

DEVELOPMENT OF THE TRANSIENT MAGNETIC FIELD MEASUREMENT EQUIPMENTS FOR J-PARC MR MAIN MAGNETS

Koji Ishii^{A)}, Kazumi Egawa^{A)}, Hitoshi Kobayashi^{A)}, Katsuya Okamura^{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, 108-0014

Abstract

The mass measurement of J-PARC main ring magnets had been completed till the end of fiscal year 2005. It was a measurement of the field producing with DC current. Before mass measurement, the dependence of longitudinal direction position was found in the transient magnetic field measurement of R&D bending magnet. We have thought that transient magnetic field measurement of the whole BL product along beam orbit was necessary. So for transient magnetic field measurement for bending magnet, we developed the equipment, in addition by which measures the magnetic field distorted by the eddy current in a vacuum chamber. The transient magnetic field measurement have been done until April 2006. Now we analyze the data.

J-PARC MR 主電磁石のための変動磁場測定装置の開発

1. 過渡変化の磁場測定の必要性

現在、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の建設中である。主リングの主電磁石群(偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石)すべてについて、直流電流で励磁した磁場測定を2005年度末までに終え、各電磁石の性能を検証した。[1][2]

さかのぼって、実機が製造される前に、実機とほぼ同一につくられたR&D用偏向電磁石を変動する電流(パターン電流)で励磁し、磁場測定をした。図1は、200A(0.13T)から3015A(0.9T)まで1.9secで上げ、10secのフラットトップの後0.87secで下げ、フラットボトム(約12sec)の電流パターンで励磁した場合の各位置での磁場変化である。ビーム軌道方向の電磁石の両端では、磁場の遅れ、中心に近いところでは、オーバーシュートがみられた。この測定は、group3のDTM151で連続にデータをとったもので、横軸は測定回数を表し、50回の測定でほぼ7secである。各点は別々に測定しているのに、時間がずれているが、周期は一致している。

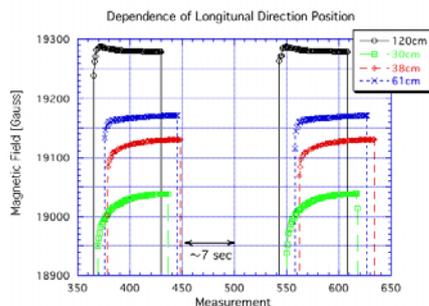


図1 偏向電磁石の磁場変化の位置依存

これは電磁石の側板に流れる渦電流が大きく影響していると思われ、側板の材質を変えることにより改善された。しかし、ビームに与える影響を評価するために、各点での磁場の変化だけでなく、磁石全長にわたるBL積の過渡変化も測定するべきである。

2. 測定機器

2.1 必要条件

磁場の過渡変化は、測定箇所 coils (ピックアップコイル)を設置し、電磁石をパターン電流で励磁したとき、コイル両端のあらわれる電圧 $V(=dB/dt)$ を積分することで測定する。偏向電磁石全長にわたりビーム軌道に沿ったBL積を測るために、長手方向は電磁石の有効長以上長さで、ビーム軌道と同じ曲率で湾曲したコイルが必要である。また、磁場の時間変化のために、ボビンやコイル支持部品には、磁性体だけでなく、伝導体も使えない。直流電流での測定に使用した偏向電磁石用のフリップフロップコイル[3]は、フリップフロップさせるために、細長い長方形で湾曲しておらず、支持機構にアルミが使われていてこの目的には使えない。

2.2 ピックアップコイル形状

長さ7000mm幅8mm継ぎ目のない一体のG10ボビンを、電磁石と同一の曲率半径89381mmに湾曲させ両端600mmは直線状になる様にして、 $\phi 0.2\text{mm}$ のホルマル線を5巻きした。(図2)予備として1つのボビンにコイルを2つ巻いている。

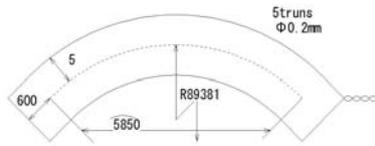


図2 ピックアップコイル外形

過渡変化の測定はノイズの影響を受けやすいので、s/n比をあげるために巻数を多くしたいが、7000mmと長いために5ターン以上は難しい。1.9secで1.9Tまで励磁したときコイル端電圧は $V = d\phi / dt = n [turn] S [m^2] dB/dt [T/sec] = 5 \times 5.8 \times 0.008 \times 1.9 / 1.9 = 0.23 [V]$ で、YOKOGAWA WE7235を使うと1Vレンジで分解能 $1.5 \times 10^{-5} V$ であるから、精度は $1.5 \times 10^{-5} / 0.23 = 6.5 \times 10^{-5}$ となる。電流精度と次に述べる磁場の歪みの測定から推測される必要最小限の精度は、得られるだろう。

2.3真空ダクトへの設置

電磁石は、真空ダクトを包含した状態で使用するものであり、SUS316L製のダクトは非磁性であるが伝導性があるため渦電流が流れる。ダクトの渦電流により、ダクト内部の磁場は遅れる、これは電流パターンに依存して、 dI/dt が大きくなるほど強い渦電流が流れると思われる。電流パターンが同じでも、影響は位置に依存し、ダクト中心が一番大きくダクト内面に近づくにつれ少なくなると思われる。図3は、ダクトに流れる渦電流がつくる中心面上の磁場を計算したものである。横軸は水平な方向の位置をあらわし、ビーム軌道中心を0ビーム軌道湾曲の外側を正とし、縦軸は渦電流がつくる磁場を、中心位置での値を0としてあらわしている。

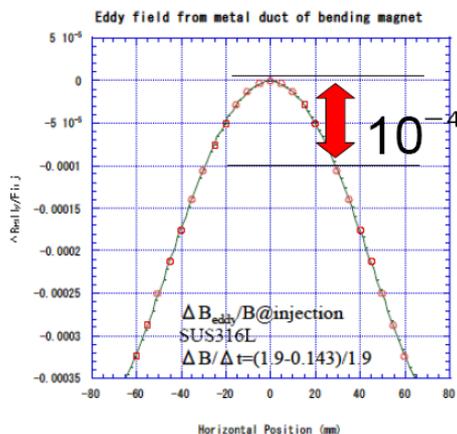


図3 真空ダクトの渦電流による磁場の歪み (2001/11/16第二回大強度陽子加速器計画技術報告会、湯浅由将氏による)

今回、測定器製作にあたり、真空ダクトに流れる渦電流の影響が測れる仕様に設計した。

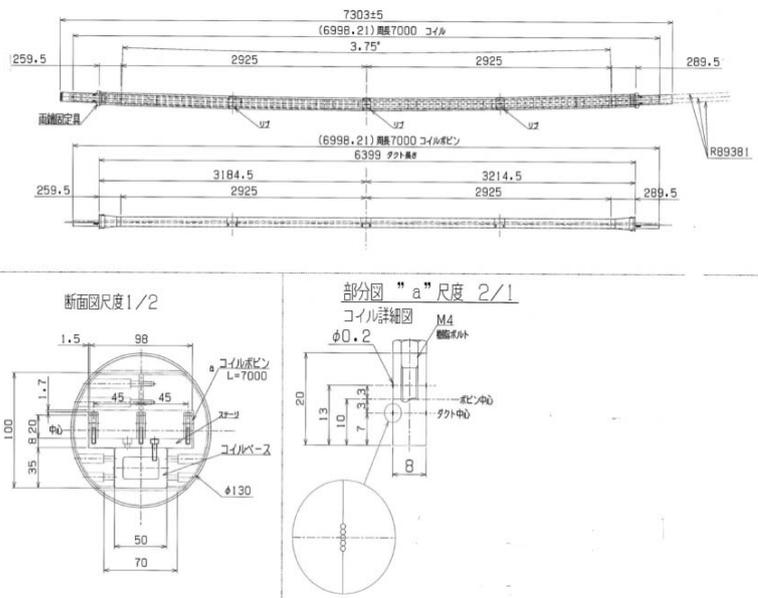


図4 測定装置全体図

まず、位置による依存を見るために、3つのボビン(2つのコイル)を、長手方向両端をそろえ、コイル面が同一平面上にあるように、45mmの間隔でG10の板(コイルステージ)に固定した。固定することによりコイルの相対的な位置を保証すると共に、細長く曲がりやすいボビンを、必要なコイル形状に固定する役割をはたしている。(図4)

3本のコイルを固定したコイルステージは、全長6399mm管状のダクトに円滑でコイルが変形することなく、挿入・引出しするために、十分な剛性を持ったコイルベース(G10)に固定した。(図4、左下)またダクトに設置されたときにダクト断面においてコイルの位置を保障するために、コイル、コイルステージとコイルベースを包むように、長手方向に3箇所(図4上)リブをつけた。リブは出入れの際すべりやすくするために、マシニングナイロンを使い、テーパをつけ、ダクトとの隙間を片側1mmにした。(図5)

当初困難が予想されたが、組上げられた部材は、引っかかりたりすることなく、適度な力で真空ダクトに挿入できた。(図6)最後にコイルベースの両端部にダクトの淵にあてて、縦方向の位置を固定する部品を取付け、完成となる。完成した測定器は、電磁石に取付け変動磁場測定に使用される。



図5 リブ

図6 真空ダクトへの挿入試験

2.4 コイルの個性

コイルは測定装置全体で6つ巻かれている。磁場の位置依存を測定するには、6つのコイルが同一であるのが理想であるが、予想される磁場の歪みを測定するには、 10^{-4} 以上の精度での製作が必要で、技術的にも費用的にも困難であった。そこで、コイルの個性を特定しようと、面積、抵抗とインダクタンスを測った。この中でインダクタンスが一番測定に影響する。また、測定方法により個性差を較正する方法も検討した。

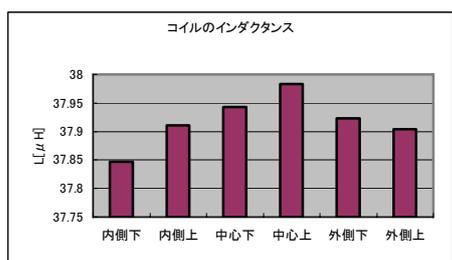


図7 コイルのインダクタンス

3. 測定

パターン電流で励磁したとき、コイル銅線の両端の電圧を時間毎に測る。そのコイル出力電圧を時間積分することによって、過渡変化する磁場を測定する。今回製作した測定装置には測定結果をつかって、必要なBL積パターンになるように、電流パターンを調整する目的もある。(図8)

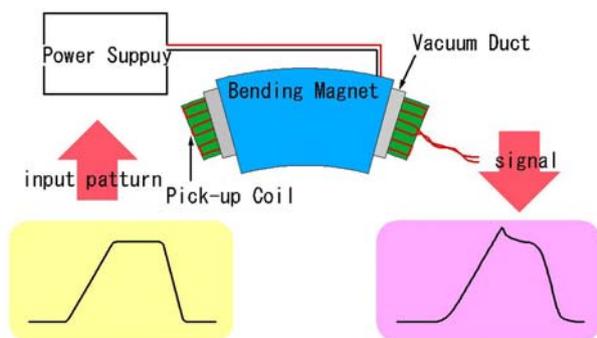


図8 ピックアップコイルを含む測定系

2005年3月下旬から4月上旬にかけて、数種類の電流パターンでの測定、1時間30分程度通電後の測定、真空ダクトを除いた測定、中心のコイルの位置に他のコイルをおいた(ダクトがないときに測定装置全体を移動)測定等をおこなった。(図9) 測定中、電磁石電源の制御方法と信号線により、信号が大きく影響されることがわかり、いくつかの方法を試した。



図9 変動磁場測定

4. 測定結果

2005/4月上旬に、パターン電流で励磁の各種類磁場測定は一区切りし、現在解析中である。図10は1.9secで3015Aに励磁したときの測定結果である。内側は中心と比べて0.2%低いが、コイルのインダクタンスも約0.2%低い。詳しくは今後の解析により、明らかにあるであろうが、測定器は必要な機能を満たすと確認できた。また、著しい、磁場の歪みも見られなかった。

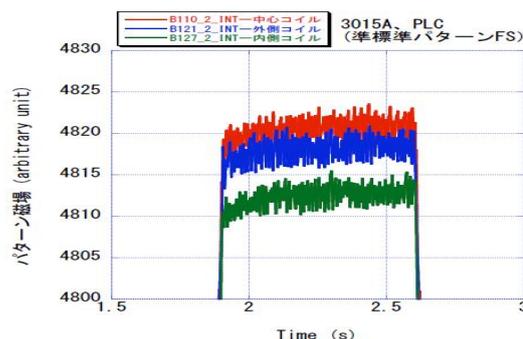


図10 偏向電磁石磁場変化

5. 今後の予定

測定データをまとめ、運転や軌道計算に必要なデータをつくと共に、さらに必要な実験がないか検討する。

参考文献

[1] 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.
[2] K. Ishii, et al., This Proceedings.
[3] E. Yanaoka, et al., Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, Nov. 2003, p193.