

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 UPDATE AND DETAIL DESIGN OF BEAM TRANSPORT LINE FOR MUON G-2/EDM EXPERIMENT AT J-PARC

飯沼 裕美^{#, A)}, 阿部 充志^{B)}, 大澤 哲^{B)}, 小田 航大^{A)}, 佐々木 憲一^{B)}, 齊藤 直人^{B)}, 中山 久義^{B)},
古川 和朗^{B)}, 平山 穂香^{A)}, 松下 諒太^{C)}, 三部 勉^{B)}, Rehman Muhammad Abdul^{B)}
Hiromi Iinuma^{#, A)}, Mitsushi Abe^{B)}, Satoshi Ohsawa^{B)}, Koudai Oda^{A)}, Ken'ichi Sasaki^{B)}, Naohito Saito^{B)},
Hisayoshi Nakayama^{B)}, Kazuro Furukawa^{B)}, Honoka Hirayama^{A)}, Ryouta Matsushita^{C)}, Tsutomu Mibe^{B)},
Rehman Muhammad Abdul^{B)}

^{A)} Ibaraki University

^{B)} KEK

^{C)} The University of Tokyo

Abstract

This paper introduces the magnetic field calculation based on the actual machine manufacturing drawing of the superconducting storage magnet for 3D spiral incident. We also discuss the design of the reference trajectory for the magnetic field and the XY coupling required for incidence. Finally, we report on the progress of transport line design and parameter determination of rotating quadrupole electromagnets.

1. はじめに

J-PARC MLF H-Line で素粒子 Muon のスピン歳差運動の精密測定実験; J-PARC Muon g-2/EDM 実験の計画が進行している[1]。米国 BNL で行われた E821 実験や、今年 4 月に最新結果が出た FNAL E989 実験とは全く異なる手法で Muon g-2 および、EDM の精密測定を行うことを目標にしている。

H-Line の Muon 線形加速器からの運動量 300 MeV/c 低エミッタンスビームを 3T の蓄積磁場中に円軌道半径 33.3 cm に収めるため、3 次元螺旋軌道入射の考案、概念設計および、実証実験に取り組んで来た。概念設計時はソレノイド型超伝導磁石を円筒形状の鉄ヨークおよび円形鉄板で囲まれた形状に、ビーム入射チャンネルや磁場調整シムの出入り貫通穴のみの簡易形状モデルで設計を進め、入射ビーム位相空間の X-Y 結合条件や、輸送ライン設計について議論してきた(加速器学会 2017~2020, [2])。その後の設計進展で、鉄ヨーク形状は 8 角形とし、ヘリウム循環用の穴、シム鉄挿入用の穴や、蓄積領域内部の設置する検出器のためのライフラインを通す穴を決定した。更に、超伝導コイル配置の詳細が決定された。これに伴い、ビーム入射軌道および、ビーム位相空間の X-Y 結合の見直しを行うことにした。本論文では、

- 実機製作に基づいた蓄積用超伝導ソレノイド磁石を OPERA-3D を用いた磁場解析、
- 新しい磁場分布に基づく入射軌道の決定、および既存のキッカー装置との整合性、
- 3 次元螺旋軌道入射に必要な X-Y 結合および Twiss パラメータの設計、
- 輸送ラインに設置する電磁石群の概要について報告する。

2. 蓄積用超伝導磁石の磁場計算

Table 1 に実験計画当初に考案した概念設計の蓄積用超伝導磁石と、今回議論する実機ベースの磁石の大きな比較を載せる。また、Fig. 1 に比較の図を示す。

Table 1: Model Comparison

モデル名	概念設計 2016 model	実機ベース 2021model
鉄ヨーク形状	円筒	8 角形
鉄ヨークに開けた穴の種類	ビーム入射用トンネル	入射用トンネル、シム鉄挿入穴、ヘリウム循環穴
入射ビームの回転方向	時計回り	半時計回り

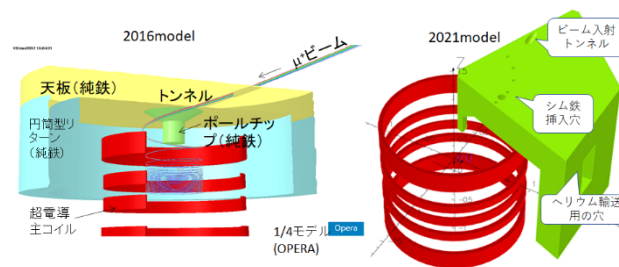


Figure 1: Comparisons of two types of models.

Figure 2 に、左に実機ベースの製作図と、右に OPERA-3D のモデル形状および、ビーム入射の向きを示す。

[#] hiromi.iinuma.spin@vc.ibaraki.ac.jp

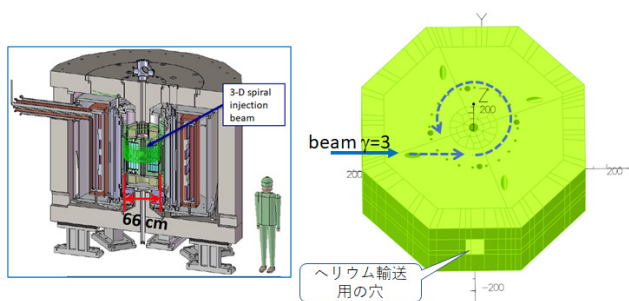


Figure 2: Drawing of 2021 model and OPERA-3D.

実機製作図面に基づく磁場計算は OPERA-3D を用いて行っている。ビーム蓄積部の中心磁場を 3 T、弱収束磁場をゼロに設定した時の均一度は 0.1 ppm 未満に調整を行う。詳細は本学会の別発表[3]を参照。Figure 2 に示す鉄ヨークに開けたトンネルを通り、蓄積磁石内部へと入射される 3 次元螺旋軌道を Fig. 3 の左図に示す。超電導主コイルおよび、弱収束磁場発生用コイルも合わせて示す。右図に、入射領域のフリンジ磁場(径方向磁場;BR)をソレノイド軸方向の位置の関数で示す。鉄ヨークに穴を多く設けたため、BR 成分が 3~5% 相対的に大きくなっている。

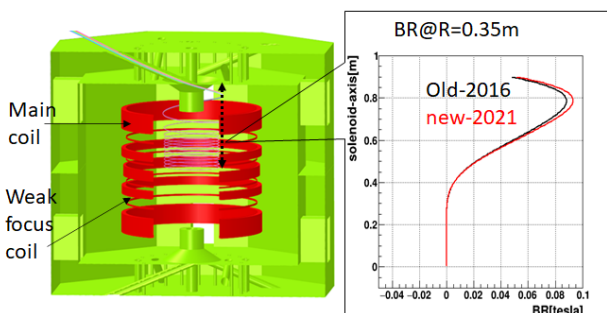


Figure 3: 3-D spiral beam trajectory inside the storage magnet.

3. 新しい磁場分布に基づく入射軌道の決定

Figure 4 に 2016-model の入射軌道を赤色で示し、同じ条件で、2021-model の磁場に単粒子入射を行った際の軌道を黒色で示す。2021-model は磁場 BR が大きいいため、黒い軌跡は高さ 0.55 m 付近で入射角の符号が変わり跳ね返されている入射に失敗している。

Table 2 に、2016-model と 2021-model の磁場分布を各々考慮し、蓄積中心平面から高さ 0.5 m 地点での入射軌道のピッチ角の調整、およびキッカー装置[4]の最適パラメータを示す。入射角度を 7 mrad 変更することにより、蓄積磁石内部へと、ビームを誘導することは可能になる。

Table 2: Model Comparison

Injection parameter	2016 model	2021 model
Pitch angle at z=0.95m	-0.262[rad]	-0.269[rad] Δ7mrad
Kicker duration time & peak current	139[ns], 790[A]	137[ns], 600[A]

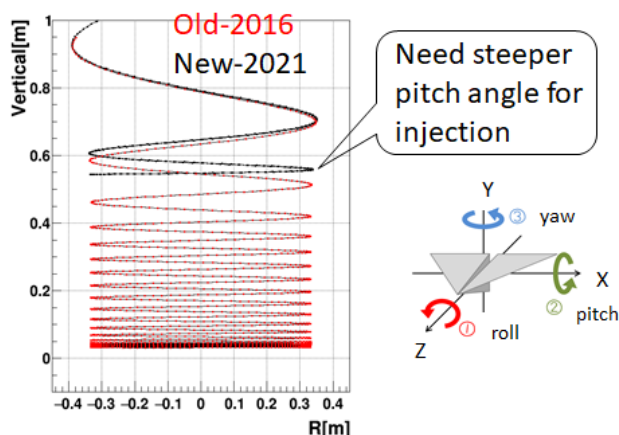


Figure 4: Single particle tracking.

入射軌道のピッチ角度変更に伴い、鉄ヨークに設置するトンネルの確度を 7 mrad 変更し、ビームがトンネルの中心部を通過するよう調整を加えた。詳細は割愛するが、運用時に入射ピッチ角度を調整する必要が生じることを想定し、鉄ヨークのトンネルの前後でシールド機能付きステアリング磁石(ASSM)を 2 台設置し、蓄積用磁石内部に洩れ磁場を出すことなく、ビーム軌道にだけステアリング作用を与える磁石の設計を行い、試作装置の製作、磁場測定も進めている。

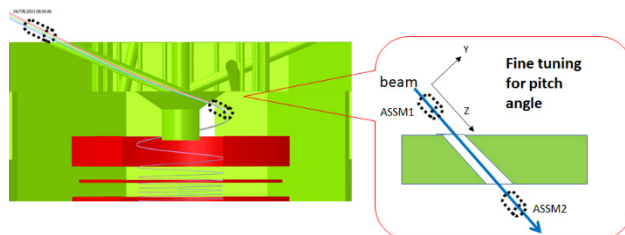


Figure 5: Additional steering devices for pitch angle adjustment.

4. 3次元螺旋軌道入射のための Twiss パラメータの決定

軸対称なソレノイド型磁場中に、螺旋軌道を描きながら入射するには、ビームの水平成分と垂直成分の運動に相関(X-Y 結合)を持たせる必要がある[2]。実機図面に基づく新しい磁場分布、さらに入射の向きを時計回りに、反時計周りに変更しているため、最適な X-Y 結合を見積もる必要がある。Figure 6 に、時計回りの入射と、反時計まわりの入射軌道を示す。X-Y 結合を明確にするため、中心軌道とその付近の軌道 9 本を示す。X-Y 結合は、計 10 本の軌道の X-Y 断面の傾きから算出できる。また、他の Twiss parameter も 10 本の軌道がもつ位相空間の分布を用いて決定できる。その結果を Table 3 に示す。尚、具体的な手法は[2]に記載している。

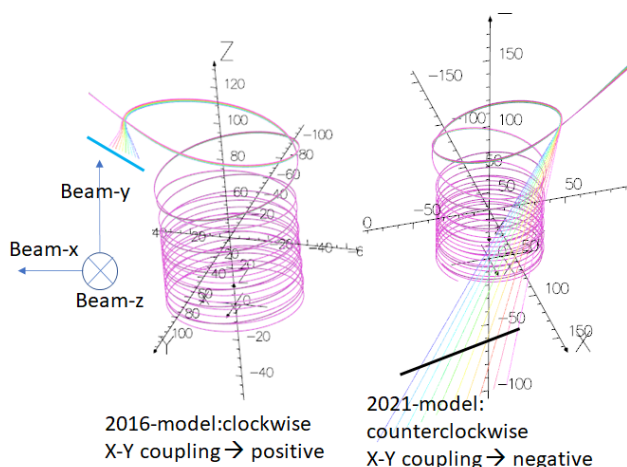


Figure 6: X-Y coupling comparison between clockwise and counterclockwise.

Table 3: X-Y Coupling and Twiss Parameters

model	2016 model	2021model
Twiss parameters	$\alpha_x=9.525, \beta_x=10$ $\alpha_y=7.06, \beta_y=10$	$\alpha_x=9.29, \beta_x=10$ $\alpha_y=6.99, \beta_y=10$
R-matrix	R1=-1.028, R2=-1.4943 R3=-0.8567, R4=-0.6068	R1=0.6332, R2=-0.4553 R3=-3.008, R4=-3.08

5. X-Y 結合ビームのための輸送ライン設計

実機製作に基づいた蓄積用超電導ソレノイド磁石を OPERA-3D で計算した磁場分布の輸送ライン建設に向けた電磁石配置を議論する。特に、傾斜角度 25 度の輸送ラインに設置する電磁石の内、X-Y 結合を与える 4 極磁石は任意の回転角の調整機構も必須であり、輸送ライン自体の規模は全長 10 m 程度と短い、ビーム調整精度に直結する電磁石架台の機械的な制御技術が必要とする技術的課題がビームラインである。

上流装置からのビーム位相空間を与えられたものとし、Table 3 の Twiss parameter および R 行列を満足する輸送ラインの Lattice 設計は SAD (Strategic Accelerator

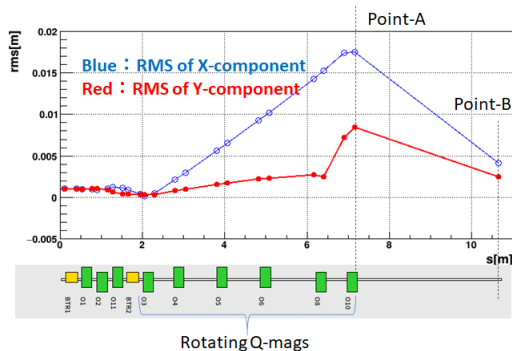


Figure 7: Image of transport line to apply appropriate X-Y coupling. Expected rms values of the beam is also shown.

Design)を利用している。Figure 7~9 に輸送ライン設計の結果を示す。また、Table 4 に輸送ラインに用いる 4 極磁石 9 個のパラメータ案を示す。

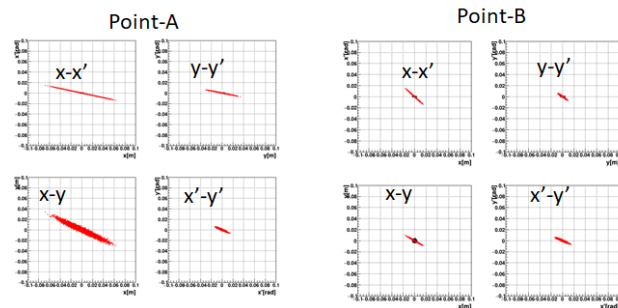


Figure 8: Phase space images at point-A and -B at the transport line.

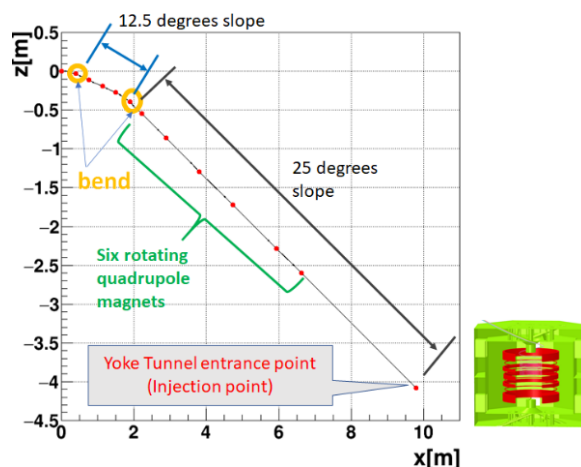


Figure 9: Transport line has two different slope sections to adjust beam injection pitch angle at the entrance point of the storage magnet.

Table 4: Tentative Parameters of Quads

Id#	Bore[m]	K[T/m]	AT[A]	Angle [degree]
Q1	0.01	0.263	24.92	0
Q2	0.01	-7.3557	-292.67	0
Q11	0.01	10.456	416.02	0
Q3	0.01	-39.12	-1556.49	-42.13
Q4	0.01	0.688	27.36	-59.88
Q5	0.03	0.0965	34.578	-65.83
Q6	0.03	0.1360	48.69	-63.63
Q7	0.05	-3.4675	-3449.22	41.32
Q10	0.05	-3.4544	-3436.148	-48.60

今後、Table 4 に基づくパラメータを満足する個々の 4 極磁石の具体設計を進めるとともに、輸送ライン全体の設計を行い、ビームライン建設準備を進めていく。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H00673, 26287055 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Abe *et al.*, PTEP, Volume 2019, Issue 5, May 2019, 053C02. doi:10.1093/ptep/ptz030
- [2] H. Iinuma, H. Nakayama, K. Oide, K. Sasaki, N. Saito, T. Mibe, M. Abe, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 832, 51 (2016). doi:10.1016/j.nima.2016.05.126
- [3] M. Abe *et al.*, “第 18 回日本加速器学会年会”, THP016.
- [4] H. Iinuma *et al.*, “第 17 回日本加速器学会年会”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Sep. 2-4, 2020;
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/THPP/THPP48.pdf