

Multi-turn injection into the FFAG accelerator at Kyushu University

Shogo Kuratomi ^{#,A)}, Yujiro Yonemura ^{A)}, Hidehiko Arima ^{A)}, Nobuo Ikeda ^{A)}
 Mutsuhito Yonekura ^{A)}, Yushi Inaoka ^{A)}, Daijiro Morokuma ^{A)}, Tadashi Korenaga ^{A)}
 Akira Takagi ^{B)}, Hisayoshi Nakayama ^{B)}, Yoshiharu Mori ^{C)}
^{A)} Kyushu University

744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 810-0395

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Research Reactor Institute, Kyoto University
 2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori, Osaka, 590-0494

Abstract

A multi-turn injection system for the Fixed Field Alternating Gradient accelerator at Kyushu University has been developed to increase the beam intensity. Bump magnets designed to consist of air core coils of polyamide-imide-insulated wires were installed in the FFAG accelerator. The beam injection test experiment results that the system can inject a beam in 4 turns into the FFAG accelerator.

九州大学 FFAG 加速器への多重入射に関する研究

1. はじめに

九州大学加速器・ビーム応用科学センター^[1]では、原子核物理、医療基礎をはじめとする様々な科学分野のビーム応用研究の推進を目標とし、固定磁場強集束 (Fixed Field Alternating Gradient; FFAG) 加速器^[2]を主加速器とする新たな加速器施設の整備を進めている。本センターの FFAG 加速器は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) より移設した FFAG 実用実証機である。本加速器の概略図と設計パラメータをそれぞれ図 1、表 1 に示す。本機は移設前に KEK において繰り返し 100 Hz 運転で 100 MeV 陽子ビームの供給を実現しており^[3]、現在は九州大学においてビーム調整および性能向上のための各種要素開発を進めている^[4]。

本研究の目的は、150 MeV FFAG 加速器のビーム強度の増強を、入射方法の面から達成することにある。本加速器の入射器としては KEK より移設したサイクロトロンを用いているが、サイクロトロンから供給されるビームはピーク電流が小さい。そこで、入射方法としてバンプ電磁石を用いた多重入射を採用することで、周回ビームのビーム強度増強を目指している。

多重入射に向け、現在までにバンプ電磁石の製作、ビーム多重入射シミュレーション、入射系整備およびサイクロトロンから FFAG 加速器へのビーム入射試験を行った。製作した電磁石は多重入射に必要とされる仕様を十分満たす事が分かった。また、入射試験によりバンプ電磁石を用いた多重入射が可能であることを確認した。本稿では電磁石の開発と入射試験の詳細についての報告を行う。

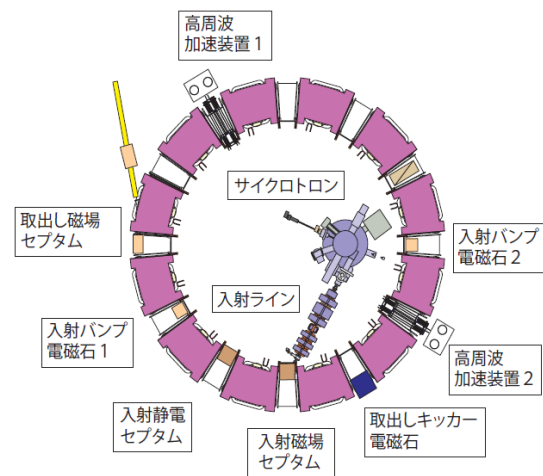


図 1 : 150MeV FFAG 加速器の概略図

表 1 : 150 MeV FFAG 加速器の設計パラメータ

| | |
|---------------|--|
| エネルギー | 10~125 MeV (proton) |
| 電磁石 | Triplet radial (DFD) |
| セル数 | 12 |
| 平均半径 | 4.47 ~ 5.20 m |
| ベータatron チューン | 水平方向 : 3.69 ~ 3.80 垂直方向 : 1.14 ~ 1.30 |
| 最大磁場 | F 磁極 : 1.63 T/D 磁極:0.78 T |
| 周回周波数 | 1.5 ~ 4.2 MHz |
| 繰り返し | 100 Hz |
| ビーム電流 | 1.5 nA |

[#] s-kura@nucl.kyushu-u.ac.jp

2. バンプ電磁石の開発

2.1 コイルの設計

150 MeV FFAG 加速器の各入射機器の配置と入射軌道の模式図を図 2 に示す。入射陽子ビームは入射磁場セプタムにより 60 度偏向された後、入射静電セプタムとバンプ電磁石によりビームの軌道を偏向され周回軌道に入射される。1 セルあたりのベータトロン振動の位相進みは約 0.6π であることを考慮し、2 つのバンプ電磁石を位相進みが π の整数倍 (3.0π) に近くなる 5 セル離れた位置に設置する。バンプ電磁石の電流を減衰させていき、バンプ軌道を閉軌道に向けてシフトさせていくことにより、バンプ軌道にビームを複数回入射する。

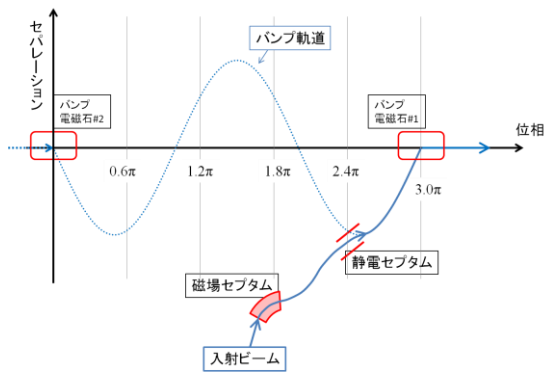


図 2: 各入射機器の配置と入射軌道の模式図

150 MeV FFAG 加速器は、磁極間の距離が広く加速器直線部が短い円形加速器であり、加速器直線部において約 400 gauss の漏れ磁場が存在する。加速器直線部に磁性体を使用した機器を設置した場合、ベータトロン振動の共鳴を誘起しビーム損失が発生する。このビーム損失を防ぐために、バンプ電磁石は磁性体を用いない空芯コイルにより構成する事とした。

ビーム多重入射では、バンプ電磁石に流す電流を減衰させていくことで、バンプ軌道を周回軌道に向けてシフトさせていく。バンプ軌道のシフト量が小さいとビームがセプタム電磁石に衝突してしまうため、バンプ軌道のシフト量を大きくとれる電磁石を開発する必要がある。軌道のシフト量は、バンプ電磁石のギャップに発生する磁場をビーム進行方向に積分した値 (BL 積) に比例して大きくなるので、電磁石には大きい BL 積が求められる。また、入射ビームは空間的な広がりを持っており、バンプ軌道および周回軌道の周りを振動しながら進む。有限幅のビームを入射に必要な量だけ偏向させるためには、加速器半径方向の磁場均一性にも配慮が必要である。以上の要求に加え、バンプ電磁石電源からの要求によりバンプ電磁石のインダクタンスは $6.0 \mu\text{H}$ 以下である必要がある。

本研究では、3 次元の磁場解析コード Opera-3d を用いて、バンプ電磁石用空芯コイルの設計を行っ

た。水平方向に 2 ターン巻いた 2 つのコイルを垂直方向に 30 mm 離れた形状を採用し、コイルのビーム進行方向の長さを 440 mm、加速器半径方向の長さを 100 mm とした。磁場解析により得られた BL 積は $2.79 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}$ 、インダクタンスは $5.7 \mu\text{H}$ であった。

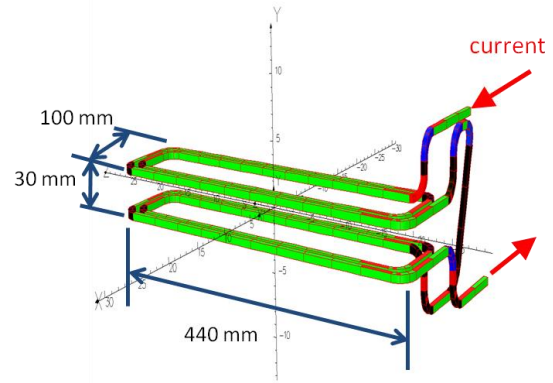


図 3: 設計したコイル形状

2.2 ビーム入射シミュレーション

設計したバンプ電磁石の磁場解析結果を組み込み、ビーム入射シミュレーションを行った。バンプ電磁石に流す電流にはピーク電流 2000 A、パルス幅 10 μsec の正弦半波を用いた。静電セプタム、磁場セプタムの位置、電場および磁場は、最も周回ビームの粒子数が得られるよう最適化を行った。

シミュレーションにより、リングの周回周期 $0.640 \mu\text{sec}$ の約 4 倍となる $2.70 \mu\text{sec}$ の時間領域においてビーム入射が可能であることが分かった。図 4 に、バンプ電磁石に流す電流波形およびビーム入射可能な時間領域を示す。ここで、入射ビームの粒子数に対して 2%以上の周回ビーム粒子数が得られれば、入射可能としている。また、入射開始から 30 ターン後の位相空間上のビーム分布を図 5 に示す。図に示す通り、複数のビームが周回軌道を中心として振動しながらリングを周回している。シミュレーションにより、入射 1 回あたりに入射静電セプタムを通過する粒子数に対して約 3.6 倍の周回ビームの粒子数が得られることがわかった。

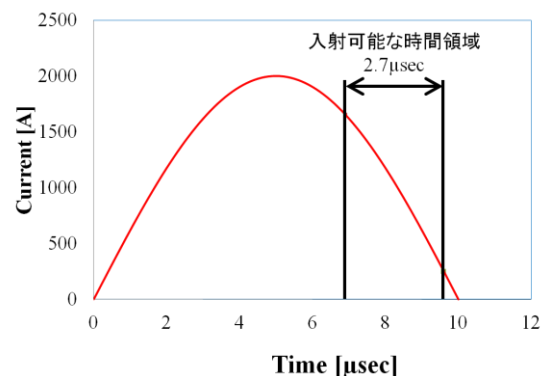


図 4: バンプ電磁石に流す電流波形とビーム入射可能な時間領域

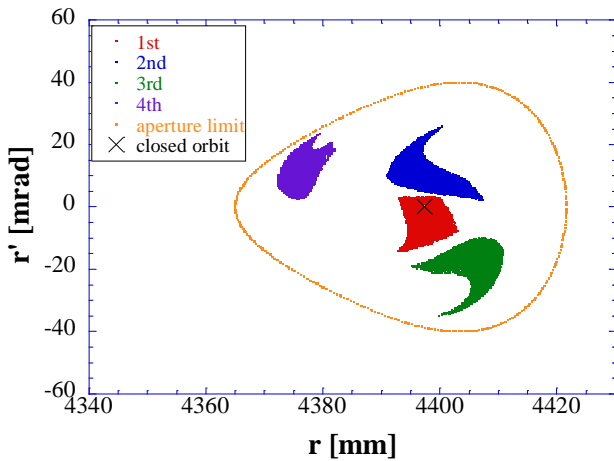


図 5:入射開始から 30 ターン後の位相空間上のビーム分布

2.3 バンプ電磁石の製作及び試験

以上の設計・検討をもとに、2 台のバンプ電磁石の製作を行った。バンプ電磁石のコイルにはピークで 2,000 A の電流が流れるため、ジュール熱によるコイルの温度上昇は無視できない。加速器の真空度の悪化を防ぐためにはコイルの温度上昇を抑える必要がある。表皮効果を考慮した発熱量の計算に基づき、直径 0.6 mm のエナメル線(ポリアミドイミド線)を 49 本より合わせたリッツ線をコイル用の導線として採用した。また、温度上昇に伴う材料表面からの放出ガスを抑えるため、コイルを支持する絶縁材料としてアウトガスの発生量が少ないセラミックスを採用した。

図 6 に製作した電磁石の外観、図 7 に電磁石の全体図を示す。真空中においてパルス電流通電試験を行ったところ、コイル表面温度は 90 度以下に抑えられており、要求される真空度以下での運転が可能であった。また、2 台の磁場性能は磁場分布、出力波形ともに設計値と 1%程度の誤差で一致することを確認した。

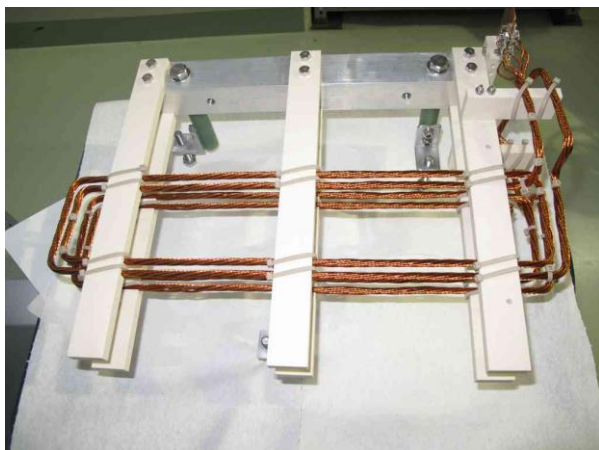


図 6:製作したバンプ電磁石の外観

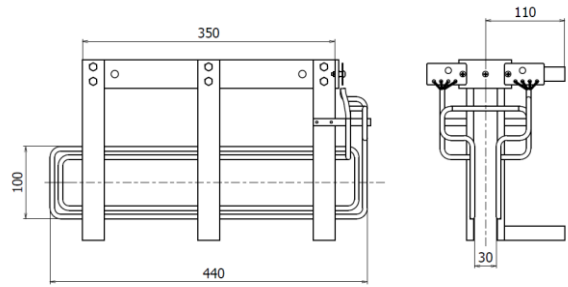


図 7:バンプ電磁石全体図

また、開発した 2 台のバンプ電磁石のインダクタンスを LCR メータにより測定したところ、それぞれ 5.65 μH 、5.66 μH となり、要求される 6.0 μH 以下となっていることが確認できた。

3. ビーム入射試験

3.1 実験体系

製作したバンプ電磁石を用いて、サイクロトロンから FFAG 加速器へのビーム入射試験を行なった。周回ビームの測定にはビームバンチモニターを用いており、ビームチョッパーを用いて入射ビームの時間幅をリングの周回周期よりも短い 250 nsec にチョップして周回ビームの測定を行った。

また多重入射が可能となるためには、主リングの周回周期よりも長い時間領域でビーム入射が可能である必要がある。そこでバンプ電磁石の電流波形に対するビームチョッパーのタイミングを変化させていき、ビーム入射が可能な時間領域を求めた。

3.2 実験結果及び考察

実験で得られたバンチモニターによる電圧波形の一例を図 8 に示す。図から明らかなようにビームが主リングを周回しており、バンプ電磁石を用いてのビーム入射が可能であることが確認された。本実験では加速空洞を使用していないため、ビームがリングを周回していくに従いバンチがビーム進行方向に広がっていく。バンチモニターによる信号電圧は入射後約 360 μsec でほぼゼロとなっているが、これはバンチ長がリングの周回周期よりも長くなり観測不可能となったためである。360 μsec 後もビームはリングを周回し続けていると考えられる。

ビームチョッパーのタイミングを変化させていくことにより求めた入射可能な時間領域は 2.46 μsec となった。主リングの周回周期は 0.640 μsec であり、主リングの周回周期の約 3.9 倍の時間で入射が可能となる。このように製作したバンプ電磁石を用いたビーム入射試験により、多重入射が十分可能な時間領域で入射ビームが周回する事が実証できた。

シミュレーションにより求められた入射可能な時間領域は 2.70 μsec であり、実験で求めた入射可能

な時間領域はシミュレーションと比べやや短い結果となった。主な要因は、シミュレーションと実際の入射ビームとの初期条件の違いにあると考えられる。本実験においては入射ビームの条件を測定していない。さらに効率の良いビーム入射を目指すには初期条件の決定は不可欠であり、今後実験およびシミュレーションを重ねてビーム初期条件を正確に求めていく必要がある。

T. Noro, T. Korenaga, S. Kuratomi, M. Yonekura, Y. Inaoka, D. Morokuma, T. Miyaoki, A. Takagi, H. Nakayama, and Y. Mori, “Beam commissioning of FFAG accelerator at Kyushu University”, in these proceedings

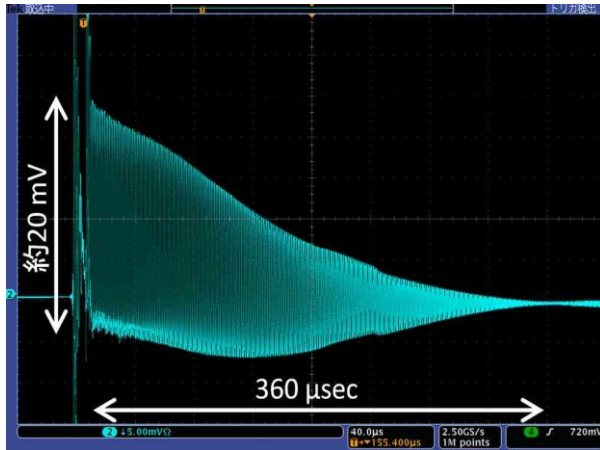


図 8: 周回ビームの信号波形

4. まとめ

150 MeV FFAG 加速器の周回ビーム強度の増強を目的として、ビーム多重入射を行うための空芯バンブ電磁石の開発を行った。バンブ電磁石を用いた入射試験により、ビームが加速器内を周回することを確認できた。また、主リングの周回周期の約 3.9 倍の間で入射が可能であることが分かった。

今後はシミュレーションと実験結果を比較検討し、さらに効率の良いビーム入射の実現を目指す。また高周波加速空洞を用いてビームをバンチ化しながらの多重入射を行い、周回ビームの強度増強の実証を目指す。

参考文献

- [1] Y. Yonemura, H. Arima, N. Ikeda, K. Ishibashi, H. Ishikawa, K. Maehata, T. Noro, T. Okai, K. Sagara, N. Shigyo, Y. Uozumi, G. Wakabayashi, S. Fukumoto, Y. Kimura, H. Nakayama, A. Takagi, Y. Mori, and T. Tomimasu, “Status of Center for Accelerator and Beam Applied Science of Kyushu University”, Proc. of EPAC08, pp3521-3523, (2008)
- [2] K. R. Symon, D. W. Kerst, L. W. Jones, L. J. Laslett, and K. M. Terwilliger, “Fixed-Field Alternating-Gradient Particle Accelerators”, Physical Review, Vol.103, No.6, 1837, (1956)
- [3] Y. Yonemura, A. Takagi, Y. Mori, M. Aiba, K. Okabe, N. Ikeda, “Development of RF acceleration system for 150 MeV FFAG accelerator”, Nuclear Instruments and Methods, A 576, 294-300, (2007)
- [4] Y. Yonemura, H. Arima, N. Ikeda, Y. Uozumi, K. Ishibashi,