



ムーンショット目標 10

2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、
地球環境と調和し、
資源制約から解放された活力ある社会を実現

実施状況報告書

2025 年度版

フュージョンエネルギーの実用化に向けた
革新的同位体分離システムの開発



田中 秀樹

信州大学 アクア・リジェネレーション機構

【目 次】

フュージョンエネルギーの実用化に向けた革新的同位体分離システムの開発	1
PM：田中 秀樹（信州大学 教授）	
水同位体分離材料のデータ駆動型探索	3
課題推進者：田中 秀樹（信州大学 教授）	
逆解析による水同位体分離材料の高効率合成	5
課題推進者：手嶋 勝弥（信州大学 教授）	
トリチウム水分離システムのモデル化・設計	7
課題推進者：片山 一成（九州大学 教授）	
トリチウム水分離システムの性能評価	9
課題推進者：立花 優（九州大学 准教授）	
重水分離システムのモデル化・設計・性能評価	11
課題推進者：平出 翔太郎（京都大学 助教）	
⁶Li 分離システムの設計・性能評価	13
課題推進者：瓜田 幸幾（長崎大学 准教授）	

2025 年度研究開発プロジェクト実施報告書

2050 年までに，フュージョンエネルギーの多面的な活用により，地球環境と調和し，
資源制約から解放された活力ある社会を実現

フュージョンエネルギーの実用化に向けた革新的同位体分離システムの開発

PM:

田中 秀樹（信州大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発プロジェクトは、研究開発項目 1：水同位体分離材料の開発、2：トリチウム水分離システムの開発、研究開発項目 3：重水分離システムの開発、研究開発項目 4： ^6Li 分離システムの開発の 4 項目から構成されており、各項目が緊密に連携をとりながら研究開発を推進している。以下に、各項目に付随する研究開発課題の進捗状況および成果について述べる。

- ・研究開発課題 1-1 水同位体分離材料のデータ駆動型探索

水同位体分離材料の計算機スクリーニングを開始するための基盤整備として、各種材料データベースから取得した構造データをキュレーションし、理論計算を実施するためのデータパイプラインの構築、ならびに経路積分分子動力学シミュレーションを実施するための計算手法の確立を完了した。

- ・研究開発課題 1-2 逆解析による水同位体分離材料の高効率合成

水同位体分離材料の合成について、仮想空間上で材料組成および実験条件を自動提案する手法を開発し、1 万点を超える合成条件の提案が可能であることを実証した。

- ・研究開発課題 2-1 トリチウム水分離システムのモデル化・設計

トリチウムの安全な取り扱い、および充填物交換時における作業従事者の安全・利便性を考慮し、本研究に適した吸着剤充填水蒸留ラボ装置の具体的な仕様を確定した。また、吸着剤充填水蒸留塔内における吸脱着反応や拡散挙動、同位体交換反応といった複雑なトリチウム移動現象の各素過程を組み込んだ物質収支式を検討し、トリチウム挙動を解析するための数値計算コードの開発に着手した。

- ・研究開発課題 2-2 トリチウム水分離システムの性能評価

トリチウム計測機器としての液体シンチレーションカウンタの仕様、放射線管理区域内にてトリチウムを取り扱うための体制と使用室の準備を終えた。また、SG に至るまでの詳細な研究計画を策定した。

- ・研究開発課題 3-1 重水分離システムのモデル化・設計・性能評価

吸着剤充填水蒸留塔の未解明なメカニズム解明とプロセス設計に向けて、基盤となる高度な研究環境の構築を完了した。

- ・研究開発課題 4-1 ^6Li 分離システムの開発

イオンふるい炭素の電極構造と Li 同位体分離挙動の関係性を評価するための Capacitive deionization (CDI) 測定環境の構築、ならびに ^6Li 分離評価の基盤整備として、小型ラボスケール装置の仕様策定を完了した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

水同位体分離材料の計算機スクリーニング、仮想空間上における材料合成条件の自動提案、ならびに各同位体分離システム（トリチウム水分離、重水分離、 ^6Li 分離）の開発を指向したラボ装置の仕様決定等を通じて、本研究開発を推進するための基盤技術および実験基盤の整備を着実に進展させた。

2) 代表的な論文

準備中

3) 代表的な特許

検討中

2025 年度実施状況報告書（成果）

2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、
資源制約から解放された活力ある社会を実現

フュージョンエネルギーの実用化に向けた革新的同位体分離システムの開発

水同位体分離材料のデータ駆動型探索

田中 秀樹（信州大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題は、A) トリチウム水分離システムの開発および B) 重水分離システムの開発にかかわる水同位体分離材料開発を担当し、吸着剤充填水蒸留法に適した HT0/HD0 吸着剤、ならびにイオン交換法に適した D イオン交換体を計算科学的手法によって探索することを役割とする。

当該年度は、水同位体分離材料の計算機スクリーニングを開始するための基盤整備として、①各種材料データベースから取得した構造データをキュレーションし、理論計算のための入力形式へと前処理・整形するデータパイプラインの構築、および②経路積分分子動力学シミュレーションを実施するための計算手法を確立した。また、SG に至るまでの詳細な研究計画を策定した。なお、水同位体分離能を評価するための吸着剤充填水蒸留装置を研究開発課題 3-1 と共用することとし、当該課題と共同でラボスケール装置の仕様を決定など、発注のための準備を行った。

上述の①および②の具体的な内容は下記の通り。

① Material Projects, CoREMOF などの結晶構造データベースより、CIF (Crystallographic Information File) ファイルを取得し、結晶表面の設定、H 原子の付加などを行うコードを開発することで、NNP (Neural Network Potential) をベースとする理論計算に用いるシミュレーションセルの構築の自動化を可能とした。

② 代表的な水吸着剤ならびにイオン交換体に対して、NNP を用いた経路積分分子動力学シミュレーションを実施し、H と T の交換反応における選択係数を、direct scaled-coordinates estimator のアンサンブル平均を得ることで評価した。その結果、それぞれの材料について T 選択性が発現することが示され、本手法によって水同位体分離材料の計算機スクリーニングが可能であることを確認することができた。

以上の成果に基づき、2026 年度より水同位体分離材料の計算機スクリーニングを開始することを予定している。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

水同位体分離材料の計算機スクリーニングを開始するための基盤整備として、①各種材料データベースから取得した構造データをキュレーションし、理論計算を実施するための入力形式へと前処理・整形するデータパイプラインを構築するとともに、②経路積分分子動力学シミュレーションを実施するための計算手法を確立した。なお、②に関する研究成果は、日本化学会 第 106 春季年会 (2026 年 3 月) において口頭発表を行った。

2) 代表的な論文

準備中

3) 代表的な特許

検討中

2025 年度実施状況報告書（成果）

2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、
資源制約から解放された活力ある社会を実現

フュージョンエネルギーの実用化に向けた革新的同位体分離システムの開発

逆解析による水同位体分離材料の高効率合成

手嶋 勝弥（信州大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、A)トリチウム水分離システムの開発および B)重水分離システムの開発にかかわる水同位体分離材料の開発を担当する。特に、水同位体分離材料の合成プロセス条件をデータ駆動的に最適化するための逆解析手法を確立する。さらに、水同位体分離性能と合成条件の相関を高精度に把握するとともに、再現性・生産性の高い合成プロセス設計基盤を構築し、合成した水同位体分離材料を研究開発課題 1-1, 研究開発項目 2 および 3 に供給することを役割とする。また、実装に向けて吸着蒸留塔に搭載できる形態で同水同位体分離材料を成形する方法を検討する役割も担っている。

当該年度は、SG に至るまでの詳細な研究計画を策定しつつ、仮想実験空間上で材料組成および実験条件を自動提案し、水同位体分離材料の合成プロセス条件を効率的に決定する手法を開発するために、次の 3 点について検討し、それぞれの成果を得た。

① データ駆動的最適化と合成プロセス設計基盤の構築

高性能な水同位体分離材料を計算科学などで提案した際に、早期合成を実現するためには、逆解析用のデータセットが必要となる。そこで、仮想実験空間上で材料組成および合成条件を自動提案する手法の開発を進め、1 万点を超える合成条件を提案できると実証した。また、過去に構築した別用途向けデータセットを活用し、予測結果を逆解析して一部の目的物を合成できることもデジタル実験空間上で確認した。さらに、短時間で提案された実験条件のデータ取得を実現するために、ロボットを利用した合成プロセスの自律的選択・自動遂行ラインの構築を進めた。本年度は、これまで自動化した部分に加え、試料調合工程および一部の評価工程の自動化を実現でき、一連の合成プロセス構築の目途を立てた。

② データセット向け基礎データ取得と他の研究グループへのサンプル供試

逆解析用のデータセット構築に向けた候補材料について合成条件の初期検討を開始するとともに、他項目に提供するサンプル作製も開始した。これまでに、候補材料に挙がっているゼオライト(10 種)、層状化合物(チタン酸塩系 1 種、複合水酸化物系 2 種)を合成した。そのうち、ゼオライト 1 種について、作製条件の調整によって粒子径を制御した分散液を作製でき、他の研究グループに供試を開始した。

③ 実装に向けた水同位体分離材料の成形手法の開発

最終的に、水同位体分離材料を実用化するためには、それを従来の充填材に被覆する、あるいは充填材として機能する形に成形しなければならない。本年度、候補材料の 1 つのゼオライト成膜と充填材の成形に関する初期検討を開始した。充填材への被覆としては、多孔質アルミナに成膜できることの端緒を得た。また、ゼオライトの前駆体をペレット状に成形し、ペレット形状のまま水熱処理することで形を維持したまま結晶化できることも見いだした。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

水同位体分離材料の合成について、仮想実験空間上で材料組成および実験条件を自動提案する手法を開発し、1 万点を超える合成条件を提案できることを実証した。

2) 代表的な論文

準備中

3) 代表的な特許

検討中

2025 年度実施状況報告書（成果）

2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、
資源制約から解放された活力ある社会を実現

フュージョンエネルギーの実用化に向けた革新的同位体分離システムの開発

トリチウム水分離システムのモデル化・設計

片山 一成（九州大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題は、A) トリチウム水分離システムの開発を担当し、フュージョン炉1次冷却水に適用可能な大流量トリチウム水分離システムとして、水蒸留法に焦点を当て、蒸留塔内に吸着剤を充填するという革新的技術の開発を行う。吸着剤充填水蒸留塔内のトリチウム移動現象は未解明であり、現状では吸着材の特性とトリチウム水分離性能を関係づけることができない。よって、ラボ装置実験により得られるトリチウム水分離に関するデータから、水蒸留塔における気液固間トリチウム移動現象のモデル化を試みる。また、吸着剤の特性と分離性能との関係を整理し、研究開発項目1：水同位体分離材料の開発に有効な情報を提供する。

当該年度は、吸着剤充填水蒸留ラボ装置の仕様を確定するとともに、吸着剤充填水蒸留塔内のトリチウム物質移動現象のモデル化に着手した。また、SGに至るまでの詳細な研究計画を策定した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

トリチウム水からのトリチウム分離回収システムに関する文献調査を行い、課題を整理した。吸着剤充填蒸留塔を用いて、実際にトリチウム水の分離を実施した報告は少なく、充填材の種類や、蒸留条件が限られている。また、吸着剤充填蒸留塔内でのトリチウム物質移動現象は明らかとなっていない。そのため、革新的な吸着剤の研究開発と並行して、標準的な蒸留装置と市販の吸着剤を用いて実験データを集積し、試験手法の最適化や分離効率に優れた吸着剤の特性を見出すことが重要であるとの結論に至った。そこで、標準的な蒸留装置構成を基本に、トリチウムの安全な取り扱い、および充填物交換時における作業従事者の安全性・利便性を考慮した、吸着剤充填水蒸留ラボ装置の具体的な仕様を以下のように決定した。

先行研究では内径 18mm、高さ 320 mmの蒸留塔が用いられたが、本研究では、トリチウム水処理能力の増大を目指していることから、より大型の内径 25 mm、高さ 1000 mmの蒸留塔を用いた試験を行う。トリチウム分離性能を高めるためには、蒸留塔内を負圧維持することが有効であるが、真空ポンプからの排気ガスはトリチウム水蒸気を含むことから、ポンプ出口にトリチウム回収システムを設置する。また、充填物交換時には、蒸留塔を開封しなければならないが、トリチウム水蒸気が周辺に拡散しないようフレキシブル・グローブボックスと局所排気システムを設置する。トリチウム水を用いた蒸留実験を安全かつ効率的に実施するため、事前に重水を用いた予備試験を行う。

吸着剤により優れたトリチウム分離係数が得られる場合、トリチウム水蒸気は軽水蒸気よりも、蒸気相から吸着相に移行しやすく、また吸着相から液相へ移行しやすい状況にあると想定される。このような吸着剤充填水蒸留塔内におけるトリチウム挙動を解析するため、トリチウム水蒸気および軽水蒸気の吸脱着反応や拡散挙動、同位体交換反応といった複雑なトリチウム移動現象の各素過程を組み込んだ物質収支式を検討し、数値計算コードの開発に着手した。重要となる素過程については、トリチウム水蒸気を用いた基礎実験を行い、物質移動パラメータを定量することとした。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

検討中

2025 年度実施状況報告書（成果）

2050 年までに, フュージョンエネルギーの多面的な活用により, 地球環境と調和し,
資源制約から解放された活力ある社会を実現

フュージョンエネルギーの実用化に向けた革新的同位体分離システムの開発

トリチウム水分離システムの性能評価

立花 優（九州大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題は、A) トリチウム水分離システムの開発を担当し、トリチウム取扱実績を有する九州大学アイソトープ統合安全管理センターにおいて、本研究開発項目を安全に実施するための体制ならびに実験環境を整備し、吸着剤を充填した水蒸留塔によるトリチウム水分離実験を実施する。当該研究開発項目は、蒸留塔内に吸着剤を充填するという革新的技術の開発を行うものであり、先行研究はほとんどなく、設計開発に参考となる実験データに乏しい。本課題では、様々な条件下においてトリチウム水分離実験を安全に実施し、多くのデータを収集することで、充填材や充填構造、運転条件と分離性能との関係性を実験的に明らかにする。さらに、 $^6\text{Li}/^7\text{Li}$ 比の分析機器を整備し、研究開発項目 4 のサポートを行う。

当該年度は、トリチウム取扱実験を安全に実施するための体制を構築するとともに、トリチウム計測機器の仕様を確定して速やかな実験環境整備を行った。具体的には、トリチウム計測機器としての液体シンチレーションカウンタの仕様、放射線管理区域内にてトリチウムを取り扱うための体制と使用室の準備を終えた。また、SG に至るまでの詳細な研究計画を策定した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

トリチウム計測機器としての液体シンチレーションカウンタの仕様を決定するとともに、放射線管理区域内にてトリチウムを取り扱うための体制と使用室の準備を行った。具体的には、トリチウム水分離実験装置を設置する実験室のトリチウム汚染状況を既設の液体シンチレーションカウンタを用いて確認した。スミヤ法による表面汚染検査の結果、全ての検査箇所において最大でも $2.2 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2$ 未満であり、表面密度限度 ($\beta \cdot \gamma$ 線放出核種: 40 Bq/cm^2) をはるかに下回っていた。また、当該実験室はトリチウム以外の放射性核種、例えばセシウム-137 やアメリカシウム-241 など也可以使用できる実験室となっている。これらの γ 線放出核種や α 線放出核種による汚染の有無についても調べた結果、検出限界値未満であり、同じく表面密度限度 (α 線放出核種: 4 Bq/cm^2) 未満であった。加えて、空間線量当量率 (バックグラウンド値を含む) も $0.03 \sim 0.04 \mu\text{Sv/h}$ であり、法定制限値 ($25 \mu\text{Sv/h}$) を大幅に下回っていた。以上の測定結果から、現在当該実験室において、放射性物質による汚染はなしと判断し、トリチウム取り扱い実験を安全に開始できるものと結論づけた。さらには、例えばトリチウム水分離実験装置に充填する吸着剤がトリチウム水に溶解すると、カラークエンチングなどによりトリチウムの検出効率が大幅に低下する可能性がある。したがって、このような場合においてもトリチウム濃度を迅速に、かつ高い精度と確度で測定できる計測機器の仕様を決定し、次年度に導入するための準備を行った。並行して、研究開発項目 4 をサポートするため、既設の誘導結合プラズマ質量分析計にオートサンプラーを導入し、リチウム同位体比を迅速に測定できる環境を整備し、測定試料の受け入れを開始した。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

検討中

2025 年度実施状況報告書（成果）

2050 年までに, フュージョンエネルギーの多面的な活用により, 地球環境と調和し,
資源制約から解放された活力ある社会を実現

フュージョンエネルギーの実用化に向けた革新的同位体分離システムの開発

重水分離システムのモデル化・設計・性能評価

平出 翔太郎（京都大学 助教）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題は、淡水から重水素燃料を生産する分離システムの基盤構築を目指し、B) 重水分離システムの開発を担当している。具体的には、イオン交換塔と吸着剤充填水蒸留塔からなるハイブリッドシステムの開発に取り組む。SG 到達前は主に吸着剤充填水蒸留塔の開発および分離機構のモデル化に注力し、SG 到達後はイオン交換塔の開発ならびにハイブリッドシステム全体のプロセス設計を推進する計画である。

プロジェクト初年度（実働約3ヶ月）となる当該年度は、重水分離システム（とりわけ吸着剤充填水蒸留塔）の原理実証（PoP）に向けた基盤整備を主目的として活動した。吸着剤充填水蒸留塔については、気固・固液界面を介した物質移動速度の差に基づく分離メカニズムの仮説を立てており、この仮説の検証に不可欠となる、気相における D_2O 吸着速度、液相における D_2O 脱着速度、および吸着剤の同位体認識能（分離性能）を個別評価するため、測定装置・計測機器群の要件定義を進めた。

具体的には、現有の定容式吸着測定装置に加え、液相での脱着速度評価に用いる液相水晶振動子マイクロバランス（QCM）装置、および吸着剤の破過曲線を評価するためのモジュール式液体クロマトグラフ（HPLC）システムの仕様選定を完了した。特に D_2O 濃度の定量には技術的困難が伴うため、事前に示差屈折率（RI）検出器を用いたデモ測定を実施し、十分な検出感度が得られることを確認した上で構成を決定した。これらの機器群は納品済みもしくは次年度初頭にかけて順次納品される体制が整っている。また、ラボスケールの吸着剤充填水蒸留塔についても、研究開発課題 1-1 と共同で仕様を決定した。これら一連の環境整備により、SG 到達までに実施する実証実験の詳細な研究計画を策定し、初年度のマイルストーンを予定通り達成した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

吸着剤充填水蒸留塔の未解明なメカニズム解明とプロセス設計に向けて、基盤となる高度な研究環境の構築を完了したことが本年度の成果である。特に、液相中の微小な質量変化をリアルタイムで捉える液相 QCM 装置や、 H_2O と D_2O の屈折率差を利用して同位体を高感度に検知する RI 検出器搭載の拡張型 HPLC システムなど、本課題の目的に特化した計測機器群の仕様選定と発注を完了した。機器選定にあたっては事前のテスト測定を通じて実現性を担保しており、次年度以降、速やかに吸脱着速度測定および破過試験を開始する準備が整った。本成果は、吸着剤の材料性能と蒸留塔のシステム性能の相関（設計方程式）を解明するための要であり、重水分離システムの実現へと直結する重要な基盤構築である。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

検討中

2025 年度実施状況報告書（成果）

2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、
資源制約から解放された活力ある社会を実現

フュージョンエネルギーの実用化に向けた革新的同位体分離システムの開発

${}^6\text{Li}$ 分離システムの設計・性能評価

瓜田 幸幾（長崎大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題は、フュージョン炉用燃料の製造に不可欠な戦略的同位体である ${}^6\text{Li}$ の高効率分離・濃縮技術の確立を目指し、 ${}^6\text{Li}$ 分離システムの開発を担当している。具体的には、 ${}^6\text{Li}$ イオンを選択的に回収可能なイオンふるい炭素電極を創製し、電気化学的にイオン回収が可能な CDI (Capacitive Deionization) プロセスを中核技術とした新規 Li 同位体分離技術の開発に取り組んでいる。電極細孔構造設計と電気化学操作を組み合わせ、将来的に高い選択性と効率を両立する ${}^6\text{Li}$ 分離技術の確立を目指し、SG 前段階では、 ${}^6\text{Li}$ 分離挙動を精緻に評価可能な実験基盤を整備するとともに、分離性能最大化に資する材料設計・装置設計の取得に注力する。SG 到達後は、これらの知見に基づき、再現性および安定性を備えた ${}^6\text{Li}$ 分離システムの概念実証を進めるとともに、装置のスケールアップおよび社会実装を見据えた設計要件の整理と最適化を図る計画である。

当該年度は、将来の本格的な性能評価および概念実証を可能とする研究基盤の立ち上げを最優先課題として研究を実施した。具体的には、①イオンふるい炭素の電極構造と Li 同位体分離挙動の関係性を評価するための CDI 測定環境の構築、ならびに②Li 分離評価の基盤整備として、小型ラボスケール装置の仕様策定を行った。①については、細孔構造を制御したイオンふるい炭素電極を対象とし、CDI 操作、電極への回収、洗浄および回収物分析からなる一連の測定フローを確立した。これにより、電極設計や操作条件の違いが Li 同位体の分離挙動に与える影響を、統一的な評価手法に基づき検討できる体制を整えた。さらに、これらの初期的検討を通じて、CDI による Li 分離挙動を体系的に議論する上で重要な評価観点や管理すべき実験パラメータを整理した。これらの知見を踏まえ、次年度以降に材料構造と分離挙動の相関を詳細に検討することを目的として、小型ラボスケール装置に求められる測定機能および運転自由度を明確化し、関連企業との協議を経て装置仕様を決定した。

以上の取り組みにより、申請時計画で初年度のマイルストーンとして設定した「 ${}^6\text{Li}$ 分離評価が可能な CDI 装置の立ち上げ」および「小型ラボ装置の仕様策定」を予定通り完了しており、次年度以降の概念実証および性能最適化研究へ円滑に移行可能な状態を確立した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

イオンふるい炭素電極を用いた CDI 法による ${}^6\text{Li}$ 分離研究を本格的に推進するための評価基盤を構築した。本研究開発課題では、電極構造と電気化学的操作の組合せによって生じる分離挙動を精緻に把握することが、将来的な性能向上および概念実証に向けた前提条件となる。本年度に整備した評価基盤により、材料構造や操作条件の違いが分離挙動に与える影響を、同一の評価枠組みの下で比較・検討が可能となった。さらに、分離挙動を安定かつ再現良く評価するために必要な測定項目や運転自由度を明確化し、それを反映した小型ラボスケール装置の仕様を確定した。本成果は、次年度以降の材料設計および運転条件の最適化検討を効率的に推進するための基盤であり、 ${}^6\text{Li}$ 分離システムの概念実証に向けた今後の研究開発を推進する上で重要な基盤を形成する成果である。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

検討中