

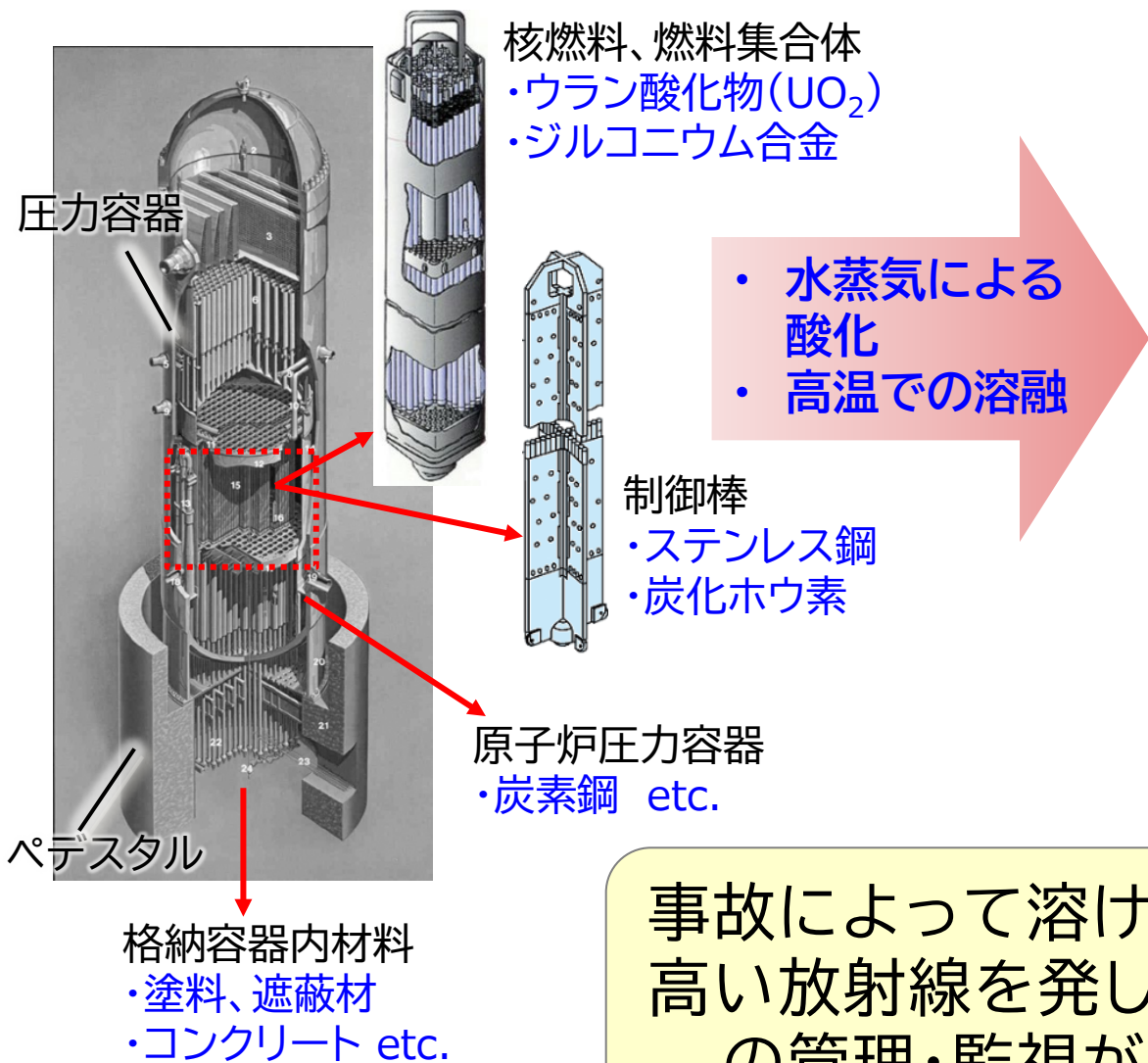
炉内に堆積した燃料デブリの性状に迫る ～サンプル分析からのアプローチ～

池内 宏知

廃炉環境国際共同研究センター (CLADS)

分析研究グループ

本報告は、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」に係る補助事業の成果を含みます。



2号機 ペDESTAL底部に堆積した燃料デブリの外観 [1]

事故によって溶け落ちた核燃料が含まれる。高い放射線を発し、安定した状態を保つための管理・監視がいまも継続されている。

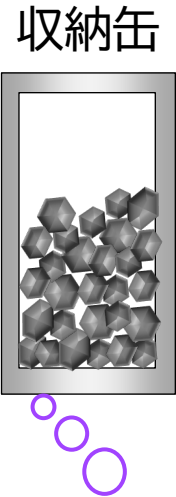
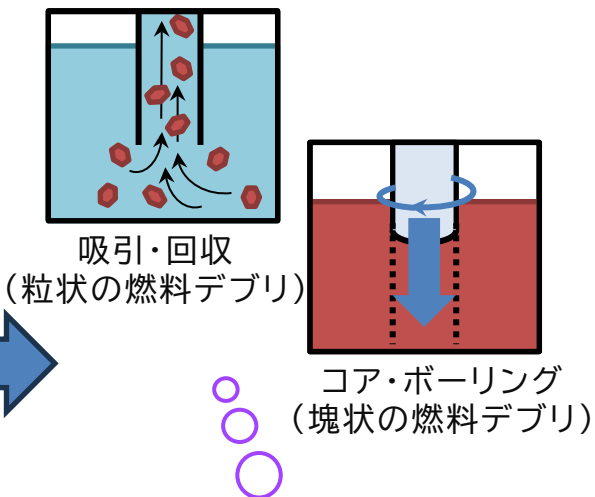
[1] 東京電力HD, 動画アーカイブ, “2024/10/3(木) 福島第一原子力発電所 2号機燃料デブリ試験的取り出し作業の進捗状況(ペDESTAL底部の様子)”

燃料デブリを安全に扱う方法を見極め、より安定な状態へ

炉内の状況を知る

取り出す

保管する



大量の堆積物があるが、
ぜんぶ核燃料とみるべき？

臨界の可能性は？
加工性は？

金属や放射性核種
をどの程度含む？

⇒ 物量感の把握

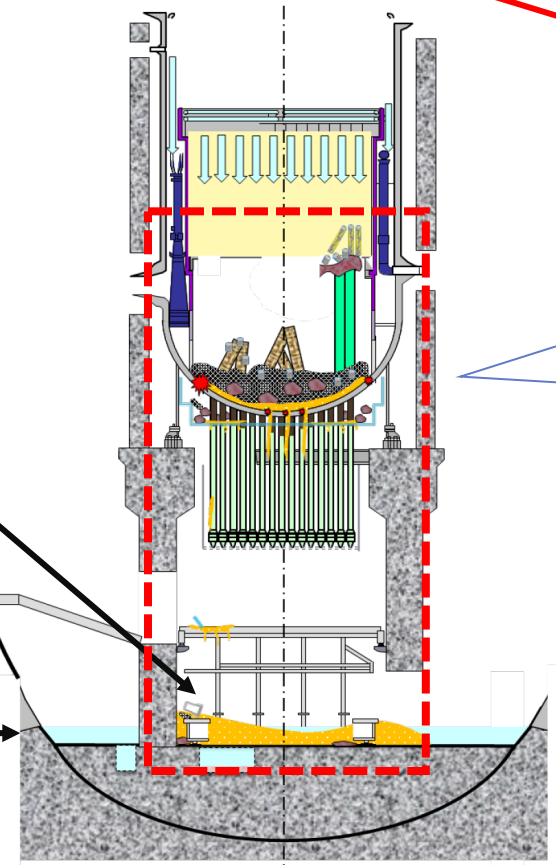
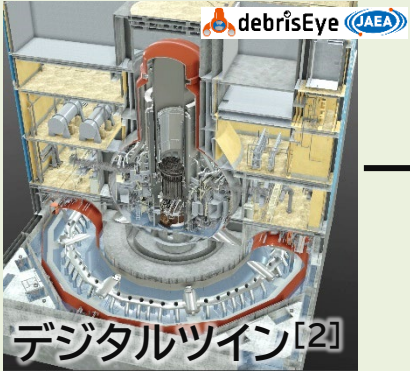
⇒ 工法・器具の開発

⇒ 水素発生・発熱・
発火対策の検討

[1] 東京電力HD, “福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査(2018年1月)取得映像の画像処理について”, 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第63回), 2019年2月28日.





廃炉において **どこに、どんな燃料デブリがあるのか** を知ることが重要

内部調査や解析などを通じて徐々に解明



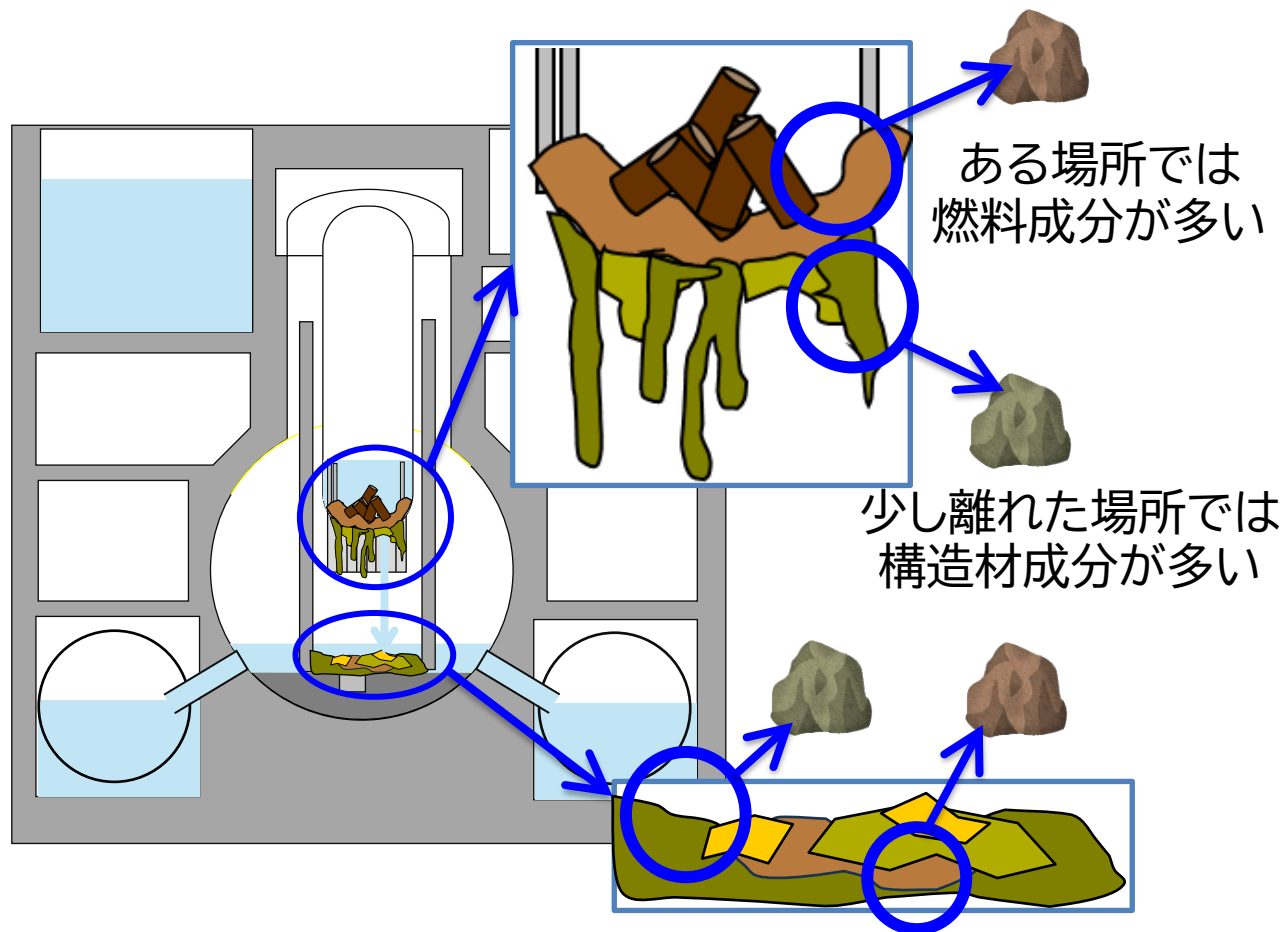
2号機の炉内状況推定図[1]

燃料デブリの組成や材質には不確かな点が多い

-  残留燃料棒やその残骸
-  多孔質な酸化物
-  粒子状のもの
-  構造材成分を多く含むもの

分析を通じて不確かな点を明らかに

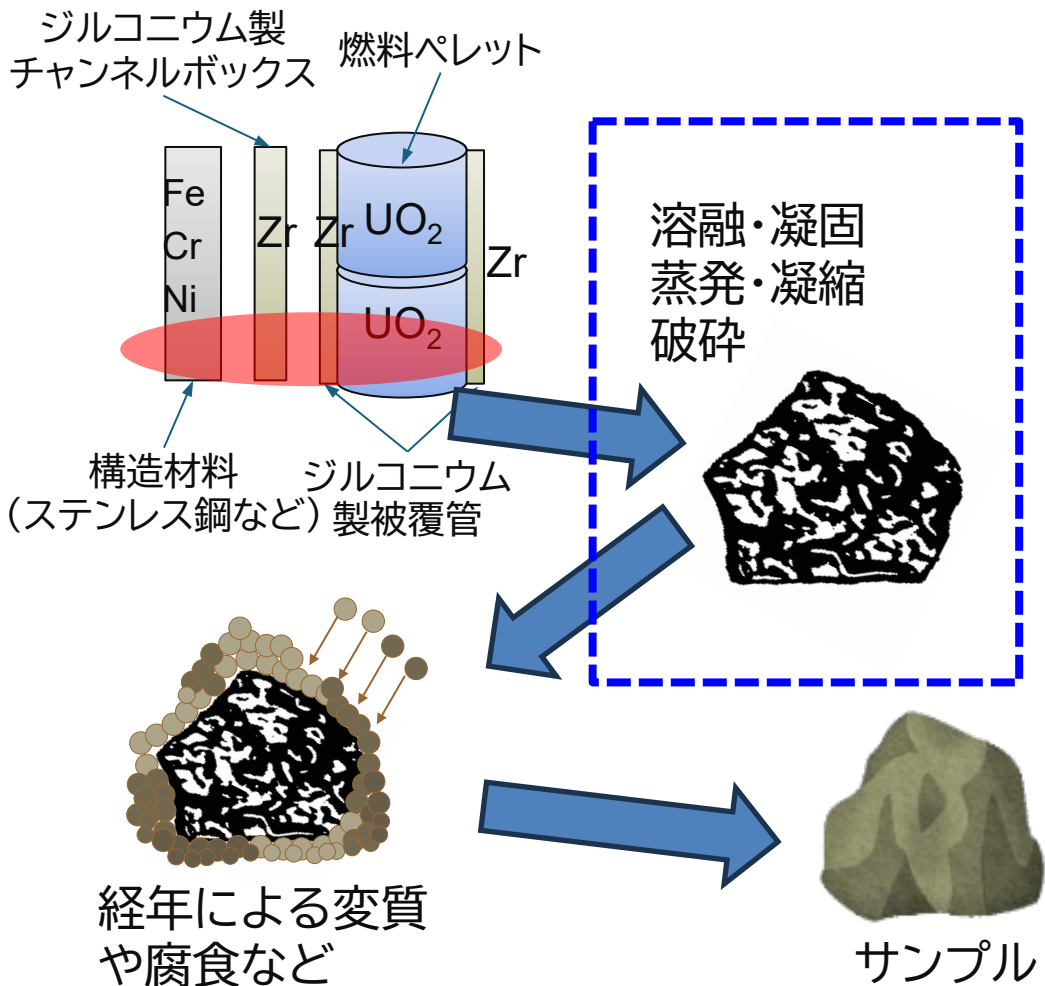
[1] 東京電力HD 動画ライブラリ, 2号機燃料デブリ試験的取り出し作業の進捗状況(把持作業完了).
 [2] JAEA, 令和4年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金(燃料デブリ)の性状把握のための分析・推定技術の開発(原子炉圧力容器の損傷状況等の推定のための技術発)」2022年度最終報告.



燃料デブリは炉内で
極めて非均質に分布
している。

燃料デブリの総量に
対して、分析可能な
サンプル量に限り
がある。

サンプルの分析データを積み上げるだけでは、
燃料デブリの性状や特徴を十分に理解できない。



サンプルの生成時において、

- どの**材料**が関与したか？
- どれくらいの**温度**を経験したか？
- それらの材料がどの程度**酸化**されたか？



サンプル生成時の炉内環境がわかることで、そのような環境下でどんな性状の燃料デブリができるか推定が可能になる。

* 原子炉建屋や格納容器内部調査の際に取得された堆積物や付着物等の汚染物サンプル

模擬燃料デブリ

内部調査サンプル*

燃料デブリサンプル

様々な炉内環境を想定した模擬試料の調製と特性把握

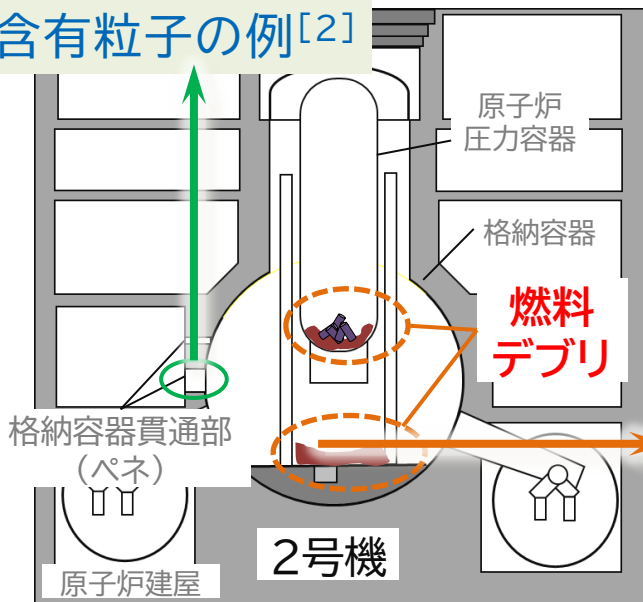


様々な材料の組合せを想定した模擬燃料デブリ^[1]



ウラン(U)含有粒子の分析による炉内環境の推定

U含有粒子の例^[2]



実物の分析と炉内環境の推定による性状把握



ペDESTAL底部より回収された燃料デブリサンプル^[3]

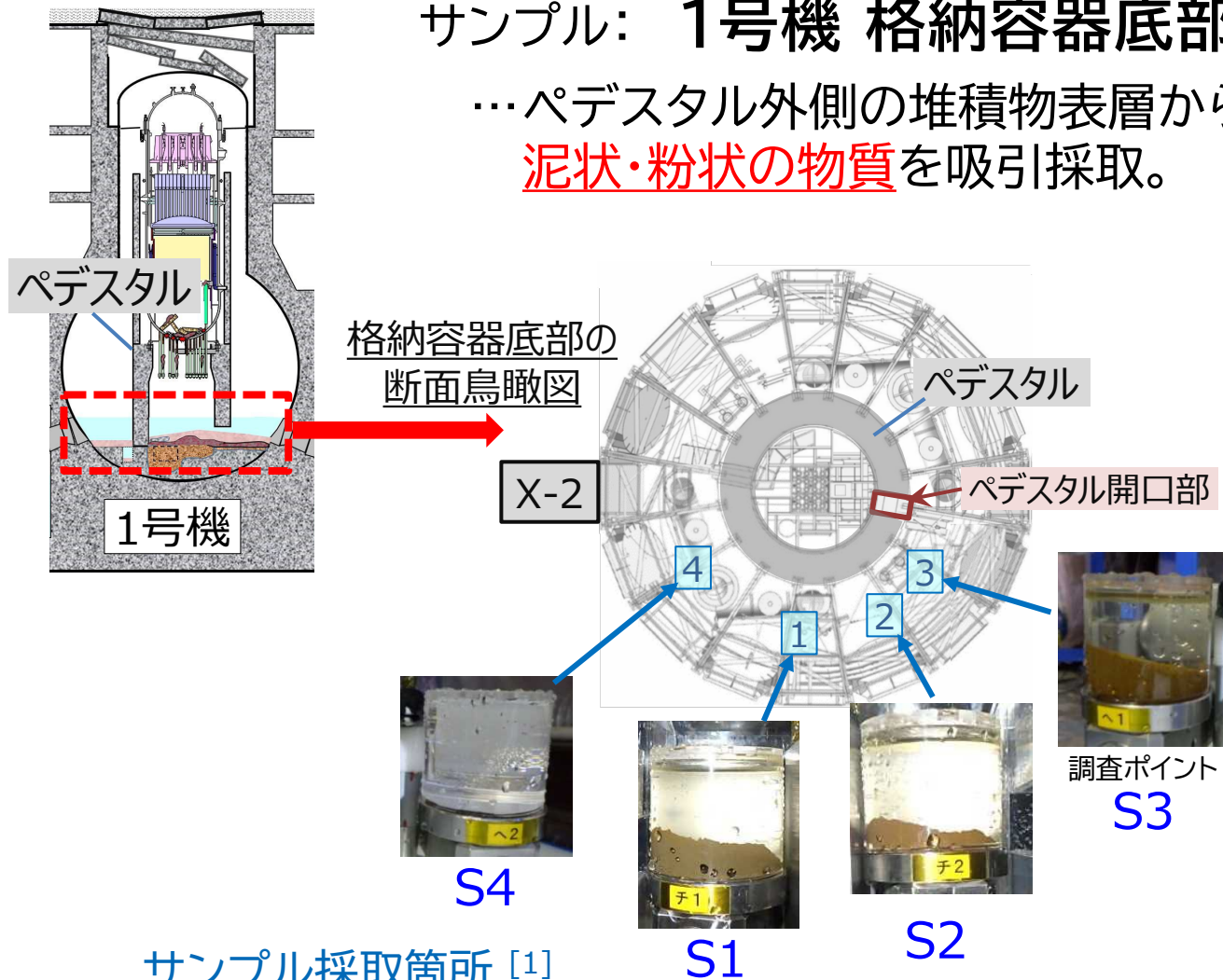
[1] JAEA, “東京電力福島第一原子力発電所における燃料デブリ特性把握・処置技術開発—平成24年度研究開発成果報告書”, JAEA-Review 2013-066.

[2] 例えば 池内, “炉内に堆積した燃料デブリの性状に迫る”, 令和5年度 福島研究開発部門 成果報告会, 2024年1月26日.

[3] 東京電力HD, “2号機燃料デブリ試験的取り出し作業の完了について”, 2024年11月7日.

サンプル: 1号機 格納容器底部堆積物

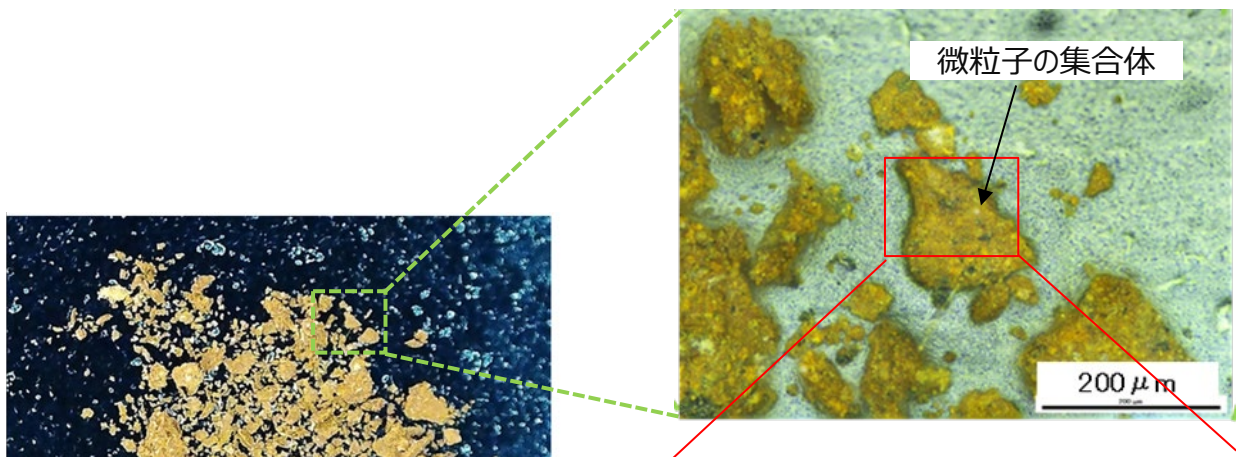
…ペDESTAL外側の堆積物表層から
泥状・粉状の物質を吸引採取。



サンプル採取箇所 [1]
(採取時期: 2023年1~2月)

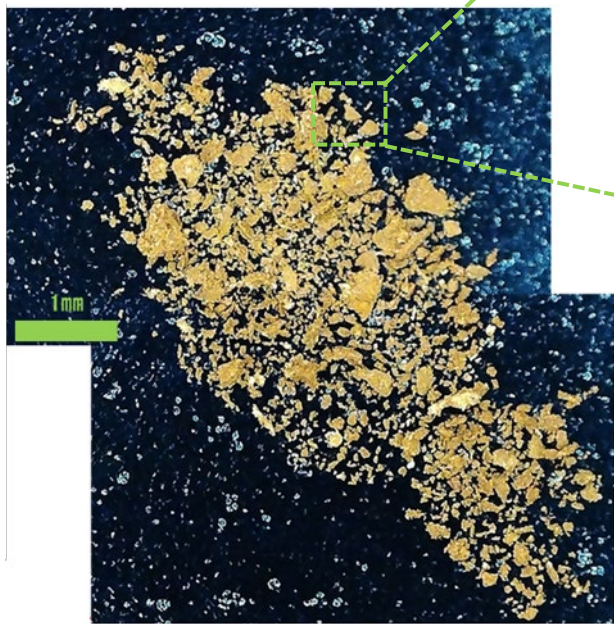
【分析目的】

- 堆積物の特徴の把握 (化学組成、材質など)
⇒ 堆積物の取り扱い方法の検討
- 1号機事故時の温度や雰囲気等、炉内環境の把握
⇒ 格納容器や圧力容器内部に存在する燃料デブリの性状推定

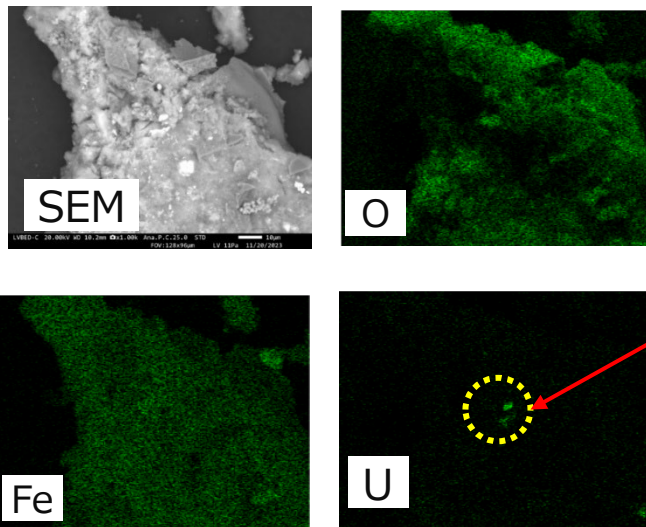


鉄さび* が大量に存在。

* X線回折とラマン分光の結果、
 Fe_3O_4 , Fe_2O_3 ,
 γ - $FeOOH$ を同定。



堆積物粒子の光学顕微鏡画像
 (調査ポイント S3)

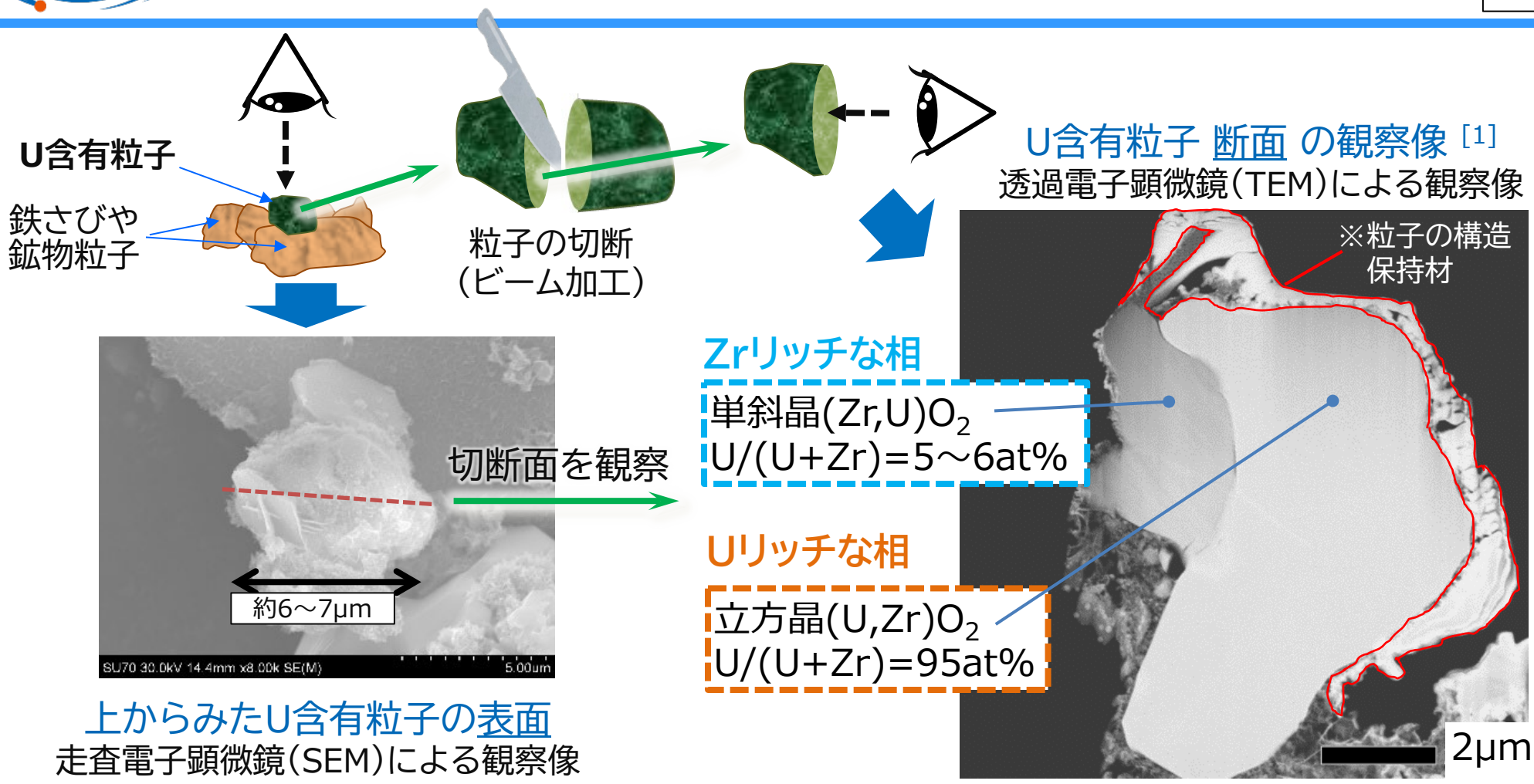


ウランはサンプル重量
 に対して1%以下。

… 大きさ数 μm 程の
 U含有粒子が存在。

堆積物粒子表面の
 元素分布 [1] 50 μm

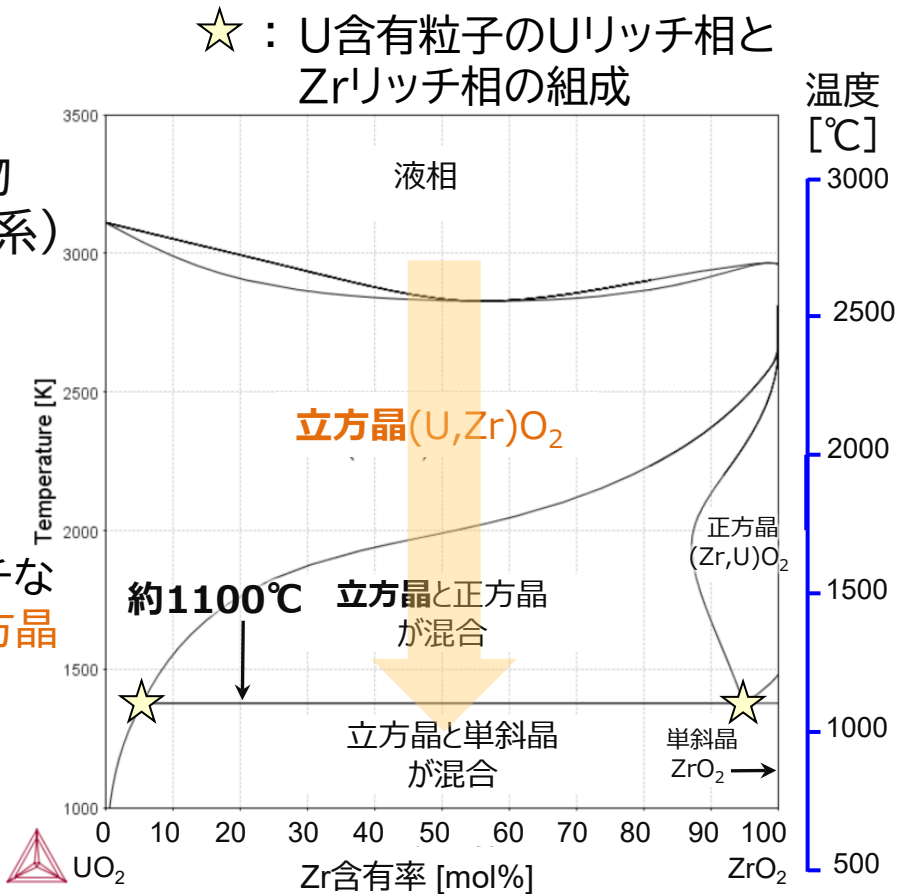
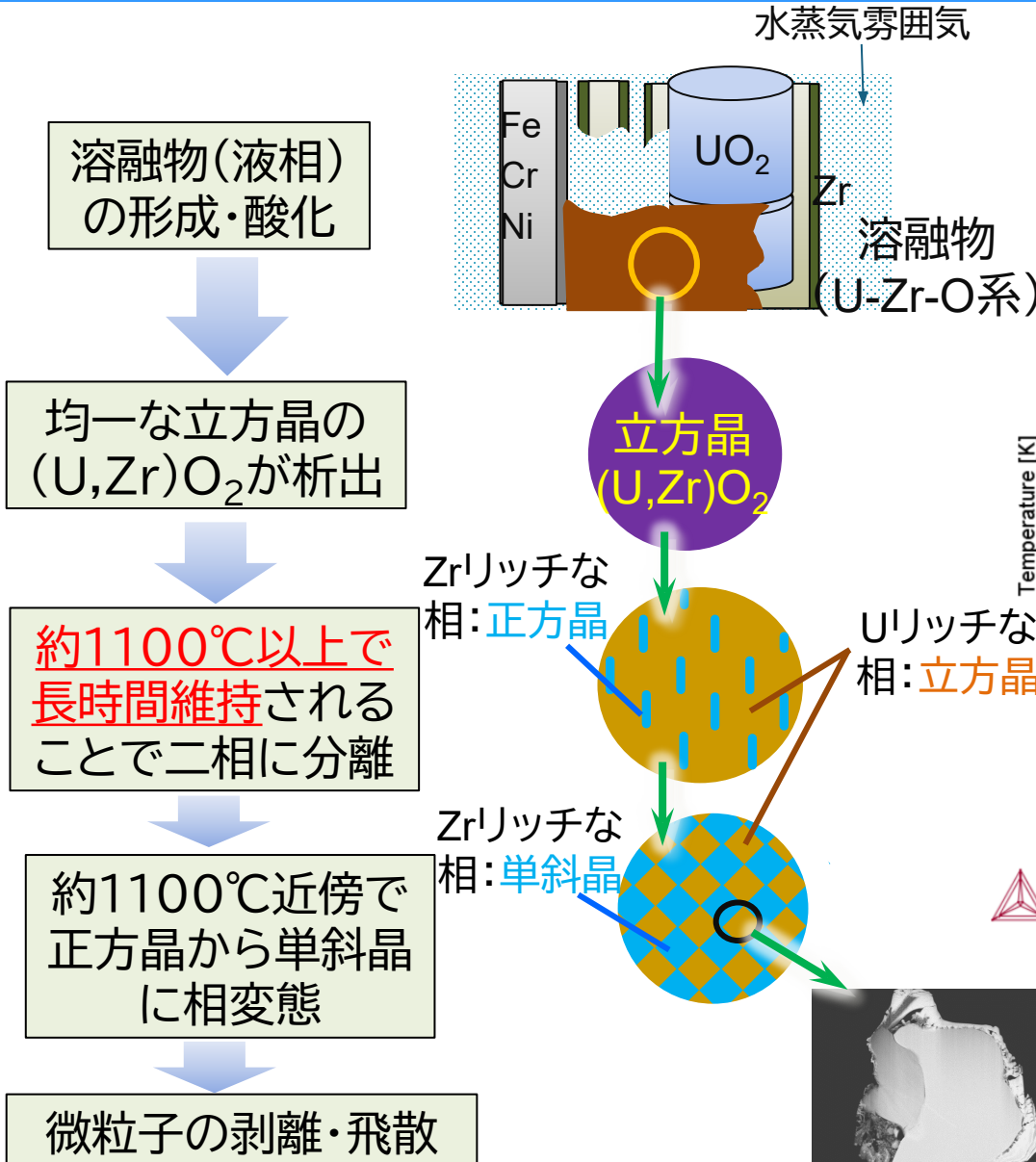
[1] 東京電力HD, “1号機格納容器底部堆積物分析結果”, 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議(第129回), 資料3-3, 2024年8月29日.



・ひとつの粒子の中に、**Uリッチな相** と **Zrリッチな相** が混在。

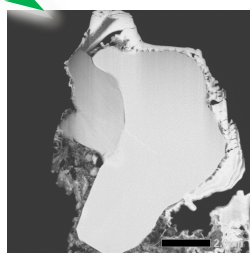
⇒ どのような条件で生成しうるかを検討(次頁参照)

[1] 東京電力HD, “1号機格納容器底部堆積物分析結果”, 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議(第129回), 資料3-3, 2024年8月29日.



UO₂-ZrO₂擬似二元系状態図^[1]

[1] JAEA. 核燃料・原子力材料熱力学データベース.



内部調査や解析等

炉内の損傷程度
1号機 > 3号機 > 2号機

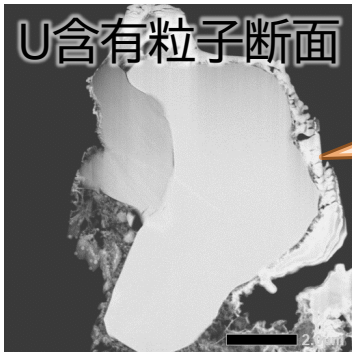
1号機ペDESTAL内部の損傷状況[1]



ペDESTALの鉄筋は構造を留めており、鉄の融点は超えていない可能性

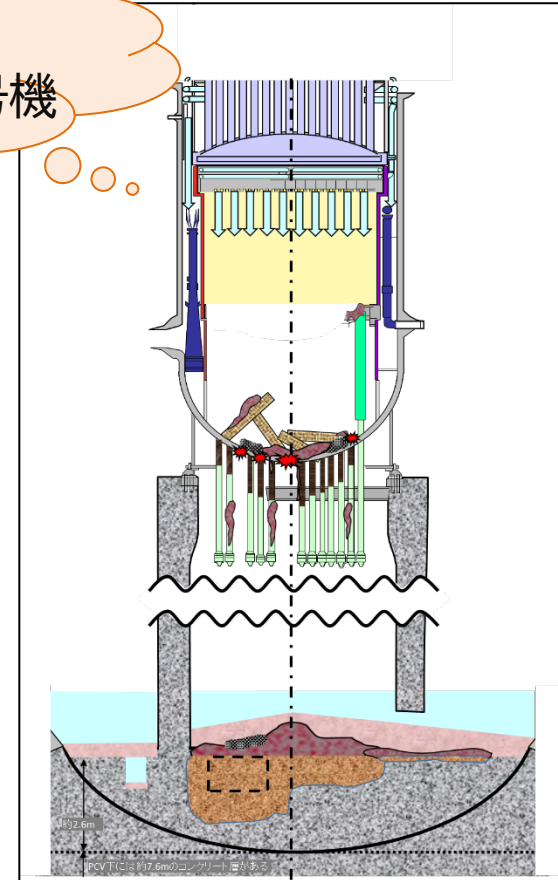
サンプル分析

U含有粒子断面



1100°C以上で長時間維持

⇒ ほかの号機よりも炉内の温度が高く、長く維持されたとの推定を裏付け。



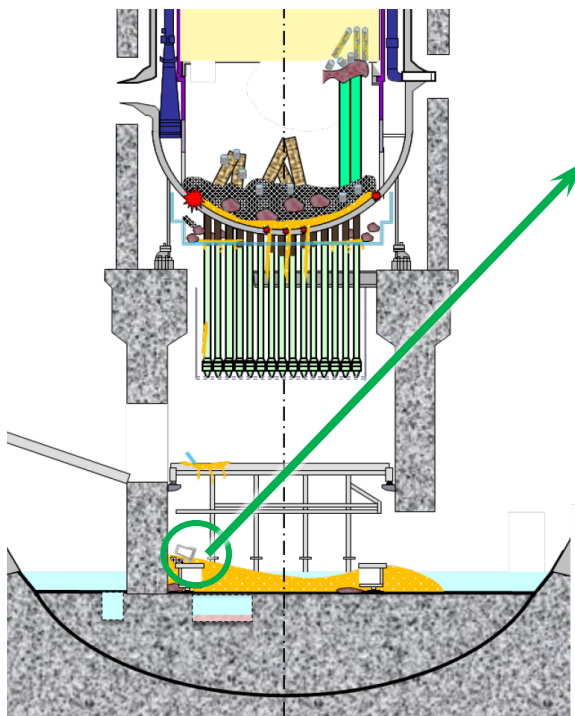
1号機の炉内状況推定図[2]

内部調査や解析等による推定にサンプル分析からの知見が加わることで、燃料デブリ生成時の炉内環境がより鮮明に。

[1] IRID, 東京電力HD, “1号機 原子炉格納容器内部調査の状況について”, 特定原子力施設監視・評価検討会(第107回), 資料5-1, 2023年4月14日.

[2] 東京電力HD, “福島第一原子力発電所事故発生後の原子炉圧力容器内・格納容器内の状態推定について”, 2021年7月19日.

【分析の目的】



2号機の炉内状況推定図^[1]



2024.10.30

試験的取り出しの状況：
燃料デブリの把持作業^[2]



2024.11.6

回収された燃料デブリ
のサンプル^[3]

- ✓ 化学組成や材質など **サンプル特性の把握**。
- ✓ 得られたサンプルの **生成プロセスの解明**。

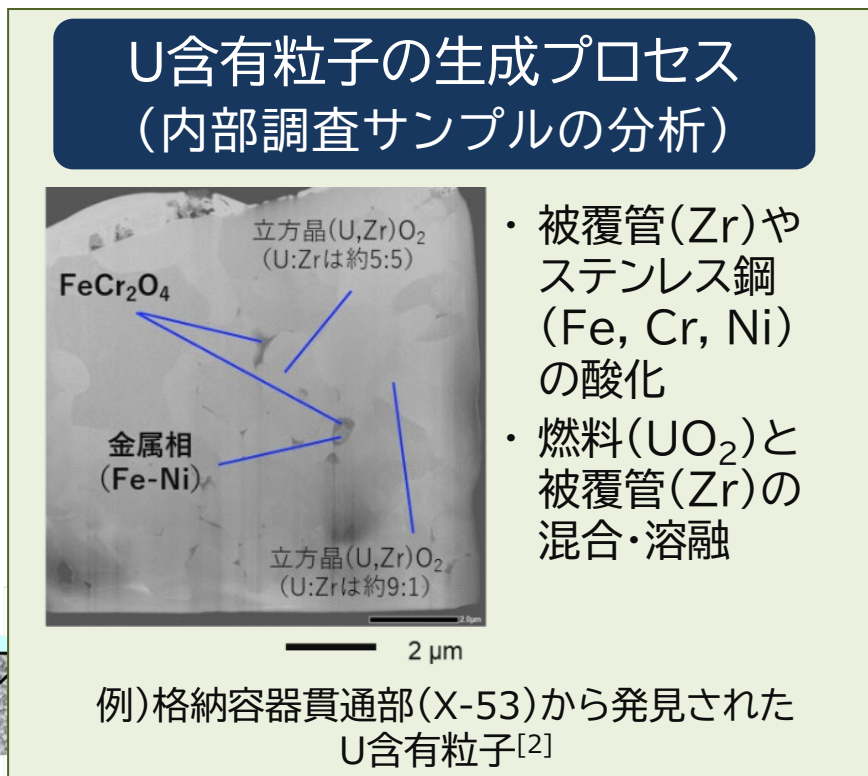
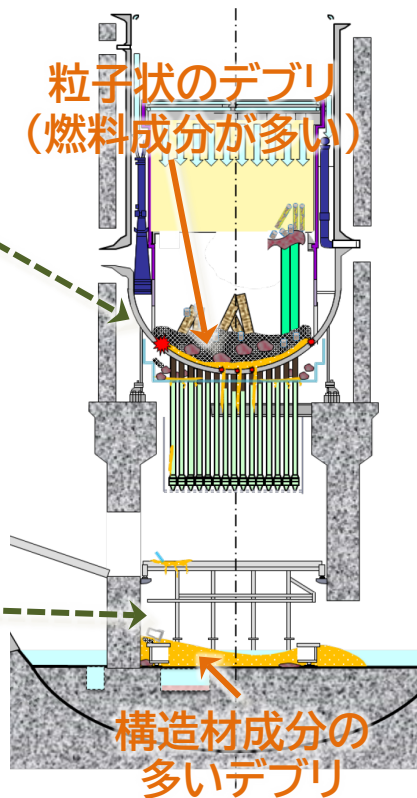
試験的取り出しで採取された燃料デブリサンプルそのものの性状に加えて、サンプル周辺の状態も推定し、より効率的に炉内状況を把握

[1] 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発))2022年度最終報告。

[2] 東京電力HD 動画ライブラリ, 2号機燃料デブリ試験的取り出し作業の進捗状況(把持作業完了)。

[3] 東京電力HD, 2号機燃料デブリ試験的取り出し作業の完了について。

◆ **これまでの推定** … 圧力容器内部からペDESTAL底部にかけて、**U-Zr酸化物とFe-Cr酸化物の混合物**や、**酸化されずに残った構造材成分**が存在する可能性



燃料デブリサンプル中にこれらの成分が検出されれば、これまでの推定がより確かなものに。

[1] 東京電力HD, 第一原子力発電所1~3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告、2022年11月10日。

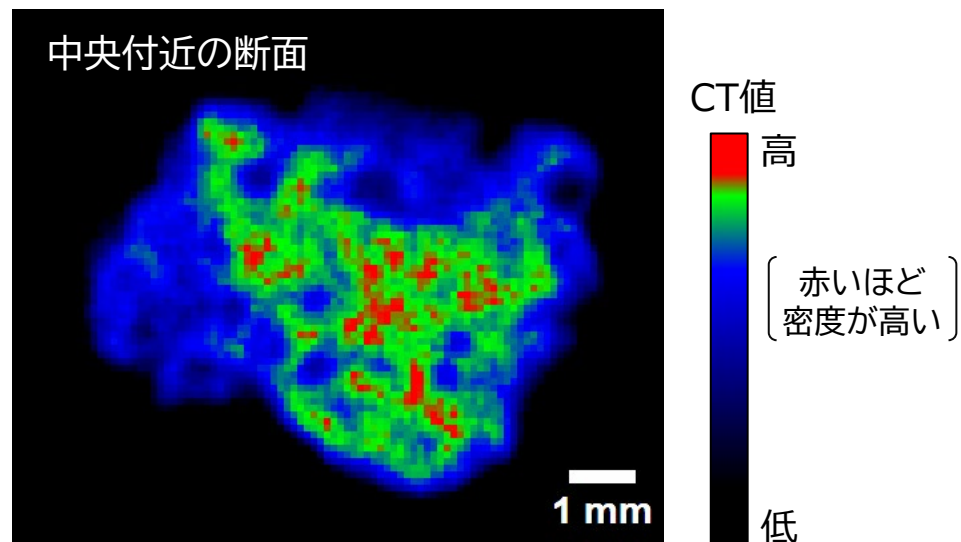
[2] 例えば 池内, “炉内に堆積した燃料デブリの性状に迫る”, 令和5年度 福島研究開発部門 成果報告会, 2024年1月26日。

- 2024年11月にJAEA大洗原子力工学研究所に受け入れ、非破壊分析を開始。

◆ サンプルの外観、内部構造



サンプル外観^[1]
(JAEA大洗研に受け入れ後)



サンプルのX線CT像^[1]

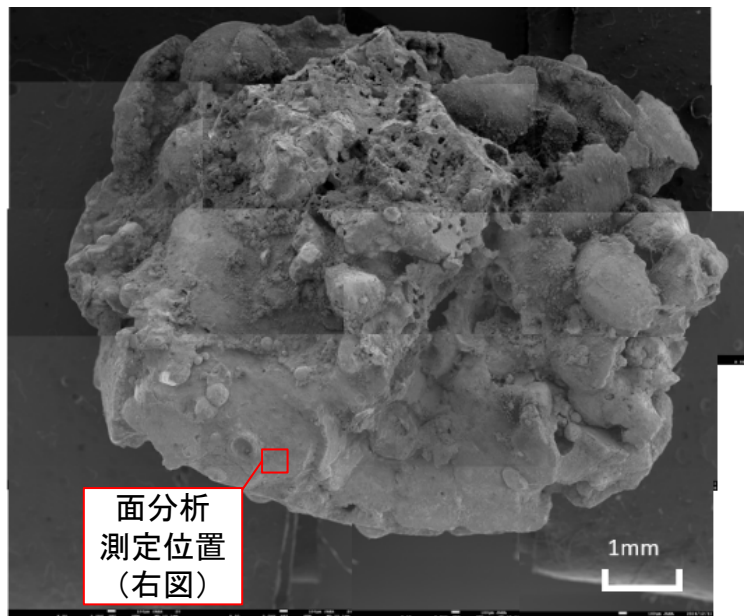
X線CT = X線コンピュータ断層撮影

密度の高い領域と低い領域
が混在しており、不均一

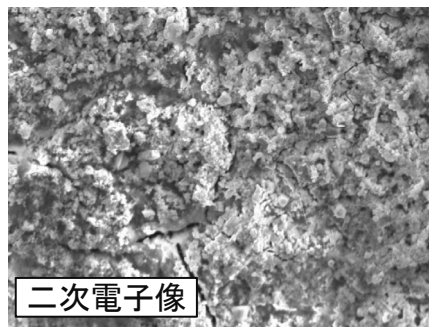
[1] JAEA, “燃料デブリサンプルの非破壊分析結果”, 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議(第133回), 資料3-3, 2024年12月26日.

◆ サンプル表面の元素分布

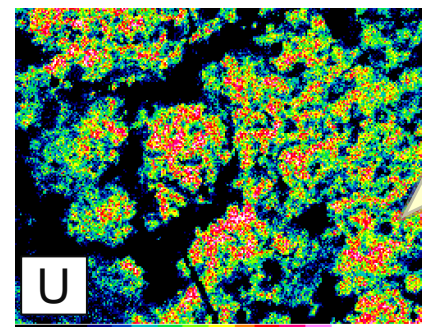
SEM = 走査電子顕微鏡 WDX = 波長分散型X線分析



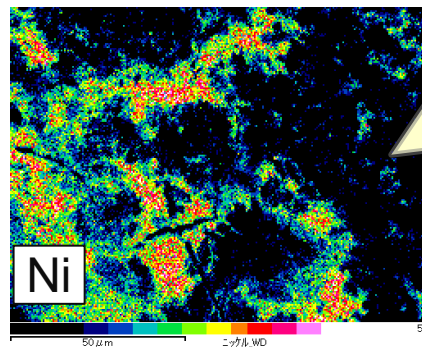
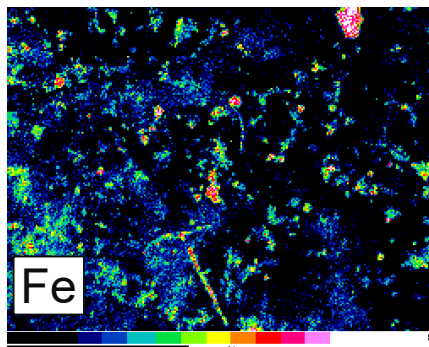
サンプルのSEM観察像^[1]



50µm



核燃料成分としてUを検出

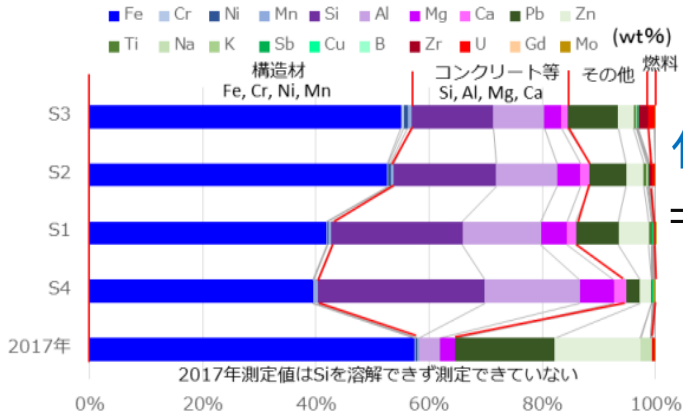


FeやNiは構造材由来の可能性

SEM/WDX面分析による元素分布^[1]

今後、元素組成や結晶状態を詳細に分析し、
サンプルの成り立ち(生成プロセス)を解明

[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133回), 資料3-3, 2024年12月26日.

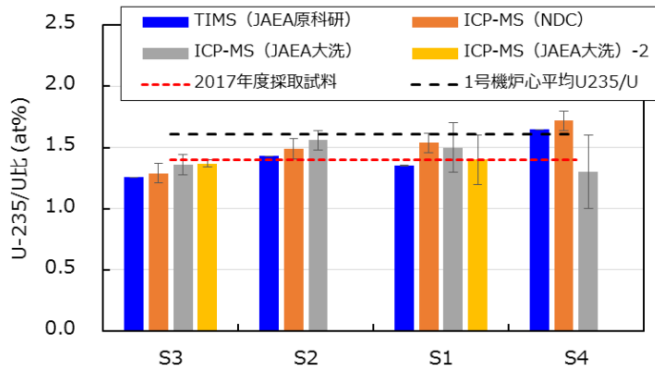
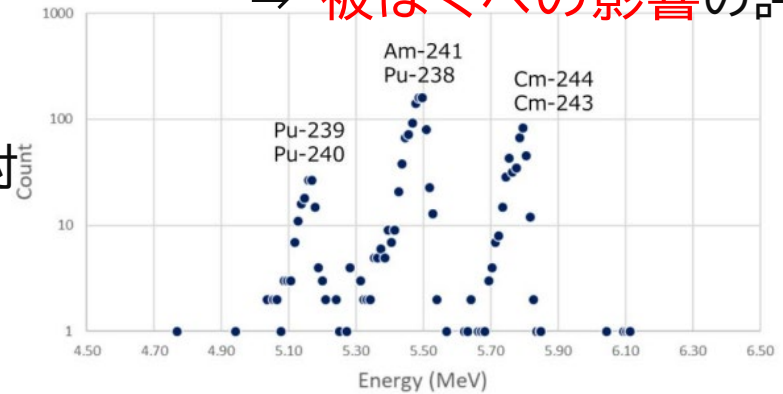


化学組成

⇒ 取り扱い・
回収方法の検討

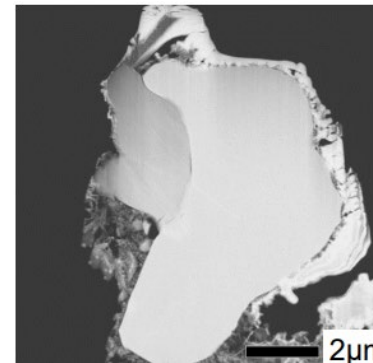
放射性核種組成

⇒ 被ばくへの影響の評価



U濃縮度

⇒ 臨界リスクの
検討



生成プロセス

⇒ 炉内状況の
把握

現時点ではすべての疑問に答えられるわけではないが…

分析を継続することで効率よく炉内状況を把握し、
合理的な廃炉工程の設計に貢献

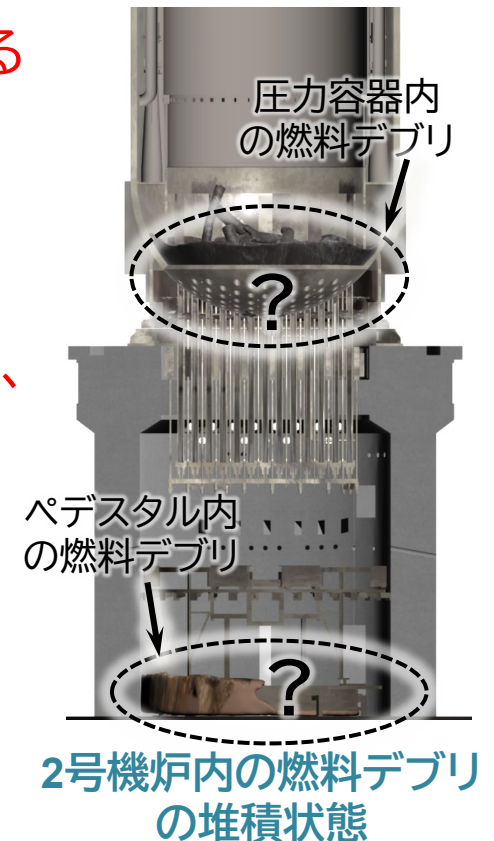
○これまでの成果

- 内部調査等で取得されたサンプルの分析
- 微粒子(U含有粒子)の生成プロセスから事故時の炉内環境を推定

○燃料デブリの取り出しが始まったことで…

- 2号機の試験的取り出し開始以降も、サンプルが限られる状況は同じ
- 分析の基本的な進め方は従来と同様:
 - 取り出された燃料デブリサンプル自体のデータ蓄積
 - サンプルの生成プロセスから炉内環境の推定を進め、炉内に堆積した燃料デブリの性状推定につなげる

⇒ 炉内状況の推定を精緻なものにし、今後の分析計画や各種工法検討や装置開発に貢献



ご清聴ありがとうございました