

GPTによるレーストラック・マイクロトロン設計 DESIGN OF RACETRACK MICROTRON BY GPT

羽島良一^{*A)}、Mohammad Ferdows^{A)}
Ryoichi Hajima^{*A)}、Mohammad Ferdows^{†A)}
^{A)}Japan Atomic Energy Agency

Abstract

In the industrial application of laser Compton scattered gamma-ray sources for purposes of nuclear security, a racetrack microtron (RTM) with 220 MeV electron energy will be a suitable device to produce 1.7 MeV gamma-ray beams. Single electron bunch from a photocathode RF gun is accelerated and a high-charge small-emittance beam is preferable in such RTM. In this paper, we adopt a simulation code, GPT, for design and optimization of a 220-MeV RTM.

1. はじめに

先進諸国による核セキュリティサミットが隔年で開催されるなど、国際社会における核セキュリティの重要性が広く認識されるようになってきた。核セキュリティの主要な脅威のひとつが、国境を越えた核物質の移動である。米国では同時多発テロの後、米国内に持ち込まれるコンテナ貨物に対して核物質の有無を全数検査することをコンテナ輸出国に課すための法案が成立している。ただし、このような検査を現実的に実施する技術が未完成であることから、この法案の執行は猶予されている。米国では、国土安全保障省が大きな研究費を投じてコンテナ内に隠ぺいされた核物質の検知技術を開発しているが、わが国においても同様の技術開発が行われている。そのうちのひとつが、京都大学、原子力機構が共同で実施している核物質の非破壊検知システムである。

われわれが開発中のシステムは、D-D 中性子源を用いたスクリーニングとレーザー・コンプトン散乱ガンマ線 (Laser Compton Scattering; LCS) をプローブとした精密検知を組み合わせることで、数 kg 単位のウランを非破壊で検知できる性能を目標としている。ガンマ線による核物質の検知は、同位体に固有な原子核共鳴蛍光散乱 (Nuclear Resonance Fluorescence; NRF) を使って行う^[2]。また、ガンマ線源としては、小型で運転が容易な加速器であるレーストラック・マイクロトロンを利用を提案している。

核物質検知システムの開発に向けて、JAEA 関西研の 150-MeV レーストラック・マイクロトロン (RTM) を用いた LCS-ガンマ線の発生実験と模擬物質の検知実験を進め、これまでに 400 keV の LCS ガンマ線の発生に成功している^[3]。

この実験と並行して、実用機となる 220-MeV RTM の設計検討を行っている。検知の対象である ²³⁵U は 1.7 MeV に励起準位を持つ。このエネルギーに合わせて LCS-ガンマ線を発生するには、220-MeV の電子と Nd:YAG レーザの 2 倍高調波を衝突散乱させればよい。この電子エネルギーを選んだ。220-MeV RTM の設計は、これまで、シミュレーションコード MIC を使っておこなってきた^[4]。MIC は RTM の製造販売を行って

いる住友重機械工業が開発したコードであり、150-MeV マイクロトロン設計に用いられた。

本論文では、汎用の粒子追跡コードである GPT (General Particle Tracer)^[5] を用いた 220-MeV RTM の設計について述べる。GPT は空間電荷、コヒーレント放射の効果も計算可能であり、これらの効果を含まない MIC の計算結果と比較することで、220-MeV RTM 設計の完成度を高められると期待される。

2. 220-MEV レーストラック・マイクロトロン構成

今回設計する 220 MeV RTM は、JAEA 関西の 150 MeV RTM^[6] と同様に光陰極 RF 電子銃を入射器として用いることとした。一般的な RTM では、熱陰極電子銃からのバンチ列を入射・加速するため、個々のバンチ電荷は比較的小さい。光陰極 RF 電子銃では、比較的大きな電荷のシングルバンチを生成できるので、これを RTM の入射器とすることで、Nd:YAG レーザーと衝突させ LCS ガンマ線を発生するのに適した構成となる。

本論文では、220 MeV-RTM の周回軌道の設計について述べるが、入射器は含んでおらず、主要な構成機器である S-band 定在波加速管 (0.5 m)、主偏向磁石 (1.48 T)、主偏向磁石入り口の逆磁場磁石などはこれまでの設計検討^[4] を踏襲している。

加速管は、サイドカップル型の定在波管とし、SUPER-FISH で計算した電磁場を GPT に読み込ませた。主偏向磁石は加速管の向きに勾配のある磁場分布を持つが、別途計算した磁場を GPT の “3-dimensional field map” として読み込ませた。また、逆磁場磁石は、GPT で定義されている “rectangular magnet” としてモデル化した。入射/出射用のシケイン磁石、収束用の四極磁石は含んでいない。横方向の収束力は、主偏向磁石の磁場勾配、逆磁場磁石、定在波加速管の高周波場によって与えられる。

本論文で示す電子軌道の計算は加速管の入り口からスタートしている。小型シンクロトロン放射光の入射器として用いられる 150-MeV RTM では、RTM に入射する電子の運動エネルギーが小さい (~120 keV) ため、1 ターン目に軌道の折り返しが必要となるので、主偏向磁石の手前に設置した逆磁場によって U-ターン軌道を形成する。今回の設計では、初期運動エネルギーを約

* hajima.ryoichi@jaea.go.jp

† Present address: Dept. Mathematics, Univ. Dhaka, Dhaka 1000, Bangladesh

7 MeV に選び、U-ターン軌道を用いずに周回可能な設計とした。

図 1、2 にサイドカップル型の定在波加速管の形状と SUPERFISH による電場分布の計算結果を示す。

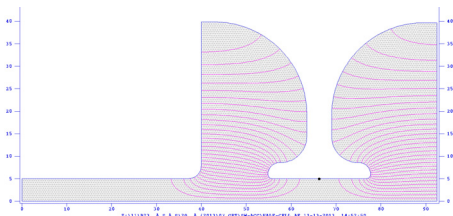


Figure 1: Cavity shape and accelerating field profile of the standing wave linac used in our model.

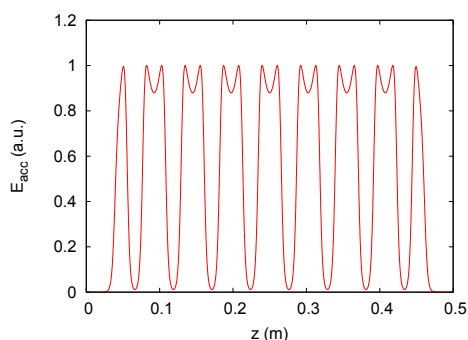


Figure 2: Field profile of the standing wave linac.

図 3 は GPT による周回軌道の計算例である。加速管の位置が $0 < z < 0.5$ m に対応している。RTM において、電子が多数の周回にわたって加速位相を維持する条件 (RTM の共鳴条件) として、次式が満たされなければならない。

$$\Delta E(\text{MeV}) = \frac{\nu \lambda(\text{cm})}{2.096} B(\text{T}) \quad (1)$$

ここではハーモニクス数 $\nu = 1$ 、RF 波長 $\lambda = 10.5$ cm、主偏向磁石磁場 $B = 1.48$ T としたので、加速電圧は $\Delta E = 7.4$ MeV となり、28 周回後に電子の運動エネルギーが 220 MeV を超える。

GPT における粒子追跡シミュレーションは、実空間で行われており、3次元空間座標に配置した加速管、偏向磁石を通った電子は、RTM の共鳴条件が満たされれば、周回を繰り返しながら加速されていく。縦方向、横方向の位相空間における電子の運動は、無矛盾に取り込まれる。また、z 方向に磁場勾配のついた特殊な磁場分布を持つ主偏向磁石における運動も正しく計算される。これに対して、PARMELA や ELEGANT といった粒子追跡シミュレーションコードでは、加速管や磁石の局所座標において電子の運動を計算し、これを加速器のレイアウトに沿って接続する方法がとられる。このため、これらのコードでは RTM の設計を無矛盾で行うことは容易でない。

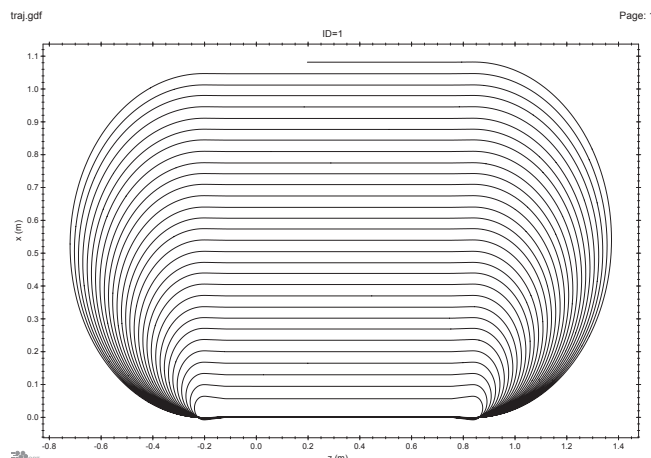


Figure 3: Electron orbit calculated by GPT.

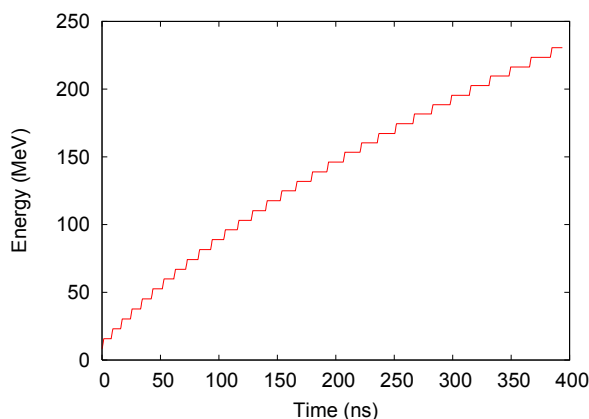


Figure 4: Evolution of electron total energy calculated by GPT.

3. 縦方向位相空間における運動

220-MeV RTM の設計では、周長、主偏向磁石と逆磁場磁石の磁場強度、加速管の電圧、位相など、いくつかのパラメータを同時に最適化しなければならない。このため、以前作成した最適化スクリプトを援用した。これは、Perl で書かれたスクリプトで、入力ファイル中のパラメータを書き換えながら、計算結果が最適となるように多数回の計算を自動的に実行するものである^[7]。ここでは、縦方向と横方向のアクセプタンスが最大となるように、RTM のパラメータを最適化した。

図 3 に示した周回軌道は、この最適化によって得られたものである。電子運動エネルギーは初期値の 7.8 MeV から 30 周回後に 222.9 MeV となる。式 (1) で求めた周回数よりも 2 周多く回った後に 220 MeV を超える。式 (1) との違いは、偏向磁石が磁場勾配を持つため実効的な磁場が小さくなるためと考えられる。具体的な磁場分布は次節で紹介する。

アクセプタンスを評価するため、3箇所にもリメータを設置した。第 1、第 2 コリメータは加速管の両端に $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ の角型として配置した。第 3 コリメータは、 $z = 0$ の位置の水平スリットとし、垂直方向の開口を 1 cm とした。第 3 コリメータは電子が z の負の向きに走る座標系 (custom coordinate system) に定義したの

で、加速管を走る電子には作用しない。

図5は、縦方向アクセプタンスの計算結果である。電子の最終エネルギー（コリメータによる損失の場合は損失時のエネルギー）をローレンツファクタ γ で表し、電子の初期位相と初期エネルギーの2次元空間に等高線図としてプロットしてある。最適化を行った後の位相方向のアクセプタンスが5 mm (~ 16 ps) と小さいが、光陰極RF電子銃からの入射であれば十分に捕獲可能なアクセプタンスである。

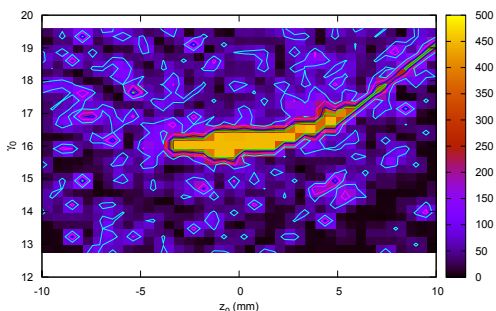


Figure 5: Longitudinal acceptance for initial kinetic energy 7.8 MeV. The contour colors represent final energy of electrons (γ).

4. 横方向位相空間における運動

横方向のビームダイナミクスにおいて調整すべきパラメータは、主偏向磁石の磁場勾配、逆磁場磁石の磁場である。ここでは、主偏向磁石の磁場勾配を固定した状態で、逆磁場の大きさを変化させ、横方向のアクセプタンスが最大となる設計を求めた。

図6に、主偏向磁石と逆磁場磁石の磁場分布、(z軸に沿った垂直方向の磁場)を示す。主偏向磁石の磁場は、 $dB_y/dz = -0.14$ T/mの勾配を持って、z軸に沿って線形的に変化する。逆磁場磁石は主偏向磁石と平行に設置され、入り口および出口で電子ビームの運動に逆偏向を与えるが、逆偏向は入り口と出口でキャンセルされるので、電子がレーストラックの軌道から外れることはない。

計算の結果、われわれの220-MeV RTMのモデルでは、逆磁場のピークを $B = -0.53$ Tとした時に横方向のアクセプタンスが最大になった。図7に、電子ビームのエンベロープ(水平方向 x と垂直方向 y)の計算結果を示す。計算では、電子ビームの横方向サイズの初期値を $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ とし、ビーム損失がなく加速が行える条件を選んである。図に示されるように、逆磁場の大きさを変えるとビームエンベロープも変化し、逆磁場を $B = -0.53$ Tとした時に、 y 方向の収束が強くなっている。この結果、コリメータで失われる電子が少なくなったものと考えられる。なお、横方向の収束力は定在波加速管のRF場の寄与もある。主偏向磁石の磁場勾配、逆磁場はどちらも y 方向に収束、 x 方向に発散となる力を与えるが、それにもかかわらずビームが輸送できるのは、RF場による収束力が働いているためと考えられる。

最適化後の横方向アクセプタンス(水平方向 x 、垂直方向 y)を図8に示す。等高線は電子の最終エネルギー(γ)である。横方向アクセプタンスは、水平、垂直方向ともに、約 $7 - 8\pi$ mm-mradであり、入射電子の運動エネルギー7.8 MeVと合わせて、規格化アクセプタンスは $110 - 130\pi$ mm-mradとなる。

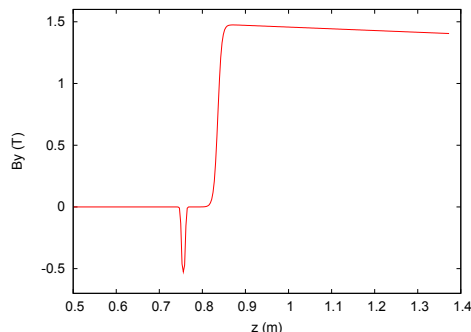


Figure 6: Magnetic field profile along z-axis. The edge of main dipole is located at $z = 0.836$ m.

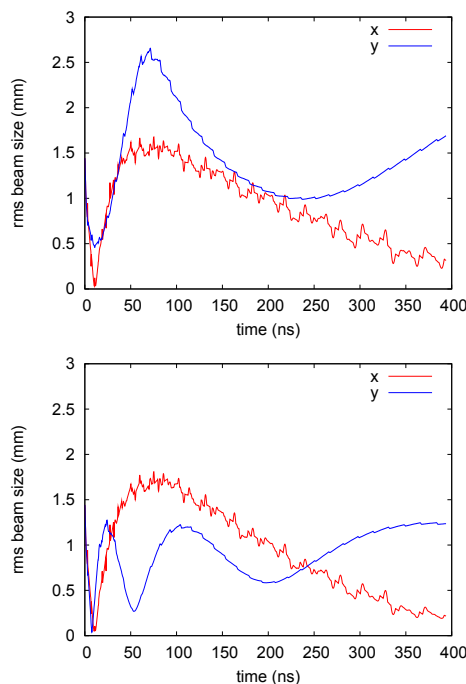


Figure 7: Electron beam envelope in the horizontal plane (x) and vertical plane (y) calculated for reverse bend field of -0.5 (top) and -0.53 T (bottom).

5. まとめ

220-MeV RTMの設計に関して、粒子追跡コードGPTを用いた電子軌道計算を行った。GPTの特徴である、実空間に配置した加速管、磁石における電子の軌道追跡により、RTMの設計を無矛盾で行うことができる。GPTに外部プログラム(最適化ツール)を組み合わせることで、縦方向、横方向のアクセプタンスを大きくし、所定

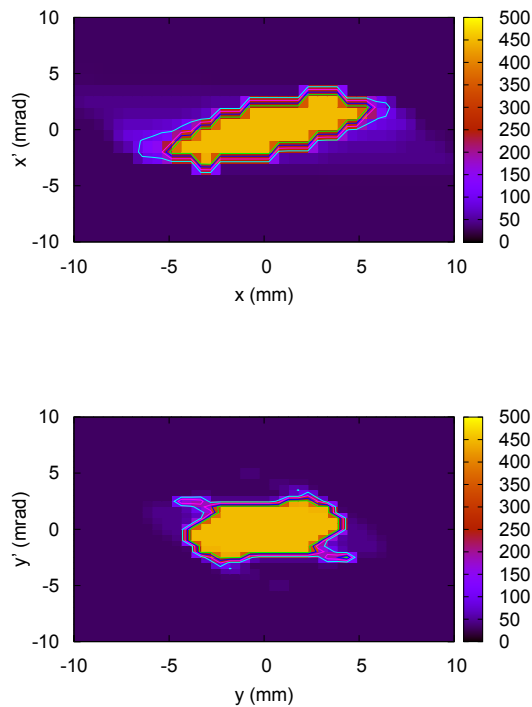


Figure 8: Transverse acceptance of the horizontal and vertical phase spaces calculated for reverse bend field of -0.53 T. The contour colors represent final energy of electrons (γ).

のエネルギーまで周回、加速が可能な設計が得られることを確認した。今回の計算で省略した、入射/出射シケイン、空間電荷やコヒーレント放射光の効果についても、GPTによる計算で取り込み可能であり、今後の検討課題である。装置全体の設計の観点からは、入射エネルギーを小さくすることが望ましいので、入射エネルギーをどこまで下げられるかについても検討すべきであろう。

本研究は、文部科学省による「社会システム改革と研究開発の一体的推進（先導的創造科学技術開発費補助金）」の支援を受けた。RTMの設計に関して堀利匡氏、酒井文雄氏から多くの情報をいただいた。GPTの入力ファイルの作成にあたっては、宮島司氏の助言をいただいた。これらの方々に感謝を申し上げる。

参考文献

- [1] H. Ohgaki et al. J. Korean Phys. Soc., **59**, 31553159 (2011).
- [2] R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech. **45**, 441 (2008).
- [3] R. Hajima et al., Proc. IPAC-2013, 3645 (2013).
- [4] T. Hori et al., Proc. IPAC-2013, 3651 (2013).
- [5] General Particle Tracer, Pulsar Physics.
- [6] M. Kando et al., Proc. PAC-1999, 3702 (1999).
- [7] R. Hajima and R. Nagai, Nucl. Inst. Meth. **A557**, 103 (2006).