

東京電力福島第一原子力発電所における
事故の分析に係る検討会（第56回）
資料5

試験的取り出し 1 回目・2 回目で取得された 燃料デブリサンプルの分析結果について

2026年10月22日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

東京電力ホールディングス株式会社

- これまでに、東京電力ホールディングスが進める試験的取り出し作業により、2号機ペDESTAL底部の燃料デブリサンプルが2回にわたり取得されている。
- このうち1回目の試験的取り出しにより採取された燃料デブリ（以後、「1回目燃料デブリ」という。2回目も同様）については、当初計画の分析を終了し、その結果を過去の事故分析検討会でも報告してきた^[1]。
- **2回目燃料デブリ**については、2025年4月25日にJAEA大洗原子力工学研究所（JAEA大洗研）の照射燃料集合体試験施設に受け入れた後、2025年8月までに非破壊分析、分取及びサンプル輸送を終了した^[1]。
- 本報では主に、それ以降の**詳細分析の主要な結果^[2]**について報告する。



2号機試験的取り出しにおける燃料デブリの採取位置・概略図（ペDESTAL底部）

- ✓ 当初計画の分析を終了^[1]
- ✓ 追加での分析を実施
⇒本報・参考資料参照



（約9mm×約7mm）

1回目燃料デブリ

- ✓ 非破壊分析及び分取を終了^[1]
- ✓ 当初計画の分析を終了^[2]
⇒本報にて報告



塊

（約5mm×約4mm）



粒

2回目燃料デブリ

燃料デブリサンプルの外観及び分析の進捗状況
（JAEA大洗研受入れ後）

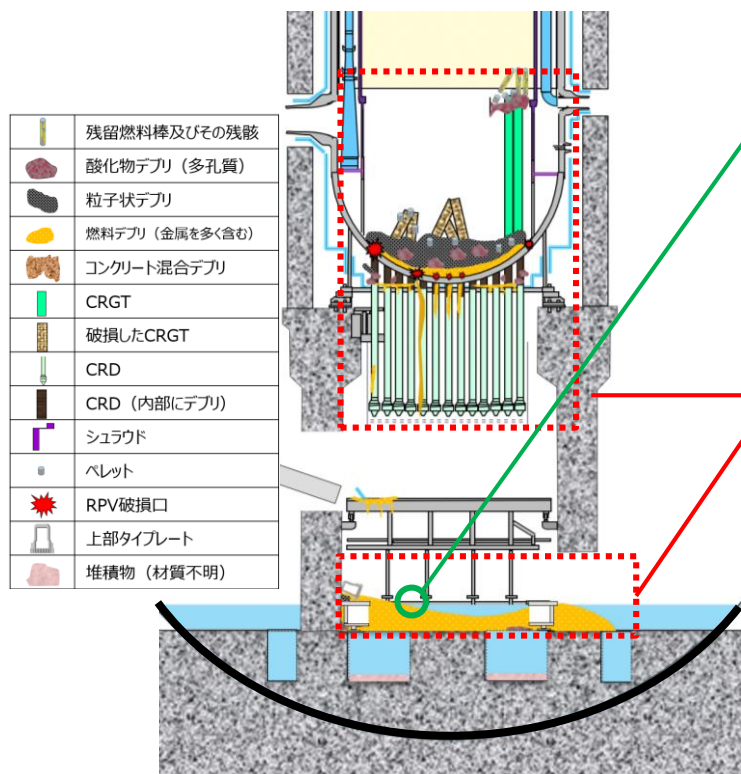
[1] JAEA, 東京電力HD, 燃料デブリサンプル（1回目）の分析結果について（続報）, 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第54回）, 令和8年3月17日. 資料6.

[2] JAEA, 東京電力HD, 試験的取り出し1回目・2回目で取得された燃料デブリサンプルの分析結果について, 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第153回）, 令和8年8月27日. 資料3-3.

- 得られたサンプルの分析を通じて、サンプル取得箇所の状況を把握するとともに、燃料デブリの生成過程を推定する。
⇒ 炉内状況の推定をより精緻にすることで、燃料デブリを安全に回収し十分に管理された安定保管の実現に向けて、燃料デブリ取り出し本格化に向けた検討の基礎とする。

＜「炉内状況の推定」から「燃料デブリ取り出し方策検討」への反映例＞

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



炉内状況推定図 2号機^[1]

1. サンプル取得箇所の状況の把握

- **廃炉ニーズに即した情報**の取得
 - ✓ サンプル中の主要構成成分（核種・元素）の種類・濃度等を把握し、各成分の由来を検討
 - ✓ サンプル中の燃料成分の含有率・分布を把握

2. 燃料デブリ生成過程の推定

- **事故時の炉内環境の検討**を通じた、燃料デブリ性状の推定
 - ✓ サンプル中でUを含む相の微細構造、構成相の組成や結晶構造等から、サンプルの生成条件を推定
 - ✓ 既存の事故シナリオや内部調査結果との比較から、サンプル取得箇所の周辺を評価（今後採取される複数のサンプル分析結果を踏まえて評価）

1. サンプル取得箇所の状況の把握 のための分析

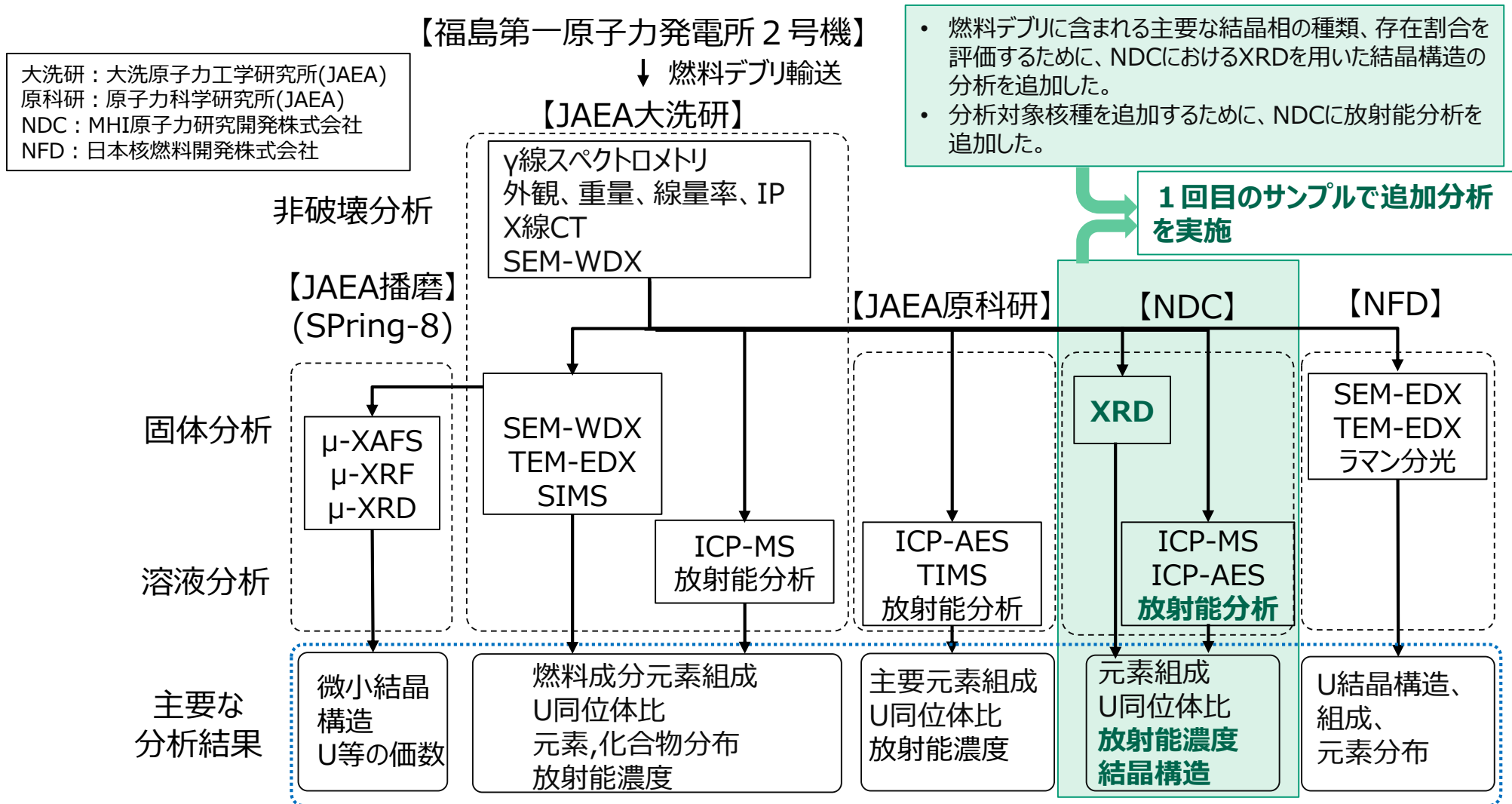
分析項目	分析方法	評価内容	廃炉への主な活用例
基本情報 【既報^[1]】 ・外観、重量 ・線量率 ・密度分布	・外観、重量、線量率測定 ・イメージングプレート(IP) ・X線CT	基本情報の整理	取り出し検討のための基本情報 (空隙の有無や多さなど)
元素含有率 (1)	・ICP-MS ・ICP-AES	燃料成分の含有率 主要成分の由来	臨界評価などの取り出し時の安全対策や、 保管方法の検討のための基本情報
同位体比 (2)	・TIMS ・SIMS	U同位体比	
放射能濃度 (3)	・γ線スペクトロメトリ ・α線スペクトロメトリ ・β線スペクトロメトリ ・液体シンチレーションカウンタ 他	注目核種とUとの帯同性 分析対象核種の放射能 量	燃料デブリ取り出し時の非破壊測定技術 開発の検討ための情報 処理・処分の検討のための情報
元素・化合物分布 (4)	・SEM-EDX ・SEM-WDX ・TEM-EDX ・XRD	元素、化合物（空隙含 む）の分布評価	取り出し工法・工具の検討のための基本 情報（硬度、靱性の推定など）

2. 燃料デブリ生成過程の推定 のための分析

分析項目	分析方法	評価内容	廃炉への主な活用例
Uを含む相等の結晶 構造・組成 (5)	・SEM-EDX ・SEM-WDX ・TEM-EDX ・ラマン分光 ・XRD ・μ-XRF/XRD/XAFS	Uを含む相等の生成時の 温度、雰囲気等の推定 U等の酸化状態	炉内状況推定図の精緻化による取り出 し工法の検討や内部調査の検討

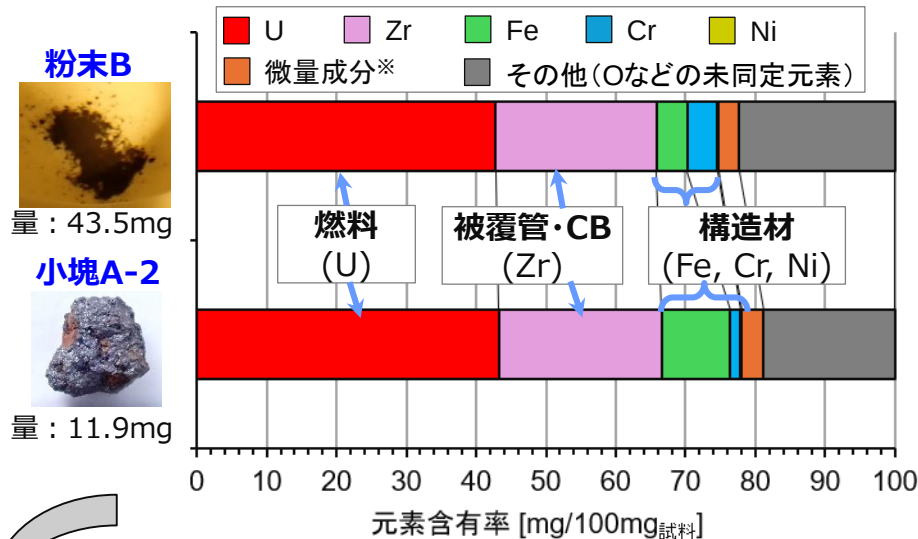
[1] JAEA, 東京電力HD, 燃料デブリサンプル（2回目）の非破壊分析結果（続報）と分取結果について, 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第141回）, 令和7年8月28日, 資料3-3.

- 分取状況及び必要量の検討を踏まえ、2回目のサンプルの詳細分析は4機関で実施した。
- NDCにおける追加分析については、1回目のサンプルで実施した。



- 塊状のサンプルについては、1回目と同様の方法（約250gのステンレス棒で打撃）での破砕により、小塊や粉末に分かれた。
- サンプルの大きさや分析必要量をもとに、分析を実施する4機関用にサンプルを取り分けた。





※ 微量成分としてPu、Nd、Gd、B、Si、Ca、Mg、S、Ti、Mn、Co、Cu、Zn、Mo、Ru、Rh、Pd、Ag、Snを検出(それぞれ、サンプル重量に対して1%未満)

図1 2回目燃料デブリサンプルの元素組成

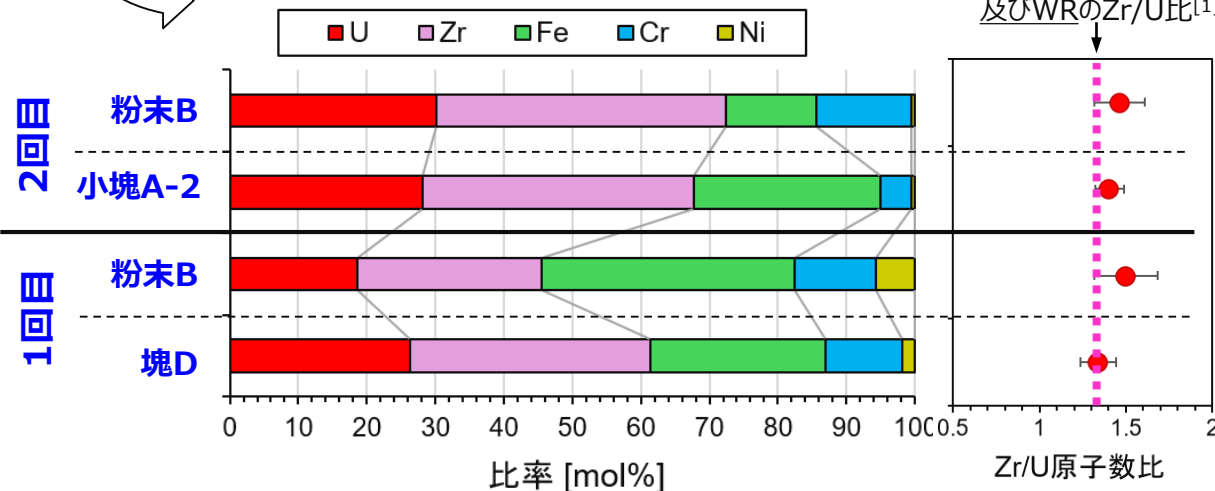


図2 1回目燃料デブリとの比較 (主要元素間の比率)

- 2回目燃料デブリは、1回目と同様に**サンプル重量に対してUの割合が最も高い**。(図1)
- 1回目燃料デブリと比較してU及びZrが多く、その一方で**構造材成分、特にNiの割合が少ない**。(図2)
- 1回目・2回目燃料デブリともに、サンプルのZr/U原子数比は、**炉心の被覆管やCB等を考慮したZr/U比に近い**。(図2)

➤ 1回目・2回目燃料デブリともに**燃料単独ではなく、被覆管やチャンネルボックス等を巻き込んでいる**と考えられる。
⇒ U濃度幅の参考情報として活用できる。

[1] Sato et al., Nucl.Eng.Des., 404, 112205. Table1 をもとに計算 (CB: チャンネルボックス、WR: ウォーターロッド)

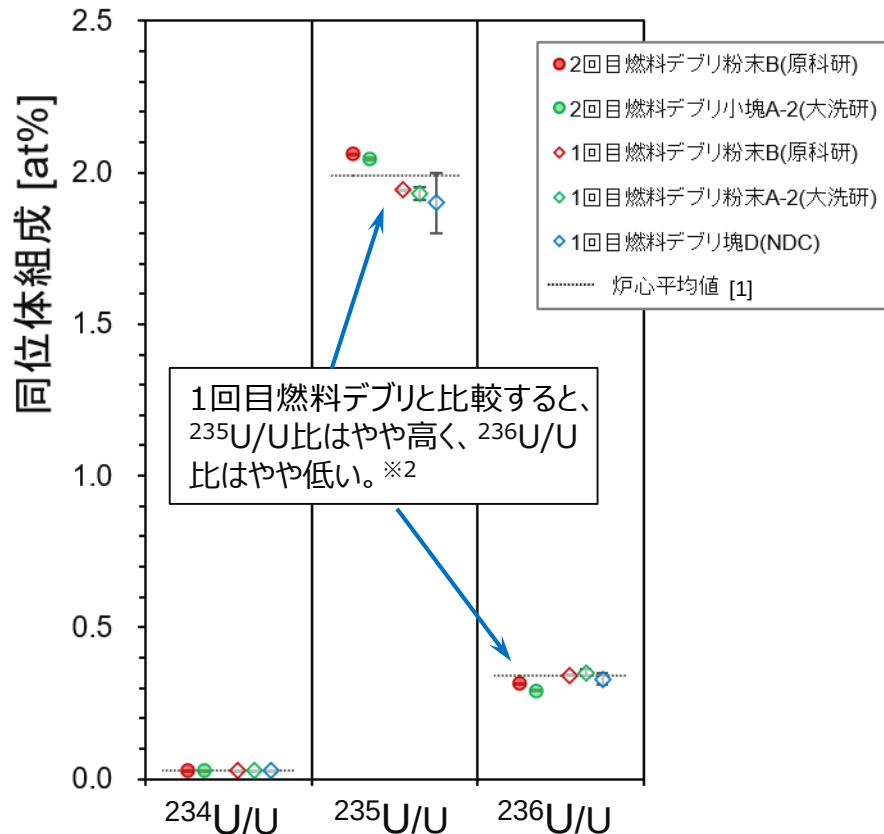
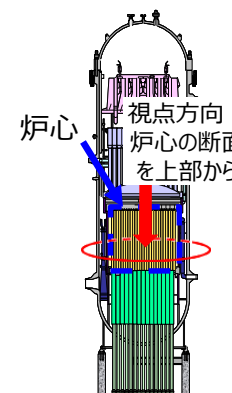


図 2回目燃料デブリのU同位体組成及び
1回目燃料デブリとの比較

■ 2回目燃料デブリの $^{235}\text{U}/\text{U}$ 比は2.04–2.06 at%であり、1回目との僅かな差が認められるものの、2号機の炉心平均値^[1]に近い。

✓ 事故前の2号機炉心では $^{235}\text{U}/\text{U}$ 比に分布があるが※1、サンプル分析では、1回目・2回目ともに炉心平均に近い値であった。

➤ 炉心のごく限られた領域ではなく、ある程度広い範囲の混合が示唆される。
⇒ 燃料デブリの $^{235}\text{U}/\text{U}$ 比の傾向については、今後も広い範囲で採取された燃料デブリサンプルを分析しつつ、生成過程に基づく事故進展過程の理解を深めながら考察していく。



※1 事故直前の炉心では、 $^{235}\text{U}/\text{U}$ 比(ウラン濃縮度)は1%以下から約4%の範囲で分布している。

※2 燃料の燃焼が進むにつれ ^{235}U は消費され、 ^{236}U が中性子捕獲で生成する傾向とは矛盾しない。

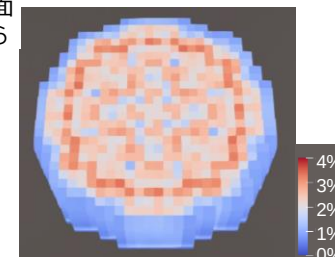


図 BWR炉心の
ウラン濃縮度分布の例^[2]
(赤色が濃い程、高濃縮度を示す)

[1] 奥村ほか，日本原子力学会2021年春の年会，3B01.

[2] JAEA，東京電力HD，燃料デブリサンプル（1回目）の分析結果について，廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第140回），令和7年7月31日．資料3-3.

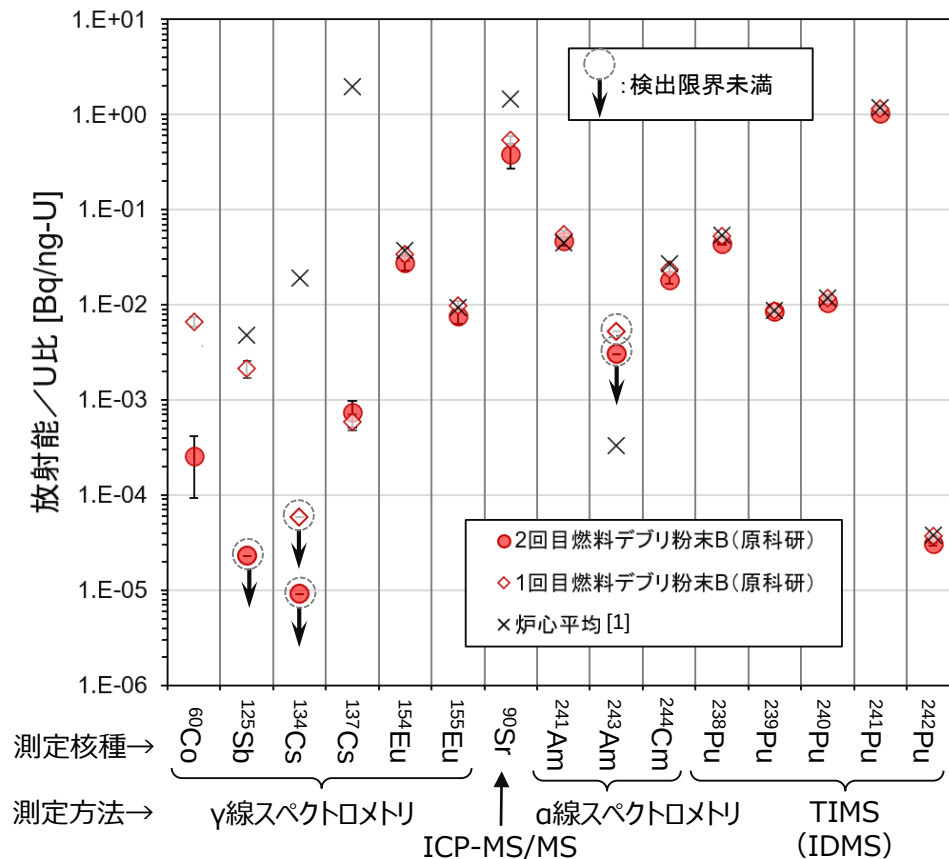


図 2回目燃料デブリ中の各核種の放射能とU重量との比率及び1回目燃料デブリとの比較

注. 放射能は、2026年6月30日時点に補正した値。

Pu同位体の放射能は、TIMS（表面電離型質量分析）で求めた同位体組成及びIDMS（同位体希釈質量分析法）で測定されたPu元素量から評価した。

■ 2回目燃料デブリサンプル中の放射能の内訳は、 ^{60}Co 及び ^{125}Sb が少ないことを除いては1回目と同様の傾向を示した。（左図）

- ✓ ^{90}Sr 、α核種（ ^{241}Am 、 ^{244}Cm 及びPu同位体）及び ^{154}Eu からの寄与が大きい。
- ✓ ^{134}Cs 及び ^{137}Cs からの寄与は小さく、炉心平均と比較しても小さい。

➤ 1回目・2回目ともに事故時の高温によりセシウムが揮発し、γ線量率の低いサンプルを形成した可能性がある。

■ Eu、Am、Cm及びPu同位体とUとの比率は、1回目・2回目ともに炉心平均値に近い。

➤ 燃料デブリ検知のための指標核種として着目される ^{154}Eu 及び ^{244}Cm ※について、1回目・2回目のサンプル取得箇所間でのUとの帯同性を確認した。
⇒ Uとの帯同性について、引き続き非破壊測定技術開発プロジェクトにも情報を提供していく。

断面観察による領域分類

小塊C 光学顕微鏡では、金属相は白く（明るく）見える

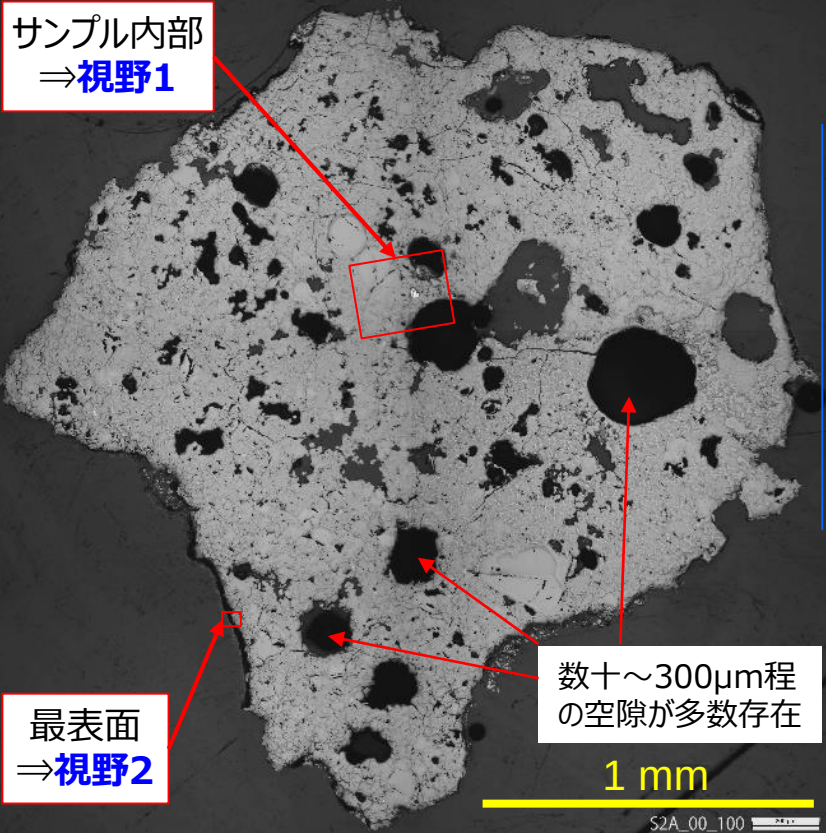
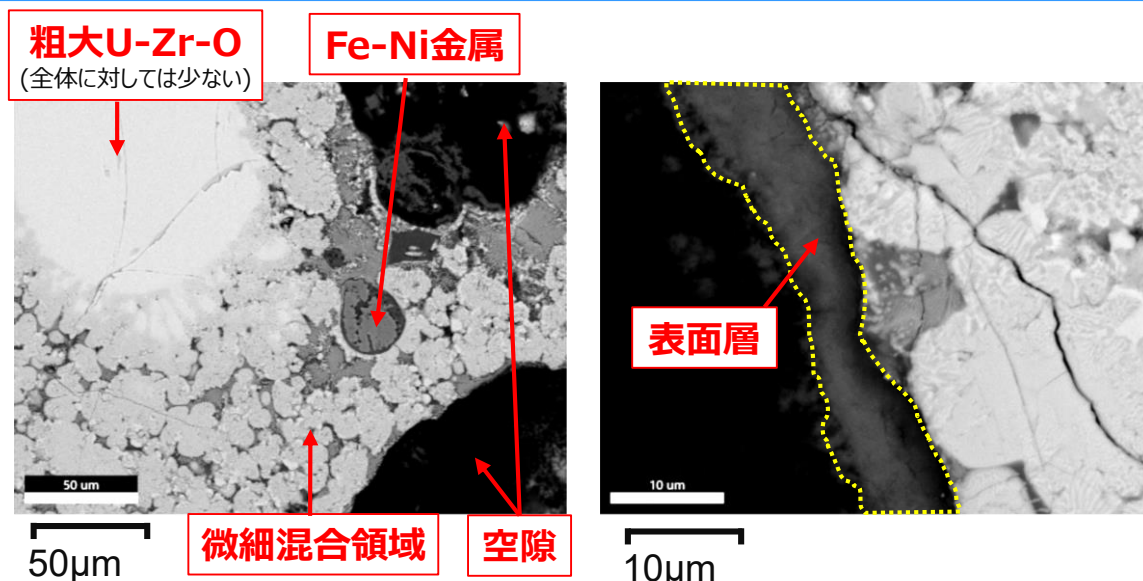


図1 2回目燃料デブリ断面の光学顕微鏡像

参考 各領域の面積割合（図1の画像解析）単位：area%

微細混合領域	粗大U-Zr-O	Fe-Ni金属	空隙
80	2	<0.1	18



視野1：サンプル内部

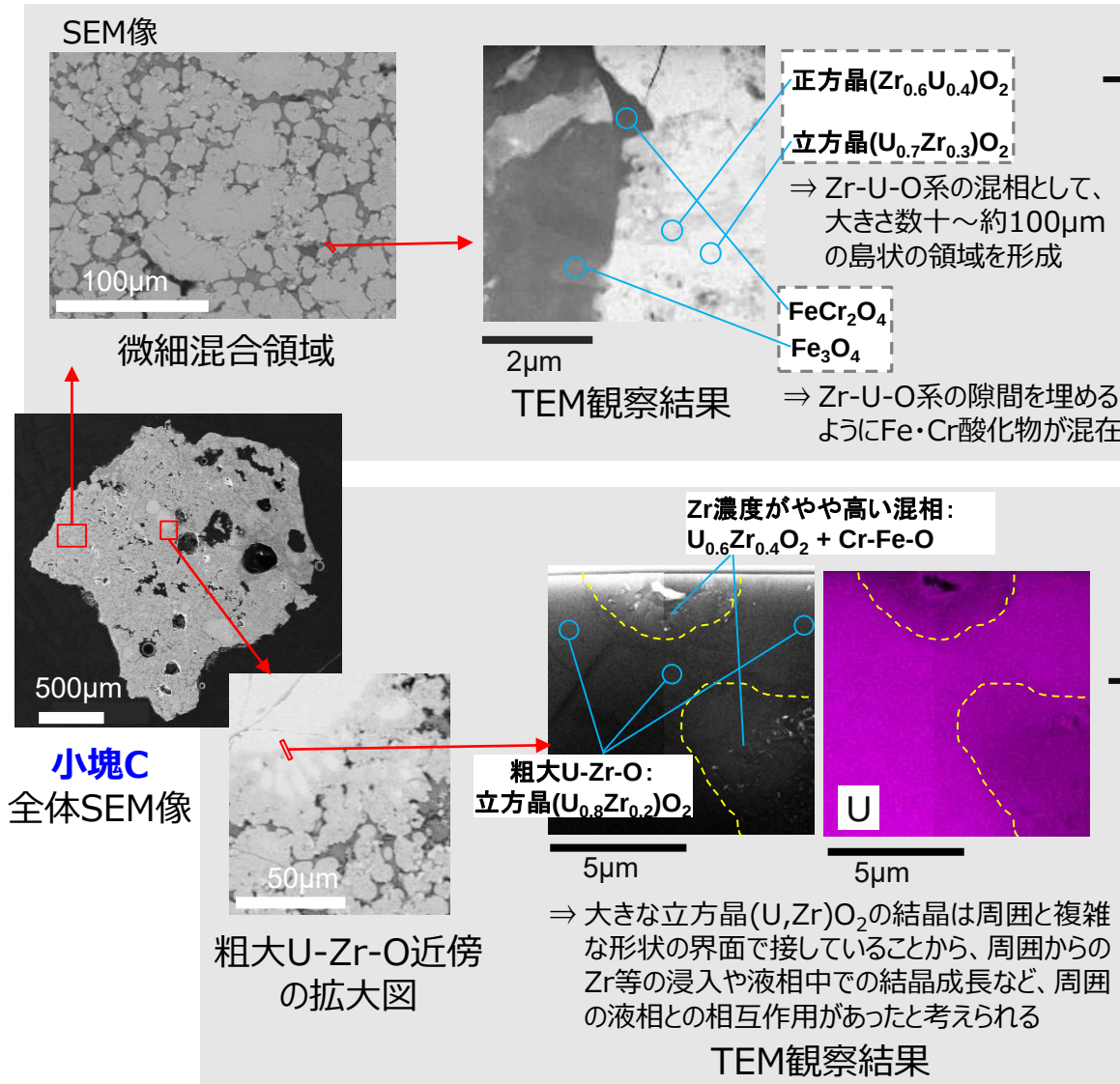
視野2：サンプルの最表面

図2 2回目燃料デブリ断面のSEM観察像

- 2回目燃料デブリは大まかに、**微細混合領域**(Zr-U-Fe-Cr-Oの複合相)、**粗大U-Zr-O**、**Fe-Ni金属**、**空隙**、及び**表面層**(Ni-Fe-O)の5種類の領域に分類された（図1・図2）。
- 1回目と比較して、Fe-Ni金属相が極めて少なく、微細混合領域が多数の割合を占める。
- 微細混合領域の**全体にわたって空隙が分布**している。

➤ 1回目と同様に砕けやすい状態であったと考えられる。
⇒ 取り出し工法・工具検討の基礎情報となる。

特徴的な微細構造や元素分布を示した領域について、SEM-EDX及びTEM-EDX分析により酸化物相や金属相の組成や結晶構造を同定し、各領域の生成過程を考察した。



- **微細混合領域**：断面の大部分を占める
- 観察された微細構造には、**Zr-U-Fe-Cr-O系の溶融・凝固過程**を経た特徴がみられる。
 - 事故時に**被覆管・CB等及び構造材**が酸化されながら燃料と混合・溶融し、冷えて固まったものと推定される。

- **粗大U-Zr-O**：断面にわずかに存在
- 大きな立方晶 $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ の結晶であり、周囲の溶融物と接していた形跡がある。
 - 溶融物と粗大U-Zr-Oとの**固液混合の状態**があったと推定される。

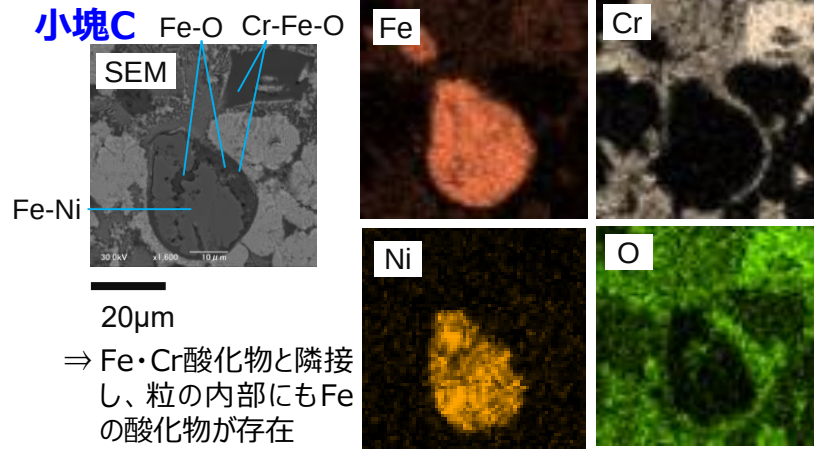


図1 Fe-Ni金属とその周辺の元素分布

小塊C

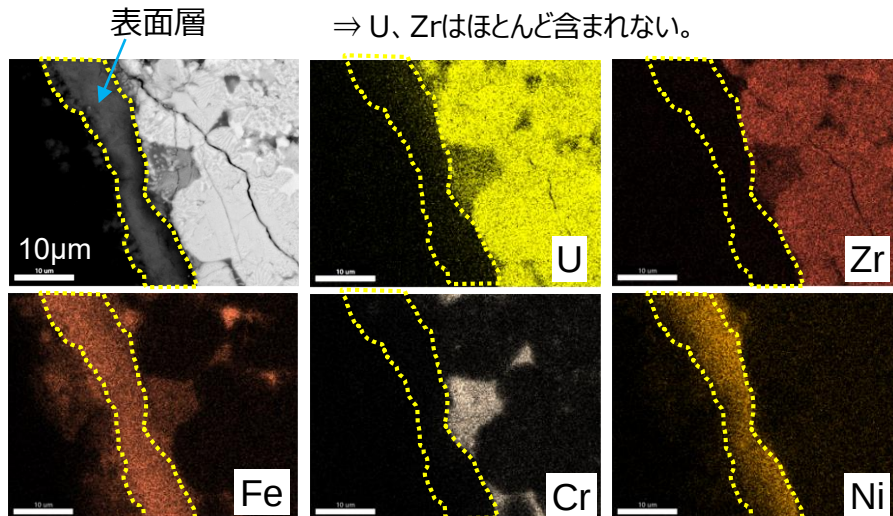


図2 サンプルの最表面近傍の主要元素分布

Fe-Ni金属：存在割合はごくわずか

- Fe-Ni金属相が Fe_3O_4 や $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$ と接触している(図1)。 Fe_2O_3 は観察されておらず、水蒸気による酸化によって生じる組み合わせに類似している。
- 発生した水蒸気により、**構造材由来の成分 (Fe、Cr、Ni)** のうちCrやFeが優先的に酸化され、Ni濃度の高い金属相が残ったと考えられる。

表面層：約10～50μmの厚さで堆積

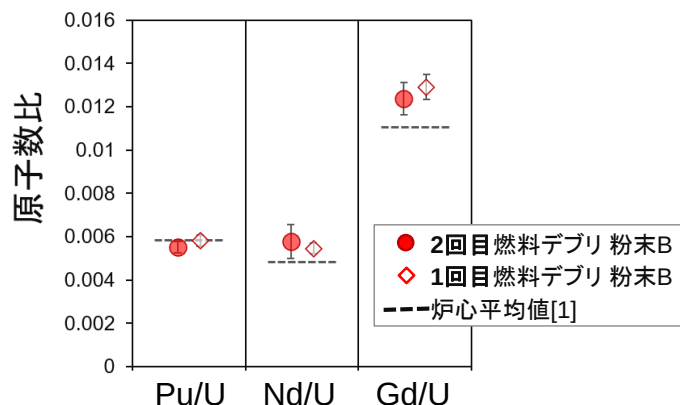
- 主にNi-Fe-Oで構成される。塊に付随していた欠片にも同様の層が見えており、水酸化物の含有も示唆される。
- サンプルの大部分が溶融・凝固により生成した後、冷却水中の溶存成分のサンプル表面への析出や表面変質等により生成したと考えられる。

炉心由来成分の混合状況

- U、Pu、Nd及びGd※に着目すると、1回目と2回目で同位体組成にわずかな差が見られるものの、いずれも炉心平均には近い値が得られている。(図1)

※ U・Pu(アクチノイド核種)、Nd(燃焼度の指標となる核分裂生成物)及びGd(可燃性中性子毒物)の同位体組成は、いずれも事故前の炉心において径方向・軸方向に分布をもつ。

- 1回目・2回目ともに、元の溶融物の形成時には、**炉心のある程度広い範囲が混合したと考えられる。**



参考 Pu、Nd及びGdの対U比

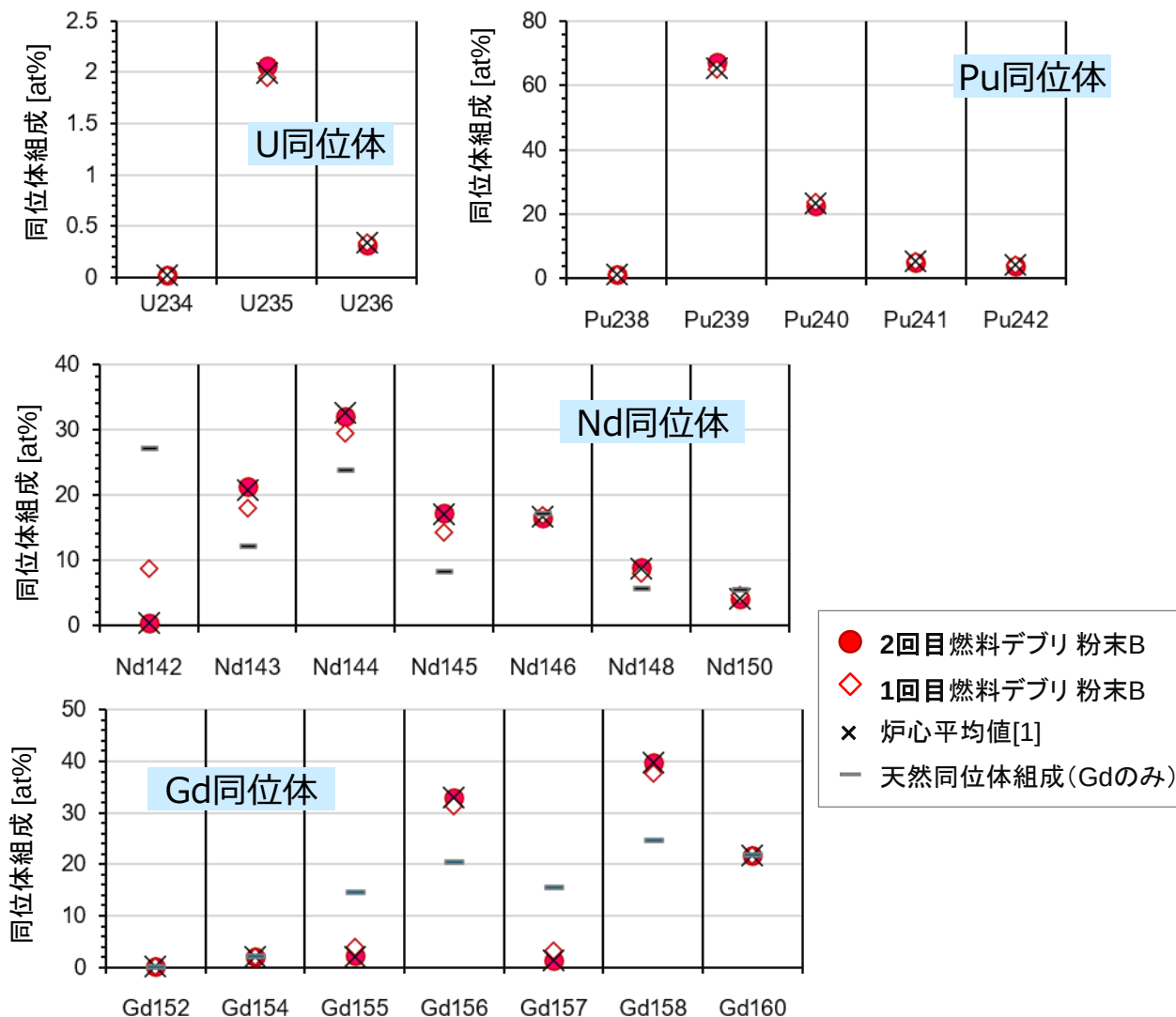


図1 1回目・2回目燃料デブリのPu、Nd及びGdの同位体組成

(JAEA原科研でのTIMSによる分析結果を比較)

構造材成分の取り込み状況

- 1回目・2回目ともに、事故前の炉心の平均組成よりも構造材成分が多い。(図1)

- いずれも、炉心で生成した溶融物がRPV下部に移行していく過程で、炉心下部の構造材※1成分を巻き込んでいった可能性がある。

※1 下部タイプレート、燃料支持金具、等

- 2回目燃料デブリは、1回目と比較してNiをほとんど含まず金属相も少ない。(図2)

- 取り込まれたステンレス鋼などの構造材成分が酸化されFe-Cr酸化物とFe-Ni金属相に分かれ、このうち酸化物相が2回目燃料デブリを構成していた(金属相は別の断片に残った)可能性がある。

- 2回目燃料デブリは角張った形状であり、より大きな溶融固化物から分離したものと考えられ、もとの溶融物から金属相が分離したとする仮説とは矛盾しない。

- 1回目・2回目ともに、炉心下部の構造材成分も巻き込みながら溶融物を形成し、その後酸化物相と金属相に分かれるなどして、異なる形成過程を辿ったと考えられる。

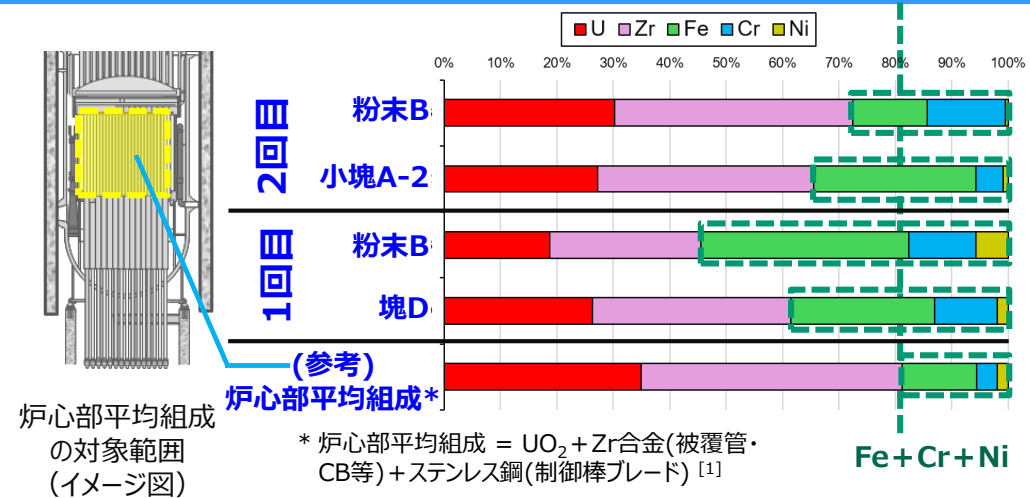


図1 溶液分析結果(主要5元素間の比率)と平均組成の比較

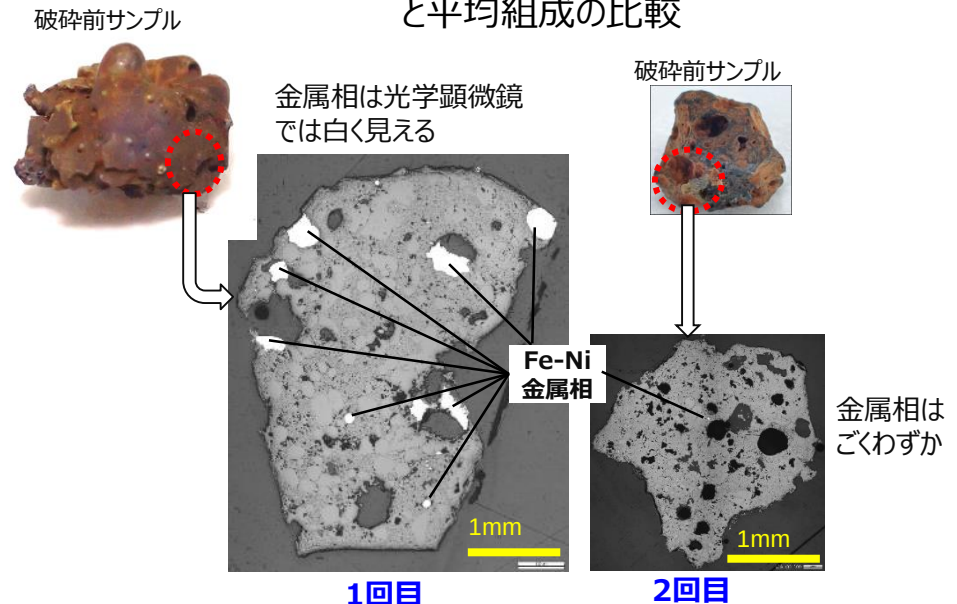
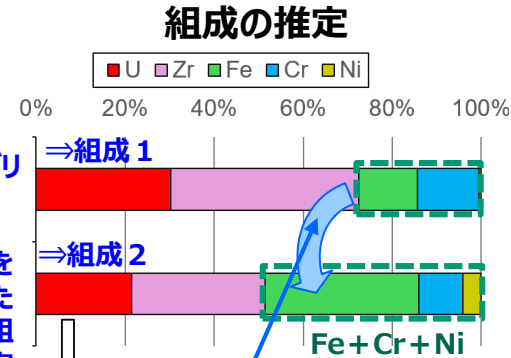
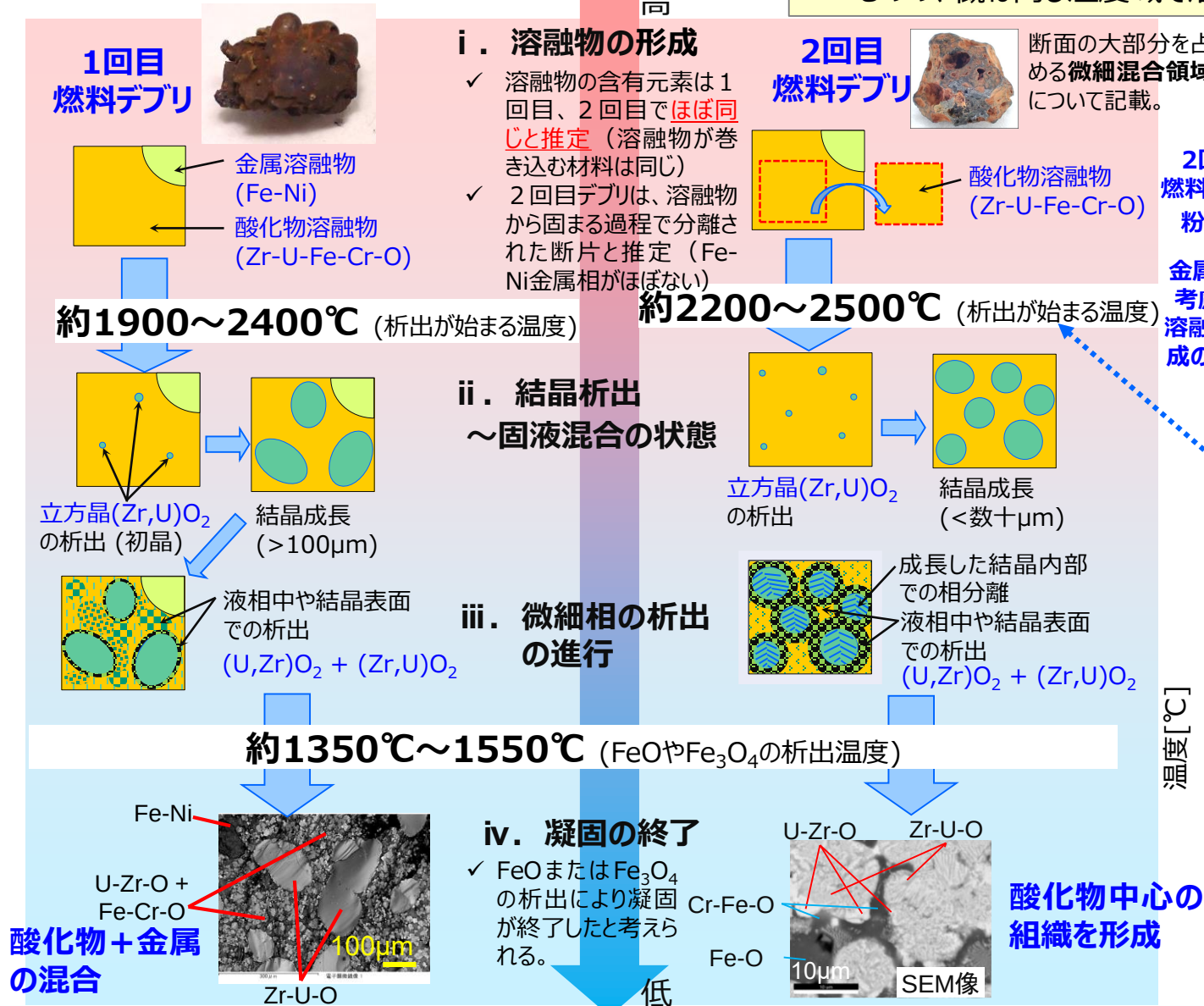


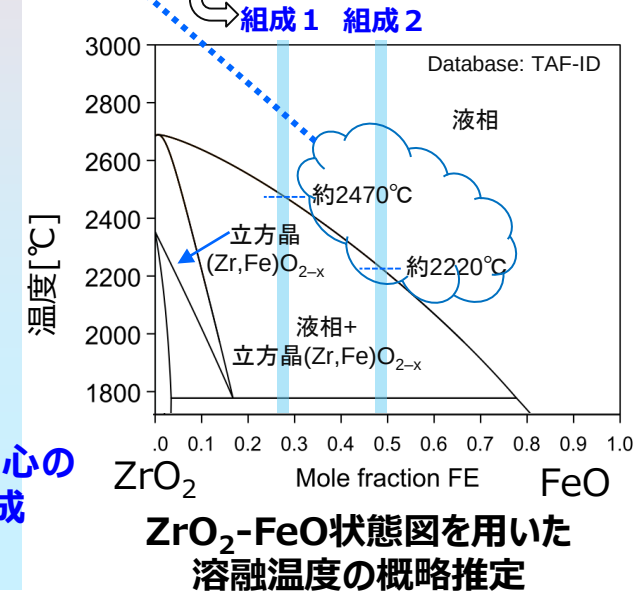
図2 断面の光学顕微鏡観察結果

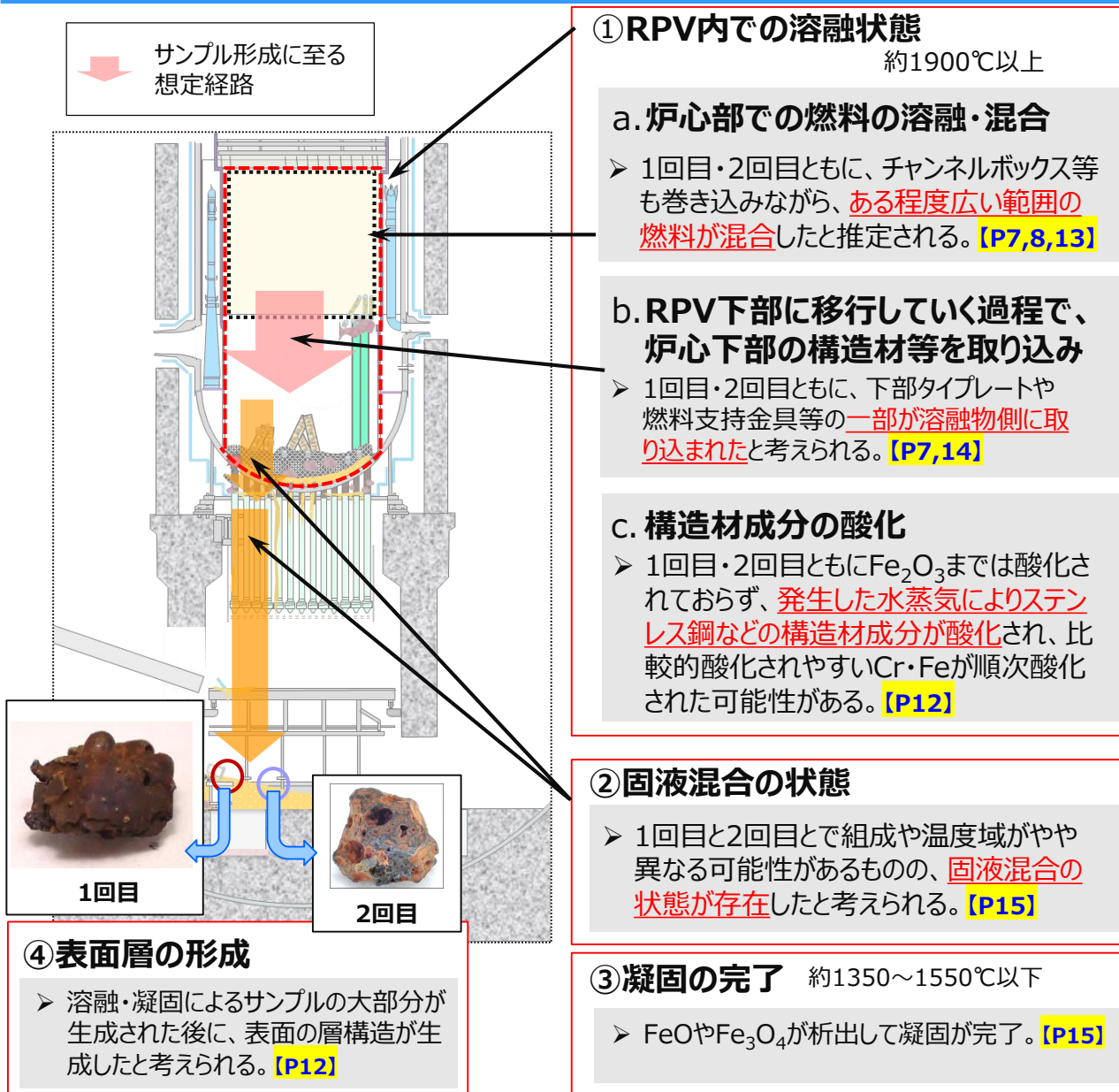
溶融物の凝固過程の推定

➤ 1回目と2回目では途中の結晶成長や相分離の過程に差があるものの、概ね同じ温度域で溶融・凝固が完了したと推定される。



2回目燃料デブリサンプルに含まれるCrは全て酸化物とし、SUS304相当の組成を逆算してFe、Niの寄与を加えることで、もとの溶融物の組成を推定した。





推定結果の概要

- 温度等の生成条件が若干異なる可能性はあるものの、1回目・2回目ともに、サンプルの形成に至る過程(左図①～④)は概ね似通っていると考えられる。
- 1回目と2回目のサンプルは採取位置が離れているものの、組成や構造、生成過程に共通する特徴が確認された。
- 今回の結果のみで炉内全体の状況を断定はできないが、2回のサンプル採取箇所の近傍には同様の燃料デブリが存在する可能性がある。

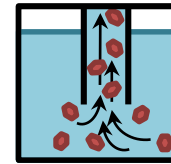
- 分析結果をもとに実際に起きた現象の理解を深めることで、炉内の「まだ見えない領域」の状況推定が可能となり、今後の燃料デブリ取り出しや内部調査の検討等に活用できる。
- ⇒ 暫定的な推定結果であることから、分析と評価の取り組みを継続し、推定結果の更新と精緻化を図っていく。

図 1回目・2回目燃料デブリの生成過程の概略推定結果

- 2回目の試験的取り出しで得られた燃料デブリサンプルは、以下の特徴が見られた。
 - ✓ 1回目と同様に、Uの重量比率が最も高い。被覆管やチャンネルボックス等のZrの成分や構造材成分（Fe、Cr、Ni）を巻き込んでいると考えられる。
 - ✓ サンプルの $^{235}\text{U}/\text{U}$ 比は、1回目とはわずかな差が認められるものの、炉心平均値に近い。燃料の混合は、炉心のごく限られた領域に限定されるものではなく、炉心のある程度広い範囲で生じていた可能性が示唆される。
 - ✓ 放射能濃度としては、1回目と同様に放射性セシウム濃度が低い一方で、 ^{90}Sr やPu同位体などのβ線・α線放出核種からの寄与が高い。
 - ✓ 1回目と同様にサンプル内部に空隙が広く分布しており、破碎しやすい構造であったと考えられる。
 - ✓ 1回目と比較して、構造材成分に由来するFe-Ni金属相の割合が少ない。2回目燃料デブリの生成において金属相と酸化物相とが分離し、金属相は酸化物と別々に移行した可能性がある。また、分離する前の熔融物の組成は1回目と類似していた可能性がある。以上は、これまでの推定を覆すものではなく、事故時の燃料や構造材等のふるまい、炉心の状態等を推定する手掛かりを与えるものである。
- 1回目と2回目のサンプルは採取位置が離れているものの、組成や構造、生成過程に共通する特徴が確認された。今回の結果のみで炉内全体の状況を断定はできないが、2回のサンプル採取箇所近傍には同様の生成過程を経た燃料デブリが存在している可能性がある
- 今後もサンプル分析を継続し、廃炉における安全確保や炉内状況推定の精度向上につなげていく。（次頁参照）

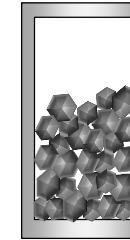


小片への加工
(塊状の燃料デブリ)



吸引・回収
(粒状の燃料デブリ)

収納缶



ニーズ

**安全に取り出して
保管する**

**作業環境の安全
を確保する**

効率的な取り出しを実現する

**炉内状況を
把握する**



着目点

ウランを含む燃料成分を
安全に取り扱える状態か

強い放射線を出すので、
何重もの防護が必要では

ウランを多く含むかを
容易に見分けられるか

硬すぎて取り出せない
のではないかな

直接確認できない
箇所はどうなっているか



分析
結果

構造材成分が多い
平均に近い $^{235}\text{U}/\text{U}$ 比

主要なガンマ線源である
セシウムは少ない

ユーロピウムやキュリウム
がウランに帯同

不均一で空隙が
多い構造

サンプルの生成過程から
温度や雰囲気等を推定



分析から
の知見

まわりと融けて混ざること
で燃料成分の性質が変
化している可能性がある

ベータ線やアルファ線など、
重点的に対策すべき放
射線源が明らかになった

ガンマ線や中性子を
測ることでウランの含
有を判別するための手
がかりが得られた

空隙の多いものは砕い
て回収できる可能性
がある

事故時の現象理解を
深め燃料デブリの状態
を予想できる

廃炉への
活用

⇒安全な取り扱い方法や
保管方法の検討に活用

⇒被ばく対策に活用

⇒非破壊測定技術開発や回収装置の設計
に活用

⇒燃料デブリ取り出しや、
内部調査の検討等に活用

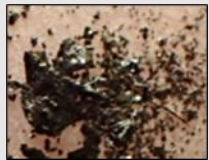
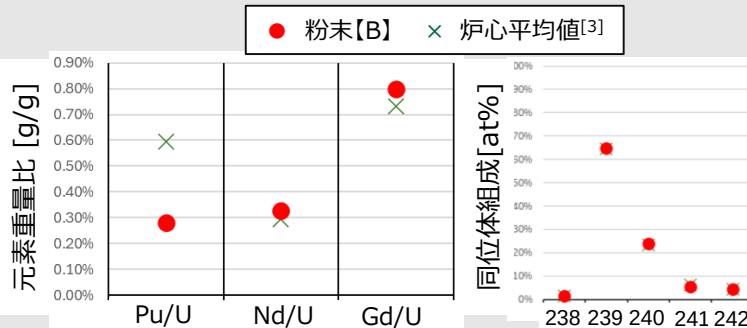
分析を通じて、燃料デブリの実態に合わせた取り扱い技術の検討や
設備設計を可能にすることで、廃炉に活用していく。

- 成分未知で性状不均一な燃料デブリの分析では、溶融・混合等により組成が極めて不均質、アルカリ融解等の特殊な前処理を伴う、従来の使用済み燃料の分析手法をそのまま適用できない場合があることなどから、既報^{[1][2]}での分析結果の公表(以後、「初回報告」という)後も、社外有識者との議論も踏まえ、継続的に分析・解析手法の高度化に取り組んできた。
- 分析結果を用いたサンプルの生成過程や性状評価を行う中で、分析手法間での比較、核種間の整合性確認、解析条件の点検などを実施してきた。その結果、以下 3 点の項目に関して従来の分析・解析手法に改善余地が見出されたことから、これらの項目について再評価を実施した。

(1) 同位体希釈質量分析法 (IDMS法) による U、Pu、Nd及びGdの元素濃度

着目点

約0.1g


1回目燃料デブリ
粉末【B】

初回報告^{[1][2]}におけるPu、Nd及びGdの対U比 Puの同位体組成^[2]

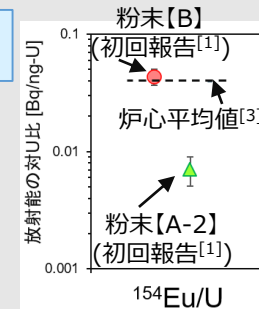
- ✓ Pu/U比が炉心平均値の半分程度であった。一方で、Nd/U比、Gd/U比、Puの同位体組成、²⁴¹Am/U比※は炉心平均に近く、これらの傾向との整合性について検討を行うとともに、手法の改良に取り組んできた。

※ ²⁴¹Amは、現時点では²⁴¹Puの壊変による生成が大部分を占める。

(2) γ線・α線スペクトロメトリ による放射能濃度

着目点

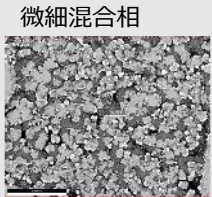
約0.01g


1回目燃料デブリ
粉末【A-2】

分取試料間での放射能濃度の比較
—¹⁵⁴Eu/U比の評価例—
(初回報告の値^[1]を使用)

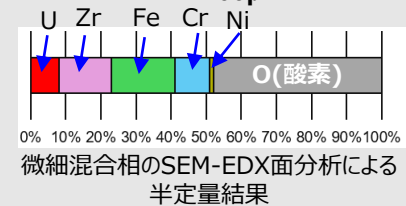
- ✓ 分取試料間での放射能濃度の差が大きく、要因検討を行うとともに、手法改良に取り組んできた。

(3) SEM-EDX面分析 による主要元素比

着目点

1回目燃料デブリ
塊【C】


100μm



- ✓ 酸化物主体という観察結果に対し、酸素濃度が低い値を示していることとの整合性について検討を進めてきた。

改善余地のある点について、分析・解析手法を改良した。

[1] JAEA, 東京電力HD, 燃料デブリサンプル (1 回目) の分析結果について, 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議 (第140回), 2025年7月31日. 資料3-3.

[2] JAEA, 東京電力HD, 燃料デブリサンプル (1 回目) の分析結果について (続報), 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議 (第144回), 2025年11月27日. 資料3-3.

[3] 奥村ほか, 日本原子力学会2021年春の年会, 3B01

(1) 同位体希釈質量分析法（IDMS法）によるU、Pu、Nd及びGdの元素濃度

① Pu価数の制御工程の見直しによる前処理の改良（Pu）

- ✓ 従来採用していた使用済み燃料を対象とする分析フローを改良し、アルカリ融解試料に適した化学分離・前処理手法を導入した。
- 前処理において、添加する試薬等の調整により試料中の6価のPuを考慮した原子価調整を行い、トレーサー溶液中のPuとの間で化学的平衡を成立させるフローとした。⇒ 手順書にも反映

② 濃度評価式の改良（U・Pu・Nd・Gd共通）

- ✓ 同位体組成から元素濃度に換算する評価式を見直した。
- 評価式に用いるトレーサー溶液及び測定試料（燃料デブリ溶解液）の添加量の評価を、両試料間の密度差※を反映して、重量ベースから体積ベースへより厳密に換算・適用した。

※ 燃料デブリの分析では高濃度の硝酸と多量のアルカリ融剤を用いるため、トレーサー溶液（主に1M硝酸溶液）よりも密度が高い。

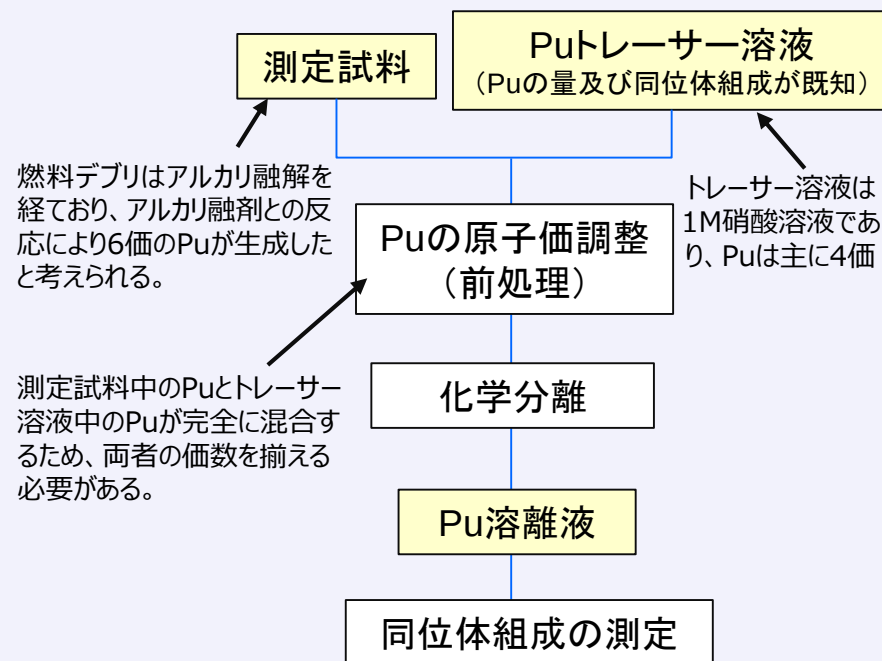


図 IDMS法によるPuの分析フロー概略

(2) γ線・α線スペクトロメトリによる放射能濃度

- ✓ スペクトルの解析手法や解析条件を再点検
- 燃料デブリを対象としたときのγ線及びα線の効率校正条件を適正化

(3) SEM-EDX面分析による主要元素比

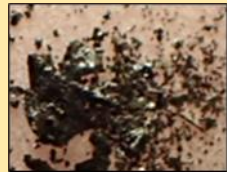
- ✓ EDXスペクトルの解析手法やソフトウェアの設定を再点検
- 燃料デブリを対象としたときのソフトウェア設定条件（ステージの傾き等）を適正化
- 評価の際は、もともと定量性が低いとされる酸素の分析結果の精度に留意

改良した分析・解析手法に基づき、必要に応じ再測定を行うとともに、分析結果を再評価した。

再評価結果

性状評価への影響

(1) 同位体希釈質量分析法（IDMS法）によるU、Pu、Nd及びGdの元素濃度 初回報告時（既報^[1] p.31）

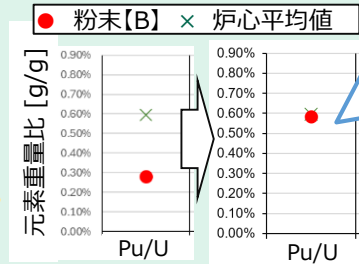


粉末[B]

分析値[mg/100mg _{試料}]	
U	29.9 ± 0.2
Pu	0.084 ± 0.001
Nd	0.098 ± 0.001
Gd	0.239 ± 0.002

再評価後

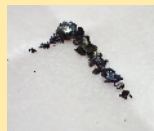
分析値[mg/100mg _{試料}]	
U	34.48 ± 0.64
Pu	0.201 ± 0.008
Nd	0.114 ± 0.005
Gd	0.294 ± 0.012



Pu/U比も炉心平均値に近い値となり、²⁴¹Am等の他のデータの傾向とも整合

⇒ 燃料がある程度広い範囲で混合したとする推定結果とも整合

(2) γ線・α線スペクトロメトリによる放射能濃度 初回報告時（既報^[1] p.34）

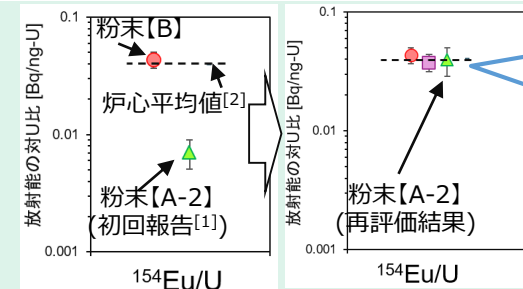


粉末[A-2]

核種	分析値 [MBq/g-試料]
⁶⁰ Co	2.0 ± 0.5
¹²⁵ Sb	2.0 ± 0.5
¹³⁷ Cs	0.6 ± 0.2
¹⁵⁴ Eu	1.8 ± 0.5
²⁴¹ Am	2.3 ± 0.6
²⁴² Cm	0.02 ± 0.02
²⁴³ Cm+ ²⁴⁴ Cm	3.5 ± 0.2
²⁴¹ Am+ ²³⁸ Pu	11.5 ± 0.4
²³⁹ Pu+ ²⁴⁰ Pu	4.8 ± 0.3

再評価後

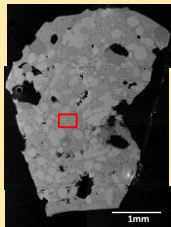
核種	分析値 [MBq/g-試料]
⁶⁰ Co	9 ± 2
¹²⁵ Sb	6 ± 1
¹³⁷ Cs	0.30 ± 0.09
¹⁵⁴ Eu	10 ± 3
²⁴¹ Am	13 ± 3
²⁴² Cm	0.04 ± 0.03
²⁴³ Cm+ ²⁴⁴ Cm	8 ± 2
²⁴¹ Am+ ²³⁸ Pu	25 ± 5
²³⁹ Pu+ ²⁴⁰ Pu	6 ± 1



分取試料間の差異がより明瞭になった

⇒ サンプルの不均一性を踏まえた評価により、核種間の帯同性に関する評価精度が向上

(3) SEM-EDX面分析による主要元素比 初回報告時（既報^[1] p.42）



塊[C]

主要元素	主要元素間の比率 [at%]
O	48
Cr	10
Fe	18
Ni	1
Zr	15
U	8

再評価後

主要元素	主要元素間の比率 [at%]
O	74
Cr	4
Fe	8
Ni	<0.5(わずかに存在)
Zr	9
U	4

⇒ 金属主体か／酸化物主体かの判断が容易になり、TEM観察等の固体分析との相互比較による評価精度が向上

[1] JAEA, 東京電力HD, 燃料デブリサンプル（1回目）の分析結果について、廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第140回），2025年7月31日。資料3-3。
[2] 奥村ほか，日本原子力学会2021年春の年会，3B01

- 再評価により分析精度が向上し、燃料デブリの生成過程に係る推定結果※に変更は無かったが、一部の知見を補強する結果となった。

※既報での評価

- ある程度広い範囲での燃料が溶融・混合し、炉心下部の構造材が巻き込まれた可能性がある。
- 構造材がある程度酸化された状態であり、1900～2400℃でも溶融が可能であった可能性がある。

- 燃料デブリの性状評価のため、データ相互や異なる手法間での整合確認を継続的に実施している。今回の再評価は、その過程で得られた知見を分析・解析手法の改良に反映したものであり、燃料デブリを対象とした分析精度および評価の信頼性向上につながった。今後も、成分未知で性状不均一な燃料デブリの分析精度向上の取り組みを継続し、必要に応じて評価結果も見直していく。

参考資料

◆ 放射能分析

- 処理・処分の検討に資する情報取得のため、従来の燃料デブリサンプルの分析から対象核種を広げて放射能分析を行った。
- 分析対象核種は、固体廃棄物の分析での対象核種^[1]を参考にしつつ、これまで燃料デブリサンプルのデータがほとんど取得されていない、β線放出核種を中心とした(右表参照)。対象サンプルは、サンプルの有効活用と分析手法の整備状況を踏まえ、1回目燃料デブリの溶解液(NDCにて保管中)を対象とした。



図 放射能分析の対象サンプル

◆ SEM-EDX及びXRDによる相状態の評価

- 複雑な形状を有する1回目サンプルの生成過程への理解をさらに深めるため、特徴的な外観を持つ箇所について相状態の評価を行う。
- サンプルは、破碎前にみられた突起部分(右図)とし、他の部位の微細組織や結晶構造・組成との比較から、部位による生成過程の違いを確認する。

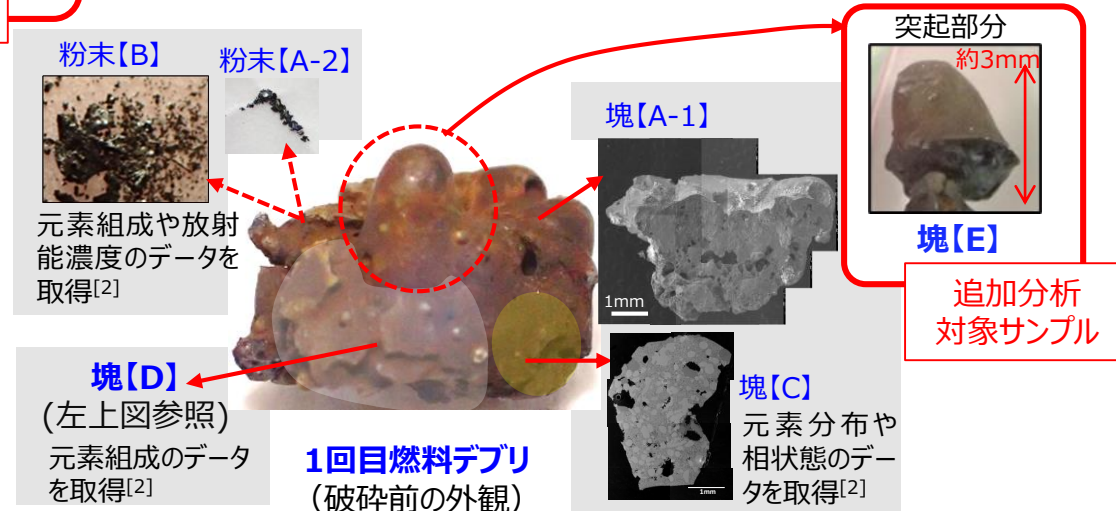


図 1回目燃料デブリの分析状況及び追加分析の対象サンプル

表 NDCでの放射能分析における測定対象核種及び測定方法

核種	測定方法
^3H , ^{14}C , ^{63}Ni , ^{79}Se	液体シンチレーションカウンタ
^{36}Cl , ^{99}Tc , ^{90}Sr , ^{129}I	β線スペクトロメータまたはガスフローカウンタ
^{41}Ca	X線計測
^{93}Zr , ^{93}Mo , ^{107}Pd	ICP-MS
^{126}Sn	γ線スペクトロメトリ(LE-Ge)
γ線放出核種(^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{241}Am , ^{60}Co)※	γ線スペクトロメトリ

※ これらのγ線放出核種は、1回目燃料デブリの他の分取試料のデータが取得されていることから^[2]、分取試料間での差異を検討するため、追加分析でも対象とした。

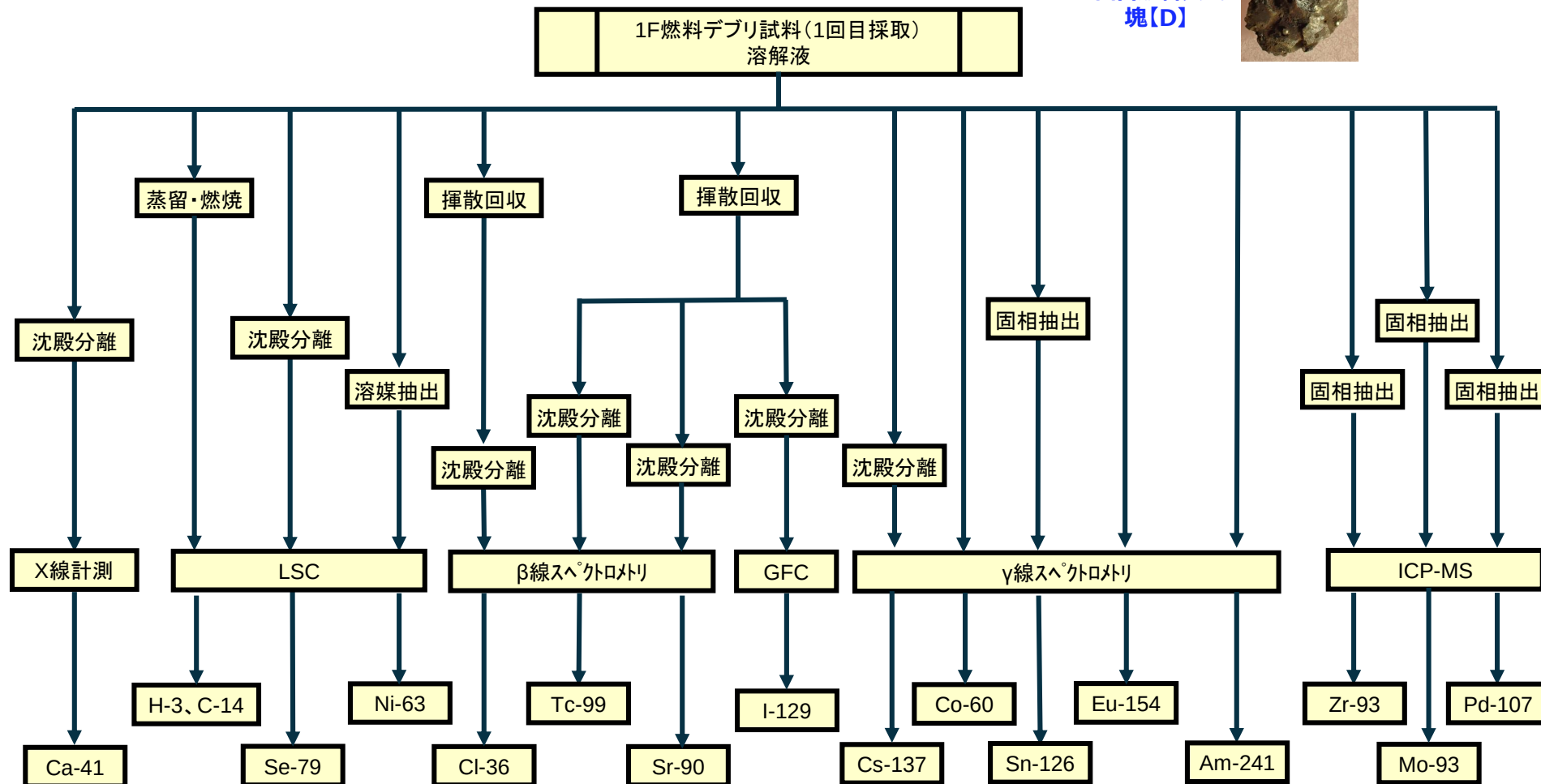
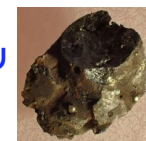
[1] 東京電力HD, 1F固体廃棄物分析における分析対象核種の選定について, 第23回特定原子力施設の実施計画の審査等に係る技術会合, 2024年12月5日。資料2-1。

[2] JAEA, 東京電力HD, 燃料デブリサンプル(1回目)の分析結果について, 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議(第140回), 2025年7月31日。資料3-3。

◆ 分析フロー（概要）

- 分析試料を核種毎に適量分取し、前処理及び分析を実施した。

1回目燃料デブリ塊[D]



LSC : 液体シンチレーションカウンタ
GFC : 2πガスフローカウンタ
ICP-MS : 誘導結合プラズマ質量分析装置

◆ 放射能濃度

- これまで対象としていたγ線放出核種に加えて、 ^{63}Ni や ^{99}Tc なども検出された。(表1)
- 1回目燃料デブリの他の分取試料でもデータが取得されているγ線放出核種の濃度について、Uに帯同しやすいと考えられる ^{154}Eu を基準にして比較を行った。(図1)
 - ^{241}Am は分取試料間での差が小さく、サンプル生成の際にUとも帯同しやすいと考えられる。 ^{90}Sr も分取試料間の差は小さいものの、炉心平均の値よりもやや低い。
 - ^{60}Co 濃度は分取試料による差が見られる。分取試料間では構造材成分(Fe+Cr+Ni)の濃度にも差があり、これらに帯同しやすいと考えられる。(参考として、Niを基準とした ^{60}Co 濃度を併記した)
 - ^{137}Cs は燃料起源であるが、溶融の過程で大部分が揮発すると考えられ、サンプル内で微量が不均一に残ったと考えられる。

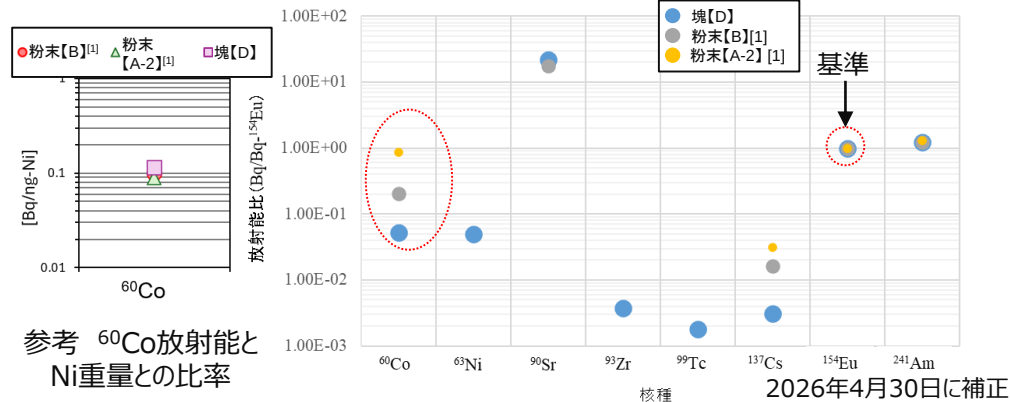


図1 1回目燃料デブリの ^{154}Eu を基準とした放射能比

1回目燃料デブリ
塊[D]



表1 放射能濃度の評価結果
(測定日時点の値)

k=2とした拡張不確かさ

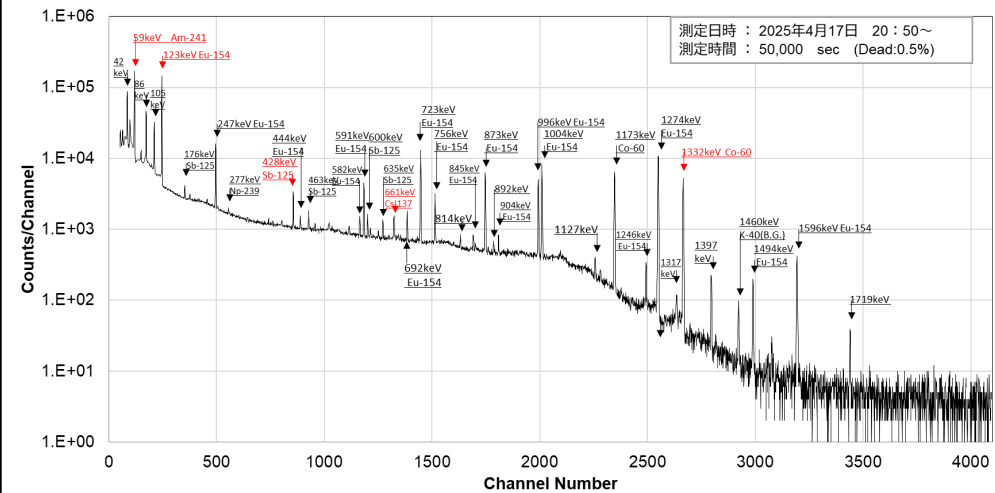
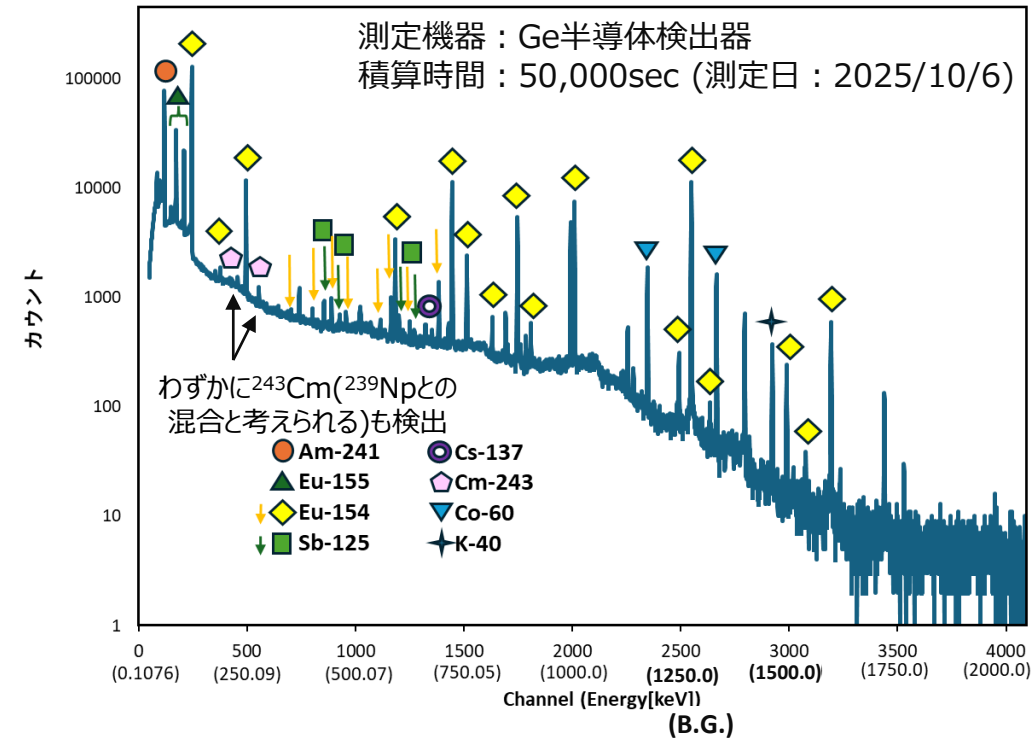
核種	放射能濃度 [MBq/g試料]	検出下限値	測定日
^3H	ND	0.030	2026/4/21
^{14}C	ND	0.015	2026/4/21
^{36}Cl	ND	4.4×10^{-4}	2026/4/2
^{41}Ca	ND	0.38	2026/5/18
^{60}Co	0.9 ± 0.1	0.015	2025/10/4
^{63}Ni	0.8 ± 0.2	0.11	2026/4/3
^{79}Se	ND	0.018	2026/4/16
^{90}Sr	$(3.3 \pm 0.3) \times 10^2$	0.25	2026/4/22
^{93}Zr	0.058 ± 0.007	9.5×10^{-4}	2026/5/8
^{93}Mo	ND	0.011	2026/5/18
^{99}Tc	0.027 ± 0.002	4.7×10^{-4}	2026/4/2
^{107}Pd	ND	4.8×10^{-5}	2026/5/12
^{126}Sn	ND	1.4×10^{-3}	2026/4/7
^{129}I	ND	4.9×10^{-3}	2026/4/14
^{137}Cs	0.044 ± 0.006	5.1×10^{-4}	2026/4/17
^{154}Eu	16 ± 3	0.039	2025/10/4
^{241}Am	19 ± 3	0.12	2025/10/4

ND：検出下限値未満

分析データの拡充が図られるとともに、様々な放射性核種の間の量的関係の検討や、その際に基準となる核種の検討等を行うための基礎情報が得られた。今後も分析対象核種を検討しつつ、データの蓄積を図っていく。

参考 γ線スペクトロメトリの結果 塊【D】溶解液

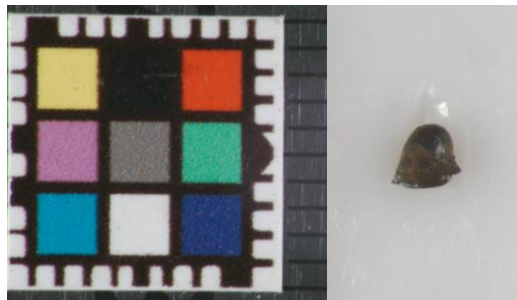
■ 主要な核種として ^{241}Am 、 ^{154}Eu 、 ^{155}Eu 、 ^{125}Sb 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co が検出された。



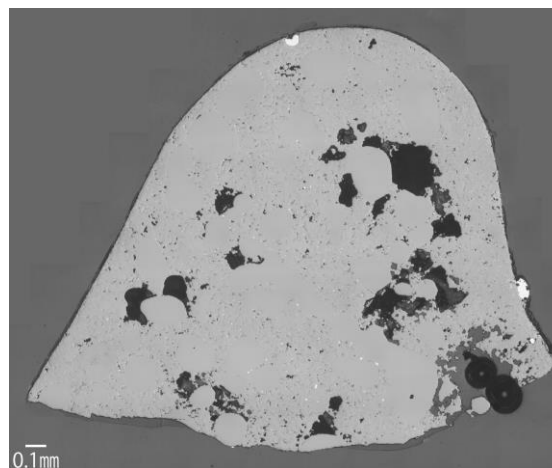
参考：1回目燃料デブリ
粉末【B】溶解液のγ線スペクトル

図 1回目燃料デブリ 塊【D】溶解液 のγ線スペクトル

◆ 断面観察結果

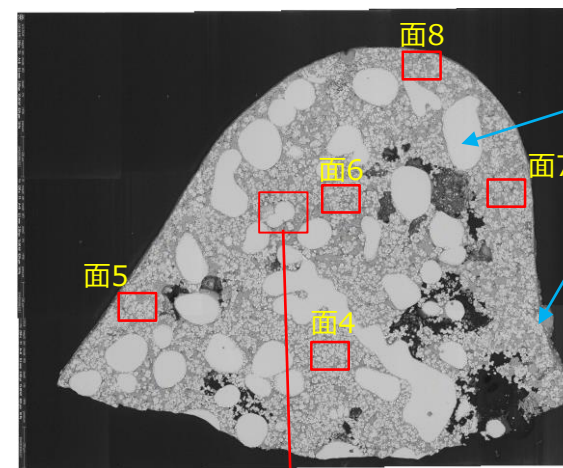


NDCに受け入れ後のサンプル外観



1mm

光学顕微鏡像



1mm

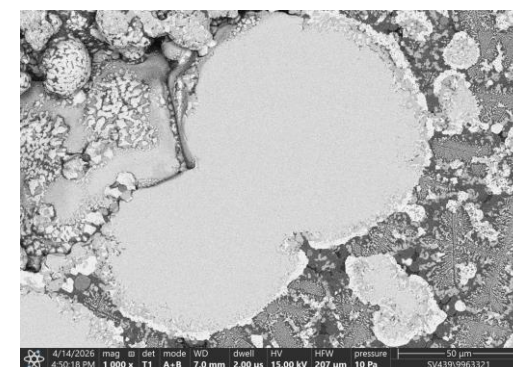
SEM像
(反射電子像)

Zr-U-O

Fe-Ni金属
(断面に対して
はごくわずか)

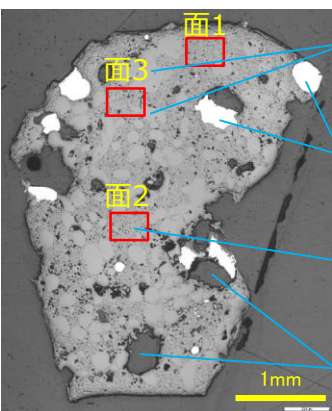
Ni/(Fe+Ni)~0.7

Zr-U-O相



Zr/U~1.1

50μm



参考 塊【C】断面の光学顕微鏡像

Zr-U-O相

- ・ Zr/U原子数比は約2
(粒によらずほぼ一定)

Fe-Ni金属相

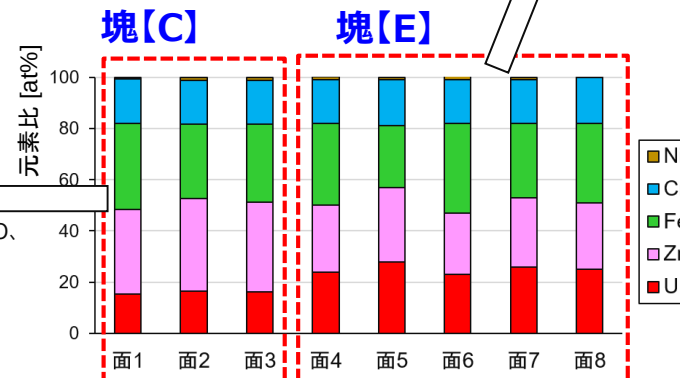
- ・ Fe/Ni原子数比は約1~3
(粒によって異なる)

微細混合相

- ・ U-Zr-O、Zr-U-O、Fe-Cr-O、
Fe-Oの混相

空隙 (数μm~数百μm)

- ・ 切断面面積に対して約2割



微細混合相のSEM-EDX面分析結果

- 1回目燃料デブリの突起部分 (塊【E】) では、断面の構成相やFe+Cr+Niの内訳において他の部位と同様の傾向が見られたが、Zr/U比が他の部位よりも低いなどの違いも見られた。

◆ 断面観察結果

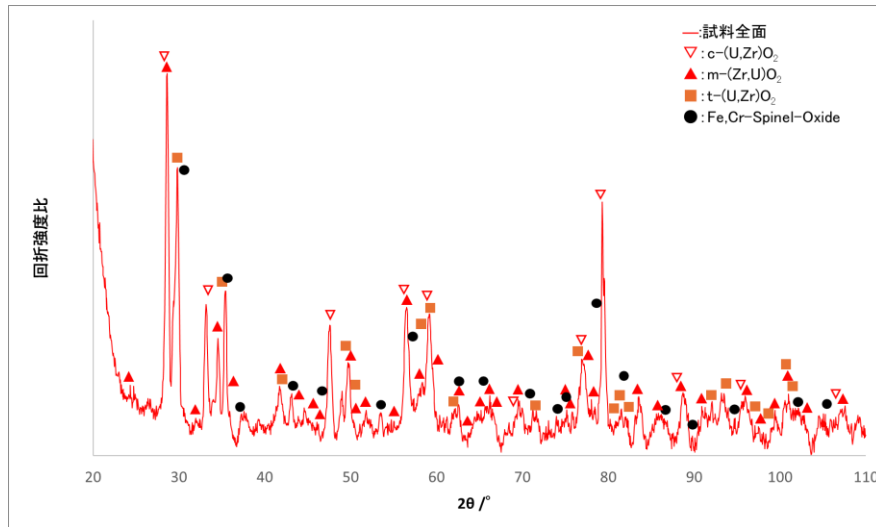
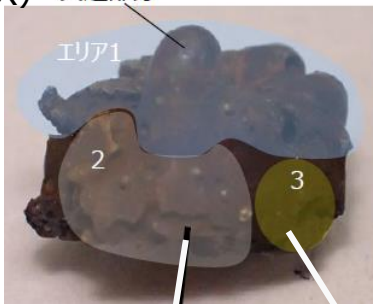


図1 塊【E】断面全体のXRD測定結果

Zr/U~1 塊【E】
(SEM-EDX) 突起部分



Zr/U~1.4
(化学分析)

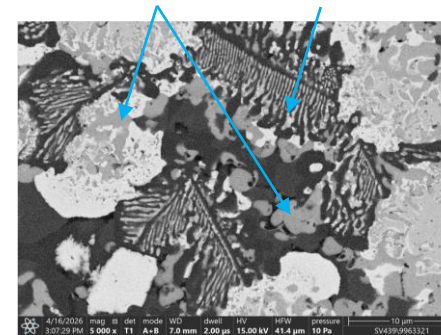
塊【D】

塊【C】

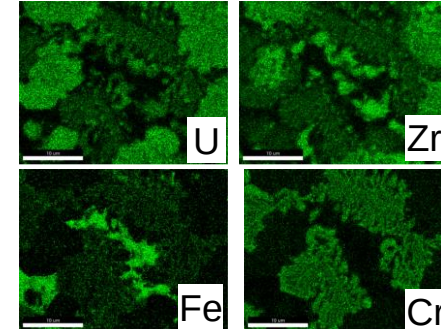
Zr/U~2
(SEM-EDX)

図3 1回目燃料デブリの部位ごとの組成

Zr濃度の高い相 デンドライト状の析出部



10μm SEM像



10μm 主要元素分布

図2 微細混合領域のSEM-EDX分析結果

- 断面のXRDの結果、従来のTEM観察等で確認されていた立方晶(U,Zr)O₂、正方晶(Zr,U)O₂、Fe-Crスピネル相のほか、単斜晶(Zr,U)O₂も同定された。(図1)
- SEM観察においても、微細混合相の中にZr濃度の高い相やデンドライト状の析出部が認められたことから(図2)、XRDで同定された正方晶(Zr,U)O₂や単斜晶(Zr,U)O₂はこれらの相に対応している可能性がある。
- サンプルの他の部位と同じ溶融物から凝固したものと考えられるが、部位によって組成の若干の違いがある(図3)ことから、凝固したタイミングの違いが反映されている可能性がある。

- 処理・処分の検討に資するための分析対象核種の拡充、及びサンプルの生成過程の更なる理解のため、1回目燃料デブリを対象に、放射能濃度及び相状態に係る追加分析を行った。
- 放射能濃度の追加分析では、これまでに対象としていなかった核種も加え、様々な分析手法を適用した。その結果、従来の γ 線放出核種に加えて、 ^{63}Ni や ^{99}Tc などの β 線放出核種も検出された。
 - 放射性核種濃度に係る分析データの拡充が図られるとともに、様々な放射性核種間の量的関係の検討や、その際に基準となる核種の検討等を行うための基礎情報が得られた。
 - 今後のサンプル分析においても、分析対象核種を検討しつつ、データの蓄積を図っていく。
- 相状態の分析では、これまで分析されていなかった突起部分についてSEM-EDXによる断面観察、及びXRDによる結晶構造の評価を行った。その結果、断面の構成相は他の部位と同様であるものの、Zr/U比が他の部位よりも低いなどの違いも見られた。
 - サンプルの他の部位と同じ溶融物から凝固したものと考えられるが、組成等の若干の違いは、凝固したタイミングの違いを反映している可能性がある。
 - 生成過程の検討自体は継続し、学会発表や論文等で報告していく。

表 溶液分析における着目元素・核種

項目	単位	着目元素・核種	分析方法
元素含有率	mg/100mg _{試料} (サンプル重量 100mgあたりの各 元素の重量)	・ U (燃料) , Zr (被覆管・CB) ・ Fe, Cr, Ni (炭素鋼, SUS等) ・ Si, Ca, Al, Mg (計装材料、海水、コンクリート等) ・ B (¹⁰B), Gd (¹⁵⁵Gd, ¹⁵⁷Gd) (中性子毒物) ・ Pb, Zn, Ti (遮蔽材, 塗料等) ・ Mo, Sb (グリス, 計装, FP等) ・ その他、定性分析やSEMで認められた元素を適宜追加	・ ICP-AES ・ ICP-MS ・ IDMS
同位体比	モル比 [-]	・ U同位体 : $\frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}}$比 または $\frac{^{235}\text{U}}{\text{U}_{\text{total}}}$ 比 $\text{U}_{\text{total}} = ^{234}\text{U} + ^{235}\text{U} + ^{236}\text{U} + ^{238}\text{U}$	・ TIMS ・ ICP-MS
		・ Pu同位体 ・ Nd同位体 (燃焼率指標) ・ Gd同位体	・ TIMS (元素量をIDMSにより評価)
放射能濃度	MBq/g (サンプル 重量あたりの各核 種の放射能)	・ γ線放出核種 ・ α線放出核種 ・ ⁹⁰Sr	・ γ線スペクトロメトリ ・ α線スペクトロメトリ ・ ICP-MS/MS

◆ JAEA原科研における溶液分析(1/3)

○ 元素含有率 → 右表参照

分析方法（概要）

- 1) 原科研に受け入れた粉末Bの試料を、タングステンカーバイド(WC)製の振動型ボールミル内で30分間粉碎処理を行った。
- 2) 得られた粉末試料をアルカリ融剤とともにアルミナ坩堝中で融解し※、得られた融成物を加熱硝酸中で溶解した。
※ アルカリ融解：もともとは酸に溶けにくい燃料デブリをアルカリ融剤（過酸化ナトリウム）とともに加熱・融解して酸に溶けやすい物質に変換しておくことにより、不溶解残渣のない均一な溶解液が得られる。
- 3) 目視による全量溶解を確認し、溶解液を250mLに定容した。
- 4) 溶解液中の元素量をICP-AESを用いた検量線法により測定し、試料供試重量(43.5mg)で割り戻すことでサンプル中の元素含有率を評価した。溶解液中にはアルカリ融剤由来のナトリウムが多量に含まれることから、ICP-AES測定では、標準試料に測定試料と同等のNaを添加したマトリックスマッチング法を適用した。
- 5) U及びPuについては、上記3)で得られた溶解液をさらにUTEVA®レジンや陰イオン交換樹脂を用いて各元素を分離し、得られた分離溶液中の元素量をIDMSにより測定した。

粉末B

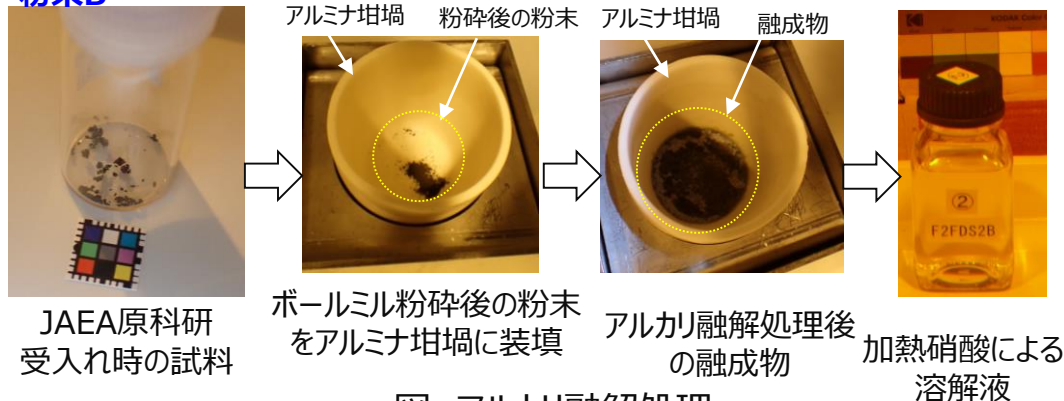


表 元素含有率の評価結果

試料供試重量：43.5±0.4mg. k=2とした拡張不確かさ

元素	元素含有率※1 [mg/100mg試料]	備考
U	42.82 ± 0.78	IDMSによる測定値
Zr	23 ± 2	
Fe	4.4 ± 0.3	
Cr	4.3 ± 0.2	
Ni	0.16 ± 0.02	
B	0.08 ± 0.01	参考値※2
Si	0.7 ± 0.06	参考値※2
Ca	0.12 ± 0.01	融剤中のCa量を補正した値
Al	対象外	坩堝由来のため対象外
Mg	0.12 ± 0.02	参考値※2
Na	対象外	融剤由来のため対象外
S	0.11 ± 0.02	参考値※2
Ti	0.03 ± 0.01	
Mn	0.41 ± 0.03	
Cu	0.11 ± 0.03	参考値※2
Zn	0.08 ± 0.02	参考値※2
Mo	<0.01	
Ru	<0.03	
Pd	0.10 ± 0.02	
Ag	0.05 ± 0.01	
Sn	<0.02	
Pu	0.237 ± 0.010	IDMSによる測定値
Nd	0.15 ± 0.02	
Gd	0.35 ± 0.02	
Ce	0.11 ± 0.04	
Co	0.35 ± 0.03	粉碎に用いたWC等に由来と推定
W	4.1 ± 0.3	粉碎に用いたWC等に由来と推定

※1 分析値の不確かさは、ICP測定、試料の秤量、溶解液の定容、検量線標準液、及び希釈操作に係る不確かさを合成し、包含係数(k=2)を掛けた拡張不確かさとして表示。

※2 操作ブランク試料/溶解液の濃度比が0.1以上であり、参考値。

◆ JAEA原科研における溶液分析(2/3)

○ 同位体比 (U、Pu、Gd 及び Nd) → 右表参照

分析方法 (概要)

- 1) 前頁「元素含有率」で調製した溶解液から適量分取し、UTEVA®レジン(U)及び陰イオン交換樹脂(Pu、Gd及びNd)を用いて各元素の分離溶液を調製した。
- 2) 調製した分離溶液を用いて、TIMSによる同位体比（例： $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 等）の測定を行った。測定に際しては、質量分別補正を要さないトータルエバポレーション法※を用いた。
※トータルエバポレーション法：フィラメントに塗布した試料を完全に蒸発させ、その過程で発生する各同位体のイオンを検出する方法。質量分別補正を要さない。
- 3) 各同位体比の測定値の平均値（ $n=3$ ）から、次式により同位体組成を算出した。

同位体組成の算出式（Uの例）

$$\begin{cases} {}^{234}\text{U}/\text{U}[\text{at}\%] = R_{234/238} / A \times 100 & R_{234/238} : {}^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \text{同位体比(測定値)} \\ {}^{235}\text{U}/\text{U}[\text{at}\%] = R_{235/238} / A \times 100 & R_{235/238} : {}^{235}\text{U}/^{238}\text{U} \text{同位体比(測定値)} \\ {}^{236}\text{U}/\text{U}[\text{at}\%] = R_{236/238} / A \times 100 & R_{236/238} : {}^{236}\text{U}/^{238}\text{U} \text{同位体比(測定値)} \\ {}^{238}\text{U}/\text{U}[\text{at}\%] = 1 / A \times 100 \end{cases}$$

$$A \equiv R_{234/238} + R_{235/238} + R_{236/238} + 1$$

表 TIMSによる同位体組成の分析結果

試料供試重量：43.5±0.4mg. $k=2$ とした拡張不確かさ

元素	核種	同位体比※ ¹ [at%]
U	^{234}U	0.027 ± 0.001
	^{235}U	2.061 ± 0.001
	^{236}U	0.314 ± 0.001
	^{238}U	97.598 ± 0.001
Pu	^{238}Pu	1.264 ± 0.009
	^{239}Pu	67.159 ± 0.008
	^{240}Pu	22.763 ± 0.003
	^{241}Pu	5.072 ± 0.006
	^{242}Pu	3.743 ± 0.002
Nd	^{142}Nd	0.40 ± 0.01
	^{143}Nd	21.18 ± 0.01
	^{144}Nd	31.93 ± 0.02
	^{145}Nd	17.16 ± 0.01
	^{146}Nd	16.51 ± 0.01
	^{148}Nd	8.81 ± 0.01
	^{150}Nd	4.02 ± 0.01
Gd	^{152}Gd	0.11 ± 0.01
	^{154}Gd	2.05 ± 0.01
	^{155}Gd	2.23 ± 0.01
	^{156}Gd	32.96 ± 0.03
	^{157}Gd	1.24 ± 0.01
	^{158}Gd	39.69 ± 0.01
	^{160}Gd	21.73 ± 0.02

※1 分析値の不確かさは、3回繰り返し測定標準偏差を、同位体組成算出時の誤差伝搬則に従い合成し、包含係数($k=2$)を掛けた拡張不確かさとして表示。

※2 測定日は以下の通り。

U : 2026年5月12日
Pu : 2026年5月13日
Nd : 2026年7月28日
Gd : 2026年7月23日

◆ JAEA原科研における溶液分析(3/3)

○ 放射能濃度 → 右表参照

分析方法（概要）

- γ線放出核種については、前々頁「元素含有率」で調製された溶解液(250mL)から0.1mLを分取し、硝酸2.9mLとともに6mLバイアル瓶に装填し、高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いたγ線スペクトロメトリ(下図参照)により測定した。
- ^{241}Am 及び ^{244}Cm については、得られた溶解液からTRUレジンを用いてAm及びCmを分離し、得られた分離溶液中の放射能をα線スペクトロメトリにより測定した。
- ^{90}Sr については、得られた溶解液の一部を分取し、担体となる安定同位体のSrを添加後、Srレジンを用いてSrを分離し、得られた溶解液中の ^{90}Sr の量をICP-MS/MSにより測定した。

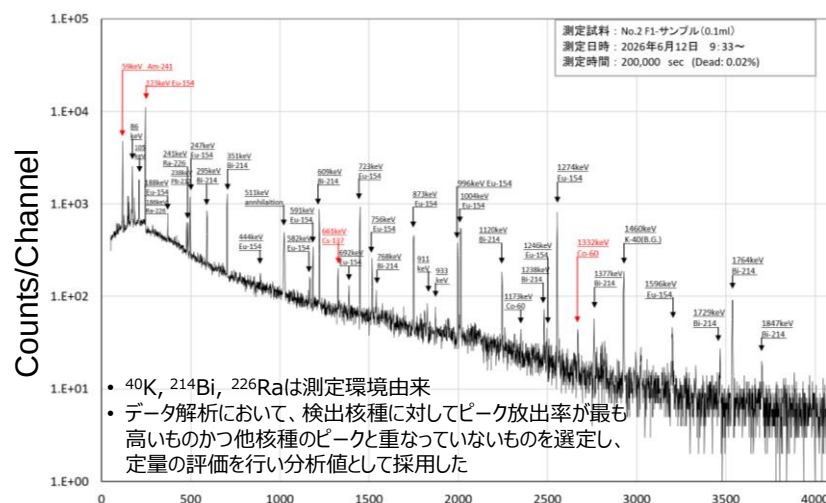


図 溶解液のγ線スペクトル

表 放射能濃度の評価結果

試料供試重量：43.5±0.4mg. k=2とした拡張不確かさ

分析手法	核種	放射能濃度※1 [MBq/g試料]
γ線 スペクトロメトリ	^{60}Co	0.11 ± 0.07
	^{125}Sb	<0.30
	^{134}Cs	<0.11
	^{137}Cs	0.32 ± 0.10
	^{154}Eu	12 ± 2
	^{155}Eu	3.3 ± 0.6
	^{241}Am	17 ± 2
α線 スペクトロメトリ	^{241}Am	20 ± 2
	^{243}Am	<1.3
	$^{244}\text{Cm}※2$	7.9 ± 0.8
ICP-MS/MS	^{90}Sr	(1.7 ± 0.5) × 10 ²

※1 測定日時点の値。不確かさは、校正、計数、γ線放出率、分取、秤量、定容、測定系の変動に係る不確かさを合成し、包含係数(k=2)を掛けた拡張不確かさとして表示した。

各分析手法の測定日は以下のとおり。

- γ線スペクトロメトリ：2026年6月12日
- α線スペクトロメトリ：2026年5月18日
- ICP-MS/MS(^{90}Sr)：2026年4月8日

※2 ^{244}Cm については、α線スペクトロメトリにおいて ^{243}Cm のピークと分離できないが、 ^{244}Cm の放射能が十分に大きいと考え、 ^{244}Cm のみで評価した。

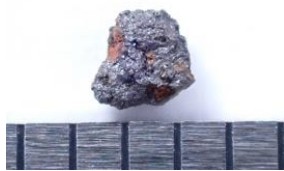
◆ JAEA大洗研における溶液分析(1/2)

○ 元素含有率 → 表1

分析方法（概要）

- 1) 分析対象試料(小塊A-2：11.9mg)を、加熱した硝酸（微量のフッ化水素酸を添加）中で溶解した。
- 2) 溶解液をPC製メンブレンフィルタ(孔径0.45 μ m)でろ過し、フィルタ上に残渣(0.9mg)を回収するとともに、ろ液を50mLに定容して溶解液とした。
- 3) 得られた溶解液中の着目核種の量をICP-MSを用いた検量線法により測定し、燃料組成^[1]や天然同位体組成を参考にして核種量を元素量に換算した。
- 4) 投入重量に対して約8%の不溶解残渣（主にFe-Cr酸化物）が発生したことから、SEM-WDX/EDXにより含有元素を評価し、不溶解残渣に含まれる元素量を推定した。
- 5) 溶解液中の元素量の分析値と、不溶解残渣の元素量の推定値と合わせて、サンプル中の元素含有率を評価した。

小塊A-2



溶解に供した試料



酸溶解前



酸溶解後

図 硝酸-微量フッ酸添加による溶解処理

表1 元素含有率の分析値
溶解液(ICP-MS) + 残渣(SEM-WDX/EDX)

試料供試重量：11.9mg. k=2とした拡張不確かさ

元素	元素含有率 ^{※1} [mg/100mg試料]	備考 (測定質量数 ^{※2} 等)
U	43.2 $\pm$ 0.9	質量数234, 235, 236, 238の合計値
Zr	23 $\pm$ 2	測定質量数: 90
Fe	9.8 $\pm$ 0.6	測定質量数: 57
Cr	1.52 $\pm$ 0.08	測定質量数: 52
Ni	0.2 $\pm$ 0.1	測定質量数: 60
Si	0.2 $\pm$ 0.1	残渣でのみ検出
Ca	2 $\pm$ 2	測定質量数: 44. 定量下限値以下
Al	0.07 $\pm$ 0.03	残渣でのみ検出
Mg	0.1 $\pm$ 0.1	残渣でのみ検出
Ti	0.10 $\pm$ 0.01	測定質量数: 47
Mn	0.38 $\pm$ 0.04	測定質量数: 55
Mo ^{※3}	0.02 $\pm$ 0.03	測定質量数: 97
Nd ^{※4}	0.13 $\pm$ 0.01	測定質量数: 146
Gd ^{※4}	0.4 $\pm$ 0.3	測定質量数: 157

※1 分析値の不確かさは、ICP測定、試料の秤量、溶解液の定容、検量線標準液、及び希釈操作に係る不確かさを合成し、包含係数(k=2)を掛けた拡張不確かさとして表示。

※2 同重体がない、または前後のカウント数から同重体の影響が極めて小さいと考えられる質量数を選定した。

※3 Moは、同位体組成が天然同位体組成と異なると考えられるため、参考値とする。

※4 Nd及びGdは、同位体比が2号機の燃料組成に近かったため、燃料組成を用いて元素量に換算した。

◆ JAEA大洗研における溶液分析(2/2)

○ 同位体比 (U) → 表1参照

- 溶解液から分取・希釈した溶液中の ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U 及び ^{238}U の核種量を、ICP-MSを用いた検量線法により測定し、これらの同位体の合計値に対する比率として導出した。

○ 放射能濃度

- γ 線スペクトロメトリ → 表2参照
 - 溶解液から、 ^{60}Co 、 ^{125}Sb 、 ^{137}Cs 、 ^{154}Eu 及び ^{241}Am を検出。(図1上。非破壊分析結果と同様の核種を検出)
 - 不溶解残渣からも同様の核種が検出されたが、 ^{60}Co の相対強度が高い(図1下)。

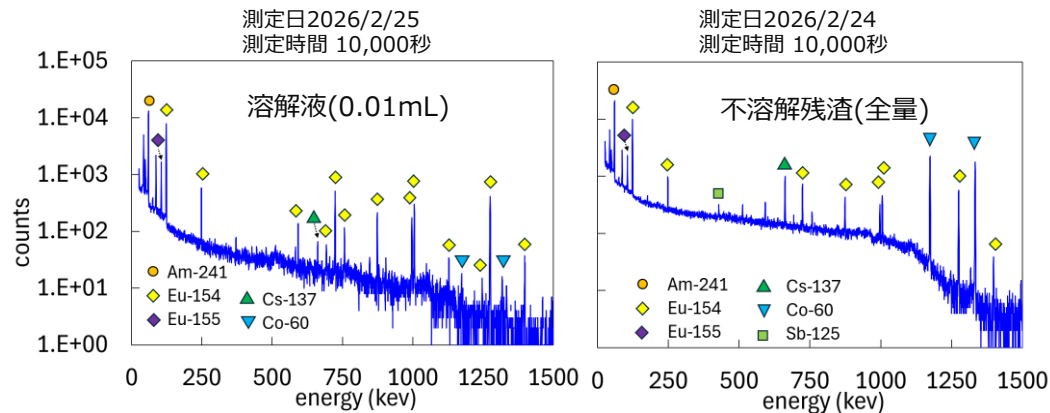


図1 γ 線スペクトル 左：溶解液 右：不溶解残渣

表1 U同位体組成の分析結果

k=2とした拡張不確かさ

核種	同位体組成 ^{※1} [at%]
^{234}U	0.027 ± 0.001
^{235}U	2.044 ± 0.004
^{236}U	0.290 ± 0.002
^{238}U	97.6 ± 0.2

※1 U = $^{234}\text{U} + ^{235}\text{U} + ^{236}\text{U} + ^{238}\text{U}$ に対する比。
分析値の不確かさは、標準液及び検量線法に係る不確かさを合成し、包含係数(k=2)を掛けた拡張不確かさとして表示。

表2 放射能濃度の評価結果

試料供試重量：11.9mg, k=2とした拡張不確かさ

核種	放射能濃度 ^{※1} [MBq/g試料]
^{60}Co	0.11 ± 0.03
^{125}Sb	<0.3
^{134}Cs	<0.2
^{137}Cs	0.19 ± 0.06
^{154}Eu	14 ± 4
^{155}Eu	4 ± 1
^{241}Am	20 ± 5

※1 測定日時点の値(測定日2026/2/25)

観察箇所の選定

【位置関係の把握に用いた外観上の特徴】

$p_1 \sim p_3$: 窪み(pit)、 r_1 : 稜(ridge)

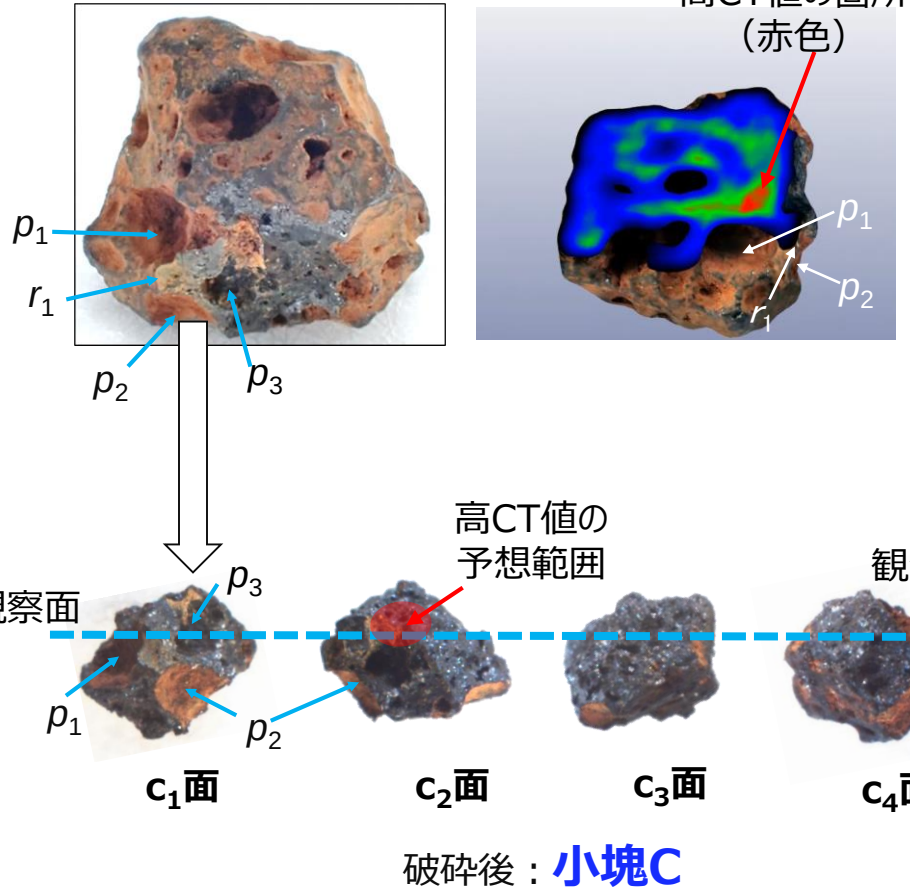


図1 2回目燃料デブリの破碎前後の大まかな位置関係

- 断面観察には、破碎前後でのサンプルの位置関係の把握が比較的容易な「**小塊C**」を供した。(図1)
- 未熔融燃料(UO_2)の存在可能性等も考慮し、破碎前サンプルのX線CT像において高CT値を示した箇所を横断する断面を作製し、観察に供した。(図2)

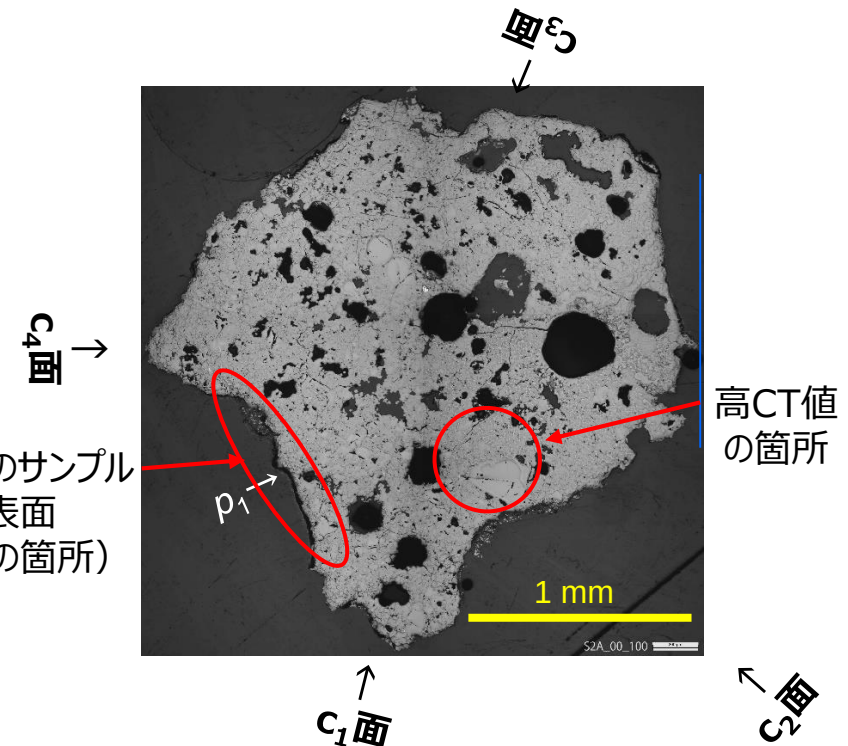
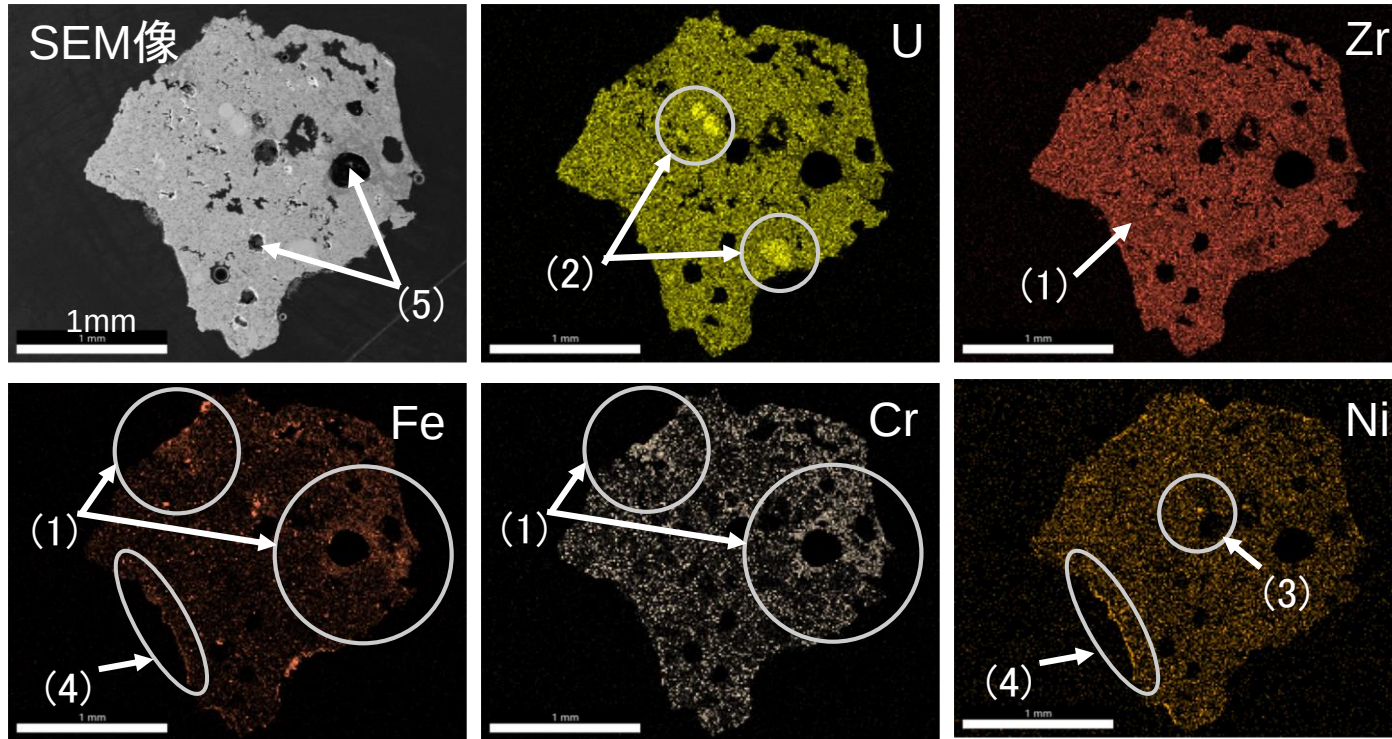


図2 **小塊C**断面の光学顕微鏡写真

断面観察及び元素分布に基づく大まかな領域分類



➤ 特徴的な元素分布を示す(1)～(5)の領域について微細組織観察を行い、各領域の生成過程を評価した。
(次頁以降)

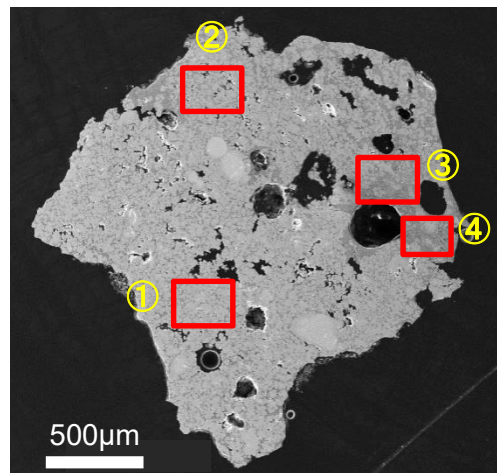
小塊C 断面全体の元素分布 (EDX元素マッピング)

【分類結果】

- (1) 全体的にZr、Uが広く分布しており、ひとつのZr-U-Oの島は数十～100 μ m以下の大きさをもつ。
その間隙にFe及びCrが分布している。FeとCrは空隙付近に偏在がある。 ⇒ **微細混合領域**
- (2) 高CT値の箇所等に、100 μ m近いU濃度が高い領域が明確に存在。 ⇒ **粗大U-Zr-O**
- (3) Fe-Niは中央付近に小さなものが一つ存在。 ⇒ **Fe-Ni**
- (4) サンプル最表面に該当する部分では、FeとNiがやや高い。 ⇒ **表面層**
- (5) 断面の全体に大小さまざまな寸法・形状の空隙が分布。 ⇒ **空隙**

微細混合領域

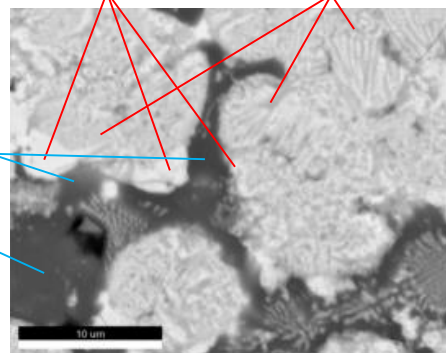
小塊C



全体SEM像

SEM像
U-Zr-O (白色) Zr-U-O (明灰色)

Cr-Fe-O (暗灰色)
Fe-O (暗灰色)



10µm

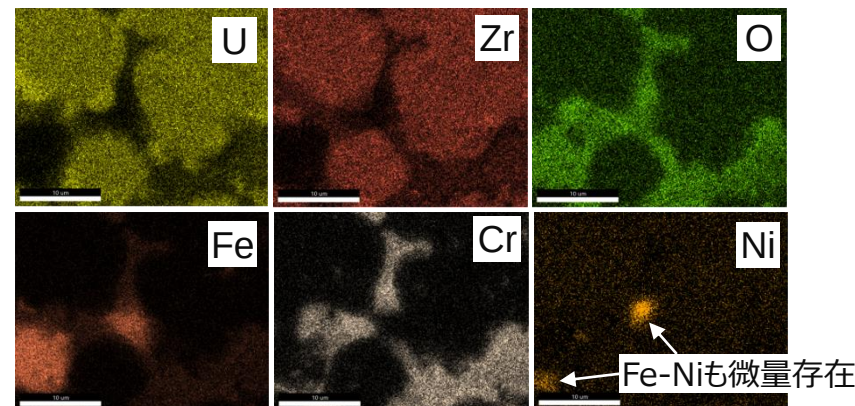
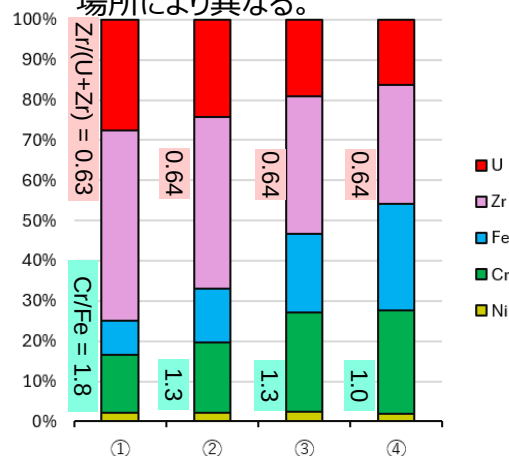


図1 微細混合領域の元素分布の典型例

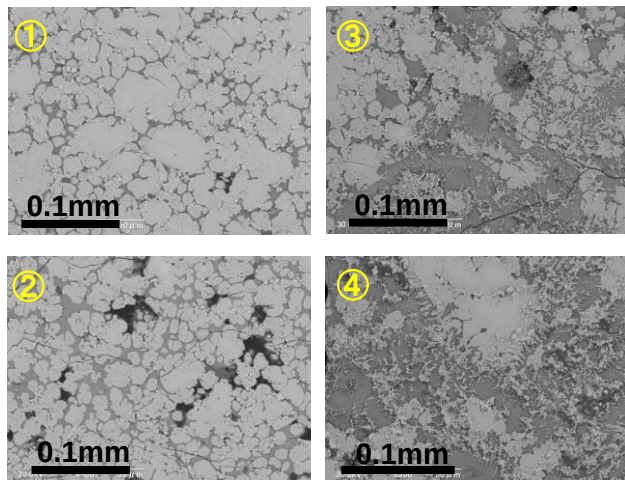
Zr/(U+Zr)比は場所によらずほぼ一定であるのに対して、Cr/Fe比は場所により異なる。



各視野の元素組成
(各視野でのSEM-EDX面分析結果)

- 微細混合領域では、主に4種類の相：Zr-U-O、U-Zr-O、Cr-Fe-O及びFe-Oが、1µm未満から数十µmまでの様々なスケールで混在している。(図1)
- マクロにはU・Zrが多い部位とFe・Crが多い部位に分けられる。(図2)

➤ 両部位では生成した温度域が異なる可能性があることから、TEM観察により各部位の構成相を調べ、生成過程の差を評価した。(次頁)



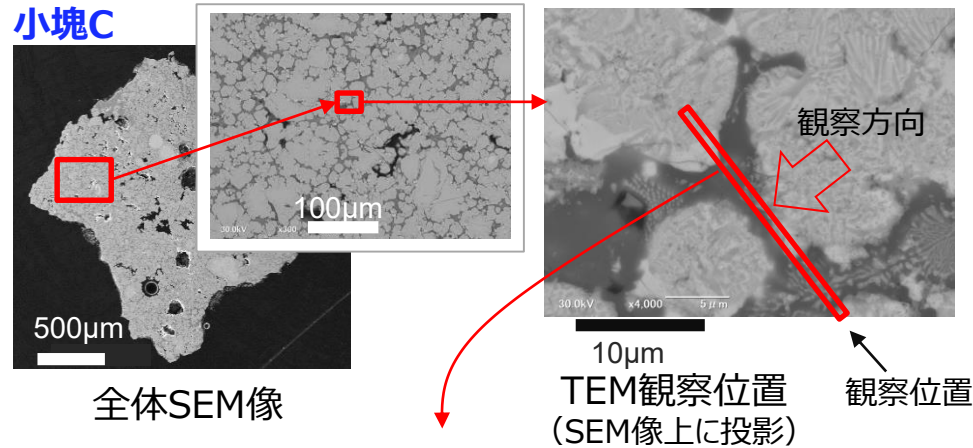
U・Zrが多い部位
(①②)

Fe・Crが多い部位
(③④)

図2 微細混合領域各部の組成

微細混合領域 (U・Zrが多い部位)

小塊C



正方晶($\text{Zr,U})\text{O}_2$
 $\text{Zr}/(\text{U}+\text{Zr})=0.64, 0.72, 0.63$
②, ⑤, ⑩

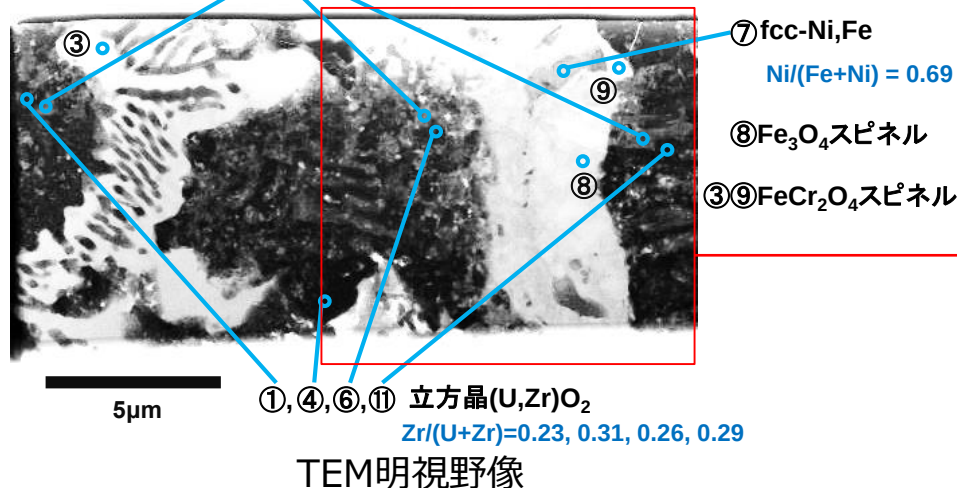


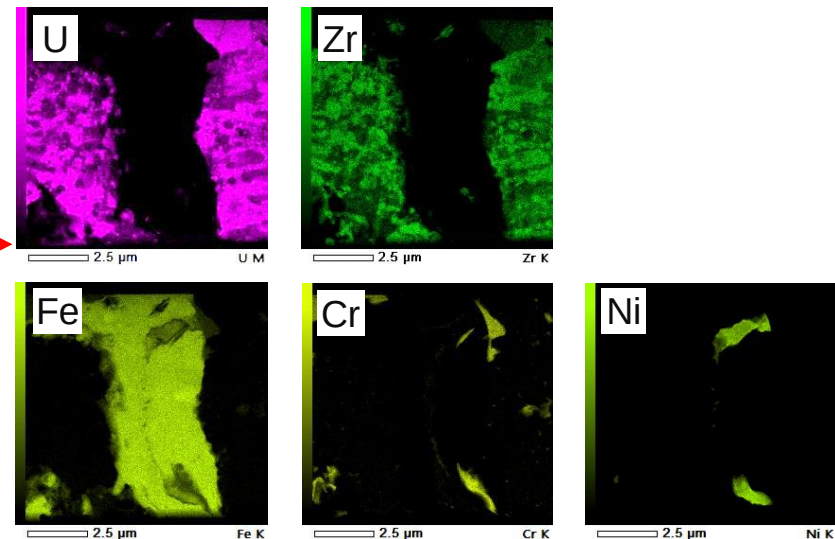
図 微細混合領域(U・Zrが多い部位)の構成相 (TEM分析結果)

■ 低倍率で数十µmの島状に見えたZr-U-Oは、TEM観察の結果、立方晶($\text{U,Zr})\text{O}_2$ と正方晶($\text{Zr,U})\text{O}_2$ が約1µm未満の微小なスケールで混合していることが分かった。

➤ 立方晶 + 正方晶の混相は、固相分離、または熔融物からの直接析出による生成が考えられる。

■ Ni-Fe金属相の周りに Fe_3O_4 スピネル及び FeCr_2O_4 スピネルが存在している。

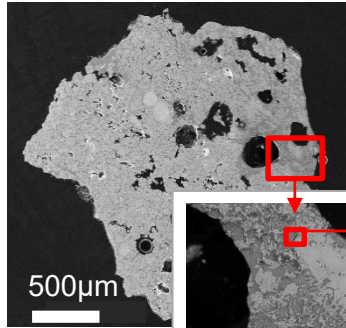
➤ 当該部分は、Fe-Cr-Ni系の構造材（ステンレス鋼など）の成分のうち、比較的酸化されやすいCr、Feが順次酸化され生成したと考えられる。



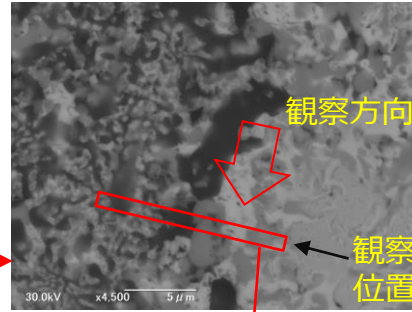
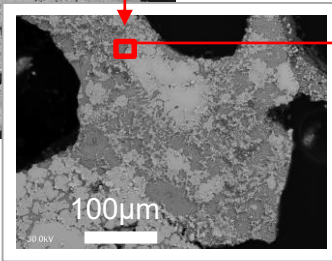
主要元素の分布 (STEM-EDX面分析)

微細混合領域 (Fe・Crが多い部位)

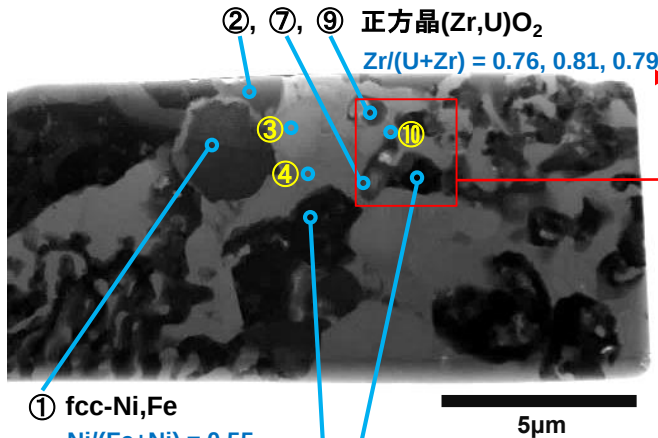
小塊C



全体
SEM像



10µm
TEM観察位置
(SEM像上に投影)



① fcc-Ni,Fe

Ni/(Fe+Ni) = 0.55
incl. Sn

③ FeCr₂O₄スピネル

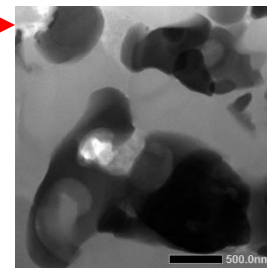
④ Fe₃O₄スピネル

⑩ Fe₂CrO₄スピネル

TEM明視野像

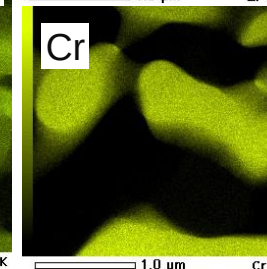
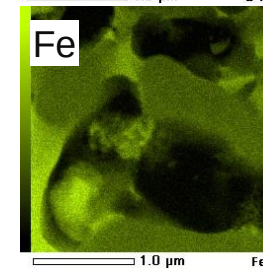
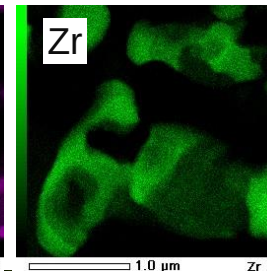
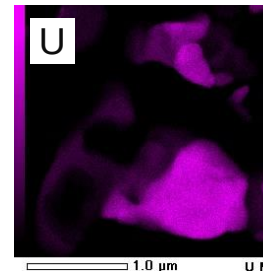
⑥, ⑪ 立方晶(U,Zr)O₂

Zr/(U+Zr) = 0.20, 0.22



TEM像
(拡大)

拡大部の元素分布
(STEM-EDX面分析)



- 同定された化合物は、U・Zrが多い部位(前頁)と概ね同様のものではあった。(図1)
- U・Zrが多い部位(前頁)と比較して、立方晶(U,Zr)O₂と正方晶(Zr,U)O₂との間の組成差が大きい。
 - ✓ U・Zrが多い部位のZr/(U+Zr)比 (前頁参照)
約0.2-0.3 (立方晶) | 約0.6-0.7 (正方晶)
 - ✓ Fe・Crが多い部位のZr/(U+Zr)比 (図1参照)
約0.2 (立方晶) | 約0.8 (正方晶)

➤ 当該部位は、U・Zrが多い部位とは異なる温度域で生成した可能性がある。

図1 微細混合領域(U・Zrが多い部位)の構成相
(TEM分析結果)

粗大U-Zr-O

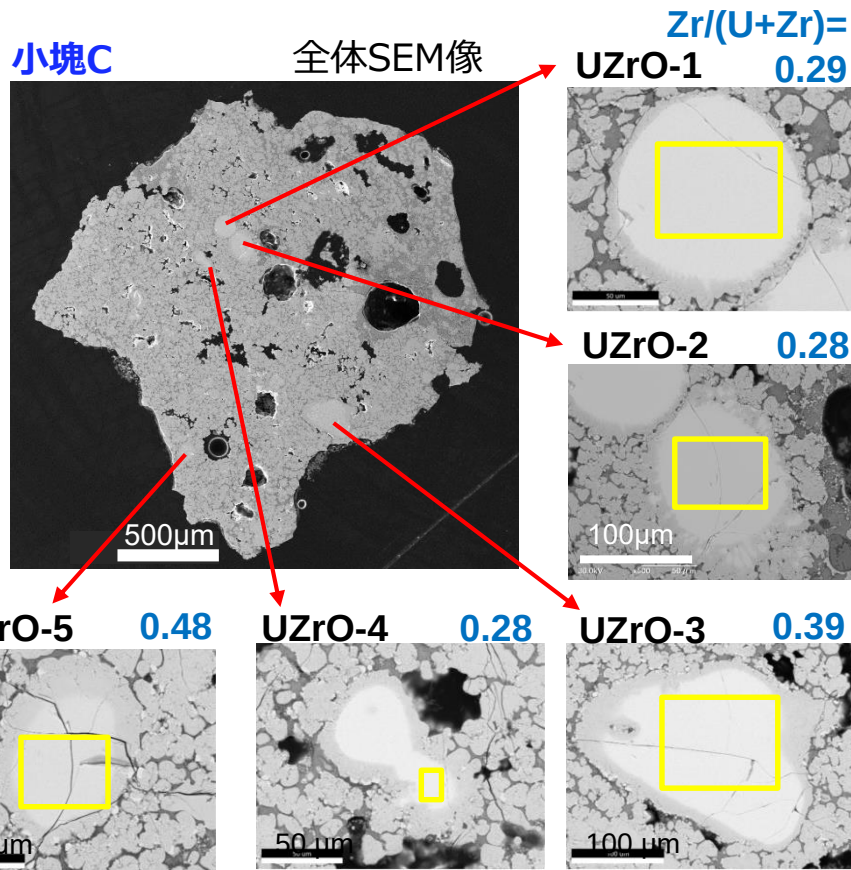


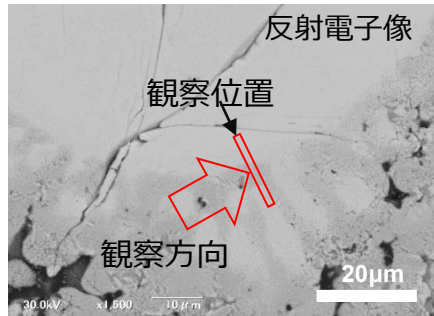
図 粗大U-Zr-O相に着目したSEM観察結果

- 粗大U-Zr-Oは約50～100μm以上の丸みを帯びた緻密な領域であり、微細混合領域の中に点在している。
 - ✓ 周囲を取り囲むZr濃度の高い相を隔てて、微細混合領域が存在している。
 - ✓ 相内部はU濃度が高い。各粒子中央付近のZr/(U+Zr)比は約0.3-0.5であり、粒子ごとに異なる。
- これらの粗大U-Zr-Oが生成した段階では、周辺の微細混合領域は液相の状態であったと考えられる。
- 個々の粒子内部のUとZrの濃度比はほぼ一定であり、単一粒子としては同程度の温度域で成長していったと考えられる。

➤ 粗大U-Zr-Oが生成したときの溶融物の状態を調べるため、微細混合領域との境界付近をTEMで詳細観察した。(次頁)

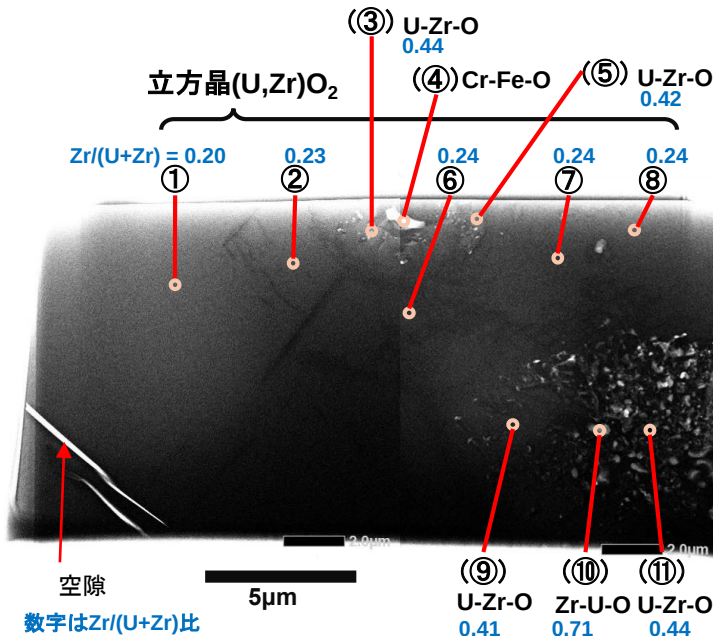
粗大U-Zr-O

小塊C



微細混合領域との境界において特徴的な形状が見られた“UZrO-2”に着目し、境界付近をTEM観察用に採取した。

TEM観察位置
(SEM像上に投影)



粗大U-Zr-O断面のTEM明視野像

図1 粗大U-Zr-Oの構成相
(TEM分析結果)

内部から外縁部にかけて枝葉状の形状が見られる。

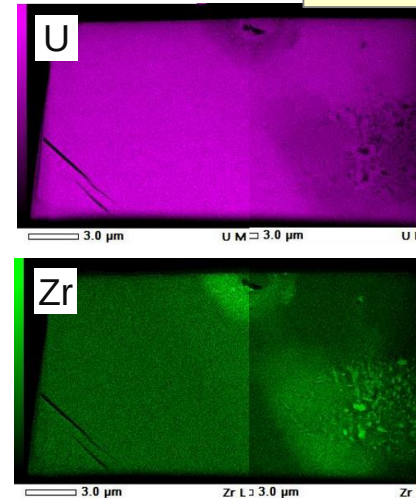
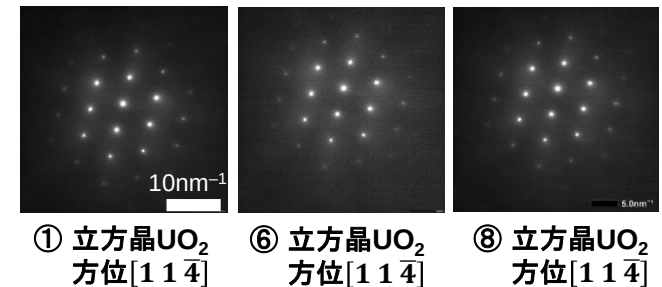


図2 U・Zrの分布
(STEM-EDX面分析)

- U濃度が高い立方晶(U,Zr)O₂相であり、外縁にかけて枝葉状の形で存在している。(図1・図2)
- 粗大U-Zr-Oの内部と「枝葉」の部分は単一結晶の可能性がある(図3)。周辺相として、「枝葉」の合間にZr濃度がやや高い領域が存在する(図1③、④、⑨～⑪)。

➤ 周辺の微細混合領域が溶融している状態で、枝葉状に結晶成長した可能性や、液相からのZr等の侵入を受けた可能性がある。

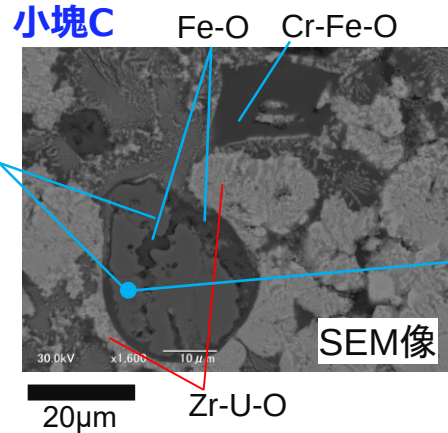
位置①②⑥⑦⑧の回折図形は同一の結晶系・結晶方位を示しており、これらは単一の結晶の可能性がある。



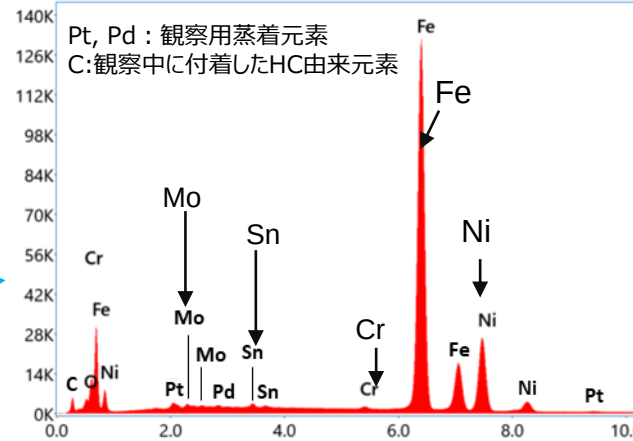
① 立方晶UO₂ 方位[1 1 4]
⑥ 立方晶UO₂ 方位[1 1 4]
⑧ 立方晶UO₂ 方位[1 1 4]

図3 電子線回折図形の例

Fe-Ni金属相



金属相上のEDX点分析スペクトル



- 大きさ数 μm ～約 $20\mu\text{m}$ のFe-Ni金属粒が微細混合領域の中に点在し、周囲をFe-OやCr-Fe-Oで囲まれている。
- 粒ごとに組成の差が見られる。

図1 Fe-Ni金属相近傍のSEM観察結果

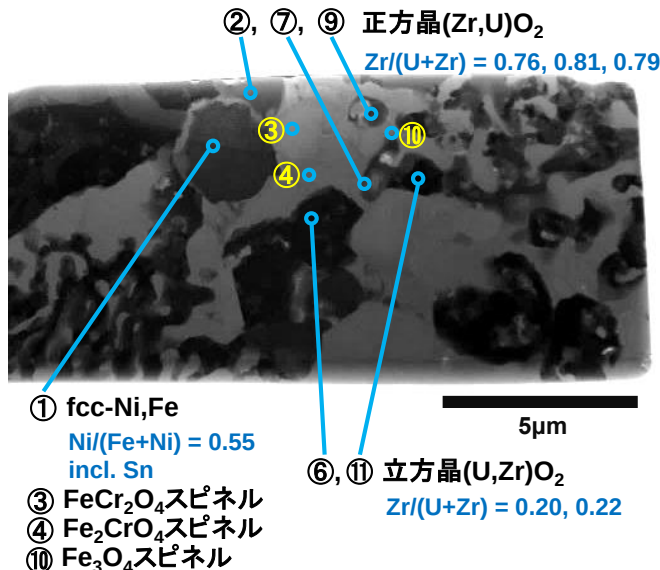


図2 微細混合領域のTEM観察結果
(図1とは別の金属相の近傍)

- 溶融・凝固過程において、構造材由来の成分 (Fe, Cr, Ni) のうちCrやFeが優先的に酸化され、Ni濃度の高い金属相が残ったと考えられる。

表面層

小塊C

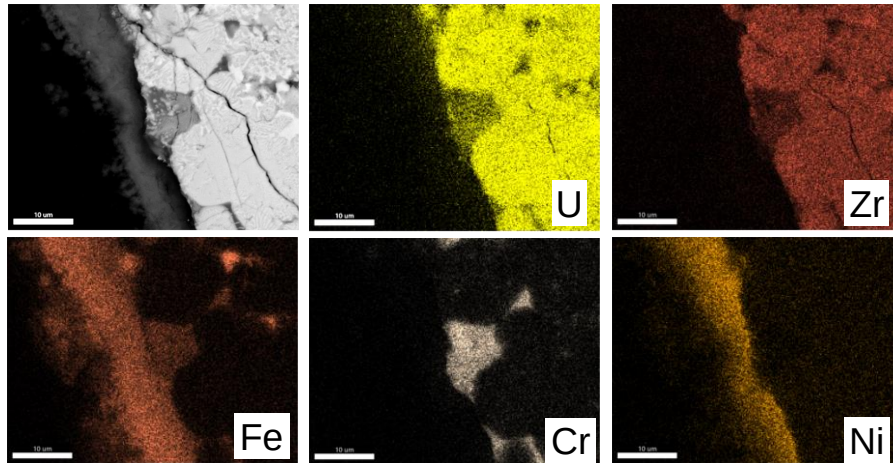


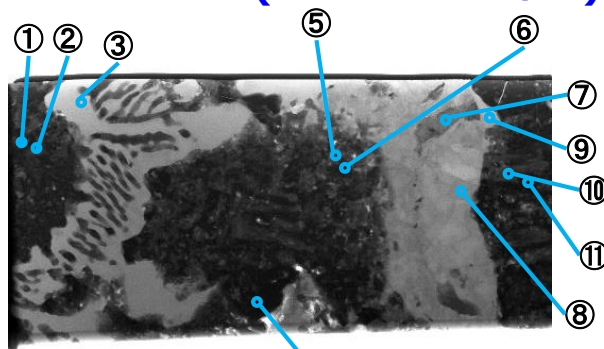
図1 サンプルの表面近傍のSEM観察結果

■ 受け入れ時サンプルの最表面の位置において、厚さ約10～50μmの層状の領域や堆積物を形成している。

➤ サンプルの大部分が溶融・凝固により生成した後、冷却水中の溶存成分のサンプル表面への析出や表面変質等により生成したと考えられる。

◆ STEM-EDXによる各相の元素組成評価

微細混合領域(U・Zrが多い部位)



TEM観察像 ④

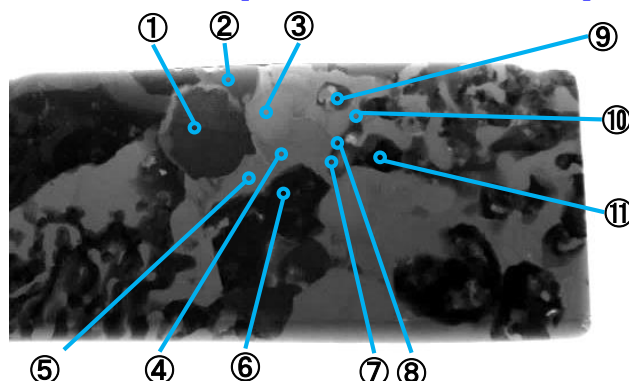
5μm

(①～⑪は左表の分析箇所に対応)

STEM-EDX点分析による各相の組成※

at%	O	Al	Cr	Fe	Ni	Zr	Sn	Pb	U	U/(U+Zr)at%	分類
①	63	n.d.	1	n.d.	n.d.	8	n.d.	n.d.	28	77	U-Zr-O
②	62	n.d.	1	n.d.	n.d.	24	n.d.	n.d.	13	36	Zr-U-O
③	58	L.O.Q.	30	12	n.d.	L.O.Q.	L.O.Q.	n.d.	n.d.		Cr-Fe-O
④	71	n.d.	L.O.Q.	n.d.	n.d.	9	n.d.	n.d.	20	69	U-Zr-O
⑤	76	n.d.	L.O.Q.	n.d.	n.d.	17	n.d.	n.d.	7	28	Zr-U-O
⑥	74	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7	n.d.	L.O.Q.	19	74	U-Zr-O
⑦	3	n.d.	n.d.	30	67	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		Ni-Fe
⑧	64	n.d.	n.d.	36	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		Fe-O
⑨	61	n.d.	27	12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		Cr-Fe-O
⑩	76	n.d.	L.O.Q.	n.d.	n.d.	15	n.d.	n.d.	9	37	Zr-U-O
⑪	73	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8	n.d.	n.d.	19	71	U-Zr-O

微細混合領域(Fe・Crが多い部位)



TEM観察像

5μm

(①～⑪は左表の分析箇所に対応)

STEM-EDX点分析による各相の組成※

at%	O	Si	Cr	Fe	Ni	Zr	Sn	U	U/(U+Zr)	分類
①	L.O.Q.	n.d.	n.d.	45	54	n.d.	1	n.d.		Ni-Fe
②	82	n.d.	L.O.Q.	1	n.d.	13	n.d.	4	24	Zr-U-O
③	70	n.d.	19	11	n.d.	L.O.Q.	n.d.	n.d.		Cr-Fe-O
④	76	2	L.O.Q.	20	n.d.	2	n.d.	L.O.Q.		Fe-O
⑤	75	2	L.O.Q.	21	n.d.	2	n.d.	L.O.Q.		Fe-O
⑥	75	n.d.	L.O.Q.	n.d.	n.d.	5	n.d.	20	80	U-Zr-O
⑦	85	n.d.	L.O.Q.	6	n.d.	7	n.d.	2	19	Zr-Fe-U-O
⑧	87	n.d.	L.O.Q.	1	n.d.	9	n.d.	3	24	Zr-Fe-U-O
⑨	84	n.d.	L.O.Q.	1	n.d.	12	n.d.	3	21	Zr-U-O
⑩	72	n.d.	6	20	n.d.	2	n.d.	n.d.		Fe-Cr-O
⑪	76	n.d.	L.O.Q.	n.d.	n.d.	5	n.d.	19	78	U-Zr-O

※ 表示した元素のうち、n.d.及びLOQを除いた元素を100%として表記した。

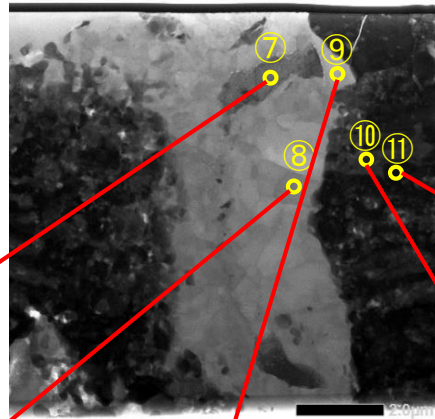
・ n.d.: スペクトル上で有意に検出されなかったことを示す。(not detected)

・ L.O.Q.: 定量下限以下。(Lower limit of quantification) スペクトルにわずかなピークが認められるものの、0.5at%未満であり定量下限以下と判断したもの。

◆ TEM電子線回折測定及びラマン分光分析による結晶構造同定

- 微細混合領域に見られた各相の位置にてTEMによる電子線回折図形を取得し、結晶系の同定を行った。また、前頁に示す各位置の組成分析結果も踏まえ化学形を推定した。(図1)
- 結晶構造については、電子線回折に加えて、適宜ラマン分光分析(図2)も併用することで同定精度を高めた。

微細混合領域のSTEM像
(前頁で示した領域の右半分)



参照物質のパターン

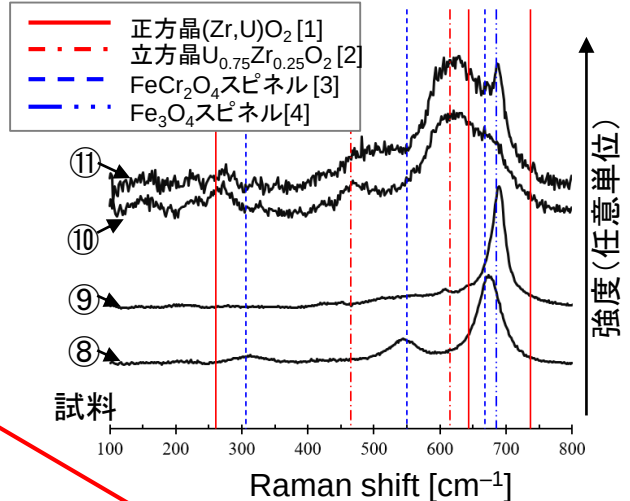


図2 各相のラマン分光
分析結果

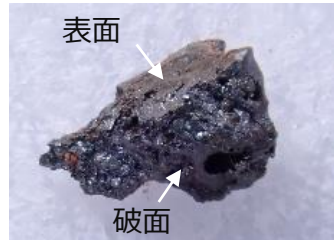
位置	⑦Ni-Fe	⑧Fe-O	⑨Cr-Fe-O	⑩Zr-U-O		⑪U-Zr-O
TEM 電子線回折図形						
結晶系同定結果	fcc-(Ni,Fe) 方位[0 1 1]	Fe ₃ O ₄ スピネル 方位[1 1 2]	FeCr ₂ O ₄ スピネル 方位[0 1 1]	正方晶ZrO ₂ 方位[3 3 1]	正方晶ZrO ₂ 方位[1 4 2]	立方晶UO ₂ 方位[0 1 3]
組成分析を踏まえた 化学形の推定結果	fcc-(Ni,Fe)	Fe ₃ O ₄ スピネル	FeCr ₂ O ₄ スピネル	正方晶(Zr,U)O ₂		立方晶(U,Zr)O ₂

図1 各分析位置のTEM電子線回折及び組成分析を踏まえた化学形の推定結果

◆ 複数の分取試料での比較

小塊C以外の分取試料についてもSEMやTEMによる詳細観察を行い、同様の元素分布や結晶構造を有することを確認した。

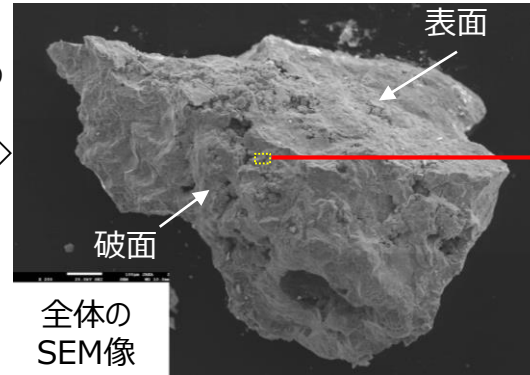
小塊A-1



破碎片の外観 500μm

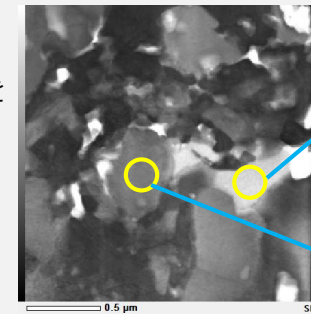
平滑面を作製し、広い範囲の元素分布を評価

破碎片のまま観察

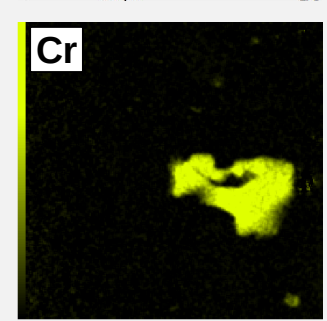
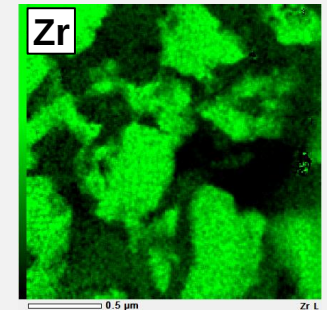
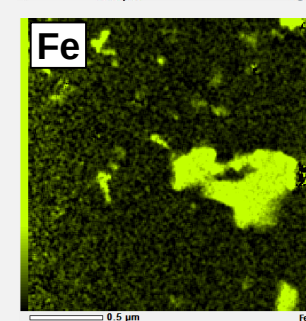
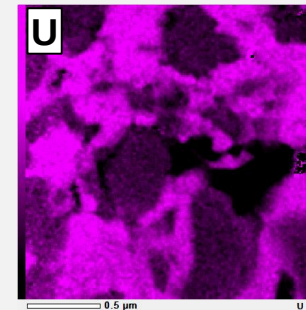


全体のSEM像 500μm

破面の一部からTEM観察用の試料を薄膜加工により採取

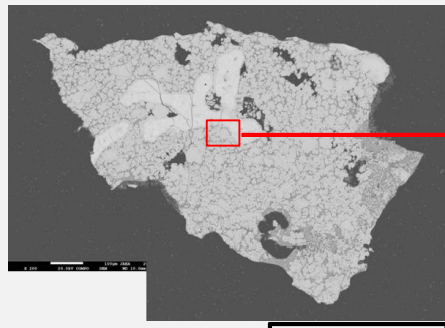


0.5μm TEM像



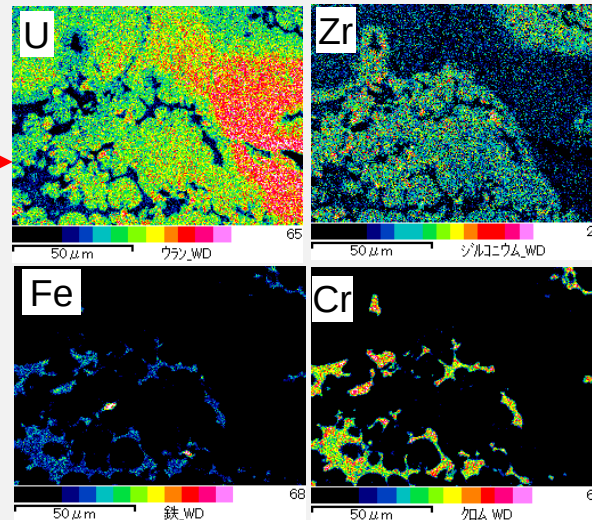
STEM-EDXマッピング

薄膜加工した断面のTEM観察結果



断面のSEM像 500μm

断面全体に微細混合領域が広がり、その中に粗大U-Zr-O相が疎らに存在 (小塊Cと同様の特徴)



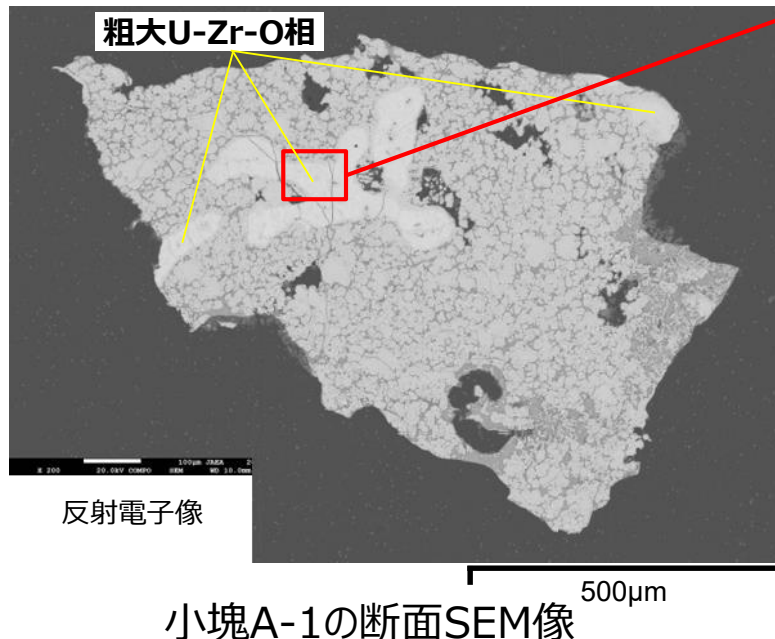
SEM-WDXマッピング

破碎片断面の元素分布 (SEM-WDX)

◆ SIMSによる局所的なU同位体比の評価

2回目燃料デブリの生成過程における粗大U-Zr-O相の形成メカニズムの検討に資するため、SIMSにより局所的なU同位体比を評価した。(粗大U-Zr-O相と微細混合領域の同位体比に顕著な差が出ていれば、両者が異なる由来をもつことの直接の証左となりうるため)

- 粗大U-Zr-O相と微細混合領域とでは、 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比に顕著な差はみられなかった。(いずれも約2at%)
- 今回の測定箇所では粗大U-Zr-O相の由来についての直接の証左は得られなかったが、今後も複数の箇所やサンプルの分析を継続し、局所的な同位体比の傾向把握を進めていく。

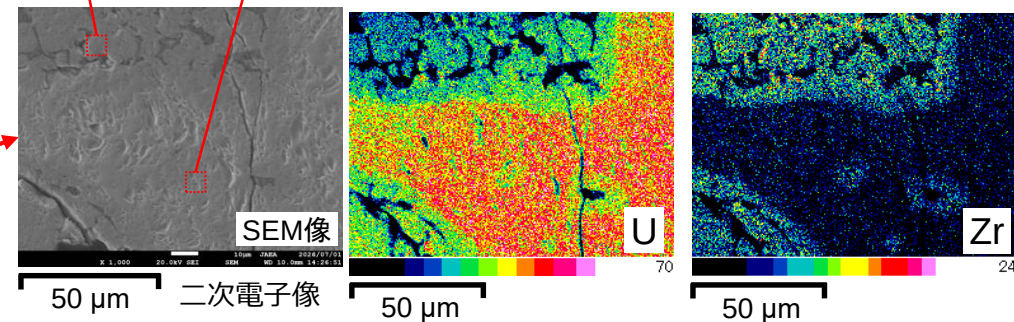


小塊A-1

破碎片の中では比較的小型であるが、小塊Cと同様に、粗大U-Zr-O相と微細混合領域が混在している。

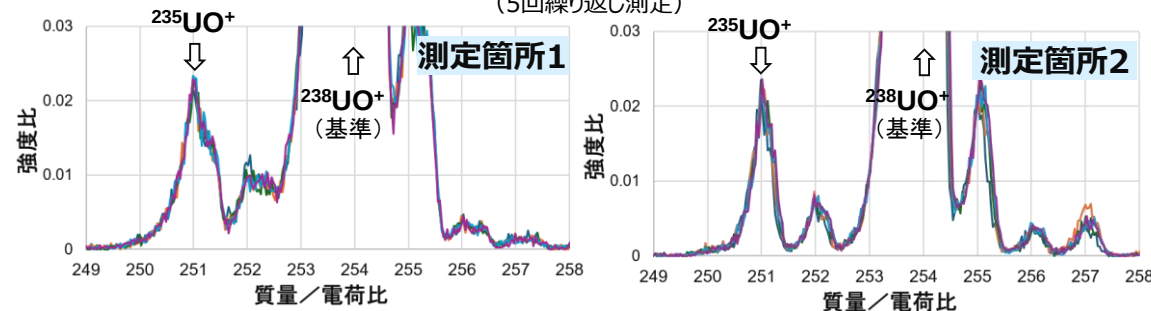
測定箇所2：
微細混合領域

測定箇所1：
粗大U-Zr-O相



SIMS測定箇所の概略位置及び周辺の元素分布 (SEM-WDX)

※ $^{235}\text{UO}^+$ と $^{238}\text{UO}^+$ のピーク面積比から $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比を評価
(5回繰り返し測定)



各測定箇所の質量スペクトル (SIMS測定結果)

◆ 放射光分析の狙い

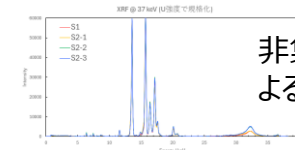
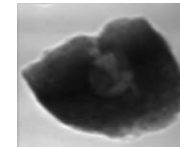
SPring-8の高輝度放射光を用いた μ -XRF/XRD/XAFS分析により、燃料デブリサンプル中の主要構成元素とその分布、燃料成分の化学状態及び結晶構造を把握する。



放射光分析 (SPring-8) の流れ

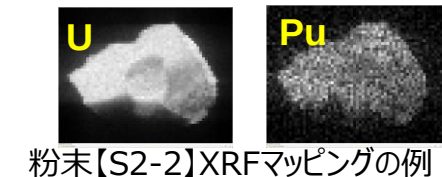
非集光ビーム (2mm角) で試料全体の分析
(X線透過像, XRF, XRD, XAFS)

✓ 試料全体の特徴の概略把握
(微細構造、構成元素、結晶構造、化学状態)



μ -ビーム (1 μ m角) で構成元素の空間分布を確認
(XRFマッピング)

✓ 構成元素の空間分布を確認
✓ Uと微量元素(Pu等)の帯同性の確認



特徴的な試料位置で結晶構造、化学状態分析
(μ -XRD, μ -XAFSによる点分析)

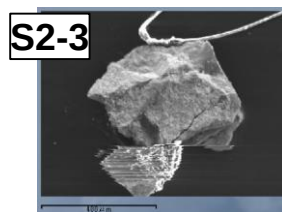
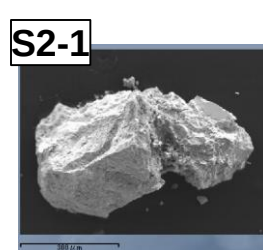
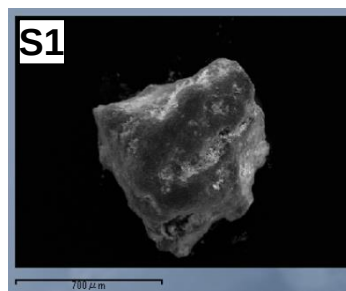
✓ 特徴的な試料位置での結晶構造・化学状態の把握
✓ 表面と内部での相違の把握

図 放射光分析に供したサンプル

(※イメージングXAFS, XRDマッピングなども利用検討)

◆ 各サンプルの主要元素間の比率

受入れ時に付随
していた欠片



塊の破碎時に発生した粉末

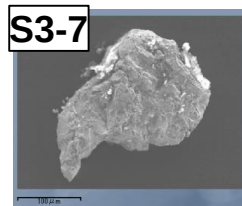
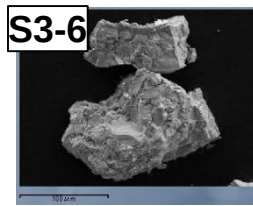
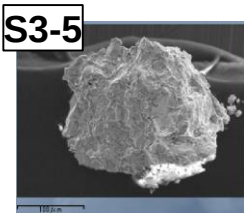
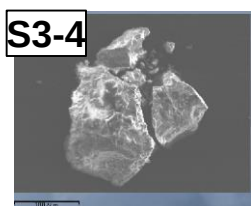
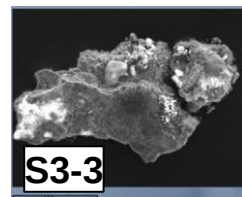
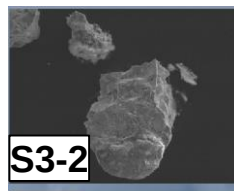
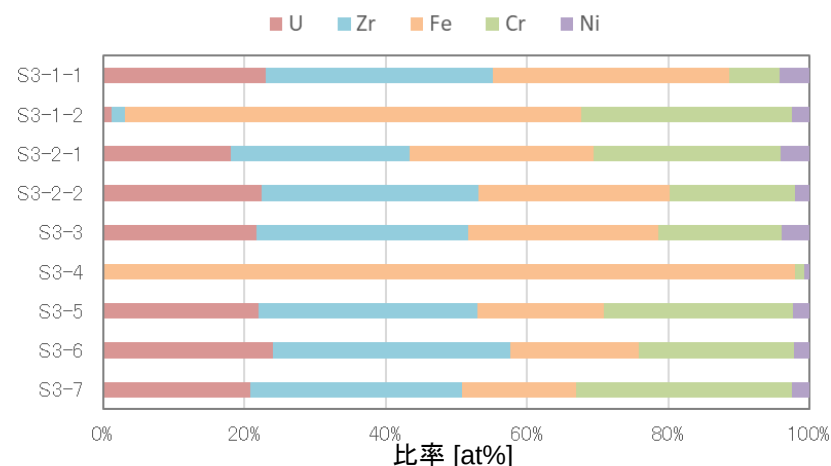
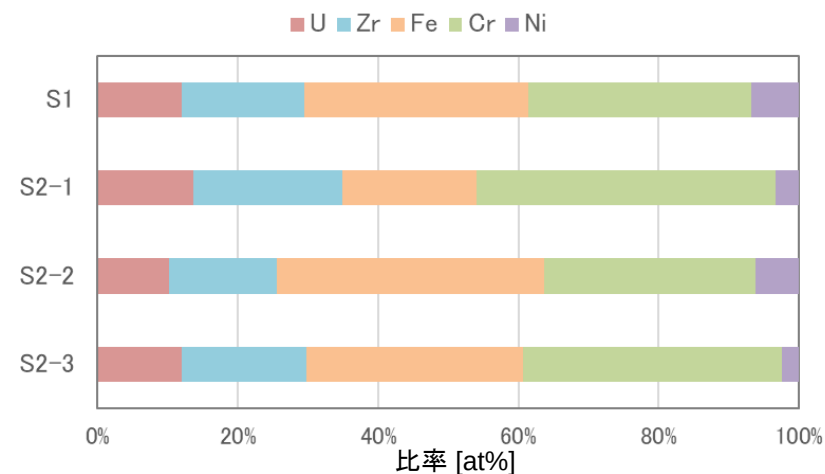


図1 放射光分析に供したサンプルのSEM像



※ 18.2 keVおよび8.5 keVでの測定結果と標準試料との比較から算出
μ-XRFでは、表面から数十μmの深さまでの情報が反映される。

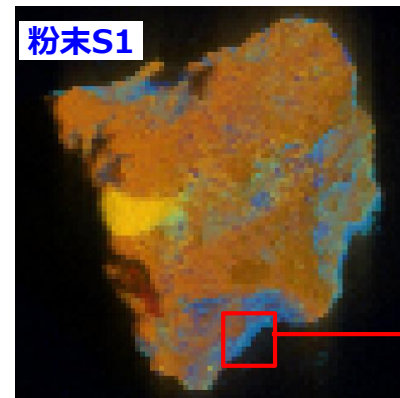
図2 各サンプルの主要元素間の比率 (XRF測定結果)

サンプル間でのZr/U比は、概ね1.4から1.6の間で変動していた(図2参照)。2回目燃料デブリとして採取された塊及び欠片ともに、燃料由来のU及び被覆管等由来のZrが混合していると考えられる。

◆ 表面近傍にかけての化学状態評価

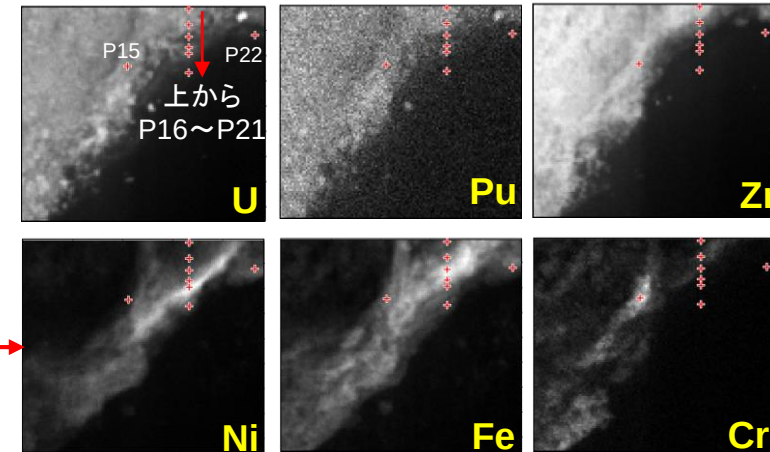
サンプルの表面と内部の位置関係が明確な粉末S1を対象に、元素分布、結晶構造、価数等の評価を行い、内部から表面にかけての化学状態を調べた。

- 表面近傍にFe・Ni濃度が高い箇所が存在していた(図1)。XRDではFeの水酸化物に近いパターンを確認しており(図2のP19及びP20)、事故後に生成した可能性がある。
- 同位置ではUの価数がやや高く(図3のP19及びP20)、XRDにおいても立方晶 UO_2 ピークがブロードになるなどの変化が認められるものの、 U_3O_8 などの高次の酸化物は認められなかった。



黄 : U 赤 : Zr 青 : Fe 水色 : Ni

表面全体の元素分布



表面近傍の拡大部分 (P15~P21 : 測定箇所)

図1 μ-XRFによる元素分布評価

測定箇所P17からP20にかけて
立方晶相ピークがブロード化

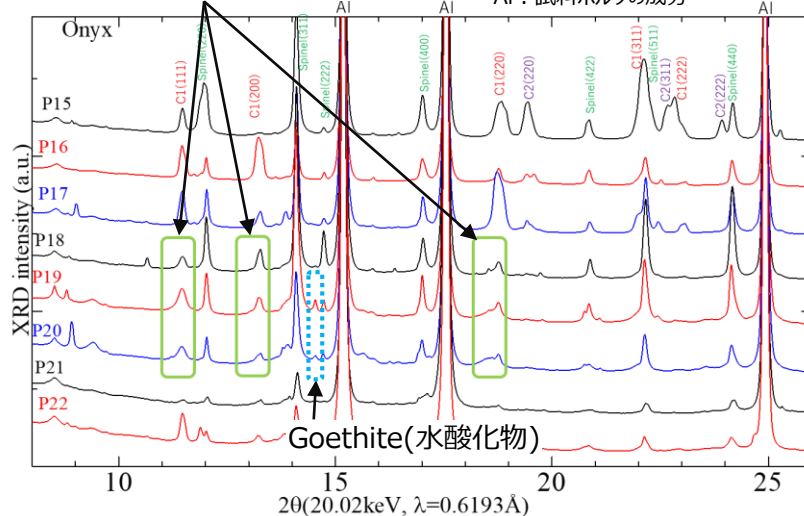


図2 μ-XRDによる結晶構造解析

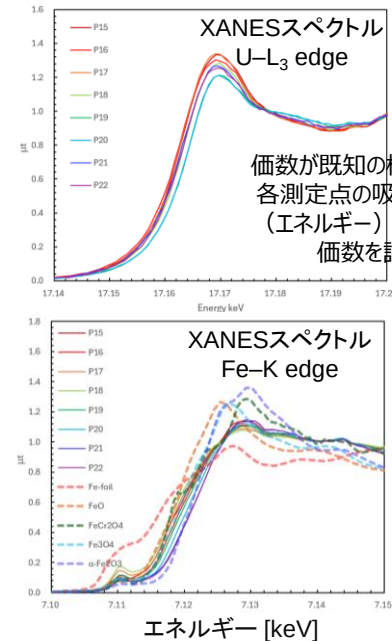
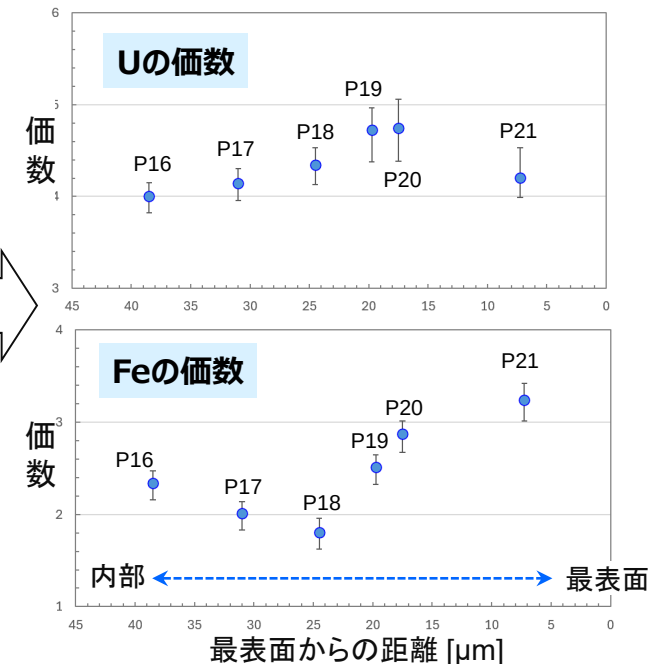
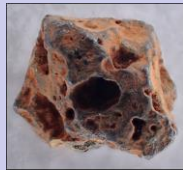
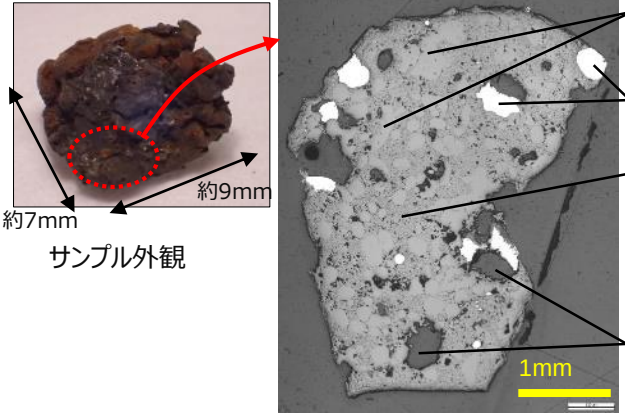
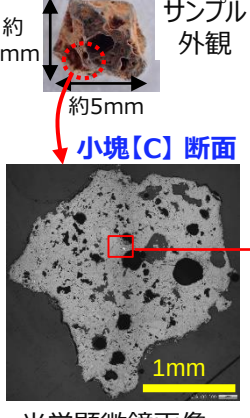


図3 μ-XAFSによる酸化状態の評価



項目	1回目燃料デブリ	2回目燃料デブリ	備考
外観	 全体的に赤褐色・表面の一部が黒色、光沢領域	  塊 欠片 全体的に茶色に近い褐色・表面の一部が黒色、空孔	2回目サンプルの茶色に見える箇所(最表面層)にはUが殆ど含まれておらず、色味の違いに反映されている可能性がある。
重量	0.693g	0.187g (サンプル総重量)	—
大きさ	約9mm×約7mm	約5mm×約4mm (塊)	—
線量率	約8mSv/h (γ線)	約0.3mSv/h (γ線)	—
γスペクトロメトリ	^{241}Am 、 $^{154, 155}\text{Eu}$ 、 ^{125}Sb 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co を検出	^{241}Am 、 $^{154, 155}\text{Eu}$ 、 ^{125}Sb 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co を検出	同様の結果
X線CT	CT値は不均一 空隙と推定される密度低が分布 体積：約 0.1cm^3	CT値は不均一 空隙と推定される密度低が分布 体積：約 0.026cm^3	同様の結果
表面観察 SEM-WDX	U、Zr、Fe、Cr、Ni、Oに加え、Si、Ca、Al等を検出	U、Zr、Fe、Cr、Ni、Oを検出 Si、Ca、Al等は未検出	2回目は均質の傾向
分取状況	人力でステンレス棒で破碎	人力でステンレス棒で破碎	—

[1]JAEA, 東京電力HD, 燃料デブリサンプル（２回目）の非破壊分析結果について（速報）、廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第138回）、令和7年5月29日。

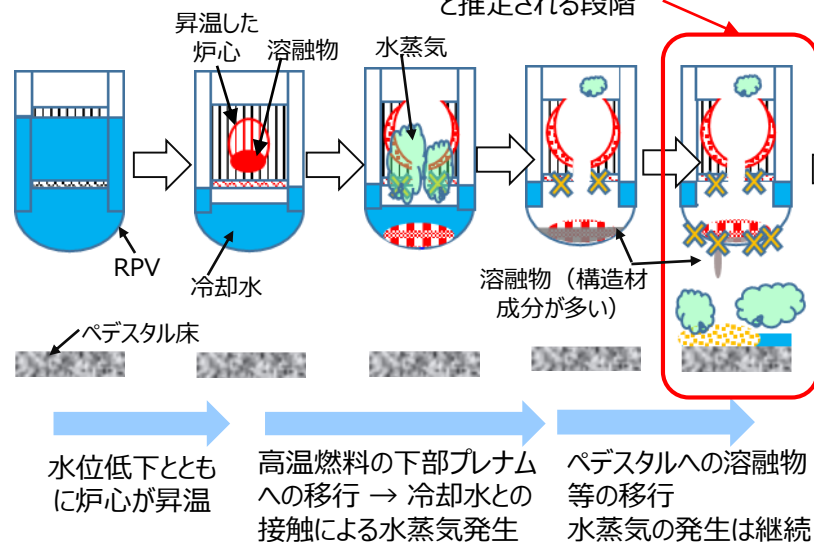
		1回目燃料デブリ	2回目燃料デブリ
断面組織及び サンプルの生成過程 の推定		塊[C] 断面  サンプル外観 約7mm 約9mm [構成相の概略] - 粗大Zr-U-O相 - Fe-Ni金属相 - 微細混合領域 ・ U-Zr-O、Zr-U-O、Fe-Cr-O、Fe-Oの混相 - 空隙 ・ 大きさ数～数百μm 光学顕微鏡画像 ✓ 構造材成分(Fe、Cr、Ni)のうち、Cr及びFeの酸化が進んだと推定される。 ✓ RPV内での熔融状態(約1900℃以上)からの凝固により生成したと推定される。	サンプル外観 約4mm 約5mm  小塊[C] 断面 [構成相の概略] (反射電子像) - 粗大U-Zr-O相 - 空隙 - Fe-Ni相 (ごくわずか) - 微細混合領域 ・ U-Zr-O、Zr-U-O、Fe-Cr-O、Fe-Oの混相 - 空隙 SEM像 光学顕微鏡画像 ✓ 構造材成分(Fe、Cr、Ni)のうち、Cr及びFeの酸化が進んだと推定される。 ✓ RPV内での熔融状態(約2200℃以上)からの凝固により生成したと推定される。
分析結果	元素含有率	・ 炉心組成と比較して構造材成分(Fe、Cr、Ni)の割合が多い。	・ 1回目と比較すると構造材成分(特にNi)の割合が低い。
	U同位体比	・ U濃縮度は $^{235}\text{U}/\text{U}$ 比で約1.9wt%	・ U濃縮度は $^{235}\text{U}/\text{U}$ 比で約2.0wt%
	放射能濃度	・ 事故前の燃料組成と比較してCs濃度が低く、γ線放出核種としては^{154}Euや^{60}Coの寄与が高い。 ・ ^{154}Eu及び^{244}Cmの濃度は事故前の燃料組成と同程度であり、Uとの帯同性を確認した。	・ 事故前の燃料組成と比較してCs濃度が低い。 ・ 1回目と比較して^{60}Co及び^{125}Sbの濃度が低い。
	元素・化合物分布	・ 主に粗大Zr-U-O相、Fe-Ni金属相、微細混合領域及び空隙で構成される。	・ 主に微細混合領域、粗大U-Zr-O相及び空隙で構成される。1回目と比較するとFe-Ni金属相が少ない。
	Uを含む相等の結晶構造・組成	・ 粗大Zr-U-O相：立方晶$(\text{Zr},\text{U})\text{O}_2$ ・ Fe-Ni金属相：面心立方Fe-Ni ・ 微細混合領域：立方晶$(\text{U},\text{Zr})\text{O}_2$、立方晶$(\text{Zr},\text{U})\text{O}_2$、正方晶$(\text{Zr},\text{U})\text{O}_2$相、スピネル型$(\text{Fe},\text{Cr})_3\text{O}_4$、立方晶FeOが存在。 ・ サンプル表面にはNi-U-Fe-O系のアモルファス相などが堆積。	・ 微細混合領域：立方晶$(\text{U},\text{Zr})\text{O}_2$相、正方晶$(\text{Zr},\text{U})\text{O}_2$相、スピネル型$(\text{Fe},\text{Cr})_3\text{O}_4$が存在。 ・ 粗大U-Zr-O相：立方晶$(\text{U},\text{Zr})\text{O}_2$ ・ Fe-Ni金属相 ・ サンプル表面にはNi-Fe-O系の相などが付着(Uをほとんど含まない)。

これまでの検討と組み合わせ、事故がどのように進展したかの推定を進めることで、燃料デブリ分布等の炉内状況の把握に努め、燃料デブリ取り出しや内部調査の検討等に活用する。

【サンプル分析結果の位置づけ】

今回の燃料デブリサンプルは、1回目・2回目ともに、ペDESTALに移行するまでの間、圧力容器内での水蒸気発生による構造材成分等の酸化を経て生成されたものと推定。

今回のサンプルが移行してきたと推定される段階



2号機事故進展時の推定^[1]

【内部調査結果からの知見】

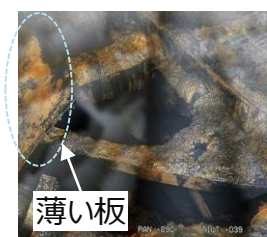
CRDハウジング支持金具サポートバー
CRDハウジング支持金具ハンガーロッド
PIPケーブル



CRDハウジングサポートに大きな損傷は確認されず
⇒燃料デブリのペDESTALへの移行時、ステンレス鋼の融点(約1450℃)を大きく超える条件ではなかったと推定される。

撮影場所F CRDハウジングサポート

CRDハウジングサポートの外観^[3]
(調査時期：2018年1月)



プラットフォーム上に薄い板を確認。設計図面との比較から、RPV直下にあった保温層(アルミニウム合金製：融点約660℃)が落下してきた可能性を示唆^[5]。
⇒燃料デブリのペDESTALへの移行時に保温層も巻き込んだと推定される。

CRDレール近傍のプラットフォームの外観^[4]
(調査時期：2017年2月)

2号機の炉内状況
推定図^[2]

[1]図出典：Yamashita et al. Annals of Nuclear Energy, 173 (2022) 109129. より抜粋・加筆

[2]JAEA, 令和5年度開始「廃炉・汚染水・処理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(RPV損傷状況及び燃料デブリのPCV内移行挙動等の推定のための技術開発))」ー令和6年度最終報告ー 2025年10月。

[3]東電HD, IRID, 2号機 原子炉格納容器内部調査 実施結果。廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第50回)資料3-3。

[4]東電HD, IRID, 2号機原子炉格納容器内部調査について。廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第39回)資料3-3。

[5]JAEA, 令和4年度開始「廃炉・汚染水・処理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(原子炉圧力容器の損傷状況等の推定のための技術開発))」 2022年度最終報告。2023年9月。

- 事故時の高温反応やデブリの移行過程において、サンプルの生成に巻き込まれた可能性のある材料をピックアップし、生成過程の推定に役立っている。

薄緑： もともとRPV内・PCV内にあった材料
薄橙： 地震後に投入された材料

主要炉心材料	主要成分	単独の融点
ウラン燃料	U, Gd, Pu, FPs, MAS	約2800℃
被覆管・CB (ジルコニウム合金)	Zr, Sn, etc. APs	約1760℃
制御棒、タイプレート、炉心支持板などの構造物 (ステンレス鋼)	Fe, Cr, Ni, Si, Mo, etc. APs	約1450℃
中性子吸収材 (炭化ホウ素)	B, C	約2450℃
その他の燃料集合体部材 (Ni合金：スペーサスプリング等)	Ni, Cr, Fe, etc.	約1450℃

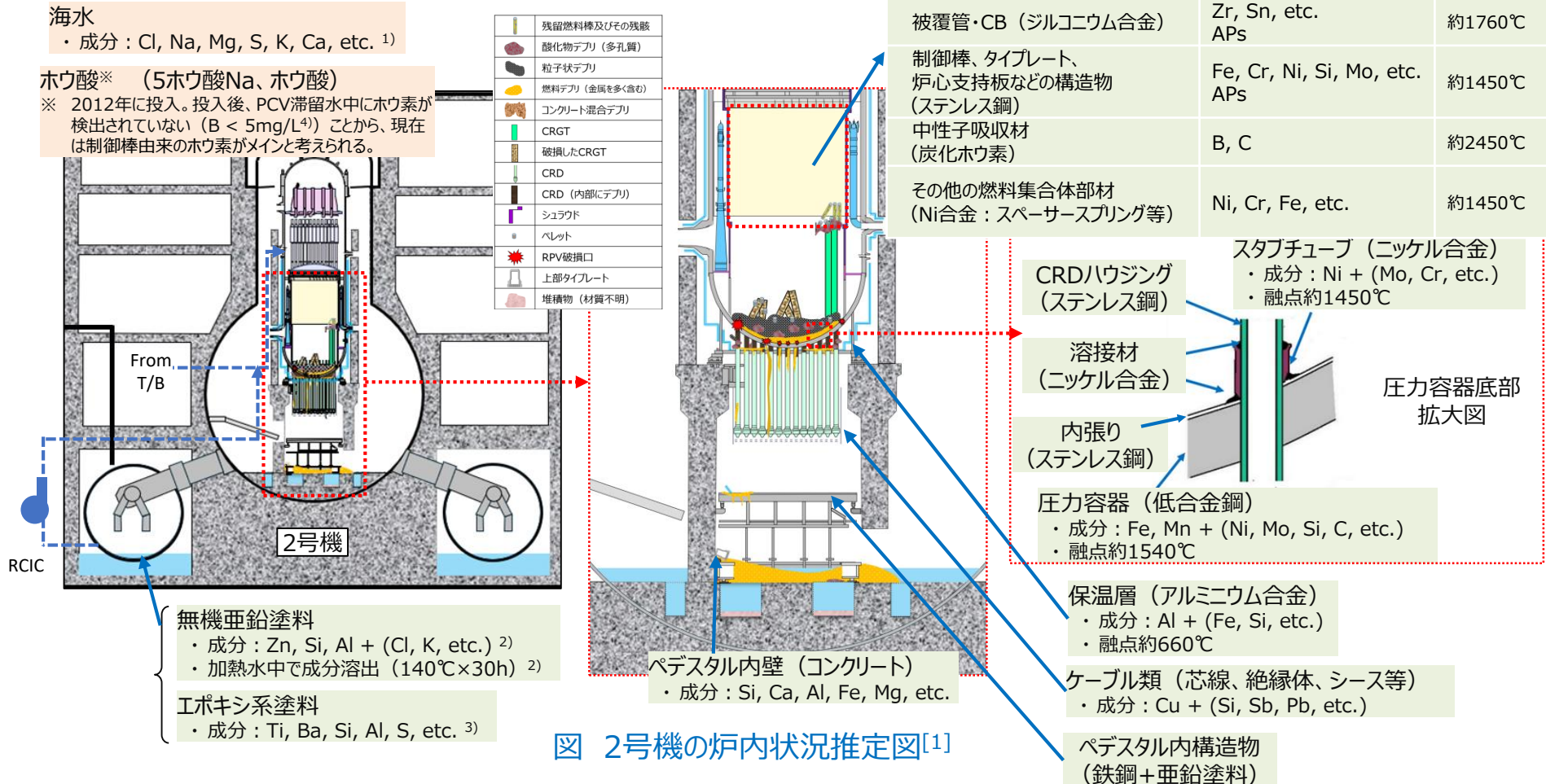


図 2号機の炉内状況推定図^[1]

1) Kirishima et al., J. Nucl. Sci. Technol. 52, (2015), 1240. 2) 中森他, 日本原子力学会2018年春の年会, 2M17.
3) 東電HD, 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 (第28回) 資料4-1. 2022年2月28日. (SEM-EDX結果)
4) IRID, JAEA, 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議 (第39回) 資料3-4-4. 2017年2月23日. (PCV滞留水の分析結果)

燃料デブリサンプルの分析では、次の3種類の分析を活用して、サンプルの特徴や成り立ちを明らかにする。

● 非破壊分析

【概要】 受け入れたサンプルの状態をなるべく変えずに空隙や高密度物質の分布、含まれる成分などの情報を大雑把に把握する。

【目的】 サンプルの基本情報を取得するとともに、核燃料に由来する成分（ウランや放射性核種など）の有無を早期に確認する。また、後段の固体分析や溶液分析においてどの部位に注目するか、分取後のサンプルの位置情報は取得できているかといった、分析の具体的な進め方を検討する。

【分析方法】 外観、重量、線量率、IP、X線CT、 γ 線スペクトロメトリ、SEM-WDX（表面）

● 固体分析

【概要】 サンプルの一部を分取してその断面を詳細観察することにより、ウランやジルコニウムなど原子炉からきた成分が、サンプル中でどのような状態にあるか（共存元素は何か、事故前の状態を留めているか、酸化されているか、等）を確認する。

【目的】 どの材料が、どのような温度・雰囲気※のもとで反応してサンプル形成に至ったかといった、サンプルの「成り立ち」に関わる情報を得る。

※ 前回報告から新たに追加したSPRING-8の放射光分析では、サンプル中の元素の立体的な分布やウランの価数など、従来の電子顕微鏡をベースとした観察手法よりも詳細なデータが得られることから、事故時の温度や雰囲気についてより精度の高い推定が可能になると考えられる。

【分析方法】 SEM-EDX、SEM-WDX、TEM-EDX、SIMS、ラマン分光、 μ -XAFS、 μ -XRF、 μ -XRD

● 溶液分析

【概要】 サンプルの一部を分取して酸等に溶解させ、得られた溶解液中の元素や核種量を測定する。

【目的】 ウランの同位体比や放射性核種濃度といった、燃料デブリを安全に取り出す／安定に保管するための工程検討に必要な情報を得る。

【分析方法】 ICP-MS、ICP-AES、TIMS、 γ 線スペクトロメトリ、 α 線スペクトロメトリ

一連の分析の取り組みを継続し、炉内に堆積する燃料デブリの特徴を徐々に明らかにすることで、燃料デブリの取り出しや保管における安全評価・合理化に貢献する。

[1] JAEA, 燃料デブリサンプルの非破壊分析結果、廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第138回）、令和7年5月29日。

分析方法略称	分析方法名	分析方法概要
ICP-AES	誘導結合プラズマ 発光分光分析	高温プラズマ中に霧状の試料を導入し、発行する光を分光することにより元素特有のスペクトルを得て、元素の定性、定量分析を行う方法。
ICP-MS	誘導結合プラズマ 質量分析	高温プラズマ中に霧状の試料を導入し、試料中の元素をイオン化し、質量分析によりイオンの質量/電荷比 (m/z) におけるイオン数を測定することにより、元素および、その同位体の濃度を測定する方法。
TIMS	表面電離型質量分析	金属フィラメント上に試料を塗布し、真空下で加熱することにより原子をイオン化し、質量分析によりイオンの質量/電荷比 (m/z) におけるイオン数を測定することにより、元素および、その同位体の濃度を測定する方法。
IDMS	同位体希釈質量分析	分析対象試料に、その試料とは大きく異なる同位体組成の標準試料を既知量添加し、添加前後の試料の同位体組成の変化量及び標準試料の添加量から、試料中の元素量（濃度）を定量する方法。同位体組成の測定は質量分析により行う。
SEM	走査型電子顕微鏡	試料表面に電子線を照射し、表面を観察する装置で、X線分析装置を付帯させることにより、元素分析を行うこともできる。
EDX	エネルギー分散型 X線分析	電子線照射により発生する特性X線を検出し、特性X線のエネルギーで分類し、元素分析や組成分析を行う方法。
WDX	波長分散型X線分析	電子線照射により発生する特性X線を検出し、特性X線の波長($\text{\AA}$)で分光して元素分析や組成分析を行う方法。※ $\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$
TEM	透過型電子顕微鏡	薄片化した試料に電子線を照射し、試料を透過した電子や散乱した電子を結像して高倍率で観察する方法で、X線分析装置を付帯させることにより元素分析を行うこともできる。また、回折像から結晶構造を得ることができる。
SIMS	二次イオン質量分析	試料表面にビーム状のイオンを照射し発生した二次イオンを質量分析計で測定することにより、イオンの質量/電荷比 (m/z) におけるイオン数を測定することにより、元素および、その同位体の濃度を測定する方法。

[1]JAEA, 東京電力HD, 燃料デブリサンプル（1回目）の分析結果について、廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第140回），令和7年7月31日。

分析方法略称	分析方法名	分析方法概要
ラマン分光	顕微ラマン分光分析	試料表面に光を照射し、ラマン散乱光を分光して、分子構造、温度、応力、電気的特性、配向・結晶性等の物性を得る方法。従来の光学顕微鏡とラマン分光法とを組み合わせ、μmオーダーの微小領域の化学形態に関する情報を得ることができる。
X線CT	X線コンピュータ断層撮影	試料にX線を照射し、透過してくるX線強度をコンピュータに取り込み、三次元的にスキャンすることにより、試料の内部の密度分布を得る方法。異なる密度の相の分布が得られる。
XAFS	X線吸収微細構造解析	試料にX線を照射し吸収されるX線のエネルギーを精密に観察し物質の内部構造を分子、原子レベルで分析を行う方法
XRF	蛍光X線分析	試料にX線を照射して発生する、物質に応じて発生するX線（蛍光X線）の波長やエネルギーを測定して構成する元素の含有量を定量分析する方法
XRD	X線回折法	試料にX線を照射して、得られるX線（回折X線）を測定し対象物の結晶構造、結晶方位、結晶格子サイズなどを解析する方法
IP	イメージングプレート	放射線エネルギーを輝尽発光として検出する放射線画像測定器。サンプルの線量分布が取得可能

[1]JAEA, 東京電力HD, 燃料デブリサンプル（1回目）の分析結果について, 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第140回）, 令和7年7月31日.