

理研超伝導線形加速器ビームラインのためのエミッタンス測定及び光学系調整 EMITTANCE MEASUREMENT AND ION OPTICS TUNING FOR SRILAC BEAMLINE

西隆博*, 内山暁仁、上垣外修一、坂本 成彦、長友傑、福西暢尚、藤巻正樹、渡邊環、渡邊裕
Takahiro Nishi*, Akito Uchiyama, Osamu Kamigaito, Naruhiko Sakamoto, Takashi Nagatomo,
Nobuhisa Fukunishi, Masaki Fujimaki, Tamaki Watanabe, Yutaka Watanabe
Nishina Center, RIKEN

Abstract

Superconducting booster linac SRILAC is constructed at RIKEN RI Beam Factory to investigate new super-heavy elements. To deliver highly intense ($\sim 10 \text{ p}\mu\text{A}$) and high-energy ($\sim 6 \text{ MeV/u}$) beams from SRILAC to experimental devices, we developed new optics tuning procedure. In this procedure we measure phase ellipse of the beam and perform online calculation to optimize optics based on the measured phase ellipse. This paper explain the detail of the procedure and result of optics tuning during the commissioning of SRILAC.

1. はじめに

理化学研究所仁科加速器科学研究センターの RI Beam Factory (RIBF) [1, 2] では気体充填型反跳核分離装置 GARIS-III [3] を用いた新超重元素探索実験が行われつつある。この実験の要求するおよそ 6 MeV/u のエネルギーを持つ $10 \text{ p}\mu\text{A}$ の V ビームを実現するのが 28 GHz イオン源 [4] 及び超伝導線形加速器 (SRILAC) [5, 6] である。SRILAC 及び GARIS-III のコミッショニングが今年の 1 月から 7 月にかけて行われ、Ar および V をおよそ 6 MeV/u まで加速することに成功し、Ar では最大 $2 \text{ p}\mu\text{A}$ までの強度のビームを GARIS-III まで供給した。

大強度の重イオンビームを GARIS-III 標的までロス無く輸送するため、我々は位相楕円の測定、及びそれに合わせた光学系の調整を短時間で行う手法を確立させた。これによりイオン源の状態やスリット条件などによってその都度異なるビームの状態、さらには実験の要求に合わせて柔軟に光学系を最適化することが可能となった。本論文では具体的なビーム位相楕円の測定手順、及び輸送光学系の調整手法などについて報告する。

2. HEBT ライン

SRILAC でおよそ 6 MeV/u まで加速された重イオンビームは差動排気システムを通過した後、High Energy Beam Transfer ライン (HEBT ライン) と呼ばれるビームトランスポートを通して GARIS-III まで運ばれる (Fig. 1 参照)。このビームトランスポートの内径は $\phi 62 \text{ mm}$ であり、構成は、TQ - TQ - D - SQ - SQ - DQ (TQ = Triplet Quadrupole, D = Dipole, SQ = Singlet Quadrupole, DQ = Doublet Quadrupole) となっている。D は両端を 25° ずつエッジを切った 90° 偏向磁石である。なお SQ と DQ の間にも 偏向磁石が 1 つあるが、こちらは GARIS-III へのビーム輸送の際には励磁されない。

さらに GARIS-III 標的の直前には差動排気システムが配置されている。GARIS-III は実験時には $\sim 70 \text{ Pa}$ の He ガスに満たされることになる一方で、HEBT ラインの真空度は $1.0\text{e}^{-5} \sim 1.0\text{e}^{-6} \text{ Pa}$ 程度に保つ必要がある。そこ

で標的直前のビームパイプの内径を $\phi 25 \sim 15 \text{ mm}$ まで狭め、真空ポンプでガスを排気し続けている。

HEBT ラインのビームトランスポートで特に重要なのは (1) ビームロスを少なく GARIS-III までビームを輸送すること (2) GARIS-III 標的上で、実験条件によって異なるスポットの形に調整可能であることの 2 点である。(1) は特に屋外の放射線量が適正な値以下に収まるようにするために重要である。GARIS-III が設置されている建物の壁が比較的薄いため、ビームトランスポートを最適化しつつ実際に線量を測り確認をしていく必要がある。また (2) については、例えば GARIS-III 実験で用いられる回転標的のためには水平方向に幅が広く垂直方向に幅が狭い楕円型が望まれる。(2) を満たしつつ (1) の条件、中でも標的直前にある内径の小さな差動排気システムにおけるビームロス許容範囲内に抑えるため、我々はビームの位相楕円を測定し、測定された位相楕円に合わせて計算コードを用いて光学系を最適化するという手法を用いた。

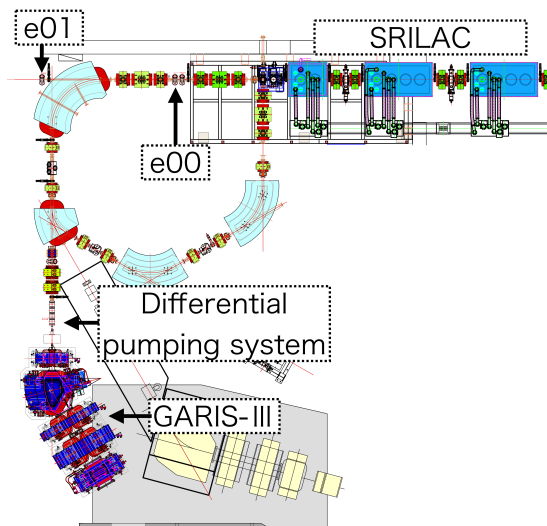


Figure 1: Top view of SRILAC, High Energy Beam Transfer line, and GARIS-III. A middle point denoted as e00 is treated as an object point for optical calculation.

* takahiro.nishi@riken.jp

3. 位相楕円の測定と光学系の調整

2020年にはこれまで SRILAC のコミッショニング及び GARIS-III のコミッショニングが行われている。1月から3月にかけては SRILAC のコミッショニングとして Ar^{13+} を最大 6 MeV/u まで加速し、2 pμA のビームを HEBT ラインを通して GARIS-III まで輸送した。また6月から7月に行われた GARIS-III のコミッショニングでは Ar^{11+} を 5 MeV/u まで加速し、0.5 pμA のビームを GARIS-III 標的に供給した。7月末には 6 MeV/u まで加速された V^{13+} が実験に用いられている。

これらのコミッショニングでは、光学系の調整は3つの段階に分けて行われた。ワイヤースキャナーを用いた物点での位相楕円の測定、物点上流の TQ による物点の位相楕円の調整、物点から GARIS-III までの光学系の調整である。HEBT ラインの光学系はまず e00 と呼ばれる地点を物点として設計されている。そのため、物点である e00 での位相楕円をまず測定し、e00 の上流の TQ を調整することで e00 の位相楕円を正立させる。これにより基本となる光学系を微調整するだけでビームロスを抑えつつ標的上のスポットの形状をコントロールすることが可能となった。以下に3つの段階についてそれぞれ詳しく説明する。

3.1 物点での位相楕円の測定

物点での位相楕円の測定は、偏向磁石の磁場を0とした上で e00、および偏向磁石を抜けた先にある e01 (Fig. 1 参照) にあるワイヤースキャナーを用いて行われた。間にある TQ 磁石によって e00 から e01 までの転送行列を 10 通りほどに変更し、それぞれの転送行列の要素と e01 の像の幅の変化を比べることで e00 における位相楕円を推定した。ここでこれら 10 種の光学系は事前にシミュレーションを行い、ほぼどのような位相楕円に対しても感度のある光学系のセットを選んでいる。

3.2 物点の位相楕円の正立調整

e00 における位相楕円を正立させるためには e00 上流にある TQ 磁石が用いられた。現在の TQ 磁石の磁場と測定された位相楕円から、e00 における位相楕円を正立させる TQ 磁石の電流値を計算し適応した。

Figure 2 に示されているのは、e00 の位相楕円を正立させる前後での推定された e00 の位相楕円の例である。この測定は 5 MeV/u まで加速された ~ 30 enA の Ar^{11+} に対して行われた。左側に示されているグラフは各光学系における e01 で測定されたビームの幅 (rms) であり、赤い点が測定値、黒い点がフィット結果を表す。右側に示されている等高線図はフィット結果から推定された e00 における位相楕円を視覚化したものである。ここでは位相楕円は2次元正規分布をしていることを仮定している。これらの図より、調整前 (a) には位相楕円が傾いている事がわかる。この時測定されたエミッタンスは、調整前は $\epsilon_h = 3.3$ 、 $\epsilon_v = 8.0$ 、調整後は $\epsilon_h = 3.1$ 、 $\epsilon_v = 6.5$ (いずれも 4 rms に相当しており、単位は [π mm mrad]) であった。測定時には Faraday Cup によりビームロスがないことを確認しているため、調整前後でエミッタ

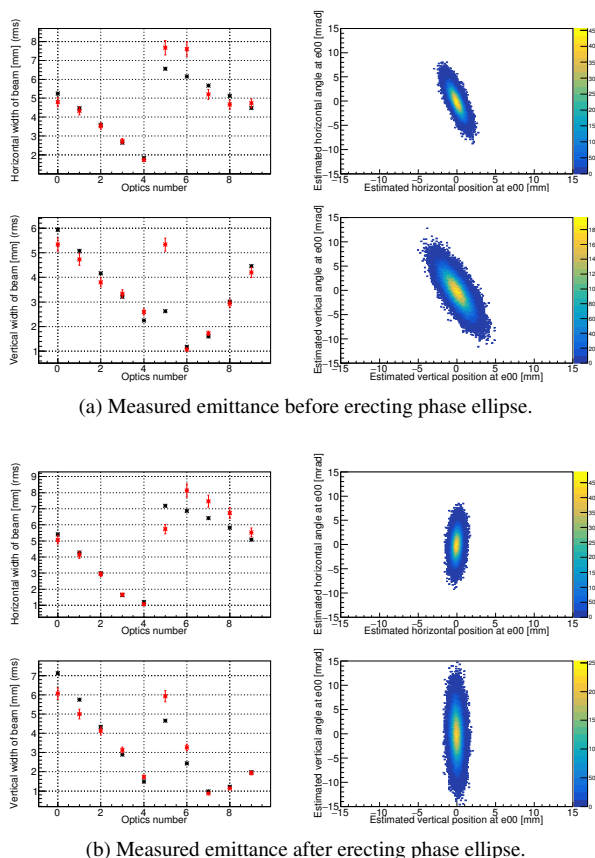


Figure 2: Data of emittance measurement before (a) / after (b) erecting phase ellipse at an object point e00. (Left) Measured values (red point) and fit results (black point) of beam widths at the point denoted as e01. (Right) Phase ellipse estimated by the fitting result. Top and bottom figures correspond to horizontal and vertical directions.

スは変化しないと考えられる。実際、両者はおおよそ 20% の精度で一致している。

Table 1 にはコミッショニング中に測定されたエミッタンスの値をまとめている。なお、値は全て 4 rms 相当の値となっている。e00 で測定されたエミッタンスは $\epsilon_{h,v}$ ともに 2 ~ 7 [π mm mrad] 程度であった。特に ϵ_v について、同じ核種でもイオン源の状態などによって値が大きく変わっていることが分かる。そのため、今回用いた手法のようにイオン源や加速器の調整毎に位相楕円を測定し、その時の位相楕円に最適な光学系を適応することが重要である。また表中 ϵ at upstream は RFQ 直前に配置されたペッパーポットで測定されたエミッタンスを表す。ここでの粒子のエネルギー (~ 3 keV/u) を考慮すると、下流までに 1.5 ~ 6 倍程度の emittance growth が見られる。この詳しい原因については現在さらなる解析中である。

なお位相楕円の測定、及び位相楕円の正立調整はワイヤースキャナーによるデータ取得を除いてほぼ自動化されており、1回の位相楕円の測定におよそ 30 分、位相楕円の正立調整と確認のための位相楕円の再測定を含めてもおよそ 1 時間程度で完了している。

Table 1: Measured Emittance in Commissioning of SRILAC and GARIS-III

Ion	Energy [MeV/u]	ϵ_h at e00 [π mm mrad]	ϵ_v at e00 [π mm mrad]	ϵ_h at upstream [π mm mrad]	ϵ_v at upstream [π mm mrad]
Ar ¹³⁺	4	3.6	2.7	–	–
Ar ¹³⁺	4	5.5	2.7	–	–
Ar ¹³⁺	6	3.9	2.3	–	–
Ar ¹³⁺	6	4.0	6.0	34.2	41.2
Ar ¹³⁺	4	4.7	6.8	92.9	83.2
Ar ¹³⁺	6	3.6	4.3	–	–
Ar ¹³⁺	6	3.2	3.2	99.3	63.5
Ar ¹¹⁺	5	3.1	6.5	–	–
Ar ¹¹⁺	5	2.2	1.6	–	–
V ¹³⁺	6	5.9	4.5	84.1	66.4

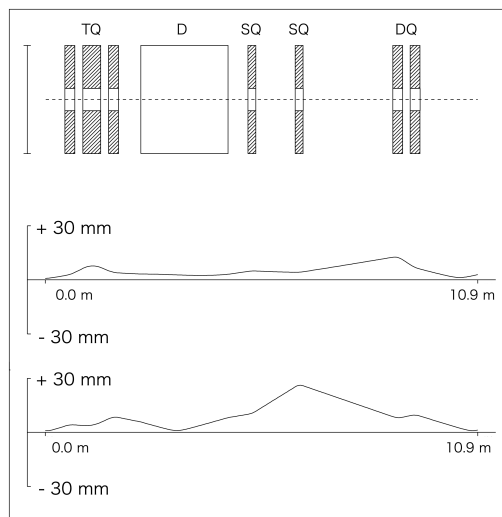
3.3 物点から標的までの光学系調整

e00 で位相楕円が正立していることを確認した後、その位相楕円のパラメータをもとに e00 から GARIS-III 標的までの光学系の最適化を行った。基本となる光学系では e00 から GARIS-III までの像倍率を水平方向、垂直方向どちらも 1.0 としており、測定された位相楕円の大きさに合わせて像倍率を変更することでスポットの形をコントロールする。その都度条件に合わせて光学系を計算し、HEBT ラインの磁石に適応する。最終的には差動排気システムに組み込まれたバップル、及び標的上でのビューワーの情報をもとにステアラーや各磁石の磁場の値の微調整を行い、光学系の最適化を行った。

Figure 3 (a) は Fig. 2 で正立したビームを GARIS-III まで輸送した際に用いられた光学系に対応している。図の最上段は HEBT ラインの e00 以降の光学要素を表し、2 段目、3 段目はそれぞれ水平方向、垂直方向のビームエンベロープが描かれている。なお、これらの絵は光学系の計算に用いられたイオン光学系計算プログラム GICOSY [7] によって描かれたものである。この際、標的では回転標的に横長の楕円型のスポットが求められていたため、像倍率は水平方向が 2.0、垂直方向が 1.0 とした。また、標的上流の差動排気システムにおいてビームパイプ径が ϕ 15 mm と小さくなっているため、この地点で焦点を結ぶように調整している。

Figure 3 (b) の写真はステアラーなどの調整後にビューワーで確認された標的上でのビームスポットを CCD カメラで撮影したものである。エミッタンスは垂直方向のほうが 2 倍以上大きい、光学系を調整することで要請通り水平方向に広いスポットを実現できていることが分かる。この時、Faraday Cup などの情報からビームロスも最大でも数 % 以下に抑えられており、屋外の放射線量も許容範囲内に収まっていたことも確認されている。

なお、これらの調整においても光学系の計算及び磁石への適応は自動化されており、ステアラーなどの微調整を含めて数時間で調整が完了している。



(a) Calculated beam envelope from e00 to GARIS-III target.



(b) Beam spot at the GARIS-III target.

Figure 3: (a) Calculated beam envelope by ion optics program GICOSY. Top figure represents optical elements. Middle and bottom figures shows beam envelope in horizontal and vertical direction. (b) Beam spot picture on viewer at GARIS-III target taken by CCD camera. The beam spot shape is horizontal ellipse as expected.

4. まとめと今後の展望

今回我々は SRILAC 及び GARIS-III のコミッションングにおいてビームロスを抑えつつ実験条件に合わせた光学系の調整を行った。調整では位相楕円を測定し、その結果をもとにその場で光学系を計算し、調整する手法を確立させた。特にこれらの手法の大部分を自動化することにより、位相楕円の測定と調整におよそ 1 時間、ステアラーを含む光学系の調整を含めても数時間でビームトランスポートの最適化を実現することに成功している。

今後はさらなるビームの大強度化とそれに伴うエミッタンスの増加に対してこの手法で対応できるのかを検証していく必要がある。また、SRILAC 及び HEBT ラインには合わせて 8 台の BPM [8] が設置されており、これらの情報から位相楕円を推定する手法も開発中である。

参考文献

- [1] Y. Yano *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 261, 1009 (2007).
- [2] H. Okuno *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 03C002 (2012).
- [3] H. Haba and for RIKEN SHE Collaboration, Proc. of the IX International Symposium on Exotic Nuclei EXON-2018, Petrozavodsk, Russia, 192-199 (2019).
- [4] T. Nagatomo *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 91, 023318 (2020).
- [5] N. Sakamoto *et al.*, Proc. of 29th Linear Accelerator Conference, Beijing, China, WE2A03 (2018).
- [6] K. Yamada *et al.*, Proc. of SRF2019, Dresden, Germany, TUP037, 504-509 (2019).
- [7] “GICOSY” on web page;
<https://web-docs.gsi.de/weick/gicosy/>
- [8] T. Watanabe *et al.*, Proc. of 2019 International Beam Instrumentation Conference, Malmo, WEPP007 (2019).