

DESIGN STUDY OF SKEW QUADRUPOLE MAGNET FOR THE J-PARC MAIN RING

Junpei Takano[#], Ainosuke Ando, Kuanjun Fan, Susumu Igarashi, Koji Ishii, Tadashi Koseki
 Alexander Molodozhentsev, Kazuaki Niki, Katsuya Okamura, Masashi Shirakata
 High Energy Accelerator Research Organization
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The Linear Coupling Resonance had been observed in the J-PARC Main Ring. The resonance is caused by two reasons, one is rotating alignment errors of the quadrupole magnets, and the other is vertical closed orbit distortion in the sextupole magnets. To reduce the effect of the resonance, we operate the machine with vertical local bumps at sextupole magnets. However it is difficult to reach high power operation with the local bumps. As an ideal method, it is useful to drive the skew quadrupole magnets to reduce the resonance. In this proceeding, the design of the skew quadrupole magnet will be shown.

J-PARC Main Ring 用スキュー四極電磁石の設計

1. Main Ring の Linear Coupling Resonance

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 Closed Orbit Distortion (COD)によって引き起こされる Linear Coupling Resonance (LCR)が観測されている^[1,2]。この共鳴を補正するため MR 内のアドレス 018 と 028 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プを作っている。MR の運転チューンを LCR 上の(22.2, 20.8)とし、加速はせずに入射エネルギーのまま周回させたときに垂直方向のローカルバンプを用いた共鳴補正有り無しのビーム強度の測定結果を図 1 に示す。

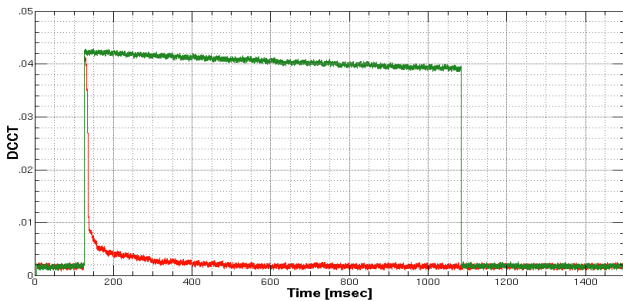


図 1 : 共鳴補正有り (緑) および共鳴補正無し (赤) の垂直方向のローカルバンプを用いた共鳴補正の結果

このように共鳴補正が無い場合、入射直後から著しいビームロスが生じていることがわかる。

この共鳴補正の測定結果を元に加速器シミュレーションコード SAD^[3]を用いて計算機上にローカルバンプを作り、LCR を再現した。その計算結果を図 2 に示す。

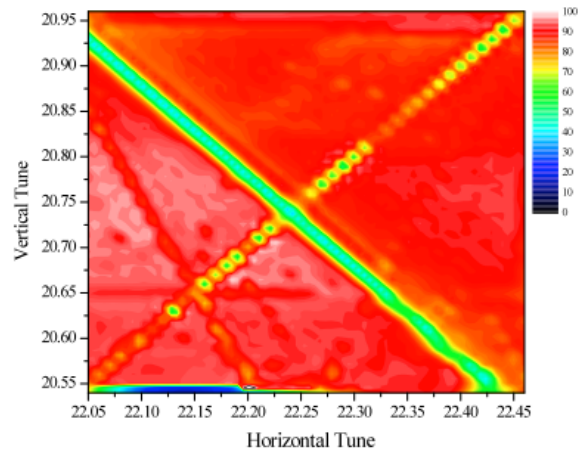


図 2 : SAD 上に再現した LCR

2. スキュー四極電磁石を用いた共鳴補正

今回 MR に導入するスキュー四極電磁石は図 3 に示すように入射直線部の最上流と最下流および速い取り出し直線部の最上流と最下流の 4 ヶ所に設置される。

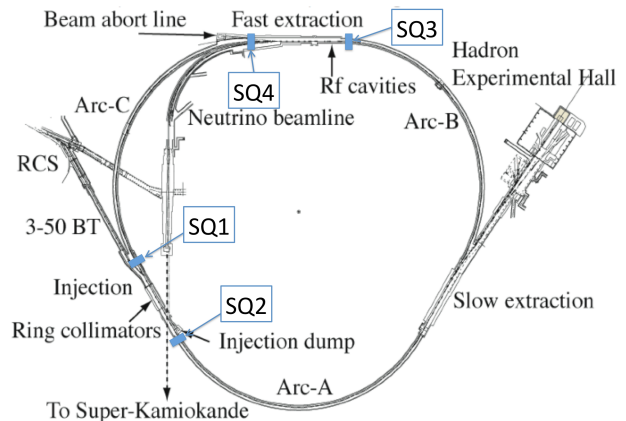


図 3 : スキュー四極電磁石の配置

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

この 4 台のスキュー四極電磁石を用いて LCR を補正した計算結果を図 4 に示す。

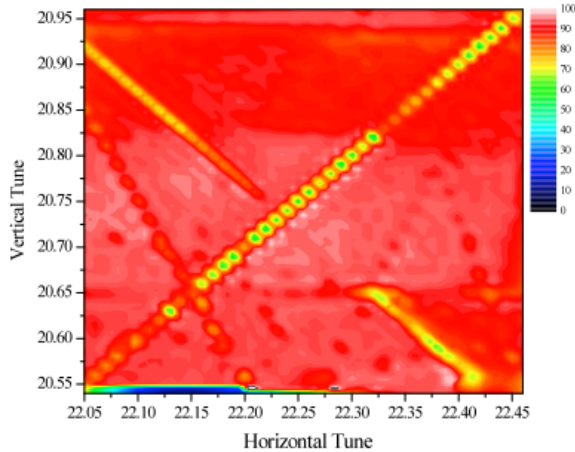


図 4 : スキュー四極電磁石を用いた LCR 補正の計算結果

この計算の結果、共鳴補正に必要なスキ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。図 4 では LCR を完全には補正出来ていないが、これはローカルバンパが実際には 3 台の QF と 2 台の QD にまたがっており、計算機上に再現した LCR がチューンマップ上で一様では無いために共鳴が残っているものと考えられる。スキュー四極電磁石を導入した後はこのローカルバンパは使わないため、実際のスキュー四極成分による LCR はチューンマップの端のほうでも補正できるものと考えられる。

3. スキュー四極電磁石の設計

3.1 スペック

今回、スキュー四極電磁石を設置する場所に既設されている外径 $\phi 134mm$ の真空ダクトをそのまま用いるためボア径を $150mm$ とした。また、必要な磁場が小さいため、冷却方式は自然空冷とした。電源は nf 回路設計ブロックのバイポーラ電源 BP4620 ($\pm 60V$, $\pm 20A$) を用いることにした。この電源を用いることで磁場強度の-margin は約 1.6 倍までとることができる。表 1 および表 2 にスキュー四極電磁石のスペックを示す。

表 1 : スキュー四極電磁石のスペック

ボア径 [mm]	150
コア長 [mm]	200
巻数 (1 コイルあたり)	54
電線断面寸法 [mm]	8 x 2
導線長 (4 コイルあたり) [m]	191.3
抵抗 [Ω]	0.231
インダクタンス [mH]	8.76
重量 [kg]	500

表 2 : Flat Base、Flat Top および最大電流におけるスキュー四極電磁石のスペック

	3GeV	30GeV	最大電流
スキュー四極成分 [m^{-1}]	5.7E-04	5.7E-04	9.4E-04
磁場勾配 [T/m]	0.0364	0.2940	0.4825
ポール表面の磁場強度 [Gauss]	27.27	220.49	361.88
電流 [A]	1.51	12.18	20.00
電流密度 [A/mm^2]	0.094	0.762	1.250
インダクタンスによる電圧 [V]	0.00	0.19	0.32
電磁石コイルの抵抗による電圧 [V]	0.35	2.82	4.62
電源-電磁石間のケーブルによる電圧 [V]	0.35	2.81	4.61
電圧合計 [V]	0.70	5.82	9.55
Q [W]	0.52	34.30	92.38
$\Delta t [^{\circ}C]$	0.23	14.85	40.01

表 2 内のインダクタンスによる電圧は 1 秒で電流をランプアップしたときのものである。電磁石の鉄芯は電流のパターン運転に対応するためケイ素鋼板を用いることにした。温度上昇の値はそれぞれの電流を一定に流した場合であり、実際にはパターン運転するため温度上昇はこれらの数値より低くなる。

3.2 磁場計算

磁場計算は二次元と三次元の両方を行った。二次元の磁場計算ではスペックを満たす磁場勾配を得られるか確認した。また、鉄芯の磁場飽和による漏れ磁場を生じさせないためのヨークの幅を求めた。図 5 に二次元の磁場計算結果を示す。

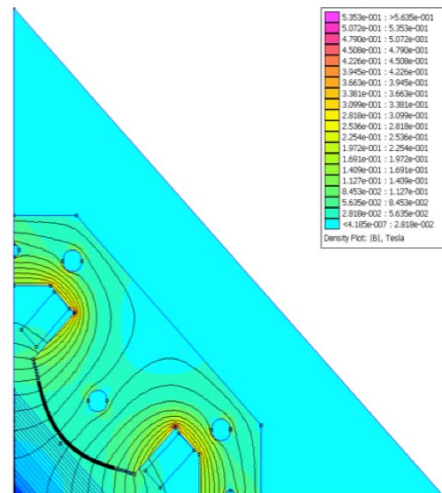


図 5 : 二次元の磁場計算結果

この結果、磁場勾配は最大電流で所定の 0.48 [T/m]を満たすことを確認した。また、ヨークの幅は 65[mm]として設計することにした。

今回、同時期に KEK-PS から八極電磁石を J-PARC MR 内のスキュー四極電磁石の近傍に移設する予定になっている。この八極電磁石と MR の主四極電磁石のビーム進行方向の漏れ磁場による影響を調べるため、OPERA-3D を用いて三次元磁場計算を行った。その結果、Flat Top においても数ガウス程度であったため特に問題は無いものと考えられる。図 6 にこの時用いた三次元磁場計算モデルを示す。

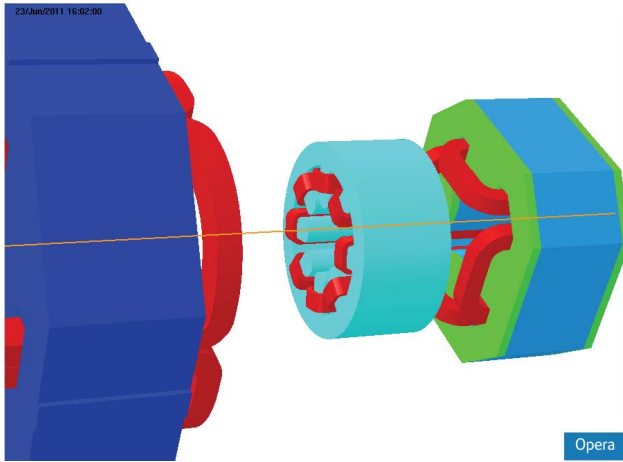


図 6：三次元磁場計算モデル

3.3 制御・測定システム

スキュー四極電磁石の制御および測定は EPICS^[4] を介して行う。図 7 にスキュー四極電磁石のコントロールシステムの概要を示す。

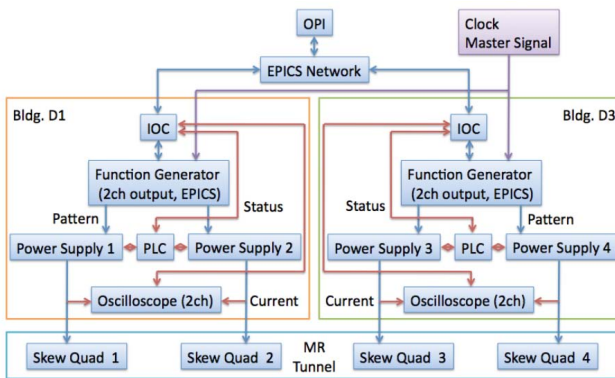


図 7：スキュー四極電磁石の制御・測定の概要図

中央制御棟の制御画面 OPI から EPICS を介して 2ヶ所の電源棟 D1 および D3 にあるファンクションジェネレーターにパターン電流の波形生成を指示する。この波形を用いてスキュー電磁石用の電源を運転する。また、電流値はオシロスコープでモニターし、EPICS を介して OPI 上に表示する。

このようにスキュー四極電磁石を他の機器と同様に遠隔操作することによって中央制御棟内でビーム運転全体を把握することができ、LCR のビームスタディを容易に行うことができる。

4. まとめと今後の予定

これまで MR では LCR 上に運転チューンを設定するとビームロスが観測されていた。この共鳴を避けるためローカルバンプリングを用いていたが、今後、ビームのハイパワー運転のためにはローカルバンプリングによる共鳴補正はアパーチャの制限やローカルバンプリングによる新たな共鳴の可能性を考慮すると不利であるため、スキュー四極電磁石を導入することにした。

磁場計算等も行い、LCR を補正するために必要なスキュー四極電磁石のスペックを求めた。

制御・測定システムに関しても最初から EPICS を用いてスキュー四極電磁石を遠隔操作することでビーム運転全体を把握し、より詳細なビームスタディをより短時間で行うことを目指している。

現在、スキュー四極電磁石は製作段階に入っており、2011 年 10 月上旬には完成する予定である。その後、磁場測定を行い、11 月末までにビームラインに設置する予定である。

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] SAD web site, <http://acc-physics>
- [4] EPICS web site, <http://www.aps.anl.gov/epics/>