

ミュオン $g-2$ /EDM 実験のための RFQ を用いたミュオン初期加速の現状 CURRENT STATUS OF THE MUON INITIAL ACCELERATION WITH RFQ FOR MUON G-2/EDM EXPERIMENT

北村遼^{*A)}、大谷将士^{B)}、深尾祥紀^{B)}、河村成肇^{B)}、三部勉^{B)}、三宅康博^{B)}、下村浩一郎^{B)}、近藤恭弘^{C)}、
長谷川和男^{C)}、石田勝彦^{D)}、Kim BongHo^{E)}、半澤光平^{F)}、齋藤直人^{G)}

R. Kitamura^{*A)}, M. Otani^{B)}, Y. Fukao^{B)}, N Kawamura^{B)}, T. Mibe^{B)}, Y. Miyake^{B)}, K. Shimomura^{B)}, Y. Kondo^{C)},
K. Hasegawa^{C)}, K. Ishida^{D)}, B. Kim^{E)}, K. Hanzawa^{F)}, N. Saito^{G)}

^{A)}University of Tokyo, ^{B)}KEK, ^{C)}JAEA, ^{D)}RIKEN, ^{E)}Seoul National University, ^{F)}Sokendai, ^{G)}J-PARC Center

Abstract

The muon linear accelerator for the muon $g-2$ /EDM experiment in J-PARC is being developed. As the first step of the muon acceleration, the muon acceleration with J-PARC RFQ(Radio-Frequency Quadrupole)-II plans to be demonstrated at H-line of J-PARC MLF. The slow muon will be obtained by the deceleration using the thin metal foil target in the RFQ acceleration test. The intensity of the decelerated muon by the thin metal foil was measured and it was $(3.3 \pm 0.4) \times 10^{-2}$ /sec. Based on this result, the beam intensity in the RFQ test at H-line is estimated to be a few /sec. The particle simulation of the RFQ and the following beam diagnostics system is conducted, and it is shown that the emittance measurement at the RFQ exit using the micro-channel plate based beam profile monitor is feasible. RFQ itself is ready and the beam profile detector for the emittance measurement has also been developed. All of the preparations for the initial acceleration test using the RFQ were almost done.

1. イントロダクション

ミュオンの異常磁気モーメント ($g-2$) は素粒子標準模型に基づき精密な理論計算ができ、かつ高精度で測定されているために実験と理論の双方が高精度で比較可能な物理量の一つである。ミュオン $g-2$ を現在の世界最高精度で測定した米国ブルックヘブン国立研究所の E821 実験の結果 [1] は、標準模型に基づく予想と約 3.3σ の乖離を示しており、このずれが標準模型を超えた新物理の兆候を表していると考えられている。

我々が大強度陽子加速器施設 J-PARC で計画しているミュオン $g-2$ /EDM 精密測定実験 (E34 実験)[2] では、先行実験とは全く独立なかつユニークな手法を用いることで $g-2$ の精密測定を目指している。実験の中核技術の一つがミュオン線形加速器である。ミュオン線形加速器実現に向けた一連の開発のうち、2 節ではミュオン線形加速器とミュオン加速試験の概要について説明する。3 節では加速器試験用低速ミュオン源の開発と加速器の最初段に位置する静電加速器の準備状況について報告する。ミュオン加速試験で用いる低速ミュオン源には、後述するように迅速性を考慮して、本実験で用いるミュオンニウム-イオン解離レーザー法 [3] に代えて、金属薄膜による低速ミュオン生成法を利用する。さらに 4 節ではミュオン線形加速器の初段 RF 加速器である RFQ(Radio-Frequency Quadrupole) の試験に向けたシミュレーション結果について述べ、5 節にてまとめている。

2. ミュオン加速器の開発状況

2.1 ミュオン線形加速器

E34 実験ではミュオン $g-2$ の高精度測定を実現するために、 $\Delta p_t/p \sim 10^{-5}$ と非常に指向性の高いビームが要求される。J-PARC で供給されるミュオンビームは陽子からパイオンを経由して三次ビームとして取り出されるため、エミッタンスが $1000 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 程度と非常に大きい。そこでミュオンを一旦冷却した後、加速することで、ビームの指向性を向上する。ミュオンは寿命 $2.2 \mu\text{s}$ で崩壊するため、加速器は速やかに加速可能な線形加速器が望ましい。

Figure 1 に E34 実験のミュオン線形加速器の概要を示す。J-PARC の大強度陽子ビームによって生成された運動エネルギー 4 MeV の表面ミュオンビームは、ミュオンニウム生成標的及びイオン解離レーザーによる冷却で 25 meV 程度まで減速され、超低速ミュオンとなる。超低速ミュオンは静電加速器で引き出された後、RFQ、Interdigital H-mode Drift-Tube Linac(IH-DTL) [4]、Disc And Washer Coupled Cavity Linac(DAW CCL)、Disc Loaded Structure(DLC) の各加速空洞により、最終的に 212 MeV まで加速される。ミュオン線形加速器全体の設計とビームシミュレーション、IH-DTL 設計の詳細については、本学会の別の発表 [5][6] にて詳しく説明されている。

2.2 ミュオン加速試験

高指向性のミュオンビームを実現するためには、各加速段階でのビームエミッタンス増大を最小化することが重要となる。またミュオンの RF 加速は世界初の試みであり、早期の実証試験が急務である。

このミュオン線形加速器実現の第一段階として、我々は静電加速器及び RFQ によるミュオン加速試験を計画している。Figure 2 に加速試験の概念図を示

*rkita@post.kek.jp

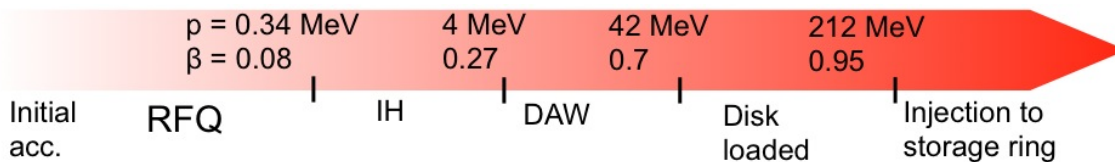


Figure 1: An outline of the muon linac.

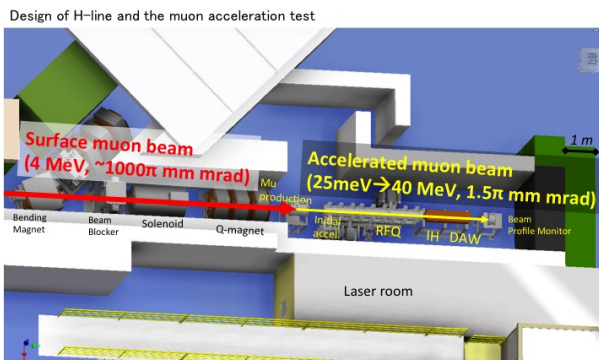


Figure 2: The brief setup of the muon acceleration test.

す。低速ミュオンを引き出す静電加速器には、加速と収束を同時に行うことができる SOA レンズを使用する。この SOA レンズはかつて英国ラザフォードアップルトン研究所で行われた超低速ミュオン実験 [7] の SOA レンズを転用し、既に後述の加速器試験用低速ミュオン源実験において、運転可能であることを実証している。また RFQ は J-PARC リニアックの RFQ 予備機である RFQ-II [8] を利用する予定であり、オフラインでのパワー試験とバックグラウンド試験を実施済 [9] である。

3. 加速試験用低速ミュオン源開発

3.1 加速試験用低速ミュオン源開発の必要性

E34 実験ではミュオニウム-イオン解離レーザーを組み合わせた冷却方法により、高効率で超低速ミュオン生成を実現する。ただしこの手法は原理的には既に確立しているものの、レーザーの設備が大規模かつ複雑化するため、迅速性に欠ける。そこで我々は金属薄膜による減速を利用した低速ミュオン生成方法 [10] に注目した。この方法では、表面ミュオンビームを金属薄膜標的に照射して減速させることで、運動エネルギー 1 keV 未満の低速ミュオン (μ^+ 又は $\text{Mu}^-: \mu^+$ と e^- 2 つの束縛状態) を得ることができる。低速ミュオンの生成効率は上記のレーザーを用いる方法に比べて大きく下がるものの、装置が大幅に低コスト化及び簡略化できるため、R&D の迅速性において非常に優れている。E34 実験ではイオン解離レーザーの整備と加速器開発を同時並行することで、速やかな実験開始を目指している。

3.2 金属薄膜による低速ミュオン生成実験

加速器試験を行う上で、金属薄膜法によりどの程度の強度の低速ミュオンが得られるのかを、実際の

ミュオンビームを用いて測定した [11]。低速ミュオンの取り出しに用いる SOA レンズは RFQ 加速試験でも使用可能であり、レンズ下流に RFQ を接続することで加速試験を実施することができる。この低速ミュオン生成実験は MLF D2 ポートで実施し、24 時間のビーム試験を行った。

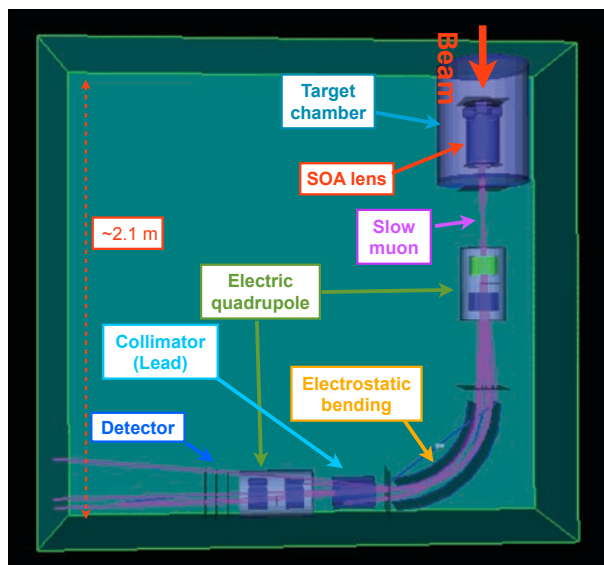


Figure 3: The schematic view of the setup for the production of the slow positive muon.

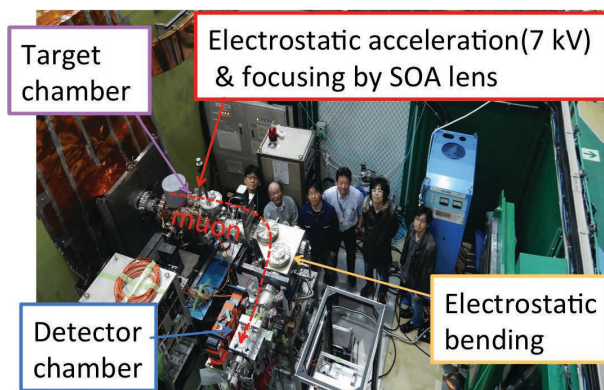


Figure 4: The experimental setup for the production of the slow positive muon.

Figure 3, 4 に実験のセットアップを示す。今回の実験では運動量 25 MeV/c のミュオンビームをアルミ薄膜標的に照射した。入射したミュオンは減速されて低エネルギーの μ^+ として放出される。この低

速 μ^+ を SOA レンズにより 7 keV まで加速したのち、静電偏向器でエネルギー選別した上で検出器まで輸送して、粒子の TOF とビーム強度を測定した。低速ミュオンのエネルギー領域では通常のシンチレータでは感度が足りないため、低エネルギー粒子に対する感度が高く、時間応答が速いという特徴を持つマイクロチャンネルプレート (MCP)[12] により低速ミュオンを直接測定した。また MCP を設置した真空チャンバーの周囲に板状のプラスチックシンチレータと波長変換ファイバー、MPPC からなる崩壊陽電子検出器 [13] を左右上面と 3 面 2 層、合計 6 台設置して、崩壊陽電子をタグすることで低速ミュオンを同定した。

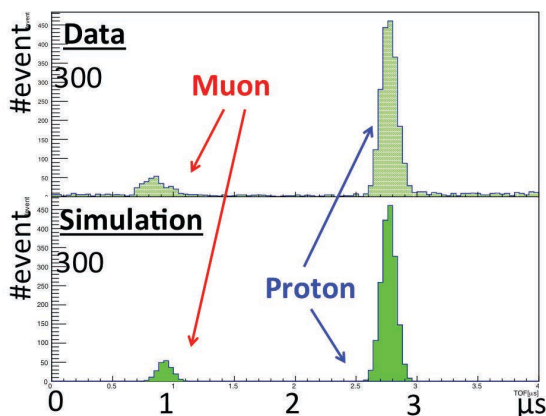


Figure 5: Measured TOF distribution showed the peak of the slow position muon. The peak position of the slow muon in the data was consistent with the simulation.

Figure 5 に TOF の測定結果を示す。MCP に入射した主たるバックグラウンドは崩壊陽電子によるものであり、寿命 $2.2 \mu\text{s}$ の exponential でバックグラウンドをフィットして、実データから差し引くことで低速ミュオンの強度を算出した。測定した低速 μ^+ の TOF はシミュレーションによる予想結果と一致しており、検出器で測定したビーム強度は $(3.3 \pm 0.4) \times 10^{-2} / \text{sec}$ であった [14]。測定結果及びシミュレーションによる評価から、低速 μ^+ のビーム強度は入射ビームの標的照射効率、低速ミュオン輸送用ビームラインの輸送効率と装置全体のエネルギーアクセプタンスに依存していた。これらビームロス因子の寄与を勘案して低速 μ^+ の転換効率を評価した結果、今回 J-PARC で測定した転換効率は先行実験の結果と概ね合致した。

4. RFQ 加速試験シミュレーション

4.1 RFQ 加速試験時の入射低速ミュオン強度評価

ビーム試験で得られた低速 μ^+ 生成効率の評価結果を元に、RFQ 加速試験時における RFQ 入射部での低速ミュオンのビーム強度をシミュレーションで評価した。加速試験は現在建設中の MLF H ラインのミュオンビームを使用する予定であり、1 MW 運転時を仮定して評価を行った。シミュレーションから予想される入射ビーム強度は数 /sec であり、金属薄

膜法でも RFQ の加速試験を行うことが可能であることを実測データに基づき確認することができた。

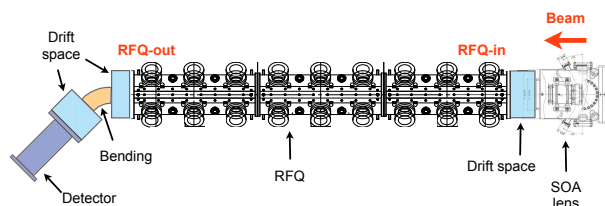


Figure 6: The setup for the simulation of the RFQ acceleration test.

4.2 RFQ による加速前後のビームプロファイルシミュレーション

Figure 6 に RFQ によるミュオン加速試験のセットアップを示す。RFQ 加速試験において、金属薄膜で生成された低速ミュオンは SOA レンズにより RFQ 入射エネルギーである 5.6 keV まで加速された後、RFQ に入射される。RFQ に入射したミュオンは 340 keV まで加速され、その後 RFQ 出射部に設置したセクター形電磁石により偏向して検出器に入る。検出器は MCP と蛍光板、CCD カメラから構成される 2 次元ビームプロファイルモニター (BPM) である。この電磁石と BPM を組み合わせることで、バックグラウンドとなる陽電子を除去した上でビームプロファイル及びエネルギー測定ができる。ビームのエミッタンスは BPM の位置を z 軸方向に前後させてビームプロファイルを 3 点以上で測定することにより算出することが可能である。

Figure 7, 8 に、シミュレーションによる RFQ 入射部と出射部でのビームの位相空間分布を示す [15]。RFQ 入射部でのビームは大きなエミッタンスを持っているが、RFQ の aperture でコリメートされるため、出射部では RFQ の aperture 半径程度のビームとして出射する。BPM でビーム径の測定を行うにはビーム径が BPM の大きさ (半径 21 mm の円形) より小さい領域に入る必要がある。そのため RFQ を出たビームは数十 cm ドリフトさせてビーム径を調整した後、曲率半径 263 mm、偏向角度 45° のセクター形電磁石で偏向させてから、BPM へと入射する。

Figure 9 に BPM を z 軸方向に移動して測定した場合の、各点における x 方向の射影ビームプロファイル分布を示す [16][17]。BPM は数百 μm 程度の位置分解能を有するため、BPM を $\pm 10 \text{ cm}$ 程度ずらして 3 点以上でビームプロファイルを測定すれば、ビームエミッタンスを測定することが可能であることがわかる。

5. まとめ

J-PARC E34 実験では、指向性の高いミュオンビームにより先行実験とは異なる新手法でのミュオン g-2/EDM 精密測定を目指して、実験の中核技術であるミュオン線形加速器の開発を進めている。世界初のミュオン RF 加速実証に向けて、初段の RFQ を用いたミュオン加速試験に向けた準備を進めている。実験に必要な低速ミュオン源と、RFQ に入射

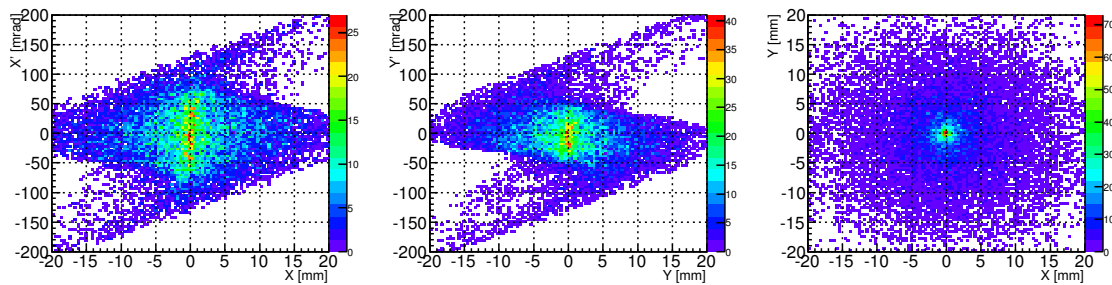


Figure 7: Simulated phase space distribution at the RFQ input using the slow positive muon source.

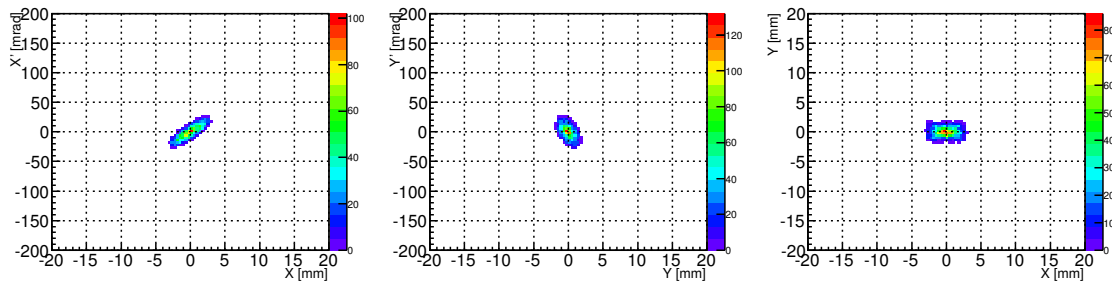


Figure 8: Simulated phase space distribution at the RFQ output using the slow positive muon source.

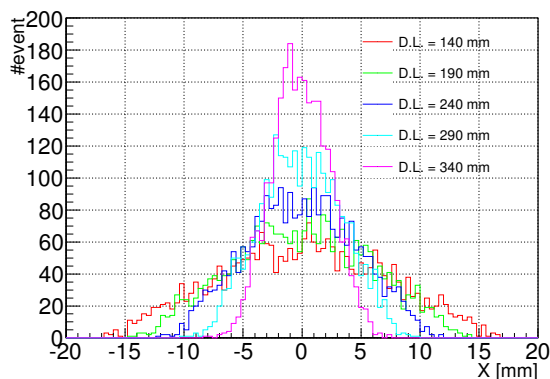


Figure 9: Simulated beam profile for the x direction(horizontal) at the BPM location.

するための静電加速器については実際にミュオンビームを用いたビーム試験での動作確認を完了した。低速ミュオン実験の結果とシミュレーションから、RFQ 試験では RFQ 入射段階で数 /sec 程度のミュオンビーム強度が得られると評価できた。RFQ 自体の準備も既に整っており、BPM で予想されるビームプロファイルもシミュレーションにより評価済である。BPM も開発が完了しており、加速試験に向けた全てのコンポーネントの最終準備を鋭意進めている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15H03666、JP16H03987、J15H05742、JP16J07784 の助成を受けたものです。また本研究を遂行するに当り、理化学研究所岩崎先端

中間子研究室ミュオングループ、MLF ミュオン科学系グループ及び J-PARC LINAC グループの方々から多大なご助力を頂きました。この場をお借りして改めて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] G.W. Bennett *et al.*, Phys. Rev.D **73** (2006) 072003.
- [2] J-PARC E34 conceptual design report(2011, unpublished).
- [3] G.A. Beer *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., **091** (2014) C01.
- [4] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19** (2016) 040101.
- [5] M. Otani *et al.*, Proceedings of PASJ2016, 2016.
- [6] Y. Kondo *et al.*, Proceedings of PASJ2016, 2016.
- [7] P. Bakule *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B **266** (2008) 335-346.
- [8] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **16** (040102) (2013) 040102.
- [9] M. Otani *et al.*, The JPS 2015 Autumn Meeting, 2015, 25aSG6 (2015).
- [10] Y. Kuang *et al.*, Phys. Rev. A, **39**, 6109 (1989).
- [11] R. Kitamura, RIKEN Accelerator Progress Report 2015 (2015).
- [12] R. Kitamura *et al.*, The JPS 2015 Annual Meeting, 21aDF8 (2015).
- [13] R. Kitamura *et al.*, The JPS 2015 Autumn Meeting, 25aSG7 (2015).
- [14] R. Kitamura *et al.*, The JPS 2016 Annual Meeting, 19aAH1 (2016).
- [15] K. R. Crandall *et al.* RFQ design codes, LA-UR-96-1836 Revised December 7, 2005, Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [16] J. H. Billen *et al.* Parmila, LA-UR-98-4478 Revised July 26, 2005, Los Alamos National Laboratory, 1998.
- [17] K. R. Crandall, D. P. Rusthoi, "Trace 3-D Documentation", Tech. rep., LA-UR-97-886 (1997).