

## J-PARC 主リング直線部四重極電磁石のための NPC チョップパの開発

### DEVELOPMENT OF NPC CHOPPER FOR QUADRUPOLE MAGNETS AT STRAIGHT SECTION IN J-PARC MR

森田裕一<sup>#, A)</sup>, 栗本佳典<sup>A)</sup>, 佐川隆<sup>B)</sup>, 下川哲司<sup>A)</sup>, 三浦一喜<sup>A)</sup>, Younghoon Jang<sup>C)</sup>

Yuichi Morita<sup>#, A)</sup>, Yoshinori Kurimoto<sup>A)</sup>, Ryu Sagawa<sup>B)</sup>, Tetsushi Shimogawa<sup>A)</sup>, Kazuki Miura<sup>A)</sup>, Younghoon Jang<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> Universal Engineering

<sup>C)</sup> Dawonsys

#### Abstract

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) aims at achieving a MW-class proton accelerator facility. One of the promising solutions for increasing the beam power is to fasten the repetition rate of Main Ring (MR) from current rating of 2.5 sec to 1 sec. However, in this scheme, the increase of output voltage is a serious concern for the main magnets. At the same time, current ripple reduction is required in order to increase the beam quality for the hadron experiments. New power supplies (PSs) for the main magnets at the straight section which have potentials to solve these problems are necessary. We have been developing a neutral-point-clamped (NPC) chopper as one of the elements for the new PS. This paper introduces the design of the NPC chopper, and also reports test results.

#### 1. はじめに

J-PARC の主リングでは、ニュートリノビームラインへのビームパワーを増強するために運転周期を現状の 2.5 秒から 1 秒へ速める。この計画では高繰返し化に伴う主電磁石電源の出力電圧の増加が問題となる。さらに、ハドロンホールへのビームの性能向上のために出力電流の低リップル化が求められている。我々は主電磁石用電源を新たに開発することで、これらの課題を解決する。その中でも、直線部四重極電磁石 (Ins. Q) 用電源の構成要素に NPC チョップパを採用する予定である。後述するように NPC チョップパは高い出力電圧、出力電流リップル抑制に有利である。また、新たに開発する電源はバンクコンデンサを備えた電圧型電源とするのでシステムの 50 Hz 交流に起因する出力電流リップルを抑制できる。本報告では J-PARC 主リングのための Ins. Q 用 NPC チョップパ試作機的设计・製作及び通電試験の結果を紹介する。アーク部電磁石のための新電源の開発状況については文献<sup>[1]</sup>に書かれている。

#### 2. 直線部四重極電磁石用電源

新しく開発する Ins. Q 用電源はバンクコンデンサを備えた電圧型電源である。全体構成のブロック図を Figure 1 に示す。

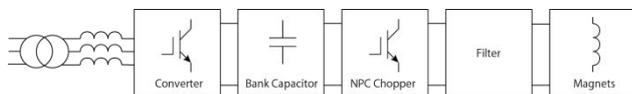


Figure 1: Block diagram of new power supply for quadrupole magnets at straight section.

<sup>#</sup> yuichi.morita@kek.jp

スイッチングコンバータ、バンクコンデンサ、チョップパ、フィルタで構成されている。電磁石は 7 種類あり、それぞれ 1 台の電源で励磁する計画である。各電磁石のパラメータ及び定格パターン電流を流したときに電磁石に印加される最大電圧を Table 1 に示す。

Table 1: Parameters of Magnets at Straight Section

Magnet Family	Number of Magnets	Load Resistance per PS [ $m\Omega$ ]	Load Inductance per PS [H]	Maximum Output Voltage [kV]
QFR	9	490	0.57	1.7
QFS	6	360	0.30	0.6
QFT	6	360	0.32	0.8
QFP	6	360	0.20	0.6
QDR	6	410	0.44	1.3
QDS	6	400	0.35	1.1
QDT	6	420	0.37	1.3

#### 3. NPC チョップパ

##### 3.1 特長

チョップパは Table 1 に示した最大出力電圧を出力できなければならない。さらにフィルタで出力電流リップルを抑制するために数 kHz のスイッチング周波数が必要である。これらの要求からスイッチング素子には IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用する。広く使用されているフルブリッジ型チョップパでは、バンクコンデンサの充電電圧がそのまま 1 つの IGBT に印加されるのに対して、NPC チョップパ

では半分の電圧に抑えられるので高い出力電圧を実現できる。さらに、中点をグラウンドに固定することにより出力電流のコモンモードノイズを抑制できるので出力電流リップル抑制に有利である<sup>[2]</sup>。NPC チョップパの外観を Figure 2 に示す。Ins. Q 用チョップパでは QFR 以外は NPC チョップパユニット 1 直列のみの構成であるが、当該試作チョップパは複数のユニットを直列にすることが可能となっており、さらに高い出力電圧が必要なアプリケーションにも対応できる。

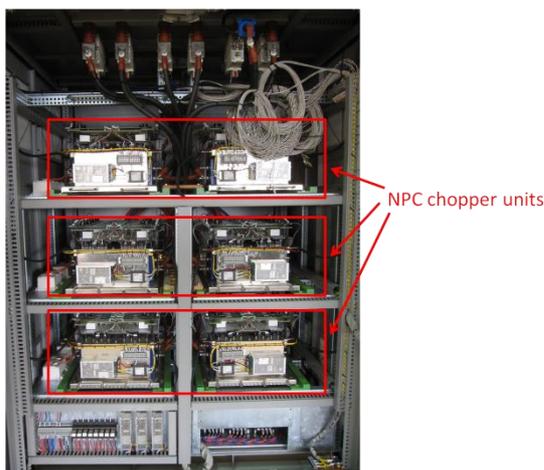


Figure 2: Front view of NPC chopper.

### 3.2 NPC チョップパユニット

NPC チョップパユニット 1 台当たりの仕様を Table 2 に示す。

Table 2: Specifications of NPC Chopper Unit

Rated Output Voltage	1500 V
Rated Output Current	400 A (Flat Top)
Switching Frequency	5 kHz

NPC チョップパユニットのレグの写真及び NPC チョップパユニット 1 台の回路図をそれぞれ Figure 3、Figure 4 に示す。使用したスイッチング素子は三菱電機社の IGBT、CM1000DUC-34NF である。ゲートドライブ基板には Concept 社の 2BB0535T Base Board と 2SC0535T driver の組合せを採用している。Figure 4 において赤丸が付けられている素子には IGBT のゲートエミッタ間を短絡してフリーホイールダイオードの機能だけを割り当てている。力行、還流、回生時の電流の経路をそれぞれ Figure 4 に示している。このように IGBT を 2 並列にすることで、IGBT 1 台当たりには流れるピーク電流を定格コレクタ電流 1000 A の約 20 % に抑え、IGBT の寿命を充分なものとする。また、チョップパ内の各要素は配線のインダクタンス低減を目的として積層バスバーで接続されている。



Figure 3: NPC chopper leg.

### 3.3 IGBT 寿命計算

定格運転中のヒートシンク温度を以下のように計算した。NPC チョップパユニットの出力電流指令値を Figure 5 に示す。Figure 6 は 1 レグ内の IGBT チップ及びダイオードチップの配置とヒートシンク内の冷却水経路である。Figure 4 の S1~4、D1~6 について回

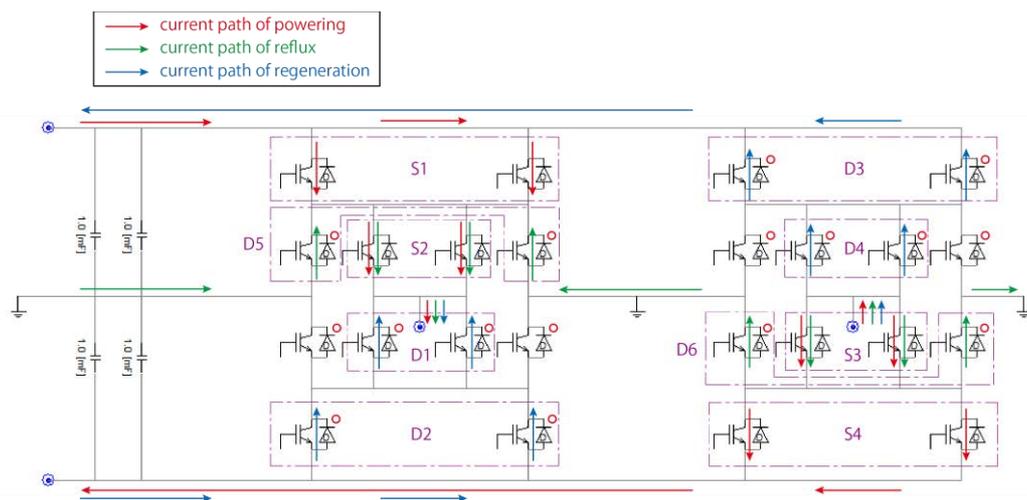


Figure 4: Circuit diagram of NPC chopper unit.

路シミュレーションにより1サイクル当たりの発熱を計算すると、Figure 7 のようになる。1チップ当たりのピーク損失を Figure 8 に示すモデルに適用して有限要素法による温度計算を行った。定常状態でのヒートシンク温度の最大値は56.1°Cとなった。

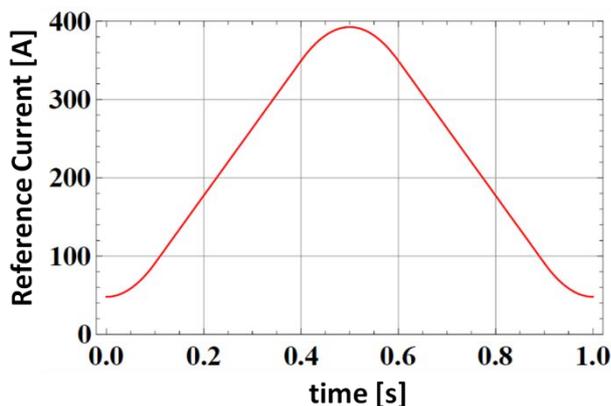


Figure 5: Reference current of NPC chopper unit.

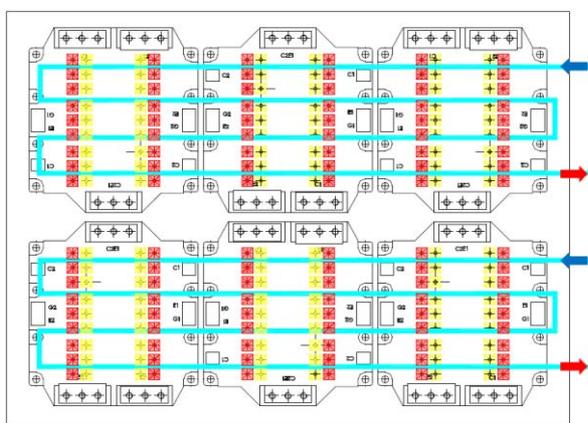


Figure 6: Location of IGBT chips, diode chips, and water paths. The red chips indicate the IGBTs. The yellow chips indicate the diodes.

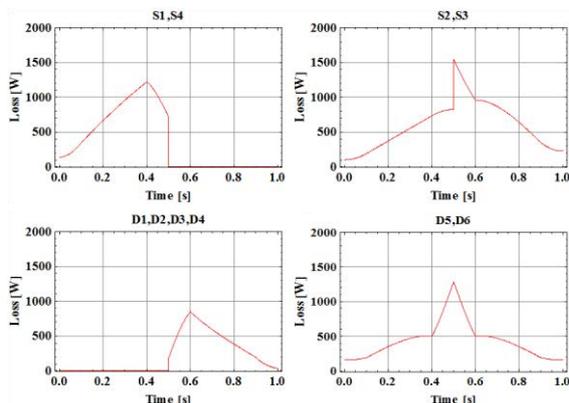


Figure 7: Losses of IGBTs and diodes.

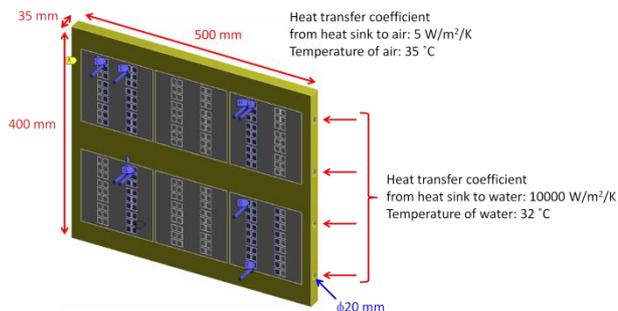


Figure 8: Heat sink model of finite element thermal calculation. The material of the heat sink is aluminum.

要求される IGBT の寿命は  $10^8$  サイクル以上の電流パターンである。ここで、故障率が 1% に達するまでの時間を寿命と定義する。CM1000DUC-34NF のデータシートから、1 サイクル内におけるジャンクション温度の最大値と最小値の差  $\Delta T_j$  が  $\Delta T_j < 35^\circ\text{C}$  の条件を満たせば要求値以上の寿命が得られる。IGBT チップ 1 つに対してジャンクション-ヒートシンク間の過渡熱インピーダンスを Figure 9 の回路モデルで考える。電気抵抗は熱抵抗、電流は損失、電圧は温度に対応する。定電圧源には先に求めた定常状態でのヒートシンク温度の最大値  $56.1^\circ\text{C}$  を適用する。

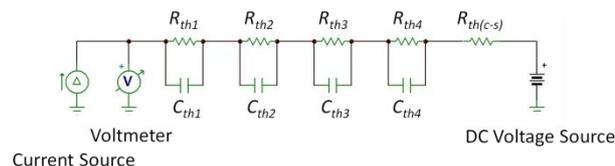


Figure 9: Thermal equivalent network.

ジャンクション-ケース間の過渡熱インピーダンス  $Z_{th(j-c)}(t)$  は

$$Z_{th(j-c)}(t) = R_{th(j-c)} \sum_i R_i \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

と表される。ここで、

$$\tau_i = R_i C_i \quad (2)$$

$$R_{thi} \equiv R_{th(j-c)} R_i \quad (3)$$

$$C_{thi} \equiv \frac{C_i}{R_{th(j-c)}} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

である。 $R_{th(j-c)}$  は IGBT チップ 1 つ当たりのジャンクション-ケース間熱抵抗である。IGBT チップ 1 つ当たりのケース-ヒートシンク間の接触熱抵抗 (熱伝導性グリスを塗布した場合) を  $R_{th(c-s)}$  とする。IGBT チップ 1 つ当たりの損失を Figure 7 から求め、そのピーク値と平均値とを持つ矩形波パルスに換算し、Figure 9 の回路の電流源の出力値とする。CM1000DUC-34NF のデータシートから、 $R_i$ ,  $\tau_i$ ,  $R_{th(j-c)}$ ,  $R_{th(c-s)}$  の値を引用または導出して Figure 9 の回路をシミュレータにより計算すると、S1-4 について IGBT チップ 1 つに対するジャンクション温度は Figure 10

のようになる。よって、 $\Delta T_j < 35^\circ\text{C}$ の条件が満たされることがわかる。ジャンクション温度が使用上限の  $150^\circ\text{C}$  の 6 割程度に抑えられることもわかった。

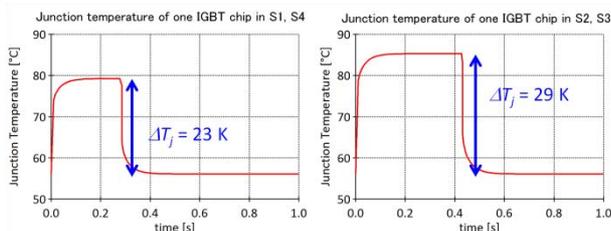
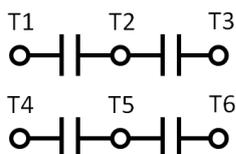


Figure 10: Temperature variation of IGBT chip in S1-4.

### 3.4 DC コンデンサ

NPC チョップユニット内の DC コンデンサは内部短絡が起こらないセルフヒーリングタイプの乾式フィルムコンデンサとする。当該コンデンサの回路図を Figure 11 に示す。6つの端子をもつコンデンサとなっている。NPC チョップユニット内では DC コンデンサを 2 台並列に接続する。NPC チョップユニットの入力電圧はサイクル毎に変動するため、電圧変動によるキャパシタンス低下に気をつけなければならない。キャパシタンスが初期値から 5% 低下するまでの時間をコンデンサ寿命と定義する。コンデンサの充放電を 60 Hz で繰り返してキャパシタンスの変化を測定した。その結果を外挿してコンデンサ寿命を求めた。これは周波数を 60 倍にした加速試験である。電極材質を適切に選ぶことで  $4.5 \times 10^8$  サイクルの寿命をもつコンデンサを開発し、NPC チョップユニットに組み込んでいる。



Capacitance: 500  $\mu\text{F}$  (between T1 and T3, T4 and T6)  
Rated Voltage: 2000 V (between T1 and T3, T4 and T6)

Figure 11: Circuit diagram of DC capacitor.

## 4. 通電試験

### 4.1 試験設備

NPC チョップユニットの通電試験のための設備の概略図を Figure 12 に示す。

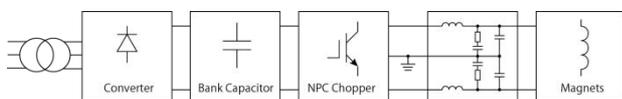


Figure 12: Schematic diagram of test facilities.

ダイオード整流器、バンクコンデンサ、NPC チョップ、フィルタの組合せで電磁石にピーク 350 A の 1 Hz 繰り返しパターン電流を流す。NPC チョップユニットの定格出力電流が 400 A なのに対して

試験では 350 A としたのは、フィルタ内のインダクタの定格電流が 350 A であるためである。NPC チョップ及びフィルタの中点は出力電流の共通モード抑制のために接地する。試験のパラメータを Table 3 に示す。フィルタの特性を Figure 13 に示す。

Table 3: Parameters of Test

Load Resistance	8.7 m $\Omega$
Load Inductance	12.9 mH
Output Current	350 A (Flat Top)
Output Voltage	$\sim \pm 10$ V
Charging Voltage	1500 V
Capacitance of Bank Capacitor	50.4 mF
Switching Frequency	5 kHz
Repetition Frequency	1 Hz

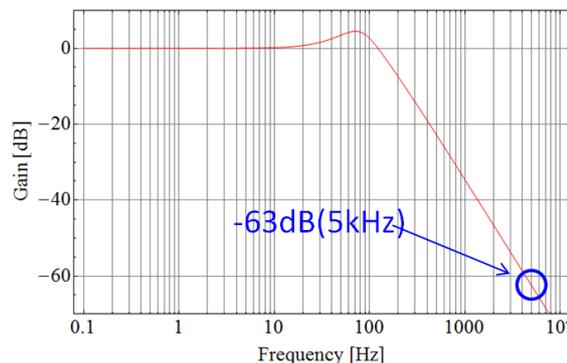


Figure 13: Bode plot of filter<sup>[3]</sup>.

### 4.2 通電試験

Table 3 の条件で繰り返し周波数 1 Hz の通電を行った。このときの出力電流指令値、出力電流、バンクコンデンサ充電電圧を Figure 14 に示す。

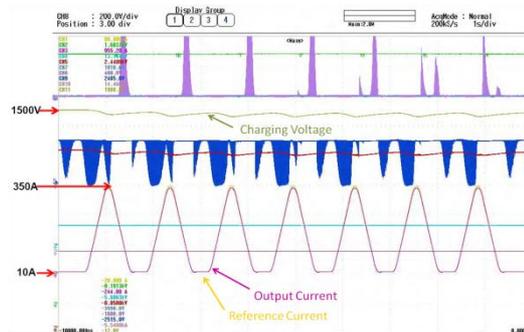


Figure 14: Reference current, output current, and charging voltage of NPC chopper in 1 Hz operation.

安定して 1 時間の連続通電ができた。3つのユニットすべてについて同様の試験を行い、同様の結果が得られた。

## 5. まとめ

J-PARC 主リングの高繰返し化及びビーム性能向上のための計画のひとつとして、直線部四重極電磁石用電源を新たに開発する。その構成要素に NPC チョップパを採用する予定である。使用する IGBT の故障率が 1 %となるまでの時間を寿命と定義し、ジャンクション温度の計算から要求値である  $10^8$  サイクル以上の寿命が得られることを確認した。チョップパ内に組み込む DC コンデンサには内部短絡しない乾式フィルムコンデンサを選ぶ。このコンデンサは  $4.5 \times 10^8$  サイクルの寿命をもつ。これらを用いて NPC チョップパを設計・製作し、ユニットごとに通電試験を行って定格充電電圧での 1 時間の連続通電が安定に行われることを確認した。

Table 2 の負荷の抵抗値、インダクタンス値に比べて当該試験の負荷の値は小さい。よって、出力電流は定格まで達しているが出力電力としては定格の  $\sim 1/100$  の試験であった。今後は文献<sup>[4]</sup>に基づいた定格電力試験を予定している。

## 参考文献

- [1] T.Shimogawa, et al., “Demonstration of Prototype Power Supply of J-PARC Main Ring Main Magnets for High Repetition Rate Operation”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 4-7, 2015.
- [2] Y.Kurimoto, et al., “Hybrid Control of Low and High Voltage Power Supplies for High Voltage and Low Ripple Magnet Power Supply”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [3] Y.Morita, et al., “Prototype Development of J-PARC Main Ring Main Magnets Power Supply for High Repetition Rate Operation”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.
- [4] Y.Kurimoto, et al., “A High Power Test Method for Pattern Magnet Power Supplies with Capacitor Banks”, Proceedings of the 2nd International Symposium on Science at J-PARC, Tsukuba, Jul. 12-16, 2014.