

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12538

研究課題名（和文）垂直軌道変位固定磁場加速器VFFAの原理検証機用電磁石の開発

研究課題名（英文）Development of electromagnets for proof of principle of vertical orbit excursion fixed field accelerator

研究代表者

有馬 秀彦（Arima, Hidehiko）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：20253495

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：新方式による高エネルギー大強度円型加速器の実現に不可欠な、未だ開発例のない垂直軌道変位固定磁場加速器（VFFA）の原理検証に向けて、VFFA集束系を構成する電磁石設計手法の構築を目指した。世界初のVFFA原理検証機となる電子VFFA開発のため、多段コイルによって構成されるマルチコイル型電磁石を採用した。数セル分の電磁石で構成した集束系において、磁石間の漏れ磁場を含む3次元磁場測定を行い、安定なビーム軌道を得るための最適な電流分布を決定する設計手法の確立に取り組んだ。今後のビーム輸送実験をはじめとするVFFA原理検証実験につながる電磁石設計のための基礎データを得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速に伴いビーム軌道が垂直に移動する円型加速器であるVFFAの原理検証は未だ前例がない。VFFAの原理検証にはビーム進行方向に対し垂直方向に指数関数的に変化していく複雑な磁場分布を有する電磁石を開発する必要があり、そのような電磁石開発例も報告されていない。VFFA電磁石の設計手法の構築や、磁石間の漏れ磁場や水平及び垂直方向の軌道の結合を考慮したビーム軌道解析により得られる成果は、VFFAの原理検証につながる基礎データの取得につながり、VFFA原理検証機開発研究の進展はもちろん、将来の高エネルギー大強度円型加速器実現への寄与のみならずその利用による波及効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：We aimed to develop a magnet design method for the VFFA focusing system in order to verify the principle of the Vertical orbit excursion Fixed Field Accelerator (VFFA), which is indispensable for the realization of a new type of high-energy, high-intensity circular accelerator. To develop an electron VFFA, which is the world's first VFFA proof-of-principle machine, a multi-coil type magnet composed of multiple coils was adopted. In the focusing system consisting of several cells of magnets, we measured the three-dimensional magnetic field including the leakage field between magnets and established a design method to determine the optimum current distribution to obtain a stable beam orbit. We obtained basic data for magnet design that will lead to future beam transport experiments and other VFFA proof-of-principle experiments.

研究分野：加速器工学

キーワード：電磁石開発 磁場測定 軌道解析 垂直軌道推移 固定磁場 円型加速器

1. 研究開始当初の背景

ミュオンなどの大強度二次ビーム生成を可能にする大強度高エネルギー加速器の実現には、従来の加速器にはない新方式に基づく加速器の開発が望まれている。理想的には、固定磁場、固定加速周波数、縦・横方向双方に強集束作用を有する加速器が望ましいが、現在これらの機能を全て有する加速器は存在しない。我々の研究グループでは、上述した特長を有する加速器として、新方式円型加速器「ハーモニートロン」を提案し、その原理実証を目指し研究を行っている[1]。

ハーモニートロンでは、ビーム集束系に垂直軌道変位固定磁場加速器(VFFA)を採用している。VFFAは加速に伴う軌道変位が垂直方向であるため周長が不変となり、従来の円型加速器とは異なりトランジションエネルギーが原理上発生しないことが利点である。VFFAの原理は1950年代に考案[2]されていたが、原理実証機が未だ存在しないため、ハーモニートロンの実現にはVFFAの原理実証が不可欠となっている。2010年代にVFFAの利点に着目した研究論文が発表[3]され、国内外の研究グループによりVFFA原理実証に向けた関連研究が行われている[4]。

[1] Y. Mori et al., *Memoirs Fac. Eng. Kyushu Univ.*, vol.77, p.1-13 (2017).

[2] T. Ohkawa, *Phys. Rev.* vol.100, p.1247 (1955).

[3] S. Brooks, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol.16, 084001 (2013).

[4] S. Machida et al., *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol.24, 021601 (2021).

2. 研究の目的

VFFAは通常の加速器に用いられない、磁場のねじれ成分であるスキュー磁場成分を積極的に利用している。スキュー磁場成分によって複雑化する粒子の運動は設計を困難にし、電磁石設計には未確立な部分が多いため、現在原理実証に至っていない。未だ開発例のないVFFA原理実証のためには、垂直方向に磁場が変化する特殊な磁場分布を発生させる電磁石の開発が不可欠である。本研究では、VFFA用電磁石で構成される集束系を開発する際の電磁石設計の指針を得ることを目的とした。水平および垂直方向、ビーム進行方向、それぞれの磁場成分を考慮した磁石設計を行い、試作した電磁石について実施した磁場測定の結果を軌道シミュレーションに反映させた場合のビーム挙動等を明らかにすることも目指す。

3. 研究の方法

本研究では、VFFA原理検証機として数十keV電子の加速を目標にリング光学設計を行い、磁場勾配などの主要パラメータに対しビーム安定性の評価を行った。集束系はスキュー成分を持つ特殊な磁石から構成する必要があるが、薄肉レンズ近似したスキュー四極電磁石とノーマル二極電磁石を交互に仮想配置することで、スキュー磁場成分を含むVFFA電磁石の転送行列を近似的に導出し、転送行列を用いた光学設計を行った。

電磁石には、複数のコイルを用いて磁場勾配を生成するマルチコイル型電磁石を採用した。VFFAに求められる指数関数分布の磁場勾配は一定値となる必要があるが、スキュー磁場成分を含むVFFAにおいては、XY方向の結合による複雑な粒子の運動や磁場分布を考慮する必要がある。本研究では、閉軌道から導出する実効的磁場勾配を新たな設計指標として提案した。

3次元磁場解析コードによる電磁石の設計後、試作した電磁石(図1)から構成される集束系について、磁石間での漏れ磁場などのビームへの影響を評価するためLabVIEW等の自動制御による3次元磁場測定を行い、3軸磁場成分の評価を行った(図2)。

軌道シミュレーション結果により求めた各コイルの電流分布を初期値として、新たな設計指標として導出した実効的磁場勾配を設計値と比較し、その手法の妥当性を評価した。



図1 VFFA用マルチコイル型電磁石



図2 VFFA集束系と磁場測定装置

4. 研究成果

本研究課題において得られた成果を以下に示す。

(1) VFFA 原理検証機の光学設計

VFFA 原理実証機の光学設計には、転送行列を用いた軌道解析法を使用した。電磁石はセクター型とし、FD シングレット集束系を採用した。セクター電磁石の場合、設計軌道上の磁場が垂直成分のみとなり、垂直方向へ軌道がキックされないため設計軌道が閉じる。この特徴は、曲率半径を一定に保ったまま加速と共に軌道が垂直方向に変化する VFFA において利点となる。

本研究では VFFA 原理検証機の対象粒子として数十 keV 電子を選択した。VFFA 電磁石において垂直 (y) 方向にスケーリング則を満たすために要求される磁場分布は、 $B_y = B_0 \exp(my)$ で表される。m は磁場勾配の指標である。スキュー磁場成分を考慮した線形近似を用いて VFFA 原理検証機におけるビーム安定性を評価した結果を図 3 に示す。安定領域において磁場勾配 m を 4、集束電磁石と発散電磁石との磁場強度比 (FD 比) を 2.75 に選択し、VFFA 原理検証機用集束系の光学パラメータを決定した。

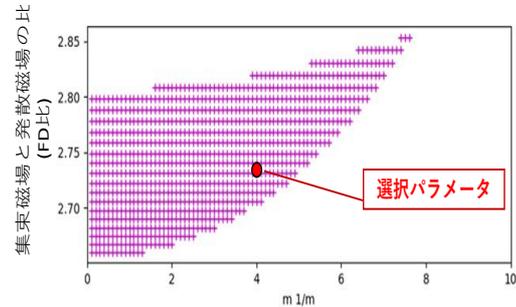


図 3 線形近似による安定領域

(2) 電磁石開発

開発中の VFFA 原理検証機において集束系電磁石の磁場分布を生成する方式として、磁極形状により生成するのではなく、コイルを多段に配置して生成させる方式 (マルチコイル型電磁石) を採用した。マルチコイル型電磁石では、ビーム実験中においても磁石の任意の領域において磁場強度、磁場勾配の微調整が可能となる。

マルチコイル型電磁石の優位性を調べるため、磁場解析コード (OPERA-3D) を使用して解析を行った。コイルは手動により製作可能な簡易構造とし、段数を 9 とした電磁石を試作し、簡易磁場測定を行った。図 4 に示すように、各電流値を調整することにより、各コイルから生成された磁場の重ね合わせにより、所定の磁場勾配を得られることがわかった。この結果を踏まえ、VFFA 集束系を構築するための電磁石 (図 1) を製作した。

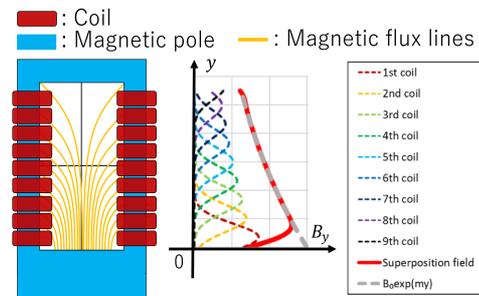


図 4 マルチコイル型電磁石と磁場分布

(3) 磁場分布測定、磁場勾配の導出 (電磁石設計手法の評価)

VFFA 原理検証機において世界初のビーム周回を成功させるためには、VFFA 集束系において VFFA 特有の複雑な磁場中をビームが安定に周回させることが重要である。そのためには磁石単体ではなく、実際の集束系として配置した磁石間の磁場分布も精度よく把握しておく必要がある。本研究では、隣接する磁石からの漏れ磁場も考慮した磁場分布を取得するため、電磁石を 3 セル分設置することで構築することとした。現有の 3 次元磁場測定装置を VFFA 集束系に対応可能とするための改造を行い、LabVIEW による自動制御で磁石内外の磁場分布 (3 軸成分) を種々の条件で測定した。図 5 に各磁石中心における垂直方向の磁場分布の測定結果を示す。図 5 に示すように、測定結果は OPERA-3D で求めた計算値と誤差 1% 以下で一致し、マルチコイル型電磁石によって VFFA の原理を満たす磁場分布の生成が可能であることが確認できた。

ビームは軌道上における磁場を受けて運動するため、軌道上の磁場勾配が重要な指標と考えられる。本研究では VFFA の設計指標として、軌道上の磁場を用いて導出した新たな磁場勾配である「実効的磁場勾配」を提案し、その妥当性を評価した。図 6 に示すように、実効的磁場勾配を用いてマルチコイル型電磁石の設計を行った結果、VFFA 原理実証機の目標エネルギー範囲 (20~40keV) において垂直方向に移動する閉軌道に要求される磁場分布を生成でき、提案した実効的磁場勾配を設計指標として用いた設計も妥当であることを示すことができた。なお、実効磁場勾配の均一度改善については、今後の検討課題として研究を継続していく予定である。

現在、本研究課題において設置した VFFA 集束系の上流に電子源を組み込み、電子源の動作試験を行っている。今後、電子ビームを VFFA 集束系に入射させ、世界初となる VFFA でのビーム輸送を実験的に確認する予定である。

本研究課題における成果については、2023 年日本加速器学会年会、加速器に関する国際会議 2023 (IPAC2023)、FFA 加速器に関する国際ワークショップ (FFA Workshop) 等において発表した。

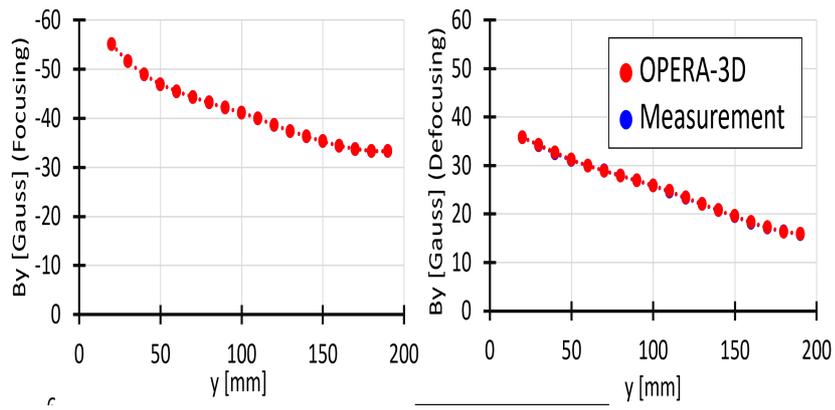


図5 各電磁石、中心軸上での垂直方向磁場の測定結果（計算結果との比較）

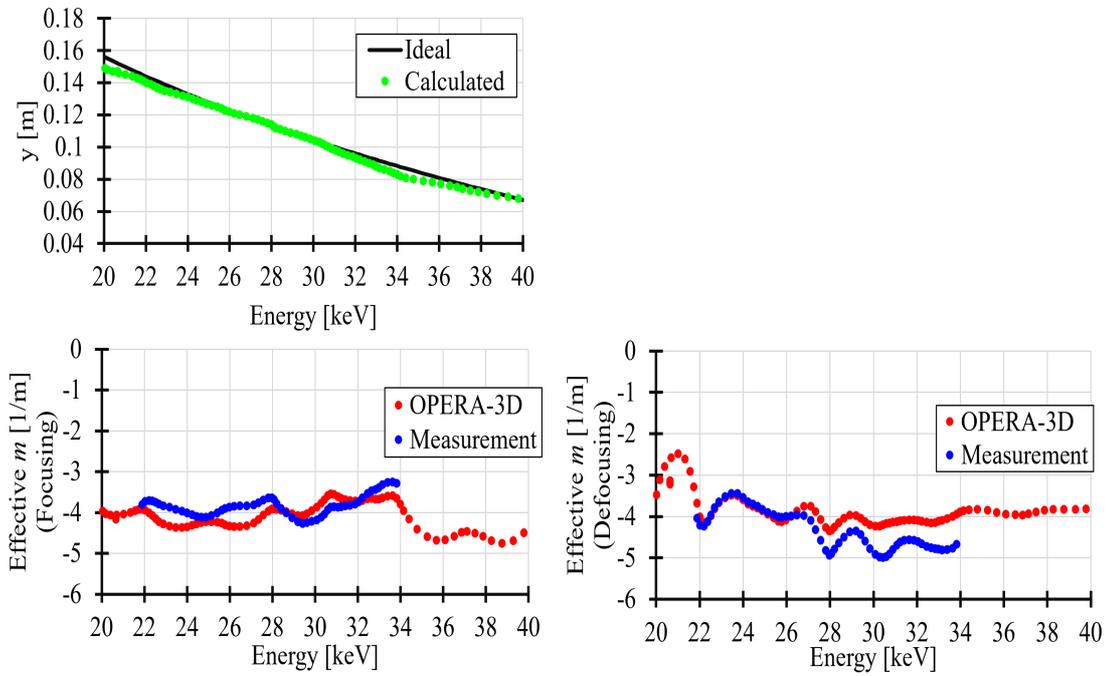


図6 ビーム位置（上）及び実効磁場勾配（下）のビームエネルギー依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0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 K. Adachi, H. Arima, Y. Yonemura, K. Takamatsu, T. Domoto, I. Ishibashi, N. Ikeda, Y. Mori	4. 巻 1
2. 論文標題 An electron model of vertical FFA accelerator for harmonytron	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of 14th International Particle Accelerators Conference (IPAC2023)	6. 最初と最後の頁 1434-1436
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 足立恭介, 有馬秀彦, 米村祐次郎, 高松恒輝, 堂本剛秀, 石橋一心, 宇山真一朗, 池田伸夫, 森義治	4. 巻 1
2. 論文標題 ハーモニートロン実現を目指す垂直 FFA 加速器原理実証モデルの磁石設計	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第20回日本加速器学会年会プロシーディングス	6. 最初と最後の頁 730-734
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Kyosuke Adachi
2. 発表標題 Beam dynamics study of beam injection for the vFFA electron model
3. 学会等名 The 2022 Workshop on Fixed Field Alternating Gradient Accelerators
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 足立恭介, 有馬秀彦, 米村祐次郎, 和賀雄飛, 伊藤彰洋, 高松恒輝, 池田伸夫, 森義治
2. 発表標題 新加速方式：ハーモニートロン実現を目指す垂直FFA加速器の原理実証(1) 垂直FFA原理検証機におけるビーム加速の研究
3. 学会等名 2021年 日本原子力学会 秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Adachi, Y. Waga, A. Ito, K. Takamatsu, H. Arima, Y. Yonemura, N. Ikeda, Y. Mori
2. 発表標題 Beam dynamics study of the vFFA electron model at Kyushu University
3. 学会等名 International Workshop on Fixed Field alternating gradient Accelerators 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 足立恭介, 有馬秀彦, 米村祐次郎, 和賀雄飛, 伊藤彰洋, 高松恒輝, 池田伸夫, 森義治
2. 発表標題 新加速方式：ハーモニートロン実現を目指す垂直FFA加速器の原理実証(2)
3. 学会等名 2022年 日本原子力学会 春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Adachi, H. Arima, Y. Yonemura, K. Takamatsu, T. Domoto, I. Ishibashi, N. Ikeda, Y. Mori
2. 発表標題 An electron model of vertical FFA accelerator for harmonytron
3. 学会等名 14th International Particle Accelerators Conference (IPAC2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 足立恭介, 有馬秀彦, 米村祐次郎, 高松恒輝, 堂本剛秀, 石橋一心, 宇山真一朗, 池田伸夫, 森義治
2. 発表標題 ハーモニートロン実現を目指す垂直 FFA 加速器原理実証モデルの磁石設計
3. 学会等名 第20回日本加速器学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 足立恭介, 有馬秀彦, 米村祐次郎, 高松恒輝, 堂本剛秀, 石橋一心, 宇山真一朗, 池田伸夫, 森義治
2. 発表標題 新加速方式：ハーモニートロン実現を目指す垂直FFA加速器の原理実証[3]
3. 学会等名 日本原子力学会2023年秋の大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Adachi
2. 発表標題 An electron model of vFFA for Harmonytron at Kyushu University
3. 学会等名 2023 Workshop on Fixed Field Alternating Gradient Accelerators (FFA23)
4. 発表年 2023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
研究 分担者	森 義治 (Mori Yoshiharu) (30124176)	京都大学・複合原子力科学研究所・特任教授 (14301)	

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
---------	---------