

平成29年度補正予算

廃炉・汚染水対策事業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)

2019年度実施分成果報告

2020年9月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
(IRID)

目次

1. 研究の背景・目的
2. 目標
3. 実施項目とその関連、他研究との関連
4. 実施スケジュール
5. 実施体制
6. 実施内容

1. 研究の背景・目的

研究の背景

福島第一原子力発電所（1F）事故後、スリーマイル島原子力発電所2号機（TMI-2）事故情報、シビアアクシデント（SA）研究情報等の知見および1F事故情報の調査、整理

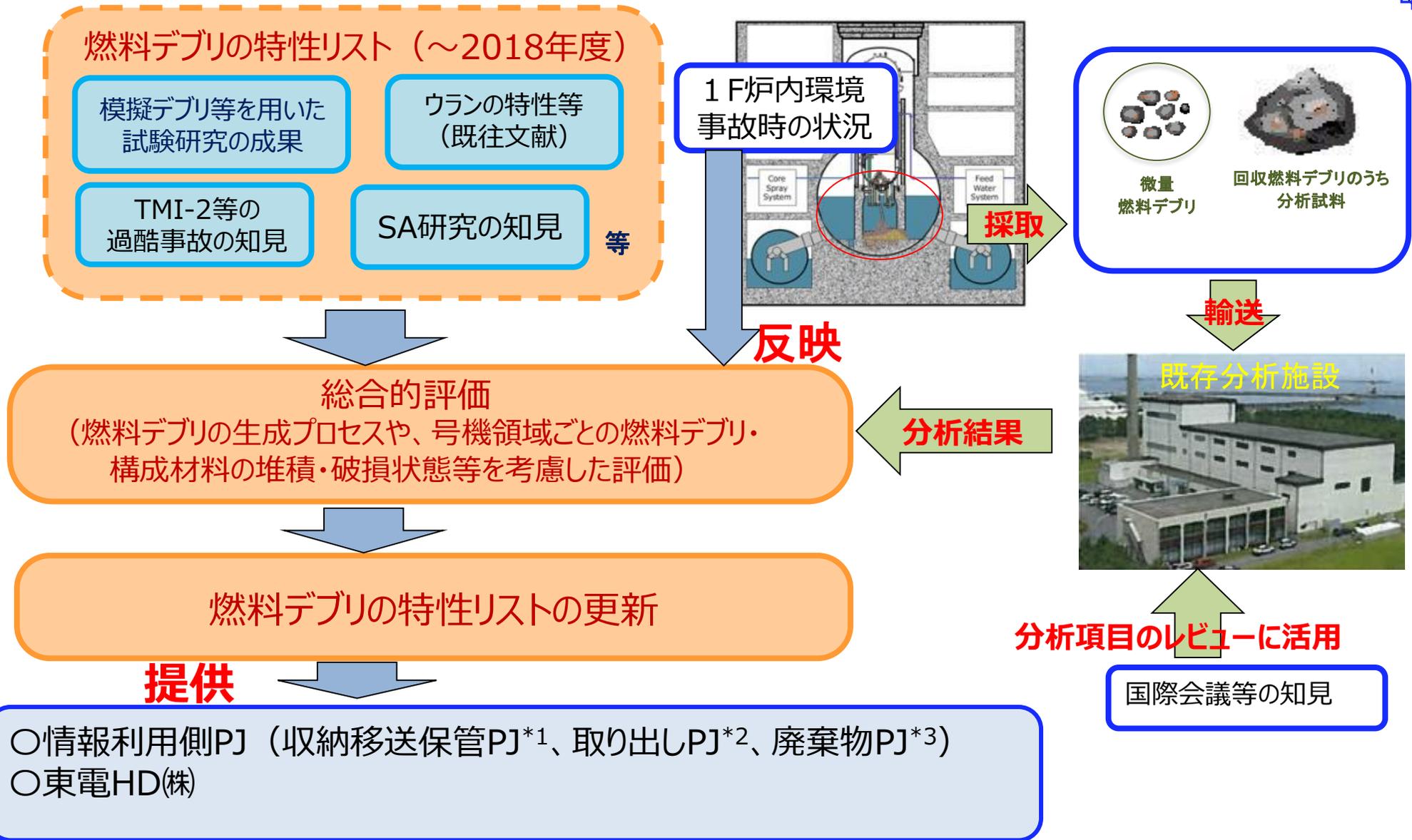
- ✓ TMI-2事件事例や海外のSA研究では**沸騰水型原子炉（BWR）に関する知見が少ない。**
- ✓ 海水影響や溶融炉心・コンクリート反応等の**1F特有事象に関する燃料デブリ情報が少ない。**



- 廃炉（取り出し、臨界管理、収納・移送・保管、計量管理、最終的取扱）を安全・着実、かつ迅速に実施するためには、廃炉作業の**技術開発に利用できる燃料デブリ情報の整理とその拡充が必要である。**
- これまでは、既存の国内外の知見や模擬物質等を用いた研究開発を基に燃料デブリ情報を推定してきたが、2021年内に燃料デブリの試験的な取り出しが開始され、**今後は実際の燃料デブリから情報が得られる見込みである。**
- 初期に得られる燃料デブリ試料は量的な観点や採取場所的な観点において極めて限定的であり、**そこから如何にして有効な情報を引き出すかが、今後の廃炉作業を進めていくにあたり重要である。**
- 1Fの格納容器の内部調査において採取された堆積物や調査装置の付着物などの分析を行った結果、ウランを含有する微粒子が検出され、この**ウラン含有微粒子を詳細に調べることによって、燃料デブリの性状を推定できることがわかってきた。**

1. 研究の背景・目的

(1) 燃料デブリ性状の推定の分析に必要な技術開発等



*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

1. 研究の背景・目的

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

2021年より初号機の燃料デブリ取り出しが開始される。初期は小規模であると想定されるが、徐々に規模を拡大し燃料デブリの取り出し作業が行われていくものと考えられる。

本格的な燃料デブリの取り出し作業において、多量の燃料デブリを扱う際に発生する微粒子によって、作業環境が悪化したり、閉じ込め対策が十分ではなく環境へ漏えいしたりすることで作業員や一般公衆の被ばく量が著しく増加するリスクがある。

適切な閉じ込め方法や、作業環境管理の方法を検討するにあたり、燃料デブリを由来とする微粒子の挙動を推定することが重要である。

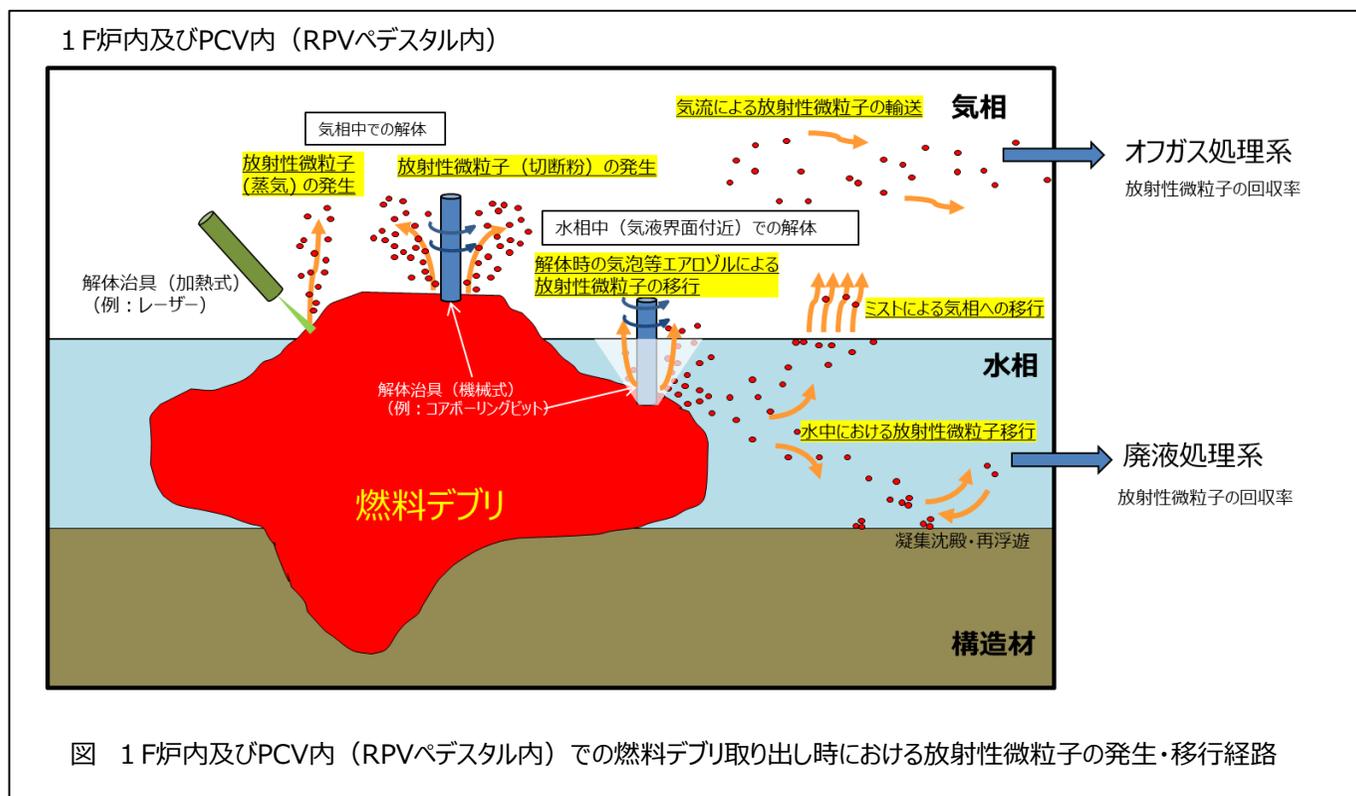
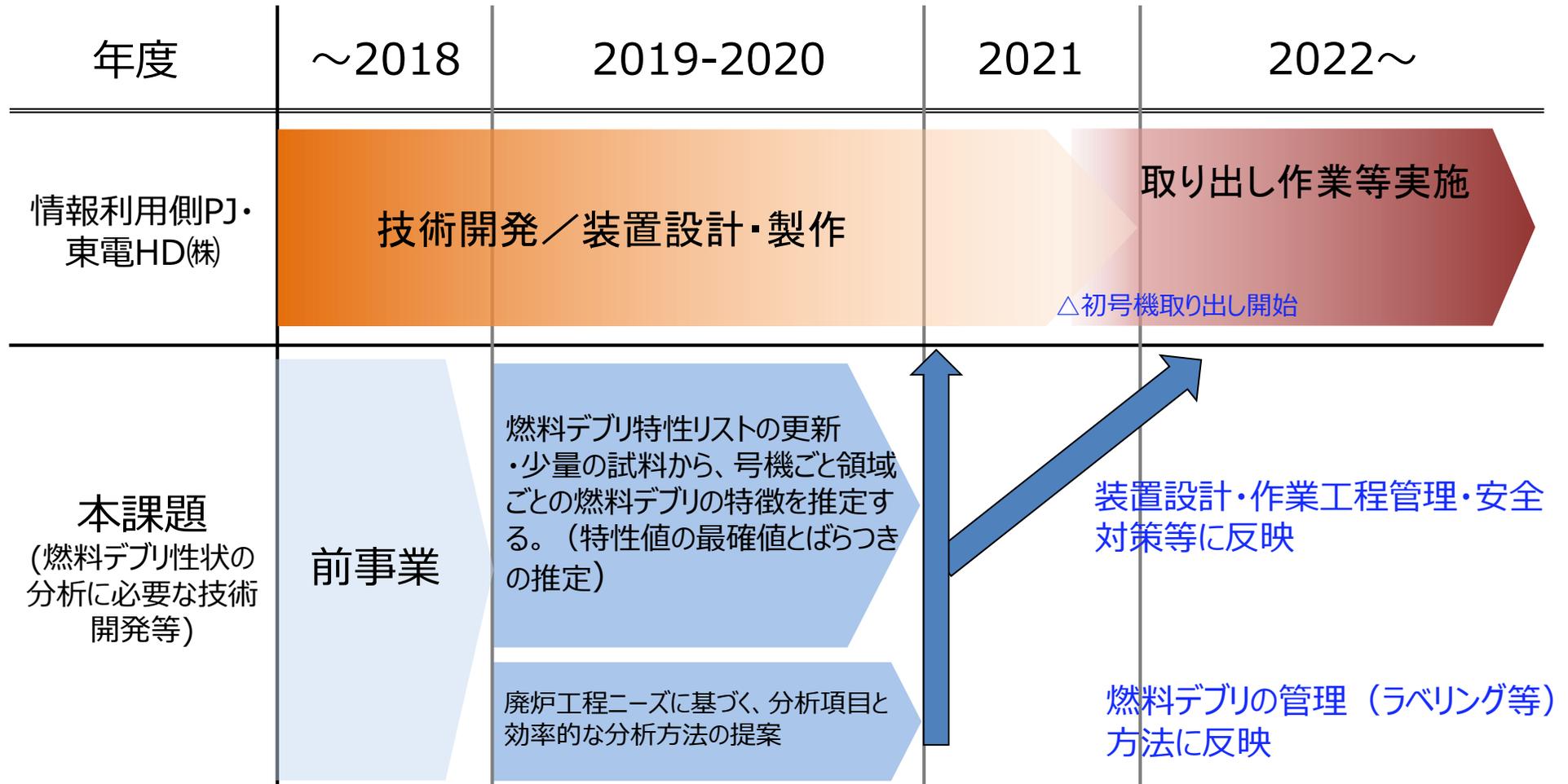


図 1 F炉内及びPCV内 (RPVペダスタル内) での燃料デブリ取り出し時における放射性微粒子の発生・移行経路

2. 目標

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

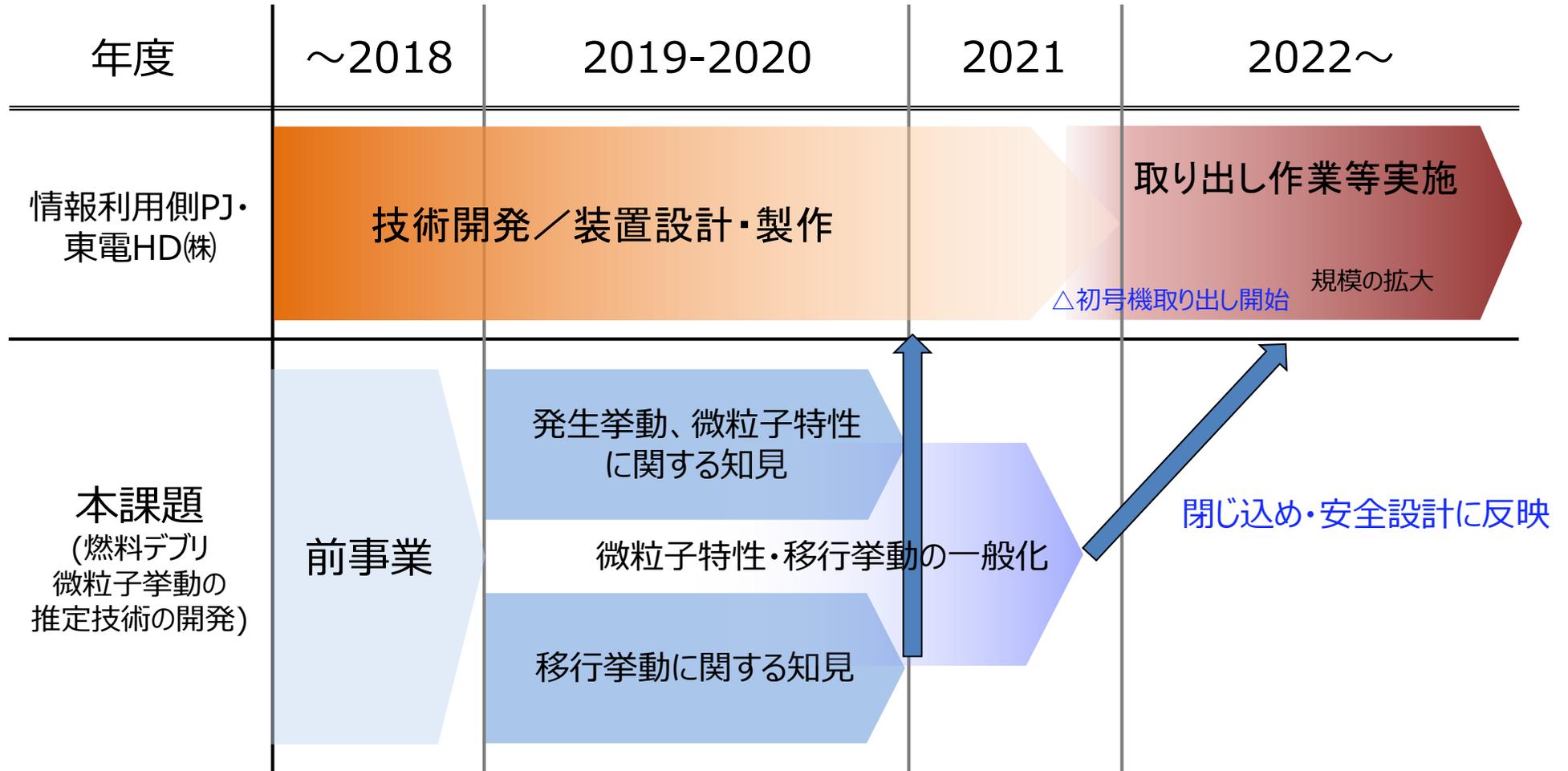
“廃炉に向けたロードマップ”と本課題の関係



2. 目標

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

“廃炉に向けたロードマップ”と本課題の関係



4. 実施スケジュール (2019年度) (その1)

3月末時点

項目	2019年度												備考
	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) 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及び分析効率化の検討	サンプル輸送準備/分析準備												
	分析準備	▼ サンプルの輸送 ▼											
	分析実施	▼ 分析終了 ▼											
	分析効率化検討	▼ 検討終了 ▼											
成果とりまとめ	▼ 分析終了 ▼												
② 燃料デブリの性状推定の高度化	内部調査結果・文献調査	▼ 調査終了 ▼											
	専門家会議による議論	▼ 議論終了 ▼											
	成果とりまとめ・特性リスト改訂	▼ 検討終了 ▼											
③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力	分析項目検討・レビュー	▼ 検討終了 ▼											
(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発													
① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動													
①-1. ウラン含有模擬デブリを用いた粒子生成に関する大型試験	契約手続き	▼ 契約 ▼											
	試験実施	加熱・機械的加工試験装置の製作・据付終了 ▼											
	成果とりまとめ	加熱・機械的加工試験装置の製作・据付終了 ▼											
①-2. 粒子生成挙動に係る基礎試験	試験準備	▼ コールド試験準備終了 ▼					▼ ホット試験準備終了 ▼						
	試験実施	▼ コールド試験の実施 ▼					▼ ホット試験の実施 ▼					▼ 試験の終了 ▼	
	成果とりまとめ	▼ コールド試験の実施 ▼					▼ ホット試験の実施 ▼					▼ 試験の終了 ▼	

黒：計画
赤：実績

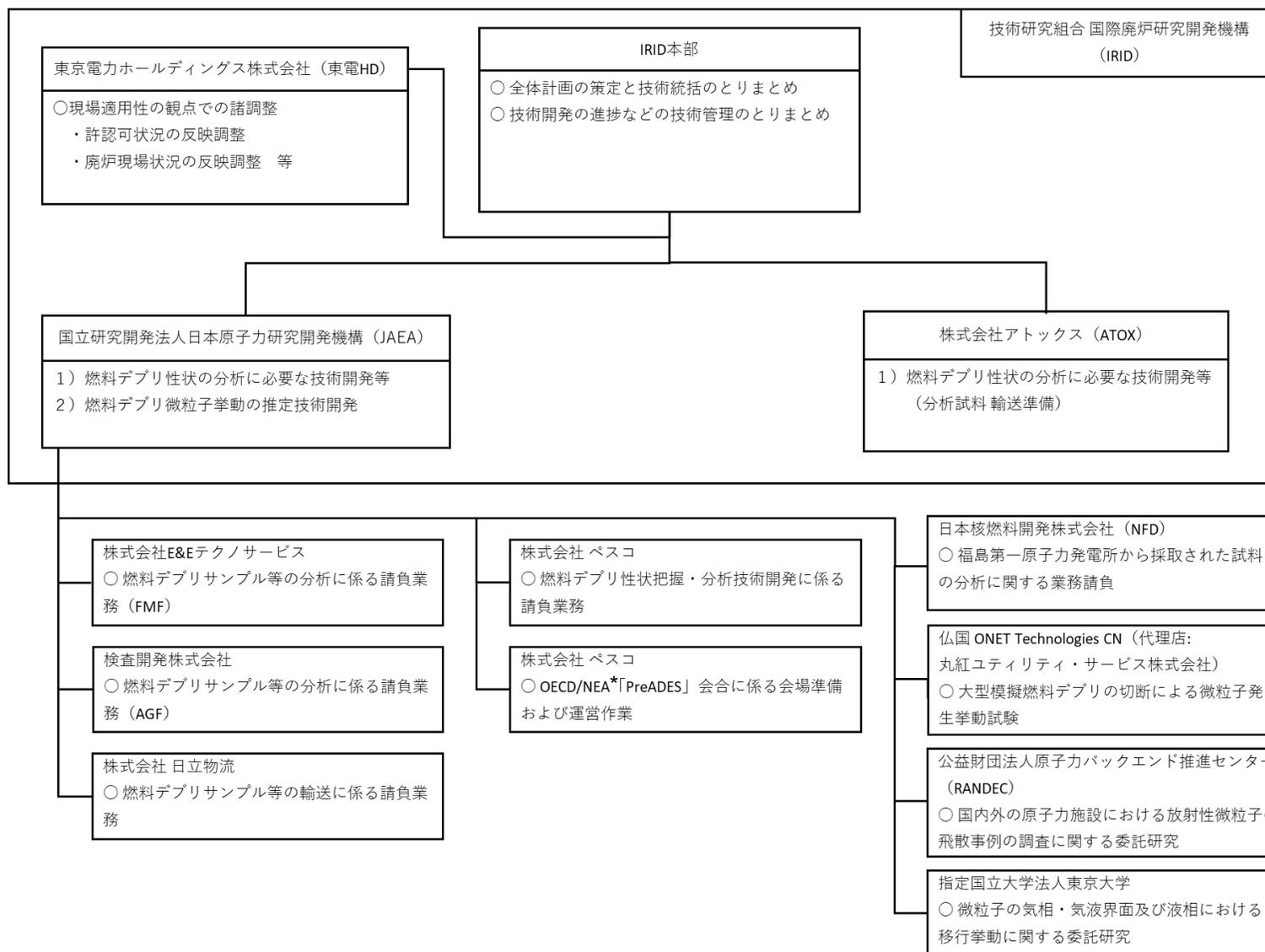
4. 実施スケジュール (2019年度) (その2)

3月末時点

項目	2019年度												備考			
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月				
(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発																
①-3 国内外の原子力施設における放射性粒子の飛散事例の調査	契約手続き			▼契約												
	国内調査			▼契約	国内情報調査・整理							▼調査終了				
	海外調査									海外情報調査・整理		▼調査終了				
	成果とりまとめ											▼調査終了				
② 微粒子の気相・気液界面及び液相における移行挙動																
②-1 気相・気液界面における微粒子挙動評価	準備・調達			▼契約												
	試験実施			▼契約			試験準備終了	移行率測定試験の実施		移行率測定試験の終了						
	成果とりまとめ									移行率測定試験の実施		移行率測定試験の終了				
②-2 液相における微粒子挙動評価	準備・調達			▼契約												
	試験実施			▼契約			試験準備終了	沈降率測定試験の実施		沈降率測定試験の終了						
	成果とりまとめ									沈降率測定試験の実施		沈降率測定試験の終了				
とりまとめ										全体とりまとめ						
主要なマイルストーン										第1回中間報告会 ▲ (10/3)			第2回中間報告会 ▲ (4/20予定)			

黒：計画
赤：実績

5. 実施体制（2019年度）



*PreADES:燃料デブリの分析に関する予備的研究(Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris)

6. 実施内容

2019年度実施成果について

(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及び分析効率化の検討
- ② 燃料デブリの性状推定の高度化
- ③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

- ① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動
 - ①-1. ウラン含有模擬デブリを用いた粒子生成に関する大型試験
 - ①-2. 粒子生成挙動に係る基礎試験
 - ①-3. 国内外の原子力施設における放射性微粒子の飛散事例の調査【RANDEC】
- ② 微粒子の気相・気液界面及び液相における移行挙動 【東大】（2019～2020年度）
 - ②-1. 気相・気液界面における微粒子挙動評価
 - ②-2. 液相における微粒子挙動評価

燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等 全体計画

① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

a. 福島第一原子力発電所から対象となる分析サンプルの輸送及び分析。

内部調査時の炉内付着物、堆積物サンプル 【2019年度】

少量サンプリング試料（燃料デブリサンプリング） 【2020年度】

b. 分析効率化の検討 【2019年度】

② 燃料デブリの性状推定の高度化

①の結果等に基づく専門家会議による領域ごとの燃料デブリの特性の評価、及び領域ごとの「燃料デブリ特性リスト」の改訂。 【2019年度、2020年度】

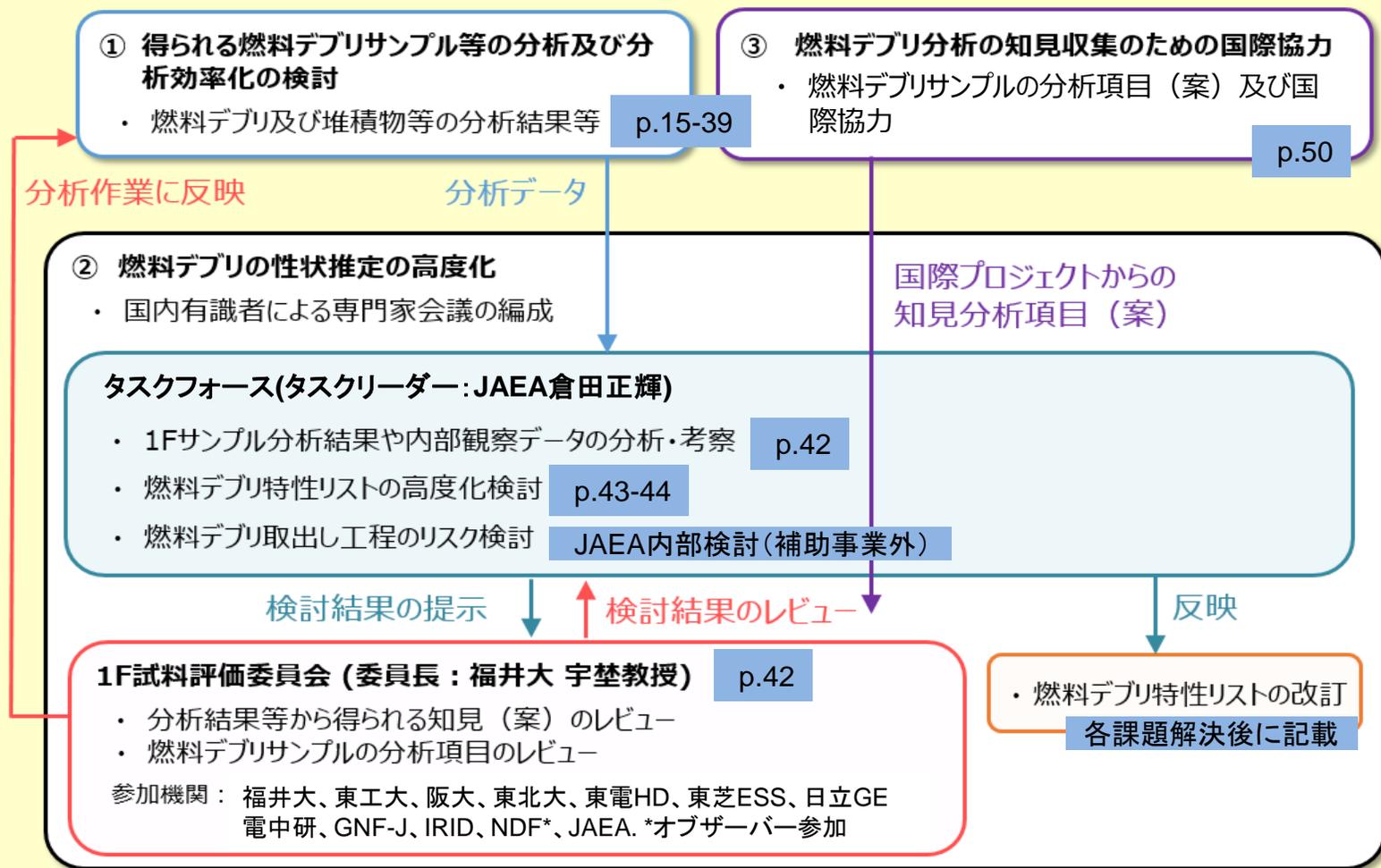
③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

①b. で実施する燃料デブリサンプルの分析項目について、OECD/NEAにおける国際会議の知見も取り込んだ専門家会議によるレビュー。

【2019年度】

注) 下線部については関連性が高いため、まとめて報告 (→46-50ページ)

各課題の位置づけ、目的及び相関関係（全体としてのアウトプットのイメージ）



(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及び分析効率化の検討

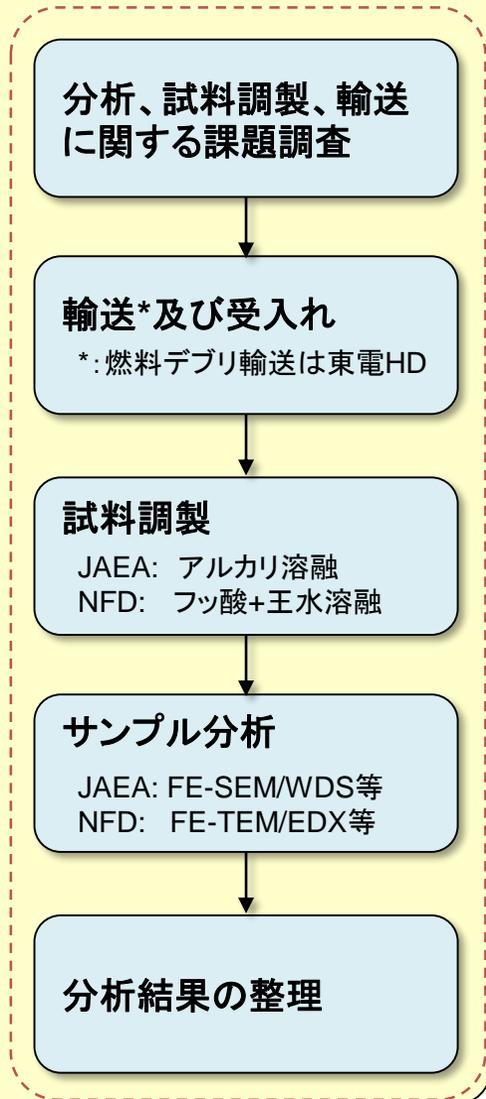
2019年度計画

1. 燃料デブリサンプル等の分析

- 以下のサンプルを大洗地区ホットラボに輸送し、破壊・非破壊分析を実施（右図）
 - a. 2018年度下期に実施した2号機調査時のPCV挿入装置の**スミアサンプル**
 - b. 2019年上期に実施予定の1号機内部調査にて採取される**堆積物サンプル**
 - c. 昨年度までの輸送済みサンプルによる追加分析（分析法確認、難溶物の分析等）
- 分析結果の系統的な整理
 - i. サンプル中の測定部位ごとのデータ（組成、元素マップ）をリスト化
 - ii. U:Zr比、(U+Zr):Fe比、各種FPのU濃度に対する規格化、など

2. 分析効率化の検討

燃料デブリの最初の試験的取り出しサンプルに対する、効率的な分析方法について、NDFや東電HDなど関係者の意見を聴取、ケーススタディを実施。（検討結果については49、50ページ）



(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

16

① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討 -2019年度実績-

1. 燃料デブリサンプル等の分析

▶大洗地区ホットラボで、以下の破壊・非破壊分析を実施

- a. 2018年度下期に実施した2号機調査時のPCV挿入装置のスミアサンプル（一部実施#1）
- b. 2019年度上期に実施予定の1号機内部調査にて採取される堆積物サンプル（未実施#2）
- c. 昨年度までの輸送済みサンプルによる追加分析（分析法確認、難溶物の分析等）
 - ・ 2号機オペフロ養生シートの難溶物のSEM/EDX分析（実施）、1,2号機のPCV内部サンプル難溶物のアルカリ融解処理及び分析（未実施#3）
 - ・ コールド試験によるGd分離法の確認（実施）
- d. 追加試料の分析（東電の要望に基づいて新たに実施）
 - ・ 1号機 X-2ペネ堆積物除去治具スミア、オペフロウェルプラグスミア
 - ・ 2号機 トーラス室内滞留水ろ過物ろ紙
 - ・ 3号機 トーラス室内滞留水ろ過物ろ紙
- e. U同位体比に関する分析精度の確認、Gd分離法の確認（実施）

#1サンプル搬入時期が遅れたため

#21号機内部調査が実施されなかったため

#3トラブルの水平展開によりセル・グローブボックスの作業再開が遅れたため

▶分析結果の系統的な整理

- i. サンプル中の測定部位ごとのデータ（組成、元素マップ）をリスト化
- ii. U:Zr比、(U+Zr):Fe比、各種FPのU濃度に対する規格化

(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及び分析効率化の検討

試料の採取位置と分析内容 (2019年度当初の計画)

● : 2017・2018年度分析実施済み
○ : 2019年度分析実施*

分析施設	測定項目	1号機			2号機					3号機	
		PCV内		PCV外	PCV内		PCV外			PCV内	
		D/W泥状サンプル	D/W堆積物サンプル	エアロック室サンプル	CRD交換レール領域調査時付着物サンプル	ペDESTAL内調査時付着物サンプル	PCV内調査時付着物サンプル	TIP付着サンプル	オペフロ養生シート	オペフロ側壁コンクリート及び周辺スミアサンプル	ペDESTAL内調査時付着物サンプル
JAEA	イメージプレート	●	○	●	●	●	○	●	●	●	●
	FE-SEM(全体像)	●	○	●	●	●	○	●	●	●	●
	α核種分析	●	○	●	●		○	●	●		●
	γ核種分析	●	○	●	●		○	●	●		●
	ICP-MS(硝酸溶液)	●		●	●			●	●		●
	ICP-MS(アルカリ融解)		○					○			
NFD**	FE-SEM (U含有粒子)	●	○			●	○		●		●
	TEM-EDX (FIB調整***後)	●	○			●	○		●		●
	ICP-MS(王水他)		○				○				

1号機D/W堆積物の化学特性や含有U粒子等の特性を分析し、従来データと比較・検討することで、1号機D/W堆積物の平均的特性とばらつきを評価する。

2号機PCV内の異なる位置のサンプルを分析し、従来データと比較・検討することで、サンプル代表性や多様性の知見を得て2号機燃料デブリの特性把握を進める。

*2018年度までの分析実施済みサンプルについても追加分析が有効な場合は分析実施
**NFD：日本核燃料開発株式会社
***FIB調整：Focused Ion Beamにより試料の断面を露出させる

(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及び分析効率化の検討

● : 2017・2018年度分析実施済み
○ : 2019年度分析実施*
■ : 2020年度に実施予定

試料の採取位置と分析内容 (2019年度の実績その1)

分析施設	測定項目	1号機			2号機				3号機		
		PCV内	PCV外	PCV内	PCV内	PCV外	PCV内				
		D/W泥状サンプル	D/W堆積物サンプル	エアロック室サンプル	CRD交換レール領域調査時付着物サンプル	ペDESTル内調査時付着物サンプル	PCV内調査時付着物サンプル	TIP付着サンプル	オペフロ養生シート	オペフロ側壁コンクリート及び周辺スミアサンプル	ペDESTル内調査時付着物サンプル
JAEA	イメージプレート	●	■	●	●	●	○	●	●	●	●
	FE-SEM(全体像)	●	■	●	●	●	○	●	●	●	●
	α核種分析	●	■	●	●		○	●	●		●
	γ核種分析	●	■	●	●		○	●	●		●
	ICP-MS(硝酸溶液)	●		●	●			●	●		●
	ICP-MS(アルカリ融解)		■					■			
NFD**	FE-SEM (U含有粒子)	●	■			●	■		●		●
	TEM-EDX (FIB調整***後)	●	■			●	■		●		●
	ICP-MS(王水他)		■				■				

1号機堆積物サンプルは未実施 (2020年度)

2号機PCV内の異なる位置のサンプルを分析し、従来データと比較・検討することで、サンプル代表性や多様性の知見を得て2号機燃料デブリの特性把握を進める。アルカリ溶融及びNFDでの分析は1Fにおける試料の集約及び輸送実施計画の調整に時間を要し、試料の搬入時期が遅れたことにより次年度に繰越し。

(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及び分析効率化の検討

試料の採取位置と分析内容 (2019年度の実績その2)

● : 2017・2018年度分析実施済み
○ : 2019年度分析実施*

分析施設	測定項目	1号機				2号機					3号機		
		PCV内	PCV外	PCV内	PCV外	PCV内	PCV外	PCV内	PCV外	PCV内	PCV外		
		D/W泥状サンプル	エアロック室サンプル	X-2ベネ堆積物除去治具スミアサンプル	オペロウエルプラグスミアサンプル	CRD交換ルール領域調査時付着物サンプル	ペDESTAL内調査時付着物サンプル	TIP付着サンプル	オペロ養生シート	オペロ側壁コンクリート及び周辺スミアサンプル	2号機滞留水のろ過物のろ紙サンプル	ペDESTAL内調査時付着物サンプル	3号機滞留水のろ過物のろ紙サンプル
JAEA	イメージプレート	●	●	○	○	●	●	●	●	●	○	●	○
	FE-SEM(全体像)	●	●	○	○	●	●	●	●	●	○	●	○
	α核種分析	●	●	○	○	●		●	●	●	○	●	○
	γ核種分析	●	●	○	○	●		●	●	●	○	●	○
	ICP-MS(硝酸溶液)	●	●	○	○	●		●	●	●	○	●	○
	ICP-MS(アルカリ融解)												
NFD**	FE-SEM (U含有粒子)	●		○	○		●		●		○	●	○
	TEM-EDX (FIB調整***後)	●		○	○		●		●		○	●	○
	ICP-MS(王水他)				○						○		○

2019年度に追加分析

1号機D/Wに近接した箇所の堆積物とPCV内の雰囲気を通じた可能性がある箇所（アクセスルート）の試料を分析し、従来データと比較・検討することで、1号機燃料デブリ性状の特性把握を進める。

2号機、3号機の高線量の滞留水のろ過物を分析し、従来データと比較・検討することで、サンプル代表性や多様性の知見を得て2号機、3号機燃料デブリの特性把握を進める。比較のため従来サンプルの詳細分析を実施する。

(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及び分析効率化の検討

1Fサンプルの分析ニーズ

○ 廃炉関連の他のPJからの燃料デブリ分析へのニーズ#

- 燃料デブリ取り出し・・・ 燃料デブリ分布・物量、侵食範囲、化学特性#、機械特性、熱特性、線量・発熱 高温反応性#、乾燥特性、水素発生特性、装置検証・モックアップ#
- 計量管理・保障措置・・・燃料デブリ中のU,Pu濃度、UとPuの同位体組成
- 臨界管理・・・ UとPuの帯同性、UとGdの帯同性、Fe, Crの混合率、燃料デブリ中のGd, Fe, Cr濃度と分布、Gd-155濃度、U同位体組成、(Pu+Am-241)/U組成、Cm-244濃度
- 線量評価・・・ Cs-137線量 (濃度)、Sr-90線量 (濃度)
- 収納・移送・保管・・・ 臨界管理に係る項目 (上述)
腐食・長期安定性に係る項目 (燃料デブリ化学形#、塩素濃度)
水素発生に係る項目 (気孔率、含水率、塩素濃度)
燃料デブリ物量の指標 (Eu-154の物量及びU帯同性)
- 廃棄物・・・ 地層処分安全評価に係る38核種インベントリ

1F堆積物サンプルから、現有施設で取得可能なデータを青字で、本事業での分析項目を下線で示す。

○ 分析データの信頼性、サンプル代表性の観点でのニーズ (JAEA内及びタスクフォースでの議論)

- 分析データの信頼性・・・ 溶解技術、不溶解成分の分析、軽元素分析、干渉元素・核種、検出限界・閾条件、誤差評価
- サンプル代表性・・・ 燃料デブリ形成メカニズムの理解
(メカニズム理解によりサンプル代表性の不確かさを減らせる可能性)

メカニズムの理解により、一部評価が可能となる項目を緑字で示す。

○ 事故進展解析・炉内状況把握

(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及び分析効率化の検討

1Fサンプル分析データの評価について（2019年度）

○ 燃料デブリに係る知見のアップデート

- 1F建屋内部観察や、炉内状況把握の解析等により、1F燃料デブリの特性は、TMI-2燃料デブリ等の従来知見と予想以上に異なることがわかってきた。
 - 号機・領域ごとに、多様な特性を有する物質（酸化物、金属・合金、化合物、等）が異なった状態で混在
- 従って、分析ニーズ（前ページ）に対応させ、号機・領域ごとに、分析データの信頼性やサンプルの代表性を考慮しつつ、分析データの評価を進める必要がある。

○ 分析の進め方

- 前ページのニーズに対応しつつ、少量のサンプルでも実施可能な分析項目を優先する（特に、燃料デブリの知見にシームレスにつながっていると見込まれるU粒子に着目した分析に関して）。
- サンプル溶解条件、分析精度（データの信頼性）、閾条件・検出限界、干渉元素・核種、誤差評価、等の課題を抽出し、燃料デブリ分析に向けた分析環境を整備する。
- サンプル代表性に係る知見が得られる可能性がある、U粒子形成メカニズムに係る知見を取得する。
- さらに、得られた分析結果を既往知見と照らし合わせて系統的に整理し、事業者が活用しやすい形式で、号機・領域ごとに、「高度化燃料デブリ特性リスト」に集約する。

(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及び分析効率化の検討

分析のねらいと分析結果の活用の概要

試料採集部位		分析のねらい	分析結果の活用	関連頁
1号機	オペフロプラグスミア	I. αダストの物量・建屋内分布 II. U含有粒子の特性(Pu帯同位体、U同位体比、化学特性) III. 2号機オペフロサンプルとの比較	I. 燃料デブリ取出し(線量・発熱、リスク)、廃棄物 II. 臨界管理、燃料デブリ取出し(化学特性、リスク) III. 事故進展解析・炉内状況把握	23 24
	X-2ペネ堆積物スミア	I. U粒子分布・特性のPCV内の場所による相違の確認 II. U含有粒子の特性(同上)、形成メカニズム、副成分の特性	I. 燃料デブリ取出し(燃料デブリ分布・物量、化学特性、リスク)、サンプル代表性 II. 燃料デブリ取出し(燃料デブリ分布・物量、線量・発熱、リスク)、廃棄物	25 26
2号機	オペフロ養生シート上 (H30サンプル追加分析)	I. U含有粒子の多様性確認 II. 事故シナリオがデブリ特性に与える影響の推定 (H30年度に同定した4群のU粒子のうち未分析の2群を分析) III. 硝酸難溶融物の分析方法の検討	I. 燃料デブリ取出し(燃料デブリ分布・物量) II. 事故進展解析・炉内状況把握 III. 分析データの信頼性	28 29
	内部調査装置シーリングスミア	I. 内部調査装置本体のスミアとの比較 II. サンプル特性のバラつき確認	I.II. 燃料デブリ取出し(燃料デブリ分布・物量、化学特性、リスク)、サンプル代表性	30
	トーラス室内滞留水ろ過物	I. PCVサンプル、オペフロサンプルとの比較(特性のバラつき確認) II. デブリ・構造材の腐食に係る知見	I. 燃料デブリ取出し(燃料デブリ分布・物量(トーラス堆積物について)、線量・発熱)、長期安定性、廃棄物 II. 長期安定性、燃料デブリ取出し(リスク)	31 32 36
3号機	内部調査装置スミア (H30サンプル追加分析)	I. 3号機サンプルに固有の粗密構造を有するU含有粒子の詳細分析 II. デブリ形成メカニズムの検討、金属相形成可能性の検討 III. 1,2号機との比較	I.II. 燃料デブリ取出し(燃料デブリ分布・物量、線量・発熱、化学特性、リスク)、臨界管理 III. 事故進展解析・炉内状況把握	33 34
	トーラス室内滞留水ろ過物	I. PCVサンプル、オペフロサンプルとの比較(特性のバラつき確認) II. デブリ・構造材の腐食に係る知見 III. 2号機との比較	I. 燃料デブリ取出し(燃料デブリ分布・物量(トーラス堆積物について)、線量・発熱)、長期安定性、廃棄物 II. 長期安定性、燃料デブリ取出し(リスク) III. 事故進展解析・炉内状況把握	35 36

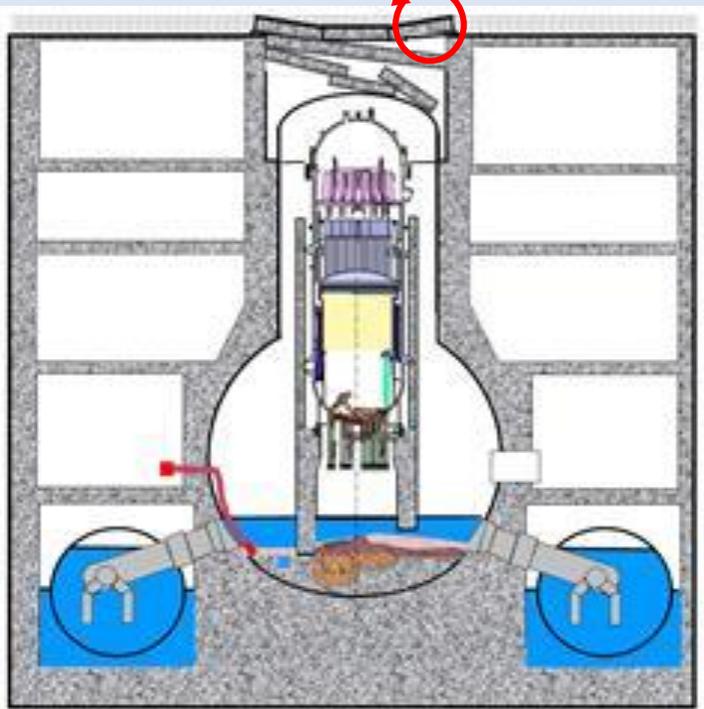
(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

23

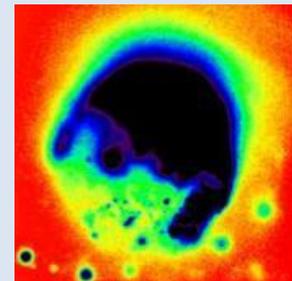
① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討 サンプルの概要と分析目的 (1号機：オペフロウェルプラグスミア)

○ サンプルの概要

サンプル取得位置



スミアサンプル外観



イメージングプレート像 (露出30秒)

- U粒子密度 (FE-SEM/WDX) : 約1個/cm²
- 主な検出成分 (ICP-MS) : Fe, Cr(構造材), Pb, Zn(塗料), Te, Mo, Cs, Ba, Sr, Sb(FP), 微量U
- 線量 : Cs-137に起因する高線量を検出

○ 分析のねらい

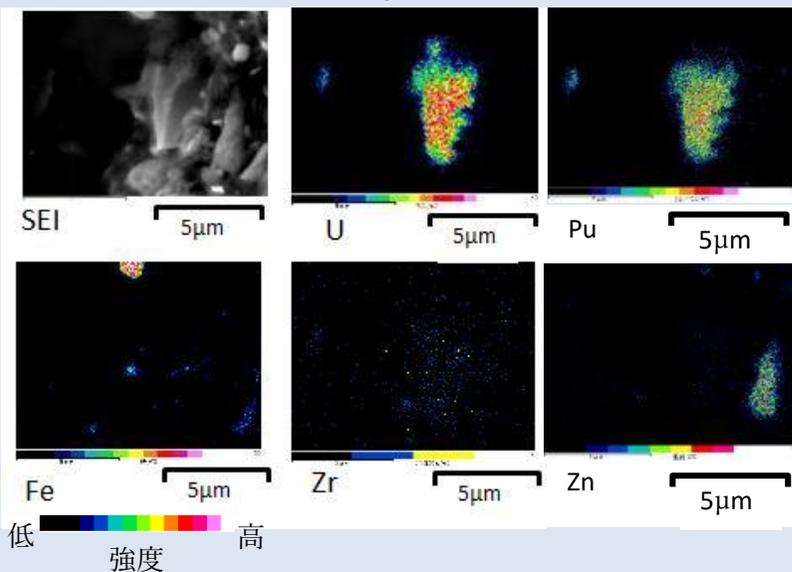
- U粒子のPCVからオペフロ移行経路
αダストの建屋内分布に係る知見【燃料デブリ取り出し、線量】
- U粒子・構造材の組成、U/Pu帯同性、形成メカニズム
燃料デブリ化学特性に係る知見【燃料デブリ取り出し】
U/Pu帯同性、同位体組成【臨界管理、計量管理】
最高到達温度予測、燃料デブリの相状態【燃料デブリ取り出し、リスク】
- 2号機オペフロサンプルとの比較
事故シナリオの違いが燃料デブリ特性に与える影響
1号機：高温熔融状態 (2500℃以上) からの徐冷
2号機：固液混合状態 (2000-2300℃程度) からの急冷
【燃料デブリ取り出し、リスク、事故進展解析】

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

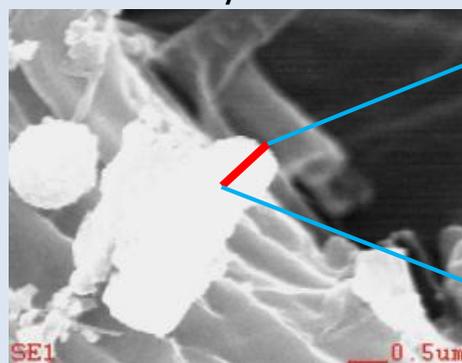
① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

分析結果 (1号機 : オペロウエルプラグスミア)

FE-SEM/WDX分析



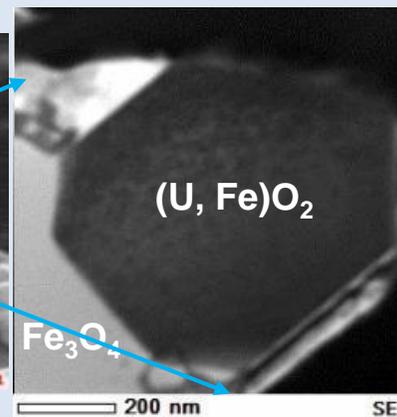
SEM/EDX



TEM分析視野の選定

1号機オペロウエルプラグスミア

TEM分析



(参考) 2号機
オペフロサンプル

角張った形状 (液相からの徐冷)
丸い形状 (気相or液相での輸送と急冷・凝縮)

- ❑ **U粒子の特性 (FE-SEM/WDX)** ・ ・ 数µmサイズのU粒子を検出 (約1個/cm²)。UとPu帯同を確認。周囲に構造材成分、塗料成分が別相を形成。U同位体比を概略評価 (後述)。Zrは検出限界レベル (低蒸気圧のZrO₂のみ移送されなかった可能性)
- ❑ **2号機オペフロサンプルとの比較 (TEM)**
 - 1号機 (2019) : Zrを含有しないU-Fe-O液相から、徐冷して析出と推定
 - 2号機 (2018) : Zr濃度の異なる4種類のU粒子を確認、それぞれ急冷して析出と推定
- ❑ **U粒子移行経路 (分析結果からの考察)** ・ ・ 1,2号機で異なる可能性。U粒子の最高到達温度が異なる可能性。
- ❑ **燃料デブリ形成メカニズム (同上)** ・ ・ 1,2号機で燃料デブリの溶融・凝固パスが異なる可能性。燃料デブリの化学的特性、機械的特性、高温反応性、水素発生特性、取扱いリスク、等に影響する可能性。

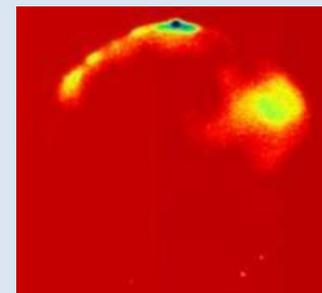
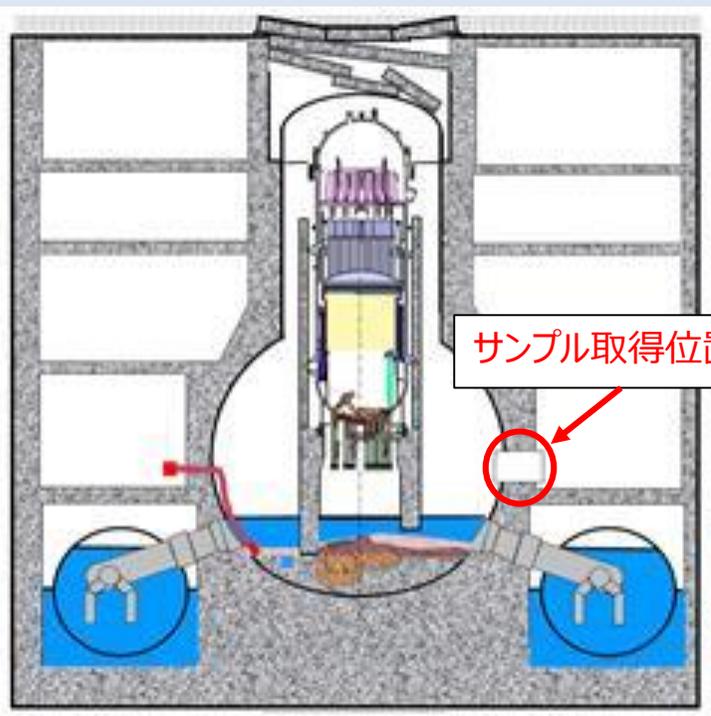
→ 酸化物系の燃料デブリの諸特性が相違する可能性

(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及び分析効率化の検討

サンプルの概要と分析目的（1号機：X-2ペネ堆積物スミア）

○ サンプルの概要



スミアサンプル外観 イメージングプレート像（露出60分）

- U粒子量（FE-SEM/WDX）：約0～2個/cm²
- 主な検出成分（ICP-MS）：Fe, Cr(構造材), Pb, Zn(塗料), Ba, Sr, Sb(FP), 微量U
- 線量：汚れ部にピンポイントで高線量部分を検出

○ 分析のねらい

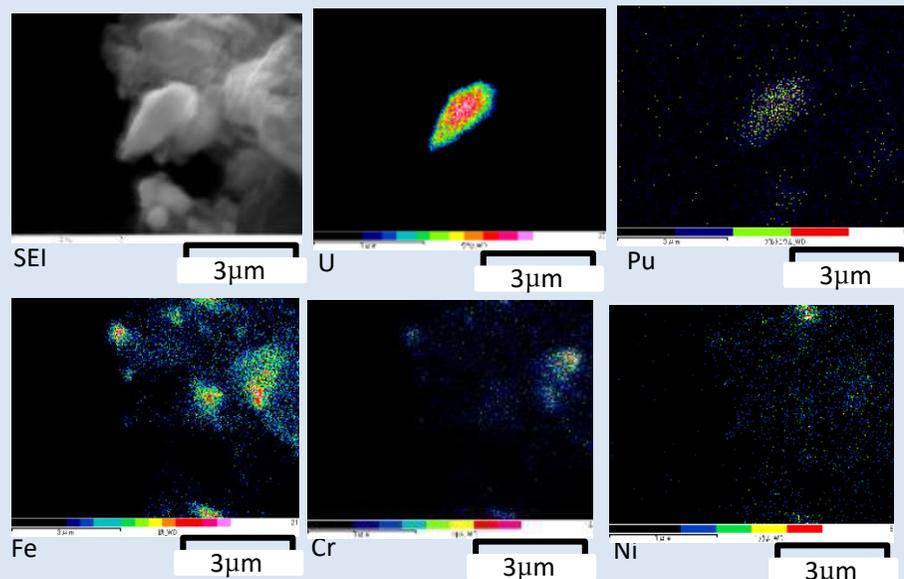
- PCV内サンプルの類似性（D/W泥状堆積物との比較）
U粒子やマトリックス成分のばらつき【代表性、燃料デブリ分布】
αダストの建屋内分布に係る知見【燃料デブリ取り出し】
- U粒子の組成、U/Pu帯同性、形成メカニズム
デブリ化学特性に係る知見【燃料デブリ取り出し】
U/Pu帯同性、同位体組成【臨界管理、計量管理】
最高到達温度予測、燃料デブリの相状態【燃料デブリ取り出し】
- 副成分：ペイント材(Zn)や構造材に係る知見
副成分の相状態（燃料デブリ特性に係る知見が得られる可能性）
【燃料デブリ取り出し】

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

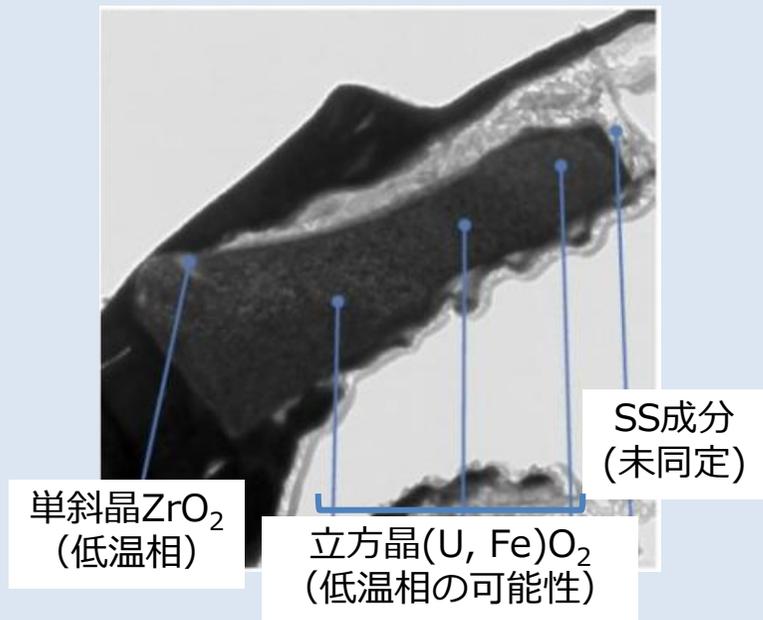
① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

1号機サンプルの分析結果 (例: X-2ペネ堆積物スミア)

FE-SEM/WDX分析



TEM分析 (U粒子の一部を切出し)



- ❑ **U粒子の特性 (FE-SEM/EDX)** ・ ・ 数µmサイズのU粒子を検出。UとPu帯同。周囲に構造材成分が別層形成 (Fe, CrとNiの存在部位が異なる⇒鋼材成分のいったん溶解を示唆)
- ❑ **マトリックス成分 (ICP-MS)** ・ ・ 鋼材成分, Si, その他軽元素 (Al, Ca, Na, Mg, etc.)
- ❑ **D/W泥状サンプルとの比較 (TEM)**
 - X-2ペネ (2019) : 低温相 (単斜晶ZrO₂) を検出、U-Zr-Fe-O液相からの徐冷の可能性
 - D/W泥 (2018) : 低温相 (α-Zr(O)) を検出、U-Zr-Fe-O液相からの徐冷の可能性
 - **堆積位置によって、燃料デブリ酸化度が異なる【化学特性、機械特性、リスク等に影響する可能性】**
- ❑ **形成メカニズム (考察)** ・ ・ 事故過程での、燃料デブリの徐冷を示唆 ⇒相分離、成分偏析

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

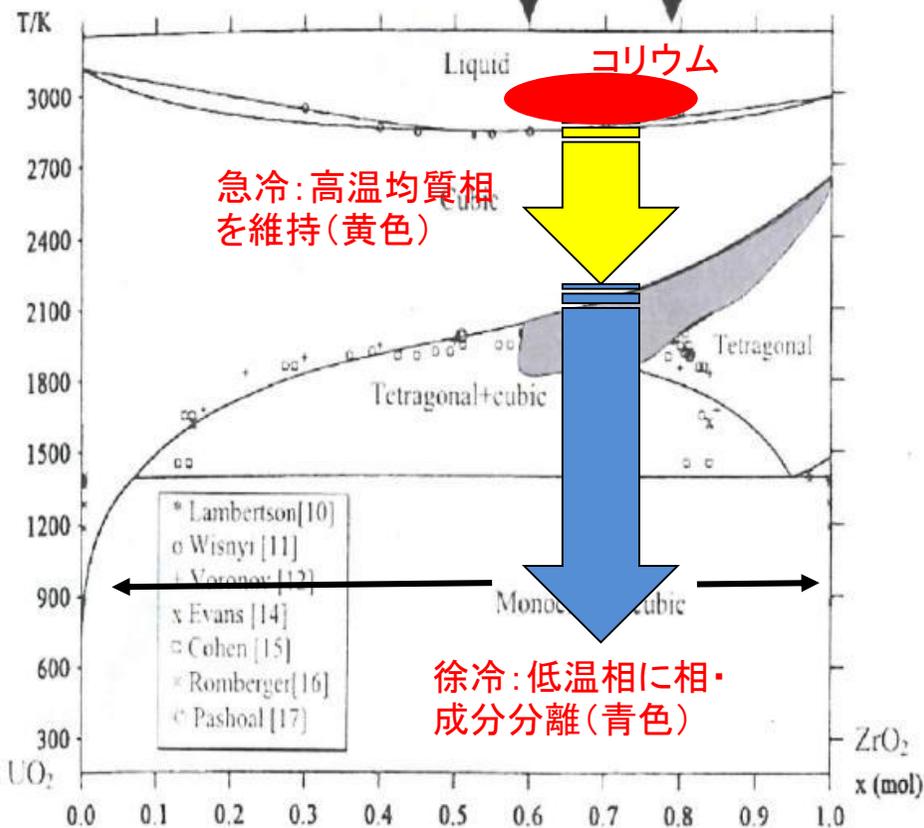
① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

(参考) 燃料デブリの溶融・凝固パスの違いによる燃料デブリ化学特性への影響

溶融燃料（コリウム）の平均組成

- 溶融燃料（コリウム）形成条件（赤）
温度：約2800K以上
組成：ややZrリッチの二酸化物

VULCANO 試験
TMI-2事故



■ Meta-stab UO₂-ZrO₂二元系状態図
(P.Piluso, JNM 344 (2005) 259.)

一般的な傾向

- 急冷で形成される燃料デブリ（黄）
相：高温安定相 (fcc, fct) の均質単相を維持
成分：主な成分 (U, Zr, Pu, Gd等) は均質分布
構造：比較的稠密 (冷却水との反応では粒子状)
大粒径結晶 (20~30μm以上)
- 徐冷で形成される燃料デブリ（青）
相：低温安定相 (U-rich cubic, Zr-rich mono)
成分：U-rich, Zr-rich等に相分離
Pu, Gd等も相分離
構造：微細結晶粒 (2-3μm以下)、粉体化しやすい
- コリウムを形成しない条件
温度：約2200~2500K程度
組成：固体 (UO₂, ZrO₂) 液体 (U-Zr-Oメルト) の混合物 (元々均質でない)
成分：U, Zrは大きく相分離
構造：液相成分が金属系と酸化物系に分離
粗密化、粉体化・破碎しやすい、活性残留

コリウム形成しない場合は、U-Zr-O三元系での評価が必要。

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

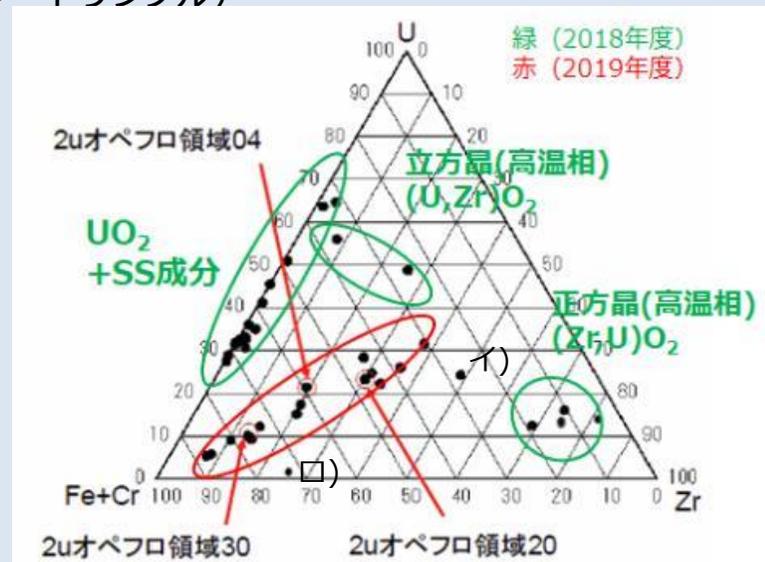
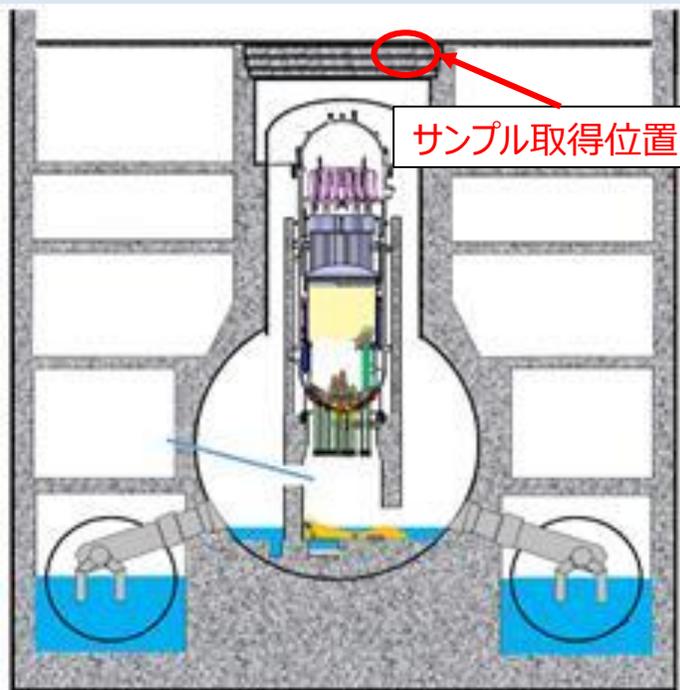
① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

サンプルの概要と分析目的 (2号機：オペフロ養生シートサンプル)

○ サンプルの概要

- U粒子量 (FE-SEM/WDX)
: 226個/cm²
- 主な検出成分 (ICP-MS) :
Fe, Cr(構造材),
Pb, Zn(塗料),
Ba, Sr, Sb(FP)
微量U
- 線量：局所的に高線量

右図：組成範囲をはずれた2試料のうち、
イ)は今後必要に応じて詳細分析、
ロ)はU含有についてデータを点検中



4群#のU粒子を同定 (2018)

○ 分析のねらい (2018年度サンプル追加測定)

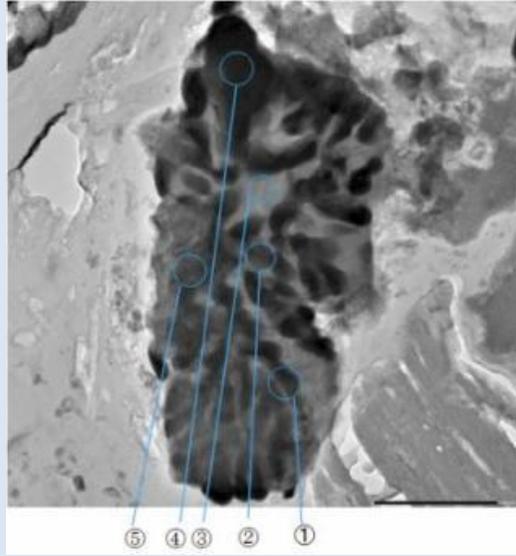
- U粒子のPCVからオペフロ移行経路
αダストの建屋内分布や付着状態に係る知見【燃料デブリ取り出し】
燃料デブリの多様性に係る知見【サンプル代表性、事故進展】
(4群の異なる粒子を検出 (2018)、追加分析実施 (2019))
- 1号機オペフロウェルプラグサンプルとの比較
事故シナリオの違いが燃料デブリ特性に与える影響【燃料デブリ取り出し】
- 難溶物の同定・溶融処理
燃料デブリ分析技術の整備に係る知見【燃料デブリ分析技術】

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

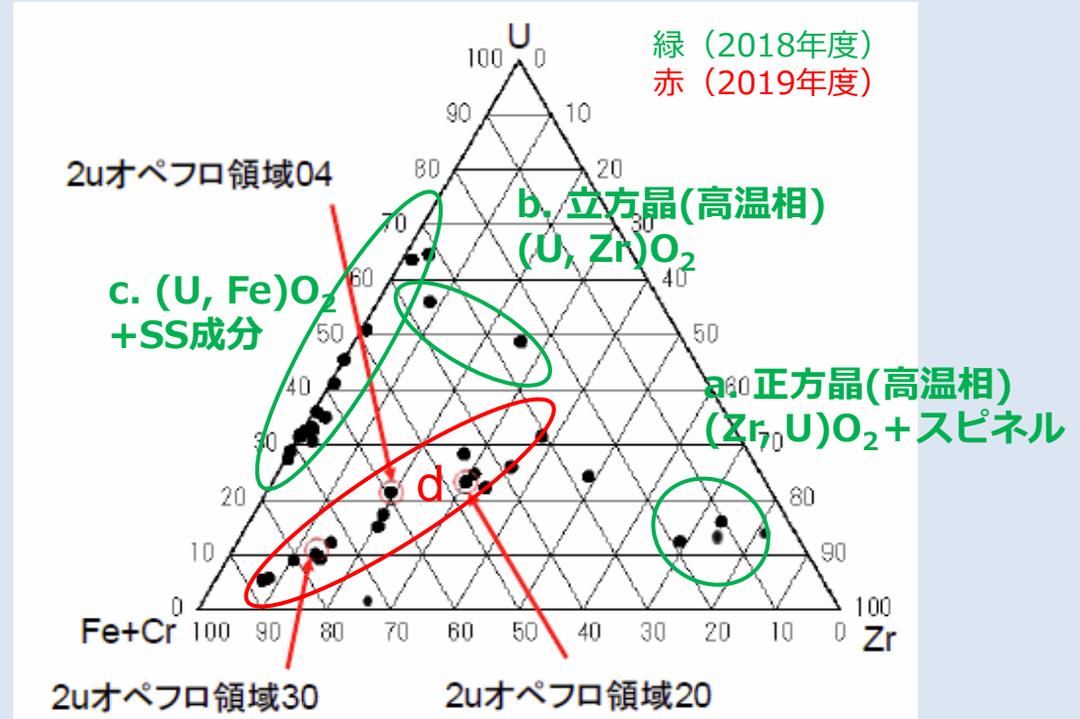
① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

2号機サンプルの分析結果 (例: オペフロ養生シートサンプルの追加分析)

TEM分析 (2019, d群)



- ①②④ (U, Zr)O₂+FeCr₂O₄ or Fe₃O₄
- ③ FeCr₂O₄
- ⑤ (U, Zr)O₂+FeCr₂O₄ or Fe₃O₄



2号機オペフロ上でのU粒子(4群)の同定

□ 4群のU粒子の化学的な特徴を同定

- a群: 高温相fct-(Zr, U)O₂, FeCr₂O₄, Fe₃O₄
- b群: 高温相fcc-(U, Zr, Fe)O₂
- c群: 高温相fcc-(U, Fe)O₂, FeCr₂O₄, Fe₃O₄
- d群: 高温相fcc-(U, Zr)O₂, FeCr₂O₄, Fe₃O₄

- 形成メカニズム (考察) ・ ・ U, Zr酸化物は高温相を維持 (ただし、複数の高温相形成)、酸化鉄相 (スピネル) が析出

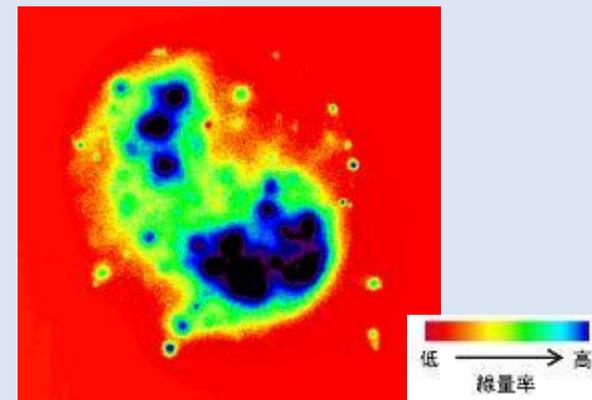
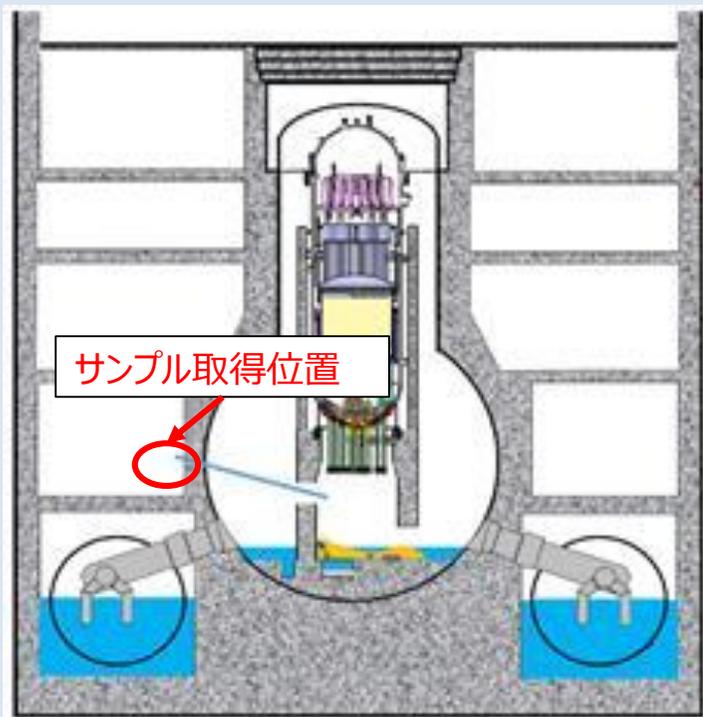
⇒ 酸化鉄固溶により、燃料デブリの化学特性・機械特性が影響を受ける可能性

(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及び分析効率化の検討

サンプルの概要と分析目的（2号機：PCV内部調査装置シーリングスミア）

○ サンプルの概要



スミアサンプル外観 イメージングプレート像（露出30分）

- U粒子量（FE-SEM/WDX）：これまでに検出されていない
- 主な検出成分（ICP-MS）：Fe, Cr(構造材), Pb, Zn(塗料), Ba, Sr, Zr, Sb(FP), 微量U
- 線量：汚れ部にピンポイントで高線量部分を検出

○ 分析のねらい

- PCV内サンプルの類似性
内部調査装置スミアとの比較【サンプル代表性】

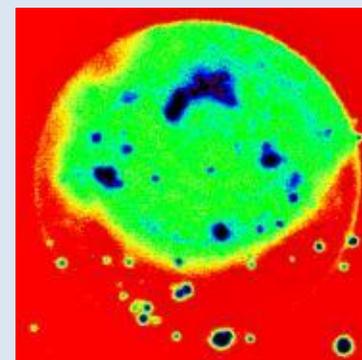
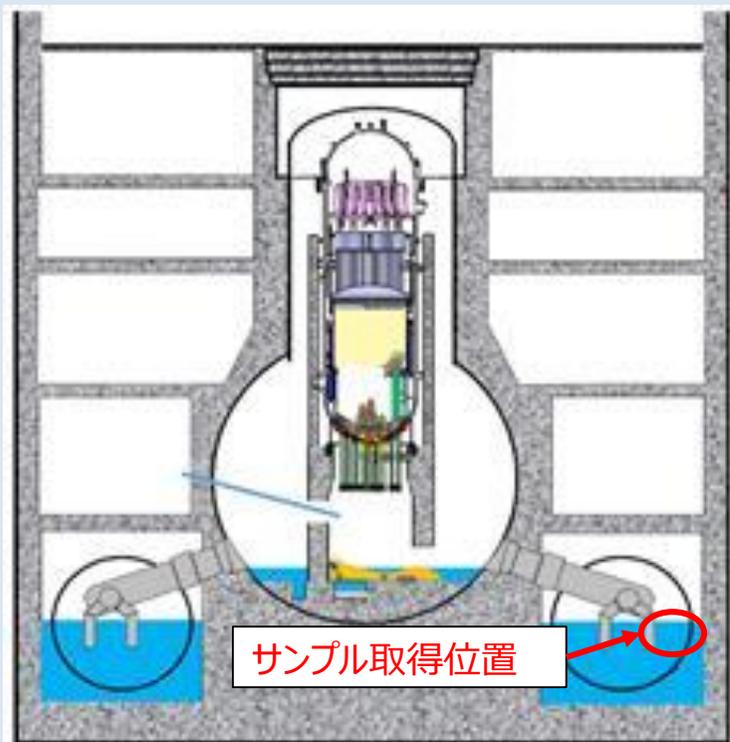
バルク成分に大きな相違は見られていない（ICP-MS）
U粒子の探索を継続予定（2020年度）

(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及び分析効率化の検討

サンプルの概要と分析目的 (2号機：トラス室内滞留水ろ過物)

○ サンプルの概要



スミアサンプル外観 イメージングプレート像 (露出30秒)

- U粒子量 (FE-SEM/WDX) : 約10~15個/cm²
- 主な検出成分 (ICP-MS) : Fe(錆), Pb, Zn(塗料), Cs, Sb(FP), 微量U
- 線量 : 汚れ部にピンポイントで極めて高い線量部分を検出

○ 分析のねらい

- オペフロサンプル、PCV内サンプルとの特性比較
燃料デブリ特性の多様性に係る知見【燃料デブリ取り出し、代表性】
水相を介した移行メカニズムに係る知見【長期劣化】
 α ダストの分布に係る知見【燃料デブリ取り出し、リスク】
- 燃料成分や副成分の特性
燃料デブリや構造材の腐食程度に係る知見【腐食、長期劣化】

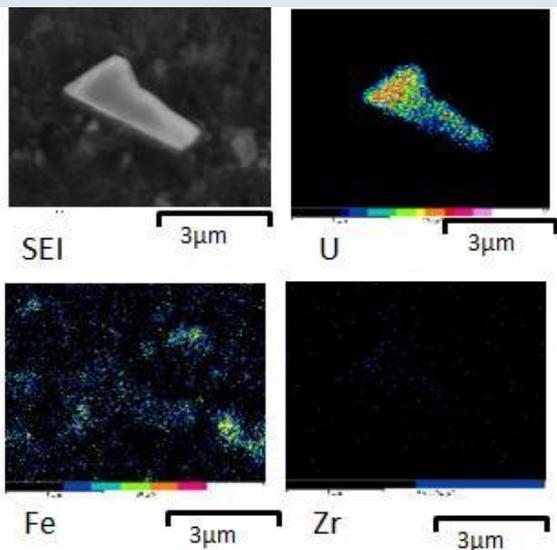
(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

32

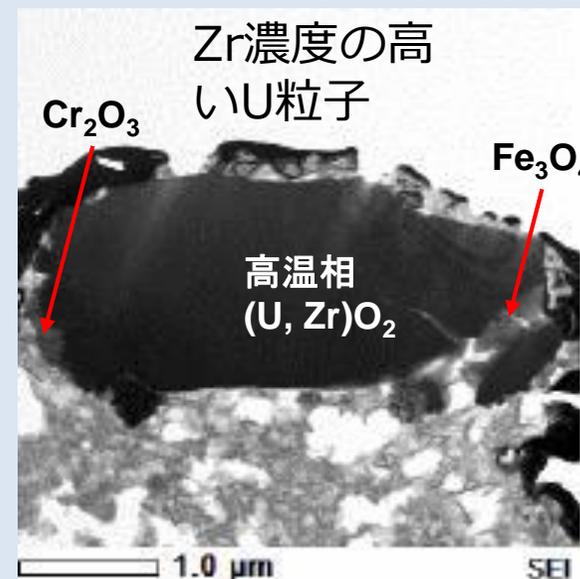
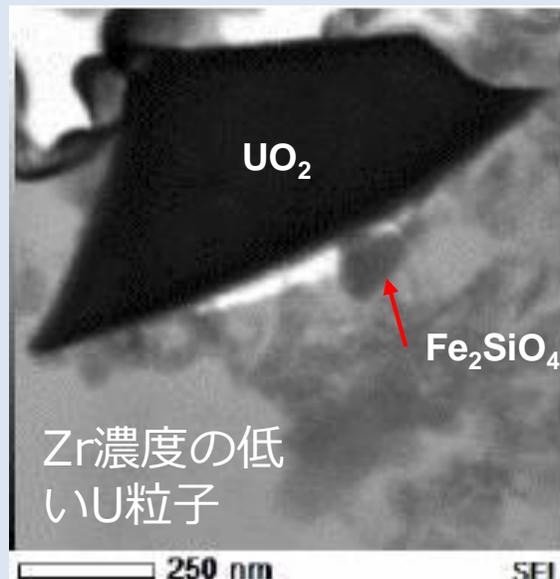
2号機サンプルの分析結果 (例: トーラス室内滞留水ろ過物)

FE-SEM/WDX分析



FE-SEM/WDXでは、今のところZr低濃度粒子のみを検出

TEM分析 (U粒子の一部を切り出し)



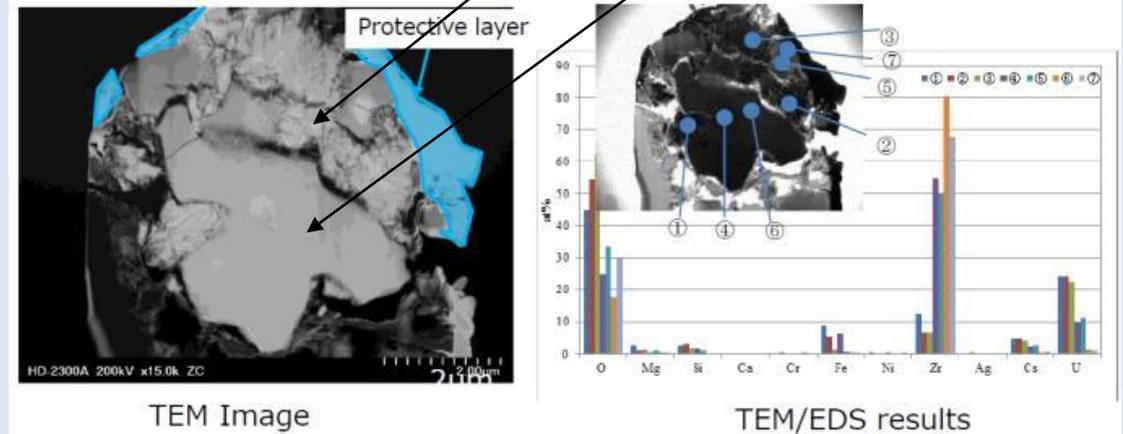
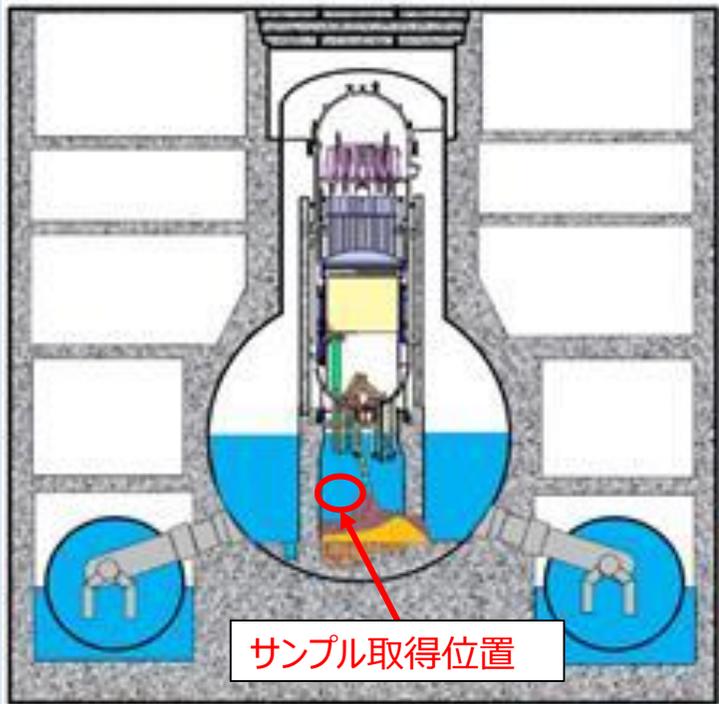
- ❑ **U粒子の特性 (FE-SEM/WDX, TEM)** ・ ・ 数µmサイズの2種類のU粒子を検出。UとPu帯同。周囲にFe検出 (錆と推定)
- ❑ **マトリックス成分 (ICP-MS)** ・ ・ 鋼材、Si, Zn, Pb, Cs, Sn, Sbなどを検出
- ❑ **PCV内サンプル、オペフロサンプルとの比較 (考察)** ・ ・ 燃料成分と鋼材成分やSiとの混合性が異なる可能性
→ **PCV内やオペフロサンプルと形成メカニズムが異なる可能性、化学特性、機械特性が相違する可能性**
- ❑ **その他の知見** ・ ・ U粒子表面に、腐食の形跡 (U(VI)形成) は観測されなかった。
→ **燃料デブリの長期安定性を示唆**

(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及び分析効率化の検討

サンプルの概要と分析目的 (3号機: PCV内部調査装置のスミア)

○ サンプルの概要 疎な部位 密な部位



- 疎な領域: 高温相fcc-(U, Zr)O₂
- 密な領域: 高温相fct-(Zr, U)O₂ + α-Zr(O)
 - 固液混合状態からの冷却、相・成分分離の可能性
 - 活性金属成分の残留を合理的に排除できる可能性等について検討中

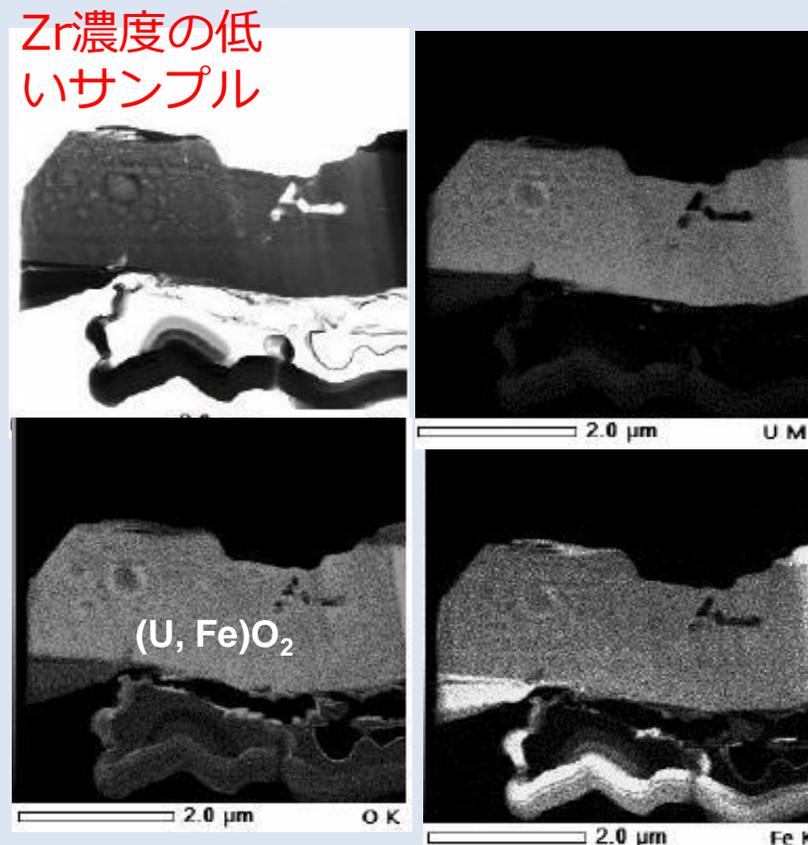
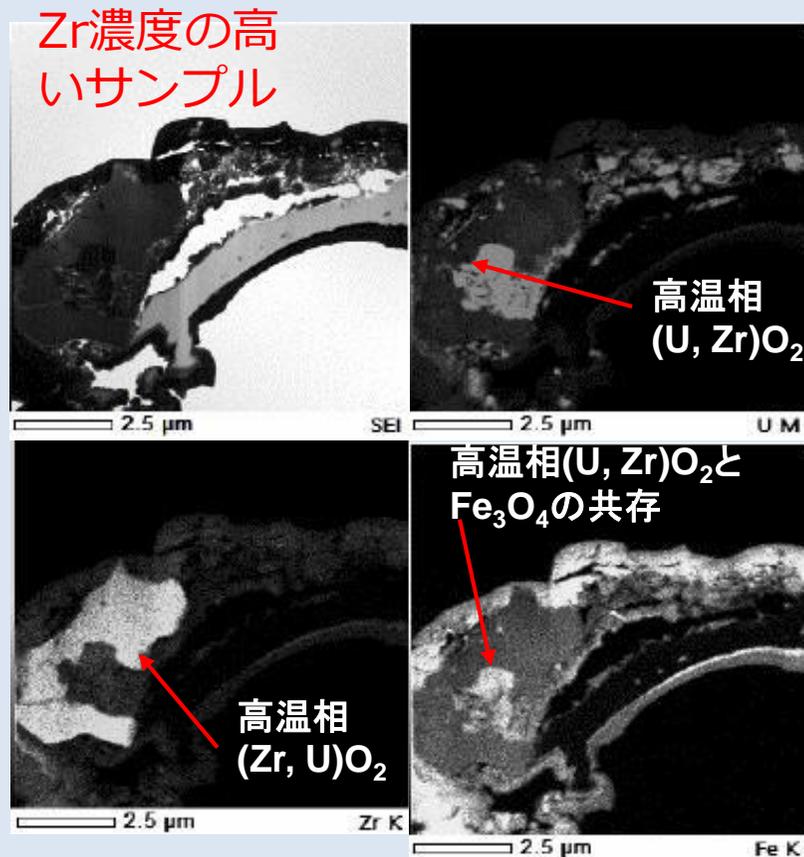
○ 分析のねらい (2018年度サンプル追加測定)

- 3号機サンプルに固有の、粗密領域が混在したU粒子の詳細分析
3号機事故過程では、相対的に低い最高到達温度と、遅い凝固速度で、燃料デブリが成分・相分離し、特性が多様化【燃料デブリ取り出し、リスク、臨界評価、長期安定性、計量、収納・保管、など】
- 他号機サンプルとの比較
事故シナリオの違いが燃料デブリ特性に与える影響【事故進展】

(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及び分析効率化の検討

3号機サンプルの分析結果 (例：PCV内部調査装置のスミア)



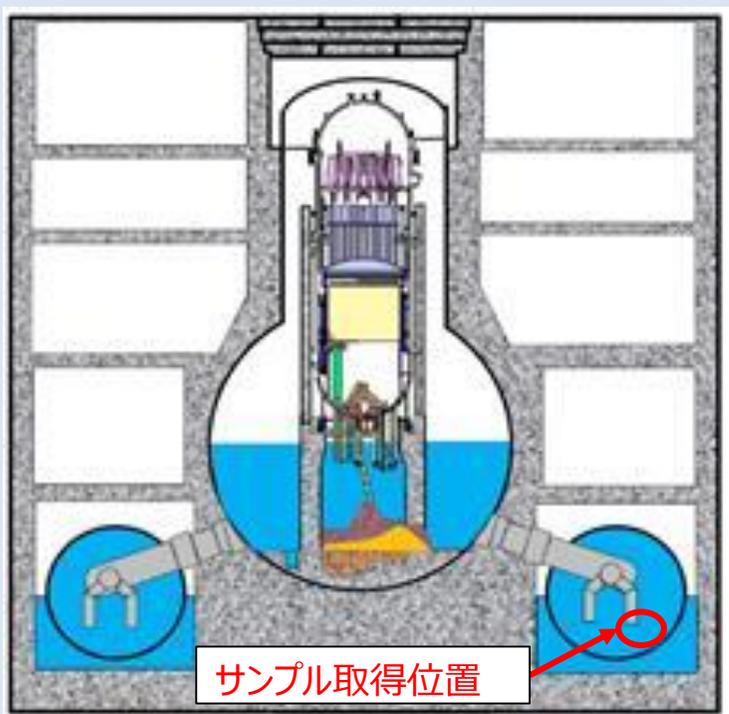
- **U粒子の特性 (TEM)** ・ ・ 追加分析では、α-Zr(O)残留は同定されず、2群の粒子の特性を評価
Zr高濃度粒子： U-Zr-Fe-O液相からの徐冷と推定、燃料デブリの最高到達温度が低い可能性 (固液混合)
Zr低濃度粒子： U-Fe-O液相からの徐冷の可能性、複数の燃料デブリ形成メカニズムを示唆
- **他号機サンプルとの比較 (考察)** ・ ・ ・ 3号機で検出されたU粒子は、他号機に比べ、いずれも複雑な構造を持っており、燃料デブリの溶融・移行・凝固過程において、燃料デブリが相・成分分離・多様化した可能性示唆

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

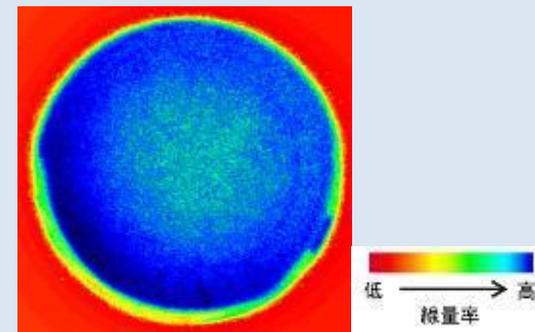
① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

サンプルごとの分析目的について (3号機：トラス室内滞留水ろ過物)

○ サンプルの概要



スミアサンプル外観



イメージングプレート像 (露出30秒)

- U粒子量 (FE-SEM/WDX) : 検出されていない
- 主な検出成分 (ICP-MS) : Fe(錆), Pb, Zn(塗料), Cs, Sb(FP), 微量U
- 線量 : 汚れがろ紙全体に広がり、高線量検出 (2号機滞留水ろ過物より、微粉化されている可能性)

○ 分析のねらい

- オペフロサンプル、PCV内サンプル、2号機サンプルとの特性比較
燃料デブリ特性の多様性に係る知見
【燃料デブリ取り出し、代表性】
水相を介した移行メカニズムに係る知見【長期劣化】
αダストの分布に係る知見【燃料デブリ取り出し、リスク】
- 燃料成分や副成分の特性
燃料デブリや構造材の腐食程度に係る知見【腐食、長期劣化】

(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及び分析効率化の検討

2,3号機トラス室内滞留水ろ過物分析結果（現在までのまとめ）

2号機

- U粒子（FE-SEM/WDX）：約10～15個/cm²
- 主な検出成分（ICP-MS）：Fe（錆）, Pb, Zn（塗料）, Cs, Sb, 微量のU
- U235/(U-235+U-238)：0.018（燃料由来）
- 線量：汚れ部にピンポイントで極めて高い線量部分を検出
- U粒子の類似性：PCV調査（2018.2）装置スミアサンプルと異なる可能性
- PCV調査（2019.2）装置スミアとの比較を予定
（2018年サンプルはペDESTALにタッチダウンしていない）

3号機

- U粒子（FE-SEM/WDX）：検出されていない。
有機物or塗料成分とみられる物質にわずかにUが付着
- 主な検出成分（ICP-MS）：Fe（錆）, Pb, Zn（塗料）, Cs, Sb, 微量のU
- U235/(U-235+U-238)：0.018（燃料由来）
- 線量：汚れがろ紙全体に広がり、高い線量を検出（微粉が堆積している可能性）
- U粒子の類似性：2,3号機で異なる可能性

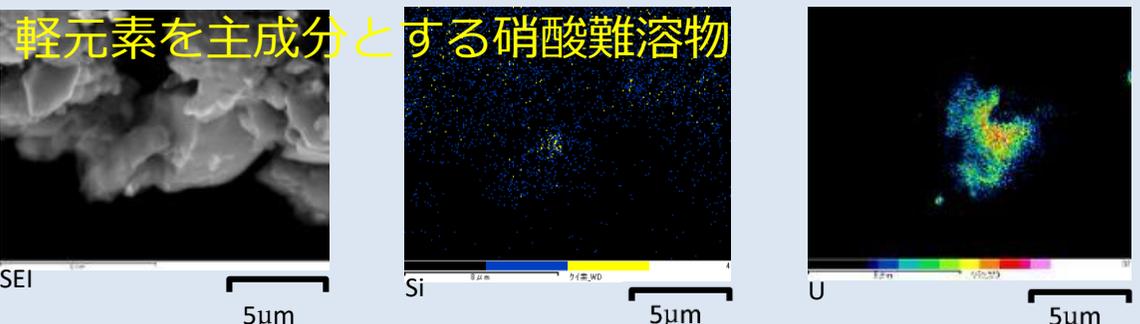
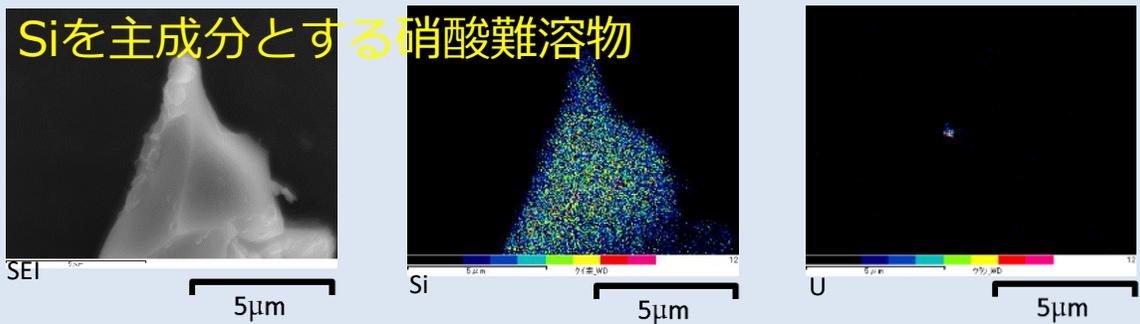
(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

難溶物の分析と溶解処理技術の整備

目的・・・燃料デブリ分析フロー確立に向けた、硝酸難溶物の主成分同定

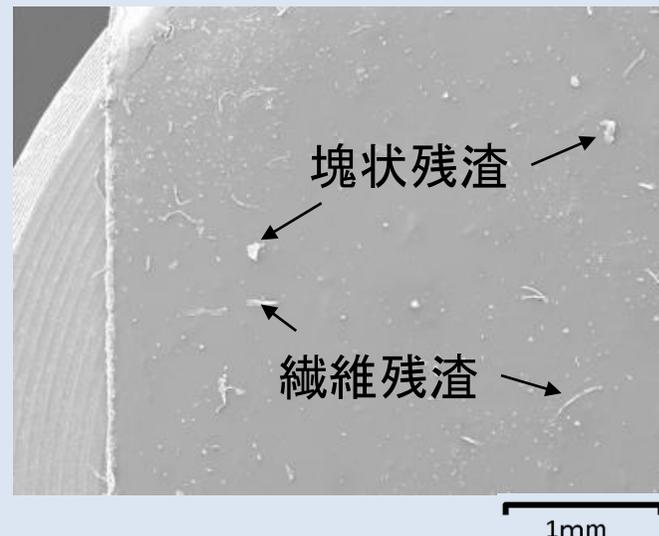
難溶物溶解技術（アルカリ溶融法以外の技術（王水・フッ酸））のフィージビリティ確認



2号機オペフロサンプル残渣のSEM/WDX分析

- 2号機オペフロサンプルの難溶物主成分は、C等の軽元素、あるいはSiO₂と推定
- ただし、その内部に硝酸で溶かしきれないU粒子が残留

⇒ 溶解処理技術の高度化（アルカリ溶融、王水・フッ酸処理）が必要



1号機オペフロサンプルの王水・フッ酸溶融後残渣のSEM分析

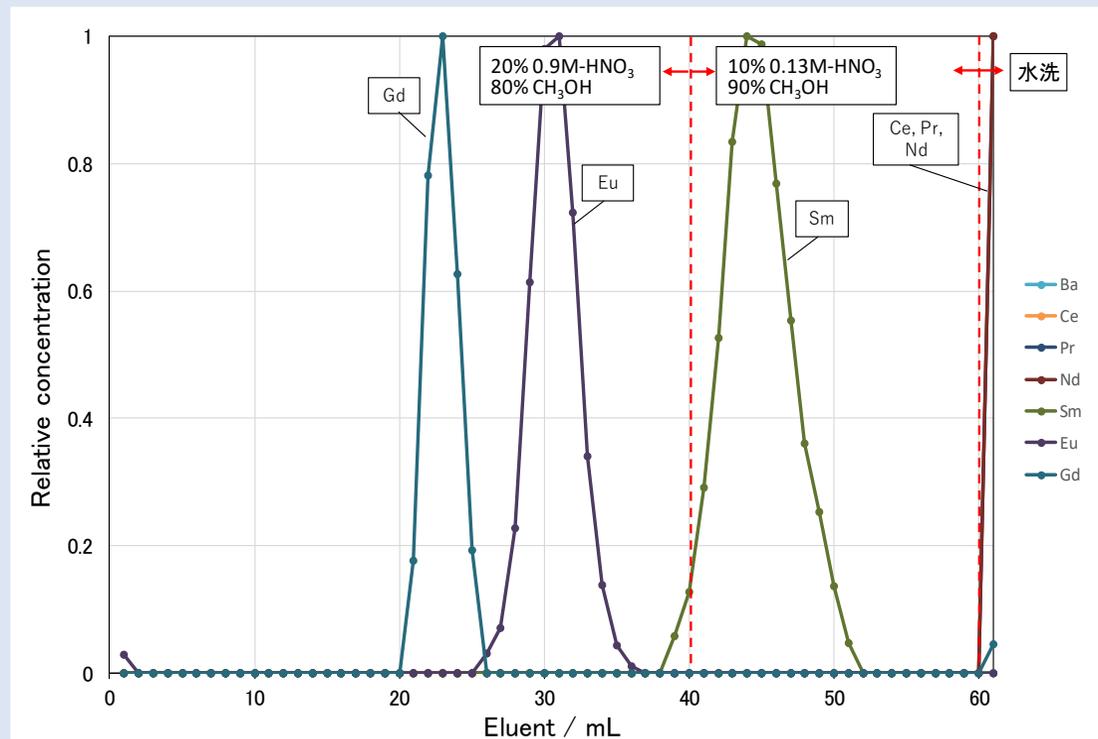
- **王水・フッ酸処理**により、1号機オペフロ、2,3号機トラス室内滞留水残渣等のサンプルをほぼ完全に溶解させることに成功
- 微量残渣は、ろ紙成分やCr等の難溶性酸化物であることを同定

(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及び分析効率化の検討

Gd分離法の確認

背景・・・中性子毒物（Gd）は、ICP-MSでの、希土類元素FP（Ce, Pr, Nd, Sm, Eu等）分析の妨害元素。
目的・・・照射済み燃料からのGd分離技術（既往文献：Bowers et al., 2008）を参考に、適切なイオン交換樹脂の選定と溶解条件の調整を実施。



□ 希土類FP分析精度向上に向けて、妨害元素となるGdの分離法を調査し、これをイオン交換法により、分離できる見通しを得た。

希土類元素の一部、Ndは、燃烧度の指標として使える可能性があり、高精度の分析が求められている。

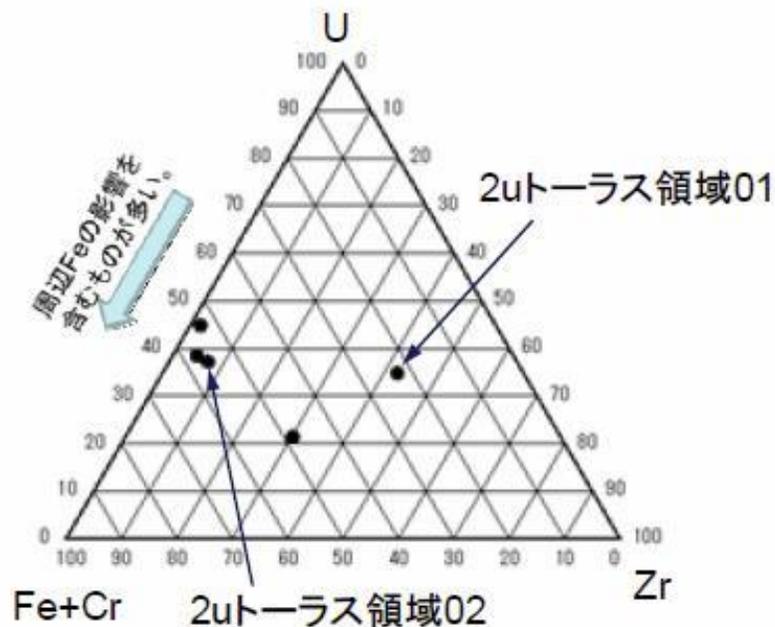
同じく、Euは、計量管理における燃料デブリ量の指標として使える可能性がある。

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

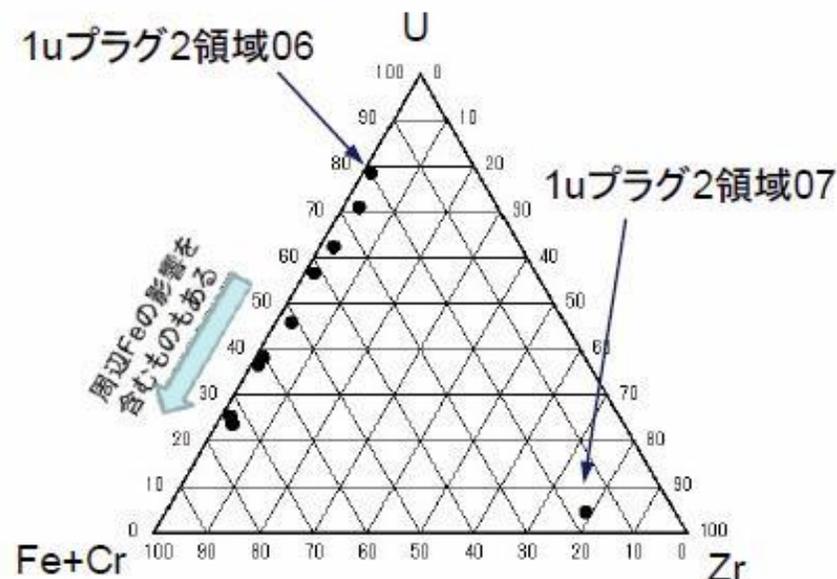
① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

分析結果の系統的な整理方法（主要成分の組成三角図の活用）

SEM/EDX測定で求めた、U:Zr比、(U+Zr):Fe比を組成三角図にプロット



2号機トラス室内滞留水のろ過物中のU粒子近傍の主要元素比の3角図



1号機オペフロウエルプラグスミアサンプル中のU粒子近傍の主要元素比の3角図

燃料デブリやU粒子において、主要成分の組成比を系統的に整理することで、燃料デブリを分別できる可能性

【U:Zr比】・・・U粒子の溶融・凝固条件（均質高温相の維持 or 低温相に成分・相分離）

【(U+Zr):Fe比】・・・燃料デブリ酸化度（活性金属成分残留の可能性）、燃料と鋼材の混合程度

⇒既往知見（TMI-2燃料デブリなど）との比較にも活用（既往知見のどれと、1Fの多様な燃料デブリのどれが、類似性を有するか判断することで、機械的特性などある程度大きなサンプルが必要な知見について、既往知見を活用できる可能性）

② 燃料デブリの性状推定の高度化

2019年度計画

- 国内専門家によるブレインストーミング ((1)①の成果、1F内部観察、関連文献、等を利用)
 - a. 燃料デブリの生成プロセスの評価 (1、2号機 +3号機についても予備的に実施#)
 - b. 号機ごと領域ごとの燃料デブリ・構成材料の破損・堆積状態の推定、燃料デブリ特性の評価
 - c. 「燃料デブリ特性リスト」の改訂、分析ニーズの観点での整理

1F試料評価委員会 (主査 福井大学 宇埜教授)

参加機関: 福井大, 東工大, 阪大 東電HD, 東芝ESS,
日立GE, 電中研, GNFI, IRID, NDF*, JAEA

*:オブザーバー参加

開催回数: 年3回程度

燃料デブリ特性リスト案の提示

検討方針の指示

タスクフォース (主査 JAEA 倉田Div.長)

参加者 : 試料分析担当者, 委員会参加機関の若手
開催回数: 適宜

- 核燃料、プラント、SA解析等の専門家による燃料デブリ特性リスト案のレビュー
- JAEAの専門家で抽出した分析ニーズと燃料デブリ特性リストの対応づけと活用方法の検討
- 分析データの評価
- 1号機D/W堆積物、2号機ペデスタル堆積物の特性評価の精度向上
- 燃料デブリ特性リスト案の作成
- 分析ニーズの観点での整理

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

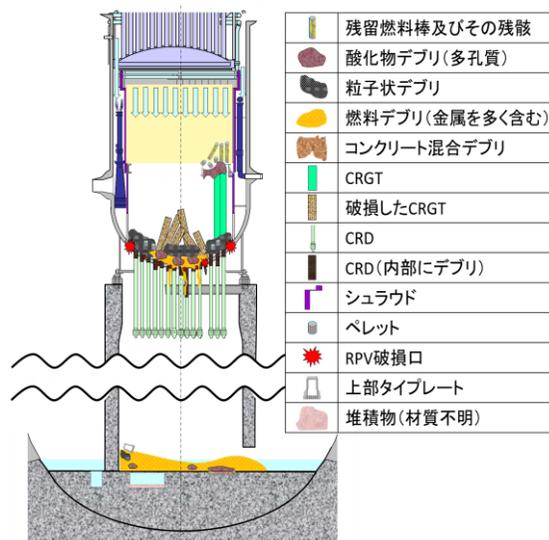
② 燃料デブリの性状推定の高度化（実施概要）

現行の燃料デブリ特性リスト



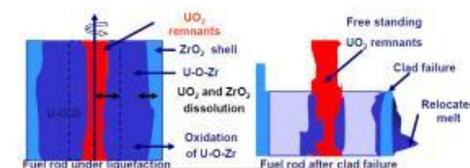
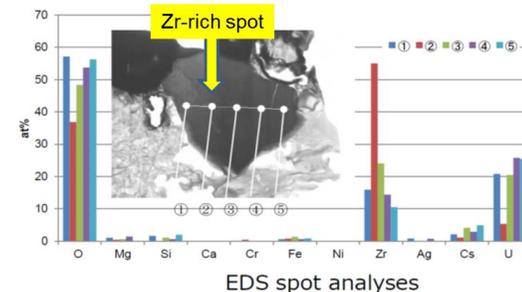
- 文献値（ウラン等既知物質）
- TMI-2や、TMI-2事故を参考にしたシビアアクシデント研究等による知見
- 模擬物質（MCCI生成物など）による試験データに基づく推定

炉内状況推定図

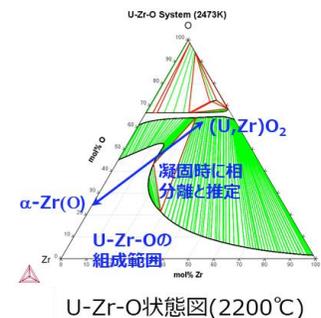


- 現場状況に基づく、1F事故進展解析による号機毎の炉内状況の推定。

サンプル分析・評価結果



U-Zr-Oの形成メカニズム



- サンプル分析結果（測定事実）
- 解析・評価（評価根拠）
- 予想される燃料デブリ特性

燃料デブリ取り出し工程のシステム設計の基礎データベースとして、現場サンプル分析結果に加え、内部調査結果や炉内状況の解析結果を考慮した専門家の意見交換により、燃料デブリ特性リストの更新・高精度化を図る。

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

② 燃料デブリの性状推定の高度化

2019年度の実績

第1回 1F試料評価委員会（2019年7月17日）

- 1F試料評価委員会の趣旨・進め方の認識共有
- 関連情報の紹介（燃料デブリ特性リスト、炉内状況推定図、1F試料分析結果、等）
 - ・1Fサンプル分析では、燃料デブリ生成プロセスの評価が重要である。
 - ・燃料デブリ特性リストは、廃炉事業者が利用しやすい形が望ましい。 **利用者側と密に連携することが肝要**
 - ・固体廃棄物の処理処分PJ等と連携し分析結果の情報共有が必要である。

第2回 1F試料評価委員会（2020年2月25日）

- 少量の燃料デブリサンプルに適切な分析項目について、国際的な議論も紹介しつつ、技術レビュー
 - ・本事業で選定した分析項目は、国際的にも高い重要度を有していることを確認した。

タスクフォース（2019年11月20日より不定期に実施）

- 本年度分析サンプル、および、従来サンプルについて、生成メカニズムの着目点を議論
 - ・気相中のCs化学種（ Cs_2MoO_4 、 CsBO_2 等）は、事故発生時の炉内状況を反映、MoやBにも着目して整理する。
 - ・U粒子は微細であっても、その化学状態はシームレスに燃料デブリ形成メカニズム（急冷or徐冷、燃料デブリの多様性、等）を反映している可能性が高い。U粒子に付随する構造材についても同様である。
 - 少量の燃料デブリサンプルから得られる知見をデブリ取り出しに向けたリスク評価に活用するには、U粒子形成メカニズムの理解が有効**
 - ・化学分析データについては、検出限界、微粉末の混入、不溶解残渣等について、常に留意したデータ整理が必要である。
- 本年度サンプルの分析データについて、信頼性の確認、データの品質管理を実施
 - ・ICP-MS分析、放射線分析における、検出限界、信頼できるデータが得られる閾条件、Np, Pu以上の重元素の評価方法、等について意見交換し、系統的なデータ整理方法についてとりまとめた。
 - ・FE-SEM/WDX、FE-TEM/EDXにおける、測定誤差要因を検討し、次年度実施する、U粒子等の形成メカニズム検討に用いる重要データを選定した。

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

② 燃料デブリの性状推定の高度化

検討の概要

【特性リスト高度化方針】

活用できる情報をリンクし、号機、領域ごとに燃料デブリや構造材の特徴を整理する。廃炉事業者に活用いただくため、燃料デブリ取出し、保管、処理などのリスク（計画時には分析ニーズとして提案）を抽出、重要度を検討する。

【リスト高度化作業】

検討TFにより、高度化特性リスト概念を構築、号機、領域ごとの情報リンクと、燃料デブリ生成メカニズムの検討を進めた。

【取り出しリスクの検討】

高度化リスト等に基づいて、燃料デブリ取り出しリスクの抽出に着手した。

燃料デブリ特性リスト改訂に資する情報

- “①得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討”で得られる分析データ
- プラントの初期物量・素材
【東電HD(株)及びプラントメーカーより情報提供頂く】
- 燃料デブリ分布の推定図
【2016-2017年実施 総合的な炉内状況把握の高度化PJ】
- 現状の燃料デブリ特性リスト
【2013-2018年実施 燃料デブリの性状把握PJ】
- JAEA 燃料デブリ等研究戦略検討作業部会での検討内容
【JAEA内部検討 補助事業外】
(東京電力ホールディングス(株) 福島第一原子力発電所 燃料デブリ等の分析について)

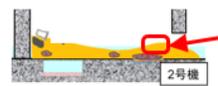
改訂する燃料デブリ特性リスト（検討タスクフォースでの検討に基づく構成概念図）

燃料デブリ生成プロセス（基本的なメカニズム及び移行挙動）や分布について、得られる情報を総合的に評価し、仮説をたてる。また、各領域の組成・構成材料を推定すると共に、燃料デブリ取り出しに係る課題を提案する。

- 燃料デブリ生成プロセス
(2)の状態に至る根拠を記載。

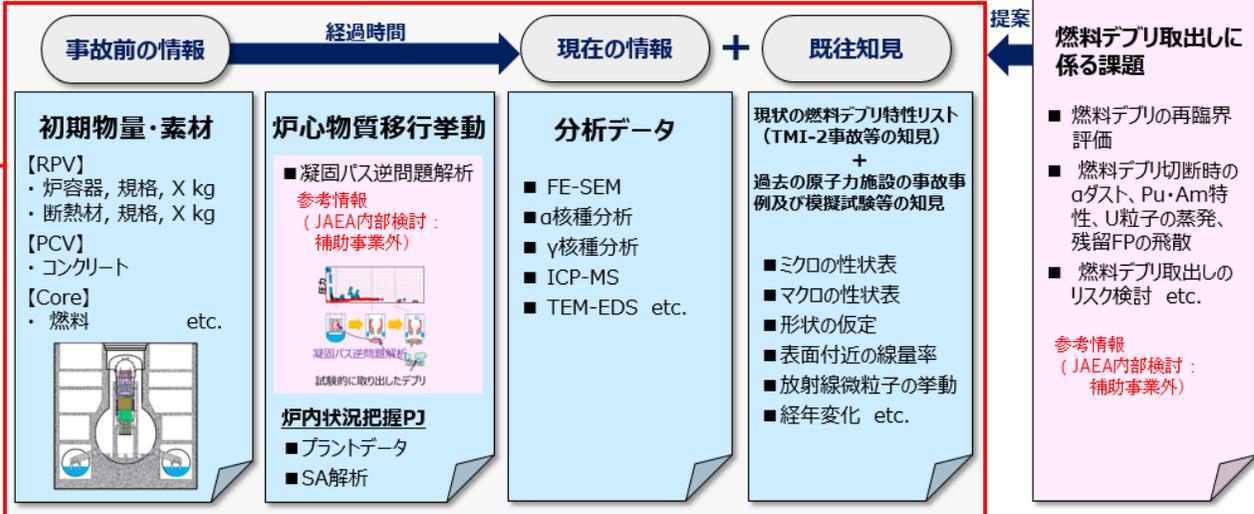
- 各領域の組成・構成材料の推定

例：2号機ベドスタル床部



- 酸化物デブリ (多孔質)
- 粒子状デブリ
- 燃料デブリ (金属を多く含む)
- コンクリート混合デブリ
- 堆積物 (材料不明)

- 主成分の相状態・分布・物量
- FPの化学形・分布・含有量
- 酸化度・混合性・均質性
- 機械的特性
- 線量率
- 表面付着物 etc.

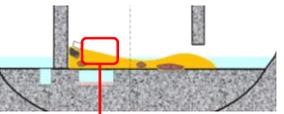


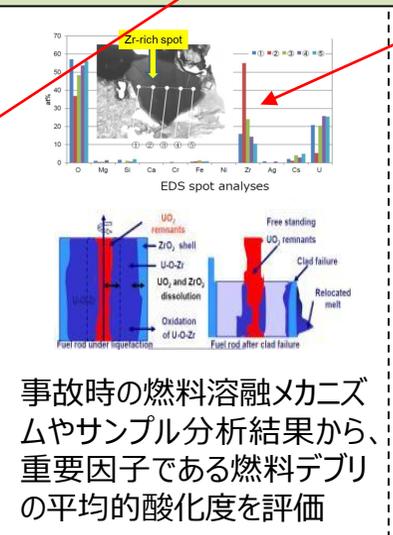
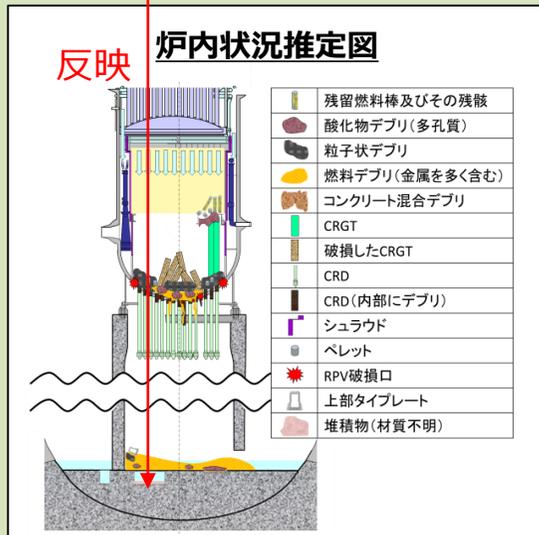
(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

②燃料デブリの性状推定の高度化

高度化した燃料デブリ特性リスト（例：2号機ペDESTAL底部）

判断根拠となる各関連情報カードを整理してデータベース化

No.	燃料デブリ分布・生成プロセスの解釈			判断根拠				リスク	
	領域	各領域の組成・構成材料の推定 組成・構成材料	燃料デブリ生成プロセス	不確かさ	初期物量・素材	炉心物質移行挙動	関連情報 内部調査		分析データ
1	 <p>2号機ペDESTAL底部</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 主成分の相状態・物量 ■ FPの化学形・含有量 ■ 酸化度・混合性・均質性 ■ 機械的特性 ■ 線量率 ■ 表面付着物 etc. 	<p>(例)</p> <p>【領域】から採取されたサンプルを分析した結果、【分析データ】であることが分かっている。【内部調査】、【事故進展】、【既往知見】及び【初期物量・素材】を総合的に評価すると、【領域】近傍には、【組成・構成材料】の燃料デブリが存在すると考えられる。本燃料デブリを取り出すリスクとして、【燃料デブリ取り出しに係る課題】が挙げられる。</p>	<p>推定の不確かさ及び不確かさを低減するための将来サンプル分析への要請を記載</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 各部位の物量 ■ 構成材料の規格 ■ 物性値 etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ プラントデータ ■ SA解析 ■ 状態図 ■ 凝固バス逆問題解析 etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 調査日 ■ 調査概要 ■ 調査結果 etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 採取位置情報 ■ MACS/M ■ FE-SEM ■ α核種分析 ■ γ核種分析 ■ ICP-MS ■ TEM-EDX etc. 	<p>過去の原子力施設の事故事例及び模擬試験等の知見；</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ ミクロの性状表 ■ マクロの性状表 ■ 形状の仮定 ■ 表面付近の線量率 ■ 放射線微粒子挙動 ■ 経年変化 etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 燃料デブリ取り出しに係る課題 ■ 分析コース



JAEAの燃料デブリTFでの検討結果、並びに、本事業内での検討TFでの検討結果を反映

【まとめ】

- ・ 燃料デブリ特性リストの改定案を作成した。(2020年度に、高度化リストを使い勝手のよい形式で整理する計画であり、67ページに参考資料として、とりまとめ形式を示す。)
- ・ 2020年度は、判断根拠を充実させ、現状で得られる全ての知見を反映した特性リストを整備すると共に、廃炉事業者との情報交換を進め、燃料デブリ取り出しリスクの抽出と重要度評価を進める。また、得られた知見の炉内状況推定図への反映を行う。

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

① b.分析効率化の検討 および

③分析項目に関する専門家会議によるレビュー

45

これらについては関連性が高いため、下記の順序でまとめて報告（46～50ページ）

① 得られる燃料デブリサンプル等の分析及び分析効率化の検討

b. 分析効率化の検討

- ・ 少量の燃料デブリサンプルの分析項目の検討
- ・ 分析効率化の検討

③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

(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及び分析効率化の検討

少量の燃料デブリサンプルの分析項目の検討

背景：燃料デブリに関するJAEA内での検討（補助事業外）

JAEA では、1 Fの廃炉作業を安全かつ着実に進めるニーズの観点から、燃料デブリの取り出しから処理処分に至る工程管理分析において、その課題と解決のための分析ニーズ、方法をまとめた。【1】

その基本的な考え方に基づき、少量の燃料デブリサンプルを例に、分析にあたっての着眼点の抽出、評価項目、分析項目について検討を行った。

【1】東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所燃料デブリ等分析について、 JAEA-Review 2020-004

検討の条件

▶ 初期に想定される少量の燃料デブリ取り出しの場合を対象に分析項目の検討を実施

- ・ 少量の取り出し燃料デブリの輸送はA 型輸送と想定
- ・ A 型容器で輸送できる量は、形状、重量では定まらないが、ここでは分析の困難さを考慮し、形状で1mm 球程度、あるいは5mm 角程度、重量として約0.5g 程度以下を想定
- ・ 現状の茨城地区の既存施設（JAEA + NFD)において実施可能と考える項目を検討

▶ 燃料デブリ分析項目検討の着眼点

- ・ 現状の茨城地区の既存施設における燃料デブリサンプルの分析にあたり、関連プロジェクトのニーズに着目
- ・ 近年、分析を蓄積してきた1 Fの付着物や堆積物の評価結果に基づき、1 F燃料デブリの特性の推定に重要な情報となる生成メカニズムについても考慮



1F試料評価委員会

← OECD/NEAにおける
国際会議の検討状況

(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及び分析効率化の検討

少量の燃料デブリサンプルに対する分析項目

- ・少量の燃料デブリサンプル（A型輸送容器）を想定、A) 受入時分析・非破壊分析、B) 物性測定・機器分析、C) 化学分析の各段階で、既存施設（JAEA + NFD）の分析設備において実施可能な分析項目を抽出 ⇒ 燃料デブリ分析ニーズに反映可能

A 受入時分析・非破壊分析

- A-1 外観観察（ペリスコープ）
- A-2 重量測定
- A-3 線量測定
- A-4 イメージングプレート
- A-5 γ 線測定（スキャン）
- A-6 X線CT*

B 物性測定・機器分析

- B-1 金相観察（光学顕微鏡）
- B-2 結晶構造・相同定（XRD）
- B-3 構成元素・不純物（SEM/EPMA）
- B-4 結晶構造・相同定（TEM）

B-5 密度測定（液浸型天秤）

B-6 硬さ・靱性（ビッカース硬さ計）

B-7 水分測定（カールフィッシャー水分計）

C 化学分析

C-1 元素分析（ICP-AES）

C-2 核種分析（ICP-MS）

C-3 α 線放出核種分析（ α 線スペクトロメーター）

C-4 β 線放出核種分析（液体シンチレーション）

C-5 γ 線放出核種分析（ γ 線スペクトロメーター）

C-6 核種分析（TIMS）*

*option : 必須ではないがより高度なデータ等取得が望める項目

(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及び分析効率化の検討

2. 分析効率化の検討

▶ 効率化の検討方針

・ NDF、東電HD、MRI、JAEAによる分析効率化に関する連絡会を開催し、試験的デブリ取り出しで予想される少量の燃料デブリサンプルを対象に、ケーススタディを実施することで合意。

- ✓ 廃炉に関するニーズに即した分析項目
- ✓ 1Fの付着物や堆積物の評価結果に基づき、燃料デブリ形成メカニズムについても考慮
- ✓ 茨城地区既存施設（JAEA, NFD）の設備状況を考慮。
- ✓ できるだけ多くのデータが得られるように分析項目とフローを検討

▶ ケーススタディ（重量、形状）

Case1： 4mmΦ球1粒、0.447g（A型輸送容器の最大搭載量での球状UO₂粒子を想定）

Case2： 1mmΦ球1粒、0.006g（金ブラシ方式のサンプリングにより球状UO₂粒子1粒回収を想定）

Case3： 粉末状サンプル（真空採血管方式のサンプリングにより3cmΦのろ紙に約0.1g回収を想定）

▶ ケーススタディ（分析に要する日数）

- ・ 事業期間内での実施を前提に、分析にかけられる日数として、1か月、2か月に限定した場合の実施項目と、上の検討方針で示したすべての分析項目を実施した場合を比較。
- ・ なお、実際の分析作業においては、非破壊分析、物性測定、化学分析等の分析サンプル加工の方法、結果の確認等、ホールドポイントを設け、関係者間で協議を行うことが想定できるが、その日程は考慮していない。

(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及び分析効率化の検討

・分析効率化の検討

▶ 検討のまとめ

分析効率化の検討として、現状の茨城地区既存施設を対象に、サンプル重量・形状および分析期間をパラメータとするケーススタディを実施した。

これらの結果をまとめると、概略以下のとおりである。

- ・燃料デブリサンプルが比較的大きい場合（Case 1）では、想定する燃料デブリの分析項目がほぼ実施可能である。（原科研、大洗研）
- ・燃料デブリサンプルが比較的小さい場合（Case 2、Case 3）は、物性測定・機器分析のなかに実施が困難な分析項目が生じる。

今後は、この結果を分析計画の検討に反映させるとともに、NDFと東電HDと協議を行い、必要な検討を追加実施する。

③ 燃料デブリ分析の知見収集のための国際協力

1F試料評価委員会に対し、OECD/NEAにおける国際会議の検討状況を紹介するとともに、前述の燃料デブリサンプルの分析項目についてレビューを受け、概略、下記のようなコメントを得た。

- ・ 現場の方がどのサンプルを採取するのかの指針になったり、採取した後の分析作業がスムーズになるようなものを作る必要がある。
- ・ 時間はまだあるので、議論を続けて良いものを作っていくことが大事である。

▶まとめ

今回の1F試料評価委員会でのレビュー結果を受けて、分析項目についての精査を継続する。

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

51

燃料デブリ微粒子挙動研究 全体計画

① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

- ①-1. ウラン含有模擬デブリを用いた粒子生成に関する大型試験（仏・ONET/CEA/IRSN）
 - U及びHf含有模擬デブリ試料の調整、加熱・機械切断時に発生する放射性微粒子のサンプリングライン・分析システムの設計・製作・据付【2019年度】
 - 上述試料、サンプリングライン・分析システムを用いた大型試験の実施、結果評価【2020年度】
- ①-2. 粒子生成挙動に係る基礎試験（JAEA）
 - Pu含有試料を用いた集光加熱・機械切断試験のための実験・捕集系の確立【2019年度】
 - Pu含有試料を用いた集光加熱・機械切断試験の実施、Pu随伴性評価【2020年度】
- ①-3. 国内外の原子力施設における放射性微粒子の飛散事例の調査（RANDEC）
 - 国内原子力施設の事例調査、纏め、実作業工程への適用性検討【2019年度】
 - 欧米原子力施設の事例調査、纏め、事例調査成果を包括した適用性検討【2020年度】

② 微粒子の気相・気液界面及び液相における移行挙動（東京大学）

- ②-1. 気相・気液界面における微粒子挙動評価
 - 試験微粒子選定、水質条件決定、気液界面移行率測定、解析モデルの検討【2019年度】
 - 気液界面移行率測定、解析モデルの適用性評価【2020年度】
- ②-2. 液相における微粒子挙動評価
 - 試験微粒子選定、水質条件決定、沈降率測定、評価用シミュレーションの検討【2019年度】
 - 沈降率測定、CFDシミュレーションの適用性評価及び移行率評価【2019-2020年度】

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

実施概要

1F燃料デブリ取り出し加工時に発生する放射性微粒子の閉じ込め対策・安全設計の検討に必要なと考えられる知見・情報



放射性微粒子発生

気相へ移行

液相へ移行

情報利用側のニーズ

<オフガス処理系>

検討課題例 1

粒子除去・捕集設備に求められる性能及びそのメンテナンス頻度等

検討課題例 2

オフガス配管材料等への付着・吸着の可能性(配管設計の最適化)

<廃液処理系>

検討課題例 1

粒子除去・捕集設備に求められる性能及びそのメンテナンス頻度等

検討課題例 2

水処理系配管材料等への付着・吸着・堆積の可能性(配管設計最適化)

検討されている加工法のイメージ

(上 ; ボーリング、下 ; レーザーガウジング)

(平成26年度補助事業 燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業)

検討に必要不可欠な知見・情報

本課題の実施によって得られる成果
(アウトプット)

検討されている加工法によって発生する微粒子の

1. 発生挙動・発生量
2. 物理特性(粒径、比重等)・化学特性(元素組成等)
3. 各相における微粒子の移行・輸送挙動

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

<2019年度の成果概要、及び各課題の相補関係>

① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

<発生挙動（発生量・粒子特性）の理解>

①-1 ウラン含有模擬デブリを用いた粒子生成に関する大型試験

- 2020年度の試験に必要な供試体の調製、サンプリング・分析システム設計、据付完了
- **U含有模擬デブリ微粒子**の発生挙動・特性の把握

①-2 粒子生成挙動に係る基礎試験

- 2020年度の試験で使用するサンプリング・分析システムの確立、性能評価完了
- **酸化物系模擬デブリ ((U,Pu,Zr)O_{2-x}) 微粒子**におけるU/Puの挙動・特性把握

Pu情報の補完

② 微粒子の気相・気液界面及び液相における移行挙動

<移行挙動の理解>

②-1 気相・気液界面における微粒子挙動評価

- 微粒子の気相→液相移行率測定実施、水質条件の影響等を評価
- **気相→液相移行現象**の評価モデル開発・最適化

②-2 液相における微粒子挙動評価

- 微粒子の液相中沈降率測定実施、水質条件の影響等を評価
- **液相移行現象**の評価モデル開発・最適化

①-3 国内外の原子力施設における放射性微粒子の飛散事例の調査

- 国内外飛散事例等の文献調査

情報補完

燃料デブリ由来微粒子の発生・移行挙動の推定・評価技術の提案

他PJ（取出PJ等）と情報共有可能な形（基礎データ、傾向等）で知見を提供

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

①-1. ウラン含有模擬デブリを用いた粒子生成に関する大型試験（仏・ONET/CEA/IRSN）

2019年度の成果実績

- 試料仕様の検討（製造法、試験体組成の検討）、**全8試料の調製完了**
- **加熱試験システムの設計完了、最適化・据付作業完了**、予備試験を実施、試験可能な雰囲気（N₂）を確認、次年度試験はN₂雰囲気では実施予定
- **機械切断試験に使用する加工器具の仕様決定、切断試験システムの設計最適化完了**、予備試験実施

		2019年度									
		7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
試料製造	試料仕様の検証	■									
	In-Vessel試料の製造・供給 Ex-Vessel試料の製造・供給		■							■	
VITI（加熱試験装置・施設）の整備	既存設備の改良・更新	■									
	サンプリングライン設計・検証 装置組立設置・コミショニング				■						
切断試験装置・施設の整備	切断試験システムの設計	■									
	切断試験チャンバー・試験システムの組立・検証						■				

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

①-1. ウラン含有模擬デブリを用いた粒子生成に関する大型試験 (仏・ONET/CEA/IRSN))

2019年度成果 (試験体について)

表：本事業で使用する試験体の仕様、製造法、及び組成決定の根拠について

試料番号	試料名	試験体の量	Pu/FP模擬体*の有無	製造法	試験項目	試料製造	組成決定の根拠
1	UO ₂ _MCCI	5 kg	×	実MCCI反応	加熱 / 切断	済 (2017年1月)	1F (1号機) の炉心溶融物・コンクリート成分のMCCI反応
2	HfO ₂ _MCCI	0.1 kg	×	るつぼ内加熱	加熱	本事業で製造	試料1の組成を参照 (1F・1号機のMCCI)
3	HfO ₂ _In-vessel	2-3 kg	○	るつぼ内加熱	加熱 / 切断	済 (2016年以前)	BSAF計算による1F・2号機の炉心溶融物の平均組成
4	HfO ₂ _Ex-vessel	2-3 kg	○	るつぼ内加熱	加熱 / 切断	済 (2016年以前)	BSAF計算+US-DOE/NRCのMCCI計算 (2号機)
5	UO ₂ _In-vessel	0.1 kg	○	るつぼ内加熱	加熱	本事業で製造	BSAF計算による1F・2号機の炉心溶融物の平均組成
6	UO ₂ _In-vessel	10 kg	○	るつぼ内加熱	切断	本事業で製造	BSAF計算による1F・2号機の炉心溶融物の平均組成
7	UO ₂ _Ex-vessel	0.1 kg	○	るつぼ内加熱	加熱	本事業で製造	BSAF計算+US-DOE/NRCのMCCI計算 (2号機)
8	UO ₂ _Ex-vessel	10 kg	○	るつぼ内加熱	切断	本事業で製造	BSAF計算+US-DOE/NRCのMCCI計算 (2号機)

* PuはCeで模擬、FP組成は1Fの燃料組成評価値 (ORIGEN2コードを用いた2011年3月11日時点での燃料組成(JAEA-Data/Code 2012-018)) を基に、1-3号機平均値の10年経過・壊変を想定した計算値を基に組成を決定した。

実燃料デブリに想定される代表組成 (コリウム系・MCCI反応生成物、FP成分有無) を比較・検討出来るように試験体仕様を設定。全8試験体の調整完了。



UO₂_MCCI試料 (No. 1) の外観



UO₂_In-vessel試料 (No. 6) の外観



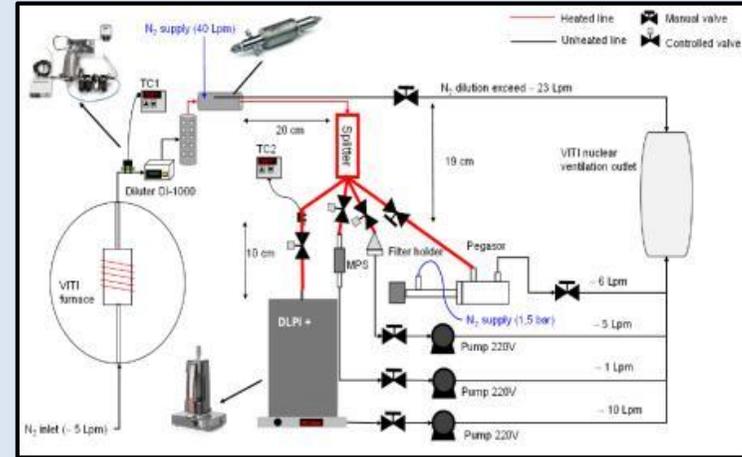
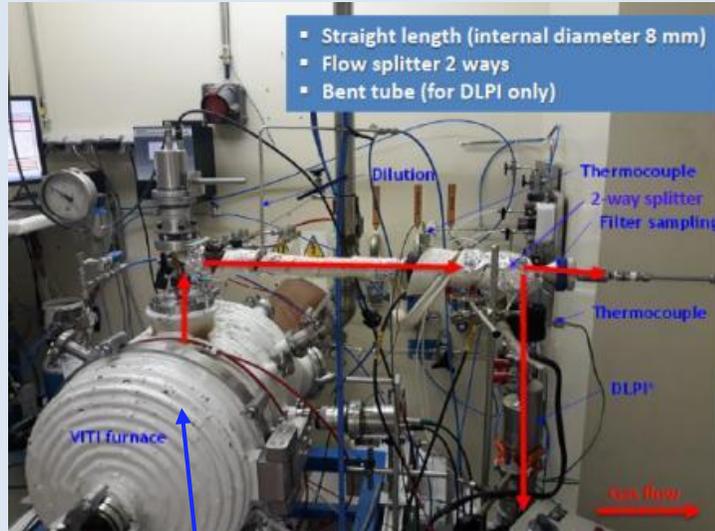
UO₂_In-vessel試料 (No. 8) の外観

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

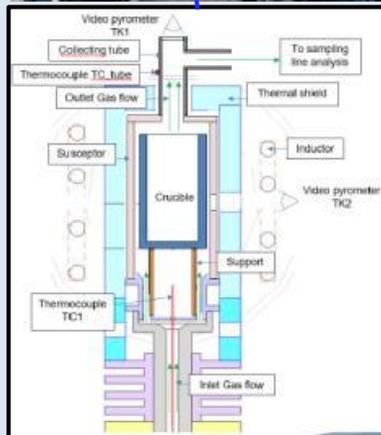
① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

①-1. ウラン含有模擬デブリを用いた粒子生成に関する大型試験 (仏・ONET/CEA/IRSN))

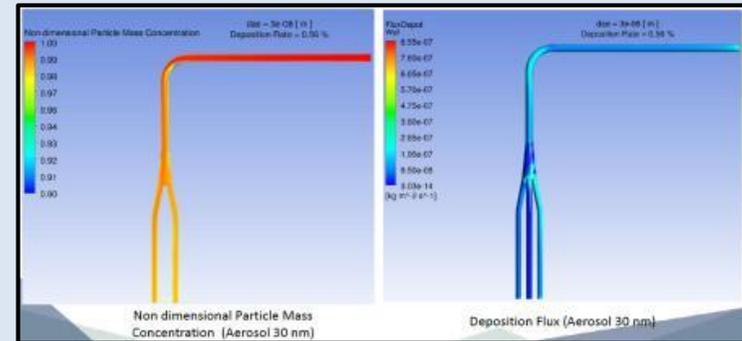
2019年度成果 (加熱試験装置及びサンプリング・分析システムについて)



最適化された加熱試験用システム、及びサンプリング・分析ライン



加熱試験用チャンバー及びサンプリング・分析ライン (上図)、加熱チャンバー内の構造図 (下図) ;
 加熱炉・及び輸送・サンプリング・分析ラインの設計を最適化し、加熱により発生する微粒子の輸送中の沈着を最小限にした。



CFDシミュレーションによる加熱試験用サンプリング・分析ライン内の微粒子移行・沈着挙動の評価

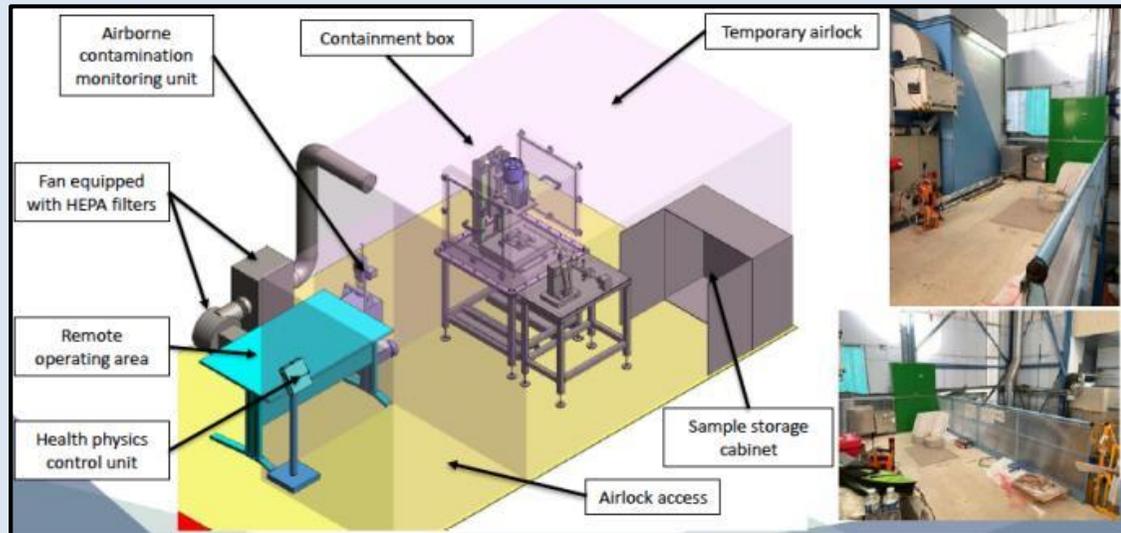
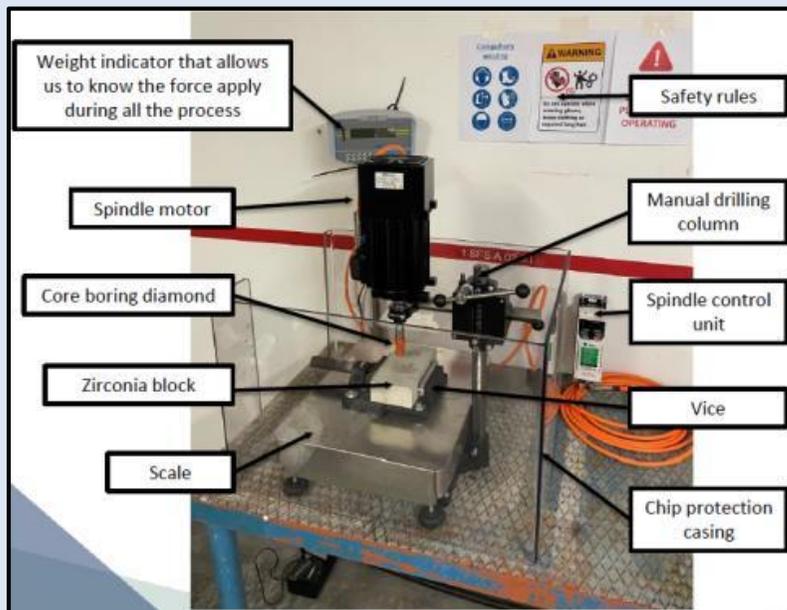
(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

57

① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

①-1. ウラン含有模擬デブリを用いた粒子生成に関する大型試験 (仏・ONET/CEA/IRSN)

2019年度成果 (機械切断 (コアボーリング) 試験装置及びサンプリング・分析システムについて)



機械切断試験用チャンバー及びサンプリング・分析ライン (デザイン最終検討中)

機械的切断試験で使用する装置 (コアボーリング) の性能試験用システム



上記切断装置の性能試験結果 (ダイヤモンド被覆型ビットによる ZrO_2 ブロックの切断試験)
ダイヤモンド製ビットよりもダイヤモンド被覆型ビットの方が切断・微粒子発生に有効なことを確認

<採取された微粒子の分析項目> (2020年度取得情報)

- 発生粒子量
- 発生粒子濃度の時間変化
- 粒子形態
- 粒子組成、密度、推定放射能

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

①-2. 粒子生成挙動に係る基礎試験(JAEA)

2019年度の成果実績

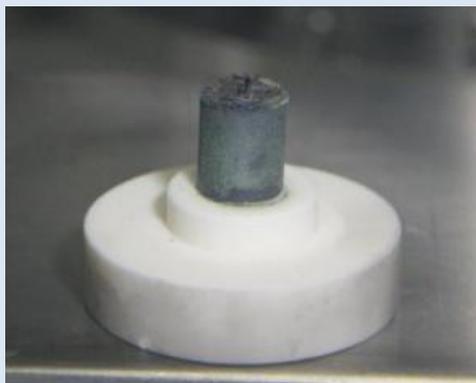
- 試験に使用する加熱装置（**集光加熱装置**）及び機械切断装置（**低速回転切断機**）を JAEA内施設（Pu燃料技術開発センター）内のグローブボックス内に設置
- 模擬物質（ $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{U}_3\text{O}_8$ ）を用いた、上述**試験装置の性能確認試験**の実施
- Pu含有模擬デブリ試料（ $(\text{Pu}, \text{Zr})\text{O}_{2-x}$ ）の調製
- 上述Pu含有模擬デブリ試料を用いた**加熱試験、機械切断試験の実施**
- 使用した加熱装置によってPuのヒュームが発生可能な事、及び発生したヒュームが微粒子状の**固化物を形成し得ることを確認**、及び機械切断装置によって発生した粒子状試料（切子）の採取、分析が可能なことを確認

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

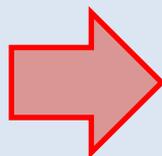
① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

①-2. 粒子生成挙動に係る基礎試験(JAEA)

2019年度の成果 (模擬デブリ試料作成、微粒子捕集システムの整備)



調製された(Pu, Zr)O_{2-x} 模擬デブリ



集光加熱装置
(熱的加工試験)



グローブボックス内に設置された
低速切断機 (機械的加工試験)

熱的加工：加熱により発生したヒューム（蒸気）が容器表面に接触・固体化して生成した微粒子を回収
機械的加工：切断によって発生した粒子（切子）を回収

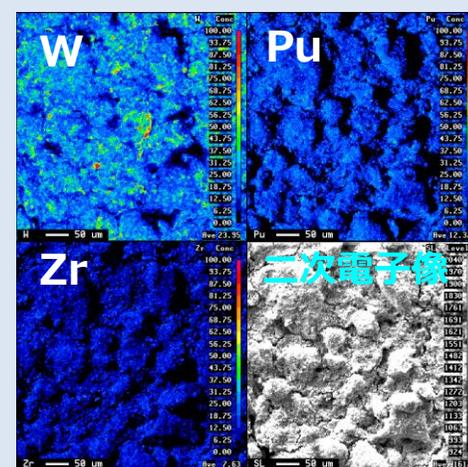
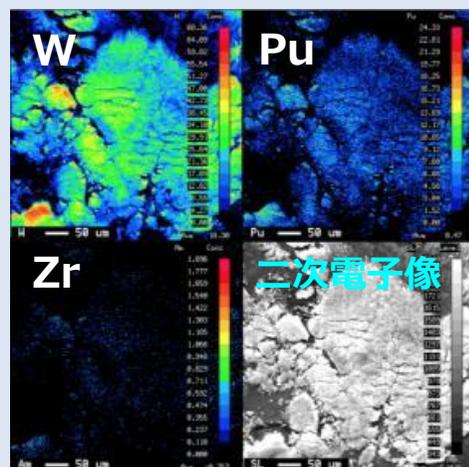
回収された試料をEPMA・粉末XRDで同定、生成した微粒子の性状（元素組成、形態等）を把握

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

①-2. 粒子生成挙動に係る基礎試験(JAEA)

2019年度の成果 (試験装置の性能確認、試料の分析)



(Pu,Zr)O_{2-x}試料を集光加熱した際に発生したヒュームの固化物(左写真、白い物質)及び当該固化物のEPMA測定結果(右写真)

(Pu,Zr)O_{2-x}試料を機械切断した後の断面(左写真)及び切断時に発生した切子(微粒子)のEPMA測定結果(右写真)

<2019年度の成果まとめ>

- JAEAのホット試験用グローブボックス内に加熱装置、機械切断装置を設置
- Fe₂O₃及びU₃O₈を用いた、加熱装置の性能確認試験を実施、ヒューム由来微粒子試料の採取・分析
- Pu含有模擬デブリ (Pu, Zr)O_{2-x}の調製
- (Pu, Zr)O_{2-x}試料を用いた加熱試験、機械切断試験の実施、採取試料の分析
(加熱時はPu・AmはZrよりも蒸発し易い、機械切断では発生粒子組成に元素依存性は無い等を確認)

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

①-3.国内外の原子力施設における放射性微粒子の飛散事例の調査 (RANDEC)

2019年度の実績

1. 国内原子力施設における事例・報告の纏め

➤ 以下の4分野、計13施設の事例報告の調査を実施

- ① 原子炉施設の廃止措置事例 (旧JAERI・“JPDR”、新型ATR“ふげん”)
- ② 核燃料取扱施設の運転・廃止措置事例 (JAEA大洗・FMF、AGF・MMF、JMTRホットラボ、WDF、JAEA原科研・燃料試験施設、東海研究所ホットラボ施設)
- ③ 混合酸化物燃料製造施設 (JAEA核サ研・Pu燃料技術開発施設、混合転換技術開発施設)
- ④ 再処理施設の廃止措置事例 (JAEA原科研・JRTRF)

➤ 調査事例を踏まえ、特に微粒子発生・飛散に関する情報を抽出し、1Fでの燃料デブリ取出作業における放射性微粒子発生・移行挙動の評価との関連性・適応性を検討中

2. 欧米施設における事例情報・内容の予備調査

- ① 欧州における放射性微粒子飛散事例が報告されている施設及び報告書等の有無に関する予備調査実施、ドイツ4施設を選定
- ② 上述内容について、米国における対象施設の予備調査実施、DOE関連照射後試験施設を選定
- ③ ウクライナ・チェルノブイリ原発事故、及び米国・TMI-2原発事故に関する情報の再調査、情報の再取得等の必要性を検討

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

62

① 燃料デブリの加工に伴う放射性飛散粒子の生成挙動

①-3. 国内外の原子力施設における放射性微粒子の飛散事例の調査 (RANDEC)

国内原子力施設における事例調査結果例

ふげん解体時の切断工法と発生微粒子の関係の調査

- ✓ 熱的加工の場合、加工法の違いにより発生微粒子の粒径分布に違いが出るが、材料による違いはあまり出ない。
- ✓ 発生した微粒子（～100 nm以上）の捕集システムとしては、従前から使用されている排気システム・HEPAフィルターで十分に対応可能である。
- ✓ 水中で加工（プラズマアーク、AWJ）を実施した際の微粒子の水→気中移行率を調査した結果、加工条件と移行率の関係（切断速度を上げる（微粒子発生量が大きくなる）或いは入熱を伴う加工（高温条件）場合、気中への微粒子移行率が高くなる、等）を抽出。

混合酸化物燃料製造施設におけるGB機械切断解体時の発生微粒子の調査

- ✓ バンドソーやニブラといった工具で機械切断を実施した場合に発生する微粒子は μm オーダーであり、熱的加工時に発生する微粒子（nmオーダー）よりも大きい。
- ✓ 工具や切断対象物の材料特性により多少の違いはあるものの、機械切断加工時に発生する微粒子のサイズ・分布は基本的には μm オーダーである。
- ✓ 発生微粒子の粒径分布において、放射性核種の種類に対する依存性は見受けられない。

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

63

② 微粒子の気相・気液界面及び液相における移行挙動 (東京大学)

②-1. 気相・気液界面における微粒子挙動評価

②-2. 液相における微粒子挙動評価

2019年度の実績

②-1. 気相・気液界面における微粒子挙動評価

- 試験に使用する**微粒子及び水質条件の選定**
- 異なる水質条件（気泡量・サイズ、pH、微粒子表面電荷）での**気→液界面微粒子移行率の測定**
- デブリ取り出し時の様々な擾乱で発生し得る気泡の影響、特に液相中の残存時間や、微粒子との相互作用を考える上で重要になる気泡サイズに着目した基礎的評価のため、及び表面張力などの水の物性値を変更するためにナノバブル・マイクロバブルを用いた試験を実施
- 気→液界面微粒子移行現象を評価するための**解析モデルの検討**

②-2. 液相における微粒子挙動評価

- 試験に使用する**微粒子及び水質条件の選定**
- 異なる水質条件（pH、電解質濃度）での**液相沈降率の測定**
- 流れのある条件下で微粒子沈降現象を評価するための**シミュレーションの検討**

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

② 微粒子の気相・気液界面及び液相における移行挙動 (東京大学)

②-1. 気相・気液界面における微粒子挙動評価

2019年度の実績

➤ 【共通】 試験に用いる微粒子の選定、水質条件の設定：

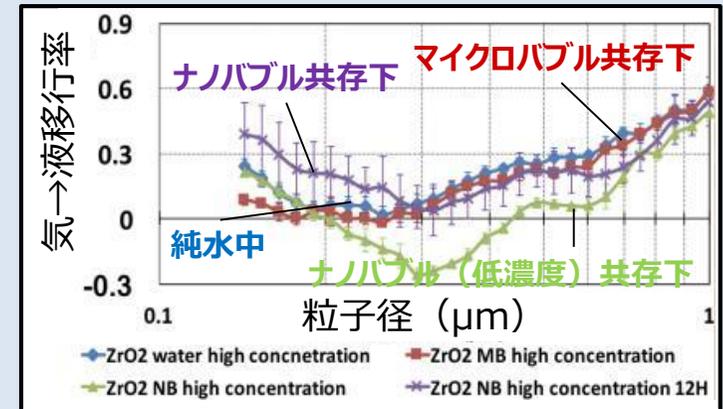
- ONETによるレーザー切断試験の結果を踏まえ、 ZrO_2 粒子 (100, 200 nm)、及び密度の低い TiO_2 粒子 (4.2 g/cm^3 、100, 200 nm) を選定、レーザー回折・DLSにより粒子サイズ確認、ゼータ電位を評価。
- 微粒子密度は移行挙動を支配する主要因であることを踏まえ、1F燃料デブリの主要成分の一つとして考えられている ZrO_2 、及びそれよりも密度の低い TiO_2 の2試料を選定
- 1FPCV滞留水の水質測定の結果 (中性pH) を踏まえ、イオン交換水 (蒸留水) を気相・気液界面、液相試験の分散媒体として選定

➤ 【②-1:気相・気液界面】 気液界面での微粒子移行率の測定

- 気相→液相移行率と粒子サイズ分布の測定を光散乱測定により実施、気泡の性質・濃度、粒子の電化等が移行率に与える影響を評価 (気泡量が多くなる、気泡サイズが大きくなると液相への移行が促進される、微粒子表面電荷の増加により移行率は上昇、等)

➤ 【②-1:気相・気液界面】 気液界面でのエアロゾル移行現象評価のためのモデルの検討

- 試験で確認された気相→液相の微粒子移行挙動を評価するためのモデル (Fuchモデル, Friedlanderモデル等) を複数検討、実験結果と比較検討中



ZrO_2 微粒子 (100 nm) の気液移行率測定結果例

(2) 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

65

② 微粒子の気相・気液界面及び液相における移行挙動 (東京大学)

②-2. 液相における微粒子挙動評価

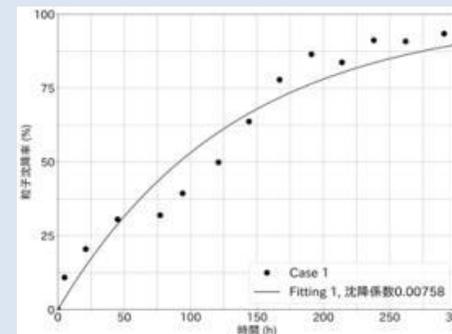
2019年度の実績 (続き)

➤ 【②-2:液相】 液相中の微粒子沈降率の測定

- ・ イオン交換水 (pH = 4, 7, 10) 中に分散させた ZrO_2 粒子を用いて、実験方法妥当性確認のための予備試験を実施、**低pH / 低電解質濃度条件下では微粒子沈降が遅い事等を確認**



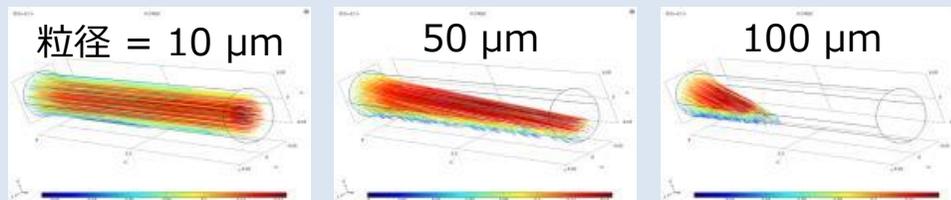
沈降率測定試験の様子：異なる水質条件（右試料；pH = 6、左試料；pH = 7）における ZrO_2 微粒子沈降の時間変化（左上写真；測定開始時の試料、右下写真；280時間後の試料）



左記データを基にした沈降率の計算例

➤ 【②-2:液相】 液相中での微粒子移行距離の評価

- ・ CFD計算のための環境構築（計算機、CFDソフトウェア整備）、及び予備計算試験実施



平均流速0.1 m/sの流れ中における異なる粒径の ZrO_2 微粒子の沈降挙動のCFDシミュレーション予備試験結果

参考資料

(1) 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

②燃料デブリの性状推定の高度化

燃料デブリ特性リストの高度化 (燃料デブリ特性リストの例)

トップページ

号機・領域ごとの詳細情報ページ

燃料デブリ特性リスト

例) 燃料デブリの性状推定の高度化

- メインページ
- 最近の更新
- ModularWebについて
- ヘルプ
- ツール
- リンク先
- 検索ページの更新状況
- ファイルもアップロード
- 情報ページ
- 印刷用バージョン
- この巻への固定リンク
- ページ情報

- 目次 (詳表)
- 1 主要デブリの区分
 - 1.1 ウラン含有粒子の凡例
 - 1.2 マトリックス成分の凡例
 - 2 1号機
 - 2.1 初期物量・素材
 - 2.2 特性リスト領域
 - 3 2号機
 - 4 3号機

主要なデブリ・堆積物の区分(定義)
号機ごとの初期素材・物量
号機ごとのデブリ等の堆積領域の区分

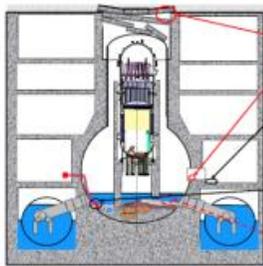
主要デブリの区分 (編集)

ウラン含有粒子の凡例 (編集)

- 急冷による高濃縮燃料: ${}^{235}\text{U}$ - ${}^{238}\text{U}$ - ${}^{239}\text{Pu}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ - ${}^{239}\text{Pu}$
 - 急冷による
 - SS系エアロ
 - α -Zr(OH) $_2$
- #### マトリックス
- 構造材 (SS)
 - 構造材 (SS)
 - 構造材 (Co)
 - その他、 Fe

主要なデブリ・堆積物の特徴(概略)
(現在は、素案としてU含有粒子と周辺物質の情報のみ記述)
(燃料デブリについては、炉内状況推定図を活用し、推定される知見を記載)
(過去の知見:TMI、チェルノブイリ、模擬試験で得られた類似物質を图示)

1号機 (編集)



- 1u-4 (今後の分析候補)
原子炉建屋ウェルプラグスミア
- 1u-3 (今後の分析候補)
原子炉建屋X-2ベネ堆積物
- 1u-1 (編入・分析済のサンプル)
原子炉建屋エアロック室堆積物
- 1u-2 (編入・分析済のサンプル)
原子炉格納容器上部堆積物
(水中ポンプ採取)
- 1u-5 (今後の分析候補)
原子炉格納容器上部堆積物
(水中R.O.V.採取)

初期物量・素材 (編集)

1号機のデブリ・堆積物の堆積領域の分類
(現場データ、事故進展解析等により、堆積状況が異なる領域を推定し定義)
(それぞれの領域の初期素材・物量を記述)
(現場写真データがある場合は图示)

- 1u-4 原子炉建屋ウェルプラグスミア
- 1u-5 原子炉格納容器上部堆積物

2号機 (編集)

3号機 (編集)

1u-4 原子炉建屋ウェルプラグスミア

- 目次 (詳表)
- 1 概要の紹介 (内部調査結果)
 - 2 概要の紹介
 - 2.1 概要 (スミア現象の発生から推定される性状、性状の分類)
 - 2.2 性状の特性 (放射性・物理的・化学的・機械的)
 - 2.3 性状の発生
 - 2.4 炉内状況推定 - 化学的
 - 2.5 性状の発生
 - 2.6 性状の発生
 - 3 性状別に示す性状
 - 4 性状の発生
 - 4.1 ランパンの発生
 - 4.2 性状の発生
 - 4.3 性状の発生
 - 4.4 性状の発生
 - 4.5 性状の発生
 - 4.6 性状の発生
 - 5 性状の発生
 - 6 性状の発生
 - 6.1 性状の発生
 - 6.2 性状の発生

領域ごとの現場の様子(写真)
デブリ・堆積物の特徴

物量、化学的・機械的特徴
FP含有量、FP化学状態
線量、表面付着
これらの不確かさ評価

サンプル分析データ

分析データ情報(取得部位・時期、サンプル量、等)
分析フロー・手法(图示)
分析結果(上の特徴に照らし合わせて図表で整理)

炉心物質の移行挙動

領域ごとの事故進展概要

デブリ溶融・凝固挙動

燃料デブリ特性への影響

デブリ取扱いリスク

関連知見

領域ごとの特徴から推定される既報の類似物質
旧デブリ特性リスト
その他、評価のエビデンス

評価結果・分析データの要点を概説
(さらに、評価・データの詳細、関連知見・エビデンスPDFにリンク)
(エビデンスの該当ページに直接リンク、解説を加える)

主な専門用語、略語等の説明(1)

専門用語/略語	説明
燃料デブリ	高温となった燃料が、制御棒や原子炉圧力容器内及び格納の構造物等ともに溶け、冷えて再び固まった物質
1F	福島第一 原子力発電所
RPV	Reactor Pressure Vessel: 原子炉圧力容器
PCV	Primary Containment Vessel: 原子炉格納容器
D/W	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
S/C	Suppression Chamber: 圧力抑制室。原子炉建屋の地下階にあるドーナツ型容器
AWJ	Abrasive Water Jet: 切断加工能力を高めるために、ウォータージェットに研磨材（アブレシブ）を混入させて、噴射・加工を行う工法
トラス室	原子炉建屋の地下階に、トラス形状（ドーナツ状）の圧力抑制室（S/C）が配置されている部屋のこと
CRD	CRD Control Rod Drive: 制御棒駆動機構
TIP	Traversing Incore Probe、or Transverse Incore Probe: 移動式炉心内計装、移動式炉心内較正装置、又は、走行型炉内検出器
オペフロ	オペレーションフロアの略語で、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DESTAL	ペDESTALは、原子炉本体を支える基礎のことをいう。鋼板円筒殻の内部にコンクリートを充填した構造となっている
FP	Fission Products: 核分裂によって生じた核種、またはそのような核種（核分裂片）から放射性崩壊によって生じた核種
BSAF	The Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: OECD/NEAのプロジェクト(2012年11月～2014年3月)の一つ
SA研究	Study of a Severe Accident: シビアアクシデント研究
VULCANO試験	France CEA Versatile UO ₂ Lab for Corium ANalysis and Observation: CEA VULCANO施設における大型 MCCI (Molten Core - Concrete Interaction) 試験
CFDシミュレーション	Computational Fluid Dynamics: 数値流体解析(流体现象の基礎方程式を数値的に解くことで、さまざまな流れの性質や、流体中での物質輸送、熱輸送などの現象を解析する手法)

主な専門用語、略語等の説明(2)

専門用語/略語	説明
FE-SEM	Field Emission (Type) Scanning Electron Microscope: 電界放出型(電子銃を伴った)走査型電子顕微鏡
FE-SEM/WDX	FE-SEM Field Emission (Type) Scanning Electron Microscope: 電界放出型(電子銃を伴った)走査型電子顕微鏡 WDX Wave-length Dispersive X-ray Spectroscopy: 波長分散型X線分光法(WDSと略す場合もある)
FE-TEM/EDX TEM-EDX	FE-TEM Field Emission (Type) Transmission Electron Microscopy: 電界放出型(電子銃を伴った)透過型電子顕微鏡 EDX Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: エネルギー分散型X線分光法(EDSと略す場合もある) Transmission Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: エネルギー分散型X線分析装置付き透過型電子顕微鏡
SEM/EDX	Scanning Electrode Microscope - Energy Dispersive X-ray Spectrometer: エネルギー分散型X線分析装置付き走査型電子顕微鏡
TEM	Transmission Electron Microscope: 透過電子顕微鏡
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy: 誘導結合高周波プラズマ質量分析法
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry: 誘導結合高周波プラズマ発光分光分析法
TIMS	Thermal Ionization Mass Spectrometry: 表面電離質量分析法
X線CT	X-ray Computed Tomography: X線を用いたコンピュータ断層撮影法
EPMA	Electron Probe Micro Analyzer: 電子線マイクロアナライザ
α 線スペクトロメーター	α -ray spectrometer: アルファ(α)線のエネルギースペクトルを測定する装置
γ 線スペクトロメーター	γ -ray spectrometer: ガンマ(γ)線のエネルギースペクトルを測定する装置

IRID

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