

# ビームコミッショニングを開始した J-PARC MR

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

小 関 忠

2008 年 9 月 10 日

## 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 3GeV シンクロトロン(Rapid-Cycling Synchrotron : RCS), 遅い繰り返しの 50GeV 主リングシンクロトロン(Main Ring synchrotron : MR), および関連するビーム輸送系から構成される[1,2]。RCS からのビームは物質生命科学実験施設(Materials and Life science experimental Facility : MLF)に送られて中性子および $\mu$ 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 からのビームは、遅い取り出し法でハドロン実験施設へ、速い取り出し法でニュートリノビームラインへ送られる。J-PARC の建設計画は二期に分けて進められており、第一期での MR の取り出しビームエネルギーの定格は 30GeV となる。図 1 に 2008 年 1 月に撮影された J-PARC の航空写真を示す。



図 1 J-PARC サイトの航空写真(2008 年 1 月)

MR は約 1.6km の周長を持つ三回対称のリングである(図 2)。一つのアーク部は、三つの FODO セルからなるアークモジュール八つから構成されている。各モジュールにミッシングバンド(偏向電磁石のない)セルを設けることによりモーメントコンパクションファクターが負(トランジションエネルギーが虚数)になるよう設計されており、加速途中でトランジションエネルギーを通過することによる

ビームロスを避けることができる。各直線部は三つの FODO セルとその両側に置かれたマッチングセクションから構成されており、長さ 116m にわたり分散関数をゼロにしている。直線部はそれぞれ「入射, およびコリメータ」, 「遅い取り出し」, 「高周波加速空洞, および速い取り出し」に用いられる。

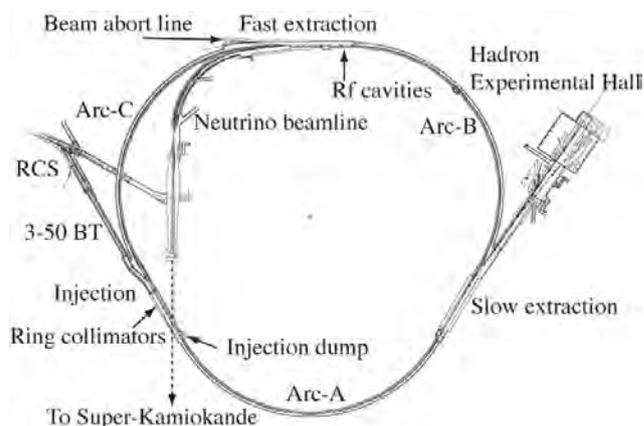


図 2 MR の平面図

MR の主電磁石システムは、96 台の偏向電磁石、216 台の四極電磁石(11 ファミリー)、72 台の六極電磁石(3 ファミリー)から構成され、さらに 186 台のステアリング電磁石(H : 93 台, V : 93 台)を持つ。高周波加速空洞には磁性合金(MA)のカットコアを用いている。高周波加速系は当面 6 システムの据付を予定しているが、コミッショニング開始当初は 4 システムである。

## 2. MR のコミッショニング計画

J-PARC のビームコミッショニングは、建設が終了し準備が整った上流側から行われている。2006 年 11 月にライナック、2007 年 10 月に RCS のビームコミッショニングが開始され[3,4]、それぞれが、現在、順調に稼働している。MR は 2007 年 12 月からトンネル内での四極電磁石の通電を開始し、その後、順次、各機器の現場での立ち上げ・調整を行い、2008 年 5 月からビームコミッショニングを開始

した。また、MLF も同じく 5 月からビームコミッショニングを開始している。

MR の初期のビームコミッショニングは、以下の三つのステージに区切って計画されている[5]。第 1 ステージは 2008 年 5 ～ 6 月に実施され、入射エネルギー 3 GeV での閉軌道の確立と rf 捕獲、入射直線部に置かれた入射ダンプへのビーム取り出しなどが行われた。その後、夏期停止を含む 5 ヶ月間のシャットダウン期間が設けられ、速い取り出し機器や遅い取り出し機器のインストール、ハドロン実験施設、およびニュートリノビームラインの建設作業を行う。第 2 ステージは 2008 年 12 月～2009 年 2 月に予定されており、30 GeV への加速、速い取り出し直線部に置かれたビームアポートラインおよびハドロンビームラインへのビーム取り出しが行われる。さらに、第 3 ステージが 2009 年 4 ～ 6 月に予定されており、ニュートリノビームラインへのビーム取り出しが行われる。

この原稿を書いている 9 月初旬現在、MR はコミッショニング第 1 ステージを終え、5 ヶ月間のシャットダウン期間の最中である。したがって、ビームコミッショニングの山場ともいえる加速試験や実験施設へのビーム取り出しにはまだ未着手である。そこで、以下では、第 1 ステージの結果を短く紹介して MR のコミッショニングが開始された様子をお伝えすることとし、機会があれば、第 2、第 3 ステージの終了後により詳しい報告をさせていただきたいと思う。

先に述べたように、MR と同じ時期に MLF もビームコミッショニングを開始し、特に 6 月は MLF と時間をシェアしながらの運転であった。第 1 ステージでの MR の運転時間の合計は、おおよそ 12 時間 × 12 日間であった。

### 3. コミッショニング第 1 ステージの結果

ビームコミッショニングはビームロスによる機器の放射化を避けるために、ビームモニタ系で測定可能な限り低いビーム強度で行った。ライナックの運転条件は、ピーク電流 5 mA、マクロパルス幅 0.1 msec である。J-PARC では、高周波チョッパーを用いて、RCS の rf 周波数と同期したパルス構造(中間パルス)をライナックであらかじめ作っておくことによりビーム損失の軽減を図っているが、MR コミッショニングの第 1 ステージではこの中間パルスの幅は 280 nsec とした。このとき RCS のパンチ当たりのビーム強度は  $4 \times 10^{11}$  ppb となり、定格ビーム強度のおよそ 1% に相当する。RCS は、取り出しエネルギー 3 GeV の単パンチモードで運転した。RCS からの取り出しビームの運動量拡がりや横方向エミッタンスは、各々、 $dp/p = \pm 0.2\%$ 、 $\epsilon = 15 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  程度と見積もられている。

ビームの繰り返しは、シングルショット、または、MR の遅い取り出しにおける標準的なサイクルである 3.64 秒周期とした。初期のビーム調整はシングルショットを基本にして行い、一つのショットで取得したデータを解析してからパラメータを変更して次のショットを打つ、というプロセスを繰り返した。

MR のビームコミッショニングは、5 月 19 日より開始した。第 1 ステージで予定していた 3-50BT の調整、ビーム入射、周回、rf 捕獲、入射ダンプへの取り出しは、最初の 4 日間で一通り達成し、その後は、ビームモニタ系の調整、COD 補正、高周波加速系の調整、チューンサーベイ、軌道パラメータの測定などを行った。

入射軌道の調整は、リングのビーム位置モニタ(BPM)を turn-by-turn モードで使用し、入射直後の数ターンの軌道を見ながら実施した。入射セプトムおよびキッカーの磁場調整とともに、入射ビームの運動量と偏向電磁石磁場のマッチング調整を行った。図 3 に、残留ガスビームプロファイルモニタ(IPM)で測定された、入射エラー調整後の周回ビームの垂直方向プロファイルを示す。図の(a)は入射後 16 ～ 23 ターン、(b)は 72 ～ 79 ターンの測定結果である。ビームの中心位置、およびビームサイズの変化はいずれも少なく、入射エラーが小さいことがわかる。ここでビームコア部の全幅を 40 mm 程度として  $\beta$  関数の設計値からエミッタンスを見積もると約  $14 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  となる[6]。一方、水平方向のビームプロファイルはフライングワイヤプロファイルモニタを用いて測定している。ワイヤ位置の校正などの時間が取れなかったため、今の段階ではまだ暫定的な値だが、水平方向エミッタンスは  $20 \sim 28 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  (Gaussian の  $2\sigma$ ) と見積もられている[7]。

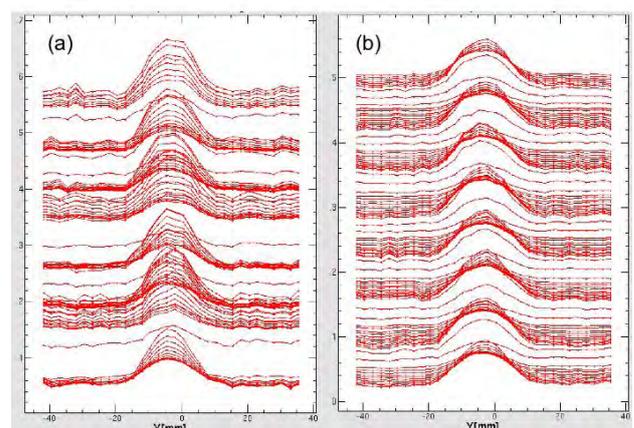


図 3 IPM で測定した垂直方向のビームプロファイルのマウンテンプロット

入射後 (a) 16 ～ 23 ターン、(b) 72 ～ 79 ターン目。

一方、まだ非常にラフではあるがチューンサーベイを行って、チューンとビームロスの関係を調べた。図 4 にチュ

ーン(22.20, 20.68)の運転で DCCT によって測定されたビーム強度の時間変化を示す。このときビームの蓄積時間は1秒である。図は六極電磁石を ON してクロマティシティ補正を行ったときの結果であるが、このチューンでは六極の ON/OFF で大きな差はなかった。一方、線形結合共鳴 ( $\nu_x + \nu_y = 43$ ) 近傍での大きなビームロスや、三次共鳴 ( $\nu_x + 2\nu_y = 64$ ) 近傍での比較的顕著なロスも確認している。ただし、後にも述べるが、現状ではチューンに  $\pm 0.03$  程度のバラツキがある。

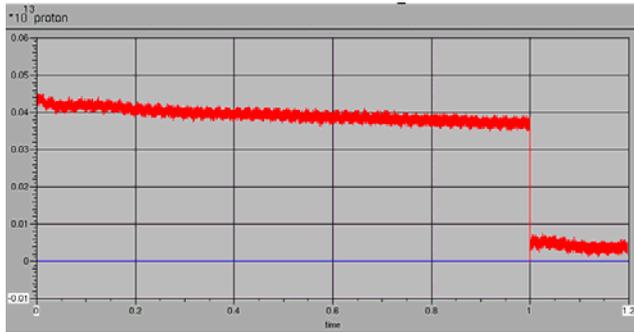


図 4 DCCT で測定されたビーム強度の時間変化

図 5 に水平方向分散関数の測定結果を示す。分散関数は、rf 周波数を変えて  $dp/p$  を  $0, \pm 0.3\%, \pm 0.5\%$  と変化させ、そのときの軌道の変位量から求めている。図の実線が設計値、丸印が測定値である。図にはリング 1/3 周のデータのみを示しているが、全体に測定結果は設計値とよく合っている。340m 付近の測定データが設計から大きく外れているのは BPM の不具合によるものである。

図 6 には  $\beta$  関数の測定結果を示す。ここでの測定値は四極電磁石のファミリーごとに励磁量を振ったときにチューンの変化量から求められたファミリーごとの平均値である。測定結果と設計値とは測定誤差の範囲内で一致している。QFP だけが設計値から大きくはずれているが、その原因はまだわかっていない。

MR, RCS とともに高周波加速系にはフルデジタルの Low Level RF (LLRF) 制御システムが採用されており、高精度で再現性のよい電圧位相制御が可能である。図 7 に MR の偏向電磁石磁場と rf 周波数とのマッチング調整を行った際に、壁電流モニタ (WCM) によって測定した縦方向ビームプロファイルのマウンテンプロットを示す。(a) は横軸のフルスケールが  $5.4 \mu\text{sec}$ 、(b) はビーム付近を  $100 \text{ nsec}$  に拡大した図である。rf パケットのほぼ中心にビームが捕らえられているため、二極振動はほとんど見えない。このときは、RCS 空洞の取り出し電圧と MR の空洞電圧とのミスマッチによる四極振動が観測されているが、ビーム入射後に MR の電圧調整を行うことによって四極振動を抑制できることも確認している [8]。

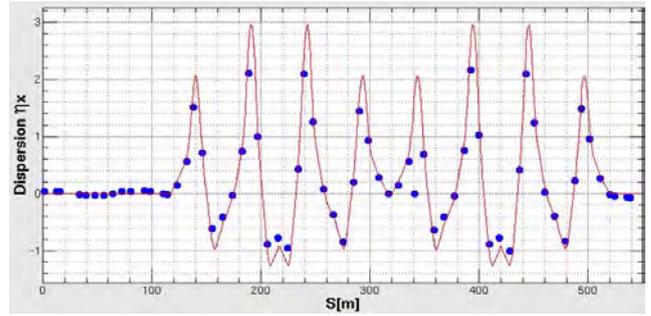


図 5 リング 1/3 周の水平方向分散関数

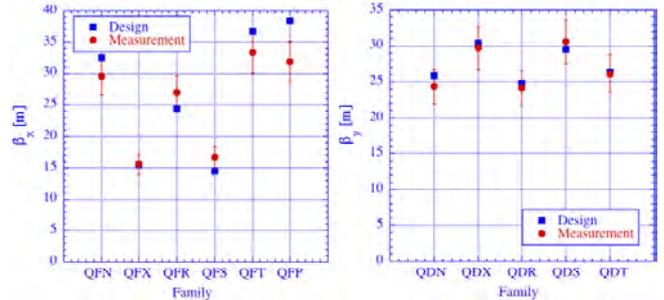


図 6 四極電磁石ファミリーごとの  $\beta$  関数の測定結果

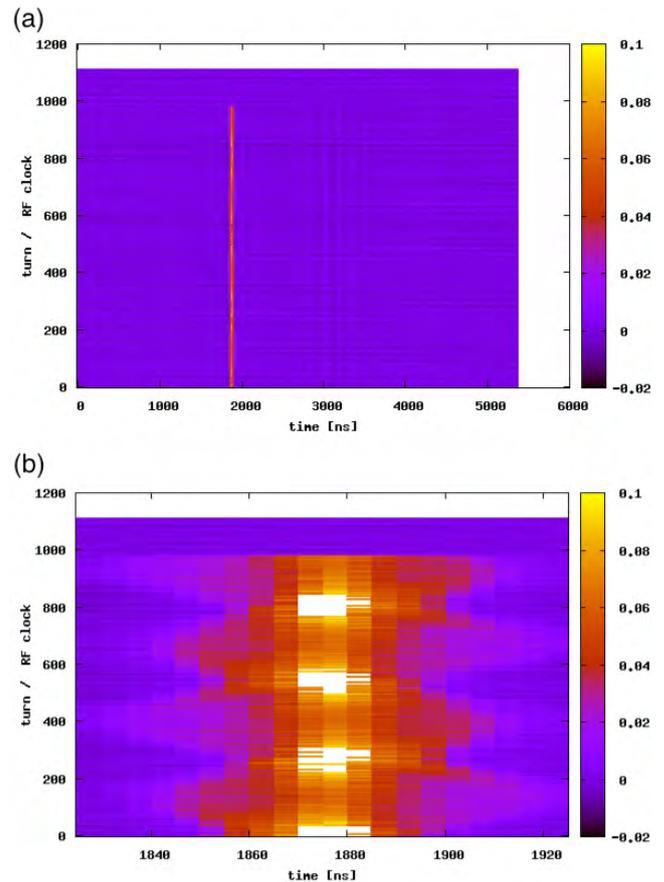


図 7 WCM で測定された縦方向ビームプロファイルのマウンテンプロット  
横軸のフルスケールが (a)  $5.4 \mu\text{sec}$ 、(b)  $100 \text{ nsec}$ 。

一方、第1ステージの運転から、いくつかの課題や問題点も明らかになっている。

図8にアーク部のBPMで測定された1秒蓄積運転における水平方向ビーム軌道の時間変化を示す。最大3mm (peak-to-peak)程度の細かい軌道変動が認められており、その原因は偏向電磁石電源の電流リプルであることが明らかになっている[9]。さらに四極電磁石電源にも同様の電流リプルが認められており、それに起因して同一のショットにおいて $\pm 0.03$ 程度のチューン変動が生じていることも確認されている。さらに、図8で蓄積時間の終盤に着目すると0.83secより大きく軌道がシフトしていることがわかる。これはビームを入射ダンプに蹴り出すために励磁されるダンプセプタムの漏れ磁場の影響によるものである。さらに、ダンプセプタムほど顕著ではないが、入射セプタムの漏れ磁場による周回ビームの軌道変動も確認されている[10]。

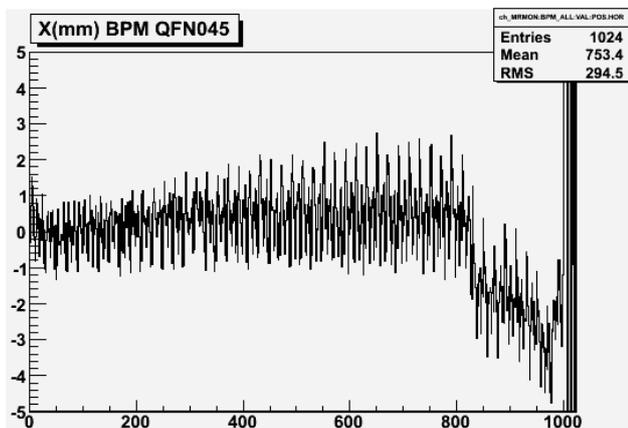


図8 アーク部のBPMで測定された水平方向軌道の時間変化

現在、第1ステージの運転で明らかになったこれらの問題点に対する検討が進められている。セプタムの漏れ磁場については5ヶ月の停止期間中に、周回側のビームダクトへのシールドの強化を実施する予定である。主電磁石電源のリプルについては、原因の調査と対策の検討が精力的に行われており、当面のコミッショニングのために最低限必要な改修案がほぼ固まりつつある(目指す大強度ビームの実現にはさらなる検討が必要であるが)。コミッショニング第2ステージの開始までにそれらの改修を終了すべく、作業が急ピッチで進んでいる。

#### 4. まとめ

MRは2008年5月より、予定通りにビームコミッショニングを開始した。5月～6月のコミッショニング第1ステージにおいては、RCSからのビーム輸送、MRへの入射、入射エネルギーでの周回とrf捕獲、およびダンプへのビ-

ーム取り出しに成功するとともに、COD補正やチューンサーベイ、各種ビームパラメータの測定を行うことができた。第1ステージの運転時間は必ずしも十分ではなかったが、ここまでコミッショニングを予定通りに進めることができた大きな要因の一つは上流側の加速器から安定なビームが供給されたことである。現在はビーム運転を停止して、取り出し機器の据え付け調整、第1ステージで明らかになった電源リプルやセプタムの漏れ磁場などの問題に関する検討や作業を進めている。12月からは30 GeVへのビーム加速とハドロン実験施設へのビーム取り出しを含むコミッショニング第2ステージが行われる予定である。

J-PARC加速器のビームコミッショニングは、KEKとJAEAとの混成チームである加速器グループのスタッフを中心に行われているが、素核研はじめ利用研究に関わる方々、放射線安全や施設部、運転業務委託の方々、そして機器製造メーカを含むたくさんの方々からのご支援をいただきながら進められている。まだまだ先は長いわけだが、この場をお借りしてこれの方々から心から感謝の意を表したい。また、昨年、および一昨年にMR(およびRCS)機器の連続運転試験などでシフトメンバーとして多大なご協力をいただいた素核研や大学の若手の方々にも改めて感謝の意を表したい。

#### 参考文献

- [1] “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, KEK-Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-044.
- [2] 山崎良成 他, “J-PARC 加速器”, 高エネルギーニュース 21(1), 11(2005).
- [3] 池上雅紀, “J-PARC リニアックにおける 181 MeV 加速の達成”, 高エネルギーニュース 25(4), 177 (2007).
- [4] 發知英明, “J-PARC 3 GeV RCS のビームコミッショニング”, 加速器, 5(1), 50 (2008).
- [5] T. Koseki, Proc. PAC07, p. 736, 2007.
- [6] 佐藤健一郎 他, “J-PARC MR のビームプロファイル測定”, 2008年8月6～8日, 第5回日本加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会.
- [7] 五十嵐進 他, “J-PARC MR フライングワイヤービームプロファイルモニター”, 2008年8月6～8日, 第5回日本加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会.
- [8] 田村文彦 他, “J-PARC リングにおける高周波加速調整”, 2008年8月6～8日, 第5回日本加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会.
- [9] 五十嵐進, “MR BPM によるビーム軌道リプルの観測”. J-PARC Acc. Memo, No. 6, July 31, 2008.
- [10] 高野淳平 他, “J-PARC MR ビームコミッショニングツールの開発”, 2008年8月6～8日, 第5回日本加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会.