

KEK 電子陽電子入射器におけるパルス電磁石の磁場測定

MAGNETIC FIELD MEASUREMENT OF PULSED MAGNETS AT KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

横山和枝[#], 染谷宏彦

Kazue Yokoyama[#], Hirohiko Someya

High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

Abstract

Pulsed magnets at the KEK Electron/Positron Injector Linac have been installed for optimizing beams which are transported pulse-by-pulse at 50 Hz to achieve simultaneously inject beams with different specifications into four independent downstream rings. This paper reports the result of magnetic field measurements of pulsed magnets by driving an actual power source which supplies a pulsed shape close to a trapezoid with a rise time and a fall time of 2 ms, a flat-top of 1 ms with a current of 300 A or 600 A.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器 (Linac) は、下流の独立した4つのリングへ異なる仕様のビームを同時入射するために、ビーム輸送系にパルス電磁石を導入している[1, 2]。Linac は、50 Hz の高周波源を使用したビーム加速装置であるため、20 ms 毎にパルスビームを生成することが可能な装置で、パルス電磁石の励磁電流は、各ビームモードのオプティクス仕様に合わせた磁場強度でパルス毎に設定される。パルス電源は、立上り立下り約 2 ms、フラットトップ約 1 ms で台形に近いパルス波形で、最大電流値は 300 A と 600 A の 2 種類がある。ビームは各リングの入射のタイミングに合わせて、フラットトップの区間にパルスマグネットを通過する。パルス電磁石にはパルス最大電流値の直流電流を励磁することができない仕様のため、実機のパルス電源で励磁して磁場測定を行った。また、磁場検出器としてはサーチコイルを使用した。サーチコイルは、直流でも時間的に変動する磁場でも測定ができる磁場検出器である。サーチコイルの較正は、磁場の絶対値がわかる校正磁石を用いて、磁束が鎖交する実効面積から求めるため、同じ捜査型のプローブを使用する市販品のテスラメータ(ホール素子プローブ)より高精度な磁場の測定が期待できる。また、直流磁場の測定ではコイル自体を動かす必要があるが、パルス磁場の測定ではその必要がない。ここでは、パルス電磁石の磁場測定を直流励磁ではなく、実機のパルス電源で励磁して行った結果について報告する。

2. 磁場測定系

磁場測定系は、磁場検出器(プローブ)と駆動装置(x, y, z, θ)を組み合わせたものである。駆動装置系の構成は、3つの電動アクチュエータと1つの中空ロータリーアクチュエータから成り、x, y, z 各軸の両端及び中央部にフォト・マイクロセンサを設け、位置の読み出し用にはパルスカウンター以外にデジタルスケールを設けた。パルスカウンターからの読み出し値は、駆動系と電磁石のアライメントを主目的にし、デジタルスケールからの読み

出し値はプローブと電磁石のアライメント用途にした。電磁石の磁極中心に対する位置のオフセット量は制御用 PC で計算管理し、プローブの検出位置を正確に把握して電磁石内を 3 次元的に移動させられるようにした。電磁石の磁場中心とプローブ磁場検出位置は、四極電磁石の場合は磁場がほぼゼロになるところを、x, y, z, θ 各々をスキャンして探した。ステージの x, y, z, θ 移動量の分解能は、それぞれ 6 [$\mu\text{m}/\text{pulse}$]、2 [$\mu\text{m}/\text{pulse}$]、5 [$\mu\text{m}/\text{pulse}$]、0.18 [$^\circ/\text{pulse}$] である。デジタルスケールの最小表示量は 10 [μm]である。プローブ走査中の振動を緩和するために、固定方法は両側支持機構にした。プローブ固定用治具のアライメントは、レーザートラッカーを用いて x, y, z 軸を移動させて測定し、50 [μm]以下になるように調整を行った。

3. パルスベンドの磁場測定

図 1 と図 2 はパルスベンド[3]を測定した際のセットアップである。このパルスベンドは、入射部の熱電子銃と RF bunching セクションの合流部で使用される 24 度偏向電磁石である。パルス電源は最大電流値が 300 A タイプである。プローブの位置をビーム軌道に沿って動かして有効長を測定すること、磁場の y-z 分布の測定、励磁特性、及びチャンバーにはステンレス製を使用したため、渦電流による磁場への影響について調べた。パルスベンドとプローブの磁場検出位置のアライメントは電磁石の割面のケガキ位置に合わせた。パルスベンドの磁極間距離は 30 mm、磁極長は 160 mm に対して、チャンバー開口サイズは 14.5 mm \times 34 mm であるため、チャンバーを入れた状態では、全軌道に沿ってプローブを動かせない。また、チャンバーは電磁石を半割にして入れ直し磁場測定用架台に測定系を再設置しなおす必要がある。

50 μm ホルマル線で 52 ターンのサーチコイルを、外径 8 mm、内径 7 mm の GFRP(ガラスエポキシ材)のパイプの中に入れてプローブを製作した。面積は磁場校正電磁石を用いて $2.05685 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ である。パルス励磁した電磁石で、ビーム通過が想定されるタイミングにサーチコイルに発生する電圧値を積分し、面積で割ることで磁束密度が求められる。励磁特性を調べる際には、絶対値の精度を重視して、校正を行った1つのサーチコイル

[#] kazue.yokoyama@kek.jp

を用いた。磁場分布を調べる際には、基準コイルを用意して、サーチコイルから引算処理し、磁場の信号出力レベルの S/N 比を上げた。測定結果は、CST Studio[4]で計算して設計した仕様を満たしていた。

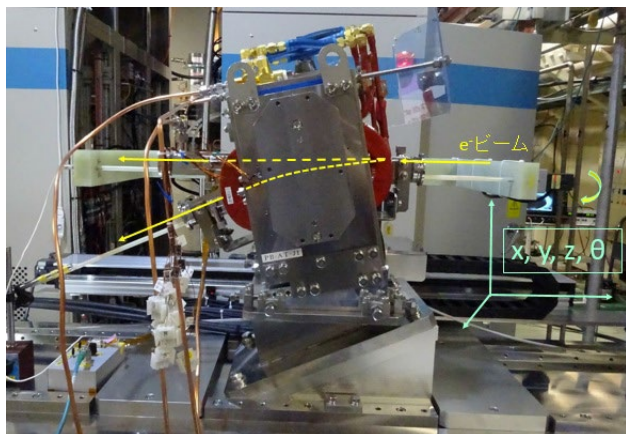


Figure 1: Measurement set up of a pulsed 24 degree bending magnets.

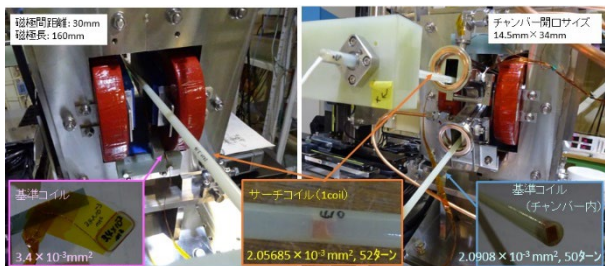


Figure 2: Search coil and reference coils for measurements.

図 3 にチャンバー取り付け無しでサーチコイルを磁石中央部に捜査した際の信号波形とチャンバーを取り付けてチャンバー内部で測定した信号波形を示す。チャンバー形状により、プローブ位置とアライメントが十分にとれないため、磁石中央部での比較ができなかったが、どちらも設定した電流値は運転値 270 A で同じである。チャンバー取り付け時には、電流波形 (CT) のピークがなまり、ビーム通過時のフラット部 (beam timing) は約 0.5%減少していることがわかった。両データを電流と磁場でグラフ化すると、図 4 のようになる。電流の立上りと立下りで磁場の応答が異なり、ステンレス製チャンバーは明らかに磁場に影響を及ぼしている。これはパルス励磁特有の現象である渦電流の影響であると思われる。しかし、図 3 のパルス波形からもわかるように、応答の遅れはビーム通過時のフラット部では大きな影響はないと思われる。また、どちらの波形でも電流が零になっても最初の電流零の磁場の値には戻っていないことがわかった。このような磁場のヒステリシスが次のパルス磁場への程度影響しているのかを調べる方法を検討している。

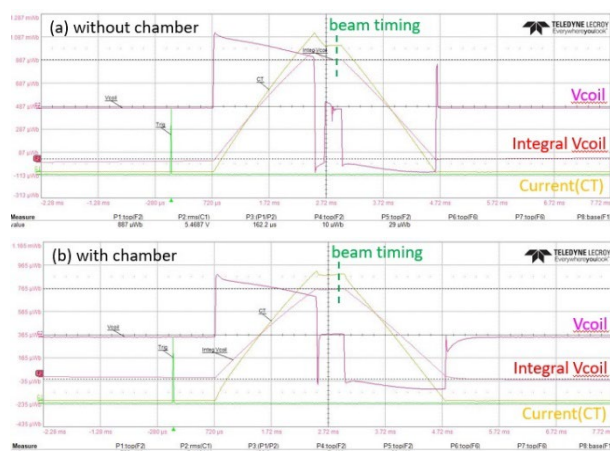


Figure 3: Measured waveforms at (a) without chamber and (b) with chamber.

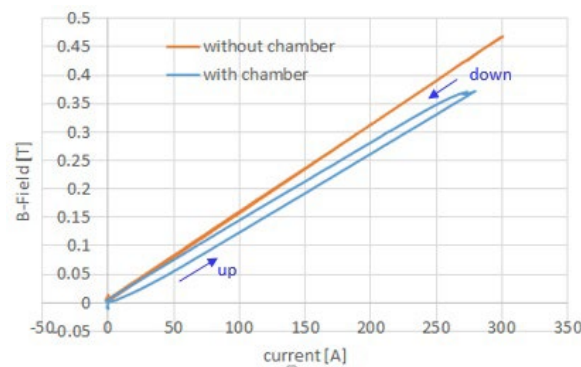


Figure 4: Current vs. magnetic field in the pulsed magnet with and without chamber.

4. 四極電磁石の磁場測定

4.1 磁場分布の精密測定

四極電磁石の磁場勾配分布は、各位置での正確な磁場値とその移動量が測定できれば原理的には高精度で求めることができる。市販品のテスラメータではホール素子 1 個が取り付けられたプローブが一般的であり、このホール素子プローブで位置スキャンを行えば、磁場勾配が求められる。しかし、実際に測定を行うと駆動装置の移動位置精度や振動、プローブの角度と電磁石のアライメントなどの誤差要因の積み重ねで、その精度は数%あることがわかった。そこで、外径 8 mm、内径 7 mm の GFRP のパイプの中に 2 つのサーチコイルを 1.56 mm 間隔に固定したプローブを製作した。サーチコイルは 1.5 mm 厚のセラミック製のボビンにワイヤー 50 μm のホルマル線を 50 ターン巻いた。それぞれの面積は、磁場校正用電磁石を用いて求め、各々の面積はコイル 1 が $726.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 、コイル 2 が $729.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ である。さらに、パルスベンドの測定と同様に、基準コイルを用意して、サーチコイルから引算処理し、磁場の信号出力レベルの S/N 比を上げた。図 5 に CST Studio で計算した磁場勾配と低い直流励磁でテスラメータを用いて測定した結果、製作し

たサーチコイル型のプローブを用いてパルス励磁で測定した結果を示す。測定したパルス四極電磁石は 300 A タイプの電源仕様である。2 つのサーチコイル及び基準コイルを使用することにより、磁場勾配の一様性が計算に近い結果で測定できた。

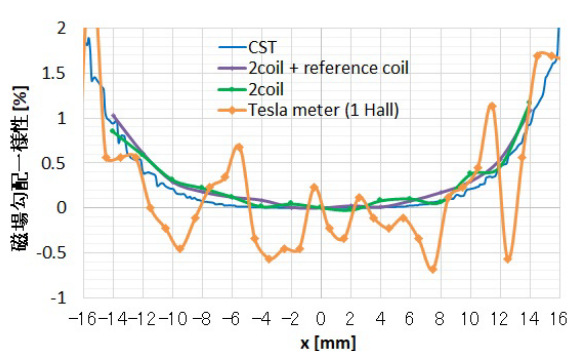


Figure 5: Magnetic field gradient on the x-axis.

4.2 励磁特性

駆動架台に乗せて捜査的に精密に磁場測定を行う方法では、アライメント及び測定データ取得にかなりの時間を必要とする。そこで、場所を選ばずにパルス四極電磁石の励磁特性を即座に簡易的に調べるために、市販のホール素子 (HG-166A-2U) を固定した距離約 20 mm に並べたプローブを製作した。2つのホール素子の出力信号の差を取り、並べた距離で除算すれば磁場勾配が計算できる。また、一定間隔で複数のホール素子を並べたプローブを製作すれば、一度に磁場分布を測定することも可能である。ただし、ホール素子の熱特性も含めた校正が必要である。サーチコイルの場合は、ホール素子のような非線形性はないので、ホール素子2個と基準コイル (15 mm × 100 mm、10 ターン) を併用してパルス励磁して磁場測定を行うことにした。最大電流値が 600 A タイプのパルス電源で測定した際の波形を図 6 に示す。ホール素子の信号 (B+, B-) から求めた磁場勾配と磁場に相当する基準コイルの積分値を 600 A までビームのタイミングの時間において調べたところ、図 7 に示すように、電流値に対してほぼ直線的な特性であった。ビームのタイミングにおける電流と磁場勾配及び直流電源且つテスラメータで測定した磁場勾配 (<300 A) を図 8 に示す。直流で測定したデータは 3 次式でフィットした。500 A あたりから磁場の飽和が出てくる様子がわかる。今回のセットアップでは、四極電磁石の中心付近にプローブをセットしたが、位置精度やホール素子の磁場の絶対値の校正については、今後の課題である。

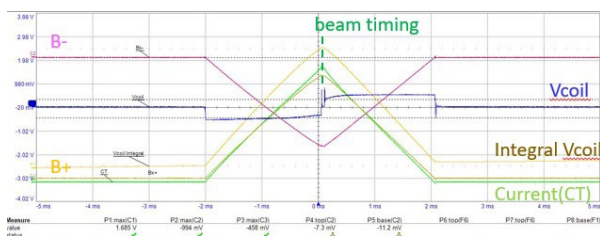


Figure 6: Measured waveforms at a current of 600 A.

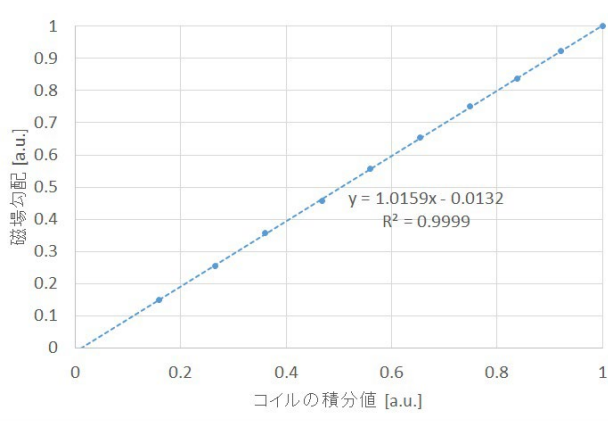


Figure 7: Magnetic field form integral coil voltage vs. magnetic field gradient from 2 hall elements.

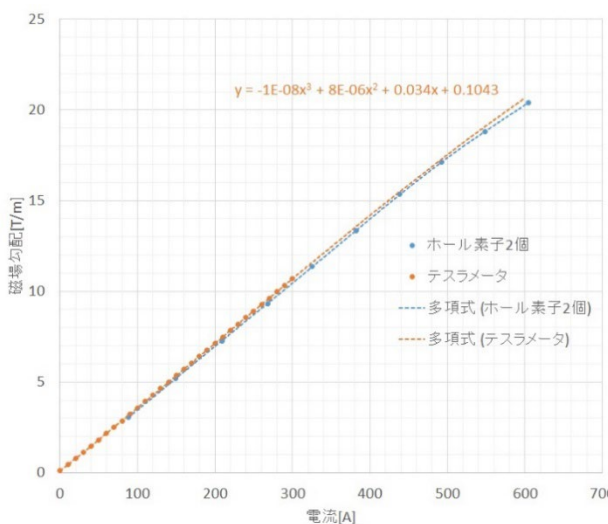


Figure 8: Magnetic field gradient vs. current.

5. まとめ

パルスベンドを運転用の実機パルス電源で励磁して磁場測定を行い、ステンレス製チャンバーを使用するとパルス特有の現象があることがわかった。四極電磁石の磁場勾配を測定するために、磁場検出器を 2 個並べたプローブを製作し、測定の効率化に成功した。今後、パルス毎に異なる電流で励磁するパルス電磁石特有のヒステリシスや磁気余効などを調べることを検討している。

参考文献

- [1] Y. Seimiya *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器におけるパルス電磁石導入の光学的検討”, Proc. of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Japan, August 9 - 12, 2021, pp. 511-513. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP033.pdf
- [2] K. Yokoyama *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器におけるパルス電磁石”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 1029-1033.

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FRPO/FRP044.pdf

- [3] T. Kamitani *et al.*, “KEK 電子陽電子線形加速器 24 度ビーム合流ラインのパルス偏向電磁石の設計”, Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31 - August 3, 2019, pp. 970-974.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPH/FRPH034.pdf
- [4] <https://www.aetjapan.com/cst/>