

ミュオン顕微鏡のためのサイクロトロンで加速された 5 MeV ミュオンビームのエミッタンス計算

BEAM EMITTANCE CALCULATIONS OF CYCLOTRON-ACCELERATED 5 MeV MUONS FOR MUON MICROSCOPY

大西純一^{#, A)}, 永谷幸則^{B)}, 中沢雄河^{A)}, 後藤彰^{B)}, 山崎高幸^{B)}, 三宅康博^{B)}
Jun-ichi Ohnishi^{#, A)}, Yukinori Nagatani^{B)}, Yuga Nakazawa^{A)}, Akira Goto^{B)},
Takayuki Yamazaki^{B)}, Yasuhiro Miyake^{B)}
^{A)} RIKEN Nishina Center
^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The transmission muon microscope project uses an accelerated beam by a cyclotron of J-PARC MLF ultra-slow muons (30 keV). Since it is extremely important to minimize the beam emittance to achieve good performance of this microscope, we tried to calculate the beam emittance during the production, transportation, and acceleration by the cyclotron of the ultra-slow muons. The production region of the ultra-slow muons by laser-ionization of muonium is as large as 70 mm in the laser direction, so the emittance gets about $100 \pi \text{mmrad}$ (2σ) by transverse momentum at the time of ionization. According to the orbit calculation of the 30 keV muon beamline, the emittance may increase at the 90-degree deflection electrode section. The normalized emittance in the radial direction increases by 2-4 times during acceleration by the cyclotron. Even if the 1 rms normalized emittance of the 30 keV muon beam is reduced to $0.024 \pi \text{mmrad}$ (2σ) in both the x and y directions by repeated ionization of muonium (two-stage cooling), the radial and vertical emittances at the cyclotron extraction port are 0.11 and $0.059 \pi \text{mmrad}$, respectively, when the phase width of the injection beam is 8 RF deg (0.2 ns).

1. はじめに

5 MeV 透過型ミュオン顕微鏡は J-PARC MLF の U-line [1]で得られている 30 keV の超低速ミュオンビームをミュオン加速のために設計製作したサイクロトロン[2]で再加速した μ^+ ビームを使用する。Figure 1 に 30 keV ミュオンビームの生成と輸送を行う超低速ミュオンビームライ

ン[3]とミュオンサイクロトロン、透過型顕微鏡システムの配置図を示す。JPARC RCS で加速された 3 GeV 陽子ビームから生成される表面ミュオンは Super-Omega [4] と呼ばれるビームラインによって輸送されるが、この μ^+ ビームは運動量分散 (20-30 MeV/c)、エミッタンス ($\sim 1000 \pi \text{mmrad}$) がともに大きい。このため、U-line ではこの μ^+ ビームを約 2000 K のタングステンターゲット上

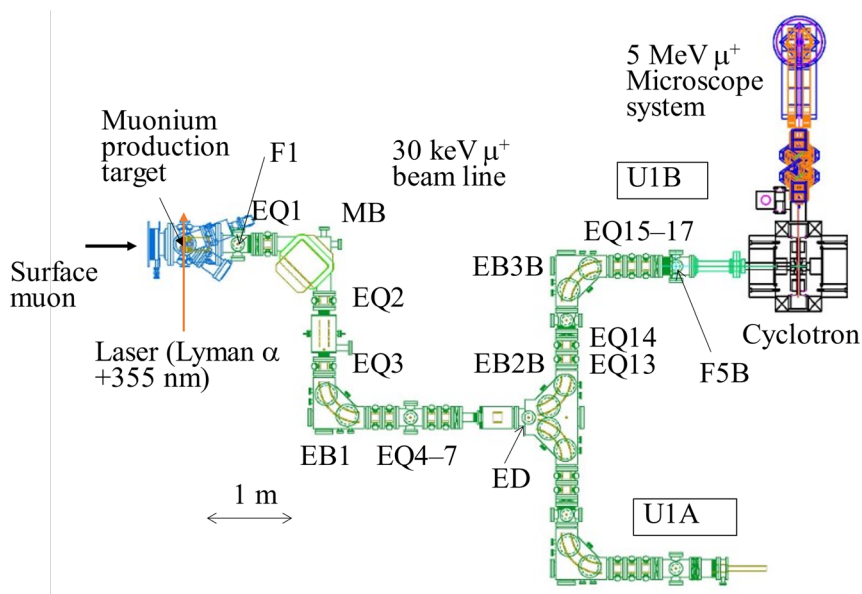


Figure 1: Configuration of ultra-slow-muon beam line (USM-BL), cyclotron and microscope (top view).

[#] ohnishi@riken.jp

に停止させてミュオニウムを生成、真空中に湧き出たミュオニウムを 122 nm と 355 nm のレーザーによってイオン化する。この μ^+ を 30 kV で引き出して超低速ビームを生成する。Figure 1 に示すように超低速ミュオンビームライン U1B は偏向電磁石1台と静電型の偏向電極 4 台、4 極電極 12 台から構成され、30 keV μ^+ を放射線遮蔽壁内から約 10 m 輸送してサイクロトロンに入射する。ミュオンサイクロトロンは縦置き(軌道面が鉛直)で 60-70 ターン加速して 5 MeV の低エミッタンスの μ^+ ビームを得る。サイクロトロンは電磁石、RF、真空などすべて完成してビーム入射可能な状態になっている。加速されたビームは実験エリアの制約から 45 度上方に取り出され、135 度偏向電磁石を通して鉛直下向きに設置される透過型顕微鏡光学系と検出器に入射される。ミュオンの平均寿命 2.2 μ s に対してレーザーイオン化からサイクロトロン出口までの通過時間は 2.9 μ s となっている。超低速ミュオンの収量はビームラインの下流において 1 秒当たり数 100 個である。ミュオン顕微鏡を実現するためには 5 MeV ミュオンビームのエミッタンスをできる限り小さく、少なくとも 1π mmrad 以下にする必要がある。従って、超低速ミュオン生成時のエミッタンスを小さくして、輸送と加速においてもビーム強度を減らすことなく、エミッタンス増加を小さくすることが重要である。以下ではミュオン生成からサイクロ出口までのエミッタンス計算結果および考察を示す。

2. 超低速ミュオン生成部のエミッタンス

Figure 2 に超低速ミュオン生成部分の配置図とビーム軌道を示す。表面ミュオンのターゲットはイオン化レーザーの方向に 70 mm あり、再イオン化された μ^+ は SOA レンズと呼ばれる4つの円形電極(S1~S4)によって、30 kV のターゲットから加速、収束される。図中のオレンジ線は μ^+ の軌道を示す。S1 電極は 1 mm 程度のメッシュであるが S2~S4 は穴あき円盤または円筒である。図中に軌道計算に使用した各電極の電圧値を示す。これは実績値であるが、ミュオンの収量が大きくなるように適宜調整される。Figure 3 にレーザー位置から 600 mm 下流におけるビームのエミッタンス計算結果を示す。エミッタ

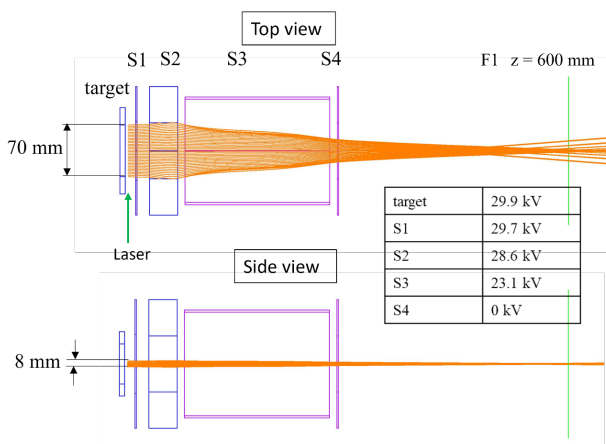


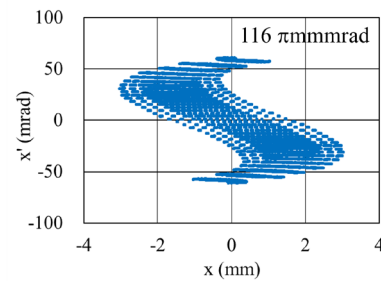
Figure 2: Arrangement of muonium production target and SOA lens for laser-ionized muons. Orange lines indicate muon beam trajectory.

スの値は 4 倍の rms エミッタンス、

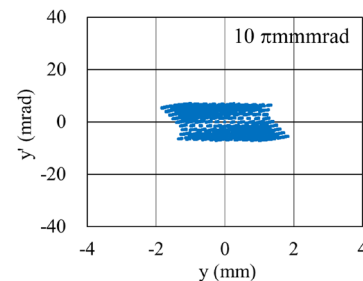
$$4rms \varepsilon = 4 \times \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

である。ビームが均一分布の楕円の場合は楕円面積/ π となる。ミュオニウムは 2000K の Maxwell-Boltzmann 速度分布に従って運動していると考えられるが、この計算ではイオン化時点の μ^+ は 0.2 eV の均一エネルギーで加速方向 (z) に $\cos\theta$ 分布を持つと仮定した。イオン化領域はレーザーの方向 (x) に 70 mm、鉛直方向 (y) に 8 mm、加速方向に 2 mm とした。F1 でのエミッタンスは x, y, z 方向それぞれ 2 mm, 1 mm, 0.4 mm のステップで粒子の初期位置と $\cos\theta$ 分布になるように方向を与えてトラッキング計算によって求めた。

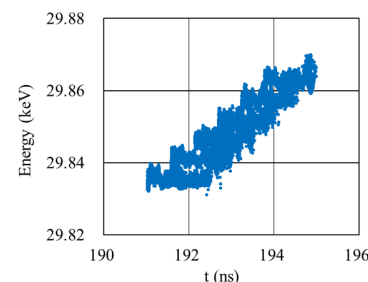
Figure 3 (a) の x-x' エミッタンス形状が S 型に歪んでいるのは主に S2 電極の影響である。この計算では S2 の口径を ϕ 100 mm としているが、使用中の電極は ϕ 76 mm であるためこの図よりさらに収差が大きい。また S 字が太くなっているのはイオン化時の横方向の運動量に起因するもので、SOA 電極の収差が十分小さくてもイオン化領域は x 方向に ± 35 mm あるため、2000K の熱運



(a)



(b)



(c)

Figure3: Calculated beam emittances at F1, 600 mm downstream from the laser-ionization position.

動から $60 \mu\text{mrad}$ 程度のエミッタンスを生じる。現在高温のタングステンターゲットの代わりに室温のシリカエアロゲルの使用が始まっていて、この場合はミュオニウムの熱運動に起因するエミッタンスは $1/2.5$ になると考えられる。Figure 3 (c) は F1 における縦方向 (運動方向) のエミッタンスを示す。横軸はイオン化位置から F1 までの飛行時間である。また加速エネルギーはイオン化位置の電位によって決まるためターゲットと S1 電極の電位差に依存する。

ミュオン顕微鏡をより現実的にするためにはさらにエミッタンスの低減が必要である。ミュオニウムのレーザーイオン化によるビーム冷却において、エミッタンス値はイオン化領域の空間サイズとミュオニウムの横方向の運動量に依存する。このため初段冷却で得られた超低速ミュオンビームを $\phi 1 \text{ mm}$ 程度に収束して薄膜に入射しミュオニウムを生成する。これを再度レーザーイオン化することにより、 $1 \mu\text{mrad}$ 程度まで低エミッタンス化したミュオンビームを得る計画である (2 段冷却)。ミュオンの寿命と効率を考慮する必要があるが、3 段以上の冷却も考えられる。

3. 超低速ミュオンビームライン (USM-BL)

超低速ミュオンビームライン (Fig. 1) の最初の 90° 偏向電磁石 (MB) は磁極ギャップ 125 mm 、中心軌道半径 400 mm 、静電偏向電極 (EB) は円筒型で電極ギャップ 100 mm 、電極高さ 160 mm 、中心軌道半径 400 mm 、静電 4 極 (EQ) のポア径は $\phi 80 \text{ mm}$ 、電極長は 80 mm である。Figure 4 に F1 からトラッキング計算で求めた USM-BL のビーム軌道を示す。トラッキング計算の初期条件として Fig. 3 で示す F1 におけるミュオンの位相空間分布を使用した。EQ の印加電圧はビームライン調整実績をもとにしてビームロスが小さくなるように調整したが最適化はできていない。また、計算結果と実際のビーム計測値との相違について現時点では調査できていない。Figure 5 に粒子数の変化 (ミュオンの崩壊は含まない) と 4 rms エミッタンスの変化を示す。この計算では x 方向のエミッタンスは $116 \mu\text{mrad}$ から $220 \mu\text{mrad}$ に、y 方

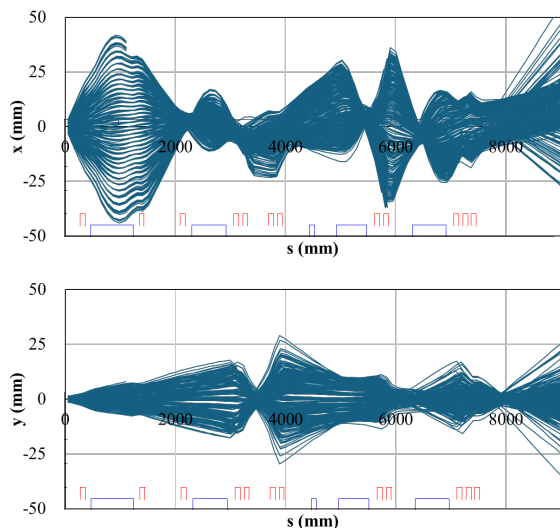


Figure 4: Beam trajectories in x and y directions in USM-BL.

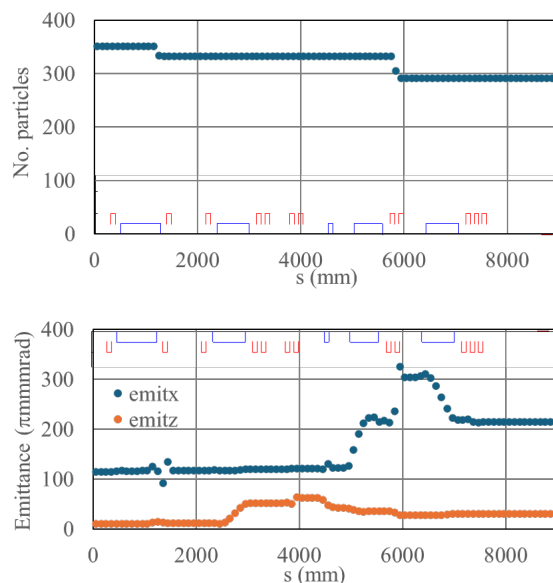


Figure 5: Changes in particle count and 4 rms emittances

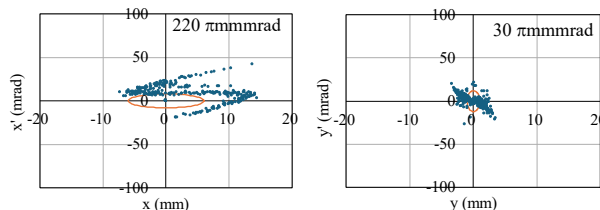


Figure 6: Calculated beam emittances at F5B. Orange lines indicate ones of 48 and $12 \mu\text{mrad}$ assumed in the cyclotron tracking calculation in section 4.

向は $10 \mu\text{mrad}$ から $30 \mu\text{mrad}$ に増加している。x 方向は MB と EQ14 付近でビームロスが生じている。エミッタンスは EB2B と EQ14 で増大しているが、EB3B では逆に減少している。一方、y 方向は x 方向に比較してビームサイズは小さいが、EB1 で増加し ED と EB2B で減少している。エミッタンスはビーム幅の大きいところ、とくに偏向電極で変化する。この理由は偏向電極のギャップが電極高さに比べて広く 6 極成分が大きい ($\sim 0.7\% / \text{cm}^2$) ためであると考えられる。Figure 6 にこの計算で得られた USM-BL 出口 F5B のエミッタンスを示す。オレンジ線は次章のサイクロロン軌道計算で仮定した F5B のエミッタンスであるので、マッチングをとる必要がある。計算上は USM-BL におけるエミッタンス増加を小さくすることは可能であると考えられるが、計算と実際のビーム軌道が合致しているかの検証が必要である。

4. サイクロロンによる加速中のエミッタンス増加

サイクロロンは 4 セクター AVF 型で引き出し半径 0.26 m 、平均磁場 0.4 T 、加速共振器の周波数 108 MHz である。Figure 7 にサイクロロンの構成とビーム軌道を示す。ミュオン顕微鏡の色収差を低減するためエネルギー分散 $\Delta E/E$ を 10^{-5} オーダーにする必要がある。このため加速共振器に加えて 324 MHz のフラットトップ (FT) 共

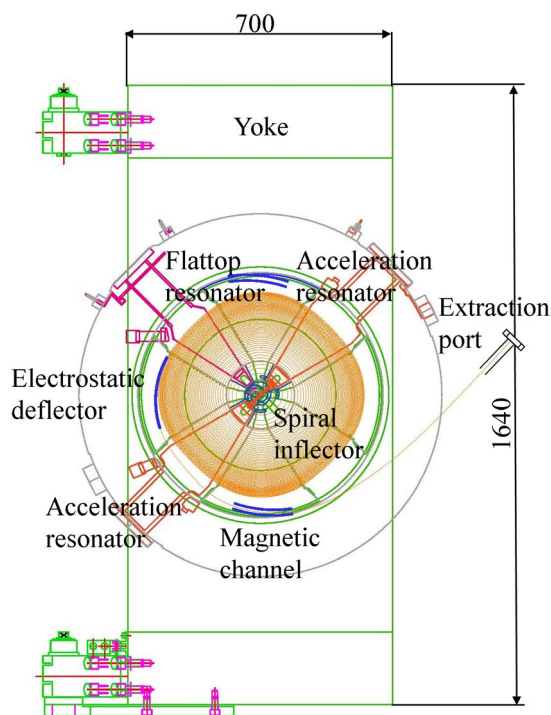


Figure 7: Configuration of 5 MeV muon cyclotron.

振器を使用する[5]。30 keV のミュオンビームはスパイラルインフレクター(最大±5 kV、ギャップ 6 mm)によって入射される。サイクロトロンは縦置き(加速面が鉛直方向)で、60-70 ターンで取り出される。

Figure 8 に FT 共振器を使用した場合と使用しない場合の加速中のビームバンチのエネルギー幅とエミッタンスの計算結果を示す。エミッタンス値は粒子速度に依存しないように、 $\beta\gamma$ (30 keV: 0.0238, 5 MeV: 0.311) を乗じた 1 rms 規格化エミッタンスで表す。計算はサイクロトロンから 1.45 m 上流の F5B において位相空間内に分布した粒子をサイクロトロン出口まで個々にトラッキングすることによって行った。具体的な計算方法は過去の発表と同じであるので、ref. 2 などを参照されたい。F5B におけるエミッタンス計算値は 3. で述べたように 4 rms エミッタンス値で $\epsilon_x, \epsilon_y = 220, 30 \pi\text{mmrad}$ となったが、水平方向はサイクロトロンの入射アクセプタンスより大きいので、この計算では Fig. 6 に示すように $\epsilon_x, \epsilon_y = 48, 12 \pi\text{mmrad}$ 、1 rms 規格化エミッタンスでは $\epsilon_x, \epsilon_y = 0.29, 0.07 \pi\text{mmrad}$ を仮定した。また初期位相幅(バンチ長)はバンチャーの使用を前提として 1σ で 2.3° (0.06 ns) とした。ビームの位相幅はインフレクターの通過など入射部で横方向の広がりとは結合するため上記エミッタンスでは加速中の位相幅は 1σ で約 6° に広がる。Figure 8 に示すように FT 共振器がない場合はこの位相幅のために加速とともにエネルギー幅は増加して、最終ターン付近では $\Delta E/E = 8 \times 10^{-3}$ となる。FT 共振器のデュー電圧分布は内周側ではゼロで半径とともに増加するが、電圧を調整することによって加速バンチのエネルギー幅を減少させることができ、最終ターン付近で 4×10^{-4} 程度に圧縮できる。

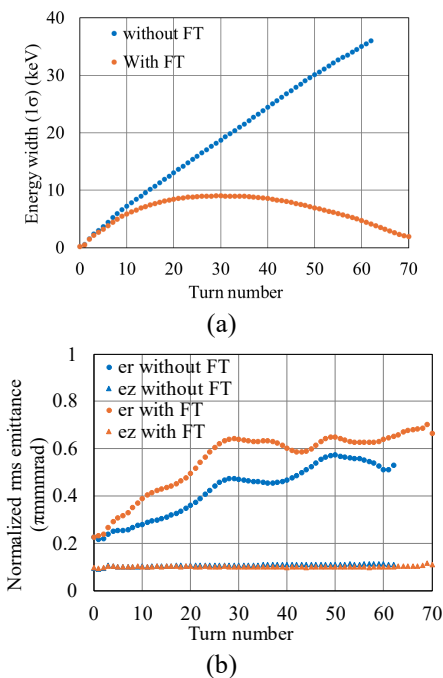


Figure 8: (a) Energy widths and (b) normalized rms emittances in radial (r) and axial (z) directions as a function of turn number for injection beams with rms normalized emittances of 0.29 and 0.07 πmmrad at F5B.

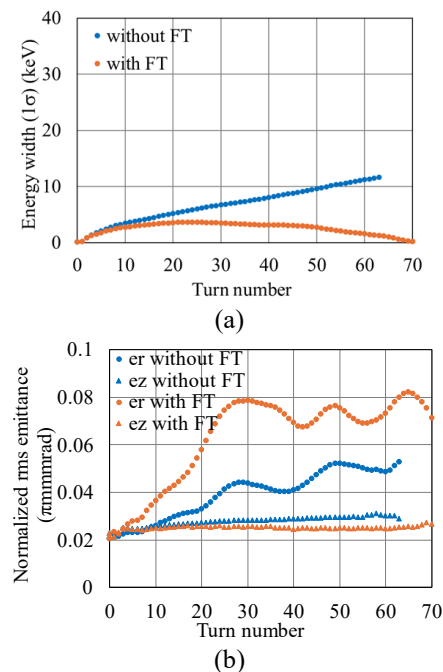


Figure 9: Same graph as Fig. 8 for low emittance beams by two-stage cooling with rms normalized emittances of 0.024 πmmrad in both x and y directions at F5B.

F5B からサイクロトロンへの入射にはソレノイド電磁石とスパイラルインフレクターが使用されているため、粒子の運動においてビームラインの水平(x)方向と鉛直(y)方向はサイクロトロンの半径(r)方向と軸(z)方向と混合しているため、Fig. 8 (a) に示すように入射直後のエミッタ

ンスは r 方向、 z 方向ともに $0.22 \pi\text{mmrad}$ 程度となっている。加速中の z 方向のエミッタンスはほぼ一定であるが r 方向は 2.5 倍以上に増加していることがわかる。ビームバンチはエネルギー幅をもつため r 方向に広がっているが、このエミッタンス計算では r 方向の位置をエネルギーの偏差分だけ補正してエミッタンス値からエネルギー分散による寄与を除外している。 r 方向のエミッタンスの増加の原因はバンチ内のベータatron振動に起因する位相振動によるものと考えられるが定量化できていない。

現状のビームエミッタンスではミュオン顕微鏡には大き過ぎるため、2. でふれたようにミュオニウムのレーザーイオン化を多段にすることによってエミッタンスをさらに小さくする計画である。2 段冷却を行って、30 keV 超低速ミュオンのエミッタンスを x, y 方向をともに $4 \pi\text{mmrad}$ (2σ)、規格化 rms エミッタンスでは $0.024 \pi\text{mmrad}$ 、位相幅を 8 度とした場合の加速中のエネルギー幅とエミッタンスの計算結果を Fig. 9 に示す。入射ビームのエミッタンスとともに加速ビームの位相幅も小さくなるためエネルギー幅も小さくなり、FT 共振器がある場合、最終ターン付近で $\Delta E/E = 6 \times 10^{-5}$ となっている。加速中のエミッタンスは 2 段冷却することによって 1/10 以下となるが、 r 方向のエミッタンス増加は起きていて、とくに FT 共振器を使用した場合の方がエミッタンス増加が大きい。ここでは示していないが、入射ビームの位相幅を小さくすると加速中のエミッタンス増加は小さくなる。Figure 10 に 2 段冷却で FT 共振器を使用し、デフレクター、磁気チャンネルを通して出口ポートまで取り出したビームのエミッタンスを示す。取出しビームのエミッタンスは磁気チャンネルで増加して、この計算ではサイクロtron最終ターンのエミッタンスより r

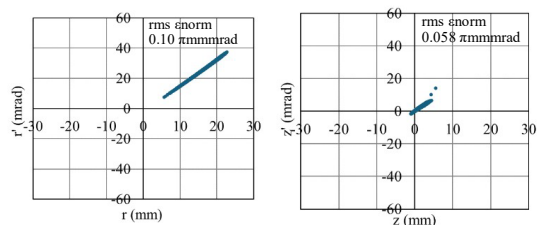


Figure 10: Emittances of extracted beams at cyclotron exit port.

方向は約 1.4 倍、 z 方向は約 2.3 倍になっている。

5. おわりに

Table 1 にサイクロtron加速前後の規格化 rms エミッタンス値を現状の 1 段冷却と計画中の 2 段冷却の場合について示す。顕微鏡の色収差を低減するため FT 共振器は必須であるので、サイクロtron取出しポートにおけるエミッタンスは 1 段冷却では $\epsilon_x, \epsilon_y = 0.38, 0.34 \pi\text{mmrad}$ 、2 段冷却では $\epsilon_x, \epsilon_y = 0.11, 0.06 \pi\text{mmrad}$ となった。また取り出し効率は 1 段冷却では 50-60%、2 段冷却では 100% であった。この結果では 2 段冷却を行った場合、1 段冷却に比べて輝度は約 40 倍であるが、1 段冷却のエミッタンスを小さくしているため、さらに高くなる。ミュオンの強度から考えて 2 段冷却を実現する必要がある。現在、2 段冷却を行った場合の取出しビームのエミッタンス (Fig. 10) をもとにして顕微鏡光学系の設計を開始している。

Table 1: Normalized RMS Emittances and Energy Widths Before and After Cyclotron

	One-stage cooling		Two-stage cooling	
	without FT	with FT	without FT	with FT
(ϵ_x, ϵ_y) at F5B	(0.29, 0.071)	(0.29, 0.071)	(0.024, 0.024)	(0.024, 0.024)
(ϵ_x, ϵ_y) at last turn in cyclotron	(0.53, 0.11)	(0.44, 0.11)	(0.056, 0.027)	(0.069, 0.026)
(ϵ_x, ϵ_y) at extraction port	(0.42, 0.84)	(0.38, 0.34)	(0.068, 0.075)	(0.11, 0.059)
$\Delta E/E$ at extraction port	4.9×10^{-3}	2.5×10^{-4}	2.1×10^{-3}	1.2×10^{-4}

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.*, “サイクロtronによるミュオンの加速”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp. 877-880.
- [3] Y. Nakazawa *et al.*, “BEAM PROFILE MEASUREMENT OF THE ULTRA-SLOWMUON FOR THE TRANSMISSION MUON MICROSCOPE”, Proc. IPAC'24, Nashville, TN, May 2024, pp. 2933-2936, doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-THAN2.
- [4] P. Strasser *et al.*, “Superconducting curved transport solenoid with dipole coils for charge selection of the muon beam”, Nucl. Instr. Meth. B, vol. 317, pp. 361-364, 2013.
- [5] T. Yamazaki *et al.*, “ミュオンマイクロビーム生成のためのフラットトップ RF 空洞の開発”, Proc. 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2020), (Online meeting), Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 885-887.