

紫外光由来 H⁻ 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

COMMISSIONING OF THE DIAGNOSTIC BEAM LINE FOR THE MUON RF ACCELERATION WITH H⁻ ION BEAM DERIVED FROM THE ULTRAVIOLET LIGHT

中沢雄河^{*A)}、飯沼裕美^{A)}、大谷将士^{B)}、河村成肇^{B)}、北村遼^{C)}、
近藤恭弘^{D)}、齊藤直人^{E)}、須江祐貴^{F)}、三部勉^{B)}、山崎高幸^{B)}

Yuga Nakazawa^{*A)}, Hiromi Iinuma^{A)}, Masashi Otani^{B)}, Naritoshi Kawamura^{B)}, Ryo Kitamura^{C)},
Yasuhiro Kondo^{D)}, Naohito Saito^{E)}, Yuki Sue^{F)}, Tsutomu Mibe^{B)}, Takayuki Yamazaki^{B)}

^{A)}Ibaraki University, ^{B)}KEK, ^{C)}University of Tokyo, ^{D)}JAEA, ^{E)}J-PARC center, ^{F)}Nagoya University

Abstract

A muon LINAC is being study for a precise measurement of the muon anomalous magnetic moment (g-2) and the electric dipole moment (EDM) at J-PARC. We conducted an experiment with a muon RF acceleration on October and December 2017. The surface muon beam is irradiated to a metal degrader to generate slow negative muonium. The slow negative muoniums are accelerated to 89 keV with an electrostatic accelerator and an RFQ. Prior to muon RF acceleration test, we conducted the commissioning of the diagnostic beam line consisting of quadrupole magnet pair and a bending magnet. The ultraviolet light is irradiated to an aluminum foil and H⁻ ion is generated. It simulates a negative muonium. Therefore, we can check operation for diagnostic beam line, which is essential for transportation and momentum selection of negative muonium. In this presentation, I would like to report the performance evaluation of the diagnostic beam line by H⁻ ions.

1. はじめに

素粒子標準模型を超えた物理として、ミュオンの異常磁気能率 (g-2) がある。ミュオン g-2 はブルックヘブン国立研究所での先行実験により 0.54 ppm という高精度で測定され、標準模型の理論値から 3.7 σ の乖離が存在することを報告した [1, 2]。先行実験ではパイオン崩壊から得たエミッタンスの大きいミュオンビームを蓄積するために収束電場を必要としたが、J-PARC E34 実験では全く異なる手法での測定を計画している [3]。E34 実験では超低速ミュオンの再加速により、低エミッタンスのミュオンビームを生成し、ビーム蓄積に収束電場を必要としない手法をとることで、先行実験における系統誤差を削減し、高精度な測定を目指す。

E34 実験の核の一つとして、ミュオン線形加速器の開発が現在進められている [4]。ミュオン線形加速器は上流側から静電加速器、高周波四重極線形加速器 (RFQ: Radio Frequency Quadrupole)、交差楕円 H モードドリフトチューブ線形加速器 (IH-DTL: Inter-digital H-mode Drift-Tube Linac)、ディスクアンドワッシャー型結合空洞線形加速器 (DAW-CCL: Disc And Washer Coupled Cavity Linac)、円盤型装荷型加速構造 (DLS: Disc Loaded Structure) といった加速構造を持ち、運動エネルギー 212 MeV までミュオンを加速する。

我々は RFQ を用いたミュオン高周波加速試験を 2017 年 10 月と 12 月に実施した [5]。この加速試験ではミュオンビームを金属薄膜標的に停止させて、Mu⁻ (負ミュオンニウムイオン) を生成し、静電加速収束器、RFQ によって Mu⁻ を 89 keV まで加速する。加速した Mu⁻ は四極電磁石と偏向電磁石で構成される診断ビームライ

ンで輸送された後、検出器でイベント数、TOF を測定する。加速された Mu のビーム強度は $(5 \pm 1) \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ と非常に低く [6]、各電磁石の最適化を Mu⁻ で調整することは困難であった。そのためミュオン加速試験に先立ち、紫外光を金属薄膜に照射することで発生した H⁻ イオンビームを用いることで診断ビームラインの調整運転を実施した。

本論文では 2 章にミュオン高周波加速試験、及び調整運転時のセットアップの概要を示す。3 章では H⁻ の生成過程を示し、4 章で H⁻ イオンの測定結果と実際に Mu⁻ イオンビームを用いた調整運転の結果と考察を示す。最後に 5 章で本論文をまとめる。

2. 実験セットアップ

ミュオン高周波加速セットアップ

Figure 1 にミュオン高周波加速におけるセットアップを示す。まず、J-PARC MLF (material and life science experimental facility) [7] で輸送した、運動エネルギー約 3 MeV の表面ミュオンビームを静電加速器に入射する。静電加速器は表面ミュオンビームを停止させる標的を設置する電極に加え、さらに 4 つの電極 (3 つの電極と GND 電極) を持つ構造となっており、静電加速と静電収束を行う [8]。カプトンとアルミニウムの金属薄膜から成る標的に表面ミュオンビームを入射することで、低速 (1 keV 以下) の Mu⁻ を生成する。Mu⁻ は μ^+ と 2 つの電子の結合状態で構成されている。低速 Mu⁻ を静電加速器 RFQ 入射エネルギー 5.6 keV まで加速する。5.6 keV に加速された Mu⁻ を RFQ により 89 keV に加速する。RFQ の下流には診断ビームラインとして、二つの四極電磁石 (QM: Quadrupole magnet) と偏向電磁石 (BM: Bending magnet) が設置してある。

Figure 2 は、診断ビームラインのセットアップを示

* 18nm021f@vc.ibaraki.ac.jp

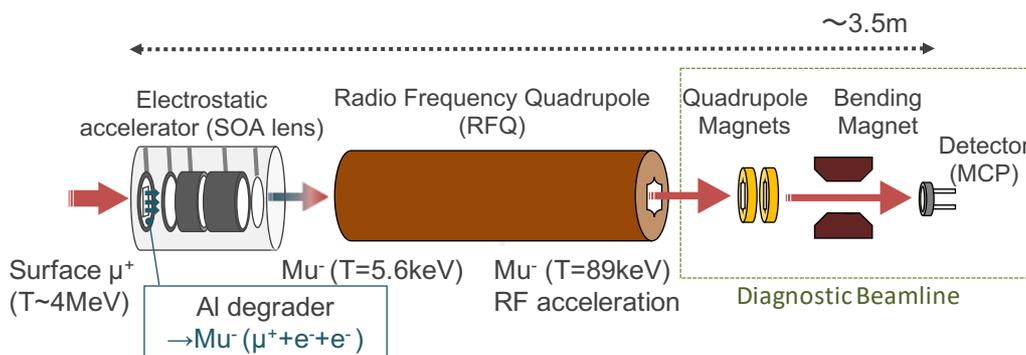


Figure 1: Experimental setup of muon RF acceleration test.

す。診断ビームラインの役割は四極電磁石によるビーム収束と偏向電磁石による運動量選別とバックグラウンドの排除である。2つの四極電磁石を用いることで水平方向(QM1)と垂直方向(QM2)の両方向に収束作用を与え、ビームの発散を抑制する。後続に配置された偏向電磁石ではビームダクトが二股に分かれており、一方は直線にダクトが配置されており、もう一方は45度曲げた位置に配置されている。診断ビームに輸送されるビームには、高周波加速された Mu^- に加え、標的から突き抜け、様々な運動量を持ったミュオンや陽電子といったバックグラウンドが存在する。そのため、偏向電磁石を用いたバックグラウンドの排除は必須である。

直進部と偏向部の下流にはそれぞれMCP (micro channel plate) が設置されている。偏向部にはMCPに加えて、蛍光板、CCDカメラが設置されており、これらをBPM (Beam Profile Monitor) と呼ぶ。CCDカメラは、蛍光板からの光信号を検出して二次元のビーム断面形状を測定する。これより、BPMでは加速された Mu^- のTOF測定、及び、プロファイル測定が可能となる。

調整運転セットアップ

Figure 3に示すように、調整運転では Mu^- 生成標的を、中心に直径3mmの穴の空いた厚さ0.5mmアルミニウム標的に取り換え、固定用アルミプレートで光ファイバーを取り付けている。光源には波長範囲が185nm-2000nmのキセノンフラッシュランプ(L9455)を使用した[9]。光ファイバーから生じた紫外線をアルミニウム標的に照射することで、 H^- イオンが生成される。 H^- イオンを Mu^- の代わりにビームとして扱うには、加速電圧を調整して同じ運動量のビームにすることが必要である。運動量が等しいビームは電磁石の磁場に対して同じ挙動をとるビームとなるため、電磁石の調整が可能となる。ただし調整運転時はRFQは使用せず、その区間はドリフトスペースとする。

3. H^- 生成過程

負イオンの生成過程は、1. 電子捕獲、2. イオン対生成、3. 電荷交換の3つの過程に分類できる[10]。本研究において、アルミニウム金属標的の表面に水分、不純物としての H_2 が付着していると仮定した時、 H^- 生成過程は1. 電子捕獲と2. イオン対生成の2つの可能性があると考え

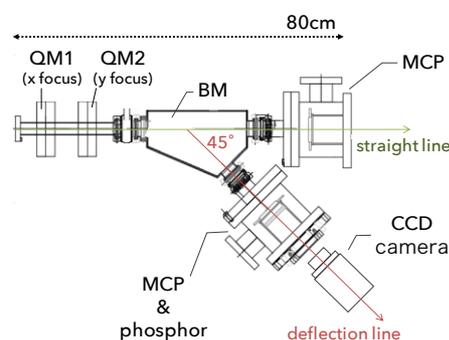


Figure 2: Schematic view of diagnostic beam line. There are quadrupole magnet pair (QM1, QM2), a bending magnet (BM), and micro channel plate (MCP) detectors at the straight line and the deflection line. The MCP, the phosphor, and the CCD camera of the deflection line is a beam profile monitor (BPM).

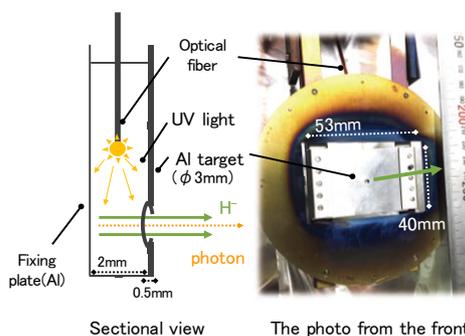


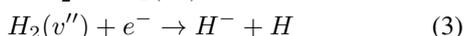
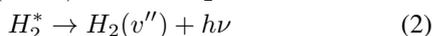
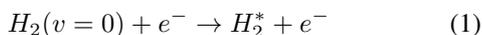
Figure 3: Schematic view and photo of Al target in electrostatic accelerator.

える。

3.1 電子捕獲

電子捕獲では、振動励起分子への電子の解離付着 (Dissociative electron attachment) によって負イオンが生成される[11, 12]。電子は紫外光をアルミニウム標的に当て

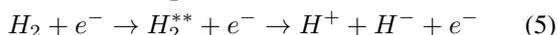
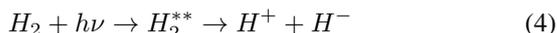
た時の光電効果から生じていると考える。生成過程は次のような機構で表す。



Equation (1), (2) は基底状態の H_2 が電子の付着によって振動状態 ($v'' \gg 5$) に励起され、振動励起分子 $H_2(v'')$ が生成される。さらに真空紫外光放射 $h\nu$ を示している。Equation (3) では、振動励起分子へ電子の解離付着プロセスが生じることで、 H^- イオンが生成されることを示す。

3.2 イオン対生成

イオン対生成では光照射と電子衝突の両方で起こりうる反応である。生成過程はそれぞれ次の機構で表される。



H_2^{**} は超励起状態と呼び、イオン化エネルギー以上の内部エネルギーを持つ状態を指す [13, 14]。Equation (4), (5) の過程は自動イオン化の一種である。

以上より、二通りの H^- 生成プロセスの可能性が考えられるが、現状では生成過程の特定には至っていない。

4. シミュレーション

調整運転におけるビーム輸送のシミュレーションを行った。初めに、Opera-3d Static Electromagnetics Module (TOSCA) により、診断ビームラインの四極電磁石と偏向電磁石をモデル化し、静磁場計算を行った [15]。次に、粒子軌道計算には Geant4 (Geometry And Tracking) を用いた [16]。TOSCA で計算した静磁場分布を導入することで診断ビームラインでの粒子軌道を計算した。粒子軌道計算ではビーム進行方向を z とし、水平、垂直成分をそれぞれ x , y とした。

ミュオン加速試験において、運動エネルギー 89 keV に加速された Mu^- の運動量は 4.4 MeV/c であるので、この運動量を持つ H^- イオンの運動エネルギーは 10 keV に相当する。シミュレーションでは、静電加速器に 10 kV の加速電圧を印加した時、ビームが 45 度の偏向部にある検出器の中心に到達するような偏向電磁石、四極電磁石の電流値を見積もる。ただし、ビームには H^- イオンの代わりとして陽子を同質量の粒子として使用し、かつ直径 10 mm で角度方向に広がりがないガウス分布と仮定する。

Figure 4a に偏向電磁石のみに電流を流した時の x - y 断面ビーム形状を示す。3 通りの電流値による結果を比較しており、12.3 A の電流を流した時に検出器の中心にビームが到達することを示す。Figure 4b では偏向電磁石が 12.3 A かつ、2 つの四極電磁石に最適な電流値を流し、最も収束した時のビーム形状を示している。この時、QM1、QM2 に流した電流はそれぞれ 0.23 A、0.4 A であり、直径 10 mm の入射ビームを直径 2 mm 程度まで収束できることを確認した。

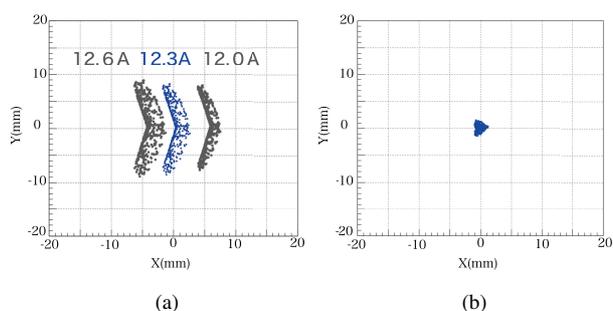


Figure 4: Beam profile simulation (a)Fit the center beam axis with the central of detector by using BM. (b)Focus of beams by using QM1 and QM2, when BM=12.3 A.

5. 結果と考察

5.1 H^- イオン測定

まず、標的に紫外光を照射した時に発生する H^- イオンの測定結果を示す。 H^- イオンの同定を行うために、ある加速電圧を印加した時の H^- イオンの TOF 分布を測定した。

Figure 5a には一例として、静電加速器に 2kV の電圧を印加した時の TOF 分布を示す。2 つのピーク信号が検出されており、早いタイミングで来ているイベントが光子、そのあとに観測されたイベントが H^- イオンであると推測した。光子のピーク信号を原点 (t_0) とし、フィッティングによりそれぞれのピーク値を算出し、 H^- イオン信号の TOF を算出した。

Figure 5b は、静電加速器に印加する加速電圧を変化させた時の H^- イオン信号の TOF の変位を示す。実測値 (プロット) と予測された結果 (実線) を比較した結果、測定された粒子の TOF は、予測結果とよく一致していた。さらに、 H^- イオン信号を偏向電磁石で任意に曲げることができたことから、負電荷の粒子であることが確認できた。

以上より、アルミニウム標的に紫外光を照射した時に H^- イオンビームが生成されることが判明した。また、測定された H^- イオンのビーム強度は、 $(7 \pm 2) \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ であり、診断ビームラインの調整運転が可能となり得る強度であった。

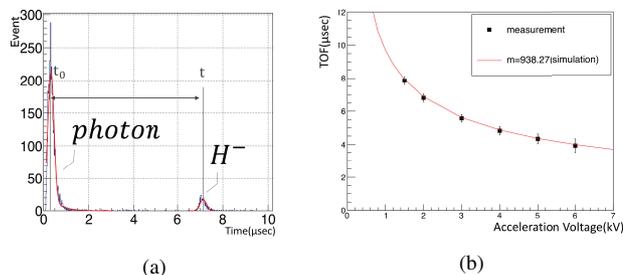


Figure 5: Identification of H^- formation. (a) The measured TOF distribution of H^- , when acceleration voltage is 2 kV. (b) Comparison of TOF gained from acceleration voltage between the measured data and simulation.

5.2 診断ビームライン調整運転

H^- イオンが生成していることを確認したので、静電加速器に 10kV の加速電圧を印加した状態で電磁石の調整を行う。 H^- イオンビームの x-y 断面ビーム形状を BPM で測定した。

Figure 6a は H^- イオンビームの中心軸を CCD カメラのスクリーンの中心に合わせるために、偏向電磁石の電流を調整した時のビーム形状の測定結果を示す。 H^- イオンビームは 11.1 A でスクリーンの中心に到達した。この結果より、ミュオン加速試験における偏向電磁石の電流値を 11.1 A と定めた。

四極電磁石の調整については、 H^- イオンビームと加速された Mu^- ビームは異なるビーム断面を有しているため、偏向電磁石のような詳細な調整はできない。よって、ミュオン加速試験での直接的な値は得られないが、動作やパラメータ等を確認するために四極電磁石の調整も行った。Figure 6b では偏向電磁石を 11.1 A に設定し、2つの四極電磁石に最適な電流値を流し、最も収束したビーム形状の測定の結果を示す。QM1、QM2 に流した電流はそれぞれ 0.4 A、0.56 A であり、直径 2 mm 程度まで収束できることを確認した。 Mu^- イオンの 4% ほどの信号が、ビーム軸から離れた位置に到達しているが、これは四極電磁石の磁場によってキックされた成分であると考える。

四極電磁石の電流値との不一致の原因は入射ビームのパラメータが異なっていることが挙げられる。シミュレーションでは角度方向の広がりが少ないビームを仮定した。対して調整運転では、 H^- イオンの発生源の測定が現状ではできないため入射ビームのパラメータが判明していない。実際の H^- イオンは角度方向に広がりを持ったビームであると考えられるので、このような不一致が生じたと考えられる。

また、偏向電磁石の電流値の不一致については、原因の 1 つに TOSCA による偏向電磁石のモデル化と製作仕様書との有効長の不一致が考えられる。TOSCA で偏向電磁石のモデルを組み、静磁場計算をしたところ、有効長が仕様書での値よりも 10% 程度小さい値となった。これが原因となり、実測とシミュレーション値での不一致見られると考えた。

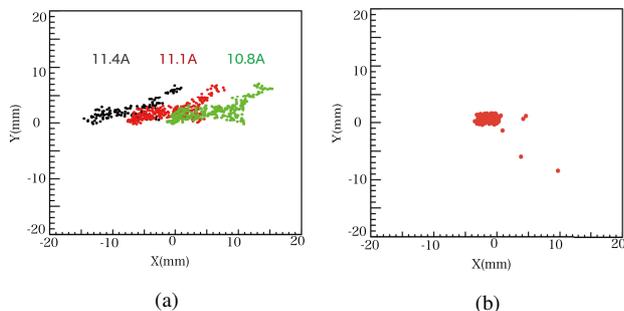


Figure 6: Beam profile measurement. (a) Fit the center beam axis with the central of CCD camera screen by using BM. (b) Focus of H^- beam by using QM1 and QM2, when BM=11.1 A.

6. まとめ

本研究では、ミュオン高周波加速試験における診断ビームラインの調整運転を行った。調整運転用としての H^- イオンビームを非常に簡易な方法で生成できること発見し、実際にミュオンビームでは検証し難い四極電磁石、偏向電磁石の動作確認、調整を行い、ミュオン高周波加速試験への準備を完了した。

また、今後 H^- イオンビームによる調整運転を 1 つのツールとして安定に扱えるようにするため、現在 H^- 生成過程の解明を進めている。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP15H03666、JP16H03987、JP16J07784、JP18H03707、JP18J22129 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] G. W. Bennett *et al.*, Phys. Rev. D 73, 072003 (2006).
- [2] A. Keshavarzi *et al.*, Phys. Rev. D 97 (2018) 114025
- [3] T. Mibe *et al.* edit., *J-PARC E34 Conceptual Design Report, Technical Design Report* (2011).
- [4] Y. Kondo *et al.*, “Re-Acceleration of Ultra Cold Muon in JPARC Muon Facility”, presented at IPAC’18, Vancouver, Canada, April-May 2018, paper FRXGBF1
- [5] S. Bae *et al.*, “First muon acceleration using a radio-frequency accelerator”, Phys. Rev. Accel. Beams. 21, 050101 (2018)
- [6] R. Kitamura *et al.*, “Result of the First Muon Acceleration With Radio Frequency Quadrupole”, presented at IPAC’18, Vancouver, Canada, April-May 2018, paper TUPAL076.
- [7] W. Higemoto *et al.*, *Materials and Life Science Experimental Facility at the Japan Proton Accelerator Research Complex IV: The Muon Facility*, Quantum Beam Sci. 2017, 1, 11.
- [8] K. F. Canter, P. H. Lippel, W. S. Crane, and A. P. Mills Jr., *Positron studies of solids, surfaces and atoms*, World Scientific, Singapore, 1986 p.199.
- [9] HAMAMATSU, 5 w xenon flash lamp modules; https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/5W_Xe-F_TLSZ1006E.pdf.
- [10] T. Sugiura, Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan, 1979 Volume 27 Issue 4 Pages 217-245.
- [11] O. Fukumasa, Shinku, 1995 Volume 38 Issue 11 Pages 903-910.
- [12] P. Berlemont, D. A. Skinner, and M. Bacal, Rev. Sci. Instrum. 64, 2721 (1993).
- [13] Lal A. Pinnaduwege *et al.*, Phys. Rev., 8 Feb. 199, pp. 754-757.
- [14] Lal A. Pinnaduwege *et al.*, Chemical Physics Letters 277 (1997) 147-152.
- [15] Opera simulation software; <https://operafea.com/tag/validation-studies/>.
- [16] Geant4 beamline; <http://public.muonsinc.com/Projects/G4beamline.aspx>.