

13kV高電圧SiCデバイスの加速器応用に関する研究

RESEARCH ON ACCELERATOR APPLICATIONS OF 13 kV HIGH VOLTAGE SiC DEVICES

徳地明^{A)}, 福田憲司^{B)}, 岡村勝也^{C)}, 神藤勝啓^{D)}, 柴田 崇統^{C)}, 内藤富士雄^{C)}

Akira Tokuchi^{A)}, Kenji Fukuda^{B)}, Katsuya Okamura^{C)}, Katsuhiko Shinto^{D)}, Takanori Shibata^{C)}, Fujio Naito^{C)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

^{B)} AIST, ADPERC

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

^{D)} J-PARC/JAEA

Abstract

A large number of high-voltage pulsed power supplies used in the accelerator system used discharge tubes such as thyratrons, because of high-voltage more than several tens kV, large currents more than several kA, fast rise time less than several tens ns. However, these discharge tubes had many shortcomings such as short lifetime, low repetition frequency, necessity of auxiliary power supply, poor stability. The performance of the accelerator had remarkably deteriorated by the discharge tube. In recent years, due to the rapid development of SiC semiconductor devices, the voltage and current of the device have been increasing year by year, and the switching time has been improved and the operating frequency has been increased. Particularly, devices with over 10 kV of a rated voltage are also being developed, and by using this ultra-high voltage devices, it is expected that the high voltage pulse power supply for accelerator will be innovatively downsized and improved in performance, many shortcomings of the discharge tubes have been overcome and accelerator performance has also improved significantly. In this paper, we introduce some attractive demonstration using 13 kV SiC devices. We have conducted systematic research on the direction of high voltage pulse power supplies for future accelerators. A part of this research was conducted as a joint project "Tsukuba Power Electronics Constellation (TPEC)" project.

1. はじめに

従来、加速器用の高電圧パルス電源は、高電圧、大電流、短パルスと言った、非常に厳しい、使用条件のために、半導体化が進まず、未だに、サイトロンなどの放電管が使用されている。1904年に真空管が発明されてから、電気製品は商品化が進んだが、1939年に半導体デバイス開発されると、全ての電気製品は半導体化により、小型化、低コスト化、高性能化が急速に進み、今では、真空管は見る事がなくなった。唯一、加速器用電源や大電力マイクロ波発生用に一部、真空管あるいは放電管が利用されてきた。しかし、これらの放電管は、寿命が短い、メンテナンスが必要、付帯電源が必要、安定度が悪い、価格が高いなどの多くの欠点があり、多くのパルスパワー産業応用の足かせとなってきた。

シリコンを中心とした半導体デバイスも高電圧化、大電流化、高速化が進み、更にはパルスパワー・エレクトロニクスと呼ばれる、回路技術の発展により、高電圧、大電流、短パルス、高繰り返しと言った非常に厳しい使用条件においても使用可能な半導体パルス電源が開発されてきた。これは非常に多数の半導体デバイスを直列・並列に動作させることによって実現している。

更に近年になり、新たな半導体であるシリコンカーバイド(Silicon Carbide: SiC)半導体[1]のデバイス開発が進み、より高電圧、より大電流の半導体デバイスが使用可能な状況となり、特に、加速器用の高電圧パルス電源開発に

当たって非常に恵まれた状況になってきている。最近では定格電圧が10 kVを超えるSiCデバイスも試作されるようになり、これらのデバイスを使用することにより、Siデバイス使用時に比べて遙かに少ない数のデバイス数でパルス電源が実現できるようになってきた。

この論文では、産業技術総合研究所で試作された定格電圧13 kVのSiCデバイスの特徴とこのSiCデバイスを使用した加速器用高電圧パルス電源の実施例を説明すると共に、今後の加速器用高電圧パルス電源の方向性についてもコメントする。

2. シリコンカーバイド(SiC)の特徴

Table 1にSiCの特徴的な性質を記載した。まずSiCはエネルギーギャップが3.26 eVとSiに比べて約3倍の値を有している。このため、200°C以上の高温での動作が可能となっている。これは加速器用電源としては高繰り返しでのパルス運転が可能であることを示している。又、電界破壊強度が3 MV/cmとSiの10倍の値を有している。この為、この為、同じ耐圧であればSiの10分の1の厚さでよく、ON抵抗は理論上300分の1に削減可能だ。又、従来と同じ厚さとした場合は10 kV以上の高電圧デバイスが実現可能となる。更に、熱伝導率は4.9 W/cmKとこれもSiの約3倍の値を有します。この為、より良好な放熱特性を得られ、ハイパワーの高繰り返しパルス発生が可能となる。最後に、飽和ドリフト速度も 2.7×10^7 cm/sと、これもSiの約3倍の値を有しており、更に高周波での動作を実現できる。

#tokuchi@myppj.com

これらの多くの優れた特性により、SiC デバイスは加速器用高電圧パルス電源にとって、極めて有益なデバイスであると言える。

Table 1: Characteristics of Silicon Carbide(SiC)

Item	Si	SiC	Characteristics
Energy band gap (eV)	1.12	3.26	High temperature operation (>200□)
Break down field (MV/cm)	0.3	3.0	High voltage (>10kV) Low resistance (1/300)
Thermal conductivity (W/cmK)	1.5	4.9	High heat dissipation
Saturation Drift Velocity:10 ⁷ (cm/s)	1.0	2.7	High frequency operation

3. 開発が進む高電圧 SiC デバイス(>10 kV)

Table 2 に現在、国立研究開発法人産業技術総合研究所と共同研究体つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション(TPEC)のプロジェクトにより開発された 10 kV 以上の高電圧 SiC デバイスを示す[2]。

IGBT では、コレクタ電圧 16 kV のものが開発されており、第13回加速器学会で理研 SACLA の近藤先生らによって評価試験の結果が報告されている[3]が、単体で

200 A のパルス電流を流せることが確認できている。スイッチング時間も 100 ns 程度と問題のない早さを示している。ただし、SiC の IGBT は安定した製造が難しく、今後は、SiC-MOSFET に移行していく可能性が高いと考えている。

又、MOS-FET でも 3.3 kV 定格のものと共に 13 kV 耐圧のもの開発が進んでいる。3.3 kV 品はすでに、量産を視野に入れて商品化が進められている。13 kV 品については、今後の市場動向を注視しながら、量産化について慎重に計画されていくことになると考えられる。13 kV 定格の SiC-MOSFET の実物の写真を Fig. 1 に示す。大きさも 14 mm×16 mm 程度であり、非常に小さいが、我々の試験では気中で 10 kV の使用は可能だった。



Figure 1: 13kV SiC-MOSFET developed by TPEC.

Table 2: Silicon Carbide Devices (>10kV) under Development at TPEC

Device	Voltage (kV)	Current (A)	Switching Time (ns)	Main Applications in Particle Accelerators
IGBT	~16	200	100	Klystron Modulator
MOS-FET	3.3~13	100	60	Klystron modulator Kicker Power Supply Electron Gun modulator Anode modulator for DC Klystron Ion Beam Extraction PS
DSRD(PIND)	2.4~13	100	2.3	High speed grid pulser

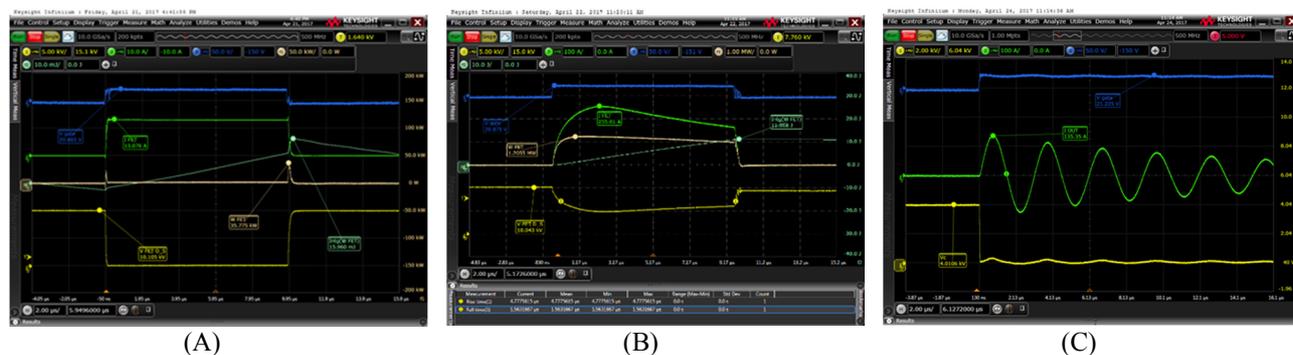


Figure 2: Experimental results of 13 kV SiC-MOSFET. (A) shows waveforms at 10 kV of the drain voltage and 12.8 A of the peak drain current, (B) shows waveforms at 10 kV of the drain voltage and 255 A of the peak drain current, (C) shows waveforms at 4 kV of the drain voltage, 135A of the peak drain current and 330 kHz of the oscillation frequency. Yellow line shows a drain voltage in 5 kV/div(A,B) and in 2kV/div(C). Green line shows a drain current in 10 A/div(A) and 100 A/div(B,C). Blue line shows a trigger signal in 50 V/div. The time span is 2 μs/div.

この素子の評価試験結果を Fig. 2 に示す。(A)の波形では 10 kV 印可状態から 12.8 A のパルス電流が流せることを確認した。(B)の波形では同条件で 255 A のパルス電流までの通電を確認したが、ドレイン電流が増えるに従い、FET の ON 抵抗が増えるため、効率・発熱を考えると数 10 A で使用することが現実的と言える。又、(C)の波形では 4 kV 充電で 135 A のピーク電流で周波数 330 kHz の正弦波振動波形で動作することも確認できている。Figure 3 は 13 kV SiC-MOSFET のドレイン電流に対する ON 抵抗の変化を測定した結果である。このグラフから分かるように、ドレイン電流が増えるに従い、ON 抵抗が増加し、大電流領域では、ドレイン電圧が 0 まで下がらず、電圧を抱えたまま電流が流れるので ON 損失は極めて大きくなる、この状態は Fig. 2(B)の波形を見ると良く理解できると思うが、素子が ON している最中でもドレイン電圧が 0 まで下がっていないことが確認できる。

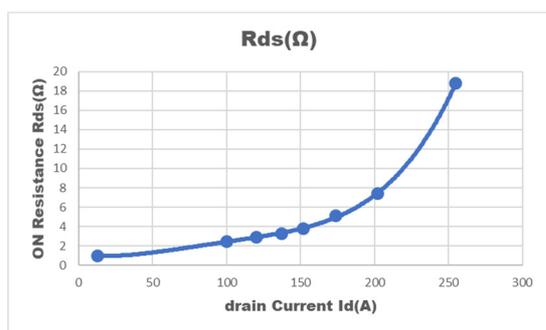


Figure 3: An ON-state resistance vs a drain current of 13kV SiC-MOSFET.

このように、10 kV 以上の耐圧を持ち、数 10 A 以上の電流を高速で流せる素子はこれまでは存在しなかった。これまでは 10 kV のパルスが発生するのに 1200 V の耐圧の MOS-FET を 10 個以上直列に動作させていたが、この新しい SiC-MOSFET を使用すれば 1 個の素子で 10 kV のパルス発生が可能となり、周辺回路も含めると大幅な小型化と高信頼化が可能となる。

ON 抵抗を考えると、特殊な例を除けば、本デバイスの動作電流は数 10 A 以下で使うべきである。それでもなお、クライストロンモジュレータ、キッカー電源、電子銃電源、アノードモジュレータ、イオンビームの高速引き出し

などには十分魅力的なデバイスと言える。

Table 2 の最後のデバイスは DSRD で、これは Drift Step Recovery Diode の略で、構造的には PIN ダイオードと同様である。所謂、SOS (Semiconductor Opening Switch) の一種であり、順電流を流した後に高速に逆電流を流した際に逆電流の回復遮断時のナノ秒オーダーでの急峻なスパイク電圧の発生に使用できる[4]。

これらのデバイスは全て、10 kV 以上の耐圧を有し、又、非常に小型であるため、加速器用途をはじめとしたあらゆる産業応用の高電圧パルス電源に非常に効果的に使用できるものと考えている。これらの素子の普及のためには、多くのユーザーがこれらの素子を使用する事に加えて、我々電源メーカーがこれらの素子を使用した小型・高性能の高電圧パルス電源を PR し、新しい産業応用の創成と多くのユーザーの獲得が必要であり、これらのアプローチにより、半導体メーカーに量産化を働きかけていく必要がある。

4. 13 kV SiC-MOSFET の加速器への応用例

我々は、本素子を加速器用高電圧パルス電源へ適用し、実機評価を行うことで、この開発途上にある素子の実力性能を評価すると共に、潜在的ユーザーとなり得る加速器関係者への PR をはかり、更には、広く産業応用への展開の可能性を示すことで、半導体メーカーに本素子の量産化への働きかけをしたいと考えている。実際に加速器用電源として性能評価した事例を下記に紹介する。

4.1 イオン源電源高速変調加速電源

本実施例は、J-PARC の試験用イオン源電源に適用されたもので BNCT 用イオン源への適用も検討されている。J-PARC 試験用イオン源電源では約 40 kV の定電圧加速電源に約 10 kV、1 ms の高速変調パルス電源を重畳し、RFQ を通過させることでエネルギーの高い 1 ms のイオンビームだけを引き出している。

従来は 900 V 耐圧の Si 製 MOS-FET を 16 直列することで 9 kV の高速変調パルス電圧を発生していた。直列数が多く又、それぞれに電源供給回路、ゲート回路が必要となり、スイッチ基板の寸法は 300 mm x 600 mm と大きかった。Figure 4 の左にその写真を示す。この度、この基板を 13 kV-SiC-MOSFET を使用した基板に改造した。Figure 4 の右に改造後の写真を示す。1枚の基板



Figure 4: Left figure shows a previous PCB that used 900 V rated Si-MOSFETs by 16 in series and 6 in parallel. A size of the PCB is 300 mm x 600 mm. Right figure shows new PCBs that use 13 kV rated SiC-MOSFETs. New circuit used 3 PCBs, and a size of each PCB is 180 mm x 100 mm. Total size of 3 PCBs is about half of the previous PCB and new PCBs generate about twice higher voltage of the previous one.

に1個の 13 kV 素子が実装されており、これを 3 枚直列に使用する事で 15 kV 以上のパルスが発生できる。1枚の基板の大きさは 180 mm x 100 mm で 3 枚合わせても従来基板の約半分の大きさであり、実力として従来基板の約 2 倍の電圧のパルス発生が可能となっている。Figure 5 に 13 kV デバイスを使用した新基板での出力波形を示す。出力電圧 15 kV、出力電流 0.2 A、パルス幅 1 ms のパルスを 25 Hz の繰り返しで発生できることを確認した。現在、J-PARC の試験用イオン源電源に実装され、約半年異常なく動作している。詳細は本学会別発表で紹介されている[5]。

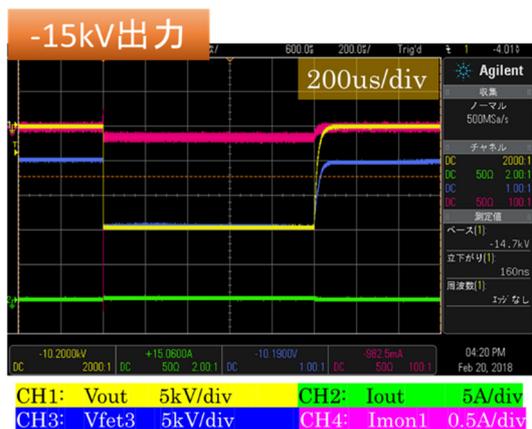


Figure 5: Experimental result of the new switch used 13 kV SiC-MOSFET. CH1(yellow) shows an output voltage (5kV/div) and the peak voltage was 15 kV. CH2(green) shows an output current(5A/div) and the peak current was about 0.2 A. The time span is 200 μ s/div. The pulse width of the output voltage was 1ms.

4.2 キッカー電源

本実施例は、KEK のデジタル加速器の入射キッカーの高圧スイッチへの適用を計画しているものである。以前はこのスイッチにはサイラトロンが使用されていたが、半導体化を目的として 2014 年に静電誘導サイリスタ(SI-Thy)に置き換えが完了している。しかし、この SI-Thy が製造中止になった事に加えて、半導体スイッチの小型を目指して、今回、13 kV-SiC-MOSFET を使用したシステムへの移行を検討した。本電源では 20 kV で 400 A 以上のパルス発生が必要となる。

従来は 4kV 耐圧の SI-Thy を 10 直列する事で実現していた。高い印加電圧では SI-Thy の漏れ電流が急激に上昇することから、定格電圧の半分の 2 kV で使用した。直列数が多く又、それぞれに電源供給回路、ゲート回路が必要となり、高圧スイッチ部の高さは 200 mm 必要だった。Figure 6 の左にその写真を示す。この度、この高圧スイッチに代わる性能のものを 13 kV-SiC-MOSFET を使用した基板で製作した。Figure 6 の右に改造後の写真を示す。1枚の基板に 12 個の 13 kV 素子が並列に実装されており、これを 2 枚直列に使用する事で 20 kV 以上のパルスが発生できる。2 枚の基板を積み上げた高さは 100 mm で従来品の半分の高さであり、段間の耐圧の確認を行うことにより、更に小型化が

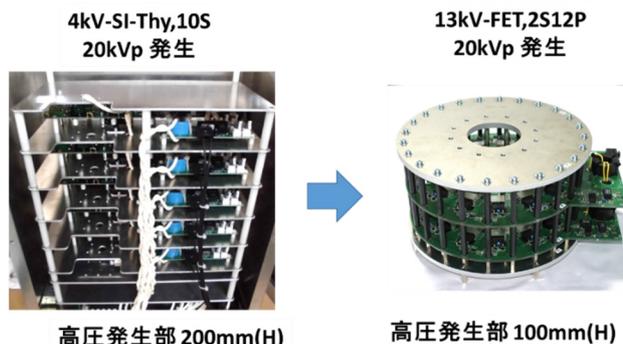


Figure 6: Left figure shows a previous switch that used 4 kV rated SI-Thys by 10 in series. A height of the high voltage switch part is about 200 mm. Right figure shows new switch that use 13 kV rated SiC-MOSFETs by 2 in series and 12 in parallel. A height of the high voltage switch part of the new switch is about 100 mm, so the height was reduced to about half.

可能と考えている。Figure 7 に 13 kV デバイスを使用した新スイッチでの動作波形を示す。スイッチ電圧 14 kV、スイッチ電流 490 A での動作を確認した。立ち上がり時間は 430 ns であった。今後、20 kV、500A の動作確認と立ち上がり時間の高速化を目指して評価試験と改良を進める予定である。詳細は本学会別発表で紹介されている[6]。

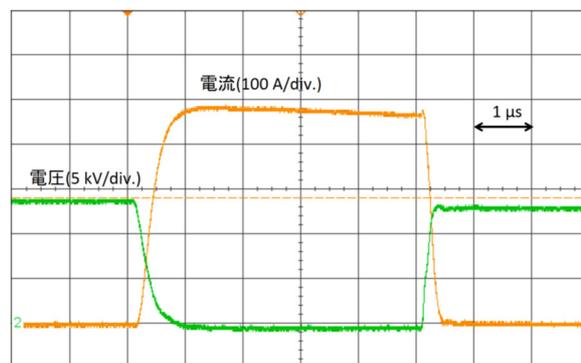


Figure 7: Experimental result of the new switch used 13 kV SiC-MOSFET. Yellow line shows an switch current (100A/div) and the peak current was 490 A. Green line shows an switch voltage (5 kV/div) and the maximum applied voltage was 14 kV. The time span is 1 μ s/div. A rise time of the switch voltage was 430 ns.

4.3 電子銃電源

電子銃用パルス電源も又小型化、高信頼化が要求されている。従来は、パルストランスを使用して高電圧のパルスを発生する方法が採用されることが多かったが、電子銃はインピーダンスが高く、電圧は 20 kV 程度以上と高いが、電流は 1 A 程度以下と低いため、パルストランスの浮遊容量、漏れインダクタンスの影響により波形に振動が生じ、これを吸収するために大きなダミー抵抗を並列に接続する必要がある、必要な電力は小さいにもかかわらず、ダミー抵抗で大電力を消費させる為に、大きな

電源が必要となっていた。近年は、半導体スイッチの高圧化が進み、MARX 回路を使用することにより、小型、高効率、出力波形の振動の小さい、立ち上がりの早い電子銃電源が製作されるようになってきた。又、キッカー電源やクライストロンモジュレータなど高電圧のパルス電源には近年、半導体 MARX 回路が多用されてきた[7,8,9]。Figure 8 は我々が製作した、半導体 MARX 回路を使用した電子銃用高電圧パルス電源である。Si 製の 3kV 耐圧の MOSFET を 2 直列で使用した MARX 基板を 8 段直列として出力電圧 25 kVp、出力電流 3 Ap、パルス幅 2 μ s、繰り返し 200 pps で動作している。高圧発生部の高さは 370 mm である。



Figure 8: -25kV high voltage pulse generator using Si-MOSFET based MARX circuit. 3 kV rated SI-MOSFETs by 2 in series were used in a MARX board and the generator used 8 MARX boards in series. A height of the high voltage switch part is about 370 mm.

本装置を 13kV-SiC-MOSFET を使用すれば、3 段の MARX 回路で実現できるので、高さはおよそ 170mm 程度となる。又、本 MARX を 5 段で使用すれば、50 kV の電子銃電源の高圧発生部の高さがおよそ 290 mm で実現可能であり、従来品の 25 kV 電源よりも小さな電源で出力電圧は 2 倍以上にすることが可能である。又、油絶縁と併用すれば、100 kV 以上の電子銃電源も比較的

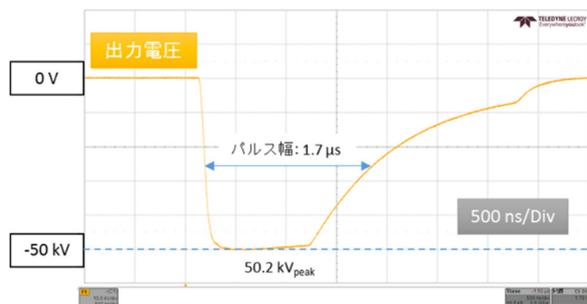


Figure 9: Experimental result of the new 5-stage MARX generator used 13 kV SiC-MOSFETs. Yellow line shows an output voltage (10 kV/div) and the peak voltage was 50.2 kV. The time span is 500 ns/div.

容易に実現できる。Figure 9 は我々が試作した 13kV-SiC-MOSFET を使用した 5 段の MARX 回路での出力波形である。出力電圧で 50.2kV の発生を確認している。

5. まとめ

近年、半導体の高電圧化、大電流化にあいまって、パルスパワーエレクトロニクスと呼ばれる回路技術の発展により、ほとんど全ての高電圧パルス電源が半導体化することが可能となってきた。更に現在、半導体の主流は Si から SiC へ変遷を始めており、直近では、10 kV を超える IGBT, MOS-FET, SBD, DSRD も開発が進んでおり、加速器応用にとって革新的に半導体化、小型化が進むものと考えられる。今回、13 kV 耐圧の SiC-MOSFET の加速器用電源の適用事例を 3 件紹介したが、どれも革新的に小型化が達成しており、又、半導体デバイスの使用数量が大幅に削減され事により、パルス電源の信頼性も改善されるものと考えられる。又、短絡耐量も非常に大きい事が確認されており、負荷短絡時などの事故時へも十分対応できるものと期待される。今後、継続して信頼性評価の確認を進めると共に、更に、多くの加速器での採用を計画していく中で、本素子の商品化を推進し、加速器の小型化・高性能化・高信頼化を進めたい。又、加速器応用だけでなく、これまででない画期的で多彩な新たな産業応用への展開が大いに期待できる。

謝辞

本研究の一部は、共同研究体「つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション (TPEC)」の事業として行われた。

参考文献

- [1] 松波弘之 他, 「半導体SiC技術と応用」、日刊工業新聞社。
- [2] 徳地明 他, “SiC化が進む加速器用高電圧パルス電源の研究”, 第 14 回加速器学会予稿集 TUOM02, 2017.
- [3] 近藤力 他, “高電圧用半導体デバイスのスイッチング特性”, 第 12 回加速器学会予稿集 WEP064, 2015.
- [4] 内藤孝 他, “SiC 半導体を用いた超短パルス高電圧電源の開発”, 第 14 回加速器学会予稿集 TUP127, 2017.
- [5] 林秀原 他, “13kV-SiC-MOSFET を用いたイオン源電源の改善”, 第 15 回加速器学会予稿集 WEP063, 2018.
- [6] 岡村勝也 他, “13kV 級 SiC-MOSFET を使用したパルスパワー電源の開発”, 第 15 回加速器学会予稿集 WEP067, 2018.
- [7] 澤村陽 他, “面実装型 3.3kV SiC ILC 電源の開発”, 第 15 回加速器学会予稿集 THP063, 2018.
- [8] 澤村陽 他, “3.3kV SiC による ILC 用チョッパー型 MARX 電源の高耐圧化”, 第 14 回加速器学会予稿集 TUP052, 2017.
- [9] 澤村陽 他, “J-PARC ミュオンビームキッカー用 MOS-FET MARX 駆動バイポーラパルストランス合成方式電源の開発”, 第 12 回加速器学会予稿集 WEP081, 2015.