

J-PARC RCS 入射バンプ用新水平シフトバンプ電源の開発と現状

DEVELOPMENT AND PRESENT STATUS OF NEW HORIZONTAL SHIFT BUMP POWER SUPPLY FOR INJECTION BUMP AT THE J-PARC RCS

高柳 智弘^{#,A)}, 植野 智晶^{A)}, 堀野 光喜^{A)}, 林 直樹^{A)}, 金正 倫計^{A)}, 岡部晃大^{A)}, 入江吉郎^{B)}
Tomohiro Takayanagi^{#,A)}, Tomoaki Ueno^{A)}, Koki Horino^{A)}, Naoki Hayashi^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)}, Kota Okabe^{A)},
Yoshiro Irie^{B)},
^{A)}J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, ^{B)} KEK

Abstract

The new horizontal shift bump (SB) power supply for injection bump has been developed and manufactured according to the energy upgrade of the LINAC (Linear accelerator) in J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 3-GeV RCS (Rapid-Cycling Synchrotron). The injection energy was increased from 181MeV to 400MeV, and the power capacity of the new power supply was doubled. The power supply adopted a capacitor commutation method to form the trapezoid waveform pattern (bump waveform) by the IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) switch. The test operation was started in January, 2014. However, the diodes of the DC charger in the FT-unit (Flat top unit) were frequently damaged and then the user operation was started without using the FT-unit. As a result, the flat-top part of the bump waveform had a slight inclination. Both the horizontal paint bump magnets in the ring and the pulse steering magnets at the injection line were used to make up for the inclination and to correct the orbit errors at the injection point. This paper reports characteristic, the trouble and the user operation status about the new shift bump power supply.

1. はじめに

J-PARC^[1]の 3-GeV RCS^[2]では、アップグレードした LINAC^[3]からの 400-MeV 加速ビームを RCS に入射するため、電源容量を倍増した入射バンプ用新水平シフトバンプ電源を開発し製作した^[4]。新水平シフトバンプ電源は、主回路に大容量電解コンデンサーを使用し、IGBT スイッチのブリッジ回路の切り替え操作による充放電を 3 回行い、台形型の出力電流波形（バンプ波形）を形成する転流方式を採用した。新電源は、現地（J-PARC RCS）で、2014 年 1 月に試験運転を開始した。しかし、バンプ波形のフラットトップ部分を形成する FT ユニット用充電器のダイオードに故障が頻発したため、2014 年 2 月からのユーザー利用運転では、FT ユニットを使用しないで運転を開始した。

FT ユニットを使用しない場合、バンプ波形のフラットトップ部分は右肩下がりになる。LINAC からの入射ビームを RCS に入射する場合、フラットトップ部分でビームの入射点を固定するため、右肩下がり波形になると、入射と周回のビーム軌道は変位してしまう。そのため、可変偏向電磁石と水平ペイントバンプ電磁石を使用して、RCS への入射と周回のビーム軌道を固定するように補正した^[5]。新シフトバンプ電源の特性、FT ユニット充電器の故障内容及びユーザー利用運転対応への現状を報告する。

2. 新水平シフトバンプ電源

2.1 回路方式

電源の主回路は、大容量電解コンデンサーの充放電を IGBT スイッチのブリッジ回路の切り替えでコントロールし、3 回のスイッチ操作でバンク波形を形成する転流方式で構成されている。転流方式の概念図を Figure 1 に示す。コンデンサーからの電流経路をブリッジ回路でコントロールし、力行、環流、回生のモードを切り替えて運用する。

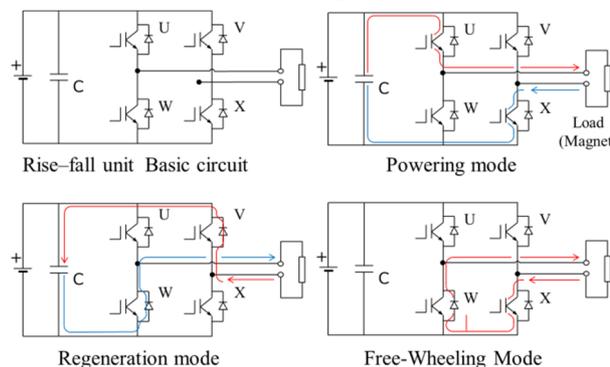


Figure 1: Schematic view of the basic circuit of the Rise-Fall-unit. Current flow shows each operation mode.

2.2 電源構造

1 台の電源盤（バンク）の主回路は、バンプ波形の立ち上がり部分と立ち下がり部分を形成する立上立下ユニット 12 台と、フラットトップ部分を形成する FT ユニット 2 台で構成されている。各ユニッ

[#]tomohiro.takayanagi@j-parc.jp

トはシリーズに接続され、電源端で 2kA/13.2kV を出力する。また、陽極側と負極側にそれぞれ立上立下ユニット 6 台と FT ユニット 1 台を配置し、中性点を接地して対地間電圧を±6.6kV にしている。

MLF (Materials and Life Science Experimental Facility) 用と MR (50-GeV synchrotron Main Ring) 用で、異なるピーク電流値の波形を出力するため、正負両極の立上立下ユニットは、下から 4 段目までを共通に使用し、5 段目を MR 用に、6 段目を MLF 用に割り当てている。新水平シフトバンク電源は、16 バンクを並列接続し、定格 32kA/13.2kV を出力する 1 台の電源として運用する。1 バンクの主回路展開接続図を Figure 2 に、16 バンクの構成図を Figure 3 に示す。

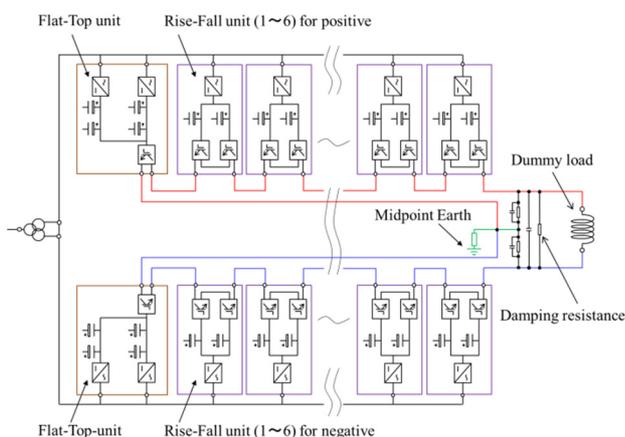


Figure 2: Schematic view of the one bank, which is composed by 12 rise-fall units and 2 flat-top units. All units are connected in series and the circuit is divided on the basis of the midpoint earth.

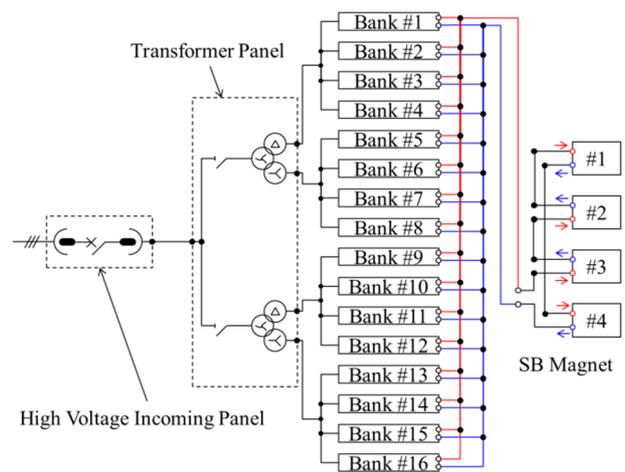


Figure 3: Schematic view of the whole circuit with 16 banks.

2.3 バンプ波形

181MeV ビーム入射時に使用していた旧水平シフトバンク電源は、IGBT アセンブリを用いたチョップ方式を採用し、バンプ波形を形成した。チョップ方式は、出力する電流と電圧が定格内であれば任意

な波形形成が可能であるため、波形形成においては柔軟性がある。しかし、電流出力時は常時スイッチングを行っているため、スイッチングに起因するリップルノイズが出力電流に重畳されやすい。旧電源は、素周波数 6kHz の IGBT アセンブリを 8 多重で構成し、合成周波数 48kHz のチョップ方式であった。この第 2 高調波の 96kHz が、負荷の電磁石に設けたセラミックダクトを覆う RF シールドのループコイルのインピーダンスと共振し、β トロン振動を誘起したため、入射部の付加的なビームロスの原因となった⁶⁾。

新電源は、コンデンサー転流方式を採用し、電流出力の立ち上げ開始時、フラットトップ部の開始時、立ち下げ開始時の波形を形成する分岐点でのみコンデンサーの充放電の切り替えを行う。バンプ波形は、3 回の切り替えで形成をするため、スイッチングに起因するリップル電流の発生が大幅に低減された。Figure 4 と 5 に、新・旧電源の電流と電圧の出力波形を示す。Figure 4 で示す旧電源の波形では、DCCT による出力電流波形にも、スイッチングノイズの影響が見られる。また、接地と筐体間に生じる電圧スパイクノイズは、スイッチングを実行している間、常に発生している。Figure 5 が示す新電源の測定結果 (1 バンク運転) では、ノイズの影響が DCCT の測定波形に表れず、また、対地間のスパイクノイズも、波形切り替え時と、最後のスイッチ OFF 時を合わせて 4 回確認できるだけである。

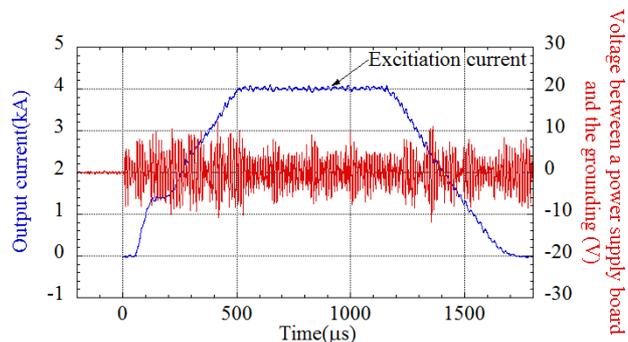


Figure 4: Measured output current and voltage spikes of the old SB power supply with IGBT chopping method.

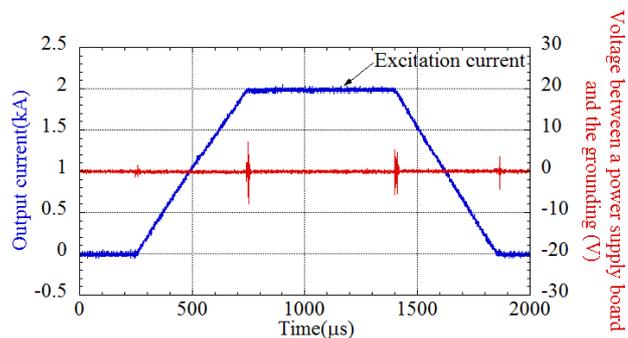


Figure 5: Measured output current and voltage spikes of the new SB power supply with commutation method of the capacitor.

3. FT ユニット

3.1 構成

FT ユニットは、MLF 用と MR 用に別々のコンデンサーバンク（充放電回路）を設けており、IGBT スwitchのブリッジ回路で、外部からの行先トリガーにより MLF 又は MR の出力回路を選択して運転する。FT ユニット主回路の展開図を Figure 6 に示す。各回路には、1 個 24mF の電解コンデンサーが 8 個設置してある(C_{ft})。コンデンサー間をつなぐ銅バーの接続を 4 並列 2 直列や 8 並列に変更し、静電容量を 48、96、144、192mF に変更できる。現地 (J-PARC RCS) での運転は、バンプ波形の平坦部の偏差が±1.0%以下となるように、回路シミュレーションの結果から 192mF の静電容量に設定している。

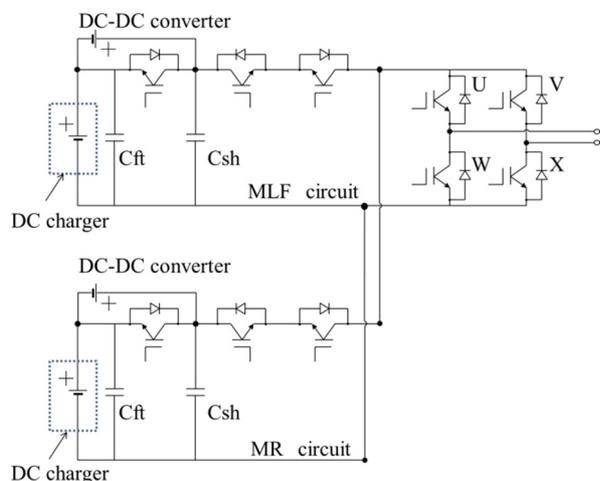


Figure 6: Schematic view of the basic circuit of the flat-top unit.

3.2 充電器の故障

新電源は、現地で試験運転を開始した直後から、工場試験では発生しなかった FT ユニットの電解コンデンサー用充電器のダイオードに故障が頻発した。Figure 7 に、充電器の内部回路の展開図を示す。同じ構成の回路が並列に接続されているが、トランスより 1 次側の IGBT ブリッジ回路は、それぞれ同時に同じ動作をする。そして、2 回路の合成電流を充電器の出力電流とし、45A となるようにフィードバックでブリッジ回路の PWM 制御を行う定電流電源として使用している。故障したダイオードは、2 素子入りの 1 モジュールでできており、銅バーで 2 素子を直列に接続して使用する（1 素子仕様:1200V/50A）。ダイオードの故障は、モジュール単位で発生しており、また、同じ個所で繰り返されるのではなく、図中 D1 から D10 の 10 個のダイオードモジュールのうち、故障発生の都度、毎回異なる箇所のダイオードが故障する。多くの故障は短絡故障で、ダイオードの破壊具合から、定格（2 直列で 2400V）を超えた高い電圧が印加されたと予想している。

原因調査として、現地で、試験運転をしながら故

障した瞬間の波形測定を試みた。しかし、故障が発生する充電器が毎回異なり、更に、異なるユニットの充電器であるため、現地試験で 7 回故障した内、電圧を測定していたダイオードが故障することは無かった。故障原因は、高電圧の印加と予想するも確証を得ることができていないため推測域を出ない。測定対象となる故障する可能性があるダイオードモジュールの全数は、使用する出力回路を MLF（又は MR）側に固定した場合で 320 個になる（16 バンク×2 ユニット×10 個）。

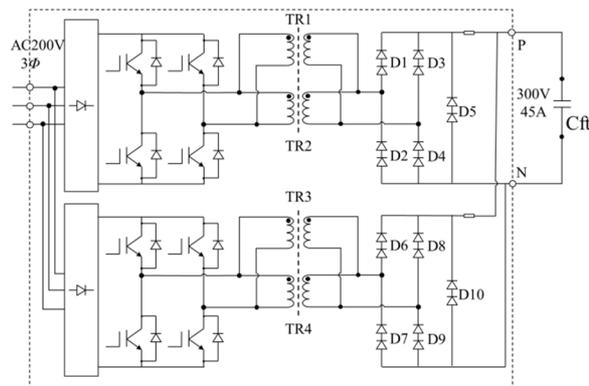


Figure 7: Schematic view of the basic circuit of the DC charger of the FT-unit.

4. ユーザー利用運転対応

4.1 バンプ波形によるビーム軌道変位の補正

LINAC で加速されたビームを 3-GeV RCS に入射する場合、水平シフトバンプ電磁石で入射バンプ軌道を生成する。ビームは、バンプ波形のフラットトップ部分の平坦期間(500μs)に入射するため、LINAC からの入射ビーム軌道と RCS の周回ビーム軌道の入射点は固定される。

しかし、現在、FT ユニット用充電器が故障して使用出来ないため、所定の波形を形成できず、フラットトップ部分は右肩下がりの形成不良の状態になってしまい、フラットトップの電流値の減少に伴い、入射と周回のビーム軌道が変位してしまう。

そこで、LINAC からのビームラインに設置してある可変偏向電磁石(PSTR)の励磁電流波形の立ち上がり部分を使用し、バンプ波形のフラットトップの傾きによるビームの変位を補正し、入射ビーム軌道の入射点を固定した。また、RCS の入射部の水平シフトバンプ電磁石の上流・下流に設置してある水平ペイントバンプ電磁石(PBH)の 4 台の励磁波形を、傾いたフラットトップ部分の補正用とペイント入射用の機能を合わせ持つパターン波形を作成し、周回ビーム軌道の変位を固定した。その結果、想定した通りのビーム入射を実現することが出来た。

現地で運転した FT ユニットを使用した正常時のバンプ波形を Figure 8 に示す。フラットトップ部分は平坦になっており、測定時は±0.5%以下である。FT ユニット問題の解決後には、立上立下ユニットと FT ユニットの充電電圧をそれぞれバランスよく調整し、工場試験で実績のある±0.2%以下を目指す。

FT ユニットを使用しない場合で、ユーザー利用運転時の可変偏向電磁石と水平ペイントバンパ電磁石の水平シフトバンパ電源の波形補正時の励磁波形を Figure 9 に示す。水平シフトバンパ電源のフラットトップ部分は、ピークから 2.7kA (約 12%) ドロップしている。通常時、可変偏向電磁石は、励磁波形のフラットトップ部分を使用し、水平ペイントバンパ電磁石は、減衰関数部分を使用し、それぞれ入射と周回のビーム軌道を制御してペイント入射を行う。水平ペイントバンパ電源は、IGBT スイッチによるチョッパ方式を採用し、任意な波形形状の電流パターンを出力することが出来る。水平ペイントバンパ電源の波形補正に関する報告は、本加速器学会年回プロシーディングスの SUPO058 「J-PARC RCS 水平ペイントバンパ電源の現状」を参照する。

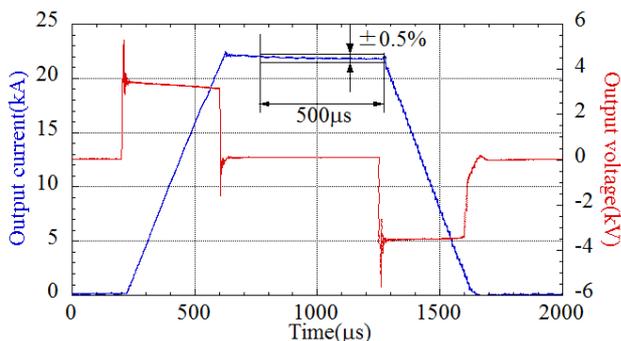


Figure 8: Measurement result of the output waveform of the current and voltage without a trouble of the FT-unit. The setting output current is 22.4kA and the setting parameter of the rise time and the flat top time is 400 μ s and 650 μ s, respectively.

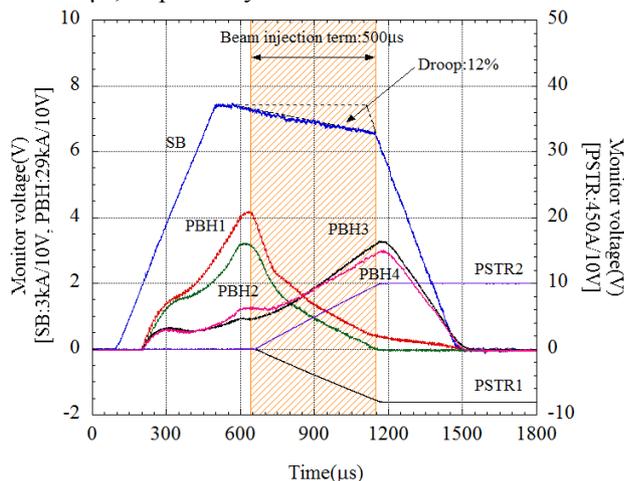


Figure 9: Measurement result of the output waveform of the current and voltage. SB shows a bump waveform pattern with FT-units trouble. PBHs show the waveform pattern of 100 π mm-mrad painting injection. PSTR shows the waveform pattern for the revision of the SB

4.2 温度問題

FT ユニットを使用せずにバンパ波形を出力した場合、フラットトップ部分は設計通りの平坦波形を形成できない。そのため、この部分の電気量を回生エネルギーとして見込んでいた立上立下ユニットは、

コンデンサーの再充電時に充電器がその分をすべて補うため、より高い負荷の稼働が強いられた。その結果、立上立下ユニットの充電器の内部回路が高温になる事象が発生した。この問題については、本日本加速器学会年回プロシーディングスの SUPO060 「J-PARC RCS 新水平シフトバンパ電源の温度問題の報告」の報告を参照する。

5. まとめ

電源容量を増強した新水平シフトバンパ電源は、LINAC の 400MeV アップグレード工事後の再開において、予定通りの期間にユーザー利用運転を開始し、入射エネルギーのアップグレードへの対応を示すことが出来た。さらに、出力電流のリプルノイズの低減によるビームロスの低減も確認された^[7]。

しかし、新電源の FT ユニット用充電器に故障が頻発したため、現在のユーザー利用運転では、FT ユニットを使用せず、立上立下ユニットのみで運転を行っている。この時、フラットトップ波形は傾き、その影響で入射と周回のビーム軌道が変位してしまうため、可変偏向電磁石と水平ペイントバンパ電磁石の励磁波形でこの傾き分を補正し、ビーム軌道を制御している。今後の 1MW 大強度ビームの生成や、MLF と MR でペイントエリアが大きく異なるユーザー利用運転を行うためには、可変偏向電磁石と水平ペイントバンパ電磁石を、当初の設計通りに利用するペイント入射が必要である。

FT ユニット問題の現地での試験調査では、測定対象とするダイオードの数が多く、原因究明に多くの時間と労力を必要とする。そのため、試験用として、1バンク構成の電源盤、FT ユニット、充電器で、それぞれ単体で試験ができる環境を整えた。現在、1バンク構成の試験において、充電器内部のダイオード故障の再現が確認され、原因追究の試験を進めている。また、並行して、ピーク電圧を抑制するダイオード用スナバー回路の設計も進めている。

謝辞

新水平シフトバンパ電源の温度問題に関して、ご教示下さいましたニチコン草津株式会社の内藤氏、志井氏、担当者の皆様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.*, Design and Preliminary Performance of the New Injection Shift Bump Power Supply at the J-PARC 3-GeV RCS, IEEE Transactions on Applied Supercond., vol.24, no.3, June 2014, 0503504.
- [5] T.Ueno *et al.*, *this proceedings*, SUPO58.
- [6] T.Takayanagi, *et al.*, Simulation model for design of a new power supply, IEEE Transactions on Applied Supercond., vol.22, no.3, June 2012, 5400704.
- [7] H.Hotchi, "Commissioning the 400-MeV Linac at J-PARC and high injection operation of the J-PARC RCS", Proceedings of IPAC2014, TUXA01 (2014).