

陽子線治療向けの大電流可変エネルギー加速器 VARIABLE-ENERGY ACCELERATOR WITH LARGE CURRENT FOR PROTON BEAM THERAPY

堀 知新*, 青木孝道、関 孝義
Chishin Hori*, Takamichi Aoki, Takayoshi Seki
Hitachi, Ltd., Research & Development Group

Abstract

We have considered concepts of a new isochronous accelerator for proton beam therapy, which can control beam energy from 70 MeV to 235 MeV without degrader. One of the features of this accelerator is that centers of beam trajectories line in ascending order of energies. This feature yields small turn separations in neighborhood of an extraction channel, from which each of beams within the range of 70 MeV to 235 MeV is extracted. In this paper we show an optical design of this accelerator, which is based on and extended from a hard edge model of AVF cyclotrons. We have found that the maximum and minimum magnetic fields are 2.45 T and 0.83T, respectively, the turn separation between 70 MeV and 235 MeV is 12.4 mm, and horizontal and vertical tunes over 10 MeV are within the range of 1.0 to 1.5 and within the range of 0.5 to 1.0, respectively. We have also verified these tunes by three-dimensional beam tracking analysis.

1. はじめに

陽子線治療 (Proton Beam Therapy, 以下 PBT) において、スループットの向上は最重要課題の一つである。その方策の一つとして、ビームの大電流化による照射時間の短縮が挙げられる。ビームの大電流化は単位時間当たりの照射線量を増加させるので、治療における照射時間の短縮をもたらす、スループット向上に繋がる。

現在、PBT には、シンクロトロン、サイクロトロン、およびシンクロサイクロトロンのいずれのタイプの加速器も用いられている。これらの中で大電流化の観点から有利な加速器は、連続ビームが供給できるサイクロトロンであろう。サイクロトロンでは、PBT で用いられる最高エネルギー約 235 MeV において、数百 nA もの大電流のビームを供給できる。しかし、治療に用いられる全エネルギー帯で大電流を供給できるわけではない。PBT で用いられる最低エネルギーは約 70 MeV だが、ディグレーダで 235 MeV のビームを 70 MeV に調整すると、電流は数 nA まで減少してしまう。

以上の背景の下で、本研究では、低エネルギー (70MeV) から高エネルギー (235MeV) まで一定の大電流 (数十 nA) を供給できる、陽子線治療向けの可変エネルギー加速器の概念構築に取り組んだ。本発表では、この新加速器の概要と光学設計例について述べる。

2. 新加速器のコンセプト

前節で述べたように、低エネルギーにおけるサイクロトロンのビーム電流低下は、ディグレーダが原因である。従って、単純にディグレーダなしでエネルギー調整することができれば、目的とする大電流化の実現に大きく近づく。また、ディグレーダをなくすことで、加速器から発生する放射線量も低減できるので、建屋の遮蔽厚を薄くできる副効果もある。

そこで我々が考案した加速器の概念を Figure 1 に示す [1]。各エネルギーの軌道中心は一致せず、エネルギーの順に直線状に並んでいる。この軌道偏心によって、軌

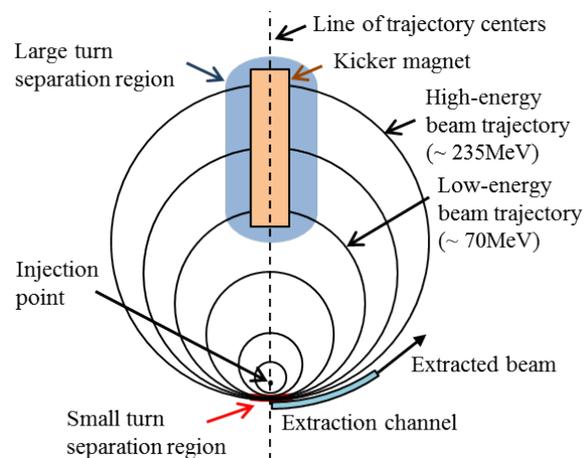


Figure 1: Concept of a new isochronous accelerator.

道間隔が広がる領域 (拡大領域) と狭まる領域 (縮小領域) ができる。拡大領域にキッカー電磁石を配置し、取り出し磁場を印加してビーム軌道をずらすことで、縮小領域近傍に設置した出射チャネルからビームを取り出す。このとき、縮小領域における軌道間隔を十分に狭めて、かつ、拡大領域で各エネルギーのビーム軌道に対して選択的に磁場を印加できれば、70MeV から 235MeV のエネルギー帯のビームを同一の出射チャネルから取り出せるのではないかと考えた。軌道の配置だけを見ると、マイクロトロンや、近年提案されている軌道長差調整型の荷電変換リング [2] と似ているが、ビーム取り出し構成や、等時性条件を満たしていることに新加速器の特徴がある。

3. 光学設計

本節では、ハードエッジモデルに基づく AVF サイクロトロンの軌道設計手法 [3] を応用した、新加速器の光

*chishin.hori.cj@hitachi.com

学設計例を示す。

3.1 セクターの構成

AVFサイクロトロンは、磁場の弱い領域(バレー)と強い領域(ヒル)よりなるセクターを周方向に繰り返した周期構造となっている。新加速器の磁場分布を検討するに際して、AVFサイクロトロンと同様に磁場の強弱を繰り返す周期構造を基本としたが、バレーの種類は二種類にして設計自由度を増加させた。すなわち、一つのセクターは、バレー1、ヒル、バレー2、ヒル、の二つの山谷で構成し、セクター内に二つあるヒルの磁場の大きさは等しくて、バレー1とバレー2の磁場の大きさは異なってよいとした。

ビーム軌道の満たすべき幾何学的条件を Figure 2 に示す。セクター数を N とし、バレー1の垂直二等分線 ℓ_1 とバレー2の垂直二等分線 ℓ_2 の交点 P_0 をビーム軌道中心とする。そして、 P_0 からみたバレー1、ヒル、バレー2におけるビーム偏向角を、それぞれ、 ξ_0 、 η_0 、 ζ_0 とおく。また、バレー1、ヒル、バレー2の曲率中心 P_1 、 P_2 、 P_3 からみたビーム偏向角を、それぞれ、 ξ 、 η 、 ζ とおき、バレー1とヒルの境界とビーム軌道の交点を Q_1 、バレー2とヒルの境界とビーム軌道の交点を Q_2 とする。バレー1における曲率半径を ρ_1 、ヒルにおける曲率半径を ρ_2 、バレー2における曲率半径を ρ_3 とすると、

$$\cot\left(\frac{\xi_0}{2}\right) = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cot\left(\frac{\xi}{2}\right) + \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \cot\left(\frac{\pi}{N}\right) + \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_1} \frac{\sin(\zeta/2)}{\sin(\xi/2) \sin(\pi/N)}, \quad (1)$$

$$\cot\left(\frac{\zeta_0}{2}\right) = \frac{\rho_2}{\rho_3} \cot\left(\frac{\zeta}{2}\right) + \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3} \cot\left(\frac{\pi}{N}\right) + \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_3} \frac{\sin(\xi/2)}{\sin(\zeta/2) \sin(\pi/N)} \quad (2)$$

が成り立つことがわかる。また、バレー1、ヒル、バレー2における磁場を、それぞれ B_1 、 B_2 、 B_3 とおき、エネルギーが0の極限における磁場を B_c とすると、等時性の条件から

$$\frac{2\pi}{\gamma B_c} = N \left(\frac{\xi}{B_1} + \frac{2\eta}{B_2} + \frac{\zeta}{B_3} \right) \quad (3)$$

を満たす必要がある。ここで γ はローレンツ因子である。

3.2 フリンジ磁場の影響評価

前節の幾何学的条件が成り立つようにヒルとバレーの磁場を調整し、そうして求めた磁場における水平および垂直のチューンは転送行列を用いて計算した。チューン評価に際しては、Wiedemannの教科書 [4] に基づいて、垂直方向の焦点距離 f_z を

$$-\frac{1}{f_z} = \int_0^{s_f} k \tan(\delta - \kappa) ds \quad (4)$$

で計算することで、ヒルとバレーの境界におけるフリンジ磁場がビーム収束に与える影響を取り入れた。ここで s はビーム軌道に沿った軌道長パラメータで、式

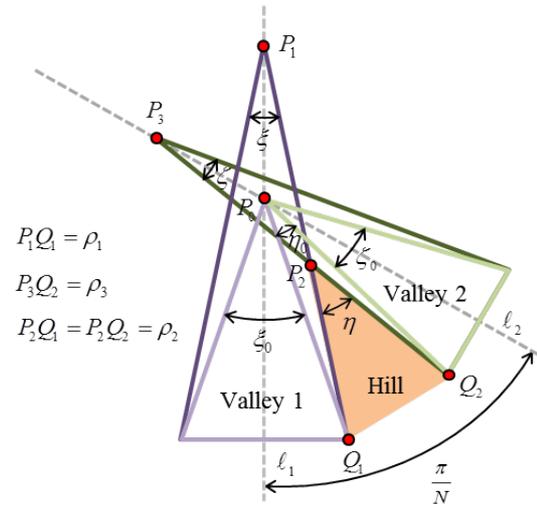


Figure 2: Geometric conditions for hill and valleys.

(4)に含まれる諸量は、ヒルのギャップ間隔を $2g$ 、隣接するヒルとバレーの磁場の差を ΔB 、粒子運動量を p 、電荷を q 、ヒルとバレーの境界とビーム軌道法線のなす角度を κ として、

$$k = \frac{s}{s_f} G, \quad (5)$$

$$\delta = \frac{s^2}{2s_f} G, \quad (6)$$

$$s_f = \frac{2g}{\cos \kappa}, \quad (7)$$

$$G = \frac{q\Delta B}{p} \quad (8)$$

で与えられる。

3.3 磁場分布と軌道の配置

磁場強度等を調整して得られた磁場分布の例を Figure 3 に示す。本設計例では、セクター数 N を2にしており、バレー1、ヒル、バレー2、ヒル、で構成されるセクターが周方向に2回繰り返している。バレー1、ヒル、バレー2の磁場は、それぞれ、0.91T、2.45T、0.83Tである。バレー1よりもバレー2の方が磁場が小さく曲率も小さいので、ビーム軌道は x 方向よりも y 方向に若干縦長になっている。なお、Figure 3には設計軌道をプロットしており、 y が負の領域のバレー1における軌道間隔が縮小し、 y が正の領域におけるバレー1の軌道間隔が拡大していることが確認できる。

縮小領域における設計軌道と y 軸の交点の座標を Figure 4 に示す。70MeV から 235MeV の軌道間隔が幅 12.4mm に収まっていることが確認できる。

3.4 チューン

Figure 3の磁場分布の下で計算したチューンのエネルギー依存性を Figure 5 に示す。青破線は転送行列で計算した水平チューン、茶実線は転送行列で計算した垂直チューンである。また、CST [5] の stationary particle tracking solver を用いた三次元トラッキング解析によつ

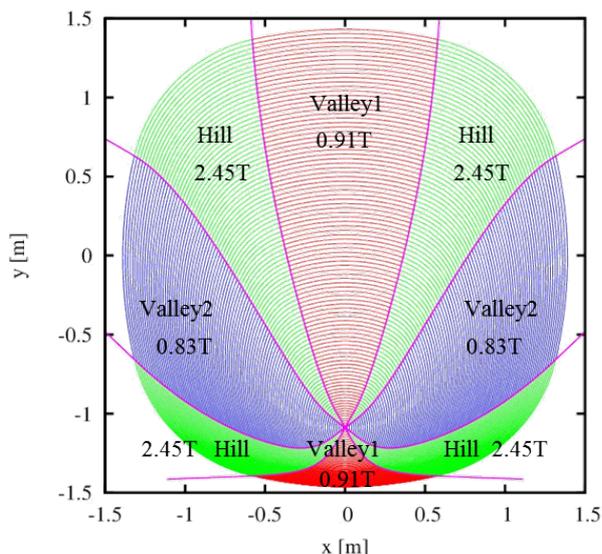


Figure 3: Magnetic fields for new accelerator.

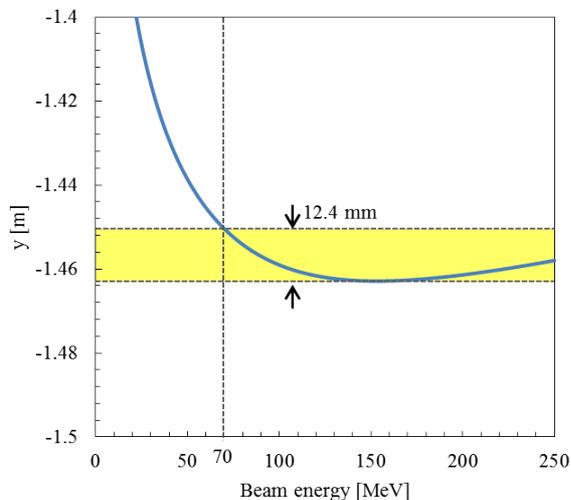


Figure 4: Intersection coordinates of beam trajectories and y axis.

でチューンを算出し、転送行列による計算を検証した。なお、低エネルギー領域ではFRINGE磁場の幅とバレーの幅が同程度の大きさとなりハードエッジモデルが破綻するので、本研究では10MeV以上を評価対象とし、高エネルギー側は、235MeVより大きい240MeV以上まで計算した。

本設計例でのチューンの特徴は、垂直チューンが0.5以上となっていることである。従って、本計算の対象外となっている10MeVまでで0.5の共鳴線を超えるように、低エネルギー領域の磁場を決定する必要がある。

水平チューンについては、転送行列による計算と三次元トラッキングの計算結果がよく一致している。垂直チューンについては、転送行列による計算よりも三次元トラッキングの計算結果が全体的に少しだけ大き

く、200MeV程度でその乖離が大きくなっている。この原因は現在のところ明らかになっていないが、三次元トラッキングによる計算でもチューンは0.5以上で安定しており、10MeV以上でのビームの安定性が確認できた。

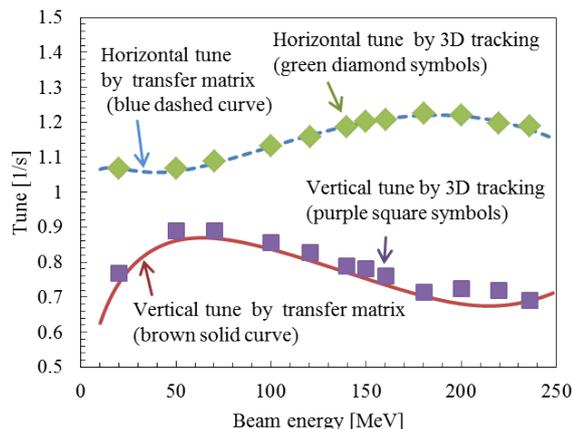


Figure 5: Energy-dependence of horizontal and vertical tunes.

チューンダイアグラムをFigure 6に示す。共鳴線は4次まで示した。10MeV以上の範囲では二次共鳴線を回避している。

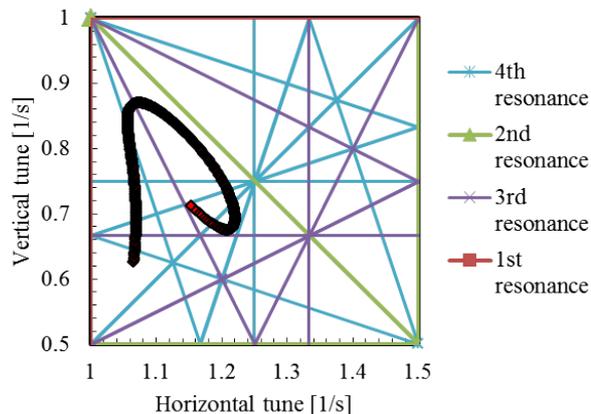


Figure 6: Tune diagram with resonance lines up to 4th order.

以上の計算によって、等時性を満たしつつ、ビーム軌道中心がずれて軌道間隔が縮小した領域と拡大した領域があるような磁場分布の解がある見通しは得られた。新加速器の概念の成立性を確認するためには、入射領域、取り出し、加速周回など、取り組むべき課題は多い。

4. まとめ

ビーム軌道の中心をずらして軌道間隔が縮小した領域と拡大した領域をつくることで、ディグレーダを用

いずにエネルギー調整できる、新しい等時性加速器について検討した。AVFサイクロトロン設計方法を応用して新加速器の光学設計を行った結果、最大磁場が2.45T、最小磁場が0.83Tで、10MeV以上で水平チューンが1.0から1.5、垂直チューンが0.5から1.0の範囲に収まる解を得た。本加速器の検討は継続し、入射領域とビーム取り出しの成立性、および加速周回の安定性について、順次検討を進める予定である。

参考文献

- [1] 青木孝道、えび名風太郎、西内秀晶、原重充、梅澤真澄、“Accelerator and Particle Beam Irradiation Device”, WO 2016/092621 A1, June 16, 2016.
- [2] 今尾浩士 他、“荷電変換リング”, in *Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016)*, Chiba, Japan, Aug. 2016, paper MOOM02.
- [3] J. R. Richardson, “Sector Focusing Cyclotrons”, in *Progress in Nuclear Techniques and Instrumentation vol. 1*, F. J. M. Farley Ed. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1965, pp. 11-21.
- [4] H. Wiedemann, “Particle Accelerator Physics”, 3rd Ed., Berlin: Springer-Verlag, 2007, pp. 131-137.
- [5] CST; <https://www.cst.com/>