

TIARA AVF サイクロトロン の低エネルギービーム輸送系における ビーム輸送効率改善の検討

STUDY ON IMPROVEMENT OF BEAM TRANSPORT EFFICIENCY IN THE LOW ENERGY BEAM TRANSPORT SYSTEM OF THE TIARA AVF CYCLOTRON

宮脇信正^{#, A)}, 柏木啓次^{A)}, 石岡典子^{A)}, 倉島俊^{A)}, 福田光宏^{B)}

Nobumasa Miyawaki^{#, A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}, Noriko S Ishioka^{A)}, Satoshi Kurashima^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{B)}

^{A)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and
Technology

^{B)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

The transport efficiency of the low energy beam transport (LEBT) for the TIARA AVF cyclotron was investigated using the beam transport simulation based on the four-dimensional emittance data obtained by the pepper-pot type emittance monitor (PPEM) installed near the ion source. As a result, the measured beam emittance by PPEM was larger than the calculation result with the design parameter and the beam loss in LEBT also was located by the beam transport simulation. The beam emittance was reduced to near the calculation result for the design parameter by limiting the beam with the slits at the exit of the ion source and the improved transport efficiency was confirmed by measuring the beam current.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所(量研高崎)のイオン照射研究施設(TIARA)の AVF サイクロトロン(K= 110)[1]は、RI 製造や材料科学、バイオ研究等の様々な分野の研究開発に利用されており、H⁺から Os³⁰⁺までの多くのイオン種のビームを、重イオンで最大 27.5 MeV/n のエネルギーまで加速している。このような様々なイオン種とエネルギーへのビーム切替えには、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輸送系(LEBT)の集束要素もその都度調整を伴う。そこで我々は、サイクロトロンへの効率的なビーム入射調整のために、LEBT 中の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の開発[2]を行ってきた。併せて、RI 製造からのニーズに応えるために、ビーム強度の増強を検討しており、その一つとして LEBT の輸送効率の改善を進めている。前者の開発では、既存のエミッタンスモニター(EM)の位置でエミッタンスの形状を制御するために、イオン源近傍でのエミッタンス測定を可能にするペッパーポット型エミッタンスモニター(PPEM)[3]を開発し、4つのイオン源で最もビーム電流が得られる HECR イオン源のビームライン上に設置した。後者におけるこれまでの検討では、この2つのエミッタンスモニター間で、最大 50%程度のビーム損失があることを、ファラデーカップ(FC)によるビーム電流測定により、経験的に分かっていた。

本報告では、アルファ線核医学治療研究で使用されるアスタチン(²¹¹At)の製造において、ビームの大強度化が望まれる He ビームの輸送効率を改善するために、PPEM で測定した 4次元エミッタンスデータから、ビーム輸送計算コードとして TRACE-3-D [4]や PSI で開発され

た Object Oriented Parallel Accelerator Library (OPAL-T) [5]を用いて検討したビーム損失の原因とビーム輸送効率の改善方法について述べる。

2. TIARA AVF サイクロトロン の LEBT

TIARA AVF サイクロトロン の LEBT は、Fig. 1 に示すように、多様なイオン種を生成するための 4 つの ECR イオン源が設置され、それぞれのイオン源に接続するビームラインが偏向電磁石(IIM)で1つに集約され、その後サイクロトロンの下部に入射するために鉛直方向へ偏向する構成となっている。

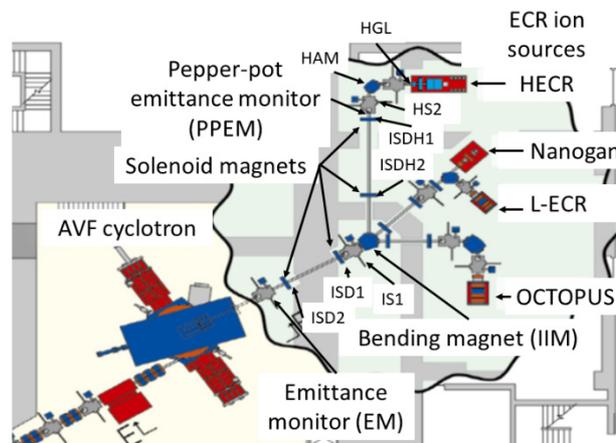


Figure 1: Schematic layout of ion sources and these low energy beam transport line.

4つのイオン源の中で最も高いビーム強度が得られる HECR は、サイクロトロンから最も遠い場所に設置されているため、他のイオン源に比べてビーム輸送距離が長い。しかし、他のイオン源のビームラインと比較しても集束要

[#] miyawaki.nobumasa@qst.go.jp

素は多くなく、ドリフト長が長い。HECR から引き出されたビームはグレーザーレンズ(HGL)で集束して精密分析電磁石(HAM)によって分析後、EM までの間はビームの集束及び偏向機器は、2つのソレノイドレンズ(ISH1, 2)と、IIM を挟んでさらに2つのソレノイドレンズ(ISD1, 2)で構成されている。この区間の HS2 と IS1 の2つのビーム診断ステーションには、FC とビームプロファイルモニター(BPM)が設置されている。PPEM は、イオン源から射出して分析後のビームのエミッタンスを測定するため、HS2 の直後に設置した。EM は ISD2 の下流の IS2 に設置され、上流と下流の2組のスリット、もしくは上流側のスリットとハープ状の検出器を用いてエミッタンス測定を行う。PPEM から EM の約 12.6 m の区間では複数の部屋の壁を貫通するため、集束機器の設置の自由度が制限されることや、IIM を除いてビームダクトは外径 152 mm φ 以上で口径が大きいと、集束機器の大型が避けられないことから、ビーム損失の改善の検討に当たっては、これらを考慮する必要がある。

3. ビーム輸送効率の改善の検討

3.1 4次元エミッタンスデータの取得

LEBT におけるビーム損失やその改善方法について検討するためのビーム輸送計算の実行に当たり、その初期値として4次元エミッタンスデータを PPEM によって取得した。TIARA AVF サイクロトロンでの PPEM は、厚さ 0.05 mm、開孔径 0.1 mmφ、ピッチ 2 mm のペッパーポットマスクとピエゾステージ上に設置したマルチチャンネルプレート(MCP)、MCP の蛍光を上部の大気窓へ反射するミラー、その窓の大気側には1軸ステージ上に設置した CMOS カメラで構成されている。本 PPEM で取得した画像から4次元エミッタンスデータを得るためには、マスクの各開孔位置とカメラ画像上のピクセル座標を求める必要がある。そこで、事前準備としてマスク全体に広がるようにビームを調整し、ピエゾステージで MCP の位置を変えて複数回の測定を行い、MCP の位置がマスクと一致する時の画像上の蛍光位置を外挿して、マスクの開孔のピクセル座標を求めた。この時、ピントを合わせるため

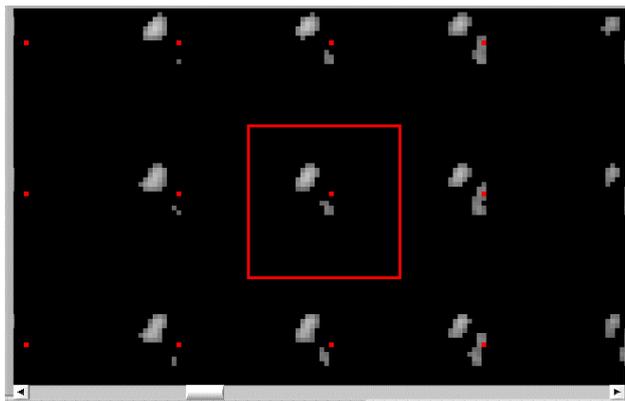


Figure 2: Measured image data with PPEM. The red points are pixels of hole pattern in the pepper-pot mask and the square of the red line is the boundary that can be measured from one hole.

MCP の移動と同様に1軸ステージ上のカメラも移動させ

る必要がある。

この結果、Fig.2 に示すように、中央の赤で示す点のマスクの開孔位置が求まる。一方、蛍光はこの点と位置が異なる。これは、開孔位置から蛍光のピクセル座標の差とマスクから MCP の距離の比がビームライン軸に対するビームの傾きであり、マスクでの水平及び垂直方向のビームの発散角が得られる。これにより、マスクの開孔位置毎のビームの傾きの4次元エミッタンスデータが得られ、ビーム輸送計算の初期値とした。

3.2 ビームエンベロープ計算

LEBT におけるビームの損失位置を調べるため、TRACE 3-D によるビームエンベロープの計算を行った。計算は、設計時のパラメーターである磁気剛性(Bp)が 0.033 Tm の H⁺ の計算条件(a)と RI 製造で使用されて現状でターゲットにおける最もビーム強度が高い 17.04 keV の ⁴He²⁺ の条件(b)で計算した結果を Fig. 3 に示す。

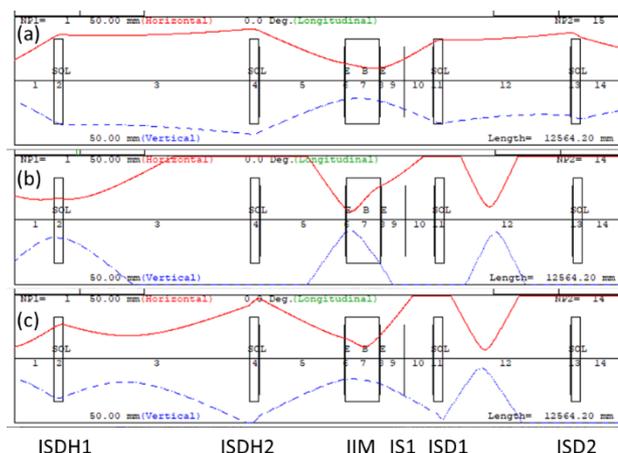


Figure 3: Beam envelopes calculated by TRACE 3-D code. The calculation condition are (a) the design parameter for H⁺ with Bp= 0.033 Tm, (b) ±10 mm and (c) ±2 mm of the slit width after HECR for 17.04 keV ⁴He²⁺.

TRACE 3-D では、PPEM で測定された4次元エミッタンスデータをビームの初期値として入力することができないため、その入力方法の一つである Twiss パラメーターを4次元エミッタンスデータから求めて入力し、計算を行った。その結果、PPEM の位置でのエミッタンスは設計時のエミッタンスと異なり、その後の輸送では ISDH1 から ISDH2 の間で内径 100 mmφ のビームダクトに当たることが分かった。そこで、イオン源出口の水平方向のスリットでビームを制限して PPEM でのエミッタンスを変えた。当初 ±10 mm のスリット幅から ±2 mm へ変更後、PPEM でエミッタンスを測定し、その結果を用いて計算した。その結果を Fig. 3 の(c)に示す。PPEM での(c)のエミッタンスは(b)の結果に近づき、ISDH1 から ISDH2 で発生していたビーム損失が小さくなることが分かった。

このスリットによるビーム損失の変化を調べるため、PPEM 直前の HS2 の FC とビームの損失位置の直後の IS1 の FC によってビーム電流測定を行い、輸送効率の変化を調べた。その結果、Table 1 に示すように、(c)は(b)に対して IS1 のビーム電流の絶対値は減少したが、輸送効率は 0.49 から 0.72 まで増加した。従って、ビーム強

度の絶対値を増加するためには、PPEM までの集束機器がグレーザーレンズしかないので、実際上はイオン源の引出し電極などで、ビーム強度を減少させることなく、(c)のようなエミッタンスを実現する必要がある。

Table 1: Measured Beam Current at HS2 and IS1 and its Ratio

Slit width (mm)	HS2 (μA)	IS1 (μA)	Ratio IS1/HS2
± 10 (b)	147.3	71.5	0.49
± 2 (c)	76.8	55.4	0.72

3.3 計算結果と測定によるエミッタンスの比較

PPEM で測定した 4 次元エミッタンスデータを基にしたビーム輸送計算を下流の EM まで行い、測定した 2 次元エミッタンスと比較した。前節で使用したエンベロープ計算コードである TRACE 3-D では、ビームラインの集束要素を容易に変更でき、全体を俯瞰することができるが、ビームダクトでの損失をその後の結果に反映できないことから、トラッキングシミュレーションコードである OPAL-T を用いて、ビームダクトによる損失を考慮し、前節のイオン源のスリット幅が ± 10 mm の PPEM の測定結果を基にした EM の位置での 2 次元エミッタンスを計算した。この結果と EM の測定結果を Fig. 4 に示す。

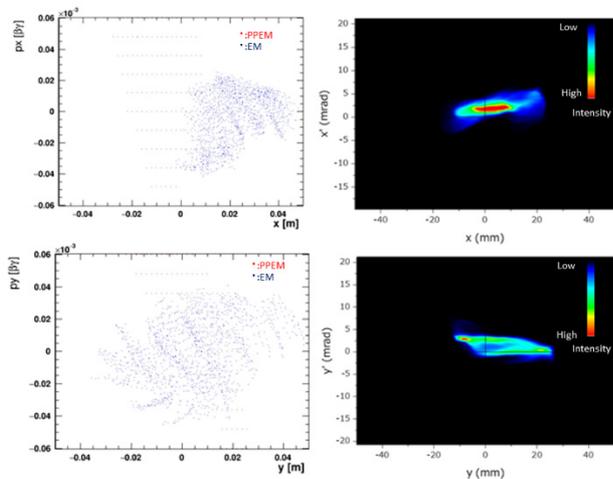


Figure 4: Calculated (left) and measured (right) beam phase space distribution at EM in the condition of ± 10 mm of the slit width after HECR for 17.04 keV $^4\text{He}^{2+}$. The calculated distributions for PPEM (red dot) and EM (blue dot) were obtained by OPAL-T code.

OPAL-T の計算結果では、初期分布の PPEM の測定結果 (赤) と EM まで輸送計算を行った結果 (青) を示した。縦軸の範囲は EM の測定結果の範囲と等しくなるように換算して表した。X と Y の両方向の位相空間の分布は、計算結果の方が角度方向に拡がり大きく、測定結果と一致しなかった。次に、イオン源のスリット幅を ± 2 mm にした場合の EM での計算結果と測定結果を Fig. 5

に示す。

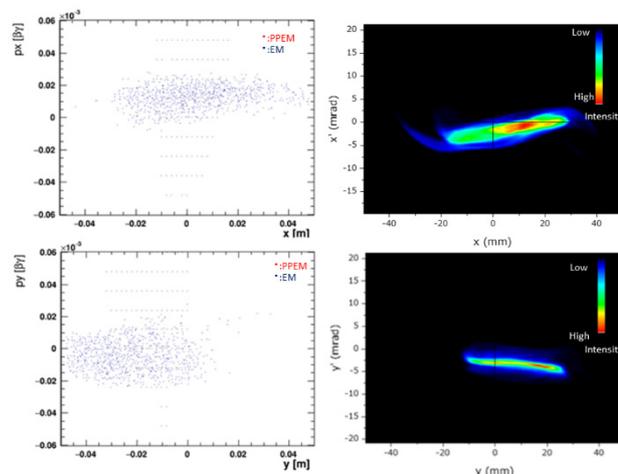


Figure 5: Calculated (left) and measured (right) beam phase space distribution at EM in the condition of ± 2 mm of the slit width after HECR for 17.04 keV $^4\text{He}^{2+}$. The calculated distributions for PPEM (red dot) and EM (blue dot) were obtained by OPAL-T code.

その結果、位置の拡がりだけでなく、角度方向の拡がりも小さくなり、形状も近づいた。Table 2 にこれらの結果についての規格化 RMS エミッタンスを示す。

Table 2: Normalized RMS Emittance

Slit width	X_EM	Y_EM	X_OPAL	Y_OPAL
± 10 mm	3.46E-2	3.77E-2	2.49E-1	2.31E-1
± 2 mm	5.81E-2	4.36E-2	1.53E-1	1.45E-1

OPAL-T の計算結果のエミッタンスの値は、スリット幅が ± 10 mm の場合に EM の測定結果より 6 倍以上大きい、スリット幅が ± 2 mm の場合では約 3 倍まで縮小した。

これらの結果から、計算したエミッタンスの形状は、スリット幅が ± 10 mm の場合、イオン源からのビームの強度分布が 1 つのピークではなく、複数のピークを有する構造を有すると考えられるが、PPEM の測定結果ではそのビーム強度分布を OPAL-T コードに反映できていないため、結果として、一様に広がったビームとして計算した可能性がある。一方、スリット幅を ± 2 mm にすることで、1 ピークのビーム強度分布に近づいたため、形状と値とも測定結果に近づいたと考えられる。PPEM のビーム強度分布が OPAL-T コードに反映できていない原因として、ビーム強度分布が開孔位置等で不連続になっていること、角度方向の測定分解能が低いこと、カメラ素子の信号または MCP の蛍光に線形性が損なわれていること等のいくつかの可能性が考えられる。位置についてはビームプロファイルモニターを用いたビーム強度分布の測定を行い、ペッパーポットマスク通過後の分布と比較することで原因究明ができる。また角度方向については、ペッパーポットマスクの開孔当たりのビームの測定可能な範

囲とその分解能はトレードオフの関係なので、測定範囲を可能な限り小さくして分解能を向上させた測定を実施することでこの原因への寄与について解明できると考えている。カメラ素子の信号または MCP の蛍光に線形性については、MCP の印過電圧を変えた測定により、ビーム強度分布への寄与を調べる予定である。

4. まとめ

TIARA AVF サイクロトロンで RI 製造等に今後必要とされるビーム電流の大強度化のための 1 つの方法として、LEBT のビーム輸送効率の改善について検討を行った。ビーム電流強度が最も高い HECR のビームラインにおいて、これまで測定ができなかったビームエミッタンスを PPEM の導入により可能となった。この PPEM の測定によって 4 次元エミッタンスデータが得られ、これを基にした Twiss パラメーターによる TRACE 3-D コードの計算により、 ^{211}At の製造に使用する $17.04\text{ keV }^4\text{He}^{2+}$ のビームの輸送における損失箇所がわかるとともに、イオン源直後のスリットでビームを制限することにより、ビームライン設計時のエミッタンスに近づけることで、ビームの輸送効率が改善した。OPAL-T コードによる輸送計算では、PPEM の測定における課題が判明し、今後対応するとともに、ビーム強度を低下させず輸送効率を増加させるためのイオン源の出射ビームの最適化や集束要素の増設など含めた検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JST、OPERA、JPMJOP1721) の支援を受けて実施しました。

参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, *Quantum Beam Sci.* 1, 2 (2017).
- [2] H. Kashiwagi *et al.*, “スリット-ハーブ装置による 4 次元エミッタンス評価の試験”, *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 566-568.
- [3] N. Miyawaki *et al.*, “TIARA AVF サイクロトロンのペーパーポット型エミッタンス測定装置の開発”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2019, pp. 810-813.
- [4] K. R. Crandall and D. P. Rusthoi, “TRACE 3-D Documentation”, LA-UR-97-886, Los Alamos National Laboratory.
- [5] A. Adelman *et al.*, “The OPAL (Object Oriented Parallel Accelerator Library) Framework”, Technical Report PSI-PR-08-02, Paul Scherrer Institut,