

# 1.7kV-SiC-MOSFET を搭載した ILC 用 MARX モジュレータの開発

## DEVELOPMENT OF MARX MODULATOR FOR ILC USING 1.7KV-SiC-MOSFET

澤村陽<sup>#, A)</sup>, 徳地明<sup>A)</sup>, 生駒直弥<sup>A)</sup>, 明本光生<sup>B)</sup>, 中島啓光<sup>B)</sup>, 川村真人<sup>B)</sup>, 夏井拓也<sup>B)</sup>  
Yo Sawamura<sup>#, A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>, Naoya Ikoma<sup>A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>B)</sup>, Masato Kawamura<sup>B)</sup>,  
Takuya Natsui<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

The ILC (International Linear Collider) is a linear accelerator with a total length of about 30 km, and will carry out electron-positron collision experiments at the highest energy that can be achieved at present. A multi-beam klystron system will be installed in the main Linac of the ILC project. RF power for generating an accelerating electric field in the superconducting accelerating cavity is composed of a multi-beam klystron and a klystron power source for driving the multi-beam klystron. The klystron power supply is called a Marx modulator and generates a pulse voltage of 120kV 140A 1.9ms and supplies it to the cathode of the multi-beam klystron. Small size, low cost and high reliability are required. The MARX modulator of the prototype power supply requires a withstand voltage of 2.4kV for the SiC MOS-FET and SiC diode, and is configured by connecting two elements with a withstand voltage of 1.2kV in series. In this research, we have developed a MARX modulator for ILC equipped with a 1.7kV-SiC-MOSFET with a high device breakdown voltage of 40% or more in order to further improve reliability. We will also evaluate the device temperature in continuous operation and report the evaluation test of the MARX modulator for ILC.

## 1. はじめに

ILC (国際リニアコライダー) は、計画は、全長約 30km の直線加速器で、現在達成しうる最高エネルギーで電子と陽電子の衝突実験を行う計画。

ILC 計画の主線形加速器にはマルチビームクライストロンシステムが搭載される。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それを駆動するクライストロン電源で構成される。

クライストロン電源はマルクス変調器と呼ばれ、120kV 140A 1.9ms のパルス電圧を発生し、マルチビームクライストロンのカソードに供給する。小型、低コスト、高信頼性が要求される。試作電源の MARX モジュレータは SiC MOS-FET と SiC ダイオードは 2.4kV の耐圧が必要であり、1.2kV の耐圧の 2 つの素子を直列に接続して構成している。

本研究ではさらに信頼性を向上させるため、40% 以上デバイス耐圧が高い 1.7kV-SiC-MOSFET を使用した開発を行った。連続運転でのデバイス温度評価も実施し、ILC 用 MARX モジュレータの評価試験について報告する。

## 2. ILC 用 MARX モジュレータの構成と特長

MARX 電源は複数の MARX ユニットの並列に充電し、直列に放電することにより MARX ユニット数に比例して高いパルス電圧を発生することができる。

MARX ユニットは MARX 回路を採用することで、並列にコンデンサに充電し、直列に放電することにより、MARX 回路段数に比例して高いパルス電圧を発生する。一般的な MARX 電源の構成を Fig. 1 に示す。

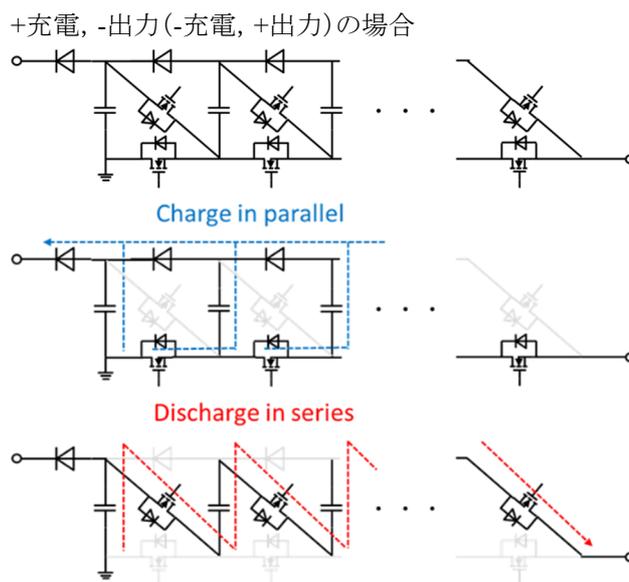


Figure 1: Typical MARX power supply configuration.

本開発の MARX 回路はパルス出力回路に高周波チョッパー回路を使用することで、出力パルス電圧の波高値を調整することができる。

4 枚の MARX 基板に位相をずらして動作させることで、出力電圧のリップルを低減する。又、チョッパーデューティを時間とともに変化させることでドループの低減も合わせて行う。

<sup>#</sup> sawamura@myppj.com

### 3. 開発した MARX モジュレータと試験結果

#### 3.1 ILC 用 MARX モジュレータの仕様と MARX 基板写真

ILC 用 MARX モジュレータの仕様を Table 1、MARX 基板の写真を Fig. 2 に示す。

Table 1: MARX Modulator Specifications

充電電圧	-2kV
MARX 段数	4段
出力パルス電圧	-1.6kVp×4=-6.4kVp
出力パルス電流	140Ap
出力パルス幅	1.9ms
繰り返し	5Hz
チョッパー周波数	50kHz 以上
出力電圧リップル	6%以下
回路方式	チョッパー型 MARX 回路
トリガ入力信号	光トリガ
制御電源入力	DC24V

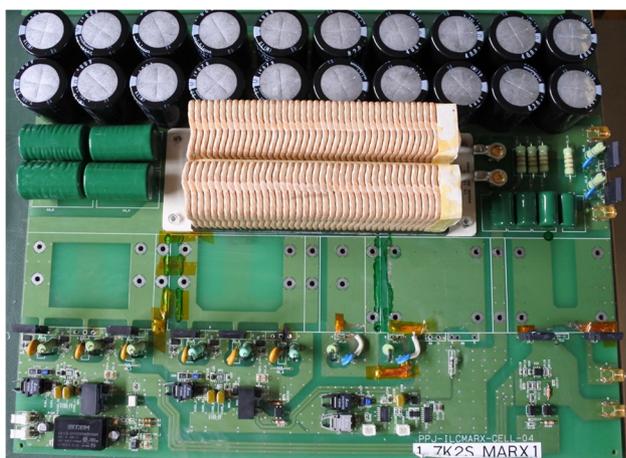


Figure 2: MARX board photo.

#### 3.2 本開発の目的

MARX 基板に実装している SiC-MOSFET の耐圧を 1.2kV から 1.7kV のものに変更し、信頼性の向上をはかるとを目的とする。

#### 3.3 PWM デュティの変化と各 MARX 基板の出力電圧

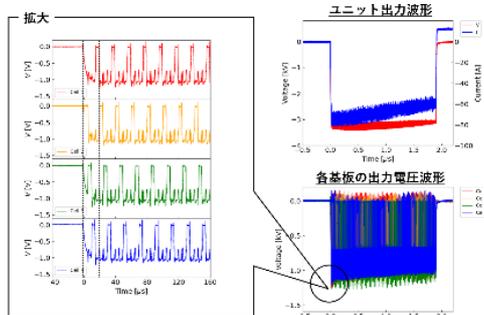
PWM デュティを変化させ MARX モジュレータ出力と各 MARX 基板の出力電圧の測定を行った。

(※各段の電圧を測定する差動プローブの耐圧制限により充電電圧は-1kVとした)

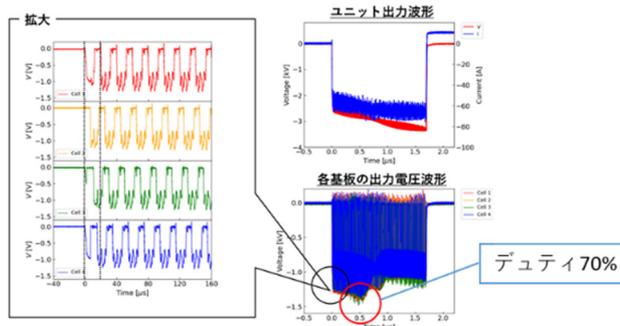
PWM デュティを可変した試験結果を Fig. 3 に示す。

Figure 3 の実測結果より PWM デュティ 45%、70%付

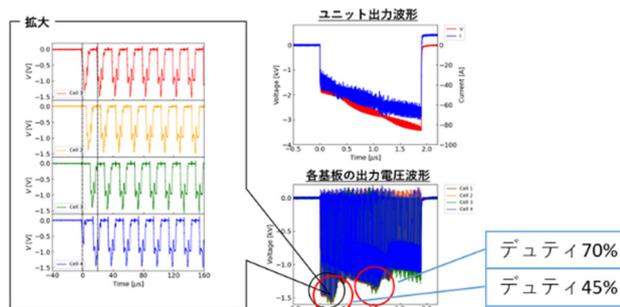
• 実測 (80~97%)



• 実測 (60~97%)



• 実測 (40~97%)



• 実測 (20~97%)

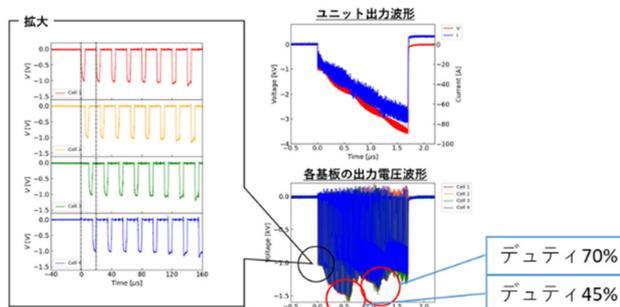


Figure 3: Output voltage of MARX board with variable PWM duty.

近でユニット出力には表れないが MARX 基板には 1.5kV を超えるような大きなスパイクが発生している。

#### 3.4 PWM デュティの変化のシミュレーション確認

Figure 4 に示すシミュレーション回路により PWM デュティ変化時の各 MARX 基板の出力電圧の確認を行った。

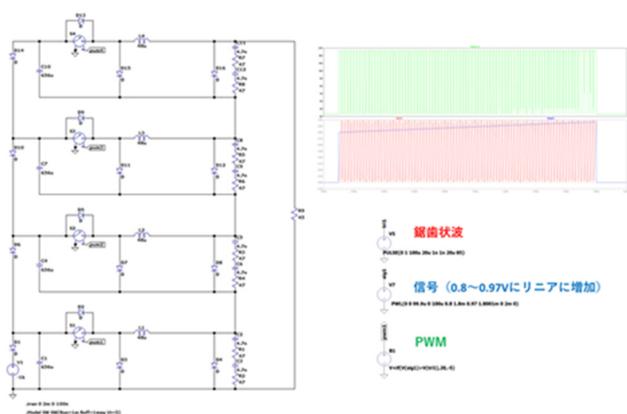
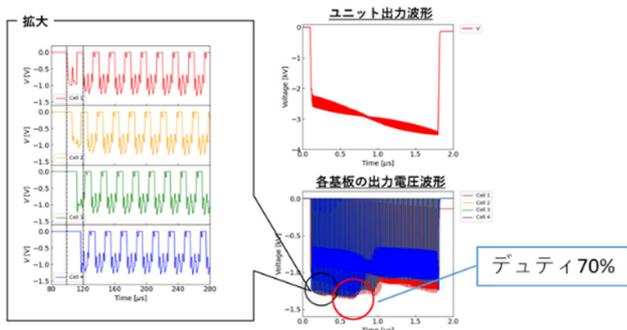


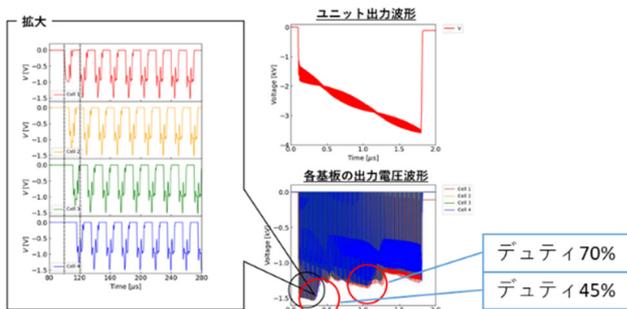
Figure 4: Simulation circuit of PWM duty change.

シミュレーションでは三角波比較法で PWM 波形を生成し位相を  $90^\circ$  ずらして各ゲートに入力を行った。

- シミュレーション (60~97%)



- シミュレーション (40~97%)



- シミュレーション (20~97%)

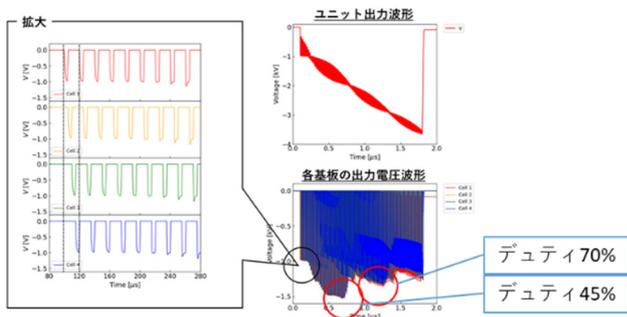


Figure 5: Simulation results.

Figure 5 に示すシミュレーションにおいても PWM デューティ 45%、70% 付近でユニット出力には表れないが MARX 基板には 1.5kV を超えるような大きなスパイクが

発生していることが確認できた。

### 3.5 Soft-start 時の測定結果と実測結果のまとめ

実際の使用時は Fig. 6 に示すように電源出力 ON 時 (立ち下り時) に PWM デューティ波形ずつ変化させユニット出力電圧にリングングが発生しない Soft-start を用いている。

- 実測 (40-60-70-79-81~97% : soft-start)

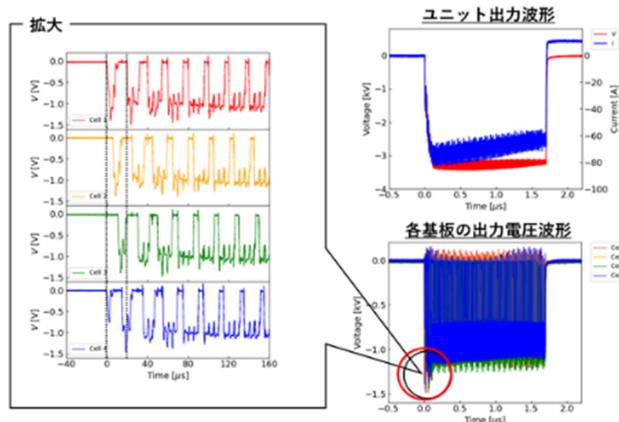


Figure 6: Measured output waveform at soft start.

Figure 6 赤○ の、Soft-start の部分でユニット出力には表れないが MARX 基板には 1.5kV を超えるような大きなスパイクが発生している。

また、各基板の出力電圧波形を時間軸は異なるが横軸 duty として Fig. 7 にプロットした。

Figure 7 より、いずれの場合も、約 45%、70% の特定

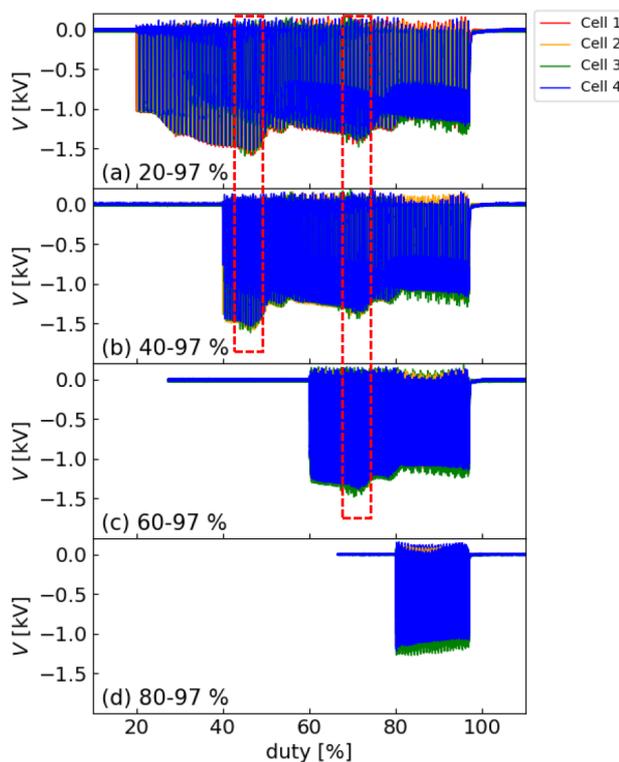


Figure 7: Output voltage waveform of each board (horizontal axis duty).

の duty で大きなスパイクが生じていることが分かる。

### 3.6 スパイク発生の原因

複数の基板が同時に ON しており、1 つの基板が OFF すると、出力電流が減少し、コイルの  $L di/dt$  より、他の ON 状態の基板出力にスパイクが生じる。

### 3.7 考察

構成的に生じるスパイクは現状の 1.2kV 耐圧の MOSFET では仕様を超えており故障する可能性があるが、1.7kV 耐圧の MOSFET では仕様の範囲内に収まっていると言える。

### 3.8 定格連続運転の結果

単発～定格繰返し 5Hz まで各周波数で、4ヶ所のヒートシンク温度をファイバ温度計で計測、併せて、ファン入口付近の気温も、T 熱電対で計測した。

温度が飽和するまで連続運転し、運転終了時点でのヒートシンク温度- 気温から、温度上昇  $\Delta T$  を求め Fig. 8 に示す。

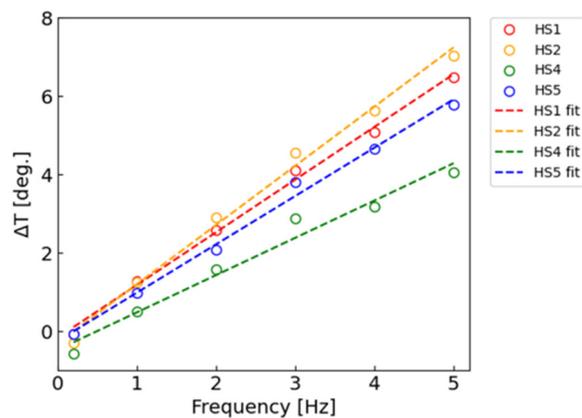


Figure 8: Repetition frequency and heat sink temperature.

※温度測定箇所

HS1 → 4 段目 放電 FET1

HS2 → 4 段目 放電 FET2

HS4 → 4 段目 チョッパダイオード

HS5 → 1 段目 充電ダイオード

主回路デバイスを 1.7kV-SiC-MOSFET に変更したが、温度上昇は周波数にほぼ比例して増加、定格出力で繰返し周波数 5Hz の定格連続運転でも 10°C 以下の温度上昇に収まった。

今回採用した 1.7kV-SiC-MOSFET は本研究の信頼性を向上させることを達成し、ILC 用 MARX モジュレータに搭載可能なことが確認できた。

## 4. 今後の展開

今後の展開として現在高エネルギー加速器研究機構に設置されている ILC MARX 電源(ILC 用 MARX モジュレータ 20 ユニット)の回路デバイスを 1.7kV-SiC-MOSFET に置換えていくことも視野に入れる。また 1.7kV-SiC-MOSFET を他の製品の開発にも採用を試み、使用実績を重ねていく。