

Commissioning of beam acceleration in J-PARC RCS and MR

Fumihiko Tamura*, Alexander Schnase, Masahiro Nomura, Masanobu Yamamoto,
Hiromitsu Suzuki, Taihei Shimada, Katsushi Hasegawa,
JAEA, Tokai-mura, Ibaraki-ken, Japan 319-1195
Masahito Yoshii, Chihiro Ohmori, Makoto Toda, Akira Takagi, Keigo Hara, Eizi Ezura
KEK, Tsukuba, Ibaraki-ken, Japan 305-0801
Shozo Anami
NAT, Tokai-mura, Ibaraki-ken, Japan 319-1112

Abstract

The beam commissioning of the J-PARC RCS was started in October 2007 and acceleration of 1.07×10^{13} protons has been successfully achieved in February 2008. Also, the beam commissioning of MR began in May 2008. The RF capture of the beam and the extraction at the injection energy of 3 GeV was successfully performed. In both of the RCS and MR, MA (magnetic alloy) cavities are employed to achieve high accelerating voltages which are necessary to accelerate the high intensity proton beams. We employ full-digital LLRF control systems to realize precise and reproducible control of RF frequencies, voltages and phases. We present the status of the RF acceleration with examples of the beam signals. Also we discuss the future plans.

J-PARC リングにおける高周波加速調整

1. はじめに

J-PARC RCS のビームコミッショニングは 2007 年 10 月に開始され、同月に 3 GeV までの加速に成功し、2008 年 2 月には 1.07×10^{13} 個の陽子の加速に成功した。現在は MLF および MR にビームを供給しながら、ビームパワーの増強のためのコミッショニングを行っている。MR のコミッショニングは 2008 年 5 月から開始され、入射エネルギー 3 GeV における RF による捕獲、1 秒のビーム保持および取り出しに成功している。

現在、RCS には 10 台、MR には 4 台の MA (magnetic alloy) 空洞がインストールされている。MA 空洞により、大強度の陽子の加速に必要な高い加速電圧を発生させることができる。これらのハイパワーシステムを制御するために、RCS、MR とともにフルデジタルの LLRF 制御システムを採用した。フルデジタルのシステムを採用したことで、非常に高精度かつ再現性の高い周波数、電圧および位相の制御を行うことができる。

RCS のコミッショニングには、181 MeV での“ストレージリングモード”および 3 GeV 加速の二つのモードがある。MR では現在のところ、加速をおこなわない 3 GeV 周回モードの調整だけが行なわれている。MR の加速調整は 2008 年 12 月より開始される予定である。

2. シンクロトロン振動数測定

シンクロトロン振動数 (f_s) の測定は、加速をしない“ストレージリングモード” (RCS) および 3 GeV 周回モード (MR) で行われた。シンクロトロン振動数は、ウォールカレントモニター (WCM) のビーム信号をリアルタイムスペクトラムアナライザーに入力し

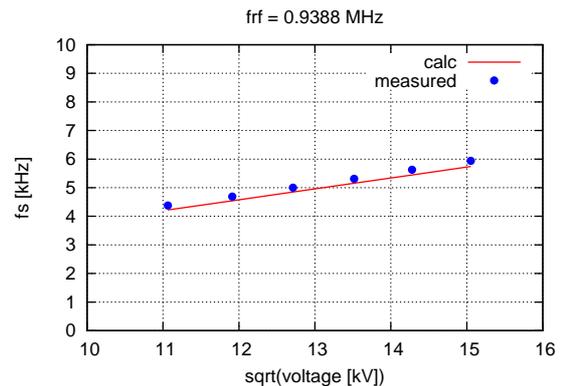


図 1: 空洞電圧と f_s の関係 (RCS)。

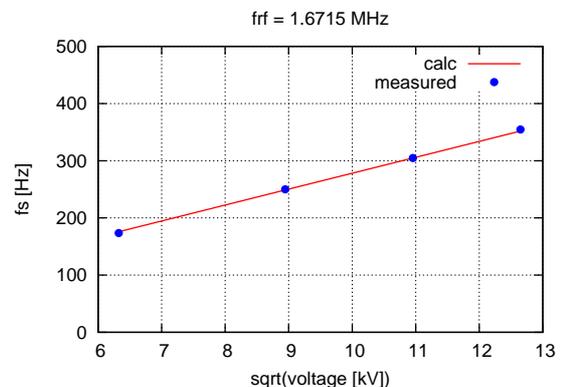


図 2: 空洞電圧と f_s の関係 (MR)。

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

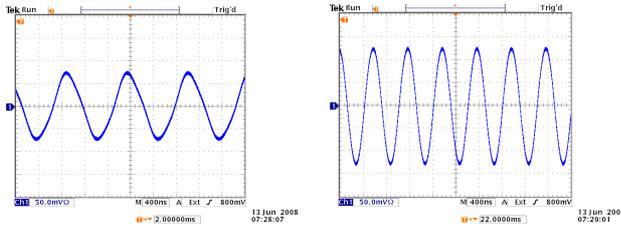


図 3: 空胴電圧モニタ信号。左: 0.938 MHz (入射)、右: 1.67 MHz (取り出し)。入射時の波形は三倍高調波で歪んでいる。

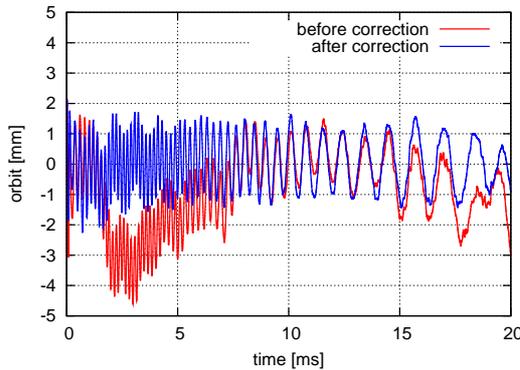


図 4: 周波数補正前 (赤) および補正後 (青) の軌道 (RCS)。

て測定した。

空胴の電圧設定を変えながら、シンクロトロン振動を測定することで、実際にビームが感じる電圧を知ることができ、電圧モニタの較正の参考にすることができる。電圧を変化させた時のシンクロトロン振動数を、図 1 および図 2 にプロットした。ただし、X 軸は電圧 (kV) の平方根である。ここで、RF 周波数はそれぞれ、0.9388 MHz (RCS) および 1.6715 MHz (MR) である。

RCS では、計算よりもおよそ 3.5% ほど高い周波数であった。一方、MR では全体的に計算と良く合い、計算から $\pm 1.5\%$ の範囲に入っている。

RCS の空胴は広帯域 ($Q = 2$) であるため、入射付近の低い周波数では、終段アンプの真空管の 3 倍高調波歪みが比較的大きくギャップ電圧に現われる (図 3)。この高調波の影響が、RCS において f_s が計算からやがずれる原因だと考えられている。一方、MR では比較的 Q が高く波形が正弦波に近いので、計算と良く合うのである。

3. RCS 加速中の周波数調整

立ち上げ後十分に時間が経過すると、RCS の偏向電磁石の磁場は安定となり、サイクル毎の変動は非常に小さくなるため、RCS の加速周波数パターンは、オンラインの軌道フィードバックを使用せずに調整が行われている。

まず、周波数の初期パターンで取り出しまでのビー

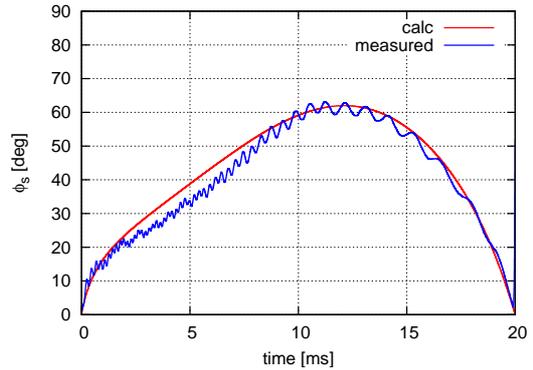


図 5: 最大加速電圧が 348 kV での ϕ_s 。赤: 計算値、青: 実測値。

ム加速を行い、サイクル中の軌道信号を記録する。そして、周波数パターンに次に示す式を用いて補正を加えるのである。

$$\Delta f_{\text{correction}} = f_{\text{rf}} \times \eta \times \frac{\Delta R}{(\text{dispersion})}. \quad (1)$$

補正を加えた周波数パターンで加速を行い、再度軌道を測定する。数回の試行により、ビーム軌道をほぼ中心にすることができる。図 4 に補正前と補正後の軌道の例を示した。この例では、補正前には 2 ms 付近で振動の中心は -3.5 mm、取り出し直前には -2 mm であったのが、補正後にはサイクルを通じて ± 1 mm 以内でおさまっている。一度調整すると、運転期間中は再調整なしにそのまま安定に加速することができる。

4. RCS シンクロナス位相測定

RCS では、加速中のビーム位相を測定し、空胴電圧の位相と比較することにより、シンクロナス位相 (ϕ_s) を求めた。ビーム位相は、ファーストカレントトランスフォーマー (FCT) からのビーム信号を、RF 周波数でデジタル検波することにより測定している。

図 5 に、最大加速電圧が 348 kV の時の ϕ_s 測定および計算値をプロットした。全体としてよく一致しており、空胴電圧モニタの較正および電圧のプログラムは正しいことがわかる。2 ms ~ 8 ms で計算と実際の ϕ_s に少々ずれがあるが、これは前述の、広帯域空胴であるために空胴に発生する三倍高調波歪みのためであることがわかっている。

5. MR での RF GYMNASTICS の例

現在の RCS の通常の電圧パターンでは、取り出しの電圧が比較的高く設定されているため、MR の待受電圧 (160 kV) とマッチしていない。このため、MR への入射後、ビームは強い四極振動を起こす。四極振動の抑制には、RCS の取り出しの電圧を下げる方法や、MR の RF 電圧を揺さぶる方法の他にも方法がある。ここでは、MR での RF gymnastics の一例とし

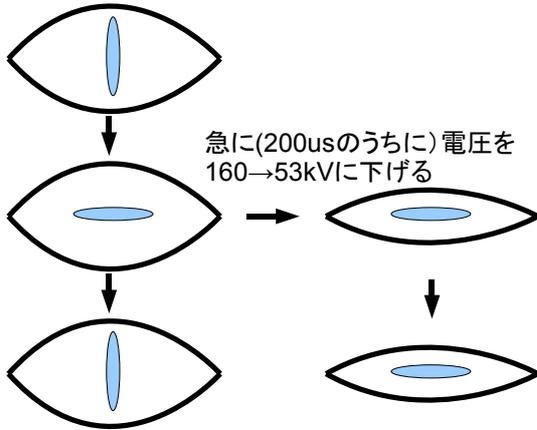


図 6: バンチ回転による四極振動抑制の概念図。1/4 回転後に急に電圧を下げることでバンチに電圧をマッチさせる。

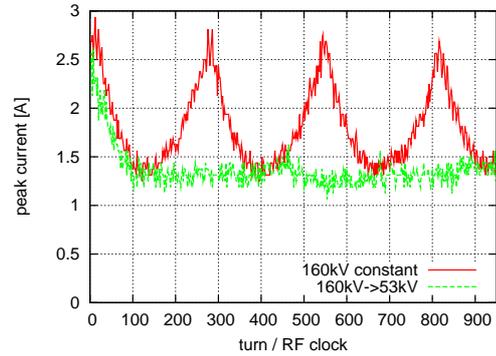


図 8: “バンチ回転” なし (赤) とあり (緑) でのピーク電流の比較。

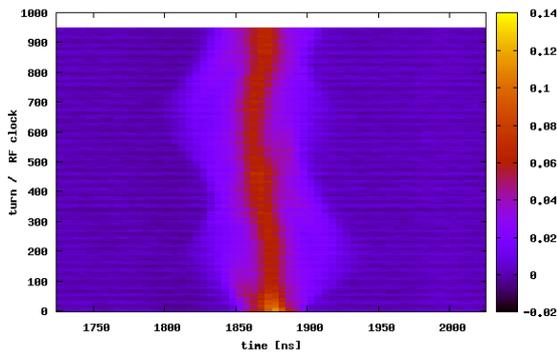
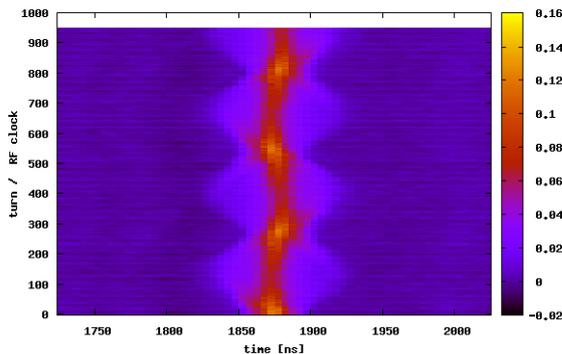


図 7: “バンチ回転” なし (上) とあり (下) でのマウンテンプロットの比較。

て、位相空間でのバンチ回転を用いた四極振動の抑制 (以下、“バンチ回転”) を紹介する。図 6 に、“バンチ回転” の概念図を示した。MR へのビーム入射後、バンチが位相空間内で 1/4 回転した時に、急に RF 電圧を下げてやることにより、RF 電圧とバンチがマッチし、四極振動を抑制できるのである。

実際に MR での通常運転および“バンチ回転”を行ったときのマウンテンプロットを図 7 に示した。この時、入射から 400 μ s 後に、電圧を 160 kV から 53 kV に下げている。マウンテンプロットを見ると、通常の場合では周期的に密度の濃い黄色の部分が見られるのに対し、“バンチ回転”を行なった場合は、1/4 回転したところで四極振動が抑制され、密度の濃い部分が出ないことがわかる。図 8 からは、明らかにピーク電流が変化していないことがわかる。

“バンチ回転”を行なったビームは運動量の広がりが小さいため、ビームコミッションにおける各種の測定を行うのに適している。また、RF 電圧を揺さぶる方法よりも短時間で四極振動を抑制できる。

6. 今後の見通し

RCS では、ビーム電流の増強に向け、二倍高調波も重畳し縦方向のペインティングの試験を行っている。MR では 2008 年 12 月から加速の試験を行う予定である。

参考文献

- [1] F. Tamura et al., “Low Level RF Control System of J-PARC Synchrotrons” in the proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, p. 3624–3626, 2005
- [2] F. Tamura et al., “Dual-harmonic auto voltage control for the rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 072001 (2008)
- [3] F. Tamura et al., “Beam Acceleration with Full-digital LLRF Control System in the J-PARC RCS” in the proceedings of 11th European Particle Accelerator Conference, Genoa, p.364–366, 2008