

直流偏向電磁石用磁場測定プローブの設計

DESIGN OF A MAGNETIC FIELD MEASUREMENT PROBE FOR DC BENDING MAGNETS

横山和枝^{#,A)}, 染谷宏彦^{A)}, 鈴木和彦^{B)}

Kazue Yokoyama^{#,A)}, Hirohiko Someya^{A)}, Kazuhiko Suzuki^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

The KEK Electron/Positron Injector Linac provides the four different quality beams for the four independent rings in the repetition of 50 Hz. To switch between the beam dump line and one of the injection lines at the downstream end of the Linac, the beam transport layout was redesigned and the DC bending magnets were replaced by pulsed magnets for switching to pulse to pulse and installed 3 different DC bending magnets. This paper reports on the design of probes that were fabricated for measuring the magnetic field of two DC bending magnets which produce around 1 T.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器(Linac)は、4つの蓄積リング(PF、PF-AR、SuperKEKB LER/HER)へエネルギーや電荷量等が異なる仕様のビームを供給している。Linacは50 Hzの高周波(RF)源を用いてビームを加速する装置である。近年、従来の直流動作機器をパルス機器に置き換えることで、1台の加速器で様々な仕様のビームをパルス毎に生成できるように改良されてきた[1]。各リングの仕様を満たすように生成されたビームは、Linac 終端部(第3スイッチヤード: SY3)で、各リングへ振り分けられる。パルス毎のビームの安定度をさらに上げるために、ビーム診断の必要性が高まり、昨年、SY3にビーム診断ラインを構築した。ビーム診断ラインへの振り分け用電磁石はパルス電磁石に置き換え[2]、その下流には各々のビームラインへの偏向角に合わせた直流電磁石を新設した。ここでは、新設した直流電磁石の磁場測定用に設計したプローブについて報告する。

2. プローブの設計

磁場測定の方法としては、ホール素子を磁石内で走行させる一般的な手法を用いた。磁場測定装置の設計では、測定する電磁石の特徴に合わせて、プローブの移動時にホール素子が物理的に振動して磁場変動として見えないようにすることや電磁石走行位置とホール素子の感度部分を精度よくアライメントできるようにする工夫などが必要である。今回測定する偏向電磁石は2台で、どちらもコイルは水冷式である。磁極間距離は16 mmで同じであるが、C型とH型で形が異なる。C型は、磁極長1000 mm、200 A励磁で約1.1 T、H型は、磁極長500 mm、200 A励磁で約0.9 Tで磁場測定範囲も異なる仕様となっている。磁場測定用プローブは、それぞれの電磁石の寸法や形状に合わせて設計し、プローブを走行させる駆動系や移動ステージは同じものを使用した。

C型偏向電磁石は、構造上、片側が開口しているため、

測定する電磁石を移動ステージにできるだけ近づければ、比較的短いプローブを使って測定することができる。レイアウトを検討した結果、移動ステージから700 mm程度の位置で、磁石開口部の磁極内をプローブで走行できるため、図1に示すような片持ち支持機構にした。ホール素子を取り付けるプローブ本体は200 mm程度の長さで非磁性材(A2024)を使用し、プローブの支持機構部は駆動架台の接続部との剛性がとれるように配慮した。また、磁場校正磁石でホール素子の特性を調べる等、移動が容易であるように、このプローブ本体は、取り外しが可能な構造にした。ホール素子が、磁石のギャップ16 mm内を走行できるように、磁極のシムも考慮して、プローブの厚みは15 mm以内の寸法になる必要がある。走行による振動が出ないようにプローブ本体の厚みは10 mmにし、その先端にホール素子を取り付けるように設計した。ホール素子のリード線用のミズを設け、ケガキ線を設けることでホール素子の磁場の感度部分と測定位置のアライメントが取れるように考慮した。

一方、H型偏向電磁石は、C型のように片側に開口部はないため、プローブを磁石入口から挿入して出口まで走行しながら磁場を測定する。走行距離は有効長の測定範囲900 mmが必要になる。プローブが長くなると片持ち機構で走行させた場合、プローブの先端が垂れたり、走行による振動が生じたり、撓みが生じることから、図2に示すような両持ちの支持機構にした。ホール素子の固定治具には非磁性のGFRPやCFRP等、軽量で撓みが生じにくい材料が良い。今回は入手しやすく加工性を考慮して、GFRPパイプ(外径φ10 mm、内径φ8 mm)を採用した。有効長の測定範囲が取れるように長さを1740 mmに設計し、そのほぼ中央にホール素子を取り付けるようにした。ホール素子のリード線はパイプの中を通して測定に妨げにならないように配線した。

ホール素子の大きさは 1.5 ± 0.1 mm角で、磁場を感知する部分は素子のほぼ中心部でφ0.3 mmの範囲にある。磁化させた針をホール素子から約10 μm離れた位置でホール素子の出力分布を測定した。測定結果を図3に示す。感度の一様性が良い部分は約0.2 mmの範囲であり、電磁石の測定位置とプローブ素子のアライメントも

[#] kazue.yokoyama@kek.jp

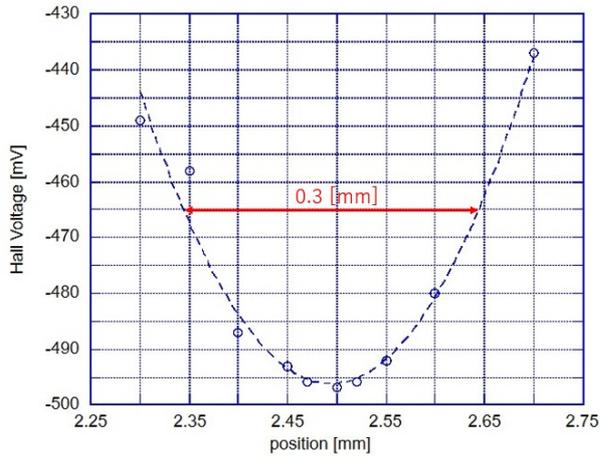


Figure 3: Sensitivity measurement around a center of a hall element.

3. ホール素子の特性

ホール素子には様々なタイプがあるが、今回は、温度によるドリフトが少なく、比較的安価で入手しやすいことから、HG-166A-2U[3]を用いることにした。ホール素子は図 4 のように、プリント基板上に取り付け、定電流 5 mA で動作させる。ホール素子の特性を調べるために、校正用磁石内で NMR (EFM-2000AX) [4]の読み値とホール素子の出力電圧値を比較した。磁場校正用磁石は、永久磁石でできており、中心磁場が 0.385 T で、φ20 mm の領域において一様な磁場分布をしている。磁場中心付近に、NMR とホール素子を置き、ホール素子を定電流 5 mA で動作させると、NMR 値 385.72 mT に対し、ホール素子の出力は 714.10 mV であった。ホール素子を反転させた時の出力は 710.60 mV で、4 mV 程度のオフセットがあることがわかった。このオフセット値は仕様値の範囲内である。この時の環境温度は 28.7°C だった。データベースの特性曲線図では、300 mT で約 600 mV の出力が得られる仕様で、換算係数は約 0.5 mT/mV である。この測定値からは、 $385.72 \text{ mT} / 714.10 \text{ mV} = 0.54 \text{ mT/mV}$ に換算される。また、磁場校正用磁石内に NMR とホール素子を置いて、約 8 時間の出力変動を調べた。このときの環境温度は $26.3 \pm 0.5^\circ\text{C}$ だった。ホール素子の温度によるドリフトは、カタログ値 $0.06\%/^\circ\text{C}$ 程度であることがわかった。これは、 1°C あたり、約 0.2 mT の変動に相当する。

校正電磁石では 1 点での特性しかわからないため、C 型偏向電磁石の磁場測定の際に、電磁石内で磁場が一様な領域に NMR とホール素子を並べて、各々の値を調べた。図 5 にホール素子出力電圧と NMR で測定した磁場値を示す。この時の環境温度は $25.85 \pm 0.1^\circ\text{C}$ だった。オフセットが 5 mV 程度あるが、直線性は非常に良いことがわかった。このグラフから、校正曲線は

$$B [\text{T}] = 0.53182 * (\text{Hall Voltage} [\text{V}]) + 0.005012$$

となり、校正用磁石で調べた換算係数 0.54 mT/mV よりも精度を上げることができた。この式に、磁場校正用磁石で測定した値 714.10 mV を入れると、384.76 mT とな

り、NMR の読み値 385.72 mT とは、約 0.24%異なる。環境温度の違いと磁石内の測定位置の違いによる磁場のずれが要因であると思われる。

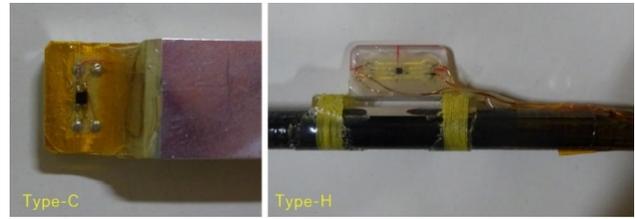


Figure 4: Hall element of the probes.

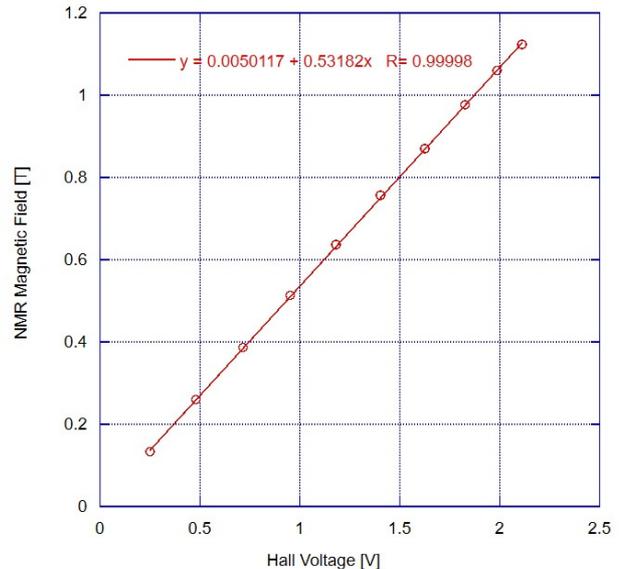


Figure 5: Hall Voltage vs. magnetic field of NMR.

4. まとめ

電磁石形状に合わせて、磁場測定用プローブの設計を行った。磁場測定用のホール素子として HG-166A-2U の特性を調べ、0.2 ~ 1.1 T の領域での出力電圧について磁場校正を行った。この範囲での直流磁場内での直線性は非常に良いことがわかった。今後は、このホール素子のパルス磁場下での特性を調べ、パルス電磁石の磁場測定を試みる予定である。

参考文献

- [1] H. Ego *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器アップグレードによるビーム入射性能向上”, The 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug., 2025, THP011.
- [2] K. Yokoyama *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器におけるビーム診断ライン用パルスベンドについて”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Aug., 2024, pp. 979-982.
- [3] <https://www.akm.com/jp/ja/products/hall-sensor/hall-element/ga-as-low-drift/hg166a2u/>
- [4] http://echo-denshi.co.jp/pdf/nmr/catalogue_EFM-2000AX.pdf