

Measurement of the injection bump magnets at J-PARC 3GeV RCS

Tomohiro Takayanagi^{1,A)}, Hiroyuki Harada^{B)}, Kenichiro Kanazawa^{A)}, Tomoaki Ueno^{A)}, Hirohiko Someya^{C)},
Yoshiro Irie^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)}, Yoshio Yamazaki^{A)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}, Junichiro Kamiya^{A)},
Masao Watanabe^{A)}, Masaya Kuramochi^{A)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

2-4, Shirakata, Shirane, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 319-1195, JAPAN

^{B)} Hiroshima University, ^{C)} KEK

Abstract

Magnetic fields of the injection bump magnets of the J-PARC 3GeV RCS were measured. The four shift bump magnets, which make the injection bump orbit, are placed in a row at the beam injection area. Furthermore, the Q magnets are placed next to the bump magnets. The magnetic field of the bump magnet is decreased because of the interference with each magnet. The accurate distribution of the magnetic field is necessary for the modelling of the beam injection system of the 3GeV RCS. The combination of the bump magnets and the Q magnets, or each bump magnet is reproduced in the test house.

J-PARC 3GeV RCS 入射バンプ電磁石の磁場測定

1. 緒言

J-PARC 3 GeV RCSにおける入射用バンプ電磁石（水平シフトバンプ電磁石4台、水平ペイントバンプ電磁石4台、垂直ペイント電磁石2台）の磁場測定を行なった。その内、入射バンプ軌道を生成する水平シフトバンプ電磁石^[1]の4台は連続して設置され、その上流と下流には、それぞれ1台のQ電磁石が水平シフトバンプ電磁石の4台(BUHS01-04)を挟むように近接して設置される（図1）。そのため、水平シフトバンプ電磁石の磁場は干渉を受けて減少する。

3 GeV RCSの入射システム^{[2][3]}を精度良くモデル化するためには、正確な磁場分布を必要とする。そこで、実際に配置する電磁石の組合せを実験室で再現し、単体で測定した場合と電磁石の干渉の影響を受けた磁場分布を測定して比較を行った。測定は、Q電磁石と水平シフトバンプ電磁石、及び、水平シフトバンプ電磁石の2台をそれぞれ組み合わせて行った。

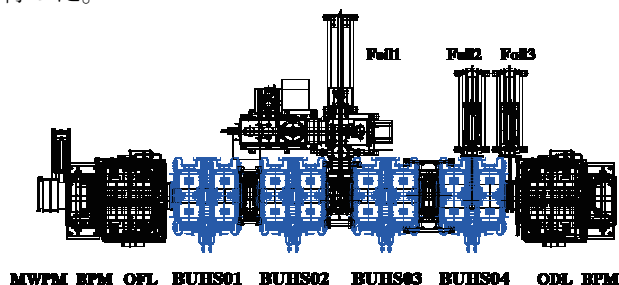


図1 水平シフトバンプ電磁石 (BUHS) 配置図

2. 磁場測定装置

2.1 マッピングバー

124個のショートサーチコイルを製作し、各々のコイルを校正した上でそのコイルを20mm間隔で直線上(Z軸=ビーム軸方向)に一直線に並べたバーを製作した(以下マッピングバーとする)。図2にサーチコイルとマッピングバー、及び、水平シフトバンプ電磁石の写真を示す。124個のコイルを直線的に並べることで、2次元(X軸=水平方向、Y軸=高さ方向)の移動で3次元のデータを取得することが可能となり、測定時間を短縮できた。コイルのボビンは(株)マックエイト製のベークライトを使用し、分解能0.01mmのデジタルノギスで測定して5.98mmだけを124個選択した。コイルは、0.01mmのエナメル線を使用し巻き数は10ターンとした。コイルを並べるバーはFRP製で、外郭で幅40mm、高さ60mmのH構造とし、長さは2500mmである。

マッピングバーはその両端を2軸のステージに固定し移動する。両端を固定したマッピングバーの中央部分は0.1mm撓むが、磁場Byの垂直成分の差は中央部と両端部で0.01%以下である。

また、電磁石を2台組み合わせて測定する場合は、1500mmのバーを延長して4000mmとした。しかし、ステージとの固定は両端のみであるため中央付近が大きく撓んでしまう。そのため、水平シフトバンプ電磁石のコア上にマッピングバーの支持台を置き、撓みを0.2mm以下とした。マッピングバーをY方向に移動する場合は、変位量に合わせてシムを挟み調整した。X方向に移動する場合は、支持台とバーの間に設けたローラーが接

¹ E-mail: takayanagi.tomohiro@jaea.go.jp

触抵抗を少なくしているため、滑らせて移動することが可能である。

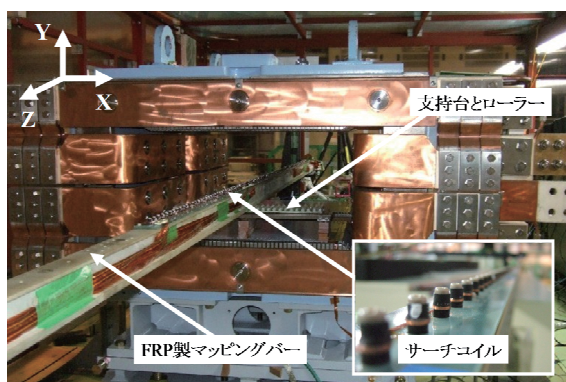


図2 サーチコイルとマッピングバー

2.1 コイルの校正

124個のコイルのボビンはデジタルノギスで測定して5.98mmの物だけを選択したが、測定精度が100分の1であったこと、また、エナメル線を巻いた場合に個体差が生じてしまうため、校正用電磁石を用いて124個すべてのコイルを校正した。校正面積を算出する方法を式1に示す。

校正用電磁石は永久磁石(386mT)で、その磁極石内にコイルと磁気プローブ(NMR)を固定した。また、コイルはフリップ式の回転台に固定し、回転は1Hzで運転した。出力電圧はFFTアナライザで測定した。コイルを固定した回転台と磁気プローブはぶつからないように50mm離れたため、磁気プローブの値はコイルの位置の磁場とは完全に一致しない。そのため、それぞれの位置の磁場を磁気プローブで測定し、磁気プローブの位置からコイル位置の磁場を示す係数k(0.999465)を算出した。さらに、コイルの出力電圧は小さくばらつきが生じやすいため、3回の測定の平均値で評価を行った。124個の測定の結果、ばらつきが1%程度であったため、解析は校正面積Sで行った。

$$S = V \cdot N / \omega \cdot B \cdot k$$

{

- V: 電圧(FFT測定値)
- N: コイル巻数(10Turn)
- ω : 2 πf (Hz)角周波数
- B: 磁束密度(NMR測定値)
- k: NMRとコイルの位置校正係数

式1 校正面積Sの算出

2.3 測定方法

サーチコイルの出力電圧はWE7000で測定した。留意したWE7000の入力チャンネルは10チャンネルであるため、124個のコイル信号を同時に測定することはできない。そのため、4チャンネルのロータリースイッチを2個使用し、8個のサーチコイル電圧を同時に測定できるようにした。ロータリースイッチは、それぞれ16回切り替えて124個を測定する。また、ショット毎の電流値のふらつきが0.5%あるため、8チャンネル分のコイルと同時にCTの

電流値を測定し、解析時に規格化を行った。さらに、ロングサーチコイルを用いて、相対的な磁場分布と4つの水平シフトバンプ電磁石の個体差の測定を行った。

WE7000の測定器は、レンジの1%程度一定にオフセット値(dV)が生じる。また、その値はチャンネル毎に異なるため、正確な測定値を求めるにはこのオフセット値を取り除く必要がある。そこで、入力切り替えスイッチを用いて、同じ条件のサーチコイルの電圧信号をプラスとマイナスに反転したデータを測定し、オフセット値を取り除くようにした。また、サーチコイルの電圧信号には、磁場以外にパルス電磁石によるノイズがのってしまう。そのため、このノイズを取り除くため、同じ位置(X=Y=0)でマッピングバーを逆に付け替え、サーチコイルの上下を反転した電圧データを測定した。この場合、サーチコイルが出力する磁場による真の電圧は反転されるが、磁場とは関係ない測定系のノイズ信号は同相のまま測定される。そのため、測定したそれぞれの値の差し引きを行い、ノイズの信号だけを取り除いた。この方法により、正確なByを求めることができる。図3に磁場の算出方法を示す。

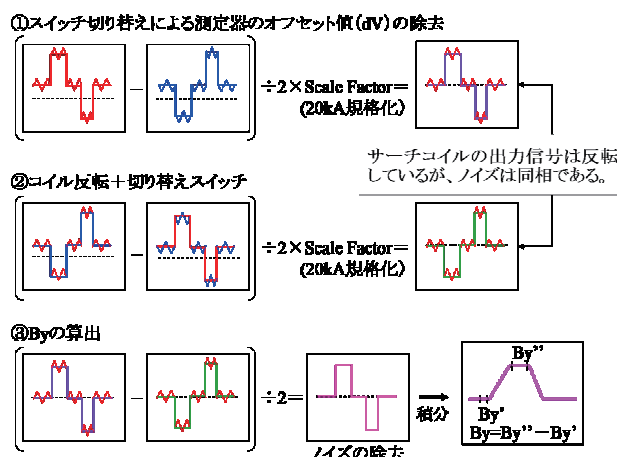


図3 磁場By算出方法

3. 測定結果

3.1 補正前後の結果比較

単体で測定した結果を用いて、補正前後の磁場分布の比較を行った結果を図4に示す。チャンネル間に生じたオフセット値の差が補正され、さらに、ノイズが除去されて磁場分布を正確に測定できることを確認した。

ロングサーチコイルによる積分磁場分布の結果を図5に示す。水平シフトバンプ電磁石に要求されている有効磁場領域(±200mm)で±0.8%以下を確認した。また、4台それぞれのX-Y軸の磁場分布を図6に示す。0.05%以下で一致している。さらに、表1に示すように、中心位置の積分値で4台のバラツキを比較した結果0.1%以下である。4台を直列に接続して励磁した場合の磁場のバラツキはほとんど無い。

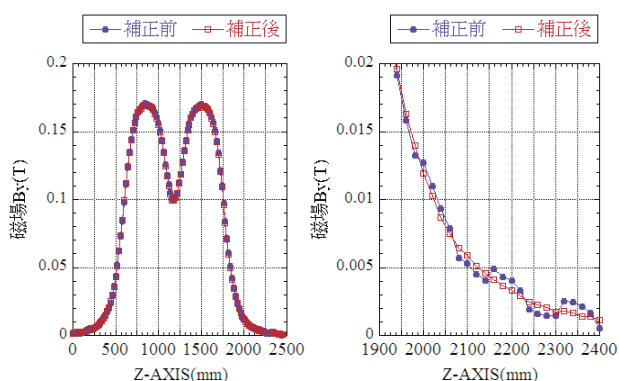


図4 補正前後の分布比較
(左)補正前後の比較と(右)低磁場領域の拡大

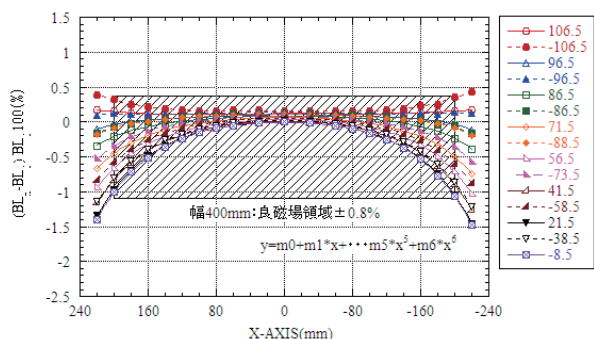


図5 積分磁場分布比較(ロングサーチコイル)

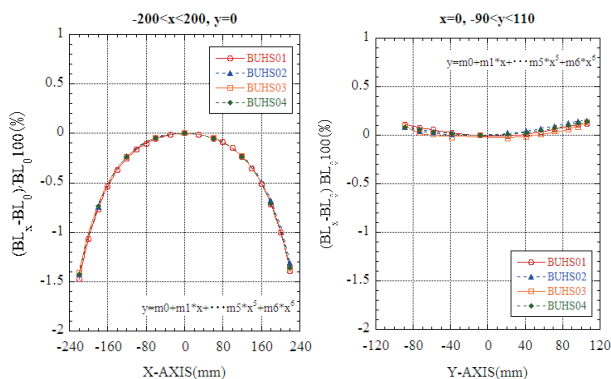


図6 4台の水平シフトバンプ電磁石の固定差比較

BUHS01	BUHS02	BUHS03	BUHS04
-0.076 %	0.026 %	0.06 %	-0.01 %

BUHS〇〇/ (4台平均) × 100 (%)

表1 4台の積分値のバラツキ

3.2 干渉磁場の測定

Q電磁石と水平シフトバンプ電磁石の2台、及び、水平シフトバンプ電磁石の2台の組合せを行い、電磁石同士の磁場干渉による磁場分布の変化を測定した。Q電磁石と水平シフトバンプ電磁石の組合せでは水平シフトバンプ電磁石のみを、水平シフトバンプ電磁石2台の組合せでは、それぞれを現地と同じ

磁場の極性になるように直列に接続して通電を行った。電磁石の中心間距離はQFL-BUHS01が1434.5mm、BUHS01-02とBUHS 03-04が1610mm、BUHS02-03が1730mm、BUHS04-QDLが1474.5mmである。

図7に干渉磁場を測定した結果を単体の測定結果と共に示す。単体の測定結果(BUHS02)と比較した場合、中心付近の分布は一致しているが、電磁石の干渉磁場の影響で裾野部分の分布が異なっている。また、水平シフトバンプ電磁石と、QFLとQDLとの距離がそれぞれ異なるため、分布もわずかに異なった。BUHS01とBUHS04の積分値は、BUHS02の積分値と比較して0.78%と0.69%減少した。

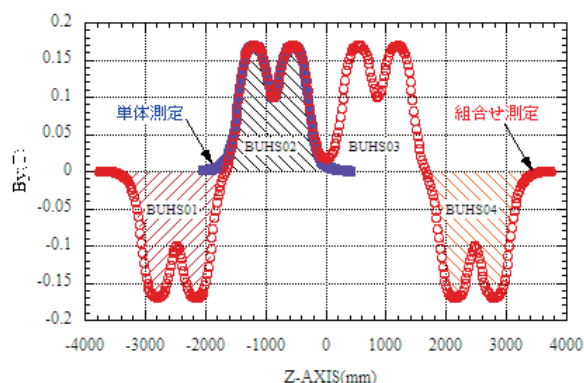


図7 干渉磁場による磁場分布の変化

3. 結語

ショートサーチコイルとロングサーチコイルを用いて、4台の水平シフトバンプ電磁石の磁場分布と個体差、及び、4台を1列に並べた場合の干渉磁場の影響を測定した。4台の電磁石は直列に接続するため電源による個別の調整は不可能であるが、製作した4台の水平シフトバンプ電磁石の磁場分布は0.05%以下で一致しているため、個々の調整は必要ない。また、隣り合う電磁石の距離が異なる位置では磁場の干渉の程度が異なり、積分値も異なることがわかった。積分磁場の調整は、BUHS02とBUHS03の電磁石の上下鉄心コアの間にリカイト(日本理化学工業所製)の絶縁スペーサーを入れて調整を行なう。

参考文献

- [1] T.Takayanagi et al., "Design of the shift bump magnets for the Beam injection of the 3-GeV RCS in J-PARC", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp1366-1369
- [2] T.Takayanagi et al., "Design of the injection bump system of the 3-GeV RCS in J-PARC", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp1358-1361
- [3] Tomohiro Takayanagi, et al., "Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan (August 2-4, 2006, Sendai Japan)