

ミュオン線形加速器 APF 方式 IH-DTL プロトタイプの 大電力試験に向けた開発状況

CURRENT STATUS FOR HIGH-POWER TESTS OF AN APF IH-DTL PROTOTYPE IN THE MUON LINAC

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

We have developed an inter-digital H-mode drift tube linac (IH-DTL) with an alternative phase focusing (APF) method in the muon accelerator for the J-PARC g -2/EDM experiment. The IH-DTL has a high shunt impedance in the low energy region and is suitable for muon acceleration. Since there is no model case designed for muons and there are no operational examples, we fabricated a prototype cavity of IH-DTL that accelerates muons to 1.3 MeV. In this paper, the preparation status for the high-power test of the IH-DTL prototype and the construction of simulations of its operation are reported.

1. はじめに

2000年初頭、素粒子ミュオンの異常磁気能率 g -2 はブルックヘブン国立研究所で行われた E821 実験により 0.54 ppm (parts per million) という高精度で測定されており [1]、標準理論からの予測値との間に約 3σ 以上の乖離を示している [2]。新物理の兆候であることが期待されているこの物理量を、従来の精度を上回る 0.1 ppm 精度での測定を目指す実験として、J-PARC ミュオン g -2/EDM 精密測定実験 [3] を計画している。この実験では、室温 (25 meV) 程度まで減速させたミュオンを 212 MeV まで加速することによって生成される低エミッタンスミュオンビームを高精度な 3 T の磁場中に蓄積する。蓄積されたミュオンが放出する崩壊陽電子を検出し、ミュオンのスピン歳差運動周期を精密に測定することで g -2 測定を行う。低エミッタンスミュオンビームを生成する手法は従来の g -2 測定には無い全く新しい手法であり、技術的な核となるミュオン加速技術は E34 実験において克服すべき課題の一つである。

ミュオン加速は、高周波四重極線形加速器 (RFQ)、IH 型ドリフトチューブ線形加速器 (IH-DTL)、ディスクアンドワッシャ型結合空洞線形加速器 (DAW-CCL)、そして円盤型装荷型加速構造 (DLS) の全 4 段の線形加速器で構成する [4]。RFQ は加速空洞の準備は既に完了しており [5]、2017 年には J-PARC MLF ミュオンビームラインにて RFQ のプロトタイプを用いた世界初のミュオンの RF 加速を実証した [6]。その一方で IH-DTL に関しては、セル長をミュオン専用設計したモデルケースは過去に例を見ず、運用例も無い。また、空洞内

の収束要素として、APF (alternative phase focusing) 方式 [7] と呼ばれる磁石などの収束要素を用いず高周波電場のみでビーム収束を行う手法を採用しており、低エミッタンスミュオンビームを実現する上では、ミュオンビームへの APF の収束力の有効性を検証することも必須となる。そこで我々は IH-DTL 実機空洞の製作に先立ち、設計から運用における R&D、そしてミュオン加速実証試験用のプロトタイプ空洞を製作した。Table 1 に IH-DTL プロトタイプの基本性能を示す。

これまでの同学会の報告では、プロトタイプ空洞の低電力試験結果 [8]、及び RF カップラーの設計に関わるシミュレーションと低電力測定結果 [9] を示し、空洞性能を満たすことを確認した。現在は高電力試験に向けたシミュレーションと試験環境の準備を進めており、2020 年冬頃に IH-DTL プロトタイプ大電力試験を実施する予定

Table 1: Design parameters of the APF IH-DTL Prototype

Beam species	muon
Resonant frequency	324 MHz
Injection energy	0.34 MeV
Extraction energy	1.3 MeV
Q_0	8700
$Z_{sh} T^2$ (mean)	42.6 M Ω /m
V_0 (cell)	0.1~0.3 MV
Maximum E	1.8 E _k
Nominal peak power	55 kW
Repetition rate	25 Hz
RF pulse width	40 μ s
Duty	0.1 %

* 20nd103s@vc.ibaraki.ac.jp

である。本論文では、IH-DTL プロトタイプの大電力試験に向けた準備状況を報告する。さらに、大電力試験を想定した時の熱計算などのシミュレーションの構築を行い、空洞の安定運転のための検証を行う。

2. APF IH-DTL プロトタイプ

IH-DTL プロトタイプの概要図を Fig. 1 に示す。加速モードとして運転周波数 324 MHz の TE₁₁ モードを連続的に励振する。16 セルから構成される IH-DTL 実機空洞 [10] に対して、プロトタイプ空洞は初めの 6 セル分を再現したモデルであり、 $\beta = 0.08$ から 0.15 までミューオンを加速する。

空洞の組立てには、ドリフトチューブを搭載したセンタープレートを両サイドプレートで挟み込む 3 ピース構造を採用した。3 つのプレートはそれぞれが電気伝導度の良い無酸素銅の削り出しによる一体加工であり、錆付けなどの処理等が必要としないため、パーツ数の減少、作業工程の簡略化が可能となり、製作コストを抑えることができた。プレート側面に溝を設けて銅製の RF コンタクトを設けることで、プレート同士の導通を担保する。プロトタイプ空洞には、可動チューナーポートが 3 つ (水平方向)、RF ピックアップポートが 3 つ (45 度下方向)、RF カップラーポートと真空ポート (45 度上方向) をそれぞれ一つずつ設けている。3 つのチューナーは直線導入器を用いた手動型であり、低電力試験によって周波数調整範囲内 (0 ~ 3.2 MHz) で十分に運転周波数である 324 MHz に調整可能であることを確認した。

高周波電力の投入には、先端にループアンテナを持つ同軸構造の RF カップラーを採用する。導体の材質は無酸素銅であり、高周波窓には TiN 成膜したアルミナセラミックス (A479S : KYOCERA [11]) を利用する。また、ループアンテナのループ面積・挿入量は、カップラーコールドモデルの低電力試験のループ結合度測定 [9] により最適化した構造 (結合度 ~ 1) から決定した。大電力試験時には回転フランジによるループアンテナの回転によって、結合度の微調整を可能とする。高周波伝送線路と RF カップラーは 77D の同軸導波管フランジの取り合いで接続する。

RF カップラーは現在製作が進行中であり、2020 年秋に完成予定である。完成次第、再び低電力試験を実施し、

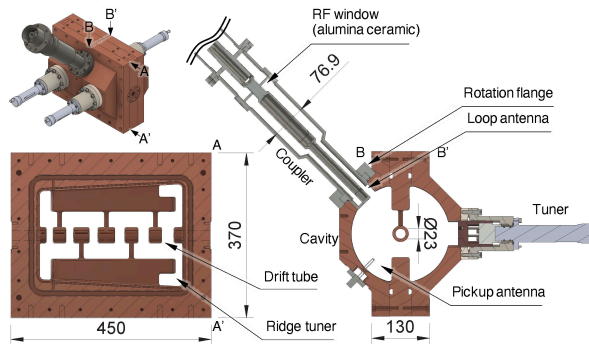


Figure 1: The sectional view of the mechanical design of the IH-DTL prototype and RF coupler.

シミュレーションと実測とで比較し性能を評価する。

3. 大電力試験セットアップ

大電力試験の実験セットアップの概要図を Fig. 2 に示す。運転周波数 324 MHz のクライストロンからの高周波電力を導波管 (WR2300)、同軸管、そして RF カップラーを通じて、IH-DTL プロトタイプに投入する。目標高周波電力 55 kW (繰返周波数 25 Hz、RF パルス幅 40 μ s) を満たすために、クライストロンに接続された導波管から出力を確認し、ダミーロードによって調整を実施する。RF カップラーに取り合うためには、77D 同軸構造まで変換する必要があるため、同軸管は 203D、152D、77D まで径を落とすためのレデューサを 2 つ設ける。同軸線路には 3 つのエルボー型同軸管を用いることで、接続の自由度を担保する。また、真空排気は空洞の真空ポートにターボ分子ポンプを装着して行う。

Figure 3 に大電力試験時における RF システムの構成図の草案を示す。空洞入力波と反射波から RF 電力を測定するために、同軸管とカップラーの間に 77D の方向性結合器を直結し、それぞれの信号に対してパワーセンサーを設置する。同様に、空洞のピックアップ信号に対してもパワーセンサーを設置する。パワーメータの測定

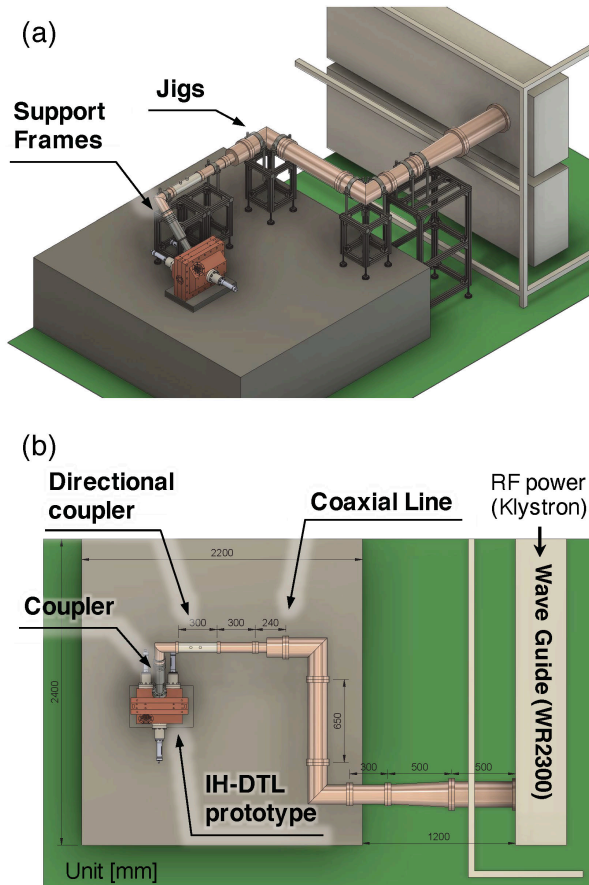


Figure 2: Schematic view of an experimental setup for high-power test of the IH-DTL prototype. (a) Perspective view. (b) Top view.

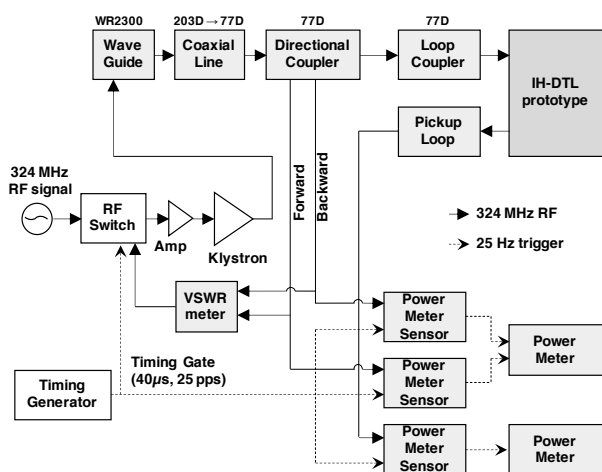


Figure 3: The design of the block diagram of the RF system for high-power test.

値は PLC (programmable logic controller) を経てデジタル信号として DAQ に記録し、測定された入力・反射電力から空洞電圧を評価し、要求される仕様を満たすことを確認する。また、空洞のインターロックには VSWRメータと真空計を採用し、空洞からの反射電力と真空をモニターする。

大電力試験は 2 週間程度の日中のみの実験期間を予定している。目標電圧を保持した安定性の評価試験と、限界電圧の評価試験を実施する予定であり、ミュオン加速器としての IH-DTL の性能を担保することが目標となる。高周波源、高周波線路は既に準備ができており、現在製作している RF カップラーが完成次第、大電力試験を実施することが可能であり、2020 年冬に試験を計画している。

4. シミュレーション

加速空洞の開発・製作において、低電力、及び大電力試験の結果をシミュレーションと比較することは、計算に使用しているソフトウェアの健全性を評価する上で必須である。特に今後の課題である IH-DTL 実機空洞の詳細設計の精度を保証するためには、次の 2 つのシミュレーション体系を整える必要があると考える。第一に、空洞に要求されるチューナー仕様や冷却機構を検討する上で、運用中の空洞の温度変化による共振周波数の変化を見積もることが重要になる。次に、運転の安定性の評価や放射線遮蔽の程度を理解するために、空洞内で生じるマルチパッキング由来の放電や空洞壁に衝突した暗電流による X 線発生を評価することが必要になる。

そこで、まずはプロトタイプ空洞における上記シミュレーションの構築を進めている。

4.1 熱計算

シミュレーションソフトウェアには CST STUDIO SUITE [12] を使用し、大電力試験時の状態を厳密に再現した 3 次元モデルによる熱計算を行う。CST MICROWAVE STUDIO (MWS) による固有値モードで計

算した 3 次元電磁場分布を、同ソフトウェアの CST MPHYSICS STUDIO (MPS) に実装することで、RF 場による空洞温度変化量、金属膨張による構造変化量、そして、構造変化によって生じる共振周波数変化を見積もることが可能となる。

Figure 4 に CST MPS による定常熱解析の 3 次元解析結果を示す。IH-DTL プロトタイプは構造の簡略化のため、水冷による冷却機構を設けていない。そのため、熱源は高周波電力のみに由来し、空冷による熱の発散を仮定している。空洞表面の熱伝達係数は大気への自然対流と仮定し $14 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ とし、実験環境の周囲温度を 27 度、高周波電力 55 kW 投入を仮定した場合の空洞内の温度変化を計算した。空洞の外壁温度は周囲温度に比べて 6 度程度上昇し、表面電流密度が最も高いドリフトチューブにおける温度上昇は最大で 11 度程度となる。

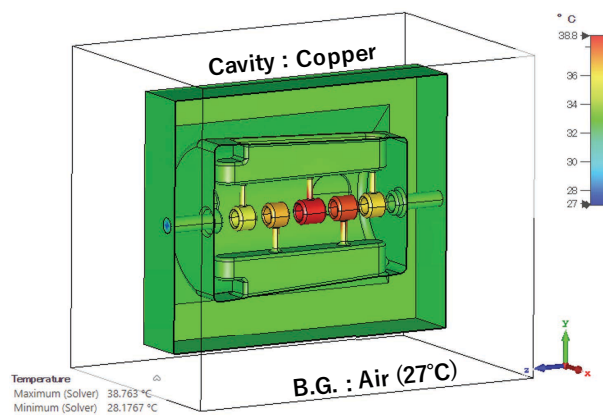


Figure 4: The result of the thermal calculation of the IH-DTL prototype with the thermal steady solver in CST MPS. Where the RF power and duty are 55 kW and 0.1 %, respectively.

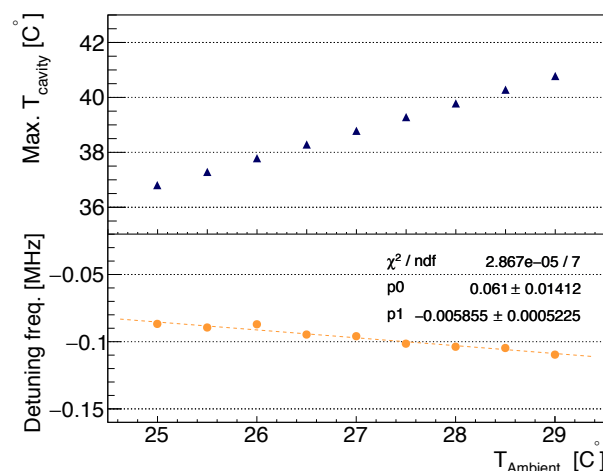


Figure 5: The variation of the maximum temperature of the cavity and a change in the resonant frequency caused by it as a function of ambient temperature. The parameter of p1 shows the slope of the linear fitting function.

ただし、IH-DTL プロトタイプの実用時の Duty 0.1% を考慮して計算した。

Figure 5 に空洞の周囲温度を変化させた時の空洞内の最大温度と、その結果として生じる固有値モードで計算された理想的な共振周波数からの変化量を示す。基準外気温 (27 度) の時の、理想的な共振周波数からの差異は -0.096 MHz となる。さらに、基準外気温から ± 2 度の気温変動を想定した場合、共振周波数の温度による変化率は、一次関数によるフィッティング結果から -0.006 MHz/ $^{\circ}\text{C}$ となる。RF 場による周波数変化量に比べると小さいため、周囲温度変動における周波数への影響は小さいと推測できる。プロトタイプ空洞の熱上昇及び周囲温度の変化による共振周波数の差異は、チューナーによって十分に補填可能であるため、大電力試験では安定な運転が行えると考えられる。

4.2 マルチパッキング・放射線量の見積もり

CST Particle Studio (PS) と PHITS コード [13] により、空洞内の暗電流の挙動と、それによって発生する X 線量の計算を進めている。空洞内での暗電流は Fig. 6 に示すように、CST PS による再現が可能であり、空洞の側面やリッジチューナーの付近でマルチパッキングが生じやすいことが判明した。

現在は、CST PS で得られた暗電流の位置分布やエネルギー分布の情報を PHITS コードを用いて解析し、空洞から生じる X 線量を見積もる手法を構築している。シミュレーションで線量の絶対値を見積もることは困難であるが、実測値と比較することで計算値のスケールを決めることができる。プロトタイプ空洞でのシミュレーション体系を確立し、大電力試験時の実測値と比較することにより、今後の IH 実機空洞での放射線量の見積もりはもちろんのこと、ミュオン線形加速器全体の見積もりにも活かせると考えられる。

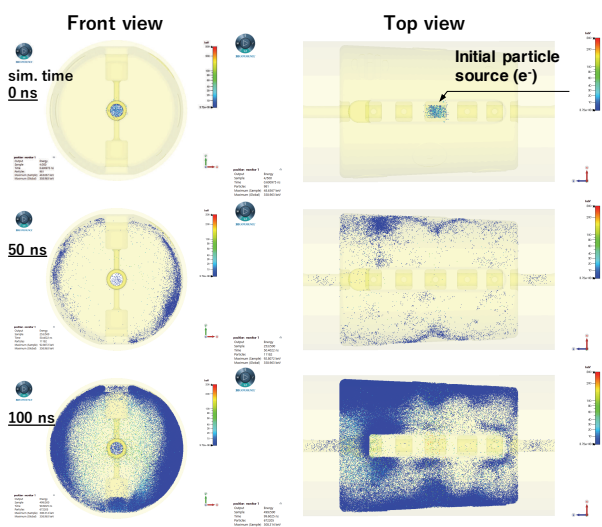


Figure 6: The result of the particle tracking calculation of the dark current due to a multipacting in the IH-DTL prototype cavity with the PIC (particle In cell) solver in CST PS.

熱計算や放射線量などの IH-DTL 加速空洞の運用に関するシミュレーション体系は現在整いつつある。プロトタイプ空洞の大電力試験では、温度、共振周波数、そして放射線量などの測定結果を上記のシミュレーション結果と比較することで、CST 及び PHITS コードによる計算の健全性を評価することも目的の一つである。

5. まとめと今後の展望

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、ミュオン専用の IH-DTL の開発を進めている。実機に先駆けて製作したプロトタイプ空洞による大電力試験を 2020 年冬に予定しており、目標空洞電圧での安定した運転を実証することを目指す。また、実験セットアップの検討と並行して、空洞の熱計算や放射線量計算も進めている。

今後の展望として、大電力試験後には IH-DTL プロトタイプによるミュオン加速実証試験を J-PARC MLF H ラインで計画している。加速試験の実現性の検討や診断ビームライン開発に関しては、本学会論文集 [14] を参照されたい。IH-DTL の運用における技術的課題を抽出しつつ、初のミュオン専用のリニアックとして確立することを目指す。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP5H03666、JP16H03987、JP16J07784、JP18H03707、JP18J22129、JP20J21440、JP20H05625 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, 114025 (2018).
- [3] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 053C02 (2019).
- [4] Y. Kondo *et al.*, presented at IPAC' 18, Vancouver, Canada, April-May 2018, paper FRXGBF1.
- [5] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 040102 (2013).
- [6] S. Bae *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 050101.
- [7] S. Minaev and U. Ratzinger, in Proceedings of the 18th Particle Accelerator Conference, New York, 1999 (IEEE, New York, 1999).
- [8] Y. Nakazawa *et al.*, presented at LINAC' 18, Beijing, China, 2018, paper MOPO085.
- [9] Y. Nakazawa *et al.*, presented at PASJ' 19, Kyoto, Japan, 2019, paper WEPI001.
- [10] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams. 19, 040101 (2016).
- [11] Characteristics of Kyocera Fine Ceramics; <https://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/product/pdf/material.pdf>
- [12] Computer Simulation Technology, CST Studio Suite; <https://www.cst.com/products/CSTMWS>
- [13] Tatsuhiko Sato *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018).
- [14] Y. Nakazawa *et al.*, presented at PASJ' 20, Ehime, Japan, 2020, paper WEPP16.