

れている。これらの空洞が配置されているためにMEBT1に設置することが可能な集束磁石は現状では8台となっており、RFQやDTL内部と比較して横方向の集束力が小さい。一方で、ビームエネルギーが3 MeVと低いために空間電荷効果の影響が大きく、現状の50 mA運転においてもビームフラグメンテーションの形成とエミッタンス増大が確認されている[5]。60 mAへの電流アップグレード時にはエミッタンス増大がさらに大きくなることが予測され、これをいかに低減するかが重要な課題となっている。この問題を解決するための方策としてビーム集束要素に高次成分を加えて、空間電荷効果によるビーム品質低下を抑制することが提案されている[6]。空間電荷効果はビーム分布の対称性から奇数次の発散項を発生させる。その最低次の成分は8極に対応する三次関数の成分なので、外部から8極磁場を印加することで空間電荷効果によるビーム発散を抑制することが期待できる。

3. 永久磁石を用いた機能結合型磁石

先述の通りMEBT1では、限られた空間に集束磁石が配置されているため現状の4極磁石に加えて新たに8極磁石を配置するスペースはない。そのため、8極磁場成分の印加には、4極磁石に重ね合わせて8極成分を発生可能な機能結合型磁石を検討することとした。Figure 2に設計した機能結合型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している。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。

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から構成されている。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ような構造としている。本設計では、4極磁場の

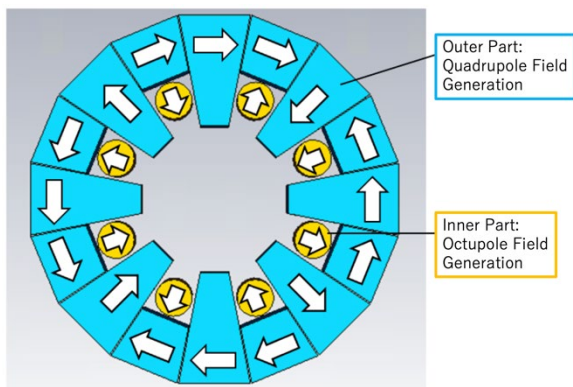


Figure 2: Design magnetic circuit for combined-function focusing magnet. All shown in this figure are permanent magnets, and the arrows indicate the direction of magnetization.

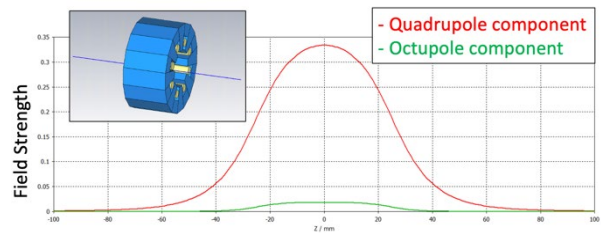


Figure 3: Magnetic field distribution along the beam axis.

強度は固定での実装となっている。これは、現状検討しているMEBT1の磁石置き換えにおいては、8台の電磁石のうちの一部のみを永久磁石で置き換えることを検討しており、永久磁石部分の4極集束力は固定として近傍の電磁石の電流調整によりビーム集束力およびビームマッチングを補正することを検討しているためである。一方、8極磁場の強度は円筒型磁石を回転させることで-17,700 T/m³から+17,700 T/m³まで連続的に変調させることができる構造とした。磁気回路のそれぞれの部分が発生する磁場分布と磁場強度変調機構については文献[7]に記述している。Figure 3は3次元磁場計算により算出したビーム軸方向の4極成分と8極成分の磁場強度分布である。縦軸の値はビーム軸から水平方向に1 mm変位した位置での磁場強度を示している。それぞれの成分の磁場強度は最大値で33 T/mおよび17,700 T/m³に相当するものである。この計算結果よりビーム軸上の同一区間に両者の磁場成分が同時に発生できていることが確認できる。

Figure 2に示した磁気回路設計を元に、プロトタイプモデルを製作した。永久磁石部分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。Figure 4に製作したプロトタイプの写真を示す。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手動で調整できるように治具を設けている。Figure 5はホールプローブで測定したmid-plane上の磁場分布である。8極磁石の大きさが最大となる場合とその値が0となる場合に磁石の回転角を調整したものであるが、いずれも設計値と十分に一致している。

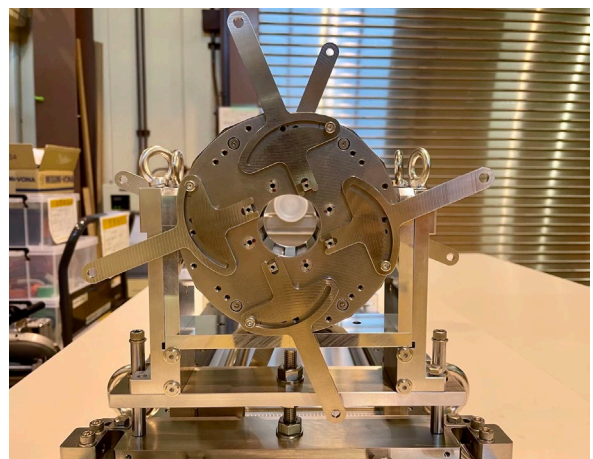


Figure 4: Fabricated prototype magnet.

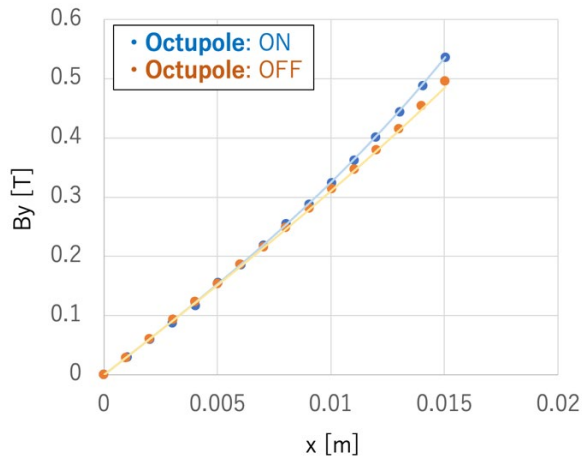


Figure 5: Preliminary result of magnetic field measurement on mid-plane of the prototype magnet.

4. 空間電荷補正シミュレーション

設計製作した機能結合型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。ラティス体系は Fig. 6 に示すものを用いた。加速および縦方向のダイナミクスを省略するために RFQ および DTL 部分を周期的な FODO ラティスで実装しており、ビームエネルギーは 3 MeV で一定としている。RFQ に続く部分には現状の MEBT1 を模擬するために実機と同様の 8 台の 4 極集束要素を配置している。この MEBT1 に相当する部分の後段に 4 台の集束要素からなるラティスを配置し DTL を模擬するラティスとのマッチング要素とした。この新たに配置した集束要素は J-PARC リニアック用に新たに製作した RFQ がこれまでのものより約 50 cm 短いものであり、RFQ 置き換え時にできる 50 cm の空間を活用して MEBT1 後段部に集束磁

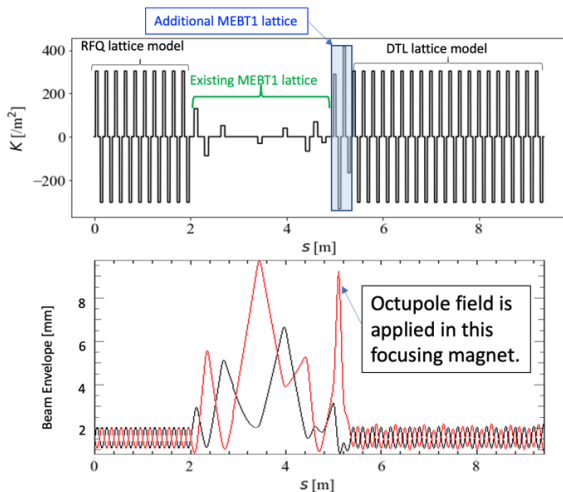


Figure 6: Simulation model of simplified 2D lattice structure.

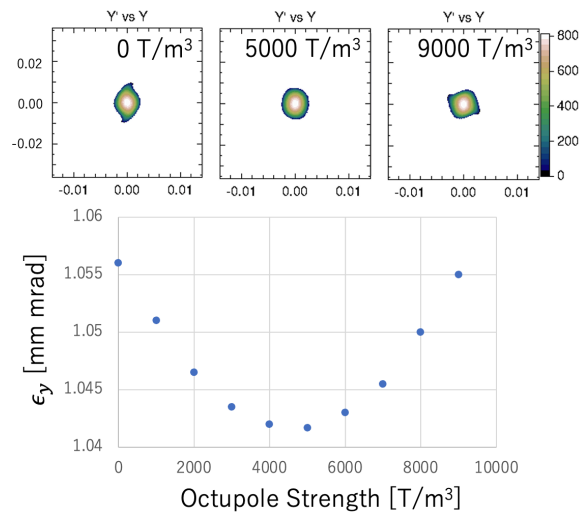


Figure 7: Results of the simulation. Upper figures show phase space distribution in vertical (y) axis of the extracted position. Lower figure shows the effect of octupole field strength on the beam emittance at DTL exit.

石を増設して DTL 入射のマッチングノブを増やす検討案を模擬するものである。8 極磁場によるエミッタンス増大の低減効果の検証においては、この新たに設置したラティスにおいてビーム径が大きくなる部分に 8 極磁場を発生させて、DTL 出口におけるエミッタンスを評価するものとした。ビーム輸送計算は WARP を用いて実行した。入射ビームの初期エミッタンスは現状の MEBT1 ビームと同程度の 1.039 mm mrad に設定した。シミュレーションにおけるビーム電流は 2 次元体系におけるチューンデプレッションが 3 次元での 60 mA のバンチ化ビームを加速する際と同等のチューンデプレッションとなるよう規格化している。

Figure 7 にシミュレーション結果を示す。8 極磁場を印加しない (0 T/m³) 場合においては、ビームフラグメンテーションが発生しておりエミッタンスが 1.056 mm mrad まで増大している。8 極磁場の印加によりビームフラグメンテーションの成長が抑制され、その強度を 5,000 T/m³ まで印加する場合にはエミッタンス増大が抑制され極小値 1.042 mm mrad が得られた。さらに 8 極成分の強度を増大させると、かえってビームフラグメンテーションの形成を助長する効果が大きくなり、再びエミッタンスが増大した。このように、8 極磁場の印加によりエミッタンス増大の抑制が可能であることを簡便な体系におけるシミュレーションで実証することができた。今後はシミュレーションを 3 次元に拡張し、加速やバンチ構造による影響を加味してさらに詳細なシミュレーションを実施することと検討している。また、前項で記述したプロトタイプを使用して J-PARC リニアックの RFQ テストスタンドにおけるビーム輸送実験を実施し、8 極磁場がビーム分布やエミッタンスに与える影響を実験的に評価することも計画している。これらの結果を用いることで J-PARC リニアックの電流アップグレードにおいて機能結合型多重極磁石の利点を最大限活用することが可能なラティス設計の確立を目指す。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K17996 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki *et al.*, “Accelerator technical design report for J-PARC”, KEK-REPORT-2002-13, JAERI-TECH-2003-044, J-PARC-03-01 (2003).
- [2] H. Hotchi, H. Harada, N. Hayashi, S. Kato, M. Kinsho, K. Okabe, P. K. Saha, Y. Shobuda, F. Tamura, N. Tani, Y. Watanabe, K. Yamamoto, M. Yamamoto, and M. Yoshimoto: PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS, 20,060402 (2017).
- [3] H. Oguri, Proceedings of 29th Linear Accelerator Conference, 29-34 (2018).
- [4] Y. Fuwa *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FRPP40, 780-782 (2020).
- [5] K. Okabe, Y. Liu, M. Otani, K. Moriya, T. Shibata, M. Chimura, K. Hirano, H. Oguri, and M. Kinsho, Proceedings of 3rd Symposium (J-PARC2019), JPS Conf. Proc. 33, 011011 (2021).
- [6] M. Chimura, H. Harada, and M. Kinsho, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 063G01 (2022).
- [7] Y. Fuwa, Y. Iwashita, and T. Takayanagi, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 32, No. 6, 4006705 (2022).