

令和3年度開始 廃炉・汚染水対策事業費補助金に係る補助事業
「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、熱挙動の推定及び簡易分析のための技術開発）」

－2022年度最終報告－

2023年10月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

報告内容

1. <u>研究の背景・目的</u>	2
2. <u>目標</u>	5
3. <u>実施体制</u>	10
4. <u>実施項目とその関連、他研究との関連</u>	11
5. <u>実施スケジュール</u>	19
6. <u>実施内容（分析精度の向上のための技術開発）</u>	22
6.1 <u>模擬サンプル調製及び試験方法の検討</u>	24
6.2 <u>模擬燃料デブリの調製</u>	26
6.3 <u>模擬燃料デブリの分析</u>	29
6.4 <u>分析結果の評価</u>	47
6.5 <u>参考資料</u>	58
7. <u>実施内容（燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発）</u>	59
7.1 <u>燃料デブリ模擬流動試験</u>	61
7.2 <u>空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析</u>	82
7.3 <u>実機熱挙動評価</u>	125
7.4 <u>参考資料</u>	144
8. <u>実施内容（簡易（その場）分析のための技術開発）</u>	148
8.1 <u>簡易（その場）分析手法の評価・検討</u>	149
8.2 <u>簡易（その場）分析技術の開発</u>	154
8.3 <u>参考資料</u>	205
9. <u>まとめ</u>	210

1. 研究の背景・目的

研究の背景〈公募要領より抜粋〉（1/2）

- ・ 福島第一原子力発電所の廃炉の各工程（燃料デブリ取り出し、収納・移送・保管、廃棄物管理等）に有用な情報を取得するためにも、燃料デブリの性状を分析・推定する技術の開発は重要である。しかし、化学組成や生成過程等において未解明の要素を多く有する燃料デブリの性状を分析・推定するには、多くの困難が予想されている。
- ・ 分析の阻害因子を低減させる手法、燃料デブリからの発熱と冷却のバランスの評価手法、燃料デブリ中の特定の項目を簡易的に検出可能な手法の技術開発が行われれば、それぞれ、燃料デブリ取り出し工程における不確実性の低減、安全評価の高度化、取り出し作業の迅速化につなげることができる。
- ・ 燃料デブリ中には、原子炉圧力容器内にステンレス鋼製の炉心シュラウド等の炉内構造物、中性子吸収材として用いられている炭化ホウ素、燃料被覆管として使用されているジルコニウム(Zr)の他、コンクリートに含まれていたケイ素、カルシウム等の多くの元素が含まれていると考えられる。このような多くの元素が燃料デブリ中に固溶、析出、あるいは不純物として母相中に内包・分散等の多くの形態を取ることで、機械的性質や化学的安定性が変化する。化学分析により燃料デブリの化学組成が分かっても、どのような性状を示すかを推定するためには情報が不十分である。燃料デブリを構成している化学形やマイクロ組織を判断し、性状を推定することは、燃料デブリの取り出し時の加工性や保管管理時の化学的安定性を評価するために重要である。また、燃料デブリのマイクロ組織を分析することは、事故時の温度履歴、事故進展過程の推定、燃料デブリの分布状態の推定にもつながり、事故炉の廃止措置上、有効なものとなる。

⇒ 次ページへ続く

1. 研究の背景・目的

研究の背景〈公募要領より抜粋〉（2/2）

- ・ 原子炉内における崩壊熱の発生は、燃料デブリ中に含まれる核分裂生成物（FP）によるものであり、今後、発熱量の低下に伴い、注水量低減、間欠注水、空冷といった多様な冷却を行うことが可能となる。実際に注水量の低下に伴う不測の事態を避けるためにも、事前に、燃料デブリ及びFPの分布状態、燃料デブリ取り出し作業の進捗、汚染水の蓄積・処理状況、原子炉格納容器（以下「PCV」という）内の閉じ込め機能等に応じた最適な冷却方法を検討、評価することが重要である。
- ・ 燃料デブリ取り出し時に、臨界防止のため形状管理対策を採用している収納容器にそれらを収納するためには、切断し、燃料デブリ中のウランをホットラボ施設へ輸送、分析しなければならない。ここで、事前にウランが含まれていない、あるいはウラン濃度が極めて低いことが簡易的に分かれば、収納容器のサイズを大きくすることが可能となり、切断回数を低減できる。既存の構造物に付着・侵入した燃料成分の有無を迅速に確認または評価可能な簡易分析技術を開発することは、ホットラボ施設での分析につながる各工程の短縮が可能な上、廃炉工程の短縮化・省力化に対して有効なものとなる。

1. 研究の背景・目的

研究の目的〈公募要領より抜粋〉

(1) 分析精度向上のための技術開発

化学形、マイクロ組織の分析においては、光学顕微鏡による金属組織観察、X線回折、走査型電子顕微鏡観察時の元素マッピング、透過型電子顕微鏡観察による構造解析等の複数の観察・分析を行い、それらの結果から総合的に判断することが重要である。

複数のマイクロ組織を含む模擬燃料デブリを作製し、その模擬燃料デブリを活用して複数の分析機関で分析を行う。その後、分析を実施した分析機関が集まり、分析結果等を共有する。当該活動を通じて、各分析機関における分析・評価の結果の相違点・その原因等を明らかにし、より精度の高いマイクロ組織の同定とそれらの特性を推定する手法を開発する。

(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発

福島第一原子力発電所のPCV内の燃料デブリの熱挙動をより精緻に推定する技術の開発を行う。このため、まずは、格納容器内の状況把握が最も進んでおり、推定結果の検証が実施しやすい福島第一原子力発電所2号機を対象に、PCV内の状態を模擬した熱挙動を数値シミュレーションにより推定する手法を開発する。

(3) 簡易（その場）分析のための技術開発

収納容器に形状管理を施すことは、臨界防止対策の1つであるため、ウランあるいは核燃料が含まれることを簡易的、あるいは作業現場（その場）で迅速に検出することが可能な技術が必要である。新規の分析手法の開発には、長期の時間と多大なリソースを必要とすることから、ある程度の基礎・基盤技術が確立している分析技術を対象に福島第一原子力発電所への現場適用を目指して技術開発を行う。

2. 目標

(1) 分析精度の向上のための技術開発

事業の狙い：

性状が不明、分析が容易ではない燃料デブリの受入れに際し、我が国の総力をあげてその特徴を評価できる技術・体制を構築する。燃料デブリ分析を担う代表的な我が国の（ホットラボを有する）分析機関*1と連携する。

*1：NDC、JAEA大洗、NFD、JAEA原科研

精度の高いマイクロ組織の同定とそれらの特性を推定する手法を開発とは：

- ・ 燃料デブリ分析項目として重要な**4つの基本量（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*2が定義され、関係者間の共通認識となること。 *2：分析手法、手順、誤差、課題
- ・ 各ホットラボの分析技術を適切に組み合わせることにより、燃料デブリ分析評価者のニーズに対応できる状態とすること。

2022年度事業：「核種・元素量」分析技術の共通認識化

- ・ ほぼ单相均質なU-Zr系焼成体の微粉末試料を調製・使用した。
- ・ アルカリ融解技術や王水・フッ酸溶解法により、難溶性成分を含む燃料デブリの溶解が可能であることを確認できた。
- ・ 均質な模擬燃料デブリ試料について、不溶解残渣が生じる場合を含む分析精度を明らかにした。
- ・ 各機関の分析操作の詳細比較により、分析機関の手法、不確かさ要因の定義及び評価方法に関して大きな差がないことを確認した。

参画機関の間で、燃料デブリ分析における課題認識の共有化を図ることができた。組成既知の均質な模擬燃料デブリ試料について、4つの分析基本量のうち「核種・元素量」に対する分析技術の共通認識化を図り、「確からしさ」という物差しを各機関で同じ定義にすることとした。

「核種・元素量」で共通認識化した各機関の分析技術・不確かさの考え方をベース

本事業の目標：4つの基本量を対象とした分析技術の共通認識化

- ・ U-Zr系の共晶固化体、溶融凝固試料を使用する。
⇒ 試料溶融条件の変化、相分布の非均質化、気孔分布の複雑化

マクロ的に同一組成であっても、ミクロ的には様々な相が分布するため、2020年度開始事業で共通認識化した分析精度（確からしさ）を適用して、未知試料のマイクロ組織の同定とそれらの特性を推定する分析技術の共通認識化を図る。

2. 目標

(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発 (1/2)

事業の狙い

福島第一原子力発電所2号機を対象に、燃料デブリの熱挙動をより精緻に推定するため、PCV内の状態を模擬した発熱挙動と冷却状態を計算評価する手法を開発する。開発にあたっては、今後の内部調査において得られる詳細な燃料デブリ分布などの評価の更新に合わせ、これを反映できる構成とする。

発熱状態と冷却状態を計算評価するためのポイント

燃料デブリの発熱量及び分布については、各々JAEA-Data/Code 2012-018「福島第一原子力発電所の燃料組成評価」中のインベントリの崩壊熱、「2号機のデブリ分布・RPV・PCV状態の推定図」に整合させるなど、最新の知見を反映する。しかし、燃料デブリの分布、気孔率などの性状、構造物の破損の程度など、現状の評価には大きな不確かさがあり、今後も更新されることが想定される。これらの情報の更新に合わせ、その影響を反映できる技術を開発するためのポイントは、(1) 燃料デブリの位置・分布の違いによる発熱の変化の影響を受ける自然対流による放熱、(2) 気孔率などの違いによる熱物性の影響、(3) 流れや放熱に与える構造物の影響を反映できることである。

計算評価においては、様々な条件設定を行う必要がある。これら設定すべき条件の多くに対して確定した情報は得られていないため、計算結果と実機のプラントデータとの比較よりこれを設定する必要がある。従って、(4) 計算時間は十分に短い必要がある。

2. 目標

(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発 (2/2)

計算評価するためのポイントへの対応

発熱する燃料デブリの位置、分布などの違いを反映して自然対流の影響を計算評価するためには、自然対流を現象論的に評価できる手法である数値流体力学(CFD)に基づく手法を採用する。CFDに基づく手法を採用することで、構造物の違いの影響についても反映した計算が可能となる。気孔率などの違いによる熱物性の影響については、実験などによりデータを取得するとともに、CFDに基づく手法に対して反映できる機能を導入する。

CFDは一般に多くの計算時間を必要とする手法である。計算結果と実機のプラントデータとの比較を繰り返し行うため、統計平均モデルを用いることで計算時間を節約できる手法を採用することで対応する。

精緻な推定を実現するための対応

目標とする精緻な熱挙動の推定を実現するためには、可能な範囲で精緻な手法・モデルを用いるとともに、手法・技術の妥当性について示す必要がある。様々な状況が複合した実機条件との比較のみではこれを示すことはできないため、個々の状況・現象に対する妥当性を示した上で、実機条件との比較を行う。自然対流に対する適用性を示すため、燃料デブリ模擬流動試験によりデータを取得する。合わせて、気孔率などの違いによる熱物性の影響についてのデータの取得も行う。構造物の影響については、より詳細なCFDに基づく手法によるデータと比較することで、妥当性を確認する。これらの影響を評価できることを確認した手法の妥当性を最終的に確認するため、継続して記録されている2号機の温度データ、注水データと照合し、過去の温度履歴を再現する。過去の温度履歴が再現できた上で、注水量をゼロとして空冷状態の温度分布、空冷での燃料デブリの温度等を検討する。

2. 目標

(3) 簡易（その場）分析のための技術開発（1/2）

事業の狙い（進め方）

- 有識者あるいは第三者機関の意見を参考に、
 - ・簡易(その場)分析に有効な分析・測定手法を調査し、その長所及び短所を整理する。
 - ・調査した簡易(その場)のための分析・測定手法に対し、実現性の高いと判断できる手法を選定し、現場適用に向けて効果的な試験方法、開発項目、評価項目等を検討する。
- 選定された技術について、具体的な技術開発を実施する。

技術開発のポイント

- 簡易（その場）分析技術としては、**XRFとLIBSが代表的であり技術開発対象**とする。
- 現時点で最も現実的であると考えられる、光ファイバーを利用したレーザー遠隔その場分析手法（光ファイバー利用レーザー誘起ブレイクダウン分析法：**光ファイバーLIBS**）と超小型レーザー（マイクロチップレーザー）を活用した**マイクロチップレーザーLIBS**を中核とした技術開発を実施する。

【解決すべき課題】

- ・核燃料物質を含む多様な試料での**実績が少ない**。
- ・**使用済み燃料**などによる**実績がない**。
- ・開発技術であり、**信頼性に欠ける**。
- ・機器が自作開発品で、**信頼性に欠け、供給できない**。

【課題に対する対応・目標】

- ・**過酷環境場**での試験により**耐放射性を実証**。
- ・**ウラン含有試料、使用済み燃料試料**での**実績を重ねる**。
- ・**実機供給スキームの一部を試行することで必要な要素技術開発を実施し、試作機を提示**。

2. 目標

(3) 簡易（その場）分析のための技術開発（2/2）

事業終了時の目標指針

- 1) **遠隔かつ過酷環境**でも分析特性が得られること。
 - ・ 模擬試料に対し、**線量率 > kGy/h (10kGy/h)** **累積線量 > MGy**においても、累積線量・線量率に依存しない分析特性を実証。
 - ・ **50m以上 (100m級)**の超遠隔分析を実現。
- 2) **ウランの有無の判定**並びに組成比が求められること。
 - ・ 検量線等から**ウラン含有比 (組成比)**を定性評価。
 - ・ ウランの検出下限として**含有量 (組成比) 1%**を明示。
 - ・ **使用済み燃料等**での分析実績。
- 3) **機器供給を試行**し、実機を念頭とした機器が提供できること。
 - ・ 機器開発から提供までを試行し、**実機試作機を提示**。

3. 実施体制

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

○研究開発実施

- (1) 分析精度の向上のための技術開発
 - ① 燃料デブリの分析精度向上に係る模擬サンプル調製及び試験方法の検討
 - ② 模擬燃料デブリの調製
 - ③ 模擬燃料デブリの分析
 - ④ 分析結果の評価
- (2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発
 - ① 燃料デブリ模擬流動試験
 - ② 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析
 - ③ 空冷時熱挙動評価
- (3) 簡易（その場）分析のための技術開発
 - ① 簡易（その場）分析手法の評価・検討
 - ② 簡易（その場）分析技術の開発

東京電力ホールディングス株式会社

○プロジェクト管理



- プロジェクト管理
- 状況報告

委託先A：国立大学法人東北大学

○研究開発実施

- (1) 分析精度の向上のための技術開発
 - ① 燃料デブリの分析精度向上に係る模擬サンプル調製及び試験方法の検討
 - ② 模擬燃料デブリの調製
 - ④ 分析結果の評価

請負先A：MHI原子力研究開発株式会社

○研究開発実施

- (1) 分析精度の向上のための技術開発
 - ① 燃料デブリの分析精度向上に係る模擬サンプル調製及び試験方法の検討
 - ③ 模擬燃料デブリの分析
 - ④ 分析結果の評価

請負先B：日本核燃料開発株式会社

○研究開発実施

- (1) 分析精度の向上のための技術開発
 - ① 燃料デブリの分析精度向上に係る模擬サンプル調製及び試験方法の検討
 - ② 模擬燃料デブリの調製
 - ③ 模擬燃料デブリの分析
 - ④ 分析結果の評価

請負先C：株式会社大和システムエンジニア

○研究開発実施

- (2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発
 - ② 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析
 - ③ 空冷時熱挙動評価

請負先D：株式会社エヌデー

○研究開発実施

- (2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発
 - ② 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析

請負先E：合同会社アプテックス

○研究開発実施

- (2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発
 - ① 燃料デブリ模擬流動試験

委託先B：国立大学法人静岡大学

○研究開発実施

- (2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発
 - ② 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析

委託先C：公立大学法人山口東京理科大学

○研究開発実施

- (2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発
 - ③ 空冷時熱挙動評価

委託先D：日本核燃料開発株式会社

○研究開発実施

- (3) 簡易（その場）分析のための技術開発
 - ② 簡易（その場）分析技術の開発
 - b) 核燃料物質による性能評価

請負先H：株式会社アトックス

委託先E：アイラボ株式会社

○研究開発実施

- (3) 簡易（その場）分析のための技術開発
 - ② 簡易（その場）分析技術の開発
 - c) 基礎基盤技術を基にした実機開発

委託先F：大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所

○研究開発実施

- (3) 簡易（その場）分析のための技術開発
 - a) 分析手法の確立

4. 実施項目とその関連、他研究との関連

4.1 実施項目とその関連：実施項目

(1) 分析精度の向上のための技術開発

- ① 燃料デブリの分析精度向上に係る模擬サンプル調製及び試験方法の検討
- ② 模擬燃料デブリの調製
- ③ 模擬燃料デブリの分析
- ④ 分析結果の評価

(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発

- ① 燃料デブリ模擬流動試験
- ② 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析
- ③ 実機熱挙動評価

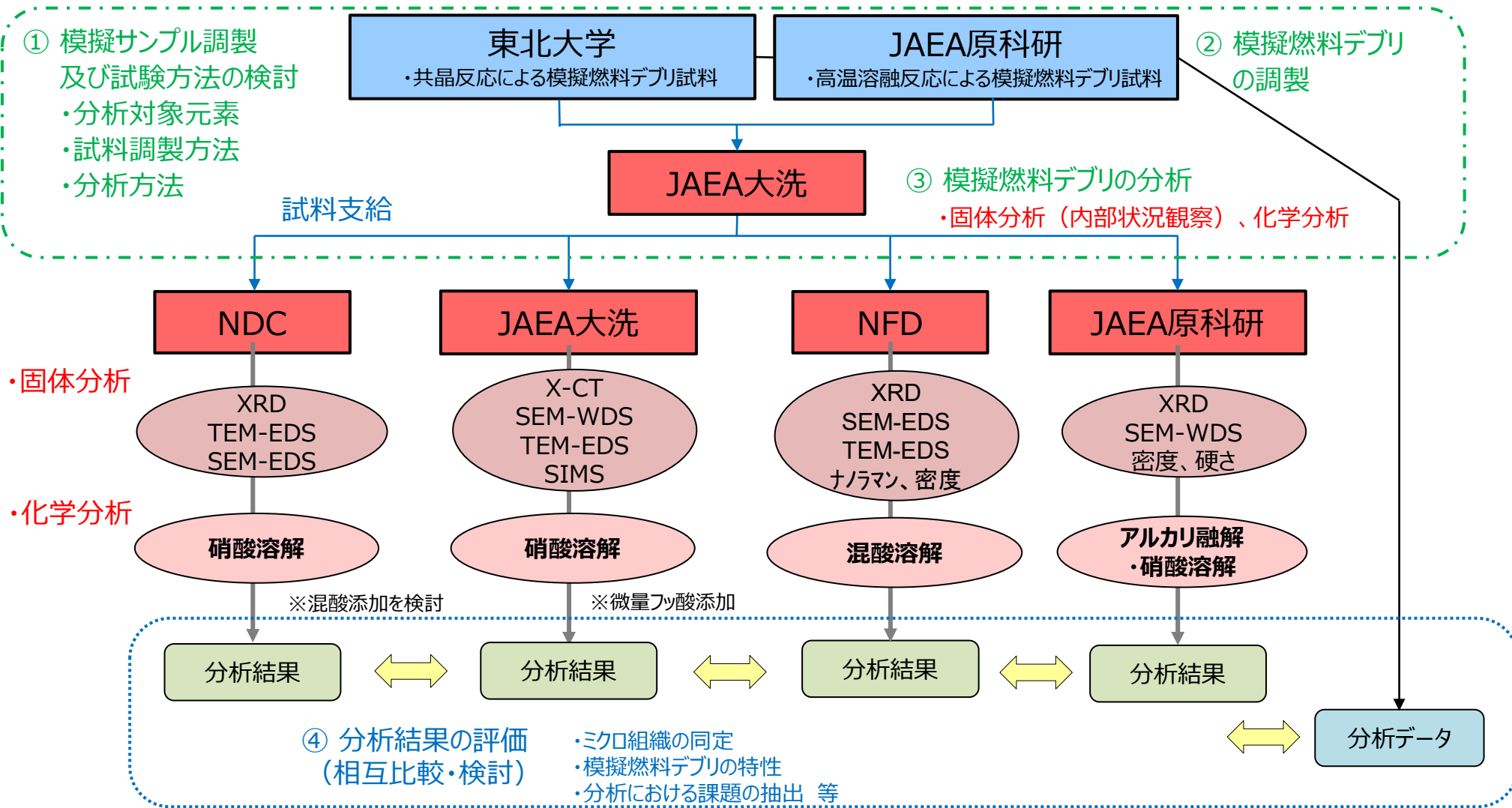
(3) 簡易（その場）分析のための技術開発

- ① 簡易（その場）分析手法の評価・検討
- ② 簡易（その場）分析技術の開発
 - a) 分析手法の確立
 - b) 核燃料物質による性能評価
 - c) 基礎基盤技術を基にした実機開発

4. 実施項目とその関連、他研究との関連

4.1 実施項目とその関連：(1) 分析精度向上のための技術開発

各分析機関の実績、模擬燃料デブリの相状態を想定しつつ、暫定的に設定。試料の実際の状態を確認したうえで切断位置や観察位置の選定等の詳細条件を検討し、分析フローに適宜反映・改訂していく。



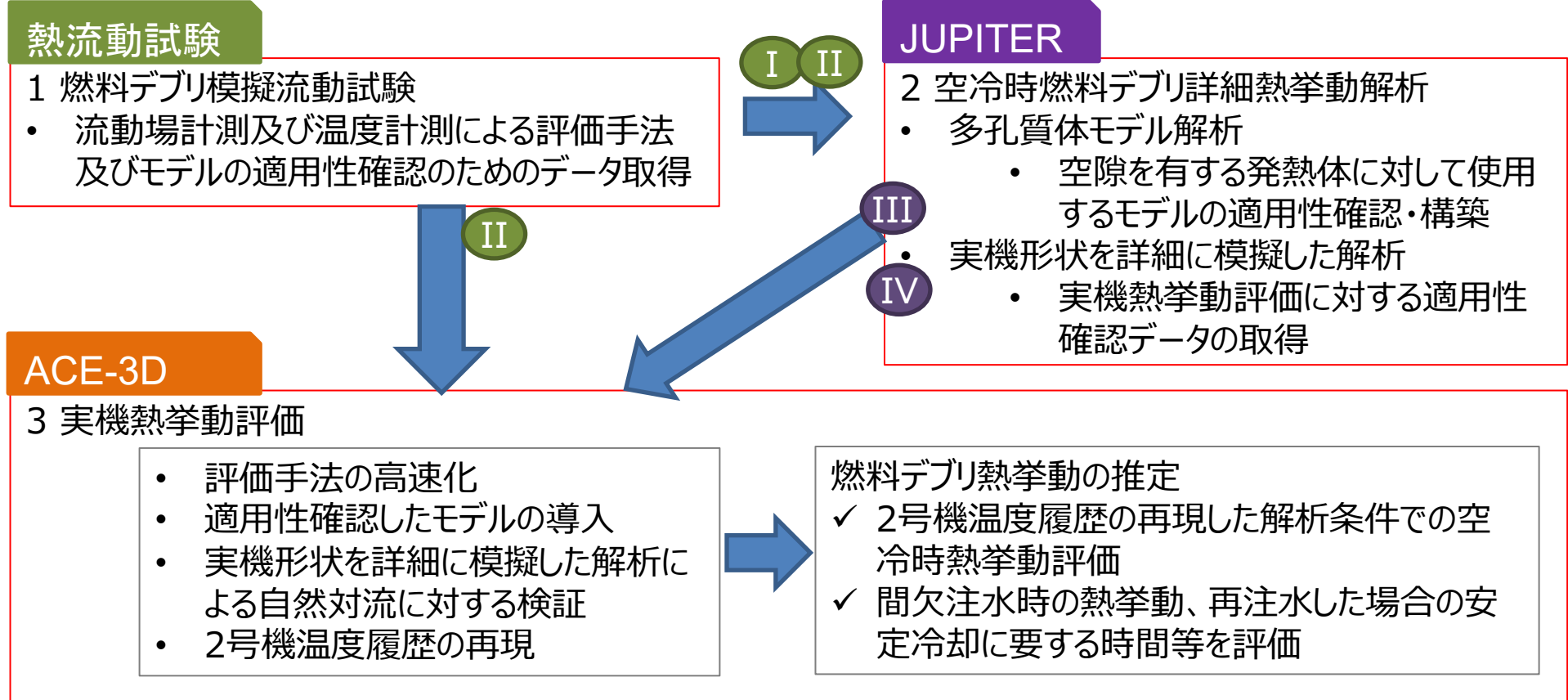
4. 実施項目とその関連、他研究との関連

4.1 実施項目とその関連：(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発 (1/2)

- 課題に対応するため3つのサブタスクを実施
 - 燃料デブリ模擬流動試験
 - 空隙を有する構造物を含む体系での熱流動試験(流動場計測、温度計測)による適用性確認のためのデータ取得
 - 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析
 - 大規模詳細解析に対応したJUPITERコードを利用
 - 空隙を有する発熱体(多孔質体)に対して使用するモデルの適用性確認・構築
 - 複雑構造物内の自然対流への適合性確認のためのデータ取得
 - 実機熱挙動評価
 - ACE-3Dコードをベースに開発
 - 空隙を有する発熱体への対応(コード開発)
 - 2号機温度履歴との比較の実施
 - 空冷時を含む実機熱挙動の評価を実施

4. 実施項目とその関連、他研究との関連

4.1 実施項目とその関連：(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発 (2/2)

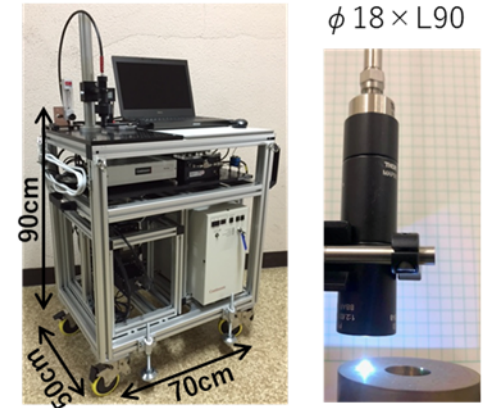
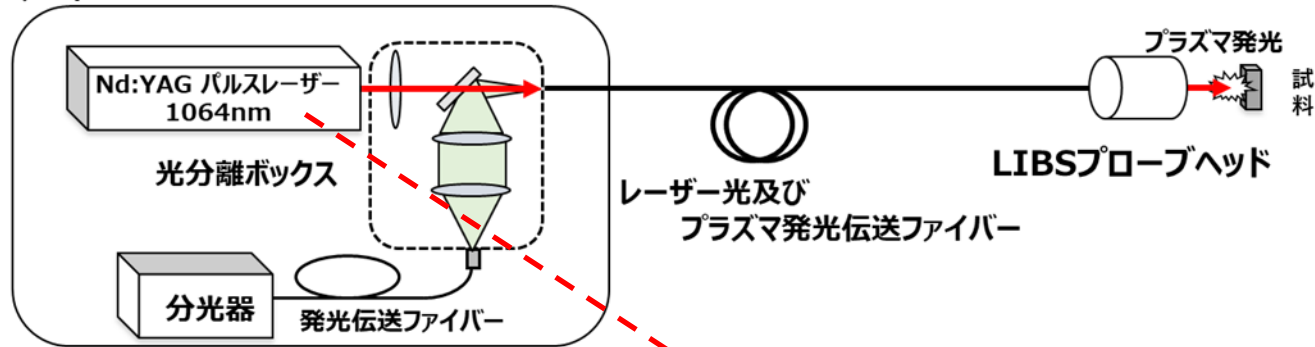


4. 実施項目とその関連、他研究との関連

4.1 実施項目とその関連：(3) 簡易(その場)分析のための技術開発(1/3)

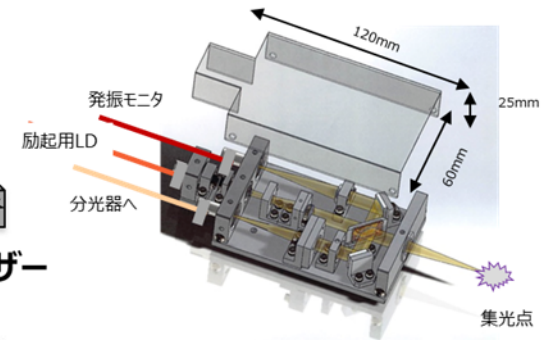
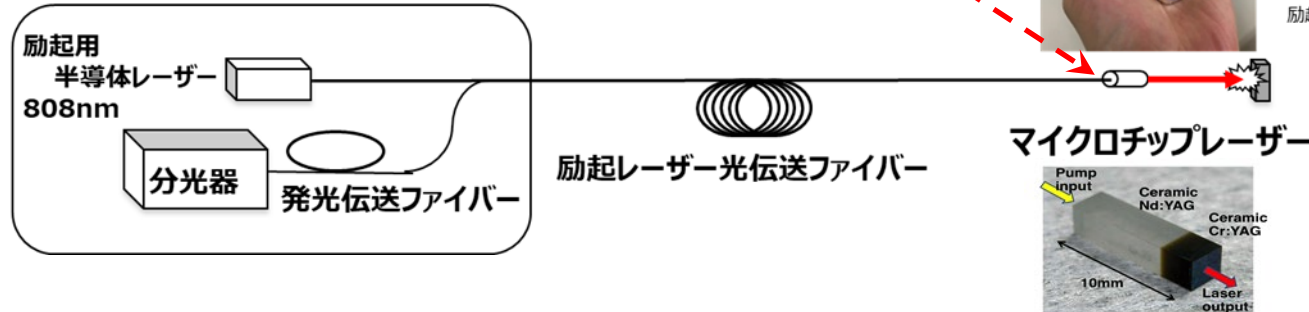
現時点で最も現実的であると考えられる、光ファイバーを利用したレーザー遠隔その場分析手法(光ファイバー利用レーザー誘起ブレイクダウン分析法：**光ファイバー-LIBS**)と超小型レーザー(マイクロチップレーザー)を活用した**マイクロチップレーザー-LIBS**を中核とした技術開発を実施

光ファイバー-LIBS



超小型レーザーを光ファイバーの先端に装着
・超長尺(100m)化の実現
・レーザー光の収束性改善

マイクロチップレーザー-LIBS



4. 実施項目とその関連、他研究との関連

4.1 実施項目とその関連：(3) 簡易（その場）分析のための技術開発（2/3）

a) 分析手法の確立（原子力機構）

- ・可搬型ファイバーLIBS (<50m) の性能確認
- ・マイクロチップレーザー利用LIBSの高出力化とデータ取得
 - ①超長尺分光の実現
 - ②表面活性接合DFCチップによる高出力マイクロチップレーザーの開発（分子研）
- ・システム供給に必要な基盤技術を提供し、試作機の提示に協力

b) 核燃料物質による性能評価（NFD）

- ・U含有標準試料、複雑系試料、照射済み燃料での試料提供・試験環境提供
- ・原子力機構で開発した各種可搬型LIBSでの性能試験実施
- ・携帯型XRFによる分析特性（放射線影響を含む）取得（LIBS試験と並行して実施）
- ・アブレーション粒子の簡易的な粒径評価

c) 基礎基盤技術を基にした実機開発（アイラボ）

- ・機構で開発した可搬型LIBSシステム（光ファイバーLIBS原型機）の供給スキームの試行
- ・試作機の提示

4. 実施項目とその関連、他研究との関連

4.1 実施項目とその関連：(3) 簡易（その場）分析のための技術開発（3/3）

事業終了時の目標指針	
1) 遠隔かつ過酷環境 でも分析特性が得られること。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 模擬試料に対し、線量率 > kGy/h (10kGy/h) 累積線量 > MGy を実証。 ・ 50m以上 (100m級) の超遠隔分析を実現。
2) ウランの有無の判定 並びに定性的な組成比が求められること。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 検量線等からウラン含有比 (組成比) を定性評価。 ・ ウランの検出下限として推定されている組成比 1%の確認。 ・ 使用済み燃料等での分析実績。
3) 機器供給を試行 し、実機を念頭とした機器が提供できること。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機器開発から提供までを試行し、実機試作機を提示。

核燃料物質、使用済み燃料による
分析実績の集積、信頼性確保
XRFの分析特性評価（放射線場を含む）
アブレーション粒子の簡易粒径評価

手作りによる実験装置を、発注可能な機器へ
（実機開発の試行による分析機器の提示）

(a) 分析手法の確立（原子力機構）

- ・ 課題総括
- ・ 光ファイバーLIBS最適化
- ・ マイクロチップレーザーLIBS最適化
- ・ XRF、LIBS過酷環境試験（耐放射線性）

表面活性接合DFCチップによる高出マイクロチップレーザーの開発
（分子研）

(c) 基礎基盤技術を 基にした実機開発（アイラボ）

- ・ 機器供給を念頭とした要素技術開発
- ・ 実機供給時の技術課題抽出
- ・ 実機開発の試行（機器提供）

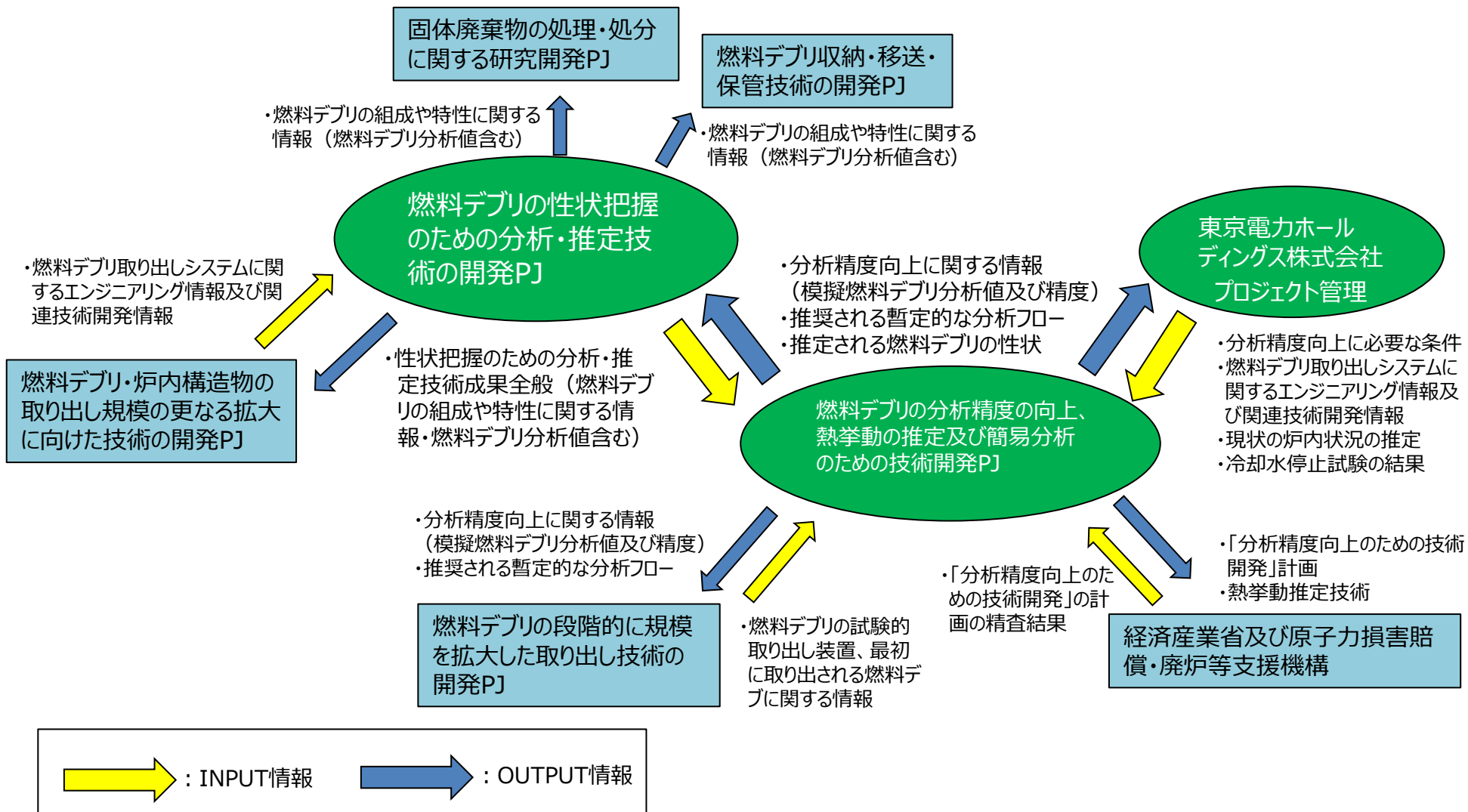
(b) 核燃料物質による 性能評価（NFD）

- ・ ホット施設の提供
- ・ ウラン含有標準試料
- ・ ウラン含有複雑系試料
- ・ 使用済み燃料利用模擬燃料デブリ

炉内その場スクリーニング分析への適用を前提とした分析実績の集積
実機開発の試行による分析装置の提供と供給システムの確立

4. 実施項目とその関連、他研究との関連

4.2 他研究との関連



5. 実施スケジュール (1) 分析精度の向上のための技術開発

項目	担当機関	2021年度												2022年度												備考												
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月													
事務連絡会等	METI、NDF、MRI、東電HD、JAEA						△9/3	第1回PS会議							△4/14	第3回PS会議				△10/28	第4回PS会議					△10/31	第5回PS会議									3/27	第6回PS会議△	
(1) 分析精度の向上のための技術開発																																						
①模擬燃料デブリ調製及び試験方法の検討	(A) 燃料デブリの分析精度の向上に関わる全機関																																					
②模擬燃料デブリの調製																																						
(a) 共晶反応利用	東北大																																					
(b) アーク溶解法	JAEA原科研																																					
③模擬燃料デブリの分析(固体分析、溶解・化学分析)																																						
(a) 請負A社	NDC																																					
(b) JAEA大洗	JAEA大洗																																					
(c) 請負B社	NFD																																					
(d) JAEA原科研	JAEA原科研																																					
④分析結果の評価	(A) 燃料デブリの分析精度の向上に関わる全機関																																					

5. 実施スケジュール (2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発

項目	担当機関	2021年度												2022年度												備考
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発																										
① 燃料デブリ模擬流動試験																										
(a)燃料デブリ模擬流動試験																										
(i) 試験部製作																										
	JAEA原科研				設計				製作・試運転																	
[Red bar]																										
	JAEA原科研			製作											製作											
[Red bar]																										
	JAEA原科研							データ取得																		
[Red bar]																										
(b) 燃料デブリ詳細流動試験																										
(i) 試験部製作																										
	JAEA原科研			設計				製作・試運転																		
[Red bar]																										
	JAEA原科研																									
[Red bar]																										
(ii) 試験																										
	JAEA原科研																									
[Red bar]																										
② 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析																										
(a) 燃料デブリ詳細熱流動解析																										
(i) 解析条件検討																										
	JAEA原科研			条件検討											条件検討											
[Red bar]																										
	大和システムエンジニア																									
[Red bar]																										
	静岡大学																									
[Red bar]																										
(ii) 解析実施 (請負契約 (C社))																										
	大和システムエンジニア																									
[Red bar]																										
(iii) 多孔質体熱流動モデル評価解析(静岡大学)																										
	静岡大学																									
[Red bar]																										
(b) 実機空冷時詳細熱挙動解析																										
(i) 解析条件検討 (JAEA原科研)																										
	JAEA原科研			条件検討											条件検討											
[Red bar]																										
	エヌデーデー																									
[Red bar]																										
(ii) 解析実施 (請負契約 (D社))																										
	エヌデーデー																									
[Red bar]																										
③ 空冷時熱挙動評価																										
(a) 評価手法の高速化及びモデルの改良																										
(i) 高速化手法検討 (JAEA原科研)																										
	JAEA原科研			手法検討																						
[Red bar]																										
	大和システムエンジニア																									
[Red bar]																										
	山口東京理科大学																									
[Red bar]																										
(ii) 高速化実施 (請負契約 (E社))																										
	大和システムエンジニア																									
[Red bar]																										
(iii) 多孔質体モデルの調査(山口東京理科大学)																										
	山口東京理科大学																									
[Red bar]																										
(b) 間欠注水状態への対応																										
(i) モデル検討 (JAEA原科研)																										
	JAEA原科研																									
[Red bar]																										
	大和システムエンジニア																									
[Red bar]																										
(ii)モデルの組込実施 (請負契約 (F社))																										
	大和システムエンジニア																									
[Red bar]																										
(c) 実機熱挙動評価																										
(i) 解析条件検討 (JAEA原科研)																										
	JAEA原科研			条件検討											条件検討											
[Red bar]																										
	大和システムエンジニア																									
[Red bar]																										
(ii) 解析実施 (請負契約 (G社))																										
	大和システムエンジニア																									
[Red bar]																										
[Red bar]																										

5. 実施スケジュール (3) 簡易分析のための技術開発

項目	担当機関	2021年度												2022年度												備考
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
(3) 簡易分析のための技術開発																										
① 簡易（その場）分析手法の評価・検討	全機関				準備・評価・検討																					
② 簡易その場分析技術の開発																										
(a) 分析手法の確立	JAEA富岡/東海																									
(i) 近赤外領域用LIBSシステムの構築とデータ取得																										
(ii) マイクロチップレーザーLIBSの高出力化とデータ取得																										
② マイクロチップレーザー利用LIBSプローブによる超長尺分光の実現	JAEA富岡/東海																									
④ 表面活性接合DFCチップによる高出力マイクロチップレーザーの開発	分子科学研究所																									
(iii) 主要構成要素およびシステムの過酷環境試験																										
(iv) 核燃料物質、使用済み燃料を用いた分析性能の総合評価																										
(b) 核燃料物質による性能評価	NFD																									
(i) 標準試料の作製																										
(ii) 標準試料での試験																										
(iii) 複雑系試料での試験																										
(iv) 使用済み燃料試料による試験																										
(v) 未照射濃縮度ウラン試料による試験																										
(vi) 廃棄物処理対応																										
(c) 基礎基盤技術を基にした実機開発	アイラボ株式会社																									
(i) 機器製作行程管理																										
(ii) 基本設計																										
(iii) 要素機器準備																										
(iv) 要素機器・部品の管理																										
(v) 組み立て・動作確認																										
主要なマイルストーン																										

6. 実施内容（分析精度の向上のための技術開発）

- 6.1 模擬サンプル調製及び試験方法の検討
- 6.2 模擬燃料デブリの調製
- 6.3 模擬燃料デブリの分析
- 6.4 分析結果の評価
- 6.5 参考資料

6. 実施内容（分析精度の向上のための技術開発）

事業の狙いとこれまでの事業との関連（再掲）

事業の狙い：

性状が不明、分析が容易ではない燃料デブリの受入れに際し、我が国の総力をあげてその特徴を評価できる技術・体制を構築する。燃料デブリ分析を担う代表的な我が国の（ホットラボを有する）分析機関*1と連携する。

*1：NDC、JAEA大洗、NFD、JAEA原科研

精度の高いマイクロ組織の同定とそれらの特性を推定する手法を開発とは：

- ・ 燃料デブリ分析項目として重要な**4つの基本量（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*2が定義され、関係者間の共通認識となること。 *2：分析手法、手順、誤差、課題
- ・ 各ホットラボの分析技術を適切に組み合わせることにより、燃料デブリ分析評価者のニーズに対応できる状態とすること。

2022年度事業：「核種・元素量」分析技術の共通認識化

- ・ ほぼ单相均質なU-Zr系焼成体の微粉末試料を調製・使用した。
- ・ アルカリ融解技術や王水・フッ酸溶解法により、難溶性成分を含む燃料デブリの溶解が可能であることを確認できた。
- ・ 均質な模擬燃料デブリ試料について、不溶解残渣が生じる場合を含む分析精度を明らかにした。
- ・ 各機関の分析操作の詳細比較により、分析機関の手法、不確かさ要因の定義及び評価方法に関して大きな差がないことを確認した。

参画機関の間で、燃料デブリ分析における課題認識の共有化を図ることができた。組成既知の均質な模擬燃料デブリ試料について、4つの分析基本量のうち「核種・元素量」に対する分析技術の共通認識化を図り、「確からしさ」という物差しを各機関で同じ定義にすることとした。

「核種・元素量」で共通認識化した各機関の分析技術・不確かさの考え方をベース

本事業：4つの基本量を対象とした分析技術の共通認識化

- ・ U-Zr系の共晶固化体、溶融凝固試料を使用する。
⇒ 試料溶融条件の変化、相分布の非均質化、気孔分布の複雑化

マクロ的に同一組成であっても、ミクロ的には様々な相が分布するため、2020年度開始事業で共通認識化した分析精度（確からしさ）を適用して、未知試料のマイクロ組織の同定とそれらの特性を推定する分析技術の共通認識化を図る。

6.1 模擬サンプル調製及び試験方法の検討

非均質で塊状の試料を、構成相や成分の情報が限定的または未知の状態を受け入れる状況

- ・ 非均質で塊状の模擬燃料デブリを対象に、個々の分析手法による分析・測定データの取得、不確かさ・信頼性の評価による個々の分析・測定データの評価、および個々のデータに立脚した各基本量の評価を行う。
- ・ 試料の切断・粉砕等により各手法に適した寸法への分割・小片化を行うことが一般的である。このため、得られる分析データは分析・測定対象を絞った後の領域に関するものである。

「分析対象領域」

分析値の対象となっている領域（EDSの面分析であればその測定視野、化学分析であれば溶解に供した部分）。

「個別情報」

個々の分析対象領域について取得された分析・測定データに基づく情報

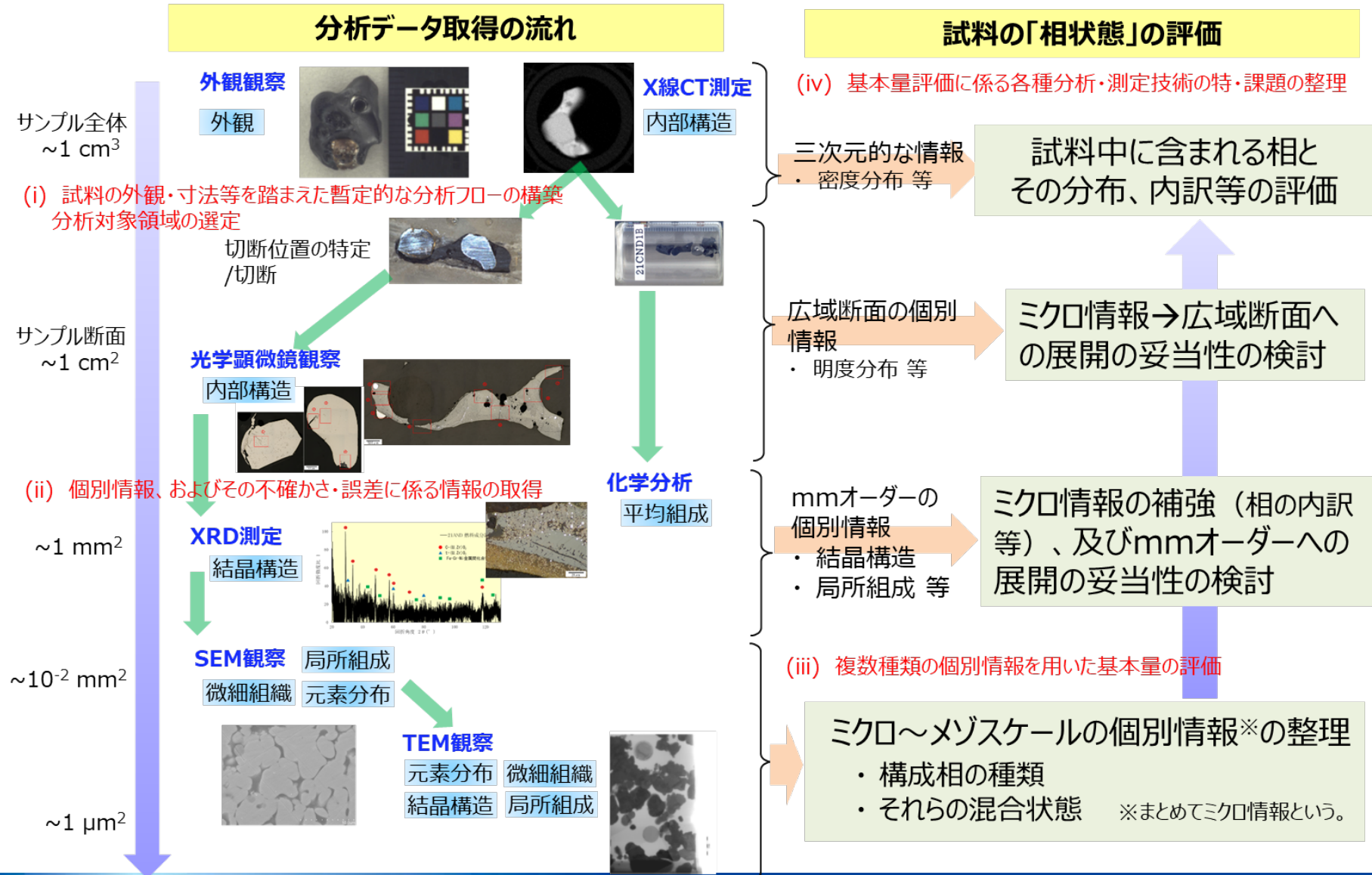
- ・ 4つの基本量は、試料の取り回しの段階で分析対象領域を適切に選定し、得られた複数種類の個別情報を組み合わせることで評価され、その評価結果が試料全体を適切に代表するものとなる。

本事業では、次の4つのステップのもと、各基本量に係る分析技術の共通認識化に向けた検討を実施する。

- (i) 試料の外観・寸法等を踏まえた暫定的な分析フローの構築
- (ii) 個別情報、およびその不確かさ・誤差に係る情報の取得
- (iii) 複数種類の個別情報を用いた基本量の評価
- (iv) 基本量評価に係る各種分析・測定技術の特徴および課題の整理

6.1 模擬サンプル調製及び試験方法の検討

分析対象領域の各レベルで得られる分析データとマイクロ組織の同定、「相状態」評価との関連



6.2 模擬燃料デブリの調製（東北大、JAEA原科研）

試料の具備要件

4つの基本量すべてが分析技術の共通認識化の対象であるが、中でも試料の非均質な特徴を捉える上で最も重要と考えられる「相状態」の分析技術の共通認識化を事業の中核に置く。

(i) 模擬性、製作性、 (ii) 「相状態」の評価上の観点、 (iii) 遠隔操作性

試料の調製方法及び対象元素

模擬燃料デブリの種類として、事故進展時に想定される生成プロセスが極端に異なる2種類のケースを設定。

圧力容器内で比較的低温での生成が想定される、燃料成分を中心とした (U, Zr, Gd, Fe)O₂焼結体・**試料【A】**、炉心構造材成分を中心としたSUS-B₄C-Zr溶融固溶体・**試料【B】**の模擬燃料デブリ。

⇒ 共晶反応による模擬燃料デブリ試料

格納容器床面での高温溶融・凝固を経たMCCI系 (SUS-B₄C-Zr-(U, Zr, RE)O₂-Concrete系) ・**試料【C】**の模擬燃料デブリ (RE：希土類元素)。

⇒ 高温溶融反応による模擬燃料デブリ試料

主要元素の想定

- U、Zr : 燃料デブリの主成分として着目。(2020年度開始事業と同様)
- B : 臨界評価に影響する制御棒成分 (B) として着目。(2020年度開始事業と同様)
- Fe、Cr、Ni : 事故進展やSUSの主要成分であるとの観点から重要元素として着目。(2020年度開始事業と同様)
- Si、Ca、Al : MCCI生成物で想定されるコンクリートの構成元素として着目。
Ca、Alについては、コンクリートの構成元素のうち相状態に影響する可能性のある元素。
- Gd : 臨界評価に影響する中性子毒の成分として着目。(2020年度開始事業と同様)
- Nd : 臨界評価に影響するパラメータのひとつである燃焼率の定量的指標を与える成分として着目。

6.2 模擬燃料デブリの調製（東北大、JAEA原科研）

(i) 模擬性、製作性

事故進展で想定される生成プロセスに対応した調製方法（原料・投入組成・加熱条件）または想定される相状態に対応した試料とする。

(ii) 「相状態」の評価上の観点









各分析機関がそれぞれの持つ技術に立脚して、「相状態」の情報を（局所的なデータの提示のみではなく）試料全体の特徴としてどこまで引き出せるかを明らかにすることが狙いである。従って、上記「(i) 模擬性、製作性」で示した「事故進展で想定される生成プロセスに対応すること」を重視する。ただし、各分析機関に配布する模擬燃料デブリは、同じ原料と投入組成、同じ製法で調製する。（同一の方法で調製した試料間の相状態のばらつき、及び分析の実現性については、要件には含めないこととする）。また、本事業では、投入組成はブラインドとせず、予め参加機関で議論し決定する。

(iii) 遠隔操作性









本事業では、ホットセルを用いた遠隔操作が分析結果に及ぼす影響を、各分析機関の共通課題として評価する。このため、今回使用する試料は未照射のため、本来はホットセルなどの利用は要しないと考えられるが、各作業は通常の燃料デブリを取り扱うラインを用いて実施する。

6.2 模擬燃料デブリの調製（東北大、JAEA原科研）

共晶反応による調製結果（東北大：試料【A】、【B】）・外観写真

試料番号→	A (NDC)	B (JAEA大洗)	C (NFD)	D (JAEA原科研)
試料識別 試料【A】				
試料識別 試料【B】				

高温溶融反応による調製結果（JAEA原科研：試料【C】）・外観写真

試料番号→		E (NDC)	F (JAEA大洗)	G (NFD)	H (JAEA原科研)
試料種別 試料【C】	上から				
	横から				
		塊状1個	塊状1個+かけら1個	塊状1個+かけら1個	塊状1個

6.3 模擬燃料デブリの分析（NDC、JAEA大洗、NFD、JAEA原科研）

表 各分析機関の分析項目と実施範囲

分析項目	NDC		JAEA大洗		NFD		JAEA原科研	
	試料【A】、【B】	試料【C】	試料【A】、【B】	試料【C】	試料【A】、【B】	試料【C】	試料【A】、【B】	試料【C】
X線CT（データ）	●	●	●	●	●	●	●	●
外観・重量	●	●	●	●	●	●	●	●
密度測定					●	●	●	●
硬さ測定							●	●
光学顕微鏡観察	●	●	●	●	●	●	●	●
X線回折測定	●	●			●	●	●	
SEM/EDX or WDX	●	●	●	●	●	●	●	●
TEM	●	●	●	●	●	●		
ラマン分光					●	●		
SIMS			●	●				
化学分析		●	●	●	●*	●	●	●

*：試料Bについて実施

試料【A】 共晶反応による模擬燃料デブリ（燃料成分）
 試料【B】 共晶反応による模擬燃料デブリ（炉心材料成分）
 試料【C】 高温溶融反応による模擬燃料デブリ

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-1 試料の外観・寸法等を踏まえた分析方針

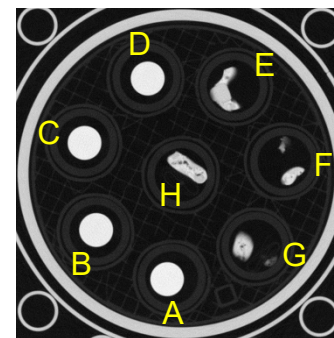
X線CT (データ)
(測定の状況)



試料の設置状況



試料収納容器外観

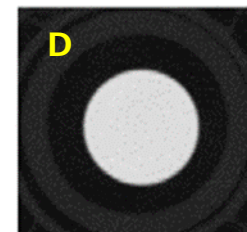
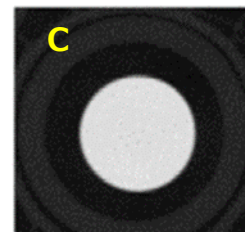
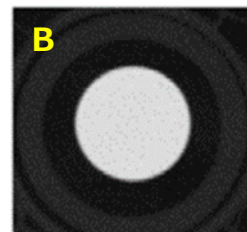
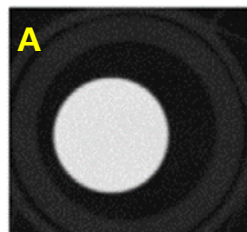


断面位置：
試料下端から
+3.0 mm

CT断面画像の一例 (試料下部)

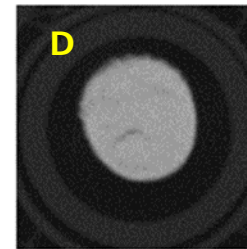
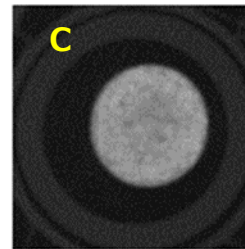
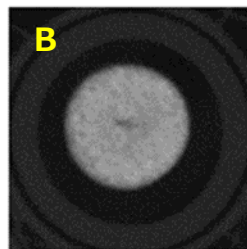
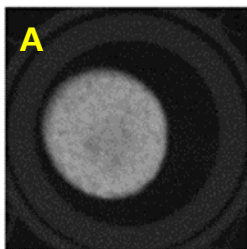
試料【A】

共晶反応による模擬燃料デブリ
(燃料成分)



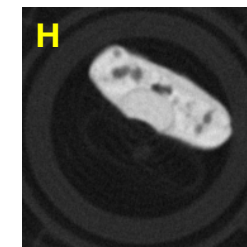
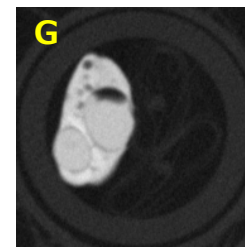
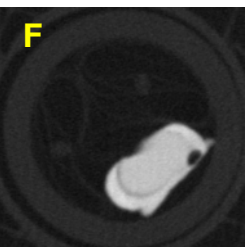
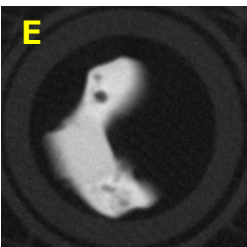
試料【B】

共晶反応による模擬燃料デブリ
(炉心構造材成分)



試料【C】

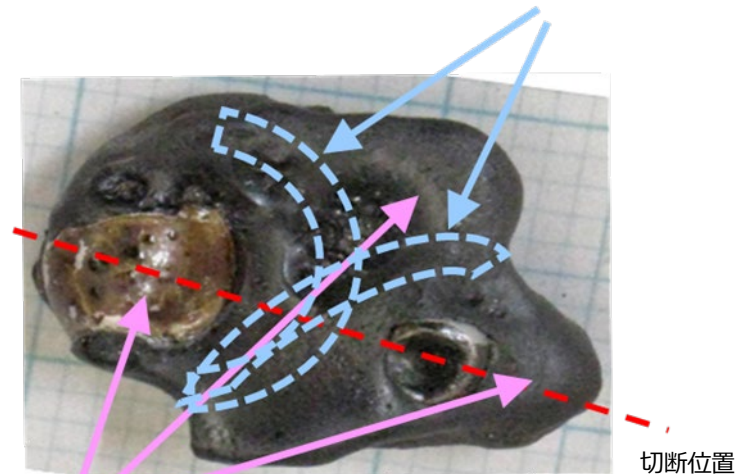
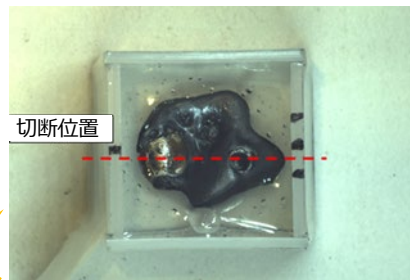
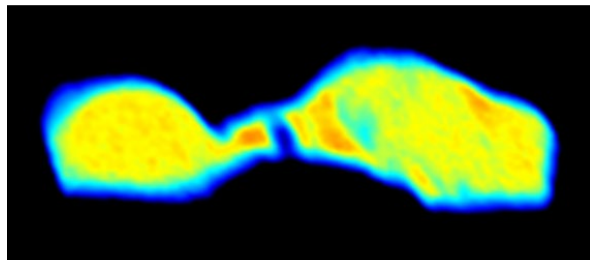
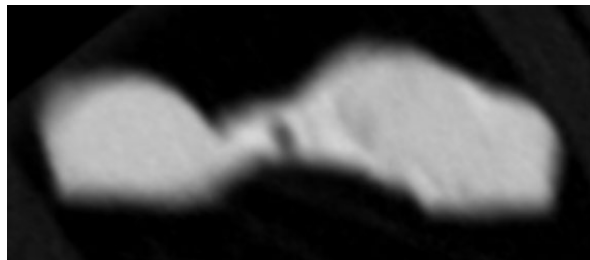
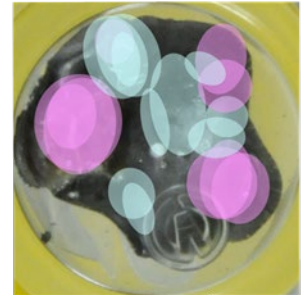
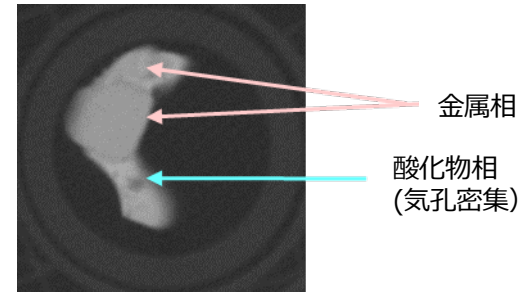
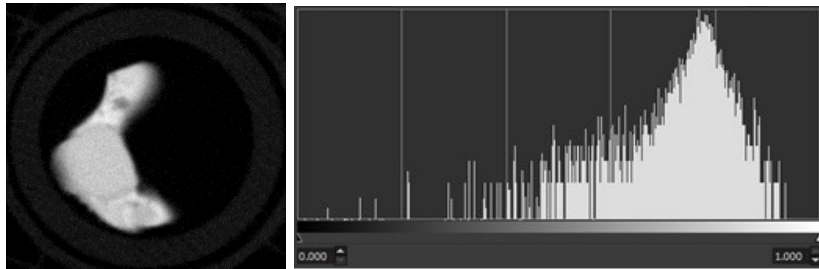
高温溶融反応による模擬燃料デブリ



6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-2 試料調製法（分析対象領域の選定）の方法論

- (1) 試料の状況（硬さ、脆さ、形状等）による取扱い方法
- (2) 試料切断位置の特定
- (3) 試料切断方法の検討



6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-3 個別情報、およびその不確かさ・誤差に係る情報の取得

各分析機関の作業ステップに応じた不確かさ要因をリストアップし、それに対する誤差値を規定（分析データに併せて提示）

各分析機関における不確かさ要因及び誤差値の検討結果の例

作業項目	不確かさ要因	誤差値
分析供試量の測定	供試量 = 溶解フラスコ重量(試料入り)-溶解フラスコ重量(空)	タイプA：標準分銅によるばらつき タイプB：電子天秤目盛由来の不確かさ、直線性
溶解液量測定	溶解液量 = 溶解液フラスコ重量(溶解・定容後) - 溶解フラスコ重量(空) (NFD) = 溶解液フラスコ容量 (JAEA大洗・JAEA原科研、NDC)	タイプA：標準分銅によるばらつき (NFD) タイプB：電子天秤目盛由来の不確かさ、直線性 (NFD) タイプB：メスフラスコ検定量 (NDC、JAEA大洗、原科研) タイプB：溶解液密度 (NFD) タイプB：温度変化 (NFD)

タイプA：実際に自分で測定を行い、複数のデータを得て、そのデータから標準偏差を算出する方法。

タイプB：タイプAの評価法以外の方法を用いて標準偏差を求める手法。論文、データブック、校正証明書などから標準偏差や合成標準不確かさが分かっている場合はその値など。

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-4 用語の定義

	CT	光学顕微鏡	SEM/EDS	XRD
得られる情報	密度	断面のマクロな状態、ミクロ組織 * 1 相状態 析出物 粒径 サブ組織	断面のマクロな元素分布、ミクロな元素組成 * 2	結晶相の同定、定性・定量分析、結晶化度、固溶体分析 * 3
推定できる性状	U含有物 (酸化物) $10\text{g/cm}^3 >$ 金属・Uなし酸化物 $5\text{g/cm}^3 < 10\text{g/cm}^3$ コンクリ・ガラス $< 5\text{g/cm}^3$ 空隙 $< 1\text{g/cm}^3$	酸化物相 (燃料、コンクリ、金属酸化物) ガラス質相 (ケイ酸化合物) 金属相 (SUS、Zr、金属間化合物) * 1	> 母相 : Fe-rich 金属相 - 67Fe/16Cr/9Ni/9Si > 柱状相 : Fe/Cr-rich 金属相 - 55Fe/31Cr/7Ni/7Si U/Zr-rich 酸化物相 : - 45U/47Zr/1Cr/4Ca/3Gd * 2	(Fe, Cr, Ni)-fcc (U, Zr)O ₂ -fcc or UO ₂ -fcc (a=... Å) (Zr, U)O ₂ -fct or ZrO ₂ -fct (a= , c=) ZrO ₂ -mono * 3

*** 1**
ミクロ情報の整理を行う際の「領域」の分類

- 領域 : 断面画像に基づく分類
- 相 : 高倍率の光学顕微鏡画像上の呈色状況から分類 (SEMで裏付けられる)。

微細組織を表す「相」の表現 (形状による表現、結晶構造を表すものではない)

- 「母相」: 面積割合が最も大きい相 (50%以上など) ⇒ 視野によって定義が異なるため、視野に注意。
- 形状に応じて「柱状相」、「菱状相」、「針状相」等。あるいは単に「粒界」、「析出物」等
- 母相とその他の区別が付きにくい場合は、単に「~相と~相の混合」と表記 (酸化物質の領域参照)

*** 2**
各相組成を表す際の「元素組成」の表現

- 並び順 : U/Zr/Fe/Cr/Ni/Si/Ca/Al/その他マイナー元素
- 周辺からの影響が疑われる元素は斜体で表示し、ビーム径や元素マップから判断できるのであれば別途記載。明言はできない場合もその旨記載。
- 微量元素については、整数表示で 1 at% 以上となるものを掲載。ピーク自体は検出されているものの整数表示の四捨五入で 0 % となるものは括弧書きで掲載。

*** 3**
結晶構造の表現

格子定数等を変えてフィッティングさせる場合はその条件を追記。

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-5 個別情報の取得：密度測定結果

表 模擬燃料デブリの密度測定結果（液浸法）

	試料【A】	試料【B】	試料【C】	試料【C】(欠片*)
JAEA原科研				
見かけ密度(0分) (g/cm ³)	7.83±0.02	6.08±0.02	6.97±0.01	
見かけ密度(60分) (g/cm ³)	8.01±0.03	6.34±0.01	6.99±0.01	
NFD				
見かけ密度 (g/cm ³)	8.070±0.010	6.433±0.007	7.037±0.006	2.850±0.060
かさ密度 (g/cm ³)	7.910±0.010	5.219±0.005	6.973±0.006	2.780±0.060

*：試料【C】から剥離した欠片（JAEA原科研では測定せず）

見かけ密度：開気孔を除いた体積の重量（バルク+閉気孔の体積）

かさ密度：開気孔を含む体積の重量（バルク+閉気孔+開気孔の体積）

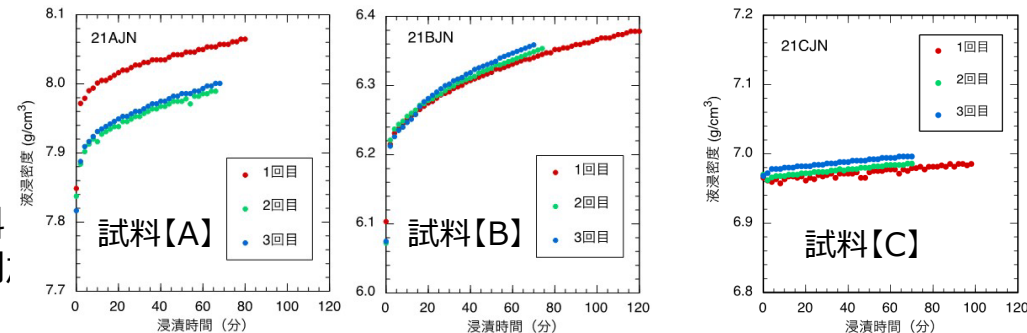
・JAEA原科研、NFDの測定結果は一致した。

・NFD測定の見かけ密度とかさ密度の差が大きい。

→見かけ密度(欠片*)はガラスのような密度の低い物質で主に構成されている可能性、閉気孔を多く含んでいる可能性が考えられる。

・試料【A】、【B】は測定中の天秤の指示値変化量が大きく長く続き、60分で平衡に達しなかったことから、表面から内部にかけて連続した開気孔、微細な亀裂等が多く存在することを示唆している。

・試料【C】も60分で完全な平衡には達していないが、変化量は試料【A】、試料【B】に比べてかなり小さいことから、内部には気孔や空洞があるとしても、試料表面には浸漬液が浸透できるような開気孔や亀裂がほとんどないことを示している。

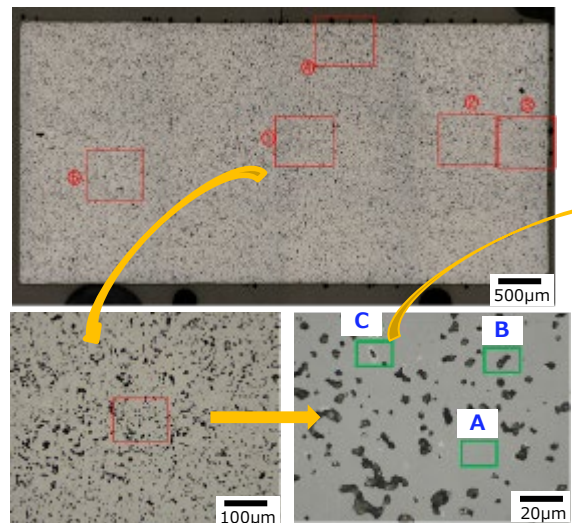


浸漬液浸透による見かけ密度の経時変化（JAEA原科研）

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-6 個別情報の取得：分析対象領域の各レベルで得られるデータとマイクロ組織の同定、「相状態」評価との関連

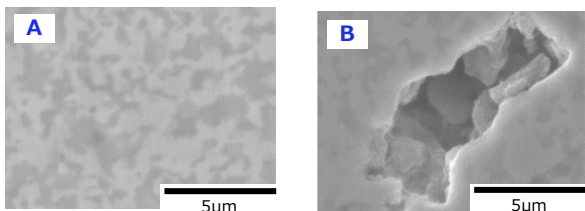
光学顕微鏡観察からTEM観察までの試料採取のフロー例



光学顕微鏡観察：

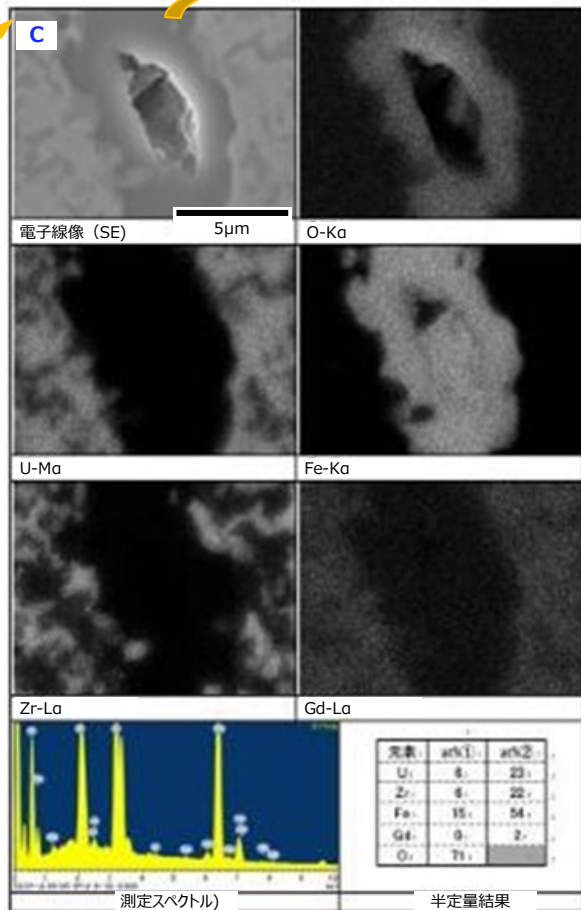
(U, Zr)O₂と(Zr, U)O₂の共晶組織

- ・視野A：母相（気孔がない位置）
- ・視野B：気孔部
- ・視野C：析出相（中心に気孔あり）

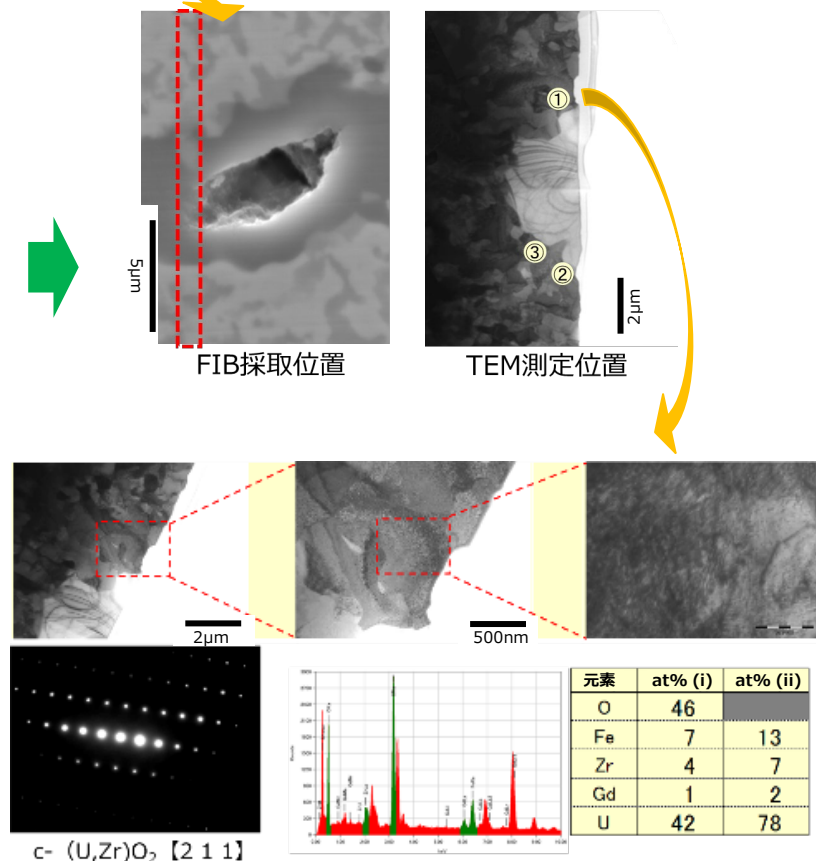


測定位置A：Uリッチ相 測定位置B：Zrリッチ相

SEM/EDS測定 測定位置A、B



SEM/EDS測定 位置C：Feリッチ相



TEM/EDS測定 位置①：Uリッチ相 cubic-(U, Zr)O₂
(Feリッチ相中のUリッチ箇所測定例)

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-7 個別情報の取得：SEM/EDS、SEM/WDS測定結果の知見

- ・各分析機関で、主要な領域（形成相）の結果が一致。
- ・この領域（形成相）を基本として全体組成の評価を実施する。

表 各分析機関による結果

	分析結果（共通・評価に使用する形成相）	分析結果の詳細（数値はat%）
試料【A】	母相、気孔部、析出相	
	・母相：Uリッチ酸化物相	66U/25Zr/2Fe/7Gd (NDC)、55U/15Zr/29Gd/1Fe (JAEA大洗)、59U/31Zr/2Fe/7Gd (NFD)、60U/31Zr/6Gd/3Fe (JAEA原科研)
	・母相：Zrリッチ酸化物相	26U/69Zr/3Fe/3Gd (NDC)、14U/77Zr/6Gd/3Fe (JAEA大洗)、30U/62Zr/4Fe/4Gd (NFD)、27U/65Zr/2Gd/6Fe (JAEA原科研)
	・析出相：Feリッチ金属相	15U/36Zr/48Fe/1Gd (NDC)、11U/13Zr/75Fe/2Gd (NFD)
試料【B】	母相、酸化物相、境界相、柱状相、菱状相	
	・母相：Fe/Cr/Ni/Zr相	54Zr/31Fe/11Cr/5Ni (NDC)、23Fe/15Zr/6Cr/4Ni (JAEA大洗)、21Zr/53Fe/11Cr/11Ni/5Si (NFD)、36Fe/23Cr/10Ni/31Zr (JAEA原科研)
	・酸化物相（柱状相、菱状相）：Zrリッチ相	81Zr/7Fe/4Cr/7Ni (NDC)、25Zr/4Fe/1Cr/1Ni/9C/61B (JAEA大洗) 65Zr/19Fe/5Cr/3Ni/8Si (NFD)
	・酸化物相（境界相）：Fe/Crリッチ相	61Fe/35Cr/2Ni/2Zr (NDC)、63Fe/28Cr/3Ni/6C (JAEA大洗)、5Zr/62Fe/28Cr/3Ni/1Si (NFD)、51Fe/34Cr/5Ni/10Zr (JAEA原科研)
試料【C】	<金属質領域> 母相、柱状晶、粒界	
	・母相：Feリッチ金属相	67Fe/16Cr/9Ni/9Si (NDC)、70Fe/14Cr/10Ni/5Si (NFD)、59Fe/20Cr/14Ni/6Si (JAEA原科研)
	・粒界：Fe/Crリッチ相	55Fe/33Cr/6Ni/5Si (NFD)、51Fe/30Cr/11Ni/9Si (JAEA原科研)
	・柱状晶：Fe/Crリッチ相	55Fe/31Cr/Ni/7Si (NDC)
	<酸化物領域> 酸化物相、ガラス相、金属相	
	・酸化物相：U/Zrリッチ酸化物相	52U/39Zr/9Gd (JAEA大洗)、45U/47Zr/4Ca/3Gd/1Cr (NDC) 35U/31Zr/8Ca/6Si/5Al/5K/4Mg/3Gd/1Fe/1Cr/1Nd (NFD)、 53U/34Zr/9Ca/3Gd/1Nd (JAEA原科研)
・ガラス相：Siリッチ酸化物相	38Si/25Al/19Ca/8Cr/5Zr/4U (NDC)、40Cr/10Al/3U/1Zr/1Si/1Gd (JAEA大洗)、 55Al/25Ca/10Si/3Zr/2Mg/2U/1Gd/1Ti (NFD)、 74Ca/8Si/Zr/7Cr/2U/1Gd/1Nd (JAEA原科研)	
・金属相：Feリッチ金属相	57Fe/42Cr/1Si (NDC)、30Fe/66Cr (JAEA大洗)、 54Cr/32Fe/5Al/2Si/2Ca/2Zr/1Gd/1Mg/1U (NFD)、 51Fe/25Cr/14Si (JAEA原科研)	

注1) 試料【A】 共晶反応による模擬燃料デブリ（燃料成分）、 試料【B】 共晶反応による模擬燃料デブリ（炉心材料成分）、 試料【C】 高温溶融反応による模擬燃料デブリ

注2) 分析結果の詳細：斜体文字は周辺からの影響を受けている可能性がある元素

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-7 個別情報の取得：SEM/EDS、SEM/WDS測定による知見

表 試料【A】 SEM面分析定量結果

試料【A】 共晶反応による模擬燃料デブリ（燃料成分）

元素	NDC		JAEA大洗		NFD		JAEA原科研	
	調製時 at(%)	分析 at(%)	調製時 at(%)	分析 at(%)	調製時 at(%)	分析 at(%)	調製時 at(%)	分析 at(%)
U	45.0	40.0±1.0	45.0	42.5±0.4	45.0	42.7±10.3	45.0	46.2±2.8
Zr	45.0	51.0±1.0	45.0	43.9±2.8	45.0	45.1±8.3	45.0	39.3±2.8
Gd	5.0	5.0±0.1	5.0	6.6±0.3	5.0	4.7±1.2	5.0	7.2±0.3
Fe	5.0	4.0±0.1	5.0	6.9±1.4	5.0	7.5±1.9	5.0	7.3±0.2

- 各分析機関の間では、Zrで最大10%の差が見られた。
- 調製時の投入量と比較して、全体としてUは低め、Gd、Feは高めの傾向を示す。
- 共晶反応による比較的均一な組織構造に対して、各分析機関によるSEMの面分析結果は、概ね、試料調製時の組成と一致しており、差異が生じる場合でもその傾向は一致した。

注) 測定点が多い箇所は、低倍のSEMデータを代表値として表示 (NFD、JAEA原科研)

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-7 個別情報の取得：SEM/EDS、SEM/WDS測定による知見

表 試料【B】 SEM面分析定量結果

試料【B】 共晶反応による模擬燃料デブリ（炉心材料成分）

元素	NDC		JAEA大洗		NFD		JAEA原科研	
	調製時 at(%)	分析 at(%)	調製時 at(%)	分析 at(%)	調製時* ¹ at(%)	分析 at(%)	調製時* ¹ at(%)	分析 at(%)
Fe	38.1	21.2±1.1	38.1	30.5±4.7	47.6	50.8±9.0	47.6	35.4±0.5
Cr	11.1	7.1±0.6	11.1	9.0±1.5	13.9	15.6±2.3	13.9	20.9±1.9
Ni	5.8	3.0±0.2	5.8	4.6±0.7	7.3	7.9±1.1	7.3	9.4±1.0
Zr	25.0	38.4±1.1	25.0	12.7±1.8	31.3	25.6±6.8	31.3	34.2±2.7
B	20.0	30.3±12.6	20.0	43.1±13.6	-	-(測定不可)	-	-(測定不可)

*1 Bを除いて算出した組成

- NDC、JAEA大洗のB測定値及び誤差値が大きいため、その影響が他元素の比率にも影響している。
- 共晶反応による比較的均一な組織構造に対して、SEMの面分析結果において、Bの組成を除いては、概ね、試料調製時の組成と一致し、差異が生じる場合でもその傾向は一致しているものの、試料【A】よりデータのばらつき及び誤差値は大きい。

注) 測定点が多い箇所は、低倍のSEMデータを代表値として表示（NFD、JAEA原科研）

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-7 個別情報の取得：SEM/EDS、SEM/WDS測定による知見

試料【C】 高温溶融反応による模擬燃料デブリ

表 試料【C】 SEM面分析定量結果 (1/2)

元素	NDC		JAEA大洗		NFD* ¹		JAEA原科研* ¹		
	調製時 at(%)	分析 at(%)	調製時 at(%)	分析 at(%)	調製時 at(%)	分析 at(%)	調製時 at(%)	分析* ² at(%)	分析* ³ at(%)
U	9.2	23.8±5.9	9.5	19.3±2.1	12.1	13.2±8.3	9.6	37.2±4.3	-(未測定)
Zr	9.2	24.8±6.2	8.9	17.0±0.5	10.4	16.5±5.0	8.9	25.0±2.7	-(未測定)
Fe	31.8	1.0±0.4	31.0	2.3±2.3	33.4	0.8±0.3	30.9	2.1±0.5	50.9±2.5
Cr	9.2	5.0±1.2	8.6	4.5±2.3	9.2	1.8±0.8	8.6	-(未測定)	29.6±2.2
Ni	4.1	0.0±0.0	4.5	0.0	4.8	0.2±0.2	4.5	-(未測定)	13.2±1.1
Si	15.4	17.8±3.0	14.7	0.1±0.1	16.8	6.6±1.7	14.7	4.2±0.7	6.3±1.3
Al	3.1	13.9±3.5	3.1	14.8±2.1	3.3	39.7±5.0	3.0	-(未測定)	-(未測定)
Ca	7.2	10.9±1.8	6.7	37.5±4.4	7.7	18.2±3.3	6.7	26.8±8.0	-(未測定)
Mg	0.3	1.0±0.1	0.4	0.0	0.9	1.1±0.1	0.5	-(未測定)	-(未測定)
Gd	1.0	2.0±0.5	0.8	4.5±0.5	1.0	1.5±0.5	0.8	4.6±0.2	-(未測定)
Nd	0.2	0.0	0.2	0.0	0.3	0.4±0.2	0.2	-(未測定)	-(未測定)
B	9.2	0.0	11.5	0.0	-	-(未測定)	11.6	-(未測定)	-(未測定)



*1 測定値のみで100分率を導出 *2 酸化物相のSEM面分析結果、 *3 金属粒のSEM面分析結果

注) 測定点が多い箇所は、低倍のSEMデータを代表値として表示 (NFD、JAEA原科研)

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-7 個別情報の取得：SEM/EDS、SEM/WDS測定による知見

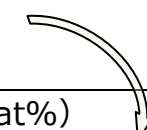
試料【C】 SEM面分析定量結果（2/2）

- NDC、JAEA大洗、NFDの測定値は、U、Zrの成分やコンクリート成分が高く、Fe、Crなど構造材料成分が低い。
- JAEA原科研のように、酸化物相、金属粒に分けて測定した結果を考慮すると、いずれも、金属成分が少ない相の測定を実施している可能性が高い。
- JAEA原科研の金属粒中にステンレス鋼よりかなり高い濃度のSiが含まれる要因は、原料混合物中の金属Zrによってアーク溶解時にコンクリート中のSiO₂が還元されて金属側に移行したためである。逆にZrが検出されていないので、原料中の金属Zrはコンクリートからの水分による酸化やSiO₂還元により酸化したと言える。
- 高温熔融反応による非均質な組織構造に対して、SEMの面分析において、測定領域（形成相）を考慮して測定、評価する必要がある。

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-8 個別情報の取得：TEM/EDS測定による知見

表 SEM観察に基づいて特定した形成層に対応する化学形態、結晶構造



SEM観察で特定した領域（形成相）に対応する化学形態、結晶構造をTEM観察により同定し、領域の妥当性を確認するほか、酸化物相中の析出物に着目した分析を実施

	SEM観察結果（共通・評価に使用する形成相）	TEM分析の概要（主な分析結果:数値はat%）
試料【A】	・母相：Uリッチ酸化物相	c-(U,Zr)O ₂ : 88U/8Zr/1Fe/3Gd (NDC) (U,Zr)O ₂ -fcc : 81U/13Zr/6Gd (NFD)
	・母相：Zrリッチ酸化物相	t-(Zr, U)O ₂ : 26U/70Zr/3Fe (NDC) t-(Zr, U)O ₂ : 25U/71Zr/3Fe/1Gd (NFD)
	・析出相：Feリッチ金属相	Fe ₂ O ₃ : 99Fe/1Gd(/U/Zr) (NDC) Fe ₃ O ₄ -cubic(spinel) : 99Fe/1U/1Zr (NFD)
試料【B】	・母相：Fe/Cr/Ni/Zr相	母相:Fe ₃ Zr相 : 53Fe/25Zr/10Cr/11Ni (NDC) Fe ₂₃ Zr ₆ -fcc相 : 53Fe/21Zr/10Cr/13Ni/3Si (NFD)
	・酸化物相（柱状相、菱状相）：Zrリッチ相	柱状相:FeB ₂ 相 94Zr/5Fe(/Cr/Ni) (NDC) ZrC-fcc相 : 100Zr (NFD) ZrB ₂ -hexagonal相 : 100Zr (NFD)
	・酸化物相（境界相）：Fe/Crリッチ相	境界相:FeCr合金相 68Fe/30Cr/2Ni (NDC) Fe-bcc相 : 65Fe/32Cr/3Ni (NFD)
試料【C】	・母相：Feリッチ金属相	(Fe,Cr,Ni)-bcc : 母相 66Fe/14Cr/13Ni/7Si (NDC) Fe-bcc : 母相) 68Fe/13Cr/13Ni/6Si (NFD)
	・粒界：Fe/Crリッチ相	Fe/Cr-rich金属相 : 45Fe/53Cr/1Ni (NFD)
	・柱状晶：Fe/Crリッチ相	Fe(σ),Cr or (Fe,Cr)boride : 3Fe/55Cr/1Ni (NDC)
	・酸化物相：U/Zrリッチ酸化物相	(U,Zr)O ₂ -fcc : 57U/34Zr/1Fe/1Cr/1Si/1Ng/1Gd (NDC) (U,Zr)O ₂ -fcc : 58U/34Zr/5Ca/2Gd (NFD)
	・ガラス相：Siリッチ酸化物相	(Si,Al,Ca,O) : 非晶質 36Si/21Ca/14Al/18Mg/5Cr/2Zr/1U/1Fe (NDC) (Al,Ca,Si,O) : 非晶質 30Ca/55Al/12Si/1Zr/1Mg/1Ti (NFD)
	・金属相：Feリッチ金属相	(Fe,Cr)-bcc : 金属 - 48Fe/48Cr/2Si/1Ca (NDC)

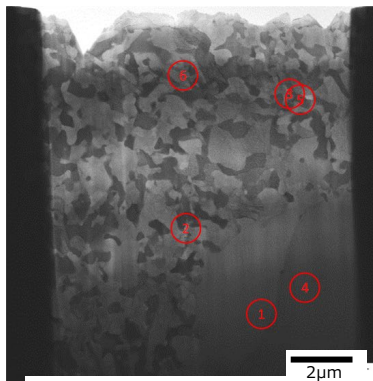
試料【A】 共晶反応による模擬燃料デブリ（燃料成分）、 試料【B】 共晶反応による模擬燃料デブリ（炉心材料成分）、 試料【C】 高温溶融反応による模擬燃料デブリ

6.3 模擬燃料デブリの分析

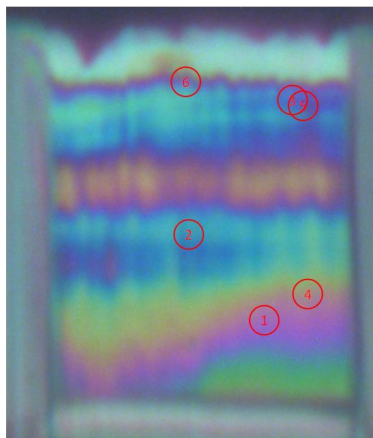
6.3-9 個別情報の取得：ナノラマン分光分析による知見

ナノラマン分析は金属相には不感であるため、試料【A】、試料【C】（酸化物相を含むことが確認された試料）を対象。

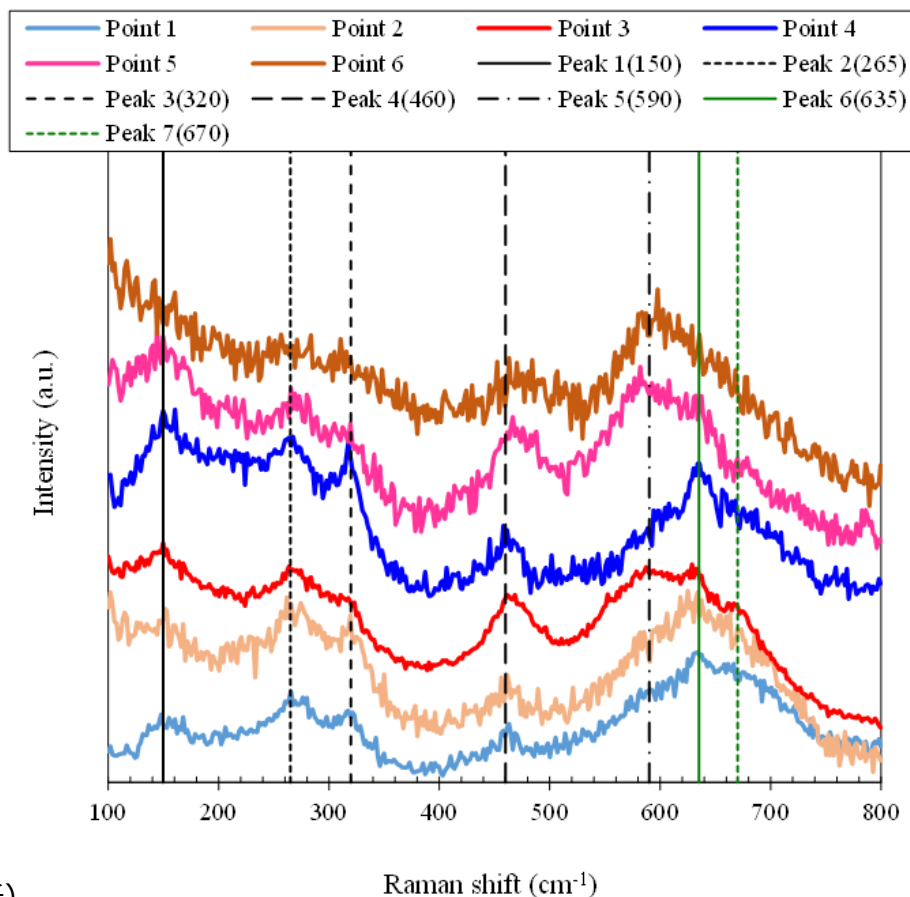
(NFD) 試料【A】



明視野像 (TEM観察)



光学顕微鏡像 (ラマン分光分析)



FIB-TEM試料 (試料【A】) のラマン分光分析結果

- ・低波数側にピークが生じている。
- ・tetragonal-ZrO₂結晶構造によるピーク。(150、265、320、460、635 cm⁻¹)
- ・tetragonal-ZrO₂結晶構造によるピーク。(635 cm⁻¹、)
- ・fcc-(U、Zr)O₂に由来するピーク。(590 cm⁻¹)
- ・cubic-Fe₃O₄に由来するピーク。(670 cm⁻¹)



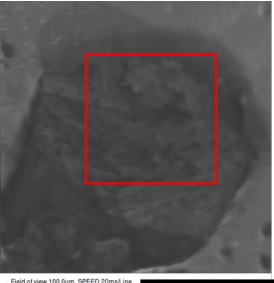
- ・ TEM観察で確認された結果の妥当性を確認

TEM・明視野像とラマン分光分析で得られた光学顕微鏡像の比較およびラマン分光分析位置

6.3 模擬燃料デブリの分析

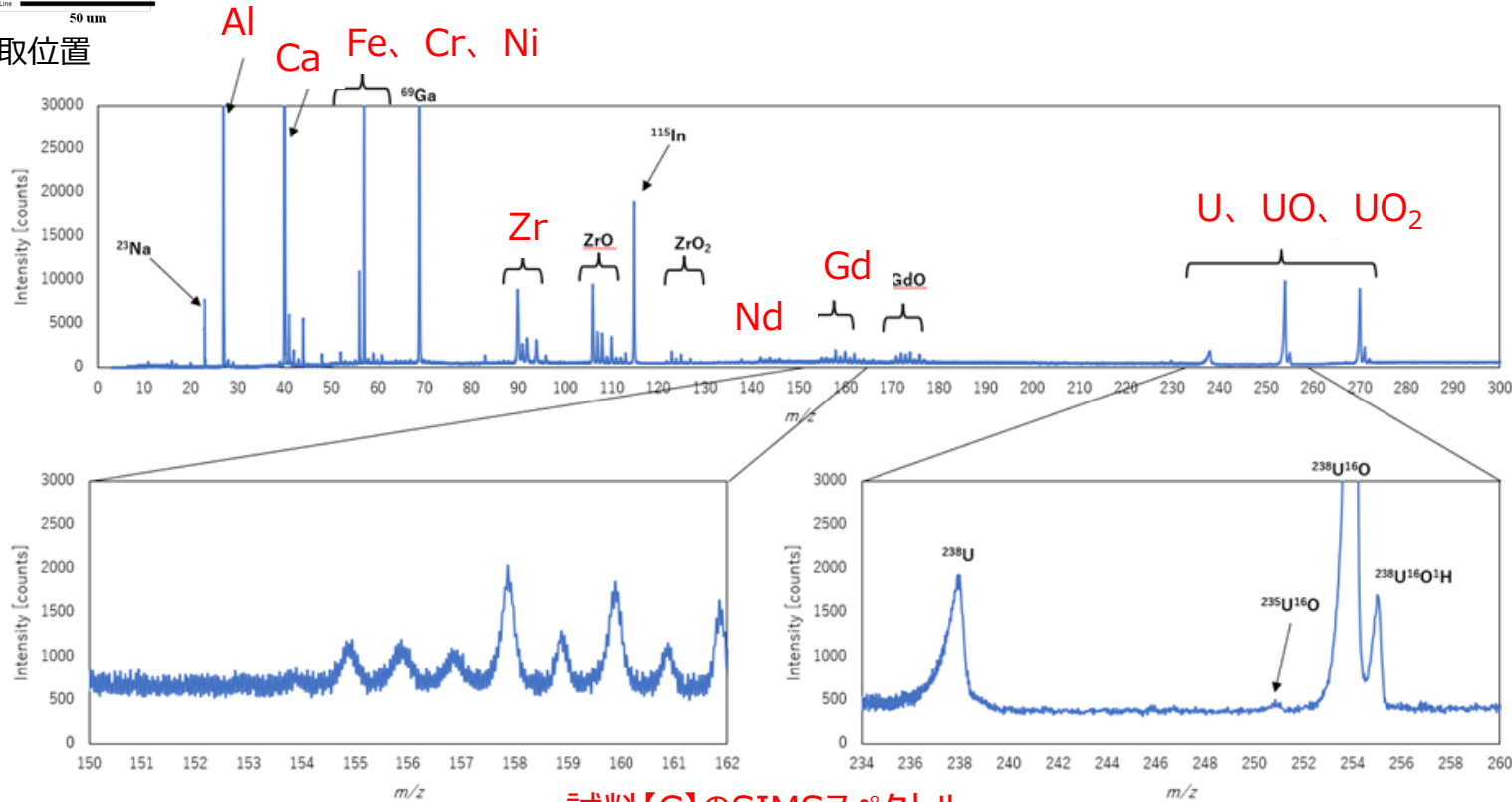
6.3-10 個別情報の取得：SIMS測定による知見

SIMS測定 (JAEA大洗) 試料【C】



試料採取位置

- 構成元素であるAl、Ca、Fe、Cr、Ni、Zr、Nd、Gd、Uの存在を確認した。
- $m/z=106$ 付近、 $m/z=126$ 付近のピークはZrに ^{16}O 及び $^{16}\text{O}_2$ が付加されたイオンピーク。
- Cr、Fe、Niの結果については、本来同位体がない m/z の位置でピークのようなものが見られ、特に安定同位体のない $m/z=57$ の個所に高いピークが見られたため、天然同位体比との比較検討ができなかった。表面に付着した有機物等の影響が考えられるが、原因は特定できていない。



試料【C】のSIMSスペクトル



- SEM、化学分析で確認された結果の妥当性を確認
- 同位体比も算出

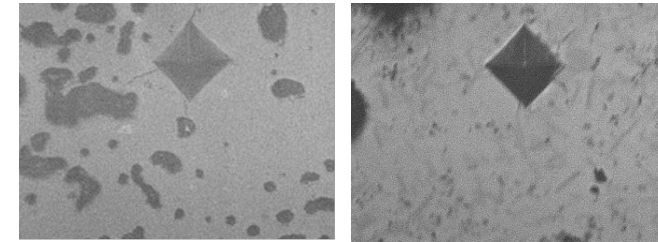
6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-11 個別情報の取得：硬さ測定による知見

表 微小硬さ測定結果

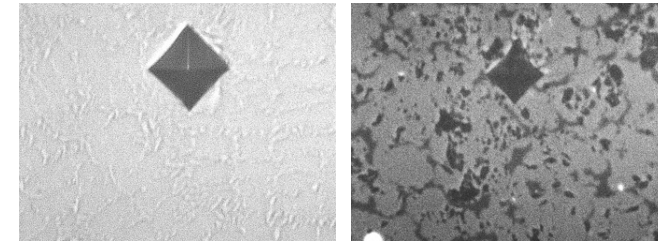
試料	測定部位	荷重 (N)	測定点数	硬さ** (GPa)	備考
試料【A】	母相*	4.903	9	8.3±0.1	気孔を避けて測定
試料【B】	母相及び酸化物相	4.903	8	8.6±0.7	ZrB ₂ とZrC分散析出
試料【C】	金属粒①	1.961	6	2.4±0.1	Si~6 at%
	金属粒②	1.961	6	3.4±0.1	Si~11 at%
	酸化物かけら内	1.961	3	4.3±0.1	Si~14at%
	金属粒③				
	ガラス相	2.942	2	7.8±0.1	ガラスリッチ領域
	主に(U,Zr)O ₂ 粒子	2.942	15	10.9±0.6 (max. 12.2)	粒間に若干の非晶質酸化物

* Uリッチ酸化物相とZrリッチ酸化物相の2相の共存相、 ** ±数値は多点測定値の標準偏差



試料【A】

試料【B】



試料【C】金属粒②

試料【C】酸化物かけら内、
金属粒③

図 微小硬さ測定時の圧子押し込み後の光学顕微鏡像

- 試料【A】の微小硬さは8.3 GPaであり、類似の組織・組成を持つTMI-2燃料デブリや模擬燃料デブリと同程度である。
- 試料【B】硬い金属として知られるFe₂Zr型Laves相（微小硬さが20 GPa前後と非常に硬い相）を含んでいるため、8~9 GPaとなる。
- 試料【C】立方晶単相(U、Zr)O₂粒子を主とした組織では、粒間に若干のガラス質酸化物を含んでいる影響があるが11 GPa程度の値が得られており、TMI-2燃料デブリや熔融固化模擬燃料デブリの立方晶単相(U、Zr)O₂に近い。
- 硬さデータとこれまでの経験、知見より、組織や相状態の特定が可能である。

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-12 個別情報の取得：化学分析による知見

表 化学分析により得られた元素組成：試料【C】

試料【C】 高温溶融反応による模擬燃料デブリ

	JAEA原科研	NDC	JAEA大洗	NFD	JAEA原科研
元素	調製時 at(%)	分析値 at(%)	分析値 at(%)	分析値 at(%)	分析値 at(%)
U	9.6	16.1±0.8	37.6±1.6	14.7±0.2	14.7±0.5
Zr	8.9	16.1±0.7	26.9±1.4	12.2±0.2	14.4±1.2
Fe	30.9	38.2±2.2	0.8±0.3	47.7±1.1	39.2±2.0
Cr	8.6	8.0±0.4	1.1±0.2	10.6±1.2	10.1±0.4
Ni	4.5	6.0±0.4	0.04±0.01	7.3±0.4	5.2±0.2
Si	14.7	2.0±0.1	2.0±0.7	4.3±0.1	7.8±2.0
Al	3.0	5.0±0.3	14.7±2.3	-(未測定)	0.0
Ca	6.7	5.0±0.3	7.2±0.8	-(未測定)	5.7±0.8
Mg	0.5	0.1±0.01	5.3±0.7	-(未測定)	0.7±0.05
Gd	0.8	1.0±0.04	3.2±0.1	0.6±0.01	1.3±0.1
Nd	0.2	0.4±0.013	0.9±0.1	0.2±0.004	0.3±0.02
B	11.6	2.0±0.2	0.2±0.02	2.6±0.2	0.3±0.01

試料溶解範囲⇒

分析領域を含む全体

酸化物の一部




分析領域を含む全体

分析領域を含む全体

6.3 模擬燃料デブリの分析

6.3-12 個別情報の取得：化学分析による知見

化学分析結果 **試料【C】**

- ・ 試料切断片など、分析対象領域を含む試料を分析したNDC、NFD及びJAEA原科研の、U、Zrは概ね一致している。
- ・ 一方、試料の一部（酸化物相）を分析したJAEA大洗のデータは、他分析機関の傾向と一致せず、酸化物相やガラス相を分析したものと推定される結果となった。
- ・ コンクリート成分の分析値にばらつきが多いが、溶解性や測定装置の影響なども考慮して評価していく必要がある。
- ・ 高温溶融反応による非均質な組織を有する試料については特に、分析及び評価対象箇所を意識した試料採取の必要がある。

6.4 分析結果の評価

6.4-1 基本量である「相状態」を評価するための個別情報の取扱い

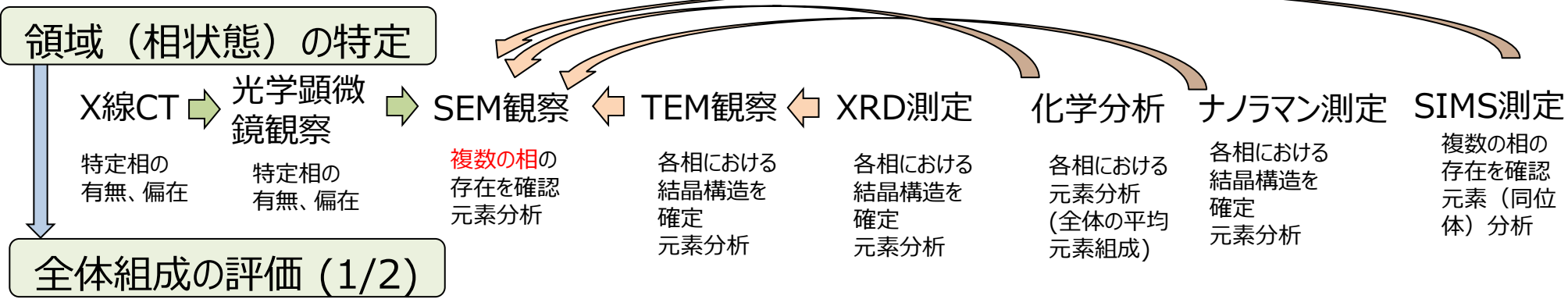
□ 評価方法

- 試料を構成する相構造の分析・評価
- 分析範囲（視野）が分析方法によって異なり、分析視野に応じて精度が異なる。
 $X線CT \geq 光学顕微鏡観察 > SEM/EDS分析 > TEM/EDS分析$
 分析範囲大：全体像把握 ↗ 分解能・精度 ↘
 分析範囲小：全体像把握 ↘ 分解能・精度 ↗
- 相分布を定量的に評価する方法を検討
 ✓高倍率測定で得られた情報を如何に**低倍率測定に反映**するか？

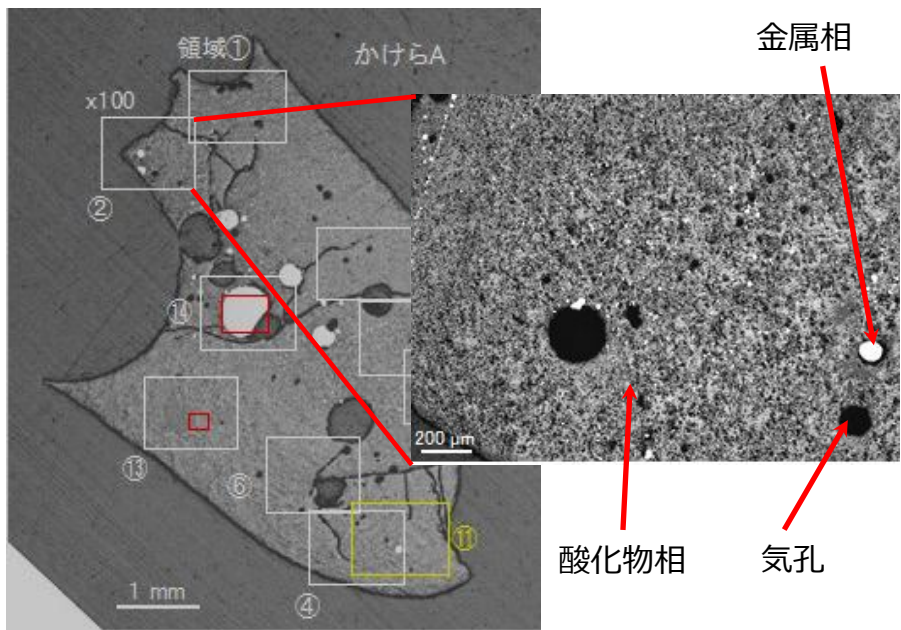
測定・分析	長所	短所
化学分析	●試料全体の元素組成を分析可能	●局所的に組成が異なる場合、試料分取量に応じて元素偏在の影響を受ける。
X線CT	●未加工状態の試料の内部構造を観察可能	●解像度が低く、微細構造の把握が困難 ●密度が近い相では識別困難
光顕試験	●試料断面全体の相状態を観察可能	●切断面のみで情報が限定 ●μmオーダーの相の識別困難
SEM/EDS分析 (電子像観察)	●試料断面の微細な相状態を観察可能 ●EDSにより観察位置の構成元素の分析可能	●詳細情報は切断面の一部に範囲が限定
TEM/EDS分析 (電子像観察)	●試料断面の極微細な相状態を観察可能 ●EDSにより観察位置の構成元素の分析可能	●詳細情報は極一部の採取範囲に限定
XRD	●試料断面の結晶相の同定が可能 ●結晶相（化合物）の組成評価可能	●非晶質の同定が不可 ●他のピーク強度、位置、バックグラウンド等の影響
ナノラマン	●試料断面の極微細な相状態を観察可能 ●結晶構造	●金属には不感
SIMS	●試料断面の極微細な相状態を観察可能 ●付属SEM/EDSにより観察位置構成元素の分析可能	●詳細情報は極一部の採取範囲に限定

6.4 分析結果の評価

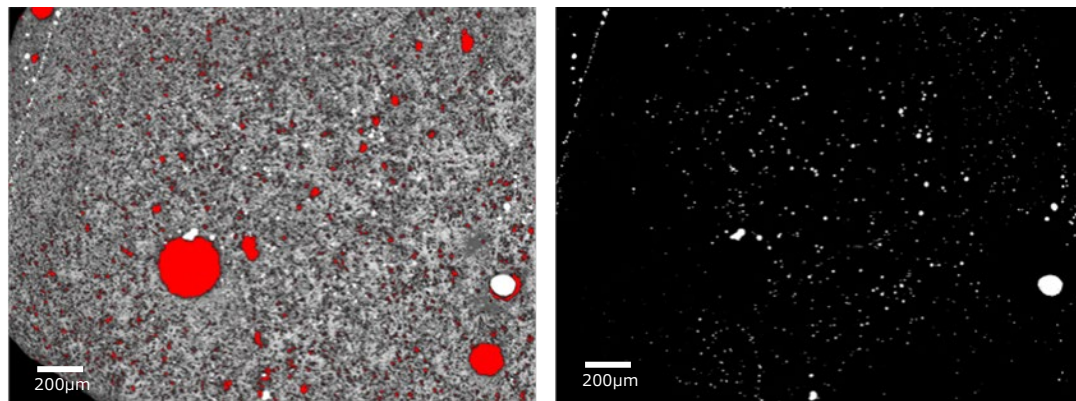
6.4-2 個別情報から全体組成を評価する方法：JAEA原科研 試料【C】の例



① 分析対象領域の決定



② 領域（形成相）の割合の評価



しきい値設定で気孔を検出（赤色部）

2階調化で金属粒を検出（白色部）

気孔/金属粒/酸化物の面積比率評価の例

光学顕微鏡観察データによる領域の特定

JAEA原科研 試料【C】の例

光学顕微鏡観察データの画像解析

6.4 分析結果の評価

6.4-2 個別情報から全体組成を評価する方法：JAEA原科研 試料【C】の例

全体組成の評価 (2/2)

③ 分析対象領域の平均的な組成の測定

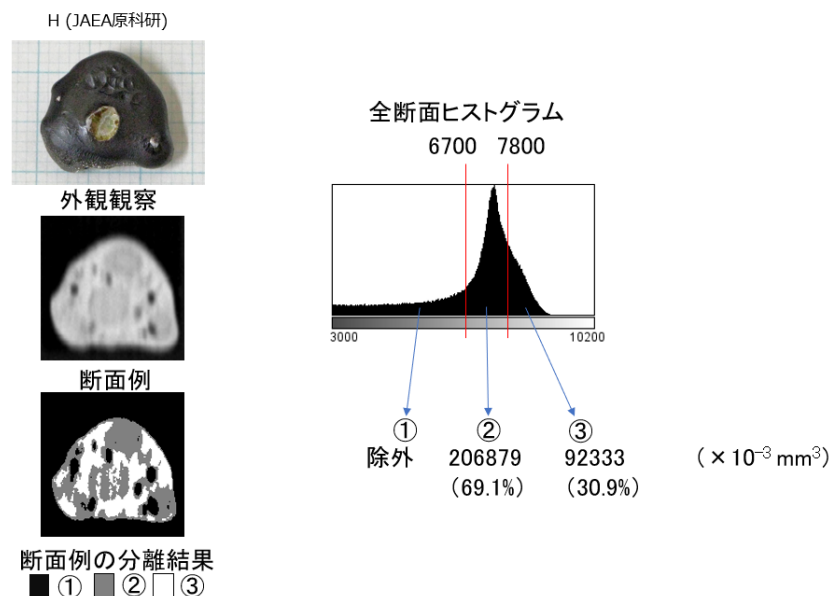
- ・領域は基本的にFe基合金、(U、Zr)O₂及びガラス質酸化物の3相から成る。
- ・mm以上のマクロな金属粒 (Fe基合金) の体積含有率はCT像で解析、ミクロな金属粒と気孔の体積含有率は光学顕微鏡観察像x50 (7視野) で解析。
- ・酸化物中の(U、Zr)O₂/ガラス質酸化物の面積比率は、両者の輝度差が大きいSEMx100の二次電子像 (13視野) で解析。
- ・Fe基合金の組成は、部分的に合金粒のみを破碎した粉末の溶解液化学分析データを用いる。
- ・ガラス質酸化物と(U、Zr)O₂の元素組成は化学分析データから評価。
(分析対象領域を含む一部分の化学分析データと比較、切削粉など)

④ 分析対象領域の割合と各領域の平均的な組成に基づく全体組成評価

- ・密度データを基に、各領域に含まれる元素重量を評価
- ・X線CTで求めた体積と各領域の元素重量に基づき、試料全体の組成を評価。
- ・CT像は1ピクセル当たり0.1×0.1 mm²で、高さ方向には0.2 mmステップで撮影されているので、輪廓面積を解析してそれぞれに0.2 mmを乗ずることで体積を算出。

⑤ 化学分析による平均組成

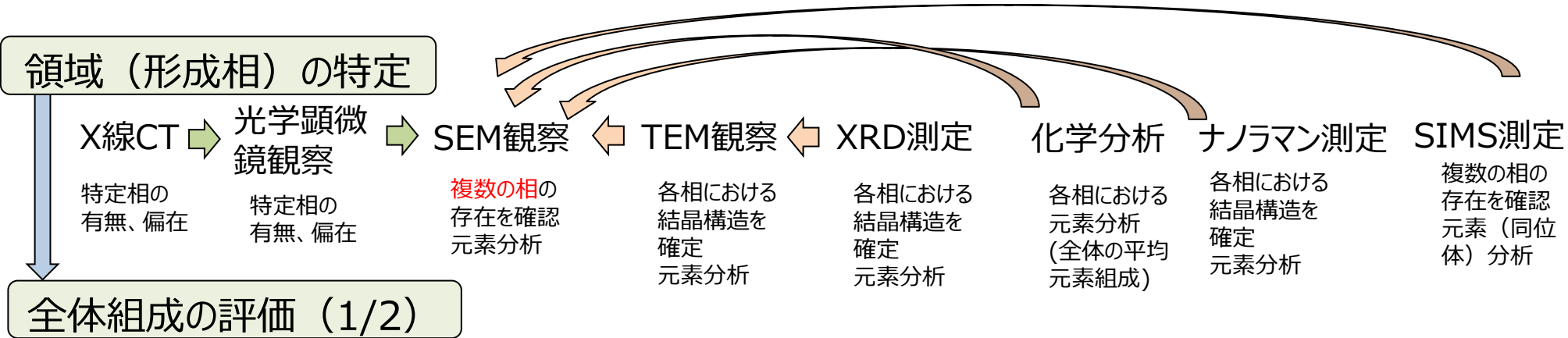
- ・分析対象試料全体を溶解して求めた化学分析データを元素分析値として使用することも考えられる。



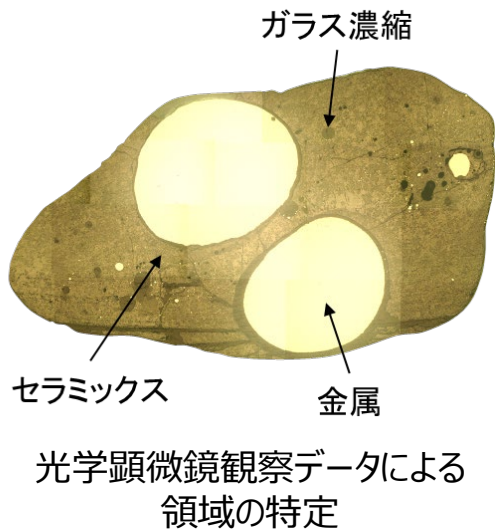
試料【C】 (JAEA原科研) の全体CT処理結果の例

6.4 分析結果の評価

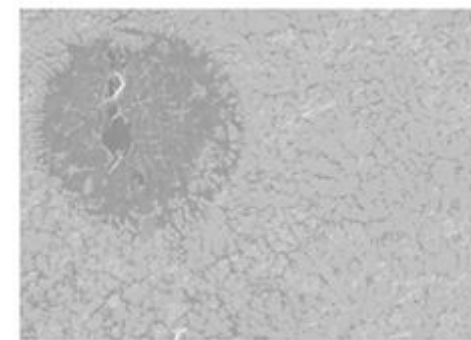
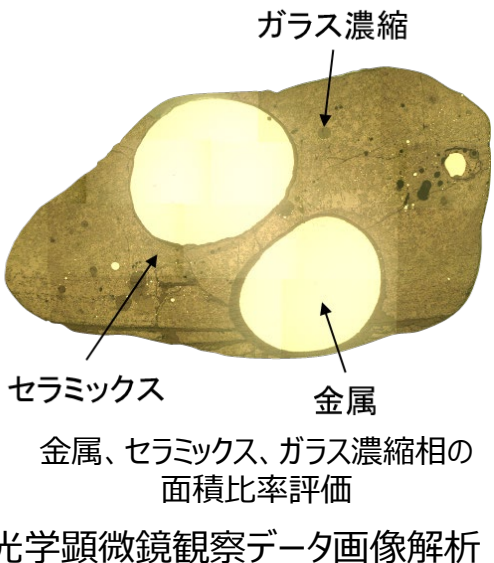
6.4-2 個別情報から全体組成を評価する方法：NFD 試料【C】の例



① 分析対象領域の決定



② 領域（形成相）の割合の評価



セラミックス相における金属相、ガラス相、セラミックス相の面積比率評価

SEMデータ画像解析

NFD試料【C】の例

6.4 分析結果の評価

6.4-2 個別情報から全体組成を評価する方法：NFD 試料【C】の例

全体組成の評価 (2/2)

③ 分析対象領域の平均的な組成の測定

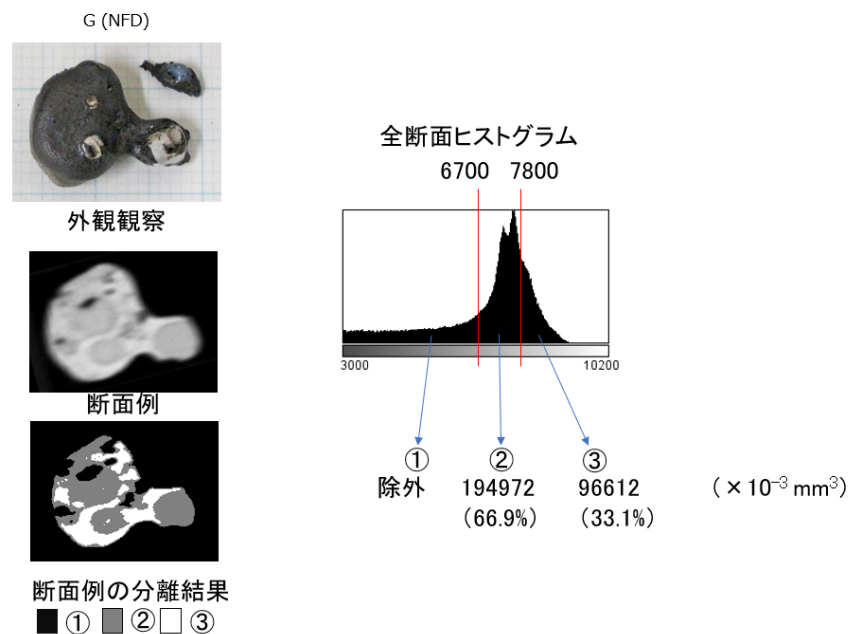
- ・領域は基本的にFe基合金、(U、Zr)O₂及びガラス質酸化物の3相から成る。Fe基合金を主相として組成推定に利用。
- ・各相の組成はTEM/EDSによる組成定量結果を用いる。
- ・セラミックス相は(U、Zr)O₂と見なした。
- ・ガラス相は含まれる金属元素 (Si含む) が仮想的に酸化物であるとした。
- ・分析対象領域を含む一部分の化学分析データと比較して、妥当性を確認。(切削紛、金属粒の分析など)

④ 分析対象領域の割合と各領域の平均的な組成に基づく全体組成評価

- ・画像解析の結果および設定した各相の密度から算出した各形成相の重量比率の推定。
- ・X線CTの試料に対応するCT像すべてから画像解析により領域分けして面積比を出し、総和をとることにより全体の体積比を算出。(空隙部分は除外)
- ・各領域の局所分析結果の値に体積比を乗じて総和を取ることにより加重平均をとる。

⑤ 化学分析による試料全体の平均組成

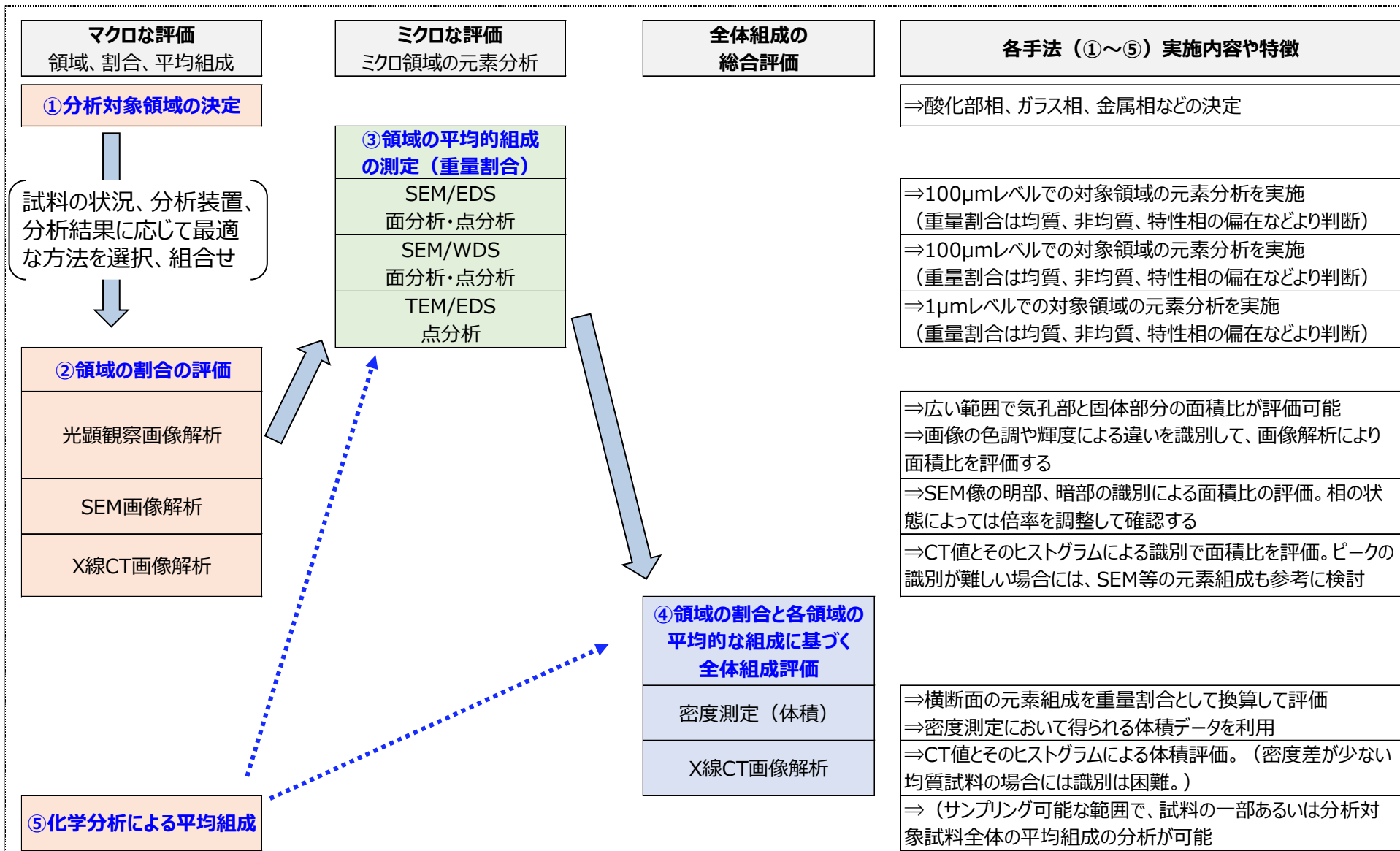
- ・分析対象試料全体を溶解して求めた化学分析データを元素分析値として使用することも考えられる。



試料【C】(NFD)の全体CT処理結果の例

6.4 分析結果の評価

6.4-3 未知試料に対する全体組成評価のフロー



6.4 分析結果の評価

6.4-4 全体組成の評価

試料【A】評価結果

元素	NDC			JAEA大洗			NFD			JAEA原科研		
	調製時 ^{*1} at(%)	分析 ^{*2} at(%)	評価値 ^{*3} at(%)	調製時 ^{*1} at(%)	分析 ^{*2} at(%)	評価値 ^{*3} at(%)	調製時 ^{*1} at(%)	分析 ^{*2} at(%)	評価値 ^{*4} at(%)	調製時 ^{*1} at(%)	分析 ^{*2} at(%)	評価値 ^{*3} at(%)
U	45.0	40.0	55.0	45.0	42.5	43.4	45.0	42.7	-	45.0	46.2	42.6
Zr	45.0	51.0	42.0	45.0	43.9	31.8	45.0	45.1	-	45.0	39.3	48.0
Gd	5.0	5.0	1.0	5.0	6.6	22.3	5.0	4.7	-	5.0	7.2	5.2
Fe	5.0	4.0	2.0	5.0	6.9	2.5	5.0	7.5	-	5.0	7.3	4.2

*1 東北大での調製時（試料投入重量組成）、*2 SEMによる微小領域の面分析結果、*3 ミクロ組織分析値から評価した値、*4 評価せず

- ・ X線CT測定の結果、マクロ的には一様な組織であったため、いずれの分析機関も、分析値（SEM/EDS、SEM/WDS測定結果）は試料調整時の組成に近い。その上で、各分析機関が評価を試みた結果について、その特徴を以下に述べる。
- ・ NDC：各相の分布は一定の面積以上では均一であると仮定したが、実際には観察視野毎に差異があるため、この差異の影響を受けたことが考えられる。特に相の割合が少ないFe₂O₃を起源とする相及び空隙については、均一性が乏しいと考えられる。
- ・ JAEA大洗：差異の原因としては、観察視野毎に差異の影響を受けたことが考えられる。
- ・ NFD：X線CT画像からマクロに一様であったため、主要元素の全体組成の推定値は断面のSEM/EDS分析結果が代表していると考え評価は実施していない。
- ・ JAEA原科研：Uをやや過小評価、Zrをやや過大評価している要因としては、SEMの二次電子像でのUリッチ相とZrリッチ相の面積比率の評価において、Uリッチ相を幾分過小評価していたものと推測される。化学分析の結果を用いているため、投入時の重量組成に近い値となっている。
- ・ 共晶反応による比較的均一な組織構造であることを考慮すると、全体組成への評価の際、観察視野毎の差異の影響や、領域の割合と各領域の平均的な組成の加重平均の影響があると考えられる。

6.4 分析結果の評価

6.4-4 全体組成の評価

試料【B】評価結果

元素	NDC			JAEA大洗			NFD			JAEA原科研		
	調製時 ^{*1} at(%)	分析 ^{*3} at(%)	評価値 ^{*4} at(%)	調製時 ^{*1} at(%)	分析 ^{*3} at(%)	評価値 ^{*4} at(%)	調製時 ^{*1,2} at(%)	分析 ^{*3} at(%)	評価値 ^{*5} at(%)	調製時 ^{*1} at(%)	分析 ^{*3} at(%)	評価値 ^{*4} at(%)
Fe	38.1	21.2	45.0	38.1	30.5	56.3	47.6	50.8	-	38.1	35.4	37.8
Cr	11.1	7.1	23.0	11.1	9.0	17.0	13.9	15.6	-	11.1	20.9	10.9
Ni	5.8	3.0	3.0	5.8	4.6	7.1	7.3	7.9	-	5.8	9.4	5.7
Zr	25.0	38.4	12.0	25.0	12.7	14.5	31.3	25.6	-	25.0	34.2	25.3
B	20.0	30.3	17.0	20.0	43.1	5.2	-	-(測定不可)		20.0	-(測定不可)	20.2

*1 東北大での調製時（試料投入重量組成）、*2 Bを除いて算出した組成、*3 SEMによる微小領域の面分析結果、*4 ミクロ組織分析値から評価した値、*5 評価せず

- X線CT測定の結果、マクロ的にはおおむね一様な組織であるものの、空隙などが観察された。試料【A】に比較すれば、分析値との差異が大きくなる傾向にある。その上で、各分析機関が評価を試みた結果について、その特徴を以下に述べる。
- NDC：SEM明度を基に求めた元素濃度の傾斜平均値ではCrが高い値を示した。差異が生じた原因としては、FeCr相及びFe₃Zr相は共に比較的大きな相であり且つ偏在しているために、分析視野における偏在状態によって差異が生じたものと考えられる。
- JAEA大洗：Zr、Bの濃度のずれが大きく、Zr、B相の濃度及び分布の均一性が十分ではない傾向があり、それが全体に影響した。実際には観察視野毎に差異がある影響と考えられる。
- NFD：X線CT画像からマクロに一様であったため、主要元素の全体組成の推定値は断面のSEM/EDS分析結果が代表していると考え評価は実施していない。
- JAEA原科研：切削粉の化学分析結果を用いているため、SEMで測定不可であったBの評価が可能となった。試料調整時の投入重量組成とほぼ一致した。
- 共晶反応による比較的均一な組織構造であることを考慮すると、試料【A】と同様に全体組成への評価の際、観察視野毎の差異の影響や、領域の割合と各領域の平均的な組成の加重平均の影響があると考えられる。

6.4 分析結果の評価

6.4-4 全体組成の評価

試料【C】評価結果 (1/2)

元素	NDC		JAEA大洗		NFD		JAEA原科研		
	調製時*1 at(%)	評価値*2 at(%)	調製時*1 at(%)	評価値*2 at(%)	調製時*1 at(%)	評価値*2 at(%)	調製時*1 at(%)	評価値*2,3 at(%)	評価値*2,4 at(%)
U	9.2	6.9	9.5	16.2	12.1	13.5	9.6	12.8	13.1
Zr	9.2	9.9	8.9	12.2	10.4	8.4	8.9	12.2	12.7
Fe	31.8	46.5	31.0	47.0	33.4	49.3	30.9	38.0	39.0
Cr	9.2	12.9	8.6	9.8	9.2	15.2	8.6	9.4	10.2
Ni	4.1	5.9	4.5	6.4	4.8	8.6	4.5	5.4	5.6
Si	15.4	9.9	14.7	3.3	16.8	4.4	14.7	6.7	5.9
Al	3.1	4.0	3.1	1.1	3.3	-	3.0	4.9	4.4
Ca	7.2	3.0	6.7	4.0	7.7	-	6.7	5.0	4.7
Mg	0.3	0.1	0.4	0.0	0.9	-	0.5	0.5	0.1
Gd	1.0	1.0	0.8	0.1	1.0	0.6	0.8	1.1	1.1
Nd	0.2	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.3	0.3
B	9.2	0.0	11.5	0.0	-	-	11.6	3.8	2.9





*1 JAEA原科研での調製時、*2 ミクロ組織分析値から**全体組成**を評価した値

*3 切断時の切削粉の化学分析データ使用、*4 切断片の化学分析データ使用

6.4 分析結果の評価

6.4-4 全体組成の評価

試料【C】評価結果 (2/2)

- NDC : SEM明度を基に求めた元素濃度の評価値ではBが低い。BについてはSEM-EDS測定では検出感度が低いため2次組織の面分析では検出されなかったためと考えられる。
- JAEA大洗 : 評価値はU、Zr、Cr、Fe、Niが高めでそれ以外の元素は低くなった。酸化物相のうち、ガラス相の存在割合を低く評価しているものと思われる。
- NFD : Fe、Cr、Niがやや高く、Siが低めとなっている。酸化物相のうち、ガラス相の存在割合を低めに評価しているものと思われる。
- JAEA原科研 : Siが低くAlが高めであるのは、加熱時の熱衝撃で物理的に弾け飛んだ割合が他の成分より多かったことや、化学分析の際の問題が疑われるが、原因は特定できなかった。
- 高温熔融反応による非均質な組織を有する試料については、特定の元素が評価できないということではなく、ばらつきが大きい元素は、各分析機関での測定視野や分析データに依存する傾向がある。
ここでの試料全体に対する評価値は、コンクリート成分やBを除き、それぞれの機関に供給された試料の仕込み値のうち試料調製中に損失しにくい元素について概ね合致しており、試料が有する特徴が判断できると考えられる。

6.4 分析結果の評価

6.4-5 全体組成の評価のまとめと課題の整理

- ・光学顕微鏡観察、SEM観察に基づく領域（相状態）の特定と、他の個別情報（分析結果）を組合せることにより、その相の化学形、結晶構造を特定した。

- ・分析対象領域の分析結果と、X線CT測定、光学顕微鏡観察、SEM観察及び化学分析の結果を利用して、試料全体の元素組成の評価を行うことができた。

⇒全体組成評価において、領域（相状態）の組成や、その組成と他の個別分析結果を用いて全体組成を求めるフローを構築した。

⇒比較的均質な相を有する試料（試料【A】、【B】）については、分析対象領域のSEM観察結果（面分析結果）が試料全体の組成と一致する傾向がみられた。分析対象領域の分析結果から試料全体を評価した場合、各分析機関ではばらつきがみられるが、これは画像解析の方法の違いによるものと考えられる。

⇒非均質な試料（試料【C】）は、分析対象領域のみの分析結果から試料全体を評価することはできないが、他の個別分析結果を用いて求めた全体組成は、ばらつきはあるものの概ね合致する結果が得られた。

・今後の課題

⇒それぞれの個別情報を得るための分析において、投入組成と傾向の異なるデータや、誤差値の大きいデータについての検証が必要であり、個別情報を取得する際の課題や基本量に対する影響について精査し、留意すべき指針としてまとめる必要がある。

⇒マクロ量（試料全体の元素組成）を評価する手法として、各分析機関より提示された（複数の）方法について、相互利用や課題の抽出を行うことで、選択肢を増やす取り組みが必要である。

⇒分析手法の共通認識化に係る取り組みの継続と検証（得られたデータの詳細な評価、課題の検討、模擬燃料デブリ分析、TMI-2燃料デブリ等の利用）が必要である。

⇒1F堆積物等のサンプルや、1F燃料デブリ分析への適用が期待される。

6.5 参考資料（主な専門用語、略語等の説明）

略語	説明
1F	東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所 (1F:Fukushima Daiichi Nuclear Power Station)
PJ	プロジェクト (Project)
NDC	MHI原子力研究開発株式会社 (NDC : MHI Nuclear Development Corporation)
NFD	日本核燃料開発株式会社 (Nippon Nuclear Fuel Development Co., Ltd.)
X-CT	X線CT (X-ray Computed Tomography)
XRD	X線回折法 (X-ray Diffraction)
TEM	透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope)
SEM	走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopes)
EDS	エネルギー分散型X線分光法 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
WDS	波長分散型X線分光法 (Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy)
FIB	収束イオンビーム：TEM観察の前処理法 (Focused Ion Beam)
SIMS	二次イオン質量分析 (Secondary Ion Mass Spectrometry)
tetragonal	正方晶系：結晶系の一つ (tetragonal crystal system)

略語	説明
cubic	立方晶系：結晶系の一つ (cubic crystal system)
fcc	面心立方格子構造 (face centered cubic)
TMI-2	スリーマイル島原子力発電所2号機 (Three Mile Island Unit-2)
PCV	原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel)
RPV	原子炉圧力容器 (Reactor Pressure Vessel)
TRL	技術成熟度レベル (Technology Readiness Levels)

7. 実施内容（燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発）

7.1 燃料デブリ模擬流動

7.2 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析

7.3 実機熱挙動評価

7.4 参考資料

燃料デブリ熱挙動の推定技術開発の概要

- 課題に対応するため3つのサブタスクを実施
 - 燃料デブリ模擬流動試験
 - 空隙を有する構造物を含む体系での熱流動試験（流動場計測、温度計測）による適用性確認のためのデータ取得
 - 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析
 - 大規模詳細解析に対応したJUPITERコードを利用
 - 空隙を有する発熱体(多孔質体)に対して使用するモデルの適用性確認・構築
 - 複雑構造物内の自然対流への適合性確認のためのデータ取得
 - 実機熱挙動評価
 - ACE-3Dコードをベースに開発
 - 空隙を有する発熱体への対応（コード開発）
 - 2号機温度履歴との比較の実施
 - 空冷時を含む実機熱挙動の評価を実施

7.1 燃料デブリ模擬流動試験

目的

- 流動場計測及び温度計測による適用性確認のためのデータ取得
 - 気孔率と熱物性の相関や窒素封入系の影響を含むデータの取得

実施方法・内容

- 7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験
 - 多孔質体を含む容器内で自然対流試験を実施し、**伝熱モデル**評価、解析コード検証のためのデータを取得
 - 窒素封入系の影響を含むデータを取得
 - パラメータを変化させた多様な試験：**小型試験装置**
 - 実機相当の流動条件での測定：**燃料デブリ模擬流動試験**
- 7.1.2 燃料デブリ詳細流動試験
 - 流動条件をコントロールした強制対流試験とすることで**流動モデル**のみに着目
 - 気孔率を変化させるため3Dプリンタ製の多孔質体などを使用

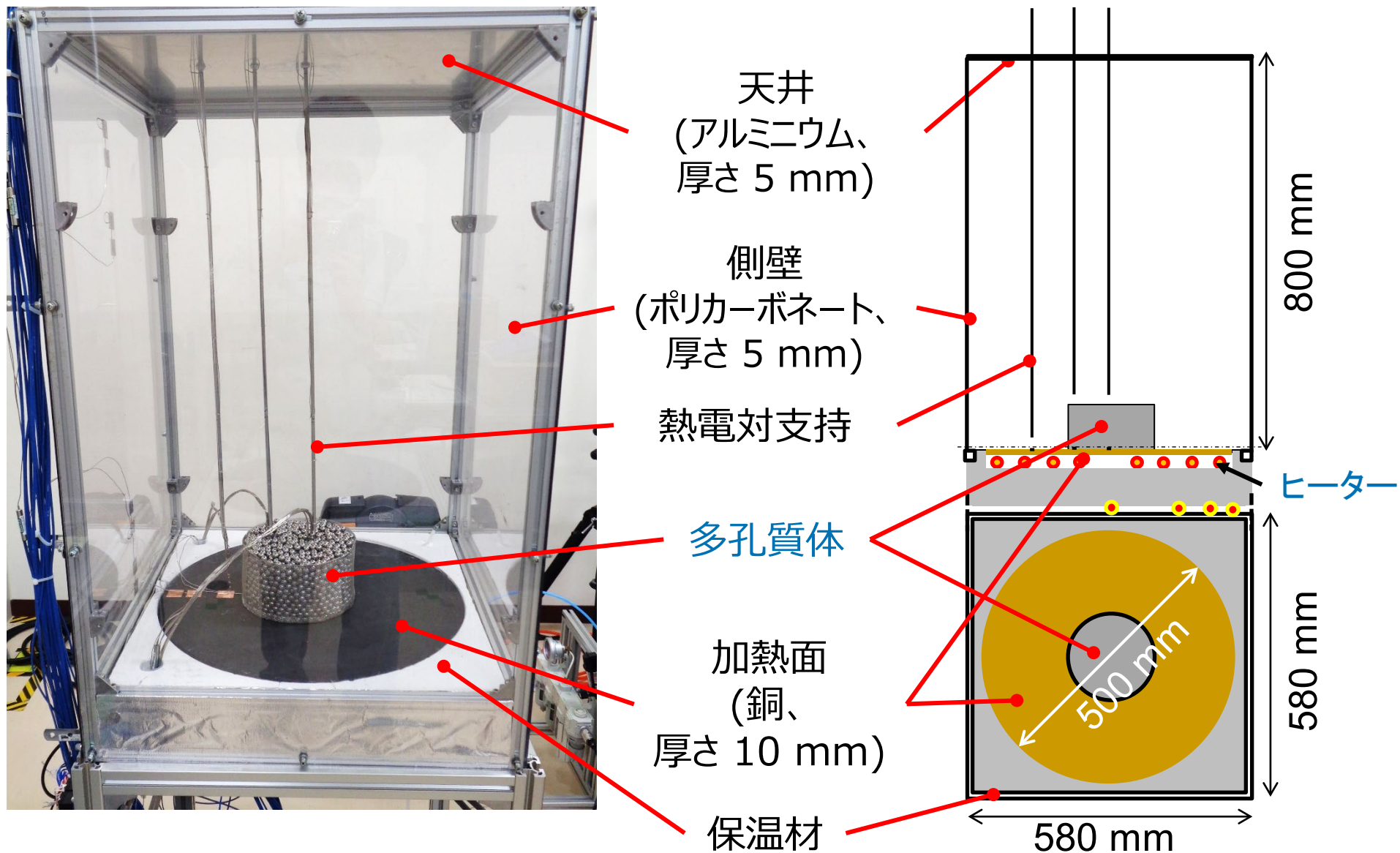
成果の反映先

- 解析に必要な多孔質体の影響を表す(伝熱・流動)モデル、モデル定数の評価
- 解析コード(ACE-3D, JUPITER)の検証

7.1 燃料デブリ模擬流動試験 概要(まとめ)

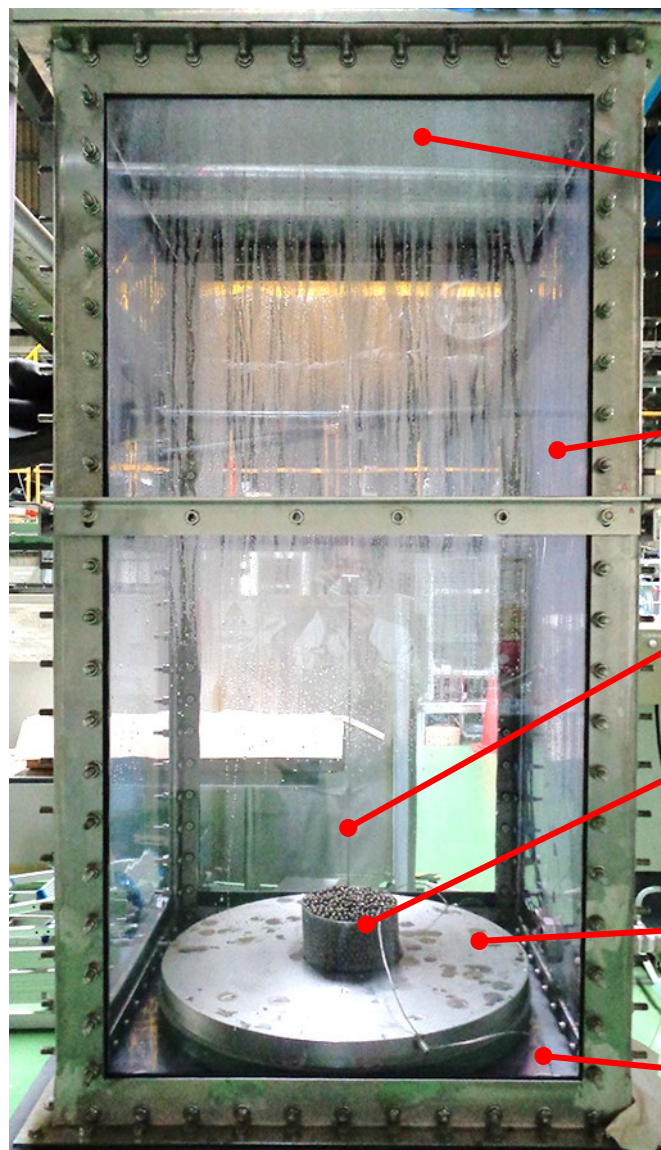
	目的	試験体系	流体	
小型試験装置	多孔質体を含む系の自然対流熱伝達のデータの取得 多数のデータの取得	直方体 0.5 m × 0.5 m × 0.8 m(高さ)	空気	自然対流のみ
燃料デブリ 模擬流動試験	実機のRa数(乱流状態)を想定した自然対流熱伝達のデータの取得	直方体 0.8 m × 0.8 m × 1.6 m(高さ)	水	試験容器に入口 出口流路あり →強制(窒素封入系模擬)+自然対流条件での試験も可能
燃料デブリ 詳細流動試験	多孔質体の熱伝達や多孔質体周りの流動データを取得 多孔質体の流動モデルの係数を取得	矩形断面流路 50 mm × 50 mm	空気	強制対流のみ

7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 小型試験装置



流体として空気を用いることで多くのデータを取得

7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 燃料デブリ模擬流動試験



天井
(アルミニウム,
厚さ 20 mm)

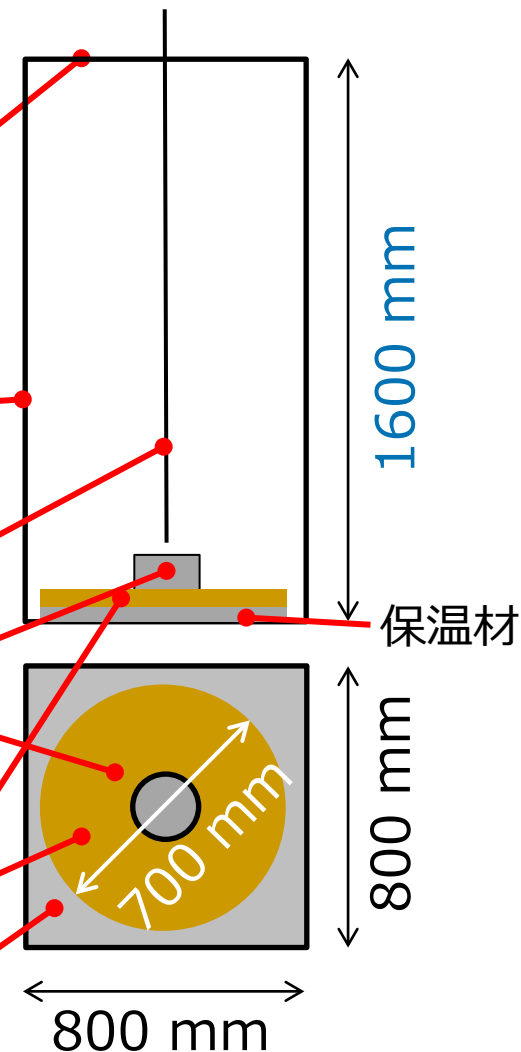
側壁
(ポリカーボネート,
厚さ 20 mm)

多点熱電対

多孔質体

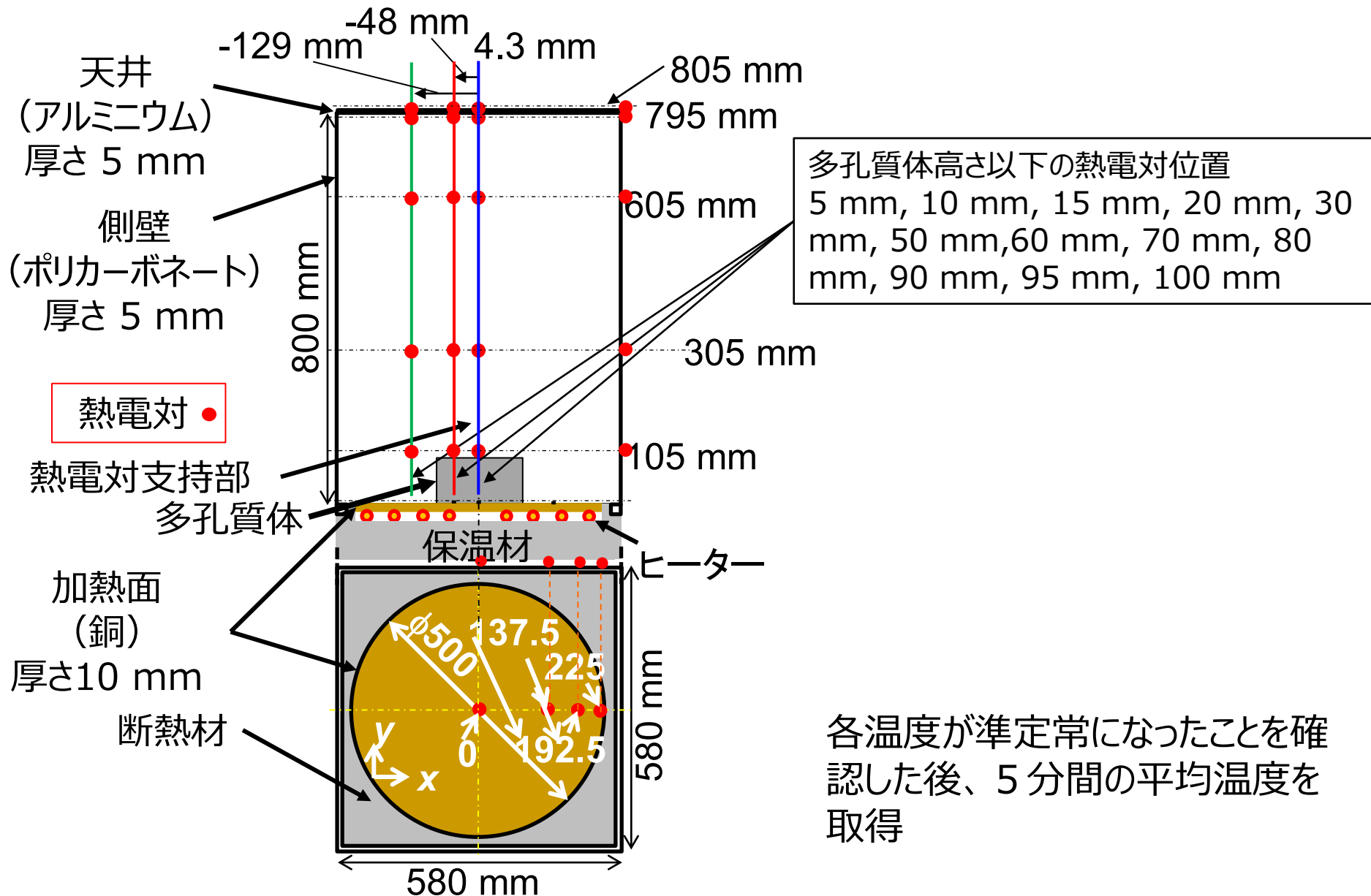
加熱面
(アルミニウム,
厚さ 10 mm)

保温材

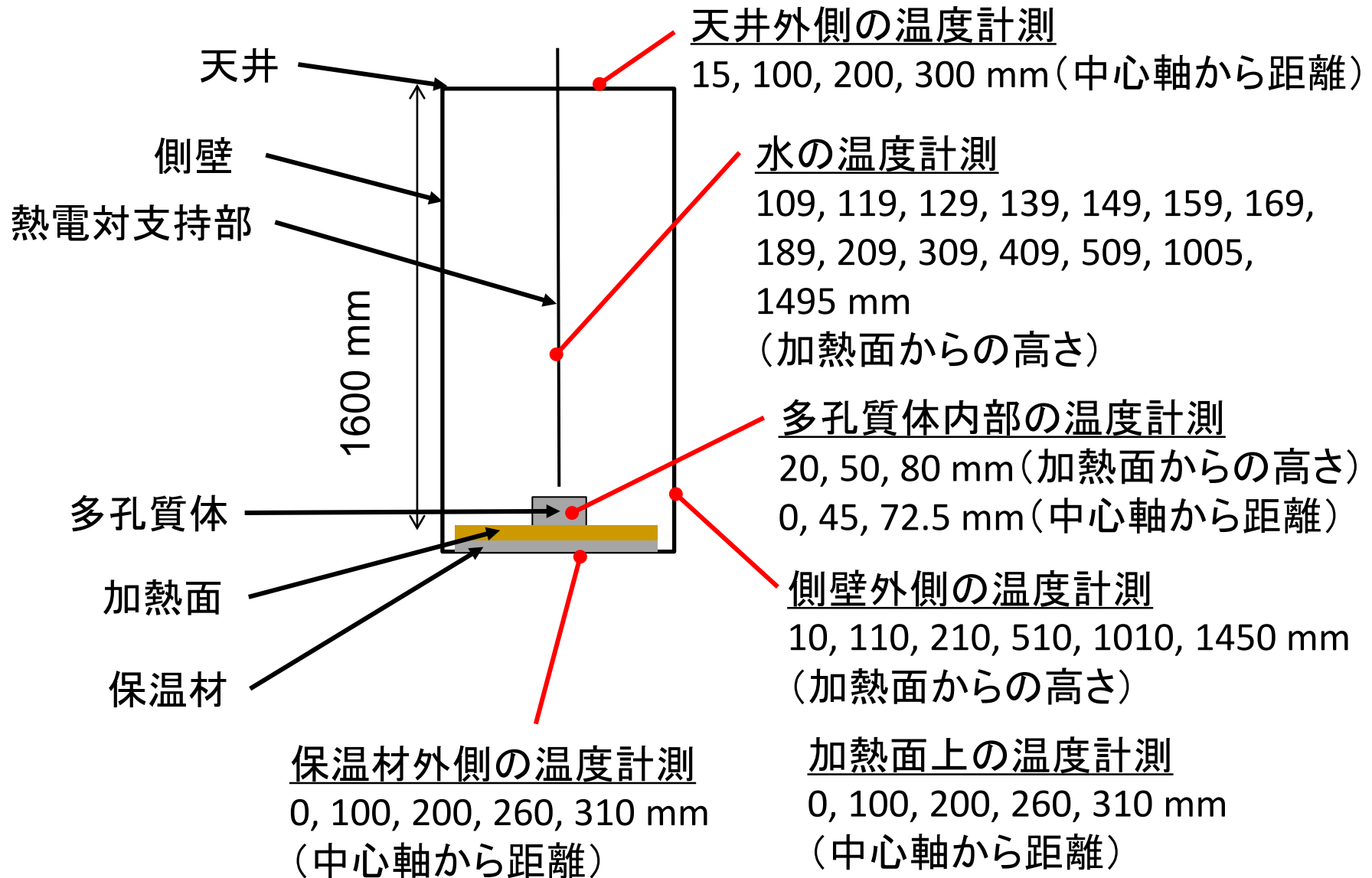


流体として水を用い、装置サイズを大型化することで実機自然対流条件に対応したデータを取得

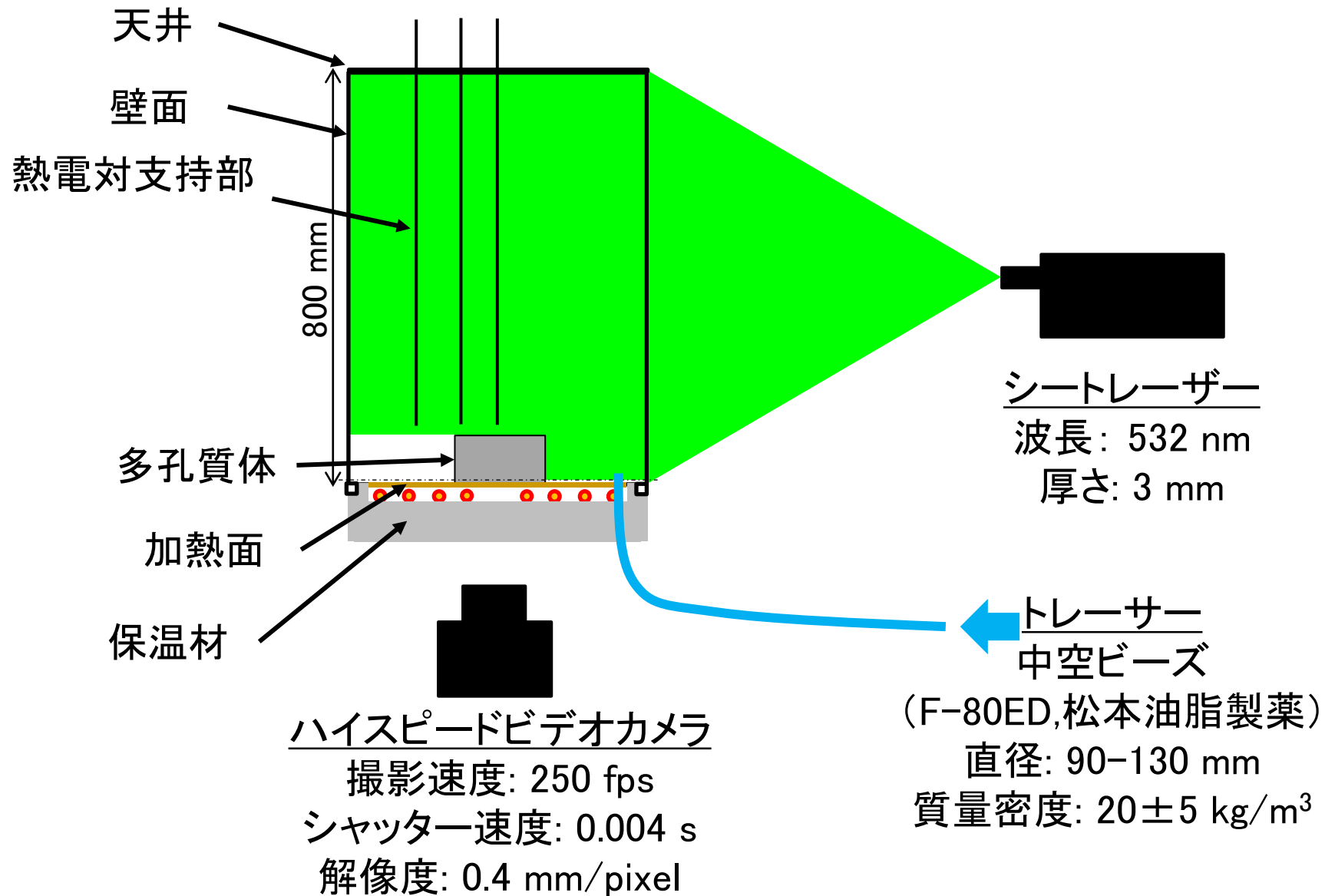
7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 温度計測 (小型試験装置)



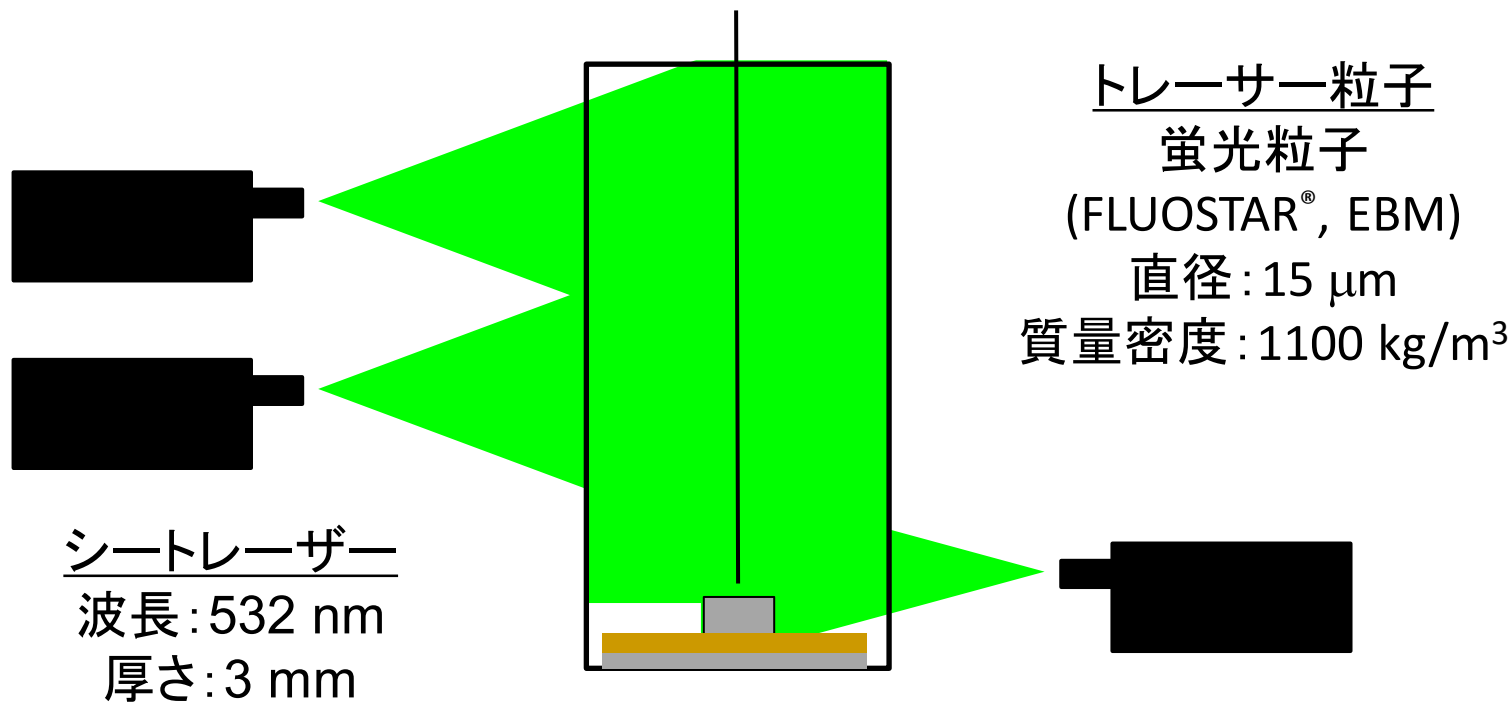
7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 温度計測(燃料デブリ模擬流動試験)



7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 流速分布計測 (小型試験装置)



7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 流速分布計測(燃料デブリ模擬流動試験)



4Kビデオカメラ
撮影速度: 3 fps
露光時間: 0.025 s
解像度: 0.39 mm/pixel

3台のレーザーにより大空間の
計測に対応

7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 多孔質体(共通)

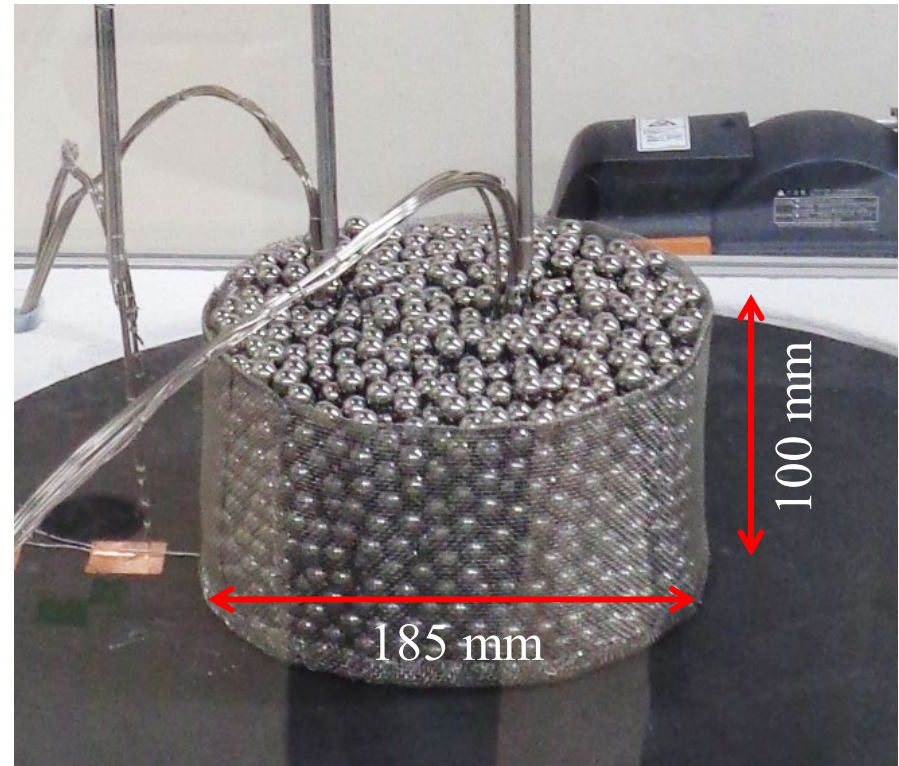
形状:円柱(形状は金網で保持)

直径:185 mm

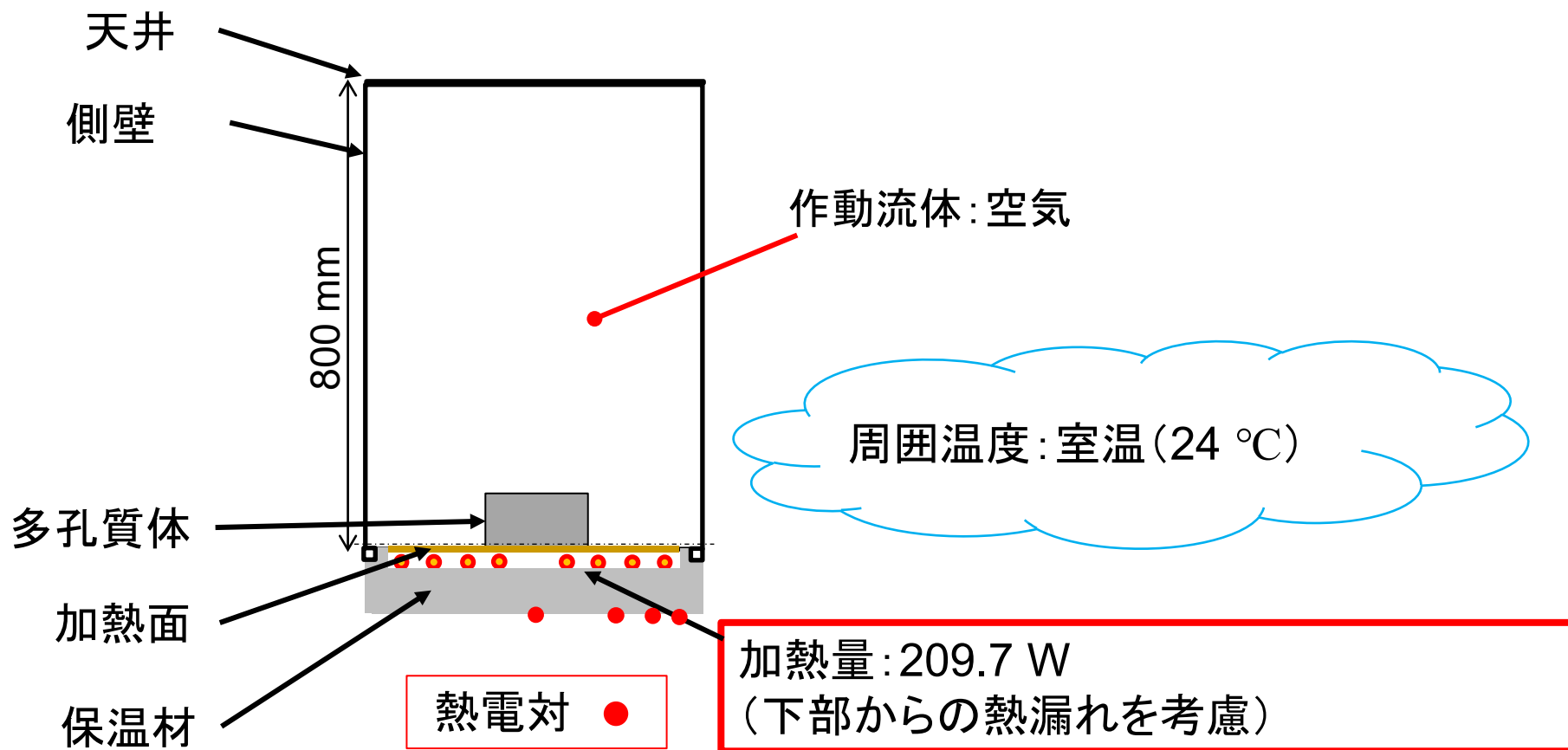
高さ:100 mm

内部構造:SUS球(直径:10 mm)

気孔率: $\varepsilon = 0.35$

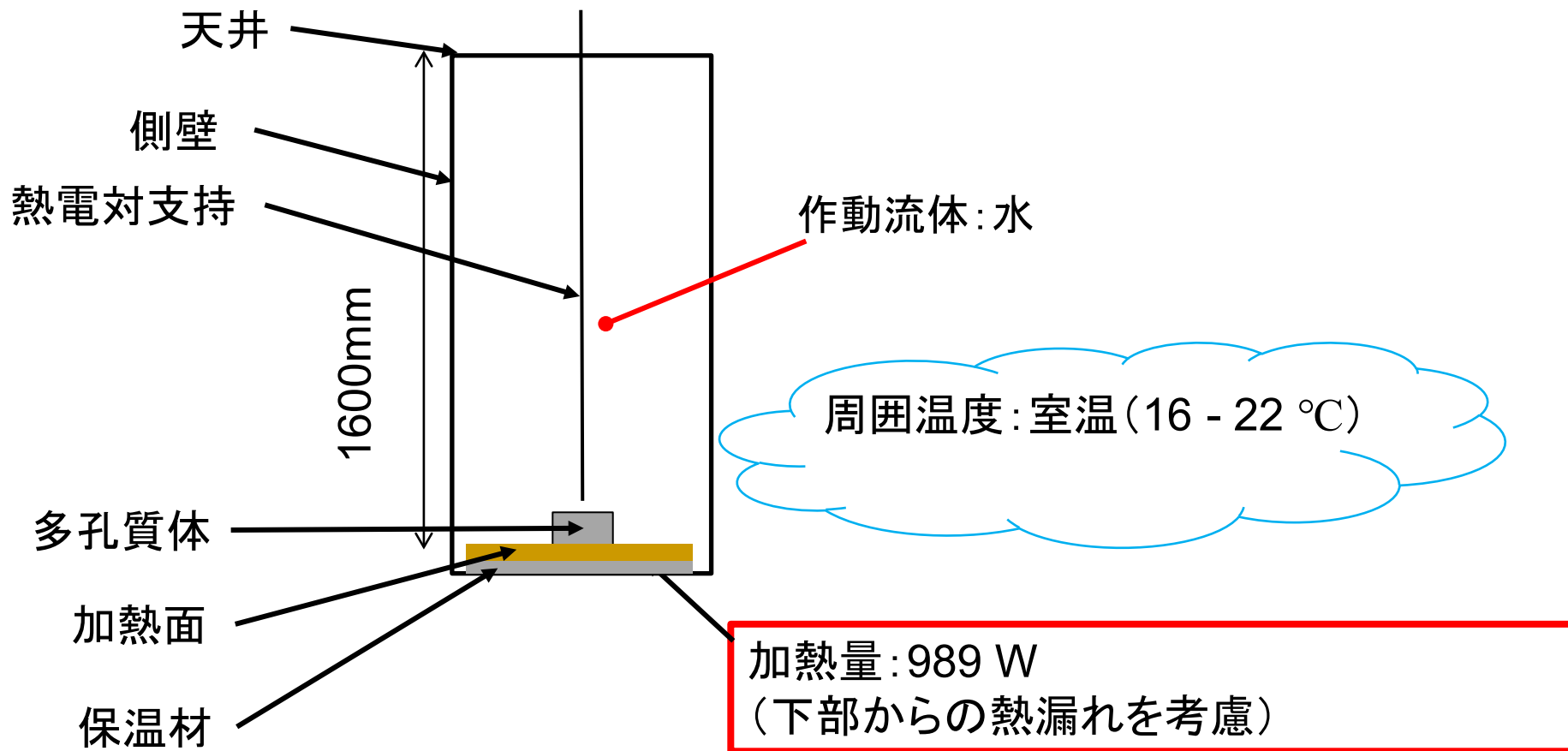


7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 実験条件(小型試験装置)



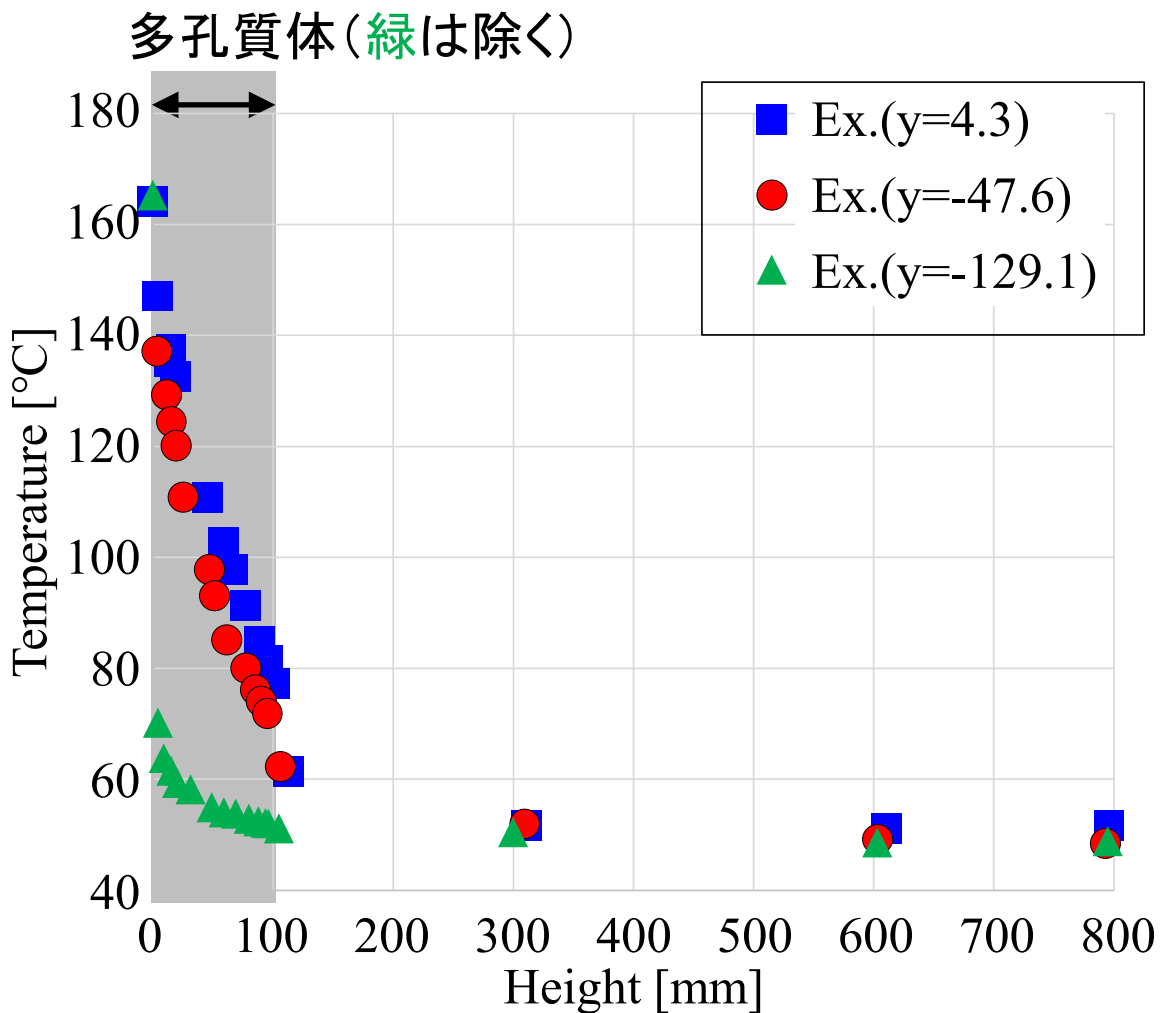
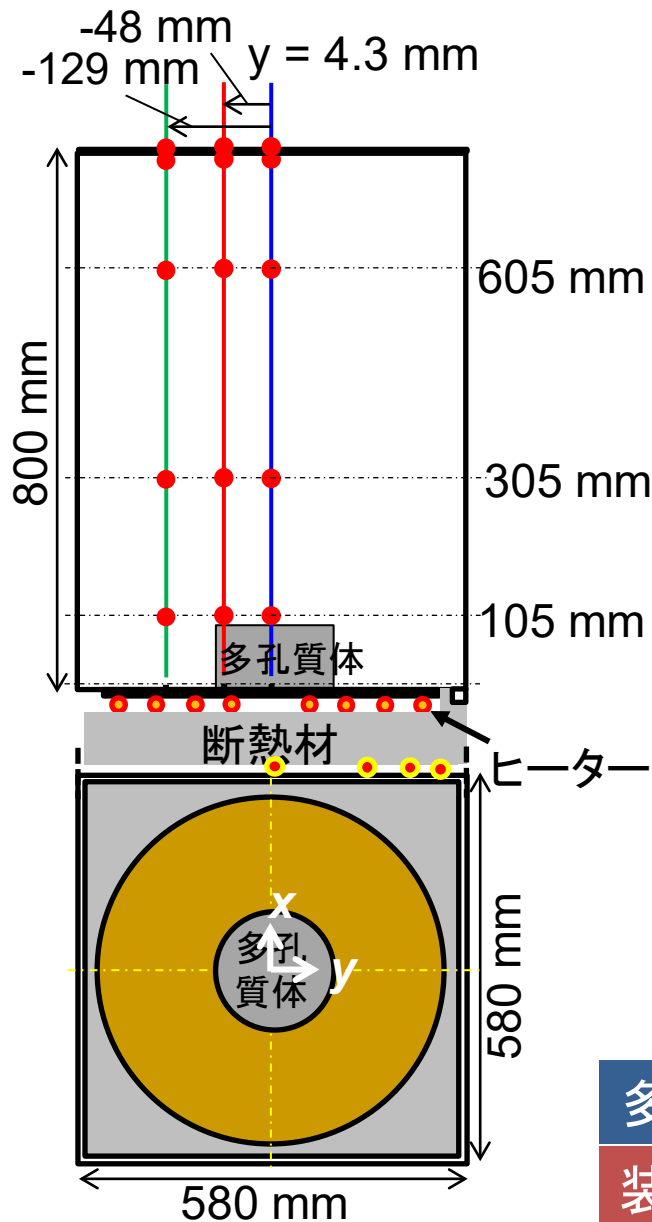
準定常に達したのを確認した後に温度と流速場を取得

7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 実験条件(燃料デブリ模擬流動試験)



準定常に達したのを確認した後に温度と流速場を取得

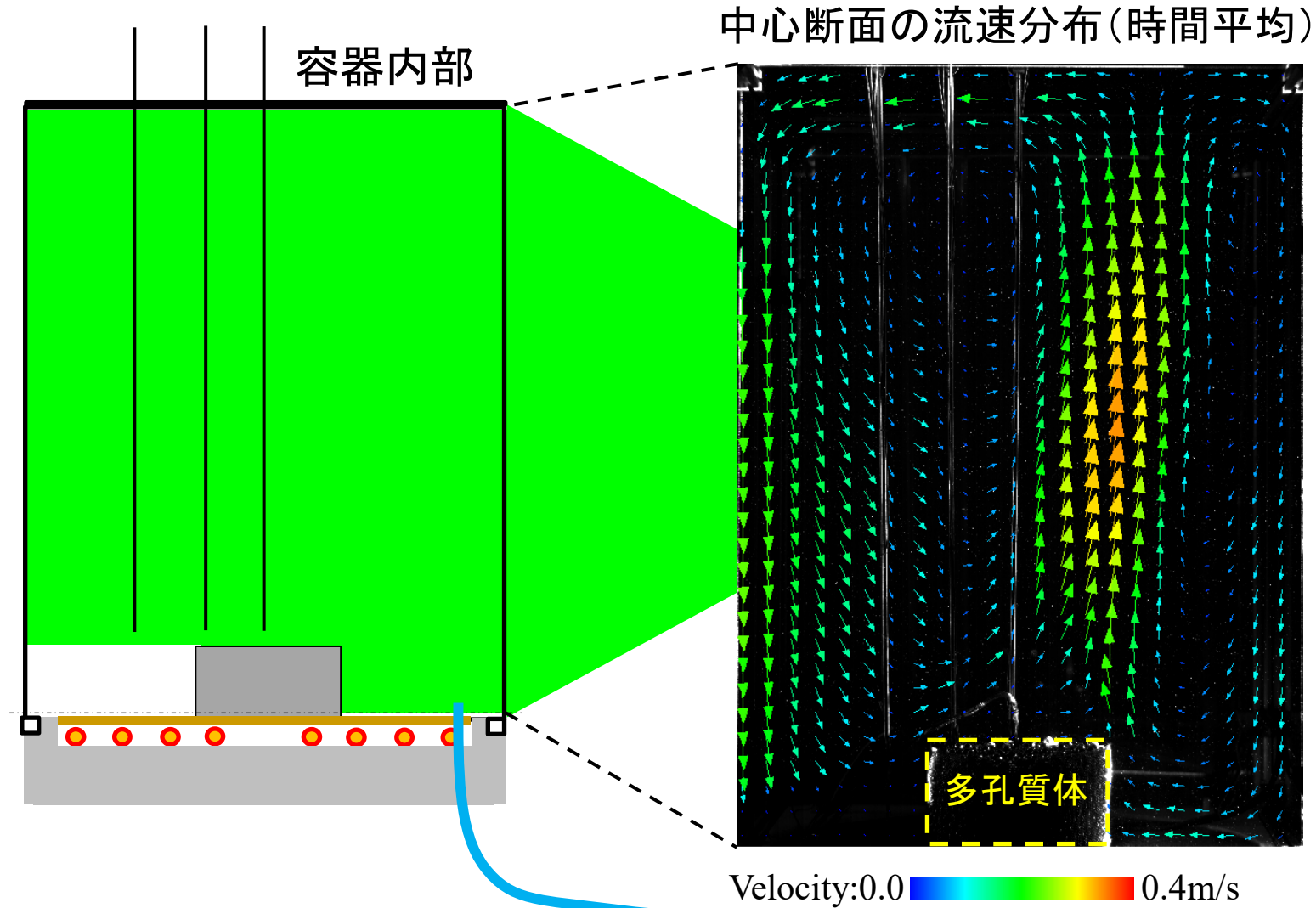
7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 実験結果(温度分布)の一例



多孔質体内部でほぼ一様の温度勾配が形成

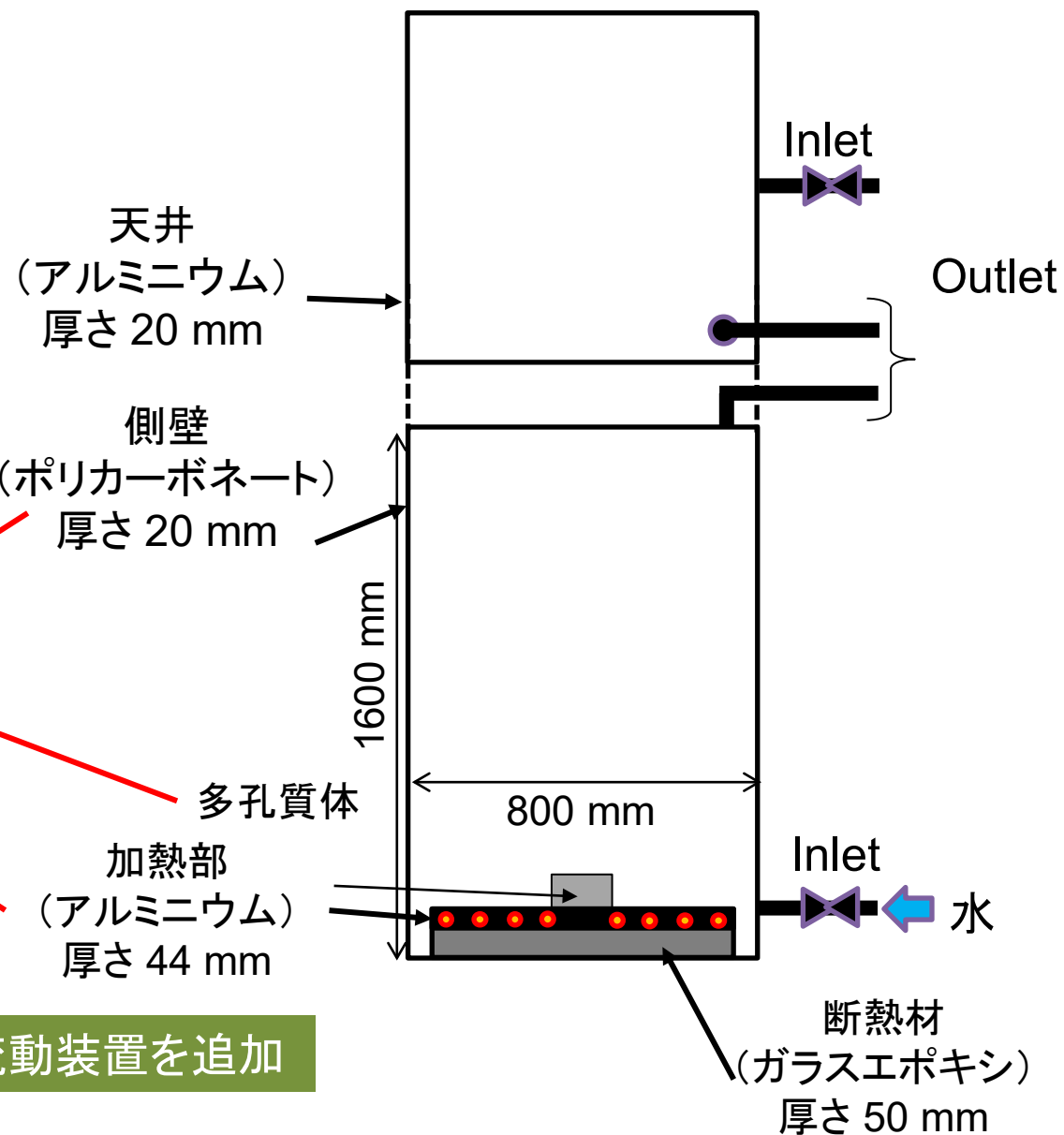
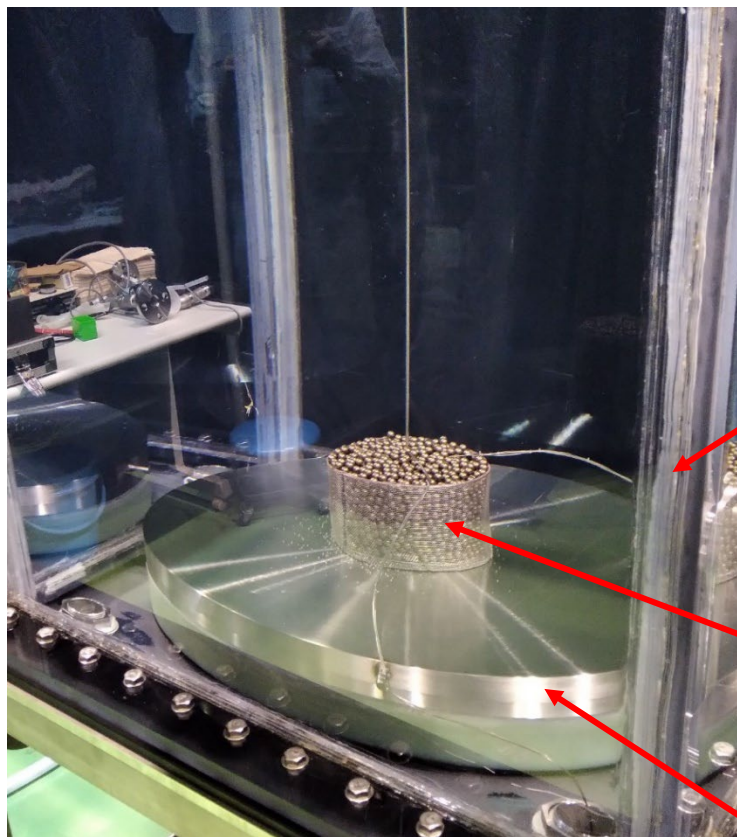
装置下部の発熱による形成される温度分布を計測

7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 実験結果(速度分布)の一例



装置下部の発熱による形成される自然対流速度分布を計測

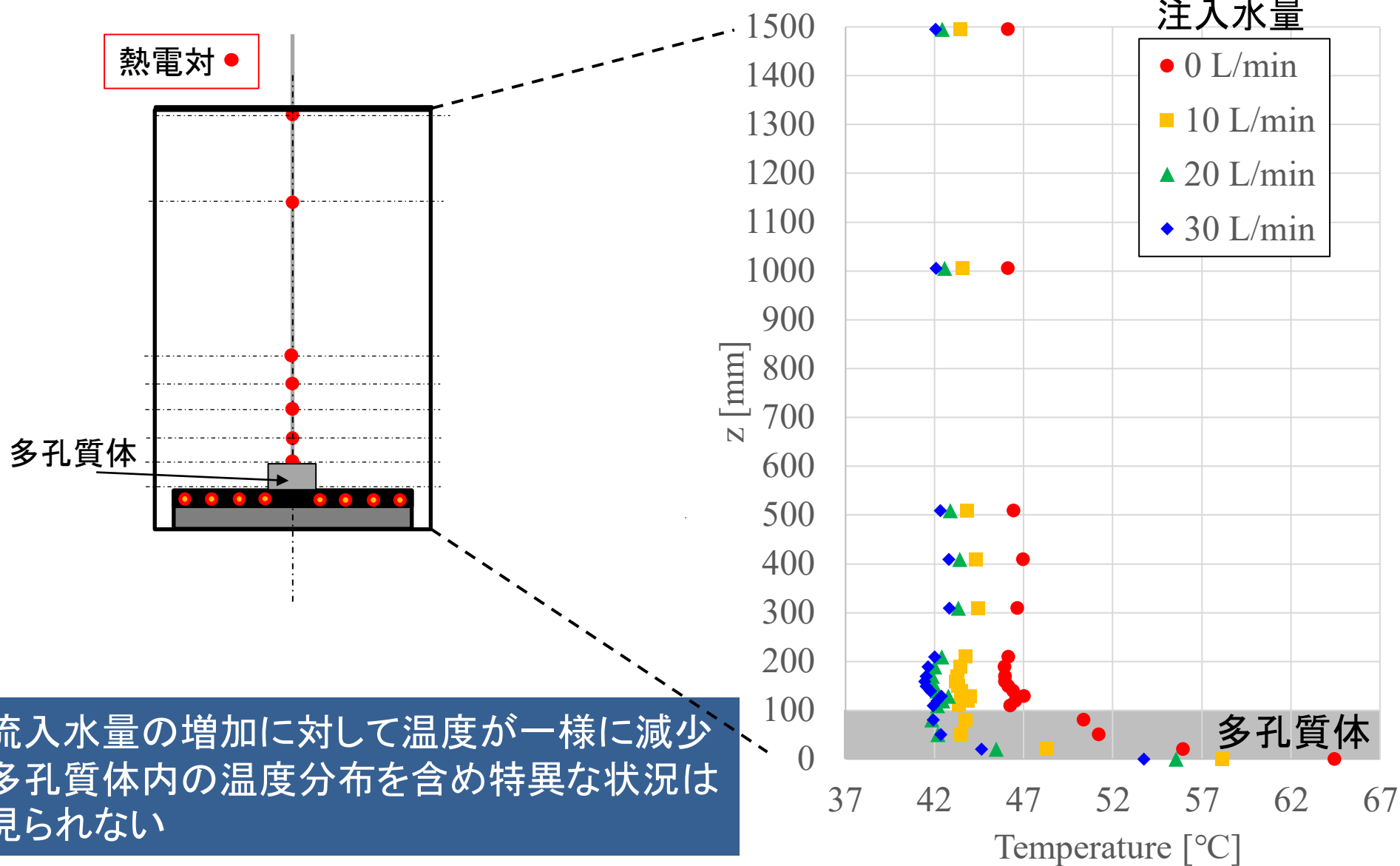
7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 窒素封入系影響評価試験



窒素封入系の影響を評価するため流動装置を追加

7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 窒素封入系影響評価試験結果

中心軸上温度分布



7.1.1 燃料デブリ模擬流動試験 窒素封入系影響評価試験結果

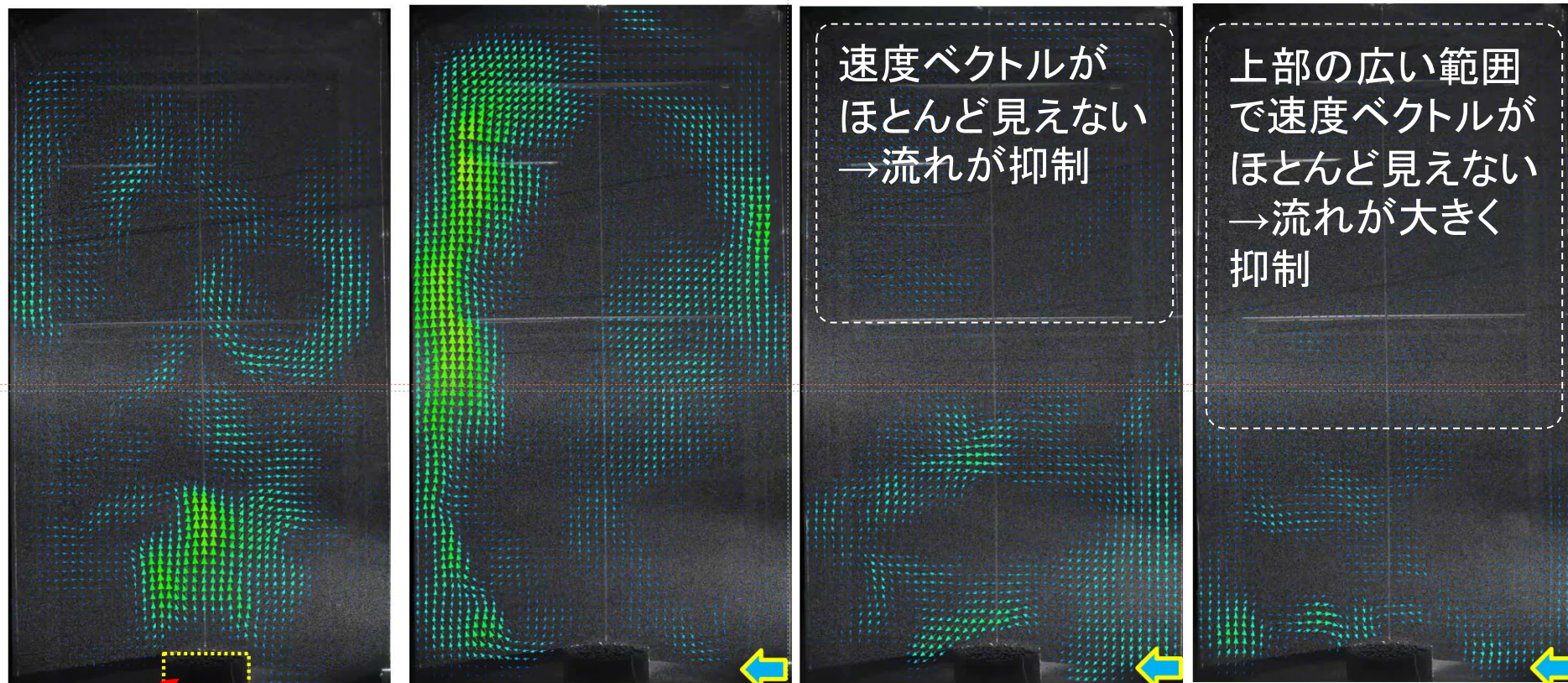
中心断面上速度分布

水流量0 L/min

10 L/min

20 L/min

30 L/min



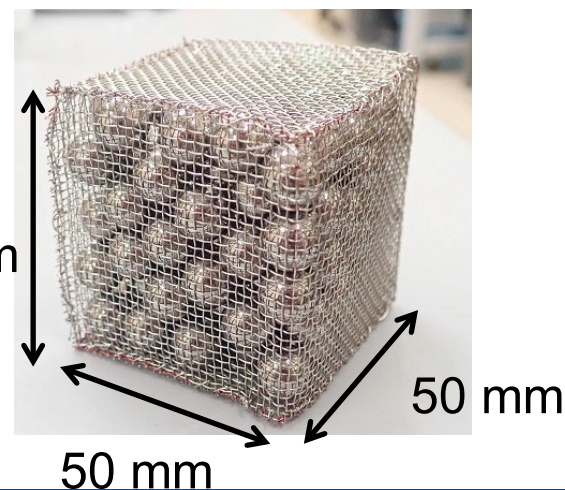
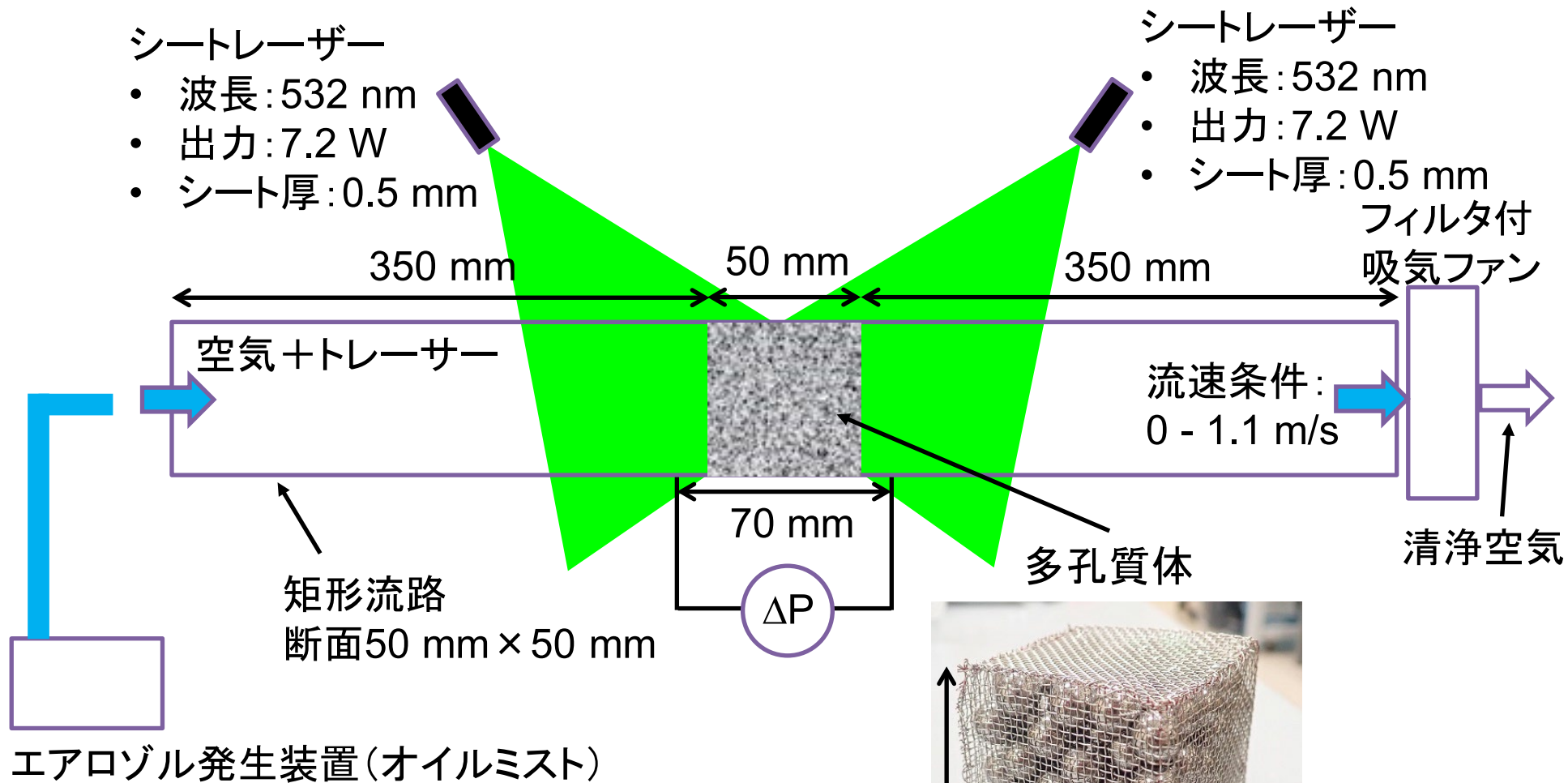
多孔質体

加熱面

0.0  0.04 m/s

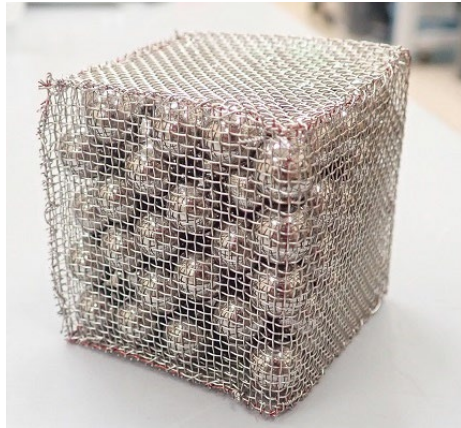
温度差の低下による自然循環の駆動力の減少により、試験体上部の流れが抑制
流量の増加に従い、流れが抑制される範囲が拡大

7.1.2 燃料デブリ詳細流動試験 燃料デブリ詳細流動試験装置

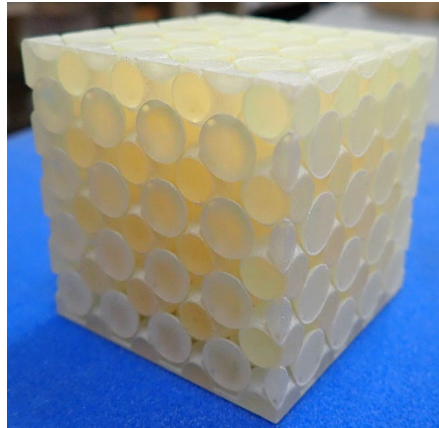


多孔質体周りの詳細な流動場の計測
多孔質体前後の圧力差の計測による多孔質体の
流動モデル係数の算出

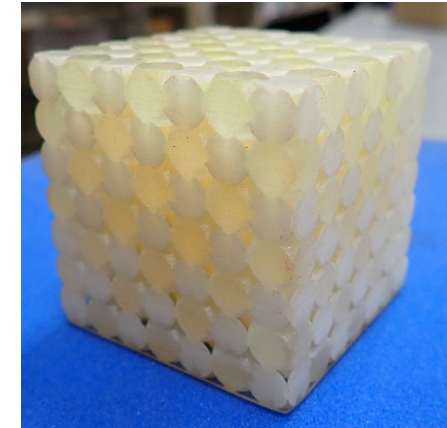
7.1.2 燃料デブリ詳細流動試験 用いた多孔質体



- SUS球径: 10 mm
- 配置: ランダム
- 気孔率: 0.473 [-]
(重量換算)
- 高さ: 50 mm



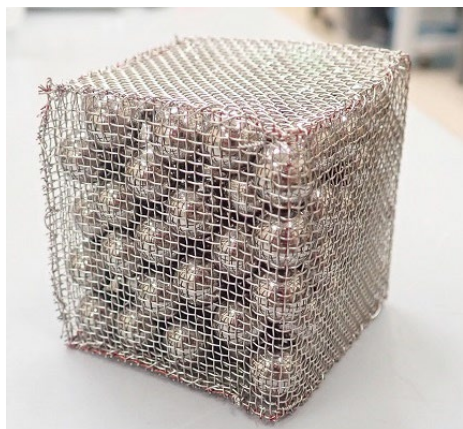
- 樹脂球径: 10 mm
- 配置: 体心立方格子
(BCC)
- 気孔率: 0.338 [-]
(重量換算)
- 高さ: 50 mm



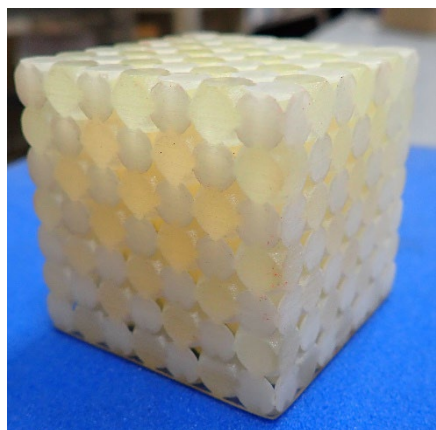
- 樹脂球径: 10 mm
- 配置: 面心立方格子
(FCC)
- 気孔率: 0.255 [-]
(重量換算)
- 高さ: 50 mm

※面心立方格子と体心立方格子の樹脂球は球どうしを結合させるため、球の間隔を9.5 mmとした

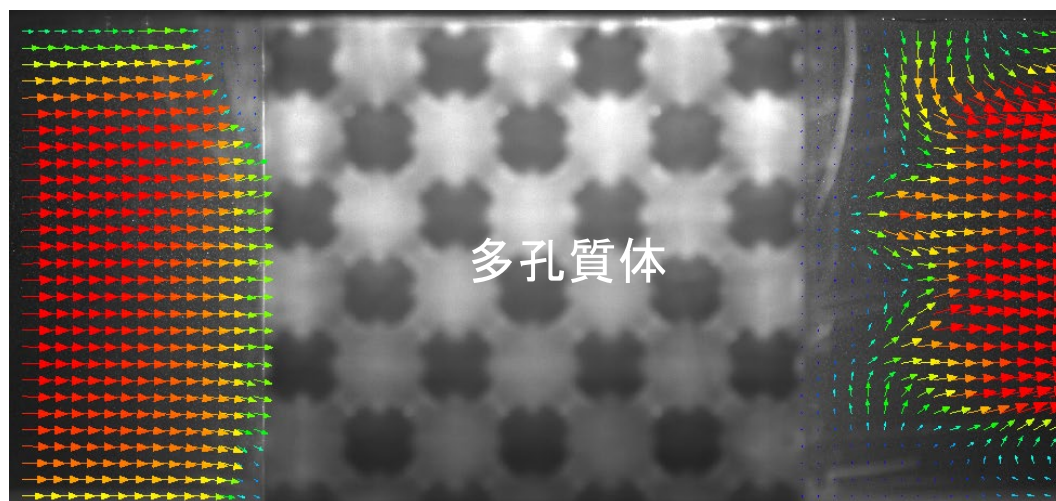
7.1.2 燃料デブリ詳細流動試験 流速分布結果の一例



配置: ランダム
気孔率: 0.473 [-]

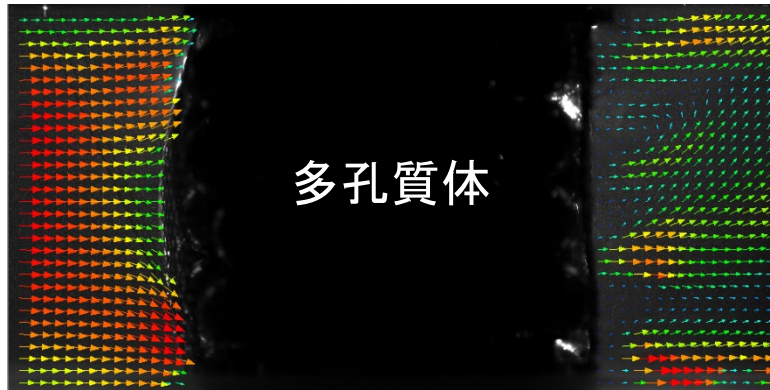


配置: 面心立方格子 (FCC)
気孔率: 0.255 [-]



多孔質体下流の流速分布が多孔質体の構造により定性的に異なる

7.1.2 燃料デブリ詳細流動試験 差圧計測結果



多孔質体

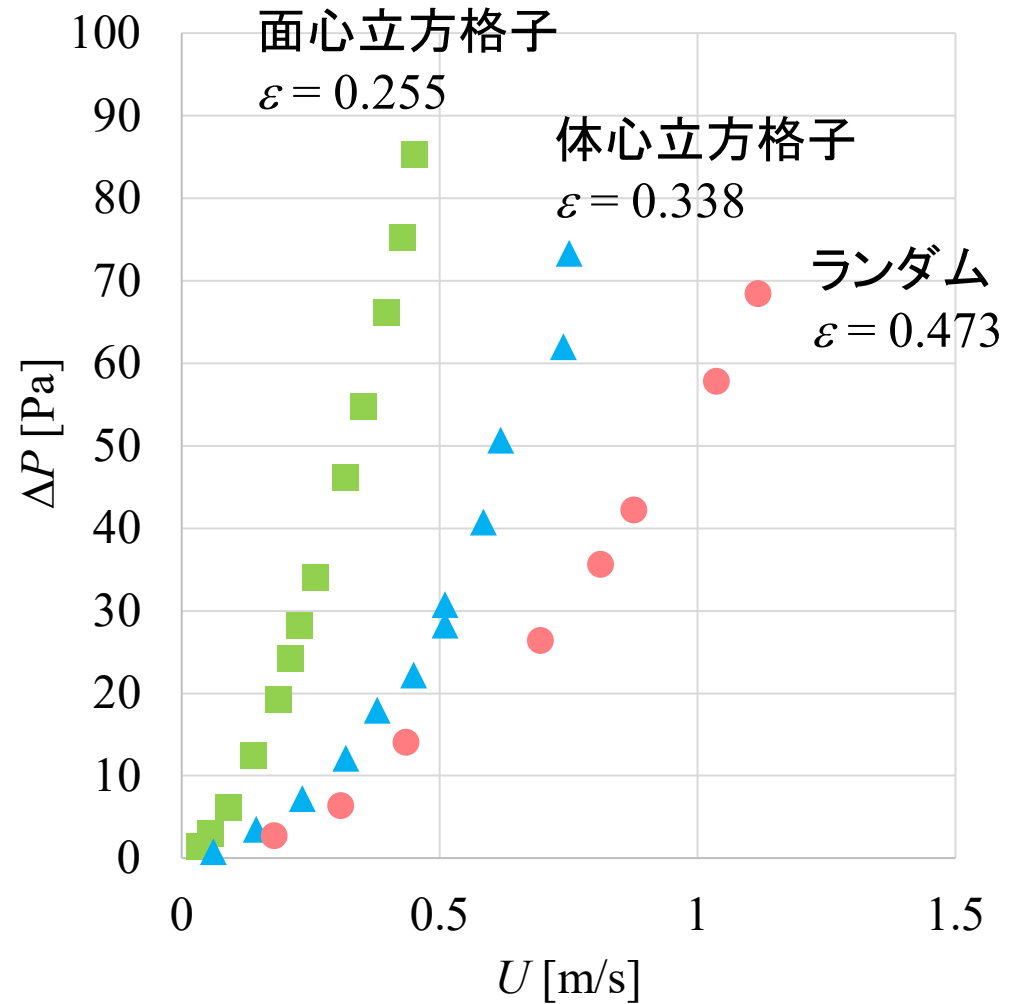
10 mm

10 mm

ΔP

差圧は10秒間の時間平均値

流速 U は左端の流速データより取得
(4秒間の時間平均値から鉛直方向に平均した値)



気孔率が小さいほど圧力損失が大きい

7.1.3 燃料デブリ模擬流動試験のまとめ

- 自然対流＋気孔を有する構造体(多孔質体)が存在する条件での試験を実施
 - 小型試験装置と燃料デブリ模擬流動試験
 - 熱電対を用いた温度計測とPIVを用いた速度場計測を同時に実施
- 強制対流＋気孔を有する構造体(多孔質体)が存在する条件での試験を実施
 - 燃料デブリ詳細流動試験
- 得られたデータは解析コードの妥当性検討やモデル・モデル定数の検討に利用

7.2 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析

目的

- 多孔質体モデルやモデル定数の選定・評価
- 実機熱挙動評価に適用するACE-3Dの検証のためのデータ取得
 - 解析コードの検証に必要な実機形状を模擬したデータを提供
 - モデル中の各種パラメータの影響の検討

実施方法・内容

- 7.2.1 多孔質体モデル解析
 - モデルやモデル定数の選定・評価を実施
- 7.2.2 JUPITERの検証
 - 「2-3 空冷状態実機詳細解析」を実施するために必要な検証を実施
- 7.2.3 空冷状態実機詳細解析
 - 形状を詳細に模擬した解析を実施
 - パラメータの影響の検討、窒素封入状態の解析を実施

成果の反映先

- 適用する多孔質体モデル
- 実機解析におけるモデル中の各種パラメータの影響の把握
- 「3 空冷時熱挙動評価」のための解析コードの検証

7.2.1 多孔質体モデル解析 選定・評価すべきモデル、評価の内容

- 流動モデル(单相)
 - Darcy-Forchheimer(ダルシー・フォークハイマー)則*1
 - 基本的な適用性の確認
 - モデル定数(透過係数、フォークハイマー係数)へのErgun (エルガン)の式*2の適用性評価
- 流動モデル(二相流)
 - Lipinskiモデル*3などの適用性の確認
 - 透過係数、フォークハイマー係数の補正の適用性
 - ⇒流動様式に対応した修正
- 伝熱モデル
 - 直列モデル(調和平均)、加重幾何平均モデル、並列モデル(相加平均)を評価
 - ⇒実験結果との比較による補正係数の導入

*1 Forchheimer, P., Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieur, Vol. 45 , (1901), pp. 1782 1788.

*2 Ergun, S. Chem. Eng. Prog. 48 (1952).

*3 Lipinski, R. J. (1982), NUREG/CR-2646, SAND 82-0765.

7.2.1 多孔質体モデル解析 ダルシー・フォークハイマー則

多孔質体(長さ L)内部の圧力損失 ΔP を以下の式で評価

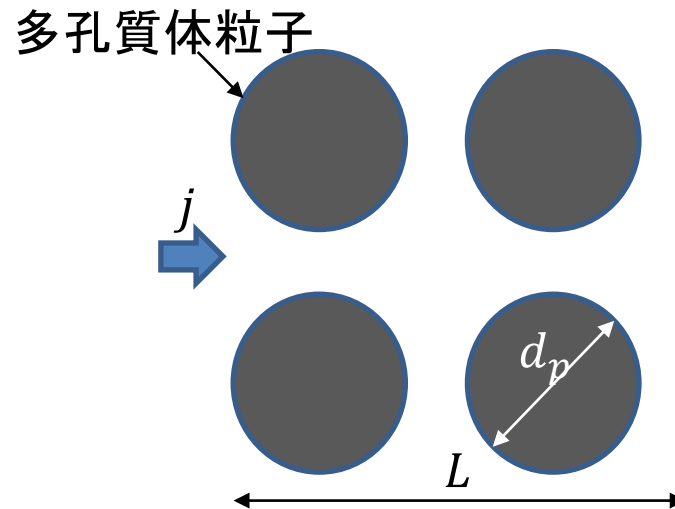
$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K} j + \frac{C}{\sqrt{K}} \rho j^2$$

摩擦に伴う損失

速度の変動に伴う損失

K :透過係数, C :フォークハイマー係数 (一般に気孔率(ε)などで変化)

j :空塔速度(多孔質体がないものとして求めた平均速度), μ :粘性係数, ρ :密度



透過係数、フォークハイマー係数を燃料デブリ詳細流動試験結果から評価
これらの係数が不明な多孔質体に用いられるエルガンの式の適用性を評価

7.2.1 多孔質体モデル解析 透過係数とフォークハイマー係数の導出

ダルシー・フォークハイマー則を修正し流速に対する一次関数を導出

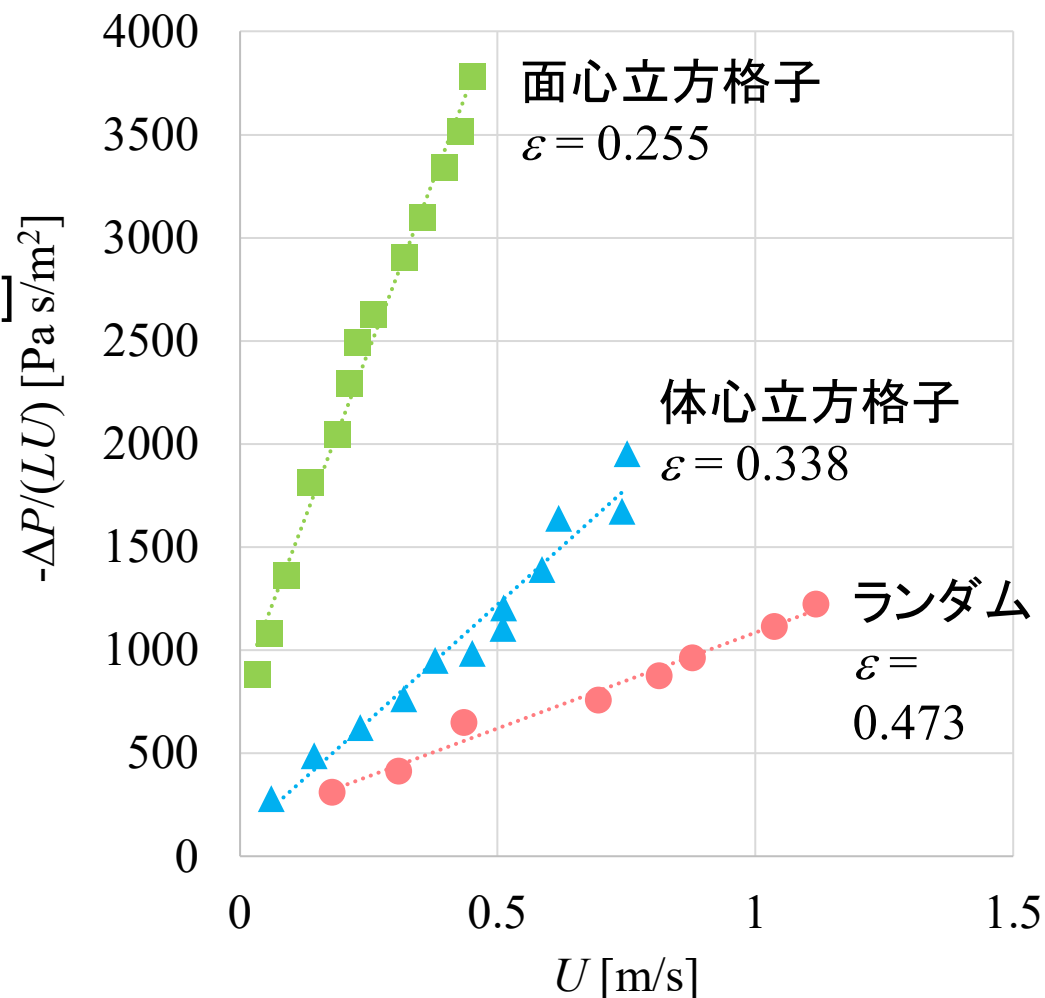
$$-\frac{\Delta P}{LU} = \frac{C}{\sqrt{K}} \rho U + \frac{\mu}{K} U$$

L : 多孔質体の長さ
 K : 透過係数[m²]
 C : フォークハイマー係数[-]

流速 U に対する最小二乗近似(1次関数)

→切片から透過係数 K 、
傾き(+ K)からフォークハイマー係数 C を導出

多孔質体	透過係数 [m ²]	フォークハイマー係数 [-]
面心立方格子 $\varepsilon = 0.255$	2.27×10^{-8}	0.83
体心立方格子 $\varepsilon = 0.338$	1.93×10^{-7}	0.82
ランダム $\varepsilon = 0.473$	1.16×10^{-7}	0.26

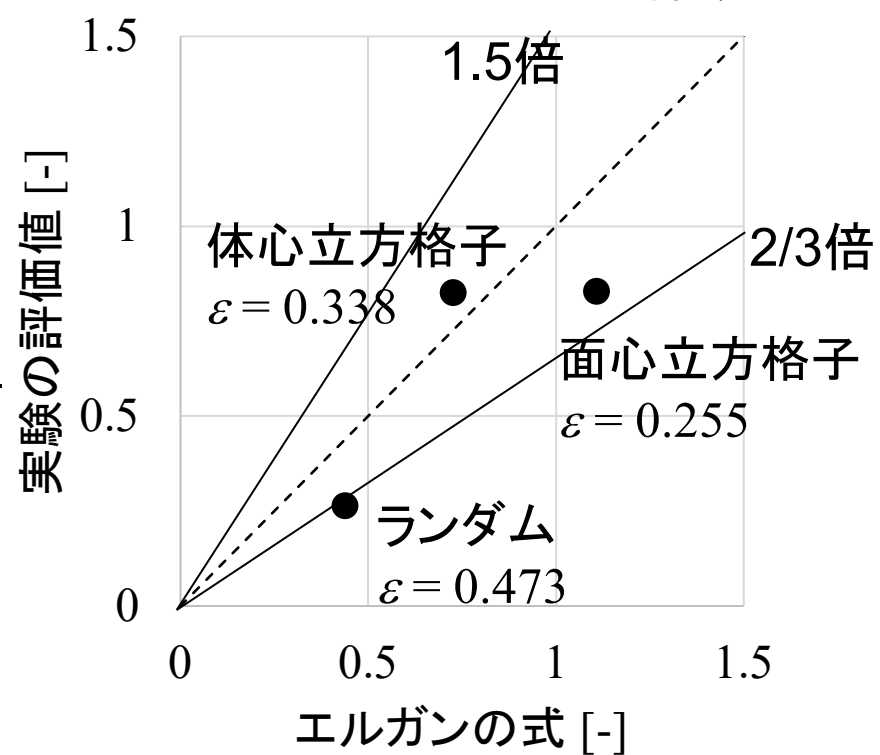
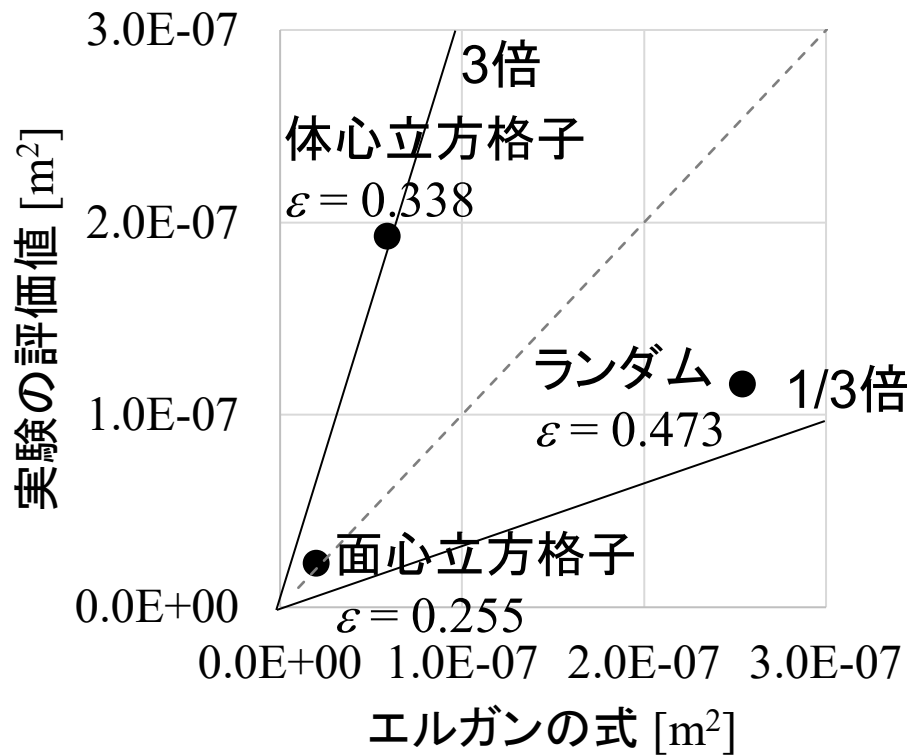


模擬多孔質体についてダルシー・フォークハイマー則で圧力損失を評価可能
透過係数 K とフォークハイマー係数 C を導出

7.2.1 多孔質体モデル解析 エルガンの式との比較

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2} \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{エルガンの式} \\ \text{多孔質体の粒径 } d_p \text{ と} \\ \text{気孔率 } \varepsilon \text{ で導出できる} \end{array} \quad \rightarrow \quad C = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}}$$

透過係数 フォークハイマー係数



透過係数で3倍程度、フォークハイマー係数で1.5倍程度の誤差
気孔率で4/3倍程度、粒径 d_p で $\sqrt{3}$ 倍の違いに相当

影響は十分に小さいと判断しエルガンの式をそのまま採用

7.2.1 多孔質体モデル解析 流動モデル（二相流）

多孔質体内二相流の圧力損失評価モデル*

$$\frac{\Delta P_k}{L} = \frac{\mu_k}{K K_{r,k}} j_k + \frac{C \cdot C_{r,k}}{\sqrt{K}} \rho_k j_k^2 \quad k: l \text{ (液相) or } g: \text{気相}$$

*Lipinski, R. J. (1982), NUREG/CR-2646, SAND 82-0765.

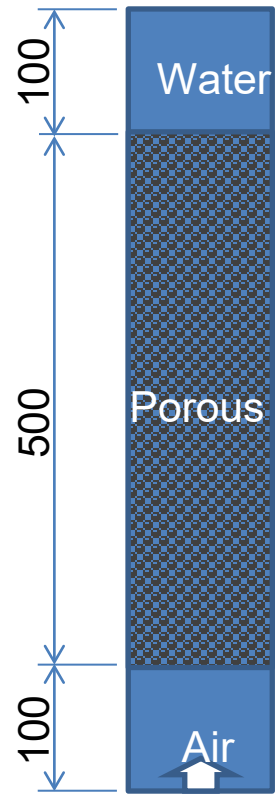
二相流の圧力損失評価に対する修正係数の例

Authors	$K_{r,l}$	$C_{r,l}$	$K_{r,g}$	$C_{r,g}$
Lipinski (1982)	$(1 - \alpha)^3$	$(1 - \alpha)^{-3}$	α^3	α^{-3}
Reed (1982), Lipinski (1984)	$(1 - \alpha)^3$	$(1 - \alpha)^{-5}$	α^3	α^{-5}
Hu and Theofanous (1991)	$(1 - \alpha)^3$	$(1 - \alpha)^{-6}$	α^3	α^{-6}

α : ボイド率 (単位体積の二相流体中に気体が占める体積割合)

まずは最も一般的な、Lipinskiのモデルを利用して評価を実施

7.2.1 多孔質体モデル解析 二相流に対するLipinskiモデルの適用結果



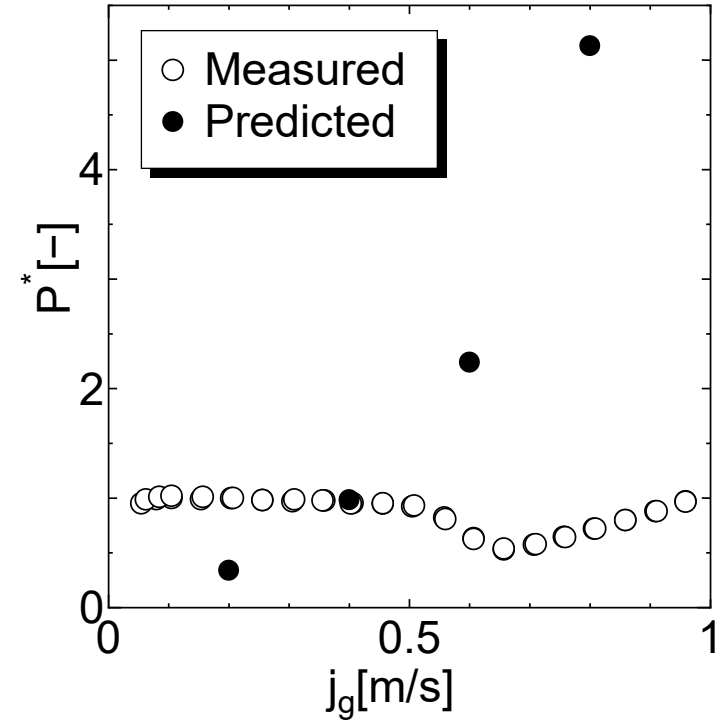
計算体系

下部ヘッドなどでの状況を想定し、水が停滞した条件での既存二相流試験*を用いて評価

計算条件

Case	J_g [m/s]	J_l [m/s]
1	0.2	0
2	0.4	0
3	0.6	0
4	0.8	0

J_g, J_l : 気相及び液相平均流速



$$P^* = \frac{\Delta P}{\rho_l g L} \quad \begin{array}{l} L : \text{計測点間の距離} \\ \Delta P : \text{圧力差} \end{array}$$

計算結果と既存試験結果*の比較

境界条件

下面: 流入(速度、ボイド率一定)

上面: 流出条件、圧力一定(大気圧)

特に気相速度が大きい場合に大幅な過大評価
Reed, Huのモデルを用いた際の変化は非常に小さい

*M. Lee, et al., Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 108, 2019, Pages 85-94

7.2.1 多孔質体モデル解析 二相流圧力損失の過大評価への対応

高流量時の過大評価への対応

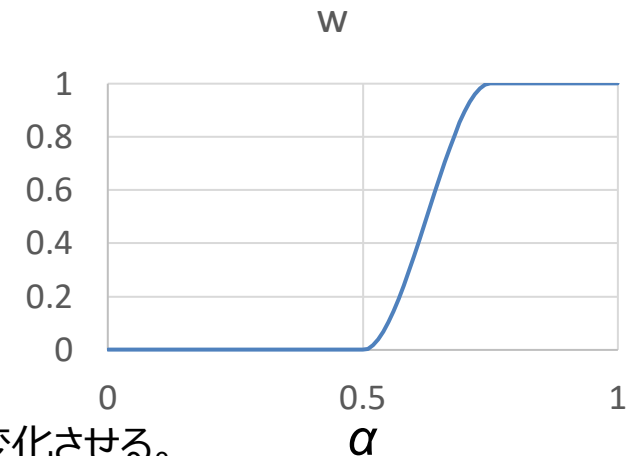
一般の二相流で広く行われる、流動様式に対応した重み付けを実施

$$-\Delta P_l = \left(\frac{\mu_l}{KK_{r,l}} j_l + \frac{C \cdot C_{r,l}}{\sqrt{K}} \rho_l j_l^2 \right) (1 - w)$$

$$-\Delta P_g = \left(\frac{\mu_g}{KK_{r,g}} j_g + \frac{C \cdot C_{r,g}}{\sqrt{K}} \rho_g j_g^2 \right) w$$

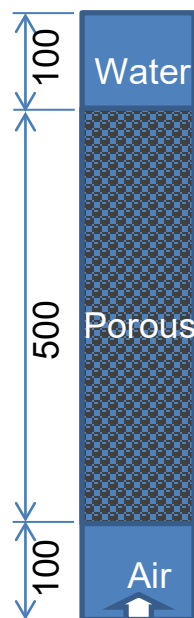
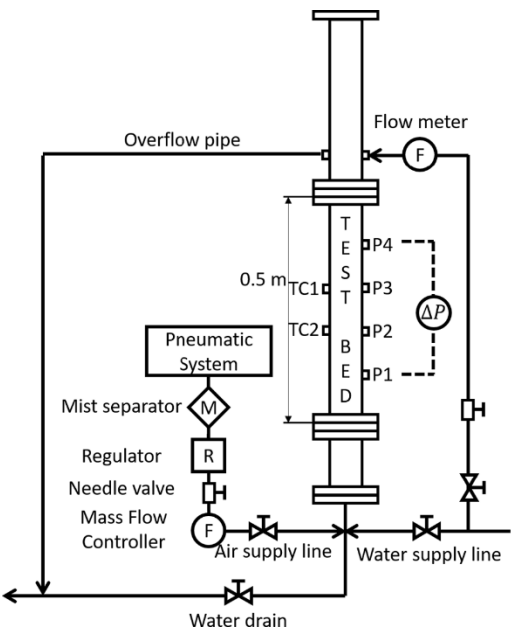
ACE-3Dの重み付け関数*を利用

$$w = \begin{cases} 0, & (\alpha \leq 0.5) \\ (4\alpha - 2)^2(7 - 8\alpha), & (0.5 < \alpha < 0.75) \\ 1, & (\alpha \geq 0.75) \end{cases}$$



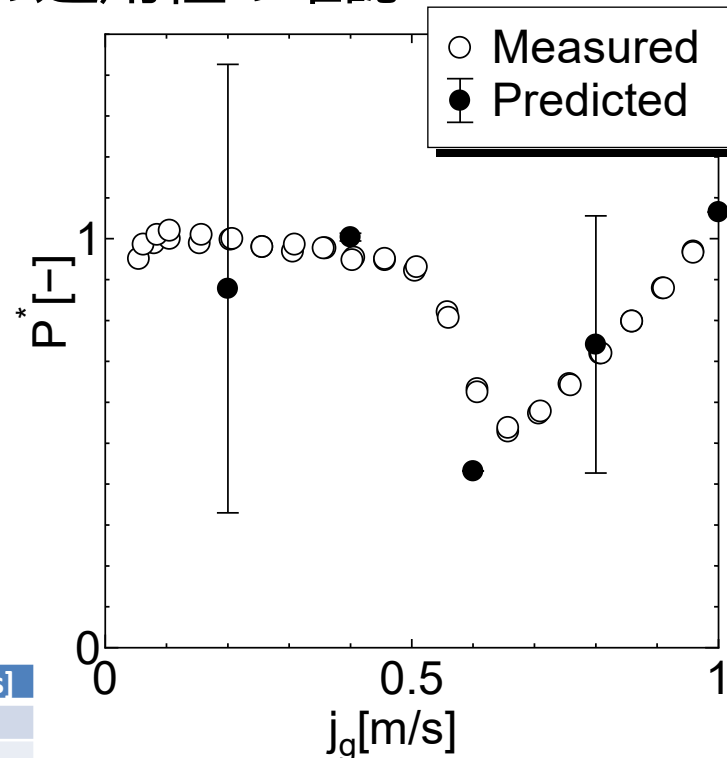
*重み付け関数：流動様式に対応して気相あるいは液相の重み付けを変化させる。
一般の二相流に対する実験結果に基づき、ボイド率0.5以下は気泡流(小さな気泡のみを含む様式)、0.75以上は液膜あるいは液滴が含まれる様式を想定

7.2.1 多孔質体モデル解析 修正したモデルの適用性の確認



Case	J_g [m/s]	J_l [m/s]
1	0.2	0
2	0.4	0
3	0.6	0
4	0.8	0
5	1.0	0

計算体系・条件



$$P^* = \frac{\Delta P}{\rho_l g L}$$

L : 計測点間の距離
 ΔP : 圧力差

計算結果と既存試験結果の比較
 解析開始後100~500秒の平均値を黒丸で、
 標準偏差を誤差として示す。

Two-phase flow pressure loss through packed particle bed for wide void fraction range, M. Lee, H.S. Park, J.H. Park, J.H. Oh M.H. Kim, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 108, November 2019, Pages 85-94

流動様式による重み付けで高流量時だけでなく、低流量時においても結果が改善
 重み付け関数の最適化は今後の課題

二相流モデルとして流動様式に対して修正したモデルを採用

7.2.1 多孔質体モデル解析 評価する伝熱モデル

連続の式(質量保存)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Navier-Stokesの式(運動量保存)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{u_i}{\varepsilon} \right) = - \frac{\varepsilon}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \frac{\nu \varepsilon}{K} u_i - \frac{C}{\sqrt{K}} \varepsilon \sqrt{u_k u_k} u_i + \varepsilon g_i$$

エネルギー保存の式

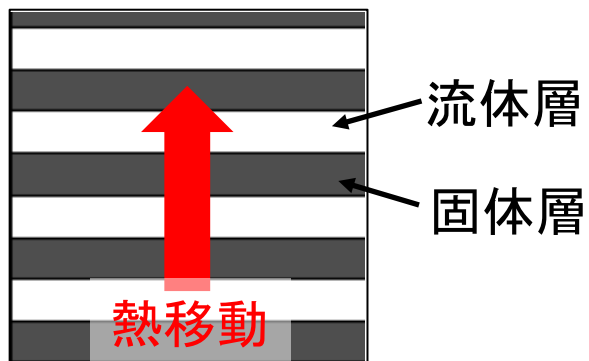
$$[\varepsilon \rho_f c_f + (1 - \varepsilon) \rho_s c_s] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_f u_k \frac{\partial T}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[k_e \frac{\partial T}{\partial x_k} \right] + (1 - \varepsilon) Q$$

x_i	位置 [m]	ν	動粘性係数 [m ² /s]
u_i	速度 [m/s]	ε	気孔率 [-]
ρ	密度 [kg/m ³]	K	透過係数 [m ²]
T	温度 [K]	g_i	重力加速度ベクトル [m/s ²]
k	熱伝導率 [W/m/K]	k_e	よどみ熱伝導率 [W/(m·K)]

多孔質体内の伝熱評価で一般に用いられる「よどみ熱伝導率」の適用を想定

7.2.1 多孔質体モデル解析 検討した「よどみ熱伝導率モデル」

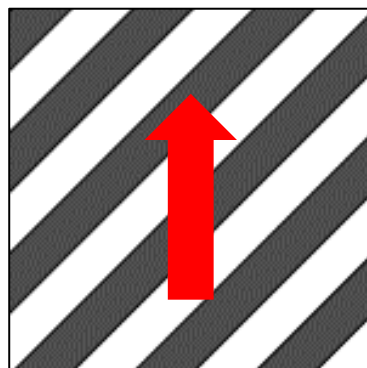
直列モデル
(調和平均)



$$k_e = \frac{\varepsilon}{k_f} + \frac{1 - \varepsilon}{k_s}$$

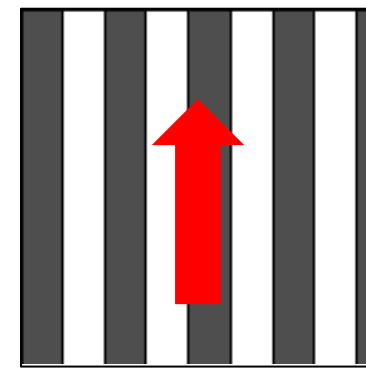
よどみ熱伝導率: 最小

加重幾何平均モデル



$$k_e = k_f^\varepsilon k_s^{1-\varepsilon}$$

並列モデル
(相加平均)



$$k_e = \varepsilon \cdot k_f + (1 - \varepsilon) \cdot k_s$$

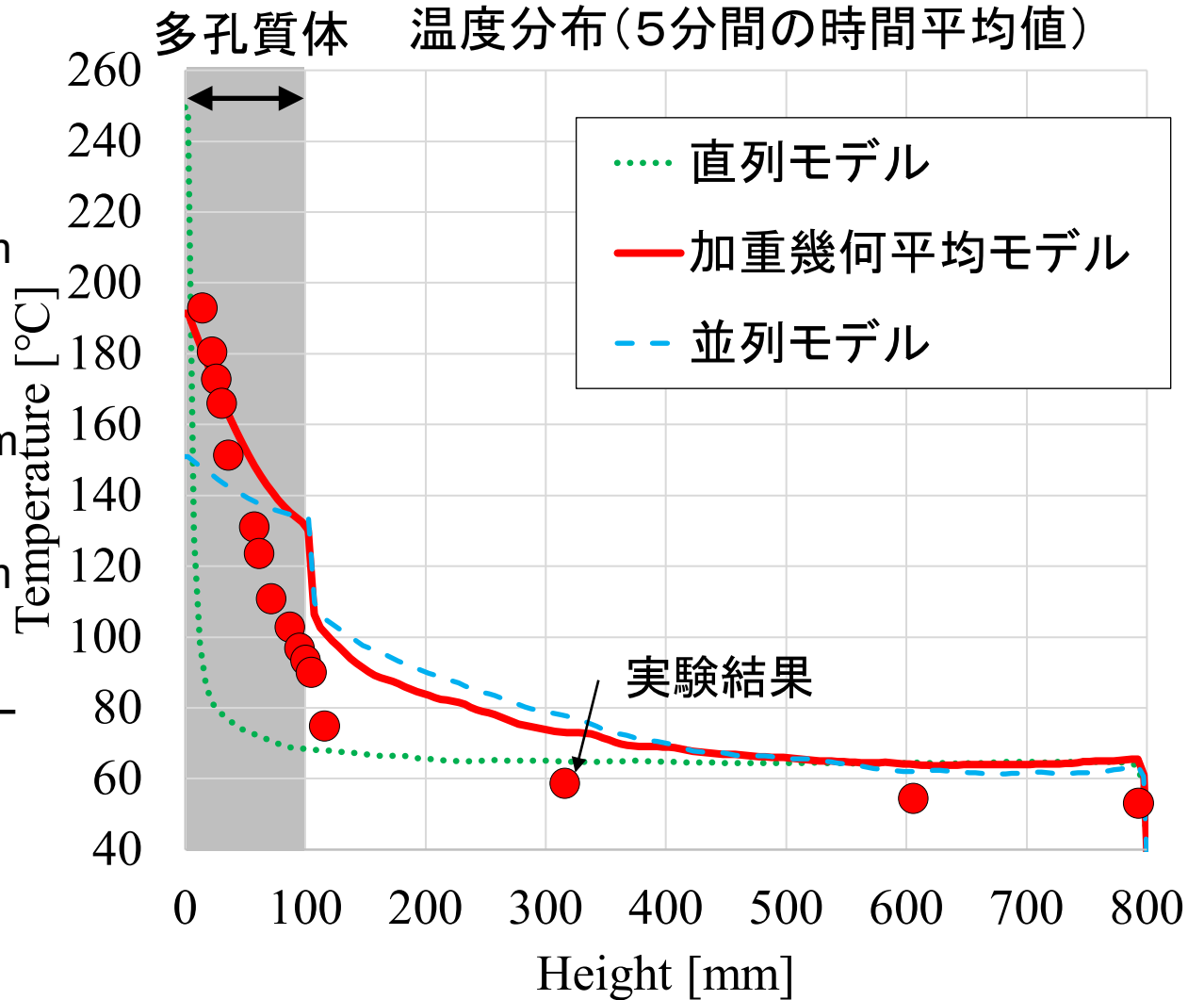
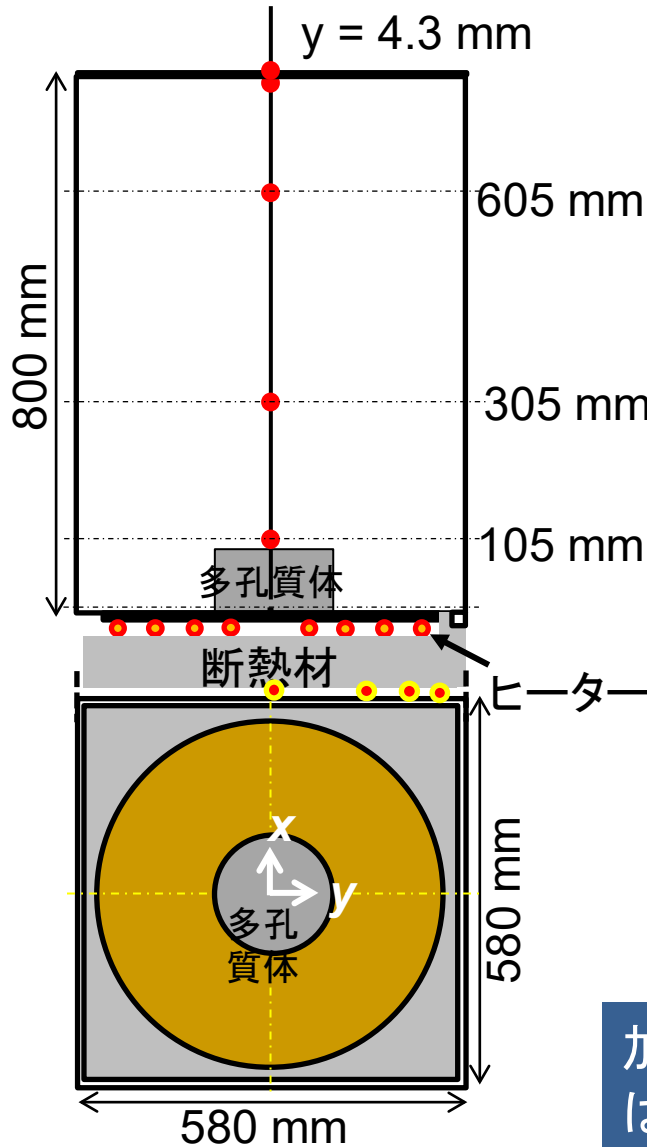
よどみ熱伝導率: 最大

※ k_f, k_s は流体及び固体の熱伝導率

「よどみ熱伝導率」の評価・推定で用いられる3つのモデルを評価

7.2.1 多孔質体モデル解析 モデルの比較 (鉛直方向温度分布)

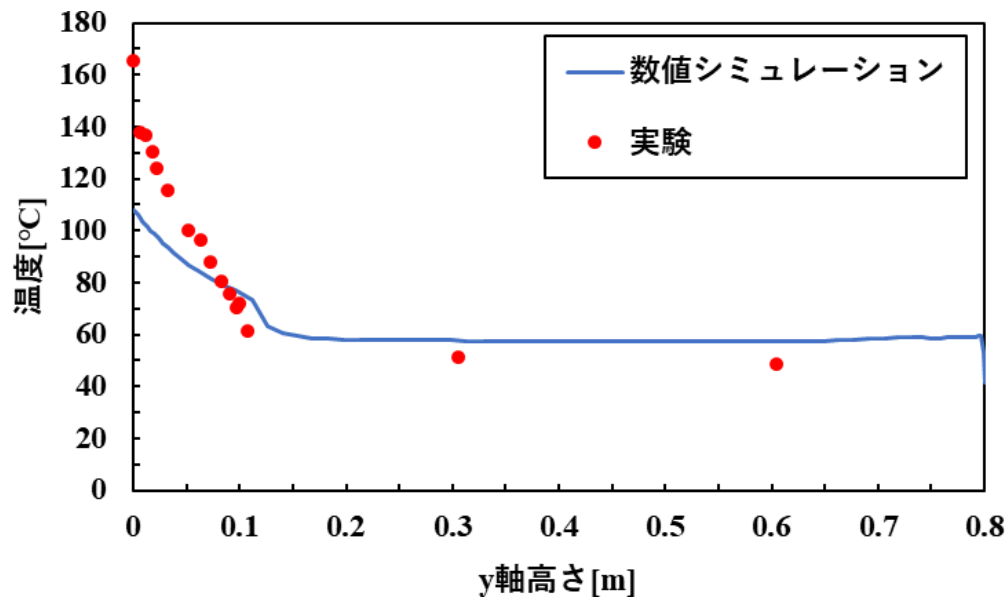
小型試験装置の結果と比較



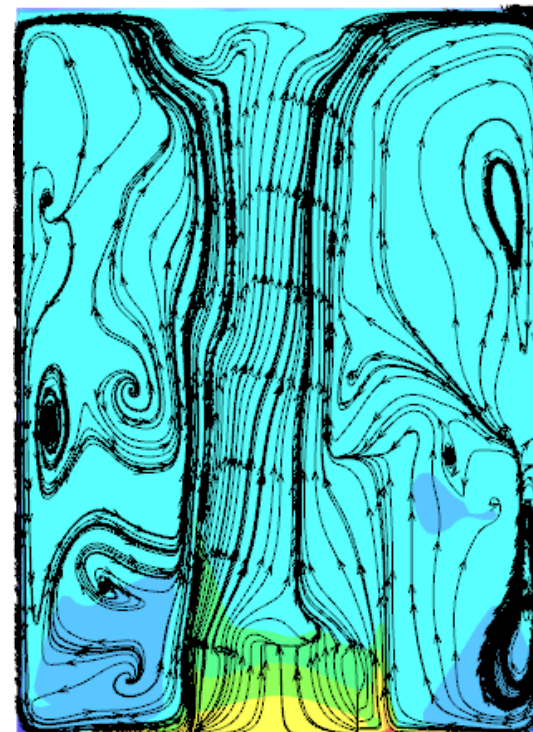
加重幾何平均モデルが実験結果に最も近いが差異は大きい

7.2.1 多孔質体モデル解析 小型試験装置の結果との比較

加重幾何平均モデルによる値 $k_e = 2.1$ [W/(m·K)]をそのまま適用



多孔質体中心部高さ方向温度

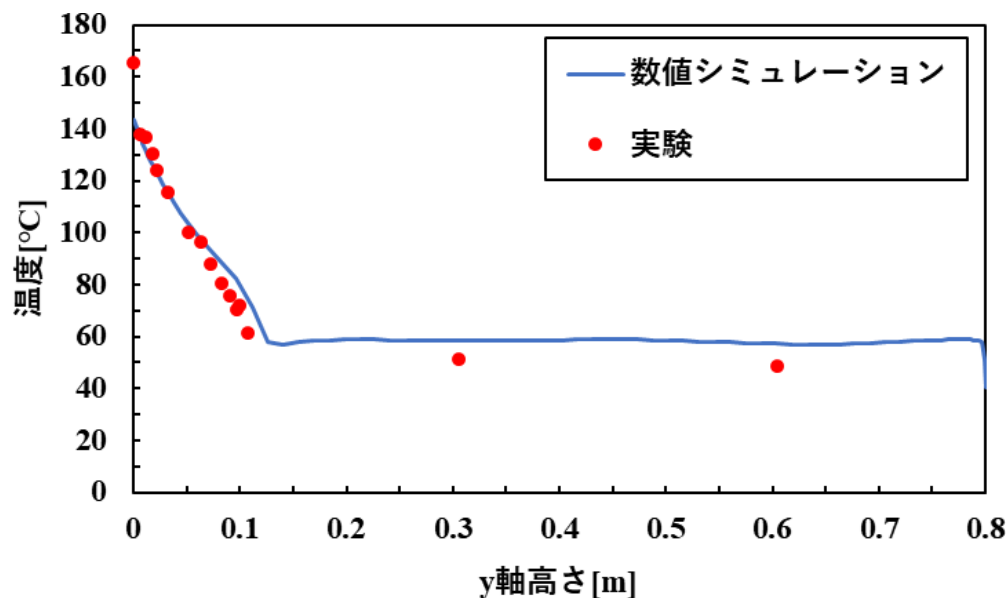


209W

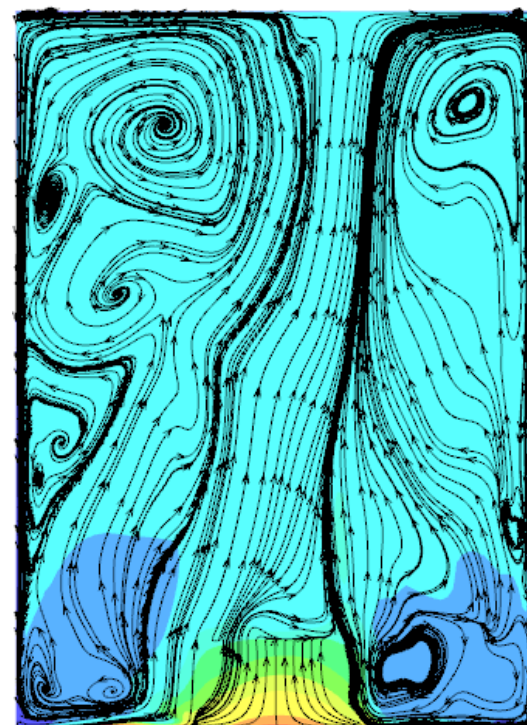
流体部分の温度はおおよそ実験と等しいが多孔質体の温度勾配が小さい
多孔質体についてモデルが想定した状況と現実の違いにより熱伝導を過大評価

7.2.1 多孔質体モデル解析 補正係数導入の効果の確認

加重幾何平均モデルによる値を補正
補正係数0.48、 $k_e = 1.0 (= 2.1 \times 0.48)$ [W/(m·K)]を適用



多孔質体中心部高さ方向温度



209W

熱伝導の過大評価を適正化するための補正係数を導入することで実験値と同等の温度分布を得た

伝熱モデルとして、加重幾何平均モデル+補正係数を用いる

7.2.1 多孔質体モデル解析 モデルの選定・評価結果

- 流動モデル(単相)
 - ダルシー・フォークハイマー則を利用するとともに、必要な透過係数、フォークハイマー係数にはエルガンの式を適用
- 二相流モデル
 - Lipinskiモデルに流動様式に対応した修正の導入
 - 流動様式に対応した修正については、さらに検討が必要
- 伝熱モデル
 - 加重幾何平均モデルに補正係数を導入して評価
 - 補正係数の適用範囲については検討が必要

7.2.2 JUPITERの検証 小型試験装置に対する解析体系

「1-1 燃料デブリ模擬流動試験」を利用して、JUPITERの妥当性を確認する

使用コード: JUPITER

寸法: 580 mm × 580 mm × 810 mm

解像度: 2.5 mm/cell

境界条件

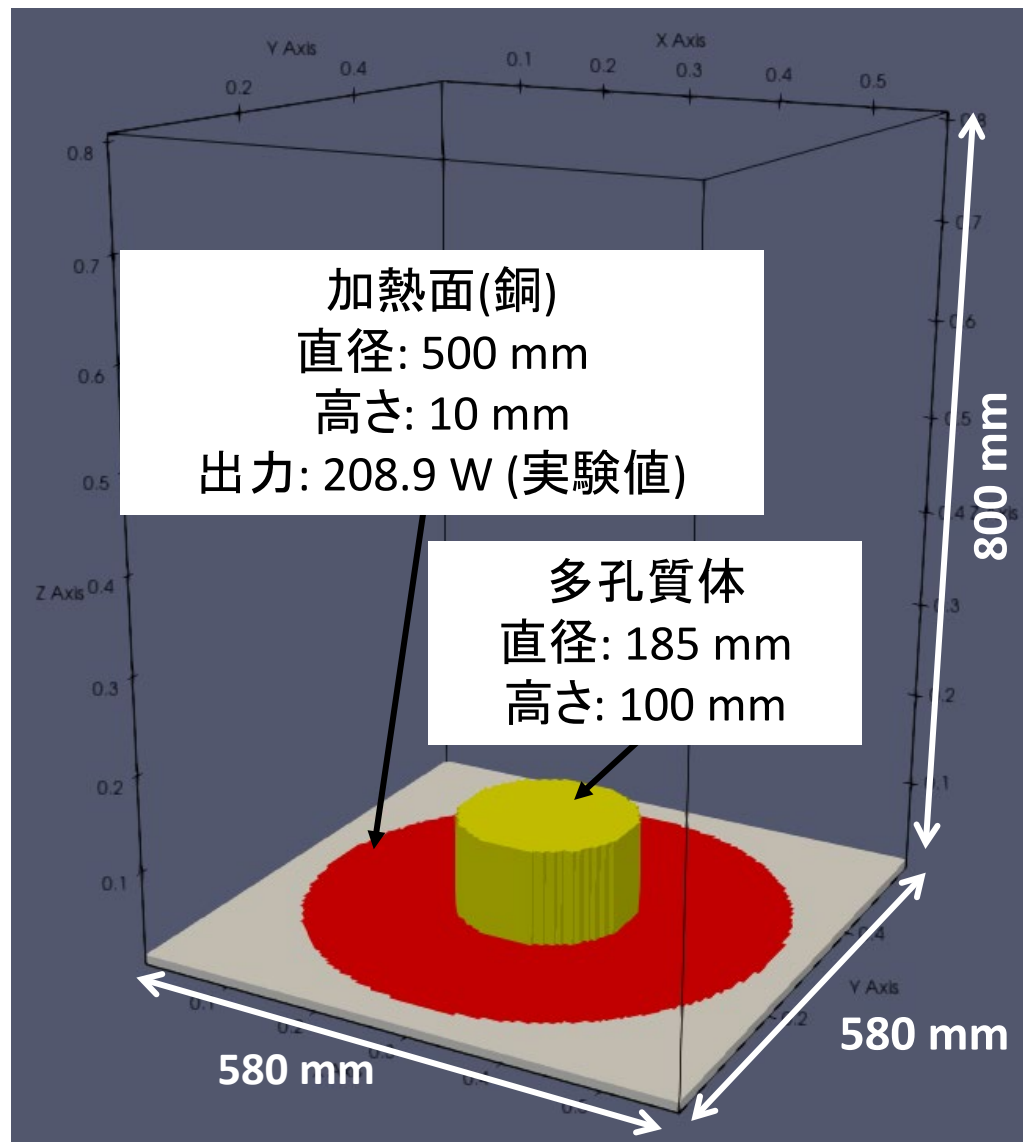
下面: 断熱

上面: 一定温度 (312.2 K)

側面: 一定温度 (311.4 K)

※実験値である壁面外側の温度から
1次元熱伝導式と自然対流の
熱伝達予測式より算出

使用流体: 空気



7.2.2 JUPITERの検証 小型試験装置に対する解析条件

多孔質体 (SUS球10 mm)

気孔率: $\varepsilon = 0.35$ [-]

透過係数: $K = 6.765 \times 10^{-8} \text{ m}^2$

※エルガンの式から導出

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2 \leftarrow \text{粒径}}{150(1 - \varepsilon)^2}$$

フォークハイマー係数: $C = 0.69$

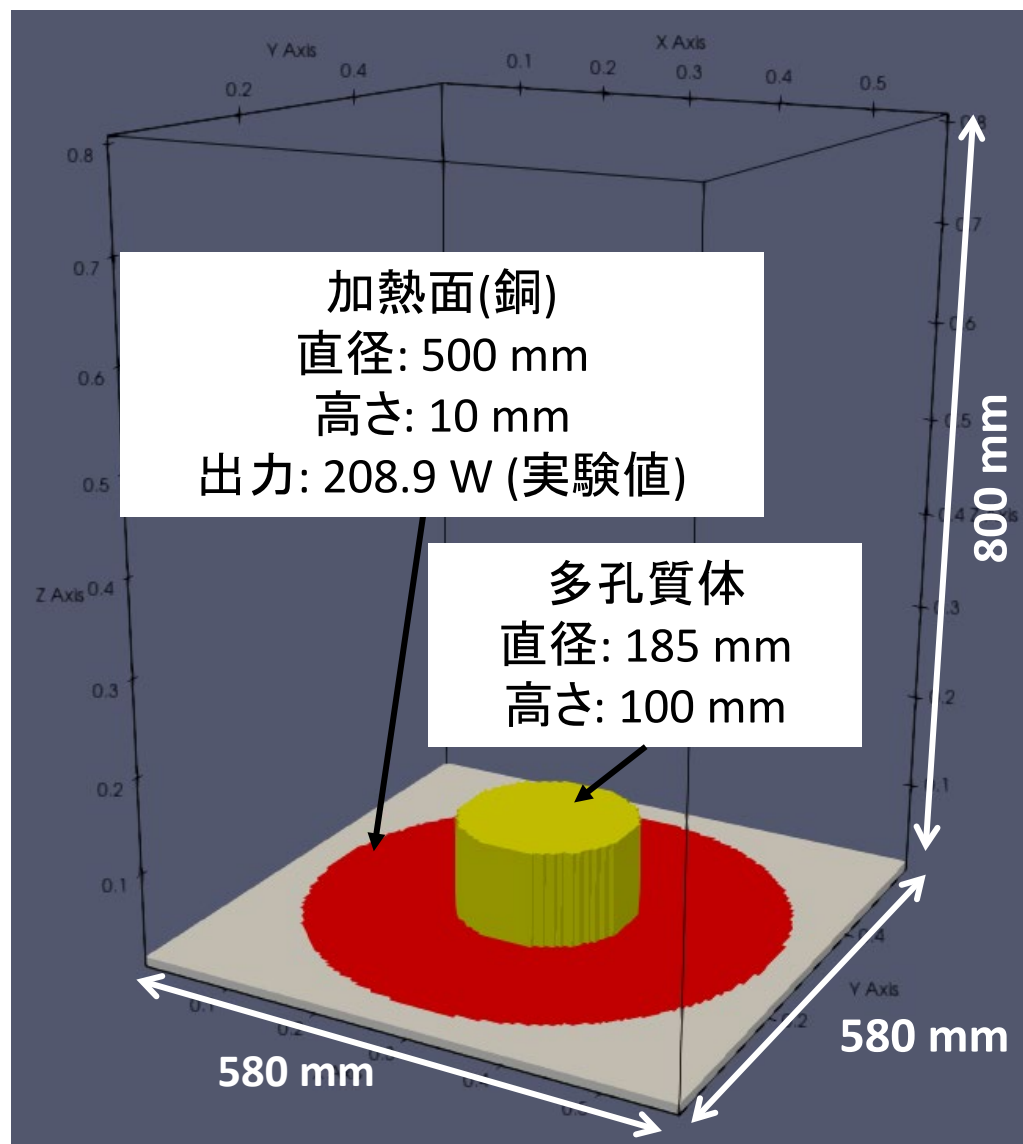
※エルガンの式から導出

$$C = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}}$$

よどみ熱伝導率:

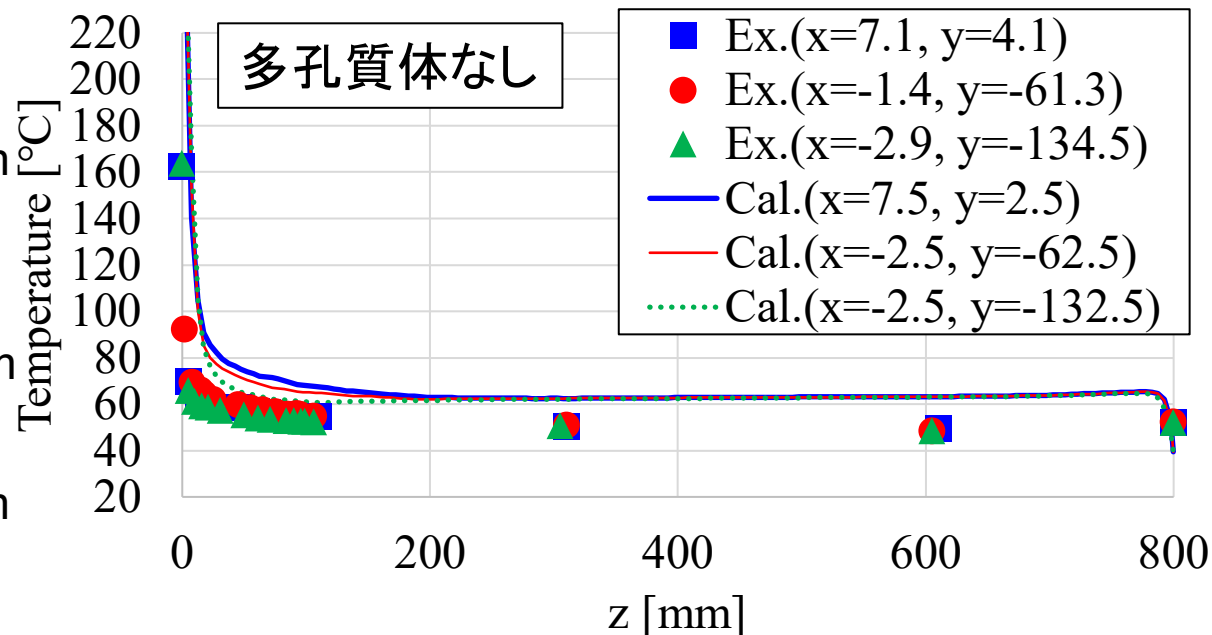
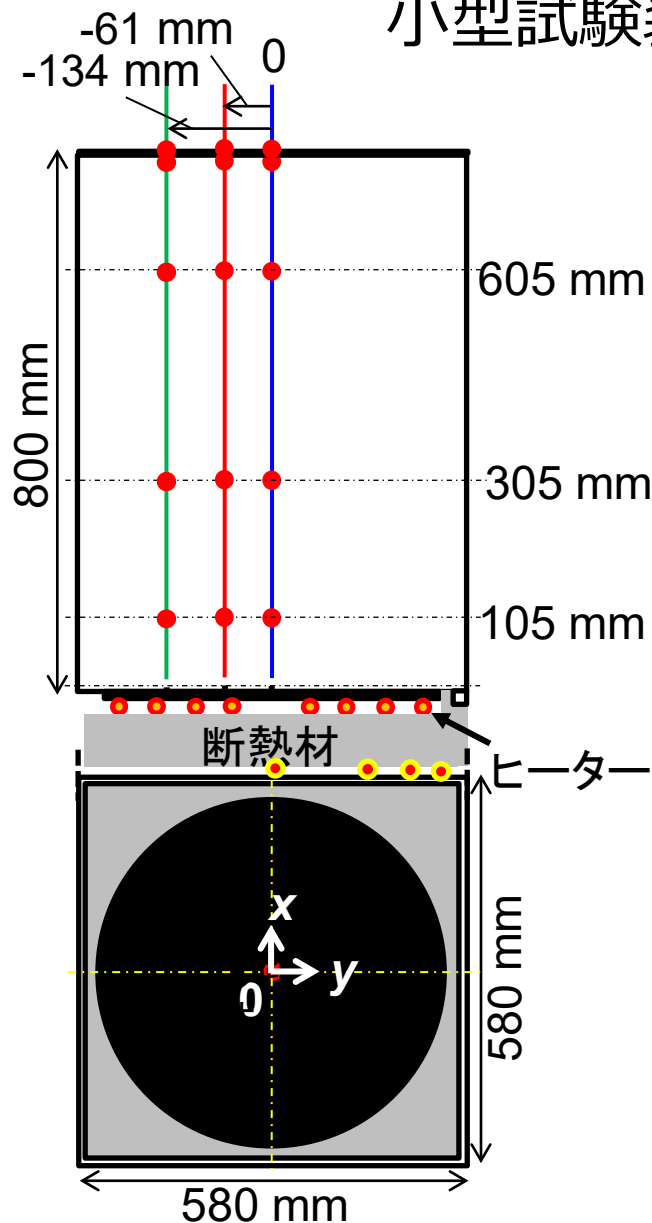
・幾何平均モデル

$$k_e = 1.9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$



7.2.2 JUPITERの検証 多孔質体なしの場合の温度分布の比較

小型試験装置

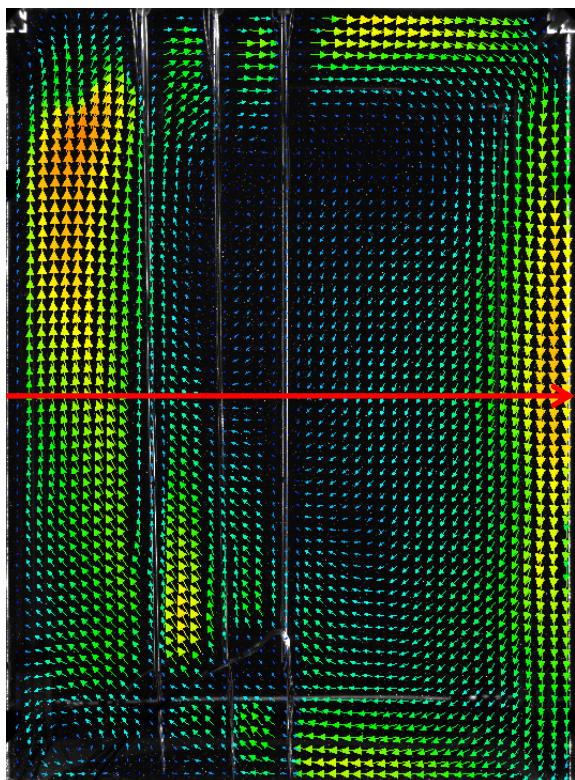


JUPITERによる解析結果は、多孔質体がない場合の試験結果を概ね再現

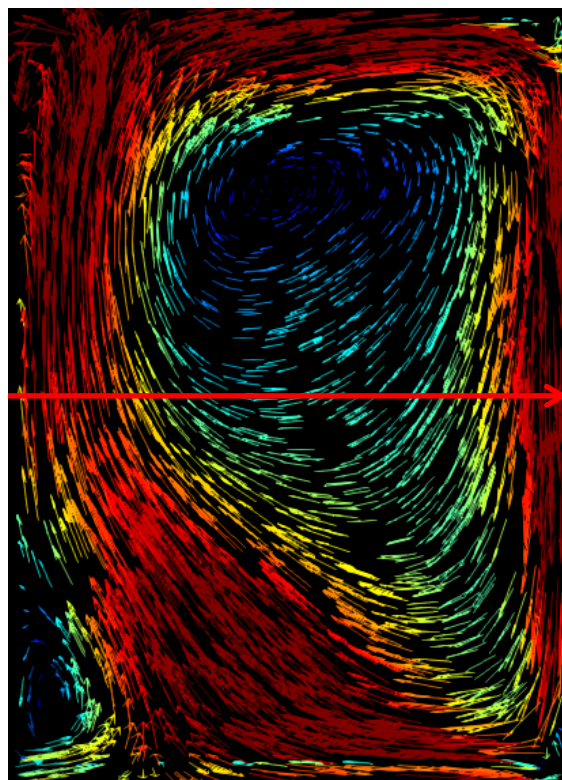
7.2.2 JUPITERの検証 多孔質体なしの場合の速度分布の比較

小型試験装置

実験

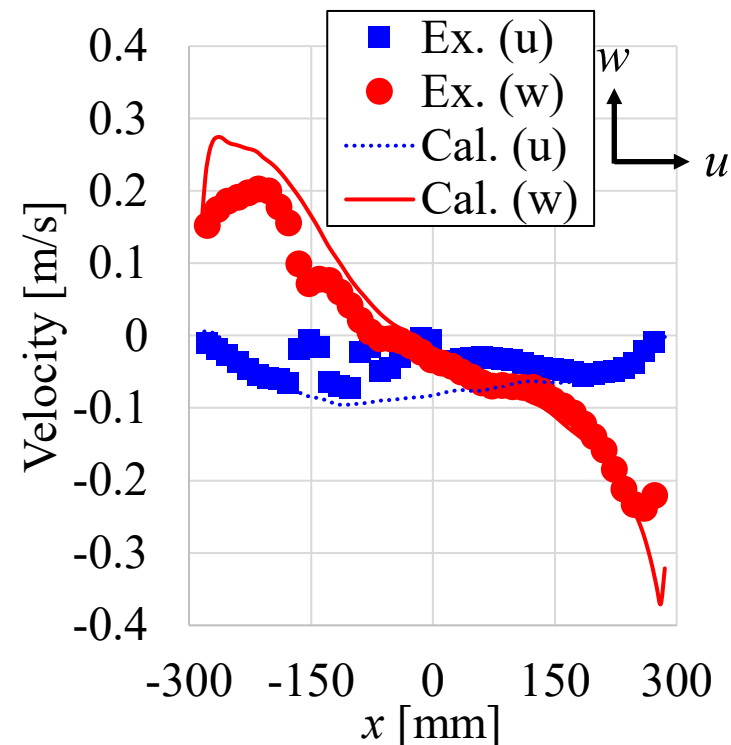


解析



0 m/s  0.3 m/s

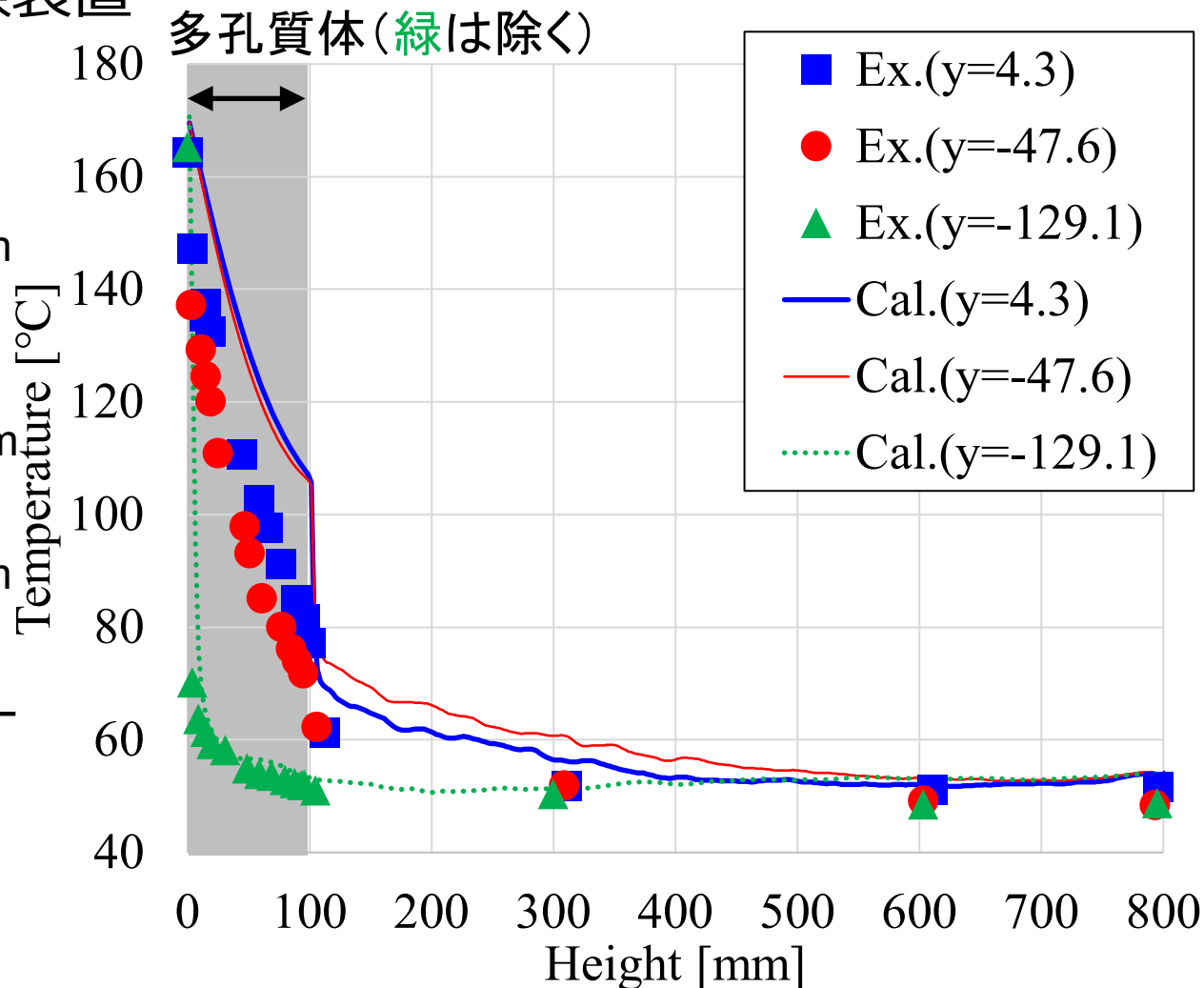
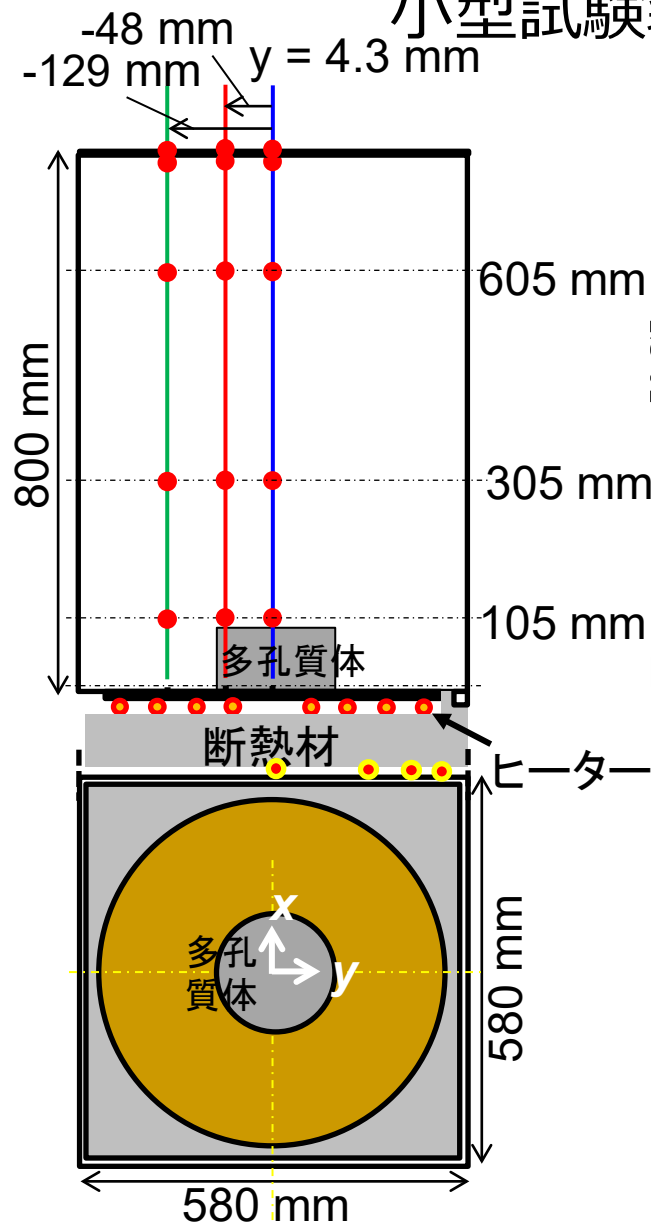
Velocity over center line



JUPITERによる解析結果は、多孔質体がない場合の流速分布を概ね再現

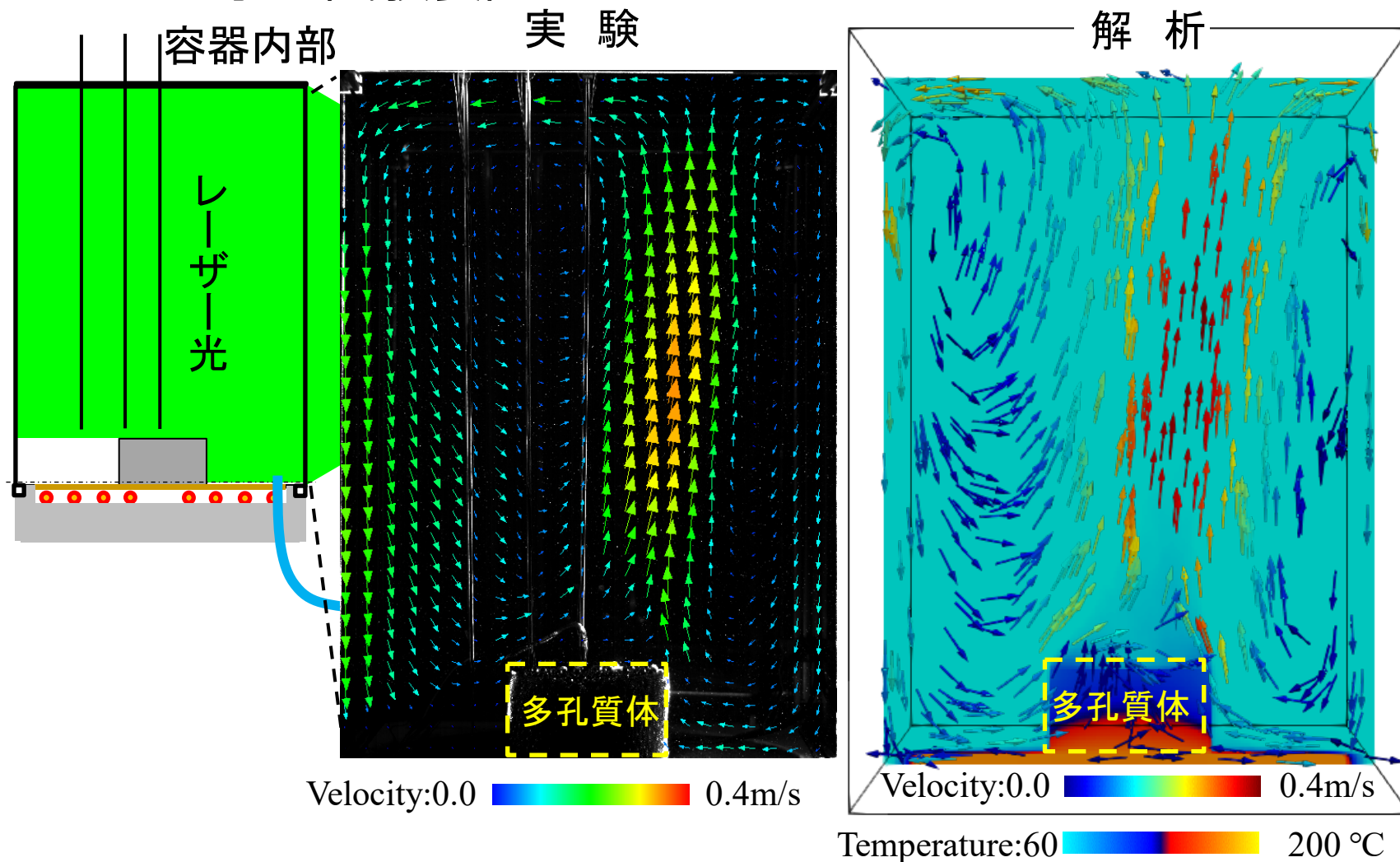
7.2.2 JUPITERの検証 多孔質体ありの場合の温度分布の比較

小型試験装置



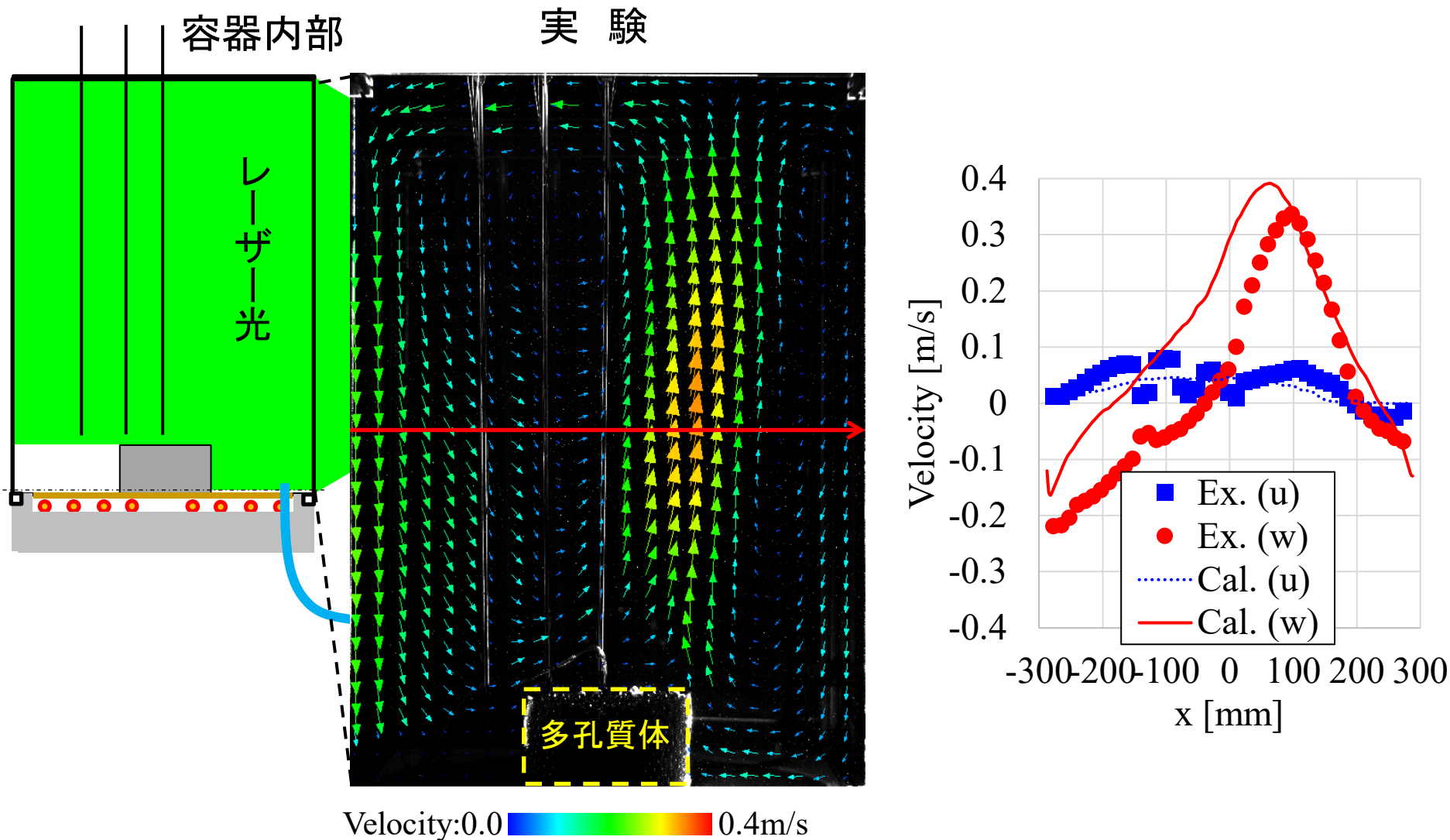
定性的に実験結果を概ね再現できることを確認

7.2.2 JUPITERの検証 多孔質体ありの場合の速度分布の比較 小型試験装置



多孔質体上部からの上昇流及び容器周囲での下降流の形成について定性的・定量的に実験結果を概ね再現することを確認

7.2.2 JUPITERの検証 多孔質体ありの場合の速度分布の比較 小型試験装置



定量的に実験結果を概ね再現することを確認

7.2.2 JUPITERの検証 燃料デブリ模擬流動試験に対する解析体系

使用コード: JUPITER

寸法: 800 mm × 800 mm × 1600 mm

解像度: 5 mm/cell

境界条件

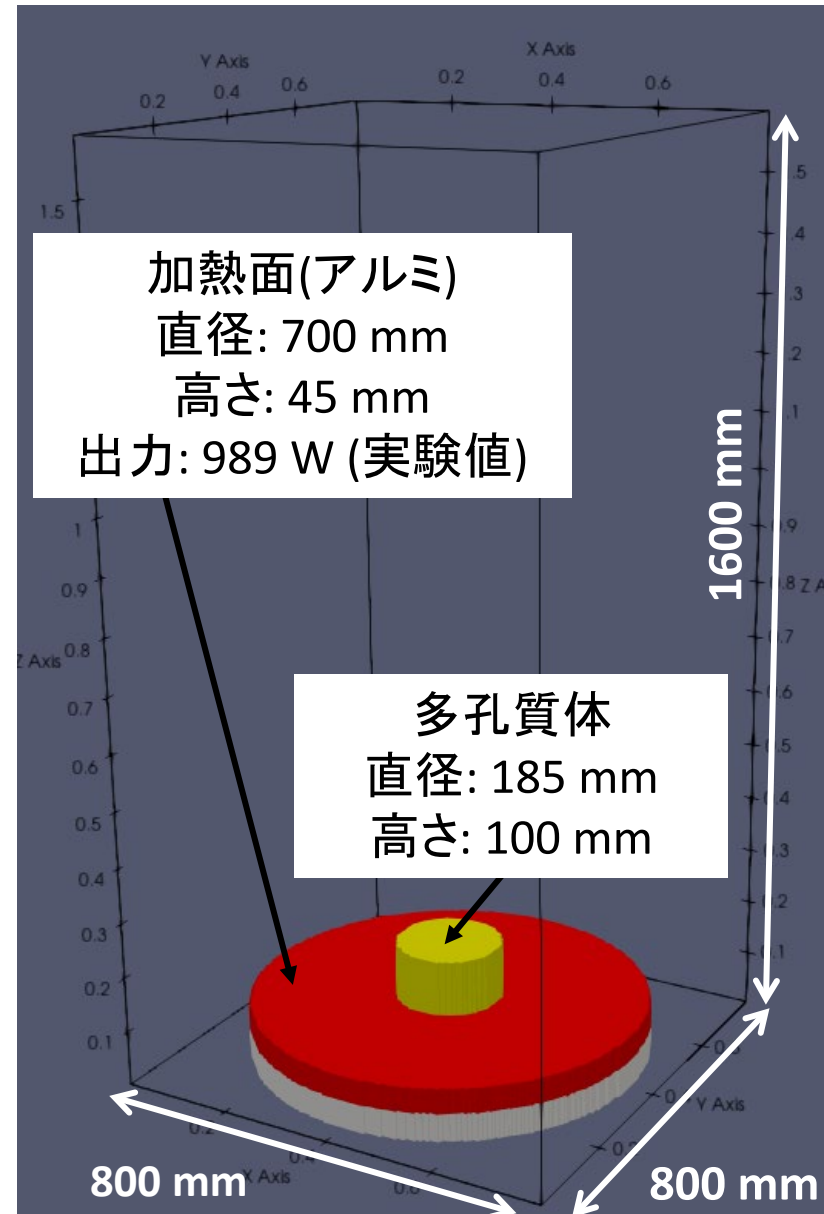
下面: 断熱

上面: 一定温度 (48.85 °C*)

側面: 一定温度 (47.65 °C*)

*実験値使用

使用流体: 水



7.2.2 JUPITERの検証 燃料デブリ模擬流動試験に対する解析条件

多孔質体 (SUS球10 mm)

気孔率: $\varepsilon = 0.35$ [-]

透過係数: $K = 6.765 \times 10^{-8} \text{ m}^2$

※エルガンの式から導出

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2 \leftarrow \text{粒径}}{150(1 - \varepsilon)^2}$$

フォークハイマー係数: $C = 0.69$

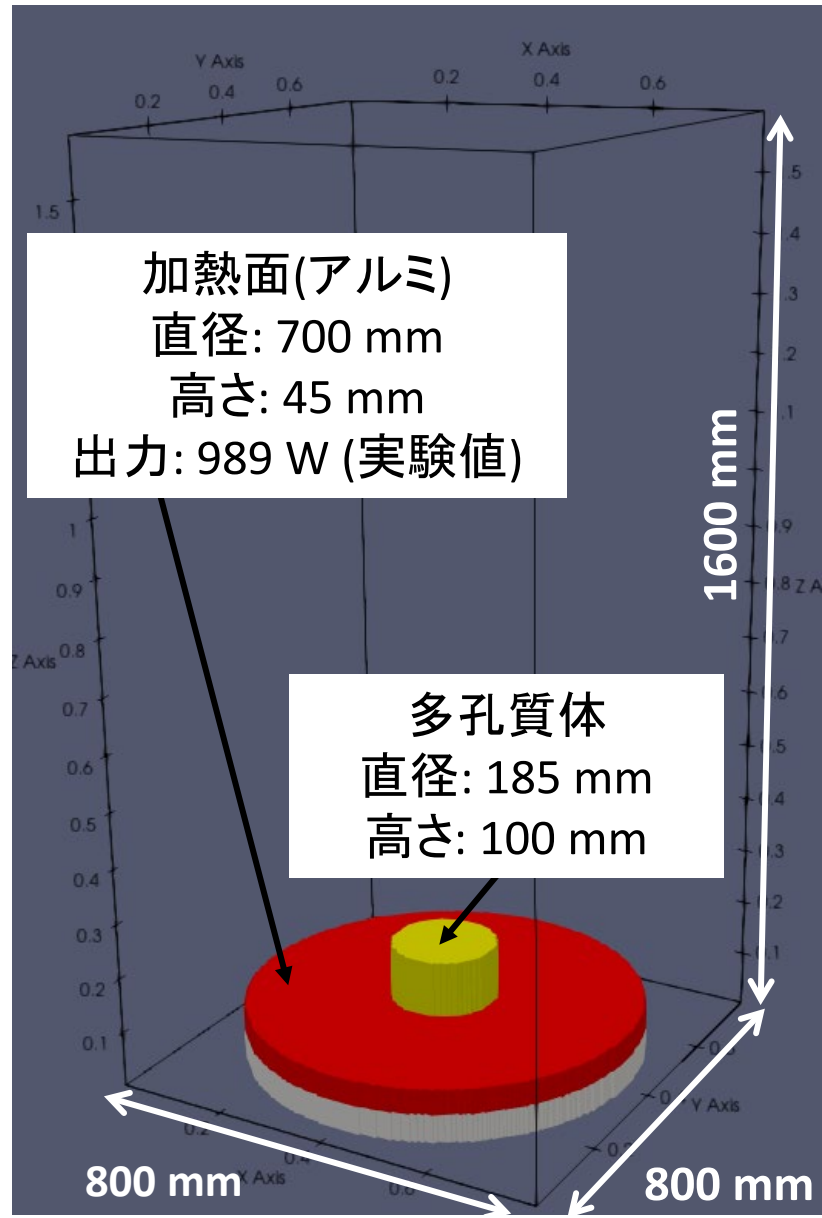
※エルガンの式から導出

$$C = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}}$$

よどみ熱伝導率:

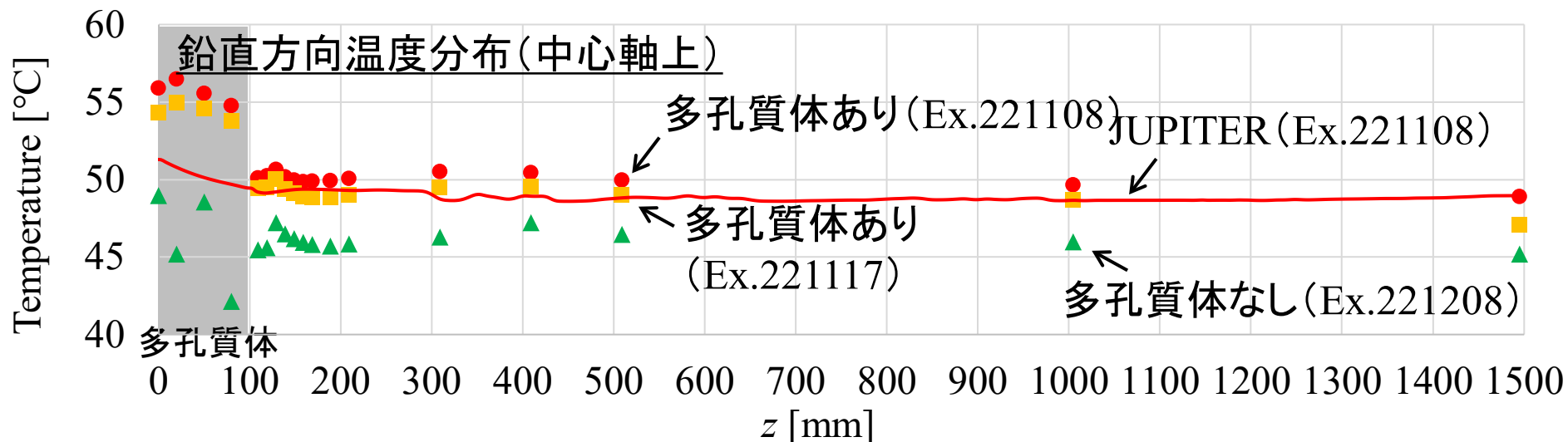
・幾何平均モデル

$$k_e = 5.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

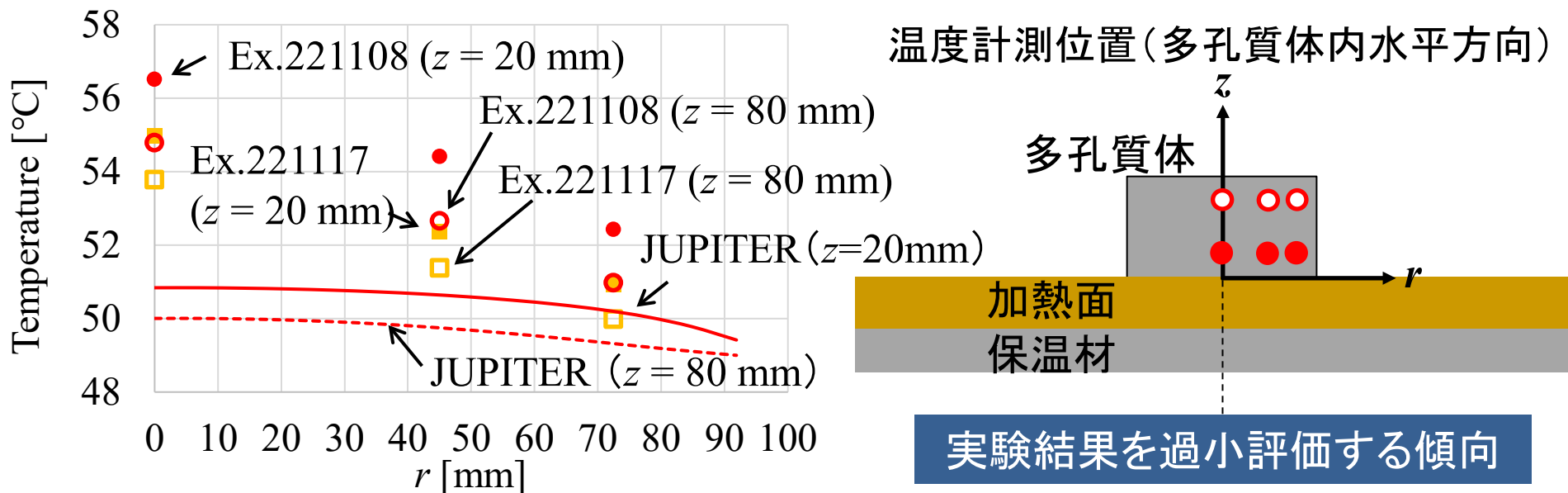


7.2.2 JUPITERの検証 温度分布の比較

燃料デブリ模擬流動試験



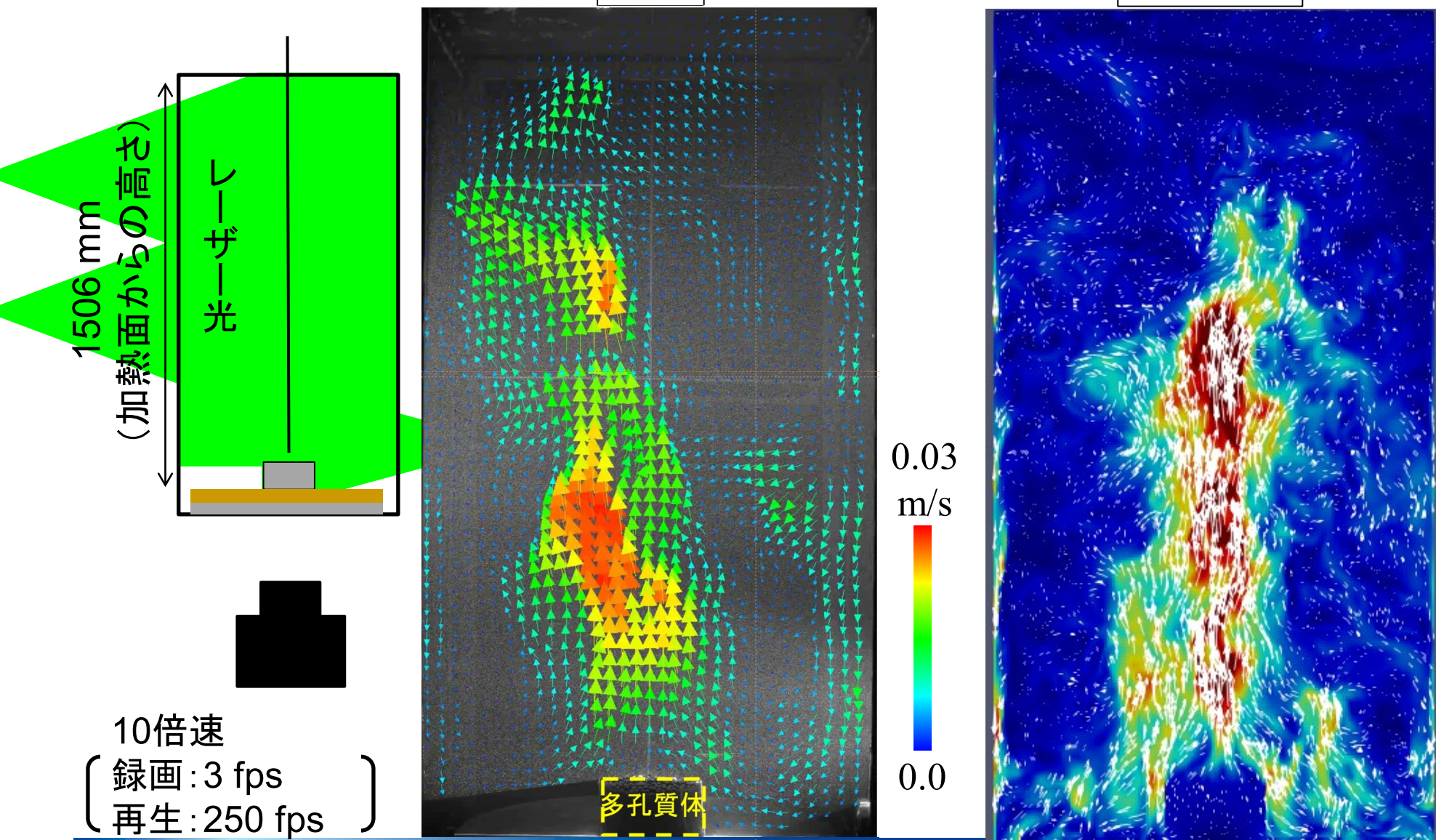
多孔質体内水平方向温度分布 (JUPITERはEx.221108の条件で実施)



7.2.2 JUPITERの検証 多孔質体ありの場合の速度分布の比較

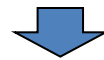
実験

数値解析



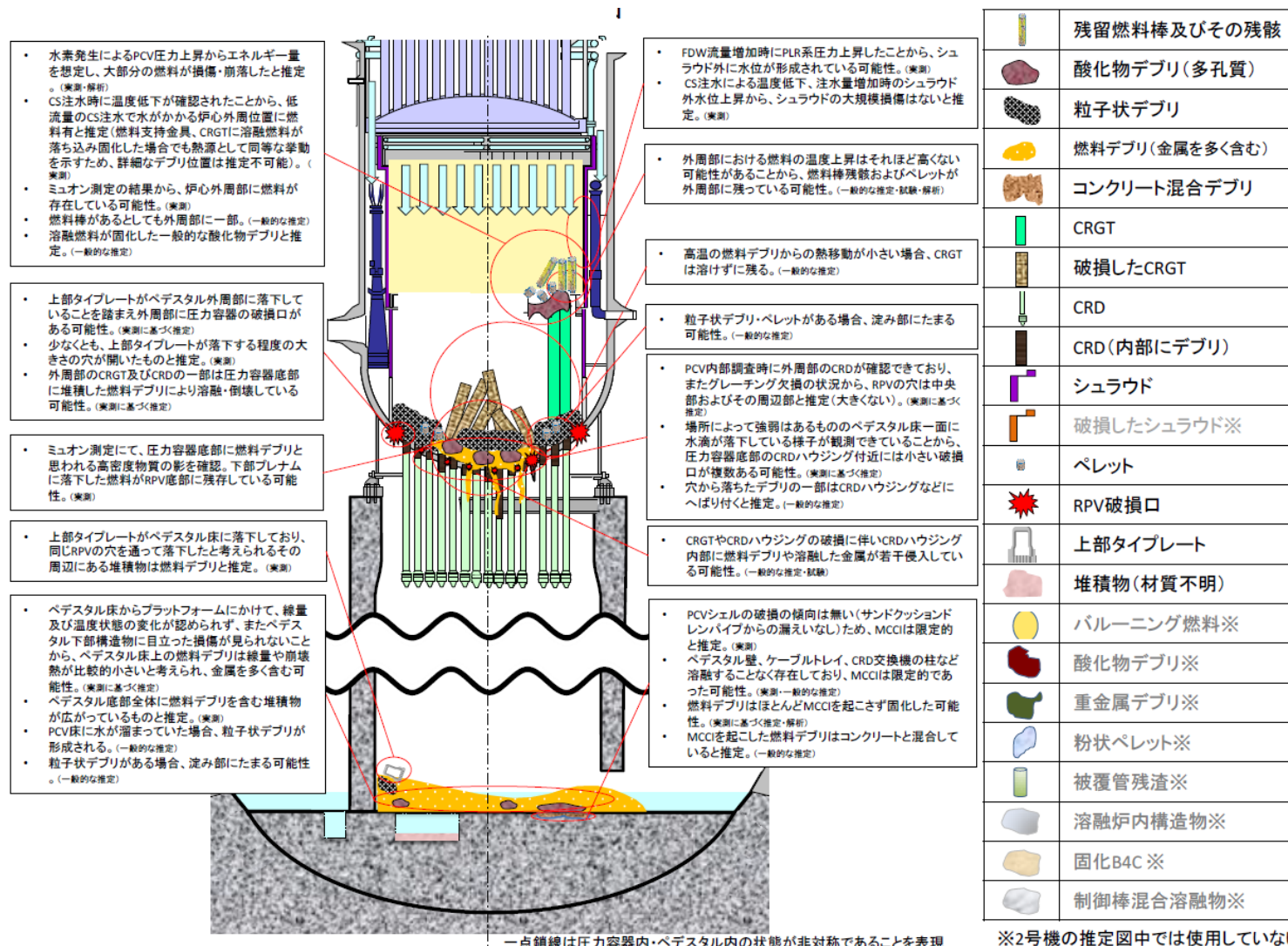
7.2.2 JUPITERの検証 JUPITERの検証に対するまとめ

- 多孔質体モデル解析で選定・評価したモデルとJUPITERを用い、燃料デブリ模擬流動試験を対象とした解析を実施
- 多孔質体がない場合には、温度、速度とも実験結果と一致
- 多孔質体がある小型試験装置による結果については、速度場は概ね一致するものの、**多孔質体上部での温度場に差異が見られる**
- 燃料デブリ模擬流動試験については、**温度場についての過小評価が見られる。**



- **伝熱モデルについては、さらに検討が必要**
 - 空間解像度の影響についての詳細な把握
 - 補正係数についての追加の検討
 - **多孔質体と純流体部(多孔質体を含まない部分)の境界部における伝熱モデルの検討**

7.2.3 空冷状態実機詳細解析 実機解析条件の検討



	残留燃料棒及びその残骸
	酸化物デブリ(多孔質)
	粒子状デブリ
	燃料デブリ(金属を多く含む)
	コンクリート混合デブリ
	CRGT
	破損したCRGT
	CRD
	CRD(内部にデブリ)
	シュラウド
	破損したシュラウド※
	ペレット
	RPV破損口
	上部タイプレート
	堆積物(材質不明)
	バーニング燃料※
	酸化物デブリ※
	重金属デブリ※
	粉状ペレット※
	被覆管残渣※
	溶融炉内構造物※
	固化B4C ※
	制御棒混合溶融物※

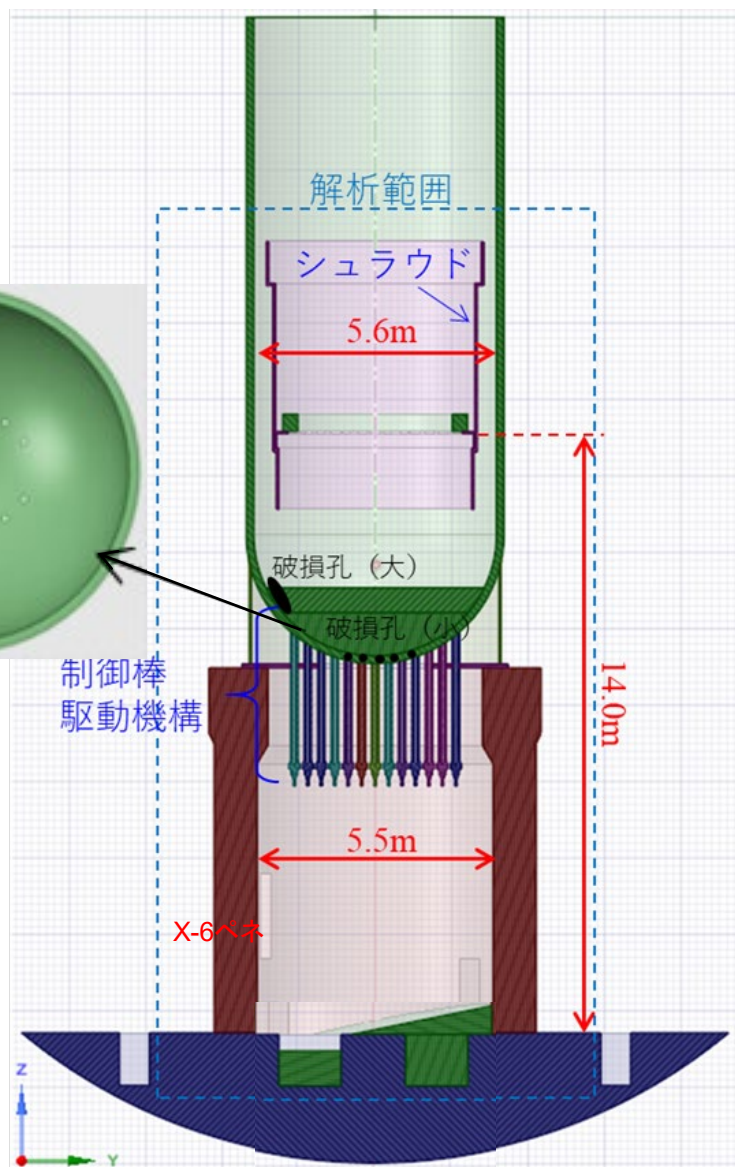
※2号機の推定図中では使用していない

一点鎖線は圧力容器内・ベDESTAL内の状態が非対称であることを表現

参考資料：
 [1]「廃炉・汚染水対策補助事業（総合的な炉内状況把握の高度化）」平成29年度成果報告， https://irid.or.jp/_pdf/20170000_01.pdf, p.18 (参照2023-07-04)

炉心下部の外周部、圧力容器下部、ベDESTAL床面にそれぞれ燃料デブリが存在すると推定

7.2.3 空冷状態実機詳細解析 解析体系



▶ 福島第一原子力発電所2号機の寸法

東京電力ホールディングスのホームページ情報

(https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline_f1/) に基づき設定

▶ 制御棒駆動機構

炉容器下部から下にある**制御棒駆動機構**について再現。燃料集合体数548本であることから、駆動機構は137本を設定[1]。

▶ 破損口の模擬

内部調査結果を参考に、タイプレートが通過できるほどの穴を設置。場所は、ペDESTAL内で一番燃料デブリ堆積高さが高いと思われる内部観察用カメラの吊りおろし位置 (X-6ペネ) の上方に**直径500mm程度の穴**を設けた。また、炉容器下部にも**クラックを模した小孔**を数か所設置した[2]。

▶ 解析範囲

炉容器、ペDESTALおよび格納容器の一部を含む10.24m×10.24m×20.48mの矩形領域とした。解析メッシュ幅は、制御棒駆動機構を解像できるように40mmと設定。**解析格子数は、33,554,432。**

参考資料：

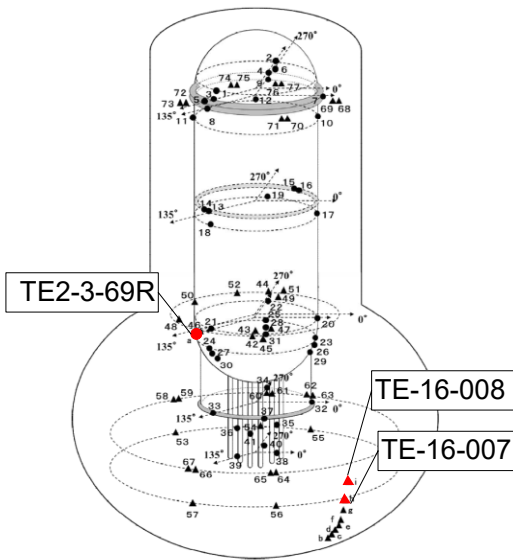
[1] 「廃炉・汚染水対策補助事業（総合的な炉内状況把握の高度化）」平成29年度成果報告, https://irid.or.jp/_pdf/20170000_01.pdf, p.18 (参照2023-07-04)

[2] 「福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査結果について」, https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2018/04/20180426_1.pdf (参照2023-07-04)

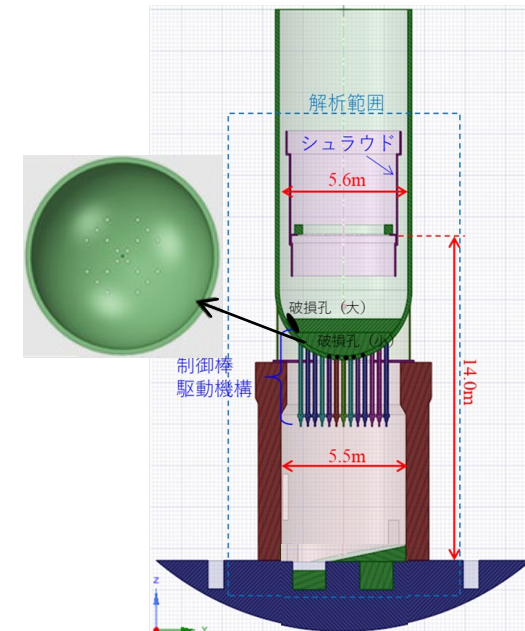
7.2.3 空冷状態実機詳細解析 解析条件

炉内各所の初期温度条件*1

部位	参照温度計測点	値
RPV	TE-2-3-69R	初期温度：34.8℃
シュラウド	//	同上
炉心支持板	//	同上
RPV支持構造物	TE-16-008/007	初期温度：31.95℃ 008：31.8℃、 007：32.1℃ の平均
制御棒支持板	TE-16-008/007	同上
ペDESTAL	TE-16-008/007	同上
制御棒	TE-16-008/007	同上
ペDESTAL下部	TE-16-008/007	同上
炉心部	TE-2-3-69R	初期温度：34.8℃
燃料デブリ		
下部プレナム	TE-2-3-69R	同上
燃料デブリ		
ペDESTAL	TE-16-008/007	初期温度：31.95℃
燃料デブリ		
雰囲気	気体温度 TE-16-008/007	初期温度：31.95℃
炉外	TE-16-008/007 境界温度	31.95℃



参照温度計測点位置*3



解析体系

解析領域の境界条件*2

位置	流動境界	温度境界
X-方向	すべりあり	等温
X+方向	すべりあり	等温
Y-方向	すべりあり	等温
Y+方向	すべりあり	等温
Z-方向	すべりなし	断熱
Z+方向	すべりあり	等温

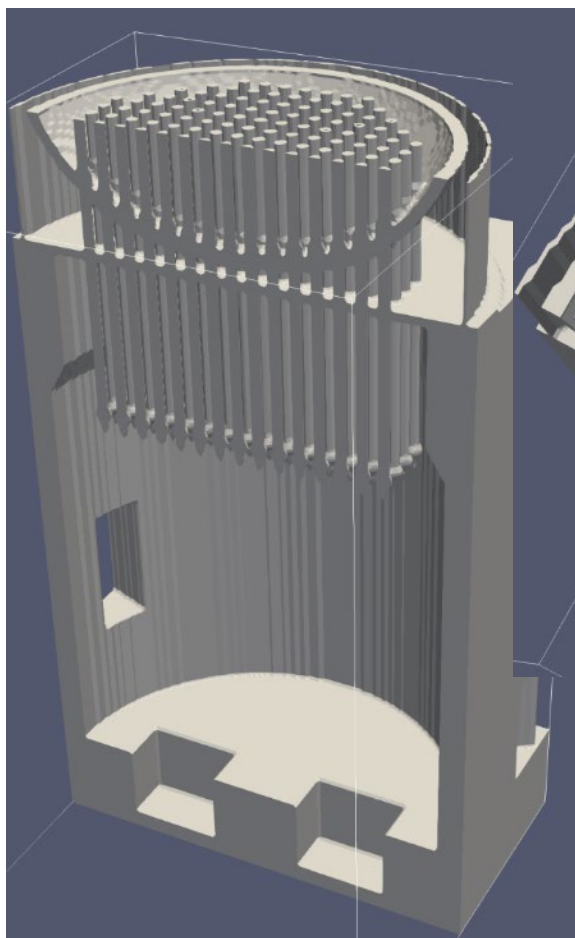
すべりあり：壁面に平行な速度成分の勾配 = 0、その他の速度成分 = 0
すべりなし：速度 = 0

*1 速度場、圧力場については、速度0、圧力均一の条件を付加

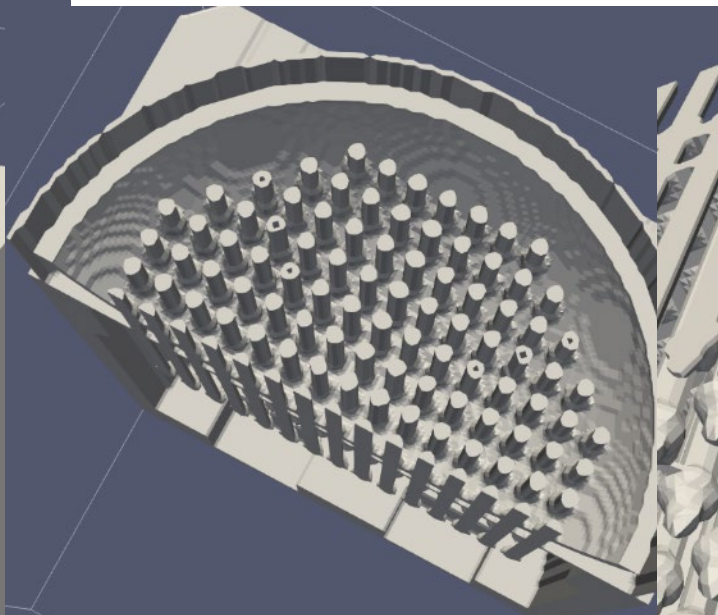
*2 解析には直交格子を用いており、X、Y方向には同一の条件を付加

*3 https://www.tepco.co.jp/decommission/information/newsrelease/thermometer/pdf/2020/thermometer_20200501-j.pdf

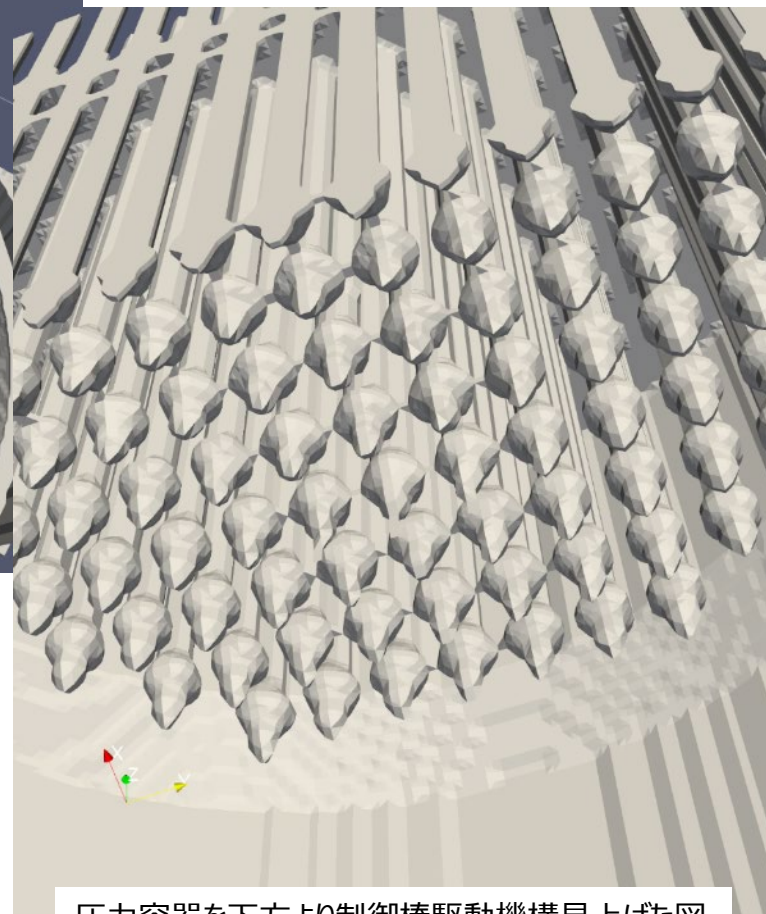
7.2.3 空冷状態実機詳細解析 解析で用いた実機形状



圧力容器下部+ペDESTAL全景



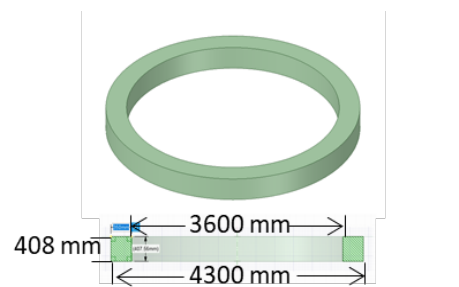
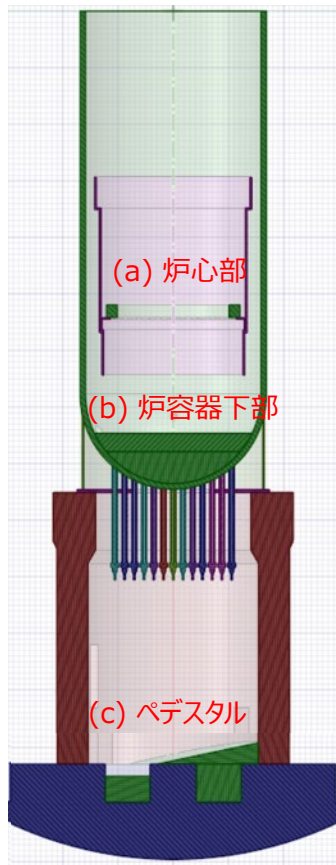
圧力容器を上方より見た図



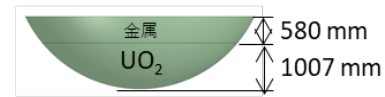
圧力容器を下方より制御棒駆動機構見上げた図
(水平断面：x-y平面、高さ方向：z)

RPV内外の構造を詳細にモデル化しJUPITERによる数値シミュレーションに適用

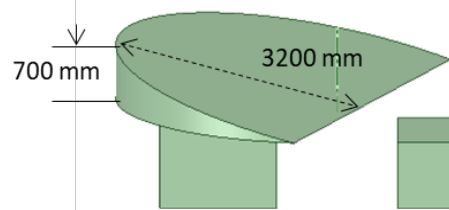
7.2.3 空冷状態実機詳細解析 燃料デブリ分布の設定



(a) 炉心部燃料デブリ



(b) 炉容器下部燃料デブリ



(c) ペDESTAL内燃料デブリ

設定した燃料デブリ形状・位置

✓ 初期炉心部質量：164,400 kg、初期UO₂質量：94,000 kgと設定。

*燃料集合体 1 体あたりの重さは300 kgとし、装荷された集合体集が548体であることから設定[1,2]。

[1] 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2019, https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20190909_SP2019FT.pdf, p.149 (参照2023-07-04)

[2] 福島第一原子力発電所 設備の概要, https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline_f1/ (参照2023-07-04)

✓ MAAP解析結果およびバーチャル原子炉による逆問題解析の知見、公開資料である「2号機のデブリ分布・RPV・PCV状態の推定図」、「福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査結果」から、炉心部、炉容器下部、ペDESTAL内の燃料デブリの体積および発熱量を算出（下部表参照）。

✓ 全体の崩壊熱80kWにて熱バランス解析を実施し、炉内温度を過大評価する結果になったことから、10年間におけるFPの放出等を仮定し、全体の崩壊熱総量を35kWに設定。

✓ 炉心部は、ミュオンの計測結果より炉心外周部に燃料デブリが堆積しているとの推測により形状を仮定。

✓ 炉容器下部では、金属層とUO₂が密度比により分離して2層となっていることを仮定。

✓ ペDESTAL内の燃料デブリは、格納容器内部調査結果を参照に0.7m～0.4mの範囲で堆積することを仮定。

設定した燃料デブリの量・発熱量など

場所	UO ₂ [kg]	構造物 [kg]	体積 [m ³]	気孔率	発熱量 (25日後) [kW]	発熱量 (2020年) [kW]	発熱量 (2020年) 放射性物質の流出を考慮 [kW]
炉心部	13,630	0	1.77	0.3	400	10	4.79
炉容器下部	61,100	56,790	18.2	0.3	2000	50	21.5
ペDESTAL	19,270	13,610	8.7	0.6	800	20	8.75
合計	94,000	70,400	28.7	-	3200	80	35.0

7.2.3 空冷状態実機詳細解析 実機全体空冷解析・計算条件

基本ケース

燃料デブリ条件

境界条件*

	炉心	下部プレナム	ペDESTAL		温度 [°C]
発熱量[kW]	4.79	21.46	8.75	RPV	34.8
気孔率[-]	0.3	0.3	0.6	格納容器	31.95
多孔質体粒子径[mm]	3	3	3		

*上面、側面、下面：温度一定

発熱量を変更

下部プレナム燃料デブリの気孔率を変更

発熱量 [kW]	炉心	下部プレナム	ペDESTAL	気孔率 [-]	炉心	下部プレナム	ペDESTAL
Case -1	4.79	21.46	8.75	Case -1	0.3	0.3	0.6
Case -2 (1.5倍)	7.19	32.19	13.13	Case -4	0.3	0.05	0.6
Case -3 (0.5倍)	2.40	10.73	4.38	Case -5	0.3	0.6	0.6

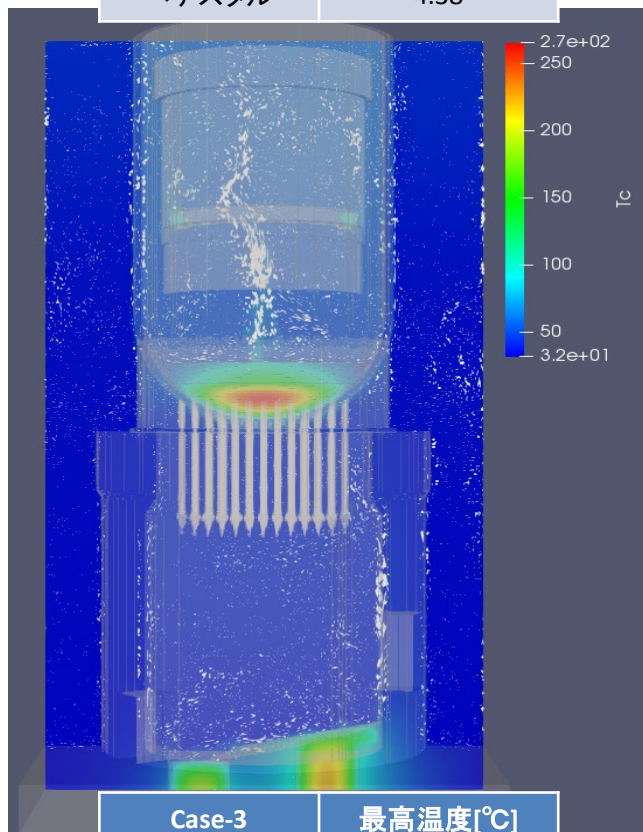
下部プレナムの透過係数(燃料デブリの径(多孔質体粒子径))を変更(部分モデル使用)

解析ケース名	d_p [m]	透過係数 K	気孔率 ε	フォークハイマー係数 C
Case 6	1mm	3.67e-10	0.3	0.4763
Case 1	3mm	3.31e-9	0.3	0.4763
Case 7	10mm	3.67e-8	0.3	0.4763

基本ケースに加え、発熱量及び下部プレナムの気孔率・透過係数を変更した解析を実施

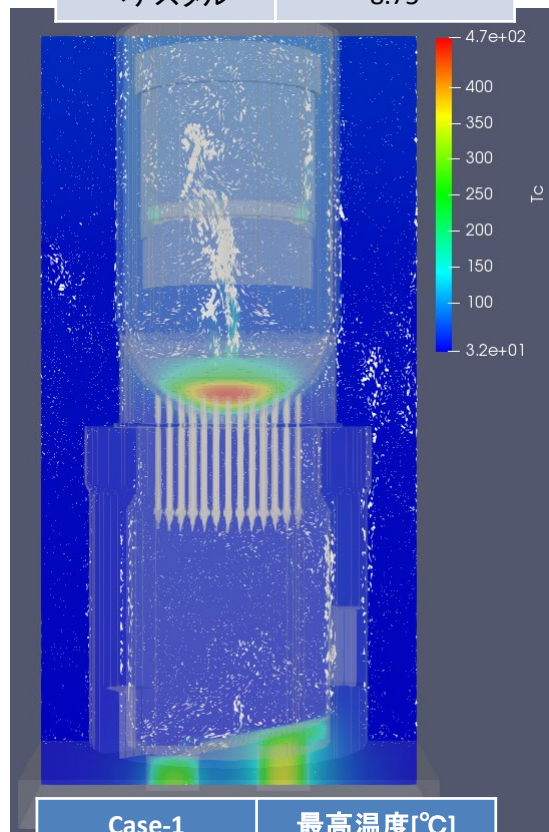
7.2.3 空冷状態実機詳細解析 燃料デブリの発熱量の影響

Case-3 0.5倍 ケース	発熱量 [kW]
炉心	2.40
下部プレナム	10.73
ペDESTAL	4.38



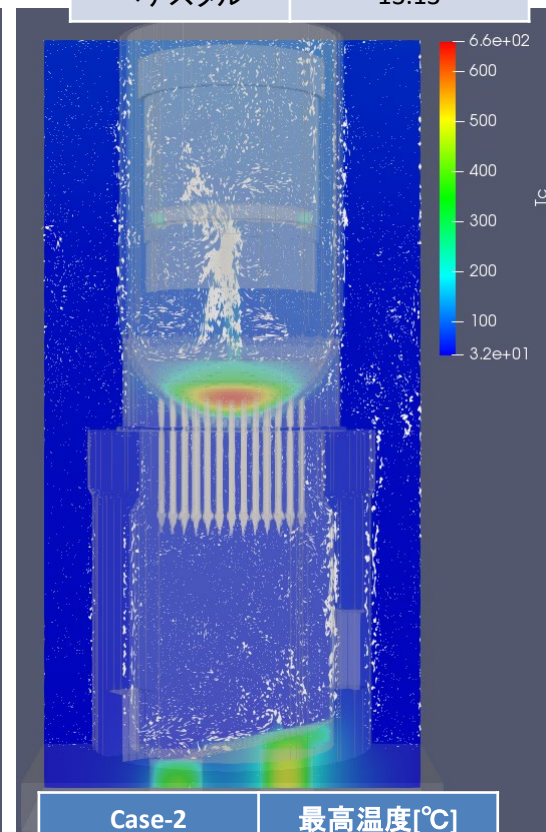
Case-3 0.5倍 ケース	最高温度[°C]
炉心	88
下部プレナム	265
ペDESTAL	242

Case-1 基本ケース	発熱量 [kW]
炉心	4.79
下部プレナム	21.46
ペDESTAL	8.75



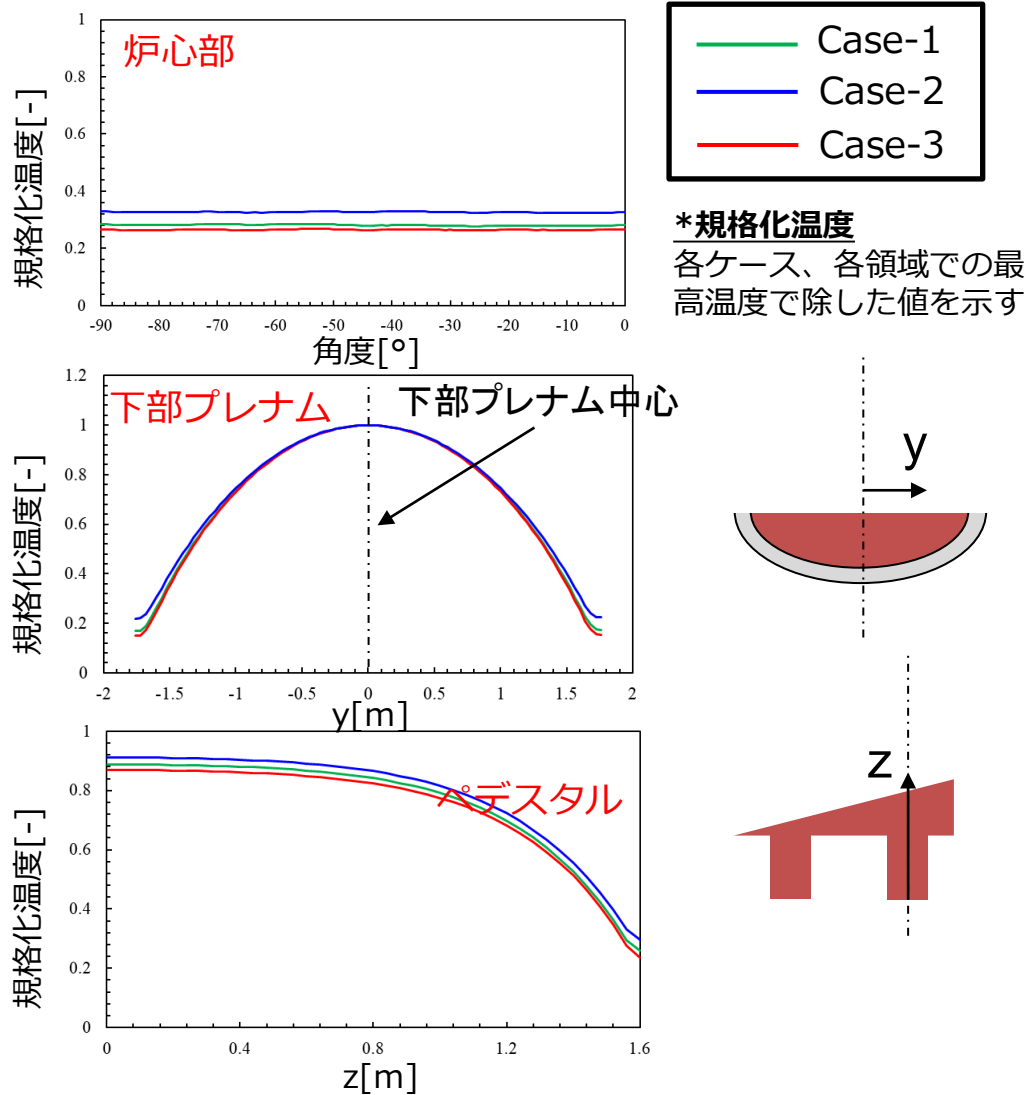
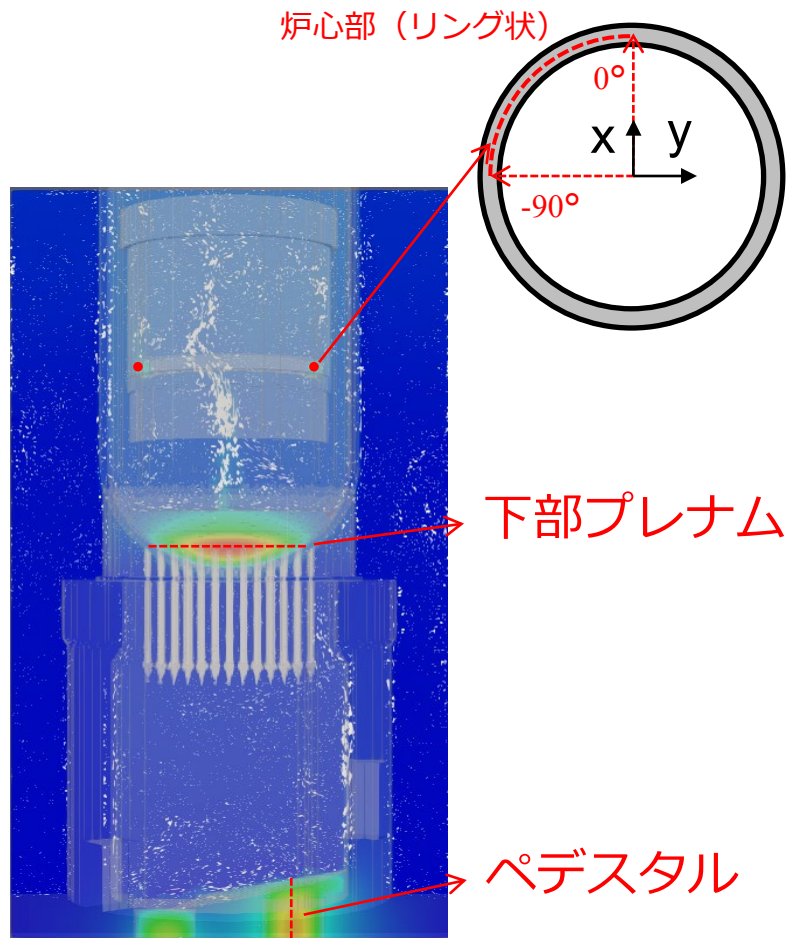
Case-1 基本 ケース	最高温度[°C]
炉心	136
下部プレナム	470
ペDESTAL	418

Case-2 1.5倍 ケース	発熱量 [kW]
炉心	7.19
下部プレナム	32.19
ペDESTAL	13.13



Case-2 1.5倍 ケース	最高温度[°C]
炉心	179
下部プレナム	661
ペDESTAL	574

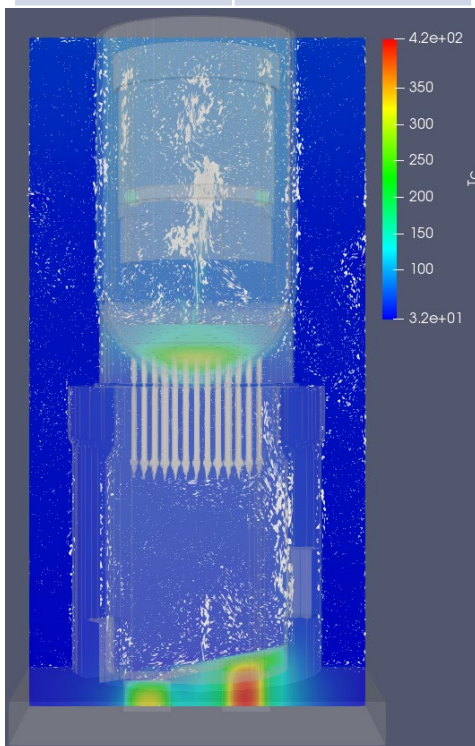
7.2.3 空冷状態実機詳細解析 燃料デブリの発熱量の影響-規格化温度分布



実機の実際の発熱量について不確かさがあるものの、パラメータサーベイの範囲では、分布そのものには影響を及ぼさない

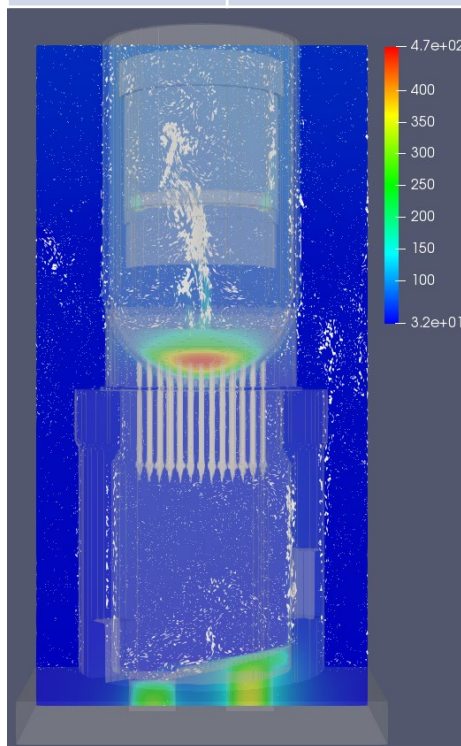
7.2.3 空冷状態実機詳細解析 燃料デブリの気孔率の影響

Case-4	気孔率
炉心	0.3
下部プレナム	0.05
ペDESTAL	0.6



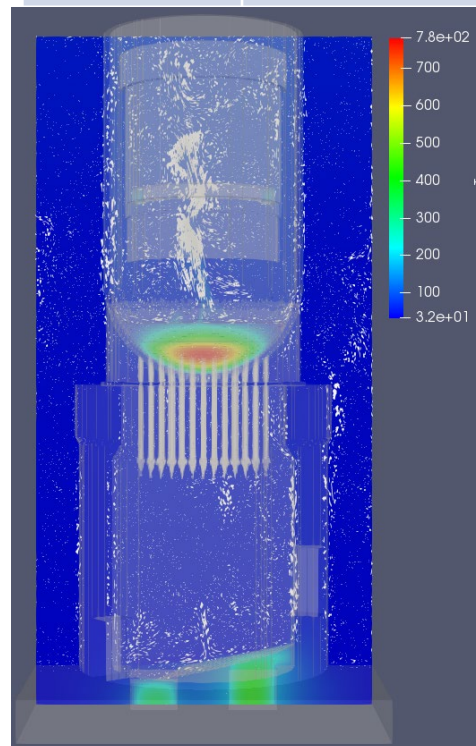
Case-4	最高温度[°C]
炉心	142
下部プレナム	291
ペDESTAL	420

Case-1	気孔率
炉心	0.3
下部プレナム	0.3
ペDESTAL	0.6



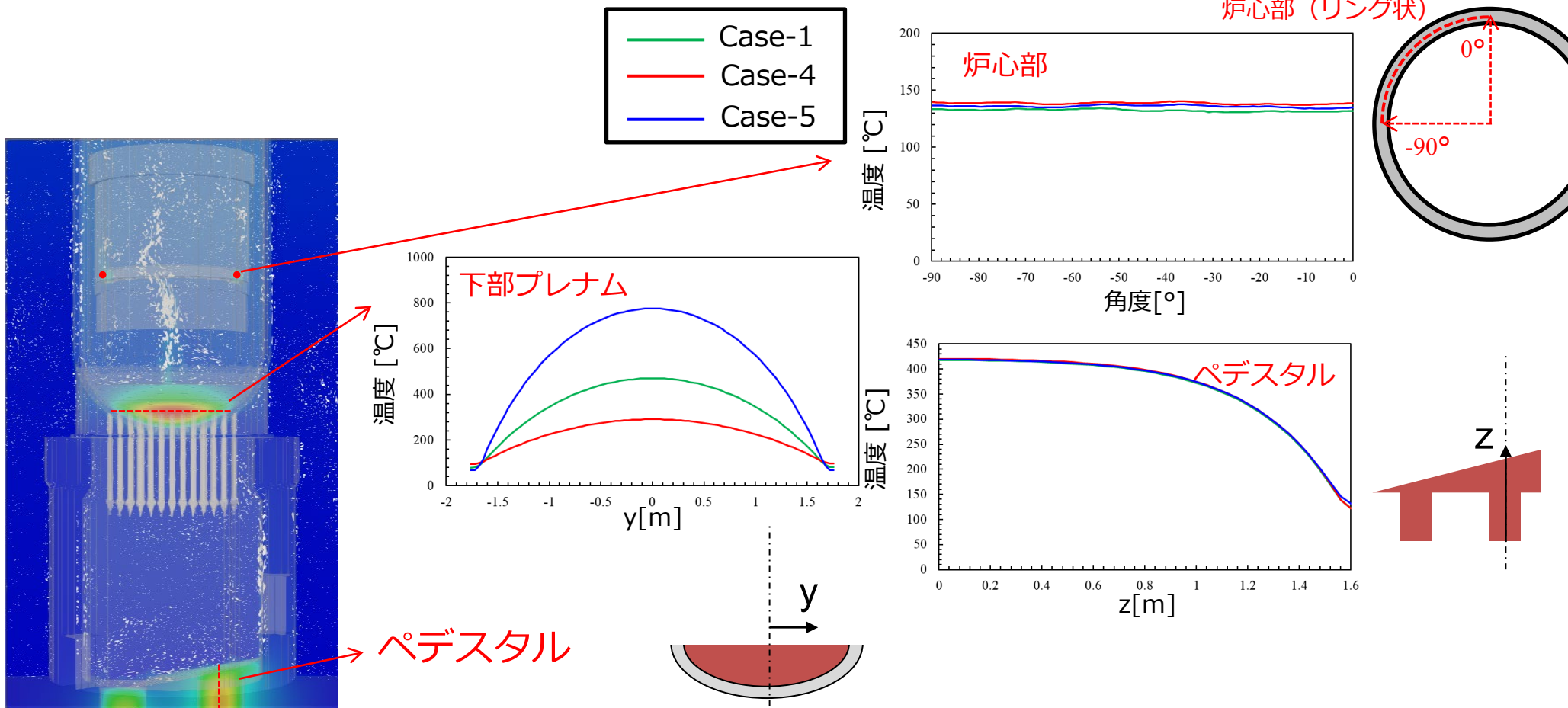
Case-1 基本ケース	最高温度[°C]
炉心	136
下部プレナム	470
ペDESTAL	418

Case-5	気孔率
炉心	0.3
下部プレナム	0.6
ペDESTAL	0.6



Case-5	最高温度[°C]
炉心	139
下部プレナム	781
ペDESTAL	419

7.2.3 空冷状態実機詳細解析 気孔率の影響-温度分布

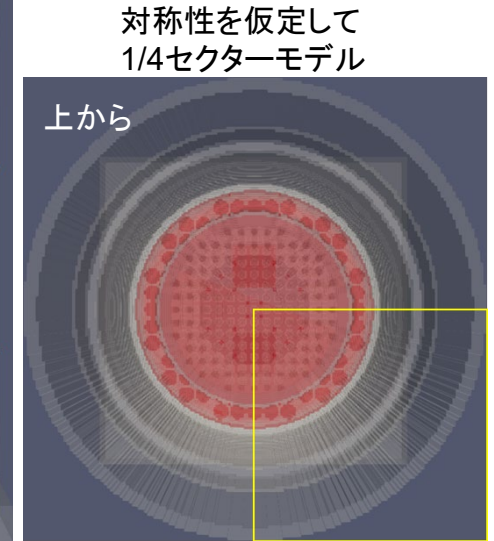
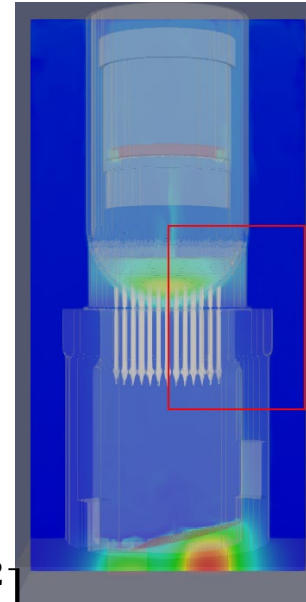
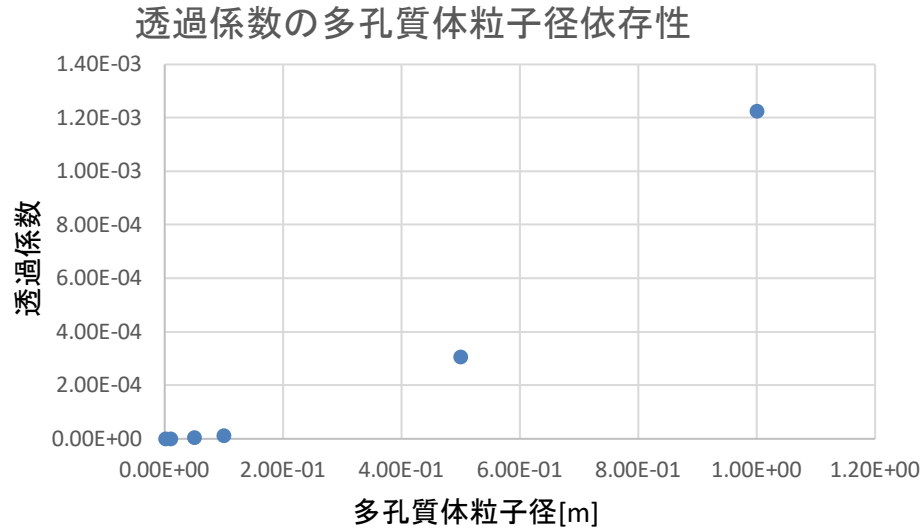


気孔率低の場合、実効的な熱伝導率が大きく温度分布が平坦化。温度分布の定性的な傾向に大きな変化はない

予想されたペDESTALから炉容器内への対流の変化の効果は小さい。炉心部およびペDESTAL部の温度分布の変化も確認できない

7.2.3 空冷状態実機詳細解析 部分モデルを用いた透過係数の影響評価

一番高温となり得る下部プレナム燃料デブリの多孔質体粒子径(透過係数)の影響を検討
解析コスト低下のため、下部プレナム部の1/4セクタを対象



透過係数 エルガンの式
$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1 - \varepsilon)^2} [m^2]$$

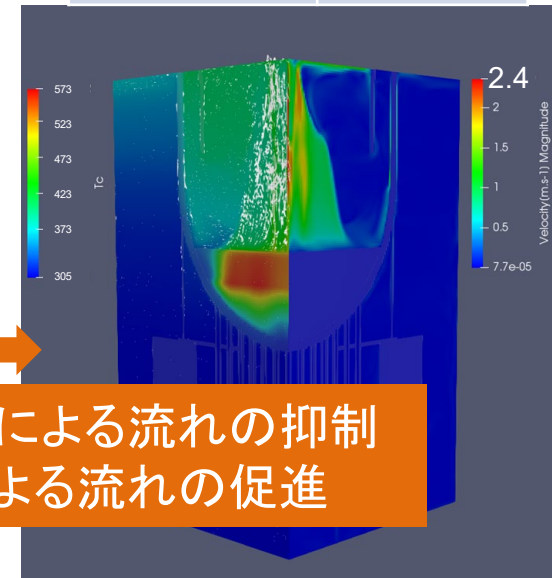
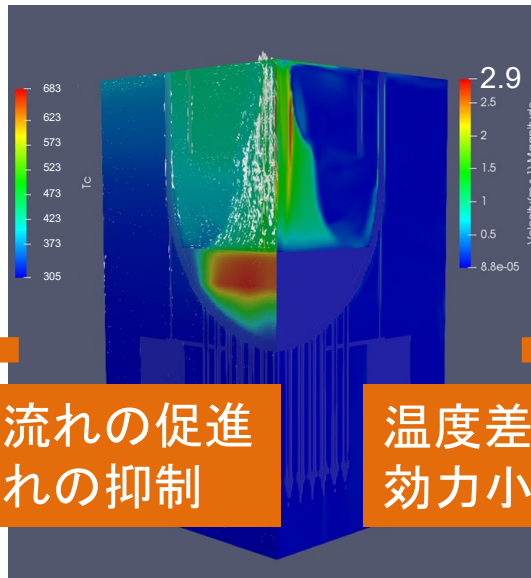
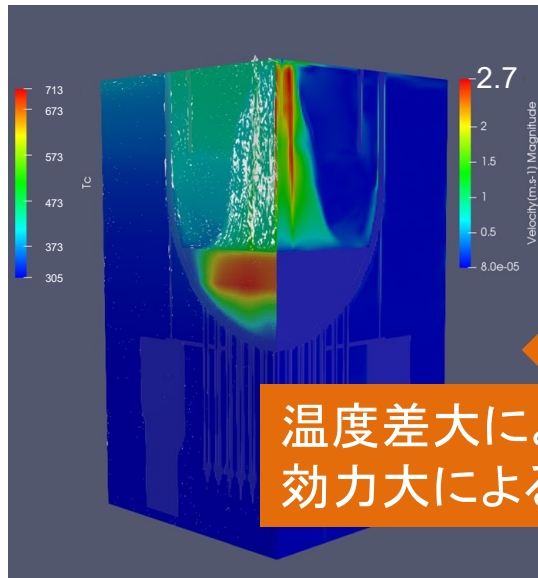
解析ケース名	d_p [m]	透過係数 K	気孔率 ε	フォークハイマー係数 C
Case 6	1mm	3.67e-10	0.3	0.4763
Case 1	3mm	3.31e-9	0.3	0.4763
Case 7	10mm	3.67e-8	0.3	0.4763

7.2.3 空冷状態実機詳細解析 下部プレナム内最高温度の透過係数依存性

Case 6	
多孔質体粒子径 d_p	1 mm
透過係数K	3.67e-10
気孔率 ϵ	0.3

Case 1	
多孔質体粒子径 d_p	3 mm
透過係数K	3.31e-9
気孔率 ϵ	0.3

Case 7	
多孔質体粒子径 d_p	10 mm
透過係数K	3.67e-8
気孔率 ϵ	0.3



温度差大による流れの促進
効力大による流れの抑制

温度差小による流れの抑制
効力小による流れの促進

Case 6	最高温度[°C]
下部プレナム	718

Case 1 基本 ケース	最高温度[°C]
下部プレナム	686

Case 7	最高温度[°C]
下部プレナム	569

多孔質体粒子径 d_p が大きくなることで最高温度が低下
温度、速度分布の定性的な差異は小さい

7.2.3 空冷状態実機詳細解析 窒素封入の影響

・窒素封入とは

原子炉格納容器内窒素封入設備は、水素爆発を予防するために、原子炉圧力容器内及び原子炉格納容器内に窒素を封入することで不活性雰囲気を維持している

・窒素封入箇所

RPV: TP34500付近

PCV: TP13900付近

であるが、近年ではPCVの注入はあまり行われていない、かつ、炉内熱流動にあたる影響が少ないため、RPVへの窒素注入のみ検討することとした。

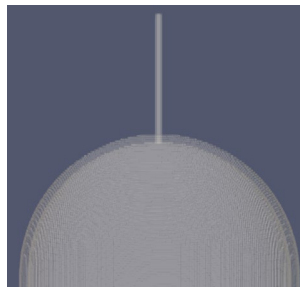
・窒素封入量(2019年の例)

2019年の名称→	RPV側(A) N ₂ 流量	RPV側(B) N ₂ 流量	PCV側 N ₂ 流量
単位	Nm ³ /h	Nm ³ /h	Nm ³ /h
2020/1/1 5:00-		13.33-	

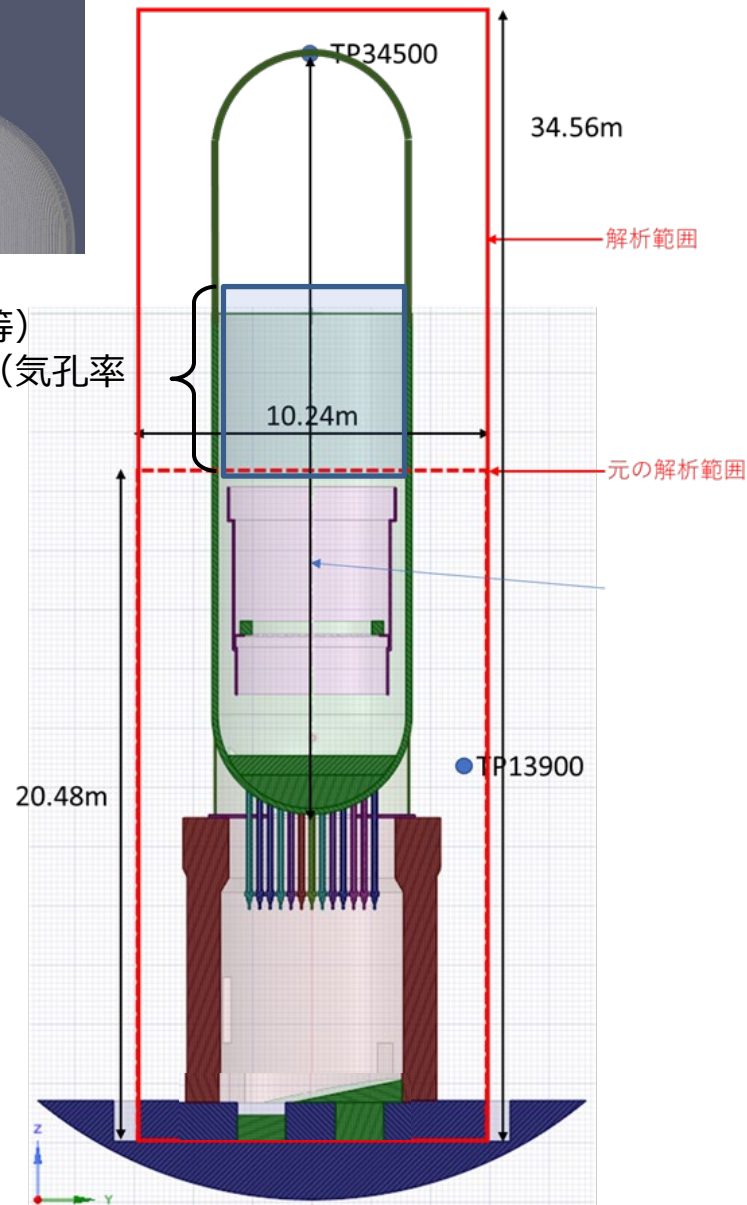
窒素注入断面積: 80mm × 40mm = 3200mm² (2メッシュ)

雰囲気: 窒素

窒素流速: 1.30m/s (15m³/h)

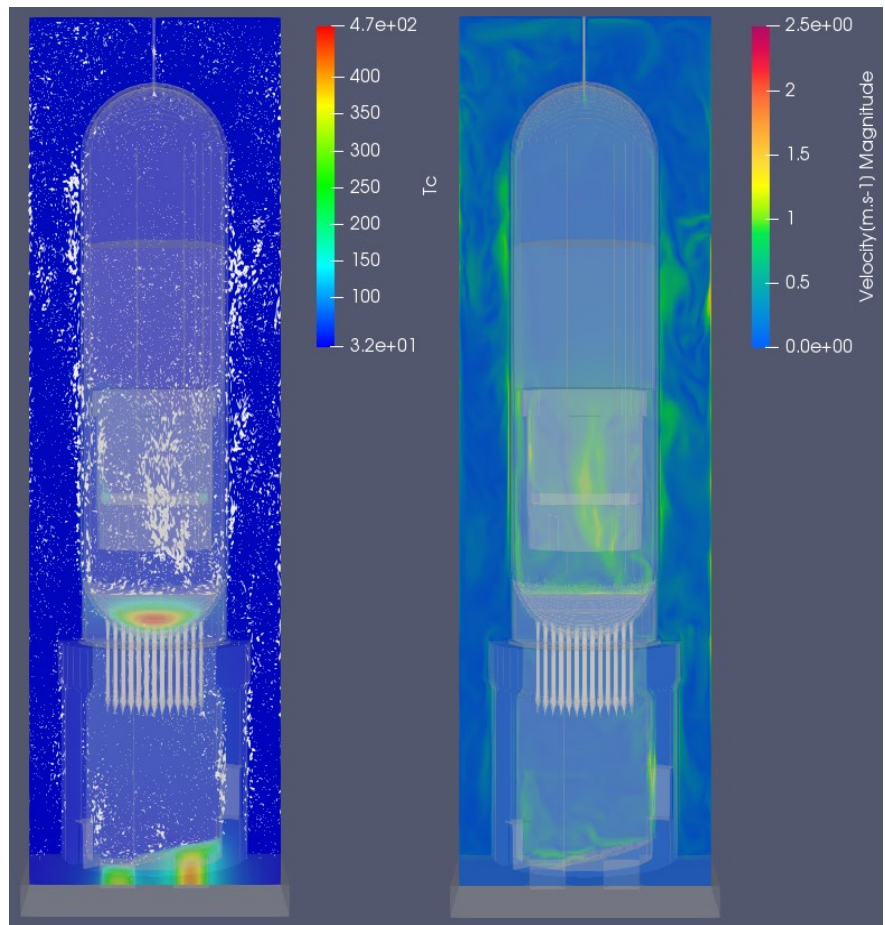


炉上部構造物
(気水分離器等)
: 抵抗を仮定 (気孔率
0.827)

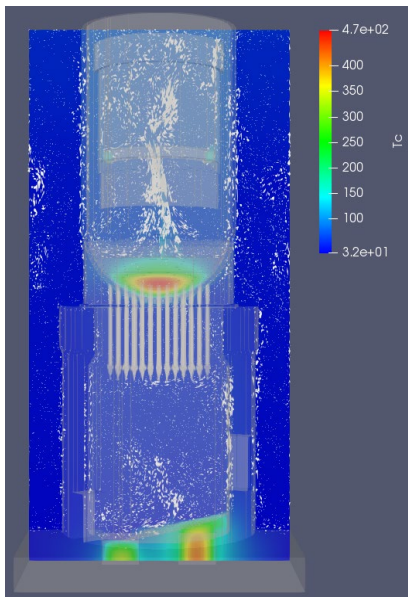


7.2.3 空冷状態実機詳細解析 窒素注入の影響

・窒素封入あり



・窒素封入なし



解析 ケース	条件	燃料デブリ最高温度[°C]		
		下部 プレナム	炉心	ペDESTAL
Case1	基本条件	470.26	135.80	417.55
CaseN 2	窒素封入 15[m ³ /h]	460.50	114.55	404.33

窒素は注入後すぐ(炉上部構造に至る前)に炉容器内に拡散し、影響は与えない

7.2.3 空冷状態実機詳細解析 空冷状態実機詳細解析のまとめ

- 燃料デブリ模擬流動試験の結果を用いた検証したJUPITERを用い、実機空冷状態を対象とした詳細解析を実施
- ACE-3Dによる実機解析への適用性の確認に必要なデータを取得
- 出力の影響については、パラメータサーベイの範囲(基本ケースの0.5倍から1.5倍)では、分布そのものには大きな影響を及ぼさない
- 気孔率を増加させた領域では温度が上昇した
- 粒子(透過係数)が大きくなると最高温度が低下
- 窒素封入系について、窒素は注入後すぐに炉容器内に拡散するため、大きな影響は見られないことを確認

7.2.4 空冷時燃料デブリ詳細熱挙動解析のまとめ

- ACE-3Dによる評価手法に対する比較データの提供のため、多孔質体モデルの評価、試験との比較による検証、実機を模擬した詳細解析を実施した。
 - 流動モデル(单相)、二相流モデル、伝熱モデルについて、評価などを実施
 - 燃料デブリ模擬流動試験との比較により、妥当性を確認
 - 空冷状態実機詳細解析により、ACE-3Dによる実機解析の適用性確認に必要なデータを取得
 - 窒素封入系について有意な影響がないことを確認

7.3 実機熱挙動評価

目的

- 空冷時における燃料デブリ熱挙動の推定

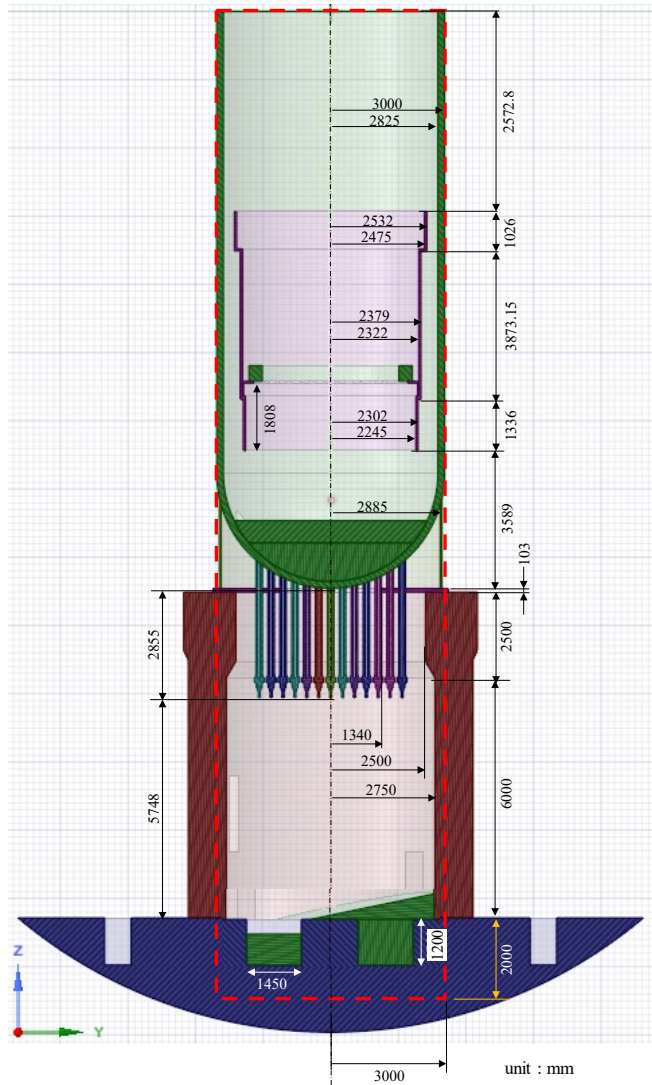
実施方法

- 7.3.1 機能追加・改良
 - 注水時＋空冷時の評価が可能なACE-3Dを適用
 - 解析コードの高速化による過去の温度履歴再現などのための長時間解析の実現
- 7.3.2 空冷時詳細熱流動解析による検証
- 7.3.3 2号機温度履歴の再現
 - 注水が継続的されている状況を再現した解析を実施。2号機の温度履歴を再現
- 7.3.4 実機解析
 - 注水量をゼロ、間欠注水、空冷から再注水した場合での安定冷却に要する時間等を検討・評価

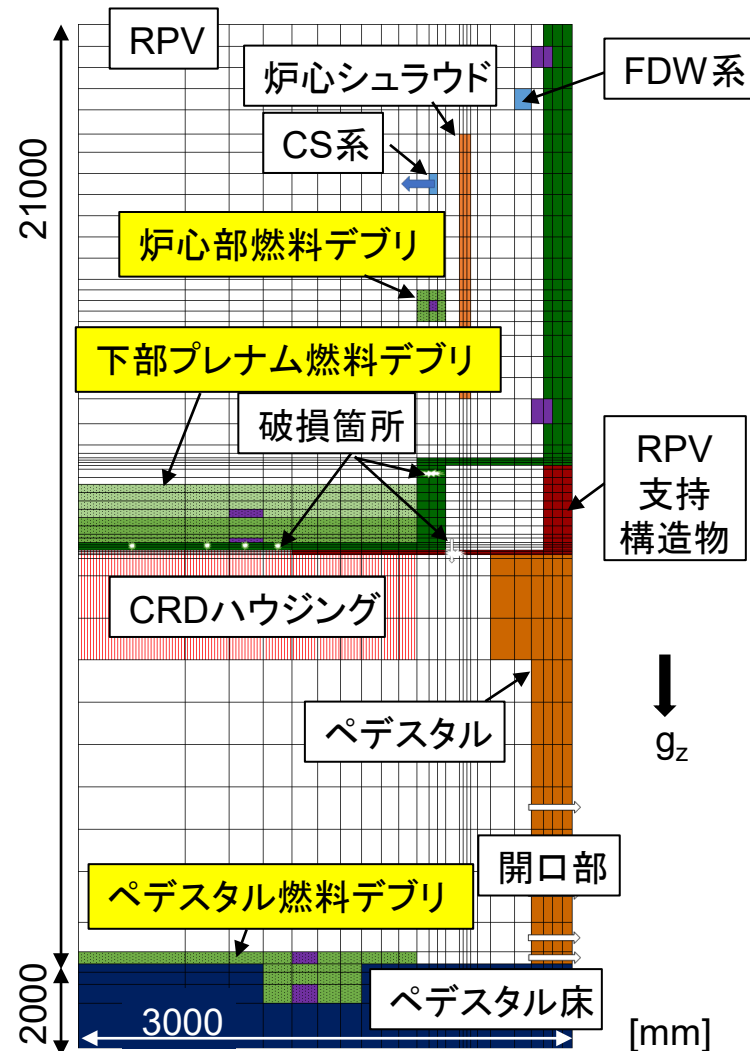
成果の反映先

- 空冷時の熱挙動(温度分布、燃料デブリ最高温度等)評価を汚染水対策に活用

7.3 実機熱挙動評価 実機解析の体系



二次元化
簡易化



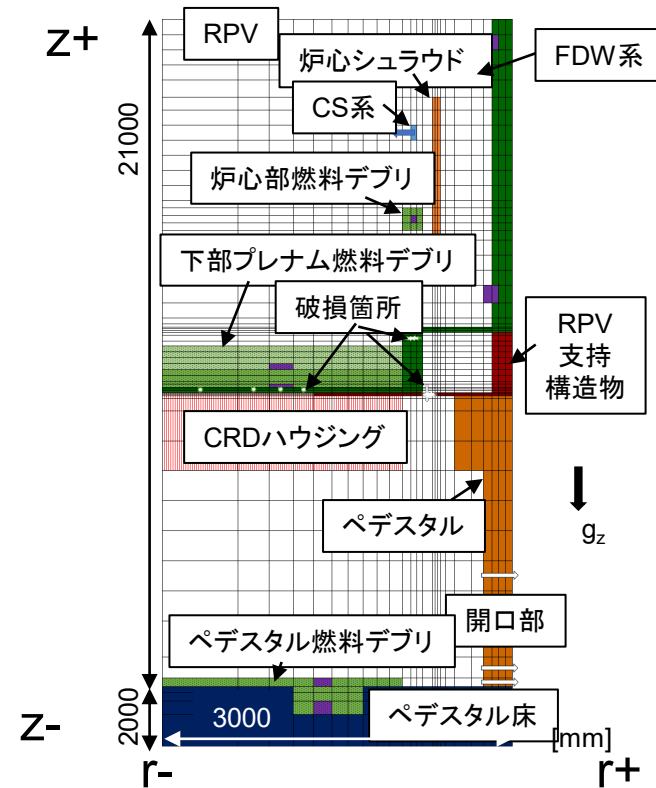
燃料デブリの分布、注水条件などは実機詳細解析の設定を適用

- 多孔質体解析機能で表現した部分・領域
- 温度評価点

7.3 実機熱挙動評価 解析条件

炉内各所の初期温度条件*1

部位	参照温度計測点	値
RPV	TE-2-3-69R	初期温度: 34.85 °C
シュラウド	//	同上
炉心支持板	//	同上
RPV支持構造物	TE-16-008/007	初期温度: 31.95 °C 008: 31.85 °C、 007: 32.05 °Cの平均
制御棒支持板	TE-16-008/007	同上
ペDESTAL	TE-16-008/007	同上
制御棒	TE-16-008/007	同上
ペDESTAL下部	TE-16-008/007	同上
炉心部燃料デブリ	TE-2-3-69R	初期温度: 34.85 °C
下部プレナム燃料デブリ	TE-2-3-69R	同上
ペDESTAL燃料デブリ	TE-16-008/007	初期温度: 31.95 °C
雰囲気	気体温度 TE-16-008/007	初期温度: 31.95 °C
体系外(温度境界)	TE-16-008/007 境界温度	31.95 °C



解析領域の境界条件*2

位置	流動境界	温度境界
r-方向	対称条件	対称条件
r+方向開口部	流出条件	流出条件
r+方向開口部以外	- (壁面)	等温
Z-方向	- (壁面)	等温
Z+方向	流入出条件	等温

*1) 速度場、圧力場については、速度0、圧力均一の条件を付加。注水条件の場合は、ノズル出口部で設定流量を注入(ボイド率=0)

*2) 解析には円筒座標系(r-z直交格子)を使用

7.3 実機熱挙動評価 実機全体空冷解析・計算条件

出力、境界条件については、空冷状態実機詳細解析(Case-1)と同様に設定

	炉心部	下部プレナム	ペDESTAL	
燃料デブリ 条件	発熱量[kW]	4.79	21.46	8.75
	気孔率[-]	0.3	0.3	0.6
	多孔質体粒子径[mm]	3	3	3

境界条件:
上面、側面、下面: 温度一定

初期温度・注水条件

	適用した解析・検討対象	条件設定に利用したプラントデータ取得日時	炉注水流量 (CS) [m ³ /h]	炉注水温度 (CS) [°C]	RPV温度 (TE-2-3-69R) [°C]	PCV温度 (TE-16-008) [°C]
7.3.2	空冷時評価の適用性確認	(JUPITER Case-1と同様)	—	—	34.8	31.95
	ペDESTAL内気孔率の影響評価	(JUPITER Case-1と同様)	—	—	34.8	31.95
7.3.3	注水継続時温度履歴の再現	2020/8/17 5:00	3	27	35	32.2
	再注水時温度履歴の再現 (注水停止)	2020/8/20 11:00	—	—	46.3	32.4
	再注水時温度履歴の再現 (再注水)	2020/8/20 17:00	3	27.5	45.3	33.4
7.3.4	窒素封入系の模擬	(JUPITER Case-1と同様)	—	—	34.8	31.95
	安定冷却検討①(注水)	2020/8/17 5:00	3	27	35	32.2
	安定冷却検討①(注水停止)		—	—	—	—
	安定冷却検討②(注水停止)	2020/8/20 11:00	—	—	46.3	32.4
	安定冷却検討②(注水)	2020/8/20 17:00	3	27.5	—	—
	間欠注水(注水時)	2020/8/17 5:00	3	27	35	32.2
	間欠注水(注水停止時)		—	—	—	—

7.3.1 機能追加・改良 数値シミュレーションの高速化について

- 境界条件の適正化による安定性向上
 - 流出条件の改良(流入出境界での圧力設定方法の見直し)
- 並列化の実施(ACE-3D)
 - ACE-3Dに対し、並列化手法のデファクトスタンダードであるMPI(Message Passing Interface)による並列化を導入
 - ACE-3Dについては、高速なPCあるいは小規模のワークステーションでの実行を想定
 - 環境に大きく依存せず実行可能な点に留意して開発
 - 情報の交換などをMPIライブラリを用いて実施



解析コードのチューニング(最適化)を実施



並列化を実施した解析コードにチューニングなどによりスループットタイムが最大1/30に向上

3000秒の計算に必要な時間: **30日以上**→**1~2日程度**

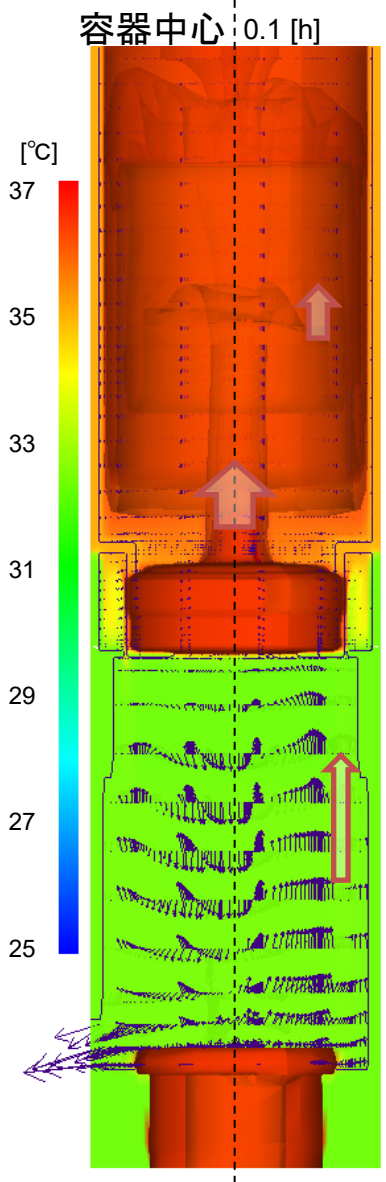
7.3.1 機能追加・改良

ACE-3Dにおける3次元化の影響

ACE-3D (2次元)



ACE-3D (3次元)

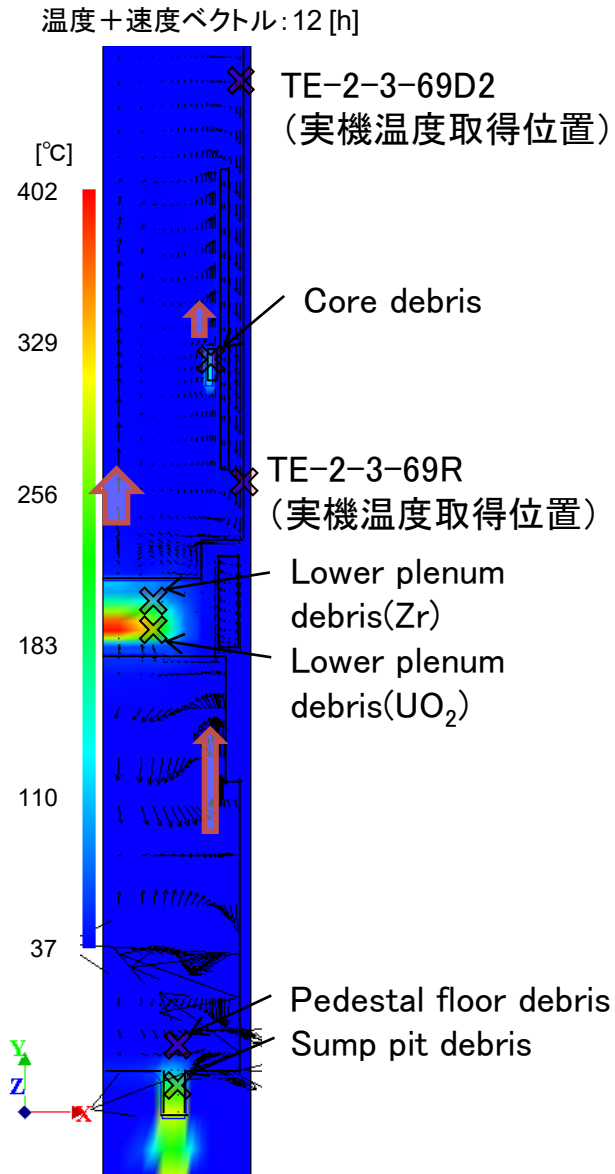


- 下部プレナム燃料デブリによる容器中心の上昇流れ
- 炉心部燃料デブリによる上昇流れ
- ペDESTAL燃料デブリによるペDESTAL内壁に沿う上昇流れ

3次元化したACE-3Dは、2次元の温度・流動結果と同様

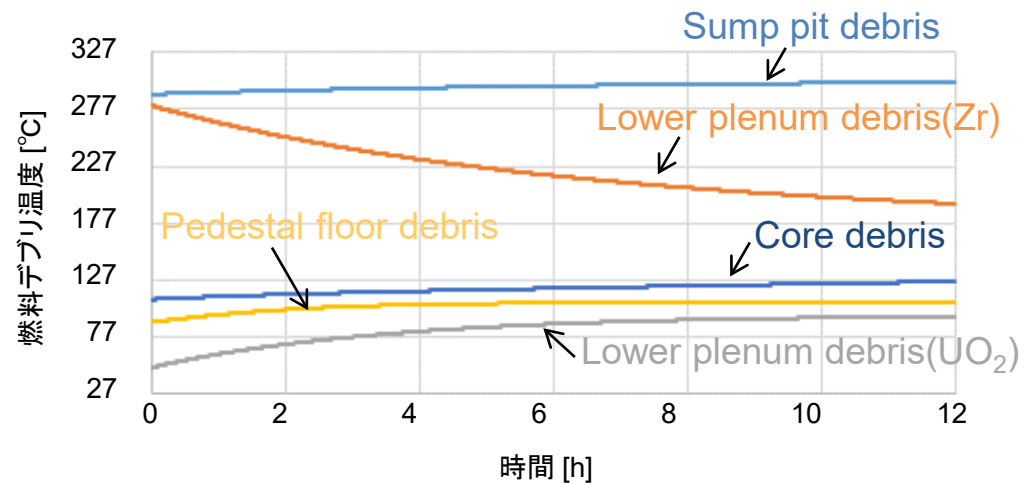
2次元での解析により長時間解析が小さい計算負荷により可能と判断

7.3.2 空冷時詳細熱流動解析による検証 空冷時評価の適用性確認

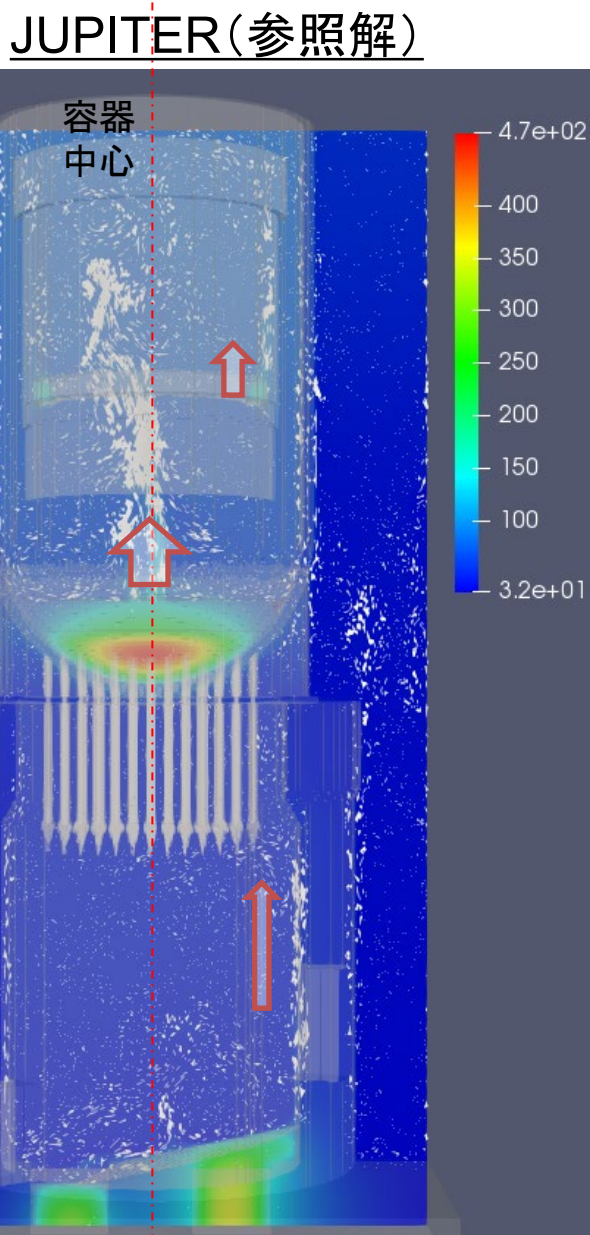
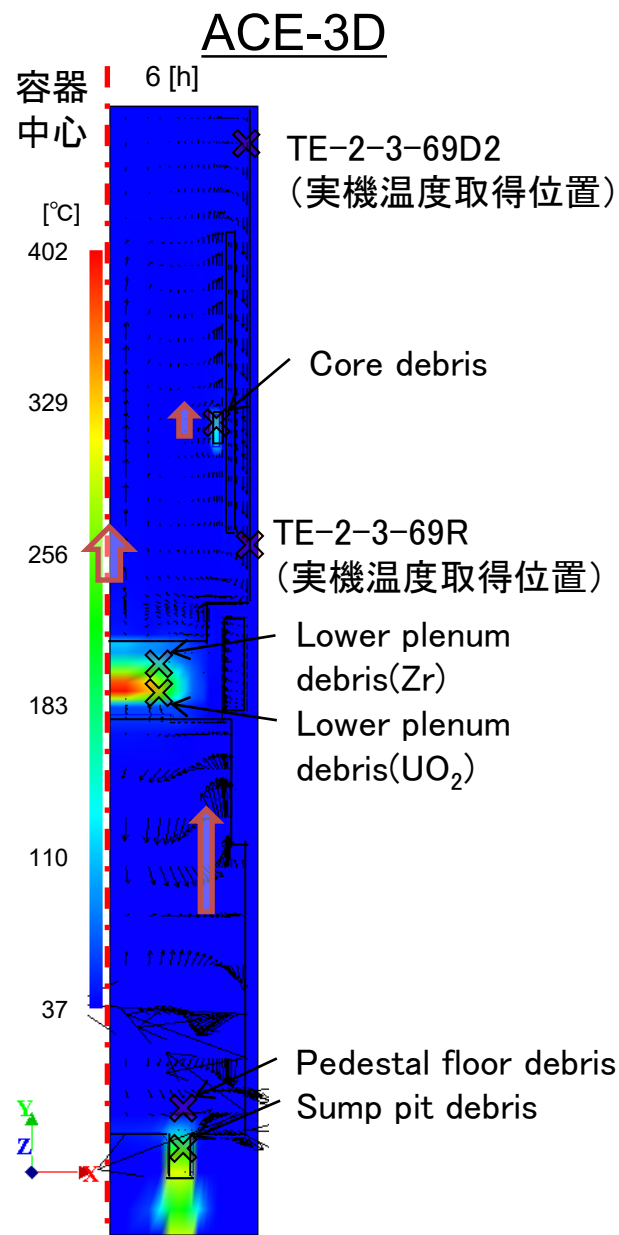


JUPITERと同条件の実機解析を実施
JUPITER温度結果(定常状態)を元に
ACE-3Dの初期温度分布(数10°C低め)を設定

12時間経過時点で燃料デブリ温度はほぼ定常に到達
定常的な流れ場を形成



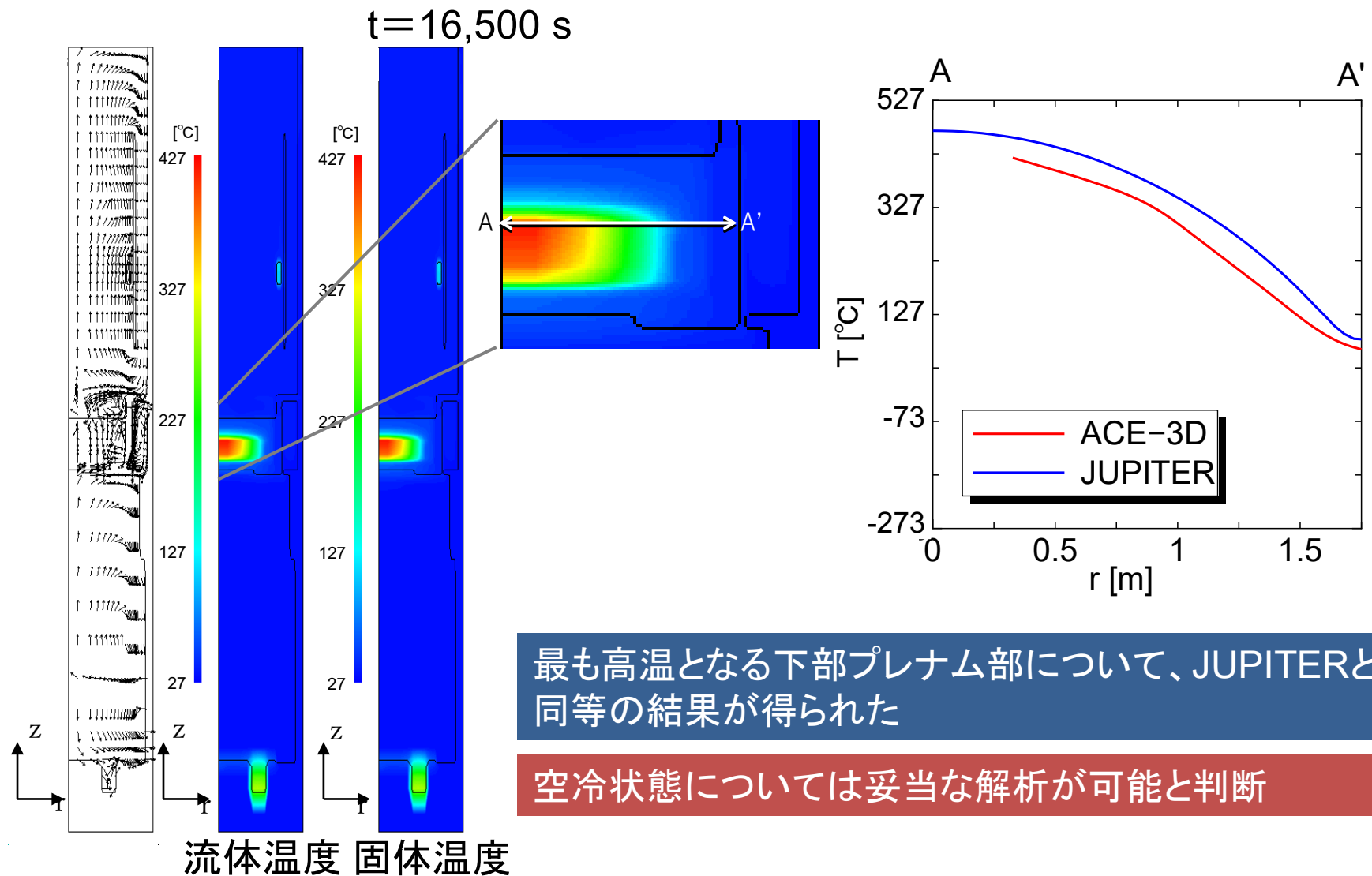
7.3.2 空冷時詳細熱流動解析による検証 空冷時における温度及び流動の比較



- 下部プレナム燃料デブリによる容器中心の上昇流れ
- 炉心部燃料デブリによる上昇流れ
- ペDESTAL燃料デブリによるペDESTAL内壁に沿う上昇流れ

参照解とするJUPITERでの流動と同様であり、空冷に関わる流動を再現した

7.3.2 空冷時詳細熱流動解析による検証 空冷状態に対する適用性確認結果

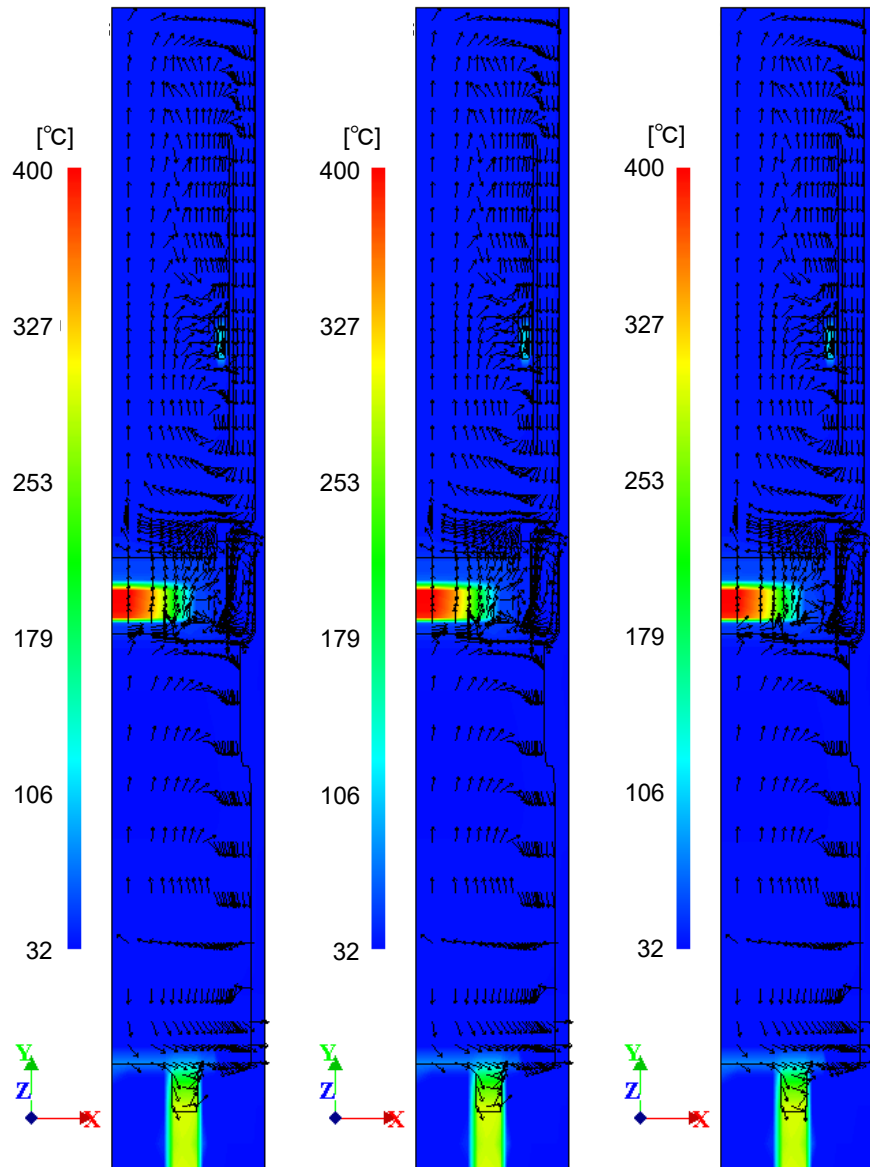


最も高温となる下部プレナム部について、JUPITERと同等の結果が得られた

空冷状態については妥当な解析が可能と判断

7.3.2 空冷時詳細熱流動解析による検証 ペDESTAL内気孔率の影響

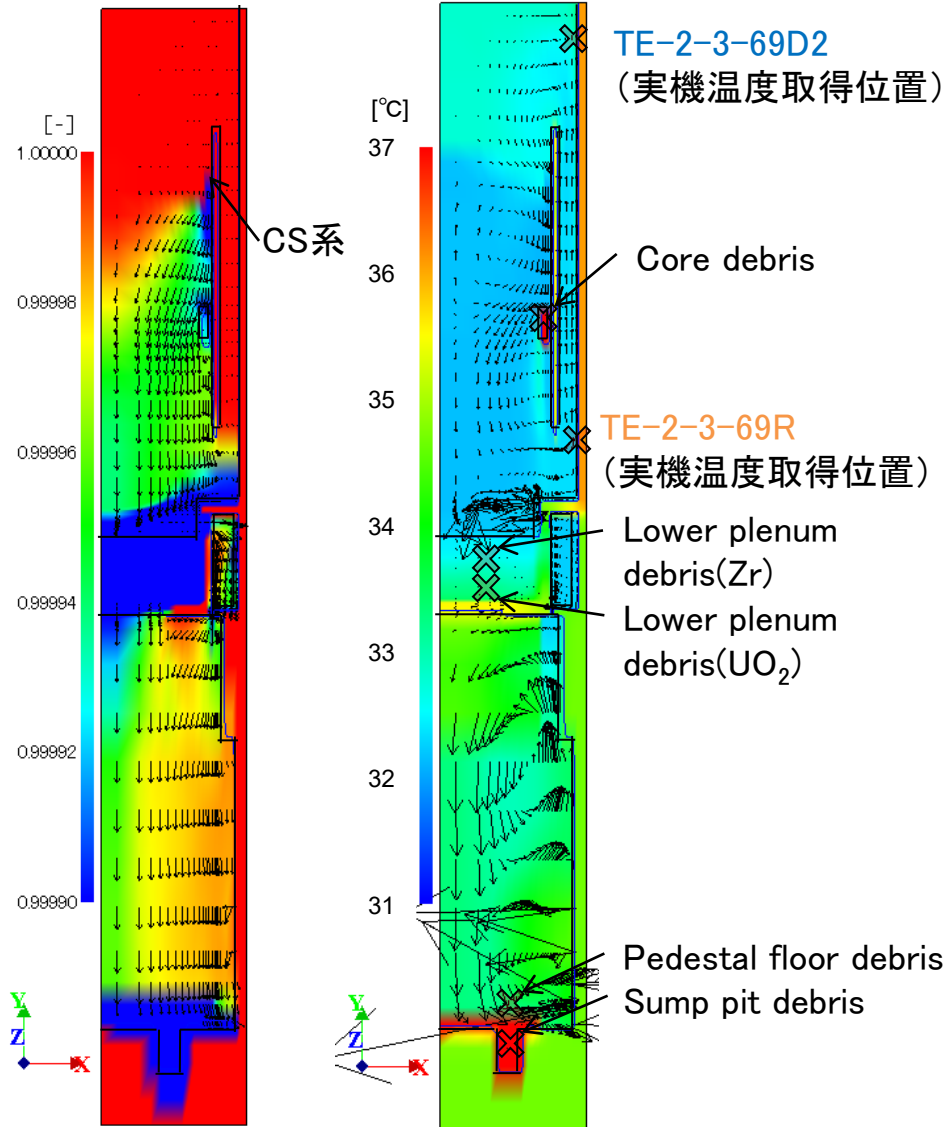
気孔率:0.3 気孔率:0.45 気孔率:0.6



ペDESTAL内燃料デブリの気孔率については、温度分布を含めた計算結果に有意な影響は確認できない

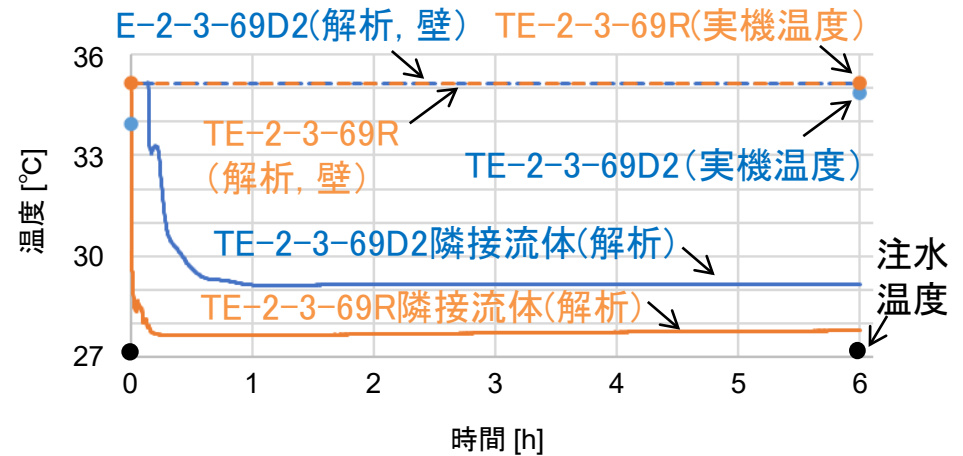
7.3.3 2号機温度履歴の再現 注水継続時温度履歴の再現

ボイド率+速度ベクトル:6[h] 温度(気体照準)+速度ベクトル:6[h]



注水が継続的されている状況を再現した解析を実施

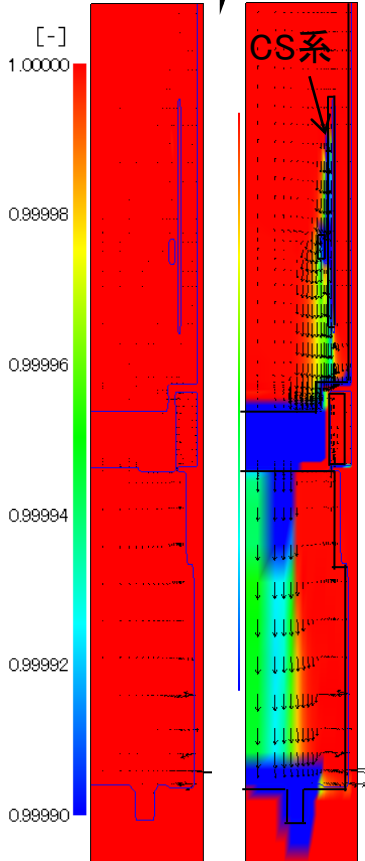
実機データとの比較により2号機の温度履歴を再現した
 実機温度取得位置近傍の炉内流体温度は、注水温度程度で定常的になる



7.3.3 2号機温度履歴の再現 再注水時温度履歴の再現

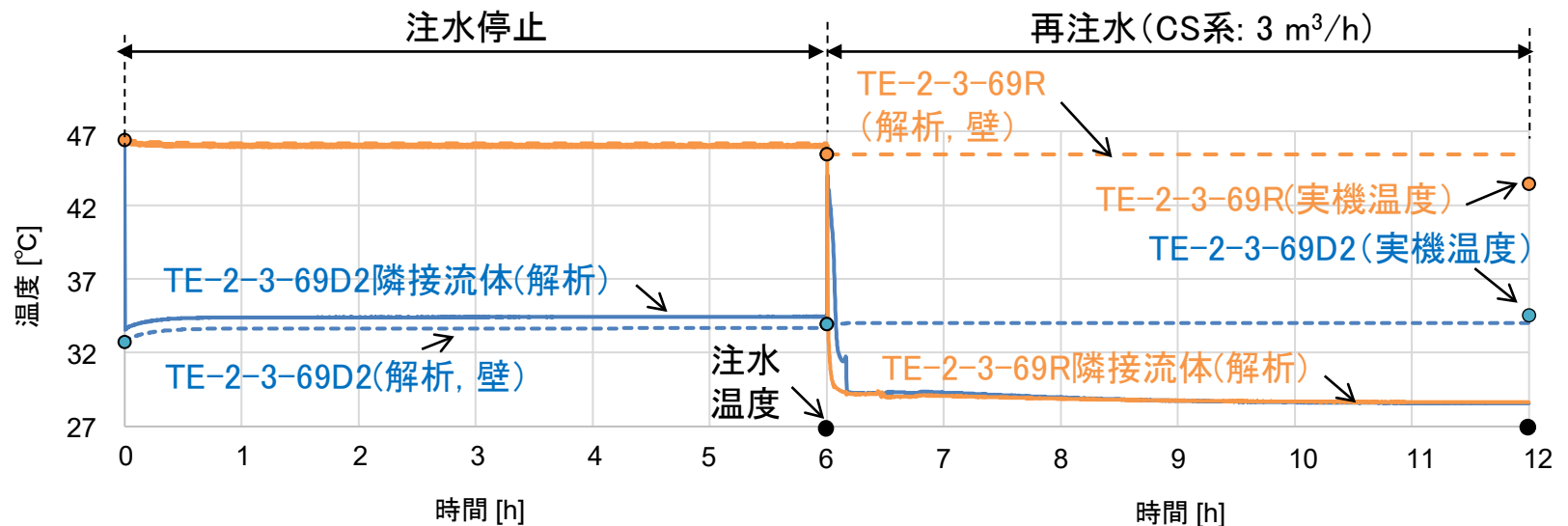
ボイド率+速度ベクトル

6 [h] ⇨ 12 [h]



注水停止から再注水された状況を再現した解析を追加実施

- 実機データとの比較により2号機の温度履歴を再現した
- 実機温度取得位置近傍の炉内流体温度は、注水停止時に壁面温度程度で、再注水時に注水温度程度で定常になる
- 詳細な確認には、プラントの温度計測点の追加、計測間隔を小さくすることが求められる

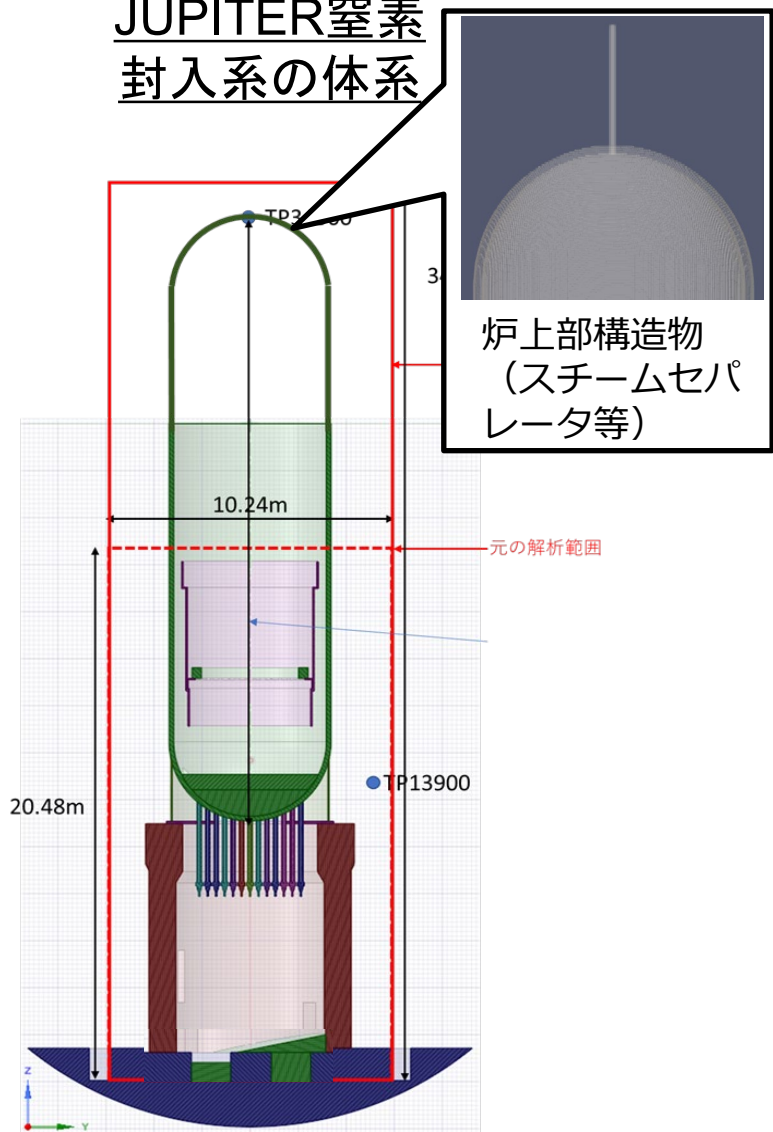


7.3.4 実機解析 実機解析の実施内容

- 窒素封入の模擬
- 注水から注水停止した場合の安定冷却に要する時間の検討
- 注水停止から再注水した場合の安定冷却に要する時間の検討
- 間欠注水による安定冷却の検討・評価

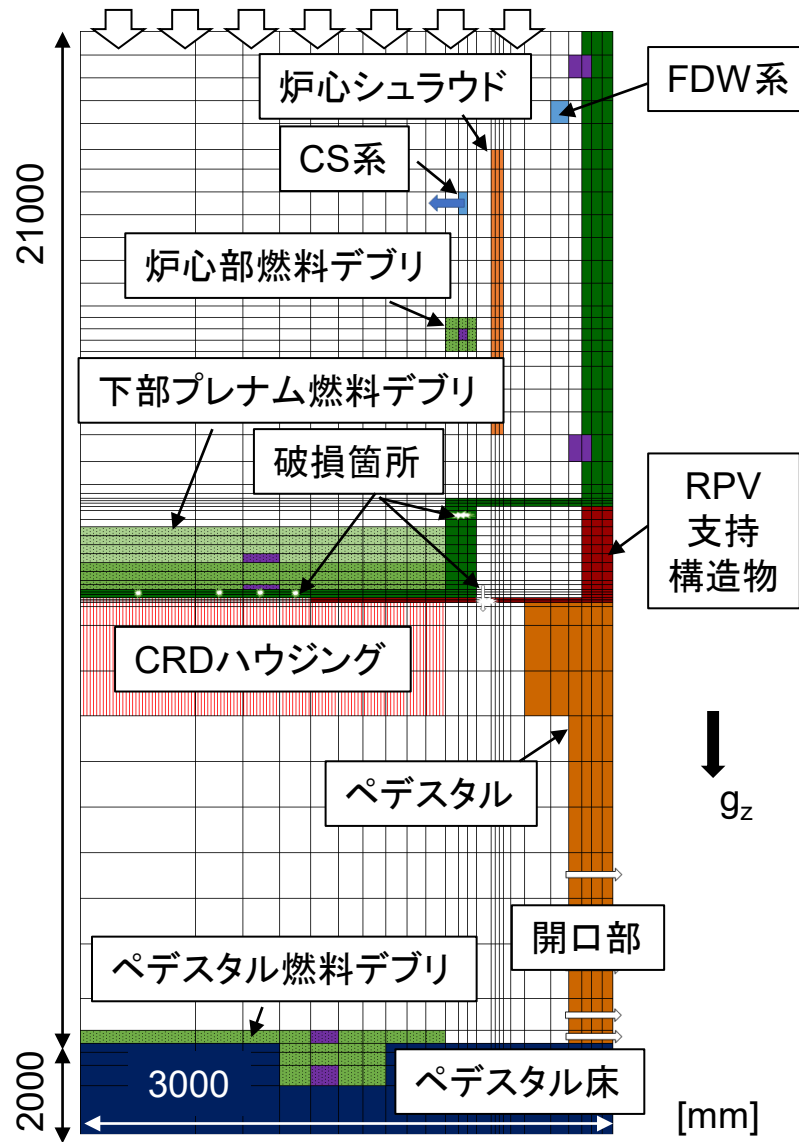
7.3.4 実機解析 窒素封入系の模擬

JUPITER窒素封入系の体系



ACE-3D窒素封入系の体系

JUPITERと等量 (15m³/h) の窒素を均一に注入



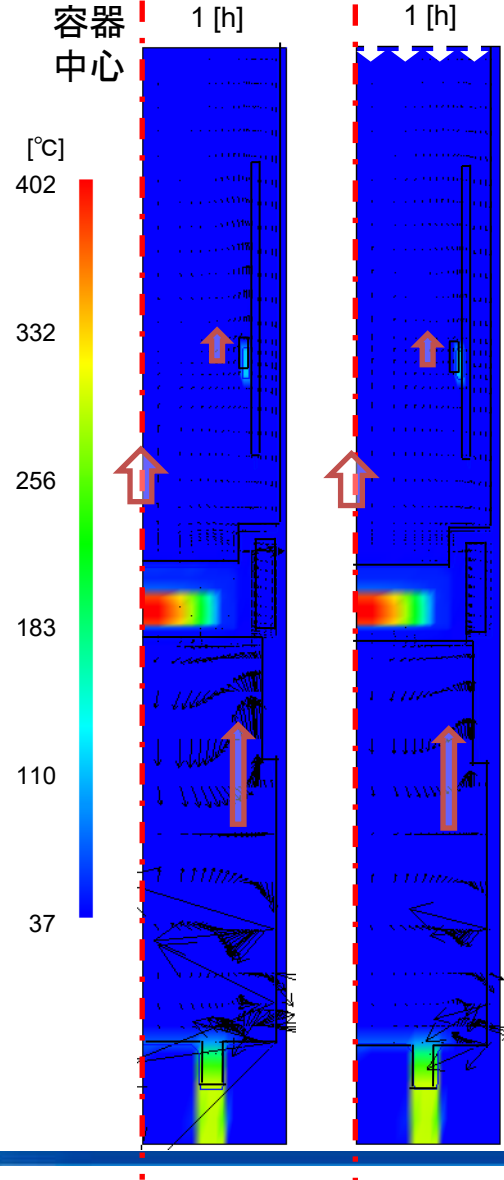
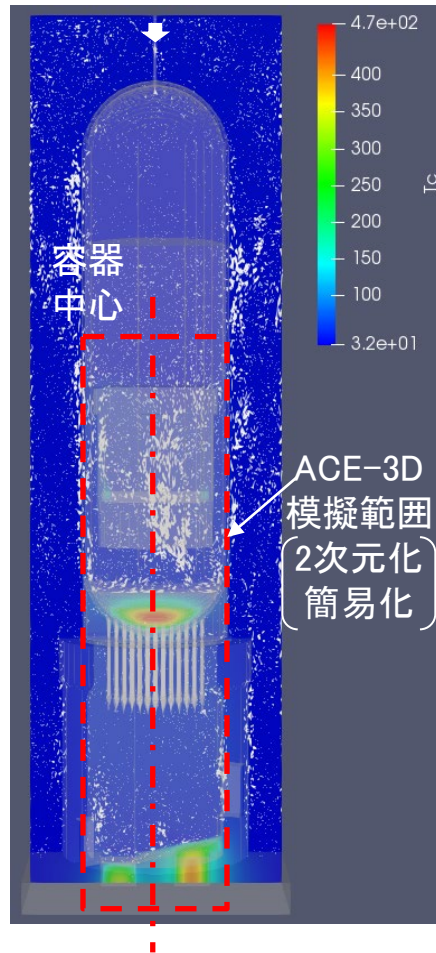
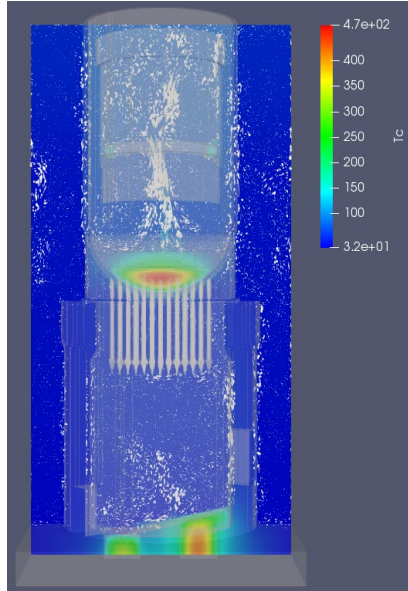
7.3.4 実機解析 窒素封入系の模擬 窒素注入の影響

ACE-3D

JUPITER窒素封入有

窒素注入無 有

JUPITER
窒素封入無



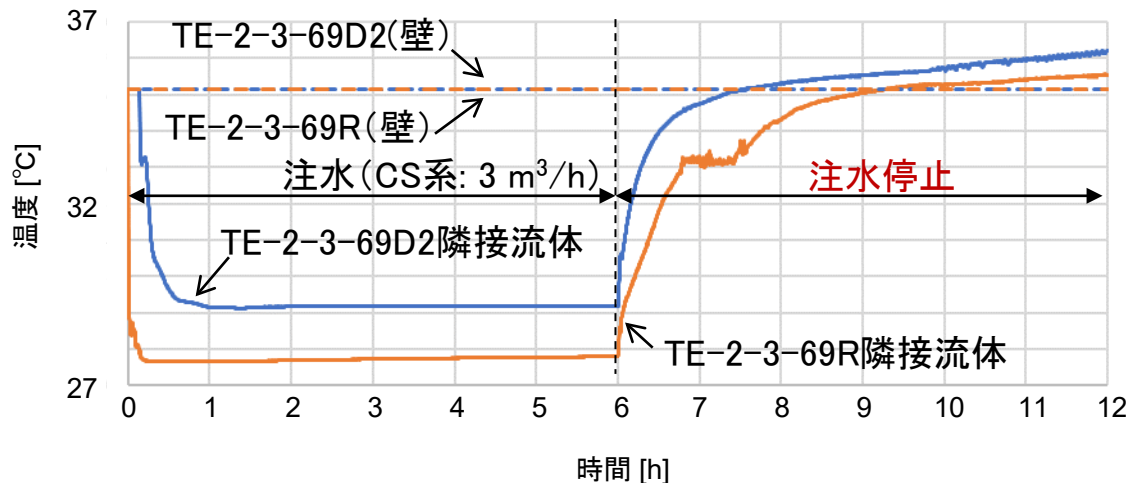
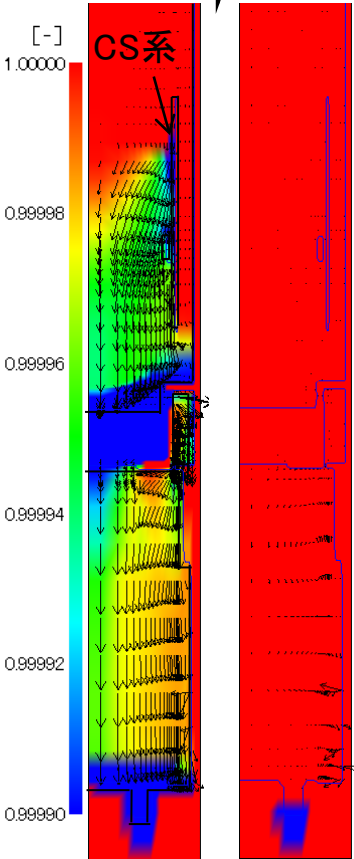
JUPITERと同様の条件で
窒素封入を模擬解析

JUPITERと同様の結果
であり、窒素封入による温度
分布や流れ場への影響は小
さい

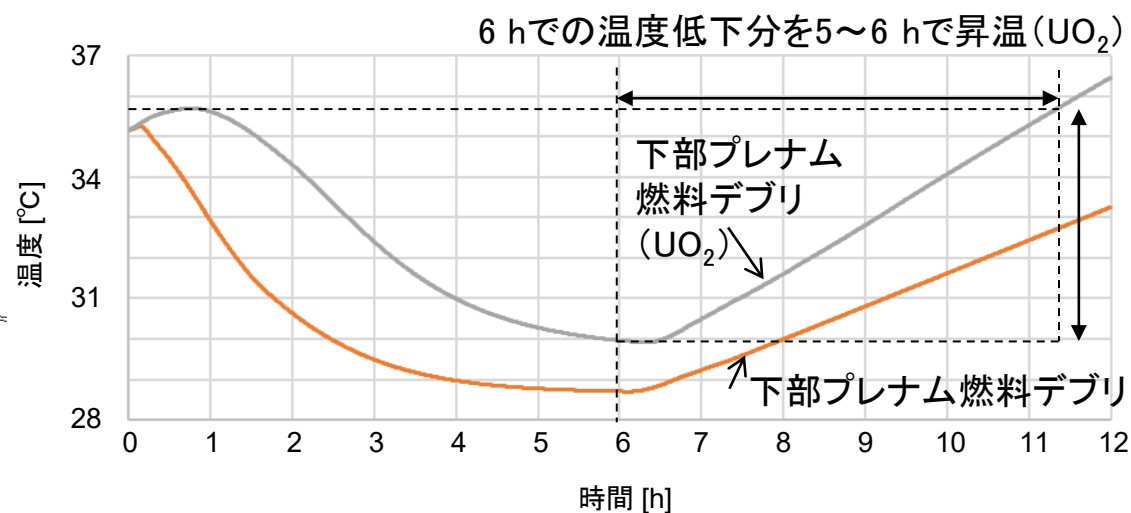
7.3.4 実機解析 注水停止した場合の安定冷却に要する時間の検討

ボイド率+速度ベクトル

6 [h] ⇨ 12 [h]

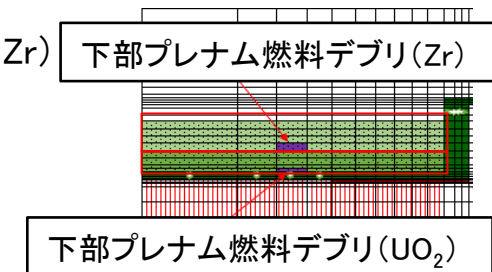


安定冷却に要する時間等を実施・評価した (注水→注水停止)



注水により低下した下部プレナム燃料デブリの温度は5~6 hで昇温される。5 h経過前の再注水が望ましい

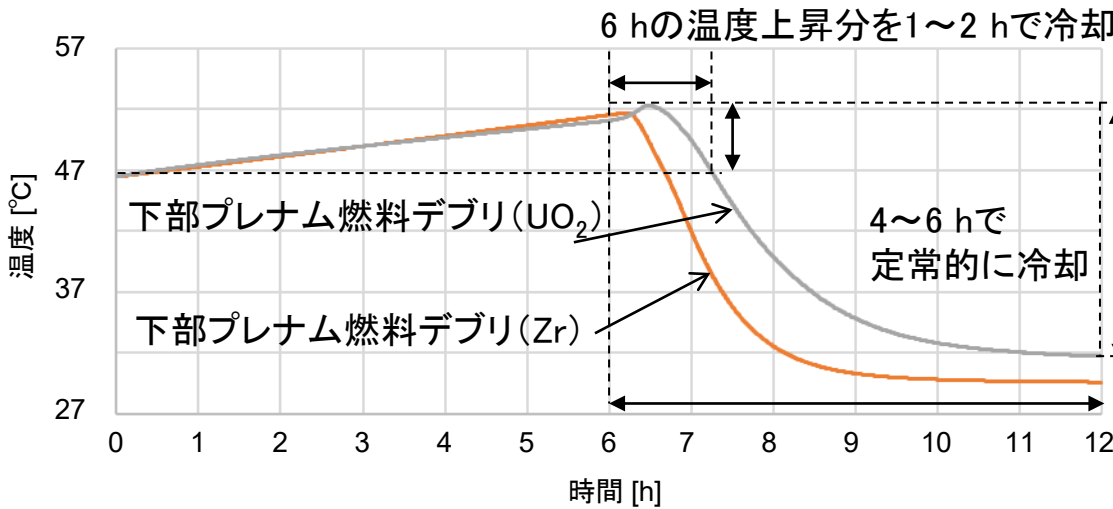
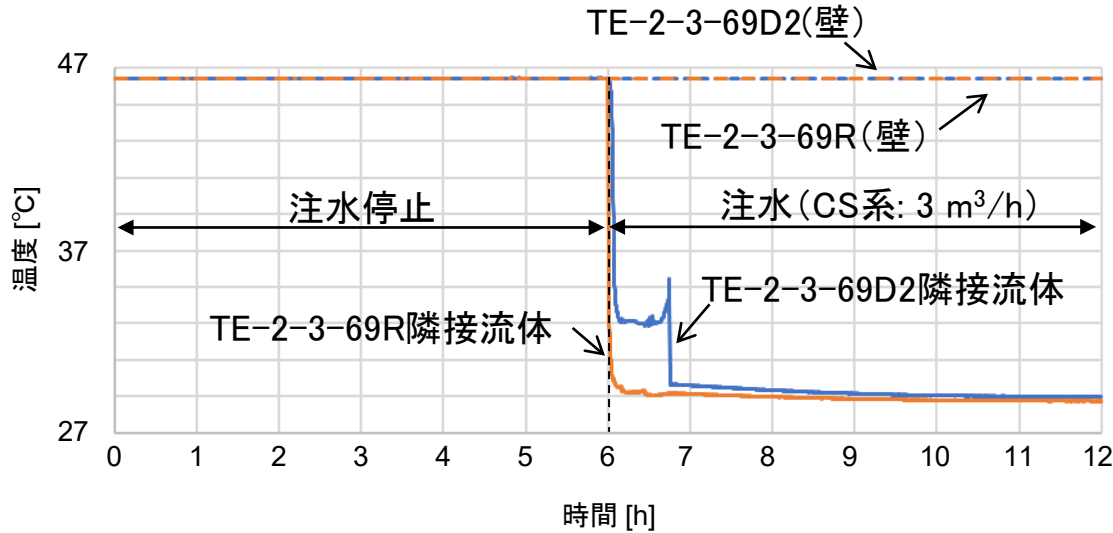
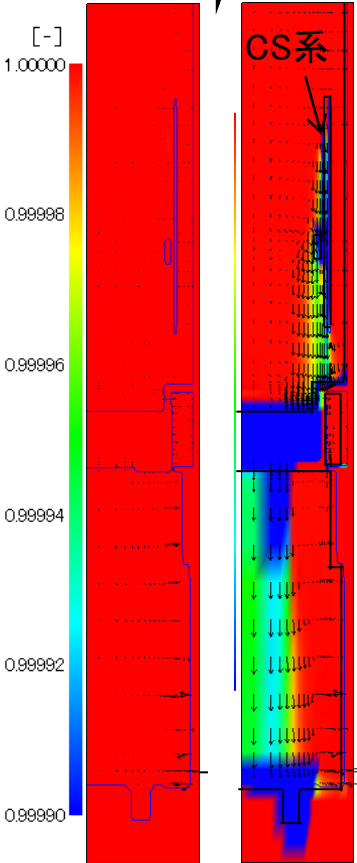
下部プレナム燃料デブリの位置関係



7.3.4 実機解析 空冷から再注水した場合の安定冷却に要する時間の検討

ボイド率+速度ベクトル

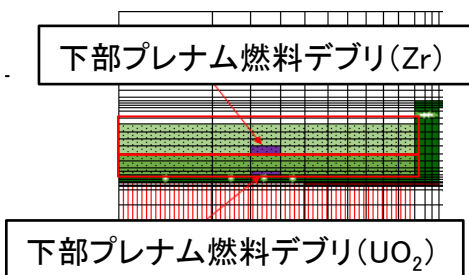
6 [h] ⇄ 12 [h]



安定冷却に要する時間等を実施・評価した (空冷→再注水)

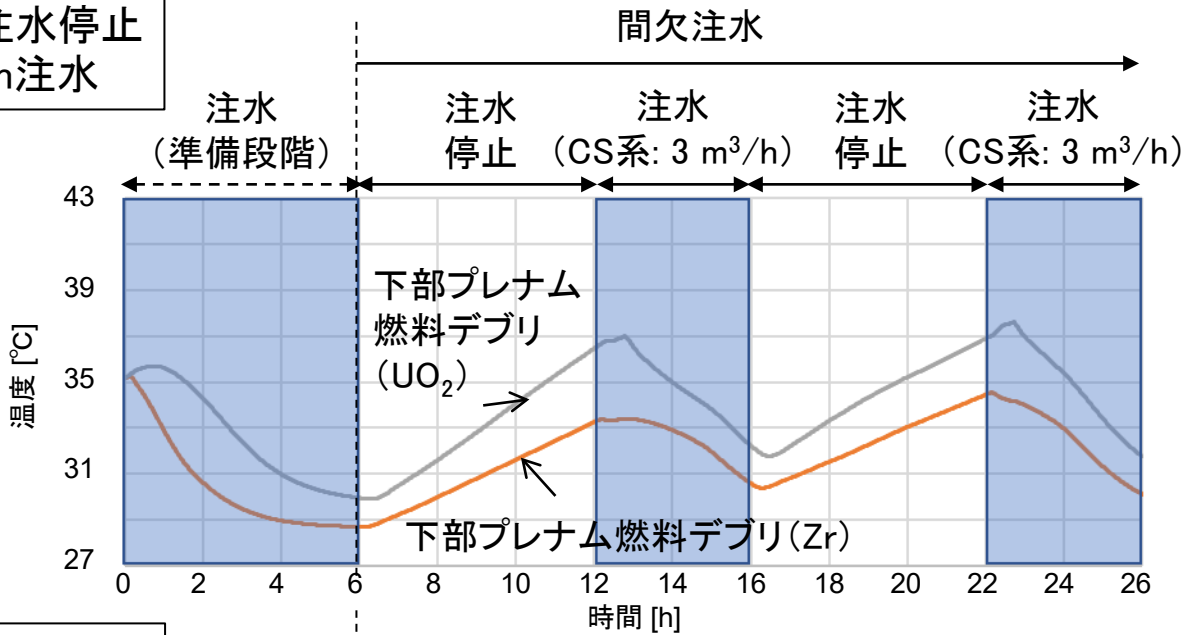
空冷で上昇した下部プレナム燃料デブリの温度は1~2 hで冷却される
再注水により定常的に冷却するには、4~6 hの再注水が望ましいと推定

下部プレナム燃料デブリの位置関係

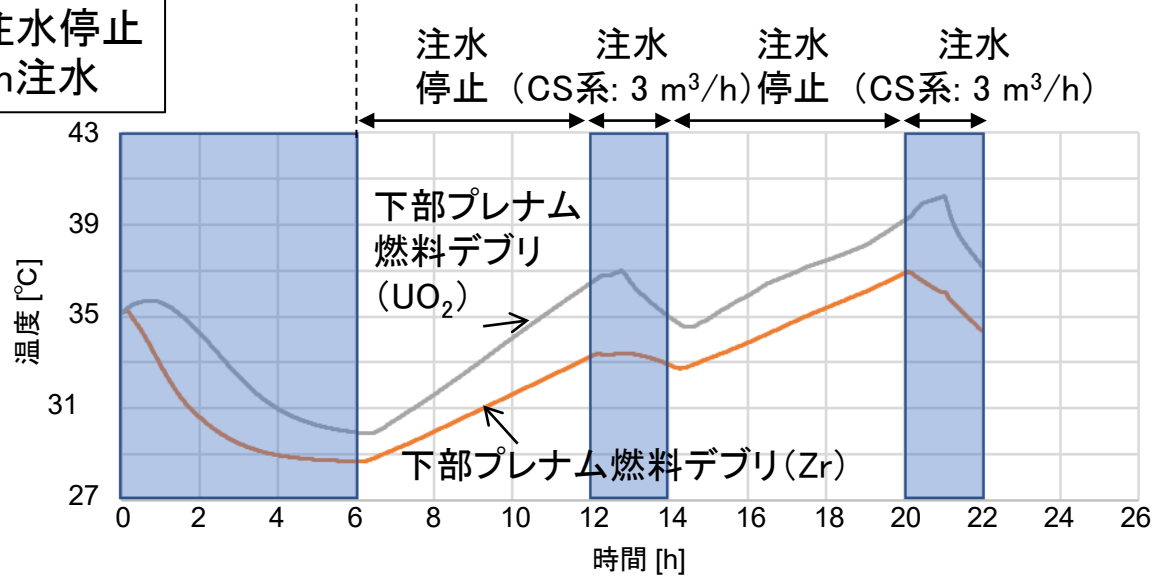


7.3.4 実機解析 模擬間欠注水による安定冷却の検討・評価

6 h注水停止
→4 h注水



6 h注水停止
→2 h注水



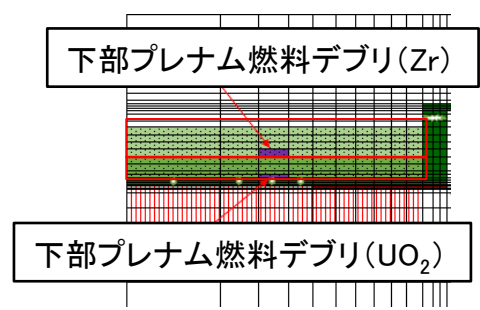
間欠注水を試験的に実施

- 6 h注水停止→4 h再注水
- 6 h注水停止→2 h再注水

間欠注水の一例として、6 h間注水停止した場合に4 h注水すれば安定的に冷却し得る
2 hの注水では不十分な可能性を確認

6 h注水停止→4 h注水であれば現状(注水継続)に比べ、注水量は40%まで削減し得る

下部プレナム燃料デブリの位置関係



7.3.5 実機熱挙動評価のまとめ

- 空冷時を対象として、ACE-3Dを用いた実機熱挙動評価とJUPITERによる詳細解析との比較を行い、JUPITER解析を再現することを確認
- ペDESTALにおける気孔率を変更した解析を行い、影響が小さいことを確認
- 注水継続時および再注水時の2号機プラントデータとの比較を行い、プラントデータを再現できることを確認
 - 詳細な確認には、プラントの温度計測点の追加、計測間隔を小さくすることが求められる
- 窒素封入系からの窒素注入を想定した解析を行い、JUPITERの解析と同様にその影響は小さいことを確認
- 間欠注水などを想定した解析を行い熱挙動を評価
- 1および3号機の評価への適用については、炉内状況把握を反映した解析条件の検討と検討結果を反映したプラントデータとの比較が必要

7.4 参考資料

7.4.1 記号表 (1/2)

7.4.2 記号表 (2/2)

7.4.3 用語表

7.4.1 記号表 (1/2)

記号	単位	記号の意味	補足
A	m^2	面積	
a_{sf}	m^2	比表面積	
C	-	フオークハイマー係数	
C_m	mol/m^3	成分mのモル濃度	
c	$J/kg\ K$	比熱	
D	m^2/s	拡散係数	
d_p	m	多孔質体粒子径	多孔質体を構成する構造の大きさ
g	m^2/s	重力加速度	
h_f	W/m^2K	熱伝達係数	
j	m/s	(平均)速度	
K	m^2	透過係数	
k	$W/m\ K$	熱伝導率	
$k_{c,m}$	m/s	気体成分mの物質移動係数	
L	m	流路などの長さ	
M	kg/mol	モル質量	
Nu	-	ヌセルト数	
P	Pa	圧力	
P^*	-	無次元圧力	

記号	単位	記号の意味	補足
$P_{m,sat}$	Pa	気体成分mの飽和蒸気圧	
Pr	-	プラントル数	
Q	W/m^3	単位体積当たりの発熱	
R	$J/mol\cdot K$	一般気体定数	
Ra	-	レイリー数	
Re	-	レイノルズ数	
Sc	-	シュミット数	
Sh	-	シャーウッド数	
r	mol/s	蒸発・凝縮速度	
r	m	半径方向座標	
T	K	温度	
t	s	時間	
U_d	m/s	多孔質体上流の速度	
u, v, w	m/s	x, y, z方向速度	
V	m/s	速度	
w_m	-	成分mの質量分率	
x, y, z	m	座標	
X_m	-	気体成分mのモル分率	

7.4.2 記号表 (2/2)

記号	単位	記号の意味	補足
α	-	ボイド率	気相体積割合 (統計平均値)
ΔP	Pa	圧力差	
ε	-	気孔率	
η	-	体内二相流の圧力損失 評価モデルの係数	
μ	Pa·s	粘性係数	
ν	m ² /s	動粘性係数	
σ	N/m	表面張力係数	
ρ	Kg/m ³	密度	

記号	記号の意味	補足
1, 2	場所、地点	
e	実効的な値であることを 表す	熱伝導率に関する 各種平均値
f	流体	
i, j, k	方向を表す	総和規則が適用さ れる
int	気液界面あるいは壁面	
l, g	気相、液相	
m	成分	
p	ポーラス(多孔質体)内	
r	(修正) Lipinskiモデルの 係数	二相流の効果を表 す補正係数
s	固体	
t	乱流による寄与	

7.4.3 用語集

用語	意味
CRD	Control-Rod-Drive／制御棒駆動機構。制御棒を引き抜いたり挿入したりする設備のこと。
CS系	Core Spray (炉心スプレイ)系。事故時などに、炉心上部より冷却水を噴霧することで、燃料の破損を防止するための設備のこと。
Darcy-Forchheimer 則	ダルシー・フォークハイマー則。多孔質体中の流速(束)と圧力損失との間に線形の関係が成り立つとする経験則(Darcy則)に対して、レイノルズ数が大きくなると線形関係が崩れる影響を、流速の二次の項を加えることにより表現したもの。地質学や流体機械の解析における圧力損失(流動)モデルとして利用されている。 参考: Forchheimer, P., Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieur, Vol. 45, (1901), pp. 1782 1788.
FDW系	Feedwater(原子炉給水)系のこと。
PIV	Particle Image Velocimetry (粒子画像流速測定法)。流体中に混入したトレーサ粒子の粒子画像により、2次元平面内の速度および方向を非接触で求めることができる流体計測手法のこと。
PCV	Pressure Containment Vessel (原子炉格納容器)のこと。
RPV	Reactor Pressure Vessel (原子炉圧力容器)のこと。
Lipinskiモデル	多孔質体中を流れる二相流の流速(束)と圧力損失との間関係を、ダルシー・フォークハイマー則を修正することで与えるモデル。同様のモデル化が種々の研究者により行われている。 参考: Lipinski, R. J., A Model for Boiling and Dry-Out in Particle Beds, U. S. NUREG/CR-2646, SAND82-0765 R7 (1982).
MPI	Message Passing Interfaceのこと。並列コンピューティングを行うために標準化された規格であり、言語を問わず利用できるなど、ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC)におけるデファクトスタンダードと言える。
直列モデル	多孔質体における実効的な熱伝導率(よどみ熱伝導率)を推定(推算)するためのモデルの一つ。多孔質体を形成する固体と内部の流体が層状に分布していると仮定し、固体と流体の熱伝導率の調和平均により、よどみ熱伝導率を与える。
加重幾何平均モデル	多孔質体における実効的な熱伝導率(よどみ熱伝導率)を推定(推算)するためのモデルの一つ。よどみ熱伝導率が、固体と流体の熱伝導率の相乗平均により与えられるとする。
並列モデル	多孔質体における実効的な熱伝導率(よどみ熱伝導率)を推定(推算)するためのモデルの一つ。多孔質体を形成する固体と内部の流体が並んで配置されているとし、固体と流体の熱伝導率の相加平均により、よどみ熱伝導率を与える。
流動様式	二相流では、気相あるいは液相それぞれの流量や流路により、流れの状況がいくつかのパターンに類型化される。このような類型化された流れのパターンを「流動様式」と呼ぶ。数値シミュレーションなどでは、流動様式ごとに異なる二相流モデルが用いられる場合がある。

8. 実施内容（簡易分析のための技術開発）

8.1 簡易（その場）分析手法の評価・検討

8.2 簡易（その場）分析技術の開発

8.2.1 分析手法の確立

8.2.2 核燃料物質による性能評価

8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

8.3 参考資料

8.1 簡易（その場）分析手法の評価・検討

「簡易（その場）分析手法に関する検討委員会」の開催と検討の経緯

簡易（その場）分析手法に関する検討委員会 委員構成

委員所属機関	人数
国立大学法人 ・福島大学 ・東京大学 ・名古屋大学 ・徳島大学	4名
国立研究開発法人 ・量子科学技術研究開発機構 ・日本原子力研究開発機構	2名
東京電力ホールディングス株式会社 ・福島第一廃炉推進カンパニー	3名
日本原子力研究開発機構 事業担当	1名

事務局：日本原子力研究開発機構事業担当部署

第1回 簡易（その場）分析手法の評価検討委員会

1. 日時：2021年11月12日（金） 15時から17時
2. 開催方法：オンライン（Webex）
3. 議題
 - 1) 委員紹介（各委員）
 - 2) 委員長選出（事務局）
 - 3) 議事内容
 - ①簡易（その場）分析手法の開発について
 - ・本課題の背景等に関するご説明（損害賠償・廃炉支援機構）
 - ・質疑
 - ・技術開発の方向性に関する確認
 - ・質疑
 - ②簡易（その場）分析手法の開発に関する技術開発内容について
 - ・具体的技術開発内容に関する説明（原子力機構）
 - ・質疑
 - ・技術開発内容の確認
 - 4) その他連絡事項（事務局）

第2回 簡易（その場）分析手法の評価検討委員会

1. 日時：2022年7月21日（木） 13時15分から15時15分
2. 開催方法：オンライン（Webex）
3. 議題
 - 1) 初めに（事務局から）
 - 2) 議事内容
 - ①簡易（その場）分析手法の開発状況について（原子力機構）
 - (a) 分析手法の開発
 - (b) 核燃料物質による性能評価
 - (c) 基礎基盤技術を基にした実機開発
 - ②マイクロチップレーザーLIBS高度化研究の進め方について（原子力機構）
 1. マイクロチップレーザー LIBS の現状と高出力化
 2. マイクロチップレーザー LIBS 高度化研究の変更について
 - 3) その他連絡事項（事務局）

8.1 簡易（その場）分析手法の評価・検討

検討委員会での検討（有効な分析・測定手法の調査）

検討対象とする分析手法の概要（分析化学的手法によるサンプル分析を除く）

利用する量子線源	利用する物理的性質		
	原子・核吸収・反応放出	原子・核共鳴吸収	原子・核蛍光発光
中性子線	高速中性子問いかけ法（問いかけ法）	中性子共鳴吸収分光	
X線	2色X線吸収画像解析(CT)		X線蛍光分光(XRF)
レーザー光		レーザーアブレーション共鳴吸収分光(LARAS)	レーザー誘起ブレークダウン分光(LIBS)

その場 = 炉内・セル内(場所)、迅速性(時間)

長所

適用性

短所

評価項目	評価指針
簡易性	前処理不要、汚染・放射線被ばくの拡大なし、多量の分析廃棄物なし。
分析性能	ウランの有無、定性分析。
使用環境	遠隔操作性、耐放射線性(炉内; >kGy/h、MGy、適用場所に依存)。
技術レベル	基礎・基盤技術が一定レベル確立されている。

8.1 簡易（その場）分析手法の評価・検討

検討委員会での評価（有効な分析・測定手法の調査結果・評価）

	2色X線CT	中性子共鳴吸収法	高速中性子問いかけ法	XRF	LIBS	LARAS
概要	X線CT分析が基本。 2色のX線吸収率の違いから物質密度を特定してCT化。 特定密度の3次元可視化。	断面積の大きな原子核固有の中性子共鳴級数エネルギーを活用。吸収量や同位体発生するガンマ線分析から核種とその量が評価できる。	高速中性子を入射し、被測定物質により熱中性子を発生。U等との核分裂熱中性子を検出してU等の総量を評価する。	X線により原子を励起し、発生する特性X線情報から元素及びその量の大小を判定。	レーザー光を試料に集光照射し、プラズマを生成。励起原子からの蛍光スペクトルから元素及びその量の大小を判定。	レーザーアブレーションで生成した原子に、波長可変レーザー光を入射し、共鳴吸収量から存在、量を推定する。
特長・長所	元素（特定密度）のCT像から対象物内のU等の3次元情報が得られる。 U等の物量が確定できる可能。	原子核の中性子共鳴吸収効果を利用することから、同位体の定量分析が可能。 試料からのガンマ線の影響を受けにくい。 イメージングへの発展性がある。	高速入射中性子とU核分裂熱中性子との区別が容易。 定量が可能。 対象物の中心部でも高感度。	簡便に対象物の組成定性分析が可能。 定性分析機器として使用実績が豊富。	短時間で簡便に元素定性分析が可能。 炉内・セル内遠隔分析に適用できる可能性あり。 高い耐放射線性。	複数元素・同位体が混在していても妨害を受けない。 同位体組成比を測定可能。 放射線の影響を受けない。
短所	熔融混合物、非均一混合物では特定元素の情報が得にくい。	エネルギー分解能の高い中性子源が必要。 高濃度での透過方向厚みに制限。 中性子吸収材の濃度の影響を受ける。	適用範囲が中性子吸収材の濃度に依存。	表面領域のみ。 耐放射線性不明。	表面局所のみ。 実績に乏しい。 微小領域破壊。 微量ヒューム発生。	減圧希ガス雰囲気が必要。 表面局所のみ。 実績に乏しい。 微小領域破壊。 微量ヒューム発生。
形状対象	任意 収納容器ごと	任意 収納容器ごと	収納容器ごと	分析対象個別直接	分析対象個別直接	分析対象個別直接 (真空容器が必要)
可設置性	小型加速器が必要 設置場所を確保して設置 (比較的大規模)	パルス中性子源として加速器が必要。 設置場所を確保して設置 (大規模)	小型高速中性子源が必要 設置場所を確保して設置 (比較的大規模)	小型・可搬型	小型・可搬型	プローブ自体は小型・可搬性 (分析用真空容器が必要)
分析遠隔性	想定外 (機器操作は遠隔)	想定外 (機器操作は遠隔)	想定外 (機器操作は遠隔)	可搬型で対応可	グローブボックス内への適用実績あり プローブ部 50m遠隔実績	グローブボックス内への適用実績あり
レベル技術	原理実証段階	原理実証段階	U廃棄物中の U量評価実績あり	実用化技術 (一般市販)	核燃料物質で実証例あり	核燃料物質で実証例あり
分野適用	全量 非破壊測定	全量 非破壊測定	全量 非破壊測定	その場 スクリーニング分析	その場 スクリーニング分析	セル・グローブボックス内 スクリーニング分析

○2色X線CT、高速中性子問いかけ法は、全量測定用非破壊分析技術として有用である可能性あり。

○中性子共鳴吸収法は、非破壊分析の適用範囲であるが、パルス中性子源の必要性から設置制約が大きい可能性がある。

○レーザーアブレーション共鳴吸収法はLIBS同様、簡易分析の適用範囲であるが、大気中では利用できない。

○簡易その場分析技術としては、XRFとLIBSが代表的であり技術開発対象である。

8.1 簡易（その場）分析手法の評価・検討

検討委員会での検討（開発項目等の検討）

LIBSとXRFの特長と委員会で特に確認された技術開発実施項目

項目	XRF	LIBS	技術開発実施項目
分析性能	定性分析 対象元素量の多い、少ない	定性分析 対象元素量の多い、少ない	U含有標準試料及び使用済み燃料での試験において、LIBS、XRFのデータを可能な範囲で併記（使用済み燃料に対するXRF計測は、状況により判断）。
使用実績	実用化技術 1 F内採取試料への適用実績有り。	研究開発手法で、実用実績、1 Fでの利用実績に乏しい。核燃料物質での実績あり。使用済み燃料での実績なし。	
耐放射線性	ガンマ線がノイズ源 耐放射線性は不明	従来型光ファイバーLIBSの場合、 $> 10\text{kGy/h}$ 、 $> \text{数MGy}$ での試験結果あり。	LIBSの耐放射線性確認試験又は使用済み燃料試験時に合わせてXRFの評価も実施。
機器供給	商業ベース	研究開発品 一部商業ベースあり	開発したLIBS機器の供給に向けた試行を実施。
その他	完全非破壊分析	極微小局所部分破壊分析 ヒューム（微小粒子）の発生	「アブレーション粒子の簡易的な粒径評価」に関する項目を新たに追加。

8.1 簡易（その場）分析手法の評価・検討

検討委員会での検討（開発項目等の見直し）

マイクロチップレーザーLIBS高度化研究の進め方：

高出力マイクロチップレーザーの開発を新たに委託研究で実施

【従来の実施方法】

- ・高パルス出力のマイクロチップレーザーを開発し、50m以上の超長尺条件での運転条件を見出す。
- ・高パルス出力マイクロチップレーザーによる LIBS スペクトルデータを取得し、分析特性を評価する。



【見直し後の実施方法】

①マイクロチップレーザー利用LIBSプローブによる超長尺分光の実現

高出力化(3mJ/pulse)マイクロチップレーザーLIBSプローブを活用し、50m以上の超長尺条件での分光試験を実現する。

②表面活性接合DFCチップによる高出力マイクロチップレーザーの開発

(DFC : Distributed Face Cooling 面分散冷却)

(新規委託研究: 自然科学研究機構分子科学研究所)

表面活性化DFCチップによる高パルス出力マイクロチップレーザー(>1ns,10mJ/pulse)を開発し、発振特性を取得する。

※専門性(特許技術の活用)に応じてテーマを分割し、実施内容を大きく変えることなく同時進行することで技術開発の加速化を実現する。

8.2 簡易（その場）分析技術の開発

8.2.1 分析手法の確立

8.2.2 核燃料物質による性能評価

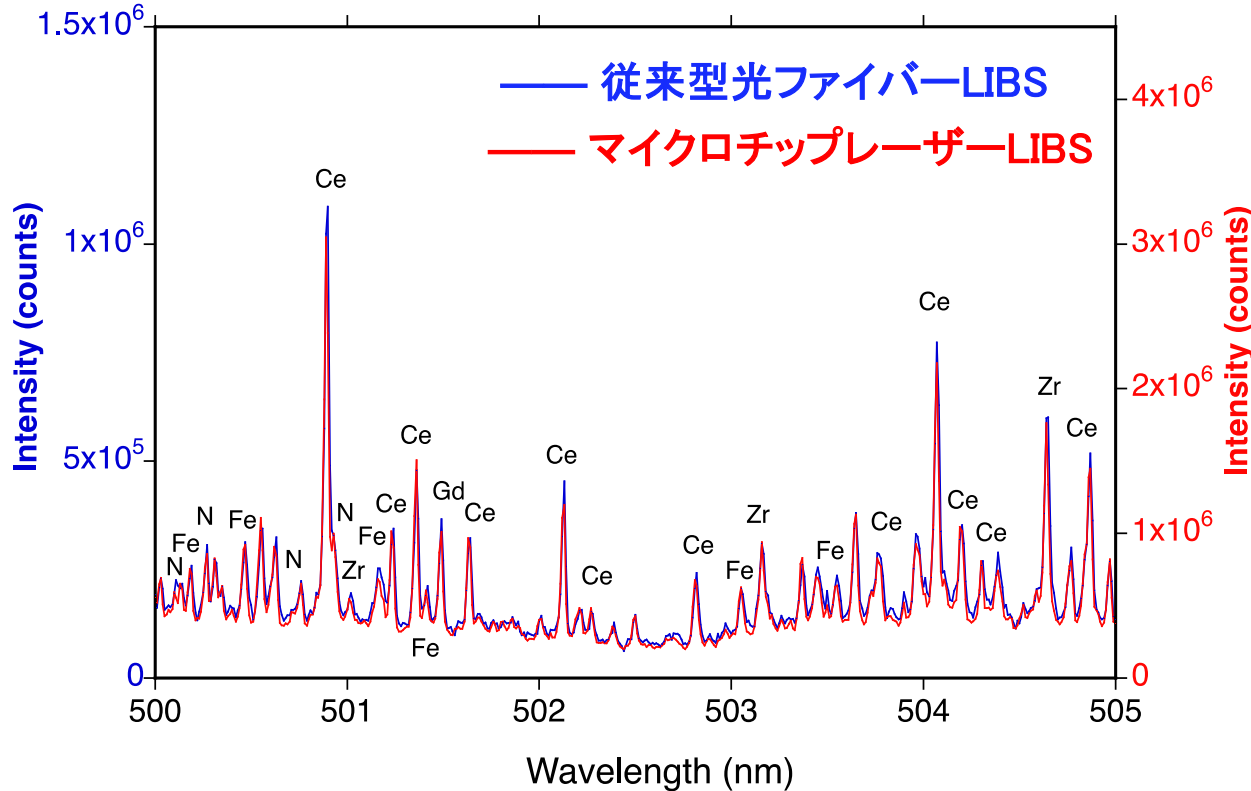
8.2.2 基礎基盤技術を基にした実機開発

技術開発の主な内容と成果

- マイクロチップレーザー利用LIBSプローブについて、従来型光ファイバーLIBSと比較し、**同等以上の分析性能**を確認した。耐放射線特性評価では、**線量率 5kGy/hの環境でも検量線に影響が無いこと**、**線量率 2kGy/hの環境で連続700時間以上（累積線量 >1.5MGy）** 運転しても異常のないことを実証した。
また、超長尺特性試験では、**100mの超長尺光ファイバー**でも **5mの場合と同様に分析可能**であることを実証した。
- **表面活性接合 DFC チップ**による高出力マイクロチップレーザーの開発では、これまでの**ほぼ10倍の出力である 10mJ/pulse**、発振時間幅 1nsを実現し、**無冷却連続運転に成功**した。
また、耐放射線性として、DFCチップ自体は、線量率2kGy/hで、**累積線量 1 MGy照射後も正常に発振可能**であることを確認した。

8.2.1 分析手法の確立 (従来型光ファイバーLIBSとの比較)

マイクロチップレーザーLIBSプローブのスペクトル取得性能の確認



従来型光ファイバーLIBS
10mJ/pulse, 5ns
光フォーカス径: 200 μ m

マイクロチップレーザー
光ファイバーLIBS
3mJ/pulse, 0.8ns
光フォーカス径: 数十 μ m

従来型光ファイバーLIBSとの比較

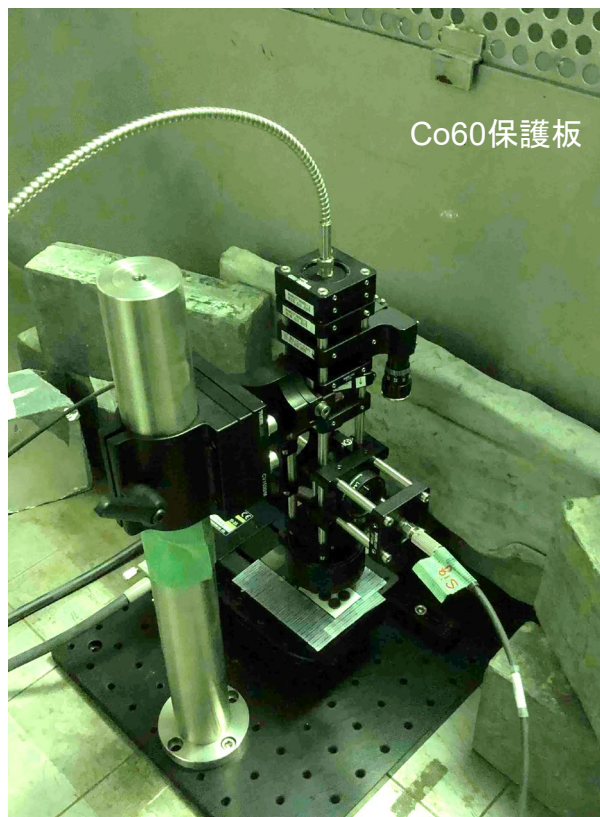
(CeO₂, Zr, Fe混合酸化物、Gd:混入酸化物によるスペクトル)

マイクロチップレーザーLIBSプローブにより、従来型光ファイバーLIBSの**3倍程度輝度の高い**発光スペクトルが取得できることが示され、**従来手法と同等以上の性能を確認した。**

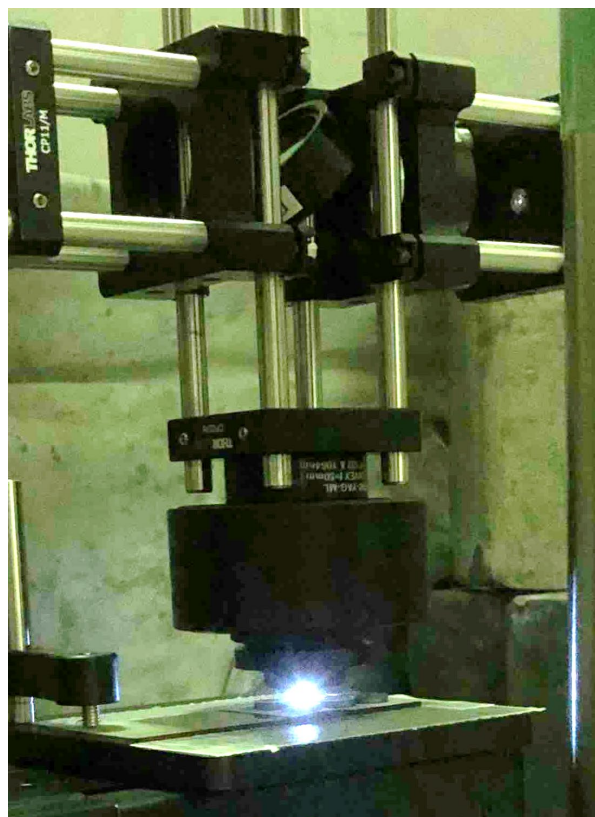
8.2.1 分析手法の確立 (耐放射線試験)

マイクロチップレーザーLIBS特性の放射線環境 (^{60}Co 5kGy/h) での確認

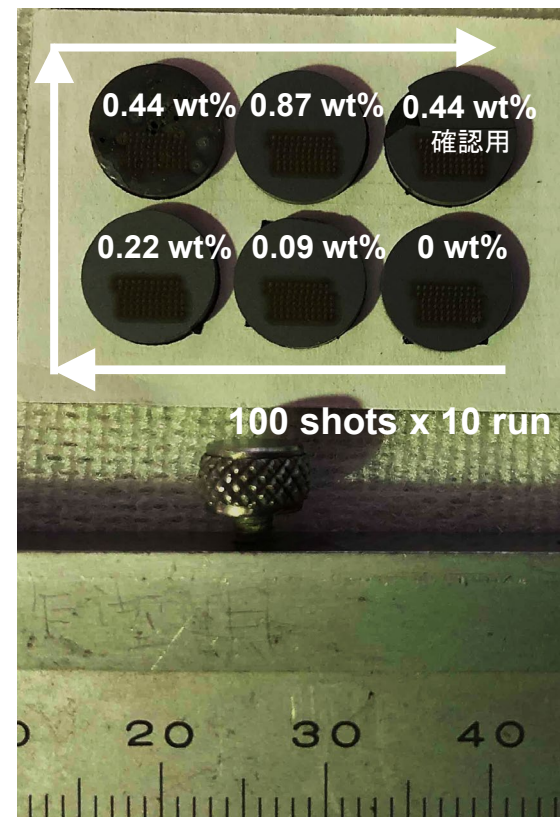
Gdを混合したCe酸化物試料を活用



マイクロチップレーザー
LIBSシステムの設置状況



試料へのレーザー照射

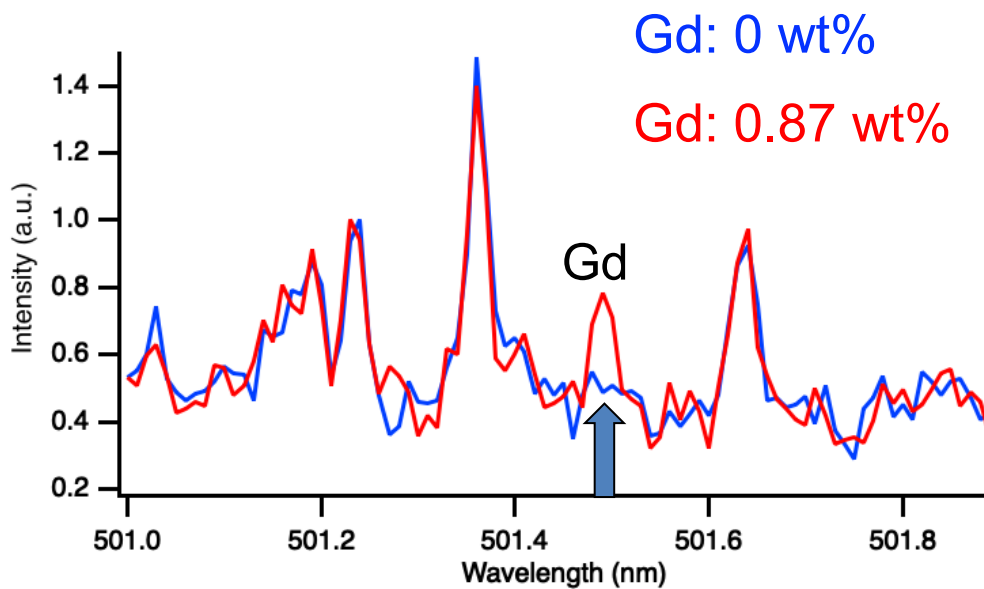


試料の配置と測定順序
照射中に試料を遠隔操作で移動

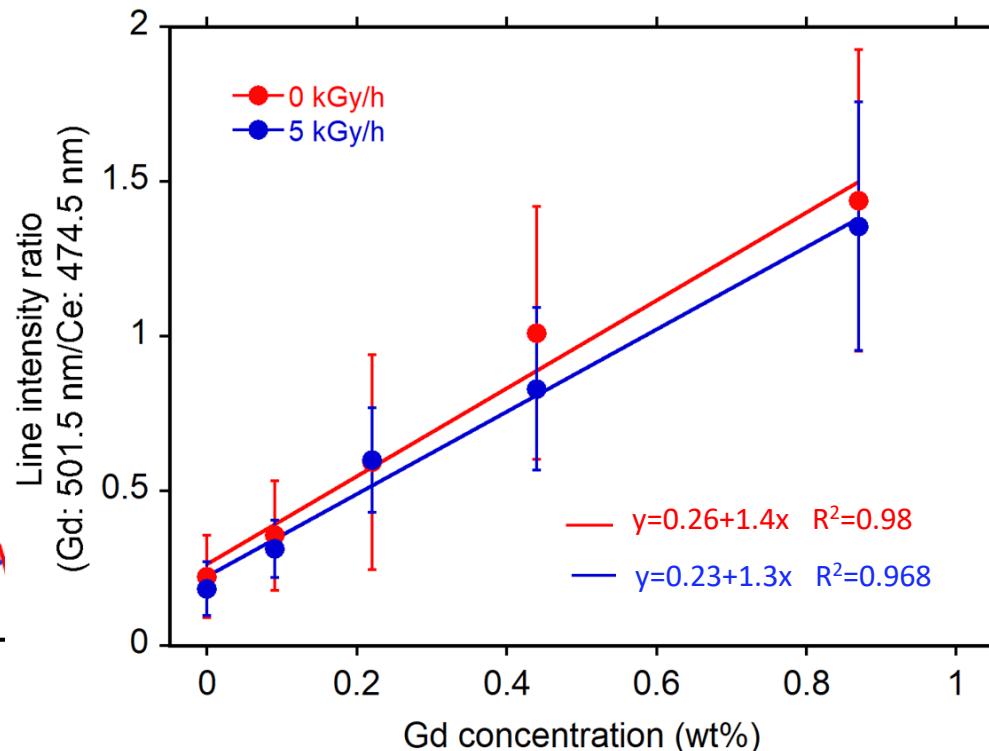
8.2.1 分析手法の確立 (耐放射線試験)

マイクロチップレーザーLIBS特性の放射線環境での性能実証

(検量線に及ぼすガンマ線の影響を確認)



Gdを混合したCe酸化物試料のスペクトル
(ガンマ線の照射無し)



^{60}Co ガンマ線環境下での
Ce酸化物試料中に混入したGdの検量線
(検量線がガンマ線の有無に依存しない)

マイクロチップレーザー(単結晶)を用いたLIBSプローブで取得した検量線も、従来の光ファイバーLIBS同様、放射線の影響を受けないことを実証した。

8.2.1 分析手法の確立 (耐放射線試験)

マイクロチップレーザーの耐放射線性の確認 (照射環境での長時間運転)

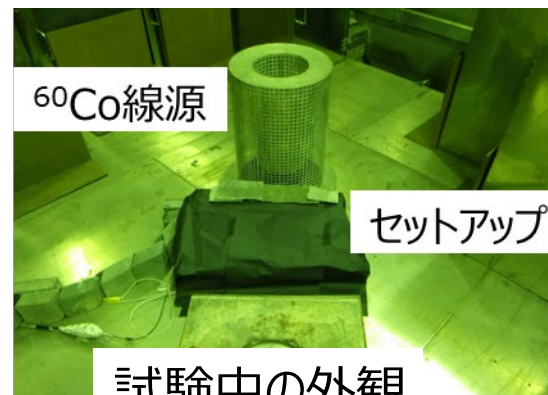
線源： ^{60}Co

線量率： $>2\text{ kGy/h}$

累積(連続)照射時間
: $728\text{時間}24\text{分}$

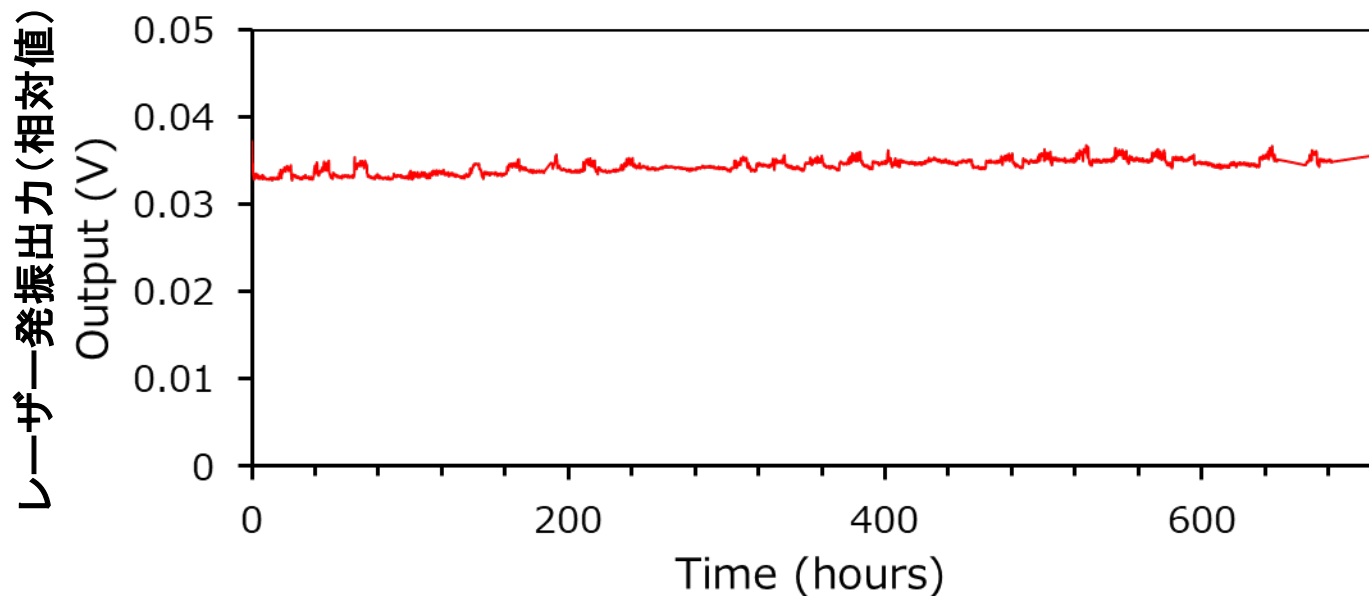


照射施設内の試験装置



試験中の外観

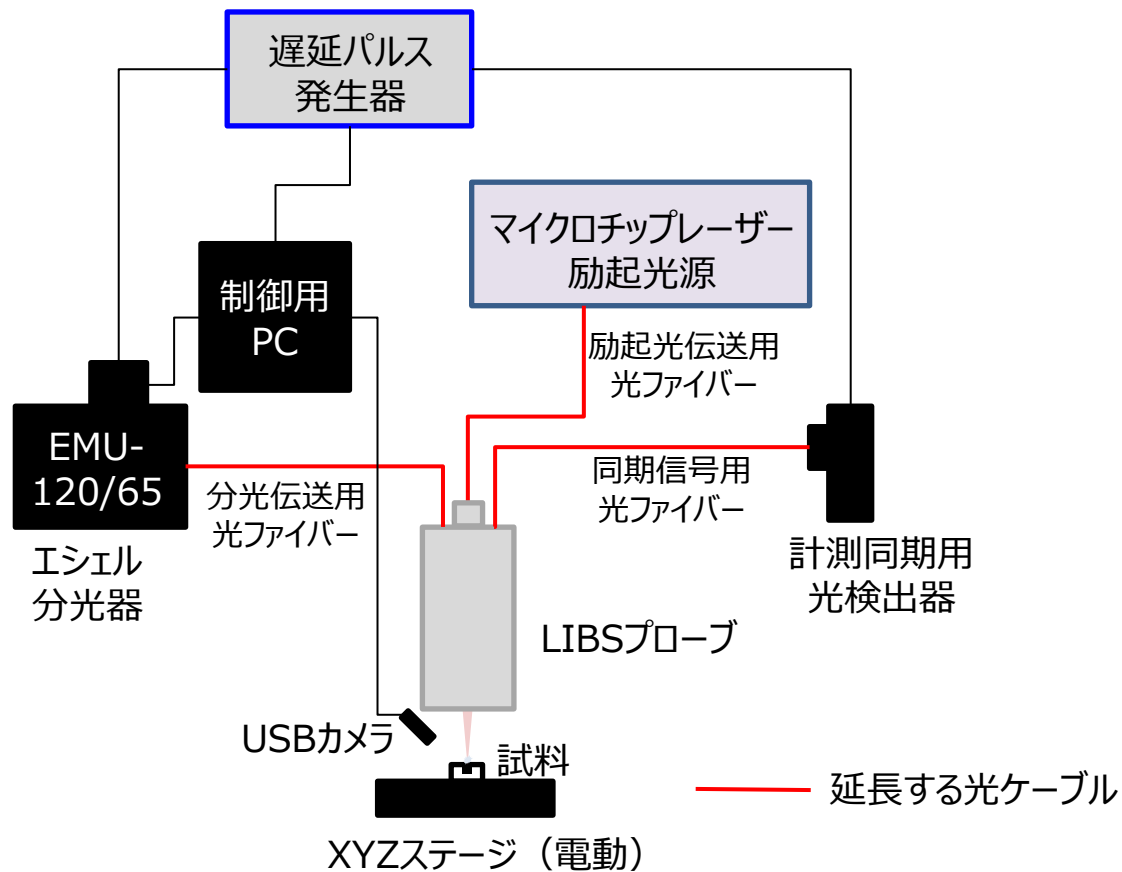
ガンマ線照射環境での
長時間連続運転を実証
累積線量は約 1.5 MGy



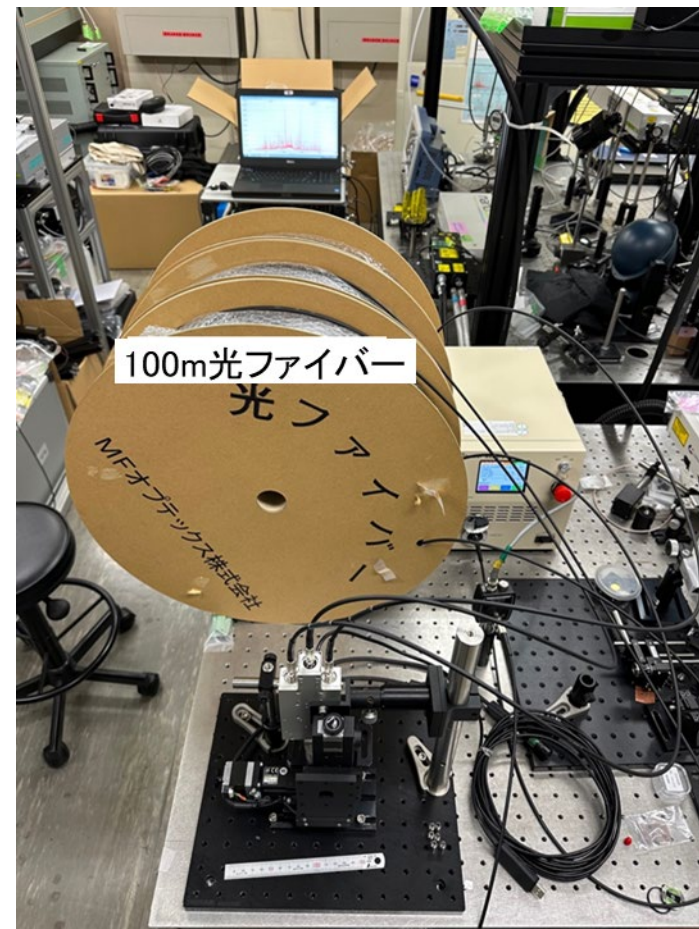
線量率環境 5 kGy/h でも変化の無い検量線が得られること、 2 kGy/h の環境中における、 700時間 以上 ($>1.5\text{ MGy}$)の連続運転で異常のないことが実証された。

8.2.1 分析手法の確立 (超長尺特性評価)

マイクロチップレーザーLIBS特性の超長尺依存性 (光ファイバー長100m)



実験体系



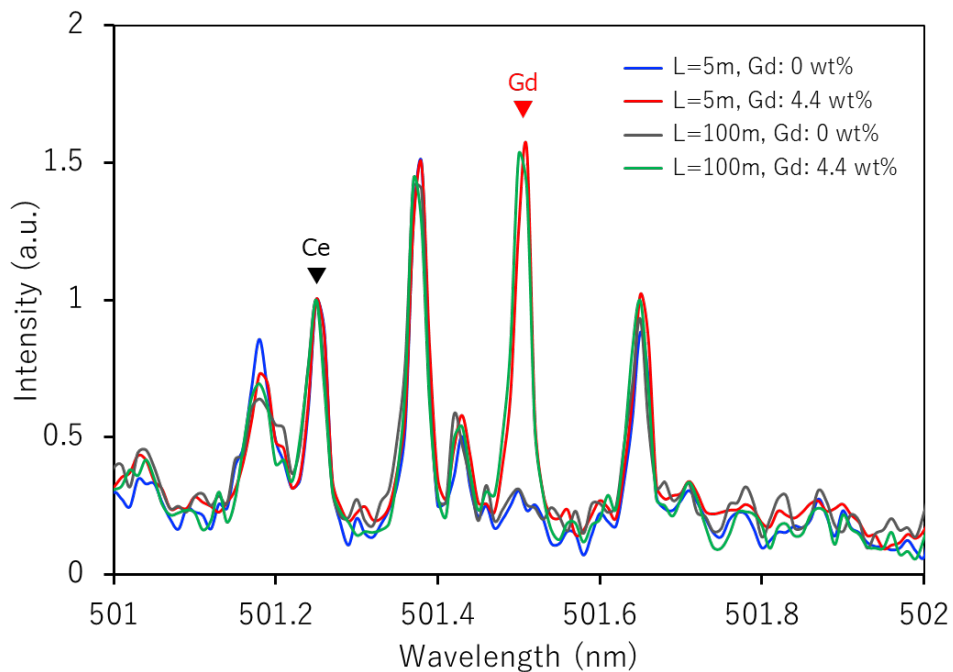
測定系の外観

光ファイバー長 L=5, 10, 20, 100 mで混合酸化物試料を測定

8.2.1 分析手法の確立 (超長尺特性評価)

マイクロチップレーザーLIBSの超長尺特性 (光ファイバー 5m、100mの例)

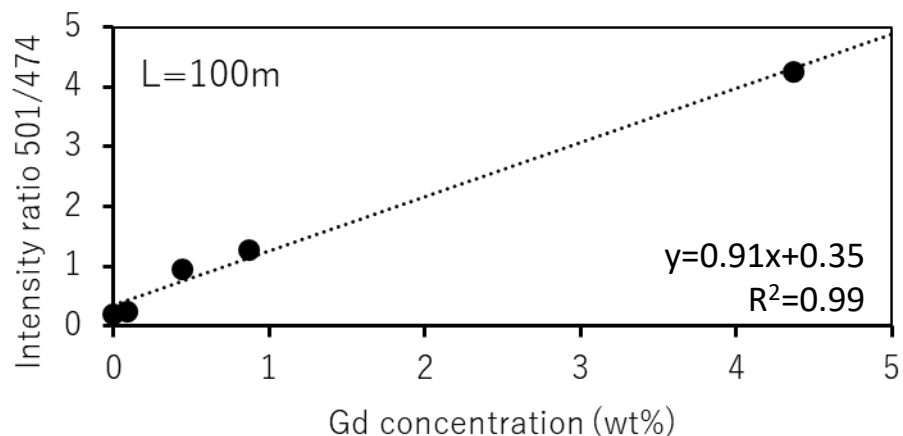
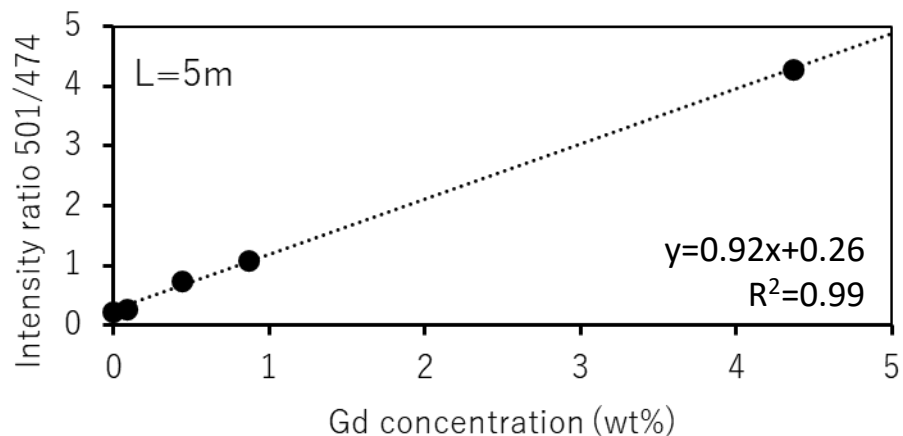
試料：Gd含有Ce・Zr・Fe混合酸化物



Gd発光線近傍のスペクトル比較

(L=5m L=100m)

▼Ceのスペクトル強度で規格化
(ほぼ同一のスペクトル)



Gd含有量に対する検量線
(光ファイバーの長さに依存しない)

光ファイバー長さによる光量の減衰は存在するが

100mの超長尺光ファイバーでも5mの場合と同様に定量分析性が維持されることを実証 160

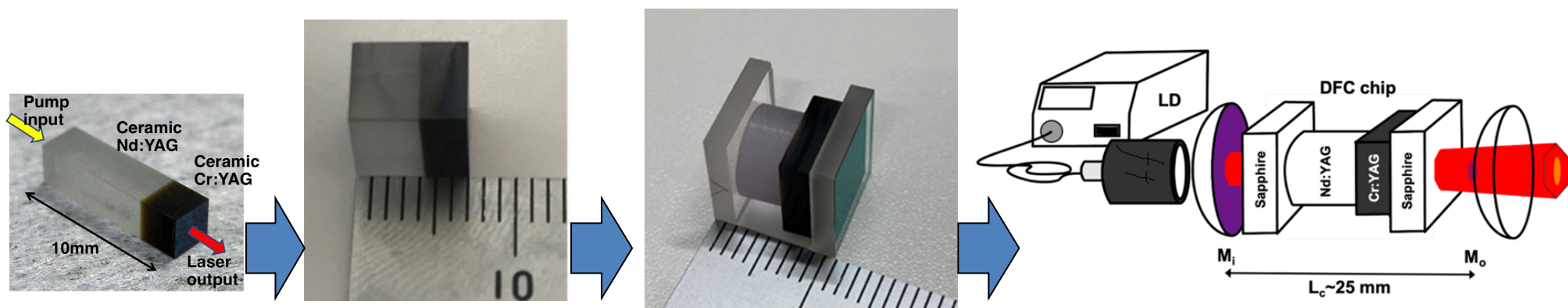
8.2.1 分析手法の確立 (DFCチップによる高出力化)

マイクロチップレーザーLIBSの高出力化とデータ取得

表面活性接合DFCチップによる高出力マイクロチップレーザーの開発

(分子研)

高パルス出力マイクロチップレーザーの開発に成功 (発振時間幅: $>1\text{ns}$,
パルス出力: 10mJ/pulse (従来の10倍))。



従来のチップ
(1mJ/Pulse)
発熱量小
除熱問題なし

体積の増大
高出力化チップ
発熱量増大
除熱に問題

表面活性接合DFCチップ
異種物質同士の分子レベルでの
光学的・熱的・構造的な一体化
効率的な除熱の実現

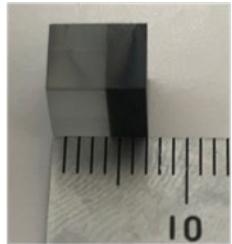
DFCチップに適合した共振器として
不安定共振器を選定

8.2.1 分析手法の確立 (DFCチップによる高出力化)

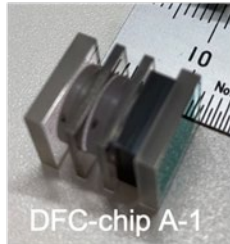
表面活性接合DFCチップによる高出力マイクロチップレーザーの開発

(連続運転特性の取得)

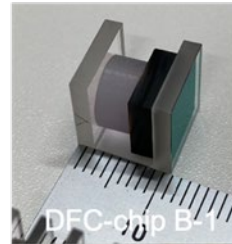
従来型マイクロチップ



DFC-chip A

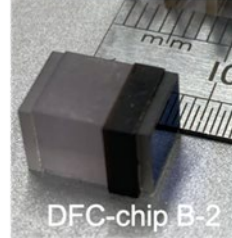
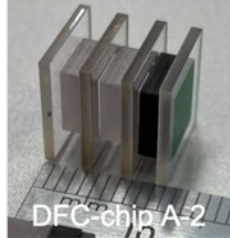


DFC-chip B



DFC-chip A-1

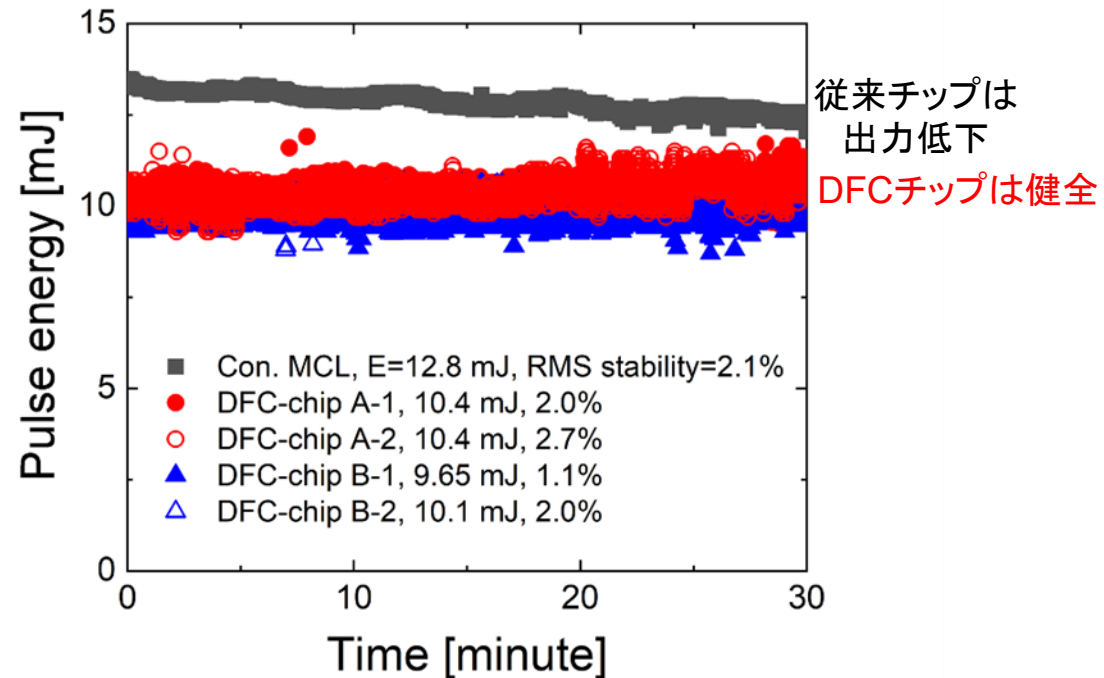
DFC-chip B-1



DFC-chip A-2

DFC-chip B-2

準備したDFCチップ



自然冷却のみでの連続発振特性

従来型マイクロチップは出力の低下がみられ、

DFCチップは高出力連続発振でも出力低下がなく健全性を保った

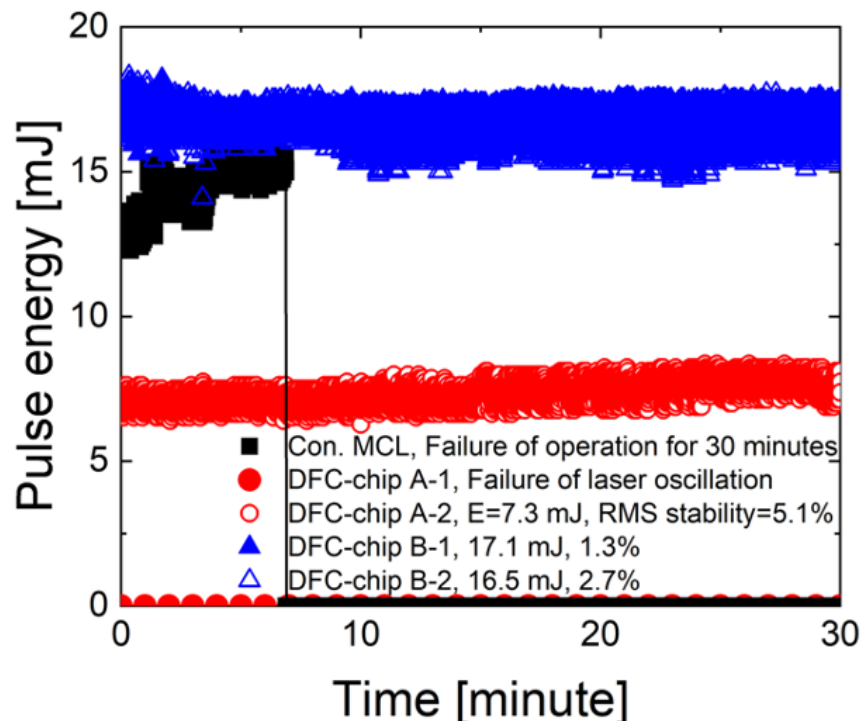
DFCチップは自然冷却のみで安定した連続発振が可能なことを確認

8.2.1 分析手法の確立 (DFCチップによる高出力化)

表面活性接合DFCチップによる高出力マイクロチップレーザーの開発

ガンマ線照射後発振出力の確認

(^{60}Co : 1MGy照射)



ガンマ線照射後の連続発振特性

従来のマイクロチップ焼結体は発振停止

DFCチップBはより高出力(高輝度)で安定発振を維持

(接合部で照射損失が発生した場合、接合面の多い多重積層型のDFCチップA)では問題となった可能性がある。詳細調査・検討が必要。

DFCチップBは、放射線耐性を有することが確認された

8.2 簡易（その場）分析技術の開発

8.2.1 分析手法の確立

8.2.2 核燃料物質による性能評価

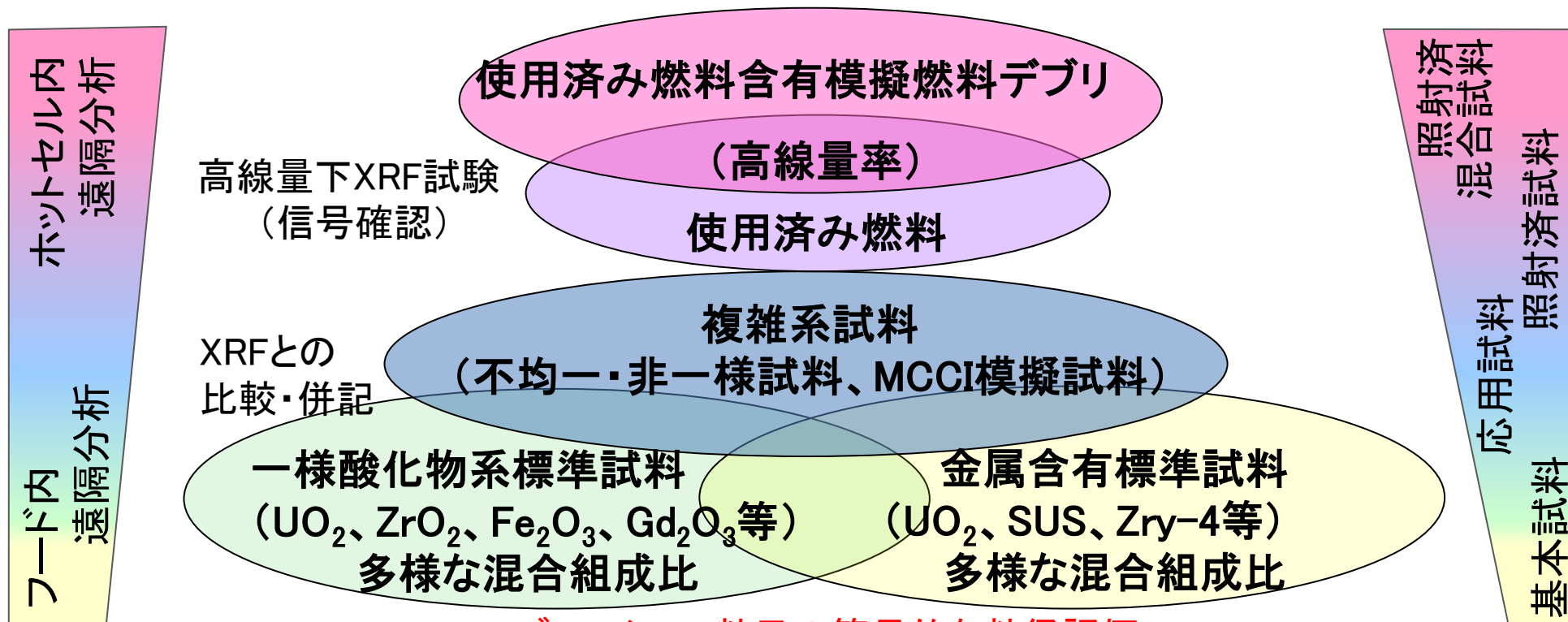
8.2.2 基礎基盤技術を基にした実機開発

技術開発の内容と成果

- 核燃料物質を含有した分析試料を準備した。
- LIBS及びXRFの未照射核燃料物質、照射済み燃料による性能評価を実施した。
酸化物試料、金属系試料、コンクリート系試料においてそれぞれ
検出下限値：0.5%、1000ppm、1000ppmを確認した。SEM-EDSの測定値と良く一致し、
元素特定のみならず定量分析評価が可能であることを示した。
- LIBS及びXRFの照射済み燃料による性能評価を実施した。
携帯型XRF：15mSv/h（使用済み燃料30mg相当）以上では計測不能。
LIBS：試験環境の上限値 1 Sv/hまで、線量率に依存しない計測が可能。
- アブレーション微粒子の存在・形状を観察した。

8.2.2 核燃料物質による性能評価の実施体系

- ・核燃料物質等使用施設に開発機器を持ち込み、標準試料、複雑系試料（MCCI模擬試料を含む）、**照射済み燃料**を用いた試料等、様々な試料を準備して分析特性を取得する。
- ・既存分析手法（EDS等）による分析結果との比較・評価、**XRFによる測定結果との比較**により、**スクリーニング分析としての実績と信頼性を確保する。**
- ・**アブレーション粒子の簡易的な粒径を評価する**



アブレーション粒子の簡易的な粒径評価

実績と信頼性確保(検証用試料の提供と分析実績の蓄積)

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (実施内容)

【未照射核燃料物質を含有した分析試料の準備】

- ・酸化物系標準試料、金属を含む標準試料、複雑系試料未照射濃縮ウラン酸化物試料を準備し、金相観察、SEM観察・SEM-EDS分析を実施した。

【LIBS及びXRFの未照射核燃料物質による性能評価】

- ・原子力機構が開発した従来型光ファイバーLIBS装置、マイクロチップレーザーLIBS装置の性能評価試験を実施した。
 - 検量線の取得により、線形性（定量性）の確認と検出下限値の評価を実施
 - 複雑系試料においてLIBS分析結果をSEM-EDS分析結果と比較
 - 標準試料に対してXRFの検量線を取得

【使用済み燃料を使用した模擬燃料デブリによる性能評価】

- ・評価に必要な高線量率模擬燃料デブリ試料を準備した。
- ・XRF、従来型光ファイバーLIBS装置の性能評価を実施した。
 - XRFによる使用済み燃料での動作試験を実施
 - 従来型光ファイバーLIBSによる使用済み燃料での動作試験を実施

【アブレーション微粒子の存在・形状観察】

- ・ヒュームを吸引して多段フィルターで捕捉し、SEM観察、EDS分析を実施した。
 - 孔径8、0.8、0.1 μm のフィルターに保持されたU含有粒子を観測

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (未照射U含有試料の準備)

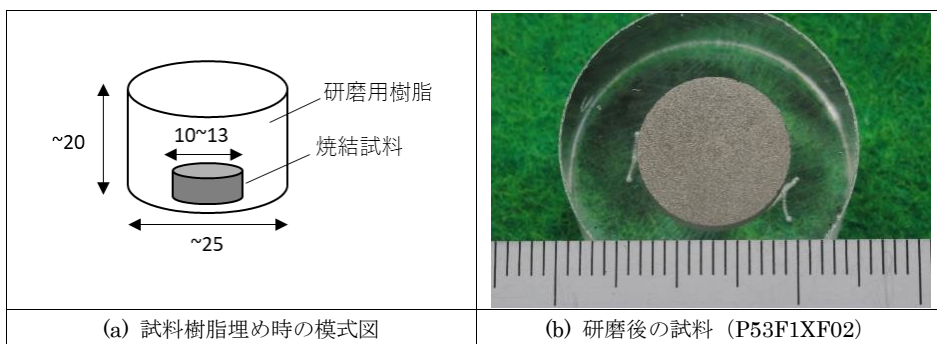
未照射核燃料物質を含有した分析試料の準備

① U含有酸化物標準試料の製作と評価

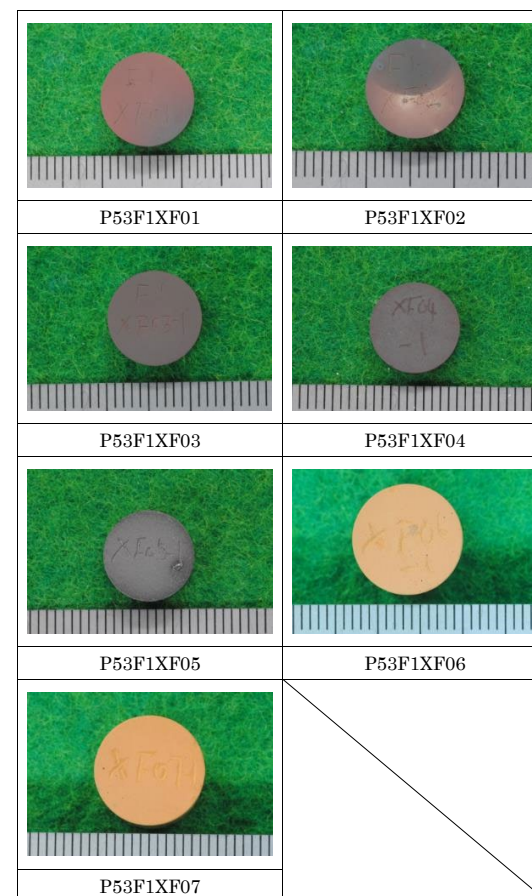
製作した酸化物系標準試料の成分 (重量%)

試料番号	UO ₂	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	コンクリート
P53F1XF01	1	49.5	49.5	0	0
P53F1XF02	5	47.5	47.5	0	0
P53F1XF03	10	45	45	0	0
P53F1XF04	50	25	25	0	0
P53F1XF05	95	0	0	5	0
P53F1XF06	1	0	0	0	99
P53F1XF07	5	0	0	0	95

Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Si ₂
16.0%	13.2%	6.2%	64.6%



樹脂埋め、研磨後の外観



焼結後の外観

別途SEM観察、EDS測定を実施
均一性を確認

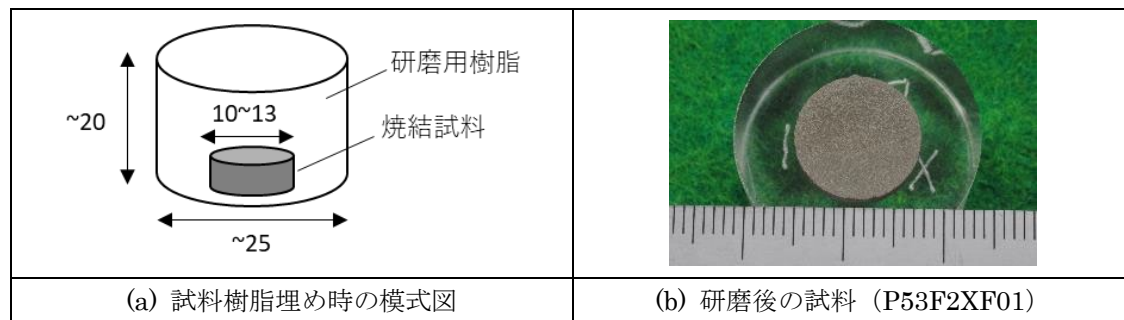
8.2.2 核燃料物質による性能評価 (U含有試料の準備)

未照射核燃料物質を含有した分析試料の準備

② 金属を含む標準試料の製作と評価

製作した金属を含む標準試料の成分 (重量%)

試料番号	UO ₂	Zr	SUS316
P53F2XF01	1	49.5	49.5
P53F2XF02	5	47.5	47.5
P53F2XF03	10	45	45



樹脂埋め、研磨後の外観



焼結後の外観

別途SEM観察、EDS測定を実施
均一性を確認

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (U含有試料の準備)

未照射核燃料物質を含有した分析試料の準備

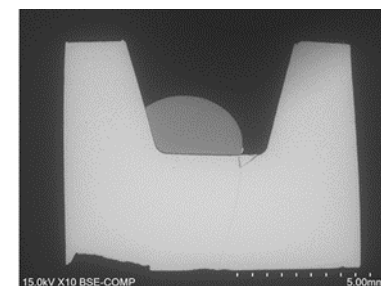
③ 複雑系試料の製作と評価

選定した複雑系試料の製作マトリックス

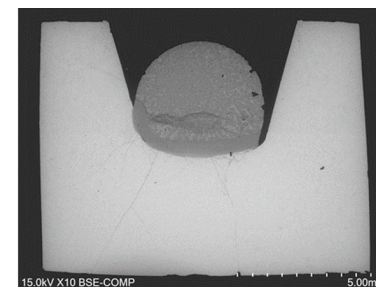
試料番号	試験体	反応対形状	温度 (°C)	時間 (min)
P53F5XF01	UO ₂ -Zr	Zr棒	1900	20
P53F5XF02	UO ₂ -SUS	SUS304板	1500	20
P53F5XF03	UO ₂ -ZrFe	Zr:Fe=1:1 (mol比)の混合金属粉末グリーンペレット	1600	20
P53F5XF04	UO ₂ -2Zr1Fe	Zr:Fe=2:1 (mol比)の混合金属粉末グリーンペレット	1600	20
P53F5XF05	UO ₂ -ZrO ₂	ZrO ₂ のグリーンペレット	2600	5



P53F5XF01



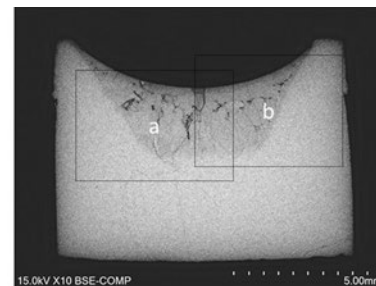
P53F5XF02



P53F5XF03



P53F5XF04



P53F5XF05

SEM/BSE観察像

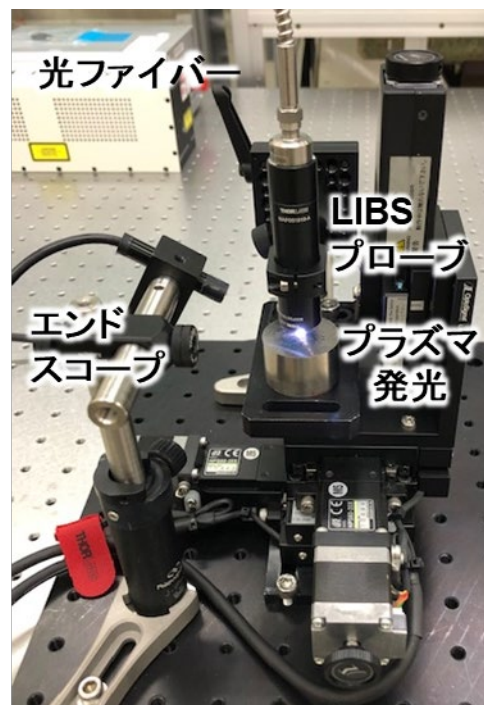
※別途EDS測定により、エリア平均組成を評価

8.2.2 核燃料物質による性能評価（LIBS装置の分析特性評価）

従来型光ファイバー-LIBS装置の性能評価

従来型ファイバー-LIBS装置での試験条件

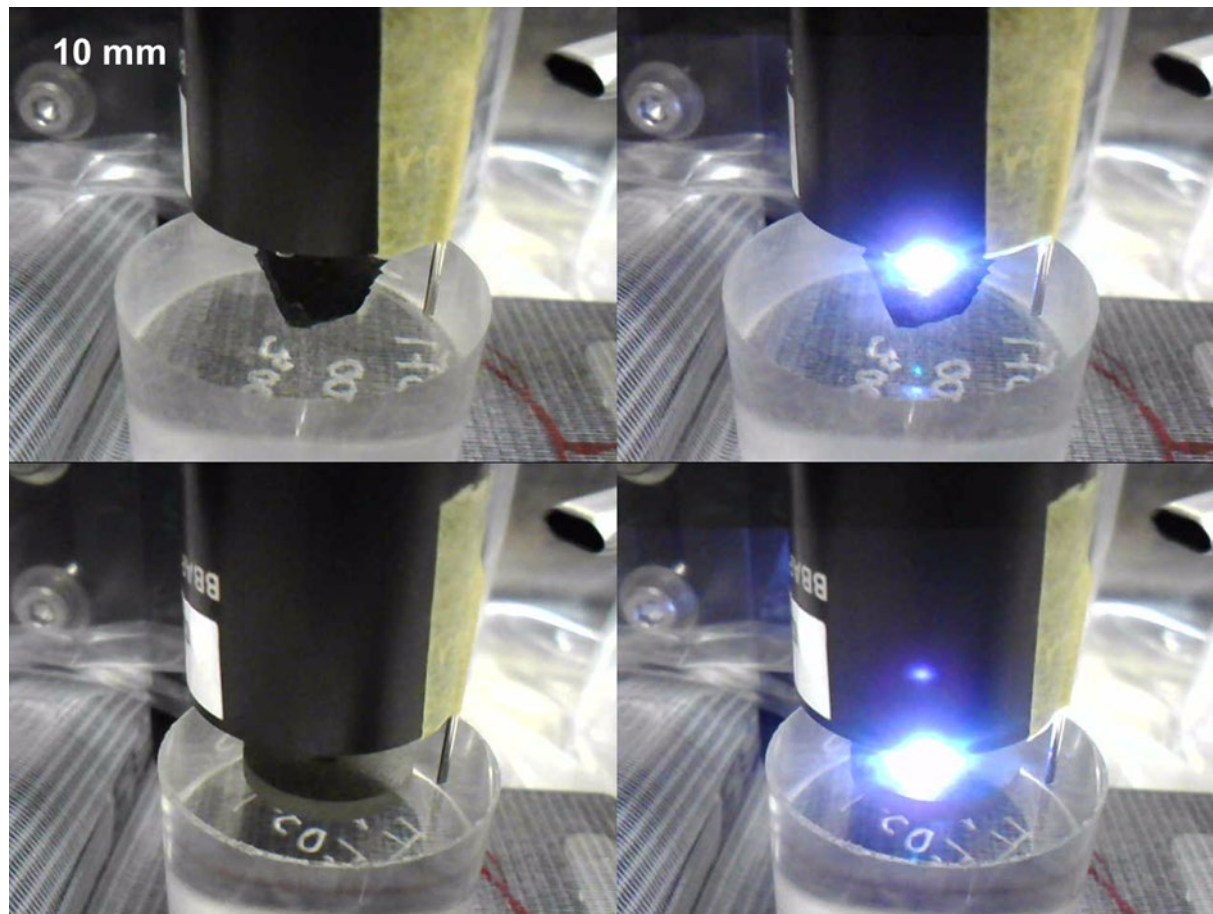
- ・ファイバー長 : 5m (コア径 : 0.8mm、開口数 : 0.12、SUS可撓被覆管)
- ・LIBSプローブ : アクロマティックペアレンズ、 $f=19\text{mm} + f=50\text{mm}$ 、0.5インチ径、無反射コート (可視-近赤外)
- ・試料台 : 電動XYZステージ+エンドスコープ (USBカメラ)
- ・照射条件 : 14.6mJ/pulse(プローブ出口)、5Hz
- ・観測条件 : 1 μs 遅延、50 μs 露光、利得 3000、100ショット-5回



8.2.2 核燃料物質による性能評価 (LIBS装置の分析特性評価)

従来型光ファイバー-LIBS装置の性能評価

レーザー照射の様子

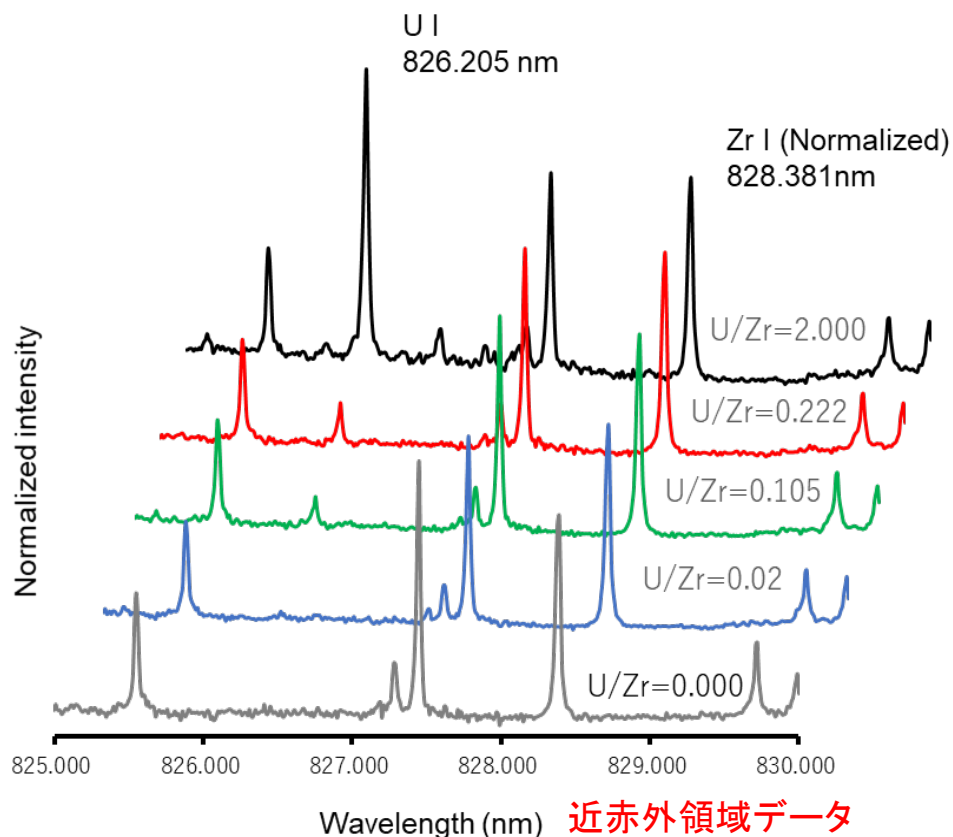


P53F1XF00
 $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$
(0% UO_2 -50% ZrO_2 -50% Fe_3O_4)

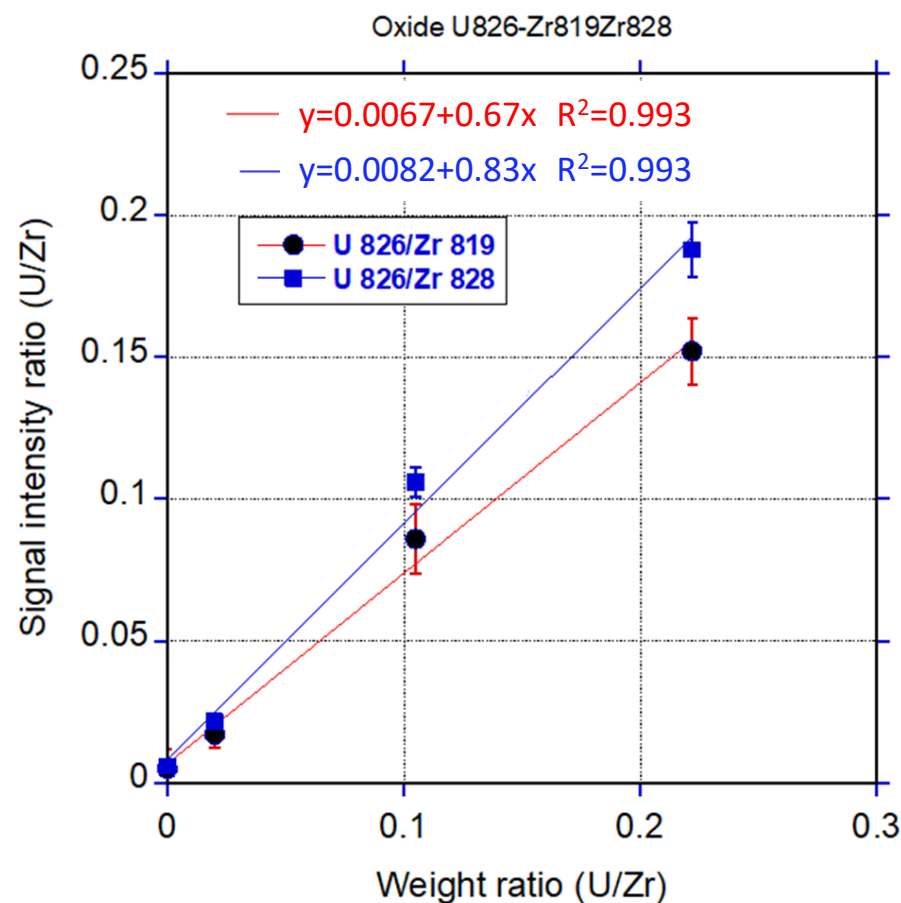
P53F2XF03
 $\text{UO}_2\text{-Zr-SUS316L}$
(10% UO_2 -45% Zr -45% SUS316L)

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (LIBS装置の分析特性評価)

従来型光ファイバー-LIBS装置の性能評価



U含有量を変えた、U, Zr 混合物の
発光スペクトル



組成比に対する検量線(低濃度領域)

- ・線形性(定量性)の確認
- ・検出下限値の評価

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (LIBS装置の分析特性評価)

従来型光ファイバーLIBS装置の性能評価 (U検出下限値評価の例)

酸化物系 (UO₂/ZrO₂)

	Wavelength (nm)		UO ₂ /ZrO ₂ 0~0.222
	U	Zr	LOD (%)
Oxide	682.692	682.878 676.241 683.289	0.72 0.72 0.79

金属系 (UO₂/Zr)

	Wavelength (nm)		UO ₂ /Zr 0.02~0.222
	U	Zr	LOD (ppm)
Metallic	860.795	683.289 682.878 676.241 838.949	110 370 19000 6900

金属系で100~1000ppm程度の検出下限を確認

酸化物系 (UO₂/Fe₃O₄)

	Wavelength (nm)		UO ₂ /Fe ₃ O ₄ 0~0.222
	U	Fe	LOD (%)
Oxide	682.692	537.149 868.862 882.422	0.47 0.49 0.28

酸化物系で0.5%程度の検出下限を確認

コンクリート (コンクリート中のFeに着目)

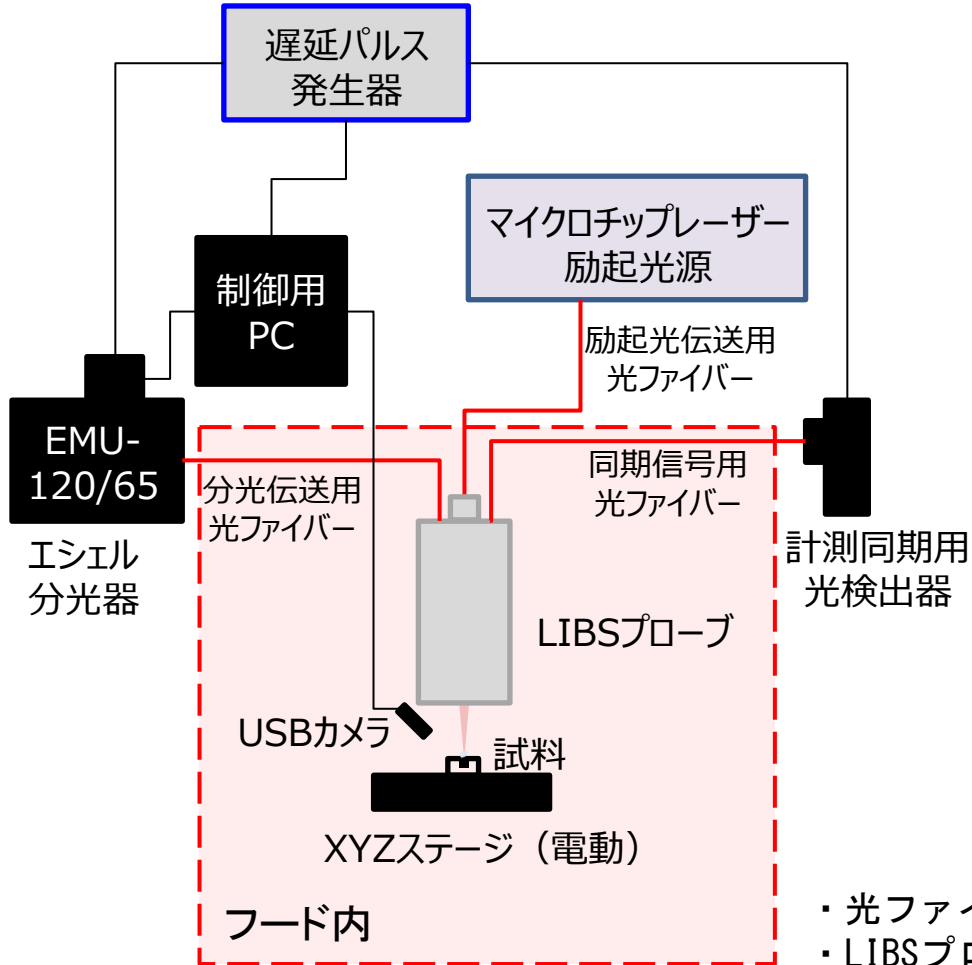
	Wavelength (nm)		LOD (ppm)
	U	Fe	
Concrete	682.692	537.149	1200
		868.862	1200
		882.422	1000
	778.415	537.149	560
		868.862	1400
		882.422	1300
860.795	537.149	5900	
	868.862	7700	
	882.422	7800	

コンクリート中で1000ppm程度の検出下限を確認

検出下限目標値：1%を十分満足することが確認された

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (LIBS装置の分析特性評価)

マイクロチップレーザーLIBS装置の性能評価試験

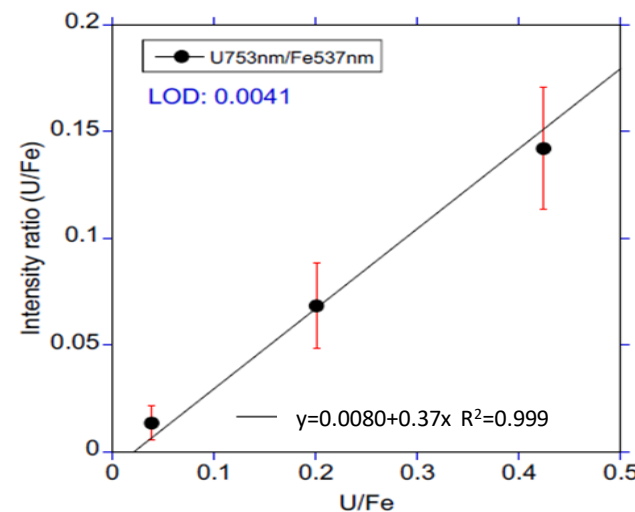
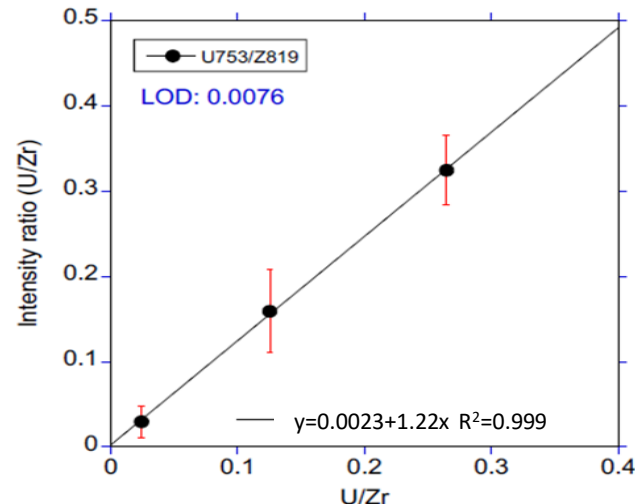
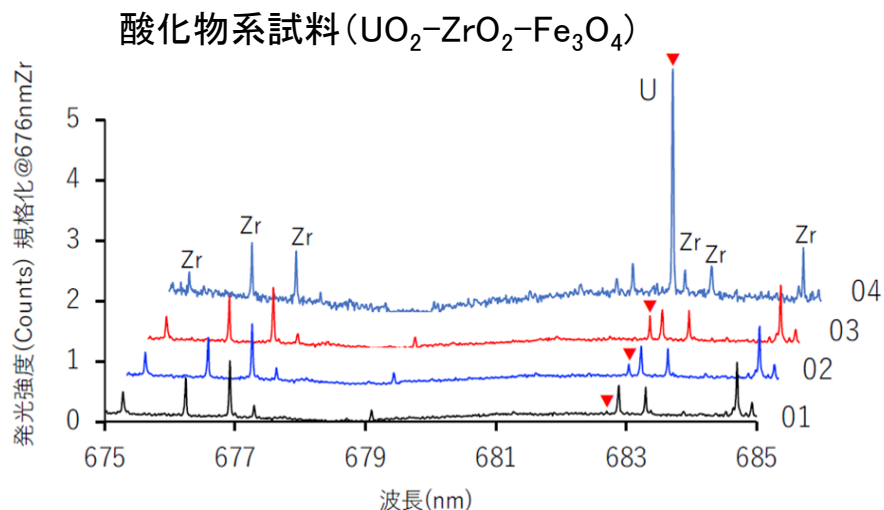


フード マイクロチップレーザーLIBS

- ・ 光ファイバー長さ : 5 m
- ・ LIBSプローブ : 単結晶マイクロチップ内蔵
- ・ 照射条件 : 1.2 mJ/pulse(プローブ出口)、5Hz、パルス幅990 ps
- ・ 観測条件 : 1 μ s遅延、50 μ s露光、測定100ショット-5回

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (LIBS装置の分析特性評価)

マイクロチップレーザーLIBSの性能評価例 (検量線の取得)



UO ₂ -ZrO ₂	Wavelength (nm)		回帰直線残差	U/Zr: 0-0.265		
	U	Zr		Slope	R ²	LOD (%)
Oxide	753.392	819.467	0.0031	1.2	0.999	0.76
		828.381	0.0042	1.3	0.999	0.99
		837.020	0.0030	0.77	0.998	1.17
		841.404	0.0020	0.71	0.999	0.84
		846.460	0.0026	0.82	0.999	0.94

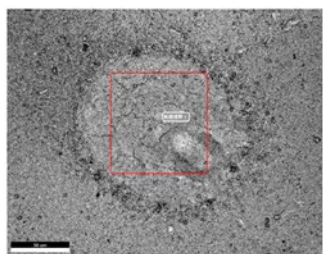
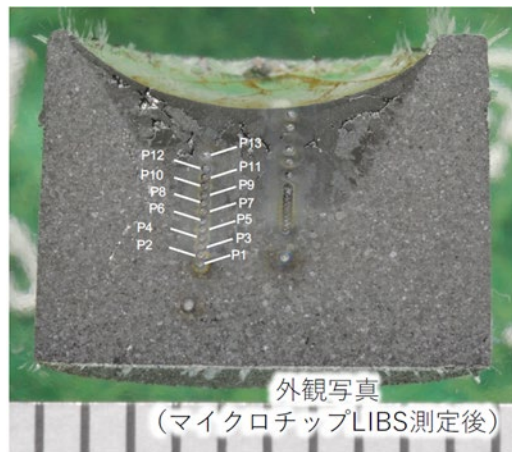
UO ₂ -Fe ₃ O ₄	Wavelength (nm)		回帰直線残差	U/Fe: 0-0.42		
	U	Fe		Slope	R ²	LOD (%)
Oxide	753.392	537.149	0.00012	0.075	0.999	0.47
		868.862	0.00046	0.33	0.999	0.41
		882.422	0.00276	0.76	0.999	1.1

光ファイバーLIBS同様、検出下限値 : 1%以下 (0.5%程度) を確認

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (LIBS装置の分析特性評価)

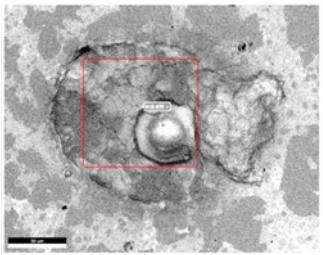
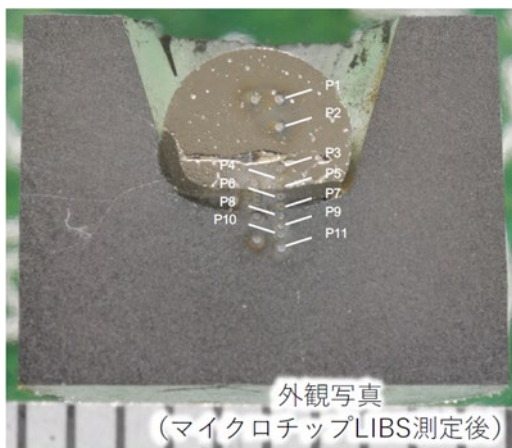
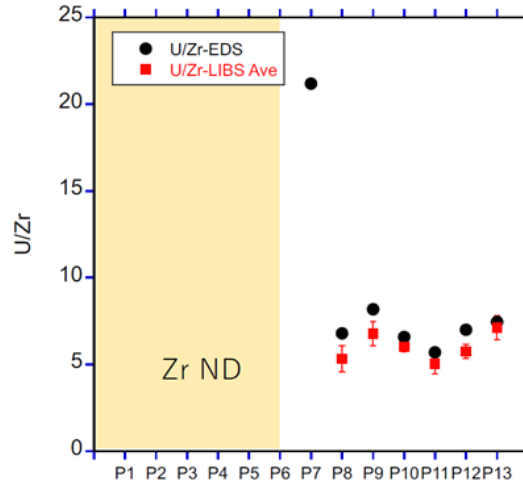
マイクロチップレーザーLIBS装置の性能評価 (SEM/EDS分析との比較)

非均一複雑系試料の分析: レーザー照射痕のSEM/EDS結果と比較



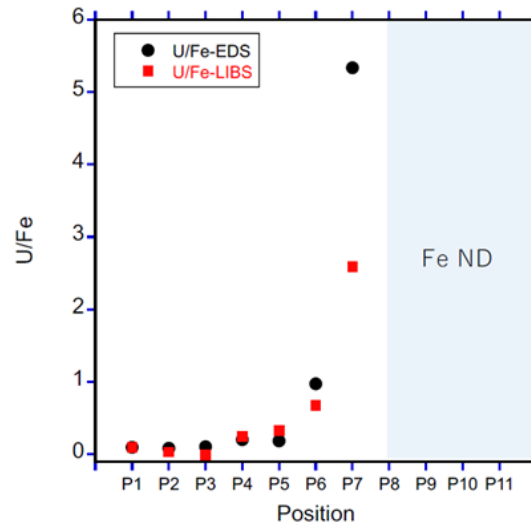
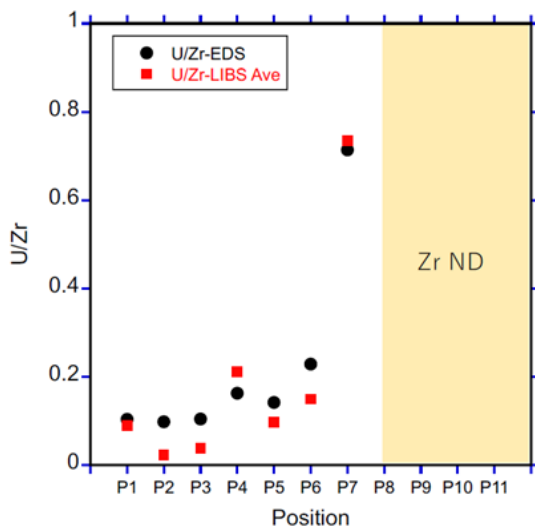
P1部: 赤枠がEDS分析範囲

UO₂ 緑つぼ
ZrO₂ のグリーンペレット
2600°C Ar



P1部: 赤枠がEDS分析範囲

UO₂ 緑つぼ
Zr, Feグリーンペレット
1600°C Ar

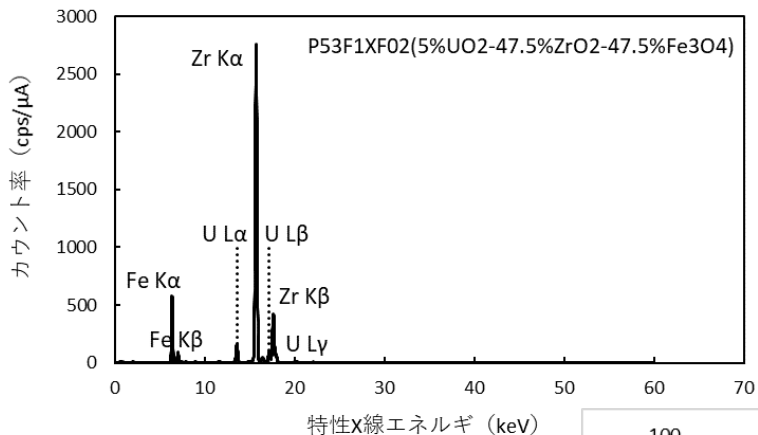


EDSの結果と良く一致: 定性性に加え、**定量分析評価が可能であることが示された**

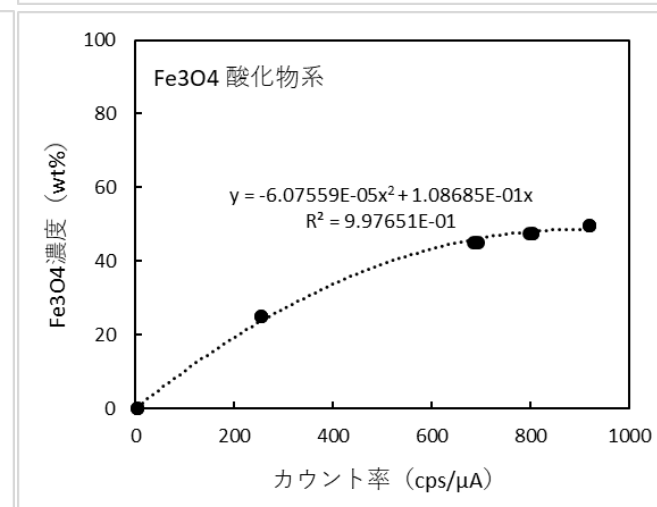
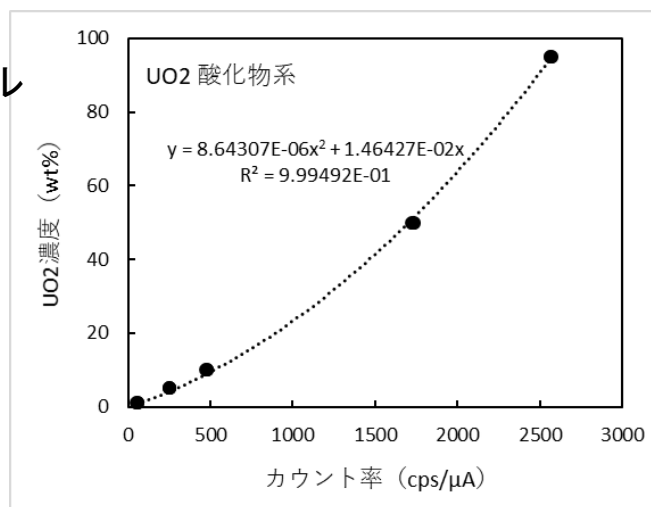
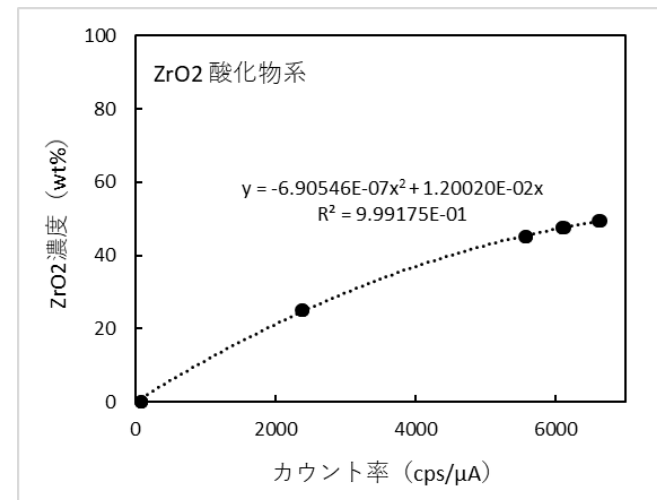
8.2.2 核燃料物質による性能評価（携帯型XRFの分析特性評価）

標準酸化物試料によるXRFの分析性能確認（検量線の取得）

リガク社製Niton携帯型成分分析計XL3t-950S



取得した検量線を基に
未知の含有量を評価



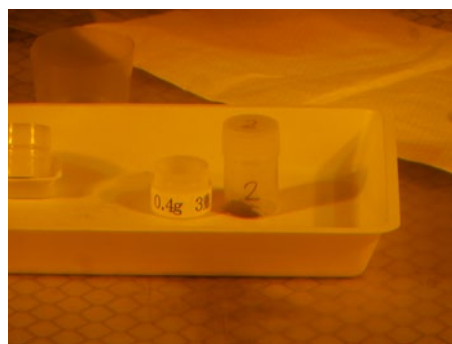
検量線の線形性が乏しいため、既知の測定値から内挿(外挿)するには留意が必要

8.2.2 核燃料物質による性能評価（使用済み燃料試料の準備）

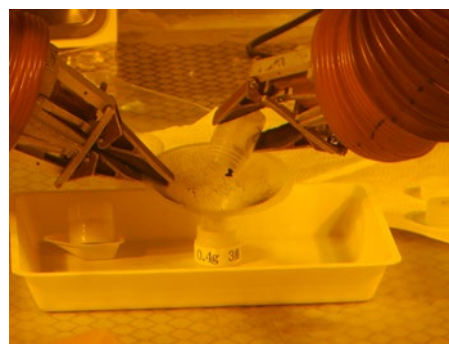
XRFによる高線量率環境での動作試験

準備した使用済み燃料試料（粉末）の組成、線量率

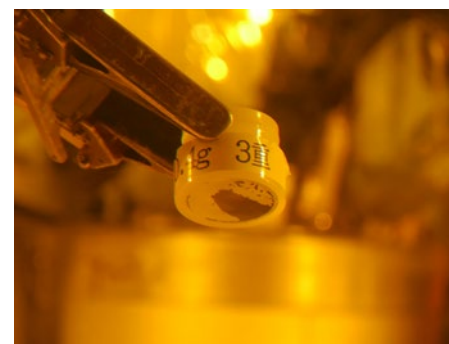
試料番号	目標線量率 (Sv/h)	線量率測定値 (Sv/h)	重量(g)/重量(%)			
			UO ₂	ZrO ₂	Fe ₃ O ₄	合計
P53F3XF01	0.1	0.2	0.40/100	0.00/0.0	0.00/0.0	0.40
P53F3XF02	1	0.9	4.00/100	0.00/0.0	0.00/0.0	4.00
P53F3XF03	0.1	0.2	0.40/50	0.20/25	0.20/25	0.80
P53F3XF04	1	0.7	4.00/50	2.00/25	2.00/25	8.00
P53F3XF05	0.05	0.05	0.065/50	0.033/25	0.033/25	0.13
P53F3XF06	0.02	0.0148	0.03/1.0	1.49/49.5	1.49/49.5	3.00



XRF用容器と秤量容器



XRF用容器への投入

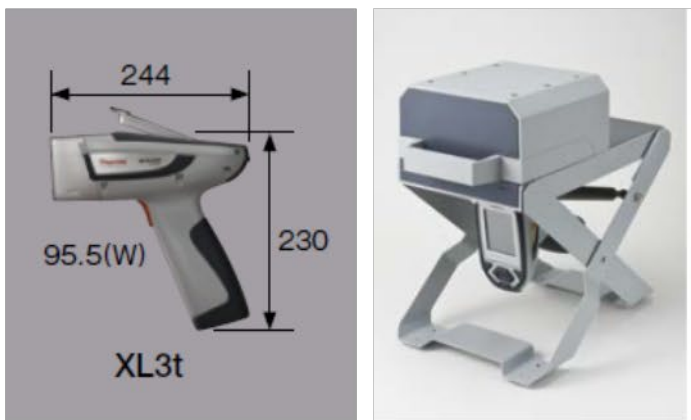


XRF用容器測定面
(プロレンフィルム3重)

8.2.2 核燃料物質による性能評価（使用済み燃料試料による評価）

XRFによる高線量率環境での動作試験

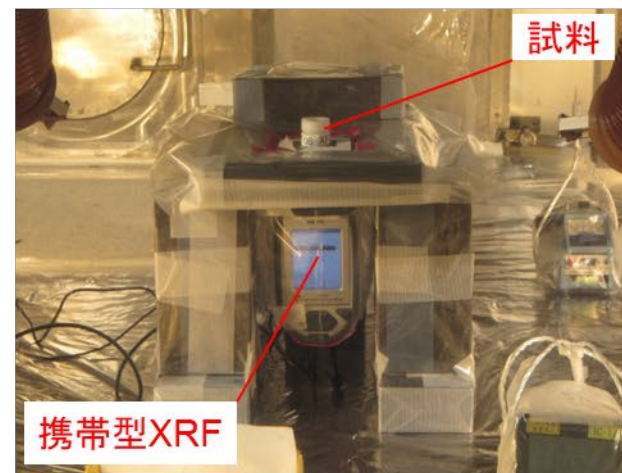
- ・線量率の異なる照射済み燃料試料を準備。
- ・遠隔操作するための事前試験を実施し、ホットセル内に機器を設置。
- ・高線量率環境におけるXRFによる測定を実施。



携帯型XRF装置の外観
(左:装置本体、右:測定スタンド)



ホットセル内概観



試料と携帯型XRFの拡大

8.2.2 核燃料物質による性能評価（使用済み燃料試料による評価）

XRFによる高線量率環境での動作試験

準備した使用済み燃料試料の成分

試料番号	目標線量率 (Sv/h)	線量率測定値 (Sv/h)	重量(g)/重量(%)			
			UO ₂	ZrO ₂	Fe ₃ O ₄	合計
P53F3XF01	0.1	0.2	0.40/100	0.00/0.0	0.00/0.0	0.40
P53F3XF02	1	0.9	4.00/100	0.00/0.0	0.00/0.0	4.00
P53F3XF03	0.1	0.2	0.40/50	0.20/25	0.20/25	0.80
P53F3XF04	1	0.7	4.00/50	2.00/25	2.00/25	8.00
P53F3XF05	0.05	0.05	0.065/50	0.033/25	0.033/25	0.13
P53F3XF06	0.02	0.0148	0.03/1.0	1.49/49.5	1.49/49.5	3.00

測定不可

測定可

約14.8 mSv/hの試料(使用済み燃料30mg)のみ作動

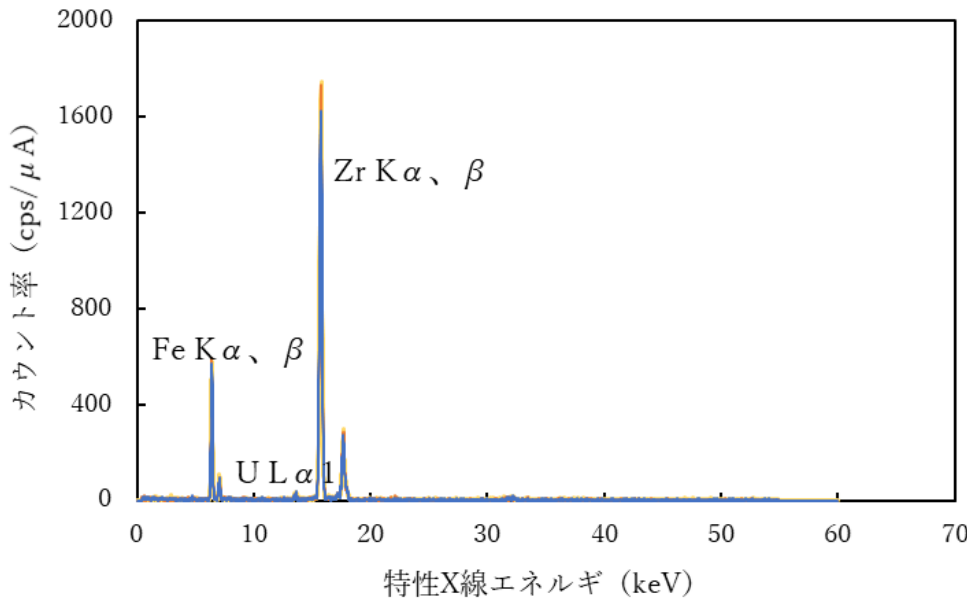
- 装置が故障するわけではなく、
 - 測定モードに入らない
 - エネルギースペクトルのシフト
 - 測定値が定まらない
- 等の現象が発生

- 燃料デブリの線量率が15mSv/hを超える場合、切断などの加工が必要
- エネルギーシフトの発生から、同定技術が不可欠。
スペクトル形状に熟知する必要あり

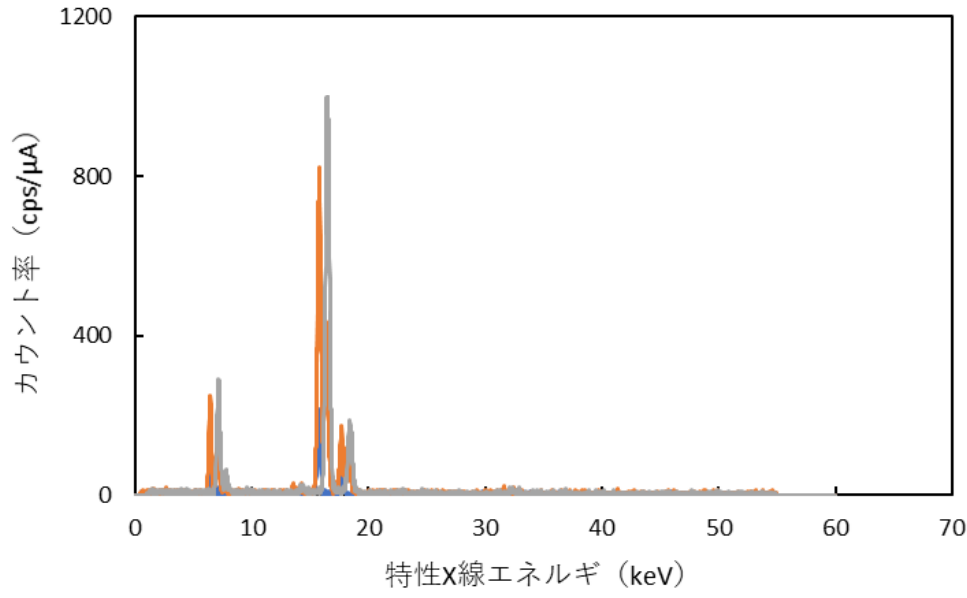
8.2.2 核燃料物質による性能評価 (使用済み燃料試料による評価)

XRFによる高線量率環境での動作試験

UO₂, ZrO₂, Fe₃O₄ = 1%, 49.5%, 49.5% (総重量: 3.0g) 線量率: 14.8mSv/h



正常なX線スペクトル例



エネルギーシフトが発生したX線スペクトル例 (重ね表示)

X線エネルギー値のみでの物質同定不可
スペクトル形状に熟知する必要あり

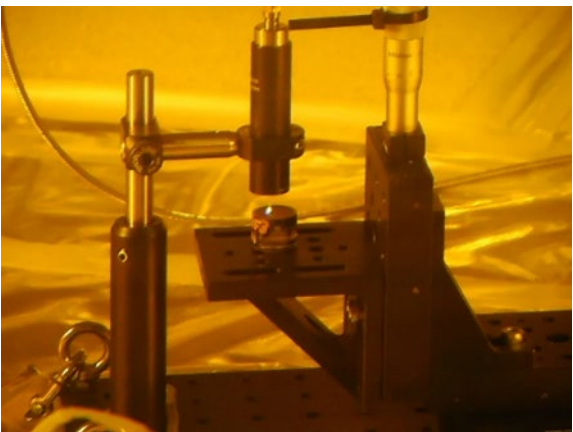
携帯型XRFでは使用済み燃料 30mg相当以上の試料では分析不能である可能性が示唆された

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (使用済み燃料試料による評価)

LIBSによる高線量率環境での分光試験



ホットセルに持ち込んだLIBS計測系
(マニピュレーターによるマイクロメータ操作)



ホットセル内セットアップ、レーザー照射の様子



ホットセル前に持ち込んだ可搬型LIBS装置
(20mの光ファイバーをセル内に導入)



ホットセルでの試験

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (使用済み燃料試料による評価)

LIBSによる高線量率環境での分光試験

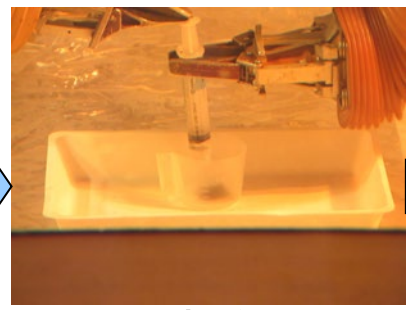
使用済み燃料を用いた模擬燃料デブリ試料 (LIBS試験用個体試料) の準備

Fe_3O_4 及び ZrO_2 を混合した使用済み燃料 (UO_2) 粉末をエポキシ樹脂で固めたもの。

- 粉末混合比: UO_2 : 37.6 wt%、 ZrO_2 : 31.2 wt%、 Fe_3O_4 : 31.3 wt%
- エポキシ樹脂と使用済み燃料混合試料の混合比は体積比でほぼ1:1



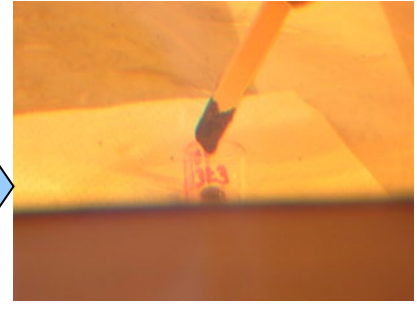
秤量



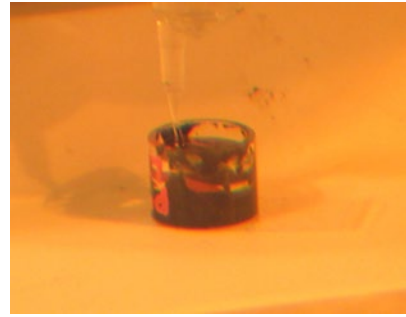
樹脂注入



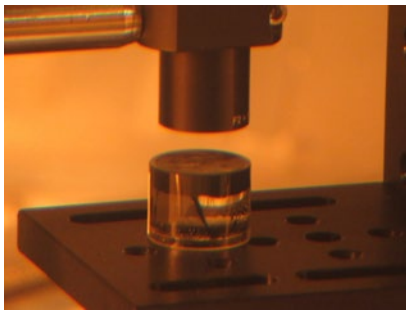
攪拌



成型



完成



LIBS試験

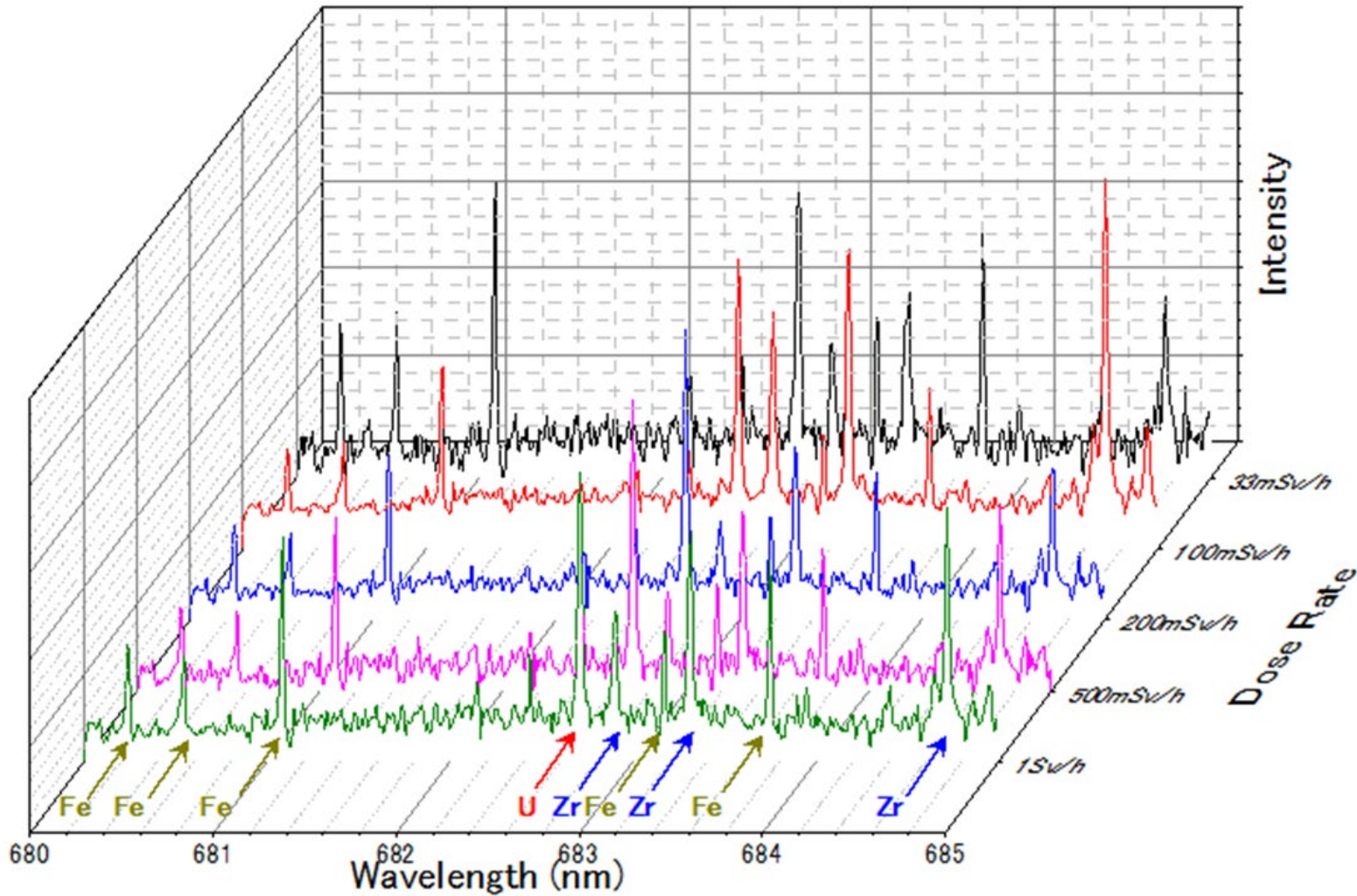
LIBS試験用固体試料の線量率: 33mSv/h

レーザー照射位置での線量率 (測定環境の線量率) は、別途準備した使用済み燃料を試験環境に静置することで調整。

線量率の上限は線量計の計測上限である1Sv/hとした。

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (使用済み燃料試料による評価)

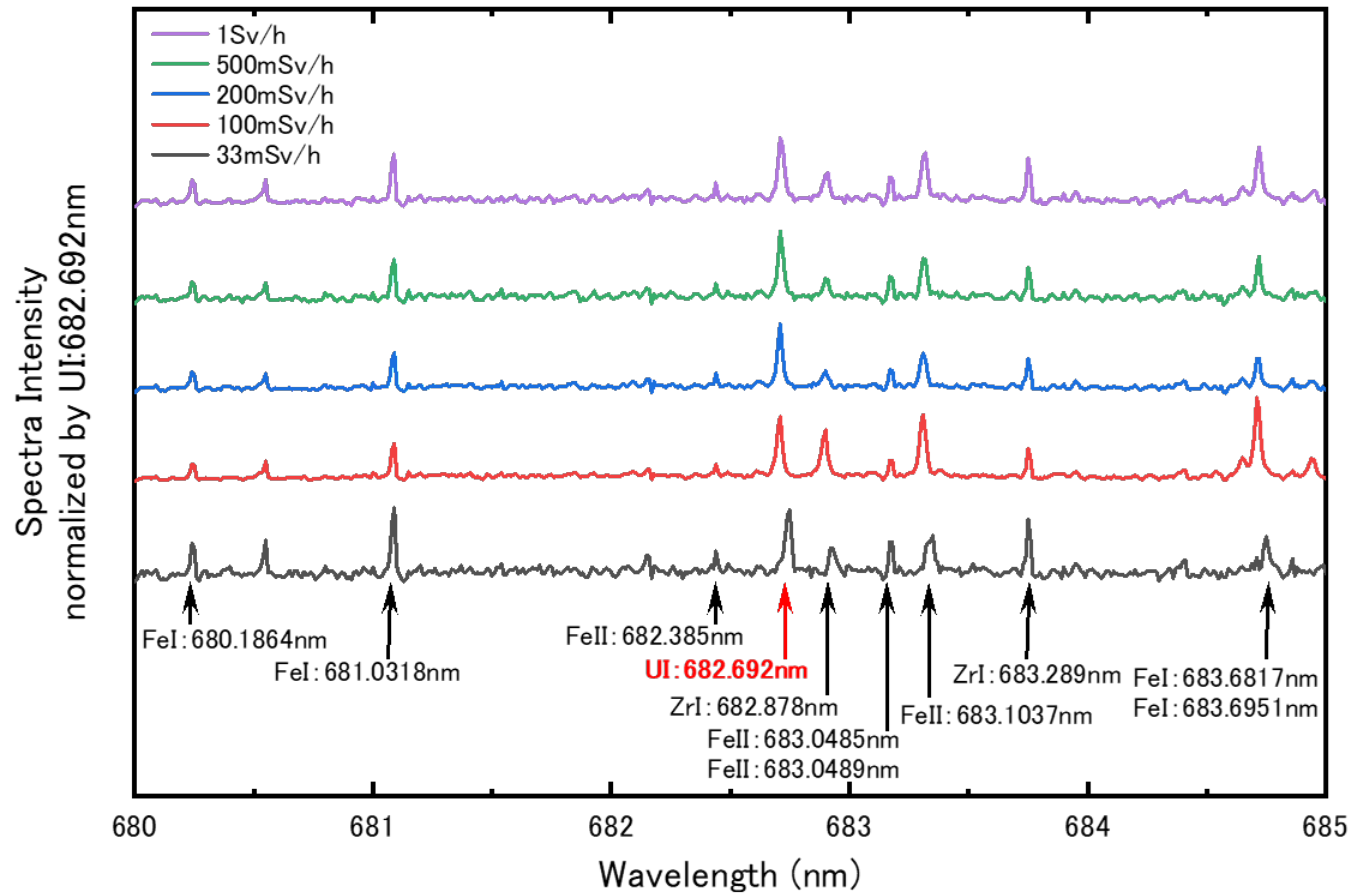
LIBSによる高線量率環境での分光試験



線量率が変化しても取得されるスペクトルに影響が及ばない

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (使用済み燃料試料による評価)

LIBSによる高線量率環境での分光試験



分析評価値の比較

	LIBSでの計測	実際の混合比
U/Zr	1.25	1.43
U/Fe	2.28	2.29

計測値は、線量率に依存することなく混合比と一致



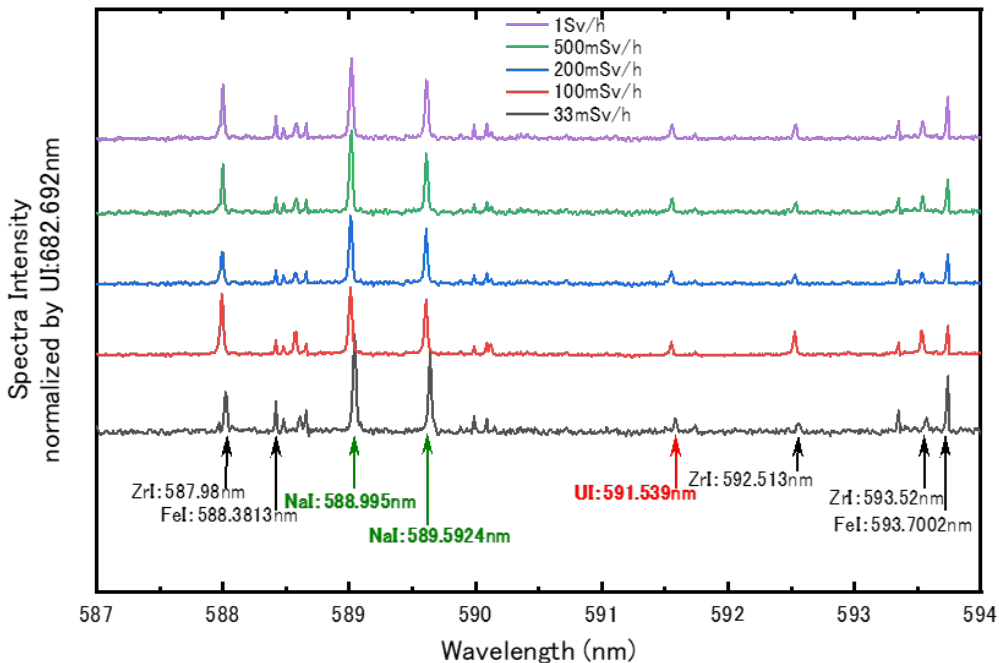
使用済み燃料における高線量率下での定量性維持

典型的なU、Fe、Zrスペクトル (UI:682.692nmで規格化)

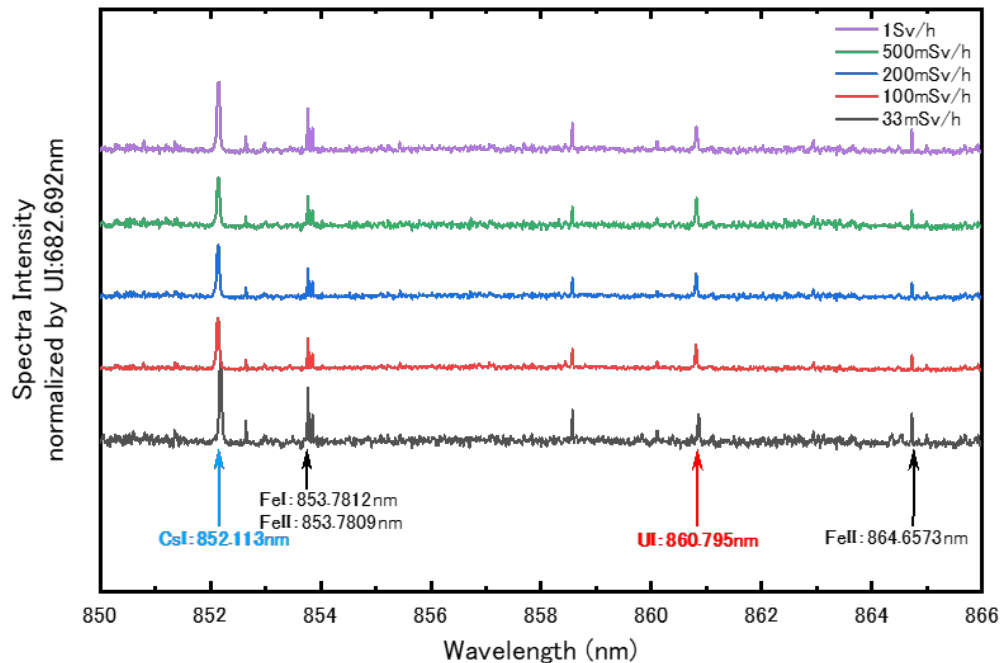
線量率が変化しても取得されるスペクトルに影響が及ばない (定量性維持)

8.2.2 核燃料物質による性能評価 (使用済み燃料試料による評価)

LIBSによる高線量率環境での分光試験



典型的なU、Fe、Zrスペクトルに
Naが観測されている例
(UI:682.692nmで規格化)



典型的なU、Feスペクトルに
Csが観測されている例
(UI:682.692nmで規格化)

Fe、Zr、Na、U、Cs、Rb の存在が同定された
他に、Mo、Ce、Gdの可能性が示唆されるスペクトルが存在

どの元素も線量率が変化しても取得される**スペクトルに影響が及ばない**

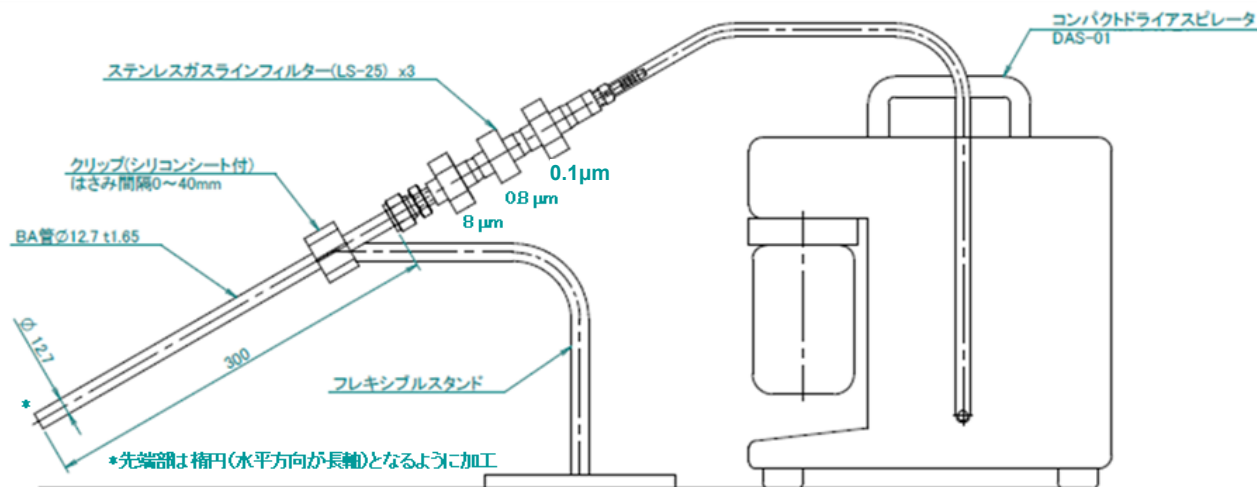
8.2.2 核燃料物質による性能評価（微粒子の観測）

アブレーション粒子補足試験

酸化物標準試料（U含有量：50%、95%）を利用



レーザー照射試験時の様子

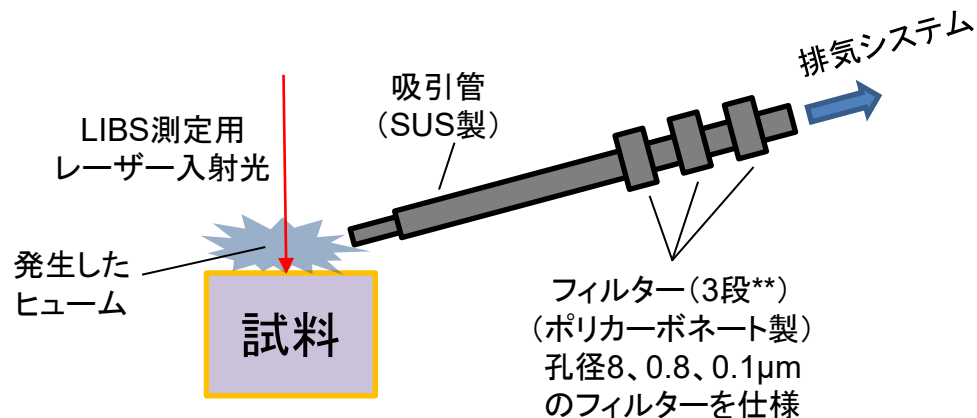


レーザー5,000回照射時に、アスピレーターで吸引し、孔径8 μm、0.8 μm、0.1 μmのポリカーボネート製メンブレンフィルターで微粒子を捕集。

それぞれのフィルターにおいて、SEM/EDSを活用し、8 μm以上、8 μm～0.8 μm、0.8 μm～0.1 μm のU粒子の存在量を確認。

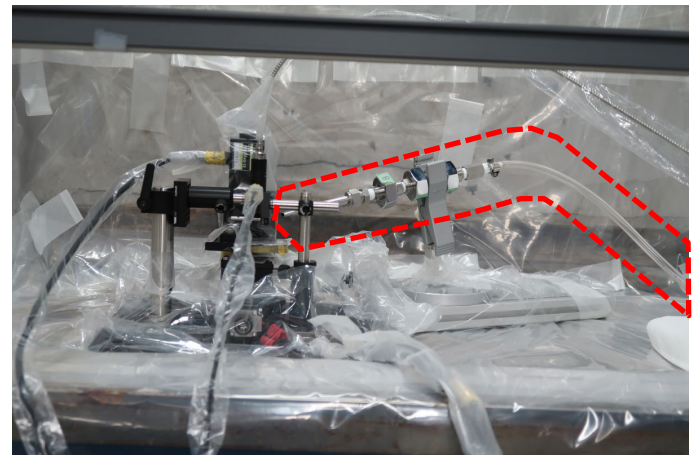
8.2.2 核燃料物質による性能評価 (微粒子の観測)

アブレーション粒子の観察

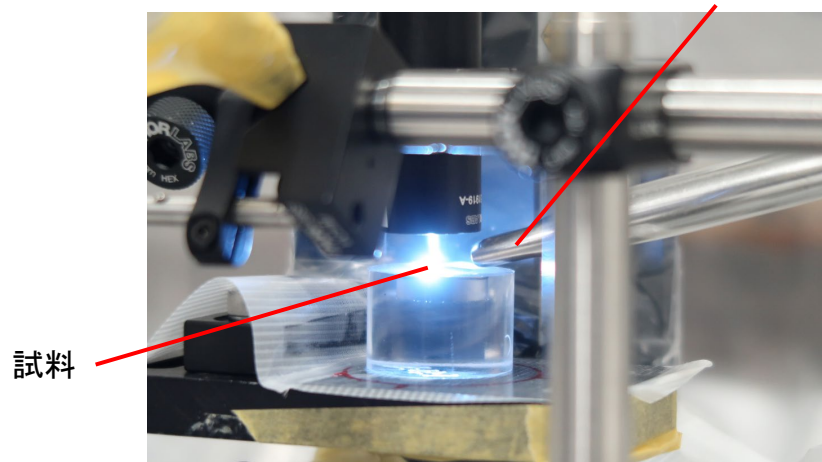


アブレーション粒子回収装置の概念図

試料番号	レーザー照射条件		
	累計回数 (回)	周波数 (Hz)	累計照射時間 (s)
P53F1XF04 (U-Zr-Fe酸化物)	5000	5	1000
P53F1XF05 (U-Gd酸化物)	5000	5	1000



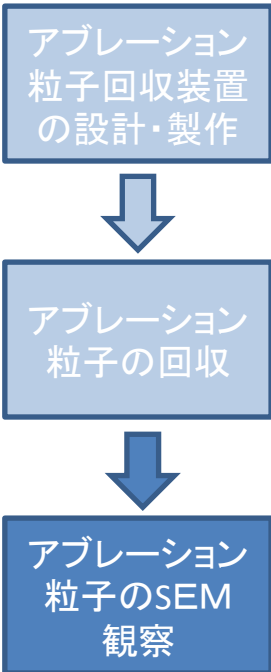
ドラフト内に設置した装置部分
吸引管(SUS製)



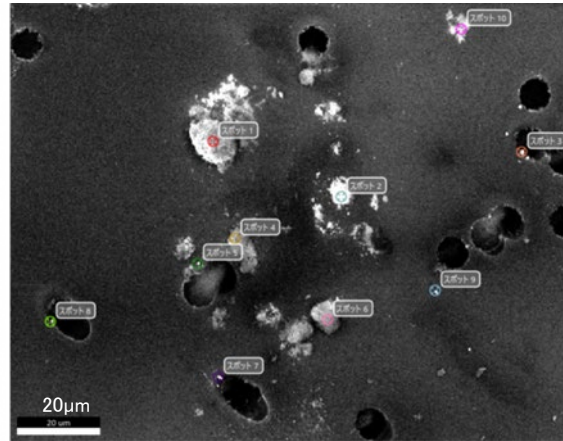
アブレーション粒子の回収試験の様子(試料部)

8.2.2 核燃料物質による性能評価（微粒子の観測）

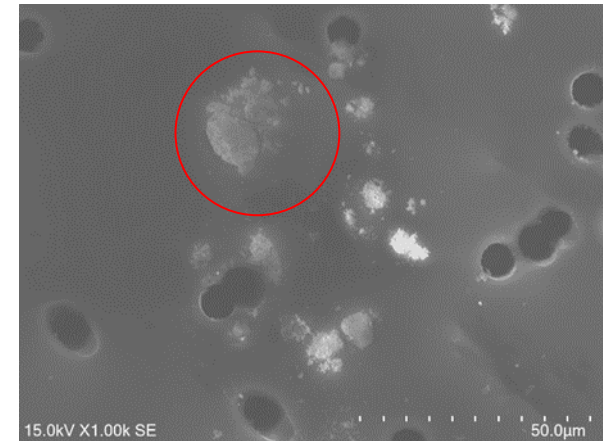
アブレーション粒子の観察 簡易的な形状評価（SEM像） **8 μ mフィルター**



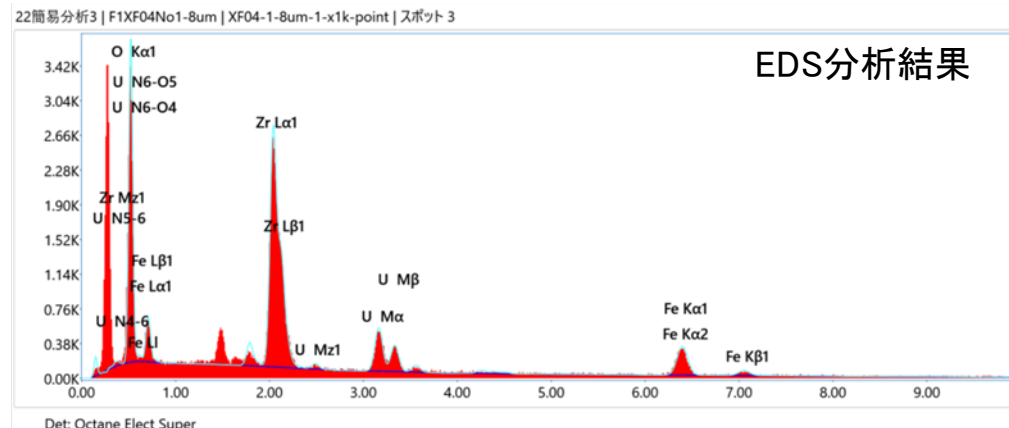
二次電子像



後方散乱電子像



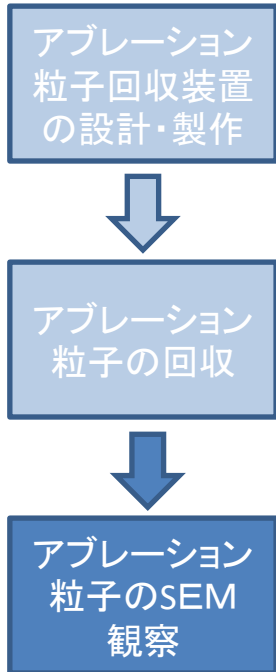
10 μ m 程度の塊状粒子



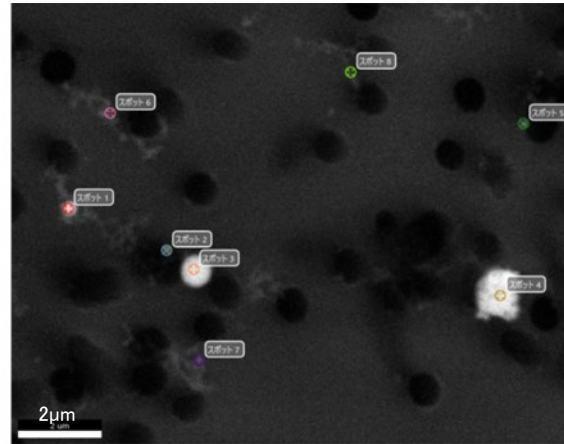
10 μ m 程度の塊状粒子が観察された。EDS分析でもUであることが確認できる。

8.2.2 核燃料物質による性能評価（微粒子の観測）

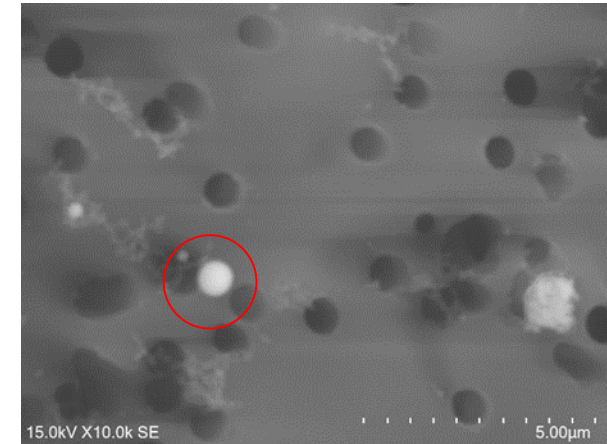
アブレーション粒子の観察 簡易的な形状評価（SEM像） **0.8 μ mフィルター**



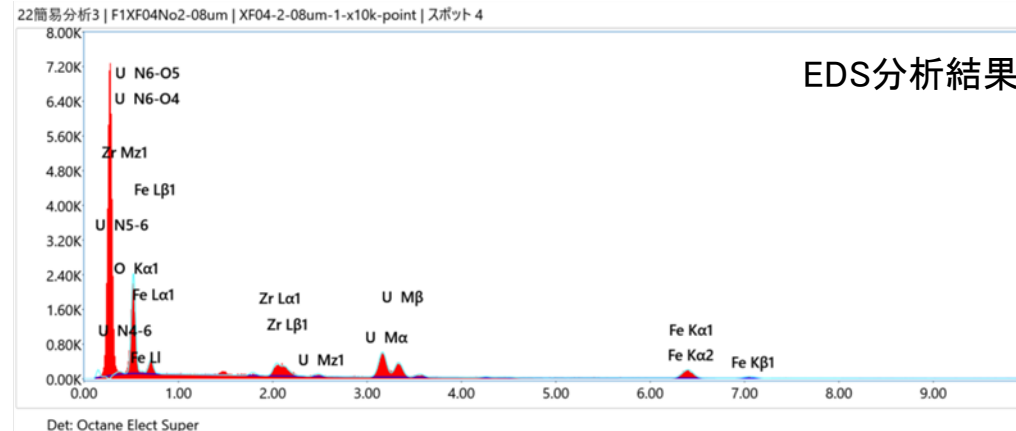
二次電子像



後方散乱電子像



1 μ m > 程度の微粒子



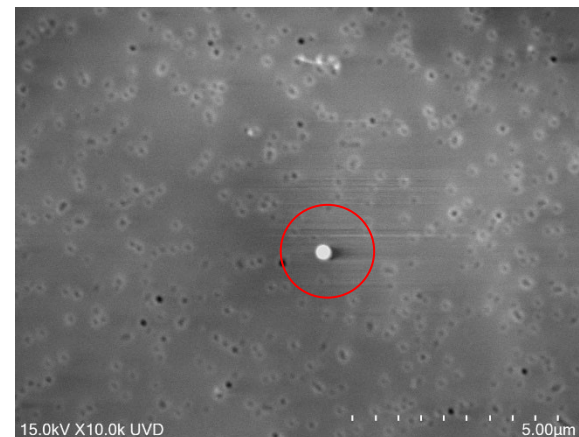
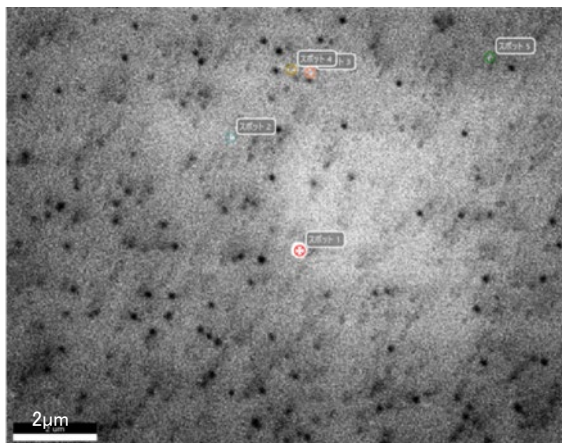
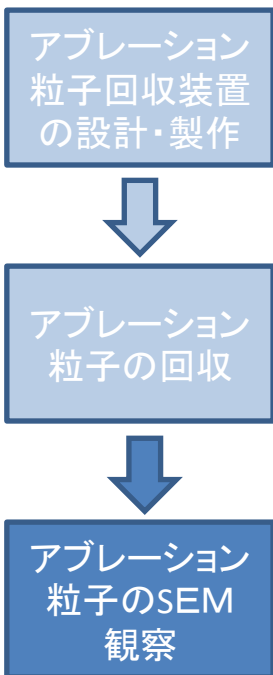
1 μ m程度の球状U含有粒子が観察された。EDS分析でもUであることが確認できる。

8.2.2 核燃料物質による性能評価（微粒子の観測）

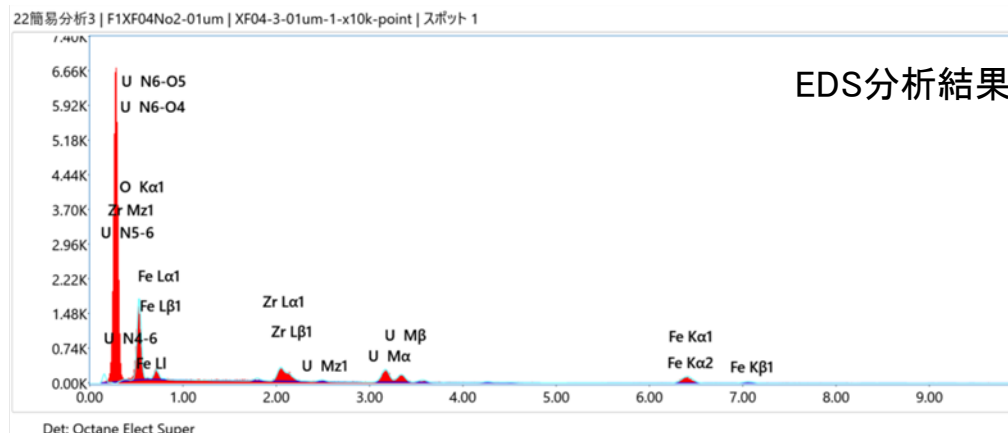
アブレーション粒子の観察 簡易的な形状評価（SEM像） **0.1 μ mフィルター**

二次電子像

後方散乱電子像



0.3 μ m程度の微粒子



ほとんどアブレーション粒子は観察されないが、ごく稀に球状U含有粒子（1 μ m未満）が観察された。EDS分析では信号強度が微弱ではあるがUが有意に検出された

アブレーション微粒子除去に関する補足情報

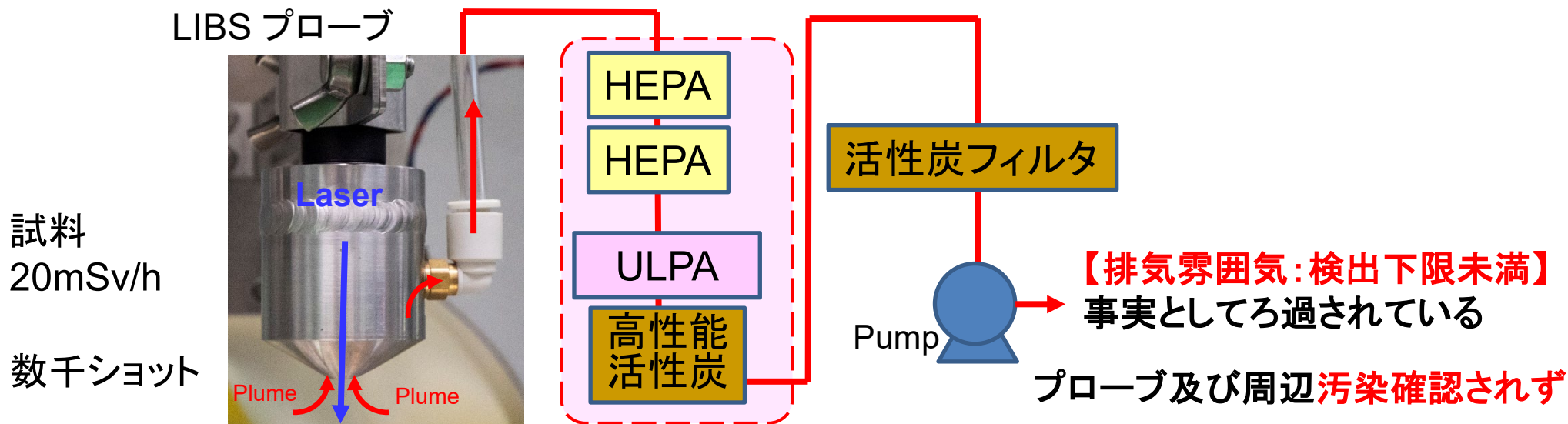
未照射ウランを試料とした試験実績

累積レーザー照射回数：10,000回を超える。

使用した光ファイバーLIBSプローブ、マイクロチップレーザーLIBSプローブ及び試料ステージは、試験後に汚染（α汚染）が確認されておらず、持ち出し可能となっている。

外科手術用サージカルスモークフィルターユニットの活用による1F現場での捕捉実績

HEPA : 0.3 μ m	捕集効率 99.97%	高性能活性炭
ULUPA : 0.1 μ m	捕集効率 99.9995%	
サージカルスモーク除去用（医療用レーザーメス・電気メス用）		



8.2 簡易（その場）分析技術の開発

8.2.1 分析手法の確立

8.2.2 核燃料物質による性能評価

8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

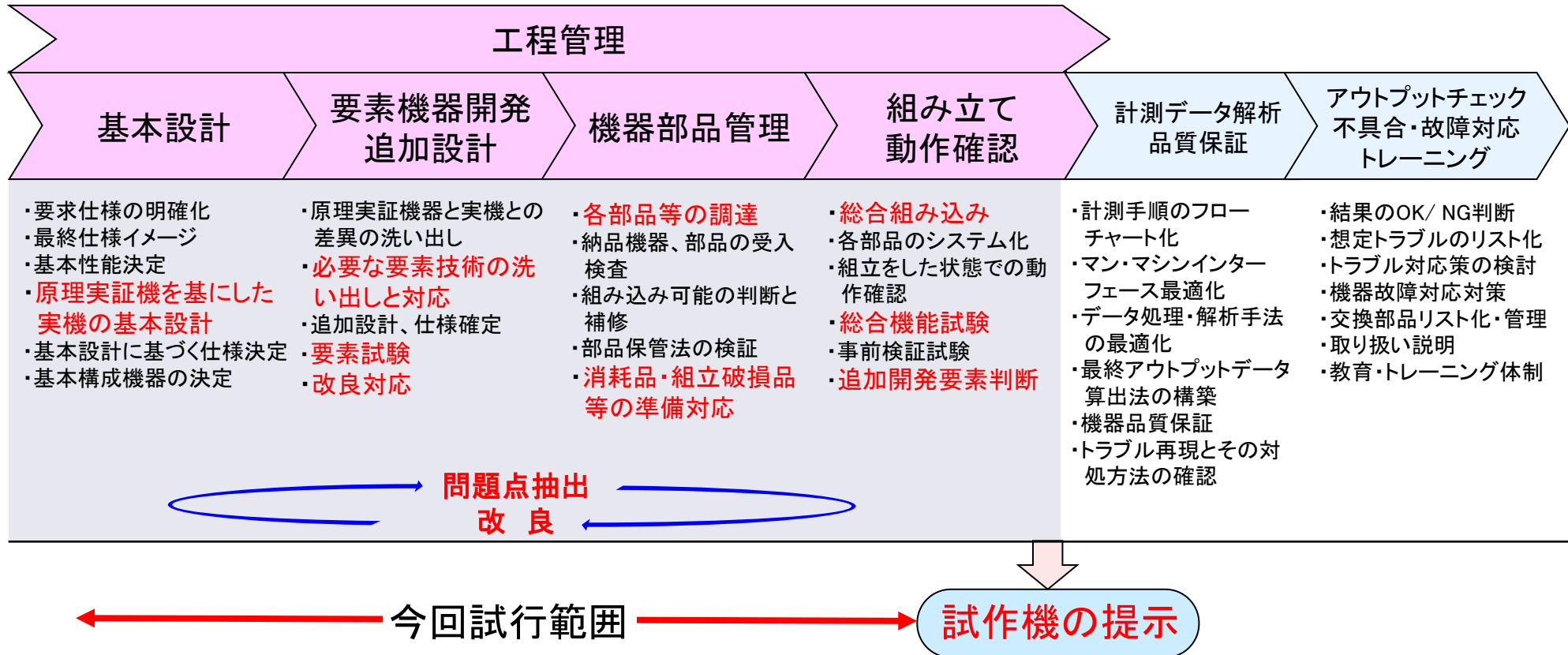
技術開発の内容と成果

- 機器製作に要する代表的な工程を試行した。
- 基本設計・要素機器開発では、特にLIBSプローブでの集光光学系や隔壁貫通回転型光ファイバーコネクタ等の検討に重点を置いた。
- 実機開発では、可搬型システムを意識し、システムを構築するラックの小型軽量化を図り、「可搬型LIBS装置」を試作機として完成させた

8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発の範囲

- 基礎基盤技術で自作してきた分析装置について、動作可能な**システムの供給に必要な手順を一部試行し、試作機を提示**するとともに、機器供給における課題を整理する（品質保証、機器故障・不具合対応、教育などは省略）。

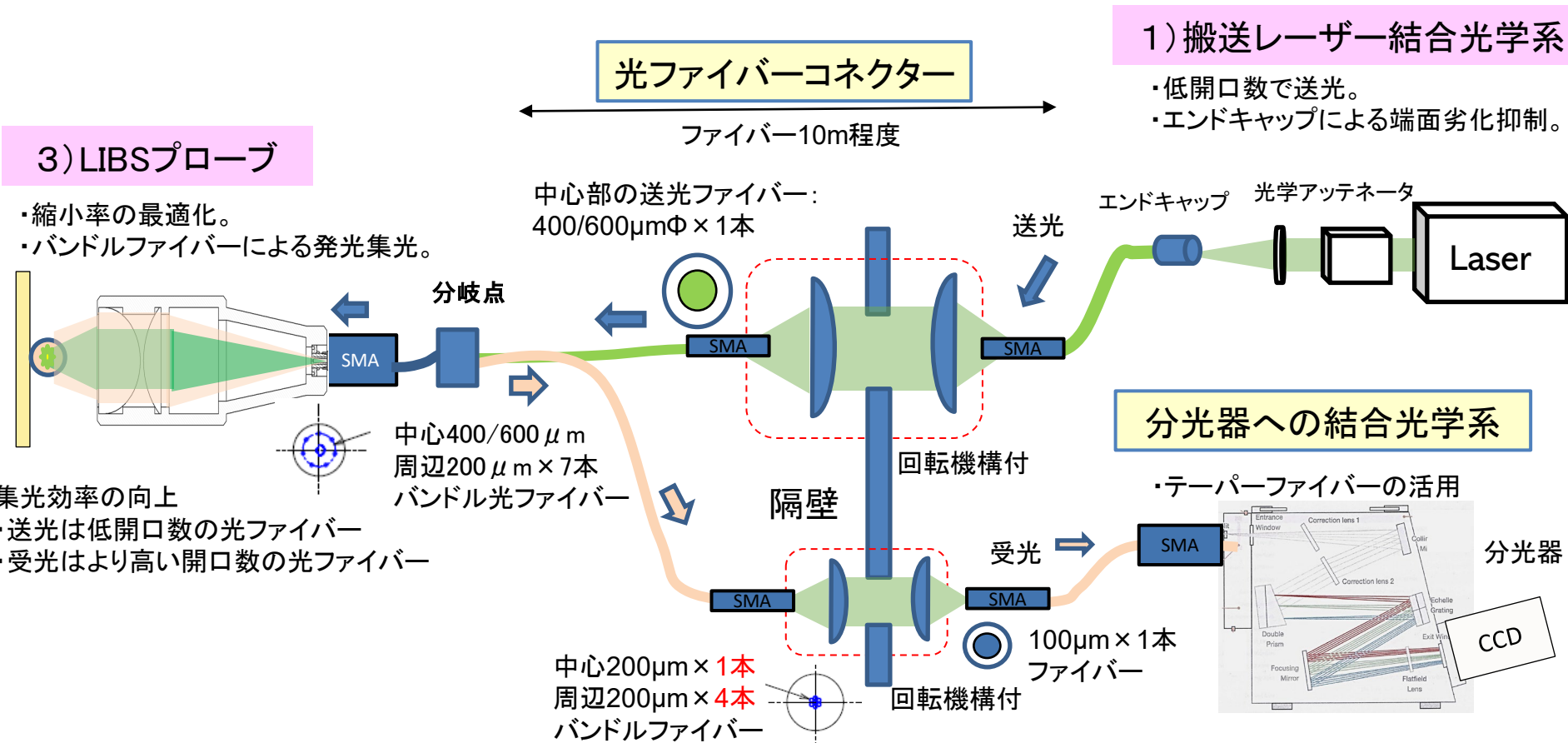
本技術開発での実施範囲



手作りの実験装置から発注可能な機器へ

8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発の概要

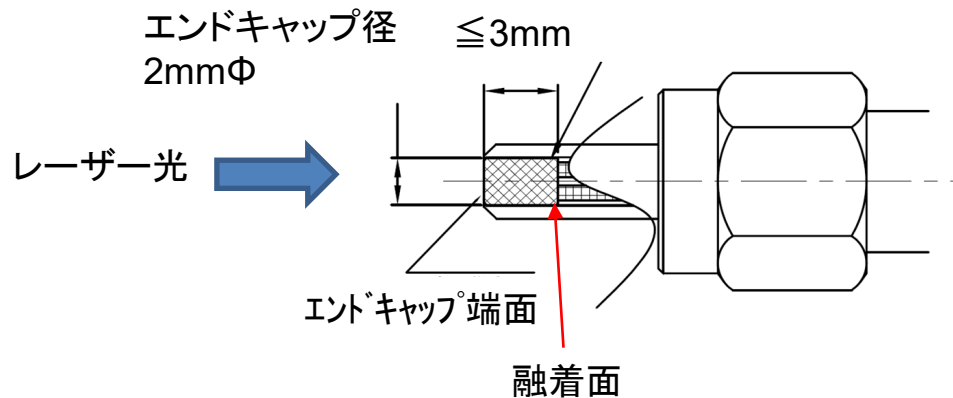
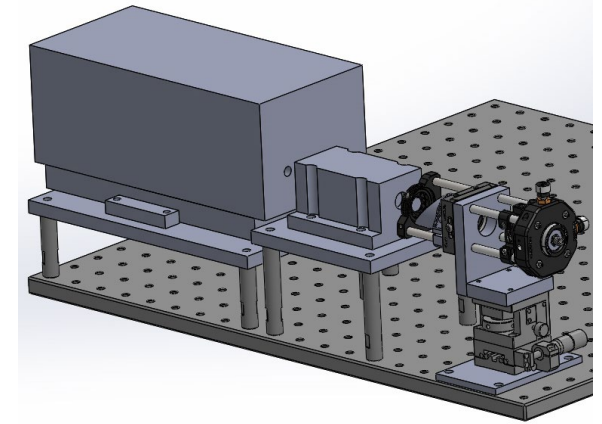
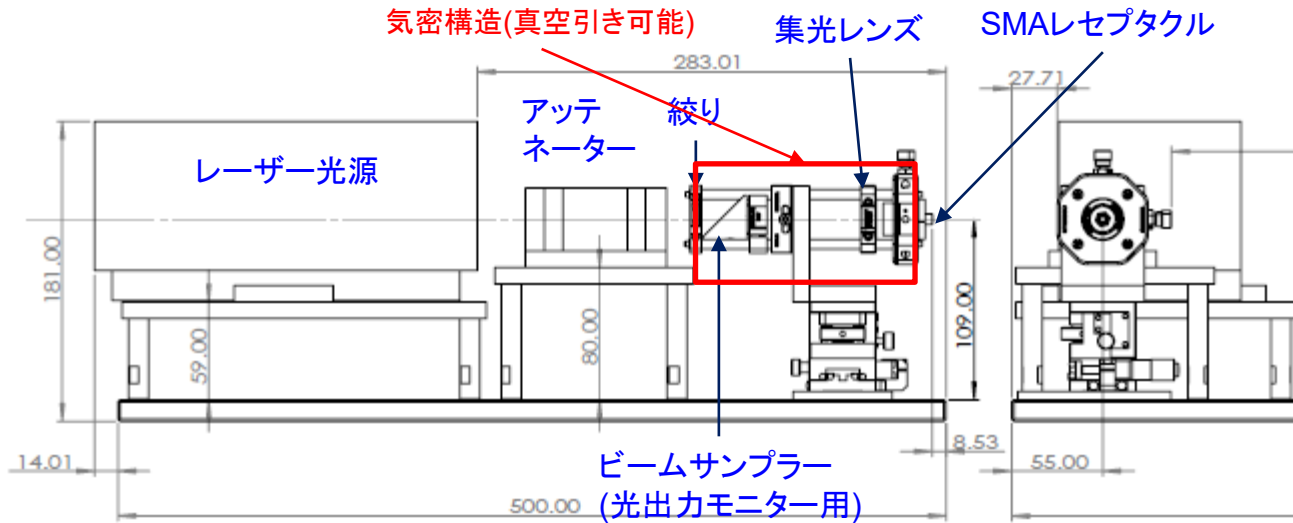
基本設計 光学系全体構想



開口数: 入射許容角に相当する指標

8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発 (各要素の開発)

要素機器開発 1) 搬送レーザー結合光学系

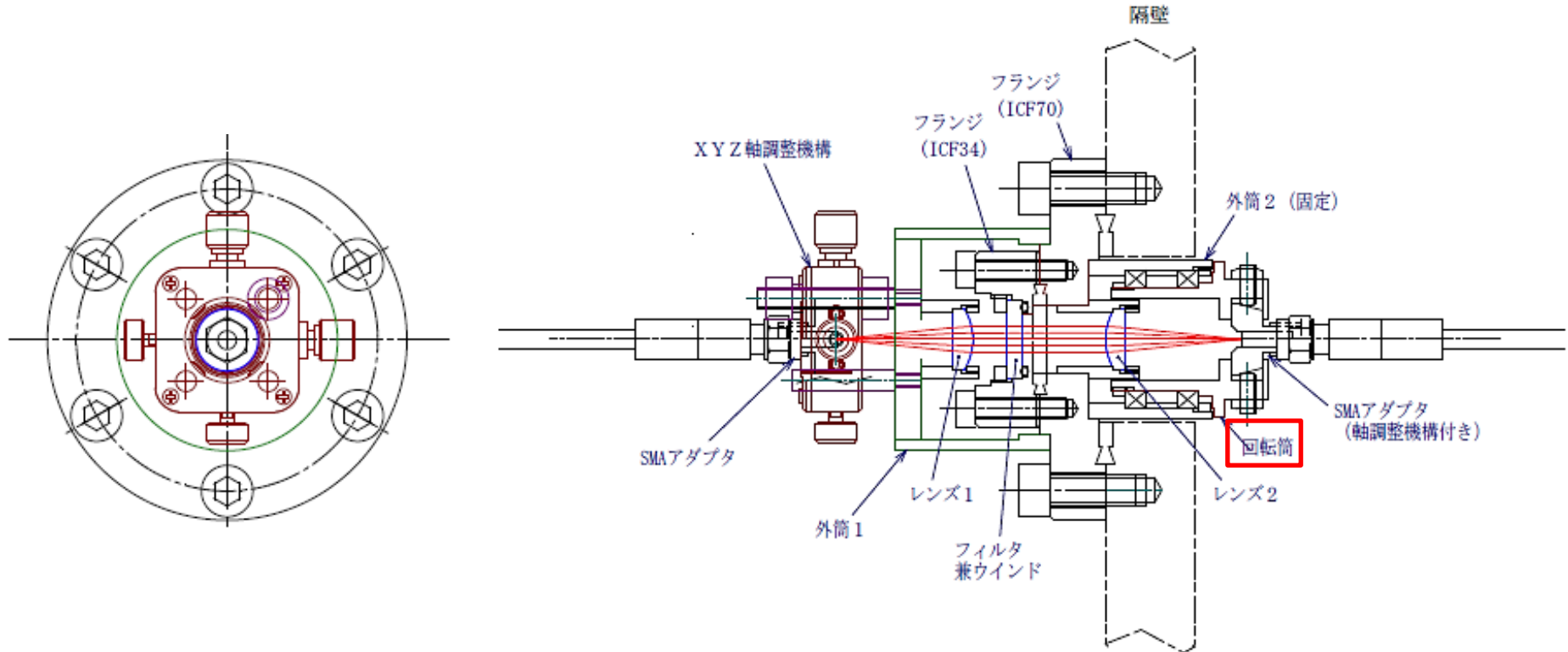


- ### 端面ダメージ抑制対策
- ・エンドキャップの融着
 - ・減圧真空箱でのカップリング

8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

要素機器開発 2) ファイバーカップリングコネクタ

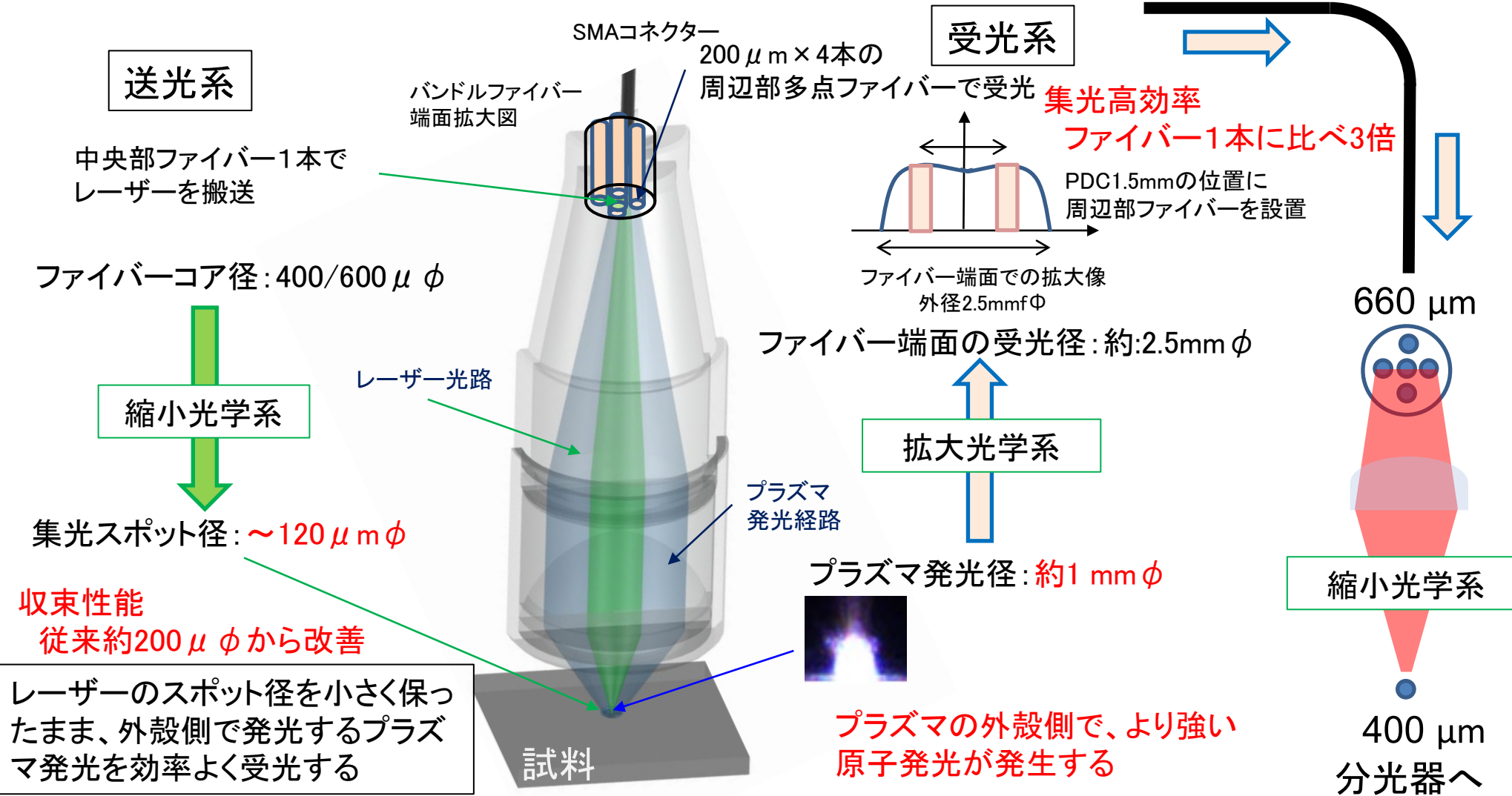
- ・**エンクロージャ隔壁**、ホットセル、グローブボックスへの適用を考慮
- ・ねじれ防止のために**回転機構**を設けたファイバーのカップリングコネクタを設計



- ・ベアリングによる高精度回転
- ・360度回転可能
- ・気密性有

8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

要素機器開発 3) LIBSプローブ部 (収束性能・集光効率の改善)



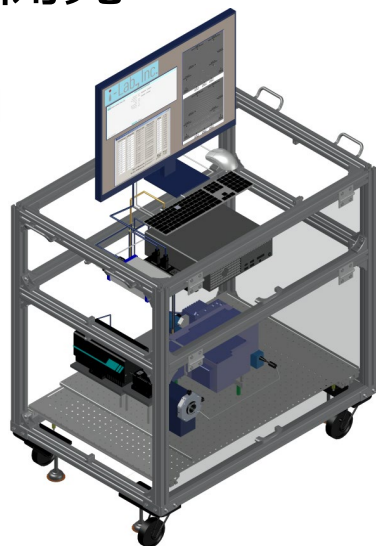
レーザー光の収束性能とプラズマ発光集光性能の両立を図った設計の実現

8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

試作機開発

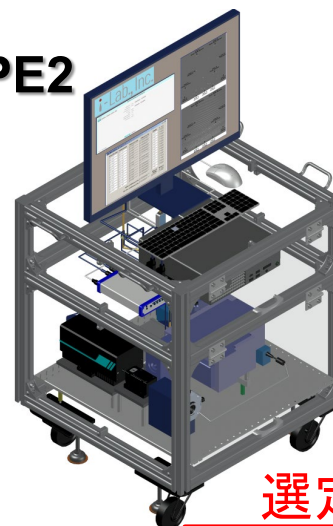
LIBSシステム架台の検討（小型・軽量化を目指した）

TYPE1



フレーム: 40mm □
寸法: 98x68x118cm
概算総重量: 106kg
転倒角度: 40.8° (x方向)
29.5° (y方向)

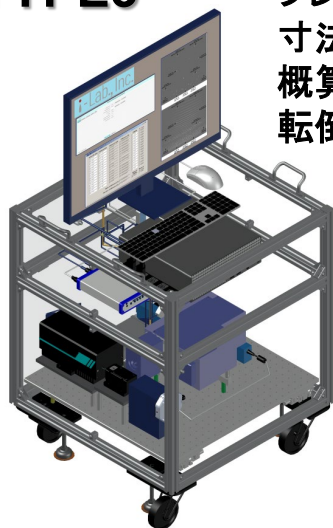
TYPE2



フレーム: 40mm □
寸法: 68x68x100cm
概算総重量: 85kg
転倒角度: 31.5° (x方向)
31.0° (y方向)

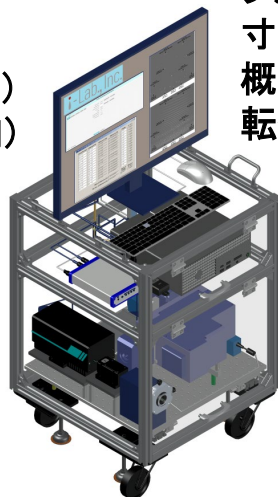
選定したフレームサイズ

TYPE3



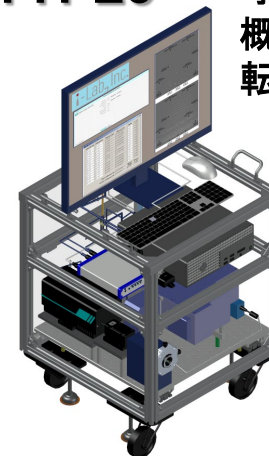
フレーム: 30mm □
寸法: 60x60x97cm
概算総重量: 74kg
転倒角度: 32.4° (x方向)
31.7° (y方向)

TYPE4



フレーム: 30mm □
寸法: 56x56x97cm
概算総重量: 62kg
転倒角度: 28.2° (x方向)
27.4° (y方向)

TYPE5



フレーム: 30mm □
寸法: 56x56x73cm
概算総重量: 59kg
転倒角度: 31.5° (x方向)
30.6° (y方向)

最小サイズ

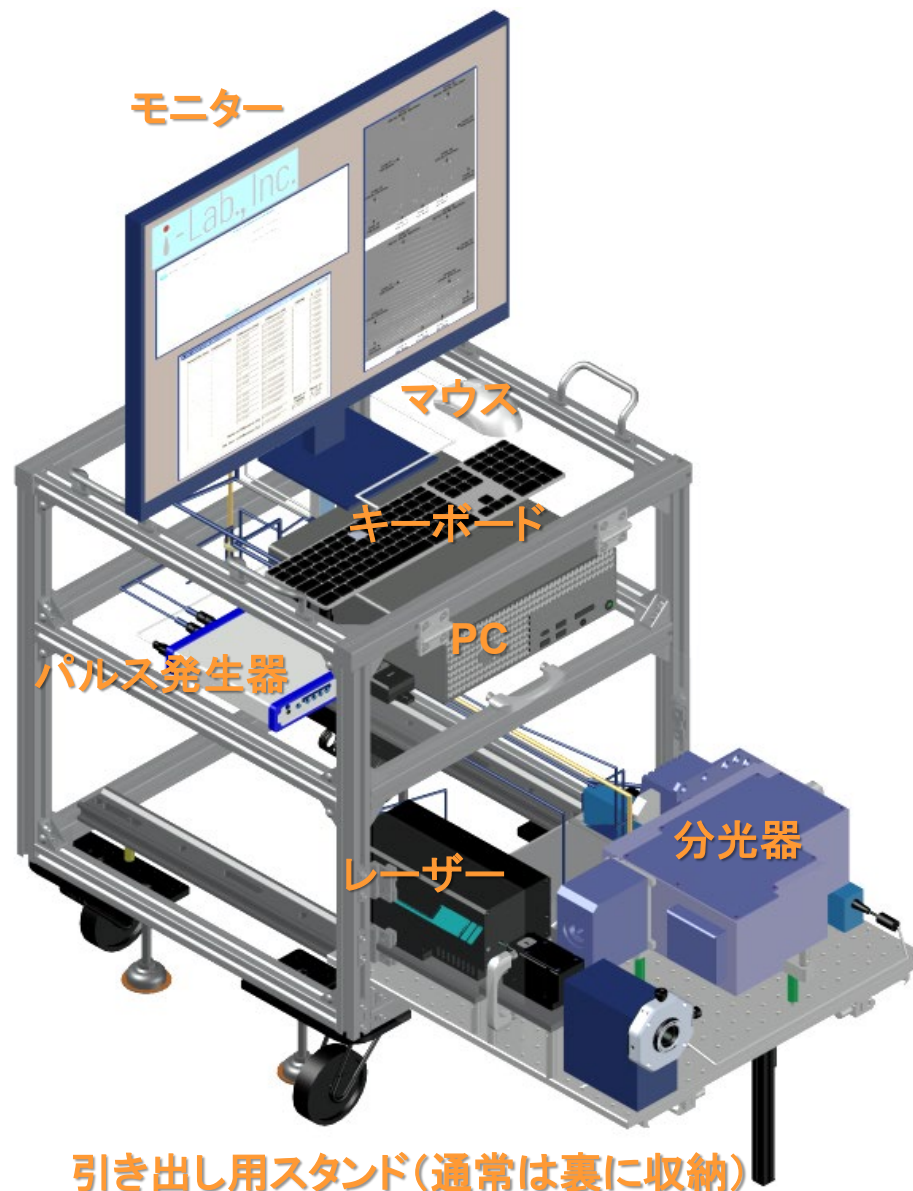
8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

試作機開発

本体部構成 (TYPE5)

【設計上の留意点】

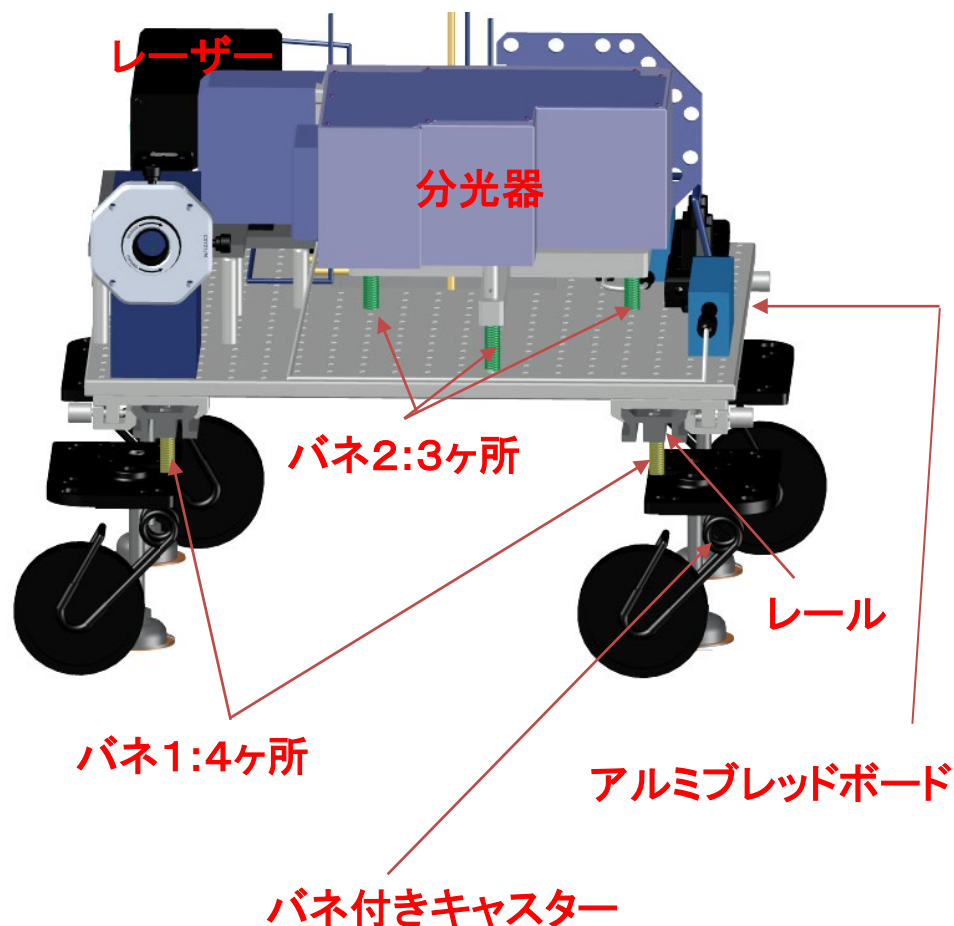
- ・LIBSシステムのワンパッケージ化
- ・光学部のメンテナンス性向上
(引き出し可能)
- ・耐振設計強化
- ・転倒防止設計



8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

試作機開発

光学機器部 (アルミフレーム部は記載省略)



【制振対策】

- ・制振ばね付き大型キャストの採用
 - ・光学機器はレール及びアルミブレッドボードに配置し、制振バネ1で保持
 - ・分光器は上記アルミブレッドボード上に制振バネ2で保持
- (※水平方向の制振バネは記載省略)

8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

試作機開発

全体イメージ (TYPE 5)

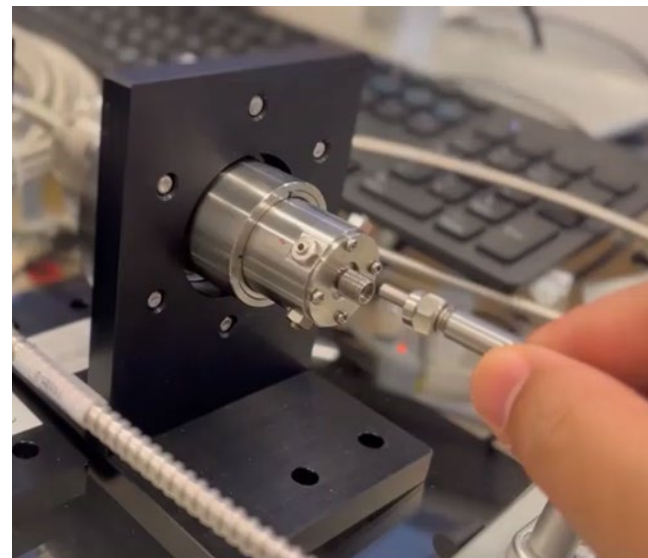
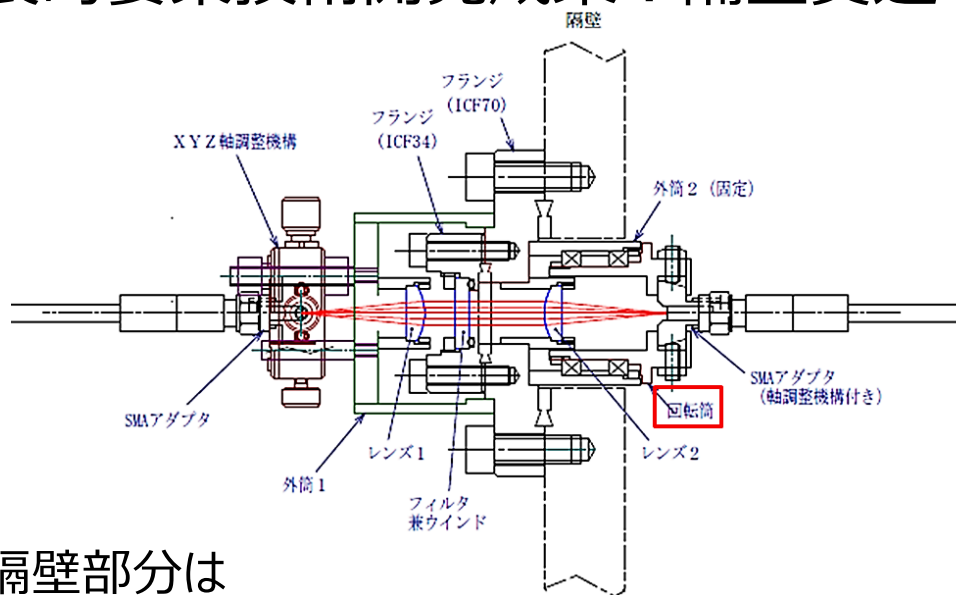
縦56×横56×高73cm

重量：59kg

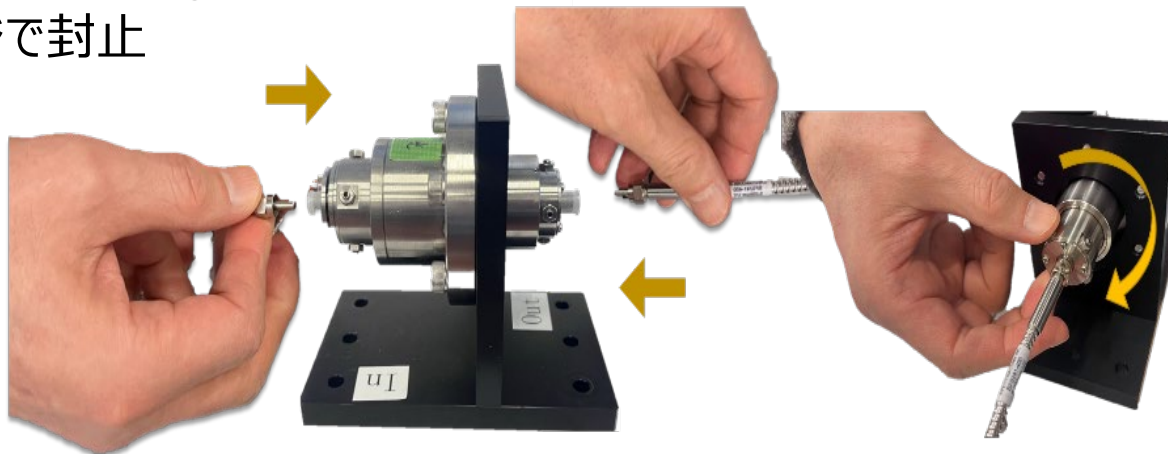


8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

特長的要素技術開発成果：隔壁貫通（密封）型回転光ファイバーコネクタ



隔壁部分は
メタルガスケットフランジで封止



利用上の**利便性向上**として**画期的な要素技術**成果

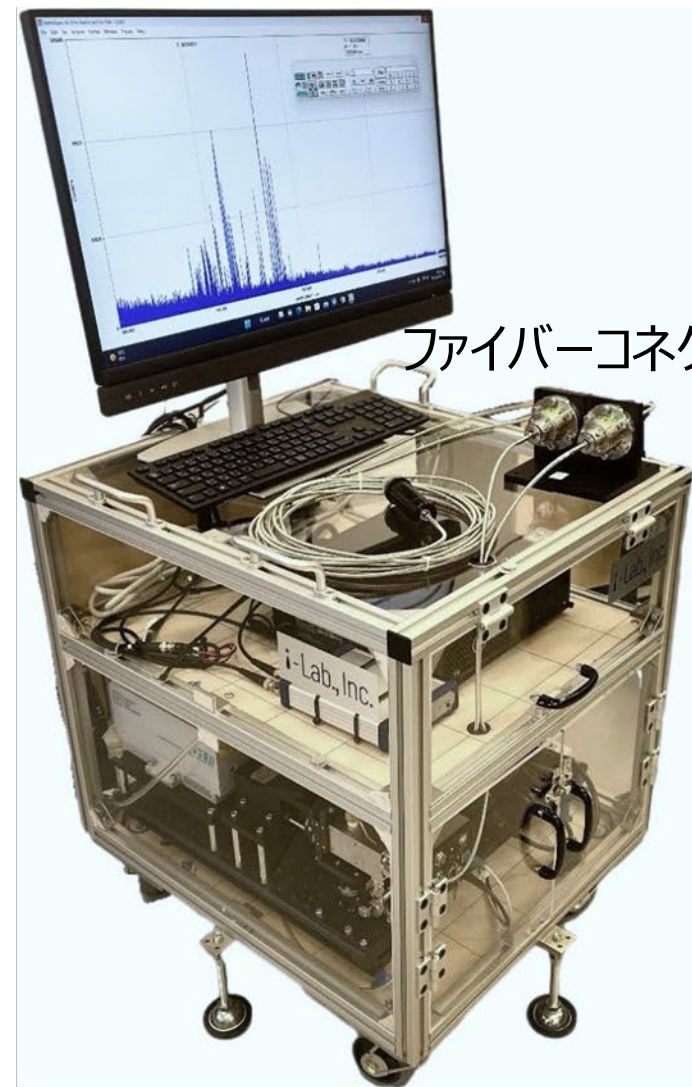
8.2.3 基礎基盤技術を基にした実機開発

試作機開発

完成した試作機



LIBSプローブ部



8.3 参考資料

8.3.1 実施内容及び成果の概要

8.3.2 隔壁貫通回転光ファイバーコネクタ

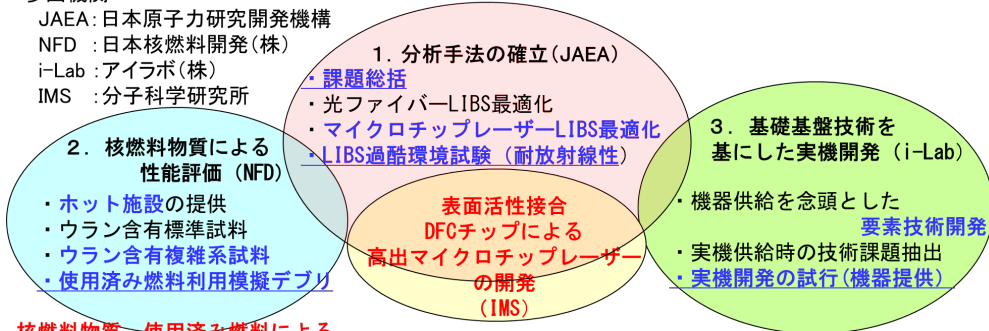
8.3.3 文科省英知事業での関連技術の進展

8.3.1 実施内容及び成果の概要

空間的（その場）・時間的（迅速性）観点から、簡易（その場）分析手法として光ファイバーを利用したレーザー誘起ブレイクダウン分光法（LIBS）による遠隔その場分析法（光ファイバーLIBS）を選定し、技術開発を行うとともに、簡易分析手法である蛍光X線分析法（XRF）について、核燃料物質や使用済み燃料による動作確認を行った。技術開発の全体像を図1に、事業終了時の目標指針に対する成果と評価を表1に示す。このうち、使用済み燃料を用いた測定では、XRFは少量試料に限られることが確認された（図2）。一方、LIBSでは高線量率な使用済み燃料含有試料でも影響を受けないことが示された（図3）。また、機器供給の試行では、実機試作機として壁貫通回転光コネクタ等を実装した可搬型光ファイバーLIBS装置を完成させた（図4）。

参画機関

- JAEA: 日本原子力研究開発機構
- NFD: 日本核燃料開発(株)
- i-Lab: アイラボ(株)
- IMS: 分子科学研究所



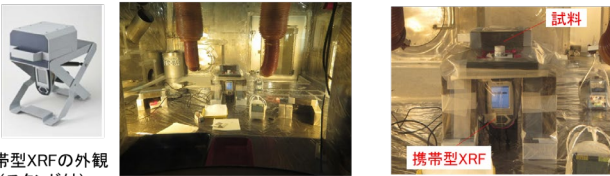
核燃料物質、使用済み燃料による分析実績の集積、信頼性確保
XRFの分析特性評価、過酷環境試験（耐放射線性）
アブレーション粒子の簡易粒径評価

手作りによる実験装置を、発注可能な機器へ
（実機開発の試行による分析機器の提示）

図1 技術開発の全体像

携帯型XRFの使用済み燃料での動作試験

- ・15mSv/hから0.9Sv/hまでの線量率の異なる照射済み燃料試料を準備。
- ・試料作製・使用セルを準備。ホットセル内に設置し、遠隔操作するための試験を実施。（セル外のPCからセル内のXRF装置にUSB接続し、PCからの遠隔操作でデータを取得）



計測可能であった使用済み燃料混合模擬試料の組成	混合重量 (g) / 重量 (%)				
	線量率 (Sv/h)	UO ₂	ZrO ₂	Fe ₃ O ₄	合計
	0.0148	0.03/1.0	1.49/49.5	1.49/49.5	3.00 g

結果 測定可能使用済み燃料: 0.03g相当 (15mSv/h) 以下 (エネルギーシフト・通信不良等、不安定性の発現) → 少量であっても利用条件に制限

図2 使用済み燃料でのXRF動作制限状況

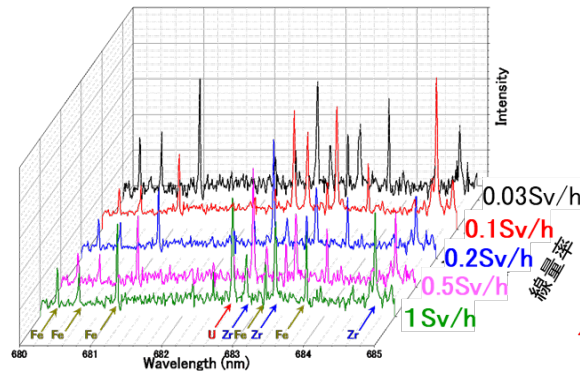


図3 使用済み燃料含有試料のLIBSスペクトル線量率に依存しないスペクトルの取得が可能

表1 事業終了時の目標指針に対する成果と評価

当初目標指針	成果	評価
1) 遠隔かつ過酷環境でも分析特性が得られること。 ・模擬試料に対し、線量率 > kGy/h 累積線量 > MGy の実証。 ・50m以上 (100m級) の超遠隔分析の実現。	マイクロチップレーザーLIBSプローブにおいて、ガンマ線環境の有無による検量線の評価した結果、5kGy/hでも変化がないことを確認した。マイクロチップレーザーの耐放射線性がMGyを超えることを確認した。マイクロチップレーザーLIBSプローブを活用した100mの超遠隔分析でも検量線に変化はなく、定量性が維持されることを実証した。	達成
2) ウランの有無の判定並びに定性的な組成比が求められること。 ・検量線等からウラン含有比 (組成比) を定性評価。 ・ウランの検出下限として推定されている組成比1%の確認。 ・使用済み燃料等での分析実績。	標準試料による検量線から不均一複雑系試料での組成比を評価し、SEM/EDXと良い一致を得た。定量分析が可能であることが示された。Uの検出下限として、酸化物系試料、金属系試料、コンクリートに対しそれぞれ約0.5%、1000ppm、1000ppmを確認した。使用済み燃料によるUの分析については、XRFでは、15mSv/hを超えると計測が不可能であったのに対し、LIBSでは、1Sv/hの線量率でも定量性を維持した分析が可能であることを実証した。	達成
3) 機器供給を試行し、実機を念頭とした機器が提供できること。 ・機器開発から提供までを試行し、実機試作機を提示。	レーザー光の収束性能とプラズマ発光集光性能の両立を図り集光効率を向上させたLIBSプローブや、隔壁貫通型回転光ファイバーコネクタ等の要素開発を含む実機試作機を完成させた。	達成

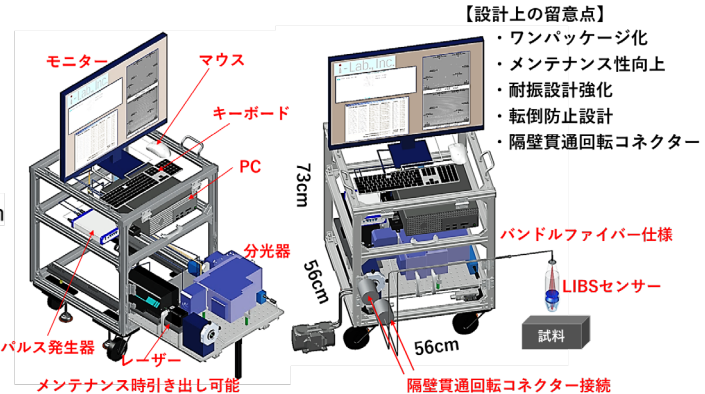
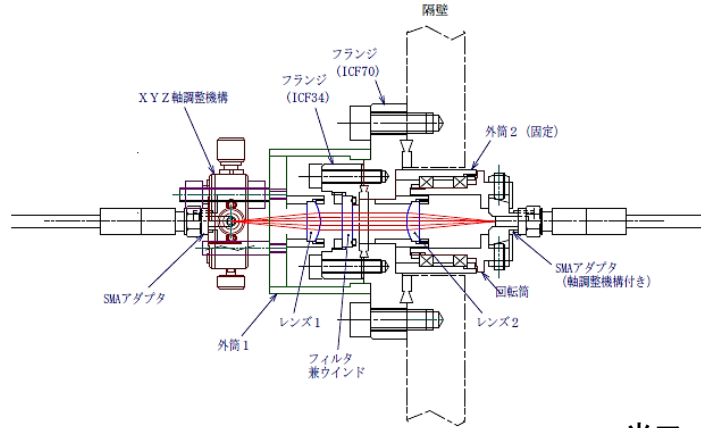


図4 基礎基盤技術を基にした実機開発

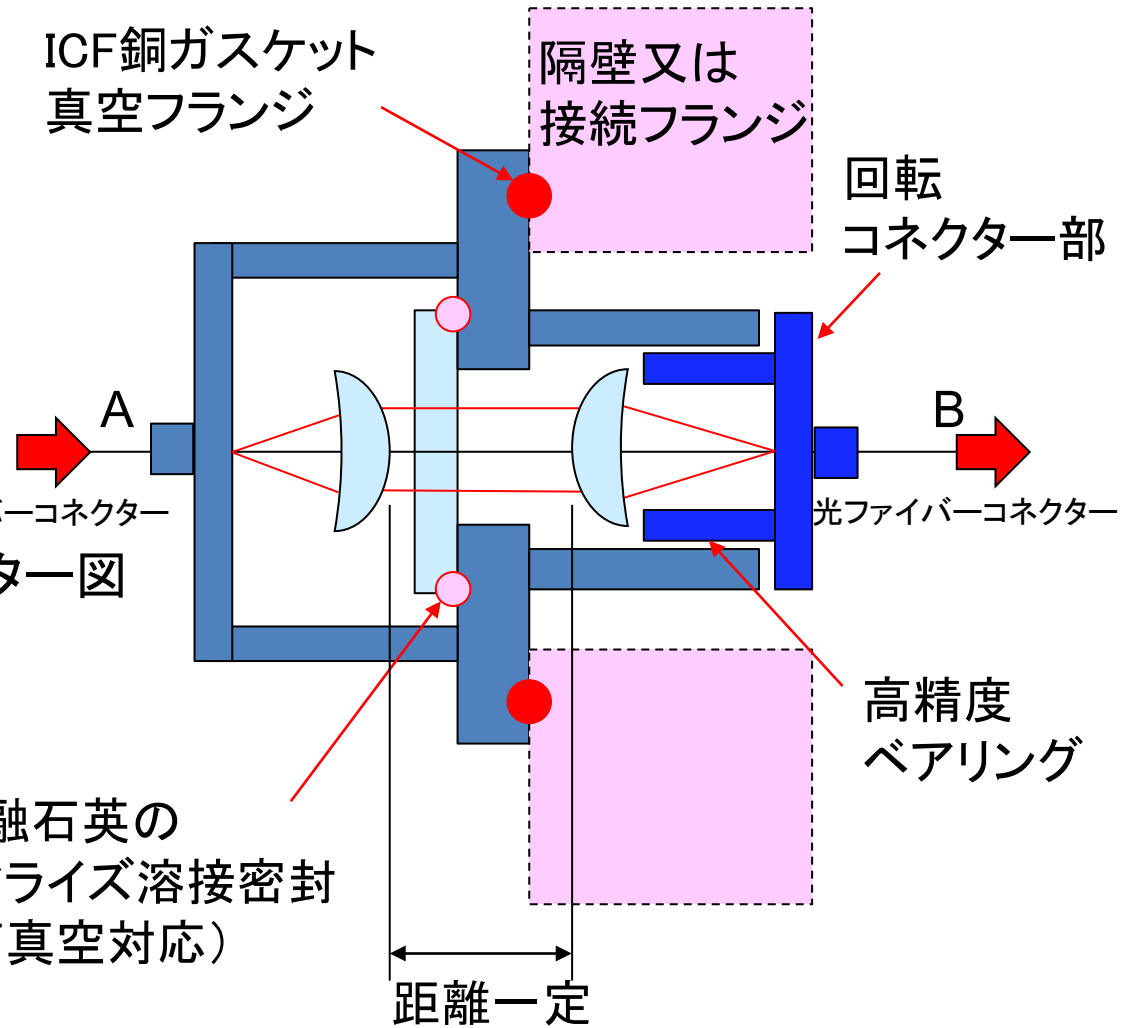
8.3.2 隔壁貫通回転光ファイバーコネクタ（1）

隔壁貫通ユニットの基本構造



P197 ファイバーカップリングコネクタ図

- ・真空対応溶融石英窓を介して光を伝達。
A側とB側とは完全隔離。
- ・直径を拡大した平行光として伝達することで精度向上と伝達ロス抑制を図っている。
- ・伝達距離は固定されている。

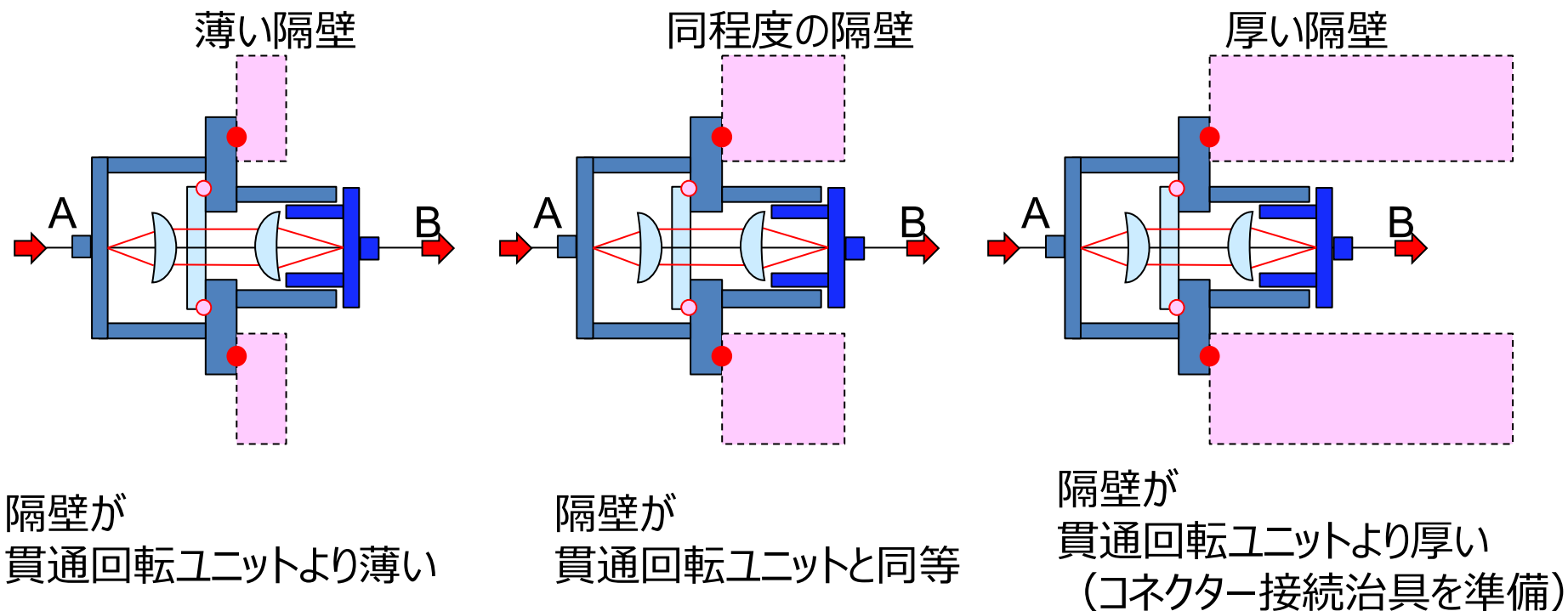


隔壁貫通回転ファイバーカップリングコネクタの模式図

8.3.2 隔壁貫通回転光ファイバーコネクタ（2）

隔壁の厚みが変わった場合の隔壁貫通ユニットの設置状況

取付断面の模式図



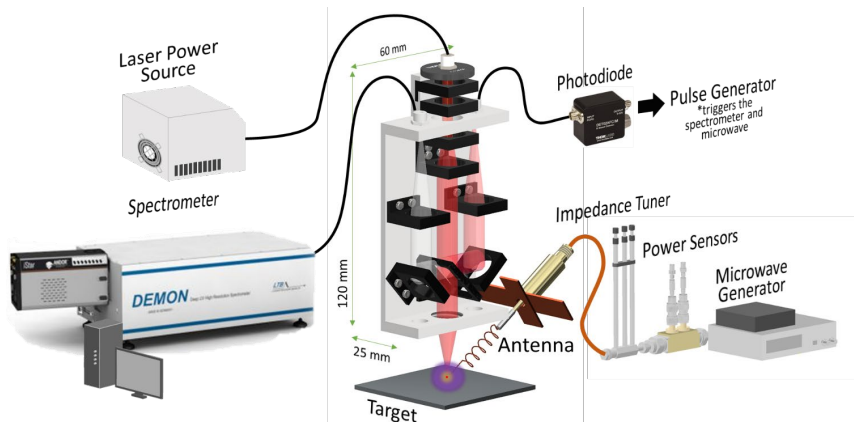
隔壁の厚みによって貫通回転ユニット自体を変更する必要はないため、カップリング効率は隔壁の厚みに依存しない。

(ただし、隔壁が厚い場合は、光ファイバーコネクタを接続するための治具が必要となる。) 回転に対する安定性も確認済み(回転しながらの動作は前提としていない)。

8.3.3 文科省英知事業での関連技術の進展

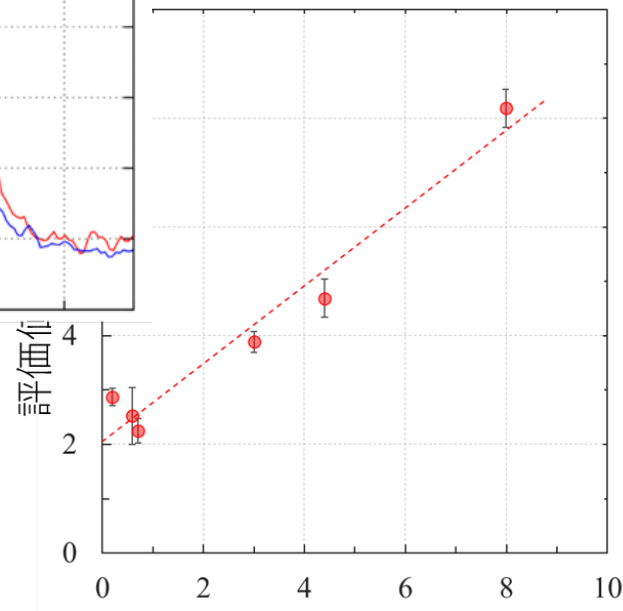
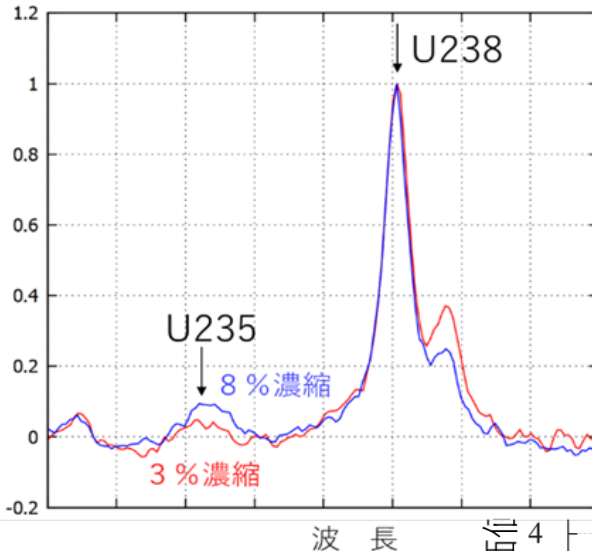
LIBSの高輝度化・高分解能分光化によるU同位体比の直接評価の可能性

(アイラボ社とJAEAとの共同実験)

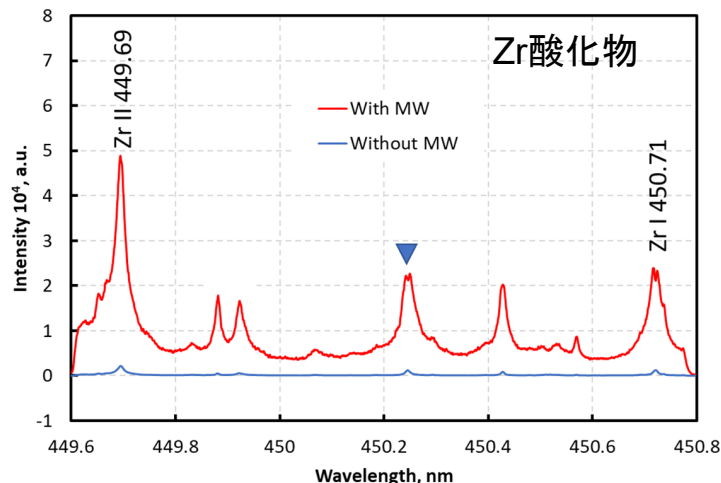


マイクロ波重畳マイクロチップレーザーLIBS実験系
(LIBSプローブはJAEA供給。図:i-Lab社より)

超高分解能分光器 (分解能 : 1/150,000) による分光結果



実際の濃縮度 (重量比%)



マイクロ波の有無によるスペクトル観測強度の比較例
(アイラボ社より)

ベースに問題があるものの、LIBS計測で濃縮度評価ができる可能性がある

9. まとめ

- 9.1 分析精度向上のための技術開発
- 9.2 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発
- 9.3 簡易（その場）分析のための技術開発

9.1 分析精度向上のための技術開発

- マクロ的に同一組成であっても、ミクロ的には様々な相が分布する燃料デブリに対して、目的とする個別情報（分析データ）を取得できる見通しが得られた。
- 相の分布、元素同伴性などの定性的なデータについては、分析対象領域において共通する傾向を抽出した。個別情報として結晶構造、組成、密度といった定量的なデータとの組合せにより、分析対象領域の相状態を評価した。試料全体の元素組成については、各分析機関によってばらつきはあるものの、投入組成や個別分析結果から推定される特徴と概ね合致する結果が得られており、燃料デブリの特徴を評価できる見通しが得られた。
- 模擬燃料デブリの分析を通じて、各分析機関における分析・評価の結果の相違点・その原因等を明らかにし、より精度の高いマイクロ組織の同定とそれらの特性（試料全体の組成）を推定する手法を開発した。燃料デブリという未知試料のマイクロ組織の同定と、それらの特性を推定する分析技術の共通認識化が図れた。
- 不均一なマイクロ組織観察からマクロ特性を評価する方法について、各機関で得られた手法や評価結果に基づき、1F燃料デブリや汚染物等のサンプル分析に対する具体的な適用法の検討と分析現場への反映が期待される。

9.2 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発

- 推定技術の検証、モデルの評価のためのデータを流動試験により取得した。
- 流動試験により取得したデータなどを用いて、解析に必要となるモデルの評価・改良を実施した。
- 改良したモデルを組み込んだJUPITERについて、流動試験結果との比較により検証を実施した。
- 検証したJUPITERを用いて、実機空冷状態を対象として詳細な数値シミュレーションを実施した。
- JUPITERによる詳細な数値解析結果や、2号機温度履歴を用いて、ACE-3Dを元にした燃料デブリ熱挙動推定技術を評価した。
- 間欠注水、注水停止から再注水した場合での安定冷却に要する時間等を検討・評価した。

9.3 簡易（その場）分析のための技術開発（1/4）

福島第一原子力発電所の廃炉では、燃料デブリの性状を分析・推定する技術の開発が重要である。特に、燃料デブリ取り出し時に、事前にウランが含まれていない、あるいはウラン濃度が極めて低いことが簡易的に分かることや、既存の構造物に付着・侵入した燃料成分の有無を迅速に確認または評価可能な簡易分析技術を開発することは、廃炉工程の短縮化・省力化に対して有効なものとなる。そこで、本技術開発では、第三者機関（有識者会議体）により、(1)簡易(その場)分析手法の評価・検討を行い、この評価・検討結果に基づき、(2)簡易(その場)分析技術の開発を実施した。

(1)簡易（その場）分析手法の評価・検討

有識者会議体である、「**簡易（その場）分析手法に関する検討委員会**」において、簡易分析法として、**XRF、LIBS法による技術開発を選定した。**

またマイクロチップレーザーの高出力化について、委託研究により、技術開発の加速化を図った。

(2)簡易（その場）分析技術の開発

委員会での検討結果を受け、現時点で最も現実的であると考えられる、光ファイバーを利用したレーザー遠隔その場分析手法（光ファイバー利用レーザー誘起ブレイクダウン分析法：光ファイバーLIBS）を活用した技術開発を行うとともに、並行してXRFによる分析性能評価を実施した。

本技術開発は、a) 分析手法の確立、b) 核燃料物質による性能評価、c) 基礎基盤技術を基にした実機開発から構成し、b) については日本核燃料開発株式会社（NFD）と、c) についてはアイラボ株式会社（アイラボ）と委託研究契約を結んで実施した。

a) 分析手法の確立（原子力機構）のうち、**マイクロチップレーザーの高出力化について、自然科学研究機構分子科学研究所（分子研）と委託研究契約を結び、技術開発の加速化を図った。**

9.3 簡易（その場）分析のための技術開発（2/4）

(a) 分析手法の確立

マイクロチップレーザー利用LIBSプローブの特性評価では、従来型光ファイバーLIBS同等以上の性能を確認した。耐放射線性については、線量率 **5kGy/h**の環境でも**変化の無い検量線**が得られること、線量率 **2kGy/h**の環境で、**700時間以上 (>1.5MGy)**の連続運転において異常のないことが実証された。また、**100mの超長尺光ファイバー**でも**5mの場合と同様に検量線に影響はなく、定量性が維持**されることも実証された。

表面活性接合DFCチップによる高出力マイクロチップレーザーの開発では、これまでのほぼ**10倍の10mJ/pulse**、発振時間幅**1ns**の**無冷却連続運転に成功し、耐放射線性：1 MGy**を確認した。

(b) 核燃料物質による性能評価

未照射**U含有標準試料、不均一複雑系試料**等を製作した。LIBS性能試験に対し**SEM/EDS等の分析結果を提示した結果**、LIBS計測がこれと良く一致した。これにより、**元素特定のみならず定量分析評価が可能**であることが示された。酸化物試料や金属系試料、コンクリート系試料においてそれぞれ**検出下限値：0.5%、1000ppm、1000ppm**程度を確認した。

並行して携帯型XRFの性能試験を実施し、基本性能評価を行った。

照射済み燃料を含有した模擬燃料デブリ粉末試料、固化試料を製作し、**ホットセル内**で試験を実現した。携帯型XRFの動作は、**15mSv/h**（使用済み燃料**30mg**相当まで）**でのみ**確認され、それ以上では動作不良を引き起こした。

従来型光ファイバーLIBSでは、試験での線量率の上限である **1Sv/h**でも**問題なく計測できること**を確認した。

(c) 基礎基盤技術を基にした実機開発：アイラボ（JAEA：基本技術の提供）

機器製作に関する代表的な工程を試行するとともに、基本設計・要素機器準備を具体的に進めた。**特にLIBSプローブでの集光光学系や隔壁貫通回転型光ファイバーコネクタ**等、独自の要素技術開発を推進し、移動式の小型ラックに組み込んだ「**可搬型LIBS装置**」を試作機として完成させた。

9.3 簡易（その場）分析のための技術開発 （3/4）

事業終了時の目標指針に対する成果と評価		
当初目標指針	成果	評価
<p>1) 遠隔かつ過酷環境でも分析特性が得られること。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・模擬試料に対し、線量率 > kGy/h 累積線量 > MGyの実証。 ・50m以上(100m級)の超遠隔分析の実現。 	<p>マイクロチップレーザーLIBSプローブにおいて、ガンマ線環境の有無による検量線を評価した結果、5kGy/hでも変化がないことを確認した。マイクロチップレーザーの耐放射線性がMGyを超えることを確認した。マイクロチップレーザーLIBSプローブを活用した100mの超遠隔分析でも検量線に変化はなく、定量性が維持されることを実証した。</p>	達成
<p>2) ウランの有無の判定並びに定性的な組成比が求められること。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検量線等からウラン含有比(組成比)を定性評価。 ・ウランの検出下限として推定されている組成比1%の確認。 ・使用済み燃料等での分析実績。 	<p>標準試料による検量線から不均一複雑系試料での組成比を評価し、SEM/EDXと良い一致を得た。定量分析が可能であることが示された。Uの検出下限として、酸化物系試料、金属系試料、コンクリートに対し、それぞれ約0.5%、1000ppm、1000ppmを確認した。使用済み燃料によるUの分析については、XRFでは、15mSv/hを超えると計測が不可能であったのに対し、LIBSでは、1 Sv/hの線量率でも定量性を維持した分析が可能であることを実証した。</p>	達成
<p>3) 機器供給を試行し、実機を念頭とした機器が提供できること。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・機器開発から提供までを試行し、実機試作機を提示。 	<p>レーザー光の収束性能とプラズマ発光集光性能の両立を図り集光効率を向上させたLIBSプローブや、隔壁貫通型回転光ファイバーコネクタ等の要素開発を含む実機試作機を完成させた。</p>	達成

9.3 簡易（その場）分析のための技術開発（4/4）

将来に向けた課題と解決に向けた検討

○感度向上手法の検討、超長尺遠隔分析手法の検討、含水多孔質性の酸化物試料への適用を要する。

【LIBS分析手法の高度化】

○Zr、Fe、Gd、Ca等が混在した未照射U標準試料による性能確認、使用済み燃料ペレット及び使用済み燃料を用いた模擬燃料デブリの分析、TMI-2燃料デブリ等の分析への適用でより多くの実績を要する。

【核燃料物質を含有した試料に対する実績の拡充】

○光ファイバー等の接続利便性、ガンマ線環境下、温度変化・粉塵に対応した耐環境性、放射能汚染環境での活用に対する対策の強化を要する。

【耐環境性（一般環境・放射線環境）の強化】

- ① 分析手法の確立に関する技術開発（手法高度化、耐放射線環境性）
- ② 核燃料物質による性能評価に関する技術開発（実績拡充）
- ③ 基礎基盤技術を基にした実機開発に関する技術開発（実機高度化・提供、耐一般環境性）