

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。

表 1 磁場測定器一覧

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	BM
フリップフロップコイル	BL積	BM
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	BM

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 と長い為、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(ポビン) 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 $\phi 0.18\text{mm}$ の銅線が使用されている。ポビン全長は 7250mm、直径は $\phi 40\text{mm}$ であるが、7m もの GFRP の円筒が一体では得られない為、ポビンは 5 つの 1.2~1.5m の円筒を継いで作っており、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 以上のポ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 本のポビンを使う。

短尺ポビンは、AFRP で作られた 2.55m x $\phi 120\text{mm}$ の円筒形をしている。ポ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

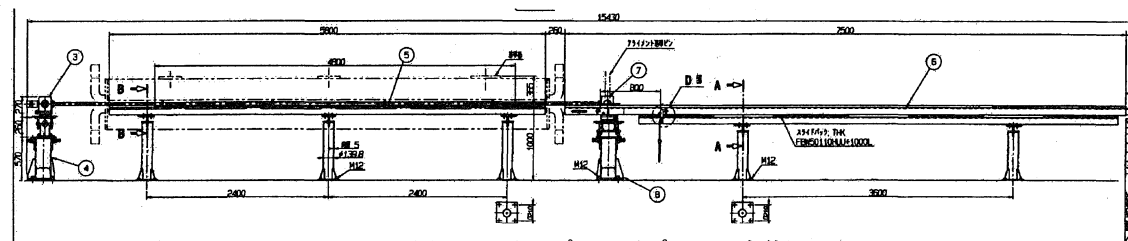


図 1 フリップフロップコイル全体図

いる。コイルの種類はロングコイル 1、バックアップコイル 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。これが測定のコイルとなる。バックアップコイルは半径 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。

長尺ポピンは、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。そこで長尺ポピンは外側にコイルを巻くタンジェンシャルハーモックコイルを検討している。

ハーモックコイルは安定に回転することが必要で、ポピンの回転による振れや振動を極力軽減する必要がある。そこでポピンの芯直性、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、ポピン中央部の撓みを抑えた。短尺ポピンの場合計算上 140 μ m 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、10 μ m の精度で加工されている。

図 2 にハーモ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。ポピ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。

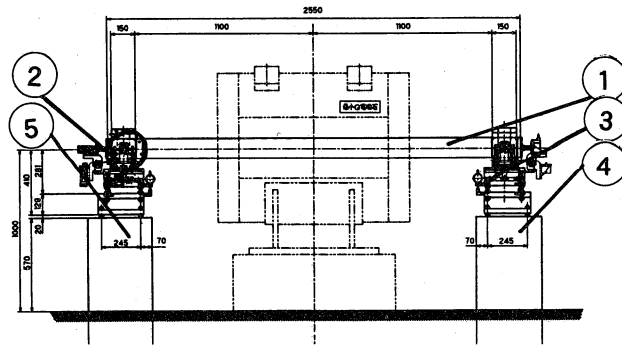


図 2 回転コイル全体図 (短円筒)

最下部の支持台(図中の(4)、(5))は 0.1 μ m 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。これはポピ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ポピンと、長尺ポピンを入れ替えて使う。ポピン内の五つのコイルの出力はポピンからでたところで 2 線式の 4 \times 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。制御のソフトウェアの開発環境として Labview を使っている。

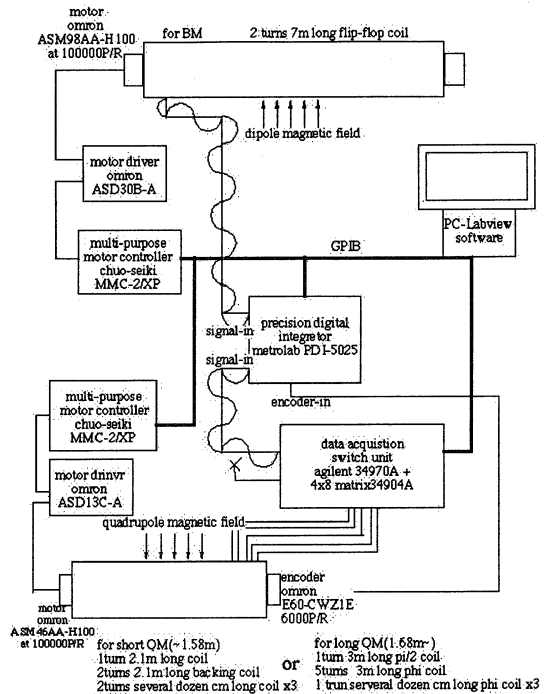


図 3 mass measurement system セットアップ図

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。

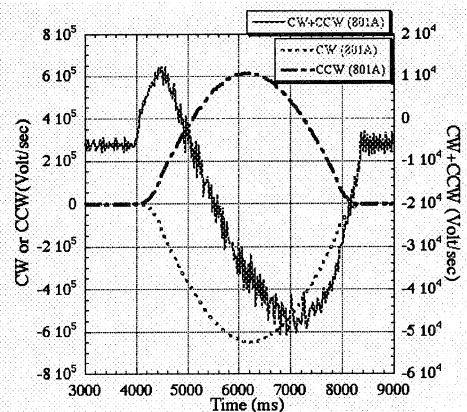


図 4 回転方向の違いによる出力比較

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 に比べて 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、なんらかの雑音に影響していると思われる種々調査の結果、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の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のの事がわかった。

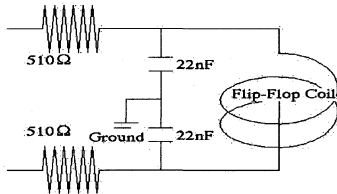


図 6 LPF 回路図

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。

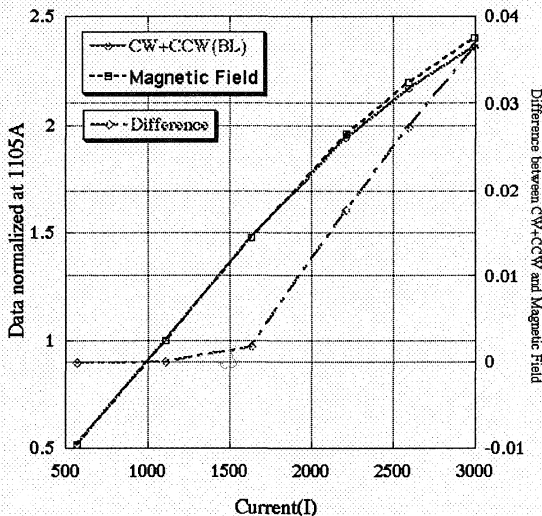


図 7 BL 積(CW+CCW) の Excitation Curve

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・挿入を繰り返してその都度測定する再現測定を行った。

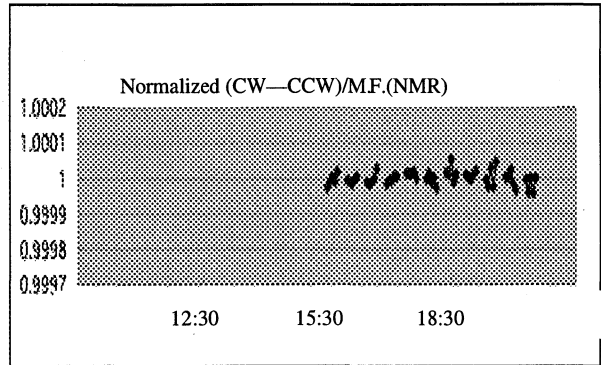


図 8 NMR で規格化した FF コイルの出力

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 $\sigma=1.56 \times 10^{-5}$ 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ぬが、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 MEASUREMENT AND ALIGNMENT, CERN92-05, 15 September 1992.
- [4] K.NIKI, *et al.*, This Proceeding.