

STUDY OF BEAM EXTRACTION BY THIRD ORDER RESONANCE FOR REFER IN HIROSHIMA UNIVERSITY

Yudai Kakiyama^{1,A)}, Shunya Matuba^{A)}, Atsushi Miyamoto^{B)}, Toshitada Hori^{B)}

^{A)} Graduate school of science, Hiroshima University
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan

^{B)} HSRC, Hiroshima University
2-313 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-0046, Japan

Abstract

REFER (Relativistic Electron Facility for Education and Research) is 150 MeV electron storage ring that belongs to Venture Business Laboratory. REFER was established in 1996 by the purpose of new light source development. Presently, REFER has only weak focusing magnets as lattice element. The beam extraction method of REFER uses energy loss by the absorber. The absorber makes beam loss to widen energy width and beam size, which brings about a problem not to be efficient of the beam extraction. Therefore, we thought about the beam extraction by a third order resonance. We need insert a focusing quadrupole magnet and sextupole magnets to induce a third order resonance. In the research, the strength of those magnets was determined. The appropriate insertion points of them were also determined. We then simulated the particle motion with Runge-Kutta method. As a result, the efficiency of the beam extraction was found to be improved greatly.

広島大学超高速電子周回装置の 3次共鳴によるビーム取り出しに関する研究

1. はじめに

広島大学ベンチャービジネスラボラトリーには超高速電子周回装置 (REFER) という 150MeV の電子リングがある。REFERでは、電子と結晶の相互作用を利用した X線 (パラメトリック X線) 生成実験が行われている。また電子線引き出しラインを持っており、取り出し電子を用いた実験も行われている。アブソーバに衝突した電子は、エネルギーロスにより内側の軌道をとる。それをキッカー電磁石で軌道の外側に蹴り出し、セプタム電磁石で引き出しラインへ曲げることによって電子は取り出されている。ただし、アブソーバはエネルギー幅やビームを広げるため、ビームロスが起り取り出し効率が良くないという問題点をもっている。そこで、3次共鳴によるビームの遅い取り出しを考えることで、取り出し効率向上を計った。

REFERにはラティス要素として弱収束型偏向電磁石があるのみで、3次共鳴を起こすために四極電磁石と六極電磁石を挿入する必要がある。本研究では、挿入する電磁石の適切な個数と位置、またチューンとセパトリティクスを適切な大きさにする四極、六極の磁場の強さを決めた。そして、その時の粒子の運動をルンゲ・クッタ法を用いてシミュレーションし、現在のビーム取り出しと比較した。また、取り出されたビームのクオリティについても議論した。

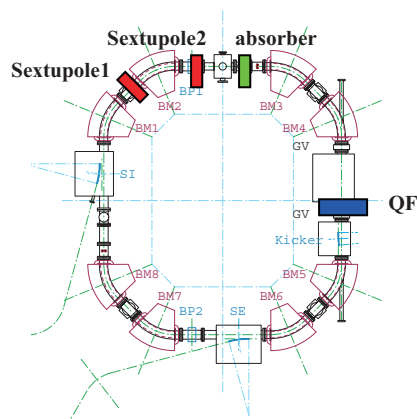


図.1 REFERの概観

Beam energy	150MeV
Ring circumference	13.712m
Horizontal tune	1.2536
Vertical tune	1.2536
Momentum compaction factor	0.6866
RF frequency	699.52MHz

表.1 REFERのパラメータ

2. Twiss Parameter

現在のREFERのTwissパラメータを図2に示す。弱収束型偏向電磁石だけのため、水平方向 (x) と垂直

¹ E-mail: m060771@hiroshima-u.ac.jp

方向(z)の β 関数は同一である。

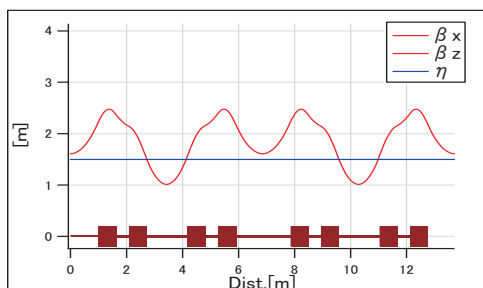


図.2 REFERのTwissパラメータ

3次共鳴を起こすためには、Horizontal tuneを1/3の整数倍に近づける必要がある。そこでBM4とBM5の間の直線部に四極電磁石を挿入することにした。線形ラティス計算で、チューン偏差 $\delta = -0.0005$ となるように選ぶと、四極の磁場の強さは $K=5.95$ と決まる。図3に四極電磁石を挿入した場合のTwissパラメータを示す。

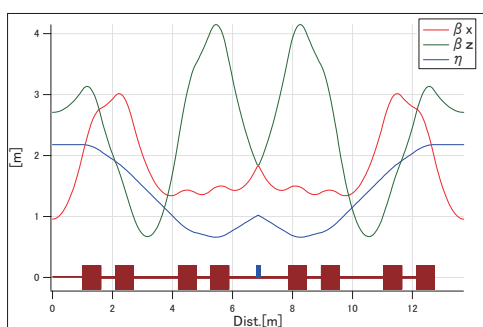


図.3 QF挿入の場合のTwissパラメータ

K value	5.95
QF length	0.1m
Horizontal tune	1.3327
Vertical tune	1.1739
Momentum compaction factor	0.62

表.2 QF挿入の場合のパラメータ

3. セパトトリクス

Horizontal tuneが1/3の整数倍に近づいたリングに六極電磁石を挿入すると、3次共鳴が起こる。ビームはセプタム電磁石で取り出しラインへ曲げられるため、セプタム電磁石で粒子の位相が適切になるような挿入位置を考えた。その結果、BM1とBM2(λ_1)、BM2とRF空洞(λ_2)の間に六極電磁石を挿入することにした。セパトトリクスの大きさを決める六極の磁場の強さは、キッカー電磁石のワイヤの太さが1mmと太いため、unstable fixed point(UFP)とワイヤ($x=-35\text{mm}$)との距離を長くすることにより、ターンセパレーションを大きくする必要がある。そこで、UFPの一つを $x=-17\text{mm}$ に設定し、磁場の強さを $\lambda_1=5.20$ 、 $\lambda_2=7.61$ と決めた。電磁石の長さも0.1mである。図4は、初期位置を一定間隔で与えたときの粒子の運動をセプタム電磁石の位置で表し

たものである。

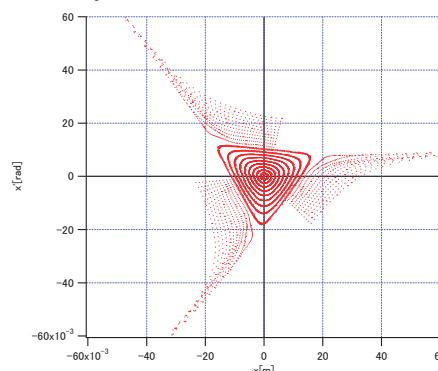


図.4 セプタム電磁石の位置でのセパトトリクス

4. Longitudinal Motion

REFERにおける縦方向位相空間のポアンカレマップを図5に示す。マイクロトロンから入射される電子ビームのエミッタンスは $0.54\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、エネルギー広がり $\pm 0.1\%$ である。このエネルギー偏差によるチューン変化を考慮して、5章ではトラッキングシミュレーションを行っていく。

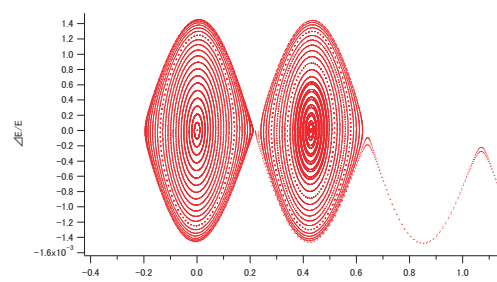


図.5 縦方向位相空間のポアンカレマップ

5. Transverse Motion

Hamiltonianに基づいた運動方程式を用いて、各電磁石およびドリフト空間などの要素について、ルンゲ・クッタ法を用いてトラッキングシミュレーションを行った。今回の計算ではドリフト空間、偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石以外の要素である、キッカー電磁石、セプタム電磁石については、薄肉レンズ近似として長さ0として蹴り角のみを与えることとした。偏向電磁石における放射光放出によるエネルギー放出については、量子効果は無視し、1周あたりの平均エネルギー損失のみを考慮した。

ビームの取り出し効率向上を議論するために、現在行われているアブソーバによるビーム取り出しを示す。RFの共振周波数を時間的に減少させると、 $x=-12\text{mm}$ の地点のアブソーバに電子は衝突する。衝突するとエネルギー150MeVの電子が平均8.3MeVのエネルギーロスを起こし、内側の軌道をとる。エネルギー広がりランダム分布に従う。同時に、多重散乱により標準偏差15.8mradのガウス分布に従う角度広がりも起こす。アブソーバに衝突した電子はキッカー電磁石($-63\text{mm} < x < -53\text{mm}$)に導かれ、0.087radの蹴り角でリングの外側に蹴り出され、セ

プタム電磁石 ($60\text{mm} < x < 70\text{mm}$) で取り出される。z 方向には、キッカー電磁石は6mm、セプタム電磁石は5mmの幅を持っている。図6(a)に1000ターン後の1万の粒子の運動の様子を表す。図6(b)にアブソーバによって取り出された粒子のターン数のヒストグラムを表す。

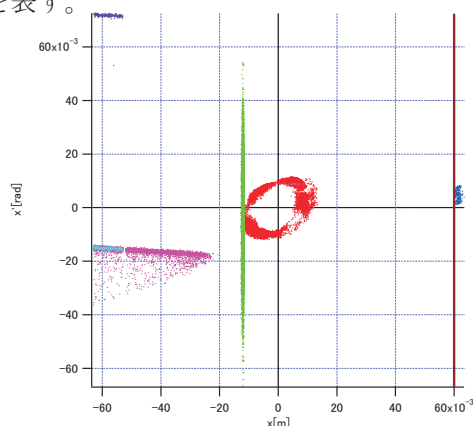


図.6(a) アブソーバによる1000ターン後の1万の粒子の運動の様子。赤は周回する粒子、緑は $x = -12\text{mm}$ のアブソーバに衝突した粒子。水色と紫はキッカー電磁石で蹴られる前、後の粒子、青はセプタム電磁石で取り出された粒子。

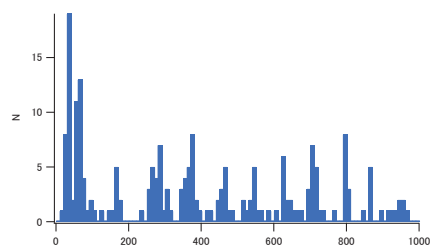


図.6(b) アブソーバによって取り出された粒子のターン数のヒストグラム

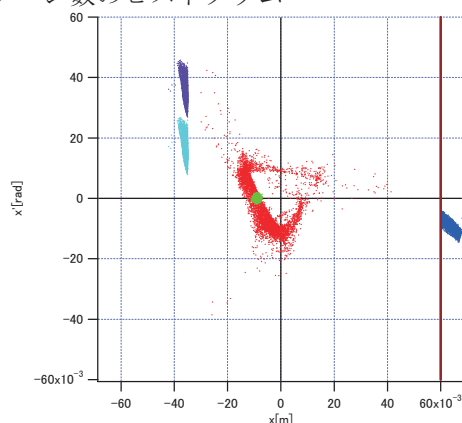


図.7(a) 3次共鳴による1000ターン後の1万の粒子の運動の様子。緑は入射粒子、赤は周回粒子。水色と紫はキッカー電磁石で蹴られる前、後の粒子、青はセプタム電磁石で取り出された粒子。

次に3次共鳴によるビーム取り出しのシミュレーション結果を示す。図7(a)は1000ターン後の1万の粒子の運動の様子をプロットしたものである。セパ

ラトリクスを外れた粒子が急激に振幅を増大させ、キッカー電磁石 ($-45\text{mm} < x < -35\text{mm}$) で 0.019rad で蹴られ、セプタム電磁石 ($60\text{mm} < x < 70\text{mm}$) で取り出されているのが分かる。このときのキッカー電磁石の位置は、アブソーバの場合より上流1.0mに設置すると仮定した。現在の設置場所では、位相空間上のセパトリクスの左下の粒子にまで蹴りを与えるためである。図7(b)に3次共鳴によって取り出された粒子のターン数のヒストグラムを表す。

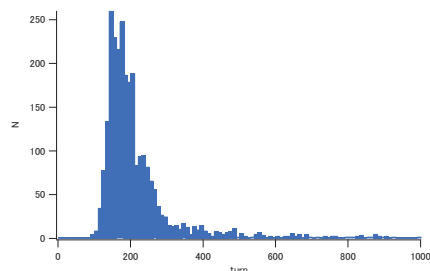


図.7(b) 3次共鳴によって取り出された粒子のターン数のヒストグラム

6. まとめ

取り出し効率(%)	アブソーバ	3次共鳴
キッカー電磁石	5.8	52.4
セプタム電磁石	30.1	68.8
全体	1.7	36.0
エミッタンス (mm · mrad)		
水平方向 (x)	1.29π	2.46π
垂直方向 (z)	0.75π	0.87π

表.3 アブソーバと3次共鳴による取り出しの比較

シミュレーションの結果から、3次共鳴によるビームの取り出し効率が約30%上がることがわかった。取り出されたビームのエミッタンスは、アブソーバの方が小さくなっている。これは、取り出し効率は悪くなるが、キッカー電磁石で蹴られるビームを絞っているからである。反対に3次共鳴では、キッカー電磁石で蹴られるビームの角度広がりが大きいため、エミッタンスが大きくなっている。角度広がりが大きくなる要因は、エネルギー偏差におけるチューン変化によって、セパトリクスの大きさが異なるからである。そこで、高周波電場を用いた強制振動 (RFキック) を与えてベータatron振幅を制御することで、セパトリクスの大きさの違いを減少させることが今後の課題である。

この研究はKEKの加速器科学総合支援事業における大学等連携支援事業の援助により行われている。

参考文献

- [1] S.Y.Lee, "Accelerator Physics" Second Edition, 1999.
- [2] 宮本 篤, 博士論文 "位相空間操作を施した3次共鳴によるビーム取り出しに関する研究"
- [3] 佐川 靖士, 卒業論文 "超高速電子周回装置引き出し線における電子軌道最適化シミュレーション"