

# J-PARC 主リング高繰り返し化における多極磁場の評価

## EVALUATION OF MULTIPOLE MAGNETIC FIELD WITH HIGH REPETITION RATE OPERATION IN J-PARC MR

内藤 大地\*, 仁木 和昭, 三浦 一喜, 五十嵐 進, 下川 哲司, 栗本 佳典, 森田 裕一  
Daichi Naito\*, Kazuaki Niki, Kazuki Miura, Susumu Igarashi, Tetsushi Shimogawa, Yoshinori Kurimoto,  
Yuichi Morita,  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

The repetition rate of the J-PARC main ring (MR) will be changed from 2.48 s to 1.3 s in order to achieve beam power of 750 kW. The high repetition rate operation requires magnetic field in the MR quadrupole magnet to be changed more quickly. The rapid change of the field increases eddy current in the vacuum duct of the quadrupole magnet. The eddy current generates magnetic error fields and induces beam losses. The beam losses should be treated to achieve 750 kW, and we estimated the error fields by 3-D magnetic simulation. We optimized the 3-D model for the simulation, and succeeded in reducing the field uncertainty less than 0.01 % in the static magnetic field simulation. We estimated the error field by the transient magnetic field simulation, and found out that the error fields were 0.5 gauss at most.

## 1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は大強度陽子加速器である。大強度陽子ビームを用いた実験に、長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) がある [1]。T2K 実験は高統計量を稼ぐ事で標準理論の精密検証を行う事を企図しており、ビームの大強度化は最先端の結果を出し続けるために必須である。大強度化を達成するため、J-PARC では主リングにおけるビームの繰り返し周期を速める事 (高繰り返し化) を計画している。繰り返し時間は現行の 2.48 秒周期から 1.3 秒周期に短縮され、ビーム強度は現行の 450 kW から 750 kW への大強度化を目指す。

高繰り返し化後のビーム運転で留意すべきものの一つにビームロスがある。ビームロス量は現在の主リングから供給されるビーム強度を制限しており [2]、高繰り返し化によってビームロスが増える事は許されない。

高繰り返し化によってビームロスを生じさせる候補として、渦電流による磁場分布の乱れが挙げられる。ここで挙げる渦電流はビームを周回させるため、電磁石内部に設置された真空ダクトに生じるものを指す。真空ダクト内の磁場はビームの加速にあわせて電磁石によって増大させられ、磁場の時間変化が渦電流を生み出す。その結果、ダクト内部の励磁が妨げられたり、本来存在しない 6 極磁場や 12 極磁場といった高次の多極磁場が生じる。ビーム運動に対してはベータatron チューンやクロマティシティの変動、共鳴効果を引き起こし、ビームのエミッタンスが増大する事でビームロスが起こる。特に高繰り返し化の際には繰り返し周期を短くするため、主リングの電磁石の励磁電流をより急峻に立ち上げねばならず、渦電流の効果が増大する。

偏向電磁石については磁場の精密測定及びシミュレーションによるビーム運動への影響を見積もり、高繰り返し化後のビーム運転に影響が無い事を明らかにした。本稿ではシミュレーションで見積もった、四極電磁石での渦電流の効果について報告する。

## 2. 四極電磁石

Figure 1 に主リングの概略図を示す。主リングは 3 回対称な形をしており、黄色で示されている部分にビームを収束させるための四極電磁石が置かれている。次にビーム方向上流から見た四極電磁石の 1/4 を Figure 2 に示す。図中の中心部の赤、緑、黒で示された部分は鉄心のシム形状を示しており、130 mm, 140 mm, 150 mm の 3 種類のボア径の四極電磁石がある。加えて四極電磁石は鉄心の長さや収束方向の違いでも分類され、合計で 11 のファミリーに分かれており、216 台が設置されている。四極電磁石中に設置されている真空ダクトは形状や材質により 11 種類存在し、同じファミリーの電磁石であっても場所毎に形状が違う。そのためすべての電磁石で渦電流の効果を測定する事は非常に難しい。そこで 3 次元磁場シミュレーションである Opera3d [3] を用いて磁場シミュレーションを行い、渦電流の効果を見積る事にした。

本稿ではボア径が 140mm、鉄心の長さが 1760mm の四極電磁石の磁場シミュレーションについて述べる。この四極電磁石は 2017 年 9 月に精密磁場測定する予定で、測定結果を利用してシミュレーションを再調整する。

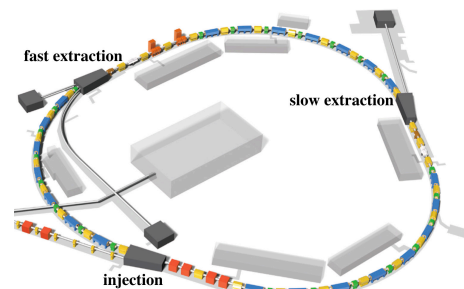


Figure 1: Schematic view of J-PARC Main Ring.

\* dnaito@post.j-parc.jp

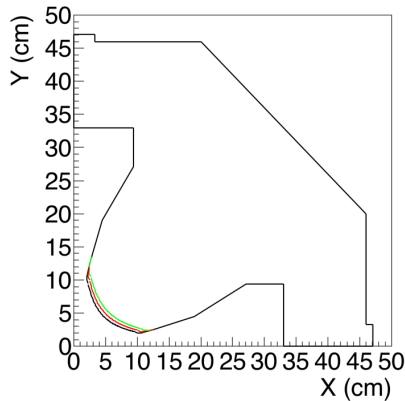


Figure 2: Schematic view of the quadrupole magnet in the MR.

### 3. 磁場シミュレーションのセットアップ

Figure 3 に磁場シミュレーションに用いた 3 次元モデルを示す。モデルでは鉄芯、端板、側板、真空ダクト、コイルを設置した。鉄芯は 65EF1600 でできた積層鋼板、その他の部分は SUS としてパラメータの設定を行った。シミュレーションの計算時間を短縮するため、鉄芯の長さは実際の 1/4 にした。また、対称条件を設定して 1/8 モデルでシミュレーションを行った。

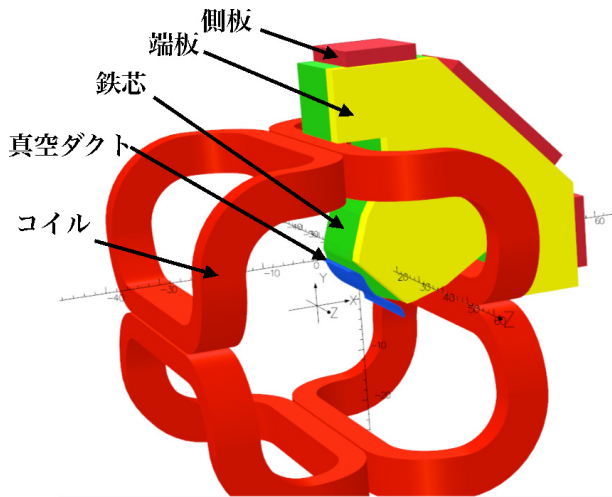


Figure 3: Schematic view of the simulation model.

次にシミュレーションでの励磁パターンについて説明する。Figure 4 にコイルに流した電流のパターンを示す。横軸が時間、縦軸が電流である。鉄心にはコイルが 24 ターン巻かれており、縦軸の値の 24 倍が鉄心の隙間を流れる。加速開始の電流値が 3 GeV の陽子ビーム周回用磁場に相当し、頂上部のビーム取り出し時の電流値が 30 GeV に相当する。また黒が現行の 2.48 秒繰り返して利用されている電流パターン、赤が 1.3 秒繰り返しての加速パターンを想定した電流パターンを示す。加速中の電流はスムージングと呼ばれる加速開始から 0.14 秒の所までで急峻に立ち上がるため、スムージング中で渦電流は最大値をとる。加えてスムージン

グでは磁場が弱いのでより渦電流の効果が大きく観測される。そこで加速開始から 0.2 秒までの期間の渦電流の効果をシミュレーションにより見積もった。

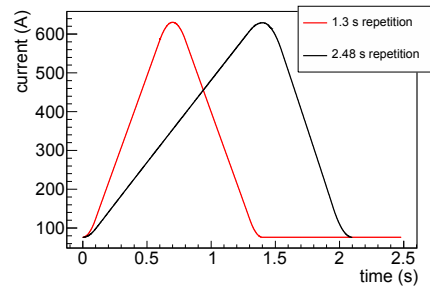


Figure 4: Current input for the simulation.

### 4. 磁場シミュレーションモデルの最適化

最初にシミュレーションモデルのメッシュ分割の最適化を行った。3 GeV 相当の電流をコイルに流して静磁場シミュレーションを行い、シミュレーションで評価された磁場エラーを比較した。Figure 5 に最適化後のメッシュ分割の様子を示す。メッシュは磁場の方向となるべく平行かつ一様に並ぶように調整を行った。

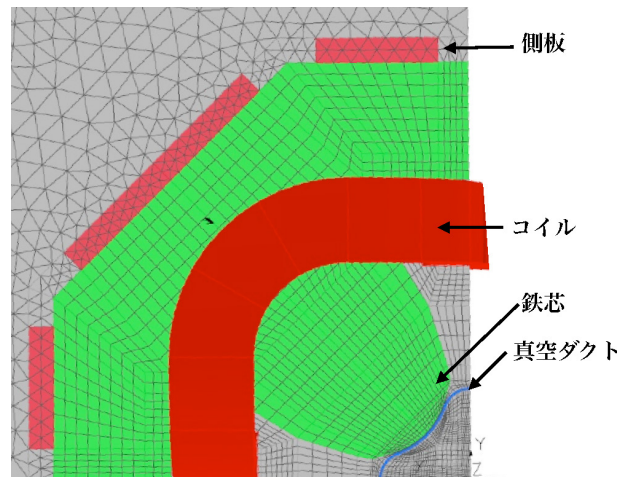


Figure 5: Schematic view of the mesh unit.

最適化前後の  $Y=Z=0$  の平面での磁場分布を Figure 6 に示す。横軸は Figure 2 の X 軸を、縦軸は磁場の Y 成分を示している。横軸の最大値はビーム運動のシミュレーションから計算した最大ビーム径に相当する。黒はダクト内部を一辺が 0.1 cm の四面体メッシュで分割し、その他を 2 cm の四面体で分割した結果、赤は Figure 5 を用いた結果である。更に  $x=2$  cm から  $x=3$  cm の区間を線形 fit したものを理想的な 4 極磁場 ( $B_Q$ ) と定義し、各点での磁場との比を取ったものを Figure 7 に示す。最適化前は磁場の計算エラーが大きく、磁場が波打っている様子が見える。最適化前は磁場の不定性が小さい所でも 1% 程度だったが、最適化後は 0.01% 以下と不定性を 1/100 に削減する事に成功し、高精度での磁場計

算を実現した。また磁場シミュレーションの計算時間を 1/5 に短縮する事に成功した。

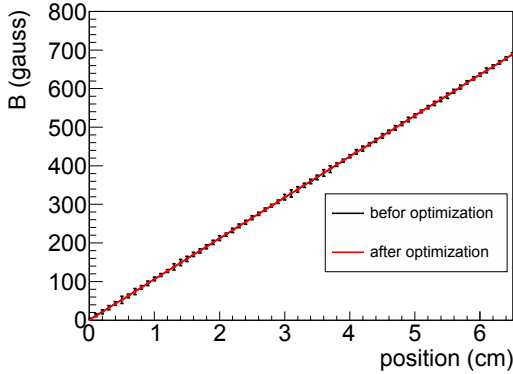


Figure 6: Comparison of the simulation result.

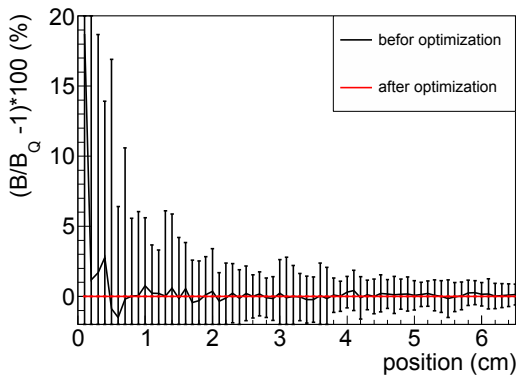


Figure 7: Distribution of the non-uniformity.

## 5. 動磁場シミュレーション

次に確立した 3 次元モデルによって行った動磁場シミュレーションの結果について述べる。まず最初に磁場変化による渦電流の生成を確認した。Figure 8 に 1.3 秒繰り返し時の  $t=0.14$  秒で真空ダクトに流れる渦電流の分布を示す。この図は Figure 2 の +X 方向から見た図である。磁場強度が高いダクトの外側 ( $X=10, Y=0$  付近) で渦電流が高く、磁場強度の弱いダクトの中心付近 ( $X=5, Y=5$  付近) で渦電流が弱くなった。また  $X=10, Y=0$  での渦電流は 2.48 秒繰り返しで  $3.9 \text{ A/cm}^2$ 、1.3 秒繰り返しで  $8.6 \text{ A/cm}^2$  となり、高繰り返し化により励磁速度が 2 倍になった結果、生じる渦電流も 2 倍程度になる事が分かった。

次に渦電流による磁場の乱れに対する評価を行った。Figure 9 に 1.3 秒繰り返し、 $t=0.14$  秒での磁場の X 方向の依存性を示す。この時、 $Y=Z=0$  の平面を選んだ。X が 1 cm 以下の領域では磁場計算の精度が出ず、磁場分布が歪んだ。その他の領域については線形な応答を示した。そこで  $X=1 \text{ cm}$  から  $X=6.5 \text{ cm}$  の領域を 1 次関数で fit し、関数から求めた磁場 ( $B_Q$ ) と各点での磁場の差分を評価する事にした。Figure 10 に 1.3 秒繰り返し、

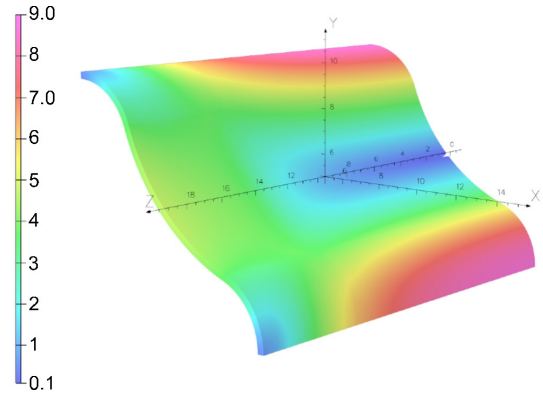


Figure 8: Distribution of the eddy current with 1.3 s repetition.

$t=0.14$  秒の際の磁場差分を示す。磁場の差分は渦電流の効果が最大となる条件でも 0.5 gauss 程度と非常に小さい事が分かった。今後は 0.1 gauss の精度での磁場測定を計画しており、高繰り返し化時でも四極電磁石による磁場の乱れが十分小さい事を実証する。また、他の形状と材質のダクトを持つ四極電磁石についても磁場シミュレーションを行い、渦電流の効果の見積もりを引き続き行っていく。

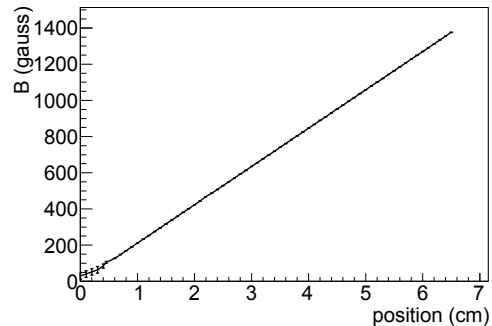


Figure 9: Position dependence of the magnetic field.

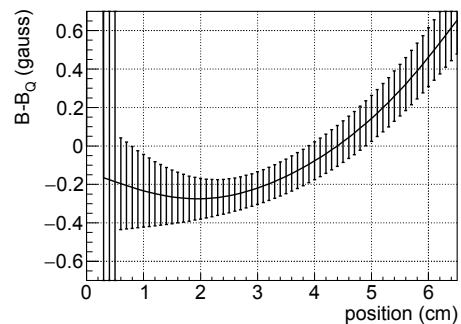


Figure 10: Position dependence of the error field.

## 6. まとめ

J-PARCの主リングではビーム運転の繰り返し時間を2.48秒から1.3秒にする事で750kWのビームパワー達成を計画している。高繰り返し化に四極電磁石を対応させるには、磁場が急峻に変化するよう、入力する電流パターンをより急峻に変化させる必要がある。すると電磁石内部に発生する渦電流による磁場の乱れが増加し、ビームロスを増加させる恐れがあった。そこで四極電磁石で渦電流の影響を見積もるため、3次元磁場シミュレーションを行った。まずシミュレーションのメッシュ分割の最適化を行い、高精度での磁場計算を可能とした。次に動磁場シミュレーションを行い、渦電流による磁場の乱れが最大でも0.5 gauss程度である事が分かった。今後は0.1 gaussの精度での磁場測定を計画しており、高繰り返し化時でも四極電磁石による磁場の乱れが十分小さい事を実証する。また、他の形状と材質のダクトを持つ四極電磁石についても磁場シミュレーションを行い、渦電流の効果の見積もりを引き続き行っていく。

## 参考文献

- [1] K. Abe *et al.*, (T2K Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A 659, 106 (2011).
- [2] Susumu Igarashi, for the J-PARC MR Beam Commissioning Group, "Accelerator based neutrino experiments T2K J-PARC", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp.14-18.
- [3] Cobham CTS Ltd.; <http://operafea.com>, Web. 24 July. 2017.