

ミューオン線形加速器 APF 方式 IH-DTL プロトタイプ用 入力 RF カップラーの開発

DEVELOPMENT OF RF INPUT COUPLER FOR INTER-DIGITAL H-MODE DRIFT-TUBE LINAC PROTOTYPE WITH ALTERNATIVE PHASE FOCUSING IN MUON LINAC

中沢 雄河^{*A)}、飯沼 裕美^{A)}、岩下 芳久^{B)}、岩田 佳之^{C)}、大谷 将士^{D)}、河村 成肇^{D)}、北村 遼^{E)}、
近藤 恭弘^{E)}、齊藤 直人^{F)}、須江 祐貴^{G)}、長谷川 和男^{E)}、林崎 規託^{H)}、三部 勉^{D)}、
森下 卓俊^{E)}、安田 浩昌^{I)}、山崎 高幸^{D)}、吉田 光弘^{D)}、四塚 麻衣^{G)}、Cicek Ersin^{J,K)}
Yuga Nakazawa^{*A)}、Hiromi Iinuma^{A)}、Yoshihisa Iwashita^{B)}、Yoshiyuki Iwata^{C)}、Masashi Otani^{D)}、
Naritoshi Kawamura^{D)}、Ryo Kitamura^{E)}、Yasuhiro Kondo^{E)}、Naohito Saito^{F)}、Yuki Sue^{G)}、
Kazuo Hasegawa^{E)}、Noriyosu Hayashizaki^{H)}、Tsutomu Mibe^{D)}、Takatoshi Morishita^{E)}、
Hiromasa Yasuda^{I)}、Takayuki Yamazaki^{D)}、Mitsuhiro Yoshida^{D)}、Mai Yotsuzuka^{G)}、Cicek Ersin^{J,K)}
^{A)}Ibaraki University, ^{B)}Kyoto University, ^{C)}NIRS, ^{D)}KEK, ^{E)}JAEA, ^{F)}J-PARC center, ^{G)}Nagoya University,
^{H)}Tokyo Institute of Technology, ^{I)}University of Tokyo, ^{J)}Siirt University, ^{K)}Gazi University,

Abstract

IH-DTL prototype in a muon LINAC for the J-PARC muon $g-2$ /EDM experiment will accelerate muons from $\beta = 0.08$ to 0.3 at a drive frequency of 324 MHz. The required RF power of 60 kW is supplied by one RF input coupler. The coupler is composed of a coaxial line with a coupling loop antenna. Because the coupler or a frequency tuner is attached to the cavity from one side, the axial symmetry of the RF field is disturbed. Thus, the coupler has to be optimized to suppress the insertion amount of a coupling loop to a necessary minimum. We conducted a low-power test using a test coupler and confirmed a loop structure that suppresses VSWR <1.1 and the field disturbance. In this paper, the design of an RF input coupler and the result of the low-power measurement for loop optimization are presented.

1. はじめに

素粒子標準理論を超える物理の兆しが潜むと期待される物理現象の一つにミューオンの異常磁気モーメント ($g-2$) が挙げられる。2000 年初頭、米国ブルックヘブン国立研究所での E821 実験 [1] では、磁場中に蓄積したミューオンのスピン歳差運動から、ミューオン $g-2$ を 0.54 ppm の精度で測定し、 $3 \sim 4\sigma$ 程度の理論値 [2] との乖離を示した。我々は、先行実験とは異なる手法による $g-2$ 精密測定実験 (E34) [3] を J-PARC にて推進している。 π 粒子崩壊から得る従来の高運動量ミューオンを利用した先行実験に対し、E34 実験ではそのミューオンを冷却・再加速することで得られる「低エミッタンスミューオンビーム」を利用することで、ビーム由来の系統誤差を削減する。

E34 実験では、全 4 段の高周波加速器からなるミューオン線形加速器を用いて低エミッタンスビームを実現する [4]。ミューオンは短寿命であることから、ミューオン線形加速器にはビームの通過時間が短いことが要求される。そこで、初段加速としての RFQ に続く加速器には、低エネルギー領域において高いシャントインピーダンスを有する IH-DTL (Inter digital H-mode Drift Tube Linac) を採用した。さらに、近年重イオン線形加速器で実績のある APF (Alternative Phase Focusing) 法 [5] を採用することで、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が可能となり、空洞の簡略化と短距離加速を実現した。実機空洞設計 [6] は既に完了しており、軸長さ 1.3 m、16 セルからなる APF 方式の IH-DTL の運転周波数は RFQ と同じ 324 MHz であり、ミューオンを $\beta = 0.08$ から 0.3 まで加速する。

実機設計を元に、まずはプロトタイプを製作した [7]。プロトタイプは軸長さ 450 mm (6 セル分) で設計されており、ミューオンを $\beta = 0.08$ から 0.15 まで加速する。ただし、ビーム電流はほぼゼロのためビームローディングは無視できる。加速性能を満たすためには、60 kW の高周波電力を投入する必要があり、1 台の RF カップラーを介して投入する。

本論文では、RF カップラーの工学設計における、CST Micro Wave Studio (CST MWS) [8] を用いた 3 次元電磁界解析結果と、低電力試験用に製作したテストカップラーによるカップリング定数測定の結果を述べる。

2. RF カップラーの設計

2.1 設計条件

RF カップラーの設計には、RF カップラーと空洞とのインピーダンス整合において、電圧定在波比 (VSWR: Voltage Standing Wave Ratio) が 1.1 以下程度であることが要求される。RF カップラーの構造には、高周波窓におけるマルチパッキングを防止するために、電場の向きが高周波窓表面に対して平行な向きになる同軸構造 (Line impedance :50 Ω) を採用

* 18nm021f@vc.ibaraki.ac.jp

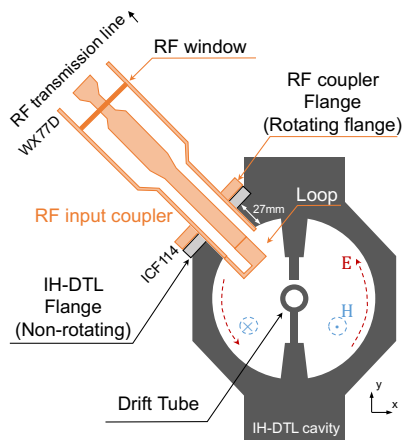


Figure 1: Schematic image of an RF input coupler.

する。空洞とのカップリングのためのループアンテナを設ける。ただし、製作の簡易化のため導体部とループアンテナはロウ付けで固定するため、カップリング係数 β はループアンテナのビーム軸に対する回転によってのみ調整することが求められている。したがって、空洞内を励振する磁場に対してある程度の角度（本研究では 30° とする）ループアンテナを傾けた状態で $VSWR < 1.1$ となる条件を見つけることが要求される。

Figure 1 に IH-DTL 空洞に取り付ける RF カップラーの概略図を示す。空洞には $\phi 58$ mm のポートに ICF114 の固定フランジが取り付けられているため、カップラーにはループ回転の調整機構としての同じ規格の回転フランジを用いる。RF 伝送ラインと 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。また、IH-DTL プロトタイプは要求するパワー 60 kW に対し duty が 0.125% であることから、パワー投入による温度上昇はほとんど無いため、冷却機構は不要とする。

2.2 RF カップラーの構成

RF カップラーの基本構造を Fig. 2 に示す。同軸線路の組み合わせとなることから、伝播モードは TEM である。導体には無酸素銅、RF 窓には TiN 成膜したアルミナセラミックス (A479S: KYOCERA [9]) を予定している。A479S の比誘電率 ϵ_r は 9.9 であり、アルミナセラミックス部分においてインピーダンス不整合が生じてしまうため、高周波窓部分の内導体にテーパーを用いることで、窓付近のインピーダンス不整合を解消した。RF 窓から空洞窓の距離は $\lambda/3$ 長に設定し、324 MHz ($\lambda = 925$ mm) の定在波のピークを避けるように設計した。以上の設計条件に基づき、CST MWS による 3 次元電磁場解析から Fig. 2 のループアンテナを除く領域を最適化した結果、320 – 328 MHz の範囲内で $VSWR < 1.00050$ を満たす構造を決定した。

3. ループアンテナの最適化

この RF カップラーはループアンテナと導体部とのロウ付け固定を想定しているため、ループアンテナ

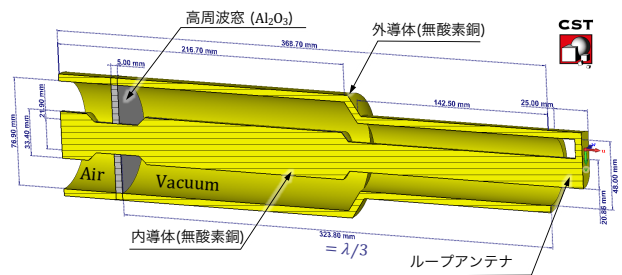


Figure 2: Design of RF input coupler with CST MWS.

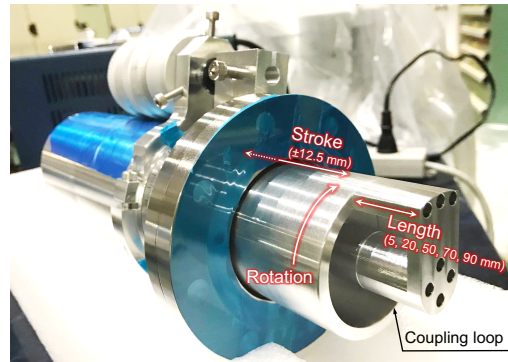


Figure 3: Photograph of the test coupler using low-power test for optimization of the coupling loop antenna.

ナの長さを事前に決定しておく必要がある。さらに、空洞にループアンテナが挿入する時、空洞の共振周波数、 Q 値が変化し、空洞内電磁場の歪みが懸念されることから、ループアンテナの挿入量を最小にしつつ、 $VSWR < 1.1$ となるループ構造を決定する必要がある。そこで、空洞とループアンテナのインピーダンス整合及び空洞への影響の確認のために、低電力試験用の RF カップラー（以下、テストカップラーと表記）を製作した。

3.1 実験セットアップ

Figure 3 にテストカップラーの写真を示す。簡略化のため高周波窓は取り付けず、作業性を考慮してループアンテナを含め導体部をアルミ製としている。さらにテストカップラーには、ループアンテナの構造を変えるために次の 3 つの調整機構を設けた。

1. 長さの異なる 5 つのループアンテナによるループ長調整 (5, 20, 50, 70, 90 mm)
2. マイクロメータヘッド (MHQ: Mitutoyo [10]) によるループ挿入量調整 (± 12.5 mm)
3. フランジ回転によるループ回転調整 ($0^\circ - 360^\circ$)

Figure 4 にテストカップラーによる低電力試験セットアップを示す。テストカップラーは空洞内に励振している磁場に対してループの面が垂直な向きになるときをループの角度 0° として設置する。空洞にはテストカップラーに加え、共振周波数の調整機構としてのチューナーと、信号の抽出機構としての RF ピックアップループを取り付ける。チューナーは空洞の電磁場に非対称な影響を与えないよう 3 方向か

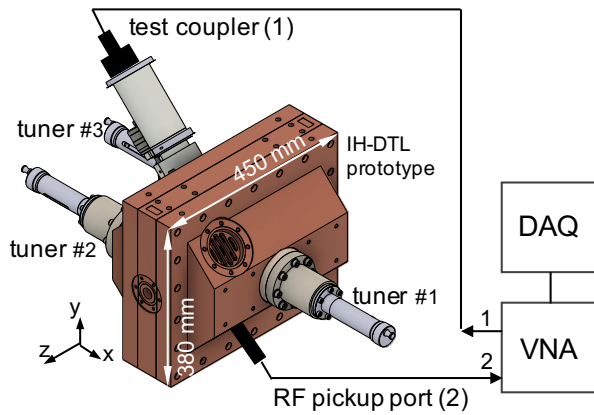


Figure 4: Experimental setup for low-power measurement. The coupler and an RF pickup loop are connected to the VNA.

ら設置しており、3台のチューナーによる周波数調整範囲は最大5MHzである。テストカップラーとRFピックアップループにVNA(Vector Network Analyzer)を繋ぎ、空洞のSパラメータを測定する。ここで、テストカップラーの信号を1、ピックアップの信号を2とする。

3.2 結果

ループの長さは20mmの時に最も過不足なく結合した。Figure 5にループの長さ20mmの時のSパラメータ測定の結果を示す。Figure 5上段はループの回転角によるテストカップラーのカップリング定数 β_1 の変化量であり、ループの挿入量によるそれぞれの結果を示す。下段は空洞における共振周波数の変化量を示す。ループの挿入量が4.5mm、回転角30°の時、カップリング定数は1.014となった。共振周波数においても、チューナーにより運転周波数である324MHzに調整することができた。

Figure 6にカップラー及びチューナーの最適化に至るまでの無負荷 Q 値(Q_0)の変化における実測値とシミュレーション値を示す。カップラーやチューナーの取付、挿入の過程で Q_0 が2.3%減少したシミュレーションに対して、実測値では21.6%の減少が確認できた。主な原因として、シミュレーションには反映していない空洞、カップラー及びチューナーにおけるRFコンタクトが原因であると推測した。RFコンタクトが Q 値を大きく下げる原因になることが判明したので、実機IH-DTLの製作においてはこれらの改善策が必要となるが、プロトタイプにおいては投入パワーが60kWと比較的小さいので、この Q_0 の減少は重大な問題にはならない。

Figure 7に、ループ挿入量が4.5mmの時のビーズ測定[11]によるビーム軸上における電磁場の歪みの測定結果を示す。カップラーとチューナーを取り付ける前の電磁場分布からの変化はピーク電場の付近では $\pm 7\%$ 以下であり、ビームダイナミクスへの影響はほとんど無い。以上より、ループの長さ20mm、挿入量4.5mmを採用することを決定した。

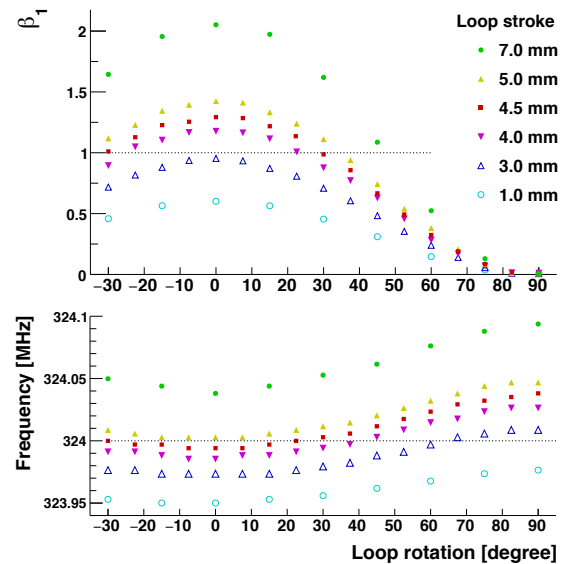


Figure 5: Loop rotation dependence of the β_1 (upper) and the resonant frequency (lower). The β is optimized at the loop rotation angle of 30 degrees.

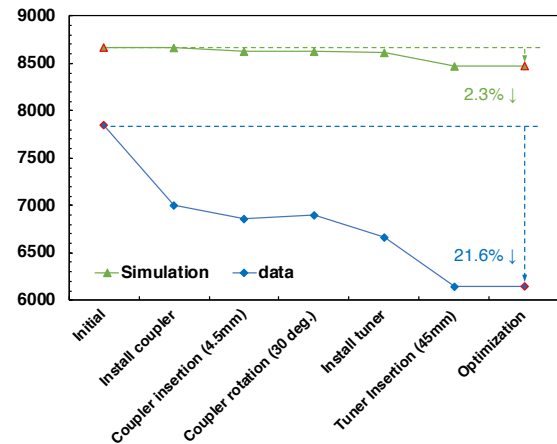


Figure 6: Q_0 dependence for coupler optimization. Green: the simulated Q_0 with CST MWS eigenmode solver. Blue: the measured Q_0 .

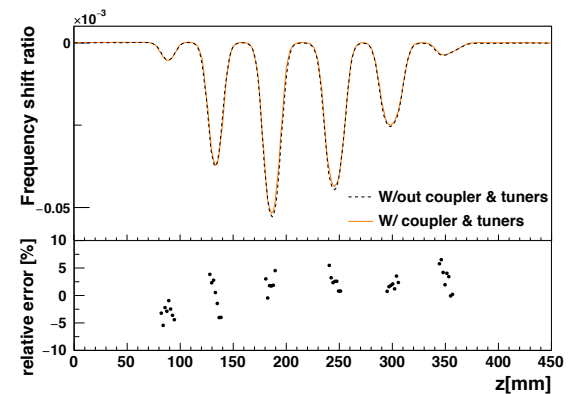


Figure 7: RF field measurement with the bead-pull test. Top: The results of frequency shift ratio with the coupler and tuners or not. Bottom: A relative error in their results.

4. まとめと展望

ミューオン線形加速器としての IH-DTL プロトタイプの研究を進めており、現在 IH-DTL のための RF 入力カップラーの開発をしている。CST MWS による 3 次元電磁場解析に基づき、 $VSWR < 1.1$ を満たすの同軸構造の RF カップラーを設計した。さらに、テストカップラーによる低電力試験によって、空洞とのカップリングのためのループアンテナの特性を評価し、最適となる構造を決定した。

現在、RF カップラーの製作と大電力試験に向けた準備を進めている。

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. D 73, 072003 (2006).
- [2] A. Keshavarzi *et al.*, Phys. Rev. D 97, 114025 (2018).
- [3] T. Mibe *et al.* edit., *J-PARC E34 Conceptual Design Report, Technical Design Report* (2011).
- [4] 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.
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] Y. Nakazawa *et al.*, “Prototype of an inter-digital H-mode drift-tube linac for muon linac”, presented at LINAC’ 18, Beijing, China, 2018, paper MOPO085.
- [8] CST Studio Suite, Computer Simulation Technology (CST); <https://www.cst.com/products/CSTMWS>
- [9] Characteristics of Kyocera Fine Ceramics; <https://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/product/pdf/material.pdf>
- [10] Mitutoyo; <https://www.mitutoyo.co.jp/useful/catalog-13-49/html5.html#page=165>
- [11] Sumit Som *et al.*, “Bead-Pull Measurement Using Phase-Shift Technique In Multi-Cell Elliptical Cavity”, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, MOPC088.