

# KEK における ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源の改善と大電力試験

## IMPROVEMENT AND HIGH-POWER TEST OF CHOPPER-TYPE MARX MODULATOR FOR ILC KLYSTRON AT KEK

中島啓光<sup>#, A)</sup>, 明本光生<sup>A)</sup>, 川村真人<sup>A)</sup>, 夏井拓也<sup>A)</sup>, 徳地明<sup>B)</sup>, 澤村陽<sup>B)</sup>, 江偉華<sup>C)</sup>  
Hiromitsu Nakajima<sup>#, A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>A)</sup>, Masato Kawamura<sup>A)</sup>, Takuya Natsui<sup>A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>B)</sup>, Yo Sawamura<sup>B)</sup>,  
Weihua Jiang<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

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

<sup>C)</sup> Nagaoka University of Technology

### Abstract

The Chopper-type Marx modulator, which consists of 20 units to provide a -120kV 140A 1.65ms 5pps pulse, is being developed to drive a 10MW L-band multi-beam klystron for the ILC. This paper describes about high power test of the modulator with Thales TH2104, 5MW L-band klystron, as the load, and some improvements of the problems which had been revealed at the high power test.

### 1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) では、約 380 台の 10MW マルチビームクライストロンを RF 源として使用する予定になっている。10MW マルチビームクライストロン用のパルス電源には、低コスト、高信頼性、高効率などが要求されており、ILC の Technical Design Report (TDR) では、ベースラインデザインとして、SLAC National Accelerator Laboratory (SLAC) で開発された P2 Marx を指標としたマルクス型の電源が採用されている[1, 2]。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、10MW マルチビームクライストロン用の電源として、長岡技術科学大学及びパルスパワー技術研究所との共同研究でチョッパ型マルクス電源の開発を行っている[3, 4, 5]。KEK では、昨年度、クライストロンを負荷として 20 ユニットで構成される ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源の大電力試験を行い、さらに、その際に明らかとなった問題点の改善を行った。

### 2. チョッパ型マルクス電源

ILC で使用する予定の 10MW マルチビームクライストロン用のパルス電源に要求される主な仕様を Table 1 に示す。

Table 1: ILC Klystron Modulator Parameters

Output Voltage	-120kV
Output Current	140A
Pulse Width (Flat-top)	1.65ms
Pulse Repetition Frequency	5Hz
Output Pulse Flat-top	< ±0.5%
Energy deposited into klystron during a gun spark	< 20J

ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源は、-120kV の出力電圧を得るために 20 ユニットで構成されており、各ユニットは、Fig. 1 に示すような降圧チョッパ回路を組み込んだマルクス回路 4 段で構成されている。各マルクス回路のコンデンサ  $C_M$  は、充電用のスイッチ  $SW_C$  を ON することにより、ダイオードを介して並列に充電され、放電用のスイッチ  $SW_D$  を ON することによりマルクス回路 4 段の充電電圧が重ね合わされて出力される。さらに、放電用のスイッチ  $SW_D$  を PWM 制御することにより、コンデンサ  $C_M$  の充電電圧が低下することによる出力電圧の低下を補正する。各マルクス回路は、最大-2kV まで充電され、-1.6kV、1.65ms のフラットな出力パルス電圧が得られる。1 ユニットの出力電圧は、マルクス回路 4 段の重ね合わせとなるため、最大で-6.4kV となり、20 ユニットで構成されている ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源は、1 ユニットが故障しても-120kV の出力パルス電圧が得られる設計となっている。また、各ユニット内のマルクス回路は、50kHz で PWM 制御が行われており、4 段のマルクス回路で PWM 制御の位相を 5 $\mu$ s ずつずらすことにより、リップルを低減している。さらに、ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源全体では、20 ユニットの PWM 制御の位相をずらすことで、出力電圧のリップルを低減する。

各ユニットの制御は、1 ユニットに 1 枚実装される制御基板によって行われ、マルクス回路 4 段に充電用のゲート信号、放電用の PWM 制御されたゲート信号を供給し、過電圧、過電流など高速で動作する必要のあるインターロックの制御を行う。また、各ユニットの充電電圧、出力電圧等のモニターも行っている。各ユニットの制御基板は、光ケーブルによって Ethernet に接続されており、Ethernet 経由で制御用の PC から HV 及び TRIG の ON/OFF、充電電圧の設定、過電流、過電圧の設定、PWM のパターンの設定などを行う。

<sup>#</sup> hiromitsu.nakajima@kek.jp

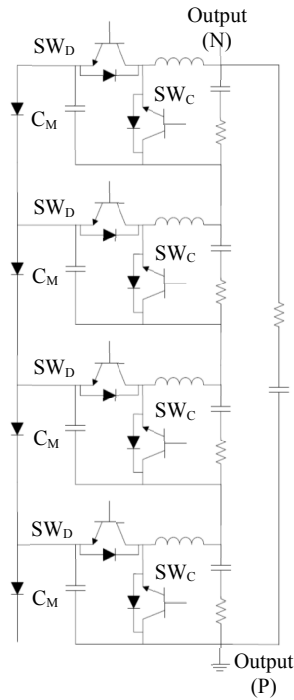


Figure 1: Simplified schematic of the Chopper-type Marx unit.

ILCクライストロン用チョップパ型マルクス電源の各ユニットは、Fig. 2 に示すように絶縁トランスを介して 20kHz の高周波で電力が供給され、各ユニット内にある整流回路で整流され、最大で 2kV まで充電される。設計では、各ユニットに 1 台のインバータユニットで充電することになっているが、現在は、インバータユニットは 5 台のみであり、インバータユニット 1 台で 4 台のユニットを充電している。また、制御回路用の電力は、各ユニット間の絶縁トランスを介して供給される。

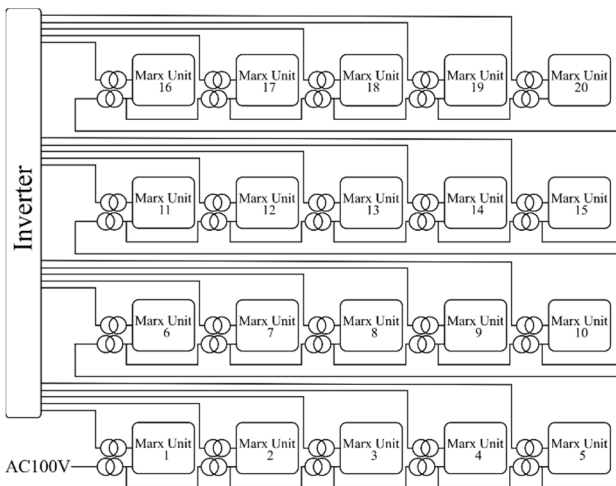


Figure 2: Block diagram of the Chopper-type Marx modulator.

### 3. クライストロン負荷での試験

Thales の 5MW クライストロン TH2104 を負荷にして、繰り返し 5Hz で ILC クライストロン用チョップパ型マルクス電源の試験を行った。クライストロンを負荷にして試験を行うためには、クライストロンの保護のために真空や冷却水のインターロックが必要となる。KEK では、全体制御システムとして、外部機器を制御するために必要となる接点出力、外部インターロックを入力するための接点入力、PC と接続するための Ethernet 等を備えた Control Board を製作し、全体制御盤として Trigger Board と共にユニット化した。Figure 3 に全体制御盤のブロック図を示す。

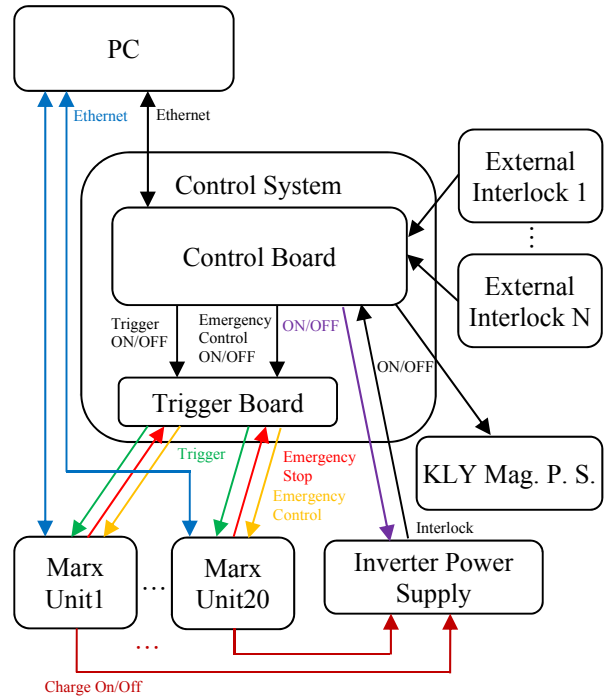


Figure 3: Block diagram of the total control system for the Chopper-type Marx modulator.

クライストロンを負荷とした試験では、充電電圧 1000V で PWM のデューティー比を 86% から 97% まで直線的に増加させることにより、Fig. 4 に示すように出力電圧 74kV、出力電流 39.6A、繰り返し 5Hz で運転できることが確認できた。しかし、その際に、充電器のインバータユニットで使用している電解コンデンサの温度が 50℃ 程度まで上昇しており冷却の強化が必要であることと筐体内上段のマルクスユニットの温度異常が発生することがあることから筐体の冷却の強化も必要となることが判明した。

また、充電電圧 1100V、繰り返し 1Hz で PWM 制御のデューティー比 100% 一定として試験を行った所、出力パルス電圧の立ち上がり部のオーバーシュートによる過電圧のために出力端付近で放電があり、高圧側の 2 ユニットが故障した。20 ユニット全てにおいて、ユニット単体での負荷短絡試験を行い、問題がないことは確認してあったが、20 ユニットでは、各ユニットに絶縁トランスやユニットと筐体間の構造的な浮遊容量があり、その浮遊容量からの急峻なサージ電流が原因で故障したのではないかと推定された。

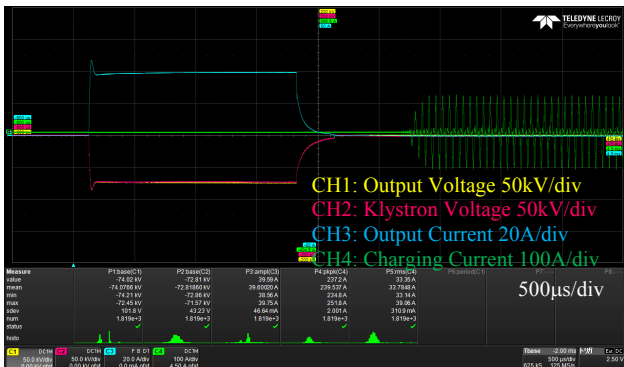


Figure 4: Waveforms of the Chopper-type Marx modulator.

## 4. 問題点の改善

### 4.1 冷却の強化

充電器のインバータユニットの冷却を強化するために Fig. 5 に示すようにインバータユニットの背面に冷却ファンを追加し前面パネルにスリットを入れた。

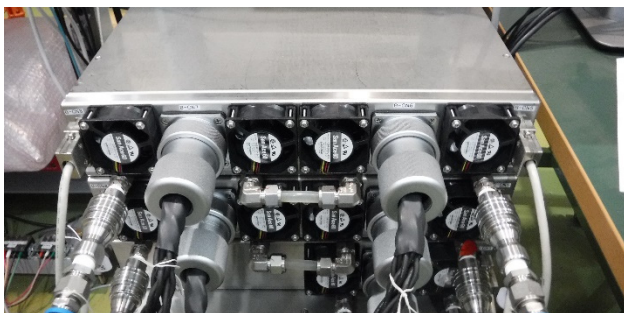


Figure 5: Photographs of the inverter units with the cooling fan.

インバータユニットの冷却強化の改造後、充電電圧 800V、繰り返し 5Hz で 30 分の連続運転を行い、インバータユニット内の電解コンデンサ、フィルムコンデンサの温度上昇を確認した。Figure 6 にインバータユニット内部のコンデンサの温度を測定した結果を示す。Figure 6 からわかるように、各コンデンサの温度上昇は低く抑えられており、問題であった電解コンデンサの温度は、約 2°C の温度上昇で 30°C 程度に収まっている。

また、筐体の冷却を強化するために筐体天板にも冷却ファンを追加しており、その結果、筐体内上段のマルクスユニットの温度異常のインターロックが発生することもなくなった。

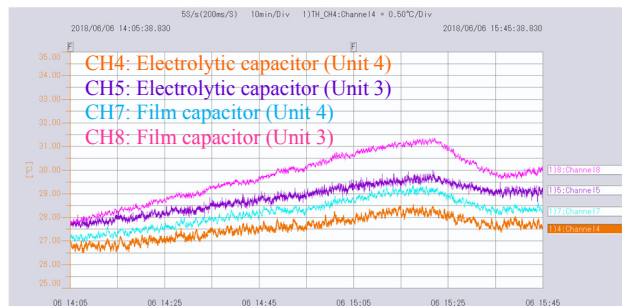


Figure 6: Measurement result of the inside capacitors' temperature of the inverter unit.

### 4.2 負荷短絡保護回路の追加

負荷短絡時の浮遊容量からのエネルギーによる過電流を抑制するために共通モードのフィルタを追加した。共通モードのフィルタは、Fig. 7 に示すようにケイ素鋼板のコア 6 個に高圧側と低圧側の出力端子からの耐圧 10kV のシリコンケーブル 2 線を 1 コアにつき 26 巻きしたもので、Fig. 8 に示すように高圧側の 5 ユニットに追加した。

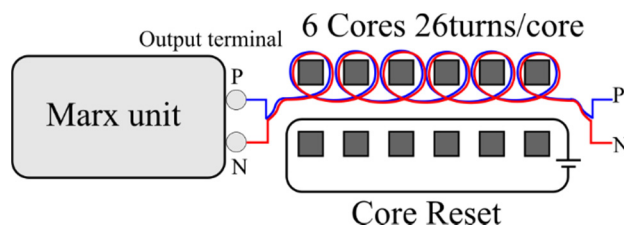


Figure 7: Block diagram of the Chopper-type Marx unit with common mode filter.

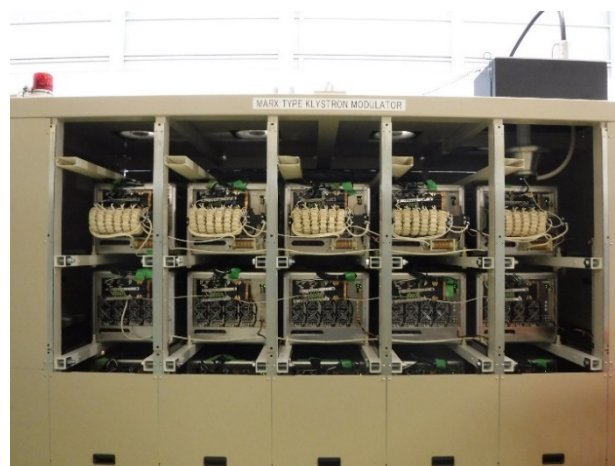


Figure 8: Photograph of the Chopper-type Marx units with common mode filter.

負荷短絡保護回路を追加した 5 ユニットに関して、ユニット単体で浮遊容量に見立てたコンデンサをユニットに接続し充電後、放電することで試験を行い、負荷短絡時の電流が抑えられることとユニット内の素子が壊れないことを確認した。その後、KEK において 20 ユニットでの負荷短絡試験を行った。Figure 9 は、20 ユニットで充

電圧を 800V として、負荷短絡試験を行った時の出力電圧、出力電流の波形であり、出力電圧が約-60kV で負荷短絡が起こり、過電流のインターロックが作動し、HV OFF となっている。負荷短絡の試験後、動作確認の試験を行い、問題がないことが確認できた。

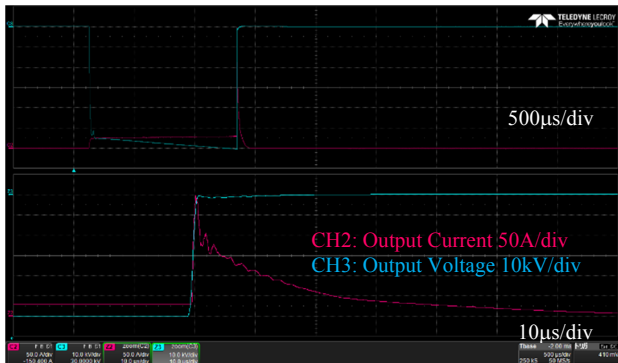


Figure 9: Waveforms of the output load short test.

#### 4.3 ソフトスタート

ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源では、PWM のデューティ比を 90% から 100% というように直線的に増加させることで出力電圧の補正を行っているが、その場合、立ち上がり部分にパルス平坦部の 1.2 倍程度の電圧がオーバーシュートとして出てしまう。そこで、立ち上がり部分のデューティ比を徐々に増加させるソフトスタート制御を行うことで立ち上がり部分のオーバーシュートを抑える。充電電圧 800V でソフトスタート制御を行った時の出力電圧波形を Fig. 10 に示す。このように、立ち上がり部分のオーバーシュートは、ソフトスタート制御を行うことで抑えることができる。また、ソフトスタートのパターンを調整することにより、立ち上がり時間を 40µs 程度にすることができた。

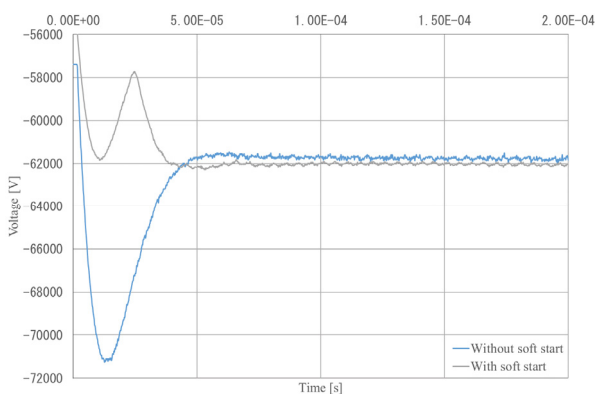


Figure 10: Waveforms of the output voltage rise time.

#### 4.4 パルス平坦部の補正

ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源では、出力電圧の補正は、PWM のデューティ比を直線的に増加させることで行っているが、コンデンサの充電電圧は、指数関数的に減少していく。そのため、出力電圧のパルス平坦部は、前半部分と後半部分でわずかに電圧の差

ができてしまう。そこで、出力電圧のパルス平坦部の平坦度を補正するために出力電圧波形から計算して、PWM のデューティ比を補正することによって Fig. 11 に示すように平坦度が約 0.23% (p-p) のよりフラットな平坦部を得ることができた。

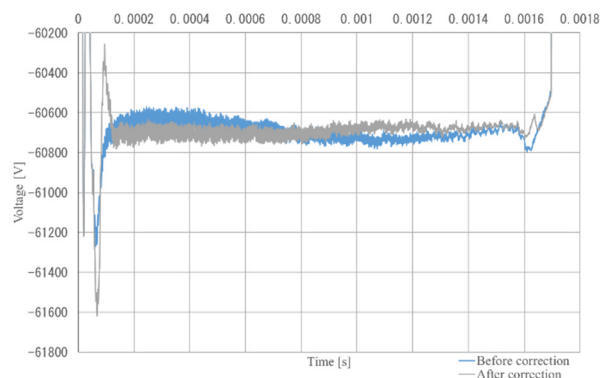


Figure 11: Waveforms of the output voltage pulse flat-top.

#### 4. まとめ

クライストロンを負荷として ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源の大電力試験を行い、出力電圧-74kV、出力電流 39.6A で繰り返し 5Hz の運転を行った。さらに、その試験の際に明らかとなった充電器のインバータユニット内部の温度上昇、チョッパ型マルクス電源筐体内部の温度上昇、負荷短絡時の浮遊容量に起因する過電流の問題に関して対策を行い、問題点が改善されたことを確認した。また、PWM のパターンを調整することにより、出力電圧波形の最適化を行った。今後は、長時間のランニング試験、及び充電電圧 1000V で繰り返し 5Hz の試験を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] ILC Technical Design Report Volume 3 – Accelerator, 2013, <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [2] M.A. Kemp, et al., “The SLAC P2 Marx”, Pulse Power Proceedings of International Power Modulator and High Voltage Conference, San Diego, CA, USA, 2012.
- [3] A. Tokuchi, et al., “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”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, 2016, Chiba, Japan, PASJ2016-TUOM08, [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUOM/TUOM08.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUOM/TUOM08.pdf)
- [4] H. Nakajima, et al., “KEK における ILC クライストロン用チョッパ型マルクス電源の現状”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, 2016, Chiba, Japan, PASJ2016-TUP034, [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP034.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP034.pdf)
- [5] H. Sasaki, et al., “チョッパ型 MARX 電源の特性改善”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2017, Sapporo, Japan, PASJ2017-WEP059, [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP059.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP059.pdf)