

MAGNETIC FIELD RIPPLE MEASUREMENT OF THE J-PARC MR MAIN MAGNETS

Susumu Igarashi¹, Hisashi Akikawa, Shu Nakamura, Hirohiko Someya
High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract (英語)

Magnetic field ripple has been measured for the main magnets of the J-PARC main ring. The power supplies generate the current ripple of the order of 10^{-5} ~ 10^{-4} for the frequencies of 150 Hz and the harmonics. Standing waves have been observed for the ripple distribution in the magnet chain. The propagation has been described with the transmission line parameters of the inductance and resistance of the magnet and the capacitance of the cable. Most of the ripples of 150 Hz and the harmonics have been generated in the common mode and the standing wave distribution was anti-symmetrical. Magnetic field ripple by the common mode current ripple has been cancelled with the symmetric cabling. The field ripple was further suppressed with resistors connected in parallel with the magnet coils. The measured ripple distribution was in a good agreement with the calculation of LTspice.

J-PARC MRの主電磁石の磁場リップル測定

1. J-PARC MRの主電磁石と電源

大強度陽子加速器(J-PARC)のmain ring (MR)は、3 GeVの陽子を30 GeVまで加速し、ハドロンホールおよびニュートリノビームラインに取り出す加速器で、2008年5月よりビームコミッションングを行っている。周長は1567.5 mで、96台の偏向電磁石、216台の四極電磁石、72台の六極電磁石により閉軌道を作っている。偏向電磁石については16台を1ファミリーとして1台の電源で電流供給を行い、計6台の電源がある。四極電磁石は11ファミリーに分けられ、それぞれのファミリーは6台~48台の電磁石からなり、それぞれの電源で電流供給している。また、六極電磁石は2ファミリーからなり、24台および48台の電磁石をそれぞれの電源から電流供給している。

電流パターンは6秒周期で、0.17秒の3 GeV入射時間、2.5秒の加速時間、0.7秒のフラットトップ時間およびそのあとの減速時間からなっている。また、加速器調整運転モードとして、3 GeV連続運転モードがある。

四極電磁石の1つのファミリーQFXの負荷は48台の電磁石で、総インダクタンスは2.3 H (3 GeV時の値)、総抵抗は1.7 Ω (DCでの値)、配線での浮遊容量は3.1 μ Fであり、電源の定格は3.0 kV、1038 Aとなっている。

電源は 10^5 台から 10^4 台のリップルを発生しており、周波数としては150 Hzとその高調波があり、また100 Hz周辺での分布がある。

配線接続は2008年夏まではファミリーの電磁石を直列に繋ぐように配線していたが、コモンモード電流リップルによる磁場リップルを低減するために、2008年秋に配線対称化を行い、行きの配線でファミリーの電磁石の四極のうちN極のみを接続して、帰りの

配線でS極のみを接続する方法に変えている。^[1]

2. 磁場リップル測定

3 GeV DC通電モードで、四極電磁石QFXの磁場リップルを測定した。磁場リップル測定には、15 mm立方の石英ガラス製のボビンに直径50 μ mのホルマル線を218ターンしたものをピックアップコイルとして使用した。コイルは四極電磁石のミニマムギャップ位置に定まるようにヒノキ材の治具に付け、電磁石の端部から約15 cm入れて測定を行った。このコイルの出力電圧を小野測器社製FFT Analyzerの入力し、サンプル周波数10.24 kHz、サンプル数4096として、最大周波数4 kHz、周波数分解能2.5 Hz、100 回平均で測定を行った。また、ミニマムギャップにホール素子を挿入し、磁場を測定したところ、0.12 Teslaであった。ただし、ホール素子の位置は正確ではなく、概ね10%程度の精度の絶対値測定と考えている。

電源に近い電磁石QFX164でのサーチコイル出力電圧の周波数分布での最大ピークは、900 Hzの3 mVでノイズフロアの2桁程度の顕著な信号となっている。その他多数のピークが観測された。この出力電圧をコイル面積および周波数(2 π f)で割り、さらにミニマムギャップ磁場(0.12 Tesla)で規格化したものを図1に示す。最大ピークは、900 Hzの 9×10^{-5} で、100 Hz、150 Hz、300 Hz、750 Hz、1800 Hzも $4 \sim 8 \times 10^{-5}$ となっている。その他、40 Hzから80 Hzのあいだはなだらかな分布で $4 \sim 7 \times 10^{-5}$ となっている。

電流測定を同じ時間帯で行っており、その結果を

¹ E-mail: susumu.igarashi@kek.jp

図2に示す。赤線でP側の電流測定から求めた90 A (3 GeV 相当電流) との比での電流リップルの周波数分布、青線で、電流偏差信号から求めた90 Aとの比でのノーマルモード電流リップルの周波数分布を示す。P側電流リップルとノーマルモード電流リップルは100 Hz以下の分布と1200 Hz、1800 Hzのピークは概ね一致している。その他150 Hz、900 Hz等のピークはP側電流リップルのみに主に観測され、コモンモード電流と考えられる。これらをQFX164の磁場リップル分布と比べると、P側電流の分布と良く似ており、コモンモード電流が実際に電磁石に流れていることが分かる。

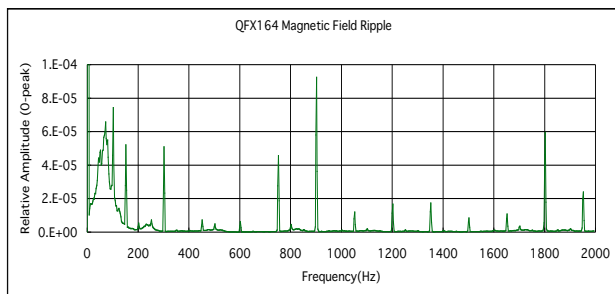


図1 QFX164の磁場リップル分布。

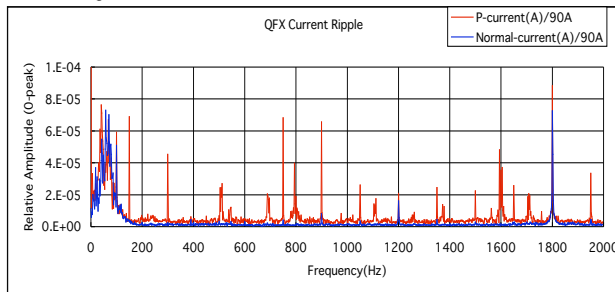


図2 QFXの電流リップル分布。P側電流リップル(赤)とノーマルモード電流リップル(青)。

3. リップルの電磁石分布

QFXファミリー48台のうち、1台おきに24台の磁場リップルを測定した。図3に、周波数150 Hz、300 Hz、450 Hz、750 Hz、900Hzの磁場リップルの電磁石分布を示す。これらは負荷中心で節となる分布となっており、電源がコモンモードでこれらの周波数リップルを発生していると考えられる。また、周波数が高くなるほど、波長が短くなっていることが分かる。図4に、600 Hz、1200 Hz、1800 Hzの磁場リップルの電磁石分布を示す。これらは負荷中心で腹となる分布となっており、電源がノーマルモードでこれらのリップルを発生していることと考えられる。2 kHz以上の周波数の磁場リップル分布については減衰の影響が見られ、電源から遠いほど、リップルが小さくなっていく。

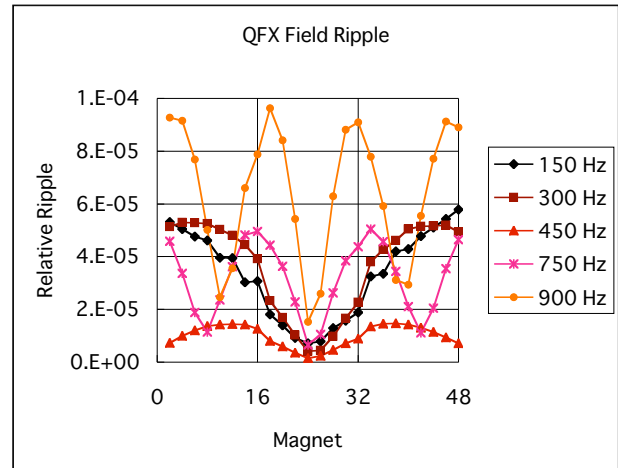


図3 周波数150 Hz、300 Hz、450 Hz、750 Hz、900Hzの磁場リップルの電磁石分布。

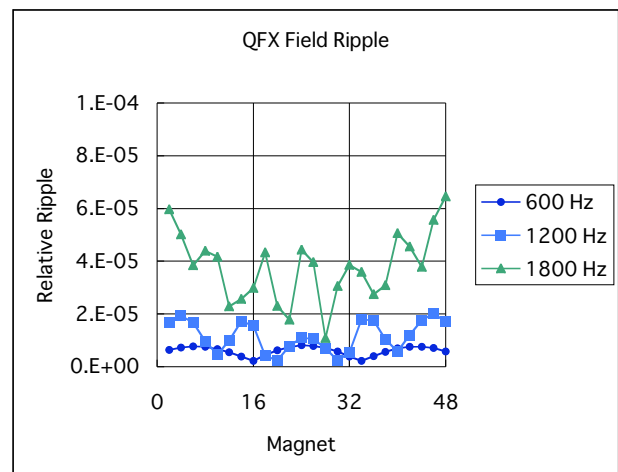


図4 周波数600 Hz、1200 Hz、1800Hzの磁場リップルの電磁石分布。

4. インピーダンス測定

QFX電磁石1台について20 Hzから10 kHzまでの周波数でインピーダンス測定を行った。インピーダンスを抵抗とインダクタンスの直列として表したとき、抵抗成分は周波数が高くなるにつれて大きくなり10 kHzでは1020 Ωとなった。DCの34 mΩ (銘板値) に比べて非常に大きくなっており、電磁鋼板の鉄損によるものと考えられる。また、インダクタンス成分は、20 Hzから4 kHzまでで銘板値49.9 mHより10%から40%ほど小さくなっている。

5. 伝送線路パラメータ

負荷電磁石系は、電磁石のインダクタンスと抵抗、および給電ケーブルの静電容量でできる分布定数回路(図5)で表すことができる。その伝播定数 γ は、次式となる。

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

この式に、QFX電磁石のインピーダンス測定値および給電ケーブルの静電容量を代入して、位相定数 β および減衰定数 α を計算した(図6および図7の赤線)。また、3GeV DC通電時のQFX電磁石でのリプル分布の測定からの位相定数と減衰定数の測定値を図6および図7の青丸で示す。計算値と良い一致を示している。

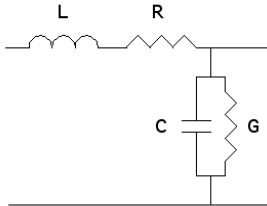


図5 電磁石のインダクタンスと抵抗、および給電ケーブルの静電容量でつくる分布定数回路図。

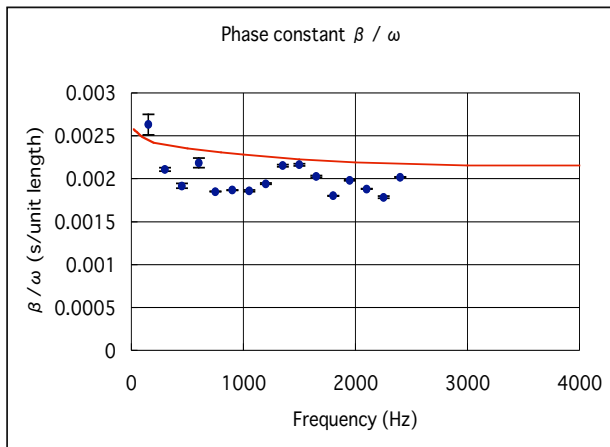


図6 QFX電磁石系の150 Hzから2400 Hzの磁場リプル分布の位相定数 β/ω の測定値(青)と計算値(赤)。

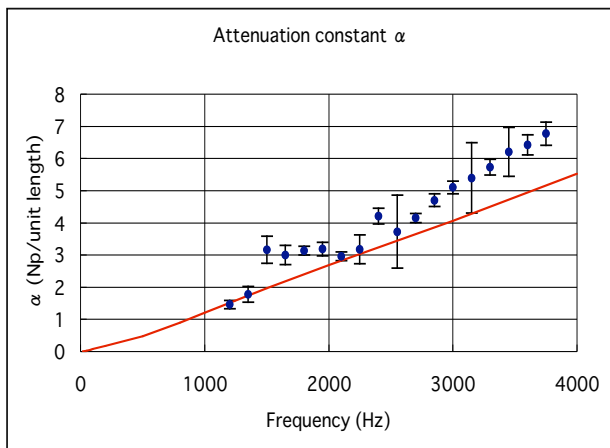


図7 QFX電磁石系の1200 Hzから3750 Hzの磁場リプル分布の減衰定数 α の測定値(青)と計算値(赤)。

6. リプル低減対策

ケーブルの対称化を行うことにより、共通モード電流が主成分磁場とならないようにした。図8で示すように、600 Hz, 1200 Hz, 1800 Hzのノーマルモードは残っているが、共通モードは観測されなくなった。また、電磁石に並列に抵抗34 Ω (2極当たり)を付け、高周波リプルを低減するようにした。LTspiceにより計算を行い、リプル分布測定が再現できることを確認した(図9)。

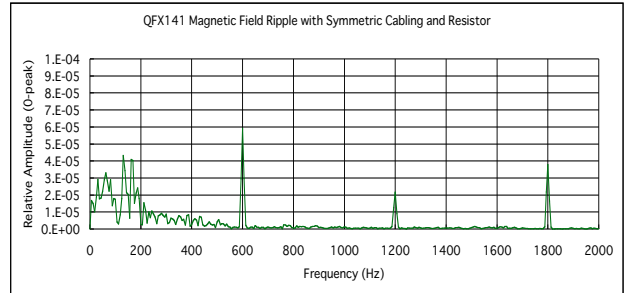


図8 リプル低減対策後のQFX141の磁場リプル周波数分布。

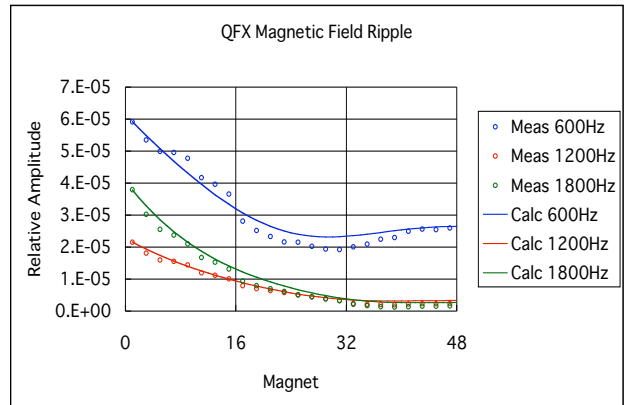


図9 リプル低減対策後のQFX電磁石系のリプル分布。測定値(○)とLTspiceによる計算値(曲線)。

7. まとめ

負荷電磁石系の磁場リプル分布は定在波となっており、その伝搬定数は電磁石のインダクタンスと抵抗、および給電ケーブルの静電容量で決まる伝送線路パラメータで表されることが分かった。共通モードで発生している電流リプルは、ケーブルの対称化を行い、主成分磁場リプルにならないようにした。また電磁石に並列に抵抗を付け、リプル低減を行った。これらの対策後のリプル分布は、LTspice計算結果と良く一致している。

参考文献

- [1] S.Nakamura, “J-PARC MRにおける電磁石電源の問題点と対策”, 第6回加速器学会年会