

# 燃料デブリ取り出し時における 炉内状況把握のための遠隔操作 技術に関する研究人材育成

研究代表者

東京大学 浅間 一

再委託先

福島大学 高橋隆行

神戸大学 横小路泰義

JAEA事業責任者

楢葉遠隔技術開発センター 川端邦明

代理発表

東京大学 鈴木俊一

# 背景・課題設定

## 燃料デブリ取り出しに必要な方針（NDF）

- ◆ 基本的考え方 1：安全（放射性物質を出さない）  
→ 放射性物質に起因するリスクの低減及び労働安全の確保
- ◆ 基本的考え方 2：確実（デブリ取り出しを俯瞰的に確認しながら確実に実施）  
→ 信頼性が高く、柔軟性のある技術
- ◆ 基本的考え方 3：合理的（取り出し作業状況確認、放射線測定を合理的に実施）  
→ リソース（ヒト・モノ・カネ、スペース等）の有効活用
- ◆ 基本的考え方 4：迅速（多種・多様な測定装置の導入・交換を容易にする）  
→ 時間軸の意識
- ◆ 基本的考え方 5：現場指向（現場で適用可能な技術を開発する）  
→ 徹底した三現（現場、現物、現実）主義



燃料デブリ取り出しにおける合理的な作業状況モニタリングの開発及び、先進技術開発の継続的人材育成を行う必要がある

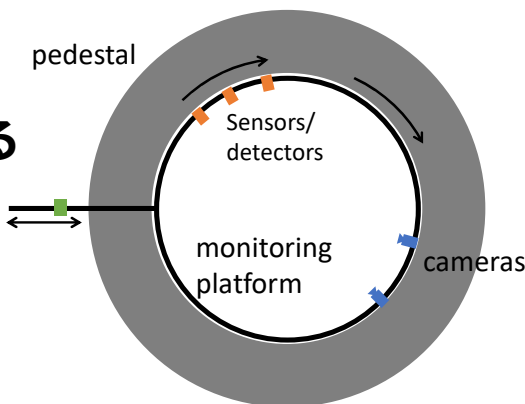
# 研究目標

## 遠隔操作技術による燃料デブリ取り出し作業状況モニタリングプラットフォームの構築

ペDESTアル内に、カメラや放射線計測デバイスが移動可能なプラットフォームを遠隔から構築し、操作・計測・可視化を行うことで作業状況をモニタリングする

### 軌道構造自動施工システムによるプラットフォーム構築

- プラットフォーム上をセンサユニットが移動
- 高剛性軽量アーム

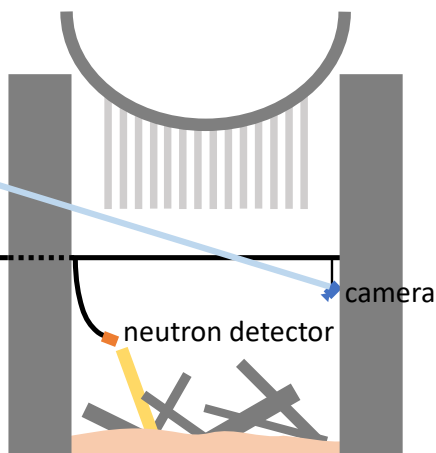


Top view

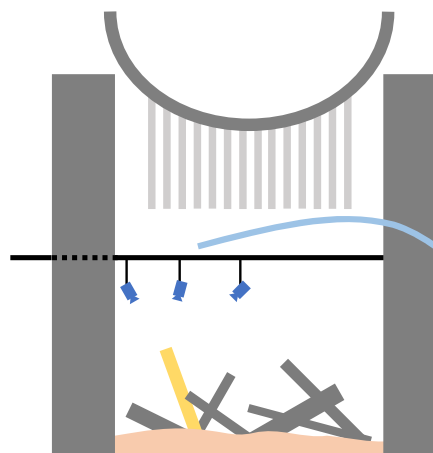
### 環境モデル立体復元

3D map

### 小型放射線モニタリングデバイス開発



Side view (offline)



Side view (online)

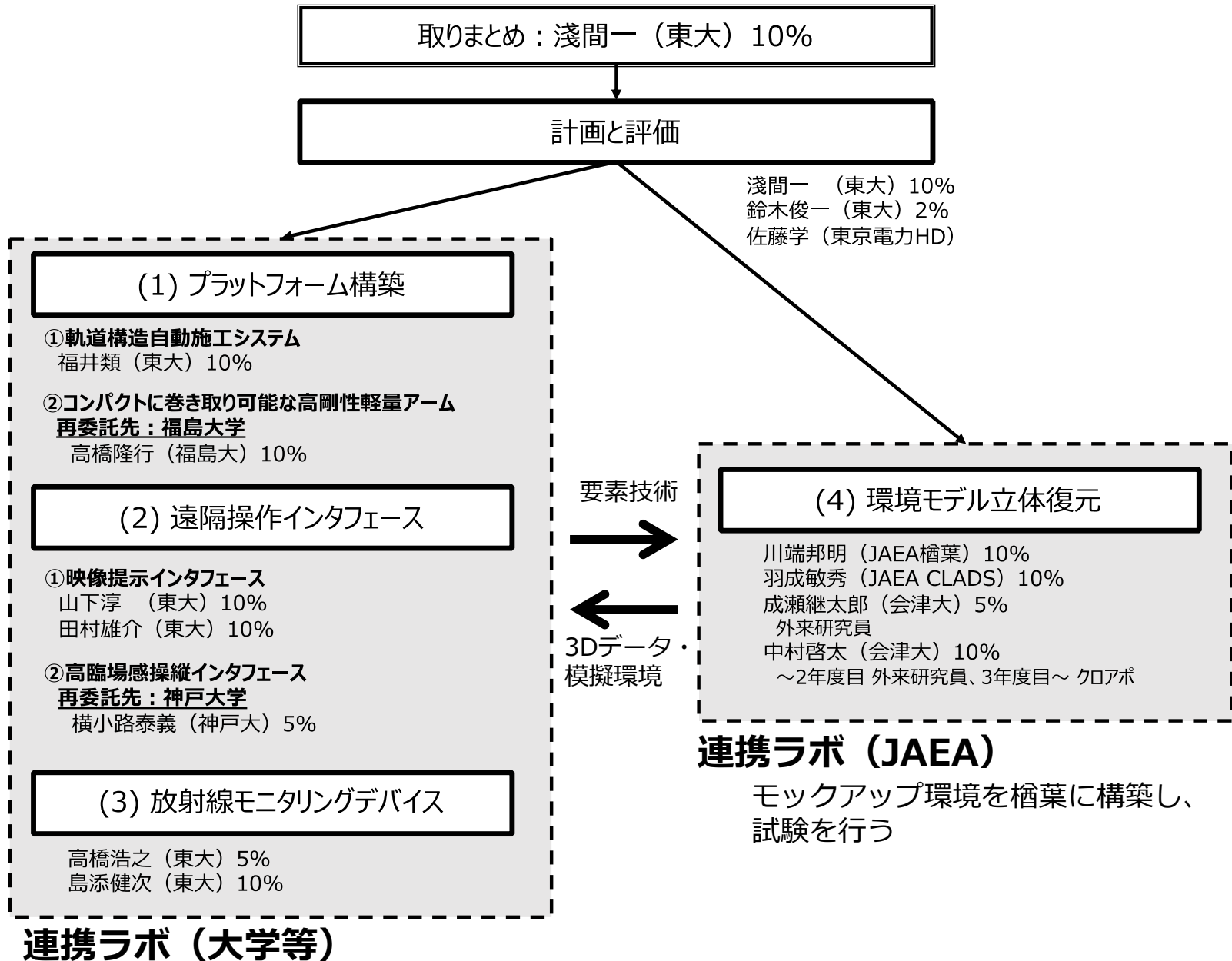
### 遠隔操作I/F

- 映像提示
- 高臨場感操縦



operator

# 研究体制



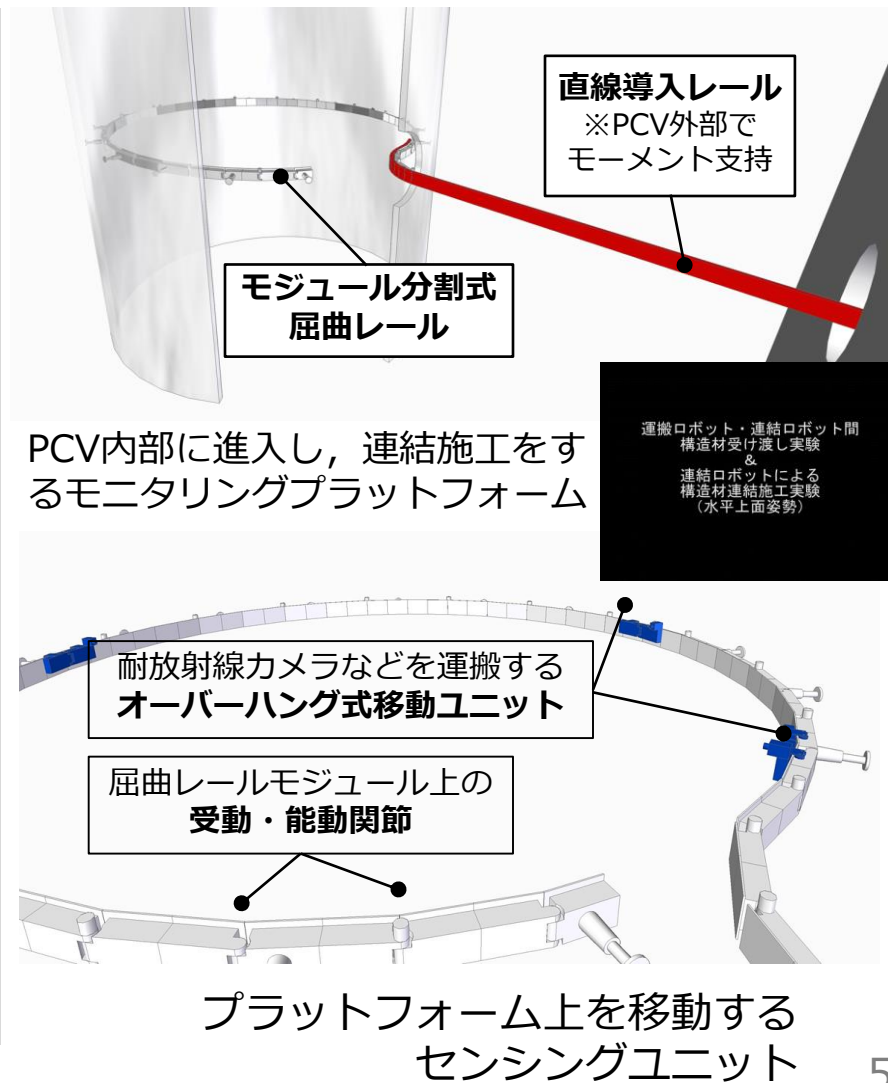
# (1)①軌道構造自動施工システム

福井 (東大)

目標：ペDESTAL内部で展開可能なモジュール分割式軌道構造の実現

【技術課題 → 達成アプローチ(新規性)】

- I. 高放射線環境に展開可能な軌道構造  
→ **PCV外部でモジュールの連結施工**  
を行う**後方からの押し出し施工法**
- II. ペネトレーションからペDESTAL内部へ長距離伸展可能な軌道構造  
→ 大モーメントを支持可能な  
**直線レールと屈曲レールの分散構成**
- III. 円形のペDESTAL内周に沿った軌道構造の実現  
→ 受動関節と能動関節を組み合わせた  
**高コンプライアンス(倣い性)軌道**
- IV. 折れ曲がった(平滑でない)軌道構造上でカメラや各種センサを運搬  
→ **受動屈曲・オーバーハング式**の移動ユニット



# (1)②コンパクトに巻き取り可能な 高剛性軽量アーム

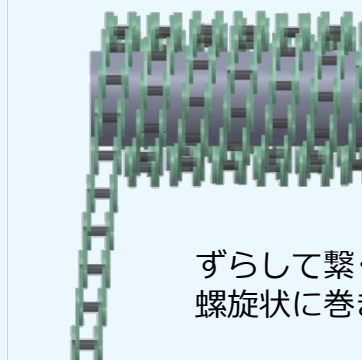
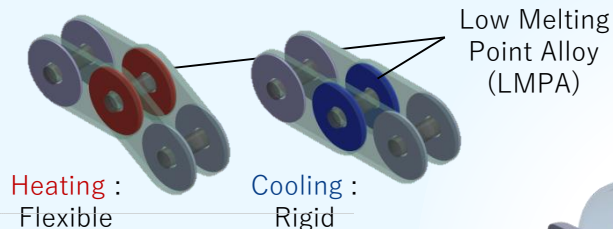
高橋 (福島大)

カメラやセンサを、適切な位置に固定するためのアームを開発する

- カメラやセンサを保持できる適切な長さのリーチならびに高い剛性
- センサ等の入れ替え時に外に取り出すためにコンパクトに収納可能

## アームの構成

低融点合金を加熱・冷却することによって、  
リジッドモードとフレキシブルモードを切り替える

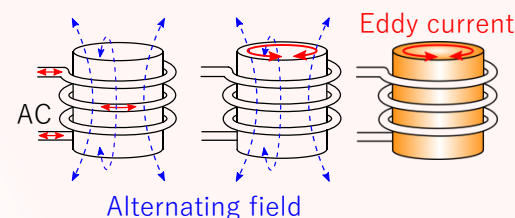


ずらして繋ぐことによって  
螺旋状に巻き取ることが可能

- ・合金により結合するので、遊びが生じない
- ・加熱というシンプルな方法で切替
- ・合金によって素早い切替が可能

## 加熱装置

加熱には誘導加熱(Induction Heater)を用いる



非接触であり、濡れたアームでも加熱が可能

Low Melt  
Point All  
(LMPA)

低融  
発熱

- ・非接触での加熱が可能
- ・巻取・加熱装置の単純化・小型化が可能

# (2)②高臨場感操縦インタフェース

横小路 (神戸大)

## 【目的】

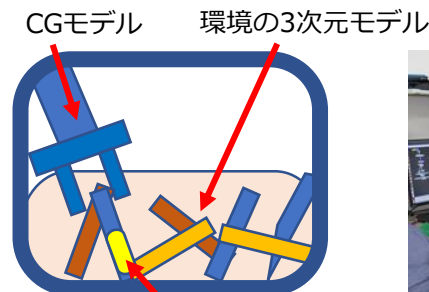
放射線量が高く密閉された狭隘空間という厳しい条件下で、プラットフォーム設置および燃料デブリ取り出し等の作業を安全かつ効率的に行える**高臨場感な遠隔操縦インタフェース**の開発

## 【研究開発内容】

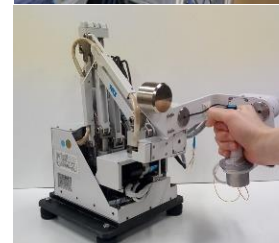
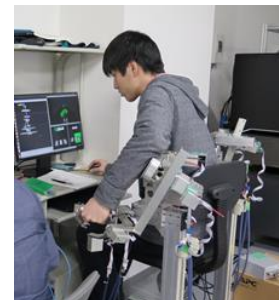
- 超多自由度構造体であるプラットフォームをペDESTAL内
- カメラやセンサを適切に配置する超多自由度の高剛性軽量アームの操縦法および操縦インタフェース
- 可動式カメラ等を利用した映像提示と組み合わせた高臨場感遠隔操縦インタフェース
- シミュレータおよびモックアップでの検証

## 【研究の新規性】

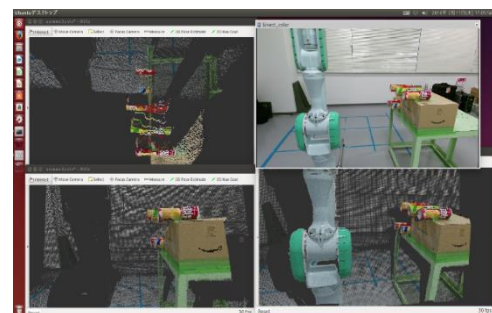
- **密閉、高放射線量、狭隘**という環境下での超多自由度アームの遠隔制御
- 3次元モデルや多視点カメラ情報、放射線情報に基づく、高臨場感な遠隔操縦



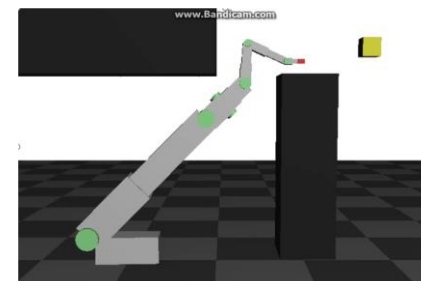
線源情報の重畳表示  
高臨場感インタフェースのイメージ



様々なマスターアーム



RGB-Dカメラ映像による遠隔作業



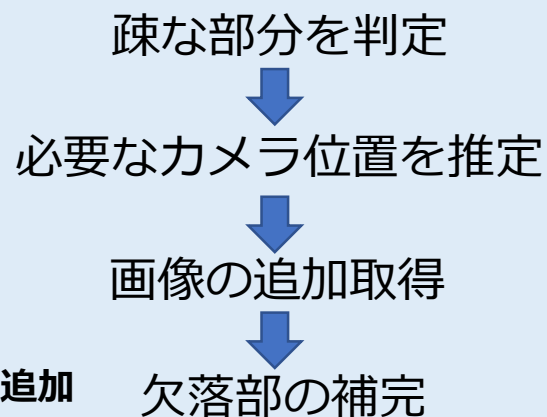
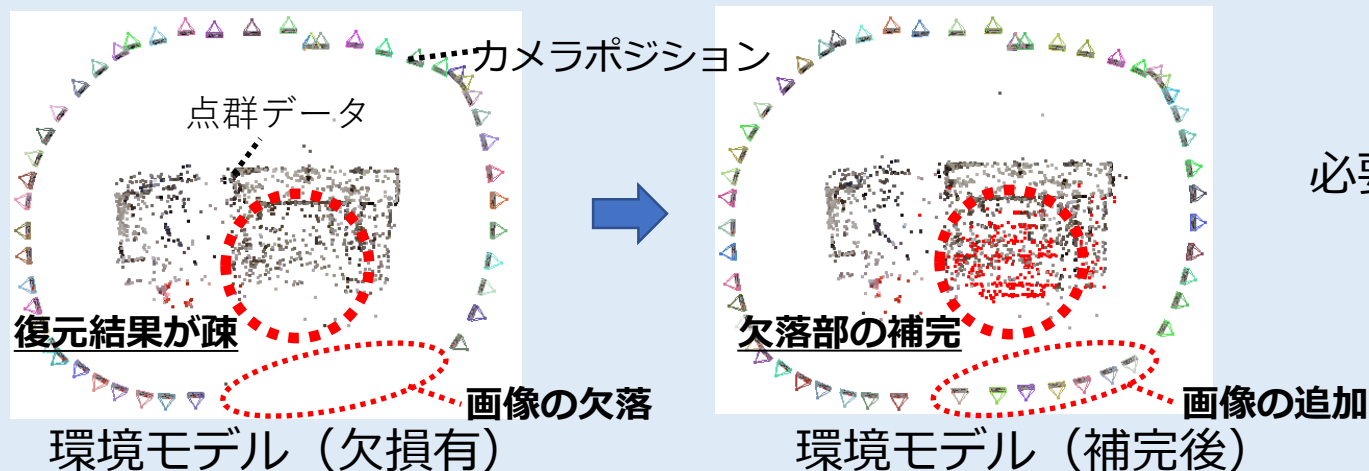
狭隘空間での冗長マニピュレータ制御

# (4) 炉内環境把握のための環境モデル生成

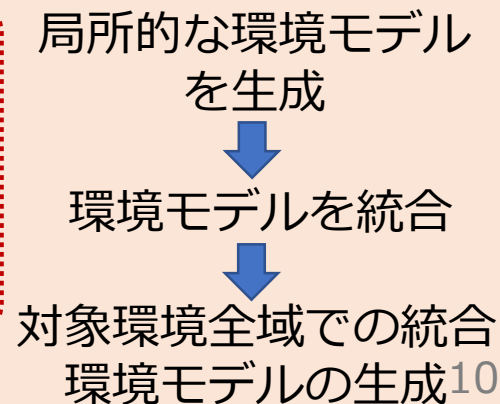
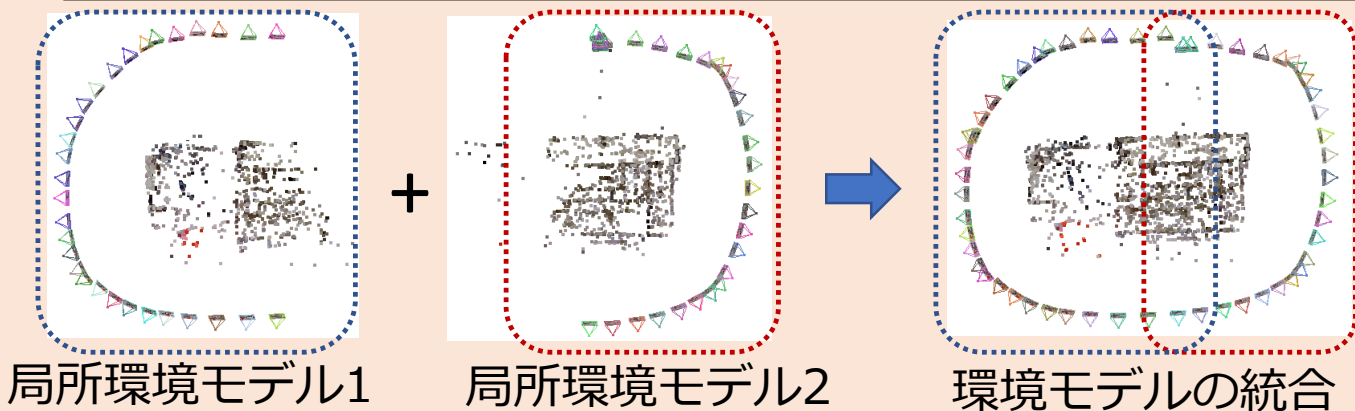
川端、羽成 (JAEA)、成瀬、中村 (会津大)

カメラ等により得られたデータから環境モデルを立体復元するための画像処理手法を開発し、軌道上を移動する複数カメラにより収集される画像に適用するシステムについて研究開発を行う。

## ✓ 復元された環境モデルの疎な部分や欠落部を逐次的に補完する手法



## ✓ 複数の局所環境モデルを統合し、環境モデルを生成する手法





# 連携ラボの効果：体制の妥当性

- 廃炉の具体的ニーズの把握
  - 浅間、鈴木（東大）、佐藤（東京電力）
- 先端的技術開発実績のある研究者
  - 軌道構造体自動施工（福井）、フレキシブルアーム（高橋隆）、映像インタフェース（山下、田村）、テレオペレーション（横小路）、放射線計測（高橋、島添）、環境モデル生成（川端、羽成、成瀬、中村）
- 遠隔技術分野と放射線計測分野の**異分野融合**
- 連携ラボ（JAEA）
  - JAEA 檜葉でのモックアップ構築、CLADSとの連携
    - 川端（JAEA 檜葉）、羽成（JAEA CLADS）
  - 既にJAEAと会津大で共同研究を開始
  - 令和2年度からポスドク1名雇用
  - 令和3年度から**クロスアポイントメント**（中村）

# 連携ラボの効果：事業継続性の妥当性

- JAEA楢葉遠隔技術開発センターの継続的有効活用
  - 試験空間（モーションキャプチャシステム、VRシステム）、研究室、加工機器等
- 継続的人材育成の3本柱
  - 研究教育
  - 座学
    - 東大大学院における廃止措置に関する講義
  - 施設見学
    - 原子力発電所等現場の施設見学
- 人材の裾野拡大：ロボット工学等遠隔技術分野
- 人材ニーズのフィードバック：東京電力HD
- 福島イノベーションコースト構想で検討されている、浜通り地区における教育人材育成拠点形成に繋げる

# 燃料デブリ分析のための超微量 分析技術の開発

代表機関

東北大学(永井 康介)

日本原子力研究開発機構(前田 宏治)

再委託機関

九州大学(出光 一哉)

長岡技術科学大学(鈴木 達也)

日本核燃料開発株式会社(樋口 徹)

# 実施概要

- キーとなるアクチノイド核種の化学分析を中心に、最適な試料前処理・分離・分析プロセスを開発。
  - 将来計画されている燃料デブリ分析の効率化・合理化。
- 微量分析(ICP-MS/MS)を原子力分野に応用することにより測定核種を単離するための前処理をせずに分析できる手法を開発。
  - 分離前処理の省力化、迅速な分析工程の確立。
- 廃棄物保管時、処分時の安定性を調べる
- 一連の研究業務における人材育成。

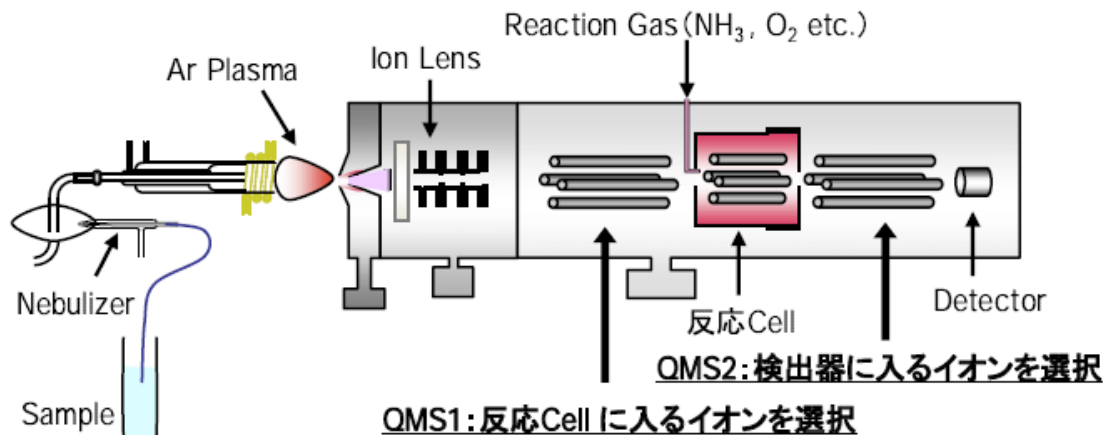
## 実施項目：

- (1) 模擬燃料デブリの溶解特性評価(JAEA、長岡技大)
- (2) 燃料デブリの主要分離・分析プロセスの確立(JAEA、長岡技大)
- (3) 模擬燃料デブリの作製 (NFD、東北大学)
- (4) ICP-MS/MSによるアクチノイド元素分析に係わる基礎データの取得(東北大学、長岡技大)
- (5) 廃棄物処分における燃料デブリの安定性研究(九州大)

# ICP-MS/MSをアクチノイド元素実験棟に設置

誘導結合プラズマ質量分析法 (Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometry) は、アルゴンの高温プラズマ (ICP) をイオン源とする質量分析法である。高感度な無機元素分析手法であるため、現在ではエレクトロニクス、材料・化学、エネルギー・環境、医薬・バイオなど幅広い分野で使用され、普及が進んでいる。しかし、ICP-MSでは試料中に爽雑物が存在する場合、それに由来する分析対象元素のイオンと同じ質量数のイオンにより妨害を受ける「スペクトル干渉」の問題がある。

ICP-MS/MSは、従来の四重極型ICP-MSで困難であった試料中の混合物に由来するスペクトル干渉を回避でき、更なる高感度・高精度測定が可能である。



# 連携ラボ

4つのアクチノイドを扱うことの出来る本格的なホットラボの外観写真



JAEA 照射燃料集合体試験施設 (FMF)



JAEA 照射燃料試験施設 (AGF)



東北大学 アクチノイド研究棟



ウラン燃料研究棟

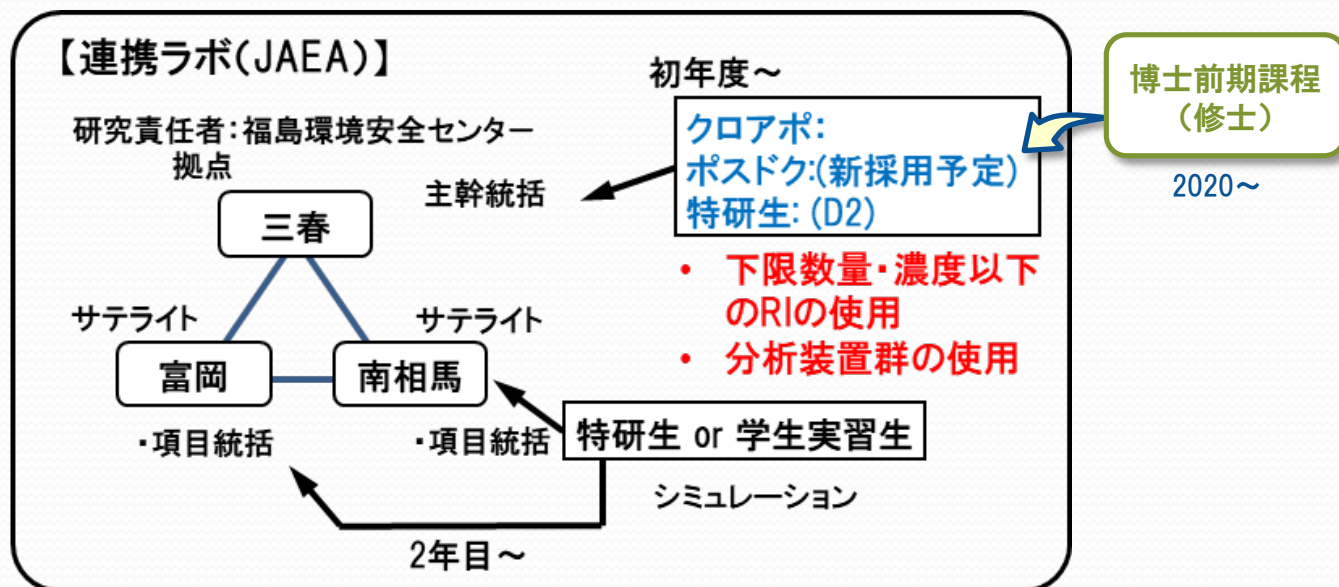
# 化学計測技術とインフォマティクスを融合した デブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成

代表事業者： 福島大学

分担機関： (株)化研 (株)パーキンエルマー・ジャパン

JAEA： 福島環境安全センター

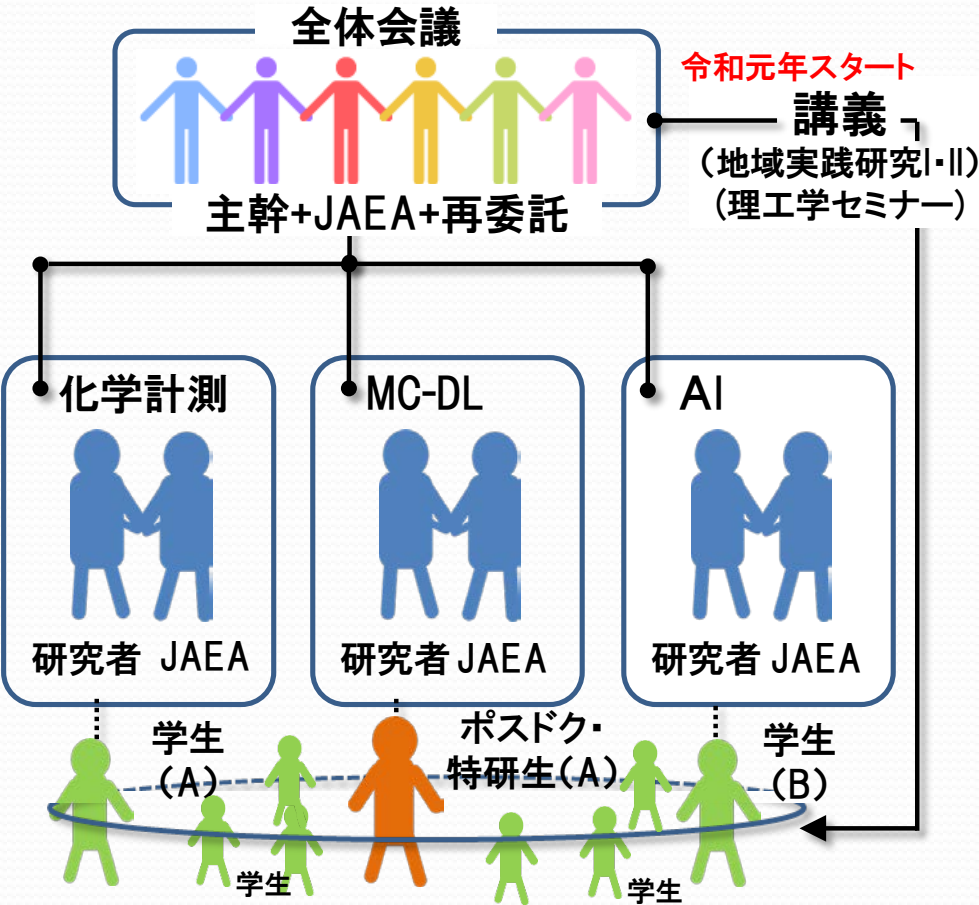
## ● 今後の研究人材育成の進め方



# 連携ラボ(大学等)⇔連携ラボ(JAEA)

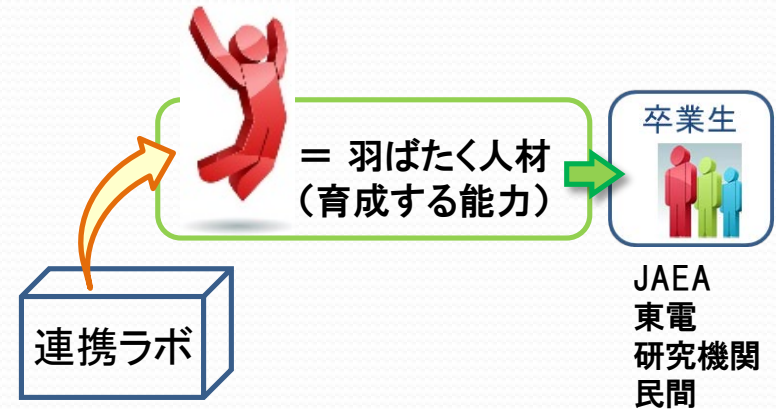
## タイアップ型人材育成構想

**教育・研究** : 身の回りの周辺環境の変化



修士・修了するには、修論研究のほかに  
22単位(11科目)の履修が必要

10単位:残12単位(6科目)



### 三春⇔福島大

- ・車で40分(約35km)。
- ・講義の前後で実験ができる環境
- ・クローポ教員にとって生活環境が大きく変化しない。



令和元年度

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業  
研究人材育成型廃炉研究プログラム

# 放射線・化学・生物的作用の 複合効果による燃料デブリ劣化機構 の解明

研究期間

令和元年度-令和4年度

実施機関

東京工業大学

日本原子力研究開発機構

ヴィジブルインフォメーションセンター

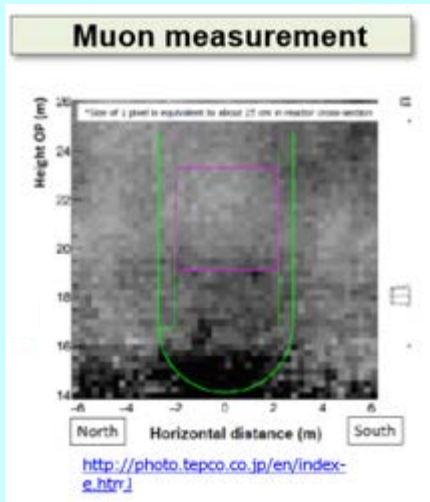
# 燃料デブリに関する研究

- ◆ 燃料デブリの**性状把握**に関する研究  
(燃料デブリの現在を知る研究)
- ◆ 燃料デブリの**性状変化**に関する研究  
(燃料デブリの未来を予測する研究)

# 燃料デブリの性状把握に関する研究

- 炉内の観察による評価。
- 採取試料の分析による直接評価。

## ミュオンによる測定



## 遠隔操作による観察



## PCV内の物質の直接採取



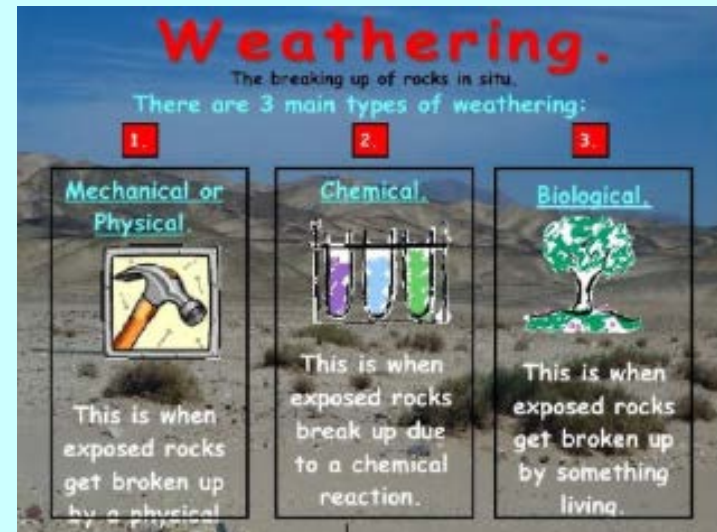
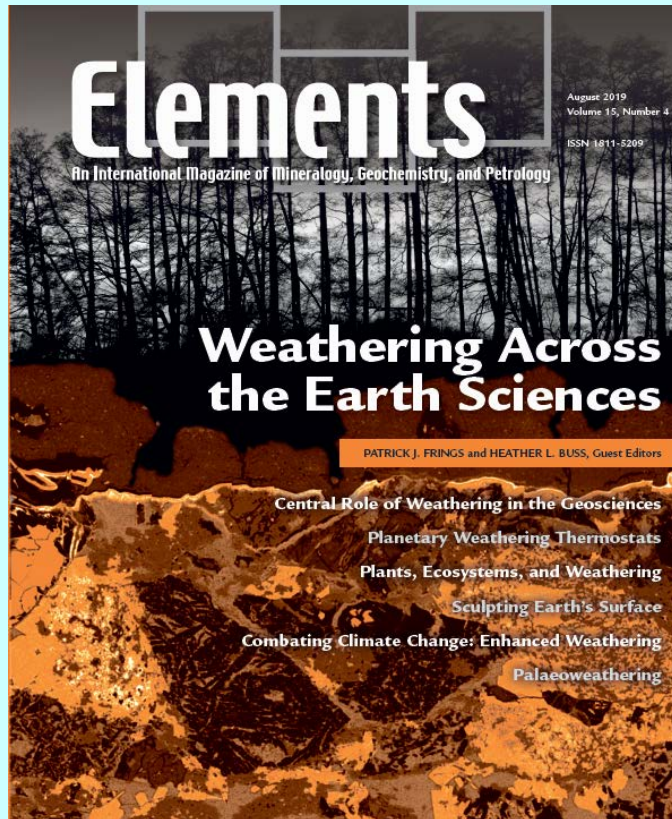
- 性状把握手法については確立された。
- 採取試料の直接評価の実施。



- 燃料デブリの性状変化を研究する準備が整った。

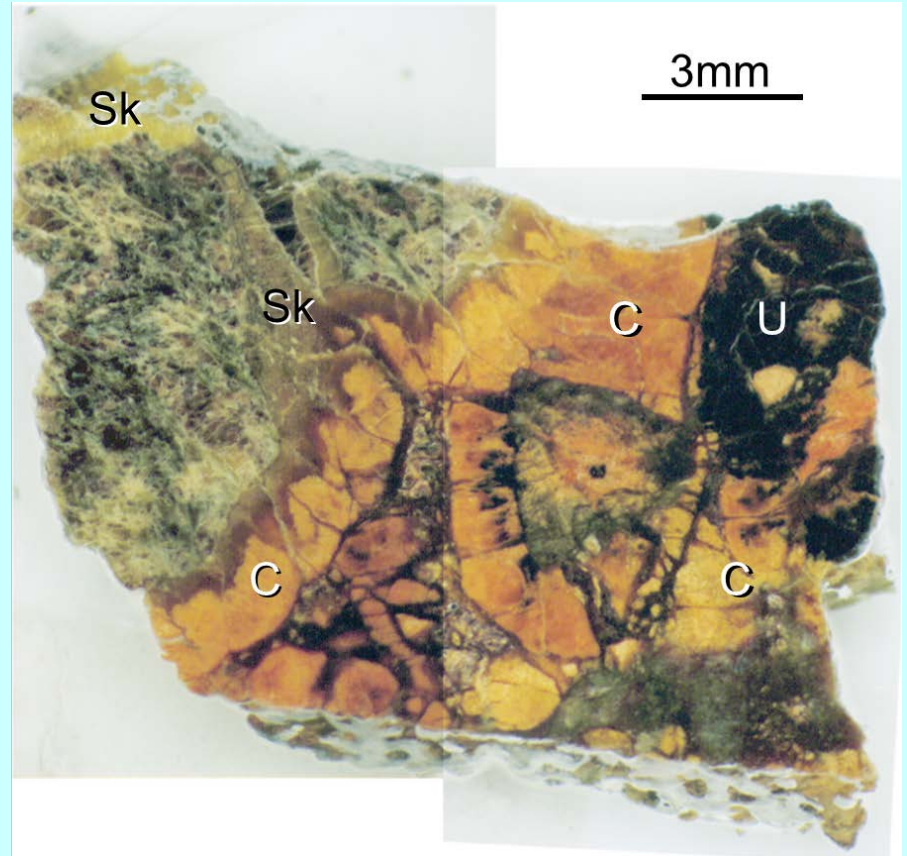
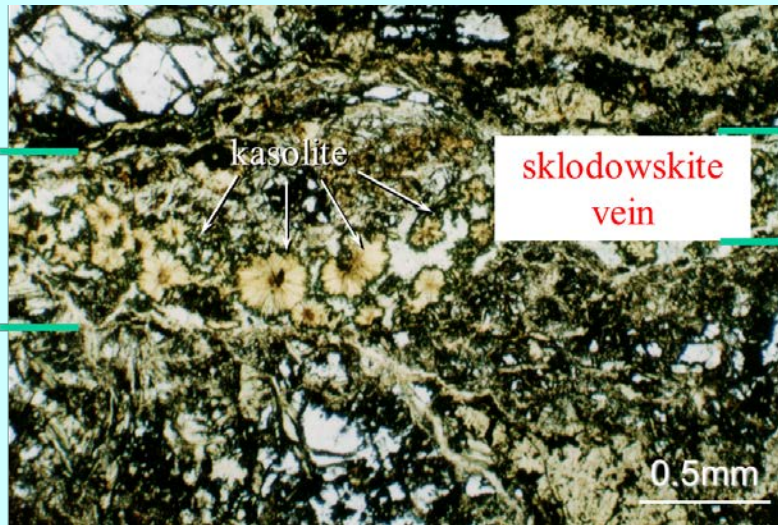
# ◆燃料デブリの性状は変化(劣化)するか

## 風化 (Weathering)



地球表層では定常的に起こっている現象  
現象解明、災害の防止のため、マイクロサイズから  
地球規模で研究されている。

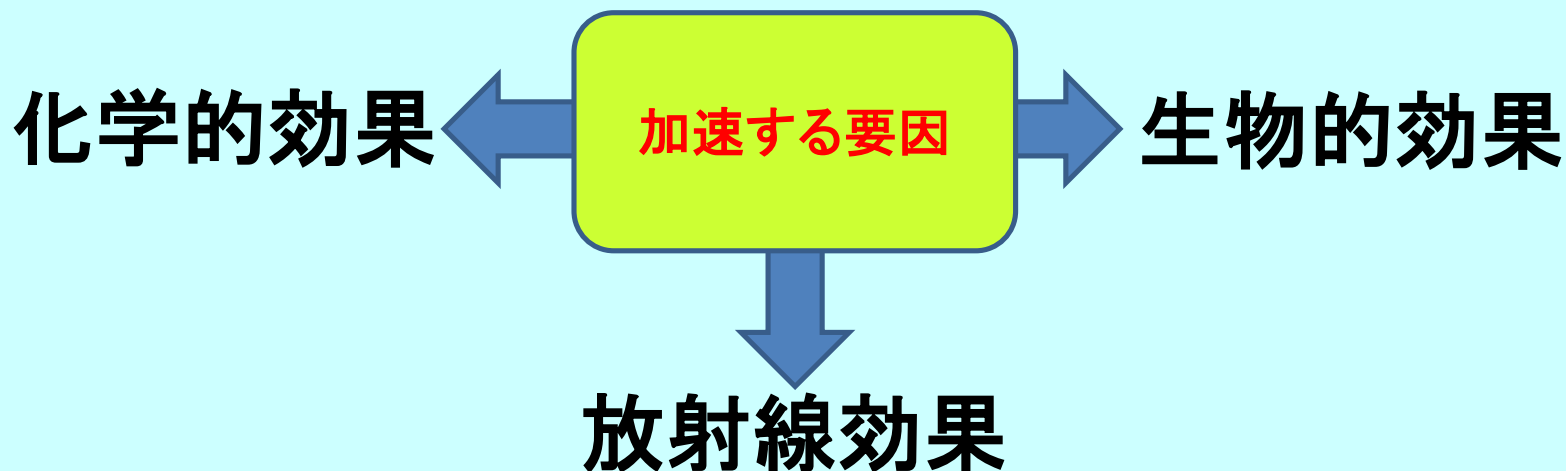
# ウラン鉱物の風化



インコングルーエントな溶解が起こっていた。  
溶解生成物が再沈殿(鉱物化)

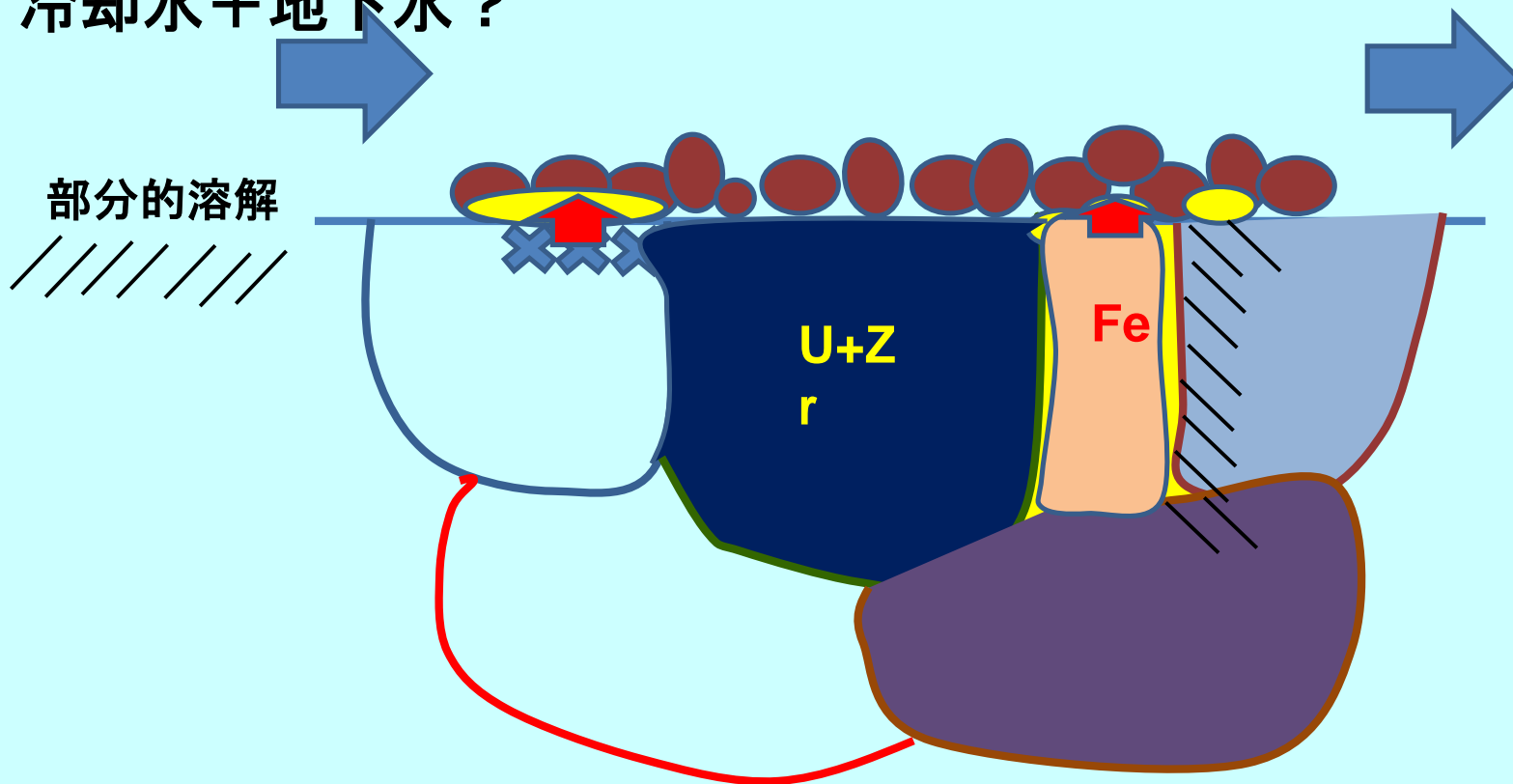
# ◆燃料デブリの性状変化(劣化)に関する研究

- 溶解はCongruentか
- 加速する要因は何か。
- どの程度劣化するか。

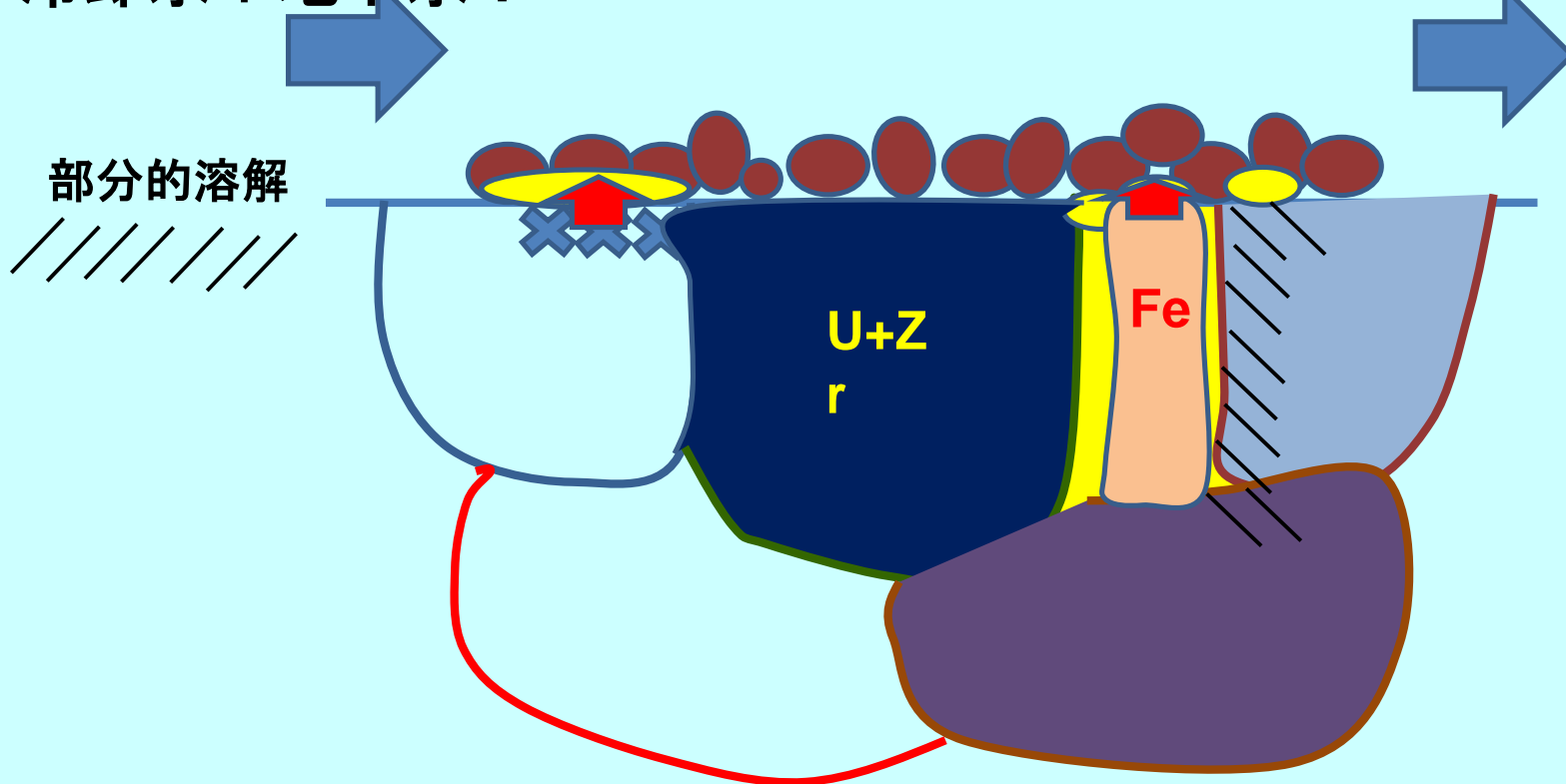


- 燃料デブリは不均質。
- PCV中には空気(酸素)の混入の可能性。

冷却水+地下水？

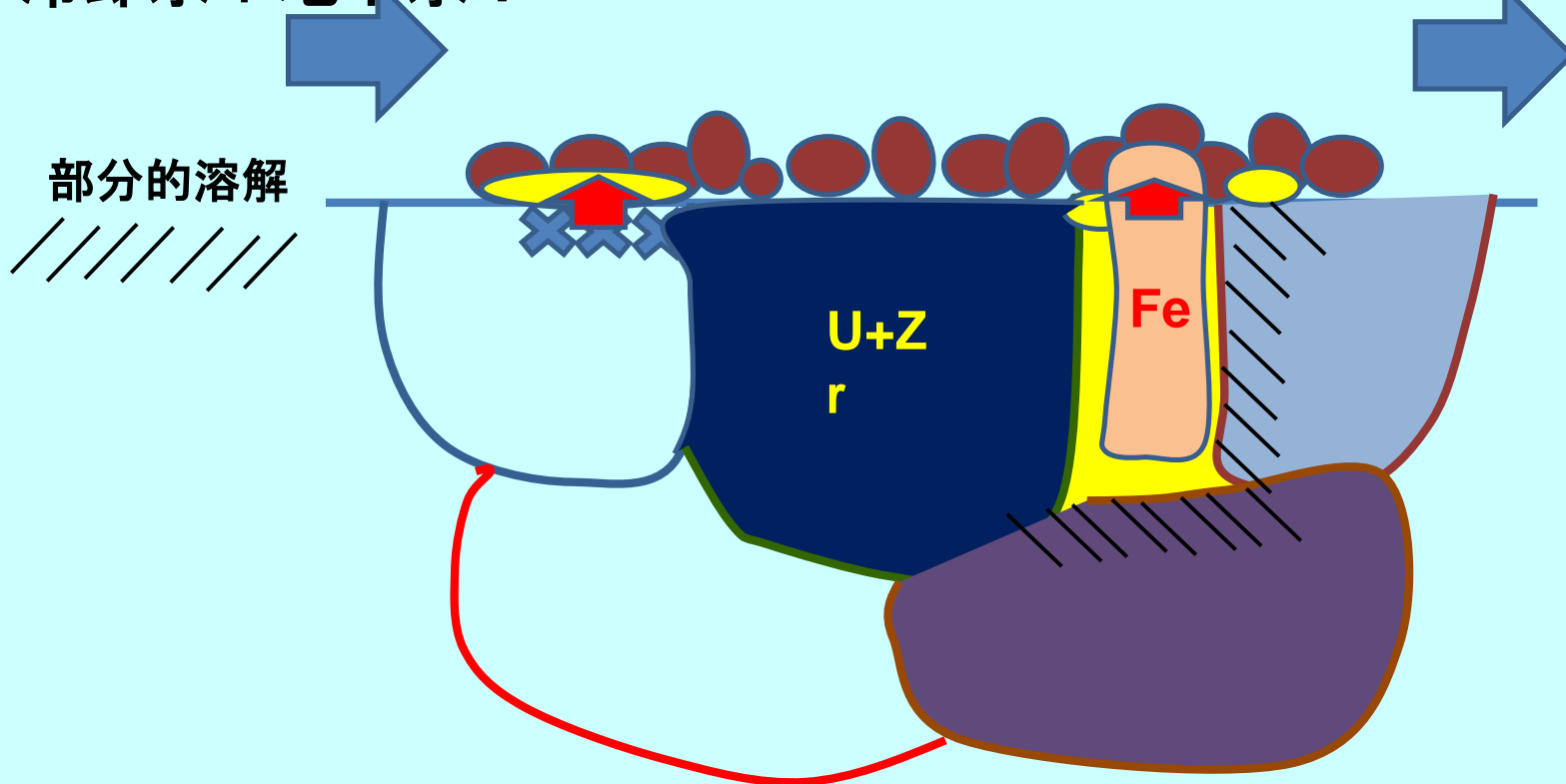


冷却水+地下水？

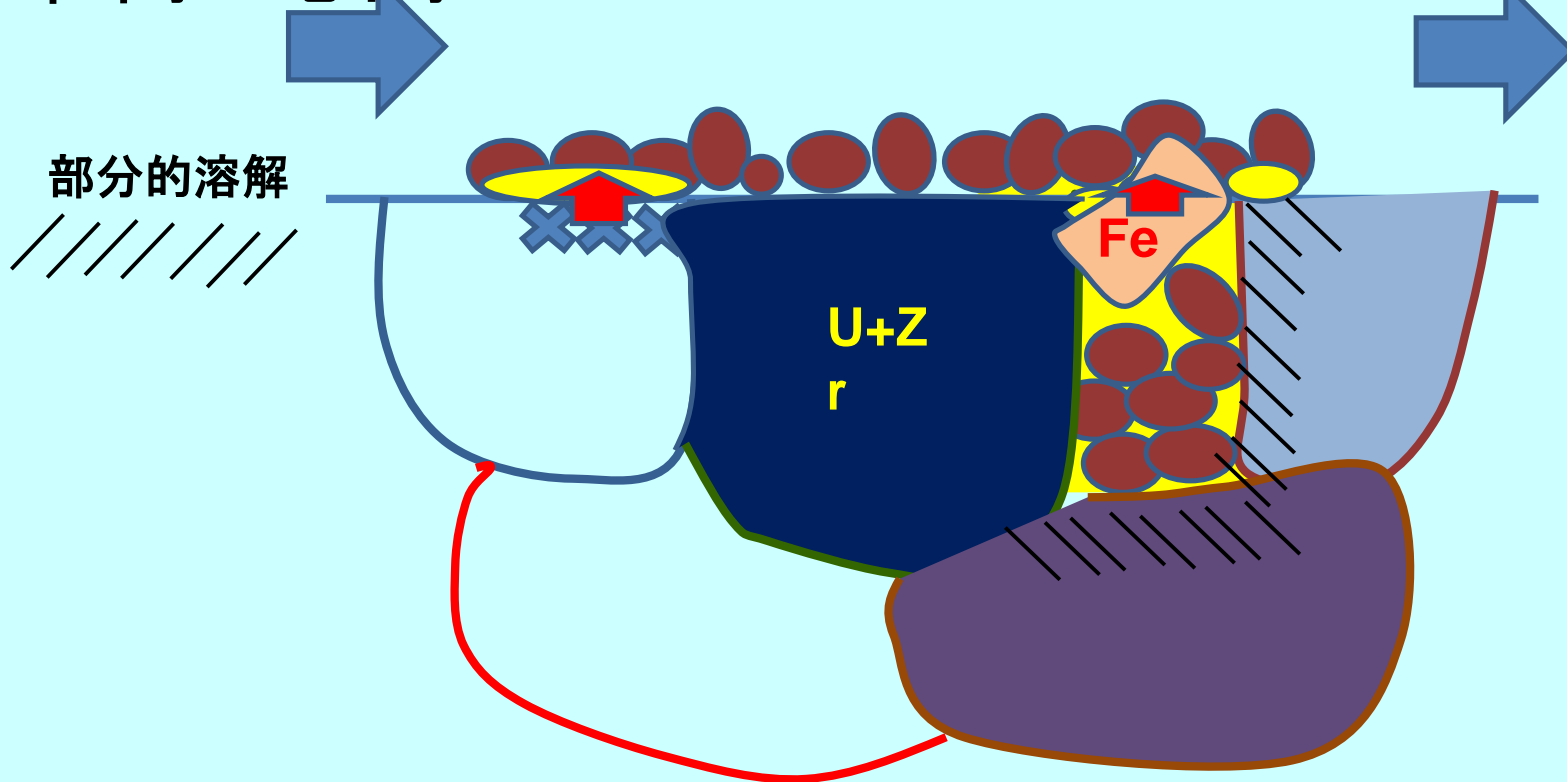




冷却水+地下水？

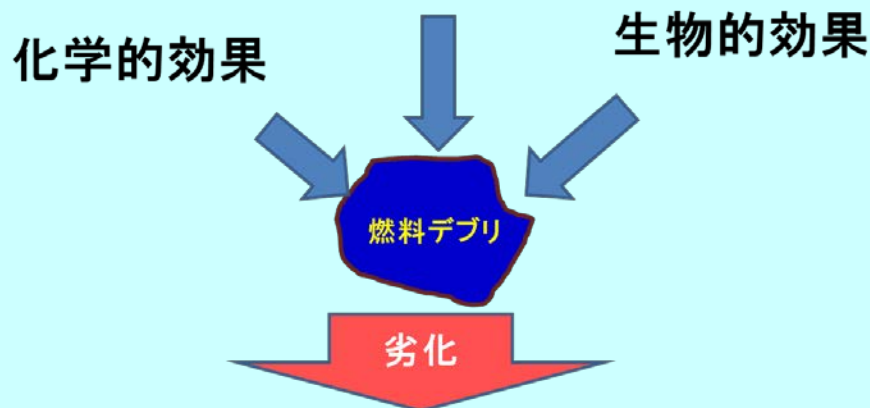


冷却水+地下水？



# ◆燃料デブリの性状変化(劣化)に関する研究

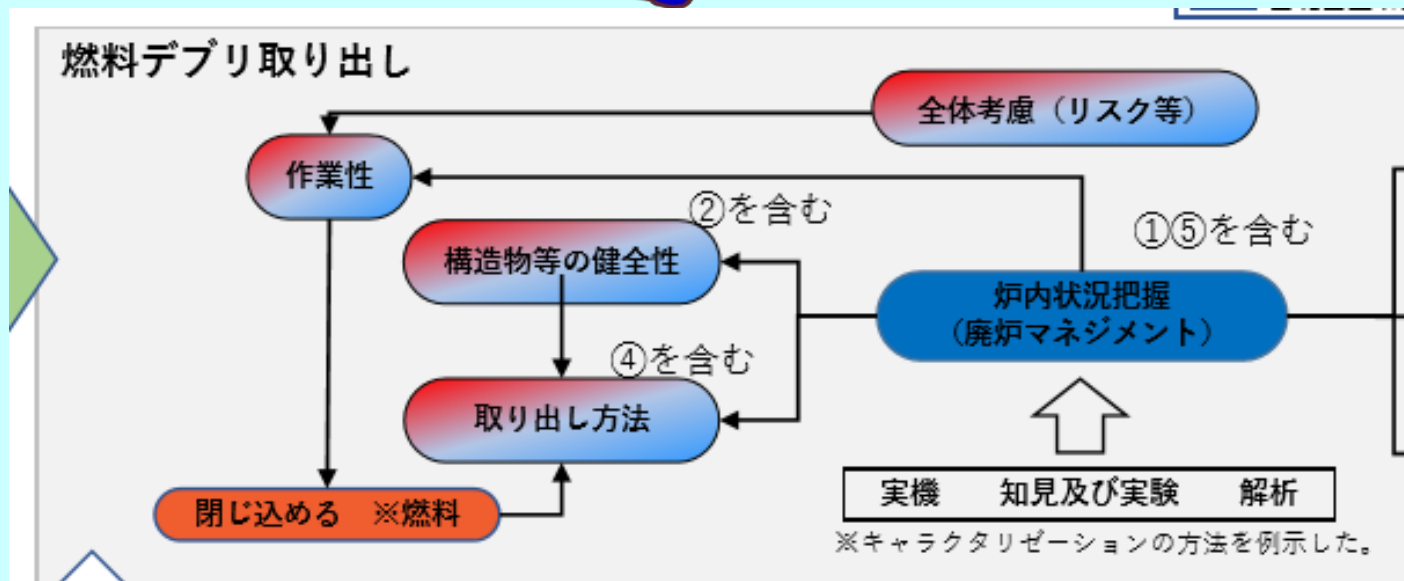
放射線効果



基礎・基盤研究の全体マップ  
(一部抜粋)



①燃料デブリの経年変化プロセスの解明



テーマ2 化学的作用による劣化機構の解明

テーマ3 生物的作用による劣化機構の解明

ウラン錯形成による劣化機構の解明(東工大)  
マイクロ流路法による劣化機構の解明(東工大)  
溶解したデブリ成分の吸着挙動の解明(東工大)

モデル微生物による劣化機構の解明(東工大)  
1F生息微生物による劣化機構の解明(JAEA)

複合作用

複合作用

アルファ線による劣化機構の解明  
燃料デブリ及び含有成分元素の物理化学状態の解明(JAEA)

アルファ線+反跳による損傷機構の解明  
燃料デブリ及び含有成分元素の物理化学状態の解明(JAEA)

テーマ1 放射線作用による劣化機構の解明

(東工大)は東工大主体  
(JAEA)はJAEA主体で  
研究を進めるテーマ。

第1段階  
第2段階

放射線損傷と酸化環境下における化学的及び生物学的損傷の複合作用による燃料デブリの劣化機構を明らかにし、酸素が存在する条件での複合作用による劣化を時間の関数として表す。