

## イグナイトロン代替半導体スイッチユニットの開発

### DEVELOPMENT OF SOLID STATE SWITCH UNIT 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 boards, which will substitute ignitrons used as crowbar switch in high power klystron cathode power supply system, has been developed and evaluated. The goal is to develop solid state switch module rated 120 kV DC and 40 kA-peak half width 50 micro-s. As part of the process, we had developed one unit-board, 48 pieces of MOS-gated-Thyristors are mounted, connected 16 pieces in parallel and 3 parallels in series; the one unit-board has rated 3 kV capability. We evaluated four unit-boards are stacked in series in 2019. This time, 10 unit-boards are stacked in series, and the stack has shown good performance under the required operating parameters, 30 kV DC.

#### 1. はじめに

クライストロン保護用のクローバースイッチ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。

クローバースイッチに要求される 100 kV 以上の高耐電圧、約 40 kA のピーク電流、約 5 kA/μs の高 di/dt 値での長期安定動作を、現行クローバースイッチ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、これを多数直並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 1 枚にて 3 kV、40 kA のスイッチング性能を評価している[2]。その後単位基板を 4 枚積とし、実機電圧の 1/10 に相当する 12 kV での 4 枚積動作試験に成功している[3, 4]。

今回は、実用可能な単位基板 6 枚を新たに追加し、実機電圧の 1/4 に相当する 30 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

実用単位基板のスイッチは 16 並列×3 直列=48 個の MOS ゲートサイリスタとゲート駆動電源からなる。

ゲート駆動電源には主回路電源から電力を供給する自己給電型の DCDC コンバータを採用している。地上側から絶縁トランスを介して給電する絶縁給電型は供給元の浮遊電圧が高くなるほどに絶縁が困難なためである。

実用単位基板では、Fig. 1 に示したように自己給電 DCDC コンバータからスイッチ素子 8 個毎に 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している。

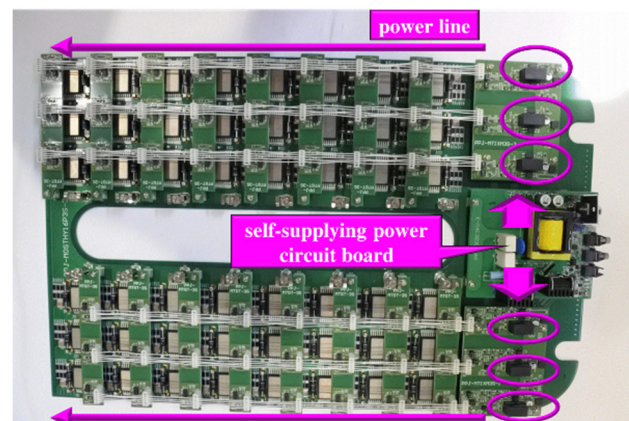


Figure 1: Signal and control power flow on unit board.

##### 2.2 スタックの構造

DCDC コンバータの部品高さが最大 38 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。

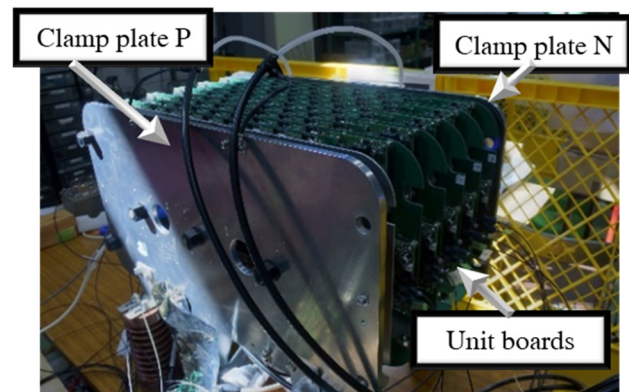


Figure 2: Stacked 10 unit boards

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

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。

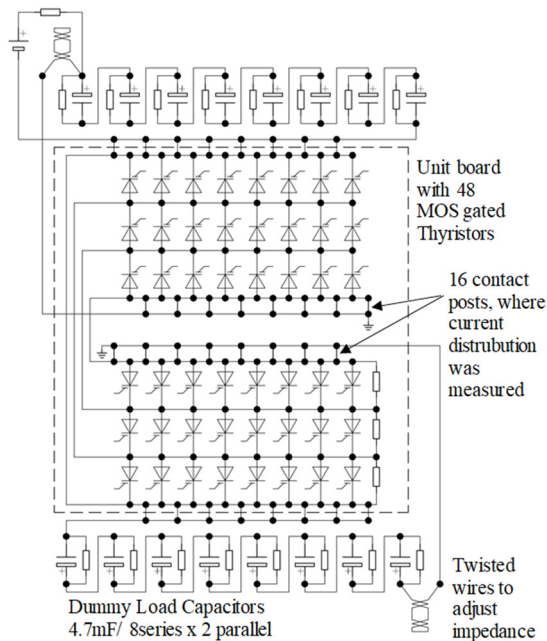


Figure 3: Schematic of single board test.

### 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。

新たに製作した 6 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 10 段積み試験

#### 4.1 10 段積み試験時接続

実用単位基板 10 段積み試験時の接続図を Fig. 4 に示す。

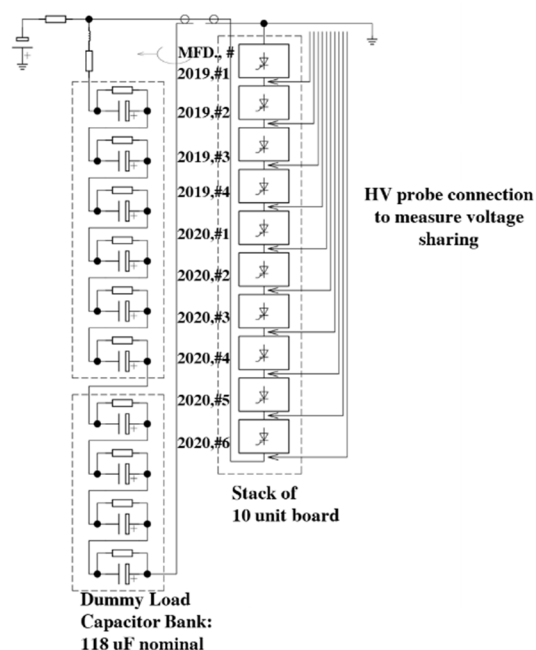


Figure 4: Schematic of stack test.

また、試験状況の写真を Fig. 5 に示す。

写真左中央に実用単位基板 10 段積みスタック、その右側に模擬負荷コンデンサバンクがあり、Fig. 4 の回路図のように充電用電源と繋がっている。

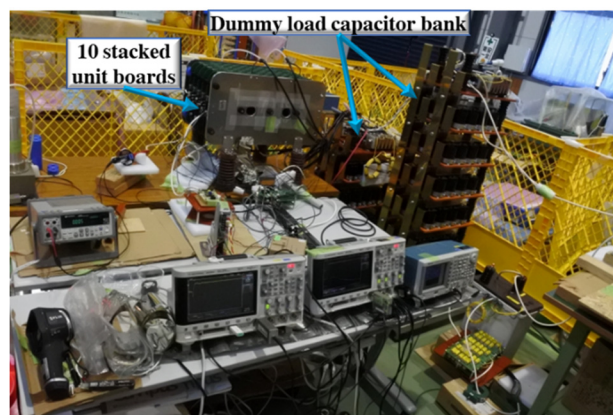


Figure 5: Configuration of stack test.

Table 1: Current distribution on each contact post of unit board

| MFG. | Unit Board # | Contact post # |       |       |       |       |       |       |       |
|------|--------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      |              | #8             | #7    | #6    | #5    | #4    | #3    | #2    | #1    |
| 2020 | #1           | 7.67%          | 7.52% | 4.99% | 6.24% | 6.00% | 5.45% | 6.11% | 6.23% |
| 2020 | #2           | 7.94%          | 6.07% | 6.20% | 5.73% | 6.29% | 4.47% | 7.53% | 6.89% |
| 2020 | #3           | 8.04%          | 6.43% | 6.11% | 6.18% | 6.72% | 4.24% | 7.36% | 6.45% |
| 2020 | #4           | 7.92%          | 5.95% | 6.11% | 5.29% | 6.15% | 5.09% | 6.90% | 6.90% |
| 2020 | #5           | 7.06%          | 5.95% | 6.07% | 6.05% | 5.77% | 5.87% | 6.71% | 7.40% |
| 2020 | #6           | 7.93%          | 6.32% | 6.21% | 5.79% | 6.64% | 4.40% | 6.90% | 6.69% |
|      |              | #9             | #10   | #11   | #12   | #13   | #14   | #15   | #16   |
|      |              |                |       |       |       |       |       |       |       |
| 2020 | #1           | 8.40%          | 5.76% | 5.06% | 5.22% | 6.15% | 6.10% | 6.62% | 6.92% |
| 2020 | #2           | 7.60%          | 5.67% | 5.53% | 5.45% | 6.19% | 6.08% | 6.13% | 7.33% |
| 2020 | #3           | 6.92%          | 6.21% | 5.53% | 5.40% | 5.70% | 6.39% | 6.31% | 7.42% |
| 2020 | #4           | 7.02%          | 5.64% | 5.65% | 5.69% | 5.48% | 5.38% | 6.66% | 7.36% |
| 2020 | #5           | 7.47%          | 5.80% | 5.68% | 6.32% | 5.28% | 6.02% | 6.21% | 7.42% |
| 2020 | #6           | 6.78%          | 5.93% | 4.69% | 6.64% | 5.30% | 6.38% | 6.22% | 7.48% |

#### 4.2 10 段積試験データ

実用単位基板 10 段積み、模擬負荷コンデンサバンク 40 kV 充放電時、定格ピーク電流での放電電流波形を Fig. 6 に示す。

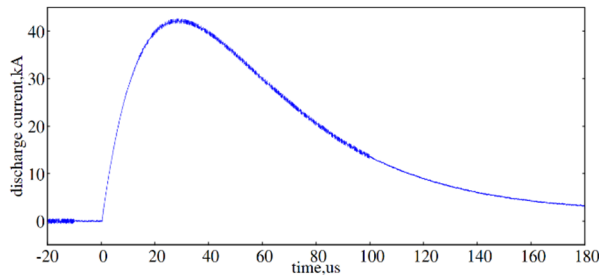


Figure 6: Waveform of total current

ピーク電流はおよそ 42 kA 流れているが、定格試験後も正常なスイッチング動作を確認している。

#### 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三段階として 120 kVdc 用スイッチの 1/40 の電圧:3 kVdc、40 kAp のスイッチモジュール基板を新たに 6 枚製作し、10 段積み 30 kVdc のスイッチとしての性能確認を行った。今後は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/WEPP/WEPP038.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPP/WEPP038.pdf)
- [3] 小野 他, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 590-593;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2020/proceedings/PDF/THPP/THPP45.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/THPP/THPP45.pdf)
- [4] 亀崎 他, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 338-340;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEPP/WEPP39.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEPP/WEPP39.pdf)