

# 福島第一原子力発電所廃炉に向けた 燃料デブリ特性把握

鷲谷 忠博

2017年7月3日

日本原子力研究開発機構 廃炉国際共同研究センター (CLADS)

日本原子力研究開発機構 (JAEA)

国際廃炉研究開発機構 (IRID)

仮訳

- **JAEAは、福島第一原子力発電所（1F）の燃料デブリおよびMCCI生成物の特性把握に関する研究を進めてきた。**

- 1F特有の反応を考慮した模擬燃料デブリ及びTMI-2サンプルの基礎データを取得
- 1Fデブリの機械的・化学的特性を推定
- 1Fデブリの「推定特性リスト」を作成

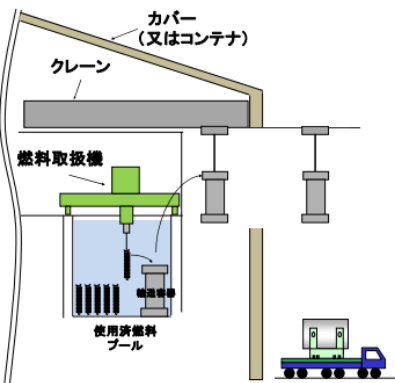
⇒ **1F廃炉の準備・計画に貢献**

- **近い将来に1F燃料デブリのサンプル採取を実施する予定であり、JAEAは分析の準備を進めている。**

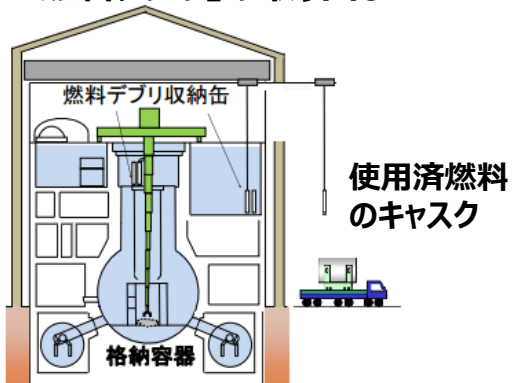
- サンプル分析の目的を考える
- 1Fサンプル分析によりデブリ特性を確認する
- 結果から1F炉心の損傷状態を確認する
- 国際協力が有効である

⇒ **1Fの燃料デブリサンプルは、燃料取り出し・保管・処理および処分により具体的に寄与し、過酷事故の研究および事故管理についての研究にも寄与する。**

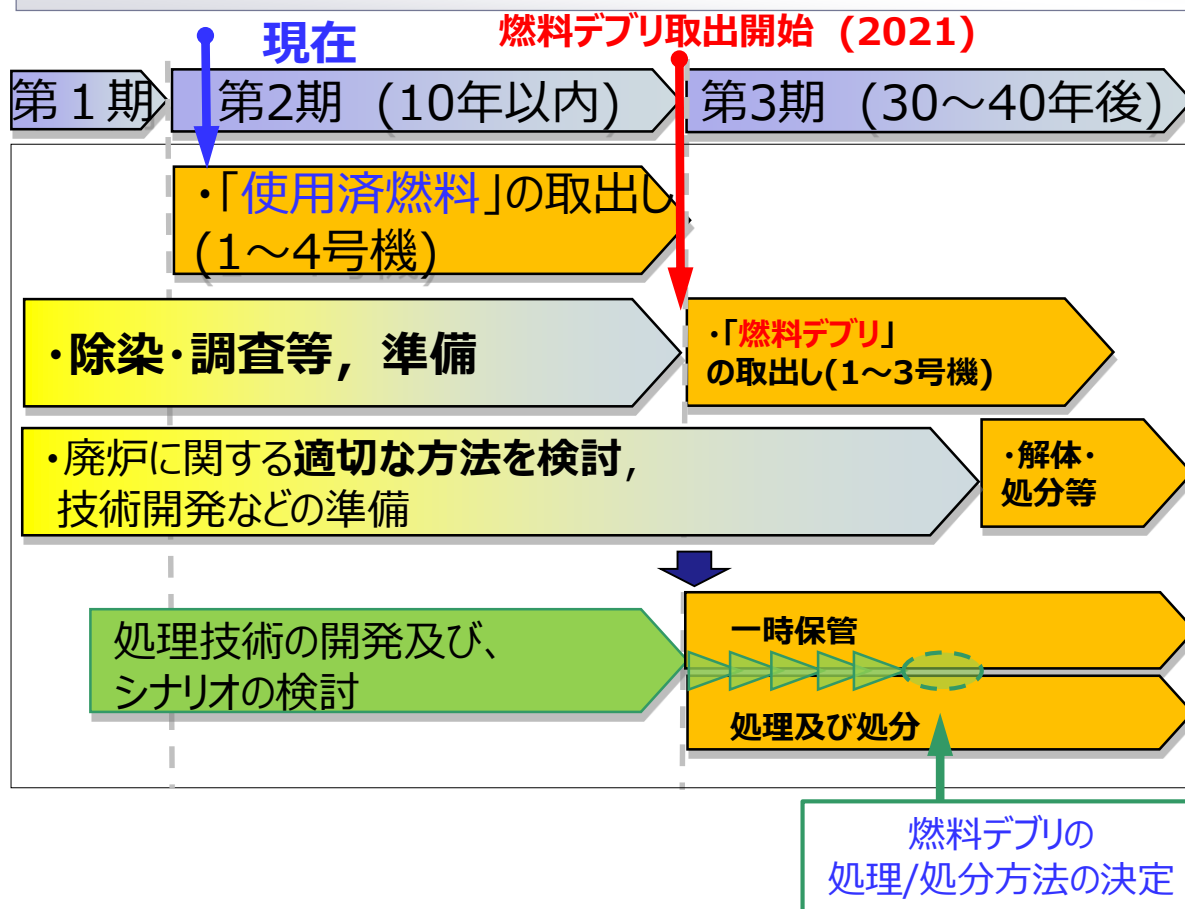
## 1～4号機の「使用済燃料」の取り出し



## 1～3号機の「燃料デブリ」の取り出し

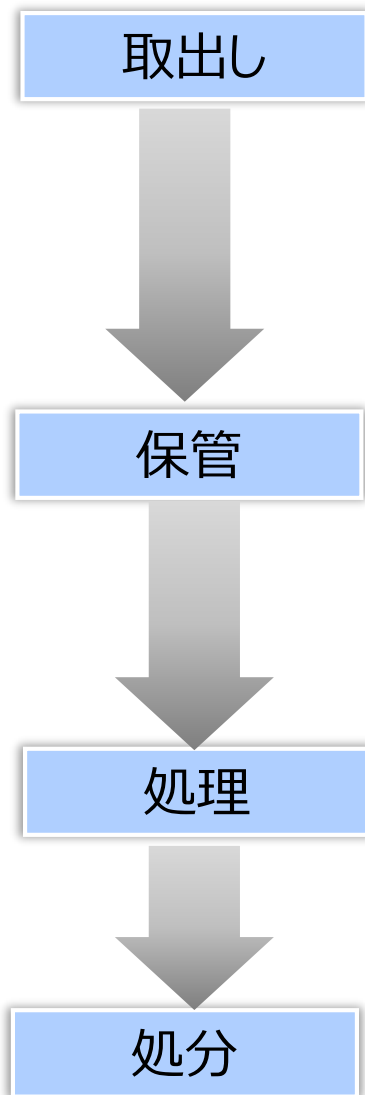


## 中長期ロードマップ

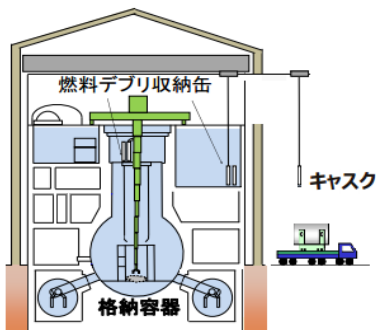


(「福島第一原子力発電所」の現状と廃炉に向けた取り組み(廃炉・汚染水対策福島評議会 事務局) 資料を編集)

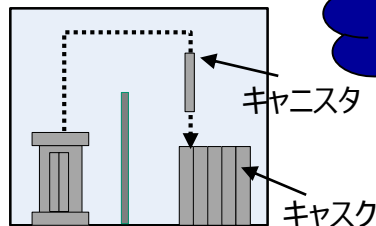
## 廃炉工程



(例) 冠水取出し



(例) 湿式保管



(例) U/Pu回収・  
ガラス固化



工具・工法  
選定

前処理工程の  
検討

処理方法の  
検討

## 燃料デブリの特性

**機械的特性**  
硬さ、破壊靱性等

**熱的特性**  
熱伝導率、融点等

**物理的特性**  
密度、含水・乾燥特性等

**化学的特性**  
酸溶解性、耐酸化特性等

## 1Fの燃料デブリ、1Fの状況に関する考察：

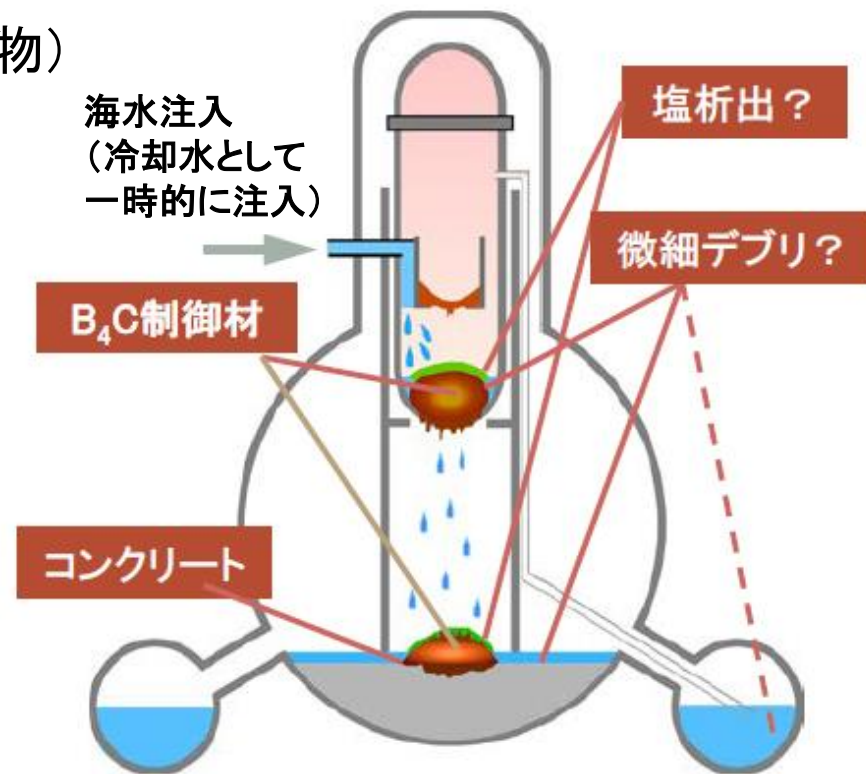
- 海水の影響 (冷却水の代替) ~燃料デブリ表面に塩の析出？
- 燃料棒の材料である  $B_4C$  の影響 ~ ホウ化物の化学形態及びデブリ中の分布
- コンクリート相互作用(MCCI)の影響
- 他の影響: プルトニウム, ガドリニウム (可燃性毒物)  
溶出、FPの化学形態等



模擬デブリにより特性を推定  
(固相、成分、混合率、機械及び熱特性)



燃料デブリの取出しに寄与(器具の設計、臨界に関する安全管理、保管及び管理)

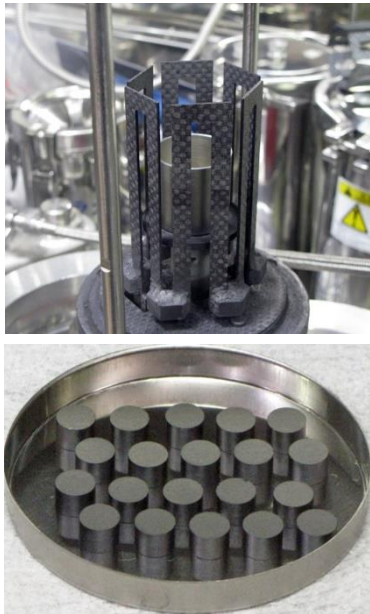


1F事故進展時の想定模式図



## (1) 焼結

- $y\text{UO}_2 + (1-y)\text{ZrO}_2 \rightarrow (\text{U}_y\text{Zr}_{1-y})\text{O}_2$
- 燃料ペレットと同様
  - 混合、粉碎、成型、焼結 (Ar, ~1730°C)
  - 添加物 :  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$
  - 酸素分圧制御下で焼結



## (2) アーク溶解

- 全体を均熱溶融
- 金属成分必須 (導通のため)
- 模擬炉心デブリ、MCCIデブリ
- ~5 g/試料片

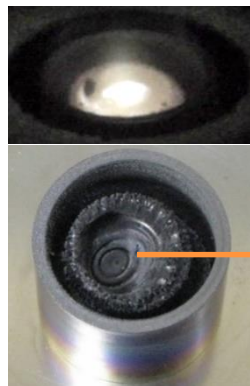


## (3) 集光加熱

- 熱源ランプ光を1点に集中
- 温度勾配条件下でエロージョン
- 任意の雰囲気ガス
- MCCIの小規模再現、 $(\text{U},\text{Zr})\text{O}_2$ の溶融等

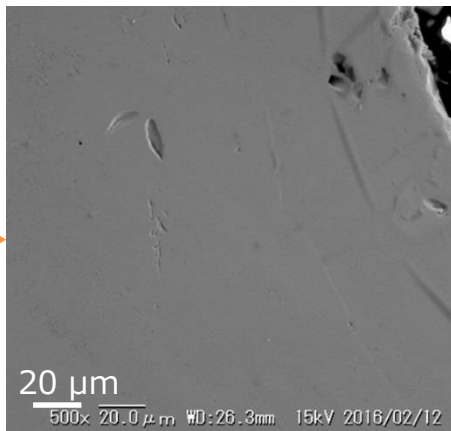


上部クラスト層

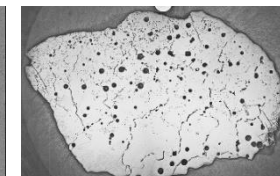
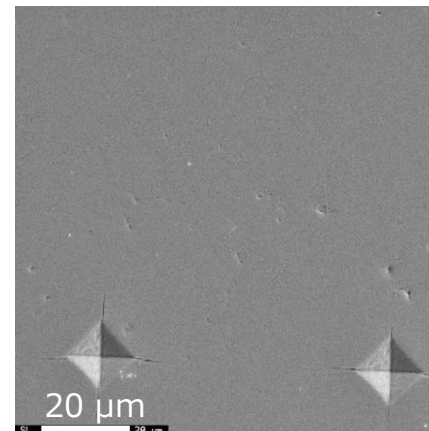


熔融状態から急冷

模擬デブリ

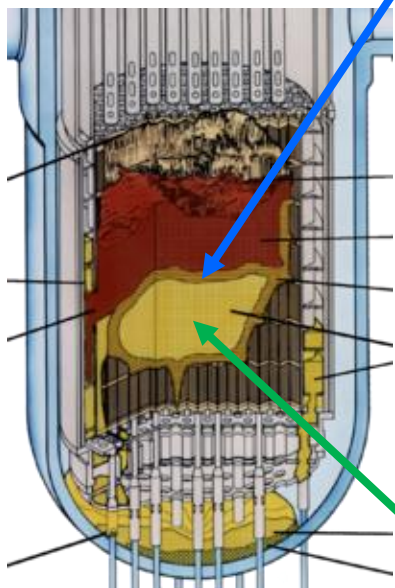


TMI-2デブリ



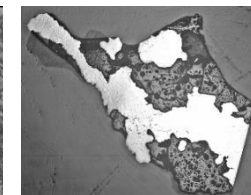
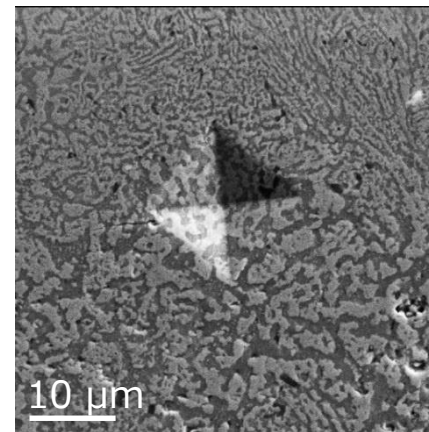
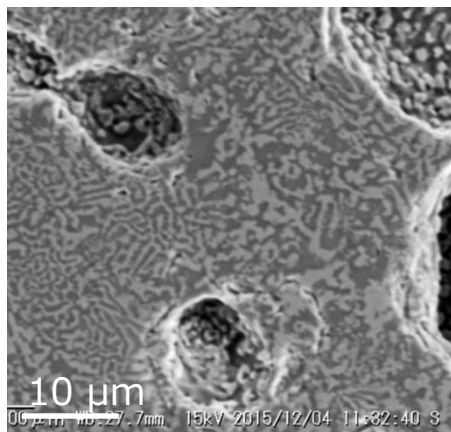
上部クラスト層 (急冷)

立方晶の単結晶



1600℃  
で焼結

熔融プール

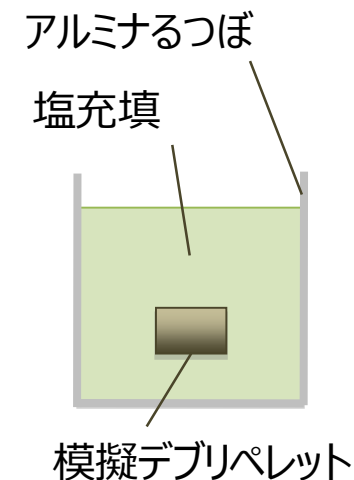
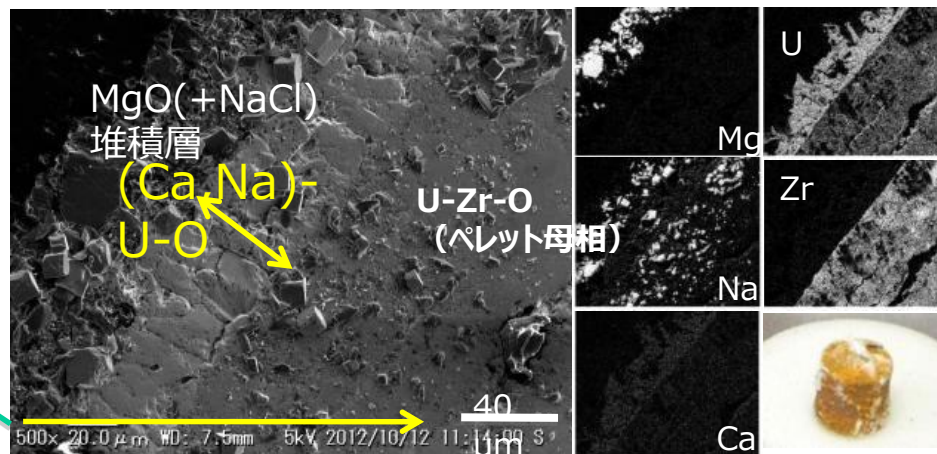
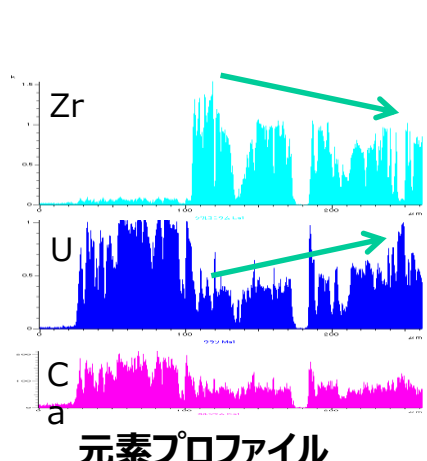


熔融プール (焼鈍)

Uリッチな立方晶とZrリッチな正方晶

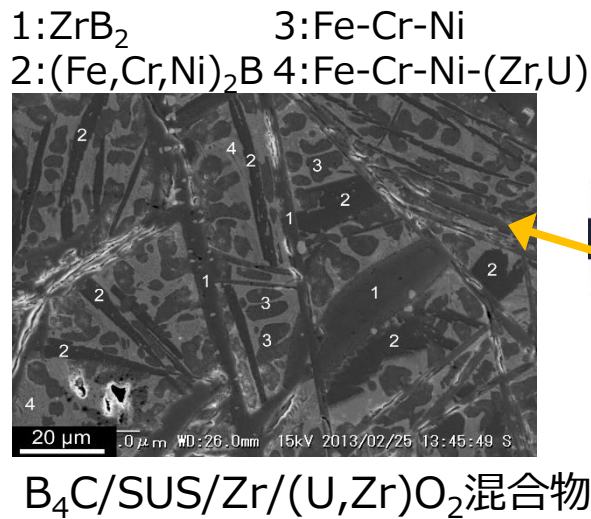
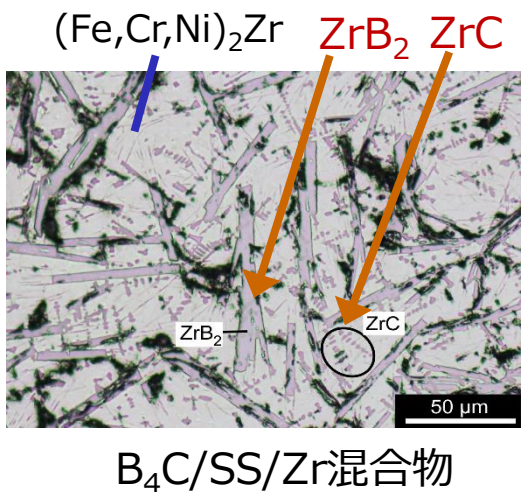


## (1) (U<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.6</sub>)O<sub>2</sub> – 高温での海水反応



海水塩と加熱した(U<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.6</sub>)O<sub>2</sub> 模擬デブリペレット断面のSEM像及びX線像 (空气中、1002°C、12h)

## (1) B<sub>4</sub>Cとの高温反応



B<sub>4</sub>C/SS/Zr/(U,Zr)O<sub>2</sub> の混合物

合金+ホウ化物

アーク溶融

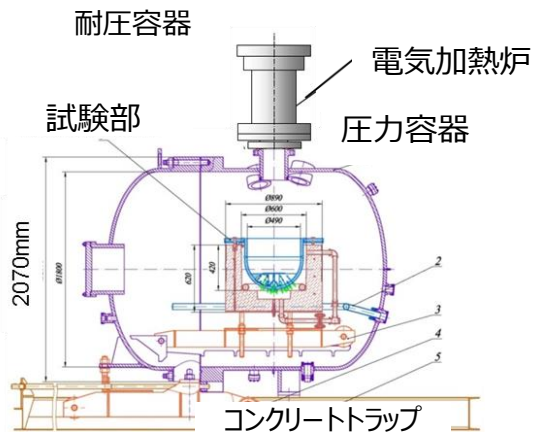
(U,Zr)O<sub>2</sub>

制御棒

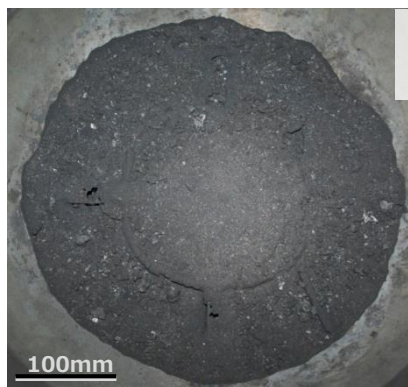


## 東芝とカザフスタン国立原子力センター（NNC）との協力

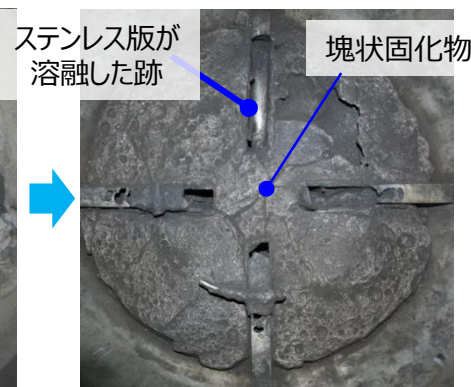
### 徐冷条件



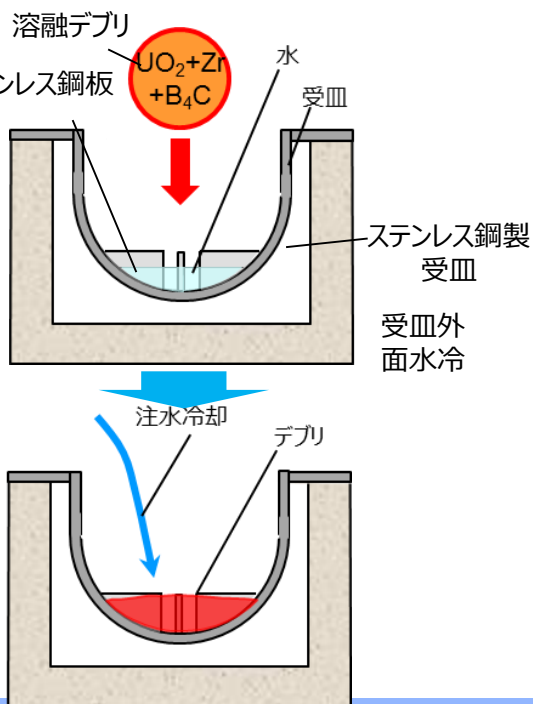
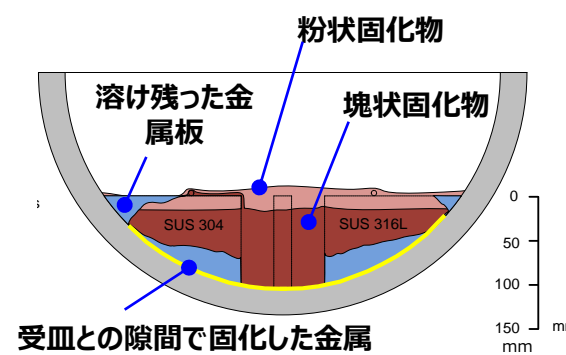
試験後外観



粉状固化物取り外し後

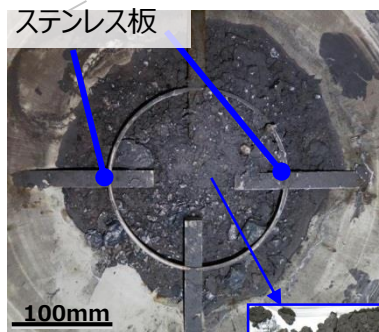


断面模式図

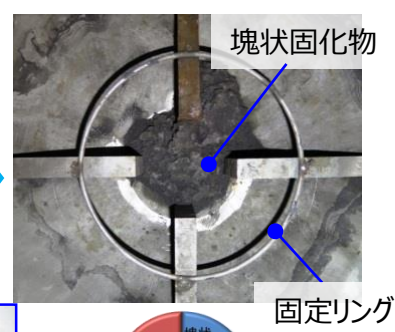


### 冷水条件

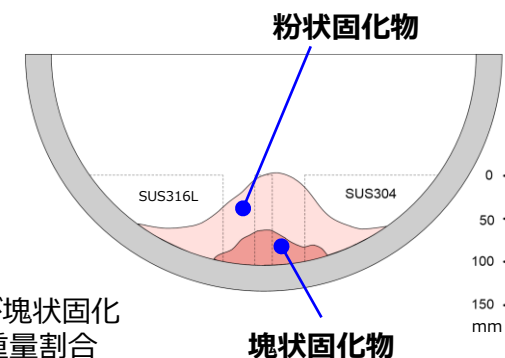
試験後外観



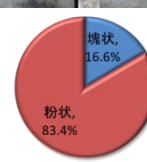
粉状固化物取り外し後



断面模式図

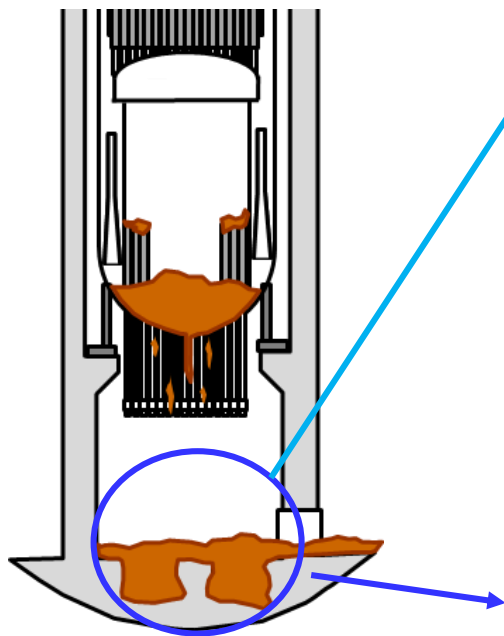


取り外した粉状固化物

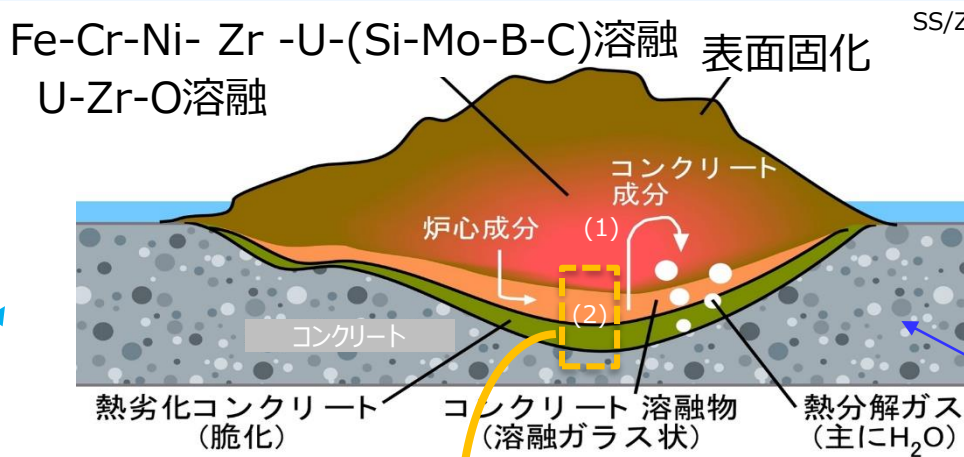


粉および塊状固化物の重量割合

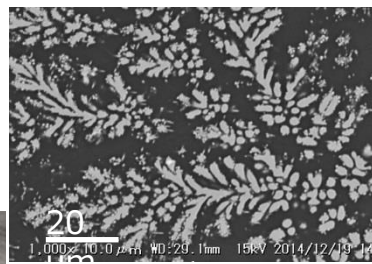
## MCCI生成物堆積のイメージ



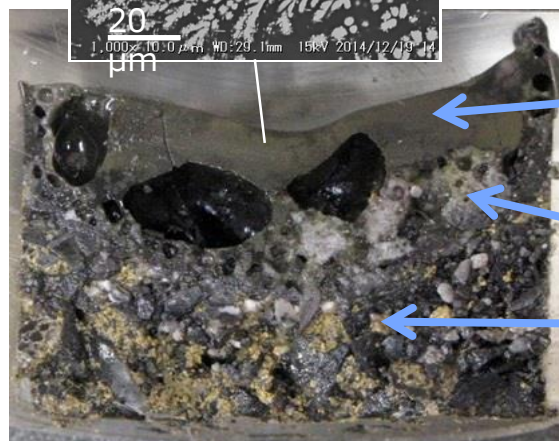
## 階層構造のイメージ



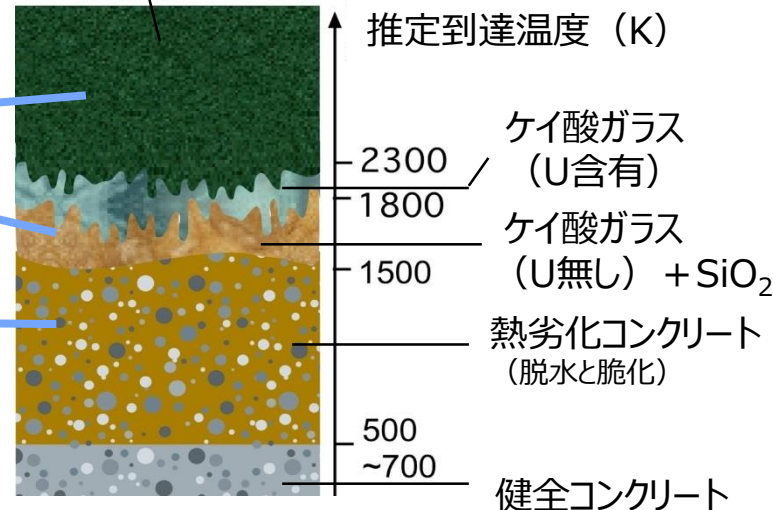
SS/Zr/(U,Zr)O<sub>2</sub>の混合物



ケイ酸ガラス (3~4 wt% U含有)  
+(U, Zr, Ca) O<sub>2</sub>沈殿

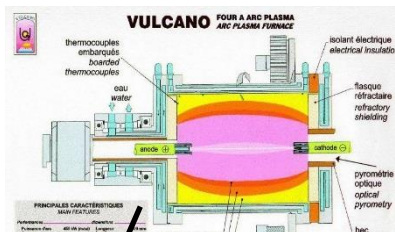


溶融反応後の断面  
(直径25 mmのコンクリート片)

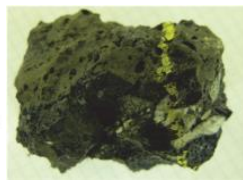




## JAEAとフランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）の協力

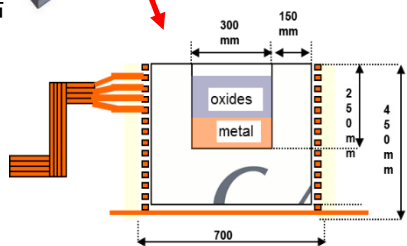


アーク加熱炉  
(酸化物加熱用)

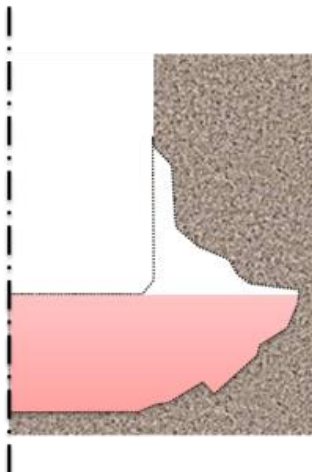


MCCIサンプル

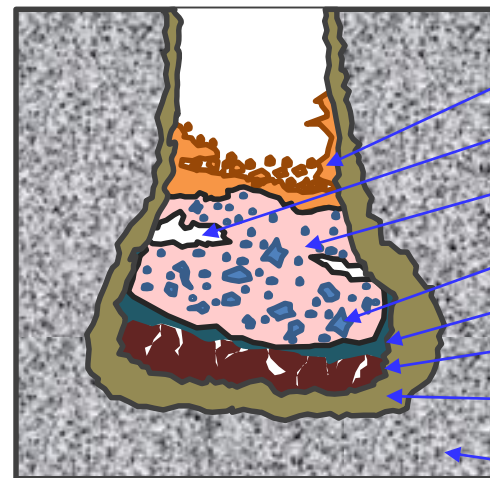
高周波加熱炉  
(金属加熱用)



TOLBIAC-ICBによる計算結果

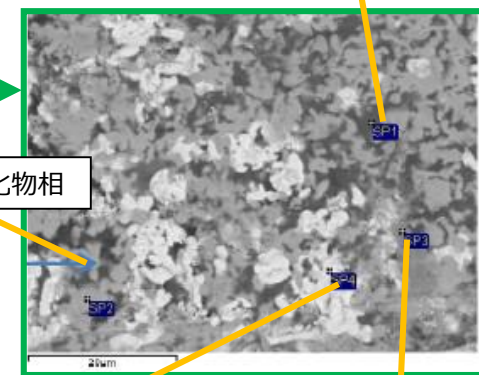
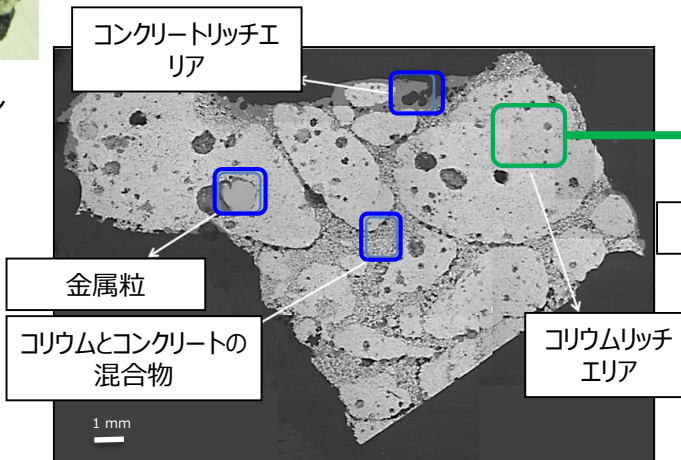


MCCI生成物の断面イメージ



- 上部クラスト
- キャビティ (空隙)
- コリウム酸化物相
- 金属析出物
- 金属層
- 下部クラスト
- コンクリート熱劣化層
- 健全コンクリート

Siリッチ酸化物相



Zrリッチ酸化物相

Uリッチ酸化物相

Feリッチ金属相

MCCI工学規模試験施設： VULCANO@CEA

SEM/EDS分析

## JAEAとウクライナ国立科学アカデミー(NASU)の原子力発電所安全問題研究所(ISP NPP)の協力

### チェルノブイリの経験

#### ◆ 燃料デブリの化学変化

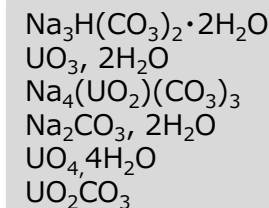
- チェルノブイリの「LFCM (溶岩状燃料含有物質)」はまだ原子炉内に残っており、LFCMは水分や空気とゆっくりと反応する。<sup>1)</sup>
- 溶存ウランを含有した二次化学種が表面に生成される。

#### ◆ エアロゾル生成

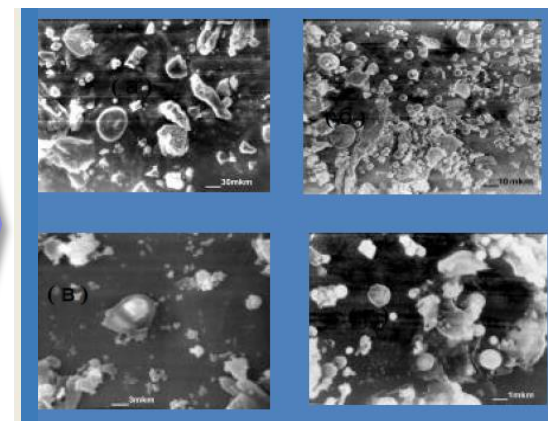
- LFCMの表面にエアロゾルが連続的に生成される。<sup>2)</sup>
- 主な放射性核種は<sup>137</sup>Cs/<sup>241</sup>Am、<sup>241</sup>Am/<sup>154</sup>Eu、<sup>137</sup>Cs/<sup>154</sup>Eu

#### 福島第一原子力発電所についての懸念

- 1F条件で燃料デブリとMCCI生成物に類似の変化が起きる可能性がある。
- 残存燃料やMCCI生成物によって生じたエアロゾルの処理。



チェルノブイリの「燃料デブリ」の表面に生成されたウラン相



LFCMから生成されたエアロゾル

1) 2013年1月28日～2月1日、オーストリアのウィーンで開催された原発事故後の廃炉と修復に関する専門家会合でB.プラコフ氏が発表した「チェルノブイリのラバとホットパーティクルの物質研究」。

2) <http://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-08/index02.html>

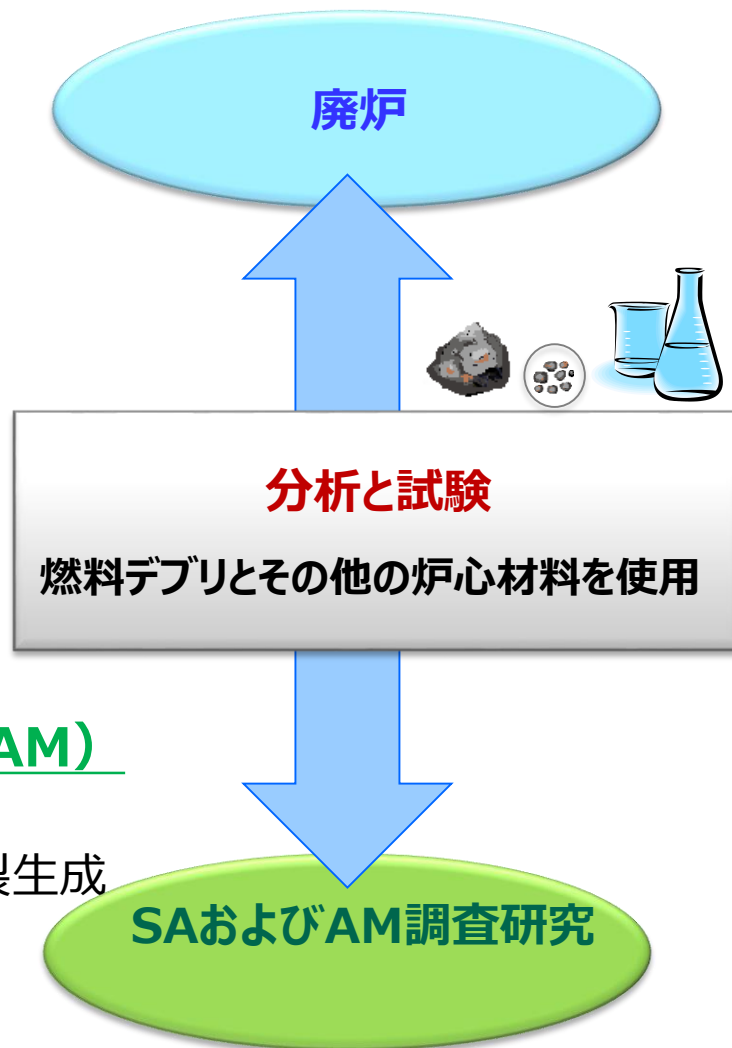


## ◆ 廃炉への寄与

- 原子炉内の**損傷状態**（量、形状、組成等）を**理解**
- **汚染**（放射線、核種、化学形態等）を**理解**
- **安全性**（臨界、水素、腐食等）を**理解**
- 燃料取り出し（臨界、ツール、方法等）を検討
- 貯蔵・保管
- 処理・処分

## ◆ シビアアクシデント（SA）やアクシデントマネジメント（AM）への寄与

- **事故進展**（格納容器内外現象、格納容器機能喪失、核分裂生成物の挙動、ソースターム等）を**調査**
- **システムの信頼性**を**調査**（冷却性、封じ込め、腐食・浸食等）



OECD/NEA/CNSIによる国際共同研究プロジェクト「燃料デブリの分析に関する予備調査（PreADES）」が開始される予定

## 領域A：上部構造材

(目的)  
表面汚染調査、線量評価、除染方法検討

## 領域B：シュラウド部

(目的)  
表面汚染調査、線量評価、除染方法検討

## 領域C：炉心部残留物

(目的)  
残留量、残留形態、均質性および安全性の評価

## 領域D：制御棒案内管 (CRGT)

(目的)  
残留量、残留形態、均質性および安全性の評価

## 領域E：RPV下部ヘッド

(目的)  
残留量、残留形態、均質性および安全性の評価

## 領域F：制御棒

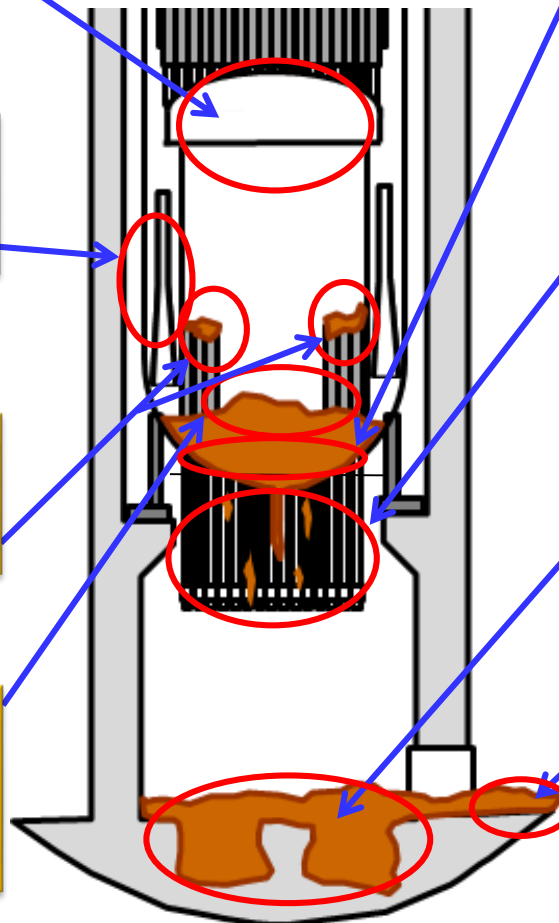
(目的)  
残留量、残留形態、均質性および安全性の評価

## 領域G：ペDESTAL床

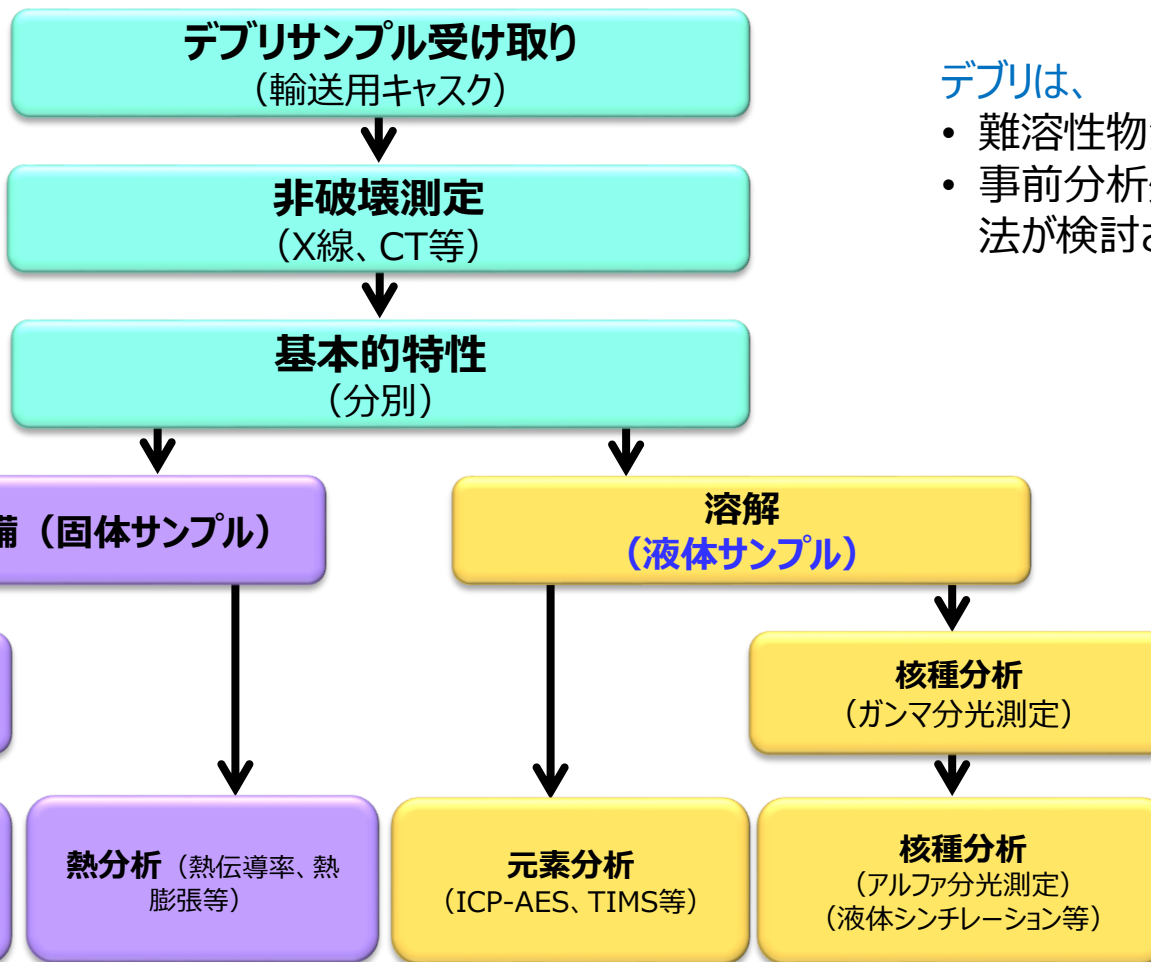
(目的)  
残留量、残留形態、均質性および安全性の評価

## 領域H：D/W床

(目的)  
残留量、残留形態、均質性および安全性の評価

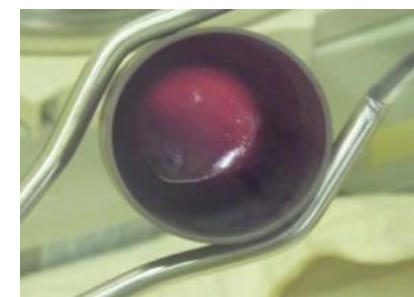


- 分析ワークフローによって効率的なデブリ分析が可能になると考えられる。
- このワークフローでは、未知の成分を伴うサンプルの値が非破壊法で大まかに分析され、全体的な分析がなされる。



デブリは、

- 難溶性物質であり、
- 事前分析処理方法としてアルカリ融解法が検討されている。



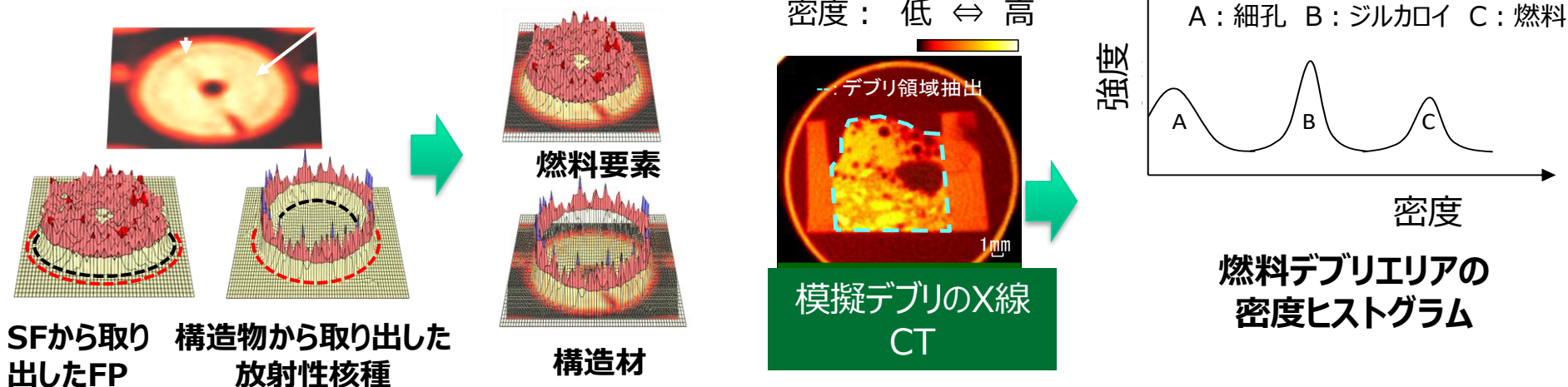
デブリ溶解  
(アルカリ融解法による)

デブリ分析ワークフロー計画の全体

X線CT検査装置は、構成機器の内部状態（バンドル・ダクト相互作用等）を検査し、健全性確認や燃料寿命推定に反映するために開発された非破壊検査装置であり、燃料監視施設（FMF）の拡張施設に設置されている

## 密度分析：

燃料クラッド管（赤）、燃料（黄）



## ガンマトモグラフィで撮影した断面

- ◆ 細孔等による気孔率の定量評価法の構築
- ◆ 燃料デブリ成分同定法の構築



## ■ 燃料デブリの特性把握

- **1F廃炉には、燃料デブリ特性の推定が不可欠**
  - 模擬デブリ等を使用して基礎データを測定した。
  - 密度、機械的特性（硬度、弾性率、破壊靱性）、および熱物性（熱伝導率、比熱、融点）
- **1F特有の条件を調査**
  - 海水、制御棒材料としての $B_4C$ 、Puとコンクリートの相互作用を実験的に調査。
  - さまざまな条件でデブリの化学変化を調査する必要がある。

## ■ 1F燃料デブリ分析の準備

- **燃料デブリ分析は、1F廃炉およびSA研究等に寄与することになる**
  - サンプル分析は、損傷炉心の理解、廃炉の実施、事故進展の調査、安全性解析に役立つ。
- **燃料デブリ分析に関する国際的な議論が必要**
  - 1F燃料デブリ分析は国際的に広がる重大事故に関する知見や専門知識として活用可能。

ご清聴ありがとうございました。