

がん治療用小型 F F A G 加速器の開発研究(II)

岩田佳之¹、三須敏幸、北條悟、金澤光隆、宮原信幸、村上健、山田聰

放射線医学総合研究所 重粒子医科学センター・加速器物理工学部

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

概要

がん治療用小型加速器の更なる普及のため、放射線医学総合研究所では医療用小型 F F A G 加速器の開発研究を行ってきた。がん治療用加速器に求められるスペックとしては、水中飛程25cm以上の炭素イオンという要請を満たすため核子あたり400MeV以上まで加速する必要がある。これまで常伝導電磁石の使用を前提とした設計を行ってきたが、更なる小型化のため平成15年度から超伝導電磁石の採用も視野に入れた設計を行っている。この医療用小型 F F A G 加速器の開発研究に関して現状報告する。

1. はじめに

放射線医学総合研究所では、医療用重イオンシンクロトロン(HIMAC)により得られる高エネルギー炭素線を用いたがん治療の臨床試行を平成6年から始め、これまで良好な成績をおさめている。この臨床実績から、重粒子線を用いた医療用加速器の更なる普及化が世界各地で進められている。炭素線を用いたがん治療用重イオン加速器に求められるスペックは、水中飛程25cm以上を達成するため、炭素イオンを核子あたり400MeV以上まで加速する必要がある。この要求を満たす加速器としてはシンクロトロンが最も有力であるが、その他 F F A G (Fixed Field Alternating Gradient) 加速器が候補に上げられる。F F A G 加速器は固定磁場かつ強収束の加速器で、シンクロトロンとサイクロトロンの長所を兼ね備えた加速器である。F F A G 加速器は固定磁場を用いるが、サイクロトロンのような等時性磁場を持たず、加速と共に磁場が強くなる特殊な磁場形状を持つ。固定磁場を用いることで繰り返しが高くとれるため、直流に近い大強度ビームが得られる。この他、加速時間が短いことからミュオンなど短寿命粒子の加速器として有望視されている。F F A G 加速器の原理は50年代に提唱されていたが、その特殊な磁場形状を持つ電磁石の設計や大口径かつ周波数可変の加速空洞の製作が当時の技術では困難であったため実用化には至っていなかった。しかしながら、近年の三次元磁場計算コードの発展や高透磁率磁性体の開発により F F A G の実用化が可能となってきた。

医療用加速器の更なる普及には加速器自体の小型化が必要不可欠である。我々は普及型がん治療用加

速器としての小型 F F A G の開発研究を平成13年度より行ってきた[1,2]。F F A G 加速器にはradial sector型とspiral sector型の2種類存在するが、この開発研究においてはradial sector型 F F A G を採用した。この設計においては常伝導電磁石の使用を前提とし、イオン源から得られる40keV/uの¹²C⁴⁺を3段カスケード F F A G により400MeV/uまで加速する(表1)。現状では最後段の F F A G 加速器の取り出し半径は11m程度となる。更なる F F A G 加速器の小型化のため、我々は平成15年度より超伝導電磁石の採用も視野に入れた検討をはじめた。ここでは超伝導 F F A G 加速器のビーム光学特性に関して報告する。

2. F F A G 加速器の小型化

F F A G 加速器で使用される磁場は

$$B = B_0 (r/r_0)^k \quad (1.1)$$

で表される磁場勾配を持ち、特にradial sector型 F F A G ではBの符号が異なるF磁極、D磁極を交互に並べることで強い収束力を得ている。ここでrは軌道半径、kはfield indexである。F F A G 加速器の大きな特徴は加速と共に粒子軌道が変化することである。そのため入射時と出射時の同径方向の軌道差(excursion)は高周波加速空洞の口径を決める。F F A G 加速器では等時性磁場を持たないため、周波数可変の高周波加速空洞が必要とされる。しかしながら、このような大口径かつ周波数可変の加速空洞には技術的制約があり、現状ではexcursionを約80cm以内に収めるよう設計を進めている。この条件を満たすため3段カスケードにする必要性が生まれた。またexcursionは電磁石や真空層の大きさを決め、更には加速器全体のサイズ及び建設費を左右する。

Parameters	前段	中段	後段
加速粒子	¹² C ⁴⁺	¹² C ⁶⁺	¹² C ⁶⁺
セル数N	10	12	12
k値	6.5	10.5	10.5
B _{max} (T)	1.35	1.45	1.92
E _{inj} (MeV/u)	0.04	6	100
E _{ext} (MeV/u)	6	100	400
R _{inj} (m)	2.06	5.93	10.1
R _{ext} (m)	2.87	6.72	10.8

表1: 3段カスケード F F A G の諸パラメータ。

¹日本学術振興会 科学技術特別研究員

Parameters	前段	後段
加速粒子	$^{12}\text{C}^{4+}$	$^{12}\text{C}^{6+}$
入射エネルギー E_{inj} (MeV/u)	0.04	6
取り出しエネルギー E_{ext} (MeV/u)	6	400

表2：2段カスケードF F A Gの加速粒子及び入出射エネルギー。

そのためF F A G加速器の小型化の為にはexcursionを短くすることが重要である。

一般に超伝導電磁石を用いることで高磁界を得ることができ、その結果軌道半径及びexcursionを短くすることができる。超伝導電磁石を採用した場合のビーム光学特性に関して検討を行った。これまでの小型F F A Gに関する開発研究では表1に示した3段カスケード構成を考えていたが、電磁石の超伝導化に伴い表2のような2段カスケード構成を考える。前段F F A Gのエネルギー範囲は3段カスケードF F A Gのそれと等しいため、ここでは表2の後段F F A Gについてのみビーム光学特性を示す。ラティスはF O D Oとし、F磁極の最大磁場を5Tとする。セル数N、k値は表3に示した範囲内とし、各N及びk値の組み合わせに対しF及びD磁極内での曲げ角及びF O D Oそれぞれの見込み角を1度ステップで変化させ閉軌道を求める。そして上記全ての組み合わせについて線形光学近似による横方向のビーム光学計算を行い、ベータatron振動が安定となる解を求め、安定解に関してビーム光学パラメータの傾向を調べた。上記計算により得られたベータatron振動の安定解に関して、k値と安定解の数の関係を図1に示した。

Parameters	Value
セル数N	8,10,...,16
k値	1,2,...,20
F及びDの曲げ角	全ての組み合わせ (1度ステップ)
F O D Oそれぞれの見込み角	全ての組み合わせ (1度ステップ)

表3：線形光学計算で用いたパラメータの範囲。

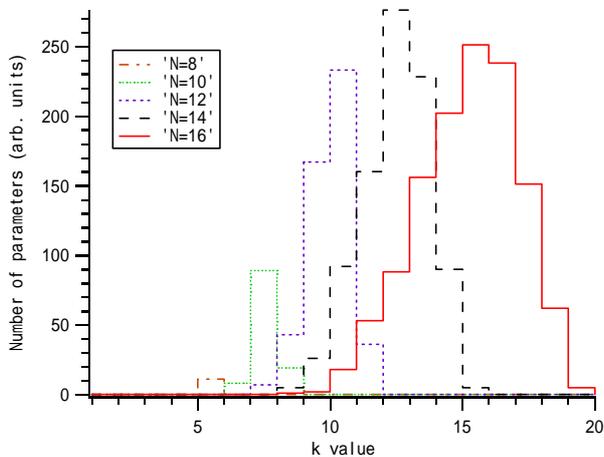


図1：F磁極の最大磁場を5Tとしたとき、各セル数Nに対するk値と安定解の数の関係。

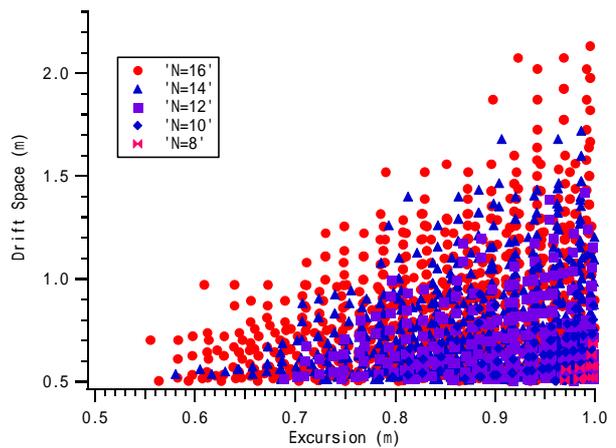


図2：F磁極の最大磁場を5Tとしたときの、各セル数Nに対するexcursionと長直線部のドリフト空間長の関係。

ここではexcursion 1mかつ長直線部のドリフト空間長 1mという条件を満たす安定解のみプロットしてある。図1から、選べるk値はセル数Nに依存することがわかる。これはF磁極の最大磁場にはよらない。また、セル数が大きいところで安定解の数が多くみられる。次に、excursionと長直線部のドリフト空間長の相関をプロットしたものが図2である。電磁石の小型化のためにはexcursionは出来る限り短くする必要があるが、同時に入出射機器及び加速空洞のためのドリフト空間を確保する必要がある。F磁極の最大磁場を5Tとすると、excursion 80cmの条件を満たす安定解は殆どがセル数N=14ないしN=16であることがわかる。これはexcursionを短く取るためk値を高くする必要があり、その結果、セル数が大きい解のみがexcursion 80cmの条件を満足できるためと考えられる。以上からF磁極の最大磁場が5Tである場合、高周波加速空洞の口径により制約(excursion 0.8m)と、入出射機器のためのドリフト空間長を1m以上確保するという両条件を満たす解は余り存在しないことがわかる。

次に同様な計算をF磁極の最大磁場が6Tの場合について行った。各セル数Nに対するexcursionと長直線部のドリフト空間長の相関を図3にプロットした。

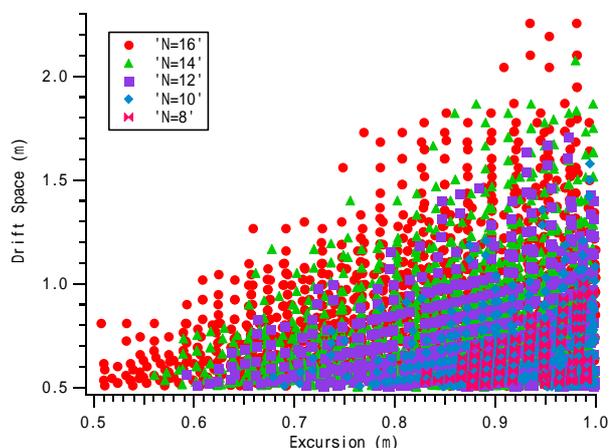


図3：F磁極の最大磁場を6Tとしたときの、各セル数Nに対するexcursionと長直線部のドリフト空間長の関係。

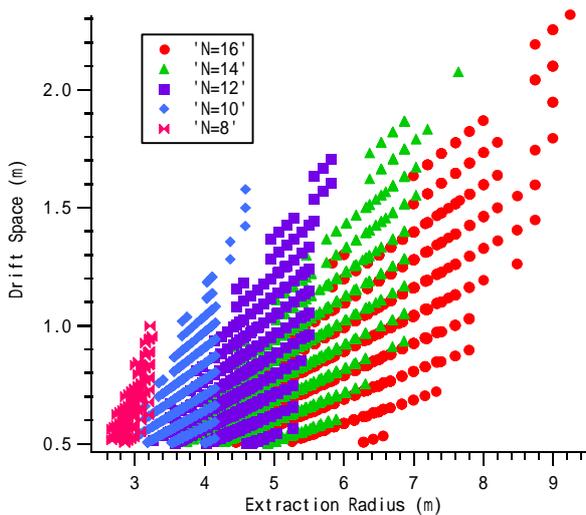


図4：F磁極の最大磁場を6Tとしたときの、取り出し半径とドリフト空間の関係。

F磁極の最大磁場が5Tの場合と同様な傾向を示すが、セル数Nが低い領域でもexcursion 0.8mかつ長直線部のドリフト空間長 1mという条件を満足する解が存在する。

図4はF磁極の最大磁場を6Tとしたときの取り出し半径とドリフト空間長の相関を示したものである。ここではexcursionが1m以内になる安定解のみプロットした。超伝導FFAGにおいても小型化のためには、ドリフト空間を短くかつセル数を少なくする必要があることがわかる。

3. まとめ

医療用加速器としての小型FFAG加速器のビーム光学特性に関する検討を行った。超伝導電磁石を用いることでFFAG加速器の小型化が可能であるが、2段カスケード構成にするためにはF磁極の最大磁場が約6T以上は必要であることがわかった。しかしながら、入出射に必要なドリフト空間の確保のため、軌道半径は余り小さくならない傾向が見られた。今回は線形近似による計算であるため、トラッキングなどによる詳細な計算が必要である。また、式(1.1)で表される磁場分布を持つ超伝導電磁石の設計が必要であり、今後多くの課題が残されている。

参考文献

- [1] T. Misu et al., "Development of Compact FFAG Accelerator for Heavy Ion Radiotherapy", Proc. EPAC2002, Paris, France, p. 599.
- [2] 三須敏幸他, "がん治療用小型FFAG加速器の開発研究(I)", 第28回リニアック技術研究会プロシーディング, 東海村, 平成15年7月31~8月2日.