

TIARA AVF サイクロトロン入射ラインのエミッタンス測定に基づくビーム輸送試験 TEST OF BEAM TRANSPORT BASED ON BEAM EMITTANCE MEASUREMENT IN THE INJECTION LINE OF THE TIARA AVF CYCLOTRON

柏木啓次[#], 宮脇信正, 倉島俊

Hirotsugu Kashiwagi[#], Nobumasa Miyawaki, Satoshi Kurashima

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and
Technology

Abstract

A test experiment of controlling the emittance shape was carried out as a part of the development of the beam injection tuning method based on emittance and acceptance measurements. Since beam emittance and acceptance of the cyclotron are measured at the same position away from an ion source, the emittance at an upstream position is calculated by backward transport. The parameters of electromagnets in the upstream beam line are determined by fitting calculation to obtain the emittance shape with specified Twiss parameters. The measurement results of the emittance shape and the trajectory calculation results were in good agreement.

1. はじめに

量研機構高崎量子応用研究所の TIARA AVF サイクロトロン[1]では、RI 製造・半導体照射・バイオ研究等の分野の研究開発のために、様々な軽・重イオンビームを頻りに切り替えて提供している。このビーム切り替えに伴うイオン源からサイクロトロンへのビーム入射調整を効率的に行うため、入射ビームのエミッタンスとサイクロトロンアクセプタンスの計測に基づいた入射調整方法を開発している。

これまで、エミッタンス・アクセプタンスを測定するシステムを開発し[2]、ステアリング電磁石を用いた入射ビームのエミッタンスの実効的拡大[3]によるアクセプタンスの測定実証を行なうとともに、エミッタンスを効率的に測定するためのスリット-ハープ法による高速測定システムを開発してきた[4]。

開発したシステムにより、エミッタンスとアクセプタンスはビームラインの同位置で計測され、位相空間内での相互の位置・形状を把握できる。しかし、エミッタンスをアクセプタンスにマッチングするためには、測定位置の上流の電磁石パラメータを変更する必要があるため、測定したエミッタンスデータを基にトラッキング計算にて逆方向に輸送することで上流のエミッタンスを求め、アクセプタンスにマッチングするための電磁石パラメータを決定する必要がある。

本稿ではこの逆方向の輸送計算及び、その結果に基づいたパラメータ制御が有効であることを確かめるため、指定した Twiss パラメータのエミッタンス形状となるように輸送ラインの電磁石パラメータ変更し、エミッタンスの計算値と実測の比較を行なった結果を報告する。

2. 逆方向輸送計算による上流位置エミッタンスの算出

TIARA AVF サイクロトロンは 4 つの外部入射用イオン源を備えている。Figure 1 に示すのは重イオン用に主に使用されている ECR イオン源からサイクロトロンへの

低エネルギービーム輸送ラインである。イオン源から出射したビームはソレノイドレンズで収束され、偏向電磁石 HAM で価数分析される。その後、2 台のソレノイドレンズで収束されながら輸送され、サイクロトロンに垂直入射部に向かうビームラインに偏向電磁石 IIM によって他の 3 台のイオン源からのビームラインと統合される。エミッタンス及びアクセプタンスは IIM から 2 台のソレノイドレンズを経た位置(IS2)で測定される。

IS2 でのエミッタンスの形状を変更するには、測定位置よりも上流の電磁石パラメータを変更して行なう必要がある。指定したエミッタンス形状に制御するための電磁石パラメータの算出には、上流のエミッタンスを求める必要があるが、イオン源から本装置までのビームラインにはエミッタンス測定装置が設置されていないため、上流位置でのエミッタンスをビームラインの逆方向に輸送計算を行なって求める。

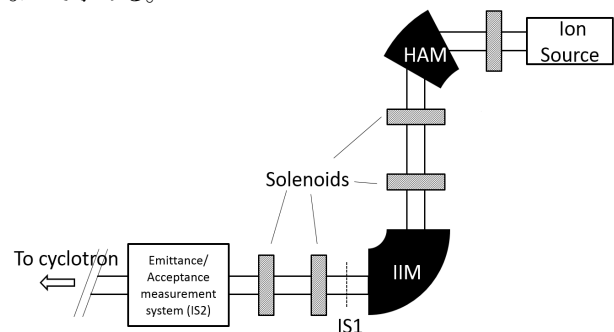


Figure1: Beam injection line from ECR ion source to emittance and acceptance measurement system.

エミッタンスの逆方向への輸送は転送行列の逆行列をビームラインを遡るように掛け合わせることで行なう。測定位置からイオン源までのビームライン主な構成要素はドリフト・ソレノイド・偏向電磁石である。ソレノイドレンズの転送行列の逆行列を以下に示す。

$$\begin{pmatrix} \cos^2(kL) & -\frac{\sin(2kL)}{2k} & -\frac{1}{2}\sin(2kL) & \frac{\sin^2(kL)}{k} & 0 & 0 \\ k \cos(kL) \sin(kL) & \cos^2(kL) & -k \sin^2(kL) & -\frac{1}{2}\sin(2kL) & 0 & 0 \\ \cos(kL) \sin(kL) & -\frac{\sin^2(kL)}{k} & \cos^2(kL) & -\frac{\sin(2kL)}{2k} & 0 & 0 \\ k \sin^2(kL) & \cos(kL) \sin(kL) & k \cos(kL) \sin(kL) & \cos^2(kL) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{L}{\gamma^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ここに、 L はソレノイドの有効長、 $k=B_0/(2B\rho)$ 、である (B_0 : ソレノイド磁場、 $B\rho$: magnetic rigidity)。

測定したエミッタンスの座標データをこの逆行列を用いてビームラインの任意の位置まで戻す。この計算には AccelSoft Inc. の PBO Lab[5]のビームトラッキングモジュール Turtle を用いる。Turtle には各要素の逆行列は用意されていないため、上記の個々の電磁石及びドリフトについての逆行列を作成し、計算に用いた。

3. 輸送電磁石パラメータの決定

前節の逆方向輸送で求めた上流位置でのエミッタンスデータを基に、アクセプタンスとのマッチング位置(IS2)でのエミッタンスの形状の制御を行なう。これにはビーム光学計算プログラム TRANSPORT の Fitting 機能を用いて指定した Twiss パラメータのエミッタンス形状となるような電磁石パラメータを算出する。

また、TRANSPORT の初期ビームパラメータは、逆方向輸送計算によって得られた粒子座標データ(x, x')から Twiss パラメータ($\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$)を次式で求めることにより決定した。

$$\begin{aligned} \alpha &= -R\sqrt{\beta\gamma} \\ \beta &= \frac{\sigma_x}{\sigma_{x'}\sqrt{1-R^2}} \\ \gamma &= \frac{\sigma_{x'}}{\sigma_x\sqrt{1-R^2}} \\ \varepsilon &= 4\sigma_x\sigma_{x'}\sqrt{1-R^2} \end{aligned}$$

ここに σ_x は x の分散、 $\sigma_{x'}$ は x' の分散、 R は相関係数である。

4. エミッタンス測定データを用いたビーム輸送試験

逆方向輸送と、その結果に基づいたパラメータ制御が有効であることを確かめるため、測定エミッタンスを逆方向輸送に基づいて求め、指定した Twiss パラメータとなるように電磁石パラメータを変更後のエミッタンスの測定結果の計算結果との比較を行なった。測定に用いたビームは 50.22 keV の O^{6+} (サイクロトロンで 160 MeV に加速するビーム入射エネルギー)である。

本試験は、測定したエミッタンスを Figure 1 の IIM 電磁石直後(IS1)まで逆方向輸送して行なった。IS1 からエミッタンス測定位置までのビームラインは 2 つのソレノイド電磁石で構成されている。今回は鉛直方向のエミッタンスデータのみを用いて試験を行った。

結果を Figure 2 に示す。パラメータ変更前の鉛直方向エミッタンス(a)の測定データを基に逆方向輸送により IS1 位置でのエミッタンス(b)を求めた。6種類の指定

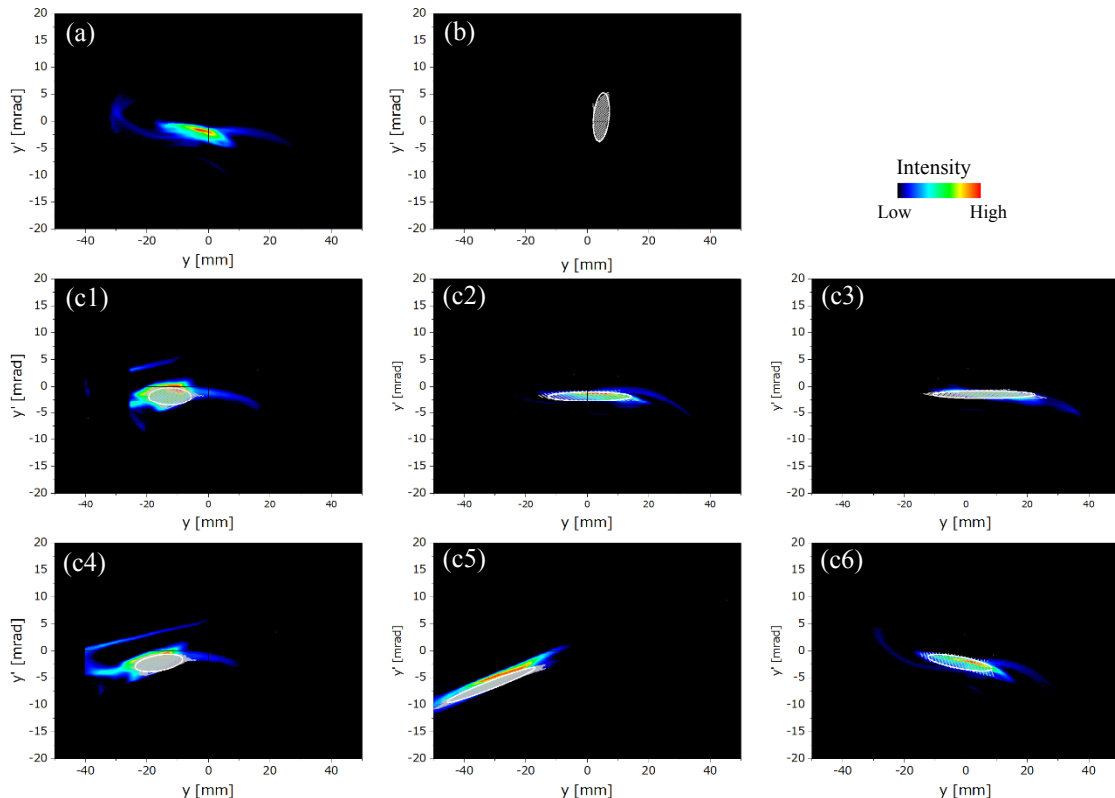


Figure 2: Measured and calculated results of the vertical emittance of 50.22 keV O^{6+} . (a) Initial Emittance at IS2 (b) Calculated emittance at IS1 (c) Measured and calculated emittance at IS2: c1) $\alpha=0, \beta=4.2$, c2) $\alpha=0, \beta=16$, c3) $\alpha=0, \beta=24$, c4) $\alpha=-0.46, \beta=5.2$, c5) $\alpha=-4, \beta=18.2$, c6) $\alpha=1, \beta=9.6$

Twiss パラメータについて TRANSPORT の計算結果(白線)と電磁石パラメータ変更後の測定結果(カラー)と TURTLE 計算結果(灰色)を(c1)-(c6)に示した。それぞれの場合においてエミッタンス測定結果と計算結果が良く一致しており、本方法によるエミッタンス形状制御が有効であることを確認した。

5. まとめと今後の予定

アクセプタンスとのマッチングのためのエミッタンス形状制御の試験を行った。測定したエミッタンスデータを逆方向に輸送して上流のエミッタンスを算出し、これを用いて指定した Twiss パラメータのエミッタンス形状となるよう、ビームラインの 2 つのソレノイド電磁石の励磁電流をフィッティング計算により求めた。この励磁電流に変更後の測定エミッタンスと計算結果が良く一致しており、本方法によるエミッタンス形状制御の有効性を確認した。

今回は測定位置から上流の 2 つのソレノイド電磁石で構成されるビームラインでの試験を行ったが、今後は自由度を高めるため、さらに上流の分析電磁石(HAM)直後までのビームラインを用いたエミッタンス形状制御を行なう。また、より正確なビーム輸送計算のため、エミッタ

ンスの 4 次元測定を行い、このデータに基づいた試験を行なう。

参考文献

- [1] K. Arakawa *et al.*, “Construction and first year’s operation of the JAERI AVF Cyclotron”, Proc. 13th. Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, 1992, pp. 119-122.
- [2] Kashiwagi *et al.*, “A transverse emittance and acceptance measurement system in a low-energy beam transport line.” Rev Sci Instrum., 2014, pp. 02A735-1-02A735-5.
- [3] Kashiwagi *et al.*, “Effective emittance expansion for transverse acceptance measurement of an AVF cyclotron.” Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2014, pp. 1181-1183.
- [4] Kashiwagi *et al.*, “Development of a fast emittance measurement system with the slit-harp method.” Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 619-621.
- [5] George. H. Gillespie and Barrey W. Hill, “Particle and accelerator modelling software for industrial and laboratory beamline design”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 139 , 1998, pp 476-480.