



燃料デブリ



放射性廃棄物管理



環境回復



放射線共通研究・基盤

部門報告②

燃料デブリを探る ～JAEAのチャレンジ～



廃炉環境国際共同研究センター
センター長 岡本 孝司

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「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。

JAEAは原子力専門家として
シェルパをめざす

山岳隊であるNDF/東電のサポート



JAEAの研究開発成果と
放射性物質取扱い経験

◆ 核燃料・放射線の
専門家と施設群

福島第一原子力発電所の廃炉

頂上（ゴール）を目指して、
安全な登山道（戦略）を探している
いろいろなアプローチ（方法論）を考えている
尾根の向こうはまだよく見えていない

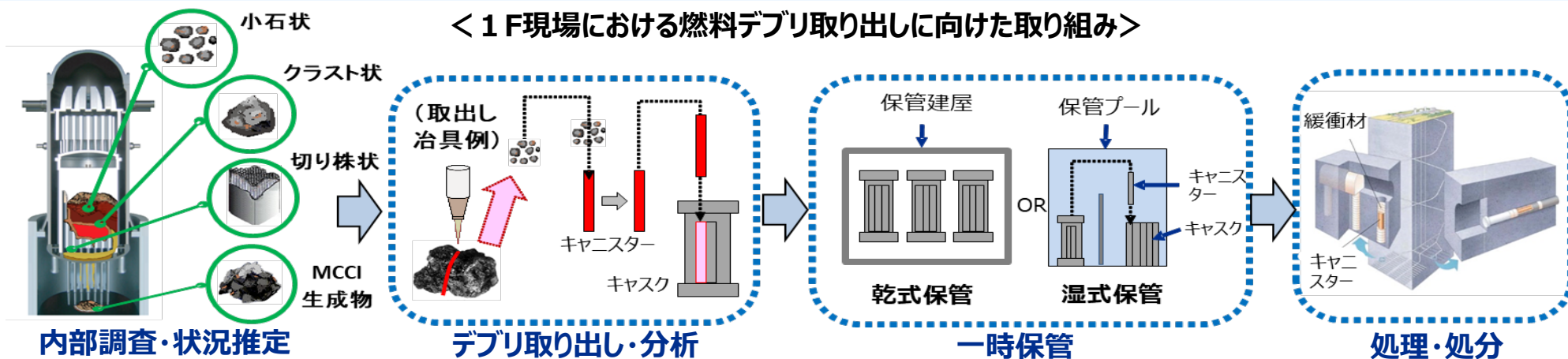
JAEAのミッション：

「基礎基盤研究を通じ、安全・リスク評価を行うことができる知識と技術の構築」



<https://fdada.info>

＜1F現場における燃料デブリ取り出しに向けた取り組み＞



＜主な研究開発＞

①原子炉内部の推定と燃料デブリの特性評価

事故進展の理解と炉内状況推定（実験・解析、炉内状況推定図） P.7

燃料デブリの性状把握（模擬物質、微粒子の分析） P.10

・燃料デブリの分析

②燃料デブリ取り出しにおける安全・リスク評価手法の確立

P.8 P.9 P.12 P.13 P.11

原子炉内部の線量率推定、放射線計測、可視化、DX技術、データベース化

特殊環境下の腐食挙動・健全性評価

燃料デブリの保管・管理技術（水素ガス発生対策、経年変化プロセスの解明）

研究開発課題設定の考え方

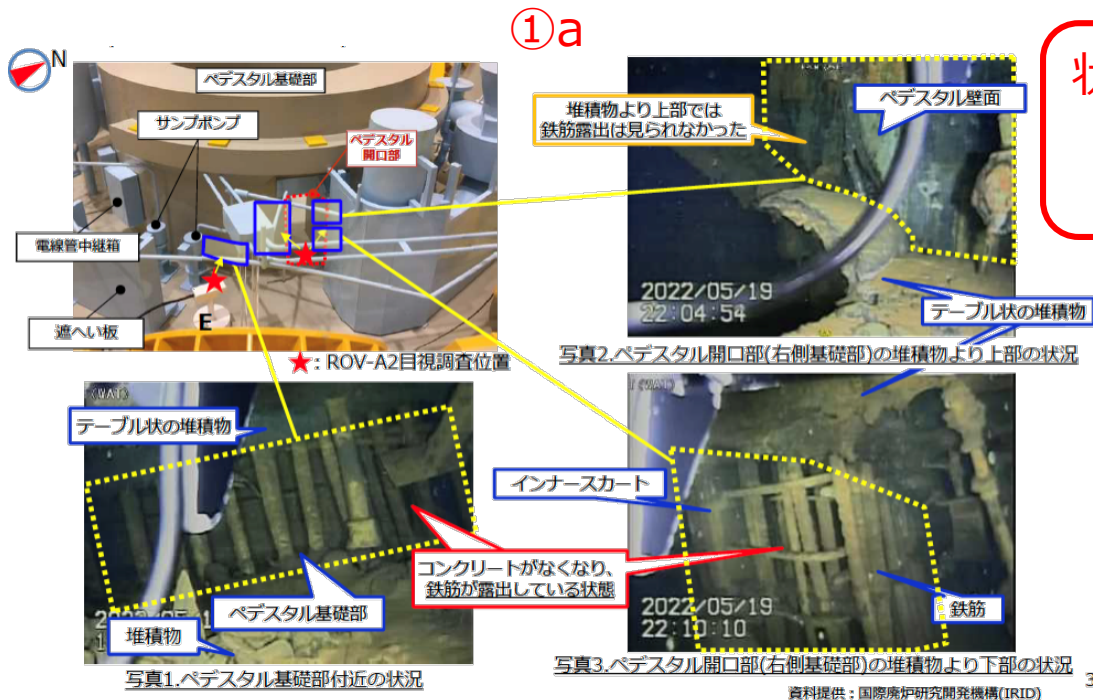
- 2030年頃に期待される1F廃炉の状況を想定
- 安全・リスク評価上の主要課題を認識
- これを達成するためにJAEAとして果たすべき役割を整理
- 研究開発の主要な優先課題を設定

③分析能力の向上と手法の標準化

分析技術の開発（現場での迅速その場分析、非破壊測定技術、標準化） P.14～16

分析設備の整備・アップグレード

状況①a：原子炉内部の状況が明らかになり、建屋内外の環境が改善されている。



ベデスタル開口エリアの調査状況

特定原子力施設監視評価・評価検討会（第100回）資料3を加工

安全・リスク評価上の主な課題

- 現場の状況や起こっている現象や施設内状況が十分に把握できていない状況
- 事故施設での現象や反応等の原理や原因が十分に同定できていない状況

状況①b：2号機の燃料デブリ取り出しの知見、3号機の工法検討結果を踏まえ、取り出し工法の検討が進んでいる。

- ・廃炉・汚染水・処理水対策事業の開発成果
- ・東京電力エンジニアリング成果
- ・国内外の技術知見

①b

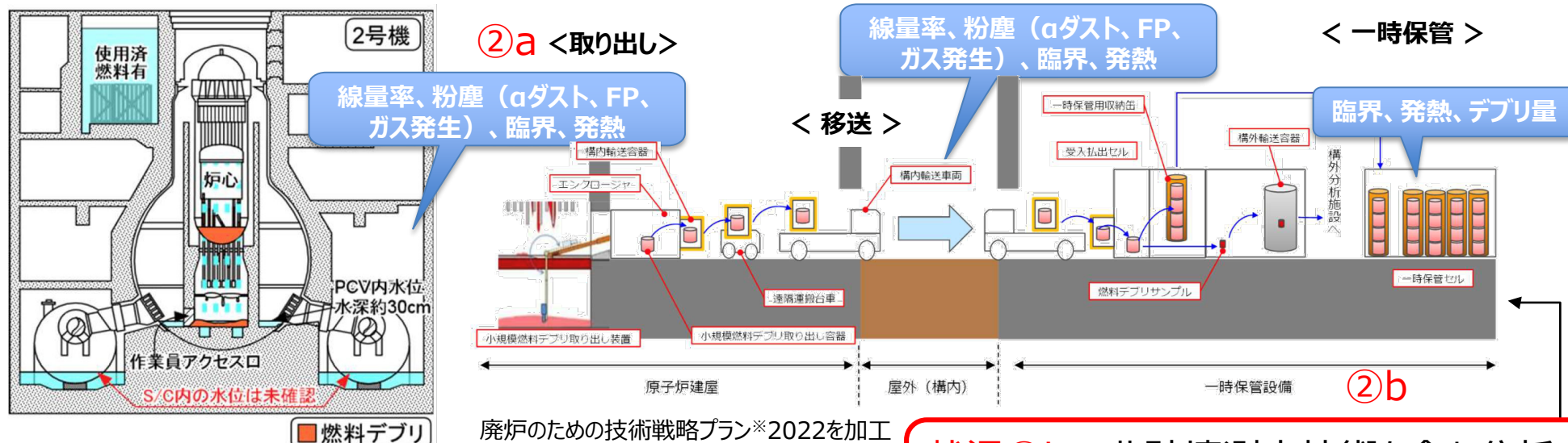


工法の検討フロー

研究開発の主要な優先課題

- 原子炉内部の推定と燃料デブリの特性評価
 - ✓ 堆積物の生成メカニズム解明
 - ✓ コンクリート消失メカニズム解明
- 燃料デブリ取り出しにおける安全・リスク評価手法の確立

状況②a：2号機の燃料デブリの取り出しが進み、燃料デブリ取扱の安全・リスク評価手法が確立されている。



安全・リスク評価上の主な課題

- 対象物質の性状や成分が未解明な状況
- 安全評価に必要なパラメータや反応特性が同定できてない状況

研究開発の主要な優先課題

- 原子炉内部の推定と燃料デブリの特性評価
- 取り出し・保管時の安全・リスク評価の手法の確立

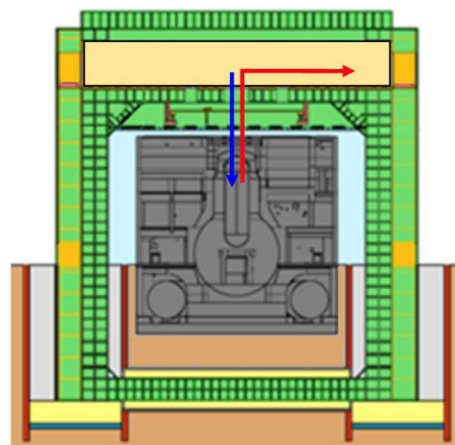
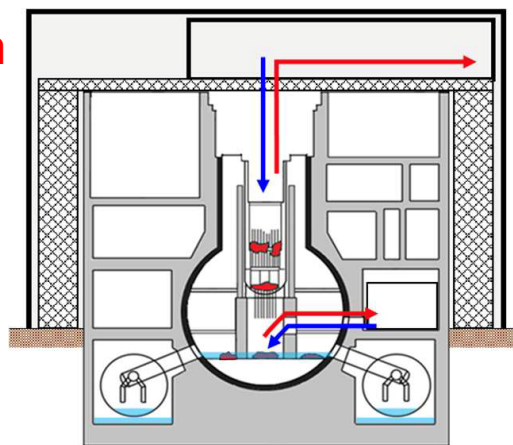
- 分析能力の向上と手法の標準化
 - ✓ 分析設備の整備・アップグレード
 - ✓ 1F現場での迅速その場分析・非破壊測定技術の開発

状況②b：非破壊測定技術を含む分析・評価手法が確立されている。



状況③a： 取り出し規模の更なる拡大（3号機）の戦略・工法の検討・選択が進み、取り出し作業の前段階まで準備が進んでいる。

③a



気中工法の一例

（上アクセスと横アクセスの組合せのイメージ図）

冠水工法の一例

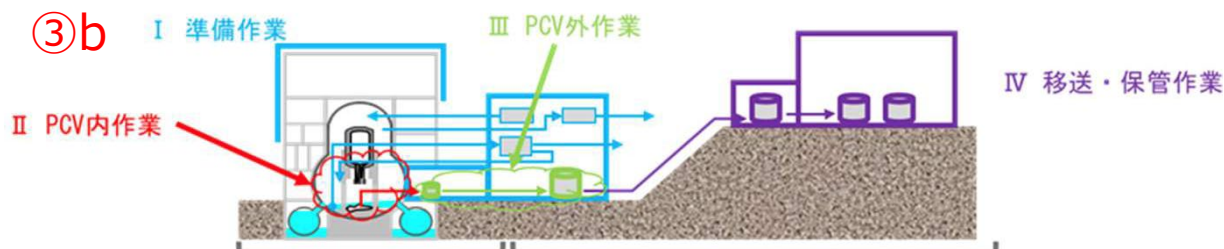
（船殻工法のイメージ図）

安全・リスク評価上の主な課題

- 安全評価に必要なパラメータや反応特性が同定できてない状況
- 特殊な装置の性能や耐久性に関して、実際の過酷条件場での実証経験が少ないこと

状況③b： 取り出し・移送・保管中の燃料デブリの安全・リスク評価手法が確立されている。

③b

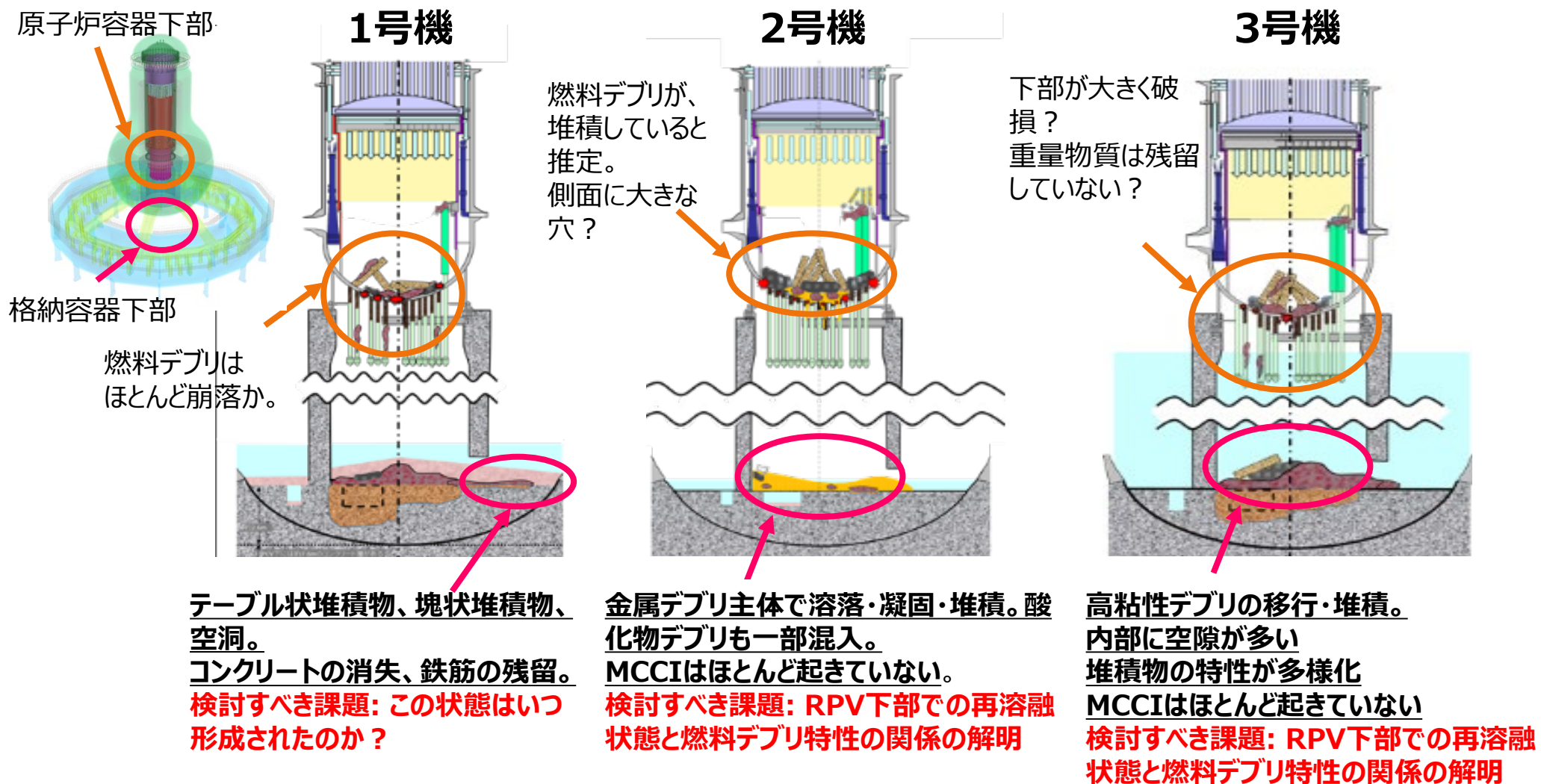


各作業フェーズのイメージ（プロセスの分割）

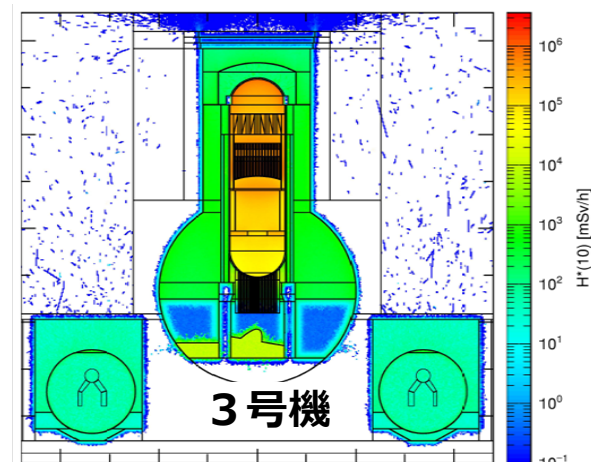
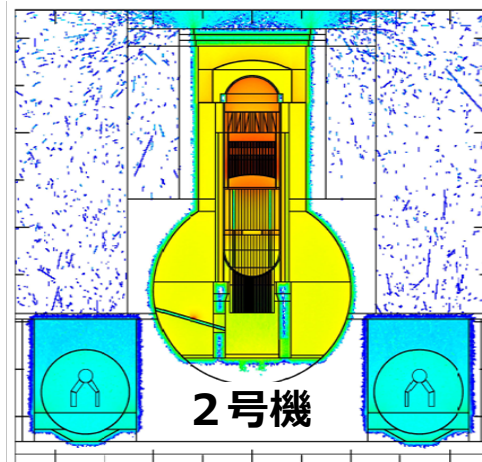
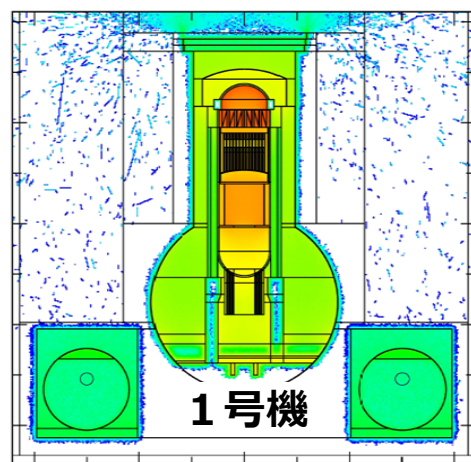
研究開発の主要な優先課題

- 原子炉内部の推定と燃料デブリの特性評価
- 燃料デブリ取り出しにおける安全・リスク評価手法の確立
 - ✓ PCV内へのアクセス
 - ✓ 線量率・被ばく線量の低減

- 少しずつ各号機の状況がわかってきたが、
原子炉容器内部（オレンジ部分）の状況はほとんどわかっていない。



- 燃料デブリ取り出し工法や事前調査のアクセス検討に資するため、東京電力HDなどによる内部調査結果や事故進展解析等の断片的情報を基に、**原子炉格納容器内の線量率分布を評価、可視化**。
- 3号機について、今後の段階的な**水位の変更**に対応した**線量率分布の変化予測**も可能とした。
- 任意の場所の線量率を的確に把握**できるツールとして活用できるようにした。



放射線量分布の推定図（原子炉容器内は100~1000Sv/h, 上側にセシウムが大量に存在）

フィードバック

- ・事故進展解析
- ・燃焼・放射化計算
- ・燃料デブリ性状把握
- ・ミュオン測定
- ・カメラ映像
- ・放射線量率測定

解析モデルの更新

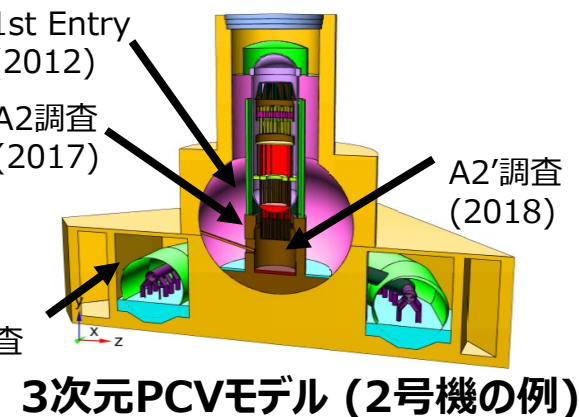
線量率分布解析

1st Entry
(2012)

A2調査
(2017)

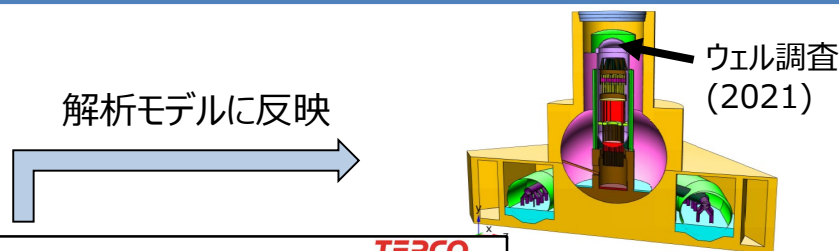
A2'調査
(2018)

トラス室調査
(2013)

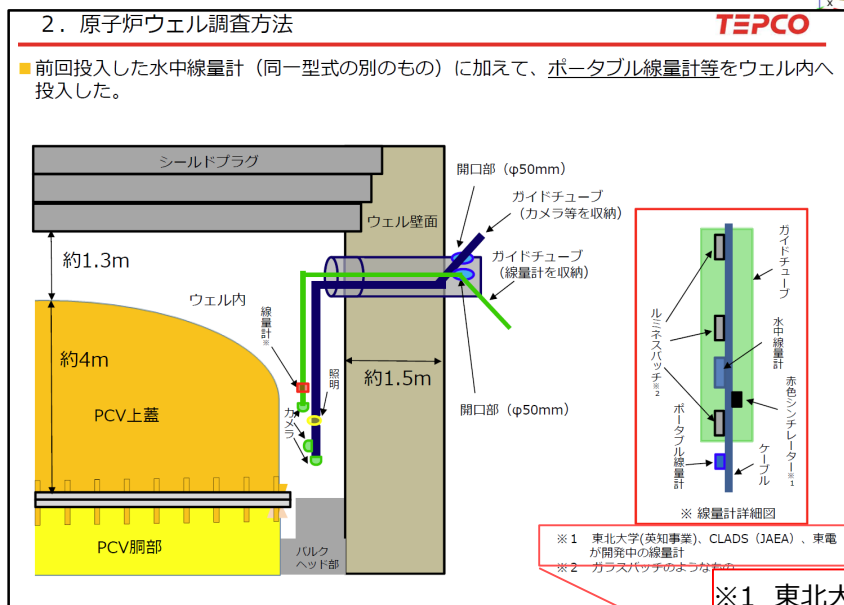


3次元PCVモデル (2号機の例)

- 2号機の原子炉ウェル*1内調査（2021年5月）に先立ち、測定点の線量率を評価し、線量率計（英知事業*2で開発）の選定など**作業計画立案に活用できた**。
- 測定結果を基に線量率分布の推定図を更新し、**より精度が高い情報として活用できるようにした**。



- *1 原子炉上部にある原子炉格納容器とシールドプラグの間の空間
 - *2 「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」
- 評価結果を更新（当初の評価よりも原子炉ウェル内の線量率が減少）



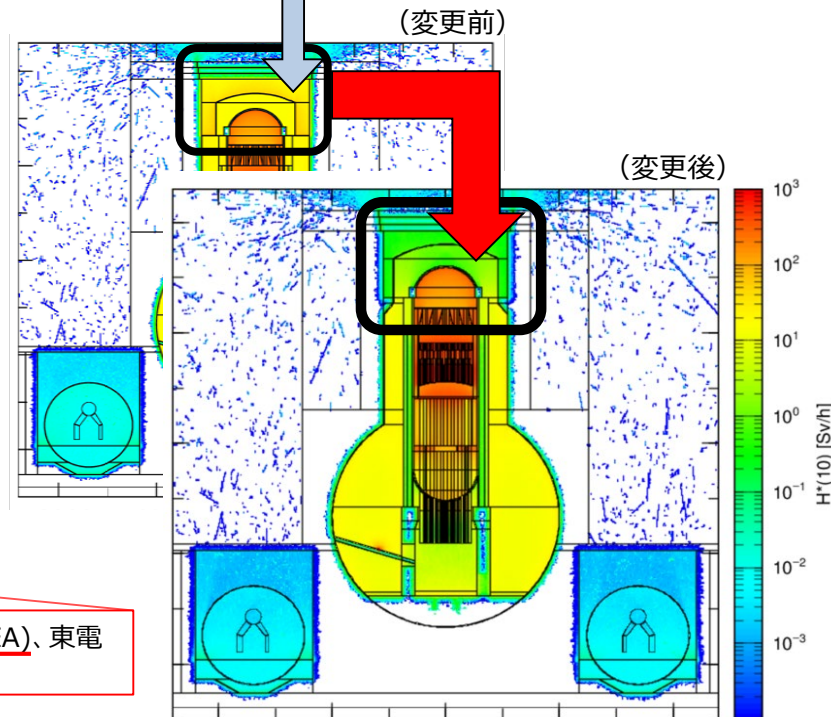
※1 東北大学(英知事業)、CLADS (JAEA)、東電が開発中の線量計

※2 ガラスパッチのようなもの

※1 東北大学(英知事業)、CLADS(JAEA)、東電が開発中の線量計

2号機原子炉ウェル内調査*3

*3 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第91回）
（令和3年6月24日）

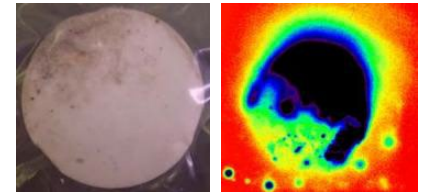


燃料デブリの**取り出し規模の拡大**に向け、内部調査等の事前検討や検証に活用すべく東電HDやIRID等と情報交換を随時行っている。また、試験的取り出し試料の分析結果を反映し、線量率分布の予測精度の更なる向上を図る。

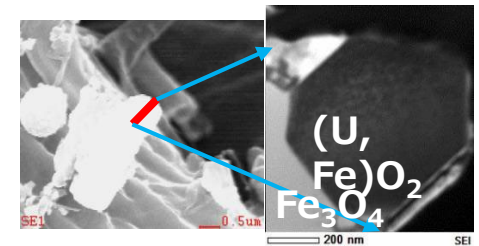
- 内部調査で採取した**未知の微粒子（ウランを含むと想定）**の分析を通じ、輸送、分析手法の選定、試料の前処理、定性・定量分析、分析データの評価という一連の**手順を確認し、燃料デブリの性状把握のための分析技術と品質管理方法を整備。**

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
ウラン粒子の検出

TEMによる
形状状態解析



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。

- 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ホーム
debrisWiki(English)

施設情報
1Fデータベース(公開資料検索)

炉内状況推定図
燃料デブリ・RPV・PCV状態の推定図
廃炉基盤データベース

事故進展
事故進展の推定
分析データ
1号機
2号機
3号機

燃料デブリ特性・報告書
燃料デブリの特性評価に係る研究
燃料デブリの経年変化特性の推定

施設情報(外部サイト)
燃料デブリモニタリングデータ
その他のコンテンツ
関係機関
廃炉における課題
未解決・未解決事項
委員会(委員限定)
委員会一覧

Yamashita Takuya トーク 個人設定 ページ ウォッチリスト 投稿履歴 ログアウト

G11 議論 問題 編集 ソースを編集 履歴表示 他 debrisWiki内を検索

1号機 原子炉建屋ウェルプラグ

目次 (非表示)

- 現場の様子
 - 内部調査結果
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
- 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
- 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
- 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
- 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
- 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス
 - 燃料デブリ・燃料物の生成プロセス

現場の様子 [編集] [ソースを編集]

内部調査結果 [編集] [ソースを編集]

2019年7月17日～8月26日に減圧操作ロボットによるウェルプラグの保持状態、汚染状態の調査を実施。ウェルプラグでは、水素燃焼の影響により瓦礫が散乱している状況。ウェルプラグ上段/中段に加え、下段も正常に位置づけられていることが確認された。上段/中段の下には、事故時の熱の影響又は経年変化によるものと推定される格子板が見られる。線量測定結果は、ウェルプラグの中央部に近づくほど線量が高くなる傾向（線量率最大値：2230 mSv/h(参考値)）。

→ 東京電力HD：1号機原子炉建屋オペレーティングフロアにおけるガレキ状況調査結果（追加調査）について（2017年9月28日）

1号機ウェルプラグ内部調査結果

debrisWiki（一部を一般にも開示）

<https://fdada-plus.info>

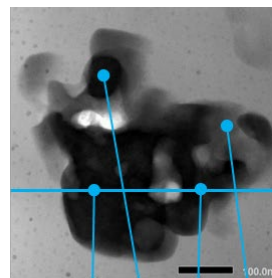


主な元素の組成比※(at%)

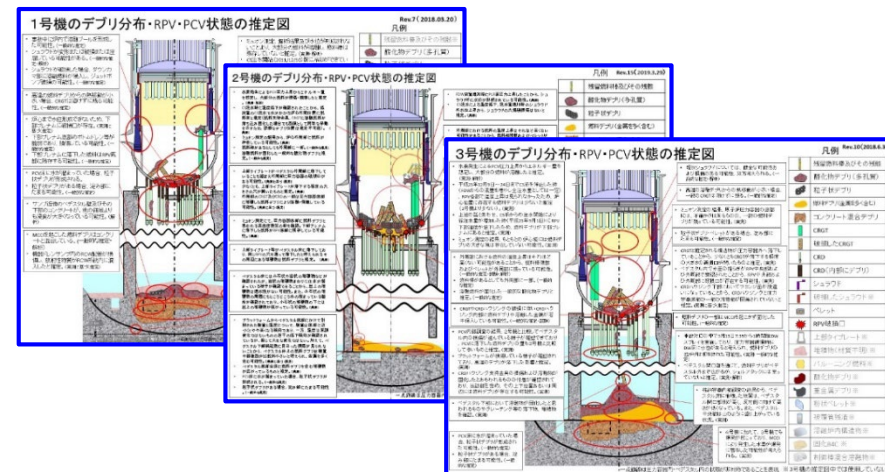
	O	Mg	Al	Si	Cr	Fe	Ni	Zn	Zr	Ag	U
①	約70	0.2	0.3	0.2	0.1	3.0	0.0	0.3	0.1	0.7	24.7
②	約70	0.1	0.3	0.2	0.2	8.5	0.0	0.3	0.1	0.7	21.1
③	約70	0.0	0.4	0.0	0.1	3.0	0.0	0.2	0.1	0.7	23.1
④	約70	0.1	0.3	0.0	0.2	12.1	0.0	0.2	0.0	0.5	14.7

※元素オーバーラップは現在評価中

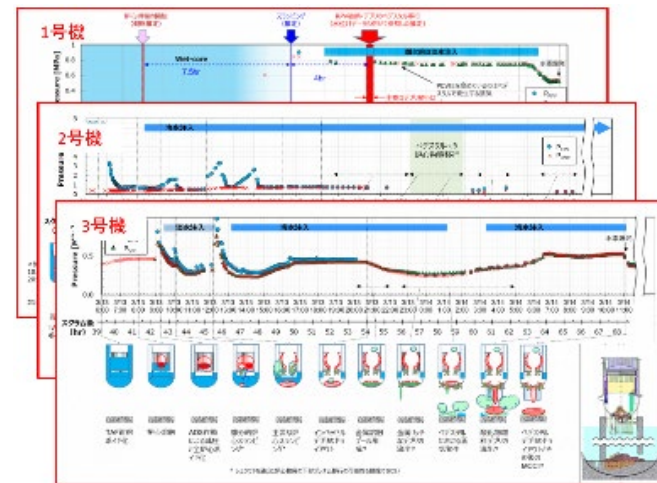
ウラン含有微粒子などサンプルの分析結果



U微粒子の組成分析

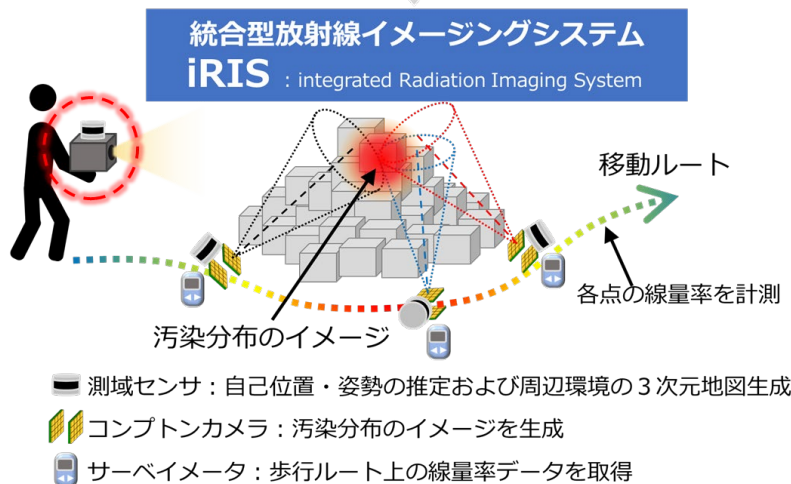


1～3号機についての「デブリ分布・RPV・PCV状態の推定図



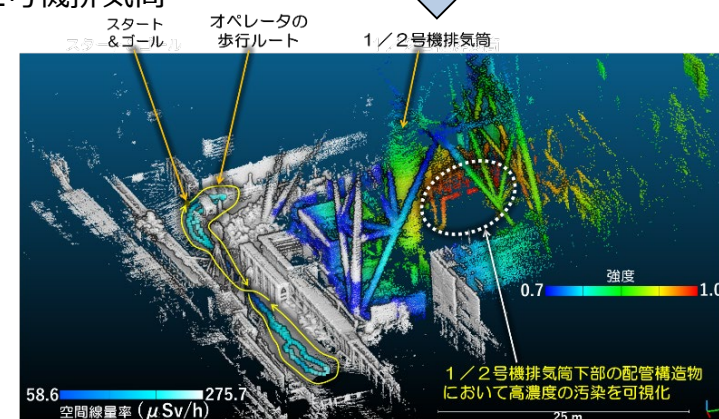
最も確からしい事故進展シナリオ

- 高濃度汚染箇所へ近づくことなく、**移動しながら短時間（5分未満）**に、1/2号機排気筒下部の放射線源や歩行ルート上の**線量率分布**や**高濃度汚染箇所**を**3次元に可視化**した。
- 建屋内外で放射線情報を可視化し、除染・線量低減や廃炉戦略を検討・策定するための有用なデータ・情報を整備していくことが可能とわかった。



1/2号機排気筒*

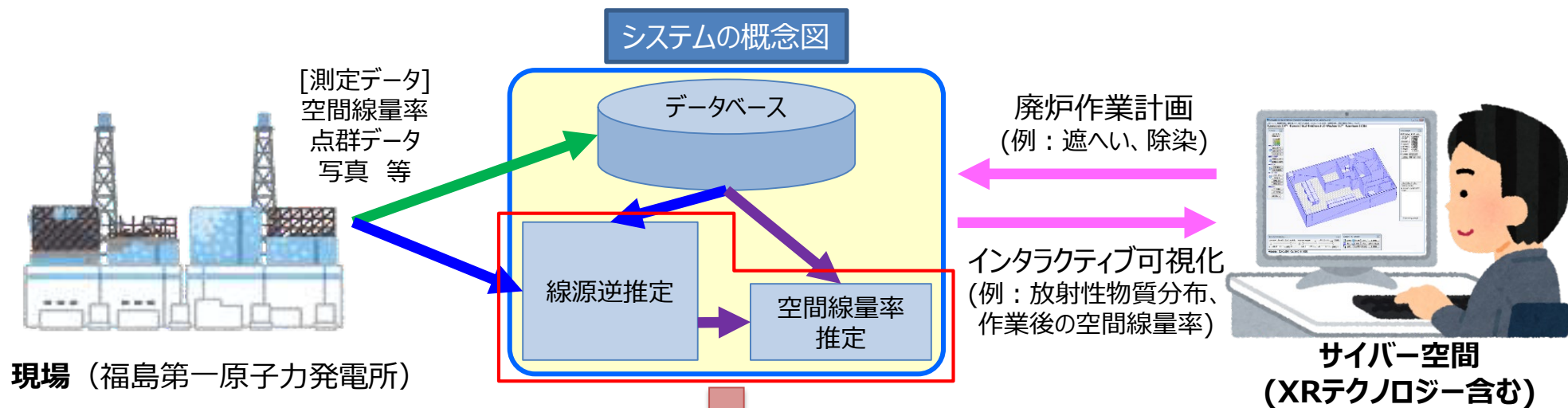
排気筒付近空間線量率と
高濃度汚染箇所を可視化



1/2号機排気筒付近の測定結果（2021年）

燃料デブリの**取り出し規模の拡大**に向け、建屋内外の様々な箇所において遠隔にて放射線源の分布測定を可能とするため、東電HDとの共同研究のもと、高放射線線量率場での利用ならびにロボットへの搭載性能など現場での適用性向上を図るとともに、ガンマ線以外の放射線の可視化を目指している。

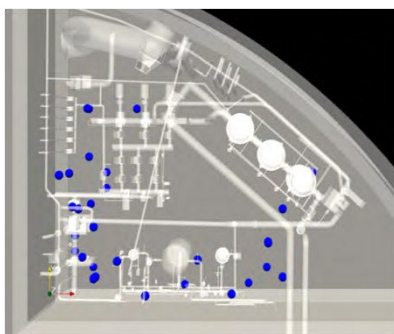
- デジタルツインによって、現場の放射線をデータベース化して安全に寄与。



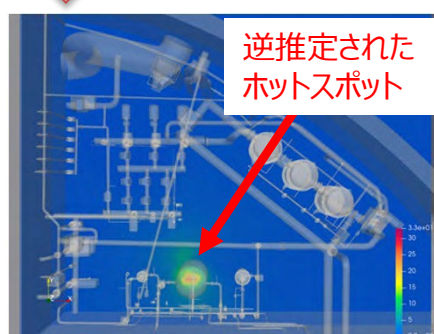
JAEAの廃止措置中原子炉
(JMTR)による検証実験



構造モデリング



最適化された観測点での計測

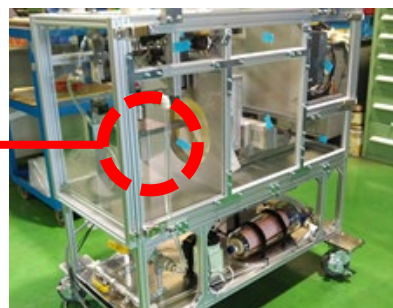
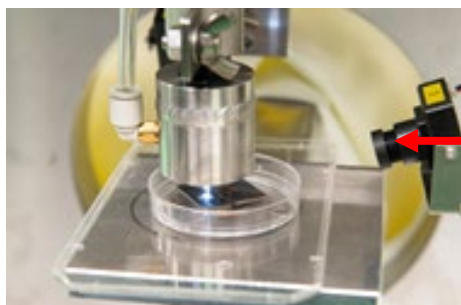


線源の逆推定

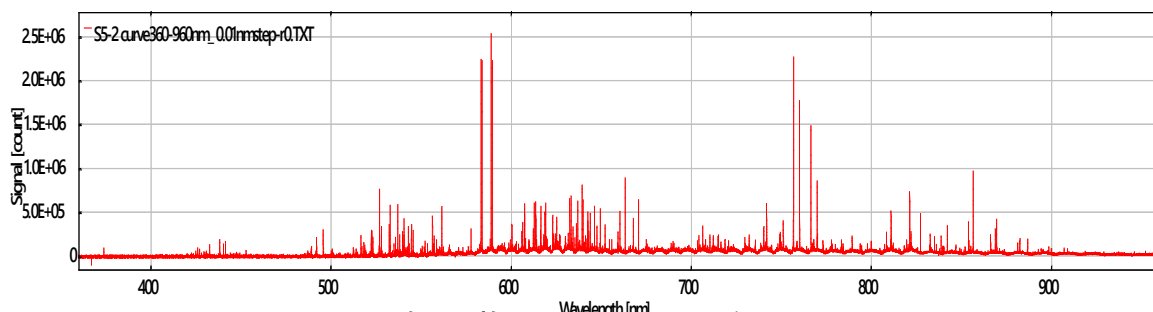
	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10
10	0.14	計測					0.08	推定				
8	0.25	0.32	0.3	0.43			0.17	0.16	0.17			
6	0.32	0.6	0.89	0.8			0.26	0.32	0.29	0.2		
4	0.65	0.57	2.3	1.91	0.98	0.5	0.43	0.73	1.21	0.97	0.58	0.2
2	0.86	2.06	28.1	6.36	0.71	0.3	0.62	1.23	28.7	1.48	0.73	0.41
0	0.46	0.97	6.56	4.2	1.16	0.24	0.62	1.12	6.38	3.31	0.88	0.43
0												

空間線量率分布の
計測値と推定値の比較

- 燃料デブリの遠隔・その場・迅速簡易分析に先立ち現場適用性を確認するため、2号機原子炉ウェル内調査で採取された放射性物質試料（換気ダクト片）を分析。
- レーザーの照射により発生した微粒子（ヒューム）による**汚染拡散がないことを確認、廃炉現場に持ち込み簡便に使用できることがわかった。**



レーザー照射部（微粒子吸引ノズル付き）
可搬・遠隔操作型分析容器（浜通り企業製）



1 F現場に搬入



可搬型LIBSによる試料の測定風景

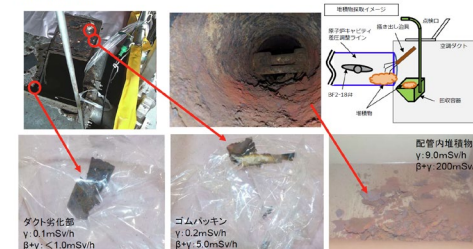


サンプルを分析

3-1. 原子炉キャビティ差圧調整ライン（西側）調査（サンプル採取） **TEPCO**

■ 事故調査の観点から、下記箇所のサンプル採取を実施した。

- ・ ダクト上部の劣化部分
- ・ ダクト点検口蓋のゴムパッキン部分
- ・ 配管内堆積物



2号機原子炉ウェル内調査*

燃料デブリの**取り出し規模の拡大**に向け、耐放射線性、小型軽量化などの操作性、信頼性の向上（燃料デブリと廃棄物との分別など）を図る。

（令和3年度開始廃炉・汚染水対策事業において、1F現場での適用に向けた機器開発、試験を実施中）

- 将来の燃料デブリと放射性廃棄物と仕分けに反映するため、破壊分析では対応が困難な、容器に収納されたキログラムオーダーまでの回収物を非破壊で計測し、**核燃料物質質量に応じて燃料デブリと放射性廃棄物を仕分け**する技術を開発。

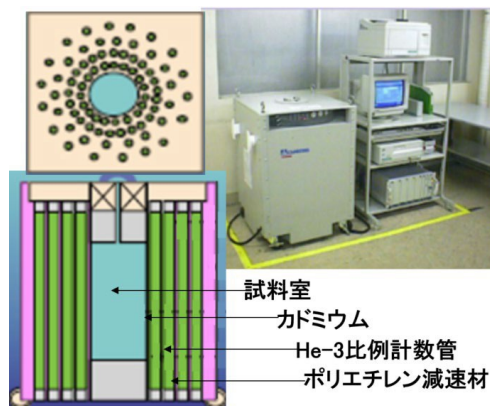
IRID（仕分けのための非破壊計測技術開発PJ：MHI,東芝ESS,日立GE,JAEAによる協働）で現在検討されている候補手法：

①アクティブ中性子法、②パッシブ中性子法、③ミュオン散乱法、④X線CT法、⑤パッシブガンマ線法

JAEAでは、既存の核燃料使用施設と非破壊計測装置を利用して、主に①,②,⑤の要素技術確認試験を2023年度から開始することを目指し、3拠点4センターによる協力体制を構築し、試験準備（試験方法の検討、模擬体製作、許認可変更等）を進めている。



原子力科学研究所/NUCEF/BECKY
にあるアクティブ中性子法装置(JAWAS-T)



核燃料サイクル工学研究所/プルトニウム燃料技術
開発センターにあるパッシブ中性子法装置(PSMC)



原子力科学研究所/燃料試験施設(RFEF)：軽水
炉使用済み燃料やTMI-2燃料デブリに対するパッシブ
ガンマ線測定等への利用を検討中

非破壊計測法の要素技術確認試験（2023年度～）を計画しているJAEAの施設・装置

- 組成が未知の試料に対するアプローチとして、**燃料デブリの特徴を評価**できる技術・体制を構築する。
- 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元素組成を評価**する。

模擬燃料デブリ (均一組成) ・Uを含む ・1F組成を模擬 	分析機関	溶解法	重量溶解率	特徴
	NDC	硝酸	～60%	- 簡便な溶解法 - ウランやホウ素化合物は溶解 - 溶けない成分を分析して 全体の元素組成を補完
	JAEA大洗研	硝酸 +微量フッ酸	～90%	微量フッ酸の添加で溶解率向上
	NFD	王水+フッ酸	98%	- ほぼ完全溶解 - 高い精度で元素の定量が可能 - フッ化物沈殿生成の可能性
	JAEA原科研	アルカリ融解	100%	- 完全溶解 - 高い精度で元素の定量が可能 - アルカリ試薬成分の混入 - アルカリ融解るつぼ成分の混入



セル内遠隔操作で実施
(実デブリを想定)

燃料デブリ分析項目として重要な**4つの基本的な評価項目**（**分析試料の形態、核種・元素量、相状態・分布、密度等**）に対する分析技術を定義し、関係者間の共通認識とする。

2030年頃に期待される状況を実現するために必要な研究開発を実施。

◆ 安全確保のために、まずは敵を知ることが重要。

内部調査によって、さまざまな情報がわかってきているが、
まだまだ不確定な要素が多く、これからも研究を重ねて、燃料デブリを明らかにする。

◆ 燃料デブリがどのように作られて、今どうなっているのかをデータベース化。

燃料デブリ、炉内状況、放射線分布などをデータベース化し安全に寄与していく。

◆ 燃料デブリの取り出し規模の拡大に対応。

分析技術の開発、分析設備の整備・充実、人材育成を進める。

JAEAは福島第一原子力発電所廃炉のシェルパを目指す。