

A CALIBRATION METHOD FOR BEAM DCCT OF J-PARC MAIN RING

Yuki Omori ^{#A)}, Yoshinori Hashimoto ^{B)}, Takeshi Toyama ^{B)}, Satoru Otsu ^{A)}

^{A)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd, 2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045, Japan

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba Ibaraki, 305-0801

Abstract

The DC-Beam Current Transformer (DCCT) of J-PARC Main Ring (MR) can measure beam current between about 0.2 mA and 20 A with three full-scale ranges of 200 mA, 2 A, and 20 A. Its frequency response is up to 20 kHz. Conversion of measured current into circulating proton number in MR is done with dividing by rf frequency, and measurable maximum number is 5×10^{14} protons. A calibration has carried out with precise digital multi meters, and then it was confirmed accuracy for current measurement is order of 0.1 % in case of DC current at environmental temperature of between 23 and 26 degree C. In this paper, mainly actual calibration methods and results were described.

J-PARC MR の DCCT の校正

1. はじめに

J-PARC メインリング(MR)の DCCT ^[1]は、KEK-B で開発された並列フィードバック型の parametric DCCT ^[2, 3]を基本にしており、FINEMET コアへの変更がなされたものである。最大 20A までの周回陽子電流を DC~20kHz の帯域で計測することができる。MR はシンクロトロンであり、ビーム電流はパルスとして DCCT に入力される。電流測定精度の設計値は 1%であり、これまでの公称精度としてきた。

DCCT の計測値を利用する範囲は広く、特に取り出された MR ビームを使用する物理実験においては、ビーム電流値、粒子数値及びその精度が重要な値となる^[4]。また、MR におけるビームロスと周回ビームとの相関の測定^[5, 6]など、DCCT の測定精度が要求されている。このような背景から、特に DC 電流値について、 $1e-4$ オーダーの確度をもつ Digital Multi-Meter (DMM)を主体としたシステムを用いて校正を行った。

2. DCCT の電流測定回路の評価方法

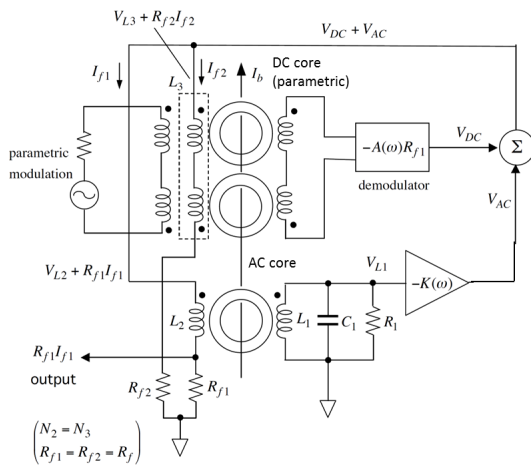


図 1. DCCT の基本構成^[1].

DCCT の基本構成を図 1 に示す。DC 側のコイルを 1kHz で parametric modulation (sine wave での基本励振)を行い、ビーム電流により磁場が付加されるときの変化は、復調器において 2 週倍した基本励振波形からの位相差として検出し、それを電圧差に変換する。AC 側では、L/R インテグレーションを行う。それぞれ、DC~5Hz, 5Hz~20kHz の応答を持つ。両者の検出信号は、検出後に SUM され、電流に変換されて DC 系と AC 系それぞれに分岐してコアでの磁束を打ち消す Negative Feedback を行う。

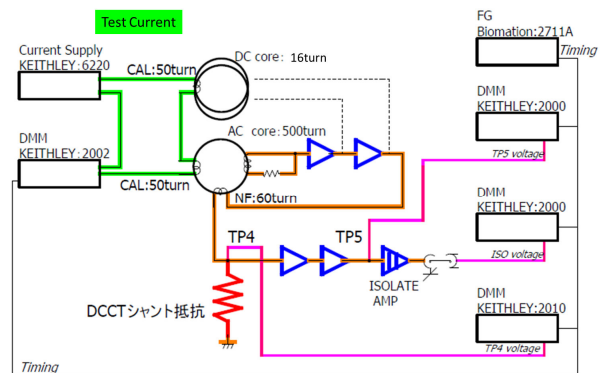


図 2. DMM で構成された校正システム。電流源は表 1 の 2 機種を測定範囲で切り替えて使用する。

図 2 に DCCT 電流測定回路の校正用の計測システムを示す。DC と AC のそれぞれ 50 turn テストコイルに、一筆書きとなるように試験電流を流す。DCCT の測定最大電流 20A の校正では、400mA を印加する。使用した精密電流源と計測に用いた DMM の仕様をそれぞれ表 1, 2 に示す。DCCT 回路の出力は、処理回路の出力電圧検出部の、TP4, TP5, ISO (絶縁アンプ出力) の 3 点で行った。DCCT 出力は計測レンジの最大電流値を 10V で出力する。校正した処理回路のレンジは、20A 及び 2A である。両者は Feedback ループは一部のアンプのゲインを除いてはほぼ同一回路であり、また出力部 TP5 でのアンプゲインが後者が 10 倍高い違いがある。

[#] z-omori@post.j-parc.jp

表 1 : 精密電源^[7,8]

Product	Current	Accuracy	Noise
HP 6626A	0~2 A	0.04%+550μA	0.1mApp
Keithley 6220A	0~100mA	0.1%+50μA	10μApp

表 2 : DMM (全て Keithley 社)^[8]

Model	Item	Digit	Accuracy@reading
2002	Input Current	8 1/2	58 μA@100mA
2010	Isolate Output	7 1/2	27μV@1V
2000	Shunt /AMP Voltage	6 1/2	77μV@1V

DC 電流の計測タイミングとゲートの基本スキームを図 3 に示す。すべての DMM と電流発生器は、Timing 信号により外部同期を取り、ON / OFF された電流いずれの時間にも DMM の ADC にゲートをかける。ゲート時間を 10 PLC (200 ms)とし、100 cycle にわたり各時間毎のデータで相関を取った。正味の電流値として、ON 時と OFF 時の DC 電流の差を取った。

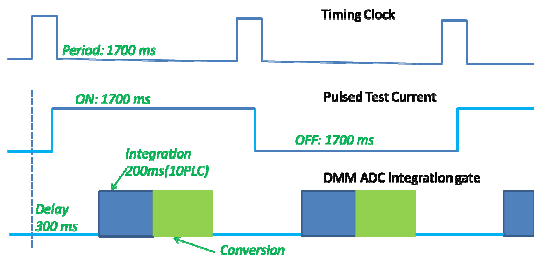


図 3. 計測のタイミングチャート

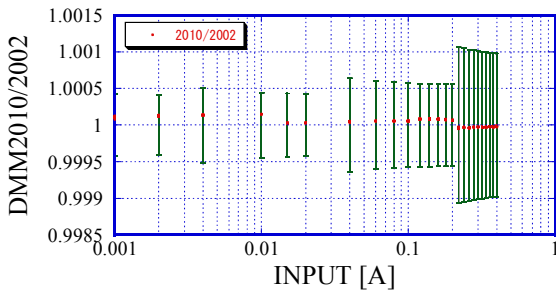


図 4. 電流計測精度の比較。緑棒：精度保証範囲。

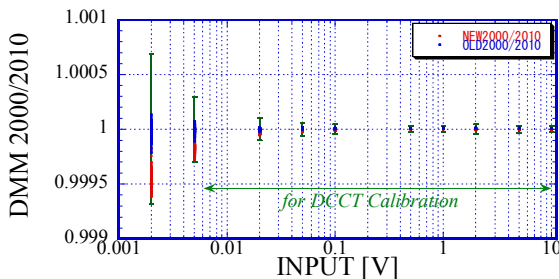


図 5. 電圧計測精度の比較。緑棒：精度保証範囲。

3. DMM の校正

DMM のメーカーの校正精度を確認するために、電流計測では 2 台(表 2: 2002, 2010)の、電圧計測では 3 台 (同 : 2002, 2010, 2000) についての計測値の

比較を行った。比較の方法は次である。 : 1) 基準とする DMM は工場出荷後 4 か月の 2002 とする、2)電流と電圧を上記の DMM の組み合わせで、図 3 のタイムスキームの同時計測を 100cycle 行う、3)電流・電圧の計測値を基準 DMM2002 の値で除算し、そのばらつきがメーカー基準の精度保証範囲にあるかを調べる。電流、電圧計測の比較結果を、それぞれ図 4, 図 5 に示す。図の緑の横棒のついたバーの範囲が、メーカーの精度保証範囲であり公称精度を測定の見み値で除算したものである。また各点 100 回の全ての測定値をプロットしてある。これらの図から、いずれの DMM も、2002 を基準とした測定値が、測定 100 回のばらつきも含めて、精度保証範囲にあることを示した。計測に用いた 2 または 3 台の複数の DMM が、メーカーの精度基準の範囲内で、1e-4 の精度で一致する確率は極めて小さいと考えられるため、全 DMM は絶対値についてメーカーの精度保証範囲内にあるとして扱うことにした。今回の DCCT 校正に用いた計測点では、いずれも 5e-4 より十分小さい計測絶対精度であると言える。この校正の計測及び後述の DCCT の校正は、全て 23.0~26.0°C の環境温度で行っており、測定精度の保証範囲内であった。

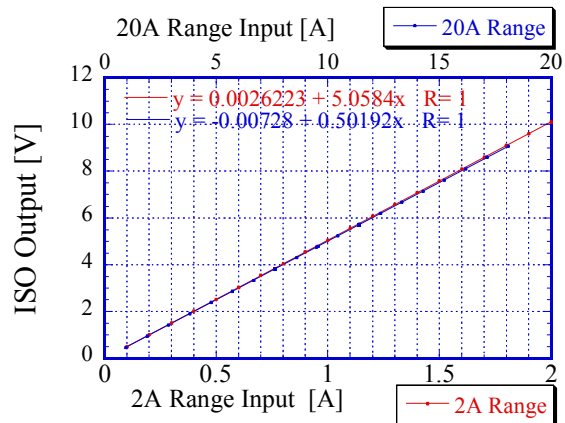


図 6. DCCT 2A, 20A レンジの直線性。

4. DC 電流での DCCT の校正

DC 電流での DCCT の校正は、図 2 の計測システムで、図 3 の時間構成を用いて行った。計測は各 100 点である。尚、20A レンジでは、ビーム電流 0 ~5A 相当の範囲での 50 turn コイルへの入力に精密電源 6220A を用い、6220A の出力範囲 (100 mA) を超える 5~20A の領域では、Function Generator (Biomation 2416A) の出力電圧波形 (ステップ) を電流ジェネレータで電流パルス(100~400 mA)に変換して入力した。

4.1 Linearity

2A と 20A レンジにおける直線性試験を行った。試験入力電流と DCCT の絶縁出力 ISO の相関を図 6 に示す。INPUT 電流値は DMM2002 で測定された値にテストコイルの 50turn を乗じた値とした。図には、各点 100 回測定の数々のデータがプロットされて

いる（以下全て同じ）．いずれのレンジも良好な直線性が確認された．一次関数でフィットされた直線の傾きの、設計値の 10[V]/full-scale current[A] に対しての差は表 3 にまとめた．2A レンジでは、設計値からのズレが 1%を超えていることがわかった．

表 3 : 2, 20A レンジの DC 校正から得た比例係数

レンジ	設計値 [V]/[A]	測定値 [V]/[A]	error %
2A	5.0	5.0584	+1.17 %
20A	0.5	0.5019	+0.38 %

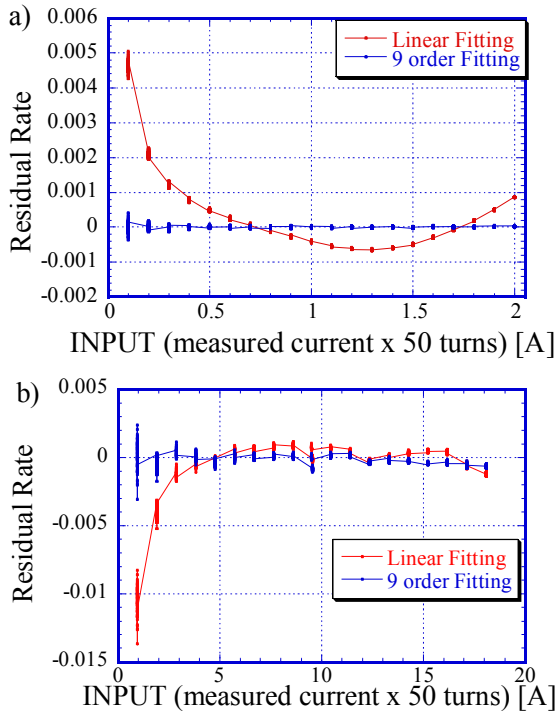


図 7. (a) 2A レンジ, (b)20A レンジの Fitting 関数からの残差.

次に上で求めた一次関数によるフィットの式に対する残差を各測定点について求めた．図 7. (a), (b)に、それぞれ 2A, 20A の残差を示す．また、9 次の多項式でフィットした場合についても、同様にプロットしてある．2A レンジ(a)では、入力電流が小さくなるにしたがって直線からの残差がプラス方向に大きくなり、入力電流 0.1A では、0.5%に上る．直線ではなく、例として 9 次の多項式でフィットした場合の残差は、きわめて小さく全入力電流の範囲でほぼ一定になる．20A レンジ(b)では、入力電流の小さい領域で残差の大きいことは 2A レンジと同じであるが極性が逆であり、入力電流 1A のときに-1.5%に近い．9 次フィットの残差は、ゼロ近辺で平坦になる．2.で見たように、DMM の測定誤差は、この領域では、 $1e-4$ 程度であるため測定のばらつきよりも有意に小さく、グラフの測定点に対する誤差棒としては

見えない．これらから、グラフのばらつき程度の誤差割合で校正を行えたことになる．2A レンジでは、 $\pm 0.05\%$ の範囲、20A レンジでは、 $\pm 0.3\%$ の範囲であった．ただ、フルスケールの最初の 1 割の領域 (2A レンジでは 0.2A, 20A レンジでは 2A まで)は、一つ下のレンジを用いるために加速器運転中は使用しないことが多い．このためそれらの領域を除いて、実用上は、2A レンジでは $\pm 0.01\%$ の範囲、20A レンジでは、 $\pm 0.1\%$ の範囲に確度を持った値を示すことができると言える．

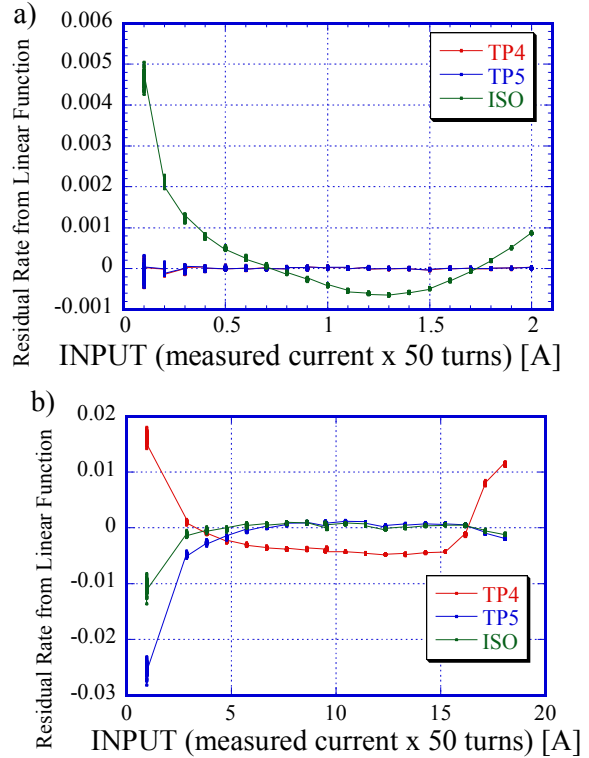


図 8. DCCT 処理回路出力部 TP4, TP5, ISO での一次関数でフィットした場合の残差. (a) 2A レンジ, (b) 20A レンジ.

上述の直線からの残差を理解するために、同時に測定した TP4, TP5 と ISO の入射電流に対する相関を、それぞれ一次関数でフィットした場合の残差として、図 8. (a), (b)に、それぞれ 2A レンジと 20A レンジのデータを示す．2A レンジでは、全入力電流範囲において TP4, TP5 の残差がゼロ近辺によく揃っていることから、DCCT のフィードバックの直線性が極めて良いことを示している．ISO 出力が入力電流の低いところで、図 7 のカーブと同じ傾向をもつことから、DCCT 出力最終段の絶縁アンプの特性に直線性からのズレがあることが理解できる．一方で、20A レンジ(b)では、電流検出部のシャント電圧を表す TP4 で大きな残差を示している．これは、大きな電流領域では、DCCT のフィードバックが直線からずれることを示している．TP5 は、TP4 の電圧を反転されるアンプであり、TP5 のカーブは TP4 と極性が逆になっている．しかし、TP4-TP5 間では、

残差のフラット領域にズレがあることから、オフセットをもたらす要因があるように見える。ISO では、上述の非直線性があると考えられることから、TP5 の出力にさらにズレを与えている。いずれのレンジにおいても、図 7 の ISO 出力の残差割合で見られるばらつきは、TP4 からすでに同じ大きさで見られていることから、DCCT フィードバック回路のもつばらつきが主であると考えられる。これらが、測定データからの考察であるが、さらなる精度の追及のために、今後 DCCT 回路内を詳細に調べる予定である。

5. ノーマライザの校正

ノーマライザは、DCCT 処理回路の後段に接続され、周回電流から周回粒子数へ変換する回路である。周回電流は、周回粒子数と周回周波数との積であるので、ノーマライザにおいては周回周波数で周回電流を除算する。除算部には、rf 周波数を入力しハーモニック数 9 で通倍して使用している。本測定では、MR の最大エネルギー 30 GeV での rf 周波数 1.71 MHz を CW 入力した場合の入出力特性を DCCT 処理回路に接続した状態で測定した。入力電流と出力電圧との相関を図 9(a)に、一次関数でフィットした場合の残差を同(b)に示す。

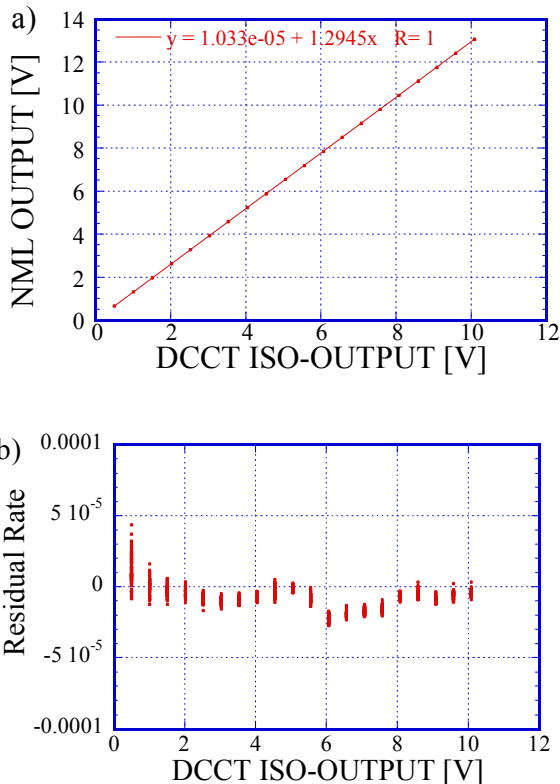


図 9. ノーマライザの直線性(a)と、フィットした一次関数での残差(b).

図(b)からわかるように、フィットした一次関数の残差は計測精度 $1e-4$ 以内で、全測定範囲でゼロ近辺に分布している。極めて良い直線性を有していることがわかった。

6. まとめ

2 または 3 台の DMM の同時計測で、基準となる DMM からの偏差全てが、メーカー校正精度の保証範囲にあることを確認し、この値を用いて、DCCT の DC 電流での校正を行った。その精度は、 $5e-4$ 以内であった。DCCT 処理回路は、実用範囲では、2A レンジでは $\pm 0.01\%$ の範囲、20A レンジでは、 $\pm 0.1\%$ の範囲に再現性を含めた精度を持つことがわかった。このような精密な値の精度を示すためには、いずれのレンジにおいても直線では残差が大きいために、例えば 9 次などの多項式で表現する必要があることがわかった。また、ノーマライザでは、入力の仕様範囲の最大 10V までの範囲において、極めてよい直線性をもち、フィットした直線からの残差は、DMM の保証精度である $5e-4$ 以下であった。

今後の予定を次に述べる。(1)DCCT については、20kHz までの AC 領域の校正を行う。この場合 DMM の AC の精度は、 0.1% 程度となる。(2) 温度依存性について、DCCT ヘッドの温度を実際の 145kW ビームの運転時の 45°C 程度まで変化させた場合についての入出力特性を測定する。(3) これまでも数回の再計測を行い、再現性はほぼ良好であるように見えているが、一週間程度の自動計測によるロングランテストを行い、校正値を最終的に評価する。(4) 電流値、粒子数の運用については、直線よりも次数の高い多項式になると考えられるので、残差が少なくなかつできるだけ次数の低い式を提示する。(5) 校正システム自身を再現性よく運用するために、DCCT システムへ組み込み、校正への切り替えと測定をリモートで行う。(6) 絶対精度 0.01% の精密シャント抵抗の評価と今回使用した DMM の電流測定精度の比較を行い、電流値精度の信頼度を確認する。(7) ノーマライザ後段のビーム粒子数の時間波形の ADC (Yokogawa WE7272) までを含めた DCCT 処理システム全体としての校正を行う。

参考文献

- [1] Y. Hashimoto, et al., 本学会報告.
- [2] M. Arinaga, et al., Nucl. Instr. And Meth. 499(2003)100-137.
- [3] S. Hiramatsu, KEK Internal 2004-4.
- [4] R. Muto, 私信.
- [5] Y. Sato, et al., 本学会報告.
- [6] T. Toyama, et al., 本学会報告.
- [7] Agilent, <http://www.home.agilent.com/>
- [8] Keithley, <http://www.keithley.jp/>