

## サイラトロン代替用半導体スイッチの開発

### SOLID-STATE SWITCH DEVELOPMENT FOR THYRATRON REPLACEMENT

明本光生<sup>#,A)</sup>, 本間博幸<sup>A)</sup>, 川村真人<sup>A)</sup>, 松本修二<sup>A,B)</sup>, 中島啓光<sup>A)</sup>, 夏井拓也<sup>A,B)</sup>, 設楽哲夫<sup>A)</sup>,  
徳地明<sup>C)</sup>, 木田保雄<sup>C)</sup>

Mitsuo Akemoto<sup>#,A)</sup>, Hiroyuki Honma<sup>A)</sup>, Masato Kawamura<sup>A)</sup>, Shuji Matsumoto<sup>A,B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>A)</sup>,  
Takuya Natsui<sup>A,B)</sup>, Tetsuo Shidara<sup>A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>C)</sup>, Yasuo Bokuda<sup>C)</sup>

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

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

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

#### 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 1.5 kV MOS gated thyristors to replace the thyatron, which operates at 43 kV and 4.3 kA, 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 50 Hz 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。サイラトロンはこれまでの運転で得られたデータから平均寿命は 34,500 時間であるが、個々の寿命のばらつきが大変大きい。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プアライブ電流の調節)が必要で保守の面[2]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、現在使用中のものと同型のサイラトロンを製造する会社が減り、今では 1 社のみとなり、将来、外国為替の変動等による価格の高昇や製造中止のリスクも心配となる。従って、これらの課題を解決するためにサイラトロン代替半導体スイッチの開発[3]を進めている。

#### 2. 製作仕様

製作仕様で特に注意したことは、既存の気中使用のサイラトロン部分を改造しないで、置き換えが容易にできることである。Figure 1 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ーシ、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いる。従って、半導体スイッチに置き換える場合は、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を直接入れ替える方式となる。また既存の

AC 入力電源、トリガー信号やインターロック信号がそのまま併用できるようにする。Table 1 にサイラトロン代替半導体スイッチの主な仕様を示す。



Figure 1: Thyatron switch tube installed in modulator.

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

Table 1: 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(P-P)	< 10 ns
Cooling system	Forced air cooling



Figure 2: Solid-state thyatron replacement switch installed in modulator.

### 3. 半導体スイッチ

#### 3.1 半導体スイッチ素子の選定

最近、いろいろな半導体素子が開発されているが 1 個の半導体素子でサイラトロンに匹敵する性能をもつ素子は現状では難しく、複数個の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方法で対応することになる。選定に当たっては、将来の半導体スイッチの量産化を考慮して、使用する半導体素子は一般に市販されていて、購入価格が手頃であることが条件となる。その中で高電圧、大電流でかつ高速スイッチング(高 di/dt)が可能な半導体素子として、IXYS 社製定格 1.5 kV の還流ダイオード付きの MOS ゲートサイリスタ (MMIX1H60N150V1) を選定した[4]。Table 2 にこのサイリスタの主な仕様を示す。

Table 2: Specifications of the MOS Gated Thyristor

Blocking voltage	1.5 kV
Peak current	11.3 kA
Turn on time	100 ns

#### 3.2 回路構成

半導体スイッチの外観と回路構成をそれぞれ Fig. 2、Fig. 3 に示す。MOS ゲートサイリスタを 6 直列接続した基板を構成単位として、それを 6 段直列にして 54kV 耐圧のスイッチにする。それを 3 並列に接続して半導体スイッチが構成される。設計上、電圧の余裕度は 25% で、電流の余裕度は 3 倍以上となる。

各半導体素子の冷却はアルミ角パイプ状の放熱器 (ヒートシンク) が取り付けられていて、下部のファンから送られる冷風がこのパイプの中を通ることによって強制空冷される。

各基板に供給する電力は絶縁トランス方式でおこない、トロイダル形状の小型高周波トランスを通して電力が供給される。また各素子のゲートトリガ信号、基板の制御電源異常のインターロック信号は光ケーブルで送られる。スイッチ本体の土台になる 19 インチラックマウント型ユニット内部には冷却用ファン 6 台、基板電力用電源回路、トリガー、インターロック回路が収納されている。ユニット前面パネルにはインターロックの状態が一目でわかる LED 表示器があり、全ての基板の制御電源状態、上部ヒートシンク温度(85°C以上で異常)3ヶ所の状態が確認できるようになっている。

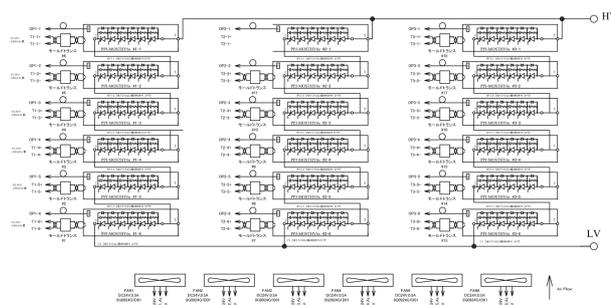


Figure 3: Block diagram of the solid-state switch.

### 4. 性能試験

#### 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。

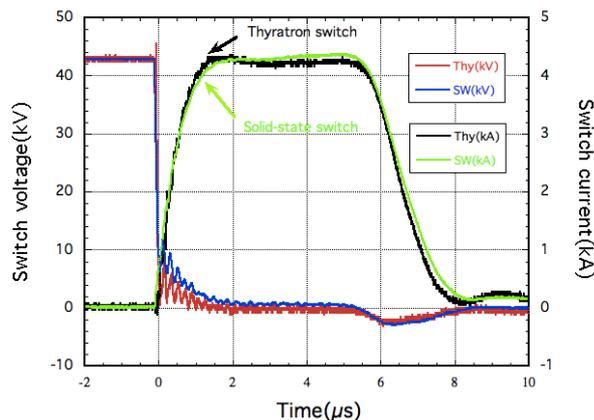


Figure 4: Switching waveforms with solid-state switch versus thyatron at 43 kV charge voltage.

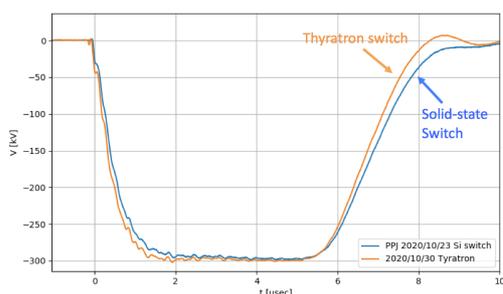


Figure 5: Klystron voltage waveforms with solid-state switch versus thyatron at 43 kV charge voltage.

ジッターは約 3 ns で、スイッチングロススイッチの電圧・電流波形から計算すると、13.8J/pulse で 50 Hz 運転で 690 W と評価される。

## 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 8.8 kA 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、2 kV 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 700 W になる。半導体スイッチは約 300 W であるので、約 400 W の電力削減になる。

## 4.5 サイズと重量

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 59% になり、約 40% 程度小型化できる。重量は本体と制御ユニット含めて 54 kg である。

## 5. 長期運転での不具合と改良

### 5.1 不具合

KL\_T1 は、サイラトロン、インバータ充電電源など高圧部品の試験運転をおこなうステーションであるため、その合間をみて半導体スイッチを取り付けたり、取り外したりしながら長時間の試験運転を行っている。初期において半導体スイッチ素子の空冷能力が不十分であることがわかり、その強化の改造が行なわれ、その後本格的な長期運転に入った。

合計運転 1,383 時間で、インターロック#1-2 基板(高圧側から 2 番目)の制御電源異常で運転停止した。故障箇所を調べたところ、#1-2 基板のサイリスタ 2 個(G-K 間短絡状態)と DC/DC コンバータ 1 個の故障及びこの基板に小型高周波トランスを通して電力を供給する低圧側電源供給基板の共振コンデンサがパンクしていた。Figure 6 に故障した#1-2 基板の写真を示す。アルミ角パイプ状のヒートシンクが外されている部分のサイリスタが故障し、基板の右端に見えるのが小型高周波トランスである。

この原因として、この基板に制御電源を供給する小型高周波トランス周辺でコロナ放電が発生し(高圧給電シリコンケーブル、基板部品にも 放電痕あり)、その放電により基板の反対側に付いている DC/DC コンバータを故障させ、その結果、ゲート電圧が不安定になり、サイリスタの故障に至ったと推測する。

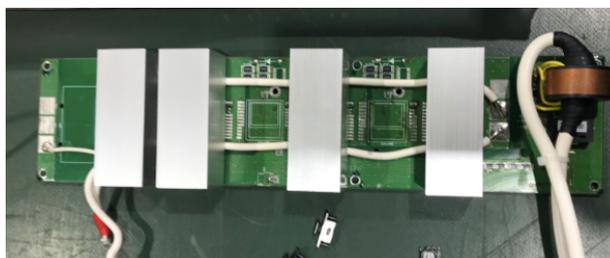


Figure 6: Breakdown #1-2 circuit board with six MOS gated thyristors.

### 5.2 コロナ放電とその対策

小型高周波トランスでのコロナ放電を調査するため、トランスの低圧側の高圧給電シリコンケーブルと基板にパルス幅約 400 ns、繰返し 50 Hz の高圧パルスをピーク電圧 43 kV まで印加する実験を行なった。シリコンケーブルとトランスのコア間で約 30 kV から青白いコロナ放電が発生することが観測された。Figure 7 に 43 kV、50 Hz でのコロナ放電の様子を示す。

このコロナ放電は高圧給電シリコンケーブルとトランスのコア間の空気層で、放電を起こす電界強度に達するため、対策としては電界強度を緩和する方法と空気層をなくす方法が考えられる。前者は基板のサイズ変更が起こるので、実装の観点から後者の方式を選び、高周波トランス部分を樹脂モールド

したものに交換することでコロナ放電の発生を抑制する対策を行なった。効果確認のために、モールド型も同様なコロナ試験を行なったがコロナ放電は確認できなかった。Figure 8 に高周波トランス部分を樹脂モールドしたものに交換した半導体スイッチを示す。現在、この改良したもので長期運転を行なっている。



Figure 7: Corona discharge between a high-voltage silicon cable and ferrite core transformer at a voltage of 43 kV, a pulse width of 400 ns and a repetition rate of 50 Hz.

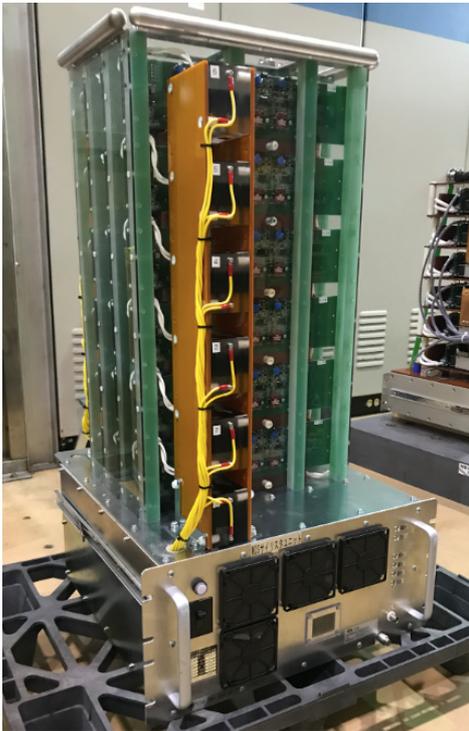


Figure 8: Solid-state thyatron replacement switch improved to suppress the corona discharge in ferrite core transformers on the circuit board to isolate from a high voltage.

## 6. まとめ

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。また、既存の装置での置き換え、故障時

での交換が容易である。さらに省電力化、小型化も可能である。今後、長期間の連続運転を行ないながら、不具合を発見してその改善を進めて行く。

## 謝辞

半導体スイッチの試験にあたりましては、三菱電機システムサービス(株)の東福知之氏、今井康雄氏、馬場昌夫氏、久積啓一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] R. Zhang *et al.*, “Present Status of KEK Electron/Positron Injector Linac”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, pp. 1245-1249, 2019.
- [2] T. Toufuku *et al.*, “Operation and Maintenance Activity of RF System in KEK Electron-Positron Linac(FY2021)”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, 2022.
- [3] M. Akemoto *et al.*, “Solid-State Switch Evaluation for Thyatron Replacement”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, pp. 768-770, 2020.
- [4] H. Mori *et al.*, “Development of Semiconductor High-voltage Switch for Klystron Modulator”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, pp. 453-456, 2017.