

J-PARC RCS 水平ペイントバンブ電源の現状

STATUS OF THE HORIZONTAL PAINT BUMP POWER SUPPLY OF THE J-PARC RCS

植野智晶, 高柳智弘#, 堀野光喜, 林直樹, 金正倫計

Tomoaki Ueno, Tomohiro Takayanagi, Koki Horino, Naoki Hayashi, Michikazu Kinsho

J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

In 3-GeV RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) of J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), the beam commissioning test with 400 MeV beam injection energy from LINAC (Linear Accelerator) was started in January, 2014, and the J-PARC user operation was started in February of the year. The performance of the paint bump power supply was upgraded, which is 1.6 times output current and 2 times output voltage. The new power supply operation was started without a trouble on schedule. However, after the test operation of the new shift bump (SB) power supply, the trouble of the circuit part was frequent. Therefore the excitation wave pattern of the horizontal paint bump (PBH) power supply, which was combined the function of the horizontal shift bump power supply pattern and the painting injection pattern, was demanded. In this paper, the contents of the upgraded power supply of the horizontal paint bump and the method of the any output wave pattern formation is reported.

1. はじめに

J-PARC^[1] 3-GeV RCS^[2] では、2014 年 1 月より、LINAC^[3]からの 400MeV 入射エネルギーによるビーム試験を開始し、同年 2 月からユーザー利用運転を開始した。RCS の入射用水平ペイントバンブ電源は、400MeV ビーム入射に対応するため、181MeV ビーム入射時の電源仕様から、電流で 1.6 倍、電圧で 2 倍の定格に増強改造した。改造後の水平ペイントバンブ電源(PBH)は、トラブルなく予定通りに運用を開始した。しかし、400MeV 対応として新規に製作した水平シフトバンブ電源(SB)が、現地での試験運転を開始した後に回路部品の故障が頻発したため、所定の波形形状での出力が出来なくなる問題が発生した^[4]。そして、水平シフトバンブ電源の形成不良波形により、RCS へのビーム入射点の変位してしまうため、入射と周回のビーム軌道を固定する補正が必要になった。そこで、水平シフトバンブ電源の補正とペイント入射の両方の機能を合わせ持つ励磁波形の出力が求められた。水平ペイントバンブ電源は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) アセンブリの直並列の多重化による高周波チョップ方式を採用しているため、出力する電流と電圧が定格の範囲内であれば、任意の波形形状での出力が可能である。本論文では、水平ペイントバンブ電源の増強内容及び任意の出力波形形成の作成について報告する。

2. 水平ペイントバンブ電源

2.1 電源仕様

水平ペイントバンブ電源は、IGBT アセンブリを直列と並列に多重に組み合わせた並列多重の二象限チョップ回路方式で構成されている^[5]。1 アセンブリ当たり 54kHz で動作し、これを 12 多重化する

ことで、合成周波数 648kHz の高速スイッチングによる波形形成が可能である。更に、MLF (Materials and Life Science Experimental Facility) 用と MR (50-GeV synchrotron Main Ring) 用として、別々に要求された異なるペイントエリアでの入射スキームに、25Hz で励磁波形を切り替える運転も可能である。水平ペイントバンブ電源回路の展開接続図を Figure 1 に示す。

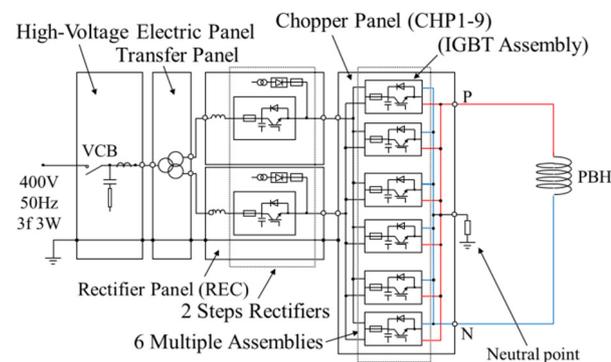


Figure 1: Schematic view of the main circuit of the Horizontal paint bump supply.

2.2 増強内容

RCS の入射部に設置された 4 台の水平ペイントバンブ電磁石は、電源と 1 対 1 で接続して励磁し、水平シフトバンブ電源と 4 台の水平ペイントバンブ電源を組み合わせることでバンブ軌道を形成する。増強改造の先行機として、且つ、旧水平ペイントバンブ電源 1 を新水平ペイントバンブ電源 2~4 の増強試験に使用するため、水平ペイントバンブ電源 1 は、電源全体を新規に製作し入換えを行った(2011 年 9 月)。水平ペイントバンブ電源 2-4 は、整流器盤とチョップ盤を追加し、その増加分に対応する制御盤を新規に製作した。そして、既存のチョップ盤の IGBT アセ

#tomohiro.takayanagi@j-parc.jp

ンブリの内部配線を変更して組み合わせ、全体として、直列に 2 倍、並列に 1.6 倍に電源容量に増強した(2012 年 9 月)。その結果、2 倍の電圧と 1.6 倍の電流の出力が可能になった。水平ペイントバンブ電源 1 の容量は 4 台の中で最も大きく、29kA/1.2kV の大電流・高電圧の出力が可能である。LINAC からのビーム入射エネルギーが 181MeV と 400MeV の各条件における電源仕様を Table 1 に、電源構成回路のうち、整流器盤(REC)とチョップパ盤(CHP)の IGBT アセブリの数を Table 2 に示す。

Table 1: Specifications of the Horizontal Paint Bump Power Supply for 181MeV and 400MeV Beam Energy

Power Supply	181MeV (kA/kV)	400MeV (kA/kV)
PBH1	17.6 / 0.8	29.0 / 1.2
PBH2	14.2 / 0.6	23.4 / 1.2
PBH3	12.5 / 0.6	21.0 / 1.2
PBH4	12.5 / 0.6	21.0 / 1.2

Table 2: Number of IGBT Assemblies of Rectifier Board (REC) and Chopper Board (CHP)

Power Supply	181MeV (REC+CHP)	400MeV (REC+CHP)
PBH1	3+36	6+104
PBH2	3+24	6+80
PBH3	3+24	6+80
PBH4	3+24	6+80

2.3 出力波形パターン

水平ペイントバンブ電源用の波形パターンは、12bit のデジタル信号として、電流指令値 (I パターン) と電圧指令値 (V パターン) を 500kHz(2 μ s) で作成する。VME モジュールから発信したデジタル信号は、電源の制御盤内でアナログ信号に変換され、電圧パターンのフィードフォワード制御で実装する。Figure 2 に制御系の構成を示す。

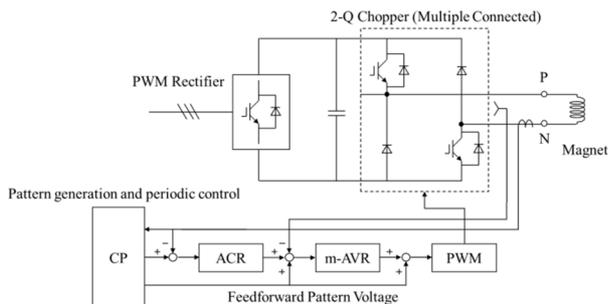


Figure 2: Block diagram of the control system.

水平ペイントバンブ電源 1 用に作成した、181MeV ビーム入射時の 150 π mm-mrad 用でピーク電流値が 10kA のペイント波形パターンと台形波形パターンの I・V パターンの指令値を Figure 3 と 4 にそれぞれ示す。

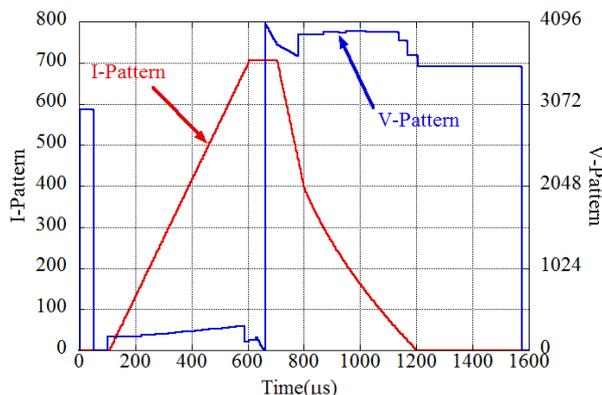


Figure 3: Command value for Painting waveform pattern of PBH1.

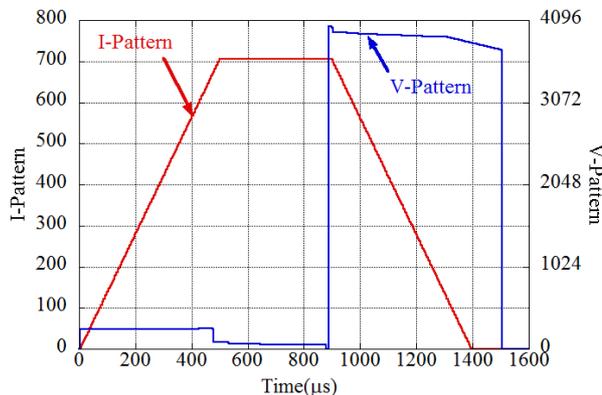


Figure 4: Command value for Trapezoidal waveform pattern of PBH1.

0 から 2048、2049 から 4096 をそれぞれ $\pm 10V$ に割り当て、29kA=10V、1.2kV=10V としてパターンを作成する。図中のペイント波形パターンは、立上げ時間 500 μ s、フラットトップ時間 100 μ s、減衰時間 500 μ s で、台形波形パターンは、立上げと立下げの時間が 500 μ s、フラットトップ時間が 400 μ s である。出力波形の形成は、V パターンを調整して行う。チョップパ回路のスイッチングの合成周波数は 648kHz で、出力する電流や電圧が定格値の範囲内であれば、台形波形や減衰関数波形 (ペイント波形) を、設定値と出力値の偏差を $\pm 1.0\%$ 以下の精度で任意に形成して出力することが可能である。181MeV 入射ビームのペイント入射 (150 π mm-mrad) 時のバンブシステム各電源の出力波形を測定した結果を Figure 5 に示す。水平シフトバンブ電源は、DCCT-TOPACC で、水平ペイントバンブ電源はピアソン CT (model 1423) で測定した。Figure 5 中の水平ペイントバンブ電源 1 の波形は、Figure 3 のパターンを使用して出力している。

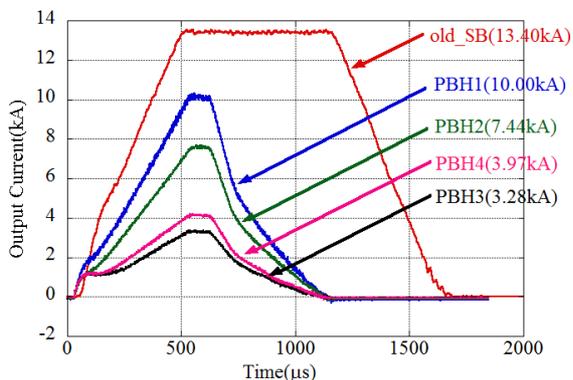


Figure 5: Measurement result of the painting waveform of $150\pi\text{mm-mrad}$ painting with old shift bump power supply at 181MeV beam injection energy.

3. 水平シフトバンプ電源の補正波形

3.1 センター入射

181MeV / 400MeV 各ビームのセンター入射時の波形を Figure 6 と 7 に示す。

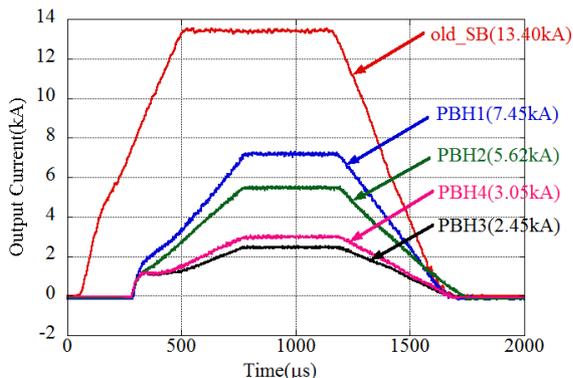


Figure 6: Measurement result of the center injection waveform with old shift bump power supply at 181MeV beam injection energy.

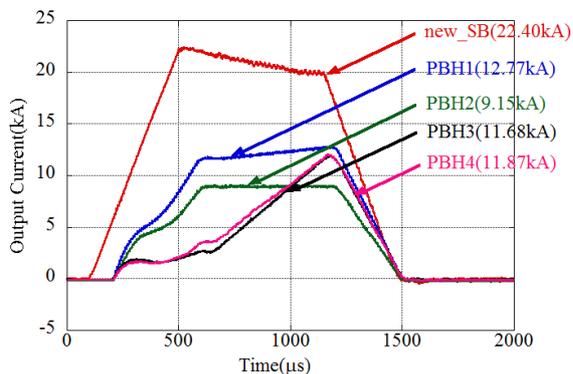


Figure 7: Measurement result of the center injection waveform with new shift bump power supply at 400MeV beam injection energy.

センター入射は、主にビーム試験用として使用する。Figure 6 は、水平シフトバンプ電源が設計通りに出力したバンプ波形の場合を示しており、この場合の水平ペイントバンプ電源は、台形形状の波形で出力している。そして、ペイント波形のフラットトップの電流値を決定する。これに対し、Figure 7 は、400MeV ビーム入射時の波形で、水平シフトバンプ電源(SB)波形のフラットトップ部分が右肩下がりとなっている形成不良波形を示す。この場合の水平ペイントバンプ電源の波形は、水平シフトバンプ電源の右肩下がりの傾きにより入射点に変位するのを固定するため、周回ビーム軌道の補正を組み合わせている。

3.2 ペイント入射

Figure 8 に、400MeV ビーム入射時の $100\pi\text{mm-mrad}$ ペイント波形を示す。この場合の水平ペイントバンプ電源の波形は、水平シフトバンプ電源の補正分と、ペイント波形分を組み合わせられた形状になっている。水平シフトバンプ電源が正常なフラットトップ波形を出力できない状態でのユーザー利用運転では、このペイント波形と、可変偏向電源の波形を利用し、 $100\pi\text{mm-mrad}$ のペイント入射による 300kW ビーム利用運転を行っている。

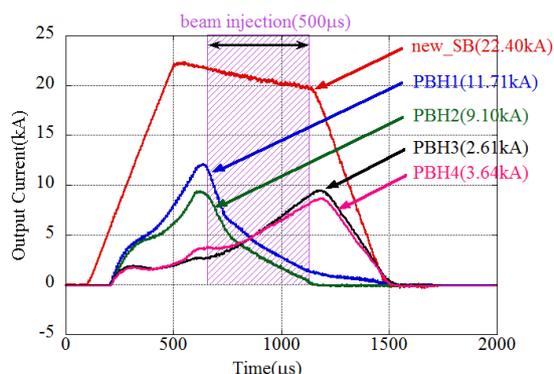


Figure 8: Measurement result of the painting waveform of $100\pi\text{mm-mrad}$ with new shift bump power supply at 400MeV beam injection energy.

4. ペイント波形パターンの調整

水平シフトバンプ電源のバンプ波形を補正するペイントパターンを作成する場合に、当初は、ビーム入射期間の $500\mu\text{s}$ を精度良く ($\pm 1.0\%$ 以下) 作成し、それ以外は、特に不問、とする 181MeV ビーム入射時の仕様通りに作成した。その結果、400MeV 入射時では、周回ビーム軌道の閉軌道変動(COD)が、リング全周に亘って約 $\pm 6\text{mm}$ 発生してしまった。理由は、水平シフトバンプ電源によるバンプ波形が正常であれば、これまでのペイントバンプ波形は、ビーム入射後は励磁量がゼロとなり、ペイントバンプ波形がビームに与える影響は極ゼロであった。そのため、ビーム入射期間の $500\mu\text{s}$ のみを精度良く ($\pm 1.0\%$ 以下) 作成すればよかった。しかし、水平シフトバンプ電源のバンプ波形を補正する役割を担う場

合は、ビームの入射期間だけでなく、バンプ波形がゼロになるまでの期間において、高い精度での調整が必要である。また、水平ペイントバンプ電源の出力波形で、4台間の相対的な誤差を小さくすることが COD 減少のためには重要であり、リングコリメータのアーチャを実効的に縮小し、余計なビーム損失を低減する事ができる。

水平ペイントバンプ電源 3 における、ビーム入射期間 500 μ s 後の 100 π mm-mrad ペイントパターン調整前後の測定波形を Figure 9 と 10 に示す。

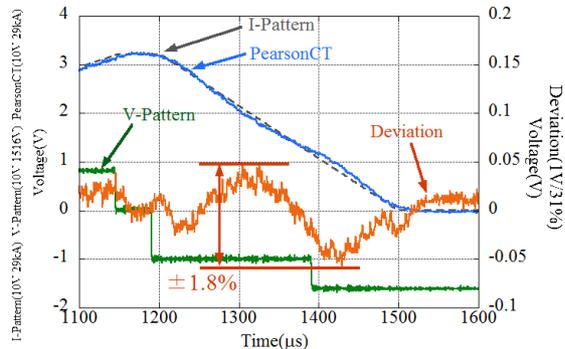


Figure 9: Deviation of a set point and the output level before the correction of the voltage pattern of the PBH3.

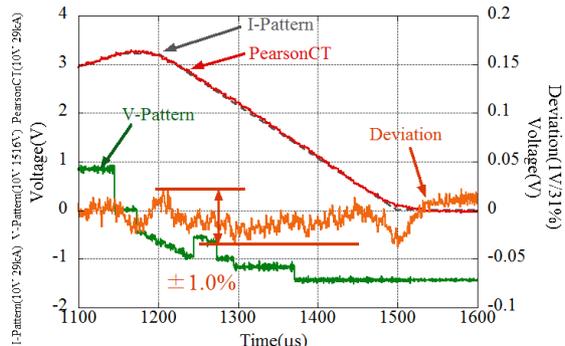


Figure 10: Deviation of a set point and the output level after the correction of the voltage pattern of the PBH3.

そして、調整後のペイント波形で 100 π mm-mrad のペイント入射を実施した結果、周回ビーム軌道の閉軌道変動(COD)が、約 ± 2 mm まで減少し、本対策として計算した通りにペイントされていることを確認した。その結果を Figure 11 と Figure 12 に示す。

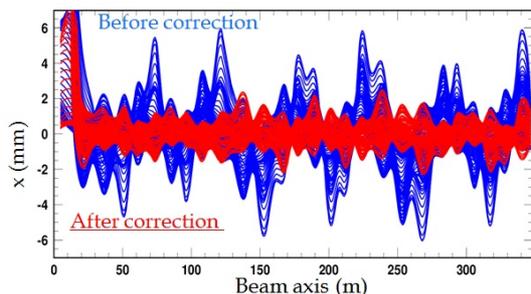


Figure 11: Measurement results of Beam COD before and after the pattern correction.

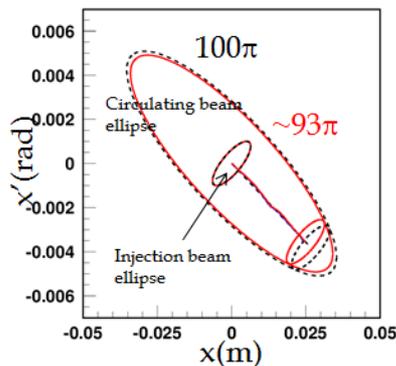


Figure 12: Horizontal phase plot of 100 π mm-mrad painting injection.

5. まとめ

400MeV ビーム入射用に増強改造した水平ペイントバンプ電源は、IGBT アセンブリの多重化で 648kHz のスイッチングを可能とし、設定精度(偏差)を $\pm 1\%$ 以下とする高精度な制御を実現している。今回、水平シフトバンプ電源のトラブルにより、水平ペイントバンプ電源の設計時に想定していなかった形状のパターン波形が要求されたが、柔軟に対応できる能力を確認することが出来た。しかし、水平ペイントバンプ電源の出力波形には、高速スイッチングに伴うリップルノイズが重畳するため、より大強度のビームを生成していくためには、ノイズの低減化が課題となる。現在、チョップ方式の弱点であるスイッチングノイズを低減し、且つ、任意の波形パターンを出力可能とする優れたフレキシブル性の性能面を生かした電源の開発を進めている。

謝辞

水平シフトバンプ電源のバンプ波形を補正するため、水平ペイントバンプ電源の波形パターン作成に関してご教示下さいました J-PARC センターの發知氏、Saha Pranab 氏、原田氏に深く感謝致します。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/index-e.html>
- [2] M.Kinsho, "Progress and Status of the J-PARC 3 GeV RCS", Proceedings of IPAC2014, THPME064 (2014).
- [3] H.Oguri, *et al.*, *this proceedings*, FSP021.
- [4] T.Takayanagi *et al.*, *this proceedings*, SUPO59.
- [5] T.Takayanagi, *et al.*, IEEE Transactions on Applied Supercond., vol.24, No.3, June 2014, 3800905.