

# DEVELOPMENT OF INJECTION BUMP MAGNET FOR FFAG ACCELERATOR AT KYUSHU UNIVERSITY

Tatsuya Fujinaka <sup>#,A)</sup>, Yujiro Yonemura <sup>A)</sup>, Hidehiko Arima <sup>A)</sup>, Shogo Kuratomi <sup>A)</sup>,  
 Kazuho Omote <sup>A)</sup>, Mutsuhito Yonekura <sup>A)</sup>, Yushi Inaoka <sup>B)</sup>, Daijiro Morokuma <sup>B)</sup>,  
 Tadashi Korenaga <sup>A)</sup>, Tadahiko Hasuo <sup>A)</sup>, Nobuo Ikeda <sup>A)</sup>,  
 Akira Takagi <sup>C)</sup> Hisayoshi Nakayama <sup>C)</sup> Yoshiharu Mori <sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University

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

<sup>B)</sup> Department of Energy Science and Engineering, Kyushu University

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

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>D)</sup> Research Reactor Institute, Kyoto University

2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori, Osaka, 590-0494

## Abstract

A bump magnet for multi-turn injection into the Fixed Field Alternating Gradient accelerator at Kyushu University has been developed. To prevent the beam loss due to the betatron resonance, the magnet was designed to consist of air core coils. It has been demonstrated that a simulation with the measured magnetic field distribution and pulse shape gives the circulating beam intensity quite comparable with the deigned value.

## 九州大学 FFAG 加速器における入射バンプ電磁石の開発

### 1. はじめに

九州大学加速器・ビーム応用科学センターでは、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<sup>[1]</sup>を主加速器とする新たな加速器施設の建設を進めている。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 実用実証機であり、陽子を 150 MeV まで加速する性能を有することから 150 MeV FFAG 加速器と称されている。本加速器の設計パラメータと概略図をそれぞれ図 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<sup>[2]</sup>、現在は九州大学伊都キャンパスにおいてビーム調整が進められている。

150 MeV FFAG 加速器の入射器としては同じく KEK より移設したサイクロトロンを用いている。本年より京都大学 8 MV タンデム加速器の伊都キャンパスへの移設事業が開始し、将来的にはタンデムからの多彩なビーム種が FFAG 加速器で供給可能となる。サイクロトロン、タンデム加速器ともに供給されるビームはピーク電流が小さく、縦方向に大きく広がっており、ビーム入射、捕獲および加速を行う際のビーム損失を如何に抑えるかが重要な開発課題となっている。現在、入射時のビーム損失を抑え、周回ビーム強度を増強するために、ビームを縦方向にチョップし、多重入射を行うための要素開発を進めている。本発表では、150 MeV FFAG 加速器への

<sup>#</sup>fujinaka@nucl.kyushu-u.ac.jp

ビーム多重入射に向けた開発について、空芯コイルを用いたバンプ電磁石の開発状況に重点を置いて報告を行う。

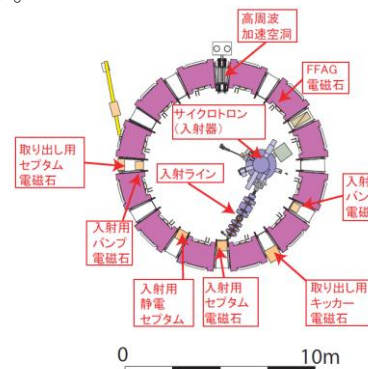


図 1 : 150MeV FFAG 加速器の概略図

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
ベータトロン	水平方向 : 3.69 ~ 3.80
チューン	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/1 cavity
ビーム電流	1.5 nA (In the first stage)

## 2. ビーム入射設計

### 2.1 ビーム入射機器の配置

150 MeV FFAG 加速器の各入射機器の配置を図 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ブ電磁石によりビームの軌道を偏向されて、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  $0.6\pi$  であることを考慮し、2 つのバンブ電磁石を位相進みが  $\pi$  の整数倍に近くなる 5 セル離れた位置に設置する。バンブ電磁石の電流を減衰させていき、バンブ軌道を閉軌道に向けてシフトさせていくことにより、バンブ軌道にビームを複数回入射する。

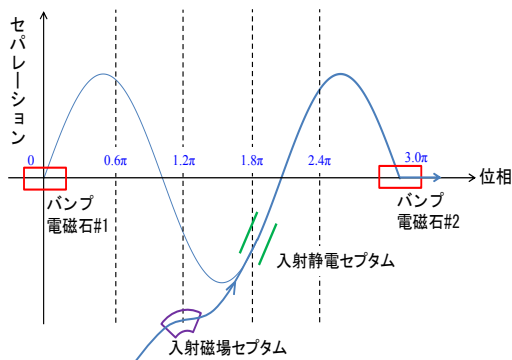


図 2：入射機器の位置関係

### 2.2 バンブ電磁石形状の検討

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。ビーム損失を防ぐためには、ビーム多重入射に使用するバンブ電磁石を、磁性体を用いない空芯コイルにより構成する必要がある。

ビーム多重入射では、ビーム損失を抑えるために、セプタム電磁石にビームが衝突しないようにバンブ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。そのためにはバンブ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) を空芯という条件下でなるべく大きくする必要がある。また、入射ビームは空間的な広がりを持っているため、BL 積のみならず加速器半径方向の磁場分布を考慮する必要がある。

バンブ電磁石用空芯コイル形状の検討には、3 次元の磁場解析コード Opera-3d を用いた。採用したコイル形状を図 2 に示す。コイルの巻き数はインダクタンスに対する制限から、2 ターン巻いた 2 つのコイルを上下に 30 mm 離す構造にした。ビーム進行方向の長さは、ストレートセクションの真空チャンバーの大きさの制限が許す最大値 440 mm とした。

また、加速器半径方向のコイル幅については、均一な磁場分布が得られる領域が最も大きく取れる長さを磁場解析により比較し、80 mm に決定した。バンブ電磁石電源の電流波形はパルス幅 10  $\mu\text{sec}$  の正弦半波であり、最大電流は 2000 A、負荷のインダクタンスは 6.5  $\mu\text{H}$  である。設計したインダクタンスは約 5.7  $\mu\text{H}$  と見積もられ、インダクタンスに対する要求も満たしていることを確認した。

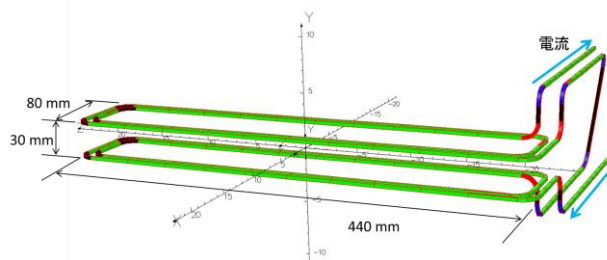


図 3：バンブ電磁石コイル形状

### 2.3 ビーム入射シミュレーション

設計したバンブ電磁石の磁場解析結果を条件として、ビーム入射シミュレーションを行い、入射タイミングと、入射静電セプタムの位置、電場の最適化を行った。最適化した条件における、入射開始からターンまでの、入射点での位相空間上のビーム分布を図 4 に示す。また、入射開始から 10 ターン後の位相空間上のビーム分布を図 5 に示す。入射静電セプタムに衝突することによるビーム損失は合計で約 22%であった。入射 1 回あたりの入射静電セプタムを通過する粒子数に対して 2.35 倍の周回ビームの粒子数が得られることがわかった。

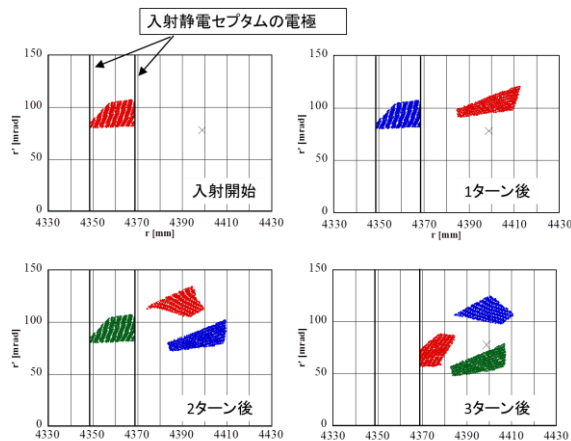


図 4：入射点における各ターン毎の位相空間上でのビーム分布

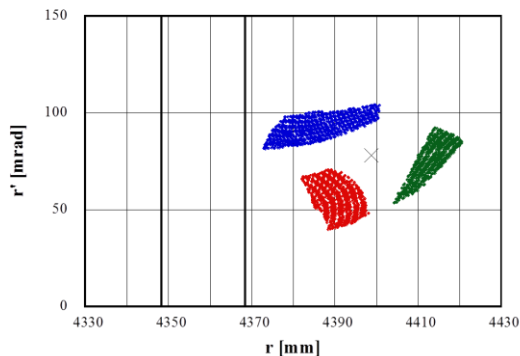


図 5：入射開始から 10 ターン後の位相空間上のビーム分布

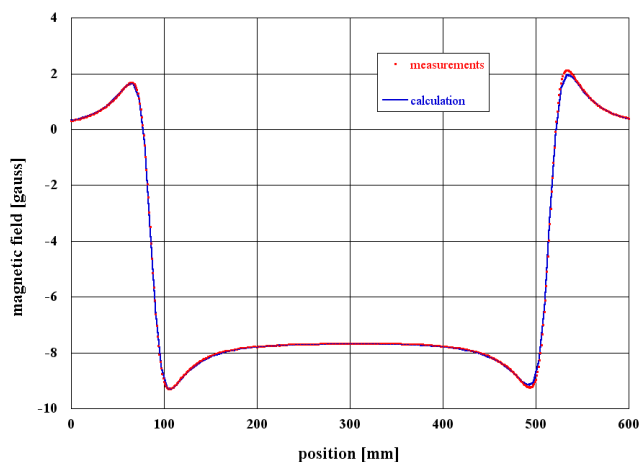


図 7：磁場分布

### 3. バンプ電磁石の開発

前章に記した設計をもとに、バンプ電磁石の製作を行った。開発したバンプ電磁石の写真を図 6 に示す。コイルには直径 3.0 mm の銅線、絶縁部には FRP、土台には 30.0×40.0 mm のアルミのフラットバーを用いた。ネットワークアナライザを用いて電流導入部を含めたコイルのインダクタンスを測定した結果、負荷全体で約 6.3  $\mu\text{H}$  となった。

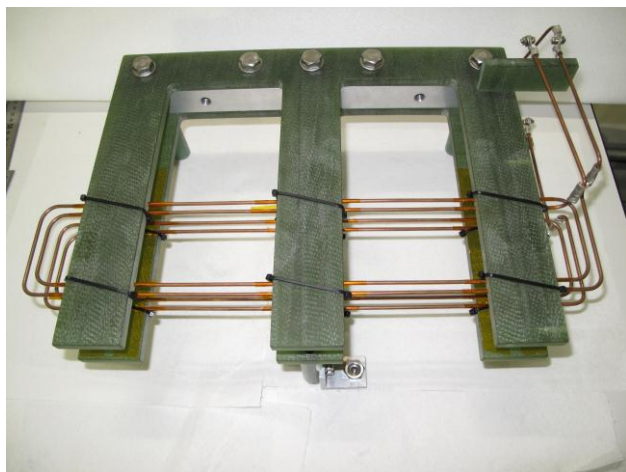


図 6：開発したバンプ電磁石

#### 4.1 磁場測定

開発した電磁石の磁場性能を評価するために、磁場測定を行った。設計に用いた計算磁場分布と製作したバンプ電磁石の実測磁場分布を比較することを目的とし、20.0A の直流電源を用いて測定を行った。測定の一例として、バンプ電磁石コイル中心軸の計算磁場分布と測定磁場分布を図 7 に示す。電流導入部近くで磁場計算からのずれが見られるが、BL 積は磁場計算による評価値に対して約 0.62% の精度で一致しており、軌道計算に与える影響は 0.5 mm 以下と極めて小さいことが示された。

#### 4.2 電力投入試験

製作したバンプ電磁石を電源に接続し、CT (Pearson 社製；MODEL110A) を用いてパルス出力電流の測定を行った。パルス部の充電電圧 5.48 kV 時の出力電流試験で得られた電流波形を図 8 に示す。100Hz 運転時のピーク電流値 2000 A に対する安定度は 0.9%、ジッターは 8 nsec であり、安定した運転ができることを確認できた。

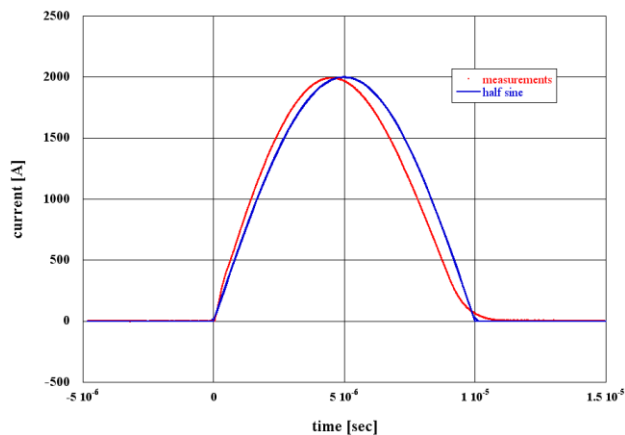


図 8：電流波形

実際に得られた波形は正弦半波よりピークの位置が約 50 nsec ずれており、立下り時にはテールを引いている。そこで、実際に得られた出力電流波形をもとにビームシミュレーションの再評価を行った。入射開始から 3 ターンまでの入射点での位相空間上のビーム分布の結果は、図 9 に示すように、設計段階とほとんど変わらなかった。また、入射 1 回あたりの入射静電セパタムを通過する粒子数に対する周回ビームの粒子数の比も 2.31 倍と設計段階とほぼ変わらない値が得られた。

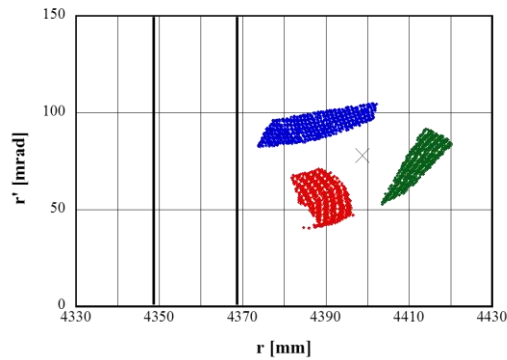


図9：実電流波形による入射開始から10ターン後の位相空間上ビーム分布シミュレーション結果

## 5. まとめ

150 MeV FFAG 加速器へのビーム強度の増強を目的として、ビーム多重入射に用いる空芯バンプ電磁石の設計、開発を行った。

製作した電磁石の実測出力電流波形を用いたビーム入射シミュレーションの結果、設計値と等しく、入射1回あたりの入射静電セプタム粒子数に対して2.31倍の周回ビームの粒子数が得られることがわかった。

今後、製作したバンプ電磁石を150 MeV FFAG 加速器に設置し、ビーム入射実験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] K. R. Symon, et al., “Fixed-Field Alternating-Gradient Particle Accelerators”, Physical Review, Vol.103, No.6, 1837, (1956)
- [2] Y. Yonemura, et al., “Development of RF acceleration system for 150 MeV FFAG accelerator”, NIM, A 576, 294-300, (2007)