

令和3年度開始

廃炉・汚染水対策事業費補助金に係る補助事業  
(燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発)

－2022年度最終報告－

2023年6月

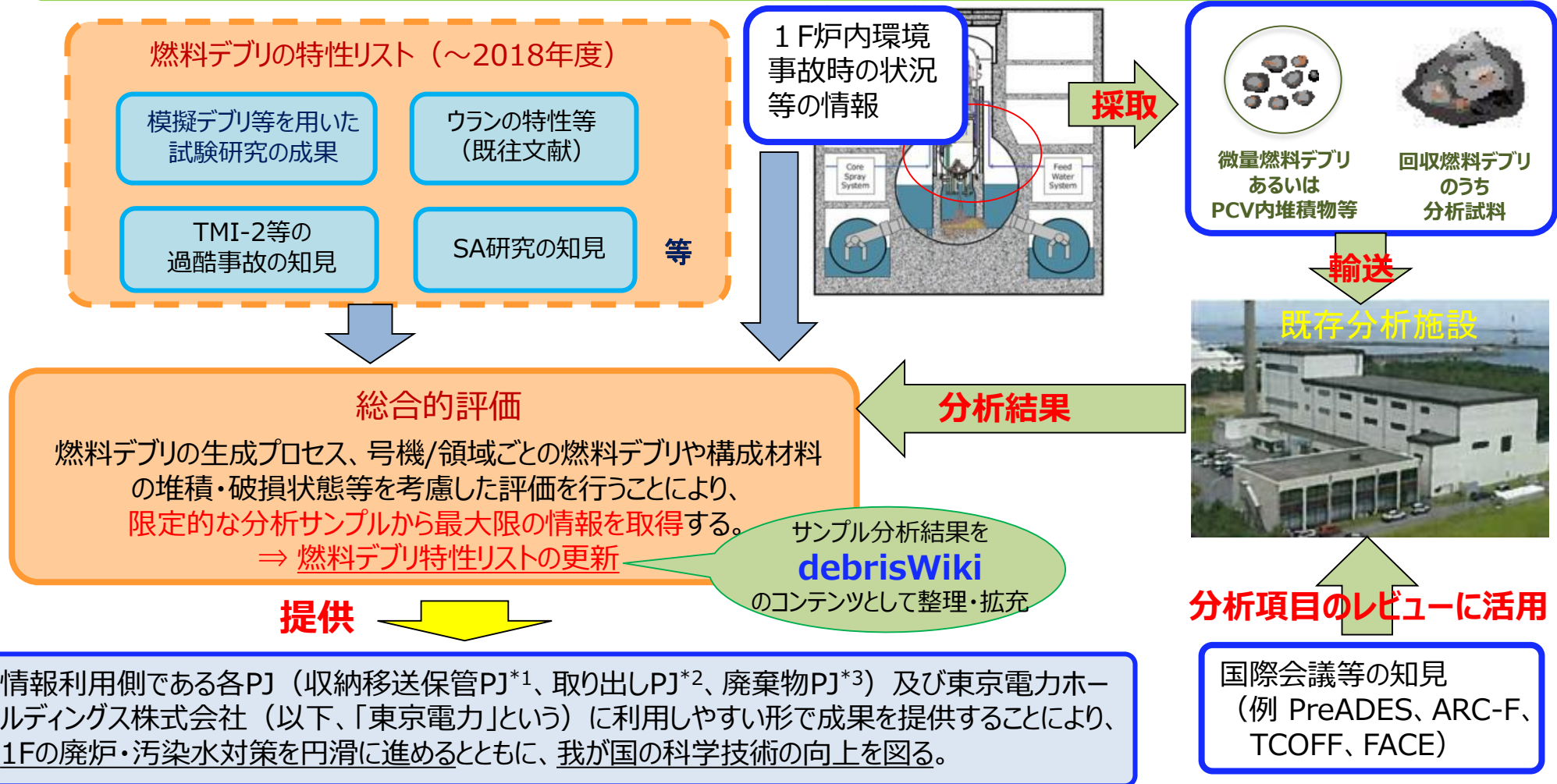
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構  
(IRID)

# 目次

1. <a href="#">研究の背景・目的</a>	3
2. <a href="#">目標</a>	4
3. <a href="#">実施項目とその関連、他事業との関連</a>	5
4. <a href="#">実施スケジュール</a>	10
5. <a href="#">実施体制</a>	11
6. <a href="#">実施内容</a>	12
(1) <a href="#">燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等</a>	13
① <a href="#">得られる燃料デブリサンプル等の分析</a>	13
② <a href="#">燃料デブリの性状推定の高度化</a>	60
③ <a href="#">燃料デブリ分析の知見収集及び性状把握のための国際協力</a>	105
④ <a href="#">まとめ</a>	116

# 1. 研究の背景・目的

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、「1F」という）の廃止措置に向けた燃料デブリの取り出し、収納・保管、処理・処分等の検討には、燃料デブリのデータや関連する情報の取得・整備が不可欠である。



\*1 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発PJ、\*2燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発PJ、\*3 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発PJ

## 2. 目標

- 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等
  - 1FのPCV内外で採取された新たなサンプル（燃料デブリ、堆積物等）を受け入れて分析データを取得し、「燃料デブリ特性リスト」に体系的に整理することで、廃炉計画に資する。
  - 新たなサンプルの分析、評価を、関連事業の成果を反映しつつ実施することにより、1Fサンプルの分析経験や知見を蓄積し、試験的取り出しで得られる燃料デブリの分析に備える。
  - 燃料デブリの分析や性状推定等において国際的な知見を活用する。

# 3. 実施項目とその関連、他事業との関連

## ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

### 公募要領記載内容（抜粋）

燃料デブリの分析技術の開発のため、今後、試験的取り出しや内部詳細調査を通してPCV内から得られる燃料デブリ及び堆積物等のサンプルについて分析を行います。

当該研究機関は、サンプルの放射線スペクトロメトリ測定、外観観察、マイクロ観察、元素マッピング等の分析機能に加え、分析・観察の前処理に関する知見と技術を有する機関とします。

### 実施方法

- 分析サンプルを茨城地区に輸送する。（サンプル採取に係る提言。燃料デブリサンプルの輸送は東京電力が実施）
- 受入れたサンプルの分析をJAEAとNFDが協力して実施する。
  - JAEA：比較的広範囲の分析、分析項目の拡充\*、新規分析項目検討\*  
（FE-SEM/WDX、ICP-MS、TIMS\*、SIMS\*等）
  - NFD：より細かい特異点の分析（FE-SEM/EDX、FE-TEM/EDX）

### 主要成果

- 内部詳細調査を通してPCV内から得られる燃料デブリ及び堆積物等のサンプルの分析データ
- 今後予定される燃料デブリの受入れを想定した分析技術の拡充と高度化

### 廃炉作業への貢献

- 取得した分析データを本事業②「燃料デブリの性状推定の高度化」で評価検討し、「燃料デブリ特性リスト」に体系的に整理することにより、廃炉計画に資する。

## 3. 実施項目とその関連、他事業との関連

### ② 燃料デブリの性状推定の高度化

#### 公募要領記載内容（抜粋）

得られた分析結果などを基に、燃料デブリの性状推定を高度化します。燃料デブリの性状推定の高度化においては、新たな知見を単に記載するのではなく、多くの知見を総合的に照らし合わせ、分析結果に至るまでに燃料デブリが経た過程を科学的に考察した上で、特性リストを作成することとします。多くの知見とは、具体的に、過去の原子力施設での事故事例、模擬試験、サンプル分析の結果、福島第一原子力発電所の事故時の状況、現場調査の結果、炉内の気相環境、ウランの特性に関する既往文献等を指します。

#### 実施方法

- 既往文献の知見や内部調査の結果等と合わせて分析データを検討し、サンプルの履歴等を評価する。
- 国内の有識者による専門家会議（1F試料評価委員会）に上記の分析データや評価結果を共有し、レビューを受ける。
- 上記の成果を「燃料デブリ特性リスト」に反映し、充実化を図る。

#### 主要成果

- ①の分析データの評価結果
- 前項の成果の反映による「燃料デブリ特性リスト」のアップデート

#### 廃炉作業への貢献

- 「燃料デブリ特性リスト」に整理した情報は、燃料デブリ取り出しを含む多くの廃炉作業の基礎情報として活用される。



1F試料評価委員会の構成

# 3. 実施項目とその関連、他事業との関連

## ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

### 公募要領記載内容（抜粋）

国際的な知見を活用しながら分析技術の開発を進めるために、各国の燃料デブリの知見を収集し、分析項目及び性状をレビューします。現場調査の結果と採取されたサンプルの分析結果から、事故時に起きた反応と事象、事故後の炉内状況、燃料デブリの生成過程、PCV内に残存する核分裂生成物の残量、空間線量率の影響等の推定を国際的に協力しながら行うことを検討します。その際には、核分裂生成物の挙動・放出過程、物質の熱物性に関して知見を有する国際会議等（例：OECD/NEA ARC-F、TCOFF等）とも連携を取り現場調査と分析結果を共有するとともに、必要に応じてそれらの知見も取り込みながら進めます。

### 実施方法

- 燃料デブリに関する文献等、国内外の新たな知見を収集しレビューする。
- 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場について、OECD/NEA及び国内外の機関と検討を行い、その設置に貢献する。

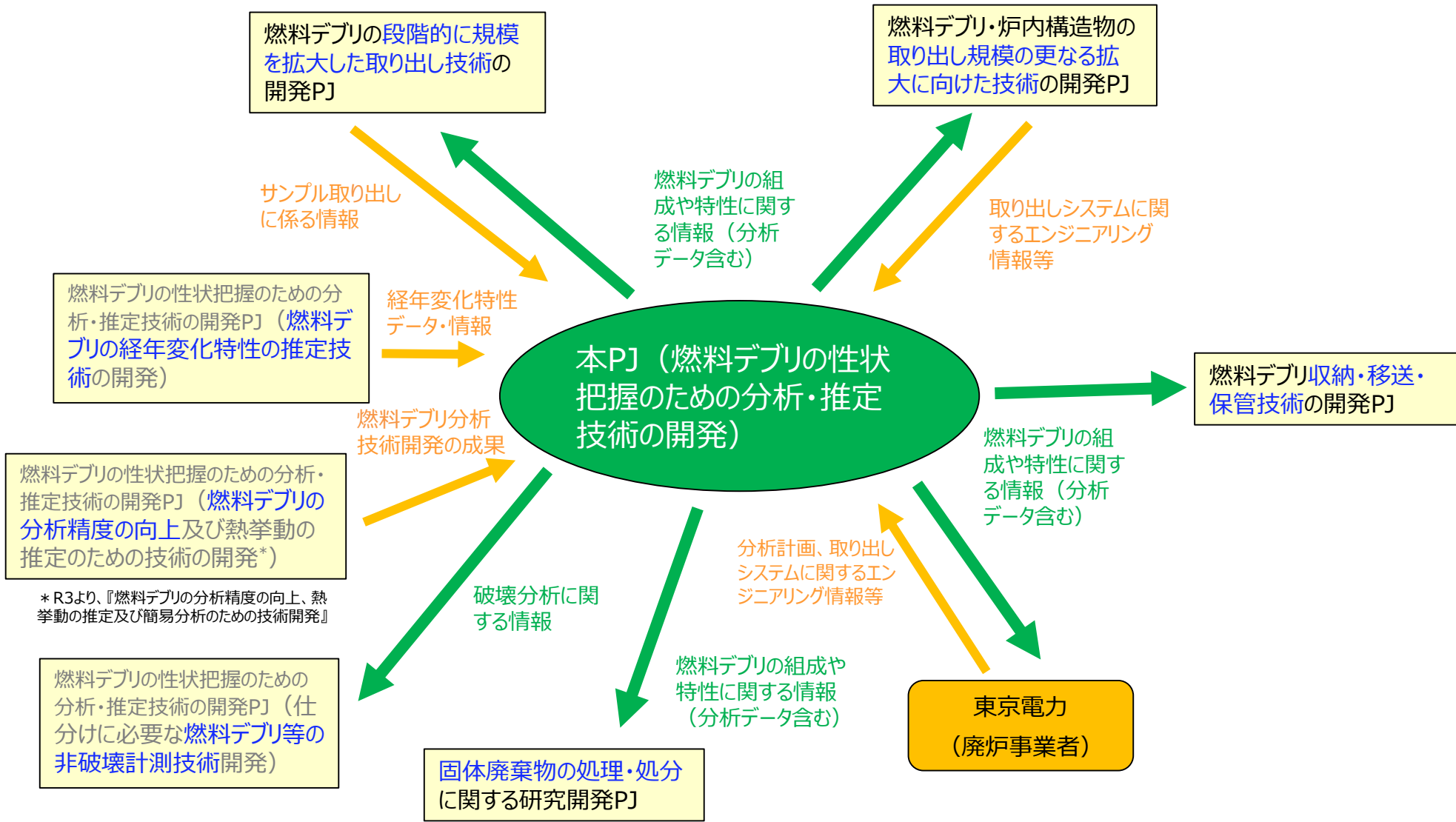
### 主要成果

- 燃料デブリに関する新たな知見のレビュー結果
- 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討結果

### 廃炉作業への貢献

- 燃料デブリの分析等に係る議論の場を通じて、我が国の最新の分析情報等を海外の専門家と共有することにより国際社会に対する情報公開を積極的に推し進めると同時に、1Fの廃炉計画に対する理解の深化を図る。

# 3. 実施項目とその関連、他事業との関連



\* R3より、『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』



### 3. 実施項目とその関連、他事業との関連

#### (1) 当事業の要求インプット

ID	要求側事業	提供側事業	内容（概要）	必要となる時期	情報の用途
I-1	(本事業)	廃炉・汚染水対策事業事務局	以下の研究成果等の情報 ① 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリの経年変化特性の推定技術の開発）』（2019-2020年度）事業 ② 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及び熱挙動の推定のための技術の開発）』（2020年度）事業	適宜	②で実施する燃料デブリ特性リストへの反映
I-2	(本事業)	NDF、東京電力によるエンジニアリング	現場調査の情報	適宜	③で実施する国際的な協力の取り組みに用いる。

#### (2) 当事業からの提供アウトプット

ID	要求側事業	提供側事業	内容（概要）	必要となる時期	情報の用途
O-1	東京電力によるエンジニアリング	(本事業)	燃料デブリ特性リスト（燃料デブリ、堆積物等のサンプルの分析データを含む。）	適宜	燃料デブリの取り出し検討他

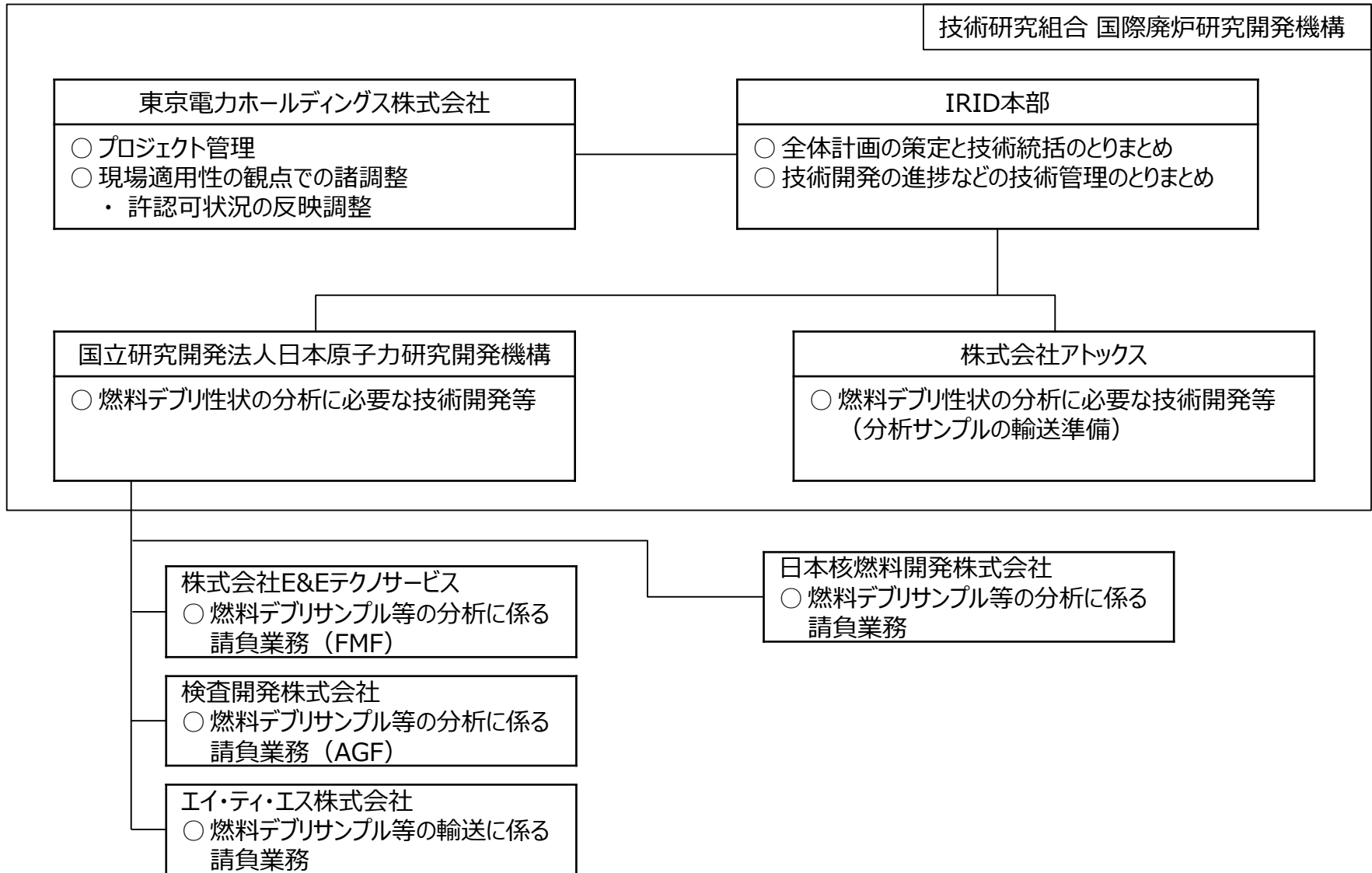
# 4. 実施スケジュール

令和3年度開始 廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発）実績工程表（2023年3月末）

項目	2021年度												2022年度											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
① 得られる燃料デブリサンプル等の分析	燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等																							
	<p>サンプルの選定及び輸送</p> <p>                     4月: 抽出に係る調整、輸送発注、輸送準備 (第1回) ▼サンプル決定                      5月: 輸送                      6月: 抽出に係る調整、輸送発注、輸送準備 (第2回) ▼サンプル決定                      7月: 輸送                      8月: 抽出に係る調整、輸送発注、輸送準備 (第3回) ▼サンプル決定                      9月: 輸送                 </p>																							
	<p>分析準備</p> <p>                     4月: 教育・訓練、装置保守、分析実施計画検討 ▼終了                      5月: NFD外注 (2021年度分) ▼発注                      6月: NFD外注 (2022年度分) ▼発注                      7月: 契約                      8月: 契約                      9月: 契約                 </p>																							
<p>サンプル分析</p> <p>                     10月: 分析 (第1回受入れ分) ▼終了                      11月: 追加分析 (第1回受入れ分)                      12月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      1月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      2月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      3月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      4月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      5月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      6月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      7月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      8月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      9月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      10月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      11月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      12月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      1月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      2月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                      3月: 追加分析 (第1回受入れ分) ▼分析終了、データチェック終了                 </p>																								
② 燃料デブリの性状推定の高度化	分析データの解析																							
	<p>1F試料評価委員会</p> <p>                     11/19: ▼11/19                      5/27: ▼5/27                      2/1: ▼2/1                 </p>																							
	<p>燃料デブリ特性リストの改訂</p> <p>                     2020年度成果の取り込み                      改訂                      debrisWiki反映                      改訂                      他PJ (経年変化特性) の成果へのリンクアップを実施                      debrisWiki反映                      改訂                 </p>																							
③ 燃料デブリ分析の知見収集及び性状把握のための国際協力	燃料デブリに関する文献調査、国内外の知見収集、レビュー																							
	<p>国内・NEA・海外機関との調整</p> <p>                     9/21: ▼PreADES-ARC-F 合同会合 (9/21)                      12/8-9: ▼NEA/CSNI FACE計画承認 (12/8-9)                      7/11-13: ▼海外機関との会合 (FACEサテライト会合: 7/11-13)                      2022年9月までの検索結果のとりまとめ                      収集した文献のレビューを開始                 </p>																							
	<p>「国際的な議論を行う場」の検討</p> <p>                     9/14, 21: ▼タスク2a関係者とのウェブ打合せ (9/14, 21)                      1/25, 26: ▼タスク2a関係者とのウェブ打合せ (1/25, 26)                 </p>																							
とりまとめ	<p>                     10/14: ▼中間報告会 (10/14)                      4/20: ▼報告内容とりまとめ                      4/20: ▼中間報告会 (4/20)                      11/9: ▼中間報告会 (11/9)                      3/1: 報告内容とりまとめ                      3/1: ▼最終報告会 (3/1)                 </p>																							
主要マイルストーン	<p>                     6/2-3: ▼NEA/CSNI会合 (6/2-3)                      12/8-9: ▼NEA/CSNI (12/8-9)                      NEA/CSNI会合 ⇒FACE関連の案件なし                      NEA/CSNI会合 ⇒FACE関連の案件なし                 </p>																							

計画  
 実績

# 5. 実施体制



# 6. 実施内容

## (1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

① <u>得られる燃料デブリサンプル等の分析</u> .....	13
(a) <u>サンプルの選定及び輸送、分析準備</u> .....	13
(b) <u>サンプル分析</u> .....	38
② <u>燃料デブリの性状推定の高度化</u> .....	60
(a) <u>分析データの解析</u> .....	60
(b) <u>1F試料評価委員会</u> .....	102
(c) <u>燃料デブリ特性リストの改訂</u> .....	102
③ <u>燃料デブリ分析の知見収集及び性状把握のための国際協力</u> .....	105
(a) <u>燃料デブリに関する文献調査、国内外の知見収集、レビュー</u> .....	105
(b) <u>「国際的な議論を行う場」についての検討</u> .....	107
④ <u>まとめ</u> .....	116

# 6. 実施内容

## (1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

### ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

#### (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

#### (b) サンプル分析

- 背景、目的、分析対象サンプル
- 分析の着眼点、分析対象サンプルの個別概要
- 分析フロー、分析データ取得方針

### ② 燃料デブリの性状推定の高度化

#### (a) 分析データの解析

#### (b) 1F試料評価委員会

#### (c) 燃料デブリ特性リストの改訂

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集及び性状把握のための国際協力

#### (a) 燃料デブリに関する文献調査、国内外の知見収集、レビュー

#### (b) 「国際的な議論を行う場」についての検討

### ④ まとめ

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 背景 (1/3) : 堆積物・付着物サンプル分析の主目的

#### 【燃料デブリ生成過程の検討】

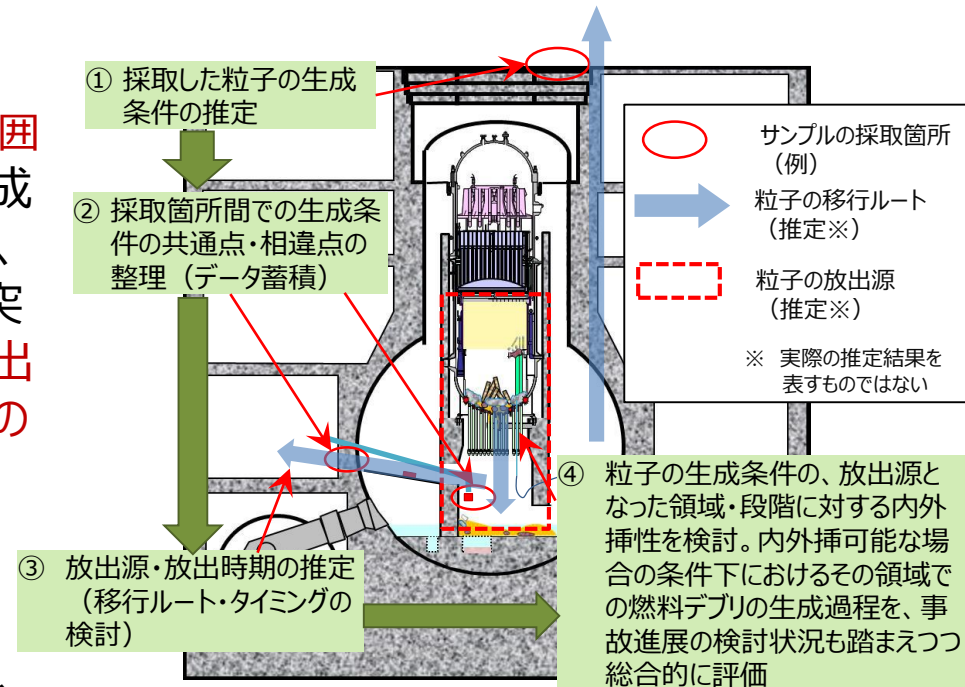
- 着目する**粒子の生成条件**（材料、到達温度、雰囲気等）を**推定**し（右図①）、採取場所ごとの生成条件の相違や共通点等の特徴を整理し（②）、粒子の放出時のルートや事故進展時の段階と突き合わせて評価することにより（③）、**粒子の放出源**となった**特定の領域・段階における燃料デブリの生成過程を検討**（④）するための知見を得る。

#### 【サンプル取得箇所の汚染状況の把握】

- サンプル中の**主要構成成分**、**主要放射性核種**、**主要構成相**を把握する。

#### 【将来的な燃料デブリ分析に向けた課題への対応】（上記2目的と連動）

- 未知試料を対象とした場合の既存分析・評価技術の改善点の確認及び実践
  - 粒子内部の（金属／酸化物の判定を含む）組成・結晶構造評価の高精度化（TEM分析）
  - 含有元素の同定過程の明確化（EDX、WDX分析）
  - 定量分析値の不確かさとその評価過程の明確化（化学分析）



堆積物・付着物サンプルの分析データに基づく燃料デブリ生成過程の推定

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 背景 (2/3) 【燃料デブリ生成過程の検討】

- 前事業（～2020年度）における号機ごと・採取場所ごとの**U粒子生成条件**の傾向

- 1～3号機では**UとZrを含む酸化物粒子（U-Zr粒子）**をPCV内で検出。1・2号機はR/Bでも検出。

⇒ PCV内での**溶融・凝固過程**の証左

⇒  $UO_2-ZrO_2$ 系の知見との比較から、1号機では徐冷過程の存在を示唆（ $UO_2-ZrO_2$ 系における高温側と低温側の双方の特徴の検出）、2号機では比較的速い冷却過程（同じく高温側の特徴の検出）の存在を示唆するなど、**号機ごとに生成過程の特徴が整理されつつある。**

- その他、 $Fe/Fe_3O_4$ 、 $FeO$ や $MoO_2$ の検出（2号機R/Bサンプル）など、水蒸気雰囲気をも想定した雰囲気条件と整合。

- これらの傾向の推定結果に関して、異なる採取箇所から採取したサンプル分析データの拡充・比較、及びU以外にも注目した生成条件の検討により、推定確度の向上が必要な段階。

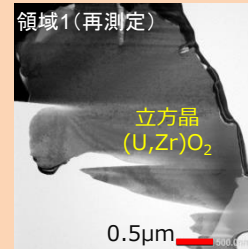
#### 高温側の特徴の例

- U含有率の高い正方晶 $(Zr,U)O_2$ 相 (U:Zrは約3:7)

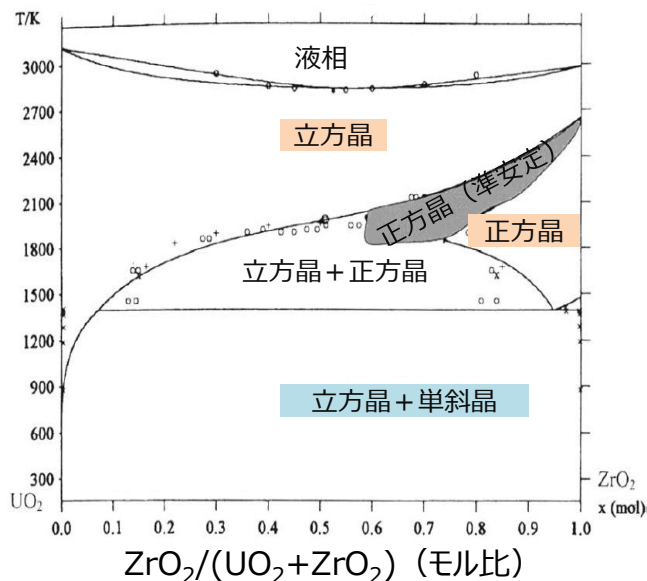
例：2号機PCV内サンプル



- Zr含有率の高い立方晶 $(U,Zr)O_2$ 相 (U:Zrは約5:5)



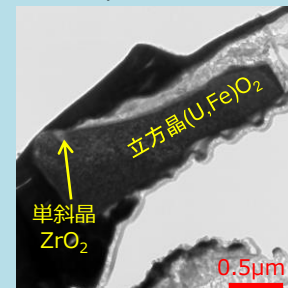
例：2号機PCV内サンプル



状態図出典：文献[1]

#### $UO_2-ZrO_2$ 状態図及び各粒子の特徴

- 単斜晶 $ZrO_2$ の相分離



例：1号機R/Bサンプル (X-2ペネ)

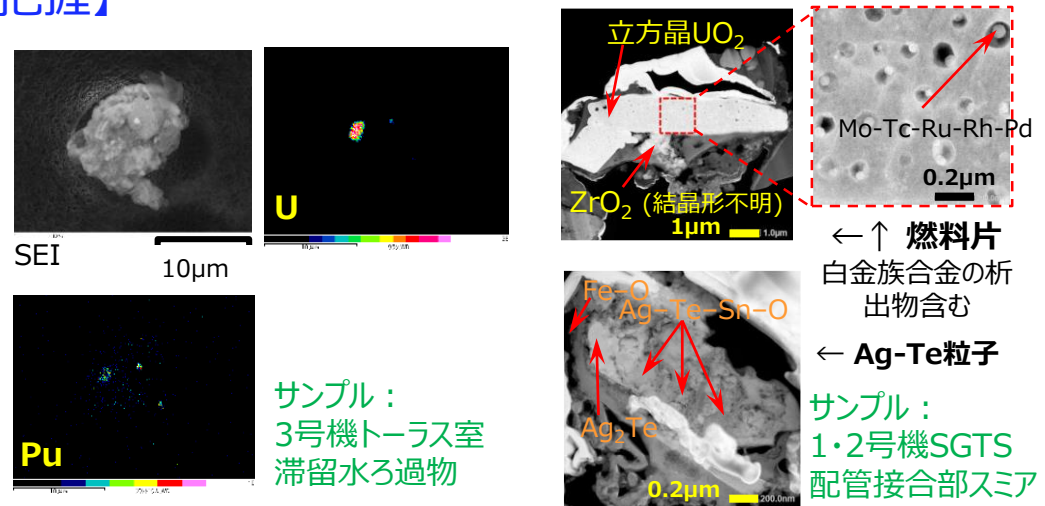
#### 低温側の特徴の例

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 背景 (3/3) 【サンプル取得箇所での汚染状況の把握】

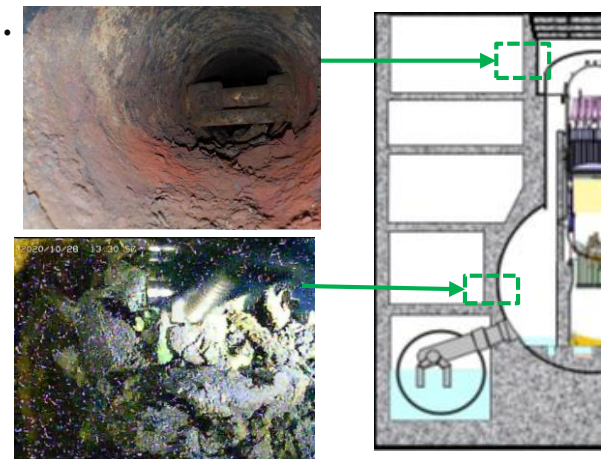
- 放射性物質の移行挙動の解明
    - PCV外のサンプルからPuやFP元素 (Ag、Teなど) を含む粒子を検出
      - ⇒ α核種を含む各種汚染のPCV外での拡がりの把握が重要
  - サンプルの由来・起源の推定
    - 試験的取り出し準備に向けた内部調査等において、配管部の腐食や堆積物を確認
- PCV内外での放射性物質の移行状況やサンプルの由来・起源の推定を通じて、当該状況に至った経緯を把握することにより、PCV内部の温度や雰囲気といった燃料デブリ生成過程の検討につながる情報や、関連PJ (p.8) での各種リスク検討に有用な情報の取得を想定



PuやFPを含む粒子の一例

ウェル差圧調整ライン配管内・配管付近の腐食<sup>[1]</sup>

X-6ペネ (アクセスルート候補) における堆積物<sup>[2]</sup>



内部調査状況の一例 (2号機)



## ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

### (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

#### 目的（2021～2022年度）

1～3号機の各部位から取得されたサンプルに対する分析データの取得とその解釈および先行事業での知見との比較を通じて、現場状況の把握と、PCV内の温度や雰囲気といった燃料デブリ生成過程の検討に資することを目的とした。

⇒ 1Fから茨城地区に受け入れたサンプルについて取得した分析データを用いて、当該サンプルに含まれる成分の由来・起源、および反応に関与した材料、到達温度、雰囲気といったサンプルの生成過程に関する推論・評価を行った。

#### ➤ サンプル分析における主要関心事項

- **燃料デブリの生成過程**の検討（経験温度、雰囲気、周辺材料との反応など）
  - ⇒ ✓ サンプル中の**U粒子**（Uを含む微粒子や微小領域）の**生成過程**の推定
- **放射性物質の移行挙動**の解明、**現場情報**の把握（α粒子の拡がり含む）
  - ⇒ ✓ サンプルの**構成成分**（核種・元素）の**由来・起源**の推定
  - ✓ ウェル差圧調整ラインでのCsと腐食生成物との反応の痕跡調査
- 各号機特有の事故進展事象の解明
- 従来よりもサイズの大きい試料（剥離片）の分析及び性状評価手法の予備的検討

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

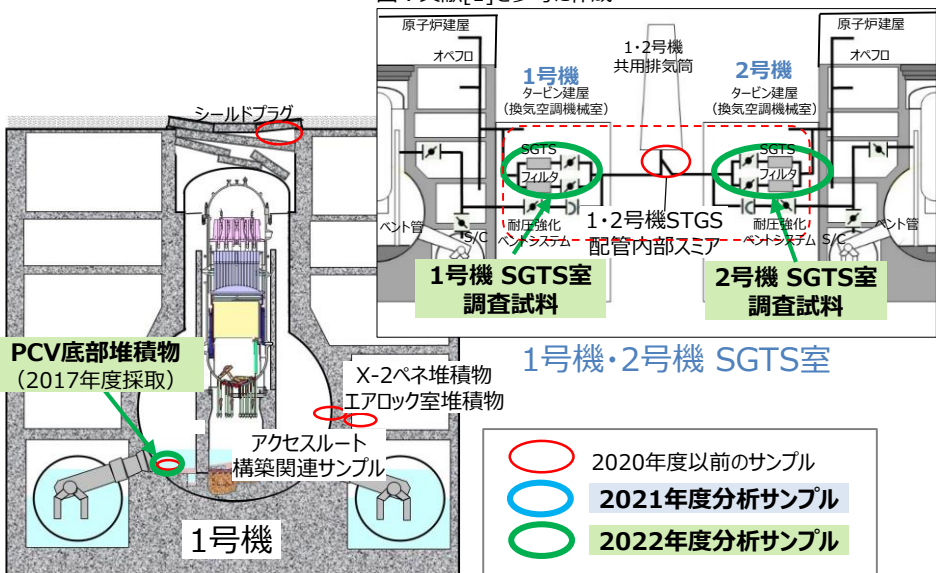
## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析対象サンプル

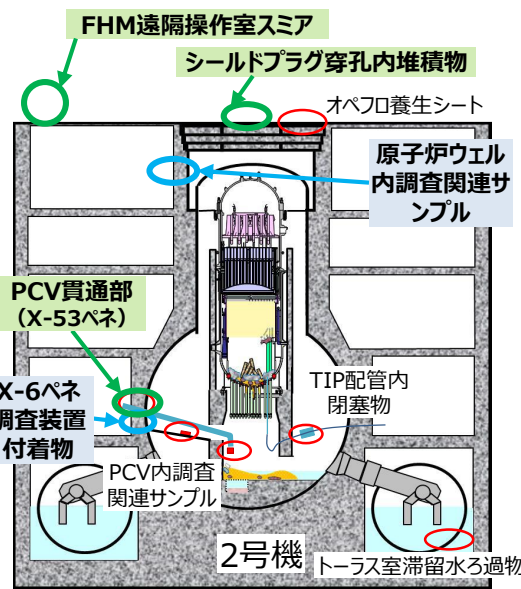
内部調査等で取得されたサンプルの中から、PCV内成分含有の可能性、及び現場情報把握の双方の観点から考慮し、東京電力との協議のもと選定。

- ✓ 2021年度は、内部調査での取得サンプルが比較的充実している2号機に着目し、前事業において知見の少なかった2号機PCV内からのサンプルを含めた。
- ✓ 2022年度は、2021年度に実施した2号機サンプルの分析結果の解釈の補強として、それに近い箇所から採取したサンプルを選定した。さらに、各号機での内部調査で新たに得られたサンプルを対象に加え、分析データの拡充を図った。

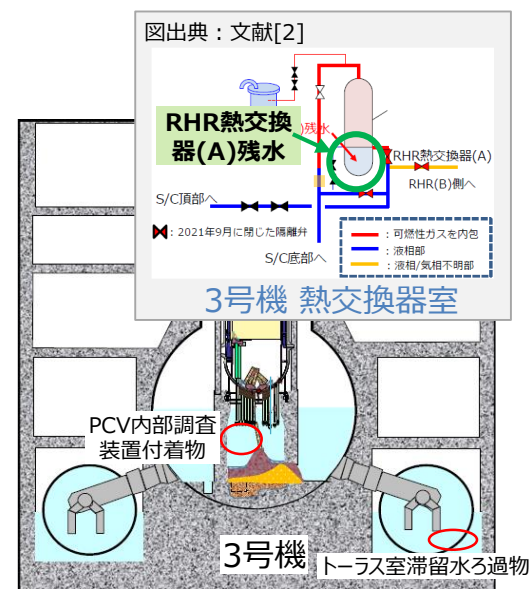
図：文献[1]を参考に作成



1号機 R/B及びPCV



2号機 R/B及びPCV



3号機 R/B及びPCV

前事業（2020年度以前）及び本事業（2021～2022年度）における分析対象サンプルの採取箇所・概略位置

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析対象サンプル (2021年度)

分析対象サンプル	主な関心事項	分析の着眼点
<p><b>2号機 X-6ペネ調査装置付着物</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまでの2号機のサンプル分析では (TIP管、オペフロ、PCV内、等)、<u>ステンレス鋼 (以下、SUSという。) -ジルカロイ (以下、Zryという。) 反応、熔融燃料の急冷過程、水蒸気雰囲気存在を示唆するなど、事故進展での各反応過程の推定に資する知見が得られているが、PCV領域のサンプル数は限られている。X-6ペネは放射性物質の放出経路のひとつと考えられることから、堆積物中のU、Zr、SUS成分を含む微粒子を分析し、前記の分析結果と比較することは有用と考えられる。</u></li> <li>X-6ペネ内の堆積物は、<u>内部のケーブル被覆の分解のみ由来すると考える</u>と存在量が多いため、<u>多種多様な起源を有すると考えられる</u> (ケーブル銅線、塗料、断熱材、燃料、FP等)。これらの由来を把握することにより、PCV内の雰囲気や経験温度、PCV内からの放出経路の推定に活用できると考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zr含有粒子の構成元素、組成、構成相 :             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 酸化物-金属の判定、結晶構造</li> </ul> </li> <li>U粒子の構成元素、組成、構成相 :             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Zr/U比、結晶構造</li> </ul> </li> <li>燃料、FP、構造材、PCV内の各種構成材に由来する核種・元素の存在状況</li> <li>粒子形状、含有元素</li> <li>ケーブル材成分 (Cu) の存在状況</li> </ul>
<p><b>2号機 原子炉ウェル内調査関連サンプル :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ウェル差圧調整ライン内堆積物</li> <li>排気ダクト劣化部 (金属片)</li> <li>排気ダクト点検口表面部 (パッキン部)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2号機のオペフロサンプルの分析では、<u>ウラン含有粒子が生成過程の異なる二種類 (熔融・凝固、蒸発・凝縮) に大別されている。ウェル差圧調整ラインも放射性物質の放出経路のひとつと考えられることから、堆積物中に同様のU、Zr、SUS成分を含む微粒子が含まれる可能性がある。前記の分析結果と比較することは有用と考えられる。</u></li> <li>サンプルが塊状である場合、<u>従前の粒子状のサンプルと異なる評価が可能になると考えられ、分析技術開発の観点からも意義がある。</u></li> <li>差圧調整ラインからダクトにかけて認められる腐食にはCsの水酸化物や塩素が寄与した可能性があり、堆積物が腐食生成物を含む場合、Csの移行挙動や、シールドプラグの高汚染をもたらした放射性物質の移行挙動の解明に繋がると考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zr含有粒子の構成元素、組成、構成相 : Zrと構造材成分の帯同性確認、酸化物-金属の判定、結晶構造</li> <li>U粒子の構成元素、組成、構成相 : Zr/U比、結晶構造、U-Pu-Zrの帯同性、粒子形状、粒子内部の微細組織</li> <li>腐食生成物中のCr/Fe比、Ni/Fe比、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の判定、Clの有無</li> <li>Cs含有粒子の構成元素、組成、構成相</li> <li>U同位体比、TRU核種含有の判定</li> <li>塊状サンプルの分析、評価手法</li> <li>堆積物成分の由来判定</li> <li>表面形状 (剥離の痕跡)</li> <li>粒子形状、含有元素</li> <li>ケーブル材成分 (Cu) の存在状況</li> </ul>

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析対象サンプル（2022年度）

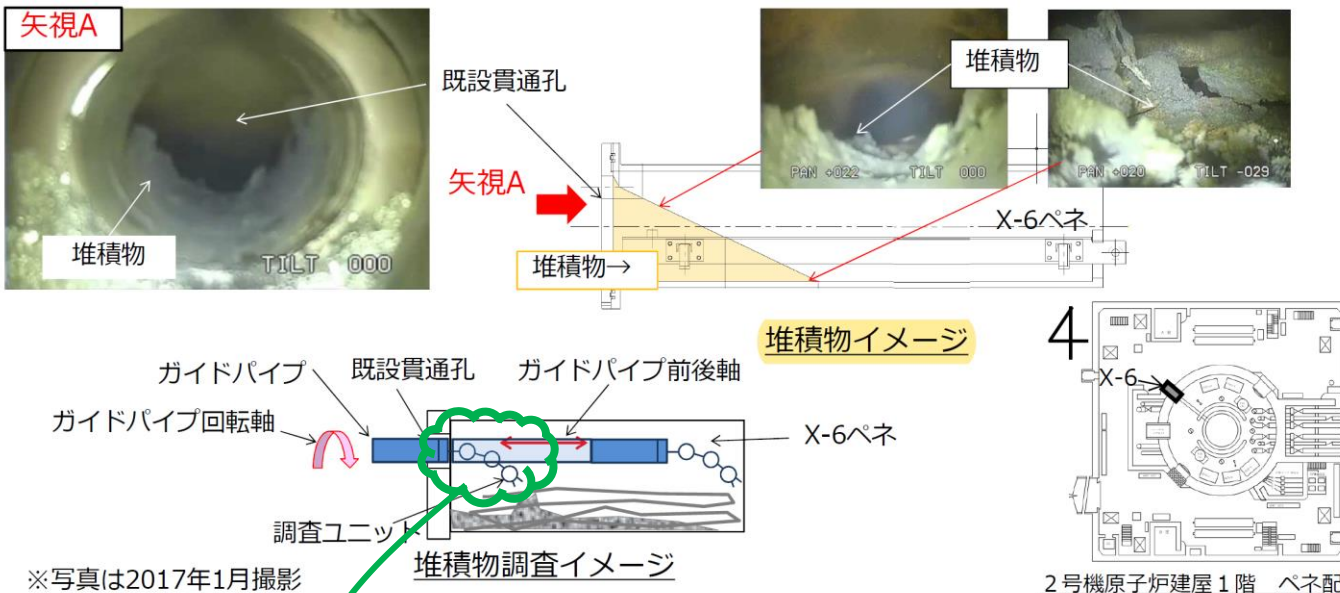
分析対象サンプル	分析目的（想定される知見）	分析項目
(1) 2022年度輸送分		
2号機 PCV貫通部（X-53ペネ）	<ul style="list-style-type: none"> <li>2号機事故途中の燃料デブリの状態（カメラ部スミアやX-6ペネとの比較）</li> <li>⇒ U粒子の検出・詳細構造分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>外観観察</li> <li>IP測定</li> <li>FE-SEM/WDX</li> <li>FE-SEM/EDX</li> <li>TEM/STEM-EDX</li> <li>ICP-MS</li> <li>放射線測定（<math>\alpha</math>、<math>\gamma</math>）</li> </ul>
2号機 FHM遠隔操作室スミア	<ul style="list-style-type: none"> <li>2号機事故途中（R/Bへのリーク時）の燃料デブリの状態（養生シートやウェル差圧調整ラインとの比較）</li> </ul>	
2号機 シールドプラグ穿孔内堆積物	<ul style="list-style-type: none"> <li>2号機オペフロでの放射性物質の分布</li> <li>⇒ 揮発性FP（Cs、Mo、Teなど）や燃料由来成分（U、Zrなど）含有粒子の検出、同位体比評価、Uと他元素（Pu、Amなど）との帯同性評価</li> </ul>	
1号機 SGTS室調査試料	<ul style="list-style-type: none"> <li>1号機事故途中（ベント時）の燃料デブリ状態（1/2号機SGTS配管内スミアとの比較）</li> <li>⇒ 揮発性FP（Cs、Mo、Teなど）を含む粒子の検出・詳細構造分析</li> </ul>	
2号機 SGTS室調査試料		
3号機 RHR熱交換器（A系）残水 ※ろ過後の残渣が主な分析対象	<ul style="list-style-type: none"> <li>3号機の事故初期におけるPCV内の状態</li> <li>水中での沈殿物の形成挙動</li> <li>⇒ U粒子の検出、他元素（Zr、Puなど）との帯同性評価</li> </ul>	
(2) 2017年度の輸送サンプル		
1号機 PCV底部堆積物 （2017年度採取）	<ul style="list-style-type: none"> <li>表層の泥状・粉状堆積物の由来・起源</li> <li>⇒ 炉心内・PCV内材料（ウラン燃料、Zry、SUS、鋼材、 그리스、遮蔽材、塗料、ケーブル、計装材料等）由来成分や事故時流入成分（海水等）の検出、U粒子の検出・詳細分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>FE-SEM/EDX（追加探索）</li> <li>TEM/STEM-EDX（新規検出箇所）</li> </ul>

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析対象サンプルの個別概要 (1/9)

### 2号機 X-6ペネ調査装置付着物



X-6ペネ内の堆積物の接触調査に使用した調査装置のグリップ部分からスミアが3種類※採取され、これらを分析サンプルとした。

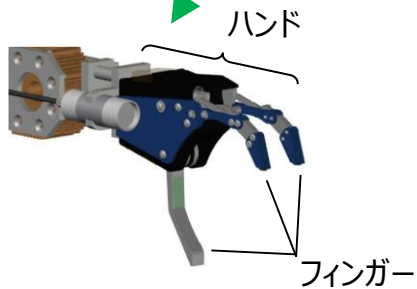
※ 3種類の内訳：

- ・ フィンガー2本分の内側
- ・ フィンガー1本分の内側
- ・ ハンド全体

※写真は2017年1月撮影

資料提供：国際廃炉研究開発機構 (IRID)

### 2号機X-6ペネ調査装置付着物の採取状況<sup>[1]</sup>



調査装置 (グリップ部分) <sup>[1]</sup>

- ✓ 堆積物は、(もともとX-6ペネ内に設置されていた) ケーブル被覆の分解物のみでは説明できない体積規模  
⇒ PCV内から何らかの気流が通過した可能性あり
- ✓ 採取後の測定でα線検出<sup>[2]</sup>  
⇒ Uを含む粒子 (U粒子) が存在する可能性大

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析対象サンプルの個別概要 (2/9)

### 2号機 原子炉ウェル内調査関連サンプル :

2021年度

- ・ ウェル差圧調整ライン内堆積物
- ・ 排気ダクト劣化部 (金属片)
- ・ 排気ダクト点検口表面部 (パッキン部)

■ 事故調査の観点から、下記箇所のサンプル採取を実施した。

- ・ ダスト上部の劣化部分
- ・ ダクト点検口裏のゴムパッキン部分
- ・ 配管内堆積物

※排気ダクトと差圧調整ラインの位置関係が両図で逆になっていることに注意。

ダクト劣化部  
y: 0.1mSv/h  
β+y: < 1.0mSv/h

ゴムパッキン  
y: 0.2mSv/h  
β+y: 5.0mSv/h

堆積物  
y: 9.0mSv/h  
β+y: 200mSv/h

配管内堆積物  
y: 9.0mSv/h  
β+y: 200mSv/h

排気ダクト劣化部 (金属片)

点検口表面部 (パッキン部)

堆積物

2号機原子炉ウェル内調査における堆積物等の採取状況<sup>[1]</sup>

- ✓ 配管内部の炭素鋼部分の腐食が顕著。  
⇒ Cs含有蒸気と反応した可能性あり。
- ✓ 採取箇所付近のスミアでα線検出<sup>[2]</sup>  
⇒ U粒子を含む可能性大

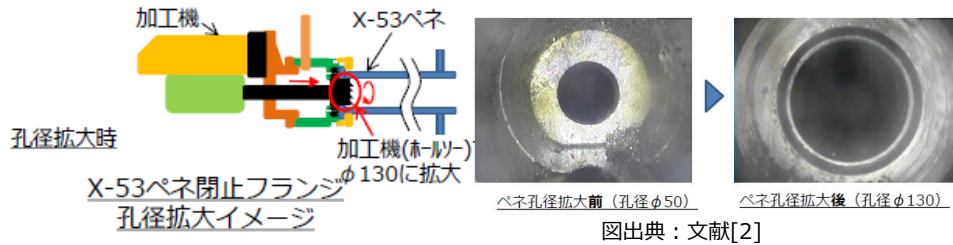
# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

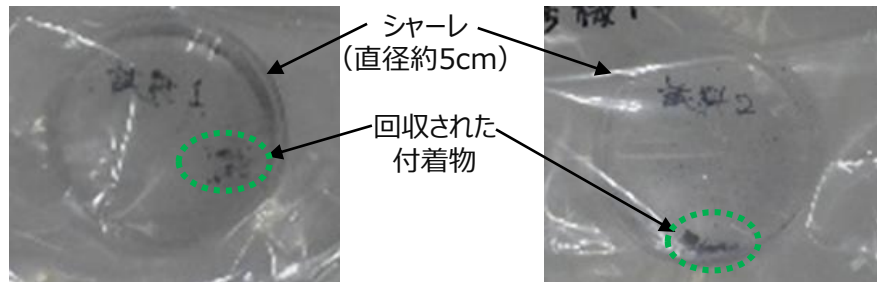
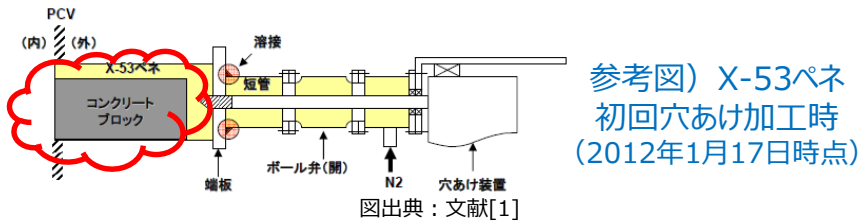
### 分析対象サンプルの個別概要 (3/9)

### 2号機 PCV貫通部 (X-53ペネ)

2022年度



#### X-53ペネ既設孔拡大時 (作業時期：2021年9～10月)



(NFD輸送分)

(JAEA大洗輸送分)

#### コア表面から回収された付着物サンプルの外観※

(採取時期：2022年8月) ※ビニル袋に入れた状態で撮影

スプレイ治具挿入のためX-53ペネ内扉既設孔をコア抜きし、PCV側コア表面の付着物 (外観は錆様) を回収したもの。

※ もともとは内扉前 (PCV側) にコンクリートブロックが置かれていた可能性あり。(左記参考図参照)

#### 【サンプル選定の背景】

- PCV内高圧時 (X-6ペネやオペフロへのリーク発生時) にPCV内由来の物質が付着した可能性あり。



- ✓ ケーブルや被覆由来の成分が含まれる場合、PCV内での破損箇所 (燃料デブリによる熱影響を受けた可能性がある箇所) の推定に資する可能性あり。

例) Sb : RPV下部に位置するケーブル類のシースや絶縁体に使用。

#### 【主要関心事項】

- 炉内計装・ケーブル由来成分の検出 (Sb、Cu-Ni、…)
- U粒子、Cs粒子の検出及び詳細構造の把握

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

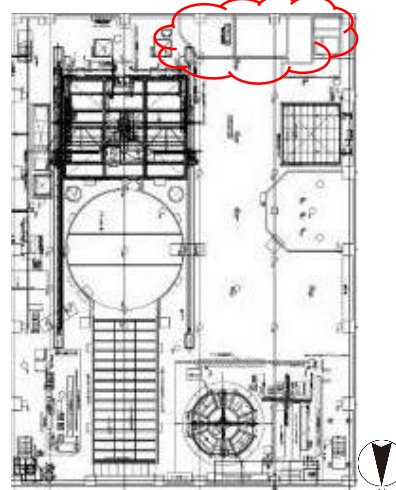
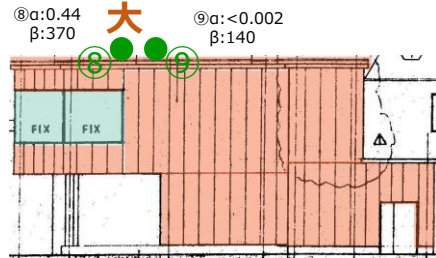
### 分析対象サンプルの個別概要 (4/9)

### 2号機 FHM遠隔操作室スミア

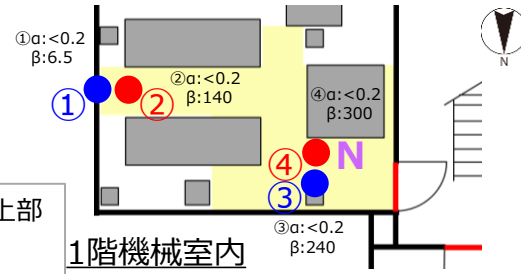
2022年度

図出典：文献[1]

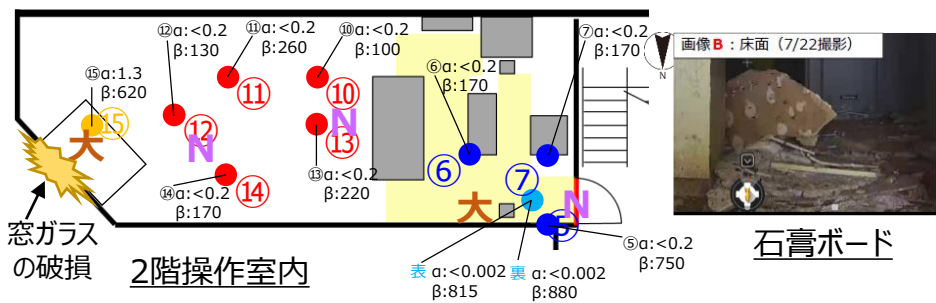
α、βの数値は表面汚染密度 [Bq/cm<sup>2</sup>]



R/B 5階



- : 床面 ● : 操作卓表面 ● : 屋上部
- : 壁面又は機器表面
- : 石膏ボード破片回収箇所



オペフロの燃料交換機 (FHM) 操作室内の床面・壁面、及び屋上部のスミア。(2022年7~8月採取)

#### 【サンプル選定の背景】

- 2階操作室内・北東部の窓ガラスが破損しており、そこから放射性微粒子が流入した可能性あり。
- 窓側 (室内) 及び屋外でα線を検出しており、α核種とその他の放射性核種で移行形態が異なる可能性あり。



- ✓ マクロなα汚染の振る舞い
- ✓ 燃料デブリ性状PJで知見の少ないCsやFP含有粒子のデータの拡充 (窓ガラス破損のタイミング次第では事故時の時間軸の情報を保持している可能性あり)。

#### 【主要関心事項】

- α核種の内訳、及び他元素との帯同性 (Pu/U比、Am/U比、元素分布)
- Csや中揮発性FP (Ag, Sn, Sb, Mo) の同位体比及び化学形態

FHM操作室のスミア採取箇所 大 : 大洗に輸送 N : NFDに輸送



# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析対象サンプルの個別概要 (5/9)

### 2号機 シールドプラグ穿孔内堆積物

2022年度

シールドプラグ上の既設穿孔箇所（2014年3月コア抜き）内部のダストを吸引装置で集塵・回収したもの（2021年8月採取）。

#### 【サンプル選定の背景】

- 高線量（ $\beta$ ・ $\gamma$ ）であり、コア抜き以降（2014年3月～）の大気中放射性物質の沈降成分、及び周辺の汚染された瓦礫成分を含む可能性あり。



- ✓ 燃料デブリ性状PJで知見の少ないCsやFP粒子のデータの拡充（R/Bへのリーク発生のタイミング次第では事故時の時間軸の情報を保持している可能性あり）。

#### 【主要関心事項】

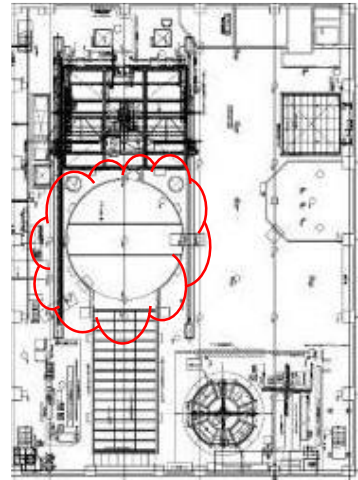
- Csや中揮発性FP（Ag、Sn、Sb、Mo）の同位体比と化学形態
- 比較的大型・高線量、かつコンクリートリッチなサンプルを対象とした定量分析技術の検証。

図出典：文献[1]

既設穿孔箇所拡大図



シールドプラグの穿孔箇所



R/B 5階

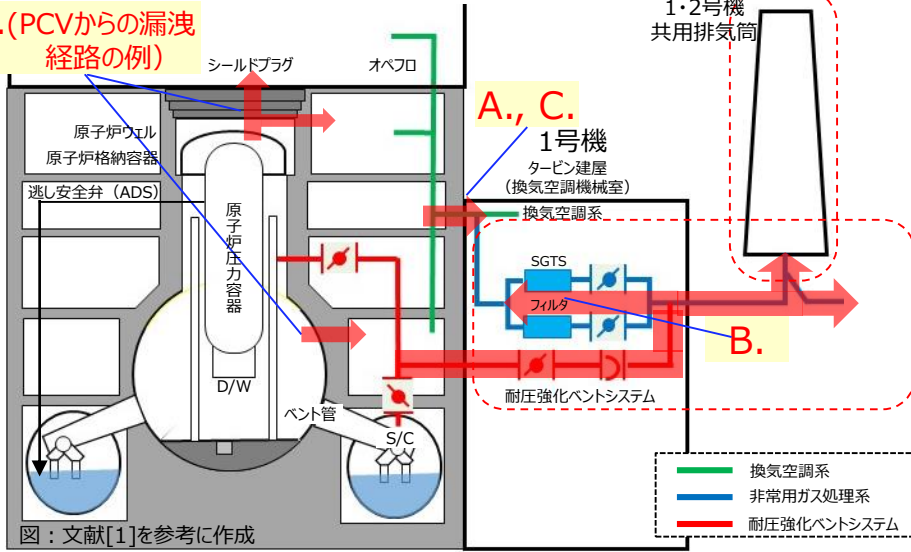
# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析対象サンプルの個別概要 (6/9)

### 1号機 SGTS室調査試料

A.(PCVからの漏洩経路の例)



SGTS室への想定流入経路として、

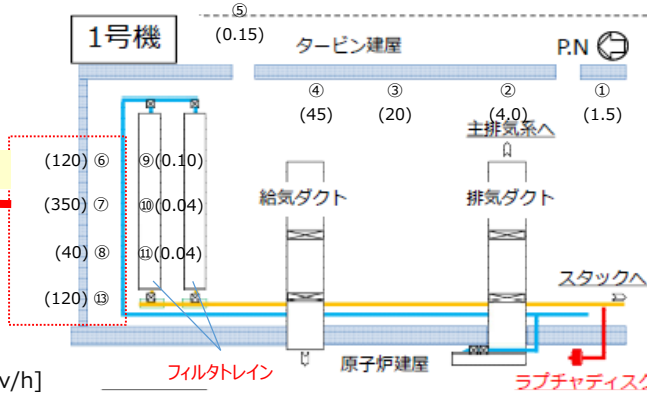
- A. ベント前のPCVからの漏洩及び空調系を介しての流入
- B. ベント時のガスが漏洩
- C. ベント後のR/B排気系を逆流してSGTS室に流入

⇒ フィルタトレイン近傍床面から採取したスミアの表面線量率が相対的に高く (左下図参照)、上記B.の過程を経た可能性が高い。(ただしA.とC.の経路も否定できない)

### 1号機事故時のSGTS室への想定流入経路 (概略)



※丸付数字は採取したスミア試料の番号を表す。  
( )内の数字はスミア表面線量当量率β+γ線 [mSv/h]



### 1号機SGTS室 スミア採取箇所 (概略)

### 【サンプル選定の背景】

- フィルタトレイン近傍床面のスミア試料からα線を検出。
- 1号機ベント時のガスが到達した可能性あり。

### 【主要関心事項】

- U、α核種、FPの含有量、同位体比
- U粒子 (蒸発・凝縮過程、燃料片)、FP粒子 (Cs、Ag) の検出・結晶構造分析

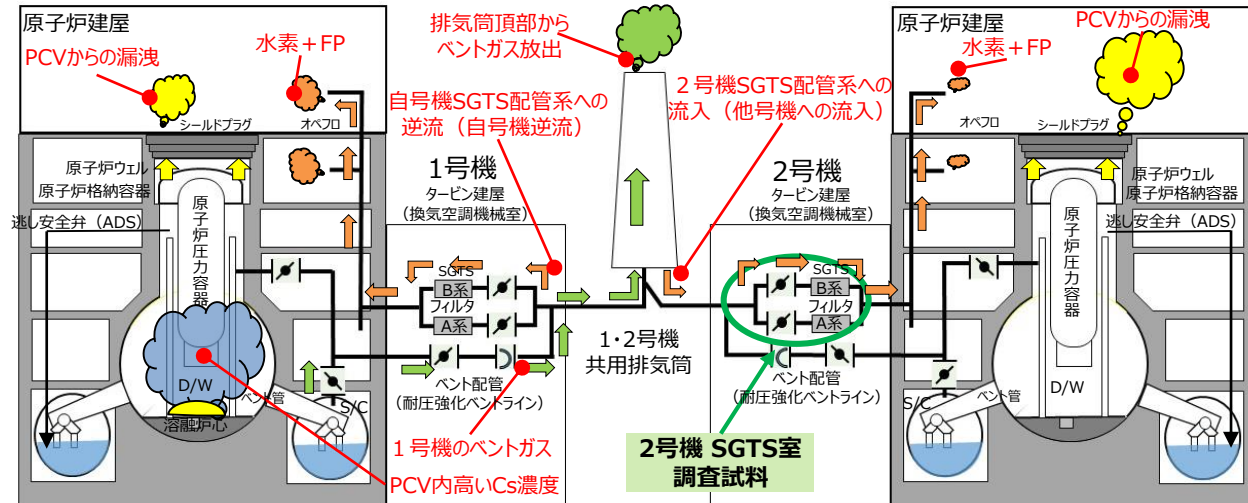
# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析対象サンプルの個別概要 (7/9)

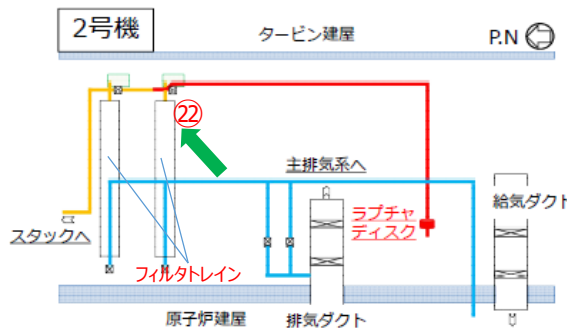
### 2号機 SGTS室調査試料

2022年度



図：文献[1]を参考に作成

### 1号機ベントガスの推定流入経路



※丸付数字は採取したスミア試料の番号を表す。

図出典：文献[2]

### 2号機SGTS室 スミア採取箇所 (概略)

SGTS室内のフィルタトレイン (B系)  
漏洩痕のスミア (2021年1月採取)

### 【サンプル選定の背景】

- 漏洩痕の位置から、フィルタトレインからの漏洩があったものと推定。
- 1号機ベント時に運ばれてきた成分を含む可能性あり。

### 【主要関心事項】

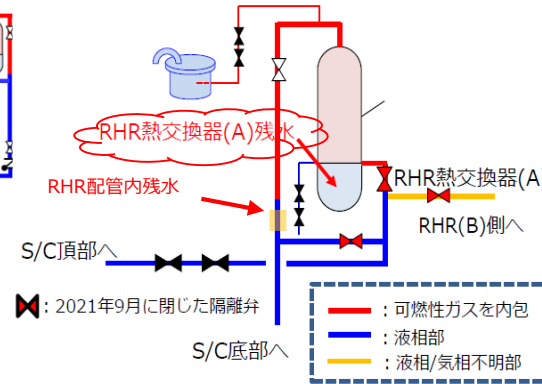
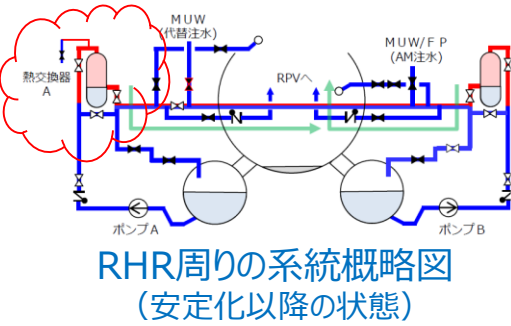
- U、α核種、FPの含有量、同位体比
- U粒子 (蒸発・凝縮過程、燃料片)、FP粒子 (Cs、Ag) の検出・結晶構造分析

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析 (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

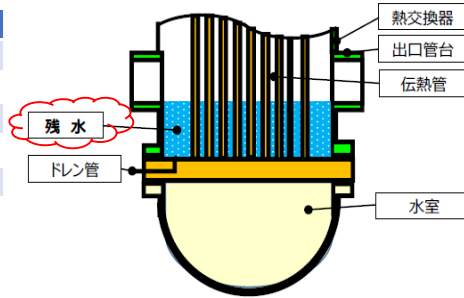
## 分析対象サンプルの個別概要 (8/9)

## 3号機 RHR熱交換器 (A) 残水

2022年度



RHR配管の系統概略イメージ



RHR熱交換器(A)残水イメージ

### 残水の採取箇所

図出典：文献[1]

残留熱除去系（RHR）の残水試料（2021年12月採取のもの）を輸送

### 【サンプル選定の背景】

- システム保有水とともに水素ガス及び<sup>85</sup>Krが滞留しており、事故初期のPCV内由来の物質が含まれている可能性。
- RHR熱交換器内残水試料の2回の採取・分析結果（左表参照）では、pHの上昇（3.8 → 6.1）及び放射性核種濃度の低下が認められ、沈殿物形成の可能性。

- ✓ 残水中に含まれる固相中のU、及びα核種の形態を調べることにより、事故初期におけるU粒子の形成条件、または環境変化に伴うPuやAmの化学形変化に関する知見が得られる可能性あり。

### 【主要関心事項】

- 固相の有無（ろ過）
- 固相側での炉心物質（U、Zr）の検出
- α核種他元素との帯同状態

### 参考) 残水試料の分析結果

#### ● 熱交換器内

・1回目（採取日:2021.12.15）

分析項目	分析結果	分析項目	分析結果
<sup>134</sup> Cs	2.46E+04 Bq/L	pH	3.8
<sup>137</sup> Cs	7.38E+05 Bq/L	塩基	2.40E+04 mg/L
<sup>60</sup> Co	2.07E+05 Bq/L	カルシウム	2.50E+02 mg/L
<sup>3</sup> H	7.69E+04 Bq/L	マグネシウム	1.10E+03 mg/L
全β放射能	8.47E+05 Bq/L	ナトリウム	8.00E+03 mg/L
前α放射能	5.09E+00 Bq/L	SS（浮遊物質）	8.4E+01 mg/L

・2回目（採取日:2022.1.17）

分析項目	分析結果	分析項目	分析結果
<sup>134</sup> Cs	1.87E+04 Bq/L	pH	6.1
<sup>137</sup> Cs	5.23E+05 Bq/L	塩基	1.90E+04 mg/L
<sup>60</sup> Co	1.37E+03 Bq/L	カルシウム	3.70E+02 mg/L
<sup>3</sup> H	3.41E+06 Bq/L	マグネシウム	1.10E+03 mg/L
全β放射能	5.20E+05 Bq/L	ナトリウム	9.70E+03 mg/L
前α放射能	<3.36E+00 Bq/L	SS（浮遊物質）	4.8E+01 mg/L

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析対象サンプルの個別概要 (9/9) 2017～18年度分析済みサンプルの追加分析 2022年度

#### ○ 追加分析の意義：

- ① 2017～18年度に実施した、Uを中心とした探索により得られた知見の補強（U以外の元素への着目）
- ② 将来の分析計画への反映

【実施内容】2017年度に茨城地区に輸送したサンプルを対象に、SEMによる追加探索及びTEM観察を行う。

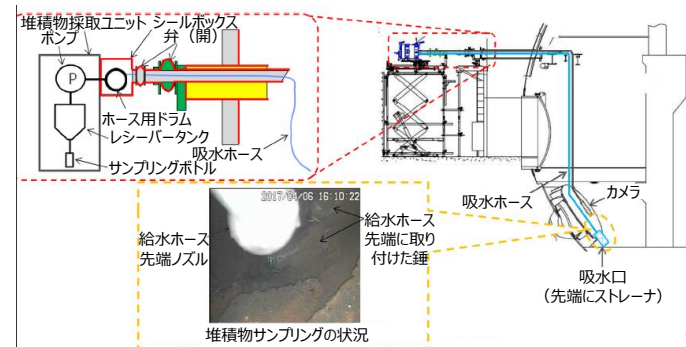
#### ○ 分析対象：

##### ➤ 1号機 PCV底部堆積物（2017年度採取）

- D/Wに移行した溶融物（U粒子として探索済）を含み、水中ROV調査サンプルと同様の由来・起源を含んでいる可能性がある。
- Uを中心とした探索を行った2017～18年度の分析よりも**広範な元素に着目した追加探索※1、2**により、**由来・起源を幅広く調査し（意義①）、将来的なROV調査サンプルの詳細分析（次期フェーズ）の計画立案に資する（意義②）。**

※1 プロセスの評価に資する元素として、Zr、Mo、Ag、Te、Sb、Sn (p.31参照)

※2 上記の他、過去の分析で認められた元素として、塗料（Zn、Ti）、ケーブル（Cu）、遮蔽材・ケーブル被覆（Pb）等の成分元素も考慮。



サンプル取得時の状況<sup>[1]</sup>（2017年4月採取）

## ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

### (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

#### 分析の着眼点【燃料デブリ生成過程の検討】

○ 堆積物・付着物（スミア含む）のサンプルは、構造材や建屋材由来の破片や粉末に、着目元素を含む微粒子や微小領域（まとめて「着目領域」という）が付着・混入している状態。

- 着目領域の探索・検出と詳細分析が重要。
- 着目元素としては、燃料由来と考えられるUに加えて、粒子の生成条件の検討に資すると考えられる元素を幅広く設定し（次頁参照）、検出できた着目領域での元素の帯同関係の確認、及び詳細分析対象を選定する。

#### ○ 分析項目と用途

- |                |  |
|----------------|--|
| ➤ FE-SEM/WDX   | 着目元素（主にU）の他元素との帯同関係の把握   |
| ➤ FE-SEM/EDX   | 同上※<br>※ EDXの特徴（多元素同時マッピング可能）を活かし、上記WDXで対象とするUに加え、CsやMoなど幅広い種類の元素に着目して探索 |
| ➤ TEM/STEM-EDX | TEM分析対象の選定<br>粒子内部の構成相の詳細分析（主要金属元素比、結晶構造、金属／酸化物の判定）                      |
| ➤ ICP-MS、放射線分析 | 着目元素の同位体比の測定（燃料中のFPや放射化生成物など、炉心での照射由来の物質を含むか否かの判定）                       |

## ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

### (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

#### 分析の着眼点【燃料デブリ生成過程の検討】

表 微粒子の探索時の主な着目元素

着目元素	着目相	得られる知見
U	(U,Zr)O <sub>2</sub> 、及び周辺のFe-Cr-Ni酸化物 (FeO、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、NiO)	UO <sub>2</sub> 、Zry、SUS間の反応過程 (到達温度、雰囲気)
Zr	Fe(Cr,Ni)-Zr系の金属間化合物またはその酸化物 金属と酸化物の判別 (Zr(O)/ZrO <sub>2</sub> )	SUS-Zryの反応条件 (到達温度) Zryの酸化条件 (雰囲気)
Mo	Cs-Mo複合酸化物 MoO <sub>2</sub> /MoO <sub>3</sub>	Mo放出時の条件 (到達温度、雰囲気)
Cs	Si-Cs酸化物 (非晶質または定比化合物) Fe-Cs複合酸化物	Cs放出時の条件 (到達温度、雰囲気)
Ag、Te、Sb、Sn	合金、酸化物、Te化物、Se化物	中揮発性FPの放出過程 (到達温度、雰囲気)

○ U以外の元素についても、由来や使用場所がある程度絞られ、かつ特定の化合物の形態が生成条件に紐付けられる場合は、より広範な観点での生成条件の評価が可能になると考えられる。

⇒ U以外の元素にも着目した生成プロセス評価法の検討

## ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

### (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

#### 分析の着眼点【サンプル採取箇所の汚染状況の把握】

##### ○ 堆積物・付着物（スミア含む）サンプル共通

- サンプルの巨視的な特徴（主要構成元素・主要放射性核種の内訳とそれらの含有率）及び炉心成分の混入程度の把握が目的であり、**定量分析が重要**。

##### ○ 分析項目と用途

###### ➤ ICP-MS、放射線分析

- 定量分析対象元素

**U、Zr、Fe、Cr、Ni**（炉心内主要材料）

**Mo**（FP、構造材、グリス：酸化還元鋭敏元素）

**B**（中性子吸収材）、**Cs、Ag、Te、Sb**（FP：粒子探索での着目元素）

**Pu、Am**（ $\alpha$ 線放出核種）

- 元素・核種の簡易同定（定性分析）

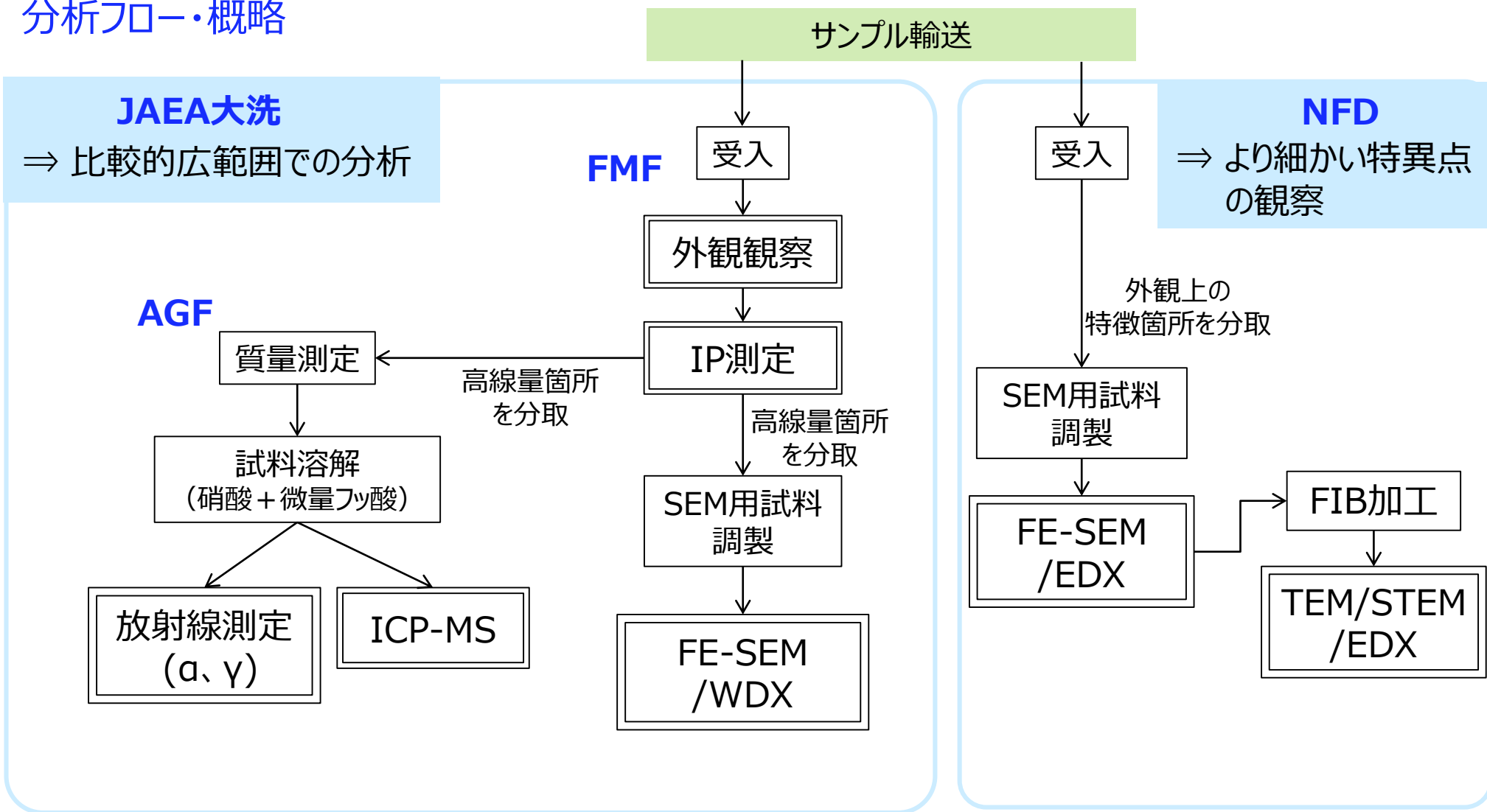
サンプル質量及び放射能への寄与の大きい元素・核種の把握（上記以外の定量分析対象元素の選定）



# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析フロー・概略



# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

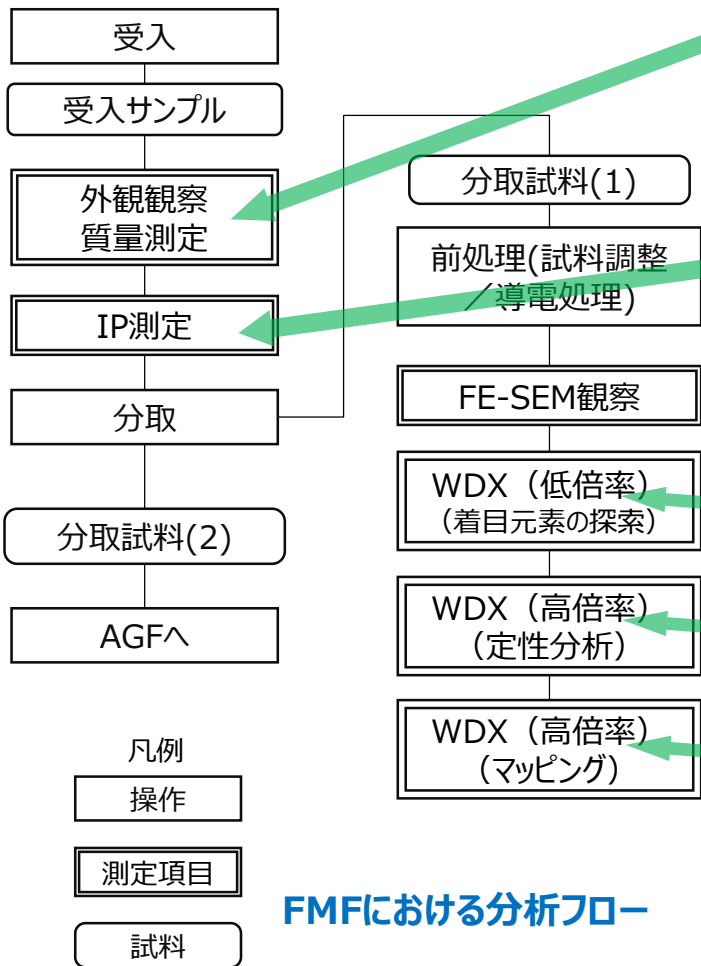
### 各分析項目とデータの用途、及び精度

分析項目	得られる情報	主な用途	本事業における精度
外観観察	呈色状況、形状、光沢の有無等	他の定性／定量分析により得られる性状データを解釈する際の参考情報 後段の詳細観察に供する部位の選定	サンプルの呈色状況、形状、光沢の有無等、外見上の特徴が判別できること
IP測定	汚染分布	後段の定性／定量分析に供する部位の選定	標準線源（ <sup>137</sup> Cs等）との比較による汚染分布の大まかな推定が可能であること
FE-SEM/WDX	着目元素の濃集領域およびその近傍での元素分布、元素間の帯同性（特にPu-Uの帯同性）	粒子の生成に寄与した材料の概略推定 α核種を含む汚染メカニズムの解明	元素の含有が判定できること
FE-SEM/EDX	比較的広範囲における着目元素の検出、および局所的な元素分布	検出された元素の種類およびその元素分布からの当該サンプルの由来・起源の概略推定 TEM分析における着目領域の選定	元素の含有が判定できること
TEM/STEM-EDX	粒子内部の微細構造、および当該粒子の構成相と各相の元素組成	粒子の生成過程（反応に寄与した材料、到達温度、雰囲気）の推定	元素の含有が判定できること 酸素濃度は酸化物／金属の判定が行える精度であること e.g. Zr(O) or ZrO <sub>2</sub>
ICP-MS	【定性分析】 当該サンプルに含まれる元素・核種 【定量分析】 検量線法により得られる対象元素の同位体比および元素組成	【定性分析】 当該サンプルの由来・起源に係る推論・評価 【定量分析】 比較的高精度での同位体比や元素組成の算出によるサンプルの由来・起源の推定 平均的な元素比を用いた採取箇所間の比較、SEMなどで得られる局所的な組成との整合性の確認	【定性分析】 操作ブランクとの比較から未知試料中に有意に含有する元素が絞り込めること 【定量分析】 不確かさを明記していること
放射線測定	【定性分析】 当該サンプルに含まれる核種 【定量分析】 溶解液のカウント数と標準線源からの放射線量	ICP-MSと同様	放射性核種の溶解液への移行割合の目安となること

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

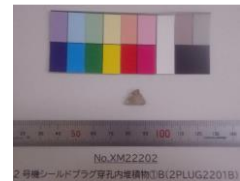
### 分析データ取得方針 (1/3) 外観・IP測定～FE-SEM/WDX JAEA大洗/FMF



FMFにおける分析フロー

#### ◆外観観察

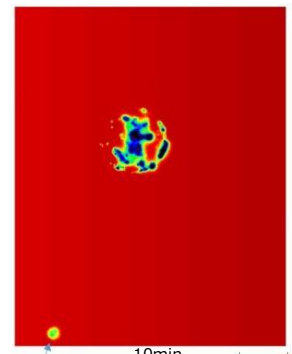
- 受け入れた試料のサイズ・呈色状況を記録するため、スケールやカラーチャートを視野に入れて撮影。適宜拡大像を撮影。
- ※ 本資料では紙面の都合上、拡大像やトリミング後の画像を掲載しており、スケールやカラーチャートが視野に含まれていない場合がある。



外観観察結果の一例 <2PLUG2201B>\*

#### ◆IP測定

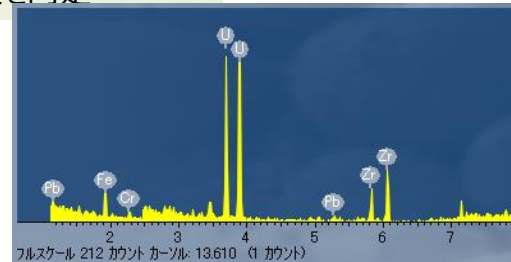
- 注目箇所の選定過程を明記するため、**サンプルサイズと暴露時間の選定方法**を記載
- 全サンプルで線量値を比較・定量できるように、**コンター情報及び標準線源情報**を記載
- ※ 本資料では紙面の都合上、サンプル部分を抜粋して掲載。



IP測定結果の一例 <2PEN2101>\*

#### ◆FE-SEM/WDX

- 探索時の着目元素：U (探索面積：最大で約1mm<sup>2</sup>)
- 同定・定量根拠を判断できるように、主要な特性X線のオーバーラップについて確認
- 全波長走査での定性分析を実施し、含有元素を同定
- マッピング対象元素：U、Pu、Zr、Cs、Mo、Sb、Fe、Cr、Ni、Zn、Siは必須とし、**この他、定性分析で検出された元素**を追加
- 各元素の同定根拠について、特性X線マップと波長チャートと対応させて明記



全波長走査による定性分析の一例 <2PEN2102>\*

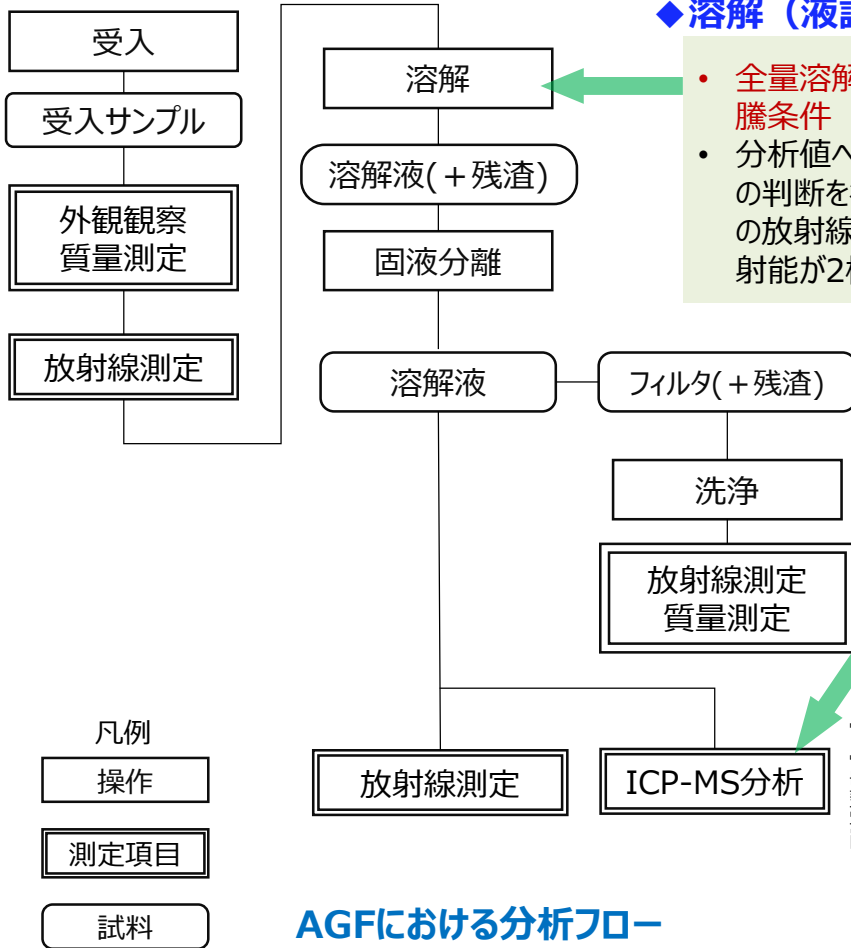
\* : p.39に示す試料番号

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析データ取得方針 (2/3) 溶解～放射線測定、ICP-MS

JAEA大洗/AGF

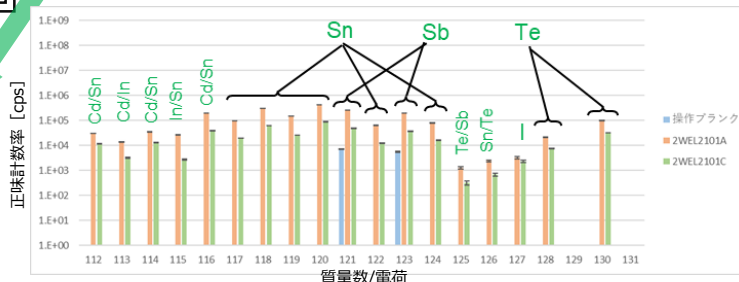


#### ◆溶解（液調製）～放射線測定

- 全量溶解のための溶解条件として、8M硝酸+微量フッ酸を用い、未沸騰条件（～100℃）にて溶解
- 分析値への残渣の影響を判断できるよう、溶解液の外観から全量溶解の判断を行うとともに、溶解前後での質量測定を実施。また、溶解前後の放射線測定により、溶解後の主要放射性核種（Cs、Coなど）の放射能が2桁以下まで低下することを確認。

#### ◆ICP-MS分析

- 定性分析（全質量数）データをブランクデータと共に全掲載し、同定結果と判断根拠を明記（未同定質量数についても示す）
- 定量分析は、原則、**検量線溶液の濃度範囲内で実施**し、検量線範囲を外れる場合（特に低濃度側に外れる場合）は、そのことを明記
- 重要核種（U同位体、Mo同位体など）については、同位体比を評価



ICP-MS定性分析結果の例

(2号機 ウェル差圧調整ライン内堆積物、m/Z=112～131を抜粋)

#### ● 定量分析値

$$\text{正味の核種質量} = X_1 - X_2$$

$X_1$  : 試料溶解液中の核種質量

$X_2$  : 操作ブランク試料中の核種質量

定量分析値の不確かさは、 $X_1$ 及び $X_2$ の検量線不確かさを合成して算出

#### AGFにおける分析フロー

凡例

操作

測定項目

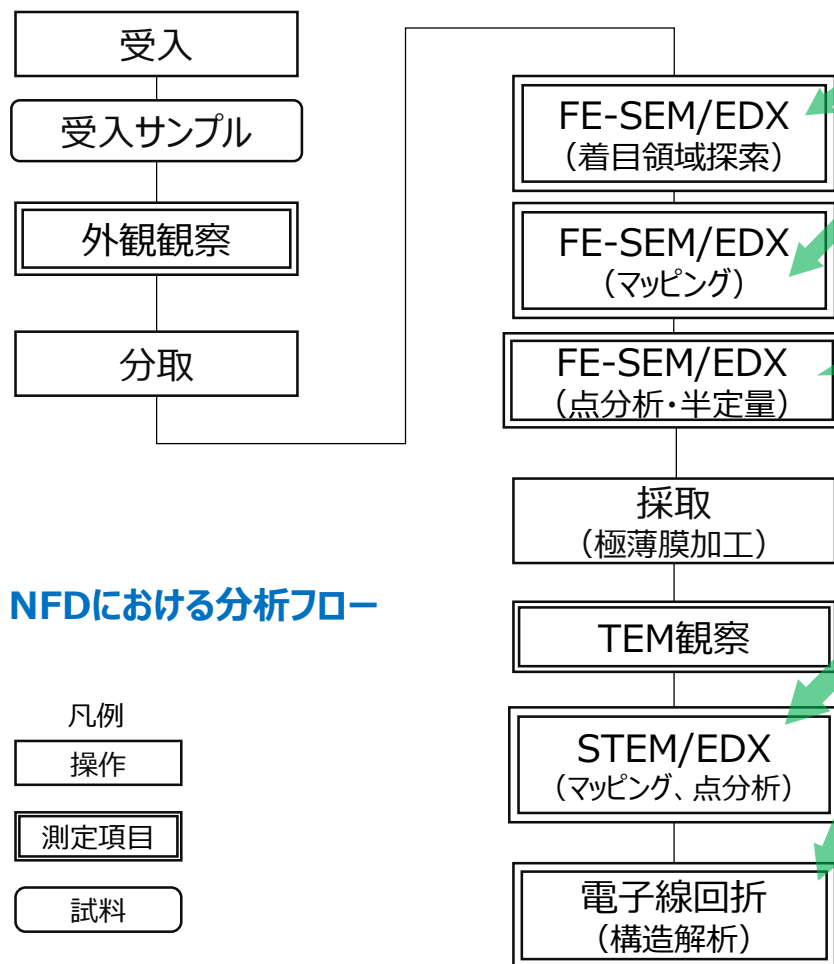
試料

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### 分析データ取得方針 (3/3) FE-SEM/EDX、TEM/STEM-EDX

NFD



#### NFDにおける分析フロー

凡例

操作

測定項目

試料

#### ◆ FE-SEM/EDX

- 探索時の着目元素 : U、Zr、Cs、Mo (探索面積 : 最大で約1mm<sup>2</sup>)
- 低倍率のマッピングでは、炉心由来や構造材由来成分の分布状況の確認のため、**C、O、F、Na、Mg、Al、Si、S、Cl、Ca、Ti、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Zr、Mo、Tc、Ru、Rh、Pd、Ag、Sn、Te、I、Cs、Ba、Sm、W、Pb、U**の34元素を必須とし、この他、特徴元素を検出した場合は追加
- **元素の同定根拠、オーバーラップ**の記載
- 点分析・ZAF校正による定量値の妥当性・判定根拠・有効数字・オーバーラップを明示

#### ◆ TEM/STEM-EDX

- 重要測定項目である酸素の定量のため、**ゼータ因子法を導入**、その基本原理・測定手順を記載
- 結晶構造解析の妥当性・確からしさを明示

# 6. 実施内容

## (1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

### ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

(a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

### (b) サンプル分析

- 分析項目一覧
- 分析結果

### ② 燃料デブリの性状推定の高度化

(a) 分析データの解析

(b) 1F試料評価委員会

(c) 燃料デブリ特性リストの改訂

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集及び性状把握のための国際協力

(a) 燃料デブリに関する文献調査、国内外の知見収集、レビュー

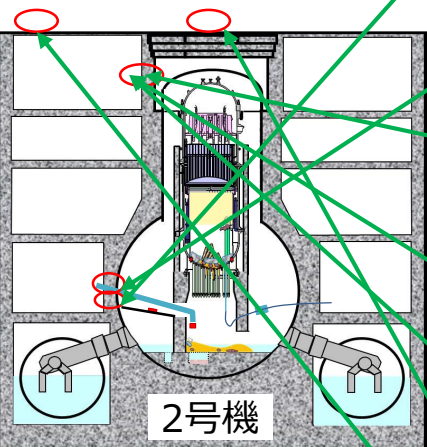
(b) 「国際的な議論を行う場」についての検討

### ④ まとめ

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析 分析項目一覧 (2021~2022年度)

— 2号機 —

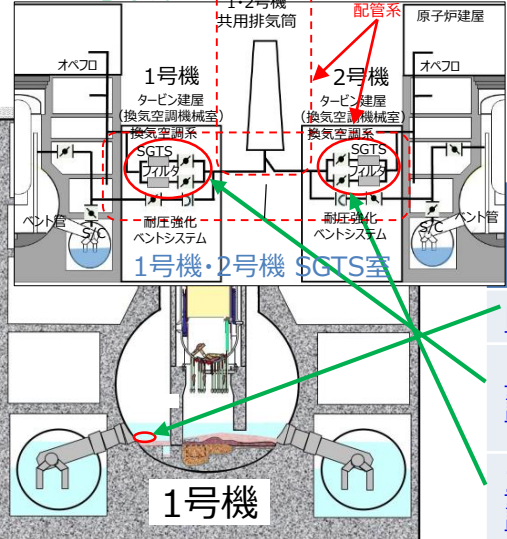


試料 (採取箇所)	試料ID	分析 機関	分析項目						分析 年度
			外観	IP	SEM	TEM	ICP-MS	放射線測定	
X-6ベネ調査装置 付着物	2PEN2101	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2021
	2PEN2102	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2021
	2PEN2103	NFD	●		●(EDX)	●			2021
PCV貫通部 (X-53ベネ)	2PEN2201A	NFD	●		●(EDX)	●			2022
	2PEN2201B	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2022
ウェル差圧調整ラ イン堆積物	2WEL2101A	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2021
	2WEL2101B	NFD	●		●(EDX)	●			2021
	2WEL2101C	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2021
排気ダクト劣化部	2WEL2102A	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2021
	2WEL2102B	NFD	●						2021
排気ダクト点検口 表面部	2WEL2103A	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2021
	2WEL2103B	NFD	●		●(EDX)				2021
シールドプラグ穿孔 内堆積物	2PLUG2201B	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2022
	2PLUG2202B	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2022
FHM遠隔操作室 スミア	2FHM2203	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2022
	2FHM2204	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2022
	2FHM2207	JAEA	●	●	●(WDX)		●	●	2022

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

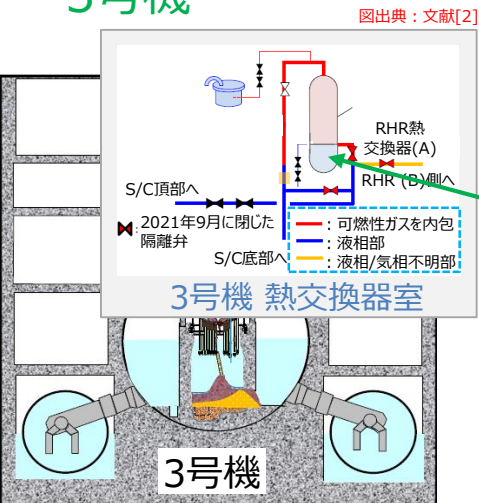
## (b) サンプル分析 分析項目一覧 (2021~2022年度)

### - 1号機 -



試料 (採取箇所)	試料ID	分析機関	分析項目						分析年度
			外観	IP	SEM	TEM	ICP-MS	放射線測定	
PCV底部堆積物	1PCV1701D-4	NFD	●		● (EDX)	●			2022
1号機 SGTS室 調査試料	1SGTS2201	NFD	●		● (EDX)	●			2022
	1SGTS2202	JAEA	●	●	● (WDX)		●	●	2022
2号機 SGTS室 調査試料	2SGTS2202	JAEA	●	●	● (WDX)		●	●	2022

### - 3号機 -



試料 (採取箇所)	試料ID	分析機関	分析項目						分析年度
			外観	IP	SEM	TEM	ICP-MS	放射線測定	
RHR熱交換器 (A) 残水	3RHR2201B	JAEA	●	●	● (WDX)		●	●	2022



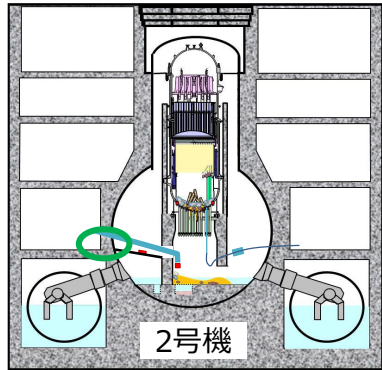
# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 2号機 -

### X-6ペネ調査装置付着物

<2PEN2101, 2PEN2102>



高線量箇所を分取し、SEM観察および化学分析に供試

### ◆ FE-SEM/WDX

- U粒子を検出：  
Uと同位置に **Pu** (2PEN2101)、  
または **Zr** (2PEN2102) を検出
- U粒子周辺にAl、Ca、Mg、Znを含む粒子、  
Fe-Ni、Ni-Cu-Zn、Cr、Pb、Ti粒子を検出

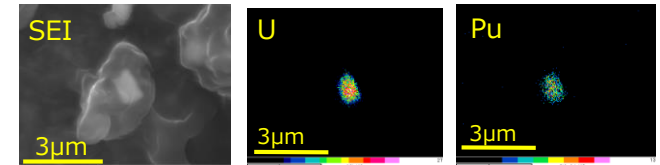
### ◆ 放射線測定

- γ核種： **$^{60}\text{Co}$** 、 **$^{106}\text{Rh}$** 、 **$^{125}\text{Sb}$** 、 **$^{134}\text{Cs}$** 、 **$^{137}\text{Cs}$** 、 **$^{144}\text{Ce}$** 、 **$^{154}\text{Eu}$** 、 **$^{155}\text{Eu}$** 、 **$^{241}\text{Am}$**  を検出

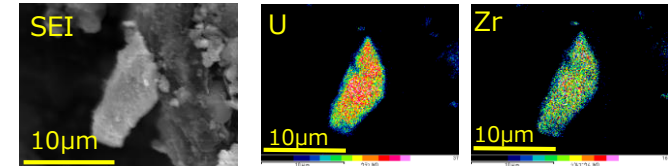
### ◆ ICP-MS

- $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比**は天然同位体比よりも有意に高く、**燃料由来**
- Moは天然同位体比に近い
- この他、Cr ( $^{52}, ^{53}\text{Cr}$ )、Fe ( $^{56}, ^{57}\text{Fe}$ )、Ni ( $^{60}, ^{61}, ^{62}\text{Ni}$ )、**Zr** ( $^{90}, ^{91}\text{Zr}$ )、Nd ( $^{143}, ^{145}, ^{146}\text{Nd}$ ) の有意値を定量。
- 定性分析において計28元素を検出：Fe、Al、Pb、Zn、Sb、U、Ca、Cu、Zr、Mn、Ni、Sn、Mo、V、Y、Gd、Pu、Sr、Pr、Ag、Nd、Pd、Tc、Rh、Bi、As、Sm、Cd

<2PEN2101>



<2PEN2102>

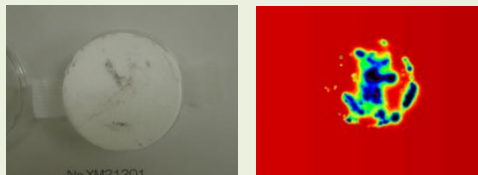


U粒子上の元素分布の一例 (FE-SEM/WDX)

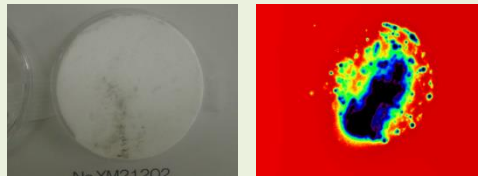
### 同位体比分析結果の一例 (ICP-MS)

Samples	Mo		U
	( $^{97}\text{Mo}/^{95}\text{Mo}$ )	( $^{98}\text{Mo}/^{95}\text{Mo}$ )	( $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ )
2PEN2101	0.7±0.2	1.7±0.4	0.0200±0.0006
2PEN2102	0.7±0.1	1.4±0.2	0.0193±0.0003
参考： 天然同位体比	0.60	1.52	0.0073

注) 誤差は、それぞれの核種の検量線による標準不確かさを合成し、2σとして表示。



外観写真 IP像 (露出10分)  
<2PEN2101>



外観写真 IP像 (露出3分)  
<2PEN2102>

### 付着物 (スミア) 外観・IP観察結果

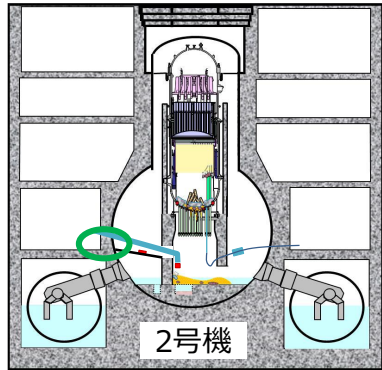
# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 2号機 -

### X-6ペネ調査装置付着物

<2PEN2103>



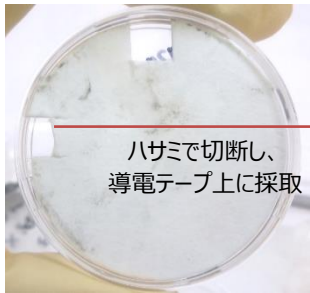
### ◆ FE-SEM/EDX

• FE-SEM/EDXの結果から着目領域23ヶ所\*を抽出し、**TEM分析対象**として以下を選定

- 高酸素濃度U-Zrとして、領域6、14
  - 低酸素濃度U-Zrとして、領域5、12
- } 計4箇所

⇒ U-Zr-O系または $UO_2-ZrO_2$ 系での相状態の解釈から、粒子の到達温度や冷却過程の理解に資する。

- \* 濃縮部分に着目：
- U濃縮部分に着目：14箇所  
(UとZrの両方を含むもの13領域、Zrをほとんど含まないもの1領域)
  - Zr濃縮個所に着目：4箇所
  - 特異元素濃縮部分：5箇所 (Pb-S、Ti、Cu-Zn各1箇所、Ni;2箇所)



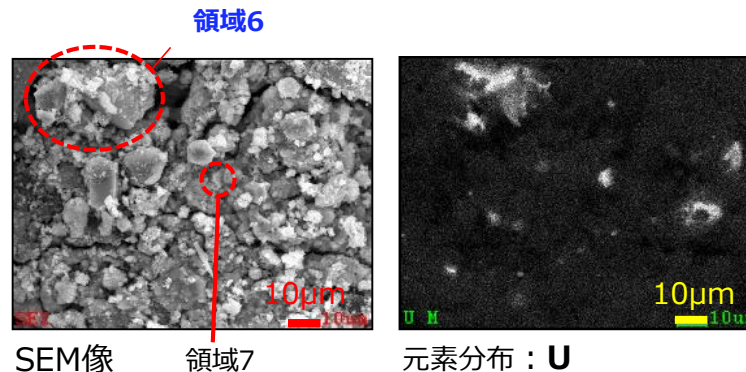
ハサミで切断し、  
導電テープ上に採取

付着物 (スミア) 外観  
SEM試料採取後



SEM観察試料  
<2PEN2103-1>  
(⇒SEM観察を実施)

### SEM観察用試料の採取



SEM像

領域7

元素分布：U

### U粒子の探索結果の一例

① 得られる燃料デブリサンプル等の分析  
(b) サンプル分析

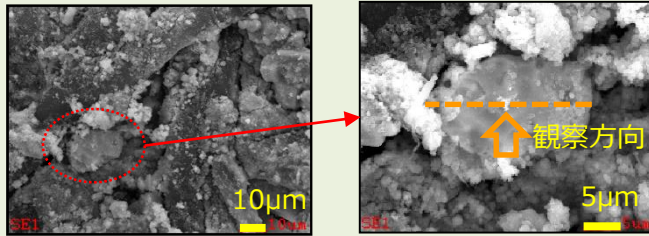
分析結果 - 2号機 -

2021年度

X-6ペネ調査装置付着物 <2PEN2103>

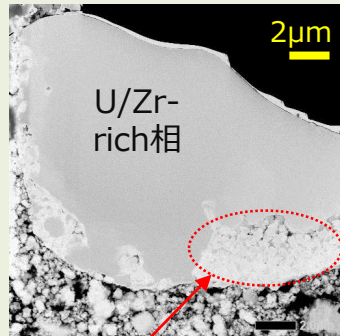
◆ TEM/STEM-EDX (4領域の観察結果)

● 領域14



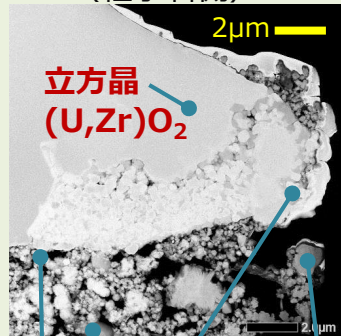
TEM観察用試料 (薄膜化試料) の採取

(粒子左側)



U/Zr-rich相と  
Fe/Cr-rich相の混  
合領域

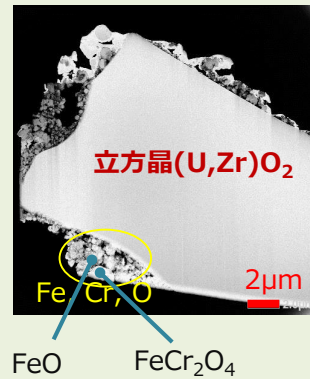
(粒子右側)



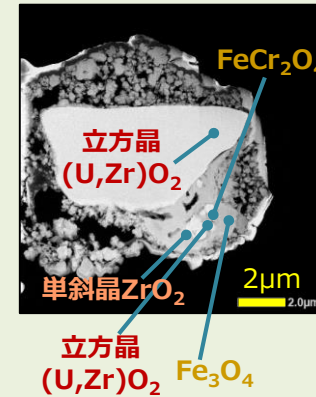
立方晶  
(U,Zr)O<sub>2</sub>  
FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>  
Ca(OH)<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub>  
SiO<sub>2</sub>+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Si-Fe-O

粒子断面の微細組織及び構成相

● 領域6

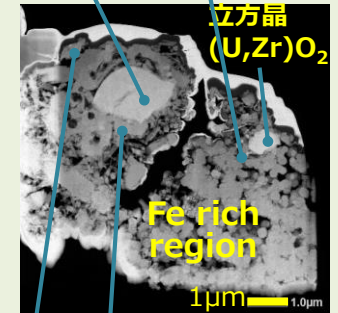


● 領域12



他の領域での観察結果

正方晶(Zr,U)O<sub>2</sub> FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>



● 領域5

- UとZrを含む最大で20µm程の粒子 (U粒子) を確認。U粒子の主要構成相は以下の通り
  - U/Zr-rich相 : **立方晶(U,Zr)O<sub>2</sub>** (U:Zrは約6:4)  
**正方晶(Zr,U)O<sub>2</sub>**、**単斜晶ZrO<sub>2</sub>**
  - Fe/Cr-rich相 : FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、FeO、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>
  - U/Zr-rich相とFe/Cr-rich相の混合 (領域14、12)
- この他、U粒子周辺でFeO、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub> (微量Al、Mg、Fe含む)、CaCO<sub>3</sub>/Ca(OH)<sub>2</sub>、Ag-Pb、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> を成分とする粒子を検出

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

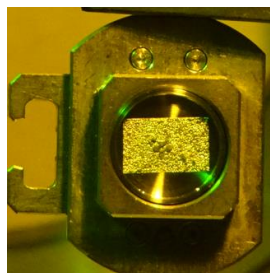
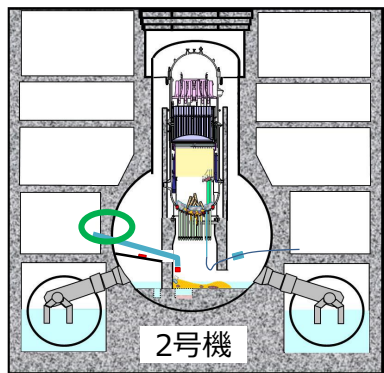
## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 2号機 -

PCV貫通部 (X-53ペネ)

<2PEN2201B>

2022年度



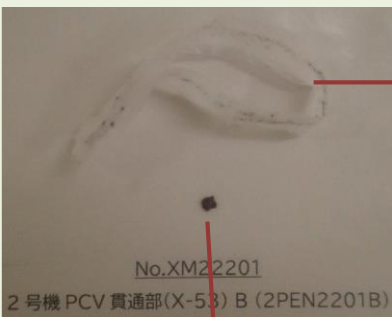
SEM観察用試料

粒を数個回収し  
SEM観察へ



全体SEM像

残りのテープ部は  
すべて化学分析へ



テープ (サンプル容器の  
封に使用) 粘着面に多  
数の粒状の試料が付着



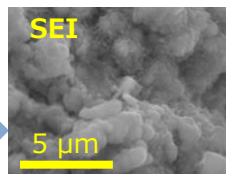
大きさ約4mmの固形物を確認



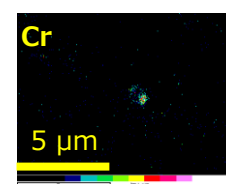
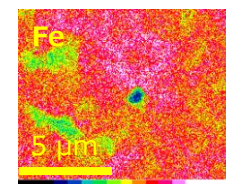
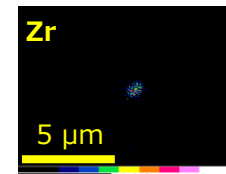
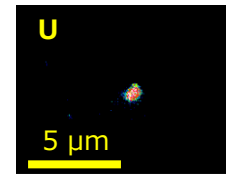
付着物外観

サンプル溶解

⇒放射線測定、  
ICP-MS に供試



U粒子とその周辺の  
元素分布の一例  
(FE-SEM/WDX)



### ◆ FE-SEM/WDX

- テープ粘着面上の粒子において、Feが広く分布する中に **U粒子検出** (U粒子上に**Zr**を検出。その周辺でCr、Ni、Zn、Moを検出)

### ◆ 放射線測定

- γ核種： **$^{60}\text{Co}$** 、 **$^{125}\text{Sb}$** 、 **$^{134}\text{Cs}$** 、 **$^{137}\text{Cs}$** 、 **$^{154}\text{Eu}$** 、 **$^{155}\text{Eu}$** 、 **$^{241}\text{Am}$** を検出
- α線計測の結果、 **$^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$** 、 **$^{238}\text{Pu}+^{241}\text{Am}$** 、 **$^{243}\text{Cm}+^{244}\text{Cm}$** を検出

### ◆ ICP-MS

- U**、**Mo**、**Ag**、**Te**を検出 (天然と異なる同位体比)
- この他、Cr、Fe、Ni、**Zr**、Sbの有意値を定量

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 2号機 -

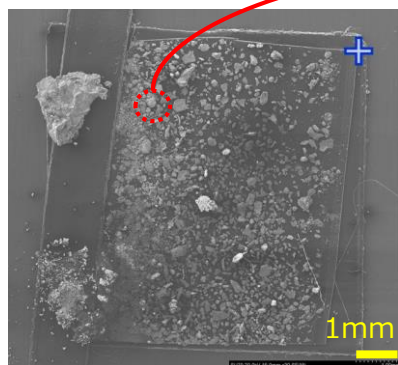
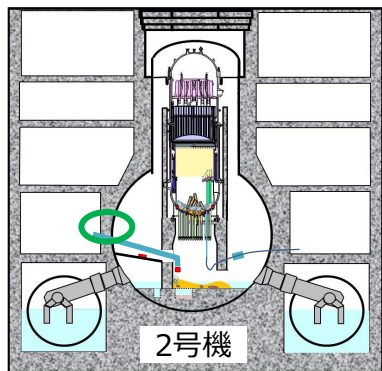
PCV貫通部 (X-53ペネ)

<2PEN2201A>

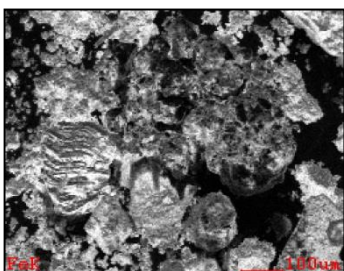
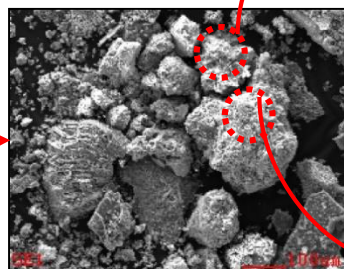
2022年度

### ◆ FE-SEM/EDX

- 全体的に**Feを含む粒子が広く分布**しており、その中に**Uを含む粒子を数多く検出**。
- U粒子生成過程の理解のため、**U濃度の高い部分とZr濃度の高い部分の混在（または接合）する2領域**（領域11、及び領域3~4。下記参照）をTEM観察に供した。

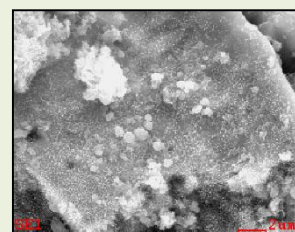


SEM観察用試料の全体SEM像

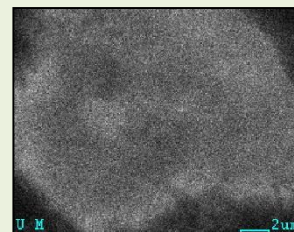


粒子の概観

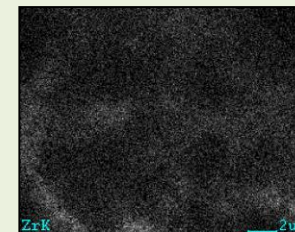
● **領域11** ⇒ 一つの粒子内でのU-rich相とZr-rich相への分離の有無から、粒子の冷却過程に関する知見の取得を想定



SEM像

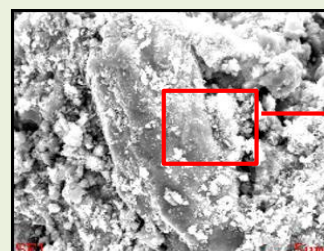


元素分布 : U



元素分布 : Zr

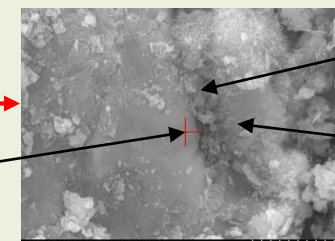
● **領域3~4** ⇒ U、Zr、Feを含む領域が隣接しており、Feを含む粒子の成り立ちに関する知見取得を想定



SEM像

拡大

Zr-richな領域



Fe-richな領域

Uを含む領域

SEM像

5µm

Uを含む領域の詳細観察 (TEM観察対象)

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

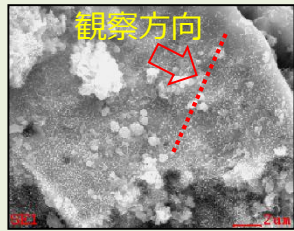
分析結果 - 2号機 -

PCV貫通部 (X-53ペネ) <2PEN2201A>

2022年度

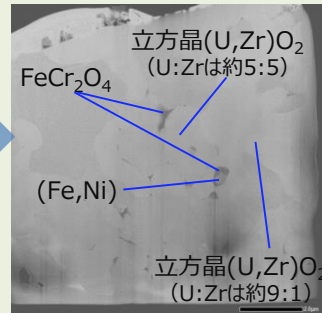
### ◆ TEM/STEM-EDX (2領域の観察結果)

#### ● 領域11 (UとZrが同程度存在)



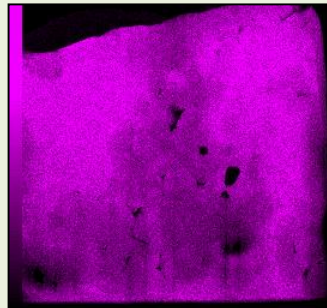
SEM像 2μm

TEM観察用試料の  
採取位置・観察方向

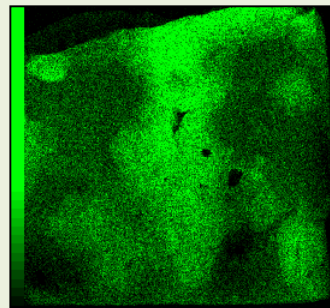


STEM像 2μm

粒子断面の微細組織



元素分布 : U



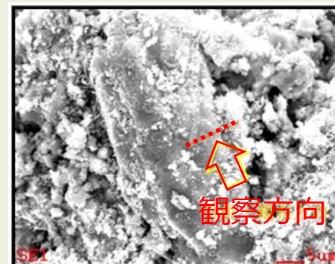
元素分布 : Zr

元素分布 (上記STEM像の視野)

粒子断面の微細組織及び元素分布

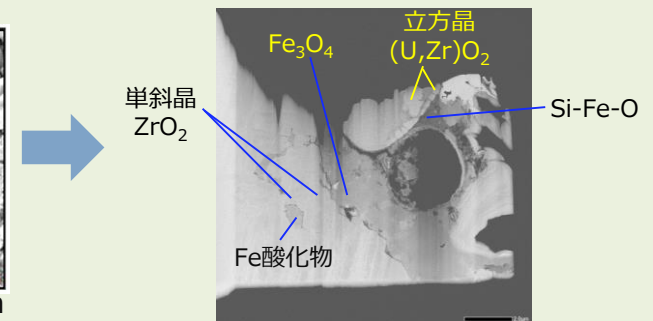
- 領域11では、Zr含有率の異なる立方晶(U,Zr)O<sub>2</sub>に加え、Fe-Ni (金属相)、Fe-Cr酸化物等が点在
- 領域3~4で、Si-Fe-O系ガラス質とみられる部分を持つ立方晶(U,Zr)O<sub>2</sub>を含む微粒子の集合体、及び単斜晶ZrO<sub>2</sub>微粒子の集合体であり、その間にFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>を含む微粒子の集合体が緻密に集まった構造

#### ● 領域3~4 (U-rich相とZr-rich相の接合部分)



SEM像 5μm

TEM観察用試料の  
採取位置・観察方向



STEM像 2μm

粒子断面の微細組織

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

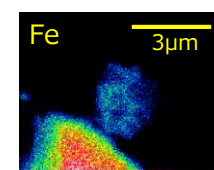
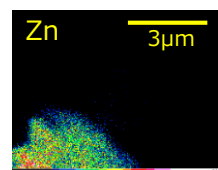
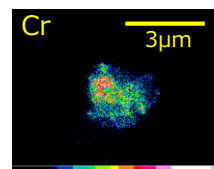
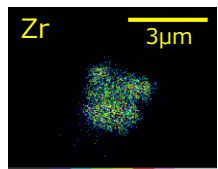
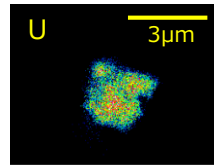
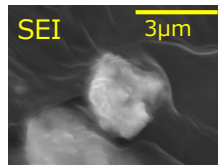
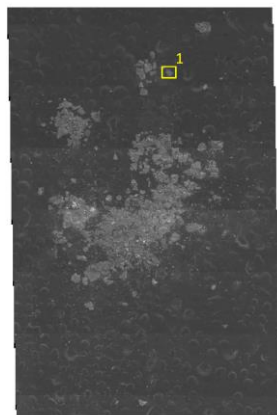
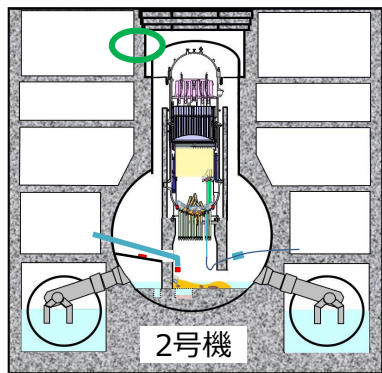
## 分析結果 - 2号機 -

47

### ウェル差圧調整ライン内堆積物

<2WEL2101A、2WEL2101C>

2021年度



全体SEM像  
(粉末部分を分取)  
<2WEL2101A>

U粒子とその周辺の元素分布の一例  
(FE-SEM/WDX)

### ◆ FE-SEM/WDX

- Feを主成分とする領域上にU粒子を検出：  
**U-Zr** (Fe-Crが隣接、または同位置にCrが存在)
- Feを主成分とする領域の一部でZnを検出
- Csの濃集領域は未検出

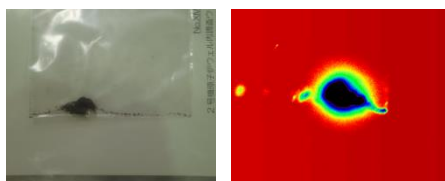
### ◆ 放射線測定※

- γ核種：**<sup>60</sup>Co**、**<sup>125</sup>Sb**、**<sup>134</sup>Cs**、**<sup>137</sup>Cs**、**<sup>154</sup>Eu**を検出

### ◆ ICP-MS

- U**、**B**を検出。**Mo**、**Ag**は天然と異なる同位体比。
- その他、Li (<sup>7</sup>Li)、Cr (<sup>52</sup>Cr、<sup>53</sup>Cr)、Fe (<sup>56</sup>Fe、<sup>57</sup>Fe)、Ni (<sup>60</sup>Ni、<sup>61</sup>Ni、<sup>62</sup>Ni)、**Cs** (<sup>133</sup>Cs)、Nd (<sup>143</sup>Nd、<sup>145</sup>Nd、<sup>146</sup>Nd) で有意値を定量。
- 定性分析において計51元素を検出：Fe、Zn、Mn、Na、Mo、Pb、Mg、C、U、Cu、Al、Ni、K、Cr、Zr、Sn、Tc、Ca、Sb、Ce、Cs、B、Ga、Ag、Sr、As、W、Li、V、Te、Ba、Cd、Rb、Gd、Ru、Pu、Se、Pr、Rh、Np、I、Pd、Nd、Y、Re、Bi、Ta、Th、Eu、Tb、Tl

※ 溶解後、目視で残渣を確認したが、放射線計測において、残渣側に残存する放射性核種は溶解液の1/100以下であることを確認。



外観写真 IP像 (露出10秒)

堆積物外観・IP観察結果の一例

<2WEL2101A>

同位体比分析結果の一例 (ICP-MS)

Samples	B	Mo		Ag	U
	( <sup>10</sup> B/ <sup>11</sup> B)	( <sup>97</sup> Mo/ <sup>95</sup> Mo)	( <sup>98</sup> Mo/ <sup>95</sup> Mo)	( <sup>107</sup> Ag/ <sup>109</sup> Ag)	( <sup>235</sup> U/ <sup>238</sup> U)
2WEL2101A	0.26±0.1	0.99±0.04	1.27±0.06	0.11±0.02	0.0209±0.0006
2WEL2101C	0.23±0.03	0.89±0.06	1.3±0.1	0.054±0.006	0.0206±0.0008
参考： 天然同位体比	0.248	0.60	1.52	1.076	0.0073

注) 誤差は、それぞれの核種の検量線による標準不確かさを合成し、2σとして表示。

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

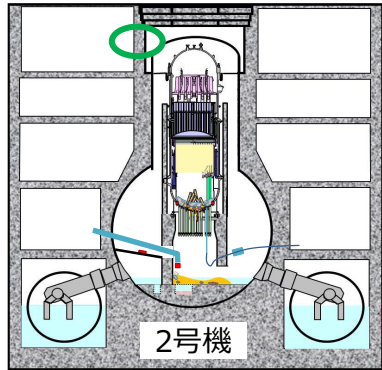
## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 2号機 -

### ウェル差圧調整ライン内堆積物

<2WEL2101B>

2021年度



### ◆ FE-SEM/EDX

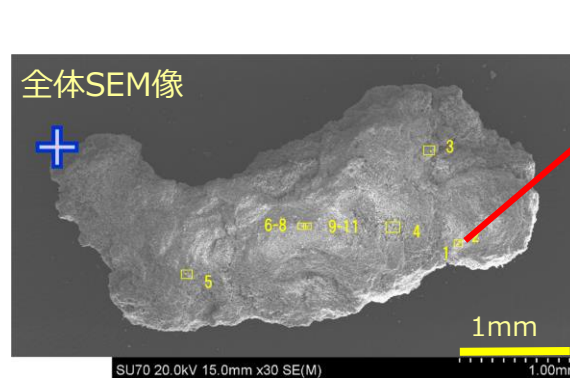
- U粒子を検出：U-Zr (Fe-Crが隣接)  
⇒  $UO_2-ZrO_2$ 系での相状態の解釈から粒子の冷却過程に関する知見取得のため、この領域をTEM観察に供した。
- この他、Si-Mg-Tiを含む粒子を検出
- 堆積物を構成する粒子表面の主成分はFe-O。表面の一部にZnの濃集領域も見られる。
- Cs、Mo、Clの濃集領域は未検出

### ◆ TEM/STEM-EDX

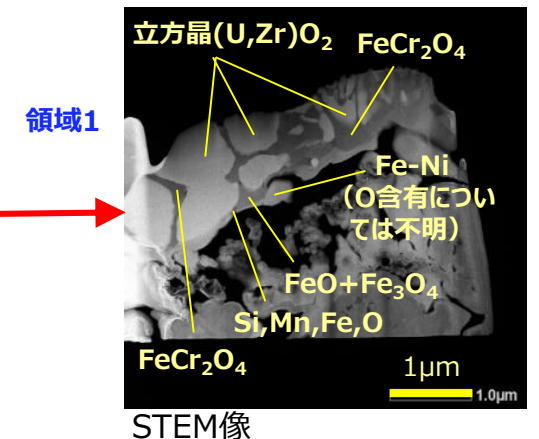
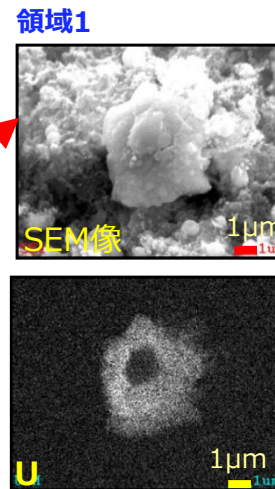
- 領域1のU粒子は、大きさ約 $4\mu m$ の不定形粒子
- 断面の上部側は、U/Zr-richな領域 (立方晶 $(U,Zr)O_2$ 相、U:Zrは6:4から5:5)
- Fe/Cr-richな領域 ( $FeO+Fe_3O_4$ 、 $FeCr_2O_4$ 、一部微量のMn含む) が混在。
- この他、Si、Fe-Niを含む領域が混在。



SEM観察用試料の採取



U粒子の探索結果の一例 (FE-SEM/EDX)



粒子断面の微細組織及び構成相 (TEM/STEM-EDX)



# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

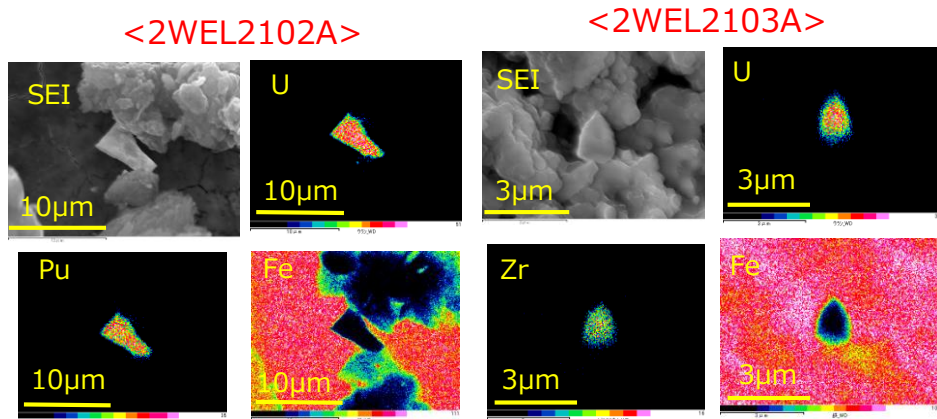
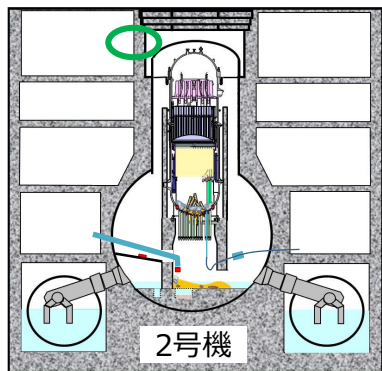
## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 2号機 -

排気ダクト劣化部・点検口表面部

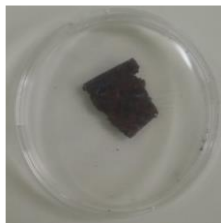
<2WEL2102A、2WEL2103A>

2021年度



U粒子上の元素分布の一例 (FE-SEM/WDX)

試料外観



同位体比分析結果の一例 (ICP-MS)

Samples	B	Mo		Ag
	( <sup>10</sup> B/ <sup>11</sup> B)	( <sup>97</sup> Mo/ <sup>95</sup> Mo)	( <sup>98</sup> Mo/ <sup>95</sup> Mo)	( <sup>107</sup> Ag/ <sup>109</sup> Ag)
2WEL2102A	0.25±0.02	0.6±0.1	1.6±0.3	1.04±0.05
2WEL2103A	0.25±0.05	0.51±0.07	1.6±0.2	—
参考： 天然同位体比	0.248	0.60	1.52	1.076

注) 誤差は、それぞれの核種の検量線による標準不確かさを合成し、2σとして表示。

### ◆ FE-SEM/WDX

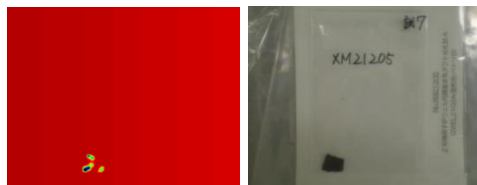
- 主にFeからなる面上に**U粒子を検出**：**U-Pu、U-Zr**

### ◆ 放射線測定

- γ核種：**<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs**を検出

### ◆ ICP-MS

- Uは未検出。
- B、Mo、Ag**を検出 (天然同位体比に近い)
- この他、Cr (<sup>52</sup>Cr、<sup>53</sup>Cr)、Fe (<sup>56</sup>Fe、<sup>57</sup>Fe)、Ni (<sup>60</sup>Ni、<sup>61</sup>Ni、<sup>62</sup>Ni)、Cs (<sup>133</sup>Cs) で有意値を定量。
- 定性分析において計44元素を検出：**Fe、Mn、C、Na、Mg、Cr、Cu、Zn、Al、K、Ca、V、Co、Ni、Ga、As、Sn、Sb、B、Sr、Mo、Pb、Rb、Ag、Cd、I、Cs、Ba、Ce、Se、Y、Pd、La、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Ta、Re、Os、Tl、Bi**



IP像 (露出3分)

外観写真

イメージングプレート

堆積物外観・IP観察結果の一例

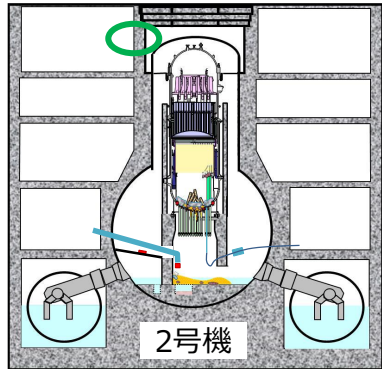
<2WEL2102A>

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 2号機 -

排気ダクト劣化部・点検口表面部 <2WEL2103B>



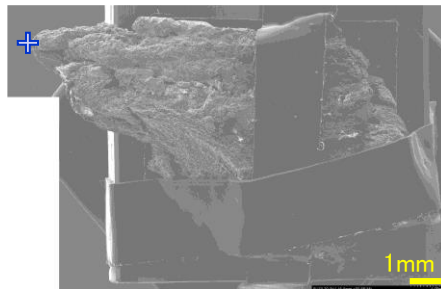
### ◆ FE-SEM/EDX

- U、Zr、Cs、Moの濃集領域は未検出
- Fe-Oが広く分布し、その上にCa-S-O、Zn-O、Cd-Cr-Cl、Cr-Mg-Al-Si-Cl-O、Cr-Si-Ni-O、Mn-Al-Si-Cl-Oの濃集領域を検出
- この他、Ti、Al-Si、Cl-Kの濃集領域も見られる。

⇒ 燃料成分、注目FP元素を含まなかったことから、TEM分析の領域は設定しなかった。



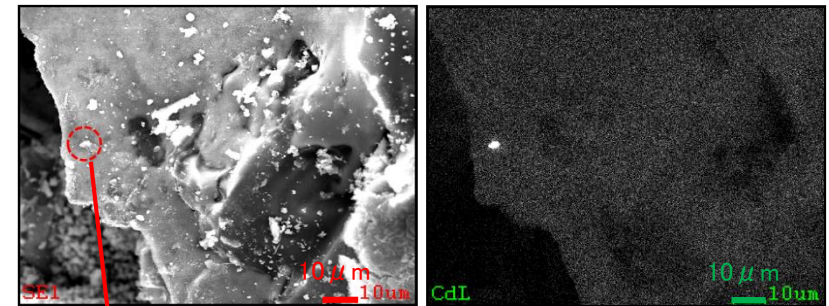
試料外観  
(2WEL2103B)



SEM像  
(例)

2WEL2103B-2に設定した  
各領域の位置(+からの距離) mm

領域No.	右方向へ	下方向へ
3	1.872	0.820
4	9.872	-0.014
5	9.785	-0.013



領域3

特異元素濃縮部分の観察 (Cdの例)

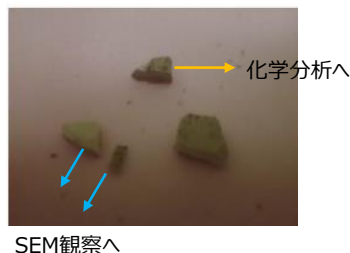
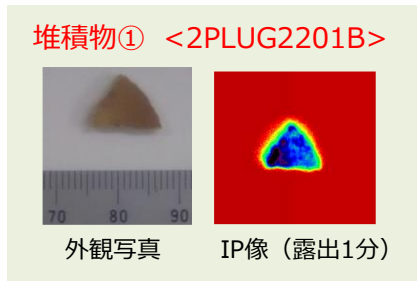
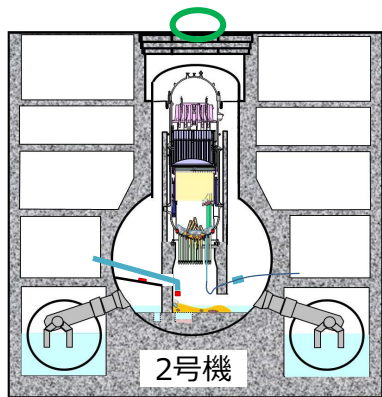
# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 2号機 -

### シールドプラグ穿孔部堆積物

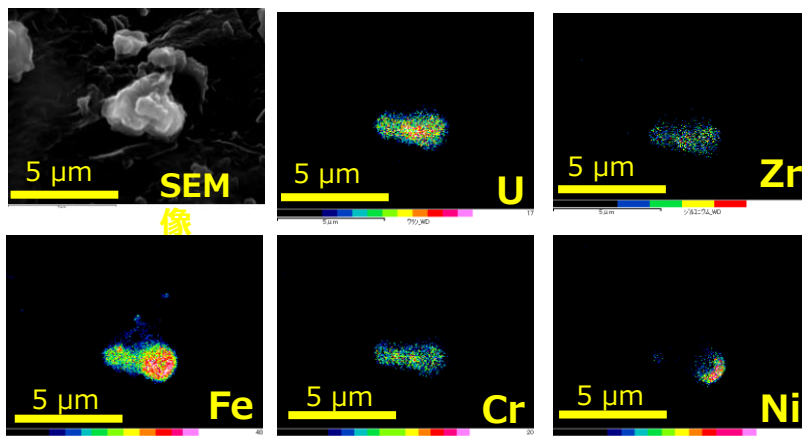
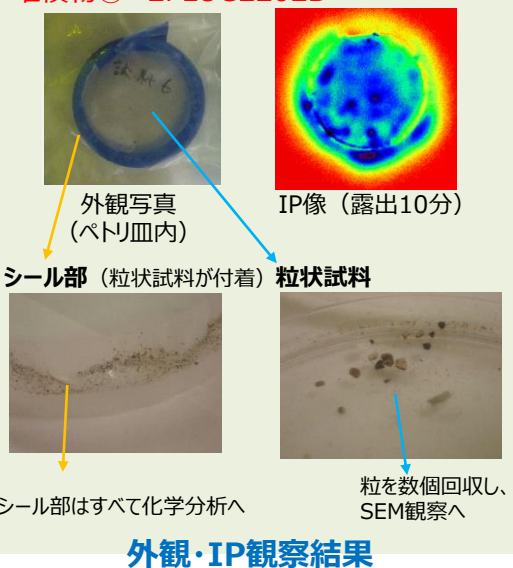
堆積物① <2PLUG2201B> ..... 三角形状の固体試料  
堆積物② <2PLUG2202B> ..... 粒状の試料



### ◆ FE-SEM/WDX

- 固体試料（堆積物①）の茶褐色面上及び粒状試料（堆積物②）中に**U**粒子検出
- U粒子上に**Zr**、Fe、Cr、Niを検出
- U粒子周辺にSn、Ca、Si、Alを検出

### 堆積物②<2PLUG2202B>



U粒子とその周辺の元素分布の一例 (FE-SEM/WDX)

### ◆ 放射線測定

- $\gamma$ 核種： **$^{134}\text{Cs}$** 、 **$^{137}\text{Cs}$** を検出

### ◆ ICP-MS

- **U**※、**Mo**、**Ag**を検出（天然と異なる同位体比）  
※ 堆積物①では $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比が0.01前後であり、天然Uからの寄与を示唆。
- この他、B、Cr、Fe、Zr、Sbの有意値を定量

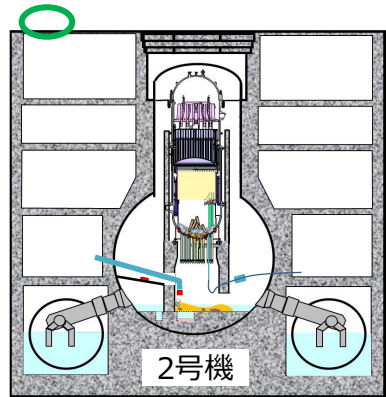
# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

### 分析結果 - 2号機 -

2022年度

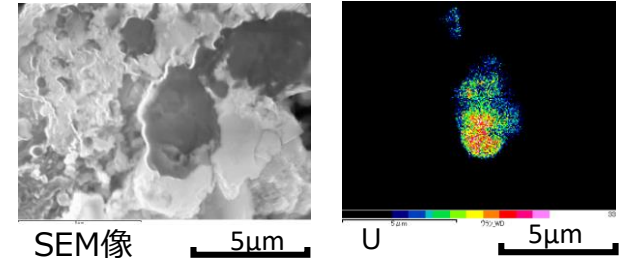
### FHM遠隔操作室スミア



- 試料⑧ <2FHM2203> ..... FHM遠隔操作室屋上より採取
- 石膏ボード表面 <2FHM2204> } ..... FHM遠隔操作室2階屋内より採取
- 試料⑮ <2FHM2207> }

#### ◆ FE-SEM/WDX

- 試料⑧（屋上採取）及び試料⑮（2階の破損した窓ガラスに近い箇所で採取）において、**U粒子を検出**（いずれもU粒子上に**Zr**検出）
  - ▶ 試料⑧ではU粒子上にFe、Crを検出
- 石膏ボード表面（2階屋内）からはU粒子未検出



U粒子とその周辺の元素分布の一例 (FE-SEM/WDX)

試料⑧ <2FHM2203> (屋上部)

試料⑮ <2FHM2207> (2階操作室内)

石膏ボード表面 <2FHM2204>

スミア採取箇所概略

付着物(スミア) 外観・IP観察結果

SEM観察へ  
化学分析へ  
外観写真  
IP像 (露出10分)

SEM観察へ  
化学分析へ  
外観写真  
IP像 (露出3分)

SEM観察へ  
化学分析へ  
外観写真  
IP像 (露出10分)

#### ◆ 放射線測定

- γ核種：試料⑧から<sup>60</sup>Co、<sup>125</sup>Sb、<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Csを検出
- 石膏ボード表面及び試料⑮から<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Csを検出

#### ◆ ICP-MS

- 試料⑧及び⑮から**U**（炉心平均の<sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U比に近い）、**Zr**検出
- 試料⑧から天然と異なる同位体比の**Mo**、**Ag**を検出
- この他、Cr、Fe、Sbで有意値を定量

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

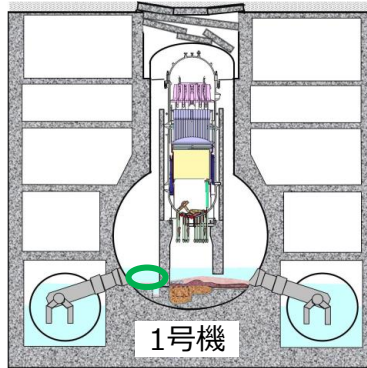
## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 1号機 -

PCV底部堆積物 (2017年採取)

<1PCV1701D>

2022年度



### ◆ FE-SEM/EDX

- 探索範囲 (約1mm四方相当) において、全体的に**FeとO**が広く分布
- この他、**Si, Ca, Al, Zn, Pb**等が広範囲に点在
- 着目元素を含む微小領域を以下の通り検出

- **U**を高濃度を含む領域 (領域1、3、7)
- **UとZr**を同程度含む領域 (領域4)
- **Zr**を高濃度を含む領域 (領域2、8)
- **Sb**を含む領域 (領域6)
- **MoとPb**を含む領域 (領域5)

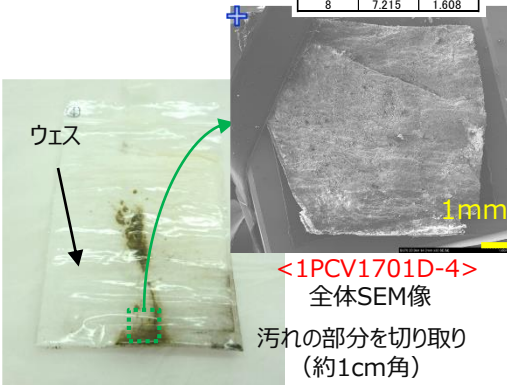
➤ **UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>系 (またはU-Zr-O系) を対象に、TEM観察対象として2領域を選定**

- **領域4** : 粒子内での相分離の状況を把握し、粒子の冷却過程に関する知見取得
- **領域8** : 高Zr含有率でのデータ拡充

単位: mm

領域No.	X	Y
1	6.077	1.720
2	6.104	1.628
3	7.854	3.247
4	7.195	1.538
5	5.288	1.097
6	5.202	1.016
7	6.333	2.734
8	7.215	1.608

着目領域の位置  
(左上 “+”基準)



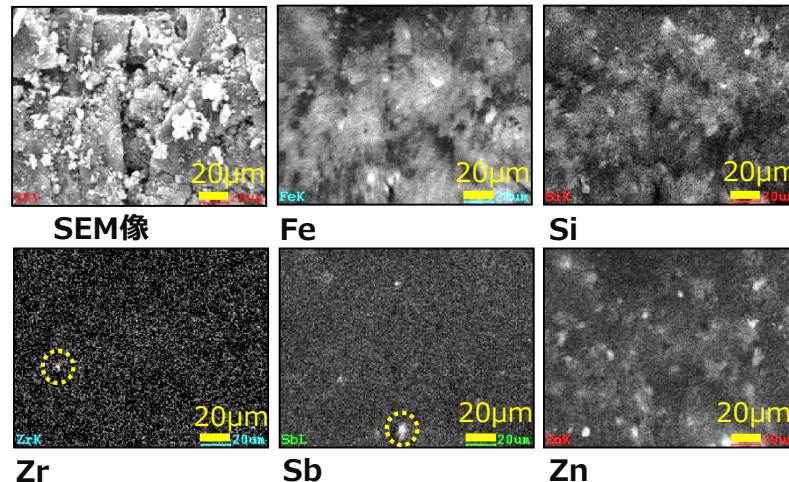
<1PCV1701D-4>  
全体SEM像

汚れの部分を切り取り  
(約1cm角)

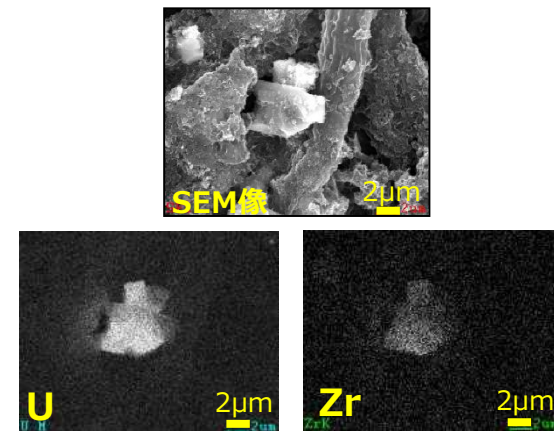
<1PCV1701D>

試料外観 (試料受入れ時)

### SEM観察用試料の採取



### FE-SEM/EDX元素分布の一例 (領域5、6周辺)



### 検出されたU粒子の一例 (領域4)

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析 分析結果 - 1号機 -

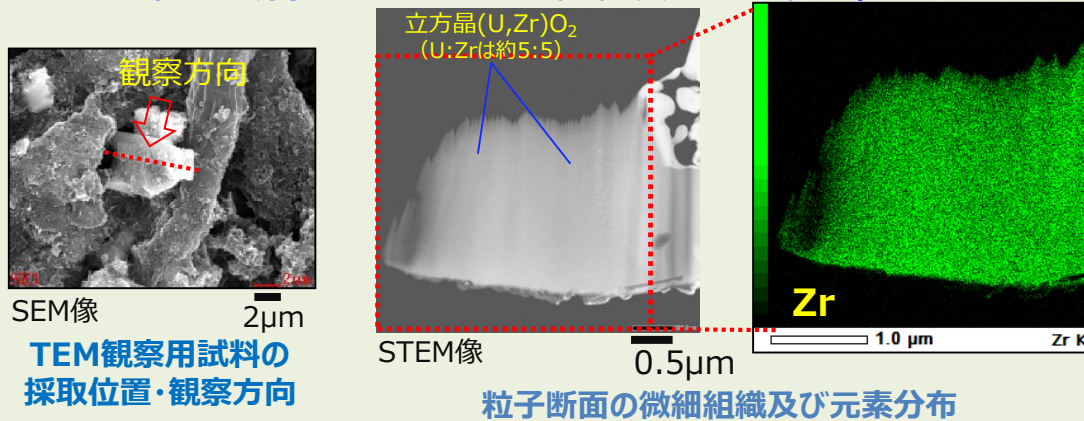
PCV底部堆積物 (2017年採取)

<1PCV1701D>

2022年度

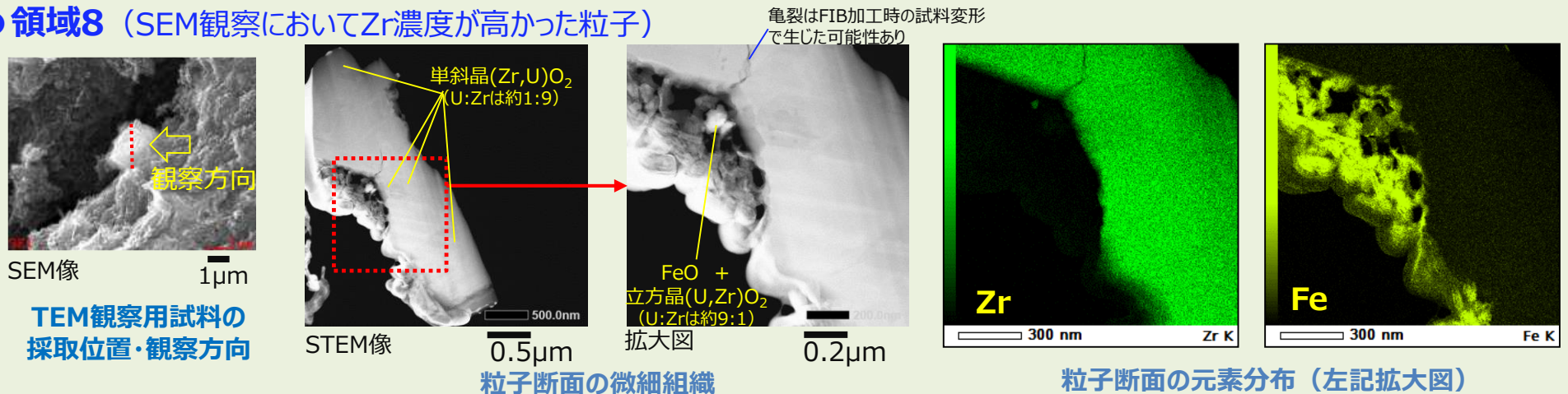
### ◆ TEM/STEM-EDX (2領域の観察結果)

#### ● 領域4 (SEM観察においてUとZrが同程度であった粒子)



- 領域4は、ほぼ一様な立方晶(U,Zr)O<sub>2</sub>であり、U:Zrは約5:5
- 領域8は、緻密な単斜晶(Zr,U)O<sub>2</sub> (長さ約3μm) に、(U,Zr)O<sub>2</sub>微粒子やFe酸化物が付着

#### ● 領域8 (SEM観察においてZr濃度が高かった粒子)



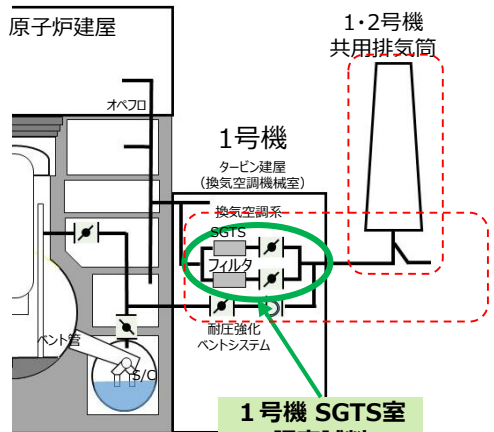
# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

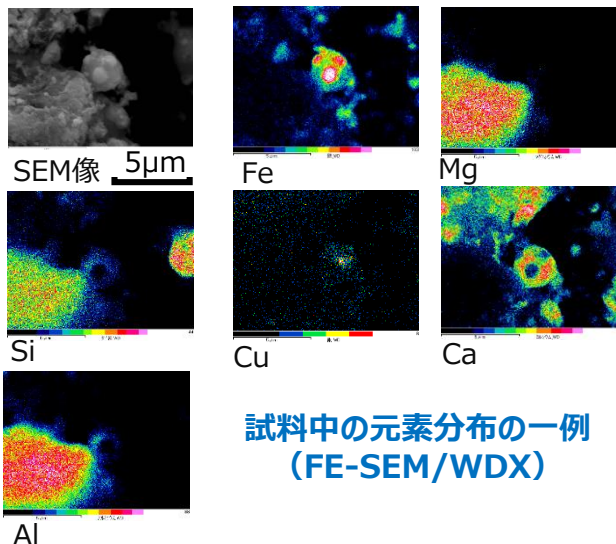
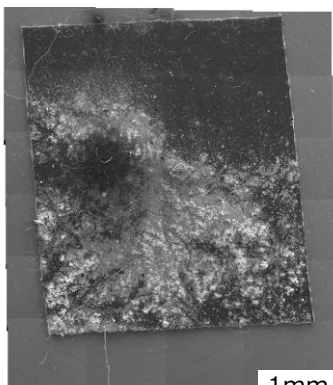
## 分析結果 - 1号機 -

### 1号機 SGTS室調査試料

### 試料⑥ <1SGTS2202>



図：文献[1]を参考に作成



試料中の元素分布の一例 (FE-SEM/WDX)

### ◆ FE-SEM/WDX

- U粒子未検出
- 試料中にFe、Cr、Ni、Zn、Si、Mg、Al、Ca、Cuを検出

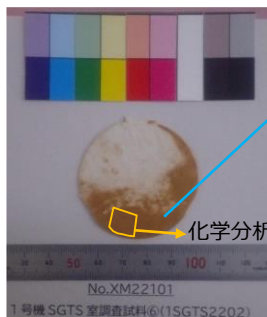
### ◆ 放射線測定

- γ核種：<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Csを検出

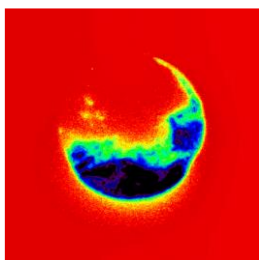
### ◆ ICP-MS

- Uを検出
- Moは天然同位体比に近い
- B、Fe、Ni、Zr、Sbで有意値を定量

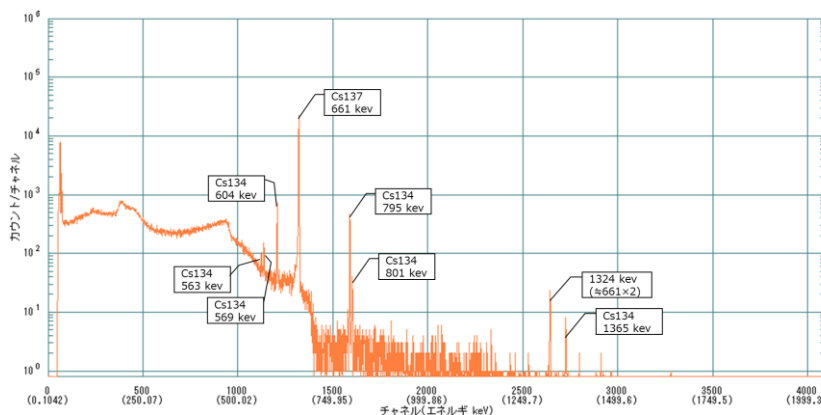
粉末をカーボンテープに附着させてSEM観察へ



外観写真



附着物 (スミア) 外観・IP観察結果



γ線スペクトル (溶解前試料)

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

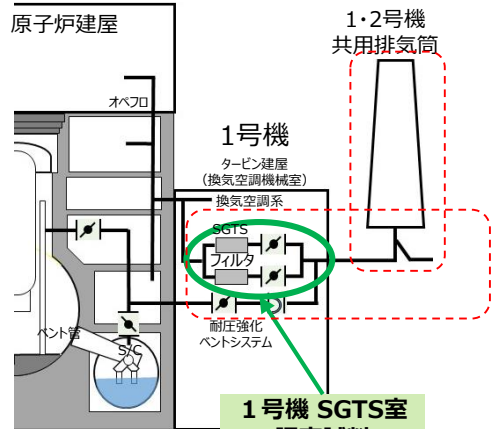
## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 1号機 -

### 1号機 SGTS室調査試料

試料⑧ <1SGTS2201>

2022年度

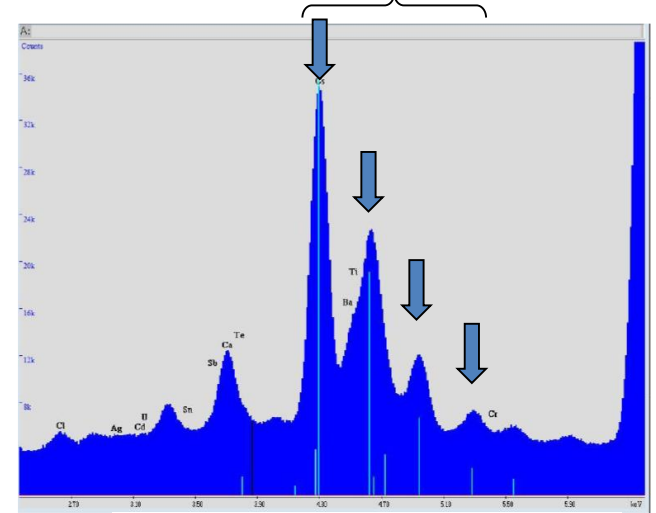


図：文献[1]を参考に作成

### ◆ FE-SEM/EDX

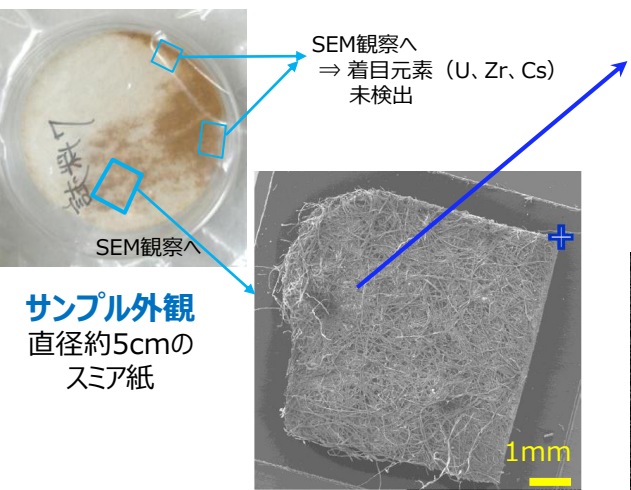
- スミア紙の付着物中に、Csを含む粒子を検出 (Csと同位置にFeも存在)  
⇒ Fe-Csを含む固相の化合物形・結晶構造から、鋼材-Cs間の反応条件 (反応温度、雰囲気) に関する知見が得られることを想定し、この領域をTEM観察に供した。

Cs-L線の主ピーク及びサブピークを確認し、強度比もデータベースに近いことから、Csを同定。

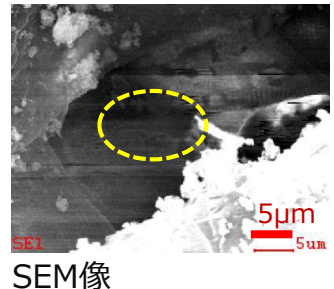


Cs-La (約4.3keV) 付近の拡大図

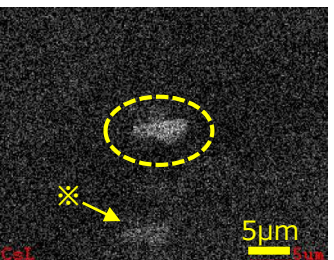
Cs含有粒子中央を中心としたEDX点分析スペクトル



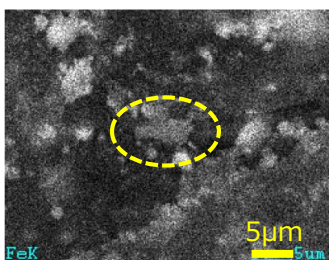
全体SEM像 (スミア紙から一部を分取)



Cs含有粒子 (画面中央)



元素分布: Cs  
※ 画面中央下部の淡い輝点は、試料変形によるドリフトの影響



元素分布: Fe



# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

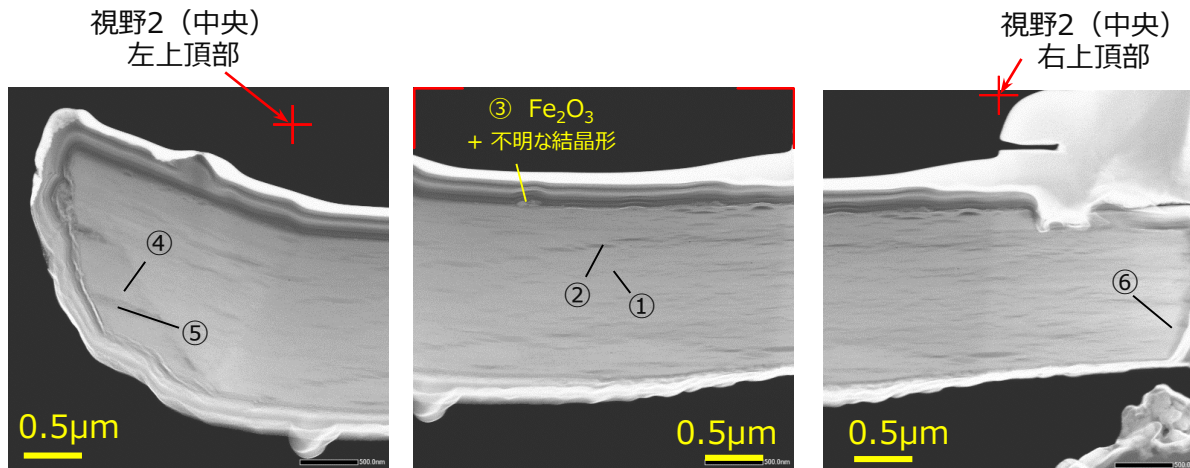
## 分析結果 - 1号機 -

1号機 SGTS室調査試料

試料⑧ <1SGTS2201>

2022年度

### ◆ TEM/STEM-EDX (Cs含有粒子の観察結果)



視野1 (左側)

視野2 (中央)

視野3 (右側)

### 粒子断面の微細組織 (HAADF-STEM像)

(図中①～⑥はEDX点分析位置を表す)

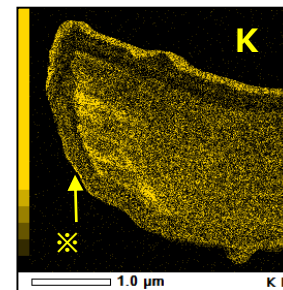
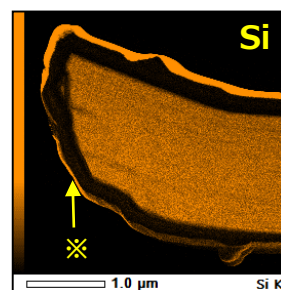
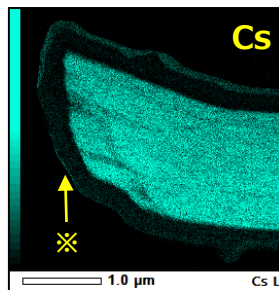
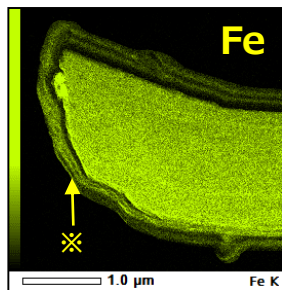
表1 EDX半定量分析結果

(Si濃度の高い位置: ①②④～⑥) 単位: at%

位置	O	Mg	Al	Si	K	Ti	Fe	Cs	その他*
①	60	4	5	23	/	1	5	2	Ba
②	54	4	4	28	/	1	7	2	
④	62	6	7	16	*	1	6	2	K, Mn
⑤	62	6	7	16	1	1	6	1	Ca, Mn
⑥	60	4	5	20	1	1	8	1	Mn

\* わずかな特性X線のピークが認められるが、定量下限未満の元素

- 長さ約6~7μmの不定形粒子
- 粒子断面にO、Siが広く分布 (表1参照)
  - Fe、Al、Mg、Cs、Tiを含有
  - 局所的にKも存在
  - SiO<sub>2</sub>系ガラスと不明な結晶形が混在
- 明灰色と暗灰色の領域が縞状に折り重なっている。(両者で組成が異なる可能性あり)



### 主要元素分布 (視野1)

※ 粒子外周部の領域には、保護膜成分 (W) や加工イオン (Ga) 等の再堆積の影響あり。

# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

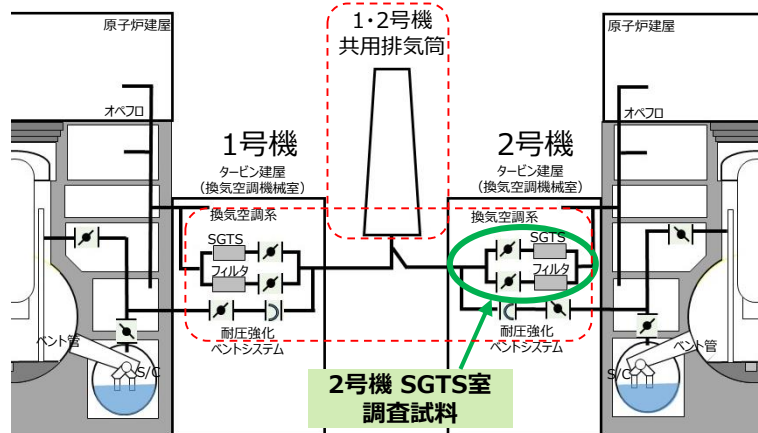
## (b) サンプル分析

### 分析結果 - 1号機 -

### 2号機 SGTS室調査試料

試料② <2SGTS2202>

2022年度



#### ◆ FE-SEM/WDX

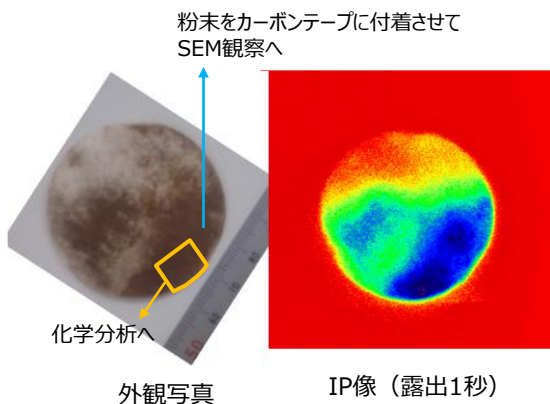
- U粒子未検出
- 試料中にFe、Cr、Ni、Si、Al、Ca、Clを検出

#### ◆ 放射線測定

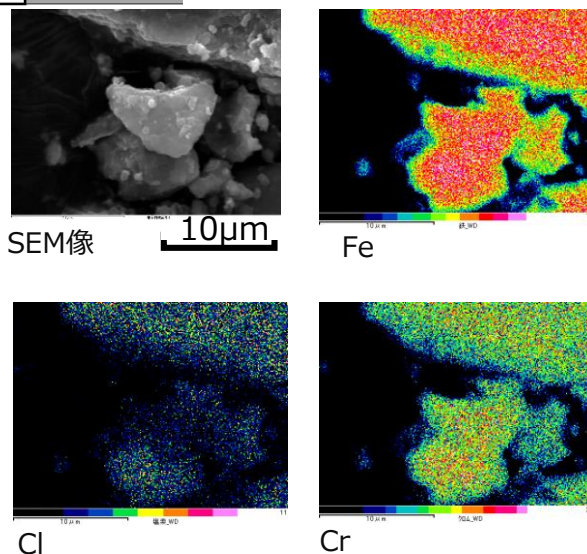
- $\gamma$ 核種： $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ を検出

#### ◆ ICP-MS

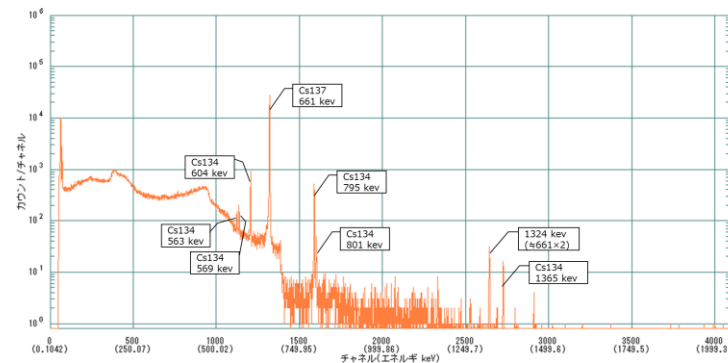
- U未検出
- Moは天然同位体比に近い
- Cr、Fe、Ni、Zr、Ag、Sbで有意値を定量



附着物 (スミア) 外観・IP観察結果



試料中の元素分布の一例 (FE-SEM/WDX)



$\gamma$ 線スペクトル (溶解前試料)

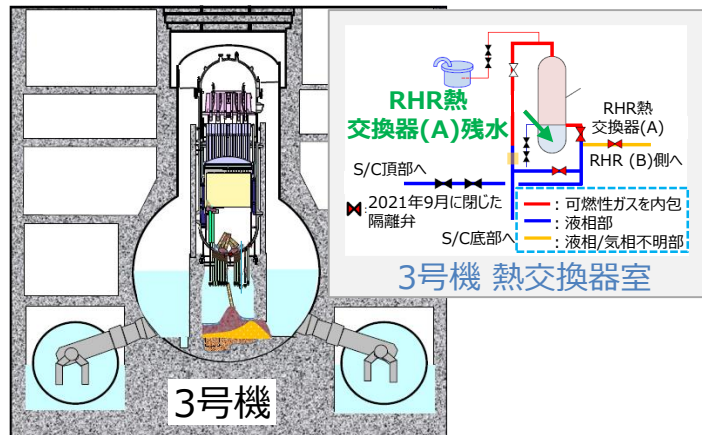
# ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

## (b) サンプル分析

## 分析結果 - 3号機 -

### RHR熱交換器 (A) 残水 <3RHR2201B>

2022年度

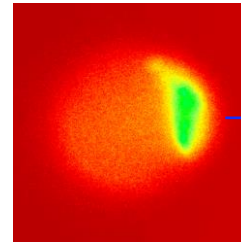


容器外観



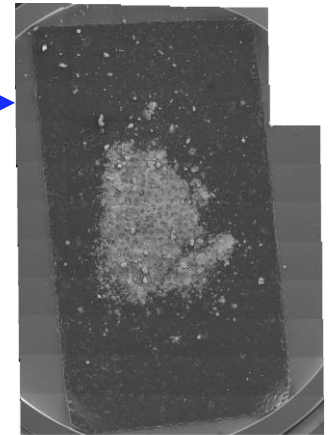
容器底部沈殿物

残水試料外観・IP観察結果



IP像 (露出1時間)

沈殿物をスポイトで採取し、乾燥させてFE-SEM/WDXに供試



全体SEM像 (SEM観察用試料) 1mm

### ◆ FE-SEM/WDX

- U粒子未検出
- 試料中にFe、Cr、Ni、Na、Mg、S、Clを検出

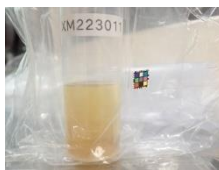
### ◆ 放射線測定

- $\gamma$ 核種： $^{60}\text{Co}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ を検出

### ◆ ICP-MS

- Moは天然同位体比に近い
- B、Cr、Fe、Ni、Zr、Ag、Sbで有意値を定量

液攪拌後に沈殿物を含む水相を採取し、メンブレンフィルタ (孔径0.45 $\mu\text{m}$ ) 上をろ過・回収して溶解・化学分析に供試



試料外観 (沈殿物+水相)

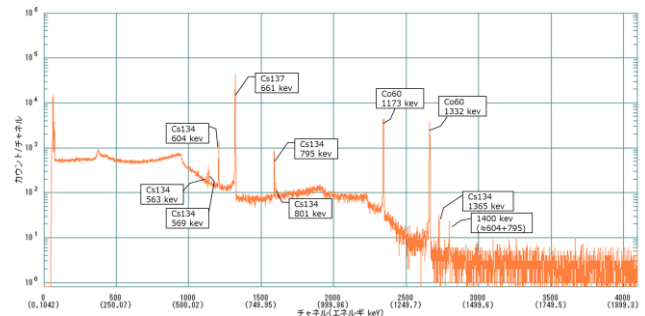


沈殿物外観 (ろ過後)



沈殿物溶解液 外観

化学分析用試料外観



$\gamma$ 線スペクトル (溶解前試料)

# 6. 実施内容

## (1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

### ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

(a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

(b) サンプル分析

### ② 燃料デブリの性状推定の高度化

#### (a) 分析データの解析

(b) 1F試料評価委員会

(c) 燃料デブリ特性リストの改訂

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集及び性状把握のための国際協力

(a) 燃料デブリに関する文献調査、国内外の知見収集、レビュー

(b) 「国際的な議論を行う場」についての検討

### ④ まとめ

(a-1) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
(a-2) " —2号機の推定結果—  
(a-3) " —1号機の推定結果—  
(a-4) " —3号機の推定結果—  
(a-5) " まとめ

## ②燃料デブリの性状推定の高度化

### (a)分析データの解析

### (a-1) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定

61

#### —概要—

- 内部調査の進展や事故進展解析等により、PCV内での燃料デブリの存在箇所や分布状態について、各号機の特徴が明らかになりつつある。
- 各号機PCV内に存在する燃料デブリの性状（成分や構成相）については、燃料デブリサンプルそのものが十分量入手できるまでの準備段階として、燃料デブリ周辺から採取される付着物や堆積物等の汚染物サンプル（以後、単に「サンプル」と表記）の分析により、燃料デブリ生成時の炉内環境や材料間の反応条件を推定し、間接的に類推する試みを実施している。
- 本項では、これまで取得した汚染物サンプル中に含まれる炉心成分（U、Zr、FP等）間の比率や微粒子内部の微細構造、構成相といった分析データをもとに、号機ごと※に予想される燃料デブリの生成条件や性状について考察した。

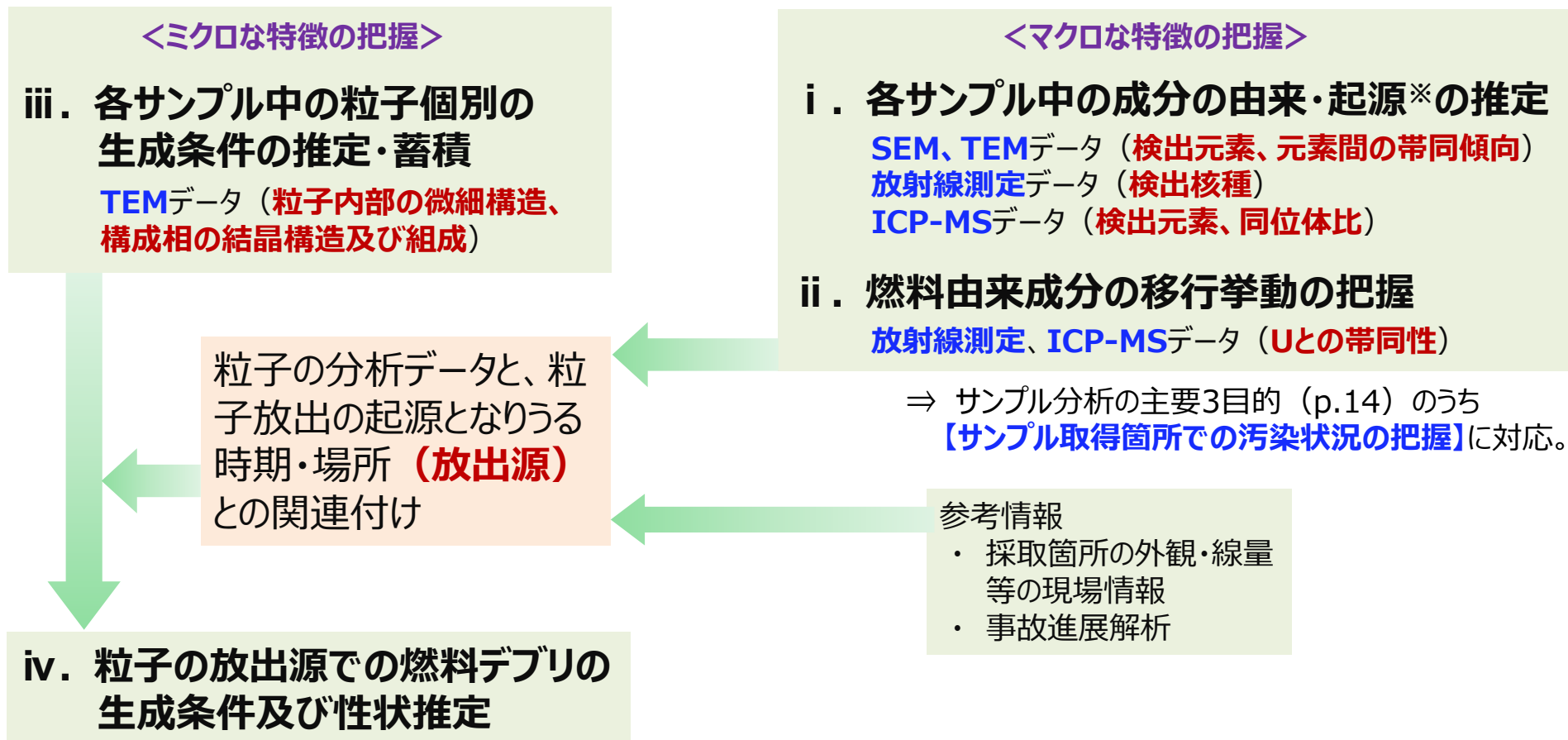
※ 以後、号機ごとの考察を進めるにあたり、本事業での取得サンプル数の多い順に2号機→1号機→3号機の順に並べている。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### ▶ (a-1) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定

62

#### —基本的な流れ—



⇒ サンプル分析の主要3目的 (p.14) のうち  
【燃料デブリ生成過程の検討】に対応。

⇒ サンプル分析の主要3目的 (p.14) のうち  
【サンプル取得箇所での汚染状況の把握】に対応。

※ 本報告では便宜的に、サンプル中の成分のもととなった材料 (燃料、SUS、Zry、塗料等) を「由来」、事故進展時の放出時期や放出元の場所情報を「起源」と呼ぶこととする。

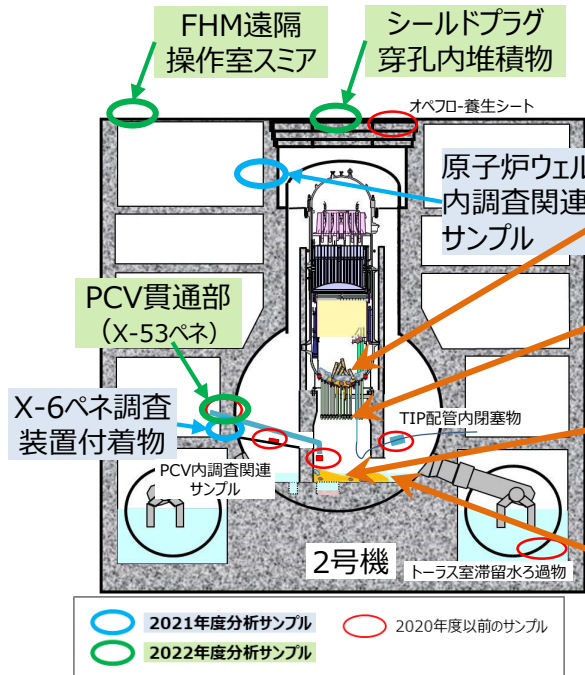
②燃料デブリの性状推定の高度化  
(a)分析データの解析

(a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
—2号機の推定結果—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

(a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
- 2号機の推定結果 -

### 燃料デブリ性状推定と各サンプル分析との関連



### ●各種燃料デブリの性状推定に必要な情報

推定対象	性状推定に必要な情報
a. RPV内燃料デブリの性状	✓ RPV内での炉心材料間の反応条件
b. RPV下部～ペDESTAL底部にかけての燃料デブリの性状	✓ RPV内での炉心材料間の反応条件
c. ペDESTAL底部の燃料デブリの性状	✓ 燃料成分のペDESTALへの移行後のPCV内の環境条件 ✓ 水中での経年による変質の有無
d. ペDESTAL外への燃料デブリの分散状況	✓ PCV内各所での燃料成分の直接検出

### ●各サンプル分析での主要関心事項

X-6ペネ調査装置附着物  
PCV貫通部 (X-53ペネ)

D/WからR/Bへの気相の放出ルート近辺の位置から採取。  
⇒ 上記a.~d.の情報 (水中での変質の影響を除く) 取得を想定。

原子炉ウェル内調査関連サンプル  
FHM遠隔操作室スミア  
シールドプラグ穿孔内堆積物

PCV内またはRPV内からR/Bへの気相の放出ルート近辺の位置から採取。  
⇒ 上記a.~c.の情報 (水中での変質の影響を除く) 取得に想定。



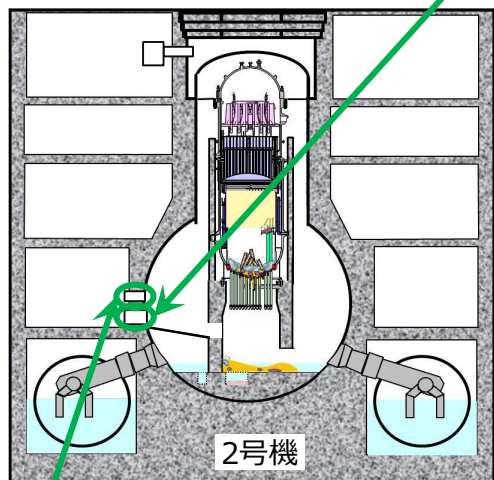
## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

65

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

##### PCV貫通部からのサンプル



##### X-6ペネ調査装置付着物

- スミア紙への付着成分として**錆成分が主**と推定。  
# FeO、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>などの酸化物の検出。
- U粒子は、**燃料成分 (U、Zr) 及びFe、Crを含む構造材成分との溶融・凝固過程**を経たものと推定。**炉心由来成分**を含んでいる。  
# 一つの粒子でUとZrが帯同関係にあり、FeやCrとも混合  
# 放射化生成物 (<sup>60</sup>Co)、FP (<sup>125</sup>Sb、<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs、<sup>154</sup>Eu等)、TRU (<sup>241</sup>Am等) の検出
- **塗料、計装材料 (ケーブルとその被覆材、検出機器等) 由来の成分**を含む可能性あり。  
# Ti粒子、Cu-Ni-Zn粒子、Pb-Sb粒子、等

⇒ X-6ペネ内部にもともと存在したケーブルの被覆の消失、被覆以外の成分の流入など、内部調査での観察結果及び推定と整合しており、事故時に高温の気流が通過したと考えられる。

##### PCV貫通部 (X-53ペネ)

- X-6ペネと同様、PCV内成分が流入と推定  
# UとZrを含む粒子の検出  
# Mo、Ag、Te (天然と異なる同位体比)

注) 各推定の根拠とした分析結果を # で表した。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

66

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### X-6ペネ調査装置付着物

#### 分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（1/2）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/WDX	2PEN2101	U-Puの粒子が存在	ウラン燃料由来	ウラン燃料起源（Zrは含まないか限りなく低い）。燃料片の飛散または溶融・凝固過程を経た可能性あり。
		観察領域の大部分はAlおよびCaを主成分とする粒子	Siが含まれないことから、コンクリート以外の材料（海水、保温材、計装材）を由来とする可能性あり。	—
		Fe-Zn粒子、Ni-Cu-Zn粒子、およびTi粒子が存在	Crが含まれないことから、健全な状態のSUSやインコネルではなく、構造材の腐食生成物、計装材料、塗料に由来	—
	2PEN2102	U-Zrの粒子が存在	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZryの溶融物由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮で形成したものではなく、溶融・凝固、またはUO <sub>2</sub> やZrを起源とした微細粒子の凝集を経た可能性。
		U粒子の近傍にAl、Ca、Mg、Znを含む粒子が存在	Siが含まれないことから、コンクリート以外の成分由来（海水、保温材、計装材）	—
		U粒子の周囲にFe-Ni、Cr、Pb粒子が存在	構造材（SUSやインコネル）の腐食生成物、遮蔽材や計装材料および塗料由来	—
ICP-MS (定量分析)	2PEN2101 2PEN2102	Cr (52, 53Cr)、Fe (56, 57Fe)、Ni (60, 61, 62Ni)、Mo (95, 97, 98Mo)、Nd (143, 145, 146Nd)、U (234, 235, 236, 238U) を同定	ウラン燃料、Moグリス、構造材（SUS、インコネル、炭素鋼など）、計装材など（同位体比やSEM観察結果から判断）	—
放射線測定 (γ線測定)	〃	<sup>60</sup> Co、 <sup>106</sup> Rh、 <sup>125</sup> Sb、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Cs、 <sup>144</sup> Ce、 <sup>154</sup> Eu、 <sup>155</sup> Eu、 <sup>241</sup> Am、 <sup>243</sup> Amを同定	放射化生成物、燃料中のFP・TRU核種	—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

67

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### X-6ペネ調査装置付着物

#### 分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（2/2）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/EDX	2PEN2103	U酸化物粒子が存在	ウラン燃料由来	ウラン燃料起源（Zrは含まないか限りなく低い）。燃料片の飛散または溶融・凝固過程を経た可能性あり。
		U-Zr酸化物粒子が存在 Uリッチ and Zrリッチ	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZry（燃料集合体）の溶融物由来	溶融・凝固過程によるもの
		低O濃度Zr粒子が存在 * α-Zrの可能性はあるが、SEM/EDXデータのため、分析誤差の可能性あり。また、TEMでは酸化物としても同定。	低O濃度から未酸化のZry又は燃料溶融物由来	未酸化のZry起源、又は低O濃度のU-Zr-O溶融物の凝固過程を経た可能性。分析誤差、周辺物質（SUS）の情報を含む可能性。
		S-Pb粒子、S-Ni粒子、Ti粒子、Cu-Zn粒子、Ni-S-Cr粒子が存在	Feが含まれないことから、SUSではなく、計装材料、塗料に由来	-
TEM/STEM-EDX	2PEN2103	U粒子近傍にFe-Cr酸化物粒子が存在 FeO、Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 、FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	構造材（SUS）の腐食生成物 または、燃料+構造材の溶融物由来	U-Zr-Fe-Cr-O溶融物の凝固過程、またはFe-Cr-O溶融物に比較的高融点のUO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> 系の粒子が接触する過程を経た可能性。
		Zr-U酸化物粒子が存在 正方晶相 単斜晶相 単体	U粒子近傍に存在することから、ウラン燃料とZry（燃料集合体）の溶融物由来	U-Zr-O溶融物の凝固過程において分離析出した可能性。
		Si粒子、Ca粒子が存在 SiO <sub>2</sub> 、Ca(OH) <sub>2</sub> or CaCO <sub>3</sub>	コンクリート由来の可能性	SiO <sub>2</sub> 粒子に微量のAl、Mg、Feが検出、Ca粒子が熱分解されていないため、コンクリート片を起源とする可能性。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

68

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### PCV貫通部 (X-53ペネ)

#### 分析結果と評価結果 (由来・起源、生成過程) の対応表 (1/1)

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/WDX	2PEN2201B	U-Zrの粒子が存在 (U粒子) Crの濃集領域が隣接	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZryの溶融物由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮で形成したものではなく、溶融・凝固、またはUO <sub>2</sub> やZrを起源とした微細粒子の凝集を経た可能性。
		U粒子の周囲にFeが広く分布	サンプル取得時の状況から、鋼材の腐食生成物由来	—
放射線測定	''	<sup>60</sup> Co、 <sup>125</sup> Sb、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Cs、 <sup>154</sup> Eu、 <sup>155</sup> Eu、 <sup>241</sup> Amを同定 (γ線計測)	放射化生成物、燃料中のFP・TRU核種。	—
ICP-MS	''	U、Mo、Ag、Teを検出 (天然異なる同位体比)	ウラン燃料、燃料中のFP核種 (同位体比から判断)	—
FE-SEM/EDX	2PEN2201A	U-Zrの粒子が存在 (U粒子)	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZryの溶融物由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮で形成したものではなく、溶融・凝固、またはUO <sub>2</sub> やZrを起源とした微細粒子の凝集を経た可能性。
		U粒子周辺にFeが広く分布。その中にMg、Al、Ca、Si、Cr、Ni、Cu、Pb、Sを含む領域が点在。	—	—
TEM/STEM-EDX	''	領域11 Zr含有率の異なる(U,Zr)O <sub>2</sub> が混在 Fe-Ni、Fe-Cr酸化物等が点在	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZryの溶融物由来 SUSの成分を含む可能性あり	U-Zr-O溶融物 (酸化物系) の凝固過程 SUS成分が粒子生成に関与した可能性あり
		領域3~4 Uを含まない単斜晶ZrO <sub>2</sub> (内部にFe酸化物が存在) Fe-O系の領域 (U,Zr)O <sub>2</sub> が接する構造	ウラン燃料とZryの溶融物を含む。	(U,Zr)O <sub>2</sub> 部分についてはU-Zr-O溶融物 (酸化物系) の凝固過程を経たものと推定 ZrO <sub>2</sub> 部分はFe酸化物を内部に含むことから、鋼材と何らかの相互作用を経た可能性あり

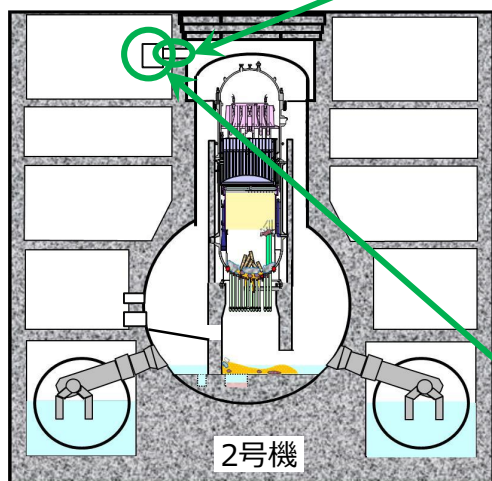
## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

69

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

原子炉ウェル内調査  
関連サンプル



#### ウェル差圧調整ライン堆積物

- 大部分は炭素鋼の腐食生成物と推定。  
# Feが主成分。Zn、Mnも比較的多い。Fe-Oの共存。
- U粒子は、燃料成分（U、Zr）及びFe、Crを含む構造材成分との溶融・凝固過程を経たものと推定。炉心由来成分を含んでいる。  
# 一つの粒子でUとZrが帯同関係にあり、FeやCrとも混合。  
#  $\gamma$ 核種： $^{60}\text{Co}$ （放射化生成物）  
 $^{125}\text{Sb}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{154}\text{Eu}$ （FP）の検出。
- 中揮発性FP由来の元素が到達していると考えられる。  
# Mo、Ag（天然同位体比と異なる）

#### 排気ダクト劣化部（金属片）、点検口表面部（パッキン）

- 大部分は鋼材の腐食生成物と推定。  
# Feが主成分。Mnも比較的多い。
- U粒子は、燃料成分（U、Zr）の溶融・凝固過程を経たものを含むと推定。燃料片を含むか否かは不明。炉心由来成分を含んでいる。  
# 一つの粒子でUとZrが帯同。  
# PuはUに帯同（Zrを含まないU-Pu粒子として存在）。  
#  $\gamma$ 核種： $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ （FP）の検出。

注) 各推定の根拠とした分析結果を  
# で表した。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

70

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### ウェル差圧調整ライン堆積物

#### 分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（1/2）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/WDX	2WEL2101A 2WEL2101C	U-Zr粒子が腐食生成物の表面またはその近傍に存在	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZryの溶融物由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮により形成したものではなく、溶融・凝固、またはUO <sub>2</sub> やZrを起源とした微細粒子の凝集を経た可能性。
		Fe-Crの存在箇所はU-Zrの存在箇所に隣接。(2WEL2101A)	SUSが部分的に酸化されFe-Cr酸化物となり、U粒子形成に寄与した可能性	U-Zr-Fe-Cr-O系の融体から凝固する過程、またはFe-Cr-O系の融体に比較的高融点のUO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> 系の粒子が接触する過程を経た可能性。
		U-Zrの存在箇所にCrが存在。同じ箇所にFeの明確な輝点は認められないが帯同の可能性もある。(2WEL2101C)		
		Feを主成分とする領域には、部分的にZnが帯同しているが、Crの帯同は明確でない。	Crが含まれないことから、健全な状態のSUSやインコネルではなく、Znを含む塗料や炭素鋼（メッキ加工）の腐食生成物由来	—
		腐食生成物表面にCsの濃集領域は認められない。(SEM/EDXでも同様)	—	Csは微粒子として付着しているのではなく、腐食生成物の表面に分布している可能性 (CsFeO <sub>2</sub> のような複合酸化物の形成との判別は困難)
放射線測定(γ線測定)	2WEL2101A 2WEL2101C	<sup>125</sup> Sb、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Cs、 <sup>60</sup> Co、 <sup>154</sup> Euを同定。	燃料中のFP核種	—
ICP-MS(定量分析)	2WEL2101A 2WEL2101C	Li (7Li)、B (10、11B)、Cr (52、53Cr)、Fe (56、57Fe)、Ni (60、61、62Ni)、Mo (95、97、98Mo)、U (234、235、236、238U)、Cs (133Cs)、Ag (107、109Ag)、Nd (143、145、146Nd)を同定。当該サンプルの大部分は、Feで構成	炭素鋼（腐食生成物）を主成分とし、ごく少量のSUSやインコネル成分を含む可能性あり。その他、ウラン燃料（U、Mo、Ag）、Moグリス、中性子吸収材、海水（Li、B）（同位体比やSEM観察結果から判断）	—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

71

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### ウェル差圧調整ライン堆積物

#### 分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（2/2）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/EDX	2WEL2101B	U-Zr粒子が存在	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZr <sub>y</sub> の溶融物由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮により形成したものではなく、溶融・凝固、またはUO <sub>2</sub> やZrを起源とした微細粒子の凝集を経た可能性。
		Mg-Si-Ti粒子が存在	計装材料を含んでいる可能性	—
		Fe-Oを主成分とし、Znの濃集領域も認められる。	Znを含む塗料や炭素鋼（メッキ加工）の腐食生成物由来	—
TEM/STEM-EDX	2WEL2101B	断面の上部側はU-Zr相とFe-Cr相が混在立方晶(U,Zr)O <sub>2</sub> 、FeO+Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 、FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 、一部微量Mn含む。この他、Si、Fe-Niを含む領域と混在	燃料+構造材の溶融物由来	U-Zr-Fe-Cr-O溶融物の凝固過程
		粒子断面下部は主にFeが分布。この他、C、S、Ca、Zn、Pb、Sn、Tc、Ca、Moを含む領域が点在。	Tcなど、炉心内物質を含んでいる可能性あり	—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

72

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### 排気ダクト 劣化部 (金属片) 点検口表面部 (パッキン)

#### 分析結果と評価結果 (由来・起源、生成過程) の対応表 (1/2)

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/WDX	2WEL2102A	Feを主成分とする面の上に、 <b>U-Pu</b> 粒子、およびMg-Siの粒子が存在	ウラン燃料由来	U粒子はPuを帯同する一方で、Zr、Cr、Fe、Niのいずれも含まないことから、ウラン燃料がZryやSUSなどの構造材を巻き込んで形成したものではない。
		Feを主成分とする領域にはZnやCrの帯同は認められない。 Feを主成分とする面上にClが分布。	点検口構成材料の腐食生成物	—
		Mg-Si粒子上には、Al、Cr、Ni、Znが点在	コンクリート、計装材料、保温材、塗料、構造材など様々な材料に由来	—
		腐食生成物表面にCsの濃集領域は認められない。	—	Csは微粒子として付着しているのではなく、腐食生成物の表面に分布している可能性 (CsFeO <sub>2</sub> のような複合酸化物の形成との判別は困難)
	2WEL2103A	長径2μm程度の <b>U-Zr</b> 粒子を確認。	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZryの溶融物由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮により形成したものではなく、溶融・凝固、またはUO <sub>2</sub> やZrを起源とした微細粒子の凝集を経た可能性。(TEM/EDXの結果に基づく考察要)
		周辺広範囲にFeが分布	Feを主成分とする領域ではCrの帯同が明確でないことから、炭素鋼の腐食生成物またはSUS由来のFeリッチな腐食生成物の可能性。	—
		表面にCsの濃集領域は認められない。	—	Csは、微粒子として付着しているのではなく、腐食生成物の表面に分布している可能性 (CsFeO <sub>2</sub> のような複合酸化物の形成との判別は困難)



## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### 排気ダクト 劣化部 (金属片) 点検口表面部 (パッキン)

分析結果と評価結果 (由来・起源、生成過程) の対応表 (2/2)

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
放射線測定 (γ線測定)	2WEL2102A 2WEL2103A	<sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Csを同定	燃料中のFP核種	—
ICP-MS (定量分析)	2WEL2102A	<b>B</b> ( <sup>10</sup> , <sup>11</sup> B)、 <b>Cr</b> ( <sup>52</sup> , <sup>53</sup> Cr)、 <b>Fe</b> ( <sup>56</sup> , <sup>57</sup> Fe)、 <b>Ni</b> ( <sup>60</sup> , <sup>61</sup> , <sup>62</sup> Ni)、 <b>Mo</b> ( <sup>95</sup> , <sup>97</sup> , <sup>98</sup> Mo)、 <b>Ag</b> ( <sup>107</sup> , <sup>109</sup> Ag) を同定。サンプル質量の大部分をFeが占める。	点検口構成材料の腐食生成物を主成分とし、ごく少量のSUSやインコネル成分を含む可能性あり。その他、Moグリス、中性子吸収材、海水 (B) など。 (同位体比やSEM観察結果から判断)	—
	2WEL2103A	<b>B</b> ( <sup>10</sup> , <sup>11</sup> B)、 <b>Cr</b> ( <sup>52</sup> , <sup>53</sup> Cr)、 <b>Fe</b> ( <sup>56</sup> , <sup>57</sup> Fe)、 <b>Ni</b> ( <sup>60</sup> , <sup>61</sup> , <sup>62</sup> Ni)、 <b>Mo</b> ( <sup>95</sup> , <sup>97</sup> , <sup>98</sup> Mo)、 <b>Nd</b> ( <sup>146</sup> Nd) を同定	点検口構成材料の腐食生成物を主成分とし、ごく少量のSUSやインコネル成分を含む可能性あり。その他、Moグリス、中性子吸収材、海水 (B) など。 (同位体比やSEM観察結果から判断)	—
FE-SEM/EDX	2WEL2103A	Fe-Oが広く分布し、その上にCa-S-O、Zn-O、Cd-Cr-Cl、Cr-Mg-Al-Si-Cl-O、Cr-Si-Ni-O、Mn-Al-Si-Cl-Oの濃集領域を検出 この他、Ti、Al-Si、Cl-Kの濃集領域も見られる。	海水成分、ケーブルシース、塗料、計装材料を含んでいる可能性。	—

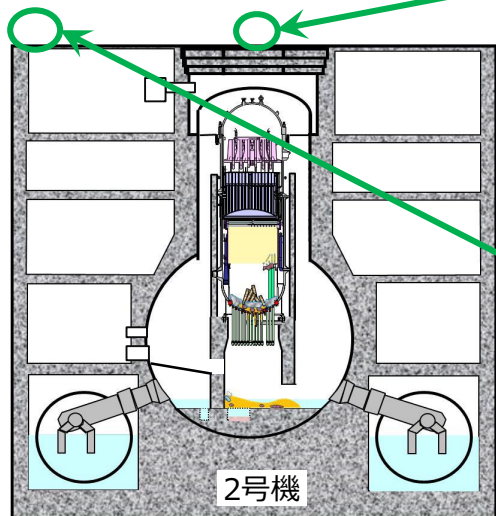
## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

74

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

R/B 5階 からのサンプル



#### シールドプラグ穿孔内堆積物

- U粒子が到達。燃料成分 (U、Zr) 及びFe、Crを含む構造材成分との溶融・凝固過程を経たものと推定。炉心由来成分を含んでいる。
  - # 一つの粒子でUとZrが帯同関係にあり、FeやCrを含む領域と隣接。
  - #  $\gamma$ 核種：  $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  (FP) の検出。

#### FHM遠隔操作室スミア

- U粒子が到達。燃料成分 (U、Zr) の溶融・凝固過程を経たものと推定。炉心由来成分を含んでいる。
  - # 一つの粒子でUとZrが帯同。
  - #  $\gamma$ 核種：  $^{60}\text{Co}$  (放射化生成物)  
 $^{125}\text{Sb}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  の検出。

注) 各推定の根拠とした分析結果を # で表した。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

75

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### シールドプラグ穿孔部堆積物

#### 分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（1/1）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/WDX	2PLUG2202B	粒状試料中に <b>U-Zr</b> の粒子が存在（U粒子） U、Zrとほぼ同位置に <b>Fe、Cr</b> が存在	UとZrが共存していることから、 <b>ウラン燃料とZryの溶融物</b> 由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮で形成したものではなく、 <b>溶融・凝固、またはUO<sub>2</sub>やZrを起源とした微細粒子の凝集</b> を経た可能性。
		U粒子に <b>Ni、Si、Sn、Ca、Al</b> を含む領域が隣接	SUS（Ni）、コンクリート（Si、Ca、Al）由来である可能性があるが、U粒子の生成への関与は不明。	—
		U粒子周辺にSi-Ca-Alを含む領域が存在	Si、Ca、Alがほぼ同位置であることから、コンクリート由来（サンプル取得時の状況から、原子炉建屋材料が混入したものか）	—
	2PLUG2201B	固体試料の白色面側にSi、Ba、Al、Tiが分布	サンプル取得時の状況と観察位置から、原子炉建屋材料（コンクリートや表面の塗料など）の由来と考えられる。	—
		固体試料の茶色面側（塗膜面側）に <b>U-Zr</b> の粒子が存在（U粒子）	UとZrが共存していることから、 <b>ウラン燃料とZryの溶融物</b> 由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮で形成したものではなく、 <b>溶融・凝固、またはUO<sub>2</sub>やZrを起源とした微細粒子の凝集</b> を経た可能性。
		U粒子に <b>Fe、Cr</b> を含む領域が隣接	<b>SUS</b> が部分的に酸化されFe-Cr酸化物となり、U粒子形成に寄与した可能性	—
放射線測定	2PLUG2201B 2PLUG2202B	<b><sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs</b> を同定（γ線計測）	燃料中の <b>FP</b>	—
ICP-MS	2PLUG2201B 2PLUG2202B	<b>U、Mo、Ag</b> を検出（天然と異なる同位体比）	<b>ウラン燃料※、燃料中のFP</b> ※ 2PLUG2201B（固体試料）では <sup>235</sup> U/ <sup>238</sup> U比が0.01前後であり、天然Uの含有を示唆。	—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

76

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### FHM遠隔操作室スミア

#### 分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（1/1）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/WDX	2FHM2203	U-Zrの粒子が存在（U粒子） U粒子上にFe、Crが存在	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZryの溶融物由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮で形成したものではなく、溶融・凝固、またはUO <sub>2</sub> やZrを起源とした微細粒子の凝集を経た可能性。
		U粒子周辺にはTi、Ca、Si、Al、Mgが存在	スミア採取箇所周辺の材料を含んでいる可能性あり	—
	2FHM2207	U-Zrの粒子が存在（U粒子）	UとZrが共存していることから、ウラン燃料とZryの溶融物由来	Zrを含むことから、気相からの凝縮で形成したものではなく、溶融・凝固、またはUO <sub>2</sub> やZrを起源とした微細粒子の凝集を経た可能性。
		U粒子周辺にFe、Si、Caが存在	スミア採取箇所周辺の材料を含んでいる可能性あり	—
	2FHM2204	Fe、Zn、Si、Al、Caが存在	スミア採取箇所周辺の材料を含んでいる可能性あり	—
放射線測定	2FHM2203	屋上採取試料より、 <sup>60</sup> Co、 <sup>125</sup> Sb、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Csを同定（γ線計測）	放射化生成物、燃料中のFP	—
	2FHM2204 2FHM2207	2階屋内採取試料より、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Csを同定（γ線計測）	燃料中のFP	—
ICP-MS	2FHM2203 2FHM2207	屋上採取試料及び2階屋内採取試料（破損した窓ガラスに近い箇所より採取）からU、Zr検出	ウラン燃料（同位体比より） ZrはZry由来のものを含む	—
	2FHM2203	屋上採取試料から天然と異なる同位体組成のMo、Agを検出	Mo、Agは燃料中のFP由来のものを含む	—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

(a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
- 2号機の推定結果 -

77

### ii. 燃料由来成分の移行挙動の把握

#### ●各サンプル採取箇所検出された成分のUとの帯同性を表す指標

> **γ線放出核種 (FP等)** の場合 :

$$A_N / W_{U-238} \quad \text{単位 : [Bq/ng]} \quad A_N : \gamma\text{線放出核種 } N \text{ の放射能 [Bq]} \quad *1$$
$$W_{U-238} : {}^{238}\text{Uの質量 [ng]} \quad *1$$

> **Zr**の場合 :

$$W_{Zr-tot} / W_{U-tot} \quad \text{単位 : [ng/ng]}$$

$$W_{Zr-tot} : \text{Zrの質量 (}^{90}\text{Zrの質量を天然比 (0.51) で割り戻して算出) [ng]} \quad *1$$

$$W_{U-tot} : {}^{235}\text{Uと}^{238}\text{Uの合計質量 [ng]} \quad *1$$

\*1 溶解液 (硝酸+微量HF) に対するγ線計測結果 ( $A_N$ ) 及びICP-MS分析結果 ( $W_{U-238}$ 、 $W_{Zr-tot}$ 、 $W_{U-tot}$ ) より算出

#### ●Uとの帯同性評価に基づく**U粒子生成過程評価への活用例**

➤ 低揮発性核種 (Eu、Am) のUとの帯同性の確認

✓  ${}^{154}\text{Eu}/{}^{238}\text{U}$ 比、 ${}^{241}\text{Am}/{}^{238}\text{U}$ 比 : 炉心平均値<sup>[1]</sup>に近い場合はUとの帯同を示唆

➤ サンプル中のU粒子の支配的な由来 (Zrとの溶融物、燃料片、蒸気種) の推定

✓ **Zr/U比** : 溶融物を含むか否かの推定 (SEM分析やTEM分析で得られる局所的な組成との比較が必要)

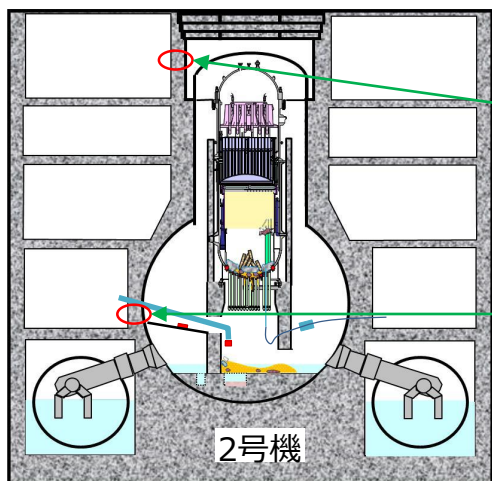
✓ 高揮発性核種との比 (e.g.  ${}^{137}\text{Cs}/{}^{238}\text{U}$ 比、 ${}^{125}\text{Sb}/{}^{238}\text{U}$ 比) : 採取箇所間の比較によるPCV内外での環境条件 (到達温度、雰囲気等) の相違の検討

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

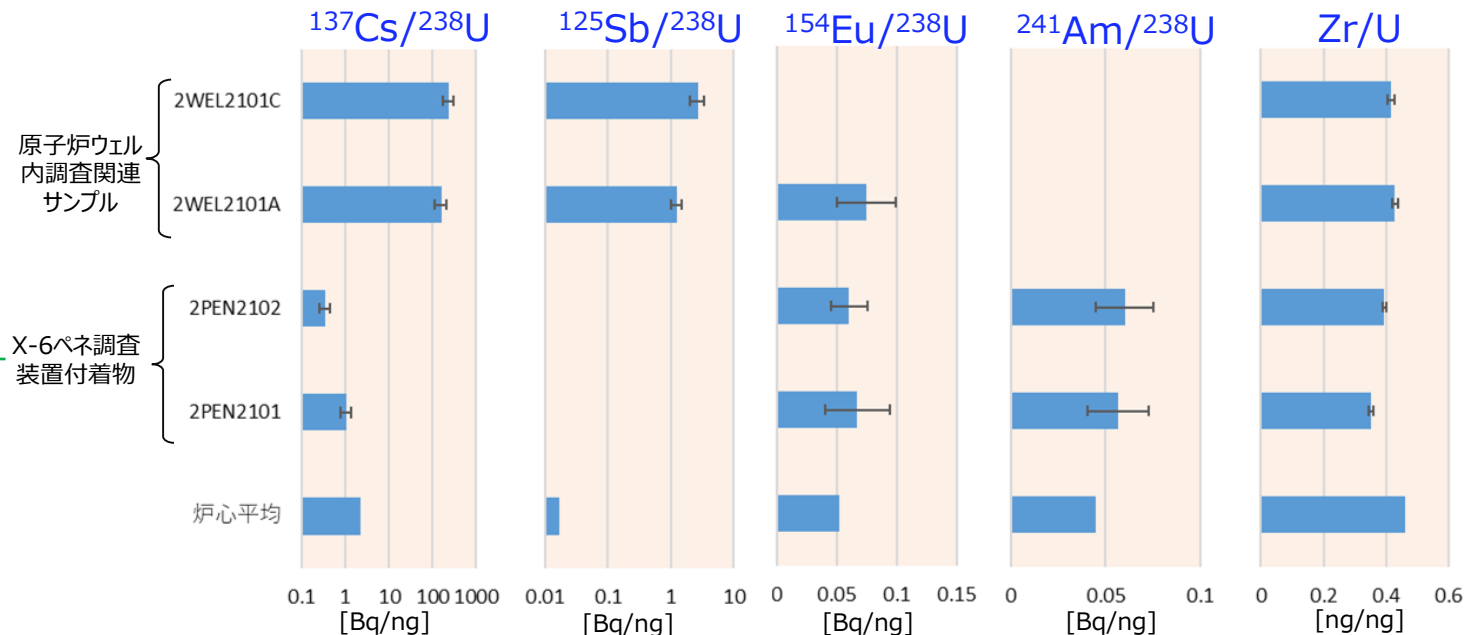
### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

78

#### ii. 燃料由来成分の移行挙動の把握



サンプルの採取箇所



燃料由来成分とUとの比 (数値及び不確かさは次頁参照)

- >  $^{154}\text{Eu}$ 、 $^{241}\text{Am}$  : 炉心平均値とオーダーレベルかつ不確かさ範囲内で一致。  
(低揮発性) ⇒ $^{238}\text{U}$ に帯同しての移行を示唆。
- >  $^{125}\text{Sb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  : ウェル差圧調整ライン堆積物において炉心平均値よりも2桁程度高い。  
(高揮発性) ⇒採取箇所による差が認められる (PCV外>>PCV内)
- > Zr : Zr/U比は炉心平均に近い。U:Zrのモル比は約1:1であり、SEMやTEMでの局所組成と整合。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

## ii. 燃料由来成分の移行挙動の把握

試料ID	γ線測定日	γ核種放射能と <sup>238</sup> U質量との比 <sup>※1</sup> <sup>※2</sup> [Bq/ng]				Zr/U比 <sup>※2</sup> [ng/ng]
		<sup>125</sup> Sb/ <sup>238</sup> U	<sup>137</sup> Cs/ <sup>238</sup> U	<sup>154</sup> Eu/ <sup>238</sup> U	<sup>241</sup> Am/ <sup>238</sup> U	
2PEN2101	2021/12/27	—	1.1 ± 0.3	0.07 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.353 ± 0.007
2PEN2102	2022/01/04	—	0.4 ± 0.1	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.394 ± 0.006
2WEL2101A	2022/01/13	1.2 ± 0.2	(1.6 ± 0.5) × 10 <sup>2</sup>	0.07 ± 0.02	—	0.428 ± 0.008
2WEL2101C	2021/12/27	2.7 ± 0.7	(2.4 ± 0.7) × 10 <sup>2</sup>	—	—	0.42 ± 0.01
2WEL2102A	2022/01/06	—	—	—	—	—
2WEL2103A	2021/12/15	—	—	—	—	—
炉心平均	—	0.016 <sup>※3</sup>	2.3 <sup>※3</sup>	0.052 <sup>※3</sup>	0.045 <sup>※3</sup>	0.46 <sup>※4</sup>

※1 γ核種放射能の減衰補正は行っていない。

※2 誤差表示は、各比の分子及び分母のそれぞれの不確かさ（1σ）を合成し、2σとして表示した。

※3 ORIGEN計算値<sup>[1]</sup> の冷却期間10年の値から算出した。

※4 東京電力による概略推定値<sup>[2]</sup>から算出した。

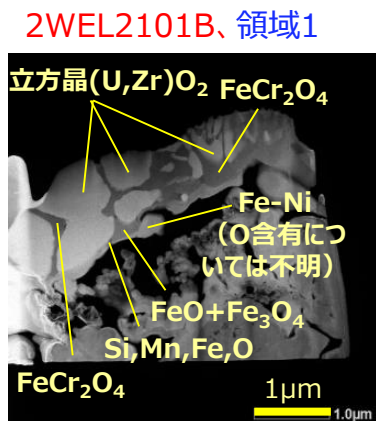
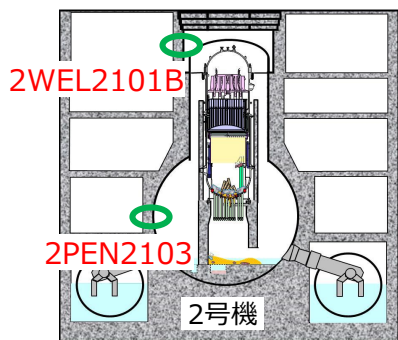
## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

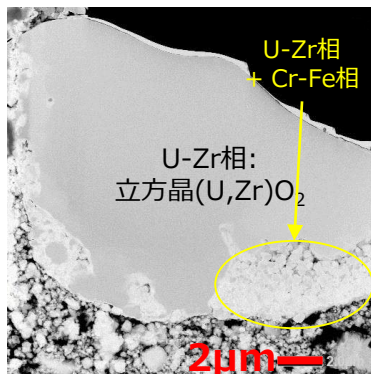
80

### iii. 各サンプル中の粒子個別の生成条件の推定・蓄積 (2021~2022年度)

#### R/B内及びPCV内で発見されたU粒子の特徴



2PEN2103、領域14



#### U-Zr-Fe-Cr-O系混合酸化物粒子

- 立方晶(U,Zr)O<sub>2</sub> (U:Zrは6:4から5:5) とFe/Cr-rich相 (FeO、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) の混合
  - 粒子の直接の生成要因はU-Zr-Fe-Cr-O系の酸化物融体からの凝固と推定
  - 温度低下とともにU/Zr-rich相→Fe/Cr-rich相の順で析出と推定 (両相の形状・位置関係より)
- サンプルによっては、粒子のごく一部でSi、Mn、Niを含む箇所が存在 (2WEL2101B)
  - これらを合金元素として含むSUSが粒子形成に関与した可能性あり
- Fe/Cr-rich相としてFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は未検出
  - 水蒸気雰囲気下での鋼材※の酸化を経験した可能性あり (次々頁参照)

※ Fe、Crを含む鋼材：SUS、インコネルなど

各領域で見つかったU粒子の例

⇒ 事故進展時のウラン燃料、Zry、鋼材間の溶融・混合の存在を示唆

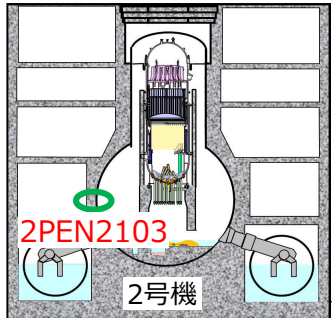


②燃料デブリの性状推定の高度化  
(a)分析データの解析

(a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
- 2号機の推定結果 -

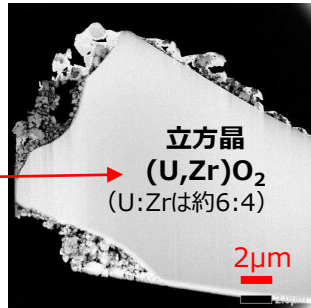
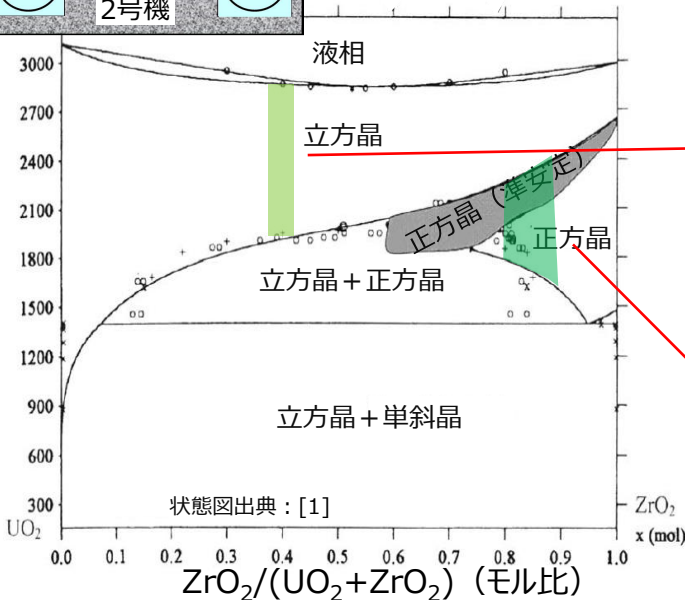
iii. 各サンプル中の粒子個別の生成条件の推定・蓄積 (2021~2022年度)

R/B内及びPCV内で発見されたU粒子の特徴



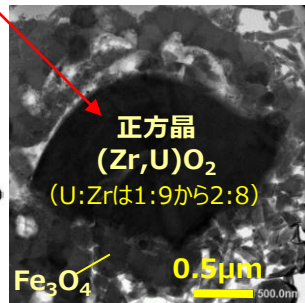
U-Zr-O系酸化物粒子

- ほぼ均一な立方晶(U,Zr)O<sub>2</sub>、及び正方晶(Zr,U)O<sub>2</sub>からなる粒子。
  - 粒子の直接の生成要因はU-Zr-O系酸化物融体からの凝固、または4元系以上の酸化物混合粒子からU/Zr-rich相が剥離したものと考えられる。



2PEN2103、領域6

UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>系において、  
約1900K以上での特徴  
と整合



2PEN2103、領域5

UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>系において、  
約1600~2400Kで  
の特徴と整合

⇒ いずれも相分離を起こさない程度に速い冷却過程を経た粒子であり、事故進展時に溶融物の飛散や冷却水との接触を経た可能性を示唆

UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>系疑似二元系状態図<sup>[1]</sup>とU粒子の各相の組成との対応

②燃料デブリの性状推定の高度化  
(a)分析データの解析

(a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
- 2号機の推定結果 -

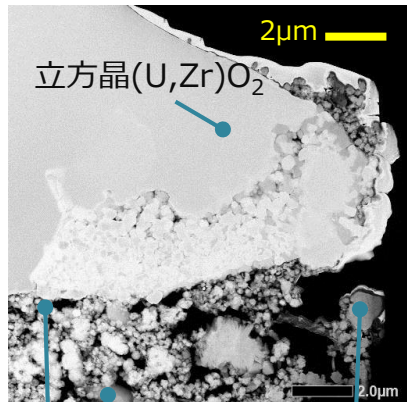
iii. 各サンプル中の粒子個別の生成条件の推定・蓄積 (2021~2022年度)

U粒子周辺に存在する粒子の特徴

- Fe/Cr-rich相：U粒子の周辺において、 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ が存在。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ は未検出。
  - 粒子周辺のものについては、水蒸気雰囲気下での鋼材※の酸化を経験した可能性あり。

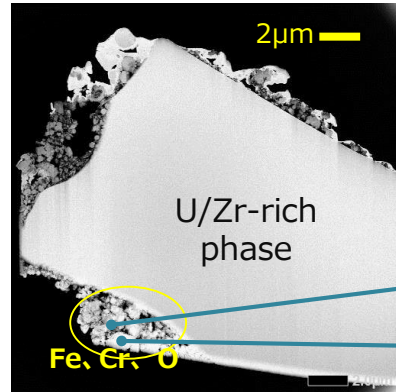
※ Fe、Crを含む鋼材：SUS、インコネルなど

2PEN2103、領域14



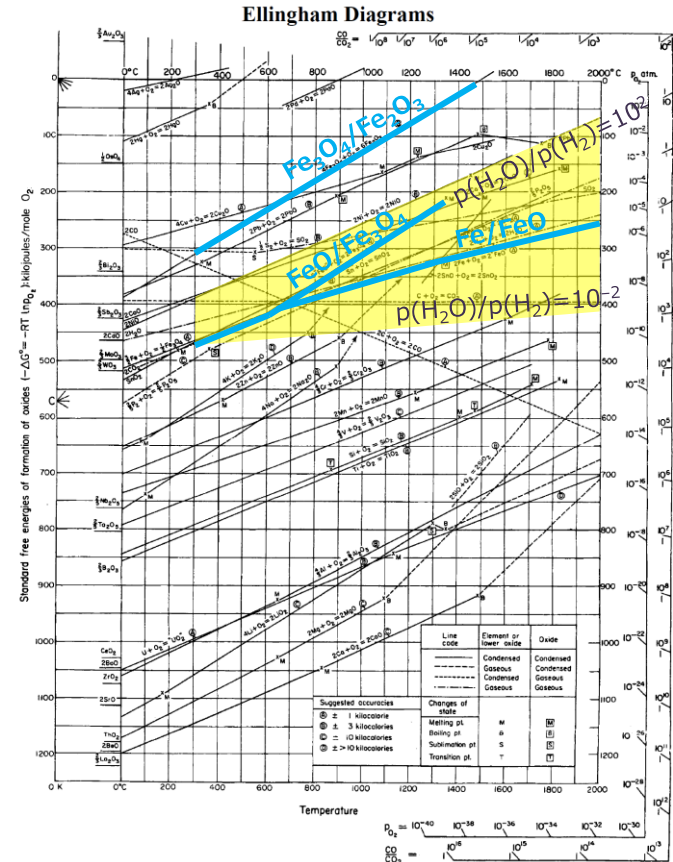
$\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaCO}_3$   
 $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Si-Fe-O}$

2PEN2103、領域6



U粒子周辺の粒子の例

$\text{FeO}$   
 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$



エリಂಗム図<sup>[1]</sup>とFe酸化物の安定条件

⇒ 鋼材の酸化過程を示唆

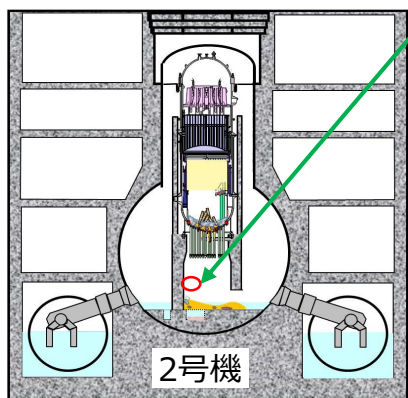
## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

83

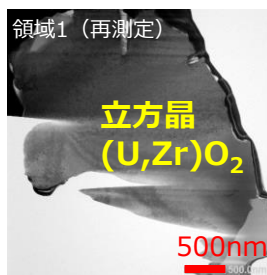
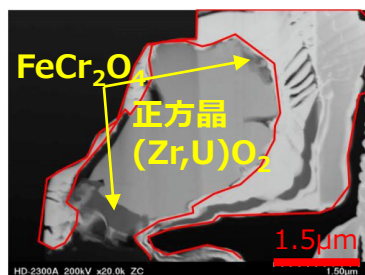
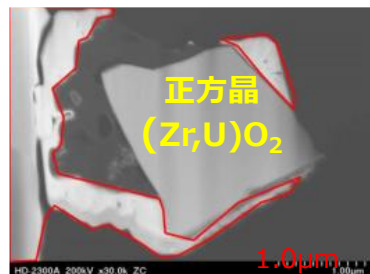
### iii. 各サンプル中の粒子個別の生成条件の推定・蓄積 (2020年度以前との比較)

#### RPV内起源と考えられるU粒子の特徴



ペDESTAL内部調査装置※スミア [1][2]

※ ペDESTAL底部には接触しておらず、RPVから流下する水と接触。



#### U-Zr-O系粒子 (溶融・凝固)

- 正方晶 $(Zr,U)O_2$  (U:Zrは約3:7) のほぼ均一な単相
- $UO_2$ - $ZrO_2$ 擬似二元系状態図 (p.81) において準安定相

#### U-Zr-Fe-Cr-O系粒子 (溶融・凝固)

- 立方晶 $(U,Zr)O_2$  (U:Zrは約5:5) と Fe/Cr-rich相 ( $FeCr_2O_4$ ) の混合
- 燃料成分 (U, Zr) 及び構造材成分 (Fe, Crを含むもの) との混合過程が存在。SUSとの混合を経た場合、Niが分離する何らかの過程が存在。

高温側で安定な相やU/Zr-rich相とFe/Cr-rich相の混合粒子など、本事業のサンプルと共通する特徴を有する。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

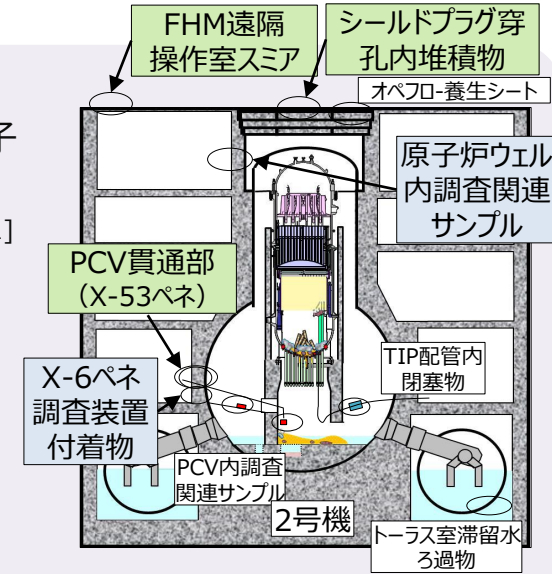
### (a-2) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 2号機の推定結果 -

84

#### iv. 粒子の放出源での燃料デブリの生成条件及び性状推定

##### ◆ 観察された粒子の放出源の推定

- 既存の事故進展シナリオや内部調査結果からの推定
  1. 金属質な燃料デブリが先行して下部プレナムからペDESTALに移行。下部プレナム部には粒子状の酸化物デブリが含まれる可能性。[1]
  2. ペDESTAL移行後の燃料デブリは低温に維持され、MCCIはほとんど起きていない可能性。[1]  
⇒ペDESTAL底部到達後は、Uを含む酸化物が再溶融する可能性は低いと考えられる。
- 分析結果に基づく推定
  - # PCV貫通部のサンプルについては、PCV内部から炉心内物質が通過。PCV外（ウェル差圧調整ライン）のサンプルにはMoやAgなどの中揮発性FPが含まれる可能性あり。⇒ 放出源としてRPV内部、ペDESTAL内部の双方が候補。
  - # PCV貫通部及びPCV外のサンプルは互いに近いZr/U比を有しており、 $UO_2-ZrO_2$ 系の酸化物融体が凝固後、固相の状態に移行したことを示唆。⇒上記 2. と整合。



炉内状況推定図[2]及びサンプル採取箇所

⇒ いずれの採取箇所のU粒子も、RPV内部またはペDESTAL内部で燃料成分と構造材が混合する段階が存在し、それが放出源になっていると考えられる。（微粒子の生成時期及び放出ルートについては不確かさが残る）

##### ◆ 燃料デブリの生成条件・性状推定

- RPV内部からペDESTAL底部にかけて、 $(U,Zr)O_2$ とFe-Cr酸化物の混合物の存在を示唆。
- ペDESTAL底部に落下したとされる金属質な燃料デブリの性状には不明点が多いが、下部プレナムにおいてSUSの水蒸気酸化過程を経た場合、Fe-Ni基合金のように、粘り気のある金属相を含んでいる可能性がある。
- ペDESTAL外に燃料デブリ起源のU粒子が広がっている可能性あり。

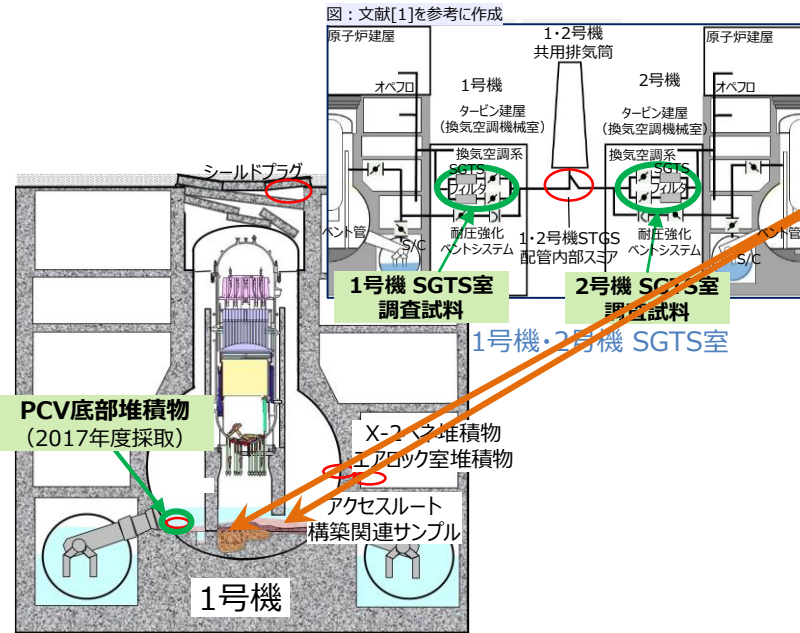
②燃料デブリの性状推定の高度化  
(a)分析データの解析

(a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
—1号機の推定結果—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 1号機の推定結果 -

## 燃料デブリ性状推定と各サンプル分析との関連



### ● 各種燃料デブリの性状推定に必要な情報

推定対象	性状推定に必要な情報
a. ペDESTAL底部及びD/W床面の燃料デブリの性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 燃料デブリのペDESTAL移行後におけるPCV内の環境条件</li> <li>✓ 水中での経年による変質の有無</li> </ul>

### ● 各サンプル分析での主要関心事項

**PCV底部堆積物 (2017年度採取)** ... PCV底部・水中から取得。  
⇒ 上記a. の情報取得を想定。

**SGTS室調査試料** ... 1号機ベント時の気相の想定通過ルート近辺から採取。  
⇒ 上記a. のうち、特にベント時のPCV内の環境条件に係る情報取得を想定。

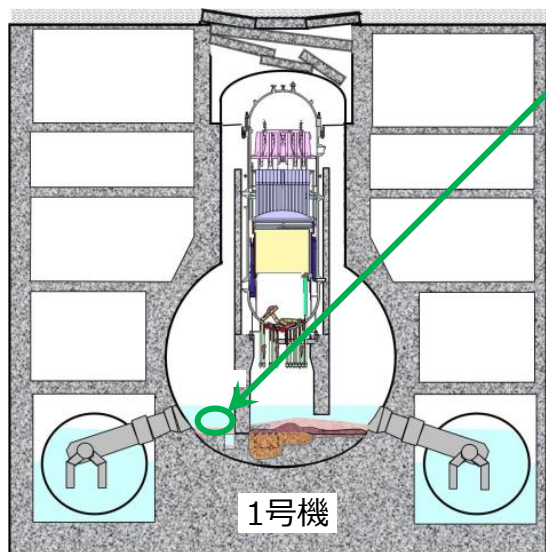
## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 1号機の推定結果 -

87

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

##### PCV底部堆積物



- 大部分は鋼材の腐食生成物と推定。  
# Fe、Oが広く分布。
- U粒子は、燃料成分（U、Zr）の溶融・凝固過程を経たものを含むと推定。炉心由来成分を含んでいる。  
# U粒子上の点分析において、様々なZr/(U+Zr)比が存在。
- PCV上部に位置する材料の混入を示唆。  
# FE-SEM/EDXでの観察における様々な元素の検出。  
Si、Al、Ca（コンクリート、計装材料）  
Pb（遮蔽材）、Sb（ケーブル被覆）、Zn（塗料）

注) 各推定の根拠とした分析結果を # で表した。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 1号機の推定結果 -

88

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### PCV底部堆積物

#### 分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（1/1）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/EDX	1PCV1701D-4	探索範囲（約1mm四方相当）において、全体的に <b>FeとO</b> が広く分布。	鉄錆	—
		<b>U</b> を高濃度に含む（U-rich）粒子、 <b>U-Zr</b> が同程度の濃度（U/Zr-rich）の粒子、及び <b>Zr</b> を高濃度に含む粒子（Zr-rich）が存在	UとZrが共存していることから、 <b>ウラン燃料とZryの溶融物</b> 由来	TEM/STEM-EDXにて詳細に調査 領域4：U/Zr-rich粒子 領域8：Zr-rich粒子
		<b>Pb-Mo</b> を含む粒子が存在	Pbについては遮蔽材を含むと考えられる。 MoについてはFP、天然由来（構造材、グリス）いずれも可能性あり	—
		<b>Sb</b> を含む粒子が存在	SbについてはFPではなく天然由来※の可能性あり ※ <sup>125</sup> Sb（半減期2.7年）の壊変により生成するTeの信号が検出されていないため	—
		上記のほか、 <b>Si、Ca、Al、Zn、Pb、Cu、Cr、Ni、Mg</b> を含む領域が広範囲に点在	塗料（Zn）、遮蔽材（Pb）、コンクリート（Si、Ca、Al、Mg）、ケーブル（Cu）、計装材料（Si、Ca、Al）	—
TEM/STEM-EDX	''	領域4：U/Zr-rich粒子 UとZrがほぼ均一に分布した(U,Zr)O <sub>2</sub> 粒子 U:Zrは約5:5	UとZrが共存していることから、 <b>ウラン燃料とZryの溶融物</b> 由来	<b>U-Zr-O溶融物（酸化物系）の凝固過程</b>
		領域8：Zr-rich粒子 ZrO <sub>2</sub> にFe酸化物、(U,Zr)O <sub>2</sub> 微粒子が接する	<b>Zryの酸化物、ウラン燃料とZryの溶融物</b> を含む	Zryの酸化過程、及び <b>U-Zr-O溶融物（酸化物系）の凝固過程</b> が存在



## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

(a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定

### － 1号機の推定結果 －

89

#### i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

#### 1号機 SGTS室調査試料

#### 分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（1/1）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/WDX	1SGTS2202	スミア紙の付着物中に、Fe、Si、Mg、Alを含む領域を検出。そのほか、Ca、K、Cr、Niを含む領域が点在。	スミア採取箇所周辺の材料を含んでいる可能性あり	—
放射線測定	〃	<sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Csを同定（γ線計測）	燃料中のFP	—
FE-SEM/EDX	1SGTS2201	Fe-Csを含む粒子を検出	FeとCsが共存していることから、由来として <b>構造材（Fe）と燃料中のFP（Cs）との反応生成物を含む可能性あり</b>	—
		スミア紙の付着物中に、Fe、Si、Ca、Alを含む領域を検出	スミア採取箇所周辺の材料を含んでいる可能性あり	—
TEM/STEM-EDX	〃	粒子断面には <b>Fe、Cs、Si</b> が広く分布。 <b>O、Mg、Al</b> も分布。局所的に <b>K</b> も存在。	候補としてはSUSや炭素鋼（Fe）、コンクリート（Si、Mg、Al、K）など	Si、K、Mg、Alの検出から、鋼材以外の成分が粒子生成に関与した可能性あり

②燃料デブリの性状推定の高度化  
(a)分析データの解析

(a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定

— 1号機の推定結果 —

i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

2号機 SGTS室調査試料

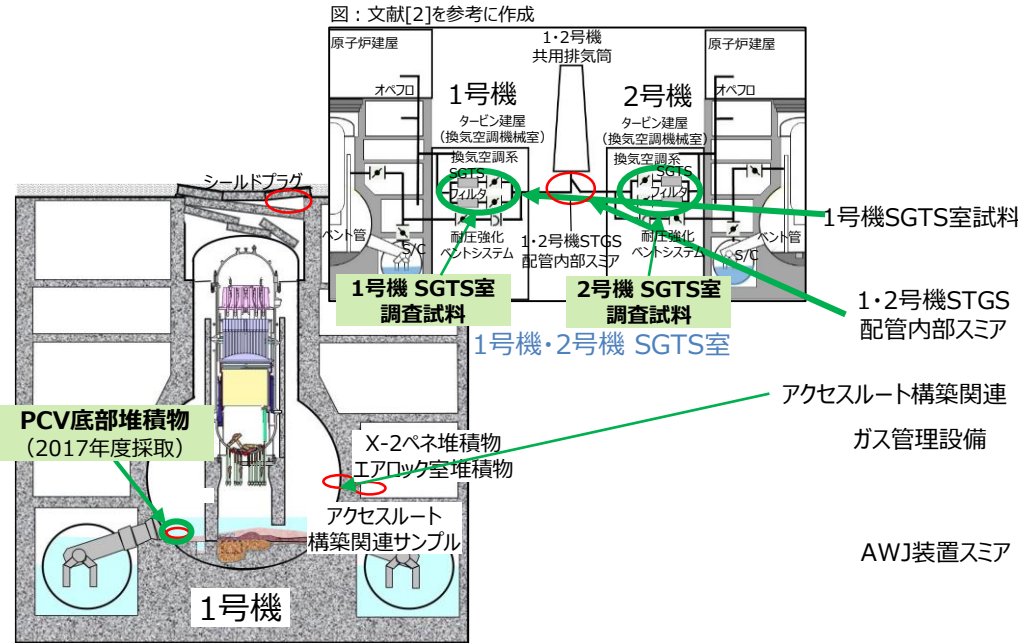
分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（1/1）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/WDX	2SGTS2202	Fe、Cr、Ni、Si、Al、Ca、Clを検出		—
放射線測定	〃	<sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Csを同定（γ線計測）	燃料中のFP	—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 1号機の推定結果 -

## ii. 燃料由来成分の移行挙動の把握



γ核種放射能と<sup>238</sup>U質量との比※1 ※2 [Bq/ng]

試料	γ線測定日	<sup>137</sup> Cs/ <sup>238</sup> U
1SGTS2202	2023/1/26	$(5.0 \pm 1.5) \times 10^4$
XM20111	2020/12/15	$(5.6 \pm 1.5) \times 10^3$
XM20121	2020/12/15	$(2.0 \pm 0.7) \times 10^3$
XM20131	2020/12/15	$(4.1 \pm 0.6) \times 10^2$
XM20141	2020/12/16	$(4.5 \pm 0.7) \times 10^2$
XM20151	2020/12/16	33 ± 6
XM20161	2020/12/14	36 ± 8
炉心平均	—	2.5※3

2020年度に取得した1号機関連サンプルの分析データを用いて評価。

- ※1 γ核種放射能の減衰補正は行っていない。
- ※2 誤差表示は、溶解液中のγ核種放射能及び<sup>238</sup>U質量のそれぞれの不確かさ (1σ) を合成し、2σとして表示した。
- ※3 ORIGEN計算値<sup>[1]</sup> の冷却期間10年の値から算出した。

> γ核種としてはCs (<sup>137</sup>Cs、<sup>134</sup>Cs) のみ検出。  
⇒採取箇所による差があり、SGTS (PCV外) > アクセスルート関連サンプル (PCV内)

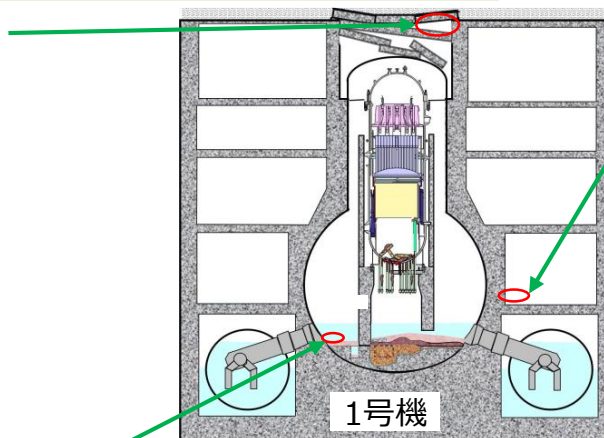
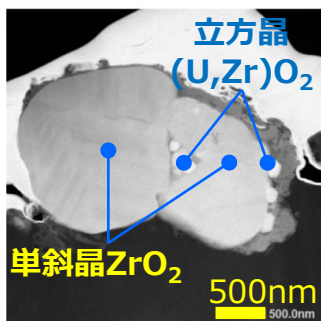
②燃料デブリの性状推定の高度化  
(a)分析データの解析

(a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
- 1号機の推定結果 -

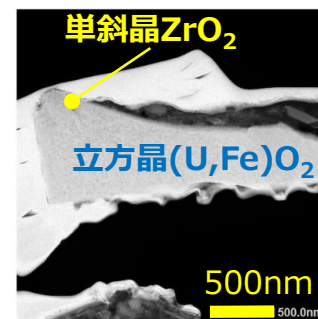
iii. 各サンプル中の粒子個別の生成条件の推定・蓄積 (前事業)

R/B内及びPCV内で発見されたU粒子の特徴

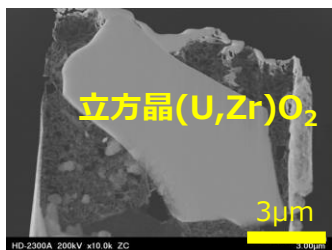
シールドプラグスミア<sup>[1]</sup>



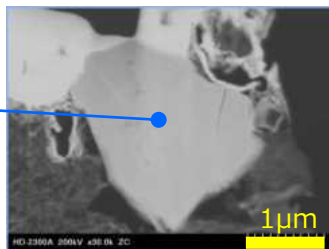
X-2ペネ堆積物<sup>[1]</sup>



PCV底部堆積物 (2017年採取) <sup>[2]</sup>



立方晶(U,Zr)O<sub>2</sub>  
+ α-Zr(O)



U-Zr-O(-Fe)系酸化物粒子 (溶融・凝固)

- 組成が異なる2相 (U-rich相とZr-rich相) の混在。Zr-rich相の一部は単斜晶ZrO<sub>2</sub>として存在。
  - UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>酸化物系融体の凝固過程で、U-rich相とZr-rich相への分離、及び正方晶から単斜晶ZrO<sub>2</sub>への相変態を引き起こす程度にゆっくり冷却されたものと推定。

⇒ 事故進展時に遅い冷却過程が存在。  
相分離による非均質化を示唆

## ②燃料デブリの性状推定の高度化

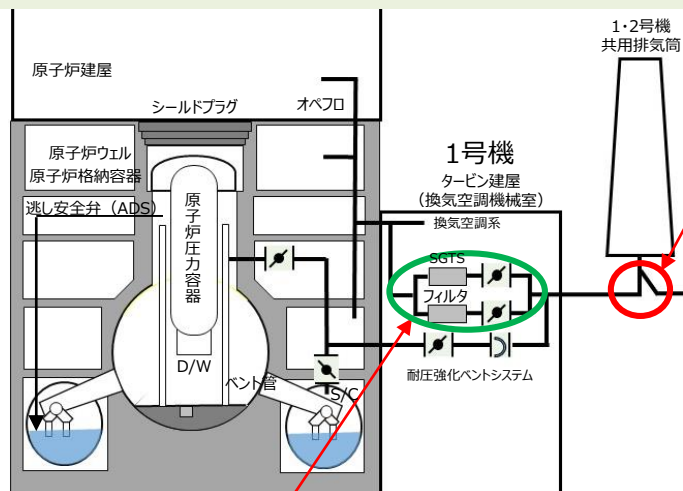
### (a)分析データの解析

### (a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 1号機の推定結果 -

### iii. 各サンプル中の粒子個別の生成条件の推定・蓄積 (2020年度以前との比較)

#### ベント時に放出されたと考えられる粒子の特徴

⇒ ベント時点での材料の混合状態、温度・雰囲気条件推定への手掛かり



#### 1・2号機SGTS配管内部スミア<sup>[1]</sup>

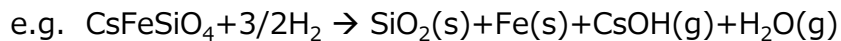
#### Cs含有粒子 (球状粒子)

- 直接の生成要因※としては融体からの冷却が有望か (SiO<sub>2</sub>の融点: ~1983K 以上を経験)

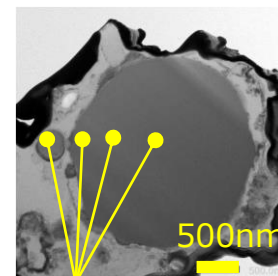
# 粒子中にFe、Znを含み、球形であることから。

※ 生成プロセス候補 (直接の生成要因)

- 融体からの冷却
- SiO(g)を含む気相からの凝縮
- SUS-CsOH反応生成物の分解



at ~1073K<sup>[2]</sup>



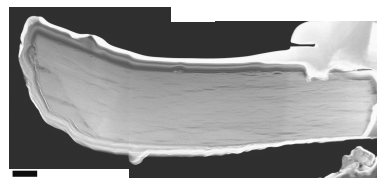
#### 非晶質Si-Fe-O

- Fe/Si原子比 約0.3-0.4
- Znも微量含有
- Cs/Si原子比 約0.07-0.09

#### 1号機 SGTS室調査試料 (本事業)

#### Cs含有粒子 (不定形粒子)

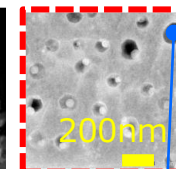
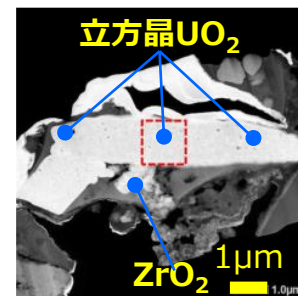
- 鋼材以外の材料 (コンクリートなど) が粒子形成に関与した可能性を示唆
- # 粒子中にK、Mg、Al等を含むことから。



<1SGTS2201>

#### UO<sub>2</sub>粒子

- 飛散した燃料片: Moが揮発しやすい酸化性条件を経験した可能性を示唆
- # PGM合金のMo/Ru比は通常の照射済燃料で想定される比率よりも低い。



Mo/Ru/Rh/Pd/Tc (白金族系合金)

注) 各推定の根拠とした分析結果を # で表した。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

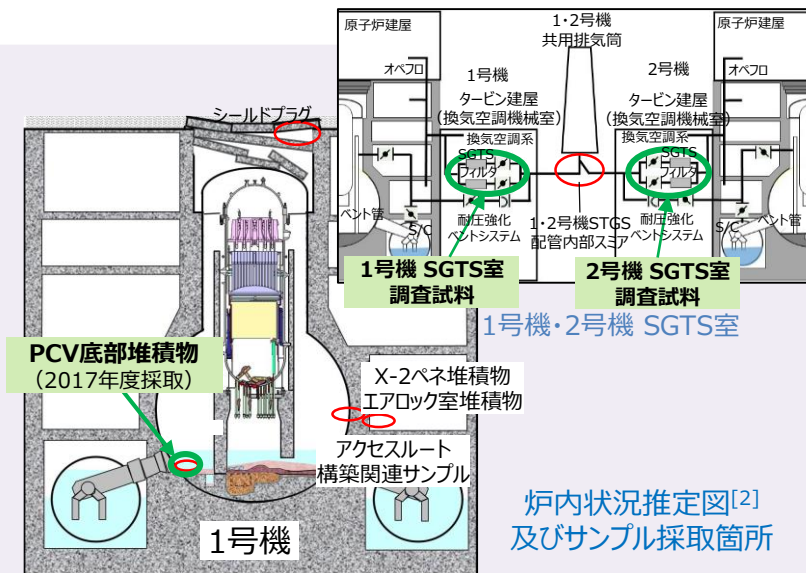
### (a-3) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 1号機の推定結果 -

94

## iv. 粒子の放出源での燃料デブリの生成条件及び性状推定

### ◆ 観察された粒子の放出源の推定

- 既存の事故進展シナリオや内部調査結果からの推定
  1. RPV破損から約10日間にわたりペDESTAL内への注水が有効ではなく、その間ペDESTAL内が高温で維持された可能性。[1]
  2. ベント発生時点ではRPVの破損、及び高温となった燃料成分のペDESTALへの移行が起きていた可能性。[1]
- 分析結果からの推定
  - # PCV底部堆積物では、低融点のPCV内材料（鉛遮蔽材や亜鉛含有塗料等）由来と考えられる成分を含有。また、U粒子の相状態は徐冷の特徴あり。⇒ 上記1.と整合。
  - # SGTS室調査試料やSGTS配管スミアでは、Mo/Ru比の低い燃料片など、酸化性雰囲気を経て放出された可能性を示唆。⇒ 上記2.と整合。



⇒ いずれのサンプル採取箇所でも観察された粒子も、RPV内部またはRPV底部破損後のいずれの情報も含んでいると考えられる。（微粒子の生成時期及び放出ルートについて不確かさが残る）

### ◆ 燃料デブリの生成条件・性状推定

- PCV底部には、酸化物融体がゆっくり冷えてできた $(U,Zr)O_2$ 、 $(Zr,U)O_2$ を含むものと推定。
- 現状の微粒子の分析結果からは、典型条件のMCCIが起きたことを示す直接の証拠（U/Zr-richな酸化物とSi/Ca/Al-richな酸化物の混合相等）は得られていない。ただし、より深部では塊状の堆積物が存在することから、その内部ではFe-Ni系の合金相や燃料成分とコンクリート成分の混合相等が存在する可能性も否定できない。

②燃料デブリの性状推定の高度化  
(a)分析データの解析

(a-4) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
—3号機の推定結果—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-4) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 3号機の推定結果 -

## 燃料デブリ性状推定と各サンプル分析との関連

### <主要推定対象>



### ●各種燃料デブリの性状推定に必要な情報

推定対象	性状推定に必要な情報
a. RPV内燃料デブリの性状	✓ RPV内での炉心材料間の反応条件
b. RPV下部～ペDESTAL底部にかけての燃料デブリの性状	✓ RPV内での炉心材料間の反応条件
c. ペDESTAL底部の燃料デブリの性状	✓ 燃料成分のペDESTALへの移行後のPCV内の環境条件 ✓ 水中での経年による変質の有無
d. ペDESTAL外への燃料デブリの分散状況	✓ PCV内各所での燃料成分の直接検出

### ●各サンプル分析での主要関心事項

RHR熱交換器 (A) 残水 …… D/WからR/Bへの気相の放出ルート近辺の位置から採取。  
⇒ 上記a.～c.の情報の包含を想定。



②燃料デブリの性状推定の高度化  
 (a)分析データの解析

(a-4) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
 - 3号機の推定結果 -

i. 各サンプル中の成分の由来・起源の推定

RHR熱交換器 (A) 残水

分析結果と評価結果（由来・起源、生成過程）の対応表（1/1）

分析項目	サンプル名	分析結果	成分由来の推定	生成過程の推定
FE-SEM/WDX	3RHR2201B	固相はFeが広く分布しており、Na、Cl、Sを含む領域を検出。		—
放射線測定	〃	<sup>60</sup> Co、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Csを同定（γ線計測）	放射化生成物、燃料中のFP	—

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

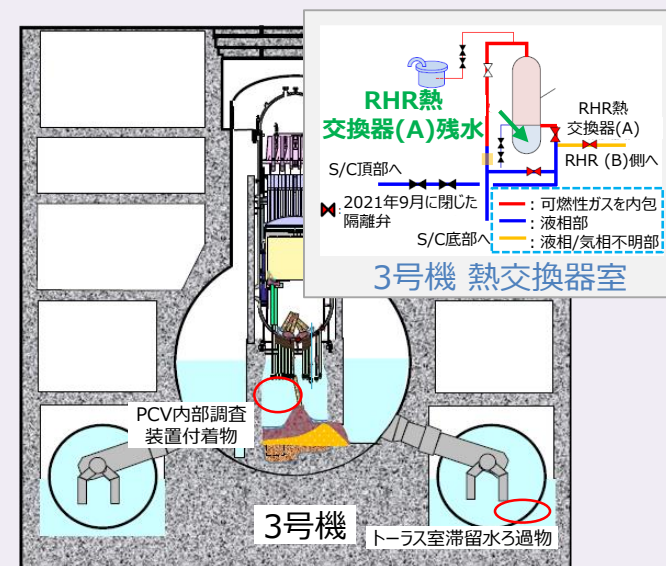
### (a-4) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 - 3号機の推定結果 -

98

#### iv. 粒子の放出源での燃料デブリの生成条件及び性状推定

##### ◆観察された粒子の放出源の推定

- 既存の事故進展シナリオや内部調査結果からの推定
    1. 酸化度の低い燃料デブリ、高粘性の固液混合状態での物質移行<sup>[1]</sup>
    2. ペDESTAL底部での冠水・ドライアウトの繰返し<sup>[2]</sup>
  - 分析結果からの推定
    - # RHR熱交換器(A)残水の固相中にU粒子は検出されず。
    - # PCV内部調査装置附着物 (2018~19年度に分析) 中に検出されたU粒子は、 $\alpha$ -Zr(O)と立方晶(U,Zr)O<sub>2</sub>との混合、粗密な領域の形成など、1・2号機と異なる特徴あり。
- ⇒ 現時点では、RHR熱交換器残水中に認められた固相については、形成時期や形成場所について不確かさが残る。
- PCV内部調査装置附着物のU粒子については、水中の浮遊物を含むことから、上記1.や2.の過程を経た微粒子や、RPV底部からPCV底部にかけて存在する燃料デブリからの剥離物である可能性あり。



炉内状況推定図<sup>[3]</sup>及びサンプル採取箇所

##### ◆燃料デブリの生成条件・性状推定

- RPV底部からPCV底部にかけて、金属／酸化物との混合物、微粒子の凝集物となった燃料デブリが存在するものと推定。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-5) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 まとめ

99

#### 【燃料デブリの生成過程の検討】

PCV内外で採取された付着物・堆積物サンプルを用いて、U・Csを含む微粒子の詳細分析結果より各粒子の生成条件を評価するとともに、燃料由来成分の移行挙動（Uとの帯同性）や既存の事故進展シナリオ等の情報から微粒子の放出源を推定し、燃料デブリの生成過程について検討を行った。

号機ごとの傾向は以下の通り。

#### －2号機－

[p.84参照](#)

- PCV貫通部及びPCV外（ウェル差圧調整ライン）でのU粒子の特徴から、その放出源と推定されるRPV底部からペDESTAL内の領域にかけて、 $(U,Zr)O_2$ とFe-Cr酸化物の混合物の存在が示唆される。
- ペDESTAL底部に落下したとされる金属質な燃料デブリの性状には不明点が多いが、SUSの水蒸気酸化を経ている場合、Fe-Ni基合金のように、粘り気のある金属相を含んでいる可能性がある。
- ペDESTAL外（D/W床面）にも、燃料デブリ起源の微粒子が及んでいる可能性がある。

#### －1号機－

[p.94参照](#)

- PCV底部には、酸化物融体がゆっくり冷えてできた $(U,Zr)O_2$ 、 $(Zr,U)O_2$ を含むと推定される。

#### －3号機－

[p.98参照](#)

- RPV底部からPCV底部にかけて、金属／酸化物との混合物、微粒子の凝集物が存在すると推定される。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

### (a-5) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定 まとめ

100

### 【サンプル取得箇所汚染状況の把握】

サンプル中の堆積物・付着物の主要構成成分、主要放射性核種、主要構成相を把握し、本事業で分析対象としたサンプル取得箇所の汚染状況について情報を得た。

号機ごとの特徴は以下の通り。

#### －2号機－

- 2号機のPCV貫通部（X-6ペネ）では、ケーブル被覆や鋼材の錆成分が多く堆積する中に、大粒径（数十 $\mu\text{m}$ ）のU粒子を含有。その近傍の貫通部（X-53ペネ）でもU粒子を確認。  
⇒ 燃料デブリ起源の微粒子がペDESTAL外にも及んでいる可能性を示唆。
- 2号機のPCV外のサンプル採取箇所（ウェル差圧調整ライン）では、Cs、Sb、Mo、Agといった揮発性のFP核種がUよりも高い割合で到達。低揮発性とされる $^{154}\text{Eu}$ はUと帯同しての移行を示唆。

#### －1号機－

- 1号機PCV底部堆積物（2017年採取試料の追加分析）は、Feを主成分とする他、Pb、Sb、ZnといったPCVの上部構造物（遮蔽材、計装材料、塗料）の成分を検出。U濃度の少ないZr-richな粒子を含んでいる。

#### －3号機－

- 水中より採取したサンプル中（PCV内部調査装置付着物）に含まれるU粒子は、二酸化物（ $\text{UO}_2$ 、 $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ ）として存在。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化 (a)分析データの解析

(a-5) サンプル分析データに基づく燃料デブリの性状推定  
まとめ

101

### 【将来的な燃料デブリ分析に向けた課題への対応】

未知試料を対象とした場合の既存分析・評価技術の改善点の確認及び実践

- 粒子内部の（金属／酸化物の判定を含む）組成・結晶構造評価の高精度化（TEM分析）
  - ✓ TEM/STEM-EDX分析における酸素定量法については、前事業※<sup>1</sup>で改良された手法（ゼータ因子法）を本事業の分析においても適用することにより、酸素濃度の定量精度の向上が図られた。
  - ✓ さらに、電子線回折において複数方位での回折パターンを取得（従来は1方位のみ）することで結晶構造解析の確度を高めるとともに、前述のEDXの結果との組み合わせにより、金属／酸化物の判定を問題なく行うことができるようになった。
- 含有元素の同定過程の明確化（EDX、WDX分析）
  - ✓ 前事業※<sup>1</sup>で示されたデータ処理の方針に従い、特性X線のオーバーラップやバックグラウンドレベルの変動に留意しつつ、元素ごとに有無の判定を行った。
  - ✓ 各元素の特性X線像上の輝点について分析者がスペクトルを確認しつつ、その元素の有無に係る判定結果を明記した。
- 定量分析値の不確かさとその評価過程の明確化（化学分析）
  - ✓ 分析精度向上事業※<sup>2</sup>において分析機関間で共有された不確かさ評価の考え方に従い、影響の大きな不確かさ要因を考慮し、合成不確かさの評価結果を分析値に付記した。
  - ✓ サンプルの溶解については、硝酸への微量のフッ酸添加により、溶解条件（温度、時間）の調節により溶解率を高めるとともに、溶解前後での溶解液の外観、サンプルの質量変化、 $\gamma$ 核種の放射能の変化を確認し、溶解率を評価可能な手法にて実施した。

※<sup>1</sup> 平成30年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発）

※<sup>2</sup> 廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリの分析精度の向上及び熱挙動の推定のための技術開発）

# 6. 実施内容

## (1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

(a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

(b) サンプル分析

② 燃料デブリの性状推定の高度化

(a) 分析データの解析

 (b) 1F試料評価委員会

(c) 燃料デブリ特性リストの改訂

③ 燃料デブリ分析の知見収集及び性状把握のための国際協力

(a) 燃料デブリに関する文献調査、国内外の知見収集、レビュー

(b) 「国際的な議論を行う場」についての検討

④ まとめ

## ②燃料デブリの性状推定の高度化

### (b)1F試料評価委員会、(c)燃料デブリ特性リストの改訂

#### 実施方法

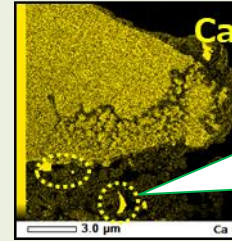
本事業期間中に新たに取得する情報を、debrisWikiに反映する。

#### 実施結果

- 他PJの成果の取り込みとしてdebrisWikiについて、『経年変化特性の推定技術の開発』の概要掲載と当該情報へのリンクアップを行った。
  - 本事業で取得した分析結果及び解析情報について、1F試料評価委員会でのレビューを行い、化学分析でのU/Zr比を指標とした号機間での傾向整理の重要性、その分析値がどの範囲を表すものであるか明記が必要、等のコメントを受け、分析結果の評価方針に反映した。
  - 分析結果については、記載内容の再チェック及び利用者の視点に立った表現の修正を行った。(右図参照)
- ⇒ debrisWikiのコンテンツとして整理し、反映した。

debrisWikiホームページ : <https://fdada-plus.info/wiki/>

#### 再チェックの一例 (2021年度分析データ)

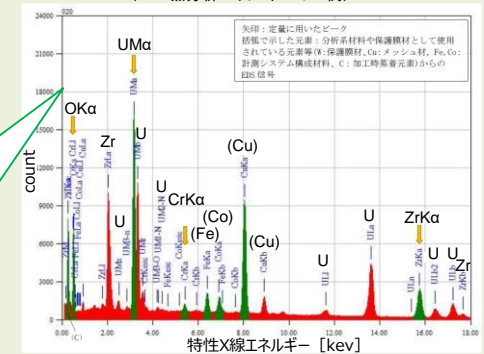


STEM-EDX  
元素分布

測定試料からの信号、  
試料外からの信号  
(システム構成元素や  
メッシュ材など)を区別  
して記載

重元素によるバックグラウンドの上昇や他元素とのオーバーラップにより擬似的に表れる輝点(偽信号)との区別のため、上記影響を考慮して着目元素の濃集箇所を明記

(EDX点分析エネルギーの一例)



STEM-EDX元素同定

分析結果 (編集 | ソースを編集)

2号機 (編集 | ソースを編集)

採取位置	debrisWiki #	TEPCO #	表名	分析種別	採取時期	分析時期	分析結果の信頼性	分析状況	分析結果										PV番号	備考
									U	Zr	U/Zr	IP	SEM	TEM	EDP	分析種別	分析種別	分析種別		
4号機燃料デブリ調査用試料 1	ZPEN2101	←	←	JAEA	2020/12	2021/10	●	スライス機	●	●	●	●	●	●	●	●	●	SRD_R3		
4号機燃料デブリ調査用試料 2	ZPEN2102	←	←	JAEA	2020/12	2021/10	●	スライス機	●	●	●	●	●	●	●	●	●	SRD_R3		
4号機燃料デブリ調査用試料 3	ZPEN2103	←	←	NFD	2020/12	2022/01	●	スライス機	●	●	●	●	●	●	●	●	●	SRD_R3		
原子炉フェリス内調査 フェリス層圧縮ライン焼結物 A	ZWEL2101A	←	←	JAEA	2021/04	2021/10	●	焼結炉	●	●	●	●	●	●	●	●	●	SRD_R3		
原子炉フェリス内調査 フェリス層圧縮ライン焼結物 B	ZWEL2101B	←	←	NFD	2021/04	2022/01	●	焼結炉	●	●	●	●	●	●	●	●	●	SRD_R3		
原子炉フェリス内調査 フェリス層圧縮ライン焼結物 C	ZWEL2101C	←	←	JAEA	2021/04	2021/10	●	焼結炉	●	●	●	●	●	●	●	●	●	SRD_R3		
原子炉フェリス内調査 炉芯ダクト焼結物 A	ZWEL2102A	←	←	←	←	2021/10	●	←	●	●	●	●	●	●	●	●	←	←		
原子炉フェリス内調査 炉芯ダクト焼結物 B	ZWEL2102B	←	←	←	←	2021/10	●	←	●	●	●	●	●	●	●	●	←	←		
原子炉フェリス内調査 炉芯圧縮部 A	ZWEL2103A	←	←	←	←	2021/10	●	←	●	●	●	●	●	●	●	●	←	←		
原子炉フェリス内調査 炉芯圧縮部 B	ZWEL2103B	←	←	←	←	2021/10	●	←	●	●	●	●	●	●	●	●	←	←		

2021年度分析データとして10試料分、  
2022年度分析データとして12試料分を反映。

## ②燃料デブリの性状推定の高度化

### (b)1F試料評価委員会、(c)燃料デブリ特性リストの改訂

#### (参考) debrisWikiの階層構造

debrisWikiホームページ: <https://fdada-plus.info/wiki/>

【背景】燃料デブリの性状データや関連情報は増加の一途となるため、膨大な情報量の中でのデータの検索や着目するデータ相互の比較を容易に行えるようにデータベース化する必要がある。

【実施概要】ウィキペディア方式のデータベースプラットフォームを構築し、本プロジェクトで収集したデータの体系的な整理を進めた。

#### debrisWikiに収録されている分析サンプル

号機	サンプル情報 (採取場所、種類)	採取時期
1号機	原子炉建屋エアロック室 堆積物	2015.12
	PCV底部 堆積物 ←NEW(一部)	2017.4
	X-2ベネ堆積物除去器具 スミアサンプル	2019.5
	アクセスルート構築関連サンプル	2019.6
	オペフロシールドプラグ スミアサンプル	2019.7~8
1/2号機	1号機SGTS室調査試料 ←NEW	2020.12
	SGTS配管スミアサンプル	2020.5
2号機	原子炉建屋オペレーティングフロア 養生シート	2014.3
	TIP配管内 閉塞物	2013.7
	PCV内部調査装置 付着物 (堆積物除去装置)	2017.2
	PCV内部調査装置 付着物 (カメラ部スミア)	2017.1
	PCV内部調査装置 付着物 (シールリングスミア)	2019.2
	PCV外 (トラス室) 滞留水 ろ過物ろ紙	2019.3
	X-6ベネ調査装置 付着物 ←NEW	2020.10
	原子炉ウェル内調査関連サンプル ウェル差圧調整ライン 堆積物 排気ダクト劣化部、点検口表面部 ←NEW	2021.4
	PCV貫通部 (X-53ベネ) ←NEW	2022.8
	シールドプラグ穿孔部堆積物 ←NEW	2021.8
3号機	FHM遠隔操作室スミア ←NEW	2022.7~8
	2号機SGTS室調査試料 ←NEW	2021.1
	PCV内部調査装置 付着物	2017.7
	PCV外 (トラス室) 滞留水ろ過物ろ紙	2019.3
	RHR熱交換器(A)残水 ←NEW	

※ NEW: 本事業 (2021~2022年度) で新たに収録

**炉内状況推定図**

**事故進展の推定**

**既往知見**

**分析方法**

**各種分析結果**

**分析結果一覧**

試料名称	試料ID	採取場所	採取時期	分析項目	分析結果
ウェルプラグ	1u-WELLP-1-2019	1u-4-22-2	2019/7	SEM	...
ウェルプラグ	1u-WELLP-2-2019	1u-4-27-1	2019/7	SEM	...
ウェルプラグ	1u-WELLP-3-2019	1u-4-22-1	2019/7	SEM	...
ウェルプラグ	1u-WELLP-4-2019	1u-4-24-1	2019/7	SEM	...
X-2ベネ堆積物除去器具 (カメラ部)	1u-XCPEN-1-2019	1u-3-22-1	2019/5	SEM	...
X-2ベネ堆積物除去器具 (シールドプラグ)	1u-XCPEN-2-2019	1u-3-22-2	2019/5	SEM	...

#### debrisWikiにおける分析結果や各種情報の収納構造



# 6. 実施内容

## (1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

### ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

(a) サンプルの選定及び輸送、分析準備

(b) サンプル分析

### ② 燃料デブリの性状推定の高度化

(a) 分析データの解析

(b) 1F試料評価委員会

(c) 燃料デブリ特性リストの改訂

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集及び性状把握のための国際協力

(a) 燃料デブリに関する文献調査、国内外の知見収集、レビュー

(b) 「国際的な議論を行う場」についての検討

### ④ まとめ

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

#### (a) 燃料デブリに関する文献等、国内外の新たな知見の収集、レビュー

##### 《実施方法と状況》

- 二つの検索エンジン (ScienceDirect、Google Scholar) を用いて、2019~22年に出版された文献の検索を行った。 【キーワード】 : Fukushima、TMI-2、Chernobyl、fuel debris
- 2022年9月時点で約512件がヒットし、そのうち235件を、燃料デブリの性状(80件)、事故進展(76件)、放射性微粒子挙動(50件)、その他(29件)に分類してリスト化した。
- その他の約277件は、計測-分析技術、再臨界、廃炉ツール(遠隔技術他)、廃炉戦略等、燃料デブリ性状との関連が薄いものであった。

分類	件数	関連分野	まとめ方	
燃料デブリの性状、内部調査	17	燃料デブリの性状	リスト化 (文献情報)	
燃料デブリの変化 (腐食、溶出、経年他)	26			
物性・熱力学	37			
事故進展、シビアアクシデント	76	事故進展		
環境モニタリング、エアロゾル	50	放射性微粒子挙動		
燃料デブリ回収技術 (工法)	16	燃料デブリその他		
水素の生成・反応	13			
燃料デブリ回収技術 (工法以外)	5	その他1F		表題のみリスト化
解析手法	6			
計測・分析技術	88			
再臨界 (解析他)	41			
廃炉ツール (遠隔技術他)	44			
廃炉戦略	57			
その他	37			

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

#### (b) 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討

##### 《想定される成果》

- OECD/NEAの国際協カプロジェクトは、これまでに大きな成果を上げており<sup>[1][2]</sup>、今後も廃炉プロジェクトへの貢献が想定される。
- このため、新たな国際協力として、今後、我が国で取得される分析データや炉内調査結果を用いた国際共同解析の枠組みを目指す。

##### 《これまでの経緯》

- CSNI の「1F事故後の安全研究検討に関する上級専門家グループ（SEG-SAREF）」において、2つの短期プロジェクト（格納容器や原子炉建屋内情報の分析に係わるARC-F及び燃料デブリ分析の予備検討に係わるPreADES）が提案された。
- ARC-FはJAEA安全研究センター（NSRC）が、PreADESはJAEA廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）が実施機関を務め、当初の目的を達成して2021年12月に終了した。
- 両プロジェクトの参加機関のほとんどは、安全研究及び廃止措置両面の観点から1F事故分析の重要性を認識し、両プロジェクトの後継プロジェクトを立ち上げることに賛同するとともに、プロジェクトの一本化を強く主張した。また、両プロジェクトを実施している期間において、除染等の進展により1F施設へのアクセス性が向上し、新たな情報やデータが蓄積されつつあった。

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

#### (b) 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討

##### 《R4年度までの実施結果》

- 後継プロジェクトの立ち上げにあたり、NEA、国内ステークホルダー（NRA、METI、東京電力、JAEA）の間でプロジェクトの一本化に向けた調整を進め、各国の参加機関との協議を経て、NRAの全体統括の下にJAEAがOAとして入る体制で実施することが合意された。
- その後、計画の具体化を図り、プロジェクトの名称をFACEとすること、主要スコープ、主要タスク案、スケジュール及び資金計画について合意した。
- 前項の計画案を10/26-27のCSNI/PRG会合を経て、12/8-9のCSNI会合に諮り、承認を受けた。
- JAEAは、NEA及び国内関係機関（NRA、東京電力、NDF、IRID等）と調整し、キックオフ会議に向けた調整（タスク内容、役割、予算、機関等）を実施。
- 2022年7月にキックオフ会合（7/11-13・パリ）を実施。
- 2023年2月に第2回会合（2/8-10・東京）を実施。

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

#### (b) 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討

#### FACEプロジェクトの概要

#### 目的

- FACEプロジェクトは、BSAF、BSAF2、PreADES、ARC-Fの建設的な拡張を考慮したものとする。主要目的を以下に示す。
  - ①シビアアクシデント対策の効果を考慮して事故シナリオの解析を精緻化する。
  - ②シビアアクシデント解析手法の現能力及び更なる改善の方向性を明確にする。
  - ③1Fから採取されたウラン含有粒子の分析結果を解釈するとともに、将来の燃料デブリ分析に係わる技術や手順を検討する。
  - ④1Fの廃止措置に係わる課題の解決及び原子炉安全性の向上に向けて、データ、情報、専門知を共有すべく、我が国の機関と国外機関とのコミュニケーションチャンネルを維持する。

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

#### (b) 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討

#### FACEプロジェクトの概要

#### 主要スコープ

- **スコープ1 :核分裂生成物の移行挙動や水素爆発を含む事故進展に係わる詳細な検討**
  - 近年の1F調査（NRAや東京電力による調査・分析活動等）を通じて得られた技術的知見の解釈
  - 境界条件の不確かさを含めたシビアアクシデント解析（炉心溶融進展、溶融炉心／コンクリート相互作用、FP及び水素挙動等）における不確かさの定量化
- **スコープ2 :原子炉建屋等から採取されたウラン含有粒子の特性評価及び廃止措置に向けた燃料デブリ分析技術の構築**
  - 想定されるウラン含有粒子生成メカニズムの検討
  - 燃料デブリ模擬物を用いた国際ラウンドロビン分析
  - 炉心溶融進展の理解
- **スコープ3 :データ及び情報の収集及び共有**

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

111

#### (b) 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討

#### FACEプロジェクトの概要

#### タスク候補 (1/3)

##### ・ タスク1

- 1a : 従来の過酷事故解析において未検討もしくは十分にモデル化されていなかったソースタームやFP分布に係る最近の重要知見についての検討
- 1b : 予防措置や活動に資するための原子炉建屋内における水素燃焼についての更なる理解促進
- 1c : 感度解析やベンチマークスタディを通じた過酷事故シナリオやその現象の解析における不確実さの定量化及び低減化
- 1d : 主要FPの放出タイミングについて、遅発放出 (数週間) を含めた予測精度の向上

##### ・ タスク2

- 2a : 事故進展及び燃料デブリの性状推定に向けた1 F サンプル中に確認されたU粒子の生成メカニズムの評価
- 2b : 燃料デブリの分析の標準化及び評価手法の確立 (国際ラウンドロビンを含む)
- 2c : 燃料デブリの取り出し時に発生する放射性微粒子の挙動評価

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

#### (b) 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討

#### FACEプロジェクトの概要

#### タスク候補 (2/3)

##### • タスク3

- 3a : スコープ1、2のタスク等に提供するものを含む、主に日本国内機関のアクティビティで得られたデータや情報の整理
  - 3b : 事故シナリオや廃炉関連課題に必要なデータや情報についての追加議論
- 
- JAEAは、国内関係機関（NRA、東京電力、NDF、IRID等）と調整し、情報提供を受け、スコープ3のタスクを実施する。その際には、プロジェクト参加機関の意向を踏まえて、スコープ1及び2のタスクに必要な情報を優先的に収集・共有する。



### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

#### (b) 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討

#### FACEプロジェクトの概要

#### タスク候補 (3/3)

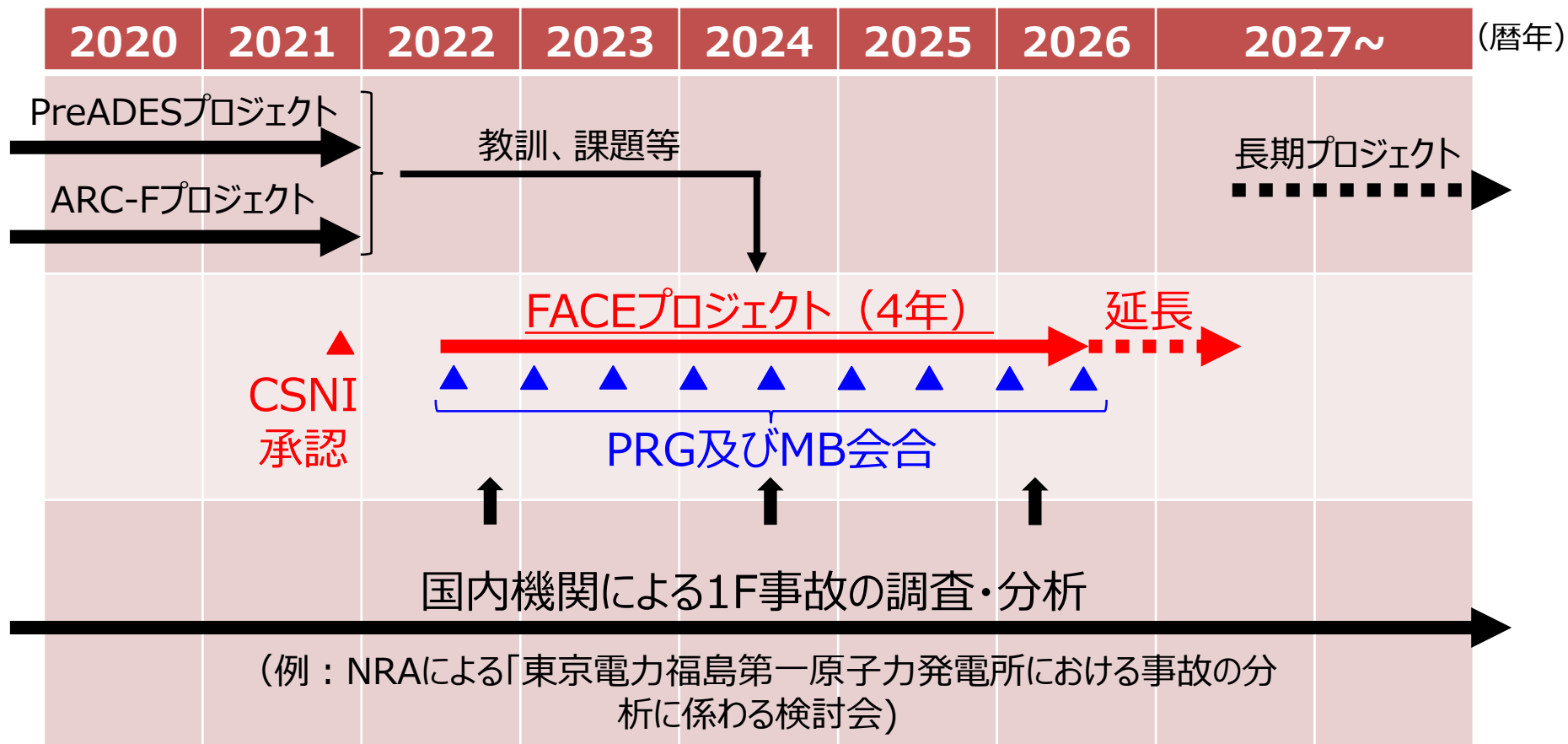
- **模擬燃料デブリを用いた国際共同分析オプション** (Round-robin analysis)
  - **狙い**
    - 燃料デブリ分析における不確からしさの理解と能力向上
    - サンプル取扱いの訓練と共通サンプルを用いた参画機関の分析能力評価の機会の設定
    - 燃料デブリ分析に係る知見の充実化
  - **実施タスク**
    - 過酷事故に係る試験で得たサンプルを用いた国際共同分析
    - 燃料デブリ分析に係る情報交換のためのシンポジウム開催

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

#### (b) 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討

##### FACEプロジェクトの概要

##### スケジュール案

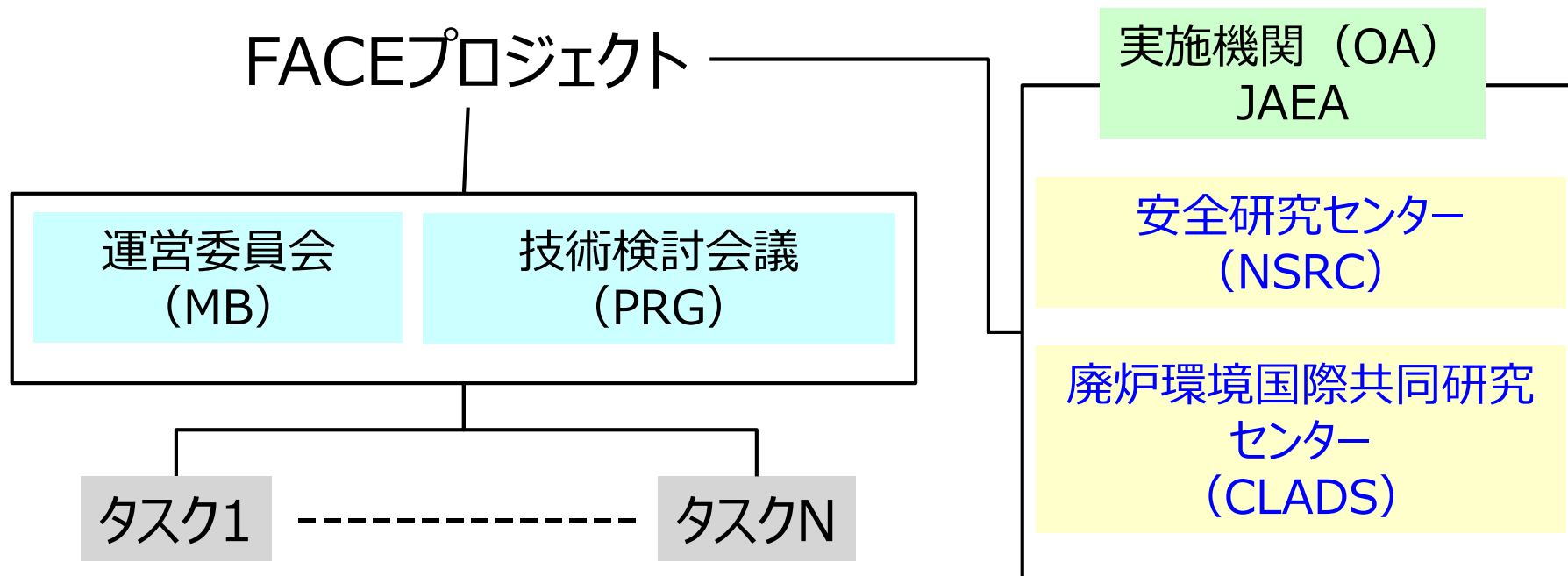


JAEAの協力例：1Fから採取した多様な試料の分析、PCVベントに係わる熱流動解析、PCV内有機物質（ケーブルや断熱材）の熱分解及び生成物分析

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

(b) 燃料デブリの分析及び性状推定に係る国際的な議論の場についての検討

#### FACEプロジェクトの構造



#### 参加予定機関：23機関（12ヶ国）

CNL（カナダ）、JRC（欧州委員会）、STUK及びVTT（フィンランド）、CEA及びIRSN（フランス）、GRS（ドイツ）、KAERI及びKINS（韓国）、CSN（スペイン）、SSM（スウェーデン）、PSI（スイス）、ISP/NPP/UNAS（ウクライナ）、NNL（イギリス）、DOE、EPRI及びNRC（米国）、CRIEPI、IAE、NRA、METI、NDF及びJAEA（日本）

技術専門家（TE）  
（東京電力、東大等）  
主要な国内機関がFACEプロジェクトに貢献

# 6. 実施内容

## (1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

- ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析
  - (a) サンプルの選定及び輸送、分析準備
  - (b) サンプル分析
- ② 燃料デブリの性状推定の高度化
  - (a) 分析データの解析
  - (b) 1F試料評価委員会
  - (c) 燃料デブリ特性リストの改訂
- ③ 燃料デブリ分析の知見収集及び性状把握のための国際協力
  - (a) 燃料デブリに関する文献調査、国内外の知見収集、レビュー
  - (b) 「国際的な議論を行う場」についての検討



### ④ まとめ

## ④ まとめ

### ① 得られる燃料デブリサンプル等の分析

- 2021年度輸送サンプルとして、2号機のX-6ペネ調査及び原子炉ウェル内調査で得た4種類のサンプル（調査装置付着物、ウェル差圧調整ライン堆積物、排気ダクト劣化部、点検口表面部）を大洗の分析施設（JAEA, NFD）に受入れて分析を実施した。
- 2022年度輸送サンプルとして、2号機の試験的取り出し準備及び1～3号機の内部調査の過程で得た6種類のサンプル（2号機-PCV貫通部（X-53ペネ）、同-FHM遠隔操作室スミア、同-シールドプラグ穿孔内堆積物、1号機・2号機-SGTS室調査試料、3号機-RHR熱交換器残水）を、大洗の分析施設（JAEA, NFD）に受入れて分析を実施した。

### ② 燃料デブリの性状推定の高度化

- 上記①のサンプル分析に関し、着眼点等の予備的な検討を経て分析計画を策定した。
- 2021年度及び2022年度に取得した分析データを用いて、燃料デブリの性状推定に向けた各サンプルの由来・起源・生成過程の推定を進めた。
- R3年度に取得した分析及び評価結果について、記載内容の再チェックと改善を行った。

### ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

- 2019～22年に出版された関連文献の検索を行い、結果をカテゴリ分けしてリスト化した。
- OECD/NEAのPreADESとARC-Fの後継プロジェクト（FACE）の立ち上げに向けた国内外の調整を進め、R4年7月にキックオフ会議を実施した。燃料デブリの分析等に係る新たな国際的な枠組みが構築された。

# 主な専門用語、略語等の説明(1)

略語	説明
1F	東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所
AGF	日本原子力研究開発機構大洗研究所 照射燃料試験施設 (Alfa-Gamma Facility)
BSAF	福島第一原子力発電所の事故進展解析に係るOECD/NEAの研究プロジェクト (Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project)
CSNI	OECD/NEAの原子力施設安全委員会 (Committee on the Safety of Nuclear Installations)
D/W	ドライウェル (Dry-Well) : 原子炉格納容器のうち、原子炉圧力容器等を格納するフラスコ型容器
EDX	エネルギー分散型X線分析 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
FACE	Fukushima Daiichi NPS Accident Information Collection and Evaluation
FE-SEM	電界放出型走査電子顕微鏡 (Field Emission Scanning Electron Microscopes)
FHM	燃料交換機 (Fuel Handling Machine)
FMF	日本原子力研究開発機構大洗研究所 照射燃料集集体試験施設 (Fuels Monitoring Facility)
FP	核分裂生成物 (Fission Product)
ICP-MS	誘導結合プラズマ質量分析装置 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)
IP	イメージングプレート (Imaging Plate)
MB	運営委員会 (Managing Board)
MCCI	溶融炉心・コンクリート反応 (Molten Core Concrete Interaction)
NDF	原子力損害賠償・廃炉等支援機構 (Nuclear Damage Compensation Facilitation Corporation)

略語	説明
NFD	日本核燃料開発株式会社 (Nippon Nuclear Fuel Development Co., Ltd.)
NRA	原子力規制委員会 (Nuclear Regulation Authority)
OA	オペレーティングエージェント (Operating Agent)
PCV	原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel)
PJ	プロジェクト (ProJect)
PRG	技術検討会議 (Program Review Group)
R/B	原子炉建屋 (Reactor Building)
RHR	残留熱除去設備 (Residual Heat Removal system)
RPV	原子炉圧力容器 (Reactor Pressure Vessel)
SEI	二次電子像 (Secondary Electron Image)
SEM	走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope)
SGTS	非常用ガス処理系 (Standby Gas Treatment System)
STEM	走査型透過電子顕微鏡 (Scanning Transmission Electron Microscope)
TEM	透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope)
TF	タスクフォース (Task Force)
TMI-2	スリーマイル島原子力発電所2号機 (Three Mile Island Unit-2)
TRL	技術成熟度レベル (Technology Readiness Levels)
WDX	波長分散型X線分析 (Wavelength Dispersive X-ray Spectrometry)
オペフロ	オペレーションフロア。原子炉建屋オペフロは、原子炉建屋の最上階で、ここで定期検査時には燃料交換作業などが行われる。
ペネ	ペネトレーション (原子炉格納容器の貫通部)

END