

可搬型電流測定ユニットによる J-PARC MR 主電磁石電源の較正

MAGNET POWER SUPPLY CALIBRATION WITH A PORTABLE CURRENT MEASURING UNIT AT THE J-PARC MAIN RING

三浦一喜^{#,A)}, 下川哲司^{A)}, 大越隆夫^{A)}, 国安 祐^{B)}, 大谷一史^{C)}, 栗本佳典^{A)},
佐川隆^{D)}, 内藤大地^{A)}, 森田裕一^{A)}

Kazuki Miura^{#,A)}, Tetsushi Shimogawa^{A)}, Takao Oogoe^{A)}, Yuu Kuniyasu^{B)}, Kazufumi Ooya^{C)}, Yoshinori Kurimoto^{A)},
Ryu Sagawa^{D)}, Daichi Naito^{A)}, Yuichi Morita^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

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

^{C)} SANKYU PLANT TECHNO CO., LTD.

^{D)} Universal Engineering

Abstract

In J-PARC MR, the bending magnets (BMs) located in the arc sections are divided into six, and the operation is carried out by the common output current pattern with the six BM power supplies. In the BM power supply, the output current feedback control is performed using electronic circuits including analog amplifications and AD / DA conversions. Due to individual differences of the electronic circuits, output current is expected to be slightly different for each power supply. Therefore, we decided to construct a current measurement unit with the portable DCCT as an independent reference and measure and calibrate the output current of each power supply under the same measurement conditions. As a result of the test using the current measurement unit and the presently installed DCCT, it is shown that the result having the performance that satisfies the practical use was obtained.

1. はじめに

J-PARC MR(Main Ring)では加速器トンネル内に配置された主電磁石をファミリーという単位に分割して電源を割り当て、ファミリー単位で出力電流パターンを制御しているが、偏向電磁石 (BM) に関しては、リング内アーク部に配置された電磁石を 6 分割して 6 台の BM 用電源で共通の出力電流パターンによる運転を行っている (Fig. 1)。主電磁石電源ではアナログ増幅および AD/DA 変換を含む電子回路を用いて出力電流のフィードバック制御[1]を行っているが、別々の電源で同一出力を行う必要のある BM 電源ではこれら回路素子の個体差により、出力電流は電源毎にわずかに異なると予想される。そこで、別途基準とする可搬型 DCCT による電流測定ユニットの構築を行い、同一測定条件下における各電源の出力電流測定を行うことで、各電源における個体差を較正することにした。この較正の効果としては、現行電源間の個体差によるビーム光学系への影響考察や、開発中の主電磁石新電源に対する応用が考えられる。今回、可搬型 DCCT とデジタルマルチメーターを用いて、出力電流を任意タイミングで運転サイクル毎に連続記録を行えるように電流測定ユニットを構築した。本報告では、J-PARC で現在稼働中の BM 電源の既設 DCCT を利用し、試験的に構築した電流測定ユニットの試験結果および、今後の展望を述べる。

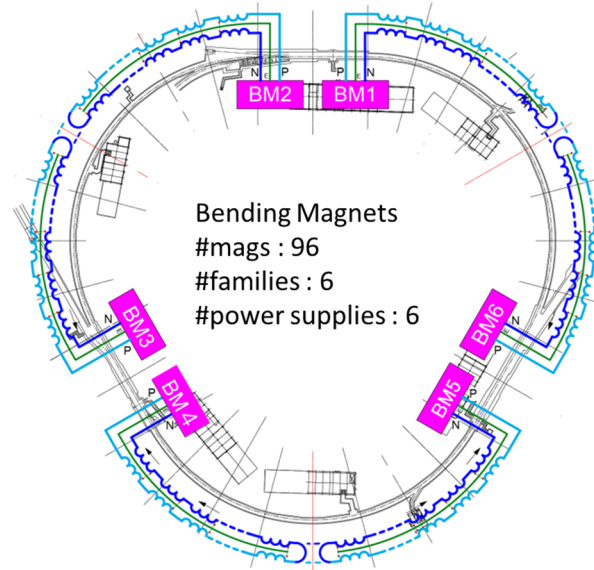


Figure 1: Placement of BM in J-PARC MR.

[#] kazuki.miura@kek.jp

2. 測定系の構成

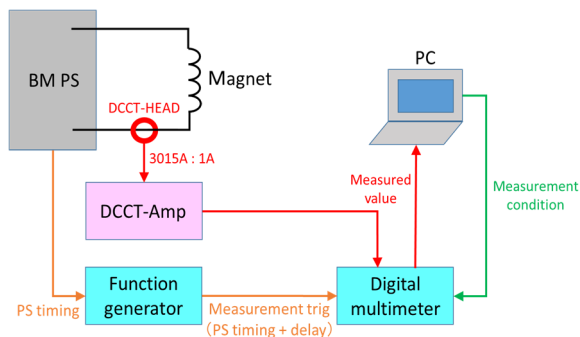


Figure 2: Configuration of measurement system.

可搬型電流測定ユニットの構成を Fig. 2 に示す。BM 電源から主電磁石への出力端子とケーブルの間に DCCT ヘッドを取り付けた状態のブスバーを挿入し、測定された出力電流値は DCCT アンプを介してデジタルマルチメーターに取り込まれる。本ユニットは測定器としてデジタルマルチメーター(KEITHLEY Model 2000)を使用しており、測定精度は 6 桁半である。使用する DCCT(HITEC C40-8-3015)が 3015A:1A の検出比を持つため、実際の出力電流に対するデジタルマルチメーターの測定精度は 1mA の桁までとなるが、これはピーク出力電流約 1600A の BM 電源に対して十分な測定精度である。デジタルマルチメーターがデータを取得するタイミングについては、主電源の動作トリガに対して任意のディレイをファンクションジェネレーターで与えたものをデータ取得トリガとすることで制御を行っており、Fig. 3 のようなパターンで出力される電流を任意のタイミングで運転サイクルごとにデータ取得することが可能で、測定回数についても PC から変更が可能である。最終的には可搬型 DCCT ユニットを用いることによって同一測定条件下で、各 BM 電源の出力電流サンプルとなる Fig. 3 の 3 点(ビームエネルギー: A=3GeV 相当, B=8GeV 相当, C=30GeV 相当)の測定を想定しており、それにより各 BM 電源における同一指令値に対する電源間個体差の測定及び較正を行う方針である。

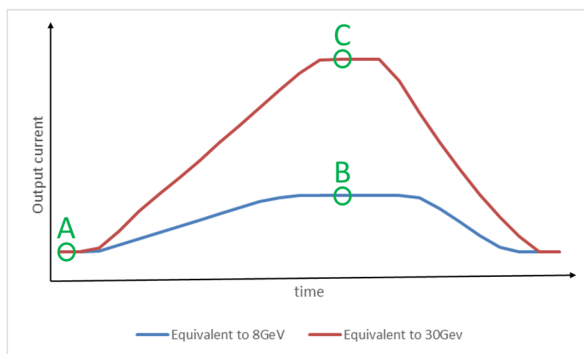


Figure 3: Schematic diagram of output current patterns.

3. 既設 DCCT による測定試験

可搬型 DCCT ユニットに使用する DCCT ヘッドおよびアンプは過去に別件のために BM 電源に導入さ

れていた既設 DCCT を再利用している。今回の試験においては、本番機の可搬型 DCCT ユニット製作に先立ち、現状の BM 電源導入状態のまま、DCCT アンプに本番機と同様にデジタルマルチメーターなどの測定系を接続し、測定系のセットアップおよび動作確認、測定精度の確認を行うことを目的として、測定毎のバラつきが出ないかを確認する(3.1)と、本番を想定した測定で測定精度を確認する(3.2)の 2 つの試験を実施した。結果を以下に示す。

3.1 測定毎のばらつき

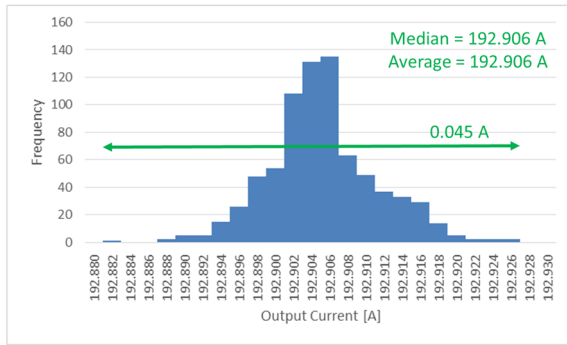
測定毎のばらつきを確認することを目的として、同測定条件下にて 1000cycle の測定を 10 セット行い、セット毎の平均値をまとめた結果を Table 1 に示す。セット毎の平均値は最も差のある No.3 と No.6 でも 6mA とわずかなものであり、No.1~No.10 の合計 10000cycle の平均値との相対誤差をとっても、0.0004%という結果となった。このことから本測定系の再現性については問題無いことが確認できた。

Table 1: Variation of Each Measurement

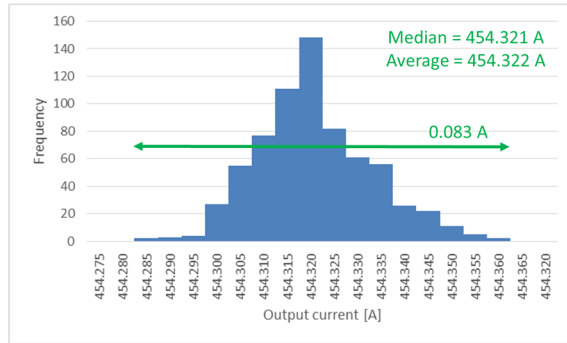
1000cycle average for each set [A]	No.1	1575.794
	No.2	1575.794
	No.3	1575.796
	No.4	1575.791
	No.5	1575.792
	No.6	1575.790
	No.7	1575.792
	No.8	1575.793
	No.9	1575.793
	No.10	1575.793
No.1~No.10 average [A]		1575.793
Maximum error [A]		0.006
Relative error [%]		0.0004

3.2 本番測定模擬による測定精度の評価

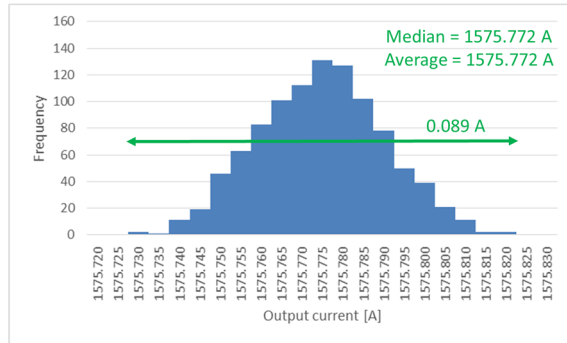
本番の測定を想定し、出力電流パターンにおける代表サンプルとなる 3 点(Fig. 3 に示す Point A,B,C)についてそれぞれ 1000cycle 分の測定値分布をヒストグラム化したものを Fig. 4 に示す。それぞれの結果を確認すると、測定値の幅は最大でも 100mA 以内に収まっており、中央値と平均値の差についても最大 1mA と本測定系においてほぼ同値であることから、測定結果の妥当性が確認された。以上より、本測定系による測定で得られる平均値を用いて、電源の出力指令値に対する電源個体差の評価を行うことが可能であることが確認された。



(a) Point A (3 GeV).



(b) Point B (8 GeV).



(c) Point C (30 GeV).

Figure 4: Histograms of measured values (1000 cycles).

4. 指令値に対する出力電流精度の評価

前項 3.2 の測定にて得られた平均値 3 点を用いて、電源出力電流指令値との関係をグラフ化した物を Fig. 5 に示す。Figure 5 において、プロットで示した 3 点が 3.2 の平均値、点線は最小二乗法で 3 点を直線でフィッティングしたものである。この直線の傾きは 1.0001 となっており、今回測定を行った BM 電源においては、指令値に対して十分な精度で出力電流の制御が行えていることが確認できた。可搬型 DCCT ユニットの本番機導入後は同様の測定を BM 電源 6 台で順次実施し、各電源の個体差の測定、校正を行う予定である。

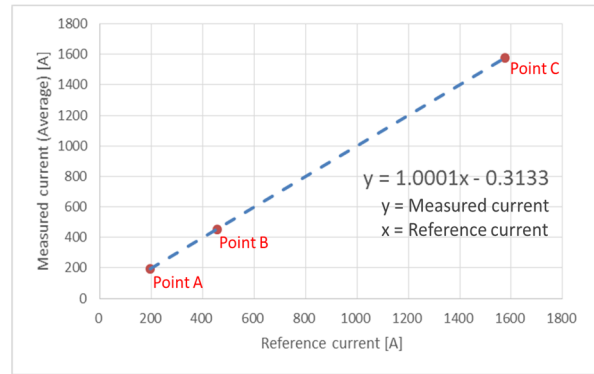


Figure 5: Linearity of reference current and measured current.

5. まとめと今後

今回、可搬型の DCCT とデジタルマルチメーターを用いて出力電流を任意タイミングで運転サイクル毎に連続記録を行えるように電流測定ユニットを構築し、試験的に J-PARC で現在稼働中の BM 電源内の既設 DCCT を利用した実際の出力電流測定を行い、構築した測定系の性能評価を行うことで、実用に耐えうる性能を有することを確認した。今後の展望としては今夏からの J-PARC MR 長期メンテナンス期間中に可搬型 DCCT ユニット本番機を製作して BM 電源 6 台に順次組み込み、それぞれの電源における出力電流を測定することで、各電源の個体差を測定、校正する予定である。なお、J-PARC MR のビーム性能向上に向けて、現在開発が進められている主電磁石新電源[2]についても、現行電源と同じく、可搬型 DCCT ユニットによる電源間個体差の測定、校正を実施する予定である。

参考文献

- [1] Y. Kurimoto *et al.*, "Precise Current Control in Accelerator Magnets with a Digital Feedback System", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 61, Feb. 2014, pp.546-552.
- [2] T. Shimogawa *et al.*, "FIRST NEW POWER SUPPLY OF MAIN MAGNET FOR J-PARC MAIN RING UPGRADE", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017.