

150MeV-FFAG 加速器の研究・開発

吉本政弘^{A)}、相場政光^{B)}、菊池健^{A)}、木場紀世美^{C)}、町田慎二^{A)}、森義治^{A)}、武藤厚俊^{A)}、
中野譲^{A)}、大森千広^{A)}、柴武二^{D)}、酒井泉^{A)}、佐藤庸夫^{A)}、柴田徳思^{A)}、高木昭^{A)}、
上杉智教^{E)}、山崎明義^{F)}、横井武一郎^{A)}、米村佑次郎^{G)}、吉井正人^{A)}、湯浅由将^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} 東京大学大学院理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷7丁目3番1号

^{C)} フェルミ国立研究所 Batavia, IL 60510-0500 USA

^{D)} 筑波大学陽子線医学研究センター 〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

^{E)} 放射線医療研総合研究所 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4丁目9番1号

^{F)} 東北大学原子核理学研究施設 〒982-0826 宮城県仙台市太白区三神峯 1-2-1

^{G)} 九州大学大学院工学府 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1

概要

PoP-FFAG 加速器による FFAG 加速方式での陽子加速の成功をもとに、汎用 FFAG 加速器の開発を目的とした 150MeV-FFAG の研究・開発を行っている。本研究では具体的な利用ターゲットとして陽子線癌治療機への応用を考えており、計画全体として FFAG 加速方式による 150MeV までの陽子加速、取り出し装置の開発及び加速したビームの取り出し、取り出したビームを用いた照射技術の開発までを行う。現在、加速器の建設は終わり、ビーム入射及び加速に関する実験を開始した。

1 はじめに

今日、加速器が医療や工業をはじめとする様々な分野で利用されており、その用途および需要はますます拡大している。こういった状況を踏まえ、汎用加速器として、FFAG (Fixed Field Alternating Gradient / 固定磁場強収束) 加速器 [1] を考える。ここで言う ‘汎用’ は、単にいろいろな用途に使えるといった意味だけではなく、コスト、運転の容易さ、フレキシビリティといった実用性も含めたい。本稿では、第2節で FFAG 加速器の原理と特徴、そして FFAG 加速器の汎用加速器としての有用性を述べる。第3節では、現在、高エネルギー加速器研究機構において開発が進められている 150MeV 陽子 FFAG シンクロトロンについて述べ、第4節でまとめとする。

2 2 FFAG 加速器の原理と特徴

FFAG 加速器では、半径 r の k 乗に比例する磁場を逆向きに交互に並べることで、強収束を実現する。磁場は時間的に一定であり、サイクロトロンのように加速とともに軌道はシフトするが、原理的には各エネルギーにおける軌道は相似形であり、ベータトロンチェーンは一定となる (スケーリング則) ように磁場を配置する。一方で、スケーリ

ング則を満たす場合、ごく限られた条件下でしか等時性は満たされないため、ビームの加速はベータトロン加速またはシンクロトロン加速による。

磁場が時間的に一定であるため、単純に考えて、繰り返しの速さは加速電場の強さのみにより決定される。したがって十分な加速電場が得られれば、通常のシンクロトロンと比べた場合 10 倍あるいは 100 倍以上の繰り返しが可能となり、円形加速器としては特徴的な大強度かつ高繰り返しのパルスビームを生成できる。また、固定磁場であることから、渦電流による損失もないので、高い電力効率が期待でき、加速器の運転も比較的容易であると言える。FFAG 加速器と同様に固定磁場を用いるサイクロトロンと比較した場合、ビームの運動量が低い場合にはサイクロトロンは非常にコンパクトで汎用性も高いが、運動量が高くなるにつれて原理的限界が生じるとともに、電磁石重量などの点で最大運動量は制限を受ける。一方、FFAG 加速器では最大運動量に原理的限界はなく、勾配の強い磁場を用いるため軌道のシフト量も少なく、比較的コンパクトな電磁石でリングを構成できる。

以上のような点から、FFAG 加速器は ‘汎用’ 加速器としての有用性を十分に備えていると言える。

3 150MEV 陽子 FFAG シンクロトロンの開発

現在、高エネルギー加速器研究機構において、陽子ビームで最大エネルギー 150MeV の FFAG シンクロトロンの開発が進められている。表1に加速器の基本パラメータをまとめた。150MeV FFAG シンクロトロンの開発研究は FFAG 加速器の実用化を大きな目的としたもので、加速器の基礎的研究を行うとともに、がん治療における新しい照射技術であるスポットスキニングの技術開発研究を行う予定である。

表 1：基本パラメータ

Type of Magnet	Triplet Radial (DFD)
Num. Of Cell	12
k-value	7.6
Beam Energy(Proton)	12 to 150MeV
Average Radius	4.47 to 5.20m
Betatron Tune	3.69～3.80 (H) 1.14～1.30 (V)
Max. Field (on ext. orbit)	1.63T (H) 0.78T (V)
Revolution Freq.	1.66 to 4.56 MHz
Repetition	250Hz

スポットスキニングとは、パルスビームを3次元的にがん細胞に照射するもので、腫瘍の大きさに比べ小さいビームを数多く照射することで正常細胞に対する被曝量を軽減するものである。FFAG 加速器による高繰り返しのパルスビームは、スポットスキニングには最適であると言える。

加速器設計の詳細は参考文献[2]に譲るとして、ここではまず製作した FFAG 電磁石の特徴と磁場測定結果について述べたい。150MeV FFAG シンクロトロンでは、その設計過程で考案された‘ヨークフリー型電磁石’ [3]と呼ばれる電磁石形状を採用した。これによって、電磁石重量を大幅に軽減でき、実用化に向けた大きな進歩となった。FFAG 加速器に必要な勾配の強い磁場を作るために、電磁石のギャップは低エネルギー側、つまり加速器半径の内側で広く、半径が大きくなるにつれてギャップを狭くしている。そのため、漏れ磁場まで含めて3次元的な磁場が十分な精度でできていることが非常に重要である。そこで、磁場測定ではホール素子を3つ組み合わせて、磁場の3成分を測定し設計における3次元磁場計算の結果との比較を行った。図1に測定結果の一例を示す。

図1から分かるように、磁場の3成分とも測定結果と計算結果が非常に良く一致しており、設計どおりの磁場分布が得られた。また図2は、12台の電磁石のうち、任意の2台の測定結果を比較したものである。

図2において縦軸は磁場の相対的な誤差であるので、磁場の絶対値が小さくなる場所では発散してしまうが、磁極部分では0.1%程度の誤差範囲に収まっている。ここで、測定誤差はアライメントとホール素子の精度が主なものであるが、ホール素子は非常に精度が良く、また2台の電磁石の測定で同じものを用いているため、磁場の相対的な誤差を考えるとときには無視できる。このことは、図2で相対的誤差が比較的連続であることから妥当である。つまり、ホール素子の分解能が悪いときは、相対誤差は分解能の範囲でばらつくはずである。アライメントエラーは次のように評価した。

FFAG 加速器における半径方向の磁場分布は次の式(1)であらわされる。

$$B = B_0 (r/r_0)^k \quad (1)$$

ここで、 B_0 は半径 $r=r_0$ における磁場強度を表し、 k は

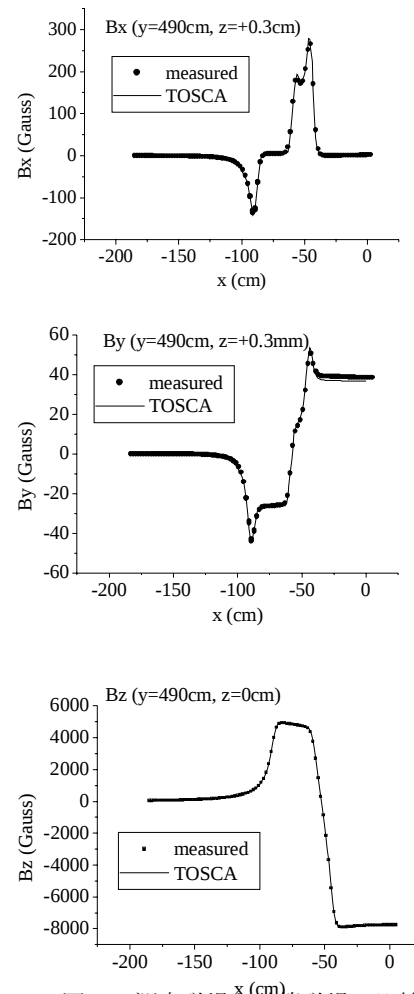


図1. 測定磁場と計算磁場の比較
(座標は加速器中心を原点、
電磁石の真中を y 軸とした)

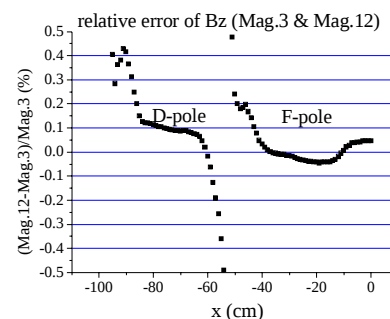


図2. 任意の電磁石2台の垂直成分相対誤差

k 値と呼ばれ磁場勾配の強さを表す。式(1)の両辺を、半径 r で微分し整理すると次式の様になる。

$$dB/B_0 = \frac{kdr}{r_0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{k-1} \quad (2)$$

式(2)において、半径 $r=r_0$ における磁場の相対的誤差は次式で表される。

$$dB/B_0 = \frac{kdr}{r_0} \quad (3)$$

ここで、アライメントエラーとして、0.2mm を仮定すると、相対誤差は $r=5m$ のとき約 0.03% となる。したがって、図 2 の相対誤差のうち、0.03% 程度はアライメントエラーによるものであると考えられる。以上から、電磁石の個体差は 10000 分の 1 のオーダーであることが分かり、電磁石のシャッフリングは不要と判断した。

加速器建設はすでに完了した。図 3 に加速器全体の写真を、図 4 に全体のレイアウトを示す。現在はビームの入射に成功し（図 5 参照）、本格的なビーム加速にむけて実験を行っている。



図 3. 150MeVFFAG シンクロトロン

4 まとめ

原理的な面から、汎用加速器としての FFAG 加速器の有用性を示した。また、現在高エネルギー加速器研究機構において進められている汎用 FFAG 開発研究を紹介した。製作した電磁石は設計どおりの磁場分布を実現していることが確認された。建設はすでに完了し、ビーム入射まで成功した。現在はビーム加速に関する実験を行っている。

参考文献

- [1] K. R. Symon et al. Fixed Field Alternating Gradient Accelerators, Phys. Rev., 103(1956).
- [2] J.Nakano Nakano et al. A Study of 150MeV FFAG SYNCHROTRON, Proc. of ARTA 2001, p15-p18
- [3] M. Aiba et al. A 150MeV FFAG Synchrotron with "Return-Yoke Free" Magnet, Proc. of PAC2001, p3254-p3257

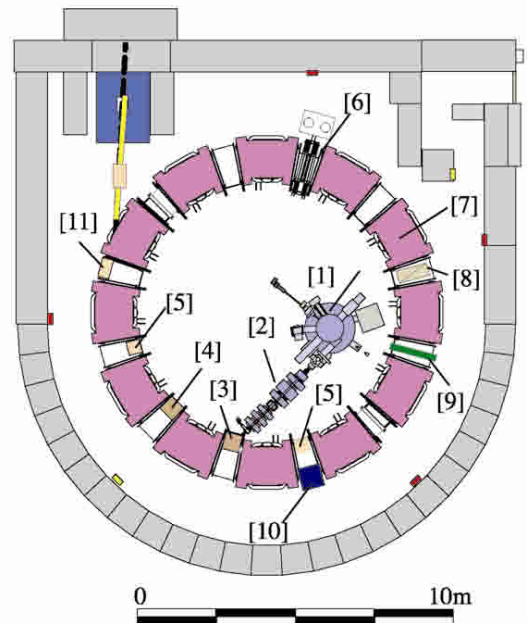


図 4. 150MeV-FFAG シンクロトロンのレイアウト

- | | |
|-----------------|------------------|
| [1] サイクロトロン | [2] トランスポート |
| [3] 入射磁場セプタム | [4] 入射静電セプタム |
| [5] バンプ電磁石 | [6] RF 加速空洞 |
| [7] FFAG 電磁石 | [8] ビーム位置モニター |
| [9] ビーム電流モニター | [10] 取り出しキッカー電磁石 |
| [11] 取り出し磁場セプタム | |

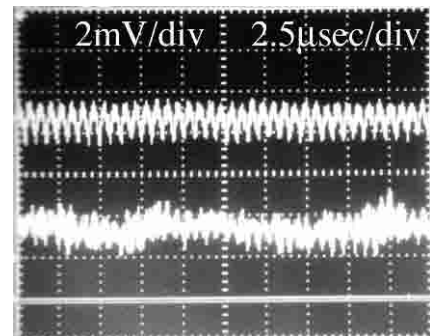


図 5. 周回ビーム信号