

J-PARC 50GeV-MR 電磁石とその製作状況について

仁木和昭、江川一美、佐藤 皓、武藤正文、森 義治、柳岡栄一

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

高エネルギー加速器研究機構と日本原子核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 年度から始まった。この計画の 50GeV-MR の主要電磁石である偏向、4 極、6 極そして補正電磁石の量産も始まっている。この報告では電磁石の設計や、R&D 機による検討結果と問題点、また実機 1 号機での結果について述べ、現在までの量産機製作状況と合わせて鋼板磁気特性と製作精度について報告する。

1 電磁石の構成

電磁石の主要パラメーターを表 1 に示す[1]。

表 1: 電磁石主要諸元

偏向電磁石	
Bending Radius	89.381 m
Field	0.143 T (for 3 GeV) 1.9 T (for 50 GeV)
Useful Aperture (horizontal)	120 mm ($\leq \pm 5 \times 10^{-4}$ at injection)
Gap Height	106 mm
Length	5.85 m
Number	96+1
4 極電磁石 (11 ファミリー)	
Field Gradient	1.35 T/m (for 3 GeV) 18, 16.3, 16.9 T/m (for 50 GeV),
Aperture	130, 140 mm ϕ
Useful Aperture (horizontal)	132 mm $\leq \pm 5 \times 10^{-4}$ at injection)
Length	0.86 m ~ 1.86 m (7 種類)
Number	216
6 極電磁石 (3 ファミリー)	
Max. Field Gradient	230 T/m ²
Aperture	136 mm ϕ
Length	0.7 m
Number	72
補正電磁石	
Max. Field	0.2 T
Aperture	170 mm ϕ
Length	0.2 m
Number	186

偏向電磁石群は最大磁場 1.9T、ギャップ長 106mm で、50-GeV 主リングを構成する 96 台と 1 台の Reference 用電磁石からなっている。4 極電磁石群は 11 ファミリーの全 216 台からなっている。ただし長さは 7 種類ある。また 11 ファミリーの内 7 ファミリー 192 台はボア直径 130mm で最大磁場勾配 18 T/m であるが、3 ファミリー 18 台が 140 mm で 16.3 T/m、1 ファミリー 6 台が 140 mm で 16.9 T/m の設計となっている。6 極電磁石は 3 ファミリーで 72 台、補正電磁石は垂直用、水平用合わせて 186 台である。

偏向電磁石のコイルは 30 ターンで抵抗 45m Ω 、インダクタンス 101mH を持っており、全 97 台が 6 式の最大約 3000A のパターン電源で励磁される。全ての電磁石は約 3.64 秒の周期でパターン励磁されるが、そのための高速のスイッチング素子 IGBT、IEGT を使った電源システムも現在製作が進んでいる[2]。

2 電磁石の設計 (鋼板の選択)

2.1 偏向及び 4 極電磁石

偏向及び 4 極電磁石の基本的設計については [1] で述べたが、重要なこととして電磁鋼板としては純鉄系に近く、厚みのある JIS 規格 65A1600 相当という鋼板を選択したことである。高磁場を出すには、2T 以上の鉄中での磁気特性が良いことと、また占積率も稼ぐ必要があることのためである。しかしこの鋼板は保磁力が高く、磁石の残留磁場が大きくなる。そのため保磁力のばらつきを小さくするために磁石製作時に鋼板のシャッフリングをすることを考えた。シャッフリングには鋼板製造時に透磁率や保磁力などの磁気特性のデータを事前に測定して反映させる。具体的にはこの鋼板の保磁力の分布が約 120A/m を中心に $\pm 12\%$ の広がりを持っていると予測されているので $\pm 4\%$ の 3 つの領域に分け 4 極電磁石においては各ファミリーは $\pm 4\%$ の領域毎の鋼板のみを使う、また偏向電磁石においてはまず真ん中の $\pm 4\%$ の領域で製作し、あとは上と下に外れた磁気特性の鋼板を半分づつまぜて製作することにした。

2.2 6 極及び補正電磁石

6 極と補正電磁石は偏向や 4 極電磁石ほど高磁場を必要としないので、高磁場特性も比較的良く保磁力も小さい鋼板である JIS 規格 50A470 を選択した。6 極は 3 つのファミリーがあるが鋼板レベルでのシャッフリングはしない。

3 R&D 機、実機 1 号機の製作・試験

磁気特性や機械的な精度を検証するため実機サイズの

R&D 機を製作した[1]。偏向電磁石については R&D 機の結果からいくつかの変更を実機で行った。R&D 機では磁極端部の形状はロゴスキーカットをしていたが、実機では単純な直角のまま（カットなし）とした。また側板の材質を鉄から SUS に変更した。現在偏向、4 極電磁石等の実機の量産を開始しており、完成した 1 号機の磁場分布などの詳細なデータが測定されているところである[3]。

3.1 偏向電磁石

R&D 機を 50GeV でパターン励磁した場合に、端板近くの磁極先端部（図 1）が外側に向かって最大で 2.2mm 程動くことが分かった。端板自身も約 0.5mm 程動く。これは R&D 機端部がロゴスキーカットの形状をしているため端板の押さえが不十分で、高磁場によって鋼板間に働

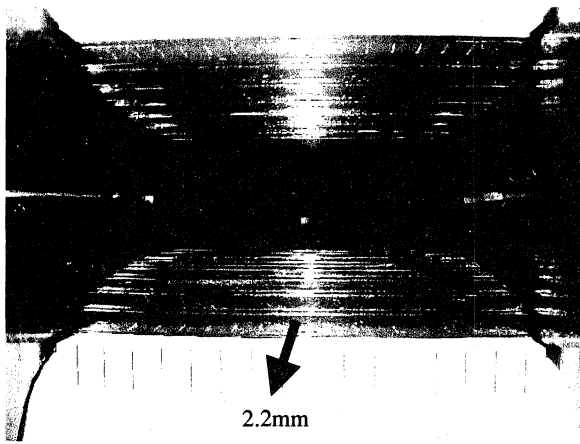


図 1：偏向電磁石 R&D 機の磁極端部（ロゴスキー形状）

く反発力でパターン励磁運転に同期して鋼板がめくれる様に動くためであった。ロゴスキー部は無機皮膜の鋼板を接着剤で固めていたがパターンを繰り返すうちに剥がれてしまった。このため実機ではロゴスキーをやめ直角のままとし端板全体で磁極を押さえることにした。さらに端板の厚みを増やし、渦電流を押さえる目的もあったスリットを止め、さらに端板自身を押さえるための支持具も設けた。これによって構造計算上では 1mm 程度以下まで動きを押さえることができ、実際の実機 1 号機の測定結果では 0.3mm 以下となった。ロゴスキーをやめたため励磁レベルに対する有効長の変化は TOSCA の計算結果によれば飽和していないときと 50GeV 励磁の時で 4mm 程度の変化だったものが 40mm 程度まで大きくなると予想される。しかし BL 積の横方向依存性は励磁レベルによらずビーム軌道中心と中心から 8cm 離れたところで、ロゴスキーカットと直角のままのいずれの場合もその差は 4mm 程度で全長 5.850m に対して 0.07%以下である[3]。

R&D 機をパターン励磁した場合に電流パターンに対してフラットトップで、時定数約 0.5 秒の磁場の遅れが見られた。大きさは 50GeV(1.9T)運転の時、1.9s の立ち上がりに対してフラットトップになった時点で約 50 ガウス程度であった。また 30GeV(1.15T)運転ではその遅れの大きさは 2 ガウス以下であった。つまりこの現象は 30GeV を超えてから急激に起っている。この偏向電磁石は 30GeV を超えたあたりから飽和が始まり、鉄の側板に急激に磁

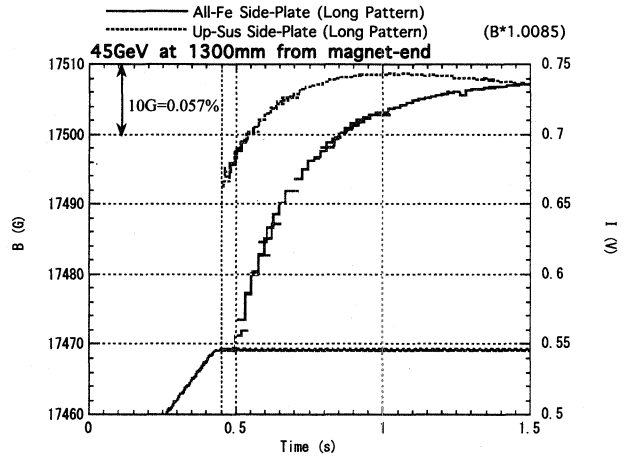


図 2：R&D 機のパターン磁場

束が入るため、側板中での渦電流がその原因ではないかと考えられる。実際、厚さ 1 cm 程度の厚みの側板に流れる渦電流の時定数は秒のオーダーであると予想された。またパターンの立ち上がりを 1.9s、4 s、8 s と変えて測定した結果、フラットトップになった時点での磁場の遅れの大きさは、明らかに立ち上がり時間に反比例依存していることが分かった。図 2 の実線は 45GeV 運転、1.9s 立ち上がり時での NMR (20ms の時間分解能で測定可能) で測定した磁場の変化を示す。この問題を解決するために、R&D 機の上側板のみを SUS に変更して磁場の変化を NMR で測定した。図 2 の点線が変更後の測定結果である。磁場の変化の大きさは SUS に変更前（実線）と変更後（点線）で 1/2 以下に改善していることが分かる。Opera-2D の計算では約 2/3 程度に改善すると予測していたが、予想以上に改善した。これらの結果実機では上下側板、左右側板すべてを SUS に変えることにした。最終的に実機 1 号機で得られた結果が図 3 の B である。電流パターン I (3.64 秒周期の標準パターン) に対してむしろ逆に磁場が上がってしまう傾向になった。これは側板の渦電流の効果がなくなって、別の効果が見えてきたものと考えられる。コイル中に流れる渦電流がこのような効果を引き出す、さらに定量的な評価が必要である。いずれにしてもこの効果を補正するには電流パターンを立ち上がりからフラットトップへ移る時に少し下げ方向に

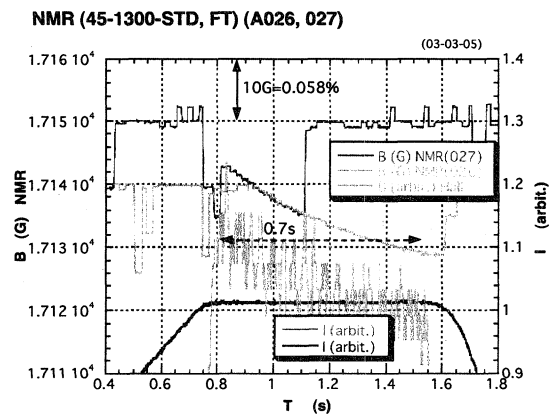


図 3：実機 1 号機のパターン磁場

することで可能であり、逆に上げる方向の補正より容易と考えている。

実機1号機での磁場測定・試験の結果、所定の性能がほぼ得られた[3]。NMRとホール素子で測定された50GeV励磁時(3015A)でのBL積は11.236Tmとなり1.9T×5.85mにたいして約1%の-marginであった。

3.2 4極電磁石

4極電磁石は磁極先端部の磁場がそれほど強くないので磁極先端部や端板先端部の動きは50GeVパターン励磁時でも40μmほどであった。そのため実機の磁極端部の形状はR&D機とほぼ同じスローカットとした[1]。また端板にはR&D機と同様なスリットを入れた。また側板による渦電流はそれほど観測されなかったので実機の側板は鉄のままとした。しかし偏向電磁石実機と同様にコイルによる渦電流の効果と考えられる磁場の変化が起こっているため、電源による同様な補正が必要となる。

R&D機は回転コイルによる磁場測定を行ったが[1]、実機用の回転コイルは現在準備中[4]である。そのためまずホール素子を使って実機1号機(130mmφ、長さ1260mm)の磁場分布やGL積を測定した[3]。その結果得られたGL積は測定した1500A励磁時(50GeVの設計値は1507A)22.71T/m・mで、18T/m×1.26mとほぼ同じ値となっている。

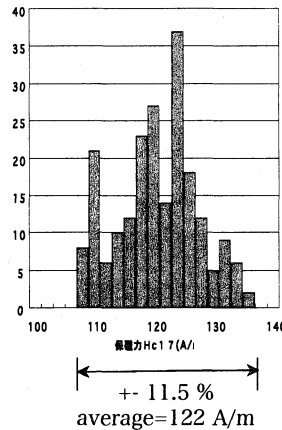
4 電磁石の量産状況と磁場測定

2001年度から電磁石の量産が始まっており既に偏向電磁石が30台以上、4極電磁石が40台以上製作されている。磁石の生産に応じて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。磁石寸法精度は製作が終了したものについて、鋼板の磁気特性については必要な鋼板の製造が終了したので全データがすでに出てきている。磁石寸法精度と鋼板の磁気特性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補正に必要な補正電磁石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、μr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。磁石製造メーカー及び鋼板製造メーカーの標準的な実力値から磁石の仕様として寸法精度についてはギャップ長のばらつきを±50μm、鉄芯長のばらつきを±2mmとした。また電磁鋼板65A1600の磁気特性についてはHc(1.7T)のばらつきを±12%、μr(1.5kG)のばらつきを±10%とした。この場合上の式からBL積のエラーは入射時で0.2%をこえることになる。COD補正をできるだけ楽にするためにこのエラーを小さくする必要がある。そのため2章で述べたような鋼板のシャッフリングを行いHcのばらつきを1/3にすることでBL積のエラーを0.14%以下にすることができる。この値であれば現在の補正電磁石の性能でCODを補正することができる計算になっている。今までに得られているデ

for Bending Magnet
sample number= 210
total weight= 3,104 t



for Quadrupole Magnet
sample number=152
total weight=2.091 t

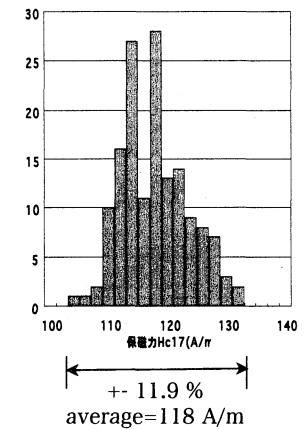


図4：保磁力(Hc)の分布

ータでは磁石の寸法精度は仕様をほぼ満たしている。また鋼板の磁気特性も仕様を満たしている。例としてHcの分布を図4に示す。左は偏向電磁石用の全鋼板3104トン、右は4極電磁石用の全鋼板2091トンからのサンプルリングのデータである。サンプリングは全ての母材コイルで行っている。また母材コイルは同じ製鋼チャージの中の一部であるのでその中では保磁力はそれほど変わらないと考えている。

電磁石の量産に対応して今年度から実機の磁場測定を行う予定にしておりその準備をすすめている[4]。偏向電磁石用に7m長のフリップフロップコイルを製作し測定を始めた。12時間の長時間Runの結果、測定系の分解能は2×10⁻⁵以下であった。そして4極電磁石用に2m長の回転コイルをAFRP(アルミナFRP)のポピンに巻いて製作し、測定の準備に入っている。さらに長い4極電磁石用の3m長のコイルはAFRPを用いてもたわみが大きくなるので磁石の中での支えができないかも含めて現在検討中である。

5 まとめ

J-PARC 50GeV-MRの主電磁石が2001年度から量産に入っており、偏向電磁石と4極電磁石の実機1号機の磁場測定や運転試験を行っている。R&D機で指摘された磁極先端部の動きや側板の渦電流等の問題点が改良されている。また量産機の生産も順調に進んでおり、磁石寸法精度や鋼板磁気特性は予想された範囲にある。現在量産機のための磁場測定装置の準備を行っているところである。

参考文献

- [1] M. Muto, *et al.*, Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Osaka, Oct. 29-31, 2001, p.277.
- [2] 武藤正文 他, This Proceedings.
- [3] 仁木和昭 他, This Proceedings.
- [4] 柳岡栄一 他, This Proceedings.