

ミュオンサイクロトロン の設計と製作

DESIGN AND CONSTRUCTION OF MUON CYCLOTRON

大西 純一^{A)}, 後藤 彰^{A)}, 山崎 高幸^{B)}, 安達 利一^{B)}, 永谷 幸則^{B)}, 三宅 康博^{B)}, 筒井 裕士^{C)}, 楠岡 新也^{C)},
熊田 幸生^{C)}, 恩田 昂^{C)}

Jun-ichi Ohnishi^{#, A)}, Akira Goto^{A)}, Takayuki Yamazaki^{B)}, Toshikazu Adachi^{B)}, Yukinori Nagatani^{B)},
Yasuhiro Miyake^{B)}, Hiroshi Tsutsui^{C)}, Shinya Kusuoka^{C)}, Yukio Kumata^{C)}, Takashi Onda^{C)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Abstract

We have been constructing an AVF cyclotron to accelerate muon (μ^+) beams to an energy of 5 MeV and to realize muon microscopy. The injected muon beams, generated from muonium at the J-PARC MLF muon beam line, have an energy of 30 keV and a low emittance of 1π mmrad. The cyclotron has an extraction radius of 262 mm, and uses not only two 108 MHz ($h = 2$) accelerating cavities, but also one flat-top cavity with a triple frequency of 324 MHz to reduce energy dispersion. The required accuracy of the isochronous magnetic field is 3×10^{-4} and is made by magnetic field measurements and shimming of magnetic poles. We have performed tracking calculations precisely to design the geometry of magnetic poles and electrodes in the central region, a deflector and a magnetic channel for beam extraction. As a result, the energy dispersion of the extracted beam was calculated to be 8×10^{-5} for an injection beam with a phase width of $\pm 4^\circ$ (pulse width 200 ps), and the emittances were calculated to be 0.35 and 0.12 π mmrad in the radial and axial directions, respectively. At present, the manufacture of almost all mechanical parts has been already completed and the magnetic field measurement and shimming is in progress. After the assembly and test of the RF system, we are planning the beam commissioning within 2020 fiscal year.

1. はじめに

J-PARC 物質生命科学実験施設 (MLF) の 4 MeV ミュオンビームをタングステン中で減速して生成したミュオニウムに真空紫外レーザーを照射、再電離して引き出すことにより、30 keV の低エミッタンス (1π mmrad (1σ)), 低エネルギー分散 (エネルギー幅 10 eV) の μ^+ ビームが生成される[1]。ビーム強度は 10^4 /パルス (25 Hz) (目標値) である。このビームを本発表の AVF サイクロトロンにより 5 MeV まで加速してミュオン顕微鏡の実現をめざしている。

Table 1 にミュオンサイクロトロン の諸元を、Fig. 1 に平面図を示す[2]。電磁石は住友重機械工業 (株) 製

Table 1: Parameters of Muon Cyclotron

Magnet	Extraction radius	0.26 m
	Central magnetic field	0.4 T
	No. of sectors	4
RF	Harmonic number	2
	Frequency of main cavity	108 MHz
	Dee voltage	50 kV (Max.)
	Frequency of flattop cavity	324 MHz
Injection	Spiral inflector	± 4.5 kV
Extraction	Deflector	7.5 kV/mm
	Magnetic channel	passive type

HM10 型サイクロトロン (H-, 10 MeV) を改造したもので、縦置きで、ヨークはヒンジにより容易に開閉できる構造となっている。ビーム入射はスパイラルラインフレクターを用

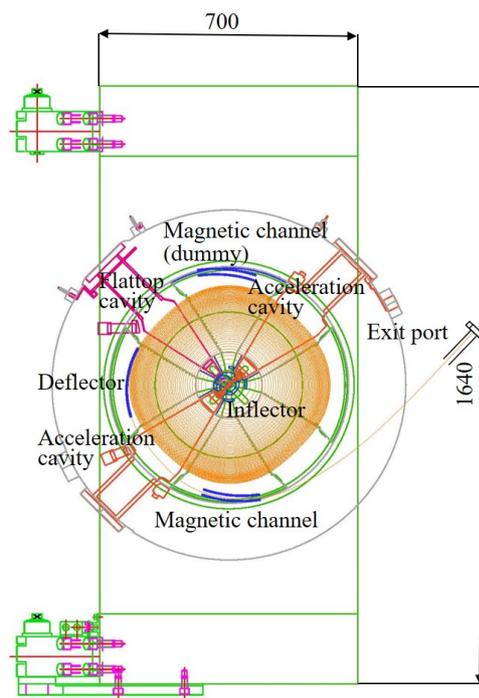


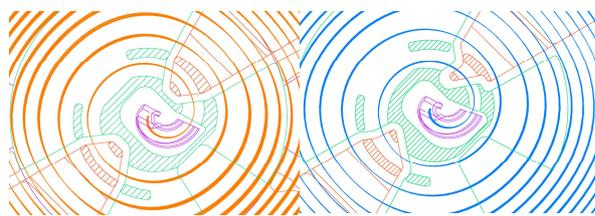
Figure 1: Plan view of muon cyclotron.

いて行う。等時性磁場はトリムコイルを設置せず、opera3d[3]で磁極形状を最適設計した後、電磁石製作後に磁場測定を行って鉄シムによって磁場調整する。加速はハーモニック数 2 で、 29° のデュー角をもつ 2 台の加速共振器(108 MHz)によって行う。デュー電圧は最大 50 kV である。サイクロロン入射後の位相(縦)方向の広がりにはビームラインや入射部の軌道差によって加速周波数 108 MHz において 10° 以上となるため、加速電圧を補正するため 3 倍周波数のフラットトップ(FT)共振器を設置する[4]。ビームの取り出しは静電デフレクターとパシプタイプの磁気チャンネルをヒル部分(ギャップ 54 mm)に設置して行う。

加速されたミュオンビームは顕微鏡として数~数 $10 \mu\text{m}$ に収束させるため、(1) 収束系の色収差によるボケを小さくするため取り出しビームのエネルギー幅を 10^{-5} 台にする、(2) 有効なビーム強度を増やすためエミッタンスを最小化することなどが要求される。以下ではこれらの観点からミュオンサイクロロンの設計と製作について述べる。

2. 中心領域の設計

1-2 ターン目は磁場 flutter がないので軸方向の収束力を得るため、電極位置や磁場を調整して加速位相を遅らせ、RF 電場による収束力を用いる。このサイクロロンでは磁極形状を先に決定したため、加速ギャップの位置を調整した。Figure 2 に検討した異なる二つの中心領域の構造とそれぞれ $4 \pi\text{mmrad}$ の入射ビームの軌道を示す。Figure 3 は加速ギャップの中央を通過する時の RF 位相を示す。Model 26 では第 1 ギャップと第 3 ギャップで位相が遅れているために軸(Z)方向に収束力が働く。このため、Fig. 4 の Z 方向のビームエンベロープからわかるように、model 26 では model 14 に比べて 1 ターン目の収束力が強くなっている。このサイクロロンでは入射



(a) Model 14 (b) Model 26

Figure 2: Two types of central regions.

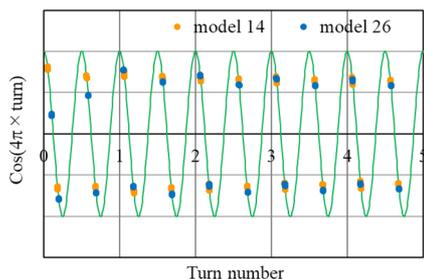


Figure 3: RF phases at passage on the center line of the acceleration gaps.

エミッタンスが小さいため Z 方向のエンベロープの違いは大きくはないが、アクセプタンスは model 26 の方が 2 倍程度大きくなる。また、Fig. 2 からわかるように model 26 の方が R 方向のビーム幅の振動が小さくなっていてマッチングがよいので、実機では model 26 を採用することにした。

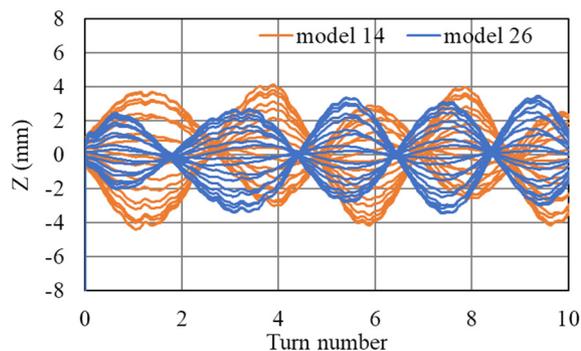


Figure 4: Beam envelopes in the axial direction. Emittance of the injected beams is $4 \pi\text{mmrad}$.

3. 鉄シムによる等時性磁場の調整

取り出しビームのエネルギー幅を小さくするため FT 共振器を使用するが、 dE/E を 10^{-5} オーダーにするためには加速ビームの位相幅を $\pm 7^\circ$ 以下にする必要がある。入射ビームのパンチ長は $200 \text{ ps} (\pm 4^\circ)$ 程度であるため、等時性磁場の精度は加速中のビームの位相変動を 6° 程度にする必要がある。取り出しまでの周回数の半分、約 30 ターンで 6° の位相変化を許容すると考えると、ハーモニック $H = 2$ であるので、等時性磁場の必要精度 $\text{dB/B} = 6 / 360 \times H \times 30 = 3 \times 10^{-4}$ となる。この精度の等時性磁場の生成は opera3d 計算だけでは厳しいので磁場測定を行って鉄シムで磁場調整する。鉄シムは Fig. 5 に示すようにセクターの側面に、径方向 21 か所、合計 168 か所取り付ける。Fig. 6 は同じ径方向の位置 4 か所に 1 mm の鉄シムを取り付けた場合の平均磁場の変化量の計算値である。磁場測定はまだできていないので、設計の磁極形状(等時性磁場から少し偏差がある)についてシムによる磁場調整を opera3d で行ってみた。Figure 7(a) にシム調整前と後の等時性磁場からの偏差を示す。また、そのときの各シムの調整量を Fig. 7(b)に示す。実際のシムによる磁場調整では等時性磁場を作成するだけでなく、軌道の偏心を補正するための 1st ハーモニック磁

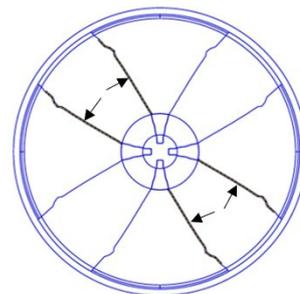


Figure 5: The sides of the sectors in which iron shims are attached.

場の導入やビーム取り出し部でビーム損失がないようするための調整も行う予定である。

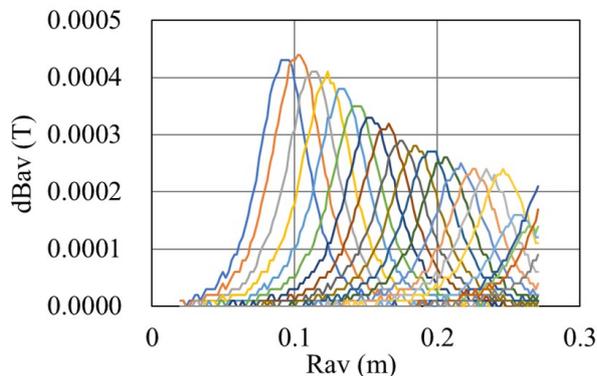


Figure 6: Average magnetic fields generated by shims with a thickness of 1 mm attached in each radial position.

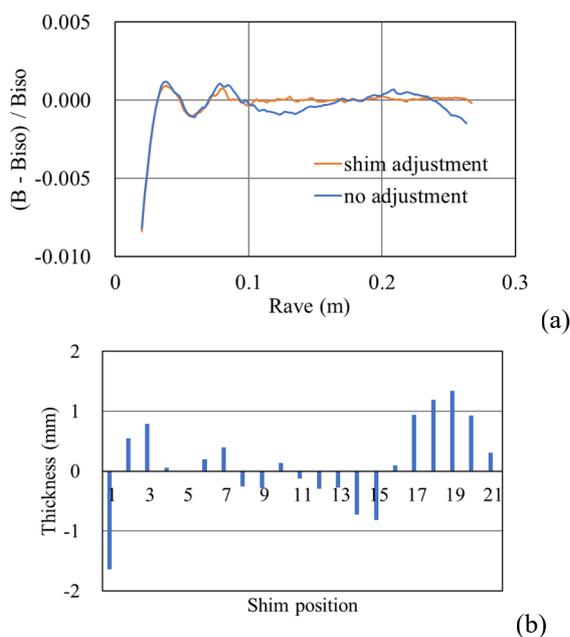


Figure 7: (a) Deviation from the isochronous magnetic field before and after shim correction and (b) adjustment thickness of shims in each position.

4. 入射マッチングと加速中の位相とエネルギー幅の変化

エミッタンスやエネルギー幅などのサイクロトロン性能やシムによる磁場調整、RF 電圧や FT 共振器の位相などの運転パラメーターの決定を行うためには入射から取り出しまでのトラッキングによる軌道計算を行う。計算方法と一部の結果は既報[2]で述べているが、本発表では入射ビームラインとマッチングさせるために、Fig. 8 に示すようにサイクロトン軌道面から上流 0.8 m の位置をトラッキング計算の出発点とした。入射ビーム(30 keV)は出発点からソレノイドレンズとスパイラルインフレクターを通して周回軌道面に入射される。ソレノイド磁場は約 0.11 T でビームは約 60 度回転する。さらにインフレクター

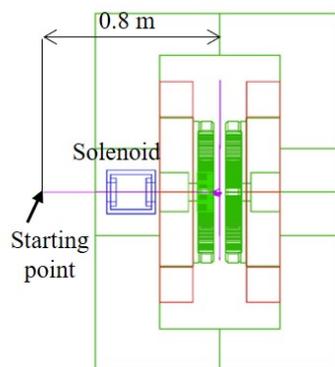


Figure 8: Starting point in the tracking calculations.

通過後、ビームライン X(水平)方向はサイクロトン径(R)方向に、Y 方向は軸(Z)方向に概ね分離し、定量的には評価できていないがカップリングは 10-20%程度であると思われる。

Figures 9 にトラッキング計算出発点における X, Y 方向のアクセプタンス(最外周 60 ターンまで加速)を示す。アクセプタンスの大きさは X, Y それぞれ 146 μmrad 、136 μmrad であった。コンターは加速後のエネルギー(中心値 5139 keV)を表し、線間は 0.5 keV である。ただ

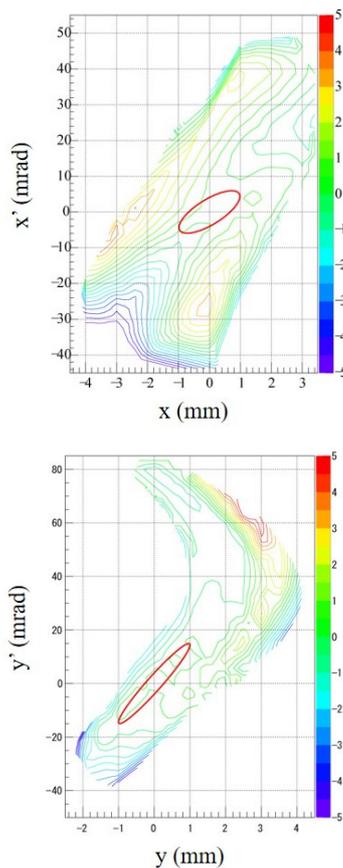


Figure 9: Acceleration acceptance at the starting point in the horizontal (x) and vertical (y) directions. The red ellipses are beam geometry used in the tracking calculations.

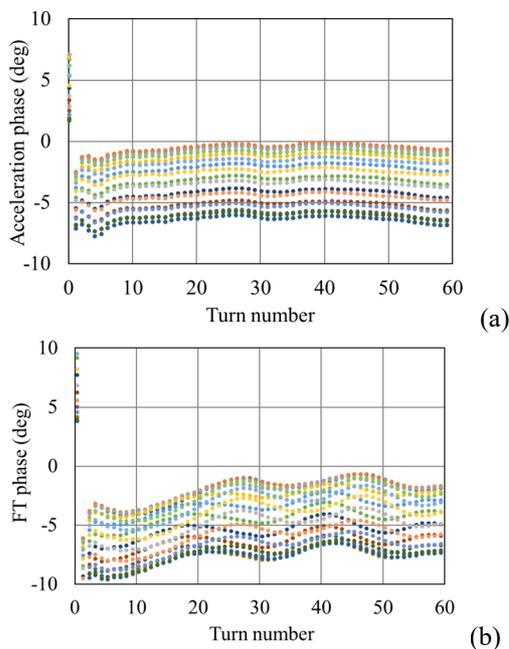


Figure 10: (a) Acceleration and (b) FT phases of 18 particles on the ellipse of $4\pi\text{mrad}$. The acceleration phase means the average of the phases when a particle passes the centerlines of two Dees, and the FT phase that when a particle passes the centerline of the FT Dee.

し、この計算では初期位相幅(バンチ長)はゼロとしている。図中に示した赤線の楕円は計画の入射ビームに相当する $4\pi\text{mrad}$ (2σ) のエミッタンスで、加速後のエネルギー分散が小さくなるように設定したものであり、以下の計算に使用した。Figures 10 に x 方向の 2σ 楕円 (Fig. 9) 上の 18 粒子についてターン毎の加速位相と FT 位相の変化を示す。加速位相は二つのディー電極の中心線を通り抜ける際の RF 位相の平均で、FT 位相は FT のディー電極中心を通り抜ける位相を $1f$ の位相で表したものである。初期位相幅はゼロであるが、インフレクター内と最初のディーまでの軌道長の差によって約 6° の位相幅を生じている。各ディー電極の通過位相は R 方向のベータトロン振動(チューンは $1-1.05$)によって変化していくが、加速位相は 180° 対称位置にある2つのディー

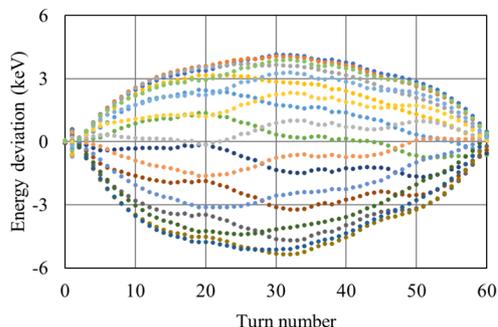


Figure 11: Change of the energy deviations from the average of the 18 particles.

電極の通過位相の平均であるため位相変化は小さくなっている。Figure 11 にターン毎の 18 粒子のエネルギーの平均値からの偏差を示す。内周側では FT 電圧はゼロまたは小さいので、ビームの位相幅に従ってエネルギー幅が増加していくが、外周側では FT 電圧によって補正されてエネルギー幅が小さくなっていくことがわかる。しかし、エミッタンスのあるビームでは R 方向のベータトロン振動によって FT 位相が粒子毎に異なる変化をするため、エネルギー幅の最小化には限界があると考えられる。

5. ビームの取り出し

ビームは約 60 ターン加速された後、静電デフレクター (max. 30 kV, gap: 4 mm) と磁気チャンネルで取り出される。磁気チャンネルは鉄心のみで構成され、磁場約 0.54 T のヒル部分に設置される。周回軌道上の等時性磁場はこの磁気チャンネル鉄心の影響を含めてシム調整するが、1st ハーモニック磁場が生成されないように 180° 対称の位置にダミーの磁気チャンネルを設置する。磁気チャンネルの中央部約 $1/3$ は R 方向の収束力をもたせるため Fig. 12(a)に示すような鉄心構造として磁場勾配 (Fig. 12(b))を付けている。Figure 13 に取り出し軌道上のビームエンベロープと rms エミッタンスを示す。横軸 s はデフレクター入口を原点としている。これらは入射取り合い点からトラッキング計算で求めたもので、出発点において横方向は Fig. 9 に示す $4\pi\text{mrad}$ (2σ) 位相空間楕円内の 4 次元ガウスビーム、位相方向は $-4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ の 5 位相(バンチ長約 200ps)、全 3380 粒子について計算した[2]。出発点から取り出しポートまでの通過率は 99.4% であった。Fig. 13(a)からわかるように、R 方向はフリッジ磁場により発散力を受けるため、前述のように磁気チャンネル中央部 ($s = 0.55\text{ m}$ 付近) で収束力を与えている。エミッタンスは Fig. 13(b)からわかるように取り出し軌道上では増加していない。一方、加速による断熱減衰で $0.08\pi\text{mrad}$ となるため、入射および加速中にエミッタンスは R 方向は約 4.5 倍に Z 方向は約 1.5 倍に

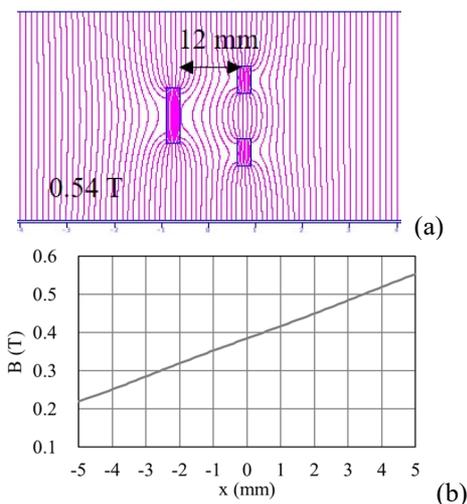


Figure 12: Geometry of iron in the central region of the magnetic channel and (b) magnetic field distribution in the radial direction.

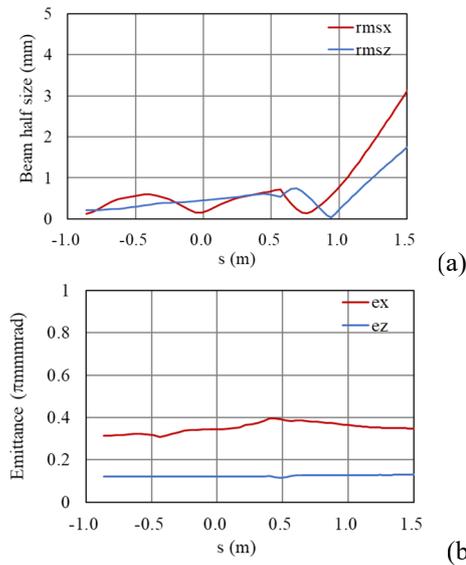


Figure 13: (a) Beam envelopes and (b) emittances in the radial (x) and axial (z) directions in the extraction region. The origin of abscissa s corresponds to the entrance of the deflector.

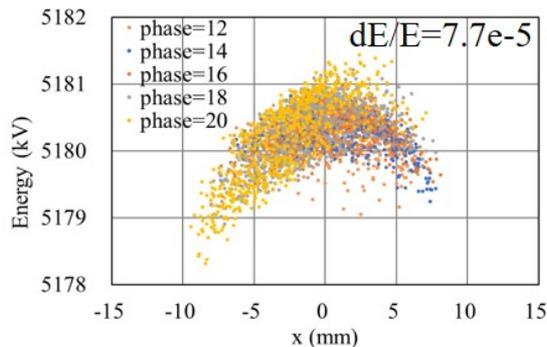


Figure 14: Energies of particles at the exit port. Phase = 12° – 20° means the relative initial phases and absolute is trivial.

増加している。Figure 14 に取り出しポートでの各粒子の x 方向の位置とエネルギーについて、出発点の位相毎にプロットしたものを示す。この計算では顕微鏡の性能に影響するエネルギー分散 $dE/E(\text{rms})$ は 7.7×10^{-5} となったが、加速後のエミッタンスやエネルギー幅は入射ビームのエミッタンスの大きさや形、位相幅、FT 共振器の電圧や位相などによって敏感に変化するため、コミッションング時には細かなビーム調整が必要となると考えられる。

6. 結論

ミュオンサイクロトロンはミュオンを 5 MeV まで加速してミュオン顕微鏡を実現することを目的としているため、取り出しビームのエネルギー幅とエミッタンスを最小化することが重要である。このため、サイクロトロン上流のビームラインとの取り合い点から取り出しポートまでトラッキング計算を行って、電磁石、中心領域の電極形状、共振器、デフレクターや磁気チャンネルなどの取り出し機器の設計を行った。その結果、横方向 x, y それぞれ $1 \pi\text{mrad}$ (1σ)、パンチ長 200 ps (位相幅 $\pm 4^\circ$) の入射条件で、取り出しポートでのエネルギー広がり $dE/E(\text{rms})$ は 7.7×10^{-5} 、rms エミッタンスはサイクロトロン径方向と軸方向、それぞれ 0.35 と 0.12 πmrad と計算された。サイクロトロンの機械部品はほぼすべて製作が完了していて、現在磁場測定を行っている。その後 RF システムの組立と調整を行ない 2020 年度中のビームコミッションングを予定している。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17H06126 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.*, "ミュオン加速用サイクロトロンの軌道計算", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 121-125.
- [3] <https://www.3ds.com/product-services/>
- [4] 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", in these proceedings.