

J-PARC muon g-2/EDM 実験に向けた 3次元らせん入射実証実験 DEMONSTRATION OF THREE-DIMENSIONAL SPIRAL INJECTION FOR J-PARC MUON g-2/EDM EXPERIMENT

飯沼裕美 ^{*,A)}, 松下 凌大 ^{B)}, 大澤 哲 ^{C)}, 小川 真治 ^{D)}, 小田 航大 ^{A)}, 中山久義 ^{C)}, 齊藤 直人 ^{C,B)}, 古川 和朗 ^{C)},
三部 勉 ^{C,B)}, Muhammad Abdul Rehman ^{C)}

Hiromi Iinuma ^{*, A)}, Ryota Matsushita ^{B)}, Satoshi Ohsawa ^{C)}, Shinji Ogawa ^{D)}, Koudai Oda ^{A)},
Hisahyoshi Nakayama ^{C)}, Naohito Saito ^{C)}, Kazuro Furukawa ^{C)}, Tsutomu Mibe ^{C)}, Muhammad Abdul Rehman ^{C)}
^{A)} Ibaraki University ^{B)} University of Tokyo ^{C)} KEK ^{D)} Kyushu University

Abstract

In the J-PARC Muon g-2/EDM experiment, muon beam with a momentum of 300MeV/c is planned to be stored in the superconducting solenoidal magnet with an orbit diameter of 0.66 m. Beam injection into such a small orbit without disturbing the precisely adjusted magnetic field is an one of the key experimental technologies, and therefore, a proof-of-principle experiment is highly required to be demonstrated. In this report, we show a preliminary result of this beam injection method: an electron beam with an energy of 80 keV ($\beta \sim 0.5$) is injected and stored for more than few microseconds in the solenoid magnet of 80 Gauss with 0.12 m radius orbit.

1. はじめに

J-PARC Muon g-2/EDM 実験 [1] では、ソレノイド型超電導電磁石内に運動量 300MeV/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能率 (EDM) 探索を行う。精密調整された蓄積領域へ静磁場を乱さずにビーム入射を行うことが実験技術の要の一つであるため、我々は、ビーム入射手法の原理実証実験に取り組んでいる。実験装置写真を Fig. 1 の右に示す。

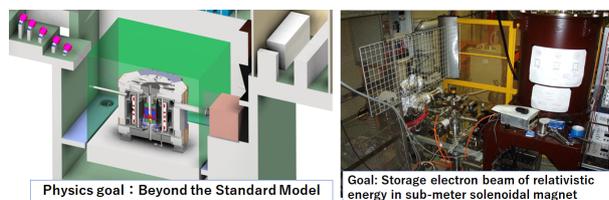


Figure 1: Left: Image of transport beam line at injection area in H-Line at MLF, J-PARC. Right: Picture of a demonstration experiment.

本論文では、80 keV の電子ビーム ($\beta=v/c \sim 0.5$) を約 80 ガウスの中心磁場をもつソレノイド型蓄積電磁石内部に入射・蓄積した結果を報告する。相対論的エネルギーの荷電粒子を半径 0.12 m の小型領域内の安定軌道に蓄積する技術は世界に前例がない取り組みである。我々は、数マイクロ秒におよぶビーム蓄積を示唆する信号の検出に成功し、入射原理を実証した。

2. 3次元らせん軌道入射

Figure 2 に示すように、ビームはソレノイド型磁石の斜め方向から入射角をもって磁石内部に入り、3次元螺旋軌道 [2, 3] を描きながら、磁石中心部の蓄積領域まで進む。この時、ソレノイド主コイルによる径方向フリ

ンジ磁場によりビームの入射角度を徐々に減少させ、最終的には垂直パルス磁場キッカーにより、磁石中心部 (図中 $z=0$ m 付近) で入射角度がゼロになるように調整する。蓄積領域内部の弱収束磁場径方向成分により、垂直キック後のビームは垂直方向にベータatron運動しながら留まる。Figure 1 に示す本番実験で用いるビーム入射の原理は、本論文で示す実証実験と全く同じである。本番実験と、実証実験の基本的パラメータを Table 1 に比較する。

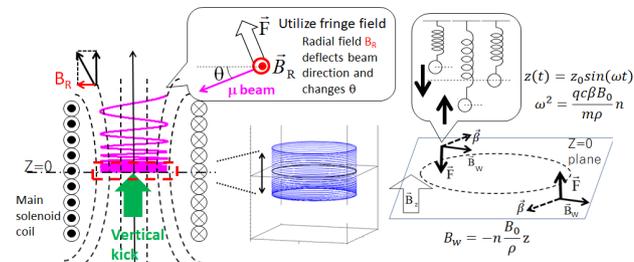


Figure 2: Basic idea of the 3-D spiral injection scheme is shown.

Table 1: Major Parameters Comparison

	Original	This experiment
Main field	3 T (± 0.1 ppm)	0.08 T (~ 100 ppm)
Weak focus index	$n=1.5 \times 10^{-4}$	$n=0 \sim 5 \times 10^{-3}$
Beam momentum	300MeV/c	300keV/c
Radius	0.333 m	0.119 m
Pitch angle	-27 degrees	44 degrees
Kicker duration time	~ 120 ns [4]	~ 120 ns
Kicker peak current	850 \sim 900 A [4]	40 \sim 50 A

実証実験と本番実験の大きな相違は、本番実験は斜め上からの入射だが、実証実験は斜め下からの入射になる点である。本番実験のキッカーパラメータ設計の詳細は本学会論文集 [4] で議論している。

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

3. 弱収束磁場と垂直パルス磁場キッカー

Figure 3 にソレノイド磁石の磁場分布を径方向、ソレノイド軸方向に垂直位置 (z) の関数で示す。特に、径方向磁場は $z = 0$ を中心に $|z| < 80 \text{ mm}$ の領域で弱収束磁場分布を持っている。複数の色は、径方向依存性を示し、 0.119m を中心に $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7 \text{ mm}$ とずらした。

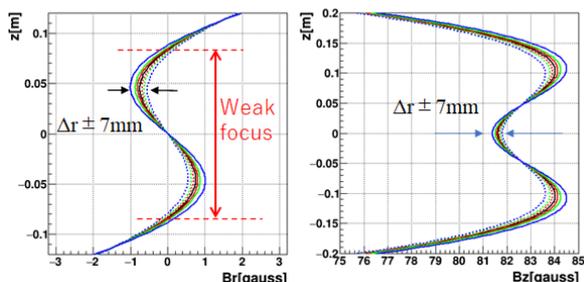


Figure 3: Magnetic field distribution as a function of vertical position. Beam is storable in the weak focus region of $|z| < 0.08 \text{ m}$.

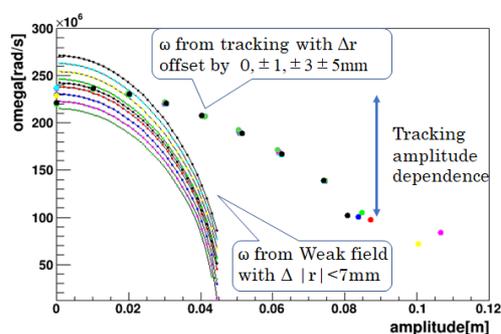


Figure 4: Betatron frequency depends on betatron amplitude due to the spatial distribution of magnetic field.

また、Fig. 4 に示すように、実証実験で用いるソレノイド磁石の磁場の空間分布に従い、蓄積領域内のビームの垂直ベータロン運動の周期は、振幅に依存する。また、ソレノイド軸方向の磁場も $|z| < 80 \text{ mm}$ で $5 \text{ Gauss}/80 \text{ mm}$ 程度の依存性を持つため、サイクロトロン運動の周期や、サイクロトロン半径にも z 依存性がある。

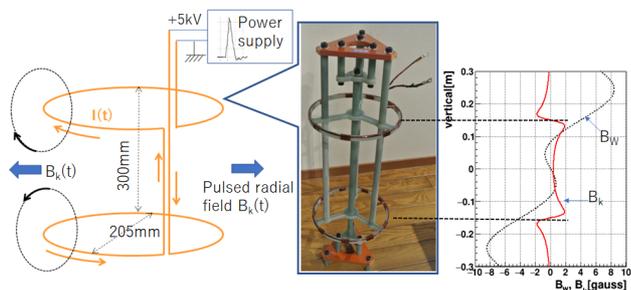


Figure 5: Kicker coil and its field distribution.

垂直キックは、磁石中心面の上下に配置する円状の導体 (以降、キッカーコイルと呼ぶ) に、ビーム入射に同期して逆相のパルス電流を印加して発生する径方向パル

ス磁場を利用する¹。Figure 5 の右にキッカーコイルが作る磁場 (ピーク電流時) と弱収束磁場 (静磁場) の空間分布を比較する。上下のキッカーコイルに挟まれる領域 $|z| < 0.15 \text{ m}$ では $B_K > 0$ であるため、電子ビームは軸方向下向きローレンツ力を受けることになる。

4. 実証実験装置概要

Figure 6 に実証実験の全体像を示す。電子銃からの 80 keV 直流ビームを約 1 m 程輸送し、偏向磁石を用いて 44 度の角度で斜め下から入射をする。軸対称なソレノイド磁場中での、特にソレノイド軸方向のビームの発散を制御するために、所謂 X-Y 結合 [2] を与える必要があり、輸送ラインには 3 つの回転 4 極磁石を設置している。Figure 7 の左にソレノイド磁石内部の蓄積槽の写真、右に直流ビームの入射軌道を窒素電離発光を利用して可視化した画像を示す。(学位論文等 [5], [6])

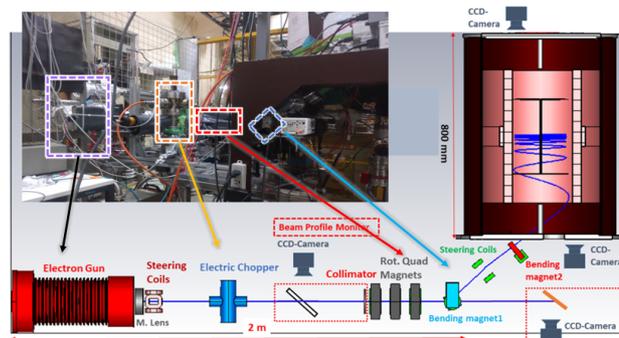


Figure 6: Outline of a demonstration experiment.

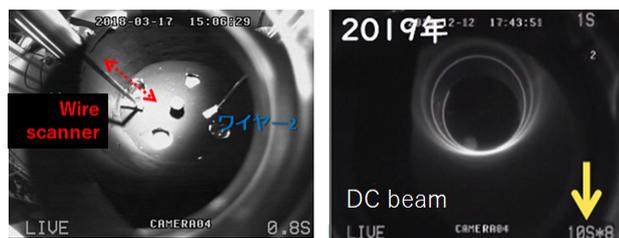


Figure 7: Left: picture of storage chamber with wire scanners. Right: Visualized three-dimensional spiral beam trajectory with DC beam from Electron-Gun.

直流電子ビームは、輸送ラインに設置した、チョッパー電極により、パルス電場をビームに与えて軌道を意図的にずらし下流のコリメータで止める。この手法により可変長のビームを切り出すことができる [5]。切り出したビームは、チョッパー電極が 0 V の時にコリメータを直進した分を利用するので、直流ビームの時のビーム軌道から変わることは原理的にはない。これを確認した結果を Fig. 8 に示す。窒素電離発光を可視化できるギリギリのビーム時間幅 $100 \mu\text{s}$ の軌跡画像は Fig. 7 の右に示す直流ビームの画像と大きな差異はない。また、蓄積槽内に設置した金属ワイヤーを用いて、ビームの鉛直方

¹ コイル付近のソレノイド軸方向の磁場はビーム軌道に若干の影響を与えるが、実証実験においては問題ない。

向の強度分布をスキャンした結果を Fig. 8 の右に示す。100 μ s 幅のビームを 1kHz で入射した信号を 10 倍して、直流の場合と同じビーム強度に合せている。チョッパー電極で切り出したパルスビームが直流ビームの軌道と大きく変わっていないことが分かる。

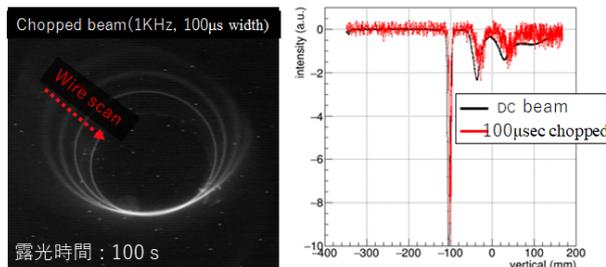


Figure 8: 100 μ s pulsed beam injection results. No big difference from DC beam injection is observed.

5. 垂直キッカー、ビーム検知装置の導入

Figure 9 に垂直キッカーコイルを蓄積槽に設置した様子と、パルス電流源に接続した際の写真を示す。印可電流はロゴスキークoilで測定し、立ち上がり 20 ns、立下り 100 ns の三角波形である。ビームの蓄積は、時間幅 100 μ s に切り出したビームを用いるため、直流ビーム用のビーム診断装置では感度が不十分である。そこで、Fig. 10 に示すように蓄積槽内部の 3 か所にシンチレーティングファイバー (SciFi) を用いた簡易的なビーム検知装置を新たに設置した。

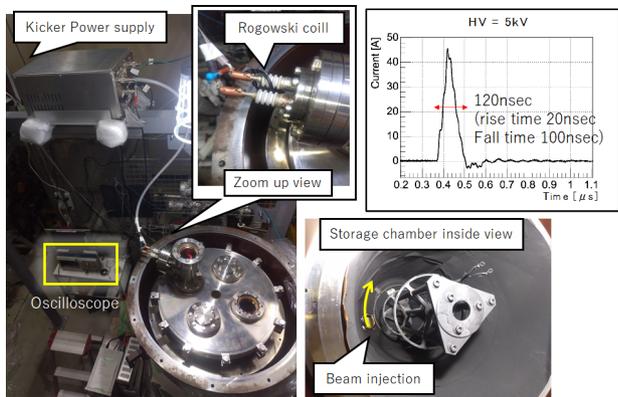


Figure 9: Kicker system is installed. Triangle-shaped current is applied to the kicker coil.

Figure 11 に単粒子入射軌道の例を示す。黒実線は垂直キッカーを適切に与えた場合を示す。灰色実線は、垂直キッカーがかかかっておらず、そのまま突き抜けて蓄積槽上面に向かう軌道、点線は入射角が足りずに、蓄積槽底面に跳ね返される例を示す。この図を参照しながら、蓄積槽内部のビーム検出のシナリオを説明する。蓄積槽下方の入射穴から入射されたビームは、キッカー装置がオフの場合は、蓄積槽上面に到達して消滅することが分かっている。蓄積槽上面に至る軌道に、径方向に 30 mm ほど出現させた SciFi を 1 本配置し (Fig. 10 中 Upper monitor と表記)、パルスビームの入射タイミングを検知する。

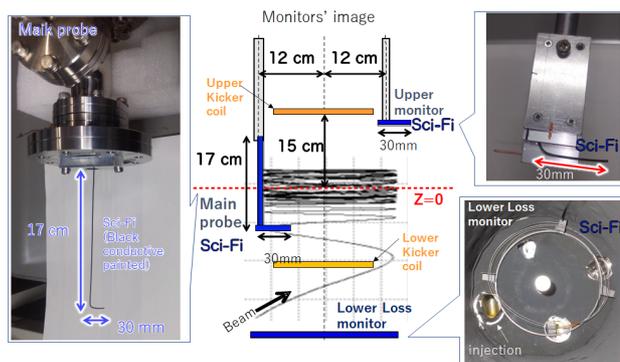


Figure 10: Beam monitors inside the storage chamber.

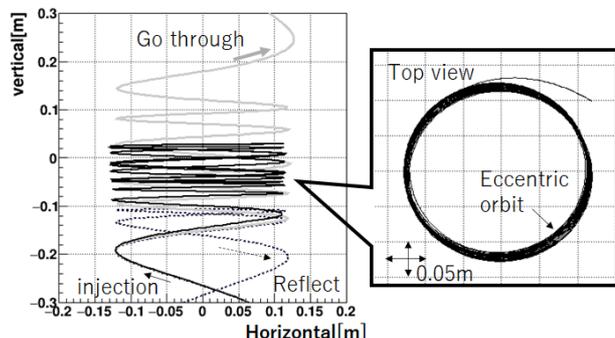


Figure 11: Single tracks of stored, go-through and reflect cases are shown. An example of eccentric orbit is also shown on the right.

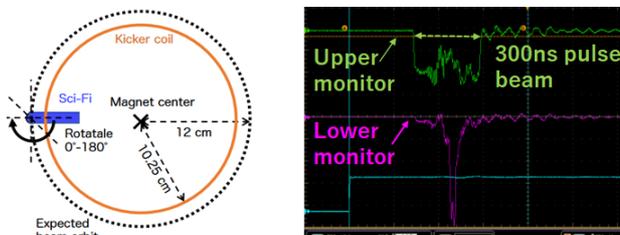


Figure 12: Left: Rotatable main probe. Right: Kicker works appropriately confirmed by upper and lower monitors.

入射角度が不十分な場合は、弱収束の磁場により下方へ跳ね返され、 $z=0$ の中央部に到達せずに、蓄積槽下面で消滅する。このため、蓄積槽の下面に SciFi を数 m 巻いたも (図中 Lower loss monitor と表記) のを配置した。蓄積領域内のビーム検知は、図中 Main monitor と示す、L 字型の SciFi を利用する。垂直方向 17 cm 部分は、蓄積領域 $|z| < 80$ mm を網羅しビームを検知する。

更に垂直方向にスキャン稼働しながら、L 型径方向 3 cm 部分で蓄積領域内のビームの垂直方向の分布を確認する。Main Monitor は、Fig. 12 の左図に示すように回転できる仕組みを持つ。水平方向に偏心したビーム軌道を想定し、ビームの存在を感じることができるようにしたものである。Figure 12 の右側に、Upper monitor と Lower loss monitor を用いて、パルス幅 300 μ s の入射ビームに垂直キックを動作させた際の信号を示す。図中、緑色の

信号が Upper monitor であり、キッカーの波形に応じて、ビームが欠けている (= 正常にキックが掛かる) 様子がわかる。それと同時に、図中、ピンク色で示す Lower loss monitor で、キッカーにより跳ね返されて蓄積槽下面に到達したビームを検知していることがわかる。パルスビームと、キッカー装置の動作タイミングの調整は上下のモニターを用いて行った。

6. 蓄積領域内の単粒子軌道計算

Figure 13 に入射、キッカー動作をしたのち蓄積に至るビームの単粒子計算結果を示す。左図は垂直位置と入射角の相関を示し、閉軌道は単粒子が弱収束磁場が働く蓄積軌道に乗ったことを示す。右図は、軌道の垂直位置 (黒実線)、入射角 (緑実線) を時間の関数で示している。同時に、キック時間に対応する三角波のタイミングを破線で、有効キッカー磁場の時間推移を赤線に示す。Figure 9 に示したように、キッカーコイルに印可するパルス電流は、立ち上がり 20 ns、立下り 100 ns の三角波形状だが、この時間全てを使ってキックを与えるのではなく、立下りのタイミングとビーム粒子の入射タイミングを合わせて入射するように調整する。本来は、更に短パルス印可電流が望ましいが、キッカーコイルに掛かる電圧が更に高くなる。すると、電源装置やキッカーコイル自体に高電圧対策が必要になるなど、安全面で別な問題が発生するため、実証実験で用いるキッカー電源はこの仕様に決めている²。

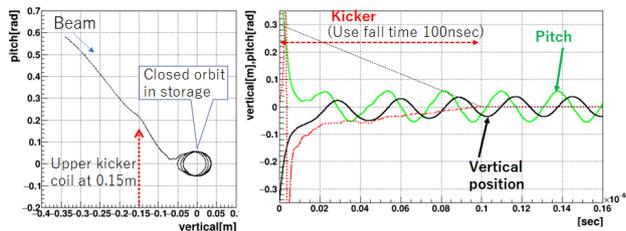


Figure 13: A single track calculation applying planed vertical kicker device.

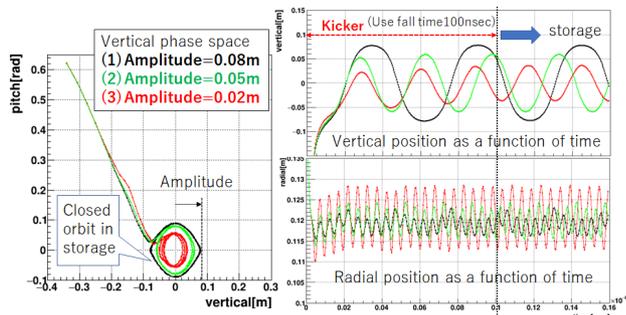


Figure 14: Comparison of single tracks with different pitch angles at injection point.

垂直キッカーに掛かるパラメータを変えずに、入射軌道の入射角の初期値を少し変え、蓄積領域における垂直ベータロン振動の振幅を変えた 3 つの例を Fig. 14 に示す。図の左側は、Fig. 13 と同様に垂直位置とピッチ角の相関を示し、右上の図は垂直位置の時間推移を示す。

² 本番用のキッカー装置はビーム軌道の最適化を最優先しており、高電圧対策も重要な技術開発要素になっている [4]。

さらに、右下の図は、原点からの径方向の大きさの時間推移を示す。3 通りの蓄積軌道から以下の点が言える：
 ① 垂直ベータロン運動の周期は振幅が小さい領域では 25 ns 程度、大きい振幅の軌道ほど、長い周期をとる。
 ② 垂直運動の振幅が小さい ($z=0$ 付近を運動) 軌道は、水平方向の偏心の影響が大きい。

実際のビーム入射は、大きく偏心して (磁場中心と軌道中心がズレて) いる可能性が高いため、その影響を想定した単粒子計算の結果を Fig. 15 に示す。

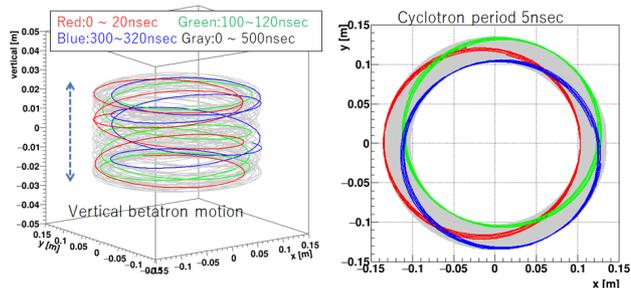


Figure 15: Eccentric stored beam in the storage volume. Very slow horizontal motion could be expected.

7. 蓄積ビーム測定

Figure 16 に Fig. 10 で示した 3 種の検出器信号を示す。Main probe の L 型 SciFi を蓄積磁場の中心 ($z=0$) 面に設置した際の測定結果である。上段は Upper monitor, 下段は Lower loss monitor の信号を示し、中段に Main probe の信号を示す。時間幅 100 μ s のパルスビームの入射の後、Main probe では数 μ s に渡り、信号を検出している。信号の色の違いは、SciFi プロブの回転角度の違いに対応しており、0 度 (黒)、45 度 (青) の信号は、90 度 (黄)、135 度 (赤)、180 度 (緑) よりも 0.5 μ s ほど遅れた時間に信号を検出している。これは、蓄積軌道がかなり偏心し、SciFi プロブがある位置まで来るのに水平面をゆっくりと移動しながらサイクロトロン運動をしていると推測している。³

同様に、Main probe の位置を $z = -10$ mm, -20 mm に設定した結果を Fig. 17 に示す。垂直キック直後から 1.5 μ s までの時間で Main probe の設置角度に依らずに信号を検出している。これは、垂直方向のベータロン運動の振幅が小さく、偏心して入射されたビーム粒子が水平方向に広がっている状況を示している。また、周期 50 ~ 100 ns の時間構造も見られる。単粒子計算と比較すると、振幅が小さく、周期の揃ったベータロン由来の振動 (計算値 25 ns) がサイクロトロン周期 (5 ns) とビートして見える周期 125 ns に近い形の周期構造ではないかと考えている。また、Fig. 16 と Fig. 17 の Main probe で検出する信号の時間情報から、実際の磁場中心は蓄積槽の中心から垂直方向に -15 mm ほど下にずれている可能性が見えている。Main probe の位置を $z = +10$ mm, $+20$ mm に設定した結果を Fig. 18 に示す。信号を検出するタイミングが Fig. 16 よりも更に遅れており、偏心した軌道が水平方向をゆっくり移動するに伴い、1 ~ 2 μ s の大きい周期を持つものと推測できる。

³ 詳細を解析中。本論文では、単粒子軌道解析と比較しつつ、信号から推測可能なビームの状態を議論するにとどめる。

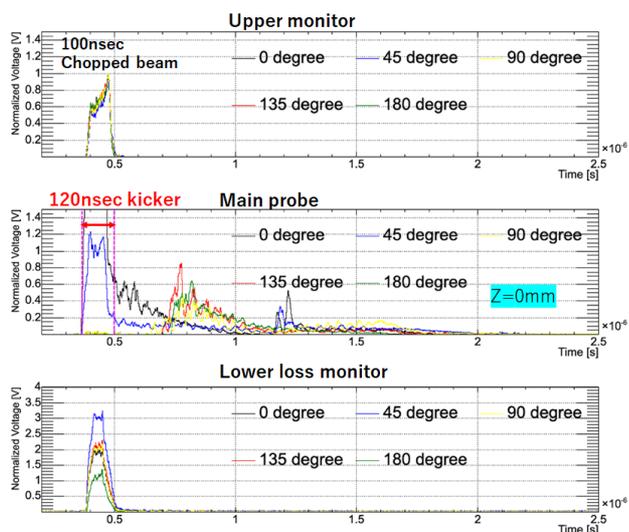


Figure 16: Stored beam signals obtained by SciFi monitors at $z = 0$ mm.

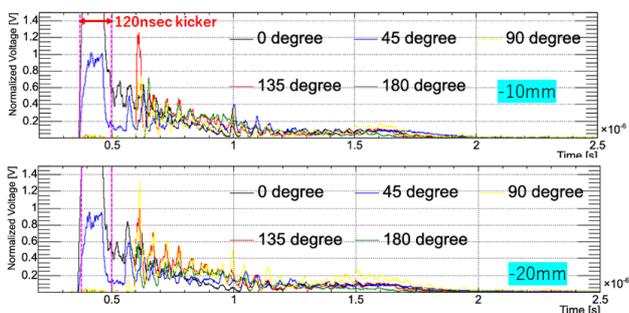


Figure 17: Stored beam signals obtained by Main SciFi probe at $z = -10, -20$ mm.

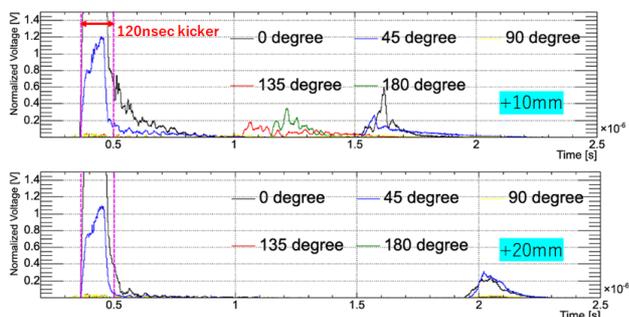


Figure 18: Stored beam signals obtained by Main SciFi probe at $z = +10, +20$ mm.

Figure 19 に Main probe の位置を $z = -80$ mm に設定した結果を示す。上段は縦軸をリニアスケール、下段はログスケールである。Main probe が検出する信号が出現するタイミングは Fig. 16 に似ている。ログスケールでは、 $1.7 \mu\text{s}$ 付近で、ビーム信号を再度検出しており、同様のふるまいが Fig. 16 でもみられる。弱収束磁場中、磁石中心平面の上下 0.08 m の空間を蓄積ビームが数 μs にわたり存在し、上下の垂直ベータatron振動の周期と、偏心軌道が水平方向をゆっくり移動する周期のビートに

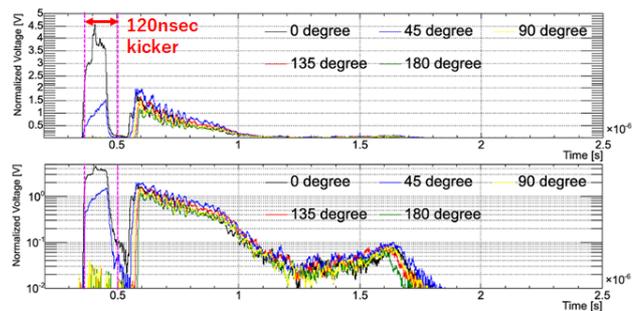


Figure 19: Stored beam signals obtained by Main SciFi probe at $z = -80$ mm. Lower plot is same as above one but its vertical axis is log.

より垂直位置、径方向位置に時間依存を持った信号を検出していると考えられる。

8. まとめと今後の課題

3次元螺旋軌道入射の実証実験、および蓄積の鍵となる弱収束磁場と垂直キッカー装置の概要を説明した。時間幅 100 ns パルスビームを入射し、垂直キッカー装置により弱収束磁場中にビーム制御する、入射・蓄積試験を行った結果を報告した。入射ビームの時間構造に比べ、十分長い時間に渡り、蓄積領域にビームが存在する事を示す信号を検出できた。相対論的エネルギーのビームを半径 12 cm の領域に数マイクロ秒間にわたり蓄積できたのは、世界初の成果である。

データ解析と単粒子軌道計算より、入射ビームは想定よりも偏心し、水平方向にゆっくり移動していることが明らかになった。Figure 20 に示すような改良型ビーム診断装置を導入し、入射ビームの偏心度を極力小さくする調整に取り組む。更に蓄積磁場分布に即した垂直方向ベータatron振動を定量的に評価することを目指す。

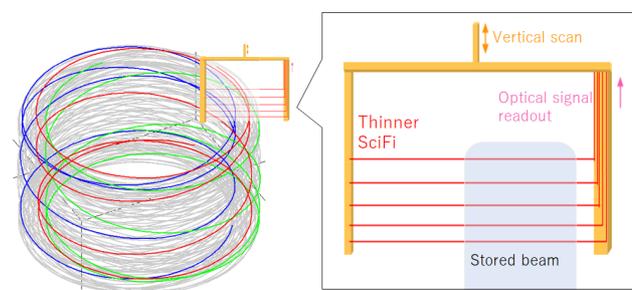


Figure 20: Image of main SciFi probe upgrade plan.

謝辞

ネクストクリエイティブサービスの牛久俊郎氏には電磁石装置製作で、また、パルスパワー研究所の徳地明氏にはキッカー電源の開発でご協力いただきました。KEK 加速器の久松広美氏より真空装置の安定運用の助言を頂きました。ビーム検出器治具は KEK 機械工学センターによる製造支援を受けています。SciFi 検出器導入に際し KEK 加速器の矢野喜治氏より指導を頂きました。本研究は JSPS 科研費 JP26287055、JP19H00673、JP20H05625 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2019, no. 5, May 2019, p. 053C02. doi:10.1093/ptep/ptz030
- [2] H. Inuma *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A, vol. 832, pp. 51–62, 2016. doi:10.1016/j.nima.2016.05.126
- [3] H. Inuma *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 32, no. 6, pp. 1–5, 2022, art no. 4004705. doi:10.1109/TASC.2022.3161889
- [4] H. Inuma *et al.*, presented at the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 2022, paper TUP036, this meeting.
- [5] 関連学位論文; <https://wiki.kek.jp/display/gminus2/Thesis>
- [6] M.A. Rehman *et al.*, Proc. IPAC'21, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 553–556, paper MOPAB162. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB162