

J-PARC MR 8GeV 運転時における主電磁石への磁場ヒステリシス影響

EFFECT OF MAGNETIC HYSTERESIS ON THE MAIN MAGNET WHEN OPERATED AT 8 GeV IN J-PARC MR

三浦一喜^{#, A)}, 下川哲司^{A)}, 森田裕一^{A)}, 吉井正人^{A)}, 吉成 柁^{B)}, 富澤正人^{A)}, 武藤亮太郎^{A)}
Kazuki Miura^{#, A)}, Tetsushi Shimogawa^{A)}, Yuichi Morita^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Masaki Yoshinari^{B)},
Masahito Tomizawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}
^{A)} KEK, ^{B)} NAT Corporation

Abstract

J-PARC main ring (MR) is a circular accelerator that extracts beams by switching between two operation modes, fast extraction (FX) operation and slow extraction (SX) operation. Extraction energy of both operation modes is 30 GeV. However, the ongoing COMET project requires beam extraction at 8 GeV for SX operation. The 8 GeV beam study was conducted from January to February 2023, then, the 8 GeV beam was successfully extracted to the Hadron Experimental Facility. On the other hand, it was observed that the beam conditions were not reproducible before and after the short maintenance that were carried out during the beam study, which involved equipment shutdown. In order to investigate the cause of this event, the parameters and other settings of each device were checked, but it was confirmed that they were the same as before maintenance. The influence of the magnetic field hysteresis of the main magnet was pointed out, and the beam state before maintenance was reproduced when the 8 GeV pattern excitation was performed after the 30 GeV pattern excitation in the main magnet as before the maintenance. The results of measuring the magnetic field of the main magnet to observe the hysteresis effect on the magnetic field is reported.

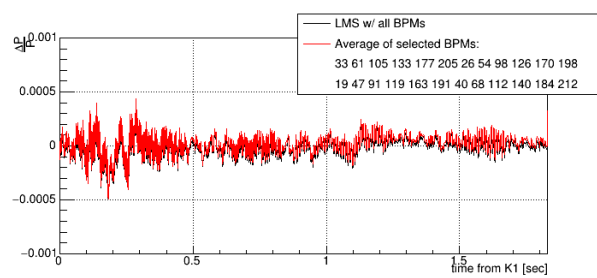
1. はじめに

J-PARC 主リング(MR)は、速い取り出し(FX)運転および遅い取り出し(SX)運転の2種類の運転モードを切り替えてビームの取り出しを行う円形加速器であり、FX 運転、SX 運転いずれも加速エネルギーを Flat Bottom の3 GeVから Flat Top の30 GeVまで加速して取り出しを行うパターン運転を通常行っているが、現在進められているCOMET計画ではSX運転でFlat Topが8 GeVでのビーム取り出しが求められている[1]。2023年1月~2月に行われた8 GeVビーム試験では、無事に8 GeVのビームがハドロン実験施設に取り出されたが、そのビーム試験中に行われた半日程度の機器停止を伴うメンテナンスの前後でビームの状態が再現しない事象が確認された。この事象に対して各機器のパラメーター等の設定確認が行われたものの、メンテナンス前の状態と同設定であることが確認されたことから、電磁石の磁場ヒステリシスの影響が懸念され、メンテナンス前と同じく電磁石で30 GeVパターンで10 cycle 通電後に8 GeVパターン通電を行ったところ、メンテナンス前のビーム状態を再現し、8 GeVビーム試験は継続された。

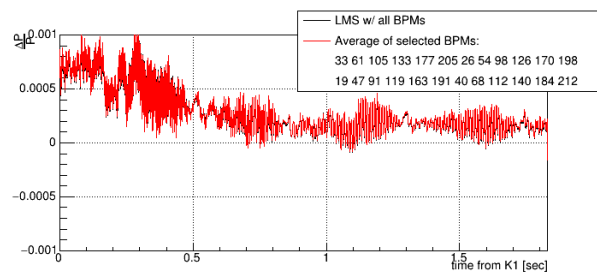
このことから、電磁石のヒステリシス影響によって磁場が変わることが想定されたため、ビーム試験終了後に電磁石の磁場測定を行い、運転パターン等の条件による磁場へのヒステリシス影響を確認した。本報告ではその確認結果および次回の8 GeVビーム試験に向けた検討結果を紹介する。

2. 8 GeVビーム試験での再現性不良

2023年1月~2月に行われた8 GeVビーム試験では、無事に8 GeVのビームがハドロン実験施設に取り出されたが、そのビーム試験中に行われた半日程度の機器停止を伴うメンテナンスの前後でビームの状態が再現しない事象が確認された。K1 入射タイミングからのメンテナンス前後のビーム運動量の違いをFig. 1に示す。



(a) Before maintenance



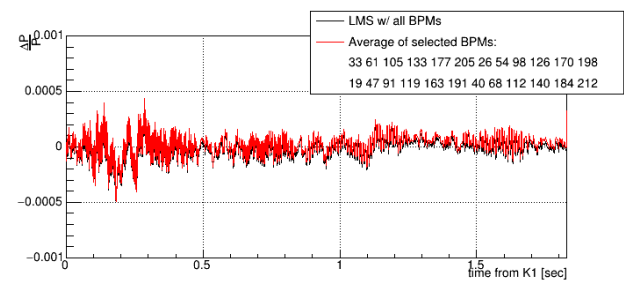
(b) After maintenance

Figure 1: Fractional momentum before and after the scheduled maintenance.

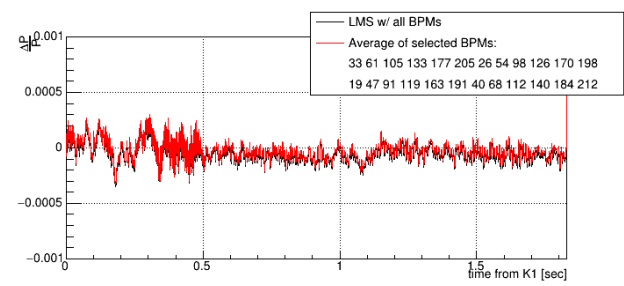
[#] kazuki.miura@kek.jp

メンテナンスの前後でビーム状態が再現できていないことが分かる。このずれは Flat bottom 運動量で 0.07% の違いであり、偏向電磁石 (BM) の磁場に換算すると 0.1 mT の違いとなる。

この再現性不良の原因調査として、電磁石電源の出力電流設定値を始めとした各機器のパラメーター確認などが行われたが、いずれのパラメーターもメンテナンス前と同様であることが確認された。これに対し再現性不良の原因として新たに電磁石のヒステリシス影響が懸念されたため、確認のために Flat top が 30 GeV パターンを 10 cycle 運転した後に Flat top が 8 GeV パターンに戻すことを試験した。この試験結果を Fig. 2 に示す。



(a) Before maintenance



(b) After maintenance (30 GeV→8 GeV)

Figure 2: Fractional momentum before and after the scheduled maintenance(30 GeV→8 GeV).

先に示した Fig. 1 と比較して、メンテナンス前の状態をよく再現している。このことから、このビーム再現性不良の原因は 8 GeV パターン後に電磁石電源を停止し、8 GeV パターンで電源を立ち上げたことによる電磁石のヒステリシス影響であったことが分かる。これまでも MR では 2018 年 1 月、2018 年 2 月、2021 年 5 月の 3 回に渡り 8 GeV ビーム試験は行われてきたが、いずれも直前まで 30 GeV パターンで運転していた状態からメンテナンスを挟まずに 8 GeV パターン運転に移行しており、今回のように 8 GeV パターン→半日メンテナンス(電源停止)→8 GeV パターン立ち上げという流れはなかったことから、今回初めてこの事象が確認されたことになる。この事象の発生条件等を確認するために行った各種測定結果を次項以降にまとめる。

3. 磁場測定によるヒステリシス影響確認

8 GeV ビーム試験終了後、先に示したヒステリシス影響を磁場の面から確認するために磁場測定を実施した。測定方法としては電磁石内に磁場測定用プローブを挿入、固定した状態(測定系を変化させない状態)で、パターンの変更や電源停止、立ち上げを行う形式で行った。測定対象の電磁石は BM116 および BM117 の 2 台とし、各条件でパターン Flat Bottom の DC 磁場 100 点の磁場データを測定、平均化することで測定エラー(標準誤差)を測定に用いたガウスメーターの分解能である 0.01 mT 未満に抑えている。測定結果を Table 1 に示す。

Table 1: Average Magnetic Field Under Each Pattern Condition

Pattern condition	Average magnetic field at flat bottom (DC)	
	BM116	BM117
30 GeV → PS OFF → 30 GeV	133.99 mT	134.61 mT
30 GeV → PS OFF → 8 GeV	134.01 mT	134.62 mT
8 GeV → PS OFF → 8 GeV	133.88 mT	134.45 mT

今回、8 GeV ビーム試験で再現性不良が問題となった条件である 8 GeV パターン→電源停止→8 GeV パターンの場合(赤字部分)でのみ DC 磁場が有意(BM116:-0.13 mT, BM117:-0.17 mT)に下がっている。また、下がり幅としても前項で示した「磁場で-0.1 mT のずれ(FB 運動量で-0.07%)」に近い値であり、運転パターン条件による磁場ヒステリシス影響を観測できたものと考えられる。この原因については、30 GeV を越えたあたりから飽和現象が起こる J-PARC MR 電磁石[2]に対して、8 GeV パターン時の磁場が小さいことに起因していると推測される。

4. 8 GeV ビーム試験時の初期条件検討

4.1 8 GeV パターン→8 GeV パターン

ヒステリシス影響を磁場で確認できたことから、磁場で確認しながら、次回 8 GeV 運転時の初期条件を検討することとした。先の磁場測定で再現性が確認された 30 GeV パターン→電源停止→8 GeV パターンの場合、30 GeV パターンと 8 GeV パターン運転時に全部で 24 台ある電磁石電源の制御パラメーターを変更する必要があり、立ち上げ時の時間ロスとなる。また、8 GeV パターン運転中に機器故障などが発生した場合も、再度 30 GeV パターンから立ち上げおよび電源制御パラメーター変更が必要となることから、初期の立ち上げ手順、故障復旧時の時間短縮を目的として、運転初期条件を 8 GeV パターン→8 GeV パターンにできないか検討した。各パターン条件での磁場再現性を四極電磁石(QFN117)で時系列順に測定した結果を Table 2 に示す。なお、いずれのパターンも 10 Cycle 以上の運転を行っており、測定平均値はパターン運転後の Flat Bottom DC 通電状態でやっている。

Table 2: Magnetic Field Measurement for Investigation of Initial Conditions (QFN117)

Pattern condition	Average magnetic field at flat bottom (DC)
30 GeV → PS OFF → 8 GeV	110.27 mT
8 GeV → PS OFF → 8 GeV	110.09 mT
8 GeV → PS OFF → 8 GeV	110.04 mT
8 GeV → PS OFF → 8 GeV	110.00 mT
8 GeV → PS OFF → 8 GeV	109.99 mT
30 GeV → PS OFF → 8 GeV	110.24 mT
30 GeV → PS OFF → 8 GeV	110.25 mT

電源停止状態から 8 GeV パターン→電源停止→8 GeV パターンを繰り返して再現性を確認した結果 (Table 2 の赤字部分)、繰り返す度に DC 磁場が徐々に下がっていき、繰り返し 3 回目から 4 回目程度で下げ止まる結果が確認された。この時の値は 30 GeV→8 GeV の時の値とも異なっていることから、8 GeV ビーム試験で確認された再現性不良時と同様の事象であると考えられる。PS OFF 時の残留磁場は各測定で再現していることから測定系のウォームアップなどの影響は考えにくい。この結果から 8 GeV ビーム試験時の初期条件を 8 GeV パターン→電源停止→8 GeV パターンとする場合、全ての電磁石で下げ止まりを確認する必要があり、ビーム試験に採用することは現実的でないということ結論に至った。一方で 30 GeV パターン→電源停止→8 GeV パターンの場合では、磁場が良く再現することが改めて確認され、8 GeV ビーム試験に際しては今回の 8 GeV ビーム試験と同様に、電磁石立ち上げ時に 30 GeV パターン→電源停止→8 GeV パターンの手順を踏む必要があることが再確認された。

4.2 30 GeV パターン→8 GeV パターン

前項の測定結果から、電源停止からの立ち上げ時には 30 GeV パターンで電磁石を励磁する必要があることが分かった。この場合におけるデメリットは立ち上げ時に電源制御パラメーター変更を行うことによる時間ロスである。そこで、30 GeV パターン→電源停止→8 GeV パターンの立ち上げを効率的に行う方法として、8 GeV パターン用電源制御パラメーターのまま 30 GeV パターン運転する方法を検討した。この場合、電磁石電源のパターン変更のみの立ち上げ手順で済むため、時間ロスを大幅に減らすことが可能である。電源制御パラメーターは運転するパターンの強度や時間構造に合わせて、電磁石電源の動作を最適化してリップル低減や電源の長時間安定動作を目的として、本来パターンごとに変更すべきものであるが、今回のように初期条件 10 Cycle 程度の運転であれば、変更せずに動作させることが可能である。電源制御パラメーターを変更しない場合のリップル悪化などが磁場の再現性に影響しないかを確認するため、QFN117 で測定した結果を Table 3 に示す。

Table 3: 30 GeV → 8 GeV Reproducibility Confirmation (QFN117)

Pattern condition	Average magnetic field at flat bottom (DC)
30 GeV → PS OFF → 8 GeV	112.11 mT
30 GeV → PS OFF → 8 GeV	112.12 mT
30 GeV → PS OFF → 8 GeV	112.12 mT
8 GeV → DC → 8 GeV	112.12 mT

8 GeV パターン用電源制御パラメーターのまま初期条件となる 30 GeV パターン通電をした場合でも、8 GeV パターン時の平均磁場はよく再現しており、懸念された初期条件 30 GeV パターン通電のリップル状態は本件の磁場再現性には影響しないことが確認された。また、Table 3 に赤字で示した通り、電源停止を挟まなければ 8 GeV パターン通電を一旦 DC 通電に変更し、再度 8 GeV パターン通電しても磁場が再現することを確認できた。ビーム試験中のパターン変更は電源停止せずに DC 状態で行うことが可能であるため、8 GeV ビーム試験中でも電磁石のパターン変更が電源再立ち上げの必要無く行えることが確認できた。このことから、次回以降の 8 GeV ビーム試験では、立ち上げ時と故障などで電源が停止した時のみ、電源制御パラメーターは 8 GeV パターン用のままで、30 GeV パターンを初期条件として 10 cycle パターン通電した後、8 GeV パターンに変更する手法が有効であることが実証された。

5. まとめ

J-PARC MR では、現在進められている COMET 計画において SX 運転で 8 GeV でのビーム取り出しが求められている。2023 年 1 月～2 月に行われた 8 GeV ビーム試験では、無事に 8 GeV のビームがハドロン実験施設に取り出されたが、そのビーム試験中に行われた半日程度の機器停止を伴うメンテナンスの前後でビーム状態が再現しない事象が確認された。その際に電磁石の磁場ヒステリシスの影響が懸念され、メンテナンス前と同じく 30 GeV パターンで通電後に 8 GeV パターン通電を行ったところ、メンテナンス前のビーム状態を再現した。

このビーム再現性不良事象に対して原因調査を行うため、ビーム試験終了後に電磁石の磁場測定を行い、運転パターン等の条件による磁場へのヒステリシス影響を確認した結果、8 GeV パターン→電源停止→8 GeV パターンの手順で電磁石電源立ち上げを行った場合に、磁場が再現しないことが確認され、8 GeV のビーム試験時の立ち上げには、30 GeV パターンを初期条件として 10 cycle パターン通電した後、8 GeV パターンに変更する手順が必要であることが分かった。この手順での立ち上げ時間ロス低減に向け、8 GeV パターン用の電源制御パラメーターでの 30 GeV パターン運転が全ての電磁石電源で行えるように通電試験を実施し、次回以降の

8 GeV ビーム試験に向けて準備を進めていく予定である。

参考文献

- [1] M. Tomizawa *et al.*, “8 GeV Slow Extraction Beam Test for COMET Experiment” *J. Particle Accelerator Society of Japan*, Vol. 15, No. 3, p117-125, 2018.
- [2] H. Kobayashi *et al.*, “J-PARC 加速器の現状とMRの課題・展望”,
<https://www.jahep.org/hepnews/2010/113kobayashi-03.pdf>