

負ミューオニウムを用いたミューオン RF 加速実証試験 DEMONSTRATION OF THE MUON RF ACCELERATION WITH THE NEGATIVE MUONIUM

北村遼^{A)}、大谷将士^{*B)}、深尾 祥紀^{B)}、二ツ川 健太^{B)}、河村 成肇^{B)}、三部 勉^{B)}、三宅 康博^{B)}、
山崎 高幸^{B)}、近藤 恭弘^{C)}、長谷川 和男^{C)}、森下 卓俊^{C)}、Bae Sunghan^{D)}、Choi Seonho^{D)}、
Kim Bongho^{D)}、Razuvaev Gosha^{E)}、飯沼 裕美^{F)}、中沢 雄河^{F)}、石田 勝彦^{G)}、齊藤 直人^{H)}、
飯島 徹^{I)}、須江 祐貴^{I)}

Ryo Kitamura^{A)}、Masashi Otani^{*B)}、Yoshinori Fukao^{B)}、Kenta Futatsukawa^{B)}、Naritoshi Kawamura^{B)}、
Tsutomu Mibe^{B)}、Yasuhiro Miyake^{B)}、Takayuki Yamazaki^{B)}、Yasuhiro Kondo^{C)}、Kazuo Hasegawa^{C)}、
Takatoshi Morishita^{C)}、Sunghan Bae^{D)}、Seonho Choi^{D)}、Bongho Kim^{D)}、Gosha Razuvaev^{E)}、Hiromi Iinuma^{F)}、
Yuuga Nakazawa^{F)}、Katsuhiko Ishida^{G)}、Naohito Saito^{H)}、Toru Iijima^{I)}、Yuuki Sue^{I)}

^{A)}University of Tokyo, ^{B)}KEK, ^{C)}JAEA, ^{D)}SNU, ^{E)}BINP, ^{F)}Ibaraki University,

^{G)}RIKEN, ^{H)}J-PARC Center, ^{I)}Nagoya University

Abstract

Muons have been accelerated by using a radio-frequency (RF) accelerator for the first time. Negative muonium ions (Mu^- , $\mu^+e^-e^-$) are generated from μ^+ injected to a thin aluminum foil. The generated Mu^- 's are extracted with electrostatic field and injected to a radio-frequency quadrupole linac (RFQ). In the RFQ, the Mu^- 's are accelerated to 89 keV. Then the accelerated Mu^- 's are transported to the micro-channel plate (MCP) detector via a quadrupole magnet pair and a bending magnet. The accelerated Mu^- 's are identified with measurements of momentum and time of flight. This work paves the way for a compact muon linac that would enable precision measurements of the muon anomalous magnetic moment and the electric dipole moment. This result also offers new muon-accelerator applications such as transmission muon microscope for use in material and life-sciences research.

1. はじめに

高周波加速器は多岐に渡る粒子種を加速することで、多様な科学の発展に貢献してきた。今回、我々は新しい種類の粒子を加速することに成功した。その粒子ミューオンは第二世代荷電レプトンに属する素粒子である。ニュートリノファクトリーやミューオンコライダー計画などの素粒子研究におけるポテンシャルから、ミューオン加速はこれまで幾度となく議論されてきた。さらに近年では透過型ミューオン顕微鏡など物質構造研究でも議論が活発になっている。しかし、加速器で人工的に生成されるミューオンビームはエミッタンスが大きいために、ミューオン加速を実証した例はこれまでになかった。

今回、我々は負ミューオニウム (Mu^- , $\mu^+e^-e^-$) 生成によるミューオン冷却手法と高周波四重極加速器 (RFQ) を用いたミューオン加速の実証に成功した。

このミューオン加速実証試験は、茨城県大強度陽子加速器施設 J-PARC で計画されているミューオン異常磁気能率精密測定実験 (E34) のための研究開発の一環として行われた。E34 実験では従来型の表面ミューオンビームを中性ミューオニウム生成及びレーザーイオン化によって 25 meV まで冷却し [1]、静電場取り出しで RFQ など 4 種類の加速空洞からなる線型加速器に入射して 212 MeV まで加速した後実験を行う [2]。加速により得られる低エミッタンスミュー

オンビームを用いることで先行実験 [3] で問題となっていた主要な系統誤差を悉く排除することが可能になり、素粒子標準模型の計算値と先行実験による実測値とのズレを異なるシステムで高精度検証することができる。

これまでの加速器学会においてミューオン線型加速器の設計状況および本加速試験の準備状況を報告してきた [4-6]。本稿では、2017 年 10 月に行ったミューオン加速試験 [7] について報告する。

本稿の構成は以下の通りである。加速試験セットアップ及びシミュレーションについて、それぞれ 2. 章、3. 章で説明する。続いて 4. 章で実験準備について記述した後、5. 章で実験結果を報告し、最後にまとめと展望について述べる (6. 章)。

2. セットアップ

図 1 に、ミューオン加速試験のセットアップを示す。試験は J-PARC MLF 試験ミューオンビームライン (MUSE D2 エリア) で行った。ビームラインから供給される約 3 MeV の正ミューオン (μ^+) を金属薄膜 (アルミ) に入射することで、主として 1 keV 以下の運動エネルギーを持つ Mu^- を生成する。生成した Mu^- を静電加速器によって RFQ の入射エネルギーである 5.6 keV まで加速した後、RFQ で 89 keV まで加速する。RFQ で加速した後は 4 極電磁石 2 台と偏向電磁石からなる診断ビームラインによって検出器まで輸送する。金属薄膜横に設置したシンチレータ一検出器によるミューオンビームの金属薄膜到達時

* masashio@post.kek.jp

刻の測定と、マイクロチャンネルプレート (MCP) 検出器による加速後の検出器到達時刻の測定の二つから飛行時間を算出し、加速 Mu^- の同定を行う。

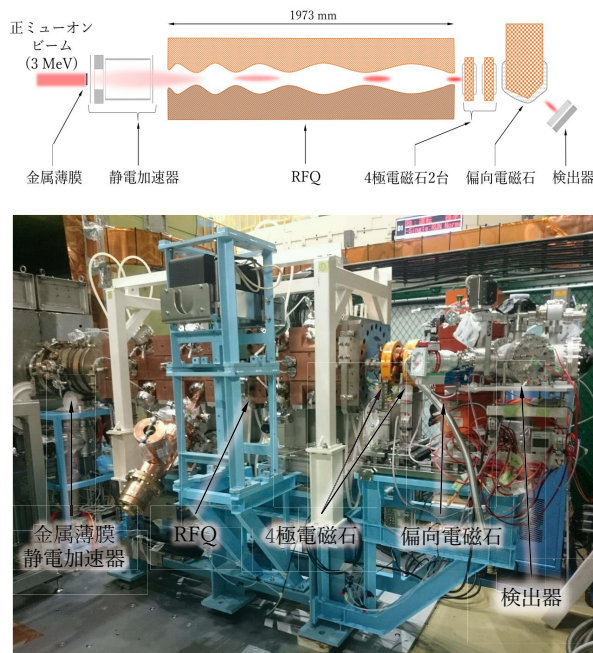


Figure 1: Experimental setup for muon acceleration at J-PARC. (Upper) Schematic drawing of the setup. (Lower) Photo of the setup. There are the electro-static acceleration chamber, the RFQ, the quadrupole magnet pair, and the bending magnet.

金属薄膜で生成される Mu^- の強度やエネルギーなどは事前に MUSE D2 エリアで行ったビーム試験によって評価した。この測定結果に関しては既に2017年度の加速器学会などで報告している [6,8]。本加速試験における金属薄膜及び静電加速器までのセットアップは、この Mu^- 試験と同じである。

RFQ に関しては J-PARC リニアック用に製作された大電流 RFQ の試作機 [9] を用いた。投入電力を粒子の質量の2乗でスケールすることで、ミューオンの加速にも用いることができる。この RFQ は J-PARC リニアックの大電流化の開発プロジェクトの一環として製作されたものであり、本来の長さの半分の2mである。このおかげでミューオン加速試験を MUSE D2 エリアで行う最も大きな障害だったスペースの問題を克服することができ、RFQ 以外の機器を含めても隙間約8cmで設置可能となった。

限られた予算で診断ビームラインを構築するために、偏向電磁石は J-PARC リニアックで使わなくなったものを借用した。また、4極電磁石は KEK 入射器で未使用だったものをお借りした。いずれも運動エネルギー89 keVのミューオンを輸送するには十分なスペックを持つ電磁石である。

3. シミュレーション

事前に測定した Mu^- 強度から、加速 Mu^- 自体を用いてビームラインを調整するのは不可能と予想されたため、測定に先駆けて電磁石の設定を最適化する必要があった。また、本試験では RFQ 加速エネルギーが89 keVと低いために横方向の実エミッタンスが小さくないため、長さ1mにも満たない診断ビームラインを輸送するにも電磁石による収束の有り無しで輸送効率に2倍以上の違いが生まれる。そこで、試験に先駆けてシミュレーションを構築し、診断ビームライン電磁石の最適化と加速 Mu^- 強度の評価を行った。

Mu^- は事前の実験結果とシミュレーションに基づき評価を行った。空間分布に関しては g4beamline [10] を用いたミューオンビームラインシミュレーションによって評価した。運動量分布は陽子・負水素イオンのデータをもとに、質量スケールにより外挿した [11]。時間分布に関してはビームラインにおける実測結果に基づいており、これまでの測定結果は、もともとの陽子ビームの時間広がり・パイオン崩壊の寿命・運動量分散によるビームライン輸送時の広がり3点を考慮した結果と無矛盾である。これらによる位相空間分布をもとに実測データから強度を規格化している。

RFQ シミュレーションはこれまでに J-PARC リニアック等で実績のある PARMTEQM [12] を用いた。加えて CST EM Studio [13] に基づく最終セル及びエンドカット部分のシミュレーションと GPT [14] による粒子トラッキングから、フリッジフィールドの影響まで見積もっている。ここまでで得られた位相空間分布に基づき TRACE3D [15] で診断ビームラインの設計を行い、設計に基づき PARMILA [16] で粒子輸送シミュレーションを行った。

図2は検出器位置で予想される加速 Mu^- の位相空間分布である。輸送ビームラインは MCP の有効領域内に輸送される加速 Mu^- の数が最大になるような最適化を行っている。得られる強度は約程度であり、約2日間のデータ取得によって十分な数(約100イベント)が得られることが分かった。

4. 実験準備

加速試験に先立ち、2016年末から加速試験機器の準備を開始した。

まず、2016年12月に J-PARC 内建屋の地下に保管されていた RFQ を J-PARC リニアック棟まで輸送した。2016年度中にはミューオン加速試験に必要な冷却水配管などの解体を行った。

2017年度からは新規に必要となる診断ビームライン架台や真空ダクトなどの機器の設計と製作を行った。診断ビームライン架台は RFQ 架台が延長される形で設計・製作を行った。これは、MUSE D2 エリアはユーザー共用エリアであるため、我々の加速試験も限られたビームタイム中に設置・データ取得・撤退まで行う必要があったためである。一体型にすることで事前に電磁石・検出器のアライメント等を行

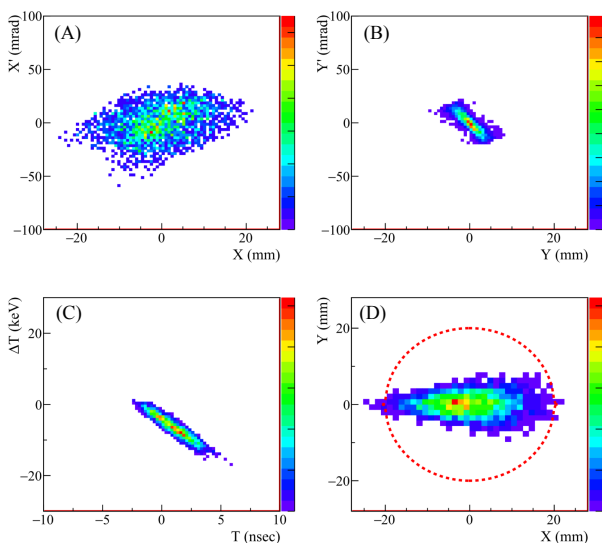


Figure 2: Simulated phase space distributions at the MCP detector. (A) the horizontal divergence angle x' vs x , (B) the vertical divergence angle y' vs y , (C) ΔW vs $\Delta\phi$, and (D) y vs x . The red dashed line shows the effective area of the MCP detector.

い、必要最低限の調整だけでデータ取得を行えるようにした。

2017年7月には全機器の製作が完了し組立作業を開始した(図3)。組立・設置完了後はレーザートラッカーで測量を行い、精度約0.2 mmで位置調整を行った。



Figure 3: Assembly of the experimental setup.

組立完了後は順次、機器の試運転を行った。このRFQを用いてミューオンを加速する場合、投入パワーはわずか3 kWにも満たない。しかし、予想される加速 Mu^- レートが非常に低いため、ごくわずかのバックグラウンドでも問題となる可能性がある。そこでRFパワー印加時のバックグラウンド測定を行った。図4に測定したバックグラウンドレートを示す。パワ

ー投入直後は加速 Mu^- と同程度のRFに同期したバックグラウンドが観測された。偏向電磁石によって軌道に変化がなかったことから、RF導入窓での電界放出電子によるX線が主要原因であると考えられる。このバックグラウンドは、RF印加と同時に徐々に減少し約2日間のコンディショニング後はMCP自体のバックグラウンドレートと無矛盾な程度で、加速 Mu^- 強度に比べて無視できる程度まで減少した。

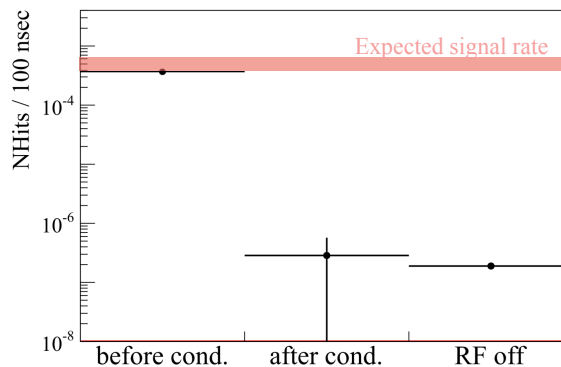


Figure 4: Background rate observed by the MCP detector. After 2-days conditioning, the background rate is consistent with the dark noise and much less than expected signal rate.

ーム診断ラインの調整には負水素イオンを用いた。本調整方法および調整結果に関しては本学会論文集[17]を参照されたい。

5. 加速試験結果

2017年10月24日から6日間にわたってビームデータを取得した。

Mu^- 加速データ取得の前に、負水素イオンによるビームラインの試運転データに加えてビームミューオンでセットアップの較正を行った。金属薄膜に入射したビームミューオン(μ^+)の大部分は減速されて下流まで到達する。その中でもRFQの加速エネルギーとたまたま等しいエネルギーのミューオンは、電磁石の極性を反転させることで検出器まで輸送される。図5が突き抜け μ^+ の解析結果である。波高の低いイベント(<100 mV)はミューオン崩壊由来の陽電子によるものと考えており、崩壊の時定数もミューオン寿命と無矛盾であった。波高でイベント選択することで崩壊陽電子イベントのほとんどを除去することができ、100mV以上の波高を持つイベントの飛行時間分布が図5(C)である。偏向電磁石による運動量とミューオン質量から、飛行距離より計算された飛行時間と無矛盾な時刻に、イベントを多数観測した。時間分布の広がりはおもとのミューオンビームの時間広がり起因するものである。

突き抜け μ^+ でセットアップの設定を確認した後に電磁石極性を反転して Mu^- の加速データを取得した。図6の赤丸点がRFQにRFパワーを印加した時、青三角点が印加していない時のデータである。

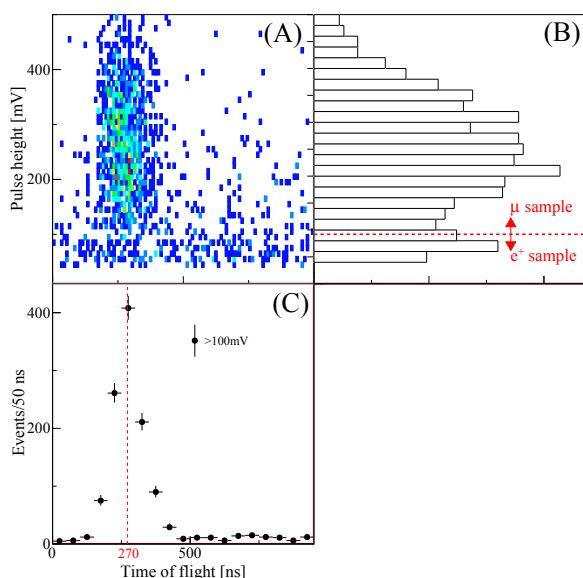


Figure 5: Distribution of the MCP pulse height and the TOF of the penetrating μ^+ . (A) Scatter plot of the pulse height vs TOF. (B) Pulse height of the MCP signal. The events above 100 mV were regarded as μ^+ . (C) TOF spectrum after the pulse-height cut was applied. The peak corresponds to the μ^+ 's injected into the RFQ with an energy of 89 keV.

二つのデータを比較すると、RF パワーを印加した場合は飛行時間 830 ns で多数のイベントが観測されていることが分かる。これは RFQ で加速された Mu^- の飛行時間をシミュレーションで見積もったものと統計誤差の範囲内で一致している。観測されたイベントレート (入射ミューオンあたり 0.5×10^{-3}) に関しても、シミュレーションによる予想値と無矛盾であった。

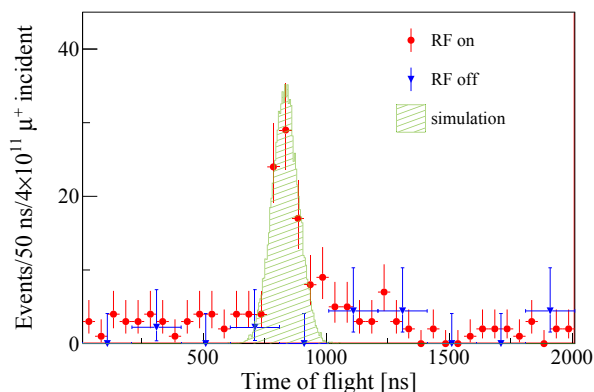


Figure 6: TOF spectra of the negative-charge configuration with RF on and off. The clear peak of the RF on spectrum at 830 ns corresponds to the accelerated Mu^- 's. The error bars are statistical. A simulated TOF spectrum of the accelerated Mu^- 's is also plotted.

以上の測定結果から、本試験によって世界で初めてミューオンの高周波加速が実現したと結論できる。

6. まとめと展望

以上により RFQ を用いて世界初のミューオン高周波加速に成功した。RFQ でバンチングまで行っているため、下流に高周波加速空洞を追加することで追加速が可能である。E34 実験では RFQ の下流に Interdigital H-mode drift tube linac (IH-DTL) [18]、disk-and-washer coupled-cavity linac (DAW-CCL) [19,20] 及び disk-loaded structure (DLS) [21] を設置し、それぞれの加速空洞で 4.5 MeV、40 MeV、212 MeV まで加速する。

IH-DTL に関しては既に 15 セル中初めの 6 セルを持つプロトタイプを製作済みであり、ビーズ測定まで完了している。こちらに関しては本学会論文集 [22] を参照されたい。現在建設中の E34 実験を行うミューオンビームライン (H ライン) において実機 RFQ [23,24] と共に順次インストールを行い、加速試験まで行う予定である (図 7)。RFQ は H⁻ 用に製作されたものを質量比でパワースケールして使用する一方、本 IH-DTL はセル長がミューオン専用設計された、世界初のミューオン専用加速空洞である。

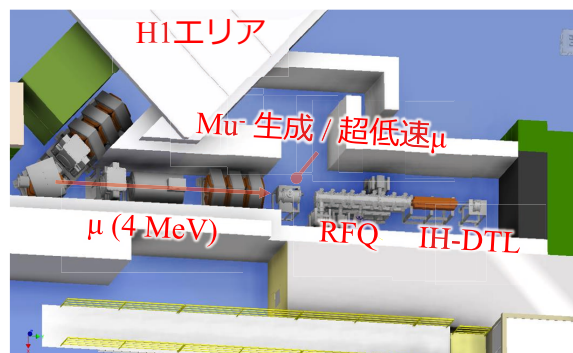


Figure 7: Schematic view of muon acceleration using the IH-DTL at J-PARC H-line.

実験の要請から加速中の大きなビームエミッタンス成長は許されない。ほぼゼロ電流のミューオンリニアックにおいて主要なエミッタンス成長の原因はビームミスマッチである。そこでビーム測定が重要となるが、ここでも前例のないミューオンビーム専用のビームモニターが必要となる。我々は既に MCP と CCD カメラからなるビームプロファイルモニターを開発し [25]、加速 Mu^- のプロファイル測定まで完了している [26]。現在はビームの位相方向測定を目指して、MCP と Constant Fraction Discrimination (CFD) 回路を用いた測定器を開発している。CT などによるビーム集団を測定する方法とは異なり、本測定器は各ビーム粒子を高時間分解能で一個一個測定することによりビームのバンチ幅を得る。こちらに関しては本学会論文集 [27] を参照されたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP25800164、JP15H03666、JP15H05742、JP16H03987、JP16J07784、JP16K13810 及び JP18H03707 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] G.A. Beer *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **091**, C01 (2014).
- [2] <http://g-2.kek.jp/portal/index.html>
- [3] G.W. Bennett *et al.*, Phys. Rev. D **73**, 072003, 2006.
- [4] 大谷将士 他、第 12 回日本加速器学会年会論文集、pp. 56–61 (2015).
- [5] 近藤恭弘 他、第 13 回日本加速器学会年会論文集、pp. 66–69 (2016).
- [6] 北村遼 他、第 14 回日本加速器学会年会論文集、pp. 100–103 (2017).
- [7] S. Bae *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **21**, 050101 (2018).
- [8] R. Kitamura *et al.*, Journal of Physics: Conference Series **874**, 012055 (2017).
- [9] Y. Kondo *et al.*, Proc. of LINAC2006, Knoxville, Tennessee USA, pp. 749–751 (2006).
- [10] G4beamline; <http://public.muonsinc.com/Projects/G4beamline.aspx>
- [11] M. Gonin *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **65**, 3 (1994).
- [12] K. R. Crandall *et al.*, “RFQ Design Codes”, LA-UR-96-1836 (1996).
- [13] CSM EM Studio, Computer Simulation Technology (CST); <https://www.cst.com/products/CSTMWS>
- [14] General Particle Tracer, Pulsar Physics; <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [15] K. R. Crandall, D. P. Rusthoi, “Trace 3-D Documentation”, Tech. rep., A-UR-97-886 (1997).
- [16] Los Alamos Accelerator Code Group (LAACG), LANL, Los Alamos; <http://www.laacg.lanl.gov>
- [17] 中沢雄河 他、「紫外光由来負水素イオンビームを用いたミュオン RF 加速試験用 診断ビームラインの試運転」、第 16 回日本加速器学会年会論文集。
- [18] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 040101 (2016).
- [19] 大谷将士 他、第 11 回日本加速器学会年会論文集、pp. 568–571 (2015).
- [20] M. Otani *et al.*, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, pp. 1543–1546 (2016).
- [21] Y. Kondo *et al.*, Journal of Physics: Conference Series **874**, 012054 (2017).
- [22] 中沢雄河 他、「ミュオン線形加速器 APF 方式 IH-DTL プロトタイプの性能試験」、第 16 回日本加速器学会年会論文集。
- [23] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **16**, 040102 (2013).
- [24] Y. Kondo *et al.*, Proc. of IPAC2015, Richmond, VA, USA, pp. 3801–3803 (2015).
- [25] B. Kim *et al.*, Nucl. Instr. Meth A **899**, 22 (2018).
- [26] M. Otani *et al.*, to be published in Journal of Physics: Conference Series.
- [27] 須江祐貴 他、「J-PARC E34 muon g-2/EDM 実験：低レートミュオンバンチ縦方向構造測定装置の開発」、第 16 回日本加速器学会年会論文集。