

13kV SiC-MOSFET を用いた高電圧パルス電源の評価

EVALUATION OF HIGH VOLTAGE PULSED POWER SUPPLY USING 13kV SiC-MOSFET

伊藤俊輝^{#A)}, 中田恭輔^{A)}, 徳地明^{A)}, 東使潔^{B)}, 小林進二^{B)}

Toshiki Ito^{#A)}, Kyosuke Nakata^{A)}, Akira Tokuchi^{A)}, Kiyoshi Tohshi^{B)}, Shinji Kobayashi^{B)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd. (PPJ)

^{B)} Kyoto University

Abstract

Pulsed power supplies used in fusion research and accelerator research require high voltage and large current, and electron tubes as thyratrons and ignitrons have been used as switches. But these devices have issues such as performance variability due to individual differences, short life, the need for maintenance. Furthermore, Despite the needs in research, the shrinking market for electron tubes has made them more difficult to obtain, and these is a risk that prices will rise and production will be discontinued. On the other hand, in recent years, in order to solve this problem, there is a growing trend to replace these devices with semiconductor devices that require no maintenance and have a semi-permanent lifespan. This report status the results of an output test of a high-voltage pulsed power supply using SiC-MOSFET with a high rated voltage of 13kV.

1. はじめに

核融合研究におけるプラズマの過熱方法の一つに中性粒子ビーム入射装置(以下 NBI)を用いるものがある。イオン源でイオンを生成、電圧を印加し加速したイオンビームの電子を剥ぎ取る、又は加えて中性の粒子ビームにすることで磁場の影響を受けずにプラズマに照射、過熱を行うという方式である。NBI のイオンを加速する加速電源のスイッチングには、従来電子管が用いられていた。しかし大容量の電子管には共振による制御回路の誤作動、陽極損失に起因する熱的機械的問題による短寿命化、電子管内でフラッシュオーバーが発生した場合の対策にクローバスイッチなど複雑な保護回路を必要とするなどの課題がある。更には電子管市場の縮小により入手難易度の高まりといった問題も存在する。その問題解決のために電子管を半導体素子であるゲートターンオフサイリスタ(以下 GTO)を用いた取り組みも行われた[1]。

近年は半導体素子の開発が進み、中でも SiC を用いた半導体デバイスは高耐圧、低損失、熱耐性、高速スイッチング等、パルス電源に適した特性を持っている。それらを利用することにより、より高性能かつ小型な回路構成でのスイッチングが期待できる。

Heliotron J 装置は、京都大学エネルギー理工学研究科附属エネルギー複合機構研究センターで稼働している中型の先進ヘリカル系プラズマ実験装置である[2]。

本装置における NBI 加速電源の出力電圧制御に用いられている四極管が製造中止になったことで半導体化の試みが行われた。本半導体化された加速電源には四極管の代わりに研究共同体「つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション(TPEC)」の開発した 13kV SiC-MOSFETを用いた回路が用いられている。本稿では、模擬負荷抵抗にて出力試験を行った際の結果を報告する。

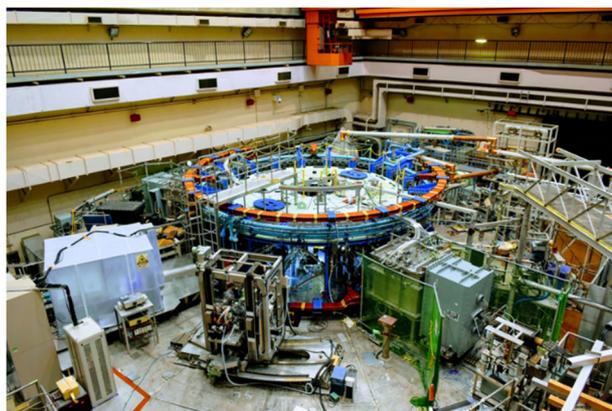


Figure 1: Heliotron J [3].

2. 半導体仕様加速電源の回路

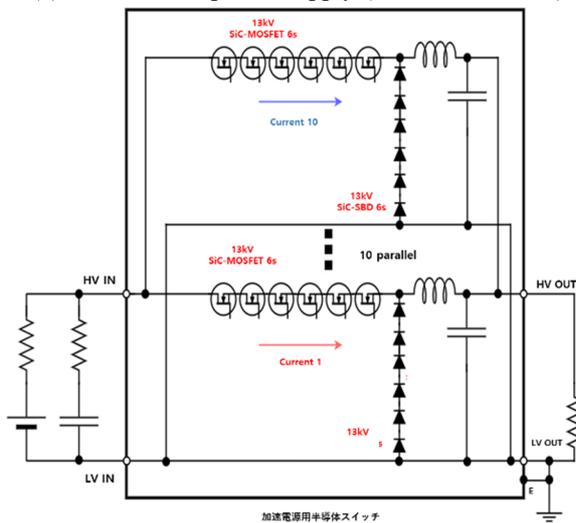
半導体仕様の加速電源の外観および回路図を Fig. 2 に示す。また、性能表を Table 1 に示す。半導体仕様の加速電源の基本回路構成は 13kV SiC-MOSFET を用いた降圧チョッパ回路となっており、スイッチングレギュレータ方式で出力電圧を制御している。ただし定格入力 +36 kV に対し十分な耐圧が必要であるため、13 kV SiC-MOSFET を 6 s に接続して高圧基板 1 ユニットの構成している。その高圧基板 1 ユニットの 10 p にすることで 100 A という電流定格を確保すると共に、基板一枚当たりの電流負担を軽減している。更に、位相を高圧基板 1 ユニットの 1/10 ずつ遅延させてスイッチングを行う事で、実効的にスイッチング周波数を高めるインターリーブ化をしている。インターリーブ化のイメージ図を Fig. 3 に示す。インターリーブ化の利点としては、高圧基板 1 ユニットの周波数を低くすることが出来る、つまりスイ

#ito@myppj.com

ツチの ON、OFF の頻度が減少することでスイッチングの損失低減や 13kV SiC-MOSFET の発熱抑制といった効果がある。また、実効スイッチング周波数が高いことの利点としては、出力電圧のリプルが低減し、より平滑な電圧が出力可能となることが挙げられる。加えて、出力の LC フィルタの定数を下げることが出来る。フィルタ容量に蓄積されるエネルギーが減少し、加速管短絡時に短絡箇所に入力されるエネルギーが小さくなるため、加速管の損傷を小さくすることが可能になる。



(a) Acceleration power supply (solid state switch).



(b) Schematic of the acceleration power supply (solid state switch).

Figure 2: Acceleration power supply (solid state switch).

Table 1: Acceleration Power Supply Performance

Input Voltage	+36kV
Output Voltage	+30kV
Output Current	100A
Pulse Width	200ms
Peak Power	3MW
Pulse Energy	600kJ
Rep. Period	3 minutes
Control Device	13kV SiC-MOSFET
Control Method	Switching Regulator

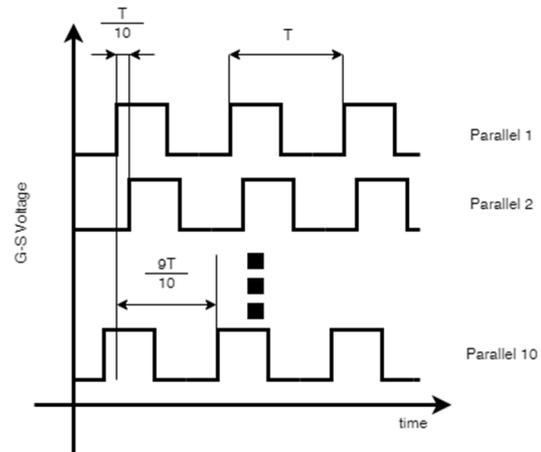


Figure 3: 10 parallel interleaved.

3. 半導体仕様加速電源の出力試験

3.1 模擬負荷抵抗の製作

高電圧かつ ms オーダーの長いパルスを出力するため、エネルギーも非常に大きくなる。Table 1 に示すような電力とエネルギーの規格を満たす抵抗を用意するのは困難であることから模擬負荷抵抗として Fig. 4 に示す水抵抗器を製作した。水抵抗器は水の有する抵抗成分を利用した抵抗器であり、大きな電流容量を持ち、温度上昇の影響を受けにくいという特性がある。Equation (1) に示すようにその抵抗値は水の抵抗率 ρ 、電極間距離 L 、電極面積 S で決定される。また、温度による抵抗値は Eq. (2) に示すように温度 t における抵抗 R_t 、20°C における抵抗 R_{20} で表される。抵抗値の測定は 13kV SiC-MOSFET 6s の高圧基板 1 ユニットを用いて、製作した抵抗にパルス印加して行った。Figure 5 に示す結果より、抵抗は 660 Ω となった。

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

$$R_t = \frac{40R_{20}}{20 + t} \quad (2)$$

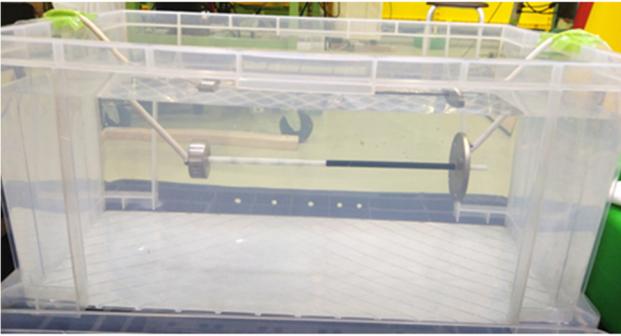


Figure 4: Water resistor.

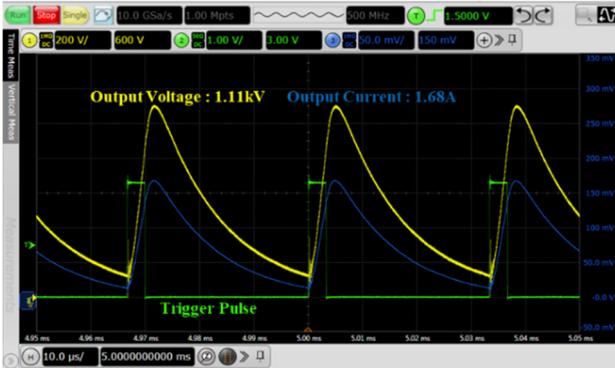


Figure 5: Resistance measurement of water resistor.

3.2 試験方法

高圧直流電源でコンデンサバンクを充電し、出力端には模擬負荷抵抗を取り付けた。スイッチングは外部からトリガパルスを入力して行った。試験条件を Table 2 に示す。

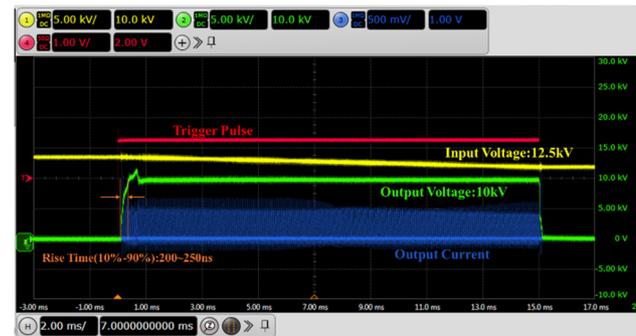
Table 2: Output Test Conditions

Input Voltage	+12.5kV
Output Voltage	+10kV
Resistive Road	660Ω
Pulse Width	15ms
Switching Frequency	30kHz

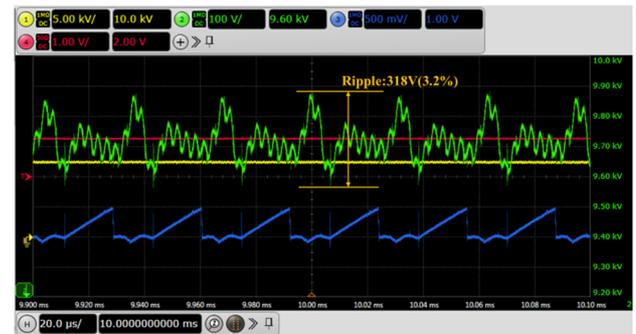
3.3 試験結果と考察

負荷に 10 kV、15 ms 出力した波形を Fig. 6 に示す。ch1 は充電電圧波形、ch2 は出力電圧波形、ch3 は高圧基板ユニット 10 の出力電流波形(減衰比 1/10)、ch4 は外部入力トリガパルスの電圧波形を示している。また、出力電圧のリプルを測定した際の $t=10$ ms における拡大波形も同時に示す。全体波形より、入力電圧は次第にドリフトしているのに対して、出力電圧は平坦であり、定電圧制御されていることが確認できる。立ち上がり時間は 200~250 μ s であった。本来、13 kV SiC-MOSFET の立ち上がり時間は ns オーダーであるが、出力部の線路インダクタンスの影響で立ち上がりが遅くなっていると考えられる。また、拡大波形の出力電圧に着目すると、細かいパルス状の波形が表れており、10 shot 毎に同じ波形を繰り返している。

これは出力電圧波形が合成されたものであり、一つのパルスの幅はおよそ 3.33 μ s となっている。この結果より、高圧基板 10 p の位相をそれぞれ 1/10 ずつ遅延させることで実効的に 300 kHz の周波数で運転できていることが確認できた。インターリーブによる動作を確認できた一方、リプルは $V_{p-p}=318$ V(3.2%)であった。拡大波形からも読み取れるように、特定のタイミングで波形に不均衡がみられた。その理由は、基板毎に位相を 1/10 ずつ遅延させているが、その値が設定値よりずれていることによるものであると考えられる。本装置の制御方式は PWM 制御であり、設定した周波数と Duty 比を基に、信号を生成、位相を遅延させてタイミングを調整して各高圧基板ユニットの 13 kV SiC-MOSFET に入力している。信号の遅延時間の調整を現状は可変抵抗で行っており、その個体差や温度等による抵抗値のずれが遅延時間のずれとなり、リプルの増大につながっている。実際、試験前後で数十 ns のタイミングのずれが確認された。これが出力電圧におけるリプル不均衡の原因であると推測される。遅延時間にずれがあると、一部の基板に過電流や過電圧が生じて素子の破壊を招く恐れもあるため、対策を要する必要がある。現状検討しているのは SiC-MOSFET に入力する信号の周波数を固定し、遅延時間の調整を個体抵抗にする、または個体抵抗と調整幅の小さい可変抵抗を用いる方法である。正しいタイミングで動作すればリプルの更なる低減が期待できる。



(a) Output voltage to resistive load.



(b) Enlarged view of output Voltage to resistive load.

Figure 6: Output voltage waveform of acceleration power supply (solid state switch).

4. まとめと今後の展望

13 kV SiC-MOSFET を用いた半導体仕様加速電源の

模擬抵抗負荷への出力を確認した。今後は定格運転、実負荷運転を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は研究共同体「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。また、共同研究を行っていただいた京都大学エネルギー理工学研究所の方々に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] M. Matsuoka *et al.*, “過渡電圧制御機能付き GTO スイッチを用いた中性粒子ビーム入射装置加速電源の開発”, T. IEE Japan, Vol. 112-B, No. 11, (1992).
- [2] K. Nagasaki *et al.*, “Heliotron J 実験”, J. Plasma Fusion Res. Vol.96, No.9 (2020) 475-518.
- [3] 京都大学エネルギー理工学研究所, “ご挨拶”, 京都大学エネルギー理工学研究所ヘリオトロン J プロジェクト, 2025-7-1, <https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/heliotronj/greeting.html>