

Beam Study with Skew Quadrupole Magnets for the J-PARC Main Ring

Junpei Takano^{#,A)}, Ainosuke Ando^{A)}, Shuichiro Hatakeyama^{B)}, Susumu Igarashi^{A)}, Koji Ishii^{A)}, Tadashi Koseki^{A)}
Shu Nakamura^{A)}, Yoichi Sato^{A)}, Masashi Shirakata^{A)}, Hirohiko Someya^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)}Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

The Linear Coupling Resonance has been observed in the J-PARC Main Ring. To reduce the effect of the resonance, four skew quadrupole magnets have been installed to the beam line in November 2011. In recent beam study, operating currents of the magnets had been optimized at injection beam energy, and corrected the resonance successfully. The results will be shown in this proceeding.

J-PARC MR におけるスキュー四極電磁石を用いた線形結合共鳴の補正

1. MR 内の線形結合共鳴

J-PARC の Main Ring (MR) では四極電磁石のビーム進行軸に対する回転方向の設置誤差と六極電磁石内における垂直方向の Closed Orbit Distortion (COD) によって引き起こされる線形結合共鳴が観測されている^[1,2,3]。この共鳴を補正するため、これまでは MR 内のアドレス 018 番と 028 番の 2 ヶ所の六極電磁石においてそれぞれ +5.9mm と -7.55mm の垂直方向のローカルバンブを作っていた。しかしながら、今後のビームパワーの向上のためには、このローカルバンブを用いた共鳴補正が困難になるため、図 1 に示すように 4 台のスキュー四極電磁石をそれぞれ入射直線部の最上流の 001 番、最下流の 016 番、速い取り出し直線部の最上流の 145 番、最下流の 160 番に新たに設置した。

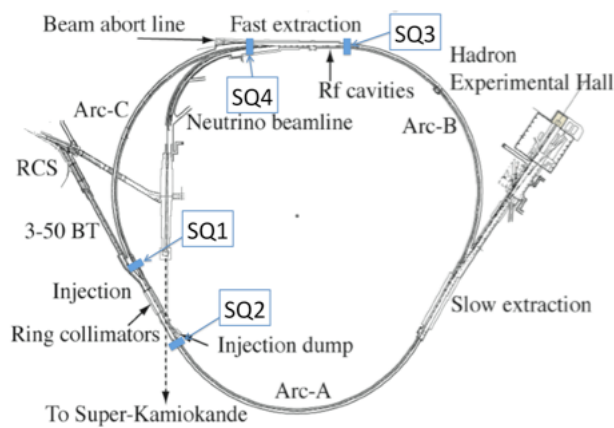


図 1: MR 内におけるスキュー四極電磁石の設置場所

これらのスキュー四極電磁石を用いることによって、図 2 および図 3 のシミュレーション結果に示されるように MR 内の線形結合共鳴を補正することができるはずである。

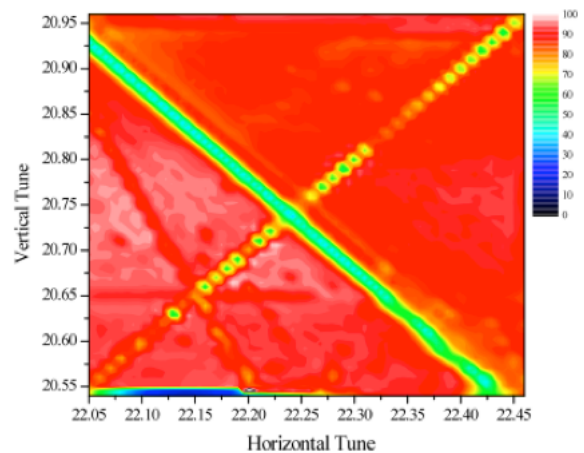


図 2: ローカルバンブを用いた共鳴補正から再現した線形結合共鳴

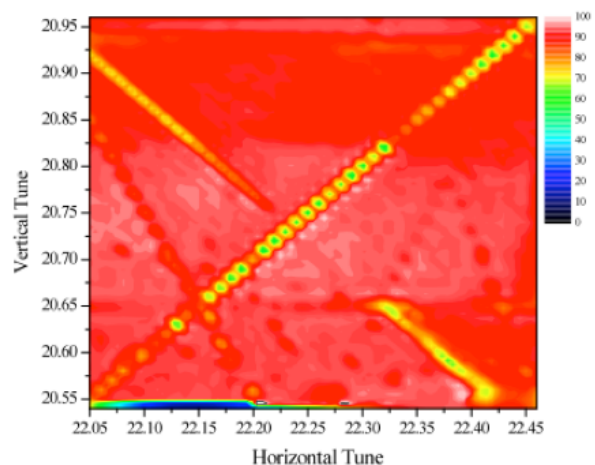


図 3: スキュー四極電磁石を用いて線形結合共鳴を補正できることを示すシミュレーション結果

[#] junpei.takano@j-parc.jp

2. スキュー四極電磁石の設計および製造

前項で示したシミュレーションの結果、共鳴補正に必要なスクュー四極電磁石のそれぞれの強さは SQ1 と SQ2 が $+5.7E-04[m^{-1}]$ 、SQ3 と SQ4 が $-5.7E-04[m^{-1}]$ となった。実際に設置する場所のスペースと真空ダクトの条件からスクュー四極電磁石のボア径を 150mm、コア長を 200mm とした。表 1 にスクュー四極電磁石のスペックを示す。

表 1：スクュー四極電磁石のスペック

	3GeV	30GeV
スクュー四極成分 $[m^{-1}]$	5.7E-04	5.7E-04
磁場勾配 $[T/m]$	0.0364	0.2940
ポール表面の磁場強度 $[Gauss]$	27.27	220.49
電流 $[A]$	1.51	12.18
電流密度 $[A/mm^2]$	0.094	0.762
電圧 $[V]$	0.70	5.82
$\Delta t [^{\circ}C]$	0.23	14.85

本電磁石は MR の加速パターンの周期に合わせて運転するため、鉄芯に厚さ 0.5mm のケイ素鋼板を用いることにした。このケイ素鋼板を金型で打ち抜き、三次元測定器を用いて寸法を測定したところ、磁極の寸法精度は 0.005% 程度であった。これは設計公差の 0.01% を満たしている。また、鉄芯組み立て後の対向磁極間隙、隣接磁極間隙、ビーム進行方向の磁極長についても全て設計公差内であることを測定で確認した。この鉄芯にコイルを組み付け、今回使用する電源の最大電流である 20A で 4 時間かけて温度上昇の測定をしたところ、コイル表面で 18.3 $^{\circ}C$ であった。図 4 に完成した電磁石を示す。



図 4：トンネル内に設置されたスクュー四極電磁石

3. 磁場測定

磁場測定は Lakeshore 製ガウスメータ 460 型と三軸ホールプローブを用いて行った。まず始めにプローブ位置をスキャンして磁場測定を行った。その結果、測定器と電磁石のアライメントは 0.3mm 以下に収ま

っていることを確認した。次に GL を測定したところ、電流 12A に対し 0.0872[T] であった。また 4 台の電磁石の GL のばらつきは 0.4% 以下であった。図 5 および図 6 にホールプローブを回転させて測定した結果を示す。

SkewQ(D) B θ -probe θz scan

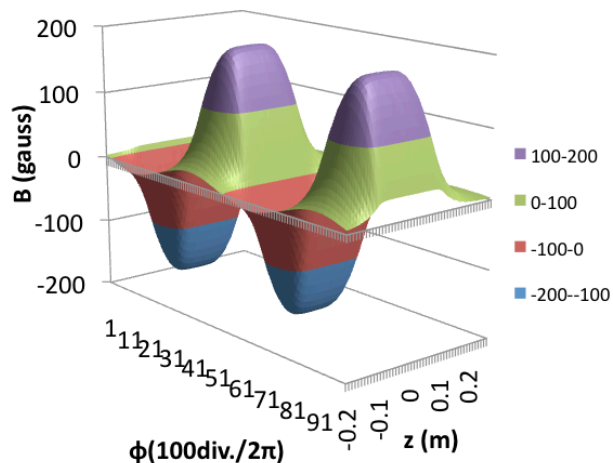


図 5： θ プローブでの測定結果

SkewQ(D) B r-probe θz scan

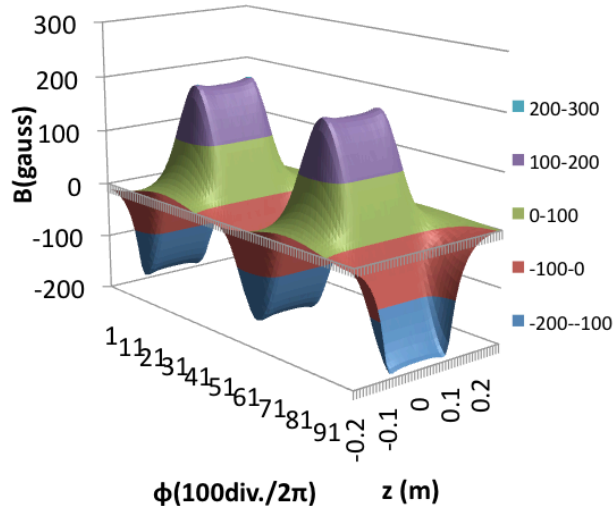


図 6：r プローブでの測定結果

θ プローブと r プローブで磁石端部での様子が異なるが、これは端部の三次元効果によるものと考えられる。この測定結果をフーリエ変換し磁場の多極成分を解析した結果、主成分である 4 極に対し 12 極が 2 桁以下、20 極が 3 桁以下であることが分かった。

次に $\pm 20[A]$ で 0.5 秒周期、5 秒周期、50 秒周期のヒステリシス測定を行った。5 秒周期と 50 秒周期では $\pm 0.5[gauss]$ 程度のヒステリシスが観測された。0.5 秒周期では $\pm 2[gauss]$ 程度であり、磁場の追従に遅れがでることが分かった。

4. ビームスタディ

今回のビームスタディではビーム強度を $4.9e+11$ ppp に設定し、線形結合共鳴の影響を見るため MR のチューンを(22.275, 20.685)に設定した。このビーム条件のもと SQ1,2 と SQ3,4 の2セットの電磁石の電流をスキャンした。そのときの入射時と加速開始前の粒子数の比をプロットしたものを図 7 および図 8 に示す。

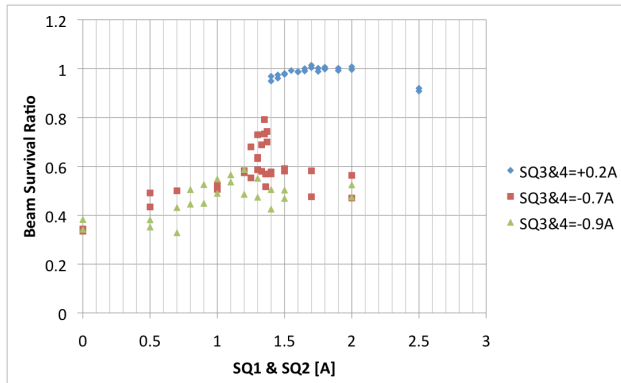


図 7 : SQ1,2 のスキャン

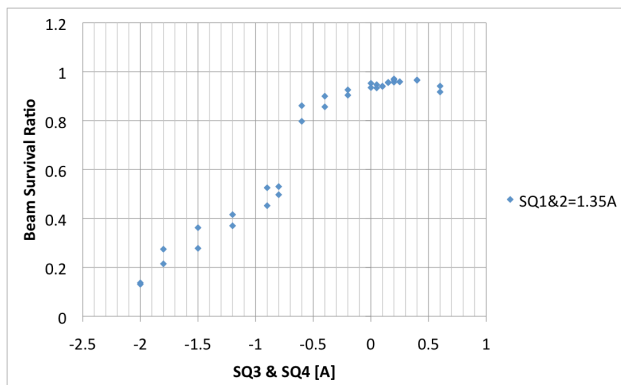


図 8 : SQ3,4 のスキャン

まず SQ3 と SQ4 を -0.9 [A] に固定し、SQ1 と SQ2 を $0 \sim 2$ [A] でスキャンを行った。このとき SQ1, 2 が $+1.2$ [A] でビームの生き残りが 0.6 であった。同様に SQ3, 4 を -0.7 [A] にして SQ1, 2 のスキャンを行ったところ、SQ1, 2 が $+1.35$ [A] のときビームの生き残りが 0.8 まで改善した。次に SQ1, 2 を $+1.35$ [A] で固定し、SQ3, 4 を $-2 \sim +0.6$ [A] までスキャンした。その結果、 $+0.2$ [A] のときビームの生き残りが 0.95 に達した。そこで、SQ3, 4 を $+0.2$ [A] で固定し、再び SQ1, 2 のスキャンを行った。その結果、SQ1, 2= $+1.7$ [A]、SQ3, 4= $+0.2$ [A] のとき線形結合共鳴によるビームロス完全に補正することができた。図 9 にスキュー四極電磁石による線形結合共鳴補正を行った場合の DCCT によるビームカレントの測定結果と共鳴補正無しの場合の測定結果の比較を示す。今回はスキュー四極電磁石を MR の加速パターンに合わせた運転をせずに DC 運転でビームスタディを行ったため、Flat Bottom のみでの比較となる。

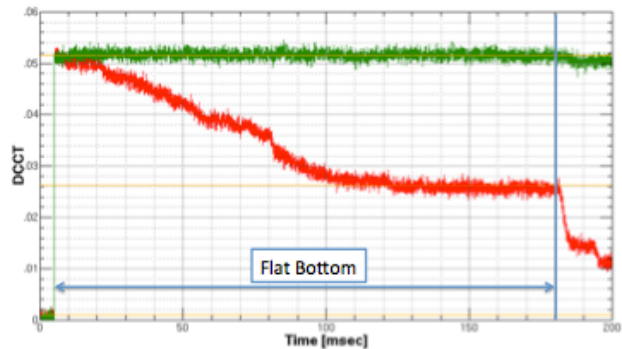


図 9 : 線形結合共鳴補正あり(緑)と線形結合共鳴補正なし(赤)の比較

図 9 に示したように、Flat Bottom において線形結合共鳴を補正しない場合、この共鳴によって約半分のビームをロスしてしまうが、スキュー四極電磁石を用いて共鳴補正を行うことでビームロスを避けることに成功した。

5. まとめと今後の予定

今回の入射エネルギーにおけるビームスタディでスキュー四極電磁石を用いて線形結合共鳴を補正できたことを確認した。今後、スキュー四極電磁石を MR の加速パターンに合わせて運転することで、入射エネルギーから出射エネルギーまでのすべてにおいて線形結合共鳴を補正できるようにする予定である。そのために各電源に外部制御としてファンクションジェネレーターを導入し、図 10 に示すように中央制御棟から EPICS^[4] ネットワークを介して制御および測定をできるようにする予定である。

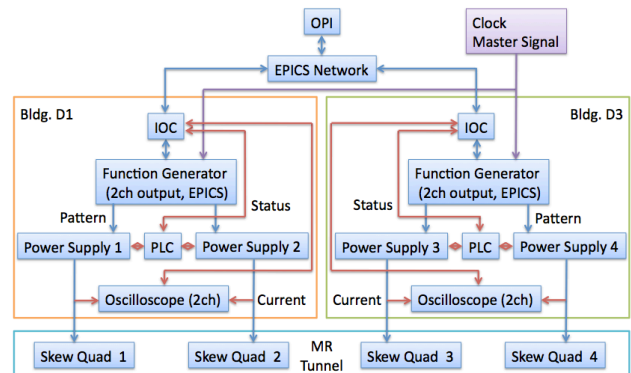


図 10 : スキュー四極電磁石の制御・測定システム

参考文献

- [1] J. Takano, et al., “ ‘Magnet Pattern Control System of the J-PARC Main Ring’”, Proceedings of the IPAC10 in Kyoto, Japan, May. 23-28, 2010, <http://ipac10.org/>
- [2] A. Molodzhentsev, et al., “ ‘Study of the Beam Dynamics for the ‘Fast Extraction’ Operation Scenario of the J-PARC Main Ring’”, Proceedings of the IPAC10 in Kyoto, Japan, May. 23-28, 2010, <http://ipac10.org/>
- [3] J. Takano, et al., “ ‘Design Study of Skew Quadrupole Magnet for the J-PARC Main Ring’”, Proceedings of the PASJ2011 in Tsukuba, Japan, Aug. 8-11, 2011
- [4] EPICS web site, <http://www.aps.anl.gov/epics/>