

サイクロトロンによるミュオンの加速

MUON ACCELERATION BY CYCLOTRON

大西純一^{#, A)}, 永谷幸則^{B)}, 後藤彰^{B)}, 山崎高幸^{B)}, 三宅康博^{B)}, 湯浅貴裕^{B)}, 安達利一^{B)},
中沢雄河^{A)}, 足立泰平^{A)}, 筒井 裕士^{C)}, 楠岡 新也^{C)}, 恩田 昂^{C)}

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

^{A)} RIKEN Nishina Center

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

^{C)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Abstract

We have been developing an AVF cyclotron to re-accelerate ultra-slow muons (30 keV) to 5 MeV at J-PARC MLF, which is to realize a transmission muon microscope. The cyclotron was installed on the ultraslow muon beam line at J-PARC MLF in the April of 2022 after magnetic field measurements and development of the RF power source. After that, we needed not only wiring and piping, but also to develop a high-voltage power supply, a low-level RF control system, an interlock system and so on for more than a year. The self-made RF source is operated in pulses (100 μ s, 25 Hz) in accordance with the injection of the muon beams and can excite the cyclotron resonator with a power of 20 kW converted to CW, which is a design value. On the other hand, the unloaded Q-value of the resonator was around 2400, which was 20-30% lower than the expected value. As a result, it was found that the Dee voltage is short, so we decided to slightly change the shape of the central region and to increase the number of turns from 60 to 71. As a result of orbit calculation with the modified shape, it was found that the acceleration acceptances were recovered and the emittances and energy width after acceleration were almost the same as the original scheme.

1. はじめに

透過型ミュオン顕微鏡の実現をめざして、J-PARC MLF の超低速ミュオン(30 keV)を 5 MeV まで加速するためのミュオンサイクロトロンの開発を進めている。Figure 1 にミュオン顕微鏡の構成を示す。J-PARC の 3 GeV 陽子ビームから生成される高エネルギー分散の表面ミュオンビーム (4 MeV μ^+) をタンゲステンまたは SiO₂ 標的に停止させてミュオニウムを生成する。標的から真空中に湧き出たミュオニウムの軌道電子をレーザーで乖離し、再び μ^+ として静電場で引き出すことにより、低エミッタンスの超低速ミュオンビームを得る。約 10 m のビームラインを通してサイクロトロンに入射し、5 MeV まで

Table 1: Parameters of Muon Cyclotron

Particle	positive muon
Injection energy	30 keV
Extraction energy	5 MeV
Extraction radius	0.26 m
RF acceleration frequency	108 MHz
Acceleration harmonics	2
No. turns of orbit	61-70
Average magnetic field	0.4 T
Weight of body	8 t

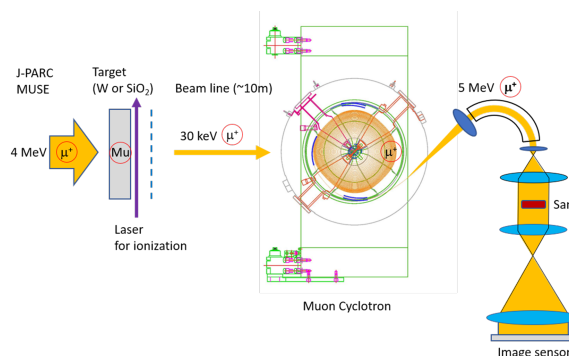


Figure 1: Schematic of muon microscope.

加速、取り出したビームを数マイクロメートルまで収束して高い透過能力をもつミュオン顕微鏡を実現する計画である[1]。

ミュオンサイクロトロンの諸元を Table 1 に示す。サイクロトロンは 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。ミュオン顕微鏡の磁界レンズの色収差を低減するためエネルギー分散 $\Delta E/E$ を 10^{-5} オーダーとする。これを実現するため加速共振器に加えて 324 MHz の 3 倍波共振器を使用してビームの位相(進行)方向の広がりによるエネルギー低下分を補償する[2]。ヨーク外形は住友重機械工業(SHI)製の HM10 型サイクロトロンと同じであるが、外部入射に変更した上、ビームエネルギー、RF 周波数、取り出し方式が異なるため、磁極形状、共振器、入射取

[#] ohnishi@riken.jp

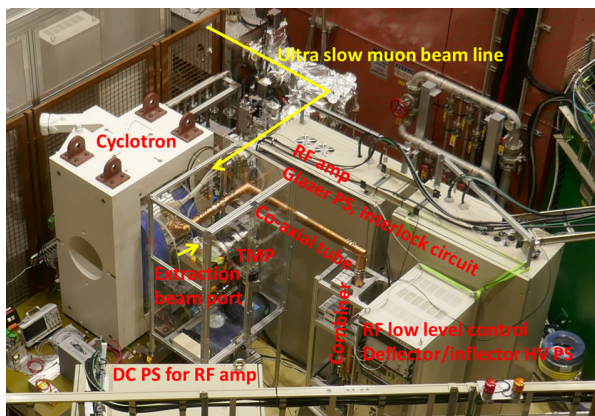


Figure 2: Muon cyclotron and their devices installed on the ultraslow muon beam line at J-PARC MLF.

り出し機器などほぼすべてを新規に設計し、SHI において製作された。電磁石は 2020 年 12 月に J-PARC において磁場測定を実施、磁極のシム調整を行って 2×10^{-4} 程度の等時性磁場が得られた[3]。RF 源 (108 MHz、20 kW) は自主開発であることから、2021 年 6 月から 2022 年 3 月まで KEK つくばサイトにおいて断続的に RF 電源と共振器のパワー試験を行った[4]。この段階で約 18 kW (CW) がサイクロトロンに入力できたが、実測した無負荷 Q 値は 2400 程度と計算値の半分以下であったため後述するようにディー電圧が不足することがわかった。

2022 年 4 月にサイクロトロンを J-PARC MLF の超低速ミュオンビームラインに搬入した後、RF 源 (108 MHz、20 kW) の整備、RF ローレベル制御系、インフレクター電源 (± 5 kV)、デフレクター電源 (-30 kV)、インターロックシステムおよび遠隔制御系の製作、サイクロトロン電磁石、グレーザーコイルの配線、サイクロトロン本体、電源類への冷却水配管、真空排気系、ビーム計測用 MCP、シンチレーターの設置などを行った。2023 年 6 月に完了、J-PARC MLF の安全審査に合格して、Fig. 2 に示すようにビーム入射可能な状態になっている。サイクロトロンへのミュオンビームの入射と加速試験は次の J-PARC MLF のビームタイムで実施する予定である。

2. ディー電圧不足と対策

加速共振器の無負荷 Q 値が 2400 程度と想定より 20-30% 小さかった。一方、自主開発された RF 源の出力パワーはミュオンビームに合わせたパルス運転 (25 Hz、100 μ s) において設計通り CW 換算で 20 kW の出力が得られているが、出力を増加させることは困難である。サイクロトロンの周回数は 60 ターンの設計である。これは R 方向のビームサイズが位相空間 R-R' におけるベータatron 振動によって変動して 60 ターン付近では小さくなりシングルターン取り出ししやすいためである。しかし、Q 値が低いとディー電圧 (46 kV 程度) が不足して 60 ターンでの取り出しができなため、ターン数を増やす必要がある。R 方向のチューンは取り出し付近で 1.04-1.05 であるため周回数を増やす場合、次にビームサイズが小さくなる 70 ターン付近の取り出しにする必要がある。

Figure 3 に中心領域の構造とビーム軌道を示す。加速

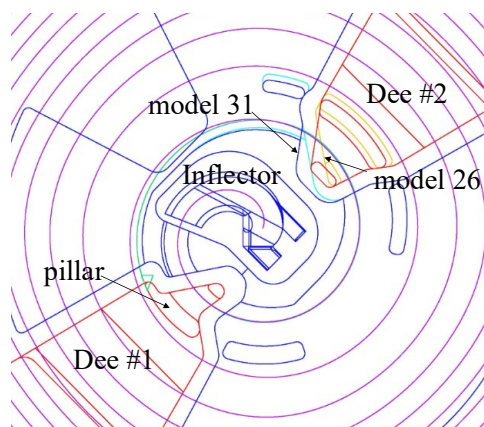


Figure 3: Configuration of the central region and beam orbit. In case of low Dee voltage, beams are lost at the pillar of the Dee #1 (green trajectory). The acceleration acceptance can be recovered when the tilt of the fourth gap at the exit of the Dee #2 is modified (model 31).

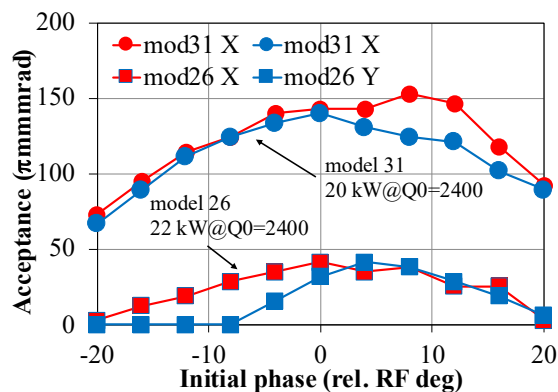


Figure 4: Acceleration acceptance vs relative initial phase. The acceptances are increased significantly by the modification of the fourth gap.

電圧を 6/7 に下げた場合、図の緑線の軌道に示すように 1 ターン後のディー #1 のピラーに当たるため加速アクセプタンスが大きく制限される。このため、図に示すようにディー #2 出口の 4 番目の加速ギャップの方向を変更することにした。Figure 4 に変更前 (model 26) と変更後 (model 31) のトラッキング計算で得られた加速アクセプタンスの大きさを入射ビームの初期位相 (相対値) の関数として示す。x, y 方向は Fig. 5 に示すように入射ビームの水平、鉛直方向である。model 26 では 22 kW 入力でのディー #1 のピラーによってアクセプタンスが小さくなっているが (20 kW ではほぼゼロ)、model 31 では 70 ターン加速相当の 20 kW 入力でのアクセプタンスは十分に回復していることがわかる。元の加速ギャップは加速効率としてはよくないが、周回軌道の中心位置の変動 (R 方向のベータatron 振動による偏心) を小さくするためにギャップ方向を傾けていた。このため加速ギャップを変更した場合周回軌道が偏心するので、磁極端面のシム板[3] (内周側から 2 番目) の厚さを変えて 1st ハーモニック磁場を作ることによって偏心調整を行う必要がある。

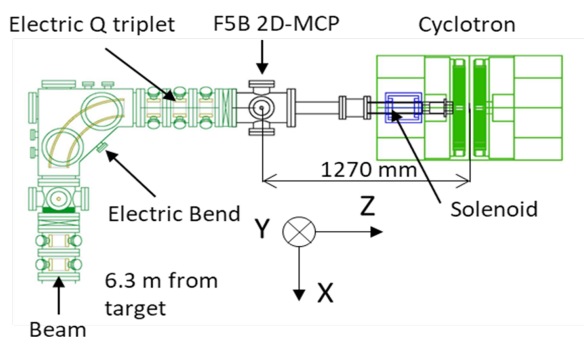


Figure 5: Arrangement of the injection beam line near the cyclotron.

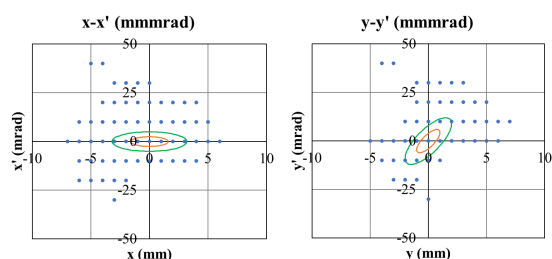


Figure 6: Acceleration acceptances at F5B (blue dots). The x and y directions are as indicated in Fig. 5. The orange and green ellipses indicate injection matched beam with sizes of 4π and 16π mm mrad (2σ).

Figure 5 にサイクロトロン上流の入射ビームラインの配置を、Fig. 6 にサイクロトロン入射点の上流 1.27m の位置 F5B での加速アクセプタンスの形状を示す。ビームの初期位相は Fig. 4 の 4 deg で位相幅をゼロとして計算したものである。アクセプタンスは $100\pi \text{ mm mrad}$ 以上であり、現状で得られている超低速ミュオンビームのエミッタンス (数 $10\pi \text{ mm mrad}$) より大きい。しかし、シングルターン取り出しを行ってミュオン顕微鏡として利用するためには、入射ビームを図のオレンジまたは緑の楕円 (それぞれ $4\pi \text{ mm mrad}(2\sigma)$ と $16\pi \text{ mm mrad}(2\sigma)$) 程度のエミッタンスにする必要がある。現状ではビームの一部を制限することになるが、新しい冷却方式による低エミッタンス化についてもその導入を検討している。

3. 加速中のビームパラメータの計算

ディー電圧不足に伴い中心領域を変更して周回数を 60 ターンから 71 ターンに増加させた場合について、加速中または取り出しビームへの影響を調べるためトラッキング計算を行った。結果として変更前とほとんど違いはなかったが、ここでは変更後の中心領域形状で、71 ターン取り出しを行った場合の計算結果について述べる。

3.1 計算方法

Figures 7, 8 に示す結果は F5B からトラッキング計算して求めたもので、ビームの初期条件は F5B において x、y 方向ともに Fig. 6 に示すオレンジの楕円 (1σ では $1\pi \text{ mm mrad}$) とした。初期位相は $\pm 4^\circ$ とするため、Fig. 4 の $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, (2.8^\circ(1\sigma))$ のトラッキング計算の結

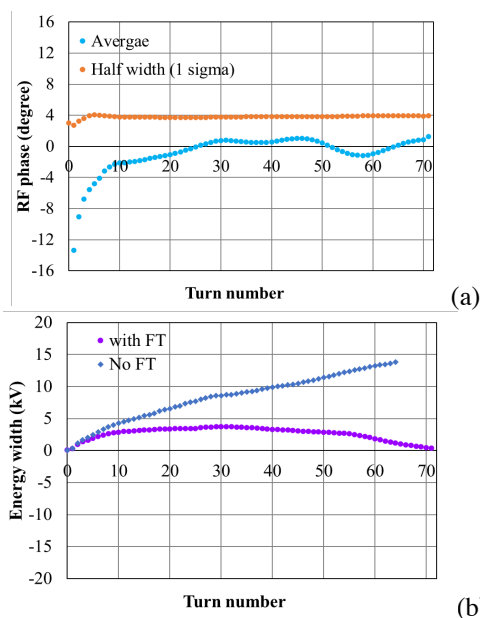


Figure 7: (a) The phase average and phase width (1σ) of beam bunch during acceleration. (b) Energy width (1σ) with and without compensation by FT resonator.

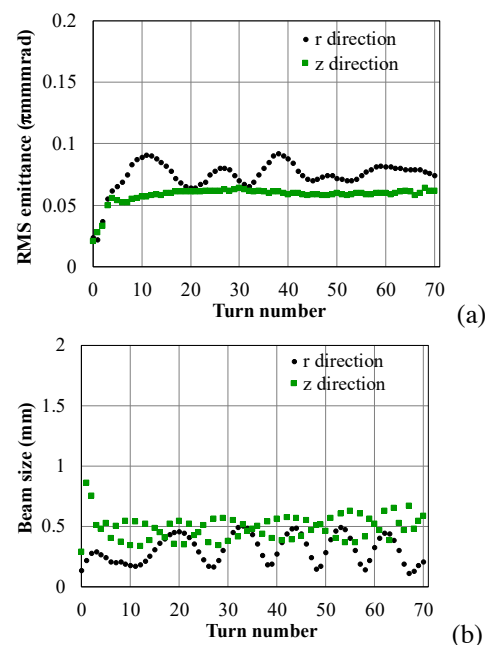


Figure 8: (a) Normalized RMS emittances during acceleration. (b) The change of the beam sizes (1σ) in radial and axial directions.

果を足し合わせた。横方向は、x 方向、y 方向の位相空間楕円を 26 分割してその代表点を初期条件としてトラッキング計算を行った。合計のトラック数は $26 \times 26 \times 5 = 3380$ である。x、y には相関はないとした。また、それぞれのトラックに対して初期ガウス分布に相当する重み付けを行って、各周回のビームパラメータを計算した。

3.2 計算結果

Figure 7(a)に加速中のバンチの平均位相と位相幅の変化を示す。入射から7-8ターンまでは平均位相が遅れる方向に変化していて磁場が低いことを示している。入射ビームの位相幅 $2.8^\circ (1\sigma)$ はインフレクターと最初の2-3ターンで $4^\circ (1\sigma)$ に増加していることがわかる。Figure 7(b)に加速中のエネルギー幅を示す。FT 共振器がない場合は位相幅と平均位相によってバンチ内で加速電圧が違うためエネルギー幅が増大していく。一方、FT 共振器を使用した場合、FT 共振器は中心部がアースされた $1/4$ 波長共振器であるため、加速前半ではエネルギー幅が増加するが、電圧と位相を調整することによって取り出し部においてエネルギー幅をかなり小さくできることがわかる。

Figure 8(a)に加速中の規格化した RMS エミッタンスの計算結果を示す。入射ビームはエネルギー 30 keV で $\beta = 0.024$ であるので、規格化エミッタンスは $0.024\pi \text{ mm mrad}$ で、最初の3ターンで2倍以上に増加していることがわかる。この原因は中心部の磁場が低いことが影響している可能性もあるが、磁場分布を変更する場合は中心領域の加速ギャップ位置を試行を繰り返して調整する必要があるため、中心領域の設計変更によってエミッタンス増加を抑制できるかはまだ調べられていない。R 方向のエミッタンスはエネルギー分散と分散関数に依存して変動するが、最外周ではエネルギー分散が小さくなっているため、エネルギー分散に依存する成分は小さいと考えられる。Figure 8(b)は R 方向と Z 方向のビームサイズを示す。R 方向のビームサイズはベータatron振動によって変化して取り出し部で小さくなっていることがわかる。

4. おわりに

本発表では述べてられていないが、サイクロトロンの上り上げのためにはたくさんのハードウェアの開発と整備が必要であった。具体的には自主開発の RF 源 (108 MHz , 20 kW) の整備、RFローレベル制御系、インフレクター電源 ($\pm 5 \text{ kV}$)、デフレクター電源 (-30 kV)、インターロックシステム、遠隔制御系の製作などである。これらは永谷がほぼすべてを行ったので別途発表されると思う。次の J-PARC MLF のビームタイムにおいてミュオンビームの入射と加速試験を実施することになるが、それまでに中心シールドの一部変更と F5B へのバンチャー [4] の設置を行う予定である。

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] 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", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 885-887.
- [3] J. Ohnishi *et al.*, "ミュオンサイクロトロン磁場測定結果の分析", Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, pp. 849-849.
- [4] J. Ohnishi *et al.*, "ミュオンサイクロトロン開発状況", Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 906-910.