



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

超伝導ダイポールによる先進核融合と

反物質科学の学際展開

齋藤 晴彦

東京大学 大学院新領域創成科学研究科

 **MOONSHOT**
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



【目 次】

超伝導ダイポールによる先進核融合と反物質科学の学際展開	1
PM：齋藤 晴彦（国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授）	
高温超伝導ダイポール磁場コイル及び周辺機器の設計製作	3
課題推進者：高畑 一也（大学共同利用機関法人自然科学研究機構 核融合科学研究所 教授）	
プラズマ実験装置システム設計と設備移転・次期装置検討	5
課題推進者：齋藤 晴彦（大学共同利用機関法人自然科学研究機構 核融合科学研究所 准教授）	
ジャイロトロンによる高密度ECHプラズマ生成と計測	7
課題推進者：矢内 亮馬（大学共同利用機関法人自然科学研究機構 核融合科学研究所 助教）	
分光計測によるダイポールプラズマのイオン特性解明	9
課題推進者：田辺 博士（国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授）	
ダイポールプラズマの平衡・輸送解析	11
課題推進者：沼田 龍介（兵庫県立大学 大学院情報科学研究科 教授）	
ダイポール磁場におけるECHの波動解析	13
課題推進者：辻井 直人（国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 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
解き放たれた活力ある社会を実現」

「超伝導ダイポールによる先進核融合と反物質科学の学際展開」

PM：

齋藤 晴彦（国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本プロジェクトは、超伝導ダイポール磁場配位を用いた先進核融合の物理的成立性を実証し、中性子利用および反物質科学への応用へと展開する。本年度は、強磁場化した RT-1 アップグレード装置を核融合科学研究所（NIFS）で立ち上げ、154 GHz 電子サイクロトロン加熱（ECH）による高密度プラズマ生成とイオン加熱実証へ進むための設計・準備年度として、装置、加熱、計測、理論解析の各課題を進めた。

研究開発項目 1 では、2.75 T 級高温超伝導ダイポール磁場コイル及び装置システムの設計を進めた。コイルについて周辺機器を含む仕様検討を行い、2026 年度の製作開始に向けた準備を進めた。また RT-1 を NIFS で運用可能とするため、インフラ設備及び実験サイトの検討を行った。

研究開発項目 2 では、154 GHz ジャイロトロンを用いた ECH システムと、イオン加熱実証に必要な計測系の設計を進めた。NIFS の 154 GHz・1 MW 級ジャイロトロンを RT-1 アップグレード装置へ接続するため、ビーム伝送系、導波路、ミラー、真空窓、光学経路、安全対策、電源・冷却機構の構成を検討した。また、イオン温度・速度分布の評価に向け、受動分光を中心とする計測系について、観測ポート、視線方向、分光視野、光学素子、ファイバ伝送系、検出器および分光器の選定を進めた。

研究開発項目 3 では、強磁場ダイポールプラズマの閉じ込め性能、輸送、ECH 吸収、加熱シナリオを予測する理論・シミュレーション基盤を整備した。平衡・輸送解析では、既存平衡解析コードの拡張、強磁場化による性能向上の検討、低 β 領域の輸送係数・閉じ込め時間スケージングの検討、局所運動論輸送解析環境の整備を開始した。ECH 波動解析では、ダイポール磁場配位での波動伝播・吸収過程を解析し、吸収効率、パワー分布、共鳴層位置を実験設計へ反映する体制を整えた。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

2025 年度において目標達成に最も寄与する成果は、強磁場 RT-1 アップグレード装置を NIFS で立ち上げるための装置・加熱・計測・解析の統合的な実施基盤を具体化したことである。

2.75 T 級高温超伝導ダイポールコイルについて設計と調達が進展し、2026 年度の製作契約および装置導入へ接続可能な段階に到達し、また機器の移設するための手順を具体化した。

154 GHz ECH については、NIFS の 1 MW 級ジャイロトロンを強磁場ダイポール装置へ導入するための伝送系と安全対策の検討を進め、波動解析と連携した入射条件最適化の枠組みを整えた。受動分光とトモグラフィ的手法によるイオン温度計測系の設計を進め、実験設計と理論予測を接続する体制を構築した。

理論解析では、平衡及び輸送、加熱シナリオに関してダイポールプラズマの基礎的性質と運転条件最適化の理解が進み、2026 年度以降の実験との連携に向けた環境整備の進展が得られた。

以上により、2025 年度は、2026 年度に予定する高温超伝導コイル製作、RT-1 装置の NIFS 移設、154 GHz ECH・計測系構築、初期プラズマ実験、および理論解析との連携に向けた基盤を整備した。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし

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
解き放たれた活力ある社会を実現」

「超伝導ダイポールによる先進核融合と反物質科学の学際展開」

「高温超伝導ダイポール磁場コイル及び周辺機器の設計製作」

課題推進者：

高畑 一也（大学共同利用機関法人自然科学研究機構 核融合科学研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本課題では、RT-1 装置を強磁場化し、154 GHz 電子サイクロトロン加熱による高密度プラズマ生成を可能にするための、2.75 T 級高温超伝導ダイポール磁場コイルの調達および周辺機器の設計検討を推進した。2025 年度計画では、コイル巻線構造、冷却配管、端部支持構造を含む詳細設計を完了し、製造仕様書を確定するとともに、電源接続部・冷却系の仕様を明確化し、2026 年度早期に製作を開始できる体制を整えることを目標としていた。

該当年度における成果として、REBCO 線材を用いた高温超伝導コイルとして、コイル中心半径 250 mm、起磁力 1.25 MA、コイル断面 100 mm×100 mm 以下、運転温度 20 K、ダブルパンケーキ巻き、運転電流 300 A 以下を主要仕様とする設計を具体化した。2026 年 2 月 12 日に入札公告の官報公示を行い、調達を進めている段階にある。また、コイルの工場試験として、外観・寸法検査、導通確認、77 K 冷却下での臨界電流値の 80%通電試験を行う方針を整理した。

さらに、コイルの支持・冷却・給電に関しては、機械的支持構造を用いることを前提に、プラズマへの擾乱を抑えつつ、電流フィーダーおよび冷却配管を実装する設計検討を進めた。REBCO コイルでは常伝導部の伝播が遅く、局所加熱・焼損リスクがあるため、フープ力の抑制、運転電流に対する臨界電流マージンの確保、クエンチ保護方式の検討を重要課題として整理し、設計を進めている。

以上により、2026 年度の製作契約およびコイル製作開始に向けた仕様策定と契約準備を進め、当初マイルストーンである「高温超伝導コイルの設計完了と製作契約準備」を概ね達成したと考えられる。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本課題において目標達成に最も寄与した成果は、2.75 T 級高温超伝導ダイポール磁場コイルの基本仕様を確定し、2026 年度の製作契約に移行可能な設計・調達条件を整理したことである。具体的には、154 GHz ECH の第二高調波共鳴層を確保するために必要な磁場強度を満たすコイルとして、REBCO 線材を用いた 1.25 MA 級コイルの寸法、運転温度、巻線方式、通電条件、工場試験条件を定めた。

この成果により、強磁場 RT-1 アップグレード装置の中核要素である超伝導コイルの製作に向けた技術的前提が明確となり、2026 年度に予定するコイル製作、真空容器への導入、冷却・通電試験へ接続できる実施基盤が整った。これは、プロジェクト全体が目指す高密度プラズマ生成およびイオン加熱実証の前提となる最重要成果である。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし

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
解き放たれた活力ある社会を実現」

「超伝導ダイポールによる先進核融合と反物質科学の学際展開」

「プラズマ実験装置システム設計と設備移転・次期装置検討」

課題推進者：

齋藤 晴彦（大学共同利用機関法人自然科学研究機構 核融合科学研究所 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本課題では、RT-1 装置を基盤とした強磁場ダイポール実験装置を NIFS において運用可能とするため、装置システム設計、安全性検討、実験サイト整備、移設対象設備の分類、輸送計画の検討を行った。2025 年度計画では、真空容器、電源、制御系、高圧電流リード、冷却水ライン、クライオライン等のインタフェース設計を進めるとともに、NIFS 構内の実験サイトを確定し、電力、冷却水、クレーン設備等のインフラ条件を確認することを目標とした。

該当年度の実施項目として、RT-1 アップグレード計画において、主な新規製作を 2.75 T 級磁場コイルに限定し、真空容器、冷却系統、磁場補正コイル、計測機器等の既存設備を最大限活用する基本方針に基づいて具体化を推進した。NIFS への移設により、既存インフラと 154 GHz ジャイロトロンを活用し、短期間で高密度プラズマ生成およびイオン加熱実証へ進む計画の整理を行った。

また、東大から NIFS へ移設可能な機器と NIFS 側で新規に導入すべき機器を分類し、移設対象設備、搬送条件、保守・点検項目、概算費用を整理した。設置場所については、NIFS 加熱装置室 ICH エリアを有力候補として検討を進める一方、X 線発生に伴う放射線管理区域設定が必要となる可能性を踏まえ、運用方法と設置場所の詳細検討を継続して実施している。

以上により、装置換装に向けた技術的課題、移設対象設備の整理、NIFS 実験サイト候補、インフラ整備課題を明確化し、2026 年度の装置移設・据付に向けた準備を進めた。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本課題において目標達成に最も寄与した成果は、RT-1 アップグレード装置を NIFS で運用するための移設・設置方針を具体化したことである。具体的には、既存 RT-1 設備のうち再利用可能な真空容器、冷却系統、磁場補正コイル、計測機器等を分類し、新規導入が必要な超伝導コイルおよび励磁電源と組み合わせる装置構成を整理した。

この成果により、2026 年度に予定する RT-1 装置の NIFS 移設、インフラ整備、強磁場ダイポール装置としての立ち上げに向けた実施範囲が明確となった。特に、装置移設を単なる輸送作業ではなく、ECH 導入、計測系整備、放射線管理、安全運用を含む統合的な装置システム設計として位置づけられた点が、年度目標達成に大きく寄与した。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし

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
解き放たれた活力ある社会を実現」

「超伝導ダイポールによる先進核融合と反物質科学の学際展開」

「ジャイロトロンによる高密度 ECH プラズマ生成と計測」

課題推進者：

矢内 亮馬（大学共同利用機関法人自然科学研究機構 核融合科学研究所 助教）

1. 研究進捗状況と成果

本課題では、強磁場 RT-1 アップグレード装置に 154 GHz ジャイロトロンを用いた電子サイクロトロン加熱（ECH）を導入し、高温電子・高密度プラズマを生成するための伝送系および計測系の設計検討を行った。2025 年度計画では、導波路、ミラー、真空窓を含むビーム伝送系の初期設計を完了し、光学経路の配置および安全対策を設定するとともに、課題 3-2 と連携して加熱ビームの焦点位置や入射角度を最適化することを目標としていた。

本年度、NIFS が保有する 154 GHz、1 MW 級ジャイロトロンを RT-1 アップグレード装置に接続するための導波経路を検討した。NIFS の使用可能な 154 GHz ジャイロトロンのうち、まず 1 本分の伝送路を整備して RT-1 に接続する方針とし、ICH エリアに近い #5 ジャイロトロンを第一候補として検討した。

また、導波管、集光ミラーボックス、真空容器内ミラーを含む ECH 入射系の構成検討を進め、RT-1 の設置候補場所、管理区域、安全通路、伝送路配置との整合を確認した。さらに、磁気フラックス計測、干渉計、トムソン散乱、X 線検出器等の計測系と加熱系を統合的に運用する必要性を整理し、プラズマパラメータを高い確度で取得する実験体制の検討を進めた。

さらに、今後の機器設計や物理解析で活用予定の電磁界解析用サーバーの整備を進めた。

以上により、2026 年度の 154 GHz ECH システム構築に向けたビーム伝送系構成、主要光学素子、入射系、安全上の検討項目を整理し、当初マイルストーンである「ビーム伝送系構成の確定と主要光学素子等の選定」に向けた基盤を形成した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本課題において目標達成に最も寄与した成果は、NIFS の 154 GHz ジャイロトロンを RT-1 アップグレード装置へ導入するための伝送経路および入射系の基本方針を定めたことである。特に、#5 ジャイロトロンを第一候補とし、導波管、集光ミラーボックス、真空容器内ミラーを組み合わせた入射系の検討を開始したことにより、2026 年度の ECH 伝送系整備の具体化が進んだ。

この成果は、2.75 T 級磁場を利用した 154 GHz ECH により高密度プラズマを生成し、電子からイオンへのエネルギー流入を実証するというプロジェクト全体の中心目標に直結するものである。加熱系と計測系を一体として設計する方針を整理したことも、初期プラズマ実験の成立性を高める重要な成果である。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし

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
解き放たれた活力ある社会を実現」

「超伝導ダイポールによる先進核融合と反物質科学の学際展開」

「分光計測によるダイポールプラズマのイオン特性解明」

課題推進者：

田辺 博士（国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本課題では、強磁場ダイポールプラズマにおけるイオン温度および速度分布を把握し、電子からイオンへのエネルギー移行および輸送特性を評価するため、受動分光を中心とするイオン計測系の設計検討を行った。2025 年度計画では、観測ポートの位置、視線方向、分光視野を確定し、空間分解能、感度、プラズマ発光強度を考慮した最適な分光視野を設計すること、さらに光学素子、ファイバ伝送系、検出器、分光器本体の選定を進めることを目標と定めていた。

本年度、初期 2 年度で目標とする 1 keV 級イオン温度の評価に向け、プラズマ中心部で自発発光が得られた場合の受動分光とトムグラフィによりイオン温度の空間分布評価が可能であることを確認し、計測条件の整理を行った。高温実験では 1 チャンネル計測のみでは発光の局在化により中心部温度の計測に不確定性が生じる可能性があるため、トムグラフィ的な視野確保が不可欠であることを明確化した。

また、RT-1 装置における光学アクセスについて、計測視野の最適化に向けたポート選定とポートプラグ導入の検討を進めた。現行ポートではニップル部により視野が制約されるため、装置内壁近傍までアクセス可能な視野角を確保するための構造検討を行った。さらに、既存分光器、CCD 検出器、拡大光学系、ファイバ経路等の利用・移設を想定し、RT-1 アップグレード装置に適した分光系の構築方針を整理した。

以上により、2026 年度の分光システム導入・稼働に向けて、観測視野、ポート構造、主波長候補、既存機器活用方針を具体化し、当初マイルストーンである分光計測系の仕様確定および導入設計に向けた準備を進めた。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本課題において目標達成に最も寄与した成果は、強磁場 RT-1 におけるイオン温度計測に必要な視野条件と計測方針を明確化したことである。特に、1 keV 級イオン温度の評価において、単一視線の受動分光では発光局在により中心部温度が隠れる可能性があることを踏まえ、トムグラフィ的計測を可能にする視野確保が重要であると整理した。

この成果に基づき、ポートプラグ導入による視野改善、既存分光器・CCD・ファイバ系の活用、CVI 529.05 nm 等の主波長選定へ向けた計測設計を進めることが可能となった。これにより、2026 年度以降の初期プラズマ実験において、イオン加熱の成否を評価するための主要診断系の成立性が高まった。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし

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
解き放たれた活力ある社会を実現」

「超伝導ダイポールによる先進核融合と反物質科学の学際展開」

「ダイポールプラズマの平衡・輸送解析」

課題推進者：

沼田 龍介（兵庫県立大学 大学院情報科学研究科 教授）

1. 研究進捗状況と成果

ダイポール磁場中のプラズマ平衡構造および輸送特性の解析を開始し、強磁場化 RT-1 実験における閉じ込め性能とイオン加熱の見通しを得るための基盤整備を進めた。2025 年度計画では、既存の平衡解析コードを拡張し、強磁場化によるプラズマ性能向上を検討するとともに、低 β 領域における輸送係数やエネルギー閉じ込め時間のスケーリング研究を開始し、次年度以降の高 β 運転に向けた基礎データを整備することを目標として設定した。

本年度の進捗として、MHD 平衡解析では、RTEQ を基幹コードとして、有限プラズマ β 、圧力・温度非等方性、トロイダル流れの効果を含む平衡解析の整備を進めた。また、ジャイロ運動論シミュレーションに必要な磁気座標として geom-dipole を構成し、有限 β プラズマにおけるジャイロ運動論輸送解析に着手した。

乱流輸送解析については、ダイポール配位における圧力勾配駆動の微視的乱流輸送を対象とし、GS2 および GPU 計算機上で動作する GK コードの活用を検討した。静電エントロピーモード乱流による内向き輸送、粒子種間のエネルギー輸送によるイオン加熱、電磁的效果、局所計算を組み合わせたグローバル輸送モデル構築を今後の発展課題として整理した。

以上により、ダイポールプラズマの平衡・輸送解析を 2026 年度以降に系統的に展開するための解析コード、磁気座標、計算環境、研究課題の整理が進み、当初マイルストーンである高 β プラズマ平衡解析に向けた基盤を形成した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本課題において目標達成に最も寄与した成果は、ダイポール配位における局所運動論輸送解析に必要な磁気座標と解析環境を整備し、有限 β プラズマを対象とする GK 輸送解析を開始したことである。

この成果により、RT-1 アップグレード実験で得られるプラズマに対して、平衡構造、閉じ込め性能、乱流輸送、粒子種間エネルギー輸送を理論的に評価するための基盤が整った。特に、局所磁束管における GK シミュレーションと、将来的なグローバル輸送モデルを接続する道筋が示されたことは、ダイポール核融合の成立性を物理的に評価する上で重要である。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし

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
解き放たれた活力ある社会を実現」

「超伝導ダイポールによる先進核融合と反物質科学の学際展開」

「研究課題名ダイポール磁場における ECH の波動解析」

課題推進者：

辻井 直人（国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本課題では、強磁場ダイポール中における高周波加熱（ECH）の波動伝播・吸収過程を解析し、効率的な加熱シナリオおよび入射条件を検討するための解析手法を整備した。2025 年度計画では、波動伝播コードをダイポール磁場配位へ適用し、磁場強度、電子密度、ビーム入射角等を変数とするパラメータサーベイを実施し、吸収効率、パワー分布、共鳴層位置を評価することを目標とした。

これに対し、154 GHz、第二高調波、トロイダル角 180° 、天頂角 95° 、発散角 2° を想定した X2 シナリオについて、ダイポール磁場中の EC 加熱解析を実施した。波動は真空中の光線として扱い、電子輸送については速度空間 2 次元のフォッカー・プランク計算で評価する枠組みを構築した。

また、無衝突高速電子の位相空間分布を軌道平均分布関数として記述し、軌道平均フォッカー・プランク方程式に基づいて高速電子輸送を評価する解析手法を検討した。これにより、ECH 波による準線形拡散、背景プラズマとのクーロン散乱、リミタ境界条件等を含む電子分布関数の時間発展を解析する基盤を構築した。

以上により、ダイポール磁場における ECH 波動解析を実験条件に反映するための初期解析を実施し、2026 年度に予定する高速電子輸送解析および加熱シナリオ最適化へ接続する基盤を形成した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本課題において目標達成に最も寄与した成果は、154 GHz X2 シナリオに基づくダイポール磁場中の EC 加熱解析を実施し、実験設計に反映可能な波動・高速電子輸送解析の枠組みを構築したことである。具体的には、真空中の光線追跡により共鳴層近傍へのビーム伝播を評価し、電子輸送については速度空間 2 次元のフォッカー・プランク解析を用いる方針を示した。

この成果により、ECH 入射条件、ビーム方向、吸収効率、パワー分布を定量的に検討するための解析体制が整い、課題 2-1 で進める 154 GHz ECH 伝送・入射系設計と連携できるようになった。これは、強磁場 RT-1 における高密度プラズマ生成とイオン加熱実証へ向けた加熱シナリオ最適化に直接寄与する成果である。

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし