

KEK-PF 高速パルスキッカーのための SiC-MOSFET パルス電源試作機の加速器 リング近傍における長期試験

LONG-TERM TEST OF A PROTOTYPE PULSED POWER SUPPLY USING SiC-MOSFETS FOR A FAST KICKER SYSTEM IN KEK-PF

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 pulsed power supply using Silicon Carbide (SiC) MOSFETs for a fast kicker system in the KEK-PF 2.5 GeV storage ring. In the kicker system, the pulsed power supply is required to generate a high-precision short pulse with high power and a high repetition rate. Because the pulsed power supply will be installed near the beam duct of the accelerator ring to reduce a stray inductance between the power supply and the pulsed magnet, and the power supply could be affected by the influence of radiation and external noise from an electron beam. To study such influence on the pulsed power supply, we constructed the test bench system near the beam duct of the accelerator ring so as to confirm the performance of the prototype power supply under the actual accelerator environment, and we operated the test bench system during the synchrotron-radiation operation for about three months. In this paper, we introduce the constructed test bench system and report the result of the stability of the output pulsed peak current over about 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]の導入を計画しており、そのため的高速キッカーと高速パルス電源が必要である。特にパルス電源においては Table 1 に示すような大電流(500 A)短パルス(100 ns 幅)を高繰り返し(1 MHz)で駆動可能な電源が必要であり、カムシャフトバンチシステム導入の鍵となっている。そこで KEK-PF では高繰り返しで短パルス出力可能な半導体スイッチング素子 SiC-MOSFET に注目し、パルス電源の開発を行ってきた。2022 年度初めに 1.2 kV SiC-MOSFET 16 直列で構成されるスイッチングモジュールを組み込んだパルス電源試作機の初号機開発を行い、実験室環境にて要求安定度を満たす出力が可能であることを確かめた[3, 4]。一方で、開発するパルス電源の設置場所は電源の低インピーダンス化のため加速器リング近傍に設置する必要があり、放射線やビームノイズ環境は実験室環境と大きく異なる。放射線やビームノイズは機器の劣化や誤点弧を引き起こす要因となることが指摘されており[5]、加速器リング近傍で実際にパルス電源を動作させ故障、誤動作の有無や出力安定性を確認する必要がある。そこで加速器リング近傍でのパルス電源動作試験(オンライン試験)システムの構築を行い、KEK-PF 放射光ユーザー運転に合わせて約 3 ヶ月間のオンライン試験を行った。本報告では構築したオンライン試験システムの構成と加速器リング内での試験の状況、出力の長期安定性の評価結果について報告する。

Table 1: Requirements of the Pulse Power Supply

Peak current	500 A (<± 1%)
Timing jitter	< 300 ps
Pulse width	100 ns
Repetition cycle	1 MHz
Operation voltage	15 kV

2. オンライン試験システム構築

加速器リング近傍でパルス電源の動作試験を行うための試験システムを構築した。本章では試験するパルス電源試作機について簡単に述べた後、オンライン試験に必要なシールドボックスの開発と試験システムの構成について述べる。

2.1 パルス電源試作機回路構成

今回試験するパルス電源試作機の回路図を Fig. 1 に示し、その動作について簡単に述べる。試作機の詳細については[3, 4]を参照されたい。回路方式はインダクタンス負荷と共振コンデンサを用いた回路を採用している。回路動作としては、まずスイッチ (SW) オフ状態で高圧 DC 電源から充電抵抗を介し時定数 RC でコンデンサへ充電され定常状態へと至る。その後、SW がオン状態になるとコンデンサに蓄積された電荷がインダクタンス負荷とダイオード、SW を有する回路部(パルサー部)へ流入し始める。この時、インダクタンス負荷であるキッカーとコンデンサで LC 共振を起こし、正弦波を生成する。LC 共振で生成した正弦波はダイオードによって整流さ

[#] sshino@post.kek.jp

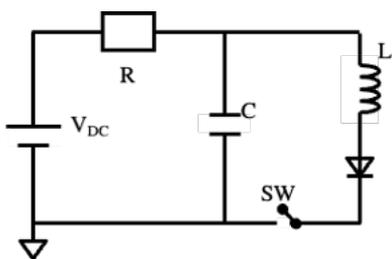


Figure 1: Schematic view of the circuit to generate a half sinusoidal wave pulse. “L” indicates the load of the kicker coil, and “SW” indicates the switch.

れ、ダイオード順方向に流れる正弦半波となる。適切なタイミングで SW を再びオフ状態にすることで、再びコンデンサへの充電が始まり、定常状態へと至る。この SW 動作を繰り返すことで、ダイオード順方向に流れる正弦半波パルス電流を生成する。

Figure 2 は開発した試作機の実際の写真である。スイッチングモジュール (SWM)、コンデンサ、ダイオードなどの各構成要素はモジュール化されており、デバッグや定格のアップグレードを容易にしている。

使用 SWM は(株)ネクスファイテクノロジー製であり [6, 7]、1.2 kV 耐電圧の SiC-MOSFET を 16 直列に接続し(並列数は 1)、一つのモジュールを構成している。MOSFET のオン/オフに必要なゲート信号は一度光信号に変換することで絶縁しており、またそれに必要な電力も無線電力伝送によって絶縁しつつ供給している。SWM の大きさは $12 \times 12 \times 14 \text{ cm}^3$ と小型ながらモジュールとしての耐電圧は 14 kV と高耐電圧であり、200 kHz でのスイッチングが可能なものとなっている。

試作パルス電源は 10 kV での安定的なスイッチング動作を目標に設計されており、コンデンサモジュールの耐電圧は 16 kV、ダイオードモジュールの耐電圧は 18 kV と裕度を持たせてある。また、各モジュール間は高圧シリコンケーブル (20 kV 耐電圧) を使用して接続した。模擬負荷 (dummy load) にはキッカー負荷 ($1 \mu\text{H}$) を模擬した巻線コイルを接続した。これは銅線による手巻きコイルであり、インダクタンス値は実測で $1.1 \mu\text{H}$ である。

実験室環境における試作パルス電源の波高安定度は、

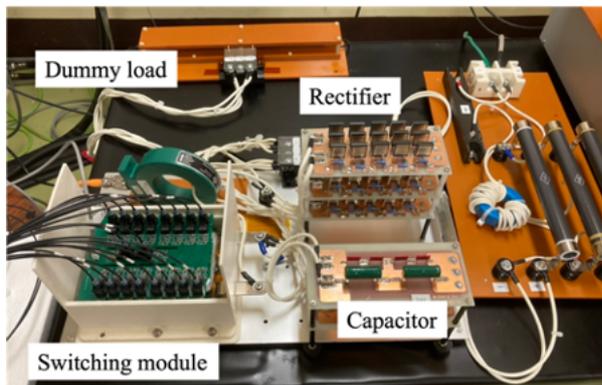


Figure 2: Prototype pulsed power supply using SiC-MOSFET switching module.

100 波形取得時のピーク電流分布の分散を平均値で割った値で算出し、10 kV 印加時(繰り返し 10 Hz)で安定度 0.2% と見積もった。解析に使用したデータは 100 波形であり短期的な安定度の結果であるが、開発目標安定度である 1% を大きく上回っていることを確認している。

2.2 オンライン試験システム用シールドボックスの開発

前節で説明したパルス電源試作機を加速器リングのビームダクト近傍で動作試験を行うためのシステム構築を行った。システムの構築のはじめにパルス電源を格納、設置するためのシールドボックス開発を行った。

Figure 3(a) は開発した電源を格納するシールドボックスの写真である。シールドボックスは SUS304 のフレームに 1.5 mm 厚のアルミ板を取り付けて覆う。特に加速器リングに近い面においては放射線強度が高いと予想されたため、アルミ-鉛-アルミのクラッド構造とした板 (Fig. 3(b)) で覆った。鉛厚の決定においては、飛来する放射線のエネルギースペクトルの情報が十分でなく、実測にも時間がかかると予想されたため、鉛の入手性や加工性、重量を考慮し 1 mm 厚と決定した。鉛厚と放射線減衰量の関係は Fig. 4 に示す通りであり、1 mm 厚の鉛でも偏向電磁石由来の放射光 ($<50 \text{ keV}$) のようなエネルギーの低い放射線については十分に遮蔽可能である。低エネルギー放射線を十分に遮蔽することで、オンライン試験システムで問題が起きた場合には 50 keV を超える高いエネルギーを持った放射線由来の問題が一因とも推定できる。またアルミ板はビームパイプ渦電流に起因するビームノイズを反射、吸収することでシールド材の役割を果たす。板材の選定については加工性、入手性からアルミと SUS304 を検討したが、アルミの方が放射ノイズの反射係数、吸収量が大きいことからアルミを選定した。アルミ板で覆ったシールドボックスは適切にアースし、ビームノイズやパルス電源スイッチング時の放射ノイズでチャージアップしないようにした。シールドボックスの大きさは $350 \times 650 \times 500 \text{ mm}^3$ と加速器一般のパルス電源筐体よりは小さく、また総重量も 20 kg 程度に抑えられており人力での扱いも容易である。

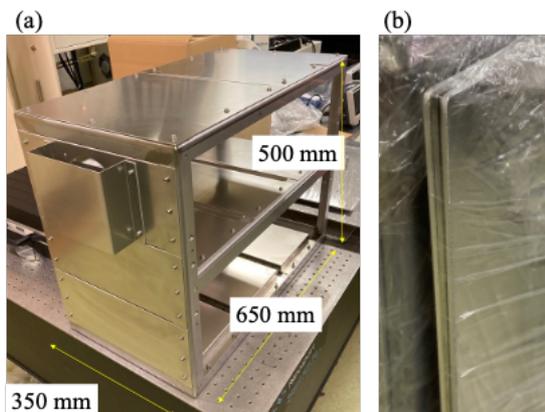


Figure 3: (a) Shielding box consisting of SUS304 frame and Al plate. (b) Side of the shielding box consisting of Al + Pb + Al plate (1.5 + 1.0 + 1.5 mm thickness).

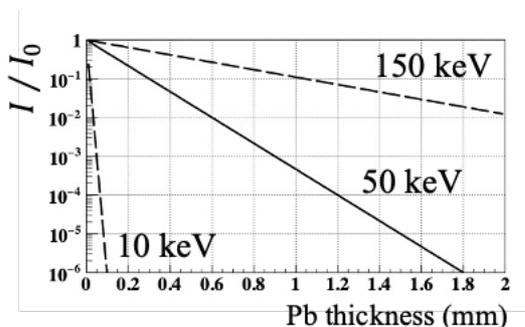


Figure 4: Transmittance of the radiation as a function of the thickness of the lead plate.

2.3 オンライン試験システムのインストール

Figure 5, 6 はオンライン試験システムインストール時の様子である。インストールはシールドボックスの架台への据付、パルス電源のシールドボックスへの格納、配線、モニターの整備の順で行った。加速器運転前に事前の出力試験を行いインストール作業が完了した。

架台はアルミフレームで設計、製作した。シールドボックスとアルミフレーム架台の切り離しは容易にできるようにしてあり、架台自体もキャスターにより移動可能なため、保守や別環境で試験する際の電源システムの移設も容易になるよう設計している。

パルス電源の格納については、シールドボックス内部にパルス電源パルサー部 (SWM, コンデンサ, ダイオード) と充電抵抗を格納した。パルサー部についてはシリコンケーブル由来の浮遊インダクタンスを極力減らすため、シールドボックスの上階にまとめて収納しケーブル長が不用意に長くならないようにした。充電抵抗から共振コンデンサに至る回路部 (充電部) については浮遊インダクタンスがあっても正弦半波出力の波高やパルス幅には影響しないと考え、充電抵抗はシールドボックス下段に収納している。電源以外にもパルス電流波形を測定する CT (ピアソン社製, MODEL 110) や庫内温度を監視する熱電対もシールドボックス内に設置している。

パルス電流出力の高速性能に影響を与えず、かつ放射線ばく露を避けた方が良いパルス電源の構成要素については、加速器トンネル外に設置した制御ラックに収納した。具体的には充電用の高圧 DC 電源 (Glassman HV)、SWM にゲート信号を供給するパルスジェネレータ (Stanford Research Systems, DG645)、制御用小型電源である。加速器リング内の電源システムと制御ラック間の距離はおおよそ 10 m であり、貫通孔を通して適切に配線した。CT 波形は 20 m の同軸ケーブルを制御ラック内のオシロスコープ (RIGOL, DS1104Z) へ繋ぎ、波形の取得を行った。熱電対の信号もラック内に設置したデータロガー (GRAPHTEC, GL840) へ接続し温度の監視を行った。ラック内使用機器の入力電圧はすべて AC 100 V である。

各種モニター (高圧 DC 電源や制御電源の電流・電圧出力、オシロスコープ、温度監視用データロガー) はネットワークハブを通して実験室の PC からモニターするよう整備した。オシロスコープによるデータ取得は Python に

より自動で行うようにしており、またデータ取得時に簡易解析を行うことで異常検知も行うようにした。プログラムによる自動化と各電源がもつインターロックと合わせることで長期間データ取得する際の人的な負担を減らすよう努めた。

放射線ばく露量のモニターについては、KEK 塩澤氏の協力のもとガフクロミックフィルムを使用して行うこととした。ガフクロミックフィルムは飛来放射線のエネルギースペクトルやばく露量の時間トレンドを測ることはできないが、設置が非常に容易でスペースも取らないといったメリットがある。今回、シールドボックス内外に複数枚フィルムを貼り付け、放射線環境をモニターするようにした。

機器の配線の接地については、パルス電源を接地せずに運用するようラック内の AC 100 V 系統は全て絶縁トランスで浮かした。開発したパルス電源試作機は接地せずに運用できるよう設計しており、こうした設計をしておくことで、接地して運用することになっても機器の耐電圧は保証して運用することが可能である。

最後に、高圧機器の危険掲示や警告灯の設置し、出力試験を行い問題がないことを確認してインストールを完了とした。

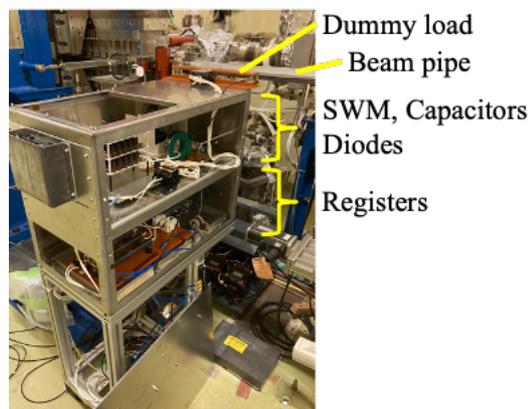


Figure 5: Shielding box and the prototype pulsed power supply in the middle of the installation.

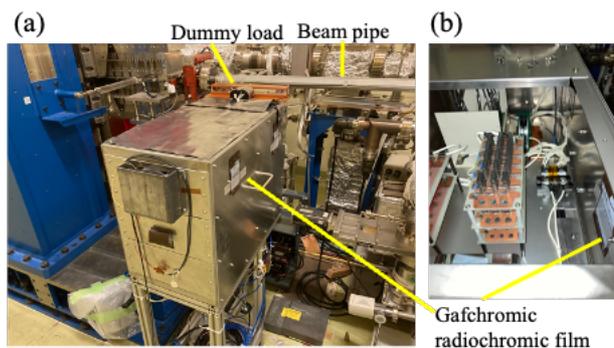


Figure 6: (a) Shielding box and the prototype pulsed power supply after the installation. (b) The inside of the shielding box. Gafchromic films were set the inside and the outside of the shielding box.

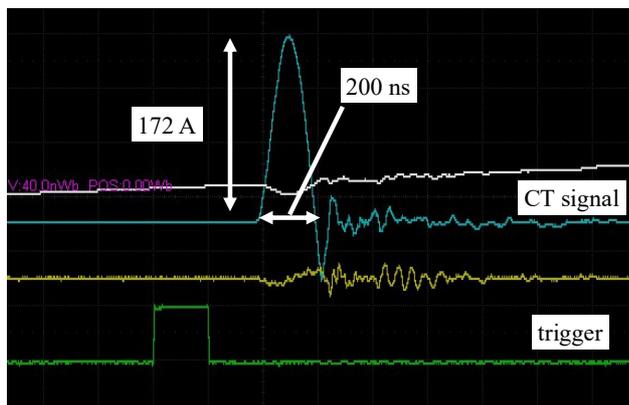


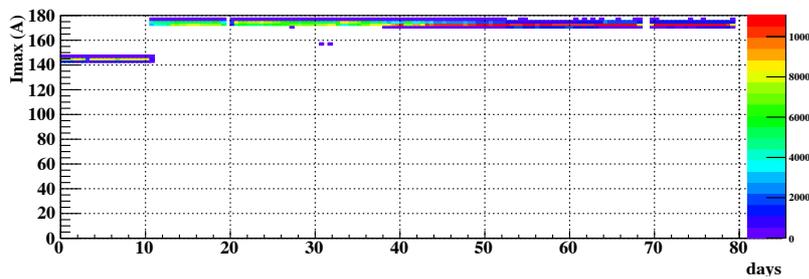
Figure 7: Waveform of the output pulsed current measured with a CT. The supplied voltage was 10 kV, and the switching repetition rate was 10 Hz.

3. 長期動作試験結果

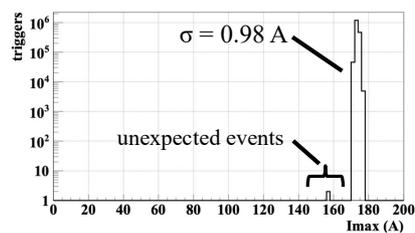
3.1 長期試験時におけるパルス出力安定性

インストールした試験システムを用いてパルス電源の動作試験を実施した。Figure 7 に定格 10 kV の電圧を印加時の取得波形を示す。10 kV 印加時でピーク電流は 172 A、パルス幅 200 ns の正弦半波出力に成功した。ピーク電流に関しては CT-オシロ間の同軸ケーブル (20 m) で 7%減衰していることも分かっている。これは出力パルス幅が 200 ns と狭く、周波数にして 2.5 MHz 相当のパルスとなるためケーブル長が 20 m 程度であっても減衰の影響を受けやすいためである。パルス幅がマイクロ秒以上 (周波数にして 500 kHz 以下) ではこうした減衰はほとんど気にしなくて良い問題であり、100 ns レベルの短パルス出力を観測する際に注意が必要である。今後は減衰の少ないケーブルの選定や、較正により波高を再現できないか検討する。長期試験に関しては、ピーク電流値の減少は見かけのものであり、実際の動作には問題がないと判断して長期動作試験を継続した。

Figure 8(a)は長期出力試験時のピーク電流値の時間トレンドである。横軸はデータ取得開始日からの日数で縦軸はピーク電流値である。長期出力試験の初めにおいては、10 日間ほど慣らし運転のためパルス電源試作



(a) Output pulsed peak current as a function of time.



(b) Histogram of the output pulsed peak current.

Figure 8: Stability of the output peak current. The supplied voltage was 8 kV for the first 10 days and 10 kV for the last 70 days. During a long-term test, no serious trouble was observed, but two unexpected peak events were measured.

機定格の 8 割である 8 kV の電圧印加で運転し様子を見た。動作に問題がないことを確認したので、定格である 10 kV まで印加してスイッチング試験を継続した。繰り返しは充電抵抗の電力定格の制限から 10 Hz で運用した。結果として、合計で約 80 日間、総 SW 回数 70×10^6 回に及ぶ試験を継続することができ、その間に機器が重故障して止まるといったことも発生せずは無事終了することができた。

Figure 8(b)は 10 kV 印加時のピーク電流値のヒストグラムであり、Fig. 8(a) 10 kV 印加時のピーク電流値分布を y 軸に射影したものと同等である。解析に使用したイベント数はデータ取得レートが使用オシロによって制限されているため 1×10^6 と総 SW 回数より少ないが、安定性の評価には十分な統計量である。ピーク電流の安定性はヒストグラムの平均値 (I_{peak}) と分散 (σ) から σ/I_{peak} で求め、0.57% と見積もった。これにより 3 ヶ月連続動作でも要求安定度である 1% を切る安定性を確保できていることが分かった。ただし、実験室環境での安定度は 0.2% であったため悪化している。わずかではあるが波高が徐々に減少しているようにもみえ、引き続き長期試験にてモニターを行う。また、ピーク電流値が 156 A と低いイベントが 2 例見つかった。Figure 8(a)でも分かるように、試験開始後約 1 ヶ月で発生しており、その後は発生していない。低頻度のため原因は現在わかっておらず、引き続き長期試験を行い調査する。上記の問題が SW 回数に比例する問題であれば繰り返しを上げた試験が効率的なため、今後高繰り返し可能な試験システムも立ち上げ、問題が再発するか検証する。

3.2 長期試験終了後に判明した課題

3 ヶ月弱の長期試験終了後にガフクロミックフィルムの回収とパルス電源の外観確認を行った。その際に見つかった事象について述べる。

ガフクロミックフィルムによる放射線計測であるが、シールドボックス内部では 1~2 Gy であった。シールドボックス内部でもビームパイプに近い方が線量は高い傾向を示していた。またシールドボックス外に貼り付けたフィルムからシールドボックスによる放射線の減衰率を 1/50 程度と見積もった。シールドボックスの鉛厚は 1 mm で 50 keV 以下の放射線ほとんど透過しないため (透過率 1/1000 以下)、遮蔽効果の低い 50 keV を超える放射線がビームパイプ方向から飛来し、3 ヶ月弱の運転で数 Gy 蓄積したと思われる。長期試験で見つかった安定

性の悪化やピーク電流の低いイベントも高エネルギー放射線が引き起こした可能性は否定できないため、実験室環境で月単位の長期試験を行い現象が再現できるか確認する予定である。

試験後の外観検査では、シリコンケーブルの被覆が劣化していることを確認した。ケーブルの劣化は絶縁破壊に繋がるおそれがあり、機器全体を破壊してしまう可能性があるため注意が必要である。Figure 9(a)は遮蔽用鉛とシリコンケーブルが接触していた箇所の様子である。鉛にシリコンケーブルの接触面に沿って白い析出物が現れていることが分かる。Figure 9(b)はシリコンケーブル表面の拡大図であり、ケーブル表面が毛羽立っていることが確認できた。鉛だけではなく、アルミ面に接触していた箇所でも同様の事象が確認されている (Fig. 10)。白い析出物について KEK 放射線科学センターに成分分析を依頼した。析出物はアモルファスシリカ (SiO_2) という結果が得られ、シリコンケーブル被覆由来であると推定された。劣化の原因としてはコロナ放電により発生したオゾンによる腐食が考えられるが、放射線由来の可能性についても考慮し、今後実験室環境で月単位の長期試験を行って現象が再現できるか確認する予定である。

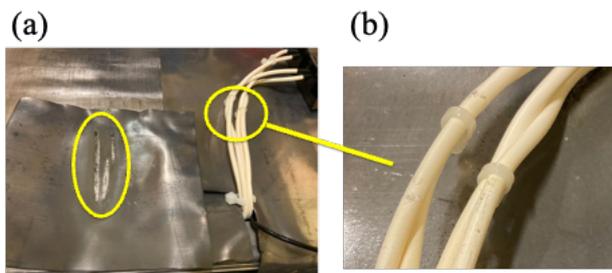


Figure 9: (a) Photograph of the white deposition observed at the lead plate. (b) Enlarged photograph of the silicon cable.



Figure 10: Photograph of the white deposition observed at the Al plate.

4. まとめと今後

KEK-PF ではカムシャフトバンチシステム導入のための半導体高速パルス電源の開発を進めている。2022 年度に開発したパルス電源試作機を加速器リング近傍で動作試験するためのシステム構築を行い、3 ヶ月に及ぶ

長期動作試験に臨んだ。結果として3 ヶ月間大きな問題はなく動作し続け、出力波高の安定度は 0.57%と要求性能を満たすことを確認した。これにより加速器環境下でも安定動作可能なパルス電源の構築に成功した。一方で、意図しない波高を持ったイベントやケーブルの劣化が見られた。これらは長期試験によって明らかになった問題であり、開発課題を見つけ出すことのできる試験システムの構築に成功したと言える。ただし、生じた問題の原因特定はできておらず、今後問題の切り分けのために実験室環境でも月単位の長期試験を行い原因の絞り込みを行う。実際に 2023 年はじめに実験室でオンライン試験システムと同等の長期試験可能なシステムを立ち上げており、オンライン試験と並行して試験を進めている。

また電源目標定格に向けて試作 2 号機の製作を進めている。充電抵抗の電力定格増強や、エネルギー回生回路導入による充電の効率化、大電流・高耐電圧・高繰り返し動作が可能な真空コンデンサ、水冷ヒートシンクを搭載した 24 kV 耐電圧 SiC SWM の導入により、15 kV 運用可能で、500 A ピーク電流、400 kHz 繰り返し、150 ns パルス幅を出力可能なパルス電源試作機を 2023 年度中に製作し、試験を行う予定である。

長期試験で得た知見を適切に試作機へフィードバックし 2024 年度末までに SiC-MOSFET スwitchングモジュールを用いた開発目標を満たすパルス電源の構築を目指す。

謝辞

本研究は JST A-Step 産学共同本格型 (体系的課題番号: JPMJTR201A) に基づき行った研究である。ガフクロミックフィルムの設置、解析に関して KEK 塩澤氏、析出物の分析に関して KEK 放射線科学センターにご協力頂きましたので感謝申し上げます。

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.* 109, 264801 (2012).
- [2] C. Sun *et al.*, "Characterization of pseudosingle bunch kick-and-cancel operational mode", *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 18, 120702 (2015).
- [3] S. Shinohara *et al.*, *Proc. IPAC'23, Venezia*. doi:10.18429/jacow-ipac2023-thpa168
- [4] S. Shinohara *et al.*, *Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18 - 21, 2022, Kyusyu University Online, Japan*. p1010.
- [5] K. Kobayashi *et al.*, "RADIATION DAMAGE EFFECTS AND PERFORMANCE OF POWER MOSFET USING SPRING-8 FAST PULSE DRIVING POWER SUPPLY", *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9 - 11, 2014, Aomori University Online, Japan*. p677.
- [6] NexFi Technology Inc., <https://www.nexfi-tech.com>
- [7] T. Nakamura, K. Nishioka, Y. Nishimura, T. Hanada and T. Okuda, "Application of SiC power devices to ultra-high voltage equipment," *2022 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, Kyoto, Japan, 2022, pp. 146-149. doi:10.1109/ICSJ55786.2022.10034706