

# RCNP AVF サイクロトロン の LEBT システム のアップグレード DESIGN OF LEBT SYSTEM FOR RCNP AVF CYCLOTRON UPGRADE

荘俊謙<sup>\*A)</sup>、福田光宏<sup>A)</sup>、神田浩樹<sup>A)</sup>、畑中吉治<sup>A)</sup>、関亮一<sup>A)</sup>、森信俊平<sup>A)</sup>、斎藤高嶺<sup>A)</sup>、依田哲彦<sup>A)</sup>、  
友野大<sup>A)</sup>、中尾政夫<sup>B)</sup>、鎌倉恵太<sup>C)</sup>、田村仁志<sup>A)</sup>、永山啓一<sup>A)</sup>、安田裕介<sup>A)</sup>、原周平<sup>A)</sup>、Koay Hui Wen<sup>A)</sup>、  
森田泰之<sup>A)</sup>、武田佳次郎<sup>A)</sup>、原隆文<sup>A)</sup>、大本恭平<sup>A)</sup>、久松万里子<sup>A)</sup>

Tsun Him Chong<sup>\*A)</sup>、Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>、Hiroki Kanda<sup>A)</sup>、Kichiji Hatanaka<sup>A)</sup>、Ryoichi Seki<sup>A)</sup>、Shunpei Morinobu<sup>A)</sup>、  
Takane Saito<sup>A)</sup>、Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>、Dai Tomono<sup>A)</sup>、Masao Nakao<sup>B)</sup>、Keita Kamakura<sup>C)</sup>、Hitoshi Tamura<sup>A)</sup>、  
Keiichi Nagayama<sup>A)</sup>、Yuusuke Yasuda<sup>A)</sup>、Shuheji Hara<sup>A)</sup>、Hui Wen Koay<sup>A)</sup>、Yasuyuki Morita<sup>A)</sup>、Takafumi Hara<sup>A)</sup>、  
Kyohei Omoto<sup>A)</sup>、Mariko Hisamatsu<sup>A)</sup>、Keijiro Takeda<sup>A)</sup>、

<sup>A)</sup>RCNP, Osaka University

<sup>B)</sup>Gunma University

<sup>C)</sup>CNS, The University of Tokyo

## Abstract

The upgrade program of the AVF Cyclotron in RCNP is under way for the improvement of the beam quality and intensity. A new Low Energy Beam Transport(LEBT) system was designed to match the injected ion beam to the acceptable phase space in the center region of the AVF cyclotron for achievement of high injection transmission. This paper summarizes the design of the LEBT system, which transports beams from 18 GHz Superconducting ECR ion source, 2.45 GHz ECR proton source, 10 GHz NEOMAFIOS and Duoplasmatron to the inflector electrode with high intensity and low emittance. This paper introduces optimum configuration of the LEBT magnets and the design of the strength of each magnet based on the calculation by using MAD-X.

## 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) は短寿命 RI 供給のプラットフォーム、及びアルファ線医学治療の推進を目指し、陽子・重陽子ビーム及びヘリウムビームの高強度化を目指して、AVF サイクロトロン のアップグレードを進めている。それに合わせ、イオン源もいくつかのアップグレードを行う。まず、イオン源の引出電圧は十数 kV から 50kV まで増大し、ビーム電流も数 100  $\mu$  A 以上に増強する。また、アップグレードに合わせて、AVF サイクロトロン の上ヨークを 60cm 上昇させるように改造を行ったため、垂直入射ラインも 60cm 延長する。この上で、我々はインフレクタ電極の直前にあるコリメータで  $30\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$  ( $\Delta x = \pm 3\text{mm}$ 、 $\Delta x' = \pm 10\text{mrad}$ 、 $\Delta y = \pm 3\text{mm}$ 、 $\Delta y' = \pm 10\text{mrad}$ ) のエミッタンスを持つ、phase space で正立した楕円のイオンビームを仮定して、AVF サイクロトロン内の軌道計算を進めている。イオンビームを AVF サイクロトロン の中心領域でマッチさせるために、軌道計算の初期条件に合わせたビームを提供できる LEBT システムが必要である。そのため、イオン源からインフレクタまでの LEBT 光学を全面的に見直すこととした。

我々はビーム輸送光学計算コード MAD-X を用いて、まず現在の LEBT システムの磁石配置のもとで、磁石強度の最適化を行った。その際、ビームの空間的な広がりを表す twiss parameter  $\beta_x, \beta_y$  の値と変化具合に注意しながらビームエンベロープの評価を行った。z 方向に輸送するイオンビームのエミッタンスを  $\epsilon$  と表す時、イオン

ビームの実空間での半径  $\Delta x, \Delta y$  は

$$\Delta x = \sqrt{\epsilon\beta_x}, \Delta y = \sqrt{\epsilon\beta_y} \quad (1)$$

で表せる [1]。この twiss parameters  $\beta_x, \beta_y$  を追いつながら最適化を行えば、輸送の途中でのビームの実空間での大きさは計算でき、ビーム品質及び輸送効率の評価をすることができる。本発表でも、主に輸送ビームの  $\beta_x, \beta_y$  で輸送システムを評価する。

## 2. RCNP の LEBT システム

RCNP サイクロトロン施設には、18GHz 超電導 ECR イオン源 SC-ECR、2.45GHz ECR 陽子源 HIP-ECR、10 GHz 永久磁石型 ECR イオン源 NEOMAFIOS、高輝度イオン源 Duoplasmatron、偏極イオン源 HIPIS などがある。さらに、AVF サイクロトロン のアップグレードに伴い、10GHz ECR イオン源 Nanogun も増設する予定である。これらのイオン源の配置を Fig. 1 に示す。

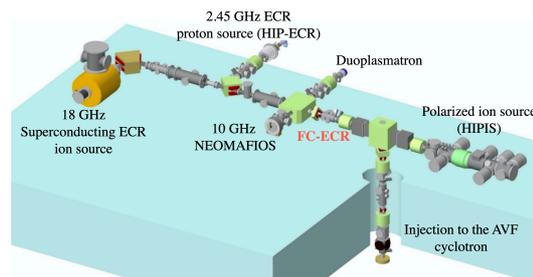


Figure 1: Ion sources in RCNP.

\* oscar@rcnp.osaka-u.ac.jp

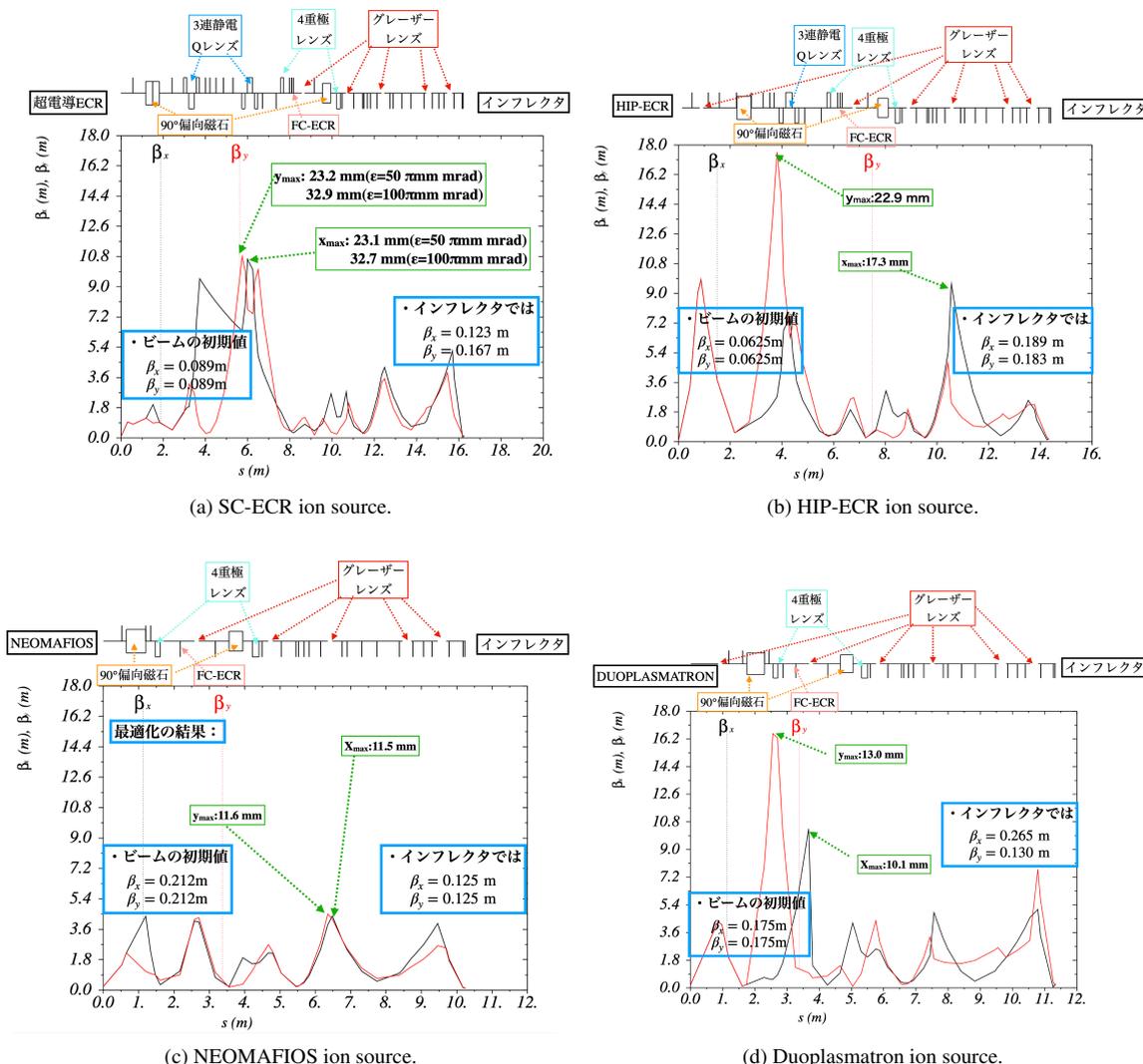


Figure 2: The LEPT system configuration and twiss parameters  $\beta_x, \beta_y$  of the ion beams from the four ion sources, and the chosen initial twiss parameters due to the optimization results.

イオンは SC-ECR、HIP-ECR、NEOMAFIOS、Duoplasmatron イオン源から引き出され、途中の FC-ECR (ファラデーカップ) を通り、偏向電磁石によって垂直入射ラインに入り、LEPT システムの下にある AVF サイクロトロンに入射されるように設計されている。ビームマッチング条件である  $30\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$  のエミッタンスのビームを作るには、垂直入射ラインの終点、すなわちインフレクタ電極の直前で  $\beta_x \leq 0.3 \text{ m}$ ,  $\beta_y \leq 0.3 \text{ m}$  を持つビームを作る必要がある。さらに、ビーム制御の便宜上、各イオン源から輸送されたビームが到達する共通のビーム診断ステーションの FC-ECR において double focus させ、ここより下流はできるだけ共通のビーム光学で輸送するのが望ましい。インフレクタ及び FC-ECR での double focus と  $\beta_x, \beta_y$  の絞りが、LEPT システム最適化の目標であり、本発表では超電導 ECR、HIP-ECR、NEOMAFIOS、Duoplasmatron イオン源の四つの LEPT システムの設計を報告する。

### 3. LEPT システムの設計

SC-ECR、HIP-ECR、NEOMAFIOS、Duoplasmatron の 4 つのイオン源の LEPT システムの構成及び twiss parameters  $\beta_x, \beta_y$  は Fig. 2 で示されている。

Figure 2a で、SC-ECR の LEPT システムには 3 連静電 Q レンズが二つ並んでおり、それによって twiss parameters  $\beta_x, \beta_y$  の増大が抑えられている。これより、SC-ECR のイオンビームは FC-ECR 及びインフレクタで double focus を成功している。

同様に、Fig. 2b では、HIP-ECR のイオンビームは偏向電磁石によって  $\beta_y$  が大幅に増大したが、その後にある 3 連静電 Q レンズにより  $\beta_y$  が抑えられ、イオンビームは FC-ECR 及びインフレクタで double focus を成功している。

Figure 2c より、NEOMAFIOS イオン源のビームが終始小さい  $\beta_x, \beta_y$  を保っていることがわかる。そのイオ

Table 1: Optimization Results of the LEBT System

	SC-ECR ( $\epsilon = 100\pi\text{mm mrad}$ )	HIP-ECR ( $\epsilon = 30\pi\text{mm mrad}$ )	NEOMAFIOS ( $\epsilon = 30\pi\text{mm mrad}$ )	Duoplasmatron ( $\epsilon = 10\pi\text{mm mrad}$ )
インフレクタ での $\beta_x$	0.123 m	0.189 m	0.125 m	0.265 m
インフレクタ での $\beta_y$	0.167 m	0.183 m	0.125 m	0.130 m
FC-ECR での $\beta_x$	0.31 m	0.71 m	1.13 m	4.94 m
FC-ECR での $\beta_y$	0.47 m	0.91 m	0.91 m	1.33 m
ビーム最大 $x$ 半径	32.7 mm	17.3 mm	11.5 mm	10.1 mm
ビーム最大 $y$ 半径	32.7 mm	22.9 mm	11.6 mm	13.0 mm

ンビームは FC-ECR 及びインフレクタで double focus を成功している。x 方向及び y 方向の twiss parameters  $\beta_x, \beta_y$  が小さくかつほぼ同じ値を保っていることから、NEOMAFIOS の LEBT システムの設計、特に FC-ECR の後にある垂直入射ラインの磁石の強度は今後の他のイオン源の LEBT システム設計の参考になると考えられる。

Duoplasmatron イオン源のビームは偏向電磁石を通りすぎた後  $\beta_x, \beta_y$  が大幅に増大し、FC-ECR で double focus を持たないことは Fig. 2d から見られる。そのイオンビームは垂直入射ラインのグレーザーレンズによって  $\beta$  が抑えられ、インフレクタで double focus を持ち、インフレクタでの  $\beta$  の目標値は実現したが、ビーム制御の便宜上、FC-ECR での double focus の実現は今後の課題となる。

#### 4. LEBT システムの最適化結果

LEBT システムの最適化の下で、4 つのイオン源エミッタンス、及びそのイオンビームの  $\beta_x, \beta_y$  を Table 1 で示す。Table 1 より、インフレクタでは、4 つのイオン源のビームがともに  $\beta_x \leq 0.3 \text{ m}, \beta_y \leq 0.3 \text{ m}$  のビームマッチング条件を満たしていることがわかる。また、FC-ECR では、SC-ECR、HIP-ECR 及び NEOMAFIOS のイオンビームは  $\beta$  が絞られ、double focus を実現している。一方、Duoplasmatron のイオンビームは、FC-ECR では  $\beta_x = 4.94 \text{ m}, \beta_y = 1.33 \text{ m}$  を持ち、double focus を持たないことがわかる。

Table 1 及び Fig. 2 より、SC-ECR は 4 つのイオン源の中でも比較的大きいエミッタンスを持つことがわかる。そのため、twiss parameters  $\beta_x, \beta_y$  が抑えられても、ビームの最大半径が他の 3 つのイオン源のビームより大きいことがわかる。現在の輸送システムでは、SC-ECR のイオンビームが壁にぶつからずに通ることができるかの確認は今後の課題である。一方、HIP-ECR 及び Duoplasmatron のイオンビームは SC-ECR より小さいエミッタンスを持つため、SC-ECR よりも大きい  $\beta_x, \beta_y$

を持っていても、ビームの実空間での広がり小さいことがわかる。

#### 5. 今後の課題

本発表の LEBT システムの設計では、4 つのイオン源のビームはともにインフレクタで  $\beta_x \leq 0.3 \text{ m}, \beta_y \leq 0.3 \text{ m}$  という目標を満たしている。しかし、この設計では FC-ECR より下流側のグレーザーレンズ及び 4 重極レンズの強度は各イオン源に共通していない。ビーム制御及び診断の便宜上、FC-ECR より下流の LEBT 光学はイオン源を問わず、全く同じであることが理想的である。そのため、インフレクタでのビームマッチング条件を満たし、かつ FC-ECR より下流側のレンズ強度が全く同じの LEBT システムの設計が今後の課題である。その実現条件として、各イオン源のビームが FC-ECR で double focus を持ち、かつ同じビーム条件を持つような LEBT システムの設計が必要である。

ビームの輸送効率のため、イオンビームが輸送の途中で壁や診断機器にぶつからない必要がある。そのため、イオンビームの実空間での広がり、そして輸送システムの太さの確認も必要である。

また、本発表は 4 つのイオン源の LEBT システムの設計について報告したが、この 4 つのイオン源以外に、HIPIS イオン源及び ECR Nanogun の LEBT システムも AVF サイクロトロンへのアップグレードに合わせて設計する必要がある。

#### 参考文献

- [1] Martin Reiser, (2008). Theory and design of charged particle beams. WILEY-VCH.