

COMMISSIONING STATUS OF J-PARC MR

Tadashi Koseki¹ for the MR Accelerator Group
 J-PARC Center, KEK and JAEA
 Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195

Abstract

Progress of MR beam commissioning after the 2008 summer shutdown is presented in this paper. MR was shutdown from July to November of 2008 to install some extraction devices and re-cable the power lines of the dipole and quadrupole magnets. Re-cabling was carried out to realize a symmetric cable configuration in order to minimize the common-mode ripples. The beam commissioning resumed in December 2008. On December 23, the first proton beam was accelerated from 3 GeV to 30 GeV and extracted by the fast extraction system to the abort beam line. On January 27, 2009, a 30-GeV proton beam was successfully extracted to the Hadron Experimental Hall by the slow extraction system using the third-order resonance method. On April 23, a 30-GeV proton beam was extracted to the Neutrino Beam Line by the fast extraction system.

J-PARC MRのビームコミッショニングの現状

1. はじめに

大強度陽子加速器施設J-PARCの加速器群は、ライナック、速い繰り返しの3 GeVシンクロトロン(RCS)、遅い繰り返しの主リングシンクロトロン(MR)、及び関連するビーム輸送系から構成されている。図1にJ-PARCサイトの航空写真(2008年1月撮影)を示す。RCSから取り出された陽子ビームは、物質生命科学実験施設(Materials and Life Science Experimental Facility, MLF)に送られて中性子及び μ 粒子の生成に用いられるとともに、MRへの入射ビームとしても用いられる。MRに入射された陽子ビームは30 GeVまで加速され、遅い取り出し法(Slow Extraction, SX)でハドロン実験施設(Hadron Experimental Facility, HD)へ、速い取り出し法(Fast Extraction, FX)でニュートリノ実験施設(Neutrino Experimental Facility, NU)へ取り出される。



図1: J-PARCサイトの航空写真(2008年1月)

現在のライナックのエネルギーは181 MeVだが、ACS(Annular Coupling Structure)空胴を新たに加える

ることにより400 MeVに増強する計画が2008年度の補正予算で認められ、空胴や高周波源の製作が開始されている。

2. J-PARC施設の現状

J-PARCのビームコミッショニングは、建設が終了した上流側から、順次、開始されてきた。2008年の秋までに、RCSはビームパワー100 kWで1時間、210 kWで70秒の連続運転試験に成功している。MLFの共同利用運転は2008年12月から開始され、 μ 粒子ターゲット、および中性子ターゲットに20 kWのビームが供給されている。ビームパワーを制限しているのは、2008年の秋にMLFへの24時間連続ビーム供給試験を開始した直後に顕在化したRFQにおける放電問題である。しかし、RFコンディショニングの方法を見直し、さらに、真空排気系の強化などの対策を実施したことにより、状況は着実に改善しており[1]、2009年の秋以降の運転では、より高いビームパワーでの共同利用運転が可能になると考えている。

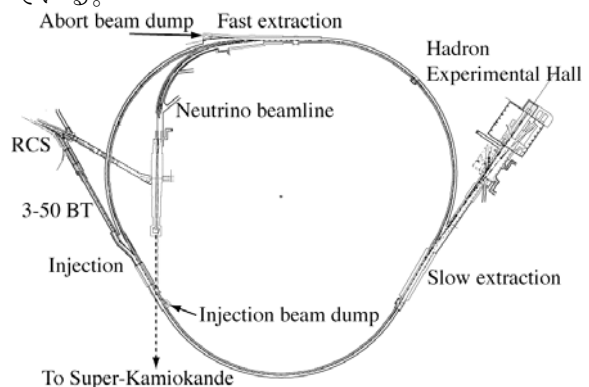


図2: MRのレイアウト

¹ E-mail: tadashi.koseki@kek.jp

MRのビームコミッショニングは、2008年の5月に開始された。図2にMRのレイアウトを示す。同年6月末までに約12日間のスタディを行い、入射、周回、RF捕獲、3 GeVでの入射ビームダンプへのビーム取り出し、軌道パラメータの測定などが行われた[2]。その後、夏期メンテナンスを含む5ヶ月間の停止期間を設け、その間にFX機器、およびSX機器のインストール、主電磁石電源の調整、偏向電磁石および四極電磁石における給電系の配線変更（後述）、HDビームラインやNUビームラインの建設作業が行われた。MRのビームコミッショニングは12月から再開され、開始から2日後には30GeV加速とFXによる30 GeVビームのアポートビームラインへの取り出しに成功した。さらに、2009年1月にSXによるハドロン実験ホールへのビーム取り出しに成功し、4月にはFXによるニュートリノビームラインへのビーム取り出しに成功した。

5月28日、J-PARCの第1期計画として建設された施設の中で最後に施設検査を受けたニュートリノビームラインが検査に合格し、これによってJ-PARC施設は全ての施設が本格的に稼働を開始したことになる。

3. MRのビームコミッショニング

MRでは、2008年5月、6月に行われた最初のビームコミッショニングにおいて、主電磁石電源の電流リップルに起因するビーム軌道、およびチューンの変動が確認されている[2]。7月からの停止期間中に、電流リップルを軽減して電源の追従性を改善するために、電源の回路構成の見直しと調整を実施した。さらに、リップルの原因の一つであるコモンモード電流を減少させるために、偏向電磁石、および四極電磁石の給電ケーブルの対称化作業を行った[3]。これは接地された中点に対してN側とP側が対称になるように配線する作業であり、その結果、ノーマルモードとコモンモードが分離して、それぞれのモードに対するノイズフィルタを最も効果的に使用することが出来る[4]。この配線変更は、偏向電磁石96台と四極電磁石216台の全数に対して実施するというかなり大掛かりな作業となったが、12月中旬にはすべて終了し、当初の予定通り12月下旬よりビーム試験を再開することができた。

ビームエネルギー3 GeVにおける垂直方向チューンの時間変化を夏期停止の前後で比較した結果を図3に示す。夏期停止後の12月の運転ではチューンの変動が1桁近く改善していることがわかる。ビーム軌道についても12月以降は電流リップルに起因する変動はほぼ解消している。

図4に加速試験における主電磁石の電流パターンとDCCTで測定された周回ビーム強度を示す。ここでは2.5秒かけて3 GeVから30 GeVに加速し、フラットトップに入ってから80 msec後にFXによってアポートビームラインにビームを取り出している。粒子数は約 4×10^{11} ppb(particles/bunch)の1バンチ運転である。加速中のビームロスはほとんど無く、極めて安定に加速されている。加速試験開始後のごく初

期の段階からこのような安定な加速が実現できたのは、加速空洞の磁性材に広帯域のファインメットを用いていることによるrfシステムの制御性の良さやフルデジタル制御を採用したローレベルrf系の優れた再現性に加え、加速中に遷移エネルギーを通過しないように遷移エネルギーを虚数にするオプティクスになっていることが大きな要因であると考えている。

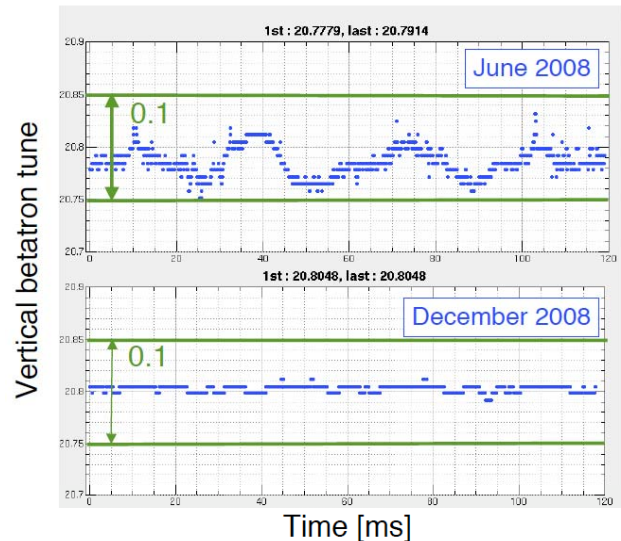


図3：配線変更前後の垂直方向チューンの時間変化

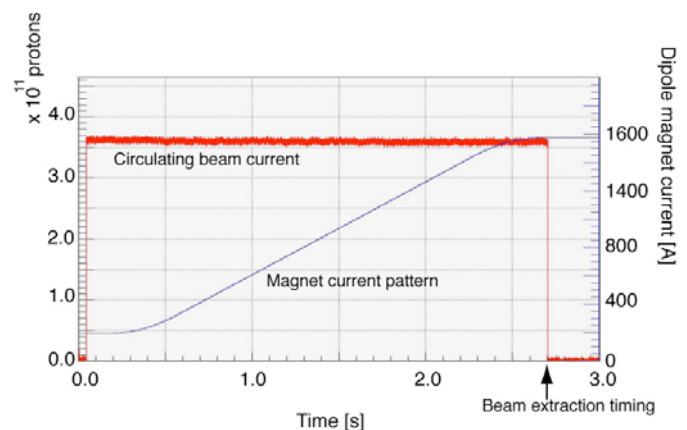


図4：30 GeV加速運転における主電磁石の電流パターンと周回ビーム強度の時間変化。

図5に、3 GeVビームで測定したリング全周分の β 関数、および分散関数を示す。実線が設計値、丸印が測定値（青/赤は水平/垂直方向）である。 β 関数はリングのすべてのステアリング電磁石の励磁量を個々に変えて、分散関数は dp/p に相当する量だけrf周波数を変えて、それぞれ場合の軌道の変位量から求めている[5,6]。 β 関数の設計と測定値との間のずれは最も大きい箇所でも10%程度である。分散関数の測定結果は1次の項までの解析では設計と良く合っており、直線部の水平方向分散関もほぼ0になっている。今後は測定誤差の評価を行うとともに、光学補正を実施する予定である。

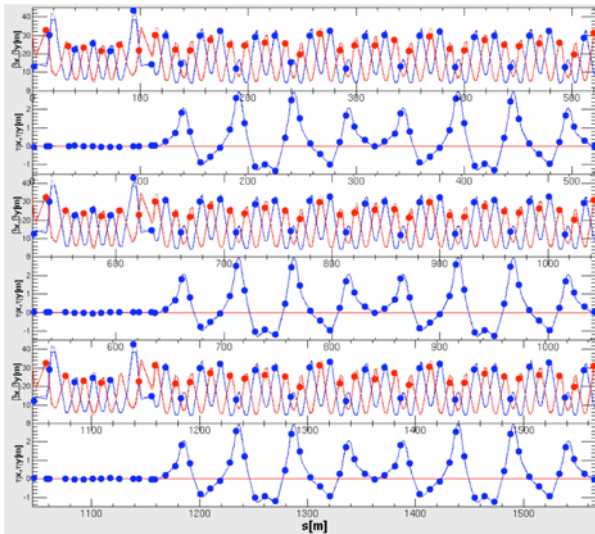


図5：β関数、および分散関数の測定結果

遅い取り出しには、116mの直線部に置かれた4台のバンパ電磁石、2台の静電セプタム（ESS）、10台の電磁セプタム、およびアーク部に置かれた8台の六極電磁石が用いられる。加速の終盤から共鳴六極電磁石を励磁して $3\nu_x=67$ の3次共鳴を励振し、同時にバンパ電磁石を用いて軌道を静電セプタムの取り出し電極によせる。加速終了後、四極電磁石QFN（アークに置かれている全48台のファミリー）をランプして水平方向のチューンを3次共鳴線にゆっくり近づけながらビームを取り出す[7]。

SXにおけるビームロスの分布を図6に示す。このときのビームは約 4×10^{11} ppb(particles/bunch)の1バンチである。図の縦軸はリング全周に設置されたビームロスモニタ（BLM）の1ショットの積分値（入射から取り出しまで）である[8]。遅い取り出しにおいてはESSの電極で生じるビームロスは原理的に不可避だが、実際、ビームロスはSX直線部に集中している。BLMの校正データから、現状では取り出し効率が95%程度と見積もられているが、今後はさらに高い取り出し効率を目指して調整を進め、ロスの低減を図っていく必要がある。

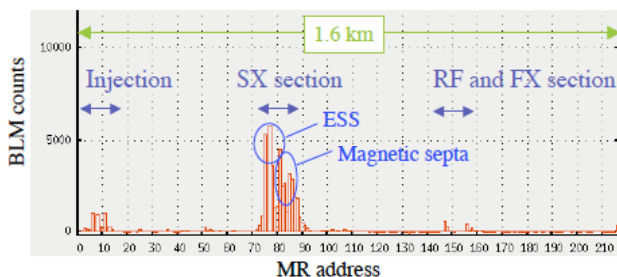


図6：遅い取り出しにおけるビームロス分布

図7にQFNをランプして取り出しを行っている間の周回ビーム強度の時間変化を示す。図では同一の条件での2つのショットのデータを重ねて示してある（赤と青）。いずれも所々でビーム強度が階段状に変化していることがわかる。これは主電磁石の電

流リプルに起因するチューンの変動によるもので、その結果、取り出しビームのスパイル形状にスパイク状の構造が生じてしまう[7]。主電磁石の配線対称化などにより主電磁石のリプルには著しい改善が見られたが、安定な遅い取り出しを行うためにはさらにリプルを1~2桁落とすための対策が不可欠である。

2009年夏に3台のスパイルフィードバック用四極電磁石を新たに設置し、2009年秋の運転からはDSPを用いたスパイルフィードバックシステムが稼働する予定である。

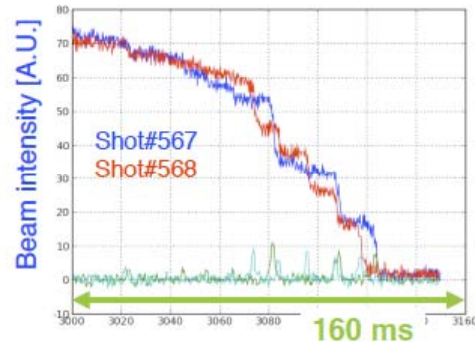


図7：遅い取り出し中の周回ビーム強度の時間変化

4. まとめ

MRは5ヶ月間の停止期間を経て2008年12月下旬よりビームコミッショニングを再開した。同月中に30 GeV 加速とアポートダンプへのビーム取り出しに成功し、さらに2009年1月、および4月には、SXによるHDへのビーム取りだしと、FXによるNUへのビーム取り出しに、それぞれ成功した。今後、FXについてはビーム強度の増強に向けて、まずは100 kW相当のデモンストレーションを早期に実施し、大強度運転における問題点の洗い出しを行う。SXについては、2009年の秋から、スパイルフィードバックシステムの試験や、より高い取り出し効率の実現に重点を置いた調整を行っていく予定である。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “Status of the J-PARC RFQ” in these proceedings.
- [2] T. Koseki, “Beam Commissioning of J-PARC MR”, Proc. Hadron Beam 2008, Nashville, Tennessee, USA, 2008.
- [3] S. Nakamura, H. Akikawa, H. Matsumoto and H. Kobayashi, “J-PARC MRにおける電磁石電源の問題点と対策”, to be published in Journal of the Particle Accelerator Society of Japan.
- [4] K. Sato and H. Toki, Nucl. Instrum. Meth. A 565 (2006) 351.
- [5] J. Takano, T. Koseki, K. Niki, S. Yamada, S. Hatakeyama, “Measurement of Beta Function of J-PARC MR”, in these proceedings.
- [6] J. Takano, T. Koseki, H. Harada, “Dispersion Measurement of the J-PARC MR”, in these proceedings.
- [7] M. Tomizawa *et al.*, “Slow Extraction from J-PARC Main Ring”, in these proceedings.
- [8] K. Satou, T. Toyama, Y. Hashimoto, M. Tejima, S. Lee and K. Yamamoto, “Present Status of the J-PARC MR BLM system”, in these proceedings.