

MASS FIELD MEASUREMENTS OF THE J-PARC MAIN RING MAGNETS

*Koji ISHII^{1, A)}, Kazuaki NIKI^{A)}, Yasuhisa NEMOTO^{A)}, Masayuki MUTO^{B)}, Eiichi YANAOKA^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} FFAG DDS Research Organization

AMITA801, 5-31-7 Shiba, Minato, Tokyo, 108-0041

Abstract

The mass production of the J-PARC main ring magnets were completed at the end of fiscal year 2004. The field measurements of all the produced magnets were started in September 2004 and ended in March 2006. The results of the field measurements for the bending magnets were already reported in the last annual meeting. In this time we concentrate our report on the results for the quadrupole and sextupole magnets. For these magnets we measured the GL or G'L products by using the 2m and 3m length harmonic coil, which were developed for these purposes. We also obtained multipole components and discuss them.

「J-PARC MR 電磁石量産機の磁場測定」

1. はじめに

大強度陽子加速器計画 (J-PARC) におけるMR主電磁石群のうち、四極電磁石は216台 (11ファミリー)、六極電磁石は72台 (3ファミリー) で構成されている。2004年秋から2005年度末にかけて、製造した全ての電磁石に対して磁場測定を行い個々の性能及び均一性の評価を行った。以下にデザインパラメータ及び四極電磁石ファミリーの詳細についてまとめておく。

Quadrupole Magnet (QM) :

Number	216 (11 families)
Length	0.86 - 1.86 m
Aperture	130/140/150 mm
Field Gradient	1.35 T/m (3 GeV injection) 18 T/m (50 GeV, typical)
Current (Max.)	1507 A (50 GeV, typical)

Setupole Magnet (SM) :

Number	72 (3 families)
Length	0.7 m
Aperture	136 mm
Field Gradient	230 T/m ² (50 GeV, typical)
Current (Max.)	657 A (50 GeV, typical)

Name	Length (m)	Number	Aperture (mm)	Gradient (T/m)	Max. Curr. (A)
QFP	0.86	6	140	16.3	1507
QFX	1.26	48	130	18.0	1507
QFS	1.26	6	130	18.0	1507
QFT	1.46	6	140	16.3	1507
QFN	1.56	48	130	18.0	1507
QDX	1.66	27	130	18.0	1507
QDS	1.66	6	140	16.9	1654
QFR	1.76	9	140	16.9	1654
QDN	1.86	48	130	18.0	1507
QDR	1.86	6	130	18.0	1507
QDT	1.86	6	150	14.7	1507

2. 装置概要



測定には専用に製作したハーモニックコイルを用いてGL積 (四極) またはG'L積 (六極) を測定する。たわみの影響を少なくするため、ハーモニックコイルは長短2種類の長さを準備し、1.46m以下の四極電磁石と全六極電磁石は短尺コイルで測定した。コイルはAFRPのボビンに巻かれており、複数種類のコイルが仕込んである。短尺ボビンの長さは2.5mあり、主コイルである2.1m長のロングコイルが半径0.0595mの位置と中心を通ってラジアル状に1ターンで巻かれてある。一方長尺ボビンの長さは3.5mに達し、計算上300 μ m程度のたわみが予想される。少しでも軽量化してたわみを減らすため、コイルは円筒外側の半径0.0598mの位置で $\pi/2$ の所をタンジェンシャル状に巻いた。このため長尺コイルでは2n極成分のうちn=4mのものは打ち消され、測定はできない。ボビンの軸受けには安定な回転のためにエアースピンドルを採用しており、漏れ磁場の影響がないようセラミックで製作した。2つのエアースピ

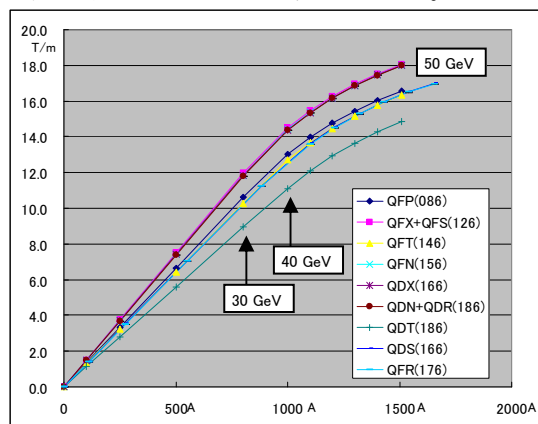
¹ E-mail : koji.ishii@kek.jp

ンドル上にはアライメントのためのターゲット台を設けており、電磁石上の2つの基準座ターゲットと一直線に並べることで、電磁石とコイルの位置関係がわかるようになっている。ボビンの両側にはモータとロータリーエンコーダが取り付けられており、コイルの信号とエンコーダからの回転角位置の信号を同時に積分器に読み込ませ、データを取得している。フーリエ変換を用い、取得したデータを周波数解析することで多極成分の抽出を行っている。また、磁場中心の計算も行いアライメント結果で補正することで、磁場中心と電磁石中心のズレ（機械精度）のチェックも行った。尚、電源は本番で使用するものではなく、測定電流はDCで行い、電流値はDCCTでモニターして磁場の補正に用いている。

3. 測定結果

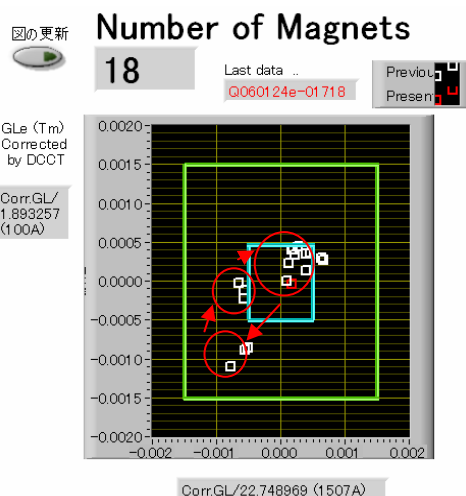
3.1 励磁曲線

下図に得られた四極電磁石の励磁曲線を示す。形状が同じものをまとめ、6~54台の平均をプロットし、標準分散を誤差として付けてある。データ点は3GeV入射相当である100A(または110A)から50GeV相当の1507A(または1654A)最大電流まで、0Aを含み11測定点である。図中で30GeVを越えたあたりから飽和が始まっているのが見てとれる。



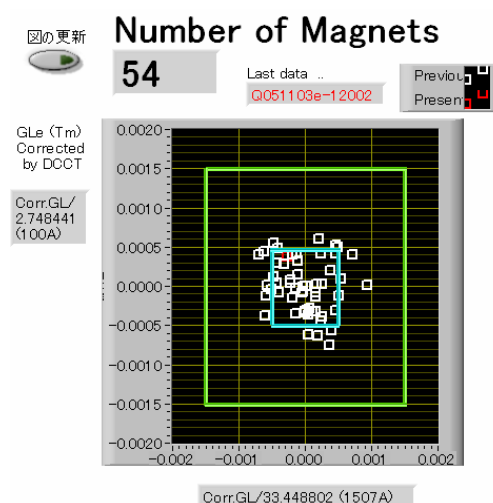
3.2 基準電磁石

測定系が安定であることを確かめるため、2週間に1度の割合で、同一の電磁石（基準電磁石）の測定を繰り返し行い、測定系の精度を示す指標として用いている。右上図に四極の基準電磁石測定の結果を示す。期間中18回の測定を行った。図中赤丸の囲みが見られるように、GL積が何度かジャンプするような現象が見られた。図中の赤矢印が示すように、最初は右上から始まり、3回動いてまた元のクラスターに戻っている。原因はわかっていないが、戻ることから季節的なものと推測される。同一のファミリーはできるだけ短期間で、変動がない間に測定するように計画を調整したが、QFX+QFSの測定のみ期間中で動いてしまった。それについては、分布に0.1%の補正を入れてバラツキを評価している。



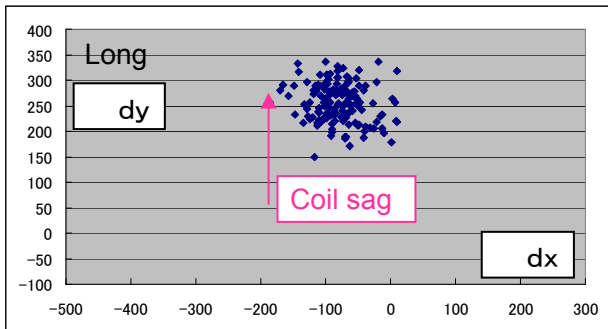
3.3 四極電磁石のGL積分布

下に四極電磁石のGL積分布を示す。長尺を用いて測定したQDN+QDRの分布で、縦軸が入射3GeV電流相当、横軸が50GeV電流相当となっている。図中外側の枠(0.15%)がオブティクスより要求される許容値(σ の3倍)を表しており、十分小さい分布の広がりを見せている。磁気特性や磁石寸法等から予想される広がりと比較しても良い結果となっている。他の四極電磁石についても同様の結果が得られているが、短尺で測定したQFX+QFSの分布は、3.2で述べた補正後も許容値範囲程度まで広がっている。製造番号等による違いは見られないので、測定系の問題と考えているが原因はわかっていない。尚、これらのGL積結果をもとに、トンネル内の設置場所に対してファミリー内でカップリングを行い、強弱がキャンセルするようシャッフリングを行っている。



3.4 磁場中心

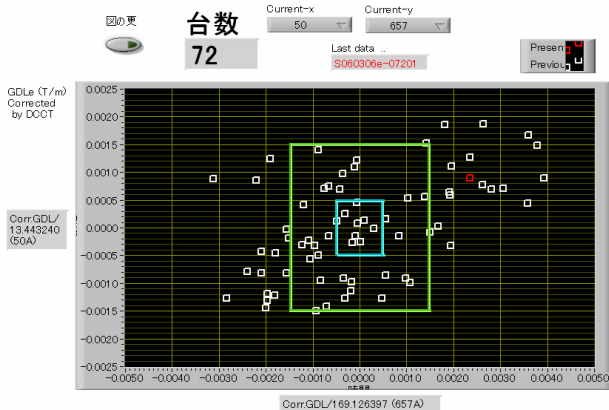
次ページの最初に長尺測定で得られた磁場中心の分布を示す。測定場所に電磁石を設置する際アライメントを行うが、そのとき記録されたアライメント



の読み値で補正をしてある。したがって分布は電磁石の機械製作精度、アライメント誤差(読み取り誤差)等を含めたものを表している。図中に示した通り、dyで300 μ m弱のコイルたわみの影響が見て取れる。dxで100 μ m弱ほどマイナスに分布しているのは、エアースピンドルのターゲット台が設置時からズレていたためだと考えられる。尚、短尺測定の際、dxで200 μ m以上分布から外れた電磁石が3台見つかった。製造元工場に持ち帰り調査した結果、基準座の不良と判明し、付け替えを行った。

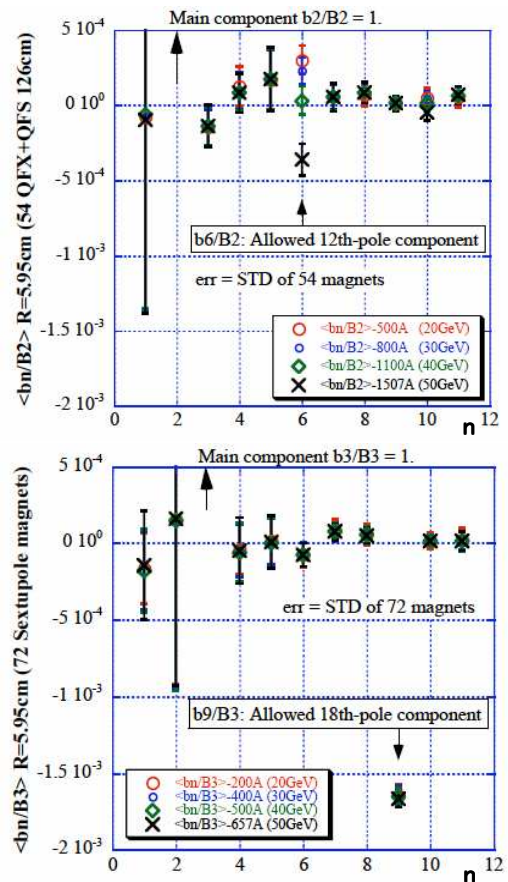
3.5 六極電磁石のGL積分布

六極電磁石のGL積分布を下に示す。縦軸が入射3GeV電流相当、横軸が50GeV電流相当となっており、また外枠も同様に0.15%の範囲を表している。四極と比べ広がった分布を持っているが、製造番号と相関が見られるため、製造過程において何らかの不均一性が生じたと考えられる。測定期間及びトンネルインストールの都合上、3回の測定期間に分け、それぞれが1つのアークに対応することにした。製造番号を使ってアーク毎に差が出ないように測定順番を決め、測定後は各アークでキャンセルするようファミリーに振り分けながらシャッフリングを行った。



3.6 多極成分

得られた多極成分の結果を次に示す。最初が四極電磁石54台(QFX+QFS)の結果で、次が六極電磁石72台の結果である。横軸が極数を表しており、縦軸がメインに対する大きさを表しており、台数分を平均した値をプロットした。



それぞれallowedである極の所で、電流値(飽和)の依存が観測された。四極の多極成分の大きさは、KEKBのそれと比べ、同程度のものであった。一方、六極の18極成分が他に比べ大きく出ているが、問題にならない程度という検討結果が得られている。

4. おわりに

1年以上にわたる長い測定期間を経て、量産した電磁石全てに対するの磁場測定が完了した。得られた結果はおおむね良好であり、オプティクスグループによる実データを用いた軌道計算も始まっている。今回測定できなかった、J-PARC電源を使用した電流に対する磁場追従性(安定性)の測定は課題として残っているが、今年度行う予定の電源・電磁石統合試験により知見が得られるものと期待する。

参考文献

- [1] E. Yanaoka, *et al.*, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, Japan, Jul. 2005, p.585.
- [2] K. Niki, *et al.*, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, Japan, Jul. 2005, p.78.