

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

PULSED BENDING MAGNET FOR THE BEAM DIAGNOSTIC LINE AT KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

横山 和枝[#], 染谷 宏彦

Kazue Yokoyama[#], Hirohiko Someya

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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. This paper reports on the design and magnetic field measurements of the pulsed magnets.

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)へビームを供給している。各リングの蓄積電流を一定に保つためには、各リングへの入射を止めることなく、安定したビーム供給を同時に達成する必要がある[1]。Linac のビーム加速装置は 50 Hz の高周波 (RF) 源を使用しており、20 ms 毎にパルスビームを生成することが可能である。それ故、RF パルス 50 Hz 毎に Linac の運転パラメータ(ビーム加速位相、ビーム収束力など)を切り替え、異なる仕様(エネルギー、電荷量など)のビームを生成し、任意のリングへそれぞれの用途に合わせたビームモードで入射を行っている。1 台の加速器で生成された様々なビームは、Linac 終端部(第3スイッチヤード: SY3)で Fig. 1 に示すように 4 本のビームパイプに分岐され、各リングへ振り分けられる。

ビーム調整の際には、SY3 領域にあるビームダンプラインが使用される。このラインは、アクシオン粒子探索実験、陽電子ビームによるチャネリング効果の研究、マイクロ波アンジュレータの開発、SSC 加速器向けカロリメータ検出器の開発、結晶標的の内チャネリング効果による陽電子生成機構の開発研究、などの様々な実験研究にも使われてきた。しかし、このラインは SuperKEKB HER 入射路から分岐しており、切り替えには直流電磁石が使用されているため、利用時間等が制限される。そこで、リアルタイムでのビーム診断やビーム照射実験を同時に行えるように、切り替え用のパルス電磁石を導入したビームラインに改造することになった。ここでは、振り分けラインのパルス偏向電磁石について報告する。

2. パルス偏向電磁石の設計

Linac で加速された PF と PF-AR 用の入射ビームは、Fig. 1 に示したパルス偏向電磁石 (BP_58_1) により、蹴りだされる。SuperKEKB LER/HER のビームは、直進し、下流の直流偏向電磁石 (BM_61_1) を通過後に分岐される。陽電子ビームは、直後の ECS (Energy Compression System) を経て KEKB LER へ輸送され、

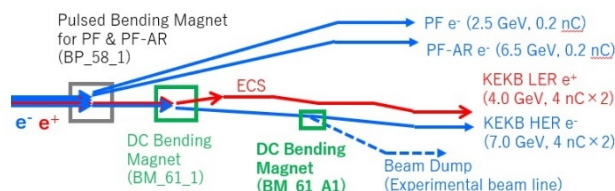


Figure 1: Old layout of the 3rd beam switch yard at the end of the Linac.

HER 入射用の電子ビームは陽電子と反対方向へわずかな偏向を受けて直進する。今回、改造を行った HER 入射用ビームラインのレイアウトを Fig. 2 に示す。BM_61_1 直後に、パルス偏向電磁石を設置することにより、HER 入射ビームの一部をパルスの取り出してビーム診断ラインへ振り分けるようなオプティクスデザインにした。既存の電磁石レイアウトを極力変更せずに済むようにビームオプティクスの検討をした結果、HER 入射ビームライン及びビーム診断ラインの両方に直流偏向電磁石 (BM_61_H1, BM_61_A1) を 1 台ずつ新たに新規製作して設置することにした。ビームライン途中の改造、つまり、ビームラインの上流下流の接続位置が決定している状況下でのレイアウト変更であるため、当然、機器の設置場所や大きさ等には制限が生じる。振り分け用パルス偏向電磁石 (BP_61_11/12) は、BM_61_1 直後に配置され、LER 用のビームラインが接近した場所になる。なるべく上流側で蹴りだした方が偏向角が小さくて済むため、横方向に大きくならないような形状を検討した。

Table 1 にパルス偏向電磁石の仕様を示す。設置場所の周辺機器との干渉を避けるため、電磁石の仕上がり寸法の横寸法は 300 mm 以下にすることにした。そのため、コイ

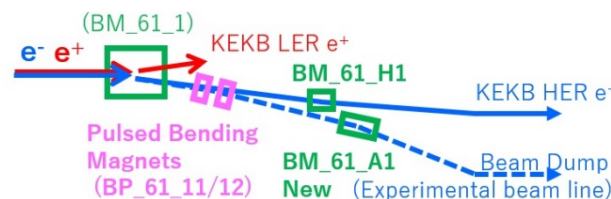


Figure 2: New layout of experimental beam line.

[#] kazue.yokoyama@kek.jp

Table 1: Specification for the Pulsed Bending Magnet

Beam energy	7.0	GeV/c
Deflection angle	-7.57	mrاد
Field strength @ 7 GeV	0.59	T
Magnet pole gap	30	mm
Magnet pole width	45	mm
Magnet pole length	300	mm
Shape of pole shim	H0.6 × W12	mm
Magnet total width	< 300	mm
Coil turn	15	turn
magnetic field uniformity	±0.01 (± 4mm at x region)	%
Cooling type	air	-
Inductance	1.5	mH
PS Max. current	600	A
Repetition	5	Hz

ルを巻くスペース(窓枠)についても、横幅を狭くする必要はあるが、縦へ細長くすると、窓枠内の磁場が強くなるため、コイル導体表面での渦電流生成による発熱が高くなる。コイルの発熱を極力抑えるような窓枠寸法とコイル位置を計算から求めた。また、横寸法が十分長く確保できないため、必然的に磁極幅も狭くなる。磁場の一様性を良くするために、磁極先端部に角型形状のシムを設けた。角型形状のシムの場合、横幅よりも高さのパラメータの方が磁場一様性に効果があるが、幅広のセラミックダクトと磁極の干渉を避けるため、高さはなるべく低くした条件でシム形状を計算から求めた。コイルの発熱及びシム形状の計算には CST[2]を用いた。電磁石の製法としては、ヨークの上下を連結する部分が横幅を取る。そこで、構造的に剛性を確保しつつ極力連結部分が狭くなるように連結ボルトの径を小さくして数を増やすような設計にした。磁極付近の端板には、渦電流生成を抑制するために、スリット加工を施した。磁場強度は磁極間距離とコイルの巻き数、励磁電流で決まるが、コイルの巻き数は、インダクタンスに大きく起因するパラメータである[3]。Linac のパルス四極電磁石で実用化している 600 A パルス電源[4]で励磁できるように、インダクタンスが 1.5 mH 以下になるようにコイルの巻き数を決定した。

3. コイルの発熱

実機電源 600A、5Hz でパルス偏向電磁石の長時間通電を行い、コイルの発熱の様子を調べた。通電時にサーモカメラで撮影した様子を Fig. 3 に示す。また、コイルの温度インターロック付近、磁石内の磁極に近いコイル表面及び端板の表面の温度変化を調べた。Figure 4 に約 6 時間通電した際の温度変化を示す。温度センサーは白金抵抗体を用いた。コイル表面温度は通電開始時は 27.7 度、6 時間後は温度上昇が緩やかになっており、41.9 度に到達していた。このデータから次式の二重指数

関数でフィッティングして到達温度を見積もった。
 $\Delta T(t) = m1[1 - \exp(-m2 \cdot t)] + m3[1 - \exp(-m4 \cdot t)]$
 $m1, m2, m3, m4$ は任意の係数で t は時間を示す。この時、 $m1+m3$ が到達予想温度に相当する。Figure 5 にコイルの温度インターロック付近の温度に関するフィッティング結果を示す。上昇温度は 15.84 度と推測され、実用上



Figure 3: Heat distribution image by an infrared thermography camera.

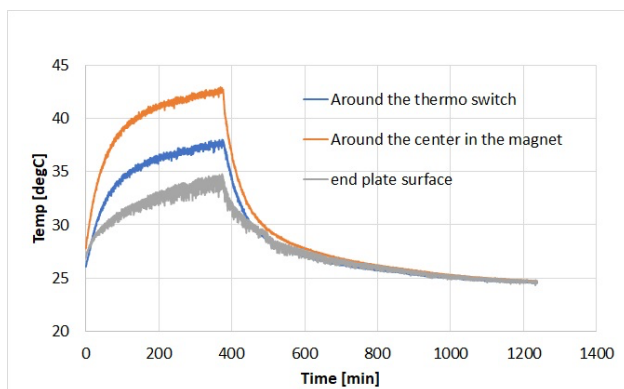


Figure 4: History of temperature on the magnets.

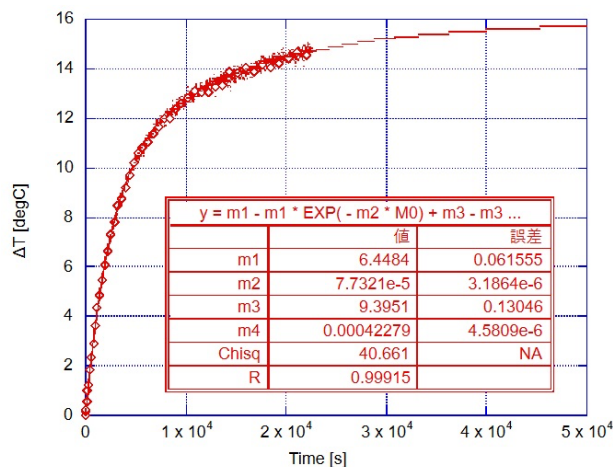


Figure 5: Estimated temperature rise by fitting function around the temperature interlock switch.

は問題ないと思われる。

4. 磁場測定

4.1 有効長の測定

パルス電源で励磁してパルス偏向電磁石の磁場測定を行った。Figure 6 に測定のセットアップを示す。磁場検出器には市販品ガウスメータの3軸プローブを用いた[5]。プローブからのアナログ信号は、オシロスコープに入力され、ビーム輸送に使用されるパルス区間に相当するタイミングゲートの出力値がパソコンを経由して磁場のデータとして収集される[4]。電源の安定度は $\pm 0.1\%$ 、ガウスメータの測定性能(システム測定ノイズ)は $0.5\ \mu\text{T}$ である。ビーム軸に対して水平方向の磁場成分を B_x 、垂直方向の磁場を B_y 、ビーム軸方向の磁場を B_z とする。プローブは片持ち支持機構であるが、角度の微調整機構を設けてある。有効長 (L_{eff}) を測定するために、ビーム軸進行方向 (Z) に対する B_y 磁場分布を測定した。 $Z=0$ が磁石中心位置を示す。今回使用した磁場測定用駆動装置の Z 方向可動域が電磁石長に対して十分ではなかったため、電磁石の片側からプローブを走行し、電磁石の半分の測定領域から有効長を求めることを試みた。電磁石の片側からの測定から有効長を求める際には、電磁石内の位置決め精度が有効長の測定精度に影響する。アライメントにはレーザートラッカー及びトランシットを用いて、端板とプローブの位置決めを精度 $0.1\ \text{mm}$ で合わせ、 Z 方向の測定ステップは $1\ \text{mm}$ で測定した。駆動装置の移動分解能は $5\ \mu\text{m}/\text{pulse}$ である。プローブ位置を端板から $165\ \text{mm}$ 移動させた位置が磁石中心に相当する。Figure 7 に CST の計算結果と測定結果を示す。

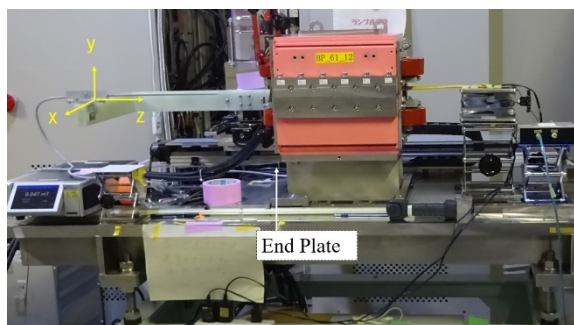


Figure 6: Setup for magnetic field measurement.

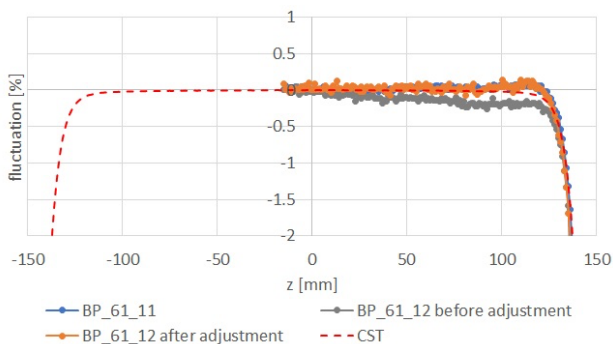


Figure 7: Fluctuation of B_y on z -axis.

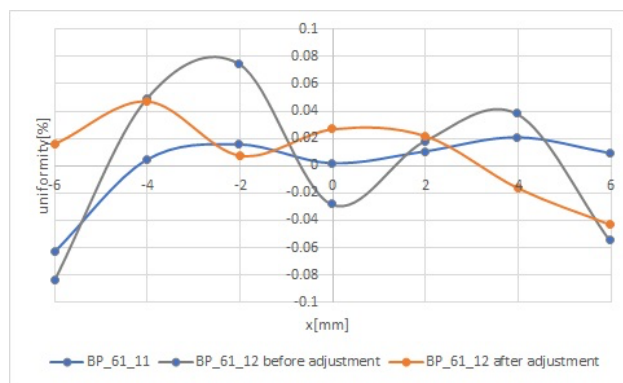


Figure 8: Uniformity of integral BL on x -axis.

BP_61_12 は磁石内部で磁場の一様性が悪いことが判明した。この磁場の変化量は 0.5% 程度あり、磁極間距離 $150\ \mu\text{m}$ に相当する。磁極間距離を計測したところ、電磁石の入口出口で $100\ \mu\text{m}$ 程度の違いがみられた。ヨーク上下の締め付けトルク量を調整して、磁極間距離を均等にしたら、Fig. 7 に示すように改善が見られた。また、Fig. 8 に示すように、 x 方向に対する磁場の一様性 (B_y 成分の Z 軸方向積分値、 $\int B_y dz$) も改善された。ヨーク上下の連結ボルトの径を小さくして数を増やしたため、磁極間距離を意識したトルク管理が重要になったと思われる。

Table 2 に測定結果から求めた電磁石の各パラメータを示す。 B_0 は磁石内の中心磁場で、測定時の励磁電流は $200\ \text{A}$ である。各パラメータは CST の計算結果に近い値が得られている。また、BP_61_12 については、トルク

Table 2: Results of Measurements

	BP_61_11	BP_61_12	BP_61_12	CST
		before adjustment	after adjustment	
B_0 [T]	0.2528	0.2517	0.2521	0.250474
L_{eff} [mm]	336.50	337.57	337.71	338.8701
$B_0 L_{\text{eff}}$ [$\text{T}\cdot\text{m}$]	0.0851	0.0850	0.0851	0.084878

調整前と調整後の測定値を比較すると、一様性は改善されているが中心磁場値や有効長値については顕著な違いはみられず、BP_61_11 と比較した個体差の方が 0.3% 程の違いがあることがわかった。

4.2 ブスバーによる弱磁場の測定

コイル接続部のブスバーは横方向への張り出しを抑えるために、Fig. 3 の写真のように片側で上下に渡る構造にした。ブスバーによるビーム軸 Z 方向の磁場成分 B_z を測定した。磁石内部の残留磁場は、 B_x 、 B_y 、 B_z それぞれ $1.3169\ \text{mT}$ 、 $0.0743\ \text{mT}$ 、 $0.0120\ \text{mT}$ であった。磁石中心部では B_z はほぼゼロに近い値である。プローブの角度を調整して磁石中央部でプローブからの電圧がゼロになることを確認し、 Z 方向の磁場分布を測定した。Figure 9 に Y 軸方向 $\pm 0.2\ \text{mm}$ のオフセット位置での Z 軸磁場分布について測定した結果と CST の計算値を示

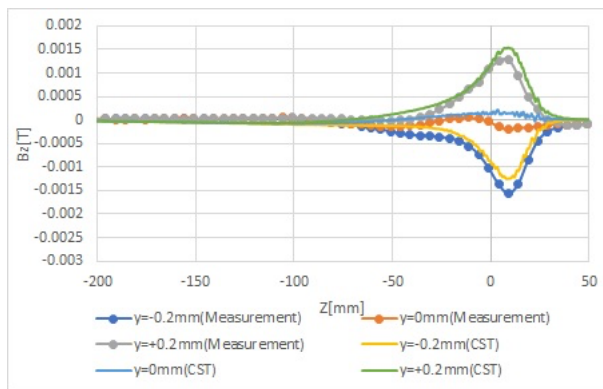


Figure 9: Bz on z-axis.

す。Z=0 が磁石入り口側の端版位置を示す。この測定結果から、計算にほぼ近い値の磁場成分 B_z が生成されていることがわかる。ビーム中心軌道 $y=0$ の B_z 成分は、残留磁場の 10 倍程度であると推測される。

4.3 励磁特性

パルス電流に対する磁場応答波形の見え方は、ホール素子や信号増幅器の周波数特性に依存する。Figure 10 に 600A、5Hz で励磁した際のピックアップコイルからの電圧信号(CH1)、電流モニターCT 出力(CH3)、2 台の異なるガウスメータによるプローブ出力(CH2[6]、CH4[5])を示す。パルス電源の出力波形は、立上り、立下り時間約 1.8 ms、フラットトップ約 0.1 ms である。F1 はピックアップコイル (15 mm × 100 mm、10 ターン) の積分波形で、パルス電流波形と同形に見えるが、ピックアップコイル信号を積分して磁場を計測するためには、積分によるオフセットノイズ分を正確に除去する必要がある。一方、ホール素子を用いたプローブを磁場計測に使用すれば、パルス波形を直接観測できるメリットがあるが、今回測定に使用したプローブでは、訛ったパルス波形に見える。また、励磁カーブは、Fig. 11 に示すように、明らかに励磁特性が歪んで見える。600 A 付近においては、磁場の飽和傾向が見えているが、ピックアップコイルの積分値とホール素子の磁場値とは異なっていることがわかる。このようにホール素子電圧のアナログ出力信号の出力仕様は、各メーカーによって異なっているため、本実機パルス電源波形で励磁した際の磁場波形を観測するのに適した独自のホール素子と電圧出力回路の設計を検討している。ビーム輸送の際には、電磁石に設定する励磁電流値に対する磁場値をより正確に特定する

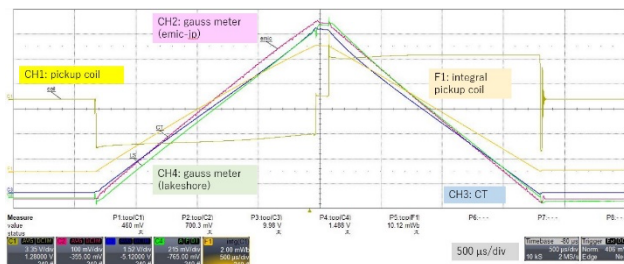


Figure 10: Pulsed magnetic field and current waveforms.

励磁曲線が必要である。また、任意波形のパルス励磁でビームモード毎に電流値が異なるが、1パルス毎に消磁を行っていないため、設定電流ごとにヒステリシスの影響が生じている可能性がある。複雑な運転パターンによるパルス電磁石の励磁特性について、より詳細に調べることが今後の課題である。

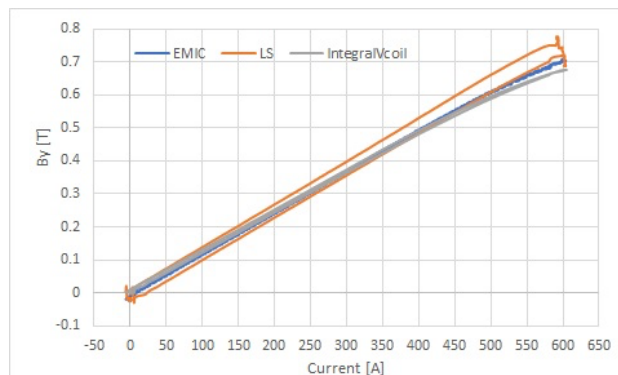


Figure 11: Excitation characteristics of magnetic field vs. current.

5. まとめ

SY3 ビームラインレイアウトの変更に伴い、空冷式パルス偏向電磁石を製作した。設置場所に見合う形状で、コイルの発熱を抑えた設計を行った。実機パルス電源で電磁石を長時間通電して温度上昇試験を行い、実用上、問題がないことを確認した。磁場測定の結果から、CSTの計算結果に近い値が得られており、設計仕様を満たしたパルス偏向電磁石であることがわかった。

参考文献

- [1] H. Ego *et al.*, “SuperKEKB 入射性能向上への KEK 電子陽電子入射器アップグレード”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, THP023.
- [2] <https://www.aetjapan.com/cst/>
- [3] Practical Definitions & Formulae for Normal Conducting Magnets (EDMS1162401_Internal_note2011_18 p.9).
- [4] K. Yokoyama *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器におけるパルス電磁石の磁場測定”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, August 29 - September 1, 2023, pp. 720-723.
- [5] <https://www.lakeshore.com/>
- [6] <https://www.emic-jp.com/>