

超電導加速空洞によるミューオン加速の検討

DESIGN OF AN SRF LINAC FOR ACCELERATING MUON

大谷将士^{*A)}、近藤恭弘^{B)}、田村潤^{B)}

Masashi Otani^{*A)}, Yasuhiro Kondo^{B)}, Jun Tamura^{B)}

^{A)}KEK

^{B)}JAEA

Abstract

A muon linac has been developed to generate a low emittance muon beam. Because muons have finite life time of 2.2 μsec and the beam current is negligible, a superconducting radio-frequency (SRF) accelerator is suitable for accelerating the muon beam. In this paper, basic designs of an SRF linac with 1.3 GHz elliptical cavities to accelerate muons from $\beta = 0.69$ to 0.94 will be presented.

1. はじめに

近年の大強度陽子加速器の発展により、ミューオンや中性子といった二次粒子を利用した物質科学・基礎科学研究が盛んである。その中でもミューオンはミューオニウムレーザーイオン化 [1] やイオン化冷却 [2] など、二次粒子であるミューオンビームの低エミッタンス化を実現する手法が確立してきており、さらにミューオンを加速 [3] した研究・実験も計画されている [4,5]。

他方、線型加速器分野においては超電導空洞の進展が目覚ましく、1.3 GHz の楕円型加速空洞を用いた European XFEL では 17.5 GeV、2699 パルスの電子ビームの加速に成功し、2 年以上もの間ビームを安定に供給している [6]。超電導加速空洞は高いクオリティファクター (Q_0) 値と高い加速勾配を実現出来る。そのため、2.2 μsec の寿命を持つために素早い加速が要求され、2 次ビームであるために電流値が小さくビームローディングがほぼゼロであるミューオンビームの加速に適している。

さて、ミューオン ($m = 106 \text{ MeV}/c^2$) は電子 ($0.511 \text{ MeV}/c^2$) のようにすぐに $\beta = v/c = 1$ まで加速することは不可能で、陽子 ($938 \text{ MeV}/c^2$) やイオン加速器と同様に、 β に応じて適当な加速空洞を選択する必要がある。さらに陽子と比較すると加速に応じて β が劇的に変化するため、RF 発散力の効果が大きいなど、設計はそれほど単純ではない。本研究ではまず、比較的速度が大きくなった後のミューオンの加速、運動エネルギー 40 MeV ($\beta = 0.69$) から 212 MeV ($\beta = 0.94$) までの加速について、共振周波数 1296 MHz の 9 セル楕円空洞を用いて検討を行う。その他、ビームエミッタンスなどの基本パラメータは Table 1 の通りである。

本稿の構成は以下の通りである。まず、楕円空洞の設計について 2 章に記述する。続いて 3 章でビームダイナミクス設計について説明する。最後に、本稿のまとめを 4 章で述べる。

Table 1: Basic Parameters of the Muon Linac Discussed in This Paper [7]

Particle	μ^+
Input Energy	40 MeV
Output Energy	212 MeV
Intensity	$1 \times 10^6/s$
Repetition	25 Hz
Horizontal $\varepsilon_{norm.,rms}$	$0.33 \pi \text{ mm mrad}$
Vertical $\varepsilon_{norm.,rms}$	$0.20 \pi \text{ mm mrad}$

2. 空洞設計

陽子加速器と同様に異なる速度 β_g で設計が必要となる。空洞 1 セル分の長さは $\beta_g \lambda / 2$ で表される。その他、本稿では光速度以下の粒子の加速を議論しているため、シャントインピーダンス r や r/Q 、(有効) 加速電場 E_{acc} などは全て以下の走行時間係数 (Transit Time Factor $T(\beta)$) を考慮した物である。

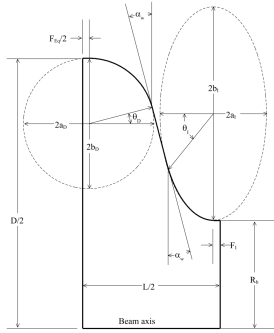
$$T(\beta) = \frac{\int_{-L/2}^{L/2} dz E_z(z) \cos(2\pi z/\beta\lambda)}{\int_{-L/2}^{L/2} dz |E_z|} \quad (1)$$

また、平均軸電場 E_0 を用いて電場ピーク平均比 E_{sp}/E_0 と最大磁場電場比 H_{sp}/E_0 を定義する。また、 $E_{acc} = E_0 T$ である。

楕円空洞の基本構造は加速軸対称であるため、2 次元の電磁場解析ソフトウェア SuperFish [8] を用いて設計を行った。設計のためのパラメータを Fig. 1 に示す。また、 $\beta_g = 0.74$ の場合の等電位面を書いた SuperFish の結果を Fig. 2 に示す。軸上の加速電場分布が平坦になるように、各 β_g に対してドーム楕円径 b_D を調整した。 $\beta_g = 0.74, 0.82, 0.87, 0.92$ の空洞において調整後の加速電場分布を Fig. 3 に示す。

エンドセルを考慮しない場合の E_{sp}/E_0 は 1.6 ~ 1.9 で、本稿で調べた限り顕著な β_g 依存性は見られなかったが、空洞パラメータをより広範囲に調べ

* masashio@post.kek.jp



β_g	0.74	0.82	0.87	0.92
L	$\beta_g \lambda$			
D	21.15	20.96	20.87	20.83
b_D	2.6	3.2	3.8	3.8
a_D/b_D	1.0	1.0	1.0	1.0
α_W	10	10	10	10
F_{eq}	0	0	0	0
F_I	0	0	0	0
a_l/b_l	1.0	1.0	1.0	1.0
R_b	3.8	3.8	3.8	3.8

unit: mm

Figure 1: (Left) definitions of the geometrical parameters [8] (right) optimized parameters.

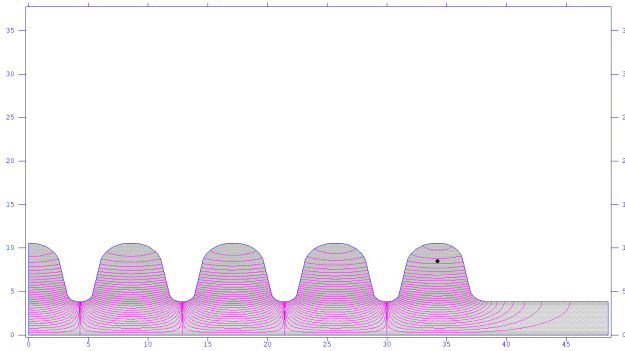


Figure 2: Elliptical cavity design using SuperFish [8]. This is the cavity for $\beta_g = 0.74$.

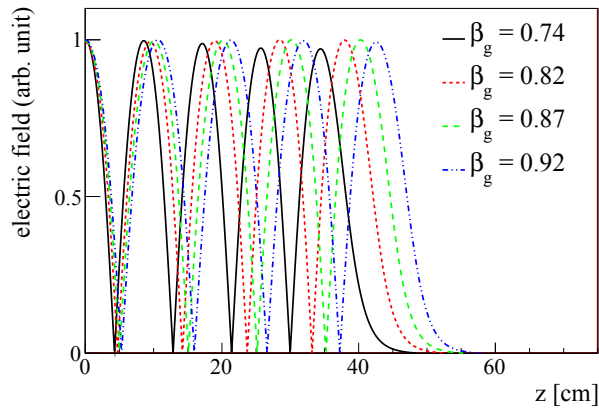


Figure 3: On-axis electric field distribution of the elliptical cavities with several velocities.

て詳細に調べる必要がある。エンドセルを考慮した場合でも E_{sp}/E_0 は 2.2 以下で、3 章で用いた $E_0 < 31$ MV/m において $E_{peak} < 68$ MV/m となる。 H_{sp}/E_0 は 1.7 ~ 2.0 mT/(MV/m) で、こちらも本稿で調べたパラメータの範囲内で顕著な β_g 依存性は見られなかった。また、 $r/Q = 50 \sim 90 \Omega$ で、 β_g と共に増加傾向であった。

3. ビームダイナミクス設計

2 章の空洞設計で得られた走行時間係数などのパラメータを用いて、縦方向の設計を PARMILA [9] で行った後、横方向及びマッチングセクションの設計を TRACE3D [10] で行い、最終的にシミュレーションで見積もった実粒子分布 [7, 11–13] を PARMILA で軌道計算した。以下に詳細を述べる。

縦方向の設計に関して、同期位相 $\phi_s = -10^\circ$ を用いた。また、各空洞で平均加速電場は $E_0 < 31$ MV/m となるように調整した。 β に応じて走行時間係数 $T(\beta)$ が変化するが、なるべく $T(\beta)$ が大きくなるように空洞を切り替えると、最初の空洞が $\beta_g = 0.74$ 、2 番目の空洞が $\beta_g = 0.82$ 、3・4 番目の空洞が $\beta_g = 0.87$ 、それ以降の空洞が $\beta_g = 0.92$ となる。このような設計でミュオンを 40 MeV から 212 MeV まで加速するには、合計 8 つの空洞が必要になる。

9 セル空洞を 4 つで 1 モジュールとし、モジュール間に横方向収束のための四極電磁石 2 台の配置を仮定すると、10 m 程度の長さにとまる。この配置で 1 モジュール目のゼロ電流位相進み $\sigma_0 = 82^\circ < 90^\circ$ となる。また、四極電磁石 4 台で横方向のマッチングを取るための上流の輸送ビームラインを設計した。輸送ビームラインを含めた TRACE3D の分布を Fig. 4 に示す。

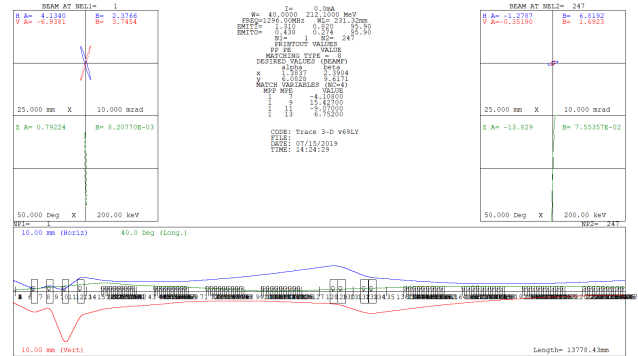


Figure 4: Beam dynamics design using TRACE3D [10].

最終的に粒子分布を PIC の一種である PARMILA で粒子毎に軌道計算した。PIC といっても空間電荷効果は無視できるほど小さく、1 パルスあたりの粒子数と同程度 $\sim 10^4$ のマクロパーティクルを用いて計算している。Figure 5 に加速後の粒子の位相空間分布を示す。縦方向に見られるテールは上流の加速器由来のもので、以下に述べるエミッタンス増加の一因であると考えられる。

Figure 6 に各セル ($9 \times 8 = 72$ セル) でのエミッタンスを示す。 x 方向と y 方向で非対称なのは超低速ミュオンを作る際の空間分布の非対称性を反映している。エミッタンス増加は x 方向で 20%、 y 方向で 70% と決して無視できない大きさである。先に述べた縦方向のテールがエミッタンス増加の一因であると考えられる。また、ミュオンは劇的に速度が変化し静止質量に対するエネルギー増分

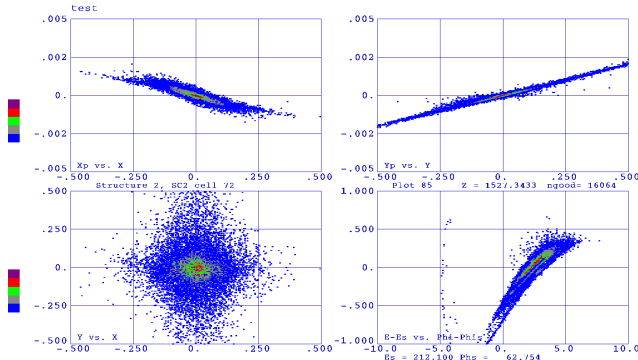


Figure 5: Phase space distribution of the output beam.

$\Delta W/mc^2$ も大きいために 1 空洞内での位相スリップが大きく [14]、同期位相 $\phi_s = -10^\circ$ に対して参照位相 $\phi_r = -50 \sim +20^\circ$ と広く分布しており、これもエミッタンス増加の一因であると考えられる。位相スリップを考慮して縦方向のアクセプタンスを広くとるために同期位相を大きくすると、RF 発散力増加のために $\sigma_0 > 90^\circ$ となるため、1 モジュールあたりの空洞数を小さくするなどの必要があり、長さが比較的長くなってしまふ。

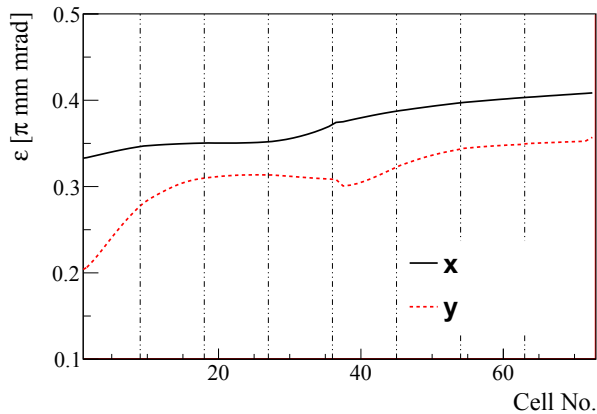


Figure 6: Emittance growth simulated by PARMILA [9].

以上の通り、エミッタンス増加は 20 ~ 70% と無視できず、原因の解明と改善が必要であるものの、ミューオンの精密測定などを目的としたミューオン加速器として十分検討可能であると考えられる。

4. まとめ

周波数 1296 MHz の超電導 9 セル楕円空洞を用いて、ミューオンをエネルギー 40 MeV ($\beta = 0.69$) から 212 MeV ($\beta = 0.94$) まで加速する設計を検討した。現状の設計ではエミッタンス増加が 20 ~ 70% と比較的大きいが、充分利用可能であると考えられる。今後はエミッタンス増加の原因の特定と、空洞の高次モードの解析などの詳細設計が必要である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15H03666、JP16H03987、JP18H03707 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] P. Bakule *et al.*, Nucl. Instr. Meth. B 266, pp. 335–346, 2008; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X07016734>
- [2] Tanaz Angelina Mohayai (on behalf of the MICE Collaboration); <https://arxiv.org/abs/1806.01807>
- [3] S. Bae *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 050101, 2018; <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.050101>
- [4] Y. Miyake *et al.*, JPS. Conf. Proc. 2 (2014) 010101; for further information see also http://slowmuon.kek.jp/MuonMicroscopy_e.html
- [5] K. Abe *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2019, Issue 5, May 2019, 053C02; <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz030>
- [6] D. Kostin *et al.*, in proceedings of IPAC2019, Melbourne, 2019 (Melbourne, Victoria Australia), pp. 12–16.
- [7] M. Otani *et al.*, in proceedings of IPAC2019, Melbourne, 2019 (Melbourne, Victoria Australia).
- [8] Billen, J. H. Billen and L. M. Young, “Poisson Superfish”, LA-UR-96-1834, 1996.
- [9] Los Alamos Accelerator Code Group (LAACG), LANL, Los Alamos; <http://www.laacg.lanl.gov>
- [10] K.R. Crandall and D.P. Rustoi, “TRACE 3D Documentation”, Los Alamos Report, No. LA-UR-97-886, 1997.
- [11] M. Otani *et al.*, J. Phys. :Conf. Ser. 1067, 052018 (2018); <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1067/5/052018>
- [12] Y. Kondo *et al.*, Proceedings of 6th International Particle Accelerator Conference (Richmond, VA) 3801.
- [13] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, 19, 040101 (2016); <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.040101>
- [14] T.P. Wangler, “RF Linear Accelerators”, WILEY-VCH Verlag, GmbH&Co, 2011.