

SiC化が進む加速器用高電圧パルス電源の研究

RESEARCH ON HIGH-VOLTAGE PULSED POWER SUPPLIES FOR ACCELERATOR APPLICATIONS WITH ADVANCED SIC DEVICES

徳地明^{A)}, 内藤孝^{B)}, 明本光生^{B)}, 岩室憲幸^{C)}, 江偉華^{D)}, 福田憲司^{E)}, 高柳智弘^{F)}
Akira Tokuchi^{A)}, Takashi Naito^{B)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Noriyuki Iwamuro^{C)}, Weihua Jiang^{D)}, Kenji Fukuda^{E)},
Tomohiro Takayanagi^{F)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

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

^{C)} University of Tsukuba

^{D)} Nagaoka University of Technology

^{E)} AIST, ADPERC

^{F)} J-PARC/JAEA

Abstract

A 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. In addition, as a result of various developments such as the MARX circuit, the LTD circuit, the matrix circuit and the SOS circuit, the circuit configuration operating a large number of semiconductor devices in series and parallel has been advanced. All high voltage pulse power supplies have become possible to realize by using semiconductors only. Then the performance of the accelerator has also been significantly improved. We have conducted a systematic research on the selection of the optimum pulse power system according to the application. 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、サイラ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、真空管は見ることがなくなった。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。SiC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様になってきた。

この論文では、SiCの特徴とSiCデバイスを加速器用パルス電源に適用した際の5種類の回路方式について延べ、それらの回路方式の実施例を説明する。

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に削減可能です。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ります。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ります。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ます。

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

イスであると言えます。

Table 1: Characteristics of Silicon Carbide(SiC)

| item | Si | SiC | Characteristics |
|--|------|------|--|
| Energy band gap (eV) | 1.12 | 3.26 | High temperature operation (>200°C) |
| 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(>10kV)

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。

IGBT では、コレクタ電圧 16 kV のものが開発されており、昨年の加速器学会で理研 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[2]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 定格のものより更に 15 kV 耐圧のものが開発が進んでいる。3.3 kV 品はすでに、量産を視野に入れて開発が進められている。15 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だろう。15 kV 定格の SiC-MOSFET の実物の写真を Figure 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。この素子の評価試験結果を Figure 2 に示す。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。実際には同条件で 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、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。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 のパルスを発生するのに 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。

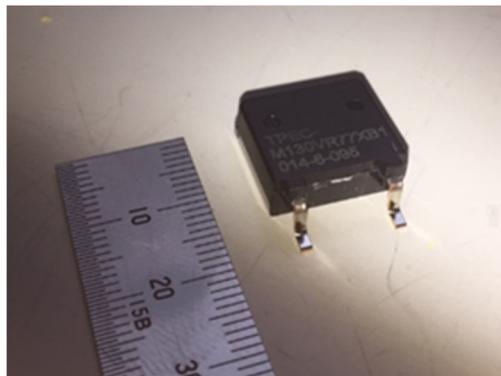


Figure 1: 13kV SiC-MOSFET developed by TPEC.

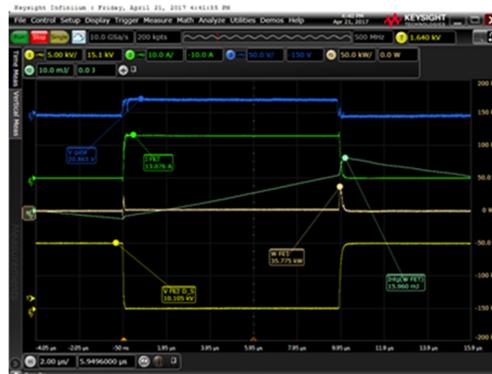


Figure 2: Experimental results of 15 kV SiC-MOSFET. Waveforms at 10 kV of the drain voltage and 12.8 A of the peak drain current, yellow line shows a drain voltage in 5 kV/div, Green line shows a drain current in 10 A/div blue line shows a trigger signal in 50 V/div. The time span is 2 μs/div.

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 | 3.3~15 | 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 Strip-line kicker PS |

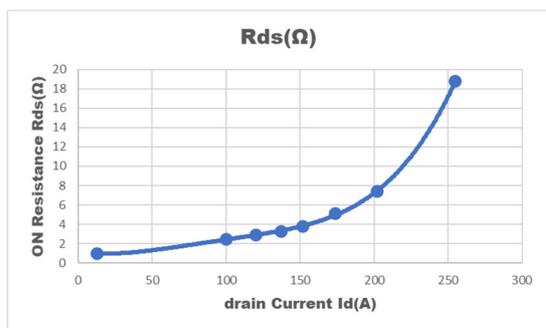


Figure 3: An ON-state resistance vs a drain current of 15kV SiC-MOSFET.

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。

Figure 3は15 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、特殊の例を除けば、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である。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の、逆電流の回復遮断時の急峻なスパイク電圧の発生に使用できるものである。

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。

4. 5種類の高電圧パルス発生回路と加速器への適用例

Table 3に代表的な高電圧パルス発生回路の特徴と加速器への適用範囲を示す。

4.1 ダイレクト方式 (マトリクス方式)

①のダイレクト方式は半導体スイッチを単純に直列、並列に接続することで、必要な高電圧、大電流のパルスを発生するもので、従来はほとんどがこの回路が使用されている。又、サイラトロンなどの放電管を半導体に置き換える際も、この方式をとることになる。多数の半導体を直並列に接続することからマトリクス方式と呼ばれる。基本的に全ての半導体デバイスを同時にON/OFFする必要があり、出力波形を調整する機能はなく、万一、誤動作などで、これが成り立たないと半導体デバイスが故障する欠点がある。パルストランス (PT) や波形形成回路網 (PFN) と組み合わせて使用することが多い。

理研 SACLA ではクライストロンモジュレータを静電誘導サイリスタ (SI サイリスタ) に置き換えて評価試験を行っている[3]。サイラトロン1本の代わりにSIサイリスタを24直列8並列に接続し、50 kV, 6 kA, 4.5 μsのパルスを60 Hzの繰返しで連続運転している。SACLAではこの半導体スイッチを1800時間以上故障なく運転している。残念ながら、本SIサイリスタは既に製造中止となっており、現在、新規入手ができない状態になっている。そこで我々は、別の半導体スイッチを使用してSIサイリスタと同等以上の性能のスイッチ基板を開発した[4]。MOSゲートサイリスタ (IXYS社: MMIX1H60N150V1, 1500 V, 11.8 kAp) を6個直列に接続した基板で、設計目標は6 kV, 6 kAp, 10 μsである。Figure 4は上記基板での評価試験結果である。5 kV充電にて、5 kAの振動パルス電流を単発で流せることを確認した。又、本基板を5枚直列接続することにより、30 kV充電にて、700 Aのパルス電流を流せることも確認しており、SIサイリスタの代替品として十分使用可能と判断できる。

Table 3: Five Types of the High Voltage Pulse Generator Using Semiconductor Devices

| Circuit Type | Voltage (kV) | Current (A) | Pulse width(μs) | Waveform Adjustable | Devises | Applications in Accerelator |
|----------------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|------------------------|---|
| ①Direct (+PT) (+PFN) | 50 | 6,000 | 4.5 | × | IGBT MOS-FET SCR | Klystron Modulator Magnetron modulator |
| ②MARX | 100 | 50 | 100 | ○ | IGBT MOS-FET | Electron Gun modulator grid pulser Magnetron modulator Neutron generator |
| ③Chopper type MARX | 120 | 140 | 1,700 | ◎ | MOS-FET | Klystron Modulator for ILC |
| ④LTD | 40 | 4,000 | 1.5 | ○ | MOS-FET | Kicker Power Supply |
| ⑤SOS | 11 | 220 | 3.7ns | × | DSRD | High speed grid pulser Strip-line kicker PS |

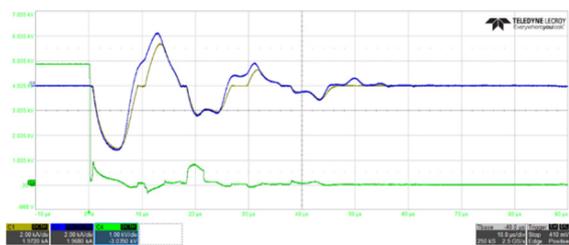


Figure 4: Measured waveforms of the MOS-GATE Thyristor Board. Green line shows an anode voltage in 1kV/div, blue line shows a load current in 2kA/div and brown line shows an anode current in 2kA/div. The time span is 10 μ s/div.

4.2 MARX 方式

②の MARX 方式は、ダイレクト方式と異なり、単に、半導体スイッチが直列になっているのではなく、コンデンサと充電用半導体スイッチ、放電用半導体スイッチを一組としたパルス電源モジュールを直列に接続することで低い電圧で充電し、高い電圧のパルスを発生することが可能である。又、必ずしも、全てのスイッチを同時に動作させる必要はなく、動作タイミングを意識的に変えることで、出力電圧波形を任意に変えることが可能である。従って、万一、スイッチの誤動作の場合も、スイッチが故障しづらい特徴がある。

Figure 5 は、MARX 方式電源の一例の出力電圧波形である。600 V 充電の MRAX 回路を 5 段直列に接続し、出力電圧 3000 V のパルス発生が可能であり、それぞれのトリガ信号をわざとずらすことで階段状のパルス出力が得られる[5]。

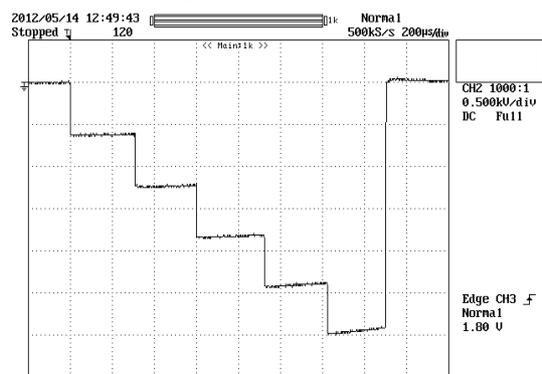


Figure 5: An output waveform controlled to be step-wise shape by the MARX generator.

4.3 チョッパーMARX 方式

出力パルス幅が ms などと長い場合、コンデンサ電圧のドループにより、出力電圧が時間とともに低下してしまう。これを改善するためには、MARX 回路の放電用スイッチを高周波チョッパー動作によるパルス幅制御により、コンデンサの電圧が下がるに伴い、パルス幅デューティを広げることにより、ロングパルスでも出力電圧が一定に制御することが可能です。

Figure 6 は国際リニアコライダ（ILC）用に開発した

チョッパーMARX 方式のロングパルス電源[6]の MARX ユニット出力波形例です。チョッパー用半導体スイッチには SiC-MOSFET を使用することで効率が改善されており、更に、TPEC で開発された 3.3 kVSiC-MOSFET に交換することにより、スロースタートなどの幅広い波形制御に対応できることが確認されています。

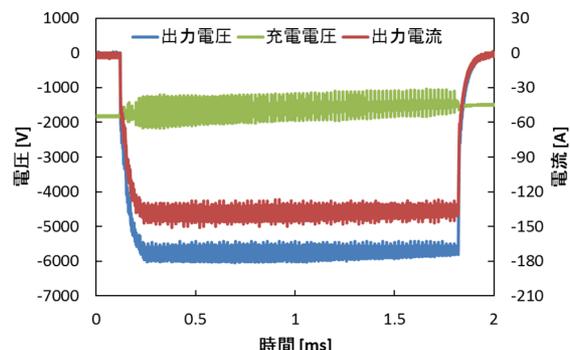


Figure 6: Measured waveforms of the chopper MARX generator controlled with a slow start modulation. Green line shows a charged voltage of a capacitor in 1 kV/div, blue line shows an output voltage in 1 kV/div and red line shows an output current in 30 A/div. The time span is 0.5 ms/div.

4.4 LTD 方式

回路的には MARX 方式と似ているが、強磁性体コアを使用することで、誘導電圧を足し合わせることで高電圧を発生する回路である。誘導電圧を使用するため、各 LTD(Linear Transformer Driver)[7]基板は全て接地電位で動作し、充電電圧や制御電源も全て共通であり、全ての LTD 基板を並列に接続することが可能である。MARX 回路では、制御電源などを供給するために、絶縁トランスなどで絶縁して供給することが必要であり、高電圧出力時にはこの絶縁の確保が技術的課題であったが、LTD では全ての LTD 基板は接地電位であり、同電位であるので、制御電源やトリガ信号の絶縁が不要である。MARX と同様にトリガタイミングを変えることで出力電圧波形の高速制御が可能である。

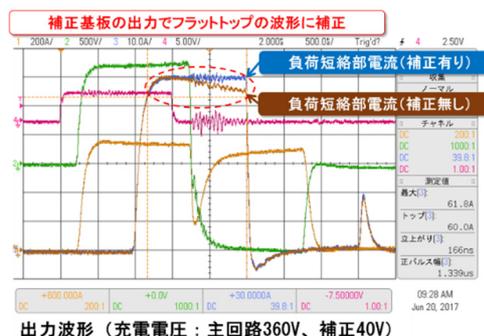


Figure 7: Waveforms of JPARC RCS kicker PS with LTD circuit using SiC MOSFETs. By using compensator LTD boards, A flatness of the current waveform on the kicker magnet is effectively improved.

Figure 7 は J-PARC の RCS キッカー電源用に開発した LTD 回路であり[8,9]、主回路用 LTD 基板 5 枚と補

Table 4: Selection Guide of Semiconductor Device and Circuit Type

| パルス幅 | | < 10 ns | < 1 μs | < 100 μs | < |
|-------|-------------------|----------------|--------------------------|-------------------|------------------------|
| 波形可制御 | 大電流 (1 kA 以上) | | ④LTD (MOSFET) | ②MARX (IGBT) | ③チョッパーMARX (IGBT) |
| | 小電流 (100 A 以下) | | | ②MARX (MOSFET) | ③チョッパーMARX (MOSFET) |
| 波形非制御 | | ⑤SOS (DSRD) | ①DIRECT (MOSFET/IGBT) | | |

正回路用 LTD 基板 4 枚を使用して 1.5 μs の間、ドループの補正された平坦な波形を得ることが確認できた。主回路用 LTD 基板には 1.2 kV 定格の SiC-MOSFET を2個直列に使用しており、出力電圧 800 V, 負荷からの反射電圧-800 V の両極性の電圧に対して耐圧を確保するようにしている。SiC-MOSFET を使用することで、出力電流 2 kA という大電流出力に対しても小さなロスでパルス発生が可能となっている。

4.5 SOS 方式

通常、半導体素子は最も高速で動作する MOS-FET でもそのターンオン時間は数 10 ns 必要である。その為、これまでの回路方式では 10 ns 以下の立上り時間のパルスを発生することは難しかった。ダイオードによっては、逆電流を遮断する時間が 1 ns 以下と非常に早いものが存在する。この特性を利用して急峻な高電圧パルスを発生する回路方式を SOS 方式という。TPEC では SiC を使用して 2.4 kV~13 kV という高い耐圧を有する DSRD を開発しており、これを SOS 回路に適用することで Figure 8 に示すように立上り時間 2.3 ns でピーク電圧 11 kV、ピーク電流 220 A のパルスを 1 kHz の繰り返しで発生することが確認できている[10]。

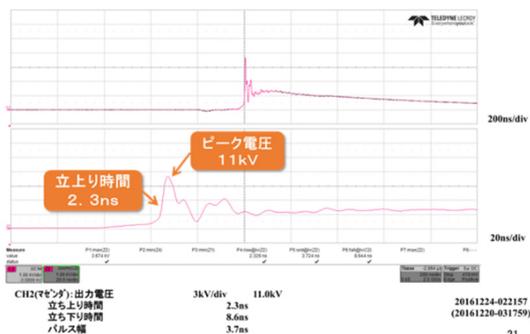


Figure 8: A waveform of an output voltage in SOS type pulse generator using SiS-DSRD.

5. 各回路方式の使い分け

第2項では最近開発が進む高耐圧の SiC デバイスを紹介し、第3項ではこれらの高耐圧半導体を使用した5種類の回路方式を説明してきたが、加速器用電源を考えたときどの素子をどの回路方式で採用するのがいいのかを判断するための一つの基準を考えてみた。その結果を Table 4 に示す。仕様素子と回路方式を選定する基準として、発生するパルス幅、出力電流、波形制

御性に基づいて整理した。

6. 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 へ変遷をし始めており、直近では、10 kV を超える IGBT, MOS-FET, SBD, DSRD も開発が進んできており、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。5 種の回路方式とこれらの新型素子を使い分けることにより、加速器応用だけでなく、これまでになかった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。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] 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.
- [3] 稲垣隆宏、他 “SACLA 油密閉型モジュレータに用いる 50 kV 半導体スイッチの開発”，第 14 回加速器学会予稿集 TUOL08, 2017.
- [4] 森均、他 “クライストロンモジュレータ用高電圧半導体スイッチの開発”，第 14 回加速器学会予稿集 TUP053, 2017.
- [5] 明本光生、他 “マルク回路方式によるパルスドループ補正”，第 9 回加速器学会予稿集 THPS108, 2012.
- [6] 澤村陽、他 “3.3KVSiC 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.
- [7] W. Jiang *et al.*, “Pulsed Power Generation by Solid-State LTD”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.42, No.11, Nov. 2014m pp3603-3608.
- [8] 高柳智弘、他 “SiC-MOSFET の LTD 回路を用いた RCS キッカー用新電源の開発”，第 14 回加速器学会予稿集 TUOM01, 2017.
- [9] 虫邊陽一、他 “キッカーマグネット用バイポーラ型 SiC-LTD 電源の開発”，第 14 回加速器学会予稿集 WEP068, 2017.
- [10] 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.