

# サイラトロン代替用半導体スイッチの評価

## SOLID-STATE SWITCH EVALUATION FOR THYRATRON REPLACEMENT

明本光生<sup>#,A)B)</sup>, 福田茂樹<sup>A)</sup>, 本間博幸<sup>A)</sup>, 川村真人<sup>A)</sup>, 中島啓光<sup>A)</sup>, 夏井拓也<sup>A)B)</sup>, 設楽哲夫<sup>A)</sup>  
Mitsuo Akemoto<sup>#,A)B)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>A)</sup>, Hiroyuki Honma<sup>A)</sup>, Masato Kawamura<sup>A)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>A)</sup>,  
Takuya Natsui<sup>A)B)</sup>, Tetsuo Shidara<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

### Abstract

The rf system of SuperKEKB injector linac consists of 60 high-power klystrons, each capable of 50 MW, 4.0  $\mu$ s pulsed power at a repetition rate of 50 Hz. Each klystron is pulsed by its own PFN-type modulator, containing a thyatron switch tube. Average lifetime of the thyatron is approximately 34,500 hours. The thyatron switches have low-quality, high replacement cost and require periodic adjustments to keep low timing jitter and drift. A solid-state switch based on an array of thyristors to replace the thyatron is in development to improve the reliability, availability and maintainability of the modulator, which decrease operational costs. This paper describes the configuration, test stand and performance of the solid-state switch.

### 1. はじめに

KEK 電子・陽電子入射器[1]は高周波源として、60 台の最大 50 MW、パルス幅 4  $\mu$ s、繰り返し 50pps のマイクロ波を出力する S バンドクライストロンを使用する。それを駆動する電源は、サイラトロンを使用した PFN タイプのパルス電源を用いている。本稿では、現在開発中のサイラトロン代替用半導体スイッチ(アノード電圧 43kV、アノードピーク電流 4.3kA、パルス幅 6 $\mu$ s、繰り返し 50Hz)の評価試験を行なったので報告する。

### 2. クライストロン電源とサイラトロン

入射器のクライストロン電源[2]は従来の LC 共振充電型電源(46 台)とスイッチング(インバータ)充電型電源(14 台)の 2 種類の電源が使用されている。インバータ充電型は従来の高圧 DC 部、充電チョークトランスと de-Qing 回路から構成する充電システムをインバータ充電器に置き換えたもので、従来の電源筐体の 1/3 のサイズになり、大幅に小型化できる。しかし、充電器の充電能力から、充電電圧の上限が 43 kV で使用される。クライストロン電源の主な仕様を Table 1 にまとめる。

クライストロン電源で最も重要なパーツで、加速器の稼働率[3]へ直接影響を与えるのがサイラトロンである。サイラトロンはこれまで 3 種類、CX2410K(e2V 社製)、F241(Triton 社製)、L4888B(Litton 社製)が使用されてきた。Figure 1 に KEKB 加速器コミショニングが開始した 1998 年 10 月から Belle 実験の運転終了する 2010 年 6 月 30 日まで入射器運転中に故障したサイラトロン 98 台の寿命分布を示す。平均寿命は約 34,500 時間であった。この期間中は、繰り返し 50Hz で運転された。

このデータからサイラトロンの平均寿命は比較的短く、個々の寿命のばらつきも大変大きく、品質が悪いことが分かる。もし、スタンバイの RF 源がなく、運転中にサイラトロンを交換する場合は直接加速器の稼働を止めること

になる。また、サイラトロンは放電管なので、安定に動作させるためには定期的なガス調整(リザーバ電圧とキーブアライブ電流の調節)が必要で保守の面[4]でも大変である。さらに、サイラトロン市場の衰退が顕著で、この種類のサイラトロンを製造することができる会社が減り、今では 1 社のみとなり、将来、価格の高昇や製造中止のリスクを抱えることになる。従って、これらの課題を解決するためにはサイラトロン代替半導体スイッチの開発を進める必要がある。

Table 1: Specifications of the Klystron Modulator

Peak power	110 MW
Average power	30 kW
Pulse transformer step-up ratio	1:13.5
Primary output pulse voltage	22.5 kV
Primary output pulse current	4.8 kA
PFN total capacitance	0.62 $\mu$ F
Pulse duration	5.6 $\mu$ s
Pulse flattop	4.0 $\mu$ s
Pulse flatness(Peak-Peak)	0.3%
Output pulse stability(Peak-Peak)	0.3%
Time jitter(Peak-Peak)	10 ns
Thyatron anode voltage	45 kV
Pulse repetition rate	50 Hz

<sup>#</sup> mitsuo.akemoto@kek.jp

Figure 2 に電源筐体に組み込まれているサイラトロンとそれに付随するサイラトロンシャシ、ヒータ・リザーバ電源、キープアライブ電源を示す。それぞれ、19 インチラックマウント型ユニットで製作されており、その交換は容易にできる。

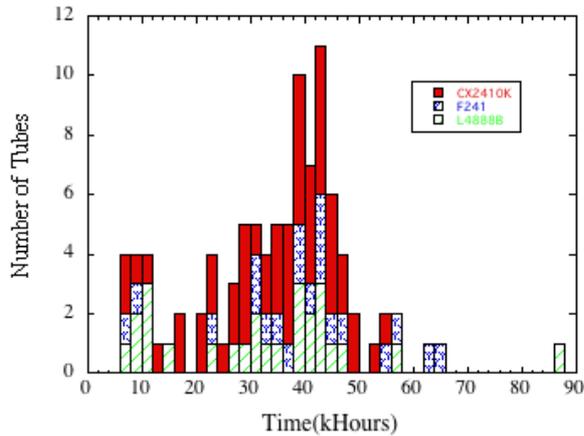


Figure 1: Failed thyatron lifetime profile.



Figure 2: Thyatron switch tube installed in modulator.

### 3. 半導体スイッチ[5]

複数個の高速スイッチング(高  $di/dt$ )が可能な半導体素子を直列接続して高電圧化、並列接続して大電流化する手法で高電圧・大電流の半導体スイッチが設計、製作される。今回採用した半導体スイッチ素子は、定格 1.5 kV の還流ダイオード付きの大電流サイリスタである。半導体スイッチは素子 3 並列 5 直列を一つのユニットとして、それを多段に直列接続した構成になっている。各半

導体素子の放熱器(ヒートシンク)はユニットに取り付けられた小型のファンで強制空冷され、また各素子のゲートトリガー信号は光ケーブルで送られる。Figure 3 に 7 段のユニットで構成された半導体スイッチの外観を示す。スイッチ本体の下部に設置されている 19 インチラックマウント型ユニットは制御部(制御電源、光分配器、トリガー入出力変換器)である。Table 3 にサイラトロン代替半導体スイッチの主な仕様を示す。

半導体スイッチに置き換える場合、サイラトロン関係のユニットを取り外して、そこに半導体スイッチのユニットに直接入れ替える方式を採用している。また既存の AC 入力電源、トリガー信号やインタロック信号がそのまま併用できるようにしている。

また、半導体スイッチには還流ダイオードが入っているため、PFN と負荷のインピーダンスミスマッチからクライストロンに 100kV 以上のスパイク逆電圧が発生する。その逆電圧を低減するために PFN に EOL クリップ回路[6]を付加する必要がある。

Table 3: Specifications of the Solid-State Switch

Peak anode voltage	43 kV
Peak anode current	4.3 kA
Pulse width	6 $\mu$ s
Pulse repetition rate	50 Hz
Turn on $di/dt$	> 8 kA/ $\mu$ s
Turn on time jitter(rms)	< 10 ns



Figure 3: Solid-state thyatron replacement switch installed in modulator.

## 4. 評価試験

### 4.1 試験方法

入射器棟クライストロン組み立てホールにある、テストスタンド1号ステーション(KL\_T1)のインバータ充電型クライストロン電源で実施した。サイラトロンとの性能比較のため、先ずサイラトロン L4888B での電圧・電流波形を測定後、半導体スイッチに置き換えて、同じ測定器を使用して測定した。

### 4.2 通電特性

Figure 4 に PFN の充電電圧 43 kV、繰返し 50Hz でのスイッチの電圧・電流波形を示す。また、Fig. 5 にその時のクライストロン電圧波形を示す。サイラトロンと半導体スイッチを同じ運転条件で比較すると、ほぼ同じ波形特性が得られた。その後、約 2500 時間の運転を続けているが動作に問題はまだ起きていない。従ってサイラトロンとほぼ同等な性能があることが確認できた。

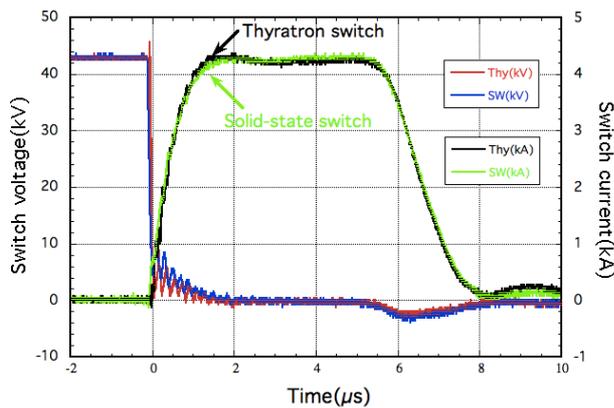


Figure 4: Switching waveforms with solid-state switch versus thyatron at 43 kV charge voltage.

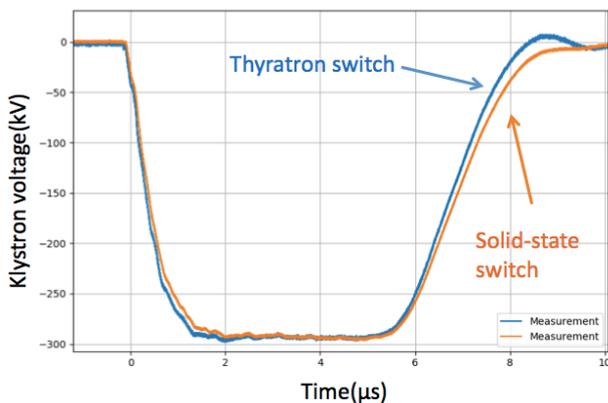


Figure 5: Klystron voltage waveforms with solid-state switch versus thyatron at 43 kV charge voltage.

### 4.3 短絡試験

短絡試験は通常の 2 倍のスイッチ電流が流れる。パルストランスの 1 次側を短絡して、充電電圧 43 kV で 7 回試験を行なったが問題はなかった。ピーク電流 8.8kA が測定された。

### 4.4 使用電力

サイラトロンにはヒータ・リザーバ電源、キープアライブ電源、2kV トリガーパルス電源、空冷用ファン電源が必要で、合計使用電力は約 700W になる。半導体スイッチは、約 120W であるので、約 580W の電力削減になる。

### 4.5 サイズ

19 インチラックマウント型のユニットで構成されているので、その高さで比較すると、半導体スイッチのほうが 57%小型化できる。

## 5. まとめ

最近のパワーエレクトロニクスの著しい発展で、電圧・電流耐量の大きい、また高速の半導体スイッチ素子が開発され、クライストロン電源の小型化、高信頼化に応用できるようになった。現在開発中のサイラトロン代替用半導体スイッチは、サイラトロンとほぼ同等の性能があることが確認できた。しかも、省電力化、小型化も可能である。今後、長期間の連続運転を行なって信頼性の面を評価する予定である。

## 謝辞

半導体スイッチの開発にあたりましては、日新パルス電子(株)の原田瞬氏、佐藤尚登氏、また大下英次氏に大変お世話になりました。この場をお借りしてお礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, “Achievement of 200,000 hours of Operation at KEK 7-GeV Electron Positron Injector Linac”, these Proceedings.
- [2] M. Akemoto *et al.*, “Present Status of the Klystron Modulator for the KEK Electron-Positron Injector Linac”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, pp. 476-479, 2018.
- [3] M. Akemoto *et al.*, “Present Status of Klystron Modulator for the KEK Electron-Positron Injector Linac”, Proceedings of the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, pp. 892-894, 2008.
- [4] T. Toufuku *et al.*, “Maintenance Activity of RF System and RF Windows in KEK Electron-Positron Linac(II)”, these Proceedings.
- [5] S. Harada *et al.*, “Development of 50kV Semi-conductor Switch for Modulator”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, pp. 462-464, 2017.
- [6] H. Honma *et al.*, “EOL クリッパー回路の試作と動作”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, pp. 348-350, 2003.