

SiC-MOSFET を用いたキッカー電磁石用 LTD パルス電源 LTD PULSE POWER SUPPLY FOR KICKER MAGNETS USING SiC-MOSFETS

高柳智弘^{#, A)}, 小野礼人^{B)}, 堀野光喜^{C)}, 杉田萌^{A)}, 植野智晶^{C)}, 不破康裕^{A)}, 篠崎信一^{A)},
徳地明^{D)}, 生駒直弥^{D)}, 亀崎広明^{D)}, 中田恭輔^{D)}, 趙鉄陽^{D)}

Tomohiro Takayanagi^{#, A)}, Ayato Ono^{B)}, Koki Horino^{C)}, Moe Sugita^{A)}, Tomoaki Ueno^{C)}, Yasuhiro Fuwa^{A)},
Shinichi Shinozaki^{A)}, Akira Tokuchi^{D)}, Naoya Ikoma^{D)}, Hiroaki Kamezaki^{D)}, Kyosuke Nakata^{D)}, Tieyang Zhao^{D)}

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

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

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

Abstract

In accelerators, kicker magnets are used to deflect the beam orbit with a short-pulse magnetic field that acts only on a specified beam bunch. The kicker magnets require pulse power supplies with excellent fast excitation and high repetition rate characteristics, and J-PARC/JAEA has been developing semiconductor switch power supplies using SiC-MOSFETs, one of the next-generation power semiconductors, to replace conventional thyatron switch power supplies. Then, using an LTD (Linear Transformer Driver) circuit, we have developed a semiconductor switch power supply with a rated output of 40 kV/2 kA, a pulse width of 1.2 μ s, and a repetition rate of 25 Hz, which can replace the existing power supply. Pulse waveform repeatability and flat-top flatness each satisfied the required specifications of $\pm 0.2\%$ or less. Furthermore, pulse jitter of ± 1 ns or less was achieved by placing the control board in a thermostatic chamber and using an FPGA with a 1 GHz clock. In addition, stable continuous operation for more than 8 hours was also achieved. The specifications of the developed LTD pulse power supply circuit for SiC-MOSFETs, the corona-free structure of the high-voltage application section, and the effect of air ducts for cooling fans will be reported.

1. はじめに

加速器では、指定したビームバンチのみに作用する短パルス磁場を使い、ビーム軌道を偏向するキッカー電磁石が用いられている。キッカー電磁石には、高速励磁特性と高繰り返し特性に優れたパルス電源が必要である。J-PARC [1]では、次世代パワー半導体の一つであるSiC-MOSFETを用いて、従来のサイラトロンスイッチ電源に代わる半導体スイッチ電源の開発に取り組んできた[2-7]。そして、LTD(Linear Transformer Driver)[8, 9]回路を用いて、既設電源の置き換えが可能な、定格出力40 kV/2 kA、パルス幅1.2 μ s、繰り返し25 Hzを可能とする半導体スイッチ電源を開発した。パルス波形の再現性とフラットトップ平坦度はそれぞれ要求仕様の $\pm 0.2\%$ 以下を満足し、さらに、制御基板を恒温槽に入れ、クロック1 GHzのFPGAを用いて ± 1 ns以下のパルスジッターを実現した。また、8時間以上の安定した連続運転も実現した。開発したSiC-MOSFETのLTDパルス電源回路の仕様、高電圧印加部のコロナフリー構造、及び、冷却ファン用エアダクト効果について報告する。

2. キッカー用半導体スイッチ電源の開発

現在のJ-PARC RCS用キッカー電源の外観写真をFig. 1に示す。3 GeVに加速したビームバンチを、狙いを定めて瞬間的にRCSから取り出すために、電磁石に短パルス波形を励磁する電源である。取り出されたビーム

は下流のMLFとMRに送られる。電源の仕様は、80 kV/4 kA/25 Hz/1.0 μ s/250 nsで、大電力スイッチにe2v製のサイラトロン(1193C)を使用した双子型電源である。本電源を、次世代パワー半導体のSiC-MOSFETを使用した半導体スイッチ電源に置換する。

開発した半導体スイッチ電源のモジュール基板をFig. 2に示す。SiC-MOSFETを使用し、高耐圧、高速応答、低スイッチング損失を実現する。本半導体スイッチ電源の特徴及び既に開発済みの内容を以下に示す。

- 放射対称型回路
- 誘導電圧重畳回路(LTD方式)
- 基板1枚でキッカー電源の機能を実現
1枚当たり: 電圧1.25 kV(32枚-40 kV)、電流2 kA
- 回路設計 : 主回路・補正回路
- バイパス回路 : 復旧時間短縮
- 定格出力 : 40 kV/2 kA/25 Hz/250 ns/1.2 μ s
(1ユニット当たり)
- 波形精度 : $\pm 0.65\%$ (リングング込み)
- 実負荷試験 : キッカー電磁石+2ユニット並列
- 小型化 : 体積比91%減
- 省電力化 : 電力25%削減
- その他 : 冷却水設備不要

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

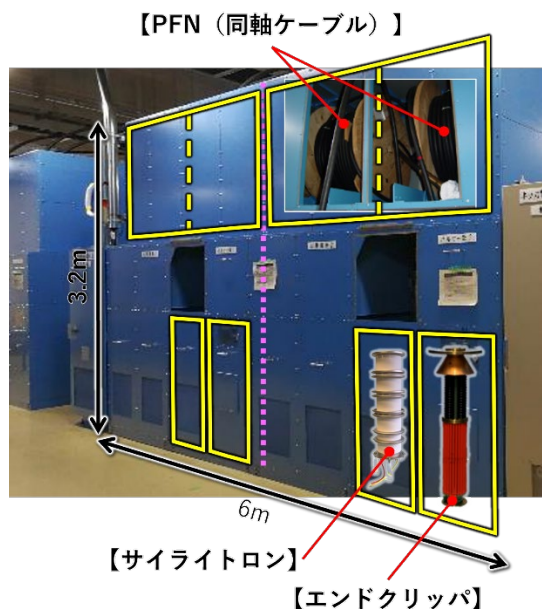


Figure 1: Current kicker power supply @ J-PARC RCS.

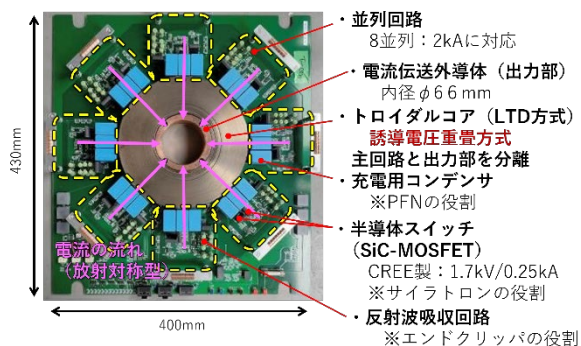
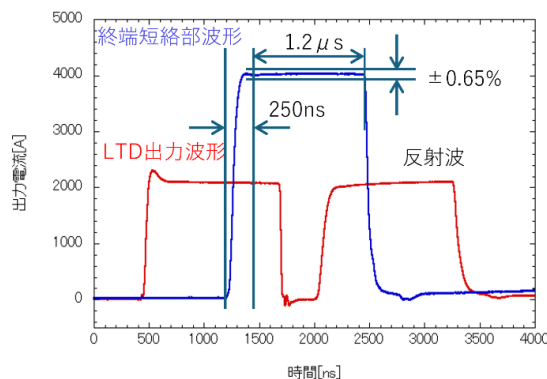


Figure 2: Main circuit module board.

3. 連続運転時の回路素子温度測定

同軸ケーブルと終端短絡器を使用し、実機と同じく反射波がある波形で8時間連続運転時の回路素子の温度を測定した。最上段(40 kV)の主回路基板を使用し、温度測定時の波形条件を Fig. 3 に示す。

温度測定時の様子と測定結果の波形を Fig. 4 と 5 に示す。モジュール基板の中心には同軸型の電力伝送導体があるため、冷却ファンは吐出しタイプを使用した。しかし、測定された上昇温度に、素子の特性とは関係が無い、測定場所違いに起因した有意差が見られた。例えば、ファンに近い位置の素子(反射波の吸収抵抗)の温度が高くなった。そこで、エアダクトを追加したところ、温度差が無くなり、効率よく冷却できることを確認した。温度が最も高くなる部分は反射波吸収抵抗器で、上昇温度が約 50 °C だった。スイッチの FET は最大でも 25 °C と温度上昇が低いことを確認した。追加したエアダクトの概略図を Fig. 6 に、エアダクトの効果を示す結果を Fig. 7 に示す。



波形条件: 40 kV/2 kA/25 Hz/250 ns/1.2 µs

Figure 3: Waveform for temperature measurement.

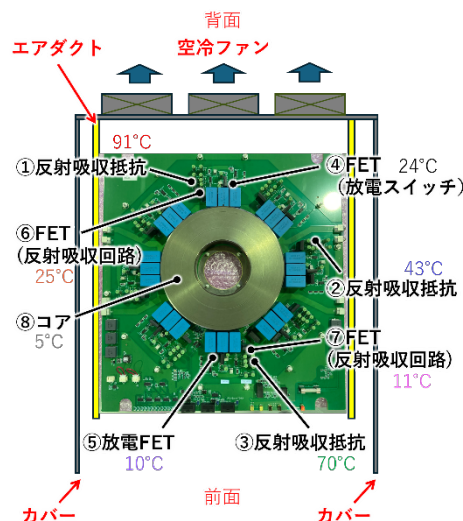
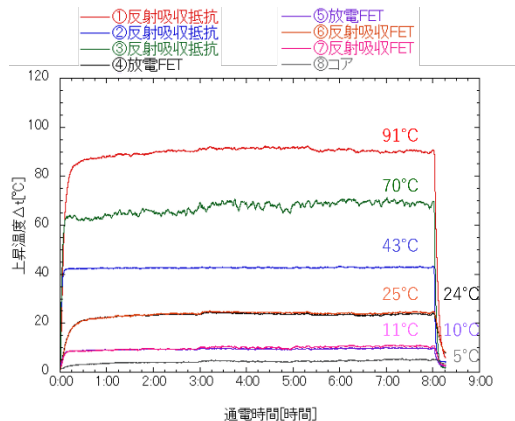


Figure 4: Measurement board and maximum temperature.



波形条件: 40 kV/2 kA/25 Hz/250 ns/1.2 µs

Figure 5: Temperature measurement results.

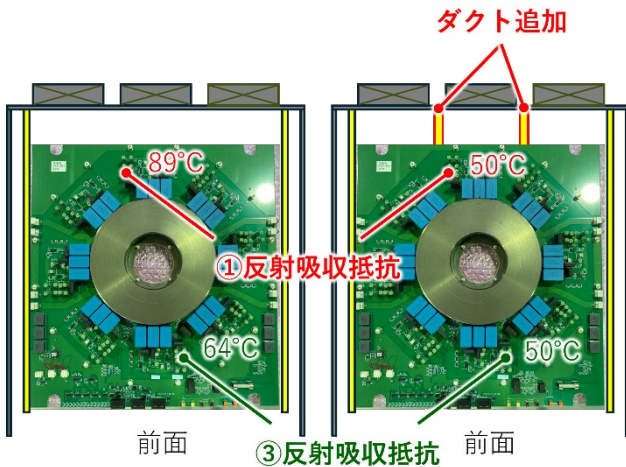


Figure 6: Schematic of additional air duct.

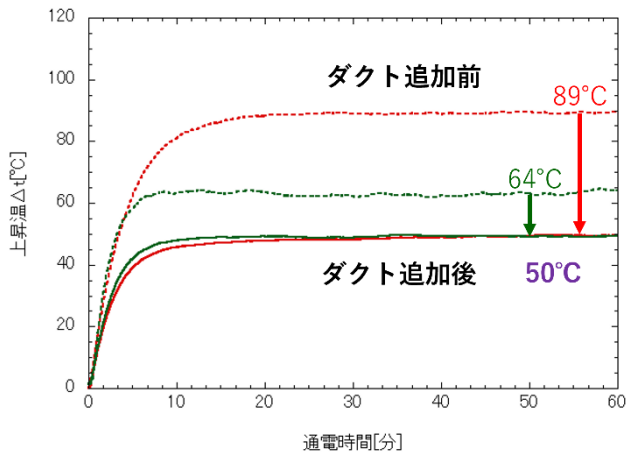


Figure 7: Results of air duct effect.

4. LTD 回路の伝送路構造

LTD 伝送路構造を Fig. 8 と 9 に示す。中心導体は絶縁油に浸し、耐電圧性を高めている。この状態で 8 時間の連続通電を 3 回行った後に銅リングを確認したところ、空気層の部分に緑青部があるのを確認した。そこで、Fig. 10 に示すように、パイプの表面に銅テープを貼り、かつ、銅リングに接触子を設け電位を銅テープと等しくなるようにした。これにより、絶縁構造は、「液体+固体」となり、実質的に空気層を無くすことでコロナ発生領域の削除を行った。この構造で 8 時間の連続通電を 3 回行ったところ、わずかな緑青が見られ、まだコロナ放電が発生していることを確認した。結果を Fig. 11 に示す。更なる対策として、内導体の径を細くして空間距離を確保し、銅リング部の電界強度が小さくなる工夫が必要になると考える。今後、試験を行う予定である。

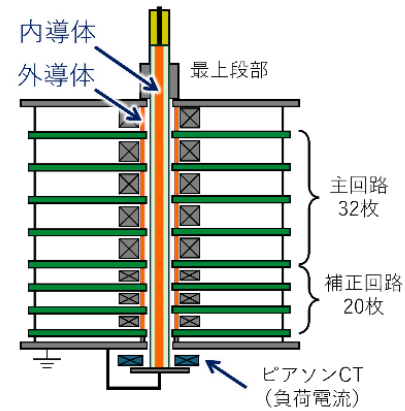


Figure 8: Schematic of vertical cross section of power supply unit.

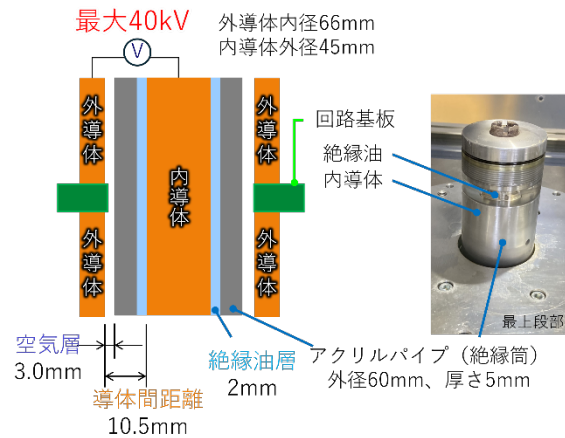


Figure 9: Schematic of oil-immersed transmission conductor.

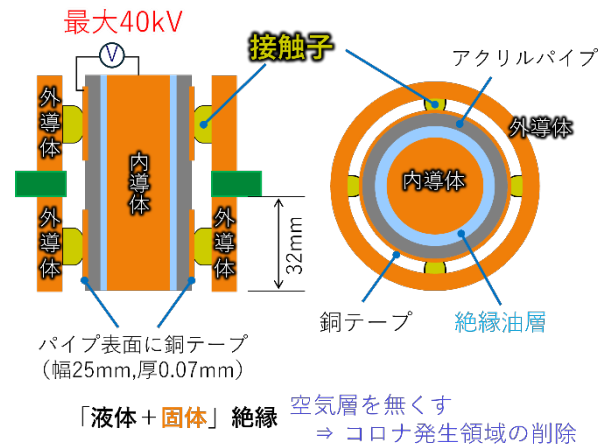


Figure 10: Schematic of ring for corona discharge countermeasure.

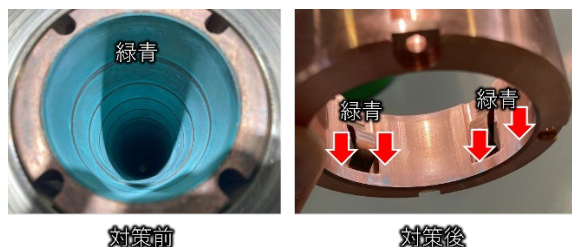


Figure 11: Picture of copper rust caused by corona discharge.

5. LTD 回路用絶縁筒の製作

5.1 絶縁原理と新構造

「導体－絶縁体－気体」の三重点の強電界部を、絶縁体のメタライズ加工と形状の最適化により緩和する。このため、絶縁油や空気絶縁に頼らない絶縁構造を確立する。Figure 12 に絶縁構造原理を示す。絶縁体の表面を金属メッキ、もしくは、メタライズを行い、内導体と外導体の金属面とそれぞれ接触させ各導体を同電位化する。

新構造で絶縁筒が製作できること、波形に影響を与えないことは確認できている。ただし、LTD 方式で高電圧を出力する場合に、主回路モジュール基板を複数枚階層的に積み重ねるため、長尺の導体に対応できる絶縁筒が必要になる。絶縁筒の長さには製作限界があるため、連結構造を確立する評価用絶縁筒を製作した。

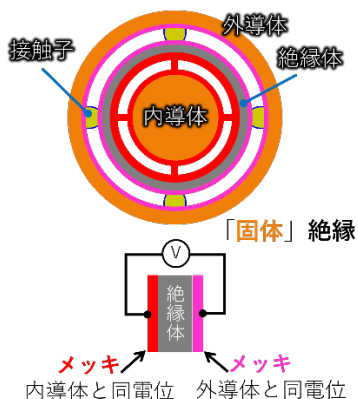


Figure 12: Schematic of insulation structure.

5.2 ABS 樹脂＋銅メッキ

製作した絶縁筒の写真を Fig. 13 に示す。主な製作仕様を以下に示す(設計製作協力:旭金属工業株式会社)。本構造は、ABS 樹脂の絶縁筒の厚みを増して耐コロナ性を高めることができる。また、銅メッキ厚を 1.25 mm と厚くすることができるため、内導体として使用できる。これにより、内導体を別途用意する必要がなくなり、材料の削減が可能となる。

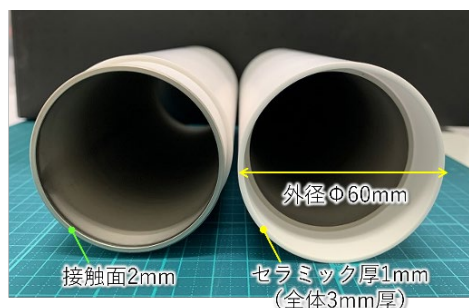
- 銅メッキ厚 :1.25 mm
- 絶縁体厚さ :7 mm
- 外径 :φ62 mm



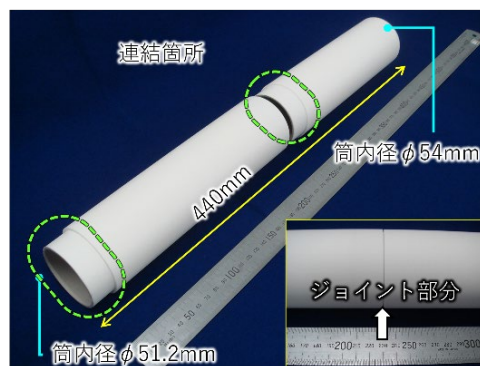
Figure 13: Picture of ABS resin + copper-plated insulation tube.

5.3 セラミックス

放電による故障防止をするため、絶縁碍子に放電劣化が生じない無機物質のセラミックスを採用する(設計製作協力:株式会社MARUWA。支援:令和3年度 JAEA 萌芽研究開発予算)。製作した絶縁筒の写真を Fig. 14 に示す。ただし、本製作ではメッキが手塗りであるため、厚さと塗り個所の管理が困難であった。



メッキ厚 (1~3 μm程度)
※本製作では内面のみ



【製作碍子 (2 ユニット)】

Figure 14: Picture of a ceramic insulating cylinder.

6. まとめ

現キッカーシステムを更新する SiC 半導体スイッチ電源の開発を進めている。これまでの研究開発により、現キッカーシステムの要求仕様(波形精度や安定度など)を満たすユニットを製作した。評価結果により、次世代パワー半導体を用いることで、小型化・省電力化が実現できることを確認した。しかし、課題として、絶縁劣化の要因となるコロナ放電を抑制し、長期安定運転の実現が残っている。本課題に関しては、ABS樹脂を絶縁筒に使用し、絶縁材を厚くする、かつ、内導体を細くし、電界強度を下げることで対応できると考えている。コロナ放電を完全に抑制することができない場合は、劣化に強い無機物質のセラミックスの使用を検討する。

今後は、以下の内容を評価し、より安定した半導体スイッチ電源の確立を実現する。

- コロナ放電の抑制が可能な絶縁筒厚さの評価。
- 細い内導体を用いて出力波形特性を評価(特性インピーダンスミスマッチ)。
- 新絶縁筒又は細い内導体を製作し、連続運転にてコロナ放電フリーの確認。

参考文献

- [1] <https://j-parc.jp/c/index.html>
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] T. Takayanagi *et al.*, “RCS キッカー用半導体スイッチ電源”, Proceedings of PASJ2020, WEOO04.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.