

# ILC 用 MARX 電源における制御電源供給の信頼性向上

## IMPROVING THE RELIABILITY OF THE CONTROL POWER SUPPLY IN THE ILC MARX MODULATOR

澤村陽<sup>#, A)</sup>, 徳地明<sup>A)</sup>, 中島啓光<sup>B)</sup>, 明本光生<sup>B)</sup>

Yo Sawamura<sup>#, A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>B)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>B)</sup>

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

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

### Abstract

The International Linear Collider (ILC) project aims to investigate fundamental questions regarding the origins of the universe, as well as the nature of space, time, and mass, by facilitating high-energy electron-positron collisions in a linear accelerator approximately 30 kilometers in length. The klystron power supply system, utilizing a MARX modulator, generates pulsed voltages of 120 kV, 140 A, with a pulse width of 1.65 ms, which are applied to the cathode of a multi-beam klystron. This study reports on efforts to enhance the reliability of the control power supply within the MARX modulator, a critical component for stable operation of the ILC accelerator. The system is required to be compact, cost-effective, and highly reliable, while also delivering long-duration flat-top pulses with voltage stability within  $\pm 1\%$ . In this work, we addressed reliability issues arising from the use of commercial DC-DC converters in the control power circuit. An overcurrent anomaly observed during operation was traced to insulation degradation in the converter under high-voltage conditions. To mitigate this issue, we replaced the commercial converters with a custom-designed isolated power supply utilizing high-frequency transformers. We conducted high-voltage endurance and corona discharge tests to verify the insulation reliability of the new configuration. The experimental results confirmed that the transformer-based approach significantly improves dielectric strength and thermal stability. Continuous operation tests over 8 hours demonstrated consistent output voltage and core temperatures without signs of corona discharge. These findings validate this method for future deployment in the 20 MARX modulator units planned for the ILC.

### 1. はじめに

ILC (国際リニアコライダー) 計画は、約 30 km の直線加速器を用いて電子と陽電子を高エネルギーで衝突させ、宇宙や物質の起源に迫ることを目的としている。



Figure 1: Interior view of the main tunnel of ILC. © KEK

本稿では、ILC に使用されるクライストロン用マルクス変調器の電源[1]について、信頼性向上を目的とした取り組みを報告する。

モジュレータには、小型・低コスト・高信頼性に加え、1.65 ms の長パルスと 1% 以内の電圧安定性が求められる。Figure 2 にクライストロン電源、Fig. 3 にその中の MARX ユニットの示す。

KEK、PPJ 共同開発のクライストロン電源は 5 列 4 段

合計 20 台の ILC 用 MARX ユニットを使用している。[5]



Figure 2: SiC MOSFET-based MARX Modulators for the ILC Klystron Modulator System.



Figure 3: ILC MARX Modulator.

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

本研究では、高電圧環境下での制御電源の信頼性向上を目指した絶縁設計の最適化のために、ILC 用 MARX ユニットにおける制御用電源 DC-DC コンバータを、市販品の DC-DC コンバータから高周波トランス方式に置換することで、信頼性の向上を図った。

## 2. 課題と再現確認

### 2.1 課題

本研究では、高周波トランス方式への置換による ILC 用 MARX ユニットの信頼性向上と、その設計・評価について報告する。

- ILC 用 MARX ユニットは 4 段の MARX 基板 (-2 kV) で構成している。Figure 4 に MARX ユニットの構成図を示す。[2, 3]
- 最上段の MARX 基板 4 にはパルス出力時-8kV の電圧が印加され制御電圧用の DC-DC コンバータで耐压を持たせている。
- 制御電源用 DC-DC コンバータが、時間とともに耐压不良を起こし始めており、過電流インターロックを発生させている。

※ 所定の電圧印加中に絶縁破壊または異常リーク電流が検出され、過電流インターロックが動作しました。

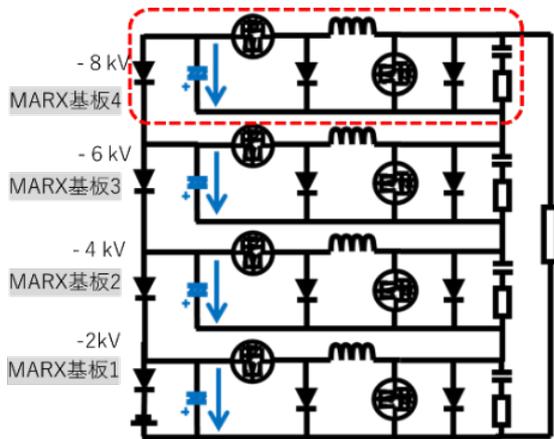


Figure 4: Board Configuration of the ILC MARX Modulator.

### 2.2 不具合症状

使用中に下記の不具合症状が発生した。

実負荷・充電電圧 900 V で通電中、MARX ユニットが過電流を検出。リセット後も再発し、さらにランダムな充電過電圧も確認された。

### 2.3 通電確認

充電電圧 500 V、1 ショット、負荷 46 Ω で通電確認し、MARX 基板 4 で過電流検出が発報。閃絡音があり、MARX 基板 4 における閃絡時の内部 DCCT 電流波形を Fig. 5 に示す。※DCCT (直流電流トランス: DC Current Transformer)

この結果により、DCDC コンバータの耐压劣化によって、1-2 次間が短絡し、出力過電流が発生していることが確認できた。

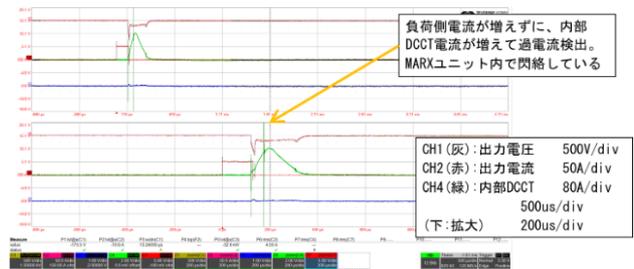


Figure 5: Waveform of Internal DCCT Current Increase During Flashover in MARX Board 4.

故障が確認された DC-DC コンバータ周辺の外観を Fig. 6 に示す。



Figure 6: Photo of the Area Around the DC-DC Converter on MARX Board 4.

Figure 7 に DC-DC コンバータ周辺の回路構成図を示す。[4]

### <<DC Supply>>

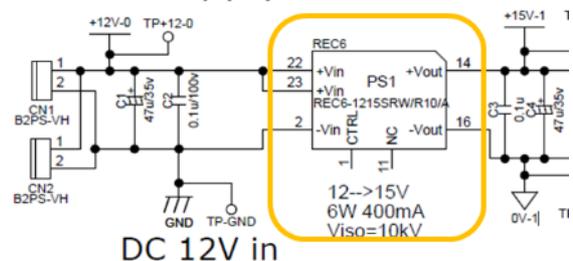


Figure 7: Circuit Diagram Around the DC-DC Converter.

### 2.4 再現試験

再現試験として下記 2 点に注目して行った。

- データシート上は 1 次—2 次間で DC10 kV の耐压を有するが、パルス電圧での長時間耐力を確認する
- 再現試験には新品と MARX ユニット実装品 (既設品) の 2 個の特性比較を行う

### 2.5 試験回路

再現試験に使用した回路図を Fig. 8 に示す。

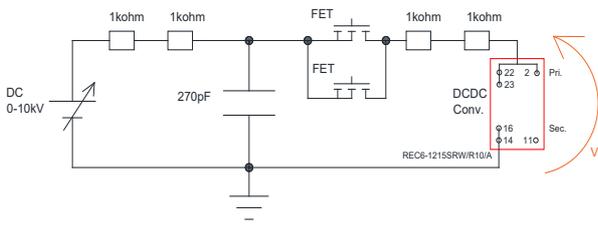


Figure 8: Circuit diagram used for the reproduction test.

既設品に 10 kV、1.7 ms、150 Hz を印加した際の電圧波形を Fig. 9 に示す。



Figure 9: 10 kV, 1.7 ms, 150 Hz Applied Voltage Waveform (Existing Unit).

既設品での 10 kV、1.7 ms、150 Hz 印加、2.3 時間連続試験で耐圧不良後の電圧波形を Fig. 10 に示す。

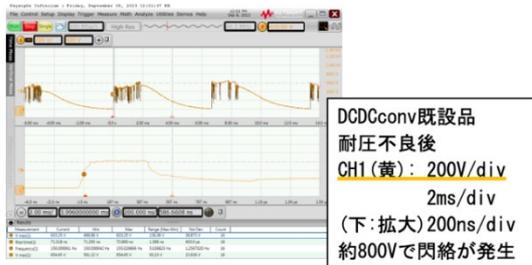


Figure 10: Voltage Waveform following 2.3-Hour Continuous Test with 10 kV, 1.7 ms, 150 Hz Applied (Existing Unit).

既設品、新品での連続耐圧試験結果を Table 1 で整理した。

Table 1: High-Voltage Endurance Test Results for Existing and New Units

DC-DC コンバータ	印加電圧 [kV]	印加時間 [H]	印加回数 [M 回]	耐圧不良
既設品	8	34.6	18.684	無し
	10	2.3	1.242	発生
新品	8	21.83	11.79	発生
	10	N/A	N/A	N/A

Table 1 の結果から、既設品では 10 kV 印加後約 1.2 M 回で耐圧不良が確認されているのに対し、新品では 8 kV 印加で約 11.8 M 回まで耐えたが、同様に劣化が確認された。これにより、市販 DC-DC コンバータの耐圧信頼性には大きな個体差があることが分かった。

## 2.6 結果

パルス耐電圧試験結果 (DC-DC コンバータ、定格 10 kV)

- 新品: 8 kV, 11.8 M ショットで耐電圧不良発生
  - 既設品: 10 kV, 1 M ショットで耐電圧不良発生
- ※個体差により耐電圧性能に大きなばらつきが見られた。

## 3. 今回の取組み

### 3.1 取組み内容

制御基板の耐圧確保を 10 kV DC-DC コンバータではなく絶縁型高周波トランス方式とトランス部で確保。

- 従来 DC-DC コンバータ方式: MARX 基板の外観写真を Fig. 11 に示す。



Figure 11: External view of the MARX board in the conventional configuration using DC-DC converters for control power insulation.

従来 DC-DC コンバータ方式の MARX ユニットにおける各回路の電位分布を Fig. 12 に示す。

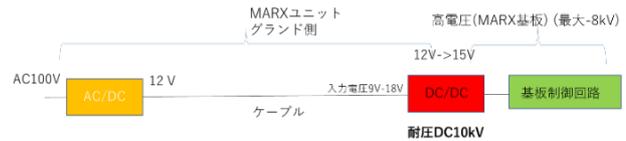


Figure 12: Voltage distribution in a MARX unit employing the DC-DC converter method, showing insulation stress concentration at high-potential points.

DC-DC コンバータ方式の電圧ディレーティング (derating);

実使用電圧: DCDC コンバータ耐圧  
8 kV: 10 kV = 80%

- 高周波トランス方式:

今回の高周波トランス方式の MARX ユニットにおける各回路の電位分布を Fig. 13 に示す。



Figure 13: Voltage distribution in a MARX unit employing the high-frequency transformer method.

高周波インバータ出力を高周波トランスコアで 1:3 倍し、高周波トランス基板で整流、DC 電圧を出力する。高周波トランスコアおよび整流基板の構成を Fig. 14 に示す。

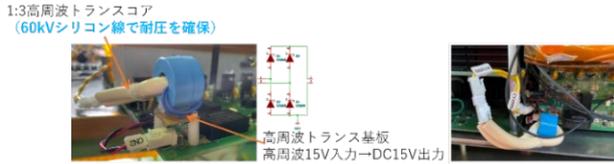


Figure 14: High-Frequency Transformer Core and Rectifier Board.

高周波トランス方式の電圧ディレーティング；  
実使用電圧: 60 kV シリコン線耐圧  
8 kV: 60 kV = 13%

本対策により、使用電圧を定格耐圧の 80%から 13% に抑え、大幅なディレーティングを確保した。これにより、電氣的ストレスを低減し、絶縁破壊のリスクを大きく軽減した。

### 3.2 トランス方式制御電圧連続試験

制御電源電圧およびトランスコア温度の時間推移(4 時間)を Fig. 15 に示す。

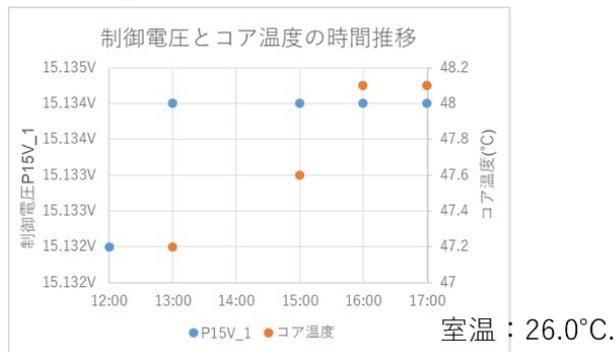


Figure 15: Time Variation of Control Power Supply Voltage and Core Temperature.

MARX 基板 4 の高周波トランスコアにおけるサーモカメラ画像を Fig. 16 に示す(最大温度は 47.2°C)。

Figure 16 に示すように、トランスコアの最大温度は約 47°Cであった。

### 3.3 MARX ユニット連続運転

充電電圧: -1.7 kV、負荷抵抗: 20 kΩ、PWM duty(パルス幅変調のデューティ比): 100 %、パルス幅: 1.7 ms、繰返し周波数: 5 Hz で MARX ユニットの累計 8 時間の連続運転を行った。

絶縁トランス方式 MARX モジュールにおける 5 Hz 動作確認時のコア温度と出力電圧推移を Fig. 17 に示す。

連続運転で制御電源電圧 P15V\_1 (15.34 V) および出力電圧 (-6.84 kV) に変化は見られなかった。

Figure 18 は 4 時間の連続運転後に測定された出力電圧波形であるが、試験開始時と比較して、出力電圧波形には ±0.1 kV 以内の変動しか見られず、温度上昇も 2°C

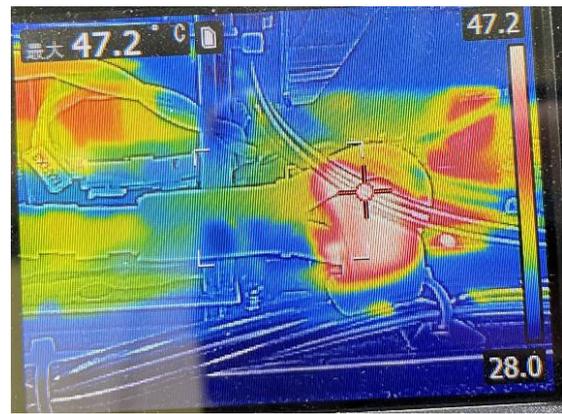


Figure 16: Thermal Camera Image of the High-Frequency Transformer Core on MARX Board 4.

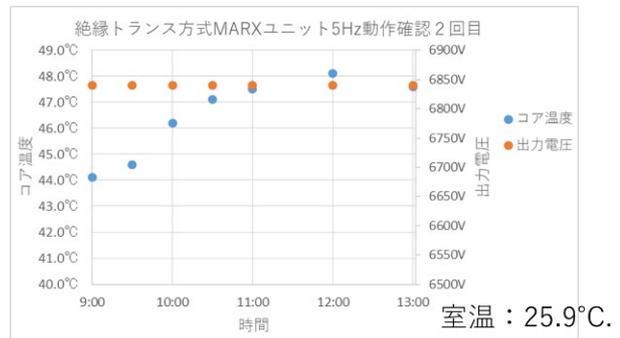


Figure 17: Verification of 5 Hz Operation of the Isolated Transformer-Type MARX Modulator.

以内であった。

MARX ユニット連続運転結果は下記の通りで問題は確認されなかった。

- 制御電圧 4 時間運転: 制御電圧は 15.1 V、コアの温度は 47.2°C。
- MARX ユニット連続運転: 出力電圧は -6.84 kV、コアの温度は 47.6°C。
- 累計 8 時間の連続運転で出力電圧の変化、コア温度の大きな上昇はなく、シリコン線部分でのコロナ放電(高電圧時に絶縁体表面に発生する放電現象)もみられなかった。



Figure 18: Output Voltage Waveform After 4 Hours of Continuous Operation.

## 4. 現状の課題と今後の展望

### 4.1 現状まとめと課題

- ✓ MARX ユニットにおける制御電源の耐圧問題に対して、高周波トランス方式を導入
- ✓ デイレーティング 13%への改善により、電氣的ストレスを大幅に軽減
- ✓ 長時間運転試験でも温度上昇・電圧変動なく、今後の 20 ユニット展開に向けた有効性を確認

現状 1MARX ユニットにおいて累計 8 時間の連続運転の確認にとどまっているので、検証できた時間とユニット数に限りがある。

### 4.2 今後の展望

今後の評価では、連続 1000 時間運転中においてコア温度が 60°C を超えず、出力電圧の変動が ±1% 以内に収まることを信頼性の指標とする予定である。

1 ユニットで確認後 20 ユニットへの展開を計画する。

これらの結果より、ILC 本体システムへの適用展開を目指している。

### 4.3 結論

ILC MARX クライストロン用モジュレータへの展開に向けて、ILC 用 MARX モジュレータにおいて、従来の DC-DC コンバータを高周波トランス方式に置換し、制御

電源の耐圧信頼性を評価した。電圧ストレス負荷下での長時間試験により、電圧変動・温度上昇ともに良好な結果を得た。今後、全 20 ユニットへの適用を目指していく。

## 参考文献

- [1] Interior view of the main tunnel of the ILC, <https://www.kek.jp/ja/about/pr/image/12899>
- [2] Y. Sawamura *et al.*, 「3.3kV-SiC-MOSFET を使用した ILC 用 MARX モジュレータの評価試験」, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, PASJ2019 THPH008 p.604.
- [3] H. Nakajima *et al.*, 「KEK における ILC クライストロン用チョップ型マルクス電源の改善と大電力試験」, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, PASJ2018 THP058 p.956.
- [4] Y. Sawamura *et al.*, 「面実装型 3.3kVSiC ILC 電源の開発」, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, PASJ2018 THP063 p.973.
- [5] H. Nakajima *et al.*, 「ILC クライストロン用チョップ型マルクス電源の現状」, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 29-September 1, 2023, Chiba, Japan, PASJ2023, FRP062.