

SiC-MOSFET を用いた J-PARC キッカー用半導体 LTD 電源 SOLID-STATE LTD BASED POWER SUPPLY USING SiC-MOSFET FOR THE J-PARC KICKER

高柳 智弘^{#, A)}, 堀野 光喜^{B)}, 小野 礼人^{C)}, 植野 智晶^{B)}, 杉田 萌^{A)}, 不破 康裕^{A)}, 篠崎 信一^{A)},
徳地 明^{D)}, 生駒 直弥^{D)}, 川上 弘晶^{D)}, 中田 恭輔^{D)}, 趙 鉄陽^{D)}, 亀崎 広明^{D)}, 川瀬 悠太^{E)}
Tomohiro Takayanagi^{#, A)}, Koki Horino^{B)}, Ayato Ono^{C)}, Tomoaki Ueno^{B)}, Moe Sugita^{A)}, Yasuhiro Fuwa^{A)},
Shinichi Shinozaki^{A)}, Akira Tokuchi^{D)}, Naoya Ikoma^{D)}, Hiroaki Kawakami^{D)}, Kyosuke Nakata^{D)},
Tieyang Zhao^{D)}, Hiroaki Kamezaki^{D)}, Yuta Kawase^{E)}

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

^{D)} Pulsed Power Japan laboratory ltd. (PPJ), ^{E)} Iwate University

Abstract

At J-PARC, a program is in progress to replace existing thyatron-based switching power supplies with next-generation system based on SiC-MOSFETs. An LTD (Linear Transformer Driver) module-based power supply unit was developed, capable of 40 kV / 2 kA with a pulse width of 1.2 μ s. Four units were fabricated, configured as a twin system (two parallel units \times two sets) equivalent to the RCS kicker requirements. A test environment was established using the developed LTD power supply, kicker magnets identical to those in operation, and 130 m of coaxial cable to evaluate the excitation current and magnetic field waveforms. The results confirmed a pulse rise time under 250 ns, meeting RCS kicker specifications and demonstrating the feasibility of replacing conventional thyatron-based supplies with semiconductor-based alternatives. This paper presents the circuit specifications and performance evaluation of the developed SiC-MOSFET-based LTD power supply.

1. はじめに

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)[1]では、次世代パワー半導体SiC-MOSFETを用いたサイラトロンスイッチ電源代替の開発に取り組んできた[2-9]。LTD(Linear Transformer Driver)[10, 11]モジュール回路を用いて、定格 40 kV / 2 kA、パルス幅 1.2 μ s の Rapid-Cycling Synchrotron (RCS)キッカー用半導体 LTD 電源を試作した。4 台を 2 並列 \times 2 組の双子型システムとして構成し、実機同型のキッカー電磁石と電力伝送用 130 m 同軸ケーブルを用いて試験環境を整備した。評価の結果、RCS キッカーに要求される 250 ns 以下の立ち上がり時間を満たし、既設サイラトロン電源を SiC-MOSFET による半導体電源に置換可能であることを実証した。本論文では、開発した LTD 半導体スイッチ電源の回路仕様と評価結果を報告する。

2. J-PARC RCS キッカーシステム

J-PARC の RCS は、Linear Accelerator (LINAC)からの 400 MeVビームを 3 GeVに加速し、2 バンチで 1 MW の大強度陽子ビームを生成する。加速ビームはキッカー電磁石で取り出され、Materials and Life Science Experimental Facility (MLF)と Main Ring (MR)に供給される。RCS 内の 2 バンチビームは間隔 0.3 μ s、幅 0.9 μ s であり、これを同時に取り出すため、キッカー電磁石には立ち上がり 0.3 μ s 以下、フラットトップ 0.9 μ s 以上の台形

波形が必要となる(Fig. 1)。この仕様を満たすため、同軸ケーブルを用いた Pulse Forming Network 回路(PFN)とサイラトロンスイッチによる 80 kV \cdot 4 kA の双子型パルス電源が用いられている[12, 13]。

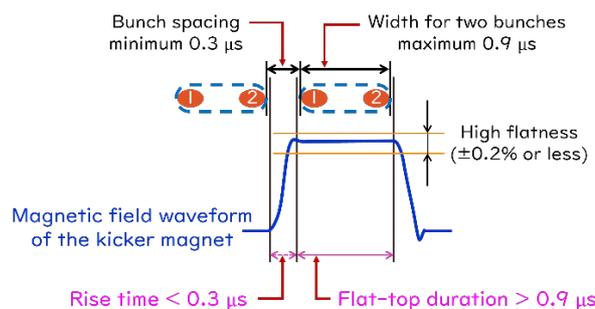


Figure 1: Document layout.

3. キッカー用 LTD 半導体スイッチ電源

3.1 サイラトロンとパワー半導体

キッカー電磁石用パルス電源には、大電力高速スイッチとしてサイラトロンが用いられてきた。しかし、RCS 用の大電力サイラトロンは受注生産で高価・長納期であり、予兆なくジッターやドリフトが悪化する不具合や放電故障による停止も生じる。J-PARC のような共同利用施設では高稼働率と予備品確保が必須であり、維持管理コストが課題となっている。そこで、安定性・長寿命に優れたパワー半導体による代替を進めており、高耐圧・高速応答・

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

低損失を持つ SiC-MOSFET を採用した。従来主流の Si-IGBT では性能不足でサイラトロン代替は困難である。

3.2 LTD 半導体スイッチ電源

キッカー電源に必要なサイラトロン、PFN、エンドクリップの機能を 1 枚にまとめた LTD モジュール基板を開発した(回路図 Fig. 2、基板写真 Fig. 3)。等しい構造の回路を 8 並列・放射対称に配置し、スイッチング時に発生するノイズを打ち消し、さらに、等インピーダンスによる低歪み出力を得る。PFN を用いないため、PFN 分の抵抗が無くなり回路全体のインピーダンスが低減する。既存システムの半分の 40 kV で必要電流が励磁可能となり、放電トラブルの低減も期待できる。モジュール基板は 1.25 kV/2 kA を出力し、32 枚の多段接続で 40 kV を実現する。さらに、モジュール基板の出力部と回路部がトロイダルコアで電氣的に切り離されているため、回路部は接地基準で構成できる絶縁設計となっている。

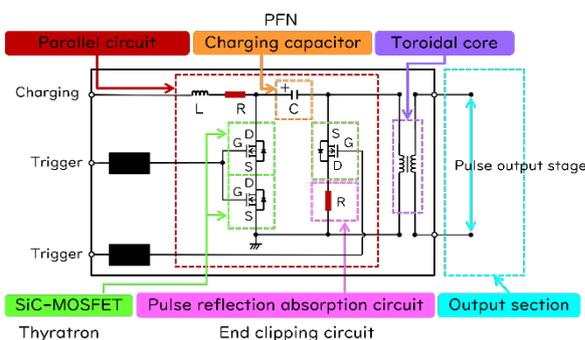


Figure 2: Circuit diagram of LTD module board .

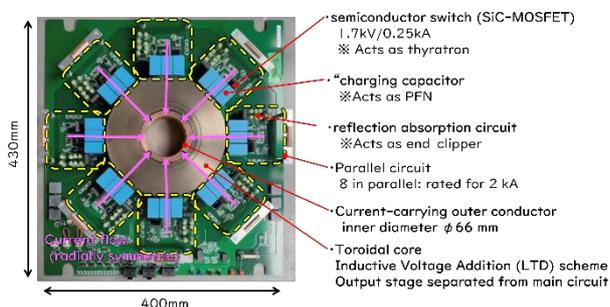


Figure 3: Picture of module board.

RCS のさらなる大強度化に向け、本電源ではフラットトップ時間を既存の 0.9 μs から 1.2 μs に延長しより長いバンチに対応できる設計とした。フラットトップの長時間化に伴いパルスドレープが生じるため、垂れの抑制に通常は大容量コンデンサが必要となるが、コストと電源筐体の増大につながる。そこで、LTD 方式の補正回路(最大 100 V \times 20 枚)を追加し、50 ns 刻みでタイミング・幅を調整してドレープを補償した。実験ではフラットトップ平坦度 $\pm 0.65\%$ 以下を達成した(Fig. 4)。

4 LTD 半導体スイッチ電源の評価

4.1 ユニットの個体差と調整

4 台のユニットで構成される LTD 半導体スイッチ電源に対し、ユニットの設定値と出力された電流の確認によりユニット間の個体差を評価した。ユニットからの出力電流

は、各ユニットで積層された 32 枚の主回路基板と 20 枚の補正基板の出力端部(最下部)に設けてあるピアソン CT と、負荷の同軸ケーブルの終端短絡部に設けたピアソン CT で電流波形を評価した。

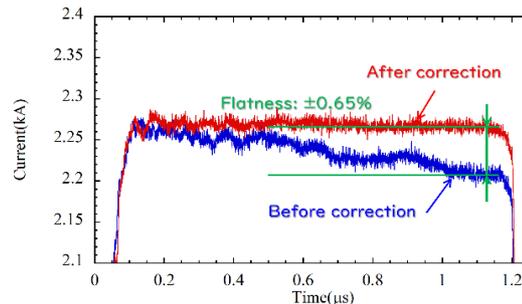


Figure 4: Results of excitation waveform correction.

各ユニットの定格 40 kV / 2 kA 出力時の充電電圧の初期設定値を 1200 V として確認した。調整前後の終端部の電流波形を Fig. 5 に、調整後の各ユニットの主回路充電電圧設定値を Table 1 に示す。ユニット間の個体差を示す充電電圧の調整範囲は $\pm 1\%$ 以下だった。終端部の合成電流波形を Fig. 6 に示す。立ち上りの時間が 160 ns 以下となり、RCS キッカーシステムの要求仕様を満足している。

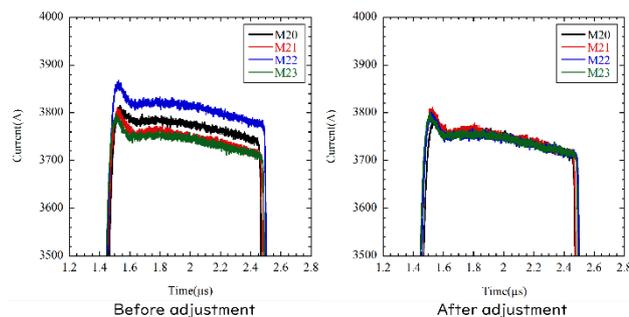


Figure 5: Results of inter-unit balance adjustment.

Table 1: Results of Inter-Unit Balance Adjustment

Main charger	Auxiliary charger
1189 V	10 V
1200 V	10 V
1178 V	10 V
1200 V	10 V

4.2 実負荷を用いた電流と磁場の評価試験

ユニットの出力端からの電力伝送用 130 m 同軸ケーブルをキッカー電磁石に接続した。電磁石は RCS の実機予備機を使用し、高電圧印加時の放電対策のため真空容器内に収められている[12, 13]。このままでは磁場測定ができないため、真空容器内に塩ビパイプを設置し、内面を大気、外面を真空側とした(Fig. 7)。パイプとフランジは Oリングで密封し、真空度は 1.4×10^{-4} Pa に維持されている。磁場波形は、先端に固定したサーチコイル

(10 ターン、直径 6 mm) の出力電圧を積分して評価した。測定結果を Fig. 8 (微分波形)、Fig. 9 (積分波形) に示す。立ち上がり時間は 250 ns で要求仕様を満足した。補正回路を用いない場合でも、フラットトップ平坦度は $\pm 1.0\%$ 以下であった。磁場と励磁電流で波形の立ち上がり時間が異なるのは、サーチコイルのインダクタンスの影響と考えられ、正確な評価は今後の課題とする。

補正回路を用いた試験では、主回路充電電圧 300 V、補正回路 10 V、出力タイミングのずれしを 50 ns とした。主回路 300 V・補正回路 80 V を同一タイミングで動作させた補正後では、補正前に見られたリングングを元の 35% まで低減できた (Fig. 10)。今後は定格出力時に主回路と補正回路の最適化を行い、さらに高い平坦度を目指す。

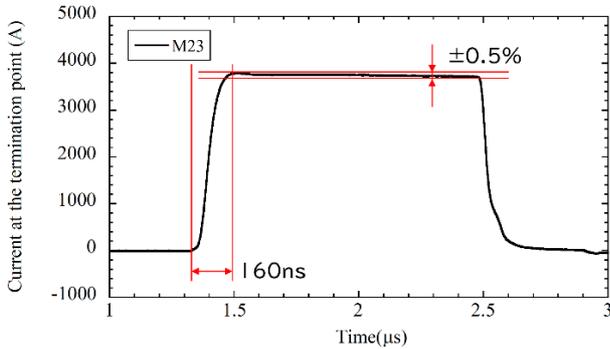


Figure 6: Measured waveform at load end. (terminated short).

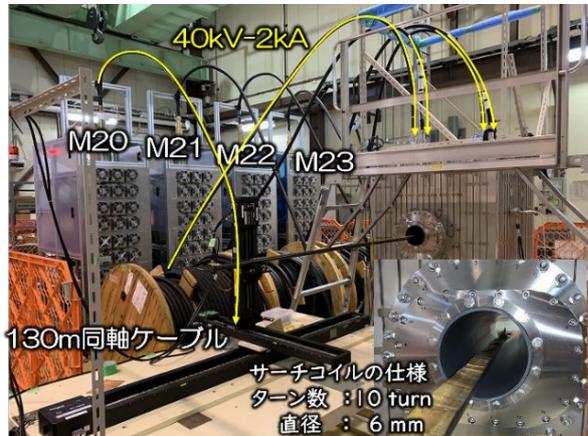


Figure 7: Picture of test setup.

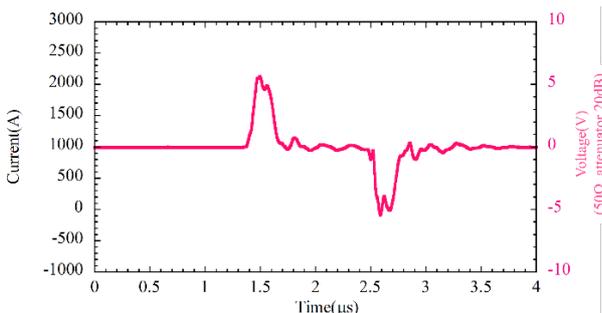


Figure 8: Measured voltage of search coil.

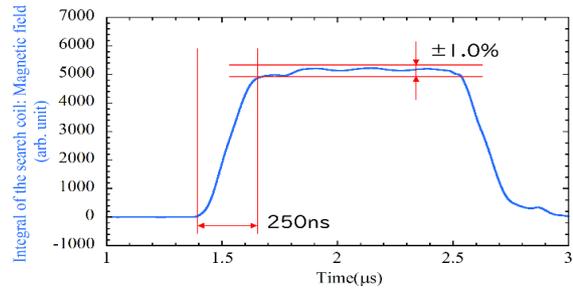


Figure 9: Integrated coil voltage waveform.

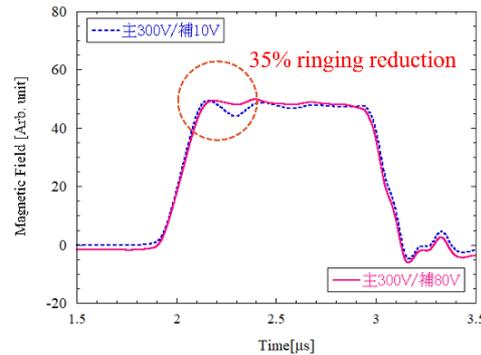


Figure 10: Results of magnetic field waveform correction for the electromagnet.

4.3 発熱温度の測定

1 台の LTD 電源ユニットを用いて、連続通電時のモジュール基板上的の素子温度を測定した。負荷は 130 m 同軸ケーブルの終端部を短絡し、反射波を発生させる条件とした。出力条件は 40 kV、2 kA、1.2 μs、25 Hz である。基板出力端の電位は 40 kV であり、温度測定には光プローブ温度計を使用した。測定箇所を Fig. 11 に、結果を Fig. 12 および Table 2 に示す。温度は約 60 分で飽和し、最大上昇は反射波吸収抵抗で約 50 °C であった。他の素子の上昇温度は Table 2 に示す通りで、一般的なパルス電源素子として許容範囲内である。冷却は空冷で、水冷設備を必要とせず、インフラ負荷を低減できる。

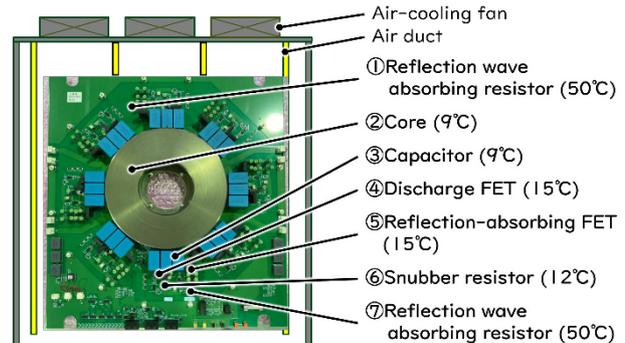


Figure 11: Temperature measurement points.

4.4 コロナ放電対策

大気解放型の電極部のコロナ放電の発生抑制は電極間空気の絶縁耐力に頼っている。空気層の電極部の電界集中箇所では波高値が 30 kV/cm、実効値で

21.2 kV/cm の臨界値に達するとコロナ放電が始まると言われている。そのため、本 LTD モジュール基板の電力伝送部である外導体と内導体の間は絶縁油とアクリルパイプだけが存在し、空気層を無くしコロナ放電の発生領域を構造的に削除した。この構造でコロナ放電を抑制できると考えたが、8時間の連続通電試験を3セット実施後に外導体の内面にコロナ放電の痕が確認されてしまった。

OPERA-2D で電界計算を行った結果、内導体と外導体の間には電界集中はなかった。しかし、外導体と同電位とするための厚さ 0.1 mm 銅テープ端部や、モジュール基板とアクリルパイプ間の空気層で最大で 80 kV/cm の電位傾きの電界集中箇所が確認され、これがコロナ放電の要因となることが分かった。現設計では直径 45 mm の内導体と厚さ 5 mm のアクリルパイプとの間は 2.5 mm 層の絶縁油で満たされ空気層はないが、基板間に空気層が 2 mm である。電荷集中を緩和するため内導体直径を 22.5 mm に細くし空気層を 10 mm 確保した場合、最大電位傾きは 15 kV/cm となり放電を抑制できる。最終的な径と構造は更なる詳細計算で決定する。計算モデルを Fig. 13、結果を Fig. 14 に示す。

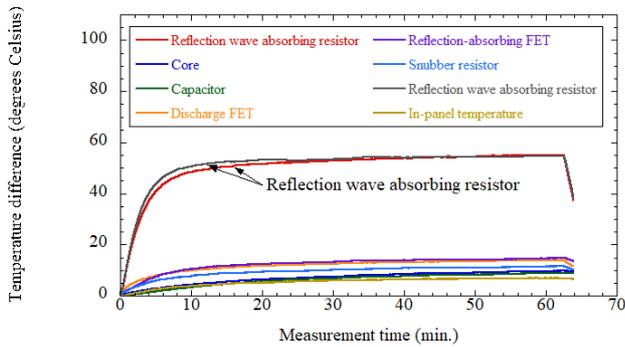


Figure 12: Temperature measurement results.

Table 2: Temperature Measurement Results

①	Reflection wave absorbing resistor	50 °C
②	Core	9 °C
③	Capacitor	9 °C
④	Discharge FET	14 °C
⑤	Reflection-absorbing FET	14 °C
⑥	Snubber resistor	12 °C
⑦	Reflection wave absorbing resistor	50 °C
—	In-panel temperature	7 °C

4.5 故障からの早期回復

装置は故障のリスクを伴い、試験時間が限られる研究施設では早期復旧が求められる。LTD モジュール基板は中心部に内導体を通す穴と外導体リングを持ち、52枚を積層して1台の電源として構成される。最下段基板が故障した場合、内導体は下部に固定されているため上段から順にモジュール基板を抜いて外す必要があり、

ケーブルや信号線の取り外しも伴い作業に時間を要する。そこで、故障基板を抜かず済むようバイパス回路を設け、他の基板が正常ならバイパス処置だけで運転再開を可能にした。

Figure 15 にバイパス回路を追加した基板写真とバイパス箇所を示す。バイパス回路を用いた場合も、各基板の充電電圧を調整することで同様の出力波形が得られる。バイパス有無の比較測定波形を Fig. 16 に示すが、有意な差はない。RCS 用 LTD 半導電スイッチ電源は定格 40 kV だが、実運転では 30 kV 程度と見込まれるため、最大 8 枚までの故障に対応可能と考えられる。週 1 回のメンテナンス日に、故障基板を予備と交換する運用を想定している。

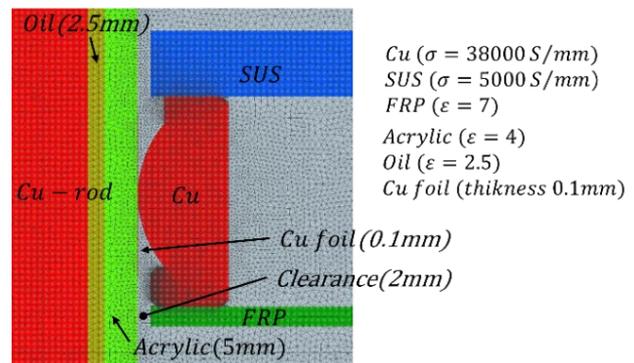


Figure 13: Electric field calculation model.

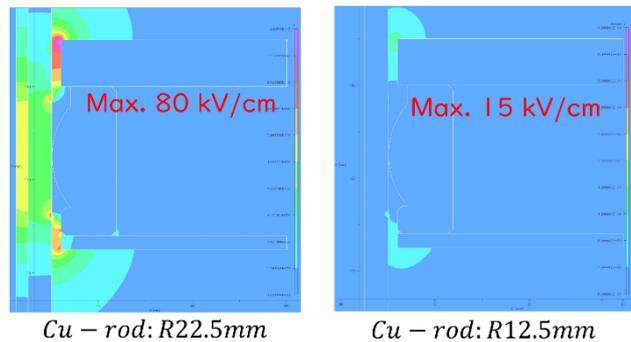


Figure 14: Electric field calculation results.

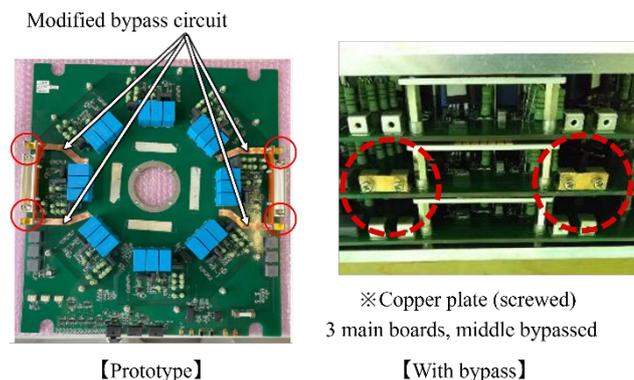


Figure 15: Bypass circuit.

4.6 低インピーダンスキッカー

キッカー電磁石は真空容器内に設置されるため、ビーム用真空容器は持たない。このため、大強度ビーム通過時に電磁石のインピーダンスがビーム挙動に影響し不安定性を生じる。現在の RCS キッカー電源では、反射波吸収回路と同構造のダイオードスタックと抵抗器の組み合わせ回路を追加した低インピーダンス手法が用いられている[14]。本 LTD 半導電スイッチ電源には反射波吸収回路が搭載されており、モジュール基板の放電 FET スイッチ投入直前まで吸収回路 FET を ON にすることで、キッカーコイルで発生する誘起電圧を吸収抵抗で抑制可能である。

反射波吸収回路による誘起電圧の抑制評価を実施し、出力端からサイン波を入力して FET の ON/OFF 時の誘起電圧を測定した。FET が OFF では現キッカー電源同様に半波整流化され、ON では抵抗分のみが確認された (Fig. 16)。本システムにより、現キッカー電源の低インピーダンス手法と同等以上の効果が期待できる。

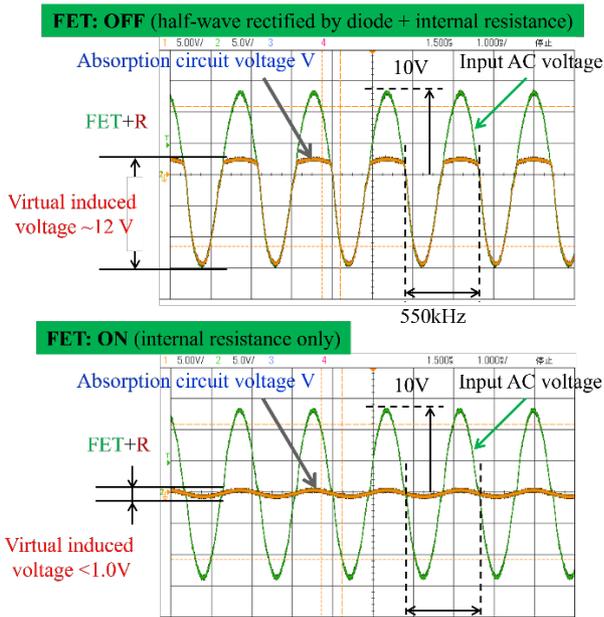


Figure 16: Evaluation results of reflection-wave absorption circuit.

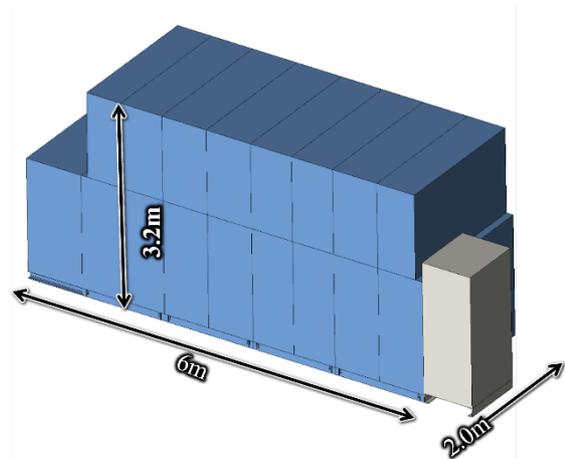
4.7 小型化と省電力化

現キッカー電源と比較して LTD 電源ユニットは、体積比で 21%にまで小型化できる。また、電力では 25%の削減が確認できた (Fig. 17)。LTD 電源ユニットは冷却設備を必要としないため、設置場所の縮小とインフラ設備の削減も期待できる。

5. まとめ

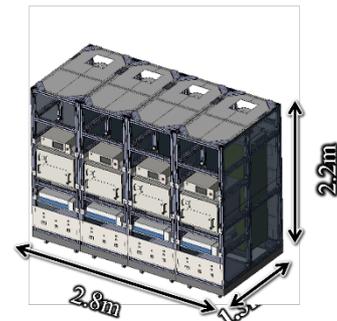
サイラトロンを用いたキッカー電源を代替するため、パワー半導体の SiC-MOSFET を用いた LTD 電源の開発を進めてきた。現キッカー電源と同等性能である LTD 電源ユニット構成を構築し、性能評価にて代替性能を実証した。今後は、J-PARC でのユーザー利用運転を想定した 1 週間の連続運転試験を行い耐久性を確認し、2026

年夏期保守後には実機で運転用開始ができるように試験と準備を進める。



◆ Performance Specifications

LTD power supply units = 1 kicker power supply



- ✓ **Compact design:** 21% of original volume
- ✓ **Power saving:** 25% reduction in power consumption
SiC power semiconductors reduce losses by over 70%
- ✓ **Other:**
 - No cooling water system required
 - Reduced air-conditioning requirements

Figure 17: Comparison of new and old kicker power supplies.

謝辞

本研究を進めるにあたり、OPERA-2D の解析を賜りました KEK 藤森寛氏に心より感謝申し上げます。

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, WE0004.

- [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] T. Takayanagi *et al.*, “キッカー電磁石用 SiC 半導体スイッチ電源”, Proceedings of PASJ2023, THOB13.
- [9] T. Takayanagi *et al.*, “SiC-MOSFET を用いたキッカー電磁石用 LTD パルス電源”, Proceedings of PASJ2024, WEOA05.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] J. Kamiya *et al.*, “Kicker Magnet System of the RCS in J-PARC”, in IEEE Trans. Appl. Superconductivity, vol. 16, no. 2, June 2006, pp.168-171. doi:10.1109/TASC.2006.873265
- [13] J. Kamiya *et al.*, “Magnetic Field Mapping and Excitation Test in Vacuum for the Kicker Magnet in J-PARC RCS”, in IEEE Trans. Appl. Superconductivity, vol. 16, no. 2, June 2006, pp.1362-1365. doi:10.1109/TASC.2006.869982
- [14] Y. Shobuda *et al.*, “Reduction of the Kicker Impedance Maintaining the Performance of Present Kicker Magnet at RCS in J-PARC”, J. Phys.: Conf. Ser. 1067 062007.