

IRIDシンポジウム2017 in いわき  
「燃料デブリ取り出しに挑む」

# 燃料デブリに迫る

～IRIDが取り組む研究開発の状況～

2017年8月3日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)  
研究管理部長  
清浦 英明

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。

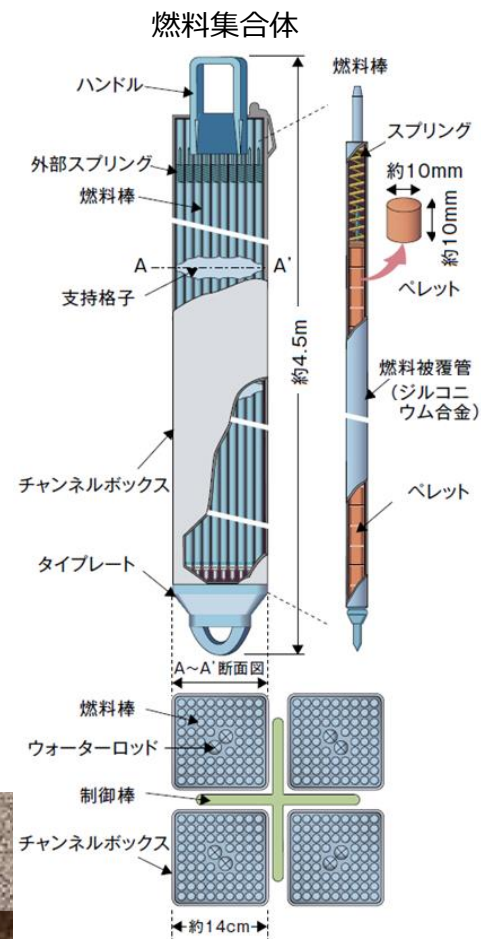
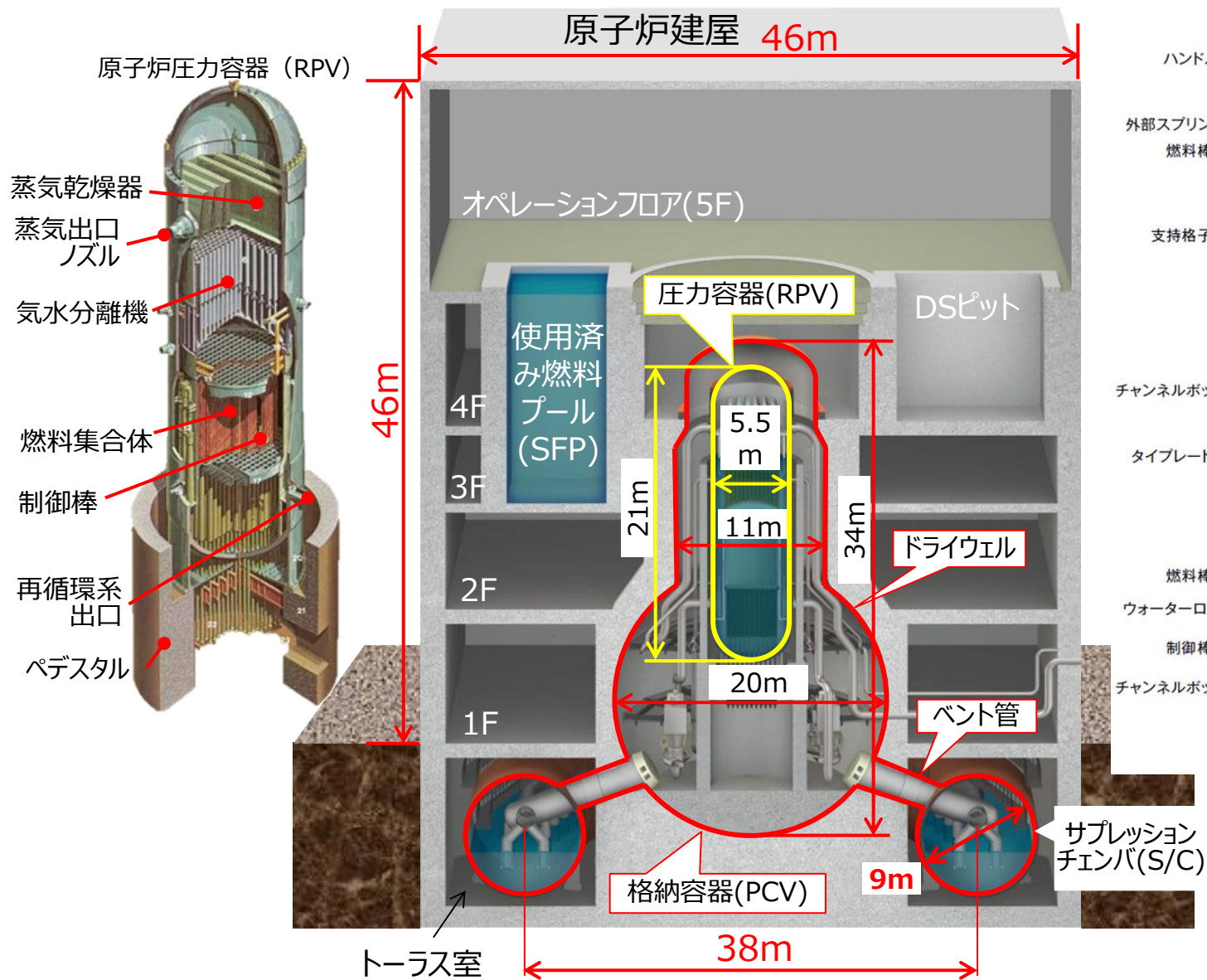
# はじめに

- 原子炉圧力容器(RPV)内の燃料は構造物とともに溶融し、一部は原子炉格納容器(PCV)の底部まで到達して固まっている、と推定されている。
- 廃炉作業を進めてゆくために**燃料デブリを取り出し、安全で安定した状態で保管する。**
  
- 燃料デブリの調査
  - 取り出し技術の開発のために、所在と量を明らかにする
  - 取り出し技術の開発のために、損傷状況を明らかにする
  - 取り出し作業の安全確保のために、性状を明らかにする

# 目次

1. 燃料デブリの広がりを推定する
2. 調査の実施
  - ・ラジオグラフィ（ミュオン）
  - ・PCV内のロボットによる調査
3. 今後の展開を考える
  - ・PCV内調査の拡充
  - ・RPV内のロボットによる調査
  - ・燃料デブリのサンプリング

# 原子力発電所の構造

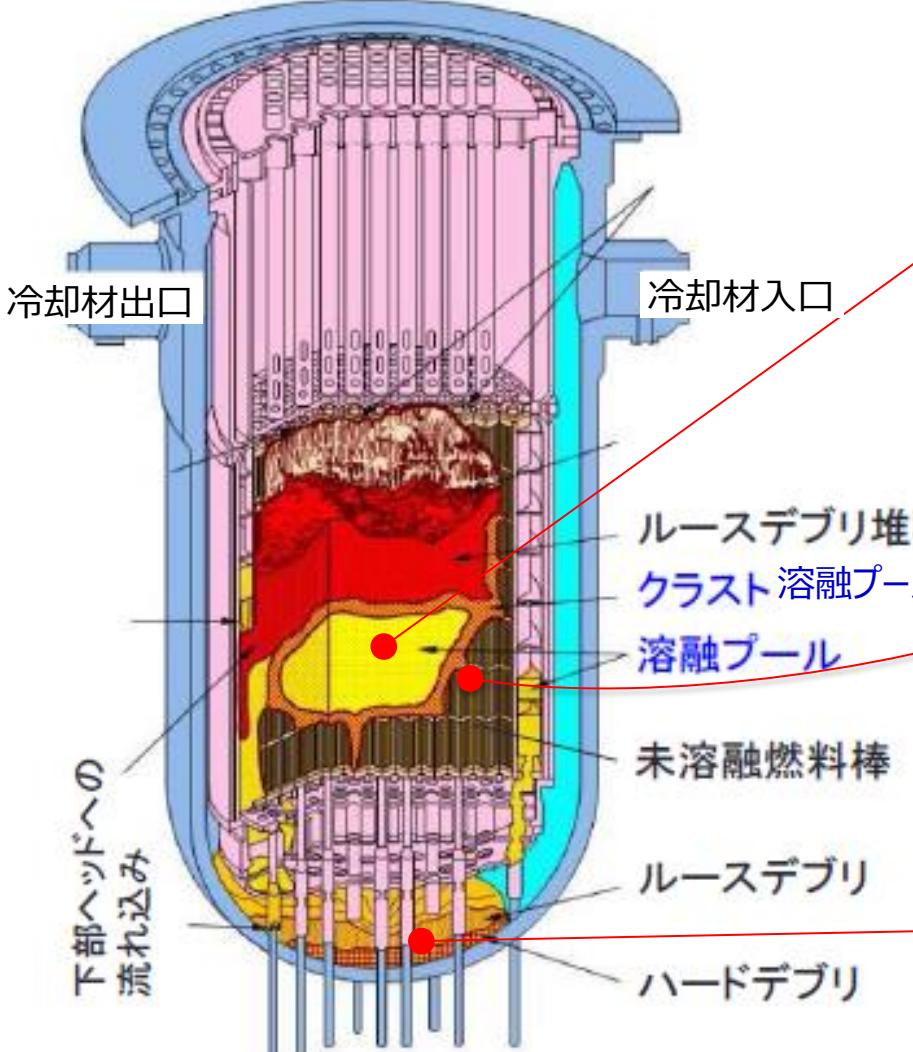


(注) 図中の寸法は  
2 / 3号機の例。

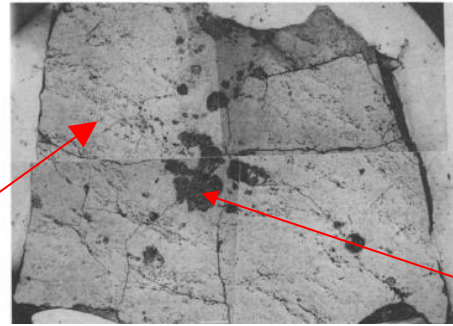
# 「デブリ」って何？（TMI-2デブリの概要）

ここでは、溶融した燃料及び溶融した構造材が混ざり合って凝固したもの

U : ウラン、Zr : ジルコニウム、Fe : 鉄、Ni : ニッケル、Cr : クロム



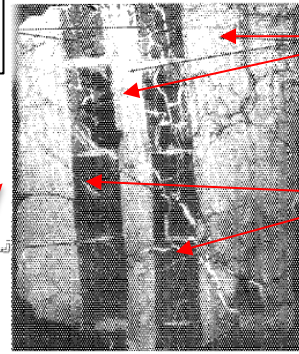
A



(U,Zr)O  
2700~3100K  
Fe-Ni-O

燃料棒と制御棒が完全に融けた液溜まり部分

B

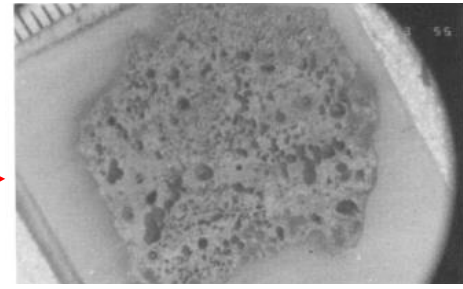


Zr-Fe-Ni-Cr  
1400~2200K

燃料ペレット

未溶融燃料棒

C



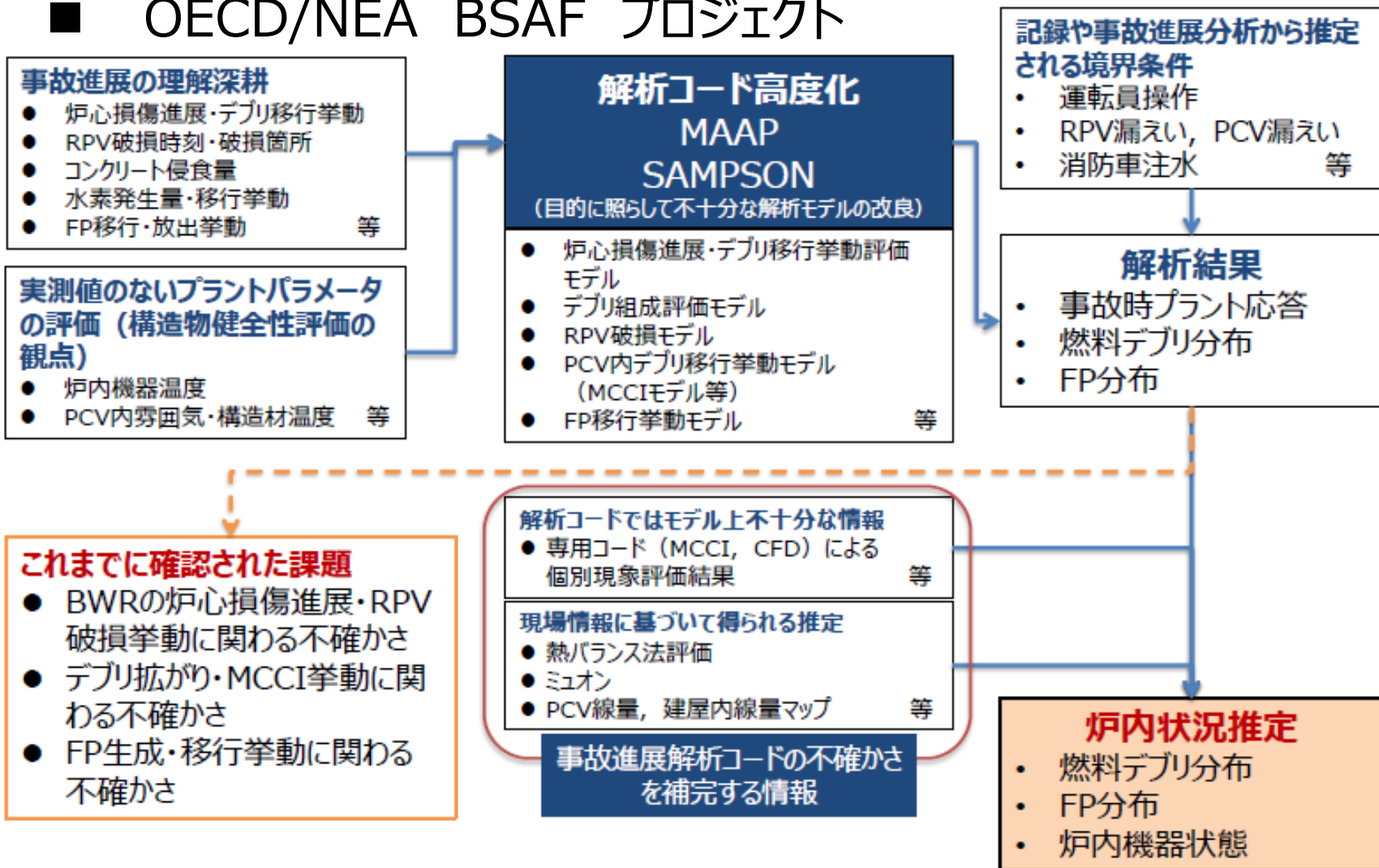
(U,Zr)O<sub>2</sub>  
2800~3100K

溶融プールから下部ヘッドに回り込んで固化

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

# 燃料デブリの広がり推定

- 事故解析コードの改良・高度化
- OECD/NEA BSAF プロジェクト



# 1Fデブリの推定

溶融進展後に予想される燃料デブリの生成箇所および材料  
格納容器底部ではコンクリートとの相互作用(MCCI)の可能性

## ルーズデブリ層



燃料片や溶融燃料が急冷され、粒子化

- ・ $\text{UO}_2$
- ・ $(\text{U,Zr})\text{O}_2$  等

## 溶融・固化した炉心



上部/下部クラスト：  
溶融燃料が比較的早く冷却されてできる塊



再溶融固化層：  
溶融燃料がゆっくり冷却されてできる塊

- ・ $(\text{U,Zr})\text{O}_2$  (Uリッチ相/Zrリッチ相)
- ・SUS-Zry合金
- ・Zr/Feホウ化物 等

## 下部プレナム/制御棒ハウジング



制御棒案内管に溶融燃料等が付着

- ・SUS
- ・ $(\text{U,Zr})\text{O}_2$  等

## 格納容器床面



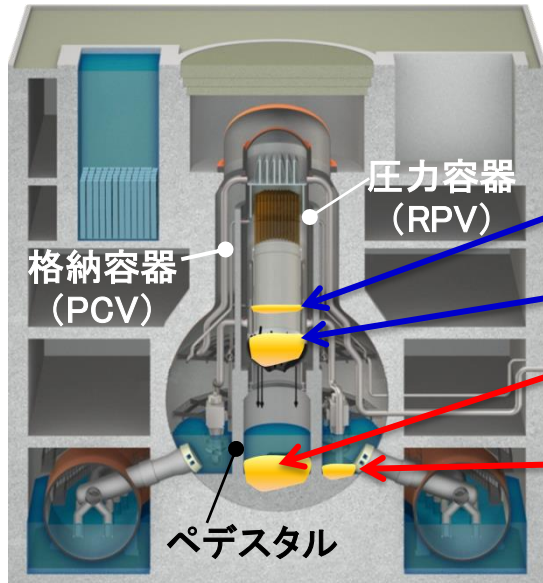
MCCI生成物

- ・ $(\text{U,Zr})\text{O}_2$
- ・ジルコン 等

# 1Fのデブリはどうなっているか？

## 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
ペデスタル内側	157	146	213
ペデスタル外側	107	49	130
合計値	279	237	364

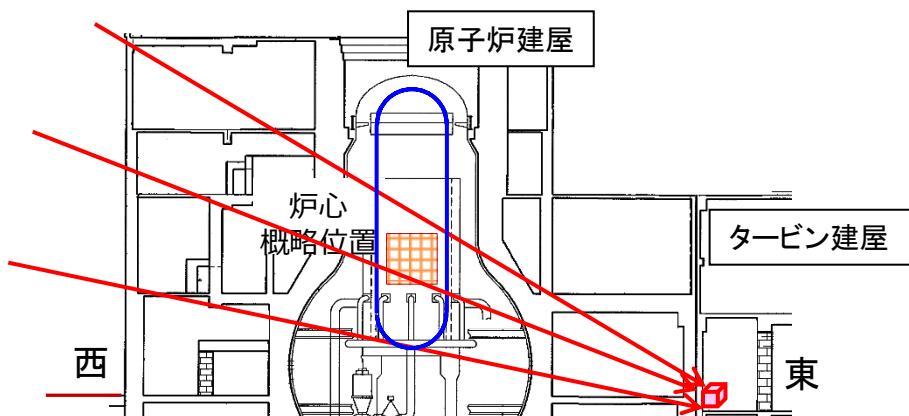
「代表値」：現時点（H27成果）において最も確からしい値。

「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）



# ラジオグラフィ（ミュオン）

- 宇宙線ミュオンを活用したラジオグラフィの適用
  - 全天から $1\text{m}^2$ あたり毎分1万個の宇宙線ミュオン粒子
  - 平均エネルギー $3\sim 4\text{GeV}$ 、高エネルギーのミュオンは大型構造物を透過
  - ミュオンの散乱角は原子番号に比例（散乱法）
- 炉心部や格納容器内部の高密度な場所を推定
  - **透過法**：物体の有無（ただし、相対的評価にとどまる）
    - フラックスの変化を影として画像化
    - 比較的小型の検出器で可能
    - 内部構造の推測にはシミュレーションとの比較



透過法検出器設置イメージ※



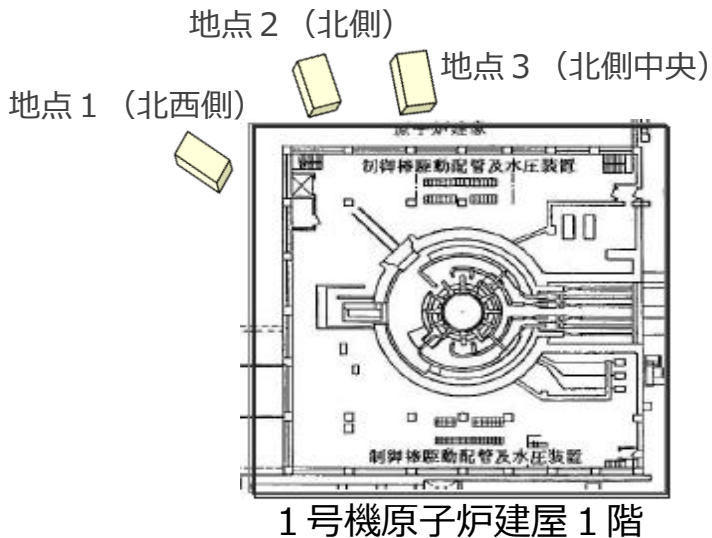
透過法検出器（約 $2.5\text{m} \times 2.0\text{m} \times$ 高さ $2.1\text{m}$ ）

- 散乱法：おおまかな物質識別
  - 分解能が透過法より高い
  - 対象を挟む大きな検出器
  - ガンマ線分別アルゴリズム他計算量

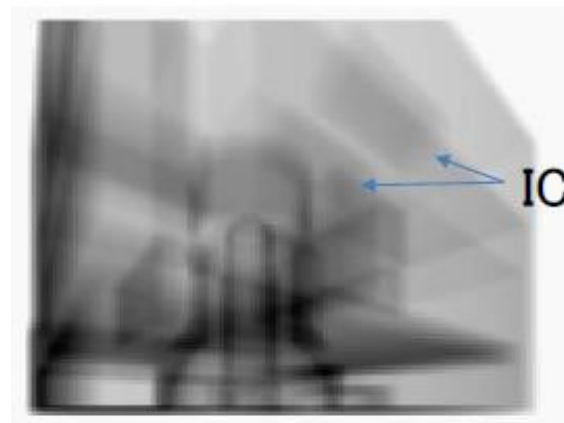
# 1号機ミュオン調査結果 (透過法)

【測定期間】2015.2.19~9.7

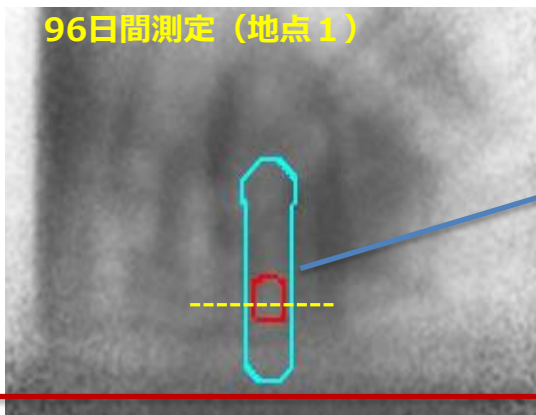
## 測定装置と現場での設置場所



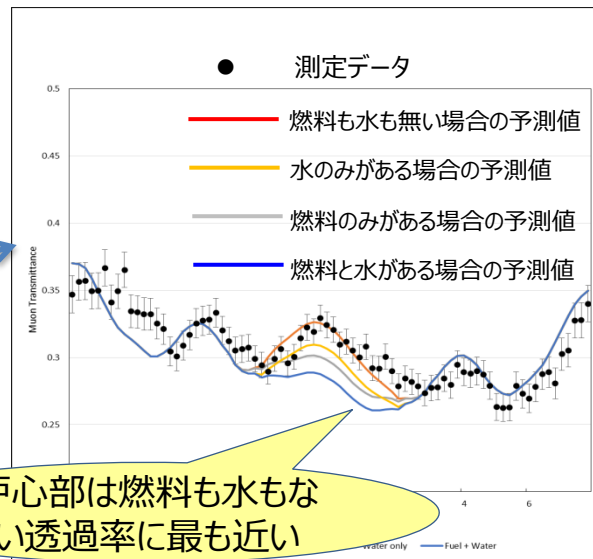
## 設計情報によるシミュレーション (比較対象)



## 透過率の測定結果と分析結果



測定値と予測値との比較 (炉心部透過率)

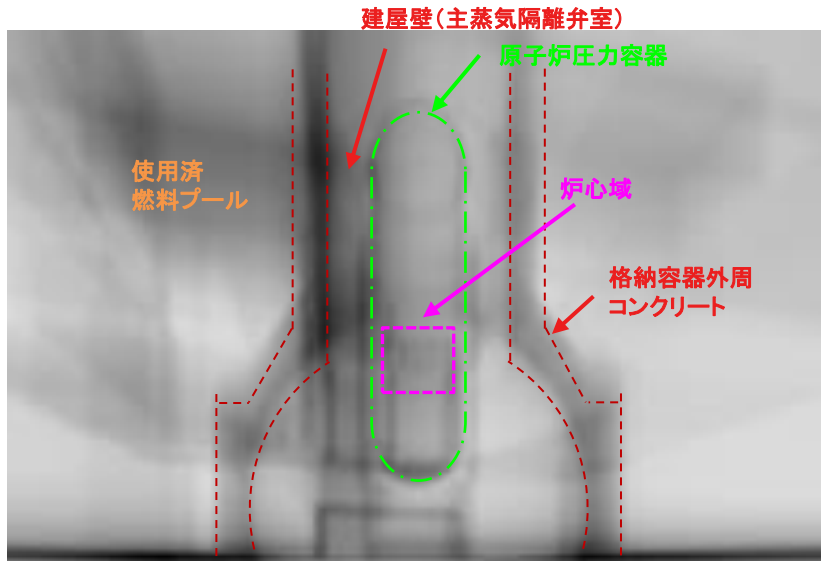


1号機では  
炉心部に燃料  
がほとんどない  
と推定

# 3号機ミュオン調査結果※ (透過法)

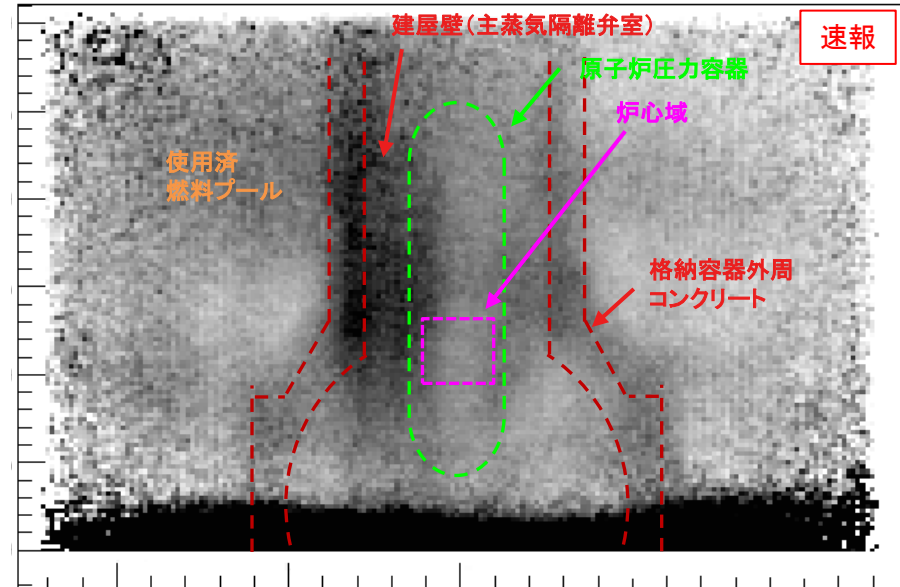
- 原子炉建屋を透過するミュオンの測定により、格納容器外周の遮へいコンクリート、使用済燃料プール、原子炉建屋の壁などの主要な構造物を確認した。
  - 原子炉建屋の構造図を元に、物質質量分布をシミュレーションした結果と比較すると、ミュオン測定により得られた物質質量分布の影は、主要な構造物の配置と一致。

(2017年7月20日時点)



南 北

シミュレーションによる物質質量分布（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)



南 北

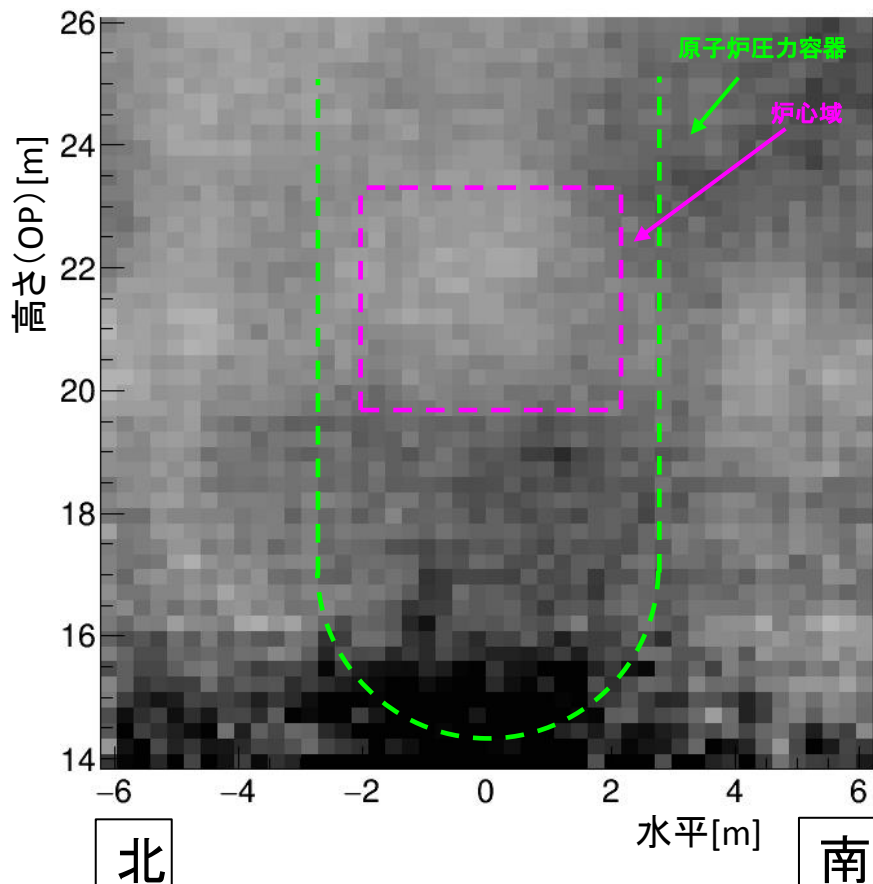
ミュオン測定による物質質量分布（密度長）の評価

※東京電力HD webより

## 2号機及び3号機ミュオン調査結果（透過法）

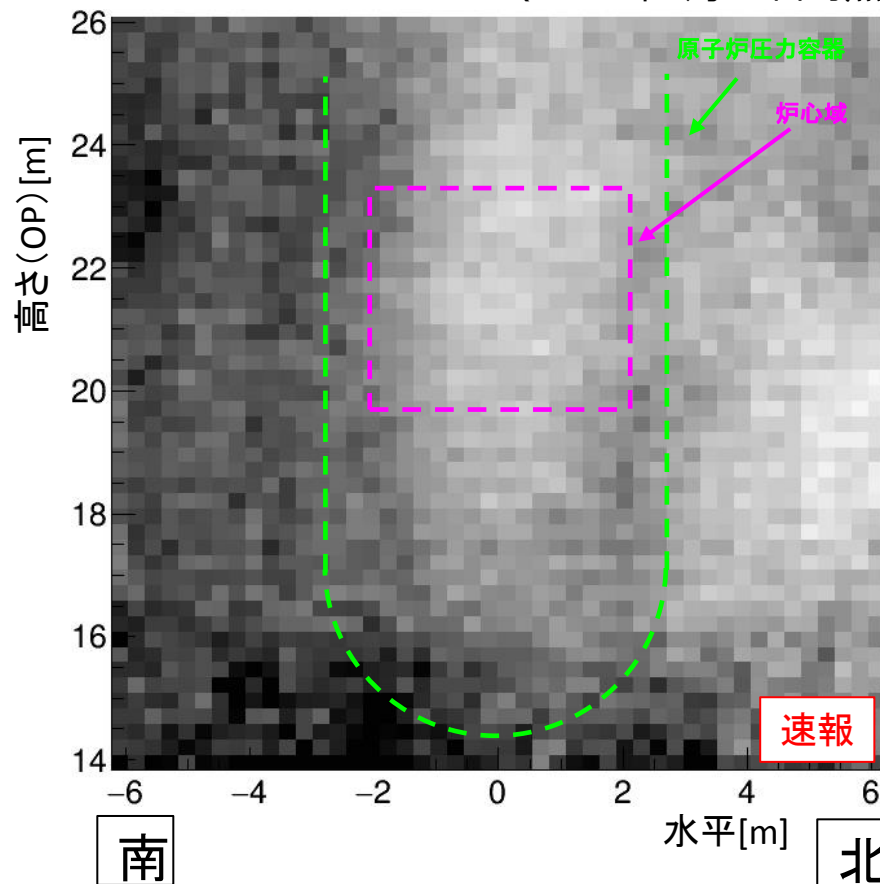
- 2号機では原子炉底部付近に高密度物質の存在が推定されている。
- 3号機の原子炉压力容器内部には，2号機の原子炉压力容器底部で確認されたような大きな高密度物質の存在は確認できていない。

### 2号機



### 3号機

(2017年7月20日時点)



# (参考) 1～3号機のミュオン測定結果と、燃料デブリ分布の推定との比較

ミュオン測定結果	1号機	2号機	3号機 (速報)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心域に大きな燃料の塊はなし (原子炉圧力容器底部の測定はなし)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉圧力容器底部に燃料デブリと考えられる高密度の物質を確認</li> <li>炉心域にも燃料が一部存在している可能性あり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現時点での評価では、原子炉圧力容器内部には一部燃料デブリが残存する可能性はあるものの、大きな高密度物質の存在は確認できていない。 (継続測定・詳細評価中)</li> </ul>

↓ 結果を燃料デブリ分布の推定に反映     
 ↓ 結果を燃料デブリ分布の推定に反映     
 ↓ 今後、格納容器内部調査やミュオン測定などで得た知見を燃料デブリ分布の推定に反映予定

現状の燃料デブリ分布の推定 (※)

### 1号機

燃料デブリ分布推定図

炉心部にはほとんど燃料なし

Core Spray System      Feed Water System

大部分の燃料が溶融し、PCVに落下

### 2号機

燃料デブリ分布推定図

RPV底部に一部の燃料デブリが存在

Core Spray System      Feed Water System

炉心域に燃料が存在している可能性      一部の燃料デブリはPCVに落下

### 3号機

燃料デブリ分布推定図

RPV底部に一部の燃料デブリが存在

Core Spray System      Feed Water System

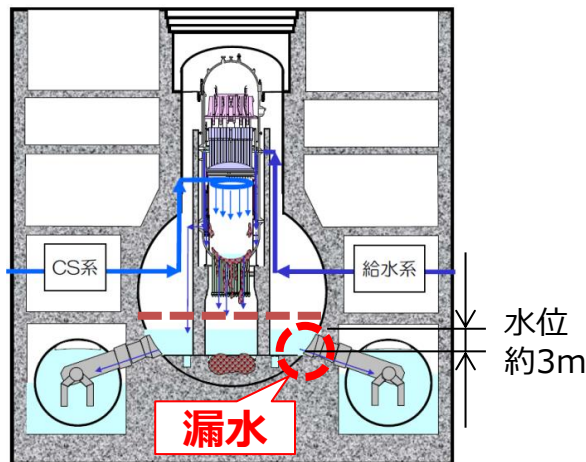
炉心域に燃料が存在している可能性      一部の燃料デブリはPCVに落下

- 1号機: 溶融した燃料がほぼ全量が格納容器に落下し、元々の炉心部にはほとんど燃料が存在しない
- 2号機: 溶融した燃料のうち、一部は原子炉圧力容器下部プレナムおよび格納容器へ落下し、燃料の一部は元々の炉心部に残存
- 3号機: 2号機よりも多くの燃料デブリが格納容器に落下していると推定

※ 「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (総合的な炉内状況把握の高度化) 」(IRID, IAE)  
 第2回福島第一廃炉国際フォーラム講演資料より抜粋 (<http://ndf-forum.com/program/day2.html>, 2017年7月3日)

# PCV内部調査方針

1号機

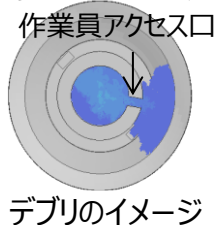


核燃料：約69トン

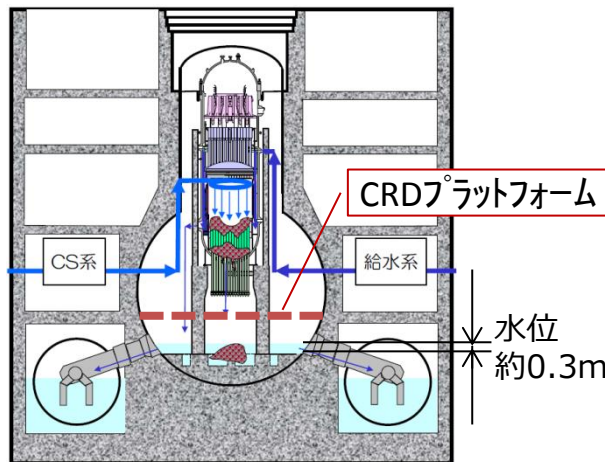
## デブリ量(トン)

炉内	15トン
炉外	264トン

ペDESTAL外側調査を優先(デブリのシェルへの到達状況)



2号機

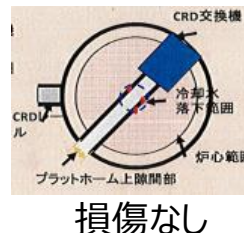


核燃料：約94トン

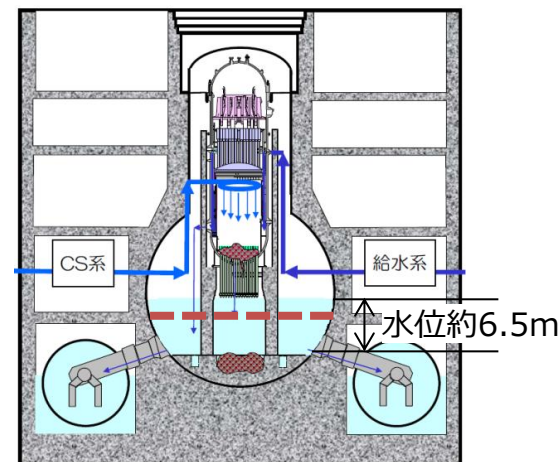
## 炉外のデブリ量(トン)

解析等	195トン
ミュオン調査	0~30トン

ペDESTAL内側調査を優先(プラットフォームの損傷状態)



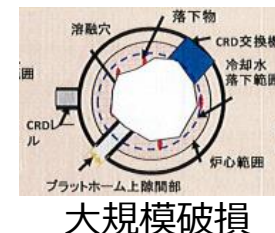
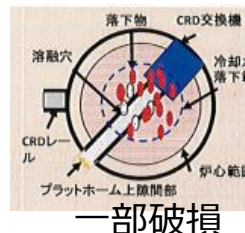
3号機



核燃料：約94トン

## デブリ量(トン)

炉内	21トン
炉外	343トン



# PCV内部のロボットによる調査

- 燃料デブリの広がりや格納容器内の損傷状況をさぐる
  - 1号機格納容器内 ペデスタル外
    - 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
  - 2号機格納容器内 ペデスタル内
    - CRDレールを経由して直接ペデスタル開口部へ侵入
  - 3号機格納容器内 ペデスタル内
    - 水位が高いため、遊泳ロボットを採用
    - 着水後、潜水によりペデスタル入口から内部へ

# 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）



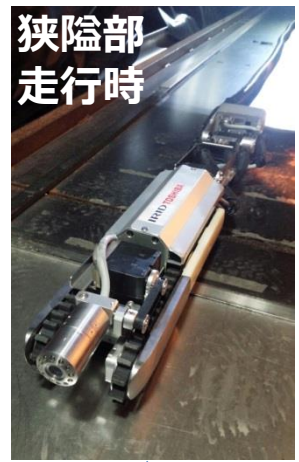
変形



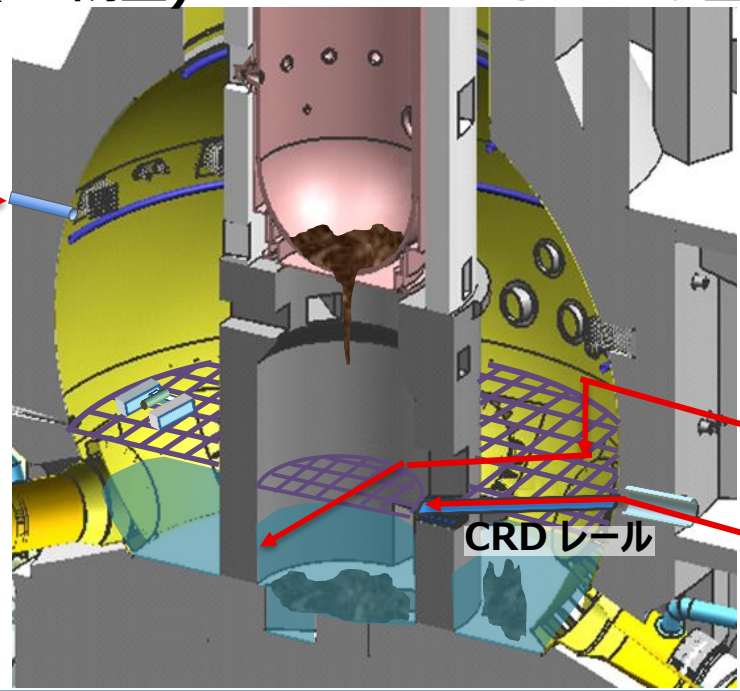
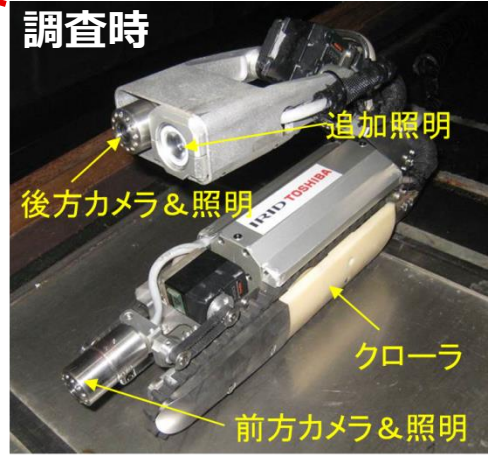
(注) 上の写真はB1調査時のロボットです。

## ペDESTAL内側の調査（2号機）

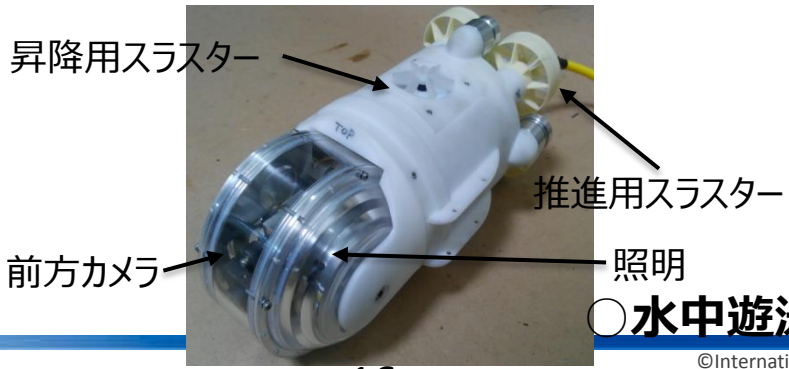
### ○クローラ型遠隔調査ロボット（A2調査）



変形



## ペDESTAL内側の調査（3号機）



### ○水中游泳型ロボット



# 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

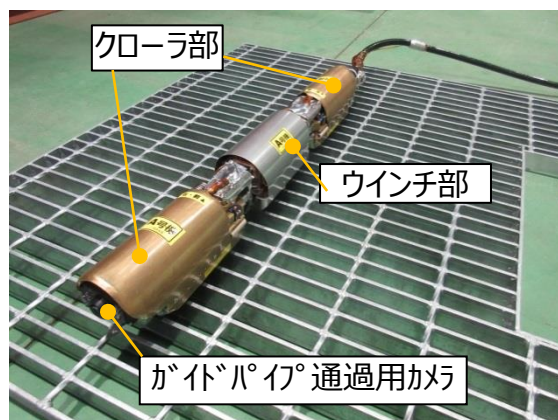
- 乱巻の抑制、干渉物の回避、ロボット放置時の処置
- ケーブル重量<ロボットのけん引力（調査範囲を制約）
- ケーブルサイズ・特性 [動力、制御、通信]（搭載機器を制約）

## ■ オペレーション

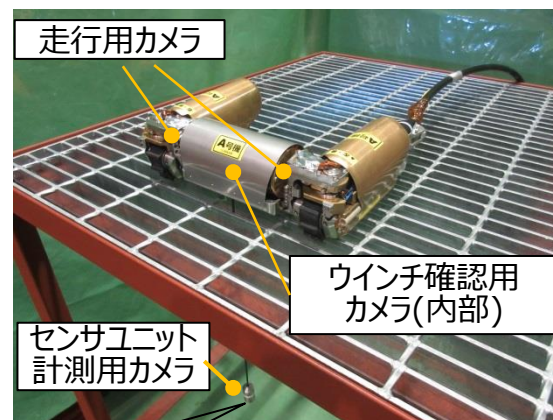
- （損傷）環境に応じた走破性
- 自己位置の確認方法、俯瞰カメラ、後部カメラ、ランドマークの活用
- 徹底した訓練、実機モックアップ試験

# 1号機 B2 調査ロボット「PMORPH (ピーモルフ)」

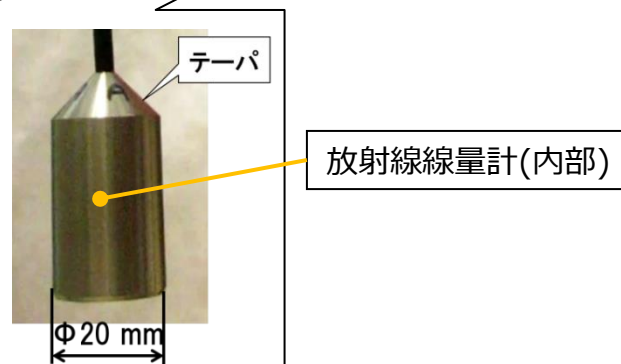
本体寸法	ガイドパイプ走行時：長さ699mm×幅72mm×高さ93mm グレーチング走行時：長さ316mm×幅286mm×高さ93mm
センサユニット寸法	幅20mm×高さ40mm      ケーブル：長さ3.5m
重量	約10kg
スぺック	カメラ×5、放射線線量計×1
耐放射線性	約1000Sv以上



I型(ガイドパイプ通過時)



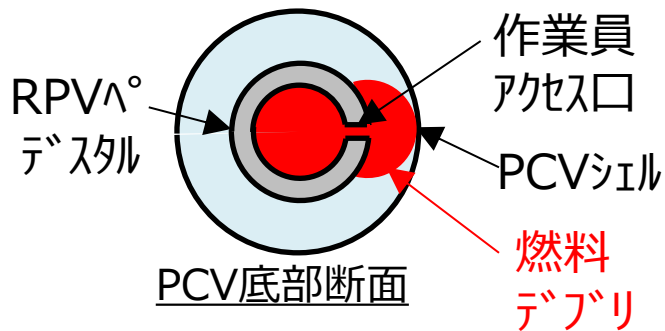
C型(平面走行時)



# 1号機ペデスタル外調査 (B2調査)

## 【調査目的】

- ① 燃料デブリの広がり状況の確認
- ② 燃料デブリのPCVシェルへの到達有無の確認



## 【実施時期】

2017年3月

## 【取得情報】

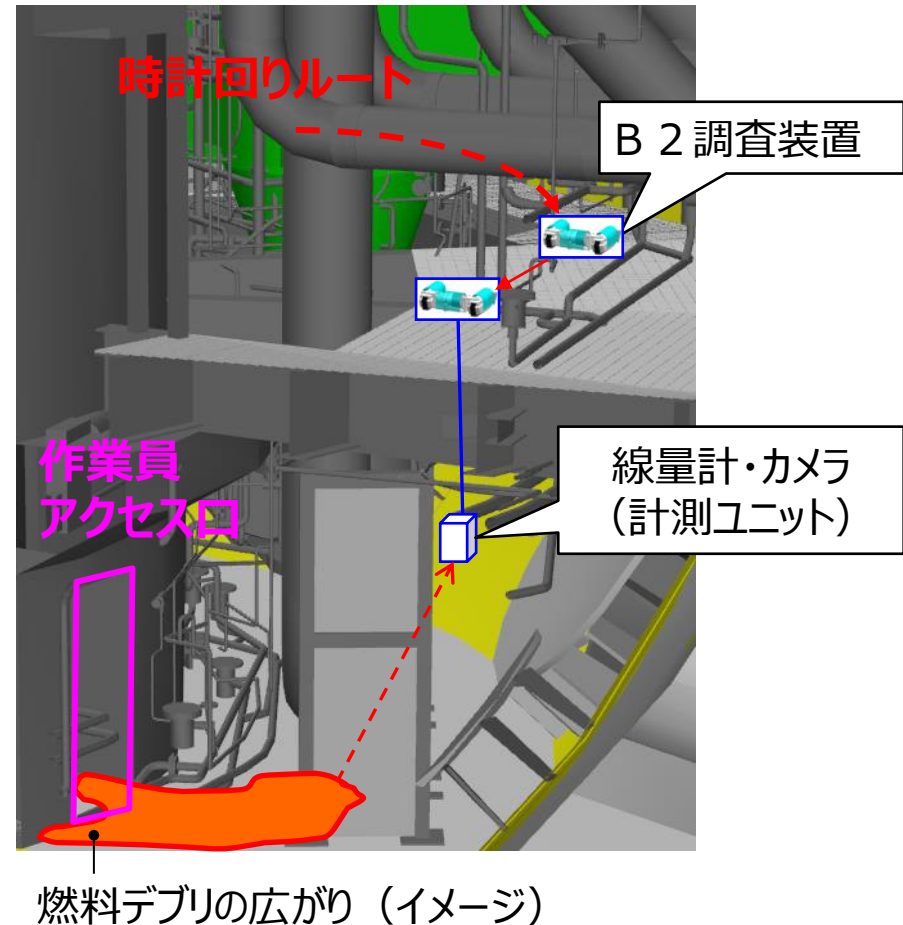
- 降下ポイントの高さ方向の線量率分布
- 地下階床面の近接映像

↓ 組合せ評価

①、②を判定

## 【調査工法】

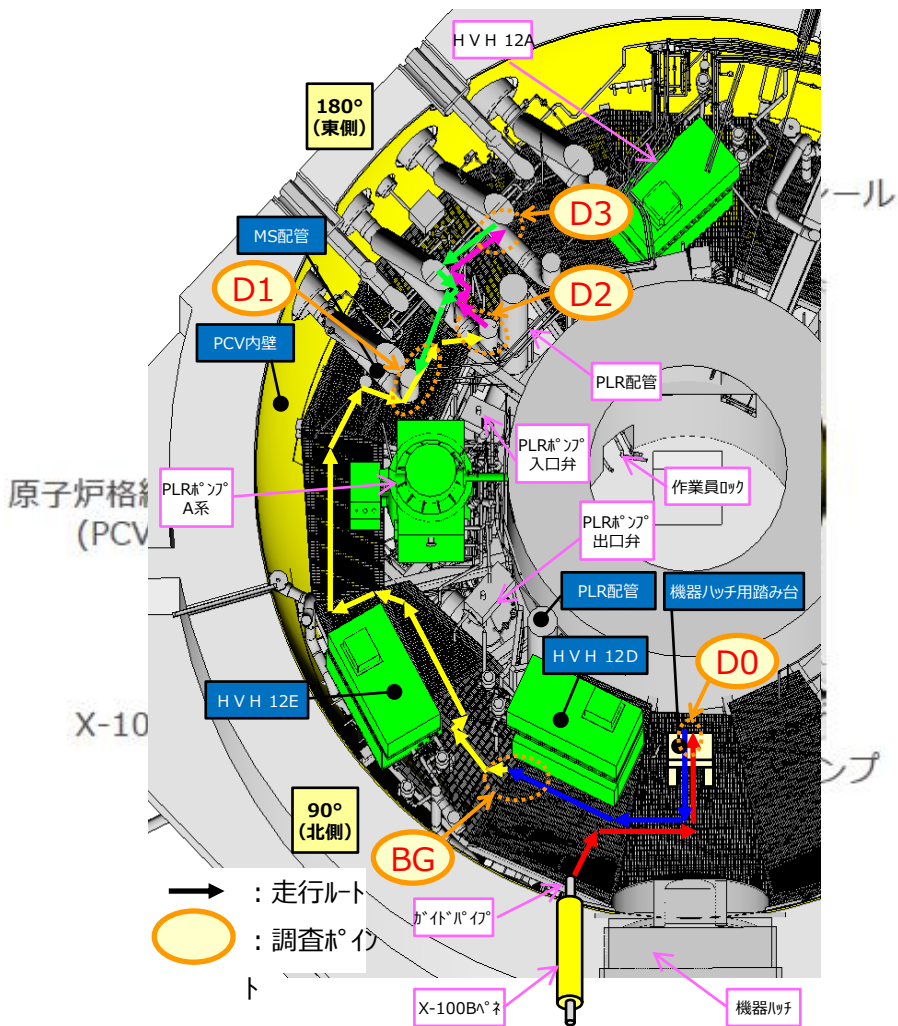
B2調査装置が1階グレーチング上を走行。線量計・カメラを降下させる。



# B2調査 調査ポイント

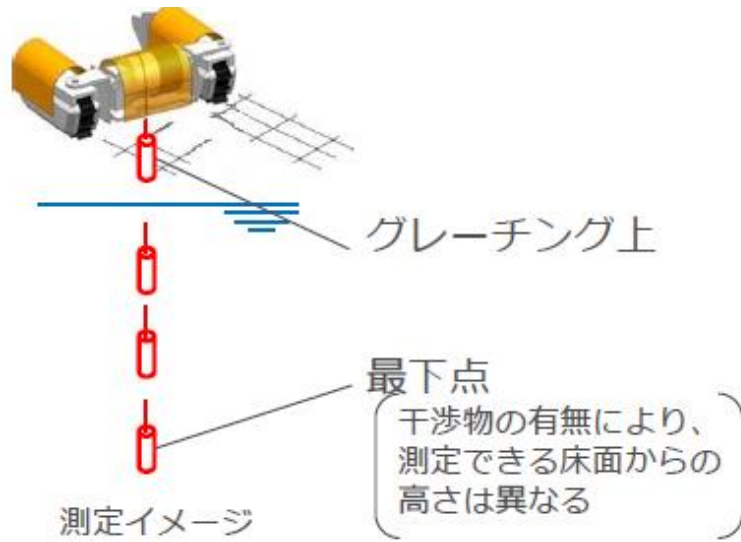
【調査日】平成29年3月18日～22日

【調査ポイント】5エリア (BG、D0、D1、D2、D3)



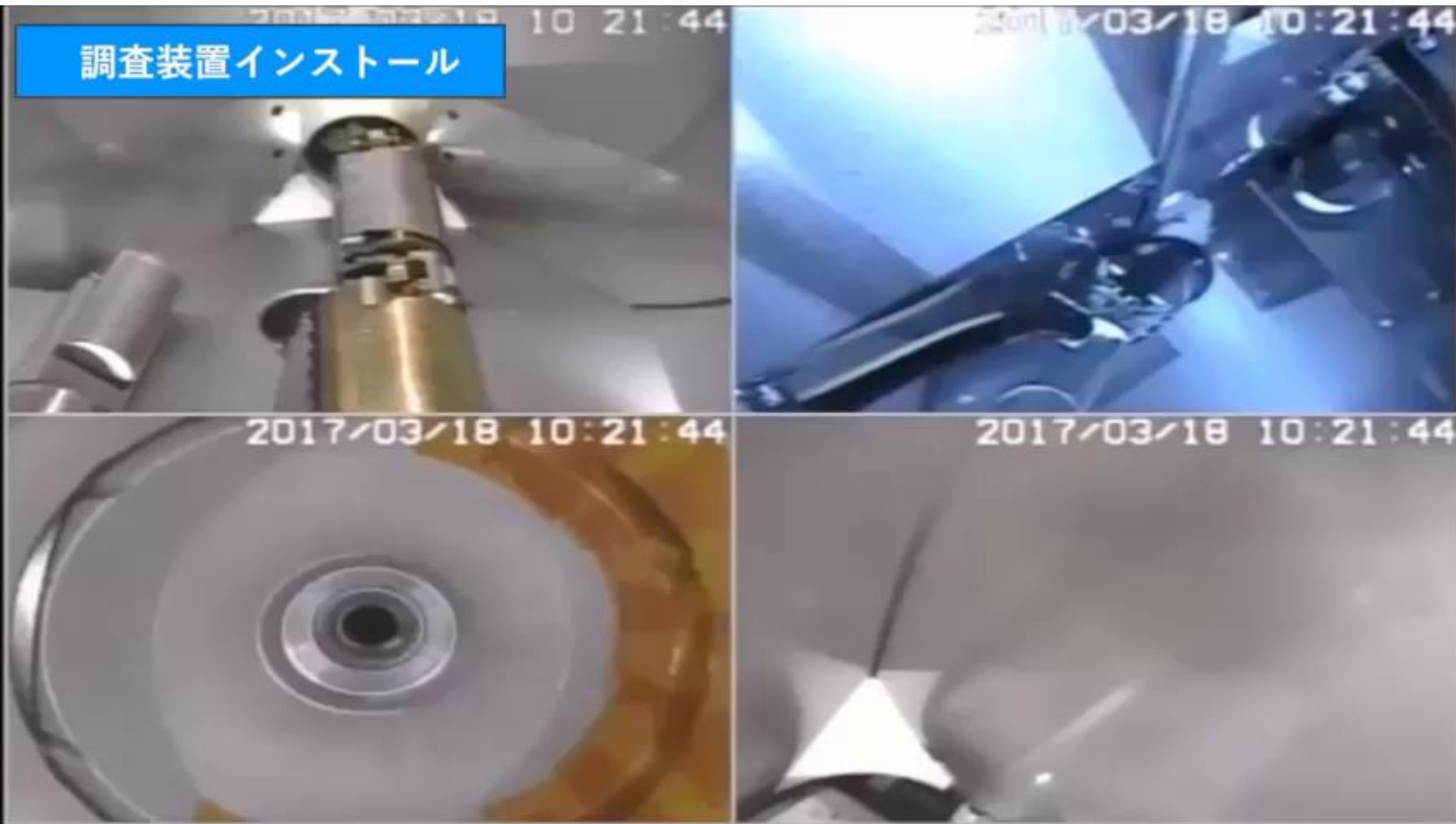
測定点	推定する内容
D0	ドレンサンプルからの燃料デブリの拡散有無
BG	D0～D3の測定に対するバックグラウンドレベルの把握
D1、D2	作業員アクセス開口からの燃料デブリの拡散有無
D3	PCVシェルに燃料デブリが到達している可能性

- 計測ユニットを底部まで下ろし、その後5 cm間隔で上昇させながら線量を測定。



# B2調査 (動画)

調査装置インストール



# B2調査 各調査ポイントの放射線量と画像

3/18 (土)

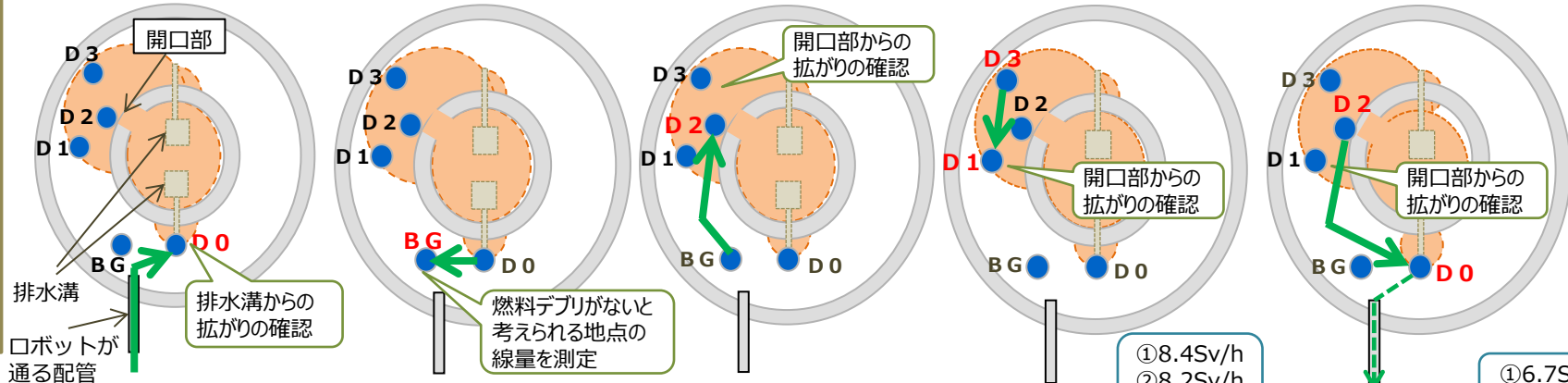
3/19 (日)

3/20 (月)

3/21 (火)

3/22 (水)

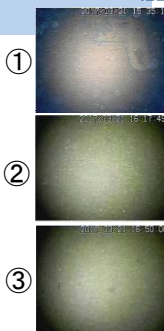
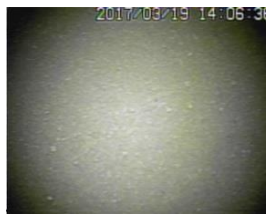
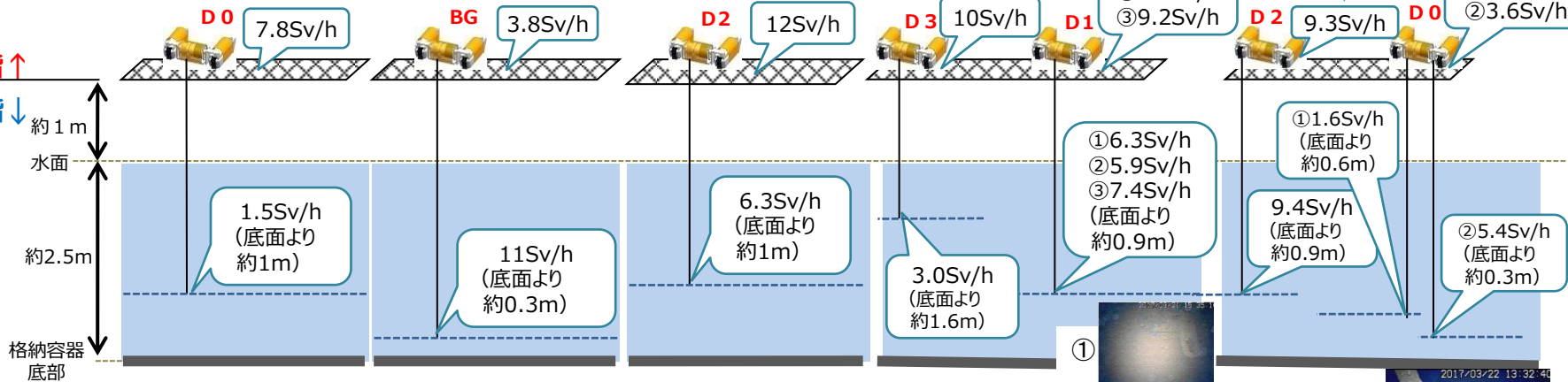
調査地点と調査の狙い  
(平面図)



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

# 1号機B2調査 まとめ ※

## <映像データの分析結果>

- ドレンサンプから距離の近いD0ポイント付近の映像データの分析の結果、ドレンサンプ（X-100B側）周辺の視認される構造物（鋼材、バルブ）に大きな損傷や倒壊がないことが確認できた。

## <線量データの分析結果>

- BGにおける堆積物表面の主線源の推定結果から、堆積物表面の主線源はCs-137であると推定できた。
- BG及びD0③においては、堆積物厚さが薄く、堆積物表面にCs-137を仮定した場合の解析で測定値と解析結果が良好な一致を示していることから、燃料デブリが存在していないか、又は存在しても少量であると推定できた。
- ペデスタル開口部から距離が近いD1、D2ポイントにおける線量率評価を実施したが、今回の条件における解析結果においては、堆積物表面高さが高く、堆積物中に燃料デブリが存在するかどうかは推定出来なかった。

## <今後の検討方針>

- 今回の調査結果及びX-100Bペネの直下で採取した堆積物の特性等を踏まえ、次回調査範囲と方法について検討を行う。

# 2号機ペデスタル内上部調査 (A2調査)

## 【調査方法】

- カメラによる撮影

## 【実施時期】

- 2017年1~2月

ペネ内事前確認

## 調査手順

1. ペデスタル内事前確認

2017年1月30日実施

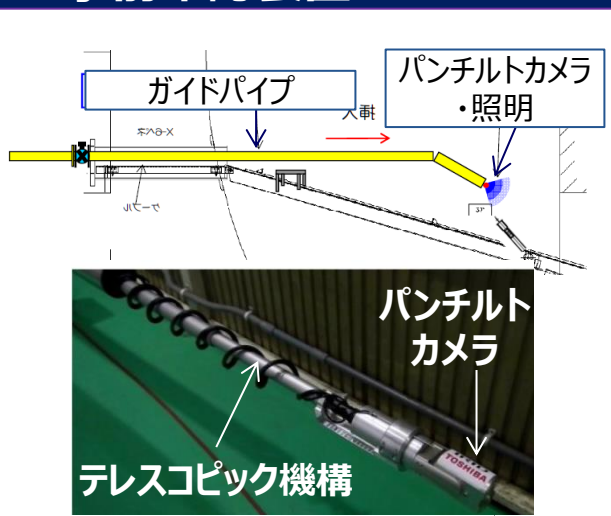
2. レール上堆積物除去

2月9日実施

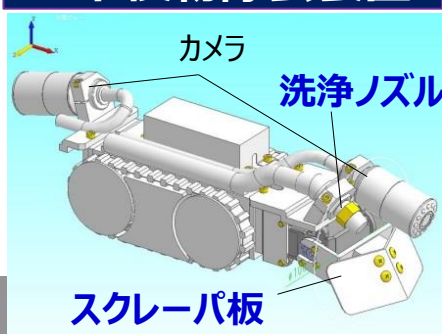
3. A2調査

2月16日実施

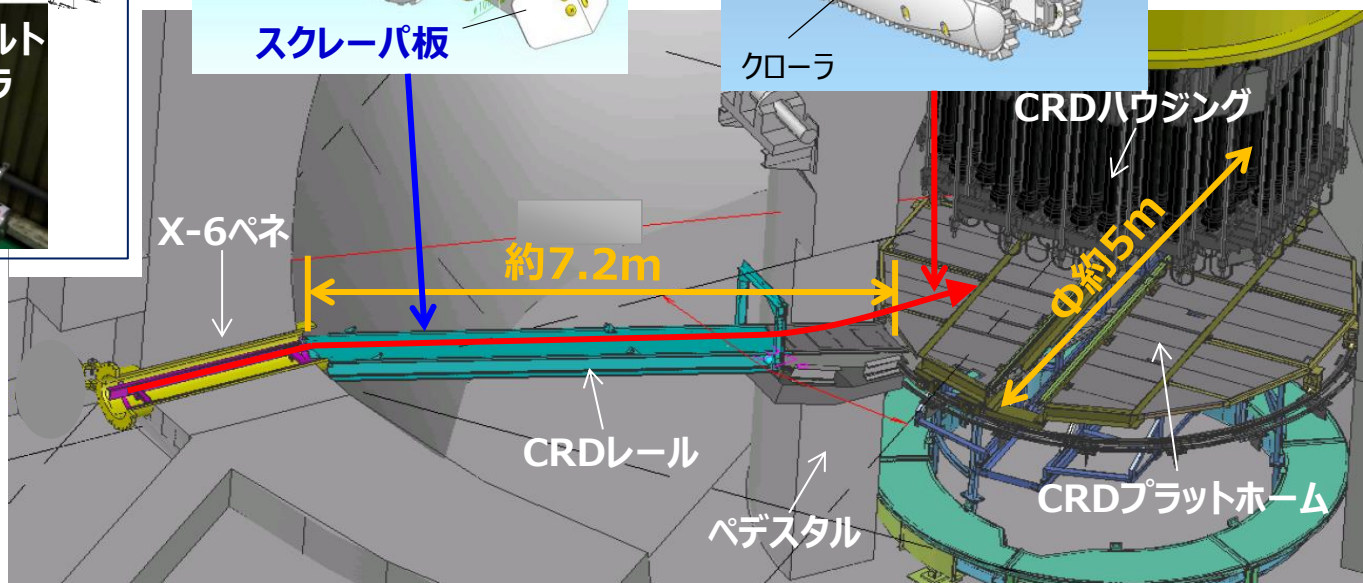
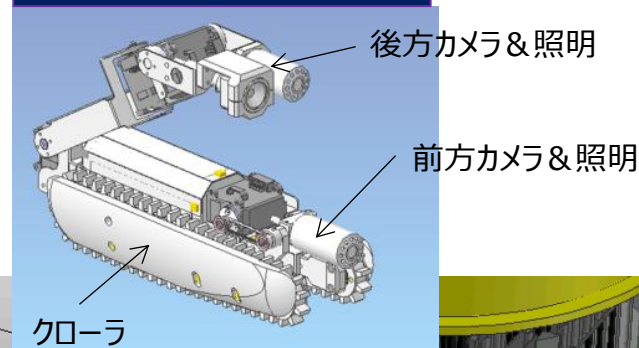
## 1. 事前確認装置



## 2. 堆積物除去装置



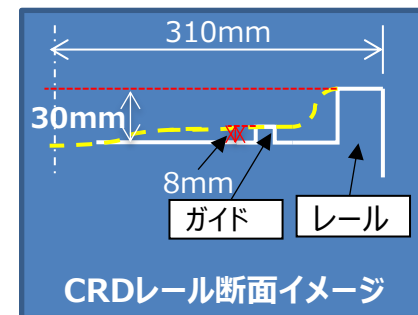
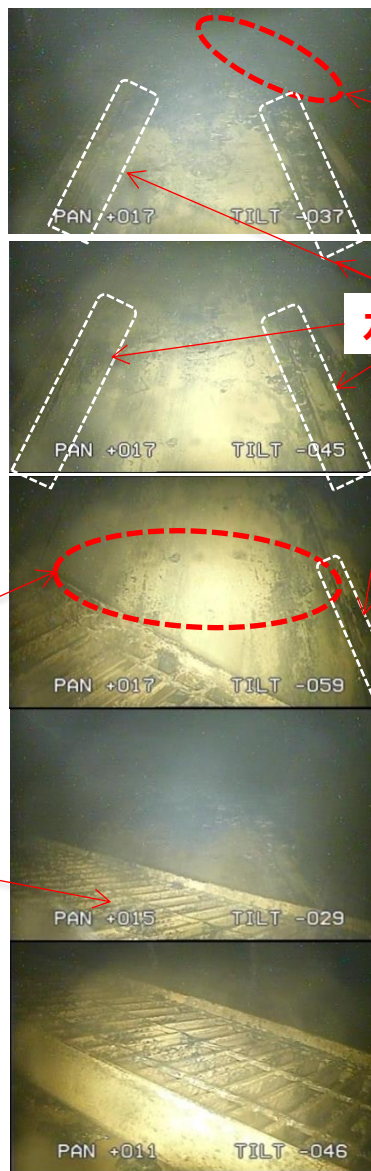
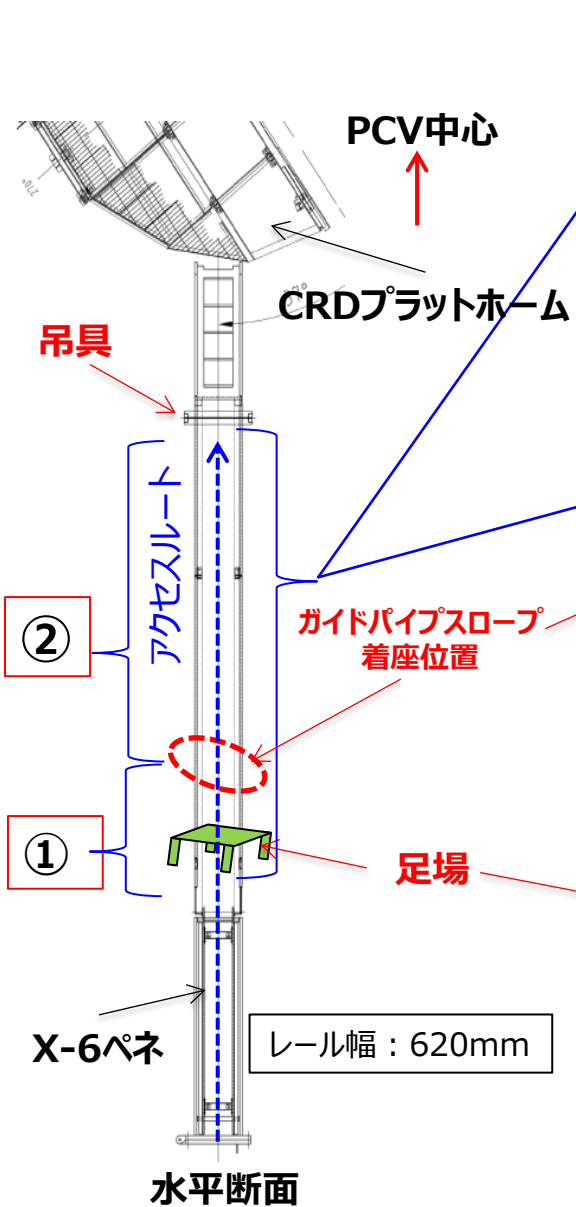
## 3. A2調査装置





# 2号機CRDレール調査結果

調査日：2017年1月30日



## ② 吊具手前のCRDレール：

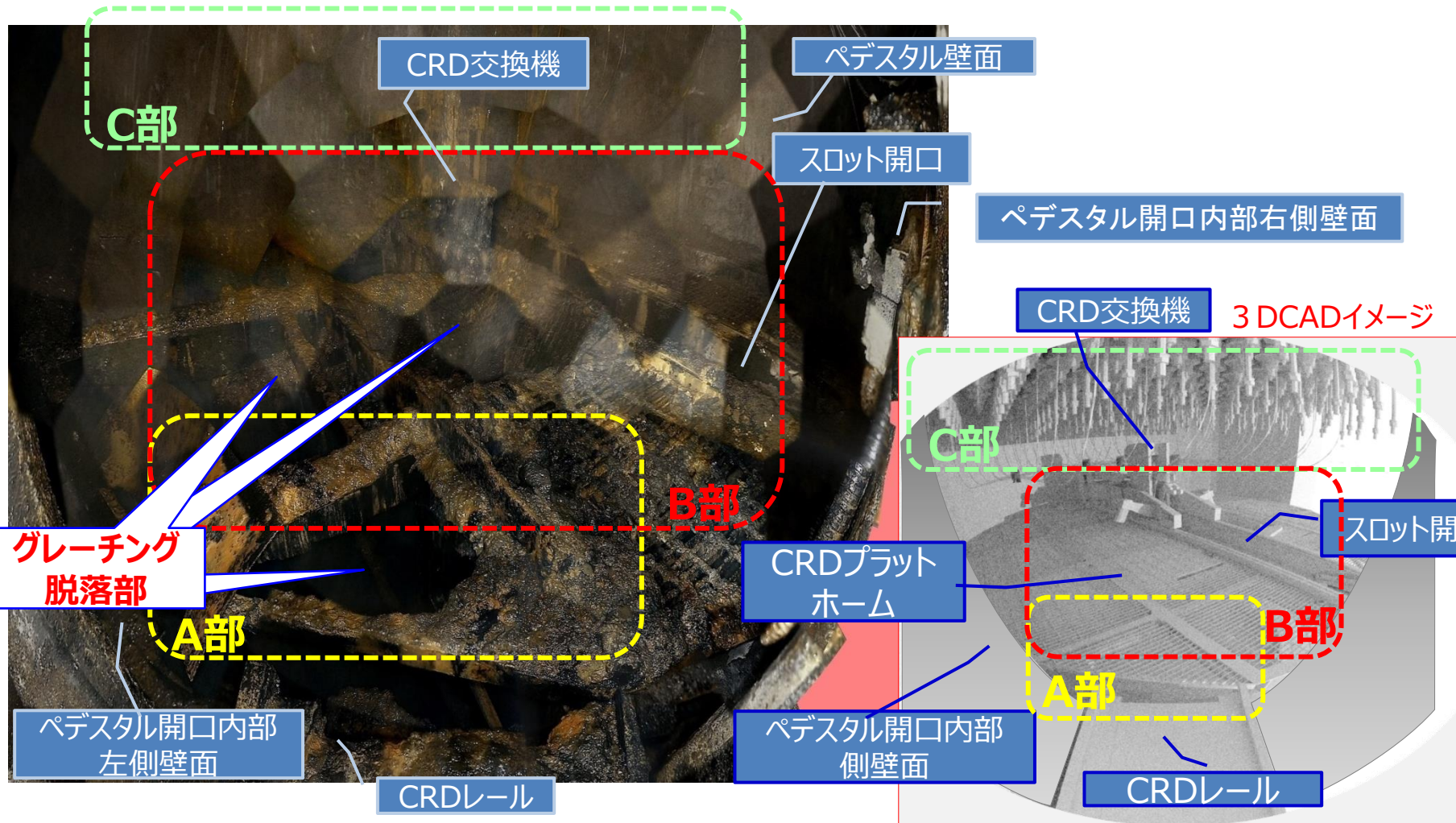
- 大きな障害物はない。
- ガイドが確認される。
- **吊具に近づくにつれて堆積物が増加。**
- CRDレール右端部に堆積物がたまっている。

## ① ガイドパイプ着座位置の確認：

- CRDレール上に足場はあるが、調査装置のガイドパイプスロープの**着座位置に干渉物／堆積物は無い。**

# 2号機ペDESTAL内調査結果

調査日：2017年1月30日

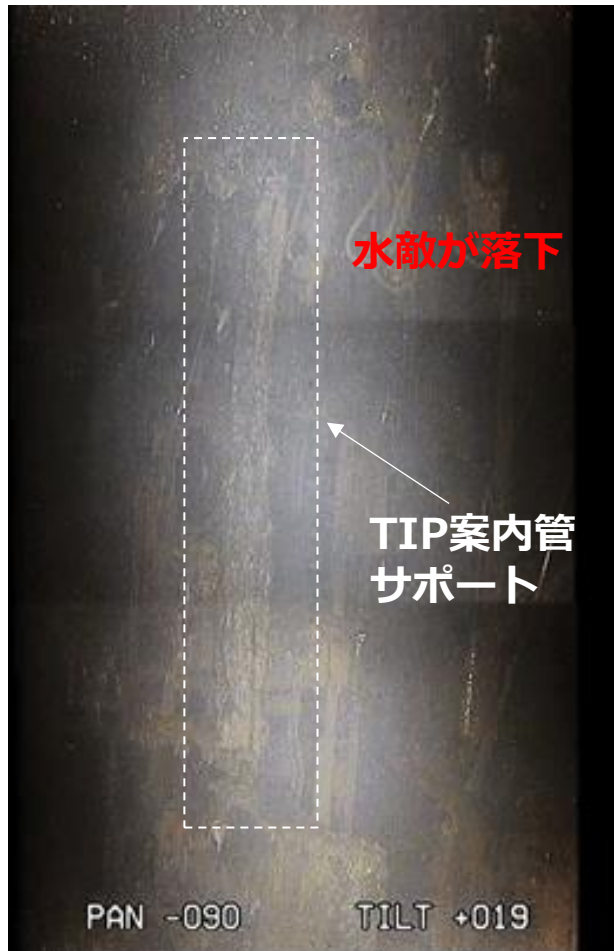


▶ CRDプラットホームの**グレーチングが脱落**しているが、フレームは残存している。

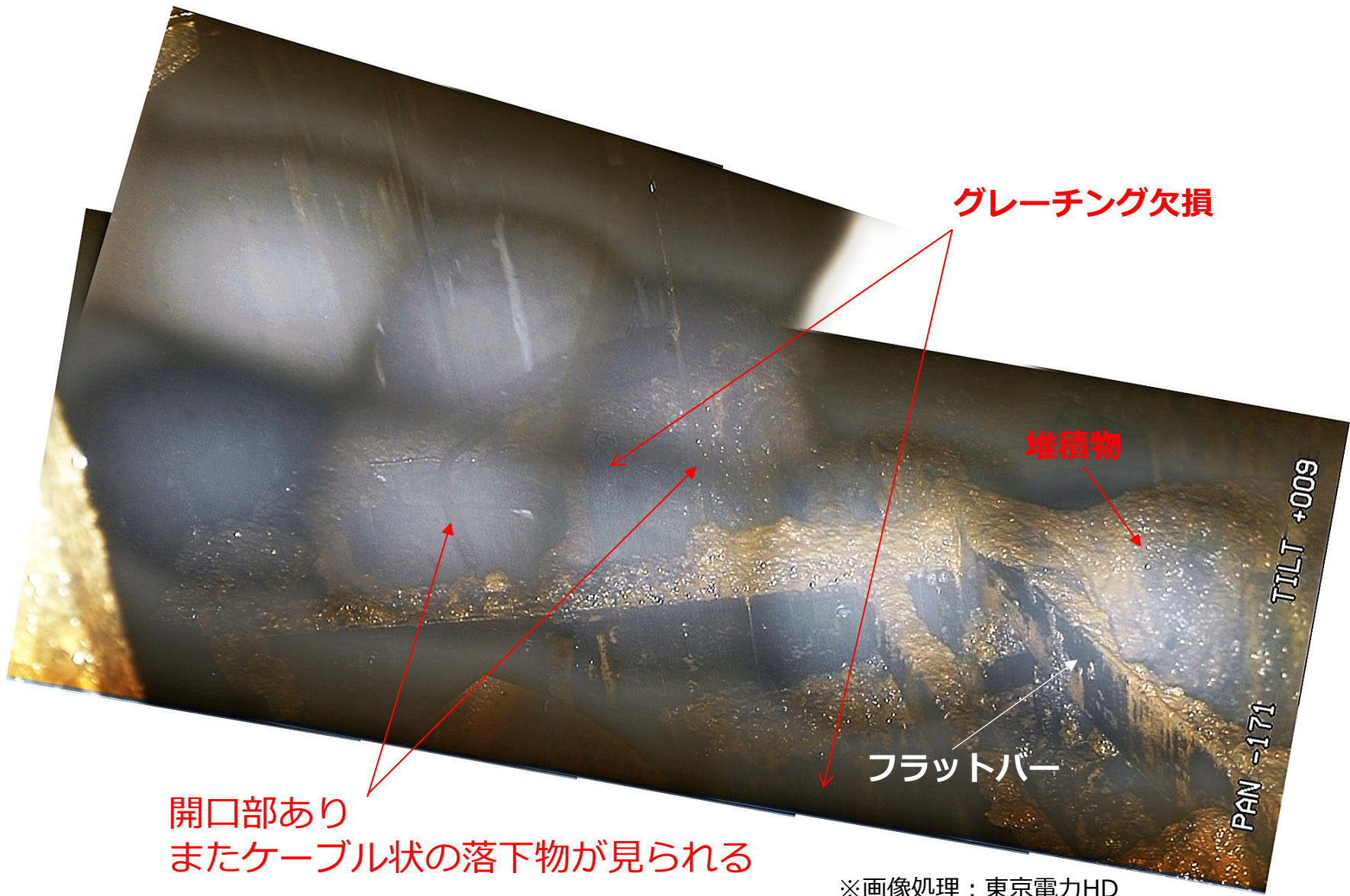
※上記画像は、東電HDにて鮮明化した画像をもとに画質改善したものを全天球化

## ペDEST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



# ペデスタル内（プラットフォーム 左奥側）



開口部あり  
またケーブル状の落下物が見られる

グレーチング欠損

堆積物

フラットバー

PAN -171  
TILT +009

※画像処理：東京電力HD

# ペデスタル内（プラットフォーム 右奥側）

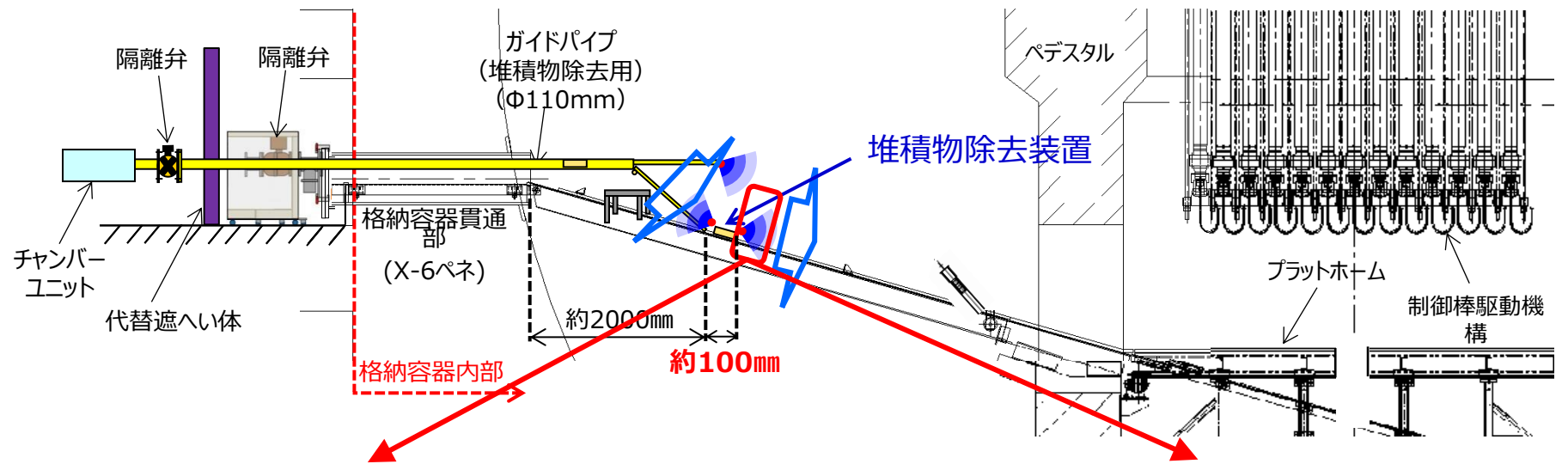


※画像処理：東京電力HD

# 2号機CRDレール堆積物除去

調査日：2017年2月9日

## ガイドパイプ着座位置付近



<ガイドパイプカメラの画像>

<堆積物除去装置前方カメラの画像>



堆積物除去前

堆積物除去後

堆積物除去前

堆積物除去後

出典：2017.2.9東電HD公表資料

## 2号機堆積物除去装置(動画)



## 2号機A2調査装置(サソロボ動画)





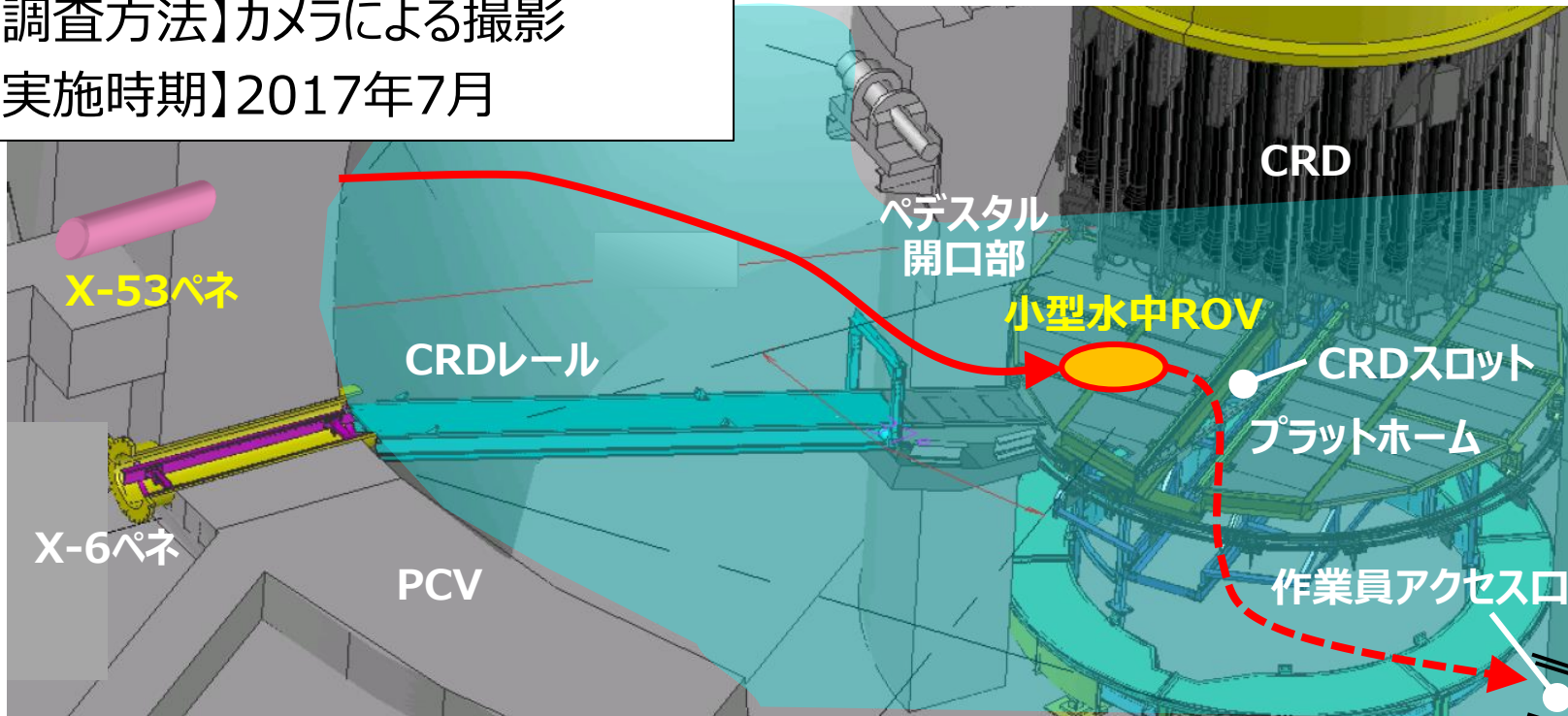
## 2号機A2調査 まとめ（推定事項）

- ① 燃料デブリの一部は圧力容器からペDESTAL下部に移行した可能性がある。
  - 量と広がりは不明。今後ペDESTAL下部での燃料デブリ落下状況の詳細調査が必要。
- ② ペDESTALプラットフォームには事故前と同様の空間が残っていて大規模な機器の落下物はないことから、次フェーズペDESTAL内部調査においてアクセス上の大きな障害はないものと推定される。
- ③ 今後のデブリサンプリングや横取出しのアクセスルートとしてX6ペネトレーションは1つの有力な候補となる。

### 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

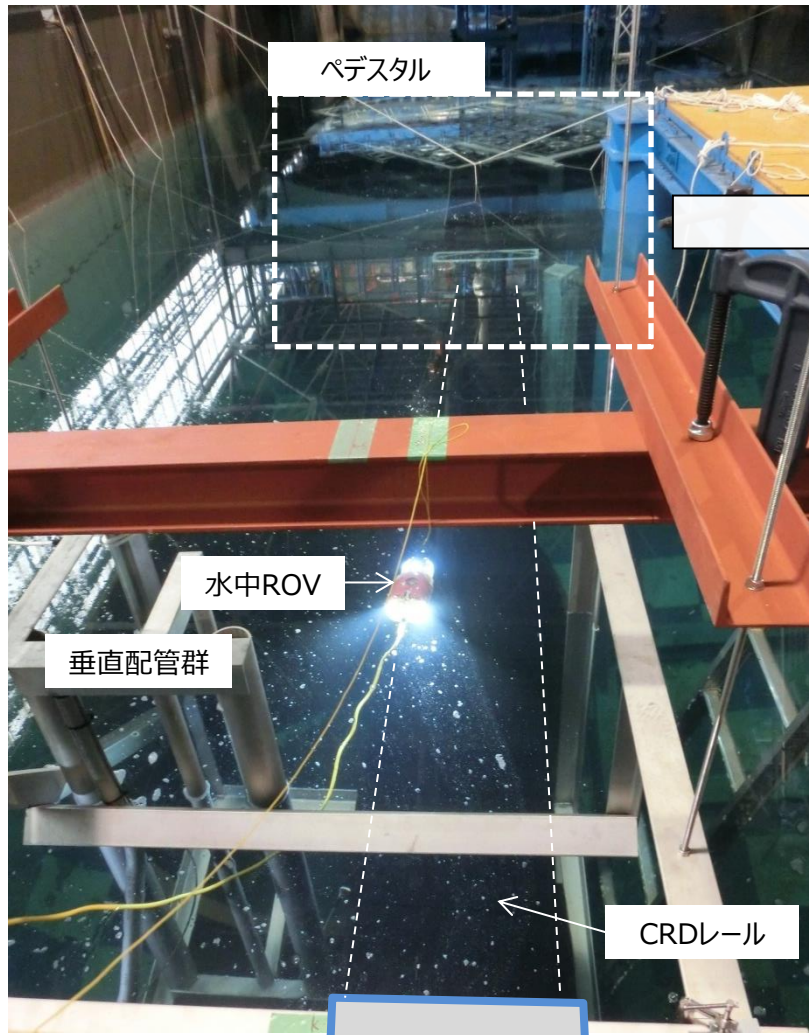
照明

後方カメラ



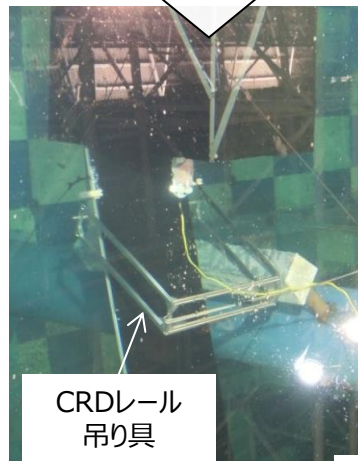
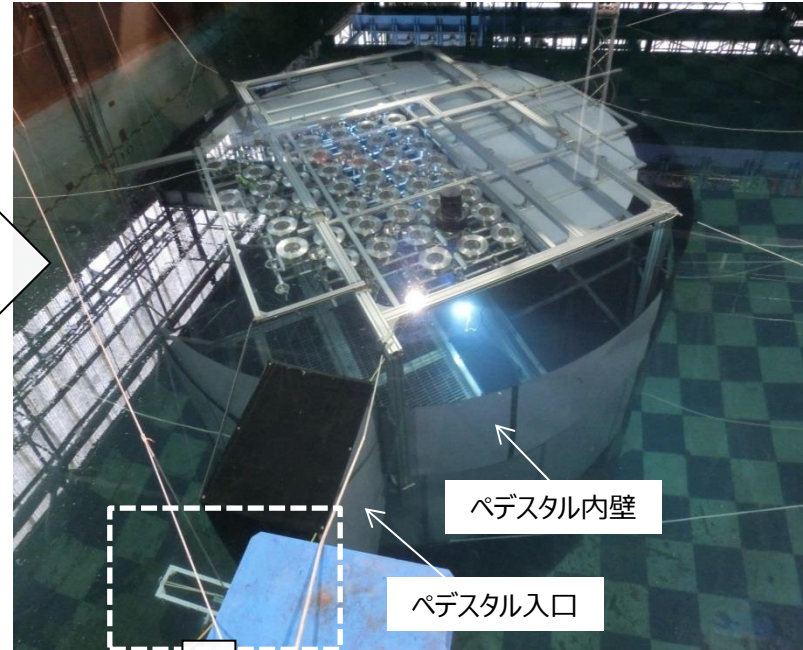
照明

# 3号機フルモックアップ試験



←X-53ペネ

X-6ペネ



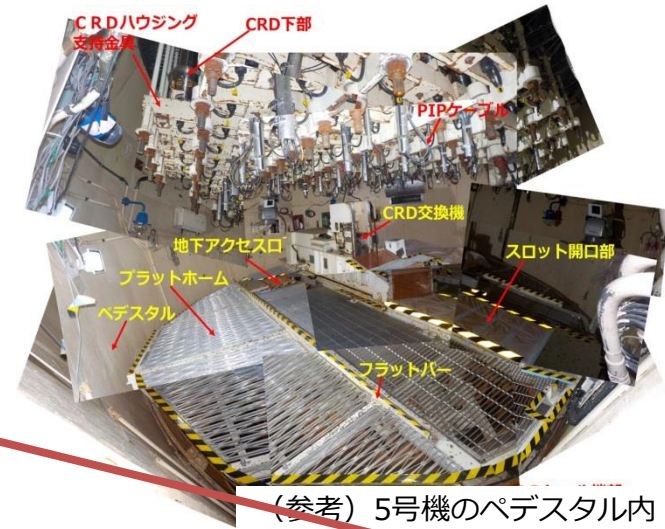
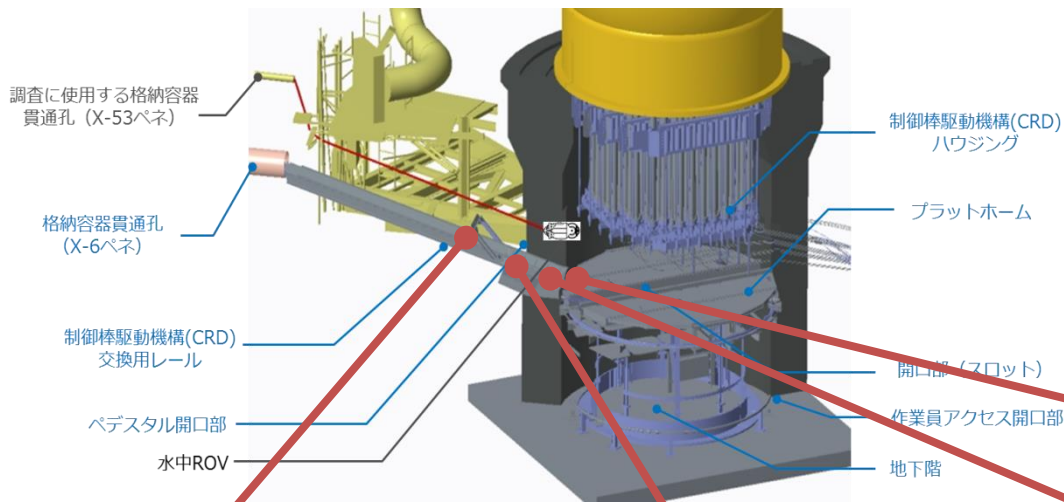
# 3号機フルモックアップ試験(動画)

# 3号機水中ROV撮影映像(動画)

隔離弁 開



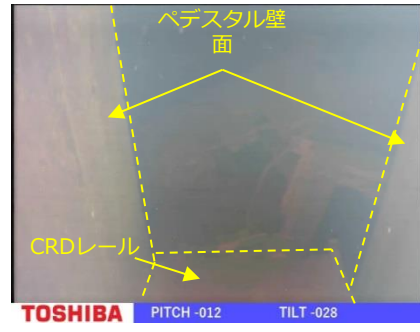
# 画像取得結果 (CRDレール～ペDESTAL開口部)



No.1



No.2



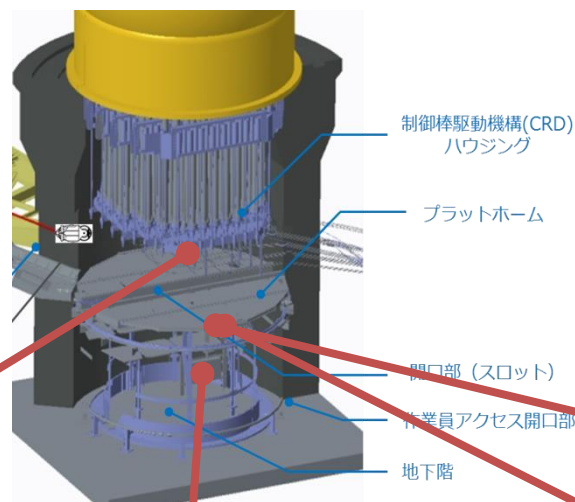
No.3



No.4

・ペDESTAL内において複数の構造物の損傷を確認した。

# 画像取得結果(ペDESTAL内)



TOSHIBA PITCH -013 TILT -092

No.16



TOSHIBA PITCH -011 TILT -073

No.17



TOSHIBA PITCH -009 TILT -090

No.18



TOSHIBA PITCH 005 TILT -053

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。



## 3号機格納容器内調査 当座のまとめ

3号機ペデスタル内部の状況を初めて撮影。

ペデスタル内部において、溶融物が固化したと思われるものや、複数の構造物の損傷を確認することができた。

- CRDハウジング支持金具の複数箇所では損傷が確認され、CRDハウジング支持金具に溶融物が固化したと思われるものが付着していることを確認した。
- ペデスタル下部において溶融物が固化したと思われるものやグレーチング等の複数の落下物、堆積物を確認した。

得られた画像データを元に、ペデスタル内部等の状況を継続確認する。

# 今後の展開を考える

## ■ PCV内調査の拡充：燃料デブリの所在（分布・量）

- 得られた情報の活用
- 獲得したノウハウ（例）
  - バウンダリの確保、ケーブルマネジメント、確実な回収、耐放射線を考慮した機器、PCV外準備作業 遠隔操作、モックアップ訓練の効果 etc
- 教訓・課題（例）
  - 走破性、干渉物（損傷機器）への対応、堆積物
  - 自己位置確認
  - ロボットサイズ、機能拡張、貫通部口径の拡大 etc

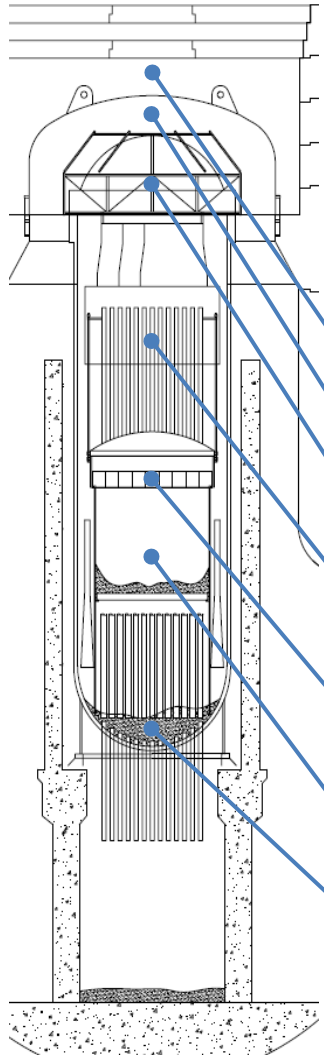
## ■ RPV内の調査

## ■ 燃料デブリのサンプリング

# RPV内部調査技術（開発中）

## 開発目的

RPVおよびRPV内の炉内構造物の損傷状況や燃料デブリの状態を調べる。



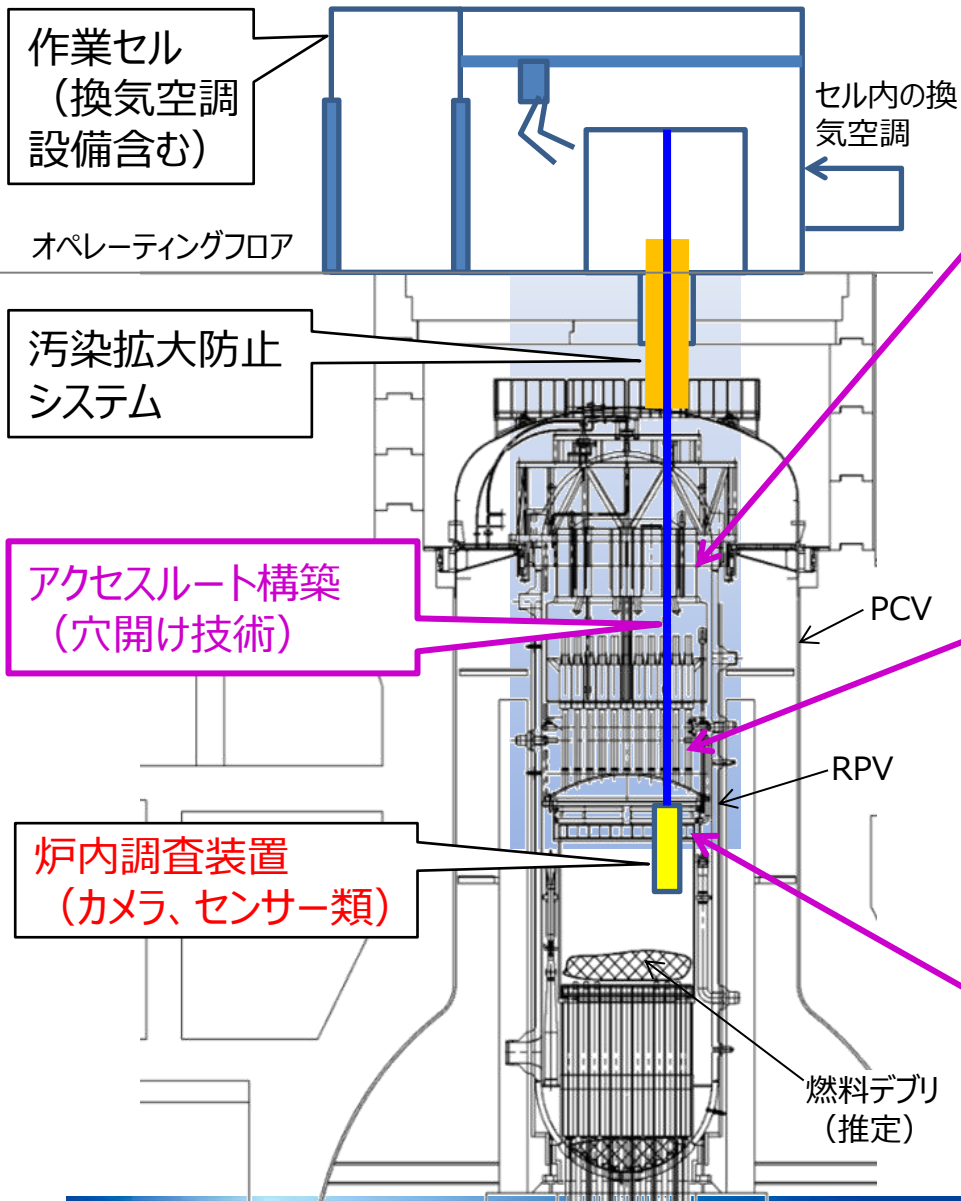
## <調査部位・項目>

調査部位	調査項目						
	線量率	汚染 状況	損傷状況			水位	デブリ 状況
			炉内 構造物	RPV	燃料 集合体		
原子炉ウェル	○	—	—	—	—	—	—
PCVヘッド内側	○	◎	○	◎	—	—	—
RPVヘッド内側	○	◎	○	◎	—	—	—
ドライヤ/ セパレータ	○	◎	○	—	—	—	—
炉心上部 上部格子板	◎	—	◎	—	◎	—	—
炉心中央	◎	—	◎	—	◎	—	◎
炉心下部～炉 底部	—	—	○	—	—	◎	◎

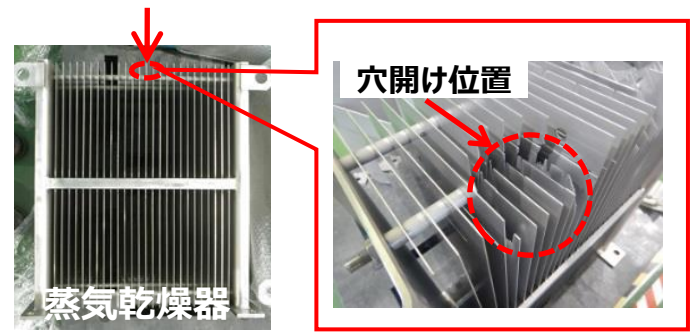
◎：直接的に測定したいデータ

○：◎のデータから間接的に推測可能

# 上部穴あけによるRPV内部調査



上部からの穴開け加工



上部からの穴開け加工

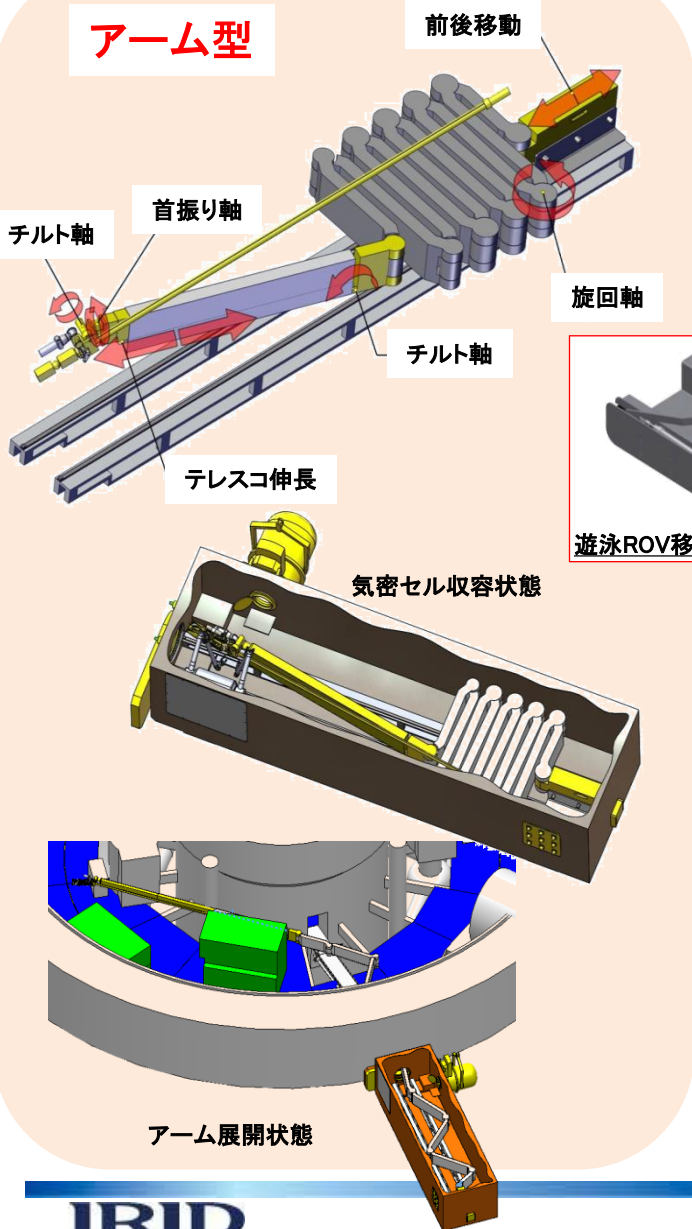


上部からの穴開け加工

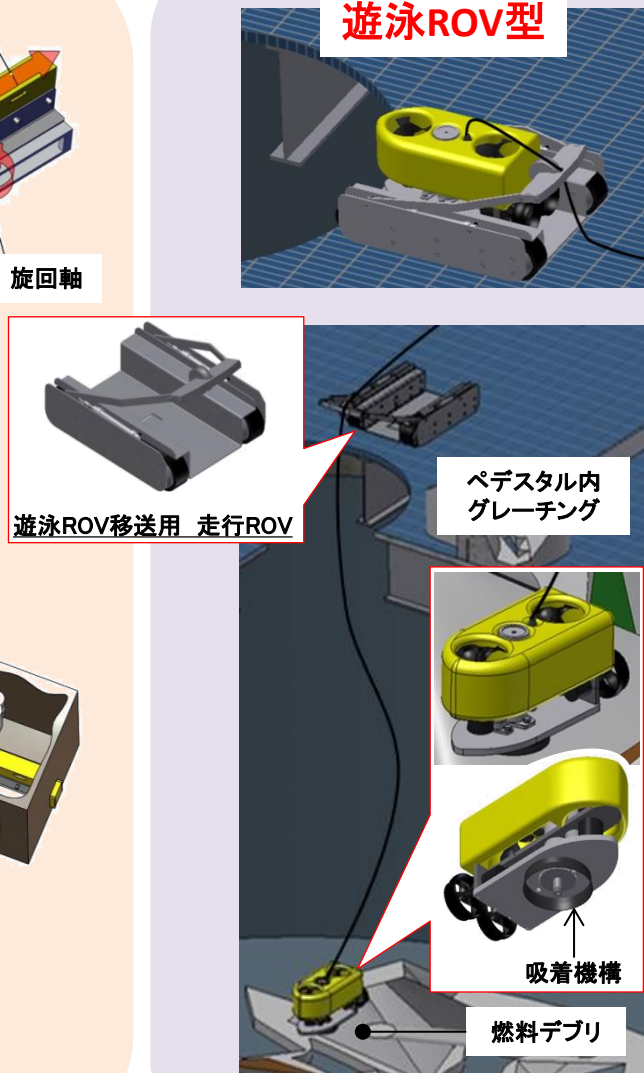


# 燃料デブリサンプリング（アクセス装置）の検討例

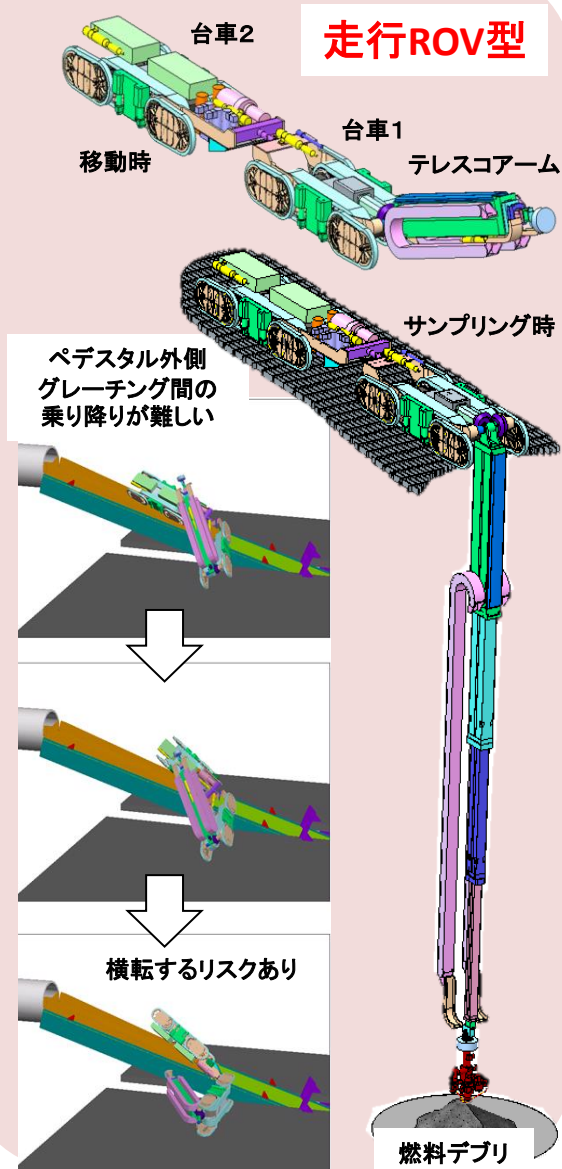
## アーム型



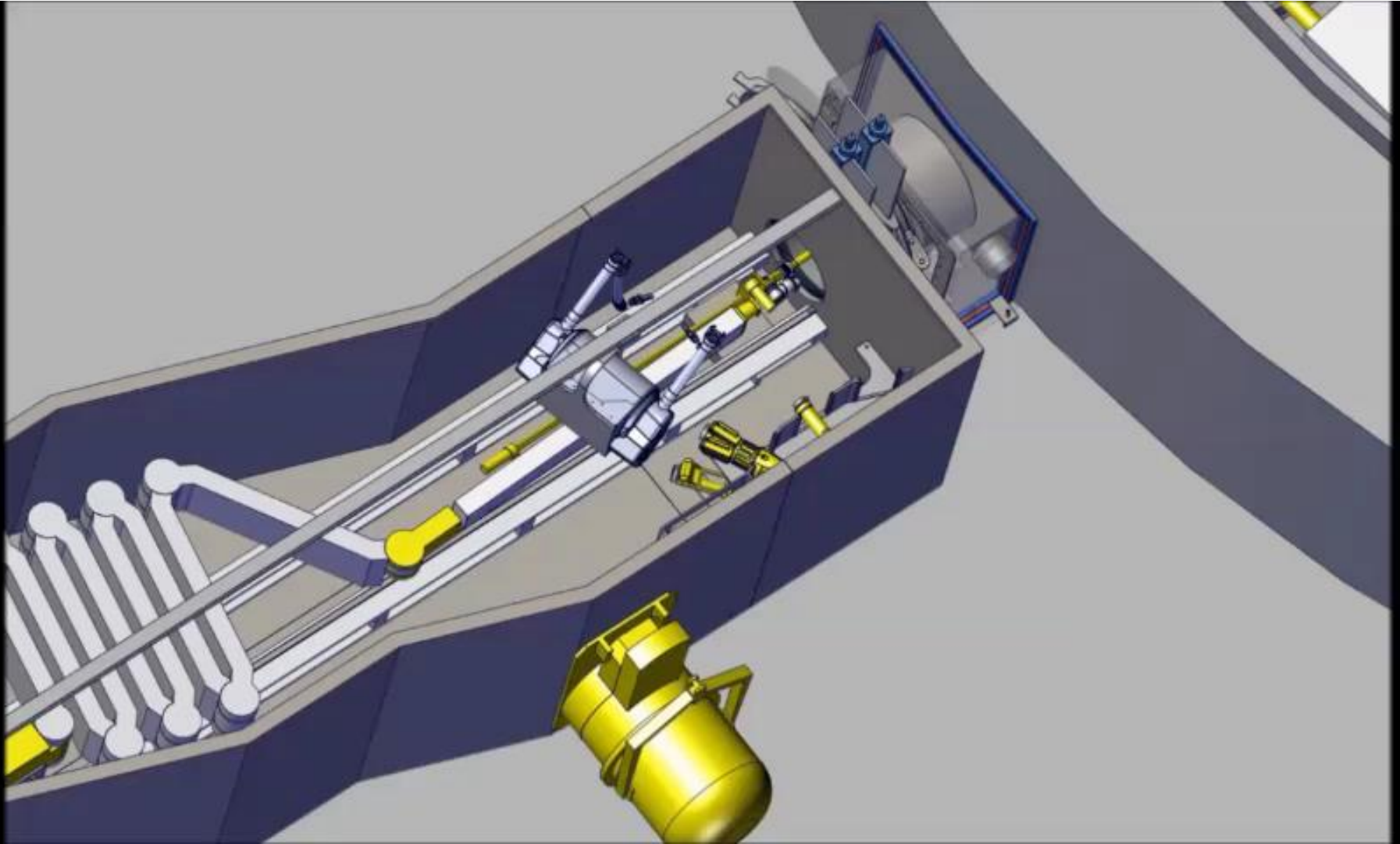
## 遊泳ROV型



## 走行ROV型



# ペDESTラル内デブリサンプリング(動画)



**ご清聴ありがとうございました。**