

# サイクロトロンで加速された 5 MeV 透過型ミュオン顕微鏡のビームライン設計 BEAM LINE DESIGN OF 5 MeV CYCLOTRON-ACCELERATED TRANSMISSION MUON MICROSCOPE

大西純一<sup>#A)</sup>, 永谷幸則<sup>B)</sup>, 新井善博<sup>C)</sup>, 足立泰平<sup>A)</sup>, 後藤彰<sup>B)</sup>, 山崎高幸<sup>B)</sup>, 三宅康博<sup>B)</sup>  
Jun-ichi Ohnishi<sup>#A)</sup>, Yukinori Nagatani<sup>B)</sup>, Yoshihiro Arai<sup>C)</sup>, Taihei Adachi<sup>A)</sup>, Akira Goto<sup>B)</sup>, Takayuki Yamazaki<sup>B)</sup>,  
Yasuhiro Miyake<sup>B)</sup>  
A) RIKEN Nishina Center  
B) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
C) Terabase Inc.

## Abstract

To construct a transmission muon microscope using a low-emittance 5 MeV  $\mu^+$  beams accelerated by a cyclotron, we investigated the beamline from the cyclotron exit and the microscope lens system. The calculated 4 rms emittance of the muon cyclotron extraction beam was  $(\epsilon_x, \epsilon_y) = (1.6, 0.6) \pi\text{mmrad}$  @ 5 MeV. The extraction beamline consisted of a  $135^\circ$  bending magnet and five quadrupole magnets, and the microscope lens system was investigated using two superconducting solenoid coils. Due to the limited number of muons, the upstream solenoid coil focuses the beam size on the sample surface to approximately  $\phi 100 \mu\text{m}$  and the incidence angle to approximately  $\pm 25 \text{ mrad}$ , and the downstream solenoid forms an image. With the investigation of superconducting solenoid shape and configuration, it was found that the spherical aberration decreased with increasing magnetic field and image magnification. For helium-free NbTi coils, a maximum coil magnetic field of 6.0–6.5 T is realistic, the image magnification is approximately 25, and the blurring due to aberration is 7–8  $\mu\text{m}$  when the momentum dispersion is  $1 \times 10^{-4}$  or less.

## 1. はじめに

J-PARC MLF の超低速 (30 keV) ミュオンビームライン U1B [1] に設置している小型サイクロトロンによりミュオン  $\mu^+$  を 5 MeV まで再加速し、得られた低エミッタンスビームを用いて透過型ミュオン顕微鏡を製作する。ミュオンサイクロトロンについてはこれまでの加速器学会で報告しているが[2, 3]、メディアアンブレインが鉛直面(縦置き)で取り出し半径が 260 mm、住友重機械工業の HM10 サイクロトロンをもとに新しく設計されたものである。サイクロトロンはビーム入射可能な状況であるが、諸般の事情によりコミショニングが 2 年近く遅れている。一方、昨年度から新規に科研費が得られたためサイクロトロンからの取り出しビームラインと顕微鏡レンズ系、超低速ミュオンの低エミッタンス化のための設計、製作を開始している。ミュオンサイクロトロンと本発表で述べる取出しビームライン、ミュオン顕微鏡は U1B ライン実験エリアに設置するためスペースが極めて狭く設計上の大きな制約となっている。また、現状の 4 rms エミッタンスは 5 MeV において約  $5 \pi\text{mmrad}$  (計算値) であるが、ビームエミッタンスはミュオン顕微鏡の性能に大きく影響するため超低速ミュオン生成部の改良による低エミッタンス化は必須となっている。本発表では取出しビームラインおよび顕微鏡レンズ系を設計するため、ビームライン電磁石の仕様やレンズ系の収差量について検討した結果を述べる。

## 2. ミュオン顕微鏡ビームライン

検討中であるが、Fig. 1 にミュオンサイクロトロンと取り

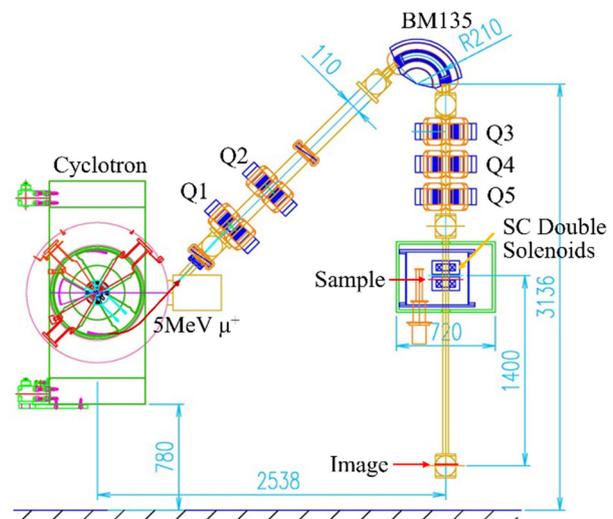


Figure 1: Arrangement plan of 5 MeV muon beamline, microscope lenses using superconducting solenoids, and image detector.

出し後の 5 MeV ミュオンビームライン、超伝導ソレノイドを用いた顕微鏡レンズおよび検出部の全体図案を示す。ビームラインは  $135$  度偏向電磁石 (BM) と 5 台の 4 極電磁石 (Q) によって構成される。レンズ系は NbTi または  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  線材の 2 個の超伝導ソレノイドからなり、4 K 小型ヘリウム冷凍機によるヘリウムフリー超伝導磁石とすることを考えている。Figure 2 にこのビームラインおよび顕微鏡部分のビームエンベロープ計算値を示す。計算に使用したサイクロトロン出口のビームパラメーターは 2024

<sup>#</sup> ohnishi@riken.jp

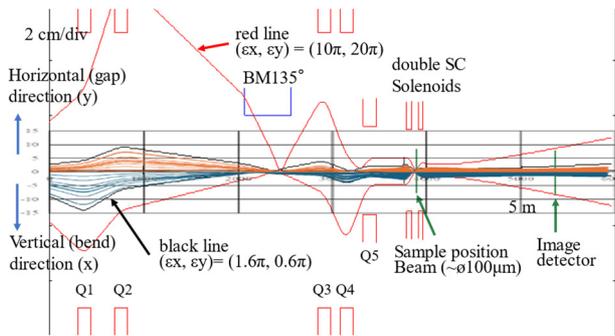


Figure 2: Beam envelopes of 5 MeV muon beamline and microscope.

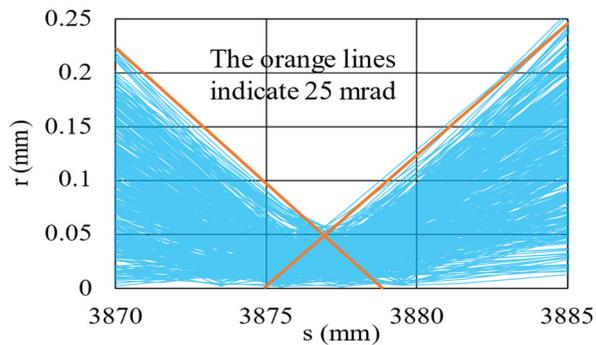


Figure 3: Enlarge view around sample (object) plane.

年の加速器学会プロシーディングス[3]に記述している。現状の取出しビームのエミッタンス計算値は 4 rms で  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  ともおよそ  $5 \pi \text{mmmrad}$  であるが、[3]で述べているようにサイクロトロンへ入射する 30 keV ビームのエミッタンスを約 1/10 に低減する超低速ミュオン生成部の改造を行う予定であるため、本発表では改良後のエミッタンス値 4 rms で  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  をそれぞれ 1.6, 0.6  $\pi \text{mmmrad}$  と仮定する。ここで x, y 方向はそれぞれサイクロトロンと 135 度 BM のメディアンプレーン方向と磁極ギャップ方向を示す。Figure 2 の赤線と黒線のビームエンベロープはそれぞれ現状と低エミッタンス化した場合のサイクロ出口のビームパラメータを用いて transport [4] で計算したもので、オレンジとブルーの複数の軌道は低エミッタンスの場合に 4 次元トラッキング計算によって得られたものである。現状のエミッタンス値を考慮して 135 度 BM は 0.5 T で磁極ギャップ 45 mm 程度のを新規製作するが、Q1-Q4 はボア径  $\phi 120 \text{ mm}$  程度、Q5 は  $\phi 55 \text{ mm}$  の既存品の流用を予定している。顕微鏡レンズ系は 2 つの超伝導ソレノイドを使用する。上流ソレノイドは測定試料を置く場所においてビームを収束させ、下流ソレノイドにより検出面に結像させる。U1 ビームラインの 1 秒当たりのミュオン数は現状では最大数 100 個程度であるため、ビームを試料面(物面)で絞る必要がある。しかし、後述するように球面収差のためビームの入射角は小さいほど良いため物面サイズはビームエミッタンスで決定される。Figure 3 に物面付近の軌道を示す。物面付近では 3 T 以上の磁場があるがトラッキング計算の結果では 4 rms エミッタンス値は 1.3  $\pi \text{mmmrad}$  程度、物面のビームサイズは  $2\sigma$  で  $\phi 100 \mu\text{m}$ 、角度広がり  $\pm 25 \text{ mrad}$  以下に収束できていることがわかる。

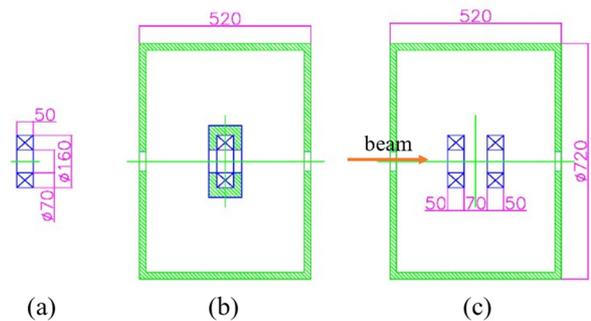


Figure 4: Three arrangements of the solenoid coils used for the evaluation of aberrations: (a) Air core single solenoid, (b) Single solenoid with yokes and shield, (c) Realistic double solenoids.

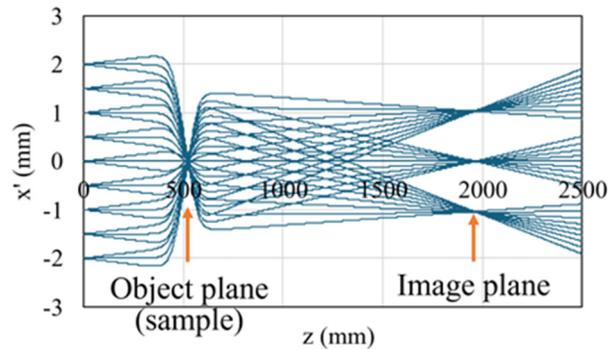


Figure 5: Beam orbit through the double solenoids (Fig. 4 (c)). The center of the two solenoids is set at  $z = 500 \text{ mm}$ .

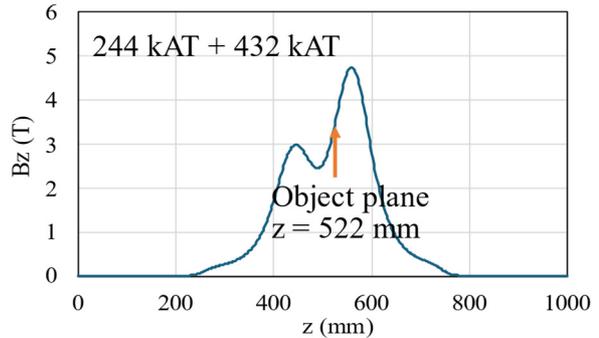


Figure 6: Magnetic field distribution on the solenoid axis when calculating Fig. 5.

### 3. 顕微鏡レンズ系

Figure 4 に顕微鏡レンズ系の収差量を比較するために使用した超伝導ソレノイドコイルの配置を示す。ソレノイドコイルのサイズは 3 つの配置とも同じで内径 70 mm、外径 160 mm、長さ 50 mm とした。これは最適化したものではなく内径 45 mm 以上の室温ボアが確保できることを念頭に仮に決めた寸法である。実際のレンズ系では Figure 4 (c)に示すように 2 個のソレノイドを並べた形状を使用する。Figure 5 に Figure 4 (c)を使用した場合の 2 個のソ

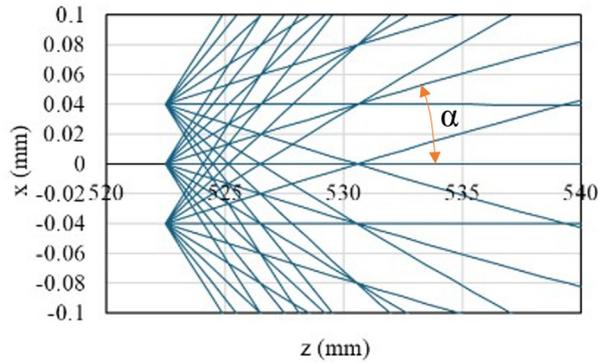


Figure 7: Beam trajectories starting from the object plane. The initial conditions for position and angle are set to within  $\pm 0.04$  mm and  $\pm 25$  mrad, respectively.

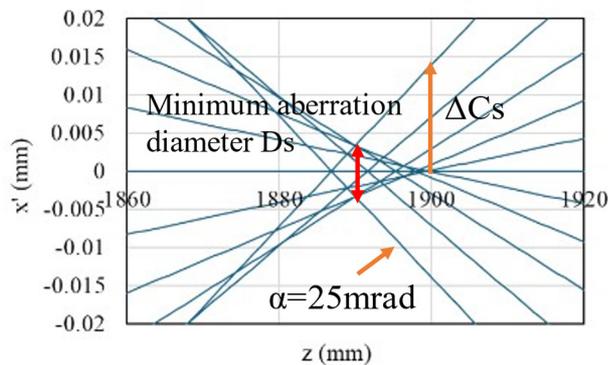


Figure 8: Enlarged view near the image point on the center axis.

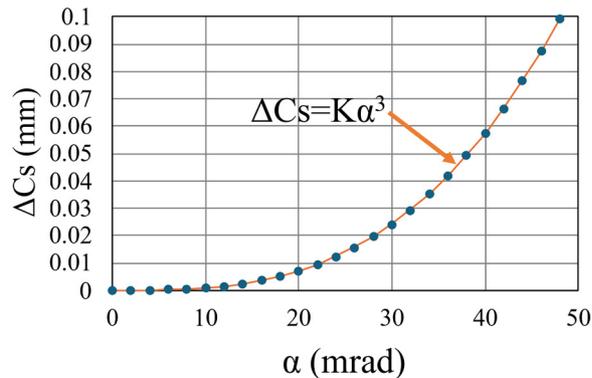


Figure 9: The aberration magnitude as the function of the injection angle  $\alpha$  shown in Fig. 7.  $K$  is a constant and it can be found that the magnitude of aberration is proportional to the cube of  $\alpha$ .

レノイドの上流からの軌道を示す。座標軸はソレノイドの中心軸のビーム方向を  $z$ 、直行する方向を  $x$  とする。2つのソレノイドの中心を  $z = 500$  mm として、各軌道は  $z = 0$  mm において  $x = \pm 2$  mm に 9 点、角度方向はそれぞれの点で  $0, \pm 0.5$  mrad の 3 方向を初期条件として計算した。縦軸の  $x'$  はソレノイドによって回転する軌道面上にとっている。この軌道計算に用いたソレノイド軸上の磁場分布を Fig. 6 に示す。ソレノイドの起磁力は上流側が

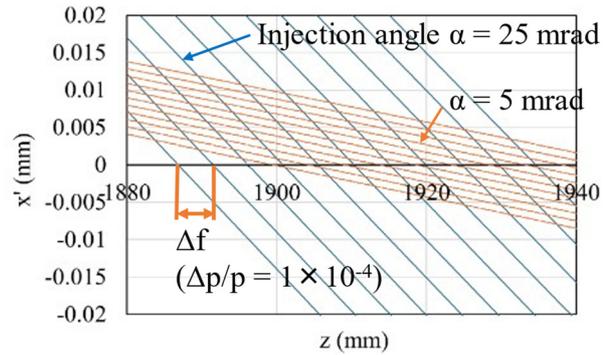


Figure 10: Orbital changes around the image point when the beam momentum is changed by  $1 \times 10^{-4}$ .

244 kAT、下流側が 432 kAT である。2次元磁場計算は poisson [5] を使用し、メッシュ間隔は 0.5 mm と 1 mm の計算結果で軌道差が小さいことを確認して 1 mm とした。出発点において 3 方向としているため上流ソレノイドの焦点付近では 3 点の像 ( $x' = 0, \pm 0.04$  mm) ができて入射角は  $\pm 25$  mrad 程度となり、下流ソレノイドで  $z = 1.9$  m 付近に拡大像が形成される。

次に像面の収差量を計算するため、上流ソレノイドの焦点付近におく試料面を出発点として軌道計算を行った。Figure 7 に試料面付近の拡大図を示す。2章において試料面では  $\phi 0.1$  mm 程度に収束できることを示したが、収差の計算では出発点を中心軸上と  $x = \pm 0.04$  mm、角度方向は  $\pm 25$  mrad 以内を 5 mrad 毎の 9 方向として軌道計算を行った。Figure 8 に像面におけるソレノイド軸付近の拡大図を示す。この図から試料面において入射角  $\alpha$  が大きい軌道は前方で収束していて球面収差を生じていることがわかる。Figure 9 に示すように Fig. 8 で定義する収差量  $\Delta Cs$  は入射角  $\alpha$  の 3 乗に比例し、 $\alpha = 25$  mrad では  $\Delta Cs = 14 \mu\text{m}$  となった。像のボケ量に相当する Fig. 8 に示す収差の最小直径  $Ds$  は  $\Delta Cs/2$  となるため  $7 \mu\text{m}$  程度となる。

Figure 10 に運動量偏差がある場合の収差(色収差)を示す。オレンジ線と青線はそれぞれ入射角  $\alpha$  が 5 mrad と 25 mrad の場合で、運動量偏差  $\Delta p/p$  を  $1 \times 10^{-4}$  ずつ増やしていくと収束位置が  $\Delta f$  ずつ後ろに移動していく。入射角  $\alpha = 25$  mrad の場合、 $\Delta p/p = 1 \times 10^{-4}$  で収差量は  $5 \mu\text{m}$  程度となっていることがわかる。

#### 4. ソレノイドコイル最大経験磁場と像倍率および収差量

超伝導ソレノイドは内径側の中央部で生じる最大経験磁場  $B_{\text{coil}}$  と超伝導材料固有の臨界電流密度によって励磁可能な起磁力に上限がある。Figure 11 (A), (B) に最大経験磁場  $B_{\text{coil}}$  に対する像面(検出面)での像倍率と球面収差量  $Ds$  を示す。この計算は 3 ケースについて行った。凡例(a), (b), (c) はそれぞれ Fig. 4 (a), (b), (c) のコイル配置に対応していて、それぞれ 1 個の空芯ソレノイドとヨーク付きソレノイド及び 2 個の空芯ソレノイドである。像面は(a), (b) についてはソレノイド中心から 1.4 m 下流、(c) については 2 個のソレノイドの中心から 1.4 m 下流とした。軌道計算で用いた磁場はヨークまたはシール

ドの鉄がある場合、poisson による 2 次元磁場計算の結果を使用した。poisson の磁場精度を確認するため、(a) の空芯ソレノイドでは、poisson による磁場を用いた場合と軌道計算のステップ (0.02 mm または 0.2 mm) 毎にコイル電流が作る磁場を数値積分して計算した結果の比較を行った。その結果では像面の位置は数 mm 程度ずれる場合があったが像面付近の軌道に違いは見られず、倍率、収差ともに変わらなかった。像倍率は磁場が高いほど焦点距離が短くなるため大きくなる。一方、収差量は磁場が高いほど小さくなっていることがわかる。この理由は磁場が高いほど軌道が中心軸寄りになり、入射角が小さくなることに等しい効果をもつためであると考えられる。

Figure 7, 8 の軌道では  $\alpha = 25$  mrad の場合、中心軸からの最大距離は 1.3 mm 程度であるが、起磁力が 2 倍の  $360 \text{ kAT} \times 2.4$  の場合、0.85 mm であった (Fig. 5 を参照)。ヨークがある場合同じ起磁力では磁場が増加するため収差量は減少するが同じ  $B_{\text{coil}}$  で比較すると空芯の場合より大きくなっている。Figure 11 の(c)以外は 1 つのソレノイドの計算結果であるが上流のソレノイドを入れたとしても結果はあまり変わらない。Figure 12 に超伝導線材 NbTi と Nb<sub>3</sub>Sn の磁場と臨界電流値の 4.2 K および 5 K における特性ラインと収差量を計算した空芯および

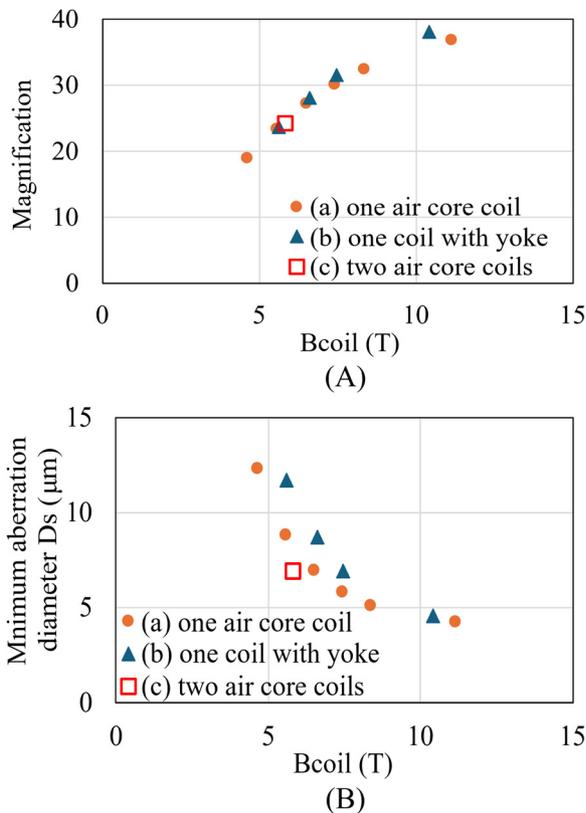


Figure 11: The magnifications (A) and aberrations (B) of the solenoid lens as the function of the maximum magnetic field on the solenoid coil indicated as “Bcoil”. The magnetomotive forces of the solenoid are  $360 \text{ kAT} \times 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.4$  for one air core coil case (a),  $360 \text{ kAT} \times 1.0, 1.2, 1.4, 2.0$  for one coil with yoke case (b) and  $360 \text{ kAT} \times 1.2$  for the downstream solenoid of case (c).

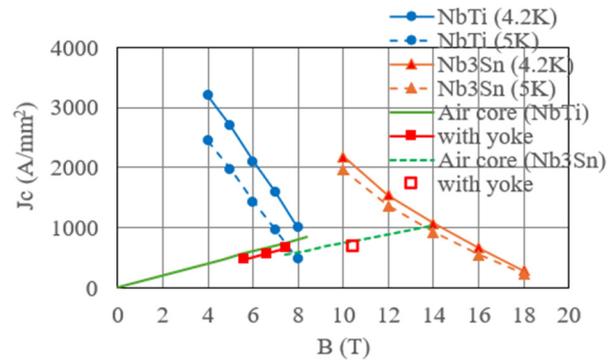


Figure 12: The relationship of the magnetic field and current density of the superconducting solenoids are shown with characteristic lines of NbTi and Nb<sub>3</sub>Sn conductors at 4.2K and 5.0K. The wire materials for the NbTi and Nb<sub>3</sub>Sn solenoids were assumed to be rectangular wire with a copper ratio of 1.2 and round wire with a copper ratio of 0.2, respectively.

ヨーク付きのソレノイドコイル (Fig. 4 (a), (b)) を NbTi と Nb<sub>3</sub>Sn で作った場合の動作ラインを示す。NbTi 線は銅比 1.2 で絶縁込みで  $1.28 \text{ mm} \times 0.98 \text{ mm}$  の平角線、Nb<sub>3</sub>Sn 線は銅比 0.2、 $\phi 0.9 \text{ mm}$  の丸線を仮定した。ヘリウムフリーの超伝導コイルの採用を考えているためコイル温度が 5K 程度になるとすると NbTi 線では最大磁場が 6.0–6.5 T、Nb<sub>3</sub>Sn 線では平均電流密度  $340 \text{ A/mm}^2$  程度となる 10 T と考えておく必要がある。最初に述べたように最適化されたコイル形状ではないが、像倍率、球面収差量のおよその値が推定できたと考えられる。

## 5. 結論

サイクロトロンで加速した低エミッタンスの  $5 \text{ MeV } \mu^+$  ビームを用いた透過型ミュオン顕微鏡を製作するため、サイクロトロン出口からのビームラインと顕微鏡レンズ系の検討を行った。ミュオンサイクロトロン取出しビームの 4 rms エミッタンスは現在開発が進められている超低速ミュオン生成部の改造後の計算値、 $(\epsilon_x, \epsilon_y) = (1.6, 0.6) \text{ } \pi\text{mmrad}$  @5 MeV を使用した。取出しビームラインは 135 度 BM と 5 台の Q から構成し、顕微鏡レンズ系には 2 個の超伝導ソレノイドコイルを使用する案について検討した。ミュオン数が限られているため上流のソレノイドコイルで試料面ビームサイズを  $\phi 100 \text{ } \mu\text{m}$  程度、入射角は  $\pm 25 \text{ mrad}$  程度に収束させ下流ソレノイドで結像させる。超伝導ソレノイドの形状と配置は 1 ケースしか検討できていないが、磁場が高く像倍率が高いほど逆に球面収差が減少する結果となった。検討したコイルサイズでヘリウムフリーの NbTi コイルの場合、コイル最大磁場は 6.0–6.5 T が現実的であり、像倍率は 25 程度、収差によるボケ量は運動量分散が  $1 \times 10^{-4}$  以下の場合 7–8  $\mu\text{m}$  程度となった。ソレノイド磁場が高いほど有利であるため、Nb<sub>3</sub>Sn コイルの採用も検討したいと考えている。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 17H06126、24H00028 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Miyake *et al.*, “Ultra Slow Muon Project at J-PARC MUSE”, JPS Conf. Proc. 2, 010101 (2014).
- [2] J. Ohnishi *et al.*, “Muon acceleration by cyclotron”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. Sep. 2023, pp. 877-880.
- [3] J. Ohnishi *et al.*, “Beam emittance calculations of cyclotron-accelerated 5 MeV muons for muon microscopy”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Aug. 2024, pp. 1094–1098.
- [4] [https://aea.web.psi.ch/Urs\\_Rohrer/MyWeb/trans.html](https://aea.web.psi.ch/Urs_Rohrer/MyWeb/trans.html)
- [5] Los Alamos Accelerator Code Group, "Computer Codes for Particle Accelerator Design and Analysis: A Compendium," LA-UR-9-1766, May 1990.