

周波数変調型可変エネルギー加速器の設計

DESIGN OF FREQUENCY-MODULATED VARIABLE-ENERGY ACCELERATOR

青木孝道^{#, A)}, えび名風太郎^{A)}, 羽江隆光^{A)}, 堀知新^{A)}, 関孝義^{A)}, 和久田毅^{A)}, 足利沙希子^{A)}, 岩田健^{A)}, 皆川俊介^{A)}, 宮田健治^{A)}, 小島啓明^{A)}, 和賀雄飛^{A)}, 西田賢人^{A)}, 中島裕人^{A)}, 野田文章^{A)}, 梅澤真澄^{B)}, Takamichi Aoki^{#, A)}, Futaro Ebina^{A)}, Takamitsu Hae^{A)}, Chishin Hori^{A)}, Takayoshi Seki^{A)}, Tsuyoshi Wakuda^{A)}, Sakiko Ashikaga^{A)}, Takeshi Iwata^{A)}, Shunsuke Minakawa^{A)}, Kenji Miyata^{A)}, Hiroaki Kojima^{A)}, Yuhi Waga^{A)}, Kento Nishida^{A)}, Yuto Nakashima^{A)}, Fumiaki Noda^{A)}, Masumi Umezawa^{B)}

^{A)} Hitachi, Ltd.

^{B)} Hitachi High-Tech Corporation

Abstract

To promote the widespread adoption of proton beam therapy, it is essential to reduce the overall size of the system. Conventional synchrotrons control the energy of the extracted beam by operating bending magnets in a time-dependent pattern. However, typical normal-conducting synchrotrons have an orbital circumference of approximately 18 meters, posing challenges for compact design. In previous studies, we proposed a novel concept for an accelerator with a static magnetic field and variable-energy capability. In this study, we confirm the feasibility of this accelerator type through particle tracking analysis under electromagnetic field conditions, based on three-dimensional magnetic field calculations at each stage: injection, acceleration, and extraction.

1. 背景と目的

近年、粒子線治療は世界的に普及が進んでいる。さらなる普及には、医療機関にとっての導入・運用コストの低減が求められる。システムの経済性向上には、以下の2点が有効である。第一に患者の治療時間、すなわち患部へのビーム照射時間の短縮である。そして第二に加速器を含めたシステム全体の小型化による敷地面積の縮小と低コスト化である。

粒子線治療には、シンクロトロン[1]、サイクロトロン[2]、シンクロサイクロトロン[3]などの加速器が用いられてきた。それぞれの加速器タイプには特徴がある。いずれも磁場中を周回するイオンビームを周回周波数に同期した高周波電場で加速する点は共通である。シンクロトロンでは、ビームは動磁場中をほぼ一定の環状軌道を周回しながら加速する。加速後磁場(フラットトップ磁場)を一定に保つことで安定周回するビームを遅い取り出し法によって取り出すことができる。よって、フラットトップ磁場によって取り出すビームのエネルギーを制御できる。逆に粒子線治療用のサイクロトロンとシンクロサイクロトロンの主磁場は静磁場である。両者の加速化から取り出せるビームは最外周を周回するビームであり、設計上の最大エネルギーのビームが取り出せる。これらの加速器は静磁場ゆえに超伝導磁石との技術的親和性が高く、高磁場化による加速器の小型化が進んでいる。また、磁場の励起と減衰のサイクルが存在せず、シンクロトロンと比較して時間平均では高いビーム電流を出力可能である。

近年普及しているスキャニング照射を用いる粒子線治療では患部形状に応じてビームの飛程と横方向の位置を変える必要があり、サイクロトロンとシンクロサイクロトロンでは加速器と照射点を接続するビーム輸送系にエネルギー吸収体と後段のエネルギー選択システムが必要

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

とされる。

以上のことから、可変エネルギー性と静的な主磁場は粒子線治療用加速器において重要な特性である。我々はこれらの特性を両立する粒子線治療に好適な新型加速器の成立性を検討中である。

2. 新型加速器の動作原理

2.1 ビーム安定性

本章ではこれまでの検討結果[4-8]を踏まえつつ、新型加速器の動作について述べる。我々は、可変エネルギー性を備え、静磁場下で動作する偏心軌道型の周波数変調加速器を提案してきた。本加速器の特徴は、取り出し可能とするビームのエネルギー範囲(85 MeV ~ 225 MeV)において、軌道が同心円の状態から大きくシフトしている点である。各エネルギーに対応するビームの設計軌道は、ほぼ共通の一点を通過するように配置されており、軌道が集約される領域(以下、集約領域)が存在する。

加速中ビームはシンクロサイクロトロン同様に弱収束磁場中を周回することでベータatron振動の安定性を確保できることが線形光学解析[3]で示された。さらにFM変調された高周波を利用した加速により、位相安定性原理に基づくシンクロトロン振動が励起され、縦方向の運動が安定化することが粒子追跡計算により確認されている[4]。

本加速器はFM変調パターンに合わせてシンクロサイクロトロンと同様、入射・加速・取り出しのサイクル運転を行う。入射したビームを所定のエネルギーまで加速し、その後加速空洞への入力電力を遮断し高周波電場を減衰させることで、ビームは一定のエネルギーで平衡軌道近傍を安定周回することが可能となる。加速用高周波のFM変調は回転式容量可変キャパシタ(RotCo)を一定角速度で駆動させるシンクロサイクロトロン同様の方式を採

用予定である。

2.2 ビーム取り出し手法

スキャンニング照射法による粒子線治療への適用を考慮し、本加速器では、横方向の高周波電場によるキックを用いた遅い取り出し法の採用を想定する[5]。本手法により、ビームの ON/OFF 制御が横方向電場の ON/OFF で実現できるため、簡便に照射線量の制御が可能となる[6]。また、加速用の高周波電力の入力を停止するタイミングを制御することで、取り出すビームのエネルギーを変更することが可能となる。

安定に周回しているビームの水平方向チューンは、弱収束磁場の採用により 1 未満であり、かつ 1 に近い値となる。そこに平衡軌道から空間的に離れた位置に勾配磁場 (Peeler / Regenerator 磁場) を付与した場合、ベータatron 振動振幅がある量以上となると $2\nu_r = 2$ の共鳴条件を満たし、水平方向ベータatron 振動が不安定化し粒子軌道の水平方向変位をターンごとに増加させることができる[7]。十分に大きなターンセパレーションが得られる軌道の外周側に磁気セパタムを設置し、取り出しチャンネルの形成をする。最終的に、ビームは取り出しチャンネルを通過して加速器外へ導かれる。

2.3 新型加速器の構成

新型加速器の構成図を Fig. 1 に示す。上記の運転を実現するため、ビーム入射のためのイオン源、安定な周回を実現するための主磁石、加速のための高周波電場を印加する加速空洞 (Dee) のほか、取り出しのための RF キックと Peeler-Regenerator (PR) 磁場を励起する各磁極とを備える。弱収束磁場は、一組の円筒形磁極を備えた単一の超伝導電磁石によって励起される。偏心軌道配置の結果として、内部イオン源方式を用いた際の入射点は磁極の中心からシフトした位置となる。

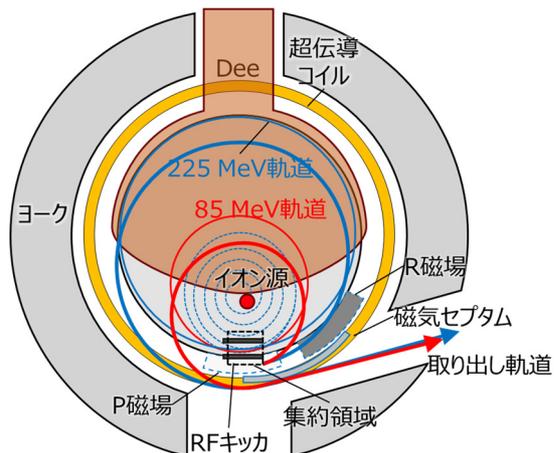


Figure 1: Configuration diagram of the new accelerator.

また、磁極には空洞共振器への電力フィード同軸管設置、ビーム到達の確認のためのモニタ挿入、キックへの電力供給などを想定した開口を設けて主磁石の三次元磁場分布を計算し、以降の解析を実施している。ビームの周回領域へ設置するモニタは、加速中にビームロスが発生した際にそのエネルギーを計測するため、挿入量に応じて計測可能エネルギーを変更できる構造を検討

中である。

PR 磁場はそれぞれ集約領域の上流側と下流側に設置されており、RF キックはその電場の励起領域が集約領域を含むように設置されている。この配置を採用することで、異なるエネルギーのビームに対しても、同一の PR 磁場と RF キックによって共鳴条件下での遅いビーム取り出しが可能となる設計である。

3. ビーム光学設計

3.1 主磁場と周回周波数

本加速器では、単純な弱収束磁場に加え、PR 磁場をはじめとする空間的分布を持つ磁場構成が求められる。よって、加速平面上の磁場が局所的な磁極形状の変化に対して感度を持ち、磁極形状によって励起する磁場分布を制御できる体系を構築することで設計・調整上の自由度を確保できる。そこで、磁極材料である純鉄の磁気飽和を考慮しつつ、現実的な磁極形状で主磁場の空間分布を形成可能な磁場強度として、Fig. 2 に示す通りイオン入射点における磁場を -2.615 T、最大エネルギー軌道の平均磁場を -2.5 T に設定した。これによって、ビームの周回周波数は 0 MeV で 39.87 MHz、 225 MeV で 30.74 MHz となる。軌道配置は Fig. 2 に示す通り偏心しており、ビームの入射点を XY 面内の原点とし、軌道集約領域を Y 軸負方向に設定することで、最大エネルギーの軌道の Y 軸との交点は -0.36 m となる。入射直後は同心円状の軌道配置であるが、加速されるにつれて軌道の中心点が Y 軸正方向にシフトする。以降では、偏向角 θ を、設計軌道と Y 軸との交点 (Y 座標が負の点) からの偏向角として定義する。設計軌道に沿って主磁場は一樣としているゆえに、設計軌道は円となり、偏向中心と設計軌道の中心点が一致する。設計軌道の中心点はエネルギーに応じてその位置を変えるため、偏向角 θ の偏向中心位置もエネルギーに依存する。

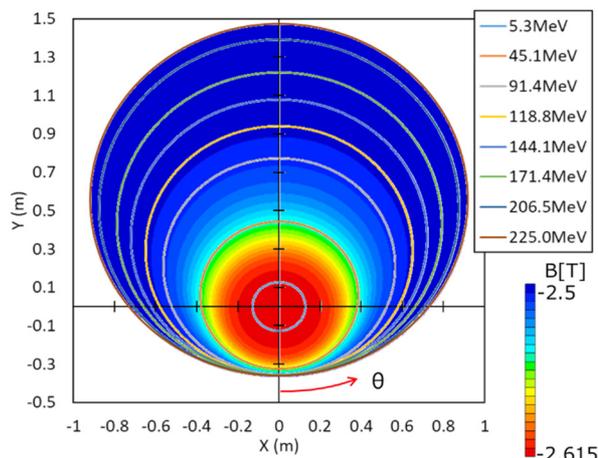


Figure 2: Orbit configuration and target magnetic field of the new accelerator.

Dee の構成から加速用高周波の周波数はビームの周回周波数の奇数倍である必要がある。ここでは両者の比を 1 とし、電圧振幅を加速中は 6 kV で一定とした場合について考えた。入射したビームが 2 ms で 225 MeV に到達でき、かつ加速中に十分な大きさの RF バケツサイズ

が確保できる加速パターンとして Fig. 3 に示す加速パターンを算出した。このような加速パターンを実現できる Dee 電極形状と RotCo のブレード形状を三次元高周波固有モード解析コード CST[9]で決定した。

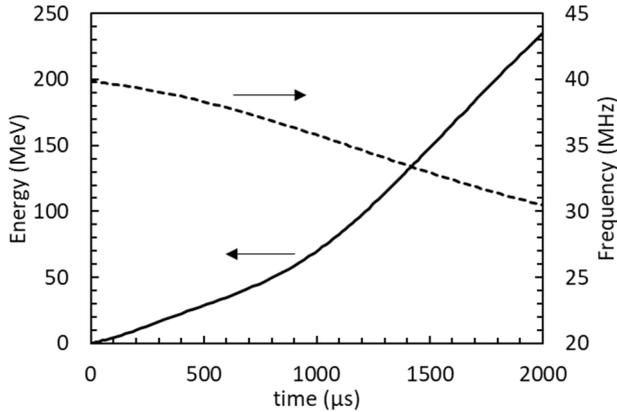


Figure 3: The expected acceleration pattern of the new accelerator. The solid line shows the temporal change of energy, and the dashed line shows the temporal change of the frequency of the orbital frequency and the frequency of the high-frequency electric field.

3.2 ベータトロン振動とシンクロトロン振動

本加速器のチューンは、Fig. 4 のチューンダイアグラムに示すように、鉛直チューンが 1/3 未満となる領域において加速に伴い変化する。水平チューンは 56 MeV 付近で極小値を取り、その後は単調に増加し、最大エネルギーでは約 0.992 となるように設計した。Twiss パラメータ β の偏向角 θ に対する依存性を Fig. 5 に示す。偏心軌道による磁場勾配の θ 依存性に起因して、 β の変調が観察される。また縦方向の運動について、加速高周波電場に

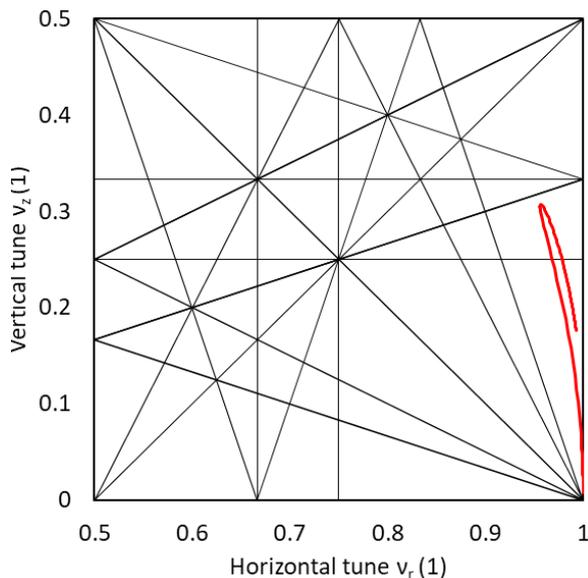


Figure 4: Tune diagram of the new accelerator. The solid red curve shows the tune of the beam accelerating from 0 MeV to 225 MeV, and the solid black line shows the resonance line up to the fourth order.

よる力を時間平均する近似の下得た RF バケツおよびシ

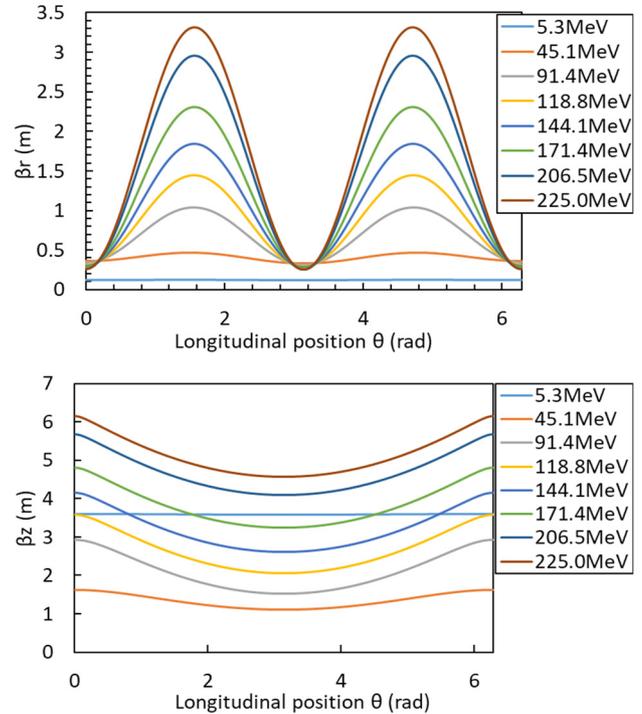


Figure 5: β function of the new accelerator. The upper graph indicates horizontal β function, the lower indicates vertical one.

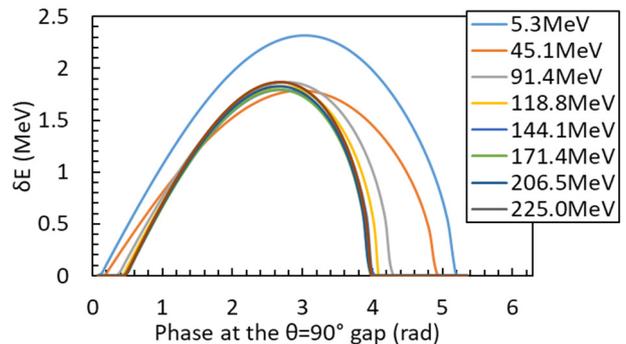
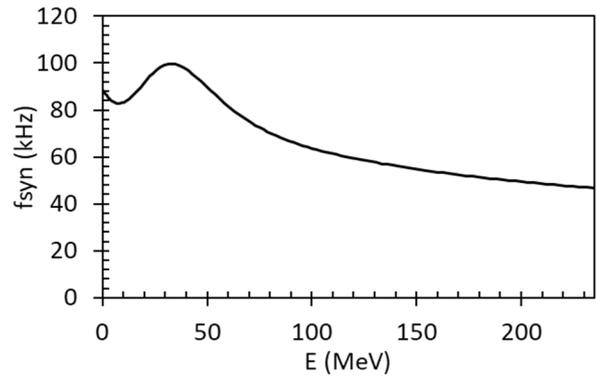


Figure 6: Synchrotron frequency (f_{syn}) and RF bucket when RF voltage amplitude $V_0 = 6$ kV in the new accelerator. Only the $\delta E > 0$ region is shown, and the $\delta E < 0$ region is also congruent.

シンクロtron振動数を Fig. 6 に示す。以上から、ビームが安定に周回・加速することが予測される。

4. 三次元軌道解析

4.1 入射軌道解析

続いて入射プロセスと取り出しプロセスの成立性を解析により確認した。入射段階では、イオン源とビーム軌道との干渉が主な課題となる。また、磁場のみを考慮した場合、Z 方向のチューンが 0 となるため、加速用高周波電磁場による収束・発散力の影響が無視できず、Z 方向の安定性は線形光学のみでは評価できない。以上の理由から三次元軌道解析を中心に成立性評価を実施した。

入射解析では CST のビーム軌道解析ソルバを用いて、加速用高周波電場による引き出しとその後 5 ターンの周回軌道を計算した。CST にイオン源と Dee 電極・ダミー Dee の形状を入力し静電場計算によって得た電場分布を計算し、その電場分布を後処理でビームの周回周波数で振動させることで入射体系を模擬した。電場の初期位相を変化させた複数の計算結果を統合することで、5 ターン目の周回開始時におけるビームの透過量と時間構造を得ることができた。Figure 7 に解析結果を示す。

この結果によると、電場の初期位相が 120 度～160 度の範囲でイオン源および周辺構造との干渉による大きなビームロスを起こすことなく加速されていることが確認できた。また、初期位相が 120 度未満の場合、ビームの Z 方向への発散が主なロスの原因であることが確認された。一方 160 度より大きい範囲ではターンあたりの加速ゲインが十分ではなくビームがイオン源に衝突することで損失が発生している。

また、この解析で確認できた入射直後の 5 ターン以内でのイオン源や周辺機器との衝突によるロス以外にもビームがロスする要因が存在する。入射されたビームはシンクロtron振動を始めるが、シンクロtron振動の進展により、加速用高周波とビームの周回との間に位相差がつく場合に以下の 2 つの要因によってビームロスが生じる。1 つ目は加速量が時間的に減少する位相範囲では、加速用高周波電場による Z 方向の力が発散方向に作用し、Z 方向変位が過大になる可能性がある。2 つ目は、シンクロtron振動が半周期進行して入射ビームのエネルギーが 0 MeV 付近まで低下すると、ビームの偏向半径がイオン源サイズ程度まで小さくなり、周辺構造に衝突する可能性がある。よって、本加速器で入射したビームが所定のエネルギーまで加速されるのはシンクロtron振動周期の 1/4 未満の期間の間に入射されたビームになる。以上により、本加速器の入射プロセスでは、イオン源出力 1 mA あたり約 600 pC の電荷量を加速可能であると見積もられる。

4.2 取り出し軌道解析

本加速器の特徴である取り出しプロセスに関する軌道解析について述べる。取り出しプロセスはピーラ・リジエネレータ磁場 (PR 磁場) による二次共鳴取り出しである。PR 磁場は多極成分を含むため、線形光学の適用が困難であり、本解析でも粒子追跡計算を用いた。

粒子追跡計算では PR 磁場を含めた体系におけるビームの位相空間上の安定限界 (セパトリクス) と取り出し

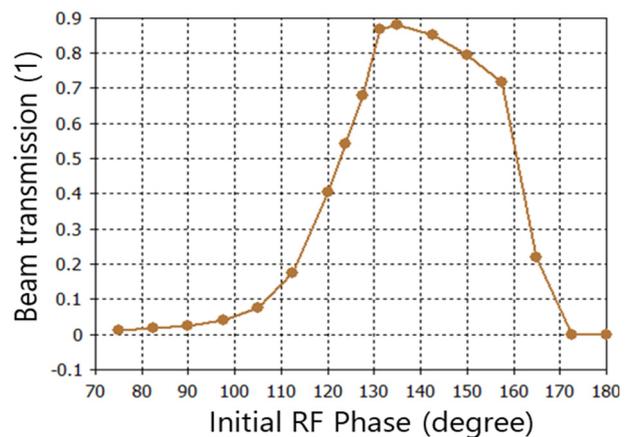


Figure 7: Beam transmission efficiency at the start of turn 5 obtained by CST analysis. The initial phase is defined as 90 degrees when the electric field in the direction of extracting the beam from the ion source is at its maximum.

ビームが乗るセパトリクスの枝について計算する。セパトリクスの評価においては、その面積が重要な指標となる。加速したビームのエミッタンスに対して十分大きな値であることを確認しつつ、横方向高周波電場を印加して、十分短時間で取り出せる程度に過度に大きな値ではないこと、エネルギー的に平滑な変化をすることを確認する。セパトリクスの枝状の粒子軌道についてはターンセパレーションと Z 方向のビームサイズについて注目した。

この評価に基づき、目標とする磁場分布を修正し、それに対応する磁極形状を再計算した。新たな三次元磁場解析によって得られた磁場に基づいて軌道解析を繰り返し実施する。この繰り返し計算では目標磁場分布から磁極形状を逆算する開発手法 [8] が使用された。磁場分布の修正方針としては、設計軌道上に付加した磁場が平衡軌道変位 (COD) を引き起こすことを利用して XY 面内で平衡軌道をシフトさせる。必要なシフト量はセパトリクスサイズを参照しつつ決定し、シフト量から追加磁場への換算は線形光学による軌道シフト量評価に依った。この三次元磁場解析と軌道解析のイタレーションによってビームの取り出しが成立する磁場分布と電磁石形状を算出した。最終的に、目標磁場に付加された軌道調整用磁場分布を Fig. 8 に示す。また、セパトリクスの枝の先、 $Y = -0.44$ m の位置よりも負側に最終的に加速器外にビームを取り出すための磁気チャネルを配置している。詳細は割愛するが磁気チャネル内の軌道計算も三次元磁場計算に基づいた磁場分布を用いた粒子追跡計算によって、85 MeV～225 MeV のビームが磁気チャネルを通過可能であることを確認した。

以上の結果から周回ビームに対して、適切な RF キックを付与して、全量セパトリクスの外に取り出せた場合、設計目標とした磁場条件下では、イオン源出力電流 1 mA あたり約 75 pC の電荷量を取り出すことが可能であると評価された。取り出しプロセスにおける主なビームロスの原因はセパトリクス枝中の Z 方向ビームサイズが増加すること、磁気チャネル中のビームの水平方向広がり磁気チャネルのセプタムによる衝突であることが確認された。

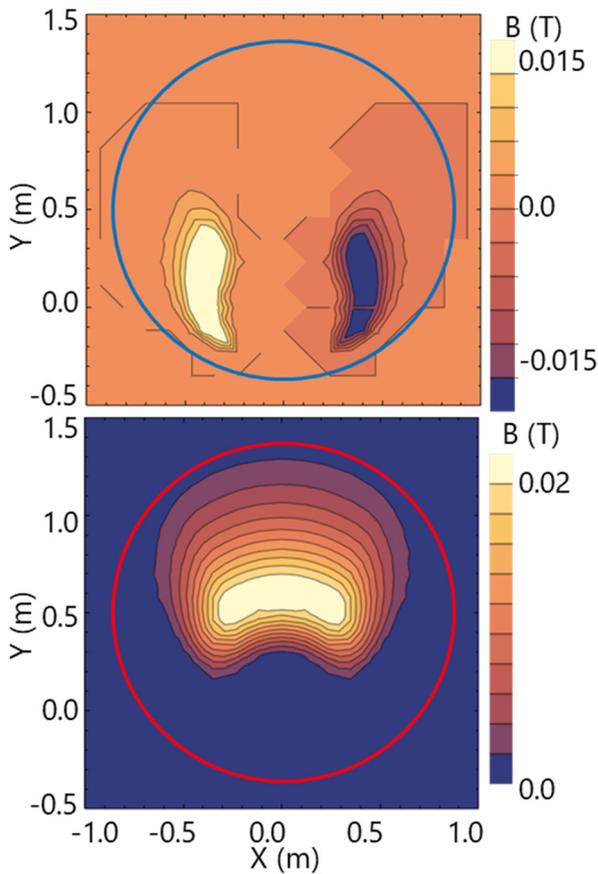


Figure 8: Target magnetic field added for trajectory adjustment. The magnetic field distribution shown in the top figure shifts the entire orbit in the X direction, and the magnetic field distribution in the bottom figure shifts the entire orbit in the Y direction. The circle shown in the figures is the maximum energy design orbit.

5. まとめ

本研究では、偏心軌道構成を有する加速器において、弱収束の静磁場下でビームを安定に周回・加速させるこ

とが可能であることを確認した。また、入射および取り出しプロセスについても、三次元軌道解析により成立性を検証した。これにより、可変エネルギー性を備えた静磁場加速器の実現性が示された。

実機製作時には構造誤差などに起因するシミュレーションとの乖離が生じる可能性はあるものの、運転 1 サイクルあたり約 75 pC の照射電荷が得られると見積もられる。このとき、取り出し時間を約 20 ms、加減速時間を約 4 ms とする運転パターンを想定すると、平均ビーム電流は約 3.1 nA となり、従来のシンクロトロンと比較して高い出力が期待できる。これは粒子線治療の高スループット化に大きく貢献するものである。

参考文献

- [1] T. Aoki *et al.*, “陽子線治療用小型加速器システムの開発と実用化”, 加速器, 2020, 17 巻, 2 号, p. 62-69
- [2] D. Amano *et al.*, “小型ガンリ縦型レイアウト陽子線治療システムの現状”, 加速器, 2013, 10 巻, 3 号, p. 166-170
- [3] S. Henrotin *et al.*, “COMMISSIONING AND TESTING OF THE FIRST IBA S2C2”, Proceedings of Cyclotrons 2016
- [4] T. Aoki *et al.*, “周波数変調型可変エネルギー加速器の提案”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, Sapporo, Japan, 2017, pp. 150-154.
- [5] T. Aoki *et al.*, “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”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31- August 3, Kyoto, Japan, 2019, pp. 1185-1188.
- [6] T. Hae *et al.*, “軌道偏心加速器における遅い取り出しシステムの検討”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31- August 3, Kyoto, Japan, 2019, pp. 214-217.
- [7] Y. Nakashima *et al.*, “周波数変調型可変エネルギー加速器におけるビーム出射解析”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2 - 4, 2020, Online, pp. 460-464.
- [8] K. Nishida *et al.*, “軌道偏心加速器における磁極形状設計手法の開発”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2 - 4, 2020, Online, pp. 372-375.
- [9] <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>