

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17996

研究課題名（和文）永久磁石を用いた大強度ビーム輸送用複合多重極磁気デバイスの開発

研究課題名（英文）Development of hybrid permanent magnet multipole for intense beam transportation

研究代表者

不破 康裕（Fuwa, Yasuhiro）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究職

研究者番号：00817356

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：荷電粒子ビームの大強度化における空間電荷効果によるビーム品質低下を抑制するためのビーム輸送用デバイスとして永久磁石を用いた機能結合型集束磁石を開発した。この集束磁石では主たる集束磁場となる4極成分に加えて、空間電荷効果の影響を補正するための高次成分となる8極成分を重畳して発生させることができる。本研究では、機能結合型集束磁石の磁気回路設計を確立し、プロトタイプを製作してその性能を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大強度荷電粒子ビームは現代科学技術を支える基盤技術であり、物理学などの基礎科学のみならず生命科学や産業応用などに広く利用されている。ビーム強度が大きくなることは実験時間の短縮などにより、多くのユーザーにビーム利用機会を提供できるメリットにつながるが、ビーム内部の空間電荷効果によるビーム品質の低下が問題となる。本研究で開発したビーム集束磁石はビーム品質の低下を抑制する機構を有しており、大強度かつ高品質のビームの提供を可能とする。

研究成果の概要（英文）：A combined-function focusing magnet using a permanent magnet has been developed as a beam transport device to suppress the beam quality degradation caused by space-charge effects in high intensity charged-particle beams. In addition to the quadrupole component, which is the main focusing magnetic field, this focusing magnet can generate a superimposed octupole component, which is a higher-order component to compensate for the effect of the space-charge effect. In this study, the magnetic circuit design of the combined-function focusing magnet was established and a prototype was built to evaluate its performance.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：ビーム物理学 荷電粒子ビーム 大強度ビーム 永久磁石 加速器

1. 研究開始当初の背景

大強度陽子加速器は現代の科学技術における強力な実験ツールとして、原子核物理、素粒子物理、物質・生命科学などの最先端研究に活用されている。将来の科学技術の発展において更なる大強度化が期待されているが、実現を目指す上での重要な課題の1つに、ビームロスの低減が挙げられる。大強度加速器ではビーム中の加速粒子の数が多く、わずかな割合で発生するロスがその周囲に大きな影響を及ぼす。このため、加速器の更なる大強度化を目指す上でビームロスの低減ができない場合には、放射線遮蔽の大規模化による経費の増大や、放射化の影響で加速器の運転維持に必要なメンテナンス作業が著しく困難になることが予期される。そのため、大強度加速器におけるビームロスの低減手法の研究開発は、更なる大強度加速器の実現のために世界的に重要な課題となっている。ビームロスの低減するための手法としては、ビーム集束系に高次多重極磁場を印加することが提案されていた[1,2]が、それを実現するための磁石デバイスが存在せず、その有効性が未検証であった。

2. 研究の目的

本研究では、空間電荷効果に起因するビームロスを低減するために、高次多重極磁場成分を印加可能な集束磁石システムの製作と性能評価を目的とした。磁石システムの方式として電磁石を用いる方法もあるが、多重極磁極の磁気飽和による磁場精度の制限や消費電力の増大の懸念があったため、本研究では、永久磁石を用いた機能結合型集束システムを提案することとした。本研究ではプロトタイプとなる機能結合型集束磁石の製作と性能評価を実施し、磁気回路の設計手法の確立、製作方法の検証と磁気特性の評価、及び測定された磁場分布を用いたシミュレーションによりその特性を評価することで、実際のビームラインで実用可能な機器の設計製作、及び運用方法の確立を目指した。

3. 研究の方法

多重極磁場を用いたビームロス低減を目指した集束磁石デバイスの開発にあたり、J-PARC リニアック加速器のビーム輸送セクションのMEBT1(Medium Beam Energy Transport 1) [3]に使用する磁石を対象に選定した。この領域はピーク電流 50mA、エネルギー3MeV の陽子ビームが輸送される箇所であり、空間電荷効果の影響が最も大きな領域の1つであり、新しい集束磁石デバイスを適用した際の効果が大きい。この領域でのビーム輸送に適用可能な磁石の設計製作、及びその性能評価を、以下の方法により実施した。

- (1) 数値的な磁場解析により永久磁石を用いた機能結合型集束磁石の磁気回路の設計
- (2) 機能結合型磁石の実装方法の検討と製作した磁石に対する精密磁場測定
- (3) 数値シミュレーションによる空間電荷効果補正の検証

4. 研究成果

(1) 永久磁石を用いた機能結合型集束磁石の磁気回路の考案

ビームロスを効果的に低減するためには空間電荷効果によるビームハロー形成やエミッタンス増大を抑制することが有効である。そのため本研究では、高次多重極磁場により空間電荷効果の影響を低減するための機能結合型集束磁石の磁気回路を考案した。ビームハロー形成を抑制するためには、主たるビーム集束を行う4極成分を稠密に配置して、同領域に高次成分として8極成分を印加することが効果的である。そのため、8極磁場成分の印加には、4極磁石を重ね合わせて8極成分を発生可能な機能結合型集束磁石を設計した[4]。図1に本研究で設計した機能結合型集束磁石の磁気回路構成を示す。ここで設計した磁気回路には起磁力の発生源として永久磁石を使用することとした。永久磁石を用いることでコイルや冷却水配管を省略し、磁石を小型化することができる。また、これに伴い電磁石におけるトラブル原因の多くを占める電源や冷却水に関連する不具合の可能

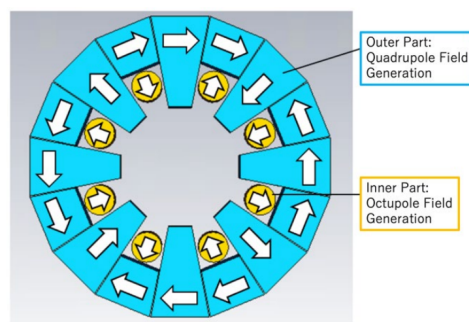


図1 機能結合型集束磁石の磁気回路

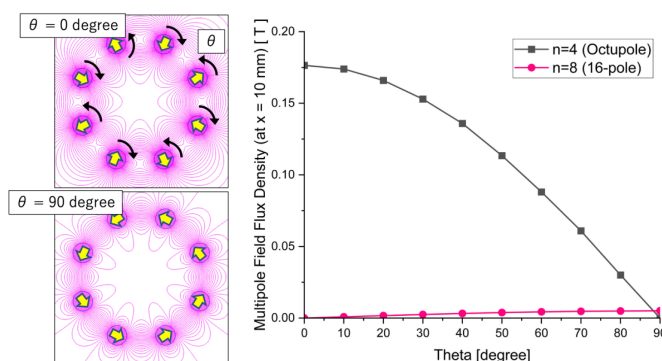


図2 8極磁場変調機構の概略図(左)と変調計算値(右)

性を排除することができ、信頼性の向上を見込むこともできるなど多くのメリットがある。

この磁気回路では磁石が2つのグループに分かれており、4極磁場を発生させるための台形型永久磁石の集まり(図中水色部分)と、8極磁場を発生させるための円柱型永久磁石の集まり(図中黄色部分)に分かれている。4極磁場についてはビーム集束のために最大強度で30 T/m程度の比較的大きな磁場勾配が必要となるためHalbach配置を基本磁石配置として、8極磁場生成のための磁石を挿入する部分を切り欠いた構造とした。本設計では、4極磁場の強度は固定とした。一方、8極磁場の強度は円筒型磁石を回転させることで連続的に変調させることができる構造とした。図2のように円柱型磁石の角度を変えることで8極成分を効果的に変調されることを磁場解析により示した。

(2) 機能結合型集束磁石の製作実証

前項で設計した磁気回路構成を元に、プロトタイプモデルとなる機能結合型集束磁石を製作した(図3)。永久磁石素材には温度特性と耐放射線特性を考慮してサマリウムコバルト磁石を採用した。このモデルでは、8極磁場強度を変調させるための磁石の回転を微調整できるように治具を設けている。

ホールプローブを用いてmid-plane上の磁場分布を測定して、発生磁場の評価を実施した。8極磁石の大きさが最大となる場合とその値が0となる場合の回転角度領域で発生磁場を調整し、いずれも図2に示した設計値と十分に一致していることが検証された。

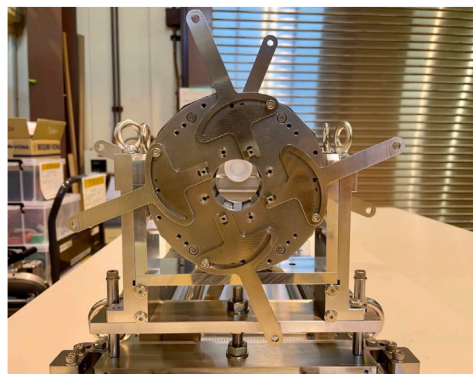


図3 製作した機能結合型集束磁石

(3) シミュレーションによる空間電荷効果補正の検証

設計製作した機能結合型集束磁石による空間電荷効果の補正を検証するために、ビームシミュレーションを実施した。このシミュレーションでは、研究初期段階における計算の簡便化と8極磁場による空間電荷補正効果を明らかにするために横方向のみの自由度をもつ2次元体系で計算を行った。シミュレーション体系には現状のJ-PARCリニアック加速器のMEBT1を模擬するため体系を用いて、その内の1台の磁石に本研究で製作した機能結合型集束磁石システムを配置することでその効果を検証した。

図4に示すシミュレーション結果は8極磁場の印加による空間電荷効果抑制によるエミッタンス増大の低減効果を示すものである。ビームプロファイルとエミッタンスは、MEBT1出口における値を評価に用いた。この結果より、効果的なエミッタンス増大低減のための最適値があることが確かめられ、大強度ビームの輸送系における8極磁場印加を用いた空間電荷効果補正のためのビームライン集束系の設計指針の基礎が確立された。

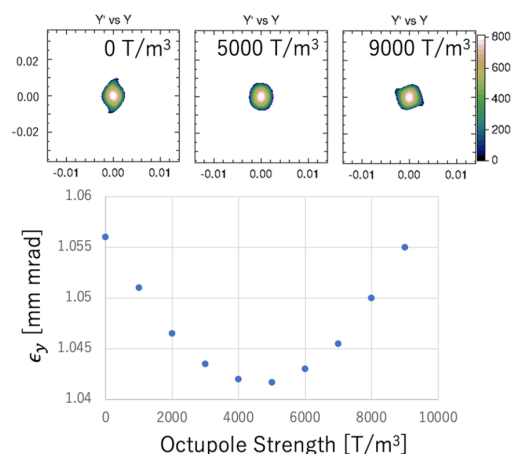


図4 シミュレーションの結果。8極磁場成分印加時のビームプロファイル(上段)。8極磁場成分印加強度とエミッタンスの関係(下段)。

- [1] M. Chimura, H. Harada, K. Moriya, K. Okabe, and M. Kinsho, Proceedings of 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2019, pp. 728-732.
- [2] M. Chimura, H. Harada, and M. Kinsho, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 063G01 (2022).
- [3] K. Okabe, et al., Proceedings of 3rd Symposium (J-PARC2019), JPS Conference Proceedings 33, 011011 (2021).
- [4] Y. Fuwa, Y. Iwashita, and T. Takayanagi, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 32, No. 6, 4006705 (2022).
- [5] Y. Fuwa, K. Moriya, and T. Takayanagi, Proceedings of 31st International Linear Accelerator Conference, 364-367 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fuwa Y., Takayanagi T., Iwashita Y.	4. 巻 32
2. 論文標題 Development of Combined-Function Multipole Permanent Magnet for High-Intensity Beam Transportation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3176251	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Fuwa, K. Moriya, T. Takayanagi
2. 発表標題 Design of Beam Focusing System with Permanent Magnet for J-PARC LINAC MEBT1
3. 学会等名 31st International Linear Accelerator Conference（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 不破 康裕, 高柳 智弘, 守屋 克洋
2. 発表標題 J-PARC LINAC MEBT1 ビーム集束系への永久磁石適用に関する検討
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Fuwa, T. Takayanagi, and Y. Iwashita
2. 発表標題 Development of Hybrid Multipole Permanent Magnet for High-Intensity Beam Transportation
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (MT27)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 不破康裕, 守屋克洋, 高柳智弘
2. 発表標題 J-PARCリニアックにおける複合多重極磁石を用いた空間電荷効果抑制についての解析
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------