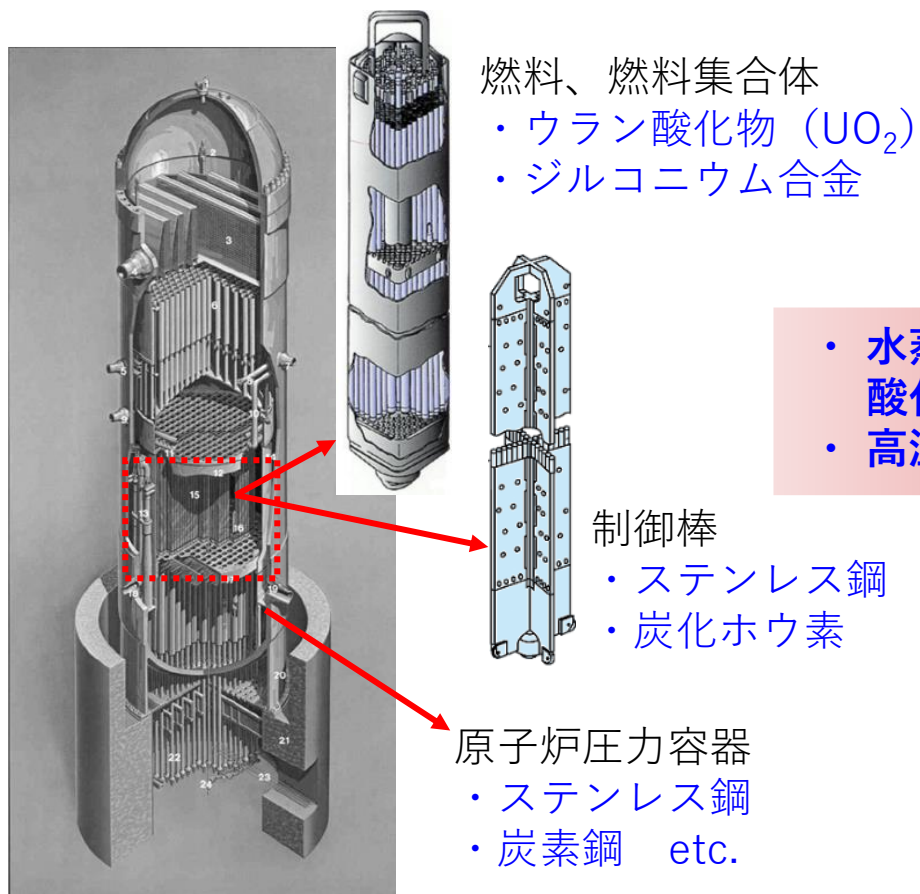


炉内に堆積した燃料デブリの性状に迫る

池内 宏知

廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)

燃料デブリ研究ディビジョン燃料デブリ取扱技術開発グループ



例) 米国・スリーマイル原子力発電所事故で生成した燃料デブリ (TMIデブリ)

Takano et al., HOTLAB2017..

・水蒸気による酸化
 ・高温での溶融



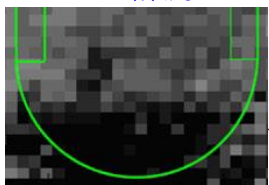
燃料デブリのイメージ

燃料デブリの取り出しに向けて、
 炉内状況 (**どこに、どんな燃料デブリがあるのか**) の把握が必須

どこに、どんな燃料デブリがあるのか

内部調査や事故進展解析
などを通じて徐々に解明

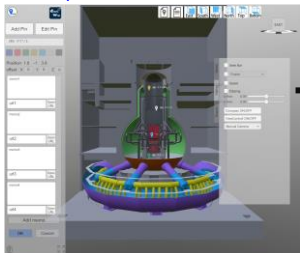
ミュオン計測^[2]



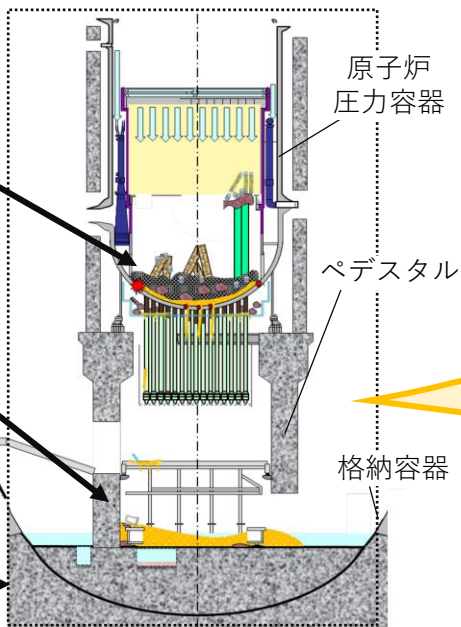
内部観察^[2]



CG化^[1]

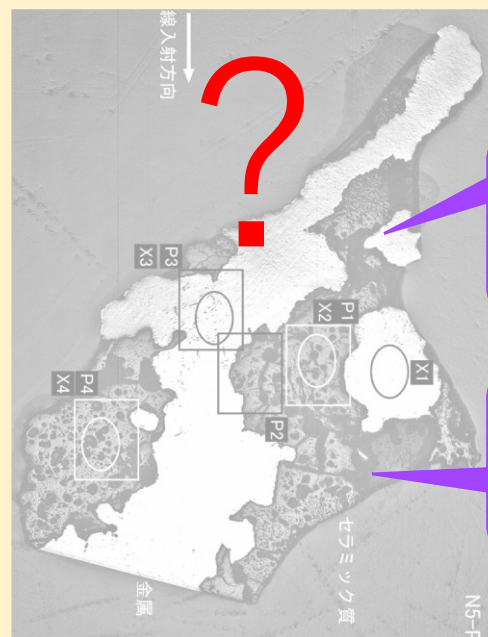


debrisEye (JAEA)



2号機炉内状況の
推定図^[1]

分析を通じて**性状**（構成相や組成）
を明らかにする



Takano et al., HOTLAB2017..

例) TMIデブリ断面

取り出し機器との相性は？
⇒ 金属質／酸化物質、
軽い／重い、…

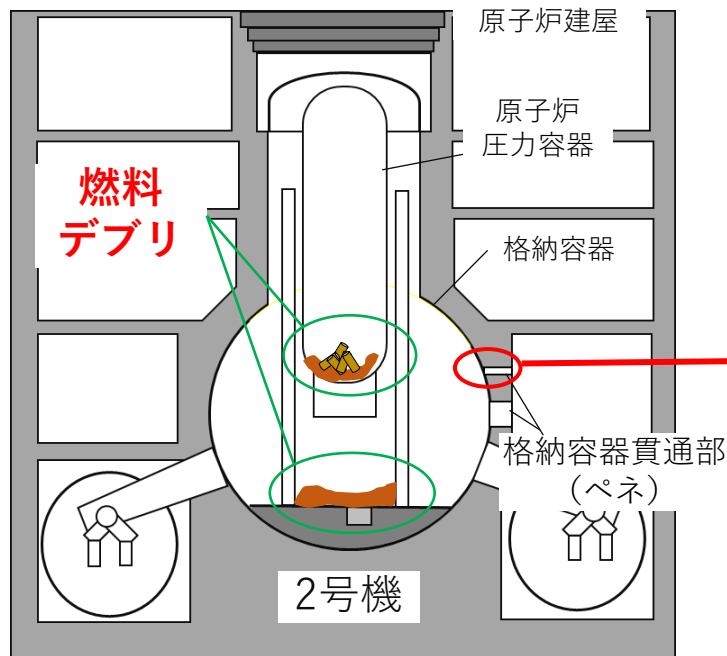
臨界の可能性は？
⇒ ウランやプルトニウム
をどの程度含むか、…

[1]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

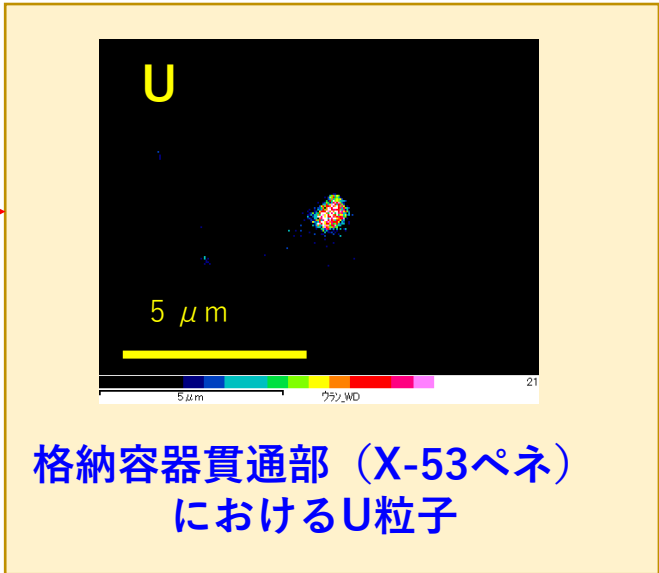
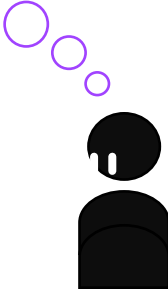
[2]東京電力ホールディングス株式会社、福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告、2022年11月10日



燃料デブリそのものへの
アクセスはこれから



周辺からはウランを含む粒子（U粒子）が
見つかっている。
事故時の高温を経て生成した粒子が飛んで
きているのでは？



周辺に存在する **U粒子の分析** により、そのおおもとである **燃料デブリの「成り立ち」** の一端を解き明かす

2号機 格納容器貫通部からの採取サンプル



X-53ペネ 扉表面の
付着物

酸に溶かし、ICP-MS分析
によりサンプル中の元素・
核種量を把握



**成分の由来（燃料か天然か）
や各元素の混ざり具合など
サンプルの特徴が分かる**



X-6ペネ 調査装置の
拭き取りスミア

分析結果の例

● U同位体比

● 元素比

$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ (質量比)

Zr/U (原子数比)

0 0.01 0.02 0.03

0.1 1 10

X-53ペネ

X-6ペネ

天然比

燃料組成
(炉心平均)

サンプル中の
Uは燃料由来

ZrもUと同程度
の量が存在

サンプルの構成粒子表面をSEMで観察し、元素分布を把握



サンプルに含まれる粒子の特徴が分かる

低倍率でざっと眺める

鉄(Fe)を多く含む粒子が広く分布
⇒ 主に鉄さび由来と推定

SEM像 Fe

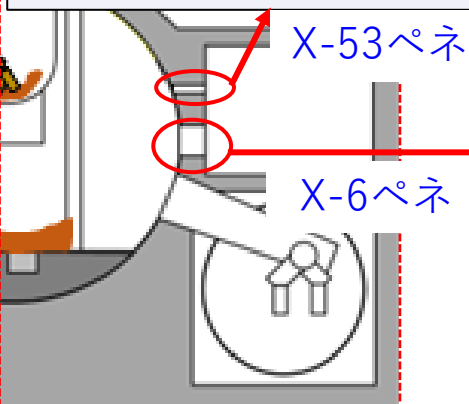
100µm 100µm

高倍率でよく観察する

SEM像 U Zr

2µm 2µm 2µm

UとZrを両方含む粒子が存在
⇒ ウラン燃料と被覆管・チャンネルボックス成分が混ざりあった粒子と推定



SE U Fe Zr

20µm 20µm 20µm 20µm

X-6ペネでも同様の傾向 (Feが広く分布し、UやZrが点在)
⇒ 鉄さび成分や燃料由来の粒子が貫通部内に堆積

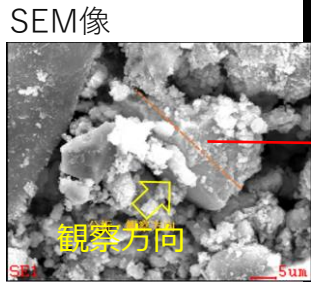
2号機 格納容器貫通部からの採取サンプル

U粒子の断面をTEMで観察し、微細構造や構成相 (元素組成、結晶構造) を把握

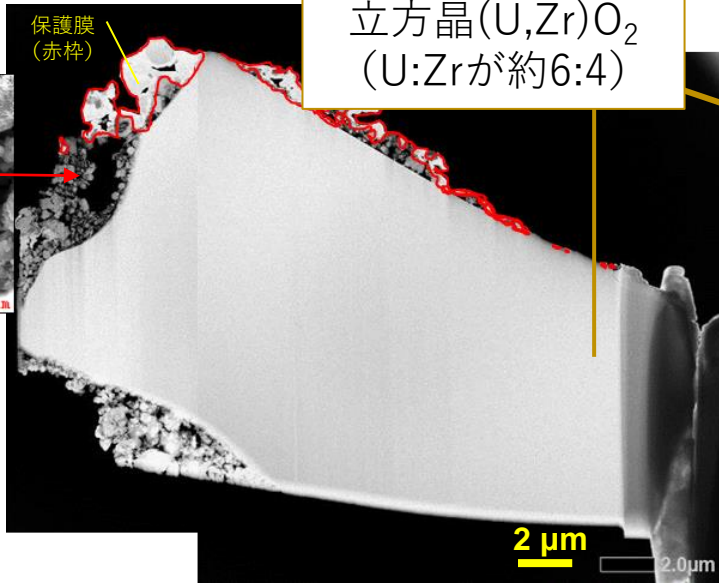


状態図など既往知見との比較から、
U粒子の経験温度や雰囲気等を推定

例) ほぼ均一な(U,Zr)O₂粒子



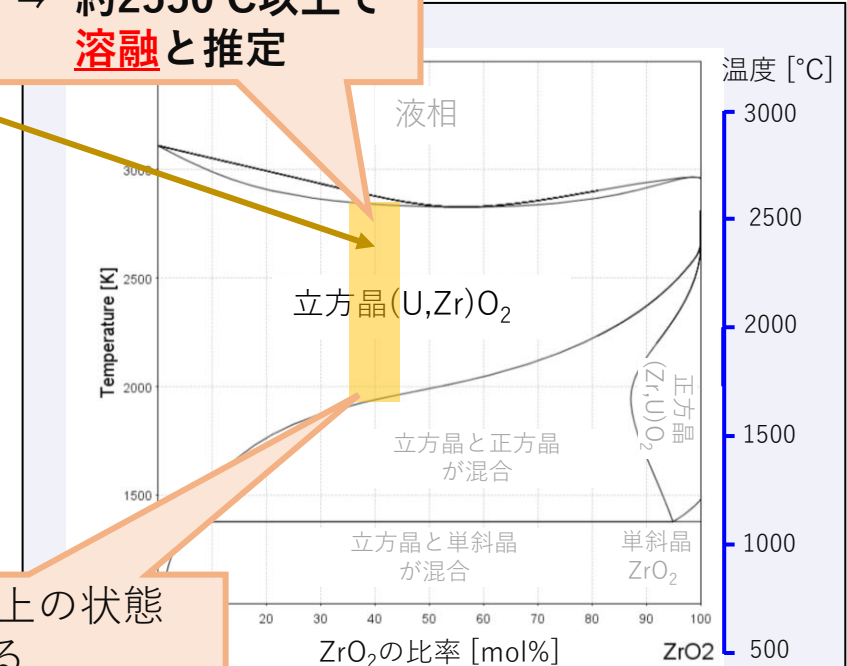
U粒子外観



U粒子断面のTEM像

2号機 格納容器貫通部
(X-6ペネ) からの採取サンプル

UとZrが混合
⇒ 約2550°C以上で
溶融と推定



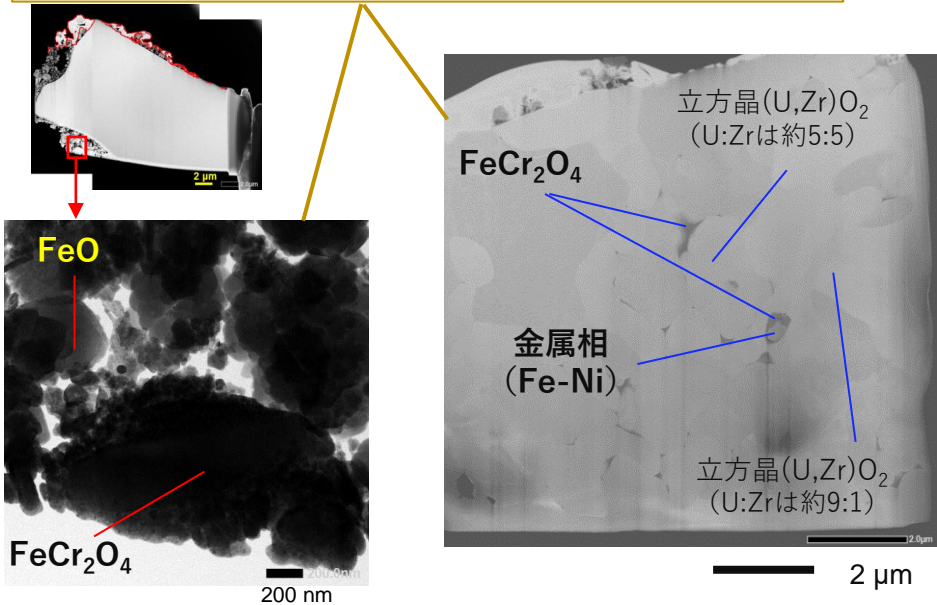
約1650°C以上の状態を留めている
⇒ **速い冷却** (水との接触や飛散等) を経験と推定

UO₂-ZrO₂擬似二元系状態図

各元素の酸化状態から雰囲気気を推定

例) Fe、Crの酸化物を含む粒子

- **Fe** : 概ね酸化物 (FeCr_2O_4 、 FeO)
一部で金属相 (Fe-Ni) を形成
 Fe_2O_3 未検出
- **Cr** : 酸化物 (FeCr_2O_4) として検出
- **Ni** : 金属相 (Fe-Ni) として検出

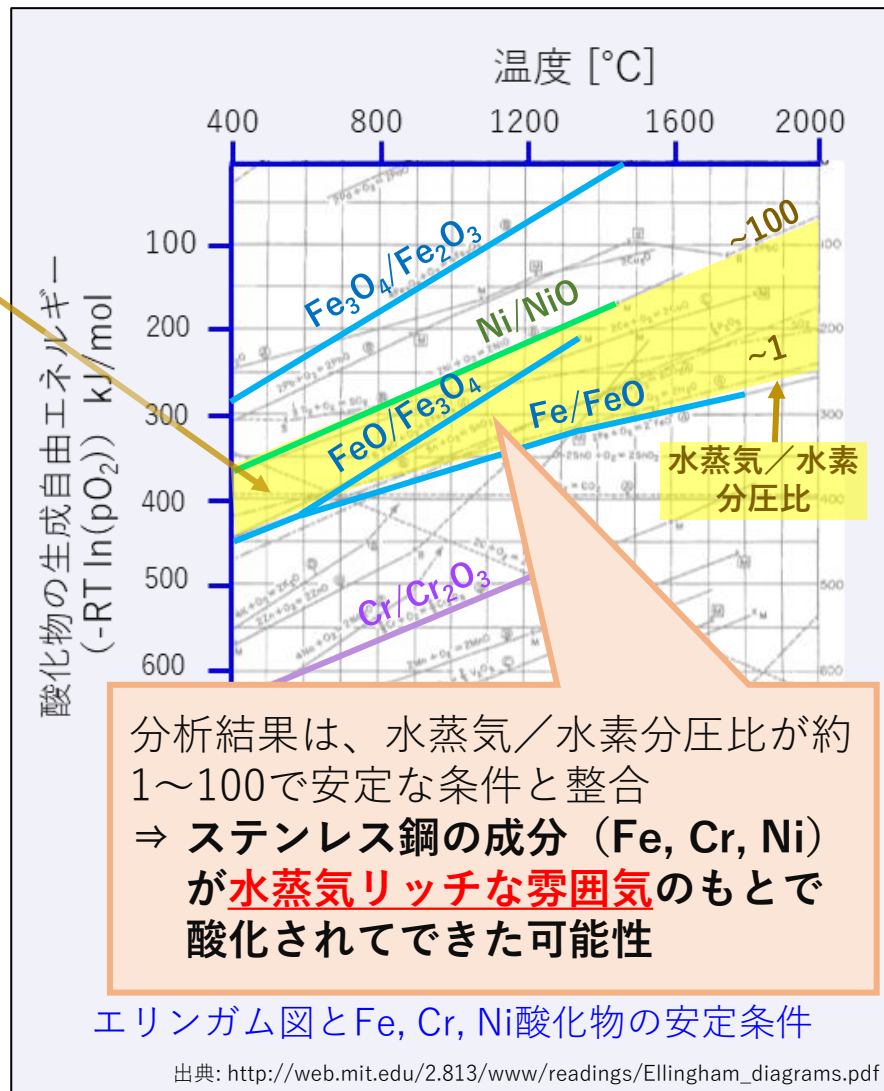


X-6ペネ

X-53ペネ

2号機 格納容器貫通部からの採取サンプル

TEM : 透過型電子顕微鏡

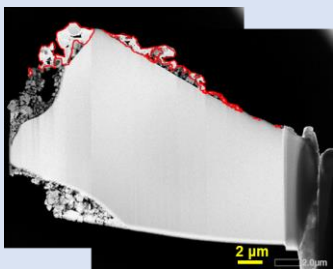


U粒子の生成条件の推定

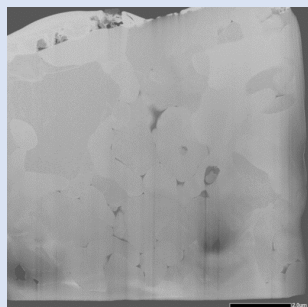
観察されたU粒子の生成には、

- ・ 約1650°C以上の高温
- ・ 水蒸気リッチな雰囲気 が必要

X-6 ペネ



X-53 ペネ



2μm

2号機 格納容器貫通部からの採取サンプル

事故進展の理解

8-1



事故進展時の炉心過熱・水蒸気発生
のシナリオと整合

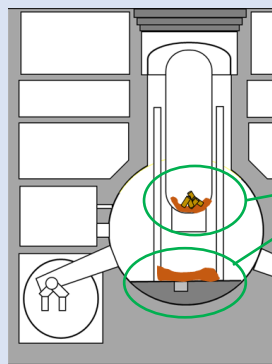
2号機 事故進展シナリオ

出典：debrisWiki

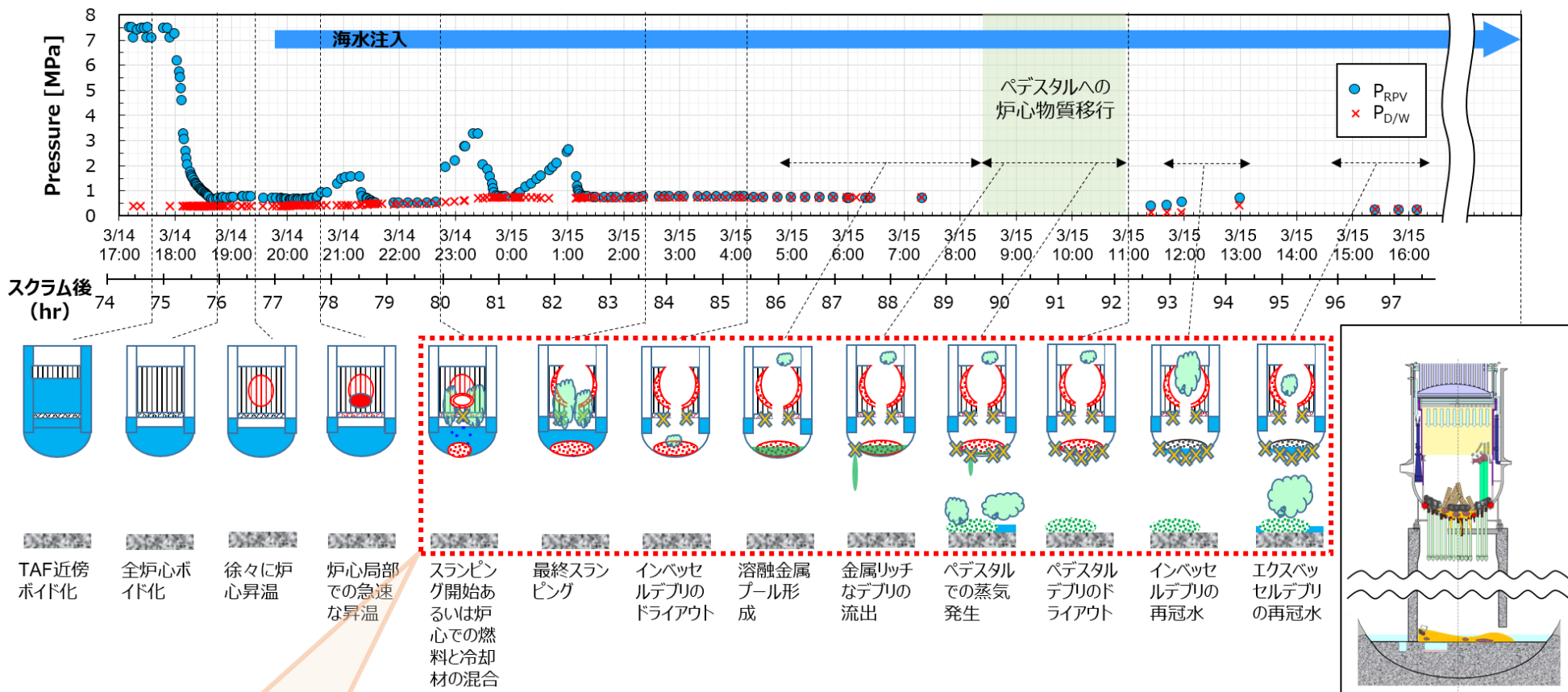
燃料デブリの性状推定

想定される環境での生成物質 (例)

- ・ Zrの酸化 ⇒ $(U,Zr)O_2$
- ・ ステンレス鋼成分の酸化 ⇒ Fe-Cr酸化物、Fe-Ni金属、etc



現実のデータに即して事故進展の理解を深め、
炉内に残っている燃料デブリの性状把握に貢献



事故進展時の炉心過熱・水蒸気発生
のシナリオと整合

2号機 事故進展シナリオ

出典: debrisWiki

- 原子炉建屋や格納容器内に付着しているU粒子の分析データから、おおもとの燃料デブリの性状を推定する技術を開発
- 分析データから燃料デブリ性状を推定する考え方は、試験的取り出し開始以降、少量の燃料デブリサンプルの分析にも応用可能
- 廃炉関連プロジェクトに分析や推定の結果を提供することで、炉内状況を把握し、安全かつ効率的な廃炉作業計画の策定に貢献

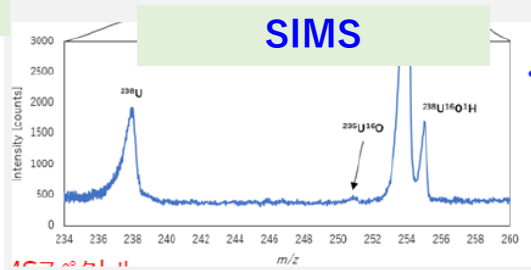
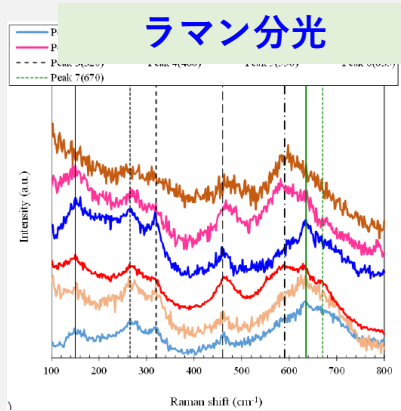
【今後の目標】

- 新しい分析技術も随時試験しつつ、燃料デブリの分析計画に反映。

【魅力/やりがい】

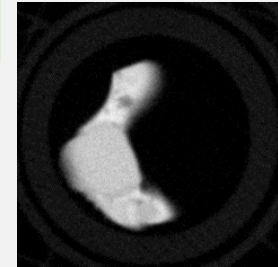
- 未知のサンプル性状や炉内状況を、分析を通じて解き明かしていくことに大きな魅力。
- 分析結果は米国・仏国など海外からも注目。

限られたサンプルから、
より多くの情報を引き出す



より大きなサンプルの
特徴を捉える

**非破壊測定
(X線CT)**



**分析と解析の両面から燃料デブリの
性状に迫り、廃炉に貢献していく**



分析データからU粒子の
生成過程を解析する

OECD/NEA FACEプロジェクト
(生成過程評価、分析技術)