



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

革新的加速技術による大強度中性子源と

先進フュージョンシステムの開発

奥野 広樹

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター
核変換技術研究開発室



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



【目 次】

<u>革新的加速技術による大強度中性子源と先進フュージョンシステムの開発</u>	1
PM：奥野広樹（国立研究開発法人理化学研究所 室長）	
<u>大規模PICシミュレーションによるビームハロー解析</u>	3
課題推進者：奥野広樹（国立研究開発法人理化学研究所 室長）	
<u>1A級イオン源の実証</u>	5
課題推進者：平塚 淳一（国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 主任研究員）	
<u>常伝導共振器の開発（低速部）</u>	7
課題推進者：石 禎浩（京都大学複合原子力科学研究所 准教授）	
<u>イオンCARAの実証試験</u>	9
課題推進者：長谷川 純（東京科学大学 准教授）	
<u>1A級イオン源の研究</u>	11
課題推進者：中野治久（自然科学研究機構核融合科学研究所 准教授）	

2025 年度研究開発プロジェクト実施報告書

【ムーンショット型研究開発事業・研究開発プログラム「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」（吉田 善章 PD）

【研究開発プロジェクト「革新的加速技術による大強度中性子源と先進フュージョンシステムの開発」】

PM：

【奥野広樹】（【国立研究開発法人理化学研究所】 【室長】）

1. 研究進捗状況と成果

当該年度は、核融合炉の早期実現に向けてインパクトが大きい貢献となるよう、目標パラメータ、タイムライン、マイルストーンの設定を行い、これらを実現するための基本諸元（周波数、磁場、閉じ込め磁場配位等）の最適化を進めた。1A 重陽子線形加速器および CARA（自動サイクロトロン共鳴加速器）を核融合分野へ展開するためのフィジビリティスタディを本格化させ、これらの加速器から得られるビームが核融合分野においてどのような需要に応え得るか、その実現可能性を明確に示した。また、2026 年度以降の本格運用に向けて体制強化を図るべく、プロジェクトで実施する R&D 項目を精査し、必要となる PI の選定を進めた。

1A 重陽子線形加速器：1A 重陽子線形加速器については、基本周波数および各セクションの周波数設定に関する検討を進め、空間電荷効果を含むビーム軌道計算を実施した。その結果、要求されるビーム品質とビームロス許容値を満たす実現可能な加速器構造（ラティス）を構築することができた。特に、ビームハロー抑制に寄与する磁気集束配置や、低速部・中高速部の周波数選定に関する知見が得られ、次年度以降の詳細設計に向けた重要な基盤が整った。

CARA+プラズマ装置：複数の応用シナリオを実現するためには、CARA の円形軌道を回転するビームをソレノイド外部へ散逸なく取り出す技術が不可欠である。本年度は、この取り出し手法を新たに確立し、CARA の応用範囲を大きく広げる成果を得た。また、CARA からのリング状ビームを FRC 等のプラズマ装置に入射する際、プラズマ中での荷電変換反応を利用して価数を変化させ、深くトラップさせる手法が最適であることをシミュレーションにより確認した。これにより、ビーム駆動型核融合炉の実現に向けた物理的成立性が一段と高まった。

ビーム需要の発掘：核融合分野におけるビーム需要を把握するため、ワークショップおよびシンポジウムを複数回開催し、研究者・技術者からの期待や要求性能を体系的に整理した。これにより、トリチウム生成、中性子材料照射、高エネルギー NBI、小型核融合炉など、複数の応用領域において本プロジェクトの加速器が果たし得る役割を明確化した。

プロジェクトマネジメント：アドバイザリーボードを月約 1 回開催し、プラズマ物理・ビーム物理の専門家から助言を得ながら、研究体制、研究サイト、技術課題の優先順位について継続的に議論を行った。その結果、2026 年度以降の本格運用に向けて、15 課題・13 名の PI を選定し、プロジェクト全体の研究推進体制を大幅に強化することができた。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

ワークショップとシンポジウム、講義等を開くことにより、領域の情報あつめ、人集めに寄与したと思われる。

2) 代表的な論文

無し

3) 代表的な特許

無し

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

研究開発プログラム「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」（吉田 善章 PD）・

研究開発プロジェクト「革新的加速技術による大強度中性子源と先進フュージョンシステムの開発」（奥野 広樹 PM）】

【大規模 PIC シミュレーションによるビームハロー解析】

課題推進者：

【奥野広樹】（【国立研究開発法人理化学研究所】 【室長】）

1. 研究進捗状況と成果

当該年度は、1A 重陽子線形加速器におけるビームハロー生成メカニズムの解明と、損失エネルギー密度 1 W/m 以下を実現するための大規模 PIC シミュレーション基盤の構築を中心に研究を進めた。本課題では、最終的に要求されるエネルギーまで加速する状態を PIC コードで再現し、ビームハローの発生を抑制したラティスの最適化を行う必要がある。このため、まず世界的に利用されている PIC コードを調査し、本課題に適したコードの選定を行った。

その結果、 10^6 マクロパーティクル以上を扱える候補として米国バークレー研究所が開発した IMPACT を選定し、スーパーコンピュータ上での実装に向けて必要なライブラリ、並列化環境、メモリ要件などについて机上検討を行った。また、ビーム物理研究者からの助言に基づき、GPU を搭載したスーパーコンピュータを用いることが望ましいとの結論に至り、今後の大規模解析に向けた計算基盤の方向性を明確化した。

さらに、大規模計算に先立ち、 10^6 個程度のマクロパーティクルを用いた PIC 計算を実施できる中規模計算環境を構築した。これにより、加速器ラティスの初期モデルを用いた空間電荷効果の評価や、ビームバンチング挙動の再現性確認が可能となり、本課題で必要となる計算環境の妥当性を検証することができた。

また、40 MW 級ビームパワーを扱う 1A 重陽子線形加速器では、損失エネルギー密度を 1 W/m 以下に抑える必要がある。この要件を満たすため、ハロー生成の初期条件、共振器形状、磁場配置など、解析すべき物理項目を整理し、2026 年度以降に実施する大規模解析に向けた計算仕様を確立した。

加えて、ビーム物理研究者との議論も活性化し、ハロー抑制に有効なラティス設計、ビームコリメーション導入方針、空間電荷効果の扱いなど、解析方針の高度化を進めることができた。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

奥野プロジェクトの課題アドバイザーでもある広島大学の岡本先生によるビームシミュレーションに関する講義を 11 月に 2 日にわたって開催

2) 代表的な論文

無し

3) 代表的な特許

無し

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

研究開発プログラム「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」（吉田 善章 PD）・

研究開発プロジェクト「革新的加速技術による大強度中性子源と先進フュージョンシステムの開発」
（奥野 広樹 PM）】

【研究課題「1A 級イオン源の実証」】

課題推進者：

【課題推進者氏名：平塚 淳一】

（【課題推進者所属：国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構】

【課題推進者役職：主任研究員】）

1. 研究進捗状況と成果

本研究課題は、軽水素正イオンビーム 1 A 以上、70 keV 程度まで加速するとともに、25 π mm $\cdot$ mrاد 以下にビームエミッタンスを抑えた正イオン源の開発試験を行うものである。また、後段に自動サイクロトロン共鳴加速器(CARA)を設置し、本研究課題で準備する正イオン源のビームを入射し加速する組み合わせ試験を実施する。

本研究は 2025 年 11 月 1 日に契約が締結され、研究活動を開始した。2025 年度は主に以下の研究進捗があった。

- ① 目標とする仕様を達成するための正イオン源の基本構造の決定
 - ② 正イオン源開発のためのビーム解析環境の整備
 - ③ ビーム軌道解析による正イオン源の構造設計の開始
 - ④ 加速したビームのビーム径、発散角、エミッタンス分布を評価するための計測装置の概念設計の完了
 - ⑤ 開発試験に使用するイオン源の準備
 - ⑥ ビーム加速試験に必要な電源系、真空排気系、冷却系等の補器設備の検討の完了
 - ⑦ CARA の据付仕様の協議と磁気遮蔽・放射線遮蔽の検討開始
- ① において、加速器の電極をプラズマ電極、加速電極、減速電極、接地電極の 4 枚構成とすることとし、②、③において有限要素法による 3 次元電磁界解析コード OPERA を用いたビーム軌道解析を開始した。厳しいエミッタンスの要求を満たしつつ必要なビーム電流を確保するため、直径 4 mm の、77 個以下のビーム孔で構成する形とし、シングルビームレット解析において発散角を抑えて 70 keV のビーム加速が可能となる見込みが得られた。
- ④においては、イオン源の後段の真空容器にビームターゲット、ビームプロファイルモニタ、及びエミッタンスモニタを設置する形とし、計測機器の内容を決定した。
- ⑤においては、既存のイオン源を改造して使用することで本開発試験を開始できることを確認し、既存のイオン源を試験エリアに移動し、改造に向けた整備を開始した。
- ⑥においては、70 keV、1 A 以上のビーム加速に必要な設備の仕様を決定するとともに、長時間運転に向けてフィラメントイオン源の異常放電時のフィラメント断線による運転停止を抑制するため、課題推進者が既に開発している異常放電時の電源高速遮断・高速再立上システムを本試験機器に適用するための設計を完了した。
- ⑦においては、PM 及び CARA の課題推進者と連携し、組み合わせ試験に向けた協議、及び磁気遮蔽・放射線遮蔽の検討を開始した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本課題で開発するイオン源の基本設計の完了

2) 代表的な論文

無し

3) 代表的な特許

無し

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・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・革新的加速技術による大強度中性子源と超高温プラズマ維持装置の開発】

【常伝導共振器の開発（低速部）】

課題推進者：

【石 禎浩】（【京都大学複合原子力科学研究所】 【准教授】）

1. 研究進捗状況と成果

2025 年度後半においては、本研究開発課題の中核である 1A 級大電流対応加速空洞の実機化に向け、加速空洞製作に関連する工学的・物理的課題の抽出と整理を重点的に進めた。その結果、空洞構造、異種金属接合、高真空維持、高周波安定性、冷却方式、保守性など、今後の実証試験および実機設計に直結する課題について整理を行い、翌年度以降の要素技術開発の指針を明確化した。また、2026 年度に予定している試験片レベルでの検証実験および評価試験について、優先順位と実施手順を整理し、実証計画として具体化した。

特に重点課題として掲げた異種金属（鉄—銅）の接合方式については、HIP (Hot Isostatic Pressing) 方式および銅メッキ方式を中心に比較検討を実施した。HIP 方式については、冶金的接合による高い信頼性、RF 損失低減効果などの利点を確認するとともに、大型構造物製作時における炉サイズ制約やコスト上昇が重要な検討課題であることを整理した。一方、銅メッキ方式については、複雑形状への適用性や量産性に優れる反面、厚膜形成品質や施工技術者の確保が重要であることを確認した。さらに、2026 年度に実施予定の試験片評価に向け、接合方式選定の判断基準となる評価項目について検討を進めた。具体的には、接合界面の電気抵抗、熱サイクル耐性、真空特性、および高周波損失に着目し、サンプルレベルで有効な評価方法を整理した。

真空シール方式については、多数空洞を接続する実機構成において全長増大を抑制する必要があることから、従来型真空フランジに代わる短尺型接合方式の検討を進めた。その結果、ピローシールを含む特殊シール構造が、コンパクト性および熱サイクル耐性の観点から有望であることを確認した。また、放射線環境下での信頼性、繰り返し加熱冷却時の耐久性、交換性などについて整理を行い、今後必要となる寿命試験およびリーク試験の計画を策定した。これらの検討を通じて、加速器全体のコンパクト化と高真空維持を両立するための設計方針を明確化した。

さらに、シミュレーション環境整備についても計画通り実施した。大強度ビームに伴うビームローディング効果を評価するため、CST を中心とした電磁場解析環境を構築し、解析用ワークステーションの導入およびソフトウェア環境の整備を完了した。これにより、空洞内電磁場分布、ビーム軌道との相互作用、共振周波数変動、ディチューン量などを解析する基盤を整備した。初期的なモデル計算を通じて、解析環境が安定に動作することを確認するとともに、今後 5 年間にわたる継続的な空洞設計最適化および高周波回路設計への反映が可能となった。

2. 代表的な成果事例：

こちらの項目については、2025 年度は詳細検討にむけての準備および計算環境の整備を実施したため、具体的な論文発表・特許取得は該当事例がありません。

2025 年度実施状況報告書（成果）

革新的加速技術による大強度中性子源と先進フュージョンシステムの開発

イオン CARA の実証試験

課題推進者：

長谷川 純（東京科学大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

2025 年度は以下の 4 つの開発項目についてマイルストーン(MS)をそれぞれ設定し研究開発を実施した。

(1) ビーム入射系の整備：(MS) CARA へのイオン入射に最適な集束レンズ系の選定

超伝導ソレノイド中に置かれた高周波空洞内での陽子のサイクロトロン自動共鳴加速を様々なビーム入射条件のもとで検討し、陽子の入射エネルギーは 10 keV 程度が最適であることを見出した。イオン源から CARA 空洞までのビーム輸送計算を行い、ビーム入射系にはアインツェルレンズ等の静電レンズが必要なことを明らかにした。

(2) 超伝導ソレノイド電磁石の整備：(MS) 既存 MRI 用超伝導ソレノイドの整備項目の確認

実証試験で利用する超伝導ソレノイドを調査し、付帯設備である GM 冷凍機のオーバーホールを実施した。また、電磁場解析コードにより超伝導ソレノイドの漏れ磁場計算を行い、移設先の実験施設で必要となる磁気シールドの設計に着手した。また、超伝導ソレノイドへの液体ヘリウムの充填作業を行う施設の環境整備を行った。

(3) 高周波加速空洞の整備：(MS) 電磁場解析および粒子軌道計算により 1 MeV 陽子の加速を確認

3 次元電磁場解析コードと粒子輸送コードを用いて、ビーム入射系、高周波 CARA 空洞、ビーム取り出し系にわたる統合ビームシミュレーションを行い、10 keV、1 mA で入射した陽子ビームが CARA 空洞内でサイクロトロン共鳴加速され、1 MeV、1 mA のビームとして取り出されることを示した。これにより設計中の加速空洞がイオン CARA 実証試験に十分に適用可能であることを確認した。

(4) ビーム診断系の整備の実施：(MS) 粒子軌道計算をもとに加速空洞出口でのビーム診断手法を決定

CARA 加速後の陽子の軌道を粒子軌道計算により解析し、空洞出口において陽子はソレノイド磁場の勾配により緩やかに集束され、CARA 空洞内での軌道半径をほぼ保ちながら取り出せることを示した。空洞出口付近に大口径の水冷式ファラデーカップを設置し、ビーム電流を測定すると同時に温度上昇からビームによるエネルギー付与を見積もることで、CARA 空洞内での陽子のエネルギーゲインを評価する手法を採用した。

以上のように、各開発項目について順調にマイルストーンを達成することができた。

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 CARA の実証試験において最も重要なイオン CARA 用の高周波加速空洞について、電磁場解析コードと粒子シミュレーションを統合した数値解析を行い、様々な電極構造を有する空洞設計案について詳細な性能評価を行い、イオンのサイクロトロン共鳴加速を効率的に起こして目標とする 1 MeV、1 mA の陽子ビームの取り出しを実現するのに最適な加速電極構造を明らかにした。これにより加速空洞の設計方針が定まり、加速空洞の詳細設計から製作へと向かう道筋をつけることができた。

2) 代表的な論文

該当なし

3) 代表的な特許

該当なし

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
革新的加速技術による大強度中性子源と先進フュージョンシステムの開発

研究開発課題 2－3－2：1A 級イオン源の研究

課題推進者：

中野治久（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

本研究課題の一部として、①フィラメント・アーク（FA）／高周波（RF）ハイブリッド放電型研究開発用負イオン源（NIFS-RNIS）から水素正イオンビームを引き出し、加速してビームの特性調査することと、FA 放電におけるフィラメント損耗の評価が課題として挙げられている。本年度は①に関連してビーム引き出し領域近傍の正イオン密度分布を評価した。また、NIFS-RNIS から水素正イオンビームを引き出し、加速する検討を行い、最初の実験では NIFS-RNIS 既存のイオン源加速器を用いて正イオンビームを引き出すこととした。②に関連して FA 放電によるフィラメント損耗量を評価の参考とするために、大型ヘリカル装置（LHD）負イオン中性粒子ビーム入射装置（NNBI）で約 4 か月間運転したイオン源のフィラメントを取り外して確保した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

なし

2) 代表的な論文

なし

3) 代表的な特許

なし