

# ミュオンマイクロビーム生成のためのフラットトップ RF 空洞の開発 DEVELOPMENT OF A FLAT-TOP RF SYSTEM FOR MUON MICROBEAM PRODUCTION

山崎高幸<sup>#, A)</sup>, 三宅康博<sup>A)</sup>, 永谷幸則<sup>A)</sup>, 安達利一<sup>B)</sup>, 吉田光宏<sup>B)</sup>, 後藤彰<sup>C)</sup>, 大西純一<sup>C)</sup>,  
熊田幸生<sup>D)</sup>, 楠岡新也<sup>D)</sup>, 恩田昂<sup>D)</sup>, 筒井裕士<sup>D)</sup>

Takayuki Yamazaki<sup>#, A)</sup>, Yasuhiro Miyake<sup>A)</sup>, Yukinori Nagatani<sup>A)</sup>, Toshikazu Adachi<sup>B)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>B)</sup>,  
Akira Goto<sup>C)</sup>, Jun-ichi Ohnishi<sup>C)</sup>, Yukio Kumata<sup>D)</sup>, Shinya Kusuoka<sup>D)</sup>, Takashi Onda<sup>D)</sup>, Hiroshi Tsutsui<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Muon Science Laboratory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization  
(KEK)

<sup>B)</sup> Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>C)</sup> RIKEN Nishina Center

<sup>D)</sup> Sumitomo Heavy Industries

## Abstract

Since the emittance of a conventional muon beam generated in an accelerator facility is large, it is difficult to focus a muon beam down to less than 1 cm. In order to obtain a high brilliance muon beam, the muon beam firstly needs to be stopped at a target and then re-emitted as ultra-slow muons (USMs). A compact AVF cyclotron with a flat-top RF system is adopted to re-accelerate USMs up to 5 MeV without increasing energy dispersion of muons, and then we can focus the muon beam with reduced chromatic aberrations. We are developing a flat-top RF cavity with novel design, which is electrically shorted near the center of the cyclotron. In this paper, we report the current status of the development of the flat-top RF cavity.

## 1. はじめに

ミュオンは電子の約 200 倍の質量  $105.6 \text{ MeV}/c^2$  を持つ第 2 世代のレプトンであり、電子と異なり  $2.2 \mu\text{s}$  と有限の寿命を持ち電子と 2 つのニュートリノに崩壊する。ミュオンは質量が大きいため高いエネルギーまで制動放射や対生成などの影響がなく、核反応も起こさないため、Fig. 1 に示すように電子や陽子といった荷電粒子に比べ優れた透過能を持っている。

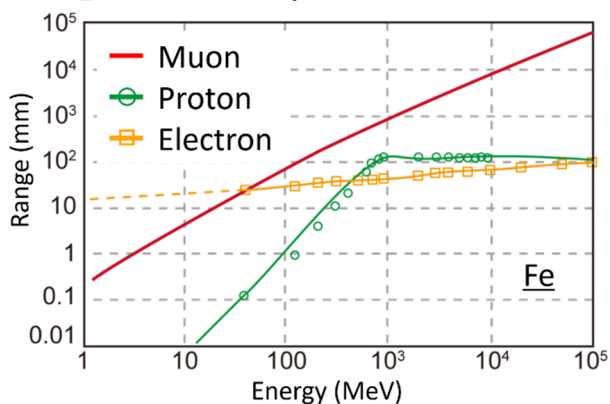


Figure 1: Range of muons, protons and electrons in iron.

ミュオンの優れた透過能を活かし、宇宙線ミュオンを用いて火山やピラミッドなどの巨大構造物のラジオグラフィ[1, 2]が行われている。また、J-PARCなどの加速器施設において、陽子ビームをグラフィイトなどのターゲット

に照射することで荷電パイ粒子 ( $\pi^\pm$ ) を発生させ、 $\pi^\pm$  が崩壊して出てくるミュオンを用いて物質生命科学から素粒子物理まで幅広い実験が行われている。代表的には、偏極した正ミュオンを用いた  $\mu\text{SR}$  (ミュオンスピン回転) 法により物質内部の磁気的性質を探る研究や、負の電荷を持つミュオンを試料に照射した際に発生するミュオン特性 X 線を利用した元素分析[3]が挙げられる。

現在、これらの研究をさらに発展させるため、加速器から生成されたエミッタンスの大きなミュオンビームを、超低速化[4, 5]及び再加速のプロセスを通してマイクロビーム化するための技術開発を進めている。本論文では、再加速に小型 AVF サイクロトロンを用いる場合に必要となるフラットトップ RF 空洞の開発状況について報告する。

## 2. ミュオンマイクロビーム生成

現在加速器で得られるミュオンビームは、陽子ビームと標的との衝突によって荷電パイ粒子を発生させ、このパイ粒子が崩壊する際に放出されるミュオンを大口径ソレノイドなどによって捕集した三次ビームである。この方法では、毎秒  $10^8$  個を超える大強度ミュオンビームが得られる一方でエミッタンスは約  $1000\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  と大きく、運動量幅も 10%程度と大きい。

もしこのビームをマイクロビーム集束させることができれば、ミュオン顕微鏡という前例のない観察手法が誕生する。ミュオンの優れた透過能を活かした透過型正ミュオン顕微鏡 (Fig. 2 左) 及び負ミュオンマイクロビームでバルク試料を走査し非破壊 3D 元素分析を行う走査型負ミュオン顕微鏡 (Fig. 2 右) である。

<sup>#</sup> takayuki@post.kek.jp

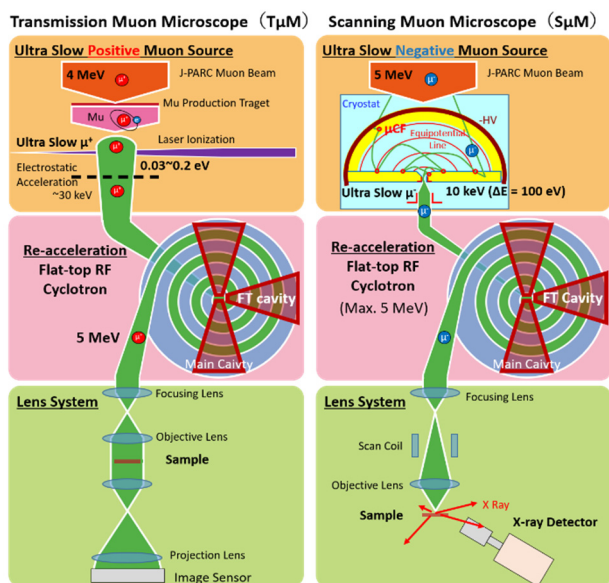


Figure 2: Muon Microscopy.

いずれの手法においても、J-PARC 加速器によって生成されるエミッタンスの大きなミュオンビームを標的に静止させた後に引き出して冷却する。このミュオンをエネルギー分散  $\Delta E$  を増加させることなく再加速することができれば、相対的なエネルギー分散  $\Delta E/E$  を大幅に減少させることが可能である。最終的に磁場レンズを用いて集束させミュオンマイクロビームを得る。

再加速方式としては、フラットトップ RF システムを備えた小型 AVF サイクロトロンを採用する。この方式によるマイクロビーム生成は重イオン加速において実績がある[6]。また、サイクロトロンは加速効率が良く、基本物理設計によるとサイクロトロン周波数 54 MHz (ハーモニクス数  $h=2$ ) の小型 AVF サイクロトロンを用いることで約 60 ターン (約 1  $\mu$ s) で 5 MeV まで加速可能であり、有限の寿命 ( $\tau=2.2 \mu$ s) を持つミュオンを十分短時間で加速できる。

### 3. フラットトップ RF 空洞の開発

本研究では、フラットトップ RF 加速に必要な 3 倍波を印加するための加速空洞 (フラットトップ RF 空洞、FT 空洞) を開発する。共振周波数が 324 MHz と高いため、サイクロトロンにおいてよく用いられる 1/4 波長同軸共振器

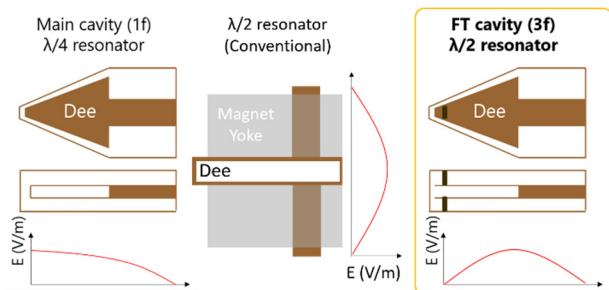


Figure 3: RF cavities. A conventional 1/4-wave resonator (left) is adopted as main acceleration cavity. To apply 3<sup>rd</sup> harmonic wave, a new type of 1/2-wave resonator (right) is used.

(Fig. 3 左) はサイズ上の制約から使用できない。サイクロトロン電磁石ヨークに穴を開けるタイプの 1/2 波長同軸共振器 (Fig. 3 中) は高コストという問題がある。そこで我々は公開特許 2002-43097 に基づき、サイクロトロン中心側にもショート端を持つ従来にない形状の 1/2 波長同軸共振器 (Fig. 3 右) を開発中である。

CST Microwave Studio (CST MWS) を用いた 3 次元電磁場シミュレーションにより FT 空洞の詳細設計を行った。Figure 4 に空洞の形状を示す。可動式ショート板による広い周波数チューニング及び C 結合の容量性チューナーによる精密な周波数チューニングが可能である。電力フィーダーおよび電圧ピックアップモニターとしてループアンテナ型の誘導性カプラーを備えている。

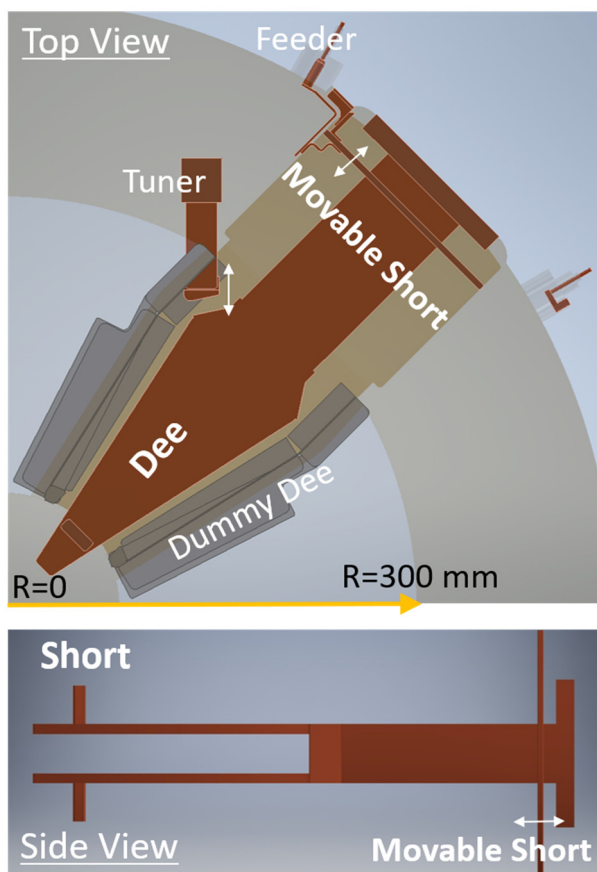


Figure 4: Schematic view of the flat-top cavity.

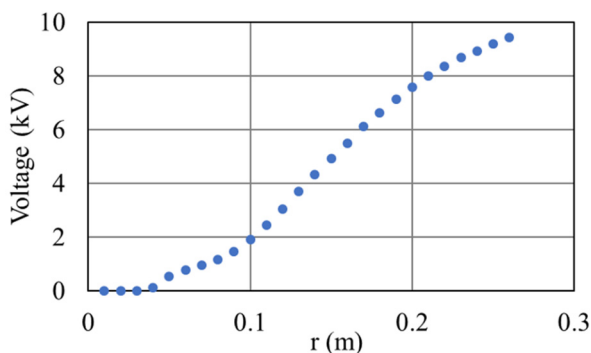


Figure 5: Dee voltage distribution.

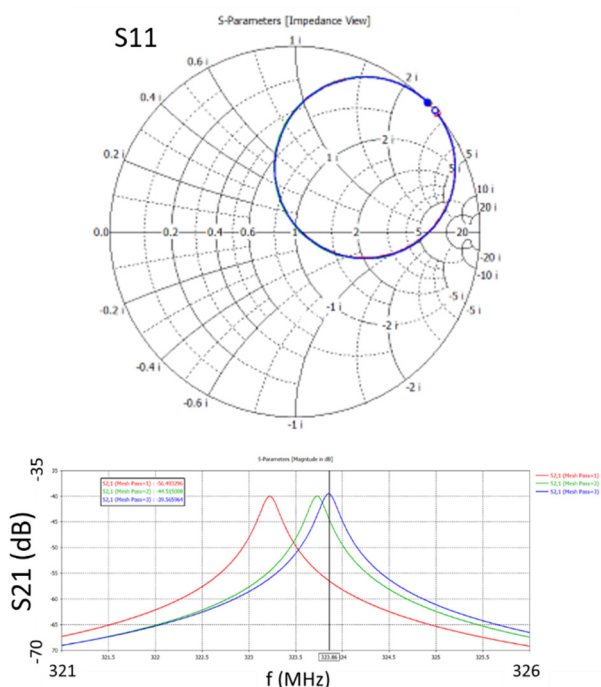


Figure 6: S-parameters of the flat-top cavity.

Table 1: Parameters of the Flat-Top Cavity

Parameters	Simulated results	Required specs
Resonant frequency (MHz)	323.89	324
Tuning range (MHz)	+10 -15	>0.4
Unloaded Q-value	4700	>3500
Dee voltage (kV)	10	10
Power loss (W)	270	~250
Feeder impedance ( $\Omega$ )	50	50
Pickup ratio (dB)	-40	-40

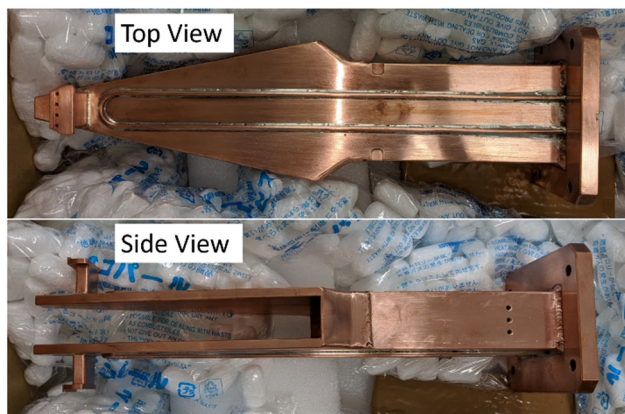


Figure 7: Pictures of the part of the flat-top cavity.

固有モードソルバーを用いて共振周波数・Q 値・電磁場分布・パワーロスなどの計算を行い、周波数領域ソルバーを用いて S パラメータを計算した。得られた電圧分布を Fig. 5、S パラメータを Fig. 6、シミュレーション結果として得られた値と要求仕様を Table 1 に示す。シミュレーション結果は全て要求仕様を満たしている。

詳細設計に基づき共振器パーツの製作を行った (Fig.7)。今後、共振器として組み立て静特性の測定、さらにパワーを投入しての性能評価を行う予定である。

#### 4. まとめ

透過型正ミュオン顕微鏡 ( $T\mu M$ ) や走査型負ミュオン顕微鏡 ( $S\mu M$ ) の実現に向け、ミュオンを静止・再加速することによるミュオンマイクロビーム生成法の研究を進めている。最大 5 MeV までの再加速手法として、フラットトップ RF システムを持つ小型 AVF サイクロトロンを採用し、このサイクロトロンの中核となるフラットトップ RF 空洞の開発を進めている。空洞の形状は中心ショート型 1/2 波長同軸共振器という従来にない形状であり、CST MWS を用いた 3 次元 RF シミュレーションにより詳細な設計を行い、現在空洞の製作が進行中である。今後、フラットトップ RF 空洞を組み立て、実際の共振器性能の試験を予定している。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17H06126、JP19H05194 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] H. K. M. Tanaka *et al.*, Geophys. Res. Lett. 36, L01304, 2009; doi:10.1029/2008GL036451
- [2] K. Morishima *et al.*, Nature 552, 386-390, 2017; doi:10.1038/nature24647
- [3] M. K. Kubo *et al.*, J. Radioanal. Nucl. Chem. 278, 777-781, 2008; doi:10.1007/s10967-008-1610-x
- [4] Y. Miyake *et al.*, "Ultra Slow Muon Project at J-PARC MUSE", JPS Conf. Proc. 2, 010101, 2014; doi: 10.7566/JPSCP.2.010101
- [5] [https://member.ipmu.jp/SpaceTech\\_to\\_QuantumBeam/planned-research/c02/index.html](https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/planned-research/c02/index.html)
- [6] M. Oikawa *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 260, 85-90, 2007; doi:10.1016/j.nimb.2007.01.280