

SiC-MOSFET を用いた半導体スイッチ電源の開発 DEVELOPMENT OF SOLID-STATE SWITCH FOR POWER SUPPLY WITH SiC-MOSFET

高柳智弘[#], 植野智晶, 堀野光喜, 山本風海, 金正倫計

Tomohiro Takayanagi[#], Tomoaki Ueno, Koki Horino, Kazami Yamamoto, Michikazu Kinsho
J-PARC/JAEA

Abstract

We are developing the switch power supply using SiC-MOSFETs of the next generation power semiconductor. The SiC-MOSFETs enable thyatron alternate switches and power-saving small switching power supplies. However, products that satisfy the specification of the thyatron (80 kV / 4 kA) adopted for the J-PARC 3 GeV-RCS kicker power supply with one module have not been developed. Therefore, it is necessary to construct a circuit in which power semiconductors are multiplexed in parallel and series. In addition, the high-speed short pulse waveform required for the kicker power supply is designed with consideration of the circuit impedance such as inductance and stray capacitance separately from the performance improvement of the power semiconductor. Therefore, a circular radially symmetric circuit was constructed in which power semiconductors were concentrically arranged and the impedance of all parallel circuits could be made equal. In addition, we report the results both the preliminary test of semiconductor new kicker power supply which adopted LTD circuit and the evaluating the loss by substituting Si-IGBT and SiC-MOSFET with the same switching circuit.

1. はじめに

現在主流の Si 製のパワー半導体より高耐圧、低損失、且つ、高周波動作に優れた次世代パワー半導体の SiC-MOSFET を用いたスイッチとパルス電源の開発を進めている。半導体の SiC 化は、サイラトロン代替スイッチや省電力小型スイッチング電源の製品化を可能とする。しかし、J-PARC[1] 3GeV RCS キッカー電源[2, 3]で採用しているサイラトロンの仕様(80kV/4kA)を1モジュールで満足する製品は開発されていない。その為、パワー半導体を直並列に多重化した回路を構築する必要がある。また、キッカー電源に要求される高速短パルス波形の出力には、パワー半導体の性能向上とは別にインダクタンスや浮遊容量など回路インピーダンスを考慮した設計が重要である。そこで、パワー半導体を同心円状に配列し全並列回路のインピーダンスを同値にできる円形の放射対称型回路を構築した[4]。これにより、回路インピーダンスの差異に起因した波形歪みを抑制できた。

本稿では、SiC-MOSFET を用いた放射対称型と一般的な線形対称型でそれぞれ構築したスイッチ回路を製作し、各出力波形歪みを評価した結果、LTD 回路を採用した半導体新キッカー電源[5]の予備試験の進捗結果、更に、同じスイッチング回路を用いて、Si-IGBT と SiC-MOSFET を換装し損失を評価した結果を報告する。

2. RCS キッカー電源と半導体スイッチ

J-PARC 3GeV シンクロトロン加速器(RCS)のキッカー電源システムは、パルス波形の形成用に PFN 回路と、大電力パルス出力用高速スイッチにサイラトロンを使用している。サイラトロンは、放電管の特性上不意にミスファイアを起こす。これは、予想していないタイミングでキッカー電源の運転を止めることになり、J-PARC 施設の稼働率

を下げる要因となる。また、サイラトロンは、リザーバーやヒーターの調整を日々実施することで安定した運転を維持している[6-8]。しかも、使用時間に限りがあり、設計で 5000 時間、運用を最適化しても約 10000 時間で寿命になる。そのため、1 年から 2 年での交換が必ず必要になる。加速器施設の安定運転を維持するには、相当数の在庫を保持していなければならぬ。これらの対応には、人件費と維持費が必要であり、ランニングコストを高くする。

そこで、安定した電源の運転と加速器の運用、且つ、キッカー電源のランニングコストの低減を実現するため、安定性、信頼性、メンテナンス性(長寿命)に優れているパワー半導体を用いた電源の開発を進めている。パワー半導体として従来使用している Si-IGBT では、キッカー電源の仕様に対応できる大電力と高速性を両立した製品は今現在無い。ところが、最近急速に開発が進み製品化されている SiC 製の MOSFET パワー半導体は、Si-IGBT と比較して、高速動作、低スイッチング損失、高耐圧の特性が優れており、キッカー電源用として使用できる可能性がある。最近では、出力電圧 13 kV 仕様が登場している[9]。しかしながら、高電圧化の開発が進んではいるが、1 モジュールでキッカー電源として必要な 80 kV/ 4 kA の仕様を実現する製品は開発されていない。大電流高電圧の半導体スイッチ電源を実現するには、複数の半導体素子を使った直並列に多重化した回路の構築が必要になる。

3. 放射対称型モジュールスイッチの開発

3.1 開発目的

RCS は、入射、加速、出射を 20 ms で行い、40 ms 後に再び入射・加速・出射を繰り返す 25 Hz の運転をしている。3 GeV に加速されたビームを取り出すとき、周長約 350 m を周回するビームは、およそ 300 ns で次の

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

ビームが周回してくる。そのため、ビームを蹴り出すには、立ち上がり 250 ns 以下、フラットトップ 1.0 μ s 以上の矩形の励磁電流波形が必要になる。

このような立ち上がりが速い励磁波形を実現するには、半導体素子の性能が良いだけでは成立しない。低インピーダンス回路の構築、回路寄生成分を抑制する構造など、高速パルス波形に必要な周辺回路を構築する。

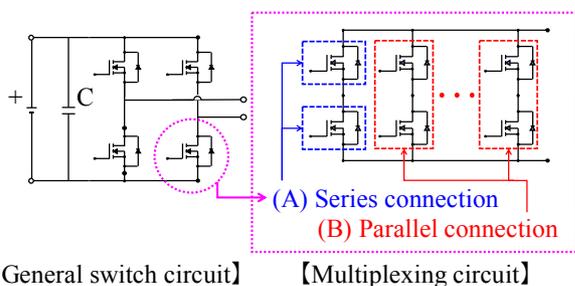


Figure 1: Conceptual diagram of a general switch circuit.

3.2 設計概要

パワー半導体の素子単体の仕様以上に大電流高電圧を出力するには、パワー半導体を複数個使って直並列に多重化した回路を構築する。一般的なスイッチ回路と多重回路の構成を Figure 1 に示す。直列の接続数を増やして高電圧化し、並列の接続数を増やして大電流化する。このとき、並列回路が増えると、電流の出力口までの伝搬距離が回路ごとに異なってしまう。これは、パワー半導体を同時に ON 操作するスイッチ回路の場合、各回路の電流伝搬時間に差が生じる原因となる。また、回路長の違いは、回路に寄生するインダクタンスや浮遊容量にも差が生じる。これらは、各回路からの合成波形となる出力電流の波形に歪みが生じる原因となる。特に、回路インダクタンス起因の波形歪は、半導体の ON 操作のタイミング調整では補正することができない。ここでは、不等長回路と呼ぶ。

そこで、パワー半導体を同心円状に配列することで、全並列回路のインピーダンスを同値にできる円形の放射対称型回路を構築した。この回路は、全並列回路において、電流伝搬の距離に差が無い。したがって、波形歪みの原因となる回路インピーダンス差を生じない。ここでは、等長回路と呼ぶ。

3.3 評価試験

並列回路を横並びにした線対称型スイッチ回路と、円配列にした放射対照型スイッチ回路の出力電流波形の測定を行い、波形形状を評価した。

基本回路を Figure 2 に示す。この回路を、並列接続し、各スイッチ回路を構築する。パワー半導体には、ROHM製の SCT3030KL(1200V/72A)を使用した。並列接続数は 8 並列とする。構築した線対称型スイッチ回路基板と放射対称型スイッチ回路基板をそれぞれ Figure 3 と Figure 4 に示す。比較のために同じにする隣接回路との距離は、線対称型スイッチ回路基板は、幅 20 mm 銅板で取り合い 15 mm になる。放射対称型スイッチ回路基板は、直径 40 mm の円周上に並べ 15.7 mm になる。取り

合いは、直径 20 mm の銅丸棒を使用する。各基板を 2 枚重ねて出力電圧を 2 倍にした試験も行う。また、線対称型スイッチ回路基板については、不等長の影響をより明確にするため、並列回路間距離を 50 mm と 300 mm にした 2 つの試験も行う。

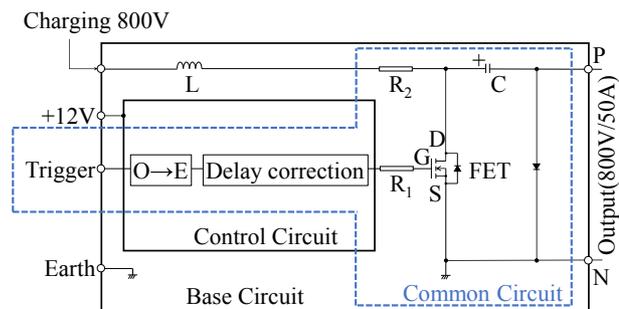


Figure 2: Block diagram of base circuit.

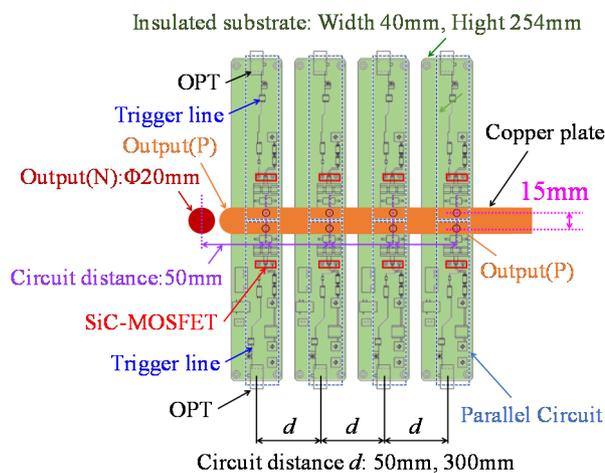


Figure 3: Schematic diagram of line-symmetrical type.

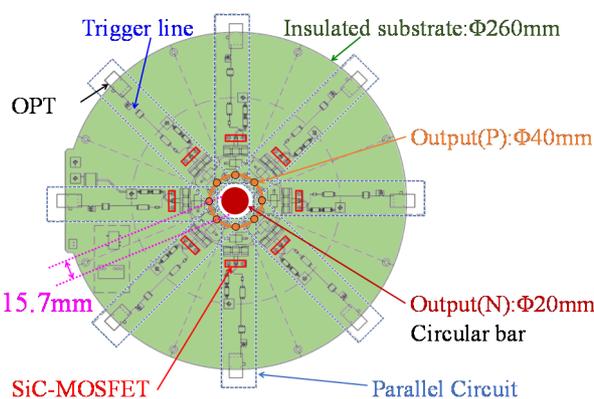


Figure 4: Schematic diagram of radially-symmetrical type base circuit.

線対称型スイッチ回路基板の距離 300 mm を 2 枚重ねた電圧を 2 倍にした試験の様子を Figure 5 に示す。放射対称型スイッチ回路基板の試験の様子を Figure 6 に示す。出力波形の測定結果のうち、基板 1 枚の 800V 試験の結果を Figure 7 に、基板 2 枚の 1600V 試験の結果を Figure 8 に示す。放射対称型スイッチ回路基板の波形形状の歪みが少なく、波形のピーク部と減衰部の部分が他の波形よりも急峻となった。また、線対称型スイッチ回路基板では、並列回路間距離の違いを比較すると、50 mm から 300 mm に広げた波形の方が歪みの程度が大きい。波形の立ち上がりの時間 T_r の 10% から 90% を評価した結果を Table 1 に示す。放射対称型スイッチ回路基板の結果が最も速い立ち上がり時間となった。

放射対称型スイッチ回路基板では、ピークと減衰の波形が急峻になり、且つ、立ち上がり時間 (T_r) が最速、そして、波形歪みが抑制されていることが確認できた。更に、放射対称型スイッチ回路については、電流の出力口が円形になる。そのため、高周波用として使用する同軸ケーブルとの取り合い構造の設計が容易になる。以上のことから、高速短パルス波形の出力において、放射対称型スイッチ回路は非常に有用であることを確認した。

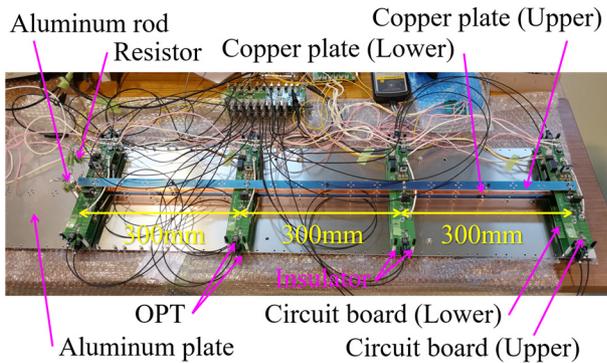


Figure 5: Test condition with a circuit distance of 300 mm and voltage doubled.

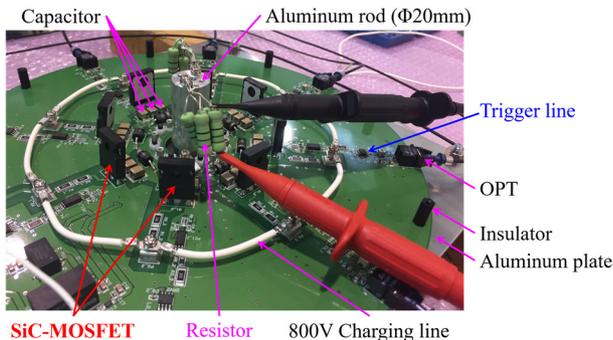


Figure 6: Test condition with radially-symmetrical type.

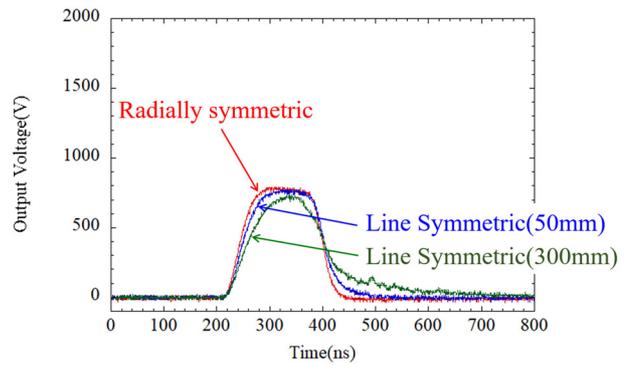


Figure 7: Measurement results of output waveforms with output voltages of 800 V.

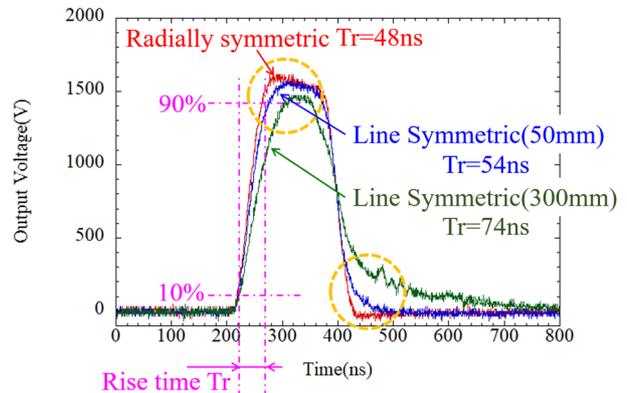


Figure 8: Measurement results of output waveforms with output voltages of 1600 V.

Table 1: Measurement Results of the Rise Time

Type	One Layer	Two Layer
Radial	48ns	45ns
Line(50mm)	54ns	52ns
Line(300mm)	74ns	70ns

4. 新キッカー電源の開発進捗

4.1 概要

LTD 回路を用いた新キッカー電源を開発している[5]。サイラトロンスイッチの代わりに SiC-MOSFET を使用し、エンドクリップの代わりに、反射波吸収回路を設けている。この抵抗回路は、3 GeV シンクロトロン加速器において、大強度ビームの周回中に生じるビーム誘起電圧を低減する。更に、PFN 回路に代わるコンデンサを設けている。これまでに、定格 4 kV の出力試験を実施した。このとき、ピーク電圧が 3.8 kV となり設定値よりも小さかった。原因を調査した結果、高速短パルス波形を起因とする回路イ

インピーダンスの影響が大きいことがわかった。対策とその効果を確認する試験を重ね、新しい主回路基板と補正回路基板を設計した。主な変更点を以下に述べる。詳細は、本加速器学会年会の虫邊陽一氏のプロシーディングス[10]を参照する。

□ 主回路基板

- プリント基板のパターン配線(電流路)を拡幅
⇒インピーダンスの低減
- 電解コンデンサをフィルムコンデンサに変更
⇒等価直列抵抗の低減

□ 補正回路基板

- 電解コンデンサをセラミックコンデンサに変更
⇒等価直列抵抗の低減

4.2 試験結果

改造の結果、ピーク電圧の低減が改善した。新旧の主回路基板と補正回路基板を積み重ね、定格 10 kV にした評価試験を実施した。試験時の様子を Figure 9 に、試験結果を Figure 10 に示す。主回路基板 13 枚(新 8 枚、旧 5 枚)と補正回路基板 11 枚(新 7 枚、旧 4 枚)を使用した。出力試験時の充電電圧は、主回路は 800 V、補正回路は 40 V とした。ただし、新補正回路基板は設計を見直し、100 V 充電も可能としている。また、定格出力時に出力電流が 2 kA となるように負荷抵抗を 5 Ω とした。試験の結果、ピーク電圧 10 kV、立ち上がり 200 ns、フラットトップ 1.5 μs を確認した。300 V の Droop は、補正回路の 40 V 充電にてフラットに補正した。立ち上がり時間とフラットトップ時間は、共に RCS キッカー電源の仕様を満足した。ドループも設計通りに補正した。以上の結果から、新キッカー電源としての主回路基板と補正回路基板の設計は終了した。本半導体スイッチ電源は PFN 回路を持たないので、出力定格は既存の半分まで済む。今後は、主回路基板を 50 枚積み上げた定格 40 kV の出力を実施し、半導体を使った新キッカー電源の完成を目指す。

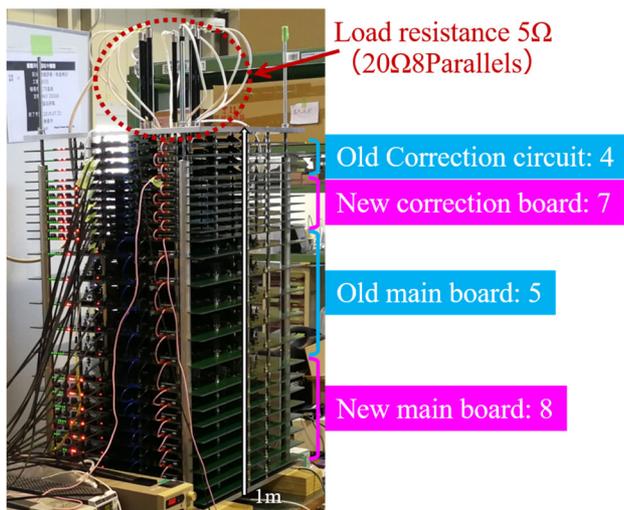


Figure 9: Situation of output voltage measurement.

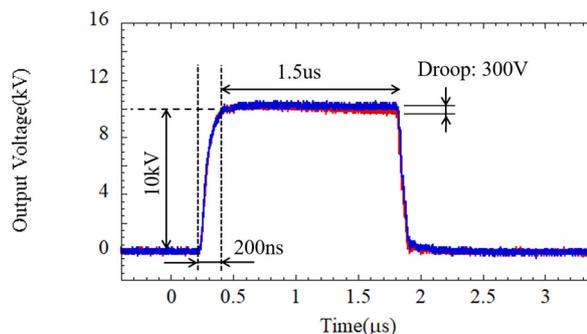


Figure 10: Measurement result of the output voltage.

5. Si-IGBT と SiC-MOSFET の比較

5.1 試験概要

既存回路の Si-IGBT 部分を SiC-MOSFET に換装し、スイッチングによる発熱温度を比較評価した。回路は、水平シフトパンプ電源用 DC 充電器[11]を使用した。定格は 300 V/45 A、スイッチング周波数は 21 kHz で、Si-IGBT は旧日本インター製の PDMB200BS12 (1200 V/200 A) を使用している。基本回路図を Figure 11 に示す。発熱温度は、半導体パッケージの部分と、その半導体を載せた冷却ファンで冷やすヒートシンクの 2 か所を測定した。出力電圧は、100 V、200 V、300 V の 3 つの条件で実施した。また、各設定電圧において、出力電流は 45 A で一定になるように、出力負荷をその都度変更した。これにより、半導体スイッチのゲート時間と幅は出力電圧値で決まるため、出力電圧依存の温度特性として評価できる。SiC-MOSFET はクリー製の CAS120M12BM2 (1200 V/193 A) を使用した。

5.2 試験結果

Si-IGBT から SiC-MOSFET に換装し、測定した温度の結果を Figure 12 に示す。ヒートシンクの部分では、25 °C から 6.5 °C まで大幅に下がった。半導体素子のパッケージ部分も 19 °C から 6.5 °C に下がった。Si-IGBT の発熱量の 35 % に相当し、大きく減少したことを示す。

ヒートシンクの発熱温度から、素子単体の損失量の評価した結果を Table 2 に示す。損失差については、出力電圧値による違いは少なく、おおよそ 300 W だった。SiC-MOSFET は、各出力電圧で温度変化がほとんどなく、更に、ヒートシンクとパッケージの温度もほぼ同じだった。これは、SiC-MOSFET 半導体からの発熱量が少ないため、本試験では換装せず回路共通部品としてヒートシンクに載った整流ダイオードによる発熱量だと考える。

Table 2: Measurement Results of the Loss

Voltage	IGBT	SiC	Loss difference
100V	341W	72W	269W
200V	387W	96W	291W
300V	416W	109W	307W

次に、SiC-MOSFET に限り、冷却ファンを停止させたときの温度を評価した。その結果、出力電圧 100 V のときに、素子単体のパッケージは 28 °C、ヒートシンクでは 47 °C になった。パッケージは素子単体の温度であるため、SiC-MOSFET の上昇温度は 28 °C ということになる。この上昇温度であれば、自然対流による冷却が可能である。しかし、これまでの SiC-MOSFET を使用した新キッカー電源の試験や、計算上の温度上昇は 2 °C 程度しかない。したがって、SiC-MOSFET の本試験で測定された温度は、整流ダイオードの発熱による分だと思われる。

以上の結果から、SiC-MOSFET の正確な温度測定は出来なかった。しかし、充電器回路をファンレス動作にできる可能は確認できた。これは、冷却水や空調などのインフラ設備を縮小し、そして、整備費用の低減が可能であることを示す。つまり、環境に優しい「Eco な加速器」を実現できることを示す。ただし、実際に既存のシステムから SiC-MOSFET に換装して運用する場合は、高周波スイッチング用として制御回路、スナバ回路、そして、整流回路に使用する素子の選定と設計を最適化する。

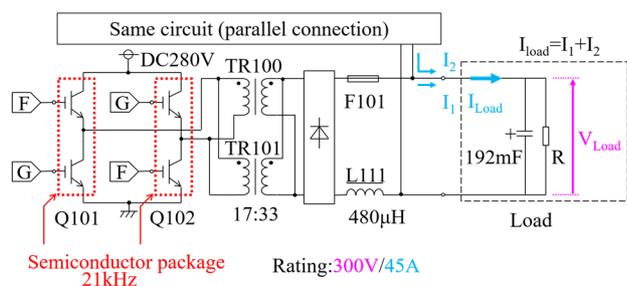


Figure 11: Basic circuit diagram.

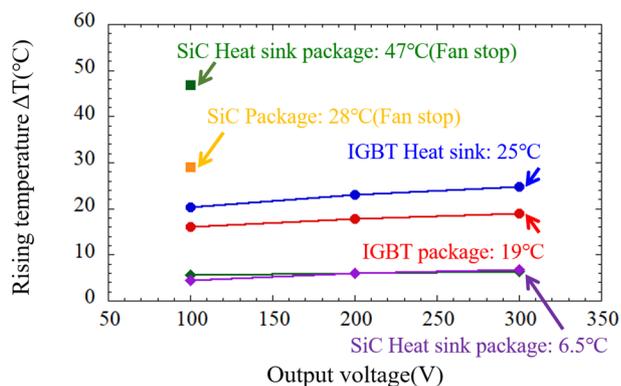


Figure 12: Measurement result of heat generation temperature of semiconductor circuit.

6. まとめ

回路基板の特性評価では、並列回路間で出力電流が伝搬する距離と時間が等しく、更に、回路寄生成分にも差が生じない放射対称型回路基板を着想した。そして、測定試験にてその性能を確認した。

新キッカー電源の開発では、ピーク電圧が定格に満

たなかった旧回路基板を見直した。そして、キッカー電源に必要な仕様の 1/4 モデルの定格 10 kV で試験し、定格通りの電圧が出力されたこと、出力波形は仕様を満足することを確認した。

Si-IGBT と SiC-MOSFET の比較評価では、既存の充電器を使い、素子を換装したときの発熱評価を実施した。そして、発熱量が 35 % に低減することを確認した。

SiC-MOSFET パワー半導体の性能を、実機を使って確認することができた。非常に魅力あるパワー半導体であり、今後の更なる開発品の登場を期待する。SiC-MOSFET パワー半導体を用いたスイッチと電源の設計製作を積極的に進めて行く。

謝辞

第 3 章「放射対称型モジュールスイッチの開発」は、JSPS 科研費 JP17K06334 の助成を受けたものです。第 4 章「新キッカー電源の開発進捗」では、開発、及び、試験にご協力くださいました株式会社パルスパワー技術研究所の皆様へ深く感謝致します。また、第 5 章「Si-IGBT と SiC-MOSFET の比較」では、試験内容の検討、及び、測定にご協力くださいました長岡技術科学大学 岡田裕司氏とニチコン草津株式会社 内藤伸吾氏に深く感謝致します。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC 加速器の現状”, in these proceedings, FSPO014.
- [2] J. Kamiya *et al.*, “THE EXTRACTION KICKER SYSTEM OF THE RCS IN J-PARC”, Proceedings of 2005 PAC, Knoxville, Tennessee, pp1009-1011.
- [3] M. Watanabe *et al.*, “JJ-PARC 3GeV RCS 入射用電磁石電源システムの運転と現状”, Proceedings of PASJ2011, MOPS055.
- [4] T. Takayanagi *et al.*, “Development of a new modular switch using a next-generation semiconductor”, Proceedings of IPAC2018, THPAL082.
- [5] 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.
- [6] T. Togashi *et al.*, “RCS キッカー電磁石電源システムのサイラトロンオペレーションの現状”, Proceedings of PASJ2010, WEPS084.
- [7] T. Togashi *et al.*, “J-PARC 3GeV RCS キッカー電磁石電源のサイラトロン運転維持管理”, Proceedings of PASJ2012, WEPS042.
- [8] T. Togashi *et al.*, “J-PARC 3GeV RCS キッカー電磁石電源の現状”, Proceedings of PASJ2016, MOP117.
- [9] A. Tokuchi *et al.*, “13kV 高電圧 SiC デバイスの加速器応用に関する研究”, in these proceedings, THP072.
- [10] Y. Mushibe *et al.*, “バイポーラ型 SiC-LTD パルス電源の改良”, in these proceedings, THP075.
- [11] T. Takayanagi *et al.*, “J-PARC RCS 入射バンプ用新水平シフトバンプ電源の開発と現状”, Proceedings of PASJ2014, SUP059.