

九大 150 MeV FFA(Fixed Field Alternating gradient)加速器における ビーム光学改善のための電磁石改造に関する研究

MAGNET REMODELING FOR THE IMPROVEMENT OF BEAM OPTICS IN THE 150 MEV FFA (FIXED FIELD ALTERNATING GRADIENT) ACCELERATOR AT KYUSHU UNIVERSITY

和賀雄飛^{#,A)}, 有馬秀彦^{A)}, 米村祐次郎^{A)}, 足立恭介^{A)}, 伊藤彰洋^{A)}, 池田伸夫^{A)}, 森義治^{B)}
Yuhi Waga^{#,A)}, Hidehiko Arima^{A)}, Yujiro Yonemura^{A)}, Kyosuke Adachi^{A)}, Akihiro Ito^{A)}, Nobuo Ikeda^{A)},
Yoshiharu Mori^{B)}
^{A)} Kyushu University
^{B)} Kyoto University

Abstract

The 150 MeV FFA synchrotron accelerator at Kyushu University is planning to increase the beam intensity and to accelerate the heavy ion beams. Magnetic field configuration of the accelerator has been re-examined to improve the beam performance using 3-D magnetic field calculation and beam particle tracking simulation. Modifying the pole shape of the defocusing magnets and attaching the iron return yokes to the focusing magnets, the betatron tune variations during beam acceleration are found to be well suppressed.

1. はじめに

FFA 加速器[1]は集束力が運動量に依らない零色収差という特徴を持ち、大きな運動量アクセプタンスと空間アクセプタンスを有している。そのため、大強度の2次粒子を生成する用途への利用が期待されている。

九州大学の150 MeV FFA 加速器[2]では、重イオンビームの加速や陽子ビームのさらなる大強度化が計画されており、ベータロンチューンの選択の自由度が高く、加速中のビーム損失を低減できる光学系が必要とされている。しかし、150 MeV FFA 加速器は設計当時、計算機の性能の問題で電磁石同士の磁場の干渉が適切に考慮されていなかったため、ベータロンチューンが運動量に対して変化する光学系となっている。そのため、現状でも陽子ビームの加速はできているものの、重イオンなどの他の粒子の加速をするためにはベータロンチューンの変化量をより小さくすることが望ましい。

本研究では、150 MeV FFA 加速器の電磁石の設計の問題点を解決する電磁石構造を検討し、零色収差を達成できる電磁石設計の確立に向けた知見を得ることを目的とした。本発表では、三次元磁場計算と軌道計算を用いてリターンヨークの追加、磁気シールドの追加、磁極形状の変更、補正磁極[3]の追加を行い、ベータロンチューンの変化量を評価した結果について報告する。

2. 150 MeV FFA 加速器の電磁石の改造点

150 MeV FFA 加速器の電磁石はDFD triplet型のヨークフリー電磁石[4]が用いられている。ヨークフリー電磁石の模式図をFig. 1に示す。ヨークフリー電磁石は集束(F)電磁石のリターンヨークを取り払っている。これにより、電磁石重量の軽量化やビームの入出射が容易となる等の長所がある。

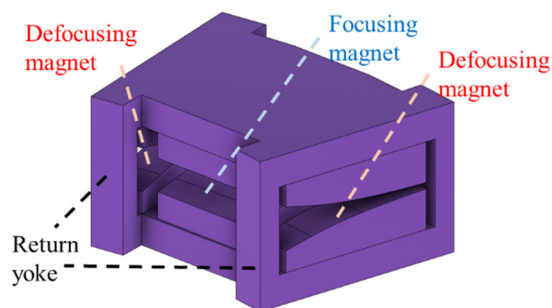


Figure 1: DFD triplet return-yoke free magnet.

ヨークフリー電磁石の磁気回路をFig. 2に示す。ヨークフリー電磁石ではF電磁石と発散(D)電磁石の磁気回路が結合しており、F電磁石のコイルによって発生した磁束線は天板を介してD電磁石のリターンヨークを通過する。それによってD電磁石のリターンヨークは磁気飽和し、F電磁石のコイルによって発生した磁束線がD電磁石の磁極間にも通過するようになる。D電磁石のコイルはD磁極の磁場の調整を行う役割を担っている。

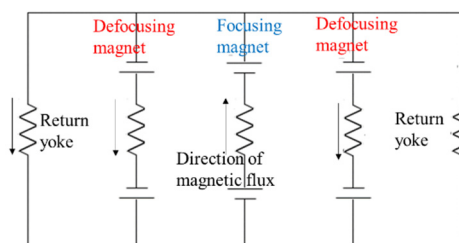


Figure 2: Magnetic circuit of return-yoke free magnet.

150 MeV FFA 加速器のヨークフリー電磁石を設計した当時、計算機の性能の制限で回転対称の境界条件を課して計算することができなかった。そこで、1 cellの電磁石について漏れ磁場が十分小さくなる遠方まで計算を行い、その磁場をセル数分重ね合わせることでリング1周

[#] waga@nucl.kyushu-u.ac.jp

の磁場を計算していた。しかし、この方法では電磁石同士の磁場の干渉が正しく考慮できていなかったため、D 電磁石のリターンヨークの磁気飽和に起因する漏れ磁場が大幅に過小評価された設計になっていた。また、D 電磁石の磁場にも磁場の干渉の影響があり、設計された D 磁極の形状では磁場が FFA 加速器の理想磁場から大きくずれていた。その結果、Fig. 3 に示すように設計時のベータトロンチューンの計算結果(青線)と実験結果(黒点)が大きく異なり、変化量も大きくなっていった。

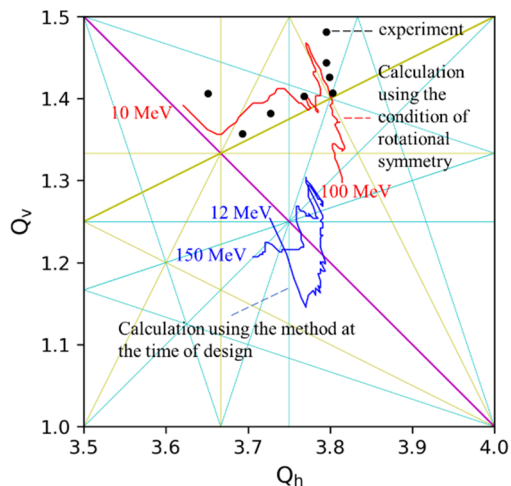


Figure 3: Comparison of calculated and experimental results for betatron tune.

本研究では 150 MeV FFA 加速器のヨークフリー電磁石の設計の問題点を解決するために以下に述べる 4 点の検討を行った。改造後の電磁石を Fig. 4 に示す。①磁気回路の独立性を高め、漏れ磁場を小さくするために F 電磁石にリターンヨークを取り付けた。②漏れ磁場をさらに小さくするために磁気シールドを取り付けた。③水平チューンの変化量を小さくするために、適切な形状となっていない D 電磁石の磁極形状を、基準である F 電磁石の磁極形状と一致させた。④電磁石長さを変化させ、垂直チューンの変化量を小さくするために補正磁極を設置した。補正磁極は半径外側ほど厚みが増加する形状をしており、厚みやテーパの角度は垂直チューンの変化量が最小となるように決定された。

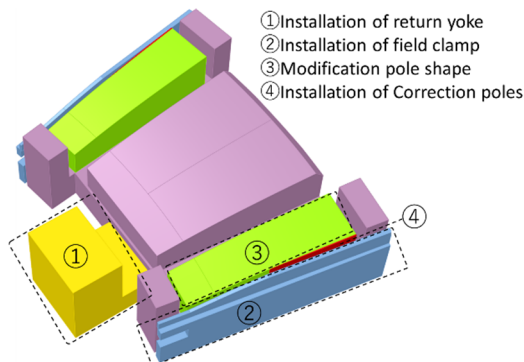


Figure 4: Remodeled magnet.

3. 結果

電磁石改造前後でのチューンの比較結果を Fig. 5 に

示す。改造後の電磁石では、現在所有する電源の仕様に合わせてコイルの電流値を決定しているため、エネルギー範囲が 10 MeV~90 MeV となっている。

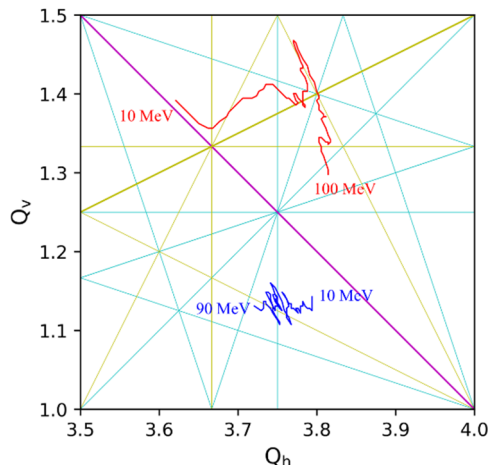


Figure 5: Comparison of betatron tune before and after magnet remodeling.

10 MeV~90 MeV の範囲においてベータトロンチューンの変化量(ΔQ_h , ΔQ_v)は改造前(赤線)の(0.2, 0.13)に対し、改造後(青線)は(0.07, 0.05)まで小さくすることができた。しかし、この計算では入射セプタムなどの機器による COD の影響が考慮されておらず検証が必要である。

電磁石の改造には以下に示す最適化の余地が残されている。F 電磁石と D 電磁石の形状を独立に変更する。また、補正磁極の形状は半径に関して一定の割合で厚みが増加する形状となっているが、エネルギーごとに適した厚みになるように改造することで垂直チューンの変化量をさらに小さくすることができると考えられる。

今後、これらの検討を行った上で実際に 150 MeV FFA 加速器の電磁石の改造を行う予定である。

4. まとめ

150 MeV FFA 加速器のヨークフリー電磁石の設計の問題点を解決するために F 電磁石のリターンヨークの追加、磁気シールドの追加、磁極形状の改造、補正磁極の追加を行った。その結果、10 MeV~90 MeV の範囲においてベータトロンチューンの変化量(ΔQ_h , ΔQ_v)は改造前の(0.2, 0.13)に対し、改造後は(0.07, 0.05)となり、適切に設計することで、ベータトロンチューンの変化量を大幅に小さくすることができた。今後入射セプタムなどの機器などによる COD の影響を調べ、再度追加する構造の形状の最適化を行った上で実際に電磁石の改造を行い、加速器の性能向上を目指す予定である。

参考文献

- [1] K. R. Symon *et al.*, Physical Review, Vol. 103, No.6, pp.1837-1859 (1956).
- [2] Y. Yonemura *et al.*, Proc. of the 17th PASJ, Online September 2-4, 2020, pp.942-943.
- [3] 和賀雄飛, 他, 「FFAG 加速器の垂直方向の集束力補正機構に関する研究」日本原子力学会 2019 年春の大会 茨城大学 2019 年 3 月, 1G08, (2019).
- [4] 高エネルギー加速器研究機構 森義治 FFAG 加速器用電磁石 特開 2003-142299, 2003-0516.