

軌道偏心加速器における遅い取り出しシミュレーション

SIMULATION OF SLOW EXTRACTION FROM COTANGENTIAL TRAJECTORY ACCELERATOR

青木孝道^{#,A)}, 羽江隆光^{A)}, 関孝義^{A)}, 中島裕人^{A)}, 堀知新^{A)}, 野田文章^{A)}, えび名風太郎^{A)}, 平本和夫^{A)}
Takamichi Aoki^{#,A)}, Takamitsu Hae^{A)}, Yuto Nakashima^{A)}, Chishin Hori^{A)}, Fumiaki Noda^{A)}, Futaro Ebina^{A)},
Kazuo Hiramoto^{A)}
^{A)} Hitachi, Ltd.

Abstract

A new conceptual accelerator was proposed. This accelerator is to be suitable for particle beam therapy system because of potential to be compact. The characteristics of this accelerator are cotangential trajectory alignment, beam stability by weak focusing field and frequency modulated RF acceleration. A slow extraction by transverse RF kick under second order resonance ($2\nu_r = 2$) will be adopted. The purpose of this research is to confirm feasibility of the beam acceleration by frequency modulated RF and slow extraction by numerical simulation. As results, the acceleration by frequency modulated RF and generation of RF bucket, and the large turn separation by peeler and regenerator deployed outside of trajectory of maximum energy beam.

1. 背景と目的

粒子線治療システム用加速器として新概念の軌道偏心した加速器[1]が提案されている。本加速器では主磁場を動径方向に減少する弱収束磁場と周波数変調高周波電場を適用しビームの安定性を実現する。主磁場が静磁場であることで主電磁石の超伝導適用が容易であり、小型化可能な点と、偏心した軌道を採用することにより取り出し可能なエネルギーが可変である点が特徴である。主磁場は偏心軌道を実現するために、磁場の最大値を取る点が磁極の機械中心からずれた点に位置する磁場分布が必要となる。この点にイオンを入射し、運動エネルギーの増大とともに、ビーム軌道中心の位置が特定の方向に移動する。また、本加速器では安定に加速するために位相安定性の原理を活用し、運動量と高周波位相からなる縦方向位相空間において、高周波バケツを形成してビームをバンチ化して加速する。ビーム取り出しは水平チューンが 1 に近いことを利用し、横方向 RF による遅い取り出しを適用予定である。これまでの研究の結果、線形光学による一定エネルギーでの安定周回[1, 2]と軌道追跡計算による磁場の非線形項も考慮した上での一定エネルギーでの安定周回[3]が確認されている。本加速器では粒子線治療における適用性を考慮し、横方向 RF を用いた遅い取り出し法[4]の適用を検討中[5]である。

以上に加え、本加速器を成立させるには軌道偏心した加速器における、RF による位相安定性を確認し、加速中のビームロスが起きないことを確認する必要がある。また、遅い取り出しの適用に際しては取り出しチャンネルの機器設計やセパトリス形成のための磁場分布を決定する必要がある。そこで、本研究の目的はビームの安定加速と横方向 RF による取り出しが理想的な電磁場分布の下で実現可能であることを軌道追跡計算により確認することである。

2. 方法

2.1 解析対象と軌道配置

本研究対象となる加速器の構成概念図を Fig. 1 に示す。Figure 1 の複数の実線で示された円は複数の異なるエネルギーに対する設計軌道を示しており、濃い実線で示された軌道は取り出されるエネルギーの上下限に対応するエネルギー(70 MeV と 235 MeV)の軌道である。イオン源からビームが入射される位置を原点とする XY 面上に軌道は配置されている。以下では最大エネルギー(225 MeV)の軌道の内側の領域を主磁場領域、外側をFRINGE磁場領域と呼び、各軌道が密になる領域を集約領域と呼ぶこととする。集約領域には数値計算結果の解析に用いる仮想的なビームモニタが設置されている。以下では特に断りのない限り位相空間は本仮想モニター上にて定義されたものである。集約領域の上下流側の最外周の外側にはそれぞれ青で示したピーラ磁場と緑で示したリジェネレータ磁場が配置されている。リジェネレータ磁場のさらに外側にはセパタム電磁石が作る取り出しチャンネルが配置されている。本研究では加速シミュレーションと取り出しシミュレーションを実施したが、加速シミュレーションではビームは主に主磁場領域を通過しつつ加速される間の振る舞いに注目し、取り出しシミュレーションでは設計軌道からずれた粒子が取り出しチャンネルに入るまでの期間に注目する。軌道計算では以下に定義する理想的な主磁場およびFRINGE磁場、最大エネルギー軌道の外に配置されたピーラ磁場とリジェネレータ磁場の足し合わせた磁場の影響を考慮した四次の Runge-Kutta 法を用いて数値計算した。また、ビーム加速のシミュレーションでは Fig. 1 の赤点線で示す、加速ギャップの周囲に高周波電場を配置している。また、取り出しのシミュレーションでは、集約領域の前後に水平方向の RF 電場を付加している。

[#] takamichi.aoki.my@hitachi.com

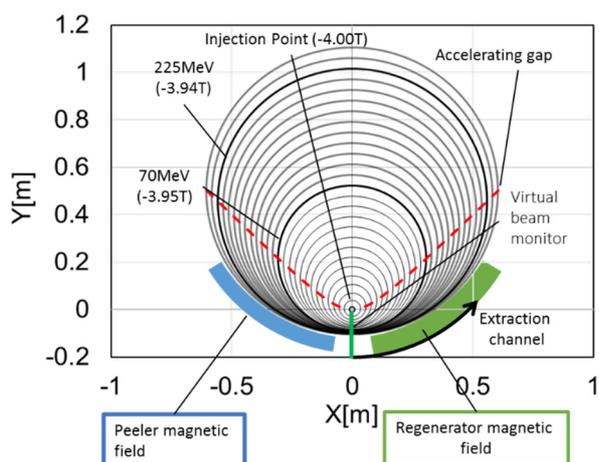


Figure 1: Simulated System.

2.2 集約領域の構成

本研究の取り出しシミュレーションで採用した集約領域の構成について述べる。集約領域の配置を Fig. 2 に示す。本加速器では、これまでの検討[1]で明らかになったように、水平方向チューンが 1 に近く、二次共鳴 ($2\nu_r = 2$) を用いた取り出し手法が適用できる可能性がある。一般に、この共鳴では主磁場を打ち消す方向のピーラ磁場と主磁場と同じ方向のリジェネレータ磁場を軌道進行方向の異なる位置に設置することで水平方向の位相空間上にセパトトリクスを形成でき、セパトトリクス外の粒子の軌道変位を大きくできる。研究対象とした加速器ではイオン入射点を原点として、そこから Y 方向に 91 mm の箇所に 70 MeV の設計軌道、さらに 10 mm 離れて 225 MeV の軌道、そこから 3 mm 離れてピーラ磁場あるいはリジェネレータ磁場が 95 mm に渡って設置されている。セプタムはピーラ・リジェネレータ磁場のさらに外側に設置されており、その厚さは 7.5 mm である。取り出しシミュレーションでは、70 MeV のビームが横方向 RF によるキックを受け、ピーラ・リジェネレータ磁場の影響で形成されたセパトトリクスの枝上を移動し、最終的にセプタムに衝突することなく取り出しチャンネルに到達することを確認する。

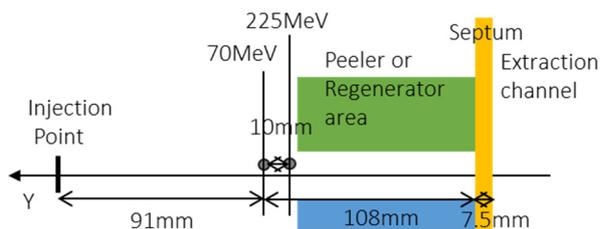


Figure 2: Configuration of Concentrated Region.

2.3 主磁場とフリンジ磁場

主磁場とフリンジ磁場は理想的な磁場分布として先行研究[3]によって定めた手法を用いて導出する。本手法によると、イオンの入射点において 4 T、最大エネルギーの 225 MeV での磁場が 3.94 T となるように軌道外側に向かって磁場が滑らかに減少する。最大エネルギーの

軌道よりも外側の領域では、さらに磁場は減少し、最大エネルギーの軌道から 332 mm 外側にて 0 T となるように減衰させている。

2.4 ピーラ磁場とリジェネレータ磁場

本研究では Fig. 3 に示す分布を持つピーラ磁場とリジェネレータ磁場を Fig. 1 に示す位置に配置した。ピーラ磁場は軌道外向きに大きさが増加する磁場、リジェネレータ磁場は途中まで大きさが増加し、極大点からセプタムに至るまでは減少する磁場である。Figure 3 の原点は 235 MeV の軌道位置に対応しており、横軸は水平方向の変位である。Figure 3 に示したように、235 MeV の軌道から 3 mm 外にずれた点より立ち上がりはじめ、セプタムの設置された 95 mm の点までビームを変位させる。

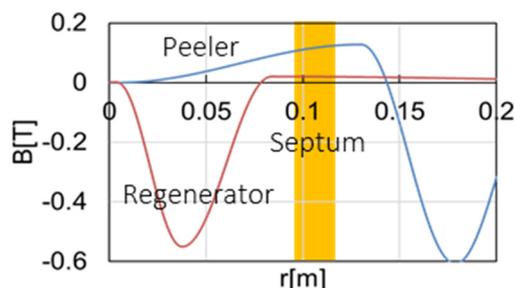


Figure 3: Distribution of Peeler and Regenerator.

2.5 計算条件

本研究では以下の条件で計算を実施した。粒子の軌道は Runge-Kutta 法によって、運動方程式を数値積分することによって得る。三次元空間上の磁場分布をメッシュデータとして入力する。この際、XY 平面から Z 方向にずれた位置の電磁場は、XY 面内の磁場勾配から Maxwell 方程式を二階微分まで考慮して解いた数値解を入力した。その他の計算条件は Table 1 に示すとおりである。加速シミュレーションの際は振幅 5 kV の加速高周波を印加し、235 GeV/s の加速速度で周波数変調をかけた。また取り出しシミュレーションではビームエネルギー 70 MeV のビームを対象とした。加速 RF は印加せず、取り出し用横方向 RF として集約領域 X 座標 ±65 mm、Y 座標 -53 ~ -98 mm の範囲に Y 軸に平行な電場を 2 kV の振幅・周波数 354 kHz で印加している。

Table 1: Calculation Conditions

Parameter	Value (Acceleration / Extraction)
Calculation time	1 ms / 100 μs
Time step	10 ps
Mesh size of field map	1 mm in XY, 2 mm in Z
RF Voltage Amplitude	5 kV / 2kV
Acceleration rate	235 MeV / 1ms

3. ビーム光学設計

3.1 横方向の光学設計

前述の主磁場において、一定エネルギーのビームは

安定に周回することが確認されている[3]。これまでの検討によると Fig. 4, 5 に示すように、取り出される予定のエネルギー領域では水平方向および鉛直方向のチューンはそれぞれ 0.993 程度、0.15 程度となる。本光学設計ではビームは加速中常に $v_r = 1$ の共鳴線の近くにおり、その影響によるビームの発散やロスが起こりうるため、今回の研究によるシミュレーションで加速中のビームロスが生じないことも確認する。

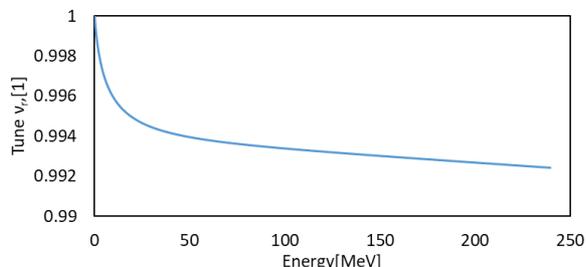


Figure 4: Horizontal Tune.

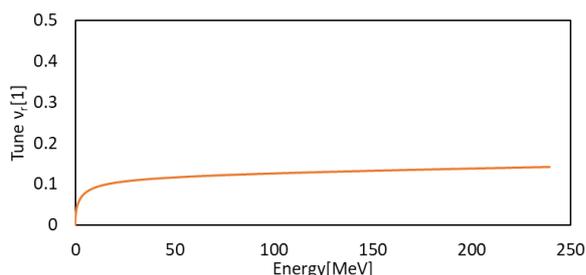


Figure 5: Vertical Tune.

3.2 縦方向の光学設計

本加速器では周波数変調加速を適用するため、位相安定性の原理に基づく、同期位相周りでシンクロトロン振動数が起こると期待できる。1 周当たり加速ギャップを二回通過することを考慮し、微小振幅でのシンクロトロン振動数を計算すると、

$$f_s = \sqrt{-\frac{2\eta V_0 \cos \phi_s}{\pi\gamma^2 \beta^2 (E + mc^2)}} \quad (1)$$

を得る。ただし、 η はスリッページファクター、 V_0 は加速ギャップに印加される電圧振幅であり、 ϕ_0 は同期位相である。本加速器の主磁場がほぼ一様であることから、モ

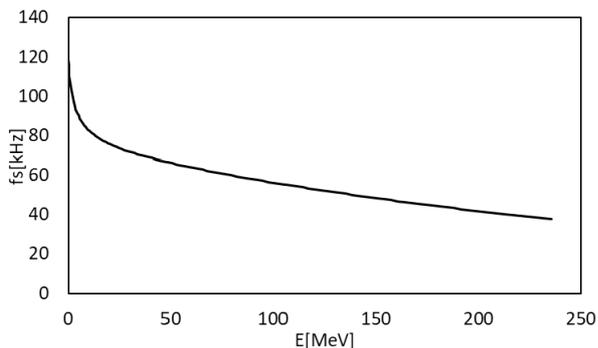


Figure 6: Synchrotron Frequency. ($V_0 = 5\text{kV}$, Acceleration time is 1 ms)

ーメンタムコンパクションファクターがほぼ 1 である。それ故、およそ $\eta = 1 - 1/\gamma^2$ である。この式から得られるシンクロトロン振動数は加速ギャップに印加する電圧が 5 kV、0 MeV から最大エネルギーまでの加速時間を 1 ms としたとき Fig. 6 に示すように、100 kHz ~ 40 kHz となる。

4. 結果

4.1 加速シミュレーション

本加速器におけるビームの安定加速の確認のため、まず、3 MeV のコースティングビームを設計軌道上に設置した。ビームの進行方向長さは 25 ターンとし、各ターンを進行方向に 20 分割するように等間隔に粒子を配置した。配置した合計 500 個の粒子について最終的に到達した運動エネルギーのグラフを Fig. 7 に示す。Figure 7 は横軸に 1 ターン目における RF 位相であり、縦軸は各粒子が 1 ms 後に到達したエネルギーである。Figure 7 から明らかなように、特定の RF 位相範囲 ($0.4\pi \leq \phi_{\text{init}} \leq 0.9\pi$) で入射された粒子のみが所定の最大エネルギー 225 MeV まで到達しており、RF によるバンチ化が確認できた。さらに、上記の位相範囲に運動量分散 $\pm 0.2\%$ の範囲の正立した楕円内に乱数により一様分布させた 500 粒子の軌道計算を実施した。結果、その平均運動エネルギーは Fig. 8 に示すように、時刻に対して単調かつ線形に増加した。またシミュレーション終了時の縦方向位相空間上の粒子分布を Fig. 9 に示す。Figure 9 によると、RF による高周波バケットの形成が確認することができる。Figure 9 に示した以外の時刻でも同様にビームが RF バケット内に安定に存在し、ビームがバンチ化された状態と

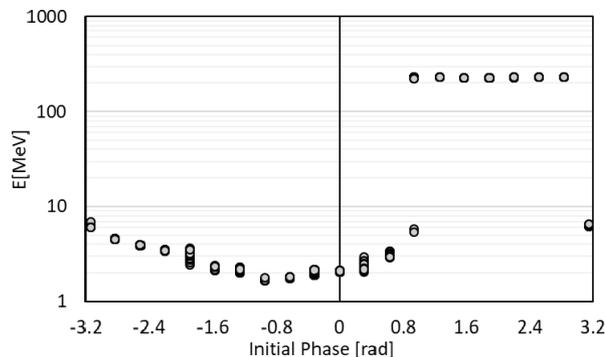


Figure 7: Reached Energy from Coasting 3 MeV Beam.

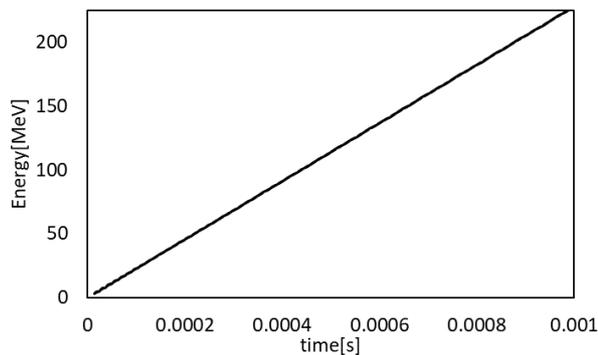


Figure 8: Bunched Beam Acceleration.

なっていることが確認できた。さらに、初期分布において楕円中心にいた粒子の運動量ずれの時間的変化を Fig. 10 に示す。Figure 10 に示したように、運動量ずれの振動が観測され、ピークカウントによって見積られる平均的な振動数は 60 kHz となった。

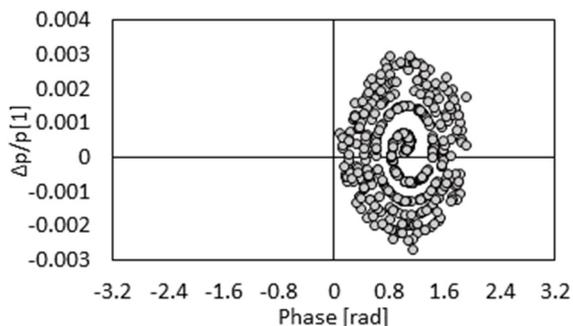


Figure 9: RF Bucket at t = 1 ms.

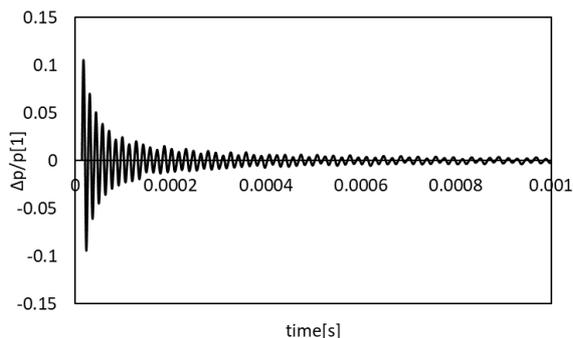


Figure 10: Momentum deviation of a Single Particle.

4.2 取り出しシミュレーション

次に取り出しシミュレーションの結果を述べる。取り出しのシミュレーションを初期エネルギー 70 MeV のビームについて実施した。初期分布として水平位相空間内に予め計算されたセパトリクスに内包される楕円分布を適用した。初期分布の楕円は変位方向 ± 25 mm, 運動量方向 ± 100 mrad の幅を持つほぼ正立した楕円であり、この楕円の内部に一様に分布した 500 粒子のシミュレーションを実行した。前述のとおり、集約領域の周辺には横方向 RF 電場が印加されており、横方向 RF 電場の周波数を水平方向のベータatron振動数に合わせることで一部の粒子の水平方向変位が増大する。水平方向変位が増

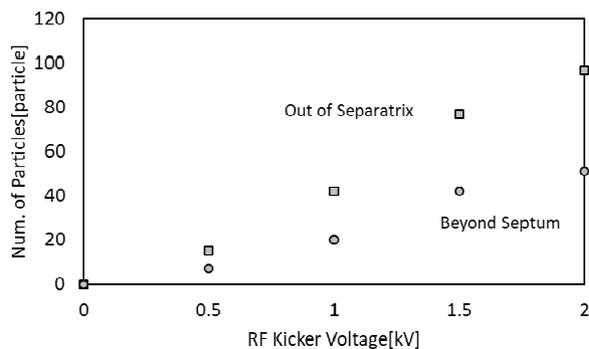


Figure 11: Extracted Particles by RF.

大した粒子は最大エネルギーの軌道の外側に設置されたピーラ・リジェネレータ磁場に入り、その後さらに外側に偏することが確認された。Figure 1, 2 に示した体系において、セパトリクスの外に達した粒子の数を四角で、セプタムに衝突することなくセプタムの外まで変位できた粒子の数を円のプロットで Fig. 11 に示す。Figure 11 の横軸は印加した RF の電圧振幅であり、RF 電圧振幅の増加に伴いセパトリクスから出る粒子とセプタムを超えた粒子の数も増大した。

5. 考察

5.1 加速シミュレーション結果に対する考察

前章に示した結果によると、適切な RF 位相に位置した粒子は 1 ms で 235 MeV の加速速度によって加速された。これは当初計画の通りの値であり、RF 加速がシミュレーションにより確認できたといえる。さらに、加速中の粒子が偏心した磁場分布が作る偏心軌道においても、ビームをロスすることなく加速されることが確認できた。さらに、運動量ずれを観察することによりシンクロトロン振動の発生が確認され、その振動数は理論計算と矛盾しない。

5.2 遅い取り出しのシミュレーション

70 MeV で安定に周回するビームに対して、横方向の RF を印加することで一部の粒子が水平方向に、変位し 100 mm 以上離れたセプタムを超えて取り出しチャンネルに導入されることを確認した。100 μ s のシミュレーション時間中に、取り出しチャンネルに導入される粒子の数は印加する RF の電圧振幅に比例することが確認された。結果、現在提案中の軌道偏心した加速器で横方向 RF による取り出しが実現可能であることが確認された。

6. 結論

現在提案中の軌道偏心加速器において、230 MeV までの安定な加速と 70 MeV における横方向 RF キッカーを用いた遅い取り出しの実現可能性が粒子追跡計算によって確認された。今後、三次元空間での粒子分布・磁場分布を考慮した取り出しプロセスを詳細解析し、ピーラ・リジェネレータ磁場を改善し取り出し効率の向上を実現する。

参考文献

- [1] T. Aoki *et al.*, “Concept of Frequency Modulated variable-energy accelerator”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, pp. 150-154.
- [2] T. Aoki *et al.*, “Betatron Frequencies in cotangential trajectory accelerator for proton beam therapy” Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver, Apr. 30 - May. 4, 2018.
- [3] T. Aoki *et al.*, “Study of Transverse Motion in Cotangential Trajectory Accelerator”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 7-10, 2018, pp. 1260-1264.
- [4] K. Hiramoto *et al.*, “Resonant beam extraction scheme with constant separatrix”, PAC93, 1993, pp.309-311.
- [5] T. Hae *et al.*, “Study for Slow Extraction System in Cotangential Trajectory Accelerator” in This Proceedings.