

ミューオン線形加速器 APF 方式 IH-DTL プロトタイプのパフォーマンス試験 PERFORMANCE TEST OF INTER-DIGITAL H-MODE DRIFT-TUBE LINAC PROTOTYPE WITH ALTERNATIVE PHASE FOCUSING FOR MUON LINAC

中沢雄河^{*A)}、飯沼裕美^{A)}、岩田佳之^{B)}、岩下芳久^{C)}、大谷将士^{D)}、河村成肇^{D)}、
北村遼^{E)}、近藤恭弘^{F)}、齊藤直人^{G)}、須江祐貴^{H)}、長谷川和男^{F)}、林崎規託^{I)}、
三部勉^{D)}、森下卓俊^{F)}、安田浩昌^{E)}、山崎高幸^{D)}、吉田光宏^{D)}

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

^{A)}Ibaraki University ^{B)}NIRS ^{C)}Kyoto University ^{D)}KEK ^{E)}University of Tokyo ^{F)}JAEA

^{G)}J-PARC center ^{H)}Nagoya University ^{I)}Tokyo Institute of Technology

Abstract

Inter-digital H-mode (IH) drift-tube linac (DTL) using an alternative phase focusing (APF) method for a muon linac is being under study. Prior to manufacturing actual cavity, prototype has been designed and fabricated. The prototype accelerates muons from $\beta=0.08$ to 0.15 with an operational frequency of 324 MHz, and it also employs the APF method. The output beam emittances are simulated to be 0.312π mm mrad and 0.180π mm mrad in the horizontal and vertical directions, respectively. We conducted bead-pull measurement and particle trajectory simulation, in order to evaluate the prototype product.

1. はじめに

1999–2001 年に実施された米国ブルックヘブン国立研究所の E821 実験において、測定されたミューオンの異常磁気能率 ($g-2$) の素粒子標準模型の予想値から 3.7σ の乖離が報告されており、標準理論を超えた物理の存在が期待されている [1, 2]。J-PARC E34 ミューオン $g-2$ /EDM 測定実験では先行実験とは異なる手法でより高精度な測定を計画している (EDM: electric dipole moment) [3]。E34 実験では $g-2$ の高精度測定のために、非常に指向性が高く質の良いミューオンビームを用いる必要があるが、J-PARC MLF から供給されるミューオンビームは三次ビームであることからエミッタンスが非常に大きい [4]。そのためミューオンビームを一度冷却した後、線形加速器を用いて再加速することで条件に合う指向性の高いビームの生成が可能となる。

実験技術の一つとして、ミューオン線形加速器の開発 [5] は非常に重要な要素である。Figure 1 にミューオン線形加速器の概要を示す。J-PARC MLF から供給される表面ミューオンビームをミューオニウム生成標的中に停止させた後、蒸発してくるミューオニウムをレーザー解離することにより運動エネルギー 30 meV まで冷却し、超低速ミューオン (USM: ultra slow muon) を生成する。生成した超低速ミューオンを加速するためには粒子の速度に応じた加速構造を用いる必要がある。まず超低速ミューオンを静電加速器によって加速したあと、高周波四重極線形加速器 (RFQ: Radio-Frequency Quadrupole) で高周波を用いた加速を行う。動作周波数は 324 MHz であり、高周波加速に加えミューオンビームを縦方向にパンチングするため役割を持つ。次に交差楕形 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) が $\beta=0.08$ から 0.28 の低速領域の加速を担う。その後は動作周波数が 1.3 GHz の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経て、最終的に $\beta=0.95$ (212 MeV) まで加速する。

2017 年 10 月に RFQ を用いたミューオン加速を実証したため [6, 7]、現在、次の加速構造である IH-DTL に着手している。本研究では J-PARC E34 実験で用いる IH-DTL の実機を製作するための準備段階として、 $\beta=0.08$ から 0.15 まで加速する構造のプロトタイプを製作し、性能評価として周波数測定とビーズ測定を行った。

本論文では 2 章に APF 方式の IH-DTL の理論と本研究で用いた IH-DTL プロトタイプの概要を示し、実際に IH-DTL プロトタイプを用いた実験として、3 章では周波数測定、4 章ではビーズ測定の結果を示す。5 章ではビーズ測定の考察と粒子軌道計算を行い、6 章で本論文をまとめる。

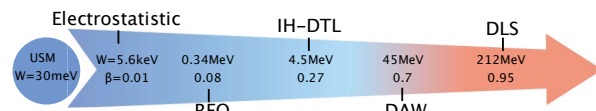


Figure 1: Schematic of muon linac.

2. APF 方式 IH-DTL

H-mode DTL では、ビーム軸に沿って、ステムに支えられたドリフトチューブが配列している。空洞内に所定の高周波電力を印加すると共振が生じ、ドリフトチューブ

* 18nm021f@vc.ibaraki.ac.jp

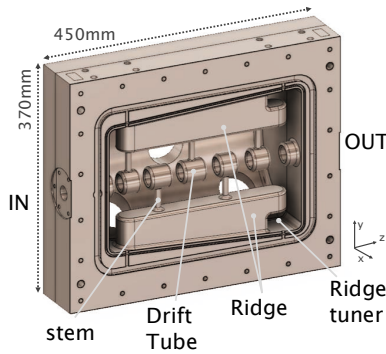


Figure 2: Sectional view of IH-DTL prototype in Three-dimensional model.

ブ間のギャップに加速電場が生まれ、粒子が加速される [8]。この時、粒子がギャップ中央に来た時の位相を同期位相と呼ぶ。空洞内では、ビーム軸方向に対し磁界を発生させる H-mode (TE-mode) を励起させ、発生した磁界により、空洞壁面からステムに誘導電流が流れる。H-mode DTL のうち、Interdigital H-mode (IH) 型共振器を用いた線形加速器を IH-DTL と呼ぶ [9]。

線形加速器では、ビームの広がりを抑えるための収束要素が不可欠となる。従来の加速器では四極電磁石や、永久電磁石を用いて収束を行うが、我々の IH-DTL では Alternative Phase Focusing (APF) 方式を採用する [10, 11]。APF 法ではギャップの同期位相を最適化することで、粒子に作用する発散と収束を高周波電場のみで制御できる。そのため、磁石といった収束要素が不要となり、加速器の簡易化や製作コストの削減に繋がる。

高周波電場における粒子の縦方向及び、横方向の運動方程式は

$$z'' - \frac{\pi e E_0 T \sin \phi}{2 m_0 c^2 \beta^3 \gamma^3 \lambda} z = 0 \quad (1)$$

$$r'' + \frac{\pi e E_0 T \sin \phi}{2 m_0 c^2 \beta^3 \gamma^3 \lambda} r = 0 \quad (2)$$

と表される [12, 13]。ここで E_0 は加速電場、 T は Transit time factor、 γ は Lorentz factor、 λ は高周波波長、 ϕ は同期位相を示す。Equation (1), (2) より、同期位相が正の時は、ビーム軸方向に発散し、ビーム軸の垂直方向に収束する。同様に、同期位相が負の時は逆に働く。従って、APF 方式では、全てのギャップでの同期位相の最適化を行うことで、全体としての収束を制御することができる。

本研究で用いた IH-DTL の三次元モデルを Fig. 2 に示す。空洞内には上下にリッジと呼ばれる板が取り付けられており、リッジにはステムに支えられたドリフトチューブが上下交互に 5 つ取り付けられている。これより空洞内には 6 つのギャップが存在し、一つのドリフトチューブとギャップの組み合わせをセルと呼ぶ。

APF 方式では高周波電場のみで加速と収束を行うため、同期位相最適化のためには、同期位相の設計に加え、共振器空洞の最適化と粒子の軌道計算が必要となる。本実験で製作したプロトタイプの実機は、E34 実験で使用する実機の実機最適化の計算の結果から決定している。実

Table 1: Cell Parameters for Optimized Phase Array

| Cell | W [MeV] | β | ϕ [degree] |
|------|-----------|---------|-----------------|
| 1 | 0.34 | 0.08 | -35.9 |
| 2 | 0.43 | 0.09 | -14.9 |
| 3 | 0.57 | 0.10 | 12.9 |
| 4 | 0.74 | 0.12 | 32.9 |
| 5 | 0.92 | 0.13 | 15.4 |
| 6 | 1.14 | 0.15 | -13.8 |
| exit | 1.3 | | |

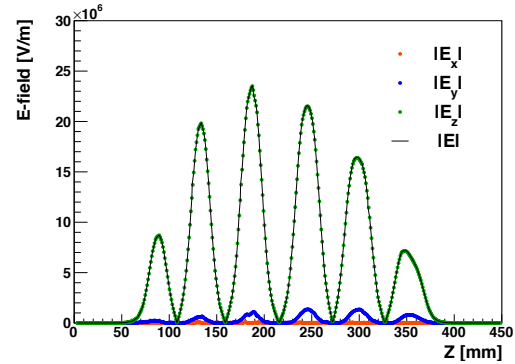


Figure 3: The designed E-field distribution as a function z .

機は出射の粒子速度が $\beta=0.27$ に相当するためにセル数は 16、空洞の長さは約 1.3 m である。実機において同期位相の最適化の計算を行い、1-6 セル分の計算結果を反映したものを、プロトタイプに採用している [14, 15]。また、空洞内の電磁場分布を得るために、CST(Computer Simulation Technology) studio suite [16] を用いて、空洞全体の電磁場解析を行う。ビーム軸上には磁場成分も存在するが、加速に影響を与えるのは電場であるため、電場の設計が非常に重要となる。

以上の工程から決定したプロトタイプの空洞のパラメータを Table 1 に示し、Fig. 3 に設計したプロトタイプ空洞のビーム軸上の電磁場分布 $|E|$ を示す。ビーム軸上の $|E|$ は大部分を z 成分の加速電場が占めているが、 y 成分の電場も存在しており、 z 成分の加速電場への y 成分電場の割合は 6 つ目のギャップで最も大きく、約 12% の有限値を持つ。

3. 周波数測定

ビーズ測定の前段階として、空洞の共振周波数と Q_0 を測定する。測定にはベクトルネットワークアナライザ (VNA : Vector Network Analyzer) を使用した。空洞には外部回路としての RF pickup アンテナが二つ取り付けられており、それぞれの反射係数 Γ_1, Γ_2 と結合定数 β_1, β_2 と、測定した Q_L により、 Q_0 を求めた。VNA を使用した測定ではケーブル、コネクタの影響で測定値が変化するため校正が必要である。従って、測定の際には反射係数のベースラインの振幅を 0 dB に定めた。

Table 2 に設計された空洞の計算値と、VNA によっ

て得られた実測値の比較を示す。 Q_0 の値は計算値から 11% の誤差が確認できたが、これは空洞の製作過程における誤差の範囲内とする。

Table 2: Frequency Measurement

| | simulation | measurement |
|--------------------------|------------|-------------|
| resonant frequency [MHz] | 324 | 321.21 |
| Q_L (loaded Q) | - | 6125.8 |
| β_1 | - | 0.075 |
| β_2 | - | 0.1814 |
| Q_0 (unloaded Q) | 8700 | 7695.2 |

4. ビーズ測定

4.1 Slater 摂動理論

空洞内電磁場に関する Slater の摂動理論によると、小さな摂動体が空洞内に入ることにより、空洞の蓄積エネルギーが摂動を受け、その結果、共振周波数がわずかにシフトする [8, 17]。この周波数シフトは摂動体の移動する領域における相対的な電場 E_0 、及び磁場 H_0 の強さに依存するため、摂動体に誘電体ビーズを仮定した時、次の関係式が成り立つ。

$$\frac{f_p - f_0}{f_0} = -\frac{\pi r^3}{U} \left[\epsilon_0 E_0^2 - \frac{\mu_0 H_0^2}{2} \right] \quad (3)$$

ここで、 f_p は摂動後の周波数、 f_0 は非摂動の共振周波数、 r は摂動体の半径、 U は共振器の蓄積エネルギー、 ϵ_0 は真空の誘電率、 μ_0 は真空の透磁率を示す。したがって空洞のビーム軸上のビーズの変位に同期した周波数シフトを測定することで、その長さに沿う電磁場分布を見積もることが可能となる。

また、周波数シフトは

$$\frac{f_p - f_0}{f_0} = \frac{\tan(\Delta\phi)}{2Q_L} \quad (4)$$

と表すことができる。 $\Delta\phi (= \phi_p - \phi_0)$ を位相シフトと呼び、周波数シフトと同様に摂動後、摂動前の位相から決定する。従って、本実験では位相シフトを測定し、それを Eq. (4) により周波数シフトに変換した後、Eq. (3) を用いて電磁場分布を見積もる。

4.2 実験セットアップ

IH-DTL プロトタイプ of ビーズ測定の実験セットアップを Fig. 4 に示す。IH-DTL に二つのループ形状の RF pick-up アンテナを取り付け、それらを介して VNA で周波数、または位相を測定する。直径 3 mm のビーズ (Al) を、ビーム中心軸に沿って空洞に張られた不導体の糸 (釣り糸) に取り付ける。ビーズの移動にはモーターコントロールシステムを導入し、モーターを用いて制御する。

4.3 結果

Figure 5a では、空洞のビーム軸上にビーズを入射側 ($z = 0$ mm) から出射側 ($z = 450$ mm) まで移動した時

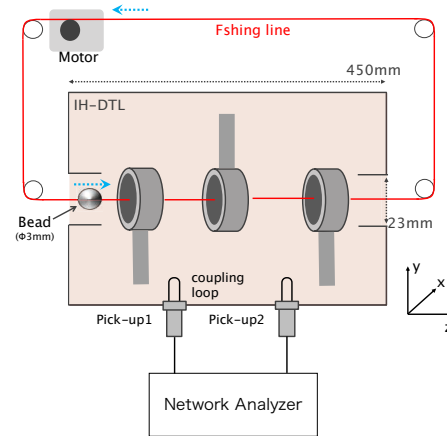


Figure 4: Experimental setup for bead measurement.

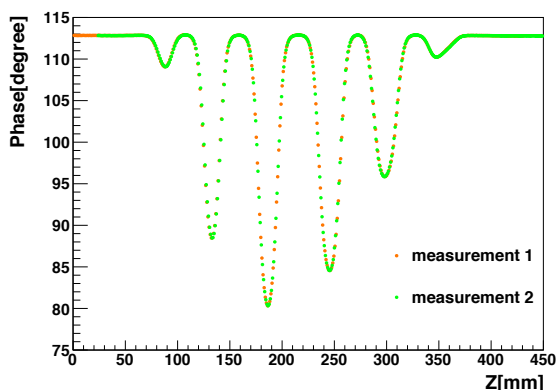
と、出射側から入射側に移動した時の位相シフトのそれぞれの測定結果を示す。ビーズの行きと帰りによる測定の誤差は 1% 以内であり、よく一致していた。非摂動時のベースラインとなる位相は $\phi_0 = 113$ 度であり、6 つあるギャップにおいて摂動による位相シフト 6 つが測定できた。

次に Fig. 5b では、Eq. (4) により、位相シフトの実測値から求めた周波数シフトと、CST により設計した電磁場分布の比較を示す。実測値は周波数シフト (Eq. (3) 左辺) としてプロットし、CST から得た電磁場分布は電磁場の両成分を含んだ分布の場合 (Eq. (3) 右辺) と、電場あるいは磁場のみの分布の場合 (Eq. (3) 右辺第一項、第二項) でのそれぞれの結果を重ね書きした。

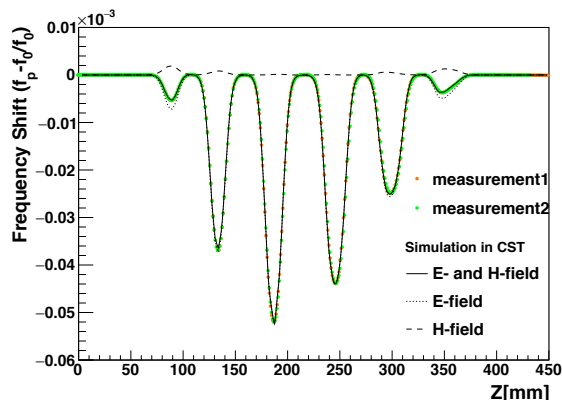
5. 考察

ビーム軸上の磁場がゼロである加速空洞の場合、Eq. (3) の第二項が消去され加速電場のみを求められるが、IH-DTL の場合、最初と最後のギャップに磁場が生じるため Eq. (3) の第二項が有限の値を持つ。誘電体を用いたビーズ測定による周波数シフトは空洞全体の電場に加え、磁場にも摂動するので、ビーズ測定から空洞に設計通りの加速電場が立つか確かめるためには磁場も考慮しなければならない。Figure 5b より、電場領域では共振周波数に負のシフト、磁場領域では共振周波数に正のシフトが生じており、それらの和、つまり電磁場領域での共振周波数のシフトと実測によるプロットは誤差 3% 以内で一致している。

誤差の原因の一つとして、ビーム軸合わせによる測定誤差が起因していると推測する。CST により各ギャップにおける X-Y 平面の加速電場 $|E|$ を計算することで、ビーズがビーム軸中心から X-Y 方向にある距離だけ離れた時の電場分布 $|E|$ の変化を見積もった。これにより、ビーム軸から 3 mm 離れた時の加速電場は約 2-3% の変化が生じることが判明した。ビーズと釣り糸のビーム中心軸は誤差 2 mm 以内で中心軸に合わせてあり、ビーズの中心軸のズレによる測定誤差は 2-3% 以内であると推測できるので、これが誤差の一因であるとした。以上より、製作した空洞は設計通りの電磁場分布になっている



(a) Phase shift ($\Delta\phi$) measurement as a function z -axis. measurement 1 (or 2) : bead is moved from incident (outgoing) port to outgoing (incident) port.



(b) A comparison between frequency shift by measurement (plot) and E and H component (Solid line), E component and H component (dotted line) in CST as a function z .

Figure 5: The result of bead measurement.

ことが確認できた。

粒子軌道計算

設計した電磁場分布が実際の空洞の電磁場分布と一致していることが判明したので、設計の電磁場分布を GPT (General Particle Tracer) [18] に導入し粒子軌道計算を行った。入射ビームには、規格化エミッタンスが、 x 方向に 0.297π mm mrad、 y 方向に 0.168π mm mrad であるミューオン粒子を使用する。これは表面ミューオンビームライン、超低速ミューオン生成、及び RFQ の出射のシミュレーションから得ている [19]。

Figure 6 では、空洞内におけるミューオンの β の平均値の変化を示しており、 $\beta=0.08$ で入射したミューオンが 6 つの加速ギャップを経て $\beta=0.15$ に到達する。速度一定の範囲はドリフトチューブ長、加速範囲はギャップ長に相当する。

Figure 7 上段の図は、ビーム軸 (z) に沿った x 成分の正規化された速度と同期位相 (ϕ) を示し、下段の図は同様に y 成分を示す。同期位相が正の範囲では横方向の収束を行うが、空洞内のギャップでは、 z 成分の加速電場に加えて y 成分の電場も含むため、 y 方向の軌道も電場により変位する。

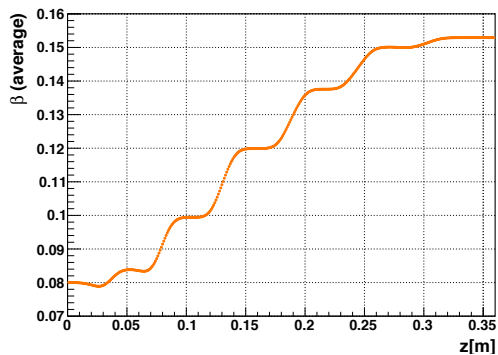


Figure 6: The normalized velocity (β) as a function z .

Figure 8 では出射ビームにおける位相空間分布を示す。 x 成分、 y 成分のエミッタンス増大はそれぞれ 0.0157π mm mrad (5.1%)、 0.0145π mm mrad (8.2%) となり、規格化エミッタンスはそれぞれ $\varepsilon_x=0.312\pi$ mm mrad、 $\varepsilon_y=0.182\pi$ mm mrad となる。Table 3 では、電磁場分布を用いた粒子軌道計算の結果を示す。

エミッタンス増大は許容の範囲内であり、出射ビームは J-PARC g-2/EDM 実験の要件を満たす。従って、製作した IH-DTL プロトタイプにおいても実験的要求を満たす粒子加速が可能であると推測できる。

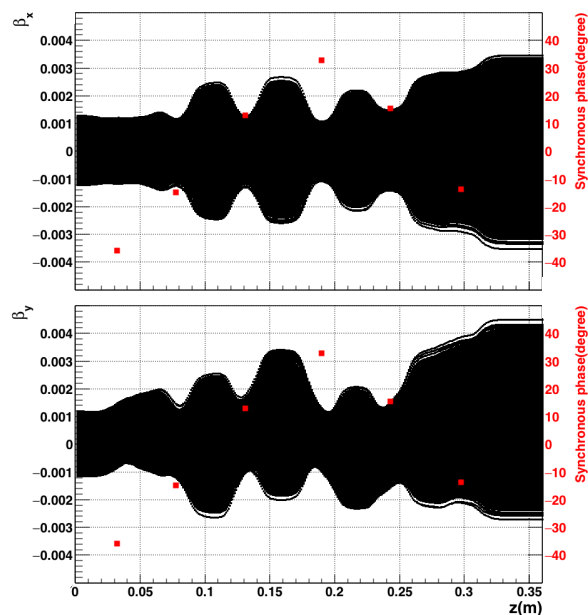


Figure 7: Beam velocity distributions (black) as a function z and synchronous phase in each gap (red). β_x versus z (above). β_y versus z (below).

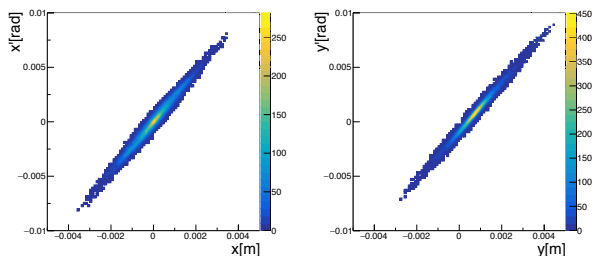


Figure 8: Phase space distributions of the output beam. The horizontal divergence angle x' versus x (left). The vertical divergence angle y' versus y (right).

Table 3: Basic Parameter for IH-DTL Prototype

| | IN (RFQ output) | OUT |
|----------------------------------|-----------------|-------|
| β | 0.08 | 0.15 |
| kinetic energy [MeV] | 0.34 | 1.3 |
| ε_x [π mm mrad] | 0.297 | 0.312 |
| ε_y [π mm mrad] | 0.168 | 0.182 |

6. まとめ

本研究では J-PARC g-2/EDM 実験で使用する IH-DTL 実機製作の研究として、プロトタイプを製作し性能を評価した。ビーズ測定によって求めたプロトタイプの実際の電磁場分布と設計電磁場分布が一致していることから、空洞を設計通りに製作することができたと言える。

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. D73, 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] 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.
- [5] 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
- [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] S. Bae *et al.*, "First muon acceleration using a radio-frequency accelerator", Phys. Rev. Accel. Beams. 21, 050101 (2018)
- [8] Thomas P. Wangler, *RF Linear Accelerators*, 2008, WileyVCH Verlag GmbH&Co.
- [9] J. P. Blewett, Symposium du CERN sur les Accélérateurs de Haute Energie et la Physique des Mesons π , v.1, Regenstreif and Edouard (CERN, Geneva, 1956), p. 162.

- [10] S. Minaev and U. Ratzinger, "APF or KONUS drift tube structures for medical synchrotron injectors - A comparison", in Proceedings of the 18th Particle Accelerator Conference, New York, 1999 (IEEE, New York, 1999).
- [11] Y. Iwata *et al.*, "Alternating-phase-focused IH-DTL for an injector of heavy-ion medical accelerators", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 569, 685 (2006).
- [12] T. Hata, *et al.*, "重イオン用 APF-IH 線形加速器の研究 (II)", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001) 186-188
- [13] J. Pang, L. Zhao, X.He, Z.Ying, "Progress of An Interdigital H-mode Drift-Tube-Linac with low injection energy", PACS 29.20.Ej; 41.75.-i (2010).
- [14] N. Hayashizaki and M. Yoshida, Development of low energy muon linac, in Proceedings of the 11th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan (Particle Accelerator Society in Japan, Tokyo, Japan, 2014), p. SUP043.
- [15] M. Otani *et al.*, "Interdigital H-mode drift-tube linac design with alternative phase focusing for muon linac", Phys. Rev. Accel. Beams. 19, 040101 (2016)
- [16] CST Studio Suite, Computer Simulation Technology (CST); <https://www.cst.com/products/CSTMWS>.
- [17] Sumit Som *et al.*, "Bead-Pull Measurement Using Phase-Shift Technique In Multi-Cell Elliptical Cavity", Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain. MOPC088
- [18] General Particle Tracer, Pulsar Physics; <http://www.pulsar.nl/gpt/>.
- [19] Y. Kondo *et al.*, "Simulation study of muon acceleration using RFQ for a new muon g-2 experiment at J-PARC", in Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference (Jefferson Lab, Newport News, Virginia, USA, 2015), p. THPF045.