

福島第一原子力発電所の「廃炉」の現状 —「見えてきたもの」と取り組むべき課題

平成30年3月14日

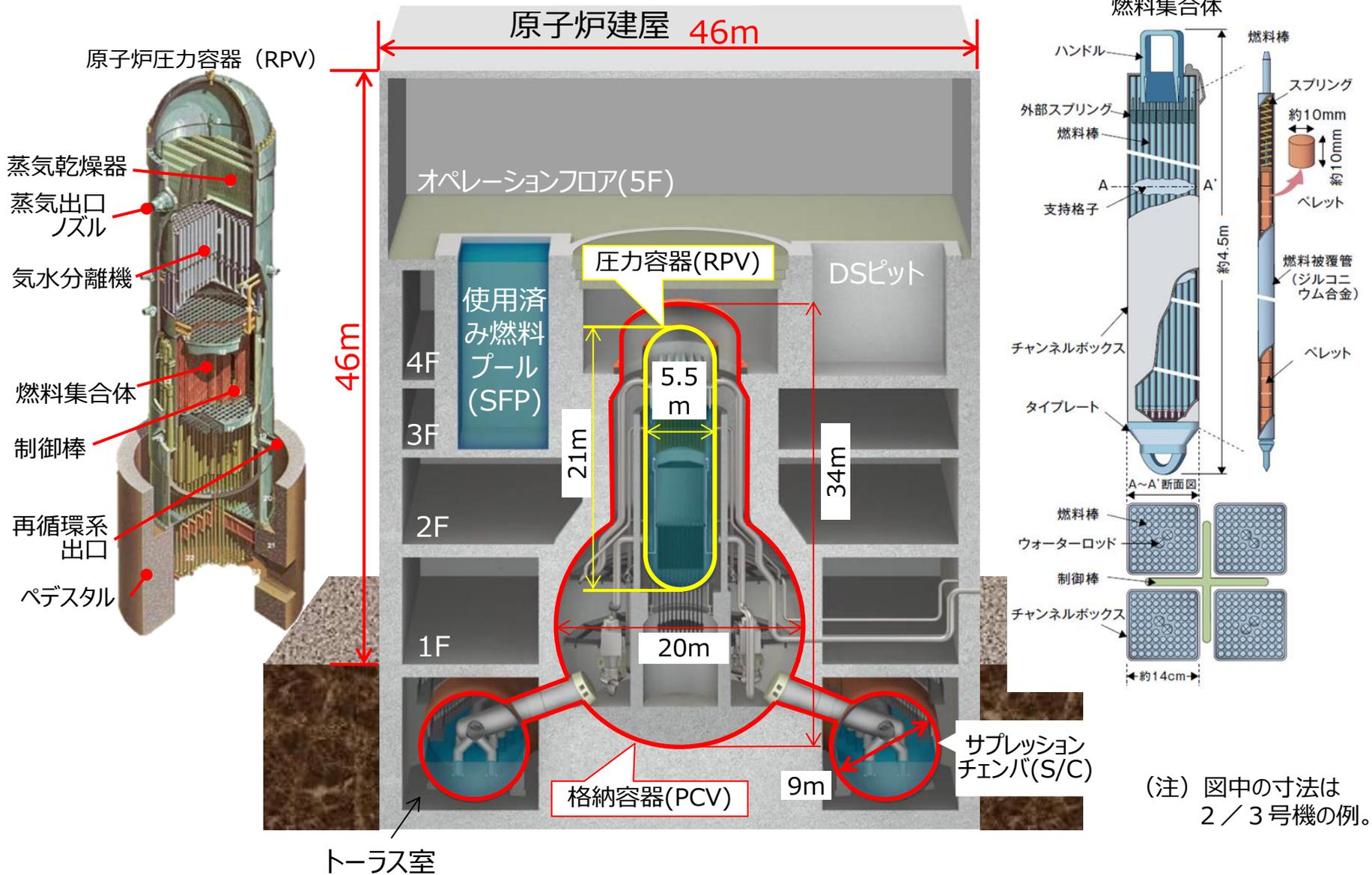
『廃炉』から始めよう、新たな一歩
—その2歩目・技術と人材、「次世代」へのつなぎ方
かながわサイエンスパーク（KSP）内 KSPホール

国際廃炉研究開発機構（IRID）
高守謙郎

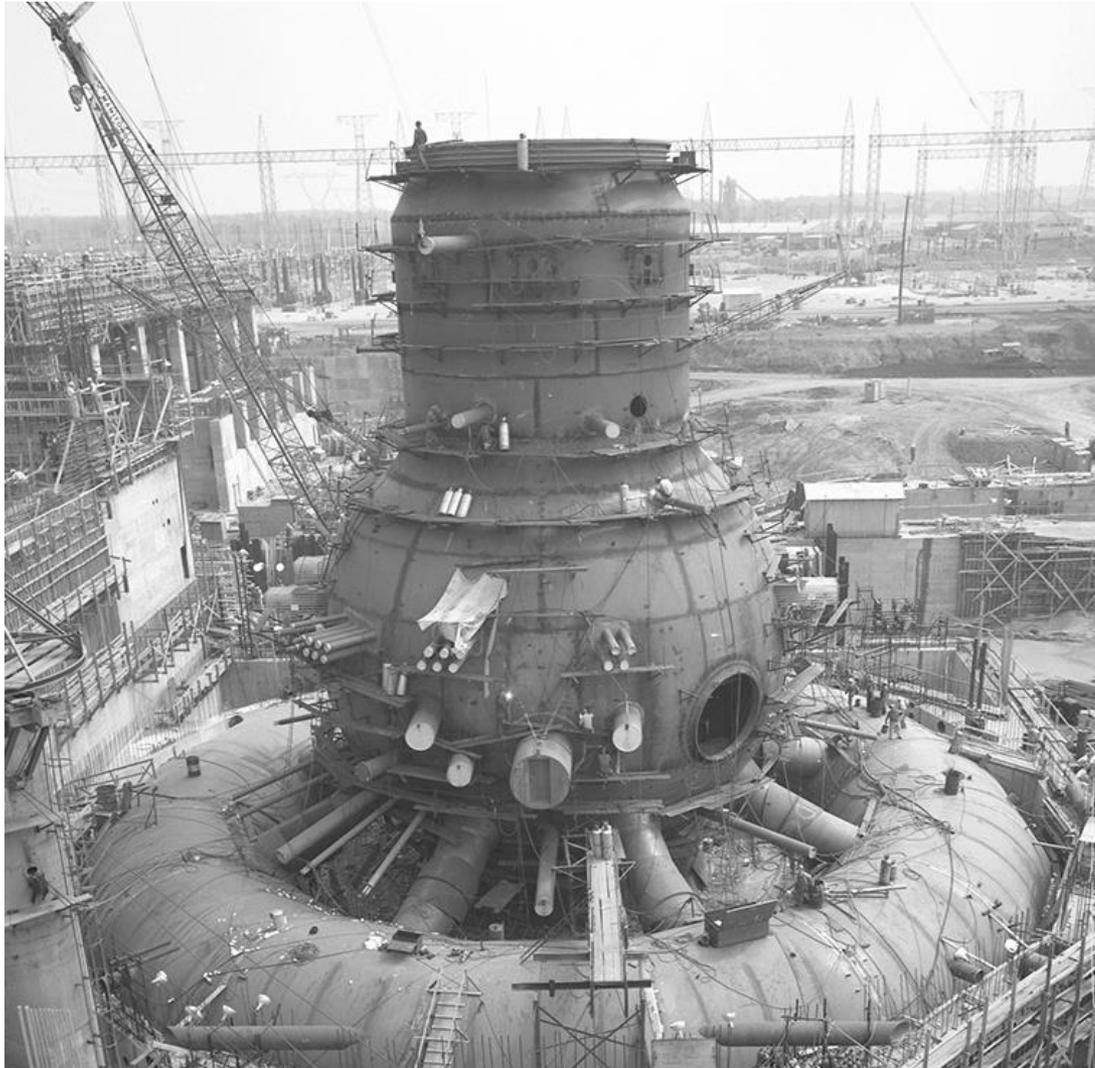
この成果は、経済産業省/廃炉汚染水対策事業費補助金の活用により得られたものです。

無断複製・転載禁止 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

はじめに① 原子力発電所の構造

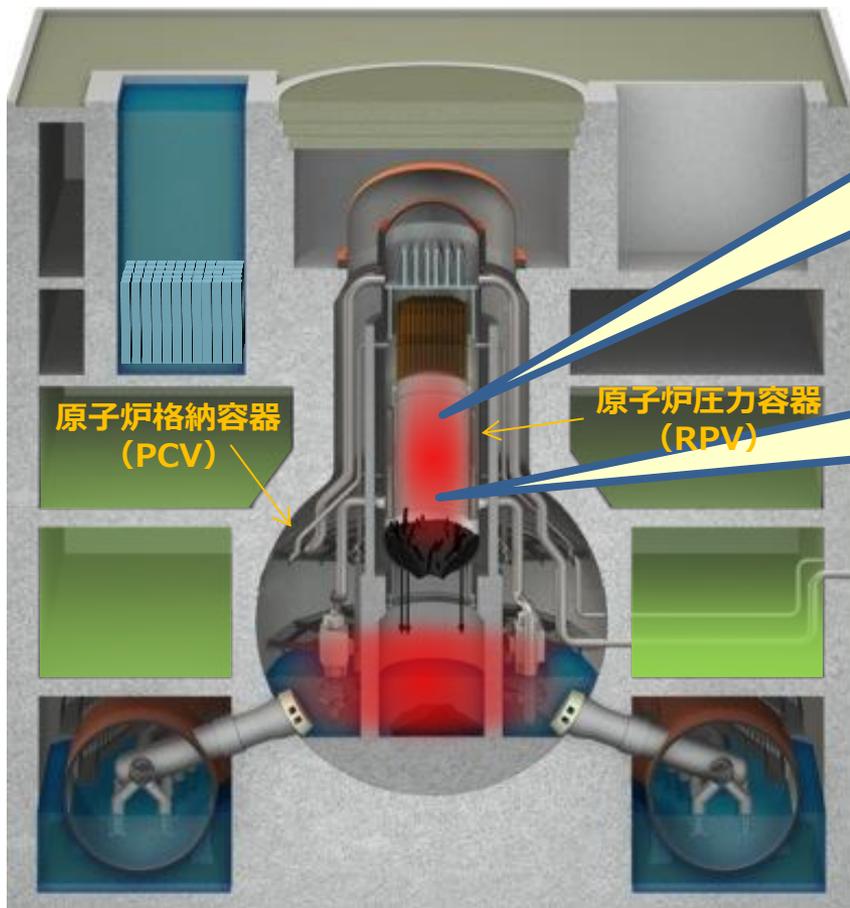


はじめに② PCVの外観（建設写真）



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

炉心溶融・メルトダウン



原子炉建屋 (R/B) 断面図

「炉心溶融」：炉心の冷却機能が失われ、核燃料の過熱により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すること。

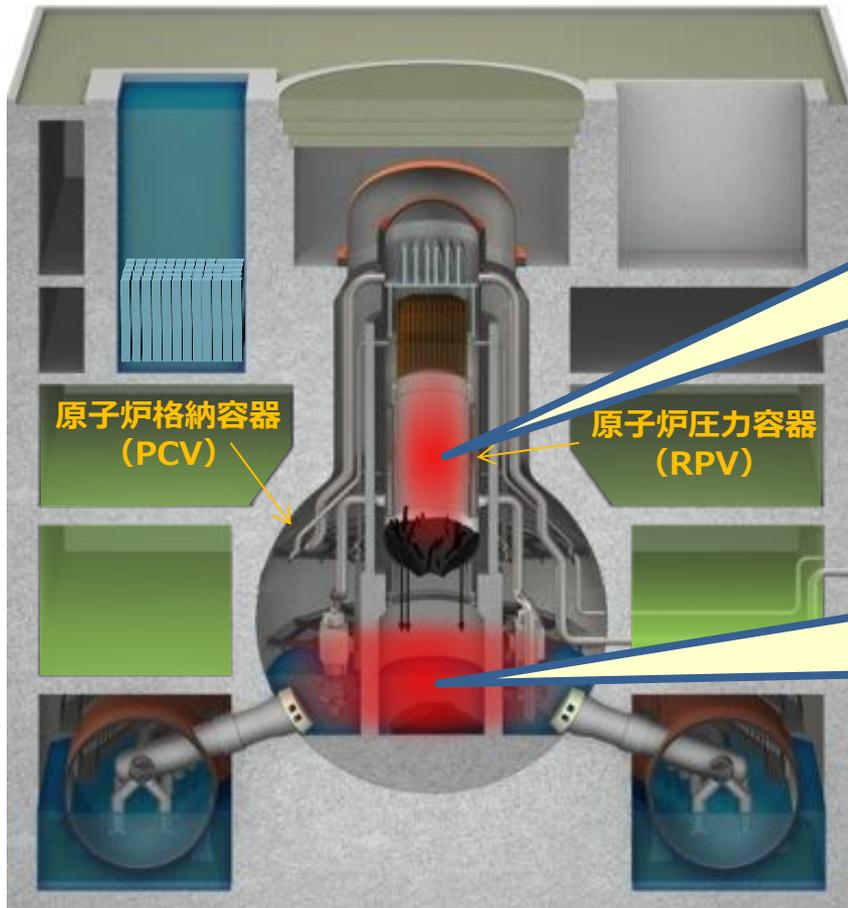
「メルトダウン」：炉心溶融が進み、溶融した燃料デブリが炉心から落下して压力容器の底に溜まること。

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。

※ 必ずしも「炉心溶融=メルトダウン」ではない。区別して使われることがある。

損傷・溶融した燃料はどこにあるのか



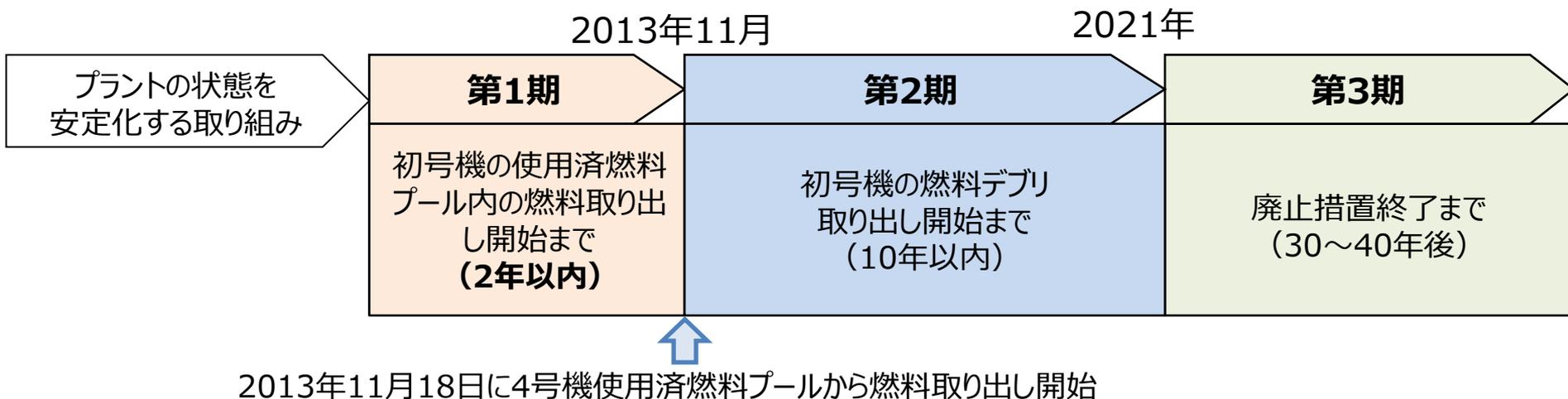
炉心の冷却機能が失われ、核燃料の過熱（残留熱）により炉心を構成している燃料集合体や炉心支持構造物が高温で融解したと推定

溶融した燃料や炉内構造物の一部は压力容器の外に流出し、格納容器内に達しているものと推定

原子炉建屋（R/B）断面図

燃料デブリ取り出しへの期待

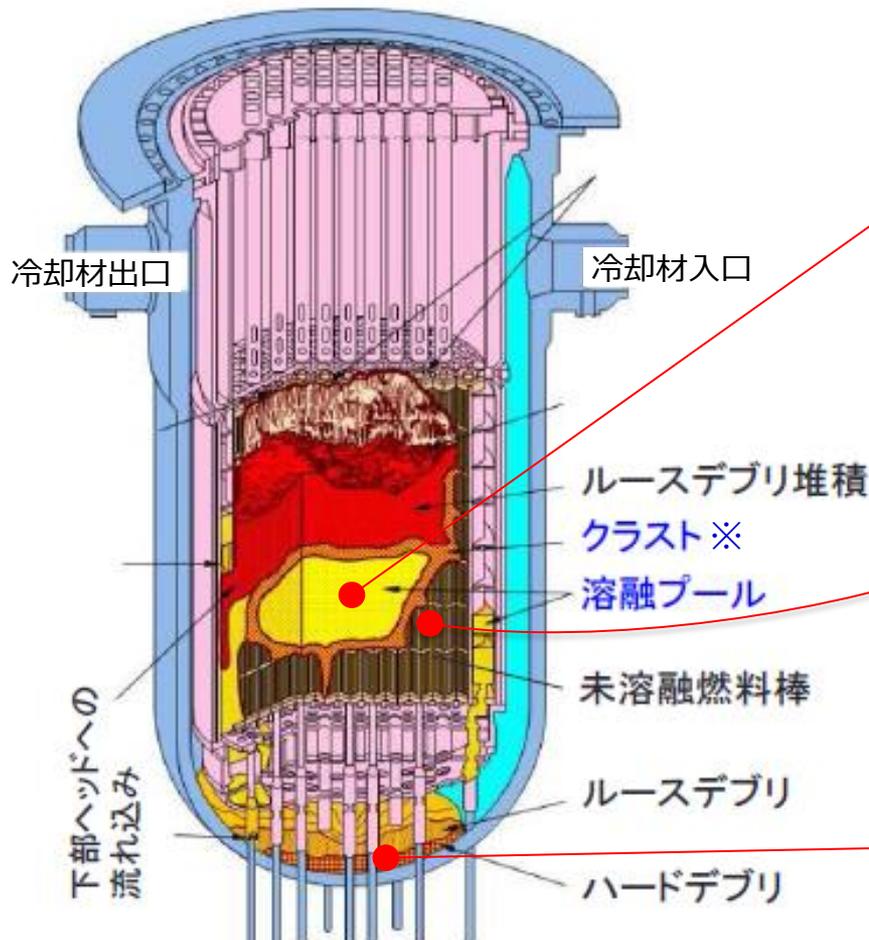
- 「福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」は、**燃料デブリ取り出しから廃止措置終了までの実行期間を30～40年程度と策定している。**¹⁾
- 初号機の燃料デブリ取り出し方法の確定を2019年度、初号機の燃料デブリ取り出しの開始を2021年度内としている。
- NDF戦略プランでは、(福島第一は)暫定措置により**一定の安定状態を維持している状況にあり、(燃料デブリ取り出しは)このような状況を抜本的に改善して、より安定的な状態に持ち込むための方策、位置付けている。**²⁾



「燃料デブリ」って何？（TMI-2デブリのようす）

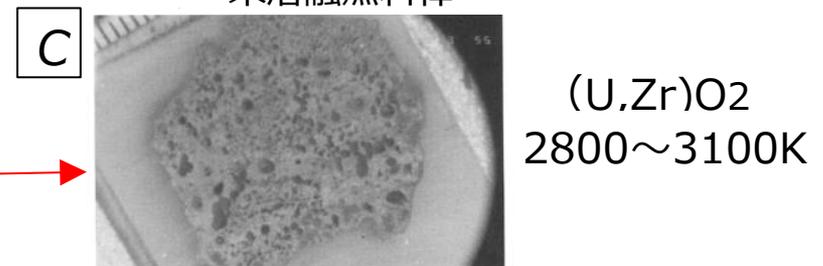
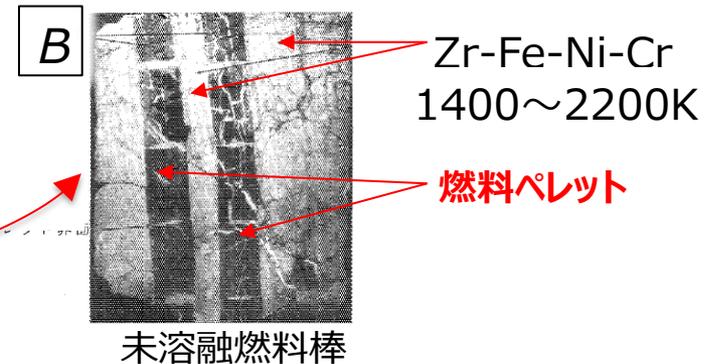
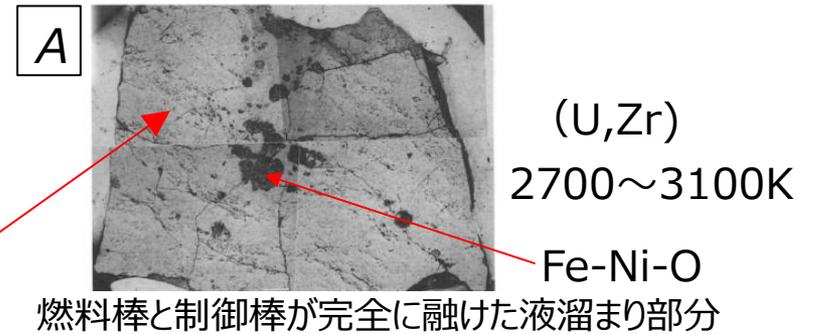
厳密な定義は無いが：

燃料及び構造材が溶融して混ざり合い、冷却により固化したもの



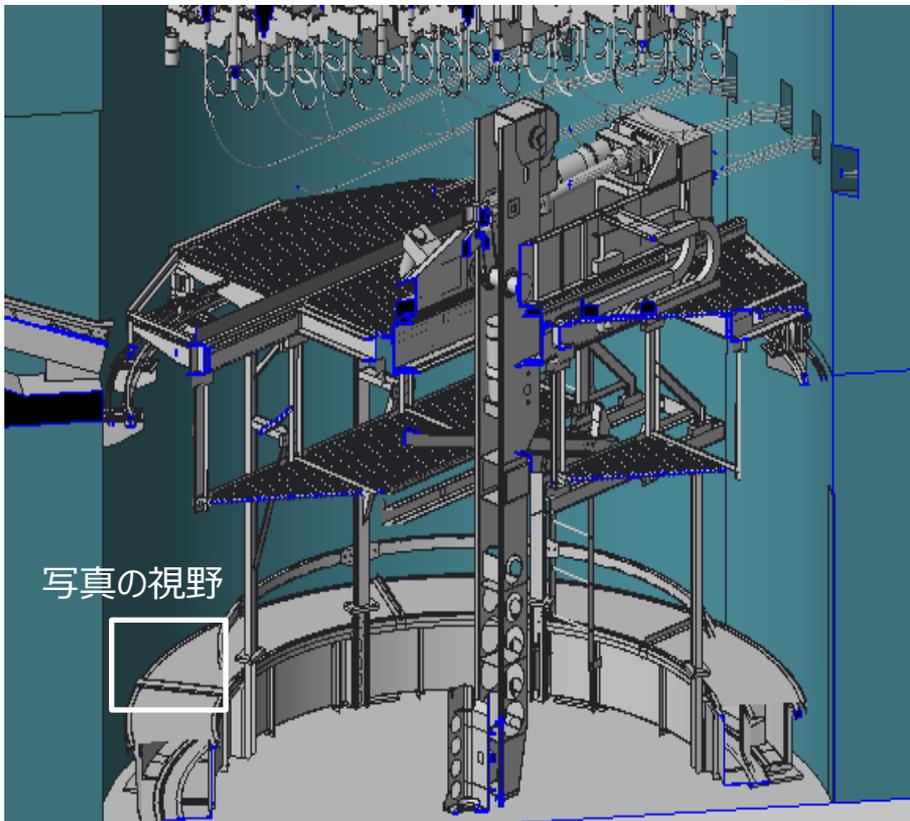
R.K. McCardell, Nucl. Eng. Des. 118(1990) 441

※ 溶融プール表面の殻状の層（緻密な組織で硬い）



U：ウラン、Zr：ジルコニウム、Fe：鉄、Ni：ニッケル、Cr：クロム

2号機格納容器内底部のようす



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DESTル内 内壁付近



燃料デブリ取り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

5. デブリを取り出す

4. PCVに水を張る

3. PCVからの漏えいを止める

2. デブリの状態を知る

1. 建屋内の線量を下げる

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

IRIDの研究開発プロジェクト

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID: International Research Institute for Nuclear Decommissioning)

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)

燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発(12PJ)

除染・線量低減技術

R/B内の
遠隔除染
技術

2016.3終了

補修・止水技術

PCV
漏えい箇所の
補修・止水
技術

PCV
漏えい箇所の
補修技術の
実規模試験

燃料デブリ取り出し技術

<安定状態の確保>

RPV/PCVの
腐食抑制
技術

RPV/PCVの
耐震性評価
手法

燃料デブリ
臨界管理
技術

<デブリ取り出し>

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

燃料デブリ
**収納・移送
・保管**技術

内部調査・分析技術

<直接的調査>

PCV
内部調査
技術

RPV
内部調査
技術

燃料
デブリ
性状
把握

<間接的調査>

RPV内
燃料デブ
リ検知
技術

総合的な
炉内状況
把握
の高度化

2016.7終了

廃棄物に係る研究開発(1PJ)

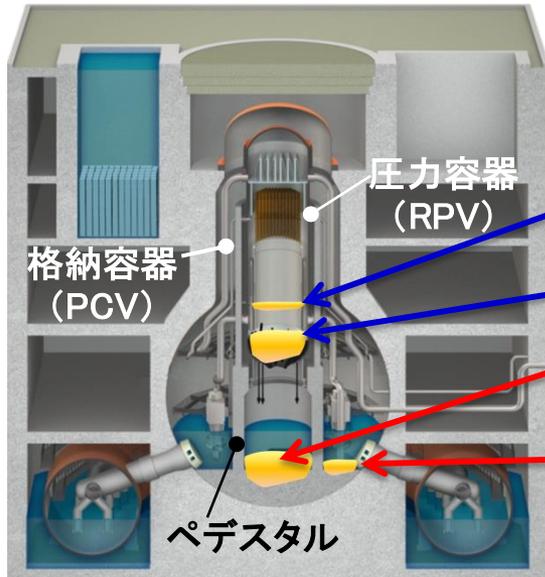
固体廃棄物の
処理・処分
技術

調査 燃料デブリの所在をさぐる

今、1Fのデブリはどうなっているか？ 解析評価例

解析による評価

原子炉建屋 (R/B)



 : RPV内
 : RPV外
 (単位: トン)

	1号機	2号機	3号機
場所	代表値※	代表値※	代表値※
炉心部	0	0	0
RPV底部	15	42	21
ペDESTAL内側	157	146	213
ペDESTAL外側	107	49	130
合計値	279	237	364

「代表値」: 現時点において最も確からしい値。

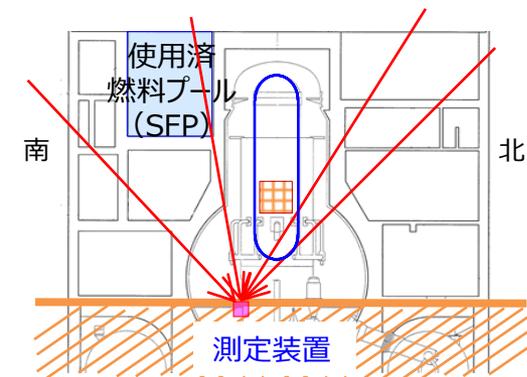
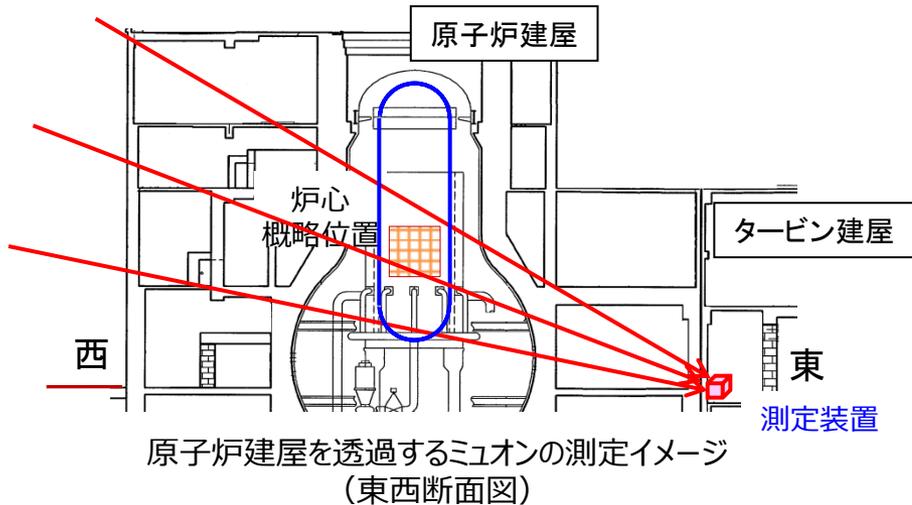
「推定重量」: 燃料 + 溶融・凝固した構造材 (コンクリート成分を含む)

- ▶ 解析結果及び実機調査データ (温度データ、ミュオン測定、PCV内部調査等) を総合的に分析・評価。随時改訂。

ペDESTAL底部のデブリが多い (80%以上) と推定

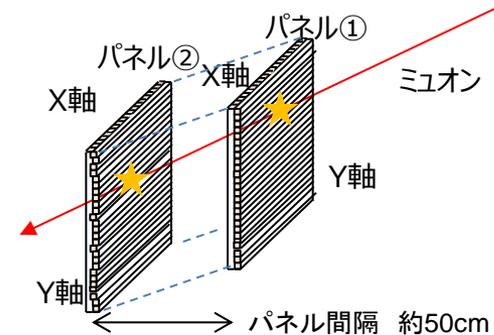
ミュオン透過法による測定（イメージング）

- 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イメージング。（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）>

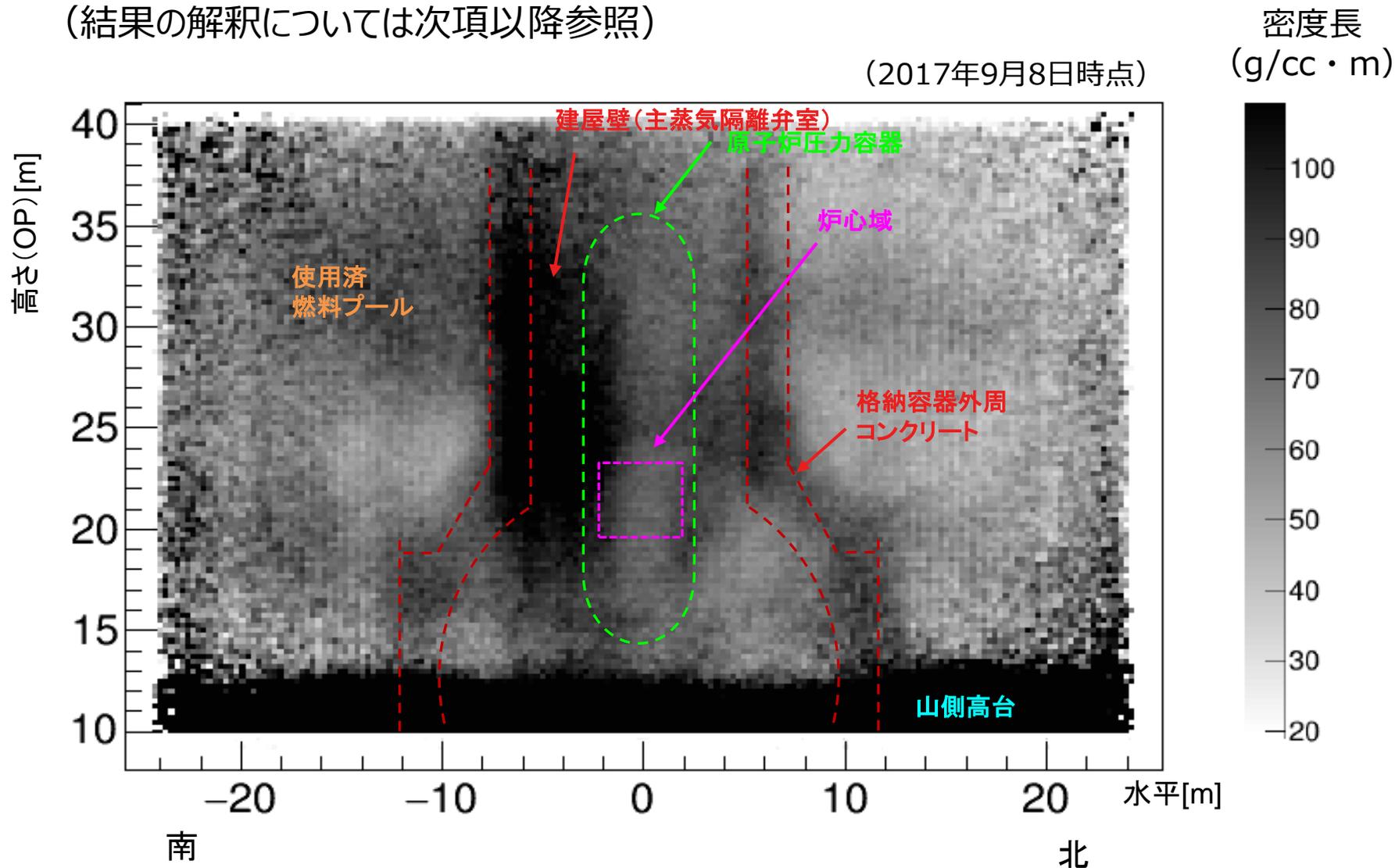
上空から飛来するミュオンを装置内部に配置した2枚のパネル検出器（プラスチックシンチレータ）で検知し、通過したパネルの座標からミュオンの軌跡を算出。



3号機ミュオン透過法測定結果

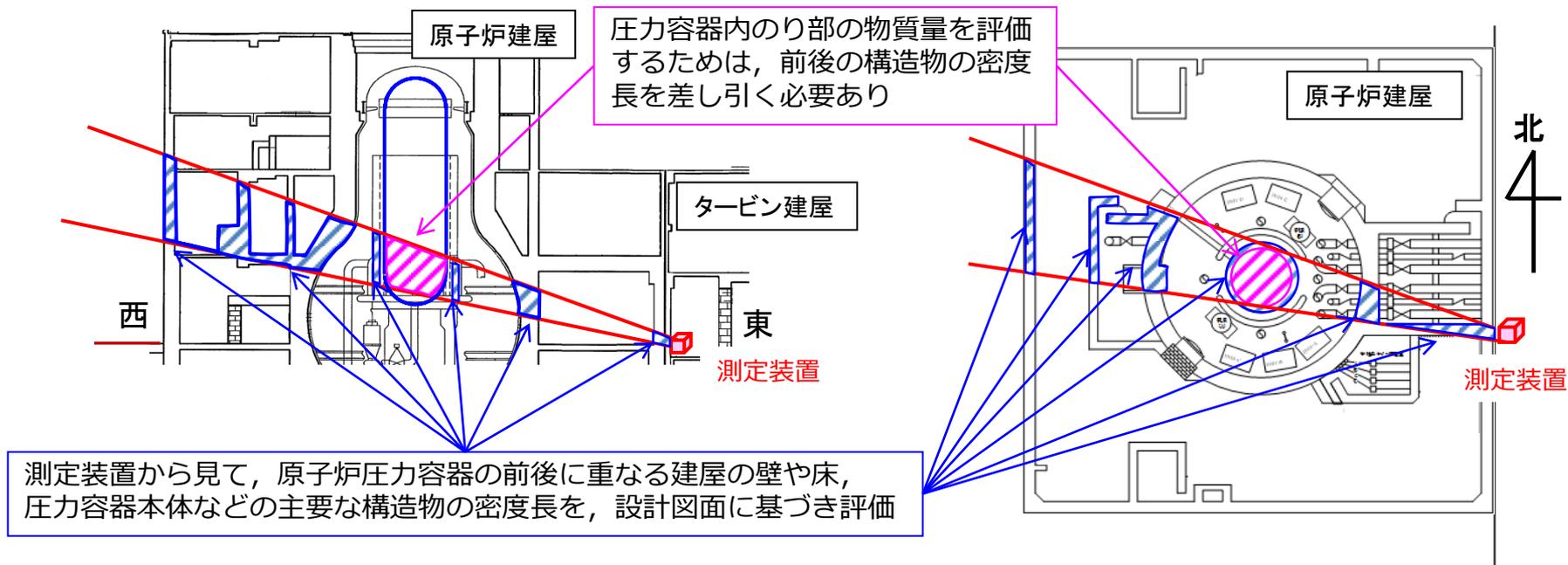
- ミュオン透過法測定により3号機の物質質量分布を評価した結果は以下の通り。
(結果の解釈については次項以降参照)

(2017年9月8日時点)



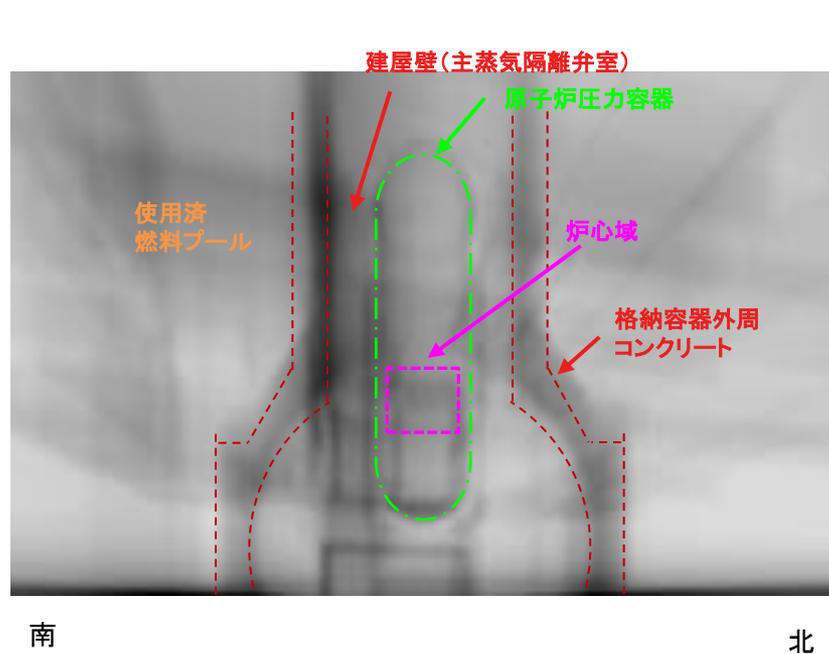
原子炉圧力容器内部の物質量の評価手法

- ミュオン測定により得られる密度長分布には原子炉建屋の壁や床，原子炉圧力容器の容器自身など構造物の物質量の影響が含まれている。
- 原子炉圧力容器の内り部の物質量を評価するためには，これら構造物の影響を差し引く必要がある。
- そのため，測定装置から見て原子炉圧力容器の前後にある構造物の密度長を設計図面とシミュレーションにより評価し測定結果から差し引く。

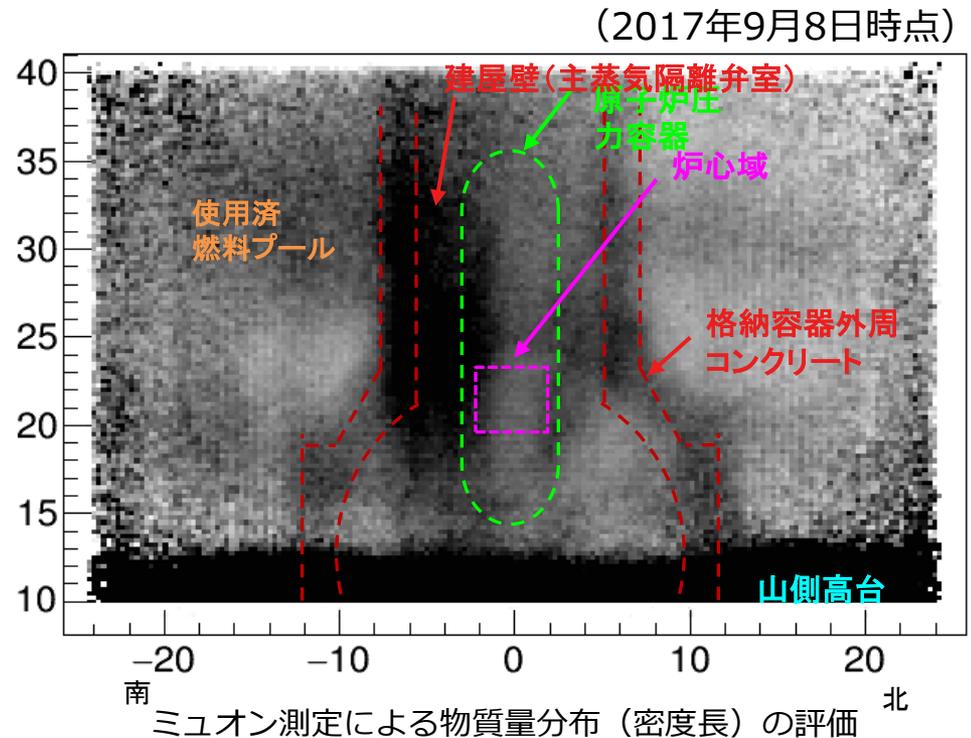


原子炉建屋の主な構造物 (シミュレーションとの比較)

- 格納容器外周の遮へいコンクリート, 使用済燃料プール, 原子炉建屋の壁などの主要な構造物を確認した。



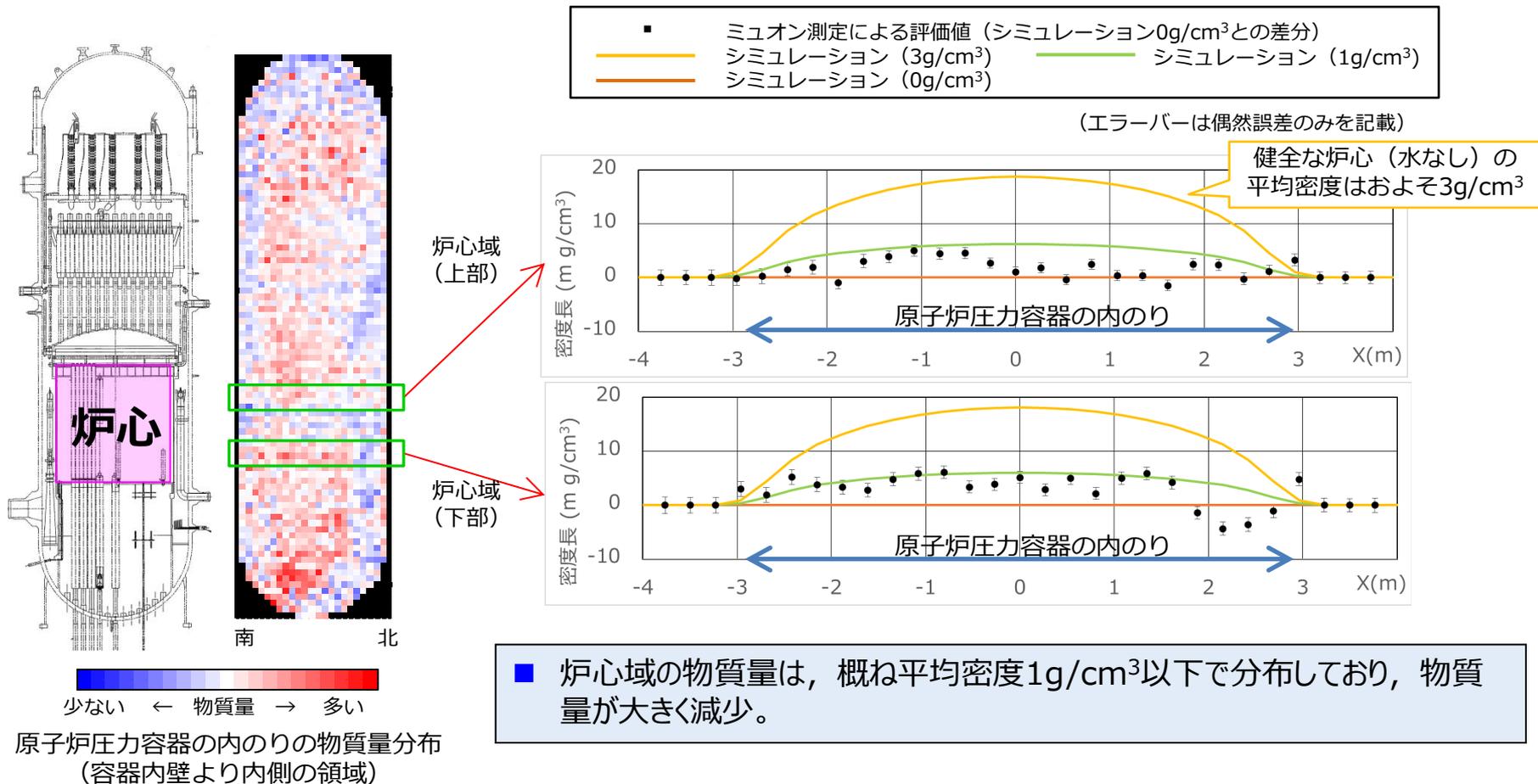
シミュレーションによる物質分布 (密度長) の評価
(炉心域, および炉底部に燃料デブリありのケース)



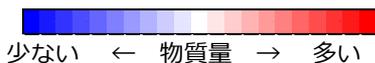
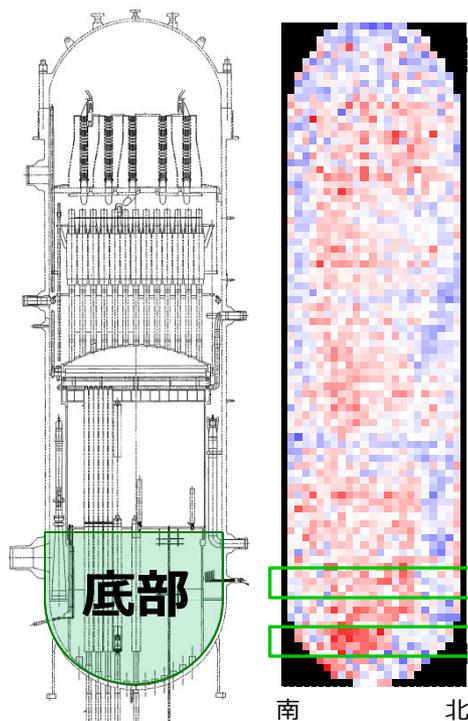
ミュオン測定による物質分布 (密度長) の評価

原子炉压力容器内の物質質量分布（①炉心域）

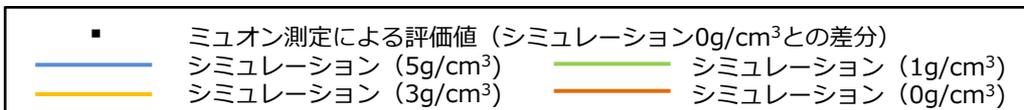
- 測定結果から原子炉建屋の壁や床，压力容器などの構造物の物質質量を、シミュレーションに基づき除去
- 压力容器内のりが、一様な密度をもつ仮想的な物質で満たされている場合のシミュレーション結果と比較し，燃料の有無を推定



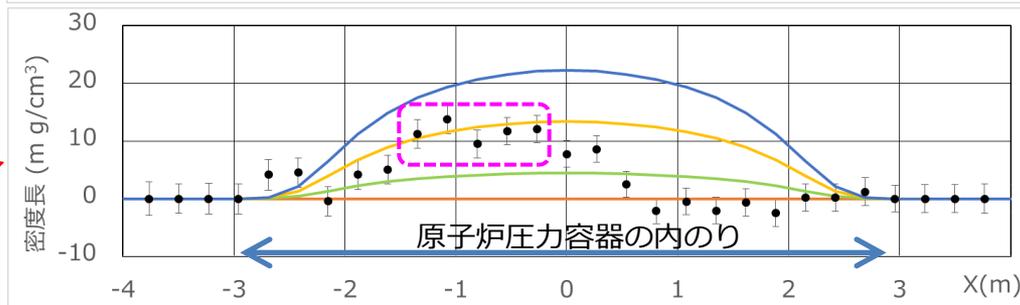
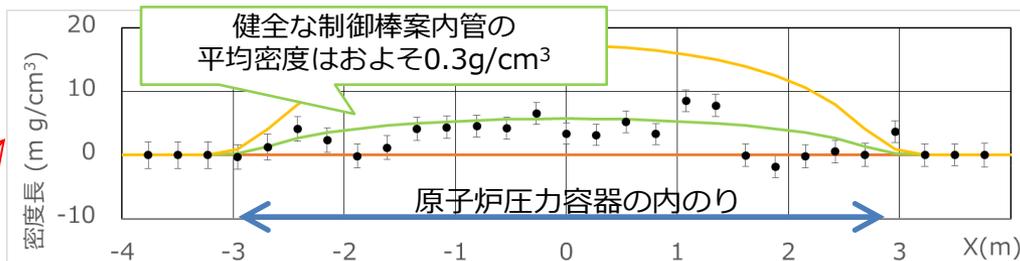
原子炉压力容器内の物質質量分布 (②原子炉压力容器底部)



原子炉压力容器の内りの物質質量分布
(容器内壁より内側の領域)



(エラーバーは統計的な誤差 (偶然誤差) のみを記載)



■ 原子炉压力容器底部 (底部ヘッド付近) は、場所によって通常よりも多い物質質量が存在することを確認。

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



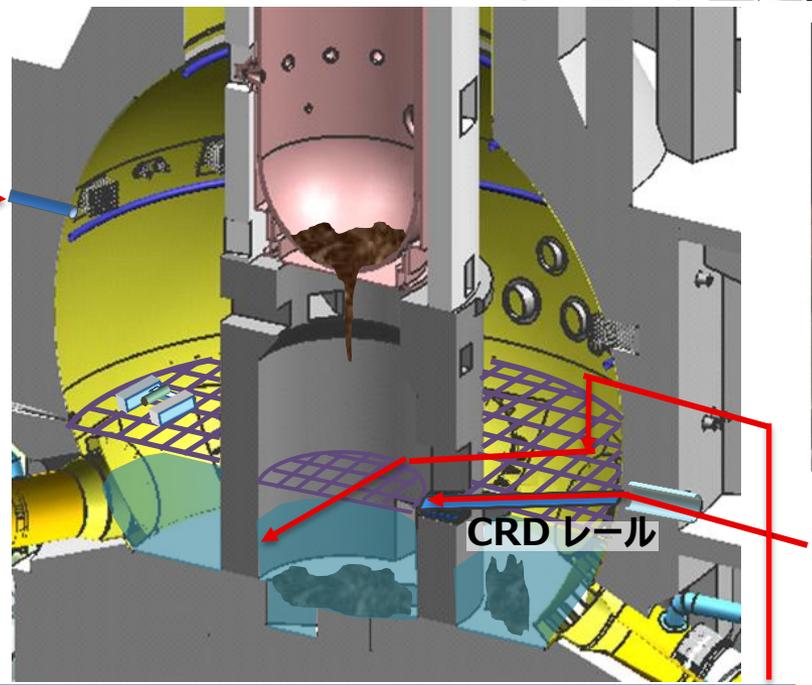
変形



(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 他



ペDESTル内側の調査（3号機）

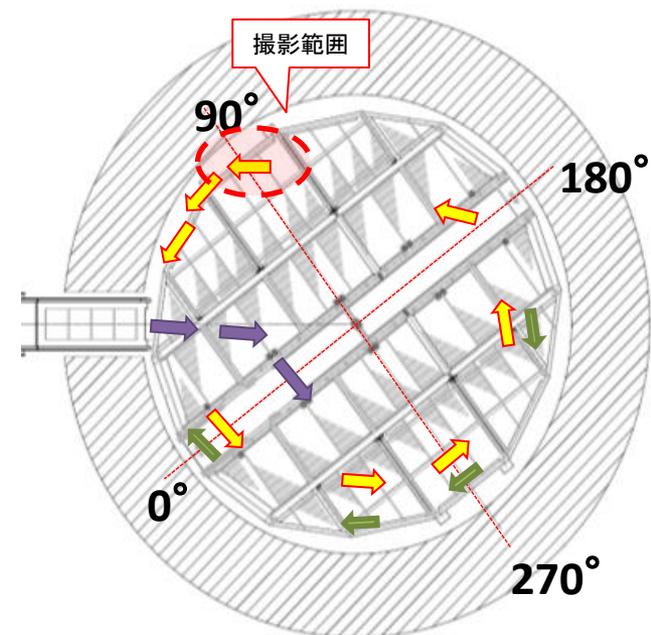


○水中遊泳型ロボット

3号機 格納容器内 ペDESTAL内外周部等



2号機（同型機）のペDESTALの様子
（定期検査時撮影）



燃料デブリ取出し工法の検討

気中－横アクセス工法の概念設計状況

燃料デブリの取出し-何を準備しなければならないのか

- 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。

取出し工法開発の要点（例）

1. 安全要求事項の達成（深層防護の実装）

- 放射性物質の拡散抑制
- 再臨界の防止・影響の抑制
- 火災その他事故
- 外部事象へのロバストネス，影響の抑制，その他

2. 技術（構成）の成立性

- デブリへのアクセス
- 切削・回収
- 移送・保管
- 遠隔作業・線量低減

3. 現場（作業）適合性

- 作業環境線量
- リスクマネジメント
- 現場の構成，他設備との協調
- メンテナンス

4. 総合的実現性

- 総作業線量
- コスト
- 所要時間
- 成果（リスク低減等）の価値，リスクの増減

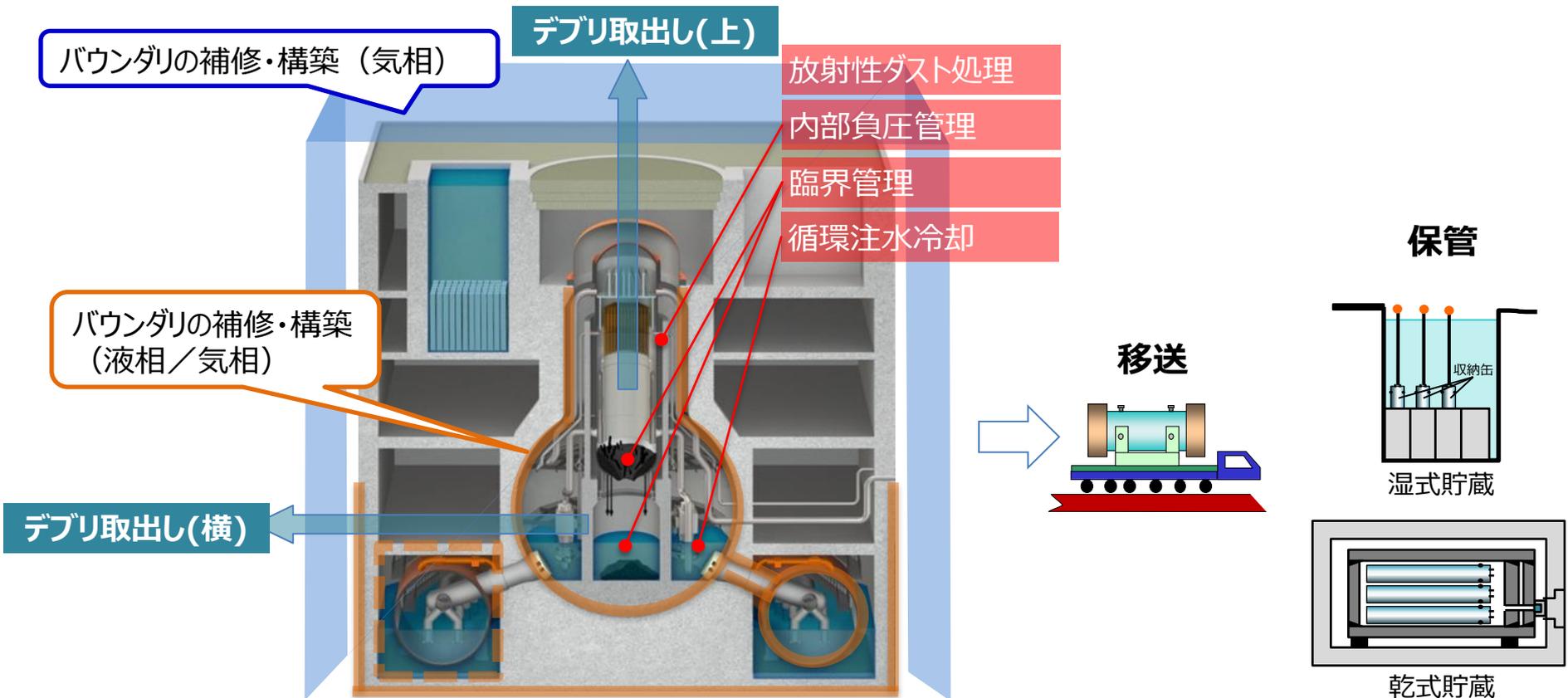
燃料デブリの取出し-何を準備しなければならないのか②

1. 原子力安全の確保 (深層防護の実装)

- 放射性物質の拡散抑制
- 再臨界の防止・影響の抑制
- 火災その他事故
- 外部事象へのロバストネス, 影響の抑制, 他

2. 燃料デブリ取出し作業

- デブリへのアクセス
- 切削・回収
- 移送・保管
- 遠隔作業・線量低減



燃料デブリ取出し方針

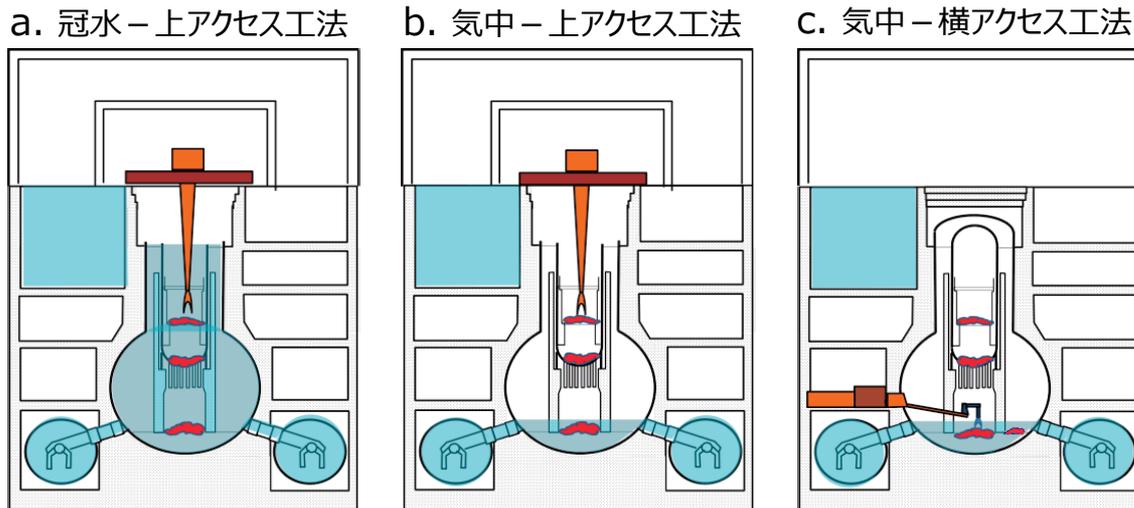
- 「福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」¹⁾は、燃料デブリ取出し方針を以下とした。

④ 気中工法に重点を置いた取組

- ・現時点で冠水工法は技術的難易度が高い
- ・原子炉格納容器上部止水作業に想定される作業線量が高い

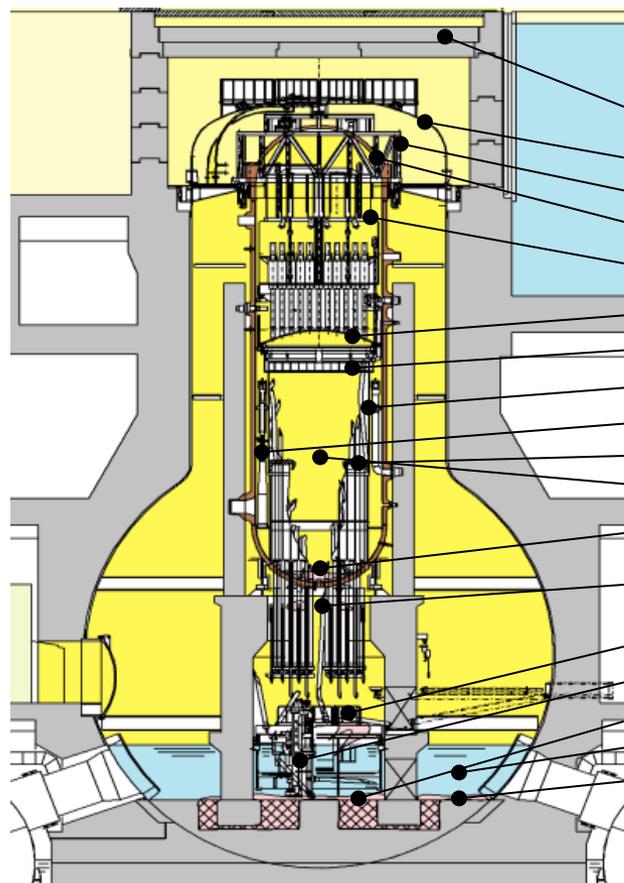
⑤ 原子炉格納容器底部に横からアクセス

- ・取出しに伴うリスクの増加を最小限に留める
- ・迅速に燃料デブリのリスクを低減する



燃料デブリ取り出し作業の排出物想定（格納容器内）

- 燃料デブリへアクセスして燃料デブリを取り出す
- アクセス（搬出）経路に介在する構造物の解体撤去
- アクセス方法の検討：格納容器内調査は進展中，将来の圧力容器内調査

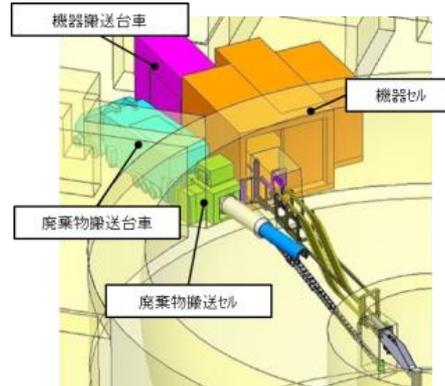
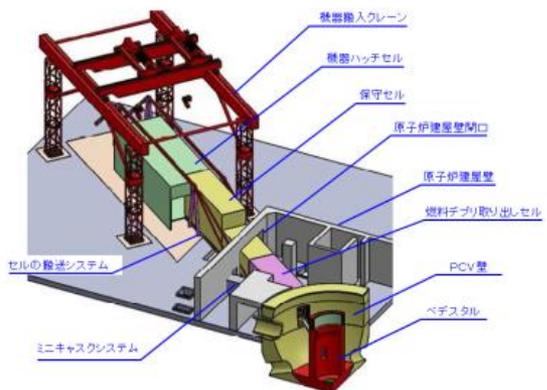


排出物の想定・分類例

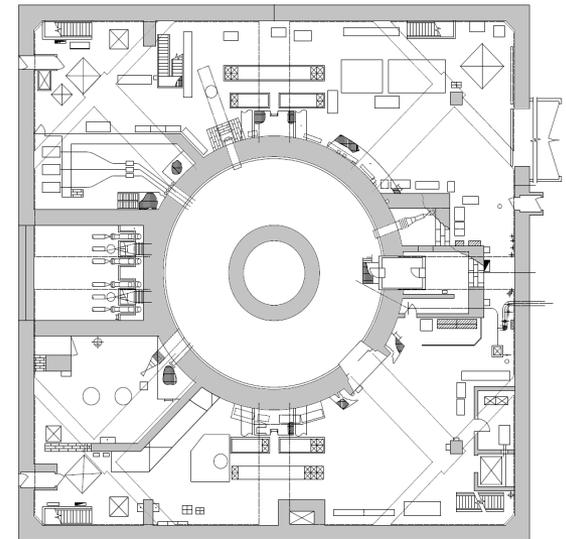
No.	排出物	分類
1	シールドプラグ	廃棄物
2	PCVヘッド	廃棄物
3	RPV保温材	廃棄物
4	RPVヘッド	廃棄物
5	蒸気乾燥器	廃棄物
6	シュラウドヘッド	廃棄物
7	上部格子板 *1	燃料デブリ
8	シュラウド *1	燃料デブリ
9	ジェットポンプ *1	燃料デブリ
-	炉心支持板 *1	燃料デブリ
10	炉心部燃料デブリ *2	燃料デブリ
11	RPV底部燃料デブリ *2	燃料デブリ
12	RPV下部/CRDハウジングに付着した燃料デブリ *2	燃料デブリ
13	ペDESTAL内部構造物 *1	燃料デブリ
14	CRD交換機 *1	燃料デブリ
15	ペDESTAL内部燃料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

燃料デブリへのアクセス (検討例)

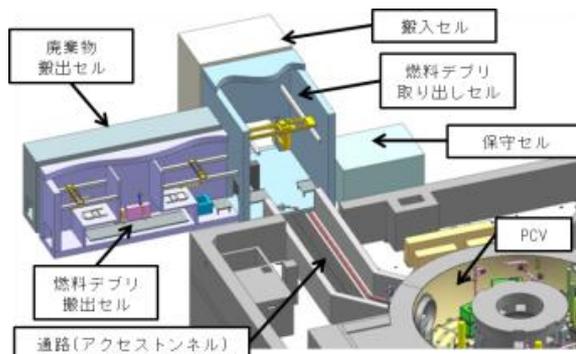
- 燃料デブリへの加工・回収装置の接近
 - 燃料デブリの所在
 - 格納容器への取り付け、漏えい防止
 - 干渉する構造物や障害物の撤去
 - 格納容器内の高線量：遠隔作業必須（メンテ含）
 - 原子炉建屋側は人による短時間作業
- 監視、トラブル防止・緩和システム
- 回収した燃料デブリの搬出経路



既存の貫通部を活用し最短距離でアクセス，搬出経路の分離方法（図左・右）



格納容器（写真上），
原子炉建屋1階平面図例（下図）

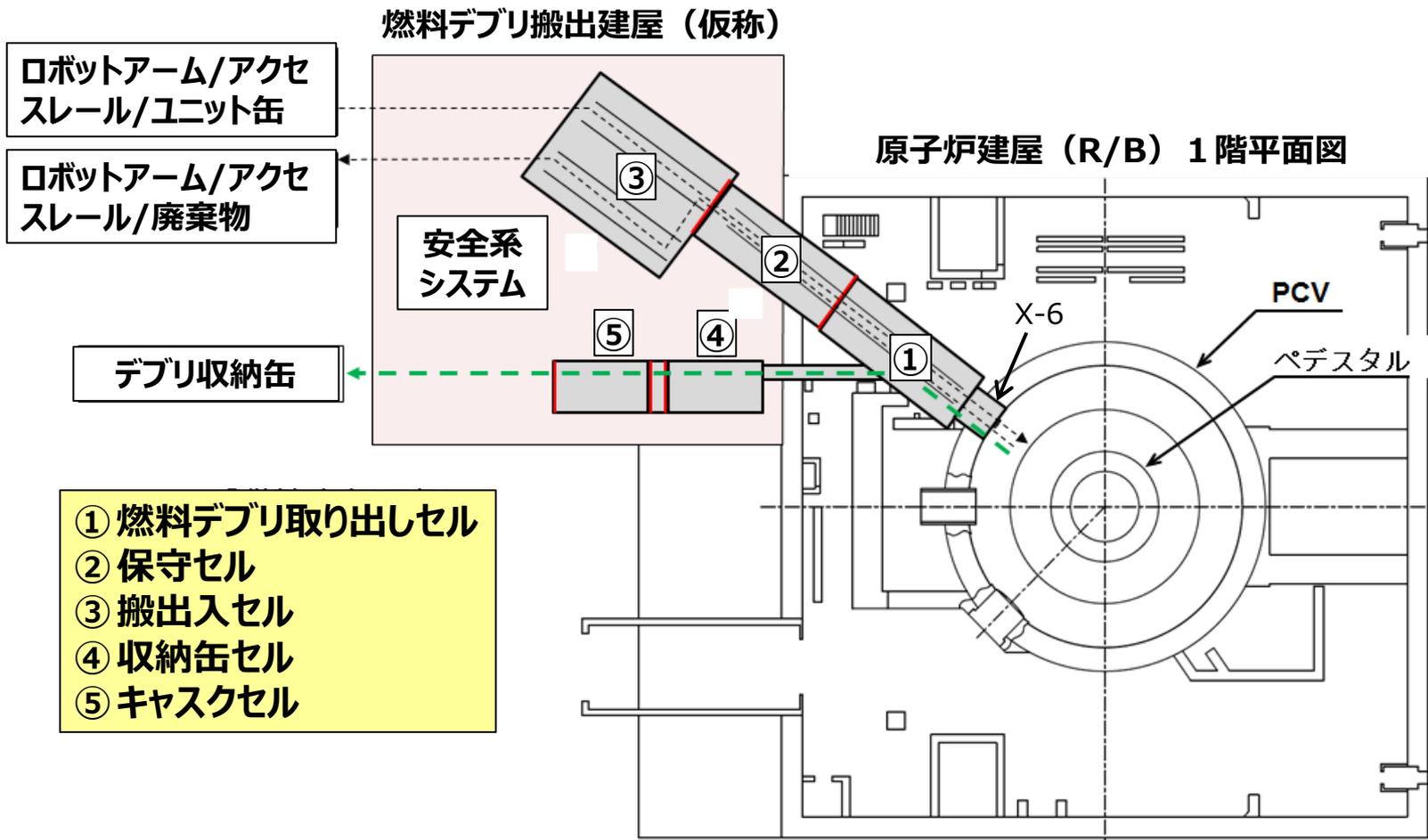


格納容器大規模開口（機器ハッチ：定期検査時使用）からアクセストンネル（通路）を設置。格納容器内に自走作業ロボットを広範囲に展開。

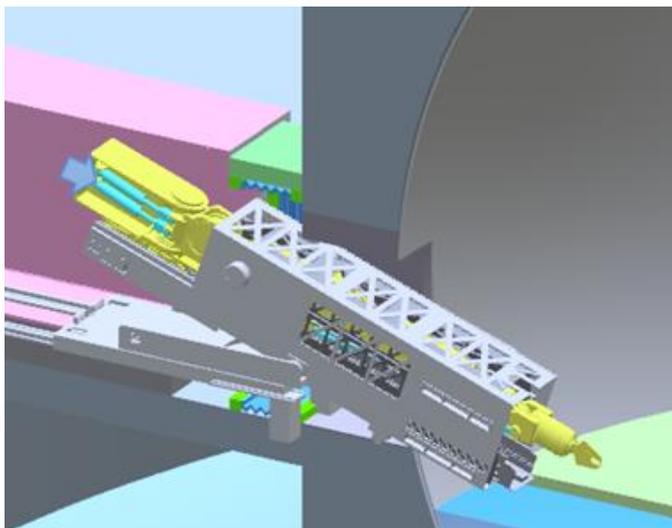
アクセスレール方式～レイアウト～

レイアウト

- 気密/遮へい機能を有した複数のセルを連結し、R/B1階フロアに設置。
- 燃料デブリ搬出建屋（仮称）をR/B脇に増設。安全系システムも併せて収納。



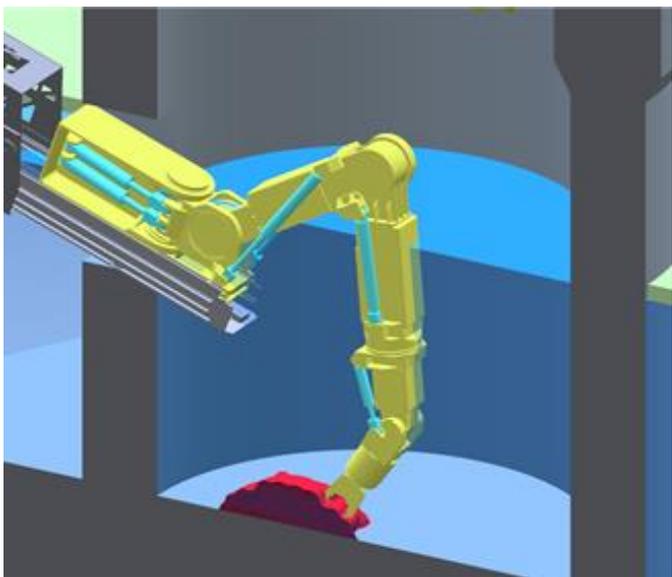
アクセスレールのコンセプト例



■ 操作・監視

- アクセスレールの操作は、操作室からのフル遠隔操作。
- 運転状態は、各制御パラメータとレールに取り付けた監視カメラ（4台）により遠隔監視。

アクセスレール：格納容器外から格納容器・ペDESTAL内へレールを設置。上段がロボットアームの移動経路。排出物は下段レールを外部へ移動。



■ 操作・監視

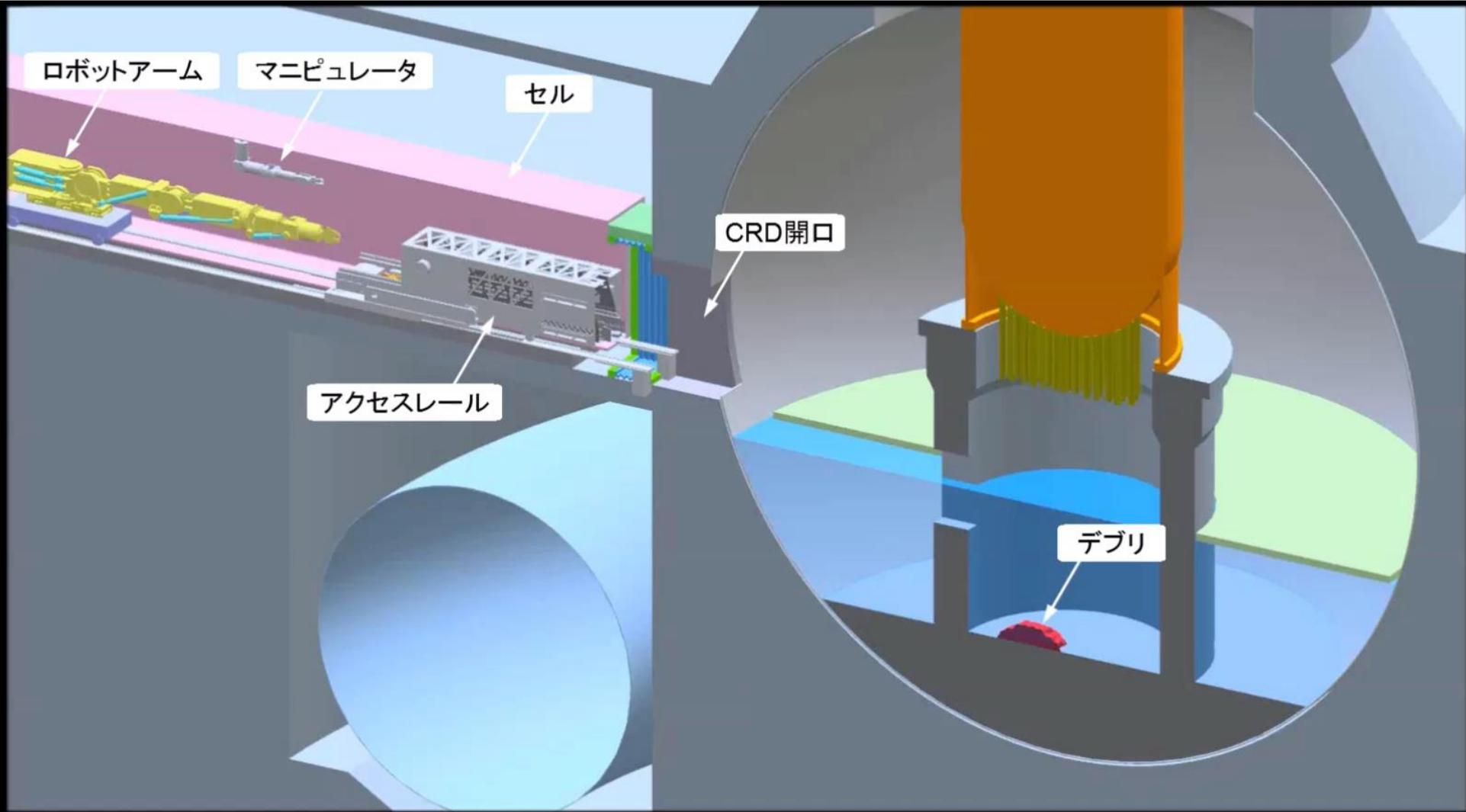
- ロボットアームの操作は、操作室からのフル遠隔操作。
- 運転状態は、各制御パラメータとアームに取り付けた監視カメラ（5台）により遠隔監視。

■ ツール交換

- 先端ツールの交換は、ロボットアームをデブリ取出しセル内に回収し、実施する。

ロボットアーム：ペイロードを考慮し、油圧駆動方式を検討

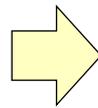
アクセスレール方式 ～イメージ～



アクセストンネル方式～コンセプト～

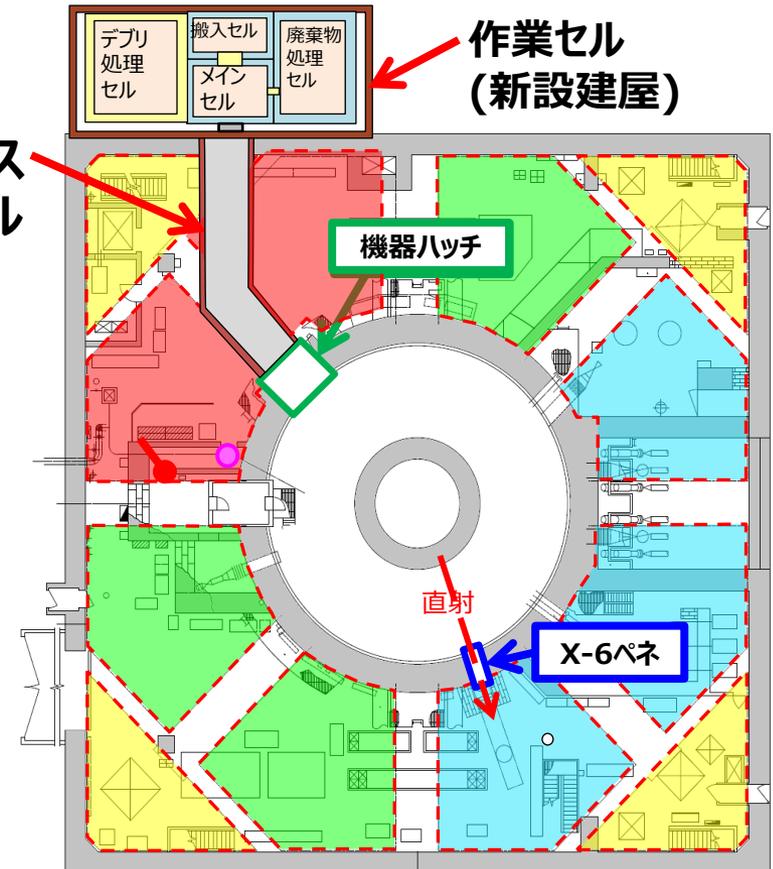
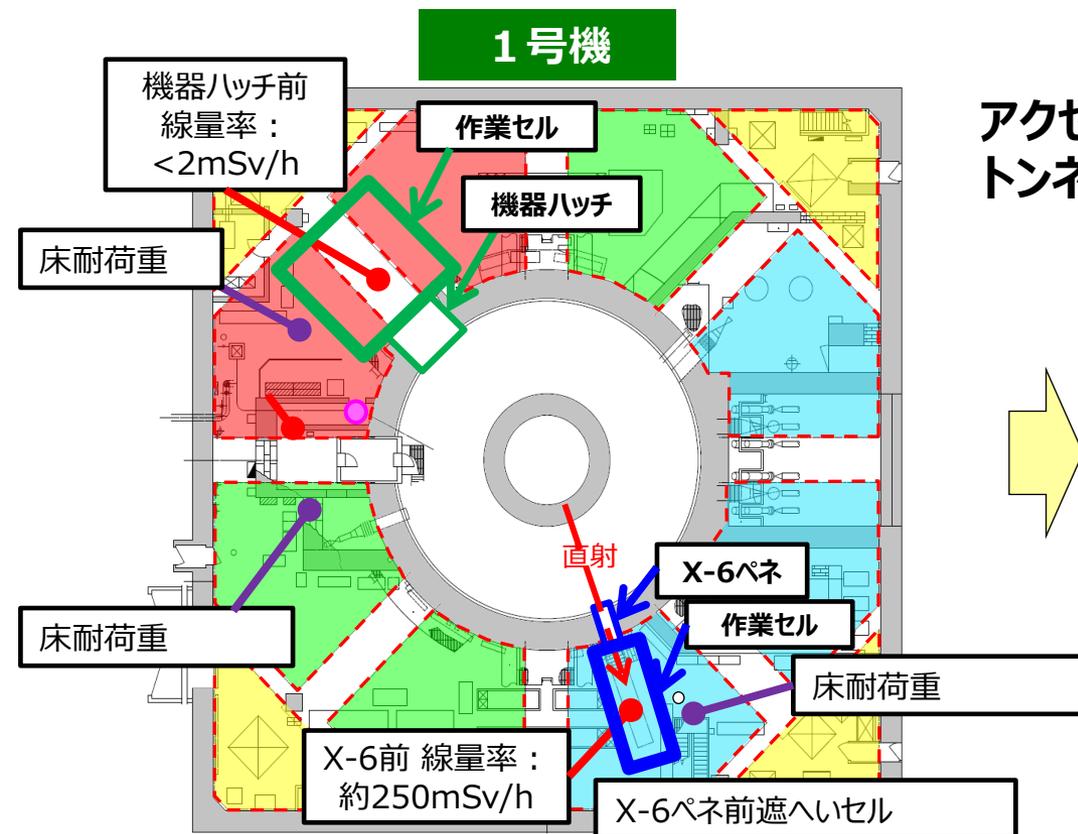
■ 1号機R/B 1階の制約条件

- 周囲線量率：全エリア高い
- 床耐荷重：作業セル（遮へい重量物）設置は厳しい



■ アクセストンネル方式のコンセプト

- ① 作業員の接近は新設建屋までとする
(1階フロアでの作業を最小化)
- ② 1階床への荷重負担を軽減

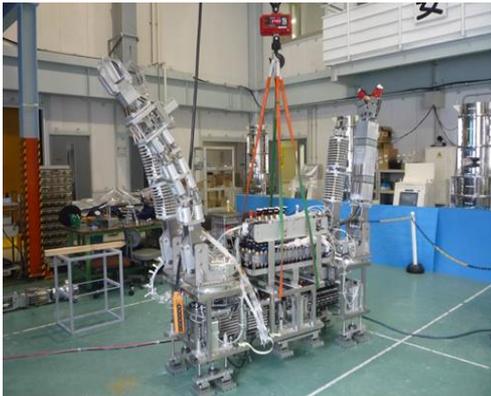


柔構造アーム機能確認試験

- 耐放射性、耐衝撃性に優れる柔構造アーム（愛称：「筋肉ロボット」）の基本的な成立性および開発課題を抽出する。

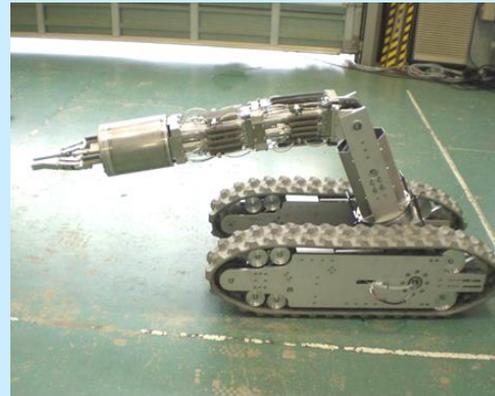
試作機 タイプⅠ

寸法：全長1800mm
幅630mm
高さ1000mm
重量：約690 k g



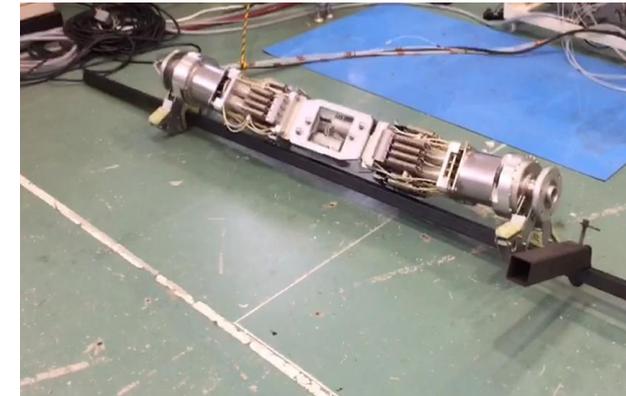
試作機 タイプⅡ

寸法：全長2750mm
幅590mm
高さ350mm（胴部）
重量：約220 k g



試作機 タイプⅢ

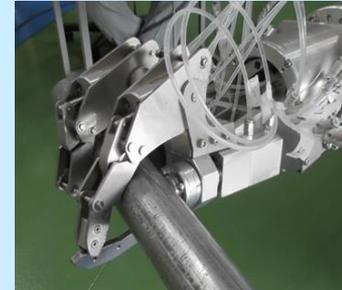
寸法：全長1635mm
幅430mm
高さ185mm（胴部）
重量：約64 k g



階段走行試験



コンクリート破砕試験



把持動作



模擬バルブ開閉

横 接 近 工 法
作 業 ス テ ッ プ

燃料デブリの切削・回収等作業

■ 燃料デブリ切削

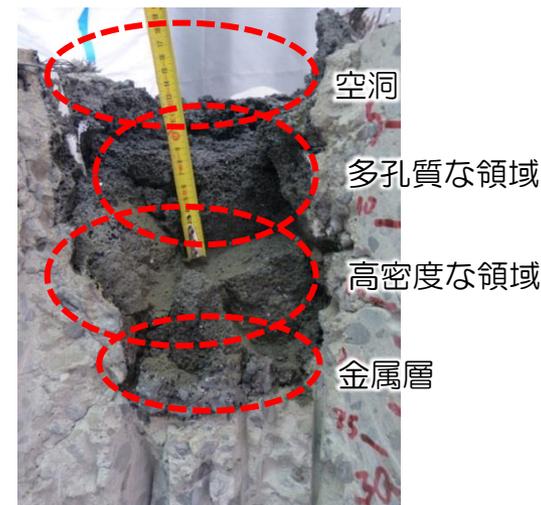
- 硬い燃料デブリの破砕
デブリの特性に応じた破砕・加工方法の選択
- 収納容器（例:Φ220~400mm）
格納サイズへの加工

■ 回収

- 加工・破砕の結果：粒径
- 把持、拾上げ、吸引、吸着
- 粉末、微粒子は水とともに吸引し、分離・回収

■ 遠隔施工

- 高線量化のため、作業・監視、レスキューのすべてが遠隔作業であること
- スループット
- **耐放射線性：装置寿命・交換頻度**



MCCI¹⁾ 試験
コンクリートと反応した溶融燃料



チゼル加工予備試験状況

1) Molten Core Concrete Interaction, 溶融炉心コンクリート相互作用

燃料デブリの切削・回収等作業

- 原子炉系領域ごとに燃料デブリの組成・特性を推定
 - 今後、調査やサンプリングにより明らかにしてゆく
- 切削能力、速度、破砕特性、飛散、所要ペイロード、遠隔作業性等検討

	様々な燃料デブリに対応	加工速度	アクセス性 (ヘッド小型)	入熱	ヒューム発生 (気中拡散)	切りくず発生量 (水中拡散)	ユーティリティ 小型化	供給可否	総合評価 / 要素試験
コアボーリング	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
ディスクソー	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
ワイヤーソー	△	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
バンドソー	△	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
超音波コアドリル	△	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
油圧カッター	△	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
チゼル	△	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
AWJ	△	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
レーザーガウジング	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
プラズマアーク	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
プラズマジェット	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
ガス	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
接触式アーク	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
アークソー	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
溶接式WJ	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み
レーザー掘削	○	△	○	○	○	△	○	○	○ 済み

	燃料デブリ 種類	主な燃料デブリ	特徴	質量(t) / MAAp	燃料デブリ物性
炉心部	切株燃料 (未溶融破損燃料)	すべて脱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ZrO ₂ が存在し、硬く脆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	压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
ベ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、分散急冷固化した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、脆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
ベDESTAL外	MCCI/粉状、小石状	ベDESTAL内部位ほど明確な層分離はなく、クラストにおよび塊状MCCIが存在	ベDESTALから流出した小石状燃料デブリが存在	70~133	50μm~20cm
	MCCIクラスト/塊状MCCI		ベDESTALから流出したコリウムがコンクリートと反応・凝集、金属成分やや多い		~0.5m

*1:レーザーガウジングは昨年度

耐放射線性

■格納容器内放射線環境

これまでの格納容器内調査実績では数十Gy/h。
作業のための燃料デブリへの接近や、原子炉圧力容器内では
100Gy/h以上もあり得ると設計上想定する。

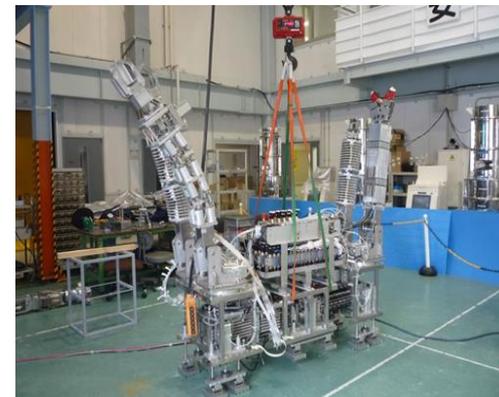
■耐放射線性

- 作業機器や監視機器の寿命を決める要因となり得る
制御系、センサー類、カメラ…
- 様々な材料が使用される中で、半導体の耐放射線性がクリ
ティカルとなる可能性
スループット低下の影響、信頼性への対策
- その他、エラストマー(シール・被覆材)など

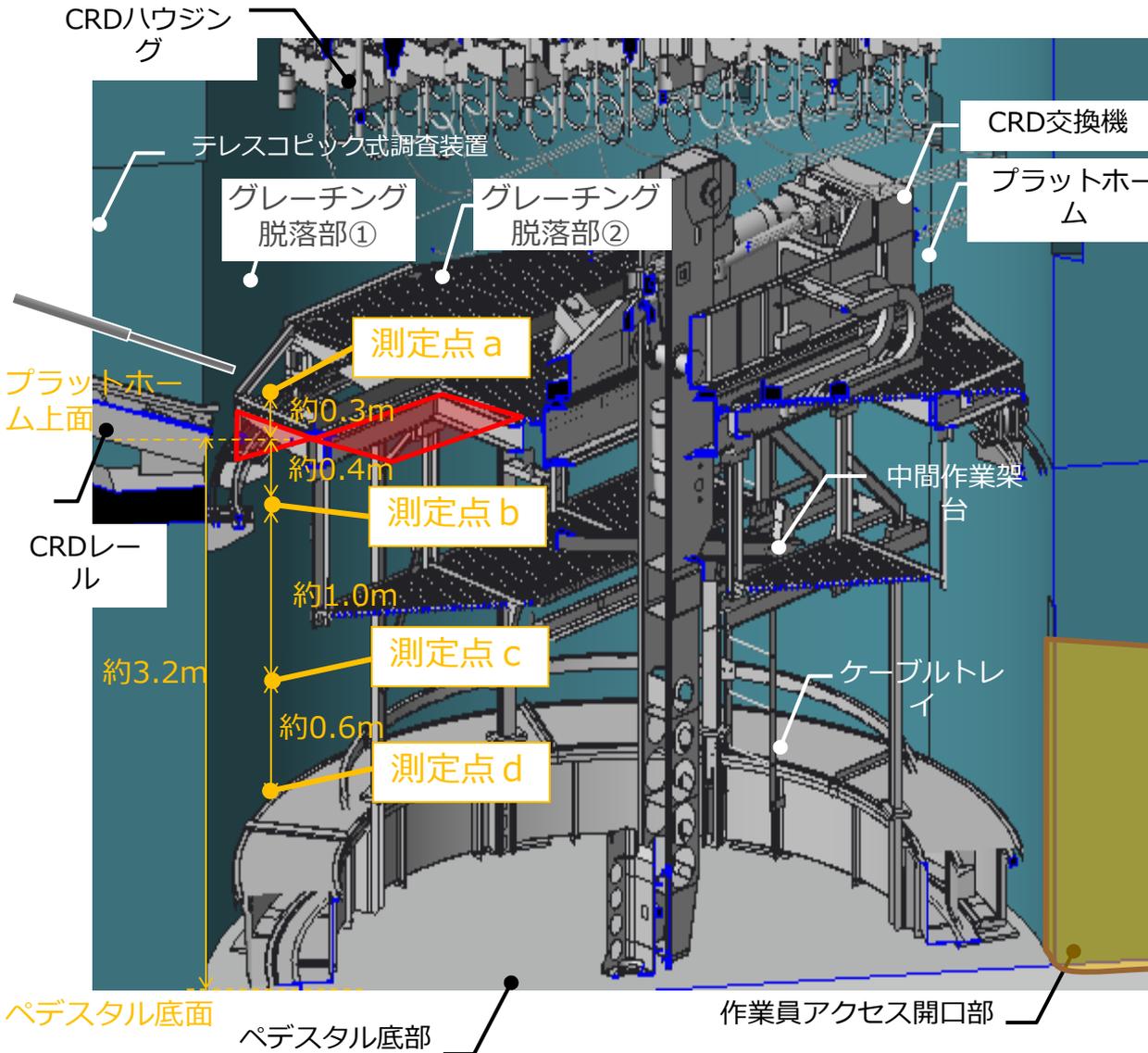
■対応

- 耐放射線性の高い機器・部品（照射試験）
- 部品交換を前提とした設計、交換頻度
- 極力、半導体機器は格納容器外（制御）

格納容器内作業ロボットの例、
空気圧駆動の柔構造アーム



2. 1月19日調査結果 (3/3)



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]

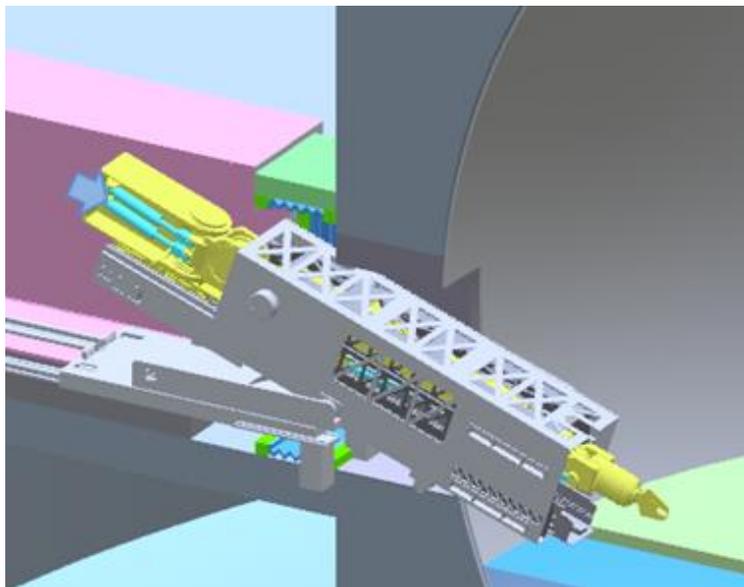
※1：Cs-137線源で校正

※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

アクセスレールのコンセプト



- サイズ: 7900mm×1980mm×2018mm
(収縮させた状態の寸法)
- 重量: 19 ton

※ 1 : PCV内放射線量 : 100Sv/hを想定
→想定寿命1,000h

※ 2 : PCV内放射線量 : 100Sv/hを想定
→想定寿命20,000h

■ 操作・監視

- アクセスレールの操作は、操作室からのフル遠隔操作。
- 運転状態は、各制御パラメータとレールに取り付けた監視カメラ（4台）により遠隔監視。

■ 耐放性

- 監視カメラ（CMOS、100kGy）は、**1回/月**の頻度で交換予定※1。
- アクセスレール（目標2MGy）は、**1回/2年**交換予定※2。

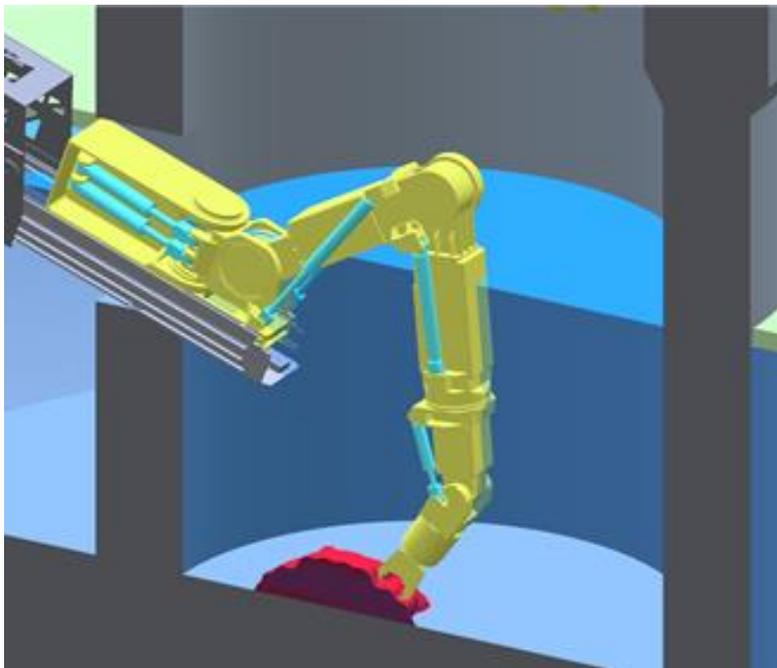
■ 保守

- 監視カメラ：燃料デブリ取り出しセル内で交換。
- アクセスレール：コンテナに収容し、入れ替え方式で交換。

■ 故障時の対応

- 傾斜軸を二重化し、片系故障時も、アクセスレールの傾斜復元及び回収を可能とする。
- 伸縮軸のモータの故障を想定し、セル内にウィンチによるアクセスレールの巻上回収機構を装備

ロボットアームのコンセプト



- サイズ: 8680mm×700mm×910mm
(腕を伸ばした状態の寸法、輸送台車は含まず)

- 重量: 4.0ton

※ 1 : ペDESTAL内放射線量 : 500Sv/hを想定
→想定寿命200h

※ 2 : ペDESTAL内放射線量 : 500Sv/hを想定
→想定寿命4,000h

■ 操作・監視

- ロボットアームの操作は、操作室からのフル遠隔操作。
- 運転状態は、各制御パラメータとアームに取り付けた監視カメラ（5台）により遠隔監視。

■ 耐放性

- 監視カメラ（CMOS、100kGy）は、**1回/週**の頻度で交換予定※1。
- ロボットアーム（目標2MGy）は、**2回/年**交換予定※2。

■ 保守

- 監視カメラ：ロボットアームを回収し、保守セル内で交換。
- ロボットアーム：コンテナに収容し、入れ替え方式で交換。

■ ツール交換

- 先端ツールの交換は、ロボットアームをデブリ取出しセル内に回収し、実施する。

■ 故障時の対応

- 各稼働軸の油圧駆動システムを多重化し、片システムが故障した場合でも、ロボットアームが搬出姿勢へ姿勢変更できるように対応。

燃料デブリの移送・保管

- 取り出した燃料デブリを管理下に置き、安定保管する。

安全設計 収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能例

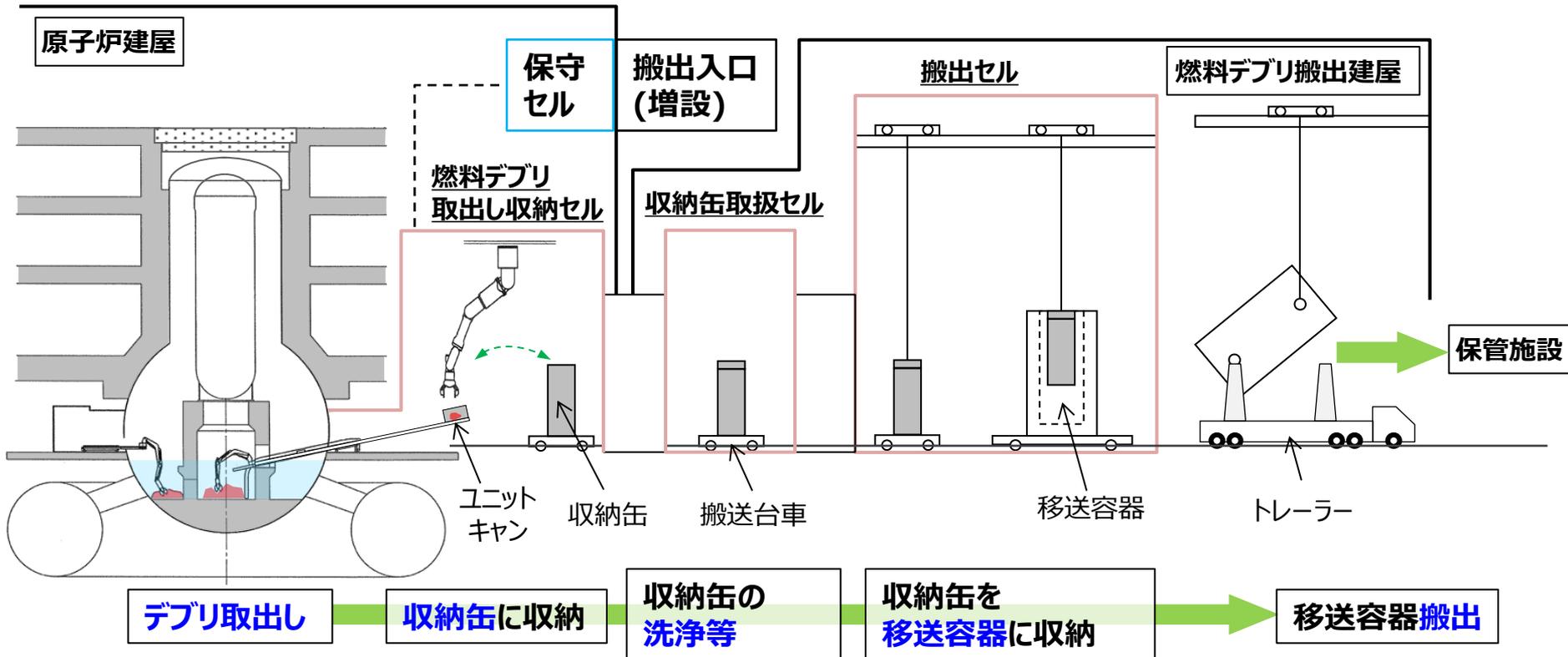
安全機能		必要となる安全機能
未臨界		未臨界の維持[乾燥、収納形状]
冷やす	除熱	安全阻害要因が生じない燃料デブリの上限温度以下で取扱い [崩壊熱は時間経過によりけた違いに落ちている]
閉じ込める	遮蔽	放射線による作業員や公衆の被ばく防止[遠隔及び遮蔽構造保管]
	閉じ込め	放射性物質の放出による作業員や公衆の被ばくの防止[収納方式]
止める、冷やす、閉じ込める、の安全機能を維持するために必要な機能	構造	取扱い等を考慮し、必要な安全機能を維持するための適切な構造強度[収納管]
	水素	燃料デブリからの放射線により水の放射線分解で発生する水素の爆発防止（構造強度維持の前提）[水切り、収納管、触媒、ベント]
	経年劣化	保管中の腐食に対する構造強度他の維持（構造強度維持の前提）[材料選択・保管環境により対応]
	火災防止	ジルカロイ等の粉体金属による火災防止（構造強度維持の前提） [実際的なリスクは考えにくい]

収納・移送・保管技術

収納缶の設計 ⇒ TMI-2等での処置経験を基本的に参照。1F固有の課題にも対処。

- 燃焼度と濃縮度が高い→反応度の違い
- 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

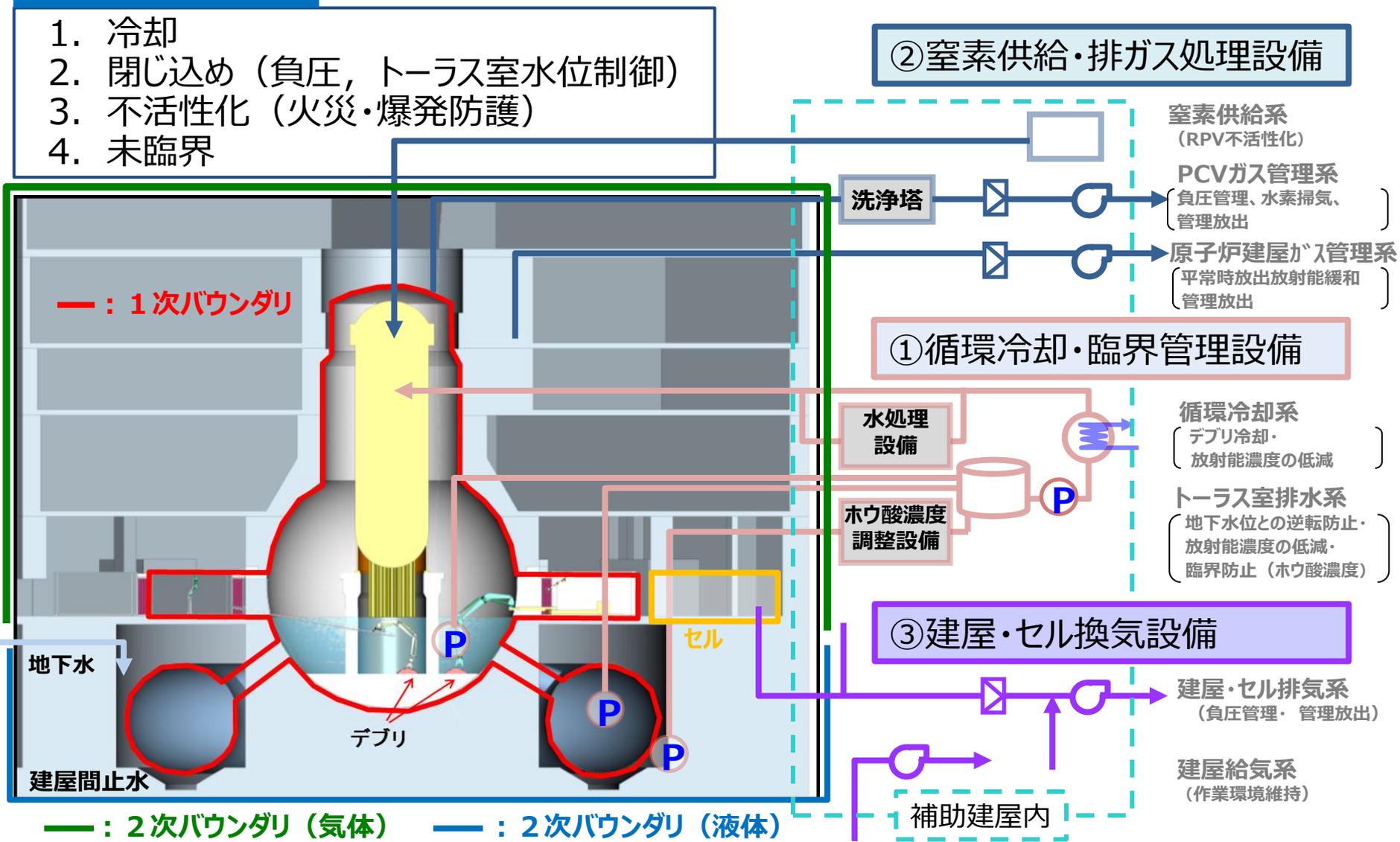
移送方法（気中-横アクセス工法の場合：例）



安全系システム 安全をより確実にする

必要な安全機能

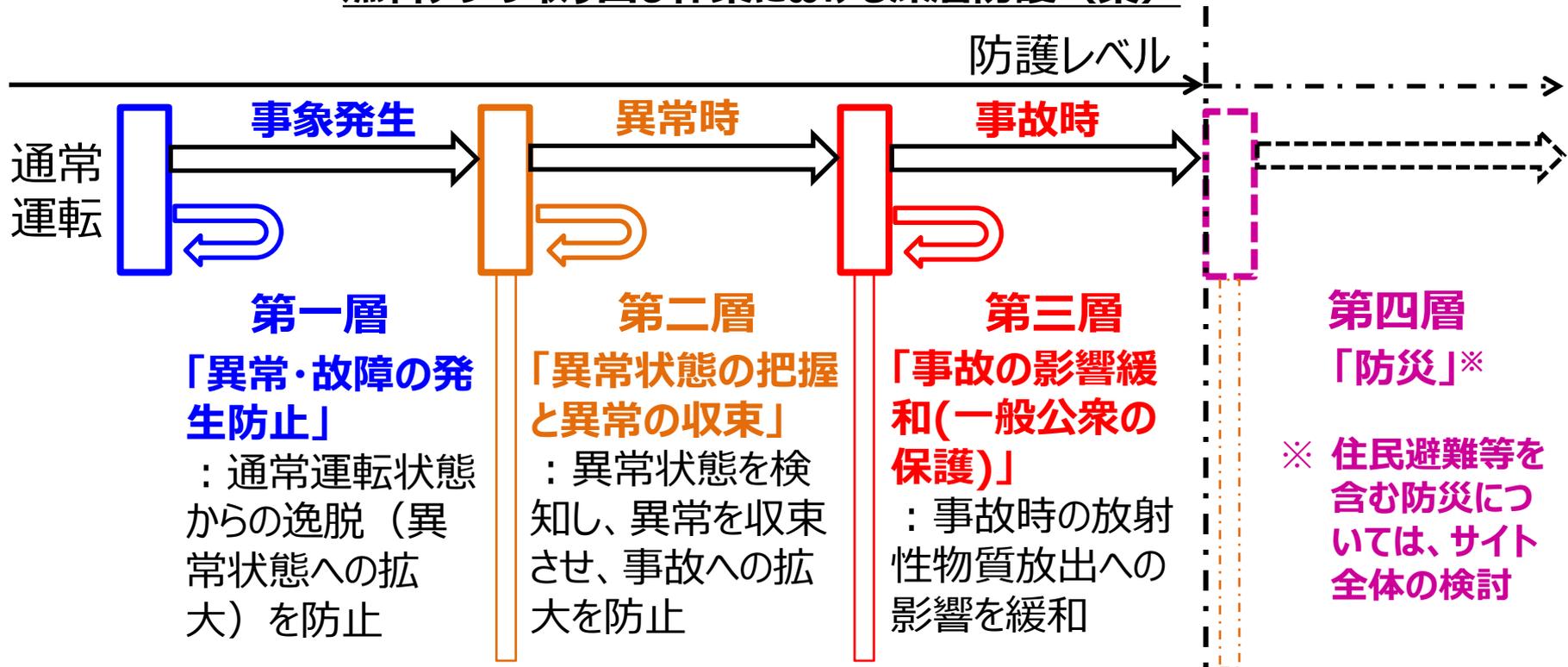
1. 冷却
2. 閉じ込め（負圧，トーラス室水位制御）
3. 不活性化（火災・爆発防護）
4. 未臨界



安全をより確実にする 深層防護(検討例)

- 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）



End of presentation