

J-PARC における加速器用パルス電源の半導体化

SEMICONDUCTOR PULSE POWER SUPPLIES FOR ACCELERATORS AT J-PARC

高柳智弘^{#, A)}, 小野礼人^{A)}, 不破康裕^{A)}, 篠崎信一^{A)}, 堀野光喜^{B)}, 植野智晶^{B)}, 杉田萌^{A)},
山本風海^{A)}, 小栗英知^{A)}, 金正倫計^{A)}, 小田航大^{C)}, 亀崎広明^{D)}, 生駒直弥^{D)}, 中田恭輔^{D)},
虫邊陽一^{D)}, 徳地明^{D)}

Tomohiro Takayanagi^{#, A)}, Ayato Ono^{A)}, Yasuhiro Fuwa^{A)}, Shinichi Shinozaki^{A)}, Koki Horino^{B)}, Tomoaki Ueno^{B)},
Moe Sugita^{A)}, Kazami Yamamoto^{A)}, Hidetomo Oguri^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)}, Kodai Oda^{C)}, Hiroaki Kamezaki^{D)},
Naoya Ikoma^{D)}, Kyosuke Nakata^{D)}, Yoichi Mushibe^{D)}, Akira Tokuchi^{D)}

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

Abstract

Silicon carbide (SiC) power devices are being developed because of their higher breakdown voltage, lower loss, and superior high-current switching characteristics compared to Si (silicon) semiconductors. We are developing a SiC power device-based pulsed power supply to replace the RCS kicker power supply using thyatrons and to update the LINAC klystron power supply system using ignitrons at J-PARC. The evaluation results by the test machine and the future plane for the development of the semiconductor pulse power supplies will be reported.

1. はじめに

シリコン (Si) の半導体に比べ、高耐圧、低損失、高速動作の性能に優れたシリコンカーバイド (SiC) のパワー半導体が、大電流の高速スイッチング特性を活かし、市場を拡大している[1, 2]。大強度陽子加速器施設 (J-PARC)[3]では、放電管のサイラトロンを用いた RCS キッカー電源の代替と、イグナイトロンを用いた LINAC クライストロン電源システムの更新を目的に、SiC パワー半導体のパルス電源の開発を進めている。

キッカー電源用に、SiC-MOSFET と誘導電圧重畳回路 (LTD)[4]方式を組み合わせたモジュール回路基板を開発した[5-9]。試作と評価試験を得て、定格出力 40 kV/2 kA、パルス幅 1.2 μ s、繰り返し 25 Hz、フラットトップ平坦度 ± 1.0 % 以下の要求仕様を実現した。さらに、同軸ケーブルを用いた実機相当の条件にて、安定した 8 時間の連続通電を達成した[10]。しかし、通電後に、コロナ放電による緑青が伝送導体部に確認された。本研究では、放電対策で一般的な絶縁油を使わず、絶縁体構造でコロナ放電を抑制する絶縁筒碍子を開発した。

クライストロン電源用には、コンデンサと充放電用半導体スイッチを組み合わせた MARX 方式を採用した[11-13]。大型のコンデンサバンクやパルストランスを必要としないため、小型化と、半導体の安定度と信頼性を備えたパルス電源を実現できる。クライストロン電源の設計仕様は、出力 120 kV/60 A、パルス幅 830 μ s、電圧リプル ± 0.1 % 以下を目標とする。本研究では、出力 8 kV/60 A の主回路ユニットを 1 台と、パルスドループを補償する出力 800 V/60 A の補正回路ユニットの 1 台を試作した。さらに、2.2 kV/2.4 kW の高耐圧 SiC インバータ充電器を製作し、組み合わせ試験による特性評価を実施した。

各試験の評価結果と、半導体化の開発について今後の展望を報告する。

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

2. 新キッカー電源

2.1 開発の歴史と現在の問題点

2017 年に、出力 3.8 kV/2 kA の開発からスタートし、2021 年には、模擬負荷を使った定格出力 40 kV/2 kA を実現した。また、実負荷の 130 m 同軸ケーブルを使い、反射波を使った実機相当の試験において、要求精度を満足することを確認した。試験時の写真と測定結果を Fig. 1 と Fig. 2 に示す。本試験にて、RCS キッカー電源の代替に必要な性能を確認することができた。さらに、誤動作や故障による停止が無く、8 時間の連続運転も達成した。しかし、強制空冷の効果が小さく、基板上的の反射波吸収用抵抗器は ΔT = 約 120 $^{\circ}$ C の温度上昇となった。本結果を受け、制御盤内に冷却用ダクトの追加を検討する。詳細は、亀崎弘明氏 (PPJ) の“1.7kV SiC MOSFET を用いた半導体キッカー電源用 LTD 回路ユニットの連続運転” (PASJ2022, THP039) [10] を参照する。

8 時間の連続通電を 3 セット実施した後、装置の目視点検にておいて、電力伝送用の外導体リングの内側に緑青が確認された。電力伝送部の縦断面図と内導体油浸部の写真を Fig. 3 に、緑青部の写真を Fig. 4 に示す。

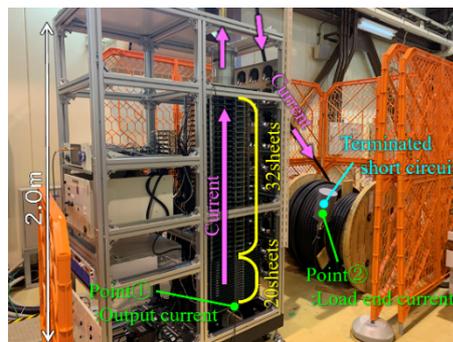


Figure 1: Picture of the experimental testing machine.

2.2 電位固定型絶縁筒の開発

LTD 方式を採用した本回路基板の電力伝送部は、誘導電圧が重畳される外導体と、出力部の中心側の内導体を組み合わせた同軸構造をしている[5-9]。内導体と外導体の間には、回路基板を階層的に直列接続した枚数に合わせた最大出力電圧が印加される。初期の放電対策では、内導体を絶縁油に浸した液体絶縁と、外導体との間に空間を設けた気体絶縁を組み合わせていた。20 kV までの通電では特に問題は見られなかったが、40 kV の通電を実施した後、コロナ放電が原因と思われる緑青が、空気層に触れる外導体の内面に確認された。継続してコロナ放電が発生すると、絶縁劣化が進行し、絶縁破壊が生じる可能性が高くなる。そこで、空気層が無く、コロナ放電を抑制する新しい絶縁構造を着想した。Figure 5 に伝送導体の新旧横断面図を示す。

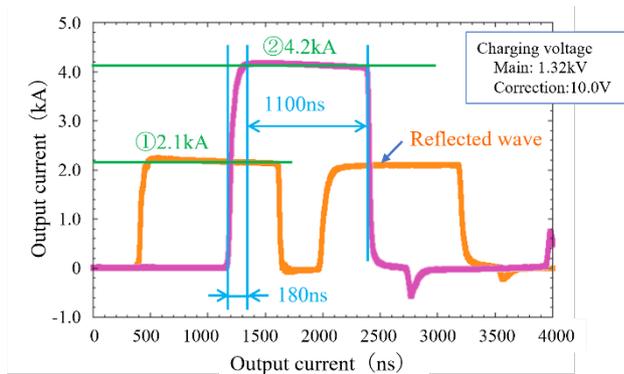


Figure 2: Measured waveforms in actual load test.

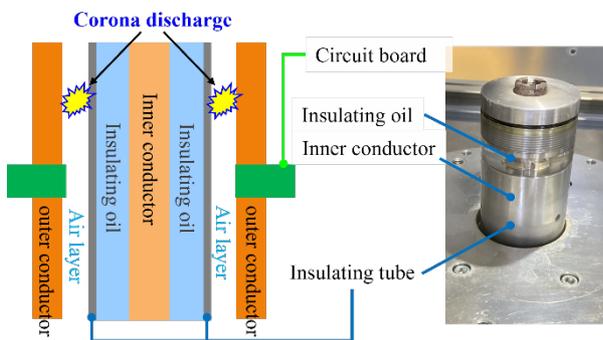


Figure 3: Longitudinal sectional view and photograph of oil-immersed area.

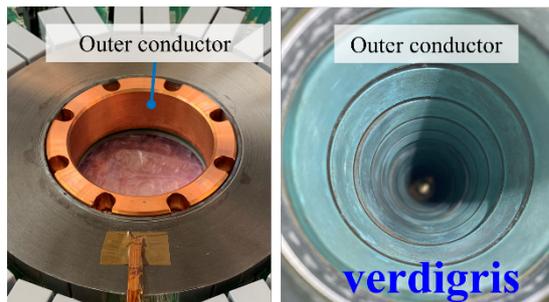


Figure 4: Photographs of confirmed verdigris areas.

新しい絶縁筒は、内導体を囲む絶縁筒の内と外の面をそれぞれメッキ塗装する。そして、金属の接触子を用いて、内導体と外導体に電気的接触をさせる。これにより、絶縁筒面のメッキは各導体の電位となり、空気層が無く、電極が絶縁体を直接挟む個体絶縁構造となる。

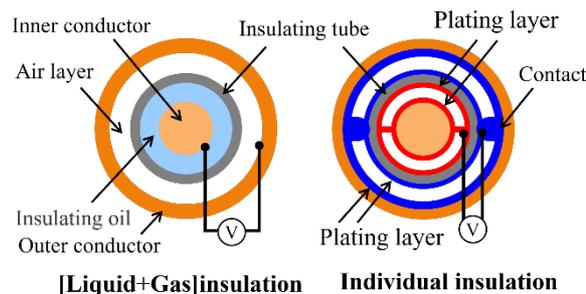


Figure 5: Comparison of cross-sectional views of transmission conductors. Left: Old type, Right: new type.

製作した絶縁筒の写真を Fig. 6 に示す。3D プリントで製作し、メッキ部は導電塗料で仕上げた。高さは製作限界の 150 mm となっている。メッキは外導体の銅リングの高さ 30 mm と合わせてある。上下のメッキ間には、回路基板厚さの 5 mm を絶縁体のまま残している。回路基板階層時の上下電位差分 1250 V の沿面距離となる。

出力電圧が 800 V の LTD 主回路基板 (M19 型) を 4 枚用いて出力 3.2 kV の通電を行い、新絶縁筒の効果を評価した。回路インピーダンスとパルス出力波形の形状を絶縁筒の有無で比較し、放電が無いこと、出力波形に絶縁筒の影響が無いことを確認した。測定結果を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。本番機では、主回路基板 32 枚、補正基板 20 枚で階層高さが 1.6 m、出力電圧が 40 kV になる。長尺に対応した絶縁筒の開発が必要になる。

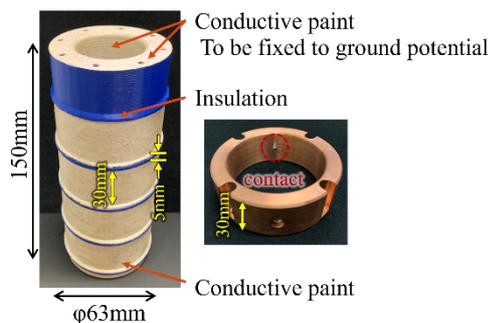


Figure 6: Picture of the insulating cylinder produced.

2.3 省電力化

SiC-MOSFET を用いて開発中の新キッカー電源は、省電力化にも貢献する。60 kV/3 kA/25 Hz の利用運転時のパラメータを例とし、現キッカー電源の使用電力と比較をした。出力性能仕様は、新キッカー電源が 4 ユニットで現キッカー電源の 1 台 (双子型) に相当する。電力測定の結果、新キッカー電源は 7.43 kW 相当、現キッカー電源は 9.87 kW となり、新キッカー電源に代替することで 25 % の省電力化を実現する。さらに、強制空冷のみであるため、電源用冷却水設備と、定期的に交換が必要となるサイラトロン の 予備機購入費用を削減できる。

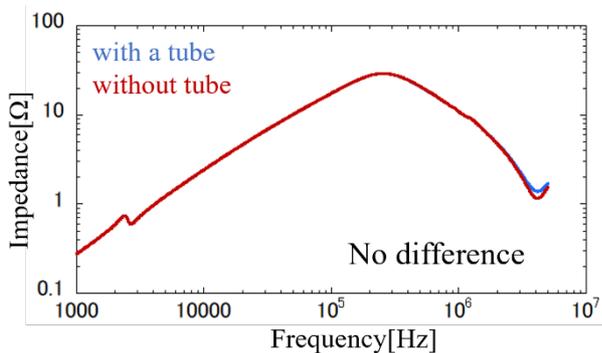


Figure 7: Circuit impedance measurement results.

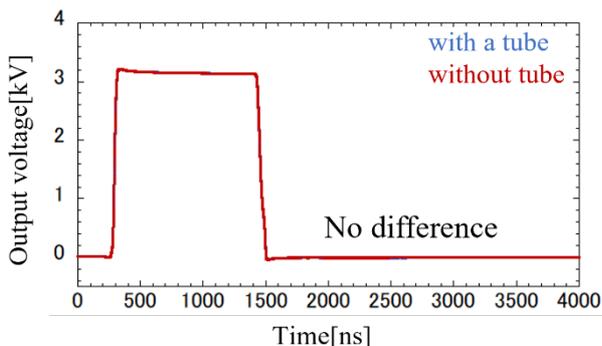


Figure 8: Measurement result of pulse output waveform.

3. 新クライストロン電源

3.1 設計概要

クライストロン電源の短絡保護のクローバー装置に使うイグナイトロンの製造中止への対策として、代替半導体スイッチの開発を進めている[14, 15]。これと並行し、コンデンサバンクやパルストランスなどの老朽化による故障や計画外停止を予防するため、クライストロン電源システムの更新を検討し、半導体を用いたパルス電源の開発を開始した。本半導体電源には、SiC-MOSFETを用いたMARX方式を採用する。現クライストロン電源システムの構成と、MARX電源への更新時に変更となる部分をFig. 9に示し、主な内容を以下に示す。

- AC6.6 kV から AC400 V に変更
- AC400 V になるため VCB と Down Trans. は不要
- AVR と H.V. Trans. React. は充電器に置換
- コンデンサバンクを MARX 回路のコンデンサに置換
- クライストロン短絡時はパルスを停止するため、かつ、コンデンサバンクが無くなるため、イグナイトロンとクローバー回路は不要
- 電源 1 台とクライストロン 4 本の接続を、1 対 1 に変更
- ディスクは不要
- アノード変調器とバイアス回路は MARX 回路に置換
3 極管クライストロンのアノード端子を抵抗分圧で印加し、2 極化して使用

3.2 新 MARX 電源の開発

本研究では、性能評価用として、主 MARX 回路ユニットを 1 台、補正 MARX 回路ユニットを 1 台、主回路用高電圧充電器を 1 台製作する。本番機と評価用試作機の仕様を Table. 1 に述べる。また、本番機のブロック回

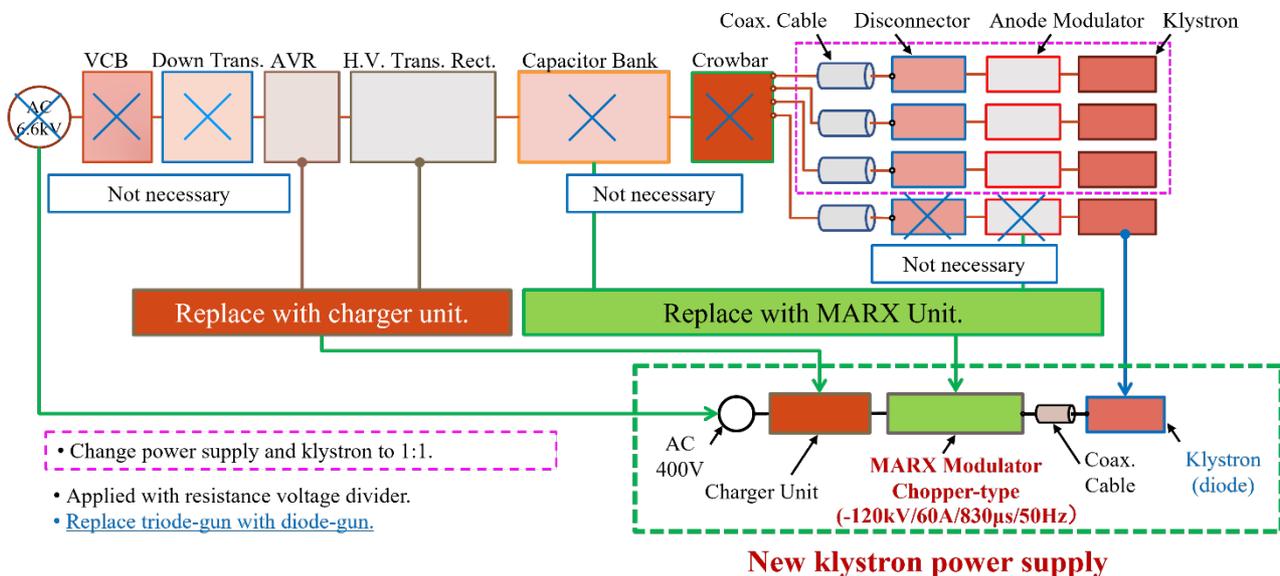


Figure 9: Overview of the current klystron power system and the changes that will be made when MARX replace to the new klystron power system.

路図を Fig. 10 に、製作する機器の主な仕様内容を以下に示す。

- ◆ 主 MARX 回路ユニット
 - 1.7 kV/72 A SiC-MOSFET
 - 8 kV/60 A
 - 2S2P:4 段 MARX 構成
- ◆ 補正 MARX 回路ユニット
 - 250 V/240 A Si-MOSFET
 - 800 V/60 A
 - 80 V×10 段:800 V
 - ドループ補正:10% ⇒1%
- ◆ SiC インバータ充電器
 - 充電電圧 2.2 kV/2.4 kW
 - 出力 1.1 A
 - 出力電位 1.2 kV フローティング
 - 安定度 ±0.1%以下

Table 1: Final Design Production and Prototype Specifications

Item	Actual machine	Test machine
Output voltage	-120 kV	-8 kV
Output current	60 A	60 A
Pulse width(flat-top)	830 μs	830 μs
Repetition	25 Hz/50 Hz	1 Hz
Ripple	<0.1 %	<1 %
Main circuit	8 kV 15 units	8 kV:2 kV×4cells 1 unit
Correction circuit	12 kV 120 V/100 cells	800 V 80 V/10 cells
Mean power	300 kW/25 Hz	20 kW/25 Hz

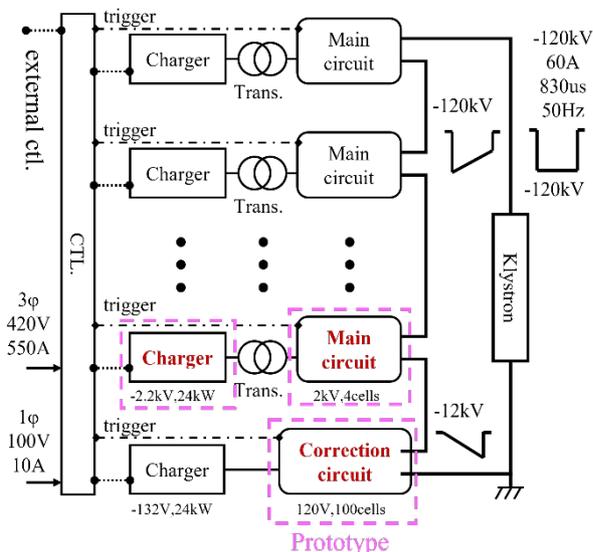


Figure 10: Block diagram of the production machine.

3.3 試験結果

評価試験の結果を Fig. 11 に、フラットトップ部の拡大波形を Fig. 12 に示す。主 MARX 回路のみの通電では、出力電圧 8 kV、フラットトップ幅 830 μs のパルスを出力する。このとき、フラット部には 400 V(5%)のパルスドループが発生した。ドループの補償には、10 段の MARX セルを持つ補正 MARX 回路を使用する。本試験では、80 μs の時間間隔で出力した 10 段のステップ状の波形を合成し、パルスドループを補償する。主 MARX 回路、補正 MARX 回路、インバータ充電器の組み合わせ試験において、パルスドループを 56 V(0.7%)にまで補償した。また、SiC インバータ充電器の単体試験を実施し、25 Hz の繰り返し充電において、±0.02%の安定度を確認した。本試験の結果より、120 kV 出力の実機のパルスドループ補償において、0.1%以下の性能達成の見通しを得た。

3.4 クライストロン電源用 MARX 回路の特徴

1ユニット 8 kV の主 MARX 回路の 15 ユニートを同じタイミングで出力する。補正 MARX 回路は、100 の MARX セルを 1 ユニートで構成し、10 セル1組として各々が独立したタイミングと異なるパルス幅で 10 段のステップ状の波形を出力する。出力電圧 120 kV の 100 分の 1 (120 V)を出力し、パルスドループを 0.1%まで補償する。主回路と補正回路を異なる設計仕様で製作し、出力波形を合成してパルスドループを補償する方法は、キッカー用 LTD 半導体パルス電源の方式で実績がある。また、3.3 章の試験結果より、本方法は、ロングパルスのドループ補償においても、高い精度で平坦度補正が可能であることを示している。

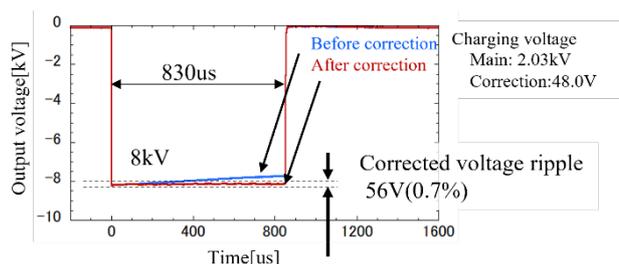


Figure 11: Output waveform of the main MARX circuit and waveform after flatness correction compensating for pulsed loops.

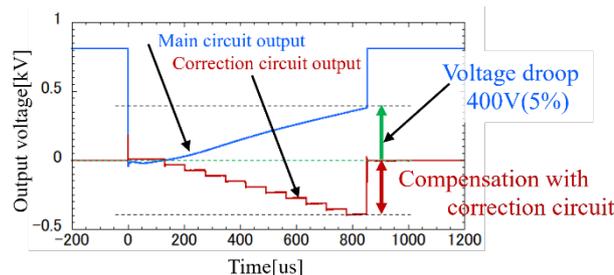


Figure 12: Waveform with enlarged flat top section.

4. まとめ

J-PARC では、加速器用パルス電源の半導体化を進めている。キッカー電源を代替する LTD 回路を採用した半導体パルス電源の開発では、定格仕様を満足した。今後、コロナ放電を抑制した長期安定運転の実現に向け、電位固定型長尺絶縁筒の開発を進めていく。

クライストロン電源システムの更新を目的に、MARX 方式を採用した半導体パルス電源の開発を進めている。出力パルスの主要部分を形成する主 MARX 回路と、パルスドロープを補償する補正 MARX 回路、高耐圧 SiC インバーター充電器の試験機を製作し、組み合わせ試験にて、所期性能を確認することが出来た。

次世代半導体を用いたパルス電源の開発は、放電管の代替を目的にスタートした。しかし、半導体の特性を活用した高精度で安定性に優れたパルス運転だけでなく、装置の省電力化にも貢献できることを確認した。今後は、持続可能な開発目標として、次世代半導体を用いたパワエレ技術を創出し、省電力化の技術基盤の開発と、新パルス電源の実用化に向けた開発を進めていく。

謝辞

2.2 章「電位固定型絶縁筒の開発」の研究は、JSPS 科研費 JP21K04014 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] A. Tokuchi *et al.*, “SiC 化が進む加速器用高電圧パルス電源の研究”, Proceedings of PASJ2017, TUOM02.
- [2] W. Jiang *et al.*, “パワー半導体を利用した高繰り返しパルスパワー電源の進展”, J. Plasma Fusion Res. Vol.94, No.4(2018), pp191-211.
- [3] <https://j-parc.jp/c/index.html>
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] T. Takayanagi *et al.*, “RCSキッカー用半導体スイッチ電源”, Proceedings of PASJ2020, WEOO04.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] H. Kamezaki *et al.*, “1.7kV SiC MOSFET を用いた半導体キッカー電源用 LTD 回路ユニットの連続運転”, in these proceedings of PASJ2022, THP039.
- [11] M. Akemoto *et al.*, “マルクス回路方式によるパルスドロープ補償”, Proceedings of PASJ2012, THPS108.
- [12] M. Akemoto *et al.*, “KEK における ILC クライストロン電源開発の現状”, Proceedings of PASJ2014, MOOI07.
- [13] C. Kondo *et al.*, “SiC 半導体を用いた電子銃用 50kV パルス電源の開発”, Proceedings of PASJ2019, THPH031.
- [14] A. Ono *et al.*, “大電力クローバ回路用半導体スイッチ”, in these proceedings of PASJ2022, TUP038.
- [15] N. Ikoma *et al.*, “半導体クローバスイッチのための自己給電回路の開発”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, WEP049.