

3.3kV-SiC-MOSFET を使用した ILC 用 MARX モジュレータの評価試験 EVALUATION TEST OF MARX MODULATOR FOR ILC USING 3.3kV-SiC-MOSFET

澤村陽^{#, A)}, 徳地明^{A)}, 明本光生^{B)}, 中島啓光^{B)}, 川村真人^{B)}, 坂本 邦博^{C)}
Yo Sawamura^{#, A)}, Akira Tokuchi^{A)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Hiromitsu Nakajima^{B)}, Masato Kawamura^{B)},
Kunihiro Sakamoto^{C)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

^{B)} KEK, ^{C)} AIST, ADPERC

Abstract

ILC (International Linear Collider) plans to carry out collision experiments of electrons and positrons with the maximum energy that can currently be achieved, using a linear accelerator with a total length of about 20 km. The multi-beam klystron system will be installed in the main linear accelerator of the ILC project. The RF power for generating an accelerating electric field in the superconducting accelerating cavity is composed of a multi-beam klystron and a klystron power supply that drives it. The Klystron power supply, called Marx modulator, generates 120 kV 140 A 1.9 ms pulse voltage and supplies it to the cathode of multi-beam klystron. Small size, low cost, high reliability are required. The prototype power supply SiC MOS-FET and SiC diode require a withstand voltage of 2.4 kV, and are configured by connecting two elements with a withstand voltage of 1.2 kV in series. In this research, 3.3kV-SiC-MOSFET is used to further improve the reliability. This time, device temperature evaluation in continuous operation is also performed, and an evaluation test of the MARX modulator for ILC is reported. A part of this work has been implemented under a joint research project of Tsukuba Power Electronics Constellations (TPEC).

1. はじめに

ILC (国際リニアコライダー; International Linear Collider) は Fig. 1 に示す全長 20 キロのトンネル内で、粒子をほぼ光速に加速し衝突させ宇宙誕生直後の超高温状態を再現させる。

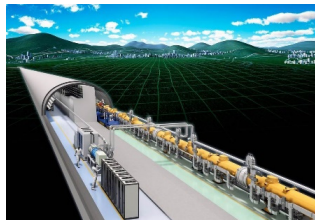


Figure 1: International Linear Collider Completion forecast (provided by KEK).

超伝導加速空洞に加速電場を生成するための RF 電力は、マルチビームクライストロンとクライストロン電源で構成される。Figure 2 のクライストロン電源は MARX 変調器と呼ばれ 120 kV 140 A 1.9 ms のパルス電圧を生成し、マルチビームクライストロンのカソードに供給する。



Figure 2: SiC MOS FET MARX power supply for ILC klystron modulator.

株式会社パルスパワー技術研究所は KEK と共同でクライストロン電源を開発中である。

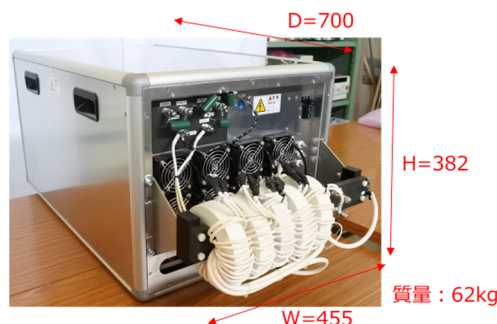


Figure 3: Pulse modulator power supply for ILC.

Figure 3 の ILC 用 SiC MOS FET MARX 方式クライストロンモジュレータ用電源に 20 ユニット搭載される。

電源は MARX 回路 + PWM チョッパー回路基板を 80MARX 構成で PWM 制御によるドループの補償と位相制御によるリップルの低減を図ることにより、実装する主コンデンサを極力小型化し(40 分の 1)、基板サイズは 10 分の 1 相当の特長を有している。

本稿は、ILC 加速器に設置されるクライストロン用モジュレータ電源の開発に関するものである。搭載される電源は、小型化、低コスト化、高信頼性が強く望まれ、また電源が出力するパルスはフラットトップが 1.9 ms の非常に長いパルス幅と電圧変動率 1% 以内という高精度の出力が要求される。

[#] sawamura@myppj.com

2. 開発の目的と内容

本研究では、MARX 回路+PWM チョッパー回路基板を 80MARX 構成で PWM 制御によるドループの補償と位相制御によるリップルの低減を行っている。試作電源のブロック図を Fig. 4 に示す。SiC MOS-FET(1.2 kV 2S3P), SiC ダイオード(1.2 kV 2S), IGBT(2.5 kV 1S), Si ファーストリカバリダイオード (1.5 kV 2S)で構成している。

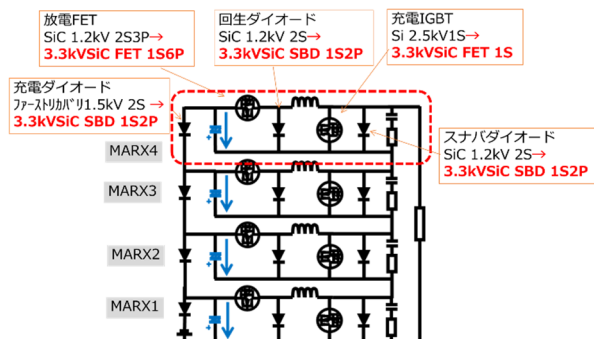


Figure 4: Block diagram of prototype power supply.

デバイスの高耐圧化をはかり、より信頼性を増すために、面実装型 3.3 kV 耐圧 SiC デバイスで実装実験を行うことを目的とし開発を行った。Figure 5 は試験に使用した TO-247 パッケージの 3.3 kV SiC MOS-FET と TO-247 パッケージの 3.3 kV SiC SBD である。

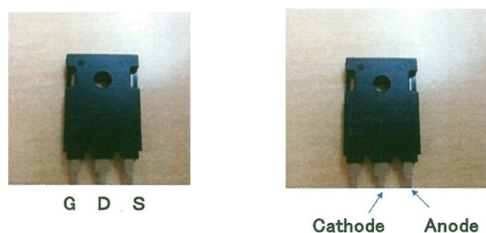


Figure 5: 3.3 kV SiC MOS-FET Package TO-247 (left), 3.3 kV SiC SBD Package TO-247(right).

今回、MARX 基板に実装した 3.3 kV SiC MOS-FET と 3.3 kV SiC SBD と従来の 1.2 kV 耐圧素子のスペック比較を Table 1, Table 2 に示す。

Table 1: 3.3 kV SiC MOS-FET Spec Comparison

	3.3 kV SiC MOS-FET (AIST, ADPERC)	SCH2080KE (ROHM)
V_{DSS}	3.3 kV	1.2 kV
$R_{DS(ON)}$ (Typ.)	60~120 m Ω	80 m Ω
I_D	-	40 A
V_{GS}	0/+20 V	-5 V/+20 V
V_{th}	2.4~2.7 V	1.6-4.0 V
V_{SD} ($V_{GS}=0$ V)	-	-1.3 V
Package	TO-247(G_D_S)	TO-247(G_D_S)

Table 2: 3.3 kV SiC SBD Spec Comparison

	3.3 kV SiC SBD (AIST, ADPERC)	SCS220KG (ROHM)
V_R	3.3 kV	1.2 kV
I_F	21 A	20 A
V_F	-	1.4 V (Typ.)
I_R	-	20 μ A (Typ.)
Package	TO-247(x_C_A)	TO-220(C_A)

3. MARX 基板への実装と評価試験

3.1 3.3 kV SiC 用新規 MARX 基板の製作と実装

3.3 kV SiC 実装基板を製作、従来の大型ヒートシンクで十分な冷却能力を稼いだ。

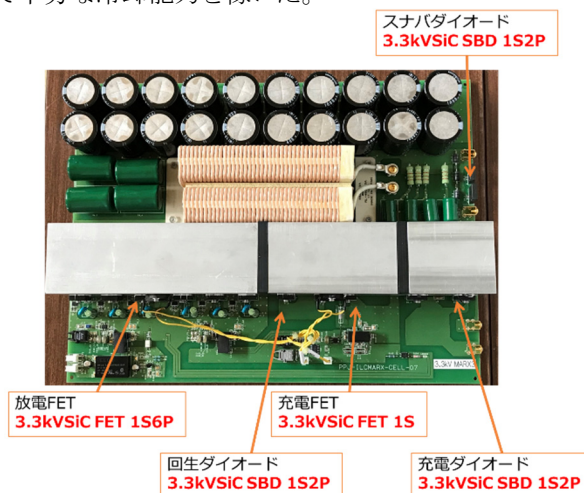


Figure 6: New designed MARX printed circuit board.

Figure 6 の新開発した MARX 基板では耐電圧(1 kV \rightarrow 2 kV)を確保するために Fig. 7 に示す TO-247 パッケージのドレイン端子のリードを曲げ実装を行い、S-D, G-D 間の実装距離を広くする手法を採用した。

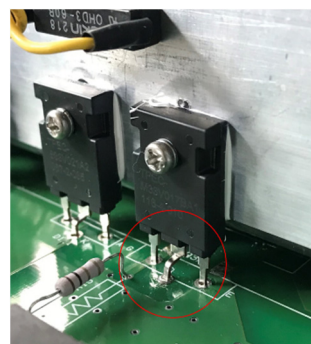


Figure 7: Bent mounting of lead of drain terminal.

従来と比べヒートシンク(ドレイン電位)とソース、ゲート端子間の耐電圧 (1 kV→2 kV)を確保する必要があり、Fig. 8 に示すようにヒートシンクと接する TO-247 パッケージバックメタル面を最小にした実装した。

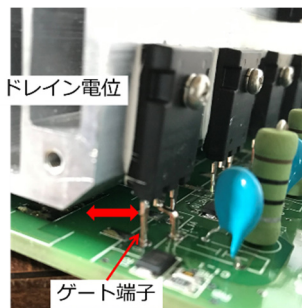


Figure 8: Mounting technique of 3.3 kV device to heat sink.

3.2 MARX 基板の定格電圧 ヒートラン試験と温度測定結果

3.3 kV SiC 素子を実装した MARX 基板単体を Table 3 の条件でヒートラン試験を実施した。

Table 3: MARX board test conditions

Item	Condition
Charging voltage	-2 kV
Load resistance	11.4 Ω
Output snubber circuit	1.5 μF, 13.3 Ω *1)
Chopper PWM frequency	50 kHz
PWM duty	80 % → 97 %
Number of PWM pulses per one shot	95 shots → 1.9 ms
Repeat frequency	(5 Hz)

*1) MARX 基板単体での試験であるが MARX ユニットに搭載されるスナバ回路を等価換算し実装。

定格電圧でのヒートラン試験写真を Fig. 9 に、出力電圧、出力電流の測定波形を Fig. 10 に示す。

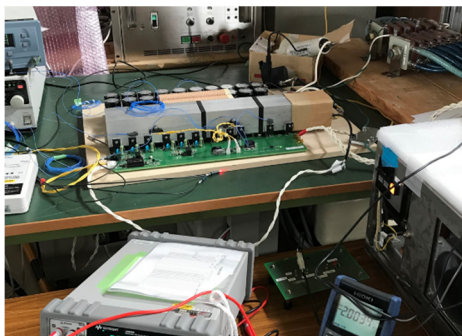


Figure 9: Rated operation heat run test photograph of MARX board.

CH2(緑): 出力電圧 -1.91kV
CH4(マゼンタ): 出力電流 -229A

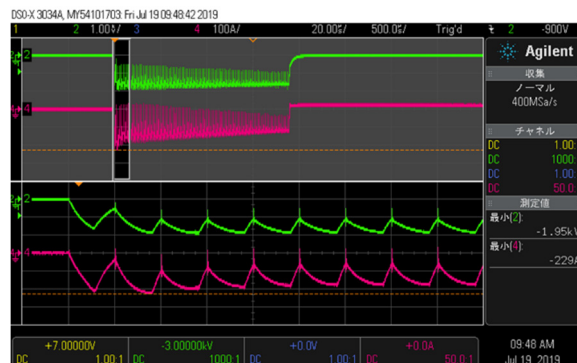


Figure 10: Output voltage and output current measurement waveform under rated operation.

出力スナバ回路により立ち上がりから 200 μs 程度の期間、電流が多く流れている。

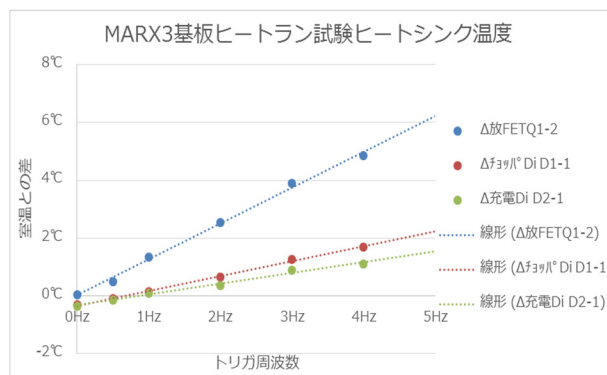


Figure 11: Heat sink temperature in heat run test of MARX 3 board.

Figure 11 でヒートシンクの温度上昇は放電 FET 3.3 kV SiC 1S6P が高いがトリガ周波数 5 Hz で 6 °C 程度の上昇に収まっている。

4. 今後の展望

3.3 kV SiC MOSFET, 3.3 kV SBD を今回新規開発した MARX 基板に実装し、基板単位での定格運転が確認できた。今後、MARX 基板 4 段構成の MARX ユニットとしての動作を確認し、3.3 kV デバイスでの高耐圧化、高信頼性の電源開発を目指す。

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。また、共同研究の高エネルギー加速器研究機構の方々に感謝の意を表す。