

# TIARA AVF サイクロトロンにおける 4 次元アクセプタンス測定方法の検討 STUDY OF FOUR-DIMENSIONAL ACCEPTANCE MEASUREMENT METHOD AT THE TIARA AVF CYCLOTRON

柏木啓次<sup>#</sup>, 宮脇信正, 倉島俊

Hirotsugu Kashiwagi, Nobumasa Miyawaki, Satoshi Kurashima

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

## Abstract

In the TIARA AVF cyclotron, a beam injection tuning technique is being developed based on the measurement of the four-dimensional transverse acceptance of the cyclotron to minimize beam loss during beam injection and acceleration. In this study, we proposed a method to measure the four-dimensional transverse acceptance by restricting the injection beam to a small area with two slits, scanning the beam angle with a steering magnet, and measuring the beam intensity after acceleration with a phase probe in the cyclotron. The experimental results showed that the beam transmission distribution corresponding to the acceptance can be obtained in a four-dimensional space with real space coordinates ( $x$ ,  $y$ ) and steering magnet currents ( $I_x$ ,  $I_y$ ). It was confirmed that the four-dimensional acceptance can be measured with the proposed method.

## 1. はじめに

QST 高崎 TIARA AVF[1]サイクロトロンでは 4 台の外周イオン源を用いて 10 MeV H<sup>+</sup>から 490 MeV Os<sup>30+</sup>までの多種のイオンのビームを材料・生物等の研究に提供している。イオン源で生成したビームを最小限のロスで加速ビームとして利用するため、入射ビームのエミッタンスとサイクロトロンの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。

入射調整は、イオン源からサイクロトロンまでの低エネルギービームライン (LEBT) の電磁石を用いて、ビームのエミッタンスとサイクロトロンのアクセプタンスを整合させることに相当する。LEBT に設置されたソレノイドレンズにおいてはビームの横方向の回転が生じ、ビームエミッタンスは水平・鉛直方向に独立に扱えない。そのため、整合のためには 4 次元空間でのビームの位相空間分布 (エミッタンス) と加速可能位相空間領域 (アクセプタンス) を明らかにする必要がある。

エミッタンス測定に関しては、4 台のイオン源からのビームが合流するビームライン上にスリット-グリッド法による 2 次元エミッタンス測定装置を開発し[2]、その装置で 3 次元エミッタンス測定 ( $xy-x'$ ,  $xy-y'$ ) に基づいた 4 次元エミッタンス測定法を開発した[3]。また、最も稼働率が高いイオン源 (HECR) の価数分析直後に、4 次元エミッタンス測定可能な Pepper-Pot 装置を開発した[4]。アクセプタンスについては、微小位相空間領域を持ったビームをサイクロトロンに入射して加速後のビーム強度計測による測定方法を提案し、上記のスリット-グリッドエミッタンス測定装置内の位置制限スリット及び角度制限用スリットを用いて 2 次元アクセプタンスを測定する技術を開発した[5]。本稿ではアクセプタンス測定範囲を 4 次元に拡張するための測定方法を検討し、その方法を用いた測定試験の結果を報告する。

## 2. 4 次元アクセプタンス測定方法

Figure 1 に TIARA AVF サイクロトロンの LEBT の簡略図を示す。4 台のイオン源から出射した全てのビームは偏向電磁石で合流してサイクロトロンの最終入射ラインに導かれる。この合流したビームライン上には 2 対の水平・鉛直スリット及びマルチワイヤー (Harp) を備えたビーム診断装置が設置されている。この装置を用いて 2 次元

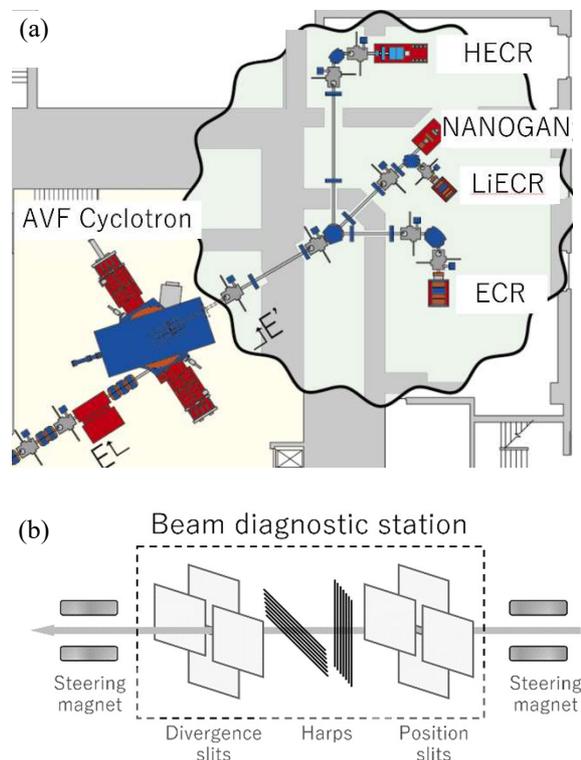


Figure 1: (a) Layout of low energy beam transport line, and (b) beam diagnostic station and steering magnets.

<sup>#</sup> kashiwagi.hirotsugu@qst.go.jp

及び 3 次元のエミッタンス測定が可能である。また、この診断装置前後には水平・鉛直方向にビームを偏向するステアリング電磁石が 1 台ずつ配置されている。

アクセプタンス測定は位相空間内でのビーム透過率分布を求めることに相当する。これを測定するためには任意の座標の微小位相空間領域を持つビームを用意してそのビーム強度と加速ビーム強度から透過率を求めればよい。これまでに開発した 2 次元のアクセプタンス測定では、入射ビームの位置範囲と角度範囲を一对の可動スリットで制限して、任意の座標の微小位相平面領域ビームを形成する。そして、この微小ビームをサイクロロンに入射し、サイクロロン引出直前の電流測定プローブで加速後のビーム電流を測定する。また、入射ビームの存在領域外の測定を可能にするため、診断装置上流のステアリング電磁石を用いてビームをスリット移動と同期して偏向することで、実効的に入射ビームのエミッタンスを拡大してアクセプタンス測定範囲を広げる。得られた加速ビーム強度分布とエミッタンス測定で得られた入射ビーム強度分布から位相平面上の透過率分布 (2 次元アクセプタンス) を求める。

4 次元アクセプタンス測定方法として 2 次元アクセプタンス測定と同様にスリット走査で行う場合、位置と角度座標を規定する 4 つのスリットを用いる必要がある。スリットは各座標の移動時間が秒のオーダーであるため、例えば座標間移動時間が 1 秒の場合各軸 10 点計測の場合  $10^4$  秒 (167 分)、20 点計測の場合  $1.6 \times 10^5$  秒 (2667 分) となり、4 つのスリット座標の組み合わせを網羅して測定するには長時間を要する。そのためより高速化が可能な方法が必要である。

高速測定方法として以下の 2 つが考えられる。方法 1: 微小位相空間ビームをスリットで形成し電場もしくは磁場でその位置と角度を走査。方法 2: 微小位相空間ビームをスリットで形成し、位置座標はスリット走査、角度座標は電場もしくは磁場で走査。方法 1 はスリットに比べ、高速走査が可能な電場・磁場のみを用いるため、最も高速な

測定が可能であるが、微小位相空間ビーム形成後に 2 つのビーム偏向装置が必要である。我々の使用可能な装置の制限から、ビーム診断装置のスリットと下流の 1 台のステアリング電磁石を用いる方法 2 を採用した。

微小 4 次元位相空間領域を持ったビームを形成するには通常水平・鉛直の位置・角度を規定する 4 つのスリットが必要であるが、これまで開発した 3 次元エミッタンス測定  $(x, y, x')$ ,  $(x, y, y')$  の結果により、実空間領域を 1mm 角程度に制限した入射ビームの角度分布は数 mm rad 以下であることから、2 つのスリットを用いた入射ビーム実空間制限のみで 4 次元微小位相空間ビームを形成する。そして、この 2 つのスリットを移動させて実空間座標を走査するとともに、スリット装置直後のステアリング電磁石を用いて実空間各座標でビーム角度を走査することで、4 次元位相空間内で測定を行う。

加速した微小位相空間ビーム強度測定には、サイクロロン内の位相プローブを用いた測定方法[6]を用いる。2 次元アクセプタンス測定で使用していた電流測定プローブは冷却水に起因するノイズ等により測定下限が数ナノアンペアに制限されており、微小電流の測定が必要な本測定では、数十ピコアンペアまで測定可能なこの位相プローブを用いた方法を採用した。位相プローブはサイクロロンの半径方向に並んだビーム位相を測定するための平行平板電極であり、通常、電極間にビームが通過した際に誘起される電圧信号から半径方向位置の rf 位相に対するビーム位相の変化を測定する装置である。アクセプタンス測定においては、ビーム取り出し直前の最も外側の位相プローブを用いて、誘起電圧信号の振幅をロックインアンプで測定することでビーム強度を測定する。

### 3. 4 次元アクセプタンス測定試験

4 次元アクセプタンスの測定試験を、入射エネルギー 50.22 keV の  $O^{6+}$  ビームをサイクロロンで 160 MeV に加加速する条件で行った。本試験は、スリット位置  $(x, y)$  とス

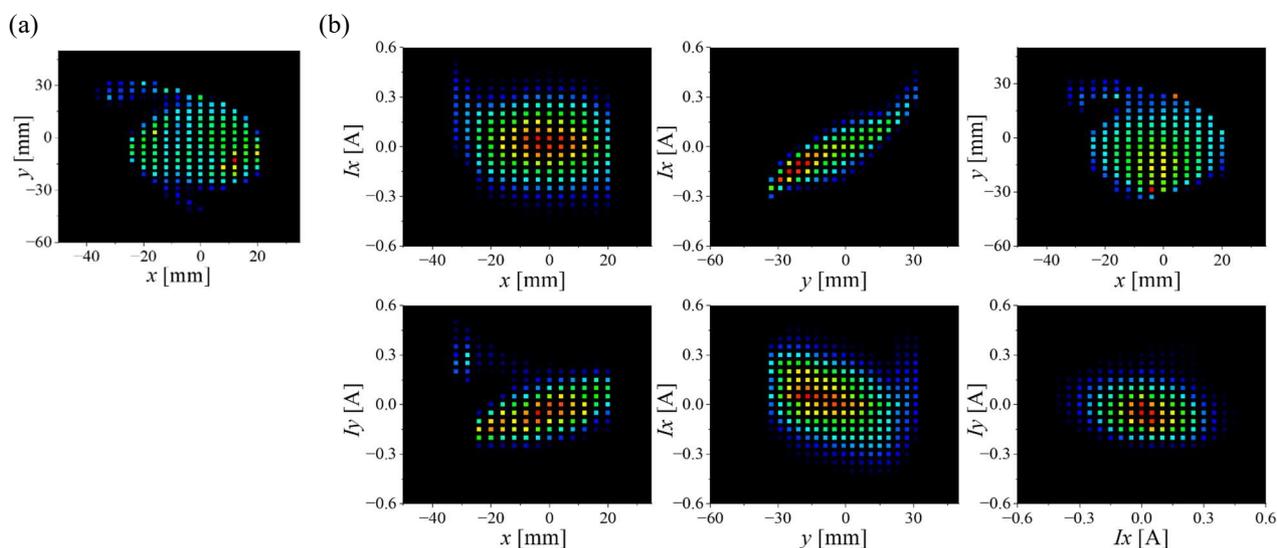


Figure 2: (a) Beam intensity distribution from an ion source in real-space, and (b) transmission distribution in four-dimensional phase space projected onto six two-dimensional planes.

ステアリング電磁石電流 ( $I_x, I_y$ ) の 4 次元空間について測定を行った。LabVIEW で作成した測定プログラムで、入射ビームの実空間領域を制限する水平・鉛直スリット座標を走査、下流のステアリング電磁石用高速電源の電流を走査し、そして加速ビーム強度であるロックインアンブ振幅出力の測定を同期して行った。入射ビーム強度分布及び、透過率分布の 4 次元データを 6 つの 2 次元平面へ投影した図を Fig. 2 に示す。各平面においてビームが加速可能な領域を測定できていることが分かる。本結果により、提案した方法で  $(x, y, I_x, I_y)$  の 4 次元空間でのアクセプタンス測定が可能であることを確認した。

#### 4. 今後の予定

4 次元位相空間  $(x, y, x', y')$  での測定を可能にするため、ステアリング電磁石のビーム偏向角とビーム偏向に伴う  $x, y$  測定位置の補正を行う。また、測定の励磁パターンや座標走査パターンを工夫して測定の高速化を行う。

#### 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] H. Kashiwagi *et al.*, “Development of a fast emittance measurement system with the slit-harp method.” Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 619-621.
- [3] H. Kashiwagi *et al.*, “Preliminary results of four-dimensional emittance estimation using slit-harp device” Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2018, pp. 566-568.
- [4] N. Miyawaki *et al.*, “Development of a pepper-pot emittance monitor for the TIARA AVF cyclotron” Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2019, pp. 810-813.
- [5] H. Kashiwagi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 8, 02A735 (2014).
- [6] H. Kashiwagi *et al.*, “Measurement of beam intensity using a phase probe in a cyclotron” Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2020, pp. 707-709.