

メディカル F F A G 加速器の研究

三須敏幸、岩田佳之、北條悟、杉浦彰則、金澤光隆、宮原信幸、村上健、山田聡

放射線医学総合研究所 先進小型加速器事業推進室

〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

概要

放射線医学総合研究所（放医研）では、炭素線がん治療用 FFAG 加速器の開発研究を行っている。本報告では、ラジアルセクター型 F F A G のラティス解析から明らかとなる小型化の可能性と制約、常伝導 F F A G 加速器の概念検討の結果、そして更なる小型化に向けた超伝導 F F A G 加速器の検討経過を紹介する。

1 はじめに

重粒子線治療に関しては、放医研が HIMAC を用いて 1400 例を越す症例に対し良好な成果を上げており、高い治療効果が期待される重粒子線がん治療装置の普及に向けた開発が望まれている。

普及型のがん治療装置では、加速器全体及び各機器の小型化や低コスト化、オペレーションやシステムの簡素化などが必要となる。F F A G は固定磁場型加速器であることから、シンクロトロンのような磁場変化に伴うフィードバックが不要であり、高磁場を作り出すことで加速器全体の小型化が可能であると考えられ、常伝導マグネットだけでなく将来的に超伝導化により更なる小型化も期待できる。又、サイクロトロンのような等時性の制約がないことから、主電磁石を含む各機器の小型化が見込まれるなど、シンクロトロンやサイクロトロン両者の短所を補える加速器であると考えられている。

本研究は、FFAG を採用することにより普及のための小型化及び低コスト化が可能か否かを見極め、加速器システムおよび主要機器製作上の技術的課題を明らかにすることを目的としている。

ここでは、治療に必要な FFAG のビーム基本仕様を、固定磁場型加速器の特徴を生かし、ラビッド・シンクロトロンよりも一桁程度繰返しを高く設定することにした（表 1）。

表 1: FFAG がん治療装置ビーム基本仕様

ビーム種	C^{6+} （入射時）、 C^{6+} （出射時）
ビームエネルギー	400MeV/u (Bp=6.3467 Tm)
粒子数(於照射系)	2×10^9 pps
繰返し	200Hz

FFAG 加速器には、ラジアルセクター方式とスパイラルセクター方式があるが、本稿では、RF 空洞の配置スペースやチューナビリティの観点から、ラジアルセクター方式に関して先行して小型化の検討を行なった。その検討結果及び経過を以下に紹介する。

2 ラジアルセクター F F A G のラティス解析と小型化

2.1 小型化の指標

ラティスのパラメータサーチを行う上で、加速器及び各機器の小型化、RF 空洞や入射機器配置の為にドリフト空間確保が重要であることから、線形近似を使ってマトリクス計算を行い、以下のパラメータの傾向を把握することで、各カスケードにおける磁場強度、セル数、k 値などのパラメータの初期設定を行なってきた。

- ・リング半径 $\langle r_{ext} \rangle$

ここでは、エネルギーに無関係にスケール則が成立する Circumference Factor F_{circ} を加速器サイズの指標として使う。Circumference Factor F_{circ} はリング半径と最大磁場の曲率半径の比 $\langle r_{ext} \rangle / \rho$ であり、リングサイズに比例した量である。

- ・Orbit Excursion Δr

Orbit Excursion Δr は入射及び取り出しでの平均軌道半径の差であり、

$$\Delta r = \langle r_{ext} \rangle \left[1 - \left(\frac{p_{ext} C}{p_{inj} C} \right)^{\frac{1}{k+1}} \right] = F_{circ} \left(\frac{B \rho}{B_{max}} \right) \left[1 - \left(\frac{p_{ext} C}{p_{inj} C} \right)^{\frac{1}{k+1}} \right]$$

で表される。従って、各機器の小型化には、リング半径の縮小と k 値の増加が必要となる。

- ・ドリフト長

2.2 線形近似を用いた解析

図 1 では、セル数 $N=8$ において収束 (F)・発散 (D) 磁石を一对としたダブレット構造で、k 値の変化に対して軌道安定性を満足するパラメータを、線形近似を使った解析コード[1]で計算した。ここでは、k 値を 0.5 きざみ、収束磁石の見込み角及び偏向角を 1° きざみで可変した全ての組み合わせについて計算を行なった。k<200 では、第 3 の安定領域まで確認することができる。セル数を上げる場合、これら高次の安定領域はより高い k 値で存在することが確認できている。図 1a から、軌道安定性を満足し、リング半径及び orbit excursion を縮小する解として、第 2 以降の安定領域を利用することも考えられるが、図 1b で示されるように、phase advance が 180° 以上となる為、垂直方向の β 関数が増大し、ダイナミックアパーチャーの縮小や磁場誤差などによる影響を受けやすいなど、多くの問題が予想される。このことから、ここでは第 1 の安定領域を中心に行なった検討結果を紹介する。

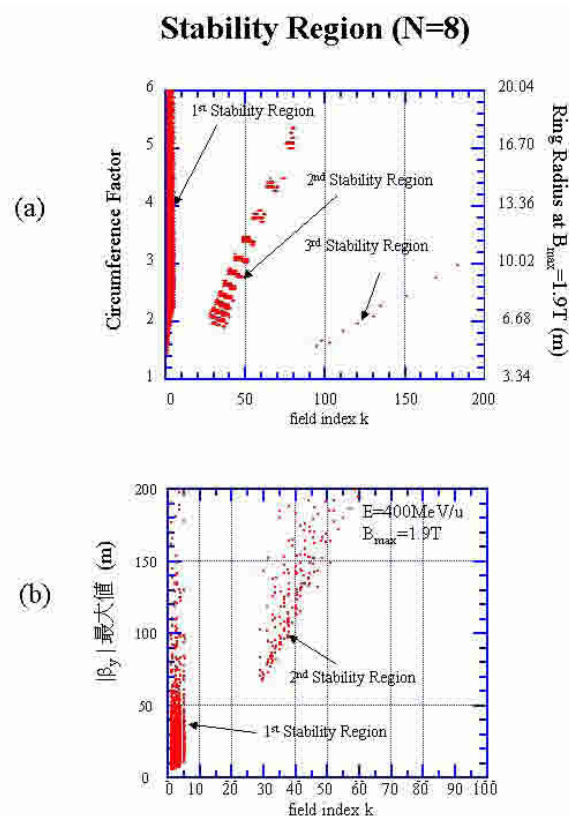
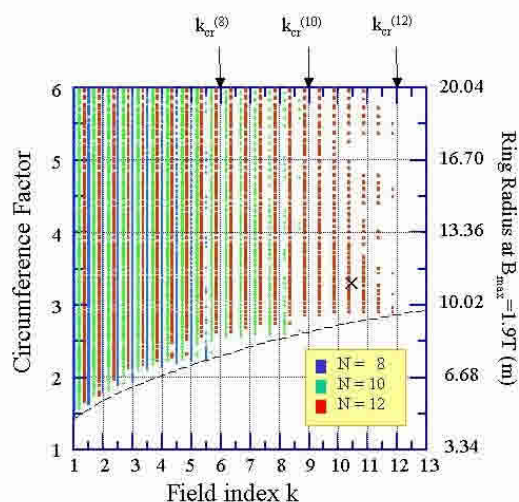


図1：ラジアルセクター型FFAGの安定領域 (N=8)

(a) Circumference Factor の field index k 依存性。右軸は最大磁場を 1.9 T とした時のリング半径。 $k < 200$ の範囲において、第3の安定領域まで確認できる。(b) 取り出しエネルギー 400 MeV/u、最大磁場 1.9 T における β 関数 (垂直方向) の振幅の field index k 依存性。

図2：ラジアルセクター型FFAGにおける circumference factor の field index k 依存性

右軸は、取り出しエネルギー 400 MeV/u、最大磁場 1.9 T に対応したリング半径。セル数が 8 (青), 10 (緑), 12 (赤) の場合についてプロットしている。×印は、常伝導FFAGの小型化における設定値である。

第1の安定領域に限定する場合、図2に示すように、セル数の増加に伴い、 k 値も高く設定できることがわかる。セル数 8、10、12 において、 k の限界値はそれぞれ 6、9、12 程度となる。この F-D のダブレット構造は、F-D-F や D-F-D のトリプレット構造に比べて、エッジ効果の影響でより高い k 値まで安定解を有することがわかっている。 k 値をより高く設定することで、各機器の小型化を図りたいが、 k 値及びセル数の増加に伴いリング半径が増加せざるを得ず、点線以下に加速器サイズを小型化することはできない。これは、 k 値の増加に伴い、垂直方向の収束解を得る為に D 磁石の寄与が増すことによる。例えば、最大磁場を 1.9 T として、ラジアルセクター型 FFAG の周長を 6.0 m 程度にするためには、circumference factor を 3 程度以下にする必要があり、セル数が 12 以上では困難であることがわかる。

3 常伝導ラジアルセクターFFAG

当初、入射用の前段 FFAG で C^{4+} を 40 keV/u から 20 MeV/u まで、後段 FFAG で C^{6+} を 20 MeV/u から 400 MeV/u まで加速する二段カスケード方式 (セル数 $N=8$, $k=5.0$) でシステム構築を行ったが、後段リングの orbit excursion が 2 m 程度と広くなることで、電磁石及び加速空洞の製作・ハンドリングなどが困難になる他、加速空洞内に装荷するコアの磁路長増加によるシャント抵抗の低下を招くなど、FFAG の利点が生かされたシステム構成とはならなかった。このことから、リング全体の小型化・低コスト化だけでなく、各カスケードでの運動量幅及び orbit excursion を縮小し、電磁石・高周波加速空洞に代表されるコンポーネントの小型化を図ることにした。そこで、FFAG を三段に設置し、一台のリングでの加速過程における運動量の変化を小さくすることにした。最大磁場は常伝導での限界と考えられる 1.9 T 程度とし、orbit excursion は主電磁石や RF 空洞等の製作性を考慮して、二段カスケード方式で検討を行った場合の半分程度以下に縮小する。特に、RF 空洞については、orbit excursion が半減することにより加速ギャップ部にセラミック材が使用できる。又、空洞内に装荷するコア材もファインメットであれば製作実績もあり、コスト低減やハンドリングが可能になる他、消費電力も半減できる等の利点がある。又、ラティスに関しては、1セルあたりのドリフト空間が大きく取れ、エッジ収束の効果も見込まれる F-D ダブレット構造を考え、高周波加速空洞や入射機器配置の為にスペースを確保する。各カスケードにおいて orbit excursion が 80 cm 程度以下になるようにパラメータ調整を行なった結果、表2及び図3のようなカスケード構成とした[2]。

表2：常伝導ラジアルセクターFFAGのパラメータ

	前段	中段	後段
ビーム種	C^{4+}	C^{6+}	C^{6+}
エネルギー (MeV/u)	0.04-6	6-100	100-400
セル数	10	12	12
対称性	5	12	12
k 値	6.5	10.5	10.5
平均取出半径 (m)	2.76	6.34	10.21
Orbit excursion (m)	0.764	0.769	0.681
磁束密度 F/D (T)	1.35/1.61	1.45/1.45	1.93/1.93

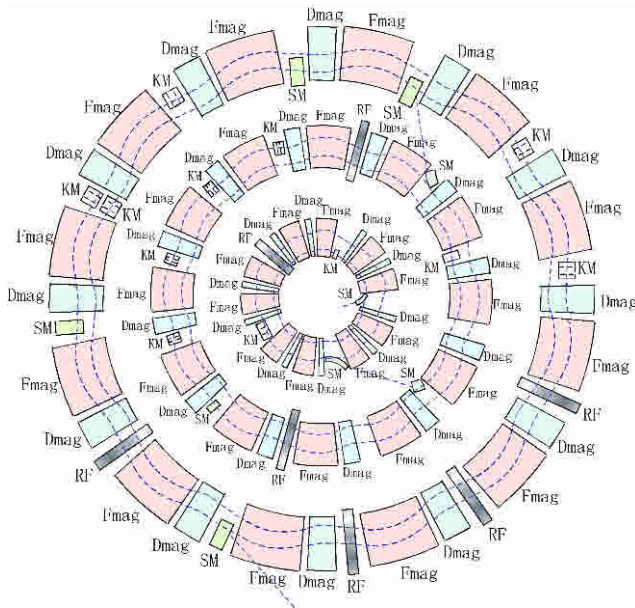


図3：常伝導ラジアルセクターFFAGのカスケード構成

前段リングでは C^{4+} を40keV/uから6MeV/uまで加速し、取出しセパタム直上流のストリッピングフォイルにより C^{6+} に荷電変換を行なう。前段リングは小型であることから、RF空洞等の配置を考慮して、10セルではあるものの対称性を5として、長直線部を確保した。

中段リングでは、 C^{6+} を6MeV/uから100MeV/uまで加速し、リングは前段及び後段リングの中間に配置する。

後段リングでは、 C^{6+} を100MeV/uから400MeV/uまで加速する。RF空洞や入出射機器の配置に必要なスペースを確保し、かつ軌道の安定領域も比較的広く取れる範囲で、システム全体が可能な限り小型に出来るラティスとした。図2の×印が後段(中段)リングの設定値であり、セル数12において、周長70m程度の三段カスケードシステムが限界であることがわかる。

4 超伝導ラジアルセクターFFAG

常伝導ラジアルセクターFFAGの検討結果を踏まえ、超伝導化により、リングサイズを更に縮小し、全体で二段のカスケード構成、すなわち、常伝導FFAG入射器(C^{4+} , 40keV/u-6MeV/u)と超伝導FFAG(C^{6+} , 6MeV/u-400MeV/u)、となるように、以下の点を考慮して検討を行なっている。

- ・RF空洞や磁石の製作性等を考慮し、orbit excursionを80cm程度以下とする。
- ・超伝導化に伴うコイルの冷却構造[3]、RF空洞、取り出し機器などの配置に必要なドリフト空間を1セルあたり平均1m以上とする。

セクション2で行なった同様の線形近似を用いたラティス計算の結果を図4に示す。以上の条件を満足する為には、最大磁場は最低5T以上必要であり、ここでは6Tとして計算を行なった。

図4から明らかなように、orbit excursionを80cm程度以下とした場合、1m以上のドリフト空間を確保する解は、セル数10～18の範囲において、N=12又は18のみであ

る。又、セル数が増加するに従い、加速器半径も増加せざるを得ず、N=12の場合リング半径は5m程度、N=18の場合6m程度以上となる。セル数20以上ではリング半径が大きくなりすぎ、超伝導化のメリットは少ない。

現在、セル数12でのラティスを中心に、超伝導電磁石の冷却構造や磁場生成方法[3]、漏洩磁場のチューンやRF空洞特性への影響などを検討している。

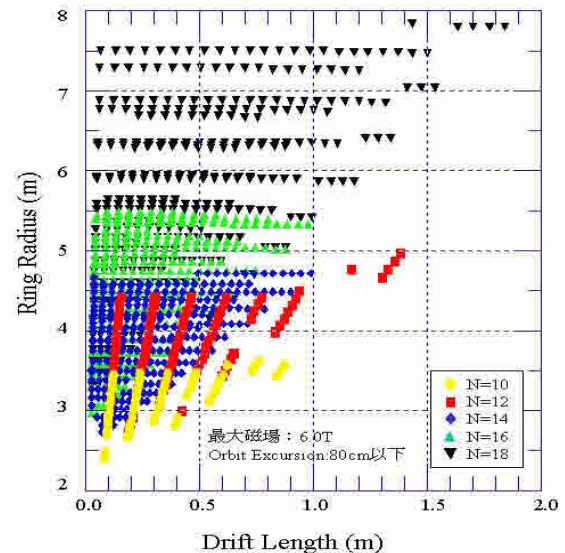


図4：超伝導ラジアルセクターFFAGにおけるドリフト空間とリング半径との関係（最大磁場6T、orbit excursion 80cm以下）

5 まとめ

イオン源及び三段の常伝導FFAG加速器によるカスケード加速でシステムを構築した結果、リング毎の orbit excursion が80cm程度以下に縮小され、最大磁場1.9T程度において周長70m程度のラジアルセクター型FFAGの結論を得た。Orbit excursionの縮小により、三段カスケード方式では、各機器がより小型化され機器の製作性も向上した。しかし、常伝導ラジアルセクター型FFAGでは三段カスケード構成で周長70m程度となることから、更なる小型化を目指して、主電磁石の超伝導化による二段カスケード構成の検討を行っている。今後は、超伝導電磁石の冷却構造や磁場生成方法、電磁石の構造に伴うラティス構成の制限、漏洩磁場のチューンやRF空洞特性への影響など、超伝導化に伴う問題点の抽出を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Misu, et al., Proceedings of EPAC2002, p.599, 2002
- [2] 三須敏幸他、Proceedings of the 8th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.54, 2003
- [3] 宮原信幸他、Proceedings of the 14th Symposium of Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Nov. 11-13, 2003