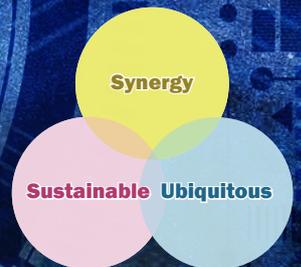
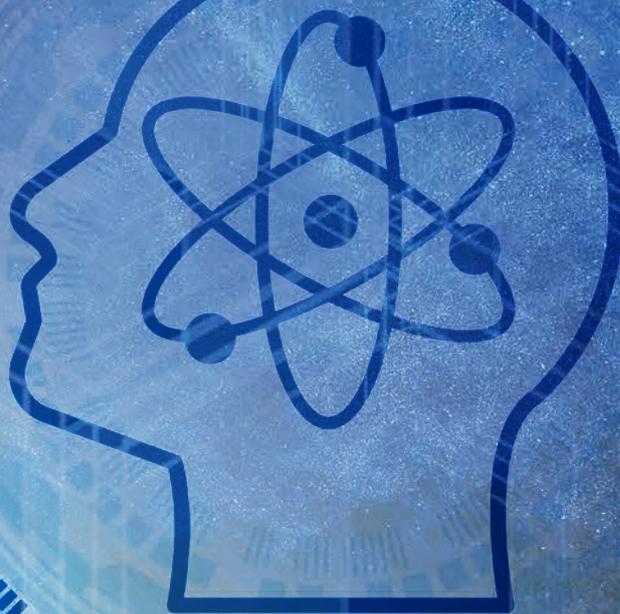




JAEA R&D Navigator

2024-25





JAEA R&D Navigator 2024-25

CONTENTS

高温ガス炉水素・熱利用研究

- | | |
|--|----|
| 高温ガス炉における核特性予測精度の向上を目指して
ー結晶性黒鉛の非弾性散乱断面積評価ー | 5 |
| CT 原理に基づく炉内出力分布測定技術の完成
ー臨界実験による原理実証ー | 6 |
| 高温ガス炉で製造された水素を利用し鉄をつくる
ー製鉄に伴う CO ₂ 排出を削減し、カーボンニュートラルに貢献ー | 7 |
| ヘリウム熱交換型水蒸気改質器解析モデルの開発
ー原子炉の熱を利用する化学反応器を数値解析で捉えるー | 8 |
| HTRR ヘリウム循環機のフィルタ差圧上昇防止策
ーフィルタ差圧上昇に寄与した微粒子を特定ー | 9 |
| 効率的な水素製造のカギとなる反応器の基盤技術
ー割れやすいセラミックス水素分離膜の簡便なシール方法の提案ー | 10 |

高速炉研究開発

- | | |
|--|----|
| 機械学習が MOX 燃料の最適な製造プロセスを予測 | 11 |
| 高速炉のより良い遮蔽設計に向けて
ー炉心支持板の中性子照射量の解析精度を「もんじゅ」試験データで確認ー | 12 |

先端原子力科学研究

- | | |
|--|----|
| インダクタの大幅な小型化
ー絶縁体積層薄膜を用いて提案ー | 13 |
| なぜウラン超伝導体は磁場に強いのか？
ー新しい超伝導の機構を解明ー | 14 |
| 電子線核分光で原子核の形を調べる | 15 |
| 熱的な力で物質を分離
ー固液界面で温度勾配により駆動される流動の理論的予測ー | 16 |
| グラフェンと金はどのように電子の手をつなぐか
ーグラフェンと金の化学結合の形成条件を解明ー | 17 |

ナノ結晶の階層化をもたらす力の発見 －先進セラミックスの加工技術に道－	18
--	----

レーザー光ビームは光線か？波動か？ －新しい光の表現 stochastic ray tracing の提唱－	19
---	----

原子力基礎工学研究

高耐熱ハイエントロピー合金の特異な力学特性の起源 －電子状態計算に基づく力学機能設計－	20
--	----

環境中の微量ウランの分布状態を超伝導技術で可視化できる分析法 －環境中の様々な微量元素の移行挙動解明への期待－	21
--	----

炉心の過熱を遅らせて過酷事故への進展を防ぐ －新燃料被覆管材料の高温耐酸化性－	22
--	----

地上の半導体ソフトエラー率を迅速に推定する手法の開発化 －安心安全な超スマート社会の実現のために－	23
--	----

マイナーアクチニド核変換システムの開発に向けて －J-PARCにおける ²⁴¹ Amの核データ実験精度の向上－	24
---	----

使用済核燃料再処理プロセスでのステンレス鋼の腐食を評価 －高レベル廃液濃縮缶内面の腐食評価手法を構築－	25
--	----

コンクリート廃棄物に含まれる難測定核種カルシウム 41 の簡易分析に向けて －電子準位の特異性を利用してカルシウム奇数同位体を選択的にイオン化－	26
---	----

詳細数値シミュレーションと理論で壁面衝突噴流の微粒化機構に迫る	27
---------------------------------	----

中性子及び放射光利用研究

その場中性子回折法による鉄鋼の相変態の再検討 －マルテンサイト相変態における格子定数の変動－	28
---	----

液体ヘリウム不要の中性子散乱用特殊試料環境の構築 －安全手軽に口スを減らして低温・強磁場環境を実現－	29
---	----

急冷水溶液に生じるナノ氷結晶を中性子と水素のスピンで観測 －食品・医薬品・細胞組織の凍結保存技術開発への貢献に期待－	30
---	----

放射光 X 線が導く水素安全対策の高度化 －酸化炭素に被毒されない水素再結合触媒の開発－	31
---	----

土壌粘土鉱物を用いた環境に優しい熱電材料の創製 ー高温域での熱電変換技術への挑戦ー	32
--	----

システム計算科学研究

鉄鋼材料の脆化要因となる水素の挙動解析 ー昇温脱離スペクトルを数値シミュレーションして水素トラップ状態を推定するー	33
--	----

大規模原子カシミュレーションの In-Situ 可視化・制御技術の開発	34
-------------------------------------	----

土の中で金属イオンはどう動く？ ー分子スケールのシミュレーションと実験が解き明かす土の性質ー	35
---	----

ガラスの複雑な原子構造を高速・高精度な原子シミュレーションで再現	36
----------------------------------	----

GPU を駆使して流体解析と観測データを高速に同化する手法の開発	37
----------------------------------	----

核不拡散・核セキュリティ技術開発

核鑑識のための電子顕微鏡画像解析による核物質分類と未知物質の検出 ー深層距離学習モデルを使用した新しい核物質異同識別手法ー	38
--	----

福島第一原子力発電所事故の対処に係る研究開発（廃止措置に向けた研究開発）

光ファイバを用いた 1F 高線量率場の放射線分布測定に成功 ー光の波長分解分析に基づく新手法の初実証ー	39
--	----

1F 原子炉建屋内の放射能汚染を 3 次元的に“見える化” ー見えない放射能汚染を可視化して 1F 建屋内の環境改善に貢献ー	40
---	----

非 GPS 環境下におけるドローンの飛行性能評価法の開発	41
------------------------------	----

廃炉作業空間モデリングのための写真測量計算負荷の軽減 ー画像シーケンスから逐次生成される立体モデル統合手法ー	42
---	----

中性子を計測せずに中性子数の増加を評価する ー短半減期希ガス核分裂生成物の放射能比に基づく臨界監視法ー	43
--	----

γ 線照射下のジオポリマーからの水素の発生と放出をモデル化 ージオポリマーによる放射性廃棄物の固定化の有効性を確認ー	44
--	----

福島第一原子力発電所事故の対処に係る研究開発（環境回復に係る研究開発）

除染や家屋解体作業における被ばく線量評価向上を目指して －作業別・場所別に作業員の被ばく線量を統計的に評価－	45
ため池における放射性セシウム分布の現場評価を目指して －底質中放射性セシウムの深度分布の経時変化による影響－	46
空から放射線を測る －東京電力福島第一原子力発電所周辺の10年の空間線量率観測成果－	47
固体表面の微量成分の分布を可視化 －レーザーと同位体計測を用いた高感度イメージング法－	48

地層処分技術に関する研究開発

地層中の割れ目がずれると割れ目内の隙間（地下水の通り道）はつながるか？ －隙間のつながり具合を現場で簡単に調べる試験手法を開発－	49
マントルから湧き上がる流体の通り道の検出に向けて －地震波速度の異方性を利用した検出の試み－	50
地下水の流れが遅い場所を見分ける －地下水の動きを割れ目の水質で判断する方法を構築－	51

安全を最優先としたバックエンド対策の着実な推進

汚染起源の推定により合理的な放射能濃度の評価が可能に －動力試験炉（JPDR）の解体によって発生したコンクリート廃棄物に対する評価方法の検討－	52
--	----

安全研究・防災支援

流体の自由表面の動きを追跡する －粒子法の安定性及び精度の向上－	53
原子炉圧力容器が急冷されるとき熱伝達 －浮力共存下の下向対流熱伝達の評価－	54
再処理施設の安全性向上に向けて －蒸発乾固事故で放出される気体状Ruの化学形の同定－	55
甲状腺測定のスクリーニングレベル見直し方法の検討 －原子力災害時における甲状腺測定の実行性向上を目指して－	56

高温ガス炉における核特性予測精度の向上を目指して — 結晶性黒鉛の非弾性散乱断面積評価 —

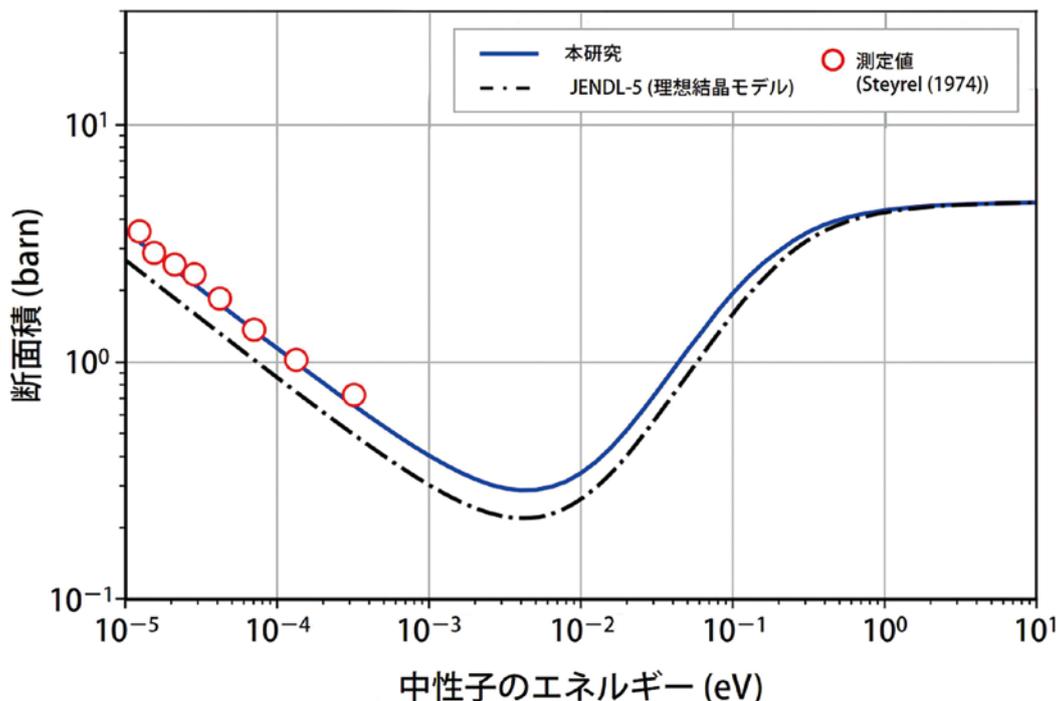


図1 非弾性散乱断面積データの評価値 (JENDL-5及び本研究) と測定値 (Steyrel (1974)) との比較

黒鉛を減速材とする高温ガス炉を設計する上では、主に熱中性子による核分裂連鎖反応で臨界状態を維持していることから、炉心解析において、熱中性子の挙動を正確に評価することが重要です。その評価には、熱中性子と同程度のエネルギーを持つ、黒鉛結晶の低周波数の格子振動と熱中性子との相互作用を定量的に考慮する必要があります。そのための断面積データの一つに、非弾性散乱断面積データと呼ばれるものがあります。

最新の核データライブラリJENDL-5に収録されている結晶性黒鉛に対する非弾性散乱断面積データは、低エネルギー領域における測定値の再現性に課題が残っていました。そこで本研究では、詳細な分子動力学シミュレーションモデルから得られた結晶性黒鉛の炭素原子の飛跡データを用いて、非弾性散乱断面積の解析を実施しました。その結果、図1に示すような測定値を良好に再現する非弾性散乱断面積データを取得することに成功しました。

本成果は、高温ガス炉の炉心核設計精度向上への貢献が期待できます。さらに、高温ガス炉のみならず、他の黒鉛減速炉や小型加速器中性子源等に対しても応用できることから、今後、利用価値が高まるものと期待されます。

本研究は、京都大学との共同研究「高温ガス炉炉内計装用中性子検出器の開発」の成果の一部です。

Okita, S. et al., An Evaluation on Inelastic Thermal Neutron Scattering Cross-Section Data of Crystalline Graphite, RADIOISOTOPES, vol.73, issue 3, 2024, p.233–240.

エネルギー研究開発領域
高温ガス炉プロジェクト推進室 沖田 将一朗



◀Webはこちらへ

CT原理に基づく炉内出力分布測定技術の完成

—臨界実験による原理実証—



図1 KUCA炉心とステッピングモーター

検出器は運転ごとにステッピングモーターの位置を変え、炉心周囲のデータを取得します。

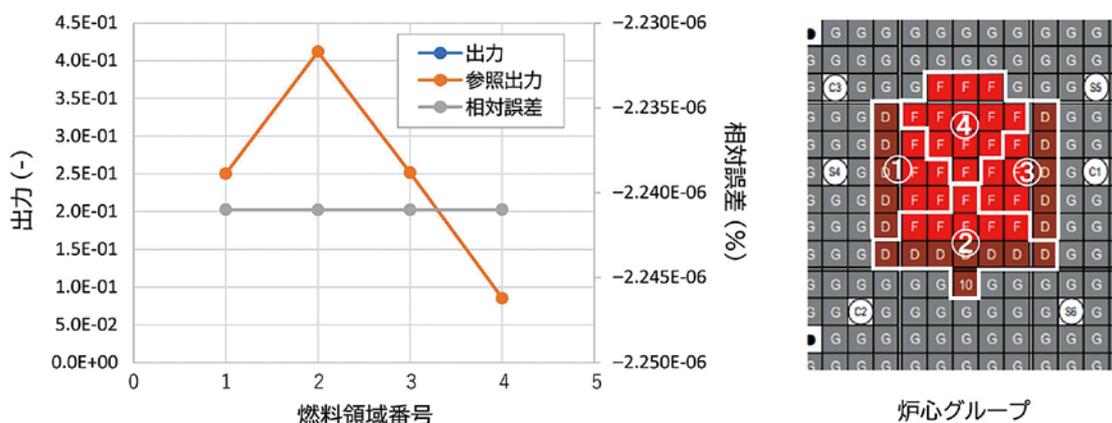


図2 炉心4グループの出力と誤差

ステッピングモーターが水平にしか動かないことから、高さ方向別の情報が取得できなかったため、4グループのみとなりました。感度の平均化には出力分布を用いますが、参照出力を用いたため、精度が高くなっています。結果として出力と参照出力が重なっています。なお、出力は分布が重要なため、全出力で規格化し無次元としています。精度に関しては、今後の課題です。

現行の軽水炉では、炉内への直接的な中性子検出器の挿入が可能であり、これにより出力分布測定を行い、炉内の燃料管理を行っています。一方で、炉内が1,000℃以上になる高温ガス炉では、検出器の炉内への装荷が困難です。

そこで、黒鉛減速体系で中性子の飛程が長い高温ガス炉の利点を利用し、炉外検出器を移動し、多くの測定点を設け、CT (Computed Tomography) 原理を用いて、炉外から漏えい中性子の測定を行い、出力分布を測定することを考案しました。このアイデアの有用性が認められ、2021年度文部科学省原子力システム研究開発事業において「高温ガス炉の出力分布測定のための核計装システムの開発」の提案が採択され、原子力機構、計装回路に詳しい株式会社ANSeeN、検出器素子に詳しい静岡大学の産学官の連携で実用化に向けた開発を行いました。2024年度に開発を完了し、その開発の中で、株式会社ANSeeN、静岡大学の検討の結果、HTTRの出力モニターの検出器を上下させる改良は、技術的な課題がないとの結論に至りました。また、原理の技術実証に関し、京都大学複合原子力科学研究所の臨界集合体実験装置KUCAにおいて出力分布の再現に成功しました (図1、図2)。

本研究は、文部科学省原子力システム研究開発事業JPMXD0221459236の助成を受けたものです。

Fukaya, Y. et al., Development of Nuclear Instruments to Measure Power Distribution of HTGR (1) Development of Ex-Core Detector, Proceedings of International Conference on Nuclear Fuel Cycle (GLOBAL2024), Tokyo, Japan, 2024, 4p.

エネルギー研究開発領域
高温ガス炉プロジェクト推進室 深谷 裕司



◀Webはこちらへ

高温ガス炉で製造された水素を利用し鉄をつくる — 製鉄に伴うCO₂排出を削減し、カーボンニュートラルに貢献 —

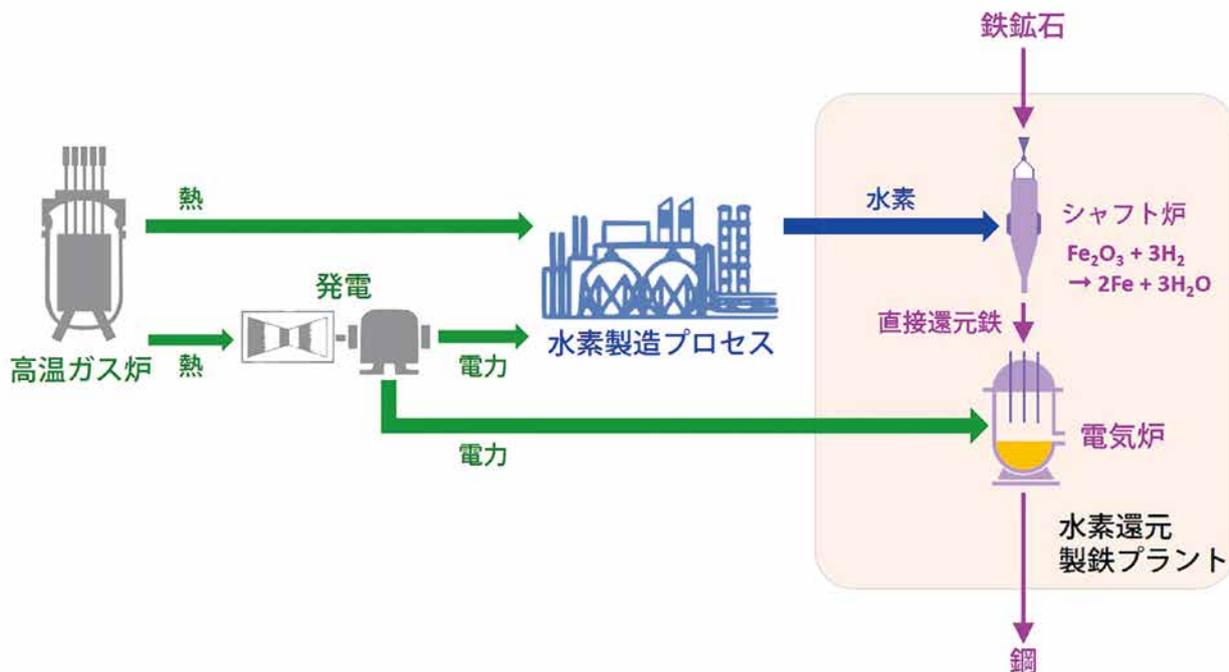


図1 高温ガス炉で製造した水素と電力を利用した水素還元製鉄プロセス

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、各種産業からの二酸化炭素 (CO₂) 排出削減が求められています。産業規模が大きく、コークスによる鉄鉱石の還元に伴ってCO₂が発生する製鉄業は、主要なCO₂排出産業部門の一つになっています。現在、鉄鉱石の還元の水素を利用することでCO₂を発生させない新しい製鉄プロセスの研究開発が進められています。

以上を踏まえて、高温ガス炉の熱及び高温ガス炉で発電した電力を用いて水素を製造し、鉄鉱石の還元を利用する高温ガス炉水素還元製鉄プロセスを提案しました (図1)。本プロセスは高温ガス炉発電による電力を電気炉での直接還元鉄の精錬に利用可能である利点もあります。高温ガス炉での水素製造にカーボンフリー水素製造法を適用することで、完全にCO₂フリーの製鉄を行うことが可能となります。本プロセスの熱物質収支をプロセスフロー解析によって導出し、CO₂排出量を評価しました。本プロセスのCO₂排出は、電気炉の黒鉛電極の消耗に伴うもののみとなります。本プロセスのCO₂排出量 (7 m³/t-鋼) は、一般の高炉製鉄プロセスの排出量 (1,047 m³/t-鋼) の0.7%にまで削減されました。ここで提案した高温ガス炉水素還元製鉄プロセスを高炉プロセスから置き換えていくことで、将来のカーボンニュートラルの達成に貢献することが期待されます。

Kasahara, S. et al., Flow Sheet Model Evaluation of Nuclear Hydrogen Steelmaking Processes with VHTR-IS (Very High Temperature Reactor and Iodine-Sulfur Process), ISIJ International, vol.52, no.8, 2012, p.1409—1419.

エネルギー研究開発領域
高温ガス炉プロジェクト推進室 笠原 清司



◀Webはこちらへ

ヘリウム熱交換型水蒸気改質器解析モデルの開発 —原子炉の熱を利用する化学反応器を数値解析で捉える—

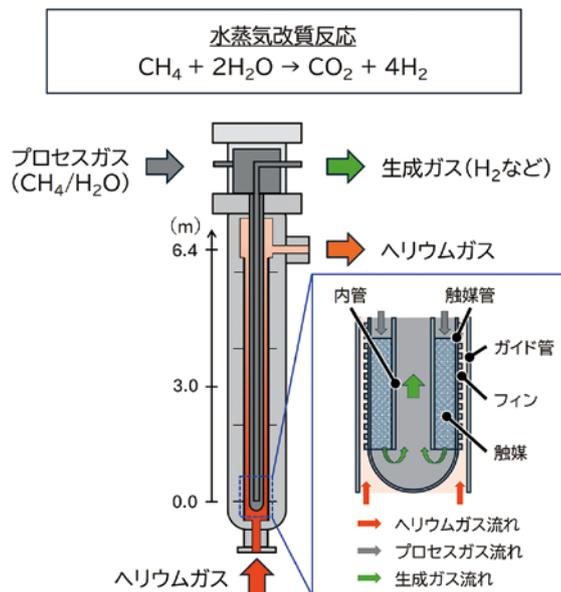


図1 ヘリウム熱交換型水蒸気改質器イメージ図

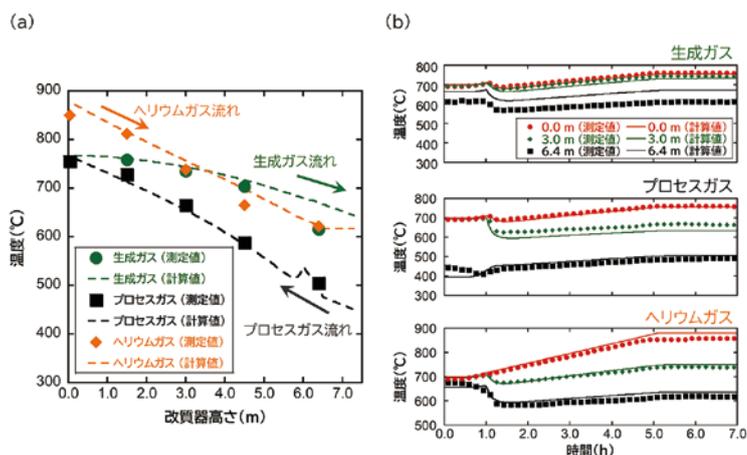


図2 炉外技術開発試験の測定値と評価モデルの計算値との比較

(a) 水素製造時の改質器内部温度 (定格時)、(b) 水素製造開始時の改質器内部の温度変化を示します。

HTTR-熱利用試験では、HTTR (高温工学試験研究炉) から得られる高温熱を活用してメタン水蒸気改質反応による水素製造の実証試験を行います。原子力機構は過去にHTTR水素製造システムの炉外技術開発試験の一つとして、ヘリウム熱交換型水蒸気改質器 (図1) を使用して、電気ヒータで900 °Cまで加熱したヘリウムガスと反応器の熱交換による水素製造の実証と水蒸気改質器の特性データ取得を行いました。水蒸気改質器は定められた運転条件の挙動把握だけでなく、数値解析上で再現し、大型化に向けて起動や停止、外乱を含めたプラント動特性の把握が必要です。

本開発では、ヘリウム熱交換型水蒸気改質器の熱物質収支評価モデルを構築し、水素製造時と起動時のガス組成、温度分布の解析を行い、炉外技術開発試験での取得データと比較し、モデルの妥当性の検証を行いました。

構築した評価モデルによる水素製造時の水蒸気改質器内部温度と出口ガス組成の計算結果は、実験結果と高い精度で一致しました (図2)。また、水素製造開始時の内部温度の変化と水素製造量は、実試験データと同様の挙動が確認されました。

これらの結果は、水蒸気改質器の水素製造時の挙動の把握や、HTTR-熱利用試験での運転条件の選定、水蒸気改質器の大型化に活用していきます。今後、評価モデル改良として、制御の時間遅れの考慮や水蒸気改質器出入口構造部の熱伝達の影響評価の反映を進めていきます。

Ishii, K. et al., Validation of Evaluation Model for Analysis of Steam Reformer in HTGR Hydrogen Production Plant, Proceedings of 30th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE30), Kyoto, Japan, 2023, ICONE30-1074, 9p.

エネルギー研究開発領域
高温ガス炉プロジェクト推進室 石井 克典



◀Webはこちらへ

HTTRヘリウム循環機のフィルタ差圧上昇防止策 —フィルタ差圧上昇に寄与した微粒子を特定—

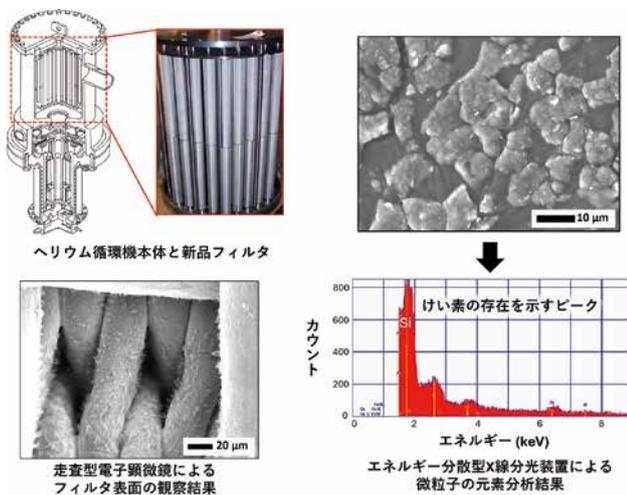


図1 ヘリウム循環機フィルタ表面の微粒子(左)及びその元素分析結果(右)

ヘリウム循環機フィルタ表面には微粒子がまんべんなく付着していました。それらの一部を分析した結果、シリコンオイルと同じくけい素を主成分とすることが分かりました。

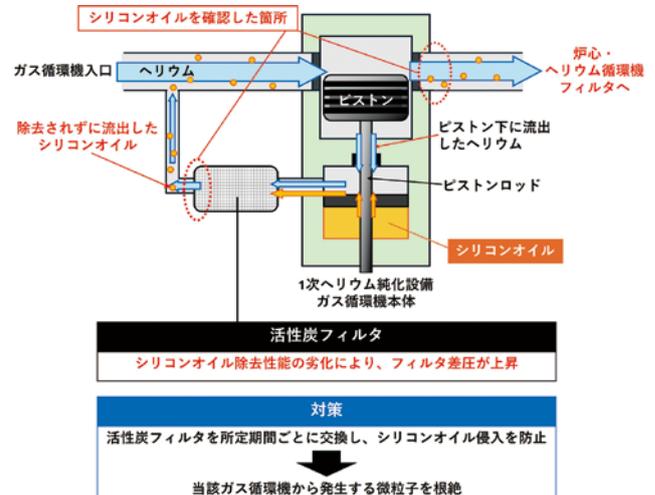


図2 シリコンオイルの炉心への侵入機構と対策

シリコンオイルは、ピストン下に流れたヘリウムが当該ガス循環機下部へ漏れることを防止しています。通常、ピストンロッドに沿って流出したシリコンオイルは、活性炭フィルタによって除去されます。しかし、赤点線枠で示す箇所にシリコンオイルが発見され、活性炭フィルタの除去性能の劣化とシリコンオイルの炉心への侵入が判明したため、活性炭フィルタの交換頻度を見直すことにしました。

高温ガス炉では炉心に黒鉛構造物を使用しており、その微粒子による原子炉システムへの影響が懸念されています。この懸念事項への対策も含めて、HTTR(高温工学試験研究炉)では、ヘリウム循環機にフィルタを設置し、ヘリウム冷却材中の微粒子を捕集しています。過去にフィルタ差圧が上昇し、その原因が黒鉛構造物の微粒子ではなく、1次ヘリウム純化設備ガス循環機(当該GC)の摺動部で生じた微粒子であると分かっています*。摺動部の改良により、フィルタ差圧は正常値を維持していましたが、2021年の運転中に再度上昇したため本研究ではその原因を調査しました。

フィルタ表面の微粒子を分析した結果、けい素を検出しました(図1)。事前調査でも、当該GCで用いるシリコンオイルの炉心への侵入痕跡を確認しています(図2)。したがって、シリコンオイルがフィルタ差圧上昇に寄与し、けい素の発生源であることが分かりました。シリコンオイルの侵入原因は、当該GC内部の活性炭フィルタの劣化と判明したため、所定の期間ごとに交換することとしました。

フィルタ差圧はシリコンオイルにより上昇しており、HTTRのようなブロック型高温ガス炉では黒鉛構造物の微粒子がほとんど発生しないことを示唆します。過去の事象を踏まえても、当該GCがフィルタ差圧上昇に寄与する微粒子の発生源と考えられます。活性炭フィルタの交換頻度を見直すことで、当該GCから生じる微粒子の根絶が期待できます。

* Inaba, Y. et al., Investigation on Dust Captured by Quintuple Filters Installed Upstream of Primary Gas Circulators in HTTR, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.51, issues 11–12, 2014, p.1373–1386.

Hasegawa, T. et al., Investigation of Deposits on Filter Element of Primary Gas Circulators in HTTR, Proceedings of 2024 International Congress on Advanced in Nuclear Power Plants (ICAPP 2024), Las Vegas, U.S.A., 2024, 10p.



効率的な水素製造のカギとなる反応器の基盤技術 — 割れやすいセラミックス水素分離膜の簡便なシール方法の提案 —

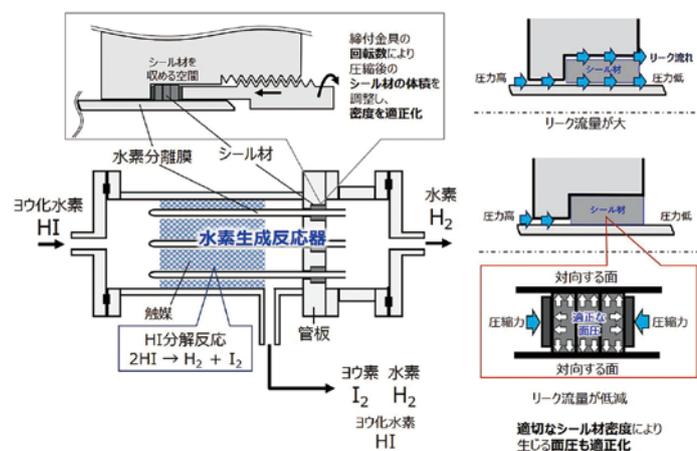


図1 水素製造を行う水素生成反応器の構造と水素分離膜のシール方法

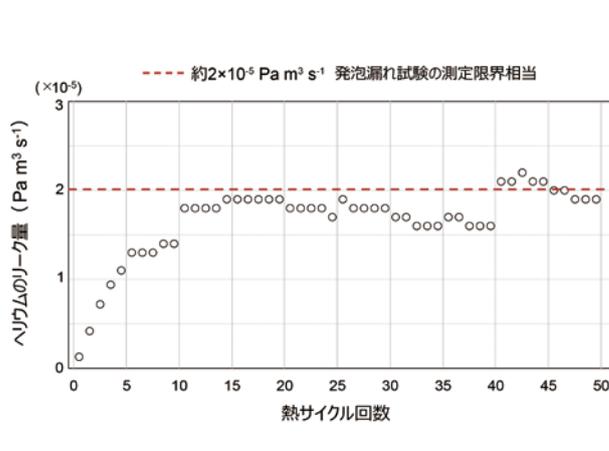


図2 水素製造プラントの起動停止を想定したリーク量の測定結果

高温ガス炉が生み出す高温熱を利用したカーボンフリー水素製造法である熱化学水素製造法IS法の水素製造熱効率、水素生成反応（ヨウ化水素酸（HI）分解）の反応器に水素分離膜を導入することで向上させることができます*。この際、管状のセラミックス製水素分離膜は、金属製管板にシール材を介して取り付ける必要があります。膨張黒鉛グランドパッキングは、HI分解反応のような高温かつ腐食性環境に耐え、セラミックスが割れないよう圧縮力のみでの付与が可能なシール材として知られていました。しかし、締付金具ネジ部に摩擦力が生じるため、リーク量低減に必要な面圧を発生させる圧縮力を、シール材に定量的に与えることは困難でした。

シール材を、それを収める空間に入れて圧縮すると3次元的に変形し、対向面との間に面圧が生じます。この変形量（体積変化）をシール材の密度（既知重量／体積変化）で代表させ、これが圧縮応力と相関することに着目しました。締付金具の回転数により既知重量のシール材の体積を調整し、目的の密度にすることで、シール材に適正な面圧を生じさせ、リーク量を低減させます（図1）。

実用プラントにおける反応器は、起動停止により高温状態と低温状態を繰り返します。このとき、シール材の熱膨張・収縮により面圧は変化するため、シール性能に影響を与えます。そこで、このシール方法について、ステンレス製模擬膜を用いて、熱サイクル試験（試験条件：25～400℃、0.3～0.9 MPa、試験流体：ヘリウム）を行いました。ヘリウムガスのリーク量は約 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ となり、このリーク量は一般的な発泡漏れ試験の測定限界値に相当し、本シール方法の有効性が確認できました（図2）。

本シール方法は簡便な施工方法で正確な面圧付与が可能であるため、多数の水素分離膜管を取り付ける将来の実用反応器に適応できると考えています。

* Myagmarjav, O. et al., Development of a Membrane Reactor with a Closed-End Silica Membrane for Nuclear-Heated Hydrogen Production, Progress in Nuclear Energy, vol.137, 2021, p.103772-1– 103772-7.

Sugimoto, C. et al., Quantitative Evaluation of Leakage Flow Rate in the Sealing Part Using Graphite Gland Packing to Mount a Hydrogen Separation Membrane Tube for HI Decomposition Membrane Reaction, International Journal of Hydrogen Energy, vol.95, 2024, p.98–107.



機械学習がMOX燃料の最適な製造プロセスを予測

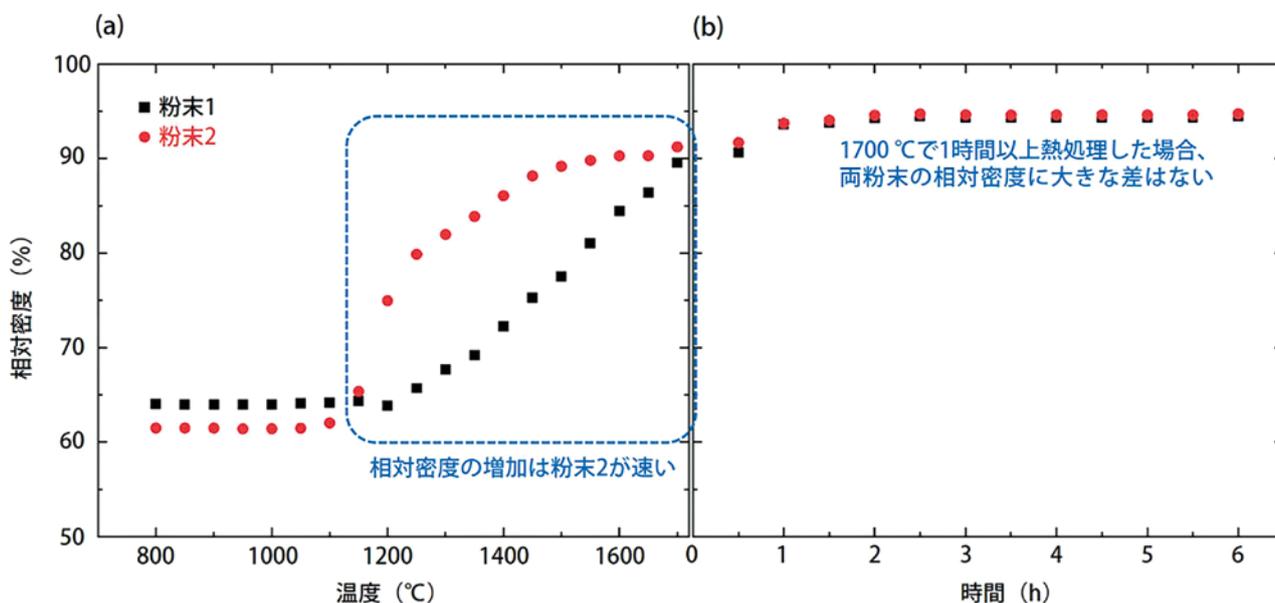


図1 機械学習モデルで予測した異なる粉末の焼結時の相対密度変化 (a) 温度依存性 (b) 熱処理時間依存性

(a) は相対密度に及ぼす熱処理温度の違いを表しており、(b) は (a) で予測された最も密度が高くなる熱処理温度 (1700 °C) において熱処理時間を変えた場合の相対密度変化を表しています。この結果から、予備試験等に頼ることなく、粉末1よりも粉末2が焼結時に相対密度の上昇速度が速いこと、1700 °C で1時間以上の熱処理をした場合、相対密度に大きな差がないことが分かりました。粉末1と粉末2は同じプルトニウム濃度ですが、粉末の原料、形状及びサイズに大きな差があります。

次世代の原子炉として開発が進められている高速炉では、ウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) が燃料として使用されます。MOX燃料の製造プロセスには多くの工程があり、それらのパラメータは複雑に関わります。そのため、最適な製造条件は、高度な専門的知識を持つ技術者・研究者が過去の知見をベースにパラメータの事前検討をした後、実験結果を評価して決定します。また、MOXはグローブボックスと呼ばれる気密性の高い容器内で取り扱う必要があるため、燃料製造設備へのアクセスは制限され、製造工程のデータ取得には限界があります。これらのことから、最適な製造条件の決定には長い期間とコストがかかります。

本研究では、既存の燃料製造データをデータベース化し、原料粉末の種類や製造パラメータと主要な燃料仕様である相対密度の関係を機械学習することによって、最適な製造プロセスを予測するモデルを導出しました。本モデルは、他の研究で報告されているモデルに比べても高い予測精度を持っており、実用化が可能なレベルです。このモデルを用いると、例えば性質の異なる粉末を使用して同じパラメータ (熱処理温度と時間) で製造した場合の相対密度変化が予測できます (図1)。この予測モデルによって、製造時の様々なパラメータを予備試験なしで、また高度な専門的知識なしで迅速に決定することが可能となります。

加藤正人, 渡部雅ほか, MOX燃料ペレットの機械学習焼結密度予測モデル, 日本原子力学会和文論文誌, vol.22, no.2, 2023, p.51-58.

大洗原子力工学研究所 戦略推進部 渡部 雅



◀Webはこちらへ

高速炉のより良い遮蔽設計に向けて

— 炉心支持板の中性子照射量の解析精度を「もんじゅ」試験データで確認 —

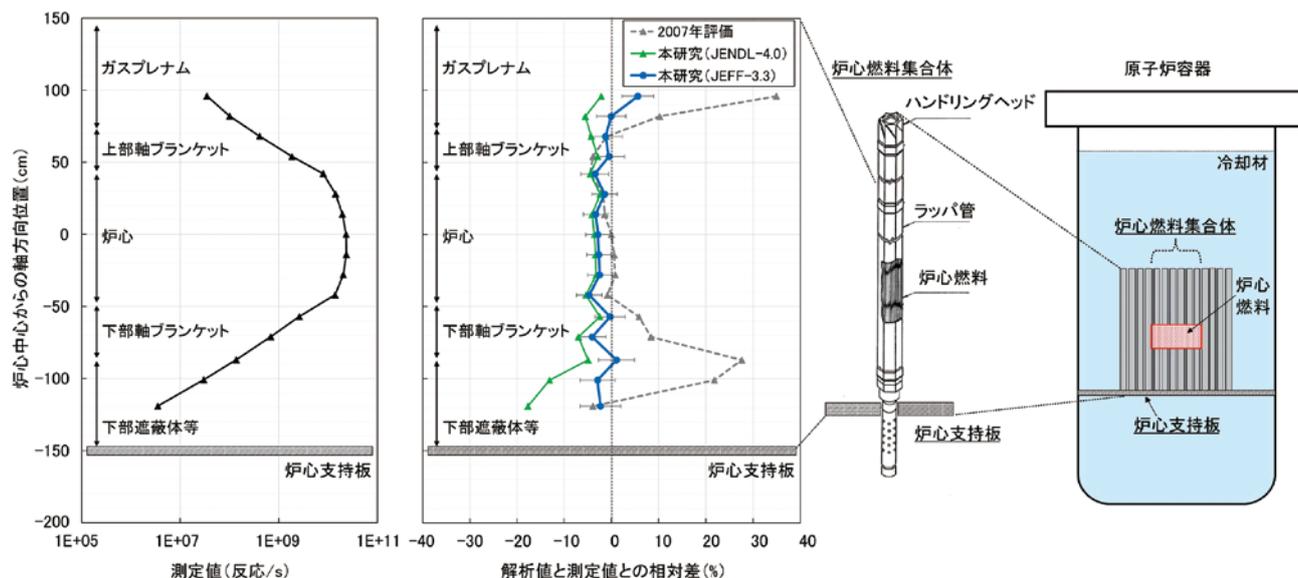


図1 Ni-58 (n, p) 反応率と再現解析の精度

中央の図に示すように、本研究により2007年評価における解析値と測定値との差が改善しました。また、炉心支持板近傍の解析精度は炉心部に比べ、核データライブラリ (JENDL-4.0、JEFF-3.3) に大きく依存することも分かりました。

炉心支持板は高速炉の燃料集合体を支える鋼鉄製の構造物ですが、原子炉運転中は中性子 (特に0.1 MeV以上の高速中性子) の照射損傷により劣化するため、炉心支持板の高速中性子照射量を精度良く予測することが重要です。

高速増殖原型炉「もんじゅ」では、様々な物質と中性子の反応率が箔放射法により測定されています。そのうち、ニッケル箔の反応率はNi-58 (n, p) Co-58の反応によるものであり、高速中性子に感度があります。試験を再現した解析値と測定値を比較することにより、高速中性子照射量の解析精度評価に活用できます。

高速中性子束は炉心で発生してから炉心支持板に到達する間に4桁以上減衰します。直近 (2007年) の評価では測定値との差が炉心内に比べて大きく現れており、減衰の評価精度に課題がありました。評価精度改善には燃料集合体の解析モデルの精緻化が有効ですが、体系全体を精緻にモデル化することは現在の計算機の性能でも困難です。そこで本研究では、モデル精緻化の効果を燃料集合体内の構成要素ごとに評価、分析し、中性子の減衰を正確かつ合理的に評価できるモデルを構築しました。その結果、炉心支持板近傍を含めて良好な精度で解析することができました (図1)。

本研究で得られた知見は、高速炉の遮蔽設計の高度化に活用されることが期待されます。

Mouri, T. et al., Evaluation of Reaction Rate Distribution for Shielding Region in the Prototype Fast Reactor Monju, Nuclear Technology, vol.211, issue 1, 2025, p.143–160.

大洗原子力工学研究所 高速炉研究開発部 毛利 哲也



◀Webはこちらへ

インダクタの大幅な小型化 — 絶縁体積層薄膜を用いて提案 —

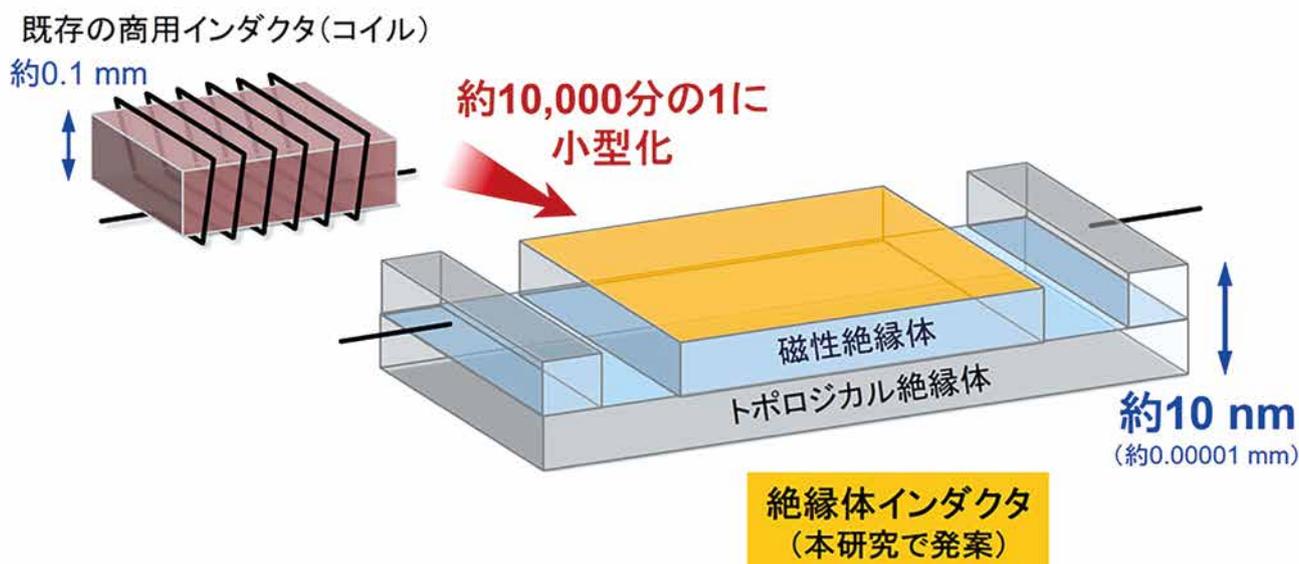


図1 本研究で理論提案した絶縁体インダクタの模式図

商用利用されている既存のインダクタ（コイル）は、最小でも0.1 mm程度のサイズを占めていました。本研究で理論提案した絶縁体インダクタは、「磁性絶縁体」「トポロジカル絶縁体」2層の積層薄膜を用いることにより、約10,000分の1のサイズでインダクタ機能を実現できると期待されます。

「インダクタ」は、電子回路で高周波信号を制御するために必須の素子です。電流の変動を打ち消す方向に電圧を誘起する機能を持ち、従来から微小な巻線（コイル）が使われてきました。しかし、この形態のインダクタはどんなに小型でも0.1～1 mm程度のサイズを占めるため、電子回路の小型化に限界を与える要因となっています。

本研究では、2種の絶縁体「トポロジカル絶縁体」と「磁性絶縁体」の薄膜の積層により実現されるインダクタ機能を新たに理論提案しました（図1）。トポロジカル絶縁体は内部に電流が流れず、表面だけに電流が流れるため、余計な電流による電力損失を起こしません。一方でその表面では、電流と磁気との相互変換が強く働く性質を持ちます。これにより模式図の積層薄膜に交流電流を流すと、磁性体中の磁気の振動を介して逆方向の交流電圧が発生する、インダクタと同等の機能が実現できることを発見しました。従来型（コイル）と同等のインダクタ機能を、絶縁体インダクタでは約10 nm程度、すなわち従来型の約10,000分の1という大幅な薄型で実現できるようになります。

本研究の成果は、電子回路の小型化と省電力化を両立する、基盤技術の足掛かりとなるものです。これまで信号処理回路中で大きなサイズを占めていたインダクタを、大幅に小型化かつ省電力化することで、情報化社会の進展に大きく貢献することが期待されます。

本研究は、JSPS科研費（JP19H05622, JP20H01830, JP21H04643, JP22K03538）及び文部科学省卓越研究員事業の支援を受けて行われました。

Araki, Y. et al., Emergence of Inductance and Capacitance from Topological Electromagnetism, Journal of the Physical Society of Japan, vol.92, no.7, 2023, 074705, 9p.



原子力科学研究所
先端基礎研究センター 荒木 康史



◀Webはこちらへ

なぜウラン超伝導体は磁場に強いのか？ —新しい超伝導の機構を説明—

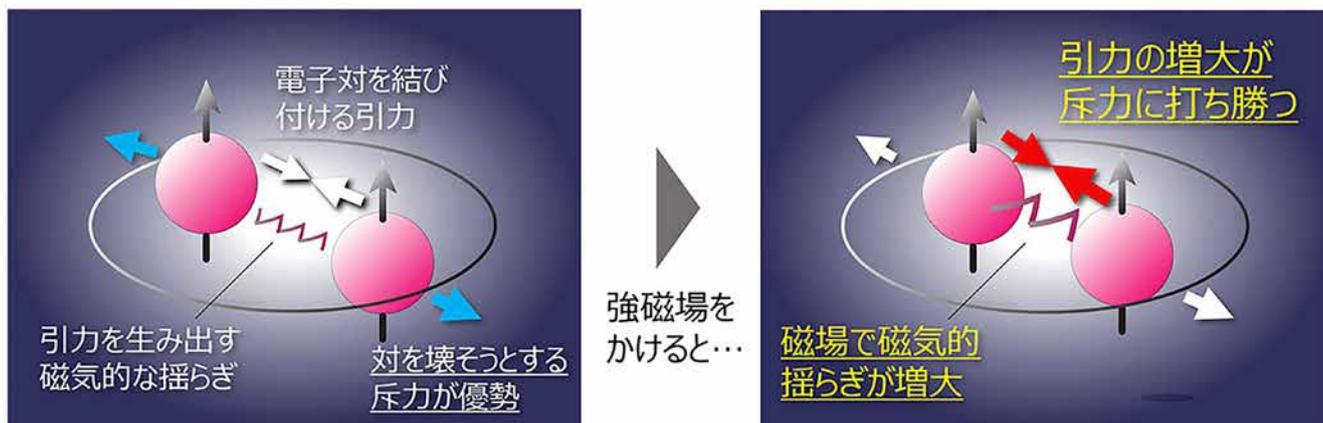


図1 ウラン超伝導体 UTe_2 で高い臨界磁場が実現する機構

スピン三重項超伝導体では、物質内部の磁気的揺らぎが、超伝導を生じる電子対（クーパー対）の形成を促します。この磁気的揺らぎは強い磁場がかかるとさらに強まり、それによって電子対の結合がより強固になります。その結果、超伝導は安定化し、強い磁場下でも壊れにくくなるのです。

超伝導体は通常、磁場に対して非常に脆弱であるため、強い磁場下でも安定して動作する超伝導体の開発は、超伝導線材や量子デバイスの進展において重要な課題となっています。ウランを含む超伝導体である UTe_2 （ウランテルル化合物）では、「スピン三重項」と呼ばれる新しいタイプの超伝導が発見されており、さらに強磁場下で超伝導がむしろ強化されるという従来の常識を覆す現象も確認されていました。

今回の研究では、核磁気共鳴（NMR）法を用いて、この磁場で強化される超伝導がどのように実現されるのか、そのメカニズムを探求しました。実験の結果、強い磁場がかかると物質内部の磁気的揺らぎが増大し、その結果として、超伝導を引き起こす電子対（クーパー対）の結合が強まり、磁場に強い超伝導状態が実現することが明らかになったのです（図1）。

この発見は、スピン三重項超伝導体においては、磁性と超伝導が深く結び付いていることを示しており、今後、この原理を応用することで、ウランを含まない他の化合物においても磁場に強い超伝導体が開発される可能性が期待されます。このような磁場に強い耐性を持つ超伝導体は、高性能な超伝導線材や量子デバイスの進化にとって極めて重要であり、超伝導技術の応用範囲をさらに広げる可能性を秘めています。

本研究は、JSPS科研費（JP20KK0061）の助成を受けたものです。

Tokunaga, Y. et al., Longitudinal Spin Fluctuations Driving Field-Reinforced Superconductivity in UTe_2 , Physical Review Letters, vol.131, issue 22, 2023, 226503, 7p.



原子力科学研究所
先端基礎研究センター 徳永 陽



◀Webはこちらへ

電子線核分光で原子核の形を調べる

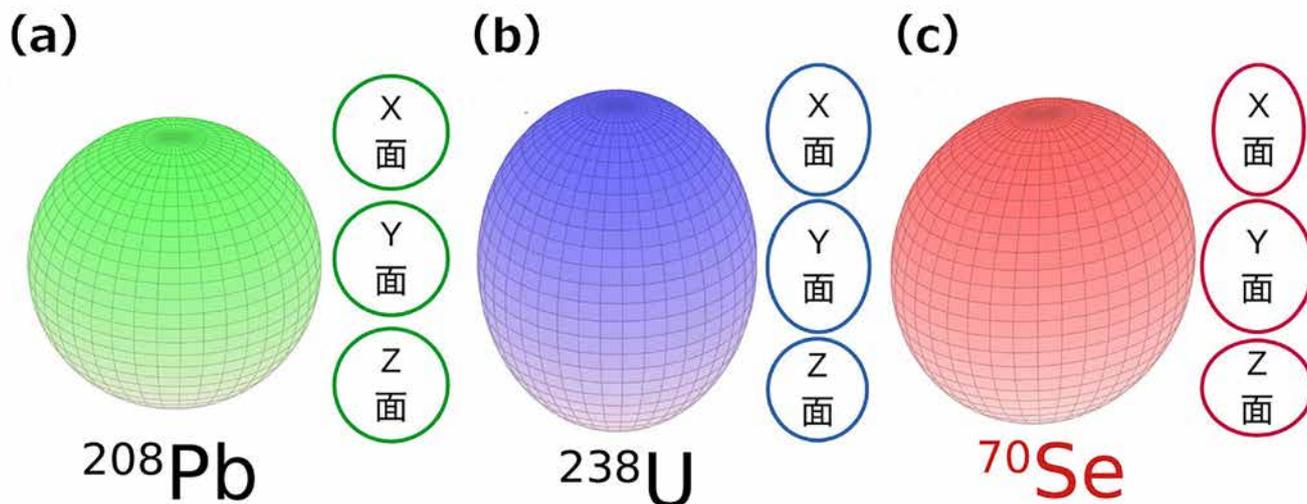


図1 原子核の様々な形状

(a) 球形の原子核、(b) 軸が伸びた原子核を表しています。(c) どの角度から見ても変形した原子核を ^{70}Se で観測しました。

原子核は一般に変形した形をしており、球形となる例は少ないです。原子核の形を調べることは、原子核の内部構造を知る手掛かりとなります。これは、原子核の反応や崩壊過程の理解を深め、例えば天体での元素合成の解明にもつながります。原子力エネルギー利用の基礎となっている核分裂も、原子核が極端に変形し、ちぎれる過程です。本研究では、セレン原子核 (^{70}Se) の形を観測しました。このため、加速されたイオンビームを使って ^{70}Se の回転状態を励起しました。量子力学的には回転エネルギーは離散的となります。回転エネルギーに対応してエネルギー準位がたくさん形成されますが、このエネルギー間隔は、原子核の形状の情報をもちます。実験では、エネルギー遷移の際に放出されるガンマ線や電子を検出することで回転準位を構築しました。この結果、 ^{70}Se は図1に示すように、三軸の長さが異なるユニークな形状を示すことが分かりました。

鉛 (^{208}Pb) のように球形な原子核は、三つのどの方向から見ても円形です (図1 (a))。レモン型に変形したウラン (^{238}U) では、一つの軸が長く、この軸から見たときだけ円形に見えます (図1 (b))。 ^{70}Se は、どの角度から見ても円形とはなりません (図1 (c))。本研究では、独自の電子線分光装置を開発することで、 ^{70}Se がユニークな形状を持つことを明らかにしました。

本研究は、文部科学省の卓越研究員事業 (JPMXS0320210193) の支援を受けたものです。

Smallcombe, J. et al., Reevaluation of Structures in ^{70}Se from Combined Conversion-Electron and γ -Ray Spectroscopy, Physical Review C, vol.110, issue 2, 2024, 024318, 16p.



原子力科学研究所
先端基礎研究センター James Smallcombe



◀ Webはこちらへ

熱的な力で物質を分離

— 固液界面で温度勾配により駆動される流動の理論的予測 —

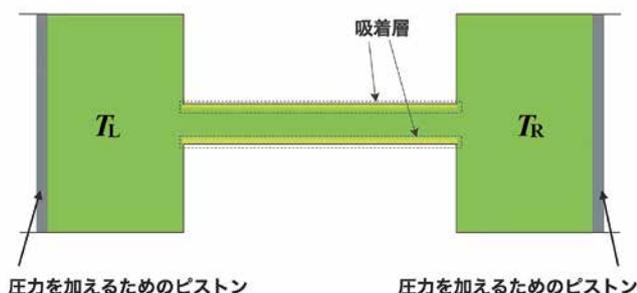


図1 問題設定の概念図

二つの大きな二成分流体を含む容器を十分に長い毛細管で繋いだ系に臨界点近くの二成分流体（二成分の流体が一樣に混ざっています）を封入します。二つの容器の組成と圧力は、臨界点の値に設定し、二つの容器の温度はわずかに異なる温度 (T_L , T_R) に設定します。

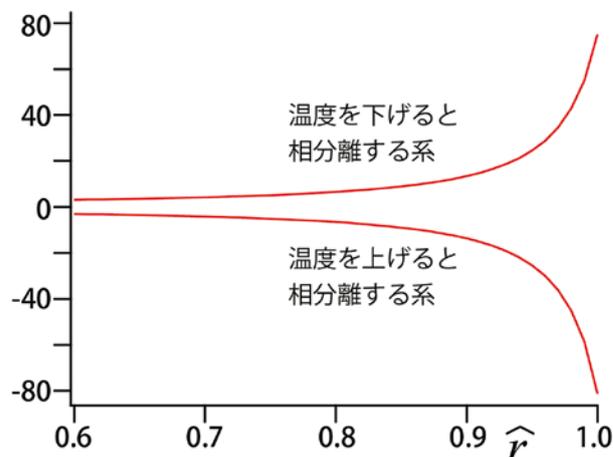


図2 毛細管中の熱的な力の分布

毛細管の中心軸からの距離（毛細管の半径が1になるよう単位を取っています）の関数としての、毛細管中の「熱的な力」の密度です（単位は理論計算におけるある特徴的な値を取っています）。正（負）の値は、温度勾配と同じ（反対の）向きの「熱的な力」を示します。

毛細管中や多孔膜などの制限された空間の流体に圧力、温度などの場の勾配をかけた際の流動は、物質の分離や微小空間での流体のコントロールの観点から重要です。特に、毛細管中の流体に温度勾配をかけると、毛細管の表面付近で、固液界面での流体の不均一性に起因した「熱的な力」が発生し、毛細管中での流動を誘起します。この現象は、非平衡物理学の基礎的問題であるにもかかわらず、その物理的なメカニズムはよく理解されていません。

私たちは、毛細管中の相分離（二成分の含まれる割合が異なる二つの状態が共存する）臨界点*近くの二成分流体（身近な例では水と油の混合系）の流動を流体力学の理論を用いて研究し、以下のことを理論的に予測しました。この場合、毛細管の固液界面においては、二成分のどちらかの成分が選択的に吸着されます。この吸着層（図1での毛細管中の黄色で示された層）の厚さは、臨界点の近くで大きくなります。私たちは、図2に示すように、この吸着層の内部で、幅広い二成分流体で、温度を下げた（上げた）時に相分離が起こるかに応じて、温度勾配と同じ（反対の）向きの「熱的な力」が生じることを示しました。この力により二成分流体の温度勾配と同じ（反対の）向きの質量流が誘起されます。

この予測の実験的検証や廃棄物分離への応用は重要な将来の研究課題です。

*臨界点…相分離が起こり始める温度と二成分の組成

Yabunaka, S. et al., Thermo-Osmosis of a Near-Critical Binary Fluid Mixture: A General Formulation and Universal Flow Direction, Physical Review E, vol.109, issue 6, 2024, 064610, 19p.

原子力科学研究所
先端基礎研究センター 藪中 俊介



◀Webはこちらへ

グラフェンと金はどのように電子の手をつなぐか —グラフェンと金の化学結合の形成条件を解明—

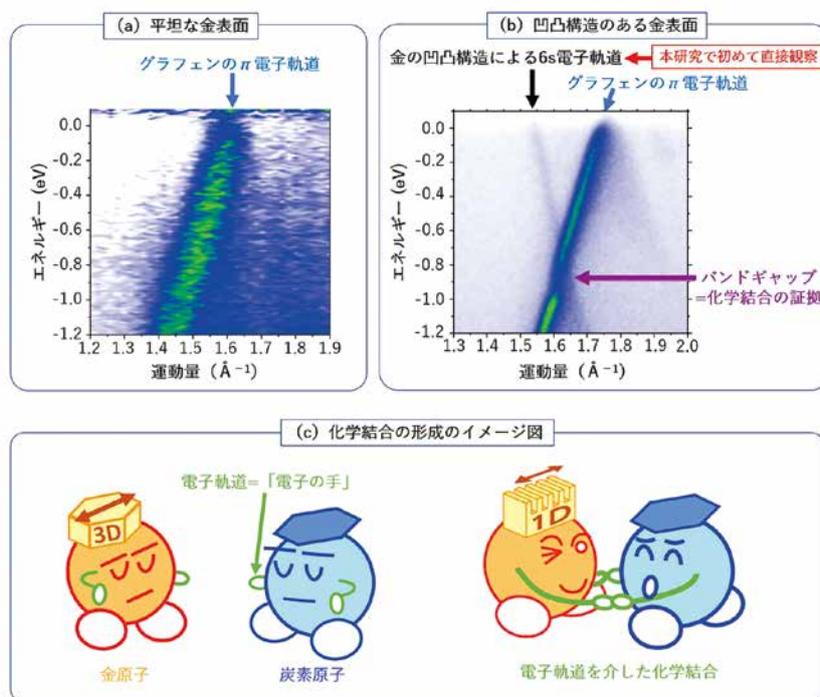


図1 (a) 平坦な金表面及び (b) 凹凸構造のある金表面に形成したグラフェンと金の間の電子軌道の角度分解光電子分光によるエネルギー・運動量の関係と (c) 化学結合の形成のイメージ図

角度分解光電子分光によって得られた電子軌道の運動量とエネルギーの関係において、(a) 平坦な金表面ではグラフェンのπ電子軌道のみが観測されました。(b) 同じ運動量とエネルギーの範囲で金の凹凸構造の周期性によって変調された金の6s電子軌道及びグラフェンのπ電子軌道が観測され、それらの交点でエネルギーギャップが生じたことから化学結合が形成したと言えます。(c) イメージ図は金原子と炭素原子の間に「電子の手」である電子軌道によって化学結合が生じたことを示します。

炭素原子の蜂の巣構造から成るグラフェン (単原子厚さの黒鉛) は、その中の電気伝導を担う電子が光速の1/300とも言われるほど極めて速く移動する特性を持つため、次世代以降の半導体材料として注目されています。本研究では配線材料の一つである金の表面にグラフェンを形成し、金の電荷やスピンをグラフェンに注入する効率に影響を与える化学結合の状態を、角度分解光電子分光によって観察しました。

その結果、図1 (a) 金の最密構造を持つ平坦な表面に形成したグラフェンでは、金の6s電子は結晶全体に三次元的に広がりグラフェンのπ電子の間に化学結合は見いだされませんでした。一方、図1 (b) 圧延された金箔の表面などに見られる原子サイズの一次的な凹凸を持つ最密構造では金の6s電子とグラフェンのπ電子の化学結合が見つかりました。このとき、結合に寄与する金の6s電子は一次元の周期性を持ちながら、グラフェンとの界面においては非局在性が高いため、化学結合の形成後もグラフェンのπ電子の特性を損なわないと分かりました。

本研究は、グラフェンと金の接合において金の原子配置の精密な制御によりグラフェンの特性を維持したまま化学結合の形成を実現できることを示しました。この知見は、グラフェンを用いた半導体素子の開発における配線金属の原子配置の制御による高効率の電流・スピン注入についての重要な基礎情報となります。

本研究は名古屋大学、大阪大学との共同研究です。また、本研究はJSPS科研費 (JP19K15400) 及びコニカミノルタ科学技術振興財団の助成を受けたものです。

Terasawa, T. et al., Band Gap Opening in Graphene by Hybridization with Au (001) Reconstructed Surfaces, Physical Review Materials, vol.7, issue 1, 2023, 014002, 10p.



原子力科学研究所
先端基礎研究センター 寺澤 知潮



◀Webはこちらへ

ナノ結晶の階層化をもたらす力の発見 —先進セラミックスの加工技術に道—

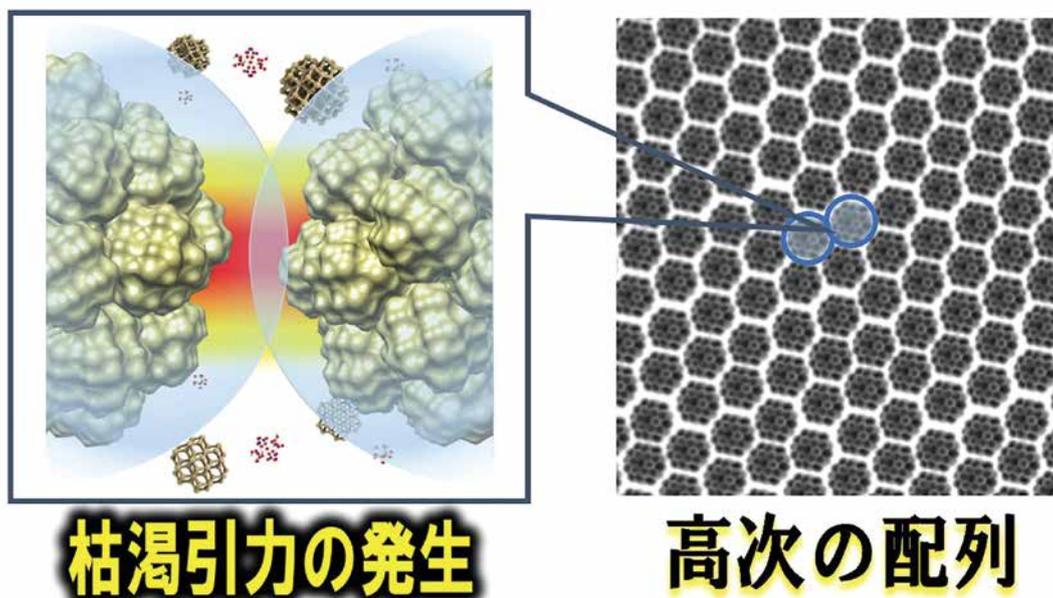


図1 電気二重層による斥力と、二粒子系の枯渴引力のバランスによって高次の配列を安定化させる

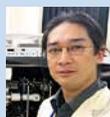
セラミックスは耐熱性や耐放射線性に優れ、腐食に強く、化学的に安定であるため、機能材料として産業で用いられます。その中でも、先進セラミックスは高価な金属資源を使うことから、これらの付加価値をさらに高めるためには限られたサイズで機能を集約したコンパクトな構造設計ができるかどうか課題となっています。

本研究では、排ガス浄化助触媒として製品化されているセリア (CeO_2) の製造プロセスを、中性子小角散乱、X線小角散乱及びレーザー共焦点微分干渉顕微鏡等の先進顕微鏡技術を駆使して調べました。その結果、小さなナノ結晶が集まり、階層構造が形成されることを発見しました。この微粒子の分散と凝集は、電気二重層の反発力と拮抗する枯渴引力が生じるために安定化されると説明できます。階層構造を構成する1次粒子と2次粒子が、サイズの異なる粒子として共存することで、高次の配列の相転移を起こすことが明らかになりました。枯渴引力は、大きさの異なる粒子が混ざっている場合に、同種の大きさ同士が集まりやすくなる力で、この力を有機高分子が含まれないセラミックス製造プロセスにおいて明らかにした初のケースです (図1)。

本成果は、微粒子が規則配列するときの結合様式を制御する集積ナノテクノロジーとして、新しい触媒やより緻密な設計が求められる光学材料の製造技術の進歩に寄与することが期待されます。

本研究は、東京大学、山形大学、北海道大学、量子科学技術研究開発機構との協力の下、黎明研究 (2021-22)、萌芽研究開発制度 (2023-24)、JSPS科研費 (JP20K05387, JP23K17808)、MEXT科研費 (JP18KK0148, JP18H01921, JP22H02010)、JRR-3 SANS-J (C3-2)プロジェクト課題 (2021-D400, 2022-D586, 2023-D857) を用いて行われました。

Aoyagi, N. et al., Globular Pattern Formation of Hierarchical Ceria Nanoarchitectures, Communications Chemistry, vol.7, issue 1, 2024, 128, 13p.



原子力科学研究所
先端基礎研究センター 青柳 登



◀Webはこちらへ

レーザー光ビームは光線か？波動か？ —新しい光の表現stochastic ray tracingの提唱—

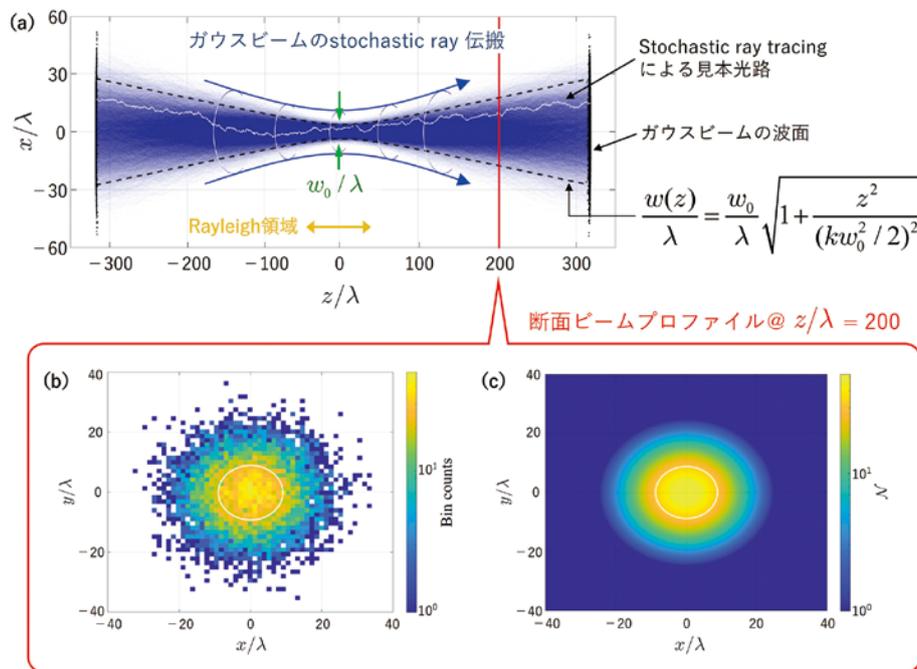


図1 Stochastic ray tracingによるガウスビームの再現

(a) 白色の曲線はstochastic rayの見本路を示しています。z軸をレーザー光伝搬方向として、1万本のstochastic rayを青色で重ねて描画し、濃淡でレーザー強度分布を表現しました。(b) Stochastic ray tracingによる光線本数分布のヒストグラム、(c) ガウスビーム理論式によるレーザー強度分布を示しています。

原子力機構では、レーザー光を物理学だけでなく廃炉措置研究などでも使用しています。これらの活動において、レーザー光伝搬を深く理解することは重要です。光が光線でもあり光波でもあることはよく知られています。しかし、従来の光線描像は光波描像から回折効果を取り除いた近似で、二つの描像は数学的に等価ではありません。さらに、集光は回折効果の一例です。光線描像は今でも有用な計算技法である一方、回折効果の欠落は集光の見積りに大きな予測誤差をもたらします。レーザー実験では集光されたレーザー光を頻繁に使用するので、これは大変な問題です。

そこで光線描像に回折効果を取り込むことができれば上記の問題は解決すると思えました。真空中伝搬するレーザー光ビームに対して、そのray（光線）は直線ではなくstochastic（ギザギザ）な光路を描くと再解釈し、その数理構成を新たな光線光学モデル“stochastic ray tracing”として提案しました。このstochastic rayの発展方程式はビーム型光波と数学的に等価で、ゆえに、光波の特徴である回折効果も光線として表現可能です。

レーザーを用いた研究ではガウスビームが頻繁に利用されます。Stochastic ray tracingで回折効果に由来する集光点付近のRayleigh領域挙動を正しく再現すること（図1 (a)）、光線本数分布（図1 (b)）が光波理論によるレーザー強度分布（図1 (c)）に整合することを数値計算で確認しました。レーザー強度分布は被照射物への注入エネルギー密度に直結するので、本手法はレーザー加工能力予測の高度化に貢献できると期待されます。

Seto, K., Stochastic Ray Tracing for Fresnel Diffraction, Optics Express, vol.32, issue 10, 2024, p.16999–17011.

敦賀事業本部
敦賀総合研究開発センター 瀬戸 慧大



◀Webはこちらへ

高耐熱ハイエントロピー合金の特異な力学特性の起源 —電子状態計算に基づく力学機能設計—

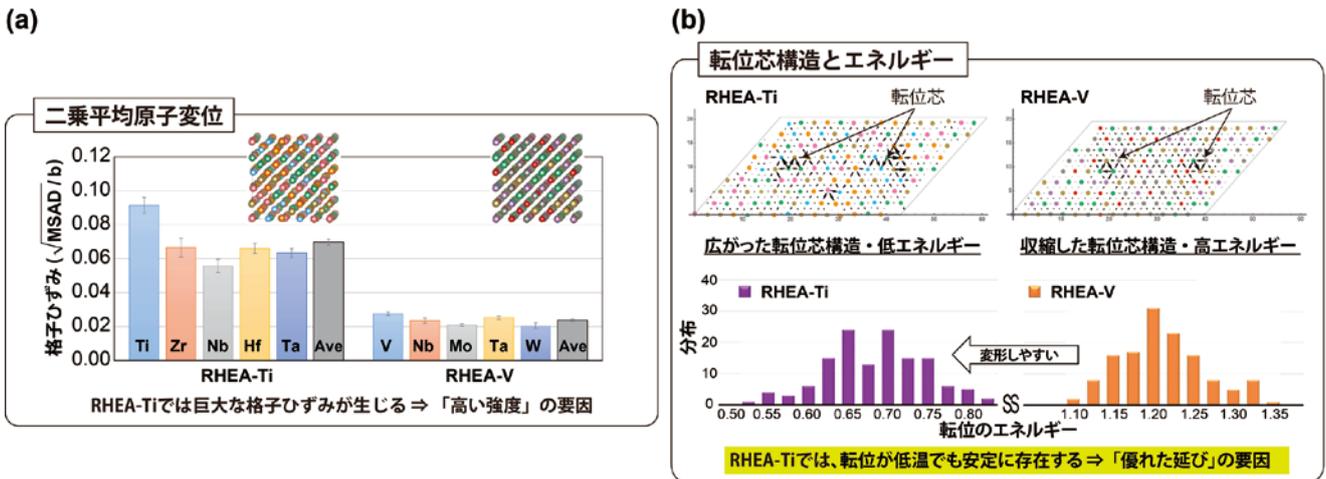


図1 電子状態計算による二つのハイエントロピー合金の格子ひずみと転位芯構造及び転位のエネルギー

Ni基超合金の耐熱温度を超えるガスタービンへの応用が期待される高耐熱ハイエントロピー合金 (RHEA) として、TiZrHfNbTa (RHEA-Ti) とVNbMoTaW (RHEA-V) という二つの合金が広く研究されてきました。本研究では、これらの合金の強度と延性が大きく異なることを実験によって示し、力学特性の違いを生じる因子を理論及び電子状態計算によって解明することを目的としました。

金属材料の強度は結晶の格子ひずみと相関することが知られています。そこで、格子ひずみを原子の変位によって評価する二乗平均原子変位 (MSAD) を用いて評価しました (図1 (a))。その結果、RHEA-TiのMSADはRHEA-Vと比べて約3倍大きく、強度を上昇させることが示されました。

次に延性を決定する転位構造の解析を行いました (図1 (b))。矢印に囲まれた転位芯領域で、RHEA-Tiの転位芯は不均質に広がっていることが確認されます。転位芯のエネルギーの分布を解析した結果、RHEA-Tiの転位のエネルギーは明らかに低いことが分かりました。これは、結晶中に転位が導入されやすいことを示しており、RHEA-Tiが優れた延性を持つ要因が転位の安定性にあることが分かりました。

これらの力学特性の違いは、Ti、Zr、Hfなどの第IV族元素によることも示され、構成元素の制御に立脚した元素戦略による力学機能設計への展開が期待されます。

本研究は、JSPS科研費 (JP18H05453) 「計算材料科学によるハイエントロピー合金の力学特性の解明と制御」の助成を受けたものです。

Tsuru, T. et al., Intrinsic Factors Responsible for Brittle Versus Ductile Nature of Refractory High-Entropy Alloys, Nature Communications, vol.15, issue 1, 2024, 1706, 10p.



原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター 都留 智仁



◀Webはこちらへ

環境中の微量ウランの分布状態を超伝導技術で可視化できる分析法 —環境中の様々な微量元素の移行挙動解明への期待—

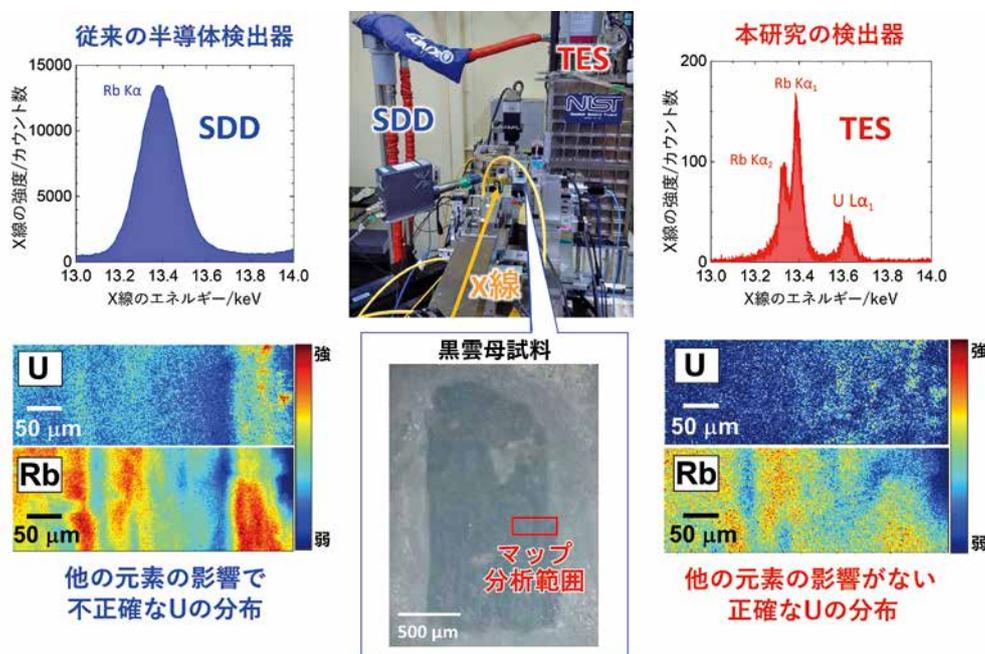


図 1 従来の検出器 (SDD) と本研究の検出器 (TES) による黒雲母試料中の U の分析結果の比較

原子力発電用燃料として用いられるウラン (U) の環境中での移行挙動の把握は、放射性廃棄物の埋設処分時の安全性評価において重要です。U の移行挙動を知るためには、環境試料に含まれる微量の U の化学状態や分布状態を調べる必要があります。試料の微小領域に X 線を照射して試料中の元素から発生する蛍光 X 線を分析する手法が用いられてきました。しかし、従来の検出器を用いる分析法では、地殻中に多量に含まれる他の元素 (ルビジウム (Rb) など) が測定妨害となり、微量の U に由来する蛍光 X 線だけを区別して分析することが困難という課題がありました。

そこで本研究では、超伝導転移端検出器 (TES) と呼ばれる、X 線を高いエネルギー分解能で測定できる新型検出器を導入した新たな分析法を開発しました。複数の大学と研究機関が協力して、マイクロメートルサイズの X 線を用いた分析に世界で初めて TES を適用しました。実際の環境試料である黒雲母を TES により分析し、従来の半導体検出器 (SDD) では Rb の蛍光 X 線に埋もれてしまい見えなかった、微弱な U の蛍光 X 線を検出することに成功しました (図 1)。さらに、SDD では Rb の影響を受けて Rb と似通っていた U の分布が、Rb と異なる分布をしていることが明らかになり、黒雲母中の正確な U の分布を調べることができました。

本研究で開発した手法は、U 以外の元素にも適用できます。この手法で試料中の濃度が百万分の一レベルの超微量元素に対し、マイクロメートルサイズの分布を明らかにできれば、様々な元素の移行挙動のメカニズムを原子・分子スケールで解き明かすことができると期待しています。

本研究は MEXT 科研費 (JP18H05458, JP21H00162)、及び JSPS 科研費 (JP19H01145, JP19H01960, JP19K15606, JP19K21893, JP19K23432, JP20K20527, JP20K15238, JP20K14524, JP21H03585, JP21H05443, JP21K18649, JP21K18917, JP22F21313, JP22H00166, JP22K18277) の助成を受けたものです。また、JASRI/SPRING-8 の研究課題 (2022A0174, 2022A0180, 2021A1610, 2019A1523, 2019B1498, 2020A0174)、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) フォトンファクトリーの研究課題 (2022G126, 2020G670, 2020G081, 2018S1-001) に支援頂きました。

Yomogida, T. et al., Application of Transition-Edge Sensors for Micro-X-Ray Fluorescence Measurements and Micro-X-Ray Absorption Near Edge Structure Spectroscopy: A Case Study of Uranium Speciation in Biotite Obtained from a Uranium Mine, Analyst, vol.149, issue 10, 2024, p.2932–2941.



原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター 蓬田 匠



◀ Webはこちらへ

炉心の過熱を遅らせて過酷事故への進展を防ぐ —新燃料被覆管材料の高温耐酸化性—

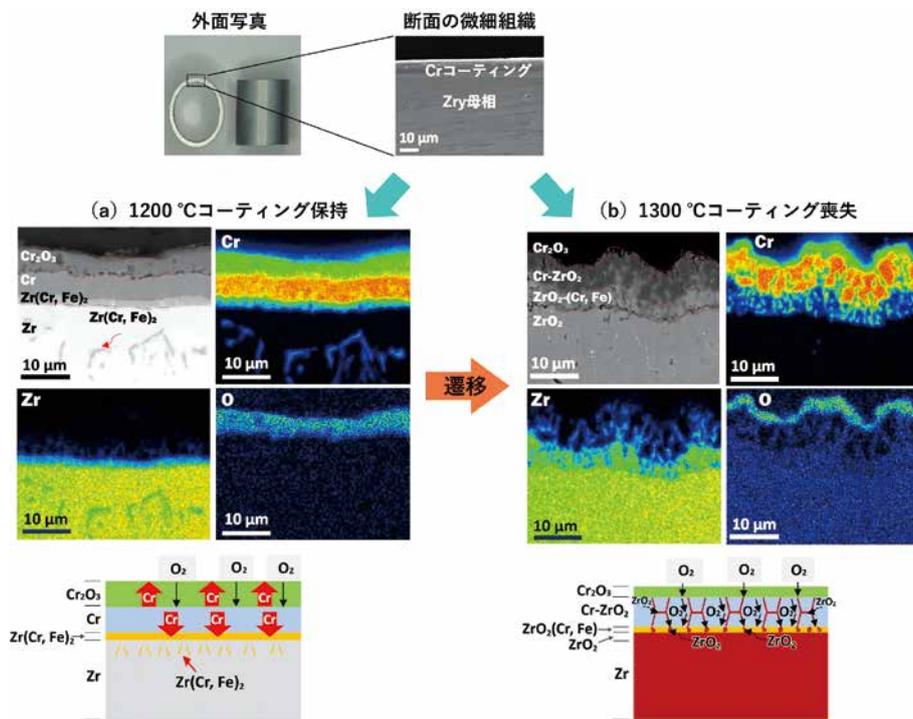


図1 Cr-Zr被覆管の微細組織変化
(a) 1200 °Cでコーティングが保持されますが、(b) 1300 °Cではコーティングは喪失します。

Crコーテッドジルカロイ合金 (Cr-Zr) 被覆管は、Zr被覆管と比較して耐酸化性に優れているため、事故耐性燃料の被覆管候補として広く知られています。これらの材料を軽水炉の新しい被覆管材料として利用するためには、過酷事故時の評価が必要です。日本の規制基準では、Zr被覆管の温度は1200 °Cを超えないこと、これは冷却材喪失事故 (LOCA) の模擬試験と酸化試験の結果から決定されます。

LOCA時の条件を再現するためには、Cr-Zr被覆管の高温水蒸気による酸化試験の必要があります。しかし、設計基準を超える過酷事故現象においては、1200 °C以上でのCr-Zr被覆管の酸化挙動に関して多くの未解明の課題が残されています。本研究では、1200 °C以上の高温水蒸気酸化下におけるCr-Zr被覆管のメカニズムと現象を調べ、「コーティング保持」から「コーティング喪失」への遷移を実験的に決定しました。

酸化試験後の断面微細組織を図1 (a, b) に示します。1300 °Cでは、外表面領域にZrO₂層が生成した場合は、Crコーティング内に析出したZrを通じてOが拡散するため、コーティングは保護膜では無くなります。試験の結果、Crコーティングは1300 °CではZrを保護できないが、1200 °CでZrを酸化から保護できることが示されました。

本研究は、Cr-Zr被覆管が高温水蒸気に曝された場合のメカニズムや現象を明らかにし、過酷事故を模擬した大規模試験データの理解に役立つものです。

本研究は、三菱重工業株式会社との共同研究「Crコーティング被覆管の通常時及び事故時挙動に関する研究」の成果の一部です。

Mohamad, A. et al., Microstructural Evolution of Intermetallic Phase Precipitates in Cr-Coated Zirconium Alloy Cladding in High-Temperature Steam Oxidation up to 1400 °C, Corrosion Science, vol.224, 2023, 111540, 15p.



原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター Afiqa Mohamad



◀Webはこちらへ

地上の半導体ソフトエラー率を迅速に推定する手法の開発化 —安心安全な超スマート社会の実現のために—

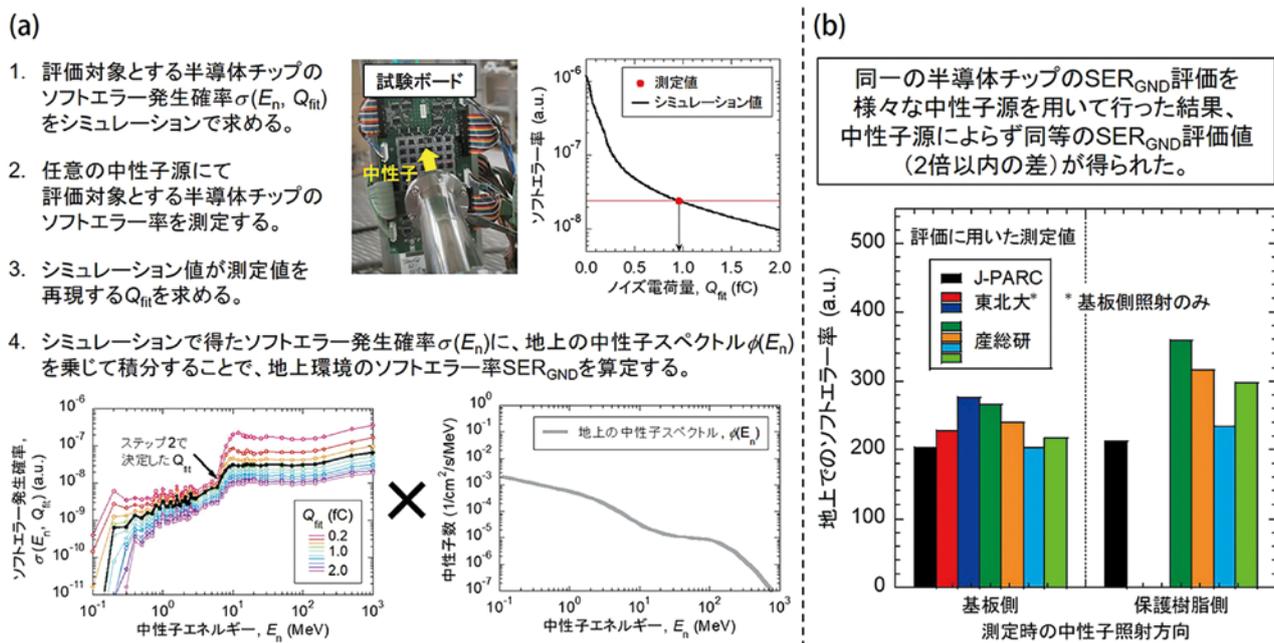


図1 (a) 地上環境のソフトエラー率の見積もり手順、及び (b) 様々な測定値を用いた地上環境のソフトエラー率の見積もり結果

放射線が引き起こす半導体チップの保持情報の反転現象 (シングルイベントアップセット; SEU) は、電子機器の一時的な誤動作 (ソフトエラー) の一因です。地上環境では宇宙から降り注ぐ中性子がSEUの主因であり、中性子は遮蔽が困難なため、特に高い信頼性が必要な機器では地上のソフトエラー率 (SER_{GND} , 単位時間当たりのソフトエラー数) の評価が不可欠です。 SER_{GND} 評価には、地上に到達する中性子を再現可能な中性子源を利用することが一般的ですが、このような中性子源は世界的に見ても数が少なく、高まる SER_{GND} 評価の需要を満たすには不十分な状況にあります。そこで、任意の中性子源を SER_{GND} 評価に利用する手法を開発しました。本手法では、半導体チップのソフトエラー発生確率 (σ , 中性子1個が半導体チップに入射したときにソフトエラーが発生する確率) の、中性子エネルギー E_n とソフトエラー発生に必要なノイズ電荷量 Q_{fit} に対する依存性 $\sigma(E_n, Q_{fit})$ をシミュレーションで求め (図1 (a) -1)、任意の中性子源で測定したソフトエラー率とシミュレーション値を比較して Q_{fit} を求めます (図1 (a) -3)。 Q_{fit} が定まると、 $\sigma(E_n)$ と地上の中性子エネルギー分布 $\phi(E_n)$ より SER_{GND} を求めることができます (図1 (a) -4)。

本手法により、特殊な中性子源以外にも、国内外に数多くある中性子源で SER_{GND} 評価が可能となり (図1 (b))、高まる半導体ソフトエラー評価の需要に応えることができます。これにより、安心安全な超スマート社会の実現のために必要となる高信頼な半導体チップの設計やそれを用いた情報システムの高信頼化に貢献します。

本研究成果の一部は、株式会社ソシオネクストとの共同研究「新型トランジスタにおけるソフトエラーシミュレーション技術の開発」およびJST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA) (課題番号JPMJOP1721) 「安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出」の支援を受けて実施したものです。

Abe, S. et al., A Terrestrial SER Estimation Methodology Based on Simulation Coupled With One-Time Neutron Irradiation Testing, IEEE Transactions on Nuclear Science, European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS 2022), Venice, Italy, vol.70, issue 8, part 1, 2023, p.1652–1657.

原子力科学研究所
 原子力基礎工学研究センター 安部 晋一郎



◀Webはこちらへ

マイナーアクチニド核変換システムの開発に向けて —J-PARCにおける²⁴¹Amの核データ実験精度の向上—

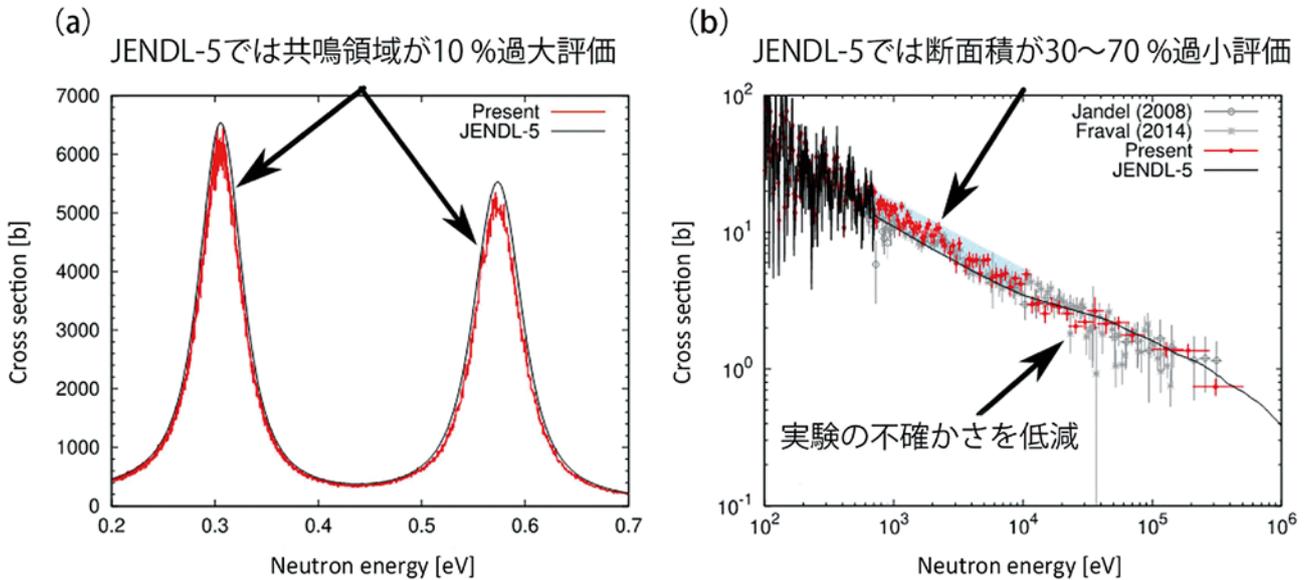


図1 過去の実験データ及びJENDL-5との比較
(a) 共鳴領域、(b) 断面積及び不確かさの低減において実験精度向上の成果が得られました。

²⁴¹Amなどのマイナーアクチニド (MA) を短寿命または安定核に変換する核変換システムの開発には、高精度の核データが必要です。システム設計に不可欠な多数の原子核反応と同位体の核データは、原子力機構が開発したJENDL-5などの様々な核データライブラリにまとめられています。しかし、核変換システムを実装するには、MAの現在の核データを改善する必要があります。実験の不確かさが数パーセント低減するだけでも、核データの精度が大幅に向上し、原子炉設計に大きな影響を与える可能性があります。特に、²⁴¹Amの中性子捕獲断面積については、異なる核データライブラリ間で低エネルギー共鳴について15%を超える不一致があり、これを解決するためのさらなる実験が必要です。また、1,000 eVを超えるエネルギー領域でも断面積の精度を向上させ、可能な限り不確かさを5%程度まで低減することが求められています。

本研究では、(1) バックグラウンドを除去するためのデータカット、(2) 共鳴を用いたバックグラウンド推定、(3) 核データに依存しない規格化、(4) 不検出ガンマ線補正、などのデータ解析手法により、世界最強の中性子ビームを持つJ-PARCのANNRIビームラインで²⁴¹Amの中性子捕獲断面積を高精度で測定する実験技術を開発しました。この技術により、少量の²⁴¹Amの使用でサンプルの放射能を減らし、その影響を最小限に抑えることで、高精度化を達成しました。

図1 (a) 及び (b) に示すように、JENDL-5では低エネルギー共鳴領域で約10%の過大評価があり、また、1,000 eVから10,000 eVの間の断面積で30~70%の大幅な過小評価があることを明らかにしました。さらに本研究の不確かさは過去のデータと比較して、それぞれ15~45%から10~20%と大幅に低くなっています。

これらの実験精度の向上は、²⁴¹Amの核データライブラリの精度も高め、核変換システムの開発を前進させるものと考えています。

Rovira, G. et al., ²⁴¹Am Neutron Capture Cross Section Measurement Using the NaI(Tl) Spectrometer of the ANNRI Beamline of J-PARC, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.61, issue 4, 2024, p.459-477.



原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター Gerard Rovira



◀Webはこちらへ

使用済核燃料再処理プロセスでのステンレス鋼の腐食を評価 —高レベル廃液濃縮缶内面の腐食評価手法を構築—

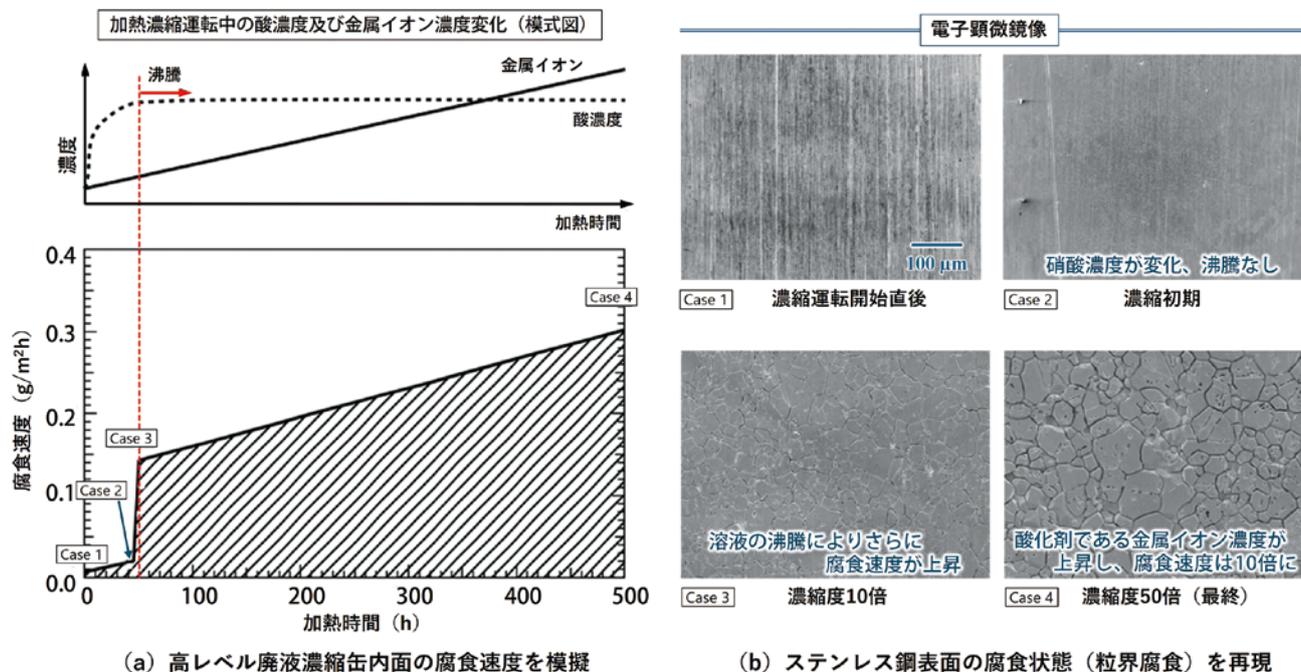


図1 使用済核燃料再処理工程の高レベル廃液濃縮缶内面のステンレス鋼腐食の様子を再現した結果

使用済核燃料再処理工程では、硝酸水溶液に溶解した使用済燃料由来の金属イオンが酸化剤として作用し、ステンレス鋼製部材が粒界腐食を起こすことが知られています。機器の高経年化対策や安定運転のためには、機器材料の腐食状態を把握し、寿命が正しく評価されている必要があります。しかし、運転開始後は高い放射線により腐食状態を実際に観察することが困難であるため、再処理工程の複雑な過程を考慮した精度の高い腐食量予測手法が必要となります。

この研究では、最も腐食が厳しいと予想される高レベル廃液濃縮缶の内面腐食を模擬した実験を行い、酸化剤濃度や沸騰などがステンレス鋼の腐食に及ぼす影響を電気化学的に明らかにしました。そして、実際の濃縮缶運転状況を反映した腐食評価手法を構築し、腐食状態を再現しました (図1(a)(b))。溶液の濃縮による硝酸濃度の増加、減圧沸騰、金属イオンのうちルテニウム、バナジウム (ネプツニウムの模擬として利用)、セリウムなどが腐食反応速度を増大させる要因となるため、濃縮運転中にはこれらの要素を監視する必要があることを提案しています。

本研究の一部は、原子力規制委員会原子力規制庁からの受託事業「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費 (商用再処理施設の経年変化に関する研究)」によって行われました。

Irisawa, E. et al., Estimating the Corrosion Rate of Stainless Steel R-SUS304ULC in Nitric Acid Media Under Concentrating Operation, Journal of Nuclear Materials, vol.591, 2024, 154914, 10p.

原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター 防食材料技術開発グループ



◀Webはこちらへ

コンクリート廃棄物に含まれる難測定核種カルシウム41の簡易分析に向けて —電子準位の特異性を利用してカルシウム奇数同位体を選択的にイオン化—

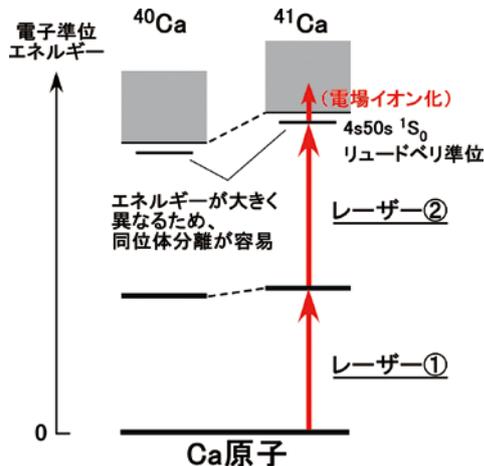


図1 レーザーを用いた2波長2段階励起による⁴¹Ca原子の選択的イオン化

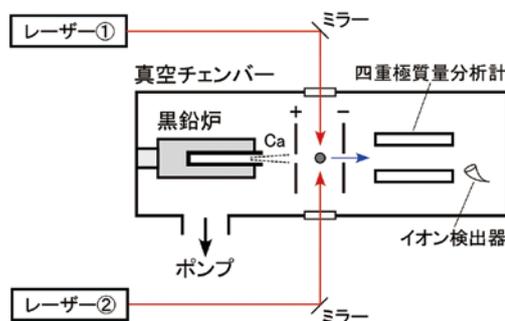


図2 Ca安定同位体試料を用いたレーザー共鳴イオン化セットアップ

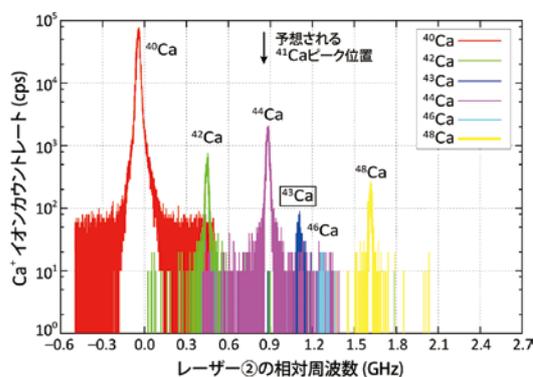


図3 レーザー②の周波数をスキャンして測定されたCa⁺イオンスペクトル (予想される⁴¹Caのピーク位置を下矢印で記載)

原子力発電所の解体作業では、大量に発生するコンクリート廃棄物を迅速に処理するため、クリアランスレベルの検認を目的とした放射性核種カルシウム41 (⁴¹Ca) の簡便かつ高感度な分析が求められています。⁴¹Caは半減期約10万年と長く崩壊により放出されるX線エネルギーが低いため、放射線計測の難しい難測定核種の一つです。代表的な質量分析法である誘導結合プラズマ質量分析法でも隣接する質量数の⁴⁰Ca及びアルゴン40 (キャリアガス成分) によるスペクトル干渉等の影響により、クリアランスレベル相当の⁴¹Ca/⁴⁰Ca比が 10^{-7} 以下の試料に対しては、分析感度が十分ではありません。

本研究で使用するレーザー共鳴イオン化法 (図1) は、⁴¹Ca原子固有の共鳴波長のレーザー①、②を照射して⁴¹Ca原子のみを選択的にイオン化できるため、他の分析法と比較して同位体・同重体等による質量スペクトル干渉の影響を抑制できます。特に、奇数同位体のエネルギーがシフトする特徴を持つリュドベリ準位を利用することで、⁴⁰Caからの分離が容易になります。図2のとおりCa安定同位体試料を黒鉛炉で加熱してCa原子ビームを生成し、レーザー②の周波数をスキャンして測定されたCa⁺イオンスペクトルを図3に示します。奇数同位体の⁴³Caが高周波数側にシフトする様子が確認され、⁴¹Caも同様な傾向が予想されます。

本研究の手法を質量分析に組み込むことで、レーザー①、②の同位体選択性及び質量分析計の質量分解能を考慮して⁴¹Ca/⁴⁰Ca比が 10^{-10} 以下の分析感度が期待され、コンクリート廃棄物の迅速分析に有用であると考えられます。

本研究の一部は、JSPS科研費 (JP19H02646) の助成を受けたものです。

Iwata, Y. et al., Resonance Ionization Spectroscopy of High-Lying 4sns and 4snd Rydberg Levels of Odd Calcium Isotopes, Journal of the Optical Society of America B, vol.41, issue 1, 2024, p.119–126.

福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター 岩田 圭弘



◀Webはこちらへ

詳細数値シミュレーションと理論で壁面衝突噴流の微粒化機構に迫る

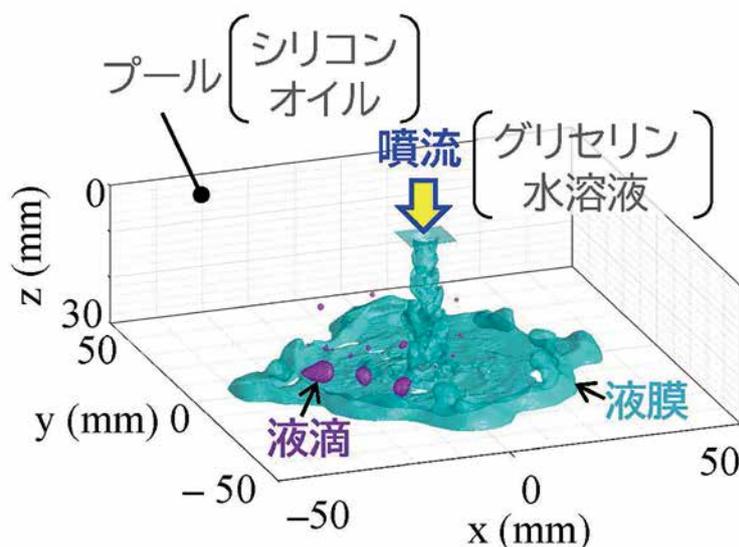


図1 壁面衝突噴流の挙動

溶融燃料を模擬したグリセリン水溶液と水を模擬したシリコンオイルを用いた、壁面衝突噴流の微粒化と広がり挙動を示しています。

微粒化は、過酷事故時の溶融燃料の冷却や、BWRの定常運転時の環状噴霧流における沸騰遷移など、原子力分野における様々な状況に関わります。ここでは、数値シミュレーションを用いた浅いプールにおける壁面衝突噴流の微粒化に関する研究^{*1}を紹介します。過酷事故において溶融燃料は、浅い水プールに侵入し、微粒化しながら床に衝突して三次元的に広がる場合があります。しかし、溶融燃料の微粒化を直接かつ詳細に調査することは困難であるため、溶融燃料を模擬した流体を用いてその微粒化を次のように調査しました。

- (1) 原子力機構が開発する詳細二相流解析コードTPFIT^{*2}を用いた詳細数値シミュレーション
- (2) 実験結果^{*3}との比較による数値結果の全体的な挙動の検証
- (3) 微粒化の要素挙動としての液滴形成の調査
- (4) 液滴形成の理論式の開発
- (5) 理論式を用いた推定値との比較

(1) に関わる数値シミュレーション結果を図1に示します。実験と同様の微粒化や広がりが数値シミュレーションでも再現できることを確認できました。次に、液滴形成に着目して調査を行い、液滴形成に関する界面不安定性や力学的釣り合い式を理論的に導き出し、その推定値と数値シミュレーション結果が一致することを確認しました。これらの結果から壁面衝突噴流の微粒化機構を明らかにすることができました。本研究が噴流の微粒化の基礎的理解を深め、原子力分野における他の状況にも役立つことが期待されます。

本研究成果は、原子力機構のスーパーコンピュータ「HPE SGI8600」を利用して得られたものです。

^{*1} Horiguchi, N. et al., Phys. Fluids, 35 (7), 073309 (2023).

^{*2} Yoshida, H. et al., Trans. At. Energy Soc. Japan, 3 (3) (2004).

^{*3} Yamamura, S. et al., Phys. Fluids, 34 (8), 082110 (2022).

Horiguchi, N. et al., Atomization Mechanisms of a Wall-Impinging Jet in a Shallow Pool, Physics of Fluids, vol.35, issue 7, 2023, 073309, 17p.

原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター 堀口 直樹



◀Webはこちらへ

その場中性子回折法による鉄鋼の相変態の再検討 —マルテンサイト相変態における格子定数の変動—

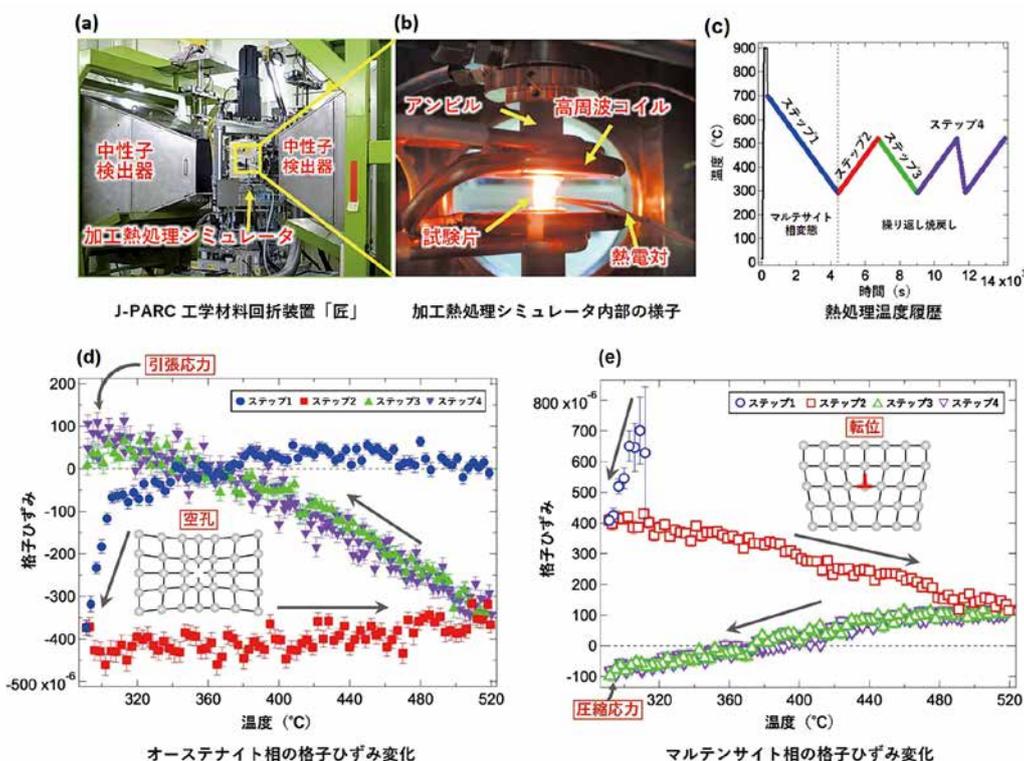


図1 その場中性子回折による部分的マルテンサイト相変態及び焼戻し中における格子ひずみ変化の調査

鉄鋼はその優れた強度、加工性、コスト効率の良さから、建設、自動車、機械など多くの産業で最も広く使用されている金属材料です。一般的な鉄鋼材料では、高温のオーステナイト相から急冷すると硬いマルテンサイト相が形成されます。このマルテンサイト相形成過程（相変態）に伴う内部応力の発生機構は、数十年にわたって議論が続いているものの、未だ明らかにはなっていません。本研究では、マルテンサイト相変態及び焼戻し過程における格子定数、内部応力、結晶欠陥の関係を解明することを目的として、J-PARCの工学材料回折装置「匠」と、その上に設置された加工熱処理シミュレータを用いて（図1 (a, b)）、その場中性子回折実験を行いました。

図1 (c) に温度履歴を示す部分的マルテンサイト相変態（ステップ1）及び繰り返し加熱-冷却過程（ステップ2～4）での格子定数変化を調べた結果、部分的マルテンサイト相変態では母相オーステナイトとマルテンサイトには、それぞれ圧縮格子ひずみ（図1 (d)）と引張格子ひずみ（図1 (e)）を示しています。このような格子定数の変化は、オーステナイトには主に空孔が形成され、マルテンサイトには転位が形成されることが原因です。さらに、ステップ2～4で焼戻しによって結晶欠陥（転位と空孔）を除去すると、マルテンサイトにはオーステナイトの引張応力と釣り合う圧縮応力が発生し、元の応力状態に戻ることが分かりました。

本研究は、鉄鋼材料の相変態に伴い発生する内部応力への理解を深め、高強度鉄鋼材料の組織制御に役立つものです。

本研究は、文部科学省の国家課題対応型研究開発推進事業元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>構造材料元素戦略研究拠点 (JPMXP0112101000) の支援を受けて行われました。

Gong, W. et al., Lattice Parameters of Austenite and Martensite During Transformation for Fe-18Ni Alloy Investigated Through *In-Situ* Neutron Diffraction, Acta Materialia, vol.250, 2023, 118860, 16p.



J-PARCセンター
物質・生命科学ディビジョン Wu Gong



◀Webはこちらへ

液体ヘリウム不要の中性子散乱用特殊試料環境の構築 —安全手軽にロスを減らして低温・強磁場環境を実現—

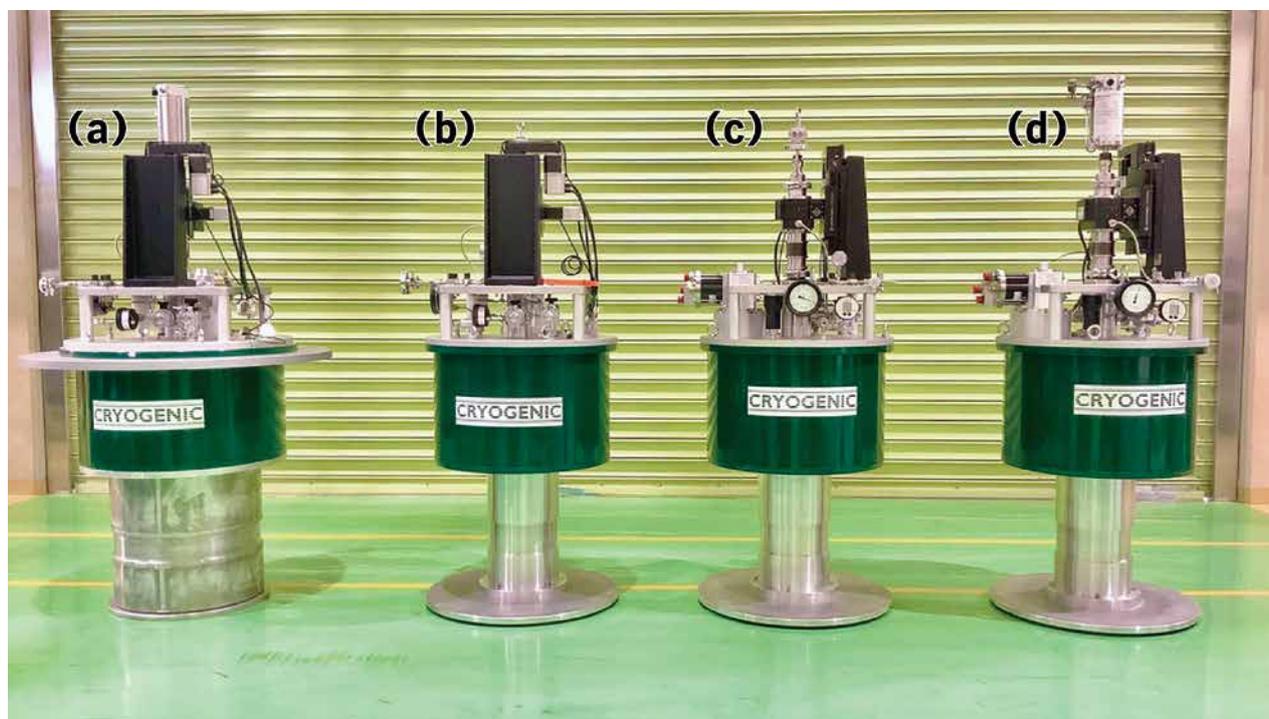


図1 新しい中性子散乱用ヘリウムフリーマグネット (a) 及び3台のトップロード冷凍機 (b) ~ (d)

量子ビームの一つである中性子は、ごく限られた施設でのみ利用可能で、二つの中性子施設J-PARC MLFとJRR-3を併せ持つ機構は世界でも希少な存在です。中性子は、高い透過性に加えて磁性に高い感度を有することから、次世代磁性材料の研究に活用されています。これらの研究では、絶対零度に近い低温や、地磁気の数十万倍の強磁場など、極限環境での測定が多く必要とされます。これを実現する冷凍機やマグネットなどの試料環境機器は、従来、液体ヘリウムを必要としましたが、ヘリウムは近年価格高騰やその供給に問題を抱えています。また取扱いに知識・経験が必要とされる上、実験中は測定を中断して定期的に補充する必要があるなど、多くのロスがありました。

そこで東日本大震災以降停止していた研究炉JRR-3の運転再開に向けて、液体ヘリウムを必要としないマグネット、冷凍機システムの開発・導入を進め、マグネットは無冷媒型として最大の10 T、合わせて1.5 Kの低温環境を安定して実現することに成功しました (図1 (a))。また同じ試料周りのデザインを持つ3台の冷凍機、さらなる低温を可能にする³Heインサートを合わせて導入することで、10 T、0.3 Kという極限環境での実験が安全・手軽にそしてロスなく安定して実現できるようになりました (図1 (b) ~ (d))。現在、再稼働したJRR-3での一つの強みとして活躍しています。

本研究は、製作メーカー及びThe International Society for Sample Environmentを通じた海外施設との密接な連携により行われました。

Kaneko, K. et al., New Standard for Low Temperature Sample Environment at JAEA/JRR-3, JPS Conference Proceedings, 11th International Workshop on Sample Environment at Scattering Facilities (ISSE Workshop 2022), Nasu, Japan, vol.41, 2024, 011015, 6p.

原子力科学研究所
物質科学研究センター 金子 耕士



◀Webはこちらへ

急冷水溶液に生じるナノ氷結晶を中性子と水素のスピンの観測 —食品・医薬品・細胞組織の凍結保存技術開発への貢献に期待—

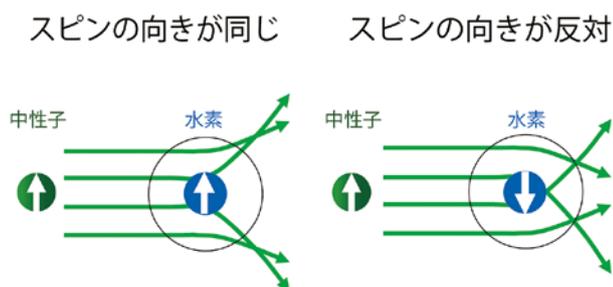


図1 スピンの違いによる中性子の水素に対する散乱の変化

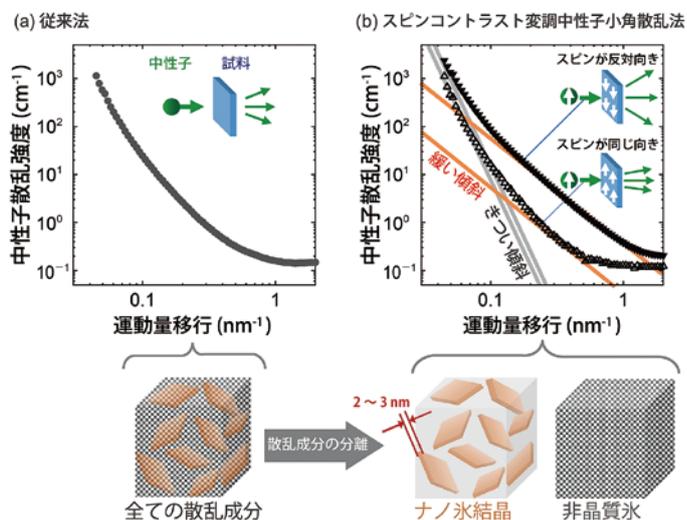


図2 (a) 従来法と (b) スピンコントラスト変調中性子小角散乱法で測定した急冷グルコース水溶液の中性子小角散乱曲線
スピンコントラスト変調を用いることで、散乱中性子をナノ氷結晶の散乱 (橙色) と非晶質氷の散乱 (灰色) に分離することに成功しました。

水は0℃以下に冷やすと一旦過冷却状態になり、その中で偶発的に生成した種結晶から氷結晶が一気に成長します。食品、医薬品、細胞組織を冷凍保存する際には、凍結保護剤を添加して氷結晶の成長を食い止め、細胞膜や細胞小器官などの破壊を防がなくてはなりません。

凍結保護剤による氷結晶の成長抑制メカニズムの解明は、凍結保存技術の高度化に欠かせません。私たちは、凍結保護剤の一つである糖 (グルコースなど) による氷結晶の成長抑制メカニズムを、「スピンコントラスト変調中性子小角散乱法」という中性子の水素核に対する散乱能がそれらのスピンの向きに強く依存する性質 (図1) を用いた分析法によって解明しようと考えました。従来の中性子小角散乱法 (図2 (a)) では、構造解析以前に散乱体が何かも分かりませんでした。それに対し、スピンコントラスト変調中性子小角散乱法 (図2 (b)) では、スピンの向きに応じた散乱曲線の変化から図中の緩い傾斜がナノ氷結晶、きつい傾斜が非晶質氷の散乱であることが分かりました。また、急冷グルコース水溶液中に生成するナノ氷結晶は板状で、その厚さ2~3 nmは過冷却水中での氷結晶生成臨界径とほぼ同じ、つまり氷結晶は核生成後に厚み方向に全く成長していないことを示します。

本結果は、グルコース分子が氷結晶の特定の面と強く結合することでその面方向の結晶成長を抑制していることを示唆しており、今後は計算科学を交えてその可能性を明らかにしたいと考えています。

本研究は、一般財団法人総合科学研究機構 (CROSS)、広島大学との協力の下、JSPS科研費 (JP21H03741)、J-PARC MLFプロジェクト課題 (2020P0202, 2021P0502, 2022P0502, 2020P0203) を用いて行われました。

Kumada, T. et al., Polarized Neutrons Observed Nanometer-Thick Crystalline Ice Plates in Frozen Glucose Solution, The Journal of Physical Chemistry Letters, vol.14, issue 34, 2023, p.7638–7643.



原子力科学研究所
物質科学研究センター 熊田 高之



◀Webはこちらへ

放射光X線が導く水素安全対策の高度化 —一酸化炭素に被毒されない水素再結合触媒の開発—

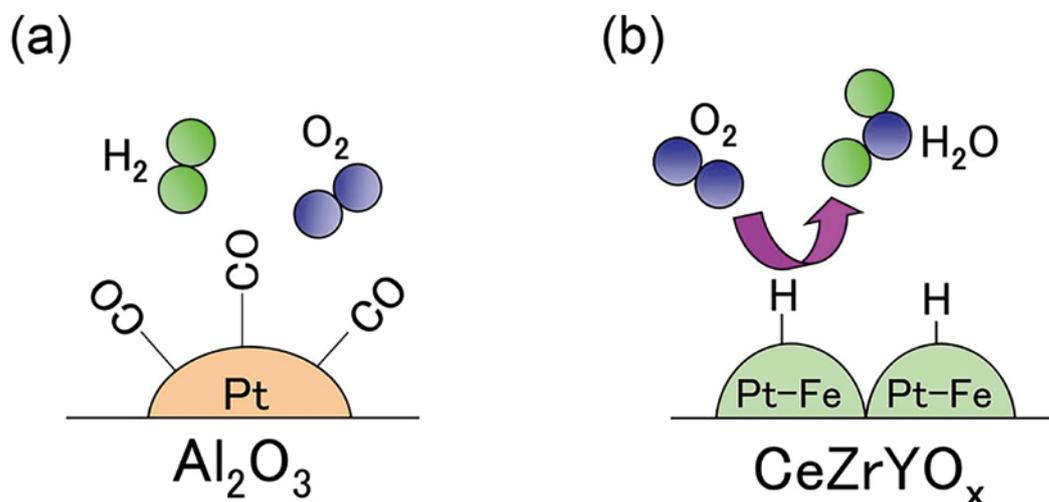


図1 (a) 従来触媒 (Pt/Al₂O₃) と (b) 新規触媒 (Pt-Fe/CeZrYO_x) における一酸化炭素存在下での水素再結合反応様式

原子炉の内部は水の放射線分解などにより常に水素ガスが発生する環境にあり、爆発事故を防ぐためにも水素ガスの低減化が必要です。触媒反応により水素ガスを減らすことができる水素再結合触媒は、停電時でも動作可能なことから、有望な水素低減化機構と考えられています。一方、シビアアクシデント時には、高温環境下にさらされることで一酸化炭素の発生が想定され、一酸化炭素は触媒の性能を無効化してしまう被毒効果を持つことから、性能劣化が起きない新たな水素再結合触媒の開発が望まれています。

本研究では従来触媒 (Pt/Al₂O₃) に対して、サポート材として酸素吸蔵放出能力を持つセリアージルコニア-イットリウム複合酸化物を使用し、金属微粒子として電子状態変化が想定される白金と鉄の合金微粒子を採用した新規触媒 (Pt-Fe/CeZrYO_x) を開発しました。この触媒は一酸化炭素存在下においても良好な触媒性能を示しました。その反応機構を解明するために、大型放射光施設 (SPring-8) からの放射光X線を利用した局所構造評価を行いました。その結果、従来触媒では白金微粒子表面に一酸化炭素が吸着することで反応が阻害されるのに対し (図1 (a))、新規触媒では表面に水素原子が吸着し、この水素原子が起点となり水素再結合反応が進行することが分かりました (図1 (b))。

本研究の成果により高性能触媒の開発が促進され、安全な原子炉の運転につながることを期待されます。

Inagawa, K., Matsumura, D. et al., Development of Hydrogen Oxidation Reaction Catalysts to Overcome CO Poisoning and Elucidation of Reaction Mechanism, The Journal of Physical Chemistry C, vol.127, issue 24, 2023, p.11542–11549.



原子力科学研究所
物質科学研究センター 松村 大樹



◀Webはこちらへ

土壤粘土鉱物を用いた環境に優しい熱電材料の創製 —高温域での熱電変換技術への挑戦—

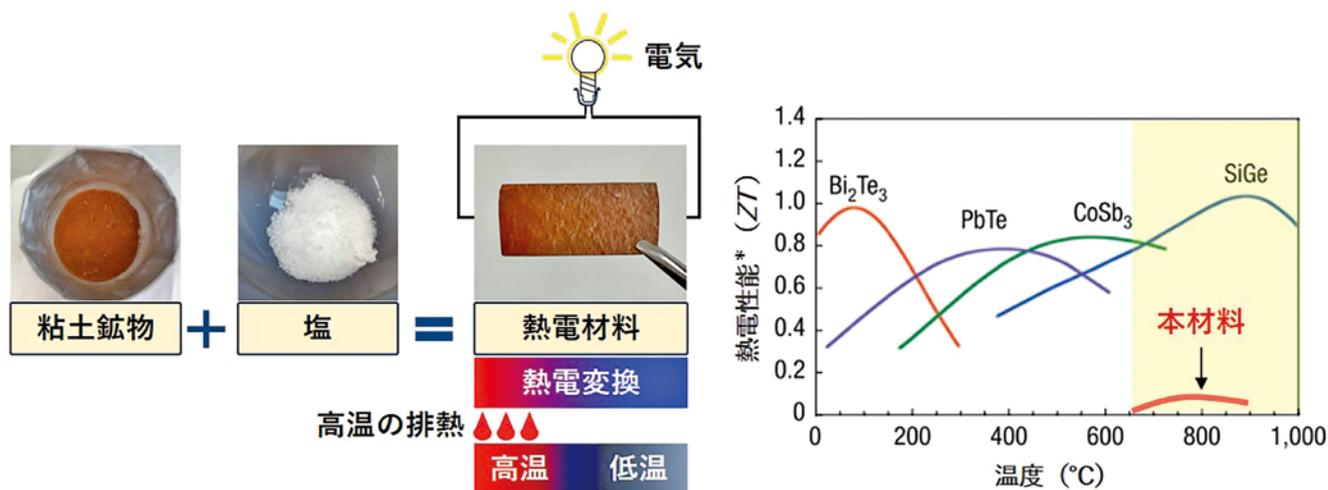


図1 溶融塩法を利用して豊富かつ無毒な資源である粘土鉱物から作製した熱電材料とその熱電性能*

* Snyder, G. J. et al., Complex Thermoelectric Materials, Nature Materials, vol.7, issue 2, 2008, p.105–114 (Figure B2 (a)より引用)。

近年、エネルギー効率の向上と廃熱の有効活用が重要視されています。本研究では、豊富かつ無毒な資源である粘土鉱物の一種、風化黒雲母 (WB) を用いた新たな熱電材料の創製に取り組みました。WBを粉砕・分級し、溶融塩法による熱処理を行うことで、高温での熱電物性を有する結晶鉱物を生成することに成功しました。特に、WBに塩化カルシウムと塩化カリウムの混合塩による溶融塩で熱処理した試料は、650 °Cから850 °Cの高温域で熱電性能を示す傾向があることが分かりました (図1)。材料コストの安さ、高温の排熱から得られる大きな温度差など総合的な判断から実用的な熱電材料としての可能性が示されました。高温域で熱電性能を示す特性は、溶融塩法によりWBが新たな構造に変化し、イオン交換などの伝導が促進されたためと考えられます。現状のZT値は既存材料に劣るものの、WBは環境に優しく資源効率の観点から有望です。今後は詳細な結晶構造の解明とさらなるZTの向上及び熱電モジュール開発に取り組む予定です。

本研究は、環境に優しい資源を活用し、高温でも動作する熱電材料の実用化を目指す一歩となりました。

本研究は、北海道科学大学、和歌山大学、筑波大学との協力の下、JSPS科研費 (JP22K19001) の助成を受けて行われたものです。

Honda, M. et al., Sustainable Thermoelectric Materials: Utilizing Fukushima Weathered Biotite via Molten Salt Treatment, AIP Advances, vol.14, issue 5, 2024, 055034, 6p.

原子力科学研究所
物質科学研究センター 本田 充紀



◀Webはこちらへ

鉄鋼材料の脆化要因となる水素の挙動解析

—昇温脱離スペクトルを数値シミュレーションして水素トラップ状態を推定する—

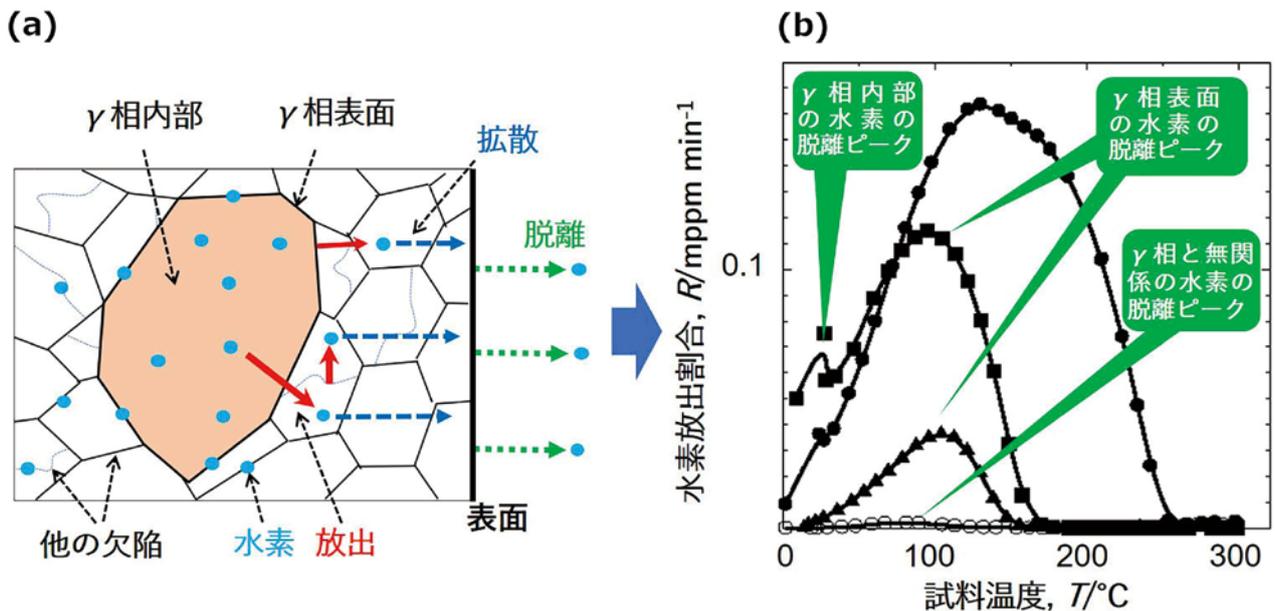


図1 (a) 水素の γ 相や他の欠陥による捕獲状態と脱離の概念図、及び (b) γ 相を含む鋼材試料の水素昇温脱離スペクトルの数値計算に基づく解釈
 (b) 内の記号○、▲、■、●は、鉄鋼試料中の水素含有量が異なる場合それぞれの測定スペクトルを表し、実線はそれらに対するフィッティング曲線を表します。

高強度鋼は高層ビルや自動車などで使われています。近年では、変形が容易な γ 相を硬い鉄鋼組織中に分布させ、加工を容易とした高強度な複合材料が開発されています。一方、高強度鋼では、内部に侵入した水素で劣化が起こる水素脆化が顕著となり、カーボンニュートラルな水素社会の実現において深刻な問題となっています。特に複合材料では γ 相表面などに水素が集中し劣化しやすい傾向があります。

水素は γ 相表面の他に様々な欠陥に捕獲されるので、実際に γ 相表面への水素の集中を調べるため、鉄鋼を徐々に加熱し、様々な欠陥から異なる温度で放出される水素が表面から脱離する量と温度の関係(昇温脱離スペクトル)を測定することで、欠陥による水素捕獲状態を推定します。図1は、昇温脱離スペクトルの数値シミュレーションから γ 相を含む鉄鋼中の水素捕獲状態を推定した結果です。脱離ピークの温度や高さが欠陥の水素捕獲状態と関係しています。これから、鉄鋼中の水素が少ないときは、 γ 相表面や内部は水素を捕獲しないが、多くなると捕獲できるようになること、 γ 相内部は比較的低い温度で水素を放出するので、 γ 相表面より捕獲する力が弱いことが分かりました。この結果から、 γ 相は高強度鋼の性質を改善するが、その内部や表面の水素脆化への影響の精査が必要と考えられます。

本研究は、JSPS科研費(JP19K05069) 基盤研究(C)「計算科学手法を用いた空孔型欠陥の定量的評価に基づく水素脆化モデルの検証」において、上智大学及び日本製鉄と連携し実施されました。

Ebihara, K. et al., Numerical Interpretation of Thermal Desorption Spectra of Hydrogen from High-Carbon Ferrite-Austenite Dual-Phase Steel, International Journal of Hydrogen Energy, vol.48, issue 79, 2023, p.30949–30962.



大規模原子力シミュレーションのIn-Situ可視化・制御技術の開発

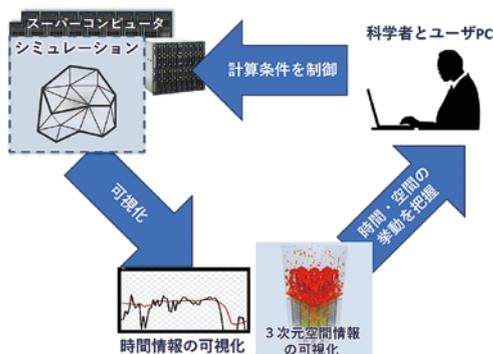


図1 In-Situ制御の概要

可視化処理、時間情報と3次元空間情報の観察、そして計算条件制御のループによりシミュレーションを設計、最適化や逆問題に役立てます。

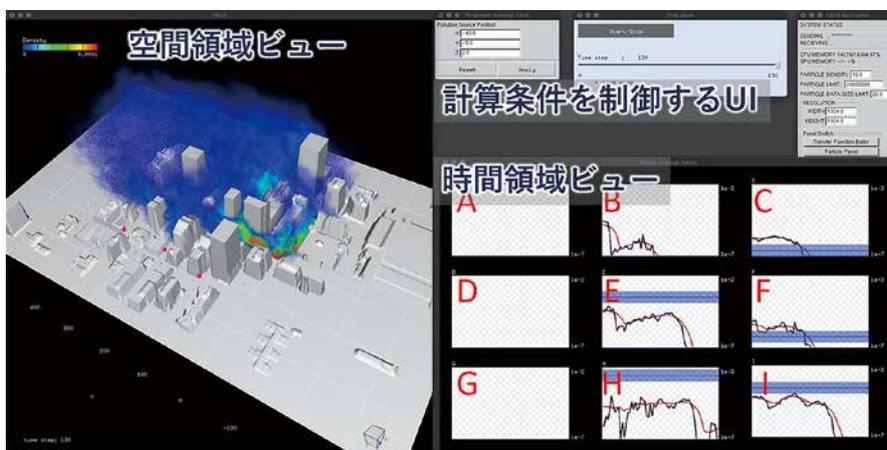


図2 In-Situ制御用の可視化画面

計算データの3次元空間情報を表示する空間領域ビュー、時間情報を表示する時間領域ビュー、そして計算条件を制御するためのユーザーインターフェース (UI) を示します。

原子力分野では非常に大規模なシミュレーションが実施され、スーパーコンピュータ (スパコン) の進化により実時間での計算も可能になっています。これを設計変数の探索や計測値から現実を再構成する逆問題解析に活用するために、計算データを可視化し、時空間の挙動を把握し、計算条件を制御するIn-Situ (その場) 制御技術 (図1) が重要です。

従来手法は計算データ的全領域を多角形の可視化要素に変換するため、可視化処理に数時間以上必要でした。そして、スパコン上の計算を中断してから計算条件を変更し再開するために数日が必要でした。本研究では可視化に必要な領域にのみ可視化用粒子を生成する粒子ベース可視化を利用して可視化処理を数秒にまで高速化しました。また、ストレージ上のファイルを介してスパコンとユーザーPCを通信することで、計算を中断することなく対話的に計算条件を制御する技術を開発しました。そして、これらの技術を統合して、空間情報と時間情報を可視化し、計算条件を対話的に変更できるGUIを開発しました (図2)。この技術を機構スパコンSGI8600上の汚染物質拡散シミュレーションに適用し、観測点での汚染物質濃度を再現する逆問題解析に成功しました。

この成果により可視化情報学会第35期論文賞を受賞しました。

本研究は、JSPS科研費 (JP20K11844) 基盤研究 (C) 「大規模分散GPGPUシミュレーションの対話的In-Situ可視化」の助成を受けて行われました。

Kawamura, T. et al., Interactive Steering on In Situ Particle-Based Volume Rendering Framework, Journal of Visualization, vol.27, issue 1, 2024, p.89-107.



土の中で金属イオンはどう動く？ —分子スケールのシミュレーションと実験が解き明かす土の性質—

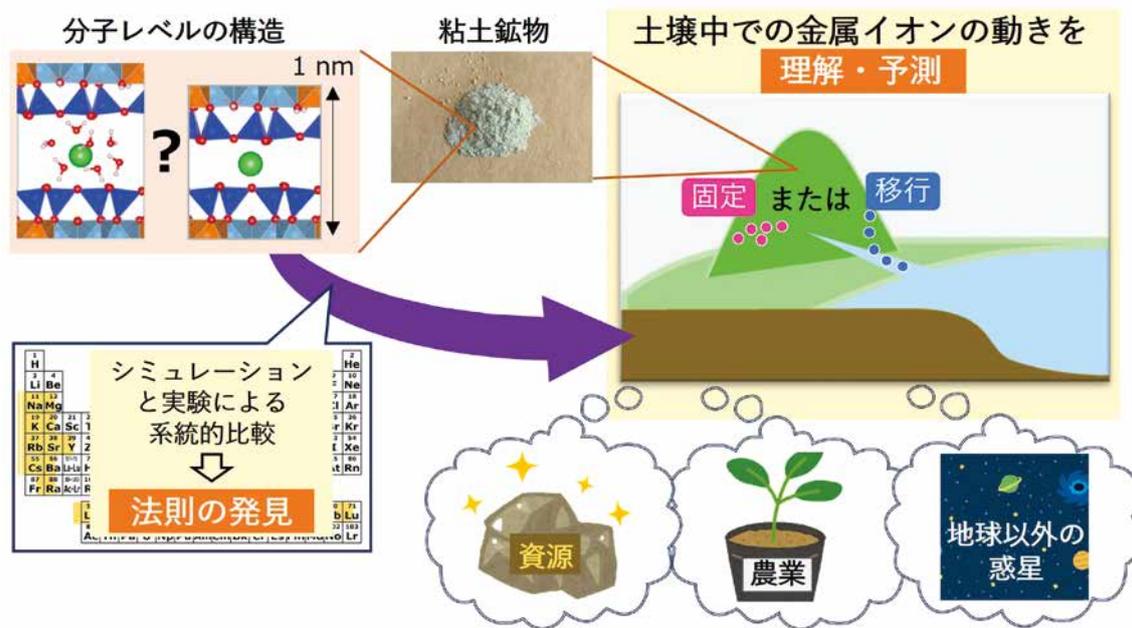


図1 土の中の金属イオンの動きを理解・予測するために重要な、分子スケールシミュレーションの概要図
シミュレーションと実験により、粘土鉱物に吸着したイオンの様子を分子レベルで明らかにすることで、天然環境における土の中でのイオンの動きを理解したり予測したりできるようになります。

「土の中でイオンがどう動くのか？」という問いは、放射性廃棄物の埋設処理をはじめとする多くの分野で重要です。そして土の中に存在する様々な鉱物の中で特に鍵を握っているのが、多くのイオンを吸着する粘土鉱物です。

これまで、粘土鉱物へのイオンの吸着については、イオンごとに個別に研究され、系統的な理解が不足していました。そこで本研究では、分子レベルの実験とスーパーコンピューターによるシミュレーションを組み合わせることで様々なイオンの吸着挙動を分子レベルで解析し、「水への溶けにくさ」と「イオン半径」の二つの因子に着目することで、吸着挙動を系統的に理解できることを明らかにしました。この発見に従い、イオン半径の大きなラジウムが粘土鉱物に強く吸着することを予測し、さらに天然の土壌試料を分析することでこの予測が裏付けられました。このことは、今回の発見が実際の天然環境の理解に適用できることを示しています。

今回の発見は、粘土鉱物への吸着反応に広く応用できる知見です。そのため、土の中の放射性核種の挙動の理解だけでなく、土の中のイオンの動きや粘土鉱物が重要とされる他分野、例えば資源や農業、惑星の環境理解にも役立つと期待されます。

本研究は、JSPS科研費 (JP19K23432, JP21H02090, JP21K18917, JP23K17034) の助成を受けて行われました。また、東京大学及び大阪大学との共同研究「放射性元素の環境中動態に関する研究」として実施されました。

Yamaguchi, A. et al., Molecular Geochemistry of Radium: A Key to Understanding Cation Adsorption Reaction on Clay Minerals, Journal of Colloid and Interface Science, vol.661, 2024, p.317–332.

システム計算科学センター 山口 瑛子



◀Webはこちらへ

ガラスの複雑な原子構造を高速・高精度な原子シミュレーションで再現

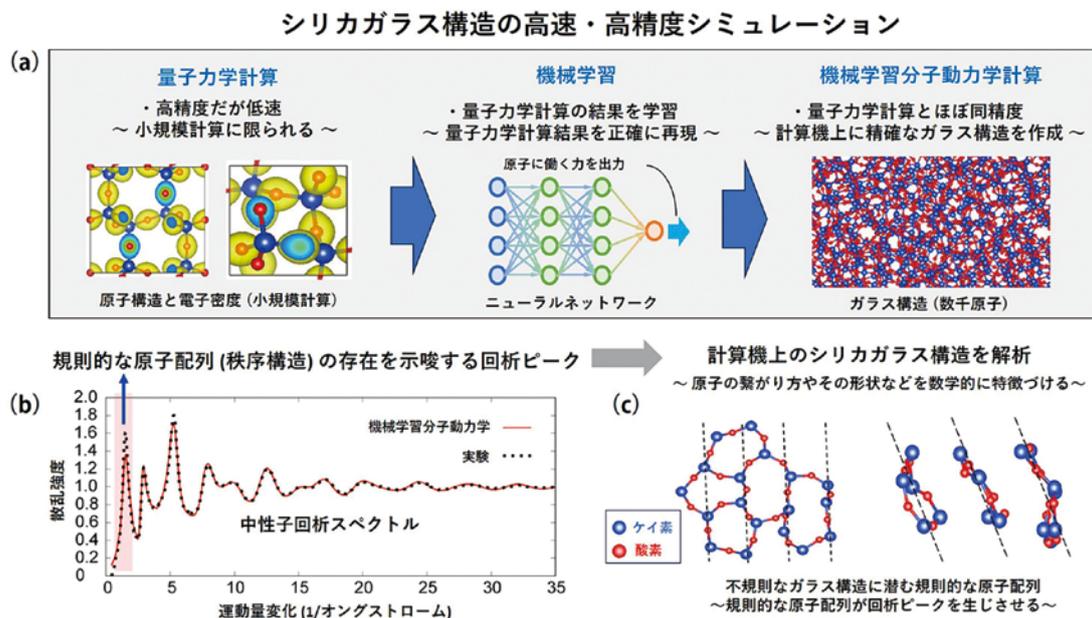


図1 機械学習分子動力学法によるシリカガラス構造シミュレーションの概略図

(a) 数万通りの小規模な構造に対して量子力学計算を実行し、機械学習により原子間力を予測するニューラルネットワークを作成します。このニューラルネットワークにより高速・高精度な機械学習分子動力学計算が可能となります。(b) 機械学習分子動力学計算により計算された中性子回折スペクトルと実験データ*、(c) 不規則なガラス構造の中に潜んだ規則的な原子配列を示します。

* Onodera, Y. et al., Origin of the Mixed Alkali Effect in Silicate Glass, NPG Asia Materials, vol.11, issue 1, 2019, 75, 11p.

シリカガラスは、その高い透明度と化学的安定性から、窓ガラスや光ファイバー、半導体製造において重要な材料です。一般的に、ガラスは原子が不規則に配置されていると考えられていますが、シリカガラスのX線や中性子線回折実験では鋭いピークが観察されることから、ある程度の規則的な原子配列 (中距離秩序構造) が存在すると考えられています。この中距離秩序構造はシリカガラスの透明度などと関連しており、その詳細を解明することは、機能性ガラス材料の開発において重要です。実験的にガラスの原子配列を特定することは困難であるため、ガラスの中距離秩序構造を解明するには高精度なシミュレーションによる構造解析が必要です。私たちは、量子力学計算の結果を機械学習によって学習させることで、高速かつ高精度な計算を可能にする「機械学習分子動力学法」を活用し、シリカガラスの回折ピークを再現することに成功しました。さらに、ガラス内部の規則的な原子配列を明らかにするには、原子の繋がりやその形状を明らかにすることが重要となります。私たちは、パーシステントホモロジー等の数学的手法を用いることにより、不規則なガラス構造内に潜む中距離秩序構造の詳細を特徴づけることを可能としました。

高精度シミュレーションにより、実験のみでは特定が難しいガラスの立体的な原子配列を解析、解明することで、機能性ガラス材料の開発が加速することが期待されます。

本研究の一部は、データ活用社会創成プラットフォームmdx (jh230069) 「統合機械学習分子動力学システムの構築」を利用して得られたものです。また、JSPS科研費 (基盤研究 (C) (JP23K04637) 「核燃料物質に特化した機械学習分子動力学法の開発」の助成を受けて行われました。

Kobayashi, K. et al., Machine Learning Molecular Dynamics Reveals the Structural Origin of the First Sharp Diffraction Peak in High-Density Silica Glasses, Scientific Reports, vol.13, issue 1, 2023, 18721, 12p.

システム計算科学センター 小林 恵太



◀Webはこちらへ

GPUを駆使して流体解析と観測データを高速に同化する手法の開発

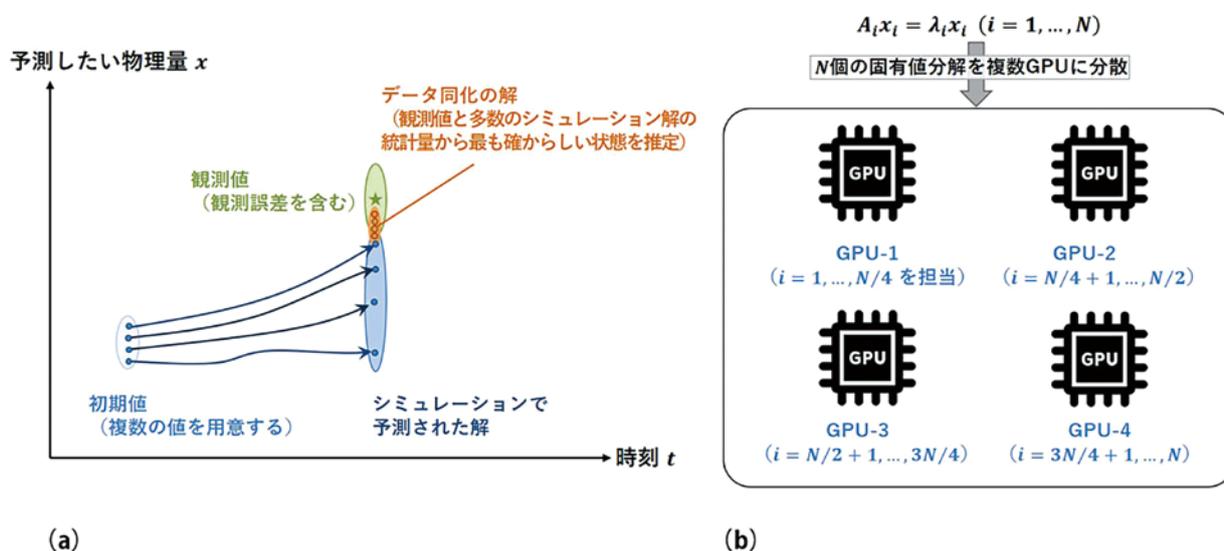


図1 データ同化の模式図

(a) データ同化 (局所アンサンブル変換カルマンフィルタ; LETKF) では、観測値と多数のシミュレーション解の統計量から最も確からしい状態を推定する手法 (最尤推定) を用いてデータ同化の解を求めます。(b) LETKF では多数の行列の固有値分解を計算します。本研究では、これを複数 GPU に分散して高速に解くコードを開発しました。

データ同化は、数値シミュレーションに現実の観測データを取り込み、シミュレーションの予測精度を向上させる手法です。天気予報の分野を中心に発展してきた手法ですが、数値流体力学 (CFD) 解析にも適用され始めたことで、幅広い科学・工学分野への応用が期待されています。

高精度なデータ同化手法の一つとして局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) がありますが、LETKFでは多数の行列を解く処理の計算速度が問題になります。今回、原子力機構と理化学研究所 (理研) は共同で、LETKFを画像処理装置 (GPU) で高速に計算するためのコード開発を行いました (図1 (a), (b))。

LETKFでは、条件の異なる複数のシミュレーション (アンサンブル計算) を行なったのち、アンサンブル計算から平均や分散などの統計量を求めます。この統計量を基にデータ同化を行います。その際にCFDの格子点数 (数万~数億) と同じ数だけの行列の固有値分解を解く必要があり、この処理が実行時間の大部分を占めます。本研究では、理研が本問題の行列に特化した固有値分解ソルバ「EigenG-Batched」を開発し、原子力機構が複数GPU間のデータ通信の最適化を行いました。これらにより、GPU計算機「Wisteria-Aquarius」(東京大学) の64GPUを用いた計算において、最適化前の実装に比べて45倍の高速化を達成しました。

本研究の一部は、JSPS科研費 (若手研究: JP21K17755) 及び学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHP CN: jh210049, jh220030, jh220031) の支援を受けて行われ、理化学研究所との共同研究「大規模並行列計算ライブラリの研究開発」として実施した成果の一部です。計算には東京大学情報基盤センター「Wisteria/BDEC-01 スーパーコンピュータシステム」を利用しました。

Hasegawa, Y., Imamura, T., Ina, T., Onodera, N., Asahi, Y., Idomura, Y., GPU Optimization of Lattice Boltzmann Method with Local Ensemble Transform Kalman Filter, Proceedings of 2022 IEEE/ACM, 13th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Heterogeneous Systems (ScalAH), Dallas (online), U.S.A., 2022, p.10-17.

システム計算科学センター 井戸村 泰宏



◀Webはこちらへ

核鑑識のための電子顕微鏡画像解析による核物質分類と未知物質の検出 — 深層距離学習モデルを使用した新しい核物質異同識別手法 —

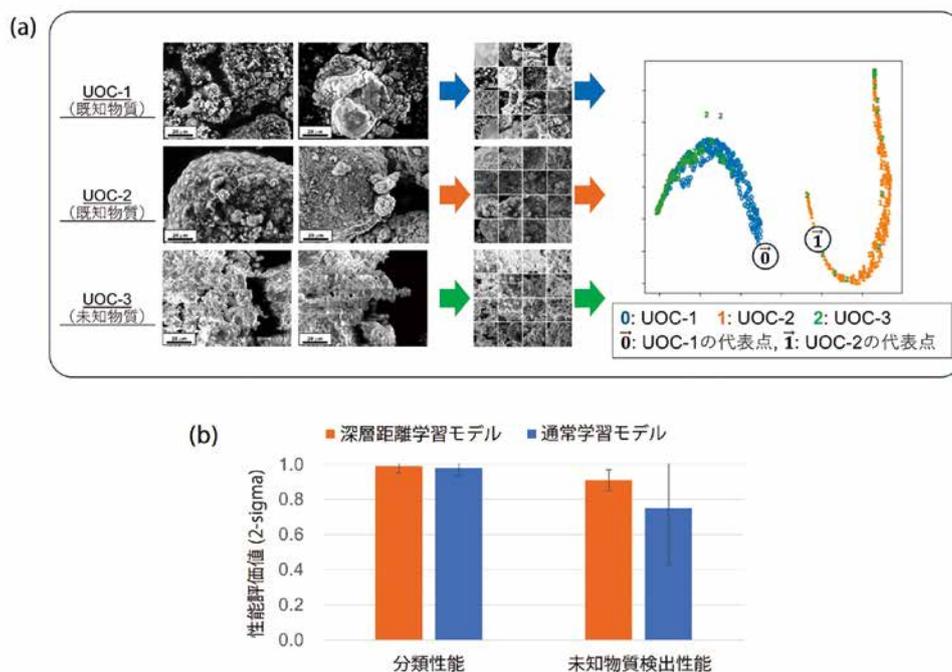


図1 深層距離学習により訓練されたCNNモデルによる核物質電子顕微鏡画像の識別

小正方形に分割された核物質の電子顕微鏡画像はCNNモデルにより多次元空間に投影され、既知物質画像の代表点からの距離に基づいて未知物質が検出されます。UOC-3を仮想的な未知物質とした図1 (a) の例では、多次元空間における既知物質画像の代表点の位置がUOC-1: $\vec{0}$, UOC-2: $\vec{1}$ で表され、個々のテスト画像の位置がUOC-1: $\vec{0}$, UOC-2: $\vec{1}$, UOC-3: $\vec{2}$ で表されています。この中で、UOC-3のテスト画像 (2) の大半が既知物質画像のテスト画像 (0, 1) の代表点から離れた位置に分布しています。このことから、UOC-3は未知物質である可能性が高いと推定されます。

テロや犯罪などの現場から押収された核物質や放射性物質の起源等を物質自身の特徴から決定する核鑑識分析技術開発の一環として、電子顕微鏡などで観察できる形態学的特性を畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) と呼ばれるモデルで解析することで高精度に核物質を識別する手法の開発を進めています。

CNNモデルは画像を高い精度で分類することができる一方で、訓練データにない未知の物質を精度良く検出することが難しいことが知られています。これは、未知物質試料を取扱う可能性がある核鑑識分析において深刻な問題となります。そこで、顔認証の分野で研究が進められている「深層距離学習」と呼ばれるアプローチをCNNモデルの訓練に適用することで、電子顕微鏡画像解析から核物質の分類と未知の物質の識別を同時に実現する技術を実現しました (図1(a))。

天然ウラン精鉱 (Uranium Ore Concentrate: UOC) の標準物質を用いた本技術の検証により、深層距離学習で訓練したCNNモデル (深層距離学習モデル) が非常に高い精度でUOCを分類するとともに、通常の学習方法で訓練したモデルよりも高い精度で未知物質を検出できることを実証しました (図1(b))。

本技術により、核鑑識分析において核物質を識別するための効果的な根拠の一つとして、電子顕微鏡画像を利用できるようになることが期待されます。

Kimura, Y. et al., Application of Deep Metric Learning Model to Microscope Image Analysis for the Determination of UOC Samples in Nuclear Forensics Analysis, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 3rd International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry (RANC 2023), Budapest, Hungary, vol.333, issue 7, 2024, p.3541–3551.



原子力人材育成・核不拡散・核セキュリティ総合支援センター 木村 祥紀



◀Webはこちらへ

光ファイバを用いた1F高線量率場の放射線分布測定に成功 —光の波長分解分析に基づく新手法の初実証—

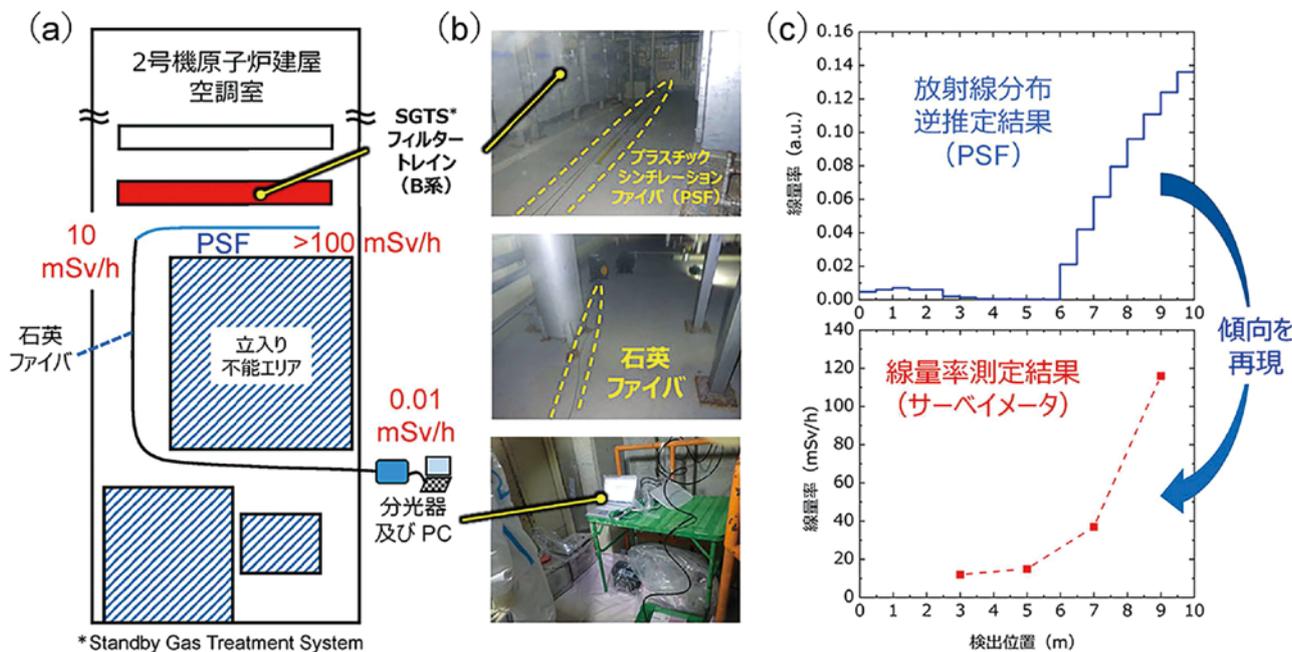


図1 (a) 1F2号機原子炉建屋空調室での放射線分布測定試験セットアップ、(b) 測定試験の様子、(c) 放射線分布逆推定結果と実際の線量率分布の比較

東京電力福島第一原子力発電所（1F）廃炉作業環境においては、作業者の被ばく線量低減と効率的な除染計画立案のため、線量率や放射性物質の分布（以下、放射線分布）を詳細に把握することが重要です。本研究では1F廃炉作業環境における放射線分布測定手法としてプラスチックシンチレーションファイバ（PSF）に着目し、PSFと放射線の相互作用により発生するシンチレーション光の波長（色）分析により1F原子炉建屋内のような高線量率環境下で放射線分布を測定する「波長分解分析法」を開発しました。本手法はファイバ内を伝搬する光の減衰量に波長依存性が存在する点を利用してPSFに沿って放射線分布を測定する手法です。ガンマ線照射場での事前評価の結果、10 Sv/hまでの高線量率で適用可能であることを確認しており、まさに廃炉現場に特化した手法となっています。

本センサを用いた1F2号機における実証試験の様子と結果を図1に示します。PSFを1F2号機原子炉建屋空調室の高線量率場に敷設し、室外の低線量率の場所に設置した分光器で波長（色）スペクトルを測定しました。このスペクトルを解析することで、図1(c)の通りPSFに沿って放射線分布を逆推定することができます。図1(c)では放射線分布の逆推定結果は、サーベイメータによって得られた「終端に向かって急激に線量率が上昇する」という実際の傾向（最大線量率100 mSv/h超）を良好に再現しています。このことから、本センサの1F実環境での有効性を確認できました。

本研究は、JSPS科研費（JP22K18129）の助成を受けたものです。

Terasaka, Y. et al., First Demonstration of a Single-End Readout Position-Sensitive Optical Fiber Radiation Sensor Inside the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Based on Wavelength-Resolving Analysis, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, vol.1062, 2024, 169227, 6p.



福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター 寺阪 祐太



◀Webはこちらへ

1F原子炉建屋内の放射能汚染を3次元的に“見える化” —見えない放射能汚染を可視化して1F建屋内の環境改善に貢献—

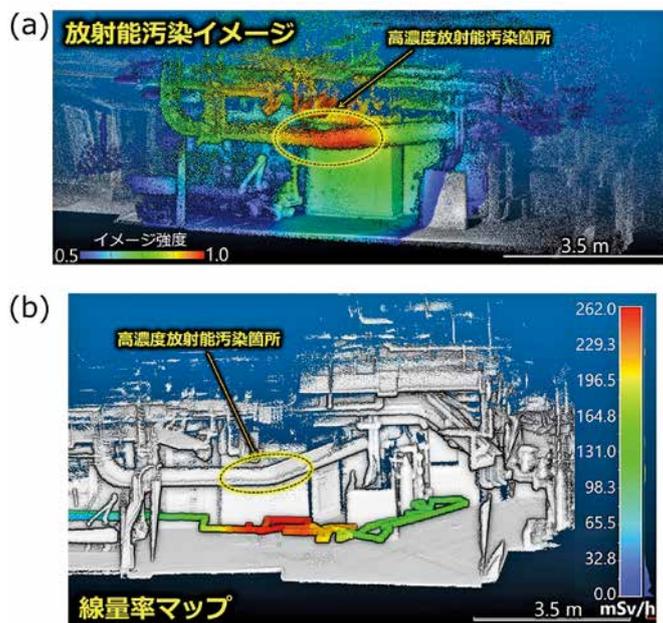


図1 1F1号機原子炉建屋内における高濃度放射能汚染箇所 (a) と線量率 (b) を可視化した建屋内3次元モデル

実証試験では、iRISを搭載したメカナムホイールロボットを1号機原子炉建屋内に投入し、遠隔にて測定を行いました。SLAM機器で取得した建屋内の3次元モデル上に、コンプトンカメラ（放射性物質可視化カメラの一種）で可視化した放射能汚染のイメージ (a) と、サーベイメータで取得した線量率情報 (b) をカラー表示しました。

Sato, Y. et al., Detailed Visualization of Radioactive Hotspots Inside the Unit 1 Reactor Building of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Using an integrated Radiation Imaging System Mounted on a Mecanum Wheel Robot, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.61, issue 7, 2024, p.856–870. (Figure 11を一部改変して転載)

東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故から13年と半年の歳月が経過しましたが、1F建屋内には作業者の立入りや長時間作業が困難な高線量率エリアが残されています。この作業現場において放射能汚染の分布を把握することは、作業者の被ばく低減や作業計画の立案を進める上で極めて重要です。

そこで原子力機構では、作業環境の放射能汚染分布を3次元的に可視化する統合型放射線イメージングシステム [iRIS (アイリス) : integrated Radiation Imaging System] を考案し、実証試験を進めています*。

図1は、東京電力HDと共同で実施した1F1号機原子炉建屋内における実証試験の結果です。建屋内は線量率が高く、作業者の進入が難しいエリアのため、コンプトンカメラ、SLAM機器及びサーベイメータから構成されるiRISをメカナムホイールロボットに搭載し、遠隔にて調査を行いました。その結果、天井配管に高濃度放射能汚染を見いだすとともに ((a) 赤色部分)、その直下にて線量率が急上昇していることを確認しました ((b) 赤色部分)。このように遠隔にて1F建屋内の高線量率エリアの調査を実施可能なiRISを用いて、今後、未調査エリアの調査を通じて建屋内の環境改善に貢献していきます。

本研究は、東京電力ホールディングス株式会社との共同研究「分析機器類の廃炉現場環境における性能実証に関する研究」として実施されました。

* 原子力機構、廃炉現場の汚染分布を3次元マップで“見える化” —見えない汚染を仮想空間で把握し、作業員の被ばくを低減—、令和3年5月14日プレス発表

Sato, Y. et al., Detailed Visualization of Radioactive Hotspots Inside the Unit 1 Reactor Building of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Using an integrated Radiation Imaging System Mounted on a Mecanum Wheel Robot, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.61, issue 7, 2024, p.856–870.



福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター 佐藤 優樹



◀Webはこちらへ

非GPS環境下におけるドローンの飛行性能評価法の開発

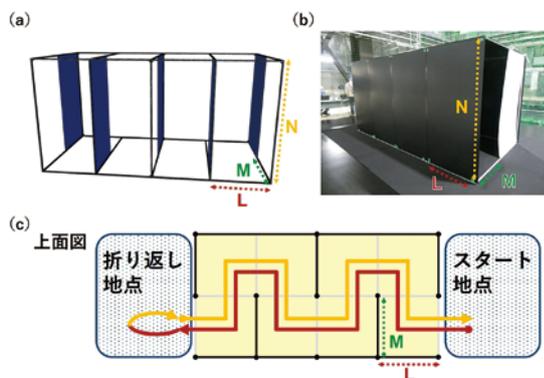


図1 非GPS環境下における水平方向への障害物回避の試験
(a) 試験場の構造、(b) 試験場、(c) 試験における飛行経路

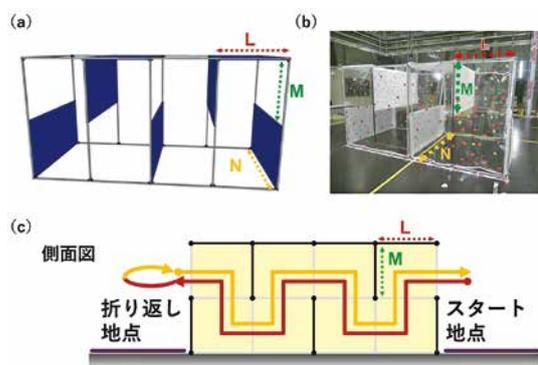


図2 非GPS環境下における垂直方向への障害物回避の試験
(a) 試験場の構造、(b) 試験場、(c) 試験における飛行経路



図3 ドローンのユーザ・メーカーとの意見交換の様子

ドローンはインフラやプラント点検の効率化、働き手不足の解決等のために注目され、更なる活躍の拡大が期待されています。また、その活躍の場にはトンネルやプラント建屋内等GPSが使えない環境も含まれます。しかし、実際にGPSが使えない場所でドローンを利用するには、GPSに関連する機能が制限される中でも十分にドローンが飛行できるか確認する必要があります。そこで、ドローン産業の促進を目的に、ドローンが一部機能に制限を受ける場所でのどの程度飛行できるのか評価する方法を研究開発しています。

具体的には、GPSの信号を遮る壁や天井が障害物となる環境でドローンが障害物を避けながら、「安定して飛行できるか?」「スムーズに飛行できるか?」を評価するための試験フィールドと試験手順を開発しました(図1、図2)。また、これらは産業のための試験であることを考慮し、ドローンのメーカーやユーザの方々との意見を取り入れながら(図3)、特殊な機材や専門の知識を必要とせず低コストで評価できるよう簡易な装置、単純な手順で評価方法を開発しました。このような評価方法の研究は、AI・ドローンなど高度化する技術を適切に利用するために重要な知識を提供し、働き手不足や国際競争力の低下などの問題を抱える今後の社会に貢献するものとなります。

本成果は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業(JPNP17004)「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」において得られたものです。

Yamada, T. et al., Development of Test Method for Evaluation of UAS Mobility Capability in GNSS-Denied Environment, ROBOMECH Journal, vol.10, issue 1, 2023, 13, 8p.



福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター 山田 大地



◀Webはこちらへ

廃炉作業空間モデリングのための写真測量計算負荷の軽減 —画像シーケンスから逐次生成される立体モデル統合手法—

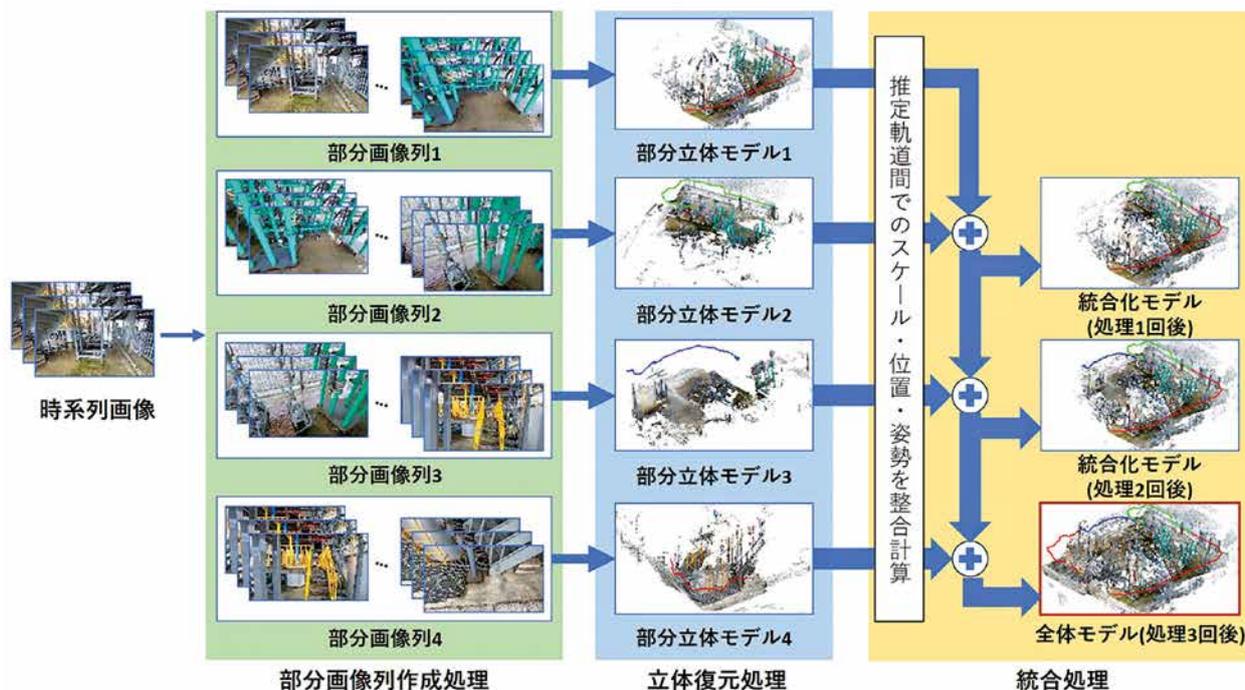


図1 部分立体モデル統合による全体モデル生成手法の概要と計算結果例 (実験用計算機のスペック
CPU: Intel Xeon® Gold 5222 CPU 4 cores (3.8 GHz), Memory: 96 GB, OS: Ubuntu 20.04 LTS)

廃炉作業を安全かつ着実に進めるためには、事前調査によって作業対象環境の状況を把握して作業計画を立案することが重要です。このため私たちは作業対象空間内の状況を把握するために、画像から作業対象空間の構造や形状を立体モデルとして復元する写真測量手法の研究開発に取り組んでいます。作業対象空間をより詳細に把握するためにはより多くの画像が必要ですが、計算処理対象とする画像枚数の増加にしたがって計算処理負荷も増大します。

本研究では、これを軽減するために、時系列画像を少数枚画像による部分画像列群に分割し、それぞれの部分画像列から生成される部分立体モデルの統合により全体モデルを効率的に生成する手法を開発しました(図1)。部分立体モデルはそれぞれ異なるスケール・位置・姿勢で生成されることから、写真測量による計算の際に推定されるカメラ軌道情報を活用して、部分立体モデル間調整により統合するアルゴリズムを導入しました。本手法を適用した場合と全画像を一括処理した場合について比較実験(撮影エリア10 m×10 m×2 m、総枚数705枚、50, 100, 150, 200枚で部分画像列に分割実施)を行ったところ、同等のクオリティのモデルが短時間(今回の実験例で最大約74%の時間削減)で得られることが確認されました。今後は、開発した手法を遠隔操作時の空間認識支援コンテンツ生成に応用していくことを検討しています。

本研究は、JAEA英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(JPJA19H19210047)「燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成」の助成を受けたものです。

Matsumoto, T., Kawabata, K. et al., Estimated Camera Trajectory-Based Integration Among Local 3D Models Sequentially Generated from Image Sequences by SfM-MVS, Artificial Life and Robotics, vol.29, issue 2, 2024, p.358–371.

福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター 川端 邦明



◀Webはこちらへ

中性子を計測せずに中性子数の増加を評価する —短半減期希ガス核分裂生成物の放射能比に基づく臨界監視法—

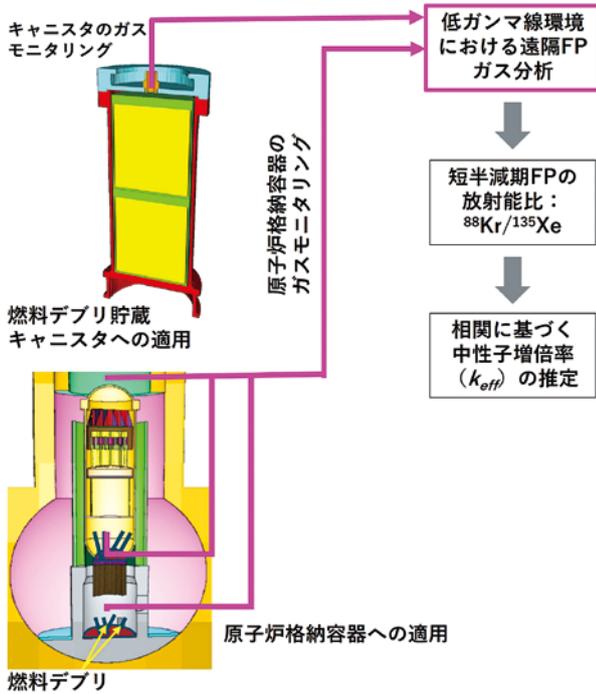


図1 ^{88}Kr と ^{135}Xe の放射能比を用いた中性子増倍率 (k_{eff}) 推定法

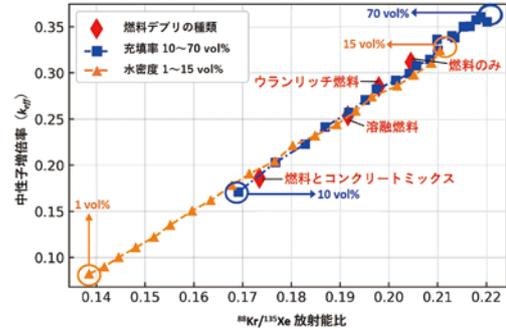


図2 キャニスタ内の様々な種類の燃料デブリに対する $^{88}\text{Kr}/^{135}\text{Xe}$ 放射能比と中性子増倍率 k_{eff} の相関

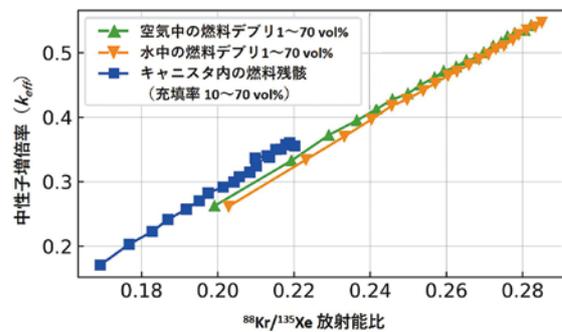


図3 原子炉格納容器 (PCV) 内の様々な種類の燃料デブリに対する $^{88}\text{Kr}/^{135}\text{Xe}$ 放射能比と中性子増倍率 k_{eff} の相関 (▲と▼) (参考のため、図2のキャニスタでの相関 (■) を挿入)

図1は、半減期の短い核分裂生成物 ^{88}Kr と ^{135}Xe の放射能測定によって、原子炉格納容器 (PCV) や燃料デブリ貯蔵キャニスタ内の中性子増倍率 (k_{eff}) を推定する応用方法のイメージです。この方法では、燃料デブリ貯蔵キャニスタ (図1上) やPCV (図1下) の様々な場所からガスを採取します。 ^{88}Kr や ^{135}Xe のような希ガスから放出されるガンマ線測定の利点は、ガンマ線のバックグラウンドが比較的低い場所で測定ができることです。また、事前に求めた $^{88}\text{Kr}/^{135}\text{Xe}$ の放射能比と k_{eff} の関係 (図2、図3) から、ガス採取点での臨界性を評価します。

これまでに開発した未臨界燃焼計算コードを、燃料デブリ貯蔵キャニスタ及びPCVの廃止措置プロセスにおける様々な燃料デブリ条件に適用しました。燃料デブリ貯蔵キャニスタをモデル化し、様々な燃料デブリ組成に対する k_{eff} と $^{88}\text{Kr}/^{135}\text{Xe}$ の放射能比 ($A (^{88}\text{Kr}/^{135}\text{Xe})$) の相関を調べました。また、PCVをモデル化し、様々な形状における $k_{eff}A (^{88}\text{Kr}/^{135}\text{Xe})$ 相関を調べました。

その結果、燃料デブリ貯蔵キャニスタの臨界性と $A (^{88}\text{Kr}/^{135}\text{Xe})$ の相関は線形であり、 $k_{eff}A (^{88}\text{Kr}/^{135}\text{Xe})$ の相関は燃料デブリ貯蔵キャニスタやPCVのような形状にほぼ影響されないことがわかりました。これらの結果は、ガンマ線のバックグラウンドが比較的低い場所で測定できる放射能比 $A (^{88}\text{Kr}/^{135}\text{Xe})$ が臨界性のモニタリングに使用できることを示しています。

Riyana, E. S. et al., Preliminary Study of the Criticality Monitoring Method Based on the Simulation for the Activity Ratio of Short Half-Life Noble-Gas Fission Products from Fuel Debris, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.61, issue 2, 2024, p.269–276.



福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター Eka Septa Riyana



◀Webはこちらへ

γ線照射下のジオポリマーからの水素の発生と放出をモデル化 —ジオポリマーによる放射性廃棄物の固定化の有効性を確認—

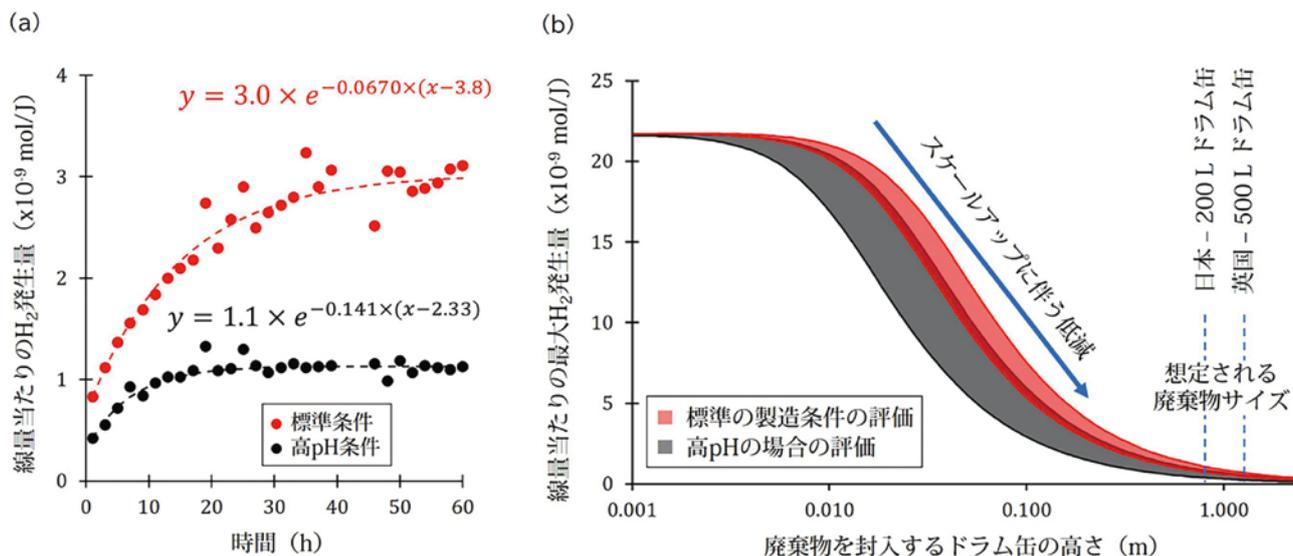


図1 (a) ジオポリマーからの水素 (H₂) ガス発生の実験結果と (b) スケールの影響の予測モデル

(a) 標準製造 (●) と高 pH 製造 (●) の 2 L ジオポリマー 試料です。線量当たりの H₂ 発生量が時間とともに一定になりますが、高 pH では H₂ の再結合 (水に戻る反応) が顕著になるため、高 pH 調製時の発生量が全体的に小さくなりました。(b) ジオポリマーを円筒のドラム缶に入れた場合を想定してモデルを作りました。ドラム缶が高くなるほど、H₂ 発生量が小さくなりますが、製造時の pH 等によって同一高さで幅を持った曲線になります。

原子力発電等で発生する放射性廃棄物を無機の固化体中に固定化することは、放射性物質の環境への拡散防止だけでなく、廃棄物の安全な取扱いにおいても重要です。廃棄物には一般に水が含まれており、これが放射性物質からの放射線によって分解され、水素 (H₂) ガスが発生するため、固化体中の廃棄物量が制限されます。そこで、H₂ ガス発生に起因する加圧や燃焼のリスクを評価するため、実際の H₂ ガスの発生量を調べる必要があります。一方、廃棄物の固定化にアルミノケイ酸塩の一つであるジオポリマーを使用すると、常温で固定化できるため、経済的で、処理中の放射性物質の飛散も高温処理より抑えられる利点があります。

本研究では、ガンマ線照射下のジオポリマーからの H₂ 発生量に及ぼす固化体スケールの影響を調べ、これをモデル化しました。実験は、共同研究先のフランス原子力庁 (CEA) の照射装置を用いて行いました。

図 1 (a) は H₂ 発生量の実験結果 (サイズ 2 L、高さ 22 cm) で、固化体中の H₂ の再結合 (水に戻る反応) と拡散によって時間とともに一定になります。特に pH が高いと、再結合が効率的になります。この結果を実験室の規模から実際の現場の規模に拡張して、図 1 (b) の廃棄物を封入するドラム缶の高さ (高さと同径の比は一定) に対する H₂ 発生量の予測モデルを作りました。想定される実規模サイズ (200 L) では、H₂ の移行経路が長くなり再結合の機会が増えます。その結果、H₂ 発生量が著しく小さくなるため、廃棄物の固定化でのジオポリマーの有用性が確認されました。

Cantarel, V. et al., Diffusion Controlled Hydrolysis in Geopolymers Under Gamma Irradiation, Journal of Nuclear Materials, vol.592, 2024, 154969, 9p.

福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター Vincent Cantarel



◀ Webはこちらへ

除染や家屋解体作業における被ばく線量評価向上を目指して —作業別・場所別に作業員の被ばく線量を統計的に評価—



帰還困難区域（5エリア Site A～E）の家屋解体作業で作業員の被ばくデータ及びGPSデータを取得
※本論文で定義する指標値

$$\text{計画値精度の指標 (RD)} = \frac{\text{空間線量率からの計画値} - \text{個人線量計による実測値}}{\text{個人線量計による実測値}}$$

図1 データの取得と予測精度の指標

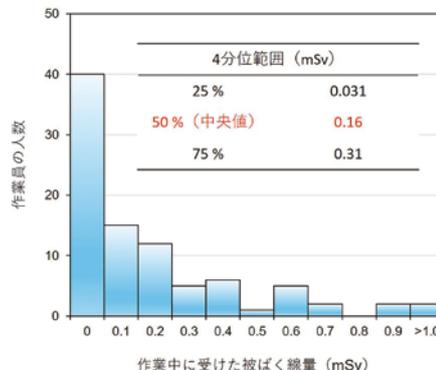


図2 対象作業における作業員別の積算被ばく線量

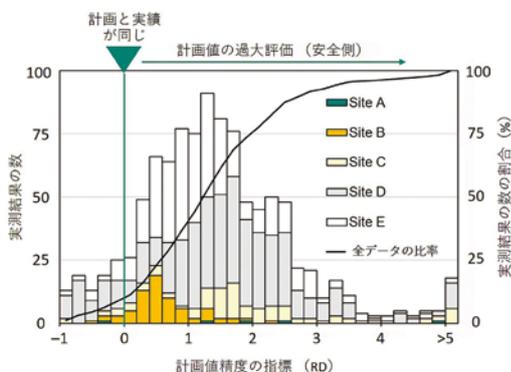


図3 作業全体における計画値の精度の分布

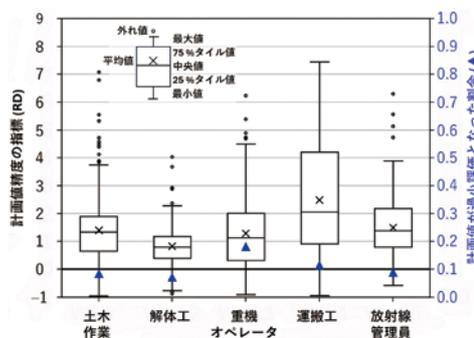


図4 作業種別の計画値の精度の指標と計画値の過小評価となる割合

本研究では、東京電力福島第一原子力発電所周辺の帰還困難区域解除のために実施されている除染作業のガイドラインで示されている作業員の被ばく評価方法の最適化を目的とし、2020年度に調査当時帰還困難区域であった住宅地5エリア (Site A～E) で行われた家屋解体及び土壌表面の被覆などの線量低減措置に伴う作業において、全作業員の外部積算被ばく線量を取得するとともに、一部の作業員の区域内の行動履歴をGPSによる位置情報として記録しました (図1)。本作業における作業員別の積算被ばく線量は最大で1.1 mSvでした (図2)。取得したGPSデータを元に、空間線量率から計算する計画値と実測した被ばく線量のデータから、計画値の精度の指標となる相対偏差 (RD: Relative Deviation) を作業エリア及び作業種別ごとに計算しました。RD値は1.4をピークに分布しており、この数値は、計画値が実測値の2.4倍となることを意味します。また、計画値が過小評価となるRD値が負の数値となったのは全作業員の9%程度であり (図3)、その作業のほとんどが森林内であったこと、線量低減作業前の作業が多かった解体工の計画値は他の作業と比較して実測値に近いことがわかりました (図4)。

本研究成果は、除染作業員の放射線防護手法の最適化につながると考えられます。

本成果は、内閣府からの受託事業「令和3年度特定復興再生拠点区域外における線量低減措置等の効果実証事業」の成果の一部です。

眞田幸尚ほか、帰還困難区域内での家屋解体・線量低減措置に伴う作業員の外部被ばく評価解析, 日本原子力学会和文論文誌, vol.22, issue 2, 2023, p.87-96.



福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター 眞田 幸尚



◀Webはこちらへ

ため池における放射性セシウム分布の現場評価を目指して —底質中放射性セシウムの深度分布の経時変化による影響—

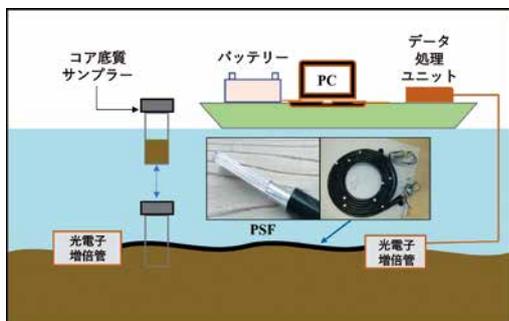


図1 プラスチックシンチレーションファイバー (PSF) のため池水底での測定状況

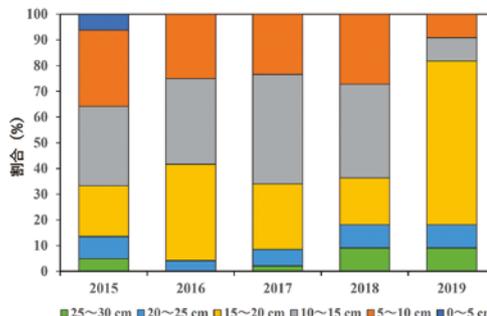


図2 ため池で採取した全底質の90%深度(底質中放射性セシウムの総量の90%が含まれる表層からの深度)の分布割合

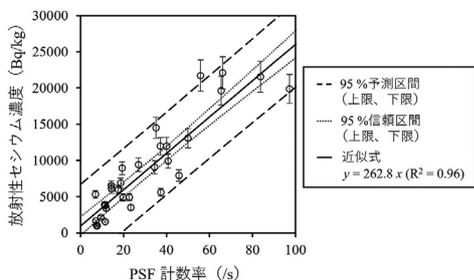


図3 PSFで得られた計数率とその測定地点で採取された底質中(0~15 cm)の平均放射性セシウム濃度の比較例

近似的傾きが換算係数を表しています。両者に強い相関が見られました。両者の相関性が強いほど近似式の決定係数が大きくなり、図4の縦軸の決定係数が大きくなります。

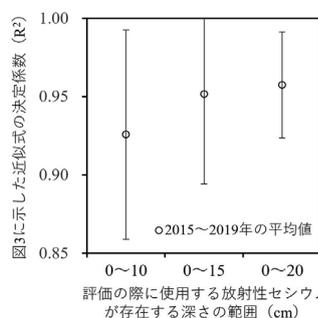


図4 着目する深度と図3に示した近似式の決定係数との関係
PSFで得られた計数率と各深度の底質中平均放射性セシウム濃度の関係の決定係数を示しています。

福島県の農業用ため池の水底における放射性セシウム (^{134}Cs 及び ^{137}Cs) のモニタリングは、灌漑用水の安全性を確保し、農業活動の再開を支援するために重要です。先行研究で、現場で底質中放射性セシウム濃度を迅速かつ簡便に推定するために、プラスチックシンチレーションファイバー (PSF) の測定技術を開発しました。

ため池水底にPSFを静置(図1)することで得られた γ 線計数率を濃度に換算するための係数が必要で、放射性セシウムが主に底質の表層から10 cmに分布していると仮定して設定されていました。しかし、底質中の放射性セシウムの深度分布は、時間の経過とともに変化する可能性が示唆されています。

本研究では、放射性セシウムの深度分布の変化を考慮した濃度評価の必要性を検討しました。2015~2019年に行われた底質採取の結果、放射性セシウムの総量の90%が含まれる深度は、表層から10 cmに分布するケースが時間の経過とともに減少し、表層から15及び20 cmに分布するケースが増加していました(図2)。2015年以降、底質の表層から15あるいは20 cmを考慮した場合、PSFの計数率と底質中放射性セシウム濃度との間に強い相関性が観測され(図3)、これは図2の傾向と一致しました。しかし、表層から10 cmだけを考慮した場合でも、十分な精度が保てる決定係数が得られました(図4)。事故後5年以降は、放射性セシウムの深度分布の変化を考慮した換算係数を用いることで、より推定精度の向上が期待できます。

本研究は、福島県土地改良事業団体連合会からの受託研究「水底の放射線分布測定手法に関する技術指導」の成果の一部です。

Katengeza, E. W., Ochi, K. et al., Optimizing Calibration Factors of Plastic Scintillation Fibers for Improved Accuracy of *In Situ* Radiocesium Concentration Measurements in Bottom Sediments of Agricultural Ponds, Cogent Engineering, vol.11, issue 1, 2024, 2340203, 9p.



福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター 越智 康太郎



◀Webはこちらへ

空から放射線を測る —東京電力福島第一原子力発電所周辺の10年の空間線量率観測成果—

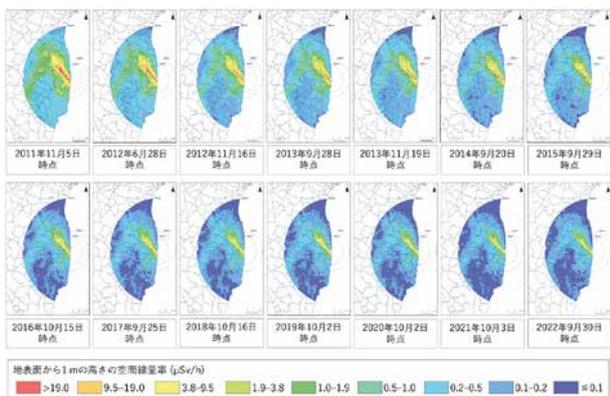


図1 1Fから半径80 km以内の空間線量率の経時変化 (2011年～2022年)
航空機モニタリングによって得られた空間線量率の経時変化を示しています。事故直後に高かった空間線量率は、除染や自然減衰の影響で時間の経過とともに減少しています。

表1 1Fから半径80 km以内の空間線量率ごとの面積割合の経時変化 (2011年～2022年)

空間線量率ごとの面積割合の経時変化を示しています。2011年には0.2 μSv/hを超える地域が全体の約95 %を占めていましたが、2022年には約23 %まで減少しました。

地表から1 mの高さの空間線量率 (μSv/h)	面積割合 (%)													
	2011年11月5日 時点	2012年6月28日 時点	2012年11月16日 時点	2013年9月28日 時点	2013年11月19日 時点	2014年9月20日 時点	2015年9月29日 時点	2016年10月15日 時点	2017年9月25日 時点	2018年10月16日 時点	2019年10月2日 時点	2020年10月2日 時点	2021年10月3日 時点	2022年9月30日 時点
>19.0	1.0	0.6	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9.5-19.0	1.7	1.4	1.1	0.8	0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
3.8-9.5	4.0	3.4	2.7	2.3	2.3	2.0	1.7	1.3	1.2	1.1	1.0	0.8	0.6	0.6
1.9-3.8	5.9	4.0	3.6	3.6	3.6	3.0	2.1	1.6	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3
1.0-1.9	16.2	8.9	5.8	5.1	4.5	4.0	3.9	3.2	3.0	2.6	2.2	2.1	1.9	1.6
0.5-1.0	22.2	20.5	18.7	17.4	12.7	11.3	7.8	6.4	5.6	5.0	5.0	4.7	4.5	4.2
0.2-0.5	44.5	42.4	33.4	34.0	33.1	32.0	30.0	25.7	24.5	23.3	22.3	21.2	18.1	15.4
0.1-0.2	4.4	18.0	31.8	33.0	37.4	40.4	42.7	34.6	34.9	36.7	35.4	38.3	32.5	37.2
≤0.1	0.0	0.9	2.8	3.8	5.3	6.5	11.3	27.0	28.9	29.5	32.4	31.4	40.8	39.7

※面積の合計値は約923 km²です。面積割合の合計値は端数処理の関係上、必ずしも100 %とはなりません。

2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所 (1F) 事故以降、私たちは、航空機モニタリングにより1F周辺の空間線量率を継続的に評価してきました。航空機モニタリングは、広範囲かつ迅速に放射線量の分布を把握でき、人や車ではアクセス困難な山林などの測定も可能です。事故直後は避難指示区域の設定に貢献し、その後も除染や自然減衰の影響を踏まえた避難指示区域の見直しや解除など、住民の安全確保にも重要な役割を果たしています。

図1と表1に示すように、事故直後には1Fから半径80 km以内の約95 %の地域で空間線量率が約0.2 μSv/h (平常時に一般の人が1年間に受ける実効線量限度、1.0 mSvにおおよそ相当する) を超えていましたが、時間経過とともに空間線量率は減少し、2022年には約23 %にまで低下したことが確認されました。航空機モニタリングにより空間線量率の変化を定量的に把握し、その推移を明確に示すことで、1F事故の影響を受けた地域の復興や住民の安全確保に向けた科学的な情報を提供してきました。これらの測定結果は、原子力規制庁のウェブサイト*を通じて一般に公開されています。

航空機モニタリングは、他の発電所で万が一事故が発生した際の緊急時モニタリングの手段としても位置づけられており、地上インフラの状況に依存せず広範囲かつ迅速な測定が可能です。この特長を活かし、事故の影響を受けた地域を適切にゾーニング (zoning: 区域分け) し、住民の安全確保のための効果的な対策に役立つことが期待されています。

本研究は、原子力規制庁原子力規制委員会からの受託事業「令和4年度原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費 (80 km圏内外における航空機モニタリング) 事業」の成果の一部です。

*航空機モニタリング結果 (環境放射線モニタリング情報>モニタリング結果アーカイブ)

<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/results/airborne>

普天間章ほか, 令和4年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング (受託研究), JAEA-Technology 2023-027, 2024, 146p.

原子力安全・防災研究所
原子力緊急時支援・研修センター 普天間 章



◀Webはこちらへ

固体表面の微量成分の分布を可視化 —レーザーと同位体計測を用いた高感度イメージング法—

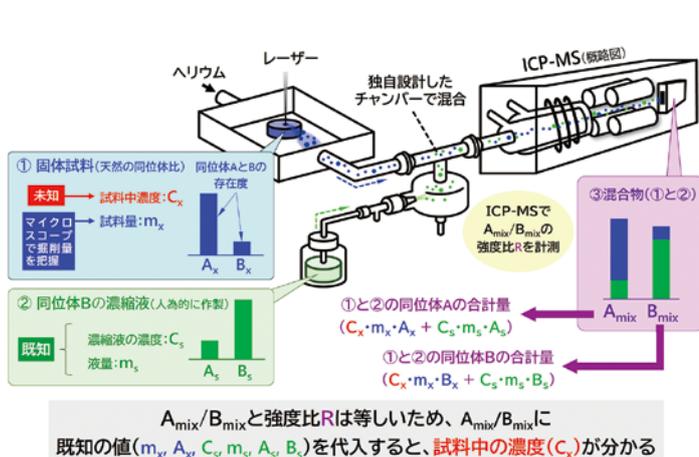


図1 定量イメージング装置の構成と同位体希釈質量分析法の原理

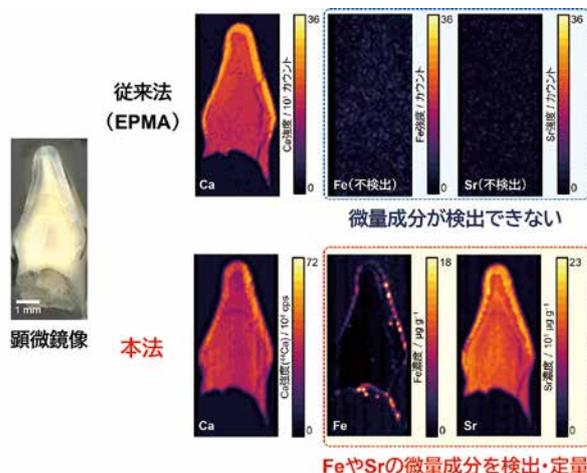


図2 本法とEPMAによる人の歯表面の成分イメージングの比較

生体・環境試料中の微量成分や微量同位体の測定には、天然とは異なる同位体比を持つ標準物質を試料へと添加して測定する同位体希釈質量分析法 (IDMS) がよく用いられます。この方法は、高感度かつ高精度な分析技術として利用されていますが、従来のIDMSでは固体試料を粉砕や溶液化を経て標準と混合する必要があるため、分布情報を得ることはできませんでした。そこで、高感度でイメージングが可能なレーザーアブレーション-誘導結合プラズマ質量分析法 (LA-ICP-MS) に独自設計のチャンバーを用いることで、レーザーでエアロゾル化した試料と噴霧した標準物質を気中で混合して分析する微量成分の定量イメージング法を開発しました (図1)。

この方法では、レーザー照射で掘削された固体試料量と掘削された試料の同位体比が分かれば、濃度と供試量既知の同位体比が異なる標準物質を随時混合して測定することで、試料からの各同位体供給分を推定でき、固体試料表面の元素濃度分布を求めることができます。必要となる固体試料中の同位体比は、試料を標準物質とは混合せずに測定することで決定し、レーザー照射での掘削量はデジタルマイクロスコップで求めました。その結果、人の歯などの固体試料における微量成分の定量とイメージングの両立を実現しました (図2)。

本法は、様々な生体・環境試料における元素やRIなどの微量成分の分析へ展開が期待されます。

本研究は、JAEA英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 (JPJA19H19210081) 「化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とティアップ型人材育成」の助成を受けたものです。

Yanagisawa, K., Matsueda, M. et al., Quantitative Imaging of Trace Elements in Solid Samples by Online Isotope Dilution Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, Analyst, vol.148, issue 18, 2023, p.4291-4299.



福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター 松枝 誠



◀Webはこちらへ

地層中の割れ目がずれると割れ目内の隙間 (地下水の通り道) はつながるか？ — 隙間のつながり具合を現場で簡単に調べる試験手法を開発 —

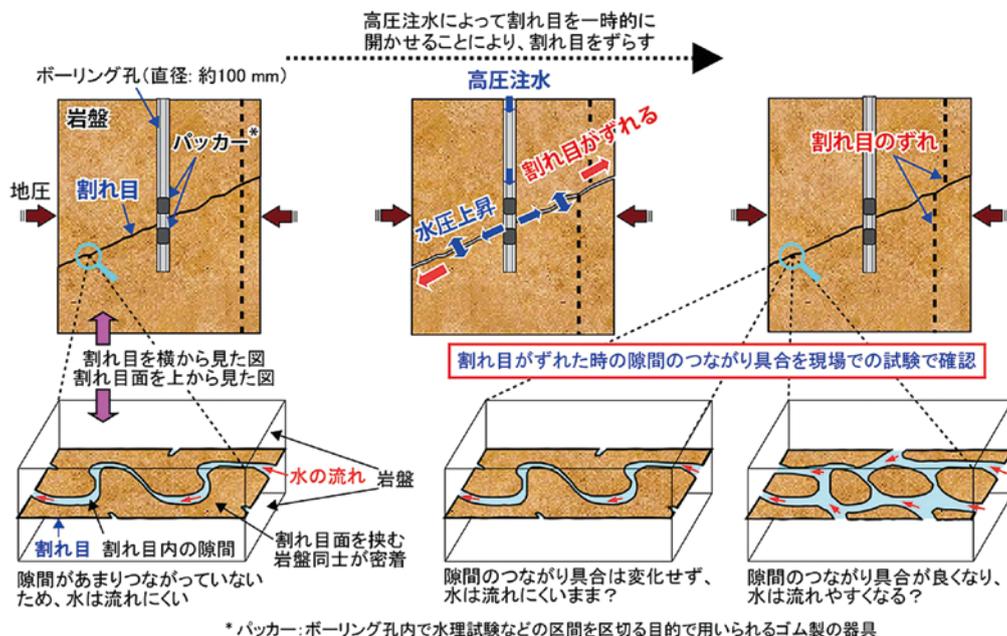


図 1 本研究のイメージ図

地層処分では、地層中の割れ目は地下水の通り道になる可能性があることから、割れ目内の隙間の大きさや隙間のつながり具合を把握することが重要となります。また、地層処分のような長期間の時間スケールでは、現在の割れ目の状態だけでなく、地殻変動に伴う割れ目のずれなどの将来的に想定される現象に対する影響を把握することも重要になります。これまでに、幌延深地層研究センターは、簡易的な方法で、ボーリング孔に交差する地下の割れ目を人為的にずらす試験手法を開発し、割れ目のずれが隙間の大きさに与える影響を容易に調べることを可能としました。本研究では、その試験手法を活用して、割れ目のずれが隙間のつながり具合に与える影響についても調べることができないかを、幌延深地層研究センターの堆積岩の割れ目を対象にした現場での試験を通じて検討しました。その結果、割れ目がずれても隙間のつながり具合は変化しないまま、すなわち、地層の透水性には影響せず水は流れにくいままであるといった現象を捉えることに成功しました。

本研究で開発した試験手法と割れ目の隙間の大きさを調べる試験とを合わせることで、将来的な地殻変動に伴う割れ目のずれを考慮した地層の閉じ込め性能をより正確に推定することが可能となりました。

今回の成果は、地層処分における地層の長期的な閉じ込め性能の評価のみならず、CO₂地中貯留において貯留層の閉塞性を評価する際にも活用されることが期待されます。

Ohno, H. et al., Effect of Fault Activation on the Hydraulic Connectivity of Faults in Mudstone, Geomechanics for Energy and the Environment, vol.31, 2022, 100317, 9p.



マントルから湧き上がる流体の通り道の検出に向けて —地震波速度の異方性を利用した検出の試み—

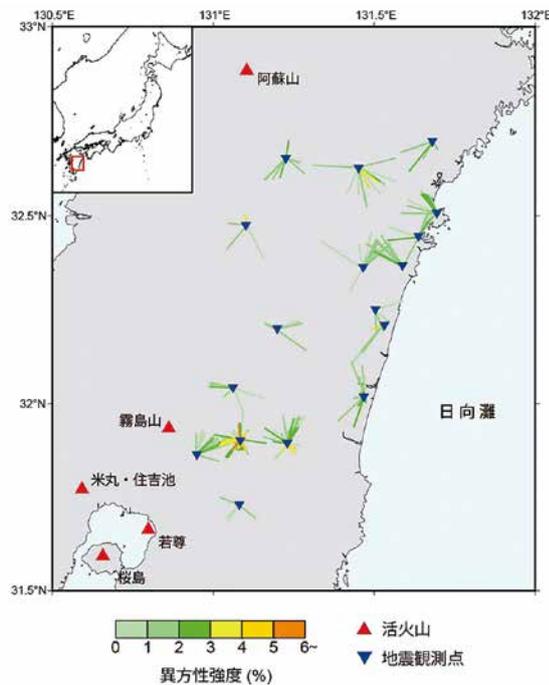


図1 地震波の解析によって推定した地震波伝播経路上の地震波速度異方性の強さ

図中の直線は、解析に使用した地震の震源（—の先端）から地震観測点（▼）へ地震波が伝播した経路を示しています。直線の色は、それぞれの地震波伝播経路上での異方性強度を示しています。異方性強度は、伝播方向の違いによる地震波速度の差が平均的な地震波速度に対して何パーセントであるかを表しています。

地層処分システムが長期的に安全機能を発揮するためには、地下水の流動や水質などが好ましい状態で維持されることが重要となります。このような地下水の特性を大きく変化させる原因の一つとして、マントルから地殻を通って上昇した流体の混入が考えられています。しかし、数千mよりも深い場所の様子をボーリング調査によって直接知ることはできません。

本研究では、岩盤中に発達した割れ目帯が流体の通り道となっているのではないかと考え、その場所を知る手がかりとして、地震波速度の異方性（地震波が伝わる方向による地震波速度の違い）に着目しました。異方性の強さは、割れ目の密度などによって変化することが知られており、地震波の解析によって地下十数kmまでの様子を調べることができます。

九州地方を事例として解析した結果、強い異方性が火山周辺の一部で見られました。この強い異方性は、火山性流体の通り道の存在を示している可能性があると考えられます。

近年、流体の上昇と地震発生との関係性が注目されています。流体は断層を滑りやすくするはたらきがあるため、地震を引き起こす原因の一つではないかと考えられています。強い異方性が流体の通り道の証拠であることを示すにはさらに詳細な推定事例を示すことなどが必要ですが、本研究は、地層処分のみならず地震防災にも貢献できる可能性があります。

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和3～4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）（JPJ007597）」で得られた成果の一部です。

小川大輝、浅森浩一ほか, 九州前弧域におけるS波偏向異方性の推定, 物理探査, vol.77, 2024, p.15–23.

東濃地科学センター 浅森 浩一



◀Webはこちらへ

地下水の流れが遅い場所を見分ける —地下水の動きを割れ目の水質で判断する方法を構築—

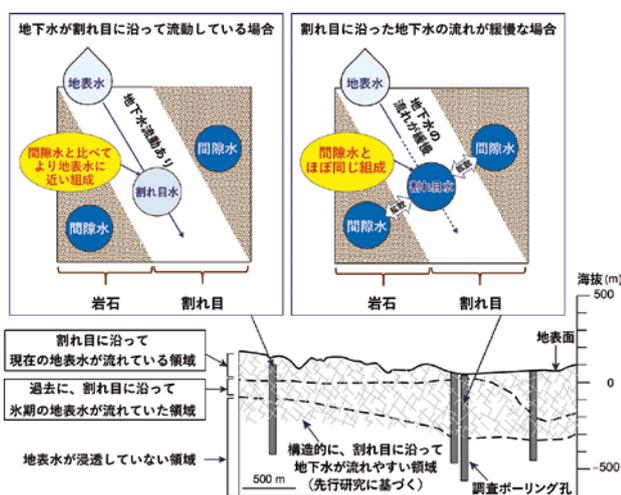


図1 幌延地域における岩盤中の割れ目に沿った地下水の流れの分布に関する概念図

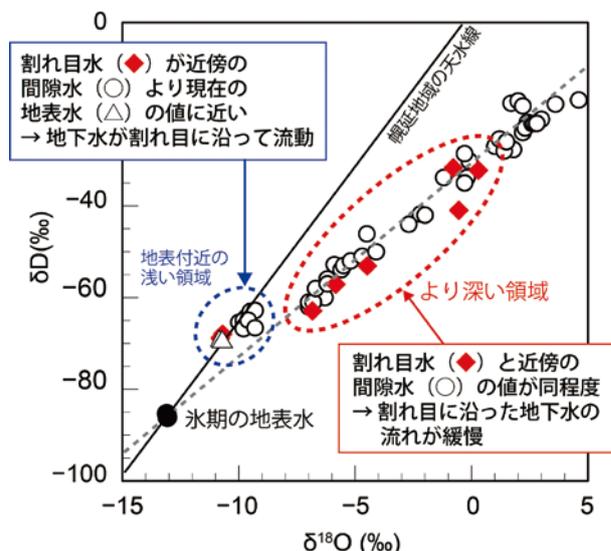


図2 割れ目水及び間隙水の水素・酸素安定同位体比 ($\delta D \cdot \delta^{18}O$) の関係

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、廃棄体から漏出した放射性核種の移行を抑制するため、地下水の流れが緩慢な領域を判別する技術が必要となります。本研究では、ボーリング孔から採取された地下岩盤中の割れ目中の水（割れ目水）とその周囲の間隙水の水素・酸素安定同位体比を比較することにより、割れ目中の地下水の流れが緩慢であるか否かを判別する方法を提示しました。割れ目水と間隙水とで同位体比が異なる場合には、本来地層に含まれる水とは異なる水質の水が割れ目を通じて流れており、同位体比が類似する場合には、割れ目に沿った地下水の流れは緩慢であると考えられます（図1）。幌延地域でこれまでに取得されたデータを用いて検証したところ（図2）、地表付近の浅い領域（孔ごとに異なり、地表から約100～250 m）では割れ目に沿った地下水の流れが生じており、これよりもやや深い領域（～約400 m）では流れが緩慢であることが明らかとなりました（図1）。いずれの領域も割れ目の連結性は高く、割れ目を通じて地表から水が浸透していることが分かっています。したがって、今回の結果から、割れ目の連結性が高い領域であっても地下水の流れが緩慢な領域が存在することが明らかとなりました。

この知見は、地層処分の候補地選定や、処分場内での廃棄体の定置位置決定に役立つと期待されます。

Mochizuki, A. et al., Assessment of the Level of Activity of Advective Transport Through Fractures and Faults in Marine Deposits by Comparison Between Stable Isotope Compositions of Fracture and Pore Waters, Hydrogeology Journal, vol.30, issue 3, 2022, p.813–827.



汚染起源の推定により合理的な放射能濃度の評価が可能に —動力試験炉 (JPDR) の解体によって発生したコンクリート廃棄物に対する評価方法の検討—

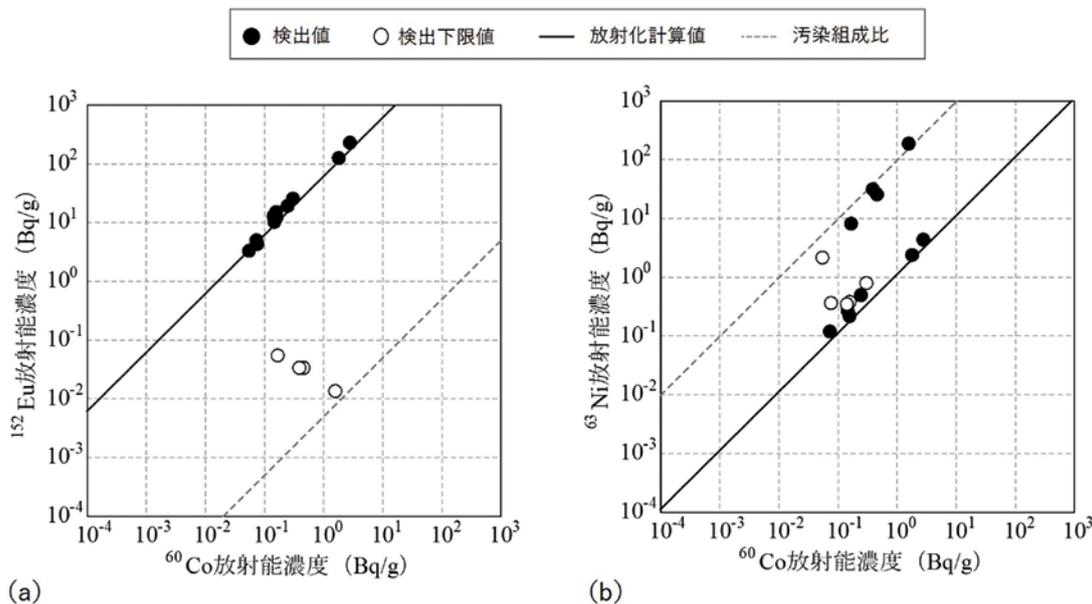


図1 放射化学分析によるEu-152/Co-60の組成比の例 (a) 及びNi-63/Co-60の組成比の例 (b)

(a) は放射化学分析の結果から Eu-152 を検出しているものは構造材の放射化、Eu-152 を検出していないものは表面汚染と Eu-152/Co-60 の計算により推定した放射化計算値と汚染組成比との関連性より分類することができます。Ni-63 に対しても汚染起源を判別して合理的に評価することができます (b)。

原子力機構では、研究施設等から発生する低レベルの放射性廃棄物を将来的に埋設処分する計画です。処分するためには廃棄物中にどのような放射性核種がどのくらいの濃度で存在しているかを調べ、処分場に受け入れ可能な放射能濃度よりも低いことを確認する必要があります。しかし、放射性核種の汚染が構造材の放射化によるものか表面汚染によるものか判別できないと放射化と表面汚染の両者を包含するような過剰に保守的な評価となる可能性があり、汚染起源を判別できることは合理的な評価手法を構築するうえで有効となります。

そこで、本研究では動力試験炉 (JPDR) の解体によって発生したコンクリート廃棄物を対象として、核種ごとに汚染起源、核種の移行挙動、核種組成比の標準偏差を指標として、理論計算法やスケーリングファクタ法、平均放射能濃度法などの複数の評価法の中から、廃棄物の放射能濃度を適切に評価できる組み合わせを検討し、評価法を選択しました。また、外部から測定可能な γ 線放出核種 Eu-152 に着目し、Co-60 との組成比の違いを利用して、廃棄物の汚染起源を推定する足掛かりを得ることができました。このことから、複数の評価法を核種ごとに組み合わせる廃棄物の放射能濃度を合理的に評価する方法を構築できる見通しを得ました。

青野 竜士ほか, JPDRから発生した低レベルコンクリート廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討, JAEA-Technology 2024-006, 2024, 48p.

原子力科学研究所 バックエンド技術部 青野 竜士



◀Webはこちらへ

流体の自由表面の動きを追跡する —粒子法の安定性及び精度の向上—

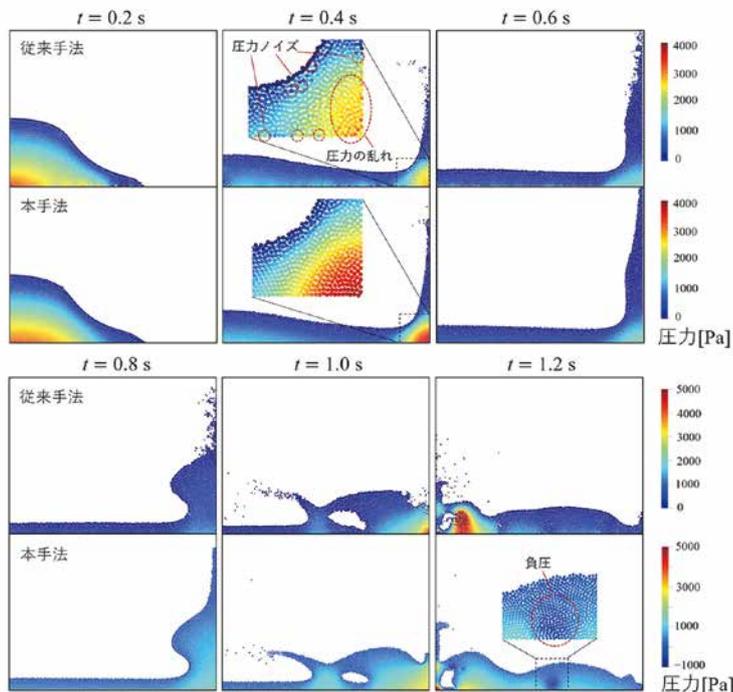


図1 従来及び本手法によるダム崩壊問題のシミュレーション結果（自由表面形状と圧力コンター図）

$t = 0.4$ sの拡大図に示されている通り、従来の手法では数値的な圧力の乱れやノイズが散見されますが、本手法では滑らかな圧力分布が得られています。また、従来の手法では負圧を考慮すると数値的に不安定になるため、負の圧力値をゼロに置き換えるリミッターを使用されています。一方、本手法では負圧を直接考慮しても計算が安定しており、 $t = 1.2$ sの図がこれを示しています。

粒子法は、計算格子を必要としないラグランジュ計算手法の一種であり、移動境界を伴う流体の追跡に優れ、炉心溶融物の挙動把握にも利用されています。しかし、従来の粒子法では粒子の移動に伴う配置の不均一性による、計算の精度が低下する問題がありました。既存の高次離散化スキームを用いて精度を向上させることは可能ですが、自由表面付近の取り扱いには限界があるため、複雑な界面形状を正確に特定することの困難さに伴い、粒子配置が偏ることによって生じる数値的不安定性（計算破綻）が課題となっていました。

本研究では、流体の自由表面の動きをより正確に追跡するために、粒子法の精度及び安定性を向上させる新たな手法を開発しました。本手法は、従来の粒子法とは異なり、粒子間の空間差分を三段階で行い、一度に解く係数の数を減らすことで数値安定性を高めるコンパクトスキームを提案しています。また、自由表面での分裂や合体を含む複雑な変化に対応するために曲面フィット法を採用し、より精度高く自由表面の位置を特定できるようにしました。図1は、自由表面流れのベンチマークとしてダム崩壊問題に対する本手法のシミュレーション結果を示しており、従来の手法と比較して圧力場や自由表面のプロファイルに顕著な改善が見られます。

今後、この開発された手法を、シビアアクシデント時の溶融炉心の挙動や溶融炉心・コンクリート相互作用(MCCI)などのシミュレーションに適用することを計画しています。

Wang, Z. et al., Compact Moving Particle Semi-Implicit Method for Incompressible Free-Surface Flow, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol.414, 2023, 116168, 49p.



原子力安全・防災研究所
安全研究センター 汪 子迪



◀Webはこちらへ

原子炉压力容器が急冷されるときの熱伝達 —浮力共存下の下向対流熱伝達の評価—

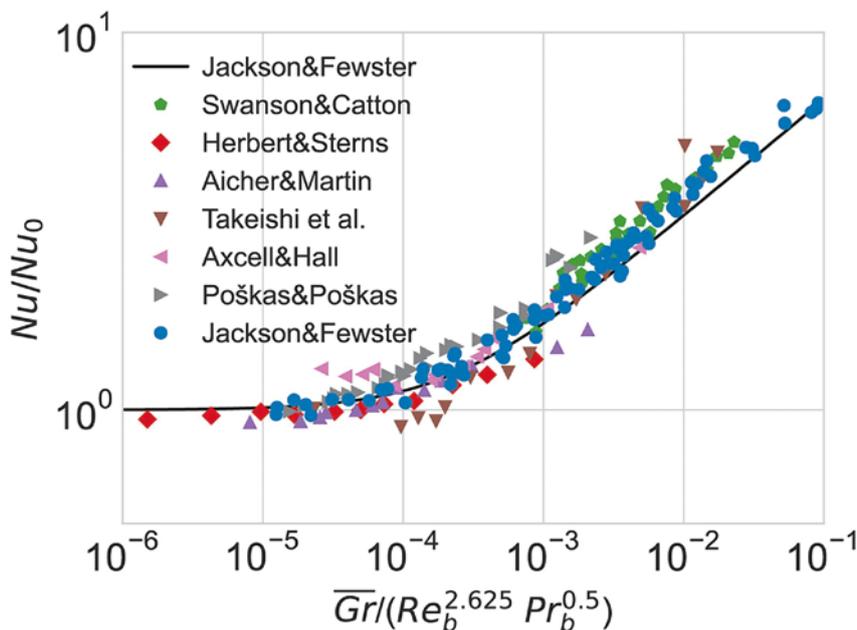


図1 様々な実験体系、試験流体で実施された対向複合対流実験のデータと、Jackson and Fewster相関式の比較

横軸は大きいほど自然対流の影響が顕著であることを表します。縦軸は自然対流影響による熱伝達の促進効果の大きさを意味します。実験データには水、空気、フロンなどの異なる試験流体で実施されたもの、円管、片面を加熱された矩形管、両面を加熱された矩形管などの異なる試験装置で実施されたデータを含みます。Jackson and Fewsterの相関式はこれらの実験データを十分に再現できることが示されました。

中性子脆化した原子炉压力容器 (RPV) 壁面に非常用炉心冷却系の起動等の要因による急激な冷却による熱応力が加わった時に壁面上に亀裂が存在した場合、その亀裂が進展する可能性があります。この事象は加圧熱衝撃 (PTS) と呼ばれます。原子力発電所の運転期間延長による高経年化を見据えると、RPV健全性の最適評価が重要となります。RPVのダウンカマ内の流れは事故条件によっては強制対流と自然対流が共存した複合対流となることが考えられます。日本国内の安全審査に用いられるJEAC4206-2007に構築された原子炉健全性評価手法では、熱応力の評価に必要なダウンカマ壁面における熱伝達率を評価するためにJackson and Fewster相関式を用います。この式は直径10 cm程度の加熱した垂直円管内を流下する水に対して実施された実験データによって作成されています。そのため、運転期間延長の許可差し止めを求めた訴訟において、この式が実際のプラントにおける評価に用いることができるのか疑問視されていました。

そこで本研究では、既存の対向複合対流の熱伝達相関式についてレビューし、複数の既往実験データと各相関式との比較を行い、相関式の予測性能を評価しました。その結果、流路の代表長さに水力等価直径を用いることにより流路形状の違いに関わらず相関式が適用可能であること、支配パラメータの無次元化により試験流体によらず相関式が適用可能であることを確認できました。

本研究は、原子力規制委員会原子力規制庁からの受託研究「令和6年度原子力施設等防災対策等委託費（加圧熱衝撃に係るリスク評価手法開発）事業」成果の一部あり、本研究で得られた成果は裁判の中でも引用されました。

Motegi, K. et al., Opposing Mixed Convection Heat Transfer for Turbulent Single-Phase Flows, International Journal of Energy Research, vol.2024, issue 1, 2024, 6029412, 22p.

原子力安全・防災研究所 安全研究センター 茂木 孝介



◀Webはこちらへ

再処理施設の安全性向上に向けて — 蒸発乾固事故で放出される気体状Ruの化学形の同定 —

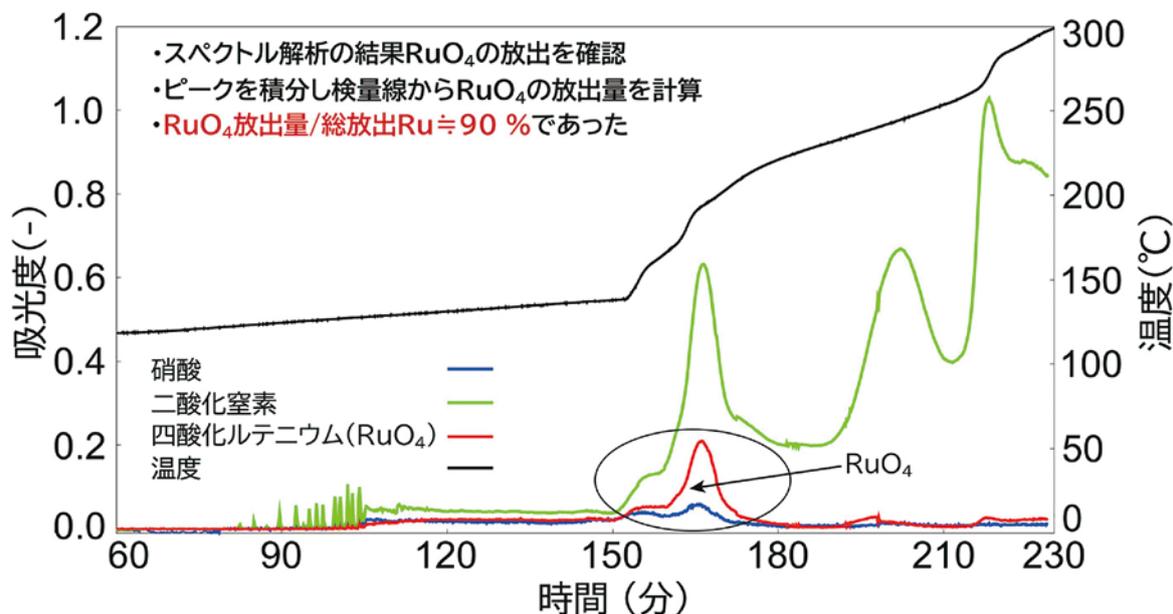


図1 s-HLLW加熱時におけるRuO₄、二酸化窒素、硝酸の放出挙動

この図は、s-HLLWを加熱した際に観測されたRuO₄、二酸化窒素、硝酸の紫外可視分光法における吸光度（放出量に相当）と、温度・時間の関係を示しています。特にRuO₄は、140℃から170℃の温度範囲で二酸化窒素や硝酸とともに放出されることが確認されました。

原子力発電所で使用された燃料は、「再処理施設」で化学処理を行うことで、再利用可能なウランやプルトニウムを回収できます。この過程で高濃度の放射性物質を含む高レベル濃縮廃液（HLLW）が生じます。HLLWは崩壊熱を発生するため常に冷却が必要ですが、冷却が長期間失われると「蒸発乾固事故」となり、放射性物質が環境中へ放出されるリスクがあります。特にルテニウム（Ru）は気体状の化合物を形成し、他の元素よりも多く放出されうるため、事故時の影響評価や安全対策にはその化学構造の把握が不可欠です。

本研究では、HLLWの模擬物質（s-HLLW）を加熱し、生じたガスを紫外可視分光法で非破壊的に分析する手法を開発しました。これを用いてs-HLLW加熱時に放出されたガスのスペクトルを測定し、そこに現れる特徴的な吸収ピークを解析することで、四酸化ルテニウム（RuO₄）、二酸化窒素（NO₂）、硝酸（HNO₃）を分離・定量しました（図1）。その結果、放出Ruの約9割がRuO₄であることを明らかにしました。

本研究の成果は、事故時のRuの生成・放出機構の解明に寄与し、事故影響評価モデルの改良に貢献します。特に、RuO₄が主要な放出物質であることを特定したことで、除去や封じ込め技術の開発が期待されます。また、本研究で確立した非破壊分析法は、事故時の放射性物質の放出評価に応用でき、再処理施設の安全性向上に資するものです。

Yoshida, N. et al., Release Behavior of Gaseous Ruthenium Tetroxide During Heating of High-Level Liquid Waste Simulant During Simulated Accident Conditions, Nuclear Technology, vol.210, issue 10, 2024, p.1999–2007.



甲状腺測定のスクリーニングレベル見直し方法の検討 —原子力災害時における甲状腺測定の実行性向上を目指して—

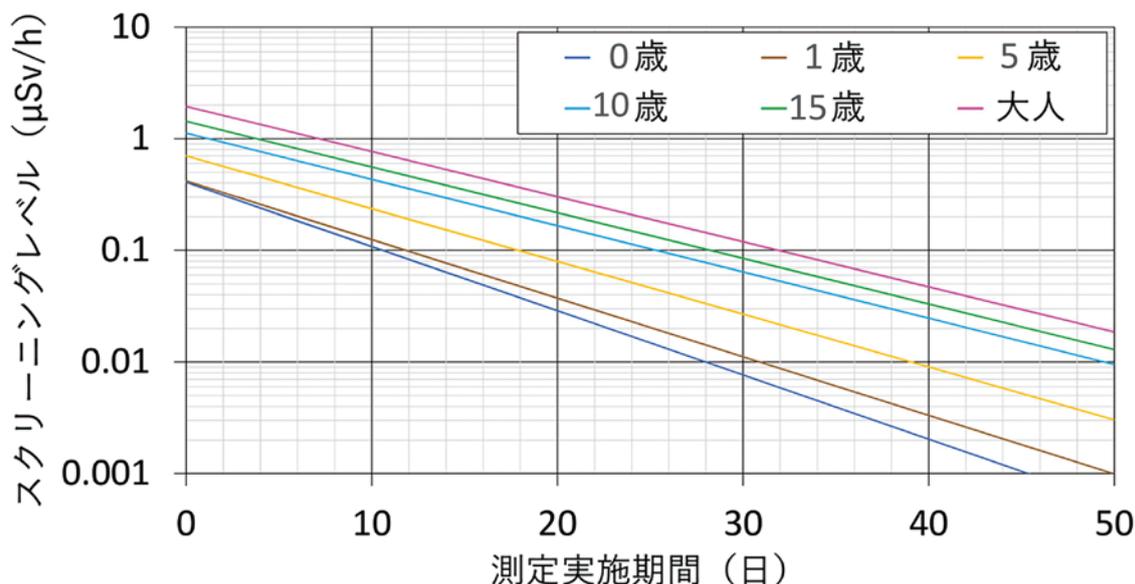


図1 甲状腺測定のスクリーニングレベル (SL) と測定実施期間との関係
(甲状腺等価線量100 mSvに相当する¹³¹I (物理半減期：約8日)を急性吸入摂取した住民を想定)

原子力災害時には放射線ヨウ素が放出される可能性があり、原子力施設周辺の住民に対して、ヨウ素が蓄積する甲状腺中の放射能測定（甲状腺測定）が行われます。初期の甲状腺測定では、より多く被ばくした者を特定する、スクリーニングを目的とした測定がNaI (TI) サーベイメータを用いて行われます。その測定実施期間は放射性物質の放出後3週間以内が目安とされ、スクリーニングレベル (SL) として0.20 μSv/hが設定されています。

しかし、原子力災害の状況によって、測定実施期間を変更せざるを得ない事態になることも想定されます。ここで、放射性ヨウ素の核種や化学形、摂取経路により測定対象者の体内での動態等は異なり、甲状腺中の放射性ヨウ素の残留時間が変化します。そのため、測定実施期間変更の際には、これら条件を加味した上で適切にSLを見直す必要があります。

本研究では、いくつかの原子力災害の状況を想定し、甲状腺測定におけるSLと測定実施期間との関係を年齢毎に計算しました。図に示した計算結果例のように、全年齢区分において、測定実施期間が長くなるに従い、SLを引き下げる必要があることが分かります。例えば、深刻な原子力災害が発生し、測定対象者数が多くなり測定実施期間を30日に延長せざるを得ない事態となった場合、測定対象者の年齢ごとに、検出下限値～おおよそ0.10 μSv/hの範囲で、SLを引き下げる必要があります。

本研究の成果は、適切な甲状腺測定の意味決定のための技術情報としての活用が期待されます。

外間智規ほか、原子力災害時における甲状腺中放射性ヨウ素放射能の簡易測定のスクリーニングレベル見直しに係る検討, JAEA-Research 2023-010, 2024, 57p.

原子力安全・防災研究所
原子力緊急時支援・研修センター 外間 智規



◀Webはこちらへ

本誌は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）の研究開発成果を紹介するウェブサイト「JAEA R&D Navigator」にて令和6年度に公開した内容をまとめたものです。

JAEA R&D Navigator

https://rdreview.jaea.go.jp/navi_jp/rd_j_index.html



JAEA R&D Navigator 2024-25

発行：令和7年7月

編集・発行：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

令和6年度成果普及情報編集ワーキンググループ

グループリーダー：国枝 賢

メンバー：岩元 洋介 橘 幸男 山口 正剛 古野 朗子 飯島 和毅
永江 勇二 安部 諭 谷村 嘉彦 家田 淳一 大関 章
中沢 哲也 西畑 保雄 相澤 一也 北村 誠司 瀬戸 慧大
前川 恵輔 香西 直文

内容は各記事の公開時点、著者情報は令和7年5月時点のものです。
本誌の内容、入手及び著作権利用に関するお問い合わせは、下記までお願いいたします。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
e-mail ird-seika_shi@jaea.go.jp

○関連媒体のご紹介

JAEA INNOVATION+

JAEAが持つ情報や最新技術、そしてアイデアやビジョンを公開し、様々な方々の未来にプラスとなることを目指すオープンプラットフォームです。

<https://tenkai.jaea.go.jp/innovationplus/>



技術シーズ集

JAEAが保有する知的財産のうち、産業上応用可能な特許技術やノウハウ等を解説するものです。

<https://rdreview.jaea.go.jp/seeds/index.html>



事業報告書

JAEAにおける年度ごとの事業内容及び研究開発状況等を総合的に報告する媒体です。

https://www.jaea.go.jp/study_results/annual_report/



JAEA公式Xアカウント

JAEAの活動・関連情報として、プレス発表、イベント情報その他お知らせなどを発信しています。「JAEA R&D Navigator」の記事紹介も発信しています。(#JAEA_RD_Navigator)

日本語：@JAEA_japan

https://twitter.com/JAEA_japan



英語：@JAEA_en

https://twitter.com/JAEA_en





国立研究開発法人

日本原子力研究開発機構

