

## イグナイトロン代替半導体スイッチ実用基板の評価

### EVALUATION OF SOLID STATE SWITCH BOARD FOR REPLACING IGNITRONS

亀崎広明<sup>#, A)</sup>, 森均<sup>A)</sup>, 徳地 明<sup>A)</sup>, 小野礼人<sup>B)</sup>, 高柳智弘<sup>B)</sup>

Hiroaki Kamezaki<sup>#, A)</sup>, Hitoshi Mori<sup>A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>, Ayato Ono<sup>B)</sup>, Tomohiro Takayanagi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Pulsed Power Japan Laboratory Ltd. (PPJ)

<sup>B)</sup> JAEA/J-PARC

#### Abstract

Solid state switch board, which will substitute ignitrons used as crowbar switch in high power klystron cathode power supply system, has been developed and evaluated. On one unit-board, 48 pieces of MOS-gated-Thyristors are mounted, connected 16 pieces in parallel and 3 parallels in series. Four unit-boards are stacked in series, and the stack has shown good performance under the required operating parameters, 12kVdc and 40kAp.

#### 1. はじめに

クライストロン保護用のクローバースwitchとして水銀蒸気の整流作用を利用したイグナイトロンがそのピーク電流耐量から長年用いられてきたが[1]、近年環境保護の立場から水銀を多量に使用する機器の使用を見直す必要が生じている。

クローバースwitchに要求される 100[kV]以上の高耐電圧、約 40[kA]のピーク電流、約 5[kA/ $\mu$ s]の高 di/dt 値での長期安定動作を、現行クローバースwitch同等の実装スペースで実現するための手段として、筆者らはスイッチ素子として表面実装タイプの MOS ゲートサイリスタを採用し、これを多数直列接続した単位基板を数十 mm のピッチで積み重ねる方式を提案し、プロトタイプ基板での単独動作試験に成功している。[2]

今回実用可能な単位基板 4 枚を製作して実機電圧の 1/10 に相当する 12[kV]での充放電試験を実施し、その性能を評価した。

#### 2. 実用単位基板およびスタックの構造

##### 2.1 実用単位基板の構造

プロトタイプ基板ではスイッチ素子のゲート駆動用電源 DCDC コンバータをスイッチ素子 1 個毎に設けていたが、16 並列×3 直列=48 個のスイッチ素子を使用しており、DCDC コンバータ 48 個の待機電力が約 25W と大きかった。

実用単位基板では、Fig. 1 に示したようにスイッチ素子 8 個毎にゲート駆動用電源 DCDC コンバータを設け、ゲート駆動電力と駆動信号をスイッチ素子の並列接続の方向に沿って伝送するように改め、ゲート駆動用電源 DCDC コンバータの品種変更とも相まって、単位基板当たりの待機電力を約 5[W]まで低減した。

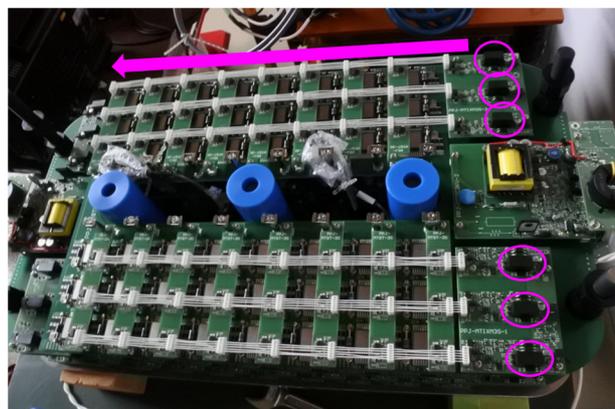


Figure 1: Signal and control power flow on unit board.

##### 2.2 スタックの構造

DCDC コンバータ部の部品高さが約 30[mm]と高く、積み重ねピッチ低減の妨げとなるので、実用単位基板は Fig.2 に示すように 180 度回転して交互に積み上げること



Figure 2: Stacked 4 unit boards.

<sup>#</sup> kamezaki@myppj.com

によりDCDCコンバータ部が次の段とは重ならないように配置し、実用単位基板の積み重ねピッチを 30[mm]とした。

実用単位基板の上下間の接続はバネ接触構造を持つ接続ポスト 16 本を均等配置し、上下を電極を兼ねるクランプ板 P および N で挟んで FRP 製クランプボルトで締め付ける構造とした。

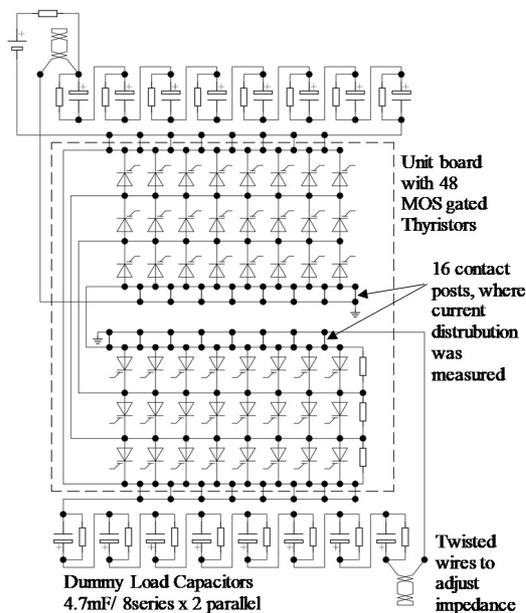


Figure 3: Schematic of single board test.

### 3. 実用単位基板単独試験

実用単位基板単独試験時の接続図を Fig. 3 に示す。

4 枚の実用単位基板の各々について 3[kV]充電時の三直列接続の直流分圧およびターンオン時の電圧分圧波形、およびピーク電流 40[kA]時の各接続ポストの電流分布を測定し、問題となるような大きなバラツキがないことを確認した。各接続ポスト電流ピーク値の全電流ピーク値に対する比率を Table 1 に示す。

### 4. 実用単位基板 4 段積み試験

#### 4.1 4 段積み試験時接続

実用単位基板 4 段積み試験時の接続図を Fig. 4 に示す。

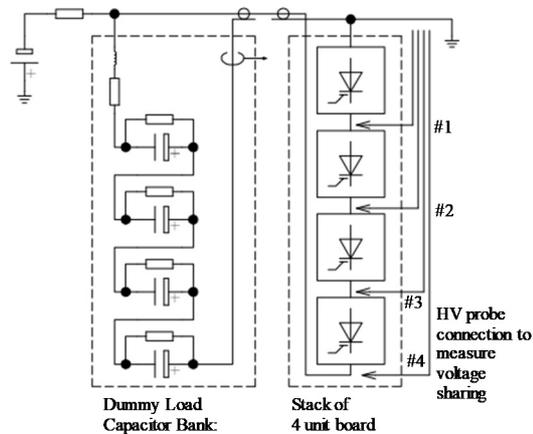


Figure 4: Schematic of stack test.

す。

また、試験状況の写真を Fig.5 に示す。

写真中央が実用単位基板 4 段積みスタック、写真右下テーブルの奥に模擬負荷コンデンサバンクが見える。



Figure 5: Configuration of stack test.

Table 1: Current Distribution on Each Contact Post of Unit Board

Unit Board #	Contact post #							
	#8	#7	#6	#5	#4	#3	#2	#1
#1	8.1%	6.3%	6.3%	5.4%	6.5%	6.1%	6.6%	7.9%
#2	8.0%	6.8%	5.0%	6.1%	6.2%	6.5%	6.3%	6.8%
#3	8.1%	6.3%	7.0%	6.3%	6.0%	6.3%	6.6%	7.5%
#4	8.5%	6.6%	6.6%	5.1%	7.3%	5.4%	6.4%	7.1%
	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16
#1	8.3%	6.3%	6.3%	5.5%	5.3%	5.9%	6.5%	8.8%
#2	7.3%	6.3%	5.6%	5.8%	5.7%	6.1%	6.3%	7.9%
#3	8.3%	6.1%	5.7%	5.7%	5.7%	5.7%	7.6%	6.7%
#4	7.7%	6.2%	6.5%	7.1%	4.4%	7.2%	6.9%	8.0%

#### 4.2 4 段積試験データ

実用単位基板 4 段積み、模擬負荷コンデンサバンク 12[kV] 充放電時の分担電圧波形を Fig. 6 に示す。

ターンオン過程においても分担電圧の異常は見られない。

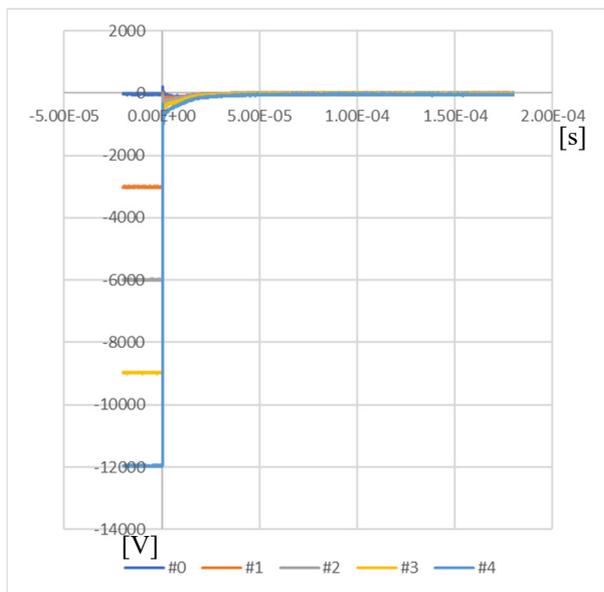


Figure 6: Waveform of voltage sharing.

実用単位基板 4 段積み、定格ピーク電流での放電電流波形を Fig. 7 に示す。

電流分担測定等のデータ取得に際して 20 回以上の定格電流放電試験(40kAp 以上)を行っており、短期的なスイッチ素子の劣化は生じていないと考えられる。

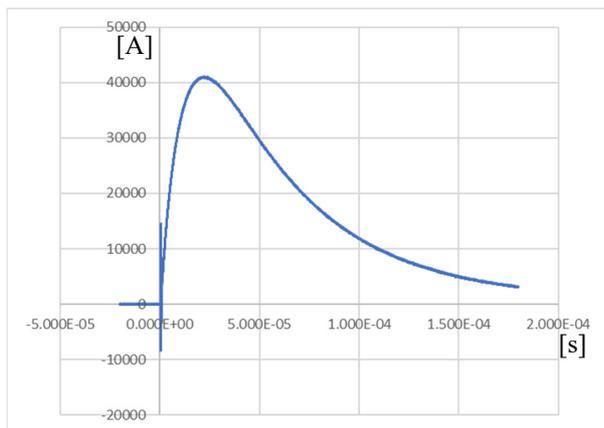


Figure 7: Waveform of total current.

#### 5. まとめ

イグナイトロン代替の半導体スイッチ開発の第二段階として 120kVdc 用スイッチ の 1/40 の電圧:3kVdc、40kAp のスイッチモジュール基板を 4 枚製作し、4 段積み 12kVdc のスイッチとしての性能確認を行った。

今後の展望として、

- 現行クローバースイッチ油タンクとの取り付け互換を考慮した耐電圧・実装設計を行う。
- 更に段数を増やし実用化を目指す。

#### 参考文献

- [1] 川村 他、Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001), pp.204-206;  
<http://conference.kek.jp/lam26/LAM26PDF/1P-27web.PDF>
- [2] 小野 他、Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 399-403;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPH/WEPH038.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPH/WEPH038.pdf)