

がん治療用小型FFAG加速器の開発研究 (I)

三須敏幸¹、岩田佳之、北條悟、杉浦彰則、金澤光隆、宮原信幸、村上健、山田聰
放射線医学総合研究所 加速器物理工学部
〒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、Fixed-Field Alternating-Gradient (FFAG)と呼ばれる固定磁場型加速器を使った炭素線がん治療装置の開発研究を行なっている。治療装置の普及も考慮し、加速器を含めた治療施設全体の小型化、最適化を図る必要がある。ここでは、FFAGの光学的特長と加速器全体及び各機器の小型化に向けた概念設計の現状を紹介する。

1. はじめに

放医研では平成13年度から文部科学省の委託を受け、重粒子線がん治療装置の普及に向けて小型FFAG加速器の開発研究を開始した。治療装置の普及においては、小型化、低コスト化、省電力化など、実現可能な範囲で最適化することが望まれる。現在検討中の炭素治療用FFAG加速器は、繰り返し数百Hz程度、水中飛程25cm以上を実現する為に炭素イオンを400MeV/uまで加速することを想定して検討を行なっている。

加速粒子	C ⁴⁺	C ⁶⁺
水中飛程	25cm以上	
入射エネルギー	40keV/u (Br=0.086 Tm)	
出射エネルギー	400MeV/u (Br=6.34 Tm)	
加速粒子数	~ 2x10 ⁹ pps	
繰り返し	200Hz以上	

2. FFAGとは

FFAGとは、動径方向に磁場勾配を有し、方位角方向の磁場が周期的変化を伴う固定磁場型加速器のことである。現在、高エネルギー加速器研究機構では陽子を150MeVまで加速する為の試作機¹が建設中であるが、FFAG加速器の特性や実用性について十分理解されているとは言えない。

固定磁場型加速器であるFFAGの利点は、シンクロトロンでは実現不可能な高繰り返し加速が

可能であり、磁場変化に伴うフィードバックが不要である事等、高磁場を作り出すことで加速器全体の小型化が期待できるところにある。その一方、AVFサイクロトロンやリングサイクロトロンは等時性の制限から加速エネルギー範囲の増加に伴い磁石の動径方向のサイズも増大する為に機器の小型化が困難である。この等時性の条件を排除し磁場分布を自由に設定することで磁石の小型化を図る事が出来ると考えられる点もFFAG加速器の魅力である。

スケーリングを伴うFFAG加速器では、平均磁場が、最小軌道半径R_{min}での平均磁場<B_{min}>に対して $\langle B \rangle = \langle B_{min} \rangle (R/R_{min})^k$ のように動径方向に変化する。このfield-index kを高く設定することで、動径方向の軌道の変位幅を抑え、主電磁石や高周波加速空洞を小型化することが考えられる。

FFAGにはエッジ効果により垂直方向のビーム収束を行なうスパイラル・セクター方式と、磁石の極性を交互に配置することでビーム収束を行なうラジアル・セクター方式の2種類がある²。

スパイラル・セクター方式は加速器サイズを小さくできるという利点はあるが、高周波加速装置の配置が問題になり、磁石形状も複雑になることから、本研究ではラジアル・セクター方式を中心に検討を行っている。

3. FFAGの光学的特徴

例えば、収束磁石(F)と発散磁石(D)を交互に配置した構成を考え、各機器の小型化(軌道の変位幅を縮小)の為にfield-index kを増加させる場合、F磁石において水平方向のビームの収束がよくなるが、垂直方向のビーム発散を防ぐ為にD磁石の磁場を上げるか磁路長を増やすことになる。この場合、D磁石の寄与が増加する分、加速器全体のサイズが大きくなるという相反する傾向を示す。従って、設計を行なう際は、加速器の全体サイズと各機器の製作性などを考慮して、妥協できるパラメータを探す作業が必要となる。

実際に、線形近似でのラティスパラメータの

¹ E-mail: maxmisu@nirs.go.jp

サーチコードを使って、全てのパラメータ空間で field index k に対して加速器サイズを表す circumference factor $\langle R \rangle / \rho$ の傾向なども解析した³。ここで、 $\langle R \rangle$ は加速器中心から取出し軌道までの半径、 ρ は最大磁場の曲率半径である。

セル数 N が小さい場合、ビームの安定条件を満たす field index k の最大値も小さくなることから、軌道の変位幅が増加し主電磁石や RF 空胴の大型化に繋がる。その一方、各機器を小型化する為に、軌道の変位幅を小さくする場合、field index k を高く設定できるようにセル数も上げなくてはならない。セル数を上げて field index k を増加させたとしても、加速器サイズを示す circumference factor $\langle R \rangle / \rho$ の最小値も増加する為、セル数 10 以上では circumference factor $\langle R \rangle / \rho$ は 3 程度以上が必要となる結果が得られた。すなわち C^{6+} を 400 MeV/u まで加速する場合、1.9 T の最大磁場を想定したとしても、加速器半径が最低 10 m 以上必要となる計算になる。

又、RF 加速空胴や入出射機器の配置スペースを確保する為には、セル数もあまり大きく取れず、小型化を考慮した場合、セル数及び field index k は以下のように 12 程度以下が適当と考えられる。

セル数	field index k	最大値
6	~	3.0
8	~	6.0
10	~	9.0
12	~	12.0

4. F F A G 概念設計の現状

平成 13 年度に行った概念設計では、イオン源及び二段の常伝導 F F A G 加速器によるカスケード加速でシステム構築を行った³が、各リングでの粒子軌道の変位幅が広がることで、電磁石及び加速空胴の製作が困難になる他、加速空胴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、F F A G の利点が生かされたシステム構成とはならなかった。

以上のことから、平成 14 年度はリング毎の粒子軌道の変位幅を可能な限り小さくとれるように、三段カスケードシステムに変更し検討を行った。三段カスケード方式では、各リングの軌道変位がそれぞれ 800 mm 程度以下に縮小できるように、各リングのセル数及び field-index k を変えている。これにより、電磁石並びに加速空胴はより小型化され製作上の問題は緩和された。

前段リングでは C^{4+} ビームを 40 keV/u から 6 MeV/u まで加速する (表 1 及び図 1 参照)。取出しセプタムの直上流でのビームセパレーションが

5 cm 程度になるようにキッカーを配置したことから、取出しセプタム直上流にストリッピングフォイルを設置する設計とした。このリングは小型である為、RF 空胴の配置を考慮して長直線部を極力長くとれるように、10 セル構造ではあるものの対称性を 5 としている他、F 磁石と D 磁石を一对としたダブレット方式にした。

	入射時	取出時
エネルギー [MeV/u]	0.04	6.0
セクター数		10
対称性		5
k 値		6.5
チューン		(3.16, 0.90)
周長 [m]	13.17	18.40
周波数 [MHz]	0.215	1.878
最小半径 [m]	1.96	2.72
最大半径 [m]	2.16	3.02
長直線部 [m]	0.72	1.00
短直線部 [m]	0.15	0.21
磁束密度 F [T]	0.15	1.35
磁束密度 D [T]	0.18	1.61

表 1 F F A G 前段リングパラメータ

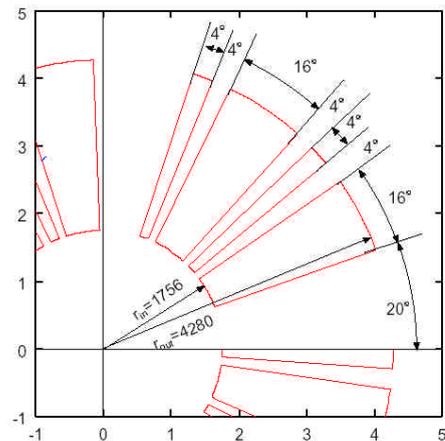


図 1 F F A G 前段リングラティス

中段リングでは、 C^{6+} のビームを 6 MeV/u から 100 MeV/u まで加速する (表 2 及び図 2 参照)。このリングは前段リングの外側かつ後段リングの内側に設置する為、入射軌道半径は 5.8 m 程度必要である。RF 空胴や主電磁石の製作性の観点から軌道変位を 800 mm 程度以下にする事も考慮し、 $k = 10.5$ とした。

後段リングでは、 C^{6+} ビームを 100 MeV/u から 400 MeV/u まで最終的な加速を行う (表 3 及び図 3 参照)。後段のリングサイズは最大磁場によって決定されるが、ここでは常伝導電磁石を想定して 2.0 T 以下に設定した。入射取出しのための

直線部を極力確保するために、前段・中段同様にダブルトラティスとしている。

		入射時	取出時
エネルギー	[MeV/u]	6.0	100
セクター数			12
対称性			12
k 値			10.5
チューン		(4.81,0.84)	
周長	[m]	37.96	43.00
周波数	[MHz]	0.894	3.002
最小半径	[m]	5.80	6.57
最大半径	[m]	6.06	6.86
長直線部	[m]	0.73	0.83
短直線部	[m]	0.15	0.18
磁束密度 F	[T]	0.39	1.45
磁束密度 D	[T]	0.39	1.45

表2 F F A G中段リングパラメータ

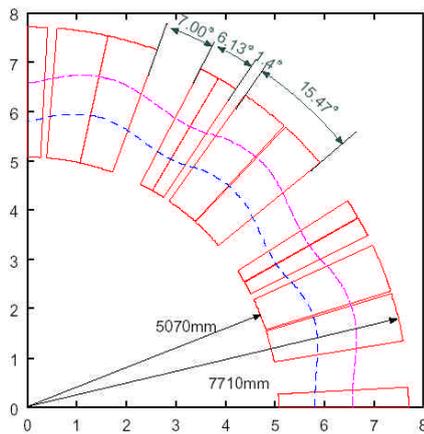


図2 F F A G中段リングラティス

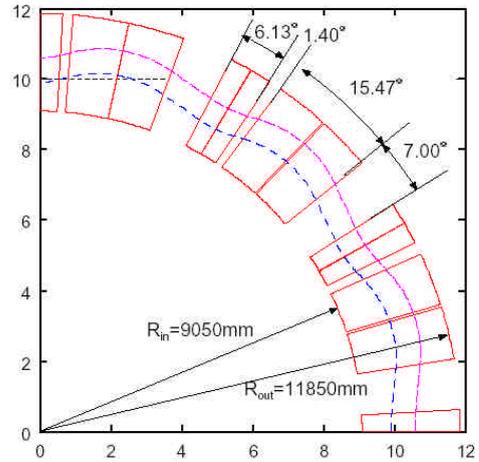


図3 F F A G後段リングラティス

カスケード段数を増やしたことによって製作上の問題が緩和された一方、常伝導マグネットを想定したラジアル・セクター型 F F A G での小型化の限界は周長 70 m 程度となることが示された。これは、前節の線形近似での光学的傾向とも一致する。

5. まとめ

イオン源及び三段の常伝導 F F A G 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、リング毎の粒子軌道の変位幅は 800mm 程度と縮小され、最大磁場 1.9 T 程度において周長 70 m 弱のラジアル・セクター F F A G の結論を得た。しかし、加速器全体及び各機器が十分に小型化されたとは言えず、引き続き主電磁石の超伝導化を含めた検討⁴を行なっている。

参考文献

- [1] M. Aiba, et al., "Development of A FFAG Proton Synchrotron", Proceedings of EPAC2000, Vienna, Austria., p581, 2000
- [2] F. T. Cole, et al., "Electron Model Fixed Field Alternating Gradient Accelerator", Rev. Sci. Instr. Vol.28, p. 403, 1957
- [3] T. Misu, et al., "Development of Compact FFAG Accelerator for Heavy Ion Radiotherapy", Proceedings of EPAC2002, p.599, 2002
- [4] 岩田佳之他、「がん治療用小型FFAG加速器の開発研究 I I」、Proceedings of the Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003

		入射時	取出時
エネルギー	[MeV/u]	100	400
セクター数			12
対称性			12
k 値			10.5
チューン		(4.81,0.83)	
周長	[m]	64.79	69.24
周波数	[MHz]	1.991	3.098
最小半径	[m]	9.90	10.58
最大半径	[m]	10.34	11.05
長直線部	[m]	1.25	1.34
短直線部	[m]	0.26	0.28
磁束密度 F	[T]	0.96	1.93
磁束密度 D	[T]	0.96	1.93

表3 F F A G後段リングパラメータ