

# ヒルとバレーのある弱収束型加速器の光学設計 OPTICAL DESIGN OF A WEAK-FOCUSING ACCELERATOR WITH HILLS AND VALLEYS

堀 知新\*, 青木孝道、羽江隆光、関 孝義

Chishin Hori\*, Takamichi Aoki, Takamitsu Hae, Takayoshi Seki  
Hitachi, Ltd., Research & Development Group

## Abstract

A trend of proton beam therapy (PBT) systems is downsizing their footprints. We have proposed a new weak-focusing accelerator with cotangential beam trajectories, which is downsized compared with existing Hitachi PBT accelerators by utilizing a superconducting magnet. The larger main magnetic field by the superconducting magnet, however, requires septum magnets to generate larger magnetic field for beam extraction. For relaxing the specification of the septum magnets, we consider an azimuthally varying field (AVF) weak-focusing accelerator. By locating the septum magnets at one of the valleys and extracting the beam from the valley, the specification is relaxed with keeping its footprint. In this study, we designed the optics of the accelerator by the transfer matrix method. The magnetic field in the valleys is smaller than the magnetic field averaged along the maximum energy trajectory by 0.2 T.

## 1. 陽子線治療用の軌道偏心加速器

陽子線治療システムの小型化に合わせて、それに用いられる加速器も小型化が進んでいる。我々も、主磁場を増強することで小型化した、陽子線治療用の軌道偏心加速器を提案している [1-5]。この加速器の概念図を Fig. 1 に示す。名前の通り、加速中のビーム軌道が同心円状ではなく、偏心していることが特徴である。偏心によって、低エネルギービームから高エネルギービームまでのターンセパレーションが狭まった、集約領域 (small turn separation region) が生じる。本加速器の狙いは、集約領域の近傍に取り出しチャンネルを設置し、そこから治療に用いる所望のエネルギーのビームを取り出す可変エネルギーを実現させることである。主磁場の大きさは 4T から 5T が目安で、超電導磁石を用いて生成する。ビーム加速領域は直径 1m 程度となる。この磁場の大きさでは、磁性体で等時性磁場を生成するのは困難になるので、高周波加速空洞の周波数は変調させる。

ビーム取り出しの際には、シンクロサイクロトロンのように、ピーラ・リジェネレータと呼ばれる勾配磁場をビームに印加して水平方向ベータatron振動を不安定化させる。取り出しチャンネルに到達したビームにはそこに組み込まれたセプタム磁石でビーム取り出し磁場を印加し、周回軌道から離脱させる。

主磁場が増大すると、取り出しチャンネルに組み込まれるセプタム磁石が生成すべきビーム取り出し磁場も増大する。とりわけ、本加速器は低エネルギービームも取り出すので、サイクロトロンやシンクロサイクロトロンに比較して、ビーム取り出しに必要な磁場が一層大きくなる。そこで、本研究では、ビーム取り出し磁場を低減してセプタム磁石の仕様を緩和する方法を検討した。

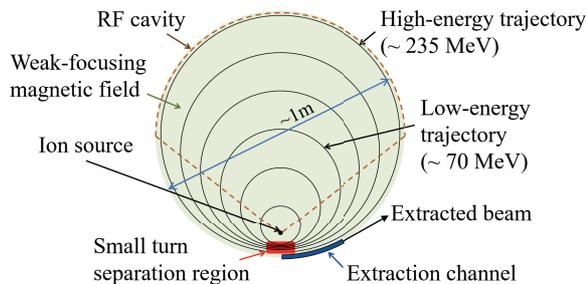


Figure 1: Schematic of cotangential-trajectory accelerator.

## 2. 取り出し磁場を低減するアイデア

取り出しチャンネルの入り口におけるフリッジ磁場の大きさを  $B_f$  とする。電荷  $q$ 、静止エネルギー  $E_0$ 、運動エネルギー  $K$  のビームを取り出すためにセプタムが印加する取り出し磁場を  $-\delta B$  とおくと、取り出しビームの曲率半径  $\rho$  は

$$\rho = \frac{\sqrt{K(K + 2E_0)}}{(B_f - \delta B) cq} \quad (1)$$

となる。 $\rho$  は、磁極に衝突しないという制約から決まるので、 $\delta B$  を小さくしてセプタム磁石の仕様を緩和するためには、 $B_f$  を小さくすることが必要となる。最も単純には、主磁場を下げることで  $B_f$  も下がるが、これは加速器サイズの増大をもたらす。

本研究では、加速器サイズを維持したまま  $B_f$  を小さくするために、磁場分布をヒルとバレーによる AVF 型とし、取り出しチャンネルの入り口近傍をバレーにすることを考えた。通常、AVF 磁場は、サイクロトロンにおいて等時性を保ちつつ垂直方向のベータatron振動を安定化させるために用いられる。このとき、周方向の平均磁場は、エネルギーとともに

\* chishin.hori.cj@hitachi.com

径方向外側に向かって増大していく。これに対して、本加速器では、等時性は放棄して加速周波数を変調させるので、周方向の平均磁場はエネルギーとともに増大する必要がない。むしろ、周方向の平均磁場を径方向外側に向かって減少させていき、AVF 磁場ではあるもの、弱収束の原理によってベータatron振動を安定化させる。

### 3. 光学設計

#### 3.1 設計方法

ビーム軌道が偏心した AVF 型の等時性加速器の光学計算ツールは、以前、著者らが開発していた [6, 7]。開発ツールはハードエッジモデルをベースとした輸送行列による光学計算コードであり、特徴は

- エッジ収束の評価式を高精度化している
- 異なる磁場のバレーを設定可能としている
- ヒルとバレーの周方向幅の割合を調整可能としている
- 集約領域となるバレーと隣接するヒルの境界の傾きを調整可能としている

という点である。本加速器の光学設計では、このツールを流用した。ただし、本加速器では等時性が要請されないので、周方向平均磁場  $\bar{B}$  を速度  $\beta$  の関数として

$$\bar{B}(\beta) = \begin{cases} -b_1 \left(\frac{\beta}{\beta_M}\right)^{p_1} + B_{\max}, & 0 \leq \beta \leq \beta_m \\ -b_2 \left(\frac{\beta}{\beta_M}\right)^{p_2} + b_2 + B_{\min}, & \beta_m \leq \beta \leq \beta_M \end{cases} \quad (2)$$

と与えることにした。この表式における調整パラメータは  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $B_{\max}$ 、 $B_{\min}$ 、 $\beta_m$  の五つで、 $\beta_M$  はビームの最大エネルギーに対応する速度である。残りの  $b_1$  と  $b_2$  は、 $\beta = \beta_m$  で  $\bar{B}$  が 1 階微分まで連続という条件から決定した。なお、 $B_{\max}$ 、 $B_{\min}$  は、それぞれ、 $\bar{B}$  の最大および最小磁場であるから、ヒルにおける磁場は  $B_{\max}$  よりも大きく、バレーにおける磁場は  $B_{\min}$  よりも小さいことになる。

#### 3.2 設計例

ビームエネルギー 235MeV に対する平均磁場を 4.5T として計算して得られた結果の一例を示す。

Figure 2 には、設計軌道と磁場分布を示した。ピンク色の線はヒルとバレーの境界、水色の線は光学計算において設定したヒルとバレーの変化領域の幅をあらわしている。ヒルは 5.04T、バレーは 4.28T となっている。バレーの磁場が平均磁場よりも 0.22T 下がっている分だけ、ビーム取り出し磁場  $\delta B$  が低減できることが期待される。

Figure 3 には、集約領域における設計軌道と  $y$  軸の交点の座標を示した。なお、Fig. 3 の  $y$  軸の原点は Fig. 2 と異なり、ビームエネルギーが 0 の極限における位置に取り直してある。低エネルギービー

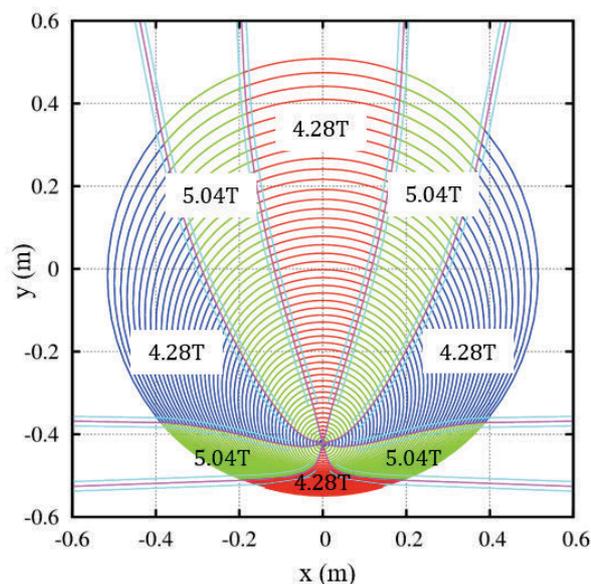


Figure 2: Design orbits and magnetic fields.

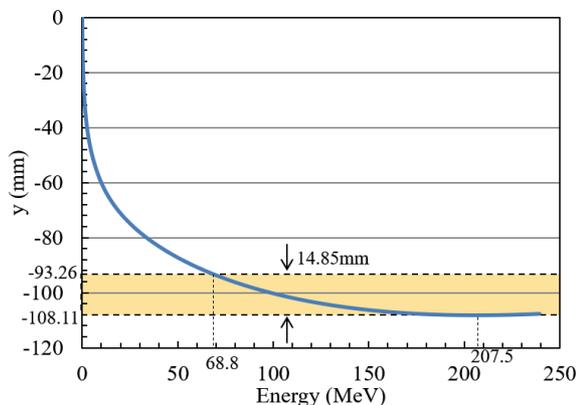


Figure 3: Width of small turn separation region.

ムを取り出すためには、集約領域の幅が小さいほうが好ましい。本設計例では、もっとも膨らむ軌道は 207.5MeV となっており、68.8MeV から 235MeV までのターンセパレーションは 14.85mm となっている。この値は最小値というわけではなく、まだ最適化の余地はあると考えている。

Figure 4 には、水平および垂直方向のチューンを示した。実線は光学計算による設計値であり、プロットされた点は、Fig. 2 に示した磁場分布を与えて GPT [8] でビームトラッキング計算をして得られた値をあらわしている。光学計算はハードエッジモデルに基づいているため、ヒルとバレーが実際には潰れてしまう低エネルギー領域で破綻している。従って、ビームトラッキング計算は 10MeV 以上のビームを対象とした。水平チューンは全エネルギー領域で 0.95 以上となっている。これは、ピーラ・リジェネレータによる共鳴を発生しやすくするためである。垂直チューンは全領域で 0.5 以下に抑えられており、

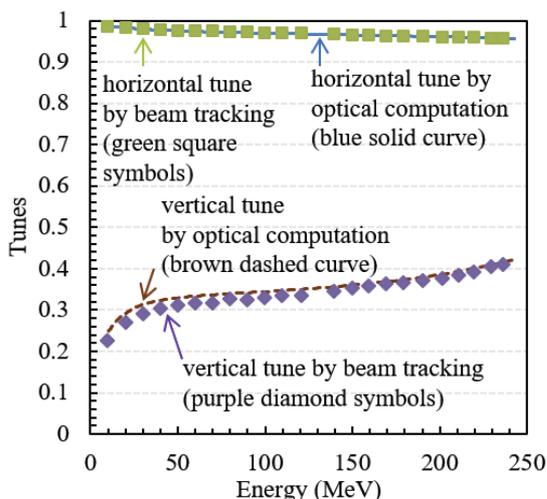


Figure 4: Betatron frequencies (tunes).

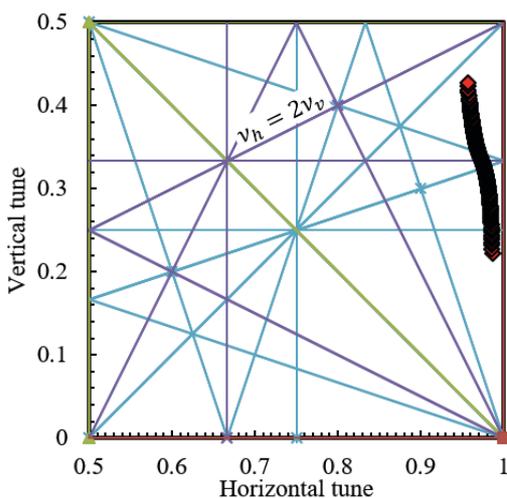


Figure 5: Tune diagram.

二次共鳴を避けている。

Figure 5 にはチューンダイアグラムを示した。図中には 4 次共鳴線までである。3 次共鳴のうち、 $\nu_h = 2\nu_v$  の共鳴は Walkinshaw 共鳴と呼ばれ、サイクロトロンやシンクロサイクロトロンの設計で避けるべき共鳴とされている。本設計例でも、この共鳴は回避した。

#### 4. まとめと課題

加速器サイズを維持したままセプタム磁石の仕様を緩和する方法として、弱収束磁場を周方向一定の磁場ではなく AVF 型の磁場として、バレー近傍にセプタム磁石を設置してビームを取り出すことを提案した。また、最大エネルギー 235MeV の軌道上の平均磁場が 4.5T で、ヒルの磁場が 5.04T、バレーの磁場が 4.28T となる光学設計例を示した。本加速器は軌道が同心円状ではなく偏心していることが特徴だが、このアイデアは、軌道が同心円状のシンクロサイクロトロンに対しても適用可能と思われる。

今後取り組むべき課題としては、起磁力配置の設計、ビーム取り出しの光学設計、入射領域の設計が挙げられる。

#### 参考文献

- [1] T. Aoki *et al.*, “Concept of Frequency Modulated Variable-Energy Accelerator”, in Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, paper THOL02.
- [2] T. Aoki *et al.*, “Betatron Frequencies in Cotangential Trajectory Accelerator for Proton Beam Therapy”, in Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC2018), Vancouver, BC, Canada, Apr. 29 - May 4, 2018, paper MOPML035.
- [3] T. Aoki *et al.*, “Study of Transverse Motion in Cotangential Trajectory Accelerator”, in Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, paper IPP001.
- [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] T. Hae *et al.*, “Study on Slow Extraction System in Cotangential Trajectory Accelerator”, in Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2019, paper FROH12.
- [6] C. Hori *et al.*, “Variable-Energy Accelerator with Large Current for Proton Beam Therapy”, in Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, paper IP005.
- [7] C. Hori *et al.*, “Variable-Energy Isochronous Accelerator with Cotangential Orbits for Proton Beam Therapy”, Nuclear Instruments and Methods in Physics A, vol. 922, Apr. 2019, pp. 352-356.
- [8] GPT; <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>