

# 「燃料デブリの分析に向けたJAEAの取り組み」

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
福島廃炉安全工学研究所

## (1) 燃料デブリを分析する目的

- ▶ 燃料デブリの性状については様々な推定がなされているが、取り出し規模の拡大に向けて必要となる実物の性状は分かっていない。
- ▶ 取り出された燃料デブリをJAEAにて分析し、物理的・化学的性状を把握することで、東京電力福島第一原子力発電所廃炉の重要な情報が得られる。

### 少量の燃料デブリの分析・評価

数グラムの燃料デブリ試料でも事故時の炉内状況の履歴を保持しているので分析結果から様々な情報が分かる。

＜実際の燃料デブリを分析することにより、以下の情報が推定可能＞

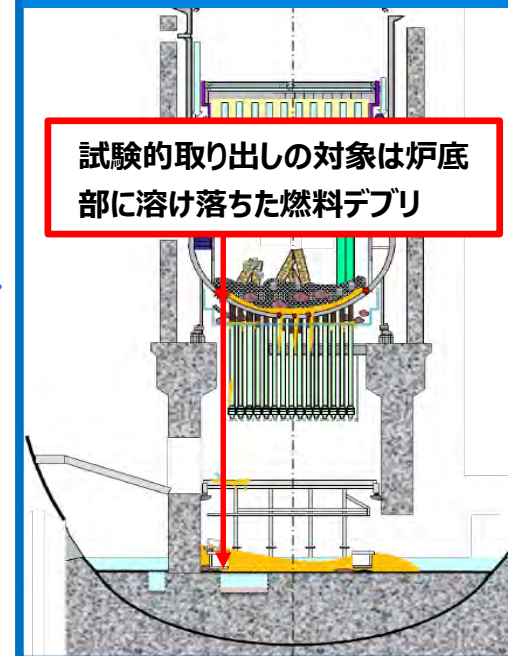
- 金属組成 ⇒ もとになった部材、臨界の可能性
- 結晶構造 ⇒ 溶融温度、冷却速度
- 酸化状態 ⇒ 生成時の雰囲気、硬さ

### 燃料デブリ取り出しの具体的な方策検討への貢献

“炉内状況推定”の「燃料デブリ取り出し方策検討」への反映例

- 燃料デブリの硬さ → 取り出し工法・工具の選定
- 燃料デブリの臨界の可能性 → 安全対策、保管方法の検討

### より現実に近い炉内状況の推定



試験的取り出しの対象は炉底部に溶け落ちた燃料デブリ

2号機炉内状況推定図

- 炉内構造物の損傷状況、燃料デブリの性状及び分布を推定したもの。
- 事故時プラントデータ、事故進展解析、模擬試験、炉内調査結果等の科学的根拠に基づき作成。
- 燃料デブリの分析・評価結果を反映させることにより、推定の信頼性が向上する。

- ▶ 試験的に取り出された燃料デブリをJAEA茨城地区の施設で受入れ、分析する体制を整備。
  - ▶ 分析結果の確認の観点から、複数の施設で特徴を活かした様々な分析を実施し、分析結果の信頼性を補完。
- ➡東京電力福島第一原子力発電所の廃炉における燃料デブリ取り出し検討へ貢献

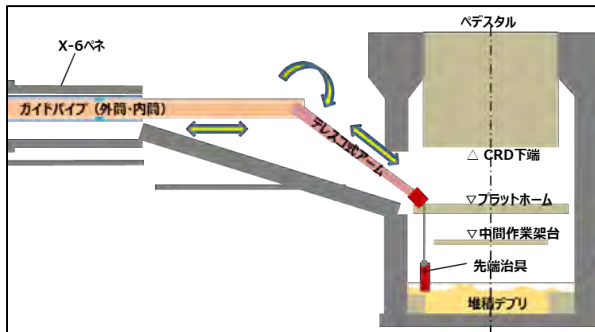
### ◆ JAEA大洗研・原科研は燃料デブリ分析に最適な施設を有する

東京電力  
福島第一原子力発電所  
(2号機)



燃料デブリ取り出し後、速やかに輸送予定。(数グラム)

テレスコピック式試験的取り出し装置イメージ



- ① ガイドパイプで貫通孔 (X-6ペネ) から挿入
- ② ベDESTAL手前でテレスコ式アームを下降
- ③ 先端治具をベDESTAL底部まで釣り下ろして、デブリを採取

出展：東京電力HD

#### JAEA 大洗研究所

照射燃料集合体試験施設 (FMF)

◆ サンプル輸送のハブ機能

・非破壊分析 ・主に固体分析

- UやPu等の燃料由来の成分を中心に組成を分析
- サンプルに応じてX線CT等の非破壊分析、U粒子等の結晶状態等の固体分析を実施



照射燃料試験施設 (AGF)

・化学分析 (核種)

#### JAEA 原子力科学研究所

バックエンド研究施設 (BECKY)

- ・化学分析 (核種、元素)
- 主要構成元素の組成を分析




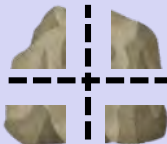

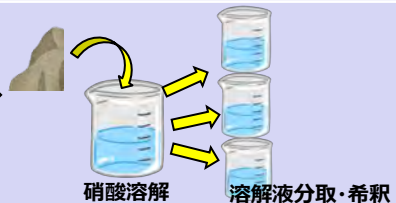





※ 研究4棟、燃料試験施設 (RFEF) も使用予定

サンプル量が少ない場合は、すべての施設を用いない場合あり。

日本核燃料開発 (株) (NFD)  
・U粒子等の結晶状態を詳細に分析

MHI原子力研究開発 (株) (NDC)  
・微量元素を含む元素組成及び同位体比を分析

➤ 非破壊・固体・化学分析を一連で実施することで、燃料デブリの性状を物理的・化学的に解明。

	非破壊分析	固体分析	化学分析
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 外観観察</li> <li>2) 重量測定</li> <li>3) 線量測定</li> <li>4) X線CTにより主に密度分布を測定</li> <li>5) 電界放出走査型電子顕微鏡・波長分散型X線分析 (FE-SEM-WDX) によりウランを探索</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 少量サンプルを切断、包埋・研磨</li> <li>2) 電界放出走査型電子顕微鏡・波長分散型X線分析により構成元素を測定</li> <li>3) 精密加工、微細加工、加工確認</li> <li>4) 透過型電子顕微鏡・エネルギー分散型X線分析 (TEM-EDX) により結晶構造を測定</li> <li>5) 二次イオン質量分析 (SIMS) によりウラン粒子中のウラン同位体比を測定</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 硝酸溶解・定容</li> <li>2) 溶解液分取・希釈</li> <li>3) 化学分離</li> <li>4) 誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) により核種・元素量を測定</li> </ol>
分析の流れ	<p>数グラム</p>  <p>燃料デブリ</p>	 <p>切断、研磨</p>  <p>微細加工 樹脂包埋</p>	 <p>硝酸溶解 溶解液分取・希釈</p>
	 <p>X線CT装置 (構造図)</p>  <p>FE-SEM-WDX装置</p>	 <p>TEM-EDX装置</p>  <p>SIMS装置</p>	 <p>ICP-MS装置</p>
分析の内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>○外観</li> <li>○重量</li> <li>○線量</li> <li>○表面の元素分布等</li> </ul> <p>※サンプル量により実施出来ない分析項目もある</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ウラン燃料と周辺材料（ジルカロイやステンレス鋼等）との反応生成物（ウラン粒子等）の結晶状態</li> <li>○ウラン粒子等の結晶状態</li> <li>○放射光分析結果から、微小結晶構造やウラン価数等評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○核物質や中性子吸収物質及び発熱性核種の濃度</li> <li>○主要構成元素の組成</li> <li>○微量元素を含む元素組成及びウラン同位体比</li> </ul>
分析の目的	固体分析や化学分析での着目箇所を決定	事故時の炉内状況（熔融温度、冷却速度、デブリ生成時雰囲気等）を推定	デブリの構成材料や臨界の可能性等の基礎データを取得



- 燃料デブリの試験的取り出しで、様々な分析による燃料デブリの生成過程の推定や炉内状況推定の検証が可能。
- 燃料デブリを安全に回収し、十分に管理された安定保管を行うため、燃料デブリ取り出し本格化に向けた検討の基礎となる。

### 情報集約・提供システム構築

▲廃炉研究基盤データベース“debrisWiki”

#### ●少量の燃料デブリで分かること

数グラムの燃料デブリでも事故時の炉内状況の履歴を保持しているので分析結果から様々な情報が分かる。

◆ 鉱物学、冶金学等の知見に基づく評価

▲ 燃料デブリ生成過程（炉内の温度変化等）を推定

燃料デブリ生成過程の推定  
分析結果の解析

分析（少量サンプル）

- ◆ 非破壊分析
- ◆ 固体分析
- ◆ 化学分析



▲ TEM（透過型電子顕微鏡）により詳細観察したウラン粒子

燃料デブリ性状・炉内分布の推定

◆ 検証試験



▲ 燃料デブリ生成メカニズムの検証

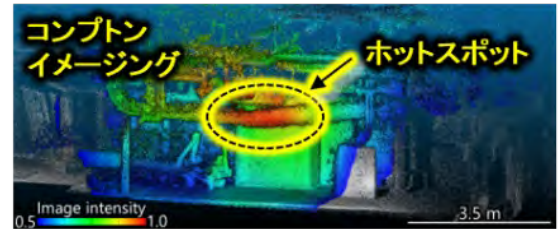
安全着実な燃料デブリ取り出し作業

◆ 分別管理に向けた技術開発

▲ 燃料デブリ仕分けのための非破壊計測技術

・ 燃料デブリを安全に回収  
・ 十分に管理された安定保管

- ◆ シミュレーション技術開発
- ◆ 放射線計測・可視化技術開発
- ◆ その場分析・測定技術開発



▲ 汚染状況の可視化

# 「燃料デブリの分析に向けたJAEAの取り組み」

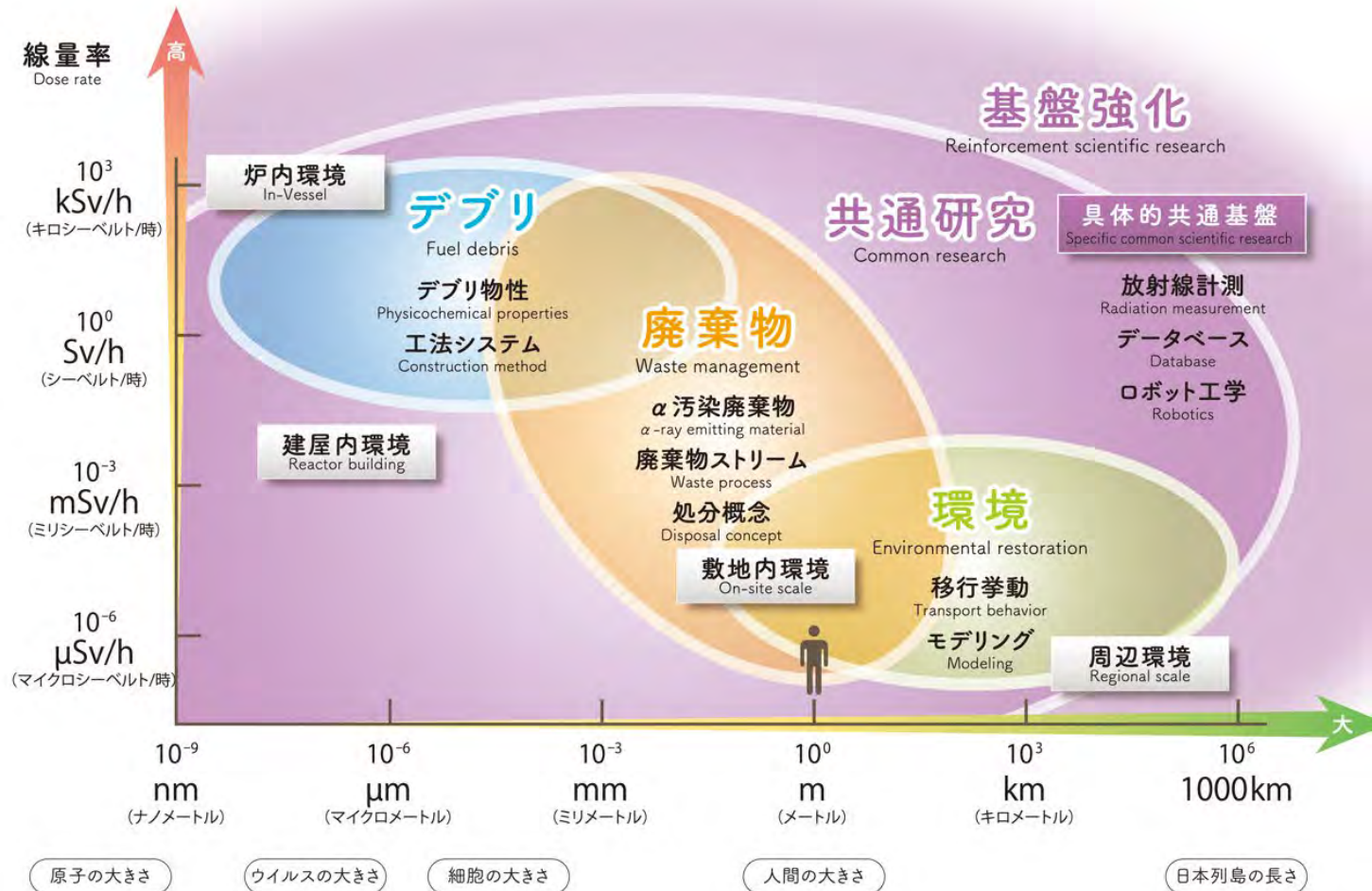
## 【参考資料集】

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
福島廃炉安全工学研究所

- (1) JAEA福島関連研究の全体像 –線量率と研究対象の関係–
- (2) 東京電力福島第一原子力発電所廃炉に向けたJAEAの研究開発
- (3) 堆積物サンプル分析による燃料デブリ等の状況推定
- (4) 燃料デブリ生成メカニズムの検証
- (5) 燃料デブリの“その場”分析システムの開発
- (6) 炉内線量率分布予測シミュレーション
- (7) データベース (debrisWiki) の構築・拡充、3D化 (debrisEye) による利用促進
- (8)–① 放射線可視化技術の開発 (iRIS)
- (8)–② 線量・線源逆推定評価システムの開発
- (8)–③  $\alpha$ ダストの“その場”計測システムの開発
- (9) 燃料デブリと廃棄物の合理的な分別管理
- (10) 原子炉内の燃料デブリ
- (11) 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリとTMI-2燃料デブリの比較
- (12) 燃料デブリの状態 炉内状況推定図 (1～3号機)

## (1) JAEA 福島関連研究の全体像 – 線量率と研究対象の関係 –

- JAEAでは、福島において廃炉や環境回復に向けた様々な研究開発を実施している。
- その中でも、燃料デブリ分野は極めて高線量下での廃炉作業を想定した安全対策や被ばく管理に関する研究開発である。





(2) 東京電力福島第一原子力発電所廃炉に向けたJAEAの研究開発

NDF戦略プランでは「燃料デブリを安全に回収し、十分に管理された安定保管の状態にする」ことが目標

◆ 得られた情報は本格的取り出しに活用



**【分析研究開発】**

- (1)燃料デブリの受入れ・分析体制の整備〔再掲〕
- (2)燃料デブリの分析項目・分析フロー〔再掲〕
- (3)堆積物サンプル分析による燃料デブリ等の状況推定



**【放射線計測・可視化技術】**

- (1)放射線可視化技術の開発：iRIS、逆推定評価
- (2) $\alpha$ ダストの“その場”計測システムの開発



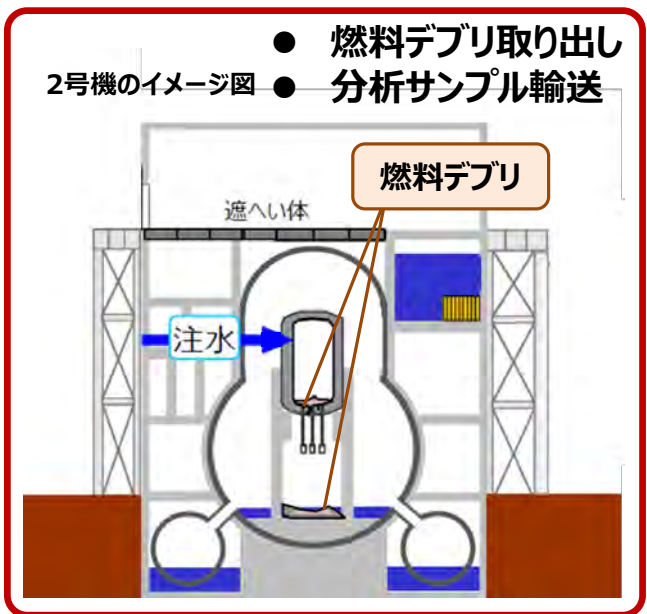
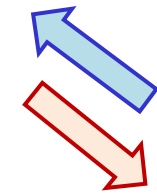
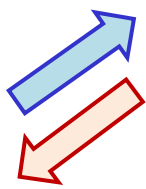
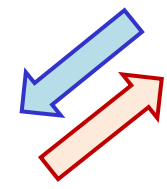
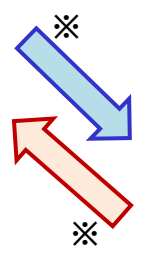
**【炉内状況把握】**

- (1)燃料デブリ生成メカニズムの検証
- (2)燃料デブリの“その場”分析システムの開発
- (3)炉内線量率分布予測シミュレーション（粒子輸送モンテカルロ計算コード）
- (4)情報利活用データベース（debrisWiki）の構築・拡充、3D化（debrisEye）による利用促進



**【分別管理に向けた技術開発】**

- (1)燃料デブリと廃棄物の合理的な分別管理



廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第126回）資料2より引用、一部追記等

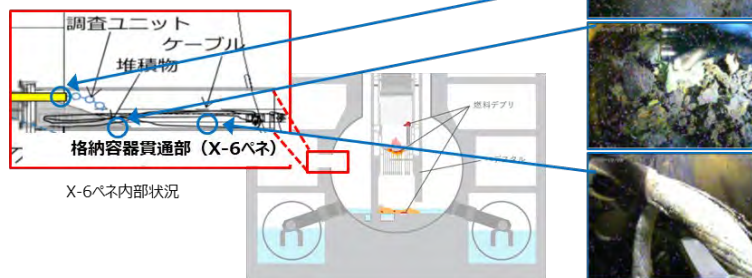
※矢印の凡例  
 : 研究成果、分析結果・評価等  
 : 取り出し作業で得られた情報、分析サンプル等

## (3) 堆積物サンプル分析による燃料デブリ等の状況推定

- 堆積物サンプル分析による燃料デブリ等の状況推定。
- 少量のサンプルの分析結果と燃料工学等の知見活用により、燃料デブリ生成過程を考察。
- 燃料デブリや原子炉格納容器（PCV）内部の状況推定、取り出し拡大の検討に寄与。

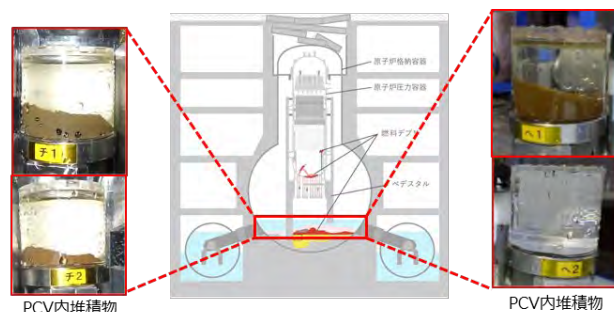
### 2号機X-6ペネ堆積物サンプリング調査

- 解放したハッチ内面の付着物の分析（2024年：実施中）  
⇒ 採取したスマア紙を大熊第1棟に移送・分析中
- ペネ内部調査装置付着物の分析（2020年）



出典：廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議(第84回)資料、東京電力HD

### 1号機PCV内部堆積物サンプリング調査



堆積物サンプリング期間  
2023/1/31~2/1, 2/10~2/11

出典：廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議(第111回)資料、東京電力HD

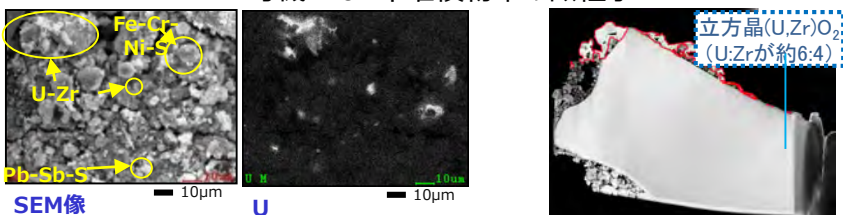
### 1号機PCV内部堆積物サンプリング調査

- 1号機PCV内部調査において吸引・採取された堆積物の分析（2023年度実施・2024年度一部継続）

### 2号機X-6ペネ堆積物を分析（調査装置付着物、2020年採取分）

- ◆ 燃料由来のUやFe、Zrを含む微粒子の詳細分析により、結晶構造から事故初期に約1600℃を超える高温状態から急速に冷却されたと推定した。

#### 2号機X-6ペネ堆積物中の微粒子



▲ SEM-EDXにより探索した各種微粒子

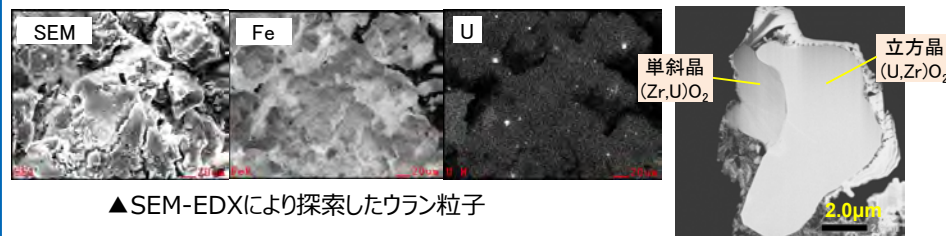
▲ TEMにより詳細観察したウラン粒子

SEM-EDX：走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型X線分析  
TEM：透過電子顕微鏡

### 1号機格納容器（PCV）内の堆積物を分析

- ◆ 堆積物サンプルは鉄を主成分とし、共存するウラン粒子は主に(U,Zr)O<sub>2</sub>固溶体であることを明らかにした。

#### 1号機堆積物サンプル中に見出されたウラン粒子



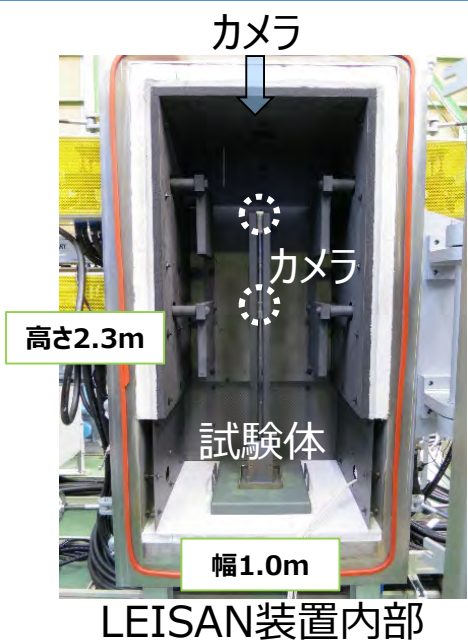
▲ SEM-EDXにより探索したウラン粒子

▲ TEMにより詳細観察したウラン粒子

## (4) 燃料デブリ生成メカニズムの検証

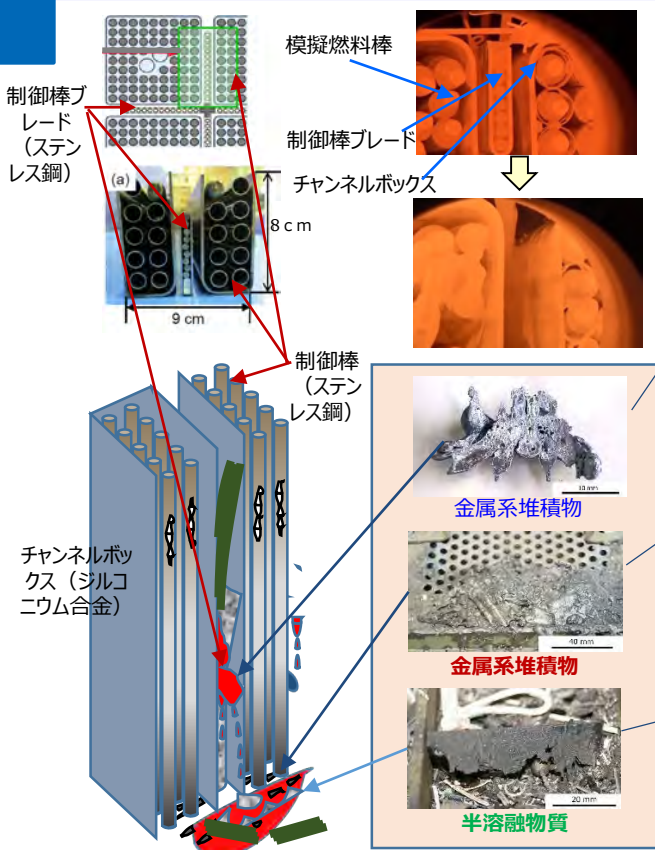
- 炉心破損により燃料デブリが生成されたメカニズムの検証、炉内状況推定の向上。
- 大規模反応試験装置 (LEISAN) により金属系材料の溶融、移行挙動を検証。
- 燃料デブリや原子炉格納容器 (PCV) 内部の状況推定、取り出し拡大の検討に寄与。

### 金属系デブリの生成挙動試験



#### 【装置の特徴】

- ・ 急速昇温 (0.3~1℃/秒)
- ・ 軸方向温度勾配 (約500℃/m)
- ・ 水蒸気量可変
- ・ 動画撮影
- ・ 反応によって発生するガスなどの測定
- ・ 実機とほぼ同寸法での試験体の使用



試験体の例：金属系デブリの生成挙動

(左図：制御棒ブレード模式図、上図：天井面からの写真、右図：生成物の外観)

#### ○金属系堆積物 (ストーン状物質)

- チャンネルボックスに付着凝固した小石状の堆積物
- ・ 主成分は、ステンレス・ジルカロイ (酸化、または部分酸化)
  - ・ 残留 $B_4C$ や燃料の一部が、内部に包まれている可能性
  - ・ 破碎・粉体化しやすい可能性

#### ○金属系堆積物 (プレート状物質)

- 溶融した状態で直接下部へ落下し、冷えて凝固した岩状の堆積物
- ・ 主成分は、ステンレス (未酸化)
  - ・ 残留 $B_4C$ が内部にくまれている可能性
  - ・ Bの溶融により、ステンレスが硬化している可能性

#### ○半溶融物質 (半溶融の金属系物質)

- 溶融前の形のまま酸化し下部へ崩落した構造物の一部と推定される堆積物
- ・ チャンネルボックスなどの一部と推定
  - ・ 残留 $B_4C$ や燃料の一部が、内部に包まれている可能性
  - ・ 化学活性が残留 (未反応の化学物質が存在)している可能性

・ LEISAN : Large-scale Equipment for Investigation of Severe Accidents in Nuclear reactors



## (5) 燃料デブリの“その場”分析システムの開発

- 高線量率下での耐放射線性を有した燃料デブリの「その場」分析技術の開発。
- レーザー誘起ブレイクダウン分光 (LIBS) 装置を開発し、東京電力福島第一原子力発電所の現場試験等により、作業現場等で簡易的かつ迅速に燃料成分を遠隔で検出。
- 燃料デブリ取り出し作業において、高線量エリアに近づくことなく効率的なデブリの状態把握が可能。

### 可搬型LIBS装置の開発

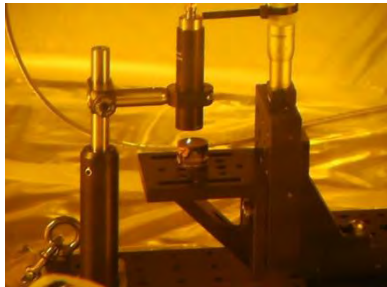
- 東京電力福島第一原子力発電所での現場試験、使用済燃料中のウラン等の分析試験を実施
- 今後、高線量率下のウラン等分析の確認試験や更なる遠隔分析のための長尺化、高感度化等を計画



2号機ウェル内調査時試料の測定



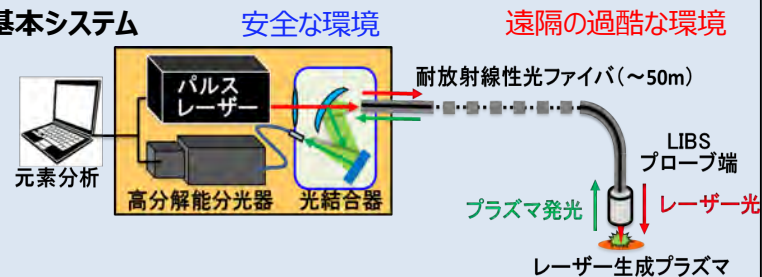
ホットセル外での分析装置操作 (安全な環境)



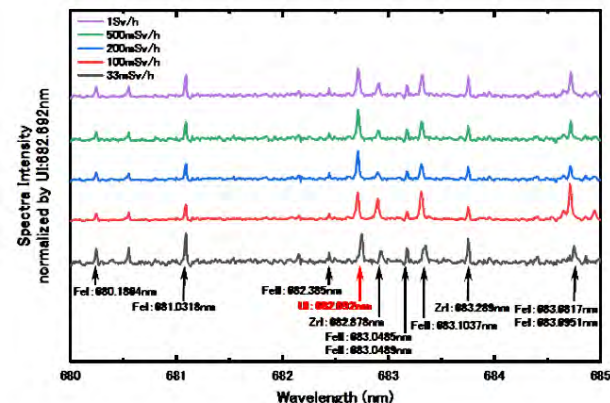
ホットセル内のLIBSプローブ (遠隔・過酷環境:最大1 Sv/h)

### 光ファイバLIBSの基本システム

測定対象試料にレーザー光を集光照射すると試料がプラズマ化して発光する。この発光は試料を構成する元素特有のもので、分光器を用いたスペクトル取得により元素が特定できる。



光ファイバLIBSシステムはこの原理を利用したもので、光ファイバを通してレーザー光を炉内などの遠隔の過酷な環境にある燃料デブリに照射し、発生したプラズマ発光を同じ光ファイバを通じて分光器に導いて測定することで安全な環境において燃料デブリに含まれるウランなどの元素特定を可能とするものです。



線量率を23 mSv/hから1 Sv/hに変化させたときの使用済燃料(U/Zr/Fe)のLIBSスペクトルの測定例 (U/Zr/Feの測定スペクトルは線量率が変化してもほとんど変わらず高線量率の環境でも定量性が損なわれないことを実証した)

### 可搬型LIBS装置を使用したホットセルでの使用済燃料の分析試験

(令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業」に関する補助事業(第二次公募、燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発(燃料デブリの分析精度の向上、熱挙動の推定及び簡易分析のための技術開発))の成果の一部を含みます。

<https://dccc-program.jp/5934/>

(6) 炉内線量率分布予測シミュレーション

- 粒子輸送モンテカルロ計算コードを用いた建屋内各所の線源・線量率推定・評価。
- 原子炉運転履歴、TMI-2事故の評価結果、炉内線量率実測値等の種々の情報の統合及びJAEAのシミュレーション技術の適用により、炉内全体の線量率分布の推定精度の向上を実現。
- 燃料デブリ取り出し規模の拡大に向けた作業計画の検討や作業の安全確保に貢献。

粒子輸送モンテカルロ計算コードを用いた線源・線量率分布推定・評価

【線量率評価に関する課題】

**シミュレーション**  
 ・ 精確な推定が難しい。

**測定**  
 ・ 作業員の被ばく等により、建屋内すべての評価は難しい。

【種々の情報の統合及びJAEAのシミュレーション技術の適用による線量率推定精度の向上】

(1) 線源の種類、量の推定精度向上

**利用情報**

- 原子炉運転履歴

**情報の反映先**

- 燃焼計算 (JAEAが開発した計算コードMOSRAを使用)
- 放射化計算 (JAEAが開発した核データライブラリJENDL-4.0を使用)

(2) 線源の分布の推定精度向上

**利用情報**

- 事故進展解析 (燃料デブリ、Csの炉内分布)
- TMI-2事故評価 (揮発性核種の放出率)

**情報の反映先**

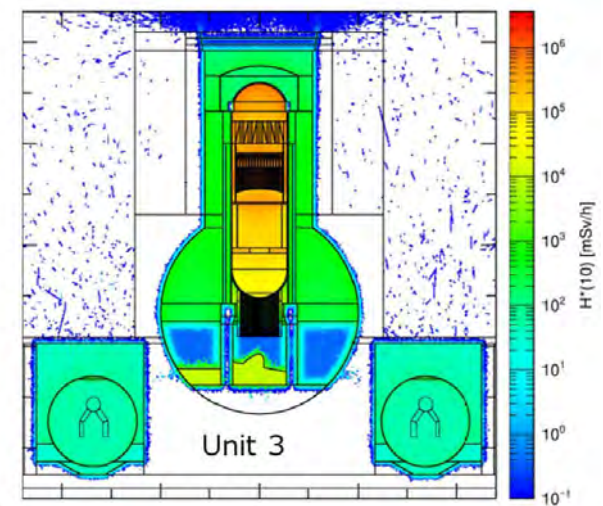
- 粒子輸送モンテカルロ計算 (JAEAが開発した計算コードPHITSを使用)

**利用情報**

- 炉内線量率実測値 (Csの炉内分布の修正)

**情報の反映先**

- 粒子輸送モンテカルロ計算



▲3号機内部の放射線量率推定図

炉内全体の線量率の推定精度を向上

⇒ 作業計画の策定や作業の安全確保に貢献



- 炉内外の状況及び燃料デブリに係る蓄積された情報を集約し、1Fデジタルツイン※を構築。
- 廃炉研究基盤データベース“debrisWiki”を構築・拡充、廃炉関係機関等に公開・活用。
- また、debrisWiki記載情報、内部調査結果、解析/試験による推定結果等の情報を3Dビューコンテンツ“debrisEye”で「見える化」。
- 廃炉関係者が活用しやすい情報を提供し、作業の効率化、安全性の向上に寄与。

解析

模擬試験

内部調査

設計情報

点群データ等

debrisWiki  
分析データ等 (参考)

1Fデジタルツイン  
debrisEye JAEA

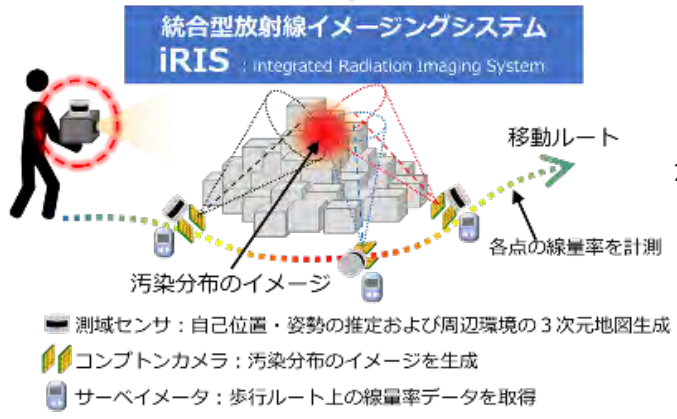
プロジェクト名	更新履歴
Zu-OPFSHE-X-2016 (Zu-1)	
Zu-PCVDEPO-3-2019 (Zu-5)	
Zu-PCVDEPO-1-2017 (Zu-3)	
Zu-PCVDEPO-2-2018 (Zu-4)	
Zu-TSP-X-2017 (Zu-2)	
Zu-TORUS-X-2019 (Zu-6)	

※デジタルツイン：リアル（物理）空間にある情報をIoTなどで集め、送信されたデータを元にサイバー（仮想）空間でリアル空間を再現する技術

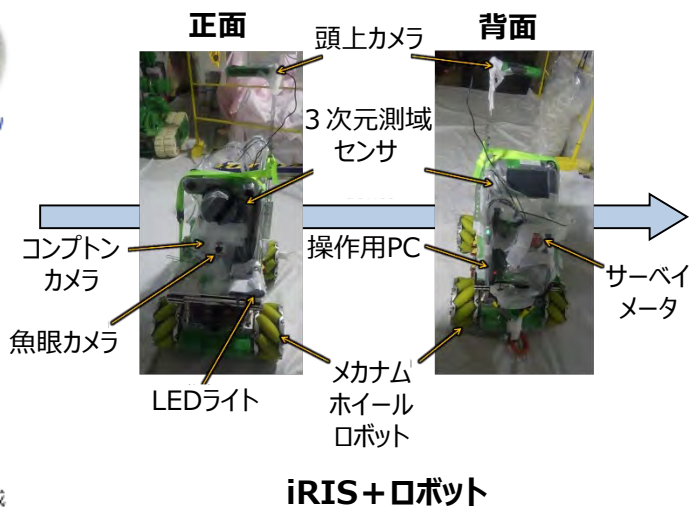
(8)ー① 放射線可視化技術の開発 (iRIS)

- 作業者が高濃度汚染箇所へ近づくことなく、遠隔測定で現場の放射線状況を可視化する技術の開発。
- 統合型放射線イメージングシステム (iRIS) を開発し、東京電力福島第一原子力発電所原子炉建屋内において、高線量率箇所での放射性ホットスポットの可視化に成功。
- 作業者の被ばく低減や効率的な作業計画の策定に寄与。

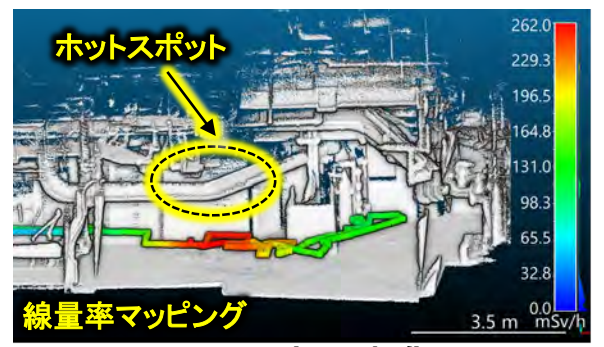
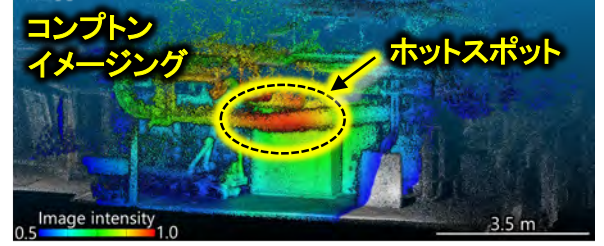
統合型放射線イメージングシステム (iRIS) の開発



本研究は、令和6年度科学技術分野の  
文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞



Y. Sato et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 61, pp. 856-870 (2024)



▲iRISによる可視化

- <補足・解説>
- ・1号機原子炉建屋1階南東側を測定
  - ・コンプトンカメラによりホットスポットを特定
  - ・3次元測域センサにより3Dイメージを取得
  - ・それらデータを統合することでホットスポットを3次元可視化
  - ・サーベイメータによる測定において、ホットスポットの直下で線量率が上昇していることを確認



(8)ー② 線量・線源逆推定評価システムの開発

- ▶ 燃料デブリ取り出し作業現場での汚染源の位置・線量を推定する技術の開発。
- ▶ 測定データから作業現場の線源及び空間線量率を推定・可視化する線量・線源逆推定評価システムを開発し、プロトタイプシステムの機能確認を東京電力福島第一原子力発電所 5号機で実施（更なる実証を計画）。
- ▶ 効率的な作業計画の策定による作業員の被ばく低減に寄与。

現場データ測定



点群スキャナ  
Focus Premium<sup>(※1)</sup>  
(FARO)

(※1) <https://www.reprogeo.be/faro-focus-premium-3d-scanner-met-hybrid-reality-capture>

(※2) <https://www.raydiant.be/product/radeye-gf-10/>



空間線量計  
RadEye GF-10<sup>(※2)</sup>  
(Thermo Scientific)



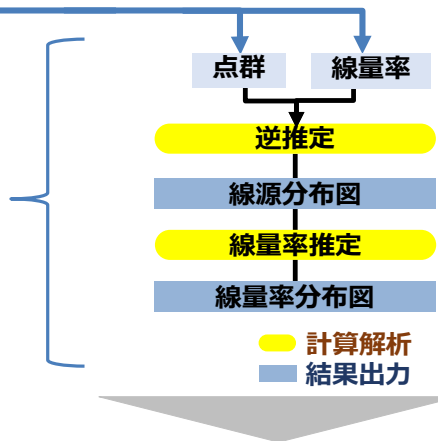
遠隔操作機器(四足歩行ロボット)  
SPOT<sup>(※3)</sup>  
(Boston Dynamics)

(※3) <https://www.technologyreview.com/2019/09/25/132879/boston-dynamics-spot-robot-dog-is-going-on-sale-for-the-first-time/>

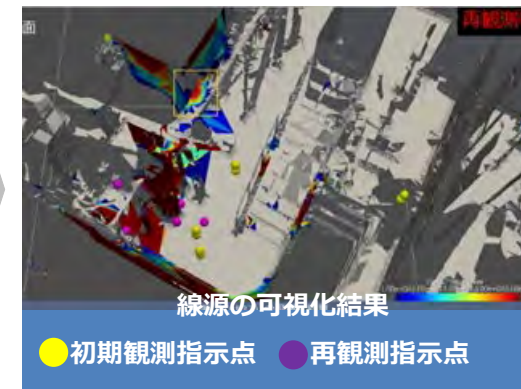


原子炉建屋構造  
(5号機点群データ)

ステップ



- 遠隔操作機器により、点群データ、空間線量率を測定
- 測定結果から線源分布を逆推定
- 定量的な推定結果を高速 3D可視化



線源の可視化結果

● 初期観測指示点 ● 再観測指示点

線源強度図

- 測定した点群データ(左図)を基に解析用データ(3Dメッシュ)を生成
- 上記データと空間線量率から、線源推定(右図)、線量率を算出
- これらの一連ステップを、目標とする10分以内で達成できることを確認

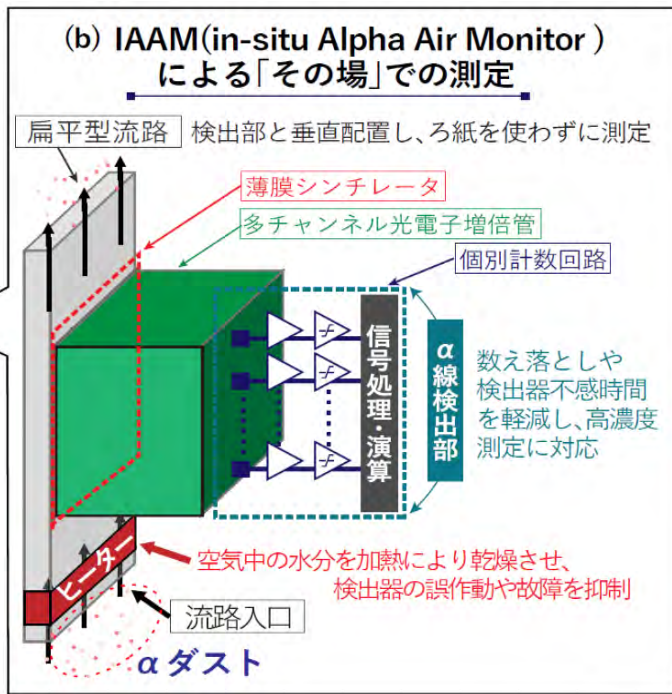
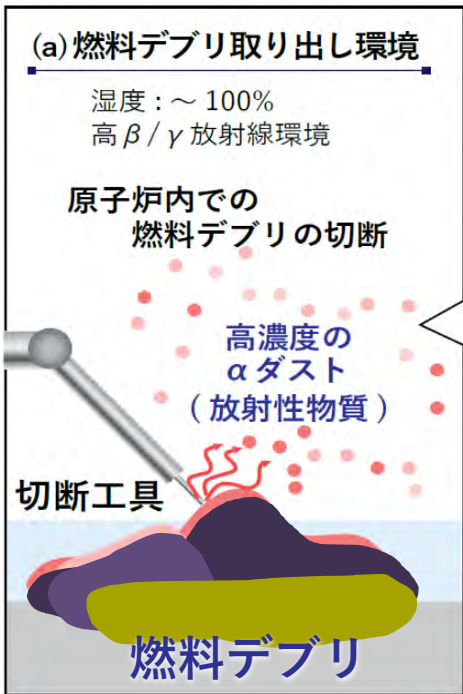
(8)ー③ αダストの“その場”計測システムの開発

- 燃料デブリ取り出し現場の放射性飛散微粒子（αダスト）による内部被ばくの低減。
- 試作した測定装置により、過酷環境（高湿度、高濃度等）でのαダストのリアルタイム測定に成功。
- αダストによる作業員の内部被ばく低減及び効率的な作業計画の策定に寄与。

αダストを「その場」で測定する技術の開発

○過酷環境（高湿度、高濃度等）下において、長期間リアルタイム測定に成功

※IAAM (in-situ Alpha Air Monitor) : 高濃度のαダストをろ紙を使わずにリアルタイムで測定できるシステム



(9) 燃料デブリと廃棄物の合理的な分別管理

- 燃料デブリと廃棄物を的確に仕分けできる非破壊計測技術の確立。
- 保管容器の外側から中性子やガンマ線を測定する非破壊計測手法を検討。
- 燃料デブリと廃棄物の合理的な分別管理に寄与。

燃料デブリと廃棄物を仕分ける非破壊計測手法の適用を検討中

- RPVからの回収物のすべてを“燃料デブリ=核燃料物質”として取り扱うことは必ずしも合理的ではない。
- 容器に収納されたキログラムオーダーまでのPCVからの回収物を非破壊で計測し、核燃料物質に応じた燃料デブリと放射性廃棄物を仕分けする技術を開発する。



・燃料デブリを安全に回収  
 ・十分に管理された安定保管

### 非破壊計測技術の適用性評価のための要素試験の例

【アクティブ中性子法】  
 容器外部から中性子を照射し、核分裂で発生する中性子とガンマ線を測定

中性子検出器  
 模擬回収物  
 コンクリート  
 SUS316  
 中性子吸収材 (ホウ素、ガドリニウム)  
 核燃料物質  
 充填  
 中性子発生器  
 検出器  
 中性子  
 核分裂  
 中性子  
 中性子  
 模擬容器製作：  
 廃棄物内容器  
 ユニット缶模擬容器

様々な組成や配置を模擬できるようにブロック状に成型した燃料デブリ・廃棄物模擬素材

即発ガンマ線分析(PGA)法の適用試験：  
 試料を中性子照射した際に放出される即発ガンマ線を測定することにより、非破壊で多元素同時分析を行う

高速中性子直接問いかけ(FNDI)法の適用試験：  
 高速中性子を照射して容器内の核分裂生成物に核分裂反応を誘起させ発生した核分裂中性子を計算し核分裂性物質量を求める



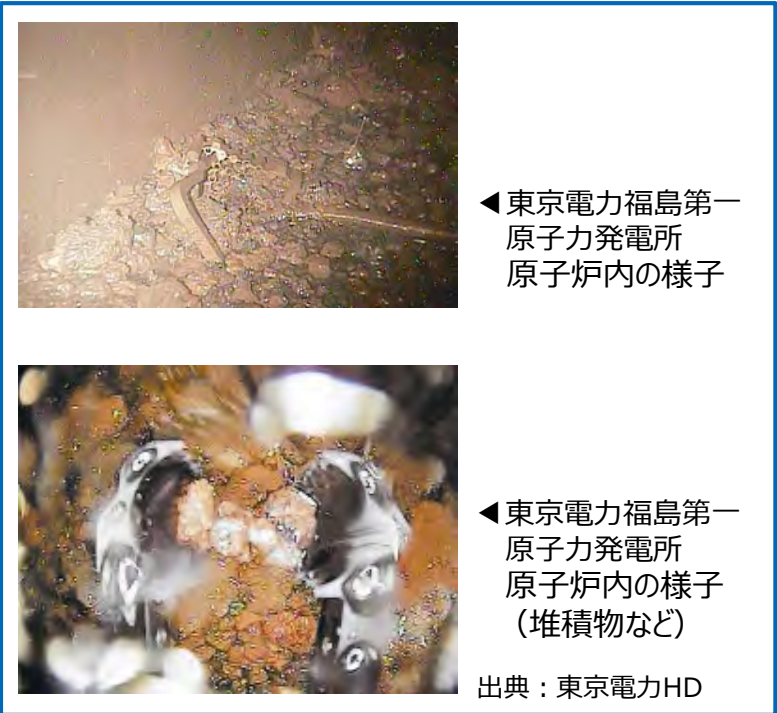
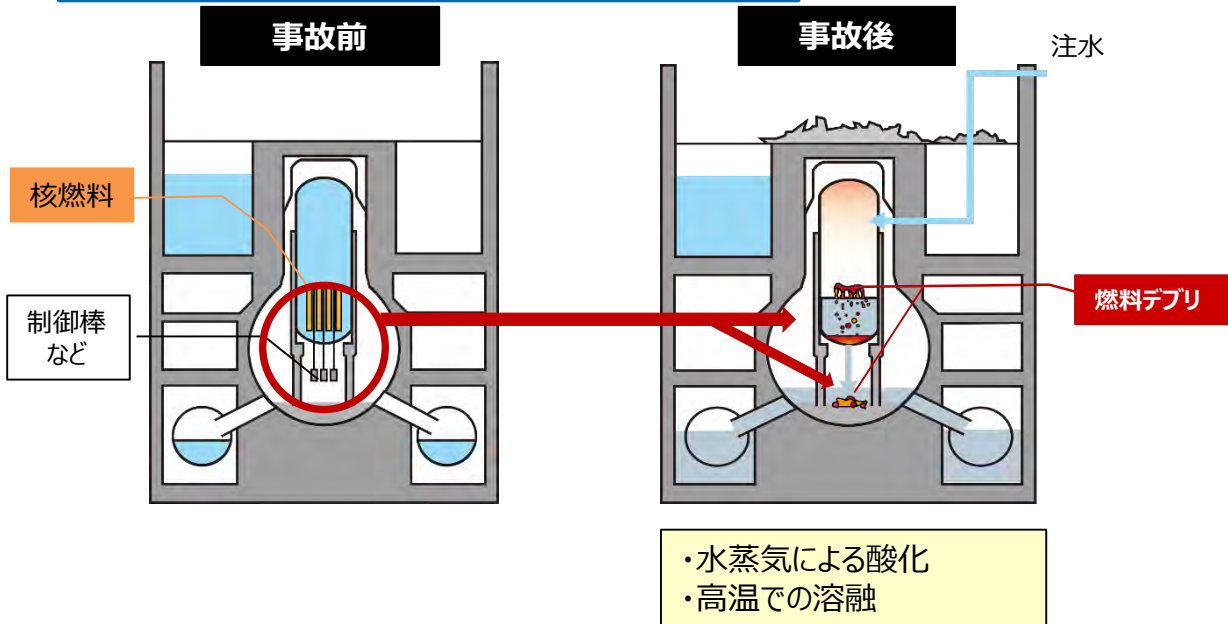
### 燃料デブリとは

燃料が加熱し、原子炉内の構造物と燃料などが冷えて固まったものを**燃料デブリ**という。

### 燃料デブリの安全対策



- ◆ 東京電力福島第一原子力発電所の原子炉内に残存する燃料デブリは、温度や気体の監視データから現在安定状態を維持している。
- ◆ 燃料デブリと水の比率が変化した場合に局所的な再臨界が発生する可能性を完全に否定できないことから、原子炉内の温度上昇や希ガス（キセノン）の発生などの監視を24時間継続。
- ◆ 万が一再臨界が生じた場合にもホウ酸水を注入しそれを抑制・停止するための万全な対策が講じられている。

### 原子炉内の燃料デブリのイメージ



(11) 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリとTMI-2 燃料デブリの比較

- 東京電力福島第一原子力発電所の炉内状況については、圧力容器底部が破損し、格納容器に落下した溶融燃料とコンクリートとの反応（MCCI）が起きた等、TMI-2とは異なる事象が想定されている。
- その他、東京電力福島第一原子力発電所の特徴として、炉心に占める構造材（ジルカロイやステンレス鋼など）の比率が高いこと、炉心冷却時に用いた海水の影響及び中性子吸収材（ $B_4C$ ）の影響等が挙げられる。

	TMI-2	東京電力福島第一原子力発電所
炉型	加圧水型軽水炉	沸騰水型軽水炉
中性子吸収材	銀・イリジウム・カドミウム合金	炭化ホウ素（ $B_4C$ ）
燃料デブリの特徴	炉心構成材の範囲で成形	$B_4C$ や格納容器下コンクリート材と反応、海水成分が残留
燃料デブリの場所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉圧力容器内で留まっている</li> <li>・デブリは圧力容器内から99%取り出し保管</li> </ul>	1・2・3号機とも原子炉圧力容器内だけでなくそれを覆っている原子炉格納容器の下部にまで到達
燃料デブリの状況	原子炉格納容器内からは99%取り出しが完了 （核燃料と炉内構造物が混ざり合った量は推定約20-30トン 装荷燃料約100トン）	1・2・3号機原子炉内に残存（全量約880トンと推定）
	 <p>◀ TMI-2の燃料デブリ</p>	 <p>◀ 原子炉内の様子 （事故直後海水急冷） 出典：東京電力HD</p>

## (12) 燃料デブリの状態 炉内状況推定図（1～3号機）

➤ 東京電力福島第一原子力発電所の炉内状況については、号機毎に事故進展が異なり、原子炉・格納容器・燃料デブリ分布など異なる状況が想定されている。

	1号機	2号機	3号機
炉内状況推定図 【debrisWiki】			
炉心部	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心部にはほぼ燃料デブリなし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心部にはほぼ燃料デブリなし (外周部に切り株状燃料の残存の可能性あり)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心部にはほぼ燃料デブリなし</li> </ul>
原子炉圧力容器 (RPV) 底部	<ul style="list-style-type: none"> <li>RPV底部に少量の燃料デブリが存在</li> <li>CRDハウジング内部及び外表面などに少量の燃料デブリが存在</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RPV底部に多くの燃料デブリが存在</li> <li>CRDハウジング内部及び外表面などに少量の燃料デブリが存在</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RPV底部に一部の燃料デブリが存在</li> <li>CRDハウジング内部及び外表面などに少量の燃料デブリが存在</li> </ul>
原子炉格納容器 (PCV) 底部 (ペDESTアル内側)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ペDESTアル内側床面に大部分の燃料デブリが存在</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ペDESTアル内側床面に一定量の燃料デブリが存在</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ペDESTアル内側床面に2号機と比較して多くの燃料デブリが存在</li> </ul>
原子炉格納容器 (PCV) 底部 (ペDESTアル外側)	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業員アクセス口を通してペDESTアル外側に燃料デブリが広がった可能性あり (堆積物を確認)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業員アクセス口を通してペDESTアル外側に燃料デブリが広がった可能性は小さい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業員アクセス口を通してペDESTアル外側に燃料デブリが広がった可能性あり</li> </ul>

出典：炉内状況推定図は、JAEA debrisWiki 引用

解説は原子力損害賠償・廃炉等支援機構「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2023」引用