

# ILC クライストロン電源用チョッパ型マルクスユニットの大電力試験 HIGH-POWER TEST OF A CHOPPER-TYPE MARX UNIT FOR ILC KLYSTRON MODULATOR

中島啓光<sup>#,A)</sup>, 明本光生<sup>A)</sup>, 江偉華<sup>B)</sup>, 小笹有輝<sup>B)</sup>, 須貝太一<sup>B)</sup>, 鈴木隆太郎<sup>B)</sup>, 林拓実<sup>B)</sup>, 徳地明<sup>B,C)</sup>, 天神薫<sup>C)</sup>, 澤村陽<sup>C)</sup>

Hiromitsu Nakajima<sup>#,A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>A)</sup>, Weihua Jiang<sup>B)</sup>, Yuki Kozasa<sup>B)</sup>, Taichi Sugai<sup>B)</sup>, Ryutarou Suzuki<sup>B)</sup>, Takumi Hayashi<sup>B)</sup>, Akira Tokuchi<sup>B,C)</sup>, Kaoru Tenjin<sup>C)</sup>, Yo Sawamura<sup>C)</sup>

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

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

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

## Abstract

The Chopper-type Marx modulator is being developed to drive a 10MW multi-beam klystron for the ILC. It consists of 20 units to provide a -120kV 140A 1.65ms 5pps pulse. Each unit has a control board and 4 Chopper-type Marx cells, which is charged up to -2kV and outputs -6.4kV 140A 1.65ms pulse. This paper describes the results of the high power test of a prototype Chopper-type Marx unit.

## 1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) では、RF 源として 10MW のマルチビームクライストロンが約 380 台使用される予定となっている。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、これまで 10MW マルチビームクライストロン用の電源として、パルストランスを使用したバウンサー回路付きの電源の開発を行ってきており、2 台の電源が KEK の超伝導 RF 試験施設 (Superconducting RF Test Facility : STF) にて運転に使用されている<sup>[1]</sup>。しかし、電源に要求されるパルス幅が 1.65ms と長く、パルストランスとそのオイルタンクが大きくなってしまふことなどから、ILC の Technical Design Report (TDR) では、10MW マルチビームクライストロン用のパルス電源として、SLAC National Accelerator Laboratory (SLAC) で開発された P2 Marx を指標としたパルストランスを使用しないマルクス型の電源がベースラインデザインに採用された<sup>[2,3,4]</sup>。

現在、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おり、これまでに試作機の製作等を行ってきた<sup>[5,6,7]</sup>。今年度、KEK では、ILC 用のチョッパ型マルクス電源の実機を製作する予定になっており、現在、試作機を使用した性能評価試験等を行っている。

## 2. チョッパ型マルクス電源

### 2.1 半導体スイッチを使用したマルクス電源

マルクス型の電源は、複数のコンデンサを並列に充電し、それらを直列に放電することでコンデンサの充電電圧の段数倍の出力電圧が得られるものであ

る。従来のマルクス型の電源は、充電抵抗を介して充電し、ギャップスイッチによって放電するものであるが、Figure1 に示すように、充電と放電用に半導体スイッチを使用することで、各段の ON/OFF のタイミングがコントロールできるようになる。

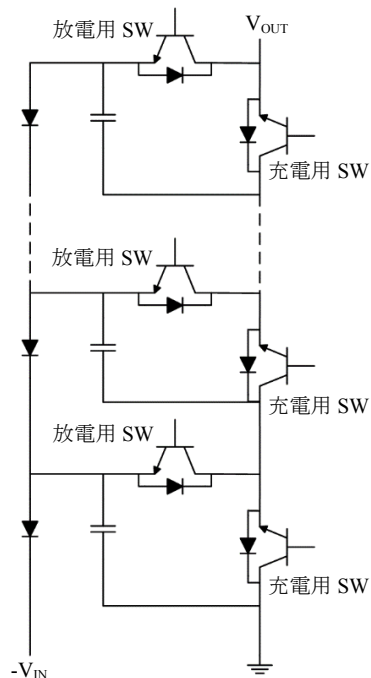


Figure1: Solid-state Marx topology.

半導体スイッチを使用したマルクス電源では、低い充電電圧でも段数を増やすことによって、高い出力電圧を得ることができ、各段のスイッチにかかる電圧は、充電電圧に等しいため、低電圧の半導体スイッチが使用できる。

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

## 2.2 降圧チョップ回路

降圧チョップ回路は、Figure2 に示すようにスイッチ、チョークコイル、ダイオード、コンデンサからなるシンプルな回路である。降圧チョップ回路では、Figure2 の SW のスイッチング周波数を一定とし、ON/OFF の比率（デューティサイクル）を調整する PWM 制御を行うことにより、一定の出力電圧を得ることができる。

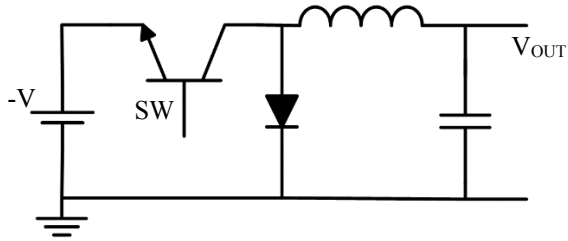


Figure2: Schematic of step down chopper.

## 2.3 ILC 用チョップ型マルクス電源

ILC の RF 源として使用される予定の 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仕様を Table1 に示す。ILC では、約 380 台の 10MW マルチビームクライストロン用のパルス電源が使用されるため、コスト、信頼性、メンテナンス性、サイズ、効率なども重要となる。

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

チョップ型マルクス電源は、Figure3 に示すように降圧チョップ回路をマルクス回路に組み込んだものであり、回路構成が単純なため、高信頼化、小型化、低価格化に大きく貢献するものと考えられる。

各マルクスセルは、Figure3 の各段の放電用 SW を PWM 制御することで、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。各マルクスセルは、最大で -2kV に充電され、-1.6kV、1.65ms のフラットなパルス出力電圧を得る。

チョップ型マルクス電源は、-120kV の出力を得るために、20 ユニットで構成される。1 ユニットは、マルクスセル 4 段で構成され、最大で -6.4kV の 1.65ms のフラットなパルス電圧を出力できるため、1 ユニットが故障しても -120kV のパルス出力が可能設計となっている。

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り行われ、マルクスセル 4 段に充電のゲート信号、及び放電のための PWM 制御されたゲート信号を光信号で供給する。現在、PWM 制御のパターンは、フィードフォワードで、上位の計算

機から設定しているが、フィードバック制御を行うことも検討している。また、制御基板は、各ユニットの過電圧、過電流のインターロック、電圧、電流のモニターなども行う。

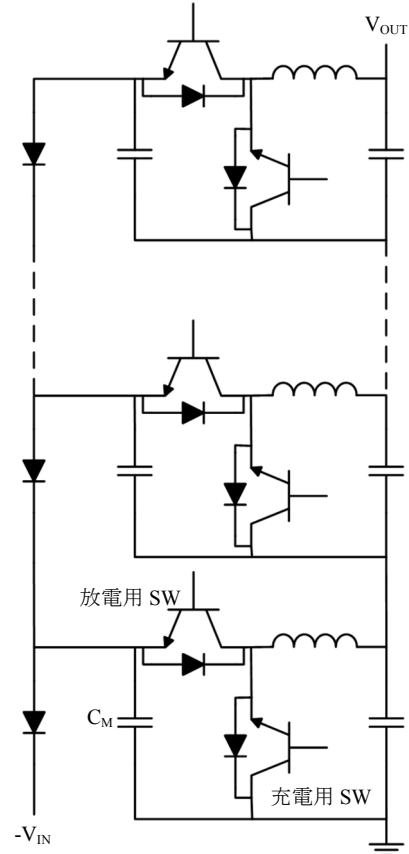


Figure3: Simplified schematic of the Chopper-type Marx.

## 3. チョップ型マルクスユニットの試験

### 3.1 チョップ型マルクスユニット試作機

Figure4 は、昨年度予備試作として製作したチョップ型マルクスユニットであり、マルクス基板 4 枚と制御基板 1 枚を収め、そのサイズは、455mm × 350mm × 511mm (W × H × D) となる。また、大電力試験の際には、PWM の調整、インターロックの調整等が容易に行えるように、Figure5 のような制御基板のみを収めたユニットを使用した。



Figure4: Photograph of one Chopper-type Marx unit.



Figure5: Photograph of the control unit.

### 3.2 大電力試験

Figure6 は、マルクスセル 1 段を-2kV に充電し、PWM 制御を行わず、スイッチング周波数 50kHz でデューティサイクルを 85%一定にした時の出力電圧、出力電流波形である。この様に、デューティサイクルが一定の場合には、コンデンサの電圧の低下とともに出力のパルス電圧が低下する。また、マルクスセル 1 段のリップルは、約 50%となる。

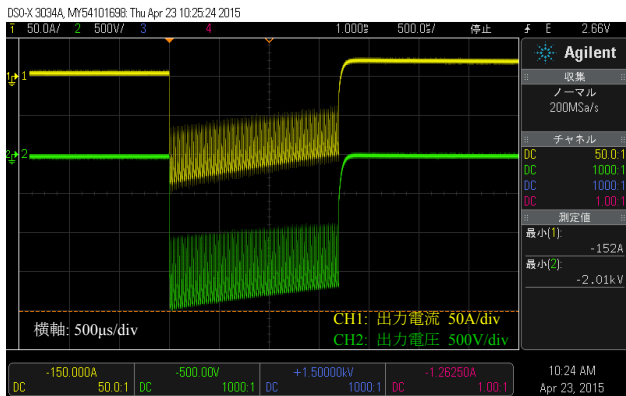


Figure6: Waveforms of one Chopper-type Marx cell without PWM control.

Figure7 は、マルクスセル 4 段接続した場合、つまり 1 ユニットを-2kV に充電した時の出力電圧、出力電流波形である。ここでも、PWM 制御を行っていないため、出力電圧が時間と共に低下している。ただし、リップルは、1 ユニット内 (マルクスセル 4 段) で各マルクスセルのスイッチングのタイミングを 1/4 周期ずらすことで、約 6%に抑えられている。最終的には、20 ユニット (マルクスセル 80 段) で PWM 制御のタイミングを調整して、要求される安定度以内のリップルに抑える設計となっている。

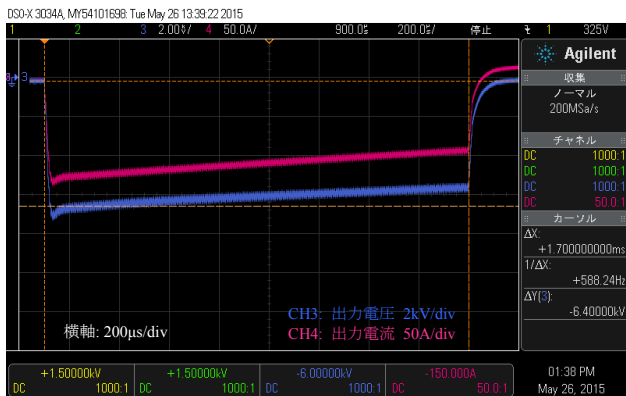


Figure7: Waveforms of one Chopper-type Marx unit (4 Marx cells) without PWM control.

Figure8 は、1 ユニットを-2kV に充電し、PWM 周波数 50kHz で PWM 制御を行った時の出力電圧、出力電流波形であり、PWM 制御を行うことにより、1.65ms のフラットなパルス電圧が出力できる。ここでは、PWM 制御のパターンは、フィードフォワードで、上位の計算機から設定している。

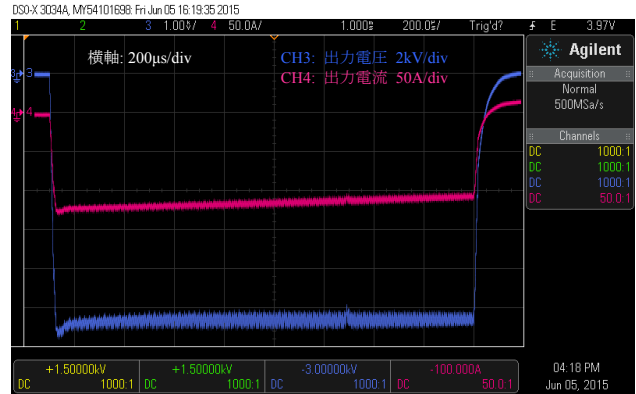


Figure8: Waveforms of one Chopper-type Marx unit (4 Marx cells) with PWM control.

Figure9 は、1 ユニットのヒートラン試験を行った時の各素子の温度である。ここでは、模擬負荷である水冷抵抗の温度上昇の問題から、充電電圧は、-1.6kV となっている。繰り返し 5pps の時の各素子の温度上昇は、最も大きい放電用のスイッチである SiC の FET でも 7.2°Cであり、-2kV 充電となっても特に問題になることはないと考えられる。

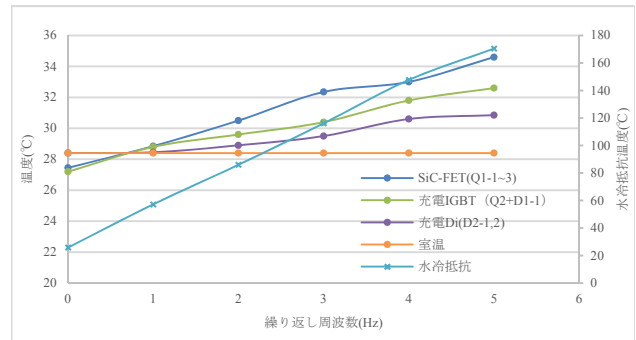


Figure9: Results of heat-run tests.

### 3.3 負荷短絡試験

1 ユニットの過電流のインターロックの動作試験として、負荷抵抗に並列にギャップスイッチを接続して、充電電圧-1kV でパルス電圧出力中にギャップスイッチを ON にする負荷短絡試験を行った。Figure10 に負荷短絡試験時の出力電流波形を示す。過電流のインターロックは、ハード的に行っており、148A が設定値となっている。Figure10 より過電流を検出してから約 800ns で PWM 制御を行っている放電用のスイッチが OFF となっており、出力電流のピークは、約 170A となっている。放電用のスイッチには、ドレイン電流の絶対最大定格がパルス (パルス幅 10 $\mu$ s 以下、デューティサイクル 1%以下) で 80A の SiC の FET を 3 並列、2 直列で使用しており、

負荷短絡時にも過電流のインターロックにより、スイッチの保護ができることが確認できる。また、ILCで使用予定の10MWマルチビームクライストロンの仕様では、短絡時の流入エネルギーは20J以下となっている。クライストロン短絡中のアーク電圧を100Vで一定であると仮定すると、ギャップスイッチON後の出力電流波形から、流入エネルギーは約5J以下となり、クライストロンの仕様を十分満たしていることが確認できる。

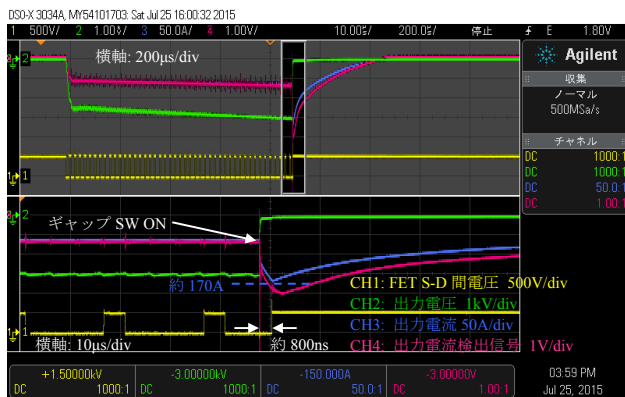


Figure10: Waveforms of one Chopper-type Marx unit (4 Marx cells) at short circuit test during pulse.

#### 4. まとめと今後の予定

チョッパ型マルクスユニットの試作機にて、性能評価のための試験を行い、その性能が確認できた。ただし、模擬負荷の問題で、-2kV充電、繰り返し5ppsで連続運転できるのは、短時間となっており、十分なランニング試験は行えていない。現在、1ユニット用の模擬負荷を製作中であり、模擬負荷の完成後、本格的なランニング試験を行う予定である。

#### 謝辞

本研究は高エネルギー加速器研究機構の共同開発研究の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] M. Akemoto, et al., “KEK 超伝導加速器試験施設 (STF) に於ける 10MW クライストロン用長パルスモジュレータの開発”, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting, pp.773-775, 2009.
- [2] ILC Technical Design Report Volume 3 – Accelerator, 2013, <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [3] M.A. Kemp, et al., “Final Design of the SLAC P2 Marx Klystron Modulator”, Proceedings of Pulse Power Conference, Chicago, IL, USA, 2011.
- [4] 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.
- [5] Y. Kozasa, et al., “ILC 用半導体マルクス電源”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, 2014, Aomori, Japan, PASJ2014-SAP055, [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP0/SAP055.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP0/SAP055.pdf)
- [6] R. Suzuki, et al., “MARX 基板の最適化”, these proceedings, WEP070.
- [7] T. Hayashi, et al., “ILC 用 MARX 電源全体充電・制御方式の検討”, these proceedings, WEP071.