

STUDY OF SPARK GAP SWITCH FOR CROWBAR CIRCUIT

Hiromitsu Nakajima[#], Mitsuo Akemoto, Tetsuo Shidara, Hiroyuki Honma, Toshihiro Matsumoto, Shigeki Fukuda
 High Energy Accelerator Research Organization
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A compact and low cost 3-electrode spark gap switch, SAMTECH PCS (T)-01, was tested in considering its use as a crowbar switch of the high voltage DC power supply for ILC (International Linear Collider) modulating anode klystron. The result showed an expected performance, but its life time was shorter than we expected. Further R&D is under way.

クローバ回路用スパークギャップスイッチの検討と試験

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、国際リニアコライダー (ILC) のスキームの一つとして、KEK が提案している分布型 RF システム (DRFS)^[1]の開発、実証試験が行われており、2012 年度には、4 台のクライストロンを並列運転するための実機に極めて近い電源 (実機の 1/3 モデル) の製作が予定されている。電源には、小型化と低価格化が求められており、いくつかのコンポーネントの開発、試験が必要となる。クローバ回路に関しても小型で低価格なスイッチが求められており、3 電極型スパークギャップスイッチの使用を検討している。

2. DRFS の電源

DRFS は、クライストロンとその電源を地下トンネル内に配置し、1 台のクライストロンから 2 台の空洞へ RF を供給するものであり、出力が 850kW、パルス幅 2.3ms、繰り返し 5pps のクライストロンが約 8000 台使用される。DRFS では、RF の制御は容易に行えるが、クライストロン及び電源の数が増えることによりコストが増大してしまうため、いかにコストを抑えることができるかが大きな課題となる。

DRFS では、コストを抑えるため、クライストロンをパルス変調アノード付きクライストロン (MA クライストロン) とし、複数台のクライストロンを共通の電源でドライブすることでコストを低減する。さらに、2 電源ユニットに 1 台の予備電源を設置することで、運転中の故障に対応し、信頼性を向上させる。

DRFS の電源は、DC 電源部と MA 変調器で構成され、1 台の DC 電源部と MA 変調器で 13 台のクライストロンをドライブする。電源は、クライストロンと共にトンネル内に配置されるため、特に小型化が要求される。KEK では、これらの要求を満たす DRFS の電源の設計が進められている^[2]。DRFS の電源の仕様を表 1 に示す。

表 1 : DRFS の電源の仕様

クライストロンの数	13
カソード印加電圧	67.4kV
ピークパルス電流	273A
平均電流	3.3A
パルス幅 (平坦部)	> 2.3ms
パルス幅 (半値全幅)	2.4ms
パルス平坦度	< ±0.5%
最大パルス繰り返し	5pps
コンデンサバンク	44μF
モジュレーションアノード電圧	54.4kV
アノードバイアス電圧	-2kV
クライストロン放電時許容注入エネルギー	< 20J

電源の DC 電源部では、スイッチング電源によりコンデンサバンクに電圧安定度 0.1%で充電され、出力電圧のサグに関しては、バウンサー回路にて補償することで、コンデンサバンクの容量が抑えられる。また、DC 電源部には、クライストロン放電時の保護のためにクローバ回路が使用される。さらに、13 台の各クライストロンは、高電圧リレーを介して接続されており、同じクライストロンが放電を繰り返す場合は、電源をオフして、高電圧リレーで切り離すことにより、残りのクライストロンは継続して運転が可能となる。

KEK では、昨年度 STF における S1-Global にて、クライストロン 2 台と試験用の電源による DRFS の実証試験が行われた^[3]。その際製作した電源では、スケジュール等の関係から、バウンサー回路、高電圧リレーが含まれておらず、クローバ回路には、サイクロトロンが使用された。現在、2012 年度に製作予定の電源に向けて、これらのコンポーネントの設計、開発、評価試験が進められている。

[#]hiromitsu.nakajima@kek.jp

3. クローバ回路用スイッチの検討

3.1 スパークギャップスイッチ

DRFS の電源には、小型化、低価格化が要求されており、クローバ回路のスイッチについても検討が必要となる。DRFS の電源のクローバ回路では、耐電圧 70kV 以上、ピーク電流 10kA 以上、応答時間 10 μ s 以内のスイッチが必要となり、通常このようなスイッチとしては、イグナイトロンやサイラトロンが使用される。また、最近では、メイン回路に直列に半導体スイッチを入れて、負荷放電時には、高速で遮断するものもある。しかし、これらのスイッチでは、小型化と低価格化を実現するのは難しい。

DRFS の電源では、小型で低価格なクローバ回路用のスイッチとして、スパークギャップスイッチを使用することを検討している。スパークギャップスイッチは、2 つの電極の間隔とその間の気体（空気、窒素、SF₆ など）により絶縁が保たれており、電極間の電圧が所定の値を超えるとアーク放電により、小さな電圧降下で大電流を流すことができる。また、3 電極型のスパークギャップスイッチは、第三の電極としてトリガ電極を備えており、トリガ電極にパルスを加えることによって、広い電圧範囲においてスイッチングが行える。スパークギャップスイッチは、構造が比較的単純であり、小型化、低価格化が可能である。一方で、クローバ動作時には、大電流が流れるため、電極の痛みによる耐圧不良などが考えられ、クローバ回路のスイッチとして、どの程度の寿命が見込めるかが課題となる。

3.2 SAMTECH 社製 PCS(T)-01

SAMTECH 社製の PCS(T)-01 は、3 電極型のスパークギャップスイッチであり、窒素ガス加圧タイプで耐電圧は 100kV、ピーク電流は 10kA、寿命は累積通過電荷で 1000 クーロンとなっている。PCS(T)-01 の仕様を表 2 に示す。DRFS の電源では、クローバ動作時には、約 3 クーロンの電荷が放出されると見込まれ、仕様では 300 回程度はクローバ動作が可能となる。

表 2 : PCS(T)-01 の仕様

Operating voltage	15kV to 100kV
Peak current	10kA
Insulating gas	SF ₆ or Syn. Air or N ₂
Gas pressure	Up to 4.5bar gauge (5.5bar absolute)
Lifetime	~10 ⁶ shots
Charge transfer	1000C
Dimensions (mm)	160mm in diameter × 60mm high
Weight	2kg
Gas connections	6mm

3.3 PCS(T)-01 の評価試験

PCS(T)-01 を評価用に購入して、クローバ動作試験を行った。また、SAMTECH 社製のトリガ発生器 TG-01 も合わせて購入し、試験に使用した。TG-01 の仕様を表 3 に示す。

表 3 : TG-01 の仕様

Pulse profile	Pseudo half-sine, negative or positive polarity
Output voltage	35kV for pulse repetition frequencies up to 275Hz (Output reduces from 35kV to 12kV over the frequency range 275-1000Hz)
Pulse rise time	~30 μ s
Pulse FWHM	~80 μ s
Pulse repetition frequency	Single shot, 1-1000Hz
Input voltage	AC 100-115V @50/60Hz
Dimensions (mm)	Width: 450mm × Depth: 450mm (600mm*) × Height: 135mm (* Including HV output)

クローバ動作試験を行う前に、加圧する窒素ガスの圧力を変えて自爆特性、トリガ特性の確認を行った。試験は、各窒素ガス圧力において 5 回ずつ行った。試験結果を図 1 に示す。図 1 に示すように、自爆特性、トリガ特性は、SAMTECH 社のデータシートと非常に近い結果が得られた。

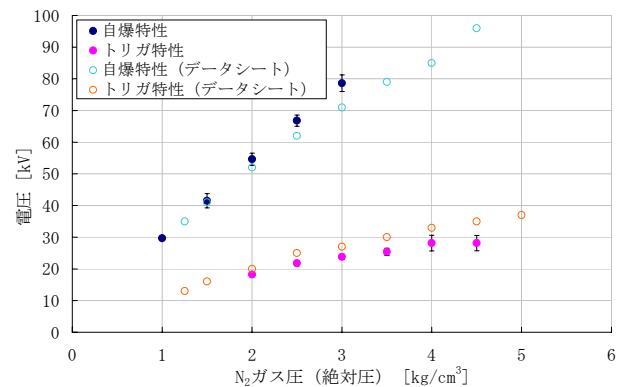


図 1 : 自爆特性とトリガ特性

PCS(T)-01 のクローバ動作試験は、KEK の STF における S1-Global にて、DRFS の試験用に製作された電源の DC 電源部を使用して行った。試験時の回路図を図 2 に示す。

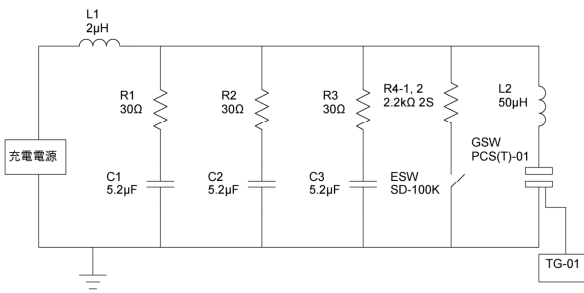


図 2：クローバ動作試験時の回路図

クローバ動作試験は、充電電圧 70kV まで 10kV ステップでクローバ動作をさせ、並列に 3 台あるコンデンサを 1 台ずつ接続することで、徐々に容量を増やして試験を行った。コンデンサ 1 台を接続して、70kV でクローバ動作させたときの電圧、電流波形を図 3 に示す。図 3 に示すように、TG-01 の仕様でトリガ電圧の立ち上がりは遅いが、PCS(T)-01 の電流の立ち上がりは 10μs 程度であり、クローバ回路のスイッチとして十分な結果が得られた。しかし、コンデンサ 1 台接続での試験時に、70kV まで充電する過程で約 65kV で自爆してしまった。このときの窒素ガス圧は、4.5kg/cm³ であった。窒素ガス圧を 5.0 kg/cm³ にあげて、再度 70kV でクローバ動作した所、正常に動作した。また、コンデンサを 2 台接続にした時には、同様に 70kV に充電する過程で自爆してしまい、窒素ガス圧をギャップスイッチの定格である 5.5 kg/cm³ まであげても改善せず、電源の最大定格での試験が行えなかった。自爆特性を確認した際には、窒素ガス圧 4.0 kg/cm³ では、80kV で 10 分間保持できているため、自爆特性が低下してしまったようである。

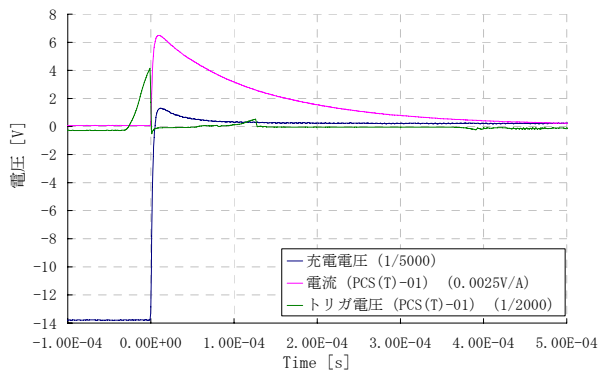


図 3：クローバ動作時の波形（充電電圧 70kV）

クローバ動作試験後、スパークギャップスイッチの電極には、図 4 のような放電痕が見られた。SAMTECH 社によると、これは特に異常な状態ではなく、磨けば特に問題ないとのことであった。PCS(T)-01 は、磨いてメンテナンスをして使用することが前提のようで、メンテナンス性が良いことが特徴のようである。今回の試験での電荷量は、多く見積もっても累積で数クーロン程度であり、DRFS

の電源で使用した場合、数回のクローバ動作でメンテナンスが必要ということになる。

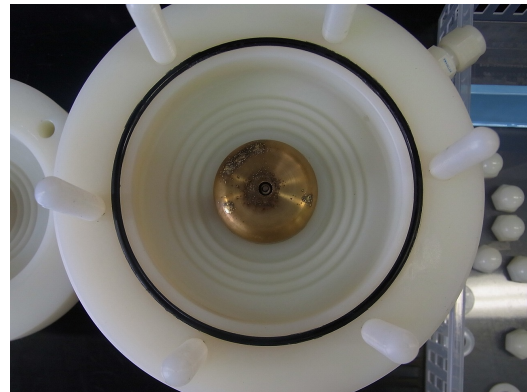
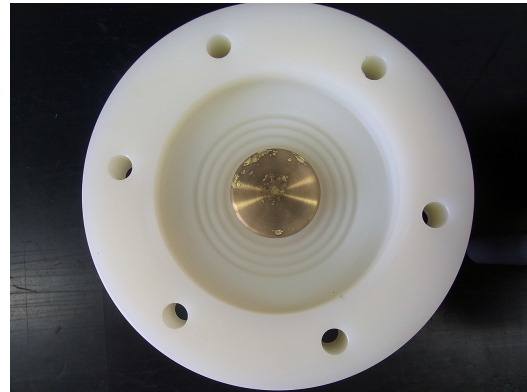


図 4：電極の放電痕

4. まとめ

ILC の DRFS クライストロン用電源のクローバ回路スイッチとして、SAMTECH 社製の 3 電極型スパークギャップスイッチ PCS(T)-01 の評価試験を行った所、性能は十分であるが、寿命としては満足な結果が得られなかった。しかし、スパークギャップスイッチは、小型で低価格なスイッチとして魅力的であり、今後、更に、検討及び試験を行ってきたい。また、クローバ回路のトリガとしては、TG-01 は動作が遅く、トリガ回路に関しては、新たに開発する必要がある。

謝辞

SAMTECH 社製 PCS(T)-01 の評価試験において、御協力いただきました日新パルス電子株式会社の皆様には、この場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] S. Fukuda et al., "Japanese ILC Scheme: DRFS (Distributed RF System)", Proceedings of this Meeting.
- [2] M. Akemoto et al., "Recent Progress in Power Supply Development of Distributed RF System for the ILC", Proceedings of this Meeting.
- [3] T. Matsumoto et al., "RF Sources of S1 Global Project in Super-conducting RF Test Facility (STF) at KEK", Proceedings of this Meeting.