

J-PARC MR における八極電磁石および電源 OCTUPOLE MAGNETS AND POWER SUPPLIES IN J-PARC MR

五十嵐進[#], ファン カンジュン, 染谷宏彦
Susumu Igarashi[#], Kuanjun Fan, Hirohiko Someya
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We have designed and produced six octupole magnets and six power supplies for the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Organization (J-PARC). They are anticipated to suppress the beam instabilities those have been observed during the injection period and in the beginning of acceleration. The octupole fields may, however, reduce the dynamic aperture and result in the beam loss. To minimize the undesirable beam loss, the octupole fields have to be ramped up and down quickly. A typical pattern of the current is a trapezoidal pattern of ramp up of 5 ms and flat top of 5 ms and ramp down of 5 ms. The magnets were produced with laminated steel sheets of the thickness of 0.35 mm. The power supplies were produced to have the voltage rating of 300 V for quick ramping of the magnetic fields. We have tested the power supply for the typical pattern of the current with the choke transformer with the inductance same as the magnet.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)の主リング(MR)では、速い取り出しモードで最大 240 kW のビーム強度で利用運転を行っている。大強度運転時では、入射直後、入射期間中、および加速初期で、横方向のビーム不安定性が観測されている^[1]。不安定性を抑制しないままにすると、ビームロスにつながる。現在これらの不安定性は、バンチバイバンチフィードバック^[2]とイントラバンチフィードバック^[3]、および、クロマティシティを負の値に設定することにより、抑制している。ただし、クロマティシティをゼロに補正することにより、クロマティックチューンスプレッドを小さくして、特に加速初期でのビームロスが減らすことも必要となっている。クロマティシティの値の設定により、これら2つの効果を両立させる必要があり、ビーム強度が増えていくと設定が難しくなることが考えられる。

八極電磁石磁場を使って、チューンがベータトロン振動振幅に依存するようにすることにより、ランダウダンピング効果で、不安定性を抑制することができる。2011年にMRの3回対称性を保つように、3つの直線部に八極電磁石を1台ずつ設置した。電磁石はKEK PSのために35年以上前に製作されたものを移設してビーム試験を行った。それにより、不安定性を抑制する効果が観測されたが、同時に力学口径を縮小させることによるビームロスも観測された。力学口径の縮小は、 $2v_x - 2v_y = 3$ と $4v_x = 90$ の構造共鳴の影響と考えられる。このため、2012年にアーク部の最適なベータトロン振動位相位置に八極電磁石を3台設置した。6台の八極電磁石を用いビーム試験を行い、ビームロスの低減に効果があることが分かった^[4]。ただし、ビームロスを完全になくすことはできず、長い時間励磁を続けると不安定

性抑制効果よりも力学口径の縮小によるロスのほうが大きくなる場合がある。そこで、必要な時間、例えば 5 ms 程度のパターンで励磁できるように、電磁石と電源を製作した。

2. 八極電磁石

電磁石のサイズは、KEK PS の八極電磁石と同じ、ボア半径 70 mm、磁極長 200 mm とする。磁場勾配 $\partial^3 B / \partial x^3 = 2270 \text{ T/m}^3$ で、磁極表面での磁場は 0.13 T を想定する。起磁力は 1800 ATurn/pole となり、極あたりのコイル巻数を 40 turn とし、電流は 45 A となる。電磁鋼板は 0.35 mm 厚の無方向性電磁鋼板で、無機質の絶縁皮膜をもつものとした。磁場が比較的速いパターンに追従させるために、うず電流についての考慮が必要で、電磁石の構造を保つために溶接する側板等は SUS とした(Figure 1)。



Figure 1: Octupole Magnet delivered to J-PARC MR.

[#] susumu.igarashi@kek.jp

磁極形状は、八極磁場の一様性のために、つまり他の多極成分の混入を最小にするように最適化した。他の多極成分の混入を $r = 60 \text{ mm}$ で 1% 以下にするように、OPERA の 3 次元計算を行った。また磁場を 1% 以内で合わせるためには、ボア半径 70 mm について 0.5 mm の精度とする必要がある。

電磁鋼板は打ち抜き加工で電磁石の半分の形状を製作した。磁極部は 30 μm の精度で加工が行われた。鋼板を加圧積層し、端板、側板の溶接を行い、磁極部の通しボルトを固定する。鉄心組み立て後に、出来上がり寸法の測定を行った。Figure 2 にボア直径の測定結果を示す。相対する極の 4 つの測定を長手方向に表面、中間、裏面で行った測定値を、6 台の電磁石について示している。140 mm を基準値として、 $\pm 0.1 \text{ mm}$ を公差とし、全ての測定がその公差内となっている。Figure 3 に鉄心長の測定結果を示す。基準 200 mm、公差 $\pm 0.5 \text{ mm}$ で、全ての測定は公差内となっている。この他、鉄心の寸法測定としては、磁極間のギャップ測定、基準面の高さ、平行度などを測定して、公差内となっていることを確認した。

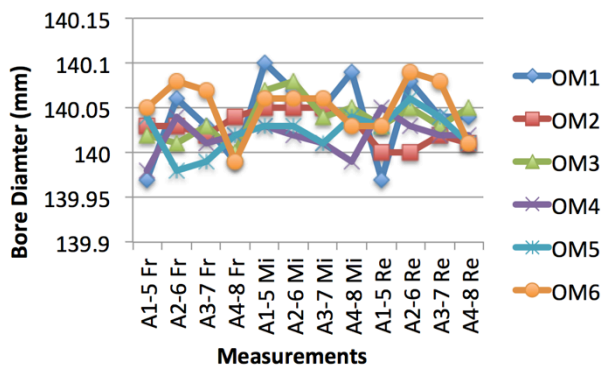


Figure 2: Results of the bore diameter measurements for the poles facing each other at the three places in the longitudinal position of the octupole magnets OM1~6.

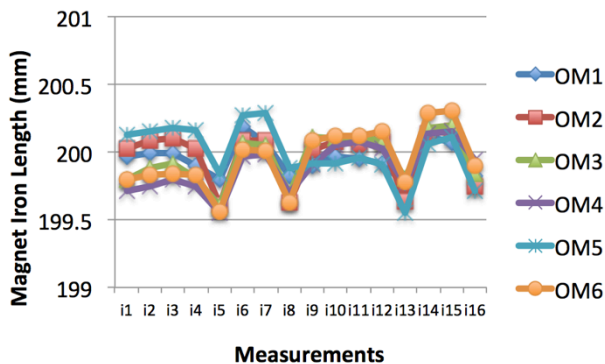


Figure 3: Results of the magnet iron length measurements of the octupole magnets OM1~6. Measurements are done at the pole centers (i1~i4), four points outside of the iron (i5~i8) for the top half of the iron, at the pole centers (i9~i12) and four points outside of the iron (i13~i16) for the bottom half of the iron.

鉄心にコイルを設置し、電磁石として完成させた後、導体抵抗測定、電圧インパルス試験、絶縁抵抗測定、耐電圧試験、インダクタンス測定を行った。Figure 4 にインダクタンス測定結果を示す。50, 55, 100, 500, 1000 Hz の周波数で測定した。50 Hz では想定していた 25 mH となっており、周波数が高くなると、うず電流効果でインダクタンスが下がることが分かった。

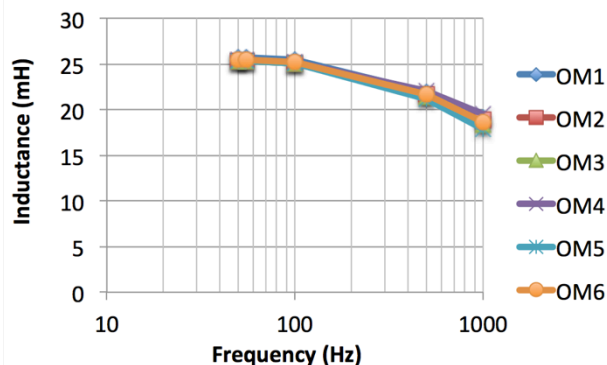


Figure 4: Results of inductance measurements for the octupole magnets OM1~6 at the frequencies of 50, 55, 100, 500, 1000 Hz.

3. 電源

電磁石 1 台の電流供給のために電源 1 台とし、全 6 台製作した。負荷は、インダクタンスとして 25 mH、コイルおよびケーブルの抵抗として 1.6 Ω を想定した。典型的な電流パターンとして 5 ms で立ち上がり、5 ms のフラットトップ、5 ms で立ち下がる台形波とし、フラットトップ電流 45 A の電流供給を可能にするためには、最大電圧 300 V が必要となる。このパターンに追従し、リップルが 1% 程度以下となるような電源を製作し、試験を行った。電源の試験は、模擬負荷として 25 mH のリアクトル、1.6 Ω の抵抗を用いて行った。

Figure 5 に 45 A の台形波パターンを設定としてファンクションジェネレーターの波形(FGout)を電源の電流設定に入力とした場合の、模擬負荷に流れる電流と模擬負荷の両端の電圧の測定結果を示す。電圧は想定どおり最大 300 V となっている。電流値も概ね設定どおり最大 45 A となっている。電流の測定値が FGout に比べ電流は 1.3 ms 遅れているが、これは毎回同じ時間遅れていた。また、フラットトップも 4 ms 程度となっていた。これらのことをあらかじめ考慮してパターンを作成すれば問題はない。

Figure 6 に同じ測定でのフラットトップでの拡大図を示す。電流値はフラットトップで 4% (peak to peak、時間領域) のリップルが観測された。周波数としては主に 100 kHz であった。これは電源のスイッチング周波数である。同時にリアクトルのギャップに設置した磁場測定のためのピックアップコイルの信号を測定・記録しており、その信号を積分し、コイルの面積を割ることにより、磁場の測定値となる。

Figure 6 では、この磁場測定値を電流にスケールするようにプロットした。電流で見られた 100 kHz のリップルは、磁場では小さくなっている。フラットトップの 4 ms の間での時間領域での磁場の変動幅は 1.3 % (peak to peak) であり、目標を概ね達成している。

フラットトップでのリップルの周波数分布を観測するために、励磁パターンを立ち上がり 50 ms、フラットトップ 50 ms、立ち下がり 50 ms として測定を行った。フラットトップ部分での電流と磁場の測定値を FFT したものを figure 7 に示す。フラットトップ電流または磁場の値と比較してのそれぞれのリップル振幅値を示している。電流リップルについては 100 kHz で最大振幅となっており、0.86 % (0-peak) であった。また 100 kHz での磁場リップルは 1.2×10^{-4} と小さくなっている。周波数が 1 kHz 以上の場合、磁場リップルは電流リップルに追従せずに、小さくなっている。1 kHz 以下の周波数帯域では電流リップルも磁場リップルも概ね同程度で 10^{-3} 以下となっている。

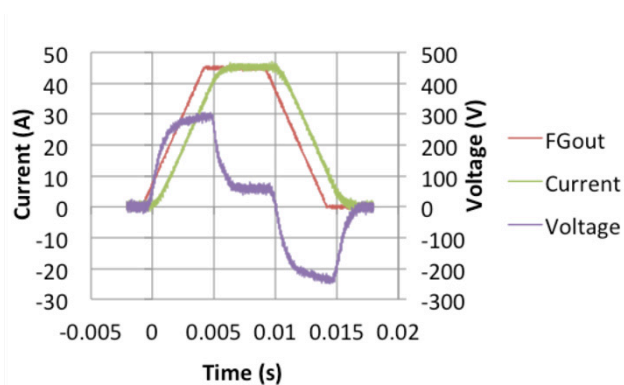


Figure 5: Measured current and voltage for the simulated load of 25 mH and 1.6Ω for the pattern of 5 ms of ramp up, 5 ms of flat-top and 5 ms of ramp down.

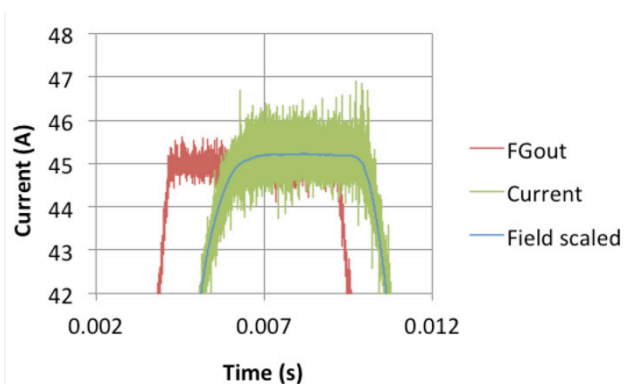


Figure 6: Measured current and magnetic field for the simulated load of 25 mH and 1.6Ω for the pattern of 5 ms of ramp up, 5 ms of flat-top and 5 ms of ramp down.

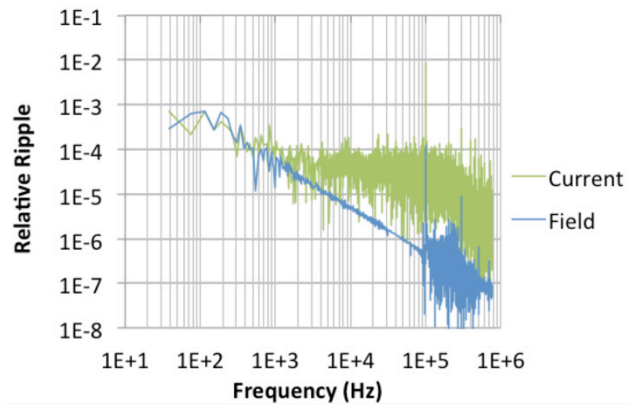


Figure 7: Current ripple and magnetic field ripple as a function of the frequency for the flat-top current of 45 A.

4. まとめ

J-PARC MR の大強度運転でのビーム不安定性を抑制するために、八極電磁石 6 台とその電源 6 台を製作した。八極電磁石の鉄心の製作精度は想定した公差の範囲内となっていることが分かった。また、コイルを付けて電磁石として完成した後のインダクタンスの測定結果は OPERA3d 計算どおりであった。電源は、立ち上がり 5 ms、フラットトップ 5 ms、立ち下がり 5 ms の電流パターンでフラットトップ電流 45 A を電磁石に流すことができることを確認した。フラットトップでの磁場変動は 1.3 % (peak to peak) で概ね要求精度内となっている。

参考文献

- [1] Y. Sato, et al., “J-PARC Main Ring における大強度運転”, these proceedings.
- [2] Y. Kurimoto, et al., “The bunch by bunch feedback system in J-PARC Main Ring”, Proceedings of DIPAC2011, Hamburg, Germany, May 16-18, 2011.
- [3] Y.H. Chin, et al., “J-PARC MR におけるイントラバンチフィードバックシステムによるビーム振動の安定化”, these proceedings.
- [4] S. Igarashi, et al., “J-PARC MR におけるビーム不安定性抑制のための八極電磁石”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.