

JAEA AVFサイクロトロンにおけるエミッタンス・アクセプタンス測定装置を用いた入射調整の予備試験

PRELIMINARY TEST OF INJECTION TUNING USING AN EMITTANCE AND ACCEPTANCE MEASUREMENT SYSTEM AT THE JAEA AVF CYCLOTRON

柏木啓次^{#,A)}, 宮脇信正^{A)}, 倉島俊^{B)}, 奥村進^{B)}

Hirotsugu Kashiwagi[#], Nobumasa Miyawaki, Satoshi Kurashima, Susumu Okumura

Department of Advanced Radiation Technology, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

We are developing technique for injection tuning to the JAEA AVF cyclotron by utilizing our emittance and acceptance measurement system. A preliminary experiment of overlapping the measured horizontal emittance and acceptance was conducted using two steering magnets. The steering magnets placed just before and after the system shift the emittance and acceptance in the transverse phase-plane respectively. The relationship between the barycentric coordinates of the emittance and the acceptance and the current of the steering magnet were measured, and each orbit in the horizontal phase-plane was clarified. The accelerated beam current was increased as a result of the fine-tuning after setting the current of the magnets to overlap the high-brightness region in emittance and the high-transmission region in acceptance.

1. はじめに

原子力機構高崎量子応用研究所の AVF サイクロトロン(K=110)施設では、半導体照射・材料開発・RI 製造・バイオ研究等の様々な分野の研究開発のため、4台の重イオン用・軽イオン用イオン源を用いて10MeV H⁺から490MeV Os³⁰⁺までの多様なビームを提供している^[1]。1つの実験に割り当てられているマシンタイムは比較的短い(短いもので0.5h)ため、イオン種・ビームエネルギーの変更を頻繁に行っている(251回/2013年度)^[2]。これらの変更において、サイクロトロンへの入射に関してはサイクロトロンでビームが最も損失が少ない条件で加速できるように、つまり、加速されたビーム電流が最大となるように低エネルギービーム輸送ラインの多数の電磁石を調整する。しかし、この調整には非常に多くのパラメータがあり、最適な条件を探し出すのは容易ではないため、効率的な入射調整方法が必要とされている。

我々はこの入射調整のためのツールとして、横方向エミッタンスとアクセプタンスの測定装置(Figure 1)を開発した^[3]。本装置はステアリングマ

グネット、水平・鉛直の位相平面の領域を制限する2組のスリットで構成される位相空間コリメータ、その直後のエミッタンス測定用ビーム強度モニター1およびアクセプタンス測定用のビーム強度モニター2で構成される。

エミッタンスは、位相空間コリメータのスリットを走査してビーム強度モニター1でビーム強度分布を測定すること(ダブルスリット法)で得られる。アクセプタンス測定では、位相空間コリメータのスリットを走査するとともに、ソレノイド電磁石で位置方向に拡げたビームをステアリング電磁石によってスリット位置にビームが存在するように偏向することで、位相平面上の様々な位置の微小領域を持つビームをサイクロトロンに入射し、ビーム強度モニター2まで到達したビーム強度を測定する。本装置によりエミッタンス・アクセプタンスを計測し、それら相互の位相平面分布を可視化することができるようになった。

本装置を用いた入射調整が有効であることを確かめるため、エミッタンスとアクセプタンスをステアリング電磁石によって位相平面上で平行移動してエミッタンスの高輝度領域にアクセプタンスの高透過

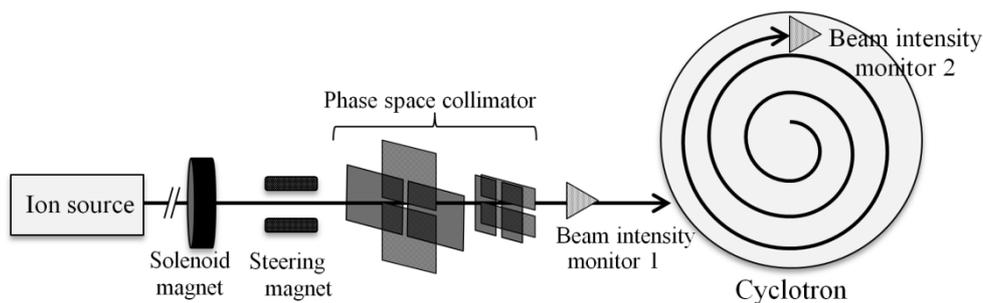


Figure 1: Transverse emittance and acceptance measurement system.

率領域を整合させるためのパラメータの測定および水平方向の整合試験を行った。

2. ステアリング電磁石によるエミッタンス・アクセプタンスの移動

2.1 平行移動の位相平面上の軌道

エミッタンスとアクセプタンスの位相平面上の移動には、それぞれ位相空間コリメータ直前・直後の2つのステアリング電磁石を用いる (Figure 2)。

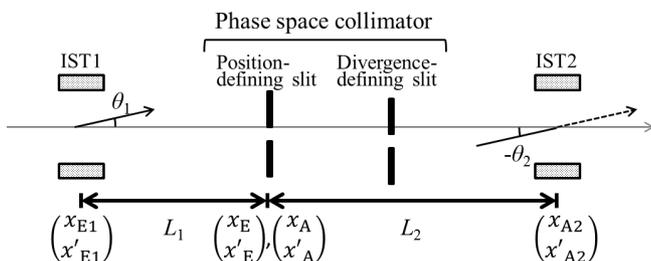


Figure 2: Arrangement of the phase space collimator and two steering magnets.

エミッタンスについては、位相空間コリメータ直前のステアリング電磁石 (IST1) によって角度キック (θ_1) を与えられ、エミッタンス測定位置である位相空間コリメータまで距離 L_1 だけドリフトする。また、アクセプタンスについては、位相空間コリメータ直後のステアリング電磁石 (IST2) によって進行するビームとは逆方向の角度キック ($-\theta_2$) を与えられ、位相空間コリメータまでの距離 L_2 のドリフト領域を上流に戻る。

以上について転送行列を用いて表すと、

$$\begin{pmatrix} x_E \\ x'_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{E1} \\ x'_{E1} + \theta_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x_A \\ x'_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{A2} \\ x'_{A2} - \theta_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる。ここで、 (x_E, x'_E) 、 (x_A, x'_A) はそれぞれ、エミッタンス及びアクセプタンス内の位置・発散角を表す。また、ステアリング電磁石は距離ゼロで角度キックを与えるとした (薄肉近似)。上式より測定位置つまり位置制限スリットにおける位置 x_E, x_A と発散角 x'_E, x'_A の関係は、

$$x'_E = \frac{1}{L_1} x_E - \frac{1}{L_1} x_{E1}$$

$$x'_A = -\frac{1}{L_2} x_A - \frac{1}{L_2} x_{A2}$$

となる。 $L_1, L_2 > 0$ であるので、ステアリング電磁石により θ_1, θ_2 を変化させると、エミッタンスについては傾きが正の直線、アクセプタンスについては傾きが負の直線の軌跡を描いて移動することがわかる。従って、エミッタンス領域中の高輝度部とアクセプタンス領域中の高透過率部を整合する場合、それぞれの移動中心座標を決定することで軌道直線の式がそれぞれ求まり、それらの交点が両者を整合させる

座標となる。

2.2 平行移動の軌道の測定

前節ではステアリング電磁石について薄肉近似を用いたが、実際は磁場分布に基づき有限距離でキックされるため、式(1)、(2)とは差異が生じる。そこで、ステアリング電磁石の励磁電流を変化させた時のエミッタンス・アクセプタンスの位相平面上における座標変化を測定して軌跡を求めた。

測定は $^{16}\text{O}^{6+}$ 160MeV 加速条件で行った。入射ラインでのビームエネルギーは 50.2keV である。IST1 の電流を変化させたときの水平方向エミッタンス重心座標の変化を Figure 3 (a) に、IST2 電流を変化させたときの水平方向アクセプタンス重心座標の変化を Figure 3 (b) に示す。

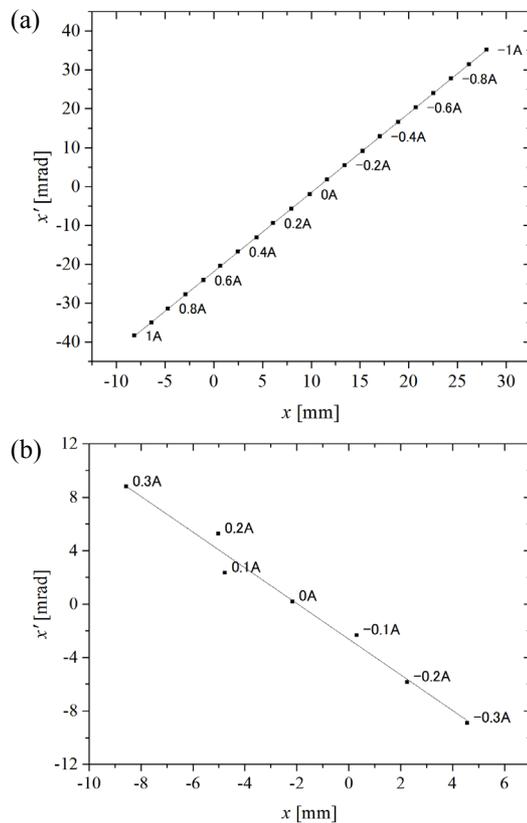


Figure 3: (a) Relationship between the barycentric coordinate of emittance and IST1 current, (b) Relationship between barycentric coordinate of acceptance and IST2 current.

各プロットの数値は IST1 及び IST2 の励磁電流を示している。この結果より、軌跡は直線となり、その傾きはエミッタンス、アクセプタンスそれぞれにおいて 2.0mrad/mm、-1.3mrad/mm と求めた。

また、整合目標座標への平行移動操作においては、指定したキック角を与える電流をステアリング電磁石に与える必要があるため、励磁電流と重心 x' 座標の関係より単位キック角あたりの励磁電流を求めた。その結果、50.2keV の $^{16}\text{O}^{6+}$ に対して IST1 は -27mA/mrad、IST2 は 35mA/mrad であった。

3. 平行移動による水平方向エミッタンス・アクセプタンスの整合試験

測定したパラメータを用いて、平行移動による水平方向エミッタンス・アクセプタンスの整合試験を行った。本試験についても前節と同様 50.2keV の入射エネルギーの $^{16}\text{O}^{6+}$ をサイクロトロンで 160MeV まで加速する運転条件で行った。

Figure 4 に実験に用いたビームライン全体を示す。ECR イオン源から出射されて輸送されたビームについてエミッタンスを測定し、アクセプタンスについては、ビームライン末端のビーム電流検出感度が比較的高い非冷却タイプのアラデーカップを用いて、位相空間コリメータからこのアラデーカップまでのアクセプタンスを測定した。また、平行移動による整合の効果を確かめるため、位相空間コリメータ下流のスリットの水平方向ギャップを 1mm にしてアクセプタンスを小さく制限した。これは、今回は平行移動による位置整合、つまりエミッタンスの高輝度部とアクセプタンスの高透過率部を合わせる回転移動を伴わない重ね合わせ操作であるため、エミッタンスとアクセプタンスの分布の重なり的大小による加速ビーム電流の変化を小さくするためである。

計測結果を Figure 5 に示す。図の下側のエミッタンス・アクセプタンスは平行移動前、上側は平行移動後の測定結果を示している。エミッタンス・アクセプタンスともに、2.2 で測定された傾きの軌道直線

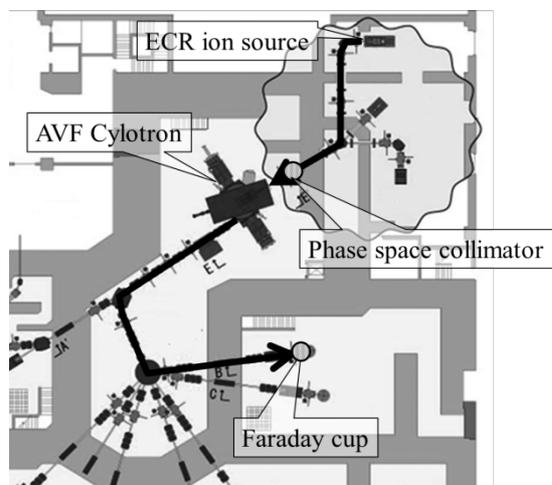


Figure 4: Layout of the beamline for the experiment.

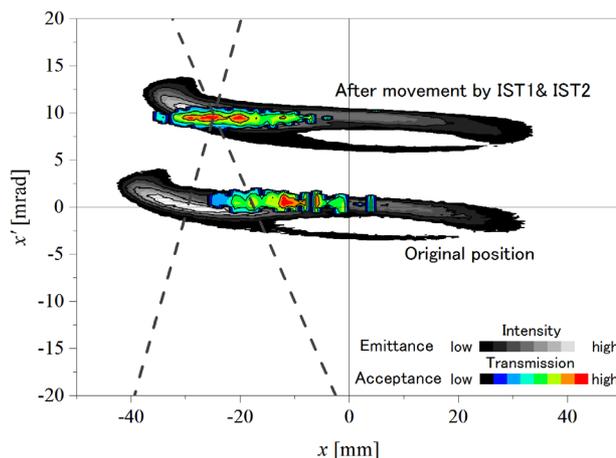


Figure 5: Horizontal emittance and acceptance before and after the movement by IST1 and IST2.

に沿って移動し、移動後はそれぞれの高輝度領域・高透過率領域が整合しているのがわかる。この時の加速ビーム電流は最大値となり、平行移動前の 212nA から 276nA に増加した。本結果によりステアリング電磁石を用いたエミッタンス・アクセプタンスの平行移動による整合が有効であり、その結果がエミッタンス・アクセプタンスの測定結果とも一致していることを確認した。

しかし、平行移動前のアクセプタンス測定はビーム電流が少なかったため精度が低く、この移動前のアクセプタンスから求めた整合目標座標に誤差が生じて平行移動後のアクセプタンスと透過率分布が異なっている。そのため、最適な整合座標への移動には、IST1、IST2 の微調整が必要であった。今後、アクセプタンスの測定感度を向上させ、励磁電流の計算値から直接平行移動整合を行えるようにする予定である。

参考文献

- [1] TIARA 施設利用の手引き.
<http://www.taka.jaea.go.jp/tiara/j661/riyoutebiki/index.html>
- [2] I. Ishibori et al., "Operation of the AVF Cyclotron", JAEA Takasaki Annual Report 2013 (2014), 170.
- [3] H. Kashiwagi et al., "A transverse emittance and acceptance measurement system in a low-energy beam transport line." Rev Sci Instrum. (2014) 02A735.