

APF 方式 IH-DTL によるミューオン加速実証試験のための診断ビームラインの開発 DEVELOPMENT OF A DIAGNOSTIC BEAMLINE FOR THE DEMONSTRATION OF THE MUON ACCELERATION WITH AN APF IH-DTL

中沢 雄河^{*A)}、飯沼 裕美^{A)}、岩下 芳久^{B)}、岩田 佳之^{C)}、Cicek Ersin^{D)}、大谷 将士^{D)}、河村 成肇^{D)}、
北村 遼^{E)}、近藤 恭弘^{E, A)}、齊藤 直人^{F)}、須江 祐貴^{G)}、竹内 佑甫^{H)}、長谷川 和男^{I)}、林崎 規託^{J)}、
三部 勉^{D)}、森下 卓俊^{E)}、安田 浩昌^{K)}、山崎 高幸^{D)}、吉田 光弘^{D)}、四塚 麻衣^{G)}

Yuga Nakazawa^{*A)}, Hiromi Iinuma^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}, Yoshiyuki Iwata^{C)}, Ersin Cicek^{D)}
Masashi Otani^{D)}, Naritoshi Kawamura^{D)}, Ryo Kitamura^{E)}, Yasuhiro Kondo^{E, A)}, Naohito Saito^{F)}, Yuki Sue^{G)},
Yusuke Takeuchi^{H)}, Kazuo Hasegawa^{I)}, Noriyosu Hayashizaki^{J)}, Tsutomu Mibe^{D)}, Takatoshi Morishita^{E)},
Hiromasa Yasuda^{K)}, Takayuki Yamazaki^{D)}, Mitsuhiro Yoshida^{D)}, Mai Yotsuzuka^{G)}

^{A)}Ibaraki University, ^{B)}Kyoto University, ^{C)}NIRS, ^{D)}KEK, ^{E)}JAEA, ^{F)}J-PARC center, ^{G)}Nagoya University,
^{H)}Kyushu University, ^{I)}QST, ^{J)}Tokyo Institute of Technology, ^{K)}University of Tokyo

Abstract

The muon linear accelerator is under development for the muon $g-2$ /EDM experiment in J-PARC. Since the first-stage acceleration with a radio frequency quadrupole (RFQ) was successful in 2017, the muon acceleration with a prototype of an inter-digital H-mode drift tube linac (IH-DTL) plans to be demonstrated at J-PARC MLF H-line as the next stage. The IH-DTL prototype will accelerate muons from 0.34 MeV to 1.3 MeV at a drive frequency of 324 MHz. We designed a diagnostic beamline in order to efficiently detect the accelerated muon and measure an emittance. The beam intensity was expected to be $\sim 10^{-2}$ Hz and it shows that the muon acceleration test is feasible. In this paper, the feasibility of a demonstration of muon acceleration with the IH-DTL prototype and the basic design of a bending magnet and single-gap buncher for the diagnostic beamline are reported.

1. はじめに

素粒子標準模型を超える物理探索のため、大強度陽子加速器施設 J-PARC ではミューオン異常磁気能率 ($g-2$) の 0.1 ppm の測定精度とミューオン電気双極子能率 (EDM) の $10^{-21} e \cdot \text{cm}$ オーダーの測定感度を持つミューオン $g-2$ /EDM 精密測定装置の建設 [1] を進めている。ビーム由来の系統誤差要因を排除するためには空間的・エネルギー的広がり極めて小さい低エミッタンスミューオンビームが要求される。そこで、我々は全 4 段の高周波加速器から構成されるミューオン線形加速器 [2] を用いてミューオンを 25 meV から 212 MeV まで加速することで、実験的要請を満たすミューオンビームを実現する。

2017 年 10 月には初段加速器の高周波四重極線形加速器 (RFQ) のプロトタイプを用いたミューオンの初加速を実証した [3]。同年に蛍光面付きの Micro channel plate (MCP) と CCD カメラで構成される Beam profile monitor (BPM) [4] による横方向ビームプロファイル測定 [5]、翌年にはマルチアノード MCP と CFD 回路で構成される Bunch width monitor (BWM) [6] による縦方向ビームプロファイル測定 [7] を成功させ、ミューオンビーム専用の検出器の開発と評価を完了させた。

RFQ によるビームの加速・バンチングの実証が完了したことから、次は 2 段目の加速器である IH 型ドリフトチューブ線形加速器 (IH-DTL) による追加速の実証試験が目下の課題である。IH-DTL では、ミューオンの寿命による崩壊損失を抑制するために、磁石などの収束要

素を不要とし高周波電場のみでビーム収束が可能となる Alternative Phase Focusing (APF) 法 [8] を採用しており、空洞の簡略化と短距離加速を実現する。

RFQ は J-PARC の H⁻ 用に製作された空洞 [9] を質量比でパワースケールして使用することを予定しており、空洞の準備は既に完了している。一方で、IH 実機空洞は設計 [10] は既に完了しているが、セル長がミューオン専用に設計された IH-DTL のモデルケースは無いため、空洞の R&D も必須であった。そこで我々は、実機製作に先立ち IH-DTL プロトタイプを製作した。2019 年に低電力試験による空洞・RF カップラーの性能の評価 [11, 12] を行い、加速試験に要求される電場分布を満たすことを確認した。2020 年冬には大電力試験も予定しており、こちらに関しては本学会論文集 [13] を参照されたい。

現在、IH-DTL によるミューオン加速の原理実証を実現すべく、IH-DTL プロトタイプによる加速実証試験を J-PARC MLF H ライン [14] にて計画している。この加速実証試験では実験エリア面積の制限のため RFQ と IH-DTL プロトタイプのビームマッチング整合が行えず、横方向の実エミッタンスの増大が懸念される。加速ミューオンビームを診断ビームラインで輸送する際に、電磁石による収束の有り無しで検出器までの輸送効率が 60% 程度減少してしまう。そのため、加速試験に先駆けて電磁石やバンチャーなどの設定を最適化する必要がある。

そこで本論文では、ビームシミュレーションによる IH-DTL プロトタイプでのミューオン加速実証の実現性を示し、加速実証試験のために新たに設計した電磁石とバンチャーから構成される診断ビームラインの開発状況

* 20nd103s@vc.ibaraki.ac.jp

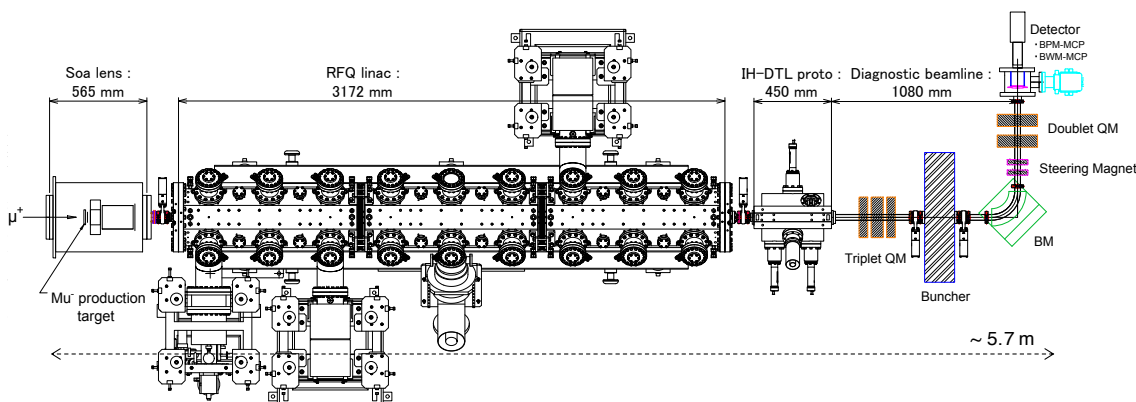


Figure 1: The setup for the simulation of the muon acceleration with IH-DTL prototype.

について報告する。

2. ビームライン設計

2.1 実験セットアップ

IH-DTL プロトタイプによるミューオン加速試験の実験セットアップの概略を Fig. 1 に示す。ビームラインは上流から Soa レンズと呼ばれる静電加速器、RFQ、IH-DTL プロトタイプ、そして診断ビームラインで構成する。H 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 (Al) に入射することで、1 keV 以下の運動エネルギーを持つ負ミューオニウム ($\text{Mu}^-; \mu^+, e^-, e^-$) を生成する。生成した Mu^- を Soa レンズによって RFQ の入射エネルギーである 5.6 keV まで静電加速した後、RFQ で 0.34 MeV まで加速する。加速されたビームは、次段加速器である IH-DTL プロトタイプに直接入射し 1.3 MeV まで加速する。

E34 実験では加速器間のビームマッチングの不整合によるエミッタンス増大を抑制するため、RFQ と IH-DTL との間に四重極電磁石 (QM) とバンチャーから構成される輸送ビームラインを導入する予定であるが、本加速試験では実験エリア面積の制限 (ビームライン長さの制約が約 6 m 以内) により輸送ビームライン設置が困難であるため、RFQ の直後に IH-DTL プロトタイプを配置する。加速されたミューオンビームは、トリプレット QM、バンチャー、90 度偏向電磁石 (BM)、ステアリングマグネット、ダブルレット QM から構成される診断ビームラインによって検出器まで輸送する。検出器には BPM と BWM を使用し、加速 Mu^- ビームの飛行時間とビームの縦横方向のプロファイルを測定する。偏向電磁石と 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や金属薄膜を通過して下流まで届きうる突き抜け μ^+ を排除した上で、エネルギー測定が可能となる。

ビームラインのパラメータは、以下のシミュレーションに基づいて決定した。Soa レンズの粒子軌道は GEANT4 [15] によって計算し、RFQ には PARMTEQM [16] を使用した。IH-DTL プロトタイプは、CST MICROWAVE STUDIO (MWS) [17] により再現した 3 次元電磁場分布を GPT [18] に組み込んで粒子軌道を計算した。診断ビームラインのパラメータは TRACE3D [19] と PARMILA [20] を

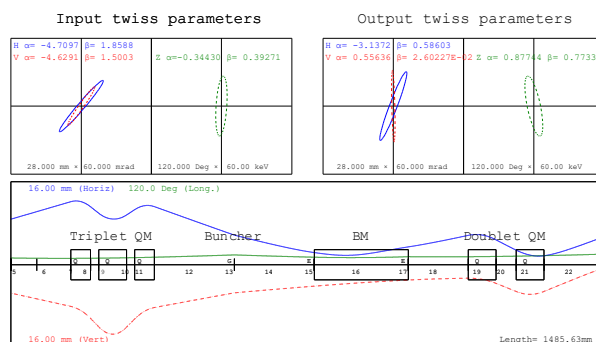


Figure 2: The beam envelope of $\sqrt{5}$ rms with TRACE3D between the IH-DTL prototype exit and the MCP detector.

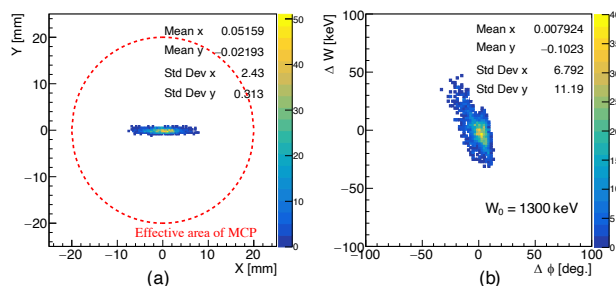


Figure 3: Simulated phase space distributions at the MCP detector with PARMILA. (a) y vs. x . The red dashed line shows the effective area of the MCP detector. (b) ΔW vs. $\Delta \phi$.

もとに設計した。

Figure 2 に入射位相空間分布とビームエンベロープ、Fig. 3 に検出器位置で予想される加速 Mu^- の x - y 分布と相対的な位相分布-運動エネルギー分布を示す。診断ビームラインは MCP の有感領域内 (ϕ 40 mm) に輸送される加速 Mu^- の個数が最大になるように最適化しており、輸送効率は 99.9% を達成した。

IH-DTL によるミューオン加速の原理実証に加えて、

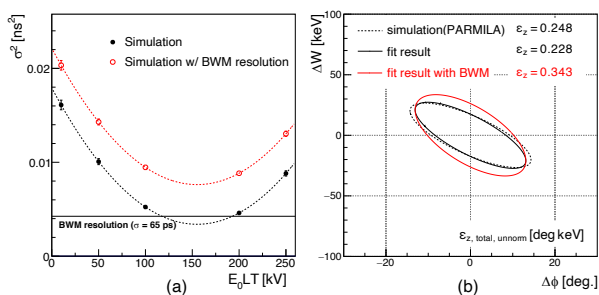


Figure 4: (a) Simulated bunch width at the BWM location as a function of the effective voltage of the buncher. The red plot shows the bunch width including the time resolution of the BWM. (b) Phase space distribution of ΔW vs. $\Delta\phi$. The dotted line is the simulated result with PARMILA and the solid lines are fitting results by buncher scan.

加速 Mu^- ビームの評価として QM とバンチャーの勾配の値をそれぞれスキャンし、縦横方向のエミッタンスの測定を行う予定である。例として、Fig. 4 (a) にバンチャーの有効電圧をスキャンした場合の、各点において予想される加速 Mu^- ビームの 1 バンチ内での粒子のバンチの時間幅を示し、Fig. 4 (b) に予想される縦方向エミッタンス楕円とスキャンによるフィッティング結果から得られる楕円を示す。BWM の時間分解能は現状で 65 ps [6] であり、測定されるバンチ幅は実際のバンチ幅と BWM の分解能の自乗和で決まる。バンチャーの有効電圧を 0 kV から 250 kV 程度の範囲で 3 点以上のバンチ幅を測定した時、元の縦方向エミッタンスに対して、40% 程度の不一致の範囲内でエミッタンス測定が可能である。BWM は 40 ps の高時間分解能を目標に現在もテストベンチによる評価を進めており、その場合はエミッタンス測定精度はさらに向上する。

BPM の位置分解能は数百 μm 程度 [4] であり、横方向においてもダブルット QM を用いた垂直方向と水平方向の Q スキャンにより横方向エミッタンス測定が可能となる。

ビームラインの輸送効率に加えて、実測から得られた低速 Mu^- の冷却効率 [21] とミューオンの寿命による崩壊、MCP 検出器の検出効率を考慮した時、予想される加速 Mu^- 強度は $\sim 10^{-2}$ Hz であった。ここで、H1 ラインに供給される表面ミューオンビーム (μ^+) のイベントレートを 1×10^8 Hz [22] と仮定している。実際の加速実証試験では 1~2 週間程度のビームタイム期間を想定しているため、加速実証・エミッタンス測定を行う上では十分なビーム強度である。

3. 診断ビームラインの装置開発

先述にあるように、実験エリアはビームライン設置可能なスペースに制限があるため、唯一長さの調整が可能となる診断ビームラインを可能な限りコンパクトに設計する必要がある。そこで、診断ビームラインの導入の可否を確認するために、ビームシミュレーションから要求される仕様をもとに、電磁石とバンチャーの工学的な設計を進めている。限られた予算内で診断ビームラインを

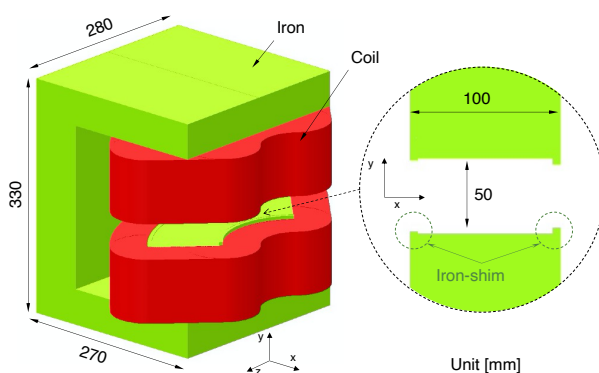


Figure 5: Design model of the bending magnet with TOSCA. The uniformity of a magnetic field can be enhanced by adjusting iron-shims.

構築するために、トリプレット QM とダブルット QM は KEK 入射器で未使用だったものの再利用を検討している。以下では偏向電磁石とバンチャーの開発状況を示す。

3.1 偏向電磁石

Figure 5 に TOSCA [23] による BM の 3 次元静磁場解析モデルを示す。装置の小型化のため、鉄ヨークの曲率半径は 150 mm としており、IH-DTL プロトタイプで加速されたミューオンビームを 90 度偏向するために要求される磁場の強さは 0.37 T である。偏向電磁石を通過する加速 Mu^- の横方向の広がり は 10 mm 以下と予想されるが、x-y 方向の磁場の均一性を担保するため、鉄ヨーク幅は 100 mm と広げにし、鉄ヨーク淵に鉄シムを配置する設計にした。設計でのコイルの電流密度は 0.01 A/mm^2 であるため、水冷による冷却機構は必要ないと判断した。

設計したモデルは Fig. 1 に示した診断ビームラインに導入可能なサイズであり、要求される磁場強度 0.37 T を満たすことを確認した。現在は、製作におけるより詳細な工学的設計や鉄シムの最適化等の検討を進めている。

3.2 バンチャー

この診断ビームラインは IH-DTL プロトタイプの加速試験での使用だけではなく、RFQ 出射ビームの診断にも利用できることを想定して設計している。そのためバンチャーのモデルには、異なる β でも対応可能なシングルギャップモデルを採用した。

Figure 6 にシングルギャップバンチャーの概略を示す。モデルの設計には CST MWS による 3 次元電磁場解析を利用した。設計時には、診断ビームラインへの導入が可能な大きさを満たし、最大電場がキルパトリック放電限界の 1.3 倍程度 (経験則によるもの) かつ、パイプ衝突由来のビーム損失が発生しないという条件のもと、有効シャントインピーダンス ($Z_{sh} T^2$) が最大となるようにビームパイプ径・ギャップ長さ、空洞内の R 構造を最適化した。

最適化による設計結果を Table 1 に示す。ただし、 E_k は共振周波数 324 MHz におけるキルパトリック放電限

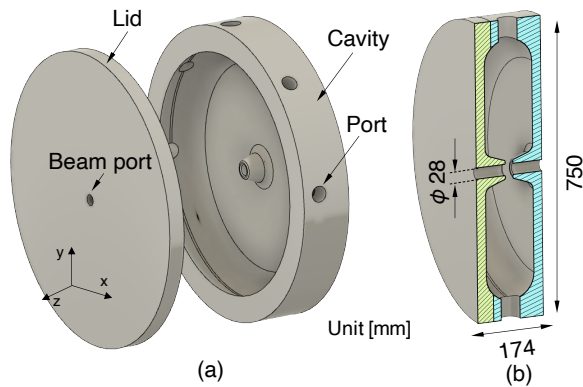


Figure 6: Design model of the single gap buncher with CST MWS. (a) Exploded view. (b) Sectional view.

Table 1: Simulated parameters for the Single gap buncher with CST MWS

Parameters	for RFQ	for IH proto
Gap length [mm]		20
Frequency [MHz]		324
Q_0		25749.1
β	0.08	0.15
Transit time factor (T)	0.61	0.87
$Z_{sh} T^2$ [M Ω /m]	9.79	20.00
$V_0 T$ [kV]	35	250
Max. E-field	$0.26 E_k$	$1.30 E_k$
RF power [kW]	0.72	18.0

界値を表す。目標有効電圧は、IH-DTL プロトタイプによる加速 Mu^- の縦方向エミッタンス測定に最低限必要とされる値として 250 kV とした。RFQ の出射ビームの診断時に必要となる有効電圧は最大で 35 kV 程度であり、設計したバンチャーの併用が可能であることを確かめた。また、設計したシングルギャップバンチャーの3次元電磁場分布を GPT に実装したビームシミュレーションを行い、加速 Mu^- ビームの輸送効率が 100% となることを確認した。

バンチャーにおいても現在は製作における工学的な設計を進めている。Fig. 6 に示すように、空洞本体と端板の分割型で構成し、本体側にチューナー・RF カップラー・真空用のポートを設けることを検討している。

4. まとめ

J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験におけるミュオン加速器実現に向けて、RFQ による初段加速に次ぐ IH-DTL でのミュオンの 1.3 MeV 追加速実証試験を J-PARC MLF H ラインにて計画している。ビームシミュレーションにより、診断ビームラインの最適化を行い、要求されるスペックを評価した。さらに検出される加速ミュオンビームの強度は $\sim 10^{-2}$ Hz 程度と見積もる

ことができ、加速実証には十分であることを示した。

現在は、ビームシミュレーションで得られたパラメータを元に診断ビームラインの設計・製作を進めており、その中でも偏向電磁石とバンチャーに関しては基礎設計が完了している。先例の無い IH-DTL によるミュオン加速実証試験の早急な実現に向けた準備を鋭意進めている。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP15H03666、JP16H03987、JP16J07784、JP18H03707、JP18J22129、JP20J21440、JP20H05625 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 053C02 (2019).
- [2] Y. Kondo *et al.*, presented at IPAC' 18, Vancouver, Canada, April-May 2018, paper FRXGBF1.
- [3] S. Bae *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 050101.
- [4] B. Kim *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A (2018) 22-27.
- [5] M. Otani *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. 1067 052012.
- [6] M. Yotsuzuka *et al.*, in Proc. IPAC'19, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 2571–2574.
- [7] Y. Sue *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 23, 022804.
- [8] S. Minaev and U. Ratzinger, in Proceedings of the 18th Particle Accelerator Conference, New York, 1999 (IEEE, New York, 1999).
- [9] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 040102 (2013).
- [10] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams. 19, 040101 (2016).
- [11] Y. Nakazawa *et al.*, presented at LINAC' 18, Beijing, China, 2018, paper MOPO085.
- [12] Y. Nakazawa *et al.*, presented at PASJ' 19, Kyoto, Japan, 2019, paper WEPI001.
- [13] Y. Nakazawa *et al.*, presented at PASJ' 20, Ehime, Japan, 2020, paper FROO03.
- [14] Y. Miyake *et al.*, J-PARC muon facility, Muse, Journal of Physics: Conference Series 225 (1) (2010) 012036.
- [15] S. Agostinelli *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 06 (2003) 250-303.
- [16] K. R. Crandall *et al.*, Los Alamos Report No. LA-UR-96-1836 Revised December 7, 2005.
- [17] Computer Simulation Technology, CST Studio Suite; <https://www.cst.com/products/CSTMWS>
- [18] Pulsar Physics. Web page, General Particle Tracer; <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>
- [19] K. R. Crandall and D. P. Rustoi, Los Alamos Report No. LA-UR-97-886.
- [20] H. Takeda, Los Alamos Report No. LA-UR-97-886.
- [21] R. Kitamura *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. 874, no. 1, 012055 (2017).
- [22] N. Kawamura *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018 (2018).
- [23] OPERA 3D, Electromagnetic design in three dimensions. COBHAM, Vector Fields Simulations Software, Kidlington, UK; <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/opera/>