

研究開発評価課題 「原子力基礎工学研究」に関する 第4期中長期計画における

中間評価

核工学・炉工学研究

目指すもの（第4期終了時にあるべき姿）：

基礎基盤

- ・原子炉の安全性・経済性・廃止措置等の合理的検討のみならず、幅広い放射線利用分野での効率的な技術開発に貢献すべく、**核データの不確かさの評価手法を確立**し、核データライブラリとして提供する。
- ・ステークホルダーとの対話を通じて軽水炉等の安全性・経済性向上に関する課題・技術開発ニーズを把握したうえで、核特性、熱流動等に対する要素コードへの機能追加を行い、**実験の代替となりうる数値シミュレーション技術の構築**を目指す。
- ・1F燃料デブリや廃止措置で発生する廃棄物など**複雑な組成を持つ試料に対する非破壊測定技術を確立**し、また、放射線・放射能検知装置の機能向上・改造やデータ解析法の開発により、非破壊測定技術の社会実装化へ貢献する。

安全性向上

- ・ステークホルダーとの対話を通じて課題・技術開発ニーズ等を把握して要素コードのカップリング手法（プラットフォーム）を開発し、全炉心体系や過渡状態のシミュレーション等も含めた**広範囲な事象に対応できるマルチフィジックスコードシステムの構築**を目指す。

第4期中長期計画の実施計画

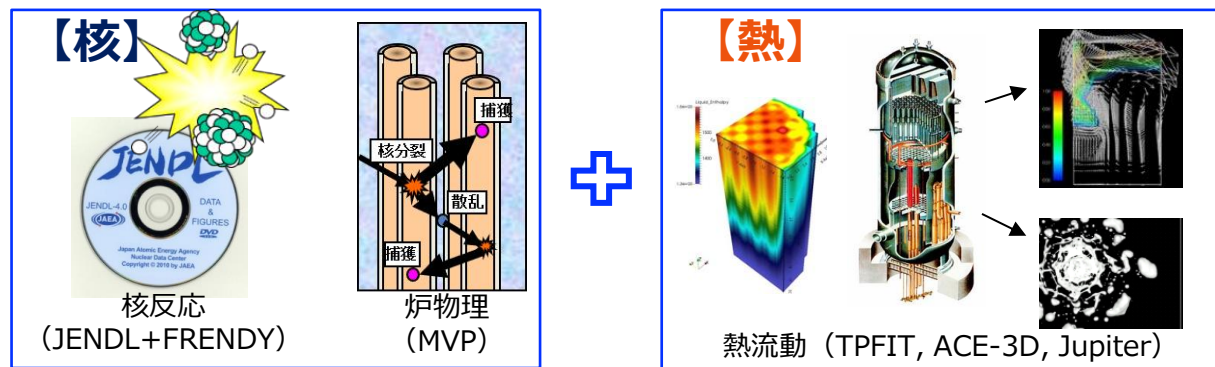
テーマ	達成目標	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
安全性向上 基礎基盤	・機構論的マルチフィジックスシミュレーションコードの構築	定常状態・全炉心シミュレーション			過渡状態シミュレーション, 構造解析等との連成			
基礎基盤	・JENDLの不確かさデータの拡充	不確かさ評価手法開発(中性子断面積、熱中性子散乱則)				JENDL-5への不確かさデータ拡充・検証		
	・構造材の中性子断面積/熱中性子散乱データの測定	構造材中性子断面積の高精度測定手法開発				断面積データ取得		
		熱中性子散乱データの高精度測定手法開発		熱中性子散乱データの取得				
	・核・熱等要素コードの機能拡充	要素高度の機能拡充 (産業界等のニーズに応じて、優先度・工程等を策定)						
	・非破壊測定技術の開発・改良	非破壊測定要素技術 (検出器, データ解析法)の開発・改良				複雑組成対応の非破壊測定技術の開発		
	[参考: 1F廃炉支援の達成目標案] ・1F廃炉・汚染水対策等のための要素コード等の開発 (外部資金を積極的に活用)	燃料デブリ熱挙動評価技術の開発						
		既往試験等を用いたJUPITERのV&V			下部ヘッド破損挙動評価			

【産業界等の動き（予測されるニーズ）】

*) メーカー各社が独自に持つ設計解析コード

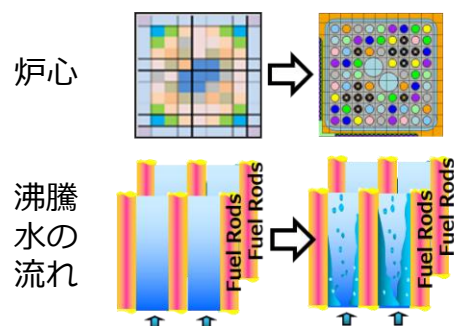
- ・ 新規ハウスコード*) の許認可・設計への適用には参照解グレードの標準コードとの比較 (V&V) が必須
- ・ 産業界と規制当局は、新たなV&Vの方法について協議中
- ・ 学協会では、取替炉心設計に適用するコードのV&V標準(学協会規格) を策定中

ロ マルチフィジックスコードの開発（計算コードの統合）



→ 複雑な体系や事象も
シミュレーション可
能に

ロ 空間・エネルギー分布を詳細化、実験式を排除



- ・ ボイドの形状まで詳細に計算
- ・ 経験則による外挿モデルを排除
- ・ 世界最高レベルの核熱計算の実現

→ 解像度
「cmからmmの世界へ」

実測値に代替し得る数値シミュレーションの実現

スパコンによる大規模
計算



JAEAにて参照解グレードの標準コードを構築し、軽水炉の安全性向上・許認可合理化にも貢献

計画

汎用核データライブラリー: JENDL-5に対する不確かさデータの拡充

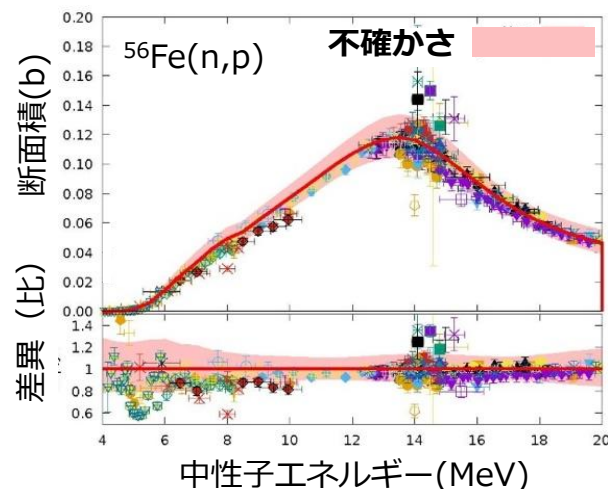
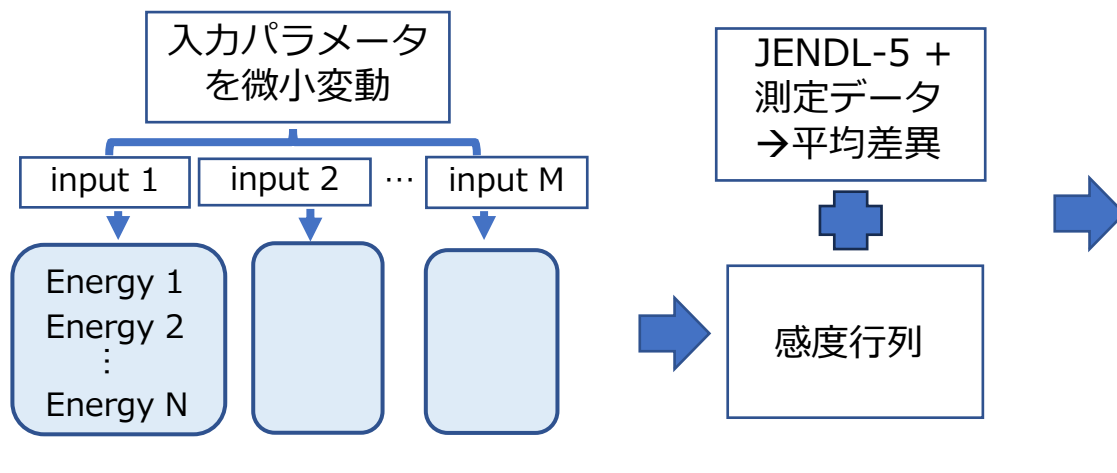
進捗

核反応計算コードの改良により**不確かさ評価手法を構築**し、検証用核データファイルを作成
文部科学大臣表彰科学技術賞「評価済核データライブラリJENDLの開発」令和7年4月

- 核反応計算コードCCONEの改良により並列計算を容易にして、効率的にパラメータに対する断面積の感度を計算
- JENDL-5と測定データとの平均的な差異を評価

平均差異・パラメータ感度からベイズ推定により不確かさを導出し、Ne~Acの687核種（全体の86%）の検証用核データファイルを作成

改良版CCONEの活用（並列計算により効率化）


本成果は核データ国際会議、原子力学会企画セッションで発表。

核データ国際会議ND2025（2025年6月マドリッド）招待講演「Developing the next version of Japanese Evaluated Nuclear Data Library: JENDL-5.1」

予定
展開

測定データとの比較により作成した核データファイルを検証するとともに、残りの核種に対する評価を進め、JENDL-5の不確かさデータの拡充を完了する。

構造材の中性子断面積/熱中性子散乱データの測定

基礎基盤

計画

加速器中性子源や原子炉(試験研究炉)を用いた構造材の中性子捕獲断面積・熱中性子散乱データの測定

進捗

散乱断面積が大きい構造材に対してデータ補正による**中性子捕獲断面積高精度測定手法を開発**。複数種の黒鉛試料に対して**熱中性子散乱データを測定**。

構造材中性子捕獲断面積高精度測定手法

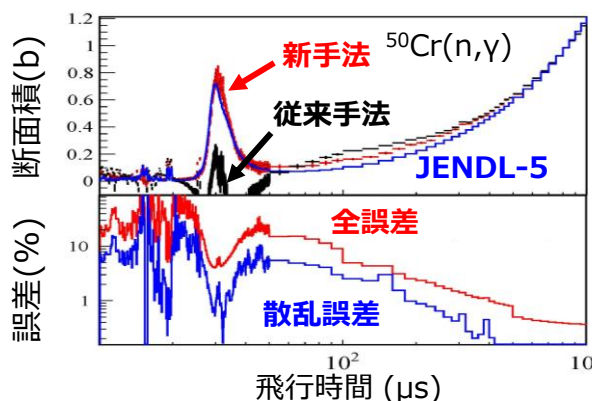
課題

中性子散乱断面積が大きい場合、散乱中性子によるバックグラウンドが増大

手法開発

- 断面積の大きいホウ素などにより散乱中性子を遮蔽
- PHITSシミュレーションにより、散乱中性子の時間遅れの影響を補正

シミュレーション計算を駆使して、中性子散乱の大きい構造材の中性子捕獲断面積の測定手法を開発



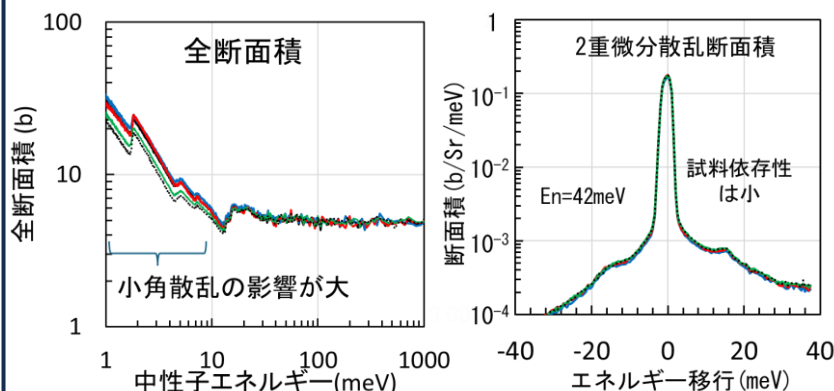
熱中性子散乱データの測定

課題

物質の構造により、熱中性子散乱が変化
複数種試料を測定

- 黒鉛の全断面積、散乱断面積を測定 (J-PARC)
- 粒径1~15μm、空孔率9~15%

➡ 小角散乱のみ影響が大



本成果は国際会議で2件、原子力学会で2件発表。

A. Kimura et al., EPJ Web of Conf., 294, 01002 (2024)

予定
展開

今後、開発手法を散乱中性子の影響の小さい捕獲ガンマ線を用いて検証し、構造材断面積の測定を行う。
また、高温試料に対して熱中性子散乱則の測定を行う。これらにより、JENDLの信頼性の向上を達成。

計画

要素コードの機能拡張・・・MVP:全炉心タリー、感度計算、FRENDY:共分散処理、TPFIT・JUPITER:沸騰事象モデル化、燃料集合体内詳細二相流データベースの構築

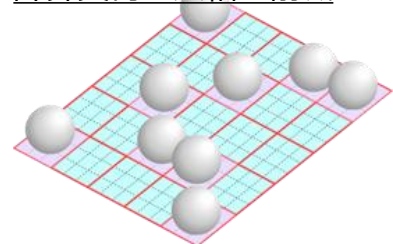
進捗

全炉心タリーを実現する手法の開発を進め、FRENDYをベースとした共分散処理システムを構築。沸騰事象モデル化を完了し、燃料集合体内詳細二相流データベースの構築に必要な可視化測定技術を開発。

最近の研究成果例1

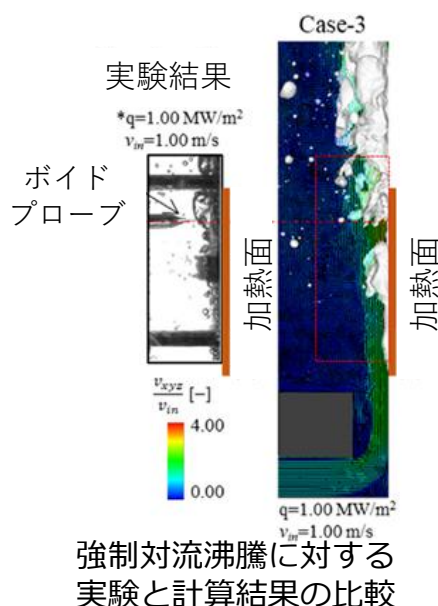
簡易沸騰モデル

解像度以下の小さな気泡の生成をモデル化することで、比較的粗い解像度でのシミュレーションを可能とし、計算負荷を大幅に削減



気泡の生成を境界面からの気相注入により模擬

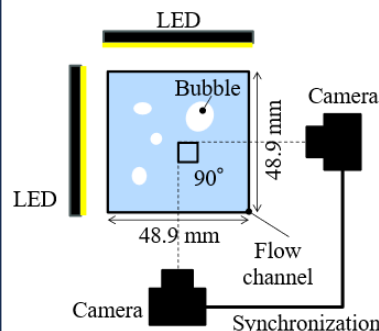
JUPITERに対する沸騰事象モデル化¹⁾



最近の研究成果例2

実験装置

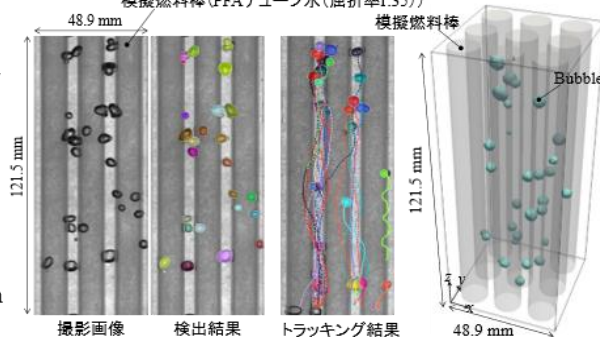
2台のハイスピードカメラを用いた3次元計測



気泡検出

深層学習を用いた気泡検出
(Mask Region-based Convolutional Neural Networkを使用)

水と屈折率が等しい材質を模擬燃料棒として採用
模擬燃料棒(PFAチューブ水(屈折率1.35))



燃料集合体内3次元可視化測定技術の開発²⁾

本成果は論文4報として成果公開した。

1) A. Ono et al., Mechanical Engineering Journal, 11[4], 24-00188 (2024). 2) S. Uesawa et al, 混相流, 39巻1号, pp.61-71 (2025).

予定
展開

要素コードの機能拡張を完了し公開する。JAMPANプラットフォームとともに国内の原子力開発に関わるメーカー・大学に提供し、新型炉開発に貢献する。

計画

複雑組成の核燃料物質・放射性物質に対応できる非破壊測定技術の開発

進捗

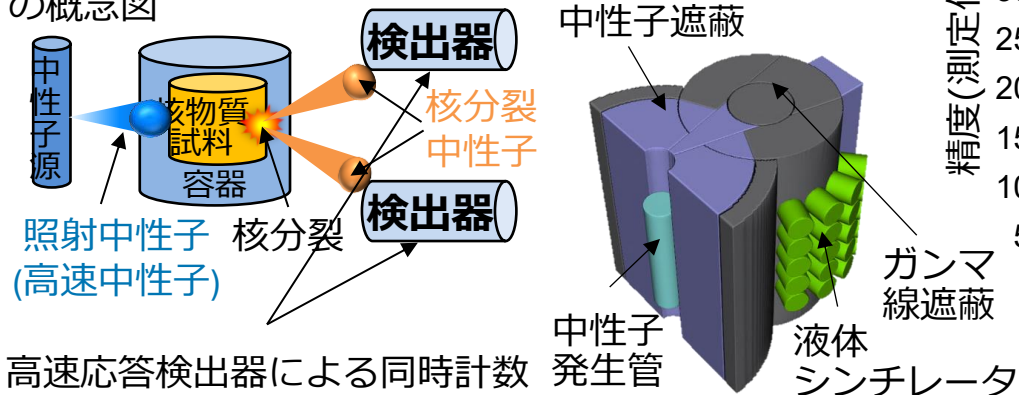
計画を前倒しし中性子吸収材に対応できる**複雑組成対応の非破壊核物質測定技術開発**に着手
令和7年7月18日プレス発表：「最も測定が困難な核物質」を非破壊測定する新技術を開発

高速中性子による核分裂は中性子吸収材の影響を受けないため有望だが、反応が速すぎて照射中性子と核分裂中性子の区別ができなくなることが問題



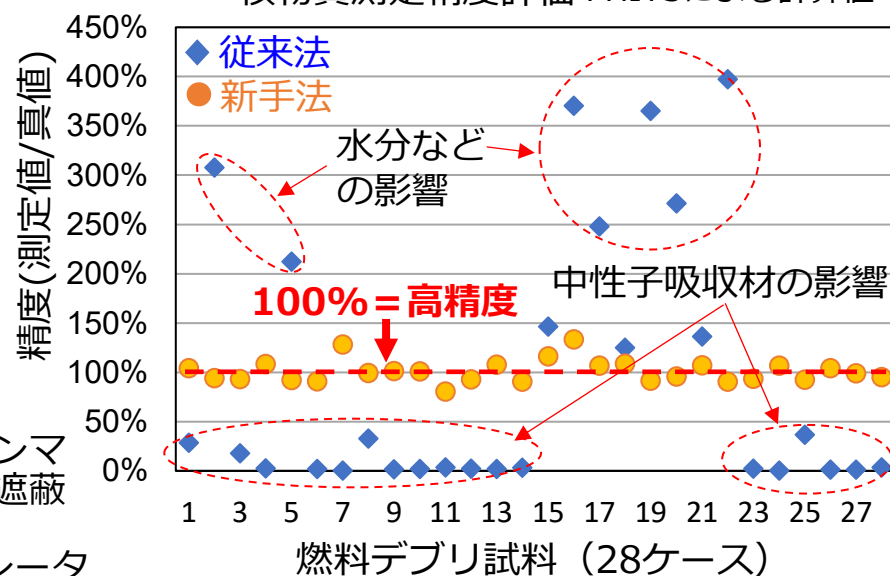
従来の1000倍高速な検出器を使い、さらに同時計数測定することによって照射中性子と核分裂中性子を区別する**高速核分裂中性子同時計数法を開発**

高速核分裂中性子同時計数法 非破壊核物質測定装置の概念図



典型的な燃料デブリ試料(28ケース)に含まれる核物質の測定精度が従来の非破壊測定法（ダイアウェイ時間差分析法）に比べて大きく改善

核物質測定精度評価 PHITSによる計算値



本成果は論文1報および特許出願を行い、実施許諾契約を締結した

M. Maeda et al., Nucl. Sci. Eng. 1-14 (2025)、特許第7287736号、実施許諾契約締結

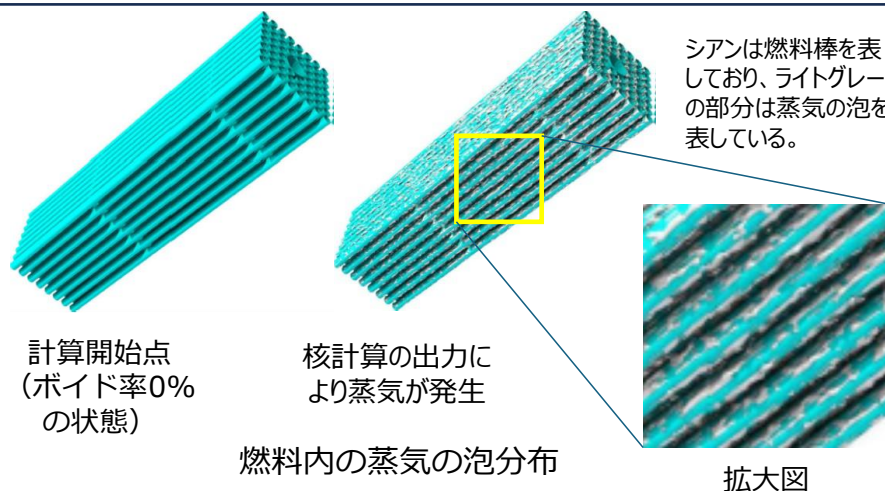
予定・展開 シミュレーションと実験検証を進め、複雑組成に適用可能な非破壊測定装置モデルを具体化する

計画

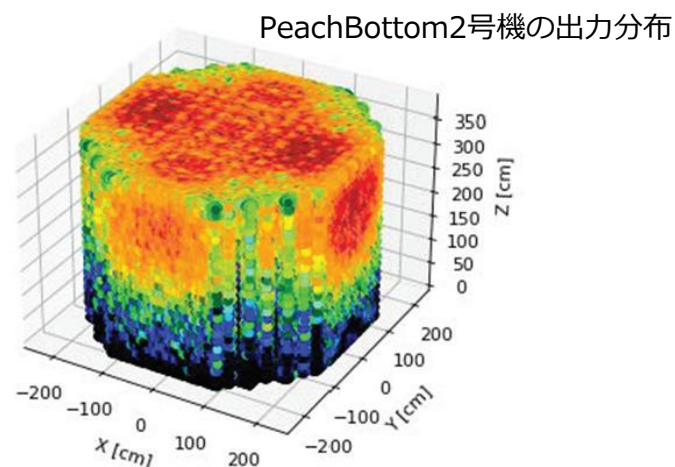
核特性解析・熱流動コード等を連成させた機構論的マルチフィジックスコードシステム
(プラットフォーム) の構築・機能拡充

進捗

マルチフィジックス・シミュレーション・プラットフォーム「JAMPAN」を完成(令和6年11月プレス発表: 原子力機構)。汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード(MVP)と多相多成分詳細熱流動解析コード(JUPITER)による機構論的核熱連成計算を実現。MVPコードとサブチャンネルコード(NASCA)による定常状態に対するBWR全炉心シミュレーションを実施



JAMPAN上でMVP/JUPITERコードを用いた機構論的マルチフィジックス(核熱連成)・シミュレーション結果の一例



JAMPAN上でMVP/NASCAコードを用いたBWR全炉心シミュレーションの結果

本成果は、論文3報として成果公開し、**JAMPANをオープンソースコードとして公開した(令和7年4月)**。

1) T. Kamiya et al., Mechanical Engineering Journal, 12[4], 24-00461 (2025). 2) T. Kamiya et al. Proc. of ICONE29 (2022). 3) K. Tada et al. Proc. of Physor2024 (2024).

予定
展開

過渡状態への機能拡張や他の物理現象に対する連成を可能とし、JAMPANプラットフォームを国内の原子力開発に関わるメーカー・大学に提供し、新型炉開発に貢献する。

トピックス（計画外の研究成果）

トピックス：計画外の成果

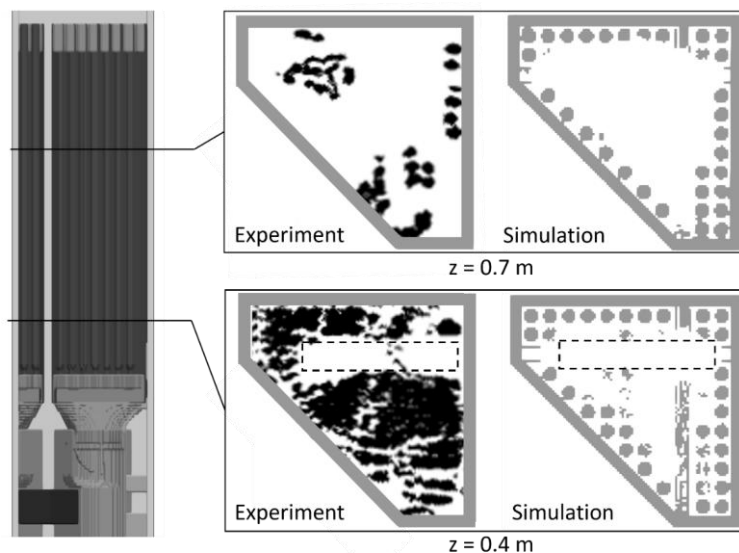
炉内状況把握のための事故時材料挙動解析技術開発

トピックス(計画外)

多相多成分詳細熱流動解析コードJUPITERを用いて炉心溶融実験に対する溶融挙動検証解析を実施した。

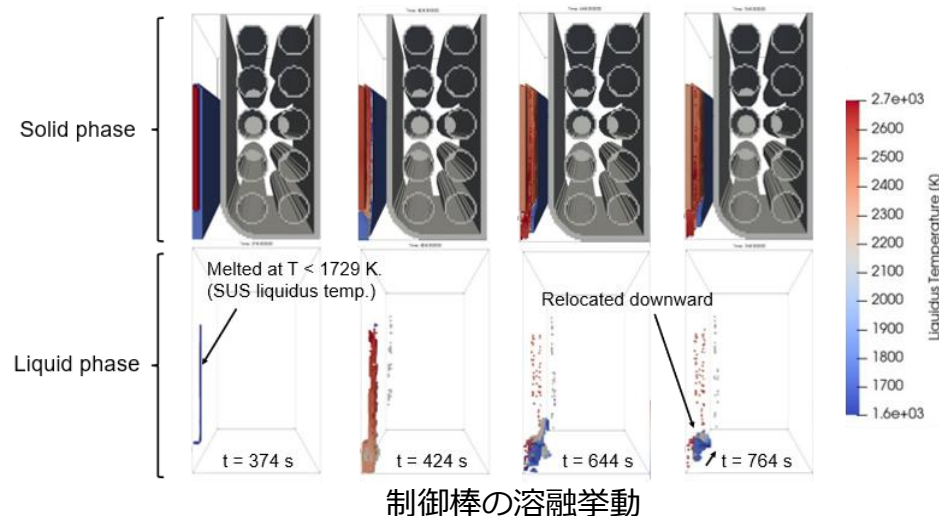
- 溶融挙動検証解析として、JUPITERコードでXR2-1試験とLEISAN試験の実験解析を実施

XR2-1試験は、米国Sandia国立研究所で実施されたEx-Reactor炉心溶融実験の一つ



XR2-1試験解析結果

LEISAN試験は、JAEA/CLADSに設置された大規模反応試験装置（LEISAN）で実施された制御棒ブレード破損試験



制御棒の溶融挙動

LEISAN試験解析結果

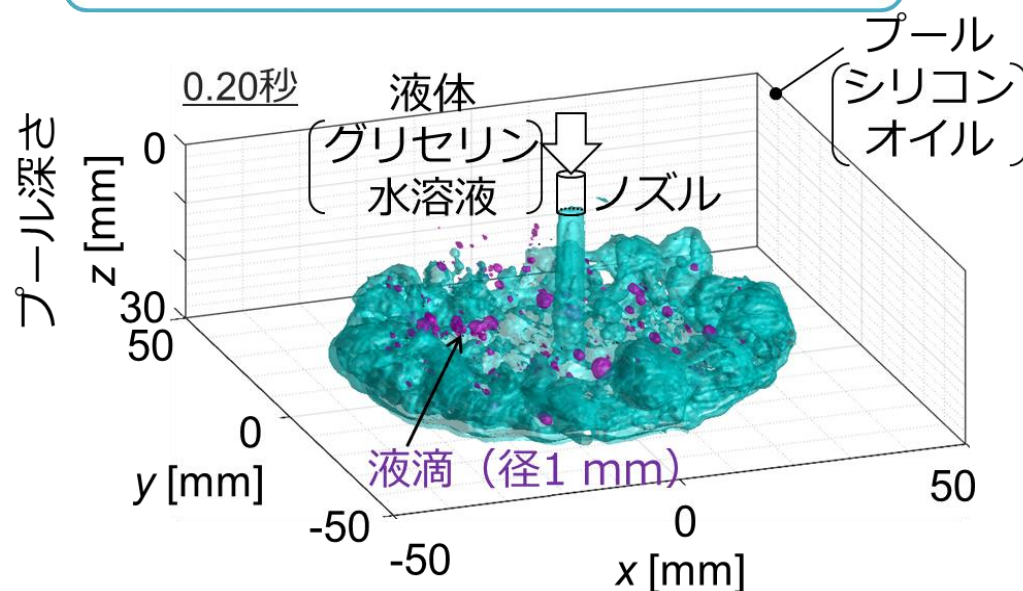
炉心溶融による燃料デブリ生成メカニズムの検証と炉内状況推定精度の向上により、デブリ取り出しへの貢献が期待される。

1) S. Yamashita, H. Yoshida, 13th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS13) (2024). 2) 山下、吉田、日本原子力学会2025年秋の大会、1P16.

燃料デブリの形成過程を解明するため、溶けた燃料と水という異なる二つの液体による現象を模擬実験により3次元で可視化する手法を開発した。

令和7年3月21日プレス発表：原子炉内で溶けた燃料が大量の微小な液滴に分裂 その現象を3次元で可視化する—燃料デブリが形成される過程の解明に向けて—

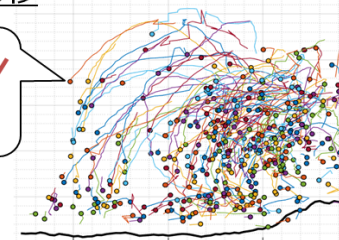
- ① 液体が0.5秒の間に1,000個近くの液滴に分裂する現象を立体的に可視化



- ② 一つ一つの液滴を追いかけてながら大きさや速さを精緻に計測

0.00~0.50秒

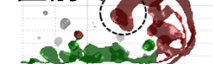
軌跡
液滴



- ③ 液滴が発生する様子を詳細に観察して大きさや速さと関連付け

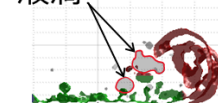
0.18秒

ちぎれる
直前



0.21秒

液滴



二相流における液滴・液膜計測技術に応用し、熱流動コードの妥当性確認データを取得することで、原子炉の過酷事故時に溶けた燃料が細かく分裂し燃料デブリが形成されるまでの過程への理解を深め、東京電力福島第一原子力発電所の廃炉や原子炉の安全性向上への貢献が期待される。

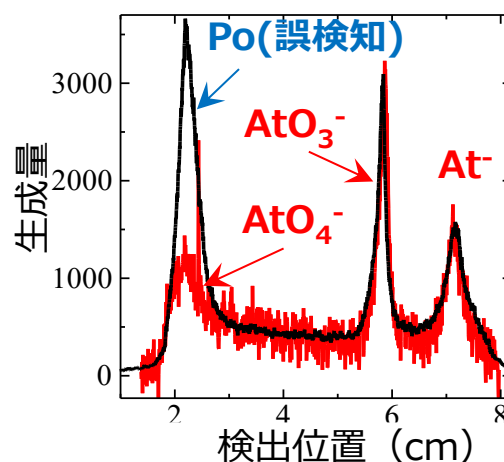
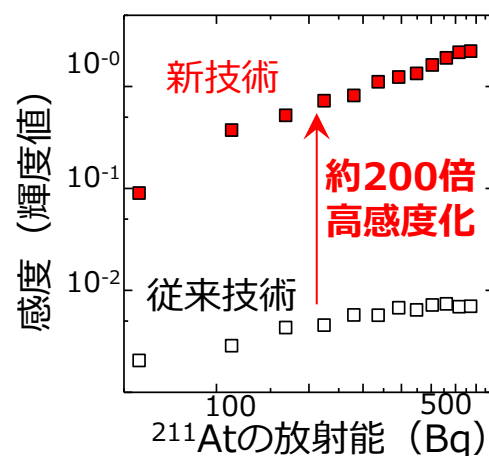
N. Horiguchi et al., Phys. Fluids, 35, 073309 (2023).

トピックス：計画外の成果 医療用 α 線放出核種分析装置の実用化研究

α 線内用療法は、がん治療の新たな可能性を切り開く次世代放射線治療法として世界的に注目されている。 α 線がん治療薬（例： ^{211}At -MABG）の治療効果を決定する α 線放出核種の化学形と放射能の迅速・同時分析装置「NuS-Alpha」を開発し、販売開始した。（令和7年4月プレス発表）

高増幅・高速・高画素カメラをベースとした撮像部開発
高感度＋短時間＋大画像分析を実現

フィルム状シンチレータを利用した α 線検出器部開発
 α 線放出核種の高確度分析を実現



新技术
従来技術

α 線放出核種分析装置
NuS-Alpha



- ✓ 高感度(迅速)
- ✓ 化学形・生成量同時分析
- ✓ 省スペース(A4サイズ)

研究機関や病院関係への販売を促進しつつ、 β 線核種分析・様々な試料への対応など高機能化を進めることで、次世代放射線治療法の普及に貢献する。

M. Segawa et al., J. Instrum. (2025) accepted, J. Radioanal. Nucl. Chem. 326 (2020),
特許第7128479号:実施許諾契約締結、関連特許7649041号取得、販売実績あり(QST)

これまでの実績と 第4期終了までの計画 中長期計画以外の成果

項目2(1)1：原子力基礎基盤研究

- 【実績】 散乱断面積が大きい構造材に対する断面積データの測定手法について誤差の検討を行うとともに、試作した共分散評価システムを用いて暫定的な評価ファイルを作成し評価データの妥当性の検討を進めた。
- 【計画】 原子力技術の基盤となる評価済核データライブラリ整備のため、開発した測定手法を用いて散乱断面積が大きい構造材に対する断面積データの測定を進めるとともに、共分散の評価手法について妥当性を検討し改良を行う。
- 【実績】 MVPに対して全炉心タリーを実現する手法の開発を進め、FRENDYに共分散処理を可能とする機能の組み込みを実施した。JUPITERに適合した沸騰事象モデル化を完了し、燃料集合体内詳細二相流データベースの構築に必要な可視化測定技術を開発した。
- 【計画】 中性子輸送計算に対して、全炉心での過渡計算を可能とする手法の開発を行う。燃料集合体内詳細二相流解析に対して、妥当性確認に必要な詳細二相流データベースを構築するとともに、これを用いて解析結果の妥当性を確認する。
- 【実績】 非破壊測定要素技術の開発を完了し、計画を前倒しして複雑組成に対応可能な非破壊測定技術の開発に着手した。その一環として、燃料デブリ用の非破壊核物質測定装置の検討を進めた。
- 【計画】 高速中性子を用いた新しいアクティブ中性子法:高速核分裂中性子同時計数法について、シミュレーションおよび実験の両面から検証を進め、1F廃止措置のみならず核セキュリティ分野にも適用可能な、複雑組成の核燃料物質・放射性物質に対応できる非破壊測定装置モデルを具体化する。

項目1(1)：一層の安全性・経済優位性を追求した原子力システムの研究

- 【実績】 マルチフィジックス・シミュレーション・プラットフォーム「JAMPAN」上で沸騰水型軽水炉（BWR）の全炉心に対する核熱カップリング・シミュレーションを実施した。燃料ふるまい解析機能の実装に向けてプラットフォームを改良した。
- 【計画】 革新的原子力システム研究開発（デジタルツイン+）として、マルチフィジックス・シミュレーション・プラットフォーム「JAMPAN」上で過渡状態に対する核熱カップリング・シミュレーションおよび核・熱・燃料ふるまい解析を実施する。

計画外の成果

- 溶けた燃料と水という異なる二つの液体による現象を模擬実験により3次元で可視化する手法を開発した（令和7年3月プレス発表）。原子炉の過酷事故時に溶けた燃料が細かく分裂し燃料デブリが形成されるまでの過程への理解を深め、東京電力福島第一原子力発電所の廃炉や原子炉の安全性向上への貢献が期待される。
- α 線がん治療薬（例： ^{211}At -MABG）の治療効果を決定する α 線放出核種の化学形と放射能の迅速・同時分析システム「NuS-Alpha（ニュースアルファ）」を販売開始した（令和7年4月プレス発表）。これにより、アスタチンを用いた放射線治療薬の実用化を加速するだけでなく、環境モニタリングなどにも適用できるため、臨床現場、放射線産業および環境分野などへの貢献も期待される。
- 測定試料と同一の構成元素を含む標識試料にパルス中性子を照射し、標識試料から放出される即発ガンマ線を計測することにより、測定試料内部の温度を非破壊・非接触で高精度に評価する手法を確立した。本手法により、従来困難であった材料内部の温度分布の把握が可能となり、材料研究や熱物性評価など、多様な応用展開が期待される。