

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

VERTICAL KICKER FOR THREE-D SPIRAL INJECTION BEAM

飯沼裕美^{#, A)}, 大澤哲^{A)}, 中山久義^{B)}, ムハマドアブドゥルリーマン^{C)}

Hiromi Iinuma^{#, A)}, Satoshi Ohsawa^{B)}, Hisayoshi Nakayama^{B)}, Muhamud Abdul Rehman^{C)}

^{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. To store a beam inside of a fiducial magnetic field, which is very precisely controlled weak focusing field, a vertical kicker will control beam motion. In this paper, we will discuss about a basic concept of the vertical kicker system, and how to optimize the kicker performance to increase higher injection efficiency. We also briefly introduce a commissioning status of newly fabricated kicker pulse power supply at our test bench.

1. はじめに

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。この計画では、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 0.1mrad で保持することを実現するために、過去に行われた実験手法[1]を踏襲せず、独立な実験手法の新規開発に取り組んでいる[2]。まず、蓄積リングとして医療用 MRI サイズ、直径 0.7m 程度の小型リングを採用し、磁場調整精度のサブ ppm レベルの達成を目指す。しかし、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。本論文では蓄積軌道直径 0.7m の小型リングへビーム入射するために新規開発した 3次元螺旋入射方式の実現のキーとなる垂直キッカー装置の設計と、入射効率の評価について議論する。3次元ビーム入射軌道に合わせたパルス磁場の時間構造の要求仕様決定方法の議論、キッカータイミングの精度及び、ミュオンビームの時間構造によって入射効率と蓄積後のビーム軌道にどのような影響がでるか議論する。更に電子銃を用いた 3次元入射テストビームラインのための垂直ビームキッカーの装置単体の試運転の現状と今後の計画を議論する。

2. 垂直キッカー装置の概要とキッカー磁場のラフな要求仕様見積り

はじめに運動量 300MeV/c ($\gamma_\mu=3$)に加速されたビームを医療用 MRI 磁石の技術を応用した磁場強度 3T 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 66cm, サイクロトロン周期は 7.4nsec 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

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

制約で技術的に困難であるため、Fig. 1 に示すように 3次元螺旋軌道を描く入射手法を考案した[4]。

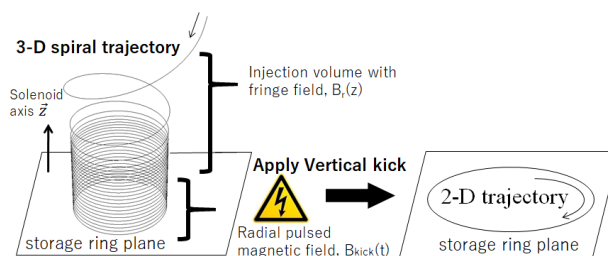


Figure 1: Outline of 3-D spiral injection scheme.

3次元螺旋軌道入射にはソレノイド磁場が適する。Figure 1 の左図のようにソレノイド磁石のフリンジ領域を 3次元螺旋軌道で入射をする。フリンジ部の径方向磁場により、徐々に入射角を減らしたうえで、図の真ん中に示す垂直キックによりパルス磁場を与え、キック後、Z=0 平面付近で入射角を 5mrad 未満とする。その後、最終的には弱収束磁場の中で Z=0 面を中心にソレノイド軸方向に単振動する形で蓄積される。

上記のシナリオを満足するキック磁場、キック領域(ソレノイド方向のサイズ)のラフな見積りを行う。例えば、入射角 15mrad を 130nsec 半サインパルス磁場で入射角をゼロにする場合を考えると、下式のように計算できる:

$$v_z = v_{z0} + \frac{q}{m_\mu} v_L \int B_R(R, z) \sin(\omega \times t) dt$$

$$0 \cong v_{z0} + \frac{q}{m_\mu} v_L B_R(R, z) \frac{2}{\omega} \quad (1)$$

$$B_R(R, z) = -\frac{m_\mu v_{z0} \omega}{2q v_L} = -\frac{m_\mu p_{z0} \omega}{2q p_L}$$

ただし、q は素電荷、 m_μ はミュオン静止質量、 $p_{z0}=1.5\text{MeV}/c$, $p_{z0}/p_L=15\text{mrad}$, $\omega=2\pi/T$, $T/2=130\text{nsec}$ とする。簡単のため、キック磁場 B_R は空間分布を持たない一様磁場とすると、 $\overline{B_R}=6$ ガウス程度と算出できる。中心磁

場 3T のソレノイド磁場に対し 6 ガウス程度のパルス磁場であるため、主磁場に与える影響は小さいことが確認できる。

また、キックに必要なソレノイド軸方向の領域(z 方向に確保すべき空間)は

$$v_z(t) = \frac{V_{z0}}{2} [1 + \cos\{\omega \times (t - t_0)\}]$$

$$z_0 = - \int_{t_0}^{t_0 + \pi/\omega} v_z(t) dt = \frac{V_{z0} \pi}{2\omega} = \frac{V_{z0} T}{4} \quad (2)$$

より、 $z_0=0.27\text{m}$ 程度と見積もる。Figure2 に式(1), (2)を用いて積分計算を行った結果を示す。図の左側が軌跡を示す x-z 断面、右が時間 vs.ソレノイド軸方向の運動量の時間変動である。青線がキック磁場をかけた場合の単粒子ミュオン振りの軌跡を示す。比較のため、キック磁場がない場合、ソレノイド磁場を素通りする螺旋軌道も示している。

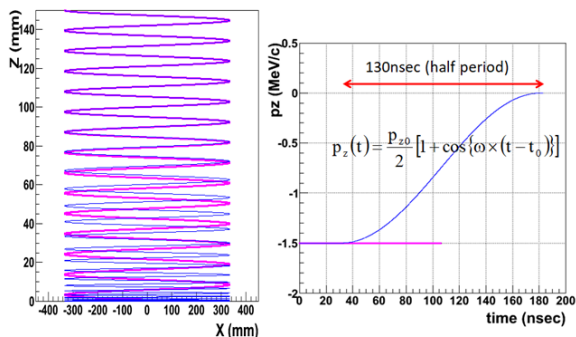


Figure 2: Left: Kicked trajectory projected on x-z plane (blue). Right: Vertical momentum $p_z(t)$ as a function of time. $p_z(t)$ is reduced by appropriate kick (blue).

3. 垂直キッカーの時間構造と基準軌道設計

3.1 キッカー磁場発生コイル形状

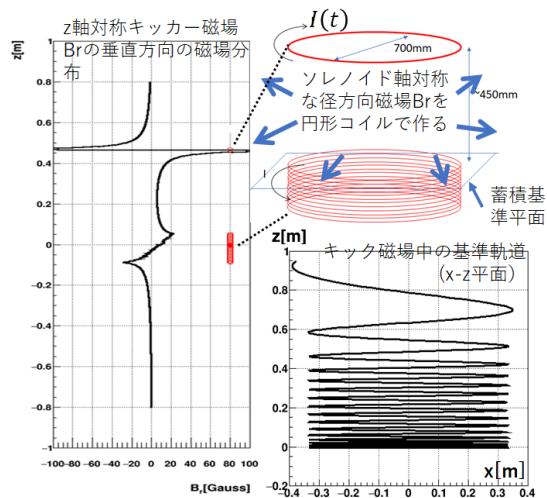


Figure 3: Kicker coil and field distribution.

パルスキック磁場の生成は、導体にパルス電流を流すことで得る。Figure 3 にキッカーコイル案のイメージと、ミュオン軌道に沿った磁場の空間分布を示す。コイルの形状だけで磁場空間分布を調整する。

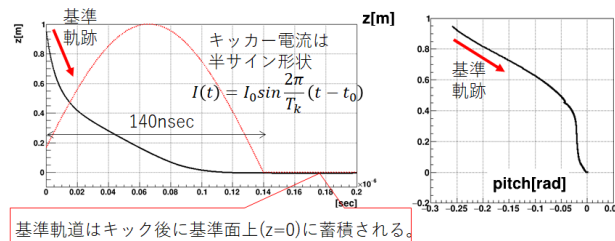


Figure 4: Left: Vertical position of a reference trajectory as a function of time (black), half sine kicker pulse shape is also shown for comparison (red). Right: Pitch angle vs. vertical position of a reference trajectory.

3.2 基準軌道の決定とビーム運動の評価

Figure 4 に基準軌道の様子を示す。図の左にソレノイド軸方向(z座標)の軌道座標がキックによりどのように $z=0$ に収束していくかを示す。比較用に、反サインの時間経過を赤線で示す。図の右側に、基準軌道のピッチ角と z 座標の相関をしめす。キック後、 $z=0$ の面に到達したときに、ピッチ角も 0 度に制御されるのが理想的なキックになる。キッカーコイル形状によりキック磁場の空間分布を決めた後の軌跡の調整は 3 つのパラメータのみで行う。

- キック開始のタイミング t_0
- キックをかける時間 duration time $T=\pi/\omega$
- キック磁場の強さ(電流値)

キッカーコイルの形状および、流す電流の強度・時間分布の最適化は基準軌道を見ながら繰り返し計算を行う。

基準軌跡を決めた後、上流のミュオン LINAC からの空間的・時間的広がりを持ったビームバンチ構造を考慮した複数粒子の入射計算を行う。ソレノイド磁場は回転対称な磁場であるため、X-Y 結合と呼ばれる相関をもったビームを入射する[5]。蓄積磁石の鉄ヨーク内部に入った後の適切なタイミングでパルスキックを与えると、ビームは Fig. 5 左図に示すような時間的振りを示す。点線で示す時刻 $t=130\text{nsec}$ 以降のキック完了後は式(3)に示す弱収束磁場により保持され、 $z=0$ 平面付近を z 方向にベータatron運動しながら蓄積領域内に留まる。

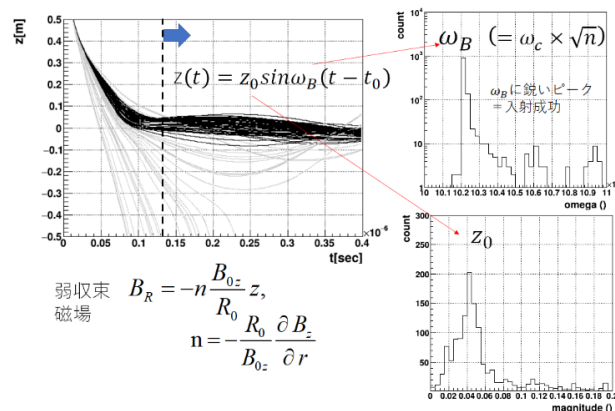


Figure 5: Beam motion during and after the vertical kick.

$$B_R = -n \frac{B_{0z}}{R_0} z, \quad n = -\frac{R_0}{B_{0z}} \frac{\partial B_z}{\partial r} \quad (3)$$

弱収束磁場の係数 n 値は、ミューオンスピン歳差運動の振動数と十分離れた数値 $n=1.5 \times 10^{-4}$ 付近に設定し、物理結果に影響を与えない設計になっている。Figure 5 の右上に、キック後の z 軸方向の運動から求めた各ミューオンのベータトロン周期のヒストグラムを示す。単一の周期にピーク構造をもつことは、各ミューオンが同じ周期のベータトロン運動をしていることを示す。また、Fig. 5 の右下に、 z 方向のベータトロン振動の振幅のヒストグラムを示す。 $|z| < 0.08\text{m}$ 以内の領域にベータトロン振動が収まっていることが分かる。

以上のシミュレーションは、ビーム 1 バンチ分の振る舞いに対して行った。現実には 25Hz で 2~3 バンチ構造になる予定である。バンチ間隔は 3nsec(MHz の RF で加速されるため)である。手始めに、キックタイミングを $\pm 3\text{nsec}$ ずらした単純な場合に、ベータトロン周期と振幅の大きさがどのように影響を受けるかを調べた。その結果を Fig. 6 に示す。

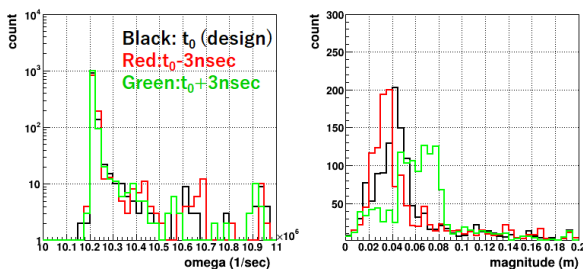


Figure 6: Frequency and magnitude of betatron motion. Different colors correspond to time shift due to bunch separation.

設計のキッカータイミングよりも $+3\text{nsec}$ ずれると蓄積後のベータトロン周期の広がり大きくは変わらないが、ベータトロン振幅が大きくなる事が分かる。ミューオン崩壊後の陽電子検出器のアクセプタンスには収まる程度であるが、入射後のビーム品質はベータトロン周期の均一さが指標になるため、入射品質はキッカー性能に大きく依存すると言える。

今後、実際のビームバンチ構造を考慮した、最適なキックタイミングおよび、キック電流の時間制御手法を確立していく。

4. 実証実験の準備状況

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。表 1 に示すように、ミューオンビームの代わりに 80KeV 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(詳細は参考文献[5,6]を参照)。

Figure 7 に実証実験用のキッカーコイルと空間磁場分布の設計値を示す。また、新規製作したパルス電流源にキッカーコイルを接続し、試運転を現在行っている。

Table 1: Comparison of Original E34 Experiment and This Test Experiment

Parameter	E34	This experiment
Main field	3 T	82.5 Gauss
Beam momentum	300MeV/c	300 keV/c
Cyclotron period	7.4 nsec	5.0 nsec
Storage orbit diameter	0.66m	0.24m
Kick duration time	130 ~ 150nsec	< 50nsec
Current/coil	300 ~ 400A	20A
Coil inductance (expected)	1.5μH	Few μH

Figure 8 にキッカーコイルに取り付けた CT(Current Transformer) 信号から、電流とその時間構造を示す。キッカー装置単体試験完了後、つくばキャンパスの電子銃ビームラインのシステムに組み込む予定である。

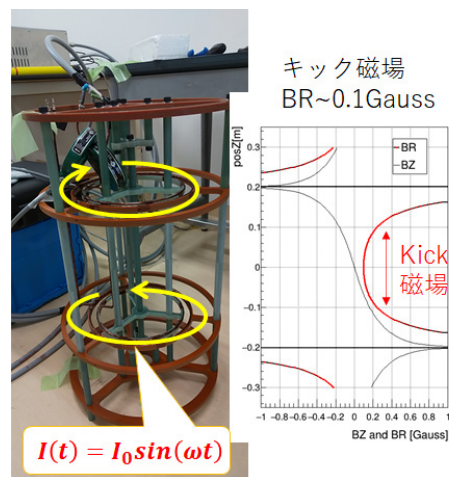


Figure 7: Kicker coil and field distribution.

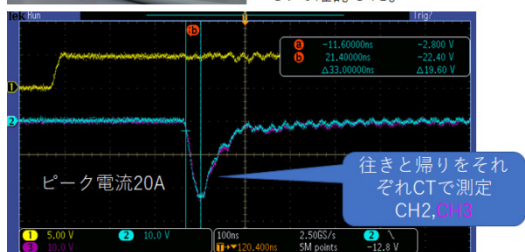


Figure 8: CT signals from the kicker coils.

5. まとめと今後

蓄積軌道の直径が 77 cmほどの小型かつ超精密磁場の蓄積リングへの入射には、垂直ビームキッカー装置によるビーム軌道制御が必須である。キッカー装置の概要とパルス磁場の空間分布、および時間構造をビーム軌跡解析結果と関連付けて議論した。現在、電子銃を用いた 3 次元入射テストビームラインのための垂直ビームキッカーの装置単体の試運転を行っており、2020 年度中にキッカー装置をビームラインに導入し、3 次元ビーム入射の一連の実証実験に取り組む予定である。

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. Iinuma *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A832 (2016)51-62.
- [5] 飯沼裕美, “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”, PASJ2020 日本加速器学会第 17 回年会, 講演番号 (WEPP49).
- [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 (WEOO05).