# J-PARC MR の運転状況 - ビームコミッショニングの進捗と震災からの復旧-

小関 忠\*1・MR加速器グループ

#### Status of J-PARC MR

Tadashi KOSEKI<sup>\*1</sup> and MR accelerator group<sup>\*1,\*2</sup>

#### Abstract

The J-PARC main ring synchrotron (MR) has started users operation since 2009. The MR has two beam extraction systems. One is a fast extraction system for beam delivery to the neutrino beam line of the Tokai-to-Kamioka (T2K) experiment. Other is a slow extraction system for beam delivery to the hadron experimental hall. After nine-month beam shutdown caused by the Great East Japan Earthquake, the J-PARC facility resumed beam operation since December 2012. The MR delivers the 150 kW beam to the T2K experiment and 3-5 kW beam to users in the hadron experimental hall. In this paper, status of the MR high power beam operation is presented. Some improvements planned in near future for the beam intensity upgrade are also discussed.

## 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の加速器は, H<sup>-</sup> リニアック, 3 GeV シンクロトロン (RCS, Rapid Cycling Synchrotron), 主リングシンクロトロン (MR, Main Ring Synchrotron) から構成される. リニアック で 181 MeV まで加速された H<sup>-</sup>ビームは荷電変換フォ イルを通って陽子に変換され, RCS に入射される. RCS で 3 GeV まで加速された陽子ビームは,物質生命 科 学 実 験 施 設 (MLF, Materials and Life Science Experimental Facility) に送られて中性子及びミュオン



図1 J-PARC 施設の航空写真

の生成に利用されるとともに、その一部は 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 (SX, Slow Extraction) によってハドロン実験施設へ、速い 取り出し法 (FX, Fast Extraction) によって T2K 実験 (東海 - 神岡間長基線ニュートリノ振動実験) を行う ニュートリノビームラインへ送られる.

図1に施設全体の航空写真を示す. 図中には各施設 のビームコミッショニングの開始年度を色分けして示 してある. J-PARC 施設のコミッショニングは 2006 年 末のリニアックを皮切りに、建設が終了した上流側か ら順次開始され、ニュートリノビームラインのビーム 試験がスタートした 2009 年4月より全施設が本格的な 稼働に入った、その後、加速器のビーム調整を進めな がら徐々にビーム強度を上げ、2011年3月に東日本大 震災によって運転が停止する直前には, MLF に 220 kW, T2K に 145 kW の強度でビームを供給していた. 震災によって J-PARC が受けた被害は深刻であり<sup>1)</sup>, 仮復旧までにおよそ9ヶ月を要したが、2011年12月 中旬より震災後最初のビーム調整を開始し、2012年1 月からは利用運転も再開した.この原稿を執筆してい る 2012 年3月の時点で、利用実験に供給しているビー ム強度は震災前と同程度に回復している.

本稿では、MRの概要を簡単に紹介し、震災前後の

<sup>\*&</sup>lt;sup>1</sup> 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: tadashi.koseki@kek.jp)

<sup>\*&</sup>lt;sup>2</sup> 日本原子力研究開発機構 JAEA, Japan Atomic Energy Agency

ビームスタディと利用運転の状況を報告する.また, 図らずも長い停止期間となった 2011 年度に行ったいく つかの改造や,ビーム強度増強に向けた直近の課題に ついても述べる.

# 2. MRの概要

図2にMRの平面図を示す. MR は約1.6 km の周長 を持つ3回対称のリングで,長さ116 m の各直線部に は「入射機器,およびリングコリメータ」,「遅い取り 出し機器」,「高周波加速空洞,および速い取り出し機器」 が設置されている.

RCS はハーモニック数2,繰り返し25 Hz のシンク ロトロンである. RCS から取り出されたビームは,取 り出し点の下流に置かれたパルス偏向電磁石によって



図2 MRのレイアウト

Circumference [m]	1567.5
Superperiodicity	3
Cycle time for FX [s]	2.6-3.2
Cycle time for SX [s]	6.0
Injection energy [GeV]	3.0
Extraction Energy [GeV]	30.0
Harmonic number	9
Number of bunches	8
Typical transition gamma	j31
Physical aperture [ $\pi$ mm-mrad]	> 81
Collimator aperture [ $\pi$ mm-mrad]	54-81
Number of dipoles	96
Number of quadupoles	216
Number of sextupoles	72
Rf frequency [MHz]	1.67-1.72
Number of rf cavities	8

表1 MRの主なパラメータ

MR と MLF に振り分けられる. たとえば, T2K 実験 にビームを供給する場合は RCS から取り出されるビー ムの約 95%が MLF に,約 5%程度が MR に送られる. MR 行きのビームは,長さ 230 m のビーム輸送系(3 GeV to 50 GeV Beam Transport, 3-50 BT)を通って MR に入射される. 通常の利用運転においては,RCS から2バンチずつ,4回入射された8バンチのビーム が MR で 30 GeV まで加速されて実験施設に向けて取 り出される.

MR の繰り返しは遅い取り出しモードでは6秒周期, 速い取り出しモードでは約3秒の周期である.表1に MR の主なパラメータを示す.

MR のラティスの大きな特徴はトランジションエネ ルギーを虚数に選んでいることである<sup>20</sup>. RCS ではト ランジションエネルギーが取り出しエネルギーの3倍 以上となるラティスを採用しているが,取り出しエネ ルギーが最大 50 GeV の MR では現在の規模で十分に 高いトランジションエネルギーを得るラティス設計は 難しい. そこで MR ではトランジションエネルギーが 虚数になるラティス構造を採用し加速過程でトランジ ションエネルギーを通過しない設計にしている. これ は,大型陽子加速器としては世界で初めての試みであ る.

図3に1/3周の $\beta$ 関数と運動量分散関数 $\eta$ を示す. 1つのアークは3つのFODO セルからなるアークモジュール8つから構成されている. 各アークモジュー ルの中心に偏向電磁石を抜いた missing-bend cellを設 け,その部分で水平方向の運動量分散関数 $\eta_x$ が最大に, その他の偏向電磁石部で $\eta_x$ が負になるようにしてい る. その結果,  $\alpha$ をマイナスに, すなわちトランジショ ンエネルギーを虚数にすることができる. また, 直線 部の $\eta_x$ を0にするために, アーク部分の両端で $\eta_x$ が



**図3** MR 1/3のβとη

— 31 —

J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 9, No. 1, 2012 31

0になるようにしている. これは、アーク部での位相 の進みが2 $\pi$ の整数倍になるように取ることで与えら れるが、MRの場合は、1つのアークモジュールの位 相の進みを3 $\pi$ /4としているので、1アーク(8モジュー ル)での位相の進みは6 $\pi$ となる.

一方,1つの直線部は、3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116 m にわたって $\eta_x$ が0である.マッチン グセクションはアーク部との間で光学パラメータの マッチングを取るために用いられる.

MRの主電磁石システムは,96台の偏向電磁石, 216 台 11 ファミリーからなる四極電磁石, 72 台 3 ファ ミリーからなる六極電磁石によって構成されている. さらに186台のステアリング電磁石(水平,垂直方向 とも各93台)が設置されている.主電磁石電源は、変 換器のスイッチング素子として IEGT/IGBT を採用し たパターン電源である. 三相 22 kV の交流を電源トラ ンスで降圧し,直接,変換器に入力する方式をとるこ とで小型化が図られている.しかし、ビームコミッショ ニングの開始当初から, 主電磁石電源の電流リプルに 起因するビーム軌道やチューンの変動が確認されてお り<sup>3)</sup>, それが現在でも大きな問題となっている. これ までに電源のフィルター構成の見直しや、負荷配線の 対称化(ノーマルモードとコモンモードの分離)を行い, コミッショニング開始当初に比べると電流リプルは大 幅に改善し、典型的には入射エネルギーで10<sup>3</sup>台、取 り出しエネルギーで10<sup>-4</sup>台になっている<sup>4)</sup>.しかし, 後述するようにハドロン実験施設への安定なビーム供 給のためには、リプルをさらに 1/10 以下にする必要が ある.

高周波加速空洞には RCS と MR のいずれも J-PARC で開発された MA(Magnetic Alloy)負荷空洞が採用さ れている. MR で陽子ビームを 3 GeV から 30 GeV ま で加速する場合のβの変化は3%程度で、加速周波数 範囲は 1.67 MHz から 1.72MHz である. MA 空洞はQ 値が低く広帯域のインピーダンスを持っているため, この周波数範囲を無同調でカバーすることができる. ドーナツ型の MA コアを径方向にカットして 2 等分し 切断面間の距離を適当に選ぶことによって空洞のイン ダクタンスやQ値を調整することができるが、MR で はこのカットコア配置を用いてQ値を26程度にしてい る. 2012年3月現在, 震災後の停止期間中に増設した 2台を含め、MRには8台の空洞が設置されており加 速電圧としては 280 kV 程度を得ることが出来る. 各空 洞は、空間電荷効果の影響を抑制するために外付けの キャパシタンスを調整して共振周波数を変更し,2倍 高調波空洞として運転することも可能である.

MRへのビーム入射には1ターン入射が用いられる. 3-50BT を通って入射されたバンチは、2 台のセプタム 電磁石によってリングの周回軌道と平行近くになるま で曲げられ、入射キッカー電磁石によって周回軌道上 にのせられる. 入射キッカーの下流側にはビームコリ メータが置かれている. コリメータは物理的口径を他 の場所よりも狭くすることによって、ビームのハロー 成分を削り落とし、ビームロスを局所化するために用 いられる. MR の物理口径は、コリメータをのぞき、 位相空間で 81 π mm-mrad 以上を確保するよう設計さ れている. それに対して, コリメータの口径を54-60  $\pi$  mm-mrad に狭くすることにより、コリメータ以外 の箇所で生じるビームロスを抑える. さらにビームコ リメータは 3-50BT にも設置されている. 3-50BT のコ リメータで RCS から取り出されたビームのハロー成分 を取り除き, MR に入射された後に空間電荷効果など の影響で発生するハロー成分を MR のコリメータで取 り除く.

# 3. ビームコミッショニングの現状

図4に単粒子シミュレーションで得られた MR のア パーチャサーベイの結果を示す<sup>5)</sup>. これは $\Delta p/p=0$ の 粒子によるトラッキングで,測定された電磁石の磁場 誤差,高次成分,アラインメント誤差,四極電磁石の フリンジ成分を考慮している. 図に示した二つの点は 現在の運転に使っている動作点で,速い取り出しが  $(\nu_x, \nu_y) = (22.40, 20.76),遅い取り出しが (22.30,$ 20.78) である.



図4 チューンダイアグラム.●は速い取り出しと 遅い取り出しの動作点.

#### 3.1 光学パラメータの測定

速い取り出しの動作点における $\beta$ ,  $\eta_x$ の測定結果を 図 5, 6 に示す. 測定は集団効果の影響を受けない低い ビーム強度(粒子数 4 × 10<sup>11</sup> のシングルバンチ運転) で行っている. 四極電磁石の設定電流と磁場との関係 に誤差が含まれるため, 2008 年のコミッショニング開 始直後は測定された光学パラメータには設計値からの ズレが確認された. そこで,加速器用計算コード SAD で構築したモデルを用いて,チューン, $\beta$ ,  $\eta$ の測定 結果から各四極電磁石の補正量を求めた<sup>6</sup>. この補正 を行った後は図に示すとおり $\beta$ の測定と設計値は良く 一致している.  $\eta_x$ は一次,二次の項をプロットしてい るがいずれも良く合っている.

さらに, 六極電磁石を用いて補正した後の色収差の 測定結果と計算結果を図7に示す. 色収差は十分に補 正されている. また, 非線形成分を含め, SAD による 計算(偏向電磁石の六極成分を考慮した場合)とも良 く一致している.

## 3.2 大強度運転と速い取り出し

速い取り出しシステムは、5台のキッカー電磁石と その下流に置かれた6式のセプタム電磁石から構成さ れている.約1 µsの立ち上がりでキッカー電磁石が 励磁され、リングを一周する時間内(~5 µs)にすべ てのビームがニュートリノビームラインに取り出され る.



2008年のコミッショニング開始当初から用いていた キッカー電磁石システムには,以下の二つの問題があっ た.(1)キッカーの立ち上がりが 1.6 µs と遅く,8 バンチを埋めてしまうとバンチ間の空き時間の中で磁 場が定格まで立ち上がらないためバンチの数が最大6 に制限された.(2)ビーム強度が上がるとキッカー電 磁石のフェライトコアが発熱し,蹴り角のドリフトが 生じた.これらの理由によりニュートリノビームライ ンに供給するビームパワーは 2010年6月まで60 kW 程度に制限された<sup>7)</sup>.そこで,2010年夏の停止期間中 に5台のキッカーすべてを新たに設計製作した集中定 数型キッカー電磁石システムに交換した.その結果,8 バンチ運転が可能な約1 µsの立ち上がりが得られ, さらにビーム結合インピーダンスも低減されて 100 kW 以上の安定な運転が可能となった.

一方,ビーム電流が上がってくるとステンレス鋼製 の真空ダクトにおける横方向 resistive wall impedance と,入射キッカー,及び取り出しキッカーのインピー ダンスに起因すると考えられるビーム不安定性の影響 が顕著になる.この不安定性によるビームロスを避け るために,ビームロスを生じるビーム入射から加速開 始にかけては色収差の補正を弱め,-1~-5程度の色収 差を与えることで振動を減衰させている.

さらに、2010年から不安定性を減衰させるためにバ ンチ毎フィードバックシステム<sup>80</sup>を導入している.図 8にバンチ毎フィードバックシステムのブロック図を



「極電磁石によって補正された 巨坂左の 値(実線)と測定値(●).

示す. ビーム位置モニタから得られるビーム位置信号 は信号処理系においてバンチ毎にサンプリングされ, 最大16タップのFIRフィルターによってリングを1 周まわった後で同じバンチを蹴りもどすタイミング合 わせが行われるとともに,フィードバック値が求めら れる. 得られた値はアナログ値に変換されて,パワー アンプを通してストリップラインキッカーに送られる.

図9にバンチ毎フィードバックを ON/OFF したとき の周回ビーム強度の例を示す.また図10に、図9と同 じショットにおける水平方向 BPM の左右電極の差信 号を示す.いずれの図も(a)はバンチ毎フィードバッ ク ON,(b)は OFF の場合である.このときの加速粒 子数は9×10<sup>13</sup> ppp (particles per pulse)である.図に 示したようにバンチ毎フィードバックが OFF の場合に



図10 図9と同じショットにおける BPM の水平方向 電極の差信号. 横軸の時間幅は最初の入射から 0.4 秒. はコヒーレントな振動が増大し大きなビーム損失を生 じる場合があるが,バンチ毎フィードバックを ON に するとそのような不安定性の成長は観測されない.

図 11 にバンチ当たりの粒子数 1 × 10<sup>13</sup> ppb (particles per bunch) の3 GeV ビームにおける空間電荷効果によるチューンシフトを求めたシミュレーション結果を示す<sup>9)</sup>. この粒子数でのシフト量は 0.15 程度となり,いくつかの共鳴の影響を受ける可能性があるが,ビームロスやエミッタンスの増大に最も大きく寄与するのは線形結合共鳴 ( $\nu_x$ ,+ $\nu_y$ =43) である. 図 12 には 1 ×



図11 空間電荷効果によるインコヒーレントチューン シフト



 図 12 粒子数1×10<sup>13</sup> ppbの水平方向プロファイル. 左は FWPM での測定結果,右はシミュレーション. (a) 入射タイミング k1, (b) 入射から 20 ms, (c) 入射から 120 ms.

10<sup>13</sup> ppbの入射ビームの水平方向プロファイルが入射 から120 ms後(加速開始前)にどのように変化するか を測定とシミュレーションで比較した結果を示す.プ ロファイルの測定にはフライングワイヤープロファイ ルモニタ(FWPM)を用いている.線形結合共鳴の影 響と考えられるプロファイルの変化がシミュレーショ ンと測定の双方で確認されている.震災後の停止期間 中にこの共鳴を補正するためのスキュー四極電磁石4 台を設置しており,今後はそれらを用いた共鳴補正を 行う予定である.

粒子数1×10<sup>13</sup> ppp, ビームパワー135 kW のときの ビームロスモニタのカウント数のリング全周にわたる 分布を図13に示す. ビームロスはリングコリメータの エリアに概ね集中しているが, 微少ながら下流側への 漏れが見える. この漏れはビーム強度が上がってくる と, コリメータエリア外に有意な残留線量を作ること になるため,現在は, コリメータを増設して,よりビー ムロスを局所化することを検討している. ビームロス が生じるのは入射と加速開始のタイミングで,失われ



図13 加速粒子数1×10<sup>13</sup> ppp のときのビームロスモ ニタのカウント数の分布



図14 2010年1月から2011年3月までにT2K実験に 供給されたパルスあたりの陽子数,およびその 積分値の推移(T2Kグループ提供)

る粒子数は全体のおよそ 1-2 %である. これは 3.2 秒 周期の運転では 135 – 270 W に相当するビームロスで ある. これからのビーム強度の増強はこのロスをいか にして低く抑えるかがポイントとなる. なお, 現在の リングコリメータの容量は 450 W であるが, 2012 年の 夏に新たなコリメータユニットを増設して 2 kW に増 強する予定である.

図14にMRが東日本大震災によって運転が停止される2011年3月11日朝までにT2K実験に供給したパルスあたりの陽子数,およびその積分値の推移を示す. 震災直前でのパルスあたりの陽子数は9.2×10<sup>13</sup> ppp, 繰り返しは3.04秒サイクルで,ビームパワーとしては 145 kW である.ちなみに陽子シンクロトロンからの取 り出しビームにおけるパルス当たりの陽子数ではMR はブルックへブン国立研究所(BNL)のAGSを抜い て世界最大を記録しており,大強度陽子加速器として 前人未踏の領域に入っている.

T2K 実験は 2010 年1月から本格的な物理実験を開始しているが、2011 年3月までにニュートリノ生成標的に供給された陽子の数は 1.43 × 10<sup>20</sup> である. これはKEK-PS において4年間に渡って実施された長基線ニュートリノ実験 K2K に供給された陽子数の約 1.4倍に相当する. このデータを解析した結果、T2K は µ型ニュートリノから電子型ニュートリノへの振動を6事象観測し、電子型ニュートリノの出現現象の徴候を世界で初めてとらえることに成功した<sup>10)</sup>. この成果は英国物理学会が発行する Physics World 誌において「2011年の物理学における 10 大成果」の一つに選ばれている.

運転停止後の MR の残留放射線量の測定結果の一例 を図15に示す.2011年3月11日に東日本大震災によっ てビーム運転は9ヶ月にわたり停止されたが,これは



図15 東日本大震災によるビーム停止後に測定されたリ ング一周の残留放射線量分布

停止期間中の4月6日,および8月31日に測定され たリング一周の残留線量分布である.ここでは機器の 表面上で測定した線量と30 cm 離して測定した線量と が示されている.残留線量が高いエリアはコリメータ 箇所にほぼ集中しているが,4月の測定結果には,先 に図11に示したビームロス分布に対応してコリメータ エリア下流のアーク部にやや線量の高い箇所がある. それ以外で所々に若干高い数値を示しているのは,アー ク部におけるη<sub>x</sub>のピーク付近である.現状では速い取 り出し部における残留線量は高くはない.

震災からの復旧後,T2Kの物理実験は2012年3月 から本格的に再開され,MRは繰り返し2.92秒で150 kWのビームを供給している.2012年4月にはさらに 繰り返しを2.56秒に短縮して190kWの運転を開始す る予定である.原子炉を用いたニュートリノ振動の実 験が次々に最新の結果を報告しているなかで,震災に よって約1年の中断を余儀なくされたことは不運では あったが,電子ニュートリノの出現現象の探求が可能 な(今のところ)世界で唯一の実験として,これから はさらに大きな成果が期待されるであろう.激化する 国際競争の渦中にあってMRのビーム強度をいかにし て速やかに増強していくかが今後の実験の成否を左右 すると言っても過言ではない.

#### 3.3 遅い取り出し

MRの遅い取り出しには三次共鳴が用いられる. 三次共鳴を励起するための六極電磁石(共鳴六極と呼ぶ) 8 台がアーク部に設置されている. 遅い取り出しの直線部には、2 台の静電セプタム(ESS1&2),10 台のセ プタム電磁石(SMS1-1~SMS3-4),4 台のバンプ電磁石(SBMP1~SBMP4)が配置されている(図16) <sup>11)</sup>. ビームが30 GeVまで加速された後,共鳴六極によっ て三次共鳴(3  $\nu_x$ =67)を励起するとともに、四極電磁石のうちアーク部48 台のファミリーである QFN の励磁電流を調整して、 $\nu_x$ を徐々に三次共鳴線に近づける. その結果、三次共鳴のセパラトリクスが次第に小さくなり、周回するビームはベータトロン振動が不安定な領域に入って振幅が増大する.静電セプタムを通過する際に、振幅の大きな粒子から順に静電場によるキッ クを受けて周回軌道をはずれ,その下流に位置するセ プタム電磁石群によってさらに大きく曲げられてハド ロン実験施設に続くビーム輸送系に導かれる.バンプ 電磁石はこの取り出しが最も効率よく行われるバンプ 軌道を作るために用いられる.

遅い取り出しのビーム強度を制限するのは取り出し 部におけるビーム損失であるから、可能な限りロスの 小さいシステムにすることが重要である.静電セプタ ムではギャップ幅25mmの高電圧陰極とセプタム面 (アース電極)の間に 104 kV の高電圧を印加してビー ムを取り出すが、セプタム面でのビームロスを軽減す るためにはその物質量を可能な限り小さく抑える必要 がある. MR ではセプタム材として厚さ 30 µm, 幅 1mmのタングステン - レニウムのリボンを採用してお り495本のリボンが3mmピッチで張られている.また, セプタム面を越えて取り出されるビームの最終ターン での位置と3ターン前の位置との水平方向距離をス テップサイズと呼ぶが、ステップサイズを大きくする ことによってロスは低減される. MR では静電セプタ ムでのβ<sub>x</sub>を約40mとして,ステップサイズが20mm 程度になるよう設計されている. 高電圧陰極とセプタ ム面の電極間距離が 25 mm であるから, ステップサイ ズとしては上限に近い値である.

図 17 に遅い取り出しの利用運転における典型的な周 回ビーム強度を示す.現在,遅い取り出し運転におけ る繰り返し時間は6秒,主電磁石の磁場のフラットトッ プは2.93 秒で,ビームはその間,約2秒かけて取り出 される.この図の場合は粒子数4×1012 ppp,連続運 転のビームパワーとしては3.3 kW である.

MRでは、さらにビームロスを低減するために、取り出し中にバンプ軌道を変化させるダイナミックバン プと呼ばれる手法を用いている<sup>12)</sup>. 図18にダイナミッ クバンプの場合と固定バンプ(時間的にバンプ軌道を 変化させない従来の方法)の場合との三次共鳴のセパ ラトリクスの違いを示す.実線は取り出し開始時の、 点線は取り出し終了時のセパラトリクスを、波線は静 電セプタムのセプタム面の位置を示す.固定バンプの 場合は、セパラトリクスの中心が動かないので、取り



図16 遅い取り出し直線部の機器配置



図17 遅い取り出し運転における周回ビームの強度と 運動量



図18 遅い取り出し開始時(実線)および終了(点線) 時のセパラトリクス.(a)は固定バンプ,(b)は ダイナミックバンプの場合.

出しの最初と最後ではセプタムリボンでのビームの傾 きが変わってしまう. その結果, ビームから見たリボ ンの実効的な厚みが変化し、ビームのロス量も変化す ることになる. それに対してダイナミックバンプは. 取り出し中にバンプ電磁石をチューンの変化と同期さ せながら励磁することによってセパラトリクスの中心 を移動させ、常にセプタムリボンでのビームの傾きを 一定に保つ方法である. この傾きをロスが最も少ない 値に最適化しておけば、ロスを最低限にする取り出し が可能となる. 図19, 図20に固定バンプ,およびダ イナミックバンプを用いた場合の遅い取り出しの直線 部におけるビームロスの分布、およびビームロスの時 間変化を示す.ダイナミックバンプを用いることで, ビームロスが大幅に減少していることがわかる. ビー ムのロス量から取り出し効率を評価すると、固定バン プでは 98.3 %, ダイナミックバンプでは 99.5 %である. 99.5 %という効率は、我々が MR の遅い取り出しシス テムの設計段階で目指した数値であり、遅い取り出し で達成された効率としては、世界の加速器の中でも最 も高い値である.

一方,ハドロン実験施設で実験を行う利用者にとっては遅い取り出しで供給されるビームは時間構造が均



図19 固定バンプでの取り出しにおける遅い取り出し 直線部のビームロス分布(上)とロスの時間変 化(下).時間原点 P1 は入射開始時刻.



図20 ダイナミックバンプでの取り出しにおける遅い 取り出し直線部のビームロス分布(上)とロス の時間変化(下).

ーで直流的なビームであることが重要である.取り出 されるビームの強度を一定に保つために,MRではス ピルフィードバックシステムを用いている.これは取 り出されるビームスピルを常にモニタしながら,ビー ム強度が一定になるように, ν<sub>x</sub>を三次共鳴に近づける 速度をフィードバック制御するもので,DSPを用いた 信号処理系と速い応答性を持つ2種類の四極電磁石か ら構成されている.

図 21 にハドロン実験施設へのビーム輸送系において シンチレーションカウンターを用いて測定された取り 出しビームのビームスピルを示す.このとき陽子数は  $4 \times 10^{12}$  ppp, (a) はスピルフィードバックがない場合, (b) はスピルフィードバックがある場合である.ビー ムスピルにはところどころに大きなスパイク構造が見

— 37 —

られる. これは主電磁石電源における電流リプル (Δ I/I ~ 10<sup>4</sup>) に起因している. MR では四極電磁石 と偏向電磁石の一部でヨークに取り付けられた補助コ イルをビーム取り出しの間だけ短絡させることにより 磁場のリプル成分を軽減する対策も取られている が<sup>13)</sup>, それでも大きなリプル成分が残り, 取り出しビー ムの時間構造に深刻な影響が出ている.

このスピル構造を定量的に評価するために次式で定 義されるデューティーファクターを用いる.

$$Duty = \left(\int_{T_1}^{T_2} I(t)dt\right)^2 / \int_{T_1}^{T_2} dt \int_{T_1}^{T_2} I(t)^2 dt, \qquad (1)$$

ここで, *I(t)* はビーム電流, *T1* はビームスピルの開始時刻, *T2* は終了時刻である.取り出されるビームの強度が時間的に完全に一様であれば,デューティーファクターは 100 %となる.図21 に示されたスピル信号のデューティーファクターを計算すると,(a) 3.6 %,(b) 17 %であり,スピルフィードバックシステムがデューティーファクターを改善していることがわかる.さらに(c) は,スピルフィードバックに加えて,ストリップラインキッカーを利用して横方向(transverse)に中心周波数 20 MHz,幅1 kHzのrf ノイズを印加した場合である.ベータトロン振動が励振されることでデューティーファクターはさらに向上し,30 %まで改善する.

遅い取り出しの利用運転におけるビームパワーは震 災前の 2010 年 11 月の時点で, 3.0 - 3.6 kW であった. そのとき, すでに transverse rf によってスピル構造が



図21 シンチレーションカウンターで測定された遅い 取り出しのビームスピル. (a) スピルフィード バックなし, (b) スピルフィードバックあり、(c) スピルフィードバック、および transverse rf あ り.

改善することは確認されていたが,20 MHz の rf を加 えた際にストリップラインキッカーでマルチパクタリ ングによる圧力上昇が生じたため,利用運転で transverse rf を使用することはその時点では断念した. しかし,震災後の長期停止期間中に,ストリップライ ンキッカーの真空ダクトにソレノイドコイルを設置す る作業を行い,ソレノイド磁場を加えることでマルチ パクタリングが完全に抑えられることが確認された.

MR はビーム運転を再開した 2012 年1月末から2月 にかけて遅い取り出しの利用運転を行った. 震災前の 状況が再現できているかを判断しながら徐々にビーム パワーを回復し,2月後半の運転では transverse rf を 加えて,ビーム強度 3.2 kW,デューティ 30 %のビー ムをハドロン実験施設に供給した.

コミッショニング開始以来,MRが遅い取り出しで 達成したビーム強度は,利用運転としては最大 6.6 × 10<sup>12</sup> ppp (5.3 kW),加速器のスタディでは 1.3 × 10<sup>13</sup> ppp であり,これらは 2005 年にシャットダウンされた KEK の 12 GeV 陽子シンクロトロンと同程度のビーム 強度である.遅い取り出しは原理的に取り出し機器で のビームロスが不可避となる方法でありビームロスと 機器の残留放射線量をより慎重に見極めながらビーム 強度を上げていく必要がある.

2010年の秋に実施された約30日の運転においては 1-3.6 kWのビームがハドロン実験施設に供給されたが, 遅い取り出し直線部において運転停止から4時間後に 測定された残留線量が最も高かったのは静電セプタム 下流の四極電磁石 QFR で,上流側真空ダクトの表面線 量が900 µSv/hであった.この線量値は今後ビーム強 度を上げて長期間の利用運転を行う際にはメンテナン ス作業に支障を来す可能性があることを示す.そこで, 2011年の停止期間中に遅い取り出し直線部に新たなコ リメータシステムを導入した.コリメータ設置後の 2012年1月から2月にかけて3-5 kWのビーム強度で 26日の運転を行い,運転停止から4時間後の残留線量 を測定したところ,QFR上流側での表面線量は150 µ Sv/hと大幅に減少した.

一方,スピル構造をさらに改善するために,現在, スピルフィードバック用の高速応答電磁石である RQ (ripple quadrupole)の電源を新規に製作している.新 しい電源は従来の2倍の電圧を出せる電源となってお り,数100Hz という高い周波数のリプル成分を抑える フィードバックに有効となることが期待される.実際, 2012年2月に試作電源を用いたビーム試験を実施した 結果,ビーム強度3kWでのデューティーを30%から 40%程度に改善できることが示された.

# 4. 震災後の停止期間中に実施された作業

震災後の9ヶ月の停止期間中,J-PARCのすべての 施設で教職員,学生,業務委託のメンバー等が復旧作 業に総力を結集して取り組んだ.MRは全周にわたっ て電磁石やモニタのアラインメントがずれ,大きい箇 所では20mmの変位が生じたため<sup>14)</sup>.すべての電磁石 の再アラインメントを実施した.さらに膨大な物量に およぶ機器の健全性の確認作業や故障した機器の改修 作業を行った.

一方で,長い停止期間となったこの時期を利用して, 性能向上に関わる作業も数多く行った.先に述べた遅い取り出しのコリメータや RQ 電源はその一例である. その他に,震災後の停止中に実施されたビーム性能の 向上に関わる主な作業を以下に示す.

- 入射キッカーの交換:真空チェンバー内の放電と波 形不良による周回ビームへの影響が問題となってい た入射キッカーを、新たに設計製作した新キッカー に入れ替えた。
- リングコリメータエリアの改造<sup>15)</sup>:放射線シールドおよび放射線アブソーバの増設と、メンテナンスをより容易にするための冷却水の配管変更や BPM の移動などを行った.2012年の夏にコリメータユニットをさらに増設することにより、容量は2kWに増強される予定である.
- ・高周波加速空洞2台の増設(7,8号機):繰り返し
  時間の短縮のために加速電圧を増強するとともに,
  空間電荷効果の影響を緩和するために一部を二倍高
  調波空洞として使用する.
- •スキュー四極電磁石の導入:線形結合共鳴の補正を 行うため,4台のスキュー四極電磁石を設置した.
- •八極電磁石の導入:ビーム不安定性抑制のため,3 台の八極電磁石を設置した.

# 5. 今後の予定

今後のビームコミッショニングにおいては, RF の フィードフォワードによるビーム負荷補償システ ム<sup>16)</sup>の立ち上げ,二倍高調波空洞を用いた空間電荷効 果によるビームロスの低減,スキュー四極による共鳴 補正などを進めていく予定である.一方,2012年の夏 も大強度化にむけた改造や新たな機器の設置が計画さ れており<sup>17)</sup>,例えば先に述べたリングコリメータの増 強や,9台目となる高周波加速システムの設置が行わ れる.また,震災で被災した機器やトンネルの修復が まだ不十分であり,例えば地下水の漏水対策や,サブ トンネルにおけるエキスパンジョンジョイントの修理 等をこの夏以降も継続して進めていく必要がある.

遅い取り出しについては、コミッショニング開始当 初はハドロン実験施設の二次粒子生成標的は5 kW 仕 様であったが、2011年の停止期間中にこれを50 kW 仕 様のシステムに増強し、実験施設側はより大強度のビー ムを受け入れる準備が整った.今後は加速器のスタディ を重ねるとともに、一部の取り出し機器の真空チェン バー材を現在のステンレス鋼から、残留線量を低減す るチタン材に変更したうえでビーム強度を増強してい く計画である.当面は BNL の AGS が達成したビーム 強度を越える 50 kW 以上での利用運転を 2014 年度内 に開始することを目指す.

J-PARCでは2013年7月からの7ヶ月間,ビーム運転を停止して、リニアックのビームエネルギーおよび ピーク電流の増強のために大規模な改造作業が行われる予定である.ビームエネルギーは新たにACS (Annular Couple Structure linac)を導入することにより現行の181 MeVから400 MeVに増強される<sup>18)</sup>.さらに、リニアックのフロントエンド部(イオン源, RFQ)は、現行の30 mA 仕様から50 mA 仕様に変更される.RCSでは、入射エネルギーを400 MeVに上げるために、入射用バンプ電磁石電源の入れ替えを行うとともに、大電流を加速するために加速空洞を1台増設して全12台のシステムとなる.この改造の後, RCS は設計仕様値である1 MW の実現に向けたビーム調整を進めていく予定である.

MR もさらにビーム強度の増強を目指すが、大強度 運転においては空間電荷効果の影響が一層大きくなり, rf バケツの中に詰め込むことの出来る粒子数は、許容 されるビームロスとの兼ね合いで、やがて限界に近づ く<sup>19)</sup>. したがって,よりビーム強度を上げるためは, 取り出しエネルギーを上げるか、繰り返しのサイクル を短くする必要がある. MR はもともとビームエネル ギー 50 GeV で設計仕様値の 750 kW を達成するという シナリオでスタートしている.しかし,現在は,主電 磁石の飽和の影響や必要とされる電力を考慮して、エ ネルギーは 30 GeV のままで,繰り返しサイクルを1 秒程度に短縮することにより, 速い取り出しにおいて 750 kW を達成するという方針に変更してその準備を進 めている.1秒サイクルの運転には主電磁石電源を高 繰り返しに対応する新しい電源に置き換える必要があ り、新規に製作する電源の R&D が精力的に進められ ている.新電源では遅い取り出しのスピル構造が十分 に良くなるように~10<sup>6</sup>の低リプルを目指す.また, 高繰り返しを達成するためには、高周波加速系により

— 39 —

高い加速勾配が要求される. MR は MA 負荷空洞を用 いているが、日立金属(株)のFT3L と呼ばれる MA コアを用いて、現行よりも2倍程度高いシャントイン ピーダンスを持つ加速空洞の開発が進められてい る<sup>20)</sup>.

## 6. おわりに

MR のビームコミッショニングと利用運転について 震災前後の状況を中心に述べた. コミッショニング開 始から約4年が経過しているとは言え, MR はまだま だ発展途上の加速器である. 目標としているビーム強 度を実現するには今後も多くの課題を解決する必要が あるが,向こう5年を目処に速い取り出しで750 kW, 遅い取り出しで100 kW の達成を目指していきたいと 考えている.

この原稿をまとめるにあたってご協力をいただいた, KEK 加速器の五十嵐進氏, 冨澤正人氏, 外山毅氏, 佐藤洋一氏, 山田秀衛氏に謝意を表したい. また当初の 予定よりも大幅に原稿の提出が遅れたにも関わらず, 粘り強く対応してくれた学会誌編集委員会と学会事務 局に感謝する.

#### 参考文献

- 1) 小関忠・長谷川和男・金正倫計「東日本大震災後の J-PARC」,加速器 Vol. 8, No. 2 (2011) 74.
- "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", KEK-Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-044.
- 小関忠「ビームコミッショニングを開始した J-PARC MR」高エネルギーニュース, Vol. 27, No. 2 (2008) 63.
- 中村衆ほか「J-PARC MR における電磁石電源の問題 点と対策」,加速器 Vol. 6, No. 4 (2009) 292.
- A. Molodozhentsev *et al.*, "Study of the beam dynamics for the Fast Extraction Operation Scenario of the J-PARC Main Ring", Proc. IPAC2010, Kyoto, Japan, 2010, p. 1937.
- S. Igarashi *et al.*, "Optics Measurement and Correction in J-PARC MR", Proc. 8th Meeting of PASJ, Aug. 1-3, Tsukuba, Japan, 2011.
- 7) T. Koseki, "High Intensity Aspects of the J-PARC

Facility", Proc. HB2010, Morschach, Switzerland, 2010, p.16.

- Y. Kurimoto *et al.*, "Bunch-by-Bunch Feedback System in J-PARC Main Ring", Proc. DIPAC2011, Hamburg, Germany, p. 482.
- S. Igarashi *et al.*, "Beam Profile Measurement using Flying Wire Monitors at the J-PARC Main Ring", Proc. IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, p. 1239.
- T2K Collaboration, "Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam", Phys. Rev. Lett. 107, 041801 (2011).
- 11) M. Tomizawa *et al.*, "Design and Initial Beam Performance of Slow Extraction from J-PARC Main Ring", submitted to Physical Review ST.
- 12) M. Tomizawa *et al.*, "Improvements of Slow-Extracted Beam from J-PARC Main Ring", Proc. 9th Meeting of PASJ, Aug. 1-3, Tsukuba, Japan, 2011.
- S. Igarashi *et al.*, "Magnetic Field Ripple Reduction of Main Magnet of the J-PARC Main Ring Using Trim Coils", Proc. IPAC2010, Kyoto, Japan, 2010, p. 301.
- M. Shirakata *et al.*, "Displacement of J-PARC caused by Megaquake", Proc. IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, p. 1662.
- M. Shirakata *et al.*, "Collimator Upgrade Plan of the J-PARC Main Ring", Proc. IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, p. 3496.
- 16) F. Tamura *et al.*, "Multi-harmonic Rf Feedforward System for Beam Loading Compensation in Wide-Band Cavities of a Rapid Cycling Synchrotron", Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 051004 (2011).
- 17) T. Koseki *et al.*, "Operation Status and Future Plan of J-PARC Main Ring", Proc. IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, p. 2499.
- H. Ao *et al.*, "Status of J-PARC Linac Energy Upgrade", Proc. Linac2010, Tsukuba, Japan, 2010, p. 357.
- 19) Y. Sato *et al.*, "Beam Dynamic Simulations of J-PARC Main Ring for Upgrade Plan of Fast Extraction Operation", Proc. IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, p. 598.
- C. Ohmori *et al.*, "High Gradient Magnetic Alloy Cavities for J-PARC Upgrade", Proc. IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, p. 2885.