

## STATUS OF FIELD MEASUREMENTS FOR J-PARC 50GeV-RING MAIN MAGNETS

Kazuaki Niki<sup>1,A)</sup>, Koji Ishii<sup>A)</sup>, Kazumi Egawa<sup>A)</sup>, Yasuhisa Nemoto<sup>A)</sup>, Masayuki Muto<sup>B)</sup>, Eiichi Yanaoka<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Accelerator Laboratory

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

<sup>B)</sup> FFAG Facility

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

### Abstract

The mass production of the main magnets of J-PARC MR was almost completed at the end of fiscal year 2004, and the magnetic field measurements for 2/3 of the bending magnets and 1/5 of the quadrupole magnets were done until May, 2005. The obtained distributions for the BL products of bending magnets and the GL products of quadrupole magnets were almost within the required precisions, which values are estimated by the beam optics for COD correction and etc.

## J-PARC 50GeV-MR電磁石の量産機磁場測定について

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所の共同プロジェクトである大強度陽子加速器計画 (J-PARC) の建設が2001年度から始まっている。この計画の50GeV-MRの主要電磁石である偏向電磁石、4極電磁石、6極電磁石の量産が2004年度までにほぼ完了した。これら量産機の磁場測定は2005年5月までに偏向電磁石の約2/3と4極電磁石の約1/5が完了し、量産機のBL積やGL積等の分布がわかってきた。今後、7月までにすべての偏向電磁石について、また2005年度末までには4極電磁石と6極電磁石すべての磁場測定が完了する予定である。量産の電磁石においては個々の高い性能が求められることはもちろんであるが、同時に多数の磁石の性能が均一であることが求められる。この報告では主に偏向電磁石についてその磁場性能の均一性を確保するために必要な量産機製作時における鋼板磁気特性及び製作精度等について述べ、磁場測定が完了した分について製作前に予測していたBL積等のばらつきと比較し考察する。

### 2. 量産電磁石とその鋼板磁気特性

50GeV-MRリングを構成する偏向電磁石は最大磁場1.9T、ギャップ長106mm、磁極長5.85mでリングのアーキ部に96台と1台のReference用電磁石からなっている。この全97台は6式のパターン電源で入射時約200A(3GeV相当)、最大エネルギー時約3015A(50GeV相当)で励磁される。4極電磁石はアーキ部の4ファミリーと直線部の7ファミリーの合計11ファミリー全216台からなっている。アーキ部の4ファミリーと直線部の内の2ファミリーの計183台は

ボア直径130mmで最大磁場勾配18 T/mであるが、直線部の内の3ファミリー21台は140 mmで16.3 T/m、1ファミリー6台は140 mmで16.9 T/m、さらに1ファミリー6台が150 mmで14.7 T/mの設計となっている。クロマティシティー補正用の6極電磁石は3ファミリー72台でアーキ部に配置される。

これら量産電磁石の製作がほぼ完了し、磁石の寸法精度や鋼板の磁気特性のデータが出てきている。磁石寸法精度と鋼板の磁気特性のばらつきは偏向電磁石の場合BL積のエラーに反映することとなり、COD補正に必要なステアリングの性能に効くこととなる。BL積のエラーは、

$$\frac{\Delta BLm}{BLm} = \sqrt{\left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Lm}{Lm}\right)^2 + \left(\frac{BiLi}{B\mu_r g}\right)^2 \left(\frac{\Delta \mu_r}{\mu_r}\right)^2 + \left(\frac{HcLi}{NI}\right)^2 \left(\frac{\Delta Hc}{Hc}\right)^2}$$

ここでgは偏向電磁石のギャップ長、Lmは磁石軌道長、 $\mu_r$ は鋼板の透磁率、Hcは保磁力、BiとLiは鉄芯中の磁場及び鉄芯磁路長である。磁石寸法測定の結果97台のギャップ長のばらつきは $\pm 50 \mu\text{m}$ 、鉄芯長のばらつきは $\pm 1\text{mm}$ であり製造前に予測していた値にほぼなっている。磁石の鋼板磁気特性については図1に97台の分布を示す。ここでそれぞれの値は各電磁石に使用した複数(3~10種類)の鉄心母材コイルの特性値の単純平均とした。使用した量による重み付けは行っていない。この磁石に用いた電磁鋼板65A1600は母材コイル段階のHc(1.7T)のばらつきが $\pm 12\%$ 程あり、これが入射磁場でのBL積のエラーを大きくする要因となっている。そのため製作段階で $\pm 4\%$ の3つの領域に分けまず真ん中の $\pm 4\%$ の領域で製作し、あとは上と下に外れた磁気特性の鋼板

<sup>1</sup> E-mail: kazuaki.niki@kek.jp

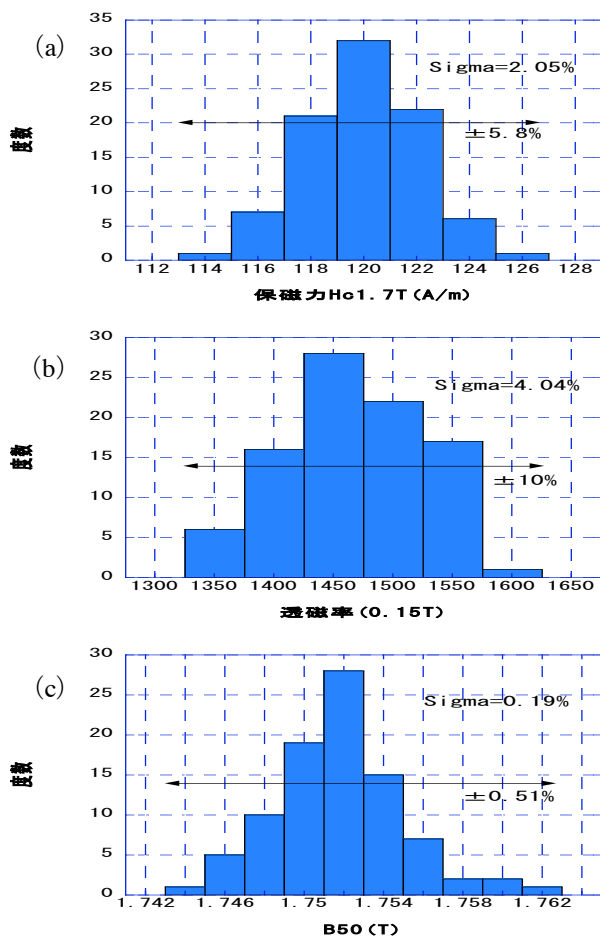


図1：偏向電磁石の鋼板磁気特性

を半分ずつまぜて製作するというシャッフリングを行っている[1]。結果として図1(a)に示すように磁石ごとのHc(1.7T)のばらつきは±5.8%程になっている。また図1(b)に示す様に0.15Tでの透磁率のばらつきは±10%で母材コイル段階の値と変わらない。その結果の入射磁場でのBL積のエラーは±0.15%以下になると予測され、オプティクスから要請される値( $\sigma$ で0.06%、許容値はその3倍の±0.18%)にほぼ収まる。50GeV時などの高磁場ではB50(エプスタイン法による5000A/mでの磁場)のばらつきが±0.51%であるのでBL積のエラーはさらに小さく±0.05~0.10%程度になると予測される。

### 3. 磁場測定

偏向電磁石のBL積を測定するために7m長のフリップフロップコイルを用いている(図2)[2][3]。1日に1台の偏向電磁石を測定し、2005年5月中旬までの64台分で今回の解析を行った。また測定系の精度は2週間ごとに基準磁石を測定し、50GeV相当磁場時(3015A)で $2\sim 3 \times 10^{-5}$ 以下、入射磁場(200A)ではその約10倍と評価している。

4極電磁石用の磁場測定装置は2m長の回転コイルをAFRP(アルミナFRP)のポビンに巻いて製作した。1日に2台の測定で、2004年末から2005年初めに



図2：磁場測定中の偏向電磁石

かけてアーク部の1ファミリー分に相当する48台の磁石のGL積や磁場の高次成分を測定した[3]。

磁場測定の手順は偏向電磁石も4極電磁石もほぼ同じでアライメント後、50GeV相当の電流値で5回初期化の運転を行い、その後0Aから最大電流まで11点の電流値で測定している。特に30GeV相当の電流値(偏向電磁石では約1600A、4極電磁石では約800A)以上では磁石が急速に飽和するので測定点を7点としている。

フリップフロップコイルによるBL積の測定結果は50GeVの仕様 $1.9T \times 5.85m$ に対して約1%強となっている。これは磁石端部の磁場分布をホール素子で、また中心部をNMRで測定して繋いだ分布を積分して求めた値とほぼ同じであった[4]。

### 4. 量産電磁石の磁場のばらつき

励磁電流200Aと3015Aでの偏向電磁石64台分のBL積の分布を図3に示す。どちらの電流値でも許容値

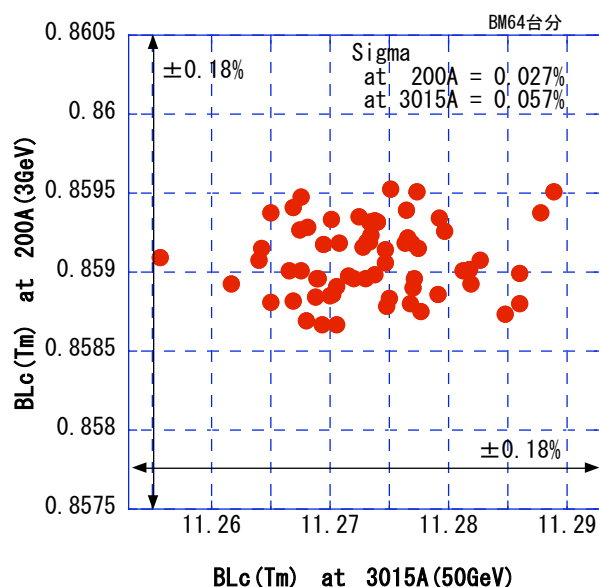


図3：BL積の分布(入射と50GeV)

±0.18%に収まっている。特に200Aでは分布の $\sigma=0.027\%$ であり要求されている0.06%より十分小さい。逆に3015Aでは $\sigma=0.057\%$ で一応0.06%より小さいが、ばらつきの最大幅が許容値の±0.18%近くまであり当初の予想より大きい。このばらつきを引き起こしている主因は高磁場での鋼板の磁気特性ではないかと考えられるが、3015AのBL積とB50との相関(図4(a))はわずかにあるように見えるがあまり強くはない。図4(b)は3015AのBL積と製造番号との相関である。これを見ると負の相関が見える。しかし図4(c)に示すようにB50と製造番号の相関は見えないので鋼板の高磁場特性以外の別な原因があるのではと推測される。例えば可能性として飽和していない場合はコイルの位置は磁場には効かないが、飽和が始まるとコイル位置のずれが磁場に効く。POISSONの計算によると3015Aではコイル位置が2mmずれると0.18%程度の影響があるが、6mの長さにわたって2mmコイル位置がずれているとも考えにくく、さらに原因を検討する必要がある。

また200Aと3015AでBL積の分布には相関がないが、飽和が始まる1600A以下の電流値でのBL積は200Aとほぼ線形の相関があり1600A以上ではまた3015AのBL積と強い相関がある。これは飽和の前後で磁場の

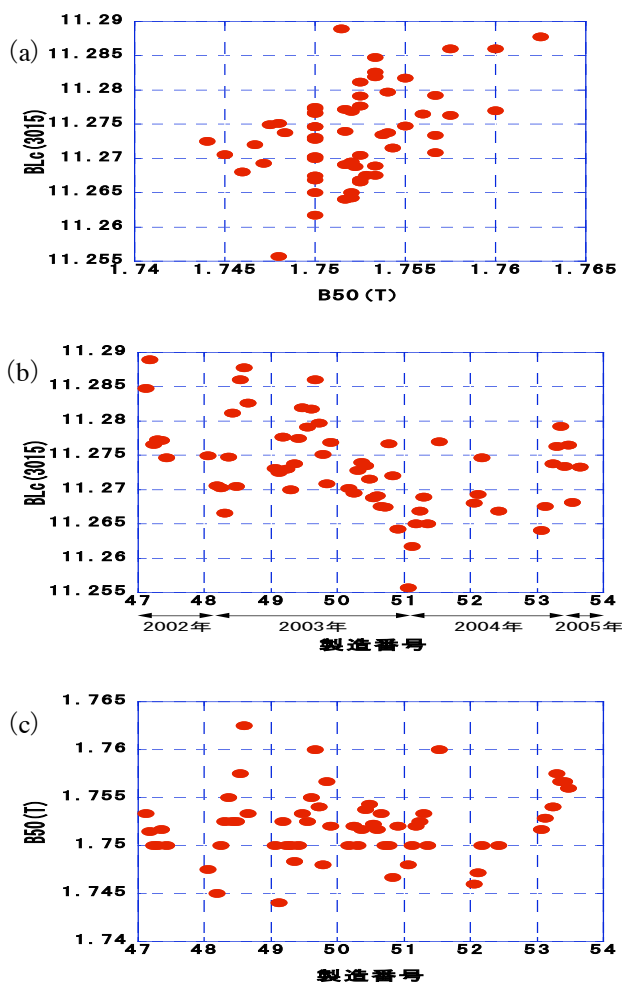


図4：BL積、B50、製造番号の相関

ばらつきの特性が変わっていることを示している。図3を平均のBL積を持つ磁石からのずれの分布として見ると、第1象限又は第3象限にある磁石は平均的な磁場の磁石と比べて飽和の前後で一貫して強いのか又は弱いのかに対して、第2象限又は第4象限にある磁石は平均的な磁場の磁石と比べて強さが飽和の後で入れ替わる。このことはCODを補正するステアリングのパターン運転に注意を要する可能性を示唆している。オプティクスから要請される許容値に入っているため磁石の配置に関するシャッフリングをしなくてもステアリングに必要な仕様は満たされているが、ステアリングに対する負担を軽くすることと上記の事情を勘案するとシャッフリングの効果は大きいと考えられる。未測定磁石が既測定64台のBL積と同様の分布をしていると仮定してシャッフリングを行った場合にはステアリングの強さは当初計画値の半分程度で済むものと期待される[5]。

同様に測定が完了した1ファミリー48台分の4極電磁石のGL積の分布をみると入射3GeV(100A)では $\sigma=0.044\%$ でオプティクスから要請される値( $\sigma=0.05\%$ 、許容値はその3倍の±0.15%)に入っている。しかし偏向電磁石と同じく50GeV(1507A)でのばらつきは多少大きく、GL積の分布は $\sigma=0.071\%$ となっている。許容値±0.15%にはほぼ入っているが4極電磁石の場合も高磁場でのGL積を見てシャッフリングをおこない、ハーモニック補正の低減を検討する必要がある。4極電磁石の場合は直線部に置かれたものの内25台分の磁石の補正コイルをパターン励磁してハーモニック補正することを考えている。

## 5. まとめ

50GeV-MRの主電磁石の製作がほぼ完了し、磁場測定が順調に進んでいる。今回偏向電磁石97台中64台と4極電磁石216台中48台の磁場測定の結果を解析した。BL積とGL積のばらつきはCOD補正やハーモニック補正のために要求されている許容値にほぼ入っている。今後さらに磁場測定を進めていくと共に、高磁場での磁場のばらつき等をみてシャッフリングを行いCOD補正やハーモニック補正の補正量を低減できるように検討する。

## 参考文献

- [1] 仁木和昭 他, Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, Nov. 2003, p.81.
- [2] 柳岡栄一 他, Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, Nov. 2003, p.193.
- [3] E.Yanaoka, *et al.*, This Proceedings.
- [4] 仁木和昭 他, Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, Nov. 2003, p.205.
- [5] S.Machida, private communication.