

FFAG とシンクロトロンハイブリッド加速手法

田中博文、中西哲也、丸山昭彦、蒲超虎、牧田陽、築島千尋、山本俊二

三菱電機・先端技術総合研究所

〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

概要

入射時は FFAG モードで偏向磁場一定の加速を行い、その後、シンクロトロンモードで、偏向磁場を変化させるハイブリッド加速手法に関し検討した。FFAG 加速器と比べて、高繰り返し加速は難しいが、加速ゲインが大きいという特長を持つ。また、シンクロトロンと比べて、偏向電磁石が大型になるが、全体寸法を小さくできるという特長を持つ。適用例として、(1)電子を 6MeV まで加速する、 ϕ 300mm 程度のコンパクトなラップトップ誘導加速器、(2)炭素を 400MeV/n まで加速する、 ϕ 16m 程度の RF 加速器の概略検討を実施した。

1 はじめに

高エネルギー(MeV 級)電子ビームや、電子ビームを変換して発生させる x 線は、産業・医療の様々な分野で利用されている。電子加速器が、(1)低コスト、(2)コンパクト、(3)取り扱いやメンテナンスが簡便となれば利用分野の一層の拡大が期待できる。一方、重粒子線治療は、開発段階を経て普及の時期を迎えようとしている。加速器としては、シンクロトロンという完成度の高い加速器が存在するが、コンパクト化、高性能化へ向けた検討[1][2]も行われている。

我々は、産業・医療利用に望ましい加速器を開発するという視点で、新たな加速手法の概念検討を実施している。そして、入射時は FFAG モードで偏向磁場一定の加速を行い、その後、シンクロトロンモードで、偏向磁場を変化させるハイブリッド加速手法を提案した[3]。本論文は上記ハイブリッド加速手法の概要と、適用例として(1) ϕ 300mm 程度のコンパクトで低コストな 6MeV ラップトップ円形誘導電子加速器、(2)炭素 400MeV/n の重粒子線加速器の概略検討結果に関して記述する。

2 ハイブリッド加速手法

入射時は FFAG モードで偏向磁場一定の加速を行い、その後、シンクロトロンモード（誘導電界加速の場合はベータトロンモード）で偏向磁場を変化させるハイブリッド加速手法に関し記述する。ハイブリッド加速は、誘導電界加速、RF 電界加速の双方の加速が可能であるが、本章の議論では電子の誘導加速器に絞った議論を行う。

低エネルギーの円形電子加速器の場合、電子ビーム出力の上限を決めるのは、空間電荷によるビーム発散力である。空間電荷の影響を小さくするには、加速中のビームサイズを大きくし、且つ、ベータトロン振動数を大きくする必要がある。平衡軌道を固定した場合には、ビームサイズとベータトロン振動数の関係は相反するので、両者を両立させるには平衡軌道を加速と共に変化させる必要がある。上記を実現する加速手法がハイブリッド加速である。以下の様

な方式で加速を行う。

入射時は FFAG モードで運転する。即ち偏向磁場を一定にしたまま加速コアを励磁し、誘導電界で加速を行う。入射した電子はエネルギーの増加と共に平衡軌道が外側に広がる。ある程度の加速電界強度があれば、電子ビームを連続的に入射可能であり、入射完了時には、内側がエネルギーの低いビーム、外側がエネルギーの高いビームが同時に周回している状況になる。入射終了後は、加速コアと偏向磁場の双方を増加させるベータトロンモードで運転する。各々の平衡軌道上のビームは平衡軌道を変えながら加速される（後述）。出射時は偏向磁場の増加を止めるか、または小さくし、加速コアはベータトロンモードと同様に励磁する。入射時と同様に電子ビームの平衡軌道は外側に移動し、出射される。

図 1 に加速シナリオの一例を示す。

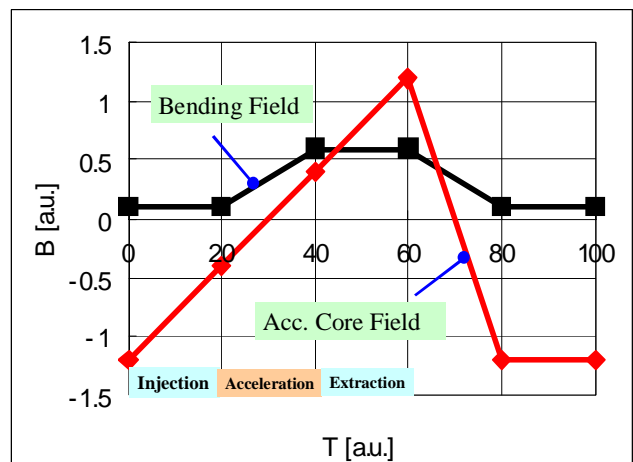


図 1：ハイブリッド加速手法の加速シナリオ
(Bending Field：偏向電磁石の励磁パターン、Acc. Core Field：誘導電界発生用加速コアの励磁パターン)

円形の誘導加速器(ベータトロン)ではベータトロン加速条件が良く知られている。即ち、 $2 \Delta B(\text{軌道}) = \Delta B(\text{軌道内側平均})$ が成り立つ時に平衡軌道を一定に保ち電子ビームが加速される。即ち、ビーム周回軌道上の磁場強度の 2 倍が、ビーム周回軌道の内側断面の平均磁場強度と等しい時に上記条件を満足する。平衡軌道が変化しないコンベンショナルなベータトロンの場合には、上記ベータトロン加速条件を成り立たせる様に偏向電磁石の励磁パターンと加速コアの励磁パターンを調整する必要がある。一方、ハイブリッド加速は入射時には FFAG モードで運転するので、入射完了時には、軌道の内側から外側まで幅の広いビームが周回していることになる。幅広ビームの各位置のビーム

は異なる平衡軌道上を周回することになる。全ての平衡軌道上で $2 \Delta B(\text{軌道}) = \Delta B(\text{軌道内側平均})$ を満足させることは難しい。よって、加速中は以下の様な3つの条件でそれぞれの位置の電子ビームは加速される。

$2 \Delta B(\text{軌道}) < \Delta B(\text{軌道内側平均})$: 半径が小さい位置を周回するビームは加速コアの強い磁束が支配的であり、上記の加速条件となる。この場合加速中の平衡軌道は加速と共に外側にずれる。

$2 \Delta B(\text{軌道}) > \Delta B(\text{軌道内側平均})$: 半径が大きい位置を周回するビームは加速コアの強い磁束の割合が小さくなり、上記の加速条件となる。この場合加速中の平衡軌道は加速と共に内側にずれる。

$2 \Delta B(\text{軌道}) = \Delta B(\text{軌道内側平均})$: ペータトロンの加速条件が成り立つので加速中の軌道はほぼ一定に保たれる。

即ち、FFAG モードで水平方向に広がったビームは、それぞれの平衡軌道位置を変えながら加速される。加速中に平衡軌道が変化しない平衡軌道位置は偏向電磁石と加速コアの励磁パターンを変えることで調整可能である。

今、加速コアの半径を r_c 、加速コアの磁束密度を B_c 、偏向電磁石の軌道最内側の半径を r_i 、とすれば、軌道上の平均磁束密度 B_{orbit} 、軌道内側の平均磁束密度 B_{acc} は以下の式で表せる。

$$B_{orbit} = B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k$$

$$B_{acc} = B_c \left(\frac{r_c}{r} \right)^2 + B_0 \left(\frac{2}{(k+2)r_0^k} \right) \frac{r^{k+2} - r_i^{k+2}}{r^2}$$

上記、2式の関係进行调整することで、加速中のビーム径や電子密度分布を調整することが可能となる。

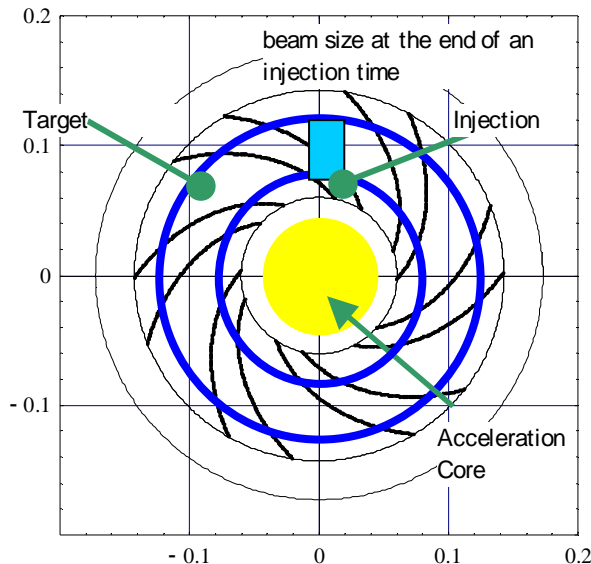


図2：ハイブリッド加速器の加速ビームの位置関係を表すイメージ図

3 ラップトップ誘導加速器

FFAG 加速器では、ビーム収束方法として、ラディアルセクター型とスパイラルセクター型に大別される。ラディ

アルセクター型は逆偏向磁場が必要で、加速器全体寸法が大きくなる。ラップトップ誘導加速器はコンパクトであることが第一命題であり、スパイラルセクター型を採用した。基本パラメータを表1に示す。

本パラメータのラップトップ誘導加速器でどの程度のビーム電流が加速できるかに関しビーム解析により概略検討を行った。具体的には入射時の空間電荷効果で発生するチューンスプレッドの大きさを計算した。空間電荷効果は線形収束力で近似し、空間電荷による収束力の弱まりで生じるビームサイズ増大の効果を考慮した最適化計算でチューンスプレッドを導出した。ピーク電流に対する水平・垂直方向のチューンスプレッドの計算結果を図3に示す。運転パラメータから許容できる垂直方向のチューンスプレッドは $\Delta v = 0.38$ 程度である。計算結果からピーク電流 8A 程度の電子ビームが加速可能であることがわかる。上記電子ビームをターゲットに衝突させ発生させた x 線の強度は、ターゲットから 1m 離れた位置で 4.3Gy/min 程度である。図4にラップトップ加速器を工業用ロボットアームに搭載したイメージ図を示す。加速器外形が $\phi 300\text{mm}$ ～ 400mm であるので、使い勝手の良い装置が実現できる。

表1：ラップトップ電子誘導加速器の基本パラメータ

	パラメータ
入射エネルギー	50keV
最大エネルギー	6MeV
入射半径	0.1m
出射半径	0.125m
K 値	2
磁石タイプ	スパイラルセクター型
繰り返し	1kHz
デューティー	2%
入射時間	20 μs
入射直後のエネルギー	50～250keV

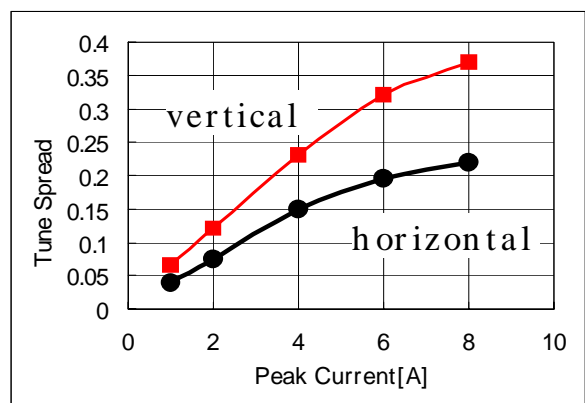


図3：加速ピーク電流値とチューンスプレッドの関係



図4：ラップトップ円形誘導加速器を工業用ロボットに搭載したイメージ図

4 RF 加速器への適用

誘導電界加速の場合、ほぼ DC 電界で加速できるので、1 週の周回時間によらず荷電粒子を加速できる。よって、FFAG モードで加速を行った後の平衡軌道が異なる荷電粒子を同時に加速できる。一方、RF 加速の場合には、荷電粒子の周回周波数と RF 周波数の差がある値以下でないと加速を行うことができない。但し、シンクロトロンと比べて横方向のアクセプタンスが著しく大きいので安定に加速できる荷電粒子は多い。定量化の為に、縦方向、横方向の運動を考慮した詳細なビーム解析が必須である。

ハイブリッド RF 加速手法とシンクロトロン RF 加速手法の長所・短所に関し、表 2 にまとめる。表からわかる様に、ハイブリッド RF 加速手法では偏向磁場強度が高く、且つ、収束電磁石が必要ないので、加速器全体の寸法をコンパクトにできる。また、水平方向のアクセプタンスが大きく、入射時の RF バケットを高くすることができる。また、入射・出射の際に平衡軌道をずらすといった制御自由度が高い。一方、平衡軌道が加速中に変化するので、偏向電磁石、RF 空洞、真空ダクト等の必要有効アパーチャがシンクロトロンより大きくなるという短所を持つ。偏向磁場強度の最大値は使用する積層鋼板の磁気特性と、電磁石電源スペックから決まる。

ハイブリッド加速方式と FFAG 加速方式を比較すると、ハイブリッド加速方式が大きなエネルギーゲインを得ることが可能である長所を持つが、偏向電磁石磁場を変化させるので、高加速繰り返しができないという短所を持つ。

表 2：ハイブリッド加速手法とシンクロトロン加速手法

	ハイブリッド	シンクロトロン
入射時の RF バケット	水平方向のアクセプタンスが大きく、RF バケットを高くすることができる	ハイブリッド程は高くできない。
偏向磁場強度	高エネルギー時に軌道を外側にシフトするパラメータを選択すれば、磁極ギャップを小さくでき、1.9T 程度の高磁場が可能	入射時に決まる垂直方向アパーチャが必要で、磁場強度は 1.5T~1.7T 程度
偏向電磁石	平衡軌道シフト分だけ、大きな磁石が必要	小さい磁石で良い
収束電磁石	必要なし	一般に必要な
RF 空洞	大口径のビームアパーチャ	小口径のビームアパーチャ

図 5 に炭素 400MeV/n のハイブリッド加速器の一構成例（磁石配置）を示す。また、表 3 に基本パラメータを示す。スパイラル角が 65 度と大きい、平衡軌道の変化の幅が小さいので、それほど複雑なスパイラル磁石形状とはならず、積層鋼板で製作可能である可能性が高い。

なお、粒子線治療装置へ適用する為には、共鳴出射法等の連続的なビーム出射手法の開発が必須となる。また、現状のパラメータではハイブリッド加速手法の特長が十分に活用されているとはいえない。 (1) 大きな横方向アクセプタンスを生かして、大きなセパトロクスに荷電粒子を入射し、空間電荷効果を抑制する、 (2) スパイラルセクター型

のシンクロトロン加速器との比較検討、等を実施しパラメータの更なるブラッシュアップを行う必要がある。

表 3：炭素 400MeV/n ハイブリッド加速器の基本パラメータ

	パラメータ
加速種	C^{6+}
エネルギー	4~400MeV/n
平均偏向半径	7.00~7.48m
セル数	16
K 値	12
スパイラル角	65 度
パッキングファクター	45%
最大磁場強度	1.9T

5 まとめ

FFAG とシンクロトロンのハイブリッド加速手法に関し報告した。FFAG 加速器の様な大強度ビームを必要とせず、シンクロトロンよりもコンパクトな加速器が必要な利用分野で有効性を発揮すると考える。現在はスペック検討段階であり、今後、横方向・縦方向の運動を考慮した詳細なビーム解析を実施し、本加速手法の有効性を検討する。

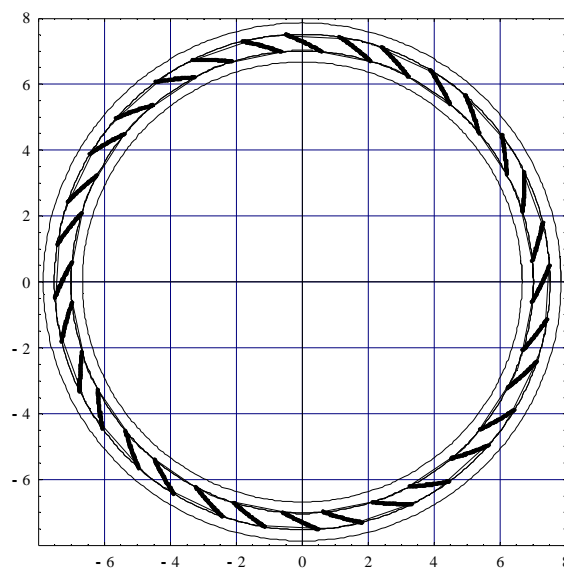


図 5：炭素 400MeV/u のハイブリッド加速器の一構成例（図中の太線が磁石の磁極境界を表す）

参考文献

- [1] T. Misu, et al., Development of Compact FFAG Accelerator for Heavy Ion Radiotherapy, EPAC 2002, Paris, France, (2002), 599.
- [2] 中野 譲他：150MeV Fixed Field Alternating Gradient Accelerator, 原子核研究 47, (2002), 91
- [3] 田中博文他：医療・工業用ラップトップ円形誘導加速器の検討、日本物理学会第 58 回年次大会、(2003)