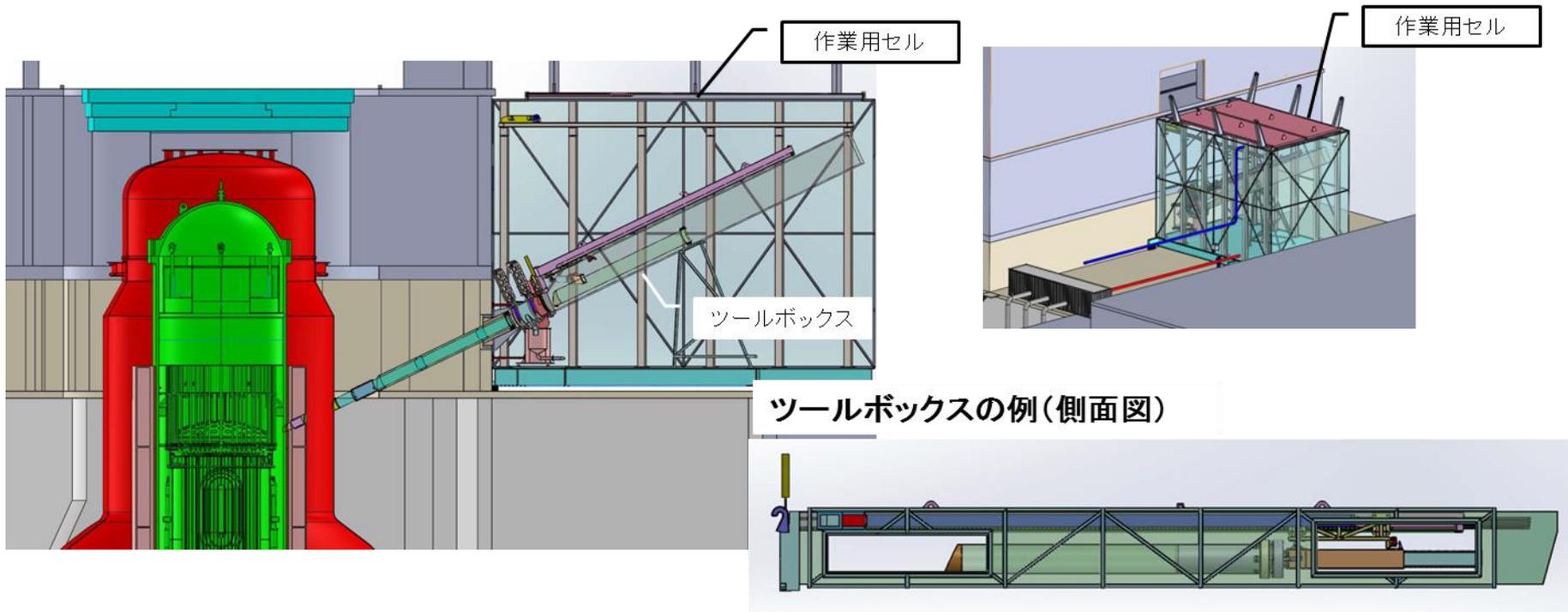


ブーム先のテレスコプアームと先端の
フレキシブルワンド：
ソナー装備の場合（左図）

動作概念（5軸、伸長機能なし）

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

デブリサンプリングの検討

設計からの調査ニーズの例

デブリ取り出し設計

- アクセス・搬出設計、切削工法、回収工法
- ・燃料デブリの所在：拡散範囲、分布、量
 - ・**硬さ、切削特性**
 - ・線量率分布、放射線強度

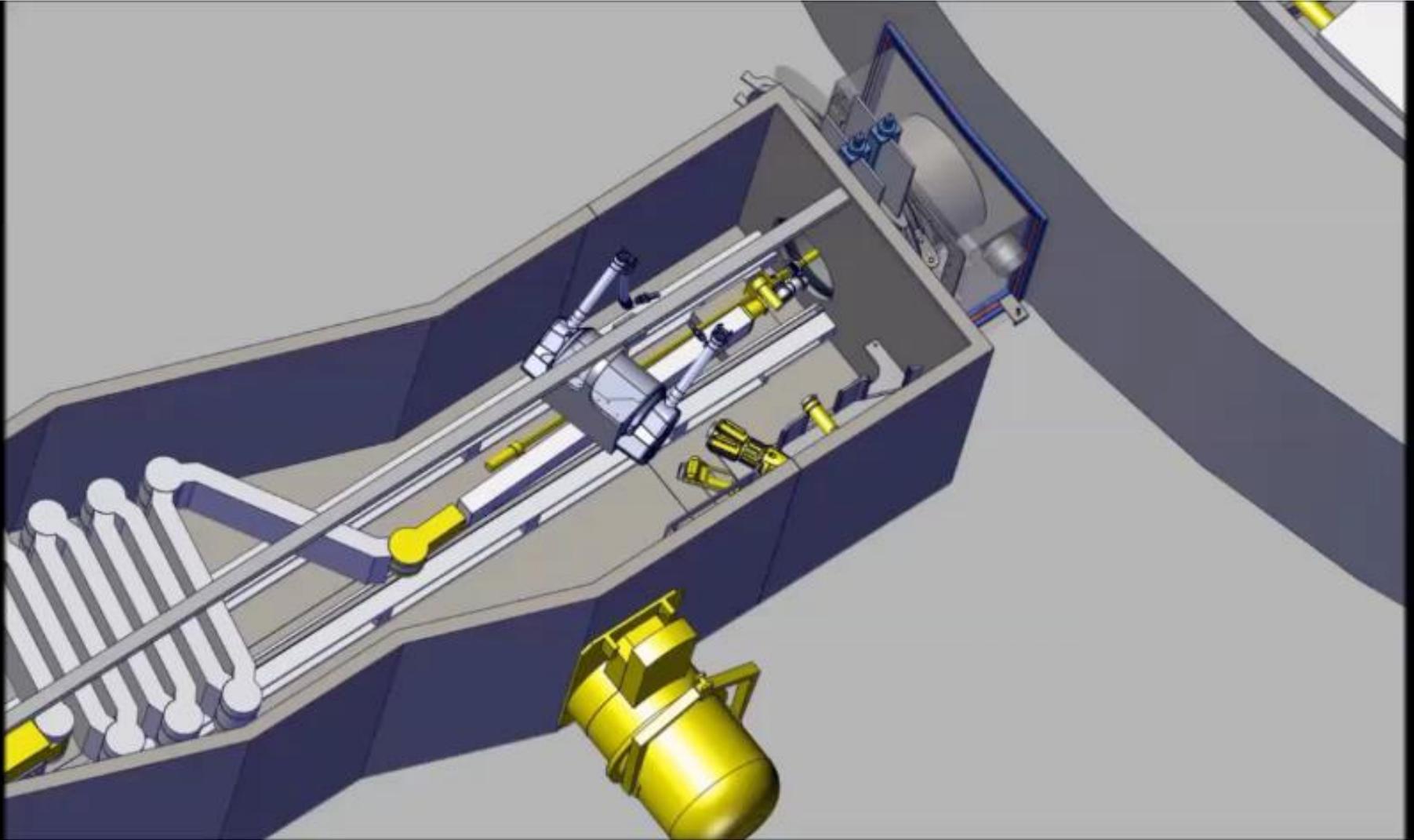
未臨界維持

- 未臨界維持設計
- ・燃料デブリの特性：**核燃料濃度**、分布、量
 - ・**中性子吸収剤濃度：B, Gd濃度**
 - ・減速材分布：水位、**デブリ中の水分量**

放射性ダスト抑制・浄化

- 漏洩抑制設計
- ・燃料デブリの特性：**(加工切削) 飛散性、溶解性、捕集特性、放射性物質濃度**

ペデスタル内デブリサンプリング(動画)



まとめ

- **Fact, 現場状況の把握がデブリ取り出し技術設計のキーポイント**
 - ・タイムリーな現場調査と情報の取得、発信
- **具体的なニーズを設定する**
 - ・内在するリスクを徹底的に抽出し、リスクの全体像を構築。リスクの抑制に必要な情報を抽出。
 - ・作業の技術構成を仮構築し、概念設計を実施。詳細設計に必要な情報を抽出。
- **現場調査の設計**
 - ・現場の制約条件や未知の状況の仮定、リスク評価
 - ・適用可能な技術の選定
 - ・技術検証、リスクアセス、モックアップと徹底したトレーニング

燃料デブリ取り出し工法の検討

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

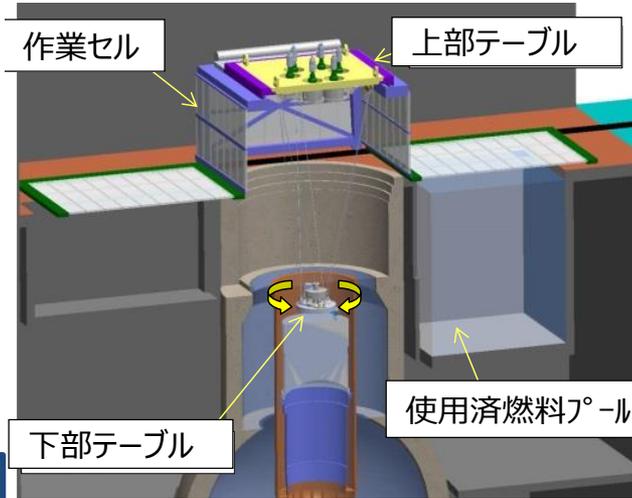
開発目的

- 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。

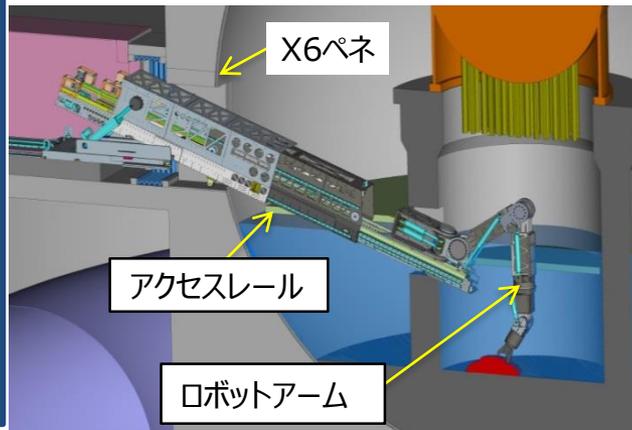
開発期間

2015.9～2017.3

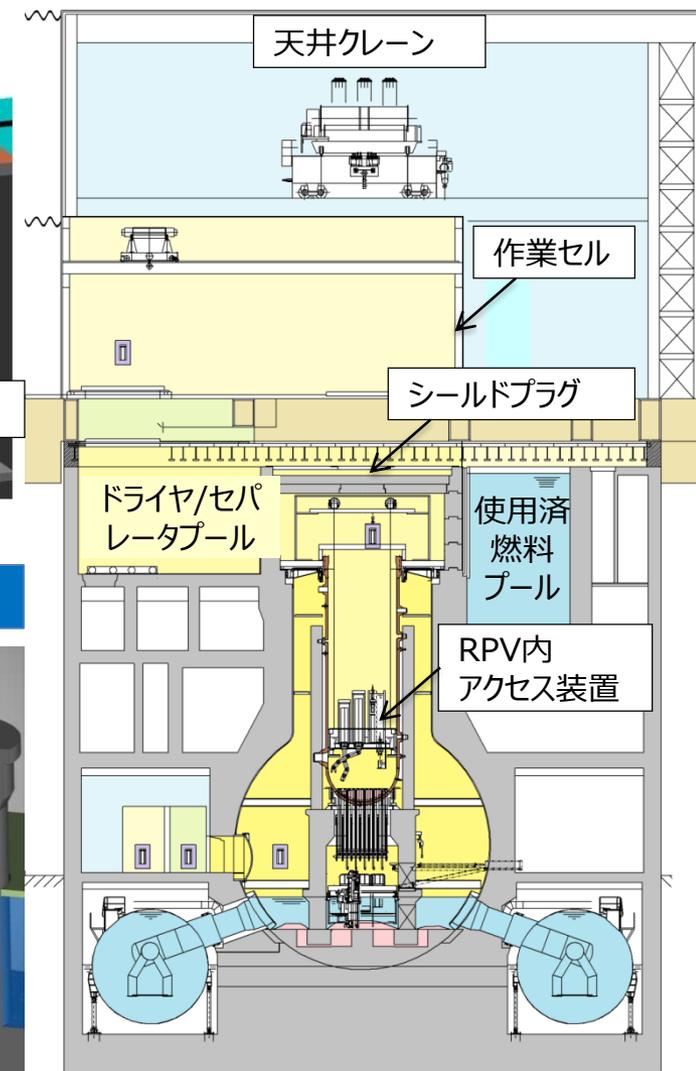
冠水-上アクセス工法（概念）



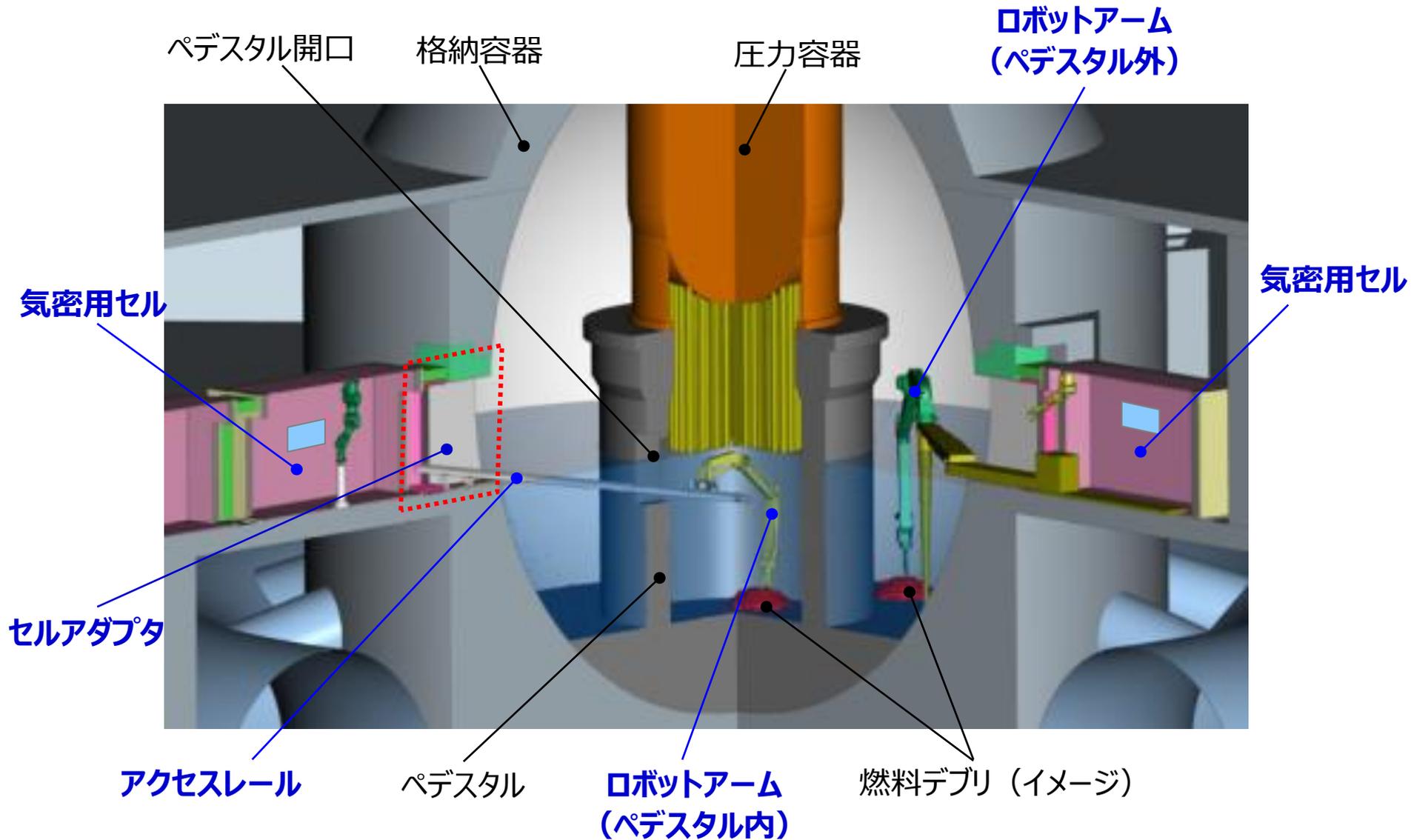
気中-横アクセス工法（概念）



気中-上アクセス工法（概念）



気中-横アクセス取り出し工法 (イメージ)



(再) 燃料デブリの取り出し

安全要求のまとめ

放射性物質の閉じ込め

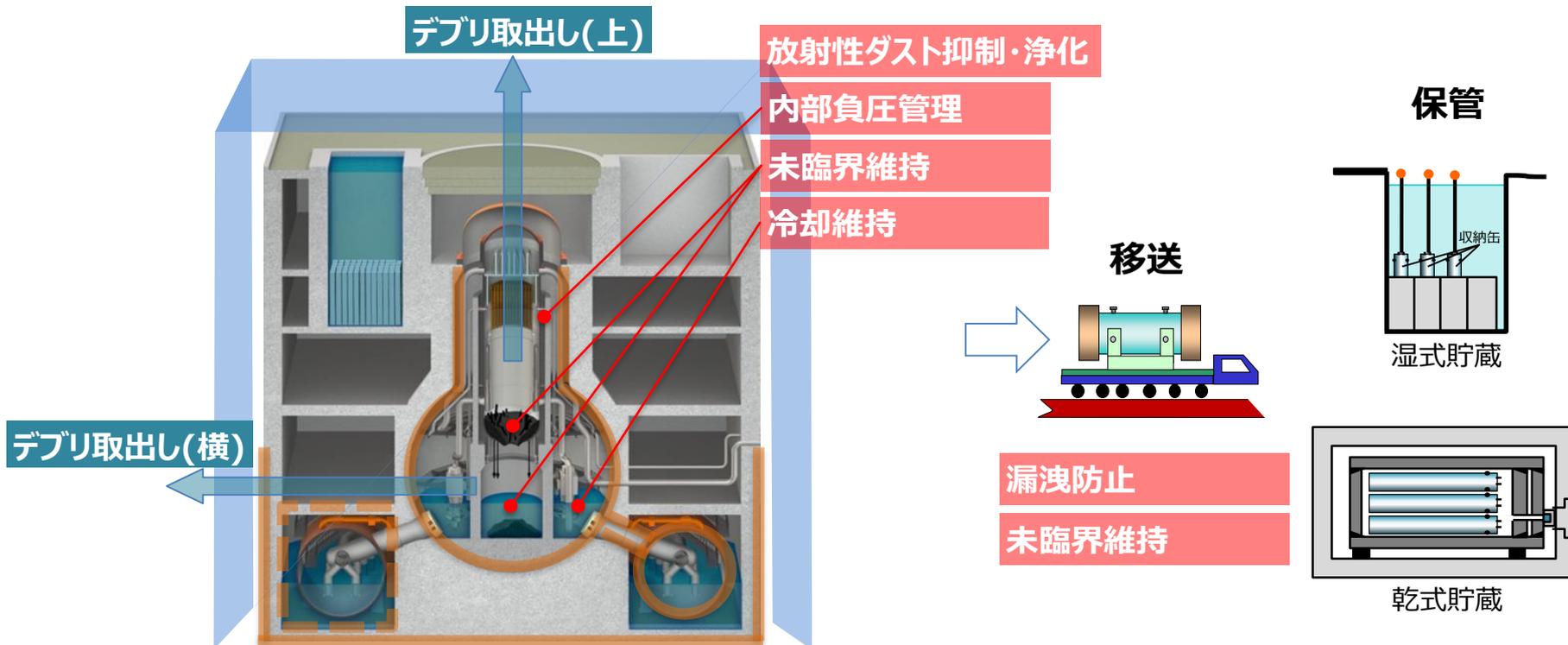
- 気体中／液体中の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止
- 移送容器による放射性物質の漏洩防止

放射性物質の追加生成の防止

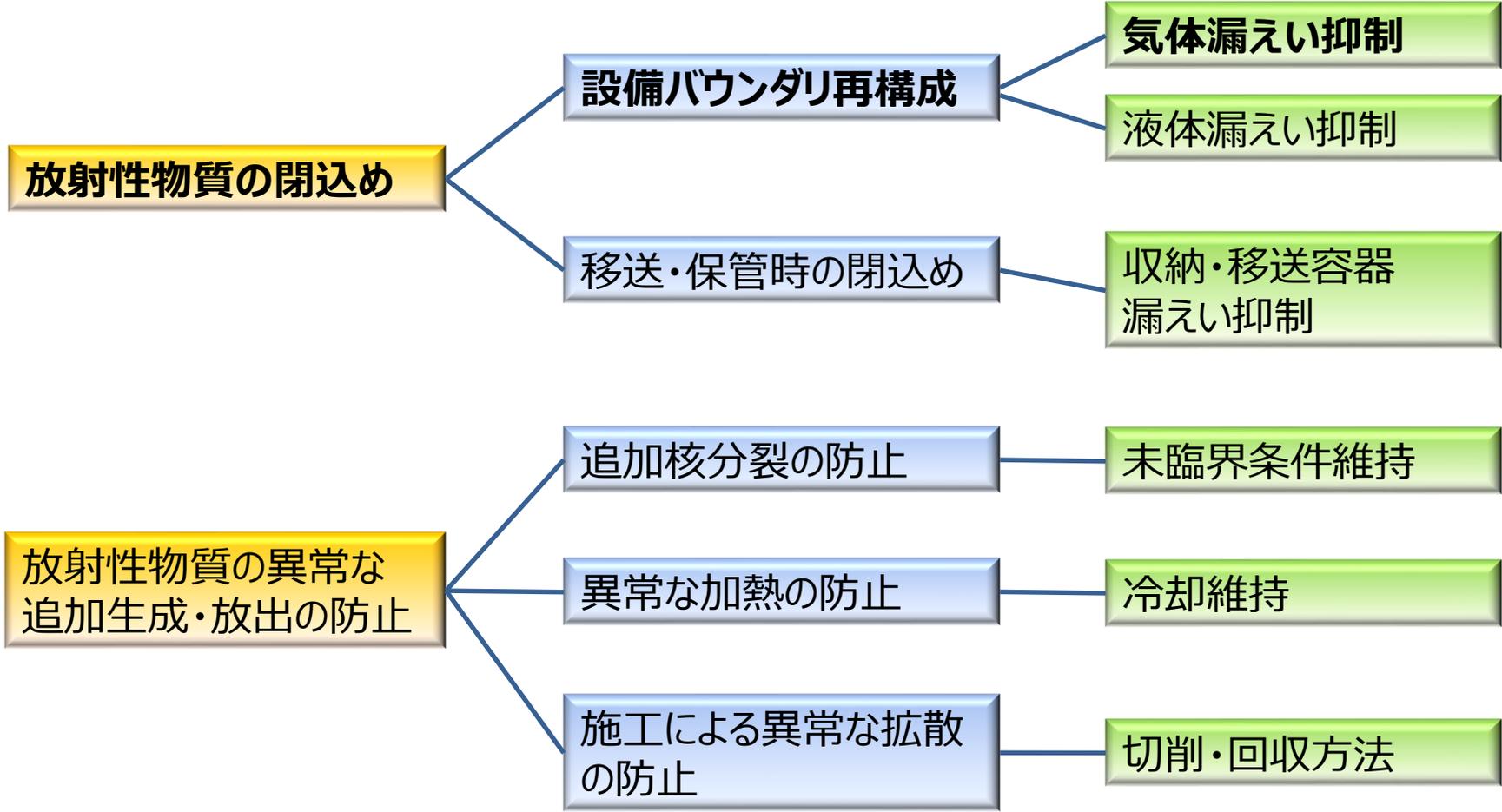
- 核反応による異常な放射性物質の生成防止
- 燃料デブリの異常な温度上昇による放出防止
- 燃料デブリ、構造物の切削による異常な拡散の防止

一般要求等

- 火災・爆発の防止
- 状態監視・モニタリング



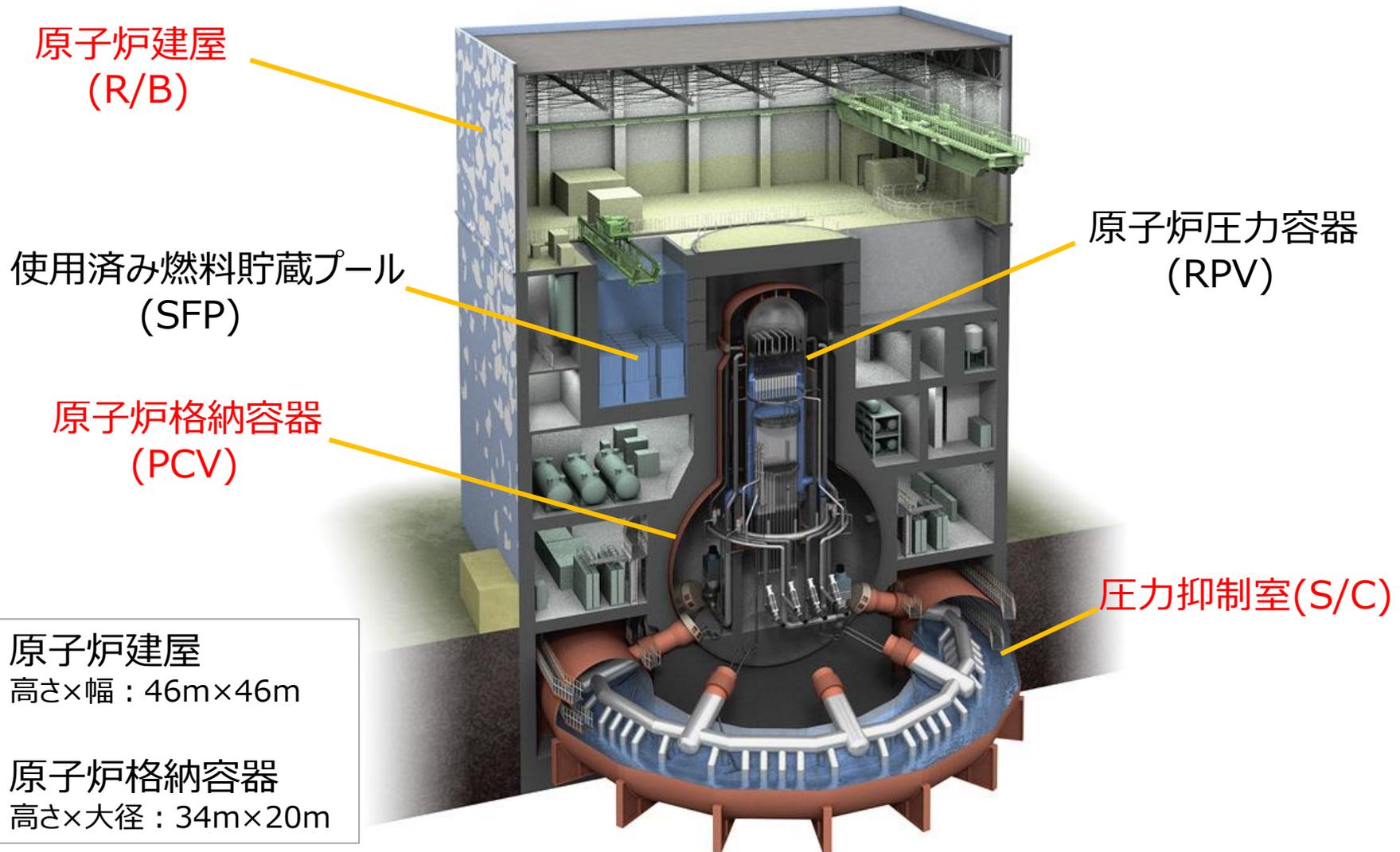
安全設計とその実装の検討例（ポイントの整理）



バウンダリを構成する

- ・気体中放射性物質の場合
- ・デブリ取り出し作業で発生するダストを閉じ込める

沸騰水型原子力発電所 原子炉建屋



原子炉建屋イメージ

原子炉格納容器のバウンダリ再構築

静的バウンダリ リーク箇所をふさぐ

- 多数のペネトレーション
- 圧力抑制室とベント管
- 漏えい個所の特定
- 補修工法の開発と工事
- 健全箇所の検証
- 経年劣化対応
- 作業線量, 所要期間

動的バウンダリ 負圧勾配:インリーク許容

- 大規模漏えい個所の特定
- 補修工法の開発と工事 (必要な場合)
- 負圧勾配システムの開発と工事
- 負圧維持 (作業中常時)
- 排気浄化
- メンテナンス

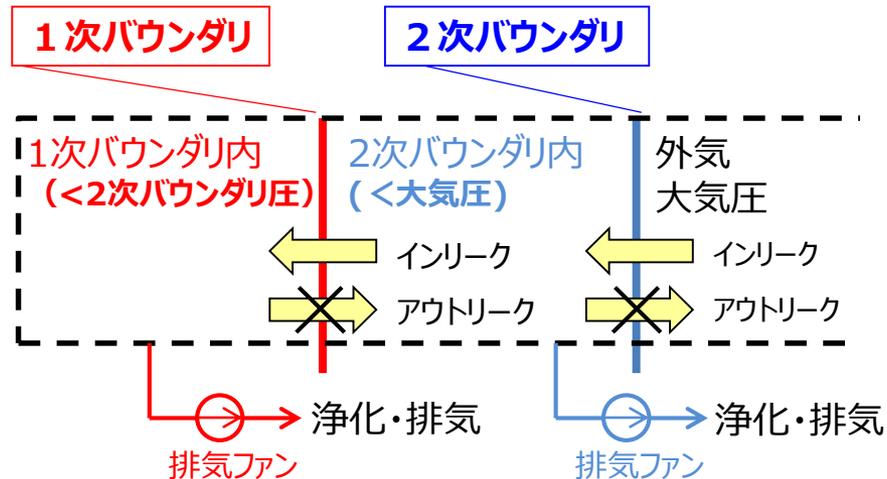


「Browns Ferry Unit 1 under construction 1966.Sep.」
Tennessee Valley Authority – TVA's 75th Anniversary webpage

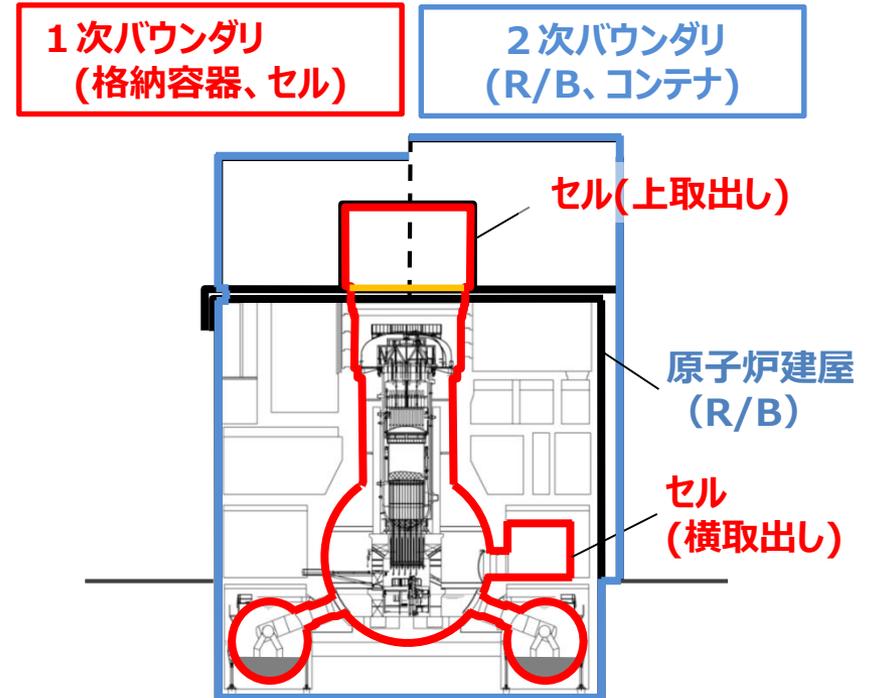
気相バウンダリ再構築（案）

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

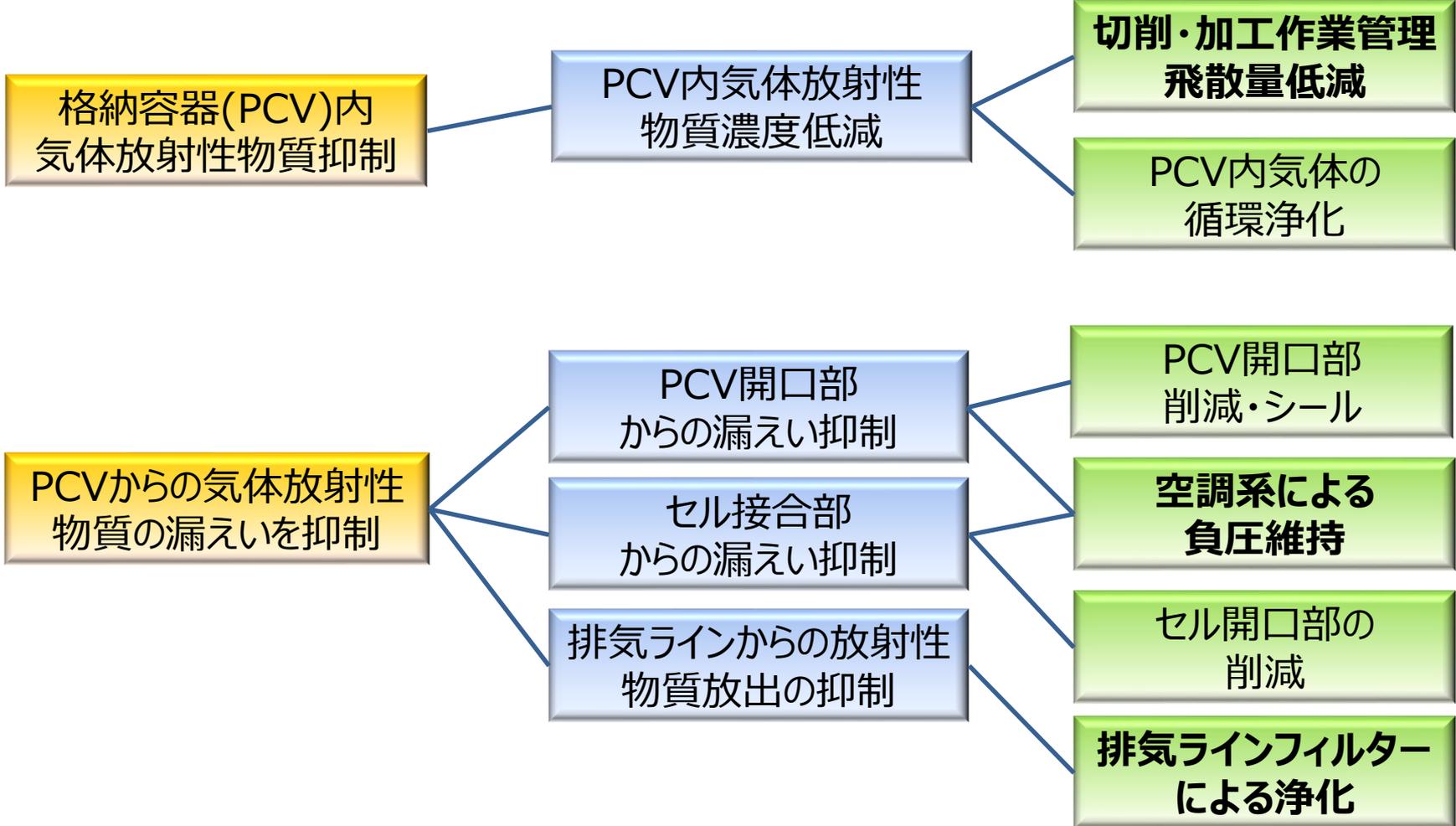


負圧勾配システムの検討



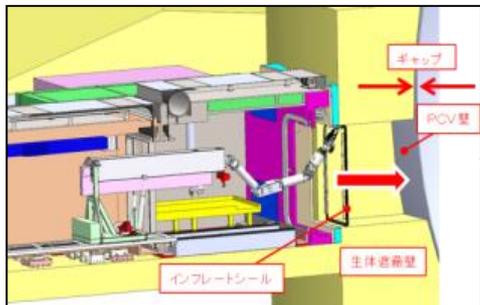
気相バウンダリのイメージ

気体中の放射性物質の漏えい防止(例) (ポイントの整理)

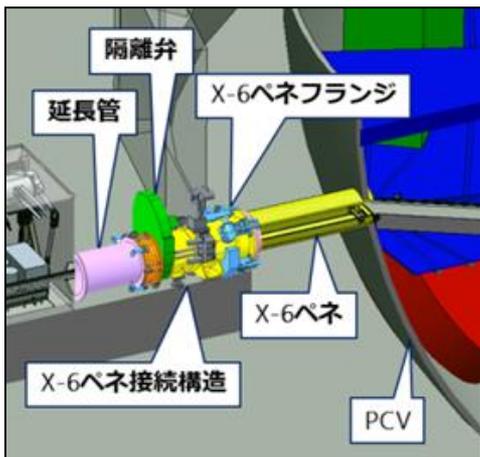


技術開発課題(例) 動的バウンダリの成立性①

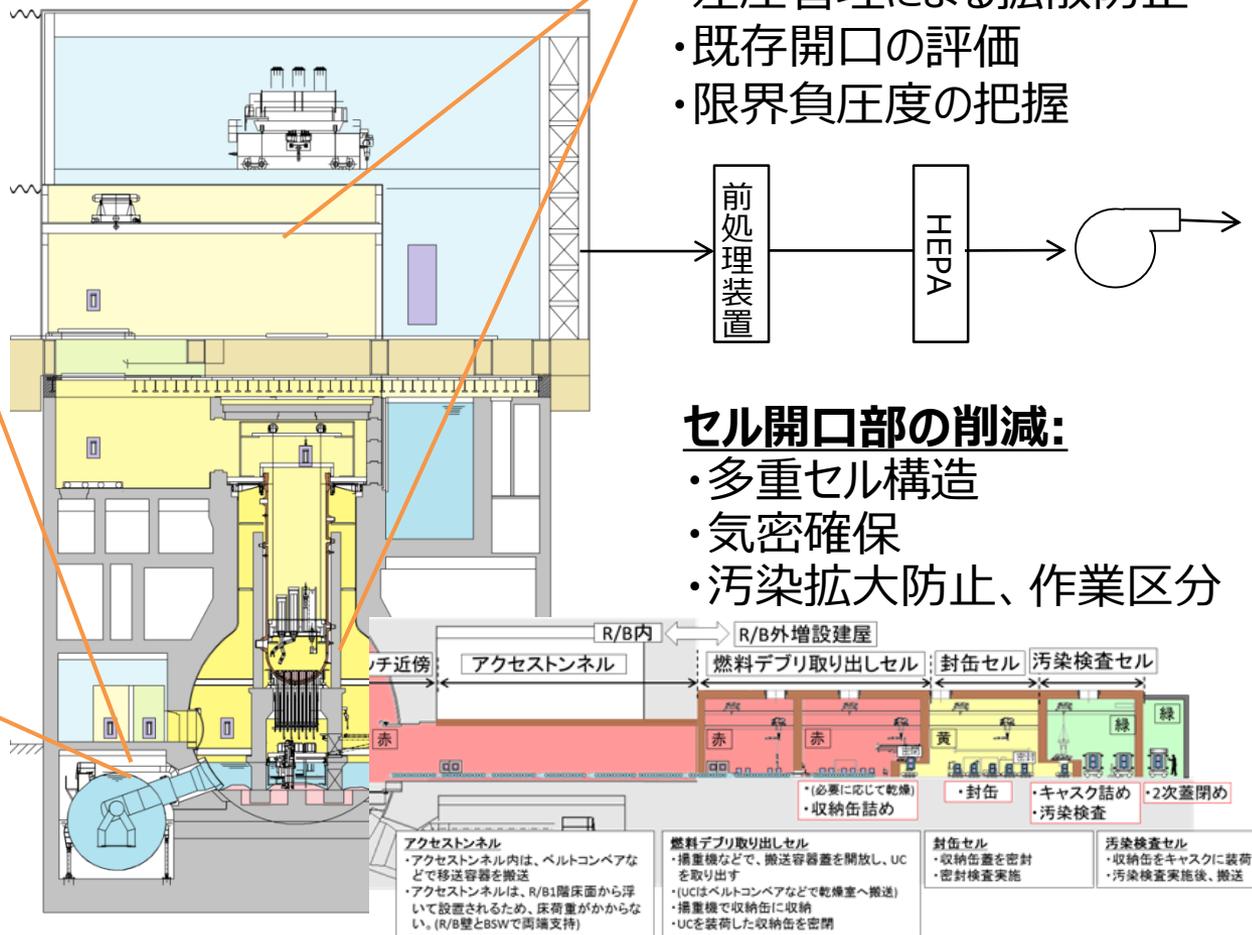
PCV開口部削減・シール： ・新規開口と漏えい抑制



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



デブリ取出し／機器搬入・デブリ搬出経路

技術開発課題(例) 動的バウンダリの成立性②

切削・加工作業管理 飛散量低減：

- ・ダスト発生抑制, 集塵, 加工速度 (スループット), PCV内再循環浄化



コアビット



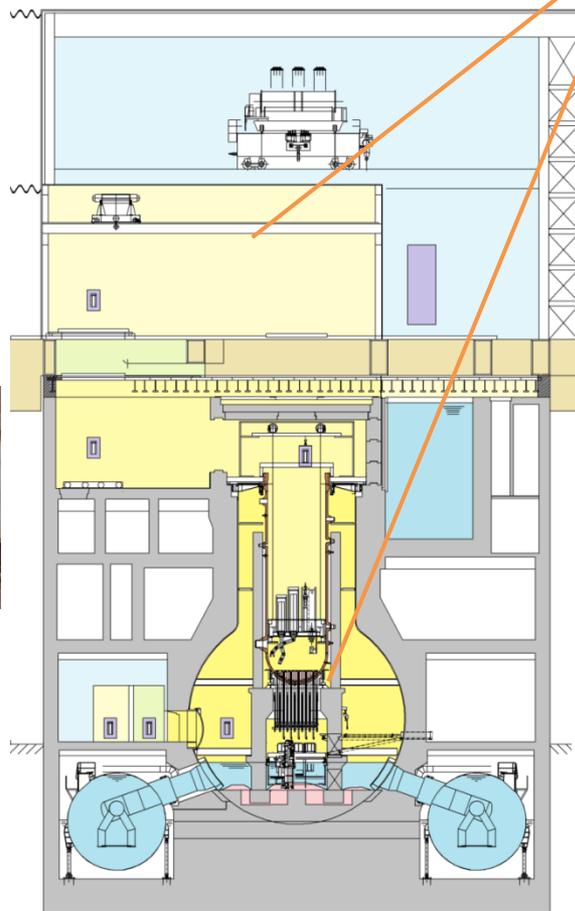
チゼル加工予備試験



超音波チゼル



レーザーガウジング

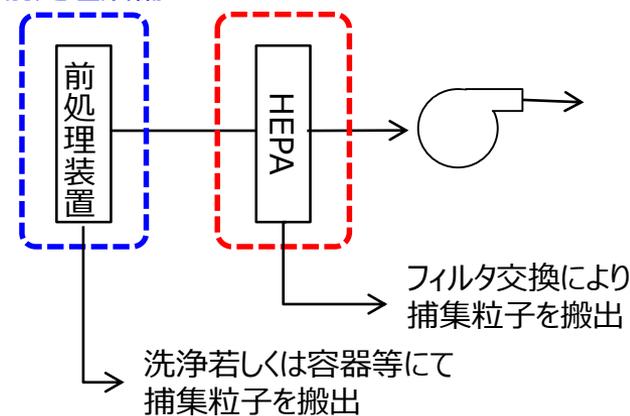


デブリ分離機 (サイクロンセパレータ)

排気ラインフィルター浄化：

- ・浄化性能 (DF)

前処理設備 最終処理設備



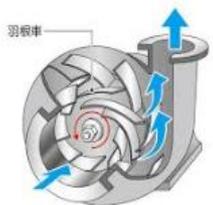
気相系粒子捕集・除去設備 構成 (案)

粒径分布

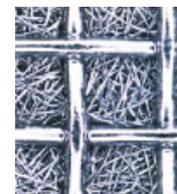
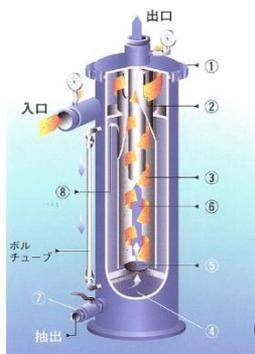
プロセス条件 (流量等)

ガス組成 (湿度等)

逆洗・遠隔回収・遠隔交換 等



デブリ吸引ポンプ



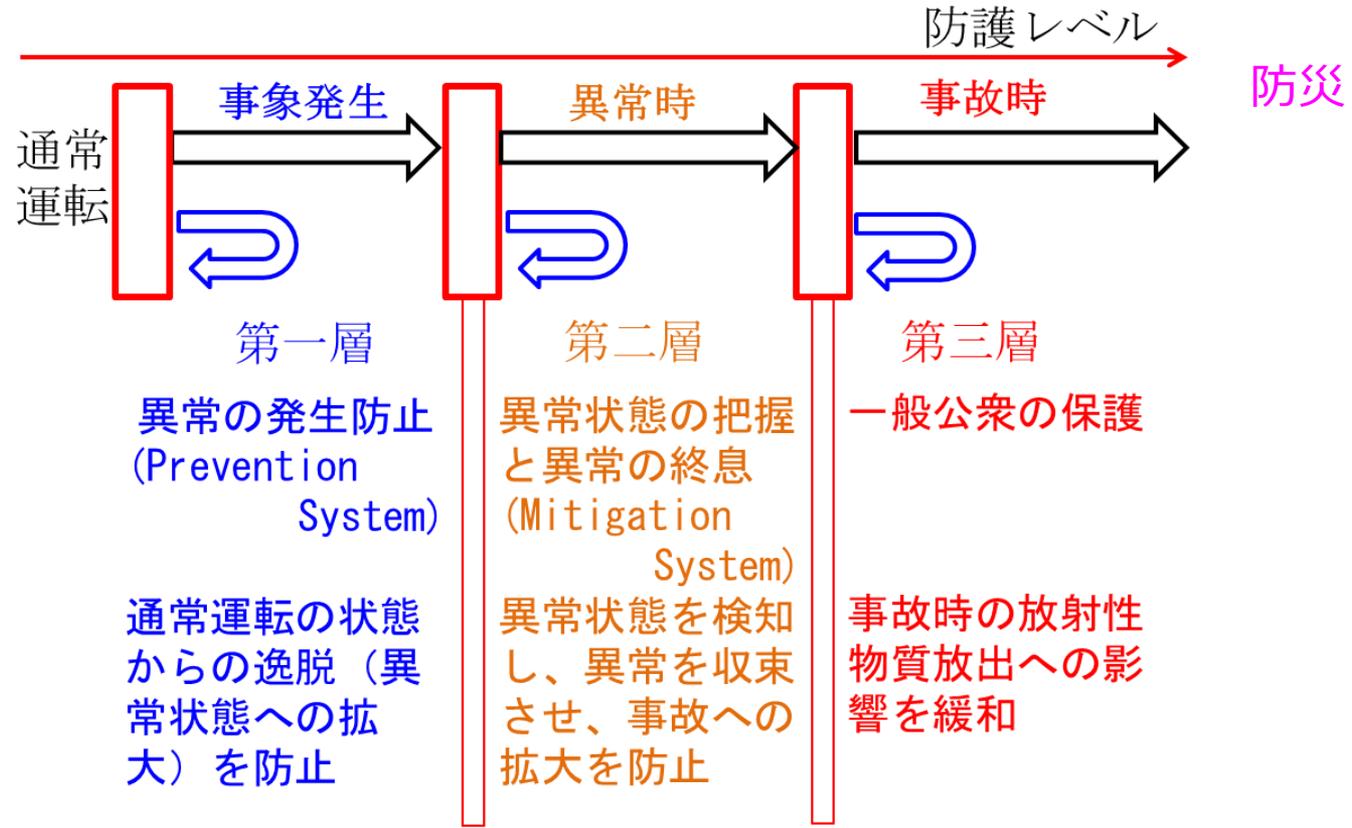
HEPA (左: グラスファイバー, 右: 金属)

深層防護を考える

放射線リスクから人と環境を護るため不確かさを考慮して、防護全体の
実効性を高める。※

深層防護の検討 defense in depth

- 影響度の高い事象に対して、多層の防護策を設定し、事象の発生の可能性を低減する。*



* 例えば、「原子力安全の基本的考え方について 第 I 編 別冊2 深層防護の実装の考え方」

深層防護 各レベルの判断基準（公衆被ばく）を考える

デブリ取り出し時における各深層防護レベルの判断基準（公衆被ばく）の例

防護レベル	判断基準 (被ばく線量)	根拠
レベル1	X_1 mSv/年	平常時の一般公衆の線量限度に対して1/10となる値を適用
レベル2	X_2 mSv/事象	本レベルで発生の可能性のある事象に対して許容線量として、有意なリスク上昇がないように設定
レベル3	X_3 mSv/事象	安全評価指針における事故時の判断基準線量を適用

(別途、作業被ばくも設定)

深層防護 系統構成（案）を考える

各深層防護レベルの定義と系統構成の例

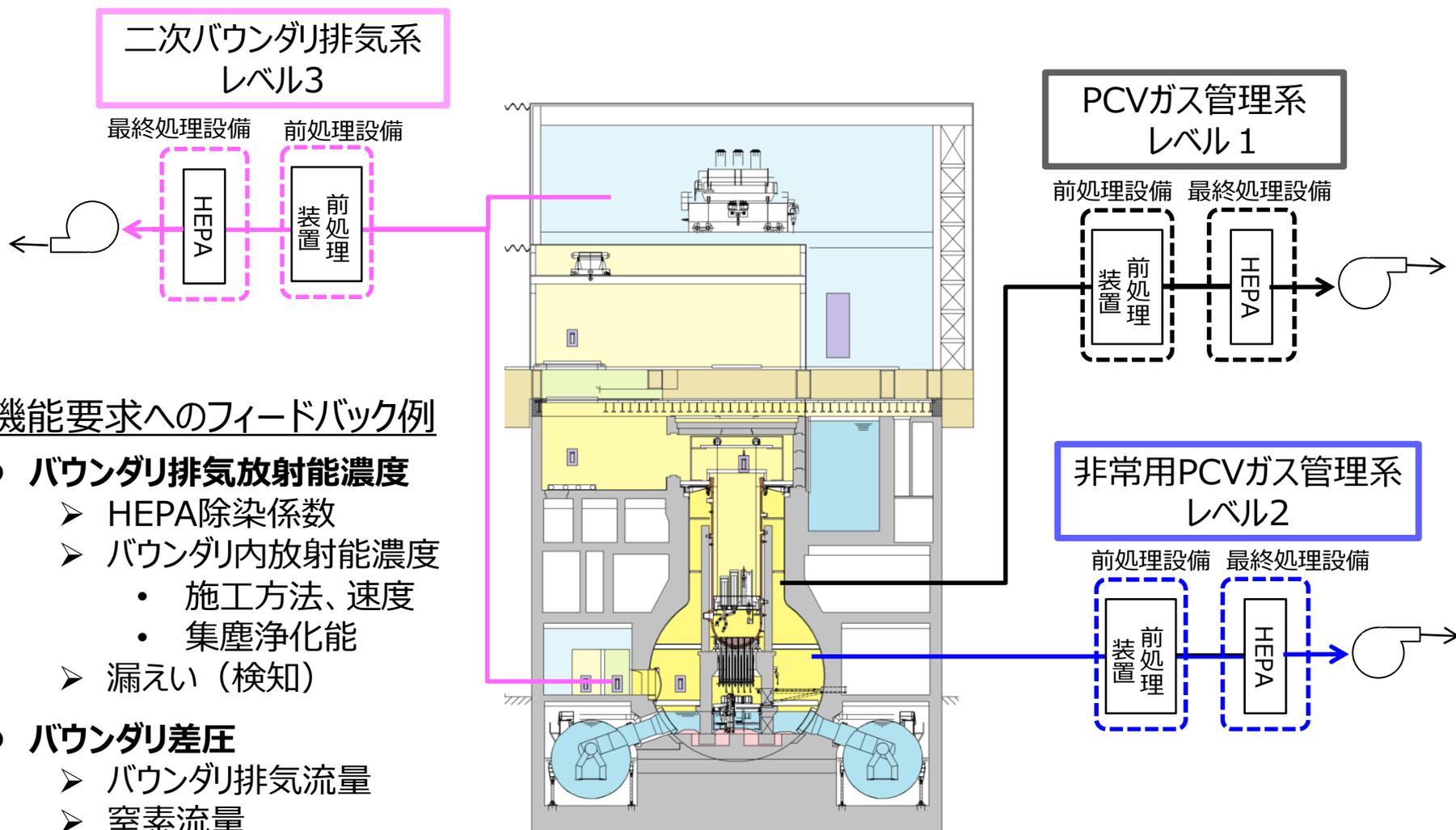
		レベル1	レベル2	レベル3 ^[*1]	レベル4 (参考)
状態の定義		通常状態	異常時	事故時	防災
防護上の目的		通常運転からの逸脱の防止 安全上重要な施設の故障の防止	通常運転からの逸脱の検知 及び制御	設計基準で想定する事象 の制御	被ばく影響緩和
系統構成	①気相漏えい防止	PCVガス管理系	非常用PCVガス管理系	二次バウンダリガス排気系	機動的対応 及び防災
	②液相漏えい防止	冷却水循環系（D/W側） PCV漏えいがある場合は、 トラス室排水系含む	冷却水循環系（S/P側） PCV漏えいがある場合は、非常用 トラス室排水系含む	非常用トラス室排水系 PCV漏えいがある場合は、非常用 トラス室排水系（可搬設備）	
	③臨界防止	常用ホウ酸水注入系 ^[*2] 【臨界近接監視 ^[*3] 】 中性子監視系／FPガス監視系	非溶解性中性子吸収材投入系 【臨界検知 ^[*3] 】 中性子監視系／FPガス監視系	非常用ホウ酸水注入系 【臨界状態監視 ^[*3] 】 中性子監視系／FPガス監視系	
	④崩壊熱除去	冷却水循環系(循環冷却)	非常用冷却系(循環冷却)	非常用冷却系 [可搬式]	

- [*1] 必要に応じて、可搬式設備の活用を検討
- [*2] 通常時から中性子吸収剤を使用する場合
- [*3] 号機ごとに選択

十分性、網羅性、冗長性、合理化は以降検討してゆく
(ここでは仮に二次バウンダリを形成する場合)

深層防護の系統構成（例）

管理値あるいは機能要求へのフィードバック



機能要求へのフィードバック例

- **バウンダリ排気放射能濃度**
 - HEPA除染係数
 - バウンダリ内放射能濃度
 - ・ 施工方法、速度
 - ・ 集塵浄化能
 - 漏えい（検知）
- **バウンダリ差圧**
 - バウンダリ排気流量
 - 窒素流量
 - 漏えい（検知）

スループットへの挑戦

デブリ取り出し作業の速度

バックグラウンド:遠隔作業への期待

<廃炉措置>

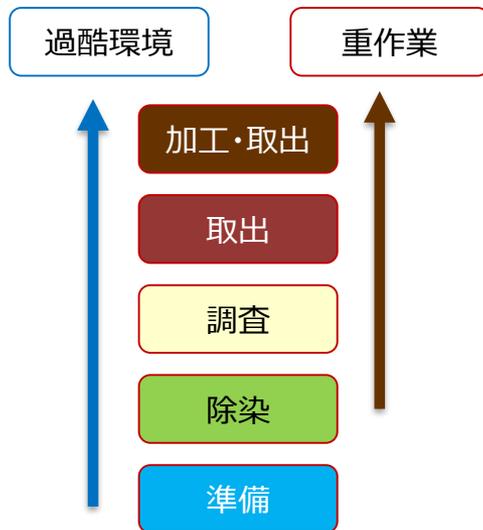
- 人が近づけない高放射線環境
- 安全最優先で着実な調査や作業

<技術のポイント>

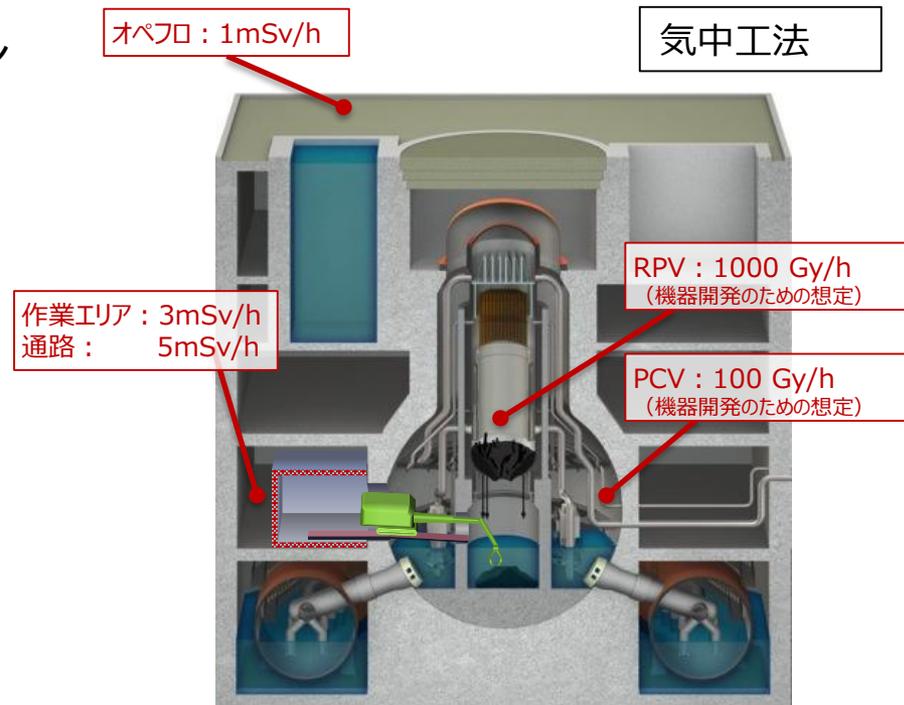
- 高線量率環境への対応
- バウンダリの確保
- ケーブルマネジメント, オペレーション
- 作業速度

<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



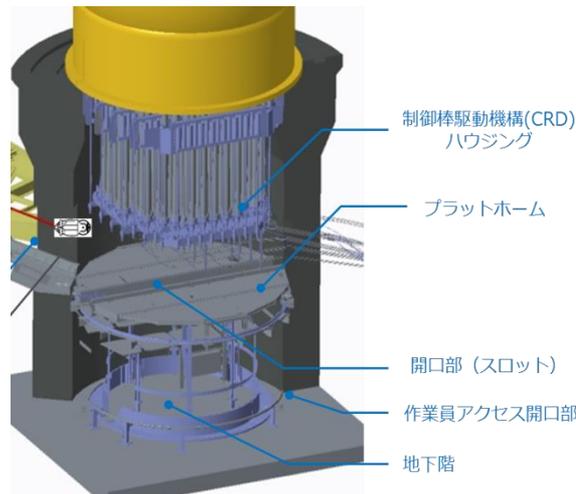
遠隔作業への期待



作業環境の推定

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

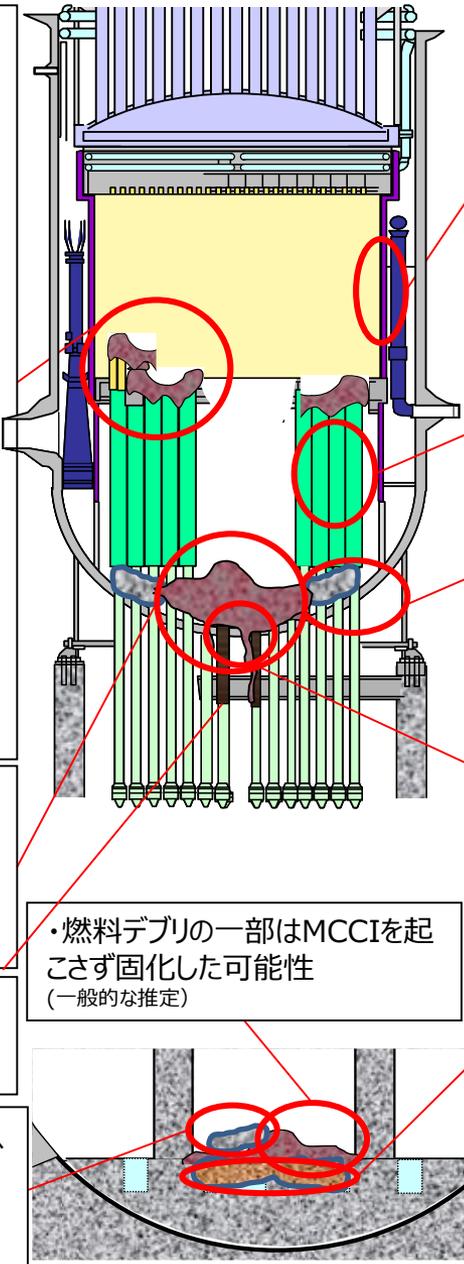


2号機格納容器内底部,
ペDESTAL内 内壁付近

TOSHIBA PITCH -011 TILT -073

(参考) 2号機のデブリ分布・RPV・PCV状態の推定図 (例)

- ・水素発生によるPCV圧力上昇からエネルギー量を想定し、大部分の燃料が溶融したと推定 (実測・解析)
- ・CS注水時に温度低下が確認されたことから、低流量のCS注水で水がかかる炉心外周位置に燃料有と推定 (燃料支持金具、CRGTに溶融燃料が落ち込み固化した場合でも熱源として同等な挙動を示すため、詳細はデブリ位置は推定不可能) (実測)
- ・ミュオン測定の結果から、炉心外周部に燃料が存在している可能性 (実測)
- ・健全燃料があるとしても外周部に一部 (一般的な推定)
- ・溶融燃料が固化した一般的な酸化物デブリと推定 (一般的な推定)
- ・ミュオン測定にて、圧力容器底部に燃料デブリと思われる高密度物質の影を確認。下部プレナムに落下した燃料がRPV底部に残存している可能性 (実測)
- ・CRGTの破損に伴いCRD内部にデブリが侵入している可能性 (一般的な推定)
- ・PCV床に水が溜まっていた場合、粒子状デブリが形成される。
- ・粒子状デブリがある場合、淀み部にたまる可能性 (一般的な推定)

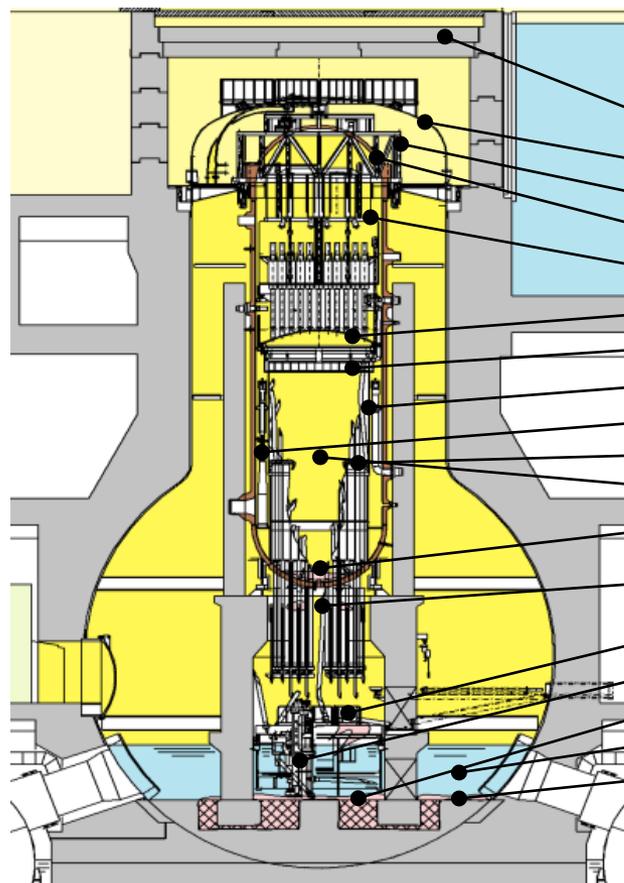


- ・FDW流量増加時にPLR系圧力上昇したことから、シュラウド外に水位が形成されている可能性 (実測)
- ・CS注水による温度低下、注水量増加時のシュラウド外水位上昇から、シュラウドの大規模損傷はないと推定 (実測)
- ・高温の燃料デブリからの熱移動が小さい場合、CRGTは溶けずに残る (一般的な推定)
- ・粒子状デブリがある場合、淀み部にたまる可能性 (一般的な推定)
- ・PCV内部調査時に外周部のCRDが確認できたことからRPVの穴は中央部と推定 (大きくない) (実測)
- ・穴から落ちたデブリの一部はCRDにへばり付くと推定 (一般的な推定)
- ・燃料デブリの一部はMCCIを起こさず固化した可能性 (一般的な推定)
- ・MCCIを起こした燃料デブリはコンクリートと混合している。
- ・PCVシェル破損の傾向は無い (サンドクッションドレンパイプからの漏えいなし) ため、MCCIは限定的と推定 (実測)

- 健全燃料
- 酸化物デブリ (多孔質)
- 粒子状デブリ
- コンクリート混合デブリ
- 健全CRGT
- 健全CRD
- CRD (内部にデブリ)
- 健全シュラウド
- バルーン燃料※
- 酸化物デブリ※
- 重金属デブリ※
- ペレット※
- 粉状ペレット※
- 被覆管残渣※
- 溶融炉内構造物※
- 固化B4C ※
- 制御棒混合溶融物※

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）

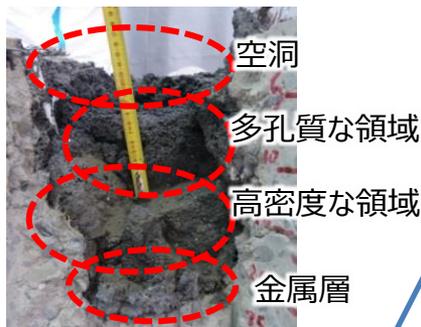


排出物の想定・分類例

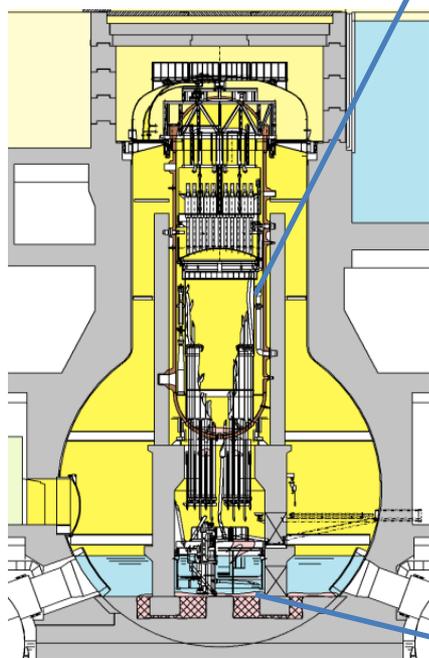
No.	排出物	分類
1	シールドプラグ	廃棄物
2	PCVヘッド	廃棄物
3	RPV保温材	廃棄物
4	RPVヘッド	廃棄物
5	蒸気乾燥器	廃棄物
6	シュラウドヘッド	廃棄物
7	上部格子板	燃料デブリ
8	シュラウド	燃料デブリ
9	ジェットポンプ	燃料デブリ
-	炉心支持板	燃料デブリ
10	炉心部燃料デブリ	燃料デブリ
11	RPV底部燃料デブリ	燃料デブリ
12	RPV下部/CRDハウジングに付着した燃料デブリ	燃料デブリ
13	ペDESTAL内部構造物	燃料デブリ
14	CRD交換機	燃料デブリ
15	ペDESTAL内部燃料デブリ	燃料デブリ
16	ペDESTAL外部構造物	廃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

切削・回収対象の特性 燃料デブリの特性を検討

- TMI-2の調査結果やデブリ/MCCI模擬生成試験, 事故進展解析を参照
- 組織、硬さ、構造材との混合状態、存在領域、量等を推定



MCCI模擬試験



燃料デブリ特性の推定

	燃料デブリ種類	主な燃料デブリ	特徴	質量[t]	燃料デブリ物性
				MAAP	寸法
炉心部	切株燃料 (未熔融破損燃料)	すべて崩落している可能性もあるが、燃料集合体存在の可能性あり	燃料集合体の一部が溶融せず残留	0~3	~4m
	粉状、小石状	残存構造物に付着あるいは積層して存在	溶融した炉心材料が急冷され、小片化		数μm~数cm
炉底部	粉状、小石状	大部分を炉底部のクラストが占める	溶融した炉心材料が急冷され、小片化	7~20	数μm~数cm
	塊状	クラスト部にはZr金属やZrBが存在し、硬く韧性のある部位が存在	ゆっくり冷却され塊となったもの		厚さ数十cm
	クラスト(岩盤状)		溶融した金属と酸化物燃料が混合固化した燃料デブリ		厚さ0.1~1m
CRD/計装管	構造物+付着燃料デブリ	管内部の隙間や外面に燃料デブリが付着して存在	圧力容器下端から下方の部分のSUS配管内を燃料デブリが流路閉塞		侵入長10数cm
ペDESTAL内	MCCI/粉状、小石状	複数の層をなしており、大部分が塊状のMCCIであると思われる	溶融した炉心材料がRPVから漏出し、分散急冷固化 MCCI進行時クラスト破損、溶融コリウムの噴出により小片化	120~209	50μm~20cm
	MCCIクラスト	気孔率が高く、韧性が低い燃料デブリが多量に存在	壁面には金属成分を含んだ噴出物が付着、床面は中空構造、上部クラストは気孔多く金属成分は少量		厚さ0.1~1m
	塊状MCCI		上部は硬いコリウムであるが気孔率大 下部は気孔率小で硬い 中央部または壁近傍に金属球在り		数10cm~
	金属層		MCCIの底部に比較的均一に分布		検討中
ペDESTAL外	MCCI/粉状、小石状	ペDESTAL内部位ほど明確な層分離はなく、クラストおよび塊状MCCIが存在	ペDESTALから流出した小石状燃料デブリが存在	70~153	50μm~20cm
	MCCIクラスト/塊状MCCI		ペDESTALから流出したコリウムがコンクリートと反応・凝固 金属成分やや多い		~0.5m

切削技術の開発・遠隔チゼル加工の例

- 要求事項を満たす切削技術の構成を検討中
- コアボーリング, ディスクソー, 超音波コアドリル, 油圧カッター, チゼル, アブレシブウォータージェット(AWJ), レーザーガウジング 他
- 加工速度

No.	チゼル種類	チゼル本数	加工状況/チゼル形状	加工結果状況	加工速度*1
1	電動駆動式	1本			28.74 kg/h*1 (287kg/日*1)
2	電動駆動式	1本			43.38kg/h*1 (433kg/日*1)
3	エア駆動式	2本			255.576kg/h*1 (2.5ton/日*1)

*1: 予備試験結果であるため、加工速度は参考値とする。加工目標は、300kg/日。1日の作業時間は10時間。

燃料デブリ取り出し 切削・回収ステップ

- 目指すべきスループットの試算例：200～300kg/日（構造材含む）

作業ステップ（例）

切削・回収作業・要求効率を考える（検討例）

アクセス搬出経路構築

.....

未臨界度評価

燃料デブリの切削

燃料デブリの回収

ユニット缶への収納

水切り

.....

ユニット缶搬出

乾燥

キャニスタへ収納

.....

項目	仮定条件
燃料デブリ取り出し期間 仮目標	1号機：10年間、2号機：10年間、3号機：10年間
年間燃料デブリ 取り出し日数	200日間(作業日数以外はメンテナンス日とする)
1日の燃料デブリ 加工時間	10時間以内
燃料デブリの量	3号機（仮）：(CRD計装管付着：6ton*、ペDESTAL内：最大277ton、ペDESTAL外：最大146ton、合計：429ton)
燃料デブリ加工ツール	1. MCCI：チゼル加工、超音波コアボーリングなど。 2. CRD計装管付着：ディスクカッター、AWJ、レーザなど。 3. 金属類付着：ディスクカッター、AWJ、レーザなど。
燃料デブリ加工速度	1. チゼル加工、超音波コアボーリング：機械的加工 2. ディスクカッター、AWJ、レーザ：干渉物撤去と同様の速度 3. コアボーリング：3.25kg/h- 高速度化検討中 4. レーザガウジング：熱的切断が必要な場合
燃料デブリ回収方法	吸引、把持、すくうなどの実績がある回収方法で回収速度を仮定

収納・移送・保管技術 課題

作業ステップ (例)

.....

ユニット缶搬出

乾燥

キャニスタへ収納

仕分け

キャスクへ収納

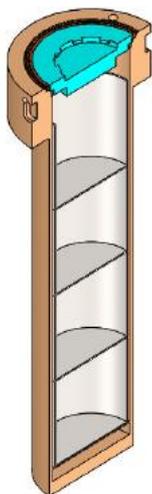
..... 保管設備へ移送

キャスク受入れ

キャニスタ解放

完全乾燥

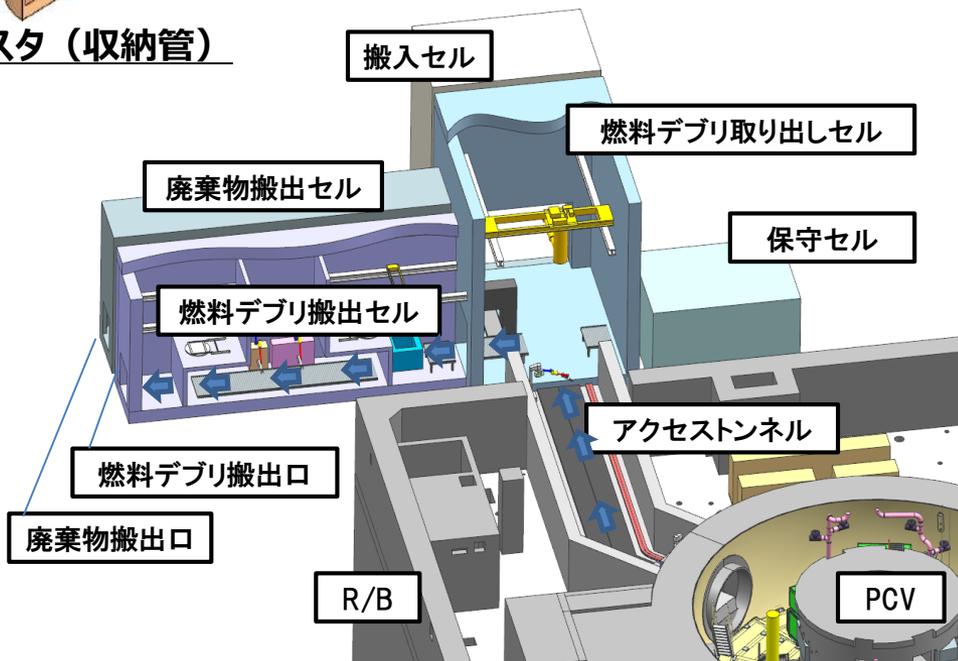
再収納・保管開始



キャニスタ (収納管)

キャニスタ (収納管) 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 (最小臨界量) 【測定】
 - 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



デブリ/廃棄物搬出ライン イメージ

収納・移送・保管技術 課題

.....

ユニット缶搬出

乾燥

キャニスタへ収納

仕分け

カスクへ収納

..... 保管設備へ移送

カスク受入れ

キャニスタ解放

完全乾燥

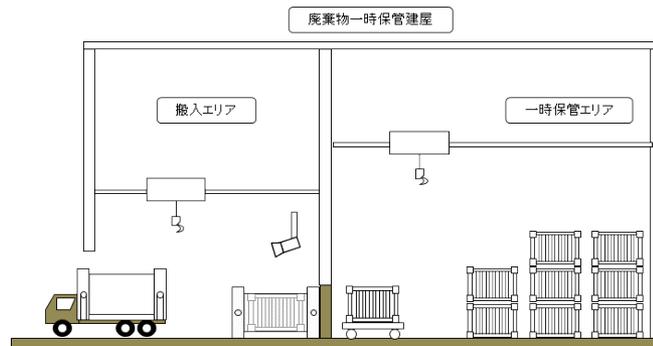
再収納・保管開始

燃料デブリと廃棄物の仕分け可能性, 安全要求事項

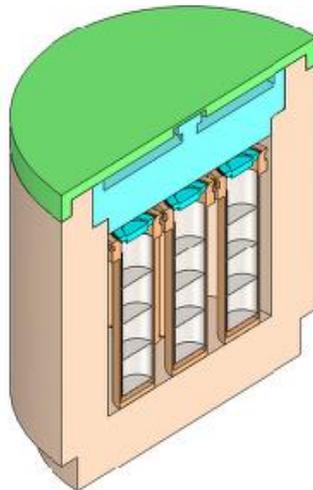
- 未臨界維持：燃料デブリのみ
- 水素発生抑制
- 漏えい防止
- 冷却
- 遮蔽

仕分けの基準と方法

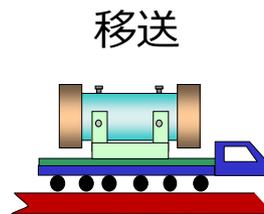
- 発生した領域、形状
- 核燃料の量
- 汚染密度
- 測定・評価方法



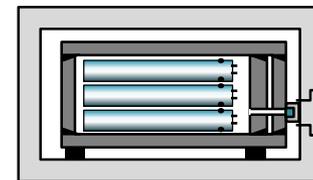
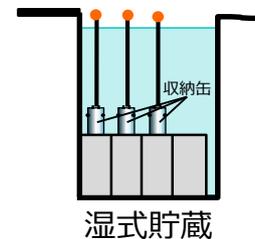
廃棄物保管



カスク イメージ



燃料デブリ保管

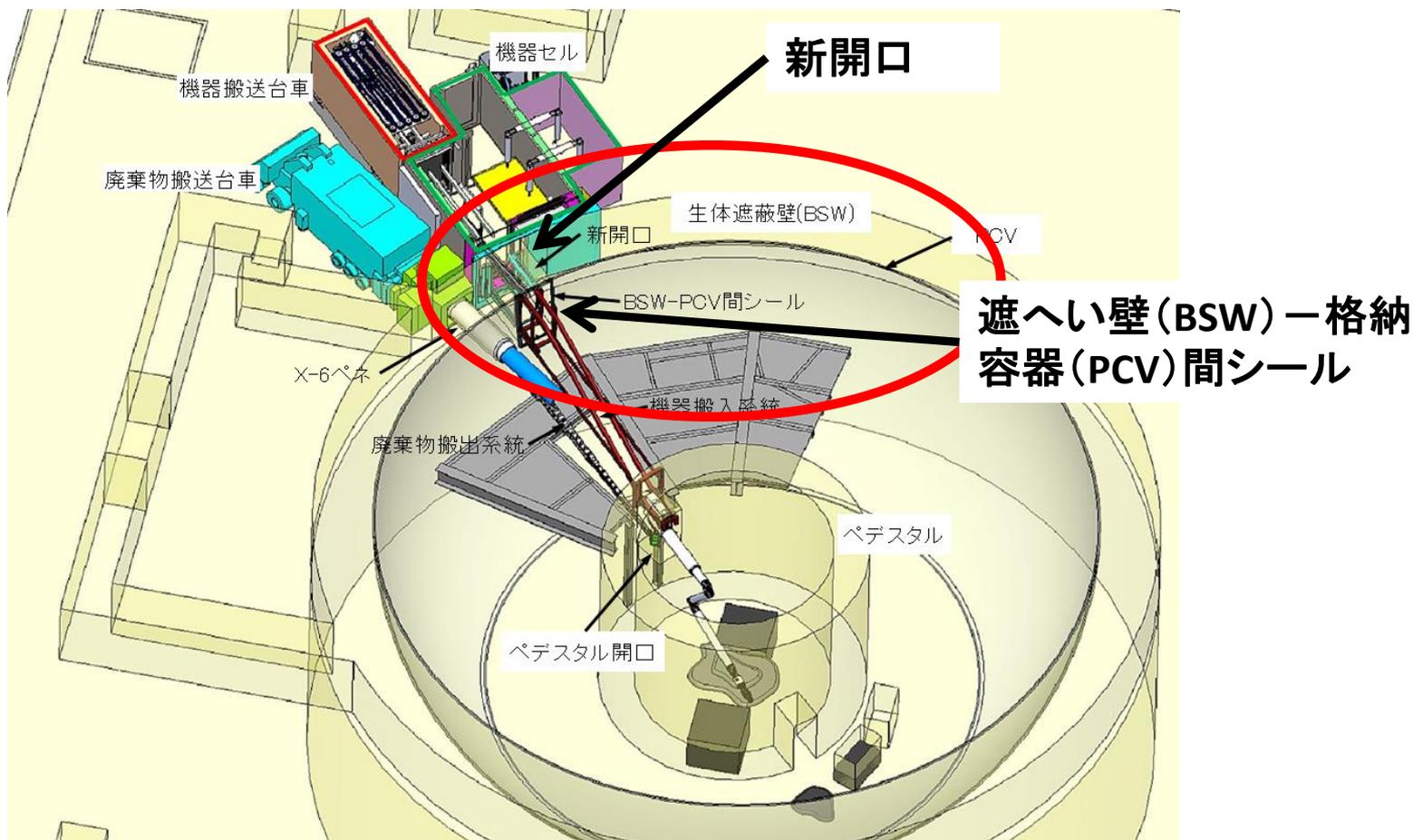


乾式貯蔵

アクセス工法の開発事例

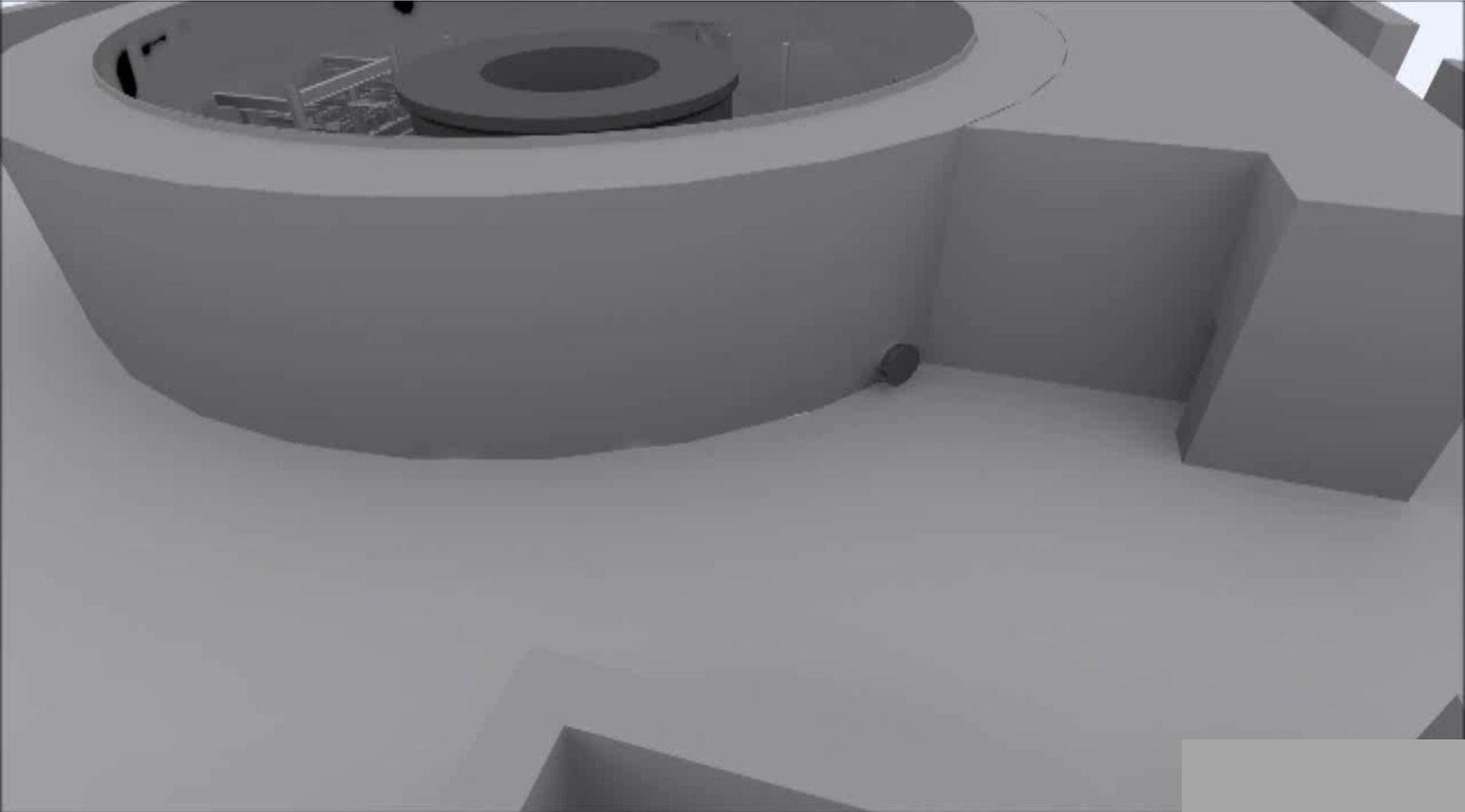
【横アクセス工法】デブリ取り出しに係る技術

- 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



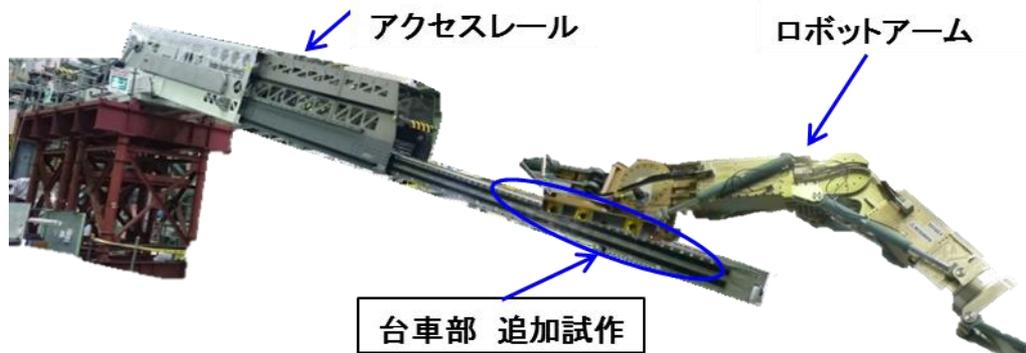
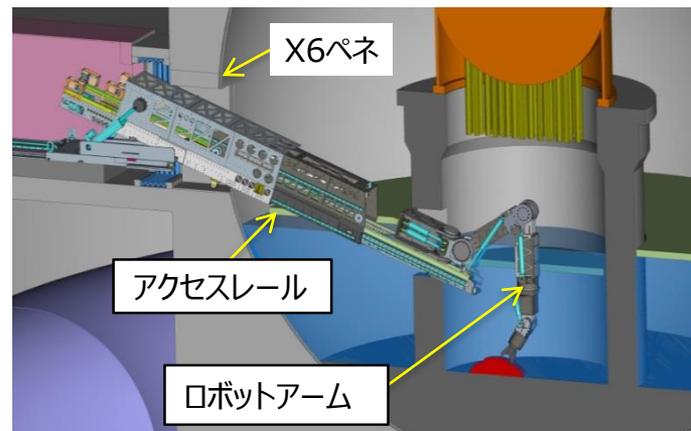
横アクセス工法の一例 イメージ

穴開け～シール設置 取り出し工法への適用イメージ



アクセスレール工法を実現する技術

- それぞれ開発を進めてきた、アクセスレールとロボットアームを組み合わせた機能試験を計画中

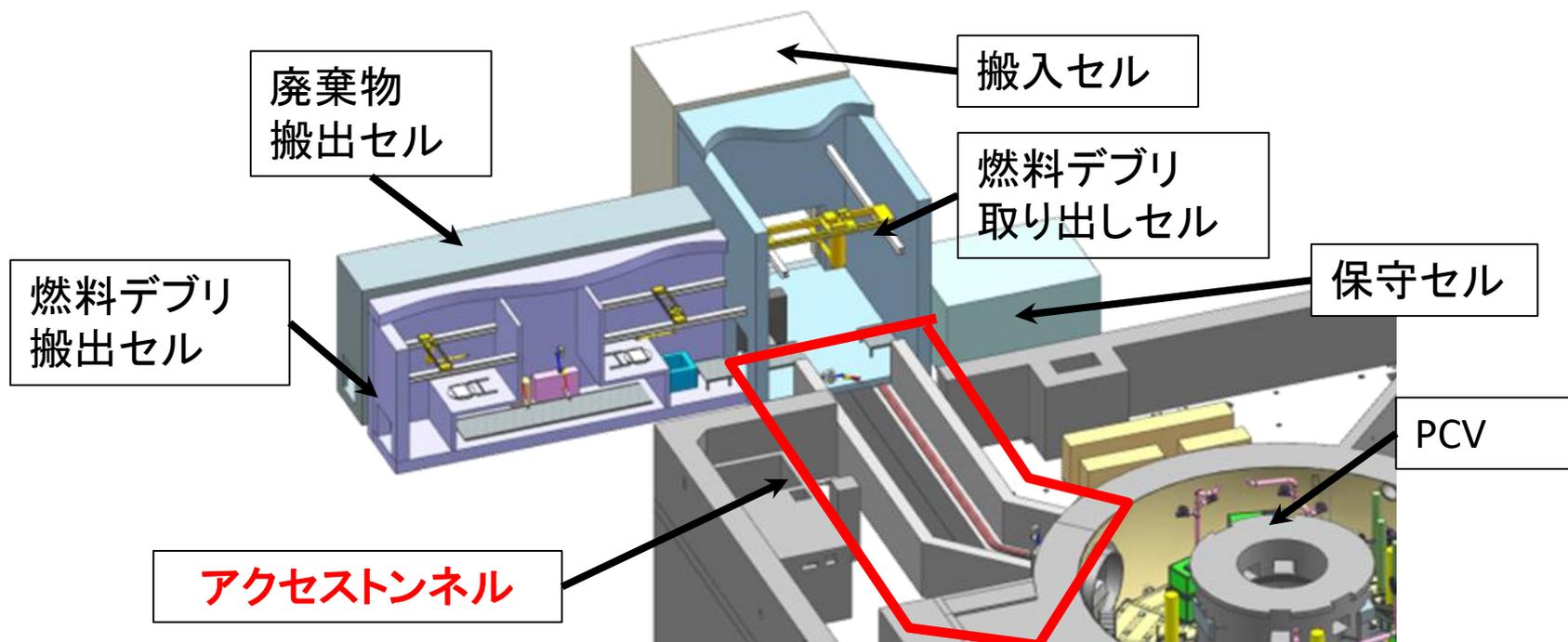


組合せ機能試験イメージ



【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

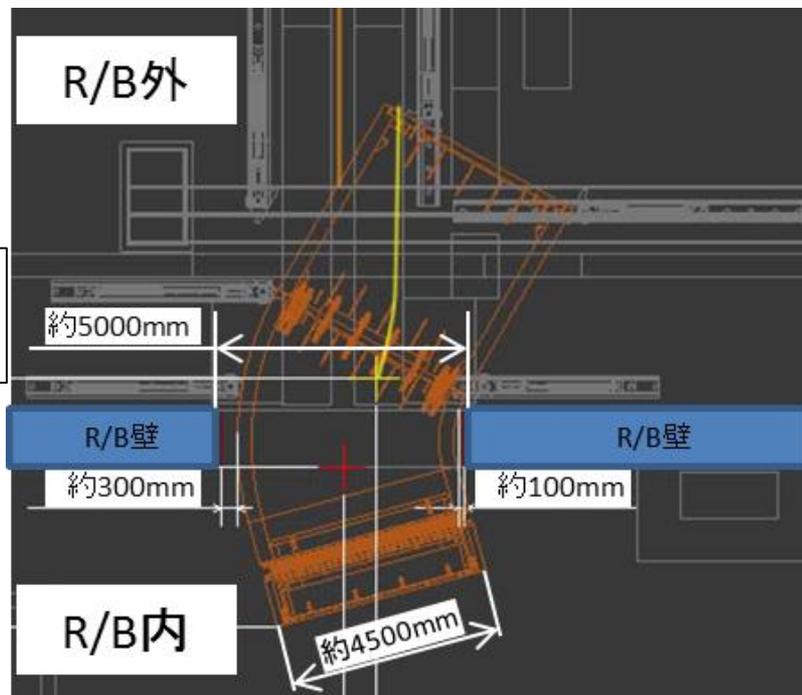
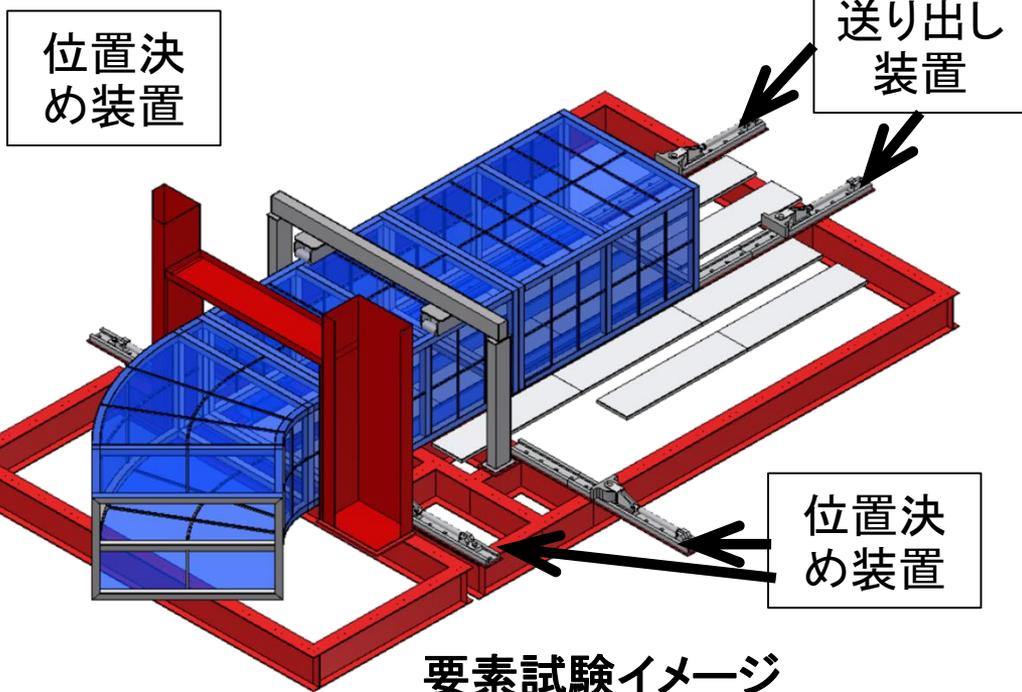


アクセストンネル工法の配置イメージ

トンネル施工技術の要素試験



送り出し工法の例

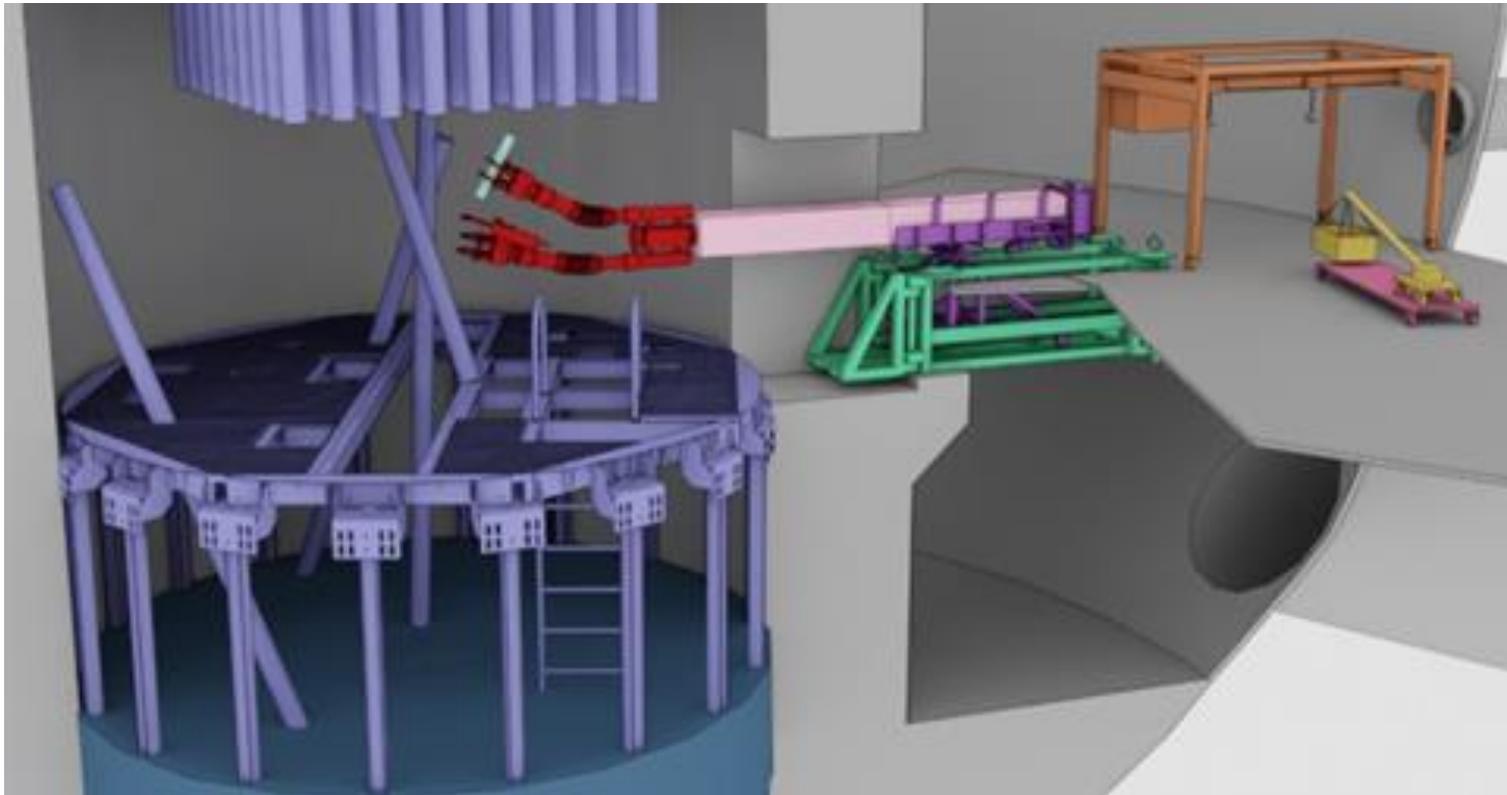


狭隘作業のイメージ

*R/B: 原子炉建屋

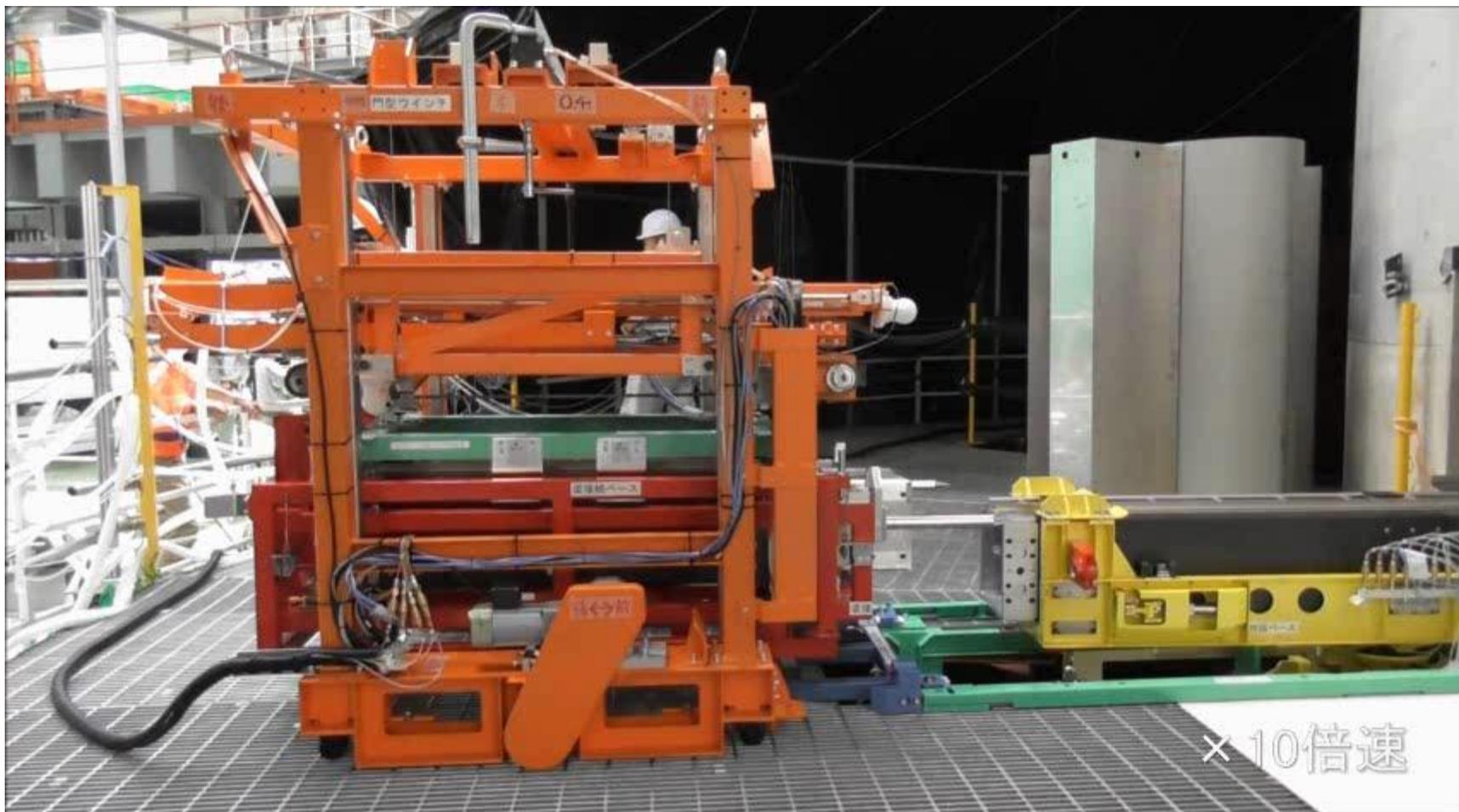
干渉物撤去技術

- 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



まとめ

● 安全 を最初に考える

- ・内在するリスクを徹底的に抽出し、リスクの全体像を構築
- ・対応、対策を、デブリ取り出しシステムへの要求機能で具現化
- ・深層防護レベルに展開・対応
- ・要求機能に機器・設備構成を割付けし設計に反映

● 迅速

- ・スループットの成立と極限の追求：デブリ取出しに要する期間

● 合理的、現場指向、確実（主に今後のステップ）

- ・仮構築した安全システムを現場のfactを積み重ねつつ、試験・評価／検証により合理化してゆく（エンジニアリング、詳細設計、PDCA）

所感

- ・長期にわたり具体的な技術開発ニーズが多数抽出されてくるものと思量
- ・デブリ取り出しへの挑戦に若手技術者の参加を期待

End of presentation