

大アクセプタンス Spiral FFAG 加速器の電磁石の設計手法に関する研究

MAGNET DESIGN FOR LARGE ACCEPTANCE SPIRAL FFAG ACCELERATOR

○ 沖田英史^{#,A)}, 有馬秀彦^{A)}, 米村祐次郎^{A)}, 池田伸夫^{A)},
本橋直也^{A)}, 上田光貴^{A)}, 黒岩健宏^{A)}, 森義治^{B)}

Hidefumi Okita^{#,A)}, Hidehiko Arima^{A)}, Yujiro Yonemura^{A)}, Nobuo Ikeda^{A)},
Naoya Motohashi^{A)}, Mitsutaka Ueda^{A)}, Takehiro Kuroiwa^{A)}, Yoshiharu Mori^{B)}

^{A)} Kyushu University, ^{B)} Kyoto University

Abstract

A new scheme for designing a spiral type of FFAG accelerator with the simpler matching technique to satisfy the requirement of 3D magnetic field rather than that of the ordinary one is reported. Optimizations of “local k” and “effective packing factor” are important to control tune variations. In this paper, details of the optimization procedure in this scheme are described for designing the 400 MeV spiral FFAG accelerator which is under discussion at Kyushu University.

1. はじめに

固定磁場強集束 (FFAG) 加速器^[1]は大きな横方向のアクセプタンスを持ち、速い繰り返し運転が可能であるため、大強度陽子ビームの生成に適した特徴を有している。中でも spiral sector 型 FFAG (Spiral FFAG) 加速器は加速器の小型化という観点から優れた特徴を有している。

Spiral FFAG 加速器は垂直方向の集束作用をエッジフォーカスのみで得ている。そのため、大きなアクセプタンスを確保するために磁極間隙を広くした場合、端部磁場の漏れが大きくなり、FFAG 加速器に必要な光学条件である零色収差を満たさず、vertical tune が大きく変化するという課題があった。

磁場を補正するために、フィールドクランプやチャンファー (chamfer) を用いた最適化が一般的に採用されている^[2]。chamfer はスパイラル磁極端部の形状を複数のパラメータを用いて変形させるものであるが、磁石の設計や磁極形状が複雑になるという問題がある。本研究では、chamfer を用いずフィールドクランプと磁極の形状の最適化による適切な磁場補正の実現で磁石形状や設計手法をより単純にすることを目標とし、局所的な磁場勾配 (local k)^[3]と実効的な磁石の占有率 (effective packing factor) をパラメータとした新しい設計手法を提案し、その設計手法の有用性を 400 MeV Spiral FFAG 加速器の設計において検証した。

2. Spiral FFAG 加速器

Spiral FFAG 加速器はスパイラル形状の磁石を導入することで、すべての磁石に同一の偏向角を持たせながら磁石への入射角と出射角を大きく取ること、強い集束力と発散力を生み出し強集束を実現する。円筒座標系における Spiral FFAG 加速器の磁場分布は(1)式によって表される。

$$B(r, \theta) = B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k \times \left\{ 1 + \sum F_n \cos \left[nN \left(\theta - \tan \zeta \ln \frac{r}{r_0} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

ここで、 N は磁場分布の円周方向の周期、すなわちセル数であり、 ζ はスパイラル角度、 F は flutter factor である。

スパイラル角度がゼロ度で集束・発散電磁石から構成される radial sector 型 FFAG 加速器に比べ、Spiral FFAG 加速器はすべての磁石の偏向角が同じ向きであるため、加速器全体の大きさを小さくすることができるという利点を持つ。

3. スパイラル磁石の設計手法

3.1 光学設計 (線形近似計算)

FFAG 加速器の集束系は、ある集束力と発散力を持った線形の集束系で近似することができる^[4]。そのため、FFAG 加速器においても従来のシンクロトロン加速器の初期設計で用いられる線形近似計算で光学設計を行うことが可能である。

Figure 1 に Spiral FFAG 加速器の線形近似計算に用いた体系を示す。Figure 1 の $2L$ は加速器直線部の距離、 r_1, r_2 はそれぞれスパイラル磁石入口、中心でのビーム軌道半径、 ϵ_1, ϵ_2 はエッジ角度である。

これらのパラメータは幾何学的関係から以下の(2)式から(6)式のように表すことができる。式中の ρ は曲率半径であり、 pf は packing factor と呼ばれ加速器一周あたりの磁石の占有率を表す。

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

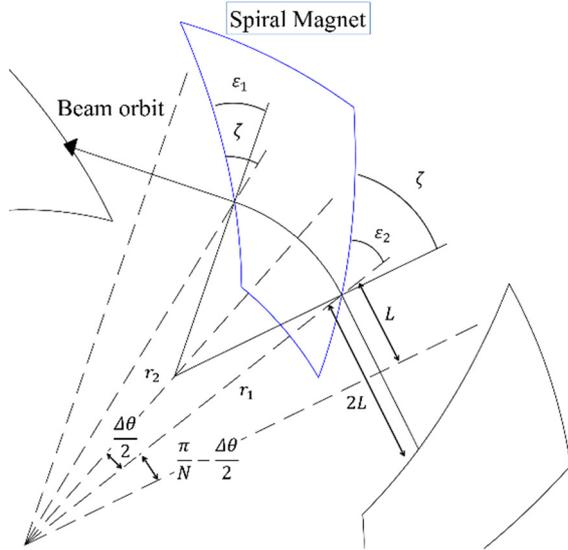


Figure 1: Schematic view of one spiral sector cell.

$$\varepsilon_1 = \pi/N - pf \times \pi/N - \zeta \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \pi/N - pf \times \pi/N + \zeta \quad (3)$$

$$r_1/\rho = \sin(\pi/N)/\sin(pf \times \pi/N) \quad (4)$$

$$r_2/\rho = 1 + \frac{\sin(\pi/N(1 - pf))}{\sin(pf \times \pi/N)} \quad (5)$$

$$L/\rho = \sin(\pi/N) \times \frac{\sin(\pi/N - pf \times \pi/N)}{\sin(pf \times \pi/N)} \quad (6)$$

Spiral FFAG 加速器において線形近似計算から決定される主なパラメータの一つに pf 値がある。始めに取り出しの運動量 p 、取り出し軌道における最大磁場 B を加速器の要請として与えることで ρ を(7)式から決定し、更に取り出し軌道の半径 r_2 、セル数 N を与えることで(5)式から pf は一意に決まる。ここで、(7)式中の c は光速を表す。

$$\rho = \frac{p}{Bc} \quad (7)$$

近似式(8)、(9)式で明らかのように、Figure 1 中に示したパラメータ ζ と磁場勾配を表す k 値により水平、垂直方向の tune (ν_H, ν_v) は大きく変化する。

$$\nu_H \cong \sqrt{k+1} \quad (8)$$

$$\nu_v \cong \sqrt{-k + F(1 + 2\tan^2 \zeta)} \quad (9)$$

ζ と k 値は加速器の光学的安定条件やオペレーションポイントを考慮しながら決定する必要がある。

3.2 磁石の二次元構造の決定

(8)、(9)式から分かるように、零色収差を満たすためには k 値が運動量に依らず一定という事が望まれる。一方で磁石端部において磁気飽和を起す磁石では、その周辺において局所的な磁場勾配 (local k) が下がることが知られており、その補正に磁極端形状の最適化が良く行われる。^[6]

本研究においてもこの手法を採用し、二次元磁場計算から local k が設計値通りになるよう磁極端形状を決定した。

3.3 実効的な packing factor を導入したスパイラル磁石の三次元構造設計

スパイラル磁石の磁極間隙は半径内側ほど大きい。そのため端部磁場の漏れが半径内側ほど大きくなり BL 積が光学設計で決定した値から離れ、vertical tune の値が設計値からずれる。加速中の vertical tune の変化を制御するためには、BL 積を光学設計値と一致させるように磁石を設計する必要がある。本研究では、実効的な packing factor (pf_{eff}) を定義し、これを用いて設計を行った。

スパイラル磁石においてビームの垂直方向に与える集束作用は入口側と出口側で逆であるため、Figure 2 に示すようにスパイラル磁極を中心で分け、ビームが磁石へ入る側 (pf_{ent}^{eff}) とビームが磁石を出る側 (pf_{exit}^{eff}) の二つの領域に分けて、各々が光学設計値で決定した $pf(pf_{opt})$ と一致するように磁石の最適化を行った。

$$L_{ent}^{eff} = \frac{\int_a^b Bz dl}{Bz(r_b, \theta_b, 0)} \quad (10)$$

$$L_{exit}^{eff} = \frac{\int_b^c Bz dl}{Bz(r_b, \theta_b, 0)} \quad (11)$$

$$pf_{ent \text{ or } exit}^{eff} = \left(\frac{1}{\pi/N} \right) \sin^{-1} \left(\frac{L_{ent \text{ or } exit}^{eff} \sin(\pi/N)}{r_1(\pi/N)} \right) \quad (12)$$

$$pf_{total}^{eff} = \left(\frac{1}{\pi/N} \right) \sin^{-1} \left(\frac{(L_{ent}^{eff} + L_{exit}^{eff}) \sin(\pi/N)}{r_1(\pi/N)} \right) \quad (13)$$

ここで、式中の L^{eff} は磁場実効長である。

従来の設計手法では、BL 積を光学設計値と一致させるために、chamfer を用いて半径外側において狭くなる磁極から端部磁場を積極的に漏らしていた。本設計手法においては、 pf_{eff} をパラメータとし磁極形状が複雑になる chamfer を用いず、磁石の側面に装着するフィールドクランプの形状を最適化することで磁石の設計を行う。本研究では以下の4つの手順に従いスパイラル磁石の三次元構造設計を行った。

- Step 1: 光学設計と二次元構造設計を基として磁石の設計を行う。
- Step 2: 磁石の両側に高さ一定のフィールドクランプを装着し pf_{ent}^{eff} 、 pf_{exit}^{eff} を半径方向において一定にする。
- Step 3: pf_{opt} と大きく異なる pf_{eff} を pf_{opt} に近づけるため、スパイラル磁石の大きさ (pf) を変更する。 pf を変更する際は、入口側 pf_{ent} と出

口側 pf_{exit} の二つに分けて、以下の式に基づき各々の磁石形状を変更する。

$$pf_{ent\ or\ exit}^{eff} = pf_{opt} + (pf_{opt} - pf_{ent\ or\ exit}^{eff}) \quad (14)$$

- Step 4 :局所的に pf_{opt} と異なる $pf_{ent\ or\ exit}^{eff}$ を補正するためにフィールドクランプの形状を最適化する。

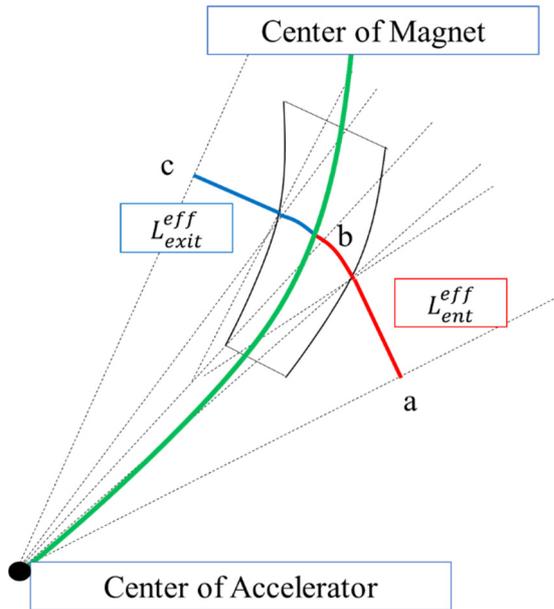


Figure 2 : Schematic view of integration path of effective length.

4. 400 MeV Spiral FFAG 加速器の設計

3章で提案した設計手法に基づき 400 MeV Spiral FFAG 加速器の設計を行った。

4.1 400 MeV Spiral FFAG 加速器のラティスの決定

400 MeV Spiral FFAG 加速器は九州大学加速器ビーム応用科学センターへの導入を想定し、入射器として既存の 150 MeV FFAG 加速器を想定し、陽子ビームの入出射のエネルギーをそれぞれ 100 [MeV] と 400 [MeV] に設定した。加速器のサイズは設置スペースの関係から最外半径を 5.5 [m] 以下とし、磁場は常伝導磁石を想定し、1.55 [T] 以下とした。また、ビームの入出射の利便性から、Horizontal 方向 1セルあたりの位相進みを 90 度付近に設定した。

以上の条件の下で設計を行い、決定した加速器のパラメータおよび Tune Diagram 上のオペレーションポイントをそれぞれ Table 1 と Figure 3 に示す。また、400 MeV Spiral FFAG 加速器を九州大学加速器ビーム応用科学センターに設置した際の想定図を Figure 4

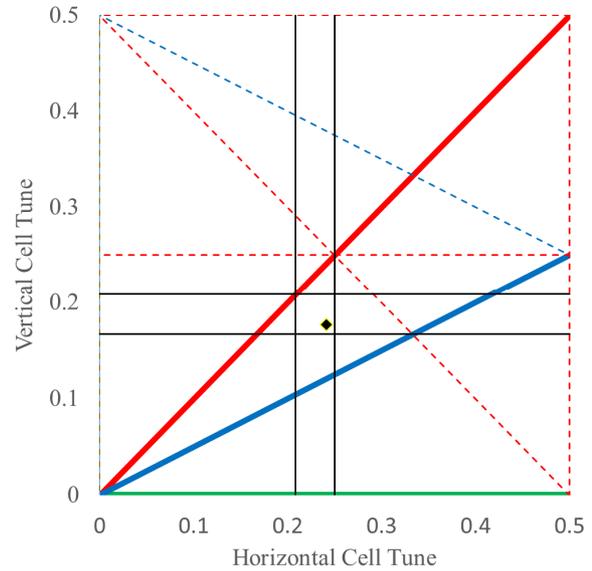


Figure 3: Operation point on tune diagram.

Table 1: Lattice Parameters of 400 MeV Spiral FFAG

Max. Radius of Magnet	5.45 [m]
Injection/Extraction Radius	4.15 [m] / 4.63 [m]
Injection/Extraction Energy	100 [MeV] / 400 [MeV]
Momentum Ratio	2.15
Cell Number : N	12
Max. Magnetic Field	1.55 [T]
Packing Factor : pf	0.44
Field Index : k	6.0
Spiral Angle : ζ	59.0 [deg.]
Horizontal Cell Tune	0.241
Vertical Cell Tune	0.176

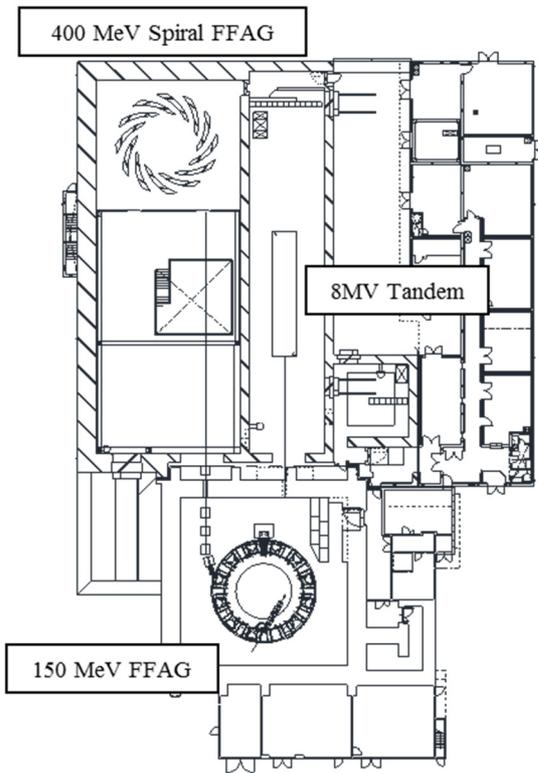


Figure 4: Possible location of 400 MeV Spiral FFAG at Center for Accelerator and Beam Applied Science at Kyushu University.

4.2 二次元磁場計算による磁極形状の決定

次に、二次元静磁場解析コード POISSON を用いて二次元磁場計算を行い、磁極端形状を決定した。

本研究では、ログスキーカットの原理を応用し磁極端を45度の角度でカットする手法を採用し、磁極端(半径485 [cm])からの長さをパラメータとして変化させた。長さ5,10,15 [cm]の結果をFigure 5に示す。磁極端のカットが磁極終端から5 [cm]~10 [cm]の範囲にあるとき取り出し軌道465 [cm]において local k は設計値である 6.0 に近いという結果が得られた。磁極端のカットの幅 10 [cm] を採用し以後の設計を進めることにした。なお、三次元磁場計算(TOSCA)コードを用いて local k を計算し、Figure 5に示す通り二次元磁場計算とほぼ一致していることを確認している。

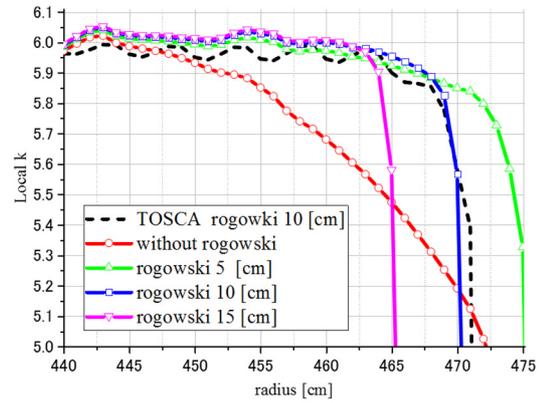


Figure 5: Local k as a function of radius at 440-475 [cm] for different widths of pole cut.

4.3 400 MeV Spiral FFAG 加速器の磁石の三次元構造設計

次に 3.3 節で提案した設計手法に従い 400 MeV Spiral FFAG 加速器の磁石の三次元構造設計を行った。磁場計算には、OPERA-3D の TOSCA を用いた。

始めに光学設計と二次元磁場計算で決定したパラメータを用いてスパイラル磁石の設計を行った。(Step 1)。この体系でエネルギーを変えながらトラッキングを行い、各エネルギーにおける pf_{eff} と tune を計算した結果を Figure 6 と Figure 7 の中の破線に示している。端部磁場の影響で pf_{eff} が光学設計値 ($pf_{opt} = 0.44$) と大きく異なり、かつ半径が小さくなるに従い pf_{ent}^{eff} と pf_{exit}^{eff} は共に pf_{opt} から離れていく。そのため、vertical tune は急激に減少し、240 MeV 以下で垂直方向のビーム運動の安定性が失われることが分かった。

次に、3.3 節で示した手法を用いて磁石の設計を行った(Step 1~4)。半径外側・出口側においてフィールドクランプを取り外した結果、 pf_{ent}^{eff} と pf_{exit}^{eff} がそれぞれ pf_{opt} に最も一致する解が得られた。この体系における pf_{eff} と tune の計算結果をそれぞれ Figure 6 と Figure 7 の実線に示す。

これらから、horizontal tune は local k を一定に、vertical tune は local k が一定の下、 f_{ent}^{eff} と pf_{exit}^{eff} を一定にすることで、その変化を補正することができることが分かった。この結果から、local k と pf_{eff} の二つパラメータのみで、Spiral FFAG 加速器の設計が可能であることが示された。

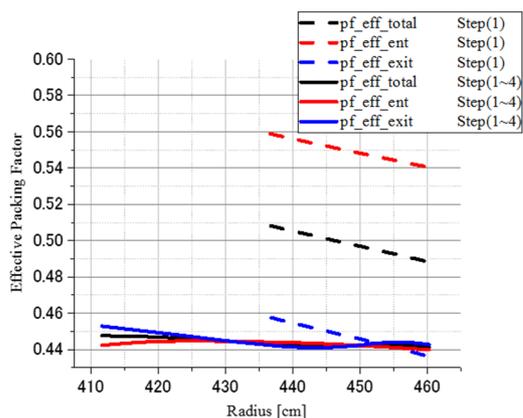


Figure 6: Calculated effective packing factor (Step 1, Step 1~4).

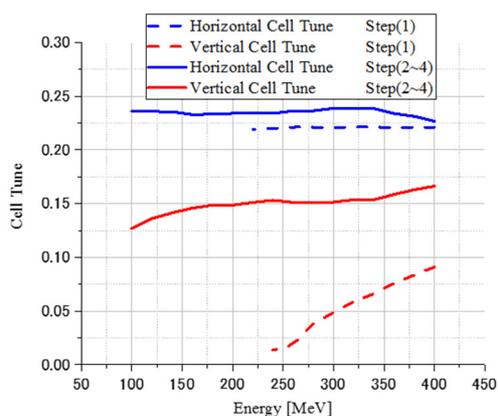


Figure 7: Horizontal and vertical cell tune with energy [MeV] (Step 1, Step 1~4).

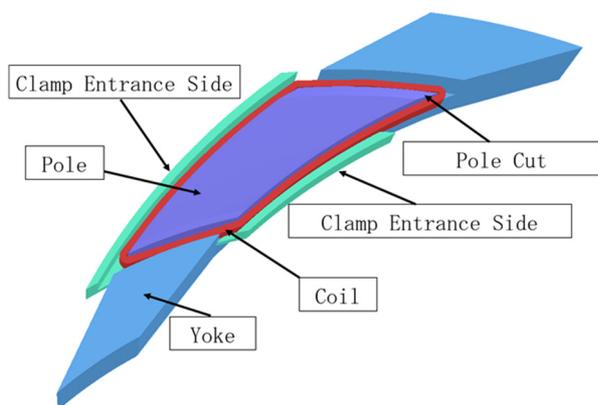


Figure 8: Geometry of spiral magnet (Step 1~4).

5. まとめ

実効的な磁石の占有率 (effective packing factor) と局所的な磁場勾配 (local k) をパラメータとした設計手法を提案し、その設計手法の有用性を 400 MeV Spiral FFAG 加速器の設計において検証した。

その結果、二つのパラメータを運動量に依らず一定になるようにフィールドクランプと磁極形状の最適化をすることで、零色収差を満たす Spiral FFAG 加速器の設計が可能であることが示された。またこのとき、磁石の形状を単純化することができた。

今後は取り出しエネルギーを 500 MeV に引き上げた 500 MeV Spiral FFAG 加速器の設計を行う予定である。

参考文献

- [1] K. R. Symon, et al., "Fixed Field Alternating Gradient Accelerators", Phys. Rev. 98, pp. 1152-1153, 1955.
- [2] T. Planche, et al., "Design of prototype gap shaping spiral dipole for variable energy protontherapy FFAG", Nucl. Instr. Meth. A. 604, pp. 435-442, 2009.
- [3] M. Yoshimoto, et al., "Magnet design study for the FFAG Accelerator", IEEE Trans. Appl. Supercond. 14, pp. 397-401, Jun, 2004
- [4] Y. Mori, "FFAG シンクロトロン加速器の開発研究", 平成 12 年度日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業 ファジビリティスタディ研究成果報告書, Apr. 2001.
- [5] Y. Yonemura, et al., "Present status of center for accelerator and beam applied science of Kyushu University", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, pp. 364-368, Aug. 9-11, 2014.
- [6] T. Yokoi, "FFAG 加速器", OHO'03 高エネルギー加速器セミナーテキスト, 2003.