

# ミューオン線形加速器 APF 方式 IH-DTL プロトタイプの大電力試験 HIGH-POWER TEST OF AN APF IH-DTL PROTOTYPE FOR THE MUON LINAC

中沢雄河<sup>\*,A)</sup>, 飯沼裕美<sup>A)</sup>, 岩田佳之<sup>B)</sup>, Cicek Ersin<sup>C)</sup>, 惠郷博文<sup>C)</sup>, ニッ川健太<sup>C)</sup>, 大谷将士<sup>C)</sup>, 河村成肇<sup>C)</sup>,  
齊藤直人<sup>C)</sup>, 溝端仁志<sup>C)</sup>, 三部勉<sup>C)</sup>, 山崎高幸<sup>C)</sup>, 吉田光宏<sup>C)</sup>, 北村遼<sup>D)</sup>, 近藤恭弘<sup>D)</sup>, 森下卓俊<sup>D)</sup>,  
須江祐貴<sup>E)</sup>, 鷲見一路<sup>E)</sup>, 四塚麻衣<sup>E)</sup>, 竹内佑甫<sup>F)</sup>, 林崎規託<sup>G)</sup>, 安田浩昌<sup>H)</sup>,  
Yuga Nakazawa<sup>\*,A)</sup>, Hiromi Inuma<sup>A)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>B)</sup>, Cicek Ersin<sup>C)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>C)</sup>, Kenta Futatsukawa<sup>C)</sup>,  
Masashi Otani<sup>C)</sup>, Naritoshi Kawamura<sup>C)</sup>, Naohito Saito<sup>C)</sup>, Hitoshi Mizobata<sup>C)</sup>, Tsutomu Mibe<sup>C)</sup>,  
Takayuki Yamazaki<sup>C)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>C)</sup>, Ryo Kitamura<sup>D)</sup>, Yasuhiro Kondo<sup>D)</sup>, Takatoshi Morishita<sup>D)</sup>,  
Yuki Sue<sup>E)</sup>, Kazumichi Sumi<sup>E)</sup>, Mai Yotsuzuka<sup>E)</sup>, Yusuke Takeuchi<sup>F)</sup>, Noriyosu Hayashizaki<sup>G)</sup>, Hiromasa Yasuda<sup>H)</sup>  
<sup>A)</sup> Ibaraki University, <sup>B)</sup> NIRS, <sup>C)</sup> KEK, <sup>D)</sup> JAEA, <sup>E)</sup> Nagoya University,  
<sup>F)</sup> Kyushu University, <sup>G)</sup> Tokyo tech, <sup>H)</sup> University of Tokyo

## Abstract

We performed a high-power test of a prototype cavity of a 324-MHz interdigital H-mode drift tube linac (IH-DTL) for the muon  $g-2$ /EDM experiment at J-PARC. This prototype cavity (short-IH) was developed to verify the fabrication method for the IH-DTL cavity with a monolithic drift tube structure. After 40 h of conditioning, the short-IH has been stably operated with an RF power of 88 kW, corresponding to a 10% higher accelerating field than the design field. Furthermore, the thermal characteristics and frequency response during the high-power operation were measured, verifying that the experimental data were consistent with the simulation results. In this paper, the high-power tests of the APF IH-DTL for muon linac are described.

## 1. はじめに

2021年4月、米国フェルミ研究所 (FNAL) により 0.46 ppm という高精度で測定されたミューオン異常磁気能率 ( $g-2$ ) の測定結果は、先行実験であるブルックヘブン研究所 (BNL) の測定結果 [1] と無矛盾であり、これらの結果は標準模型予測値 [2] との乖離が 4.2 標準偏差 [3] であることを示した。この乖離は未知粒子の兆候 [4] と考えられる一方で、FNAL と BNL ではエミッタンスの大きいミューオンビームに由来する不定性が存在する。そこで J-PARC では、ミューオンの冷却と線形加速による低エミッタンスビームを実現することで、従来の精度を上回る 0.1 ppm 精度での全く新しいミューオン  $g-2$  測定 (J-PARC E34 実験 [5]) を推進している。

ミューオン線形加速器 (linac) は radio frequency quadrupole (RFQ)、Interdigital H-mode drift tube linac (IH-DTL)、disk and washer coupled cavity linac (DAW-CCL)、disk loaded structure (DLS) の全 4 段の高周波線形加速器で構成され、室温 (25 meV) 程度まで減速された低速ミューオンを 212 MeV まで加速する [6, 7]。

RFQ によってバンチ化及び加速されたミューオンは、その後、次段加速器により 0.34 MeV から 4.3 MeV ( $\beta (=v/c) = 0.08-0.28$ ) の範囲で加速する。この低  $\beta$  領域では Alvarez DTL が広く使われているが、我々は加速効率の向上のために、Alternating phase focusing (APF) [8] 法を適用した IH-DTL を採用した。IH-DTL の主要パラメータを Table 1 に示す。APF 法は、各ギャップの正負の同期位相を適切に選択することで、RF 電界に由来する横方向の収束力を利用する方法である。この方式では、電磁石等の複雑な収束要素を含むドリフトチューブ (DT) を必要としないため、構造を大幅に簡略化することがで

Table 1: Main Parameters of the IH-DTL

Beam species	$\mu^+$
Beam intensity	$1 \times 10^6 / \text{s}$
Beam pulse width	10 ns
Repetition rate	25 Hz
RF pulse width	40 $\mu\text{s}$
Duty factor	0.1%
Resonant frequency	324 MHz
Injection energy	0.34 MeV
Extraction energy	4.26 MeV

きる。さらに、H モード構造による  $\pi$  モード加速を用いることで高い Transit time factor を得ることができ、高加速効率を実現する。APF 法は磁場収束に比べ収束力が弱いので、ビーム電流が比較的小さい重イオン linac [9–11] などで採用されている。ミューオン linac もビーム電流が非常に小さい ( $\sim 10^6$  muons/s) ので、APF 法による電場収束で十分にビーム制御が可能となる [12]。

また、製作コスト削減のために、空洞構造には無酸素銅 (OFC) 製のセンタープレートと 2 枚の半円筒形状のサイドシェルによる 3 枚構造 [13] を採用する。プレートとシェルのボルト締めのみで組み立てが完了するため、製作過程が非常に簡易になる。特に、センタープレートは DT を一体加工にしているため、DT 単体のアライメント作業が不要となる。また、設計した IH-DTL の表面電場強度は  $2.0 E_k$  ( $E_k$ : Kilpatrick limit [14]) と比較的高いが、0.1% という非常に低い duty で動作するため、さらなるコストダウンのために空洞表面処理を省略する。

324-MHz IH-DTL 空洞に一体加工の DT を適用するのは初めてのケースであるため、我々は、IH-DTL のプロトタイプ (以下、short-IH) を製作した。short-IH の主な目的は、(1) 一体加工 DT で達成される空洞性能及び

\* 20nd103s@vc.ibaraki.ac.jp

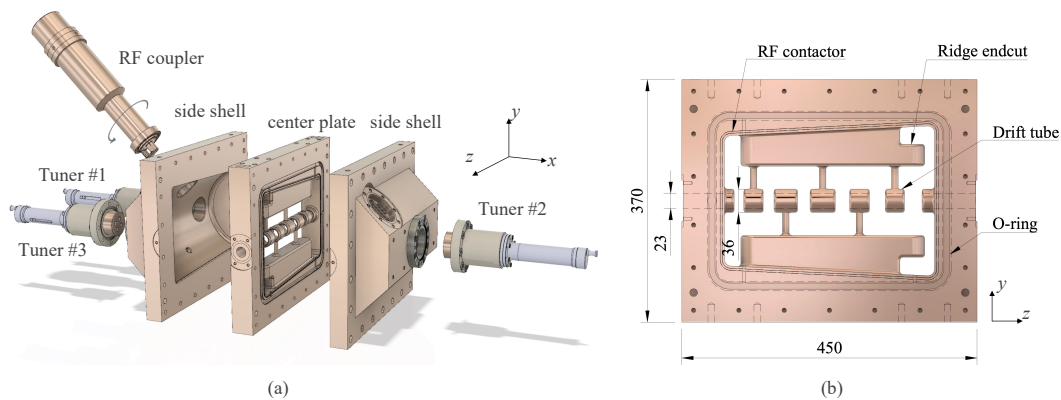


Figure 1: (a) Mechanical structure of the short-IH. (b) Center plate.

電場精度の評価、(2) 無表面処理の空洞での大電力運転の実証、(3) 3次元有限要素法 (FEM) モデルを用いた IH 設計の妥当性の検証である。

これまでの同学会の報告では、低電力試験 [15] により、ビームダイナミクス設計から要求される電場分布 (設計からの電場誤差  $\pm 2\%$  以下 [16]) を満たすことを確認し、一体加工 DT の製作精度が要求を満たすことを証明した。本論文では、short-IH の大電力試験結果及び熱特性の測定による FEM モデルの検証結果について報告する。Sec.2 で short-IH の基本設計を紹介する。次に、Sec.3 では、short-IH の大電力試験結果に加え、熱特性を評価結果を示す。最後に、Sec.4 でこれらの結果をまとめる。

## 2. SHORT-IH

### 2.1 設計・製作

short-IH は、実機 IH-DTL (以下 full-IH) の上流側 3分の1に相当する構造を持つ。16セルからなる full-IH の最初の6セルと同じ同期位相を持ち、0.34 MeV から 1.30 MeV ( $\beta (= v/c) = 0.08-0.15$ ) までミューオンを加速することが可能である。

short-IH の RF 設計は、CST MICROWAVE STUDIO (MWS) [17] による3次元 FEM モデルを用いて行った。Figure 1 に short-IH の構造を示す。short-IH は、full-IH と同じ DT 半径、セル長、リッジ幅を持つが、リッジのエンドカットと空洞径を微調整することで電場分布が平坦になるように設計した。空洞の共振周波数は調整し易くを持たせるために 321.88 MHz とし、算出された Unloaded quality factor ( $Q_0$ ) は 8600 となった。Table 2 に full-IH と short-IH の FEM モデル解析結果を示す。short-IH の設計加速電界勾配 ( $E_0$ ) は平均 3.0 MV/m であり、設計電圧に必要な RF パワーは設計  $Q_0$  から 65 kW と算出された。

前述したように、空洞の組立てには、一体加工 DT を搭載したセンタープレートと両サイドシェルで挟み込む3枚構造を採用した。空洞の材質には OFC class1 を使用しており、センタープレート両側の溝にはベリリウム銅製によるコイルスプリング RF コンタクターを設置し、バイトン O リングで真空封止をする。Figure 2 に加工後の short-IH のセンタープレートを示す。三次元測定機

Table 2: Comparison of the Full-IH and Short-IH

Parameters	Full-IH	Short-IH
Number of the cells	16	6
Extraction energy (MeV)	4.26	1.30
Cavity length (m)	1.45	0.45
Averaged accelerating field (MV/m)	3.6	3.0
Maximum surface field (MV/m)	35.4	34.7
	( $2.0 E_k$ )	( $1.9 E_k$ )
Nominal peak power (kW) [100% $Q_0$ ]	310	65

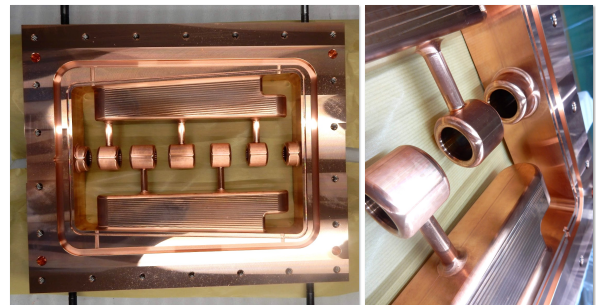


Figure 2: Fabricated center plate of the short-IH.

で空洞の寸法を測定した結果、DT の半径は、実測値と設計値の差が  $50 \mu\text{m}$  以下であり、DT 間のギャップ長も  $200 \mu\text{m}$  の公差内で加工されていることが確認できた。また、焼付け、酸洗、化学研磨、クロメート処理などの表面処理を行わず、加工コストの低減を図った。

short-IH は、3つのチューナーポート、3つの RF ピックアップポート、1つの RF カプラポートとスリット構造の真空ポートを搭載している。周波数調整のためのチューナーは最大 50 mm の可動範囲を持ち、可動性を担保するために RF コンタクターを省いている。RF パワーの供給には、ループ型 RF カップラーを採用した [18]。導体の材質は OFC であり、RF 窓には TiN コーティングされたアルミナセラミックス (KYOCERA A479S [19]) を使用した。ループアンテナを回転させることで、RF カップラーの結合係数を調整することが可能である。ループアンテナのサイズと角度は、先立って開発した低

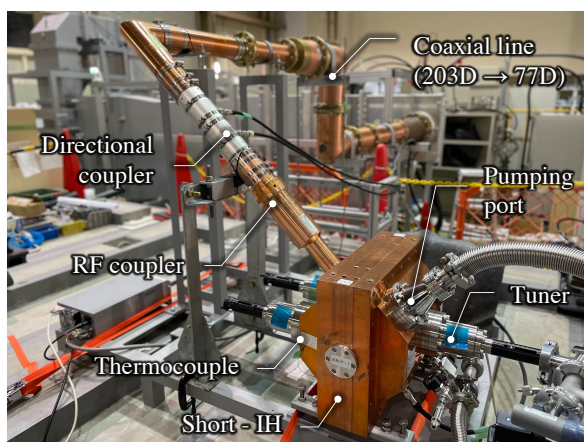


Figure 3: Experimental setup of the high-power test of the short-IH.

電力カップラー [20] を基に決定した。ミューオンビーム電流は非常に小さくビーム負荷は無視できると想定されるため、結合定数は臨界結合となるように設定する。

## 2.2 低電力チューニング

空洞の製作後、低電力チューニングを行なった。最初に、空洞単体の共振周波数と  $Q_0$  を Vector Network Analyzer (VNA) を用いて測定した。測定された  $Q_0$  は 7800 であり、シミュレーションの結果 (8600) の 91% に相当する [20]。次に、チューナーと RF カップラーを short-IH に設置し、同様の測定とチューニングを実施した。RF カップラーの結合係数を臨界結合に調整しつつ、周波数が 324.00 MHz になるように 3 つのチューナーの挿入量を調整した。調整後の  $Q_0$  測定値は 7100 であり、シミュレーションの結果 (8300) の 86% に相当する。センタープレートのコイルスプリング RF コンタクトと RF コンタクトレスの可動式チューナーによる  $Q_0$  の劣化は許容範囲内であり、製作手法の健全性が確かめられた。また、調整後の RF カップラーの結合係数の測定値は 1.01 であり、測定された  $Q_0$  を考慮すると、設計電圧に必要な RF パワーは 75 kW と算出された。

## 3. 大電力試験

### 3.1 実験セットアップ

大電力試験セットアップを Fig. 3 に示す。RF 源には 324-MHz クライストロン (Canon E3740A [21]) を用いており、導波管 (WR2300)、同軸管 (203D-77D)、RF カップラーを介して空洞に RF パワーを印加した。空洞の真空排気には 240-L/s のターボ分子ポンプを用いた。空洞内の真空圧は Bayard-Alpert (BA) ゲージで測定し、 $1.0 \times 10^{-3}$  Pa を超えると RF パワーがオフになるようにインターロックを設定した。また、熱電対により空洞外壁温度と空洞から約 2 m 離れた位置での環境温度を常時測定した。

Figure 4 に大電力試験時の RF ブロック図を示す。同軸管とカップラーの間に設置された方向性結合器で空洞への入力 RF パワー ( $P_f$ ) と反射 RF パワー ( $P_r$ ) をパ

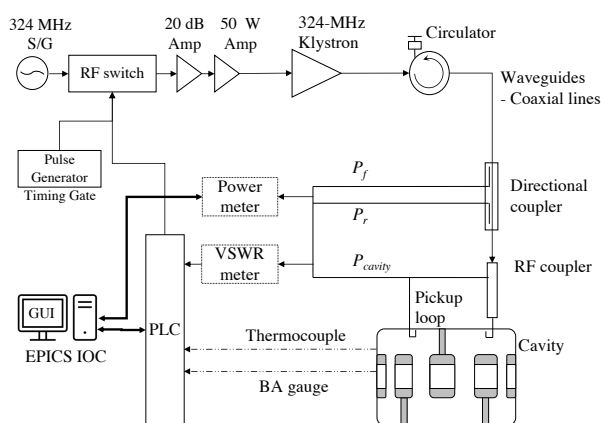


Figure 4: RF block diagram of the high-power test system.

ワーメーター (SPANAWAVE 8542C [22]) 及び VSWR メータで測定し、空洞のピックアップパワー ( $P_{cavity}$ ) も同様に測定した。パワーメータからのデータは、EPICS (experimental physics and industrial control system) で直接記録した。VSWR メータからのデータは、PLC (programmable logic controller) を介して記録し、RF のインターロックとして設定した。

### 3.2 コンディショニング

Figure 5 に short-IH のコンディショニング結果を示す。プロットは空洞のパワー、空洞内圧力、空洞外壁と周囲温度との差をそれぞれ表している。大電力試験は日中のみを実施しており、横軸は RF-on の積算時間を示している。Sec. 2 で述べたように、空洞の表面処理を施していないため、コンディショニングの初期には多くのガス放出と放電が発生した。そこで、定格より低い duty factor (繰り返し周波数 1 Hz、パルス幅 20  $\mu$ s) でコンディショニングを開始し、徐々に RF パワーを上昇させた。約 20 時間後、ガス放出が減少したため、duty factor も徐々に増加させた。空洞のトリップも徐々に軽減し、コンディショニング開始から約 30 時間後、定格の duty factor の 0.1% (25 Hz, 40  $\mu$ s)、及び定格の RF パワー (75 kW) に到達した。

定格 RF パワー (75 kW) を保持した安定性の試験を行ったところ、7 時間の連続運転中の空洞トリップの発生は 2 回のみであった。また、空洞外壁の有意な温度上昇も測定された。さらに、定格より 10% 大きい電圧に相当する RF パワー (88 kW) での 7 時間の安定性試験では、空洞のトリップは一度も発生しなかった。これらの結果から、表面処理なし、RF コンタクトレスの可動式チューナー使用の場合でも、short-IH が非常に安定に動作することが確認された。なお、大電力運転時には、次節で述べる空洞の熱膨張による周波数シフトを補正するため、手動で周波数調整を行った。

### 3.3 熱特性

水冷システムを持たない short-IH は熱による影響が顕著に表れるため、FEM モデルとの検証に適している。full-IH では空洞外壁に水冷システムを設置する予定であるが、一体加工の DT を直接冷却することは困難である

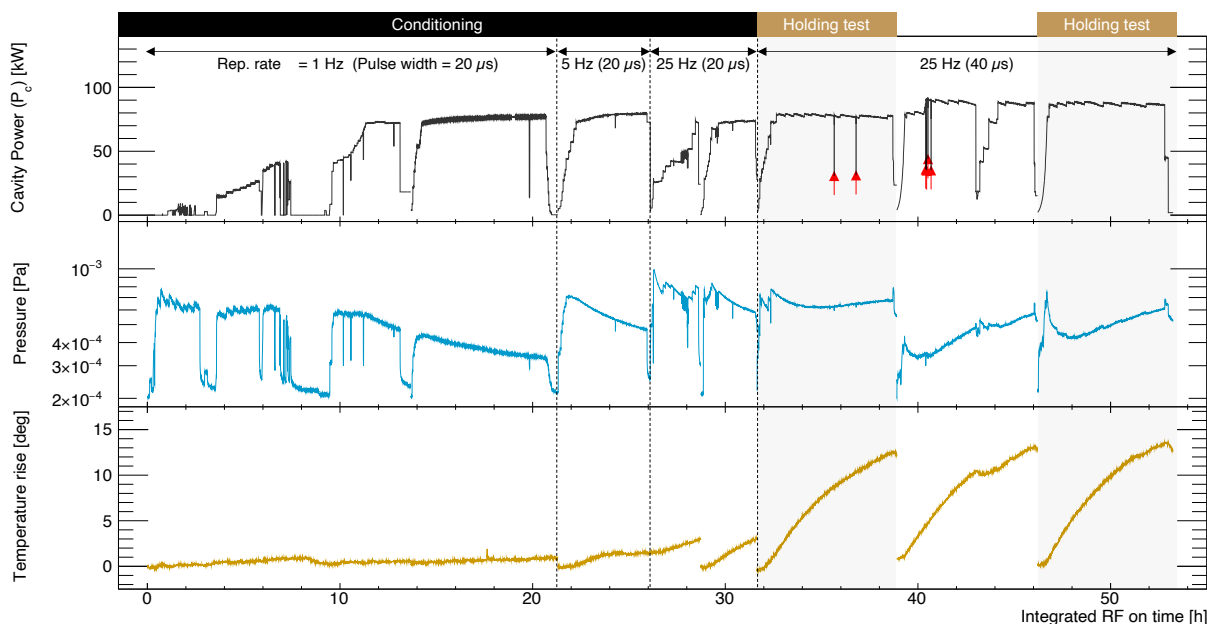


Figure 5: Conditioning history of the short-IH. (Top) Cavity power. The red arrows indicate the cavity trip caused at the duty factor of 0.1%. (Middle) Pressure in the short-IH. (Bottom) The temperature data shows the difference between the cavity's outer temperature and the ambient temperature.

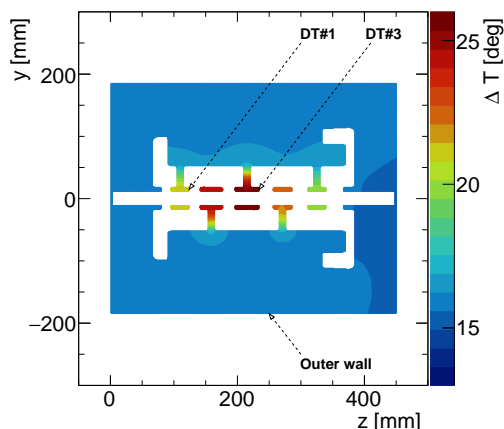


Figure 6: Steady state temperature distribution of the short-IH with the peak power of 88 kW and duty factor of 0.1%. The distribution represents the temperature difference from the initial state.

ため、熱解析による設計検討は依然重要になる。

short-IH の消費電力による温度上昇と構造変位の解析には、CST MPHYSICS STUDIO (MPS) を用いた。この解析では、計算を簡略化するためにチューナーや RF コンタクターなどの詳細な構造は省略している。まず、CST MWS を用いて計算した空洞表面の消費電力を CST MPS に入力し、Fig. 6 に示すように、空洞の定常状態での温度分布を導出した。ここで、空洞外壁表面での熱伝達係数は、大気への自然対流 [23] を仮定して  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$

とし、消費電力には 0.1% の duty factor を乗算している。次に、この温度分布を用いて、熱膨張による構造変位を計算した。最後に、構造の変位量を再度 CST MWS に入力し、共振周波数からの周波数シフトを計算した。さらに、上記の手順を過渡的解析に応用することで、空洞の過渡的な温度と周波数応答を計算した。

Figure 7 は、RF パワー 88 kW の 7 時間運転時の過渡的な周波数シフトと温度変化の実測値とシミュレーション結果を示す。横軸は RF パワーをオンにしてからの時間を表している。上図は 324 MHz からの周波数シフト  $\Delta f$  を表しており、実測値とシミュレーション値を以下の関数でフィットした。

$$\Delta f = a_1 + a_2 \exp\left(\frac{t}{-\tau_1}\right) + a_3 \exp\left(\frac{t}{-\tau_2}\right). \quad (1)$$

フィットにより得られたパラメータは Table 3 にまとめられた。周波数項の測定パラメータは数 10 kHz の範囲でシミュレーションと一致しており、測定された 2 つの時定数も概ねシミュレーションと一致することを確認した。

Figure 7 の下図は、空洞の温度ドリフトを表す。測定値である黒点は空洞外壁に取り付けた熱電対の温度と周囲温度との差を示しており、青の点線は空洞外壁温度のシミュレーション結果を示している。周波数シフトの結果と同様に、空洞外壁の実測温度はシミュレーション結果とよく一致した。また、緑と黄色の点線は Fig. 6 に示す DT#1 と #3 の末端温度の過渡的なシミュレーション結果を表す。DT の熱容量が空洞壁の熱容量よりも小さいため、 $t = 0-0.3 \text{ h}$  の間に DT の温度は外壁の温度よりも速い時定数で上昇し、その後は外壁と同じ時定数で温度上昇することを示している。このシミュレーション結果は、周波数シフトで測定された 2 つの時定数  $\tau_1$  と  $\tau_2$  が、この DT の局所的な熱膨張と空洞全体の熱膨張の時

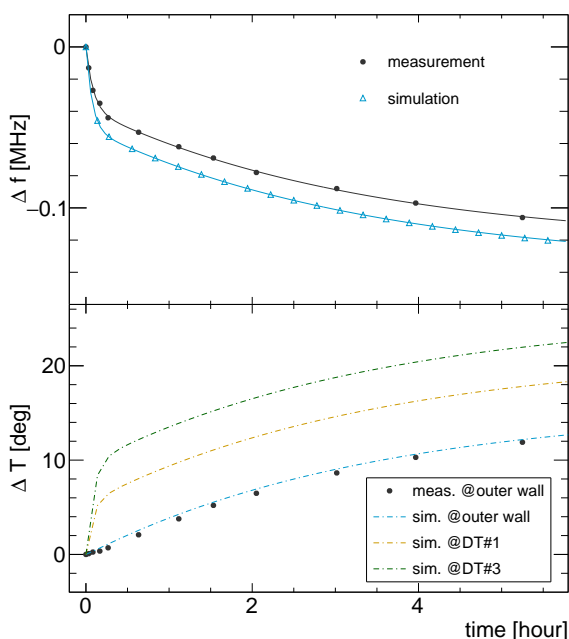


Figure 7: (Top) Frequency shift as functions of time from RF-on. Solid lines show the fitting results. (Bottom) The measured and simulated temperature drift as functions of time. The data shows the difference between ambient and cavity surface temperatures.

Table 3: Fitting Results for the Measured and Simulated Transient Response for Frequency

	$a_1$ (MHz)	$a_2$ (MHz)	$\tau_1$ (h)	$a_3$ (MHz)	$\tau_2$ (h)
meas.	-0.12	0.038	0.086	0.084	3.31
sim.	-0.14	0.051	0.074	0.086	3.37

定数の違いに起因していることを明示している。これらの結果は、FEM モデルを用いた IH-DTL のシミュレーションの妥当性を証明するものである。

#### 4. まとめ

J-PARC muon  $g-2$ /EDM 実験のための、APF IH-DTL (short-IH) の大電力試験を実証した。この short-IH は、full-IH に要求される性能の実現可能性を示すために開発されたものである。40 時間のコンディショニングの結果、設計電界 3.0 MV/m より 10% 高い加速電界に相当する RF パワー (88 kW) の投入に成功した。また、7 時間の長時間運転時の際に、空洞トリップが一度も発生しなかったことから、表面処理を施していないにもかかわらず、非常に安定した運転が可能であることが確認された。さらに、大電力運転中の過渡的な空洞外壁温度と共振周波数応答を測定し、3 次元 FEM モデルとの比較を行ったところ、測定された周波数シフトはシミュレーションとよく一致することが確かめられた。

これらの結果は、APF IH-DTL がミューオン加速用の DTL として実用的であることを示しており、short-IH の開発で確立された設計・製作手法が、ミューオン  $g-$

2/EDM 実験の実現に必要な full-IH に適用できることを証明するものである。

#### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費, JP18H03707, JP16H03987, JP16J07784, JP20J21440, JP20H05625, JP21K18630, JP21H05088, JP22H00141, JST FOREST Program (Grant Number JPMJFR2120) の助成を受けたものです。この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP21502029-0)、三菱財団自然科学研究助成 No. 202111003 の支援を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] G. W. Bennett *et al.*, Phys. Rev. D 73, 072003 (2006).
- [2] T. Aoyama *et al.*, Physics Reports 887, 1 (2020).
- [3] B. Abi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 126, 141801 (2021).
- [4] M. Endo *et al.*, J. High Energ. Phys. 2021, 75 (2021).
- [5] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 053C02 (2019).
- [6] Y. Kondo *et al.*, presented at IPAC' 18, Vancouver, Canada, April-May 2018, paper FRXGBF1.
- [7] M. Otani *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2022, 10.1093/ptep/ptac067 (2022), 052C01,
- [8] S. Minaev and U. Ratzinger, in Proceedings of the 18th Particle Accelerator Conference, New York, 1999 (IEEE, New York, 1999).
- [9] Y. Iwata *et al.*, nima 569, 685 (2006).
- [10] Y. Iwata *et al.*, nima 572, 1007 (2007).
- [11] P. F. Ma *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 24, 020101 (2021).
- [12] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams. 19, 040101 (2016).
- [13] Time incorporated company, Japanese Patent No. 5692905 (P5692905) (2015).
- [14] W. D. Kilpatrick, Review of Scientific Instruments 28, 824 (1957).
- [15] Y. Nakazawa *et al.*, presented at PASJ' 19, Kyoto, Japan, 2019, paper WEPI001.
- [16] M. Otani *et al.*, in Proceedings of the PASJ' 16, 858 (2016).
- [17] Computer Simulation Technology, CST Studio Suite; <https://www.cst.com/products/CSTMWS>
- [18] Y. Nakazawa *et al.*, in Proceedings of the 3rd J-PARC Symposium, 10.7566, JPSCP.33.011128 (2019).
- [19] Characteristics of Kyocera Fine Ceramics; <https://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/product/pdf/material.pdf>
- [20] Y. Nakazawa *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 1350, 012054 (2019).
- [21] Canon electron tubes and devices, Canon E3740A.
- [22] Spnawave, 8542C
- [23] P. Kosky *et al.*, Chapter 14- mechanical engineering, in Exploring Engineering(Fifth Edition), pp317-340 (2021).