

J-PARC g-2/EDM 実験のためのビーム入射設計と実証実験成果報告

BEAM INJECTION DESIGN AND DEMONSTRATION EXPERIMENT RESULTS REPORT FOR THE J-PARC g-2/EDM EXPERIMENT

飯沼裕美 ^{*,A)}, 松下凌大 ^{B)}, 大澤哲 ^{C)}, 中山久義 ^{C)}, 古川和朗 ^{C)},
阿部充志 ^{C)}, 大谷将士 ^{C)}, 小川真治 ^{C)}, 齊藤直人 ^{C,B)}, 佐々木憲一 ^{C)}, 高柳智弘 ^{D)}, 三部勉 ^{C,B)}
Hiromi Iinuma ^{*,A)}, Ryota Matsushita ^{B)}, Satoshi Ohsawa ^{C)}, Hisahyoshi Nakayama ^{C)}, Kazuro Furukawa ^{C)}, Mitsushi Abe ^{C)},
Masashi Otani ^{C)}, Shihji Ogawa ^{C)}, Naohito Saito ^{C,B)}, Ken'ichi Sasaki ^{C)}, Tomohiro Takayanagi ^{D)}, Tsutomu Mibe ^{C,B)}
^{A)} Ibaraki University ^{B)} University of Tokyo ^{C)} KEK ^{D)} JAEA

Abstract

To perform precise measurement of the muon anomalous magnetic moment (g-2) and electric dipole moment (EDM), we have made technical challenges to inject the beam into the precisely-tuned storage region in the storage magnet without disturbing the static magnetic field. In this paper, outline of 3-D spiral injection scheme and current status of design works are introduced, as well as results of validation experiment by use of electron gun.

1. はじめに

J-PARC Muon g-2/EDM 実験 [1] は、ソレノイド型超電導電磁石内に運動量 300 MeV/c の Muon ビームを直径 0.66 m の軌道で蓄積し、異常磁気能率 (g-2) の超精密測定と電気双極子モーメント (EDM) の探索を同時、独立に行うことを目指す。EDM 信号は Fig. 1 に示すように磁場中を相対論的速度で進む muon が感じる有効電場に比例する [2] ため、均一度 0.1 ppm 以内に精密調整された蓄積領域へビーム入射・蓄積を行わねばならない。これを実現するために、3次元螺旋ビーム入射 [3] を新規開発し、その原理実証実験に取り組んできた。本論文では3次元螺旋ビーム入射の概要を2章に示し、入射設計の現状を3章に、原理実証実験の結果を4章に示す。

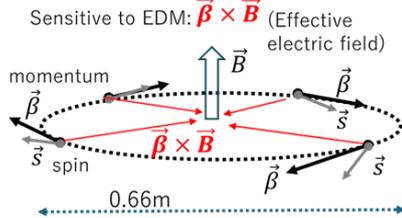


Figure 1: Image of EDM measurement in the compact ring with precise magnetic field.

2. 3次元螺旋ビーム入射の概要

3次元螺旋ビーム入射の概要と、ビーム入射後の蓄積磁石有効磁場領域内の垂直ベータトロン振動 (Vertical Betatron Oscillation, 以降 VBO と呼ぶ) のイメージを Fig. 2 に示す¹⁾。

z 軸対称なソレノイド磁場への3次元螺旋軌道を取るビーム運動は、サイクロトロン運動 (周回運動) とソレノイド軸方向の運動に分離できる。前者は、主磁場 (B_z) とビーム運動量で決まり、常に径方向に収束力がかかる。

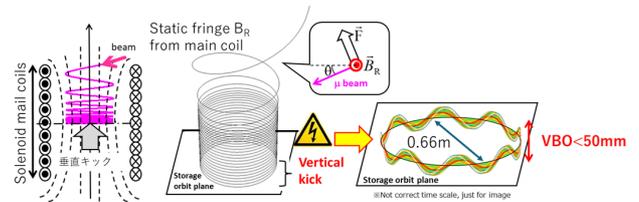


Figure 2: Outline of the 3-D spiral injection scheme. VBO motion in the storage volume is also shown.

一方、z 軸方向のビーム運動の制御は蓄積磁石のフリンジ磁場 (径方向静磁場) と蓄積領域の上下に配置する垂直キッカー装置が生成するキック磁場 (径方向動磁場) を組み合わせで行われる。ビームの z 軸方向の発散を抑えるように適切な制御を要する。具体的には、個々のビーム粒子が入射軌道に沿って感じる積分磁場 $B_R L$ の制御を行う²⁾。

$B_R L$ の設計値を決める。簡単のため、粒子が感じる径方向磁場 B_R と入射角度が一定の場合を考えると、速度 $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ の荷電粒子が感じる積分磁場は下式で得る。

$$B_R L = \frac{m}{q} v_z, L = v \int dt \quad (1)$$

例えば運動量 300 MeV/c で入射角度 -0.27 rad が一定の場合は -0.26 T m と算出できる。軸対称なソレノイド磁場中を通す基準軌道の設計は z 軸方向の運動: $z(t)$ と $z'(t)$ の2つのパラメータを決められた $B_R L$ に合致できればよく、以下の項目に留意してパルス磁場キッカーのキック時間とキック磁場の空間分布を決定する:

- $z(t)-z'(t)$ 軌道を決め、 $z'(t)$ を何秒かけてゼロにするか?
- 垂直キックに必要な z 軸方向の長さ?

実機設計磁石のフリンジ磁場 B_R は空間依存性があり一定値ではないので Eq. 1 に対応する計算は軌道に沿った

* hiromi.iinuma.spin@vc.ibaraki.ac.jp

¹⁾ 特に断らない限り本論文ではソレノイド軸を z 軸、蓄積磁石の中心を原点とするデカルト座標系で進める

²⁾ 基準軌道の設計の詳細、静磁場中のビーム運動は参照論文 [4]、垂直キッカーを用いたビーム制御は [5] を参照。

逐次積分が必要で、垂直キックを終了するタイミングで $z = z' = 0$ になるように調整せねばならない。Figure 3 の左に、その結果として蓄積磁石の内部の入射領域～蓄積領域まで ($0 < z < 0.95$ m) の $z(t)-z'(t)$ の設計軌道を示す。

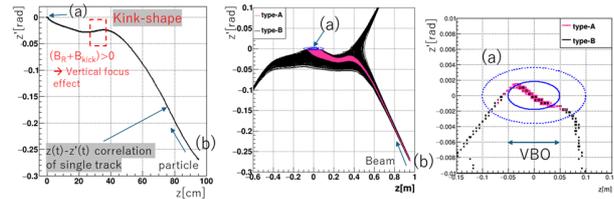


Figure 3: Left: $z(t)-z'(t)$ of a reference trajectory inside the storage magnet. Center: beam trajectories with phase space. Right: time slice of center plot at the end of the kick.

3. 3次元螺旋ビーム入射設計の現状

基準軌道の周りに有限な位相空間を持ったビームを入射する際の課題を以下に示す：

- 蓄積磁石内部の磁場環境下で、位相空間に広がりを持ったビーム粒子の個々の B_{RL} を揃える (= z 軸方向の発散を抑える)、
- 入射ビームは磁石外部の自由空間から蓄積磁石ヨークトンネルを経て数テスラの強いソレノイド磁場中に入射するため、ビーム位相空間 (Twiss parameter) は基準軌道付近の磁場の空間分布形状に依存する。

ビーム入射の例を Fig. 3 中央の図に示す。設計軌道に沿って有限の位相空間 $\epsilon = 0.1 \pi \text{ mm mrad}^3$ としている。ピンク色: type-A 分布は基点 (b) ($z = 95$ cm) における適切な位相空間調整済みのビーム粒子 1000 サンプルの $z(t)-z'(t)$ 相関図を示す。黒線: type-B 分布は同じエミッタンスの単純ガウス分布 1000 サンプルの入射例である。また、垂直キック終了時の $z(t)-z'(t)$ 相関の時間スライスを図右に示す。図中の青い実線は Fig. 2 に示した VBO=50 mm に相当する楕円である。すなわち、type-A, type-B の分布のうち目標の楕円中に収まる割合が各タイプの入射・蓄積の成功率を示している。

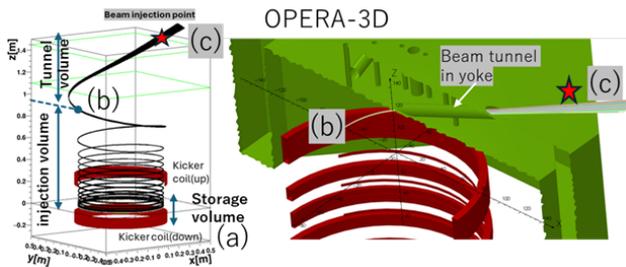


Figure 4: Beam trajectory inside the storage magnet by the 3-D spiral injection scheme. Points (a), (b) and (c) are indicated for coming discussions.

Figure 4 の左に type-A の入射軌道群 1000 サンプルについて蓄積磁石外部の入射点 (c) から蓄積領域 (a) まで

の全体像を示す。入射途中の基点 (b) を合わせて示す。Type-A の基準軌道設計および位相空間設計は基点 (b) を挟んで以下のように取り組んだ：

- (a) から (c) までの逆軌道計算によりお手本となる理想の位相空間を基点 (b) と入射点 (c) で算出する、
- (c) に於ける位相空間形状から Twiss-parameter を算出し、順方向入射計算を行い、基点 (b) に於ける位相空間形状をお手本に近づくように調整する。
- (b) で調整された位相空間を用いて順方向入射計算を進め、蓄積領域 (a) に於ける VBO 楕円に収まる割合を算出する。

ここで、入射点 (c) と磁石内部の基点 (b) は Fig. 4 の右図に示す通りである。項目 2. と 3. を 2~3 回繰り返して type-A の結果を得ている。以降に、お手本の位相空間を決める手法、入射設計の現状結果を示す。

3.1 逆軌道を用いたお手本位相空間の決定

Figure 5 の左に逆軌跡群を示す。基準軌道を緑色、灰色は後述 Fig. 6 の左図に示す初期点を始点とする逆軌跡群である。基準軌道付近に黒い軌道群は蓄積磁石鉄ヨークトンネルを通過できる ((b)→(c)) ものを示す。磁場分布形状に従い軌道群は回転対称な形状をもつので、回転方向の広がりを考慮しない $r-z-\theta$ 形式に変換すると Fig. 5 の中央に示すように、軌道群は“ほぼ”1 本の紐状で表現できる。ただし、 r は軌道の z 軸からの径方向距離、 θ は軌道に沿った位置ベクトルと運動量ベクトルがなす角度である。この相関が正に、**3次元螺旋ビーム入射に必要な強い X-Y 結合** である。図の右側に示す、基点 (b) における $r-z-\theta$ の拡大図を見ると、紐の一部が黒く鉄ヨークトンネルを通過できるアクセプタンスになっている。

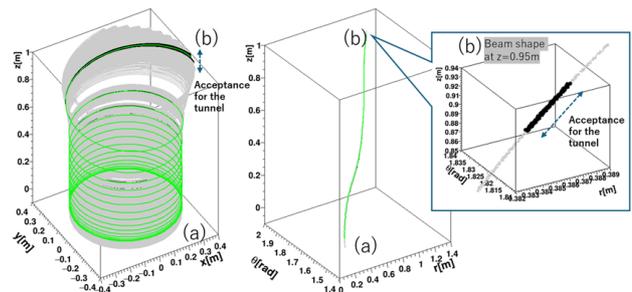


Figure 5: Left: Back trajectories. Middle: the same but $r-z-\theta$ system. Right: Zoom-up view at (b).

Figure 6 の左図は逆軌跡群の始点を示す。赤い楕円は VBO=50 mm を示す。黒色で示す鉄ヨークトンネルを通過できる軌道群がゆるいカーブ形状になる理由はキッカー磁場の空間分布形状に起因する [5]。個々の逆軌跡群の (a) から (b) までの間の B_{RL} の分布を Fig. 6 の右側に示す。以上の議論より、逆軌跡群の周回方向の広がりが、 B_{RL} の広がりで定量化され、お手本となる軌道群は設計軌道がもつ B_{RL} を中心とする特定の範囲内に限られることを示した⁴。

³ 本論文では縦方向のエミッタンスは扱わない。

⁴ ΔB_{RL} の幅の大小が垂直キッカーの優劣を決める指標となる。

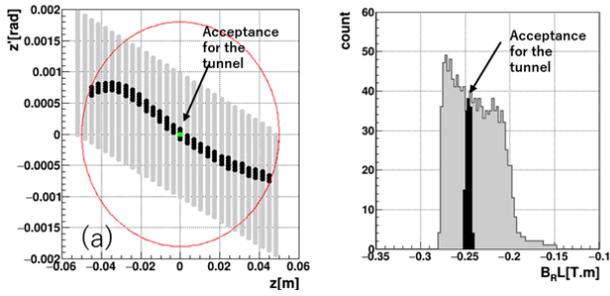


Figure 6: Left: Initial points of reverse tracking. Black are selected by beam tunnel acceptance. Right: $B_R L$ distributions for each reverse trajectory.

逆軌跡群を用いた、お手本となる位相空間の形状を算出する過程で明らかにした蓄積領域 (a) と基点 (b) の間の z - z' 相関を Fig. 7 に示す。上段 (下段) 左側の z - z' 相関の指標を示す色分けが上段 (下段) 中央に示す基点での z - z' 相関の色分けに対応関係がある。上段 (下段) 右側は横軸が $B_R L$ 、縦軸が基点における z 方向の分布を示し、 $B_R L$ が蓄積領域での z - z' 相関と対応を持つことが分かる。

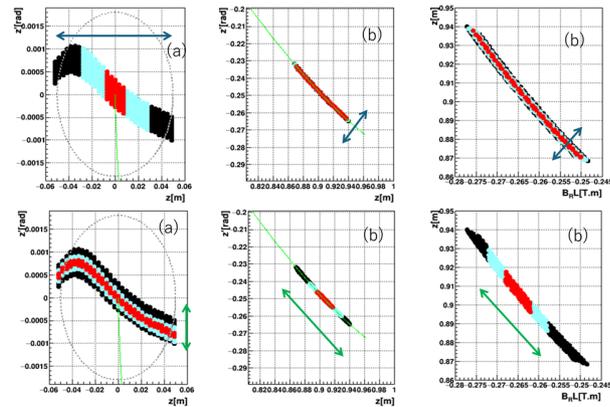


Figure 7: Dependencies of z - z' shape at (a) and (b).

3.2 入射設計の現状

Figure 8 に逆軌跡群から求めた入射点に於ける r - z - θ 相関および、ビーム座標系での横方向 4 次元位相空間の相関の傾きを実線で示す。これらの情報から決定したビーム位相空間の Twiss-parameter [3] を横方向のエミッタンス $\epsilon = 0.1 \pi \text{ mm mrad}$ のガウス分布形状に適応した入射ビーム (Fig. 8) を用いて順方向軌道計算を行った。その結果を Fig. 9 に示す。1000 サンプルの入射軌道のうち 970 サンプルが $VBO=50 \text{ mm}$ 内部の楕円に収まっている。また、蓄積領域でのビーム分布の色分けが、右図に示す基点に於ける r - z - θ 分布に明確に見て取れることが分かる。その一方で、Fig. 8 のビーム分布には色分けが混ざっている。これは、基点から入射点までの間に存在する鉄ヨークトンネル内の磁場の空間分布に起因すると考えられるが、詳細は現在解析中である [7]。

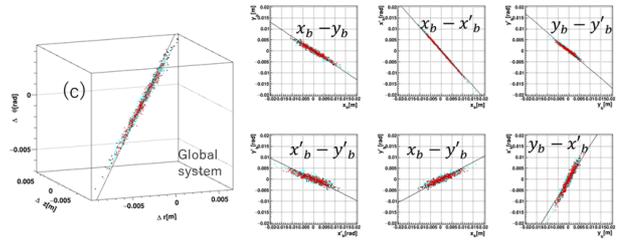


Figure 8: Beam phase space at point (c). Twiss-parameters are estimated from lines obtained from reverse trajectories [3].

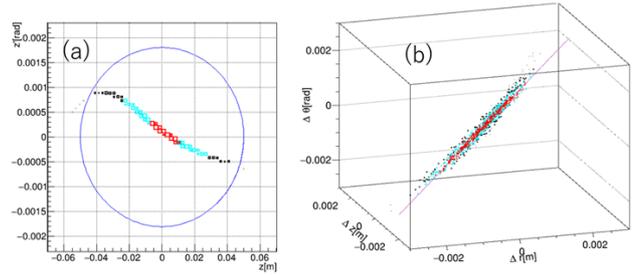


Figure 9: Beam phase space at points=(a) and (b) with forward direction from point (c). 970 out of 1000 samples are stored inside $VBO=50 \text{ mm}$ ellipse.

4. 3次元螺旋ビーム入射の原理実証実験

2014 年より 3 次元螺旋ビーム入射の原理実証実験 (Spiral Injection Test Experiment; SITE) に取り組み、以下の項目を達成 [8] した:

1. 回転 4 極磁石を用いて強い X-Y 結合を持つ位相空間を持ったビームの生成とビーム診断、
2. 螺旋軌道ビームの軌道の可視化と画像で認識する、
3. 垂直キッカー、弱収束磁場を用いた本番と同様の手法によるビーム蓄積の実現。

ビームラインの写真と概要を Fig. 10 および Fig. 11 に示す。直線部終端に X-Y 結合のかかったビーム断面像を確認する Monitor-1、蓄積磁石内の真空槽内部のビーム軌道を可視化する Monitor-3 がある。また、蓄積槽内部ソレノイド軸方向のビーム分布を測定するために wire-scan2 本 (DC ビーム) も設置している⁵。

4.1 X-Y 結合ビームの生成とビーム診断

SITE 実験では直線部に配置した 3 つの回転 4 極磁石を用いて任意の X-Y 結合を掛けたビーム断面測定を行った。Figure 12 の上段に示す 21 通りの画像は直線部終端の Monitor-1 で得たものである。尚、これらのデータを取得の際に回転 4 極磁石の角度を $0, -20, -45$ 度に固定し、K 値を振っている。データ番号と K 値の情報を後述の Fig. 13 の右に示す。4 つの回転 4 極磁石を含む直線部の転送行列と 21 通りの画像情報から直線部上流のコリメータに於ける σ 行列を得る。ビーム位相空間を

⁵ SITE の詳しい説明は博士論文、修士論文など参照 [9]。



Figure 10: Picture of SITE and core members of Mr. Matsushita (left), Prof. Ohsawa (center) and Prof. Nakayama.

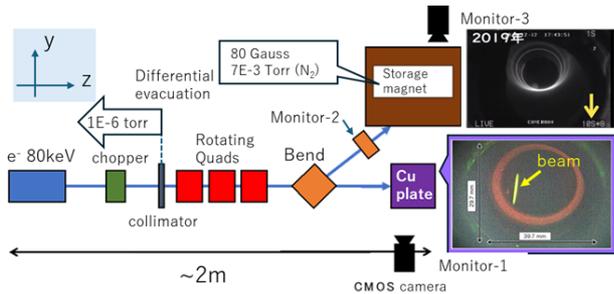


Figure 11: Outline of SITE. Monitor-1 and Monitor-3 measure X-Y coupling and 3-D spiral trajectories.

表現する σ 行列は 10 個の独立変数から成るので原理的には 10 例以上の画像情報があれば良い。そして、X-Y 結合の制御の妥当性を評価するために、求めた σ 行列を用いて Monitor-1 に於けるビーム断面図のシミュレーション計算を行った。その結果を Fig. 12 に示す。黒い分布は画像データ、赤い分布は計算結果である。更に、黒・赤の分布それぞれの傾きと、傾き軸に射影した幅を Fig. 13 に示す。シミュレーションはデータを良く再現している。

4.2 3次元螺旋ビーム入射の結果

以降の章では、直流電子ビームを用いた蓄積槽内部の3次元螺旋軌道の評価と、パルスビーム入射、キッカー装置を用いた蓄積実験の結果を紹介する。ただし、別途投稿論文を準備中であるため、本論文での紹介は限定的になる。

直流ビームを用いた3次元螺旋軌道の確認 直線部 Monitor-1 の手前に配置する偏向磁石により 45 度上方に軌道を変え、蓄積磁石へビーム入射を行った結果の一部を Fig. 14 に示す。直線部 Monitor-1 で X-Y 結合を確認のち、蓄積槽に設置したカメラで3次元螺旋軌道を確認し、また、ワイヤースキャナーを用いてソレノイド軸方向 (vertical 方向) のビーム分布を確認している。図中の data#1,data#2 は回転4極の K 値を調整して、X-Y 結合を変えている。

パルスビーム入射後の蓄積信号の確認 SITE でのビーム蓄積信号の取得目標を、蓄積磁石内部の弱収束磁場有効領域内に入射したパルスビーム幅より十分長い時間存在する信号と定めた。Figure 15 に直流ビームから 100 ns 幅のパルスビームを切り出し、パルスビーム入射

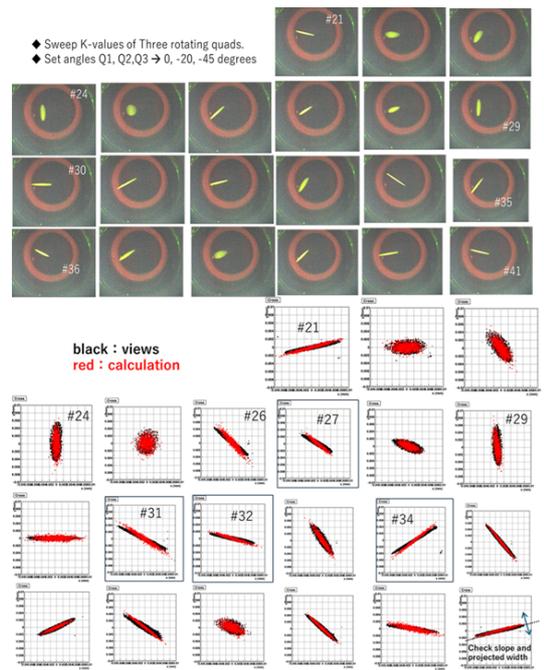


Figure 12: Up:Beam cross-section views at Monitor-1. Bottom: Comparison of beam cross-sections by changing beam line settings.

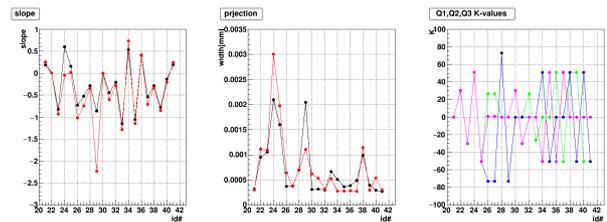


Figure 13: Left and center: Comparisons of slope and projected width of Fig. 12 views. Right:K-values as function of data#id.

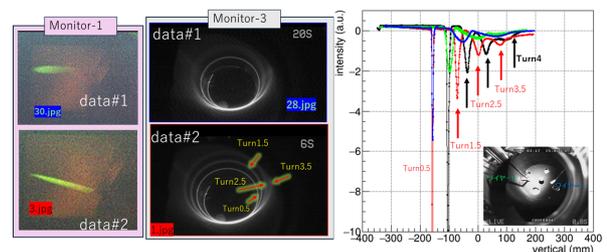


Figure 14: Left: Views at monitor-1. Center:Nitrogen gas makes the ionized and luminescent orbits clearly visible. Right: Wire-scan detected vertical distributions of beam.

と同期して垂直キッカーを掛けた結果を示す。蓄積槽内のパルスビーム検出は直径 1 mm のシンチレーティングファイバー (SciFi) を用いておりパルスビームが蓄積有効領域に 1 μ s 以上とどまっていた結果を得ている。

蓄積磁石は主コイルと電流の向きが逆の補助コイルを組み合わせ、ソレノイド磁石の中心部に弱収束磁場を設けている。Figure 16 はソレノイド中心部 0.1 m 範囲

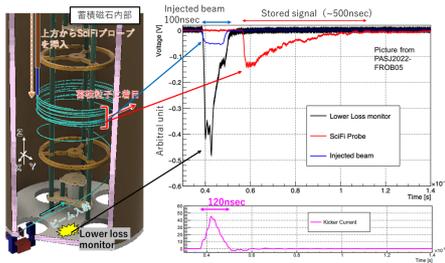


Figure 15: Signal of stored beam [10, 11].

内に弱収束磁場が作る蓄積領域があることを説明しており、横軸にソレノイド軸方向 (vertical)、縦軸に径方向磁場を示している。

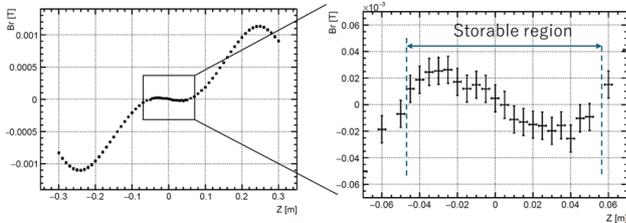


Figure 16: Radial magnetic field as function of vertical positions. Weak focusing field in the middle area is for beam storage.

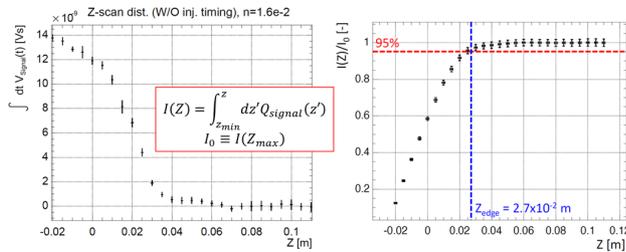


Figure 17: Left: Stored beam distribution along the vertical direction detected by SciFi. Right: Integral of left side data to obtain stored region which should be consistent with storable region by weak focusing field.

Figure 17 の左に入射後に蓄積され続けたビームのソレノイド軸方向の分布を示す。蓄積磁石上部より差し込んだ SciFi の位置を横軸に、SciFi の信号量の大きさを縦軸に示す。蓄積ビーム分布の上限値は、このデータを積分し、一定値になる（積分してもビームが存在しないので一定になる）点と定義できる。測定結果より、蓄積されたビームの分布領域の上限は $z=0.27$ cm であり、Fig. 16 で示した蓄積可能領域の範囲内にあることが示された。

5. まとめ

3次元螺旋ビーム入射の設計概要と現状の報告を行った。原理実証実験からは強い X-Y 結合を掛けたビーム調整とビーム診断を報告した。更に、蓄積磁石中の3次元螺旋軌道の測定、さらに蓄積信号の測定結果を報告し

た。弱収束磁場が作る有効蓄積領域内に蓄積ビームを保持できていることを確認し、設計通りの実験結果を得た。今後、2030年の本番実験開始を目指す。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP26287055, JP19H00673, JP20H05625 の助成を受けたものです。KEK 入射者の皆様、運転員の皆様、機械工作センターの皆様にはご理解とご支援を承りました。PPJ、ネクストクリエイトサービスの皆様には新しい装置開発でご協力いただきました。

参考文献

- [1] M. Abe *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2019, Issue 5, May 2019, 053C02. doi:10.1093/ptep/ptz030
- [2] H. Inuma, “New approach to the muon g-2 and EDM experiment at J-PARC”, 2011. 5 pp. Published in J.Phys. Conf. Ser. 295 (2011) 012032. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/295/1/012032/pdf>
- [3] H. Inuma *et al.*, Nucl. Instru. Meth A 832 51 – 62 2016. doi:10.1016/j.nima.2016.05.126
- [4] H. Inuma, “Precise control of a strong X-Y coupling beam transportation for J-PARC muon g-2/EDM experiment”, in *emphProc. IPAC’23 Venezia*, 05 2023, pp. 286-289. doi:10.18429/jacow-ipac2023-mopa110
- [5] 飯沼、他、第 19 回日本加速器学会年会、TUP036, 2022 年 10 月 18 日. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/TUPO/TUP036.pdf
- [6] H. Inuma *et al.*, “Trajectory design for passing through solenoid magnet fringe field and method for adjusting its strongly X-Y coupled phase space for three-dimensional spiral beam injection”, in *Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan*, Jun. 2025, pp. 2020-2023. doi:10.18429/JACoW-IPAC25-WEPM029
- [7] S. Ogawa *et al.*, “Design of beam phase space distribution to realize precise three-dimensional beam injection at J-PARC muon g-2/EDM experiment”, in *Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan*, Jun. 2025, pp. 2101-2104. doi:10.18429/JACoW-IPAC25-WEPM055
- [8] H. Inuma *et al.*, “Results from validation experiment for three-dimensional spiral beam injection scheme”, in *Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan*, Jun. 2025, pp. 2894-2897. doi:10.18429/JACoW-IPAC25-THPM099
- [9] SITE の博士論文、修士論文, <https://wiki.kek.jp/spaces/gminus2/pages/176324781/Thesis>
- [10] 松下、他、第 21 回日本加速器学会年会、THP015, 2024 年 7 月 31 日. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/THP0/THP015.pdf
- [11] 飯沼、他、第 19 回日本加速器学会年会、FROB05, 2022 年 10 月 18 日. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROB/FROB05.pdf