

# J-PARCでのRFQによるミュオン加速に向けた準備状況と展望 CURRENT PREPARATION AND PROSPECTS OF THE MUON ACCELERATION TEST WITH RFQ IN J-PARC

北村遼<sup>\*A)</sup>、大谷将士<sup>B)</sup>、近藤恭弘<sup>C)</sup>、Bae Sunghan<sup>D)</sup>、Choi Seonho<sup>D)</sup>、深尾祥紀<sup>B)</sup>、二ツ川健太<sup>B)</sup>、長谷川和男<sup>C)</sup>、飯沼裕美<sup>E)</sup>、石田勝彦<sup>F)</sup>、河村成肇<sup>B)</sup>、Kim BongHo<sup>D)</sup>、三部勉<sup>B)</sup>、三宅康博<sup>B)</sup>、森下卓俊<sup>C)</sup>、Razuvaev Georgiy<sup>G)</sup>、齊藤直人<sup>H)</sup>、下村浩一郎<sup>B)</sup>、Strasser Patrick<sup>B)</sup>  
R. Kitamura<sup>\*A)</sup>、M. Otani<sup>B)</sup>、Y. Kondo<sup>C)</sup>、S. Bae<sup>D)</sup>、S. Choi<sup>D)</sup>、Y. Fukao<sup>B)</sup>、K. Futatsukawa<sup>B)</sup>、K. Hasegawa<sup>C)</sup>、H. Iinuma<sup>E)</sup>、K. Ishida<sup>F)</sup>、N. Kawamura<sup>B)</sup>、B. Kim<sup>D)</sup>、T. Mibe<sup>B)</sup>、Y. Miyake<sup>B)</sup>、T. Morishita<sup>C)</sup>、G. Razuvaev<sup>G)</sup>、N. Saito<sup>H)</sup>、K. Shimomura<sup>B)</sup>、P. Strasser<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup>University of Tokyo, <sup>B)</sup>KEK, <sup>C)</sup>JAEA, <sup>D)</sup>Seoul National University, <sup>E)</sup>Ibaraki University, <sup>F)</sup>RIKEN, <sup>G)</sup>BINP SB RAS, <sup>H)</sup>J-PARC Center

## Abstract

J-PARC E34 experiment aims to measure the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment at the same time precisely. The one of the key techniques is the muon linac to accelerate muons to 212 MeV. The world's first muon acceleration test with RFQ will be carried out at J-PARC MLF in this autumn. The low-energy muon source using the thin metal foil target and beam profile monitor for the low-energy muons were developed towards the RFQ acceleration test. While the setup of the RFQ test is being constructed, the operation test for whole components will be carried out in this summer.

## 1. イントロダクション

大強度陽子加速器施設 J-PARC で計画中の J-PARC E34 実験では、ミュオン異常磁気モーメント ( $(g-2)_\mu$ ) と電気双極子モーメント (EDM) の同時超高精度測定を実現するため、ミュオン線形加速器 (ミュオンリニアック) の開発を進めている [1]。このミュオンリニアックでは、ビーム広がりに対する実験からの要求  $\Delta p_t/p < 10^{-5}$  を満たすため、運動エネルギーで 25 meV の超低速ミュオンを 212 MeV まで加速することにより規格化横エミッタンス  $1.5\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  程度の低エミッタンスミュオンビームを達成する [2]。

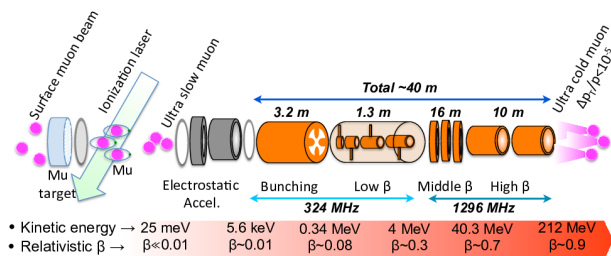


Figure 1: Overview of the muon LINAC.

Figure 1 にミュオンリニアックの構成を示す。J-PARC の大強度陽子ビームからパイオンの崩壊を経て得られる運動エネルギー 4 MeV の表面ミュオンビームをミュオニウム ( $\text{Mu}^+e^-$ ) 生成標的で停止させて  $\text{Mu}^+$  を生成する [3]。この  $\text{Mu}^+$  をレーザーにより室温でイオン解離することにより、25 meV まで冷却された超低速正ミュオン (USM) が得られる。USM は静電加速収束器 (SOA レンズ) によって 5.6 keV まで加速された後、

\*rkita@post.kek.jp

RFQ (Radio-Frequency Quadrupole linac) へと入射され、加速されつつ縦方向へバンチングされる。ミュオンの質量は約  $105.6 \text{ MeV}/c^2$  で電子と陽子の中間程度のため、 $\beta$  は電子リニアックに比べて緩やかに 1 へと近づく。そのためミュオンリニアックでは  $\beta$  によって最適な加速空洞を選択して、高効率の加速を実現する。RFQ の後段には Interdigital-H mode DTL (Low  $\beta$ )、Disk And Washer CCL (Middle  $\beta$ )、Disc Loaded structure (High  $\beta$ ) の順で各  $\beta$  領域毎に加速空洞を選択して、設計を進めている [4, 5, 6]。

この世界初となるミュオンリニアック実現を目指して、RFQ を用いたミュオン RF 加速実証試験を 2017 年秋に J-PARC MLF (Material and Life science Facility) のミュオンテストビームラインにて実施予定である。我々はこのミュオン加速試験に向けて、加速試験用低速ミュオン源の開発と低速ミュオンビーム専用ビームプロファイルモニター (BPM) の開発を進めてきた。本講演ではこれまでのミュオン加速試験に向けた開発の準備状況と来る加速試験への展望を述べる。

## 2. RFQ 試験用低速ミュオン源の開発

加速試験に用いる RFQ は J-PARC の陽子リニアック用に設計されたプロトタイプの RFQ を使用する予定である [7]。RFQ による加速試験を行うためには RFQ の入射エネルギー 5.6 keV 以下の低速ミュオンを必要とする。一方 USM を得るためには  $\text{Mu}^+$  のイオン解離用レーザーなど大型の装置が別途必要となるため、加速実証試験では取り扱いの容易な低速ミュオン源が望ましい。そこで我々はミュオンビームを金属薄膜に照射することで得られる負ミュオニウム ( $\text{Mu}^-: \mu^+e^-e^-$ ) に着目して、これを疑似 USM として利用することにした [8]。 $\text{Mu}^-$  の平均エネルギーは 0.1 keV 程度であるため、RFQ の入射エネルギー 5.6 keV 以下という要求を

満たす。

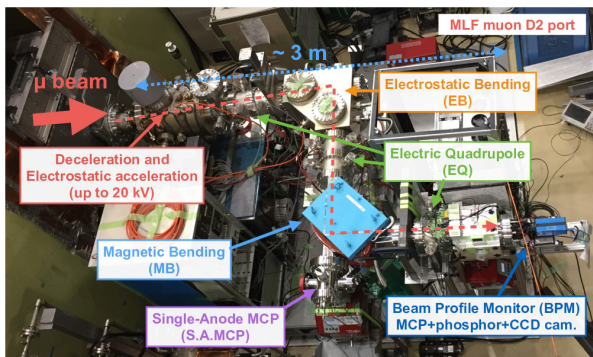


Figure 2: Setup of the slow muon production by the thin metal foil.

我々はRFQ加速試験の予備実験として、 $\text{Mu}^-$ 生成及び静電加速収束器の実証試験をJ-PARC MLFのミュオンテストビームライン(Dライン)にて実施した[9]。Figure 2に実験セットアップを示す。ミュオンビームを金属薄膜標的に照射することで $\text{Mu}^-$ が生成される。標的の下流に生成した $\text{Mu}^-$ は静電レンズ(SOAレンズ)によって加速と収束を同時に行いつつ、下流の輸送ビームラインへと引き出される。輸送ビームラインは複数の収束用静電四重極と静電偏向器、偏向電磁石から構成されている。SOAレンズ及び輸送ビームラインを構成する静電四重極と静電偏向器は英国ラザフォードアップルトン研究所内理研RAL支所で使用実績のある機器を利用している。SOAレンズと静電偏向器、偏向電磁石に印可する極性と電流を調整することで任意の極性、運動エネルギーを持つ粒子を後段に設置した検出器まで輸送可能である。SOAレンズには最大で20 kVまでの電圧を印可可能であり、電圧極性を正負それぞれ任意に選択することで、20 keVまで加速した減速 $\mu^+$ 及び $\text{Mu}^-$ を引き出すことが可能である。検出器には低エネルギー粒子観測に適したマイクロチャンネルプレート(MCP)を用いて、Time-Of-Flight (TOF)を測定することによりミュオンを同定した。

Figure 3に観測したTOF分布を示す。赤と青の点はSOAレンズと輸送ビームラインの極性を正極性及び負極性とした場合である。ヒストグラムはビームオフの場合及びBPM上流に設置した偏向電磁石をオフにした場合のデータに、シミュレーションで生成したシグナル分布を上乗せしている。図中の左にあるピークは、プロンプト陽電子によるものである。Figure 3よりシミュレーションで予想された時間領域にミュオン由来のピークが観測されていることがわかる。これより $\text{Mu}^-$ の生成とRFQの入射エネルギー5.6 keVまでの加速が可能であることを確認した。

### 3. 低速ミュオンのビームプロファイル測定

加速試験に用いるRFQではミュオン100 keV程度まで加速できるが、加速後のビームも低エネルギーか

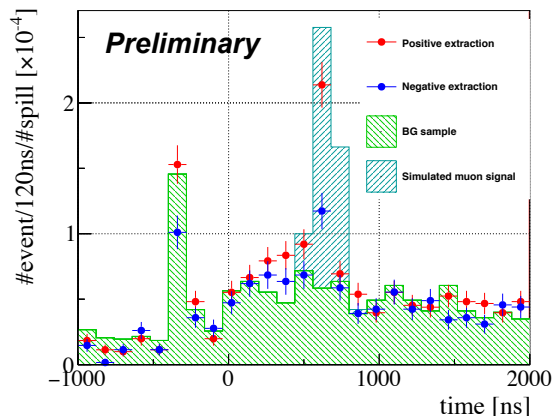


Figure 3: Time-Of-Flight distribution at BPM.

つ粒子数が少ないため、ビームプロファイル測定には専用のBPMが必要となる。我々はMCPをベースにした低速ミュオン専用のBPMを開発し、低速ミュオンビームのプロファイル測定試験を実施した。

Figure 4に低速ミュオンビーム用BPMの概略を示す。BPMに入射した低速ミュオンの信号はMCPにより増幅され、MCP背後に設置された蛍光板で光子へと変換される。光子の分布は最後段に設置されたCCDカメラにより2次元データとして撮像、処理される。

開発したBPMは低速ミュオン源用ビームラインに設置して、動作試験を行った。このテストではUV光源から生成した水素分子イオンを用い、イオンビームのプロファイルをBPMで測定した。静電四重極の収束電圧の調整して、Figure 5に示すようにBPMの有効半径内( $\phi 40$ )にビームが収束できるよう光学系を構築した。

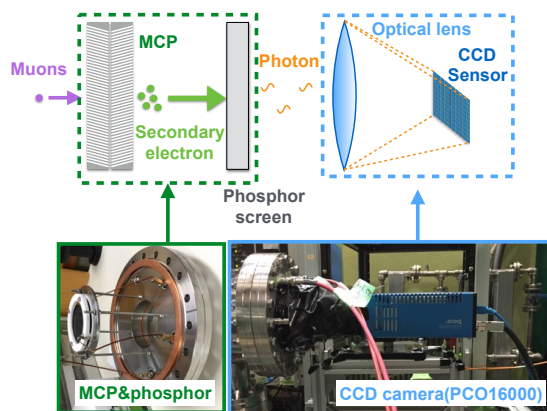


Figure 4: Schematic view of the beam profile monitor for the low-energy muons.

ビームタイムの都合上、よりビーム強度が得られる減速 $\mu^+$ を低速ミュオン源として用いて、BPMによる低速ミュオンのビームプロファイル測定を実施した。Figure 6に減速 $\mu^+$ のビームプロファイルを示す。開発したBPMにより低速ミュオンのビームプロファイルが測定可能であることを確認した。

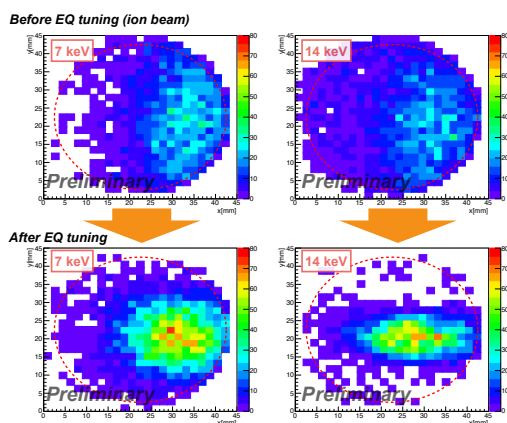


Figure 5: Beam profiles of ion beam at the calibration run for the alignment of the transport beam line.

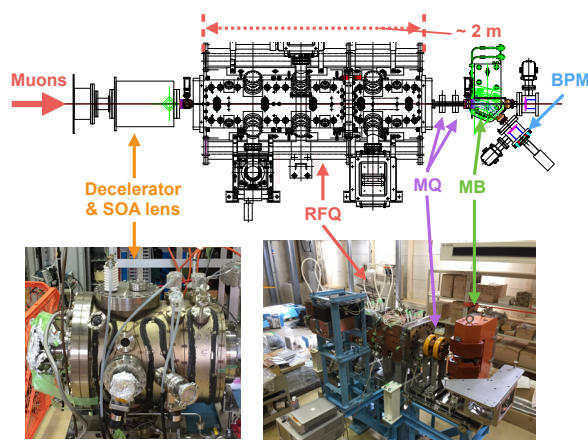


Figure 7: Experimental setup for the RFQ acceleration test.

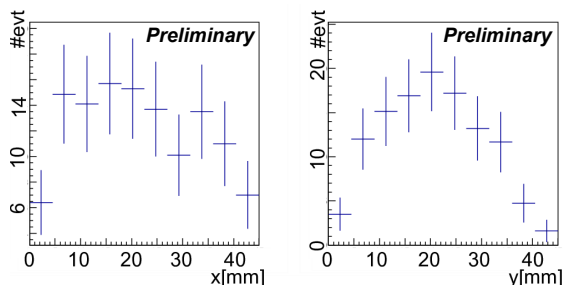


Figure 6: Beam profile of the decelerated positive muons.

予備試験で得られた低速ミューオン源のビームパラメータについては、得られたデータの詳細な解析とシミュレーションによる比較作業を進めている。

#### 4. 加速試験に向けた準備状況

2017年秋にJ-PARC MLFのミューオンテストビームラインにて予定されているミューオン加速実証試験に向けて、RFQを含めた実験セットアップの構築を進めている。Figure 7に実験セットアップの概略を示す。金属薄膜標的に照射されたミューオンビームは $\text{Mu}^-$ を生成し、SOAレンズにより5.6 keVまで加速収束されてRFQへと入射する。ミューオンはRFQにより100 keV程度まで加速されたのち、RFQ直後に設置された診断ビームラインにより検出器まで輸送される。診断ビームラインは2つの四重極電磁石とセクター型偏向電磁石から構成されており、四重極電磁石はKEKB、セクター型偏向電磁石はJ-PARCリニアックMEBTにてそれぞれ使用実績がある機器を利用している。ビームは開発したBPMまで輸送され、TOF測定およびビームプロファイルの測定が可能である。

Figure 8に予想される加速ミューオンの位相空間分布を示す。XY分布における点線赤丸はBPMの有効径を示す。Figure 8は最もY収束の強い条件で、この条件下においてもBPMでのビームプロファイルをほぼカバーして測定できることがわかる。ミューオンを加速する

ために必要なパワーは2 kW程度を見込んでいる。また加速したビームは診断ビームラインに設置した四重極電磁石とBPMからのプロファイル情報によりQスキャン法を用いてエミッタンスの測定を行う予定である [10]。

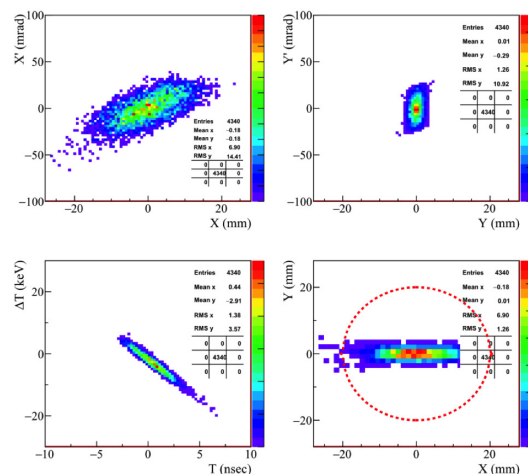
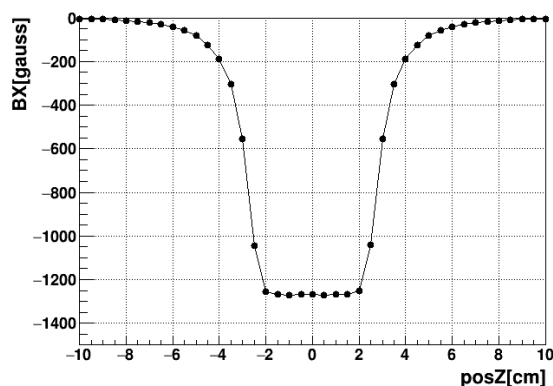


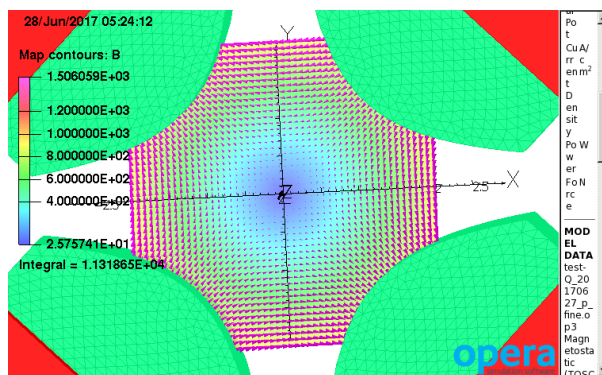
Figure 8: Beam phase space distributions at BPM in RFQ test.

RFQへの大電力カップラーの接続及び診断ビームラインの建設は2017年7月に完了した。半導体RFアンプによるRFQへのパワー印可試験は2017年8月頃に実施予定である。四重極電磁石の磁場評価に向けて、磁場プローブによる測定とFigure 9に示すような磁場マップシミュレーションの構築も並行して進めている。診断ビームラインの真空機器組み立て作業は8月中には完了する見込みで、真空系の立ち上げ後、キャリブレーションランによりビーム光学系のテストを実施する予定である。





(a) Simulated magnetic field distribution by OPERA.



(b) Schematic view of MQ by OPERA.

Figure 9: Magnetic field simulation of Magnetic Quadrupole (MQ) in the diagnostic beam for RFQ test.

## 5. まとめ

世界初となるミュオン RF 加速試験実証に向けて、加速試験用低速ミュオン源の開発と RFQ への入射部である静電加速器の動作試験、及び低速ミュオン専用 BPM の開発とビームプロファイル測定試験を完了した。2017 年秋の加速試験に向けて、本格的なセットアップの構築と入射させる低速ミュオンビームパラメータの詳細解析を進めている。セットアップ完成後にはキャリブレーションランを実施して、診断ビームラインの光学系調整を行う予定である。

## 謝辞

本研究を実施するに際し、理化学研究所岩崎先端中間子研究室及び J-PARC リニアックグループには多大なご協力を頂きました。本研究は日本学術振興会科学研究費 JP15H03666、JP16H03987、J15H05742、JP16J07784 の助成を受けております。本研究は J-PARC MLF の以下の課題番号 (Proposal No. 2016A0067 and 2016B0214) にて実施されました。

## 参考文献

- [1] M. Aoki *et al.*, Conceptual Design Report for The Measurement of the Muon Anomalous Magnetic Moment  $g-2$  and Electric Dipole Moment at J-PARC (2011).
- [2] Y. Kondo *et al.*, Proceedings of 13th Annual Meeting of PASJ, Chiba, Japan, 2016, pp. 66–69.
- [3] G.A. Beer *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., **091** C01 (2014).
- [4] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19** 040101 (2016).
- [5] M. Otani *et al.*, Proceedings of 12th Annual Meeting of PASJ, Tsugaru Japan, 2015, pp. 56–61.
- [6] Y. Kondo *et al.*, Proc. of IPAC2017, TUPVA094.
- [7] Y. Kondo *et al.*, “Fabrication and low-power measurements of the J-PARC 50-mA RFQ prototype”, Proceedings of LINAC2006, Knoxville, Tennessee USA, (2006), pp. 749–751.
- [8] Y. Kuang *et al.*, Phys. Rev. A, **39**, 6109 (1989).
- [9] R. Kitamura *et al.*, Proc. of IPAC2017, TUPVA097.
- [10] H. Wiedemann, “Particle Accelerator Physics”, Springer, 3rd Edition (2007).