

## 福島第一の廃炉に向けた研究開発の現状と課題 燃料デブリ取出しの技術開発

2018年1月10日

平成29年度 東京工業大学 廃止措置技術・人材育成フォーラム  
東京工業大学 大岡山キャンパス

技術研究組合 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

# ご紹介の内容

---

1. はじめに
2. 調査 溶融燃料デブリの所在
3. 気中－横アクセス工法の概念設計状況
4. デブリ取り出しにおける安全設計の検討

## 【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(1PJ)

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

## 2. 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

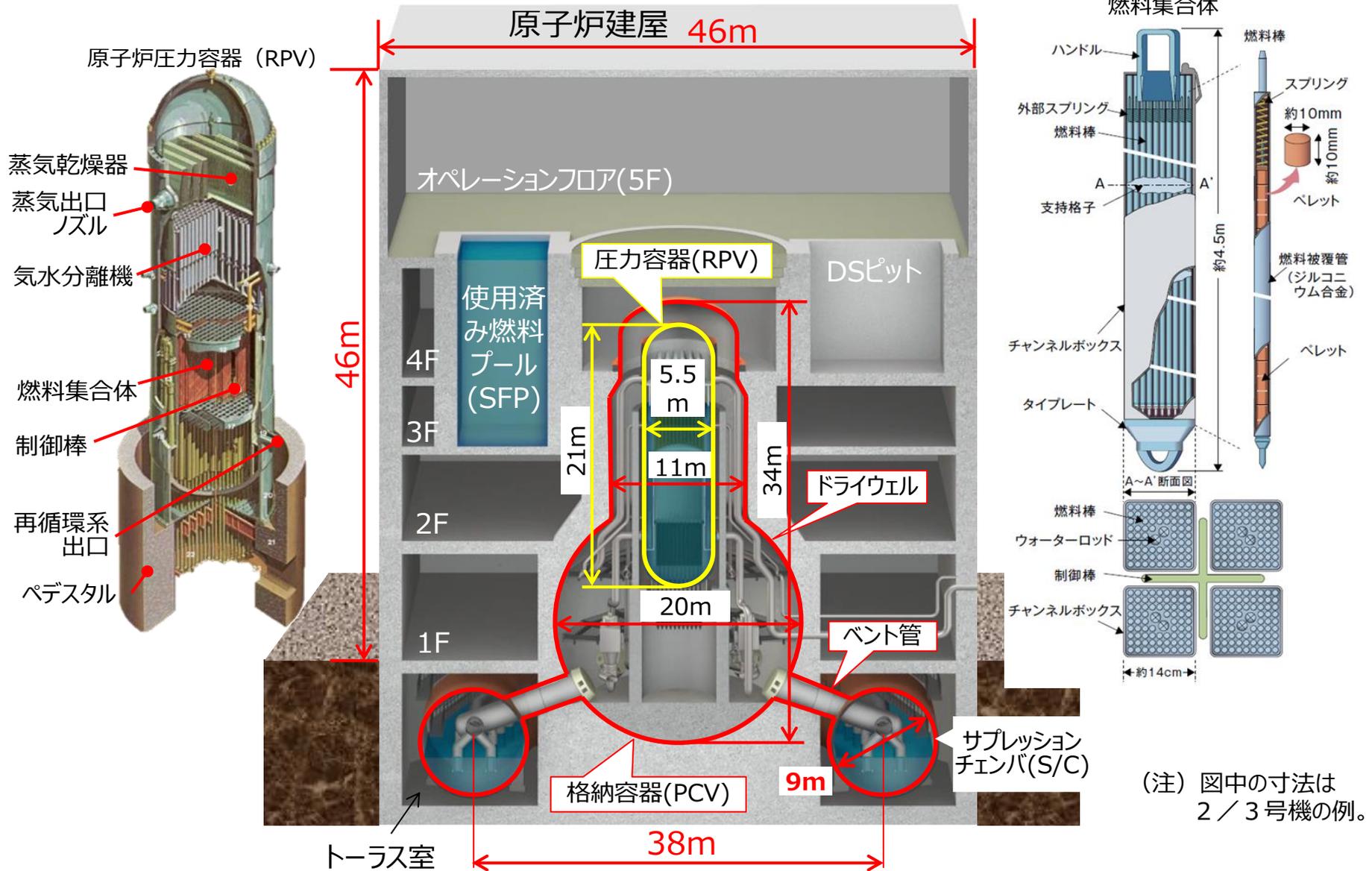
総合的な  
**炉内状況  
把握**  
の高度化

2016.7終了

## 3. 廃棄物に係る研究開発(1PJ)

固体廃棄物の  
**処理・処分**  
技術

# 原子力発電所の構造



# 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

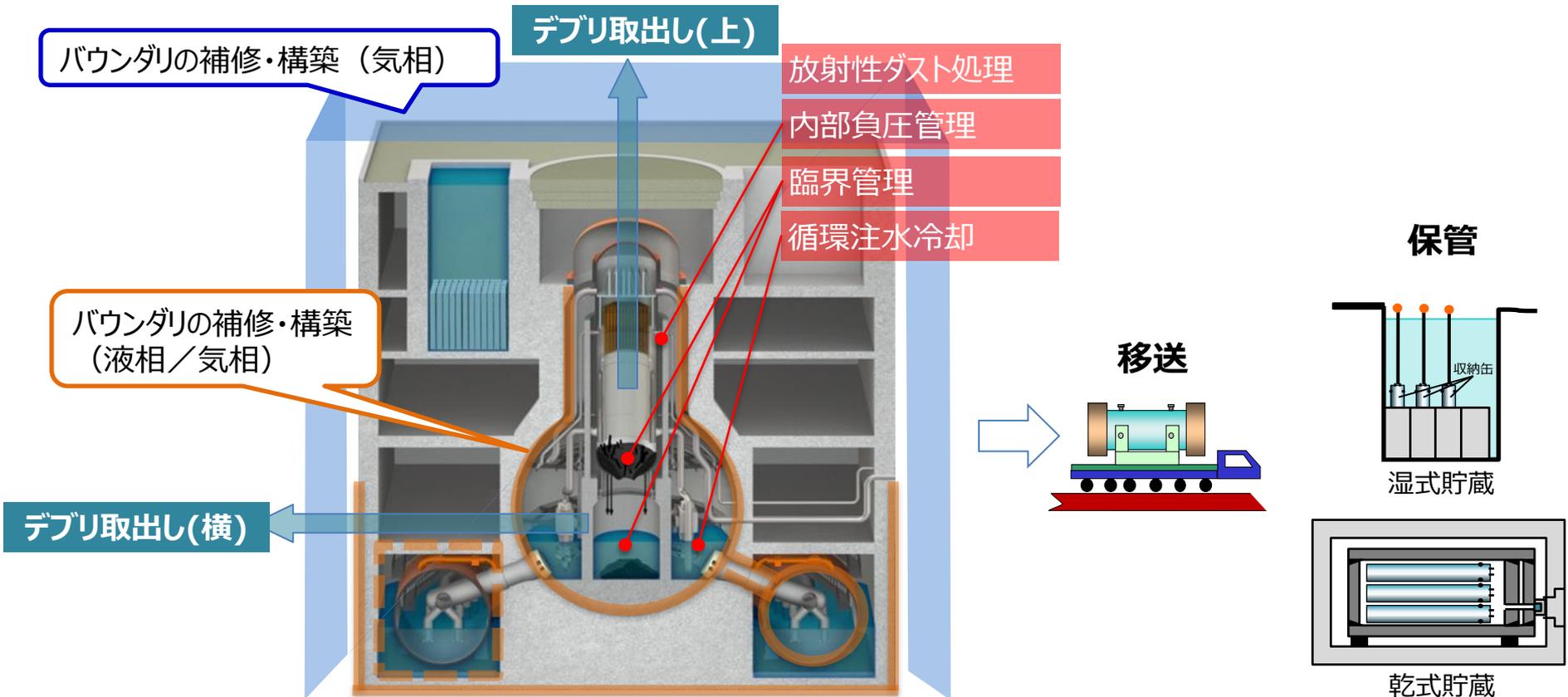
# 燃料デブリの取出し-何を準備しなければならないのか

## 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



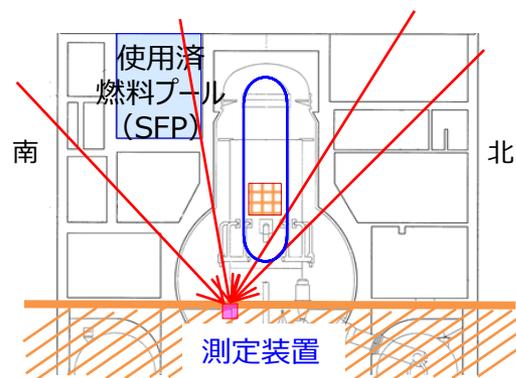
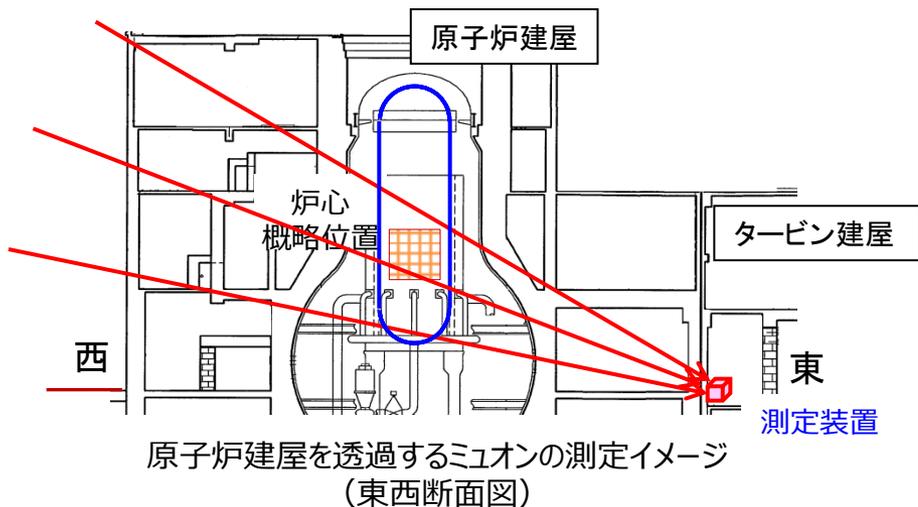
# ご紹介の内容

---

1. はじめに
2. **調査 熔融燃料デブリの所在**
3. 気中－横アクセス工法の概念設計状況
4. デブリ取り出しにおける安全設計の検討

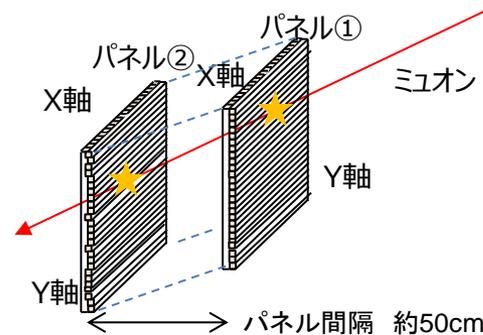
# ミュオン透過法による測定

- 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)>

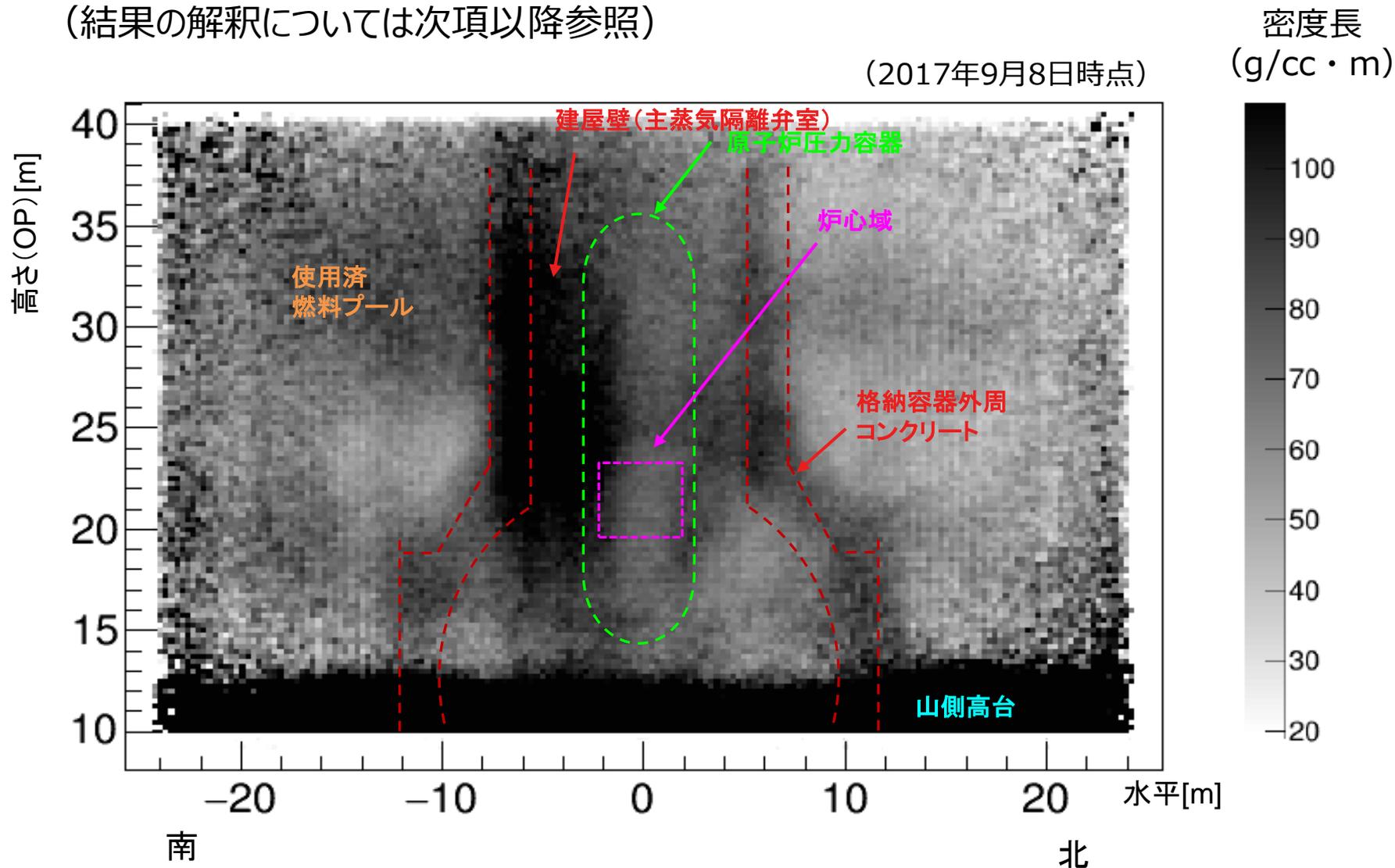
上空から飛来するミュオンを装置内部に配置した2枚のパネル検出器 (プラスチックシンチレータ) で検知し、通過したパネルの座標からミュオンの軌跡を算出。



# 3号機ミュオン透過法測定結果

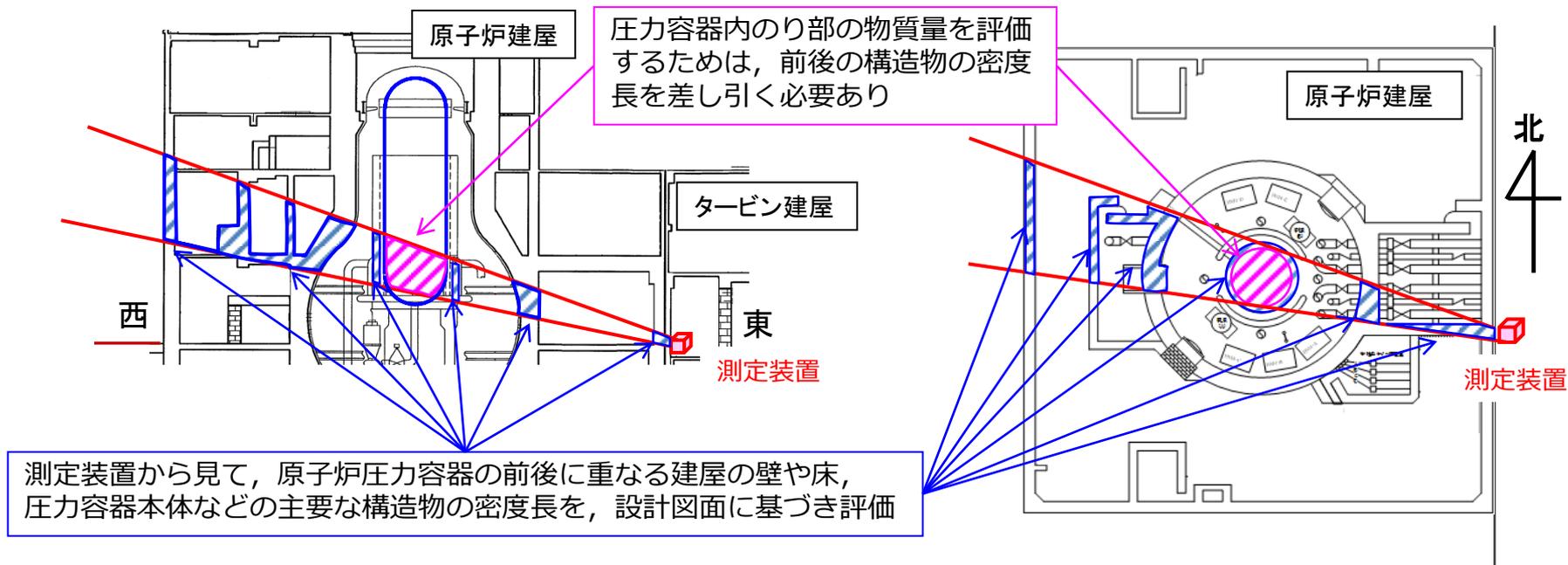
- ミュオン透過法測定により3号機の物質質量分布を評価した結果は以下の通り。  
(結果の解釈については次項以降参照)

(2017年9月8日時点)



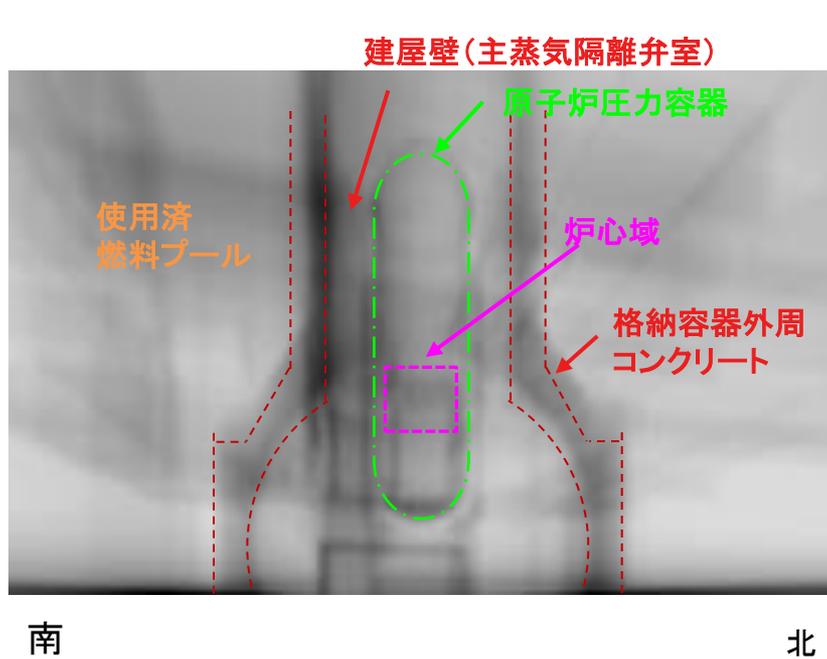
# 原子炉圧力容器内部の物質量の評価手法

- 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。

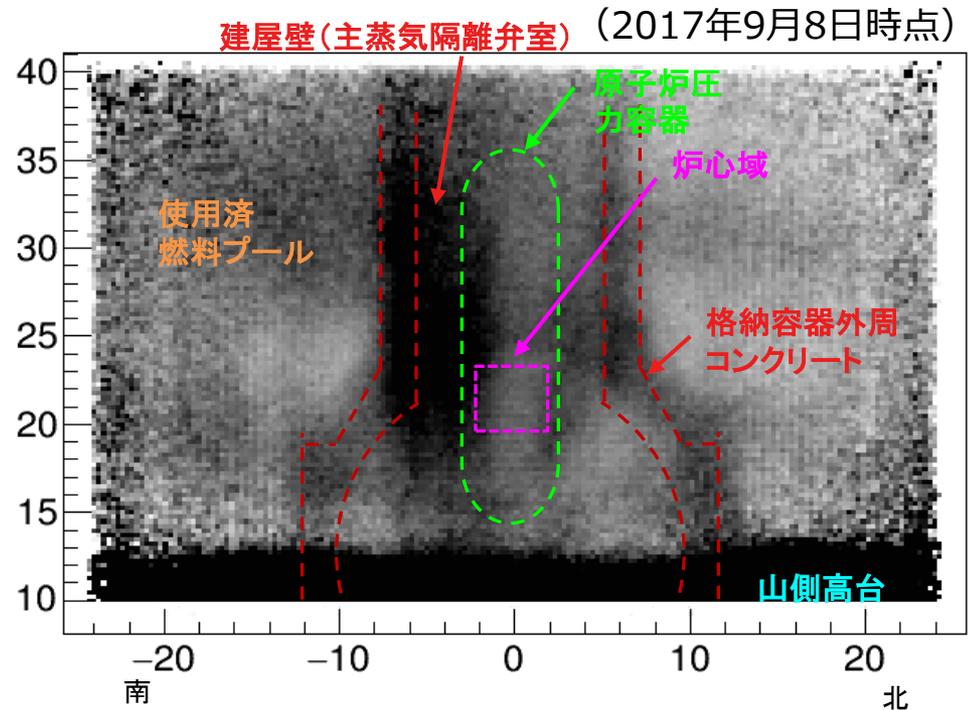


# 原子炉建屋の主な構造物 (シミュレーションとの比較)

- 昨年実施した1F-3調査では、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。



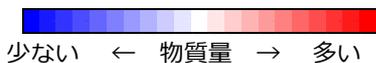
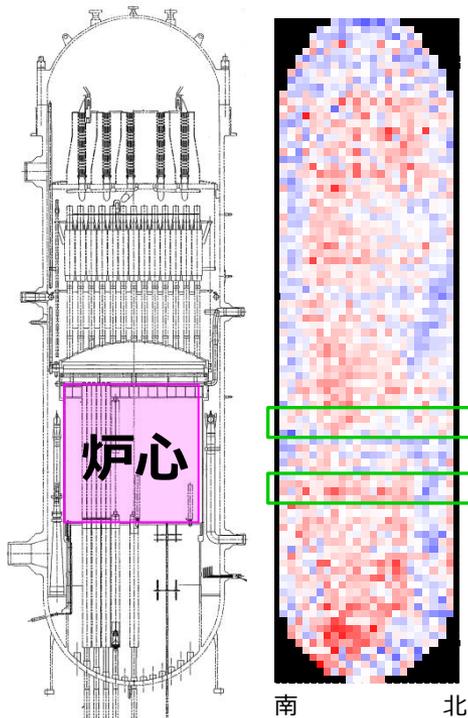
シミュレーションによる物質分布(密度長)の評価  
(炉心域、および炉底部に燃料デブリありのケース)



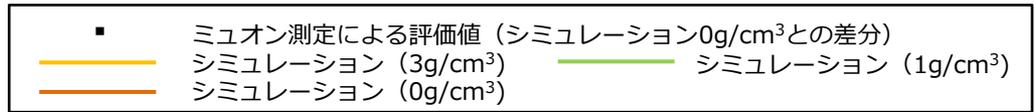
ミュオン測定による物質分布(密度長)の評価

# 原子炉压力容器内の物質質量分布 (①炉心域)

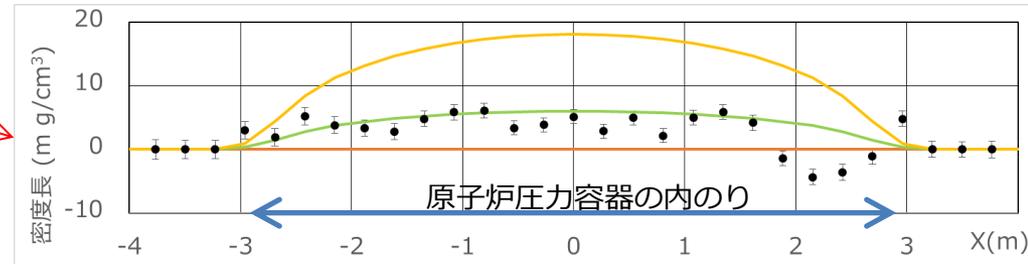
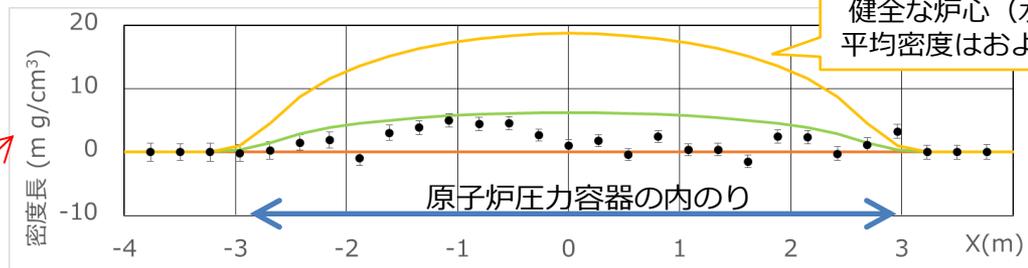
- 測定結果から原子炉建屋の壁や床, 压力容器などの構造物の物質質量を、シミュレーションに基づき除去
- 压力容器内のりが、一様な密度をもつ仮想的な物質で満たされている場合のシミュレーション結果と比較し、燃料の有無を推定



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)

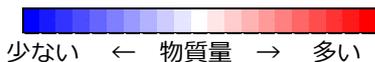
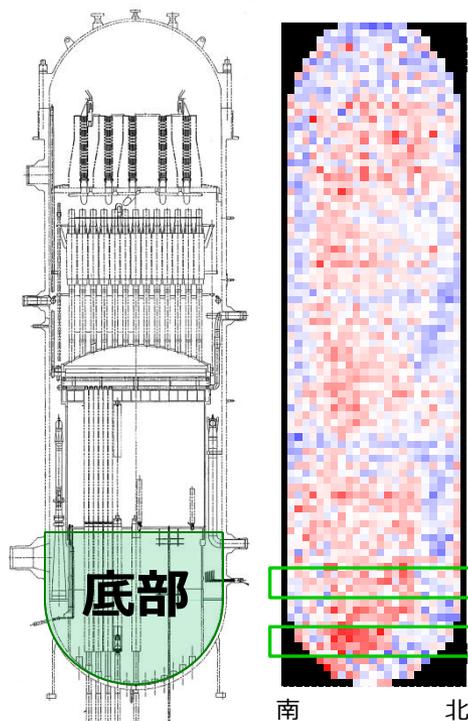


(エラーバーは偶然誤差のみを記載)

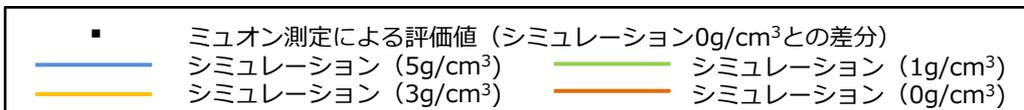


- 炉心域の物質質量は、概ね平均密度1g/cm<sup>3</sup>以下で分布しており、物質質量が大きく減少。

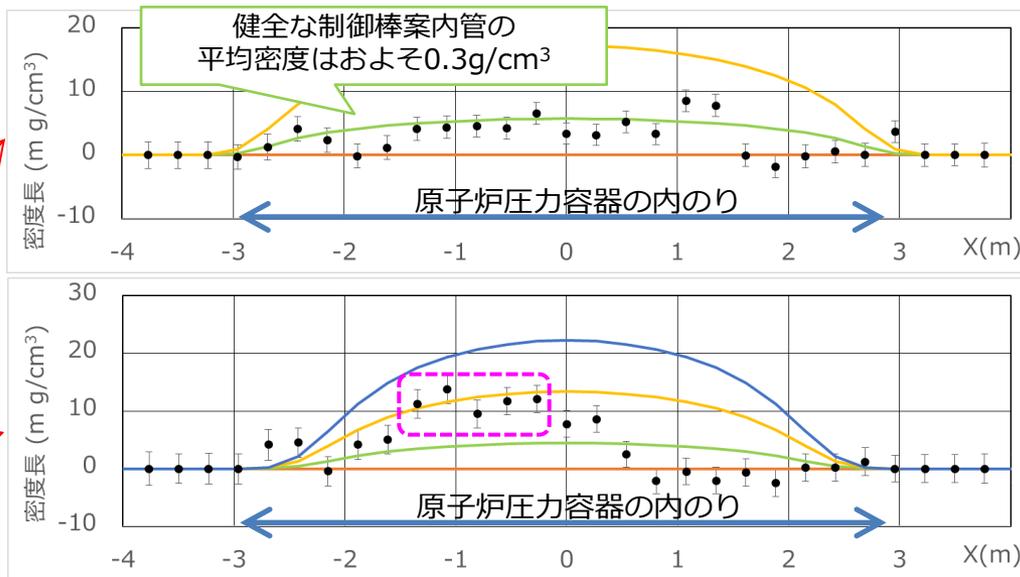
# 原子炉压力容器内の物質分布 (②原子炉压力容器底部)



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が存在することを確認。

# PCV内部のロボットによる調査

## ペDESTAL外側の調査 (1号機)

### ○形状変化型ロボット (B2調査)



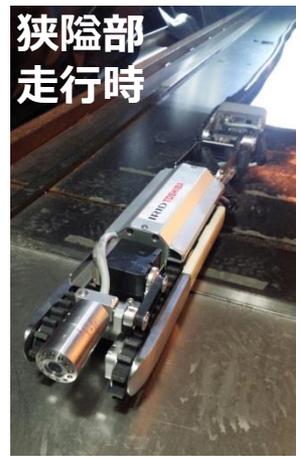
変形



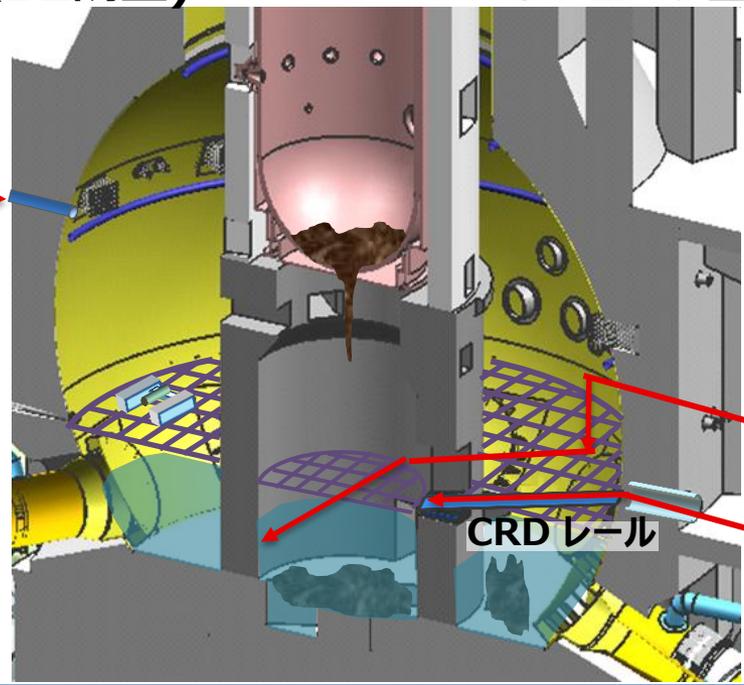
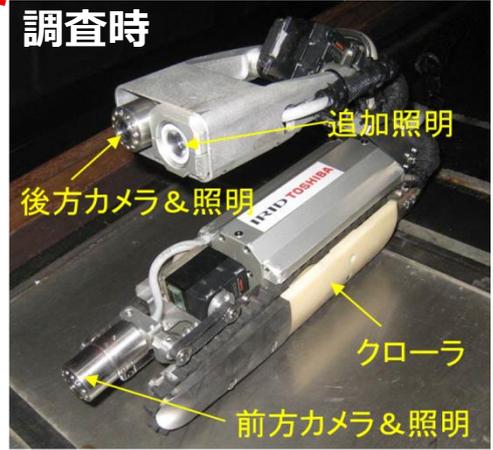
(注) 上の写真はB1調査時のロボットです。

## ペDESTAL内側の調査 (2号機)

### ○クローラ型遠隔調査ロボット (A2調査)



変形



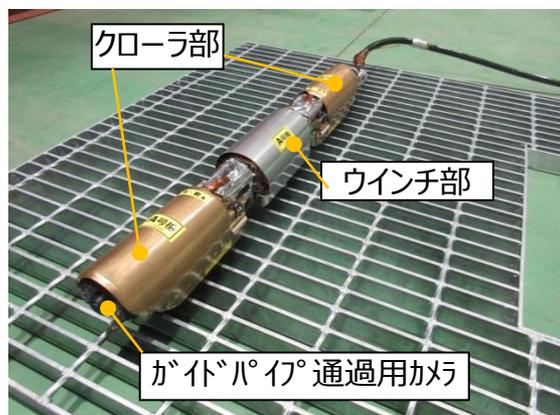
## ペDESTAL内側の調査 (3号機)



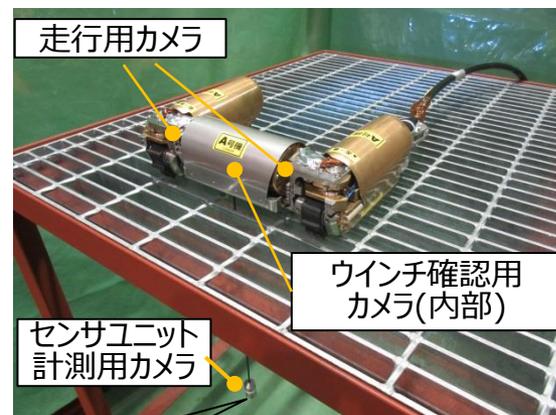
### ○水中遊泳型ロボット

# 1号機 B2 調査ロボット「PMORPH (ピーモルフ)」

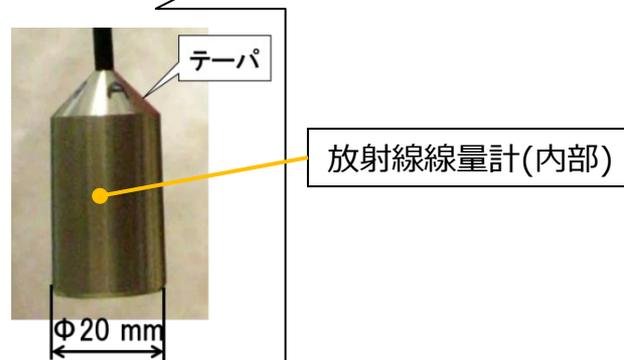
本体寸法	ガイドパイプ走行時：長さ699mm×幅72mm×高さ93mm グレーチング走行時：長さ316mm×幅286mm×高さ93mm
センサユニット寸法	幅20mm×高さ40mm      ケーブル：長さ3.5m
重量	約10kg
スペック	カメラ×5、放射線線量計×1
耐放射線性	約1000Sv以上



I型(ガイドパイプ通過時)

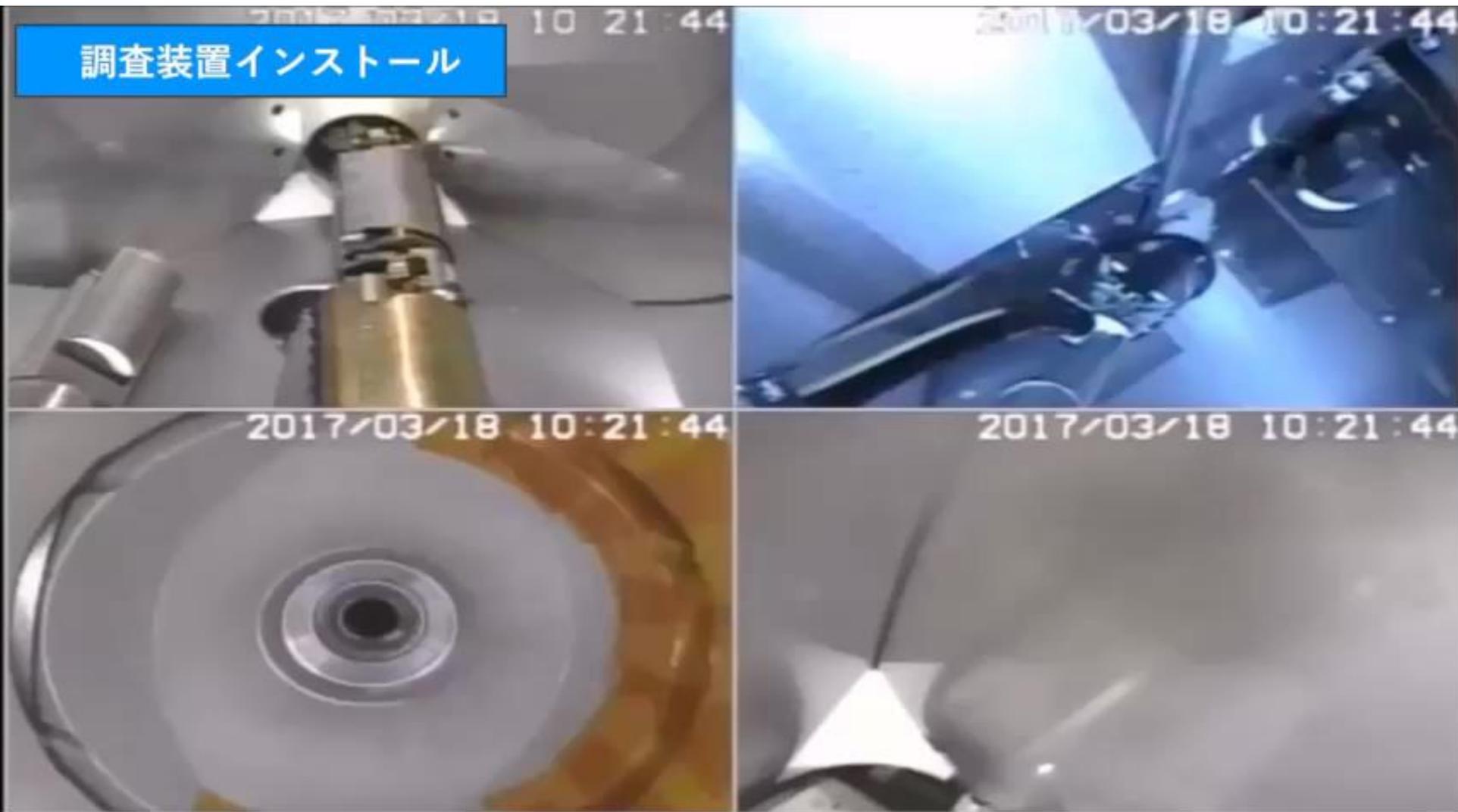


C型(平面走行時)



## B2 調査 1号機 (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

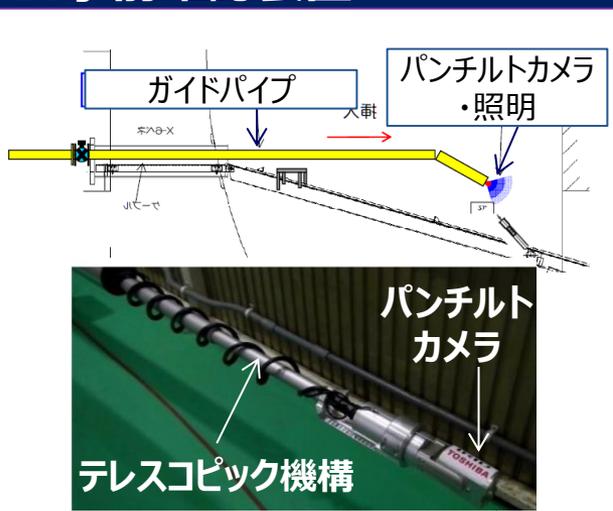
2. レール上堆積物除去

2月9日実施

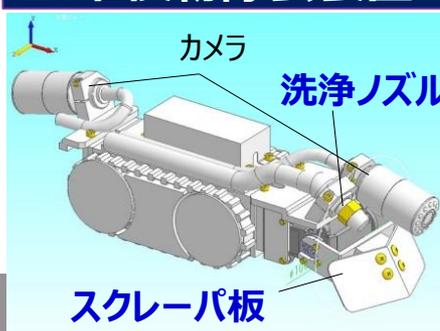
3. A2調査

2月16日実施

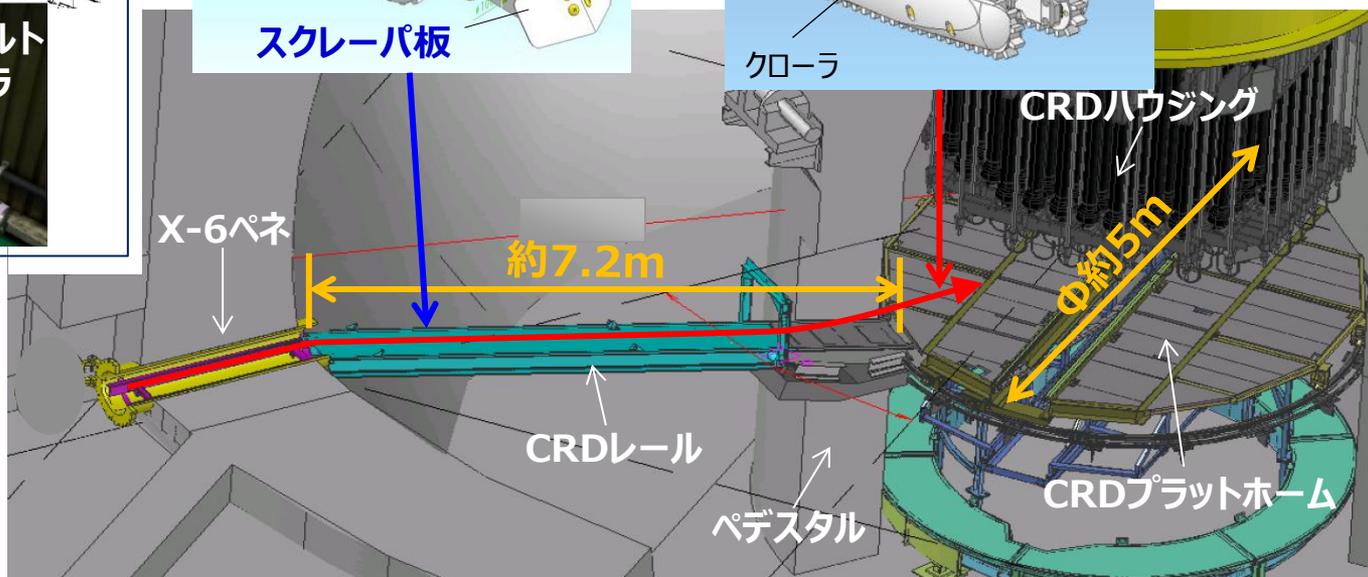
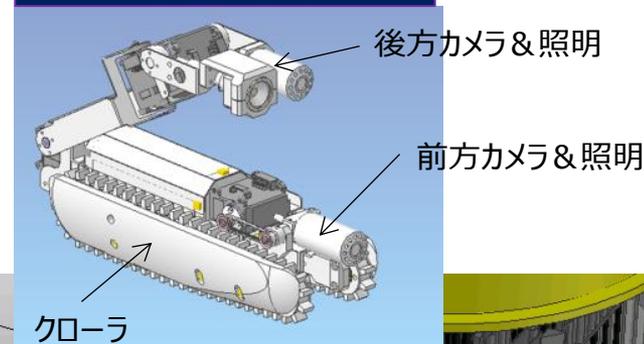
## 1. 事前確認装置



## 2. 堆積物除去装置



## 3. A2調査装置



## ペDESTアル内（プラットフォーム 左側）

- グレーチングが欠損した開口部からは湯気が上昇している
- 相当の水滴が落下し続けている



# 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

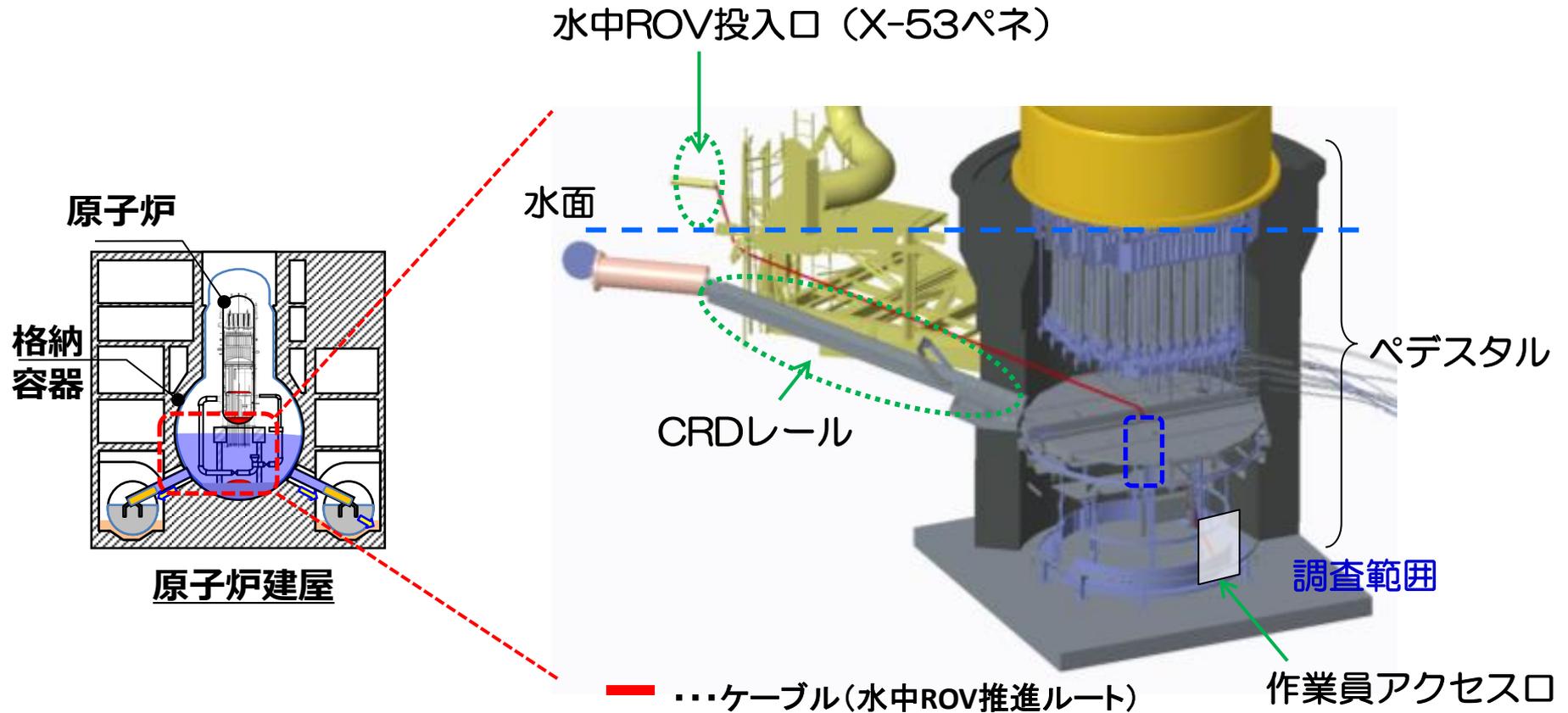
照明

後方カメラ

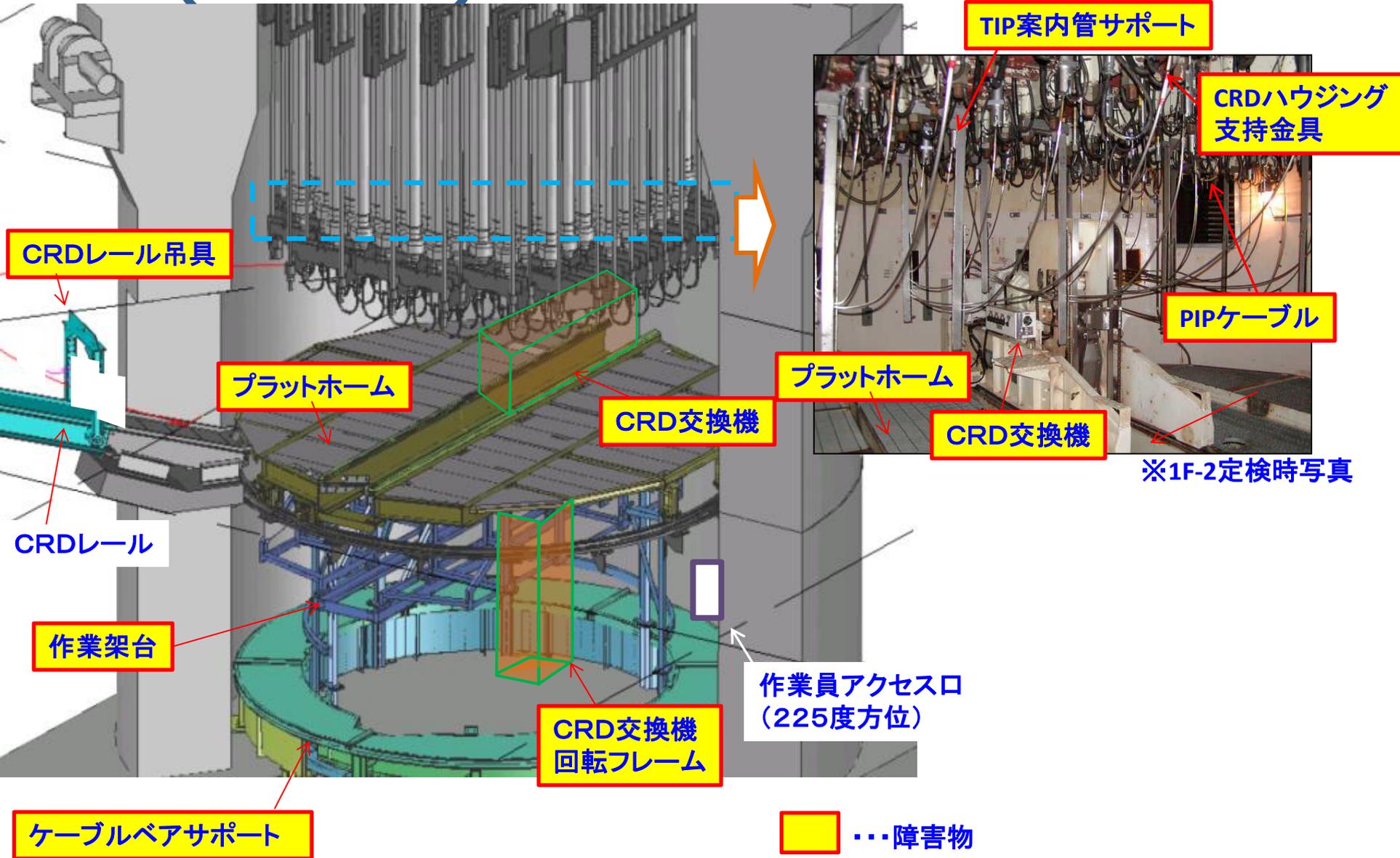
照明



# 3号機格納容器内調査ルート

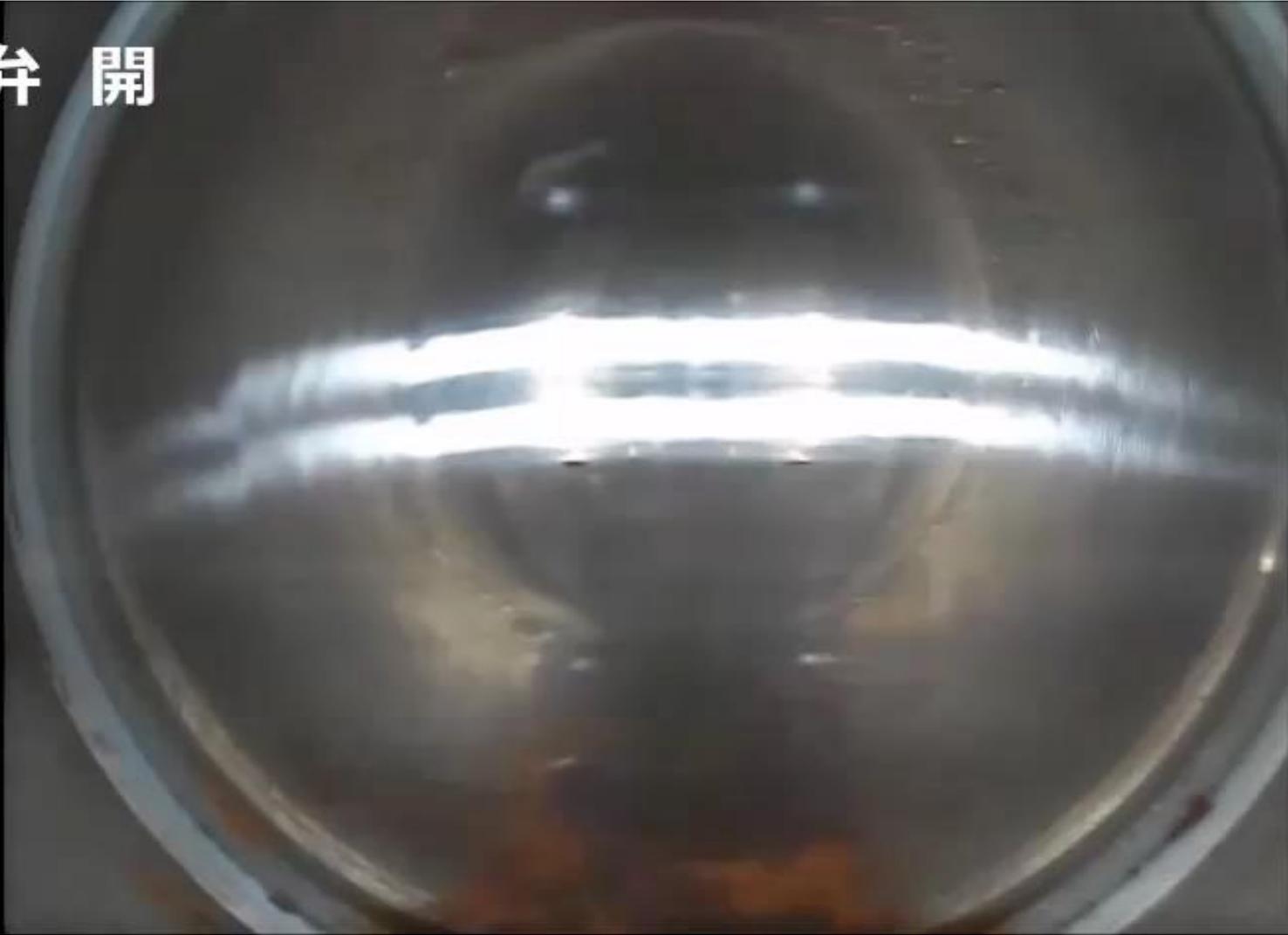


# PCV(格納容器)内構造物



# 3号機水中ROV撮影映像(動画)

隔離弁 開



# CRDレール入口から内部プラットフォーム上

<カメラ向き: 上方>

CRDハウジングサポート  
サポートバー

端子箱

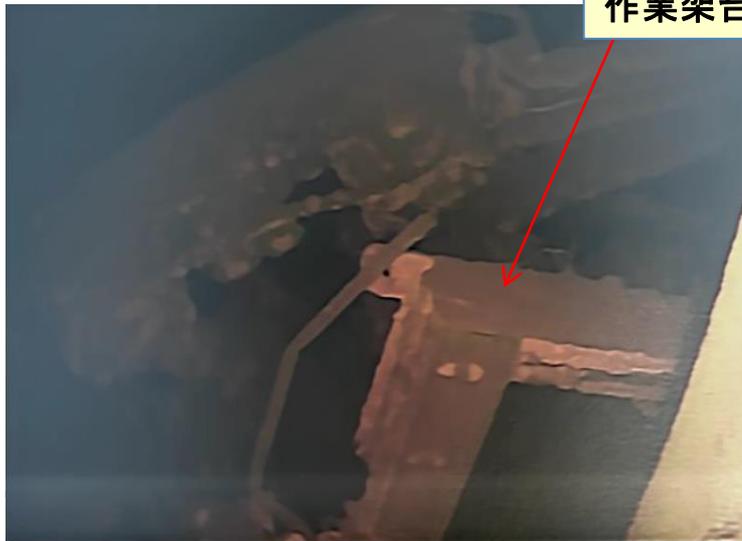
CRDハウジングサポート  
ハンガーロッド



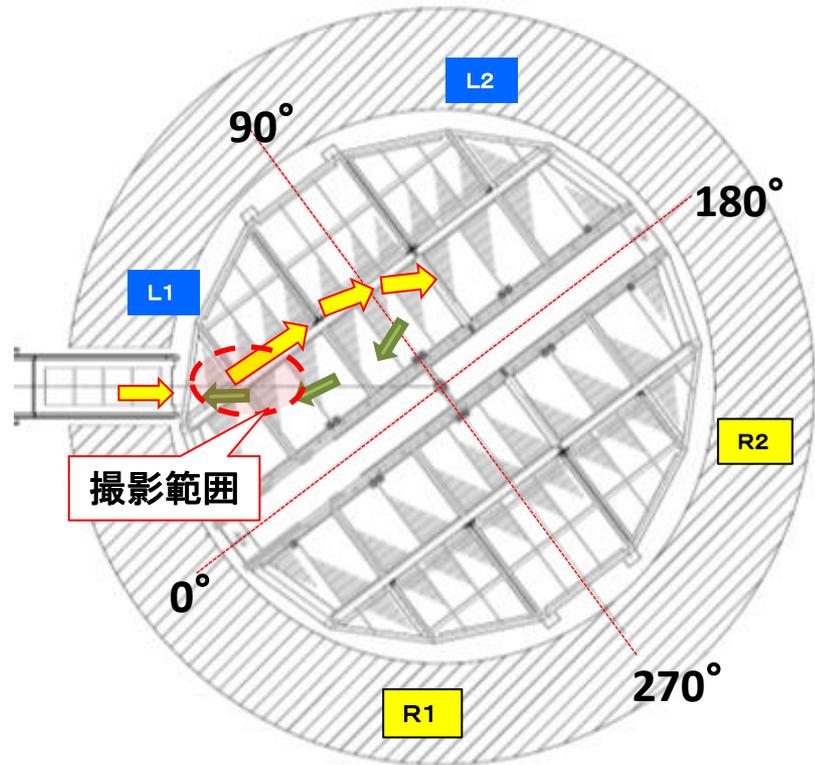
[[参考)撮影日時: 7月19日7:01:33]

<カメラ向き: 下方>

CRD交換機  
作業架台

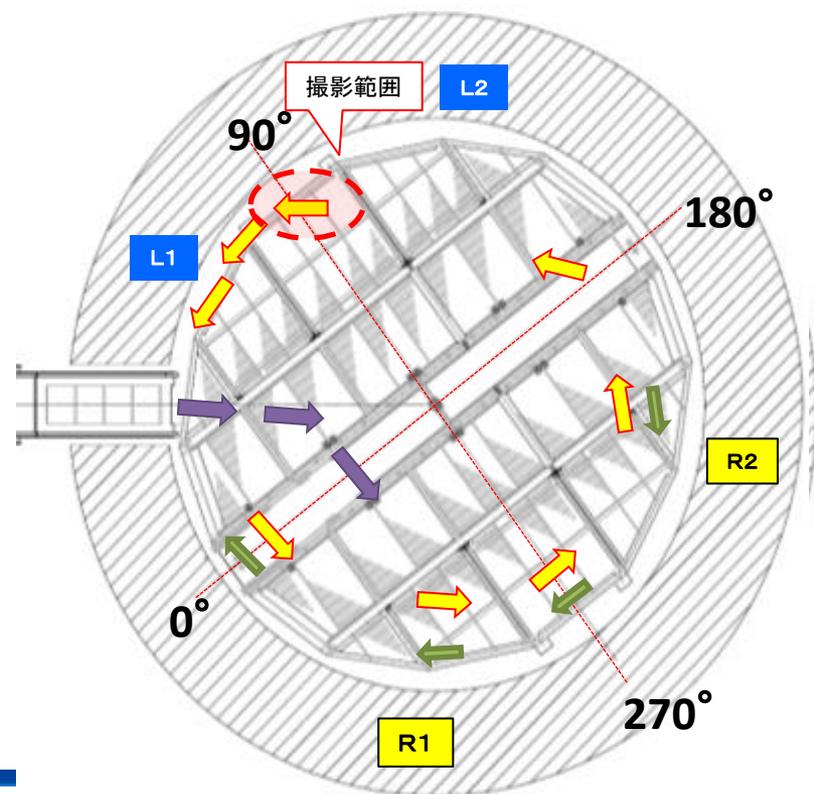


[[参考)撮影日時: 7月19日7:02:29]



# ペDESTラル内外周部等

プラットフォームのグレーチング



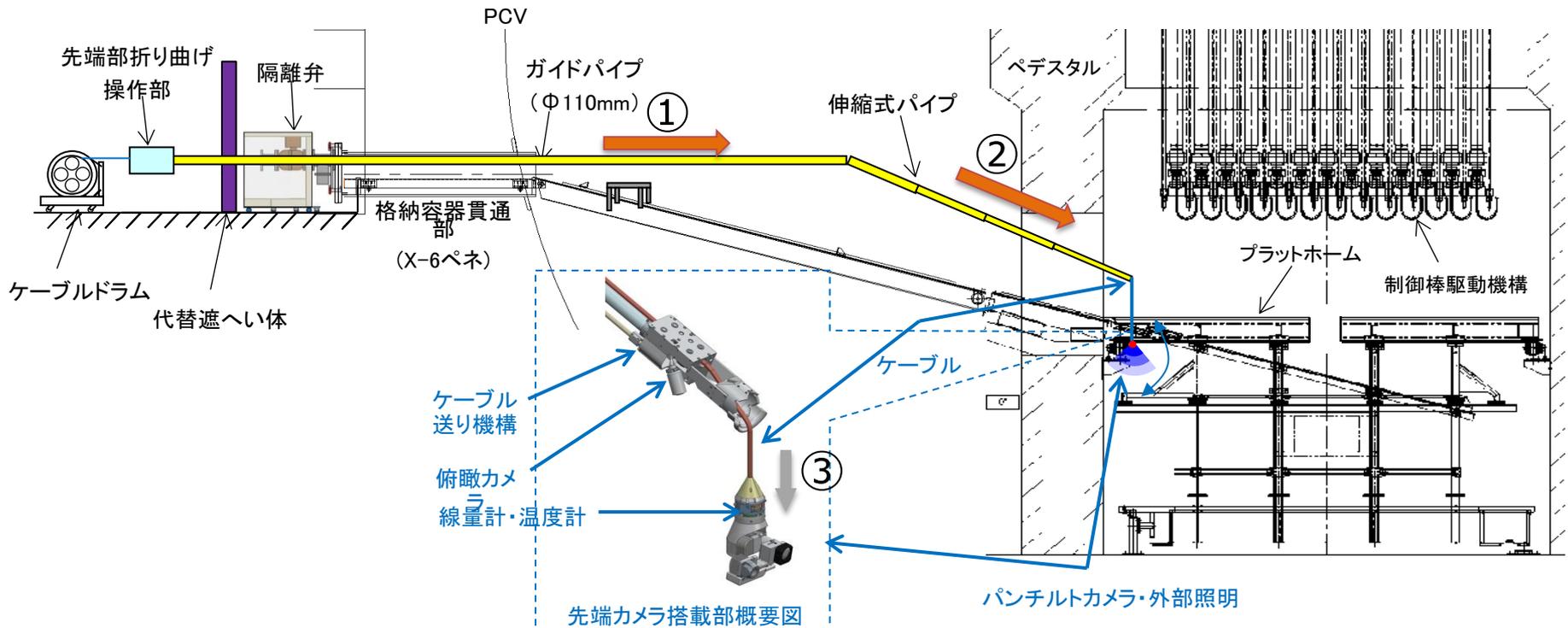
# 2号機ペDESTAL内下部調査 (A2'調査)

## ■調査内容

プラットフォーム下の状況確認

## ■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)

## ◆画像取得範囲の拡大

⇒パンチルト機構 (①) を設けて広範囲を調査

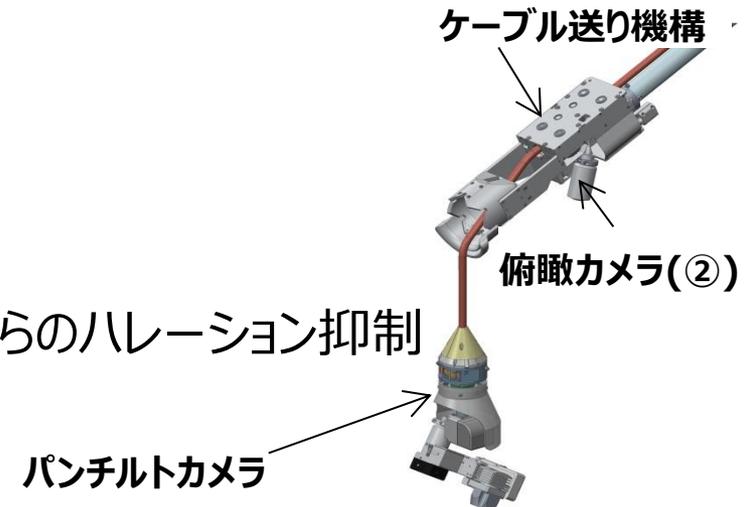
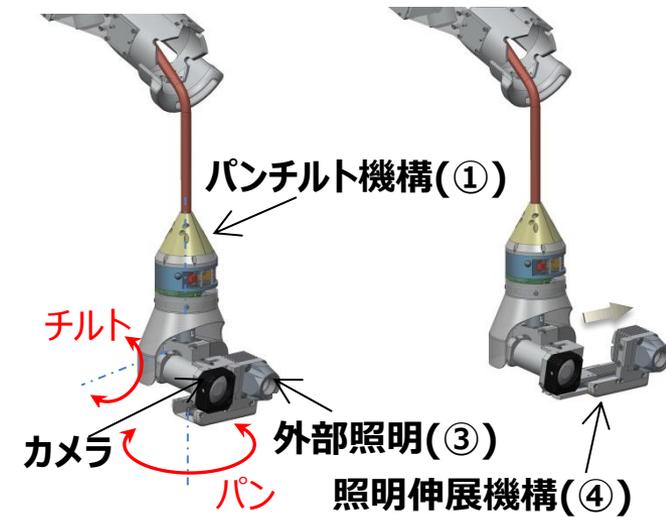
## ◆遠隔操作性の向上

⇒俯瞰カメラ (②) を設けてパンチルトカメラの状況を監視

## ◆暗闇、霧等の条件下における視認性向上

⇒外部照明 (③) の設置により照度向上

⇒照明伸展機構 (④) により光軸をずらして霧からのハレーション抑制



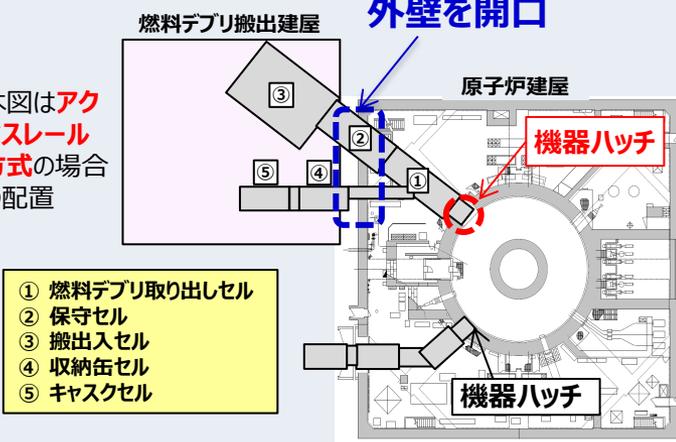
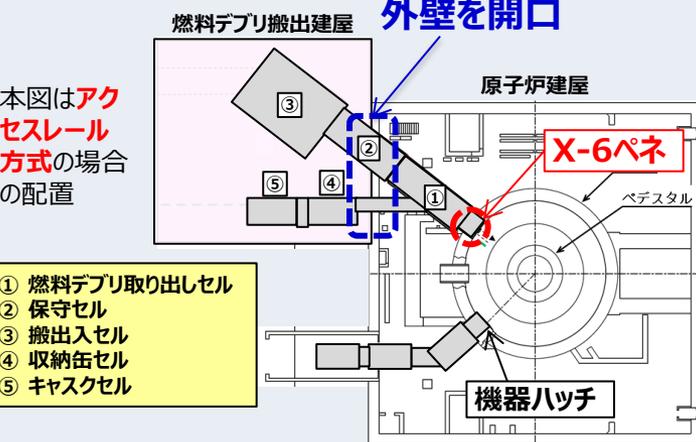
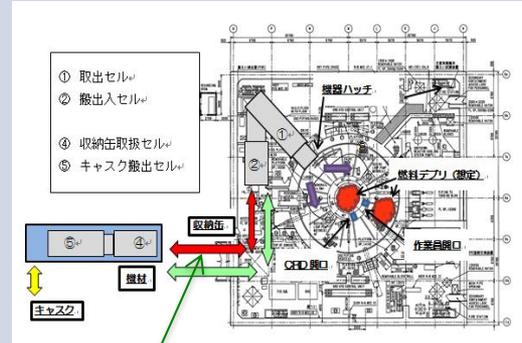
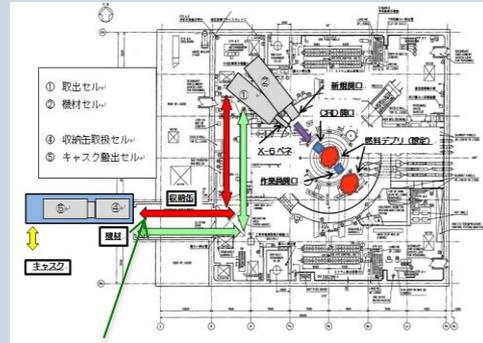
# ご紹介の内容

---

1. はじめに
2. 調査 溶融燃料デブリの所在
3. **気中－横アクセス工法の概念設計状況**
4. デブリ取り出しにおける安全設計の検討

# 横アクセス工法～デブリ搬出ルート～

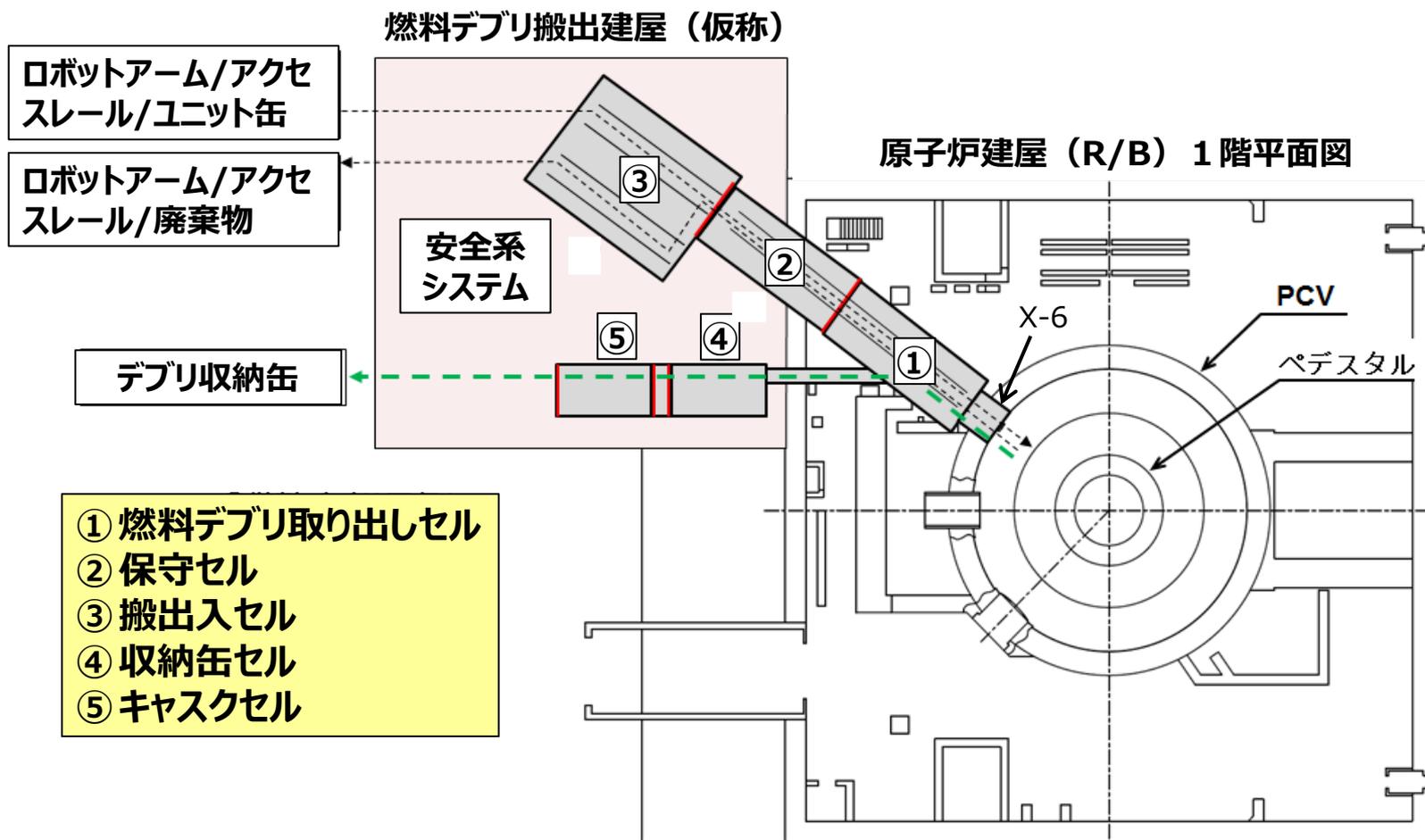
■ デブリ搬出ルートについて、以下の**2ケース（PLAN-A、B）**について検討。

号機	1号機	2/3号機
配置の基本的な考え方	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較的アクセスのしやすいPCV西側を使用して、デブリの搬出は「<b>機器ハッチ</b>」から。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較的アクセスのしやすいPCV西側を使用して、デブリの搬出は「<b>X-6ペネ</b>」から。</li> </ul>
<p><b>PLAN-A</b></p> <p>デブリはR/B外壁を開口して搬出</p>	<p>燃料デブリ搬出建屋 外壁を開口</p> <p>※ 本図は<b>アクセスレール方式</b>の場合の配置</p>  <p>① 燃料デブリ取り出しセル ② 保守セル ③ 搬出入セル ④ 収納缶セル ⑤ キャスクセル</p>	<p>燃料デブリ搬出建屋 外壁を開口</p> <p>※ 本図は<b>アクセスレール方式</b>の場合の配置</p>  <p>① 燃料デブリ取り出しセル ② 保守セル ③ 搬出入セル ④ 収納缶セル ⑤ キャスクセル</p>
<p><b>PLAN-B</b></p> <p>デブリはR/B大物搬入口から搬出</p>	 <p>① 取出セル ② 搬入セル ④ 収納缶取扱セル ⑤ キャスク搬出セル</p> <p>大物搬入口</p>	 <p>① 取出セル ② 機材セル ④ 収納缶取扱セル ⑤ キャスク搬出セル</p> <p>大物搬入口</p>

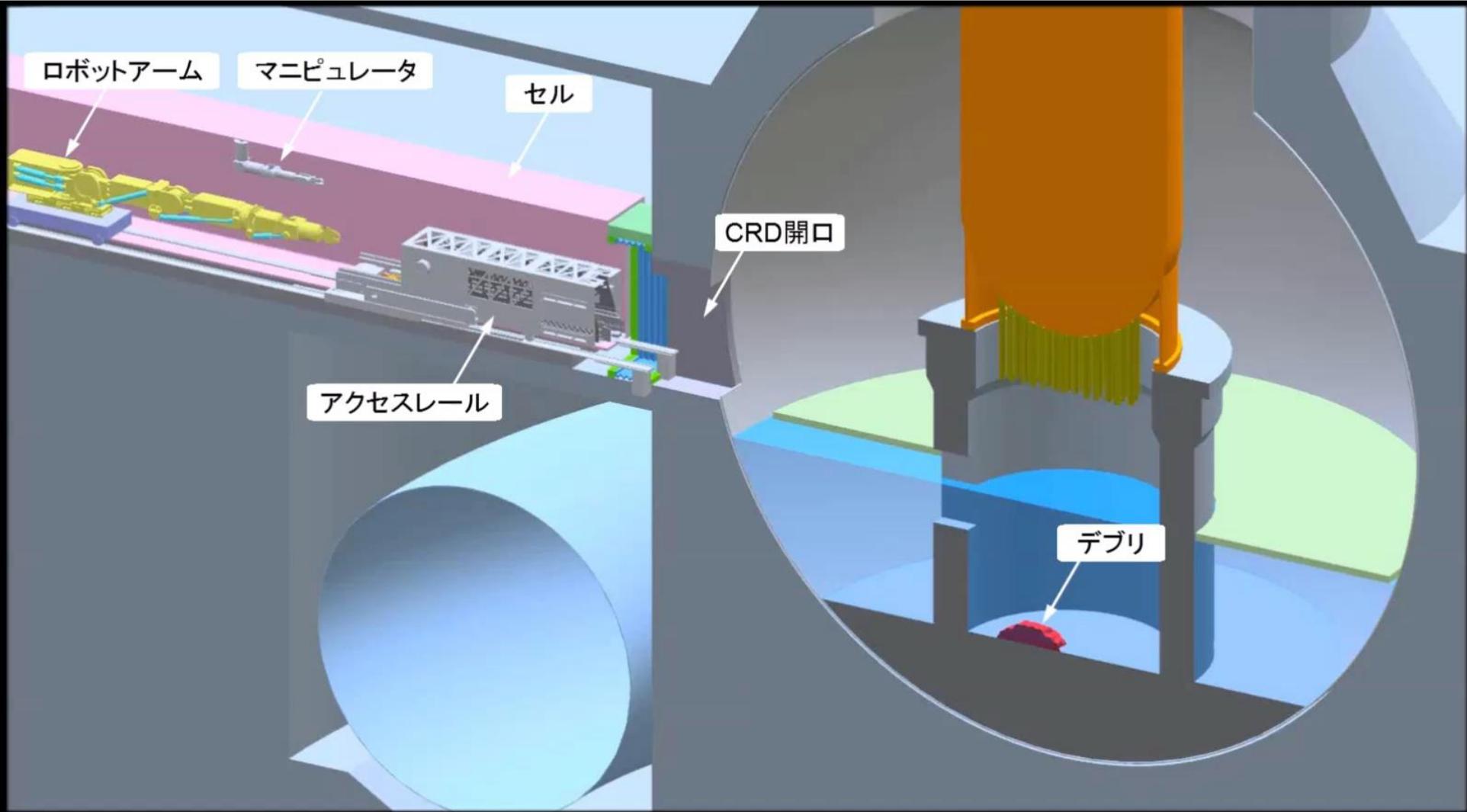
# 【PLAN-A】アクセスレール方式～レイアウト～

## レイアウト

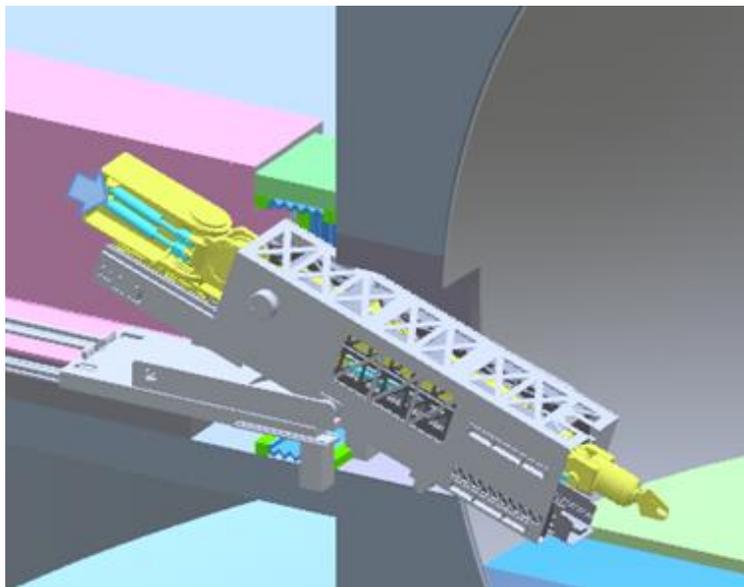
- 気密/遮へい機能を有した**複数のセルを連結**し、R/B1階フロアに設置。
- **燃料デブリ搬出建屋**（仮称）をR/B脇に増設。安全系システムも併せて収納。



# 【PLAN-A】アクセスレール方式～取り出しイメージ～(動画)



# 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※<sup>1</sup>。
- アクセスレール（目標2MGy）は、**1回/2年**交換予定※<sup>2</sup>。

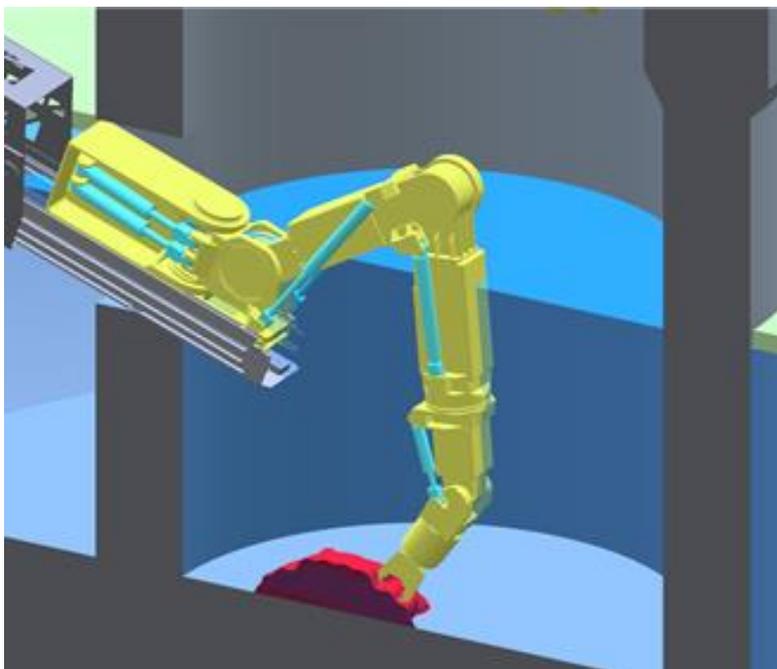
## ■ 保守

- 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。

# 【PLAN-A】アクセスレール方式～工場モックアップ～(動画)



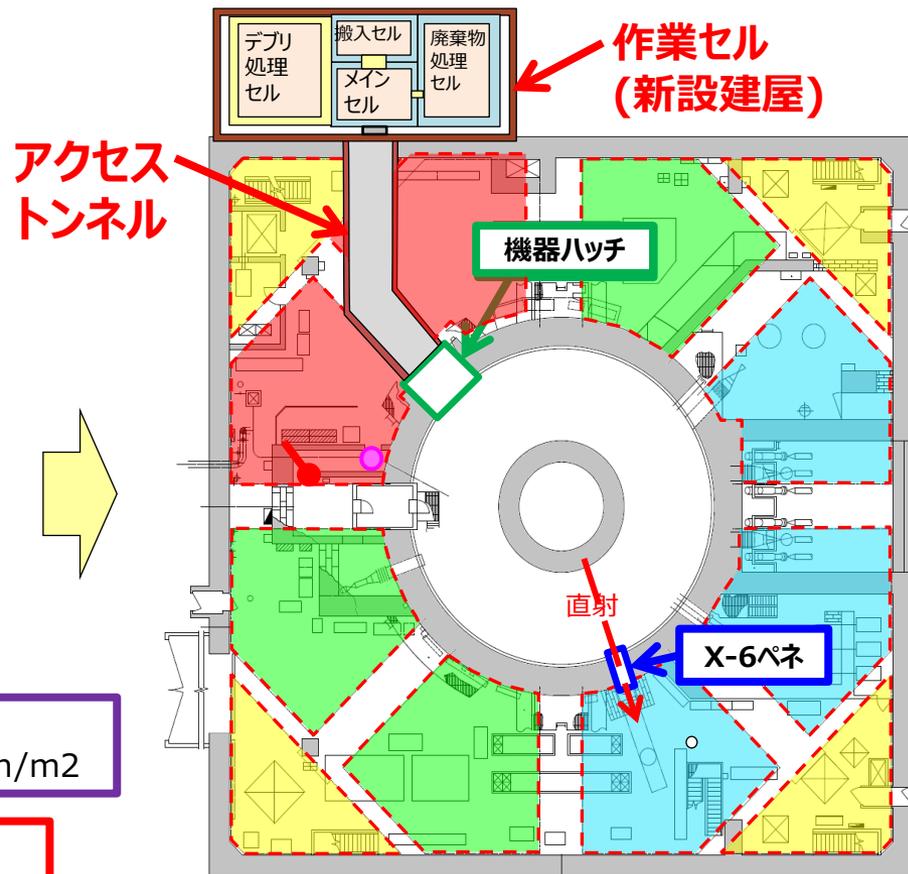
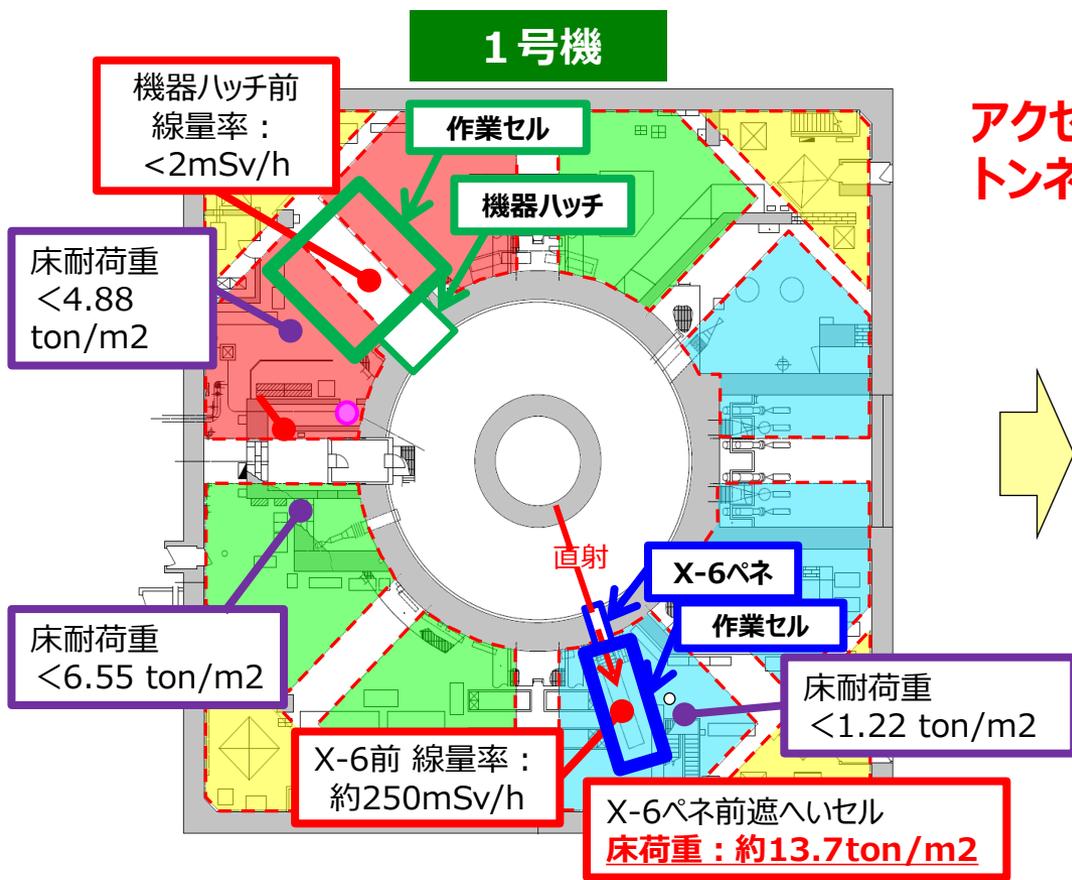
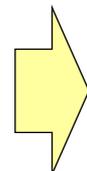
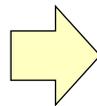
# 【PLAN-A'】アクセストンネル方式～コンセプト～

## ■ 1号機R/B1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





# 【PLAN-A´】アクセストンネル方式～デブリ搬出～(動画)

## 横接近工法 作業ステップ

# 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。

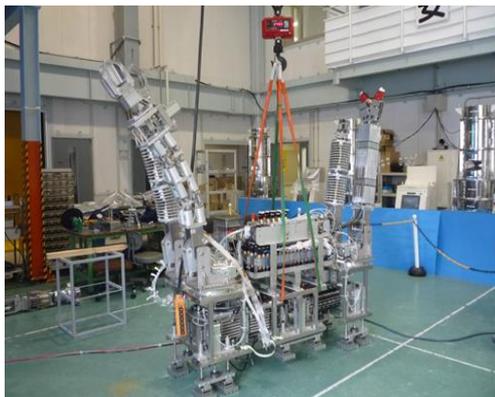
試作機 タイプⅠ

寸法：全長1800mm

幅630mm

高さ1000mm

重量：約690 k g



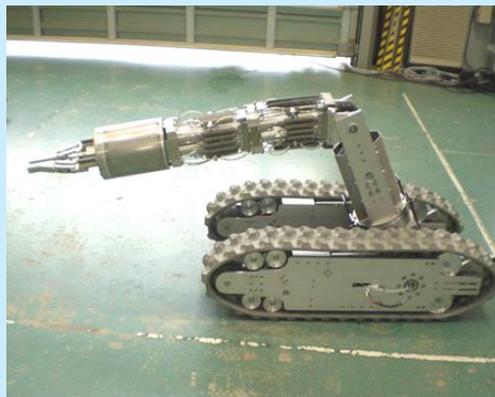
試作機 タイプⅡ

寸法：全長2750mm

幅590mm

高さ350mm（胴部）

重量：約220 k g



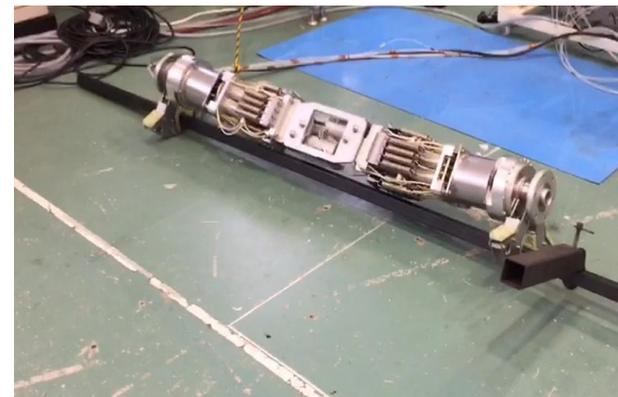
試作機 タイプⅢ

寸法：全長1635mm

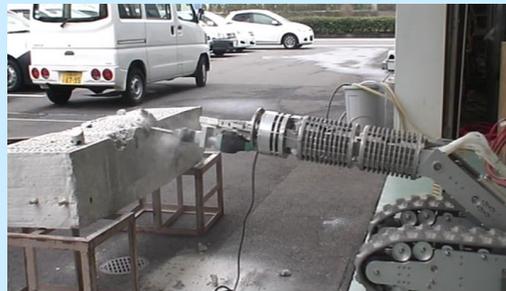
幅430mm

高さ185mm（胴部）

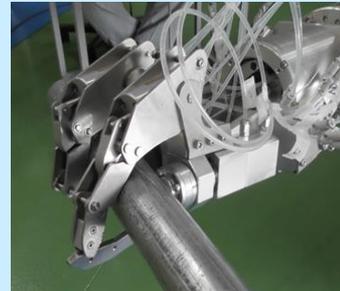
重量：約64 k g



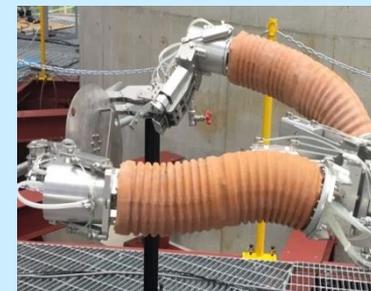
階段走行試験



コンクリート破砕試験



把持動作



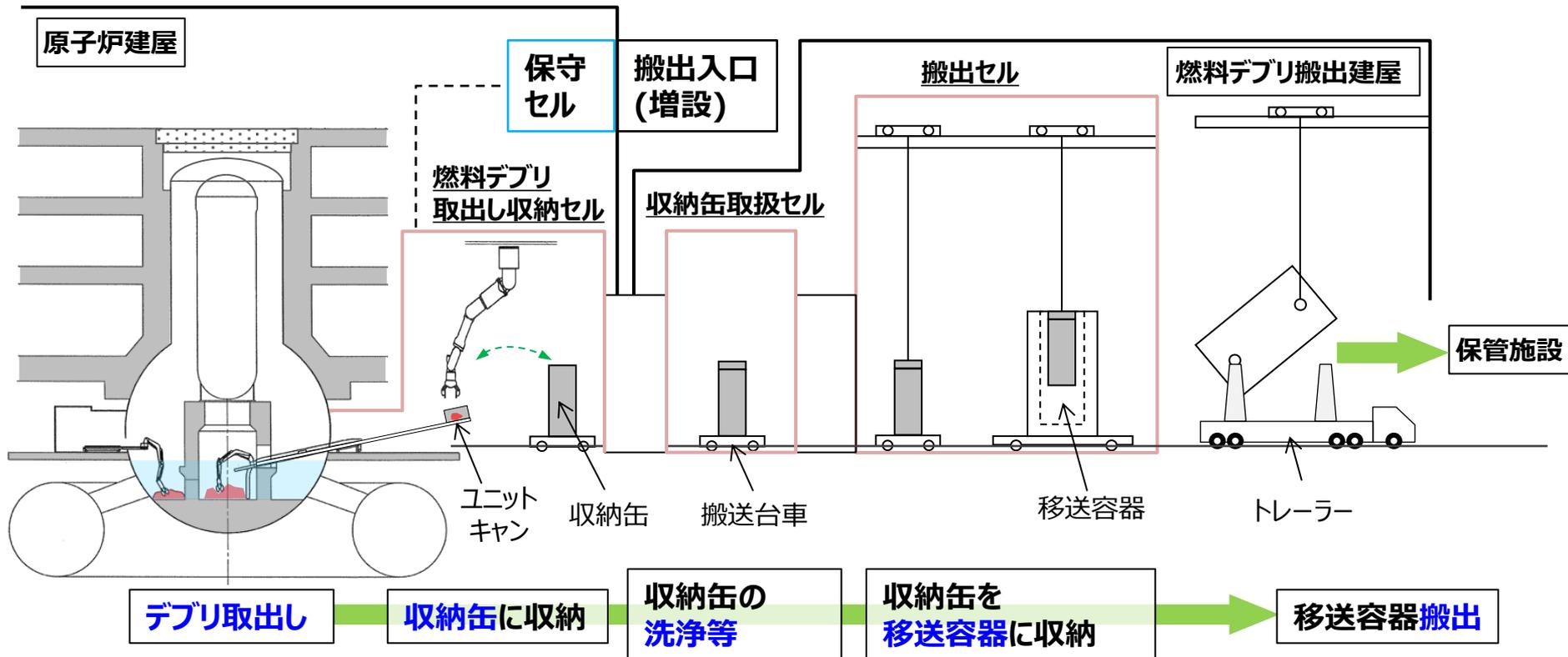
模擬バルブ開閉

# 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）



# ご紹介の内容

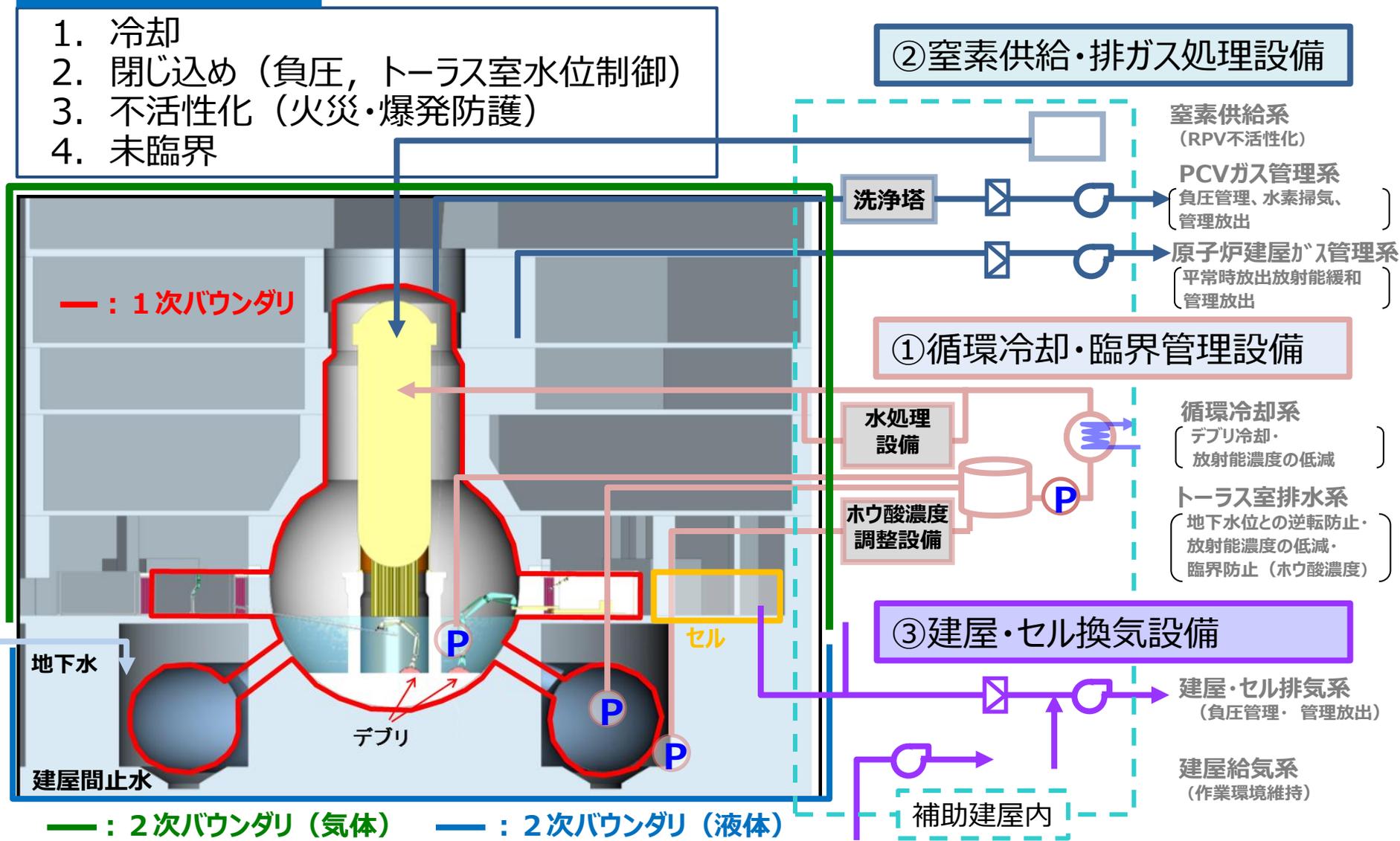
---

1. はじめに
2. 調査 溶融燃料デブリの所在
3. 気中－横アクセス工法の概念設計状況
4. **デブリ取り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

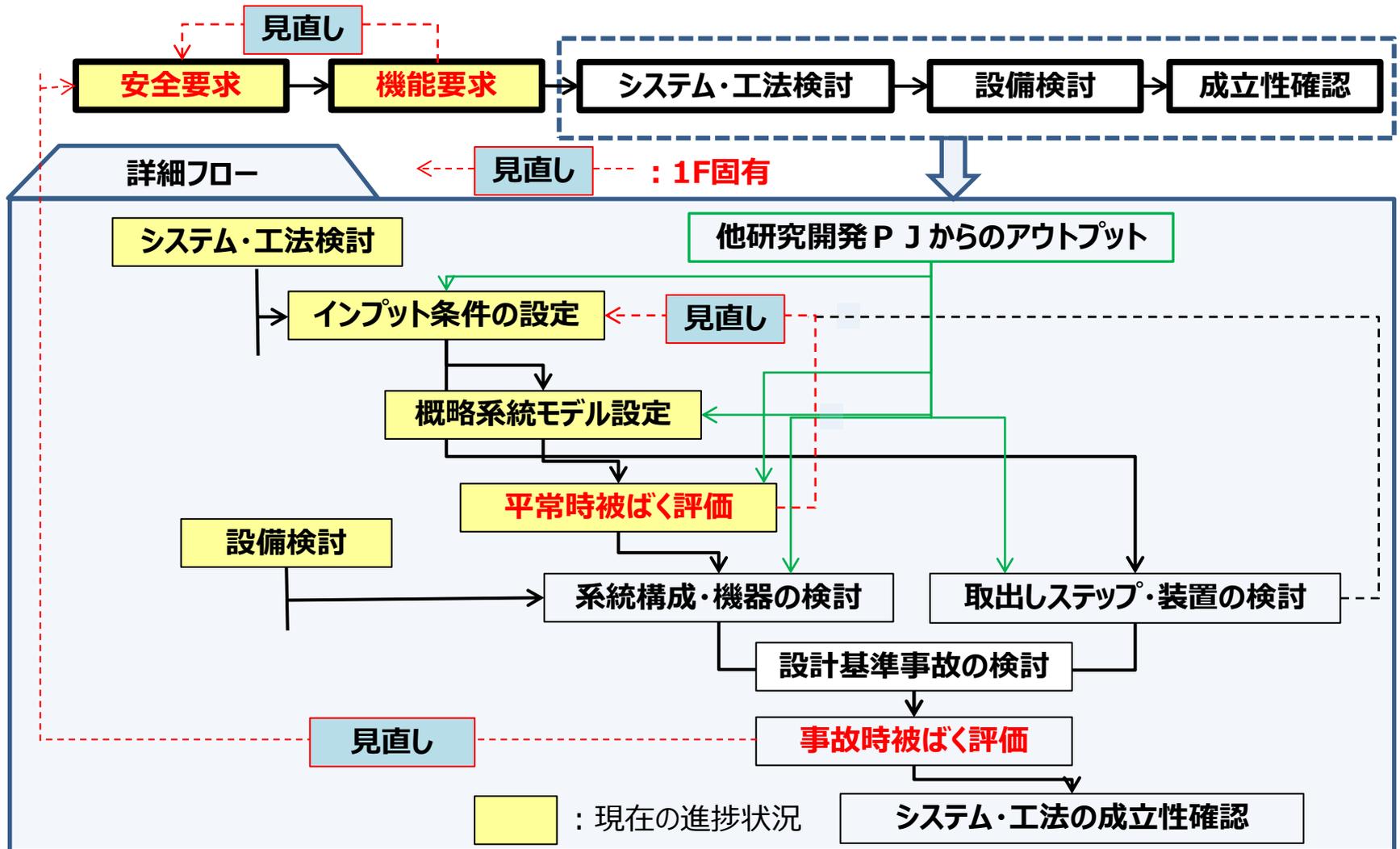


# 検討の進め方：背景

- 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

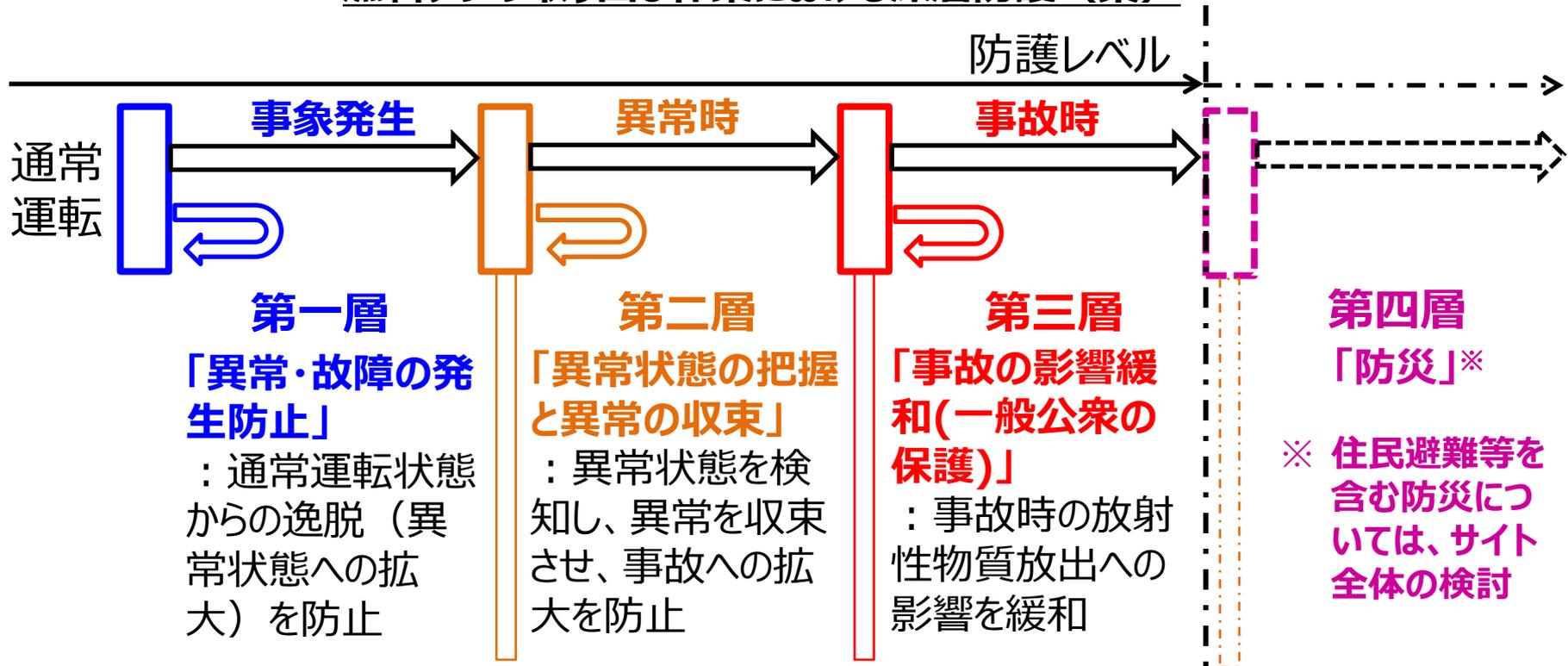
- 安全要求の設定（仮定）にスループットからの機能要求を加えてゆく
- 安全要求は基本的には不変であるが、現状内在するリスクや作業リスク（作業線量）の想定・評価によっては見直しがあり得る



# 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***