

## 軌道偏心加速器における遅い取出しシステムの検討

### STUDY ON SLOW EXTRACTION SYSTEM IN COTANGENTIAL TRAJECTORY ACCELERATOR

羽江 隆光, 青木 孝道, 堀 知新, 中島 裕人, 野田 文章, 関 孝義, 平本 和夫

Takamitsu Hae, Takamichi Aoki, Chishin Hori, Yuto Nakashima, Fumiaki Noda, Takayoshi Seki, Kazuo Hiramoto  
Hitachi, Ltd.

#### Abstract

A new type accelerator is being developed for the next generation particle therapy system. Since the accelerator utilizes weak focusing magnetic field and frequency modulated RF acceleration, the accelerator can be downsized by application of a superconducting magnet. The accelerator characteristically has a cotangential trajectory. In other words, there is a trajectory concentrated part by eccentrically orienting the helical trajectory to one side. To realize variable energy beam extraction from the trajectory concentrated area, we devised an extraction method that utilizes a transverse RF kicker, peeler and regenerator magnetic fields. In this method an extracted beam energy can be controlled by an applied time of an acceleration RF voltage without using energy degrader, and there is a possibility that the beam current and the beam pulse width can be controlled by the voltage pattern of the RF kicker.

#### 1. はじめに

現在、粒子線治療に用いられている代表的な加速器にはサイクロトン型加速器(AVF サイクロトン、シンクロサイクロトン)とシンクロトンがある。

サイクロトン型加速器は、直流主磁場を用いるため超電導による高磁場化が容易であり、加速器本体は小型化できる。しかし、出射エネルギーが一定であるため、治療に必要なエネルギー帯のビームを得るには、加速器外にディグレーダ、偏向電磁石やスリット等よりなる Energy Selection System (ESS)を設置する必要がある。ディグレーダには、不要放射線発生とビーム利用効率低下という課題がある。また、フラグメンテーションの問題もあり、サイクロトン型加速器の陽子線治療以外への適用を難しくしている。

一方で、シンクロトロンは、陽子線、重粒子線治療の双方に適用できるうえ、出射エネルギーが可変であり ESS は不要である。また、遅い取出しが可能で、拡散共鳴出射[1]を用いれば出射ビームの位置、強度を高精度に制御できるため、ビームを患部形状に合わせて走査するスキミング照射に適するという利点がある。しかし、シンクロトロンは、交流主磁場が必要で一般に常伝導電磁石が用いられるため、加速器本体はサイクロトンより大型化するのが課題である。

そこで我々は、サイクロトン型加速器とシンクロトン双方の特長を併せ持つ次世代の粒子線治療用加速器として、軌道偏心加速器[2]を提案している。本加速器は、シンクロサイクロトンと同じく、直流主磁場と周波数変調加速を用いるため、超伝導化により加速器本体を小型化できる。さらに、周回軌道を偏心させて軌道集約領域を設け、その領域付近からビームを取出すことにより出射エネルギーを可変とし、ESS の不要化を図る。本加速器は、陽子線、重粒子線の双方に適用しうるが、本稿では、陽子線治療に適用した場合の加速器全体システムの概念設計結果と、スキミング照射への適用を目指し検討を進めている遅い取出し手法について述べる。

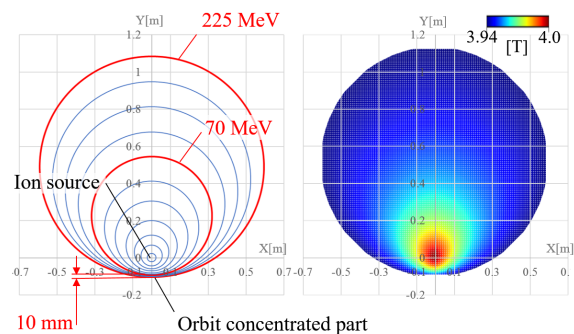
#### 2. 軌道偏心加速器

##### 2.1 軌道配置

Figure 1 (a) に示すように軌道を偏心させることで、治療に必要な取出しエネルギー帯である 70 ~ 225 MeV の軌道を集約させた径方向幅 10mmほどの軌道集約部を作る。その理由は以下 2 点ある。

- 軌道集約部付近からビームを取出せば、どのエネルギーのビームであっても必要キック量が小さい。
- 軌道集約部に、横方向高周波電場を発生させる高周波キッカを置けば、必要エネルギー帯の軌道全てに電場が効果的に作用し、後述する取出しに用いることができる。

このような軌道配置を実現する周回平面上の理想主磁場分布を Fig. 1 (b)に示した。また、チューンダイアグラムを Fig. 2 に示した。理想主磁場分布にてトラッキング解析評価した結果、十分な水平・垂直方向のアクセプタンスが存在することを確認している[3]。



(a) Orbit distribution (b) Main magnetic field

Figure 1: Orbit and main magnetic field.

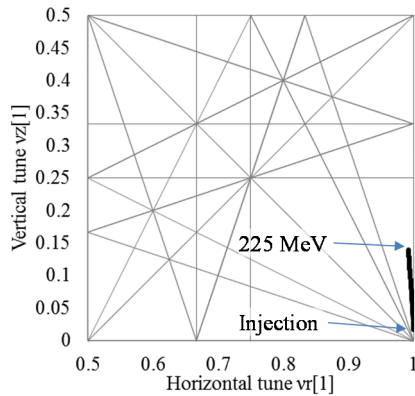


Figure 2: Tune diagram.

## 2.2 機器構成

本加速器の構成図を Fig. 3 に、主な仕様を Table 1 にそれぞれ示す。本加速器は、主電磁石、イオン源、高周波加速系および出射系から構成される。出射系構成については 4 章で述べる。

### (1) 主電磁石

伝導冷却式の超電導電磁石であり、弱収束の理想主磁場を形成してビームを安定に周回させる。理想主磁場分布を形成する磁極形状は、特異値分解により求めた。超電導線材としては、比較的安価でかつ十分な機械強度を持つ NbTi 線材を適用する。

### (2) イオン源

PIG イオン源を用いる。円筒状のメインプラズマ室(チムニー)の長手方向が主磁場の向きと平行になるよう配置してチムニー内部に水素ガスを導き、上下のカソード電極に直流電圧を印加して放電させプラズマを生成する。ビーム引出しは、高周波加速電場による。

### (3) 高周波加速器系

TEM モード、 $\lambda/2$  共振型の加速空洞を用いる。主磁場が弱集束の非等時性磁場であることから、高周波加速系には周波数変調制御が要求される。このため、加速空洞のインダクタンスか静電容量のどちらかを時間的に変動させなければならない。周波数帯は 50 MHz 程でありインダクタンス可変素子の適用は難しいため、加速空洞の Dee 電極と反対側の開放端付近に回転コンデンサを取付けることで、2 ms 周期で共振周波数を変調させる。3D 電磁場解析により加速空洞のシャントインピーダンスを求めた結果、必要な高周波電力は約 30 kW であった。高周波電源には半導体増幅器を用いる。

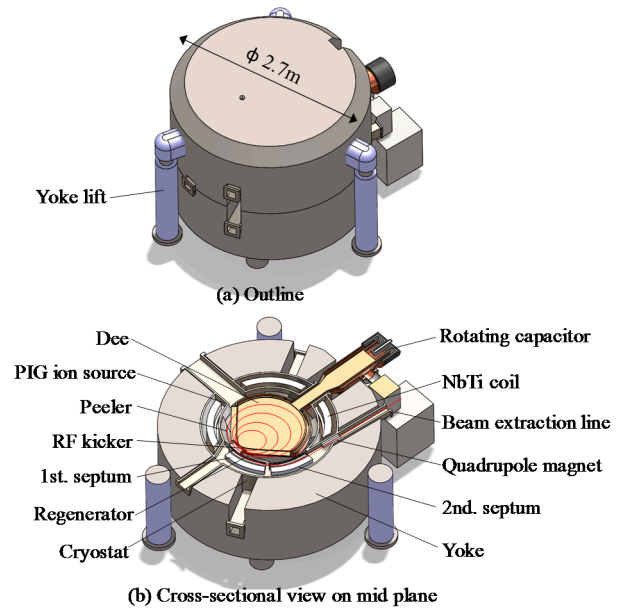


Figure 3: Schematic view of the cotangential trajectory accelerator for proton therapy.

Table 1: Design Specifications of the Cotangential Trajectory Accelerator for Proton Therapy

Diameter of yoke	2.70 m
Total weight	60 t
Magnetic field	4.0 T at injection point, 3.94 T at max. energy orbit
Main coil	NbTi cable, conductive cooling
Magnetomotive force of main coil	1.8 MA
Harmonic number	1
RF frequency	61.0 ~ 48.5 MHz
RF voltage, required power	10 kV, 30 kW
Extracted beam energy	70 ~ 225 MeV without degrader
Extraction method	Slow extraction, RF kicker + peeler regenerator
Pulse repetition rate	< 500 Hz

## 3. ビームの入射と加速

PIG イオン源は最大 500 Hz の繰り返しでパルス運転し、1 サイクルあたりでパルス長 10  $\mu$ s 前後のビームが加速位相に捕獲される。捕獲されたビームは、偏心軌道を描きながら、Dee 電極の加速間隙を通過するたびにエネルギーを増していく。ビームが任意の取出しエネルギーに達したら、高周波加速電場を遮断する。すると、ビームはそのエネルギーの軌道に留まりながらデバンチされ、

取出しプロセスへと移行する。なお、ビームが最大エネルギーまで安定に加速されることについては、周波数変調加速を考慮した3D トラッキングシミュレーションにより確認している[4]。

## 4. ビームの取出し

### 4.1 取出し手法

軌道集約領域に配置する高周波キッカによる横方向高周波電場と、ビーム周囲軌道外に配置するピーラ・リジェネレータ磁場[5]を組合わせてビームを取出す手法を考案した。本手法の模式図を Fig. 4 に示す。まず、加速高周波電場の遮断後に、高周波キッカにより横方向高周波電場を印加し始め、ビームの水平方向ベータ振動を共鳴的に増大させる。ベータ振動振幅は徐々に増して行くが、高周波キッカのみで取出しに十分なターンセパレーションを得られないため、最大取出しエネルギー225 MeV の軌道の外周側に設けるピーラ・リジェネレータ磁場を利用する。

ピーラ磁場領域とリジェネレータ磁場領域は Fig. 4 に示すように、軌道集約点を挟んで配置する。ピーラ磁場領域では主磁場強度が径方向外周側に向かって減少し、リジェネレータ磁場領域では逆に増加する磁場勾配領域を含むようにする。さらに、取出しエネルギー帯の全軌道が両磁場領域と交差するように両磁場領域が存在する位相角範囲を設定する。こうすることで、取出しエネルギー帯のビームは、高周波キッカの作用でピーラ・リジェネレータ磁場領域にまで到達しさえすれば、水平方向チューンが1に近づいていき半整数共鳴が起こる。そして、軌道集約部付近においてターンセパレーションが急激に増し、セプタム電磁石に入射させることができる。

その様子を、トラッキング解析コード GPT[6]を用いて単粒子でシミュレートした結果を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。いずれも加速高周波無しで、高周波キッカ電圧  $V_{RFK} = 2 \text{ kV}$  のみ印加した。また、最大磁場勾配は、ピーラ磁場領域で  $-23 \text{ T/m}$ 、リジェネレータ磁場領域で  $67 \text{ T/m}$  とした。以上の条件で、平衡軌道位置から単粒子を出発させ、セプタム入口まで軌道計算した。Figure 5 より、ピーラ・リジェネレータ磁場領域付近にセパトロクスが存在しており、水平方向(ここではy方向)の共鳴が起きている様子がわかる。Figure 6 より、取出しエネルギーが  $70 \text{ MeV}$ 、 $225 \text{ MeV}$  の場合とも、セプタム導体厚み  $7.5 \text{ mm}$  を超える  $11 \text{ mm}$  以上のターンセパレーションが得られることが確認できる。

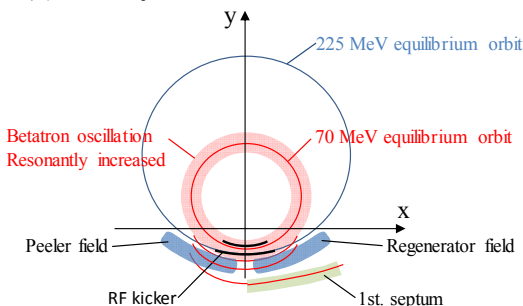


Figure 4: Slow extraction concept of the cotangential orbit accelerator.

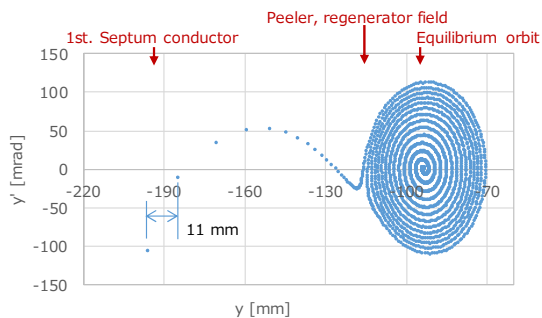


Figure 5: Particle behavior in transverse phase space after the RF kicker turned on, simulated by single particle 3D tracking analysis (extraction energy 70 MeV).

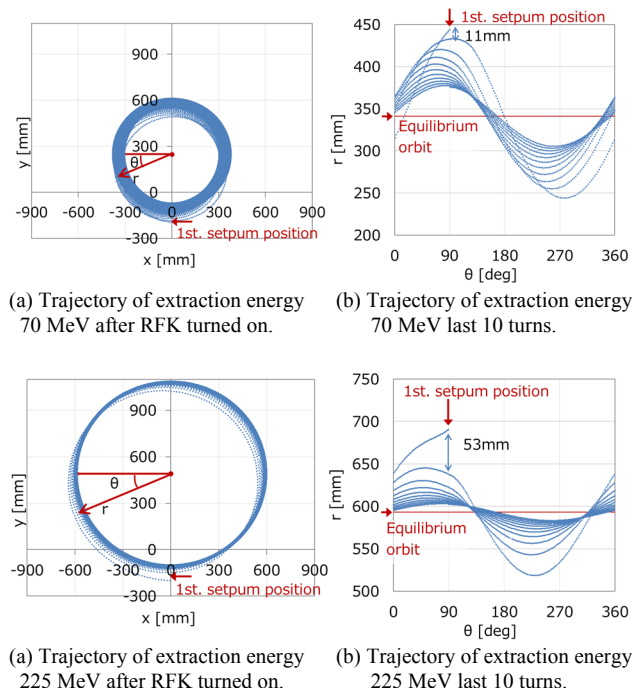


Figure 6: Beam extraction trajectories simulated by single particle 3D tracking analysis.

### 4.2 出射系の機器構成

出射系は、高周波キッカと、ピーラ・リジェネレータ磁場用シム、複数台のセプタム電磁石よりなる出射チャンネルから構成される。

#### (1) 高周波キッカ

高周波キッカは、周囲軌道面上にビーム通過孔を有する電極対であり、軌道集約点付近に設置してビーム軌道に対し横方向高周波電場を印加する。このとき電極対の間にすべての取出しエネルギー帯の軌道が含まれるようにする。横方向高周波電場の周波数については、取出しエネルギーのビームの周囲周波数  $f_{rev}$  と水平チューンの小数部  $\Delta \nu_r$  との積を含む周波数帯を選ぶ。電源には半導体増幅器を用いる。 $f_{rev} \times \Delta \nu_r$  は  $400 \text{ kHz}$  以下であり、この周波数帯で電源の出力インピーダンスと負荷

側を電力整合させるために、整合トランスと全域通過フィルタを用いる。

Figure 5 は単粒子の解析例だが、実際のビームはアクセプトランス内である程度の拡がりを持ちながら周回している。十分に強い横方向高周波電場を与えれば1サイクル 2 ms の内に全ての周回電荷を取出すこともできるが、それより弱い横方向高周波電場を与えることで遅い取出しが可能になる。

### (2) ピーラ・リジェネレータ磁場用シム

最大エネルギー軌道の外周側に磁極片のシムをピーラ・リジェネレータ磁場分布を形成する。Figure 7 に示すように、シムの内周側に同じく磁極片のコレクターバーを置き、シムにより最大エネルギー軌道内周側に生じる不要磁場を打ち消す。

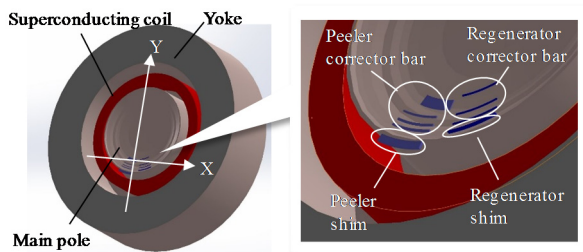


Figure 7: Peeler and regenerator shims.

### (3) セプタム電磁石

ピーラ・リジェネレータ磁場領域に到達したビームを加速器外へ導くためのセプタム電磁石であり、加速器の真空チャンバ内に設置する。取出しエネルギーに応じ磁場変動させる必要があり、空芯コイルとする。起磁力が大きく、コイル導体の冷却に注意を要するため、以下対策を施す。

- 1) コイルは両極性通電する。
- 2) パルス運転で Duty を抑える。
- 3) コイルターン毎に独立した冷却流路を設ける。

1) について説明する。取出しエネルギー帯において、ちょうど平均の運動量となるエネルギーを中間エネルギーとする。そして、セプタム電磁石を励磁しない場合に、中間エネルギーのビームが取出されるように主電磁石のフリッジ磁場を定める。中間エネルギーより低いエネルギーのビームを取出す場合は、高いエネルギーのビームを取出す場合と逆極性で励磁することで、励磁電流振幅を最小化する。

2) の Duty については、最上流側のセプタム導体の厚みを考慮し、3) の条件も加味して実現可能な冷却負荷から定める。

3) については、特に、熱負荷が最も厳しくなる最上流側のセプタム電磁石に適用する。

Figure 8 は、セプタム電磁石 3 台を用いて出射チャンネルを構成した例である。3 台の発生磁場は上流側より  $\pm 0.6$  T,  $\pm 0.9$  T,  $\pm 1.2$  T であり、協調してパルス励磁運転する。Figure 8 には、取出しエネルギー 70~225 MeV

のビームにつき、主磁場のフリッジ磁場も考慮してトラッキング解析した結果を示した。

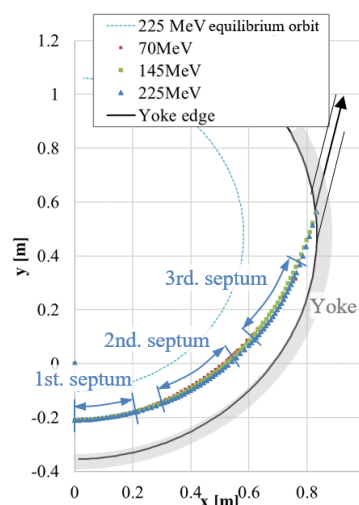


Figure 8: Design example of extraction channel.

## 5. まとめ

直流主磁場・周波数変調加速を用いる加速器において、偏心軌道、高周波キッカ、ピーラ・リジェネレータ磁場を組み合わせることで、ディグレダ不要で遅い取出しが可能となるシステムを考案した。トラッキングシミュレーションで検証した結果、陽子線治療機向けのエネルギー帯 70~225 MeV の取出しが可能であることを確認した。本加速器は、高周波キッカ電場によって、ビームの出射と停止、さらに出射ビーム電流を制御しうるため、スキヤニング照射に適した高精度な出射制御が実現できる可能性がある。

## 謝辞

高エネルギー加速器研究機構の富澤氏と武藤氏には、セプタム電磁石を設計検討するにあたり、大変有益なご助言を頂きました。この場をお借りし、感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] K. Hiramoto *et al.*, "Resonant beam extraction scheme with constant separatrix", PAC93, 1993, pp. 309-311.
- [2] 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.
- [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, Aug. 7-10, 2018, Nagaoka, Japan.
- [4] T. Aoki *et al.*, "Simulation of Slow Extraction from Cotangential Trajectory Accelerator", in Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2019, paper IPPH004.
- [5] K. J. Le Couteur, "The Regenerative Deflector for Synchrocyclotrons", Proc. Phys. Soc. London B 64, 1951, pp.1073-1084.
- [6] GPT; <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>