

$g-2/ED$ 精密計測用ミュオン蓄積超電導磁石の磁気設計の最新化

UPDATED MAGNETIC DESIGN OF MUON STORAGE MAGNET FOR $G-2/EDM$ PRECISION MEASUREMENTS

阿部充志^{A)}, 萩津透^{A)}, 齊藤直人^{A)}, 佐々木憲一^{A)}, 三部勉^{A)}, 中山久義^{A)}, 飯沼裕美^{B)}
Mitsushi Abe^{#,A)}, Toru Ogitsu^{A)}, Naohito Saito^{A)}, Ken-ichi Sasaki^{A)}, Tsutomu Mibe^{A)}, Hisayoshi Nakayama^{A)},
Hiromi Iinuma^{B)}
^{A)} KEK, ^{B)} Ibaraki Univ.

Abstract

This proceeding describes update of the magnet for muon $g-2/EDM$ precision measurements. The design method for the magnet has been developed and candidate coil block (CB) and iron yoke placements have been designed considering the superconducting limitations of current density 125 A/mm² and maximum magnetic field on CBs less than 5.5 T, as reported on NIMA vol.890 2018. Since then, the magnet design has progresses and introduced holes on the iron yoke for shim trays and refrigerators. The progresses have made it necessary to optimize the CB placements again according to the iron yoke new design. This presentation discusses the optimization results of magnetic field distribution and CB placements, comparing the former magnetic design.

1. はじめに

ミュオン磁気・電気モーメントの高精度測定に用いる磁石(Fig. 1 参照)は、ミュオンを周回・蓄積するシリンダー状の領域(断面 3 cm 幅、10 cm 高で直径 66.6 cm)に、高磁場(3.0 T)で超高均一磁場(磁場振幅 ± 0.1 ppm、均一度 0.2 ppm)を必要とする。これは、MRI 磁石の場合に比べ約一桁良い均一度である。また、周辺磁場も螺旋入射(Spiral injection)[1]を可能とする分布が必要である。このような磁場を発生する起磁力配置の設計手法は既に開発し、当時の設計状況を反映した起磁力配置設計例と共に報告した[2,3,4]。その後の設計進展で、磁石全体を覆う鉄ヨークには、冷凍用と微調整磁場シミング用[5]の貫通穴が運転時にも存在することになった。また、実際の製作法を考えると、全体の外径は、円筒より製作しやすいと考えられる八角形柱形状としている。

これらの設計変更は、それぞれ、上下及び周回方向の対称性を考慮するなど、磁場への影響の小さい設計としたが、今回、コイル配置の見直しを行うことで、設計磁場を仕様の理想磁場に近づけた。さらに、磁場分布の変更のため、入射用のトンネル角度の変更も行い、その変更も考慮して、均一磁場を生成するように CBs(Coil Blocks)配置を最適化した。それらの結果について、旧磁気設計と比較して、報告する。

2. 磁石設計の進展

参考文献[2,3,4]で報告している旧起磁力配置は、M20160422 と呼ぶ起磁力配置である。この段階では、鉄ヨークに開けた穴は、ミュオン入射口のみであった。ただし、対称性を考慮して、上下天井鉄ヨークに各 4 本、合計 8 本の貫通口をもうけた。

その後、製作性を考えて設計を進めた。現状の磁石設計の全景と鉄ヨークの形状を Fig. 1 と Fig. 2 に示した。Figure 1 上部には磁石の断面で、全体像を示している。

全体を囲む鉄ヨークはっているが、外部からの誤差磁場を遮蔽すると共に、ブーム軌道と蓄積部の磁場分布を整形する役目も持っている。

また、Fig. 1 下側には muon のらせん入射軌道[1]を示している。鉄ヨークに開けたトンネル(入射口)を通過するビームダクトを使って muon は入射される。3 T の軸方向磁場 B_z でらせん状に周回しながら、半径方向磁場 B_R に

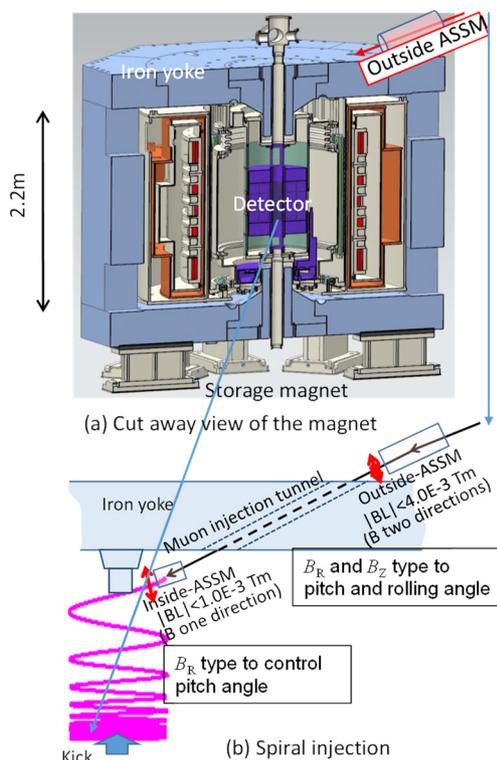


Figure 1: Schematic drawing of storage magnet, muon spiral injection and two Active Shield Steering Magnets.

[#] abemk@post.kek.jp

より軸方向移動速度を減速しながら、**muon** 蓄積領域に近づく。 $Z=0$ 面付近にはキッカーコイルがあり B_R を発生させることにより軸方向移動を止める。

磁石全体としては八角形柱の形である。高精度な磁場シミングを実行するために、詳細シミング用のシムトレイを出し入れするために、実験運転時にも閉止されない上下合計 40 個の貫通穴がある。さらに、冷凍機からの液体ヘリウム輸送管を通す穴も必要で、対称性を考慮して 8 個の角穴を半径大側の鉄ヨークに配置することになった。

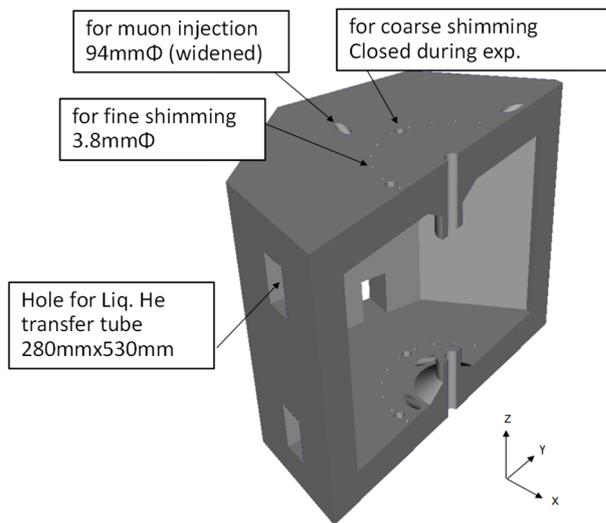


Figure 2: Cutaway view of iron-yoke with holes.

ている。

このような設計の進展で、全体として鉄量が減少する。その量は全体の 4.2 % であり、比較的大きい。そのため、磁気抵抗が増加し、起磁力を増やすことになると予想される。均一磁場の生成を最重要として、増加する起磁力配置の最適な配置の検討が必要である。既に開発済みの起磁力配置の最適化手法を適用して、新たなコイル配置を求めた。

磁石設計変更による磁場変化は、主に B_R の変化を通じて入射軌道に影響を与える。設計磁場からの誤差に対しては、Fig. 1 下部に示した 2 個の ASSM(Active Shield Steering Magnet)を使い入射軌道の微調整を行う予定である[6]。しかし、その能力は限られている。そのため、鉄ヨークや CBs の配置変更によりどの程度の B_R 変化が生じるかを把握することも重要な検討事項であると考え以下の議論を行う。

Figure 2 には鉄形状を示す。外径は 8 角形柱(旧;円柱)である。側面には液 He 輸送管を通す矩形穴があるが、対称性を考えて上下対称、周回方向 4 回対称で、合計 8 個の矩形穴を開ける。入射口は以前と同様に対称性を考えて 8 個開けているが、直径を拡大し、入射角度を補正している。また、磁場シミング終了時に磁場が変化することのないように、実験時にも開である fine シムトレイ用の穴を上下合計 40 個開けている。この結果、鉄ヨークの作る磁場が変化するため、CBs の配置変更が必要になる。言い換えると、鉄量が減少し、磁気抵抗が増えるために、合計起磁力を増加させることになる。

この鉄形状に対して、参考文献[2,3,4]の方法で、均一磁場を生成するために最適化起磁力配置、つまり、CBs(Coil blocks)配置を求めた。CBs には MRI 用磁石の応用と考え、超伝導コイルで、電流密度 125A/mm 以下、導体の経験磁界 5.5T 以下で検討した。

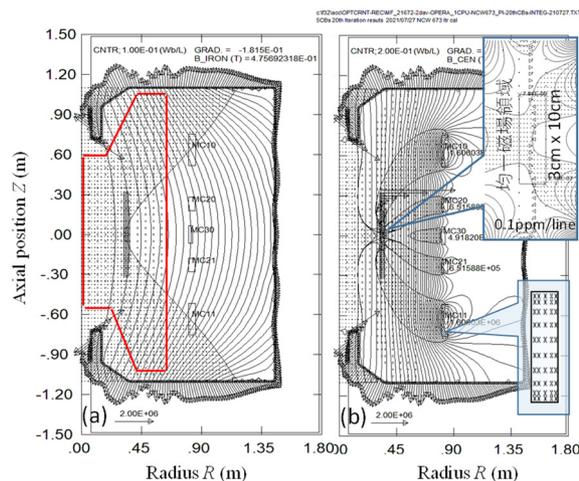


Figure 3: (a) 2D reconstructed iron yoke magnetic field at procedure No.4, reconstructed by using 350 circular filament currents (arrows), (b) 2D reconstructed magnetic field with tuned CB placements.

3. 起磁力配置の最適化

3.1 計算法と結果

計算手順は Table 1 の通りである。今回は鉄ヨーク形状の変更は無い。まず、No.1 でCBs 初期値を配置する。これに対して、3D 磁場分布を計算(No.2)し、周回方向に平均値(No.3)を算出する。この周回方向に平均した磁場分布に対して、CBs の作る磁場を差し引いた鉄ヨークの作る磁場の周回方向平均化した磁場分布を算出する線輪電流群の電流分布を算出する{No.4 及び Fig. 3(a):

Table 1: Procedure to Obtain Magnetomotive Force Placements

No.	Procedure	3D or 2D	Note
1	Initial placements (Iron yoke/CBs)	3D/2D	See ref. [1] 3D: Iron yoke, CBs: 2D
2	3D magnetic field calculation	3D	OPERA code was used
3	Azimuthally averaged magnetic field	3D →2D	3D cal. at every 10 degrees 2D used for CBs optimizations.
4	Extraction of iron yoke magnetic field	2D	See Fig. 3(a)
5	Tuning of CB placements (DR, DZ)	2D	To obtain homogeneous magnetic field (See Fig. 3(b))
6	If $DR < 1.0E-5$ m, $DZ < 1.0E-5$ m	2D	YES: Iteration finish, No: back to 2 and continue
7	3D magnetic field cal. with tuned CBs	3D & 2D	A set of circular currents to reconstruct 2D magnetic field

矢印の始点が線電流位置で、矢印の長さに比例した電流値}。この鉄ヨークが作る磁場と共に、均一磁場を構成できる CBs 配置を求める(No.5)。このとき、CBs 配置の変化が小さい場合(磁場磁場変化が 0.1 ppm 以下)、繰り返し計算収束として、CBs 配置を出力するが、大きければ再度 No.2 の計算に戻り繰り返し計算を実行する。

繰り返し計算が収束すると、3D 磁場計算を行い、収束結果を確認すると共に、周回方向平均化した磁場分布を再構成する円電流群の電流値を算出する。この円電流群は、CBs と鉄ヨーク磁場を模擬する電流群(Fig. 3 参照)に分けられるが、CBs は、断面内部に多くの円電流を配置{Fig. 3(a)参照}して磁場を再現する。鉄ヨークの作る磁場は、鉄ヨーク内面に多数の電流を配置して参考文献[2,3,4]の方法を使い、No.4 で電流値を決める。この電流群と CBs で再現する 2D 磁場分布は、Fig. 3(b)のようになるが、muon 軌道及び法解粒子の検出付近の軌道についての基礎検討に用いる。

Table 2: Electromagnetic Parameters

Parameters	M20210727 (This presentation)	M20160422 (NIMA 2018)
Number of CBs	5	5
Holes on iron yoke	Holes shown in Fig. 2	Injection & 7 dummies
Pole face Z position	0.720 m	0.720 m
Pole radius	0.070 m (in), 0.148 m (out)	
Max. AT on a CB	1.6060275 MAT	1.594 MAT
Total CB Amp.-turns	5.00705145 MAT	4.988 MAT
Max. B on conductor	5.39 T	4.99 T
B amp. in 30x100mm	0.237 μ T (0.079 ppm)	0.39 μ T (0.13 ppm)
Iron magnetic field	0.4756923 T	0.4787095 T
SC wire size in (R, Z)	1.524x2.202mm	1.53x2.21mm
Cu ratio	2.5	2.5
Current	417.15 A	417.88 A

3.2 最適化結果

前節の最適化繰り返し計算の結果得られた起磁力配置 (M20210727) のまとめ表を、旧起磁力配置 (M20160422) と比較して Table 2 に示す。両者の間に大きな差異はないが、合計起磁力は予想されていたように増加したが、その割合は 0.38 % であり、小さい増加であった。両端に配置される最大起磁力の CB は 0.75 % 増加した。この増加は、鉄ヨークの欠損部が多くなり、磁気回路としての磁気抵抗が増加したためである。一方、鉄ヨークが作る磁場は 0.63 % 減少した。この減少分をコイル起磁力増加で補ったことになる。これらの変化は、鉄ヨークに穴を開けて発生した損量(4.2 %) に比べ小さい。その理由は、穴の位置と形状を、磁場に対して変化の小さい位置・形状としたためである。

既に説明した Fig. 3(b) に示した磁場分布は、2D 周回方向平均化し、線電流群で再構成した磁場分布であるが、蓄積領域での均一度は 0.079 ppm である。実際に、この均一度を実現するには、設置・励磁後の磁場シミングが重要である。鉄ヨークにシムトレイ用の穴を設計しているように、磁場シミングの検討は進めている[5]。ここで

は詳しく触れないが、磁場シミングの基本的な方法は、MRI 用磁石の磁場調整用に開発された手法を用いる計画である[7,8]。

Figure 3(b) の 2D 磁場分布は、674 個の線電流による 2D 再構成磁場分布で示している。3D 磁場計算結果周回方向に平均した磁場との差異は $5.0E-9$ T 以下であり、精度良く磁場分布を再現できる。ビームの軌道計算には、この再構成磁場が利用できる。

4. 磁場分布について

ここでは、起磁力配置を見直した磁石が生成する磁場分布を、入射領域と、muon 蓄積領域に分けて調べる。

4.1 ビーム蓄積領域の磁場分布

ビーム蓄積領域は、半径 R で 0.318~0.348 m、軸方向位置で -0.05~+0.05 m の範囲の円筒状の領域である。この領域で磁場分布の変動が 0.2 ppm の範囲であることが目標である。周回方向平均化した磁場は既に Fig. 3(b) に示しており、十分良い均一度に設計されている。しかし、3D 磁場分布には、主に、入射口の鉄ヨーク欠損に由来する磁場のリップルが存在する。この領域の赤道面上の 3D 磁場計算結果を Fig. 4 に示した。中心 (0.333 m, 0.0 m) 磁場からの差異 (中心磁場-当該位置 3D 計算磁場) を示している。参考に、中心磁場からの残差 ± 0.1 ppm を示す平行線と、2D 再構成磁場(中心磁場を通過する斜線)を示している。

図中で \circ は周回方向平均化した磁場強度、 \times は 3D

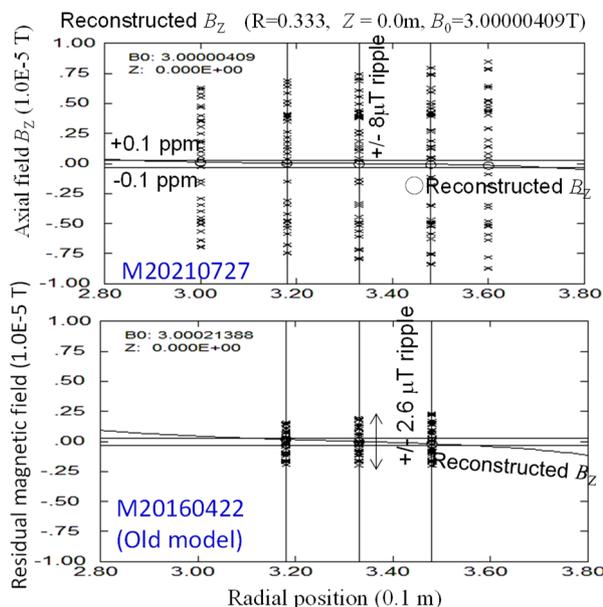


Figure 4: Magnetic field in the fiducial volume. 2D reconstructed magnetic field agrees well with the azimuthally averaged 3D magnetic field, but ripple is larger than 0.2 ppm and has been increased from 2.6 μ T to 16 μ T (peak to peak). Shimming simulation showed that the ripples can be well shimmed with less than 150 cc iron shim pieces.

計算値であり、周回方向に 10 度毎の計算値を、全て同一面に示している。磁場の強弱・正負の散乱は、周回方向に強度が波打つ磁場リップルを示しており、主原因は入射穴とそのダミー穴である。穴の直径を増加させたため、リップル振幅は約 3 倍に増加している。しかし、このリップルは磁場シミングによる平坦化が容易に可能であり、使用する鉄量は 100 cc 余りであると、参考文献[5,7]に示したアルゴリズムによる磁場シミングのシミュレーションで確認されている。

均一磁場設計は良好であり、周回方向平均した 2D 再構成磁場は、 ± 0.1 ppm の範囲に入っている。実機では、磁場シミングにより、この 2D 再構成磁場に近い磁場分布が実現できると考えている。

4.2 螺旋入射領域の磁場

Muon 入射領域($Z=0.30\sim 1.10$ m)の磁場は、入射軌道そしてキッカー動作のタイミングに大きな影響を及ぼす。そのため、軌道を微調整するステアリング磁石を入射口前後に配置する予定である(Fig. 1(b)参照)[6]。しかし、調整能力には限りがあり、磁石設計段階では、より正確に磁場分布を把握して、muon 入射条件の検討に反映する。Figure 5 には半径 $R=0.36$ m、 $R=0.42$ m 上で半径方向磁場 B_R と軸方向磁場 B_Z を軸(高さ)方向位置 Z の関数で示した。2D 再構成磁場である。旧起磁力配置(M20160422)と比較して示した。

軸方向磁場 B_Z は、Table 2 に示したように起磁力を増加させることで磁場強度を 3.0 T に合わせているため、 B_Z には大きな差異は無い。起磁力配置を最適化する繰り返し計算の終了時に残った残差のみである。また、この残差も、実験時には電流を通じて微調整するので、実質的に差異はない。従って、入射軌道の半径方向位置(つまり、Larmor 半径)には大きな差異はない。

一方、半径方向磁場成分 B_R には 3.5 % の差異がある。この理由は次のように考えている。入射領域では CBs による B_R と鉄ヨークによる B_R は互いに反対方向である。鉄ヨークに穴が増え、磁気抵抗が増加したため、鉄ヨークによる磁場($B_R < 0$)が減少した。それを補うために、CBs 起磁力が増加し、CBs 群端上側部($Z > 0.75$ m)の $B_R (> 0)$ を強めた。そのため、合計の B_R は正の方向に強くなった。

この正の B_R は muon の軸方向移動速度を減速させる磁場である。 $Z=0$ m 付近では、軸方向移動がキッカーの助けも得て、muon の軸方向移動は止まる。今回の起磁力配置では B_R が強まった、これを反映して、入射角(入射トンネル)を、軸方向移動を早めるように、 $22.0 \rightarrow 22.7$ 度に変更した[9]。

今回の鉄ヨークの形状変更は比較的大きな変更であった。今後も磁場分布に影響を与える変更が予測されるが、今後の変更は今回以上の規模にはならないと予想される。今回の起磁力配置が製作に結びついていくと考えているが、今回の起磁力配置でより細かく誤差磁場とその補正可能性は検討していく必要がある。

4.3 弱集束磁場コイルとシムコイル

この新しい起磁力配置(M20210727)を反映して、弱集

束磁場コイルとシムコイルの設計[5]を見直す必要があり、進めている。下記の方針である。

シムコイルには大きな変更は無い。 B_Z タイプと B_R タイプの 2 種類×周回方向 6 分割で考えている。起磁力配置の変更により、シムコイルの半径方向位置を変更するのみである。

弱集束磁場コイルは 8 個の CBs から構成される。これは、5 個の主 CBs の半径内側に配置する計画である。8 個の弱集束用 CBs は全て 10 kA 程度以下(n-index = $1.0E-4$)で、小さい。そのため、狭い場所に配置可能である。一方、半径の大きい位置に配置する場合、電流が増大し、設置誤差による誤差磁場が増大することを避ける配置とする方向で検討(主コイルも含めた全体の製作性)を進めている。

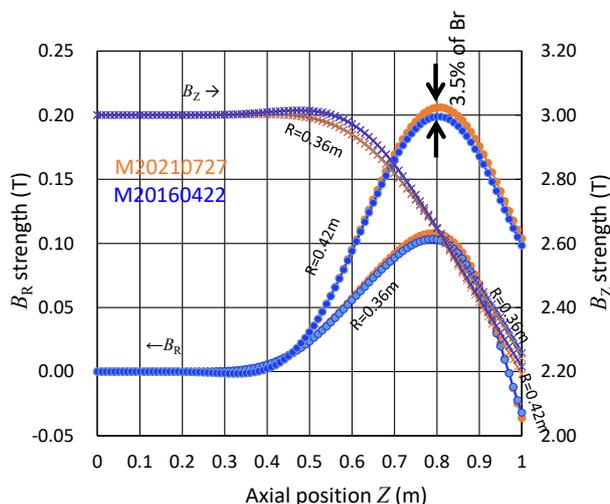


Figure 5: Magnetic field in the fiducial volume. 2D reconstructed magnetic field agrees well with the azimuthally averaged 3D magnetic field, but ripple is larger than 0.2 ppm and has been increased from 2.6 μ T to 16 μ T (peak to peak). Shimming simulation showed that the ripples can be well shimmed with less than 150 cc iron shim pieces.

5. まとめ

Muon の g/EDM 詳細計測用磁石について、設計進展に対応して、起磁力配置を最新化した。磁場に影響を与える設計の進展は、鉄ヨークに磁石調整と運転に必要な穴を開けたことである。鉄量で 4.2 % 減少した。この鉄ヨークで均一磁場を生成するコイル配置を最新化した。0.38 % の起磁力増加が必要であった。Muon 蓄積領域の磁場に周回方向の磁場変動が大きくなったが、シミングより均一磁場を発生できる。入射領域の磁場で、 B_R 成分は 3.5 % 大きくなった。これを反映して、入射角度(入射口のピッチ角)を $22.0 \rightarrow 22.7$ 度と増加した。

謝辞

本研究は、科学研究助成事業(科研費) JP19H00673

のサポートを受けています。

参考文献

- [1] H. Inuma *et al.*, “Three-dimensional spiral injection scheme for g-2/EDM experiment at J-PARC”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 832, 2016, pp51-62.
- [2] M. Abe *et al.*, “Design method and candidate of a magnet for muon g-2/EDM precise measurement in a cylindrical homogeneous volume”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A, Vol. 890, 2018, pp. 51-63.
- [3] 阿部充志, “プロジェクトレビュー、特異値分解固有モードを利用した磁場設計(核融合装置技術から応用した磁場設計)”, プラズマ・核融合学会誌 95, No. 4, 2019, pp. 155-172, (プラズマ核融合学会のHPよりアクセス可).
- [4] 阿部他, “g-2/EDM 精密計測用ミュオン蓄積超電導磁石の特異値分解を基礎にした均一磁場設計手法”, 第14回日本加速器学会年会, 北海道大学, 2017年8月1~3日, IPP001.
- [5] 阿部他, “g-2/EDM 精密計測用ミュオン蓄積超電導磁石の磁場調整方針”, 第16回日本加速器学会年会, 京都大学, 2019年7月31日~8月3日, THOH07.
- [6] 阿部他, “g-2/EDM 精密計測用超電導磁石内設置能動磁気遮蔽型ステアリング磁石の試設計”, 第17回日本加速器学会年会, Web開催, 2020年9月2~4日, FRPP46.
- [7] M. Abe *et al.*, “Static magnetic field shimming calculation using TSVD regularization considering constraints of iron piece placements”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, 2017, pp. 4400812.
- [8] 阿部他, “MRI 磁石を用いた超高均一度シミングの可能性検討”, 2019年度春期第98回低温工学会・超伝導学会研究発表会, 2019年5月28~30日, No. 3A-a10.
- [9] 飯沼他, “Muon g-2/EDM 精密計測用蓄積磁石へのビーム入射輸送ライン設計の最新化”, 第18回日本加速器学会年会, Web開催, 2021年8月9~12日, MOP016.