

J-PARC RCS 入射バンプシステムの現状と将来計画

PRESENT STATUS AND FUTURE PLAN OF THE J-PARC RCS INJECTION BUMP SYSTEM

高柳智弘^{#,A)}, 植野智晶^{A)}, 堀野光喜^{A)}, 富樫智人^{A)}, 飛田教光^{B)}, 山本風海^{A)}, 金正倫計^{A)}
Tomohiro Takayanagi^{#,A)}, Tomoaki Ueno^{A)}, Koki Horino^{A)}, Norimitsu Tobita^{B)}, Kazami Yamamoto^{A)},
Michikazu Kinsho^{A)},

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

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

Abstract

Each power supply of the injection bump system at the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) has been upgraded along with the 400 MeV injection beam energy of the LINAC (Linear Accelerator). In January 2015, RCS has been demonstrated 1-MW high power beam by using the upgraded power supply. However, after one month, a fixing bolt of the shift bump magnet coil was dropped, and the water leakage of the cooling pipe of the connection conductor bar was occurred. Furthermore, depending on a high power beam, a current fluctuation of the paint bump power supply has been confirmed. On the other hand, a high residual dose of the injection area has been clarified. In order to install a shield in the injection area, the structural changes of the shift bump magnet and the division of the shift bump power supply are considered, respectively. This paper reports the present status and future plan of the injection bump system.

1. はじめに

J-PARC(大強度陽子加速器施設)[1][2]の 3-GeV RCS(Rapid Cycling Synchrotron)[3]の入射バンプシステム[4]は、LINAC(Linear Accelerator)の 400 MeV 入射に対応するため、定格容量を倍増した新しい電源への交換と増強改造を行った[5]。そして、2015 年 1 月、1 MW 大強度ビーム加速試験の成功に貢献した[6]。しかし、2015 年 2 月に水平シフトバンプ電磁石(SB 電磁石)のコイルサポートボルトが脱落し、1ヶ月後には導入バーの冷却水配管からの漏水が発生した[7][8]。大強度ビーム試験の中で、水平ペイントバンプ電源(PBH 電源)のパルスショット毎の電流値変動が問題化し、より高い再現性が求められるようになった[9][10]。また、荷電変換多重入射方式に起因した入射部の残留線量の増加が顕在化した[11]。1 MW 利用運転に備え入射部に遮蔽体を追加する計画があり、SB 電磁石の変更と SB 電源の分割化による 2 台電源システムを検討する。本論文では、入射バンプシステムの現状と将来計画について報告する。

2. 入射バンプシステムの現状

2.1 水平シフトバンプ電源

181 MeV 入射時の電源は、主回路に IGBT 半導体スイッチを用いたチョッパ方式を採用していた。チョッパ方式は、電源の出力定格の範囲内であれば、IGBT 半導体スイッチの ON/OFF 操作の繰り返しにより任意な波形形成が可能である。この方式は、入射パラメータの容易な変更やビームコミッションングの要求に円滑に対応するなど、ビーム調整試験において非常に有能であった。しかし、スイッチ操作に起因した電流リップルが励磁波形

に必ず重畳する。水平シフトバンプ電源(SB 電源)のパルス励磁波形(バンプ波形)のフラットトップ(FT)部分にも、連続した電流リップルが重畳していた。RCS の加速ビームが大強度化していく過程で、FT 部分の電流リップルがビーム振動を誘発し、ビームロスを引き起こすことが明らかになった[12]。ビームロスはビームパワーの出力を制限するため、RCS が 1 MW 利用運転を実現するためには、ビームロスの低減、つまり、連続した電流リップルを根本的に抑制する必要があった。

400 MeV 入射用の新 SB 電源には、コンデンサの充放電回路を用いた転流方式を採用した[13]。本方式は、台形形状のバンプ波形を形成する場合、常時スイッチングを行うチョッパ方式と異なり、バンプ波形の立ち上がり開始時、フラットトップ開始時及び終了時の 3 回のスイッチ操作のみで形成が可能であり、連続した電流リップルを根本的に抑制することができる。新 SB 電源のバンプ波形の FT 部分には連続した電流リップルが発生せず、バンプ波形に起因したビームロスは大幅に低減した[14]。

新 SB 電源は、RCS で運転を開始した当初、バンプ波形の FT 部分を担う FT ユニット用充電器に故障が頻発した。この故障は工場試験では発生せず、RCS の運転で初めて確認された事象であった。問題の原因を直ぐに解明できなかったため、FT ユニットを使用せず、可変偏向電磁石と水平ペイントバンプ電磁石の励磁波形を調整して利用運転を行った[15]。しかし、FT 部が形成されないバンプ波形であったため、立ち上がり立ち下りの部分を担う立上立下ユニットが必要とする電力回生量を確保できず、立上立下ユニット用充電器に過負荷運転の原因とする高温問題が発生してしまった[16]。高温問題については、送風機を追加し対応した。

FT ユニット用充電器の故障調査は、R&D機や予備機を使用した故障の再現から始めた。そして、コンデンサ充電回路の制御の誤動作が原因の一つであることを

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

明らかにした。対策[17]を施した FT ユニット用充電器には故障が発生せず、また、設計通りのパンプ波形の場合は立上立下ユニット用充電器に高温問題も発生せず、安定した運転を継続している。

2.2 水平シフトパンプ電磁石

水平シフトパンプ電磁石(SB 電磁石)は、2008 年の運用開始からトラブル無く安定した運転を続けてきた。しかし、2015 年 2 月に電磁石コイルのサポートボルトが脱落し、同年 3 月には、4 台の SB 電磁石を直列に接続する導入バーの冷却水配管から漏水が発生してしまった。対策品の設計と製作に時間を必要としたため、同年 6 月末の利用運転が終了するまでの期間、脱落せず残ったボルトを全て増し締めし、更に、ボルトに記した合いマークを 1 週間に 1 度確認することで、ボルト緩みの早期発見と脱落防止に努めた[7]。導入バーは送風機を用いて冷却すると共に、送風機の故障に備え光ファイバ熱電対を用いた導入バーの 24 時間温度監視を行った。

2015 年の夏期保守期間に、電磁石は、緩みと脱落の両対策を施した新しいサポートボルトに交換した。導入バーは、冷却配管を銅パイプからホローコンダクターに変更し、パイプの固定をロウ付けから半田付けに変更した。そして、配管の熱伸び方向を考慮して固定した新しい導入バーに入れ替えた。利用運転中の導入バーの温度上昇は $\Delta T=6^\circ\text{C}$ と低く(Figure 1 参照)、運転と停止の繰り返しによる熱伸縮でパイプが亀裂するリスクは低減された[8]。対策後 1 年が経過した現在、問題となるような兆候は観測されていない。

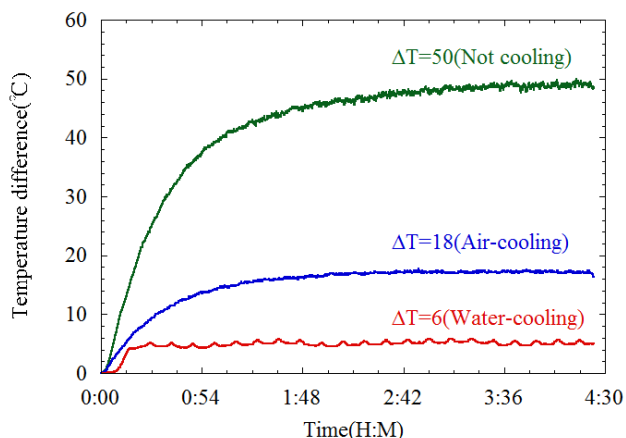


Figure 1: Temperature difference of the copper bar in each cooling method (Operation current=22.1 kA).

2.3 水平ペイントパンプ電源

水平・垂直のペイントパンプ電源(PB 電源)は、ビーム試験で使用される台形型やペインティング入射で使用する減衰関数型など、様々な形状の励磁波形が要求される。そのため、181 MeV 入射で採用した任意の波形形成を可能とする、IGBT 半導体スイッチを用いたチョップパ方式を 400 MeV 入射でも引き続き採用した。

任意波形は、素周波数 54 kHz の IGBT モジュールを用いて、直並列に多重化接続したアセンブリを 12 多重にした合成周波数 648 kHz で形成する。また、電力ケーブルに CVQ(カドラプレックス)を用いて回路全体を低イ

ンダクタンス化し、出力電流パターンの指令値と出力電流値の偏差を $\pm 1.0\%$ 以下とする速い応答性と高い設定精度を実現している。更に、電流フィードバックと電圧フィードフォワードによるアナログ制御を採用し、MLF(物質・生命科学実験施設)用とMR(Main Ring)用に各々異なる出力パターンを 25 Hz のパルスショット毎に変更可能としている[18]。

大強度ビーム試験で問題となったショット毎の電流値の変動幅は、電流偏差では $\pm 1.0\%$ 以下を示し電源性能の仕様内である。つまり、SB 電源を転流方式に変更し、スイッチングノイズが大幅に低減されたため、PB 電源の電流値変動が問題化し、より高い再現性が要求されるようになった。パルスショット毎の電流値変動の原因は、入力パターンのストロブ信号と IGBT の PWM(Pulse Width Modulation)三角波のジッタに起因していると考え、2つのクロックを同期化することで改善を期待した。しかし、同期化による改善は確認できず、代わりに、フィードバック基板の設定電圧信号の配線ルートの変更によって電流値変動が大幅に改善した(Figure 2 参照)[10]。

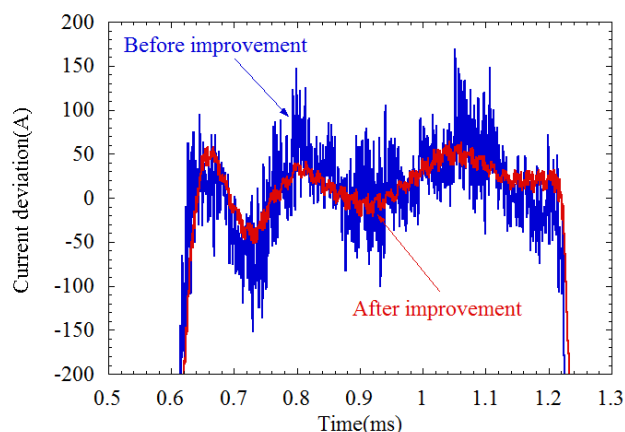


Figure 2: Current deviation of the horizontal paint bump power supply (PBH4) before and after the improvement (Operation current=10 kA).

3. 入射パンプシステムの将来計画

3.1 水平シフトパンプ電磁石

RCS は荷電変換多重入射方式を採用しているため、大強度ビームに応じて入射部は残留線量が高くなる。ペイントエリアの拡大、フォイルサイズの縮小化、高真空化などにより残留線量の一定の低減は可能である。しかし、1 MW 利用運転を見据え、保守作業時の被ばく量を抑制するための遮蔽体の追加を検討する。遮蔽体は、1 つ目の荷電変換フォイル(Foil)の位置に追加した場合が被ばく量を抑制するのに最も効果的である。しかし、現状の入射部は多数の電磁石とビームモニタが連続して配置されているため、遮蔽体を追加するスペースは無い。更に、入射とダンプのビーム軌道を変えずに遮蔽体を追加するスペースを確保したいため、構造の変更や移動をする機器は極力少なくしたい。

SB 電磁石の鉄心は Foil2 を挿入するため、上下流に分割した構造をしている(鉄心間距離 0.26 m)[19]。そこで、フォイルの挿入に影響せず且つ Foil の上下流に位

置するSB電磁石の2と3のみ鉄心の形状を変更することを検討した(Figure 3 参照)。鉄心長(0.4 m)は変更せず、中心に寄せて一体化した鉄心(0.8 m)を更に上下流に各々0.13 m 移動することにより、Foil1 の上下流に新たに0.26 m(全体で0.56 m)のスペースを作ることが出来る。鉄心構造を変更する前後の磁場分布と積分磁場の3次元解析結果を Figure 4 と 5 に示す。磁極長が 1.06 m (0.4+0.26+0.4) から 0.80 m に減少した分、積分磁場も 0.31 Tm から 0.27 Tm と 86.4 %に減少した。

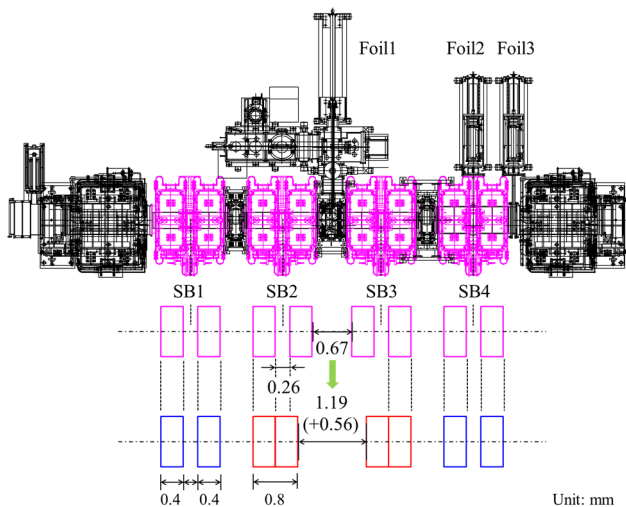


Figure 3: Consideration of the structural changes of the SB magnet.

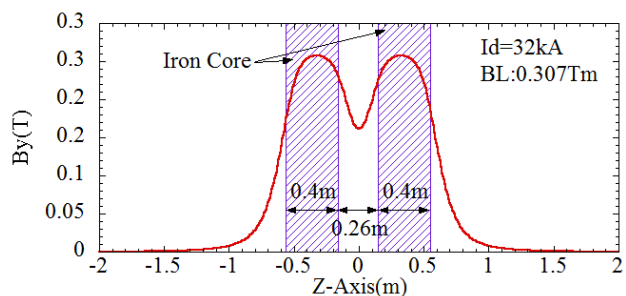


Figure 4: Analysis result of the current SB magnet design.

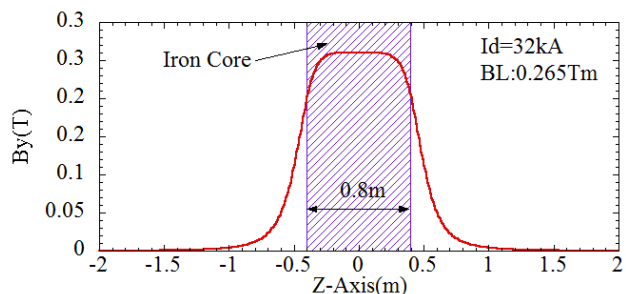


Figure 5: Analysis result of the new SB magnet design.

3.2 水平シフトバンク電源

SB電磁石4台を直列に接続し電源1台で励磁する現

システムから、組み合わせをSB1とSB4、SB2とSB3とする鉄心が同形の電磁石2台を直列接続し、各々を電源1台で励磁する新システムへの変更を検討する。新システムは新たに電源1台が必要になるが、電源を製作する費用と設置場所の確保は困難である。そこで、現在のSB電源の2分化で対応することを検討する。SB電源は、2kA/12kVの出力性能を持つ電源盤(バンク)を16台並列接続し、定格32kA/12kVの電源1台として運用している。この構成を2分化し、バンクを8台並列に接続した16kA/12kVの定格電源とすることで2台の電源になる(Figure 6 参照)。

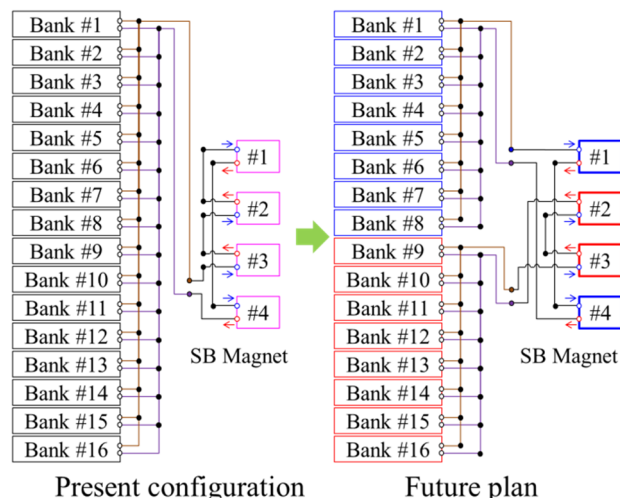


Figure 6: Bank configuration of the shift bump power supply (Left: Present, Right: Future).

新システムにおいてもビーム変位量を変更しない場合、半減した定格電流分を補い必要な磁場値を確保するため、電磁石コイルのターン数を2倍にする4ターン化を検討する。SB電磁石4台を直列した現システムと2台を直列にする新システムでの電磁石1台当たりの励磁電流、励磁場、コイルターン数、負荷インダクタンスを、それぞれ I_0 、 I 、 B_0 、 B 、 N_0 、 N 、 L_0 、 L とした場合、各関係式は(1)、(2)、(3)式となる。

$$B_0 = \mu_0 \frac{N_0 I_0}{g}, B = \mu_0 \frac{NI}{g} \quad (1)$$

$$I = \frac{I_0}{2}, B = B_0 \text{ より } N = 2N_0 \quad (2)$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2}{g} = \frac{\mu_0 (2N_0)^2}{g} \text{ より } L = 4L_0 \quad (3)$$

この時、現システムと新システムで必要な出力電圧 V_0 と V は(4)、(5)式となる。

$$V_0 = (L_0 + L_0 + L_0 + L_0) \cdot \frac{dI_0}{dt} = 4L_0 \frac{dI_0}{dt} \quad (4)$$

$$V = (L + L) \cdot \frac{dI}{dt} = 8L_0 \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{I_0}{2} \right) = 4L_0 \frac{dI_0}{dt} \quad (5)$$

電磁石 1 台当たりのインダクタンスは 4 倍になるが、電磁石の直列数が半分になり、また、バンプ波形の立ち上がり立ち下りの時間は現仕様を維持するため、励磁波形の di/dt の傾きも半分になる。その結果、新システムで必要となる出力電圧は現システムと同じになり、既存バンクの出力能力を変更改造せず使用できる。ただし、電源 2 台体制にてバンプ波形を形成するため、電源 2 台間の励磁タイミングを 0.1 マイクロ秒レベルで調整する制御システムが必要になる。

現システムの利用運転時の励磁電流値は 22.1 kA である。新システムに換算すると 11.1 kA になる。しかし、新システムでは鉄心位置を 0.13 m 移動することを検討しており、鉄心間距離が 1.62 m から 0.13 m 縮めた分、ビーム偏向角度を大きくする必要がある。従って、換算値は 12.1 kA となる。更に、鉄心形状を変更する SB 電磁石 2 と 3 については、積分磁場の減少分約 15 %を補うため 13.9 kA が必要になる。新システムの定格電流 16 kA の約 87 %で利用運転を行うため、電源容量的に問題は無い。しかし、ビーム調整や大強度試験で必要とするビーム変位量を算出すること、鉄心のコア形状とターン数の変更による磁場分布や渦電流損への影響を評価することが今後の課題である。そして、新システムで必要となる最大励磁電流値を確認する。

4. まとめ

入射バンプシステムの電源は、181 MeV 入射のビーム試験で得た知見を基に、400 MeV 入射対応に変更する時に、SB 電源と PB 電源各々に要求される特性と用途に合わせた電源回路システムを採用した。これに対し電磁石は、電磁力耐力、発熱温度、耐振性などの基本構造設計は 400 MeV 入射の仕様を考慮して設計した。そのため、変更や改造も無く現在も継続して利用している。しかし、181 MeV 入射の 7 年間に亘る運転ではトラブルは発生しなかったが、400 MeV 入射の運用を開始してから、水平シフトバンプ電磁石のコイルサポートボルトの脱落や導入バーの冷却水配管からの漏水が発生してしまった。故障発生後の調査で、当時の検討が不十分であったと思わざるを得ない改善の余地が確認された。今後 SB 電磁石の 4 台は全て、コイルのターン数を 2 倍にした新しい電磁石とし、SB2 と SB3 については、遮蔽体を追加するスペースを確保するために鉄心形状を変更する設計検討を行う。トラブルで得た経験と知識を生かし、故障リスクを低減する設計に努めたい。

また、SB 電源の 2 分化に対応する電力線ケーブル用中継端子台の構造や、電磁石の 4 直列接続から 2 直列接続となる取り合い用導入バーの構造に関する検討も必要である。特に、電磁石との取り合いについては、今後、入射部が高放射線場になることを想定し、耐放射線性に優れたバスダクトを開発し電力線ケーブルに代えて使用することも検討する。

PB 電源で採用しているチョップ方式の電源は、任意波形の形成を可能とする優れた機能を持つが、スイッチングに起因したノイズの周辺環境への影響が問題となる。IGBT ゲートパルスの位相制御システムを改造し、コモン

モードノイズの低減を目的とした多重化回路の対称化切り替え試験や、高多重化制御により高周波化したスイッチング回路による電流リプル低減効果の確認試験を計画している。

謝辞

水平ペイントバンプ電源の電流値変動の問題解決にご協力くださいました日立製作所の皆様、新水平シフトバンプ電源の開発にご協力くださいましたニチコン草津株式会社の皆様に深く感謝致します。また、入射バンプシステムの将来計画に関して、様々なご指導を頂きました入江吉郎氏とサハ・ブラナブ氏に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/index.html>
- [2] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC 加速器の現状”, in these proceedings, FSPO028.
- [3] K. Yamamoto *et al.*, “J-PARC 3 GeV シンクロトロンでの大強度運転の状況”, Proceedings of PASJ2015, FAP031.
- [4] 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.
- [5] T. Takayanagi *et al.*, “Upgrade Design of the Bump System in the J-PARC 3-GeV RCS”, Proceedings of IPAC2011, TEPO028.
- [6] 山本風海 他 “J-PARC 3GeV シンクロトロンでの 1MW 出力の達成”, 高エネルギーニュース, 第 34 巻 1 号, pp.19-28 (2015).
- [7] K. Horino *et al.*, “J-PARC RCS 水平シフトバンプ電磁石の現状報告”, Proceedings of PASJ2015, THP074.
- [8] K. Horino *et al.*, “J-PARC RCS 水平シフトバンプ電磁石の現状”, in these proceedings, MOP112.
- [9] S. Kato *et al.*, “J-PARC RCS におけるペイント入射用電磁石電源の高精度出力調整”, Proceedings of PASJ2015, THP075.
- [10] T. Ueno *et al.*, “J-PARC RCS ペイントバンプ電源の現状報告”, in these proceedings, MOP116.
- [11] M. Yoshimoto *et al.*, “J-PARC RCS 入射部の放射化と残留線量測定”, Proceedings of PASJ2015, THP011.
- [12] 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).
- [13] T. Takayanagi *et al.*, “NEW INJECTION BUMP POWER SUPPLY OF THE J-PARC RCS”, Proceedings of IPAC2015, WEPMA058.
- [14] H. Hotchi, “Commissioning the 400 MeV Linac at J-PARC and High Intensity Operation of the J-PARC RCS”, Proceedings of IPAC2014, TUXA01 (2014).
- [15] T. Ueno *et al.*, “J-PARC RCS 水平ペイントバンプ電源の現状”, Proceedings of PASJ2014, SUP058.
- [16] K. Horino *et al.*, “J-PARC RCS 新水平シフトバンプ電源の温度問題の報告”, Proceedings of PASJ2014, SUP060.
- [17] 内藤伸吾 他 “充電制御装置および充電装置”, 特願 2015-044764.
- [18] 高柳智弘 他 “高精度大電流パルス励磁電源の開発”, 電気学会, 電学論 D, 127 巻 8 号 (2007).
- [19] 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, pp.1366-1369.