

## STATUS OF THE J-PARC 3GeV RCS

Hideaki Hotchi<sup>1</sup>, Michikazu Kinsho

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), Japan Atomic Energy Agency (JAEA)  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195

### Abstract

The J-PARC 3GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) has been commissioned since September 2007. The initial tuning of the basic parameter has been completed in February 2008, and then since May 2008 the RCS beam has been supplied to the succeeding MR (50GeV Main Ring) and MLF (Material and Life Science Facility) for their commissioning. Now the RCS is in transition to the challenging phase for aiming at the higher current operation. In this paper, we present the beam commissioning results obtained so far and also the prospect of the RCS.

## J-PARC 3GeVシンクロトロン の 現 状

### 1. 概要

図1のJ-PARC 3GeVシンクロトロン (RCS; Rapid Cycling Synchrotron) <sup>[1]</sup>のビーム試験は、2007年9月より開始された。基本的には、2週間のビーム試験期間と2週間のビーム停止期間からなる4週を1サイクルとし、2008年2月末迄の計6サイクルでRCS主体のビーム調整試験を実施した。初期のビーム調整では、不要なビーム損失を避ける為に、パンチあたりの粒子数 $4.2 \times 10^{11}$ という設計値の1%程度の低電流ビームを使用した。又、RCSは、 $h=2$ の2パンチ、繰り返し25Hzが設計運転となるが、同様の理由により、この期間の殆どは、 $h=2$ の1パンチ、シングルショットで初期調整にあたった。一発のビームを入射し、そのデータ解析を行う。速い時で数分、遅い時は1時間以上も次の一発を入射するのに時間をかけることもあったが、リニアックからの入射ビームの軌道・エネルギーが共に十分安定していたので、こうした効率の良いビーム調整が実現した。初期調整終了後は、ビーム強度及び繰り返しを順次上げていった。

2007年9月の最初のランで、入射軌道及び入射ダンプラインの調整を行い、次の10月のランで、入射エネルギー181MeVでの周回と3GeV加速試験を実施した。まず、10月26日に181MeVでの周回調整を開始した。1台の四極電磁石が逆極性であったという不測の事象が発生したが、シミュレーション等により直ぐに原因を突き止め、その日の内に周回達成となった。続いて、翌週の10月31日に所期エネルギー3GeVへの加速及び取り出しに成功した。3GeV加速達成後は、まず、11月のランで3GeV加速時の施設検査、次の12月のランで入射ダンプの施設検査を、それぞれ受検し、12月25日にめでたく合格通知を受領することが出来た。施設検査を2007年度内に通過するという目標を掲げてビーム試験に臨んでいた

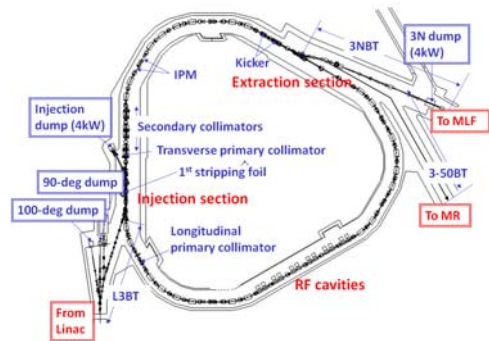


図1 : J-PARC 3GeV RCSの機器配置。

わけであるが、当初の予定よりも3カ月前倒しで、その目標を達成することが出来た。2007年中の4ランは、施設検査という予定に追われ、殆ど十分な試験調整が出来ずにいたが、2008年1月より、本格的なRCSの調整試験を開始した。2008年2月末迄の期間に、加速器としての基本的なチューニングや基礎データの収集等を通り行い、2008年5月より、MR及びMLFへのビーム供給を開始したところである。5月以降は、3週間のビーム試験期間と1週間のビーム停止期間からなるサイクルへ移行し、MRとMLF主体のビーム試験を実施しているが、RCSも、必要な試験時間を確保し、大強度ビームの加速に向けた試験調整を継続している。

### 2. ビーム試験結果

RCSのビーム試験<sup>[2]</sup>は、以下の4つの運転モードから構成される。(1)入射ダンプモードでは、リニアックで181MeVに加速されたビームを直接入射ダンプへ導き、入射軌道及び入射ダンプ軌道の調整を行った。(2)1/3周モードでは、ビーム入射後、RCSの1/3周を回ったところで直ちにビームを取り出し、出射ダンプへビームを導いた。このモードでは、大

<sup>1</sup> E-mail: hotchi.hideaki@jaea.go.jp

雑把に主電磁石の磁場強度と入射エネルギーのマッチングを確認したのみで、様々な周回系のパラメータ調整は、次に述べる周回モードで行った。(3) 181 MeV周回モードは、加速無しのストレージリングのような運転である。この運転モードでしっかりと光学系等の基本調整を行い、(4) 3 GeV加速モードへ移行する方針を取った為、ビーム試験期間の半分以上が、この運転モードでの試験調整に充てられた。

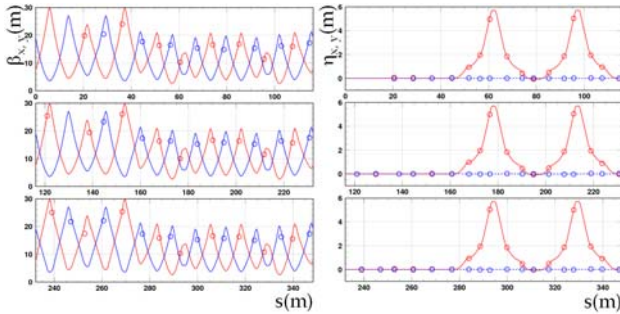


図2：補正後のベータ関数（左）と分散関数（右）の測定結果。○が水平、○は鉛直成分。

## 2.1 181MeV周回モード

本運転モードでは、最初に、偏向電磁石と入射エネルギーのマッチング調整から開始し、その後は、周回周波数測定及びRF捕獲と順次調整を進め、RF捕獲後、COD補正を実施した。補正前のCODは、10mm程度存在したが、周回部に設置した52台の補正電磁石により、現状2mm程度にまで補正出来ている。次に我々は、チューン・ベータ関数・分散関数の測定と補正を実施した。調整開始時の最初の測定では、設計値から若干のずれが生じていたが、その一連の測定結果を、我々のモデル計算の中で統一的に再構築し、そのモデルから各四極電磁石の補正量を導出した。図2に示される通り、唯一回の補正により、ほぼ設計通りの光学系を構築することに成功した。色収差の補正も含めた光学系の調整終了後、我々は、入射軌道と周回閉軌道のマッチング調整を行った。本調整では、入射軌道と閉軌道間の mismatchにより生じるベータトロン振動を最小化するように、入射点での軌道の位置と傾きを調整した。以上が、本運転モードでの基本パラメータの調整手順になるが、我々は、この調整結果を崩さぬように、次の3GeV加速モードへと移行した。

181MeV周回モードでは、その他に、フィジカルアパーチャサーベイ、入射ラインや出射ラインからの漏れ磁場の影響、ベータトロン共鳴サーベイ等、RCSの性能を評価する上で重要となる基礎データの収集も精力的に行った。

## 2.2 3GeV加速モード

本運転モードでも、最初に、偏向電磁石の磁場

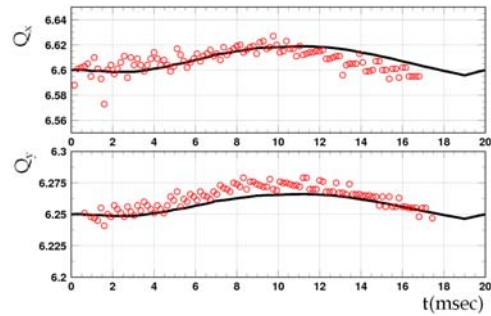


図3：加速過程のチューン。

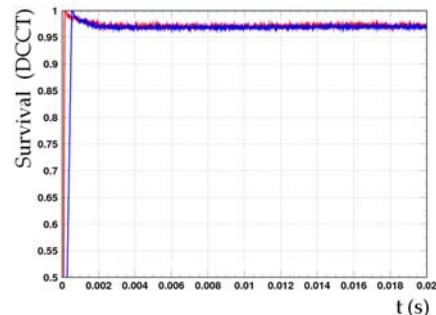


図4：サバイバル率。バンチあたりの粒子数は $\sim 5 \times 10^{12}$ （設計値の12%）。

パターンボトムと入射エネルギーのマッチング調整から開始し、その後、RF周波数パターンの補正を実施した。偏向電磁石の磁場とRF周波数は非常に安定していたので、この調整後は、軌道フィードバックなしで安定に加速することが出来た。その後は、COD補正及び加速過程のチューン・分散関数・色収差等の測定を行い、181MeV周回モードでの調整結果との整合性を確認した。図3に加速過程のチューン変動の観測結果を示す。主電磁石の磁場パターンは、高調波成分を用い、正弦波に合わせ込まれる予定であったが、偏向電磁石については、電源容量の制限の為に、パターン補正が十分に出来ず、現状、正弦波から最大0.2%程ずれている。図中の変動は、この偏向電磁石と四極電磁石間の磁場トラッキングの不整合に由来する。磁場のトラッキング精度に関しては、今後、加速過程のベータ関数を測定し、定量評価したいと考えている。今後、ビーム電流を上げて行く際には、加速過程のチューンの制御が大きな鍵を握るので、その定量評価は、直近の大きな課題の一つである。

以上の初期調整を経て、我々は、バンチあたりの粒子数と繰返しを徐々に上げていった。出射ダンプの容量4kWによる制限があった為、ほんの数分間の運転ではあったが、52kW出力（バンチあたりの粒子数 $4.6 \times 10^{12}$ 、 $h=2$ の1バンチ、繰返し25Hz）という実績を作ることが出来た。バンチあたりの粒子数でいえば、設計の1割強に相当する。現状は、ペイント入射無しの中心入射なので、空間電荷的にはより厳しい状況で、その影響も有意になる領域である。この運転時のビーム損失率は6.5%、その殆どが入射

エネルギー近傍のビーム損失で、ビーム損失パワーは0.2kW程度であった。ビーム損失モニタの出力やラン終了後実施した残留線量測定の結果から、そのビーム損失の殆どが、コリメータ（許容値4kW）でしっかりと局所化されていることが確認出来た。図4に示されるように、その後の調整により、同様の運転条件でのビーム損失率は、現状、3%程度にまで改善されている。又、我々は、 $h=2$ の2バンチ運転の試験も行い、パルスあたり $1.1 \times 10^{13}$ の粒子の加速と取り出しに成功している。この試験は、シングルショットで行ったが、25Hz運転に換算した場合の出力は、130kWに相当する。これが、我々が現状で達成している瞬間最大出力である。

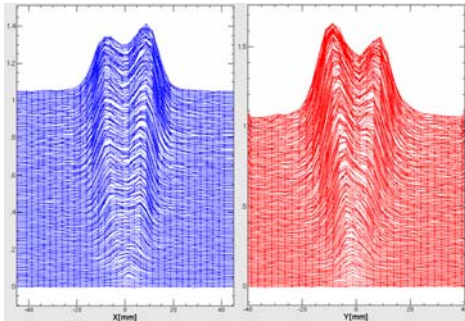


図5：残留ガスプロファイルモニタで測定した横方向ペイント入射時（ペイントエリア $\sim 100\pi$  mm mrad）のプロファイルマウンテンプロット（入射開始から終了500 $\mu$ sec迄）。左図は水平、右図は鉛直成分。

### 3. 今後

今後は、いよいよ、100kW、200kWと順次、高出力を目指すことになる。その際、ビーム損失の更なる低減が大きな研究課題になるが、大きな鍵を握るのが、横方向・縦方向のペイント入射である。これは、位相平面の広い範囲に粒子を分布させ、空間電荷密度を制御する目論見であるが、我々は、その試験を本年5月・6月のランから開始したところである。図5に、横方向ペイント入射時のビームプロファイルの測定結果を示す。横方向に関しては、入射点での入射・周回軌道の位置と傾きを時間的に制御し、ビームプロファイルを整形している。一方、縦方向に関しては、入射期間中のRF周波数や加速電圧の2倍高調波成分の位相を時間的に変化させることで、バンチングファクタ（平均電流/ピーク電流）の改善を目指している。図6に示される通り、181MeV周回モードで実施した縦方向ペイント入射の前試験では、目論見通り、バンチングファクタの改善が確認されている。

ペイント入射は、空間電荷密度を制御する為の強力な手段であるが、一方で、横・縦方向に振幅の

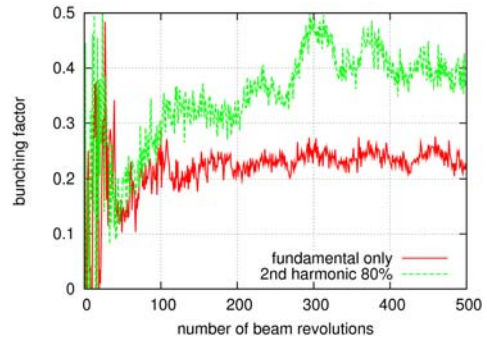


図6：バンチングファクタ。赤は、RF電圧が基本波のみの場合、緑は、2倍高調波を重畳し、入射期間中に、その位相やRF周波数を時間変化させた場合（縦方向ペイント）の測定結果。

大きい粒子が増え、その非線形な振る舞いが問題になる可能性も有り、その調整には、研究的な要素も多分に含まれる。今後、ビーム電流の増強と共に、横方向ペイントエリアを拡幅（設計値  $216\pi$  mm mrad）して行くことになるが、その効果を十分に引き出す為には、そのペイントエリアに対し、十分なダイナミックアパーチャが確保されていることが前提条件となる。現状は、出射ラインからの漏れ磁場の影響が強く、様々な線形・非線形共鳴がオペレーティングポイント近傍で観測されている。漏れ磁場に関しては、本年の夏季シャットダウン中に、シールド強化を図る予定である。

又、本年の11月には、加速空洞11号機の設置（現状、10台設置。元々の設計では、マージンも含め11台設置予定であった）も予定しており、大強度ビーム加速に向け、ハードウェアの整備も本格化する。

今後は、オペレーティングポイントや加速中のチューン変化等の最適化と共にペイント入射の調整を進め、ビーム電流の増強及びビーム損失の軽減を試みることになる。

### 4. まとめ

RCSは、2007年9月よりビームコミッションングを開始した。2008年2月末迄の期間に、加速器としての基本的なチューニングや基礎データの収集等を一通り行い、本年5月よりMR及びMLFへビーム供給を開始した。今後は、ペイント入射試験を本格化し、ビーム出力の増強を目指す。我々の当面の目標は、設計出力の1割に相当する100kW出力での安定運転を実現することである。

### 参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC", KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- [2] H. Hotchi, "Beam Commissioning of J-PARC 3GeV RCS", J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol.5, No.1, 50-63, (2008).