

ミューオン高周波加速のための高時間分解能バンチ長測定 BUNCH SIZE MEASUREMENT WITH HIGH TIME RESOLUTION FOR RF ACCELERATED MUON BEAM

須江祐貴 *^{A)}、飯嶋徹 ^{A,B)}、居波賢二 ^{A)}、四塚麻衣 ^{A)}、飯沼裕美 ^{C)}、中沢雄河 ^{C)}、大谷将士 ^{D)}、河村成肇 ^{D)}、
下村浩一郎 ^{D)}、二ツ川健太 ^{D)}、三部勉 ^{D)}、三宅康博 ^{D)}、山崎高幸 ^{D)}、北村遼 ^{E)}、近藤恭弘 ^{E)}、森下卓俊 ^{E)}、
長谷川和男 ^{E)}、石田勝彦 ^{F)}、牛沢昂大 ^{G)}、竹内佑甫 ^{H)}、齊藤直人 ^{I)}、安田浩昌 ^{J)}
Yuki Sue^{†A)}, Toru Iijima^{A,B)}, Kenji Inami^{A)}, Mai Yotsuzuka^{A)}, Hiromi Iinuma^{C)}, Yuga Nakazawa^{C)}, Masashi Otani^{D)},
Naritoshi Kawamura^{D)}, Koichiro Shimomura^{D)}, Kenta Futatsukawa^{D)}, Tsutomu Mibe^{D)}, Yasuhiro Miyake^{D)},
Takayuki Yamazaki^{D)}, Ryo Kitamura^{E)}, Yasuhiro Kondo^{E)}, Takatoshi Morishita^{E)}, Kazuo Hasegawa^{E)},
Katsuhiko Ishida^{F)}, Takahiro Ushizawa^{G)}, Yusuke Takeuchi^{H)}, Naohito Saito^{I)}, Hiroyasu Yasura^{J)}

^{A)}Graduate School of Science, Nagoya University

^{B)}Kobayashi-Maskawa Institute (KMI), Nagoya University

^{C)}Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

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

^{E)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{F)}Riken

^{G)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

^{H)}Graduate School of Science, Kyushu University

^{I)}J-PARC Center

^{J)}Graduate School of Science, University of Tokyo

Abstract

We develop a high time resolution bunch-width monitor for muon linac and demonstrated to measure a bunch size of 89 keV negative muonium ions ($\mu^+e^-e^-$) accelerated with a radio-frequency linear accelerator. The bunch-width monitor employing micro-channel plate achieves time resolution of $\sigma = 65$ ps. In the demonstration of the bunch width measurement using this monitor, the bunch width of $\sigma = 0.55 \pm 0.14$ ns is obtained. This result means the utility of this monitor to measure a bunch length of low-energy and low-intensity muon beam.

1. 研究背景

ミューオンは電子の 207 倍の質量を持つ荷電レプトンであり、その異常磁気能率は素粒子標準模型を超えた物理を探索する上で非常に良いプローブとなることが分かっている。磁気能率に含まれる g 因子は Dirac 方程式では $g=2$ であるが、実際は量子補正によってわずかに大きくなり、それを異常磁気能率 $g-2$ と呼ぶ。この値は 1970 年代頃から測定が行われ、素粒子標準模型の高精度検証に役立ってきた。最新の結果として 2000 年代には米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) で行われた BNL E821 実験 [1] によって 540 ppb ($\text{ppb}=10^{-9}$) と非常に高い精度での測定が行われた。この結果は現在標準模型からの予測値に対しておよそ 3σ の有意度でわずかに大きく [2]、新物理の寄与によるものではないかと期待されている。それを明らかにするために、現在米国フェルミ国立研究所 (FNAL) と東海村大強度陽子加速器施設 J-PARC にて誤差を数分の一まで削減した検証実験が行われる [3,4]。

FNAL で行われる後継実験 E989 実験 [3] では BNL

E821 実験で用いたミューオン蓄積リングをそのまま流用して同じ原理で測定するため、ビーム運動量など実験の主要なパラメータが同様のものとなる。J-PARC E34 実験ではこれら 2 つの実験とは大きく異なる実験セットアップでの精密測定を行うことで、2 つの実験の検証という重要な役割を果たすことにもなる。その異なる点の 1 つにミューオンビームがある。BNL 及び FNAL の実験では、陽子ビームを π 中間子生成標的に当てることで生成される数 GeV の π 中間子が飛行中にミューオンに崩壊する過程を経て、実験に用いる 3.2 GeV のミューオンビームを直接生成していた。この手法はエミッタンスの増加により、BNL E821 実験においては系統誤差に大きな影響を与えていた。これを削減すべく J-PARC E34 実験 [4] では 212 MeV の低エミッタンスミューオンビームを用いる。J-PARC ミューオン施設 (MUSE) において現在建設中の H ライン [5] で生成される大強度の表面ミューオンを、ミューオニウム生成とレーザーによるイオン化 [6] を用いて室温程度 (25 keV) まで冷却する。その後線形加速器によって 212 MeV まで加速することで、エミッタンス 1.5 π mm mrad、運動量分散 (RMS) 0.1 % 未満のビームを得る。

ミューオン線形加速器は Figure 1 に示すように、陽子加速器と電子加速器を組み合わせた全 4 種類の加速

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

† ysue@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

空洞で構成される [7–10]。2017 年 10 月には初段加速器である高周波四重極線形加速器 (RFQ) の約半分の長さのプロトタイプ RFQ を用いることで、89 keV までミュオンを高周波加速させることに成功した [11]。その後、マイクロチャンネルプレート (MCP) と CCD カメラを用いたミュオン用の横方向ビームプロファイルモニターでの横方向測定を実施した [12, 13]。残るビーム診断系の課題の一つとして、縦方向のビームモニターが必要となる。しかし、ミュオン線形加速器はビーム強度が $10^6 \mu^+ / s$ 程度と低電流ビームとなるため、集団的なふるまいから測定する Fast Current Transfer などの手法を用いるのは難しい。そこで、新たに縦方向モニターを開発し、89 keV の加速ミュオンを用いたバンチ幅の測定実証試験を行った。本学会論文ではモニターの開発と実証試験の結果について報告する。

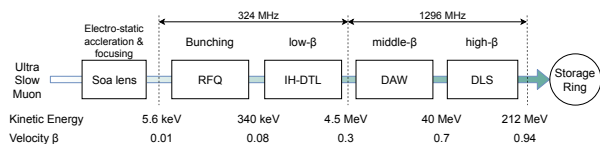


Figure 1: Schematic diagram of the muon linac.

2. 縦方向モニターの開発

このモニターは 324 MHz の運転周波数で加速されるビームにたいして 1 % 程度の位相分解能が要求され、これは 30–40 ps の時間分解能に相当する。そこで、1 ミュオンずつを高精度の時間分解能で測定し、長時間の測定を最終的に足し合わせることでバンチの構造を測定する手法を考案した。Figure 2 にそのイメージを載せる。モニターは 1 ミュオンの検出時間と加速高周波に同期した参照信号の時間差を精度よく測定する。得られた時間差を高周波の周期である約 3.09 ns 毎に重ねることで複数の粒子からバンチの形状を測定する。この手法ではモニターには 1 ミュオンに対する検出感度と高い時間分解能が要求される。

開発したモニターの構成図が Fig. 3 である。今までの加速試験においてミュオン検出には MCP を用いてきた。MCP は内部に 12 μm の無数の二次電子増倍管を持つような構造であり、荷電粒子が入射すると内部で二次電子増幅を起こすため典型的には 10^7 程度のゲインの信号を得ることができる。そのため低エネルギーの 1 ミュオンに対して高い検出効率があることが過去の測定から分かっている [11, 14]。それに加えて MCP が高い時間応答性を持っているという点に着目した。粒子検出部の MCP には浜松ホトニクス製 F1217-11G [15] を採用した。有感領域は直径 42 mm の円形となっており、この領域にビームを当てて測定を行う破壊型モニターとなる。

MCP のアノード部は円形を短冊状に 4 分割したマルチアノードタイプとした。これは位置依存による時間分解能の悪化を防ぐためである。このモニターは直前の偏向電磁石によって MCP 側にビームを変更することでの測定を想定しているが、運動量毎にわずかに偏向角が変わるため縦方向の位相空間が水平方向の横方向の広がり

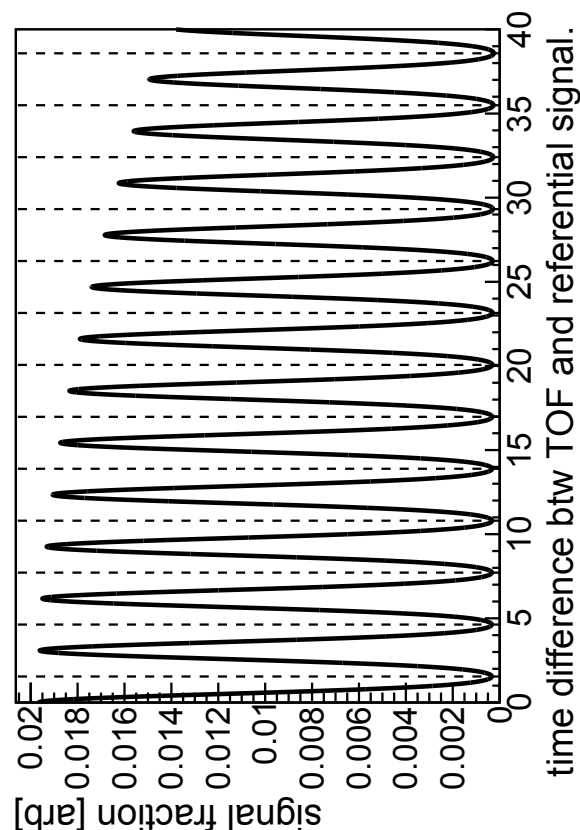
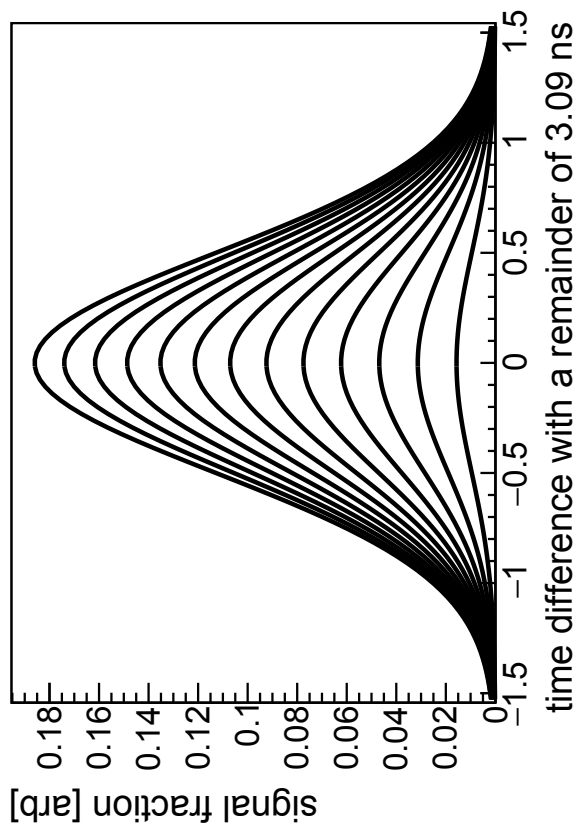


Figure 2: Conceptual image of this measurement method.

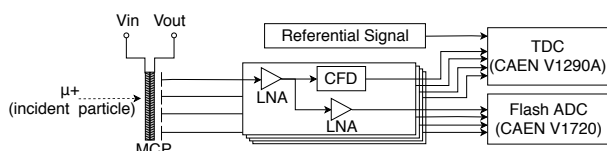


Figure 3: Schematic diagram of the monitor. LNA stands for Low-Noise Amplifier.

に影響を与える。低速でビームエネルギーの広がり大きいビームではこの効果は顕著である。これを削減するために、 x 軸方向に分割された各アノードで測定することで、位置に依存する縦方向分布の変化を取得することを可能とした。

MCP のパルス信号から検出時間を決定する信号処理には constant-fraction discriminator (CFD) を用いた。CFD は信号波高依存での時間不定性 (Time-walk) を強力に削減することが可能である。この回路は高エネルギー素粒子実験で開発された装置の流用であり、回路全体でのジッターは設計値で 5 ps 以下となっている [16]。データ取得は VME バスモジュールの Time-to-Digital Converter (TDC) と Flash Analog-to-Digital Converter (FADC) を用いた。TDC は最下位ビットが 24.4 ps、時間分解能が 35 ps (カタログ値) の CAEN 製 V1290A [17] を用いた。FADC にはサンプリング周波数 250 MHz の CAEN 製 V1720 [17] を用いた。

このモニターの時間分解能はパルス幅 34 ps 以上のピコ秒パルスレーザーを用いてオフライン試験で測定した [18]。その結果 $\sigma = 65$ ps 以下という時間分解能を得、これは 2% の位相分解能に当たる。この値はレーザーパルスのパルス幅を含めているため、実際のモニターとしての時間分解能はこれよりも小さな値となると考えられる。本測定の詳細については本学会論文集 [19] に記載されている。今後さらなる時間分解能を目指す場合は、より短いパルス幅のレーザーを用いることによるテストベンチの改良と、より時間分解能の良い TDC の開発が必要になる。

3. バンチ測定実証試験

このモニターを用いたバンチ幅測定の検証のために、RFQ で加速した 89 keV の負ミューオン (Mu^- , $\mu^+e^-e^-$) バンチ幅測定を行った。その実験セットアップを Fig. 4 に示す。このセットアップのうち、RFQ を用いた 89 keV までの加速は過去に行った加速試験 [11] と同様である。J-PARC ミューオン実験施設 D2 ラインから供給される 2.9 MeV のミューオンをアルミニウム標的に照射することで、減速された Mu^- を得る。 Mu^- を用いる理由は、エネルギーの広がりを小さくするためと、 Mu^- 生成標的を貫通した μ^+ による背景事象を分離するためである。RFQ に入射されるミューオンは 50 ns 程度の広がりを持っているため加速周期に対しては直流ビームとして入射される。加速後の Mu^- は 2 つの四重極電磁石 (QM1 と QM2) とバンチャー空洞を用いて輸送する。四重極電磁石の磁場勾配はそれぞれ 2.0 T/m と 1.8 T/m である。バンチャー空洞は 2 ギャップを持つドリフトチューブ型の空洞となっており、クレ

ストにおけるエネルギーゲインが 5.3 keV となる [20]。その後、89 keV の Mu^- は偏向電磁石 (BM) によって 45° の角度で偏向され、モニターの MCP によって検出される。Figure 5 に示すように RFQ 出口から MCP までの輸送ラインは TRACE3D [21] と PARMILA [22] をもとに設計した。

324 MHz はシグナルジェネレータで生成し、324 MHz 5 kW 半導体アンプを用いて RFQ とバンチャーに入力した。RFQ とバンチャーの高周波の位相差は、空洞からのピックアップ信号をモニターしながら、可変長同軸管にて調整した。6 日間のデータ取得中における位相差の不安定性は 3 度以下であり、バンチャーでの収束に対する影響は測定するバンチ幅に対して十分に小さい。同時にこの 324 MHz 高周波は CANDOX Systems 製 Trigger Delay Module [23] を用いて位相を検出しバンチ幅モニターへ参照信号として供給した。

Mu^- の生成効率などによってこのセットアップにおける加速 Mu^- の強度はおよそ 0.5 MHz となっている。これに対し、ダークレートを含めた MCP のヒットレートは 12.0 ± 0.2 MHz であった。そのため、取得されたデータの大半は背景事象となる。そこで、まず FADC でサンプリングされた波形データを用いて加速 Mu^- 由来と考えられる信号事象を抽出し、その後 TDC で取得された高精度の時間情報を用いたバンチ幅測定を行う。

主要な背景事象源はミューオンの崩壊によって放出される数 MeV の陽電子である。MCP で検出される Mu^- は陽電子に比べて高いゲインで検出されることが分かっている [11]。ミューオンが Mu^- 生成標的に到達してから加速 Mu^- の到来時間するまでの飛行時間 (TOF) を定義すると、シミュレーション結果から TOF は 839 ns と推測される。Figure 6 は推定される Mu^- 到来時間付近のイベント (ON-TIME) と背景事象のみと考えられるイベント (OFF-TIME) の MCP 信号波高の比較である。高波高領域において超過が見られることが分かる。そこで、800 mV 以上の信号のみを選択してその TOF 分布を記したのが Fig. 7 である。840 ns と 1440 ns 付近に 2 つのピークが確認できる。これはミューオン実験施設に陽子ビームを供給する RCS 加速器が 2 バンチ運転をしていたこと由来するマクロバンチで、バンチ間隔 598 ns と一致する。このことから RFQ による 89 keV までの加速と、信号波高による Mu^- の抽出が成功していることが分かる。

Figure 7 のピーク付近のイベントの TDC 情報を用いてバンチ構造の測定を行う。TOF 分布の信号付近以外の領域に対してフィットを行い信号付近に残留してしまった背景事象量を見積もった。バンチ幅測定結果から背景事象を一様に差し引いた結果が Figure 8 である。ガウシアンフィットの結果としてバンチ幅は $\sigma = 0.55 \pm 0.14$ ns であった。破線は粒子輸送シミュレーションにて見積もった値であり、測定結果と誤差の範囲で一致している。この結果は低エネルギー・低強度ビームに対するこの手法の有効性を示している。また、このプロットは約 40 時間の測定で取得した約 70 イベントの結果である。今後ビーム強度の増加とともに測定時間は減少し、最終的には数分程度まで短縮可能となる。

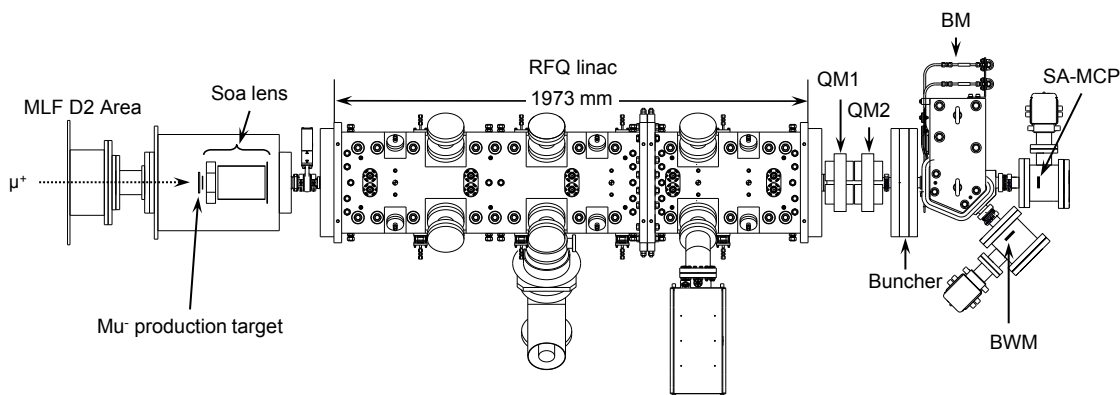


Figure 4: The schematic drawing of the apparatus to produce Mu^- bunches installed into the MFLF MUSE D2 area at the J-PARC.

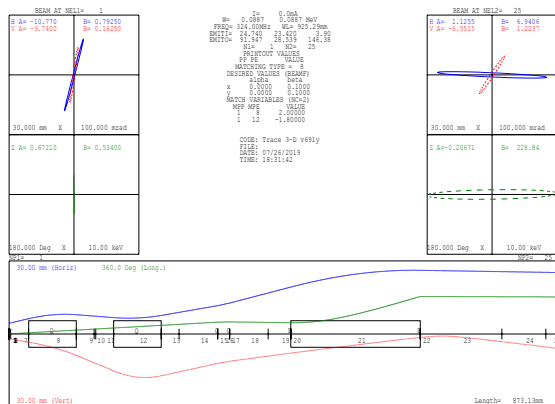


Figure 5: The TRACE3D calculation for the period from the RFQ exit to the MCP.

4. まとめと今後の展望

ミューオンの異常磁気能率測定による新物理探索を目的とした実験が J-PARC で準備中である。この実験におけるミューオン線形加速器上流部で用いるためのバンチ幅モニターの開発を行った。モニターは、MCP と CFD 回路を用いた高時間分解能の 1 ミューオン検出手法により 1 % 程度の位相分解能でのバンチ幅測定を目指す。ピコ秒パルスレーザーを用いた時間分解能測定結果としては 65 ps 以下となり 2 % 以下の時間分解能を有していることを確認した。また、89 keV の加速 Mu^- とこのモニターを用いたバンチ幅測定の実証試験を実施した。その結果としておよそ 40 時間の測定で $\sigma = 0.55 \pm 0.14$ ns のバンチ幅の測定に成功した。これは低エネルギー・低強度なミューオンビームに対する本モニターの有効性を示す結果となった。

現在、Figure 9 に示すように、340 keV まで加速する実機 RFQ とそこから 1.3 MeV まで加速するプロトタイプの Interdigital H-mode ドリフトチューブ加速器 (IH-DTL) を用いた加速試験を H ラインで計画中である。RFQ はすでに準備が完了しており、プロトタイプ IH-

DTL は低電力試験やカップラーの設計を進めている段階である [24]。これについては本学会論文集 [25, 26] にも詳細が記載されている。加速試験においては今回開発したバンチ幅モニターを利用して IH-DTL 前後でのバンチ幅測定を目指す。特に IH-DTL は Alternating-phase focusing 方式を用いているため [8]、ビーム整合の調整やその加速の検証に大きな役割を果たすと期待できる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15H03666、JP15H05742、JP16H03987、JP16J07784、JP18H03707、及び JP18H05226 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] G. W. Bennett *et al.*, [Muon $g - 2$ Collaboration], Phys. Rev. D **73**, 072003 (2006).
- [2] M. Tanabashi *et al.* [Particle Data Group], Phys. Rev. D **98**, no. 3, 030001 (2018).
- [3] A. Chapelain [Muon $g - 2$ Collaboration], EPJ Web Conf. **137**, 08001 (2017).
- [4] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2019**, no. 5, 053C02 (2019).
- [5] N. Kawamura *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, no. 11, 113G01 (2018).
- [6] G. A. Beer *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2014**, 091C01 (2014).
- [7] Y. Kondo *et al.* in *proceedings of IPAC2015, Richmond, 2015* (Richmond, Virginia USA), p. 3801.
- [8] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, no. 4, 040101 (2016).
- [9] M. Otani *et al.*, in *proceedings of IPAC2019, Melbourne, 2019* (Melbourne, Victoria Australia), p. 1924.
- [10] Y. Kondo *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **874**, no. 1, 012054 (2017).
- [11] S. Bae *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **21**, no. 5, 050101 (2018).
- [12] B. Kim *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **899**, 22 (2018).
- [13] M. Otani *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **1067**, no. 5, 052012 (2018).
- [14] R. Kitamura *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **874**, no. 1, 012055

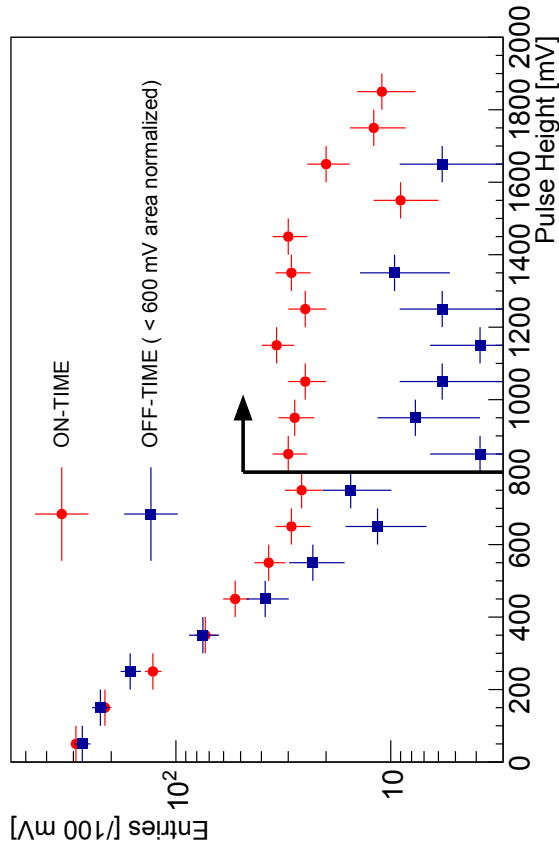


Figure 6: Pulse height distribution of the signal-contained events (ON-TIME) and the background events (OFF-TIME). The OFF-TIME events are normalized so that the number of OFF-TIME events whose pulse height is less than 600 mV is equal to that of the ON-TIME events.

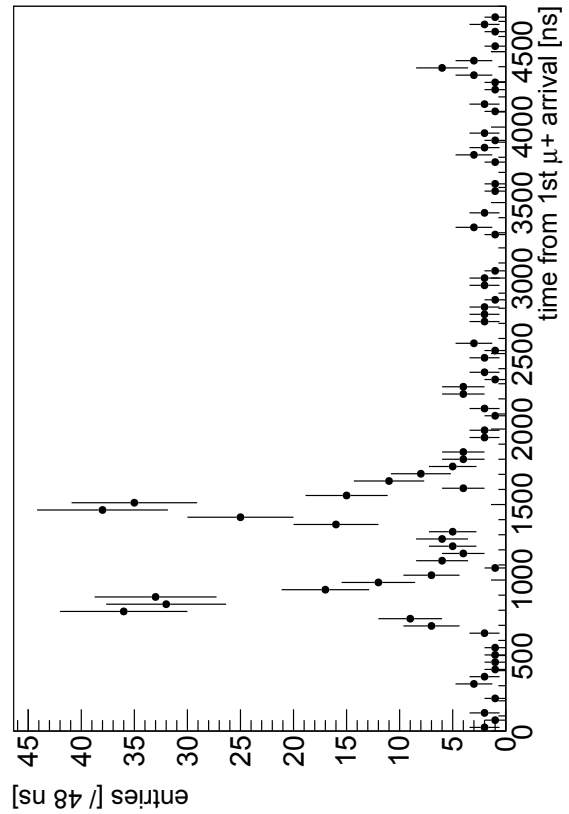


Figure 7: TOF distribution of the events whose pulse height is more than 800 mV.

プロトタイプ用入力 RF カップラーの開発」、第 17 回日本加速器学会年会論文集.

(2017).

- [15] HAMAMATSHU PHOTONICS K.K.; <https://www.hamamatsu.com>
- [16] K. Inami [Belle-II PID Group], Nucl. Instrum. Meth. A **766**, 5 (2014).
- [17] CAEN S.p.A.; <https://www.caen.it>
- [18] M. Yotsuzuka *et al.*, in *proceedings of IPAC2019, Melbourne, 2019* (Melbourne, Victoria Australia), p. 2571.
- [19] 四塚麻衣 他、「J-PARC E34 muon $g - 2$ /EDM 実験：低エミッタンスミューオンビーム実現に向けた高時間分解能縦方向ビームプロファイルモニターの開発」、第 17 回日本加速器学会年会論文集.
- [20] M. Otani *et al.*, arXiv:1907.02235 [physics.acc-ph].
- [21] K. R. Crandall and D. P. Rusthoi, Los Alamos Report No. LA-UR-97-886, 1997.
- [22] H. Takeda, Los Alamos Report No. LA-UR-97-886, 1998.
- [23] CANDOX Systems Inc.; <http://www.candox.co.jp>
- [24] Y. Nakazawa *et al.*, in *proceedings of IPAC2019, Melbourne, 2019* (Melbourne, Victoria Australia), p. 606.
- [25] 中沢雄河 他、「ミューオン線形加速器 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.
- [26] 中沢雄河 他、「ミューオン線形加速器 APF 方式 IH-DTL

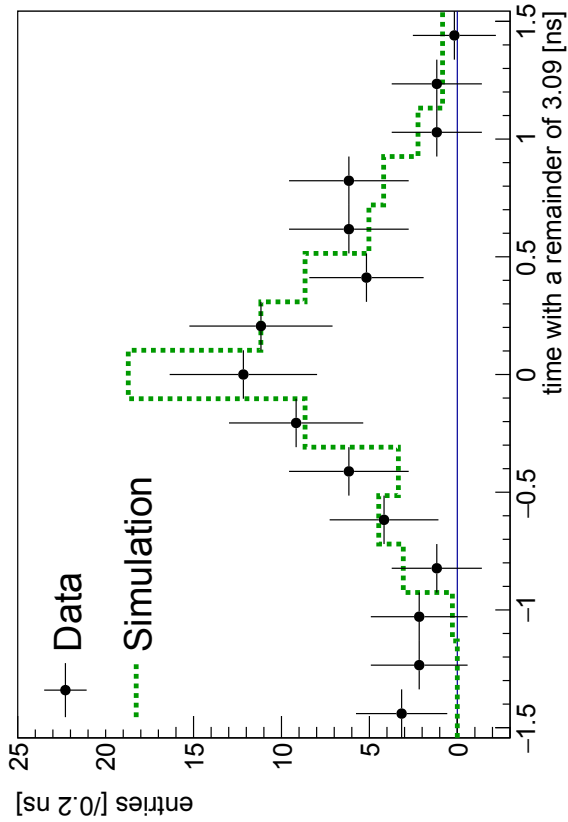


Figure 8: The measurement result of the bunch width. The event number in the simulation is normalized. The range of horizontal axis corresponds to a period of operating RF.

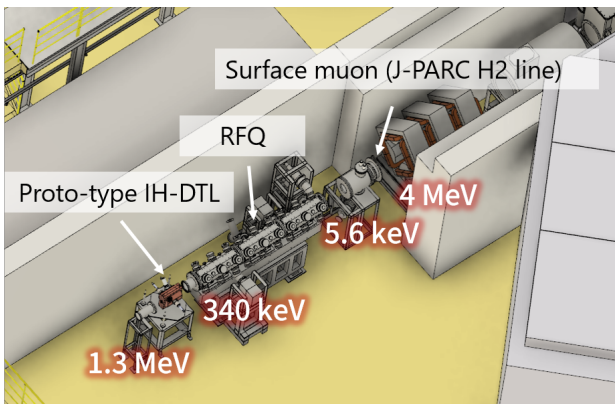


Figure 9: Setup image of the acceleration test up to 1.3 MeV.