

J-PARC 加速器用イグナイトロン代替半導体スイッチと新キッカー電源の開発 DEVELOPMENT OF IGNITRON ALTERNATIVE SEMICONDUCTOR SWITCH AND NEW KICKER POWER SUPPLY FOR J-PARC ACCELERATOR

小野礼人[#], 高柳智弘, 植野智晶, 堀野光喜, 山本風海, 金正倫計

Ayato Ono[#], Tomohiro Takayanagi, Tomoaki Ueno, Koki Horino, Kazami Yamamoto, Michikazu Kinsho
J-PARC/JAEA

Abstract

There are ignitron and thyratron as a large current, high voltage discharge switch. J-PARC uses an ignitron switch as the klystron power source clover device used for LINAC high frequency source for acceleration and a thyratron switch as the kicker power system used for extracting high intensity beam of RCS. Ignitron uses mercury, which is of limited use worldwide, and is expected to be discontinued in the future. Therefore, we have developed a semiconductor switch for ignitron substitution using MOS gate thyristors. In order to be used as a crowbar device, a switch capable of resisting an operating output of 120 kV, 40 kA, 50 μ s is required. We have developed an oval type substrate module that achieves an operating output of 3 kV, 40 kA, 50 μ s per substrate. Report on preliminary test results. Finally, 40 pieces of this circuit board are stacked to output 120 kV. In addition, we adopted a LTD circuit using SiC-MOSFET as an alternative switch of thyratron, and developed a radially symmetric pulse power supply circuit to which this circuit was applied. This circuit board achieves a rise of 250 ns or less, and a flat top of 1.2 μ s or more necessary for the RCS kicker power supply system, with a pulse output of 800 V and 2 kA per circuit board. We report on the power test results at 20 kV (final specification 40 kV) combining the 26 stacked main circuit boards and the correction circuit board that compensates for the flat top droop.

1. はじめに

大電流・高電圧の放電スイッチとして、イグナイトロンやサイラトロンがある。J-PARC[1]では、LINACの加速用高周波源で使用するクライストロン電源[2]のクローバー装置[3]にイグナイトロンスイッチを、RCSの大強度ビームの取り出しに使用するキッカー電源システム[4,5]にサイラトロンスイッチを用いている。イグナイトロンは、世界的に使用が制限されている水銀を使用しており、将来的に製造中止が見込まれる。そこで、MOSゲートサイリスタを用いたイグナイトロン代替半導体スイッチを開発している。クローバー装置として使用するためには、120 kV、40 kA、50 μ sの動作出力に耐得うるスイッチが必要である。1枚当たり、3 kV、40 kA、50 μ sの動作出力を実現するオーバル型基板モジュールを開発した。予備試験結果について報告する。最終的には、本回路基板を40枚積み重ねて120 kVを出力する。また、サイラトロンの代替スイッチにSiC-MOSFETを用いたLTD回路[6]を採用し、更に、本回路を応用した放射対称型パルス電源回路[7]を開発した。本回路基板は、RCSキッカー電源システムに必要な立ち上がり250 ns以下、フラットトップ1.2 μ s以上を、1枚当たり800 V、2 kAのパルス出力で実現する。主回路基板26枚の積み重ねとフラットトップのドゥループを補正する補正回路基板14枚を組み合わせた、20 kV(最終仕様40 kV)での出力試験結果について報告する。

2. クライストロン電源のクローバー装置

J-PARCでは、LINACの加速用高周波源で使用するクライストロン用高圧電源内にクローバー装置がある。クライストロン用クローバー装置は、クライストロンが放電した際にクライストロンを保護する回路であり、スイッチにイグナイトロンが使用されている。使用されているイグナイトロンは、National ELECTRONICS製のNL7703EHVが5本直列に接続されている。負荷側の短絡電流を検知し、トリガープルス発生器よりトリガースignalを送りイグナイトロン5本を同時にスイッチさせ、クライストロンへの短絡電流をバイパスしクライストロンを保護する。クローバー装置動作時のクローバー電流(イグナイトロン流れる電流)波形をFig. 1に示す。また、LINACクライストロン用高圧電源13号機の概略回路をFig. 2に示す。

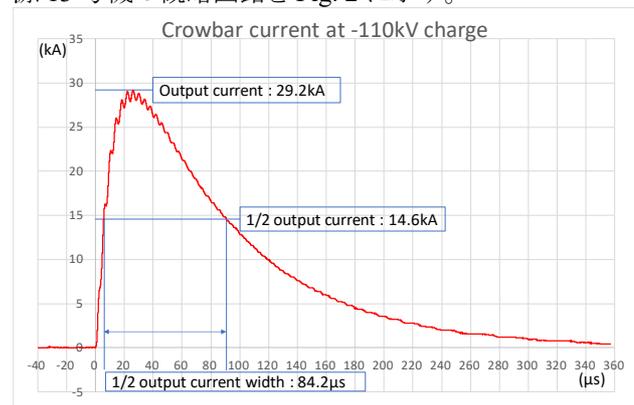


Figure 1: Crowbar current waveform at-110kV charge.

[#] onoayato@post.j-parc.jp

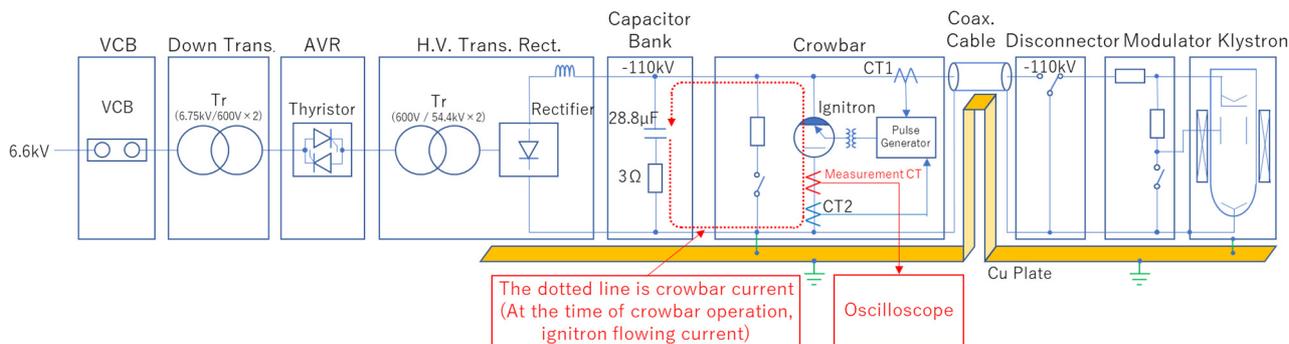


Figure 2: High-voltage power supply for Klystron (#13).

試験は、断路器を開放しクライストロンには電圧印加しない状態で行い、コンデンサバンクを定格電圧である-110 kVまで充電し、テストスイッチにて模擬クローバー動作を行った。クローバー電流は、ピーク電流:29.2 kA、出力電流半値幅:84.2 µs、立ち上がり時間:25.5 µsとなっている。

パワー半導体素子には、IXYS製MOSゲートサイリスタMMIXH60N150V1(1500V/パルス電流11.8 kA(10 µs))を使用した。外観をFig. 5に示す。耐パルス電流について I^2t 換算が成り立つとすると、50 µsのパルス幅では5.3 kA(50 µs)と試算した。耐電圧について120 kV/120直列=1 kV(1.5 kVの67%)、耐電流について40 kA/16並列=3.3 kA(5.3 kAの62%)とし、全体の素子構成は120直列16並列(1920素子)となる。素子構成3直列16並列の回路を1基板モジュールに収納し、本基板モジュールを40枚直列に積み重ね120 kV出力を実現する。

3. イグナイトロン代替用半導体スイッチ

3.1 概要

MOS ゲートサイリスタを用いたイグナイトロン代替用半導体スイッチを開発しており、1枚当たり、3 kV、40 kA、50 µsの動作出力を実現するオーバル型基板モジュールを製作した。外観をFig. 3に示す。また、基板モジュールの単回路ブロック図をFig. 4に示す。

本基板モジュールについて、単回路には、MOS ゲートサイリスタが3直列で実装されており、3 kVの耐電圧性能を確保している。さらに、この単回路を一枚の基板にオーバル型で16並列配置し、40 kAの耐電流性能を確保する。基板モジュール1枚分について評価試験を行った。

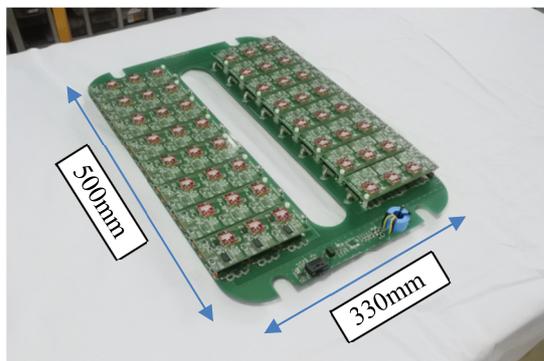


Figure 3: Board appearance.

3.2 並列電流分担確認

MOS ゲートサイリスタ素子のカソード電極ピンに極細ロゴスキーコイルを挿入し電流測定を行った。測定箇所をFig. 6、測定結果をFig. 7に示す。

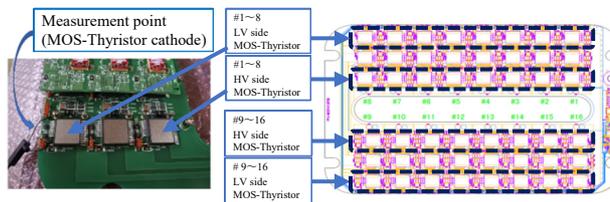


Figure 6: Measurement point.

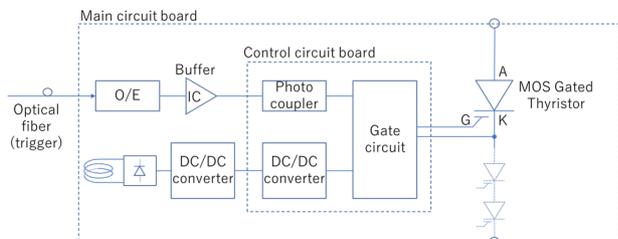
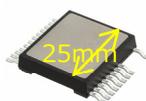


Figure 4: Single-circuit block diagram.



1500V/11.8kA(10us)

Figure 5: IXYS MM1X1H60N150V.

(Ap) Current distribution at 150V charge(Apeak)

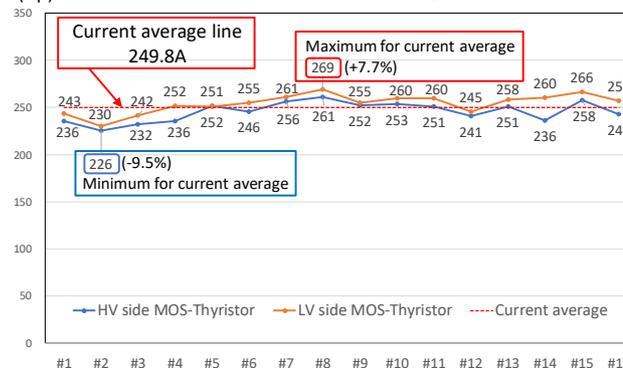


Figure 7: Current distribution at 150V charge.

測定箇所は、3直列となっているMOSサイリスタのHV側とLV側の2か所とし、16並列分行った。150V充電時の電流分布は、平均電流値からのばらつきが+7.7%~-9.5%であることを確認した。平均電流からのばらつきが最大9.5%となっており、許容範囲と考えられる。

3.3 直流分担電圧確認

測定は、3直列となっているMOSサイリスタのLV側のカソードを基準とし、HV(V3)、MID(V2)、LV(V1)の各段のアノード端子間を差動プローブにて行った。測定箇所をFig. 8、測定結果をFig. 9に示す。

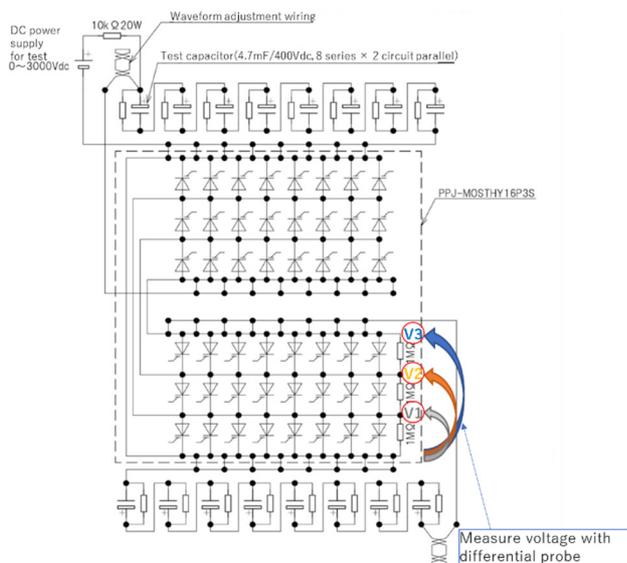


Figure 8: Measurement point.

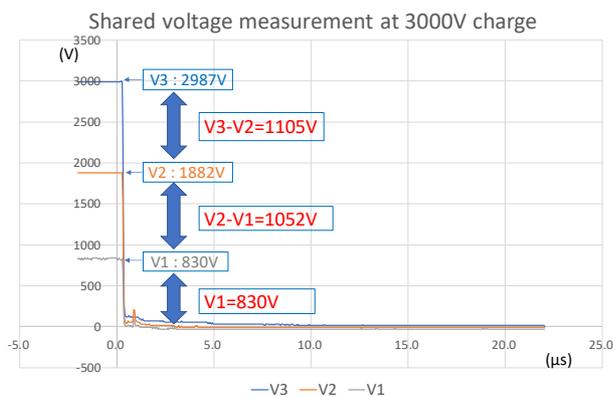


Figure 9: Shared voltage measurement at 3000V charge.

3000V時の各段のMOSサイリスタA~K間の分担電圧は、LV段(V1)=830V、MID段(V2-V1)=1052V、HV段(V3-V2)=1105Vであることを確認した。分担電圧の最大値は1105Vとなっており、素子耐電圧1500Vに対し許容範囲内であった。

3.4 定格負荷放電試験および素子温度上昇確認

3kV充電にて、出力電流40kAの定格負荷放電試験を行った。放電時のMOSサイリスタのケース温度上昇を光ファイバー温度計にて測定した。定格負荷試験用アルミ電解コンデンサの接続および出力全電流測定用ロ

ゴスキーコイルのセットアップの様子をFig. 10に示す。試験用電解コンデンサは、4.7mF/400Vのものを8直列×2回路並列としている。回路図はFig. 8を参照。また試験の全景をFig. 11に示す。

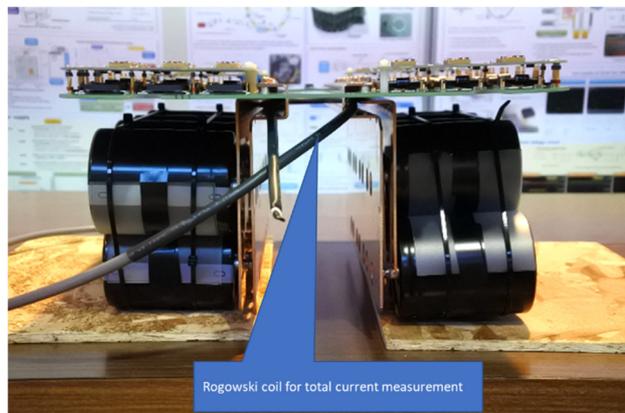


Figure 10: Capacitor and Rogowski coil setup.

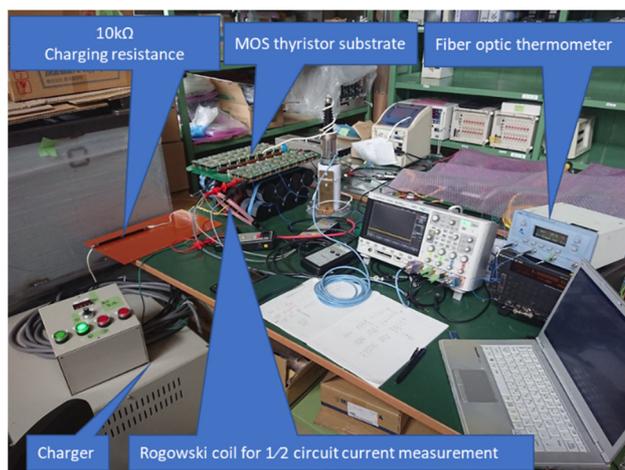


Figure 11: Rated load discharge test setup.

試験結果をFig. 12に示す。3000V充電時の定格負荷放電出力電流波形(CH4)は、出力ピーク電流:40kA、出力電流半値幅:70μsであり、3kV、40kA、50μsの動作出力を実現した。放電時の素子のケース温度上昇は、1°C以下となっている。



Figure 12: Rated load discharge test.

3.5 まとめ

MOS ゲートサイリスタを用いたオーバル型基板モジュール 1 枚で、3 kV、40 kA(定格電流)、50 μ s の動作出力を実現することが確認できた。今後、最終目標である 120 kV 出力を目指す。基板モジュールを 40 枚段積み重ねて耐電圧を確保するが、各基板での出力のばらつき、120 kV という高電圧への対策、イグナイトロンへの置き換えとした場合の互換性が今後の課題となります。

4. キッカー電磁石用放射対称型パルス電源

4.1 概要

現状のキッカー電源のシステムは、パルス波形の形成用に PFN 回路、大電力パルス出力用高速スイッチにサイラトロン、反射波を吸収する為にエンドクリップ(反射波吸収回路)で構成されている。実運転時の出力電流(1/2 回路分)波形を Fig. 13 に示す。

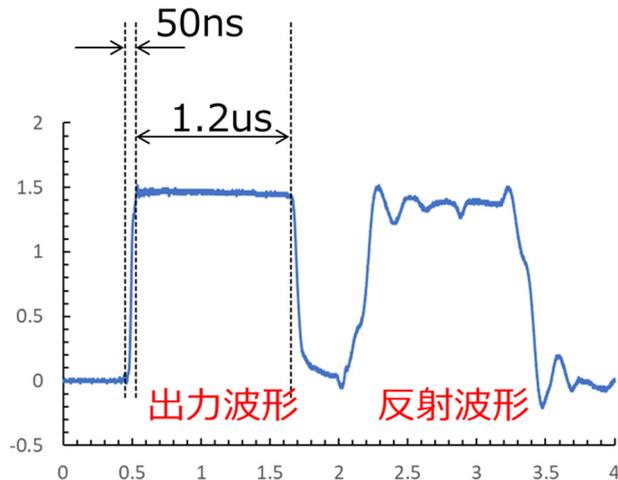


Figure 13: Actual output current (1/2 circuit).

使用されているサイラトロンは、e2v 製の CX1193C であり、現在隔年で交換しているが油中に収められている為メンテナンスが容易ではない。そこで半導体スイッチと誘導電圧重畳回路の組み合わせた LTD(Linear Transformer Drivers)回路を採用し、更に本回路を応用した放射対称型パルス電源を開発した。LTD 回路は、1 モジュールでサイラトロンスイッチ、PFN回路、エンドクリップを実現している。1 モジュールのブロック図と外観を Fig. 14 に示す。

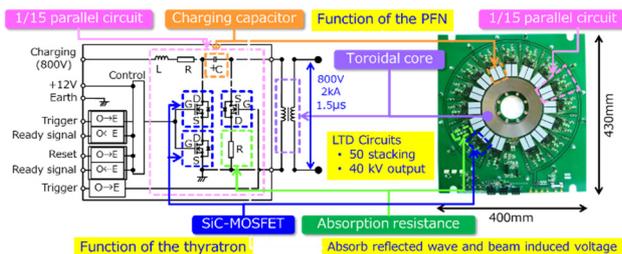


Figure 14: 1 module block diagram and appearance.

4.2 抵抗負荷出力確認

主回路基板 26 枚の積み重ねとフラットトップのダブルループを補正する補正回路基板 14 枚を組み合わせた、20 kV での出力試験結果について報告する。出力試験は、10 Ω の負荷抵抗で行った。試験セットアップの様子を Fig. 15、測定結果を Fig. 16 に示す。



Figure 15: Resistance load(10 Ω) test setup.

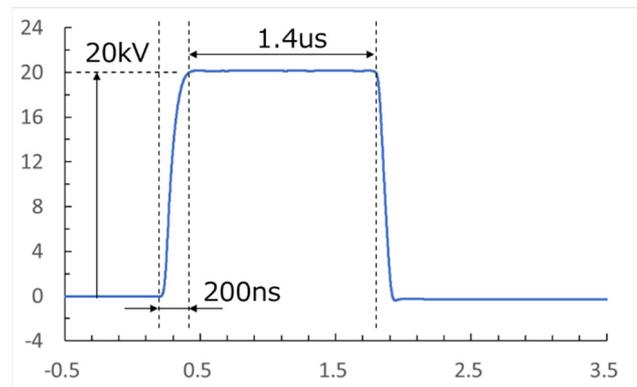


Figure 16: Resistance load(10 Ω) output waveform.

4.3 まとめ

抵抗負荷での出力確認はフラットトップ部 1.4 μ s と良好であった。今後、反射エネルギーを考慮したケーブル負荷での確認および基板をさらに積み重ねて最終 40 kV 出力を目指す。基板の積み重ねおよび周辺機器の配置等構造検討や高電圧対策が課題である。

謝辞

第 3 章「イグナイトロン代替用半導体スイッチ」および第 4 章「キッカー電磁石用放射対称型パルス電源」では、開発と試験に協力頂いた株式会社パルスパワー技術研究所の皆様へ深く感謝する。クローバー電流の測定やイグナイトロン代替スイッチの開発に協力頂いた J-PARC の篠崎信一氏、不破康裕氏、リニアック RF グループの皆様へ深く感謝する。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC 加速器の現状”, in these proceedings, FSPI001.
- [2] M. Kawamura *et al.*, “J-PARC リニアック用クライストロン電源システムの現状 2013”, Proceedings of PASJ2013, SAP061.
- [3] M. Kawamura *et al.*, “U H F クライストロン電源の大電力試験”, Proceedings of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, 21-23 July 1993, pp202-205.
- [4] J. Kamiya *et al.*, “THE EXTRACTION KICKER SYSTEM OF THE RCS IN J-PARC”, Proceedings of 2005 PAC, Knoxville, Tennessee, pp1009-1011.

- [5] M. Watanabe *et al.*, “J-PARC 3GeV RCS 入出射用電磁石電源システムの運転と現状”, Proceedings of PASJ2011, MOPS055.
- [6] W. Jiang *et al.*, “Pulsed Power Generation by Solid-State LTD”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.42, No.11, Nov. 2014m pp.3603-3608.
- [7] T. Takayanagi *et al.*, “SiC-MOSFET を用いた半導体スイッチ電源の開発”, Proceedings of PASJ2018, FROM07.