

新しい J-PARC RCS 入射水平シフトバンプ電磁石用パルス電源の開発

NEW INJECTION BUMP POWER SUPPLY OF THE J-PARC RCS

高柳 智弘^{#,A)}, 植野 智晶^{B)}, 堀野 光喜^{A)}, 飛田 教光^{A)}, 林 直樹^{A)}, 金正 倫計^{A)}, 入江 吉郎^{C)},
岡部 晃大^{A)}, 谷 教夫^{A)}, 内藤 伸吾^{D)}, 志井 春重^{D)}, 戸田 克則^{D)}
Tomohiro Takayanagi^{#,A)}, Tomoaki Ueno^{B)}, Koki Horino^{A)}, Norimitsu Tobita^{A)}, Naoki Hayashi^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)},
Yoshiro Irie^{C)}, Kota Okabe^{A)}, Norio Tani^{A)}, Shingo Naito^{D)}, Harushige Shi^{D)}, Katsunori Toda^{D)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

^{B)} Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.,

^{C)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

^{D)} Nichicon Kusatsu Corporation

Abstract

The new injection bump power supply for the SB (Shift Bump) magnet^[1] of the beam injection sub-systems at the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)^[2] 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron)^[3] has been developed and manufactured. The power capacity of the new power supply was more than doubled along with the injection beam energy upgrading of the LINAC (Linear Accelerator) from 181MeV to 400MeV^[4]. Furthermore, the low ripple noise on the output current was required to prevent the resonance of the RF shield loop at the ceramic duct with the excitation magnetic field^[5]. The power supply newly adopted a capacitor commutation method to form the trapezoid waveform pattern (bump waveform), where the maximum output current and output voltage are 32 kA and 12 kV respectively. A low noise and stable power supply was then realized that has high uniformity at the flat-top current ($\leq \pm 0.1\%$) and is capable of producing two different flat-top currents alternately at 25Hz.

1. はじめに

J-PARC^[2] 3GeV RCS^[3]のビーム入射システムの一つである水平シフトバンプ電磁石^[1]用の新しいパルス電源(新バンプ電源)を開発し製作した。新バンプ電源は、LINAC^[4]のビーム加速エネルギーが181MeVから400MeVへアップグレードするのに合わせ、現在の3倍以上の電源容量(電流1.6倍、電圧2倍で設計)が必要になる。さらに、電磁石のセラミックス真空ダクトを覆う高周波遮蔽用銅箔(RFシールド)における、ループコイルのインダクタンスと励磁場の共振^[5]によるビームロス^[6]を防ぐため、励磁電流波形に重畳する電流リップルノイズの低減が要求される。

そこで、新バンプ電源の主回路方式に、これまでのIGBT (Insulated Gated Bipolar Transistor)の半導体スイッチを用いたチョップ方式^[7]から、コンデンサの充放電回路を用いた転流方式を採用することにした。コンデンサ転流方式は、台形状のパルス波形(バンプ励磁波形)を形成する場合に、常時スイッチングを行うチョップ方式と異なり、出力電流の立ち上げ開始時、フラットトップの開始時及び終了時の3回のスイッチ操作で波形形成が可能であり、原理的にスイッチングノイズの発生を低減することが可能である^[8]。本論文では、転流方式を採用した新バンプ電源の特性について述べる。

2. 新バンプ電源の開発背景

2.1 RCS

RCSは、物質・生命科学実験施設 MLF (Materials & Life Science Experimental Facility)^[9]へのビーム供給と、50GeVシンクロトロン加速器 MR (50GeV Main Ring Synchrotron)^[10]の入射器の2つの役割を担っている。各施設が要求するビームの電流値やエミッタンスは異なり、RCSでは、横方向のペインティング入射^[11,12]により、各施設の要求に合うエミッタンスのビームを生成する。また、LINACから入射されるH⁻(負水素イオン)のビームを、入射点に設置した炭素薄膜(荷電変換フォイル)を用いて陽子(H⁺)に変換して周回軌道に合流する荷電変換入射方式を採用する^[11]、1パルス当たり 8.3×10^{13} 個の陽子を20ミリ秒で3GeVまで加速し、25Hzの速い繰り返しにより1MWの大強度陽子ビームを生成する。

2.2 水平シフトバンプ電磁石

水平シフトバンプ電磁石は、RCSの入射部に4台配置され、バンプ励磁波形のフラットトップ部分を用いて、周回閉軌道に入射ビーム軌道(バンプ軌道)を形成する^[11,12]。4台の水平シフトバンプ電磁石は、すべて同じ構造で製作し、磁場分布の誤差もほぼゼロである^[13]。この4台の電磁石を接続導体で直列に接続し、1台の電源で励磁する。これにより、負荷の合成インピーダンスは大きくなるが、4台間には、励磁タイミングのズレに起因するバンプ軌道の閉軌道誤差 COD(Closed Orbit Distortion)は発生し

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

ない。また、水平シフトバンク電磁石は、入射ビーム軌道と周回ビーム軌道の変位量と、エミッタンスが $486\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ の周回ビームのフィジカルアパーチャーをカバーするセラミックス真空ダクト（内径：幅 $470\text{mm}\times$ 高さ 270mm ）を挿入するため、電磁石のギャップ口径は、コイル間距離で幅が 616mm 、ギャップ高さが 310mm と大口径になり、大きい励磁電流と電圧が必要になる。

最初の荷電変換フォイルで陽子(H^+)に変換されなかった H^0 ビームを H^+ ビームに変換するため、2 つ目の荷電変換フォイルを配置する必要がある^[14]。この 2 つ目の荷電変換フォイルの位置は、上流から 4 番目に配置された水平シフトバンク電磁石の中心になるため、この電磁石用のセラミックス真空ダクトのみ、フォイルを挿入する面と断面の四つ角に RF シールドが無い構造となる。これにより、4 台の水平シフトバンク電磁石において、RF シールドは対称的な構造では無くなり、励磁場と RF シールドのループコイルとの間で発生した共振磁場によるビームの蹴り角がキャンセルされず、ビーム振幅が増大するなどの不安定性を引き起こす^[5]。

2.3 新バンク電源への要求仕様

1MW 大強度陽子ビームの出力運転の実現を目的とする RCS では、ビームロスによる機器の放射化が問題になる。ビームロスの原因は様々であるが、ビーム入射時のバンク電磁石に起因するビームロスは、励磁波形に重畳する電流リップルノイズの低減で抑制が可能であり、励磁電源の性能改善が要求される^[16]。また、入射部でのバンク軌道の形成は、RCS 周回ビームの中心軌道の対称性の崩れを引き起こし、ベータatron 関数の歪みによる共振振動の原因になる。さらに、周回ビームの荷電変換フォイルによる散乱を最小に抑えるため、ビーム入射終了後は、速やかにバンク軌道を落とす（励磁電流をゼロにする）必要がある。

J-PARC は、加速器の稼働率を高くするため、機器が故障した場合には、早期の回復が望まれる。

要求内容まとめ

- バンプ軌道を高い精度でコントロールする『バンク励磁波形の高いフラットトップ平坦度』と『ショット毎の優れた再現性』。
- ビーム軌道の不安定な振幅を抑制し且つセラミックス真空ダクトの RF シールドとの共振を抑制する『励磁電流に重畳する電流リップルノイズの低減』
- 大口径電磁石に対応する『大電流出力』。
- 大きい負荷インピーダンスに流す大きい励磁電流をより速い時間で立ち下げる『高電圧出力』。
- ペインティング入射に対応する『励磁電流値の最大 20%の変更を 25Hz ショット毎に可変とする能力』。
- 故障時の修理や予備部品との交換時に要する時間を短縮する『メンテナンス性に優れた構造』。

3. 開発成果

3.1 回路方式

新バンク電源は、回路方式にコンデンサの充放電を利用する転流方式を採用した。大容量電解コンデンサの電流経路を、半導体の IGBT スwitch のブリッジ回路の操作で切り替え、力行、環流、回生の各モードをコントロールして運用する。バンク励磁波形は、電流出力時、フラットトップの開始と終了時の 3 回のスイッチ操作で波形を形成することが出来る。常時スイッチングを行うチョッパ方式によるパターン形成時と比較し、スイッチングの回数を限ることが出来るため、電流リップルノイズの発生を原理的に低減することが出来る。転流方式と操作モードについて、Figure 1 と 2 に概念図を示す。

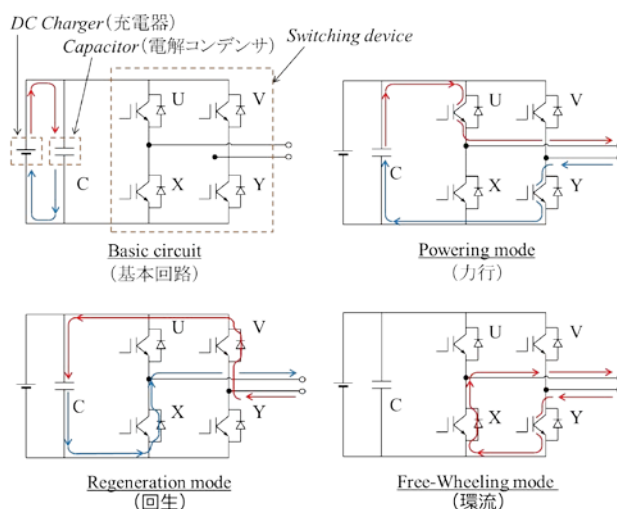


Figure 1: Base circuit of the commutation method.

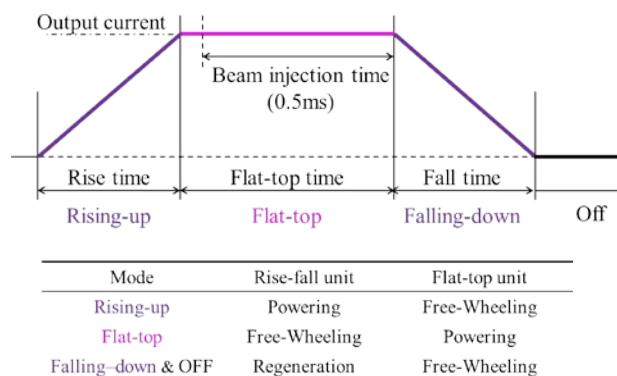


Figure 2: Operation mode of the bump wave formation.

3.2 新しいコンデンサ

コンデンサバンクを主回路に使用する電源を設計する場合、必要な出力電流値と波形形状に見合うコンデンサの容量を事前に定める必要がある。また、大電流出力に対応するには、大容量コンデンサが多量に必要なが、設置スペースが限られる場所では、コンデンサの選定で制限されてしまう。新バン

ブ電源は、3GeV シンクロトロン棟の地下 1 階に設置するため、電源盤の大きさが制限される。そこで、大容量且つコンパクトなコンデンサを開発した。定格 $350V \times 24mF$ 、ケースサイズ $\Phi 90 \times 250L$ のアルミ電解コンデンサを新バンプ電源用に製作した（ニチコン株式会社製：LNK2V243MSEAZX）。

3.3 ユニット構造

新バンプ電源の構成は、機能別に回路を分割するユニット方式とした。故障時には、該当ユニットを交換することで復旧が可能となるため、作業時間を大幅に短縮することが出来る。また、ユニットの種類を少なくすることで、設計と予備品に要する負担を軽減することも出来る。

主回路は、出力電流のピーク値とバンプ励磁波形の立ち上がり立ち下りの時間を定める「立上げ立下げユニット（立上立下ユニット）」と、フラットトップの時間と平坦度を定める「フラットトップユニット（FT ユニット）」の 2 種類で構成した。それぞれの基本回路図を、Figure 3 と 4 に示す。回路は、共にコンデンサ転流方式であり、同じ原理で動作する。また、電解コンデンサもすべて同じ $24mF$ で、型式 LNK2V243MSEAZX を使用する。

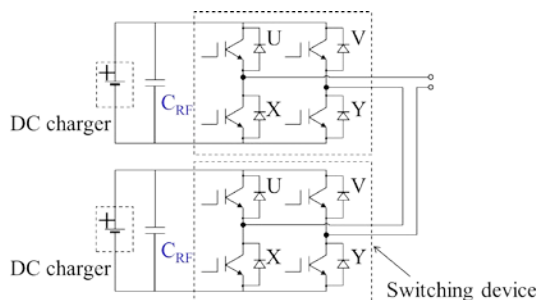


Figure 3: Schematic circuit diagram of the rise-fall unit.

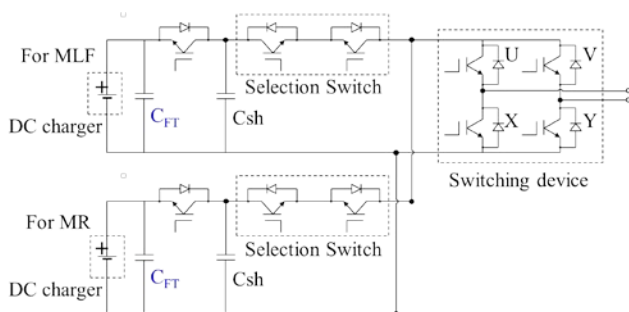


Figure 4: Schematic circuit diagram of the flat-top unit.

立上立下ユニットは、1 回路 1 充電器とし、コンデンサの合成容量 C_{RF} が $48mF$ （4 並列 2 直列）の転流回路を 2 直列とする。FT ユニットは、MLF 用と MR 用に、それぞれ 1 回路 1 充電器の独立した転流回路を設けている。各回路には 8 個のコンデンサを搭載し、接続配列を変更することで、 $48mF$ （4 並列 2 直列）、 $96mF$ （4 並列）、 $144mF$ （6 並列）、 $192mF$ （8 並列）の合成容量 C_{FT} に変更することが出来る。転流回路は、半導体スイッチの選択スイッチ（Selection Switch）で切り替える。UVXY の

Switching device と Selection Switch は、共に $1400V/600A$ の IGBT 素子を使用した。

3.4 電源構造

新バンプ電源は、立上立下ユニット 12 台と FT ユニット 2 台を直列に接続した回路構成を 1 バンクとし、このバンクを 16 台並列に接続する構成とした。1 バンクの主回路図を Figure 5 に、構成図を Figure 6 に示す。1 バンク毎に、直列に接続した 12 台のユニットの midpoint を接地し、立上立下ユニット 6 台と FT ユニット 1 台をそれぞれ正極と負極に割り当てる。1 バンク当たりの定格は、電流/電圧で $2kA/12kV(\pm 6kV)$ になる。並列接続した 16 台を一括して 1 台の電源システムとしてコントロールすることで、最大 $32kA/12kV(\pm 6kV)$ の出力が可能となる。

3.5 波形調整

コンデンサの充電電圧をユニット毎にコントロールし、力行、環流、回生の各モードを切り替え操作することで、フラットトップのピーク電流値、立ち上がり立ち下りの各時間、そして、フラットトップの平坦度を任意に調整することが出来る。

1 バンクに搭載した正極側(P)負極側(N)の立上立下ユニットの各充電電圧の設定は、同段(P/N)は同じ設定値とし、段毎に設定変更が可能である。ただし、通常の運用においては、下から 1~4 段目(P/N:1-4)はすべて同じ設定値、5 段目(P/N:5)と 6 段目(P/N:6)を独立に設定する。そして、外部からのタイミングで P/N:5 と P/N:6 を切り替えて出力することで、20% のピーク電流値を 25Hz の繰り返し運転でショット毎に変更することが可能となる（P/N:1-4 は、毎回同じ設定値で出力する）。さらに、立上立下ユニット 192 台と FT ユニット 32 台の全ユニットに対し、各コンデンサの充電電圧を 0.01% 以下の分解能で設定調整する充電・回生システムと、ユニットの転流切り替えを 100ns 以下で調整する制御システムを構築し、励磁電流の安定した再現性を実現する。

4. 性能評価

4.1 ノイズの低減と高いフラットトップ平坦度

新バンプ電源は、2014 年 2 月から運用を開始した。Figure 7 に、ユーザー利用運転で使用している $22.1kA$ の励磁電流波形を示す。この時の各ユニットの充電電圧は、P/N:1-4 と P/N:6 を $370.0V$ 、P/N:5 を $0V$ 、FT ユニットを $140.0V$ で設定した。フラットトップ中の電流リップルは抑制され、更には、設定電流値と出力電流値の偏差は $\pm 0.20\%$ 以下となり、高いフラットトップ平坦度を実現したことを確認した（FT ユニットコンデンサの合成容量は $192mF$ ）。また、旧バンプ電源の IGBT を用いたチョップ方式と、新バンプ電源の転流方式における、運転中の筐体と接地の電位差を測定した比較結果を Figure 8 に示す。出力電流は、 $181MeV$ 入射時のパラメータで、 $13.4kA$ の励磁波形で比較した。電位差は、スイッチングのタイミングで発生しており、回路方式により特性の

違いを確認することが出来る。チョップ方式の電位差が高いのは、接地に流れる漏洩電流の起因となる IGBT の数が多く、スイッチングを高い合成周波数 48kHz で操作しているからと考える。

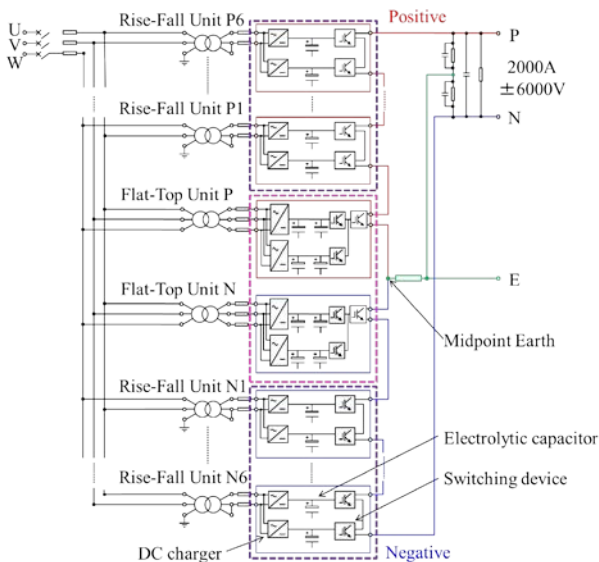


Figure 5: Schematic circuit diagram of one bank.

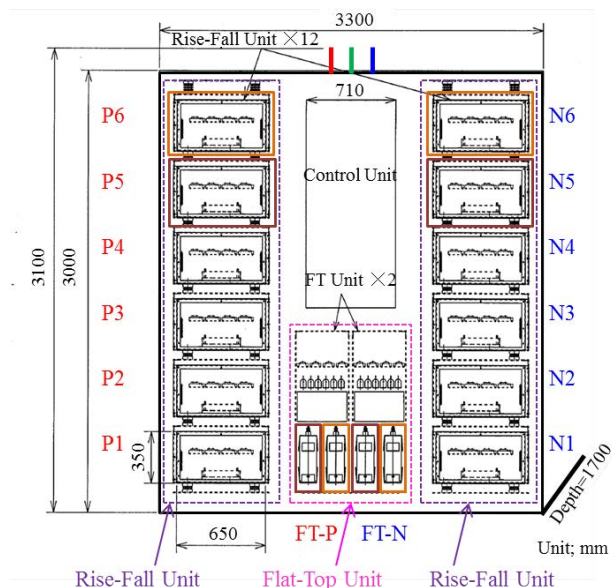


Figure 6: Structural drawing of one bank.

4.2 出力電圧ピーク値の低減

転流回路の切り替え操作時に、高いサージ電圧が発生する。そのため、ユニット数が多い立上立下ユニットを、1、3、5、6 段目(P/N:1,3,5,6)と 2、4 段目(P/N:2,4)の 2 つのグループに分け、グループ毎に出力するタイミングをずらす。これにより、同時に切り替えるユニットの数を制限し（グループ内は同じタイミング）、高いサージ電圧の発生を抑制する。切り替えタイミングを 5 μ s シフトした結果とその時

のタイミングチャートを Figure 9 に示す。サージ電圧は、5.3kV から 4.6kV と 0.7kV 低減した。これは、ノイズの低減だけでなく、負荷（電磁石）の印加電圧を低減するなど、回路保護にも効果的である。

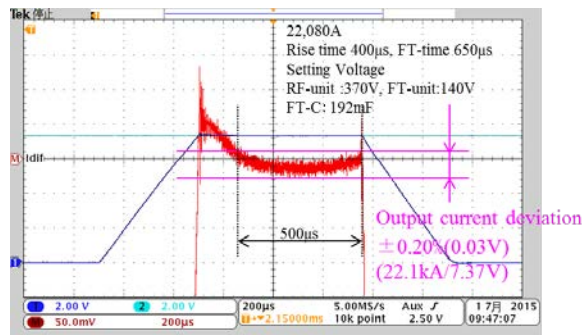


Figure 7: Measurement result of the output current at the time of the user use operation. Output current deviation in this figure is the difference between the output current and the setting current.

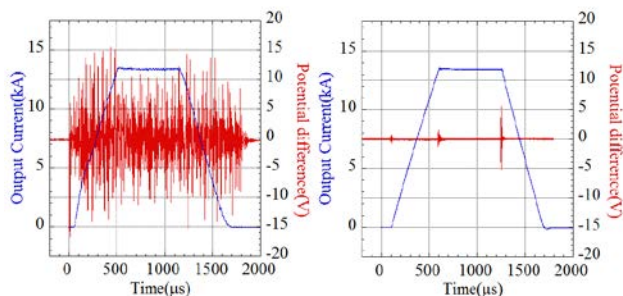


Figure 8: Comparison result of the potential difference between the mainframe and the grounding.

4.3 フラットトップ平坦度の調整

全 16 バンクにおける FT ユニットコンデンサの合成容量を、192mF と 48mF にした場合の出力電流を測定した波形を Figure 10 に示す。FT ユニットコンデンサの充電電圧設定値は、それぞれ 140V と 145V であった。フラットトップの平坦度は、192mF の時は $\pm 0.20\%$ 以下、48mF の時は $\pm 0.10\%$ 以下となり、コンデンサの合成容量を小さくすることで、より高い平坦度を実現した。

バンプ励磁波形のフラットトップの開始から終了までの期間において、電磁石の抵抗成分の変化で発生する電圧降下分と等しい電圧を電源から供給することで、フラットトップの平坦度を高くすることが出来る。電源から見た電磁石の抵抗成分は、フラットトップ開始時では渦電流により等価的に増大し、その後、時間の経過と共に低下する。コンデンサ充電電圧の降下分は、容量が 192mF と 48mF の場合、以下の(1)と(2)式より、 $\Delta 4.7V$ と $\Delta 18.7V$ になる。これより、電磁石抵抗成分の電圧変化分は、48mF の電圧降下分 $\Delta 18.7V$ により近かったことになる。

$$\Delta V = \frac{22080A}{16\text{バンク}} \times \frac{650\mu s}{192mF} = 4.7V \quad (1)$$

$$\Delta V = \frac{22080A}{16\text{バンク}} \times \frac{650\mu s}{48mF} = 18.7V \quad (2)$$

励磁電流による電源装置と電磁石負荷の発熱を抑制するため、励磁波形のフラットトップ時間は最大 800 μ s と限られている。そこで、コンデンサ容量が 48mF で、フラットトップの設定時間を 800 μ s にした場合のフラットトップ平坦度の測定波形を Figure 11 に示す。RCS 加速器のビーム入射期間である 500 μ s のフラットトップ部分は、ほぼゼロの平坦度になった。今後は、この設定波形にて運用を行う予定である。

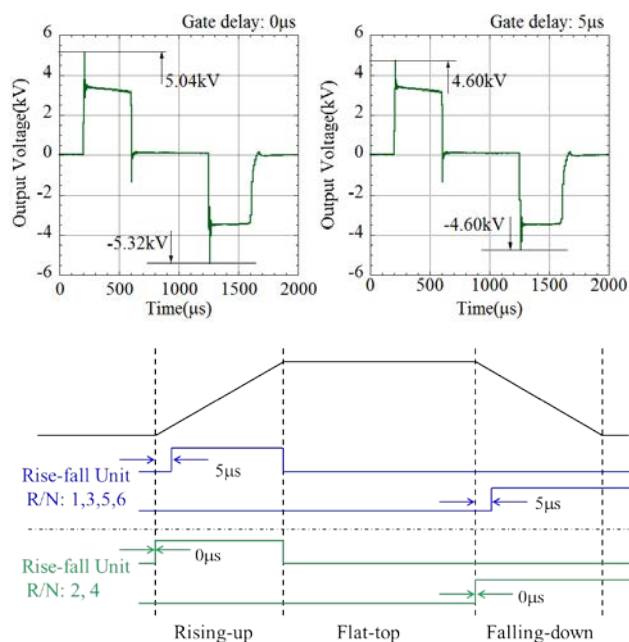


Figure 9: Comparison of the measurement results of the output voltage (up) and switching patterns (down).

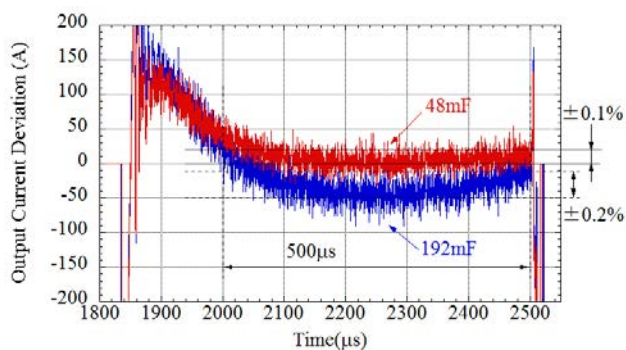


Figure 10: Comparison of the flatness with differential composite capacity.

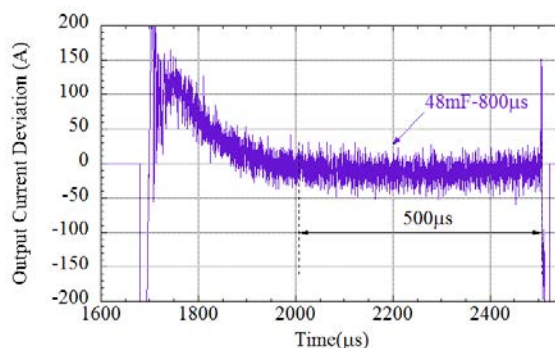


Figure 11: Measurement result of the output current in the case of 48mF-800 μ s setting.

4.4 バンプ励磁波形の任意性

バンプ励磁波形の立ち上がり時間を 150 μ s と 500 μ s に設定し、それぞれの条件で測定した出力電流と電圧の波形を Figure 12 に示す。150 μ s 立ち上げ時の電流/電圧のピーク値は 1800A/12kV、500 μ s 立ち上げ時は 2000A/5kV となった。フラットトップは、それぞれ $\pm 0.18\%$ 以下と $\pm 0.11\%$ 以下となり、各条件にて、高い平坦度を実現した。測定時の各ユニットコンデンサの充電電圧設定値を Table 1 に示す。ただし、この波形は、模擬負荷による 1 バンクでの測定である。立ち上がり時間を速くすると、電磁石に挿入したセラミックス真空ダクトの RF シールドのループコイルに生じる誘導起電力が高くなる。そして、渦電流を防止する目的で設けたループ回路を直流的に遮断するチップコンデンサが放電して破壊してしまうため、実負荷では行っていない^[17]。

Table 1: Setting Parameters of Each DC-charger

Rise-time	Rise-fall unit			Flat-top unit
	P/N:1-4	P/N:5	P/N:6	
150us	1152.0V	0V	1152.0V	133.0V
500us	394.0V	0V	303.0V	143.0V

4.5 25Hz ショット毎の出力電流値の変更

MLF/MR のペインティングエリア切り替え試験の一例として、水平シフトバンプ電磁石の励磁電流値を、ビーム軌道の変位量 93mm と 107mm に相当する 15%の変更で実施した。ショット数の割合は、MLF 用と MR 用にそれぞれ 150 ショットと 8 ショットとし、6 秒周期の遅い取り出し試験を模擬した。ただし、実機において、水平シフトバンプ電源の電流値を変更してのペインティング入射は実施されていないため、1 バンクの模擬負荷にて測定した。MLF 用は 1530A、MR 用は 1800A で設定し、それぞれ、立上り立下りユニットの 5 段目と 6 段目を割り当てた。測定した波形を Figure 13 に、各ユニットコンデンサの充電電圧設定値を Table 2 に示す。波形は、

電流値変更直後から 5 発分の偏差波形を重ねており、それぞれ、 $\pm 0.05\%$ 以下の高い再現性を確認した。

Table 2: Setting Parameters of Each DC-charger

RF-unit			Flat-top unit
P/N:1-4	P/N:5(MLF)	P/N:6(MR)	(MLF/MR)
1133.0V	270.0V	1120.0V	124.0V / 134.0V

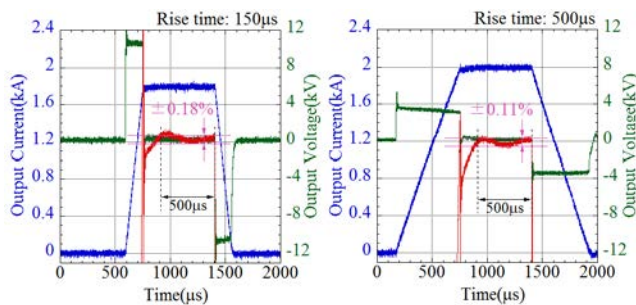


Figure 12: Measurement results of the different rise-fall time. Setting parameters of the rise time are $150\mu\text{s}$ (left) and $500\mu\text{s}$ (right).

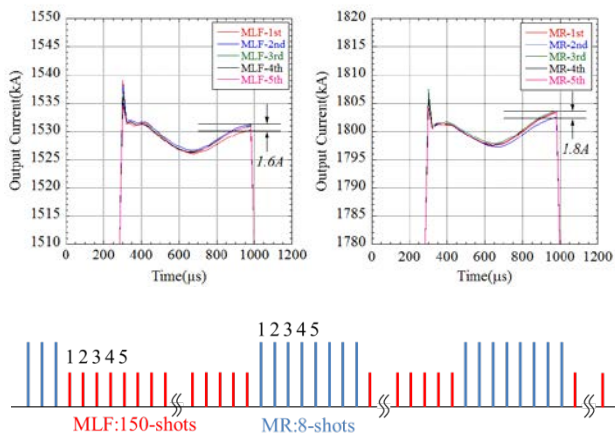


Figure 13: Measurement results of the current deviation of each 5 shots (up) and the timing chart of the output is the MLF and MR (down). Flat-top currents for different setting, 1530A (MLF) and 1800A (MR) where the P/N:5 and the P/N:6 are used respectively.

5. まとめ

励磁電流波形に高周波リップル電流の重畳を抑制する大電流・高電圧のパルス電源の開発に成功した。これにより、J-PARC の 3GeV シンクロトロン加速器 (RCS)における入射水平シフトバンプ電磁石に起因するビーム損失が大幅に抑制された^[6]。この成果は、加速器構成機器が放射化するリスクを低減すると共に、RCS の所期性能である 1MW 相当の陽子ビームの加速成功に貢献した^[18]。

さらに、新バンプ電源の開発成功は、コンデンサ転流方式の欠点である励磁波形の変更においても、任意に調整できることを示した。また、故障時の作業時間を短縮する構造を採用し、メンテナンスにも考慮した電源となっている。これらの成果は、加速器用電源の主回路方式に、新しい選択の道を開いたことになる。

参考文献

- [1] T.Takayanagi et al., “Design of the shift bump magnets for the Beam injection of the 3-GeV RCS in J-PARC”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp1366-1369.
- [2] <http://j-parc.jp/index.html>
- [3] M.Kinsho, “Status of the J-PARC 3 GeV RCS”, Proceedings of IPAC2015, THPF044.
- [4] K.Hasegawa, “Commissioning of Energy Upgraded Linac of J-PARC”, Proceedings of LINAC2014, TUIOB03.
- [5] Y.Shobuda et al., “Analytical Estimation of the Field Modulation during the Injection Period of the 3 GeV RCS in J-PARC”, to be published in the proceeding of the 2nd International Symposium on Science at J-PARC 2014, Tsukuba, Japan (2014).
- [6] H.Hotchi, “Commissioning the 400-MeV Linac at J-PARC and high injection operation of the J-PARC RCS”, Proceedings of IPAC2014, TUXA01 (2014).
- [7] T.Takayanagi et al., “Comparison of the Pulsed Power Supply Systems Using the PFN Switching Capacitor Method and the IGBT Chopping Method for the J-PARC 3-GeV RCS Injection System”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.24, No.3, June 2014, 3800905.
- [8] 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 superconductivity, Vol.24, No.3, June 2014, 0503504.
- [9] <http://j-parc.jp/MatLife/ja/index.html>
- [10] <https://j-parc.jp/Acc/ja/equipment.html>
- [11] T.Takayanagi et al., “Design of the Injection Bump System of the 3-GeV RCS in J-PARC”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp.1358-1361.
- [12] P.K.Saha, et al., “Direct observation of the phase space footprint of a painting injection in the Rapid Cycling Synchrotron at the Japan Proton Accelerator Research Complex”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 040403(2009).
- [13] T.Takayanagi et al., “Improvement of the Shift Bump Magnet Field for a Closed Bump Orbit of the 3-GeV RCS in J-PARC”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.18, No.2, June 2008, pp306-309.
- [14] I.Sakai, et al., “H- Painting Injection System for the J-PARC 3-GeV High Intensity Proton Synchrotron”, Proceedings of PAC2003, pp.1512-1514.
- [15] T.Takayanagi et al., “Design of the shift bump magnets for the Beam injection of the 3-GeV RCS in J-PARC”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp1366-1369.
- [16] T.Takayanagi, et al., “Upgrade Design of the Bump System in the J-PARC 3-GeV RCS”, Proceedings of IPAC2011, TEPO028.
- [17] T.Takayanagi, et al., “Grounding and Induced Voltage Issues of the Injection Bump Magnet System of the 3-GeV RCS in J-PARC”, Proceedings of EPAC08, TUPD016.
- [18] “J-PARC の 3GeV シンクロトロン加速器が性能を大幅に向上”, <http://j-parc.jp/ja/topics/2015/Pulse150206.html>