

RCNP AVF サイクロトロン大強度化のための LEBT システムの最適化

OPTIMIZATION OF LOW ENERGY BEAM TRANSPORT SYSTEM FOR HIGH INTENSITY AVF CYCLOTRON AT RCNP

板倉菜美^{#, A)}, 福田光宏^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 齋藤高嶺^{A)}, 友野大^{A)}, 田村仁志^{A)}, 安田裕介^{A)}, 荘 俊謙^{A)}, 趙 航^{A)}, Shali Ahsani Hafizhu^{A)}, 松井昇大朗^{A)}, 井村友紀^{A)}, 渡辺薫^{A)}, 石畑翔^{A)}, Gabriel Pecar^{B)}
Nami Itakura^{#, A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Takane Saito^{A)}, Dai Tomono^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)}, Yusuke Yasuda^{A)}, Tsun Him Chong^{A)}, Zhao Hang^{A)}, Shali Ahsani Hafizhu^{A)}, Shotaro Matsui^{A)}, Tomoki Imura^{A)}, Kaoru Watanabe^{A)}, Sho Ishihata^{A)}, Gabriel Pecar^{B)}
^{A)} RCNP, Osaka University
^{B)} Duquesne University

Abstract

At Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, an upgrade of the K140 AVF cyclotron has been underway since 2019 to improve its performance, i.e., to increase the intensity of the accelerated beams. To achieve high intensity, it is important to enhance efficiency of the beam injection efficiency into the central region of the AVF cyclotron. Therefore, it is necessary to optimize the low-energy beam transport (LEBT) system from an ion source to an inflector electrodes. Specifically, the LEBT system should be designed to transport the beam from the ion source with high intensity and low emittance. When calculating the transport of high-intensity beams, space-charge effects must be taken into account, and since it is difficult to perform analytical calculations, simulations are performed. For the actual simulation calculations, we use OPAL-t, etc., which can calculate the space-charge effect in the Particle In Cell method. The emittance is then measured with a pepper-pot emittance monitor upstream of the AVF cyclotron to confirm the simulation results. In this presentation, details of the simulation calculations and emittance measurements of the LEBT system will be presented.

1. はじめに

RCNP が保有する K140 AVF サイクロトロンはアップグレードを通して、高強度・高品質なビームの供給を目指している。アップグレードの目的としては、短寿命 RI 供給機能の強化、二次粒子供給機能の強化などがある。これを達成するには AVF サイクロトロンでの加速ビームを $10 \sim 100 \mu\text{A}$ にする必要がある。イオン源から AVF サイクロトロンインフレクタ電極までの低エネルギー輸送 (LEBT) システムでは、 1 mA を超えるビームの輸送を行う。Figure 1 はイオン源及び LEBT ラインの配置図である。ここでは低エネルギーかつ比較的大電流のイオンビームを扱うので、空間電荷効果を考慮したビーム輸送を考えなければならない。また、ビームの大強度化を達成するために、AVF サイクロトロンに効率よく入射できるインフレクタ電極を開発する必要もある。したがって、ビームを高強度・低エミッタンスを保ったまま輸送できるように、LEBT システムを最適化することは重要な課題である [1]。本研究ではイオン源を 10 GHz NANOGAN と想定し、AVF サイクロトロンインフレクタ電極までの軌道計算を行う。また、ビームラインのうち 2 箇所にはペッパーポット型エミッタンスモニター (PPEM) を設置し、エミッタンスを測定する。

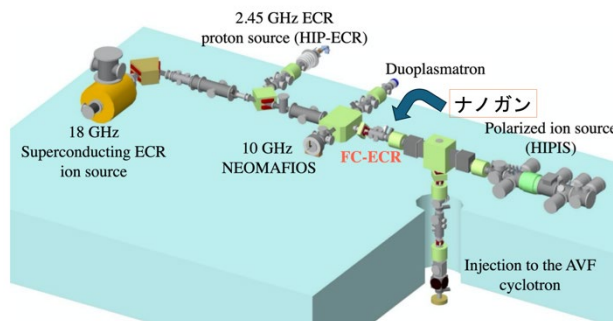


Figure 1: Ion source and LEBT line in RCNP.

2. ビームラインの軌道計算

本研究では、ビーム軌道計算コード ocelot を用いて、twiss パラメータ β_x, β_y の値を追う。He²⁺ のイオンビームを想定し、初期条件は、 $x_0, y_0 = 5 \text{ mm}$, $x'_0, y'_0 = 50 \text{ mrad}$, $\varepsilon_{x0}, \varepsilon_{y0} = 250 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ とした。電流値は 1 mA , $25 \mu\text{A}$, $10 \mu\text{A}$ の 3 種類で計算を行った。

想定するビームラインは、ナノガンからインフレクタ電極までである。ナノガンから引き出された He²⁺ は偏向電磁石 2 つを経由して LEBT ラインの本流に入り、その後偏向電磁石によって垂直入射ラインに入り、AVF サイクロトロンに入射される。磁石配置は現在の LEBT システムを想定し、磁石の強度はインフレクタ電極の直前で直径

[#] nami@rcnp.osaka-u.ac.jp

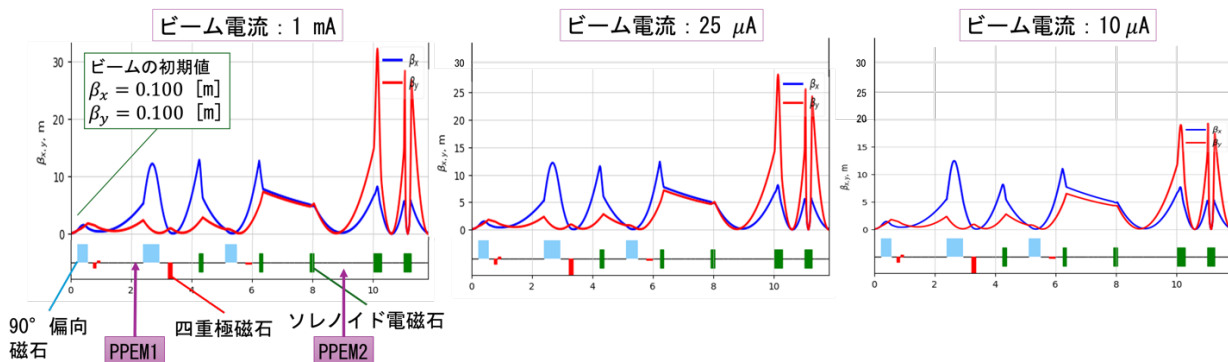


Figure 2: The LEBT system configuration and twiss parameters β_x , β_y of the ion beams from nanogan.

8 mm 以内に収まるようにあらかじめビーム輸送光学計算コード MAD-X によって最適化された値を用いた。しかし、MAD-X では空間電荷効果が考慮されていないため、ocelot で空間電荷効果を考慮した計算を行い、ビームの発散・収束を確認する。

Figure 2 では、ビームラインの構成と ocelot での計算結果を示す。ビーム電流が大きくなるとビームがより発散しているため、空間電荷効果が考慮できていることがわかる。また、終端(インフレクタ電極の直前)でビームは収束しており、よく最適化できていたということが出来る。しかし、ビームの輸送中には発散が大きくなっている部分があり、その部分ではビームが壁にぶつかりビーム輸送効率が悪くなっている可能性があるため、最適化は引き続き行う必要がある。

3. PPEM によるエミッタンス測定

PPEM [2]の基本原理は、測定対象のイオンビームを小さなホールが規則的に開いているマスクで遮り、それぞれのホールから透過したビームの像をカメラを通して画像で取得して、それを解析することでエミッタンスが得られるものである(Fig. 3)。マスクを通ったビームの像を明確に得るために蛍光板付きのマルチチャンネルプレート(MCP: HAMAMATSU Photonics)を用いた。マスクは直径 1 mm のホールが 3 mm 間隔で空いており、アルミ版の厚さは 0.05 mm である(Fig. 4)。

今回の実験では、Fig. 2 に示す2箇所 PPEM を設置し、測定を行った。実験中にビームの強度が大きすぎてマスク及び MCP の一部が破損した。マスクは交換したが、MCP の破損が画像に影響するため(Fig. 5)、PPEM1 の位置の時にビームを左右に振って3種類の画像を取得した。そこからビームの x, y 方向の位相空間分布及びエミッタンスを取得した(Fig. 6)。

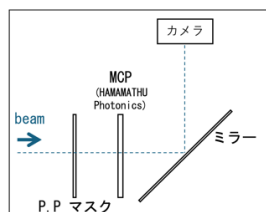


Figure 3: Schematic of PPEM.

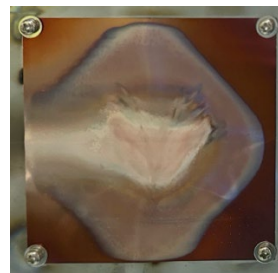


Figure 4: PPEM mask.

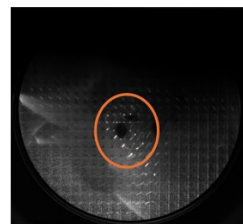


Figure 5: Images of the impact of MPC breakage.

PPEM2 の位置での測定結果は Fig. 7 に示す。2 箇所でのエミッタンスの値を比べると、空間電荷効果の影響で上流(PPEM1)より下流(PPEM2)のエミッタンスの値の方が大きくなっているはずである。まず PPEM1 の各値を見ると、 $150\pi \sim 270\pi \text{ mm} \cdot \text{mmrad}$ と大きな差がある。これを改善するために、位相空間分布からエミッタンスを求める解析方法を改善する必要がある。PPEM2 のエミッタンスの値と比べると、PPEM1 の値の方が大きいまたは同等である場合もある。これは、ビームラインの壁にぶつかり、ビームをロスしたことによってエミッタンス値が小さくなってしまったと考えられる。

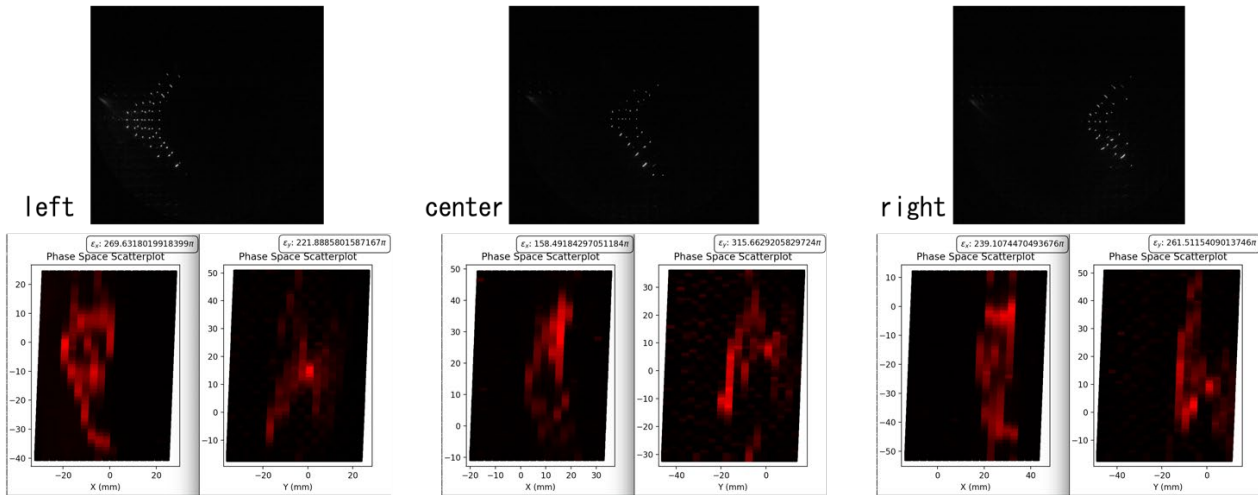


Figure 6: Images and obtained phase space in PPEM1.

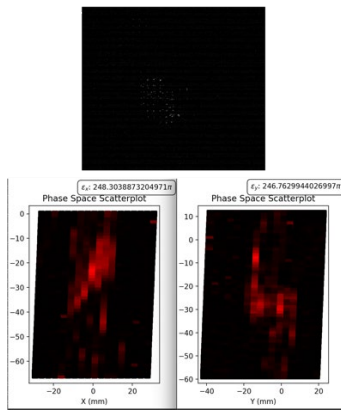


Figure 7: Images and obtained phase space in PPEM2.

4. まとめと今後の展望

RCNP の LEBT システムを最適化するために、軌道計算コード ocelot を用いた軌道計算と PPEM によるエミッタンス測定を実施した。低エネルギーかつ大電流のビームを輸送するため、空間電荷効果を考慮することは必要不可欠である。ocelot で空間電荷効果を含む β_x, β_y の値を

得ることができた。Opal-t などの他の計算コードでも移動計算を行うことで、より詳しいビームの解析や、計算コードの違いによる空間電荷効果の比較を行う。また、PPEM について、画像データの取得方法や解析方法を見直し、より正確なエミッタンス値を得る必要がある。これらを踏まえた上で、ビームの最適化を行い、同様の実験を行うことで、軌道計算から得られたエミッタンスと PPEM から得られたエミッタンスのデータを比較し、同等であることを確認する。今回はナノガンを想定したが、他のイオン源でも LEBT システムの最適化を行う。

謝辞

指導及び実験を共に行なって下さった依田先生、福田先生、神田先生、解析を共に行なってくださった Gabriel さん、解析において助言をくださった RCNP の先輩方に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] T. H. Chong *et al.*, “DESIGN OF LEBT SYSTEM FOR RCNP AVF CYCLOTRON UPGRADE”, Proc. 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2020).
- [2] N. Miyawaki *et al.*, “DEVELOPMENT OF A PEPPER-POT EMITTANCE MONITOR SYSTEM FOR THE TIARA AVF CYCLOTRON”, Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2019).