**PASJ2018 THP045** 

# 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 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 <sup>E)</sup>、近藤恭弘 <sup>F)</sup>、齊藤直人 <sup>G)</sup>、須江祐貴 <sup>H)</sup>、長谷川和男 <sup>F)</sup>、林崎規託 <sup>D</sup>、 三部勉 <sup>D)</sup>、森下卓俊 <sup>F)</sup>、安田浩昌 <sup>E)</sup>、山崎高幸 <sup>D)</sup>、吉田光宏 <sup>D)</sup>

Yuga Nakazawa<sup>\* A)</sup>, Hiromi Iinuma<sup>A)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>B)</sup>, Yoshihisa Iwashita<sup>C)</sup>,
 Masashi Otani<sup>D)</sup>, Naritoshi Kawamura<sup>D)</sup>, Ryo Kitamura<sup>E)</sup>, Yasuhiro Kondo<sup>F)</sup>, Naohito Saito<sup>G)</sup>,
 Yuki Sue<sup>H)</sup>, Kazuo Hasegawa<sup>F)</sup>, Noriyosu Hayashizaki<sup>I)</sup>, Tsutomu Mibe<sup>D)</sup>, Takatoshi Morishita<sup>F)</sup>,
 Hiromasa Yasuda<sup>E)</sup>, Takayuki Yamazaki<sup>D)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>D)</sup>
 <sup>A)</sup>Ibaraki University <sup>B)</sup>NIRS <sup>C)</sup>Kyoto University <sup>D)</sup>KEK <sup>E)</sup>University of Tokyo <sup>F)</sup>JAEA
 <sup>G)</sup>J-PARC center <sup>H)</sup>Nagoya University <sup>I)</sup>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  $0.312\pi$  mm mrad and  $0.180\pi$  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へブン国立研 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 (面重極線形加速器 (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バンチングするため役割を持つ。次に交差櫛形 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

<sup>\* 18</sup>nm021f@vc.ibaraki.ac.jp

### **PASJ2018 THP045**



Figure 2: Sectional view of IH-DTL prototype in Threedimensional 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

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

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

と表される [12,13]。ここで  $E_0$  は加速電場、T は Transit time factor、 $\gamma$  は Lorentz factor、 $\lambda$  は高周波波長、 $\phi$  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最適化は、E34 実験で使 用する実機の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

Cel	l W [MeV	<b>ν</b> ] β	$\phi$ [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
exi	t 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 ザー (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 付けてあり、それぞれの反射係数  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$ と結合定数  $\beta_1$ 、  $\beta_2$ 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

Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan

## **PASJ2018 THP045**

て得られた実測値の比較を示す。Q<sub>0</sub>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。

	simulation	measurement
resonant frequency [MHz]	324	321.21
$Q_L$ (loaded $Q$ )	-	6125.8
$\beta_1$	-	0.075
$\beta_2$	-	0.1814
$Q_0$ (unloaded $Q$ )	8700	7695.2

# Table 2: Frequency Measurement

## 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*<sub>0</sub>、及び磁場 *H*<sub>0</sub> の強さに 依存すため、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。

$$\frac{f_p - f_0}{f_0} = -\frac{\pi r^3}{U} \left[ \varepsilon_0 E_0^2 - \frac{\mu_0 H_0^2}{2} \right]$$
(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、 $\varepsilon_0$ は真空の誘電率、 $\mu_0$  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

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

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 プロトタイプの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 値からを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  $0.297\pi$  mm mrad、y方向に  $0.168\pi$  mm mrad であ るミューオン粒子を使用する。これは表面ミュオンビー 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  $\beta$  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 ( $\phi$ ) 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 ( $\beta$ ) 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 0.0157 $\pi$  mm mrad (5.1%)、 0.0145 $\pi$  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).  $\beta_x$  versus z (above).  $\beta_y$  versus z (below).

## **PASJ2018 THP045**



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
$\varepsilon_x \ [\pi  \mathrm{mm  mrad}]$	0.297	0.312
$\varepsilon_y \ [\pi \text{ mm mrad}]$	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. Higemotoetal., 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 radiofrequency 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  $\pi$ , 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.