

MW 級ビームパワーに向けた J-PARC 主リング主電磁石電源の増強 UPGRADING MAGNET POWER SUPPLIES OF J-PARC MAIN RING TOWARD MW-CLASS BEAM POWER

森田裕一^{#, A, B)}, 吉井正人^{A, B)}, 三浦一喜^{A)}, Tan Yulian^{A)}, 小野礼人^{A)}, 吉成柁^{C)}, 佐川隆^{D)}
Yuichi Morita^{#, A, B)}, Masahito Yoshii^{A, B)}, Kazuki Miura^{A)}, Yulian Tan^{A)}, Ayato Ono^{A)},
Masaki Yoshinari^{C)}, Ryu Sagawa^{D)}
^{A)} KEK
^{B)} SOKENDAI
^{C)} NAT Corporation
^{D)} Universal Engineering

Abstract

The Hyper-Kamiokande experiment will use a proton beam of 1.3 MW to elucidate the CP violation of neutrinos. In this project, the main magnet power supplies in the J-PARC main ring are required to operate with the short cycle-time of less than or equal to 1.20 s. The output voltage of DC/DC converters and the input power of AC/DC converters of bending magnet power supplies (BMPSs) reach the limits with the conventional pattern generation method. To address this issue, a new method of the pattern generation was proposed. Furthermore, the capacitances of the capacitor banks in the BMPSs are planned to be increased for the purpose of mitigating the input powers. In this report, the result of the circuit simulation for the BMPS that demonstrates the feasibility of the high-repetition-rate operation is described.

1. はじめに

ニュートリノの CP 対称性の破れの検証を目的としてハイパーカミオカンデの建設が進められている。実験に利用するニュートリノビームは J-PARC 主リングから供給される 1.3 MW の陽子ビームを用いて生成される[1]。

J-PARC 主リングではビーム増強のための改造が行われている。RF 陽極電源の増強により、粒子数を 2.4×10^{14} ppp から 3.2×10^{14} ppp へ増加させる[2]。それと並行して、ビーム取り出しの繰り返し周期を 1.36 s から 1.20 s 以下へ短縮する。これらにより、ビームパワーを現状の 830 kW から 1 MW を超えるビームへと増強する。

高繰返し化実現のためには主電磁石電源の改造及び調整が不可欠である。繰り返しが早くなると出力電圧、受電パワーが増大する。コンデンサバンク(C-BANK)の増強とパターン生成方法の改造によってこれらに対応する。回路シミュレーションを基に、高繰返しのための主電磁石電源のアップグレードについて検討してきた。

本報告では、ハイパーカミオカンデのためのビーム増強における、J-PARC 主リング主電磁石電源の増強計画を紹介する。

2. 主電磁石電源

偏向電磁石電源(BMPS)は偏向電磁石(BM)16 台を励磁する電源であり、主電磁石電源の中で出力電力が最大である。全 6 台の電源により主リングの 96 台の BM を励磁する。BMPS の仕様および回路図をそれぞれ Table 1 と Fig. 1 に示す。

Table 1: Specifications of BMPS

Load	1.5 H, 750 mΩ
Output current	1600 A
Output voltage	6000 V
Capacitance/C-BANK	480 mF
Capacitor voltage	Maximum 1700 V

BMPS は高繰返し化により引き起こされる大きな出力電圧および系統の電力変動抑制を可能とするように設計されている[3]。大きな出力電圧(最大 6 kV)を出力するため、3.3 kV IGBT を用いたフルブリッジ DC/DC コンバータを 6 直列にしている。系統の電力変動を抑えるために C-BANK によるエネルギー貯蔵方式を採用している。各 DC/DC コンバータに 480 mF の C-BANK を接続している。Figure 1 に示すように 2 台の DC/DC コンバータは AC/DC コンバータを通して系統と接続しているが、4 台の DC/DC コンバータは系統につながっていない。この方式により AC/DC コンバータ及び高圧の変圧器が不要となるため、大幅に省スペース化できる(フローティングコンデンサ方式[4])。

Figure 1 に示した通り、1 電源当り 6 台の C-BANK がある。C-BANK 2 台ずつを 1 台の海上コンテナ内に収めて屋外ヤードに設置している。C-BANK 1 台の回路図を Fig. 2 に示す。C-BANK 1 台は 96 台の 5 mF 乾式フィルムコンデンサから成り、静電容量は計 480 mF である。コンデンサ 4 台当たり 1 本のヒューズを割り当てる。各コンデンサには 4 並列 0.2 Ω 抵抗器(0.05 Ω 相当)が直列に接続される。コンデンサ 4 台(20 mF)、ヒューズ 1 本、抵抗器 16 本で構成される構造をコンデンサユニットと呼ぶ。

[#] yuichi.morita@kek.jp

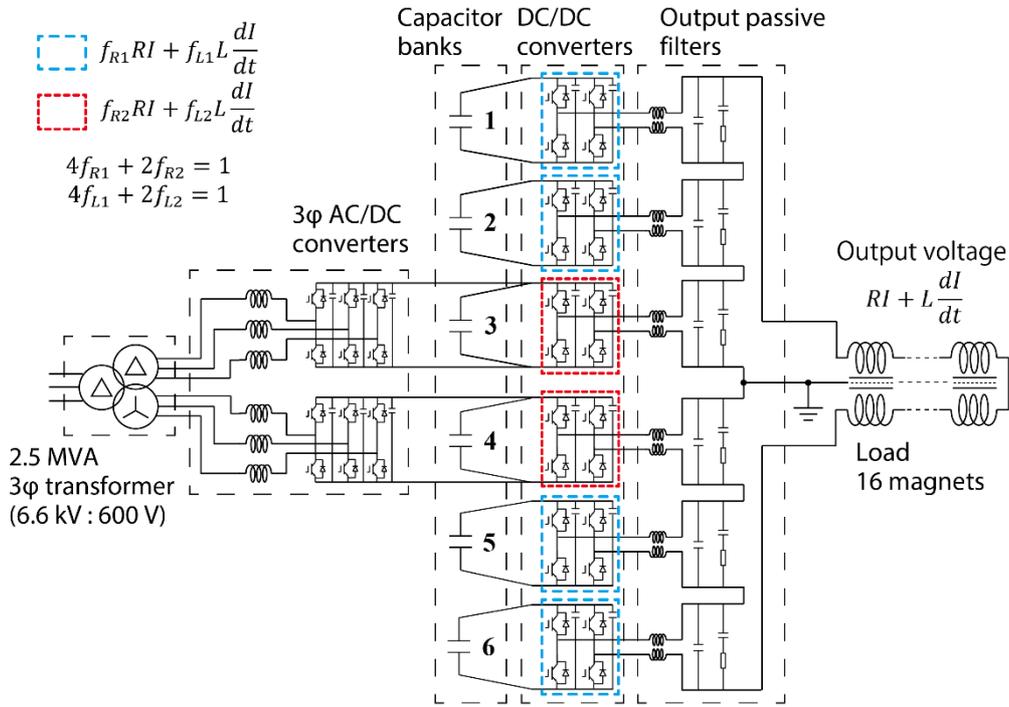


Figure 1: Schematic of BMPS.

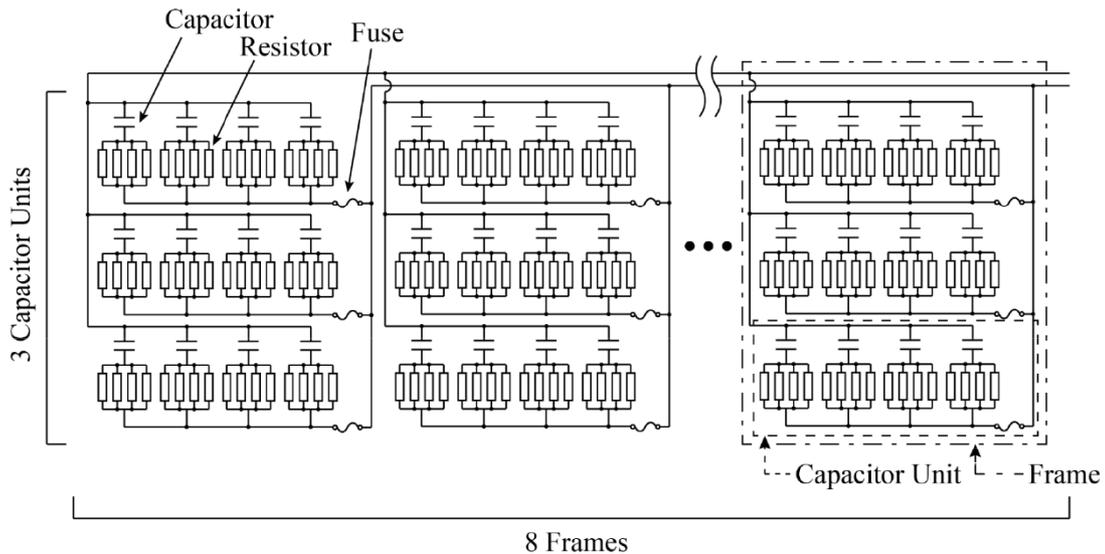


Figure 2: Schematic of C-BANK.

コンデンサユニット3台を1つの架台に収める。8台の架台が1つのC-BANKを構成する。コンデンサ充電電圧は最大1700Vであり、コンデンサユニット1台の充電エネルギーは約30kJとなる[5]。

3. 出力電流・電圧パターン

3.1 現行のパターン生成方法

フローティングDC/DCコンバータ1, 2, 5, 6と系統に接続されたDC/DCコンバータ3, 4とで異なる分担比で電圧を出力している。負荷の総抵抗を R 、総インダクタンスを L とすると、電源の出力電圧 V_{out} は

$$V_{out} = RI + L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

となる。このうち、フローティングDC/DCコンバータ1台あたりが負担する出力電圧 V_{ref} は

$$V_{ref} = f_{R1}RI + f_{L1}L \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

としている。この電圧をフィードフォワード出力する。フローティングDC/DCコンバータの回生時には、C-BANK充電電圧がちょうど初期値となるように戻らなければならない。回生時の(2)式第1項及び第2項に適当な係数かけることにより充電電圧が初期値となるように操作している[6]。DC/DCコンバータ3, 4は出力電流をフィードバック制御

している。よって、3, 4それぞれの出力電圧 V_{out3} , V_{out4} は

$$V_{out3} = V_{out4} = f_{R2}RI + f_{L2}L \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

となるように制御される。ここで、

$$4f_{R1} + 2f_{R2} = 1 \quad (4)$$

$$4f_{L1} + 2f_{L2} = 1 \quad (5)$$

である。DC/DC コンバータ 3, 4 の C-BANK のエネルギーも磁石の励磁に使う。そのため、AC/DC コンバータ 3, 4 によって C-BANK3, 4 の充電電圧をフィードバック制御する。任意の時間 t における C-BANK の充電電圧 $V_{DC}(t)$ の値は、まず、0.14 s かけて初期値 1650 V から 1700 V まで昇圧した後、エネルギー保存則

$$\frac{1}{2}f_{L2}LI^2(t) - \frac{1}{2}f_{L2}LI_{FB}^2 = \frac{1}{2}CV_{FB}^2 - \frac{1}{2}CV_{DC}^2(t) \quad (6)$$

に従ったパターンとする。ここで $I(t)$ は時間 t における出力電流、 L は負荷のインダクタンス、 C は C-BANK1 台の静電容量、 I_{FB} , I_{FT} はそれぞれフラットボトム時、フラットトップ時の出力電流、 V_{FB} , V_{FT} はそれぞれフラットボトム時、フラットトップ時の C-BANK 充電電圧である。 $V_{DC}(t)$ が最小値をとった後、1650 V まで昇圧する際の充電電圧波形は直線(ただし、両端の 0.1 s は2次関数によるスムーズング期間)としている。

BMPS の出力電流パターンはビームの運動量に比例した磁場を生成するように決められる。陽子ビームは主リングに 3 GeV のエネルギーで入射し、30 GeV まで加速されて実験施設へ取り出される。利用運転に用いている出力電流パターン I_{out} を Fig. 3 に示す。時間構造(単位は秒)は、(フラットボトム、加速、フラットトップ、減磁、バッファ)=(0.14, 0.65, 0, 0.5, 0.07)である。加速期間の 0.65 s 及び減磁期間の 0.5 s はそれぞれ前後のスムーズング時間 0.1 s ずつを含んでいる。上述の方法により生成されたパターンを用いてシミュレーションした結果と通電した結果は Fig. 3 に示す通り良く一致している。

3.2 高繰返し化のためのパターン生成方法

現行のパターン生成方法を用いて 1.20 s 以下の周期のパターンを生成すると、減磁時のフローティング DC/DC コンバータの出力電圧の増大が大きい。これはフローティング C-BANK の充電電圧を短時間のうちに初期値まで充電しなければならず、そのためには負の大きな出力電圧が必要となるからである。これを抑えるには、DC/DC コンバータ 1, 2, 5, 6 に求められる回生量を減らせばよく、そのためには、加速時において 3, 4 の duty を大きくして、1, 2, 5, 6 の duty を小さくすればよい。しかしながら、そうすることによって DC/DC コンバータ 3, 4 の加速時出力電圧及び AC/DC コンバータ 3, 4 の受電電流 I_{ac3} , I_{ac4} が増大してしまう。各 DC/DC コンバータの出力電圧、AC/DC コンバータの受電電流、C-BANK の充電電圧最小値に余裕をもったパターン生成を考える上で、次の条件を要求することとした。

- DC/DC コンバータの duty 80 % 以下
- C-BANK 電圧 1200 V 以上
- 受電電流ピーク値 ± 1400 A 以内

先述のように加速時に DC/DC コンバータ 1, 2, 5, 6 の分担が大きいと、回生時に負荷からエネルギーを回収するのに大きな出力電圧を要し、duty 80 % を超えてしまう。そのため、加速時は DC/DC コンバータ 3, 4 が duty 80 %

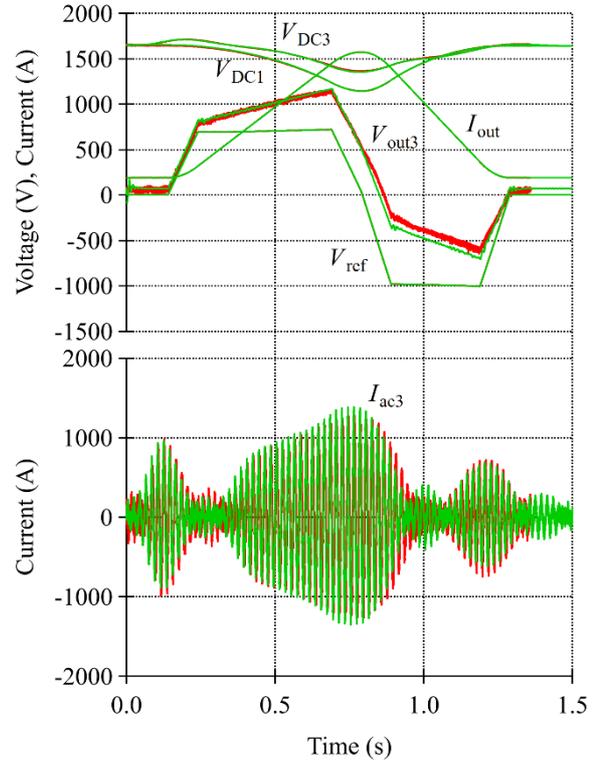


Figure 3: The measurement and the simulation results of the pattern operation with the 1.36s cycle in the BMPS. The red lines and the green lines represent the measurement and the simulation, respectively.

を保つように分担比を調整して V_{ref} , $V_{out3,4}$ を決める。さらに、減磁時の出力電圧を抑制するためには、減磁開始から直ちに回生を始めたい。そのため、フラットトップ直前のスムーズング期間で(2)式の第1項を直線的にゼロまで減少させ、フラットトップから V_{ref} が直ちに負となるようにする。フラットトップ以降は(2)式の第1項に係数 R_c を掛けた

$$V_{ref} = R_c f_{R1}RI + f_{L1}L \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

を用いる。フラットトップ直後のスムーズング期間において(7)式第1項を直線的に回復させ、その後の減磁期間で再び直線的にゼロまで減少させる。減磁終わりのスムーズング期間では元の充電電圧に戻るよう(7)式第1項及び第2項に適当な係数をかけることにより調整する。 R_c の値は回生時の DC/DC コンバータ 1, 2, 5, 6 の duty が 80 % を保つように決めた。シミュレーションの結果を Fig. 4 に示す。先の3条件を満たすパターンが生成できている。

高繰返し化によってパターン波形が急峻となるため、出力電流の追従誤差の悪化が懸念される。これに対しては従来の学習制御を適用することにより現状レベルまで抑制できると考えている。

4. コンデンサバンク増強

パターン生成法の変更に加えて、C-BANK の静電容量を増強して、フラットトップ時の AC/DC コンバータ 3, 4

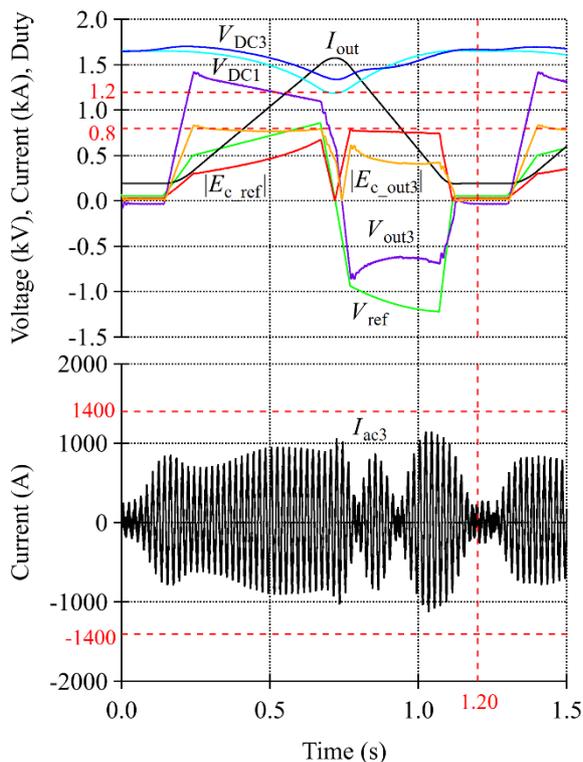


Figure 4: The simulation result of the pattern operation with the cycle of less than 1.20 s in the BMPS. E_{c_ref} and E_{c_out3} represent the duties of the floating DC/DC converter and the DC/DC converter 3, respectively.

の受電電流ピーク値を緩和する。第1章で紹介したように、C-BANK1台は 24 ユニットからなり、480 mF の静電容量をもつ。BMPS 全6台に対して、C-BANK3と4にそれぞれ3ユニット(60 mF)追加して 540 mF とする。追加するコンデンサユニットは、より高い位置(架台の上部とコンテナ天井の隙間)に据え付ける必要があるため、高所へユニットを持ち上げられるリフターを新たに用意する。第3章のシミュレーションは当該増強後の静電容量値で行っている。

5. スケジュール

2028 年度にビームパワーを 1.3 MW とするため、主リングの周期の短縮と粒子数の増加を段階的に進めている。2025 年 5 月時点で 1.36 s 周期 830 kW のビームをニュートリノ実験施設へ供給している。2024 年度末から 2025 年夏に 1.28 s 周期で運転するための主電磁石電源の調整を行っている。秋からは加速時間のパターンを変えずに減磁時間のみを短縮した運転となる。そして、損失ビーム量を減らして、約 900 kW での利用運転を目指

す。また、2025 年度中にコンデンサユニットを 36 台購入する。

更なる周期短縮に向けては、2026 年夏に BMPS 3 台それぞれに対してコンデンサユニット 6 台、計 18 台を追加し、電源の調整を行う。それとともに、建設当初から使用している主電磁石電源の調整を進める。

2027 年夏に残りの BMPS 3 台それぞれに対してコンデンサユニット 6 台、計 18 台を追加し、電源の調整を行う。建設当初から使用している主電磁石電源についてもやはり通電試験を行って 1.20 s 以下の周期のパターン通電を確立する。

2028 年秋から主リングの周期を 1.20 s へ短縮し、さらに粒子数を増やして 1.3 MW のビーム供給を目指す。

6. まとめ

ハイパーカミオカンデへ向けた 1.3 MW ビーム増強において、主電磁石電源のパターンを更に高繰返し化する。出力電圧、受電電流の増大が問題となるが、BMPS について、パターン生成方法の変更及び C-BANK の増強によって、尤度を持った運転が可能であることをシミュレーションで確認できた。C-BANK をもつ他の電源(QFN,QDN)については C-BANK の増強はせず、パターン生成方法の変更のみで運転が可能なることをシミュレーションで確認している。残りの全ての主電磁石電源については、出力電圧が最も大きくなる減磁時において、1.20 s 以下の繰返しに求められる~0.4 s の減磁パターンの通電試験を行って通電可能であることを確かめている。

参考文献

- [1] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC main ring”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 033G01 (2021).
- [2] K. Seiya *et al.*, “J-PARC 主リングにおける陽極電流の計算と加速空洞の駆動高周波位相角の最適化”, Proc. 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug. 2025, TH0708, this meeting.
- [3] T. Shimogawa *et al.*, “New power supply of main magnets for J-PARC main ring”, Proc. IPAC2019, Melbourne, May 2019, pp. 1266-1268.
- [4] T. Shimogawa *et al.*, “Development of charging control for floating capacitor method”, Proc. the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018), Nagaoka, Aug. 2018, pp. 508-511.
- [5] Y. Morita *et al.*, “Capacitor bank of power supply for J-PARC MR main magnets”, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 901 (2018) pp. 156-163. doi:10.1016/j.nima.2018.06.002.
- [6] T. Shimogawa *et al.*, “Test Demonstration of Magnet Power Supply with Floating Capacitor Method”, JPS Conf. Proc. 8, doi:10.7566/JPSCP.8.01 2021.