

キッカー電磁石用 SiC 半導体スイッチ電源

SiC-BASED SEMICONDUCTOR SWITCH POWER SUPPLY FOR KICKER MAGNETS

高柳智弘^{#, A)}, 小野礼人^{A)}, 堀野光喜^{B)}, 植野智晶^{B)}, 杉田萌^{A)}, 金正倫計^{A)}, 徳地明^{C)}, 生駒直弥^{C)},
中田恭輔^{C)}, 亀崎広明^{C)}, 隅田博之^{C)}

Tomohiro Takayanagi^{#, A)}, Ayato Ono^{A)}, Koki Horino^{B)}, Tomoaki Ueno^{B)}, Moe Sugita^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)},
Akira Tokuchi^{C)}, Naoya Ikoma^{C)}, Kyosuke Nakata^{C)}, Hiroaki Kamezaki^{C)}, Hiroyuki Sumida^{C)}

^{A)} Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)/Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)} Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)/NAT corporation (NAT)

^{C)} Pulsed Power Japan laboratory ltd. (PPJ)

Abstract

The kicker system used for injection and extraction of accelerated beams requires a pulsed power supply with high speed and high repetition rate of short pulses acting only on a specified bunch of beams. We have developed a semiconductor switch power supply with a rated output of 40 kV/2 kA using SiC-MOSFETs, one of the next-generation power semiconductors. Then, we reconfigured this semiconductor switch power supply into two units with 20 kV/2 kA output and conducted energization tests using an actual kicker electromagnet. It was also demonstrated with magnetic field waveforms that the flat-top correction function of this power supply can suppress ringing in the waveform by less than half. This achievement enables the reduction of the kick angle difference caused by ringing, which is a factor in beam loss. In the presentation, specifications, test equipment, and evaluation results of the developed SiC semiconductor switch power supply will be reported.

1. はじめに

加速したビームの入射や取り出しに、高速のパルス磁場でビーム軌道を偏向するキッカーシステム[1, 2]が用いられている。キッカーシステムには、指定したビームのバンチのみに作用する短パルスの高速性と、高繰り返し動作性に優れたパルス電源が必要である。Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)[3]では、次世代パワー半導体の一つである SiC-MOSFET を用いて、サイクロトロンスイッチ電源に代わるサステナブルな半導体スイッチ電源の開発に取り組んでいる。2022 年には、定格出力の電圧が 40 kV、電流が 2 kA の半導体スイッチ電源ユニットを開発し、模擬負荷を用いた定格通電試験を行い、要求仕様を満足することを確認した[4]。

本研究開発では、この半導体スイッチ電源ユニットを、電圧 20 kV、電流 2 kA を出力する 2 台の電源ユニットに組み替え、実機相当の双子型電源として実負荷の電磁石に励磁し、磁場波形を用いたフラットトップ調整方法を検証した。実負荷の電磁石には、予備機として保管してある J-PARC の Rapid-Cycling Synchrotron(RCS)[3]用のキッカー電磁石を使用した。ただし、キッカー電磁石は、高電圧印加時の放電損傷を防止するため、真空容器に入れ、かつ、高真空状態で通電を行う必要がある。そこで、本研究開発の目的である通電中の磁場波形を確認するために、塩ビパイプを真空容器に通し、パイプの内側を大気状態にして磁場測定用プローブを使用できる環境を整えた。この試験装置を使用は、励磁波形と磁場波形の同時測定を可能にした。

開発した半導体スイッチ電源は、矩形波を形成する主回路基板と、フラットトップ部の垂れ(ドループ)を平坦に補償する補正回路基板の 2 種類で構成されている。

キッカー電磁石の磁場波形を即時に評価し、主回路基板と補正回路基板の出力タイミングと充電電圧値を調整することにより、磁場波形に生じたリングングを半分以下に抑制できることを実証した。この成果により、リングングに起因して生じたビームのバンチ軌道の蹴り角差を低減することができる。開発した SiC 半導体スイッチ電源の仕様、試験装置、及び、評価結果について報告する。

2. SiC 半導体スイッチ電源

キッカー電源用として、次世代半導体の SiC-MOSFET を放射対称型に配置し、誘導電圧重畳回路(LTD)[5, 6]方式を組み合わせたモジュール回路基板を開発した[4, 7-11]。回路図を Fig. 1 に示す。本モジュール基板は、パルス励磁時の矩形波を形成する主回路基板と、フラットトップ部に生じるドループを平坦に補償するための補正回路基板の 2 種類で構成される。

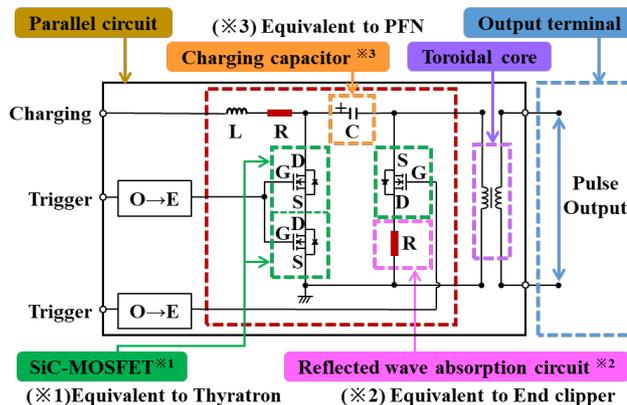


Figure 1: Circuit block diagram of the LTD.

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

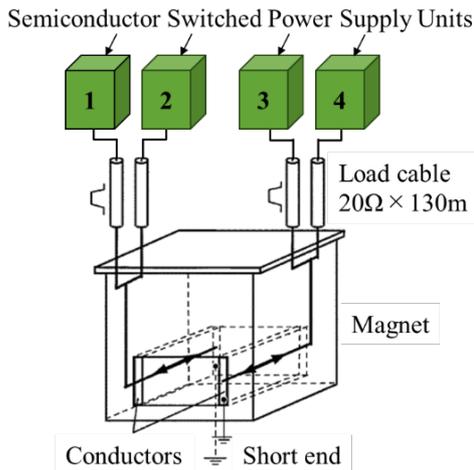


Figure 2: Configuration for RCS Kicker System.

本モジュール基板の最大の特徴は、現キッカー電源回路で構成されている大電力用高速スイッチング素子のサイラトロン(1193C, $e2v$)と、電気エネルギーを蓄積し矩形の短パルスの形成に用いる同軸ケーブルの PFN 回路、そして、反射波を吸収するエンドクリップ回路の機能を 1 枚のモジュール基板で実装していることである。また、LTD 回路方式は、トロイダルコアを用いて電源回路の一次側と二次側の電位を分離できるため、本モジュール基板の一次側回路は接地電位での設計が可能となる。高電圧出力回路の設計において、制御回路部の高耐圧絶縁設計が不要となり、原理的に出力電圧値は無限となる。そのため、高電圧出力が要求されるキッカー電源には、この LTD 回路方式を採用した。一方で、出力電流値は並列回路数で決まるため、モジュール基板用絶縁基板の製作可能なサイズに制限される。

RCS キッカー電磁石用の半導体スイッチ電源としては、32 枚の主回路基板(1250 kV/2 kA)と 20 枚の補正回路基板(100 V/2 kA)の直列多段接続により、出力電圧 40 kV、出力電流 2 kA、パルス幅 1.2 μ s、繰り返し 25 Hz、フラットトップ平坦度 $\pm 0.5\%$ 以下が要求仕様となる。

3. 試験装置

3.1 電源ユニットの構成

開発中の半導体スイッチ電源を、J-PARC の RCS で使用している既存のキッカー電源と置き換える場合のシステム構成案を Fig. 2 に示す。本半導体スイッチ電源は、外部回路の同軸ケーブル型 PFN を使用しないため、出力回路全体のインピーダンスが半分になり、必要な出力電圧も 80 kV の半分 40 kV で仕様を満足することができる。半導体デバイスには CREE 製(1.7 kV/0.25 kA)の SiC-MOSFET を採用した。絶縁基板のサイズ制限から 8 並列回路構成となり、モジュール基板当たり 2 kA が限界となる。RCS キッカーシステムには 4 kA が必要であるため、本仕様の半導体スイッチ電源ユニットを 2 並列で使用する。双子型構成とするためには、出力定格の電圧が 40 kV、電流が 2 kA の電源ユニットが 4 台必要となる。

また、キッカー電磁石の磁場波形を確認するためには、励磁用電源ユニットの双子型構成が必要となる。そこで、開発した電源ユニット(40 kV/2 kA)を、出力電圧 20 kV、

出力電流 2 kA の 2 台に組み換え、双子型を構成した。この 2 台の電源ユニットを用いて、キッカー電磁石への通電を行った。試験装置の写真を Fig. 3 に示す。

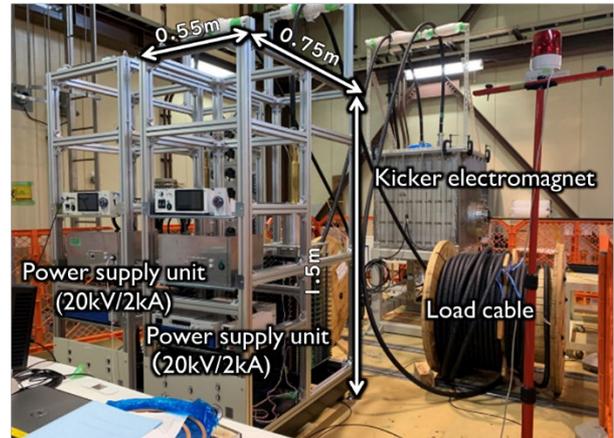


Figure 3: Picture of test stand.

3.2 磁場測定装置

高電圧に印加されるキッカー電磁石は、放電による故障を防止するため真空中で使用される。そのため、通電中のキッカー電磁石の磁場を測定するためには、真空容器内に磁場測定用プローブを事前に固定して置く、又は、大気中で放電が発生しない本キッカー電磁石の限界値である 10 kV 以下の電圧でのみ通電をする必要がある。そこで、塩ビパイプを用いた真空ダクトを製作し、真空容器内に配置したキッカー電磁石のギャップを通して固定した。これにより、塩ビパイプのダクト内側は大気、キッカー電磁石本体は真空中となる空間を隔てた状態を作ることができる。この試験装置を用いて、高電圧印加時のキッカー電磁石の磁場測定を行った。磁場測定用プローブと塩ビパイプ製ダクトの写真を Fig. 4 に示す。

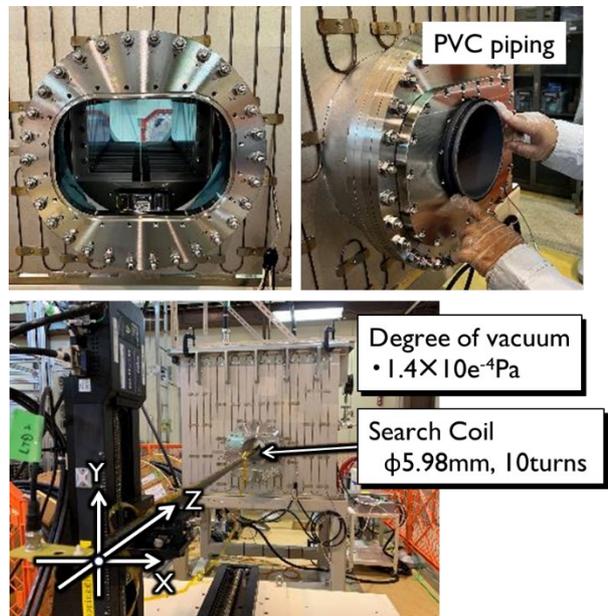


Figure 4: Magnetic field measurement device and vacuum vessel made of PVC.

3.3 真空度

塩ビパイプの真空ダクトは、外径 $\phi 165$ mm、長さ 1220 mm で、ガス放出面積は約 0.63 m² とある。真空容器とのフランジ取り付け部分には、O-ring を使用している。塩ビパイプの排気後 5 時間のガス放出速度は $3.2E-4$ Pa·m/s (株式会社オーム社の『新版 真空ハンドブック』より) であるため、排気速度が 1000 リットル/s のポンプの到達予想圧力は $2E-4$ Pa となる。実際の真空度は $1.4E-4$ Pa になり、40 kV 出力試験が可能となった。

4. 測定結果

4.1 磁場波形

半導体スイッチ電源の出力電流とキッカー電磁石の磁場波形の測定結果を Fig. 5 に示す。出力電流は 2 ユニットのうち片方の電流値を示す。磁場波形は、直径 5.98 mm のボビンに $\phi 0.1$ mm のエナメル線を 10 ターン巻いたサーチコイルを使用した。波形はサーチコイルの両端電圧を示しており、キッカー電磁石の中心位置 ($X=Y=Z=0$) での測定結果を示す。半導体スイッチ電源の主回路と補正回路の充電電圧は、それぞれ 300 V と 10 V で、出力電圧に換算すると 4.5 kV になる。出力電流の波形に見られる二つ目の波は、反射波を示している。

サーチコイルで測定した微分波形を積分したキッカー電磁石の磁場波形を Fig. 6 に示す。フラットトップ最初の部分に、電流波形には見られ成り大きなリングングが発生しているのを確認できる。これがビーム軌道変位の原因となっている。このリングングの形状は、過去に測定された磁場波形と同様な傾向を示している[1]。

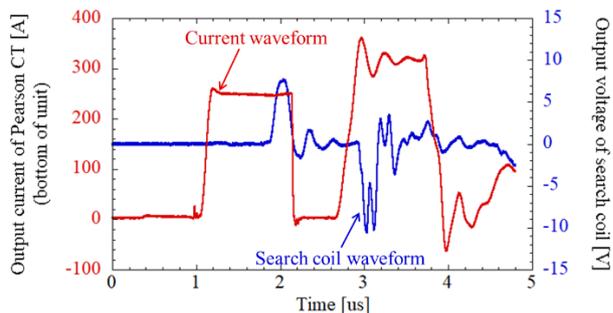


Figure 5: Measurement results of the output current of the power supply and the magnetic field waveform of kicker electromagnet.

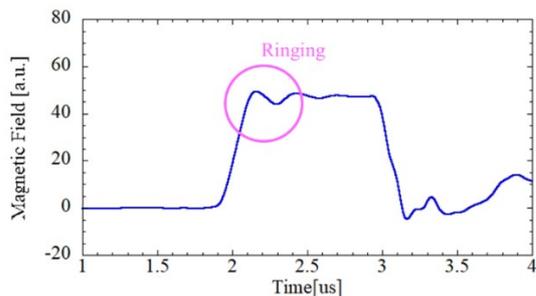


Figure 6: Magnetic field waveform of kicker electromagnet.

4.2 リンギングのビーム軌道への影響

キッカー電磁石の磁場波形に生じるリングングは、蹴り出されたビームのバンチ軌道に影響を与える。現在の RCS キッカーシステムでは、積分した磁場が 8 台全体で平坦状態になるように、キッカー電源を各々異なる出力タイミングで出力し、磁場波形のリングングの凹と凸の部分が重なりあうように運用をしている。本原理の説明として、測定波形の一例を Fig. 7 に示す。上図 a は 2 台のうち 1 台を 114 ns ずらした波形を、下図 b はずらした後の 2 台の磁場波形の凹凸が重なり平坦となる波形を示している。このように、電源の出力タイミングを変え、磁場波形をずらすことでリングングの凹凸の影響を無くしている。フラットトップの平坦部分にビームのバンチを重ねる [1, 12]。本図は、リングングの様子を明確にするため、参照図に色付けを施してある。

RCS からビームを取り出し、MLF にビームを輸送するライン(3NBT)には出射セプタム電磁石がある。そのセプタム電磁石直後の四極電磁石 (QX1) 付近のビーム位置

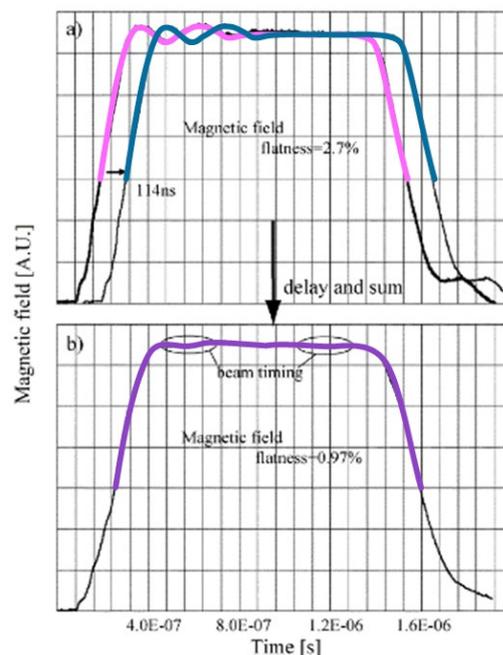


Figure 7: Magnetic field waveforms of two kicker magnets and ringing suppression method.

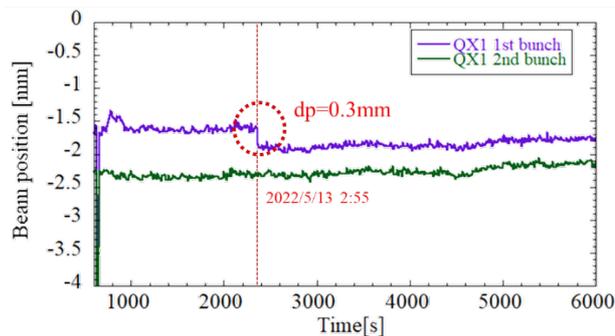


Figure 8: Beam position on the 3NBT line of two beam bunches extraction from the RCS.

の測定結果を Fig. 8 に示す。この図は、RCS から取り出された 2 バンチビームの 1st バンチと 2nd バンチの軌道の水平方向の位置を示している。それぞれ、 -1.62 mm と -2.34 mm の位置にいたが、あるタイミングで 1st バンチだけが 0.3 mm ズレ、 -1.9 mm の位置になったことを確認できる。このズレが発生したタイミングで、キッカー電源の 5 号機 No.1 で 5 ns のディレイが発生していたことが、常時記録している波形データから確認できた。今回のビーム地の測定結果は、2 バンチの水平方向の位置ズレが小さくなった例を示しているが、キッカー電磁石の磁場波形のリンギングと電源の出力タイミングのズレがビーム軌道に影響を与えることを示した結果である。

4.3 リンギングの抑制

半導体スイッチ電源が備える出力波形のドゥループ補正機能を利用し、キッカー電磁石の磁場波形に生じるリンギングの抑制可否を評価した。Figure 9 は、補正基板を使わない調整前(主回路のみ)の磁場波形(青色)と、補正機能を使用した磁場波形(桃色)を示す。補正の条件は、補正回路基板の充電電圧を 30 V とし、出力タイミングを主回路基板から 50 ns 遅らせた。この結果、補正前の磁場波形のリンギングの波の大きさを 100% とした場合に、 35% に低減することができた。また、16 枚の主回路基板のうち 6 枚を 50 ns 遅らせて出力したところ、 16% にまで低減することができた。検証結果を Fig. 10 に示す。しかし、この条件の場合、リンギングは抑制できたが、立ち上がり時間(Rise time: 10%-90%)が 160 ns から 240 ns になり、遅れが生じた。

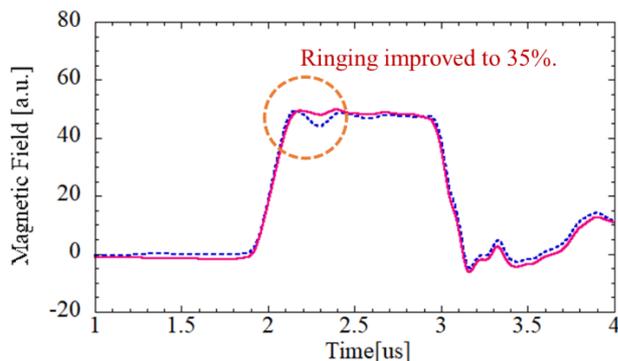


Figure 9: Ringing reduction result with correction board.

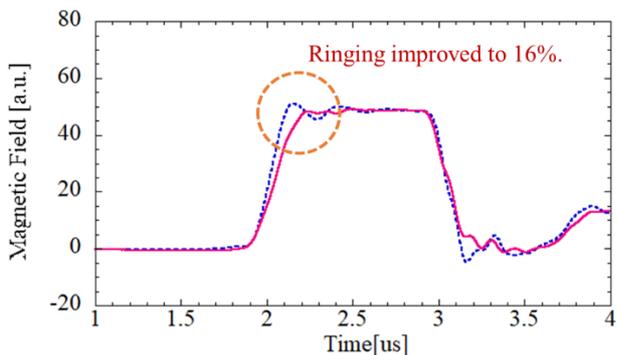


Figure 10: Ringing reduction results when the main board and correction board are used together.

4.4 出力波形特性

磁場波形のリンギング抑制と高速な立ち上がり時間(要求仕様 250 ns 以下)を両立させるため、磁場波形を形成する電流波形(半導体スイッチ電源の充電電圧依存)の特性を評価した。試験は、主回路基板の充電電圧値に対する磁場波形の①Delay と②Rise time の 2 条件で行った。

測定結果を Fig. 11 と、Fig. 12(a)と(b)にそれぞれ示す。この結果は、充電電圧を高くすると、Delay は短く、Rise time は速くなることを示している。本半導体スイッチ電源の実際の運用では、主に 30 kV から 35 kV の範囲内で使用することが想定されている。そのため、リンギングの抑制と立ち上がり時間の改善は十分に期待できる。今後、磁場波形のリンギング抑制の最適解を評価する。

リンギングのビーム軌道への影響対策は、キッカー電源の出力タイミングのジッタ・ドリフトの低減も効果が期待できる。そのため、リンギング抑制の評価試験と並行して、半導体スイッチ電源用出力トリガのジッタとドリフトを 5 ns 以下(目標値 1 ns)にする制御回路を開発している。本研究開発の成果は、本学会のプロシーディングス(隅田博之氏(PPJ):FRP16『LTD 用低ジッタトリガパルス発生器の開発』)を参照する。

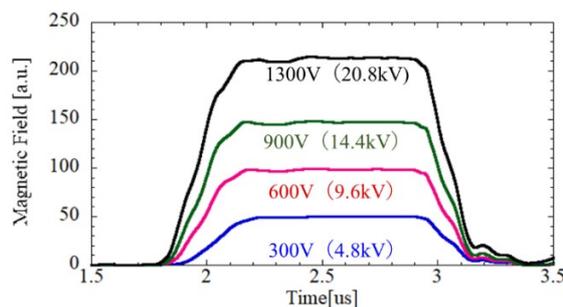


Figure 11: Relationship between charging voltage values of the main circuit board and magnetic field waveforms.

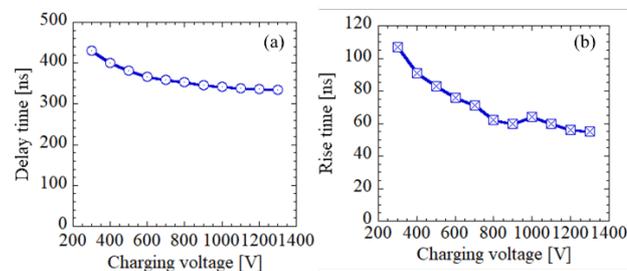


Figure 12: Measurement result of the delay(a) and Measurement result of the rise time(b).

5. バイパス回路の追加

J-PARC などのユーザー利用者が実験を行う施設では、想定外の故障が発生すると、実験スケジュールに大きな影響を与えてしまう。そのため、故障からの復旧時間の短縮が強く求められる。本半導体スイッチ電源は、故障率が高いスイッチ回路の部分に信頼性が高い半導体デバイスを採用しているため、突発的な故障リスクは小さくなることを期待できる。しかし、故障リスクがゼロではな

い。また、本半導体スイッチ電源は、電力伝送部に同軸構造の長尺の金属筒(中心導体)を使用しており、放射対称型モジュール基板の中心部を通して(Fig. 13 参照)。故障が発生した基板を交換する場合には、この中心導体を引き抜く作業が必要になる。そして、中心導体の引き抜きは、複数人の作業員と時間を要する作業となる。そこで、故障した基板は交換せず、スルーして電流出力ができるように、モジュール基板にバイパス回路を追加した。故障時は、このバイパス回路を有効にする作業のみで運転再開が可能となり、復旧時間を短縮できる。

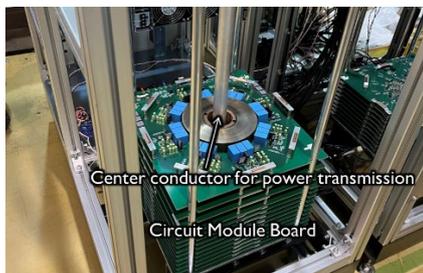


Figure 13: Center conductor for power transmission.

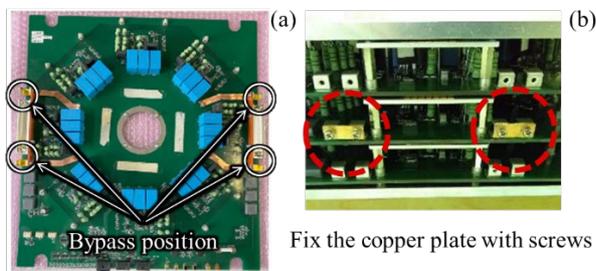


Figure 14: Bypass circuit and plate.

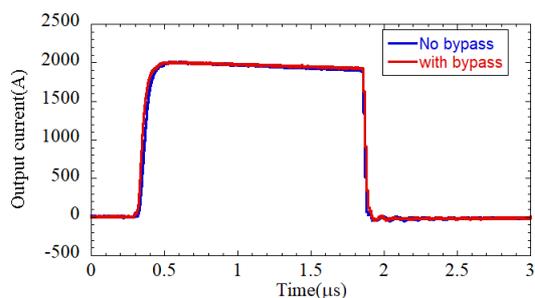


Figure 15: Evaluation results of the bypass circuit.

バイパス回路を追加したモジュール基板のプロトタイプ機を 1 枚製作し、バイパスの実施・未実施の条件で、出力電流波形への影響の有無を評価した。プロトタイプ機のバイパス回路は、幅 10 mm、厚さ 1 mm の銅板を使用した。Figure 14 を参照する。モジュール基板の外側に端子部を設け、銅板を接続することで回路をバイパスできるようにした。評価試験は、3 枚のモジュール基板を直列に接続し、中央の 1 枚にプロトタイプ機を使用した。バイパスの実施・未実施で出力電流波形を測定した結果を Fig. 15 に示す。試験の結果、波形に有意な差は見られなかった。また、定格の 2 kA を 25 Hz で 8 時間通電した

後のバイパス部の温度上昇分は約 6 °C だった。以上の結果より、バイパス回路の有効性を確認することができた。

6. まとめ

次世代半導体の SiC-MOSFET を用いてキッカー電磁石用半導体スイッチ電源を開発した。電圧が 20 kV、電流が 2 kA の 2 台の電源ユニットを使い、実機同様の双子型電源を構成し、キッカー電磁石を用いた実負荷試験を実施した。そして、出力電流波形と真空中のキッカー電磁石の磁場波形を同時に測定し、半導体スイッチ電源の波形補正機能を用いてリングングを 16 % に低減できることを実証した。また、モジュール基板が故障したときに備え、分解・交換の作業をせず、短時間で運転再開を可能とするバイパス回路をモジュール基板に取り入れた。以上の試験により、半導体スイッチ電源を実機として利用するために必要な開発要素の対し、多くの知見を得ることができた。また、本半導体スイッチ電源は、サステナビリティを有しており、持続可能な開発目標として、7 番、9 番、12 番、13 番に相当する省エネ効果と設備の縮小が期待できることを確認した。

参考文献

- [1] J. Kamiya *et al.*, “J-PARC 3GeV 出射用キッカー電磁石”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul.30-Aug.1, 2003, 2CB2.
- [2] J. Kamiya *et al.*, “Magnetic Field Measurement of the Extraction Kicker Magnet in J-PARC RCS”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.16, No. 2, June 2006, 1362-1365.
- [3] T. Naito *et al.*, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, August 1-3, Sendai, Japan, 2006, FP17.
- [3] <https://j-parc.jp/c/index.html>
- [4] T. Takayanagi *et al.*, “J-PARC における加速器用パルス電源の半導体化”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 242-246.
- [5] W. Jiang *et al.*, “パワー半導体を利用した高繰り返しパルス電源の進展”, J. Plasma Fusion Res. Vol.94, No.4(2018), pp. 191-211.
- [6] W. Jiang *et al.*, “Pulsed Power Generation by Solid-State LTD”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.42, No.11, Nov. 2014, pp. 3603-3608.
- [7] T. Takayanagi *et al.*, “J-PARC キッカー用 LTD 半導体スイッチ電源”, Proceedings of PASJ2021, MOOB06.
- [8] T. Takayanagi *et al.*, “RCSキッカー用半導体スイッチ電源”, Proceedings of PASJ2020, WEOO04.
- [9] T. Takayanagi *et al.*, “パワー半導体を用いたキッカー用パルス電源とイグナイトロン代替スイッチの開発”, Proceedings of PASJ2019, THOH02.
- [10] T. Takayanagi *et al.*, “SiC-MOSFET を用いた半導体スイッチ電源の開発”, Proceedings of PASJ2018, FROM07.
- [11] T. Takayanagi *et al.*, “SiC-MOSFET の LTD 回路を用いた RCS キッカー用新電源の開発”, Proceedings of PASJ2017, TUOM01.
- [12] H. Harada *et al.*, “Beam-based compensation of extracted-beam displacement caused by field ringing of pulsed kicker magnets in the 3 GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 093G01.