

冷却ミュオンの高周波加速実証 DEMONSTRATION OF RF LINEAR ACCELERATION OF COOLED MUON BY LASER IONIZATION

鷺見 一路^{*,A)}, 茨木 優花^{A)}, 市川 忠樹^{A)}, 飯嶋 徹^{A)}, 居波 賢二^{A)}, 糝 翔太^{A)}, 近藤 彩夏^{A)}, 杉山 蒼^{A)}, 鈴木 一仁^{A)}, 上田 晃市^{A)}, 四塚 麻衣^{A)}, 有留 翔一^{B)}, 松下 凌大^{B)}, 小山 駿^{B)}, 佐藤 太希^{B)}, ニツ川 健太^{C)}, 池戸 豊^{C)}, 石田 勝彦^{C)}, 上岡 修星^{C)}, 河村 成肇^{C)}, 木村 真人^{C)}, 幸田 章宏^{C)}, 児島 一輝^{C)}, 三部 勉^{C)}, 中村 惇平^{C)}, 岡崎 祐太^{C)}, 大谷 将士^{C)}, 齊藤 直人^{C)}, 下村 浩一郎^{C)}, Strasser Patrick^{C)}, 山崎 高幸^{C)}, 吉田 光宏^{C)}, 原 秀明^{D)}, 今井 康貴^{D)}, 宮本 祐樹^{D)}, 植竹 智^{D)}, 山基 真佑^{D)}, 早坂 圭司^{E)}, 佐藤 優太郎^{E)}, 矢村 昂暉^{E)}, 飯沼 裕美^{F)}, 葛葉 昌弥^{F)}, 佐藤 颯人^{F)}, Kamal Saeid^{G)}, 近藤 恭弘^{H)}, 中沢 雄河^{I)}, 小川 真治^{J)}, 塩谷 漸^{J)}, 竹内 佑甫^{J)}, 谷田 征輝^{J)}, 東城 順治^{J)}, 山田 瑞樹^{J)}, 吉岡 瑞樹^{J)}, Xie Xinhai^{K)}

Kazumichi Sumi^{*,A)}, Yuka Ibaraki^{A)}, Tadaki Ichikawa^{A)}, Toru Iijima^{A)}, Kenji Inami^{A)}, Shota Koji^{A)}, Ayaka Kondo^{A)}, Soh Sugiyama^{A)}, Kazuhito Suzuki^{A)}, Koichi Ueda^{A)}, Mai Yotsuzuka^{A)}, Shoichi Aritome^{B)}, Ryota Matsushita^{B)}, Shun Oyama^{B)}, Taiki Sato^{B)}, Kenta Futatsukawa^{C)}, Yutaka Ikedo^{C)}, Katsuhiko Ishida^{C)}, Shusei Kamioka^{C)}, Naritoshi Kawamura^{C)}, Masato Kimura^{C)}, Akihiro Koda^{C)}, Kazuki Kojima^{C)}, Tsutomu Mibe^{C)}, Jumpei Nakamura^{C)}, Yuta Okazaki^{C)}, Masashi Otani^{C)}, Naohito Saito^{C)}, Koichiro Shimomura^{C)}, Patrick Strasser^{C)}, Takayuki Yamazaki^{C)}, Mitsuhiro Yoshida^{C)}, Hideaki Hara^{D)}, Yasutaka Imai^{D)}, Yuki Miyamoto^{D)}, Satoshi Uetake^{D)}, Shinsuke Yamamoto^{D)}, Kiyoshi Hayasaka^{E)}, Yutaro Sato^{E)}, Koki Yamura^{E)}, Hiromi Iinuma^{F)}, Masaya Kuzuba^{F)}, Hayato Sato^{F)}, Saaid Kamal^{G)}, Yasuhiro Kondo^{H)}, Yuga Nakazawa^{I)}, Shinji Ogawa^{J)}, Zen Shioya^{J)}, Yusuke Takeuchi^{J)}, Masaki Tanida^{J)}, Junji Tojo^{J)}, Mizuki Yamada^{J)}, Tamaki Yoshioka^{J)}, Xinhai Xie^{K)}

^{A)} Nagoya University, ^{B)} University of Tokyo, ^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

^{D)} Okayama University, ^{E)} Niigata University, ^{F)} Ibaraki University,

^{G)} University of British Columbia, ^{H)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA),

^{I)} RIKEN Nishina Center, ^{J)} Kyushu University, ^{K)} Peking University

Abstract

The precision measurement of the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment at J-PARC aims to independently verify a sign of physics beyond the Standard Model of particle physics indicated by previous experiments. The low emittance muon beam, approximately 1π mm-mrad in normalized total emittance, essential for this experiment is achieved by muon cooling and acceleration. In the cooling process, muons with a kinetic energy of 3 MeV are decelerated and thermalized to 30 meV in the muonium (μ^+e^-) state, which is then dissociated by a laser. These cooled muons are accelerated to 212 MeV using electrostatic accelerating lens and four types of RF accelerating cavities. In this study, the cooled muon beam was realized by an ultra-stable laser with a wavelength of 244 nm, and muons accelerated to approximately 100 keV by a radio-frequency quadrupole linac were detected using a microchannel plate. This paper reports the muon time-of-flight and phase-space distribution measurements from the cooled muon production experiment and the RF acceleration test.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC では、ミュオンの異常磁気能率 ($g-2$) を 0.45 ppm の精度で精密に測定し、電気双極子能率 (EDM) を $1.5 \times 10^{-21} e \cdot \text{cm}$ の感度で探索する実験を計画している [1]。この実験では、ミュオン冷却と再加速により低エミッタンスミュオンビームを生成し、それを小型で磁場均一度の高い 3 T の超伝導ソレノイド電磁石内に入射する、という新しい手法を用いてスピンと磁場の相互作用を観測する。ミュオン $g-2$ の現在の実験平均は、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) とフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) により測定された結果を合わせたもの [2] であり、素粒子標準模

型の予想値 [3] との間の乖離が新物理の兆候と目されている。一方で、FNAL の実験は BNL と同じ測定手法を用いており、J-PARC の実験で独立な検証を行うことで実験値をより確かなものにできる。ミュオン EDM は、BNL により $1.8 \times 10^{-19} e \cdot \text{cm}$ まで探索されている [4]。より高精度に探索し、その探索感度で EDM を観測できれば新物理の直接的な証拠となる。

この実験の目標精度・感度は統計誤差が支配的であり、大強度かつ低エミッタンスなミュオンビームの実現が鍵となる。ミュオンは $2 \mu\text{s}$ の寿命で崩壊する素粒子であり、質量は約 $106 \text{ MeV}/c^2$ と陽子の 10 分の 1 程度である。ミュオン冷却の過程では、正電荷のミュオンを室温のシリカエアロゲル標的に照射し、標的内で散乱することで熱化し、その際に電子と束縛し形成されるミュオニウム (μ^+e^-) 形成する。真空中に拡散したミュオニウムの電子をレーザー共鳴イオン化で剥ぎ

* ksumi@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

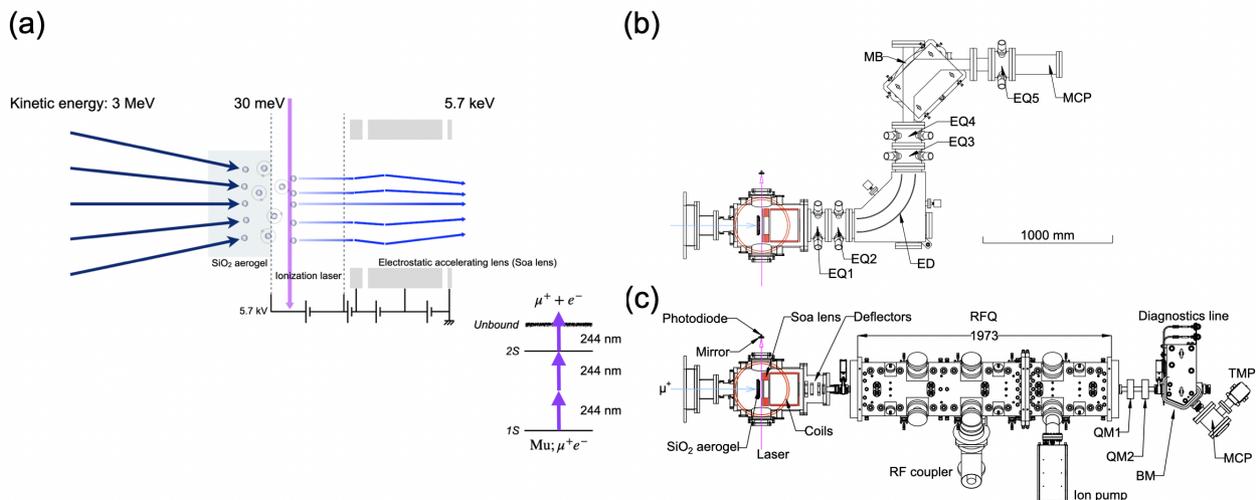


Figure 1: Schematic drawing of the experimental arrangement. Insets show (a) a schematic view of the mechanism for the ultra-slow μ^+ production [1] and an energy level diagram with the two transitions involved in ionizing the muonium (Mu), (b) a layout of slow muon beam line (SMBL), and (c) a setup for acceleration test.

取ることによって 30 meV の超低速ミュオンを得る [5,6]。この過程で、規格化全エミッタンスで約 1000π mm-mrad あったエミッタンスが約 1π mm-mrad まで小さくできる。その後の加速では、静電加速レンズで 5.7 keV まで加速しながら超低速ミュオンを取り出し、RFQ など各速度域に適した 4 種類の加速空洞で 212 MeV まで加速する [7,8]。この運動量にして 5 桁の加速により、指向性が飛躍的に高まる。

低エミッタンスビームの実現には、冷却技術と加速技術の確立が不可欠である。冷却ミュオン源の開発では、エミッタンスや偏極度といったビームの品質と、超低速ミュオンを取り出す効率の 2 つの課題がある。我々はまず、扱いやすいシリカエアロゲルからもミュオニウムが生成可能であることを実証した [9]。さらに、レーザー加工でシリカエアロゲルの表面積を増やすことでミュオニウムの放出確率を向上してきた [10,11]。レーザーについては、ミュオニウム精密分光実験のために岡山大学が開発した波長 244 nm のレーザー [12] を用いたレーザー共鳴イオン化が可能な段階となった。加速器の開発では、ミュオンの初段加速の早期実証が最初に必要であり、簡易な低速ミュオン源として負ミュオニウムイオン ($\mu^+e^-e^-$) 源を開発し [13]、RFQ を用いた加速実証に成功した [14]。本稿では、上記の開発により初めて行うことができた超低速ミュオンの生成と加速の実証試験結果について報告する。

2. 実験装置

試験は J-PARC ミュオン科学実験施設 (MUSE) [15] の S2 実験エリアで行った。冷却ミュオン生成試験は 2023 年の 2 月から 5 月と 2023 年の 3 月に、加速実証試験は 2024 年の 4 月にそれぞれ行ったものである。このエリアで用いた表面ミュオンと呼ばれる運動エネルギー 3 MeV の正ミュオンは、J-PARC が供給する強度約 900 kW で繰り返し 25 Hz の 3 GeV パルス陽子ビームを

炭素標的に照射し、生成された正パイオンが標的表面で崩壊することで得られるものである。ここでは、冷却ミュオン生成試験と加速実証試験のセットアップを Fig. 1 に示し、実験装置について述べる。

超低速ミュオンは、Fig. 1 (a) に示すように、真空中に漂うミュオニウムに波長 244 nm の狭幅パルスレーザーを照射し、二光子励起による $1S$ - $2S$ 遷移を経てイオン化することで得た。レーザーシステムは、光コムシステムで周波数制御された外部共振器型半導体レーザー、パルス増幅を含む数段の光アンプ、2 段階の非線形波長変換で構成されるもの [12] で、試験時の出力は 1 mJ、パルス時間幅は 57 ns、直径は 1 mm であった。レーザーはシリカエアロゲル標的の下流側端面付近を水平に通り、ミラーで 180 度反射して同じ軌道に戻る。ミュオニウムはこのように対抗する二光子を吸収して $2S$ 軌道に遷移し、さらにもう 1 つの光子を吸収してミュオンと電子が解離する。得られた超低速ミュオンは、Soa レンズ [16] と呼ばれる静電加速レンズにより、RFQ とのマッチングが取れるように収束しながら 5.7 keV まで加速して取り出した。標的周りには数十 μT の環境磁場が存在するが、チャンバに取り付けた 3 軸コイルでその磁場を打ち消した。

生成試験では、Soa レンズで取り出されたミュオンを Fig. 1 (b) に示す低速ミュオンビームライン (SMBL) で輸送して評価した。SMBL は負ミュオニウム源の評価にも用いたもの [13] で、5 つの静電四極レンズでビームを収束しながら輸送し、電場と磁場の偏向で粒子の種類と運動量を選別し、最下流でミュオンを検出した。

加速試験では、Soa レンズで取り出されたミュオンを J-PARC リニアックの RFQ 試作機 [17] を用いてミュオンを加速した。この RFQ 試作機は負水素イオンを 0.8 MeV まで加速するように設計されたもので、電圧を変えて負ミュオニウムの加速にも用いたものである [14]。周波数 324.03 MHz、投入電力 2.6 kW、パルス幅 40 μs 、繰り返し頻度 25 Hz で運転した。入射軌道調

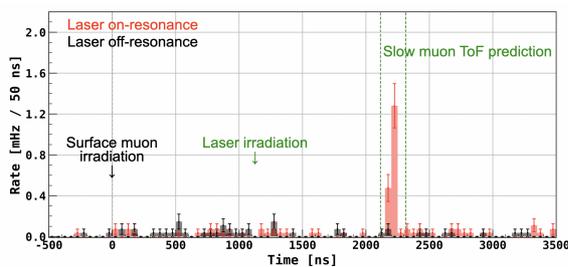


Figure 2: Distributions of the MCP pulse timing at the end of SMBL.

整用に静電デフレクタを Soa レンズと RFQ の間に配置した。RFQ 以降の診断ラインも負ミュオニウム加速試験のもの [18] を再利用した。供給電流 $I_{i=1,2}$ [A] を用いて $2.25 \times I_i$ [T/m] で与えられる 2 つの四極電磁石 (MQ1 と MQ2) の磁場勾配を変えながらビームプロファイルの変化を観測した。表面ミュオンビームやレーザー由来の加速ミュオン以外の粒子は、偏向電磁石 MB による水平 45 度の偏向で落としている。

SMBL と診断ラインで共通して使用した時間測定モニタとビームプロファイルモニタは、高速応答でミュオン 1 個でも検出可能なマイクロチャンネルプレート (MCP) アセンブリを用いたものである。時間測定モニタは、浜松ホトニクス製のシングルアノードのアセンブリ F9892-21 で増幅電子を取り出し、電圧波形の立ち上がりからミュオンの到達時間を測るものである。信号処理では、CAEN の V1720 を用いてサンプリングレート 250 MS/s で波形を取得した。時間分解能は 1 ns 以下を期待でき、崩壊陽電子の背景事象は応答の違いが波高に現れるため選別が可能である [19]。プロファイルモニタは、浜松ホトニクス製のアノードを蛍光板に置き換えたアセンブリ F2225-21P-Y003 であり、蛍光板で増幅電子を光に変換し、カメラで光った位置を記録するものである。カメラには PCO 製の CCD カメラ pco.1600 を用い、露光時間 500 ns で撮影した。試験中の設置位置では CCD カメラの 1 ピクセルが MCP 面での 0.1 mm 程度に対応していた。別の設置位置で UV 光を用いて評価した位置分解能は 0.3 mm 以下である [20]。MCP の開口率は 60% であり、これが両モニタの検出効率となる。

3. 結果

まず、RFQ での加速の前に行った超低速ミュオン生成試験での低速ミュオン測定結果について述べる。この測定の主目的は超低速ミュオンの計数と冷却ミュオン源の調整であるため、Soa レンズの電圧をスケールして 10 keV の低速ミュオンを取り出した。Figure 2 には EQ5 下流に設置したモニタで測定した時間と波高の分布を示している。2200 ns 付近がレーザー照射タイミングと低速ミュオンの ToF から期待される信号領域であり、超低速ミュオンの生成を確認できた。この状態でレーザーの周波数と照射タイミングを調整し、毎秒 0.13 ± 0.02 個の信号を得た。また、5.7 kV で取り出した低速ミュオンのプロファイル測定も行った。Figure 3 に

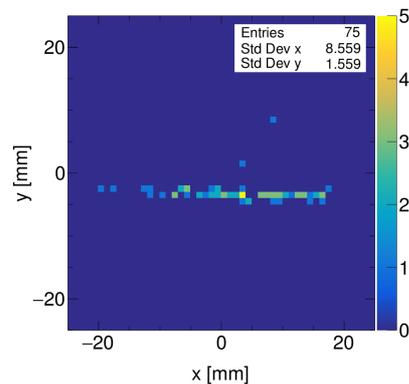


Figure 3: Transverse phase distributions measured at the end of SMBL.

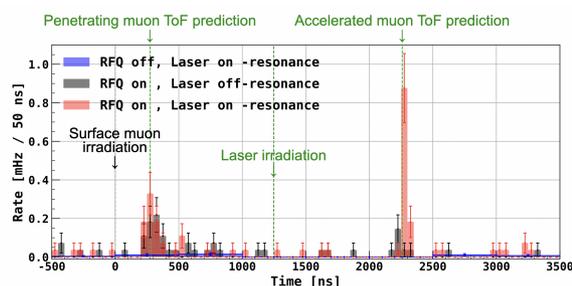


Figure 4: Distributions of the MCP pulse height and the timing under three conditions: without RF operation, with RF operation and the laser frequency tuned to off-resonance, and with RF operation and the laser frequency on-resonance.

は、垂直 (y) 方向に最も絞れる SMBL の光学設定で測定したプロファイルの一例を示している。この結果に基づく Q スキャン法によるエミッタンス評価は進行中である。

続いて、RFQ 加速試験で行った ToF 測定について述べる。Figure 4 に異なる条件で取得した MCP 信号の時間と波高の分布を示す。測定条件は、共鳴イオン化はしているが RFQ に電力を投入していない場合、電力は投入しているがレーザーの周波数を最適値から外している場合、電力を投入しレーザー周波数を共鳴に合わせている場合の 3 つである。300 ns 付近に見えるピークは、シリカエアロゲル標的を貫通し RFQ を素通りしたミュオンのうち運動エネルギーがちょうど加速ミュオンと同程度のものである。RFQ で加速はされないが収束の効果は受けるため、RFQ に電圧がかかっている場合にのみ検出できている。レーザー照射から加速ミュオンの予想 ToF が経過したタイミング付近には、超低速ミュオンが生成され RFQ に電圧が発生している時のみにピークが現れ、超低速ミュオンを加速できたと結論づけた。

最後に、初めて成功した加速ミュオンのビームプロファイル測定について述べる。Q スキャン法でエミッタンスを測定するために、MQ2 の収束力を変えて測定した Fig. 5 は、 $I_1 = 0.9$ A で、 I_2 が -0.70 A、 -0.75 A、

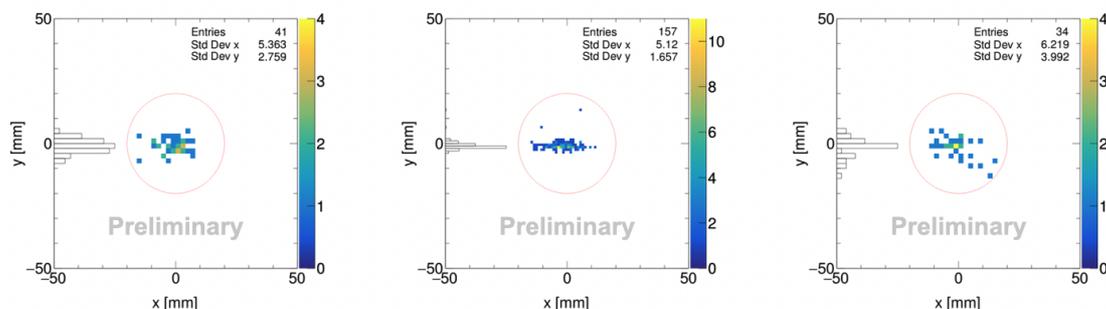


Figure 5: Transverse phase distributions measured using beam profile monitor at the end of diagnostics line. The circle drawn with the red-dashed line is the MCP’s sensitive area, $\phi 40$ mm. The current of the quadrupole magnets were $I_1 = 0.90$ A and $I_2 = -0.70$ A (left), -0.75 A (center), or -0.85 A (right).

-0.85 A の条件でそれぞれ 1-4 時間ずつ測定したビームプロファイルであり、 $I_2 = -0.75$ A 付近でビームが y 方向の最も絞られていることが確認できた。中心の集団から外れた数個の事象は、MB のダクトなどの上流の物質から飛来する崩壊陽電子由来の背景事象と見ており、プロファイルから算出する rms を過大評価させるものである。この背景事象の混入を考慮し、Q スキャン法によるエミッタンス評価を進めている。

4. まとめと展望

J-PARC で計画しているミュオン $g-2$ と EDM の精密測定実験のための研究開発の一環として、レーザー共鳴イオン化による超低速ミュオン生成を試験し、毎秒 0.1 個程度飛来する低速ミュオンの飛行時間とプロファイルを測定した。そして、RFQ を用いた超低速ミュオン加速を行い、ToF 測定から 100 keV 近くまで加速されたミュオンを同定し、加速実証に成功したと結論した。加速されたミュオンのプロファイル測定にも成功しており、今後エミッタンスの評価を進めていく。

今後、このミュオン冷却のシステムは新設された H ライン [21] の H2 実験エリアに移動し、実機の RFQ [22] と IH-DTL [23] による加速を順次行っていく予定である。H2 エリアには表面ミュオン生成標的付近に設置した大口径ソレノイドで集められたミュオンが運ばれるため、S2 エリアの約 50 倍の表面ミュオン数が期待できる。また、H2 エリア横の実機レーザーシステムの設置も進み、より大強度のレーザーでイオン化効率を向上できる見込みである。これらのアップグレードを経て超低速ミュオン生成と加速の理解を深め、実験要求を満たすミュオンビームの実現を目指す。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (18H05226, 19H05606, 20H05625, 21K13944, 21J01132, 22KJ1594, 22K21350, 22H00141, 24H00023, 24K03211)、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JP-MXS0118069021、JST 未来社会創造事業 JPMJM17A1 の助成を受けたものです。実験は J-PARC MLF の実験課題 (2011MS06) として実施されました。

参考文献

- [1] M. Abe *et al.*, “A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2019, p. 053C02, 2019. doi: 10.1093/ptep/ptz030
- [2] D. P. Aguillard *et al.*, “Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.20 ppm”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 131, p. 161802, 2023. doi:10.1103/PhysRevLett.131.161802
- [3] T. Aoyama *et al.*, “The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model”, *Phys. Rep.*, vol. 887, pp. 1-166, 2020. doi:10.1016/j.physrep.2020.07.006
- [4] G. W. Bennett *et al.*, “Improved limit on the muon electric dipole moment”, *Phys. Rev. D*, vol. 80, p. 052008, 2009. doi:10.1103/PhysRevD.80.052008
- [5] K. Nagamine *et al.*, “Ultraslow Positive-Muon Generation by Laser Ionization of Thermal Muonium from Hot Tungsten at Primary Proton Beam”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 74, p. 4811, 1995. doi:10.1103/PhysRevLett.74.4811
- [6] P. Bakule *et al.*, “Pulsed source of ultra low energy positive muons for near-surface μ SR studies”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, vol. 266, pp. 335-346, 2008. doi: 10.1016/j.nimb.2007.11.009
- [7] M. Otani, “First muon acceleration and muon linear accelerator for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2022, p. 052C01, 2022. doi:10.1093/ptep/ptac067
- [8] Y. Kondo *et al.*, “The Muon Linac Project at J-PARC”, in *Proc. 31st International Linear Accelerator Conference (LINAC’22)*, pp. 636-641, 2022. doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-WE1AA05
- [9] P. Bakule *et al.*, “Measurement of muonium emission from silica aerogel”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2013, p. 103C01, 2013. doi:10.1093/ptep/ptt080
- [10] G. A. Beer *et al.*, “Enhancement of muonium emission rate from silica aerogel with a laser-ablated surface”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2014, p. 091C01, 2014. doi:10.1093/ptep/ptu116
- [11] J. Beare *et al.*, “Study of muonium emission from laser-ablated silica aerogel”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2020, p. 123C01, 2020. doi:10.1093/ptep/ptaa145
- [12] 植竹智他, “ミュオニウム精密レーザー分光実験@J-PARC”, *高エネルギーニュース*, vol. 39-4, pp. 170-181, 2021.

- [13] R. Kitamura *et al.*, “Development of negative muonium ion source for muon acceleration”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 24, p. 033403, 2021. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.24.033403
- [14] S. Bae *et al.*, “First muon acceleration using a radio-frequency accelerator”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 21, p. 050101, 2018. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.050101
- [15] Y. Miyake *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 225, p. 012036, 2010. doi:10.1088/1742-6596/225/1/012036
- [16] K. F. Canter *et al.*, in *Positron Studies of Solids, Surfaces and Atoms*, edited by A. P. Mills, Jr., W. S. Crane, and K. F. Canter, (World Scientific Singapore, 1986), p. 199.
- [17] K. Hasegawa *et al.*, “Fabrication and Low-Power Measurements of the J-PARC 50-mA RFQ Prototype”, in *Proc. LINAC’06*, pp. 749-751, 2006.
- [18] Y. Nakazawa *et al.*, “Beam commissioning of muon beamline using negative hydrogen ions generated by ultraviolet light”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 937, pp. 164-167, 2019. doi:10.1016/j.nima.2019.05.043
- [19] M. Otani *et al.*, “Response of microchannel plates to positrons from muon-decays”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 943, p. 162475, 2019. doi:10.1016/j.nima.2019.162475
- [20] B. Kim *et al.*, “Development of a microchannel plate based beam profile monitor for a re-accelerated muon beam”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 899, pp. 22-27, 2018. doi:10.1016/j.nima.2018.05.014
- [21] N. Kawamura *et al.*, “New concept for a large-acceptance general-purpose muon beamline”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2018, p. 113G01, 2018. doi:10.1093/ptep/pty116
- [22] Y. Kondo *et al.*, “High-power test and thermal characteristics of a new radio-frequency quadrupole cavity for the Japan Proton Accelerator Research Complex linac”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 16, p. 040102, 2013. doi:10.1103/PhysRevSTAB.16.040102
- [23] Y. Nakazawa *et al.*, “Interdigital H-Mode Drift Tube Linear Accelerator for a Muon Linear Accelerator”, *Phys. Sci. Forum*, 8, 20, 2023. doi:10.3390/psf2023008020