

# SPACE CHARGE EFFECTS IN THE RI BEAM FACTORY ACCELERATOR COMPLEX

Hiroki Okuno

Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

## Abstract

The accelerator complex for RI beam factory (RIBF) was successfully commissioned at the end of 2006 and started supplying heavy ion beams in 2007. However, the beam intensity now available of uranium beam is far below our goal of  $1 \mu\text{A}$  ( $6 \times 10^{12}$  #/s). In order to achieve it, upgrade plans are under way, including the construction of a new 28 GHz superconducting ECR ion source. The new ECR will take all the succeeding accelerators and beam transport lines to a space charge dominant regime, especially the front end section and the low energy cyclotron, which should be carefully reconsidered to avoid emittance growth due to space charge forces. Simulation results using the code TRACK and OPAL show that space charge forces largely affect the beam dynamics in all the sections.

## RIビームファクトリー加速器系における空間電荷効果

### 1. はじめに

次世代のRIビーム施設を目指す理研のRIビームファクトリー (RIBF) [1]の加速器複合系部分は、2006年末に完成しファーストビームを得ることができ、2007年からRIビーム生成の為に重イオンビームの供給が行われている[2]。ビーム強度については、ビーム診断系改良やフラットトップ共振器の導入等により日々増強しつつあるが、特にウランビームに対する強度が目標としている  $1 \mu\text{A}$  ( $6 \times 10^{12}$  #/s) を下回っており、抜本的なアップグレードが必要であり、ファーストビームが得られた当初から、その計画が進行中である[3]。そのアップグレード計画は、28 GHz 超伝導ECRイオン源の建設[4,5,6]、この大強度イオン源からのビームを加速する新入射器系リニアックの建設[7,8]の2本の柱から成る。この28 GHz 超伝導イオン源から来るウランの大強度ビームは数  $100 \mu\text{A}$ に達すると予想されその後の加速器及びビーム輸送系を空間電荷効果が支配的な領域に導くことは確実であり、空間電荷力によるエミッタンスの増大を極力避けるような設計及び運転が必須となる。本稿では、まず、設計製作が進んでいる新入

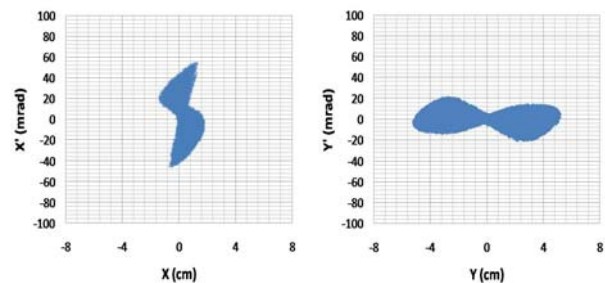


Fig. 2: Emittance plot of U35+ at the end of the LEBT in the case of 50% neutralization of the space charge forces.

射系における空間電荷効果について、TRACK[9]によるシミュレーション結果を基に議論する。次にサイクロトロン中の空間電荷効果については、特に低エネルギーサイクロトロンであるRRC (理研リングサイクロトロン) 中での縦方向位相空間における渦巻き運動が懸念されるため、OPAL[10]によるシミュレーション結果を基に議論する。

### 2. 新入射器系における空間電荷効果

新入射器系の概略図を図1に示す。これは、 $^{84}\text{Kr}^{13+}$ ,  $^{136}\text{Xe}^{20+}$  and  $^{238}\text{U}^{35+}$ , といった質量電荷比がほぼ7の粒子を核子当たり0.68 MeV まで加速するように設計されている。主な構成物は、超伝導イオン源、4ロッドRFQ、イオン源からRFQの入口まで、低エネルギーのビームを輸送するLEBT、3つの4分の1波長型の共振器から成るドリフトチューブリニアック (DTL) である。以下、TRACK コードを用いてビーム軌道をシミュレートした結果をLEBT, RFQ, DTL の順で示す。

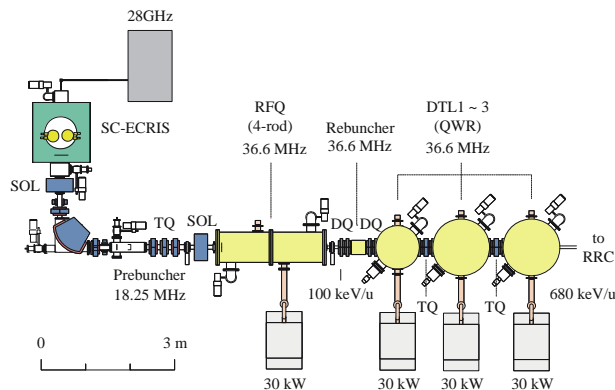


Fig. 1: A plan of the new injector RILAC II.

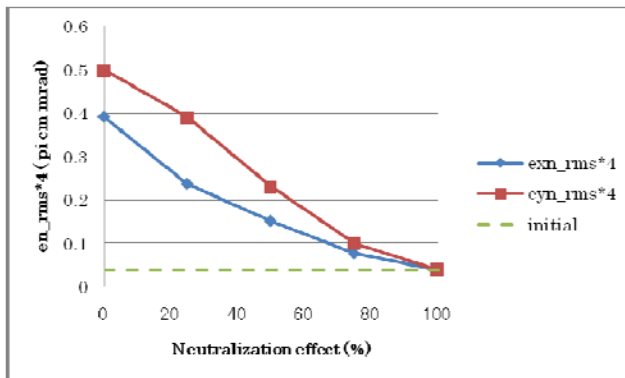


Fig. 3: Normalized emittance in the horizontal and vertical direction at the exit of the LEBT is listed versus neutralization factor of the space charge forces.

LEBTはイオンの荷電数を選択する前後で2つの部分に分かれ選択する前については、イオンの引き出し領域、ソレノイド磁石そして荷電分析の為の90度分析電磁石で構成されている。偏向電磁石の曲率半径は510 mm でエッジアングルは27 度に設定されており、2重収束になるようになってきている。まず、分析スリットでのU(34+), U(35+), U(36+)の3種のイオンが 0 mAでは良く分離している事が確認された。しかしながら、より現実的には、イオン源から引き出される他のイオンからの空間電荷効果も考慮する必要がある。そのため、U(35+) とイオン源のサポートガスとして使われる酸素イオン (2+, 3+, 4+,

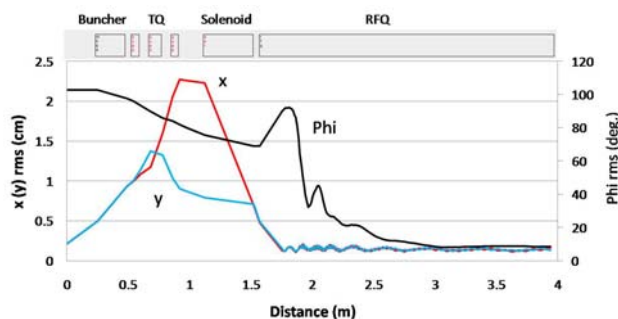


Fig. 4: Beam dynamics from the selection slits in the LEBT to the exit of the RFQ.

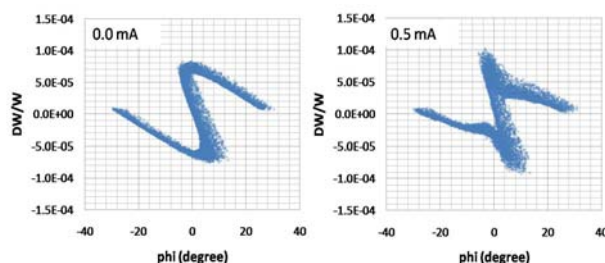


Fig.5: Longitudinal emittance plots at the entrance of the RFQ in the case of 0.0 mA and 0.5mA

	Transmission (%)	Trap efficiency (%)
0.0 mA	68.9	86.7
0.5 mA	50.2	81.1

Table 1: Transmission and trap efficiency of the ion beams from the selection slit to the exit of the RFQ.

5+, 6+) も同時にシミュレートされた。各イオンの電流値は、U<sup>35+</sup> 0.5 mA, O<sup>2+</sup> 1.4 mA, O<sup>3+</sup> 2.5 mA, O<sup>4+</sup> 2.6 mA, O<sup>5+</sup> 1.9 mA, O<sup>6+</sup> 1.6 mA で、LEBT内から発生する電子によって空間電荷力が中和されるいわゆる Neutralization Factor (NF) も変えて計算された。計算の結果Uビームのエミッタンスは、NF が減少するに従って、たとえば図2 に示すように大きく歪む事がわかった。図3にNFとエミッタンスの関係を示す。このNFの実際の値は、残念ながら現段階では理論的に予測することは出来ないため、このLEBTの実験データを待つしかない。

U35+の分析後、イオンビームは、RFQの入口まで輸送される。図4には、その構成要素と位置が示されている。これらについては、佐藤氏のTRANSPORT等を用いた検討により設計されている<sup>[11]</sup>。各要素の磁場強度はTRACE3D<sup>[12]</sup>を用いて、RFQの入口でのビームのTWISSパラメータがRFQの要求するそれとマッチするように決定された。このセクションにはビームバンチャーが設置されこの加速条件での基本周波数である18.25 MHzでバンチされたビームを作る。このバンチャーの電圧や位置は、基本周波数の2倍で運転されるRFQの適切なバケットにトラップされる効率を最大にするように最適化される必要がある。そのため、イオンの価数分析後のLEBTからRFQ出口までのビーム軌道をTRACKによりシミュレーションし、0.0 mA の時の 0.5 mAの時で比較した。RFQのVane構造の為の入力ファイルはDESRFQ<sup>[13]</sup>によって作られたものを用いた。図4に0.5 mAの場合の計算結果を示す。また表1には、このセクションでの通過率とトラップ効率を示した。図5にRFQ入口での縦方向エミッタンスを示すが、0.5 mAの際にパンチの形は大きく歪んでいるがトラップ効率にはあまり変化がない事がわかった。また通過率が0.0 mAと0.5 mAで20% ほど下がるが、これの原因について

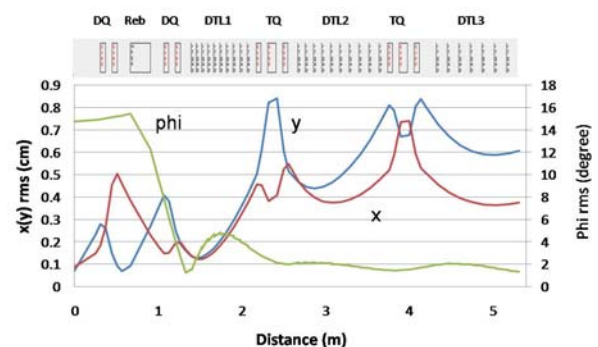


Fig. 6: Beam dynamics of the DTL with short MEBT including a re-buncher.

PSI Inj. 2	RRC	fRC	IRC	SRC
1	0.644	0.096	0.031	0.016

Table 2: List of the parameter  $V$ . The definition of  $V$  is shown in the text.

は、検討中である。

DTLについても軌道計算を行ったが、このモデルは、図6に示すように2つのDQとそれに挟まれたリバンチャー、DTL内の構造を表わすRFギャップ、ドリフトスペース、2つのTQから成る。図6は、0.5mAの時の結果であるが、0.0 mAの時とほぼ同等であり、DTLのエネルギー領域まで行ってしまえば空間電荷効果によるエミッタンスの増大も小さい事を示唆している。

### 3. サイクロトロン中での空間電荷効果

サイクロトロン中のバンチの縦方向の運動は、本来、等時性のため、1週毎のバンチの形はほぼ止まって見える。しかしながら、ビーム電流が増えるに従って、その空間電荷力により渦巻き運動を起こすようになる。この現象は大強度陽子施設を有するスイスのPSI研究所の入射用サイクロトロン (Injector 2) で、1980年代に見いだされ精力的に研究がなされた<sup>[14]</sup>。Pozdeyev<sup>[15]</sup>らによれば、この渦巻き運動の程度 $V$ は、イオンの価数 $q$ 、電流値 $I$ 、ハーモニクス $h$ 、運動量を $p=m\gamma R\omega$  とあらず諸量を用いて、

$$V = qI / (\gamma^5 m h \omega^3)$$

と表わされる。 $V$ をRIBF内の4つのサイクロトロン (RRC, fRC, IRC, SRC) と渦巻き運動が顕著にみられるPSIのInjector 2 について比較したものを表2に示す。これより特にRRCがPSIのInjector 2 状況が似ている事が推察される。現在、PSIのAdelmannらによって開発されたOPALコードを使って、RRCのシミュレーションを実施しており、現段階では全部で300ターンあるうちの10ターンのみの計算である。一例として0.50 mA 初期位相±4degの時の結果を図7に示すが、最初の10ターンであっても渦巻き運動が顕著に見られることがわかる。今後、最終ターンまで、さまざまな電流値、初期条件のもと、計算を行い、取り出し効率の劣化を議論するとともに、FT共振器による補正によってそれが改善できるか等の議論を実施する予定である。

### 4. まとめ

現在RIBF加速器系進行中のビーム強度増強計画は、新たな28GHz超伝導ECRイオン源と新入射器リニアックを建設するというものである。本稿では、新入射器系で生じる空間電荷効果を議論するとともに低エネルギーサイクロトロンにおける渦巻き運動も生じる可能性が大きい事を示した。

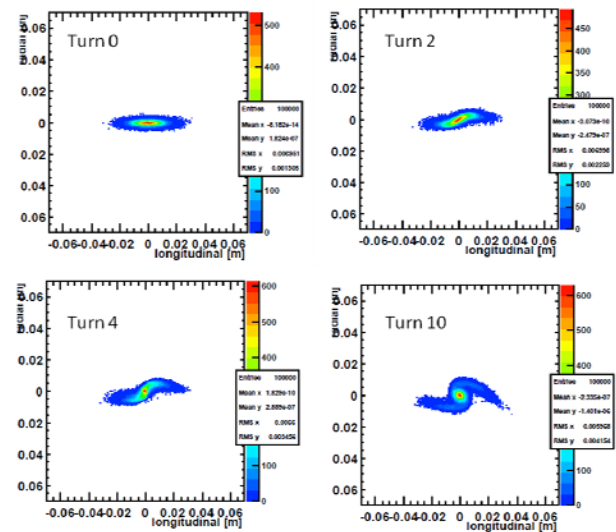


Fig.7: Longitudinal emittance plots in the RRC. The number in each graph is the turn number after the injection.

### 参考文献

- [1] Y. Yano, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 261 pp. 1009-1013, 2007.
- [2] N. Fukunishi, *et al.*, *Proc. Particle Accelerator Conference 2009*, in press, May 2009, Vancouver.
- [3] O. Kamigaito, *et al.*, in this proceedings.
- [4] T. Nakagawa, *et al.*, *High Energy Physics and Nuclear Physics* **31** (2007) 133.
- [5] Y. Higurashi, *et al.*, in this proceedings.
- [6] J. Ohnishi, *et al.*, in this proceedings.
- [7] O. Kamigaito, *et al.*, 3rd Ann. Meeting of PASJ and 31th Linac meeting in Japan, Sendai, (2006) 502.
- [8] K. Yamada, *et al.*, in this proceedings.
- [9] P.N. Ostroumov, V.N. Aseev, and B. Mustapha., *Phys. Rev. ST. Accel. Beams* **7**, 090101 (2004).
- [10] A. Adelmann, *et al.*, *Tech. Rep. PSI-PR-09-05*, Paul Scherrer Institut (2009).
- [11] Y. Sato, *et al.*, in this proceedings.
- [12] K. R. Crandall, Los Alamos Report, No. LA-11054-MS, 1987.
- [13] A.A. Kolomiets, *et al.*, ITEP report, 2001.
- [14] S. Adam, *IEEE Trans. On Nuclear Science* **32**, 2507 (1985).
- [15] E. Pozdeyev, Thesis, MSU, 2003.