

## 50kV 半導体スイッチの開発報告

### DEVELOPMENT OF 50kV SEMI-CONDUCTOR SWITCH FOR MODULATOR

原田 瞬<sup>A)</sup>, 佐藤 尚登<sup>A)</sup>, 大下 英次<sup>A)</sup>

Shun Harada<sup>A)</sup>, Hisato Sato<sup>A)</sup>, Eiji Oshita<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Nissin Pulse Electronics Co., Ltd.

#### Abstract

We, Nissin Pulse Electronics Co., Ltd, developed 25kV 2kA semiconductor switch two years ago. However, considering the application of klystron modulator for Linac, it is very important to develop the 50kV class semiconductor switch as the replacement thyratrons. In this time, we have developed the 50kV class semiconductor switch for the replacement thyratrons and the outline is mentioned.

#### 1. はじめに

クライストロンモジュレータ用サイラトロン代替スイッチとしてIGBT素子を用いた半導体スイッチを開発し、2015年8月に25kV 2kAスイッチを本学会にて発表した。前回のノウハウを生かし今回50kV 6kA級半導体スイッチを新たに開発したので、その概要について報告する。

#### 2. スイッチ概要

表1に今回開発した半導体スイッチの主要仕様を示す。

Table 1: Specifications of Switch

Rated voltage	50kV
Rated current	6kA
Pulse width	7 $\mu$ s (FWHM)
Pulse repeatedly	50pps
Apply element	Thyristor

#### 3. 開発経緯

今回の50kVスイッチの開発にあたってはスイッチのコンパクト化を考慮し、Times素子の延長で考えるのではなく、新たな素子の発掘から検討および予備実験等を行った。過去の経験よりサイリスタは通電面を確保出来れば、ピークサージオン電流での使用も可能となると考え、小型のサイリスタで予備実験などを行い、小型かつ安価な素子の可能性を調査した。

##### ● スタッドタイプサイリスタ

装置の小型化を考慮し、表2に示すスタッドタイプのサイリスタの実力を試験した。小型化設計が容易なこと、および均一な通電面の確保のため、センターゲートタイプで試験を行なった。

Table 2: Specifications of Switch

Rated voltage	1.2kV
Surge on-state current	4kA
di/dt(repeatedly)	1000A/ $\mu$ s

ゲート入力後の導通面を稼ぐために、1 $\mu$ sの可飽和リアクトルを挿入しても、di/dtが2kA/ $\mu$ sであったため、破損を繰り返した。

図1に破損の様子を示す。本サイリスタは高速タイプではなかったため、写真からわかる通り、可飽和リアクトルを挿入しても、導通面が広がらず、局所電流集中による破損を生じたと考えられる。



Figure 1: Photo of Stud thyristor.

##### ● 別タイプサイリスタ

スタッドタイプでは6kAまで持ち応えない事がわかった。そこで別タイプのサイリスタを探し出し、素子単品レベルでの特性試験を実施した。主要パラメータを表3に示す。また、図2にサイリスタ端子間電圧、通電電流波形を示す。

Table 3: Specifications of Switch

Rated voltage	1.5kV
Rated current	6kA
Pulse width	8 $\mu$ s (FWHM)
Pulse repeatedly	5pps
di/dt(repeatedly)	5kA/ $\mu$ s

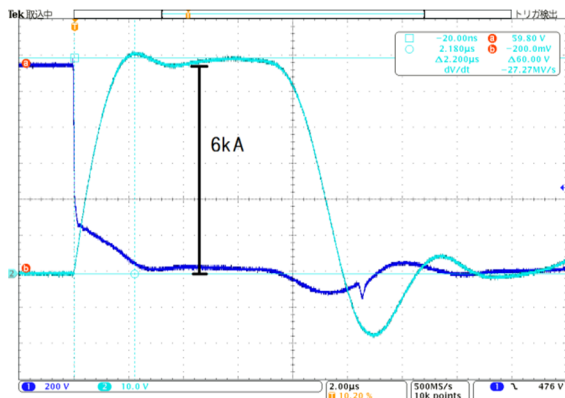


Figure 2: Current and voltage waveform.

このサイリスタは単発、大電流には強く並列接続をさせなくとも繰り返し数が数 pps の場合は、6kA 通電に耐え得るものであった。一方、繰り返しを上げていくと定格内での使用にもかかわらず、局所加熱によるものと思われる破損を繰り返した。

最終的には、素子を並列接続することにより、局所加熱の問題をクリアした。

● 損失測定

図 3 に損失測定の代表例を示す。(素子 A: スタッドタイプ、B 採用タイプ)

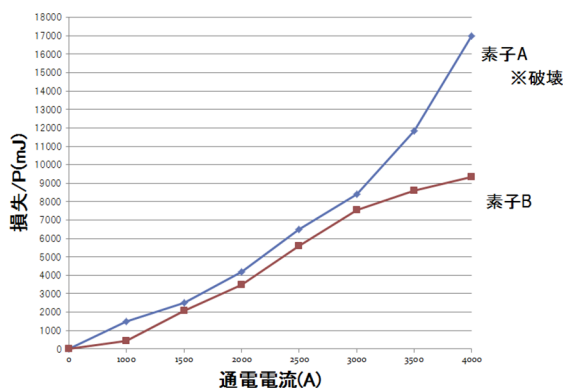


Figure 3: Ross characteristics of thyristor.

スタッドタイプでは、ある電流値を超えると急激な損失上昇となる傾向にあったが、採用素子 B では、素直な損失カーブとなる事が確認出来、より安定した信頼性のあるスイッチとなり得るものと考えられる。

● 可飽和リアクトル効果確認

一般的にサイリスタの ON 時間は数  $\mu$ s 程度であるため、トリガー入力後、電流通電開始時の通電面確保、ON 抵抗の低下によるスイッチング損失低減のため、可飽和リアクトルを回路に挿入し素子の特性を測定した。図 4 に測定波形を示す。

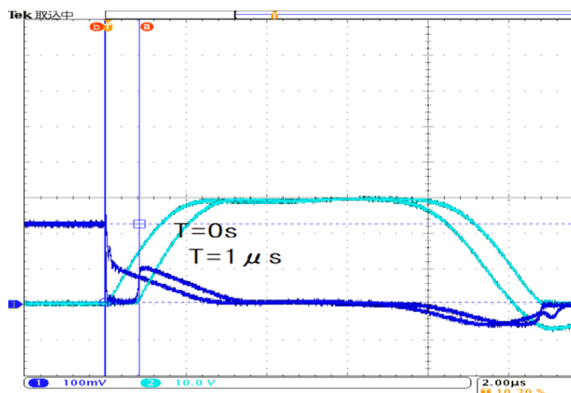


Figure 4: Characteristics of current - resistance.

図 4 からわかる通り電流通電時の ON 電圧は、可飽和リアクトルの有無にかかわらずほぼ同じであり、スイッチング時の損失低減には大きく寄与しないことが判明した。

● 繰り返し運転試験

PFNの定数を変更し、可能な限り繰り返しを上昇せ今回の素子が 6kA 運転に耐え得るかどうか確認試験を行った。主要パラメータを表 4 に、また、図 5 に測定波形を示す。

Table 4: Specifications of Switch

Rated current	6kA
Pulse width	7 $\mu$ s (FWHM)
Pulse repeatedly	25pps
di/dt(repeatedly)	3kA/ $\mu$ s

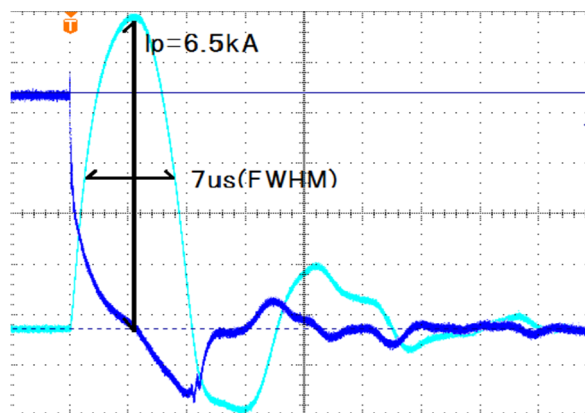


Figure 5: Current and voltage waveform.

表 4 のパラメータにて約 50 時間の連続運転を行い、素子に問題が発生しないことを確認した。

#### 4. 50kV スイッチ組立

社内試験による基礎データを元に 50kV、6kA 用のスイッチとして組み上げた。外観を図 6 に示す。

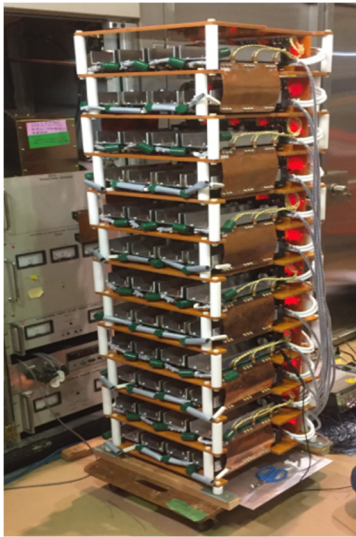


Figure 6: Outline view of switch.

#### 5. 動作確認試験

このスイッチを用い実際に印加電圧 43kV にて 2~3 時間程度の動作確認試験を実施した。表 5 に主要運転パラメータを示す。

Table 5: Running Parameter of Switch

Applied voltage	43kV
Impressed current	4.3kA
Pulse width	7 $\mu$ s (FWHM)
Pulse repeatedly	50pps

今回のスイッチ開発において重要なポイントであるサイラトロンからの置換について、その波形比較を行った。図 7 図 8 に各々サイラトロン、半導体スイッチの測定波形を示す。

- 立上り時間について

立上り波形を比較すると、サイラトロンに比べて半導体スイッチの方が明らかに遅くなっている。これは、半導体スイッチ ON 時の過渡抵抗の影響と、回路インダクタンスの増加による影響の 2 つの要因が考えられる。今後の検討課題としている。

- スイッチング損失について

上記パラメータにて 2~3 時間程度の連続運転を行い、素子の温度上昇ならびにスイッチの大まかな損失を算出した。温度上昇  $\Delta t$  は約 3°C であり、半導体スイッチの損失としては全体で 2.6kW 程度であった。これは供給エネルギーに対し 4%程度の損失であり、既設サイラトロンからの置換に対しては、問題ないレベルと考えている。

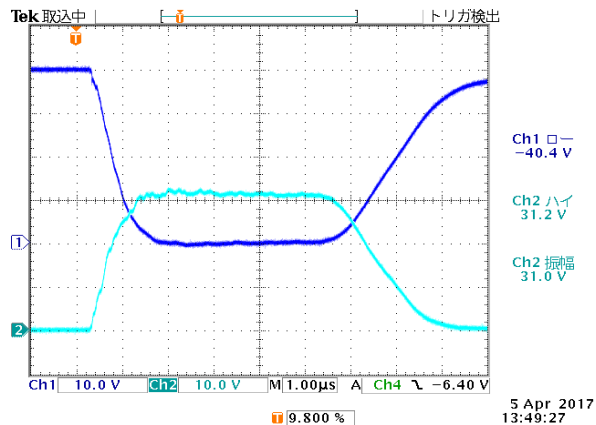


Figure 7: Waveform of thyatron current.

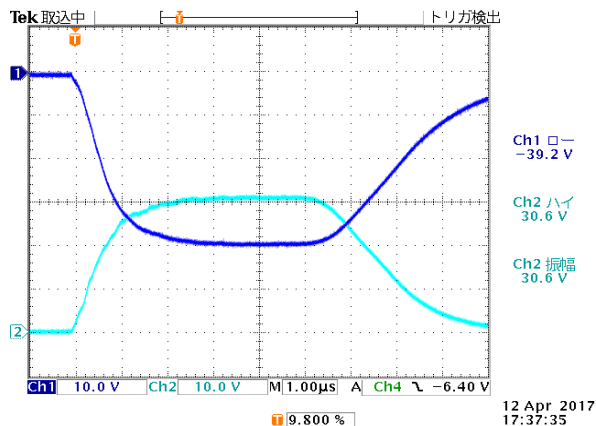


Figure 8: Waveform of thyristor current.

その後、クライストロンブレイクダウンを想定した短絡試験を 10 回実施し、素子の健全性を確認した。短絡試験後に再度通常運転に戻し問題なく通電出来ることを確認している。

#### 6. おわりに

今回 50kV6kA、繰返し 50pps 級の半導体スイッチを開発、短時間動作確認まで実施した。実際にクライストロンモジュレータへの応用を考えた場合、長時間運転における信頼性確認、ならびにクライストロンブレイクダウン時のシステム対応が重要になると考えられる。

今後高エネルギー加速器研究機構殿との共同研究を行い、さらなる評価を行ってゆく予定である。

#### 謝辞

今回の半導体スイッチの開発にあたり、御支援を頂戴しました高エネルギー加速器研究機構、明本先生、川村先生、中島先生にこの場を借りて感謝申し上げます。