炉内状況把握と燃料デブリ性状把握に関する最近の成果

2022年10月27日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門

本資料には、IRID が補助事業者として実施した資源エネルギー庁の平成26年、30年、31年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金（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が含まれます。本資料を断りなく二次使用することを禁じます。

本資料には、廃炉・汚染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（燃料デブリの分析精度の向上及び熱挙動の推定のための技術開発））に係る補助事業の成果が含まれます。本資料を断りなく二次使用することを禁じます。

未来へげんき
To the Future / JAEA

これまでの成果・課題と最近の研究成果

【これまでの成果】

東電との協働のもと、活用できる全ての知見・データを統合し、**炉内状況推定図を作成。**

- 現場調査の結果、測定データ等
- 模擬実験結果、過去の知見
- シミュレーション・解析による推定

統合

模擬物質や大型MCCI（溶融燃料とコンクリートの相互作用）試験により**燃料デブリ特性リストを作成。**

【課題】

直接見えない部分の予測をするため、**事故進展シナリオの更なる理解が必要。**

※格納容器（PCV）下部（ペデスタル）に堆積したデブリの深部、圧力容器（RPV）内の残留デブリ及び圧力容器破損の状況など。

燃料デブリ分析に備え、未知の物質の分析技術が必要。

＜今回報告＞

【最近の研究成果】

RPVの破損や破損後の燃料デブリの移行・堆積など主要事象の**事故シナリオの精緻化・評価を踏まえ、炉内状況推定を高度化（2/３号機）。** スライド2～4

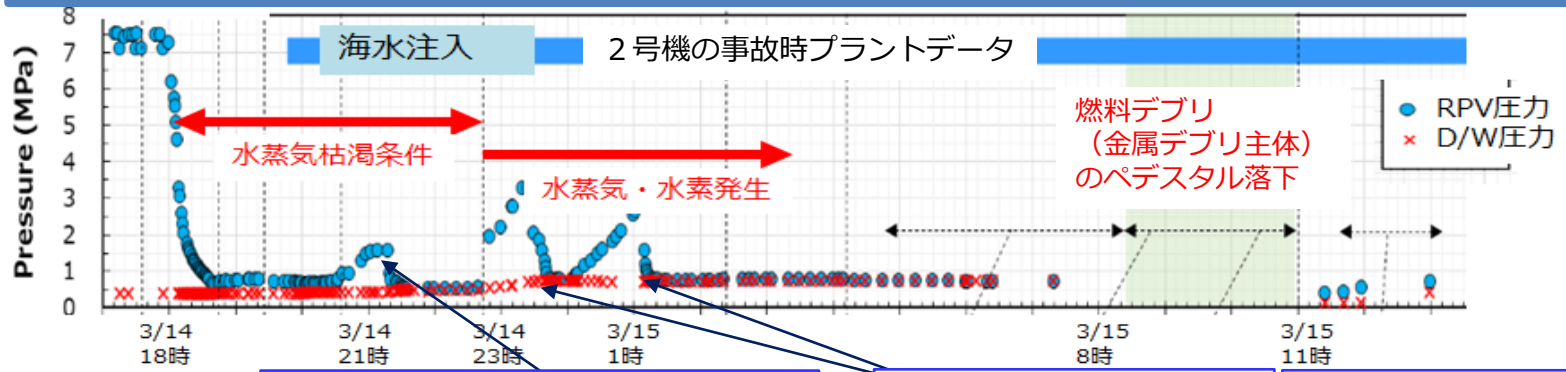
内部調査で採集されたウランを含む未知の微粒子を分析・評価しつつ、分析技術・方法を整備。 スライド5

⇒**検討結果を統合するデータベース**を東電等と共有し、**燃料デブリ取り出し戦略検討**に反映。 スライド6

⇒**今後の研究開発や分析準備の取組みに反映（2030年頃の取り出し規模の拡大に向けて）。** スライド7

事故進展シナリオの精緻化による炉内状況推定の高度化：２号機

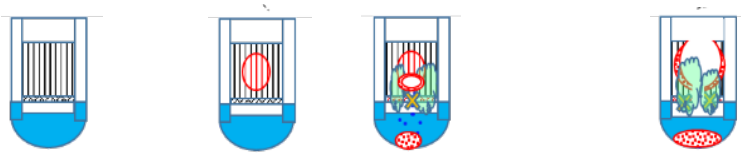
燃料デブリの試験的取出しが始まる**２号機**と取り出し工法の検討中の**３号機**について、内部調査、解析、模擬試験結果をもとに、RPVの破損や破損後の**燃料デブリの移行・堆積**等の事故進展シナリオを精緻化し、得られた知見・情報を反映して**炉内状況推定を高度化**。

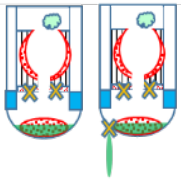


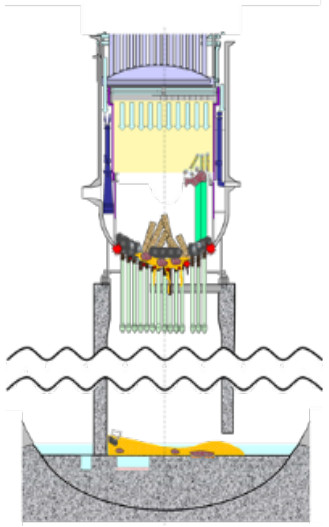
・金属デブリのRPV下部への先行落下

・粒子状の燃料デブリのRPV下部への連続的な落下
・連続的な圧力上昇
・デブリ酸化度の上昇

・金属デブリ再溶融
・燃料デブリ昇温（粒子状を維持）







２号機の炉内状況推定図

金属デブリ：燃料デブリのうちステンレス鋼や炭化ホウ素、金属ジルコニウムなど金属成分が多いもの

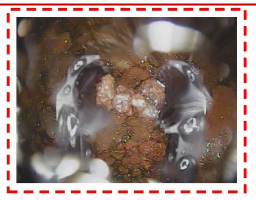
事故時プラントデータと解析により各段階の事故進展を理解

新たに得られた知見

- ❑ **RPV下部での燃料デブリ堆積後の再昇温過程**が事故進展に大きく影響。**金属成分の多い燃料デブリが先行溶融（1000～1300℃）し、RPVを局所破損し、ペデスタルに落下**したと推定。
- ❑ ペデスタルに堆積したが温度が低いためコンクリートを溶かしにくく、事故直後に想定されていた**MCCIはほとんど起きていない**と推定。

RPV内：粒子状燃料デブリ残留

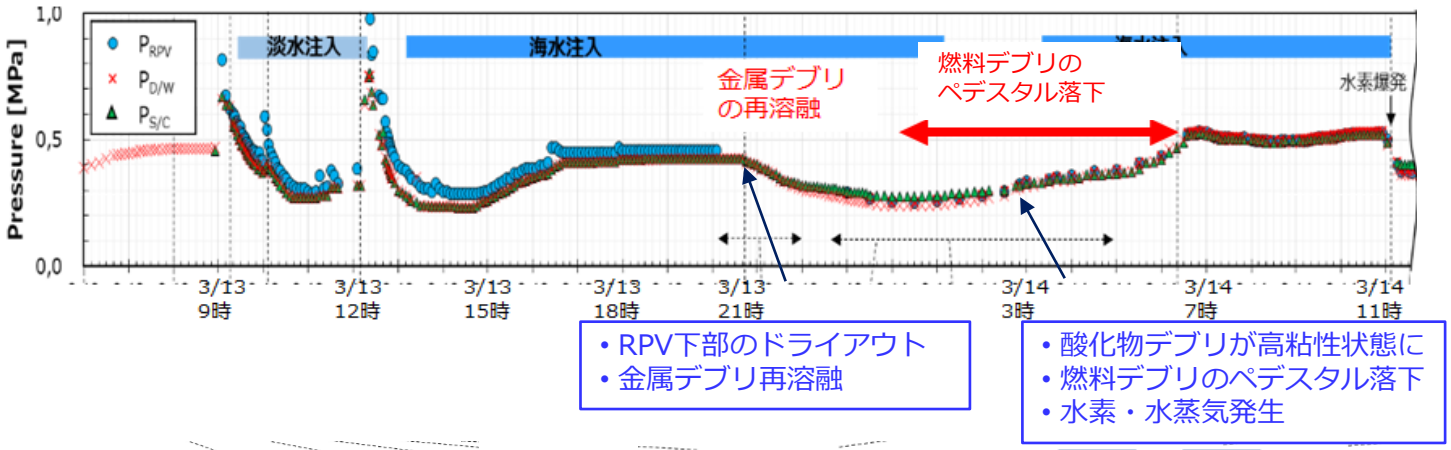
ペデスタル内：金属デブリ凝固・堆積酸化物デブリ混入

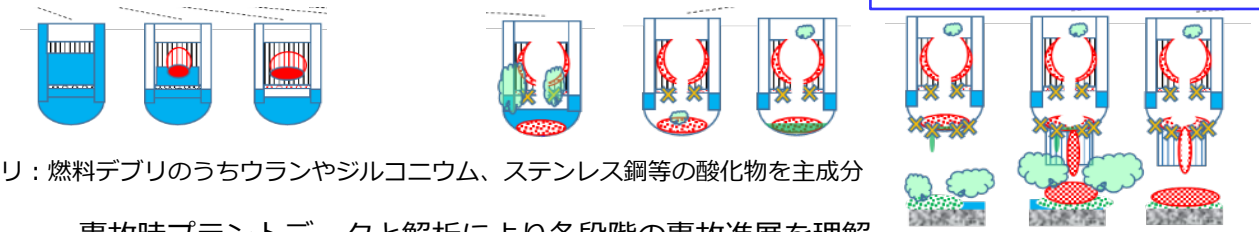


２号機の内部調査結果（2019年2月）

事故進展シナリオの精緻化による炉内状況推定の高度化：３号機

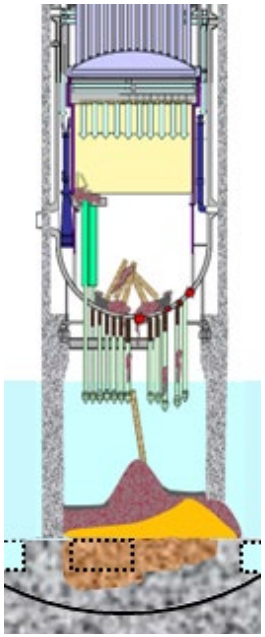
３号機の事故時プラントデータ



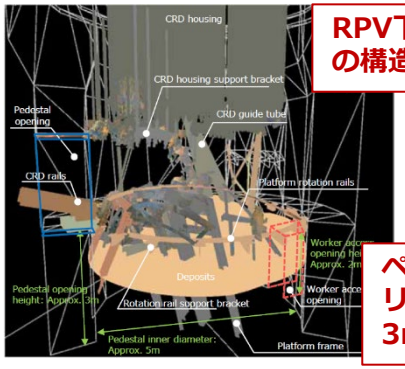


酸化物デブリ：燃料デブリのうちウランやジルコニウム、ステンレス鋼等の酸化物を主成分

事故時プラントデータと解析により各段階の事故進展を理解



３号機の炉内状況推定図



RPV下部やペデスタル内の構造物は大きく破損

ペデスタル床コンクリート面の上に最大3mの堆積物

3号機の内部調査結果（2017年7月）

新たに得られた知見

- ❑ **RPV下部での燃料デブリ堆積後の再昇温過程**が事故進展に大きく影響。金属成分の多い燃料デブリが先行溶融（1000～1300℃）後、**酸化物の割合が多い燃料デブリが高粘性状態を形成**（固液混合状態：2000～2300℃）し、RPVを広い範囲で破損させ、数時間かけてペデスタルに移行。
- ❑ ペデスタルに堆積したが、燃料デブリが高粘性でコンクリートと直接反応しにくく、事故直後に想定されていた**MCCIはほとんど起きていない**と推定。

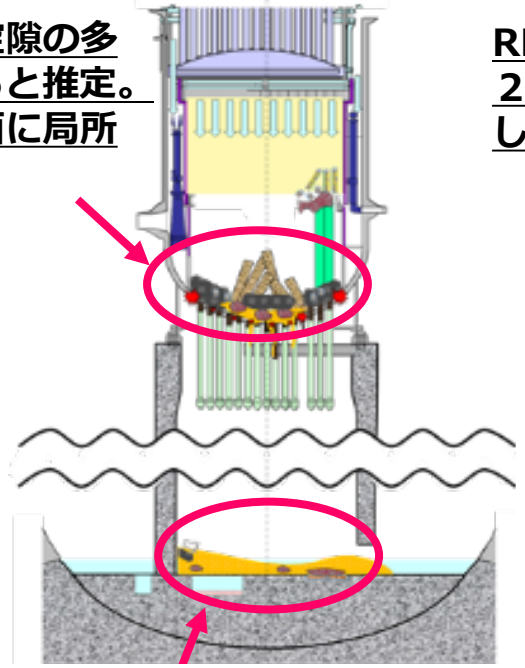
https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2018/d180426_08-j.pdf

炉内状況推定図への知見の反映

燃料デブリの分布について従来の推定の妥当性を確認し、**炉内状況推定図に燃料デブリの特性などの知見**を反映。また、解決すべき今後の課題を明確化。

２号機

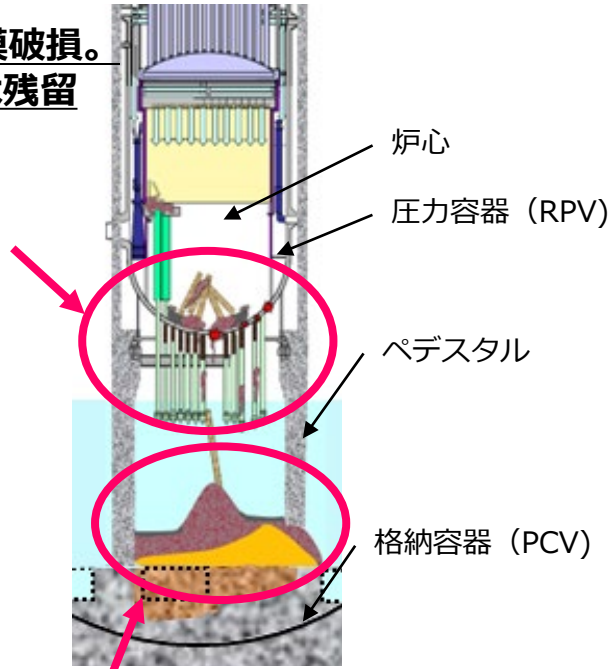
燃料デブリ本体が、空隙の多い状態で堆積していると推定。側面に大破損孔、底面に局所破損孔が形成。



金属デブリ主体で溶落・凝固・堆積。酸化物デブリも一部混入。
MCCIはほとんど起きていない。
検討すべき課題: RPV下部での再溶融状態と燃料デブリ特性の関係の解明

３号機

RPV下部ヘッドが大規模破損。２号機に比べ、重量物は残留していない。



高粘性デブリの移行・堆積。
内部に空隙が多い可能性。
堆積物の特性が多様化している可能性。
MCCIはほとんど起きていない可能性。
検討すべき課題: RPV下部での再溶融状態と燃料デブリ特性の関係の解明

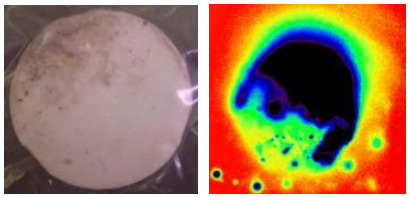
⇒圧力容器内部の状況についても、今後詳細解析が必要。

燃料デブリ性状把握：最近の成果

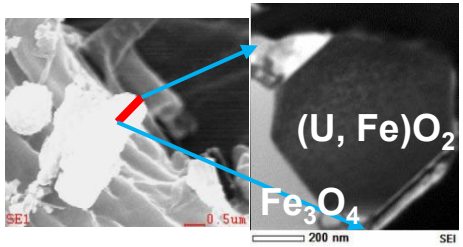
- 内部調査で採取した**未知の微粒子（ウランを含むと想定）**の分析を通じ、輸送、分析手法の選定、試料の前処理、定性・定量分析、分析データの評価という一連の**手順を確認し、燃料デブリの性状把握のための分析技術と品質管理方法を整備。**

未知の微粒子（ウランを含むと想定）の分析

- 茨城地区の分析施設にサンプルを受け入れ、分析。
- 未知試料（**内容物が不明**）について、定性・定量分析（バックグラウンドやピーク・波長等の適切な設定、妨害元素・干渉の検討、等）
- 得られた分析データと評価の過程（**品質管理**）及び分析データからの推定とその根拠をデータベース化（**debrisWiki**）
- **品質管理された分析データと、JAEAでの推定結果を、デブリ取出し工程検討の基礎知見として東電等の関係機関に提示し、共同解析**。さらに、OECD/NEAの国際プロジェクトに提供、国際的な共同解析を実施。



サンプル外観（左）と
イメージングプレートによる高汚染部位の同定



SEM/EDXによる　TEMによる
ウラン粒子の検出　相状態解析

大熊第2棟完成予想図

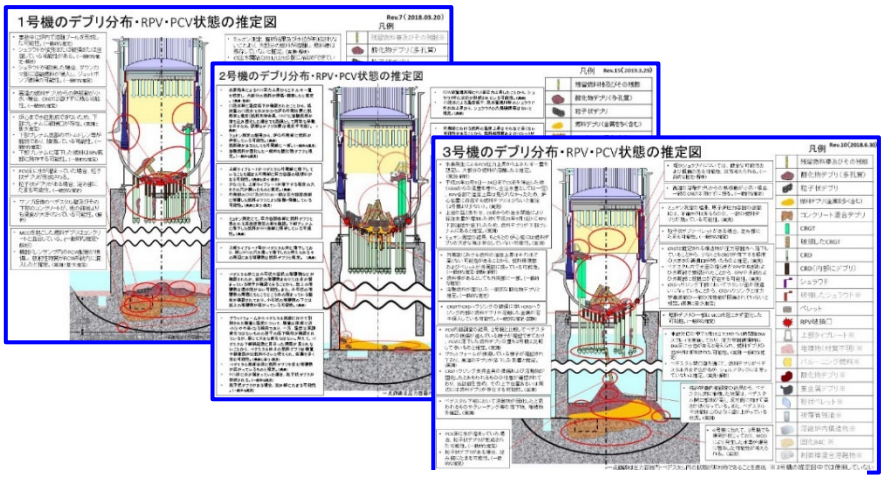
今後、燃料デブリの試験的取出しや、取出し規模の拡大に向けて、分析技術や品質管理方法を大熊第２棟、茨城地区の分析施設に反映。

関連データ・情報の統合：debrisWiki（デブリウィキ）～炉内状況と燃料デブリのデータベース～

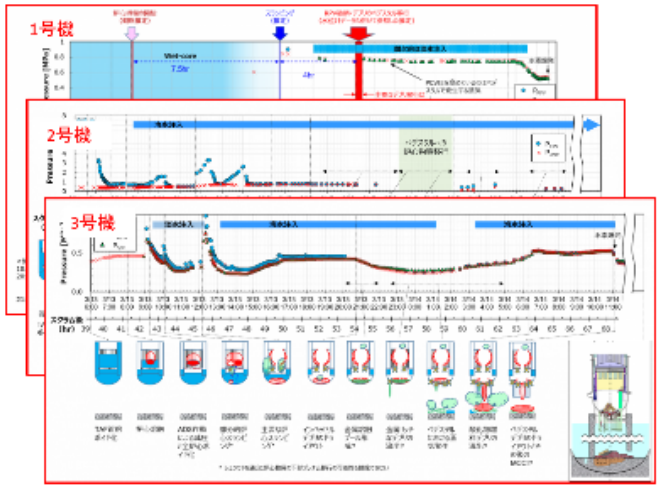
炉内状況推定図や分析データを廃炉基盤データベースとして統合。
多くの分野の専門家・技術者が最新知見を共有できる仕組みを整備。

debrisWiki　（一部を一般にも開示）

https://fdada-plus.info



1～3号機についての「デブリ分布・RPV・PCV状態の推定図



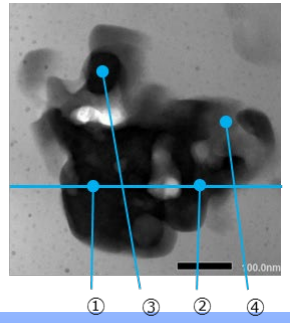
最も確からしい事故進展シナリオ

主な元素の組成比※(at%)

	O	Mg	Al	Si	Cr	Fe	Ni	Zn	Zr	Ag	U
①	約70	0.2	0.3	0.2	0.1	3.0	0.0	0.3	0.1	0.7	24.7
②	約70	0.1	0.3	0.2	0.2	8.5	0.0	0.3	0.1	0.7	21.1
③	約70	0.0	0.4	0.0	0.1	3.0	0.0	0.2	0.1	0.7	23.1
④	約70	0.1	0.3	0.0	0.2	12.1	0.0	0.2	0.0	0.5	14.7

※元素オーバーラップは現在評価中

ウラン含有微粒子などサンプルの分析結果



U微粒子の組成分析

今後の取り組みの方向性：2030年の想定からのバックキャスト

１F廃炉現場の状況（2030年想定）

- ２号機からの試験的取出し～段階的取出しが進捗し、実デブリ分析データや格納容器内部情報が拡充される。併せて、分析ノウハウや炉内状況の理解が少しずつ精緻化する。
- ３号機からの取出しを開始する準備が本格化する。
- １F構内に新設される保管設備で、燃料デブリ等の保管が開始される。

上記の実現に向けた、JAEAにおける今後の研究開発の取り組み

- 実デブリ分析の需要拡大に応じ、**適切な品質管理**の下で実施、**データベース化**
- 内部調査、実デブリ分析結果等、最新情報で炉内状況推定図を高度化
  ①1号機格納容器内部調査結果の反映、破損・堆積メカニズムの推定
  ②試験的取り出しサンプルの分析と、その推定図への反映
  ③内部調査・分析結果を随時反映、取出し規模の拡大に向けた情報整理
- **debrisWikiをアップデート。**
- **大熊第２棟の整備**と分析の専門家の育成。
  ＃ 特に、分析戦略を立案・運営できる『**分析人材**』**の育成**
- 燃料デブリと廃棄物を仕分けするための**非破壊分析装置**の開発。

まとめ

〇燃料デブリの試験的取出しが始まる２号機と取り出し工法の検討中の３号機について、事故シナリオの精緻化を行い、炉内状況推定図に反映した。

- 2号機の試験的取り出し及び規模の拡大を安全に進めていくとともに、3号機を始めとする各号機の更なる規模の拡大におけるアクセスルート、取り出し工法を検討する際に、これらの結果が考慮される。

今後、東電との協働で事故進展シナリオと炉内状況の推定の精緻化を進める。

- **2号機：試験的に取り出される燃料デブリの分析で推定結果を検証し、取出し規模の拡大に向け、燃料デブリ特性や分布の理解を深める。併せて、圧力容器内の状況の推定精度を向上させる。**
- **3号機：格納容器底部に堆積する燃料デブリの取出しに向け、深さ方向の変化や内部状態の推定を進める。**
- **1号機：内部調査結果など新たな知見を踏まえ、今後炉内状況把握図を更新する。**

〇 燃料デブリ性状把握について、内部調査で採集された未知の微粒子（ウランを含むと想定）の分析を通じ、分析に関する一連の手順を確認し、基本的な分析技術と品質管理方法を整備した。

- **今後、燃料デブリの試験的取出しや、取出し規模の拡大に向けて、分析技術と品質管理方法を大熊第２棟、茨城地区の分析施設に反映する。**

さらに、これらの研究で得られた知見を他の事業の成果等の関連情報とリンクさせ、debrisWikiに集約し、更新を継続する。東電を始めとする関係機関と共有する。