

KEK-PF 高速パルスキッカーのための 800 kHz 高繰り返し駆動に向けた SiC-MOSFET パルス電源の開発と高繰り返し試験 DEVELOPMENT OF A SiC-MOSFET PULSED POWER SUPPLY TOWARD 800 kHz OPERATION FOR THE KEK-PF FAST KICKER SYSTEM

篠原智史 ^{*,A)}, 満田史織 ^{A)}, 内藤大地 ^{A)}, 奥田貴史 ^{B)} 中村孝 ^{B)}

Satoshi Shinohara ^{*,A)}, Chikaori Mitsuda ^{A)}, Daichi Naito ^{A)}, Takafumi Okuda ^{B)}, Takashi Nakamura ^{B)}

^{A)} High energy accelerator research organization (KEK)

^{B)} NexFi Technology

Abstract

We are developing a SiC-MOSFET-based pulsed power supply to introduce a camshaft bunch kicker system in the KEK-PF 2.5 GeV storage ring. The kicker system is required to generate half-sine pulses with a peak current of 500 A and a pulse width of 200 ns at a high repetition rate of 800 kHz with a supplied voltage of 12.5 kV. In a previous prototype development, we achieved stable operation at 400 kHz with a supplied voltage of 2.3 kV, but both the frequency and voltage were limited due to insufficient capacity for heat dissipation and voltage tolerance. To overcome these limitations toward the target specifications, a new prototype was developed with improved voltage tolerance and thermal capacity ratings of power supply components, such as compact high-voltage charging resistors and diode banks mounted on water-cooled heatsinks. In this paper, we report on the design and evaluation of the new prototype, which operated at supplied voltages up to 12 kV and repetition rates exceeding 400 kHz. We also report the results of a long-term durability test performed over three months.

1. はじめに

放射光源加速器 KEK-PF 2.5 GeV リングでは、カムシャフトバンチシステム [1,2] の導入が計画されており、その実現には高速キッカーとそれを駆動可能な高速パルス電源が必要である。特にパルス電源には、Table 1 に示すような、500 A の大電流・200 ns 幅の短パルスを、800 kHz という高繰り返しで安定に出力可能な性能が開発目標として求められる。KEK-PF ではこの要件を満たすため、高速スイッチング性能を有する半導体素子 SiC-MOSFET に着目し、高繰り返し動作が可能なパルス電源の開発を進めてきた [3-6]。これまでに開発した試作機では、NexFi Tec. 社製の特注 SiC-MOSFET スイッチングモジュール (SWM) を搭載し、SWM の定格である 400 kHz において安定なパルス出力を実現している [6]。一方で、従来の試作機では構成要素の耐電圧が十分ではなく、目標電圧を印加することができなかった。また、高繰り返し動作に伴う素子や回路の発熱が、800 kHz 駆動に向けた大きな課題として残されていた。本発表では、最終目標である 500 A・800 kHz 出力に向けたパルス電源試作機の設計と開発した試作機の出力性能評価結果、さらに長期信頼性の結果について報告する。

2. 高繰り返しパルス電源の設計

Figure 1 に、設計した高繰り返しパルス電源試験機の回路図概略を示す。本電源は、インダクタンス負荷と充放電コンデンサからなる LC 共振回路によりパルス電流を生成する。この回路方式は、これまで KEK-PF で開発してきた半導体パルス電源において採用されており、400 kHz 定格での安定動作を実現している [6]。本

Table 1: Requirements of the Pulsed Power Supply

Contents	Requirements
Waveform-shape	Half-sine
Peak Current	500 A (<± 0.1%)
Repetition Rate	800 kHz
Pulse Width	200 ns
Timing Jitter	100 ps
Voltage	12.5 kV

試験機でも同様の方式をベースに、目標である 800 kHz の高繰り返し動作を実現すべく設計を行った。

設計した電源回路は、大きく 2 つのパートから構成される。一つは充電部 (DC section) で、高圧 DC 電

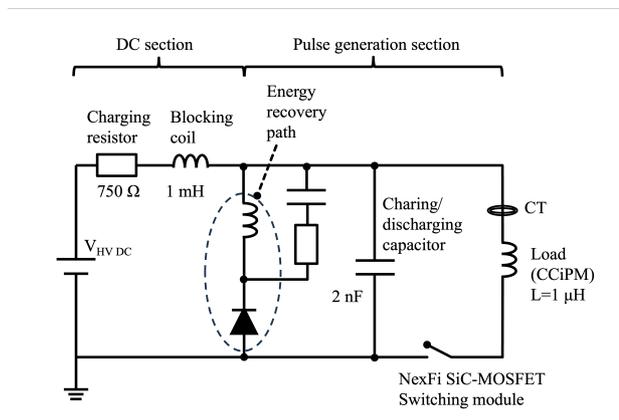


Figure 1: Schematic of the circuit of a prototype pulsed power supply.

* sshino@post.kek.jp

源、充電抵抗 (charging resistor)、突入電流抑制コイル (blocking coil) から構成され、もう一つはパルサー部 (Pulse generation section) で、充放電用コンデンサ、インダクタンス負荷、スイッチ (SW) から構成される。回路の基本動作は以下の通りで、まず、SW がオフの状態では、高圧 DC 電源から充電部を通じて充放電用コンデンサに供給され、充電が行われる。充電が完了すると、SW をオンにすることで、蓄積された電荷がパルサー部へ流入する。このとき、インダクタンス負荷 (キッカマグネット) と充放電コンデンサによって LC 共振が生じ、正弦波状のパルス電流が形成される。その後、SW を再びオフにすることで放電が停止し、再度コンデンサへの充電が開始される。この動作を繰り返すことで、インダクタンス負荷に対して高繰り返しのパルス電流を供給することが可能となる。

本回路の特徴の 1 つは、パルサー部にエネルギー回生回路を組み込んでいる点にある。SW オン時に放電されたエネルギーは、熱として消費される前にエネルギー回生回路を通じて充放電用コンデンサへ再充電される。充電時間は回生回路により出力パルス幅と同程度の時間 (数 100 ns) での再充電が可能で、最大 800 kHz の高繰り返し動作に対応できる。さらに、通常は正弦波を正弦半波に整流するためのダイオードバンクを負荷の前後に設ける必要があるが、本回路ではエネルギー回生回路内に整流ダイオードを配置することで、負荷前後へのダイオード実装を省略できる。これにより、負荷付近の浮遊インダクタンスを低減でき、より効率的な出力が可能となる。

本設計をもとに LTSpice [7] によるシミュレーションを実施した結果、12.5 kV の印加電圧条件下でピーク電流 500 A、パルス幅 160 ns の正弦半波パルスを 800 kHz で出力可能であることを確認した。出力は 125 kW 相当の大電力となるが、エネルギー回生により入力電力は 19 kW で済むことも確認され十分実現可能な設計にまで落とし込んだ。これにより、本試作機は要求仕様を満たすパルス電源として適切に設計されていると判断している。

3. 高繰り返しパルス電源試験機の開発

Figure 2 に、開発した高繰り返しパルス電源の試験機の写真を示す。本試験機は、これまでに開発した試験機 [6] で明らかとなった課題を踏まえ、パルス電源の各構成要素の定格を向上するよう開発を行った。以下にパルサー部、充電部に分けて詳細を述べる。

3.1 パルサー部

パルサー部では、回路構成要素の発熱が大きな課題であり、特に前試作機ではエネルギー回生回路に用いたダイオードバンクの発熱が顕著であった。従来のダイオードバンクは、1.2 kV 耐圧の SiC ショットキーバリアダイオード (SBD) を 20 直列 2 並列としたモジュールを 2 並列接続する構成であった。この構成において、ピーク電流 100 A、繰り返し周波数 250 kHz でパルスを印加した時点で、Fig. 3(a) に示すように、ダイオードバンクの温度は約 75 °C に達することが確認された。目標とするパルス出力の実現に向けては、熱容量の向上

が不可欠であることが明らかとなったが、単純にダイオードの直並列数を増加させた場合、寄生成分が増大し、充電速度の低下を招くおそれがあった。そこで、今回開発したダイオードバンクには水冷構造を導入し、放熱性能の向上と小型化の両立を図った。Figure 4 に示すように、1.2 kV SiC-SBD を 6 直列 1 並列とした基板をセラミックス板にマウントし、それらを薄型の水冷ヒートシンクで両面から挟み込む構造とした。電流の経路は表面と裏面の経路を対称にすることで電流ループの面積を最小化し、浮遊インダクタンスの低減を目指した。結果として前ダイオードバンクと比較して体積占有率は 1/8 と小型ながらも 14.4 kV 耐圧と十分な設計となった。ただし、熱容量については水冷機構が十分に機能するかを今後の実験により検証する必要がある。

使用したスイッチングモジュール (SWM) は、NexFi Tec. 社製の特注 SiC-MOSFET SWM である [8-10]。モジュールは約 15 cm 角と小型ながら、24 kV の高耐電圧性能を有する。1.2 kV 耐圧の SiC-MOSFET を 20 直列 (1 並列) で構成し、ゲート駆動には光信号による絶縁伝送方式を、電力供給には無線電力伝送方式を採用しており、いずれも絶縁構造となっている。前試作機で用いていた SWM は最大繰り返し周波数が 400 kHz に限られていたが、ゲート駆動の消費電力低減と放熱性能の向上により、最大 1 MHz での動作が可能となった。

負荷には、実負荷であるセラミックスチェンバー型パルスマグネット (Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet; CCiPM) [11, 12] を接続した。空芯型パル

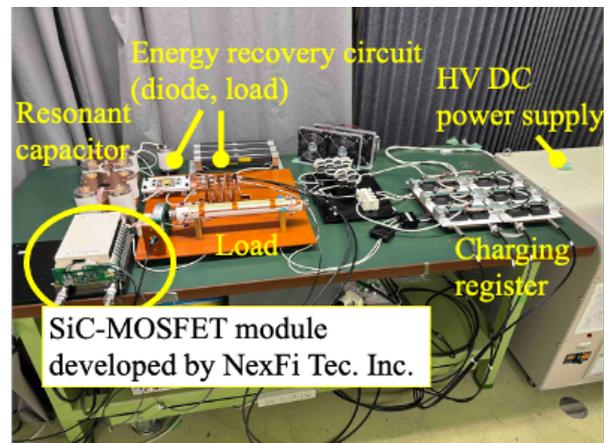


Figure 2: Prototype pulsed power supply for the high repetition rate tests.

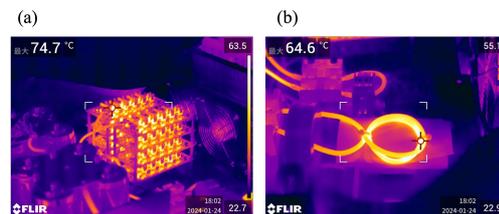


Figure 3: The left (a) and right (b) figures show the thermal distribution of the diode bank of the energy regenerative path and dummy load, respectively [6].

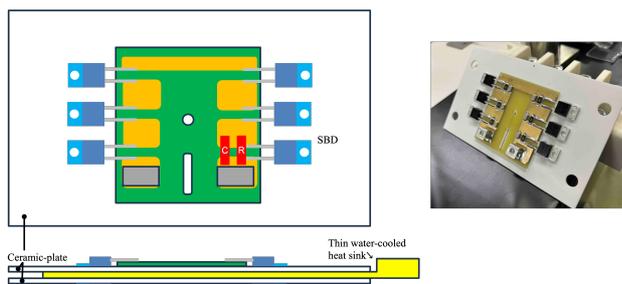


Figure 4: Left: Design of a water-cooled diode bank structure. Six series-connected SiC-SBDs are mounted on a ceramic plate, and sandwiched from both sides by thin water-cooled heat sinks. Right: Photo of the water-cooled diode bank during the development.

スマグネットである CCI_{PM} は、円筒形セラミックス製真空ダクトの壁面にパルスコイルを埋め込んだ一体構造を有しており、高繰り返し動作に対する高い周波数追従性と、大電流駆動時の優れた放熱性能を両立している。これまでの開発では模擬負荷を用いて試験を行っていたが (Fig. 3(b))、本試験よりカムシャフトキッカーとして使用可能な実負荷 CCI_{PM} を接続しての動作検証を行った。パルス電源と実負荷を一体で開発していくことにより、実負荷特有の容量成分を考慮したパラメータ設計が KEK-PF 内で可能となり、スムーズな実機適用が期待される。

コンデンサバンクには、前試作機と同様に明電舎製の真空コンデンサ (SCF-352.5H65C) を採用した。250 pF のコンデンサを 4 並列で 1 モジュールとし、それを 2 並列接続することで、全体で 2 nF の容量を構成している。このバンクは 21 kV の耐電圧と 620 Arms の許容電流を有しており、最終的な出力目標に対して十分な性能を備えている。

3.2 充電部

充電部では、これまでの開発で使用していた空冷ヒートシンク付きの抵抗バンク (Fig. 5(a)) において、パルス耐電圧をさらに向上させる場合に構成の見直しが必要であった。さらに、充電速度の向上および発熱対策として抵抗器の並列数を増やすと、ヒートシンクの大形化が避けられず、実装の難易度が高くなるという課題もあった。これらの課題に対し、本研究では、水冷ヒートシンクにセラミックス板を介して厚膜抵抗を実装する構造を採用し、放熱性能を向上させつつ小型化を図った。新たに開発した充電抵抗バンク (Fig. 5(b)) は、厚膜抵抗を 2 並列 3 直列とした構成を 1 モジュールとし、それを 2 並列で運用する構成とした。この構成により、全体として 21 kV の耐電圧と 750 Ω の抵抗値を実現しており、設計要求を満たしている。前号機と比較して体積占有率は 1/6 と大幅に小型化されているにもかかわらず、許容電力は 3.6 kW から 9.6 kW へと向上しており、許容電力の大幅な改善に成功した。

その他の充電部構成要素としては、突入電流抑制用コイルにコアロスの小さい FINEMET[®] (PROTERIAL) コアを採用することで、動作時の消費電力の低減を図った。また、高圧電源には (有) エイチ・エス・エレクト

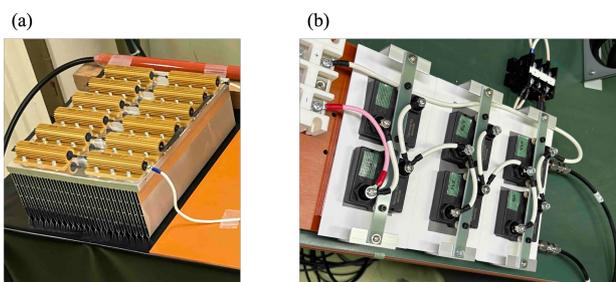


Figure 5: (a) Previous charging resistor module with air-cooled heat sink [6]. (b) Newly developed charging resistor module using thick-film resistors mounted on a ceramic plate with water-cooled heat sinks.

リック社によって特別に開発された高繰り返し充電を可能とする高圧 DC 電源を用いた。高圧 DC 電源に必要な定格は、シミュレーションの結果、12.5 kV · 800 kHz 動作時には、充電部に平均 1.5 A の電流が流れることが予測された。この条件に対応するため、既存電源では 12 kV · 1.5 A 仕様だったものを 15 kV · 2 A の出力ができるよう拡張し、本試験機における定格運転を可能とした。

4. 高繰り返しパルス電源出力試験

4.1 高電圧印加試験

開発したパルス電源が所定のパルス耐電圧性能を有しているかを確認するため、高電圧印加時の動作試験を実施した。Figure 6 に、12 kV の電圧を印加し、1 kHz でパルス電源を駆動させた際の電流波形を示す。パルス電流は、CT (Pearson; MODEL 110) により測定し、波形はオシロスコープ (Tektronix; MSO64) で取得した。高電圧試験は試験初期段階であったため、負荷には CCI_{PM} ではなく、高圧ケーブルを用いて内製した空芯コイルの模擬負荷を使用した。CCI_{PM} は真空中であれば 12 kV の耐電圧を十分に有するが、本試験は大気中で実施したため、絶縁耐力不足の可能性を考慮した。印加電圧 12 kV において、ピーク電流 410 A · パルス幅 200 ns の正弦半波パルスが得られ、目標に迫る出力が確認された。これにより、開発したパルス電源のパル

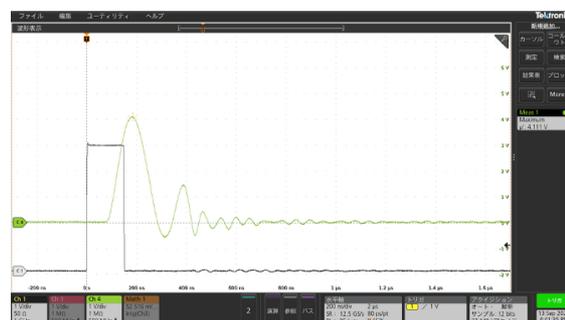


Figure 6: Output waveform measured at 12 kV and 1 kHz operation with a peak current of 410 A and a pulse width of 200 ns.

ス耐電圧性能は、おおむね要求を満たしていることが示された。一方、12 kV 印加時のシミュレーション結果 (480 A · 160 ns) と比較すると、電流値の低下とパルス幅の増大が生じた。これは浮遊インダクタンスによる出力効率の低下や、MOSFET のターンオン特性の影響と考えられる。また、パルス後半に現れたアフターパルスは、回生回路のコイル定数と模擬負荷との整合不足によるものである。今回の試験では模擬負荷を用いたため精密な整合調整は実施しなかったが、今後の実負荷接続に向けては波形整合の最適化が重要となる。

4.2 400 kHz を超えた高繰り返し試験

400 kHz を超える高繰り返し試験の実施にあたっては、実負荷である CCI_{PM} を大気開放下で使用したため、印加電圧を 1.2 kV に抑えて試験を実施した。Figure 7 に、印加電圧 1.2 kV、ピーク電流値 50 A の条件下における、600 kHz 駆動時の出力波形を示す。このときのパルス幅は 200 ns、パルス間隔は 1.67 μs であり、目標の 800 kHz 繰り返しに迫る高繰り返し出力の達成が確認された。また、試験では回生部の定数を調整することで、高電圧試験で見られたアフターパルスの抑制にも成功している。

Figure 8 に、繰り返し周波数とピーク電流値の関係を示す。各周波数に対し 100 波形を取得し、その平均値 I_{peak} を代表値、標準偏差 σ_{peak} を誤差としてプロットしている。周波数の増加に伴いピーク電流は減少し、1 kHz で 54.9 A だった値は、600 kHz で 49.1 A (89.5%) まで低下した。これは、表皮抵抗の増加によりエネルギー回生が阻害され、コンデンサ充電が設計通りに回復しないことが原因と考えられる [6]。一方で、前号機では 90% を下回る周波数は 350 kHz であったのに対し、本試作機では 600 kHz まで維持されており、充電速度が約 2 倍に向上したと評価できる。この性能向上は、充電抵抗値を前号機の半分を設定したことにより、回路の充電速度が改善された結果である。今後は、エネルギー回生を阻害している要因の特定と改善を進め、また小型化し調整が容易になった充電抵抗バンクの並列数の増強により充電性能の向上を図る予定である。

次に繰り返し周波数に対する出力の安定度を評価したものが Fig. 9 である。Figure 9(a) はピーク電流の安定度を示しており、安定度は σ_{peak}/I_{peak} により評価し

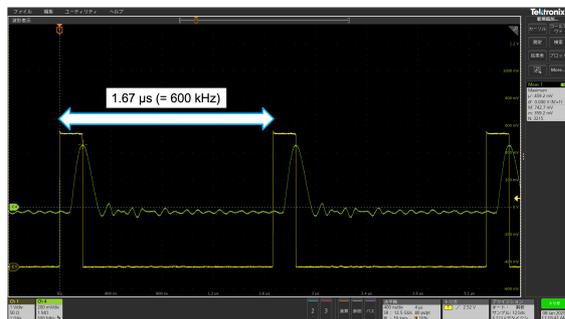


Figure 7: Output waveform measured at 1.2 kV and 600 kHz operation with a peak current of 50 A and a pulse width of 200 ns.

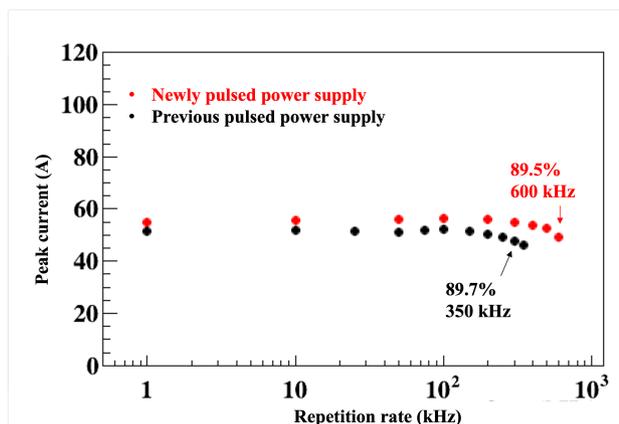


Figure 8: Relationship between output peak current and repetition rate. Red and black dots represent the results obtained with the newly developed pulsed power supply and the previous version [6], respectively.

た。Figure 9(b) はタイミングジッターの繰り返し周波数依存性を示しており、ジッターは波形がピーク電流値の 50% 点に初めて達する時間を測定し、その時間分布の標準偏差として定義した。ピーク電流値の安定度は 0.4%、ジッターは約 300 ps で高い安定度を示したが、Table 1 の開発目標は下回った。ただしこれらのばらつきは主に計測器ノイズによるものと確かめられており、実際の出力性能はさらに良好と見込まれる。今後は、より高精度な測定系の構築と評価を進める予定である。

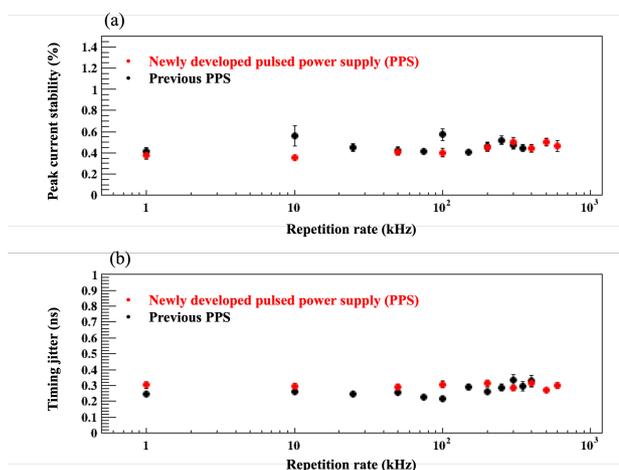


Figure 9: Stability of output peak current (a) and timing jitter (b) as a function of repetition rate. Red and black dots represent the results obtained with the newly developed pulsed power supply and the previous version [6], respectively.

回路構成要素の高繰り返し動作時における発熱については、50 A · 600 kHz という高負荷条件下においても十分に抑制されていた。特に、今回新たに開発したダイオードバンクについては、Fig. 10 に示すように、良好な冷却性能が確認されている。今後さらなる熱容量の拡張が必要になった場合でも、小型化された構造を

活かし、モジュールの追加による柔軟なバンク増強が可能である。

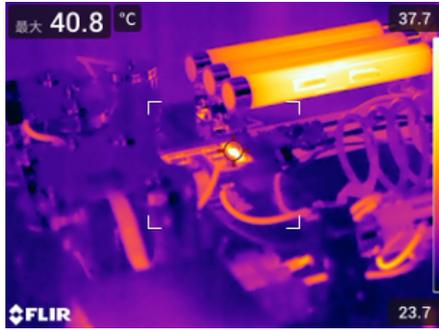


Figure 10: Thermal image of SBD module during 600 kHz operation.

5. パルス電源長期耐久試験

パルス電源の長期耐久性を評価するため、2024年11月～12月および2025年6月に、長期間の連続運転試験を実施した。2024年度の試験では模擬負荷を用いて動作安定性を確認し、2025年度には実負荷である CCiPM を接続した環境下での評価を行った。

Figure 11 には、2024年度の模擬負荷試験における長期連続運転中の出力ピーク電流値を示す。この試験では、印加電圧を 2.3 kV、繰り返し周波数を 100 kHz に設定し、ピーク電流 100 A の条件で連続運転を行った。電源の調整や都合により出力を故意に落とした時間以外では、連続2か月間にわたり一度の停止もなく安定動作を維持した。この間、ピーク電流の変動は 0.14% に抑えられ、極めて高い電流安定性を維持し続けたことを確認された。累積スイッチング回数は 4200 億回に達しており、これはサイラトロン等の従来型スイッチング素子では実現困難な水準である。このように、模擬負荷下での長期試験により、開発したパルス電源が高い信頼性を有することが確認された。

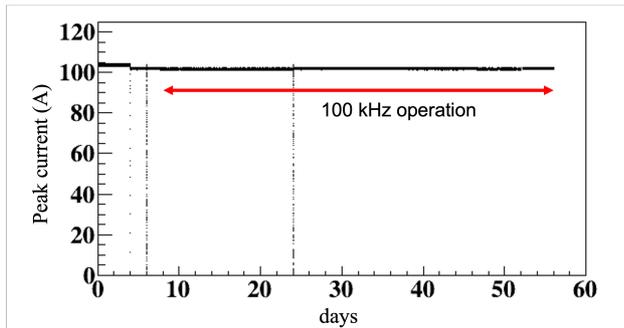


Figure 11: Long-term variation of the peak output current during the 100 kHz, 2.3 kV operation over two months.

2025年6月には実負荷である CCiPM を接続した長期連続運転試験を実施した。Figure 12 に、CCiPM を接続した状態で実施した連続運転試験の様子を示す。CCiPM は真空引きすることで、実環境に近い条件を再現し実験を行った。この試験では、放射ノイズによる周

辺機器への影響を考慮し、まずはピーク電流値は 50 A に抑えて 100 kHz での連続駆動を行った。試験期間は約3週間でありスイッチング回数は 1300 億回、出力安定度は期間中に 0.23% と安定に動作し続け、故障や異常動作は一切見られなかった。この結果から、本システムは実負荷接続時においてもピーク電流値は低いが、長期安定運転が可能であり、実運用に向けた高い信頼性を有することが実証された。

今後は構築した真空引きした実負荷に高電圧を印加し、大電流 500 A・高繰り返し 800 kHz の試験を進めていく計画である。

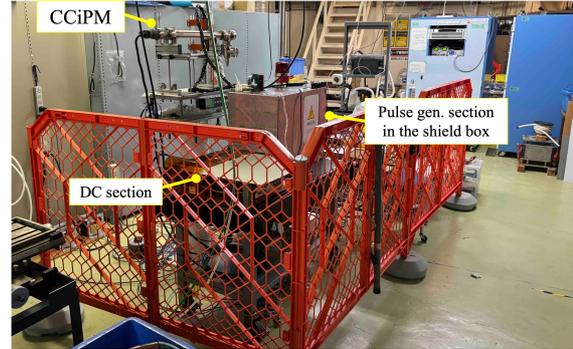


Figure 12: Photograph of the long-term durability test setup with CCiPM.

6. まとめ

本研究では、KEK-PF のカムシャフトバンチシステム導入に向け、SiC-MOSFET を用いた高繰り返しパルス電源の開発と性能評価を行った。従来試作機で課題であった耐電圧および発熱に対し、厚膜抵抗を水冷ヒートシンクに実装した小型高耐圧の充電抵抗バンクや、水冷式の小型 SBD ダイオードバンクを構築し、定格の向上を図った。評価試験では、12 kV 印加時に 410 A・200 ns のパルス出力を達成し、パルス耐電圧の要求値に概ね到達した。高繰り返し動作では、1.2 kV・50 A 条件で 600 kHz 駆動の安定出力を確認した一方、周波数上昇に伴うピーク電流低下が観測された。この課題に対しては、充電部定数の最適化やエネルギー回生率の改善により、800 kHz 動作の安定化を図る予定である。長期信頼性評価では、模擬負荷および実負荷下で 100 kHz 動作を合計3か月間継続し、ピーク電流安定度は 1% 未満、累計スイッチング回数は 5500 億回に達した。いずれの試験においても異常は発生せず、高い安定性が示された。以上より、本パルス電源は高電圧・大電流・高繰り返し各要件に対し、それぞれ目標に近い性能を実現している段階にある。今後は回路定数の最適化を進め、12.5 kV・500 A・800 kHz の最終仕様を同時に満たすパルス電源の実現を目指す。

謝辞

本研究は JST A-STEP Grant Number JPMJTR201A, Japan の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] C. Sun *et al.*, “Pseudo-Single-Bunch with Adjustable Frequency: A New Operation Mode for Synchrotron Light Sources”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, p. 264801, 2012.
- [2] C. Sun *et al.*, “Characterization of pseudosingle bunch kick-and-cancel operational mode”, *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams*, vol. 18, p. 120702, 2015.
- [3] S. Shinohara *et al.*, “Development of a Prototype Pulsed Power Supply using SiC-MOSFETs for a Fast Kicker System in KEK-PF”, in *Proc. IPAC’23*, Venice, Italy, May 2023, pp. 4366–4368.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-THPA168
- [4] S. Shinohara *et al.*, “Development of a Fast Pulsed Power Supply Using SiC-MOSFETs for KEK-PF”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2022, p. 1010.
- [5] S. Shinohara *et al.*, “Long-Term Test of a Prototype Pulsed Power Supply Using SiC-MOSFETs for a Fast Kicker System in KEK-PF”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2023, p. 863.
- [6] S. Shinohara *et al.*, “High Repetition Tests of a Prototype Pulsed Power Supply Using SiC-MOSFETs for a Fast Kicker System in KEK-PF”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2024, p. 390.
- [7] Analog Devices Inc., <https://www.analog.com>
- [8] Nexfi Technology Inc., <https://www.nexfi-tech.com>
- [9] T. Nakamura *et al.*, “Application of SiC power devices to ultra-high voltage equipment”, in: *2022 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, 2022, pp. 146–149.
doi:10.1109/ICSJ55786.2022.10034706
- [10] T. Okuda *et al.*, “A 5-kV pulse generator with a 100-kV/ μ s slew rate based on series-connected 1700-V SiC MOSFETs for electrical insulation tests”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 92 (11), p. 114705, 2021. doi:10.1063/5.0058083
- [11] C. Mitsuda *et al.*, “Development of the Ceramic Chamber Integrated Pulsed Magnet Fitting for a Narrow Gap”, in *Proc. IPAC’15*, Richmond, VA, USA, May 2015, pp. 2879–2882.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-WEPMA049
- [12] Y. Lu *et al.*, “New development of Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet for pulsed multipole injection at KEK-PF”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2021, p. 39.