

低エネルギーミュオン線形加速器の開発 DEVELOPMENT OF LOW ENERGY MUON LINAC

林崎規託^{#,A)}, 吉田光宏^{B)}

Noriyosu Hayashizaki^{#,A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}

^{A)} Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

In the ultra-slow muon microscope or the g-2/EDM experiment, ultra-slow muon produced by the muonium laser ionization must be reaccelerated to the desired energies using linear accelerator (linac). We have developed an interdigital H-type drift tube linac (IH-DTL) for muon acceleration in low energy region. Generally, the IH-DTL has been used for low energy heavy ion acceleration, and it is able to give high shunt impedance in low energy region. Ultra-slow muon beam, which is pre-accelerated up to 340 keV using the RFQ converted from the J-PARC H⁻ linac, is boosted up to 3.7 MeV with the IH-DTL. Their operating frequency is 324 MHz. As the fabrication structure of the IH-DTL, we can consider the three pieces type that attaches two semi-cylindrical shells to a center frame. The center frame and drift tubes can be machined by monobloc, and it realizes the improvement of manufacture accuracy.

1. はじめに

本研究は、文部科学省科学研究費補助金の新学術領域研究「超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」において必要とされる、超低速ミュオン線形加速器の開発をおこなうものである。また、J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)における、g-2/EDM 実験計画のための超低速ミュオン線形加速器の開発と連携して進められている。

超低速ミュオン顕微鏡や g-2/EDM 実験計画のように、ミュオンを超低速化後に再加速をおこなう超低速ミュオン加速器の先行研究は皆無であり、モデルケースは存在しない。このため本研究では、ミュオニウムをレーザー解離することで得られた超低速ミュオンを 1 MeV 以上に再加速するための低エネルギーミュオン線形加速器として、高周波四重極線形加速器(RFQ)と Interdigital-H (IH)型ドリフトチューブ線形加速器(DTL)の組み合わせを採用した。前者については既存装置を有効活用することを考え、J-PARC 主加速器のために製作された、運転周波数が 324 MHz の負水素イオン加速用 RFQ の予備機を利用する予定である。後者については、RFQ と同じ運転周波数をもつ IH-DTL を新しく開発中である。

2. 低エネルギーミュオン IH-DTL の設計

ミュオンの平均寿命は 2.2 μs と短いため、ミュオン加速器には、小型でビーム通過時間が短いことが求められる。そこで、RFQ に続く DTL のタイプとしては、低速領域($\beta < 0.2$)において優れた加速効率(シャントインピーダンス)を有する IH-DTL を選んだ。なお、その特徴ゆえに、これまで IH-DTL は低エネルギーの重イオン加速のために用いられるこ

とが多く、運転周波数は 30~200 MHz の範囲にあったが、本研究では前段の RFQ と同じ 324 MHz となっており、このように高い運転周波数での開発は初めてのものである。ミュオニウムのレーザー解離によって得られる超低速ミュオンビームのパルス幅は 1~2 ns, 繰り返しは RCS と同じ 25 Hz である。加速空洞の高周波フィリングタイムを考慮しても、デューティは 0.1%以下と小さい。

加速空洞内でのビーム収束方法については、ドリフトチューブ(DT)電極のなかに収束磁石を配置せず、加速位相の正負の調整により横方向と進行方向の両方のビーム収束を可能とする、Alternating Phase Focusing (APF)法を採用することにした。

加速空洞の製作方法には、東工大において数多くの製作実績をもつ、無酸素銅の一枚板から全ての DT 電極を立体的に削り出したセンタープレートに、半円筒形のサイドシェルを両側面から取り付ける 3 ピース構造を採用し、加工精度と性能向上の両立を図った。

これらの条件を考慮しながら、CST MICROWAVE STUDIO と General Particle Tracer により設計をおこなった、低エネルギーミュオン IH-DTL の設計仕様と空洞形状を Table 1 および Figure 1 に示す。

Table 1: Specifications of the Muon IH-DTL

Frequency [MHz]	324
Input energy [MeV]	0.34
Output energy [MeV]	3.7
Number of gaps	17
Synchronous phase [deg]	-36, -36, 36, 36
Beam bore radius [mm]	7.5
Length [m]	1440
Q_0	11800
Shunt impedance [M Ω /m]	56.6
RF power [kW]	168

[#] nhayashi@nr.titech.ac.jp

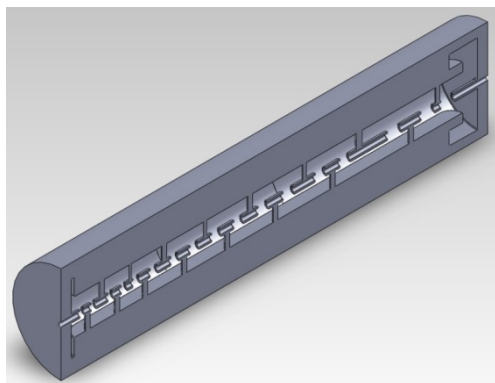


Figure 1: Cavity design of the muon IH-DTL with APF.

低エネルギーミュオン IH-DTL の加速電場分布を Figure 2 に示す。橙色のラインは加速電場、青色のラインは同期粒子が加速時に通過する電場強度である。別途計算した RFQ の出射ビームパラメータを、IH-DTL に入射してビームシミュレーションをおこなった結果を Table 2 に示す。APF を導入した効果によりトランスミッション 95 %以上、規格化 RMS エミッタンス $0.68 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、ビーム通過時間 30 ns の結果が得られた。

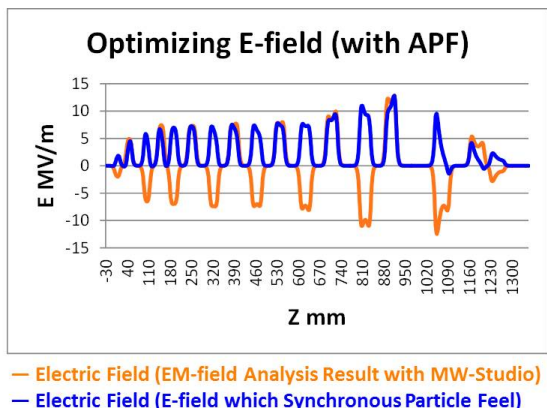


Figure 2: Electric field distribution of the muon IH-DTL.

Table 2: Beam Tracking Simulation Result

Input energy [MeV]	0.34
Output energy [MeV]	3.7
Energy spread [MeV]	0.95
Transmission [%]	99.6
Acceleration time [ns]	30
Norm. RMS Emittance [$\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$]	0.68

本研究で設計をおこなった運転周波数 324 MHz の低エネルギーミュオン IH-DTL の加速エネルギーである 3.7 MeV ($\beta = 0.26$)は、他の DTL に比べてシャントインピーダンスが有利な速度領域の上限付近に位置すると思われる。また、IH-DTL を選んだことにより空洞径を $\phi 260 \text{ mm}$ 程度と小型化できた。課題は出射ビームのエネルギー分布が大きいことである。後段の中エネルギーミュオン線形加速器が受け入れ可能なエネルギー分布を考慮しながら、電場分布の再調整をおこなう必要がある。

3. プロトタイプ製作

低エネルギーミュオン IH-DTL の 3 次元 CAD モデルから 3 ピース構造の製作図面を描き起こして、精密機械加工メーカーに依頼してセンタープレートとサイドシェルのプロトタイプを製作した。サイドシェルはアルミニウムに銅メッキを施して製作し、コストダウンを図った。全部品を組み合わせ、ネットワークアナライザーによる高周波測定をおこない、共振周波数 323.5 MHz, Q_0 値 10800 を確認した。

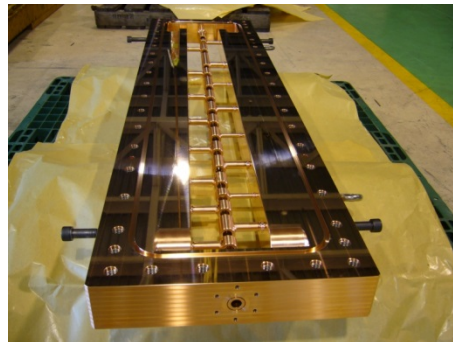


Figure 3: Centerplate of the muon IH-DTL.



Figure 4: Prototype of the muon IH-DTL.

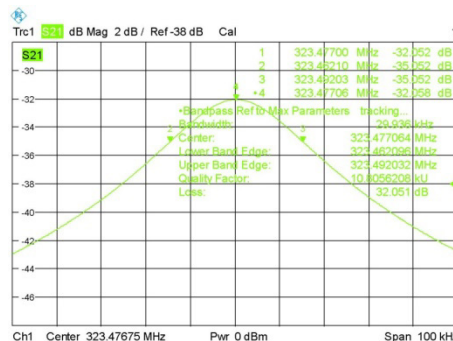


Figure 5: Measured S21 parameter of the muon IH-DTL.

4. まとめ

運転周波数 324 MHz の低エネルギーミュオン IH-DTL の設計とプロトタイプ製作をおこなった。今後は電場分布測定や、ミュオンビームの代替として電子ビーム加速試験なども計画しながら、実機製作にフィードバックしていく予定である。本研究の成果の一部は JSPS 科研費 24108504 および 26108707 の助成を受けたものである。