

スケーリング FFAG 加速器におけるヨークフリー電磁石の集束力補正機構の開発 DEVELOPMENT OF DEVICES FOR FOCUSING FORCE CORRECTION FOR SCALING FFAG ACCELERATOR WITH RETURN-YOKE FREE MAGNETS

和賀雄飛^{#, A)}, 米村祐次郎^{A)}, 有馬秀彦^{A)}, 上田光貴^{A)}, 足立恭介^{A)}, 松浦浩巳^{A)}, 池田伸夫^{A)}, 森義治^{B)}
Yuhi Waga^{#, A)}, Yujiro Yonemura^{A)}, Hidehiko Arima^{A)}, Mitsutaka Ueda^{A)}, Kyosuke Adachi^{A)}, Hiromi Matsuura^{A)},
Nobuo Ikeda^{A)}, Yoshiharu Mori^{B)}

^{A)} Kyushu University

^{B)} Kyoto University

Abstract

In the case of scaling FFAG accelerators, the horizontal focusing force is determined by the magnetic field gradient. As a method of correcting the horizontal focusing force of the FFAG accelerator, a new method of adjusting the magnetic field gradient by arranging a plurality of coils having different current values on the magnetic pole surface is proposed at Kyushu University. This method has the feature that by adjusting the current value of each coil, the amount of correction of the focusing force can be adjusted while the accelerator is in operation. In this research, the purpose is verifying the principle of focusing force correction with correction coil and verifying the validity of the design method. Prototype of correction coils are installed for the return-yoke free electromagnets of the 150 MeV FFAG accelerator at Kyushu University and measurement of magnetic field has been done for its performance evaluation. In this paper, the validity of the structure of the correction coil is explained.

1. 背景

DFD triplet ヨークフリー電磁石は、集束電磁石のヨークを取り除くことによって、FFAG 加速器においてビームの入射、取り出しの自由度の飛躍的な向上と電磁石重量の大幅な削減を可能にした[1]。

ヨークフリー電磁石では発散電磁石のリターンヨークの磁気飽和を積極的に利用している。また、集束電磁石と発散電磁石の磁気回路が結合している。したがって、起磁力の変化に対し磁場分布が非線形に変化するという特徴がある。以上の特徴から磁性体の磁気特性はヨークフリー電磁石に発生する磁場と大きく関係していると考えられる。ヨークフリー電磁石の設計時に磁場の調整量を見積もるためには、磁性体の磁気特性の磁場に対する寄与の大きさを評価することが重要であると考えられる。

FFAG 加速器の電磁石は combined function 型であるため起磁力を変更することによって任意の磁場成分のみを補正することができない。そこで FFAG 加速器の水平方向の集束力を調整する手法として、磁極表面に階段状に配置した空芯コイルを用いて複数の磁場成分を補正する手法が提案されている[2]。本手法は加速器運転中に電流値を変更することによって集束力を変更することが可能であるという特徴を持つ。

本研究では、ヨークフリー電磁石において磁性体の磁気特性の磁場に対する寄与を調べた。また、補正コイルのプロトタイプを製作し、磁場測定による集束力補正手法の検証を行った。

2. 原理

2.1 ヨークフリー電磁石

九州大学に設置されている 150 MeV FFAG 加速器[3]

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

の DFD triplet ヨークフリー電磁石の概略図を Fig. 1 に示す。DFD triplet とは 1 セルが発散電磁石、集束電磁石、発散電磁石で構成された電磁石のことである。またヨークフリーとは集束電磁石のリターンヨークを無くした電磁石のことである。本電磁石の磁気回路を Fig. 2 に示す。ただし、 R_r 、 R_D 、 R_F はそれぞれリターンヨーク、発散電磁石、集束電磁石の磁気抵抗を表し、 V_D 、 V_F はそれぞれ発散電磁石、集束電磁石の起磁力を表し、 ϕ_D 、 ϕ_F はそれぞれ発散電磁石、集束電磁石の磁束を表している。

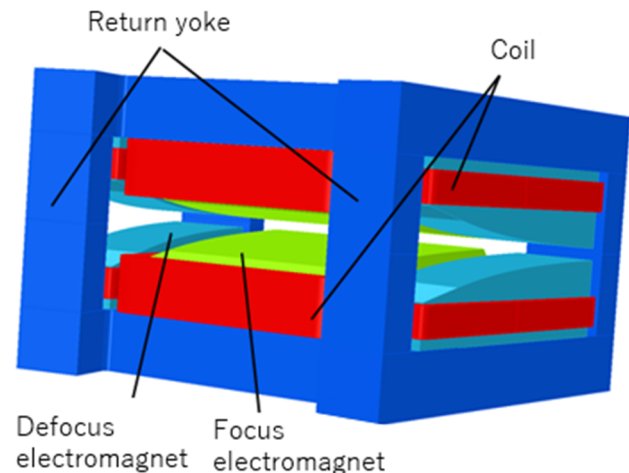


Figure 1: DFD triplet return-yoke free magnet.

Figure 2 に示すように、ヨークフリー型電磁石では集束電磁石のコイルの起磁力 V_F によって発生した磁束線 ϕ_F は初め、発散電磁石間の磁気抵抗 R_D よりもはるかに小さい磁気抵抗 R_r を持つ発散磁石のリターンヨークを通過しようとする。しかし、 ϕ_F がある値以上になると、発散電磁石のリターンヨークは磁気飽和を起こし、磁気抵抗 R_r が上昇する。すると、磁気抵抗 R_r と R_D は同程度の値となり、発散磁石の磁極間に磁束線が通過するようになる。集束

電磁石の磁極間を通る磁束 ϕ_F に対して発散電磁石の磁極間を通過する磁束 ϕ_D が小さい場合は発散電磁石のコイルの起磁力 V_D によって補っている。

以上の特徴から、ヨークフリー電磁石はリターンヨークの磁気抵抗によって磁場分布が大きく変化すると考えられる。磁性体の磁気特性は磁気抵抗と関係がある。ヨークフリー電磁石において磁石を構成する磁性体の磁気特性の磁場に対する寄与の大きさを明らかにするために磁場測定を行った。

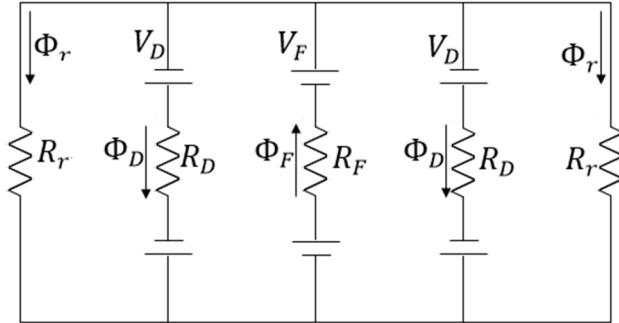


Figure 2: Magnetic circuit of DFD triplet return-yoke free magnet.

2.2 補正コイルによる集束力補正原理

ラジアルセクター型の FFAG 加速器の理想的な磁場は次のように表せられる。

$$B_z = B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k \quad (1)$$

$$k = \frac{r}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial r} \quad (2)$$

k は field index であり、FFAG 加速器では一定値である。Equation (1) を級数展開すると、次のように表される。

$$B_z(r) = B_0 \left[1 + \frac{k}{r_0} (r - r_0) + \frac{k(k-1)}{2r_0^2} (r - r_0)^2 + \dots \right] \quad (3)$$

Equation (3) に示すように FFAG 加速器の磁場は 2 極、4 極、6 極…にわたる複数の磁場成分を含んでいる。本研究で提案されている補正コイルでは複数の磁場成分を補正することが可能である。補正コイルによる水平方向の集束力補正原理の概念図を Fig. 3 に示す。Figure 3 は補正コイルを設置した電磁石の断面図を示しており、コイルの色と補正される磁場の色が対応している。Figure 3 に示すように、まず赤色で表される 1 段目のコイルによって補正領域全体に磁場が増加する。次に黄色で表されるコイルによって半径内側の補正量が不足している領域の磁場が増加する。これを繰り返すことにより磁場を補正する。また、複数のコイルによる補正磁場は 2 極以上の項を含むようになり、各コイルの電流値を調節することによりコイルの数だけ磁場成分を最適化することができると思われる。

FFAG 加速器において水平チューンは次のように表される[4]。

$$v_H \approx \sqrt{1+k} \quad (4)$$

Equation (4)より、 k は集束力に関するパラメータであるが、実際には、 k は周方向で変化するため FFAG 加速器の集束力を表す指標として用いることが難しい。したがって本研究では補正コイルの設計の際、集束力を表す指標として、先行研究によって提案されている実効的な磁場勾配 k_{BL}^{eff} を用いた[5]。 k_{BL}^{eff} は次式で表される。

$$k_{BL}^{eff} = \frac{r}{BL} \frac{\partial BL}{\partial r} - 1 \quad (5)$$

$$BL = \int B_z dl \quad (6)$$

本研究では VECTOR FIELD 社の TOSCA を用いてヨークフリー電磁石の発散電磁石の補正範囲において、 k_{BL}^{eff} が一定の範囲に納まるように補正コイルの段数、起磁力、位置を決定しプロトタイプを製作した。また、補正コイルによる集束力補正手法を検証する目的で磁場測定を行った。

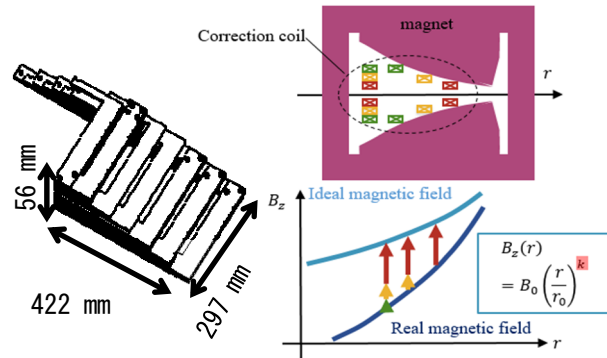


Figure 3: Principle of focusing force correction with correction coils.

3. 磁場測定

ヨークフリー電磁石において発散電磁石の磁場はリターンヨークが磁気飽和することによって発生する。そこで、磁気特性の磁場に対する寄与の大きさを明らかにするために集束電磁石のみ励磁し、発散電磁石の中心付近で起磁力ごとの磁場測定を行った。補正コイルの性能評価を行う目的で、加速器運転条件である集束電磁石のコイルの起磁力が 42860 AT、発散電磁石のコイルの起磁力が 5500 AT の条件で場所ごとの磁場測定を補正がある場合とない場合について行った。補正コイルの設置場所を Fig. 4 に示す。測定範囲の模式図を Fig. 5 に示す。本研究で開発した磁場測定装置を Fig. 6 に示す。150 MeV FFAG 加速器の電磁石はサブミリオーダーで設置されているため、測定の位置の精度も同様の精度となることを目指して開発を行った。本測定装置は二台の直行した電動アクチュエータを駆動させることによってホール素子を平面上で移動させ磁場を測定することができる。測定装置には高さ調節機能と水平調節機能を備えている。本測定ではミディアムプレーン($z=0$)上の磁場測定を行った。

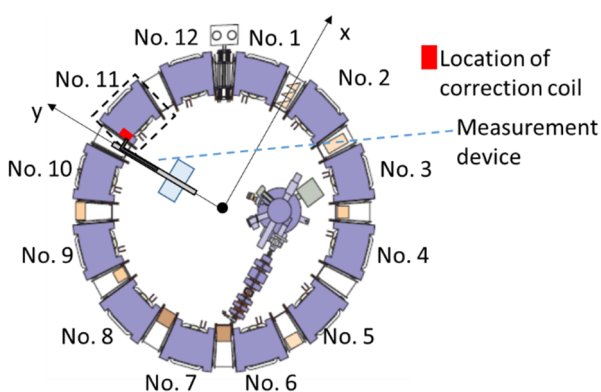


Figure 4: Measurement magnetic field system.

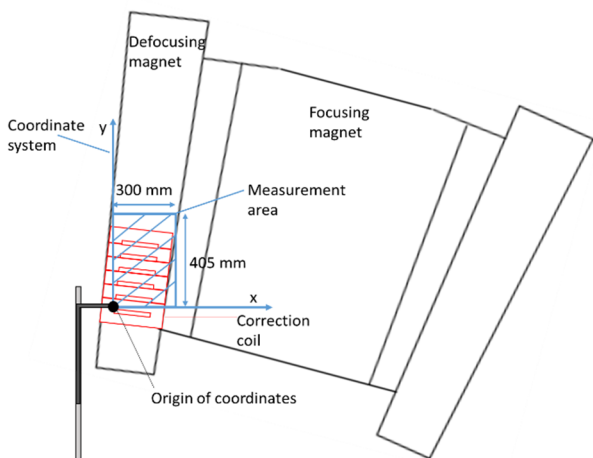


Figure 5: Measurement area.

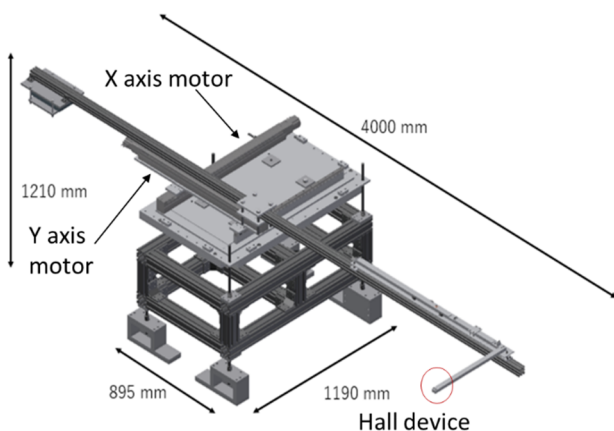


Figure 6: Measurement device.

ホール素子加速器平面上での設置精度は三角測量を用いた測定より $x=1.0\text{ mm}$, $y=1.2\text{ mm}$ であった。また z 方向の位置決定は太さ 0.2 mm 水平ケガキ線と加速器平面が一致するように行った。そのため設置精度は $z=\pm 0.2\text{ mm}$ となっている。ホール素子は Group 3 社製のものを使用した。設計時と実験時における補正コイルの電流値を Table 1 に示す。実験では電源台数の制約上、設計と同じ電流を補正コイルに流すことができなかったため、

実験的に磁場勾配が一定に近づくように各コイルへの電流値を決定した。

Table 1: Current in Correction Coil

上部からの段数	設計におけるコイルの電流値	実験におけるコイルの電流値
1	$420 \times 2\text{ AT}$	$260 \times 2\text{ AT}$
2	$420 \times 1\text{ AT}$	$260 \times 1\text{ AT}$
3	$420 \times 1\text{ AT}$	$260 \times 1\text{ AT}$
4	$184 \times 2\text{ AT}$	$110 \times 2\text{ AT}$
5	$122 \times 2\text{ AT}$	$110 \times 2\text{ AT}$
6	$75 \times 2\text{ AT}$	$25 \times 2\text{ AT}$

4. 磁場測定結果

集束電磁石のみ励磁して発散電磁石の磁場を起磁力ごとに測定した結果を Fig. 7 に示す。ただし、測定点は Fig. 5 に示す測定領域における $x=150\text{ mm}$, $y=405\text{ mm}$ の点である。

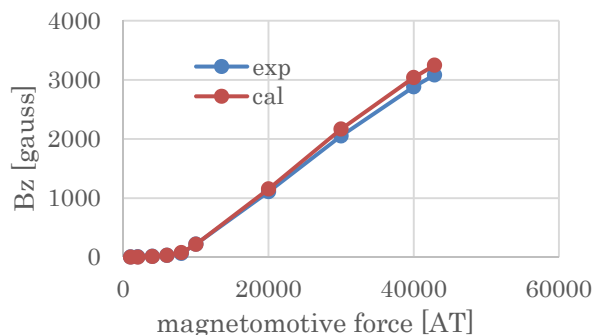


Figure 7: Variation of measured magnetic field relating to variation of magnetomotive force.

Figure 7 より、8000 AT 付近でグラフの傾きが変化しているため、リターンヨークが磁気飽和していることがわかった。また、磁場計算結果と測定結果との比較を行った結果、磁気飽和を起こした後のグラフの傾きが異なっていることがわかった。

補正コイルを設置し、加速器運転条件の集束電磁石のコイルの起磁力が 42860 AT 、発散電磁石のコイルの起磁力が 5500 AT で励磁を行い、磁場分布の測定を行った。結果を Fig. 8 に示す。また、Fig. 8 において補正後と補正前の差をプロットした結果を Fig. 9 に示す。Figure 8 及び Fig. 9 より、補正コイルによって補正された磁場は滑らかであることがわかった。したがって、 $z=0$ においては補正コイルの段差の影響はないことがわかった。これは、補正コイルの各段において幅の広い銅板が用いられているために、コイルに発生する磁場がコイルの内側と外側で滑らかに変化するためではないかと推察される。したがって、各段のコイルの断面の形状が変化した場合のコイルに発生する磁場の変化を検証する必要があると考えられる。

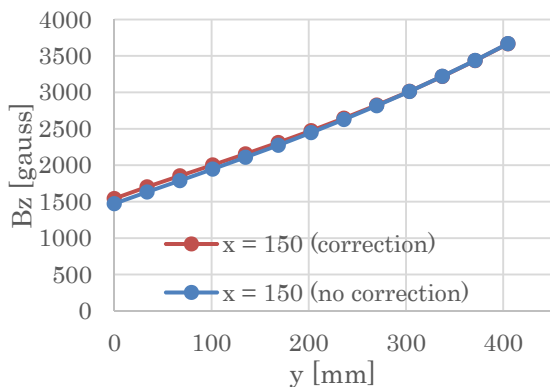


Figure 8: Variation of Measured magnetic field relating to measured point.

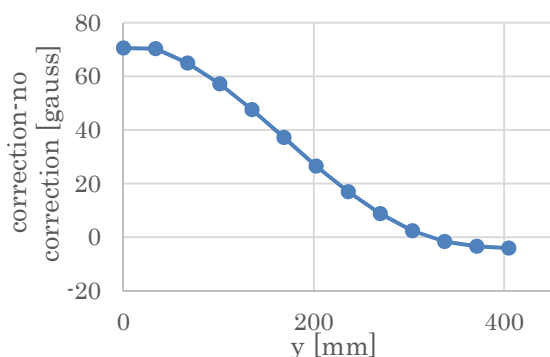


Figure 9: Amount of increase of B_z .

磁場測定結果から得られた発散電磁石中心の k 値を Fig. 10 に示す。ただし、 k 値は測定結果から補間を用いて半径方向の磁場分布を求め、Eq. (2)を用いて計算を行った。

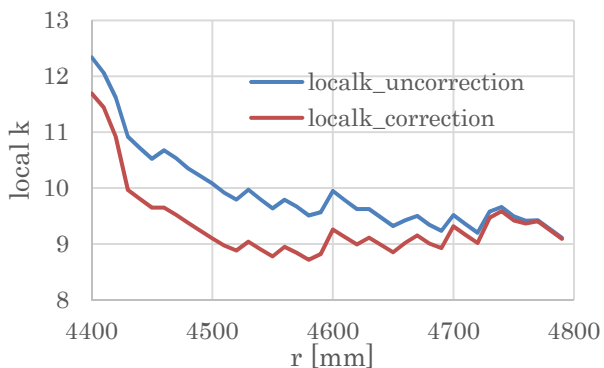


Figure 10: Local k .

Figure 10 より、補正コイルにより k 値を補正できることが実験的に確かめられた。データが半径によって細かく変動しているのは測定点の間隔が x 方向に 25.00 mm, y 方向に 33.75 mm と広いために補間を行った際の誤差が大きくなってしまったためであると考えられる。

5. 磁気特性の磁場に対する寄与

ヨークフリー電磁石において磁性体の磁気特性の変化の磁場に対する寄与を調べるため、モデル化した磁

性体の BH カーブを変化させ、三次元磁場計算を行った。計算で用いた BH カーブのモデルを Fig. 11 に示す。

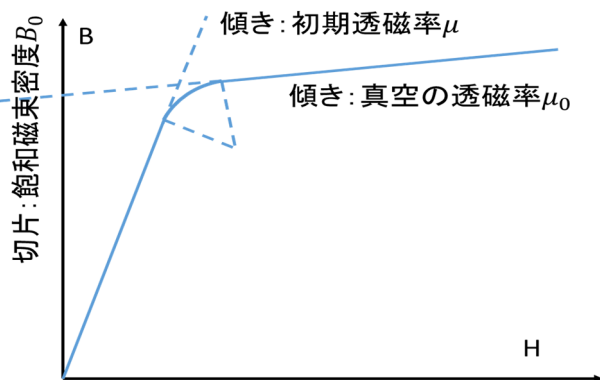


Figure 11: BH curve model.

Figure 11 に示すモデルは、原点を通り初期透磁率 μ_0 の傾きをもつ直線と $H=0$ で飽和磁束密度 B_0 を通り真空の透磁率 μ の傾きを持つ直線を円弧で滑らかにつないだものである。ヨークを構成する磁性体の BH カーブの飽和磁束密度を変更して計算を行った結果を Fig. 12 に示す。

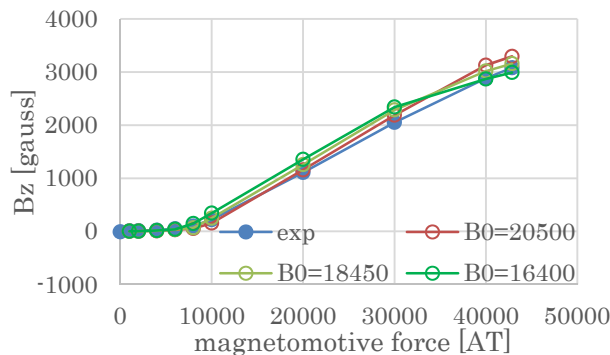


Figure 12: Simulation results on condition that BH curve of yoke is changed.

Figure 12 より、飽和磁束密度が $B_0 = 18450$ gauss の場合と $B_0 = 16400$ gauss の場合 30000 AT 付近でも傾きが変化している。Figure 2 に示す磁気回路より、飽和磁束密度が下がることによって発散電磁石の磁場が下がるということは、ストレートセクションに漏れる磁場が増加した可能性が考えられる。また、リターンヨークと同じ磁性体で構成されている場所は天板のみであるため、磁気飽和した場所は天板であると考えられる。また、リターンヨークが磁気飽和をする起磁力である 8000 AT における測定結果は $B_0 = 18450$ の場合と $B_0 = 16400$ gauss の間にとどまっている。しかし、飽和磁束密度の変化によって傾きはほとんど変化しないため、飽和磁束密度の変化のみでは実験と計算の差を説明することはできないと考えられる。リターンヨークを構成する磁性体の飽和磁束密度以外の要因としては初期透磁率や磁極を構成する磁性体の飽和磁束密度や初期透磁率が考えられるためさらなる検証が必要である。

6. まとめ

補正コイルのプロトタイプ製作を行い、補正コイルを用いた集束力補正手法の原理検証を行う目的で 150 MeV FFAG 加速器のヨークフリー電磁石の一部に設置した状態で磁場測定を行った。その結果、スケーリング FFAG 加速器の集束力の評価指標である k 値が補正できていることが確認できた。

スケーリング FFAG 加速器に使用されているヨークフリー電磁石において磁石を構成する磁性体の磁気特性の磁場に対する寄与の大きさを明らかにするために起磁力ごとの磁場測定を行った。測定結果と三次元磁場計算結果を比較した結果、リターンヨークの飽和磁束密度の変化によってリターンヨークが磁気飽和を起こす時の磁束密度の計算値と測定値におけるずれは説明できたが、リターンヨークが飽和している領域における測定値と計算値の差を説明できなかった。リターンヨークを構成する磁性体の飽和磁束密度以外の要因としては初期透磁率や磁極を構成する磁性体の飽和磁束密度や初期透磁率が考えられるため検証が必要である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 上田光貴, 九州大学工学研究科エネルギー量子工学専攻修士論文 (2018).
- [3] T. Yokoi *et al.*, Proc. Of PAC 2003, pp3452-3454.
- [4] K. R. Symon *et al.*, Physical Review, Vol. 103, No.6, pp.1837-1859 (1956).
- [5] 沖田英史, 九州大学工学研究科エネルギー量子工学専攻修士論文 (2016).