

AVF サイクロトロン¹の横方向アクセプタンス計測のためのエミッタンスの実効拡大

EFFECTIVE EMITTANCE EXPANSION FOR TRANSVERSE ACCEPTANCE MEASUREMENT OF AN AVF CYCLOTRON

柏木啓次[#], 宮脇信正, 倉島俊, 奥村進

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

Department of Advanced Radiation Technology, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

A technique for effectively expanding the transverse beam emittance is developed to enlarge the region for transverse-acceptance measurement. The expansion is performed using solenoid magnets and a steering magnet. The beam from an ion source is enlarged in the position direction as necessary using solenoid magnets placed upstream of a phase space collimator. The enlarged beam is moved in the angular direction by a steering magnet in accordance with change in the region defined by the collimator during the measurement. Accordingly, the emittance is effectively expanded to a large parallelogram in a phase-plane. Measurement tests were carried out under the condition of accelerating a beam of $^{16}\text{O}^{6+}$ from 50.2 keV to 160 MeV. The emittance is effectively expanded about 12 times. We have confirmed that the technique is useful for enlarging the region for the acceptance measurement.

1. はじめに

TIARA AVF サイクロトロン施設(K 値 110)では、4 台の重イオン・軽イオン用の外部イオン源を用いて 10MeV $^1\text{H}^+$ から 490MeV $^{192}\text{Os}^{30+}$ までのイオンを主に材料・生物研究のために提供している^[1]。そのユーザーの研究の特性に起因して 1 つのビームの照射時間は比較的短く (短いもので 0.5h)、イオン種やエネルギーの変更を頻繁に行う。

イオン種及び加速エネルギーによってイオン源・サイクロトロン¹の運転条件及びビーム輸送の条件は異なるため、加速イオン種毎に、イオン源から引き出されたイオンビームを加速器でできるだけ損失なく加速し、ビーム照射ラインに供給するためのパラメータの最適化を行う必要がある。この最適化のうち、サイクロトロンへのビーム入射に関しては、計

算値を基準として加速後のビーム電流が最大となるよう入射ビームラインの偏向・集束マグネットを調整することで行われるが、これには多くのパラメータが関係しているため、真に最適な条件となっているかどうかを判断するのは容易ではない。

そこで、我々はこの最適化を行うためのツールとして、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を計測してそれらの相互の関係を可視化する装置の開発を行っている。

アクセプタンスの計測では、イオン源からのエミッタンスの一部をスリットで切り出してサイクロトロンで加速されるかをテストするため、エミッタンスの領域外については計測ができない。そこで、広いアクセプタンスの計測領域を確保するため、入射ビームのエミッタンスを実効的に拡大する技術の開発を行った。

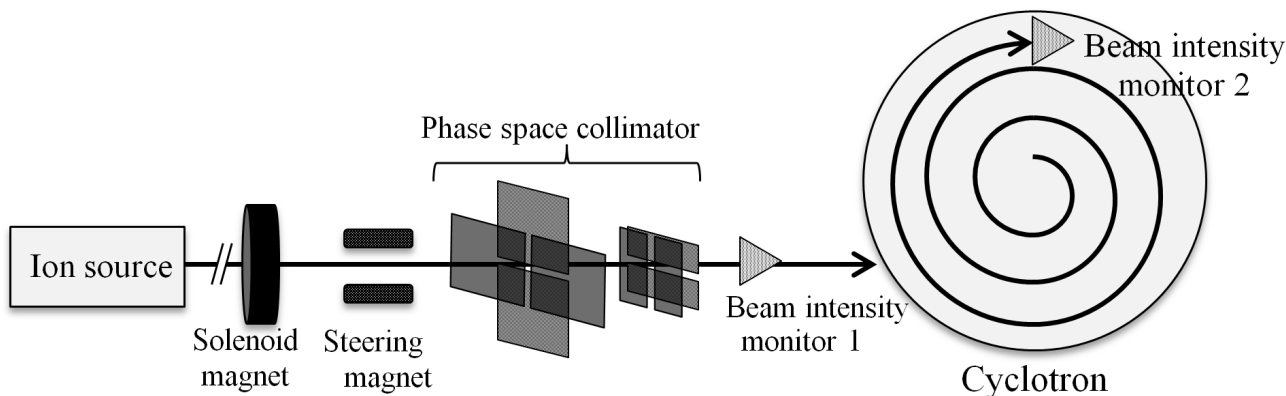


Figure 1: The system for transverse emittance and acceptance measurement.

[#] kashiwagi.hirotsugu@jaea.go.jp

2. アクセプタンス計測装置

Fig. 1 にエミッタンス・アクセプタンス計測装置の概念図を示す。本装置はイオン源とサイクロトロン間の低エネルギービーム輸送ライン上に設置された位相空間コリメータと、その直後のビーム強度モニター1及びサイクロトロン内部のビーム強度モニター2から成る。また、ソレノイド電磁石とステアリング電磁石は今回開発したエミッタンスの実効拡大に用いる機器である。位相空間コリメータは水平・鉛直方向の位置と角度の範囲を制限する二対のスリットから成り、イオン源で発生したビームから位相空間上の任意の位置の微小領域を切り出す。

アクセプタンス計測では、この位相空間コリメータによって位相空間上の様々な位置について微小なエミッタンスのビームをサイクロトロンに入射し、加速後の電流をサイクロトロンのビーム引出部直前のビーム強度モニター2で計測する。この加速されたビームの位相空間上の強度分布を位相空間コリメータ直後のビーム強度モニター1で計測した入射ビームの位相空間分布（エミッタンス）で規格化してビームの透過率分布を求める。

しかし、この計測は入射ビームのエミッタンスから微小領域を切り出して行うため、エミッタンスの領域外では計測ができず、これまで計測されたアクセプタンスは一部のみであった (Fig. 2) [2]。つまり、エミッタンスがアクセプタンス全体をカバーしていないため、計測可能なアクセプタンスはエミッタンスと重なりがある領域のみに制限されていた。

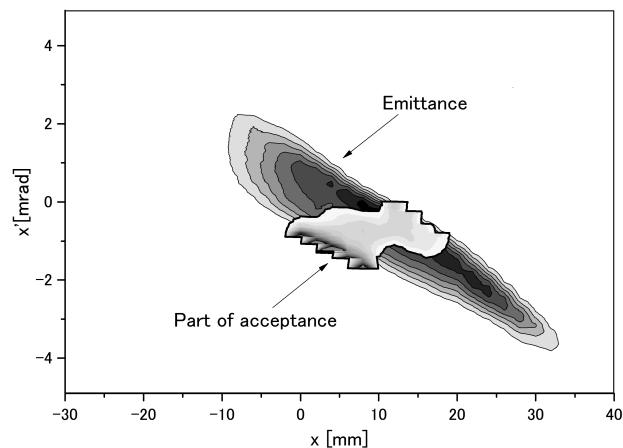


Figure 2: Measured part of acceptance and emittance.

3 エミッタンスの実効拡大

3.1 エミッタンスの実効拡大方法

アクセプタンス全体を計測するための広い計測範囲を確保するには、エミッタンスの大きいビームが必要となる。しかし、イオン源から出射するビームのエミッタンスを任意の大きさに制御する技術は確立されていないだけでなく、たとえ大きなエミッタンスを実現したとしてもそのビームをロスさせるこ

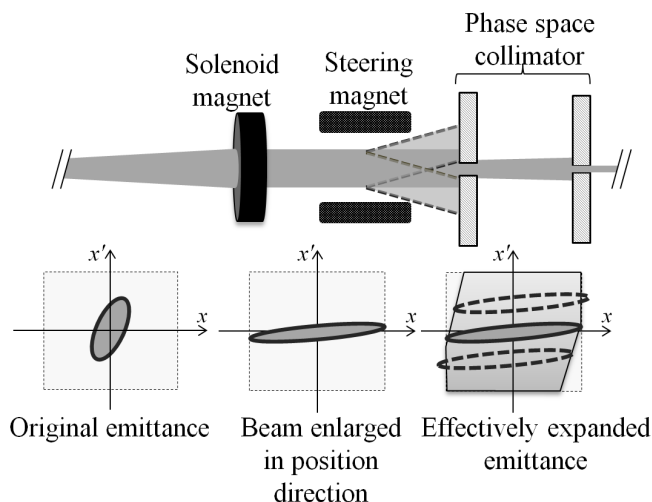


Figure 3: Method for effective emittance expansion.

となく輸送するのは困難であると考えられる。そこで我々はイオン源から出射するエミッタンスは変えずに、位相空間コリメータ上でエミッタンスを実効的に大きくして広い計測範囲を実現する方法の開発を行った。

アクセプタンス計測時には位相空間コリメータで制限された領域のみが下流に通るので、この領域の座標の変化にビームを追従させることで元のエミッタンスが存在しない領域についても計測を行うことが可能となる。つまり、位相空間コリメータから出射可能な実効的なエミッタンス領域を大きくすることが出来る。

この方法を既設の機器で実現するため、Fig. 3 のようなソレノイド電磁石とステアリング電磁石を用いる方法を採用した。まず、輸送ラインのソレノイド電磁石を用いて位相空間コリメータ上でエミッタンスを必要に応じて位置方向に拡げる。そして、位相空間コリメータ直前のステアリング電磁石を用いて位相空間コリメータで制限される領域の座標の変化に合わせてビームの偏向角を変化させる。つまり、ビームを位置の方向に拡げるとともに、角度方向に移動させることにより、位相平面上の二次元領域にエミッタンスを実効的に拡大することができる。ステアリング電磁石から位相空間コリメータまではビームがドリフトするため、偏向によりエミッタンスは位相平面上を斜めに移動する。そのため、拡大されたエミッタンスは Fig. 3 に示すような平行四辺形領域となる。

3.2 偏向角の算出方法

このエミッタンスの実効拡大を行うためには、位相空間コリメータで制限された移動する領域に正確にエミッタンスを移動させる必要がある。エミッタンスの形状はイオン源の運転条件に応じて変化するため、その実効拡大においては、まず、エミッタンスの計測を行い、その結果を用いてステアリング電磁石がビームに与えるのに必要な偏向角を算出する。

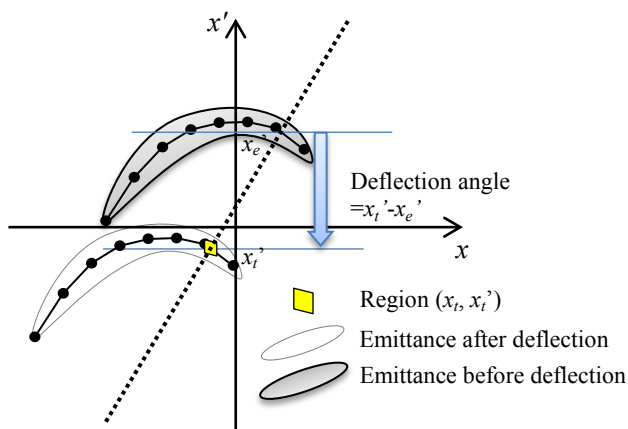


Figure 4: Method for calculating deflection angle.

Fig. 4 に偏向角の算出方法の概念図を示す。ここではビームのエミッタンスが単純な楕円でなく、湾曲した形状を例にした。エミッタンスの領域中の点は計測された位置ごとの最も強度が高い箇所を示している。これらの点を結んだ曲線は各位置における強度の最大値を表す曲線とみなせる。また、黄色で示した領域は位相空間コリメータで制限された領域を示している。ステアリング電磁石で偏向されたビームのエミッタンスはその偏向角に応じて図の点線で表されるような直線に平行に移動する。そのため、黄色領域を通った点線と前述の曲線との交点のみがこの黄色領域に移動可能となる。従って、偏向角は交点の x' 座標 x_e' と黄色領域の重心座標の x' 座標 x_i' の差 $x_i' - x_e'$ となる。アクセプタンス計測時にはこの黄色領域は位相平面内を走査するため、偏向角を算出と、その偏向角を与えるステアリング電磁石の励磁電流の変更は繰り返し行われる。

4. 実証試験

エミッタンスの実効拡大方法の実証及びこの拡大

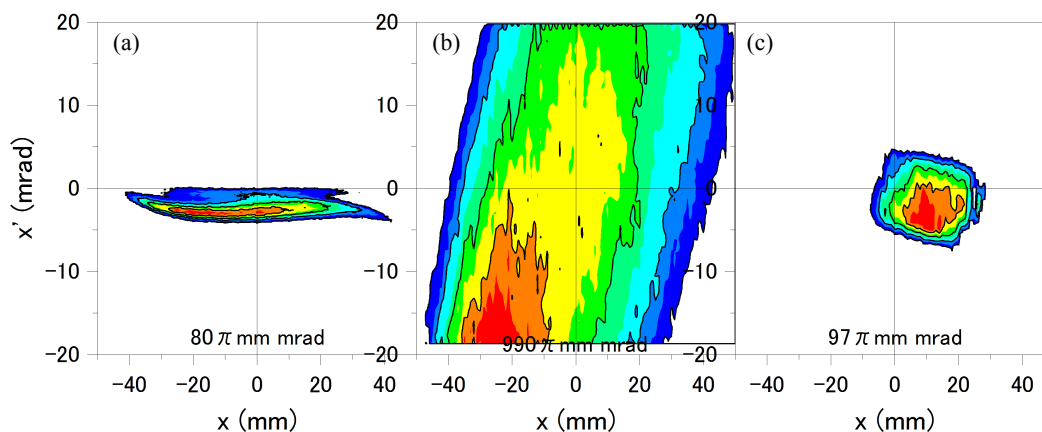


Figure 5: Measurement results of the $^{16}\text{O}^{6+}$ beam.

(a) Emittance, (b) Effectively expanded emittance, (c) Acceptance.

したエミッタンスを用いたアクセプタンスの計測試験を行った。本計測試験は ECR イオン源から 50.2keV のエネルギーで引き出された $^{16}\text{O}^{6+}$ をサイクロトロンで 160MeV まで加速する運転条件で行った。水平方向の計測結果を Fig. 5 に示す。(a)はエミッタンス、(b)は拡大されたエミッタンス、(c)はアクセプタンスの計測結果である。(a)、(b)より、元のエミッタンスを広い平行四辺形領域に実効的に拡大することに成功し、アクセプタンスの計測領域が 1.2 倍以上の面積に拡大されたことが確認された。また、(c)より、この拡大技術を用いて(a)の元のエミッタンス領域外のアクセプタンスについてアクセプタンスの計測が行えることについても確認された。以上により、開発したエミッタンスの実効拡大方法がアクセプタンスの計測範囲を拡大する方法として有効であることを実証した。

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] H. Kashiwagi, et. al, "Preliminary test of a transverse acceptance measurement system", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011) 504.