

高度な X-Y 結合を用いた 3 次元螺旋ビーム入射のための輸送区間のビーム制御 およびモニター手法の仕様

DISCUSSIONS OF BEAM CONTROL AND MONITORING METHOD OF TRANSPORT SECTION FOR 3-D SPIRAL BEAM INJECTION USING STRONG X-Y COUPLING

飯沼 裕美^{#,A)}, 阿部 充志^{B)}, 大沢 哲^{B)}, 佐々木 憲一^{B)}, 中山 久義^{B)}, 古川 和朗^{B)}, 三部 勉^{B)}, 平山 穂香^{A)},
リーマン ムハマド アブドウル^{C)}

Hiromi Inuma^{#,A)}, Mitsushi Abe^{B),C)}, Katsunobu Oide^{B)}, Satoshi Ohsawa^{B)}, Ken'ichi Sasaki^{B)}, Hisayoshi Nakayama^{B)},
Hiromi Hisamatsu^{B)}, Yoshinori Fukao^{B)}, Kazuro Furukawa^{B)}, Tsutomu Mibe^{B)}, Muhammad Abdul Rehman^{D)}

^{A)} Ibaraki University, ^{B)} KEK, ^{C)} SOKENDAI

Abstract

A newly developing three-dimensional spiral injection scheme for the beam insertion into a compact (medical MRI size) ring is introduced. The new scheme provides a smooth injection utilizing a radial solenoidal fringe field of a storage magnet. Because of its axial symmetric field shape, the beam phase space requires a strong X-Y coupling at the injection point. In this paper, we will discuss the outline of the new injection scheme, emphasizing an importance of a X-Y coupling in the beam phase space, as well as 4-by-4 sigma-matrix. We also discuss activities at test beam line at KEK tsukuba campus and how to measure and control sigma-matrix.

1. はじめに

ミュオン異常磁気モーメント($g-2$) は、堅牢な標準理論の予言値と、実験結果にズレの兆候がある数少ない物理量の一つである。1970 年代から欧米で実験が繰り返され、最新の実験は 1997 年の E821 実験(米国 BNL) で精度 0.54 ppm を達成[1]している。そして標準理論の予言値とのズレは 3 シグマ以上であると言う結果を出している。この値は新物理の有無を決定づけるには十分ではなく、実験精度、理論の予言精度を更に向上させねばならない。

ミュオン電気双極子モーメント(EDM)の存在は CP 対称性の破れの証拠となるので、実験的な直接検出は直ちに未知の新物理の証拠発見になる。E821 実験では、実験精度の範囲内でゼロであると報告している[1]が、直接的な測定方法ではなく、ゼロと結論づけるには不十分である。

J-PARC MLF のミュオンビームを用いて、ミュオン $g-2$ と EDM の精密測定実験を行う準備が進んでいる[2]。これら物理量は、式(1)に示すように、スピン歳差運動の角運動量ベクトル $\vec{\omega}$ の直交成分になるので、原理的には二つ同時に測定可能である。

$$\vec{\omega} = \frac{q}{m} \frac{g-2}{2} \vec{B} + \frac{q}{m} \frac{EDM}{2} \vec{\beta} \times \vec{B} \quad (1)$$

ただし、両者のベクトルの大きさは大きく異なり、 $g-2$ を 1 とすると EDM 起源のベクトルの大きさは 1000 分の 1 (E821 実験の上限値程度と仮定して)であるため、両者を分離するには式(1)中の \vec{B} と $\vec{\beta} \times \vec{B}$ の項を高精度で制御する必要がある。サブ ppm レベルの高精度磁場調整された蓄積リング内にビーム蓄積軌道面の安定度 0.1

mrad で保持すること、かつ、EDM 測定の理想「電場が存在せず、サブ ppm で精密調整された静磁場中にビームを蓄積」を目標にすれば良い。これを実現するために、過去に行われた実験手法[1]を踏襲せずに、独立な実験手法を新規に開発した。まず、蓄積リングとして医療用 MRI サイズ、直径 70 cm 程度の小型リングを採用する。Figure 1 に示すように、従来実験方式の蓄積リング直径 14 m から 20 分の 1 コンパクト化を可能にし、磁場調整精度のサブ ppm レベルを達成する。また、J-PARC MLF で生成される超冷ミュオンビームを線形加速器で再加速して得る低エミッタンスビームを用いれば、蓄積リング内に強収束電場は必要ではなく、弱収束磁場のみでビームを蓄積領域内に保持できる[2]。一方、MRI サイズの小型蓄積リングに相対論的運動量まで加速されたビームを入射・蓄積を行う事は、加速器技術としても前例がなく、実験の成否を決める重要な研究開発要素技術の一つである。本論文では MRI サイズの小型リング[3]へビーム入射するための新規開発した 3 次元螺旋入射方式[4]について議論する。

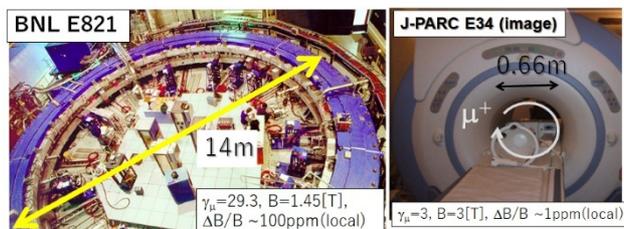


Figure 1: Storage ring scale comparison. Left: BNL-E821[1]; Right: New $g-2$ /EDM experiment at J-PARC.

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

2. 3次元螺旋入射の概要

ミュオン LINAC[4]で運動量 $300 \text{ MeV}/c$ ($\gamma\mu=3$)に加速されたビームを医療用 MRI 磁石の技術に応用した磁場強度 3 T のソレノイド型磁石[3]に入射・蓄積を行う手順の概要を説明する。磁場中のサイクロトロン運動の直径は 66 cm , サイクロトロン周期は 7.4 nsec ほどになる。一般的な蓄積リングへの入射手法(サイクロトロン 1 周期以内に水平キックを与えて定常軌道へと誘導する)はキッカー電源からの制約で技術的に困難であるため、Fig. 2 に示すように 3 次元的な螺旋軌道を描く入射手法を考案した[4]。

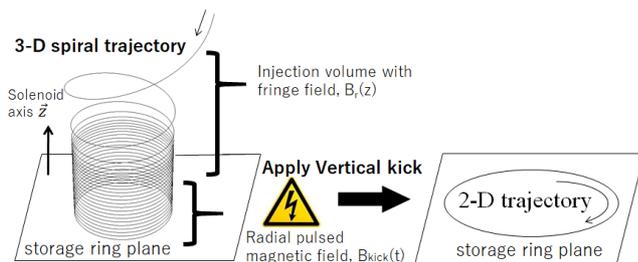


Figure 2: Outline of 3-D spiral injection scheme.

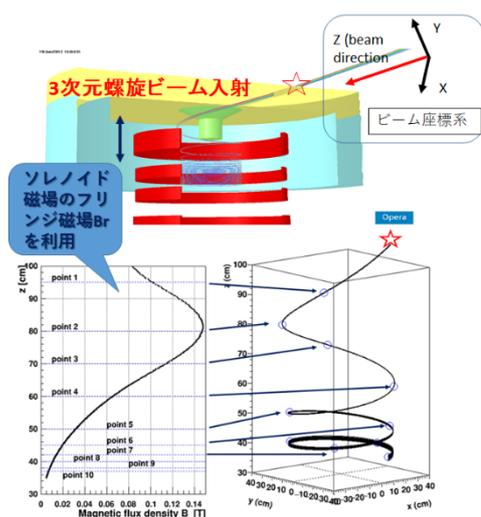


Figure 3: Drawing image of storage solenoidal magnet and fringe field which deflect beam vertical motion to horizontal. Fringe field of injection volume (left) and design trajectory of 3-D spiral injection (right).

Figure 3 上部に現在設計中の蓄積磁石(1/8 カットモデル)と入射ビーム例を示す。医療用 MRI とは異なり、蓄積磁石の大部分を鉄ヨークで覆うことができる。ミュオンビームを通す穴や、実験機材の動力ライン、冷却水ラインなどの最低限の穴を開けるのみで済むため、蓄積磁石外側の装置に起因する蓄積磁場の外乱を最小限に抑えることができる。また、Fig. 3 の左下側に入射領域(鉄ヨーク内側の $110 > z > 39 \text{ cm}$)のビーム軌道に沿った径方向磁場を示す。右に入射領域($39 > z > 0 \text{ cm}$)の 3 次元的な設計軌道を示す。入射領域の B_r 分布は高さ 80 cm の地点で極大を持つ。これは、ソレノイド主コイルの

縁に相当する。図中の point 1~9 は右側の軌跡上の○印に相当する。鉄ヨーク外側の入射地点 point 0 は□印で示す。入射後、最初のサイクロトロン 2 周回程度の間に入射角 θ は 44 mrad から 30 mrad になる。現設計では高さ $z=39 \text{ cm}$ の地点でキッカーコイルからのパルス磁場を受けて、 $z \sim 0 \text{ cm}$ 付近では $\theta < 5 \text{ mrad}$ に収めるよう制御する。

本論文では入射地点でのビーム形状の調整を主に議論する。垂直キックを与え、弱収束磁場中の蓄積領域内にビームを誘導する詳細は本学会の[5]に議論しているので参照してください。

3. 入射領域の磁場分布とビーム位相空間

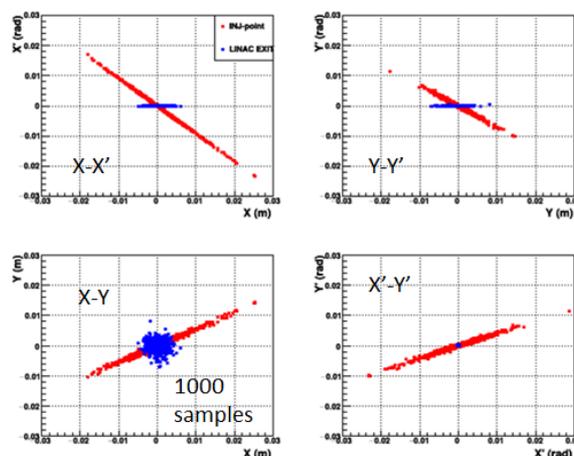


Figure 4: Beam phase-space shape at the injection point.

ソレノイド磁場は軸対称磁場であるため、ビームは適切な X-Y 結合を与えねばならない。ここで、X-Y 結合とはビーム中心を原点に取り、ビーム進行方向を Z 軸とした場合、水平方向(X 軸)、鉛直方向(Y 軸)のビーム運動が相関を持つ状態をいう。上流のミュオン LINAC からのビームパラメータは Table 1 に示すように X-Y 結合を持たないため、LINAC 終点から蓄積磁石入射点までの輸送ラインにおいて適切な X-Y 結合を与える計画である。

Figure 4 の赤点は 500 サンプルのビーム分布を示す。青点は蓄積磁場内のビームが適切な軌道を取る条件をトラッキングにより求め、その 4 次元位相空間を示す。(パラメータ決定方法の詳細は論文[4]を参照)。

Table 1: Beam Parameters at LINAC Exit

parameters	Numeric value
a_x, a_y	0.004, -0.008
β_x, β_y	20, 20
$\varepsilon_x, \varepsilon_y [\text{mm-mrad}]$	0.113, 0.089

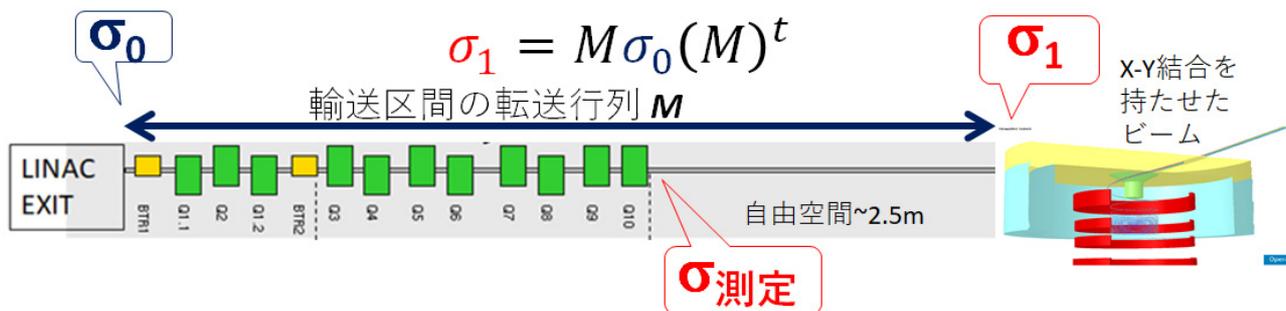


Figure 5: A draft idea of beam transport line. Eight rotating quadrupoles apply appropriate X-Y coupling to the beam.

Figure 5 に LINAC 出口から蓄積磁石入射点までの輸送ラインイメージを示す。X-Y 結合を与えるため、8 つ^{注)}の任意角度の回転 4 極を図中の Q3~Q10 に設置する予定である。(注:冗長性を持たせて 8 つを想定している。)

Figure 5 に示す輸送ライン始点におけるビーム分布 (Fig. 4 青点) に相当する σ 行列、輸送ライン終点のビーム分布 (Fig. 4 赤点) に相当する σ 行列それぞれ σ_0, σ_1 とすると、下式(2)を満足する転送行列 M を求めれば良い。

$$\sigma_1 = M\sigma_0 M^t \quad (2)$$

転送行列 M は輸送ライン終点に於ける X-Y 結合に関わる行列 U とビーム座標系の位相空間の X 成分と Y 成分の位相空間に関わる行列 D に分離できる。

$$M = U^{-1}D \quad (3)$$

ただし、

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & & \\ a_x & 1 & & \\ & & 1 & 0 \\ 0 & & a_y & 1 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} \mu I & -R_4 & R_2 \\ & R_3 & -R_1 \\ R_1 & R_2 & \\ R_3 & R_4 & \mu I \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mu = \sqrt{1 - (R_1 R_4 - R_2 R_3)} \quad (5)$$

a_x, a_y は、 $\Delta X - \Delta X', \Delta Y - \Delta Y'$ の相関の傾きに相当し、輸送ライン始点と終点の Twiss パラメータとは以下の関係を持つ。

$$a_x = (\alpha_0^x - \alpha_1^x) / \sqrt{\beta_0^x \beta_1^x} \quad (6)$$

y 成分も同様である。始点の α 値をできるだけゼロに近く、始点と終点の β を同じ値にするように設計すれば、終点における α は下式(7)のように単純化できる。

$$\alpha_1^x = -a_x \times \beta_0^x \quad (7)$$

Table 2: Beam Parameters at Injection Point

parameters	Numeric value
a_x, a_y	-18.352, -14
β_x, β_y	20, 20
R_1, R_2	-0.552, 0.435
R_3, R_4	3.704, 3.302

Table 2 に入射点に要求されるビーム条件より、X-Y 結合を含むビームパラメータを示す。

輸送ラインには複数のビームモニターを設置し、入射点における 4 次元位相空間行列 (Fig. 5 の σ_1) の測定および、8 つの回転 4 極を用いた制御が 3 次元螺旋入射の入射効率を決めるカギの 1 つになる。本番実験に先立ち、X-Y 結合ビームの測定手法、調整手法の原理実証をすべく、電子銃を用いた実証実験取り組んでいる。

4. 電子銃を用いた入射実証テストベンチ

高エネ研つくばキャンパスにおいて電子銃を用いた 3 次元螺旋軌道入射の実証実験を行っている。ミュオンビームの代わりに 80 keV 電子ビームを中心磁場 80 ガウス程度のソレノイド磁石に入射をし、3 次元軌道の可視化できることを特徴としている。詳細は本学会の[6]を参照。

Figure 6 に、テストベンチの概要をしめす。電子銃出口から入射点まで約 1 m とコンパクトながら、直線部には 3 つの回転 4 極を備え、X-Y 結合を与えることができる。また、入射に際しては 44 度斜め上にキックしてソレノイド磁石内へ誘導するが、キックせずに直線部の終端までビームを飛ばしてビーム断面像を測定可能である。

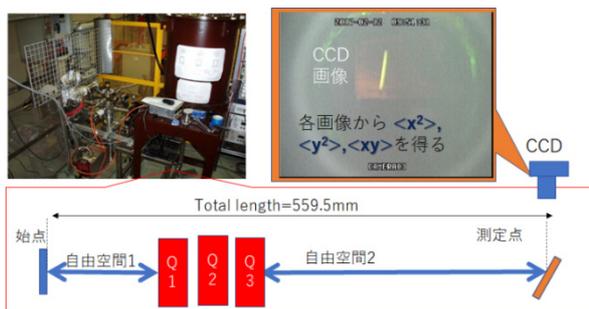


Figure 6: Outline of electron-gun test beam line at KEK.

電子銃出口より下流 50 cm にコリメータを配置し、そこを始点と定める。始点から直線部終端までの転送行列は回転 4 極と自由空間長さから算出できるので、3 つの 4 極磁石を様々に設定し Fig. 7 のように複数のビーム断面像を取得し、その情報から、ビームライン始点における式(8)に示す 4 次元位相空間(σ 行列)を算出できる。

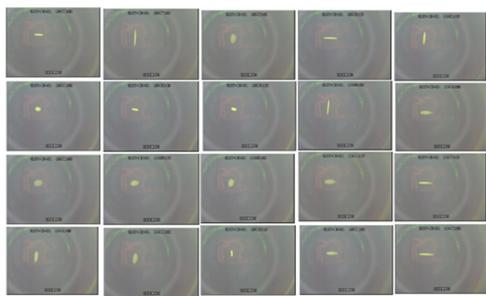


Figure 7: 20 data samples to analyze σ -matrix.

$$\sigma_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xx' \rangle & \langle xy \rangle & \langle xy' \rangle \\ \langle xx' \rangle & \langle x'^2 \rangle & \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle \\ \langle xy \rangle & \langle xy' \rangle & \langle y^2 \rangle & \langle yy' \rangle \\ \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle & \langle yy' \rangle & \langle y'^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

Figure 7 に示す断面ビーム画像毎に、 $\langle x^2 \rangle$, $\langle y^2 \rangle$, $\langle xy \rangle$ の 3 つの測定値をえることができる。各ビーム像を作る始点と終点を結ぶ輸送ラインは 4 極をノーマル配置にすれば下式(9)の様に記述される。これを 20 通り繰り返すと、式(10)の方程式を立てることができる。

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \end{bmatrix}_f = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & m'_{34} \\ 0 & 0 & m'_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \end{bmatrix}_i \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \langle x^2 \rangle_1 \\ \langle y^2 \rangle_1 \\ \langle xy \rangle_1 \\ \langle x^2 \rangle_2 \\ \dots \\ \langle xy \rangle_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 m_{11}^1 & m_{12}^1 m_{12}^1 & 2m_{11}^1 m_{12}^1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & m_{12}^{20} m_{34}^{20} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle x^2 \rangle_i \\ \langle x'^2 \rangle_i \\ \langle xx' \rangle_i \\ \langle y^2 \rangle_i \\ \langle y'^2 \rangle_i \\ \langle yy' \rangle_i \\ \langle xy \rangle_i \\ \langle xy' \rangle_i \\ \langle x'y \rangle_i \\ \langle x'y' \rangle_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)の方程式より始点における σ 行列を得る。この算出結果が妥当性を確認するために、転送行列を用いて、測定点におけるビーム断面の再構成計算をし、実際の測定値との比較を行った。

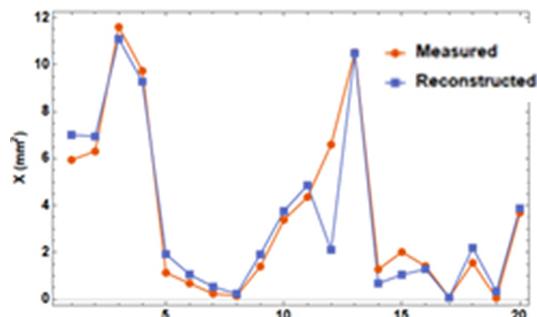


Figure 8: Comparison of $\langle x^2 \rangle$ reconstruction results and measured data from Fig. 7.

x 成分のビームサイズの測定値と、再構成計算結果の比較例を Fig. 8 に示す。横軸に全 20 データのデータ番号、縦軸に $\langle x^2 \rangle$ 値を示す。 $\langle y^2 \rangle$, $\langle xy \rangle$ の比較も同様におこなった。いずれも定性的な振る舞いは再現できており、現在より詳細な解析をおこなっている。今後、3 つの 4 極を回転させたデータを蓄積し、 σ 行列の測定精度や X-Y 結合の調整精度の定量評価に取り組んでいく。また、Fig. 9 に示すように、4 極磁石の下流に設置した偏向電磁石によりビームを斜め上にキックし、ソレノイド磁場への入射実験も進めている。現況報告は[5]を参照してください。

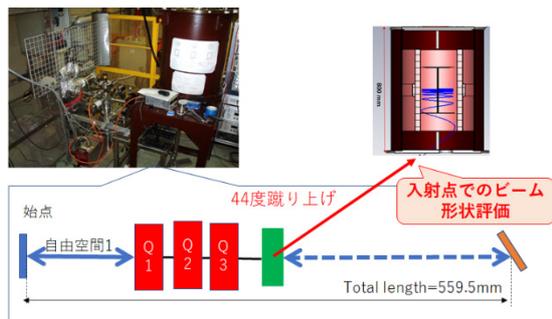


Figure 9: Three-dimensional injection beam line [6].

5. 小型蓄積磁石内部におけるビーム軌道補正用ステアリング磁石の必要性

蓄積ソレノイド磁石内部のソレノイド軸対称な磁場形状は、ビームに要求される X-Y 結合を決めると同時に、ビーム軌道の入射角の決定にも大きく寄与する。Figure 10 に示すように、磁石中心を原点に取り、超電導コイルと鉄ヨークの相対的なズレが、設計軌道の入射角に与える影響を見積もる必要がある。例えば、2 mm ほど図に示す 3 方向に相対的にずれると、Fig. 10 の下図に示すように、入射角を 0.75 mrad ほど磁石内部で調整せねばならない。このため、ステアリング磁石による調整機構を考慮する必要があることが分かった。

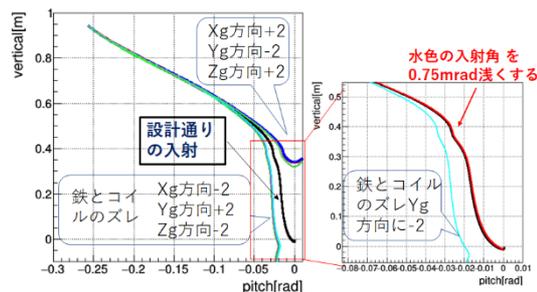
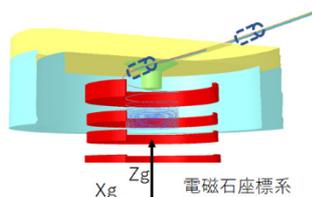


Figure 10: Injection angle vs. displacement of superconductive coils relative to the iron yoke.

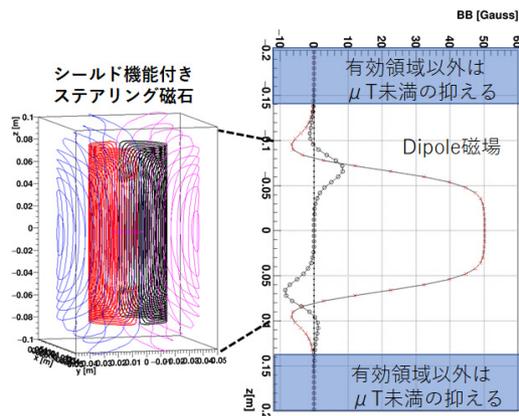


Figure 11: Concept of shielding steering magnet.

中心磁場強度 3 T、蓄積領域の均一度 0.2 ppm(p-p)の磁場分布が要求される蓄積磁石内に、鉄ヨークを持たないシールド機能付きステアリング磁石の概念設計に現在取り組んでいる。詳細は本学会の[7]を参照してください。Figure 11 にシールド機能付きステアリングコイルのコイル配置概念図と、磁場計算結果を示す。ビームが通る区間にだけ偏極磁場を与え、それ以外の領域には洩れ磁場を ppm オーダで抑える設計になっている。現実のビームラインに設置するための詳細設計、および試作機の製作に現在取り組んでおり、2020 年度末にはテストベンチ評価をまとめる予定である。

6. まとめと今後の方針

標準理論を越えた物理探索のため、新しい実験方式によるスピン歳差運動の精密測定を行う J-PARC $g-2/EDM$ 実験が進んでいる。従来の実験方式に比べ半径が 10 分の 1 小さい MRI サイズの単ユニットソレノイド型超電導磁石内部にミュオンビームを蓄積する手法の概要を紹介した。蓄積領域内はソレノイド軸対称な磁場であるため、入射後のソレノイド軸方向のビームサイズの制御には適切な X-Y 結合が必要であり、専用輸送ラインの転送行列の決定方法を紹介した。さらに、3 次元螺旋軌道入射手法を実証実験における X-Y 結合を含む 4 次元位相空間 (σ 行列) の測定について言及した。

今後は、定量的なビームラインパラメータの測定と制御の精度を見積もるべくデータ取得を引き続き行い、本番実験に向けた輸送ライン設計に反映させる。

謝辞

本研究は、科学研究助成事業(科研費) JP26287055 および、JP23740216 のサポートを受けています。

参考文献

- [1] G.W.Bennett *et al.*, Phys. Rev. D 73 (2006), 072003.
- [2] M. Abe *et al.*, PTEP, Volume 2019, Issue 5, May 2019, 053C02; <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz030>.
- [3] M. Abe *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A890 (2018) 51-63.

- [4] H. Inuma *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A832 (2016)51-62.
- [5] 飯沼裕美, "3次元螺旋ビーム入射実証実験のための垂直ビームキッカー装置の単体性能評価", PASJ2020 日本加速器学会第 17 回年会, 講演番号 (THPP48).
- [6] 平山穂香, "J-PARC ミューオン $g-2/EDM$ 実験のための 3次元らせんビーム入射の実証実験の現状報告", PASJ2020 日本加速器学会第 17 回年会, 講演番号 (WEOO5).
- [7] 阿部 充志, "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", PASJ2020 日本加速器学会第 17 回年会, 講演番号 (FRPP46).