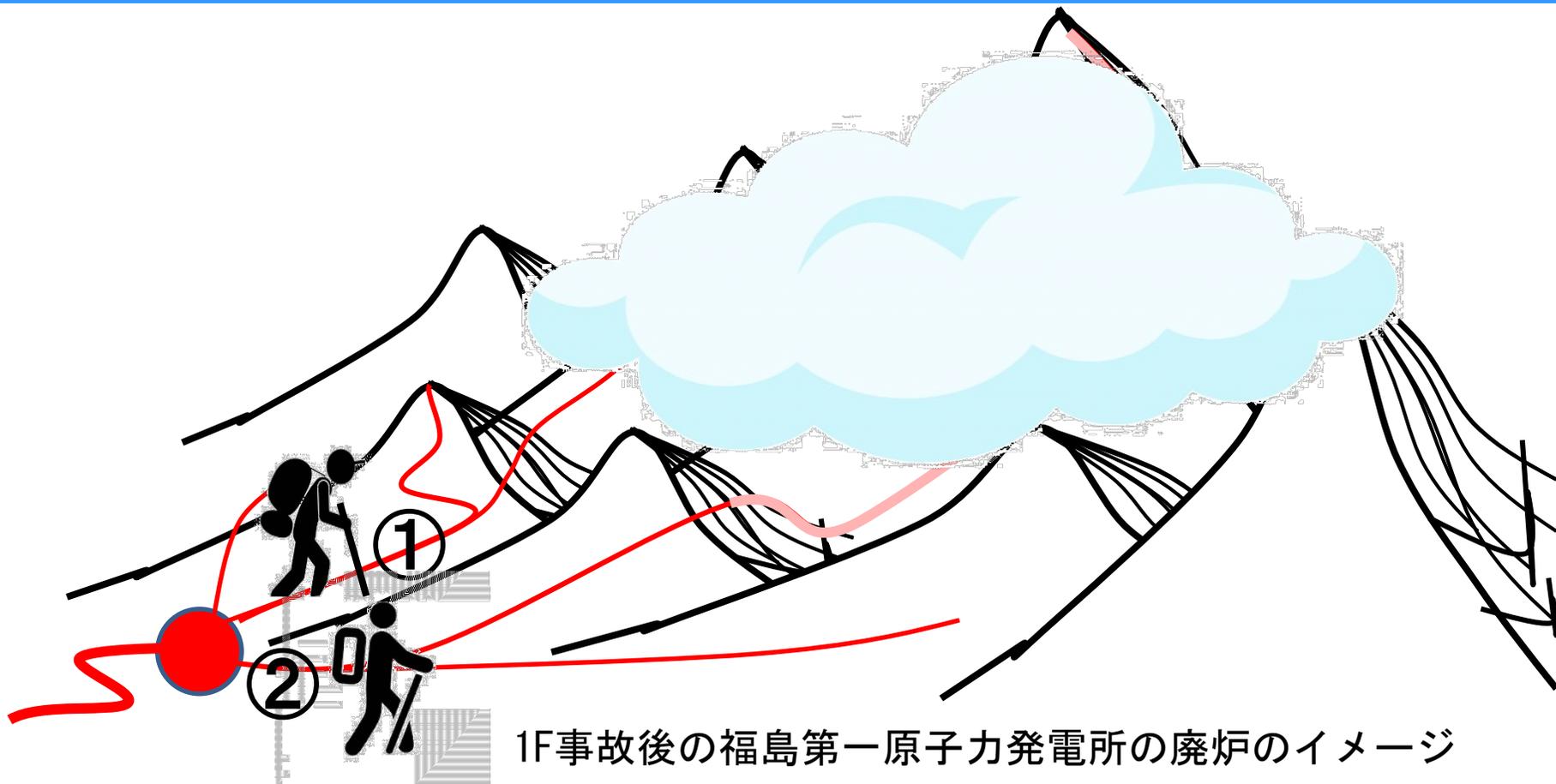


## 部門報告②

### 燃料デブリ取り出し に向けた研究開発



廃炉環境国際共同研究センター  
炉内状況把握ディビジョン  
溝上 伸也



1F事故後の福島第一原子力発電所の廃炉のイメージ

## ①のルート

### 炉内状況の把握

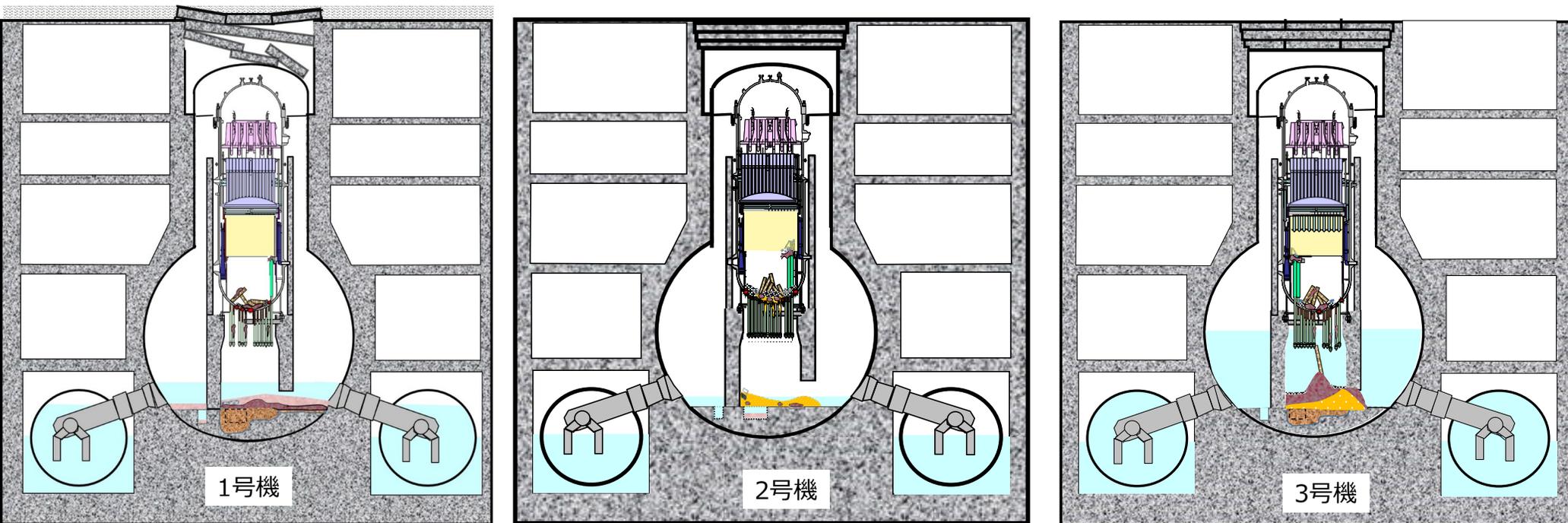
事故分析から原子炉破損等の炉内状況を明らかにしようとする取り組み

## ②のルート

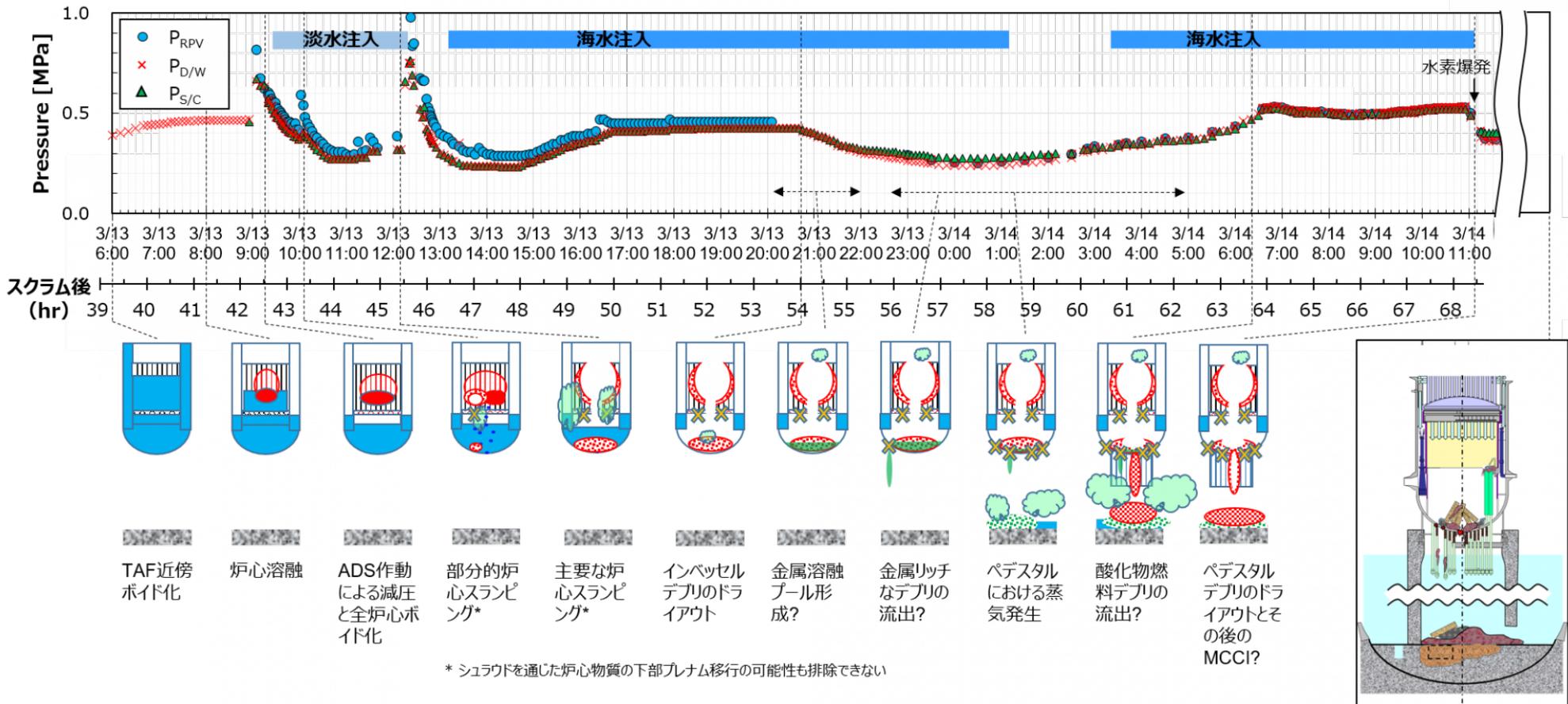
### 燃料デブリの性状把握

模擬燃料デブリなどを用いてデブリの性状を明らかにしようとする取り組み

- 事故を理解すると、原子炉・格納容器・燃料デブリの状況が理解できる
- 2016, 2017年度「総合的な炉内状況把握の高度化」事業において、東京電力と協働し、燃料デブリ分布の推定図を作成



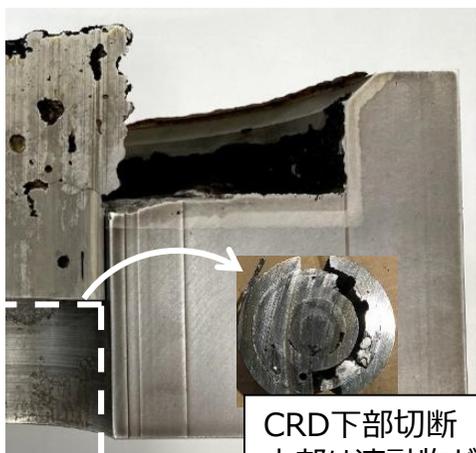
- その後も、事故進展の分析を継続しており、事故時の測定データ、現場の状況と整合するような事故の経過を説明できるようになってきた



- このような事故進展の分析には、事故進展解析のみならず、それを支える局所の現象のメカニズムの理解の進展が不可欠

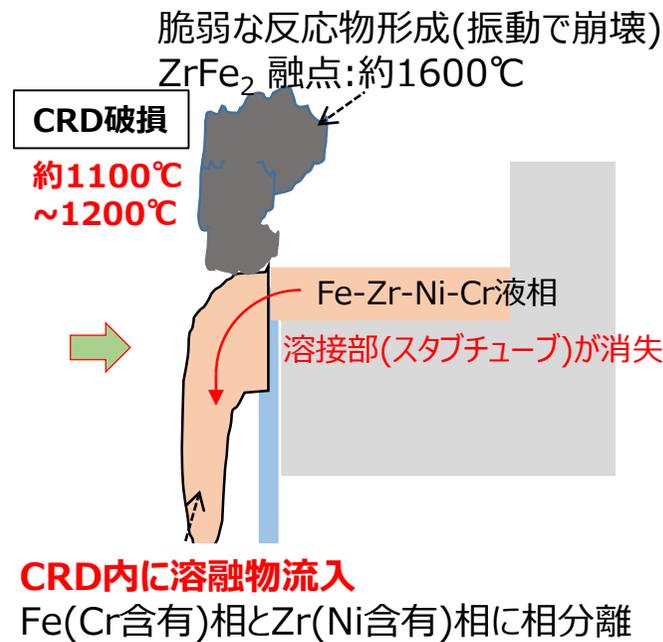
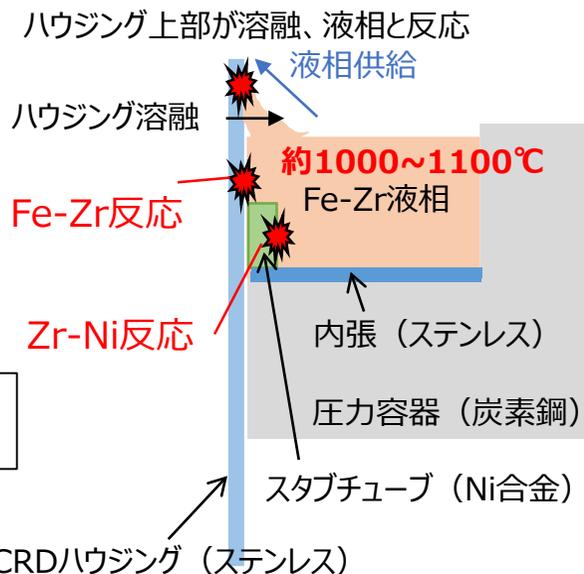
**富岡町のCLADS実験棟に整備した実験設備を用いて、圧力容器の下部に使われている金属材料間の反応による、内容物の流出挙動を調査\*1**

- ✓ 主に2つの共晶反応で溶融が進行  
**金属溶融物-制御棒駆動機構ハウジング : Fe-Zr**  
**金属溶融物-制御棒駆動機構スタブチューブ : Zr-Ni**
- ✓ **金属単体の融点よりも低い温度(1050~1250 °C)**でCRDの破損が進行する
- ✓ 金属液相プール形成、CRD反応開始から破損まで (2500~3500 s、液相プール形成からは約5000 s)
- ✓ **制御棒駆動機構と圧力容器の溶接部が脆化 :**  
**脆弱な反応物が形成、ハウジングを溶接している制御棒駆動機構スタブチューブが消失**



CRD下部切断  
内部は溶融物が充填

試験後の断面



\*1 佐藤拓未他、日本原子力学会2021年秋の大会、2021年9月8日~10日、講演番号2J13.

目的・・・炉内セシウム (Cs) 分布推定のために必要となる鋼材とCsとの高温化学反応や、水相を介したCsの再分布推定のために必要となる炉内に付着したCs化合物の水への溶解挙動に関する知見を取得する。

水酸化セシウム (CsOH) と鉄さびとの高温化学反応挙動

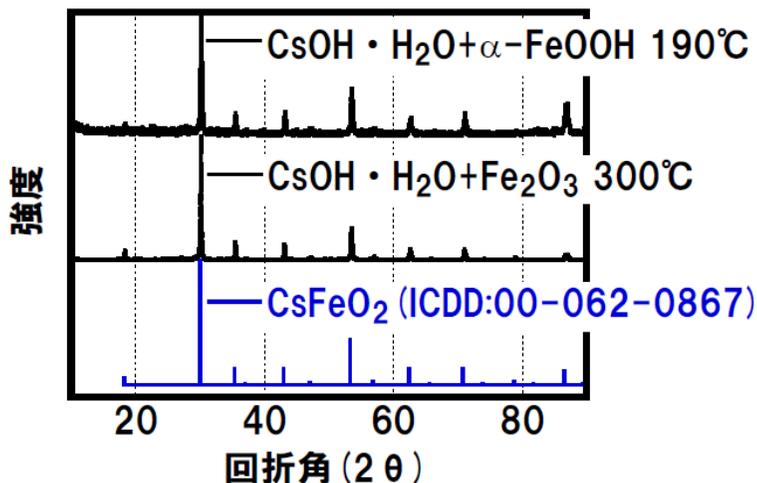


図1 CsOH・H<sub>2</sub>Oと鉄さび (FeOOH、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) との混合粉末の大気中加熱後試料のX線回折測定結果

CsOHと鉄さびでは、数百℃程度でセシウムフェレート (CsFeO<sub>2</sub>) が生成することがわかった。

2号機原子炉ウエル接続配管で確認された高線量のさび



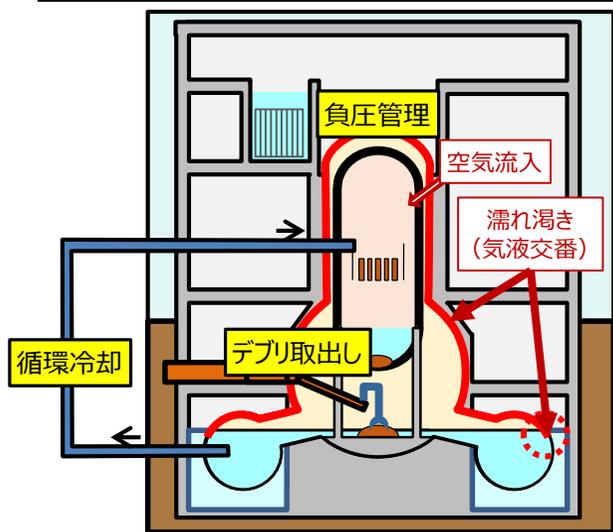
図2 差圧調整配管の炭素鋼部分における、ファイバースコープを用いた観測結果

さびやすい炭素鋼配管が高線量、さびにくいステンレス鋼配管が低線量となっており、CsFeO<sub>2</sub>生成の可能性

【成果・アウトカム】 格納容器相当の比較的低温領域においても、Csと鋼材が化学吸着する可能性を示した (炉内Cs分布の拡大)。また、既報値が3倍程度異なる不確かさの大きいCs<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>の溶解度を明らかにした (炉内Csの再分布)。

目的・・・デブリ取出し時の**負圧管理**により格納容器（PCV）内へ**空気が混入した場合を想定**し、冷却水面近傍の**濡れ濁き部分（気液交番部）**における**低濃度域の酸素**に対する腐食速度変化の知見を取得する。

### PCV内負圧管理中の空気流入の影響検討

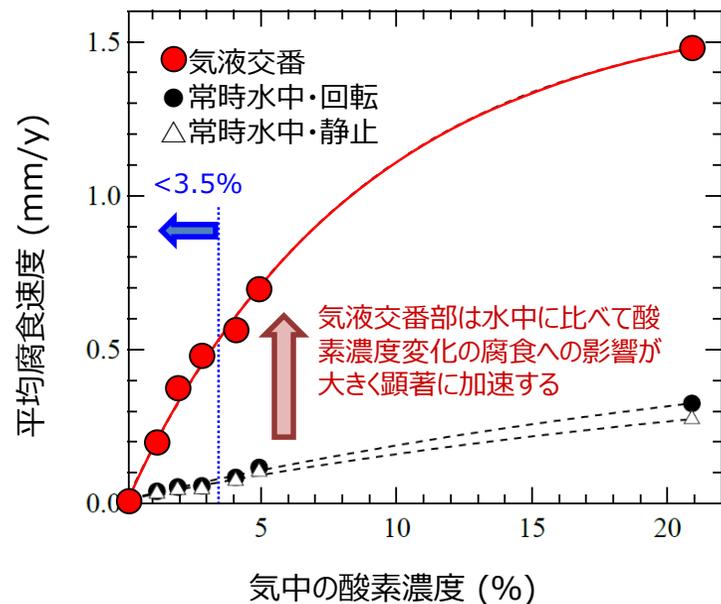


格納容器内の濡れ濁き部

減圧機能確認試験（2020年7月6-9日実施）では、PCV内酸素濃度を3.5%以下に維持することが機能確認の判断基準となった。  
一方、現状は約0.8%程度に保持されている。（令和2年7月30日チーム会合資料No.3-3-4より）

水中に比べて液面等の濡れ濁き部（気液交番部）は4-5倍程度腐食が加速する。空気流入による酸素濃度増加により腐食がさらに加速する可能性がある。

### 実験による低濃度域酸素による腐食速度変化の検討



5%以下の酸素濃度において気液交番部の腐食は顕著に加速した。

【成果・アウトカム】 格納容器内の濡れ乾き部分では、低濃度域であっても酸素濃度が増加すると濃度が加速することが明らかとなり、格納容器負圧管理時の酸素濃度管理が重要であることを示した。

- 燃料デブリ性状把握に関する研究では、
  - 模擬デブリを用いたデブリの性状把握
  - 実際の事故炉から回収されたデブリを分析するための手法の開発を実施してきた

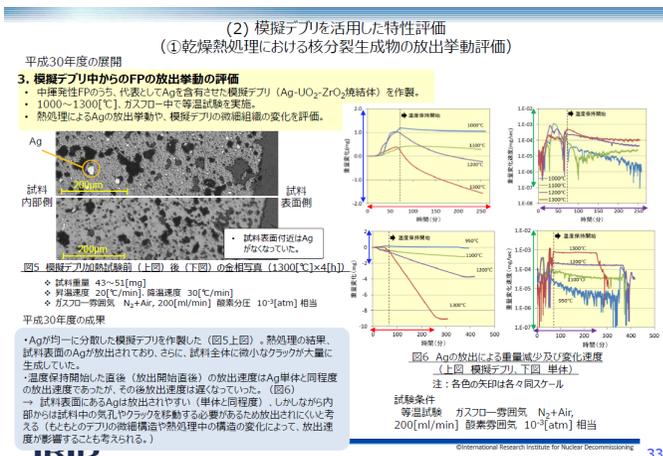


図1 模擬デブリを用いた核分裂性物質の放出挙動評価

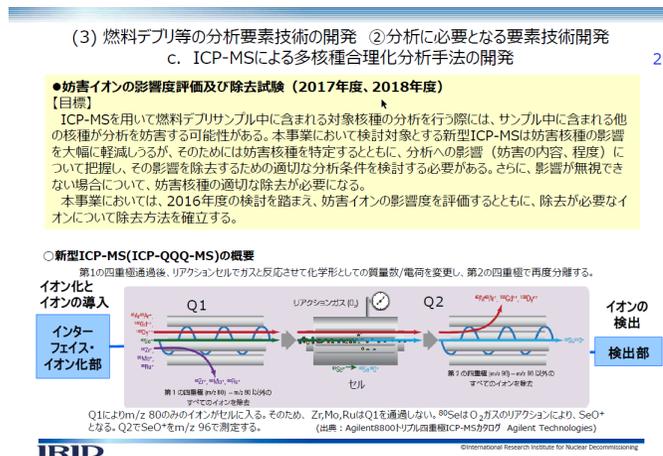
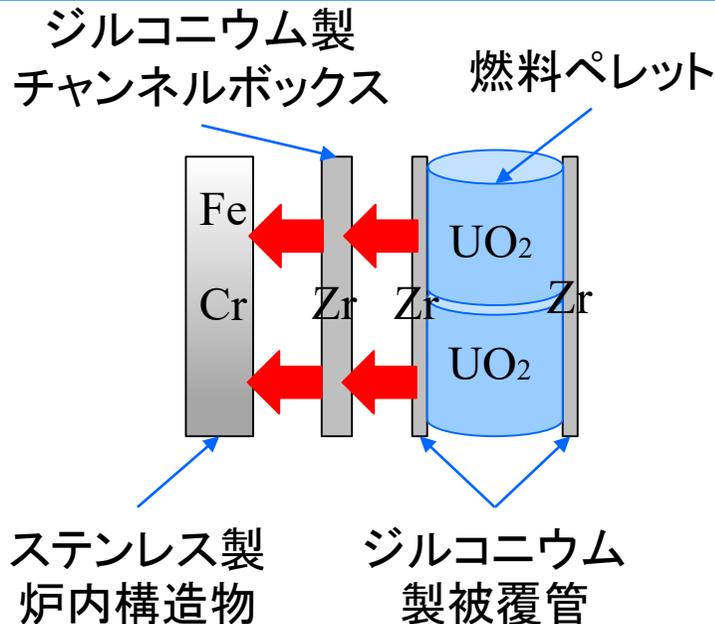
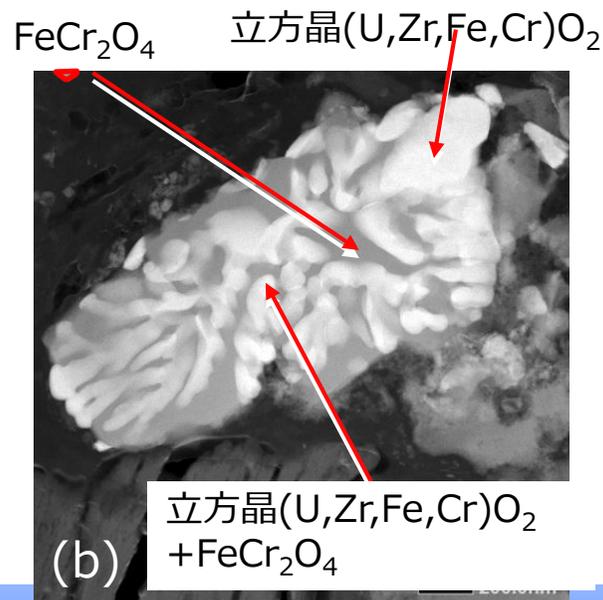
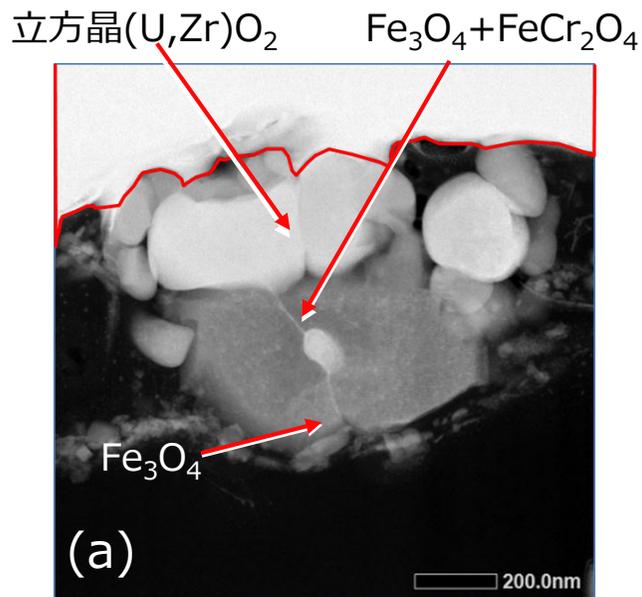


図2 燃料デブリ分析のための質量分析 ICP-QQQ-MS技術の開発

- 平成29年度の炉内状況把握の終了に伴い、事故炉から採取されたサンプルの分析も実施



- (a): Fe+Crを含む立方晶(U,Zr)O<sub>2</sub>と、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粒子が凝集した粒子
- (b): 立方晶(U,Zr,Fe,Cr)O<sub>2</sub>とFeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>の混合相で構成された粒子
- 燃料が高温化して溶融し、燃料ペレット、ジルコニウム製の被覆管、チャンネルボックス、そして、ステンレス製の炉内構造物を巻き込んで燃料デブリとなる
- 実際の燃料デブリも事故時の燃料溶融挙動を反映し、**複雑な組成かつ非均質な構造**を持つことが推定される。

➡ 小さなウラン含有粒子がデブリの性状をつかむ手掛かりとなる

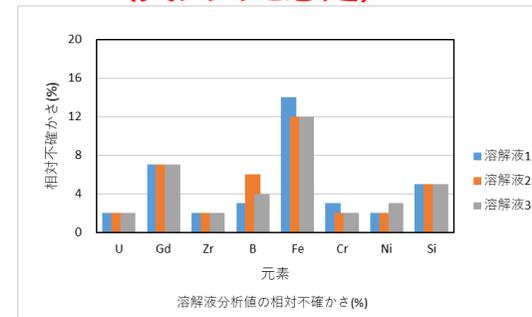
【目的】 性状が不明、分析が容易ではない燃料デブリの特徴を評価できる技術・体制を構築する。

【方法】 我が国の代表的な分析機関に対し、それとは独立した機関によって調製された模擬燃料デブリを支給し、各分析機関が保有する設備、溶解法及び分析技術を用いてその模擬燃料デブリの元素組成を評価する。

分析機関	溶解法	重量溶解率	特徴	
<p>模擬燃料デブリ (均一組成)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Uを含む</li> <li>1F組成を模擬</li> </ul> <p>東北大学</p> 	NDC	硝酸	~60%	<ul style="list-style-type: none"> <li>簡便な溶解法</li> <li>ウランやホウ素化合物は溶解</li> <li>溶けない成分を分析して全体の元素組成を補完</li> <li>微量フッ酸の添加で溶解率向上</li> </ul>
	JAEA大洗研	硝酸 + 微量フッ酸	~90%	<ul style="list-style-type: none"> <li>ほぼ完全溶解</li> <li>高い精度で元素の定量が可能</li> <li>フッ化物沈殿生成の可能性</li> </ul>
	NFD	王水+フッ酸	98%	<ul style="list-style-type: none"> <li>完全溶解</li> <li>高い精度で元素の定量が可能</li> <li>アルカリ試薬成分の混入</li> <li>アルカリ融解するつぼ成分の混入</li> </ul>
	JAEA原科研	アルカリ融解	100%	



セル内遠隔操作で実施 (実デブリを想定)

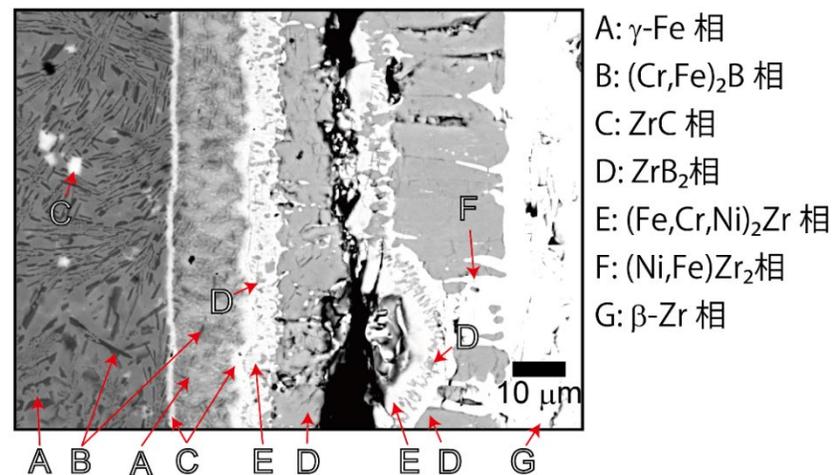
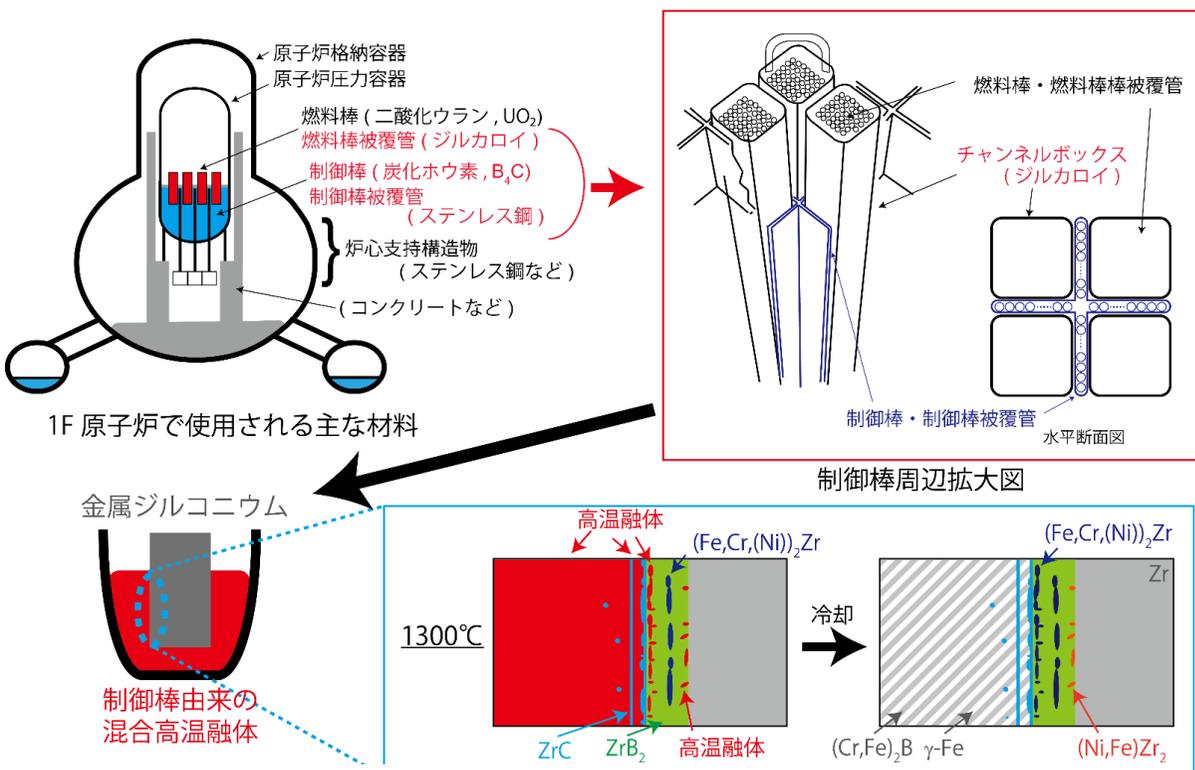


分析対象元素、各分析操作ごとに精度・誤差を検証

【成果】 各機関の分析操作の詳細比較による、分析機関の手法、不確かさ要因の定義及び評価方法、特徴 (課題) の共有化が図れた。

【目的】1F事故時に炉内での主要反応の一つとして推定されている、**制御棒周辺材料の溶融凝固による金属系デブリの形成における高温反応を解明する**

【方法】“**固体金属ジルコニウム**”と“**ステンレス鋼と炭化ホウ素の高温金属融体**”を反応させ、形成した“**金属系デブリ**”を実験・理論の両面から検証した。



実験で得られた金属系デブリとその構成相

### 実験概要と明らかにした金属系デブリ形成メカニズム

【成果】 制御棒周辺材料間由来の“想定される金属系デブリ”の詳細とその形成メカニズムを解明した。本成果は、1F事故で溶融した制御棒（ステンレス鋼と炭化ホウ素）と燃料被覆管（主成分が金属ジルコニウム）から成る燃料デブリの特性解明につながる。

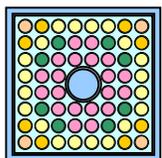
【目的】 今後の1F廃炉に係る研究開発や事業者による許認可等の支援が可能な、詳細かつ正確な事故直前における3次元核種インベントリデータを作成する。

【方法】 1F各号機の燃料集合体設計仕様と実機運転管理データに基づき、設計計算ベースの炉内全領域毎に燃焼計算及び微量不純物を含めた放射化計算を行い、約1600核種のインベントリを評価。

従来の1F核種インベントリデータ：  
軸方向分布、可燃性毒物、微量不純物を考慮しない装荷領域(5~6)毎のORIGEN2計算



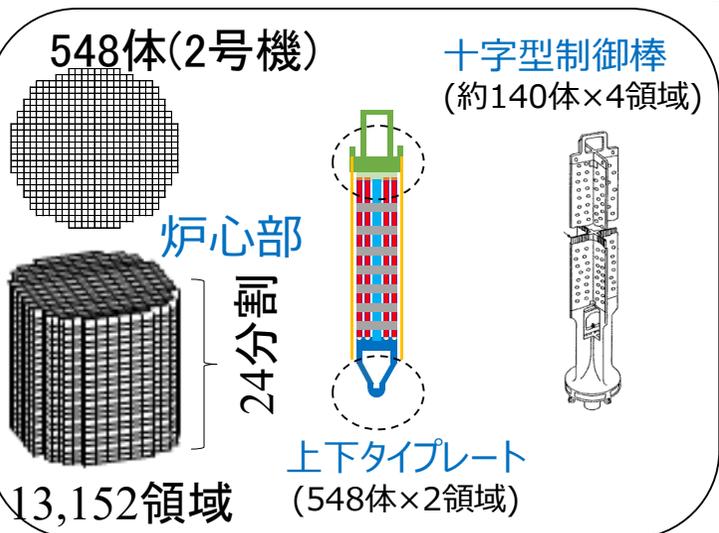
炉内燃焼度とボイド率分布を考慮した1群断面積ライブラリによる全炉心ORIGEN2計算とGd内挿



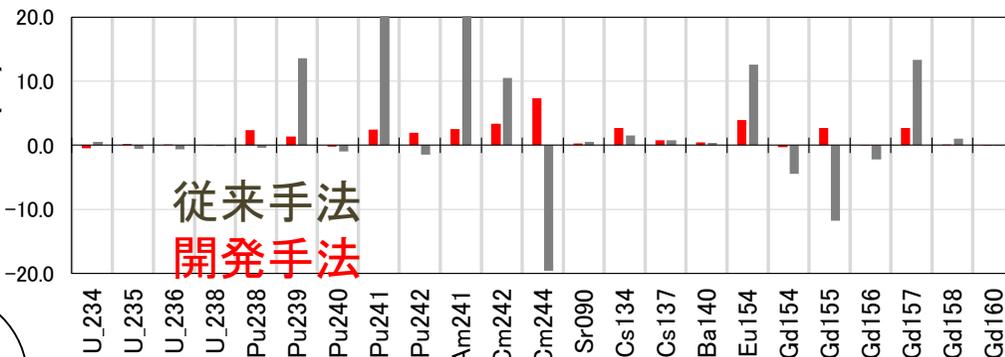
非均質燃焼計算 (MVP-BURN)



軸方向依存ORIGEN2断面積作成



非均質燃焼計算との差異(%)



集合体1体(34GWd/t)燃焼計算による精度検証

3次元核種インベントリデータの主な用途

- 事故進展解析の高度化 (崩壊熱分布)
- 燃料デブリ性状把握 (分析データとの比較・解釈)
- 被ばく・環境影響評価 (放射能比の利用)
- 崩壊熱/線量率/臨界性評価 (デブリ取出し)
- 非破壊測定技術開発 (仕分け技術開発)
- 処理・処分(放射能インベントリ評価)

【成果】 軽水炉に対する非均質燃焼計算と同等な精度が得られ、高速計算が可能な全炉心核種インベントリ計算手法を開発。これを1F各号機に適用し、多様な用途に利用可能な3次元核種インベントリデータを作成。



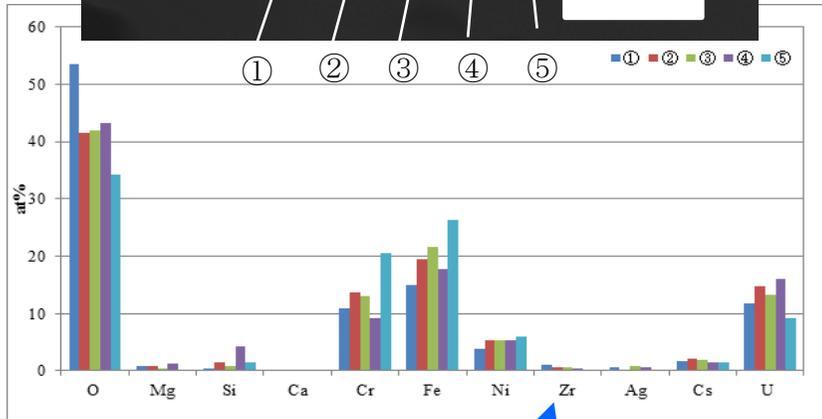
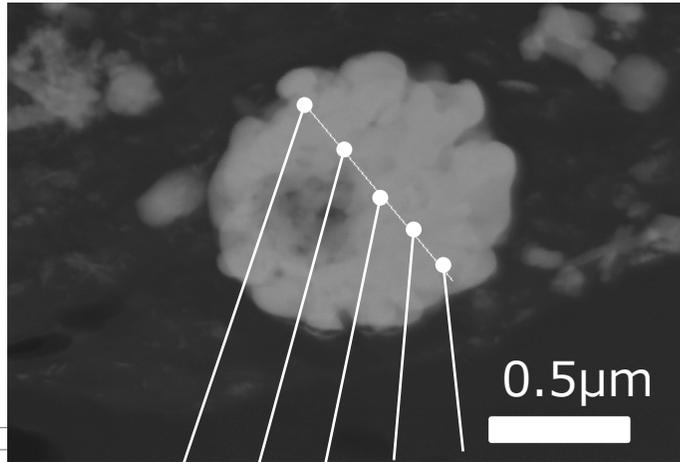
## ①炉内状況把握のための研究

## ②燃料デブリ性状把握のための研究

- 破損メカニズム 解明研究
- FP挙動 評価研究
- 経年変化 に関する研究

- 信頼性の高い 分析手法整備
- 模擬デブリを 用いた研究
- デブリ成分に 関する研究

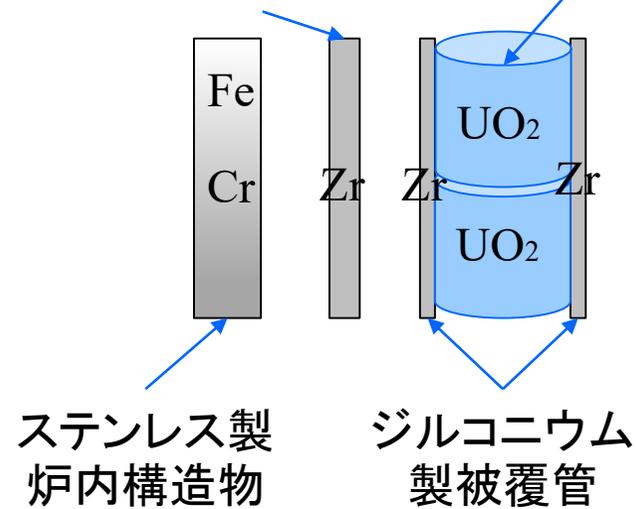
➡ 基礎体力を高めながら、それぞれの研究について成果を上げてきた



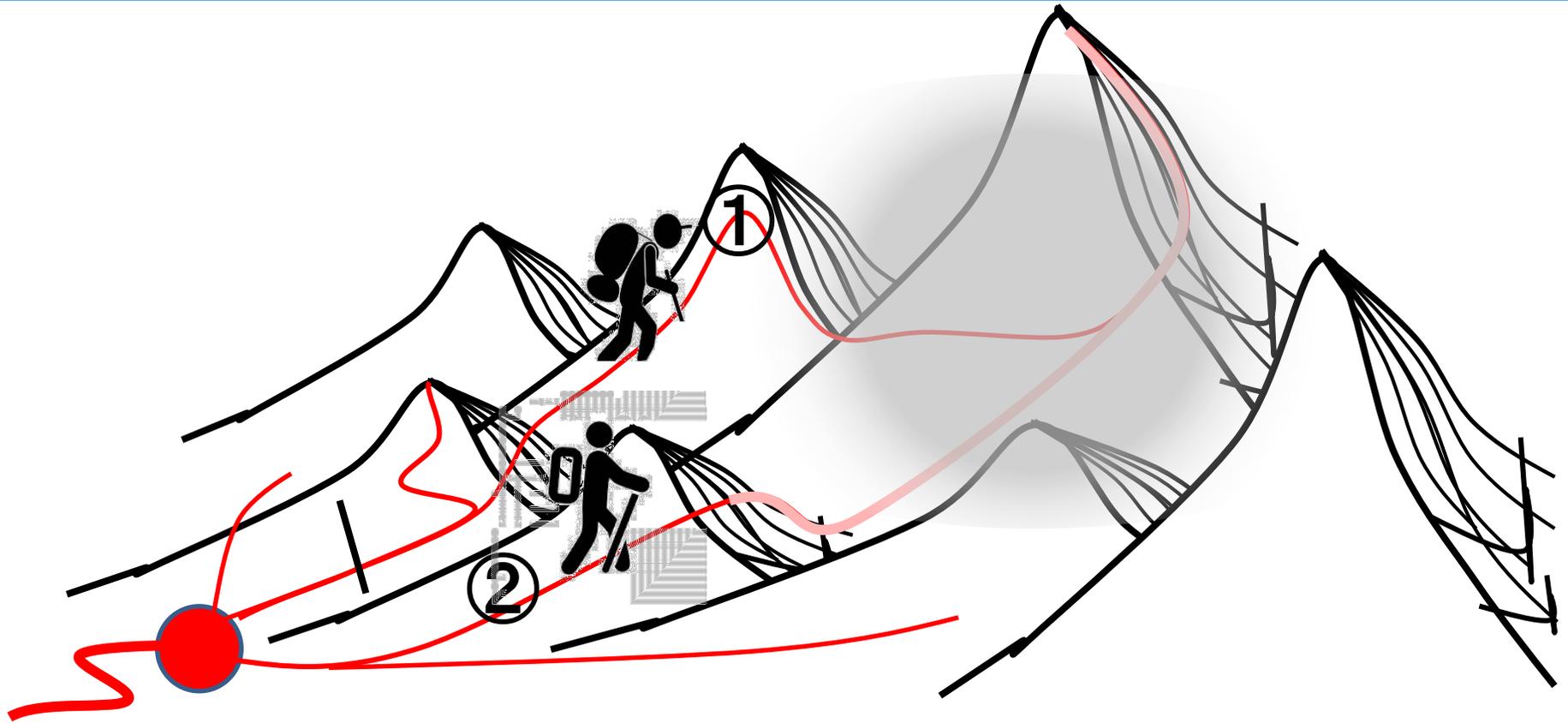
ジルコニウムがほとんどない

ジルコニウム製チャンネルボックス

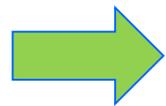
燃料ペレット



- 2号機最上階で採取したサンプルから、ほとんどZrを含まないUリッチ粒子が検出された
- ウランと鉄、クロム等ステンレス材料が混ざるためには事前にZrと混ざっていないと成り立たない
- Zrは難蒸発性であることから、蒸発凝縮で生成した粒子には存在量が少なくなると考えられる
- 2号機では蒸発が発生するほどの高温な時間帯があったと推定される ← 事故進展とのかかわり



現在の福島第一原子力発電所の廃炉のイメージ



異なるルートを歩んできた2つの研究分野が  
おぼろげながらも、合流して先に進める道筋が見えてきた

## 燃料デブリ取出

### ■ 中長期ロードマップ

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
------	------	------	------	------	------	------

▼ 燃料デブリ  
試験的取り出し  
(2号機)

燃料デブリの  
段階的取り出し規模の拡大  
(2号機)

取り出し規模の更なる拡大  
(1/3号機)

2030年頃までの  
望ましい姿

### 第3期の主な成果

- ◆ シミュレーションや模擬試験等を通じて1F炉内状況に関する知見創出。
  - ◆ 他機関による1F炉内状況の調査や海外との連携を通じて最新の知見を収集
  - ◆ 1F炉内状況に関する多くの知見を体系的にデータベースとして統合・編纂
- 研究成果により、燃料デブリ取出方法の検討等に寄与。  
→ 今後、取り出し本格化に向け、分析評価手法の確立が課題。

**取り出し本格化に向けて安全・リスク評価方法・体制がほぼ確立されていることが期待される。**

- PCV内部調査。シミュレーションを援用した**状況把握**。
- 安全が確保された状態で、段階的に取り出しの規模拡大
- 得られた知見を踏まえ、収納・移送・保管方法等工法改善。
- 閉じ込め機能確保、冷却、臨界管理・評価、局所的な中性子測定、水素管理・評価等による**安全性確立**。
- 燃料デブリの仕分け手法。処分概念を踏まえた**安全な保管管理**

演繹  
成果と課題

俯瞰

### の反映

### 第4期の 主要課題

① 分析と解析  
による推定

燃料デブリの分析と事故事象の解析・評価により炉内状況を推定する。

② 分析手法  
の信頼性向上

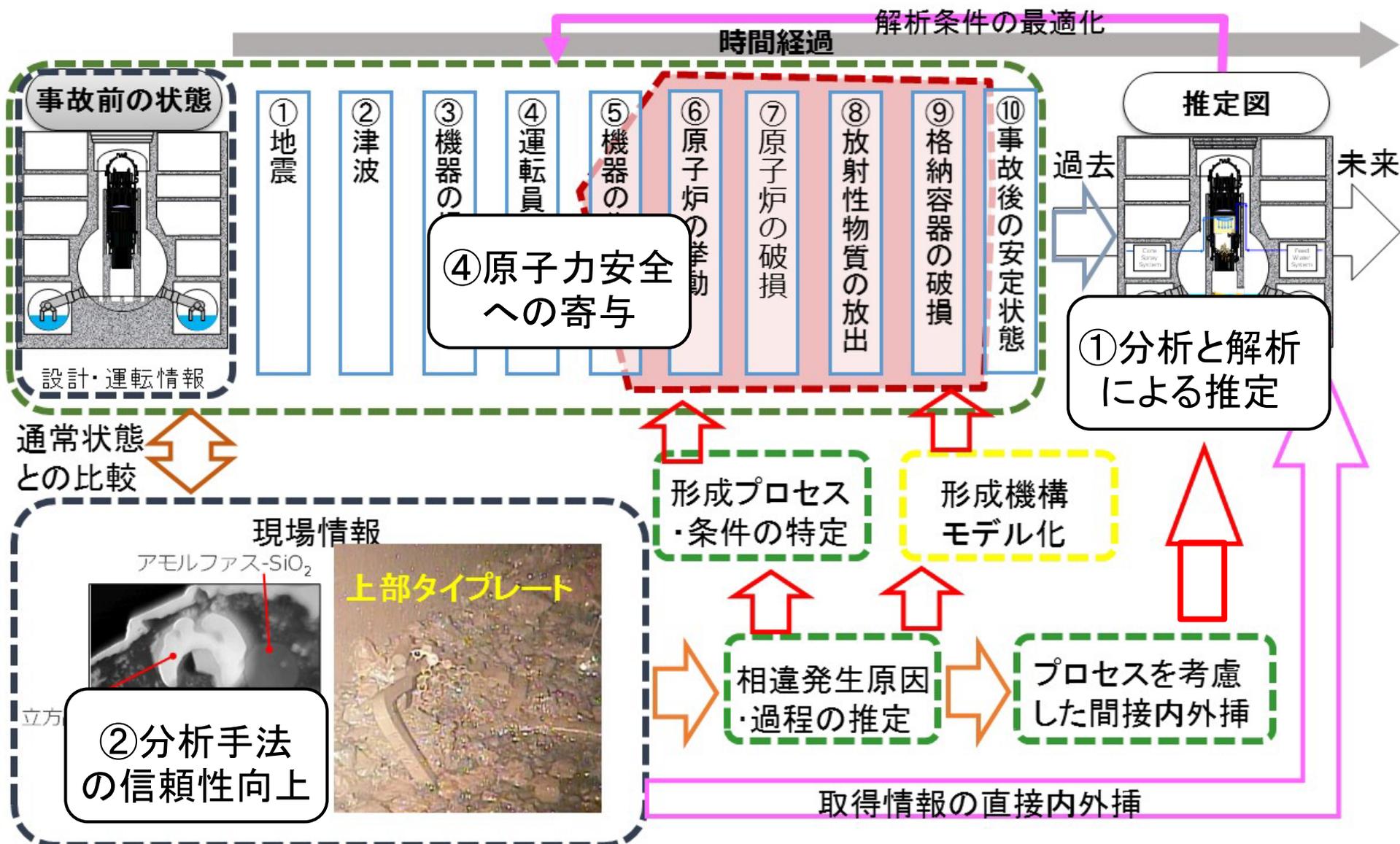
非破壊測定を含む取り出された燃料デブリの分析評価手法を確立する。

③ 処分概念  
確立への貢献

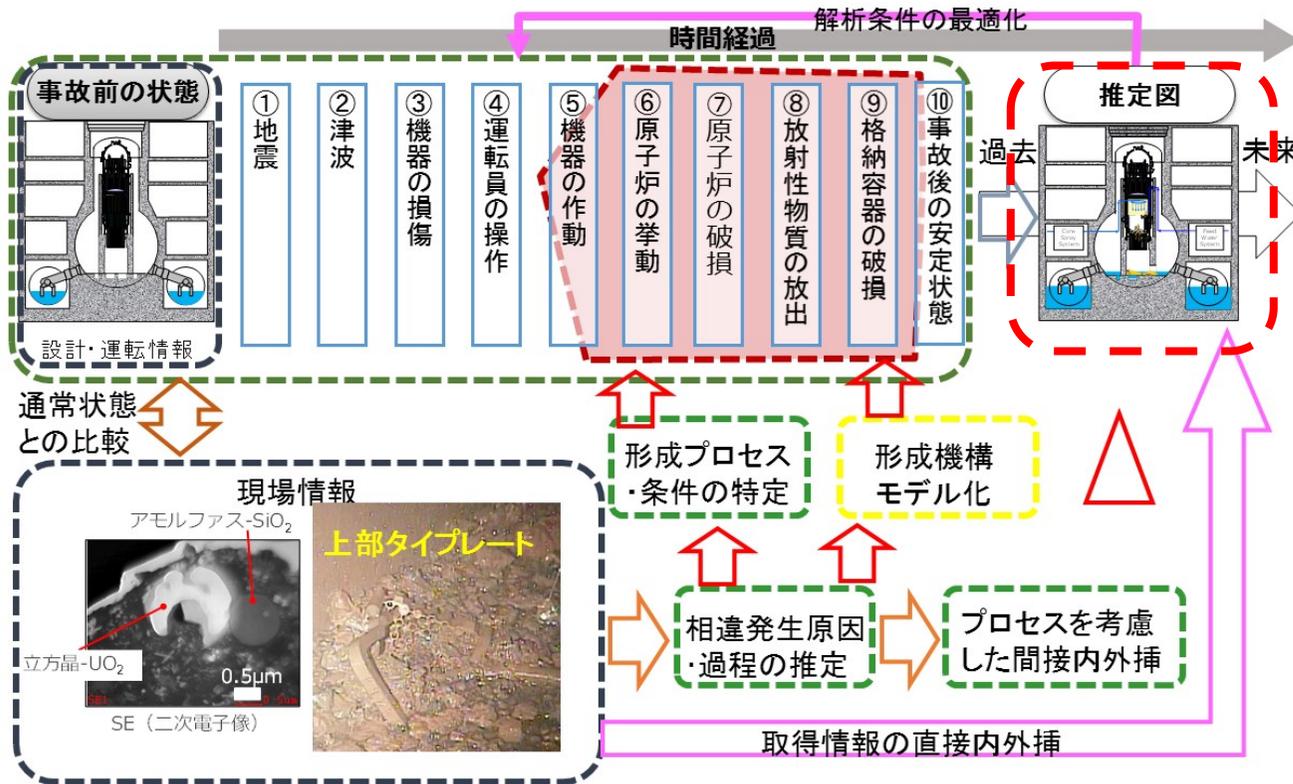
燃料デブリ取り出し及び保管時の安全を確保し、処分概念の技術候補を提示する。

④ 原子力安全  
への寄与

得られた知見を結集し、原子力安全にも寄与する。

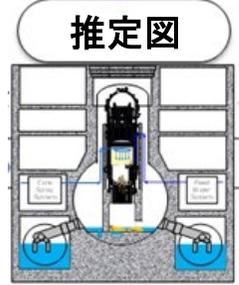


事故進展分析とサンプル分析を一体として進めることで、理解をさらに深めることが可能



炉内状況把握の検討と  
デブリ性状把握の検討の  
協働により、推定図には  
デブリ情報も付加される

JAEA/CLADSの研究活動からの  
アウトプット(デブリ情報付き推定図)



必要に応じ  
情報を参照

廃炉に関わる開発・評価

③処分概念  
確立への貢献

- 過去の経緯から、炉内状況把握とデブリ性状把握の研究の成果はそれぞれに存在
- 事故進展分析結果とサンプル分析結果（将来のデブリ分析含む）に炉内状況把握とデブリ性状把握の研究者が容易にアクセスできるように管理
- DebrisWikiというWiki形式を用いたサイトを構築し、後世へもつながる実務者用データベースとして活用できるよう、現在整備を進めている。

debris Wiki

事故進展の推定

事故時におけるプラント状態とその後の状態変化の関係を図1に示す。1Fの各号機では、原子炉スクラムから炉心溶融、RPV・PCV(ワンダリ)の破損、水素爆発、放射線物質放出等、号機毎に異なる様々な事故事象を経て安定状態に至った。安定状態の中でも、摩耗や腐食等の変化を経て、現在の推定図に示されている状態となっていると予測される。ここでは、スクラムから冷温停止までの事象の評価・予測結果を示す。

まず、基礎情報として、2011年3月11日地震補正予算「廃炉・汚染対策推進補助金」総合的な炉内状況把握の高度化で検討された事故進展<sup>[1]</sup>をもとに、原子力機構が別途検討した炉心溶融・炉心物質移行挙動<sup>[2]</sup>を加味して、

事故進展に関する情報

debris Wiki

上部クラスト及び溶融プールから採取された燃料デブリ試料の分析結果（微細構造、元素組成）

概要

TMI-2事故後の上部クラスト及び溶融プールから採取された燃料デブリ試料の微細構造、元素組成等を調べ、その生成プロセスを推定。<sup>[1]</sup>

- EPMA、中性子線分析などの分析結果（図1参照）から、ひとつの試料におけるEPMAによる点組成のばらつきは非常に小さい。⇒ 溶融していた、あるいは融点直下の温度（～2600K）での維持を示唆。

試料	酸化物相	金属相
K09-P2-F 上部クラスト	c-(U <sub>1-x</sub> Zr <sub>x</sub> )O <sub>2+y</sub> , x~0.05 t-(Zr <sub>x</sub> U <sub>1-x</sub> )O <sub>2</sub> , x~0.95 (Fe,Cr)O <sub>x</sub> (spinel?)	主要相: γ-(Fe-Ni) マイナー相: Ag-In-Sn, Ni-Sn, Te-Ag-Se-Cd
G08-P11-H 上部クラスト	c-(U <sub>1-x</sub> Zr <sub>x</sub> )O <sub>2+y</sub> , x~0.06 t-(Zr <sub>x</sub> U <sub>1-x</sub> )O <sub>2</sub> , x~0.9 (Fe,Cr)O <sub>x</sub> (spinel?)	主要相: γ-(Fe-Ni) マイナー相: Ag-In-Sn, Ni-Sn
G08-P8-C 溶融プール	c-(U <sub>1-x</sub> Zr <sub>x</sub> )O <sub>2+y</sub> , x~0.09 t-(Zr <sub>x</sub> U <sub>1-x</sub> )O <sub>2</sub> , x~0.9 (Fe,CrAl)O <sub>x</sub> (spinel?)	A few small droplets

過去の事故(TMI-2)に関する情報

- これまでの炉内状況把握と燃料デブリ性状把握の研究について概観し、将来の両研究の目指すべき方向性についてまとめた
- 事故進展分析とサンプル分析を一体的に進めることで、燃料デブリの取り出しに資する、原子炉・格納容器・燃料デブリに関する情報を信頼性を高めつつ提供するための枠組みを構築した
- 上記の取り組みを効率的に進めるための、これまでの研究成果をとりまとめたデータベースを整備していく

## ② 燃料デブリ取出しに向けた研究開発

廃炉環境国際共同研究センター 炉内状況把握 Div.  
燃料熔融挙動解析 Gr. 溝上 伸也

### (1) はじめに

燃料デブリ取り出しに関わる CLADS の研究には、燃料デブリ性状把握のための研究と炉内状況把握のための研究があります。前者は 1F で発生していると推定されている燃料デブリの特性（化学的特性、物理的特性等）の把握に向けた研究を模擬燃料デブリの作製により実施し、後者は原子炉内の状況の詳細かつ正確な把握のため、事故が起きてから原子炉の燃料が実際にどのような経過をたどっていったのかという事故進展の分析を研究の対象としていました。現時点においても、この枠組みは継続していますが、廃炉の進展に伴い事故炉へのアクセス性が高まったことにより、現場からの情報が蓄積されるにつれて、その関係が変化してきています。そのため、本報告ではその状況変化を踏まえた今後の CLADS における燃料デブリ取り出しに向けた研究開発のあり方について説明します。

### (2) 炉内状況把握のための研究について

炉内状況把握の研究では、「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）事業」（以下、「デブリ性状把握」という）を開始し、東京電力等との協働により図 1 に示す燃料デブリ分布の推定図を作成しました。その推定図は、事故解析、データ分析、現場からの情報を総合的に評価して作成されたものです。この事業は 2017 年度終了ですが、その後も事故進展分析を継続し、現在では、図 2 に示すように、事故の最終形態である推定図に至るまでの途中経過についても炉内の状態変化を捉えられるようになってきています。

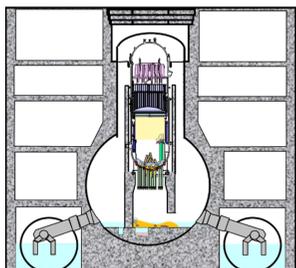


図 1 燃料デブリ分布の推定図(2号機)<sup>1)</sup>

2号機の燃料デブリの分布(推定)を示しています。もともと燃料があった炉心部にはほとんど燃料は無く、多くは原子炉底部に存在し、床にも一部落下しています。

このような事故進展の分析は、CLADS で実施している高温時の原子炉下部構造と燃料デブリの相互作用を確認する実験や、蒸気中に含まれるセシウムと鉄系材料との化学的結合を確認する実験により明らかになったメカニズムを時系列に従って、適所に適用することにより高度化していく形で進められています。また、2011 年から現在に至るまでの原子炉・格納容器の経年変化に関する研究、例えば、格納容器内への酸素の流入の腐食への影響を評価する研究を実施することで、燃料デブリの取り出し時の原子炉・格納容器の状態をより信頼性の高い形で、廃炉事業者に提供することが可能となります。

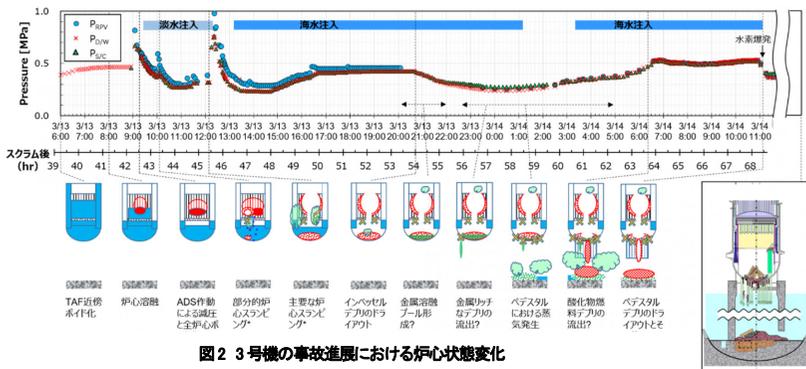


図 2 3号機の事故進展における炉心状態変化

事故時の原子炉圧力  $P_{Priv}$ 、格納容器圧力  $P_{Psv}$ 、 $P_{Sic}$  を細かく評価することで、原子炉の状態（水位、溶解状況）の変化を理解することができます。

### (3) 燃料デブリ性状把握のための研究について

燃料デブリ性状把握の研究では、以前から実施されて

いた「廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握）事業」（以下、「デブリ性状把握」という）について、模擬デブリを用いたデブリの性状把握及び実際の事故炉から回収されたデブリを分析するための手法の開発を実施してきました。また、2017 年度の炉内状況把握の終了に伴い、同事業が手掛けた、事故炉から採取されたサンプルから抽出されたウランを含有する微小粒子の分析も実施しています。この分析は将来の実デブリ分析につなげるために重要と位置付けられています。

図 3 にウラン含有粒子の分析結果の例を示しますが、事故前のウランペレットと同じである立方晶の二酸化ウラン（被覆管の材料であるジルコニウムを含む）が確認されている一方で、炉内構造物の材料である鉄系の材料の混合・析出も確認されています。このことから、実際の燃料デブリも事故時の燃料熔融挙動を反映し複雑な組成かつ不均質な構造を持つことが推定されます。

立方晶  $(U, Zr)O_2$   $Fe_3O_4 + FeCr_2O_4$

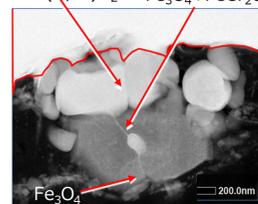


図 3 2号機で採取されたウラン含有粒子の TEM 画像<sup>2)</sup>

2号機の 5 階で採取されたウラン含有粒子の断面図。ウラン燃料と同じ立方晶であること、ステンレス製炉内構造物の材料である鉄・クロムが確認できます。

実デブリも含めて、その性状を把握するためには、それを支える信頼性の高い分析技術の確立が必要であるため、燃料デブリの分析技術の標準化も併せて進められています。また、燃料デブリの基礎知識となる崩壊熱や燃料中のウランやプルトニウム、核分裂生成物の存在量の解析評価を東京電力から燃料設計情報の提供を受けて実施するとともに、模擬燃料デブリを用いた燃料デブリの基本特性の分析も進められています。

### (4) 燃料デブリ取出しに向けた状況の変化

前述の 2 つの補助事業、炉内状況把握とデブリ性状把握は異なる分野の異なる内容を実施する事業として進められてきましたが、ウラン含有粒子の分析の開始を契機に状況が変化しつつあります。すなわち、ウラン含有粒

子は溶解状態にある燃料デブリから発生したものであるため、事故の進展と密接なつながりがあります。そのため、ウラン含有粒子の分析結果から、その粒子が経験した事故の状況を推測できる可能性があります。例えば、ウランと鉄を含むがジルコニウムを含まない粒子は蒸発により生成されたと推定されます。ウランはジルコニウム製被覆管の中にあるので、ウランが鉄と混ざるためには、まずジルコニウムと混ざり、その後鉄と混ざります。そのため、この粒子はジルコニウムが凝縮蒸発性であるという特徴が影響したと考えられ、このことから、2号機では、燃料デブリからごく一部が蒸発するほどに高温化したという事故の特徴を引き出すことができます。

このように、燃料デブリの性状を把握するための研究結果から事故進展に関わる情報も得られる状況になっています。また一方で、事故進展に関する研究においても、燃料デブリの性状に関連する情報が得られるようになってきました。前述の原子炉下部構造と燃料デブリの相互作用の確認実験は、実際に燃料模擬物質が原子炉の炉内構造物を巻き込みながら溶解していく状況を模擬したものです。そのため、実験の副産物である溶解物は、事故進展情報をもった試料として、模擬デブリを用いたデブリの性状を把握するための研究に使用することもできます。

さらに、図 2 で示したように、事故進展の各時間帯における燃料の状態及びその雰囲気条件は、事故進展解析による評価によっても、また、ウラン含有粒子・将来の実デブリ分析の結果からもその生成過程として予想される炉内の状態という形で評価することができますので、事故進展研究、デブリの性状把握の両方から高度化することが可能です。その結果として、デブリの性状に関する情報を追加した燃料デブリの推定図という形で高度化がなされ、廃炉へのインプットとすることが可能です。

なお、炉内状況把握、デブリ性状把握とスタートが異なる研究であったため、両者が一体的に進んでいくためには、分散した情報をまとめ、分野の異なる研究者が密なコミュニケーションが取れる状況を作ることが重要です。現在、CLADS では、双方の研究者が情報を持ち寄り、一次情報を参照しながら検討を実施するためのプラットフォーム「debrisWiki」の整備を進めています。

### (5) まとめ

本報告では、事故進展理解に関する研究、燃料デブリの性状理解に関する研究をとりまく現在の状況を整理し、両者が有機的に結合して研究を進めていくための環境整備の状況と、今後の方針を示しました。

1) Yamashita, Comprehensive Analysis and Evaluation of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2. Nucl. Technol. 1-21  
2) 東京電力 HD, 1-3 号機格納容器内部調査関連サンプルの分析結果, 2020.11.26, 第 84 回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合