

ミュオンサイクロトロン磁場測定結果の分析

DATA ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD MEASUREMENT OF MUON CYCLOTRON

大西 純一^{#, A)}, 後藤 彰^{B)}, 永谷 幸則^{B)}, 山崎 高幸^{B)}, 湯浅 貴裕^{B)}, 安達 利一^{B)}, 三宅 康博^{B)},
筒井 裕士^{C)}, 楠岡 新也^{C)}, 熊田 幸生^{C)}, 恩田 昂^{C)}

Jun-ichi Ohnishi^{#, A)}, Akira Goto^{B)}, Yukinori Nagatani^{B)}, Takayuki Yamazaki^{B)}, Takahiro Yuasa^{B)}, Toshikazu Adachi^{B)},
Yasuhiro Miyake^{B)}, Hiroshi Tsutsui^{C)}, Shinya Kusuoka^{C)}, Yukio Kumata^{C)}, Takashi Onda^{C)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

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

^{C)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Abstract

An AVF cyclotron, which accelerates ultra-slow muons generated by laser ionizing muonium from 30 keV to 5 MeV at J-PARC MLF, is under construction. In December 2020, we performed magnetic field measurements using a rotating coil before installing a vacuum vessel and resonators. From the magnetic field measurement results, we adjusted the thickness of the iron shims on the sides of the magnetic pole sectors to generate the high accurate isochronous magnetic field. As a result, we successfully obtained the isochronous magnetic field in which the phase change of the beam during acceleration is as small as $\pm 2^\circ$ with respect to the RF phase. When we calculated the acceleration orbit using the measured magnetic field map, it was found that the outer acceleration orbit was eccentric due to the magnetic channel for extraction (dummy side), and it was difficult to extract the beam. After some simulation calculations we found that the influence on the orbit can be avoided by moving the dummy magnetic channel toward the outside by 2.7 mm. Using the partially modified magnetic field map, we conducted tracking simulations from 0.8 m upstream of the injection point to the exit port of the cyclotron. The beam emittances at the starting point are $1 \pi\text{mmmrad}$ (1σ) in horizontal and vertical directions, and a pulse length is 200 ps, which are the design values. As a result, the beam emittances and the energy dispersion were calculated to be $0.27 \pi\text{mmmrad}$ (H), $0.10 \pi\text{mmmrad}$ (V), and 6×10^{-5} (1σ), respectively, which were the same as the design.

1. はじめに

J-PARC 物質生命科学実験施設(MLF)でミュオニウムをレーザーイオン化することで生成した超低速ミュオンを30 keV から 5 MeV までサイクロトロンで加速することによって透過型ミュオン顕微鏡の実現をめざしている[1]。Table 1 にミュオンサイクロトロン諸元を示す[2]。このサイクロトロンは住友重機械工業(株)製 HM10 型(H, 10 MeV)を原型とし設計され、縦置きで電磁ヨークはヒンジで容易に開閉できる構造である。このサイクロトロンはエネルギー分散を小さくするため高い等時性磁場の精度が求められる。しかし、トリムコイルを設置していないため、

Opera3d[3]で磁極形状を最適設計した後、磁場測定を行って鉄シムによって磁極のセクター長を調整する。加速中の位相変化は $\pm 3^\circ$ が目標である。ビームの加速はハーモニック数 2 で、 29° の2つのディー電極をもつ加速共振器(108 MHz)によって行う。ディー電圧は最大 50 kV でターン数は 60-70 である。また、ビームのエネルギー分散を小さくするため 3 倍周波数のフラットトップ(FT)共振器を設置している[4]。2020年12月に磁場測定を行った後、真空容器、RF共振器を組み立てて2021年8月の時点でRFの調整中である。

2. 磁場測定

2.1 測定方法

磁場測定は新規に開発したローテーティングコイルを

Table 1: Parameters of Muon Cyclotron

Magnet	Extraction radius	0.26 m
	Central magnetic field	0.4 T
	No. of sectors	4
RF	Harmonic number	2
	Frequency of main cavity	108 MHz
	Dee voltage	50 kV (Max.)
	Frequency of flattop cavity	324 MHz
Injection	Spiral inflector	± 4.5 kV
Extraction	Deflector	7.5 kV/mm
	Magneti channel	passive type

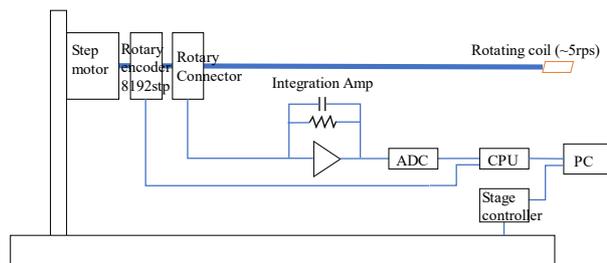


Figure 1: Magnetic field measurement system.

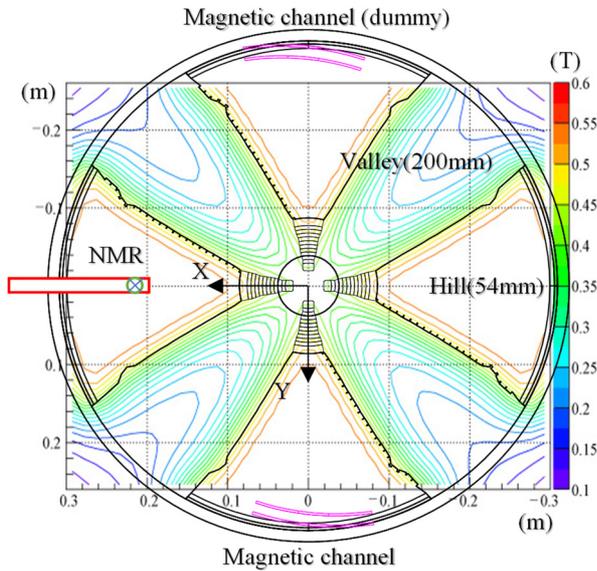


Figure 2: Magnetic field map.

用いて行った。Figure 1 に磁場測定器の構成を示す。測定コイルは一辺 5 mm の立方体に 50 μm のタングステンワイヤーを 94 ターン巻いたものを使用した。このコイルを約 5 Hz で連続回転させ、ロータリーエンコーダーにより 1 回転につき 1024 等分角で回転コイル出力の積分信号を読み取った。測定値は 1 か所 24 回転でダイポール成分を求めて、磁場範囲の 0.18–0.55 T で線形性を確認した後、NMR の位置の磁場でスケールリングした。測定コイルは 3 軸のステージで駆動した。測定範囲はミディアンプレーン上で、サイクロトロンを中心を原点にして X (水平) 方向、Y (鉛直) 方向、それぞれ ± 300 mm、 ± 270 mm である。ステージの駆動範囲が不足していたため、上半面と下半面は測定コイルを付け変えて測定した。また、 $y = \pm 270$ mm は磁気チャンネル (MC) があるため測定できない部分があった。測定間隔はシミュレーションで等時性や軌道計算の精度に問題がないことを確認して 10 mm とした。Figure 2 に磁極形状と測定した磁場マップを示す。

2.2 Opera3d による設計磁場との比較

Figure 3 にシム調整後の Opera3d 磁場計算との差を示す。-45°と 135°の $R=320$ mm 付近に 0.014 T の山がみられる。これは加速共振器のないバレーの磁極形状が磁場計算のモデルと製作されたもので相違があったためである。Figure 4 に半径 250 mm の円周上の磁場分布の測定値と Opera3d 計算値の差を示す。セクター中心部は磁場が平坦であるため、測定と計算の相違は小さいが、シム調整前の測定 (オレンジ線) では -X 方向と -Y 方向のセクターの磁場が 0.001 T 程度低い。これは当初、ヨーク扉の締め付け力が不足していたためであると思われる。磁場の変化部は測定と計算の偏差が大きい、この理由としてサーチャコイルの位置誤差が最大 0.5 mm 程度あったことと、Opera3d 計算においてセクターエッジ部やシム構造部分で計算誤差が大きくなっている可能性が考えられる。

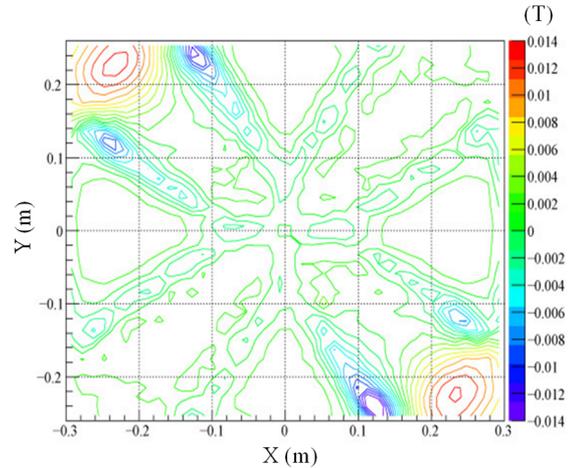


Figure 3: Difference between measured and Opera3d calculated magnetic field map.

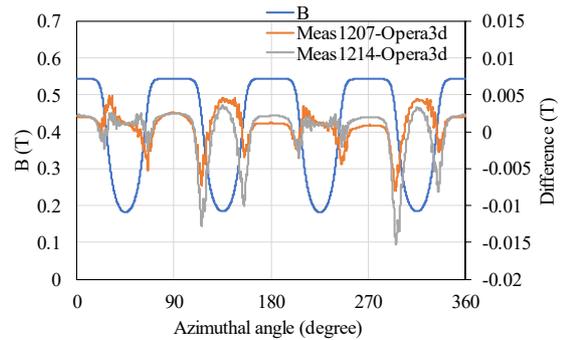


Figure 4: Difference between measured and Opera3d calculated magnetic field on the circumference of a radius of 250 mm. “Meas1207” and “Meas1214” indicate the measurements before and after the shim adjustment, respectively.

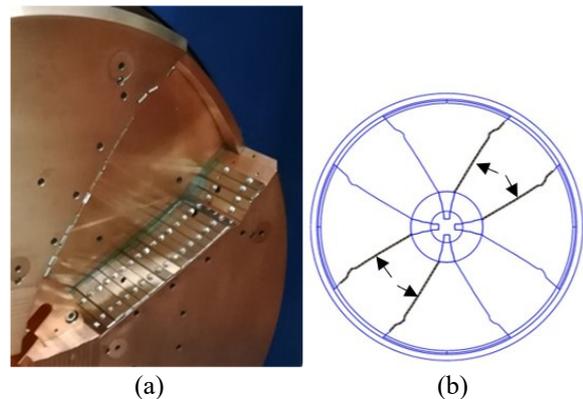


Figure 5: (a) Iron shims mounted on the sides of the pole sectors. (b) Position of the sides of the sectors to mount shims.

3. 鉄シムによる等時性磁場の調整

取り出しビームのエネルギー幅を小さくするため FT 共振器を使用するが、 dE/E を 10^{-5} オーダーにするために

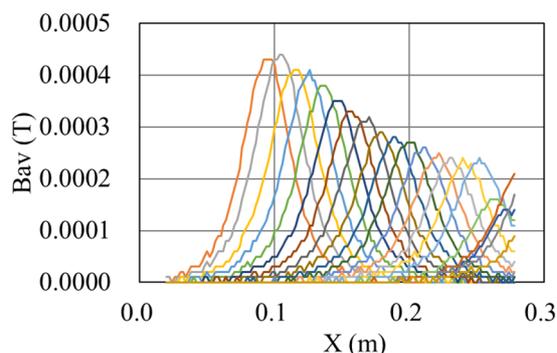


Figure 6: Average magnetic field generated by shims with a thickness of 1 mm mounted in each radial position.

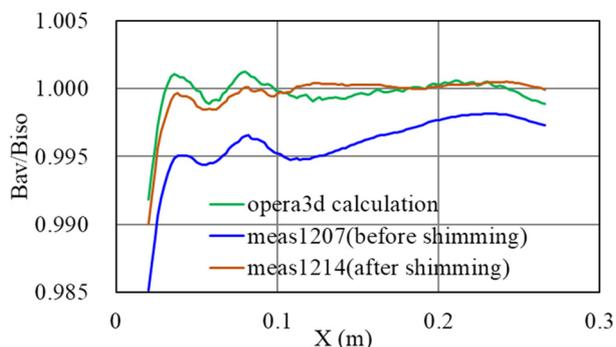


Figure 7: Ratio of the averaged magnetic fields on the closed orbit to the isochronous magnetic field.

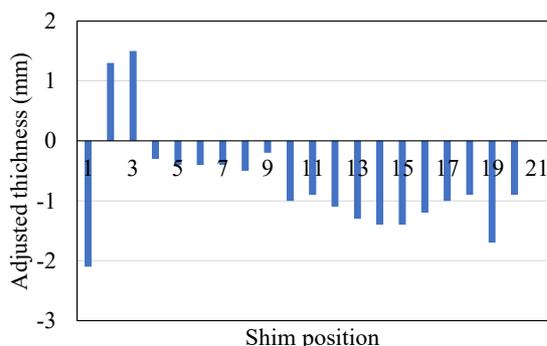


Figure 8: Adjusted thicknesses of the iron shims. The position number is assigned from the inside.

は、入射ビームのバンチ長を 200 ps ($\pm 4^\circ$) 程度にした上で、加速中のビームの位相変動を小さくする必要がある。取り出しまでの周回数の約半分の 30 ターンで 6° の位相変化を許容すると考えると、ハーモニック数 $H = 2$ であるので、等時性磁場の必要精度は $\Delta B/B = 6 / (360 \times H \times 30) = 3 \times 10^{-4}$ となる。しかし、このサイクロトロンはトリムコイルを設置していないため、Opera3d 磁場計算で磁極形状を最適設計した後、実機を磁場測定して鉄シムによって等時性磁場を作成する。鉄シムは Fig. 5 に示すようにセクターの側面に、径方向 21 か所、合計 168 か所取り付け。Figure 6 に各 R 位置に取り付けた厚さ 1 mm の鉄シムが作る平均磁場の Opera3d 計算値を示す。Figure 7 は

Opera3d 計算や測定で得られた磁場マップから計算した閉軌道上の平均磁場の等時性磁場からの偏差を示す。横軸 X は閉軌道のセクター中心での位置である。シム調整前はメインコイル電流値が 0.5% 程度低かったが、シム調整できない内周部分を基準にすると外側で平均磁場が 0.3% 程度高くなっている。これは先に述べた設計上のミスが影響していると思われる。Figure 8 に実際に調整した鉄シム厚さの補正量を示す。この補正量は Fig. 6 のシムが作る平均磁場から、修正すべき磁場分布をフィッティングして求めた。シム調整後の測定で得られた等時性磁場 (Fig. 7 の茶色の線) は加速中の位相変動に換算すると $\pm 2^\circ$ 程度となるので、高精度の等時性磁場が作成できていることがわかる。

4. 加速軌道と偏心

Figure 9 に測定で得られた磁場マップを用いて計算した軌道を示す。軌道の偏心をみるため、各ターンの軌道中心 (X 軸、Y 軸それぞれ 2 点の交点座標の平均値) の変化を Fig. 10(a) に示す。これから、(1) 振幅 1 mm 程度のベータatron 振動がある、(2) -Y 方向 (上方) に軌道が変位して、ダミーの磁気チャンネル (MC) による磁場の低下のためさらに大きく変位する、ことがわかる。ダミー MC は 1 次ハーモニック磁場を作らないように本来の MC と対称の位置に設置しているものである。(1) のベータatron 振動は大きい量ではないのでエネルギー分散など取り出しビームへの影響は小さいが、内側から 2 番目のシムで 1 次ハーモニック磁場を作って補正することにした。(2) については FT 空洞が 1 台で非対称であるため、Opera3d 設計磁場においても最外周で 3 mm 程度の -Y 方向への変位がみられたが、測定した磁場マップでは 0.3 mT 程度の 1 次ハーモニック成分があるため、-Y 方向へさらに変位し、ダミー MC の影響を強く受ける。この結果、ダ

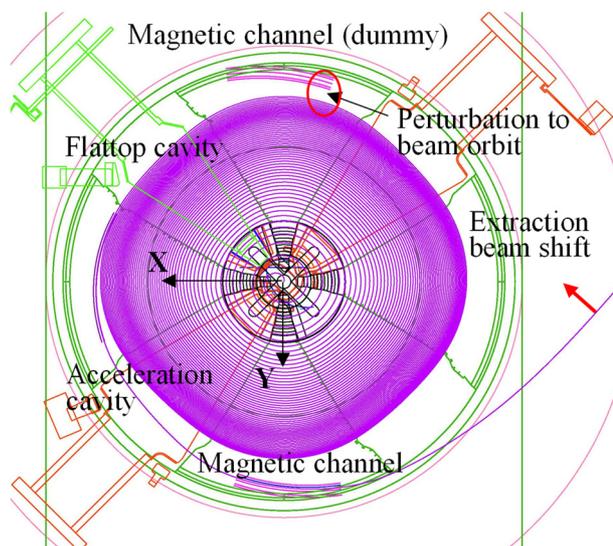
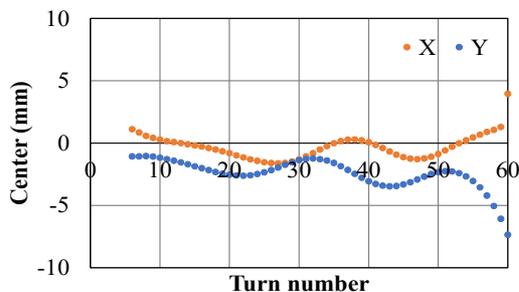
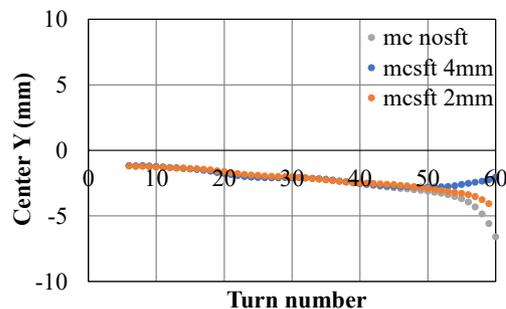
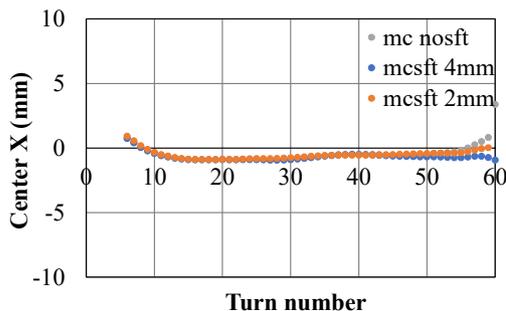


Figure 9: Beam orbit calculated using measured magnetic field map. Extraction orbit shifts inside from the exit port.



(a) Without correction.



(b) With correction for X and Y directions.

Figure 10: Eccentricity of the center of the acceleration orbit in the turn number.

ミーMC 近傍の磁場によりエミッタンスを増加させるとともに、出口ポートで軌道が 30 mm 以上内側にずれて取り出しが困難となることが判明した。これを修正するため、(1) 鉄シムで1次ハーモニック磁場を補正する、(2) ダミーMC を外側に移動する、の2方法が考えられたが、より簡単な(2)についてシミュレーションを行った。MC は、ダミーMC と同じ形状であるが、Fig. 11 に示すように鉄のバーからできていて、取り出し軌道上の磁場を減少させ、ビームを外側へ偏向させるものである。Figure 10(b)に内側から2番目のシムで1次ハーモニック磁場を作ってベータatron振動を修正するとともに、ダミーMC を外側に 2mm と 4mm 移動させた場合の軌道中心の変位を示す。この軌道計算は測定で得られた磁場マップに MC を移動させたときの磁場の变化(Opera3d 計算値)を加算して行った。この結果、図から分かるように外周部での軌道の偏心が抑えられ、設計通りの取り出しが行えることを確認できた。最終的にダミーMC を 2.7mm 外側に移動させることにしたが、工程上 MC 移動後の磁場測定はできなかった。

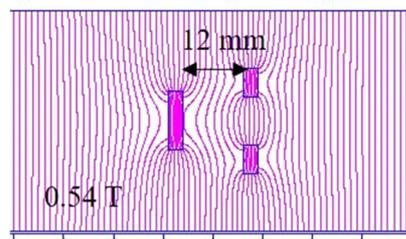


Figure 11: Cross-section of the magnetic channel made of iron bars and flux lines.

5. エミッタンスをもつビームの軌道計算

サイクロトロン の 0.8m 上流から出口ポートまでエミッタンスをもつビームについてトラッキング計算を行った。入射ビームはバンチ長 200 ps ($\pm 4^\circ$)、水平(X)方向、鉛直(Y)方向、それぞれ $1 \pi \text{ mmmrad}(1\sigma)$ のガウスビームとし、全粒子数は 3380 とした。Figure 12 に加速中のビームの X 軸上の平均位相、位相幅、エネルギー幅の変化を示す。位相幅(オレンジ)はインフレクターで増加し、最初の数ターンを除いて加速中は一定で $3.5^\circ(1\sigma)$ となっている。平均位相(青)は内周側で周回軌道の偏心のため変化しているが、8 ターン目以降は 3° 以内の変動に収まっていて等時性磁場はよいことがわかる。エネルギー幅(紫)は内周側では増大するが FT 共振器で圧縮され

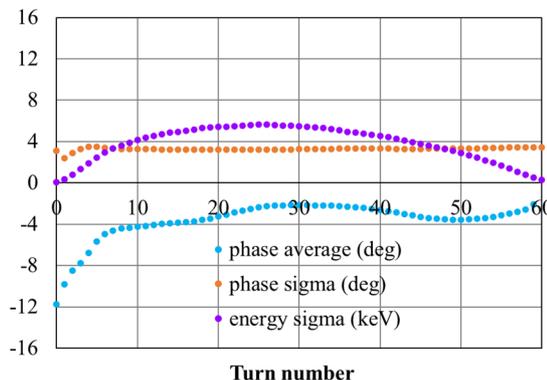


Figure 12: Ratio of the averaged magnetic fields on the closed orbit to the isochronous magnetic field.

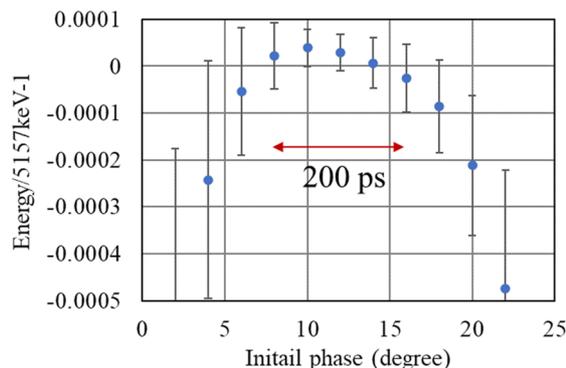


Figure 13: Energy spread of extraction beams.

Table 2: Beam Parameters at the Exit Port Obtained by Tracking Calculation

Transmission efficiency	98.6%	
dE/E	6e-5	
	H	V
rms emittance (π mmrad)	0.27	0.10
beta (m)	115	34
alfa	-167	-55

て最終の 60 ターンで 0.3 keV (6×10^{-5}) 程度になっている。平均位相は -3° 付近で 0° からずれているが、加速位相に対する FT 位相を調整した結果このときにエネルギー幅が最小になった。Figure 13 に出発点の位相広がり(バンチ長)をゼロとして初期位相(相対値)を変えた場合の加速後のビームのエネルギーとその広がりを示す。横方向のエミッタンスは X, Y それぞれ 1π mmrad(1σ) である。この図に示されるように初期位相によってエネルギーとその広がりはともに大きく変化するため、入射ビームのバンチが長くなるとエネルギー幅が増加することがわかる。Figure 12 は、エネルギー広がり小さくなるようにバンチ($\pm 4^\circ$)の位相を Fig. 13 の初期位相を 8° から 16° に取って計算したものである。Table 2 に Fig. 12 の条件でトラッキング計算した場合のサイクロトロン出口ポートでのビームのパラメータを示す。サイクロトロン上流の出発点からの通過効率 98.6% であった。エミッタンスはサイクロトロン径方向(H)、軸方向(V)、それぞれ 0.27π , 0.10π mmrad(rms)、エネルギー幅は 6×10^{-5} となった。これは Opera3d 磁場マップで計算した設計値とほぼ同じ結果となった。

6. 結論

ローテーティングコイルを用いてミュオンサイクロトロン磁場マッピング測定を行い、磁極セクター長を鉄シムで調整することにより 10^{-4} レベルの高精度の等時性磁場を作成することができた。測定した磁場マップを用いて加速軌道を計算した結果、0.3 mT 程度の 1 次ハーモニック磁場のため周回軌道が偏心して、ダミー側磁気チャンネル(MC)の誤差磁場により取り出し軌道が出口ポートからずれることが分かった。シミュレーション計算の結果、ダミーMCを 2.7 mm 外側に移動することにより、誤差磁場の影響による偏心を低減して、設計軌道での取り出しが可能となることがわかった。エミッタンスをもつビームについてサイクロトロン上流から出口ポートまでのトラッキング計算を行った。その結果、取り出しビームのエミッタンスやエネルギー幅は Opera3d 磁場による設計とほぼ同じであることがわかった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17H06126 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Miyake *et al.*, "Ultra Slow Muon Project at J-PARC MUSE", JPS Conf. Proc. 2, 010101 (2014).
- [2] J. Ohnishi *et al.*, "ミュオンサイクロトロン設計と製作", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 669-673.
- [3] <https://www.3ds.com/product-services/>
- [4] T. Yamazaki *et al.*, "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", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 885-887.