

# PERFORMANCE IMPROVEMENT PLAN OF THE BUMP SYSTEM IN J-PARC 3-GeV RCS

Tomohiro Takayanagi #, Tomoaki Ueno, Noki Hayashi, Yoshio Yamazaki, Michikazu Kinsyo  
Japan Atomic Energy Agency, JAEA/J-PARC  
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195, JAPAN

## Abstract

In the bump system of the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron), the performance improvement according to upgrade of the Linac (Linear Accelerator) to 400MeV beam is planned. Both of the increase of the power supply capacity and the improvement of the setting accuracy of the output current are required. Moreover, the operating point that the vibration of the current ripple resonates with betatron tune was clarified. Therefore, the present level of the current ripple is necessary to decrease to half or less. The development of the pulse power supply system that solves the problems of the current ripple is required.

## バンブシステムの性能向上計画

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC) <sup>[1]</sup>における 3-GeV RCS(Rapid Cycling Synchrotron) <sup>[2]</sup>の入射用バンブシステム <sup>[3]</sup>では、Linac(Linear Accelerator)の 400MeV ビームへのアップグレードに合わせて、電源容量の増強と出力電流の波形精度を高める性能向上を計画している。その中で、水平シフトバンブ電源は、より安定した入射軌道を確認するため、出力電流偏差の許容値を現在の定格の $\pm 1.0\%$ 以下から $\pm 0.2\%$ 以下へと性能を高めることを検討している。また、励磁波形に生じるリップル電流の振動とベータトロンチューンが共鳴するオペレーティングポイントが存在することが明らかになった。そのため、リップル電流は、現在の半分以下且つ限りなくゼロへと低減する必要がある。本稿では、3-GeV RCS の入射用バンブシステムの性能向上計画及び電源のアップグレードの内容について説明する。

### 2. バンブシステム

#### 2.1 バンブシステムとは

J-PARC 3-GeV RCS の入射用バンブシステムは、Linac からの入射ビーム ( $H^-$ ) と RCS の周回ビーム ( $H^+$ ) を合流させ、大強度の陽子ビームを生成する重要なシステムの一つである。4 台の水平シフトバンブ電磁石が入射用バンブ軌道を生成し、Linac からの  $H^-$ ビームを、水平シフトバンブ電磁石 4 台の中心に置かれた荷電変換フォイルで  $H^+$ へと変換して周回軌道へと入射する。また、水平シフトバンブ電磁石の上下流に、それぞれ 2 台設けた水平ペイントバンブ電磁石 (全 4 台) と、L3BT ライン (Linac からの入射ライン) に設けた 2 台の垂直ペイントバ

ンブ電磁石を用いて、水平と垂直の両方向のペイントビーム入射を行う。これにより、Linac からのエミッタンスの小さいビームを RCS の大口径ビームに様に分布させ、空間電荷効果によるベータトロン振動のチューンシフトを抑制することで、ビーム損失を低減しながら大強度ビームを生成することができる。

#### 2.2 電源構成

バンブシステムの各電源は、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)のアセンブリを直列と並列に組み合わせ合わせたチョップ回路方式で構成されており、台形波形や減衰関数波形を任意に設定して出力することが可能である (図 1 参照)。

水平シフトバンブ電源は、3300V-1200A の IGBT 素子をアセンブリ化し、それを 8 多重 7 並列とした回路を構成している (図 2 参照)。素子のキャリア周波数を 6kHz とし、合成した PWM(Pulse Width Modulation)周波数は 48kHz となる。定格電流は 20kA、最大電圧は 6.4kV の出力が可能で、電流の時間変化(di/dt)が 20kA/185 $\mu$ s、フラットトップ時間が 600  $\mu$ s、電流偏差が $\pm 1.0\%$ 以下の台形波形のパターン出力を行う。

水平・垂直のペイントバンブ電源は、1200V-600A の IGBT 素子をアセンブリ化し、6 多重を基本とした回路構成をしている。キャリア周波数は 50kHz で、出力の正負の位相をシフトすることで合成 PWM の周波数は 2 倍の 600kHz となり、高速スイッチングが可能となる。これにより、台形波形パターン及び減衰関数波形パターンを任意に設定することができ、25Hz の連続運転においてそれぞれの波形を交互に出力した場合でも、電流偏差は $\pm 1.0\%$ 以下が可能となる。また、各電源の電流定格仕様に合わせて並列多重の構成を最適化し、水平ペイント

# tomohiro.takayanagi@j-parc.jp

バンプ電源 1 においては、6 多重 3 並列の回路構成で定格電流が 17.6kA、最大電圧が 800V の出力が可能となっている。

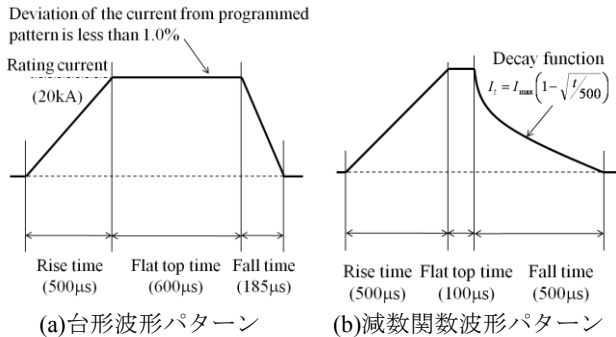


図 1 : 出力波形パターン例

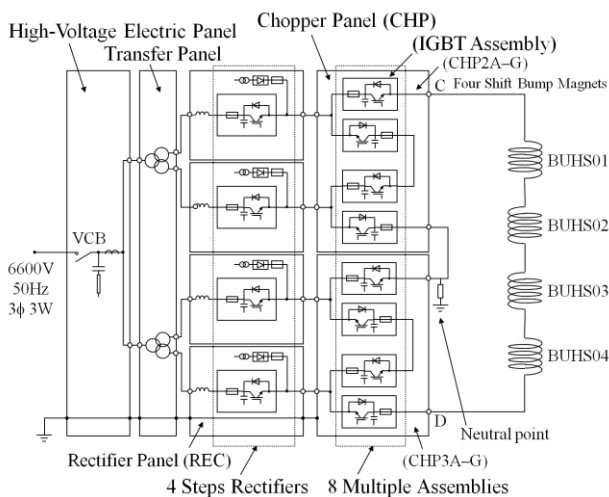


図 2 : 水平シフトバンプ電源回路の概念図

### 3. 性能向上計画

#### 3.1 RCS の現状

2007 年 10 月 26 日に、Linac からの 181MeV 入射エネルギーによる RCS へのビームの入射と周回に成功し、次いで、10 月 31 日に、RCS の設計仕様である 3GeV への加速に成功した。また、2009 年 12 月 10 日には、300kW 相当による大強度ビーム試験を行い、1 時間の連続運転を実証した。これにより、181MeV 入射エネルギーにおける RCS の一つの目標を達成した<sup>[4]</sup>。

現在、RCS では、MLF(Material and Life Science Experimental Facility)と MR(Main Ring Synchrotron)へのビーム供用運転を安定に行うためのビームロスの低減と、更なる大強度化へ向けたビーム試験を行っている。また、機器のコンディショニング調整とビームスタディの成果により、100kW 相当による連続運転を、稼働率 94%以上で安定した運転を行っている。

#### 3.2 アップグレードの内容

Linac では、2009 年 3 月に、ビーム加速エネルギーを 400MeV とするエネルギー増強計画がスタートし、2012 年に機器の製作と据付が完了する予定でいる。そのため、RCS では、2013 年から 400MeV の入射エネルギーで運転を行う。

RCS では、Linac の 400MeV 化に合わせて、主に、入射システムのアップグレードを計画している。その中のひとつに、バンプシステムの電源容量の増強と出力電流の波形精度の性能向上がある。入射ビームエネルギーの増加に伴い、各電源容量は定格電流で約 1.6 倍、出力電圧で約 2 倍が必要となる(表 1 参照)。

表 1 : 電源定格一覧

電源名	181MeV	400MeV
	電流/電圧 (kA/kV)	電流/電圧 (kA/kV)
水平シフトバンプ	20.0/6.4	32.0/13
水平ペイントバンプ 1	17.6/0.8	29.0/1.2
水平ペイントバンプ 2	14.2/0.6	23.4/1.2
水平ペイントバンプ 3	12.5/0.6	21.0/1.2
水平ペイントバンプ 4	12.5/0.6	21.0/1.2
垂直ペイントバンプ 1	2.05/0.6	3.40/0.6
垂直ペイントバンプ 2	±1.52/±0.6	±2.5/±0.6

また、不要なビームロスを低減するため、±0.2% 以下の出力電流偏差を実現した入射ビーム軌道の安定化が要求される。さらに、これまでの大強度ビーム試験において、水平シフトバンプ電磁石の励磁電流波形に生じるリップル電流の振動である 48kHz の第 2 次高調波成分(96kHz)と、ベータトロンチューンが共鳴する問題が生じた<sup>[5]</sup>。400MeV の入射エネルギーでは、1MW の大強度ビーム生成が最大の目的であり、ビーム損失の低減は重要な課題となる。そのため、大強度ビーム試験において、ベータトロンチューンのオペレーティングポイントの範囲が制限されてしまうことが無いよう、電流偏差の性能向上とは別に、リップル電流の問題解決が必要になる。

### 4. 課題

現在稼働しているバンプシステムの電源は、IGBT アセンブリの多重化回路構成によるチョップ方式を採用している。これにより、任意な波形パターンを出力することが可能となるが、チョップに起因するリップルが励磁波形に必ず生じる。水平シフトバンプ電源は 48kHz でチョッピングしているため、波形には 48kHz を基本波とした高調波が生じる。また、電流偏差は、リップル電流の振幅分を含めて評価し、定格 20kA の±1.0% 以下という仕様から 200A の電流振幅は許容してきた。しかし、この程

度の振幅でもベータトロンチューンと共鳴し、その結果、ビームは大きくロスしてしまった。したがって、電源のアップグレードには、リップル電流の半減且つ限りなくゼロとすることが要求される。

アップグレード後の水平シフトバンプ電源は、定格電流 32kA、出力電圧は 13kV が計画されている。この仕様を満足する電源を現システムと同様なチョッパ回路方式で構成を設計した場合、IGBT のアセンブリは 16 多重 11 並列の回路構成となる。この多重化でスイッチング周波数は 96kHz となるため、チョッピングに起因するリップル電流の振幅は、計算上半分になる。しかし、基本周波数が共鳴してしまうため、根本的な解決にはならない。

その対策として、IGBT 素子のキャリア数を変更する案を検討し、キャリア周波数を 6kHz から 4kHz にして予備試験を実施した。測定した励磁波形の周波数解析の結果、4kHz × 8 多重とする周波数 32kHz にピークがシフトした (図 4 参照)。

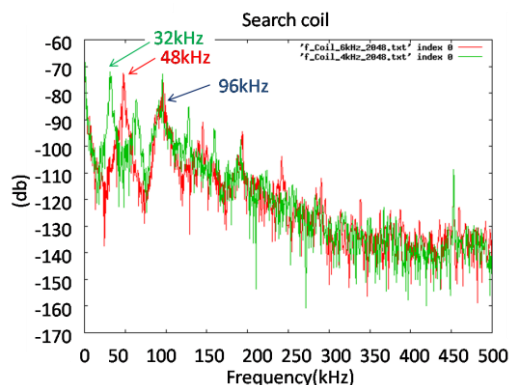


図 4 : 励磁波形の周波数解析結果

これより、キャリア周波数を 8kHz とした場合、16 多重化でリップル成分は 128kHz となり、共鳴点からシフトすることできる。さらに電流振幅は、現在の 200A の約 38% にまで低減することになる。しかしながら、IGBT 素子のキャリア周波数の高速化には、素子の熱負荷対策が課題となる。また、現システムのチョッパ方式で 16 多重回路構成の電源を製作した場合、確実に数が増える IGBT 素子による高周波ノイズ<sup>[6]</sup>の増大や、電源盤、アセンブリ、トランスなどの高圧部の絶縁設計などの課題が残る。

## 5. 新しいパルス電源の検討

コンデンサの充放電を利用した転流方式のパルス電源を検討している。この方式は、コンデンサバンクを形成し、高速切り替えスイッチの On/Off で台形波形パターンを形状を作成する方法である。図 5 に基本回路構成を示す。立ち上げ・立ち下げユニットとフラットトップユニットを別回路で構成してそれぞれを直列に接続する。

主回路はチョッパ方式ではなく転流方式となり、ノイズの発生源となるスイッチの切り替え回数が少なく、チョッパ方式に伴うリップルが原理的に発生しない。そのため、ノイズとリップルを極小化でき

ると考える。また、高速スイッチには IGBT 素子を用いる予定であるが、回路構成を対称化し、高周波ノイズをキャンセルするようにする<sup>[7]</sup>。しかしながら、この方式による水平シフトバンプ電源仕様に対応した大電流且つ高電圧の製作実績は無く、また、大量のコンデンサを使用するため、既存の設置スペースに収納するためには、小型のコンデンサの開発が必要になる。

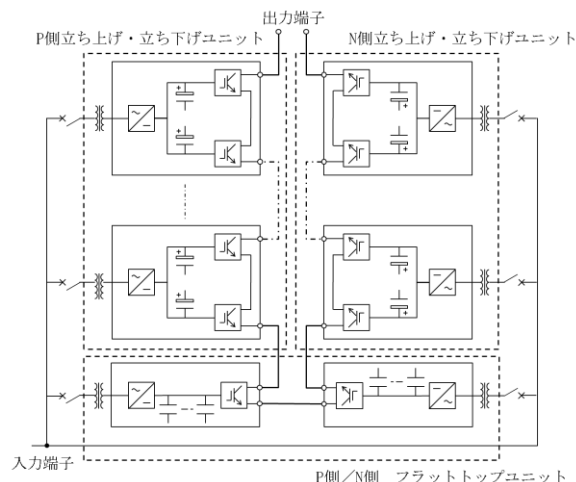


図 5 : コンデンサ転流方式回路の概念図

## 5. まとめ

水平シフトバンプ電源の回路構成の決定には、IGBT チョッパ方式とコンデンサ転流方式のそれぞれ長所・短所を明確化し検討する必要がある。そのため、コンデンサ転流方式を用いた R & D 機を製作し、試験結果を現在稼働しているチョッパ回路方式の電源と比較評価する予定である。また、水平・垂直ペイントバンプ電源に関しては、任意のペインティング波形を出力する必要があることから、実績のある IGBT チョッパ方式を採用することを検討している。

## 参考文献

- [1] KEK Report 99-4 and JAERI-Tech 99-056 (1999).
- [2] H. Hotchi, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 5, No. 1, 2008
- [3] T. Takayanagi, et al., IEEE Transactions on Applied Supercond., vol.16, no.2, pp.1358-1361, June. 2006
- [4] <http://j-parc.jp/Acc/ja/index.html>
- [5] H. Hotchi, et al., Physical Review Special Topics, Accelerator and beams 12, 040402 (2009)
- [6] T. Takayanagi, "J-PARC 3GeV RCS 入射バンプ電磁石用パルス電源の低ノイズ化", 第 9 回加速器電源シンポジウム
- [7] K. Sato, et al., "ノイズの発生機構: 3 導体伝送線路理論でのノーマルモードとコモンモードの結合", 第 5 回日本加速器学会年会, pp154-158