

J-PARC 3-50BT ビーム輸送系磁石の仮復旧に関するビーム軌道の検討 BEAM OPTICS FOR THE MAGNET RECOVERY IN 3-50BT BEAM TRANSFER LINE

富澤正人^{*A)}、五十嵐進^{A)}、佐藤洋一^{A)}、白形政司^{A)}、高野淳平^{A)}、武藤亮太郎^{A)}

Masahito Tomizawa^{*A)}, Susumu Igarashi^{A)}, Yoichi Sato^{A)}, Masashi Shirakata^{A)}, Junpei Takano^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization(KEK)/J-PARC Center

Abstract

Coil layers of the bending magnet (B15D) in the transport line from Rapid cycle synchrotron (RCS) to Main Ring (MR) of J-PARC were partially shorted in the slow-extracted beam operation (RUN81). The magnetic field reduction rate by the partial layers shorting was estimated from the comparison between the measured BPM data and the calculation by SAD code. The shorted coil layers were bypassed to recover the beam operation temporarily. The effect on the beam by the skew field components generated by the bypass was investigated by the tracking simulation using SAD and POISSON code. A solution to correct the orbit shift generated after the 2nd layer shorting was derived, which used two steering magnets.

1. はじめに

J-PARC main ring (MR) からの 30 GeV 陽子の遅い取り出し運転 (RUN81) は 2019 年 2 月初頭から開始された。5.2 秒サイクル、フラットトップ長 2.61 秒で 50kW を超えるビームをハドロン実験施設に供給していた。この利用運転中の 3 月 15 日に、RCS から MR へのビーム輸送系 (3-50BT) のビーム軌道シフトが観測された。BPM データから、3-50BT 上流側の偏向電磁石 B15D (Fig. 1:) のコイル層間短絡による磁場減少が原因と推測された。3 月 18 日の 0 時過ぎに大幅な軌道のシフトが発生し運転は停止された。停止直前の BPM で測定された軌道シフトから、B15D 磁場の減少分を評価した。

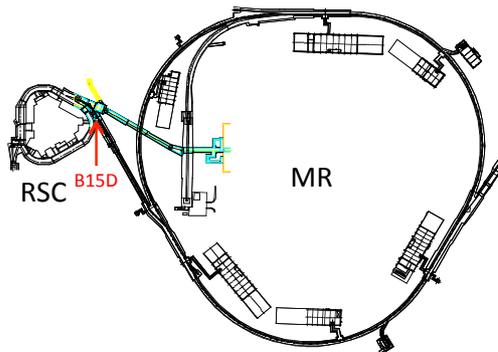


Figure 1: B15D location.

運転停止後の現場調査にて、B15D の下コイルに部分的層間短絡が発生していると特定された [1, 2]。上下コイルはそれぞれ 5 段構造となっている。層間短絡が発生した部分の電流経路をバイパスし、下側コイルは残り 4 段に電流を流し、電流を 1.111 倍することで磁場を回復し運転を再開する目標が立てられた。しかしこの場合、5 段の上側コイルと 4 段の下側コイルの直列通電により、ヨークが非対称に励磁されるため磁場にスキュー成分が発生する。運転再開

に先立って、このスキュー成分によるビームへの影響評価を行った。その評価に基づいて、4 月 23 日に 50 kW ビームの運転再開を果たした。しかし、4 月 23 日に、コイル間にセットされたモニター電圧の変動とビーム軌道のシフトが観測された。バイパスしたコイルに隣接するコイルの新たな相関短絡が発生したものと推測された。コイルのさらなるダメージを懸念して、通電電流をバイパス時の値の 0.1 % 減にセットすることとした。この磁場減少による軌道のシフトを、B15D の上流、下流のステアリング 2 台により補正する解を SAD コード [3] により求めた。この結果をもとにビーム軌道調整を行い再度再開を果たした。しかしその後もコイルの短絡は進行し、4 月 24 日未明に運転は中止された。以上述べた磁場減少分の評価、スキュー成分によるビームへの影響評価、軌道補正計算について報告する。

2. コイル層間短絡による磁場減少分の見積もり

3 月 18 日のビーム運転停止直前に、B15D のコイル相関短絡により磁場が減少し水平方向の軌道が大きくシフトしビームロスも大幅に増えた。Figure 2 の青と緑の点は、3-50BT に置かれた BPM により測定された水平方向の位置のシフト量である。相関短絡が起こる前の位置のシフト分を差し引いている。BPM の番号 3 が B15D の下流で最も近い位置に置かれたものである。青の点の測定は緑の点より 1 つ前のショットであり明らかに磁場は後のショットのほうが増大している。軌道計算は SAD により行った。B15D の前で軌道はシフトしていないという仮定のもとに軌道を計算を行った。B15D の磁場を 0.25% だけ減らした軌道が赤で示されている。この計算結果は、B15D 直下流のいくつかの BPM の測定値を再現することから、ビーム運転停止直前の相関短絡による磁場減少は約 0.25% であると評価した。

3. 非対称励磁によるビームへの影響評価

3 月 18 日の運転停止後の現場調査にて、B15D の下コイルの下側に層間短絡が発生していると特定さ

* masahito.tomizawa@kek.jp

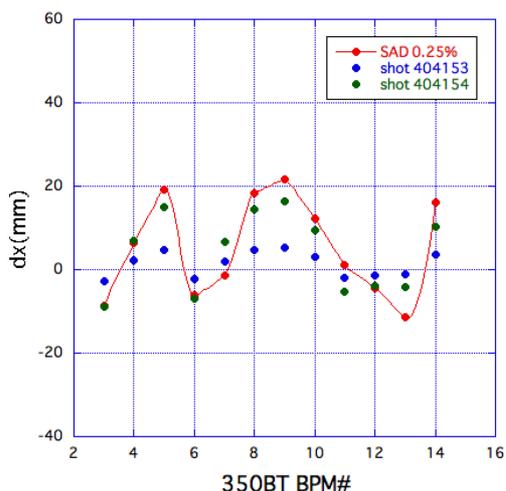


Figure 2: Horizontal beam positions measured by BPMs and calculated by SAD.

れた。応急処置をして運転を再開するために、層間短絡が発生した部分の電流経路をバイパスする作業を行った。上下コイルはそれぞれ5段構造となっている。バイパスにより下側コイルは残り4段のみに上コイルと同じ電流を流すことになる。従って磁場を同じにするためには電流を1.111倍する必要がある。しかしこの場合ヨークが非対称に励磁され、磁場にスキュー成分が発生する。運転再開に先立って、このスキュー成分の発生によるビームへの影響評価を行った。

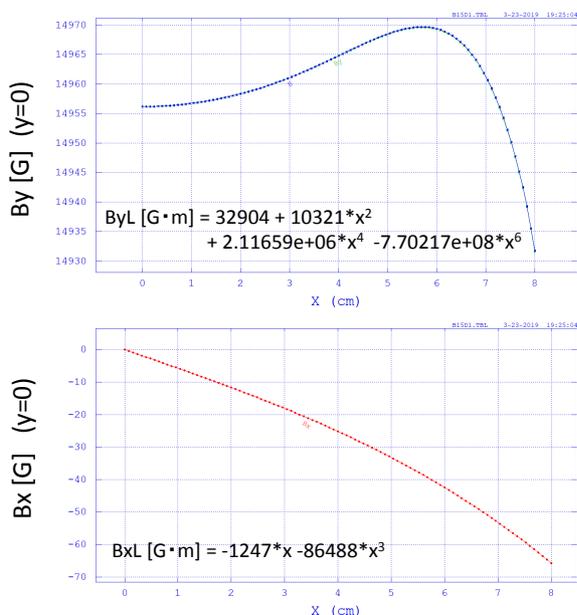


Figure 3: Field distributions at $y=0$ to obtain normal and skew multipole components.

Figure 3 は POISSON コード [4] で計算された median plane ($y=0$) での磁場分布である。上図の $B_y(x)$ 分布を偶数次数でフィットした。このフィットした係数から normal 成分の multipole 係数が求まる。下

図は $B_x(x)$ 分布のプロットである。この場合は奇数次でフィットした係数から skew 成分の係数が求まる。求められた multipole の normal 成分、skew 成分を B15D の両端に thin lens 近似で取り入れ、SAD で tracking 計算を行った (Fig. 4)。初期条件として、水平、垂直方向の rms エミッタンスはプロフィールモニターで測定された値に近い $1.47\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (2.5σ cut) とした。運動量の広がり全幅で 0.4% である。multipole がない場合の tracking による水平、垂直方向の rms エミッタンスは、それぞれ 1.480, 1.472 であったのに対し (Fig. 4 上図)、normal と skew 成分を入れた場合は、それぞれ 1.495, 1.495 と 2% 程度増加した (Fig. 4 下図)。この増加はほとんど skew 成分の寄与による。この増加分ならば遅い取り出し運転は可能であるという判断をし、運転を再開することにした。相関短絡前と運転再開後のプロフィールの測定から求めたエミッタンス増加比はそれぞれ、水平方向で 4% アップ、垂直方向でほぼゼロであった。

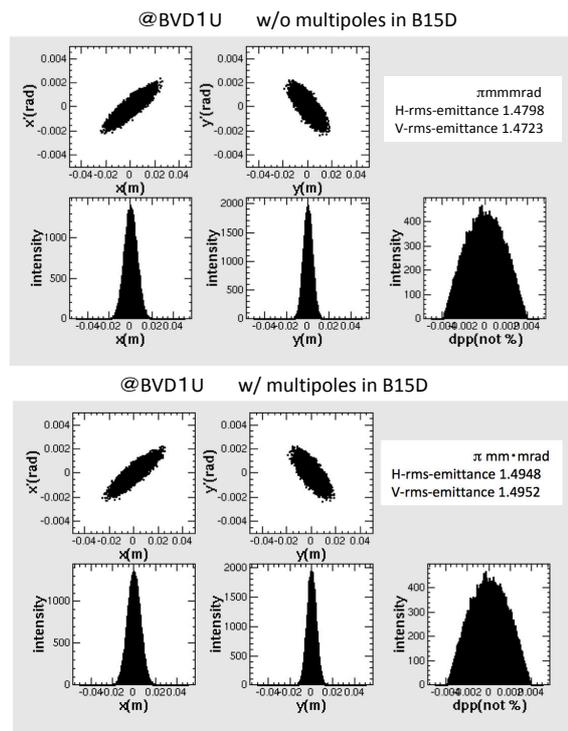


Figure 4: Beam distributions at BVD1U (downstream of B15D) by tracking simulations w/o and w/ the multipole components.

4. 再度の軌道シフト発生と補正

運転再開後の 4 月 23 日に、コイル間にセットされたモニター電圧とビーム軌道の変動が観測された。バイパスしたコイルに隣接するコイルの相関短絡が発生したものと考えられた。コイルのさらなるダメージを懸念して、通電電流をバイパス時の値の 0.1% 減にセットすることとした。この磁場減少による軌道のシフトを示したのが、Fig. 5 である。上図は SAD による計算結果で下図は BPM による測定値

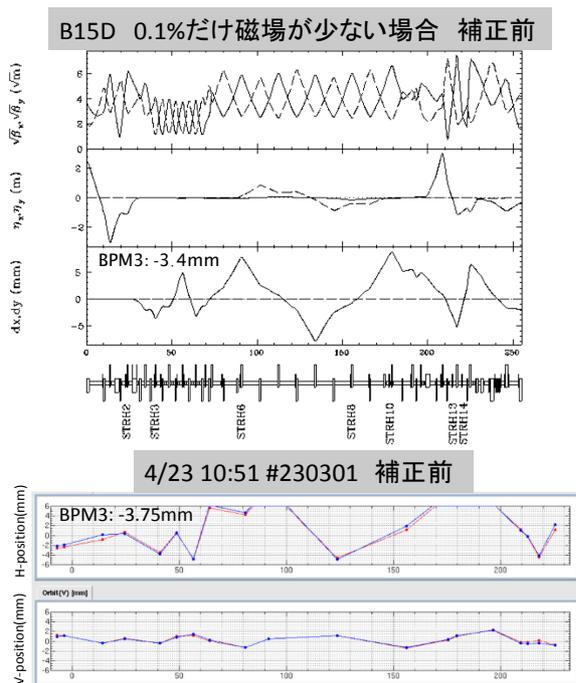


Figure 5: Beam orbit shifts by SAD (upper) and BPMs (lower) for the B-field reduced by 0.1% (before correction).

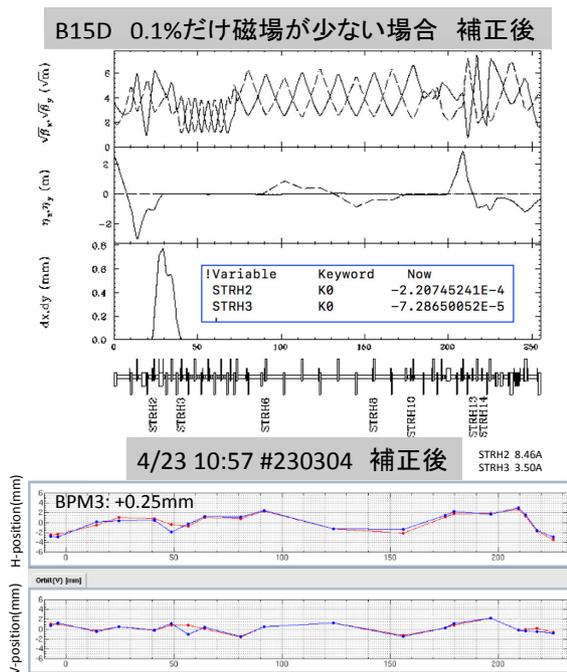


Figure 6: Beam orbit shifts by SAD (upper) and BPMs (lower) for the B-field reduced by 0.1% (after correction).

である。BPM3で軌道のシフト量は、SADでは-3.4 mm、測定では-3.75 mmとほぼ一致している。0.1%の磁場減少でも、下流で大きな軌道シフトを発生しており軌道補正が必要であった。SADによりこのシフトをB15Dの上流と下流に置かれたステアリングSTRH2とSTRH3で補正する解を求めた (Fig. 6 上図)。計算で求めた補正量を出発点として、STRH2とSTRH3の強さを調整することにより磁場を減らす前の軌道に戻すことができた (Fig. 6 下図)。ただし、Fig. 7でわかるように、B15Dの周辺では軌道のシフトがあるが、ビームダクトのクリアランスは大きく問題は生じない。この軌道補正はうまく機能し利用運転を再開したが、その後もコイルの短絡は進行し4月24日未明に運転はついに中止された。

5. まとめ

J-PARCメインリングの遅い取り出しビームの利用運転 (RUN81) 中に、RCSからMRへのビーム輸送系 (3-50BT) の上流側の偏向電磁石 (B15D) のコイルの層間短絡による磁場減少によりビーム軌道のシフトが観測された。BPMにより測定された軌道シフトとSADコードによる計算との比較により磁場減少分は0.25%と評価した。その後、層間短絡が発生した部分の電流経路をバイパスする作業を行い、ヨークが非対称に励磁されることによるskew成分のビームへの影響をSADによるtrackingにより評価した。その評価結果をもとに50 kW遅い取り出し運転が再開された。しかし、運転中層間短絡が進行し、コイルのダメージの低減のために電流値を0.1%減することになった。この磁場減少による軌道のシフトを、

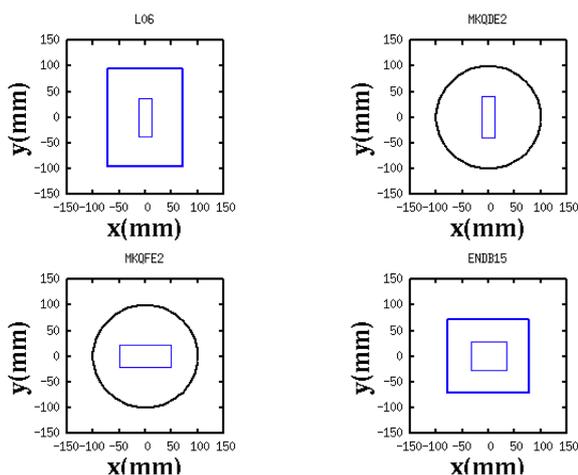


Figure 7: Beams with 54 π mm-mrad and beam ducts.

B15Dの上流、下流のステアリング2台により補正する解をSADコードにより求めた。この結果をもとにビーム軌道調整を行い再度再開を果たした。しかしその後もコイルの短絡は進行し4月24日未明に運転は中止された。

参考文献

- [1] M. Shirakata *et al.*, "J-PARC 3-50BT B15D 電磁石の層間短絡", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul.31-Aug.3, 2019, THOH06.
- [2] J. Takano *et al.*, "J-PARC 3-50BT B15D 電磁石におけるレイヤーショートの原因と推察", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of

PASJ2019 WEPI044

Japan, Kyoto, Japan, Jul.31-Aug.3, 2019, WEPH037.

[3] SAD homepage; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>

[4] [https://laacg.lanl.gov/laacg/services/
download_sf.phtml](https://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml)