# J-PARC 50GeV-MR 電磁石の量産機のための磁場測定装置について

柳岡栄一、岩井正明、江川一美、小俣和夫、仁木和昭、武藤正文、森義治 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

2001 年度から始まった大強度陽子加速器計画(J-PARC) 50GeV-MR の偏向電磁石、4 重極電磁石、6 重極電磁石及 び軌道補正電磁石の量産が進んでいる。全ての電磁石は、 磁場測定により性能を検証してからトンネル内に配置さ れる。

多数の電磁石の磁場測定では、電磁石の設置する時の設 置誤差、測定誤差をなくす必要があり、かつ電磁石の設置 や、温度を室温になじませる等に時間を要するので、迅速 性も求められる。これらの要求を充たす安定した操作の容 易な磁場測定装置を開発を進めている。

### 1 磁場測定装置

現在、磁場測定器として既存のもの、製作中また計画中のものを、表1に示す。

磁場測定器	測定目的	測定磁石
ホール素子+3 軸移動架台	磁場分布、エディカレント	BM、QM、SM
NMR 測定器	絶対磁場、エディカレント	ВМ
フリップフロップコイル	BL 積	ВМ
ハーモニックコイル	多極成分、GL 積	QM、 SM
ピックアップコイル	BL 積、エディカレント	ВМ

表1 磁場測定器一覧

#### BM:偏向電磁石 QM:4 重極電磁石 SM:6 重極電磁石

量産機の測定としては主に、フリップフロップコイルと ハーモニックコイルを用いる。また、NMR 測定器は絶対 磁場確認に、その他の装置は詳細な電磁石磁場特性を検証 するため数台程度について主に標本抽出的に使われる。

### 1.1 フリップフロップコイル(FF コイル)

偏向電磁石(BM)の中心面上での磁場の軸方向の積分 (BL積)測定に使用される。そのため、コイルは中心面内 に軸を持ちその軸を中心に回転出来る構造となっている。 BMの鉄芯長は5850mmと長いため、FF コイルの有効長も 7000mmと長くなっている。コイルはGFRPの円筒(ボビ ン)の外周面に作られた溝に巻かれており、ターン数は2 ターン、横幅は39mm、又コイルには  $\phi$ 0.18mmの銅線が 使用されている。ボビン全長は7250mm、直径は $\phi$ 40mm で るが、7m もの GFRP の円筒が一体では得られない為、ボ ビンは5つの1.2~1.5mの円筒を継げて作ってあり、全長を 4 ケ所の軸受けで支える構造となっている。

BM は鉄芯 5850mm と長い H 型であり、且つ軌道の曲率 に合わせて湾曲したセクター型構造の電磁石となってい る。よってFF コイルは電磁石の側面から出し入れ出来ず、 電磁石の軌道に沿って軸方向から出し入れする。このため 7m 以上のボビンを出し入れするための補助架台(コイル 待避台)が必要で、システム全体の長さは 15m になる。そ の全景を図1に示す。

図1に於て、左側に電磁石が置かれ、右半分が待避台で ある。電磁石の両側には FF コイルの回転を支持するため の支持台が置かれ、左側の支持台に回転用モーターが取り 付けられている。待避台は挿入する時のガイドにもなって いる。

FF コイルは回転を要するため直線構造となっている。 このため湾曲した BM の軌道上には正確には設置できない。 本システムでは BM のサジッタ幅の中心を通る位置を FF コイルの設定中心としている。電磁石はセクター型のため 横方向の設定位置のエラーは BL 積のエラーとなるが、こ の大きさは横方向のズレ 1mm 当たり 0.001%であり問題な い。

### 1.2 ハーモニックコイル

ハーモニックコイルは、4 重極電磁石(QM)、6 重極電 磁石(SM)の各主極成分と高次成分の軸方向積分値の測 定に用いられる。QMはボア直径130mmと140mmの2種 類があり、鉄芯長は0.86mから1.86m、まで7種類ある。 そのためハーモニックコイルは、1.46mまでのQM用と 1.56m以上のQM用の長短2本のボビン使う。

短尺ボビンは、AFRP で作られた 2.55m x ¢120mm の円 筒形をしている。ボビンは内側に十字の板を組み込み、そ の板に彫られた溝にハーモニックコイルが、巻かれている。 コイルの種類はロングコイル 1、バッキングコイル 1、及 びショートコイル 3 となっている。ロングコイルは、円筒 中心と半径 59.5mm の位置を幅 2.1m で、1 ターンである。



図1 フリップフロップコイル全体図

これが測定の中心コイルとなる。バッキングコイルは半径 15mm と半径 44.63mm を長さ 2.1m で 2 ターン巻かれてい る。このコイルはロングコイルの 4 極成分を打ち消す時に 使われる。ショートコイルは半径 5mm と半径 50mm の間 に、軸方向に 3 ケ所(中央に 200mm 長コイル、両端に 650mm 長コイル) 巻かれている。

長尺ボビンは、長さが 3.5m にも達するので AFRP を使 っても設置した時の中央部の撓みが大きくなるという問 題がある。特に内部に GFRP の板を入れると、それが重り となりさらに撓みが大きくなりほとんど実用にならない。 そこで長尺ボビンは外側にコイルを巻くタンジェンシャ ルハーモクックコイルを検討している。

ハーモニックコイルは安定に回転することが必要で、ボ ビンの回転による捩じれや振動を極力軽減する必要があ る。そこでボビンの芯直性、真円度等の工作精度と形状の 安定さが求められる。芯直性を、高めるために AFRP を使 い、円筒の厚さを 5mm として可能なかぎり重量を抑え、 ボビン中央部の撓みを抑えた。短尺ボビンの場合計算上 140µm となっている。真円度については、軸受により支え られる端部は特に重要であり、10µm の精度で加工されて いる。

図2にハーモクックコイル磁場測定装置の全体図を示す。 滑らかな回転の為に、軸受けにはエアースピンドルを採用 した(図2の(2)(両側))。エアースピンドルは、電磁石 からの漏れ磁場の影響を受けないようにセラミック製と なっている。ボビンの両端部にはそれぞれモータとロータ リーエンコーダが取り付けられている。エアースピンドル の位置調整は、その下部にある三軸の調整機構で行われる。



最下部の支持台(図中の(4)、(5))は 0.1µm の非焼成の セラミックを含有した高密度コンクリートで作られてい る。これはボビン回転中の架台振動による測定への影響を 避けるため、組立形状の構造を避け重量と剛性を高めるた めに採用した。

# 2 データ処理システム

図3中一番上がFF コイル、一番下がハーモニックコイ ルを示す。ハーモニックコイルは短尺ボビンと、長尺ボビ ンを入れ替えて使う。ボビン内の五つのコイルの出力はボ ビンからでたところで2線式の4×8マトリクスの切り替 え器(スイッチングボード)に結線されている。

測定の中心となる積分器は、FF コイルからの信号とス イッチングボードを経由した回転コイルからの信号を切 り替えて計測する。ハーモニックコイルの時には、エンコ ーダからのパルス読み取りで回転角位置も計測する。これ らの測定機器は、GPIBを通してパソコンで制御する。制 御のソフトウエアの開発環境として Labview を使っている。



図3 mass measurement system セットアップ図

## 3 測定結果

3.1 測定結果と雑音対策

FF コイルの測定系の大半ができ、動作試験を行なって いる。図4はBMを801A(約0.6T)で励磁した時の測定結 果の一例である。CW と CCW は回転用モータ側からみて 定義している。

図 4 では CW,CCW および CW と CCW の和を示している。



CW と CCW のデータは、大きさが同じで、回転方向に より符号が逆になるはずなので、差が BL 積の大きさを示 し、和は0になるはずである。しかし図4では0になって いない。CW が CCW にくらべて 7%程度大きく又 CW と CCW が非対称になっている。

この非対称は、なんらかの雑音が影響していると思われ 種々調査の結果、実際電磁石用電源の VCB を入れるとコ イルからの信号に雑音がのることがわかった。電源と電磁 石をつなぐケーブルをはずしても雑音が出るため、これは IGBTの電源が出す基本周波数128kHzとその高調波による 放射ノイズが原因であろうと考えられる。

コイルからの出力をスペクトロアナライザで周波数解 析により、電源の VCB を入れると、100kHz 以上で広域に わたる雑音がのる亊がわかった。



そこでローパスフィルター(LPF) をコイルの出力端に入 れた。フィルターの時定数は、波形を歪ませないように可 能な限り高い周波数で、かつ CW と CCW の非対称性が充 分小さくなるように検討し 11.2µsec とした。(図6)これ により、(CW-CCW)/(CW+CCW)は 0.005%以下となった。

雑音が軽減されたところで、励磁電流を変えて NMR 測 定器で磁場を参照しながら測定した。NMR 測定器は BM 軸方向の中心に置かれている。図 7 は測定した BL 積 (CW+CCW)と磁場を、電磁石鉄芯中の磁場が飽和してい ない 20GeV 相当の 1105 A で規格化したものと、その差で ある。磁場が飽和してない 1500A 以下では、磁場の強さの カーブとよく一致している。



飽和がおこっている領域では、BL 積が小さくなっている。この様子はホール素子とNMR 測定器で測定した磁場

分布から求めた BL 積とよくあっていた。電磁石の飽和が 進むに連れ、電磁石端部からの漏れ磁場が次第に大きくな っていく影響と思われる。

#### 3.2 安定度と再現性

測定器の長時間安定性と設置毎の再現性を見るため、12 時間の連続励磁による BL 積の測定と電磁石へのコイルの 待避・挿入を繰り返しその都度測定する再現測定を行った。



図 8 NMR で規格化した FF コイルの出力

図 8 は NMR で規格化された BL 積の安定度の様子を示 す。NMR を含めた測定は 6 時間であったが、測定値のば らつきは $\sigma$  =1.56x10<sup>-5</sup> であった。これが FF コイルの測 定系の分解能と考えられる。又再現測定でもほぼ同様の結 果が得られた。

## 4 今後の予定と課題

測定システムの完成には、まだ幾つかの設計、製作が残 っている。現在製作中の短尺ボビンのコイルを、架台に取 り付け、動作試験を行ない、正確性、安定性等を高めて行 く。それと平行して、長尺ボビンの設計、製作も進めなけ ればならなが、長いボビンは、その長さゆえに製作の精度 を達成するのがより困難になっている。

一方、測定にこぎつけた FF コイルも、多数の電磁石を 複数の人が測定する事となるので、測定結果に個人差が出 るのをふせぐ必要がある。そこで測定器の設置やプログラ ム操作を、誰でも簡単におこなえてミスが起こらないよう にしなければならない。設置方法とプログラムの、簡略化 とマニュアル作成等をおこなう必要がある。磁場測定シス テムの完成を急いでいる。

## 参考文献

- [1] KEK Report 2002-13 ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR J-PARC, March 2003.
- [2] M.MUTO, *et al.*, Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Osaka, Oct. 29-31 2001, p277.
- [3] CERN ACCELERATOR SCHOOL MAGNETIC MEASUREENT AND ALIGNMENT, CERN92-05, 15 September 1992.
- [4] K.NIKI, et. al., This Proceeding