

【公開版】

平成30年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高電圧半導体スイッチを使用した電子線滅菌用高電圧パルス電源の開発」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

目 次

第 1 章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究開発の背景	1
1-1-2 研究目的及び目標	2
1-1-3 目的及び目標に対しての実施結果	3
1-2 研究体制	4
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第 2 章 本論	8
1. 高電圧半導体デバイス（S I サイリスタ）の開発課題への対応	8
【1-1】イオン注入型高抵抗チャネル構造検討	8
【1-2】アノード p ⁺ 層及び n バッファ層のドーピング濃度の最適化検討	8
【1-3】埋め込みフィールドリング構造の検討	9
【1-4】ウエハー厚みの最適化検討とデバイス試作	9
2. 高電圧パルス電源の開発課題への対応	10
【2-1】パルス回路のモジュール化の検討	10
【2-2】光ファイバーによる絶縁制御の検討	11
【2-3】油絶縁・冷却による高繰り返し化の検討と高電圧パルス電源の試作	12
【2-4】マイクロトロン負荷での実負荷試験	14
最終章 全体統括	15
3-1 研究開発総括評価	15
3-2 事業展開にむけて	16

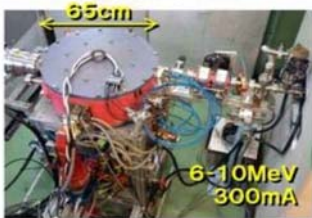
第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

電子線滅菌装置は電子線を高エネルギーに加速する為の加速器にいくつかの方式があるが主なものはロードトロンとマイクロトロンがある。ロードトロンはベルギーのIBA社の開発した方式であり、現在、世界的に最も主流の方式であるが、直流駆動方式であり、出力エネルギー、出力電力が固定で、150kWという高出力の状態でしか動作させることが出来ず、10kW程度の出力で足りる医療器具用、食品用（海外）等大部分の滅菌用途にとっては、非常に効率が悪く、装置サイズが大きく、コストが高いという課題がある。一方、我国の金属技研(株)が開発中の加速器にマイクロトロンがあるが、これはパルス駆動方式であり、その繰り返し頻度を変えることで、電子線の出力を数kWから数10kWまで自由に変えることが出来る。又、モジュール動作が可能なので、数台並列に運転することにより、更に高出力の電子線を得ることも可能となる。出力エネルギー、出力電力が可変で、装置サイズが小さく、コストも低いという特徴を有するが、高電圧のパルススイッチにサイラトロンという真空管を使用しており、500Hz以上の高繰り返し運転ができず、その為、出力電力が20kW程度と低く、又、サイラトロンの寿命が1年程度と短いという課題があった。

・電子線滅菌装置の比較

	従来技術 ロードトロン	新技術 マイクロトロン
技術の名称		
エネルギー	10MeV固定	1~20MeV選択可
出力	150kW固定	2~40kW可変 並列運転可能
価格	15億円	3億円
大きさ	直径3.5m	直径~1.3m
課題と特徴	<p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー、出力が固定 ・ 高コスト ・ 装置サイズ大 	<p>【特徴】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー、出力が可変 ・ 従来の5分の1のコスト ・ 装置サイズ小

1-1-2 研究目的および目標

本事業は従来のサイクロトロン（真空管）の代わりに、8 kV以上の耐圧を有する半導体スイッチ（Siサイリスタ等）を開発し、このスイッチを使用した長寿命の高電圧パルス電源を開発し、これでマイクロトロンを使用した電子線滅菌装置を駆動可能とするものである。従来、電子線滅菌装置はベルギーのロードトロンが市場を独占してきたが、本研究開発により、ロードトロンに比べ、出力可変、低コスト、高効率、小型の国産・工業用電子加速器の実現を目指す。

開発については、以下の2つのサブテーマについて、それぞれの目標を定めて進めた。

[サブテーマ【1】高電圧半導体デバイス（Siサイリスタ）の開発]

- ・【1-1】イオン注入型高抵抗チャネル構造検討
- ・【1-2】アノードp層及びnバッファ層のドーピング濃度の最適化検討
- ・【1-3】埋め込み型フィールドリング構造の検討
- ・【1-4】ウェハー厚みの最適化検討とデバイス試作

<技術目標値>

- ・耐圧8 kV
- ・ピーク電流5 kA
- ・ターンオン時間400ns

[サブテーマ【2】：高電圧パルス電源の開発]

- ・【2-1】パルス回路のモジュール化の検討
- ・【2-2】光ファイバーによる絶縁制御の検討
- ・【2-3】油絶縁・冷却による高繰り返し化の検討と高電圧パルス電源の試作
- ・【2-4】マイクロトロン負荷での実負荷試験

<技術目標値>

- ・出力電圧120 kV、出力電流100A
- ・パルス幅10 μs
- ・繰り返し1 kHz
- ・平均出力120 kW、ピーク出力1.2 MW
- ・電子線平均出力40 kW

【公開版】

電子線滅菌用の高電圧パルス電源に要求される仕様は出力電圧：40～120kV、出力電流：100A、パルス幅：10 μ s、繰返し：100Hz～1kHz、平均出力：4～120kW、ピーク出力：4～12MW、出力安定度：0.01%であり、これにより発生される電子線の平均出力は2～40kW可変出力を想定する。最高出力電圧は120kVと極めて高く、従来はサイラトロンと言われる真空管しか使用可能なスイッチはなかった。サイラトロンでは繰返しは500Hz以下であり、又、出力安定度は0.1%以上であったが、このスイッチを半導体に置き換え、1kHz以上の繰返しで出力安定度0.01%以下で安定に動作させる。

本研究で開発する電子線滅菌用の高電圧パルス電源は、充電電圧 6kV をパルストランスにて昇圧し出力電圧 24kV、出力電流 100A、出力パルス幅 10 μ s、繰返し 1kHz のモジュール 5 台を直列に接続し、負荷電圧 120kV を出力する。

1-1-3 目的及び目標に対しての実施結果

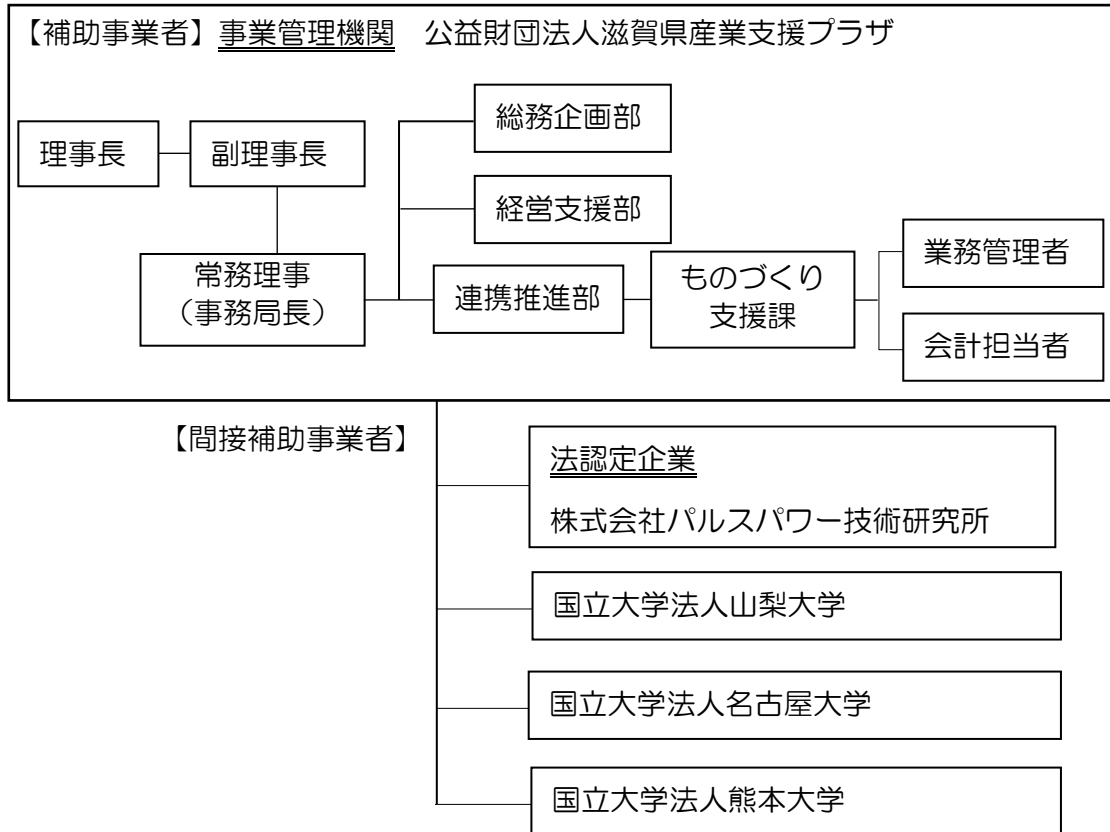
チップ試作については平成29年度の試作で問題であった実装時の耐圧不良（電極ショート不良）は解消されるとともに、入力端子の逆電圧を16V 増加することに成功した。そして耐電圧 7.5kV(at 6Hz) で特性オン抵抗 132 Ω cm²、ターンオン性能は 2.65kV,3290A の条件にて 450ns の成果を得た。これらの成果は当初の目標には達しなかったが昨年同様、SiC の理論限界に迫る低損失、高耐圧性能で有り、ターンオン性能においても 1 チップにて 3000A 以上で 500ns 以下の極めて高速性能を達成した。また AlN 基板を用い、試作チップに対し 100A 程度の静的な導通特性を測定した結果、約 30m Ω の低いオン抵抗が観察され、開発したサイリスタの低損失性能が裏付けられた。

パルス電源の試作については、開発目標である、120kV、100A、10 μ s、1kHz のそれぞれの目標値を超える性能を達成し、さらには、マイクロトロン設備に対し、既設の電源を本開発の電源と置換え、動作試験、評価・検証を実施し、今回開発した半導体を使用した高電圧パルス電源で、既設電源と同等以上の動作をすることを確認し、実負荷に対して問題なく使用できることを確認した。

1-2 研究体制

(研究目標・管理体制、研究者氏名、協力者)

1-2-1 研究組織・管理体制



総括研究代表者 (P L)
 氏名：徳地 明
 所属組織：株式会社パルスパワー技術研究所
 所属役職：代表取締役

副総括研究代表者 (S L)
 氏名：矢野 浩司
 所属組織：国立大学法人山梨大学
 所属役職：大学院総合研究部 工学域
 電気電子情報工学系 教授

1-2-2 研究者・協力者

① 研究者氏名

【間接補助事業者】株式会社パルスパワー技術研究所

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
徳地 明（PL）	代表取締役	【1-4】 【2-1】 【2-2】 【2-3】 【2-4】
澤村 陽	技術部	【1-4】 【2-1】 【2-3】 【2-4】
森 均	技術部	【1-4】 【2-3】 【2-4】
虫邊 陽一	技術部	【1-4】 【2-3】 【2-4】

【間接補助事業者】国立大学法人山梨大学

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
矢野 浩司（SL）	大学院総合研究部 工学域 電気電子情報工学系 教授	【1-1】 【1-2】 【1-3】 【1-4】
山本 真幸	大学院総合研究部 工学域 電気電子情報工学系 助教	【1-1】 【1-2】 【1-3】 【1-4】

【間接補助事業者】国立大学法人名古屋大学

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
清水 尚博	プラズマナノ工学研究センター 特任教授	【1-1】 【1-2】 【1-3】 【1-4】

【間接補助事業者】国立大学法人熊本大学

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
浪平 隆男	パルスパワー科学研究所 准教授	【2-1】 【2-2】 【2-3】 【2-4】

② 事業管理機関

【間接補助事業者】公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

氏名	所属部署・役職	実施内容
田中 勝晴	連携推進部 部長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
篠原 弘美	連携推進部 副部長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
福井 浩成	連携推進部 ものづくり支援課 課長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
山本 博之	連携推進部 ものづくり支援課 参与	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
加藤 芳一	連携推進部 ものづくり支援課 サポイン事業推進 コーディネートスタッフ	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務、間接補助事業先との連絡調整業務

③ 協力者

氏名	所属部署・役職	実施内容
吉田 昌弘	金属技研株式会社 技術本部 加速器応用部 加速器応用課 課長	マイクロトロンを使用した電子線加速器の電源仕様策定、評価試験
岡村 勝也	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 教授	SIサイリスタの高排熱パッケージング技術のアドバイス
明本 光生	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 教授	SIサイリスタを使用したクライストロンモジュレータへの技術適用に関するアドバイス
高山 健	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 研究員	SIサイリスタを使用したデジタル加速器への技術適用に関するアドバイス
堀田 栄喜	国立大学法人東京工業大学 研究員	SIサイリスタの特性やパッケージ仕様、電源の仕様ほかにおけるアドバイス

SI サイリスタ：静電誘導サイリスタ

1-3 成果概要

・SIサイリスタの開発は、開発目標の100%達成はできなかったが、耐電圧7.6kV、ピーク電流5kAの単発動作と6kV、600Aで500Hzの繰り返し動作の確認ができた。特性のばらつきが大きく、歩留まりが悪い課題は残ったが、継続した改良により、世界的にも他に類を見ない画期的なデバイスの実現の可能性が極めて高いことを確認した。

・高電圧パルス電源の開発については、電源のモジュール化、光ファイバーの活用・油絶縁冷却による小型化、サイリスタを使用した1kHz動作が確認できた。

・事業化に向けて、電子線加速器と接続してのパルス電源のシステム試験において、現場搬入、据え付け、配線、試験の各段階で金属技研㈱の現場スタッフに多大なご協力を頂いた。今回開発したパルス電源の有望顧客である金属技研㈱との友好的協力関係を深め、事業化に向けた一歩を踏み出すことが出来た。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

連携推進部 ものづくり支援課 参与 山本 博之

〒 520-0806 滋賀県大津市打出浜2番1号 コラボしが21 2階

電話 077-511-1414 FAX 077-511-1418

E-mail : h-yamamoto@shigaplaza.or.jp

【法認定管理機関】

株式会社パルスパワー技術研究所

代表取締役 徳地 明

〒 525-0058 滋賀県草津市野路東7丁目3番46号

滋賀県立テクノファクトリー2号棟

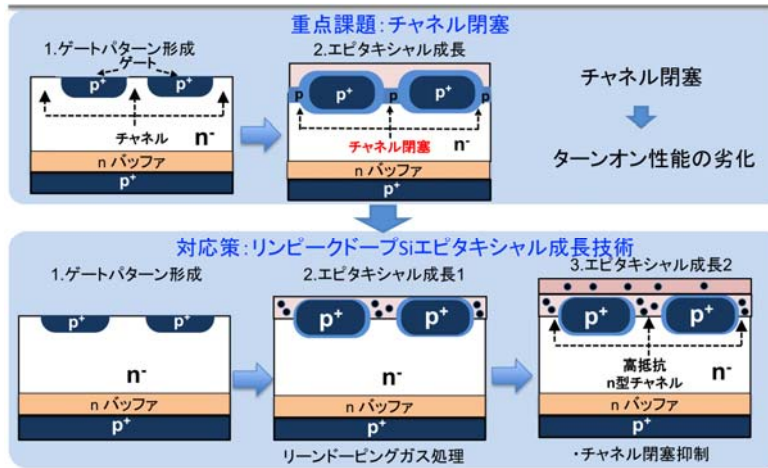
電話 077-598-1470 FAX 077-598-1490

E-mail : tokuchi@myppj.com

第2章 本論

1. 高電圧半導体デバイス（Siサイリスタ）の開発課題への対応

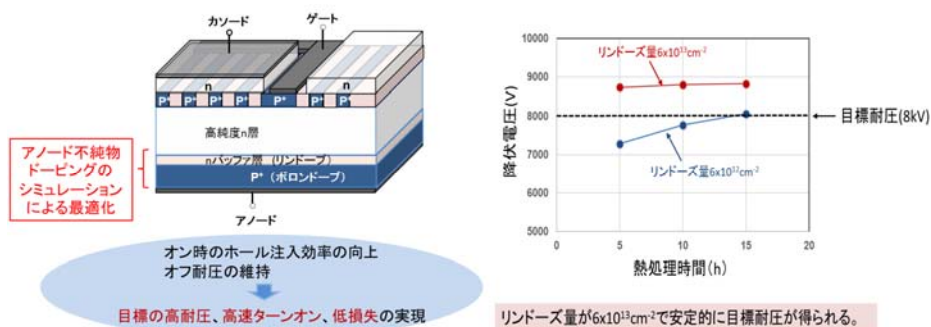
【1-1】イオン注入型高抵抗チャンネル構造検討



イオン注入型高抵抗チャンネルの形成に際し、エピタキシャル成長時点でチャンネル閉塞となりターンオン性能が劣化する課題があった。

対応策としてリンピークドーピング Si エピタキシャル成長技術で、エピタキシャル成長時にリンドーピングガス処理を行うことで、高抵抗 n 型チャンネルを形成しチャンネル閉塞を抑制できた。

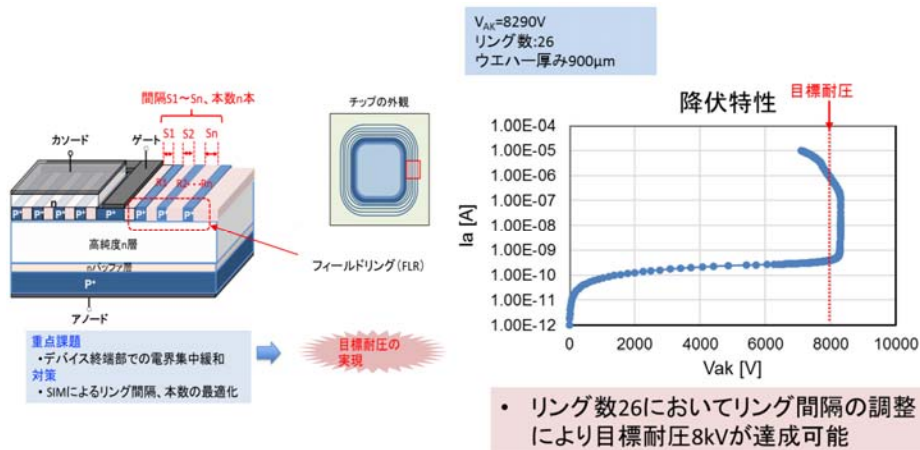
【1-2】アノード p⁺層及びnバッファ層のドーピング濃度の最適化検討



アノード側リンドーズ量は、オン時のホール注入効率の向上、オフ耐圧の維持に関わり、目標性能の高耐圧、高速ターンオン、低損失の実現に大きく影響する。

アノード不純物ドーピングのシミュレーションによる最適化を行い、リンドーズ量が $6 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ で安定的に目標耐圧(8kV)を得ることを確認できた。

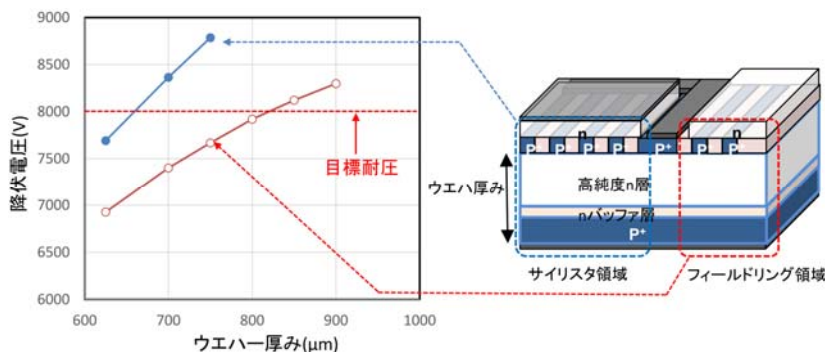
【1-3】埋め込みフィールドリング構造の検討



埋め込み型フィールドリング構造により、デバイス終端部での電界集中を緩和し目標耐圧を実現する。

シミュレーションによりフィールドリング間隔、本数の最適化を行い、リング数26でリング間隔の調整により目標耐圧8kVが達成可能であることを確認できた。

【1-4】ウエハー厚みの最適化検討とデバイス試作



29年度実施の一次試作品の課題を分析し、30年度実施の二次試作で対策を行い、当初の目標値を全てクリアするSiサイリスタの試作に取り組んだ。主な対策は、①層間絶縁膜の成形プロセス、およびボンディング工法を改良し、組立時の耐圧性能劣化を解決。②FLR接合深さ、ゲート長、および各拡散層の厚みを最適化し、一次試作と同じ675μmのウエハーを使いながら、目標の耐圧8kVを実現、の2点である。

その結果、耐電圧7.5kV(*at 6Hz)で特性オン抵抗132mΩcm²、ターンオン性能は2.65kV、3290Aのパルス試験にて450nsのターンオン時間を得た。この結果は当初の目標に達しなかったものの、SiデバイスでありながらSiCの理論限界に迫る画期

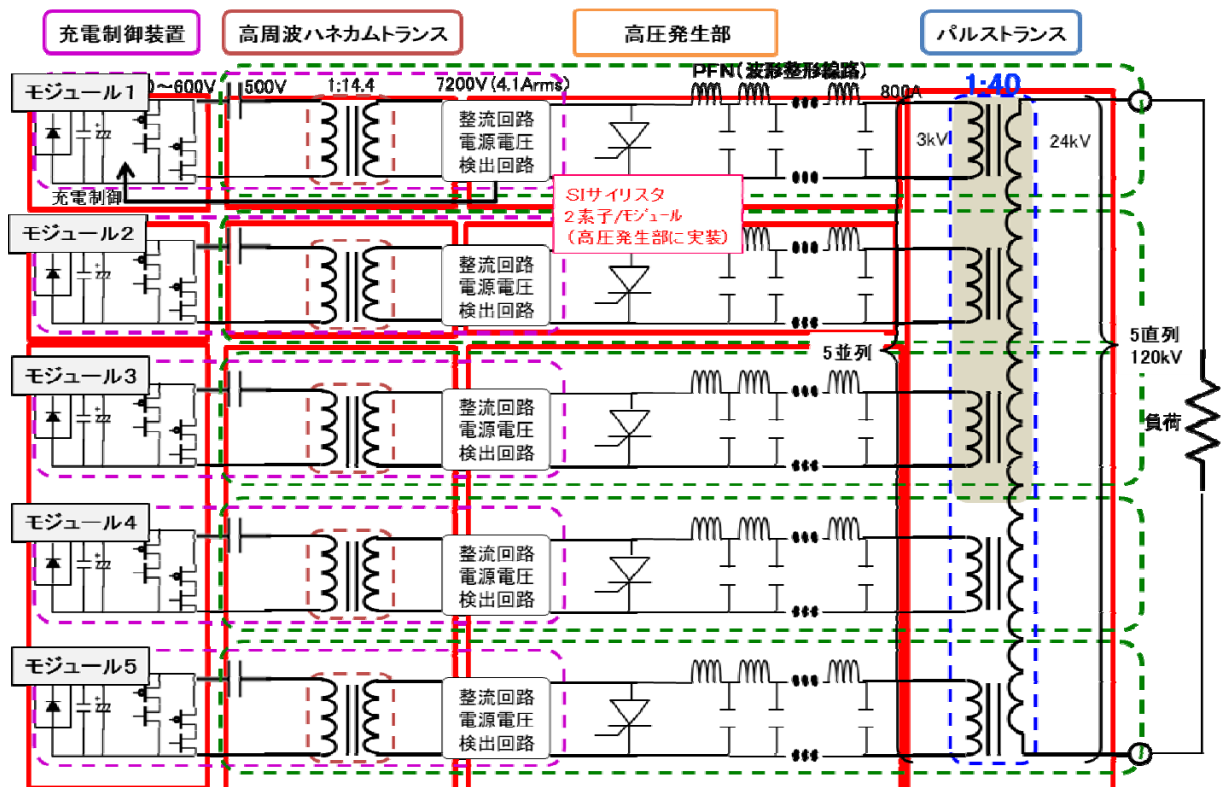
的な性能で有り、1チップにて3000A以上の大電流パルス的高速パルス試験に成功したことは、今後の事業化のための大きな成果といえる。

*：直流電圧の印加では、耐圧性能の劣化がみられ、継続して対策を試みる。

2. 高電圧パルス電源の開発課題への対応

【2-1】パルス回路のモジュール化の検討

- ・開発したパルス電源の構成図を以下に示す。



平成28年度に各2モジュールを試作し、性能評価を行い、平成29年度に設計改善を行ったうえで、全5モジュールを完成した。取組内容の詳細を以下に示す。

① 高電圧パルス電源の開発

高圧発生部5台連結組立

- 1)パルストランスは5モジュールをレールに通して設置。
- 2)パルストランスの構造変更に伴いバイアス用のコイルを別途実装。
- 3)出カスナバ回路の追加実装。



【公開版】

4) 10個の半導体スイッチのうち、1台に試作した
SIサイリスタを実装し、性能検証。



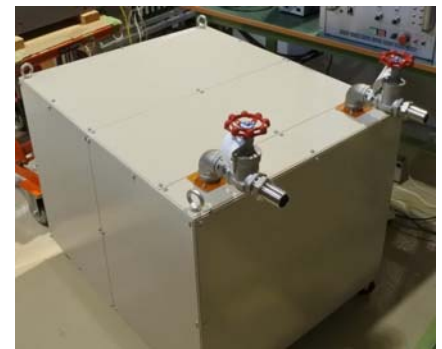
② 充電制御装置の開発

盤内冷却強化、制御応答高速化等の部分的な改良を行い、
5モジュールを完成した。

③ 周辺装置の設計、導入

• 模擬負荷

間接水冷抵抗 (WD-5) 16台を金属筐体内に収納し、
筐体内にて配線、配管を施す。60Ωの水冷抵抗を
16並列接続する。又、結線変更により、
8直列2並列にも変更可能。



• 模擬負荷冷却チラー

上記模擬負荷装置の冷却装置としてチラーを購入した。
インバータの出力が30kW(10kW*3回路)。社内供給可能電力
の制約から1回路ずつ試験実施の場合10kW。チラーの冷却性
能は10kW以上を選定。



【2-2】光ファイバーによる絶縁制御の検討

• SIサイリスタ用ゲート回路の検討 (熊本大学)

光リンクを絶縁油中で長期間使用して特性の変化などが
ないかを評価する。
評価はAVAGO製AFBR1624Z-AFBR2624Z 日立製DC9370を使用する。

(5V、100kHz、Duty30%のパルス)

平成29年11月(57日目以降)より週3日、日中(9:00~17:00)油温を50℃に加熱し
て試験実施。

試験開始から157日間、出力信号に変化が無いことを確認した。

【公開版】

【2-3】油絶縁・冷却による高繰り返し化の検討と高電圧パルス電源の試作

平成28～29年度は、【2-1】の開発において、パルス回路のモジュール化の検討を行った後、5台の電源モジュールを製作し、10kWでの単体試験を行った。その結果、全5台の電源モジュールにおいて、出力電圧3kV、出力電流800A、パルス幅10 μ s、繰り返し1kHzの出力を確認した。更に、5モジュールを連結組立し、高電圧パルス電源部を完成した。

平成30年度は、油タンクの製作、および5電源モジュールを連結動作させると共に異常時には動作停止させる全体制御盤を製作した。発電機を調達し、フル定格：入力150kW・出力120kWの電源単体試験（5モジュールの電圧電流バランス評価、各部の温度上昇測定など）を実施した。その結果、最高出力電圧123kV、最大出力電流103A、パルス幅10.3 μ sの出力を確認した。また、SIサイリスタを使用したシステムでは500Hzでの動作を確認し、MOS-GATEサイリスタを使用したシステムでは1kHzでの動作を確認した。出力安定度については長時間の評価ができなかったが、基本的に半導体を使用したシステムであるため、十分な性能が出せるのと判断している。

・トランスの導入

当社の受電はAC200Vまでしかなく、本開発した高電圧パルス電源は高出力であるためAC420Vの受電が必要だった。これに対応するため、AC200VをAC420Vに昇圧するトランスを導入し、充電制御装置及び高電圧発生部の単体定格試験を実施した。



・スライダックの導入

本開発での高電圧パルス電源の試験の各段階で受電電圧を0VからAC460Vまで変化させて、低い電圧での電源の調整や、受電電圧を変化させた時の出力電圧の変動を見るために、交流電圧を変化させるスライダックが必要であり、これを使用して上記各試験を実施した。



【公開版】

- 油タンクの導入

5台の高電圧発生部を収納し、電気絶縁油を充填することで120kV、100A、10 μ s、1kHzの高電圧パルス発生試験を実施できた。



- 全体制御盤の導入

5台の充電制御装置、5台の高電圧発生部をマイコンにより一括制御し、さらにLANで接続されたパソコンにより操作できるもので、これを使用して、総合運転評価試験を実施した。



- Siサイリスタチップの導入

サブテーマ1における半導体素子の動作シミュレーション、および製造装置を借用して各製造条件のパラメータを決定し、マスク図・工程表を完成した。拡散工場を選定し、1次試作、2次試作を実施した。



- PPSパッケージの導入

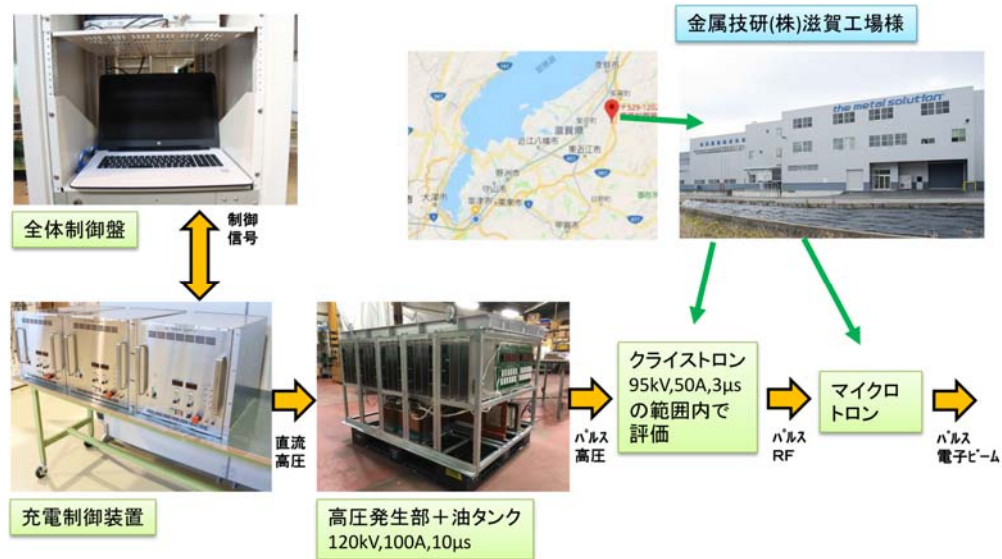
組立工場を選定し、上記チップに対するパッケージングを行った。高電圧・大電流のスイッチング素子であり、ボンディング条件の最適化設計に注力した。完成したデバイスを高圧発生部に実装し、電源モジュールとの組み合わせ試験を実施した。



【2-4】マイクロトロン負荷での実負荷試験

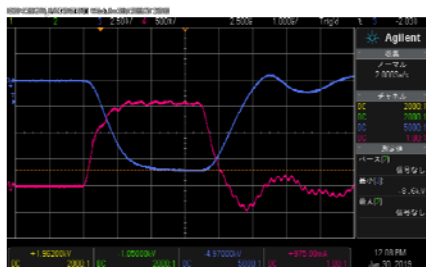
- 金属技研(株)の装置に組み込み評価試験

平成30年度は、金属技研(株)が保有するマイクロトロン加速器施設に開発した電源を仮設置し、実負荷での動作確認を行い、マイクロトロンを負荷として安定に動作することの確認と必要な電子ビームの加速が得られることを確認し、電子ビーム加速用電源としての妥当性を確認した。



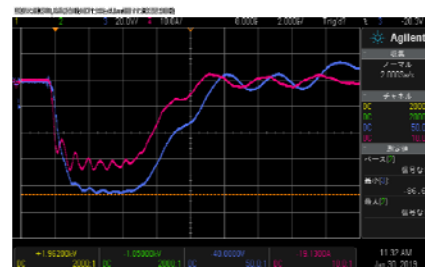
具体的には、金属技研(株)保有のマイクロトロン設備に対し、既設の電源を本開発の電源と置換え、動作試験、評価・検証を実施した。その結果、マイクロトロン駆動用クライストロンに65kVで4.5μsのパルス電圧を印可し、32Aのビーム電流が流れることを確認した。客先のクライストロンの性能限界によりこれ以上の電圧印加は行わなかったが、既設電源と同等の動作をすることを確認した。

金属技研様既設電源での出力電圧、電流波形



青:クライストロン電圧 65kVp
 赤:クライストロン電流 32Ap
 1μs/div
 コンデンサ切り出し方式
 電圧立ち上がり時間:1.1μs
 電圧平坦幅:2.6μs

本開発電源での出力電圧、電流波形



青:クライストロン電圧 65kVp
 赤:クライストロン電流 32Ap
 2μs/div
 PFM 6段(12段中)、2並列(5並列中)
 電圧立ち上がり時間:1.1μs
 電圧平坦幅:4.5μs
 電流の極性は反転して測定

最終章 全体統括

3-1 研究開発総括評価

・SIサイリスタは昨年逝去された西澤先生が発明されたデバイスであるが商品化が難しく、これまでどの半導体メーカーも商品化を断念してきた。こういった経緯の中で、今回の開発で世界最高性能の電圧・電流が得られたことは特筆すべき成果である。

・高電圧パルス電源の開発については、当面は商品化されている MOS サイリスタを複数個使用して耐圧を確保した半導体スイッチでの商品化・販売促進を進め、本開発の8kV耐圧の SI サイリスタが信頼性・歩留りなどを解決し、商品化が実現した時には、これに置き換えていくことで更に、小型化・高信頼化による高電圧パルス電源の商品価値向上を目指していくことになる。

高電圧パルス電源は電子線滅菌用途のほか、非破壊検査、がん治療、加速器応用、排水・排ガス処理、エンジン燃焼促進、レーザー、集塵機など多様な産業応用への水平展開も期待されている。こういった産業応用では、高電圧パルス電源の性能が応用装置の性能に直結しており、高電圧パルス電源の高性能化が日進月歩で要求されている。本プロジェクトで開発した高電圧パルス電源の高性能化と現在開発途上の SI サイリスタの商品化は多くの業界が切望しているものであり、本プロジェクト終了後も、継続して開発を進めていく考えである。

3-2 事業展開にむけて

(1) 想定している具体的なユーザー、マーケット及び市場規模等に対する効果

本プロジェクトの直接のターゲットは電子線滅菌用電源である。それ以外のユーザーとして集塵機、レーザー、加速器、非破壊検査、排水・排ガス処理装置が考えられる。

(2) 事業化見込み（目標となる時期・売上規模）

下記の表の通り、当該パルス電源の生産、販売、売上規模の予測を示す。

製品等の名称		電子線滅菌用高電圧パルス電源				
開発事業者		パルスパワー技術研究所				
想定するサンプル出荷先		金属技研、IHI、三菱重工、海外メーカー（主に中国）				
スケジュール	事業年度	平成 31 年度	平成 32 年度	平成 33 年度	平成 34 年度	平成 35 年度
	サンプルの出荷・評価	●————→				
	追加研究	●————→				
	設備投資	●————→				
	製品等の生産	●————→				
	製品等の販売	●————→				
	特許出願					
	出願公開					
	特許権設定					
	ライセンス付与					
売上見込	売上高（千円）	30,000	40,000	50,000	70,000	100,000
	販売数量	1 台	1 台	1 台	2 台	3 台
	売上高の根拠	代表機種は、初号機は 3000 万円／台で販売開始し、台数の増加と年を追うごとに単価を段階的に 2000 万円まで下げる。コストダウンの設計変更を織り込む。出力により価格的には幅がある。				

(3) 事業化に至るまでの遂行方法や今後のスケジュール

上記(2)に掲載した表に示すような、サンプル出荷、追加研究、設備投資を行い製品生産・販売を行う。

(4) 成果（試作品）の無償譲渡や無償貸与

今年度、金属技研(株)にて実負荷(クライストロン)との組み合わせ試験を実施したが、その後も必要に応じて、評価試験の為に、無償貸与する可能性がある。

以上。