

ILC 用 SiC MOS FET MARX 方式クライストロンモジュレータ用電源の開発 A DEVELOPMENT OF SiC MOS FET MARX TYPE KLYSTRON MODULATOR FOR INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER

徳地 明^{#,A)}, 澤村 陽^{A)}, 明本 光生^{B)}, 中島 啓光^{B)}, 川村 真人^{B)}, 江 偉華^{C)}, 鈴木 隆太郎^{C)}, 林 拓実^{C)}
Akira Tokuchi ^{#,A)}, Yo Sawamura ^{A)}, Mitsuo Akemoto ^{B)}, Hiromitsu Nakajima ^{B)}, Masato Kawamura ^{B)},
Weihua Jiang ^{C)}, Ryutaro Suzuki ^{C)}, Takumi Hayashi ^{C)}
A) Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.
B) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
C) Nagaoka University of Technology

Abstract

ILC (International Linear Collider) plan, the main linear accelerator of the ILC plan, 378 units 1.3GHz 10MW multi-beam klystron system is mounted. RF power for generating the acceleration field on the superconducting accelerating cavity is composed of multi-beam klystron and klystron power source for driving it. We propose a low-cost pulsed power supply in a compact that combines the structure and the chopper circuit of the MARX-type power supply, aim to reduce the ripple by droop compensation and phase control by PWM control. The power supply is made up of 20 units a chopper control method MARX circuit of four stages. Aiming at miniaturization of the size, adopting SiC devices to reduce the PWM switching losses, and also adopted the charging voltage digital feedback control using an A/D converter.

1. はじめに

ILC (国際リニアコライダー) 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である。

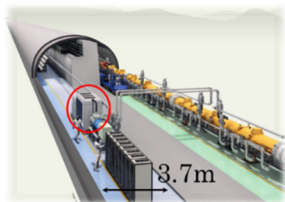


Figure 1: Underground 100m and narrow space.

必要台数; マルチビームクライストロン

- ✓ 主加速器用 ……380 台
- ✓ その他 ……270 台

多数のパルス電源を長時間の運転が必要とされるため高効率、高信頼性、小型化、軽量化、低コスト化が要求されている。

ILC用高周波電源

Table 1: Specification of Pulsed Power Module

Output voltage [kV]	-120
Current [A]	140
Flat top part [ms]	1.65
Max. average power [kW]	139
Repetition rate [pps]	5
Ripple ratio [%]	< ±0.5
Rise time [us]	< 100

[#] tokuchi@myppj.com

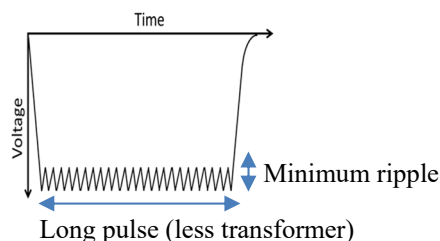
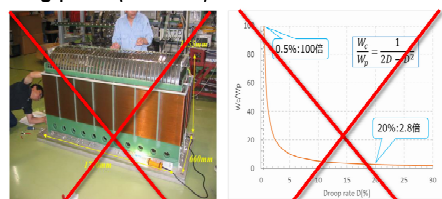


Figure 2: Output pulse.

クライストロン電源はマルクス変調器と呼ばれ、120kV 140A 1.65ms 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。

Long pulse(1.65ms) Low droop ± 0.5%



Need yt product has a larger pulse transformer Need a capacitor which capacitance is large

Figure 3: Requirements of Klystron modulator.

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 1.65ms 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。

チョップパ型マルクス電源は下記の特長を有している。

- 回路がブロック化され、オンボード化
 - ✓ 量産可能(低コスト化)
- 各素子の耐電圧が充電電圧と等しい
 - ✓ 低耐圧素子(低コスト化)

- 各段ごとに ON/OFF を切り替え可能
✓ 低リップル化(小型,軽量化)

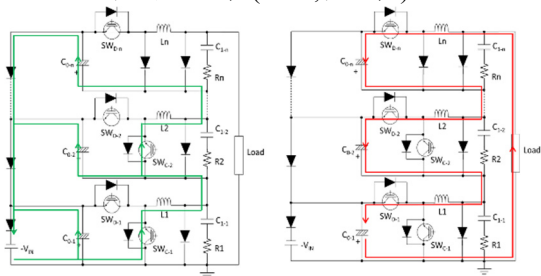


Figure 4: Chopper type MARX circuit in Charge and Discharge mode.

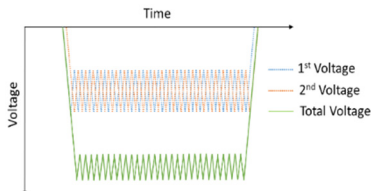


Figure 5: Explanation drawing of Chopper type MARX circuit in two stacked operation mode.

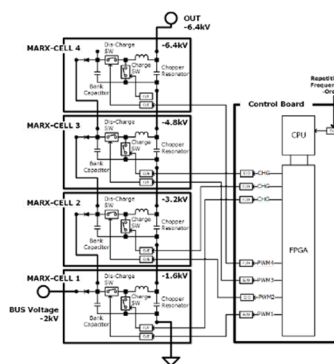


Figure 7: Block diagram of Chopper type MARX Unit.

2. チョッパ型マルクス電源の構成検討

2.1 チョッパ型マルクス試作基板とユニットの構成

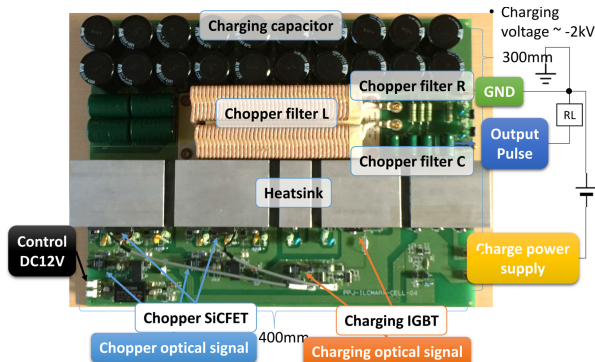


Figure 6: Explanation drawing of Chopper type MARX board.

チョッパ型マルクス電源は Fig.6 に示す 300mm × 400mm の MARX 基板を 4 段用いて、MARX ユニットとする。MARX ユニートを 20 台で Klystron Modulator 電源とする。

Table 2: Specification of Chopper type MARX Cell and Unit.

CELL	Bus Voltage	-2.0kV
	Nominal Output Voltage	-1.6kV
	Bank Capacitor Drop	>20%
UNIT	Number of CELL stage	4
	Output Voltage	6.4kV
	Size	445W × 505D × 350H

2.2 チョッパ型マルクス試作基板使用デバイスと損失測定

SiC, IGBT, Si それぞれの損失を比較した結果、より小型化を目指し PWM スイッチングロスを低減する SiC デバイスを採用した。

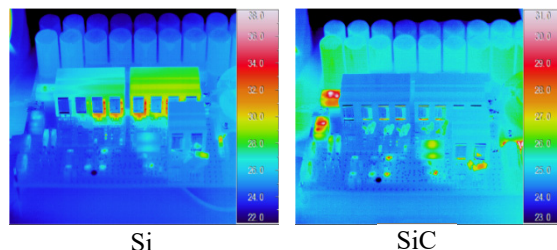


Figure 8: Thermography image comparison Si and SiC.

3. MARX ユニットの開発

本研究では、マルクス電源の構成とチョッパ回路を組み合わせた小型で安価なパルス電源の提案で PWM 制御によるドロープの補償と位相制御によるリップルの低減を行う。

3.1 MARX ユニット構成

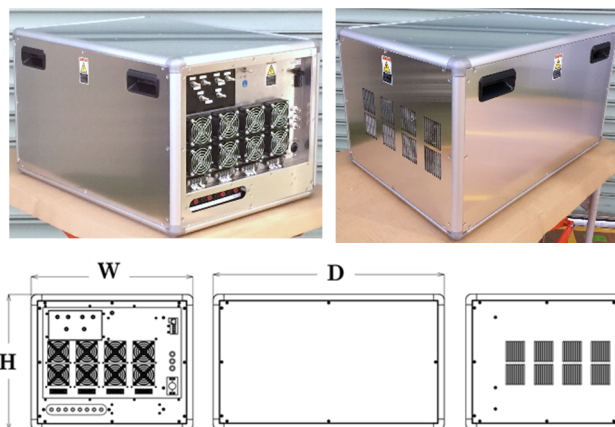


Figure 9: Appearance of MARX Unit.

Measurement points	Dimensions (mm)
W	455
D	650
H	382

Figure 10: Outline drawing of MARX Unit.

Mass 47.5kg

300mm×400mm の MARX 基板を 4 段用いて、MARX ユニットとし、各 MARX ユニットでは-6.4kV の出力を発生。

3.2 MARX ユニットインターフェース

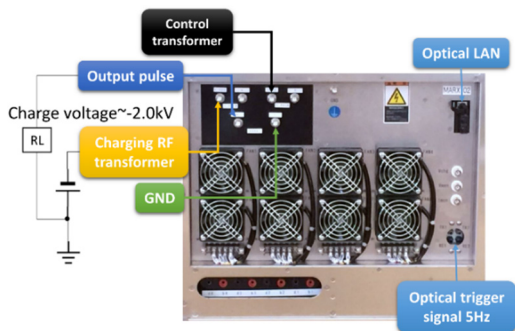


Figure 11: Interface of MARX Unit.

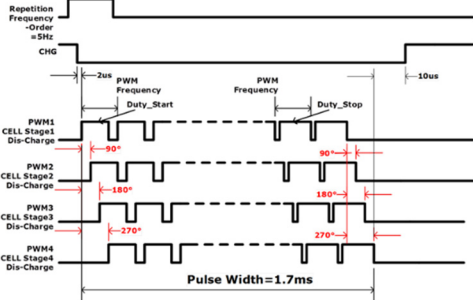


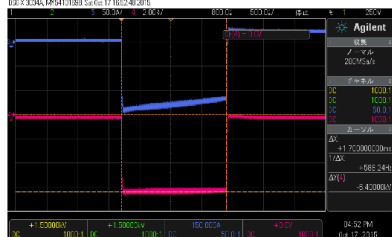
Figure 12: Timing chart of Control signal.

MARX ユニットのインターフェースは絶縁トランスや光ケーブルにより、MARX ユニットが-120kV 高電圧印加の状態でも電源供給及び制御を可能とした。

3.3 MARX ユニット単体動作確認

3.3.1 MARX ユニット-2kV 充電運転波形

- MARX ユニット MARX 基板 4 段
- 充電電圧 2.0kV 模擬負荷抵抗 43Ω
- Chopper 周波数 50kHz PWM Duty 77-97% 可変 出力パルス数 85pulse (1.7ms)



CH4; Output voltage 6.4kV/2.0kV/div
CH3; Output current 140A/50A/div 500us/div
Output voltage ripple: ±3.7%

Figure 13: MARX Unit -2kV charging operation.



CH1; MARX1 SiC-FET S-D voltage 500V/div
CH2; MARX2 SiC-FET S-D voltage 500V/div 5us/div
Output voltage rise time (10% -90%): 19us

Figure 14: MARX Unit -2kV charging operation. (Expanded)

出力電流のドレージはCTの特性によるもので、出力電圧-6.4kV、出力電流 140A の動作を確認できた。

3.3.2 MARX ユニット 5Hz 動作繰り返し運転

定格出力のヒートラン試験で、放電 SiC-FET の温度上昇が数度程度におさまることを確認した。

3.3.3 ギャップ SW による MARX ユニットの負荷短絡試験

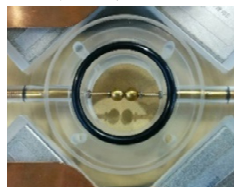
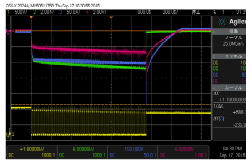


Figure 15: Gap switch for load short test.



CH1; SiC-FET S-D voltage 500V/div
CH2; Output voltage 2kV/div
CH3; Output current 50A/div 200us/div

Figure 16: Load short test wave form.

Fig.15 のギャップ SW を負荷に接続し MARX ユニットの負荷短絡(過電流検出)試験を行った。

過電流検出 150A(3.75V)からゲートターンオフまでの遅延時間は 600ns に収まった。

4. クライストロンモジュレータ用電源の開発

4.1 ユニット-接地筐体耐圧試験 DC120kV

4.4.1 MARX ユニット DC 耐圧試験

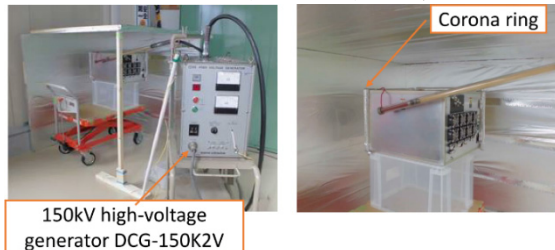


Figure 17: Unit-grounded enclosure withstand voltage test DC120kV.

MARX ユニットのユニット-接地筐体を模擬した耐圧試験を行い DC120kV 印加時でも十分耐圧が確保されることを確認した。

4.4.2 MARX ユニット-接地筐体間高電圧印加 ユニット動作試験

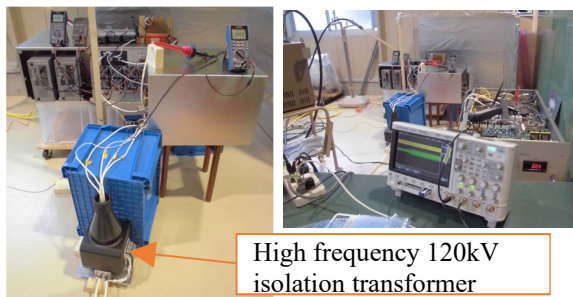


Figure 18: Unit-grounded enclosure DC120kV applied, unit operation test.

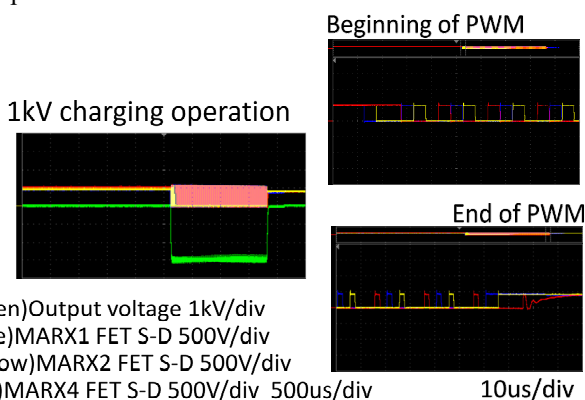


Figure 19: Unit-grounded enclosure DC120kV applied, unit operation test waveform.

50kV インバータ→TV150 (120kV 絶縁トランス)→整流回路 から充電電圧、制御用電圧を供給し MARX ユニットの DC120kV の高圧に浮かした状態でユニットの動作確認試験を実施し、1kV 充電での MARX ユニット動作を確認した。

4.2 クライストロンモジュレータ用電源構成

MARXユニットでは-6.4kVの出力を発生させ、MARXユニットを20台構成することによりKlystron Modulator電源として-120kVの出力を得るシステムを試作。

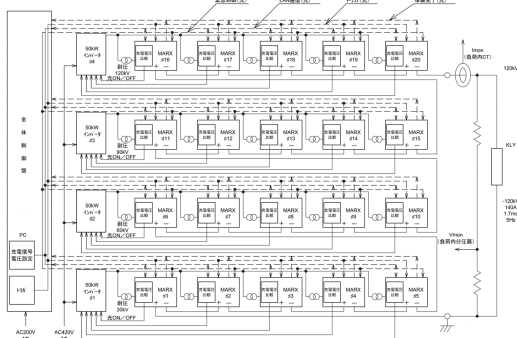


Figure 20: Pulsed power supply block diagram as the Klystron Modulator.

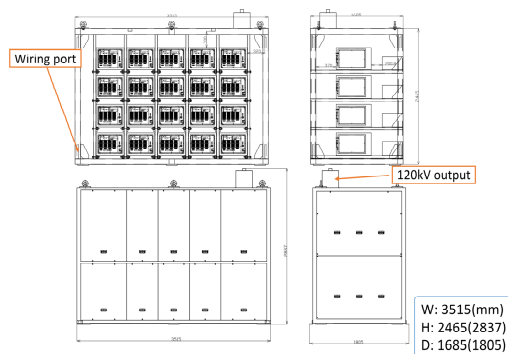


Figure 21: Pulsed power supply rack configuration as the Klystron Modulator.



Figure 22: Pulsed power supply as the Klystron Modulator.

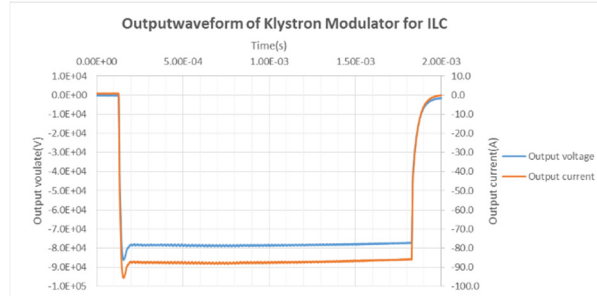


Figure 23: Output waveform of Klystron Modulator for ILC.

現時点で、単発動作で、模擬負荷での 80kV, 88A の出力を確認した。

出力電圧リップルは±0.23%であった。

5. おわりに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)、長岡技術科学大学とで共同研究開発中のクライストロンモジュレータ用電源の試作品を KEK つくばキャンパス STF 棟に設置し全体での性能試験を実施中である。

今年度中に定格運転 120kV140A 出力 5Hz 連続運転の目途を立てることを目指している。