

## DEVELOPMENT OF A SUPERCONDUCTING MAGNET FOR THE FFAG ACCELERATOR

Tetsuhiro Obana<sup>1,A)</sup>, Toru Ogitsu<sup>B)</sup>, Tatsushi Nakamoto<sup>B)</sup>, Ken-ichi Sasaki<sup>B)</sup>, Akira Yamamoto<sup>B)</sup>,  
Masahiro Yoshimoto<sup>C)</sup>, Yoshiharu Mori<sup>D)</sup>, Tomofumi Orikasa<sup>E)</sup>

A) The Graduate University for Advanced Studies  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

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

C) Japan Atomic Energy Research Institute  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

D) Kyoto University Research Reactor Institute  
Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka, 590-0494

E) Toshiba Corporation  
2-4 Suehiro-machi, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa, 230-0045

### Abstract

A superconducting magnet for the Fixed Field Alternating Gradient accelerator is proposed. The static magnetic field is required to be proportional to the k-th power of the orbit radius where k is the geometrical field index of the accelerator. The 3D coil configuration with the left/right asymmetric and elliptical cross section is designed to meet the requirement in terms of integral magnetic field. The 3D magnetic field generated by the designed coil is evaluated and the field integral along the circular arc trajectory fulfils the requirement. In addition, the particle tracking is performed with the 3D magnetic field. As a result, a particle can be circulated and accelerated stably in the FFAG.

## FFAG加速器用超伝導電磁石の開発

### 1. はじめに

固定磁場強集束(Fixed Field Alternating Gradient = FFAG)加速器を粒子線治療用加速器として利用することが検討されている。FFAG加速器は、従来のシンクロトン加速器に比べて、操作が容易で安価といった特色を持つ[1]。しかしながら、粒子線治療用FFAG加速器を広く普及させるためには、加速器自体の大きさを病院内に設置できる程度に小型化することが必要不可欠である。そこで、FFAG加速器で用いられる電磁石の超伝導化が提案された。超伝導電磁石は、高磁場を発生することにより、加速器を小型化し、更に、加速器運転時の消費電力を低く抑えることができるため、経済的である。また、FFAGで要求される磁場は一定なので、超伝導化に適している[2][3]。

今回は、超伝導コイルの磁場設計と粒子軌道シミュレーション結果について報告する。

### 2. FFAG用電磁石の磁場分布

電磁石を設計する際、FFAG加速器の基本原則からビームポア中に式(1)を満たす磁場分布を発生させる必要がある。図1は、FFAG加速器の概略図を

示す。

$$B(x) = B_0 \left( \frac{R_0 + x}{R_0} \right)^k \dots (1)$$

$x$ 、 $R_0$ 、 $B_0$  及び  $k$  は、それぞれ電磁石中心からの距離、FFAG加速器中心と電磁石中心間の距離、電磁石中心における磁束密度、及び  $k$  値を示す[3]。

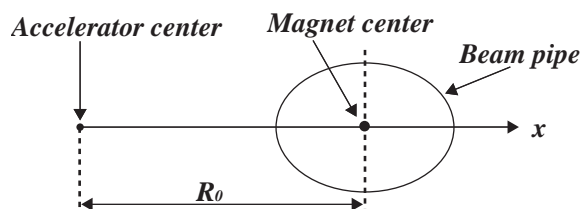


図1：FFAG加速器の概略図

### 3. 重ね合わせ電流分布の作成

FFAG用電磁石に要求される磁場分布は、多極磁場成分が重ね合わされた非線形分布となる。従来の超伝導電磁石の設計概念を基にした場合、図2のような、様々な電流分布を組み合わせることが必要と

<sup>1</sup> E-mail: obana@post.kek.jp

なる。しかし、そのような複数の電流分布をコイルによって実現する場合、断面の異なる多数のコイルが必要となり、通電時に生じる電磁力の向きが複雑なため、コイルのサポートが非常に困難となる。そこで、図3のように、電流分布を重ね合わせて左右非対称の電流分布を作り、更に、コイルの小型化を実現するために、楕円周上の電流分布を作成した。その結果、左右非対称で且つ口径が楕円のコイル断面形状(図4)を得られた[3]。

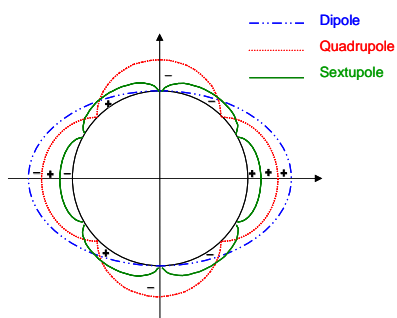


図2：各極磁場成分に対する電流分布

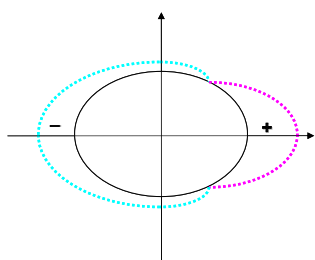


図3：重ね合わせた電流分布

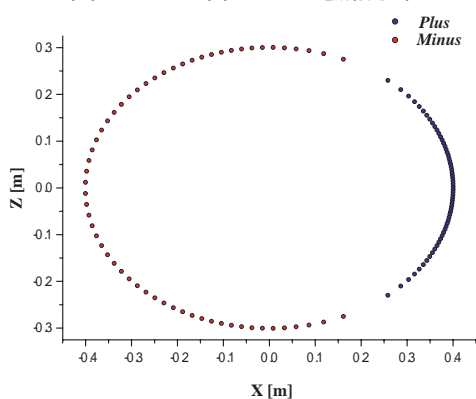


図4：コイル断面形状

#### 4.3Dコイル形状

集束用及び発散用コイルの3次元形状設計を行った。コイル形状は鞍型(図5)である。コイル設計には、ビーム軌道上(円弧)での積分磁場BLを用い、得られた積分磁場は、Local  $k+1$ (式2)により、評価した。

$$k+1_{local} = \frac{d(BL)}{dx} \frac{R_0+x}{BL} \dots (2)$$

$x$ はコイル中心からの距離、 $R_0$ は加速器中心とコイル中心間の距離である。コイル設計時に用いたパラメータを表1に示す。

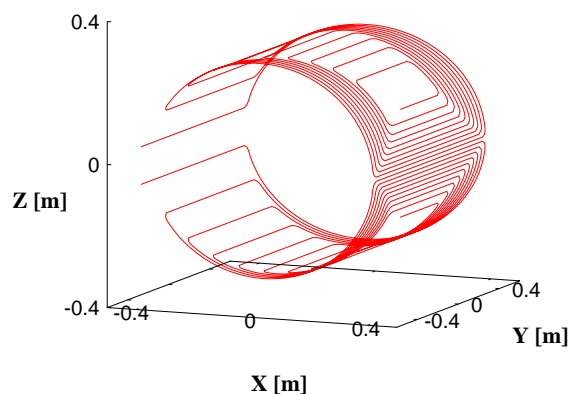


図5：鞍型コイル形状

コイル形状を設計する際、積分磁場計算結果と目標値の差が極力小さくなるように、コイル直線部における各コンダクターの配置を調節した。その結果、粒子が通過する領域に対して、ビーム光学上で要求される精度の積分磁場が得られた(図6)[4]。

表1：設計パラメータ

ボア径@長軸	0.8 m
ボア径@短軸	0.6 m
集束用コイル全長	1.09m
発散用コイル全長	0.55m
k値	10.0
集束用コイル中心での磁場	1.0 T
発散用コイル中心での磁場	0.43T
加速器中心と集束用コイル中心間の距離	5.0m
加速器中心と発散用コイル中心間の距離	4.9m
入射ビームエネルギー	~40MeV
出射ビームエネルギー	~230MeV

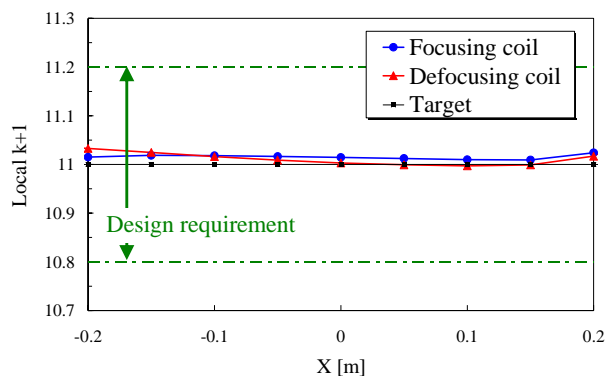


図6：積分磁場計算結果

## 5. 粒子軌道シミュレーション

積分磁場で設計要求を満たした集束用及び発散用鞍型コイル形状により作成した3D磁場MAPを用いて、粒子軌道シミュレーションを行った。電磁石配置はFODO、セル数は12、電磁石形状はradial sector型、F/D比は2.3である。

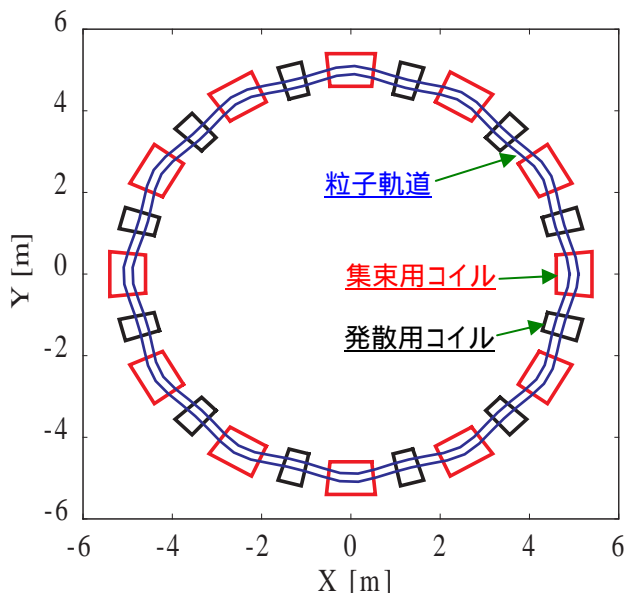


図7：粒子の閉軌道及びコイル配置

その結果、粒子は各エネルギーの閉軌道を描くことができ(図7)、またビームエネルギーを213MeVまで得ることができた(図8)。更に、各エネルギーに対するtuneを求めた結果、得られたtuneは共鳴線上に存在せず、また線を横切ることなく一箇所に集まった(図9)。よって、粒子を安定して加速できることが分かった[4]。

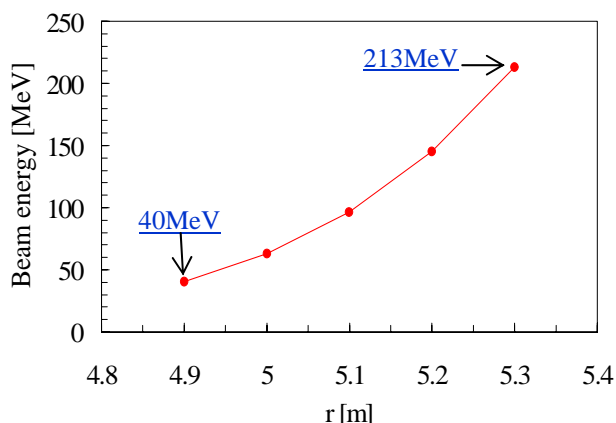


図8：各軌道に対するビームエネルギー

## 6. まとめ

FFAG加速器用超伝導コイルの設計及び設計され

たコイル形状によって得られた磁場分布を用いて粒子軌道シミュレーションを行った。その結果、積分磁場で評価することにより、加速器設計で要求される磁場を実現することができる3Dコイル形状が得られた。更に、設計された3Dコイル形状を用いた際、粒子を安定に周回及び加速できることが分かった。

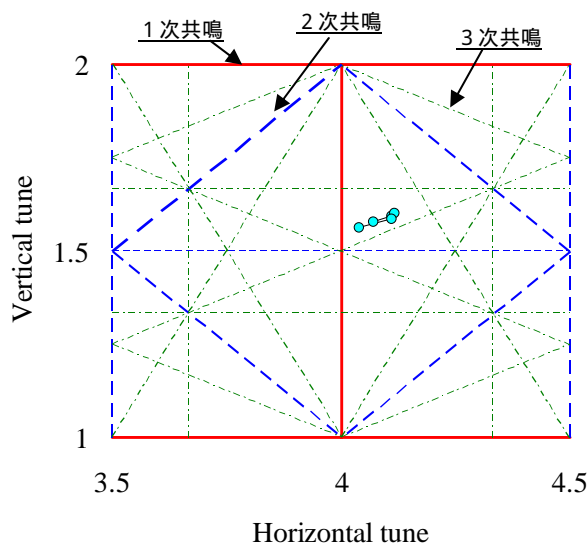


図9：各エネルギーに対するTune  
(赤線：1次共鳴、青線：2次共鳴、  
緑線：3次共鳴)

## 参考文献

- [1] M.Yoshimoto, et al., "Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology", Tsukuba, November, 2003
- [2] M.Abdelsalam, et al., "Superconducting Magnet Design for Fixed-Field Alternating-Gradient(FFAG) Accelerator", IEEE Trans. On Magnetics, vol.30, no.4, July 1994, pp.2620-2623
- [3] T.Obana, et al., "Magnetic Field Design of a Superconducting Magnet for a FFAG Accelerator", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, June 2005, to be published.
- [4] T.Obana, et al., "第72回 2005年度春季低温工学・超電導学会講演概要集", Tokyo, May 31- June 2, 2005