

J-PARC 主リング高繰り返し化における主電磁石磁場の評価 EVALUATION OF MAGNETIC FIELD OF J-PARC MR MAIN MAGNETS WITH HIGH REPETITION RATE OPERATION

内藤 大地*, 三浦 一喜, 染谷 宏彦, 五十嵐 進, 栗本 佳典, 下川 哲司, 森田 裕一
Daichi Naito*, Kazuki Miura, Hirohiko Someya, Susumu Igarashi,
Yoshinori Kurimoto, Tetsushi Shimogawa, Yuichi Morita
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The repetition rate of the J-PARC main ring (MR) will be changed from 2.48s to 1.3s in order to achieve designed beam power of 750 kW. The high repetition rate operation requires magnetic field in the MR bending magnet to be changed more quickly, and current pattern for the bending magnet is also required to be changed more quickly. The rapid current pattern increases eddy current in the vacuum duct of the bending magnet. The nonuniformity of the magnetic field caused by the eddy current was calculated to be $O(10^{-1})\%$. To measure the nonuniformity, we produced search coils. We evaluated and adjusted induced electromotive force of the search coils. The uncertainty of the nonuniformity from the search coils were found to be less than 0.02 %, and we established the method for the measurement of the nonuniformity.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は大強度陽子加速器である。2016 年初頭には長基線ニュートリノ振動実験である T2K 実験 [1] に対して 400 kW の陽子ビームを供給した。このビーム強度はデザイン値である 750 kW の約半分であり、T2K 実験においてさらなる高統計を得るにはビーム強度増強が必須となる。ビーム強度向上のための方法の一つとして、J-PARC の主リングのような陽子シンクロトロンにおいては、繰り返し周期を速める方法が挙げられる。繰り返し周期を短くするには主リングの電磁石の励磁電流をより急峻に立ち上げねばならない。すると電磁石に励磁される磁場の時間変化が大きくなり、電磁石内部のダクトに生じる渦電流が増加してしまう。この渦電流は磁石の中でビームが通過する領域の磁場の一様性を乱し、ビームのクロマティシティとエミッタンスを大きくする可能性がある。しかし渦電流の磁場に対する効果はこれまで測定されておらず、高繰り返し化を実現するには早急にビームへの影響を見積もる必要がある。

そこでまず、主リングの偏向電磁石における渦電流の効果を測定する事にした。この磁場の乱れの効果は電磁石に励磁されている磁場に対しては非常に小さく、高精度かつ高精度で磁場を測定しなければならない。今回は磁場の乱れの測定方法の確立について報告する。

2. 偏向電磁石

Figure 1 に主リングの概略図を示す。主リングは 3 回対称な形をしており、各アーク部の青色で示されている場所には、ビーム軌道を曲げるための偏向電磁石が置かれている。次にビーム方向上流から見た偏向電磁石のうち、鉄心部分の拡大図を Figure 2 に示す。鉄心間のギャップは 106 mm、鉄心のシム間隔は 180 mm となっている。ビームが通る領域を高真空に保つため、鉄心の中には高さ 104 mm、幅 135mm、厚み 2 mm の SUS でできた真空ダクトが置かれている。陽子ビームを 3 GeV から 30 GeV に加速するため、偏向電磁石中

の磁場はビーム繰り返しの度に 0.14 T から 1.1 T に変化させられる。この時真空ダクトに発生する渦電流が、ビームの通過する領域の磁場一様性を乱す。

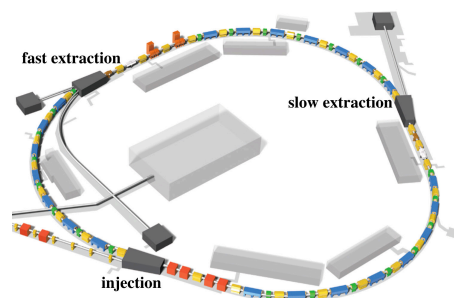


Figure 1: Schematic view of J-PARC Main Ring.

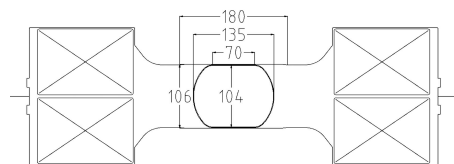


Figure 2: Schematic view of the bending magnet in the MR.

3. ビーム運転の高繰り返し化

J-PARC の主リングではビーム運転の繰り返し時間を 2.48 秒から 1.3 秒にする事で 750 kW のビームパワーを達成する。高繰り返し化に偏向電磁石を対応させるには、磁場が急峻に変化するよう、入力する電流パターンをより急峻に変化させる必要がある。偏向電磁石に入力される電流パターンの比較を Figure 3 に示す。縦軸が入力電流、横軸が時間を示す。黒が 2.48 秒繰り返しでの電流パターン、赤が 1.3 秒周期での入力電流パターンを示す。入力電流の立ち上がり時間は現行の 1.4

* dnaito@post.j-parc.jp

秒から 0.7 秒になる事が分かる。この変更により真空ダクトに生じる渦電流が増加してしまう。

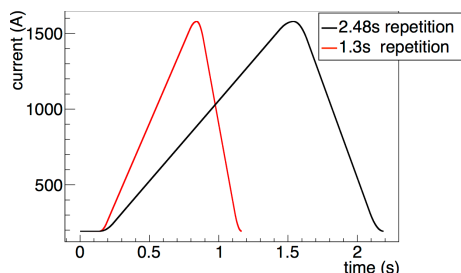


Figure 3: Timing dependence of input current for the MR bending magnet.

そこで Figure 2 の横方向を x 、縦方向を y 、ビーム軸方向を z と定義し、真空ダクトに生じる磁場の非一様性 ($\Delta B(x)$) を計算した。真空透磁率を μ_0 、磁石の鉄心間のギャップを g 、ダクトの厚みを h 、ダクトのコンダクティビティを σ 、磁場の時間変化を (dB/dt) とすると、 $y=0$ での $\Delta B(x)$ は、

$$\Delta B(x) = \frac{2\mu_0 h \sigma}{g} \frac{dB}{dt} x^2 \quad (1)$$

と書ける [2]。Figure 4 に $\Delta B(x)$ の位置依存性を示す。縦軸が $\Delta B(x)$ 、横軸が x 方向での位置を示す。緑が 2.48 秒繰り返しの際の磁場の非一様性の計算値、赤が 1.3 秒繰り返しの際の磁場の非一様性の計算値を示す。また、黒はシミュレーションにより見積もった、1.1 T の静磁場を偏向磁石に励磁した際の磁場の非一様性を示す。この図から磁石に励磁する磁場を時間変化させると、静磁場の場合よりも 10 倍以上磁場の非一様性が大きくなる事が予想される。また、高繰り返し化によって渦電流による磁場の非一様性が現行の 2 倍になる可能性がある。

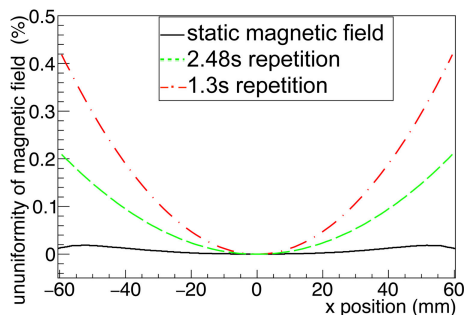


Figure 4: Position dependence of ununiformity of magnetic field.

4. 磁場測定のセットアップ

磁場の非一様性を測定するために考案したセットアップを Figure 5 に示す。第 3 章で用いた座標系に従うと、左図はセットアップの xy 平面への射影、右図は yz 平面への射影を示す。5 つのサーチコイルを真空ダクトの中に並べ、磁場の時間変化によってコイルに発生する誘導

起電力を測定する。それぞれのサーチコイルにはより線を用いて 2 つのコイルが形成されている。Figure 6 にそれぞれのコイルの接続図を示す。互いに違うサーチコイルに属する 2 つのコイルのペアが、誘導起電力が打ち消されるように接続されている。この状態でコイルの出力を図中下側の線から読み出すと、コイルが置かれている 2 点の磁場の強さの違いのみを検出する事ができる。この方法で磁場の非一様性を測定するには、同じ磁場をかけた時にコイルに生じる誘導起電力が、測定に用いる全てのコイルで一致していなければならない。

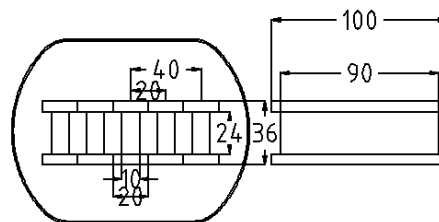


Figure 5: Schematic of the setup to measure the ununiformity of the magnetic field.

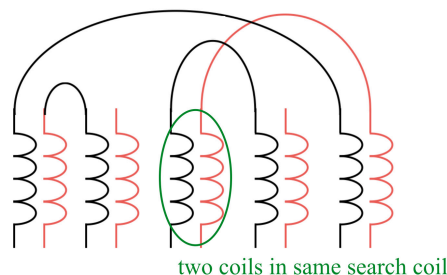


Figure 6: Schematic of the connection of the coils.

作成したコイルに発生する誘導起電力の個体差を評価するため、385 mT の永久磁石磁場の中に入れ、コイルを 1Hz で回転させてコイル単体での誘導起電力を測定した。測定ではコイルからの出力を 24bit ADC 入力 of FFT アナライザに入力し、波形から 1Hz の成分のみを取り出し、得られた正弦波の振幅を誘導起電力とした。この時、永久磁石の磁場を B_E 、磁束が貫くコイルの面積の最大値を S 、回転周波数を w とすると、誘導起電力 V は

$$V = -B_E \times S \times 2\pi w \quad (2)$$

と書ける。Equation 2 を用いて、コイルの面積と、基準となるコイルからの誘導起電力の差を計算した結果を Table 1 に示す。coil ID はサーチコイルの ID を示す。同じサーチコイルに属する 2 つのコイル間の個体差は 0.01% 以下に抑えられていたので、片方のコイルの測定結果のみを示す。この結果より、全てのサーチコイルで出力の差が 0.1% 以下に抑えられている事が分かった。またコイルの面積 S から実際の磁場の非一様性の測定で検出される誘導起電力を計算した。その結果、2.48 秒繰り返しの場合は一番磁場の非一様性の差が小さいコイルの組み合わせで 0.3 mV、最大で 1 mV となる事

が分かった。また 1.3 秒繰り返しでは最小で 1 mV、5 mV となる事が分かった。

Table 1: Summary of the Magnetic-Field Measurement in the Permanent Magnet

coil ID	output (V)	S (m ²)	difference from coil 1 (%)
1	4.298	1.774	0
2	4.302	1.776	0.073
3	4.302	1.776	0.071
4	4.301	1.775	0.055
5	4.301	1.775	0.048

さらにサーチコイル間の個体差の削減のため、実際の偏向電磁石で磁場を測定する場合の磁場の方向と、コイルの位置関係を用いる事にした。この磁場とコイルの位置関係を Figure 7 の左に示す。なお、この図は第 3 章の座標系では yz 平面での射影を示す。この図で磁束はコイルに対して垂直に向いている。そこでコイルを Figure 7 の右図のように傾けると、同じ磁場の強さに対して、誘導起電力を小さくする事ができる。この関係を用いてコイルを傾けて補正するため、磁場の z 方向の非一様性が 150 mT で 0.1%/m の小型偏向電磁石中にサーチコイルを並べ、100 Hz の正弦波でコイルに電流を流して誘導起電力を測定した。この測定では実際にサーチコイル同士を接続し、2つのコイル間の誘導起電力の差を測定した。Table 2 に測定結果をまとめた。1 列目は誘導起電力の差を取ったコイルの ID、2 列目は観測された誘導起電力、3 列目は coil 1 の誘導起電力との差の割合、4 列目は誘導起電力を補正するために傾けるべきコイルの角度を示す。この結果より小型偏向電磁石中では誘導起電力の差をノイズに対して有意に測定する事ができた。

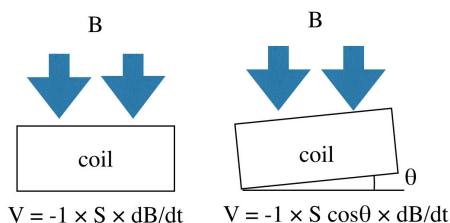


Figure 7: Position relation between magnetic field and the search coils in the MR bending magnet.

Table 2: Summary of the Angle Correction for the Search Coils

configuration	output (μ V)	difference (%)	correction ($^{\circ}$)
coil2-coil1	917.8	0.053	1.9
coil3-coil1	856.6	0.050	1.8
coil4-coil1	497.2	0.029	1.4
coil5-coil1	548.0	0.032	1.4

次に、Table 2 の結果を用いてコイルを傾けて磁場を

測定した。コイルを傾ける際はコイル底面を押しネジと引きネジを用いて架台に固定した。補正後の測定結果を Table 3 に示す。1 列目は誘導起電力の差を取ったコイルの ID、2 列目は観測された誘導起電力、3 列目は coil 1 の誘導起電力との差の割合を示す。この結果より全てのコイル間の個体差を 0.02% 以下にする事に成功し、 $O(10^{-1})$ % である渦電流による磁場の非一様性に対して十分個体差を小さくする事に成功した。これにより磁場の乱れが測定可能な磁場測定方法を確立した。

Table 3: Comparison of the Outputs of the Search Coils after the Angle Correction

configuration	output (μ V)	difference (%)
coil2-coil1	34.2	0.002
coil3-coil1	312.5	0.018
coil4-coil1	72.1	0.004
coil5-coil1	125.3	0.012

5. まとめ

J-PARC の主リングではビーム運転の繰り返し時間を 2.48 秒から 1.3 秒にする事で 750 kW のビームパワー達成を計画している。高繰り返し化に偏向電磁石を対応させるには、磁場が急峻に変化するよう、入力する電流パターンをより急峻に変化させる必要がある。すると電磁石内部のダクトに発生する渦電流による磁場の乱れが現行の 2 倍になる可能性があり、ビームのクロマティシティとエミッタンスを増加させる恐れがあった。そこで渦電流による磁場の乱れの位置依存性を測定するため、偏向電磁石中心のビームダクト中にサーチコイルを並べて測定する事にした。サーチコイル同士を誘導起電力が打ち消されるように接続する事で、磁場の乱れ成分だけを取り出す。この測定方法を実現するには同じ磁場の強さに対して、サーチコイルに発生する誘導起電力を一致させる必要がある。そこでサーチコイルに発生する誘導起電力の個体差を評価し、サーチコイルを傾ける事で誘導起電力を調整した。その結果、全てのコイル間の個体差を 0.02% 以下にする事に成功し、 $O(10^{-1})$ % である渦電流による磁場の非一様性に対して十分個体差を小さくする事に成功した。これにより磁場の非一様性が測定可能な磁場測定方法を確立した。今後はこのサーチコイルを実際の偏向電磁石の真空ダクト中に設置し、磁場の非一様性の測定と評価を行う。

参考文献

- [1] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A 659, 106 (2011).
- [2] D. A. Edwards and M. J. Syphers (1992), “An introduction to the physics of high energy accelerators”, Wiley-VCH, p. 113.