

2025 年度若手研究者スタートアップ支援プログラム報告書

2026 年 8 月 5 日

プラズマ・複相関輸送ユニット 矢嶋美幸

研究課題名：タングステン共堆積層における水素同位体動的吸蔵・ 同位体交換挙動の実験的解明と装置基盤整備

1. 研究目的

共堆積とは、スパッタリングにより放出された壁材料原子がプラズマ中の水素同位体を巻き込みながら壁表面に堆積する現象である。共堆積層には水素同位体が多量に取り込まれるため、磁場閉じ込め型核融合装置における燃料粒子バランスやトリチウム保持に大きな影響を及ぼす可能性がある。本研究では、プラズマ照射装置とイオンビーム解析装置を連結し、大気開放することなくその場計測を行えるプラズマ照射－イオンビーム解析統合装置を新たに構築する。この統合装置を用いて、タングステン共堆積層における水素同位体の動的吸蔵と同位体交換挙動を定量評価する。これにより、将来の核融合炉における燃料粒子管理およびトリチウム除染技術の確立に必要な基礎的知見を得ることを目指す。

プラズマ対向壁候補材料であるタングステン共堆積層については、その場計測による基礎データが限られている。とりわけ、プラズマ照射環境下における水素同位体の動的吸蔵や、同位体交換時における各同位体の深さ分布・拡散については、十分な知見が得られていない。従来の研究では、共堆積層を形成した試料を大気開放後に回収・評価する手法が主流であり、堆積層の形成過程を含めて水素同位体の動的挙動を連続的に観測することは困難であった。加えて、大気開放に伴う表面酸化や不純物の混入は、吸蔵量および深さ分布の評価に影響を及ぼす。

本研究の独自性は、共堆積層の形成から水素同位体計測までの一連の実験を大気開放することなく実施できる点にある。この統合装置を用いて、プラズマ照射中にイオンビーム解析を行うことにより、水素同位体の動的挙動と深さ分布を評価する。さらに、得られた試料の構造を透過型電子顕微鏡（TEM）で評価し、水素同位体の吸蔵特性との相関を明らかにする。

2. 2025 年度の研究成果

2025 年度は、この統合装置の基盤整備を中心に進めた。まず、本支援によりプラズマ照射装置用のコイル 2 台およびコイル冷却用チラー 1 台を導入した（図 1）。また、科学研究費助成事業 基盤研究（B）〔成果 7〕により架台およびターボ分子ポンプを整備するとともに、装置の運用に必要な電力を確保するため、総合工学実験棟電源室にブレーカーを新設した。

さらに、本体真空チャンバーおよび差動排気用ポートを設計し、プラズマ装置側とイオンビーム解析装置側で大きく異なる圧力条件を両立させる方式を確定した。これにより、プラズマ照射装置とイオンビーム解析装置の連結機構の基本構成を決定した。

一方、分電盤の設置および機器搬入が 2026 年秋以降にずれ込む見込みとなったため、統合装置を用いたその場計測の実施は次年度以降に延期した。この計画変更を受け、既存装置を用いた実験を先行して進めた。具体的には、名古屋大学の小型プラズマ照射装置 Co-NAGDIS を用いて共堆積層試



図 1 本支援により導入したプラズマ照射装置用コイル（2 台）および基盤研究（B）〔成果 7〕により整備した架台。

料を作製し、水素同位体プラズマを照射した。さらに、作製した共堆積層試料と比較用のバルクタングステン試料を対象として、NIFS の 1 MV タンデム加速器による弾性反跳粒子検出法 (ERDA) 測定に着手した。

これらの測定により静的に吸蔵された水素同位体の深さ分布データを取得した。現在、その解析および妥当性の検証を進めているため、本報告では詳細な結果の記載を控える。現時点までの解析により、共堆積層試料では重水素と軽水素のスペクトルが重なり、ERDA 測定単独で両同位体を分離評価することが困難であることを確認した。この課題に対応するため、 $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ 反応を利用した核反応分析 (NRA) を導入し、重水素を選択的に検出し、その深さ分布を ERDA よりも深い領域まで計測する方針を並行して実施することとした。

NRA 計測系の立ち上げは、核融合科学研究所技術職員の田窪英法氏と共同で進めており、検出器の導入、計測系の構成設計、および ^3He ガス供給系の設計を進めている。この整備に関連して外部資金 2 件を獲得しており [成果 11、12]、これらを分析基盤の整備に充てている。その一環として、イオン源のプラズマ点火に用いる ^3He ガス専用ポンベスタンドを新設することとし、現在発注を進めている (図 2)。

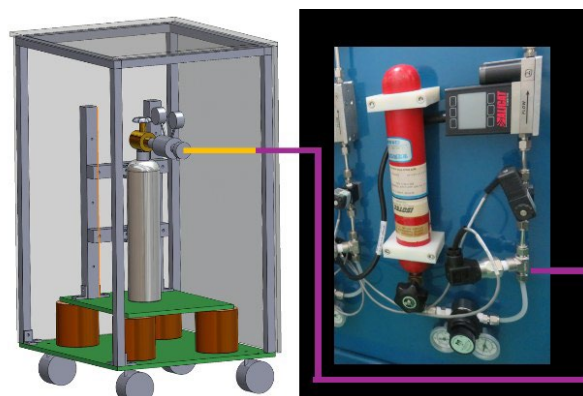


図 2 ^3He -NRA 用に新設する ^3He ガス専用ポンベスタンド。左は設計図、右は既設のガス供給ラインを示す。 ^3He ポンペは上流側で分岐接続し、既存のマスフローコントローラを共用する。上記スタンドは OPEN MIX LAB 公募研究プログラム [成果 11] により整備を進めている。

3. 2026 年度以降の研究計画

2026 年度は、コイルおよび真空チャンバーの整備、分電盤および電源設備の設置、 ^3He ビームの調整、NRA 計測系の立ち上げ、プラズマ点火試験を順次実施する。これらを通じて、2026 年度内に装置の基本動作を確立することを目指す。あわせて、共堆積層試料を作製し、ERDA および NRA により静的に吸蔵された水素同位体の深さ分布を取得する。

2027 年度は、プラズマ装置チャンバーにおける ERDA/NRA 計測系の確立を進めるとともに、共堆積層試料に対する分析を継続する。プラズマ照射装置とイオンビーム解析装置の統合運転については、現在提出中の変更申請が 2027 年 3 月頃に承認されることを見込んでおり、承認後、2027 年度内に開始する計画である。このため、2027 年 9 月に提出する本支援の最終報告書では、装置基盤の整備状況、ERDA/NRA 計測系の確立状況、および共堆積層試料の静的吸蔵量に関する分析結果を中心に報告する。統合運転下でのその場計測については、変更申請の承認時期と装置立ち上げの進捗を踏まえ、最終報告時点までに得られた結果を併せて示す。

本研究は、科学研究費助成事業 基盤研究 (B) (2030 年 3 月まで) および立松財団特別研究助成 (2028 年 3 月まで) により継続する。本研究に関連して外部資金を複数件獲得しており [成果 7-13]、うち 4 件では研究代表者を務めている。本支援によって初年度の研究基盤が構築され、次年度以降も外部資金を活用して研究を継続できる体制が整いつつある。今後は、本支援により構築した装置基盤を活用して研究を発展させ、基盤研究 (B) ・ (A) 等、さらなる外部資金の獲得を目指す。

また、本研究に関連する成果として、核融合炉プラズマ対向材料中のトリチウム保持に関する

JET-ILW タイルの分析結果を、2025 年 5 月の国際会議 PFMC-20 における招待講演で報告した。

最後に、報告者は NIFS の 1 MV タンデム加速器を用いたイオンビーム解析の共同利用支援を担当している。本研究で整備する装置基盤は、この共同利用支援にも活用される見込みである。

4. 研究成果等

論文

- [1] E. M. Hollmann et al., Nuclear Fusion 66, 056035 (2026), 査読有
- [2] T. Otsuka et al., Nuclear Materials and Energy 43, 101928 (2025), 査読有
- [3] M. Zhao et al., Nuclear Fusion 65, 046009 (2025), 査読有
- [4] M. Zhao et al., Nuclear Fusion 65, 046003 (2025), 査読有
- [5] S. Masuzaki et al., Nuclear Materials and Energy 42, 101843 (2025), 査読有
- [6] 田窪英法 他, 第 37 回タンデム加速器研究会報告集 (2026), 査読無

学会発表

国際会議発表 6 件 (うち招待講演 1 件、口頭発表 3 件、ポスター発表 2 件)

国内会議発表 8 件 (口頭発表 3 件、ポスター発表 5 件)

外部資金

- [7] 科学研究費助成事業 基盤研究 (B)、代表
- [8] 科学研究費助成事業 挑戦的研究 (萌芽)、代表
- [9] 文部科学省 AI for Science 萌芽的挑戦研究創出事業 (SPReAD)、代表
- [10] 公益財団法人 立松財団 特別研究助成、代表
- [11] 自然科学研究機構 OPEN MIX LAB 公募研究プログラム (技術開発型)、共同研究者
- [12] 科学研究費助成事業 奨励研究、メンター
- [13] 科学研究費助成事業 基盤研究 (B)、分担