

平成31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

「HiPIMS 対応可能なフレキシブルパルス電源システムの開発」

研究開発成果等報告書

令和2年5月

担当局 東北経済産業局
補助事業者 公益財団法人福島県産業振興センター

目次

第1章 研究開発の概要	2
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	3
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 本論	6
2-1 DC-DCコンバータ	7
2-2 パルス生成回路	9
2-3 異常放電保護回路	11
2-4 システムコントローラ	14
最終章 全体総括	16
3-1 研究開発成果まとめ	16
3-2 研究開発後の課題	18
3-3 事業化展開について	18

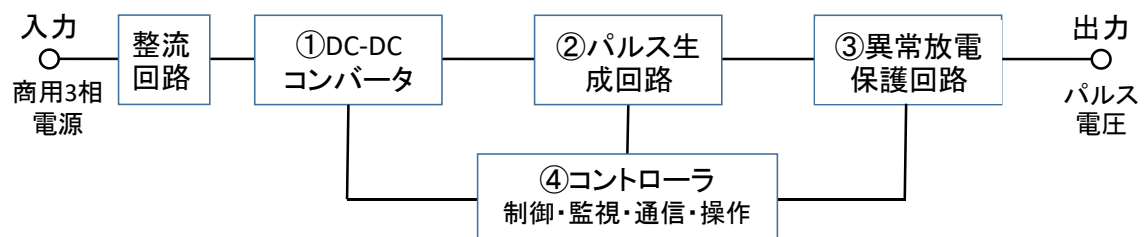
第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車部品等では、ピストンリングやバルブリフターなどの内燃機関部品の低摩擦化ならびに耐摩擦性の向上を目的として、DLC(Diamond Like Carbon)やCrNコーティングの適用が広がっている。最近では、川下自動車部品メーカー等の強い要請から更なる精緻なコーティングが求められており、その実現には従来と異なる成膜方式が求められる。

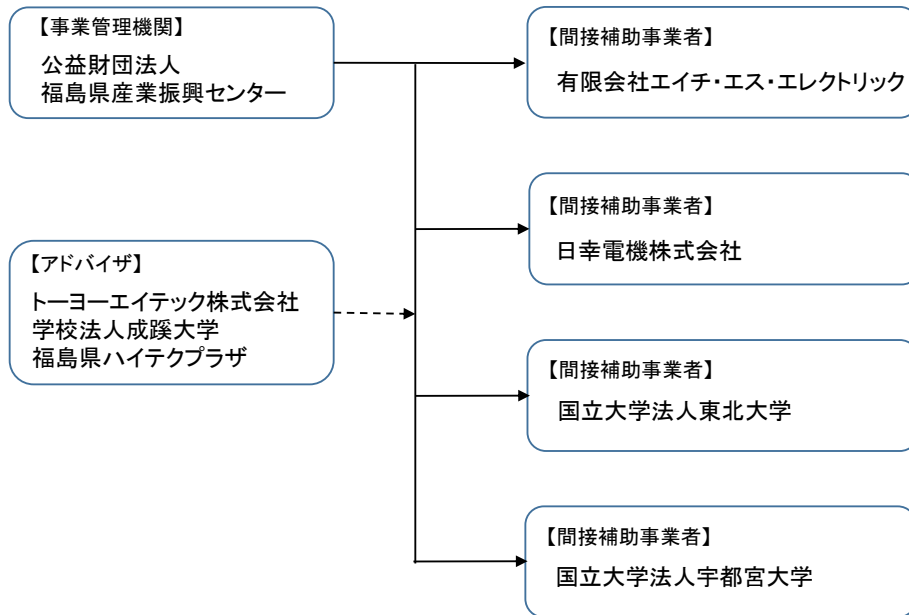
1999年に考案されたHiPIMS法(高出力インパルスマグネトロンスパッタリング法)は、パルスパワー技術を用いて短時間に大電力を投入することによりイオン化率を飛躍的に高める手法で、スパッタリング方式の本来持っている平滑性を維持しながら、これまで欠点とされていたコーティング硬度を改善できるため、成膜性能が格段に向上する手法として研究機関や業界団体などでその有用性が注目されている。しかし、当該手法を確立するには大電力パルスを緻密に制御しなければならず、パルス波形をフレキシブルに設定・変更できるスパッタリング電源が必須になる。しかし、このような電源は未だ市場に投入されていないためHiPIMS法も普及に至っていない。

本研究は、HiPIMS法に適したフレキシブルパルス電源の開発を目的とする。具体的には、下図に示すように、①DC-DCコンバータ、②パルス生成回路、③異常放電保護回路、④コントローラで構成され、出力パルスの周波数、振幅、デューティを自由に制御できる電源を構築する。これにより、要求膜質実現のための成膜条件の抽出や、新しい成膜方法の確立が期待される。



1 - 2 研究体制

研究組織



実施メンバー

	所属	氏名	分担内容
事業管理機関	福島県産業振興センター 技術支援部	加藤 和裕	本事業に係る事務的支援、ならびに事業化支援
		長尾 伸久	
		坪井 一	
間接補助事業者	エイチ・エス・エレクトリック	関本 英雄	プロジェクトリーダー、DC-DCコンバータ及びパルス電源の開発を中心に、研究遂行の全般を担当
	日幸電機	菊地 馨	高効率DC-DCコンバータ用トランス・インダクタの開発
		大庭 孝一	
		渡辺 崇史	
	東北大学	一ノ倉 理	サプリーダ、異常放電保護回路の開発、高効率DC-DCコンバータの開発、プロジェクトリーダーの補助
	宇都宮大学	後藤 博樹	フレキシブルパルス電源システムのコントローラの開発

アドバイザー

機関	氏名	具体的な協力内容
トーヨーエイトック株式会社	岡本 圭司	成膜事業者(川下ユーザー)として試作開発電源の評価試験、及び仕様策定に関するアドバイスをして頂く。
学校法人成蹊大学	中野 武雄	成膜技術の専門家として成膜技術全般のアドバイスをして頂く。
福島県ハイテクプラザ	三瓶 義之	薄膜生成の技術指導をして頂く。

1 - 3 成果概要

フレキシブルパルス電源を構成する4つの要素①DC-DCコンバータ、②パルス生成回路、③異常放電保護回路、④制御装置(コントローラ)の開発を行い、それらを組み合わせてフレキシブルパルス電源システムを構築した。小容量で各種試験向けの α 版フレキシブルパルス電源、大容量で商業生産向けの β 版フレキシブルパルス電源を製作した。 α 版パルス電源は、企業や大学においてプラズマ試験を実施し、良好な評価を得た。以下、個別成果をまとめる。

①のDC-DCコンバータについては、小型軽量化と高効率化のために、SiC-FETとSiCダイオードを使用し、スイッチング周波数85kHzで最高効率95.7%のDC-DCコンバータを開発した。さらにトランスとリアクトルの小型化によって装置容積の30%削減を達成した。本機の定格出力は500V-10A-5kWであり、複数台を直並列で使用できるため、パルス電源の出力に応じて柔軟にシステムを組むことができる。

②のパルス生成回路では、正負の3値パルスを生成可能な回路を考案し、研究開発向けに5kW級のパルス電源(α 版と称する)、生産ライン向けに50kW級のパルス電源(β 版と称する)を開発した。さらに、主パルスのほかに、主パルスと同期したパルスを基板に印加する回路を開発した。これは、スパッタ等での成膜品質の向上に有用な手段である。

③の異常放電保護回路に関しては、約200nsの速度で過電流遮断が可能な双方向スイッチを開発した。さらに、永久磁石と鉄心で構成される限流器を提案し、 α 版および β 版パルス電源に対応できる限流器を開発した。双方向スイッチと限流器を併用すれば、突発的な異常放電に対してもシステムを確実に保護できる。これらの発明について国内特許出願を行った。

④の制御装置の開発においては、低コストでシステムの制御・監視・通信・操作を実現するために、myRIOをベースとしたリアルタイムコントローラを開発するとともに、安価

なシングルボードコンピュータとタッチパネルを用いた操作システムを構築した。さらに、IOT対応を目的として、遠隔操作ソフトウェアを一般的なPCで使用できるように整備し、ユーザ所持のPCにて遠隔操作できるように改良した。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

所属：有限会社エイチ・エス・エレクトリック

氏名：関本英雄

電話&FAX：0241-27-8487

E-mail：hselectric@hse-web.jp

第2章 本論

図1に、本事業で開発を目指すフレキシブルパルス電源システムの構成を示す。商用の交流電圧を整流して得られる直流電圧を方形波インバータで交流に変換し、トランスで昇圧した後に再度整流して高電圧の直流を得る。この直流電圧を半導体スイッチで切り替えることにより、正負のパルス電圧を生成するものである。例えば同図のように、DC1000V、DC500V、DC1500Vの直流電圧に対して、半導体スイッチを適切に切り替えれば+1000V、-500V、および-1500Vの波高値のパルス電圧が得られる。このパルス電圧がスパッタ装置の励磁電圧になる。それぞれのDC-DCコンバータの出力電圧を調整すれば、パルスの波高値を制御できる。また、パルス発生回路のスイッチングのタイミングを変えれば、パルス幅も制御できるので、フレキシブルパルスの生成が可能になる。スパッタ装置で生じるアーキング対策のため、パルス発生回路とスパッタ装置の間に異常放電保護回路を挿入する。同期パルスは成膜品質向上のために印加するものである。図では省略しているが、システム全体の制御・監視・通信・操作用にコントローラを設ける。以下、実施内容ごとに研究内容と成果を記述する。

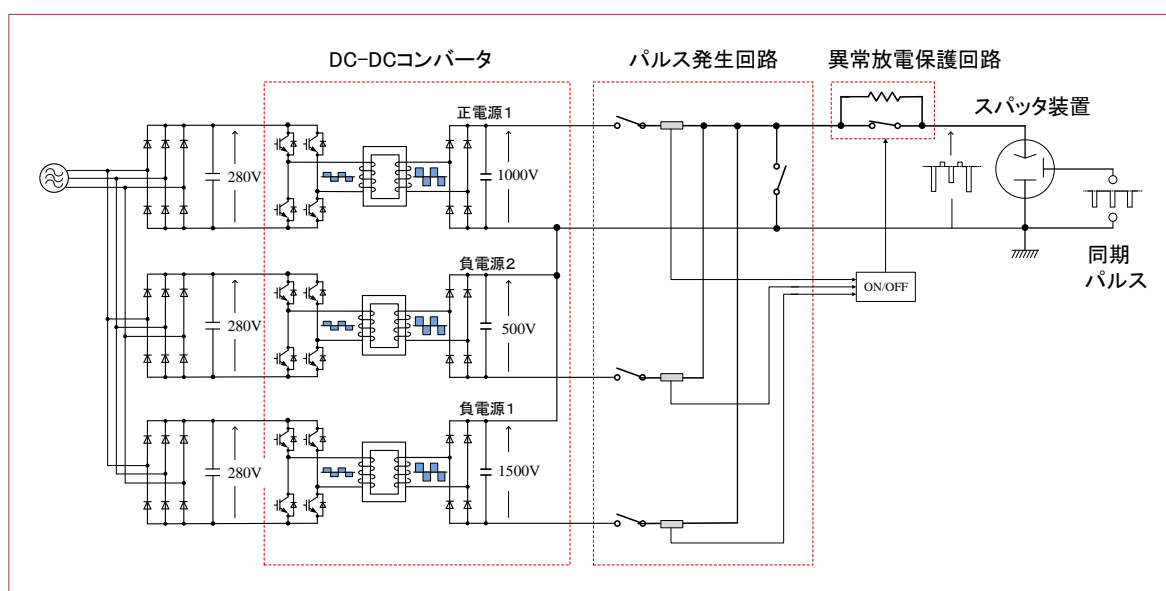


図1 フレキシブルパルス電源システムの全体構成

2-1 DC-DCコンバータ

図2にDC-DCコンバータの基本的な回路構成を示す。商用三相電圧を全波整流して得られる直流電圧（約280V）を方形波インバータで交流に変換し、トランスで昇圧した後に整流・平滑して所望の直流電圧を得る。定格出力は500V-10Aとした。小型軽量化のためにインバータを高周波でスイッチングさせる必要があるので、ここではインバータはSiC-FET、整流回路はSiCダイオードを使用した。

図3(a)に、 α 版パルス電源用に試作したDC-DCコンバータユニットを示す。本コンバータユニットは、モジュール化して β 版用DC-DCコンバータにも適用することを想定し、出力定格を500V/10A/5kWとした。同図(b)に効率の測定結果を示す。定格の10%以上で効率90%以上が得られ、出力4kW時に最高の95.7%に達し、目標値である95%を上回った。

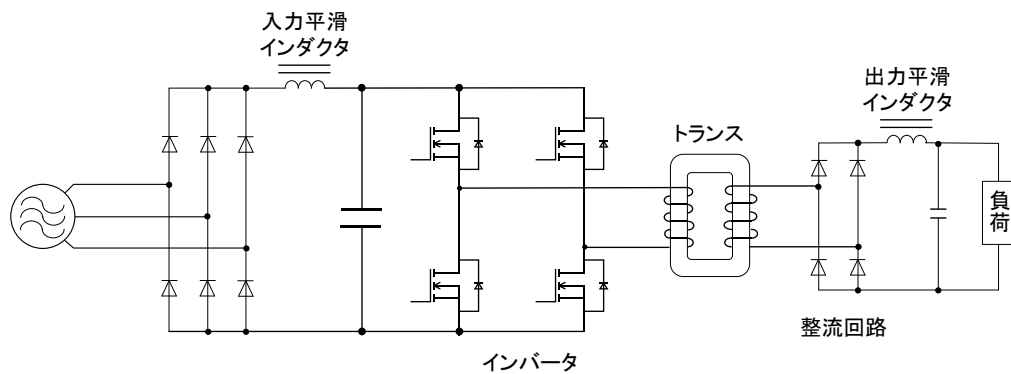
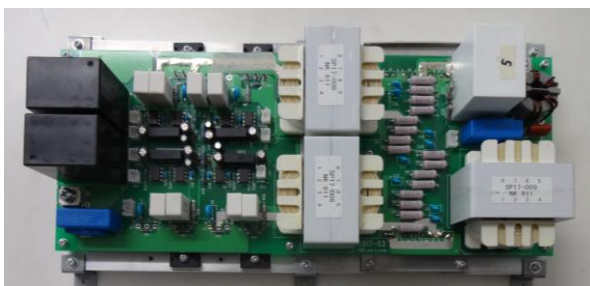
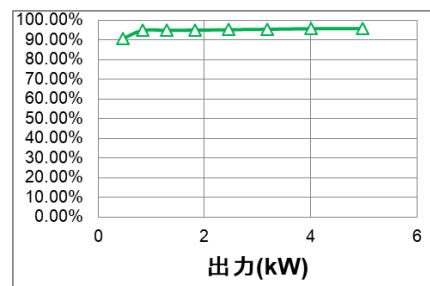


図2 DC-DCコンバータの基本回路



(a) 試作器外観



(b) 効率特性

図3 試作器の外観および効率特性

次いで、DC-DCコンバータの小型化のために、コア材をMB 3材からPC 9 5材に変更したトランス(EI60-3P)を1個使用して、強制空冷を1.5m/sにしたところ、 α 版のトランス(EI60-2P)2個使用した場合と同等の温度上昇に抑えることができ、体積にして-30%の小型化が達成できた。さらなる小型化を目的にトランスのモールドを試みたが、効果は限定的であった。

出力平滑インダクタはリッツ線をまとめて巻く構造なので、図4に示すように、巻線をボビン巻幅に1層毎に分ける構造にして層数を増やせば、断面積を増やせるため冷却に有利になる。これによってコアサイズをEI60-2PからEI-50-2Pに小型化することができ、モールド無しで体積比-38%の小型化を達成した。一方、入力平滑インダクタは、商用三相電源の整流回路とインバータ回路の間に挿入される。珪素鋼板のコア材をエッチング付きに変更し、コイル仕様の見直しを行ったところ、コイル温度とコア温度が同程度になった。これよりコアをCS-125からCS-63に変更が可能になり、体積比にして-32%の小型化を達成することができた。

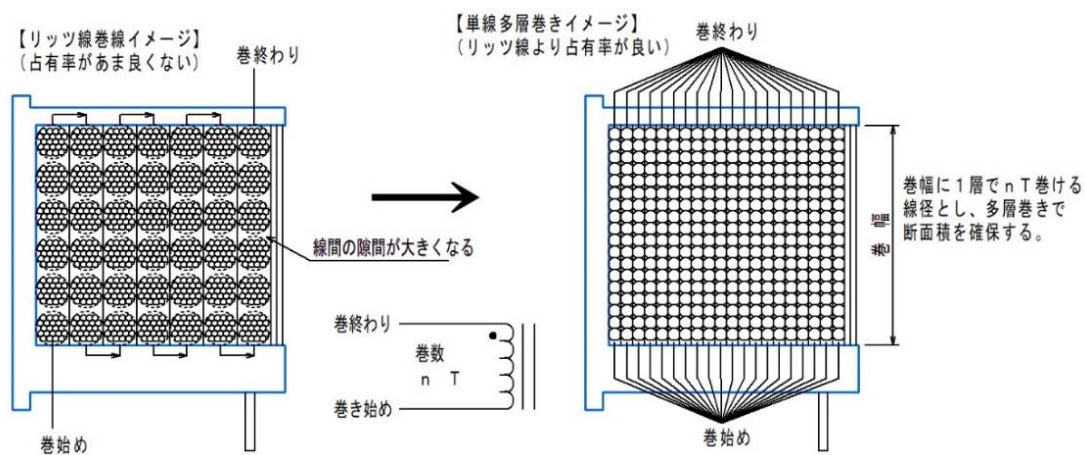


図4 巻線構造の違い

以上の検討結果を基に、 β 版試作機用として小型軽量化を図ったDC-DCコンバータを製作した。図5にその写真を示す。トランスの最適設計をすることにより使用数を1個削減し

たこと、ヒートシンクを薄型化したことにより30%の小型化が達成出来た。変換効率も目標値である96%を達成した。

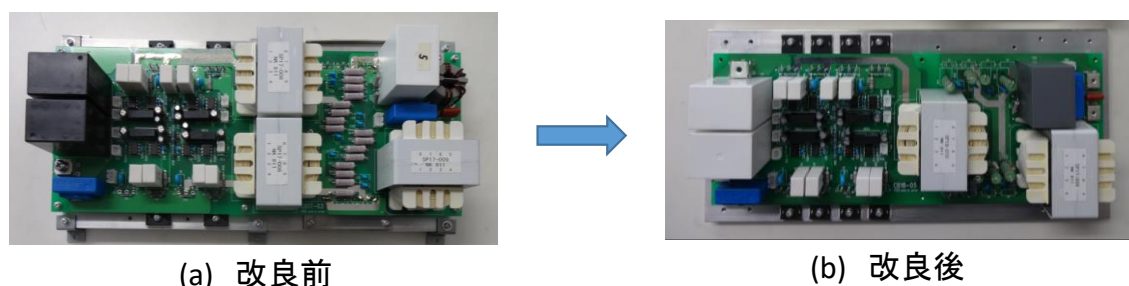


図5 β版パルス電源用DC-DCコンバータユニット

2-2 パルス生成回路

図 6(a)にパルス生成ユニットの基本構成を示す。3 個の DC 電源をパワースイッチ (SW1,SW2,SW3) で切り替えることによって、チャンバーなどの負荷に 3 値のパルス電圧が印加される。SW4 は、負荷への電圧印加を止めたときに、チャンバー内に帯電された電荷を瞬時に放電させるための双方向スイッチである。各パワースイッチは、同図(b)に示すように、IGBT を直並列接続することにより十分な耐圧と電流容量を確保した。同図(c)はパルス生成回路より得られるフレキシブルパルス波形の一例を示したものである。例えばある時刻に SW2 を閉じると $-V_{n1}$ が印加され、SW2 を開き SW4 を閉じると 0V となる。次に、SW4 を開き SW1 を閉じると $+V_{p1}$ が印加される。SW1~SW4 の開閉タイミングと開閉期間、さらに DC 電源電圧の調整によってフレキシブルパルス波形が得られる。

試作したパルス生成ユニット基板の写真を図 7 に示す。HiPIMS 法の特長である瞬時大電力に対応するため、ここではスイッチ構成を 3 直列 3 並列とした。このパルス生成ユニットの動作試験結果を図 8 に示す。今年度の目標である 3 値の電圧値を持つパルス波形が得られている。また、パルス電圧の立上り時間と立下り時間の目標値 1μ 秒以下に対して、実測が約 0.1μ 秒と十分下回っており目標性能を達成出来た。図 9 に製作した DC-DC コンバータユニットとパルス生成ユニットの装置外観を示す。

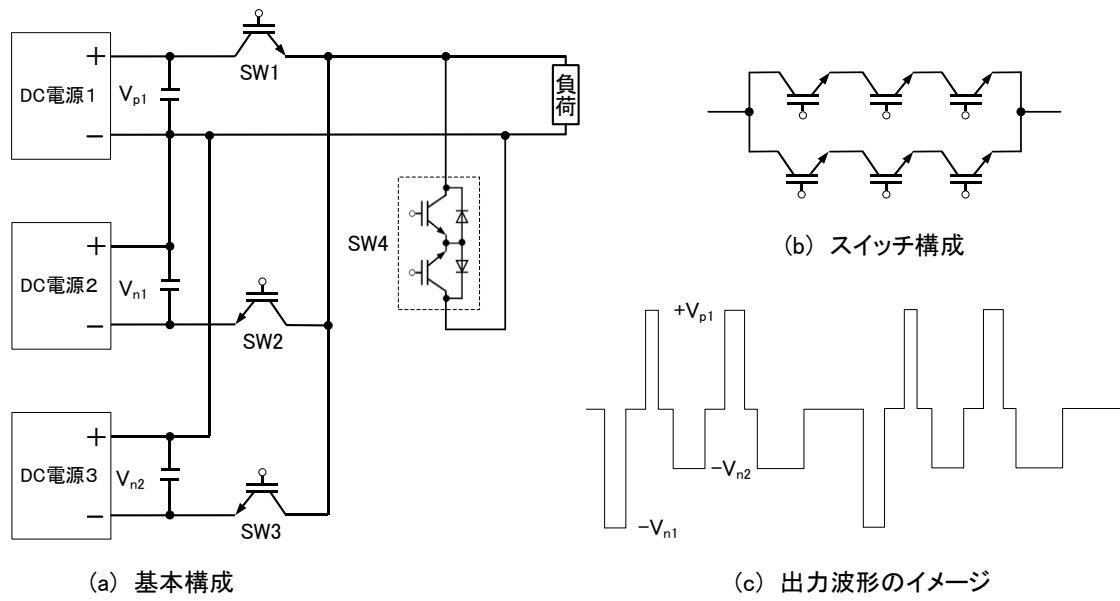
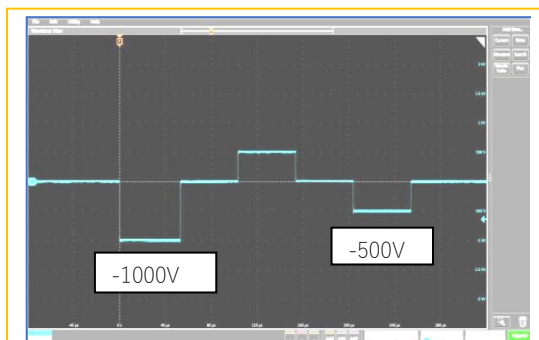


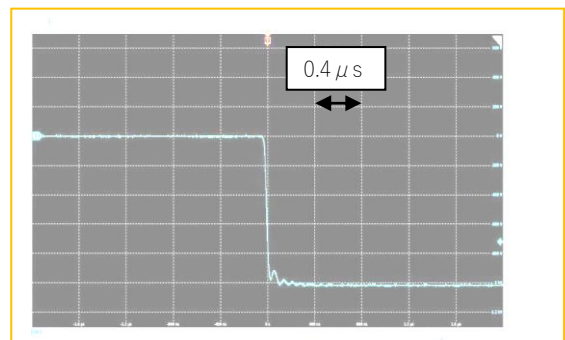
図6 パルス生成ユニット



図7 製作したパルス生成ユニット



(a) 3値のフレキシブルパルス波形



(b) 立下り波形

図8 パルスユニットの評価試験結果



(a) DC-DC コンバータユニット



(b)パルス生成ユニット

図9 装置外観

2-3 異常放電保護回路

スパッタ装置内で異常放電（アーキング現象）が生じると、ターゲット表面の溶融・飛散による成膜品質の低下や、過電流による回路素子の焼損を招く。その対策として本研究では双方向スイッチと限流器による保護装置を開発した。図10(a)に双方向スイッチによる保護回路の基本構成を示す。通常は双方向スイッチがオン状態で、電流は双方向スイッチを流れる。異常放電が生じて過電流になると、双方向スイッチがオフして並列抵抗に電流が流れることによって過電流が制限される。同図(b)に試験結果の一例を示す。製作した双方向スイッチの外観を図11に示す。

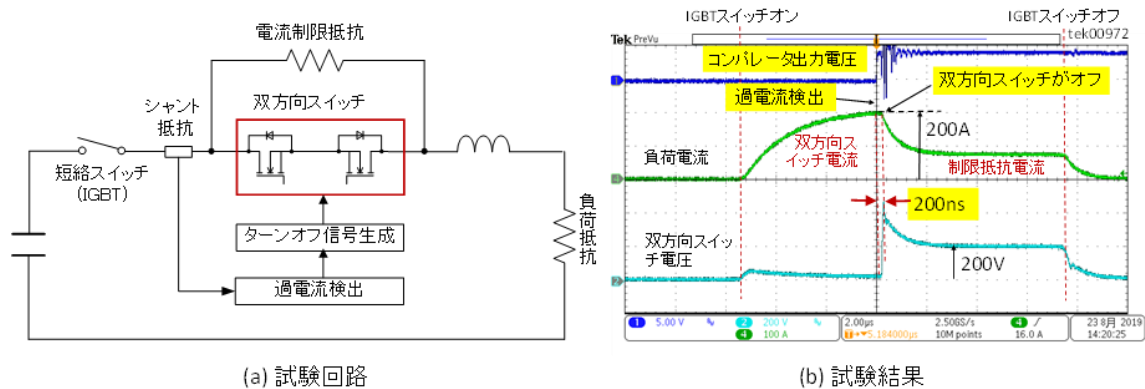


図10 双方向スイッチによる過電流保護回路

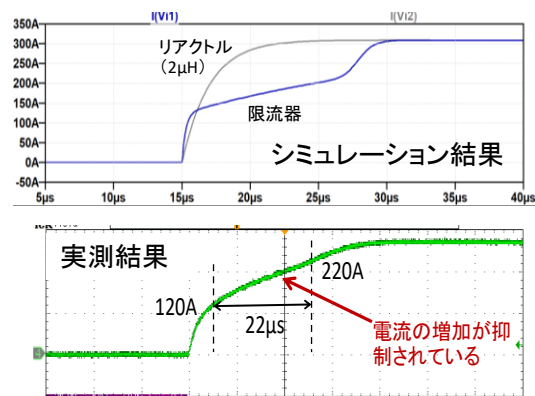


図11 双方向スイッチ外観

さらに、突発的な異常放電にも対応できるように、本研究では限流器を併用することとした。図12(a)は本研究で提案した限流器である。永久磁石と鉄心、および巻線で構成されるシンプルな構造である。鉄心の非線形磁気特性と永久磁石のバイアス効果のため、通常は極めて小さいインダクタンスとして動作しているが、過電流時は高インダクタンス領域に動作点が移動して電流が制限される。同図(b)に限流器にステップ電圧を印加したときの巻線電流の応答波形のシミュレーション並びに実測結果を示す。シミュレーション結果には、通常の線形リアクトルの場合のステップ応答電流も示した。これを見ると、限流器を使用することにより、一定値以上の電流に対して増加が抑制される限流効果が確認される。したがって、双方スイッチに直列に限流器を挿入すれば、双方向スイッチが応答するまでの電流増加を抑制できるため、より確実な異常放電保護が可能になる。



(a) 限流器の外観



(b) ステップ電圧印加時の電流波形

図12 限流器の外観および特性の一例

図13に、試作した限流器と双方向スイッチを組み合わせた異常放電保護回路をパルス電源に適用したときの試験回路を示す。負荷として2個の抵抗を直列接続し、一方の抵抗をIGBTスイッチで短絡することにより異常放電を模擬している。図14に試験結果を示す。ここでパルス電源の出力は、負パルスを-1000Vおよび-500V、正パルスを800V、パルス幅はいずれも $25\mu\text{s}$ とした。同図(a)は正常運転の場合であり、負荷電流はすべて双方向スイッチ側を流れている。同図(b)はIGBTスイッチをオンとして模擬的に異常放電を発生させた場合で、双方向スイッチの電流がゼロになった後は制限抵抗に電流が転流することがわかる。以上より、双方向スイッチと限流器を組み合わせた異常放電保護回路が目標とする動作を行っていることが確認される。

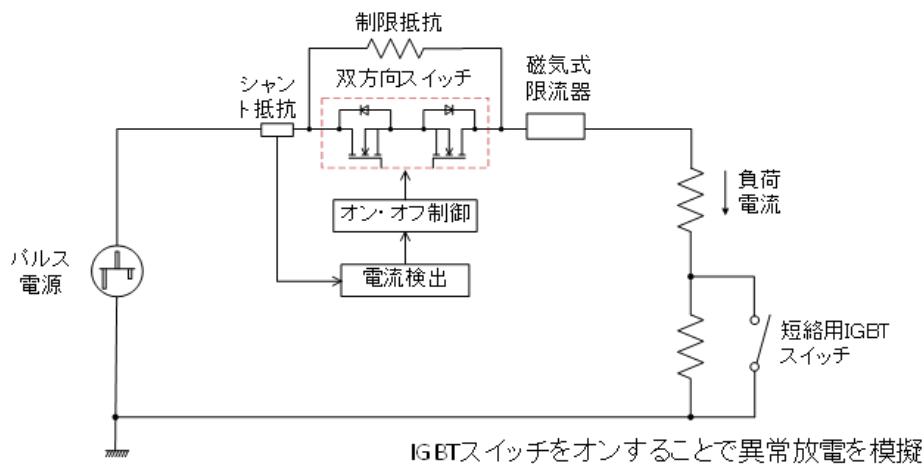


図13 双方向スイッチと限流器を併用した異常放電保護回路

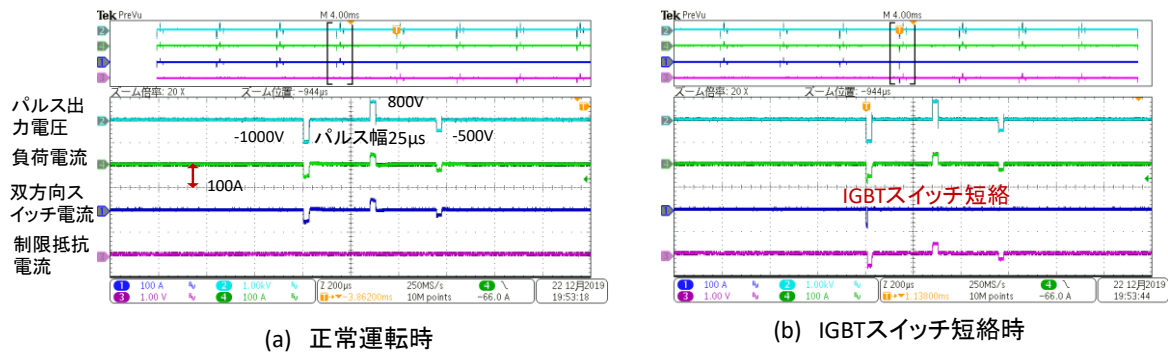


図14 パルス電源への適用結果

2-4 システムコントローラ

図15に制御システムの全体構成を示す。本制御装置ではDC-DCコンバータ、パルス生成回路、および保護回路を構成する半導体スイッチの動作信号（ゲート信号）を供給する。供給されるゲート信号はDC-DCコンバータ各部の電圧・電流および外部PCやタッチパネルにより設定されたフレキシブルパルスパターンやDC-DCコンバータ動作設定（スイッチング周波数など）に基づき、リアルタイムコントローラで適切な動作信号を発生させる。ゲート信号はリアルタイムコントローラ内部のFPGAで生成することで25ns単位の正確な信号の生成を可能とした。

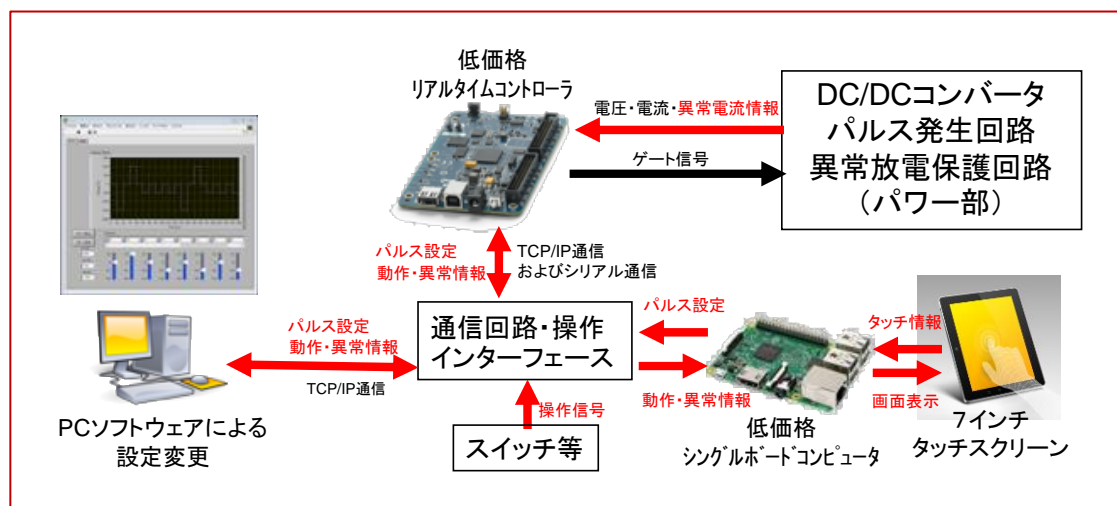


図15 フレキシブルパルス電源システム制御装置の構成

パルス電圧パターンについては、PC用のソフトウェアとタッチパネルインターフェースにより設定できる。図16に開発したPCソフトウェアの表示例を示す。本ソフトウェアでは3つのDC-DCコンバータの電圧設定と発生時間を順番に並べることにより任意のフレキシブルパルスパターンの設定が可能である。なお、設定したパラメータに対応するフレキシブルパルス電圧波形は即座にプレビューされる。図17に、設定されたフレキシブルパルスパターンに基づいて発生したパルス発生回路用のゲート信号波形を示す。

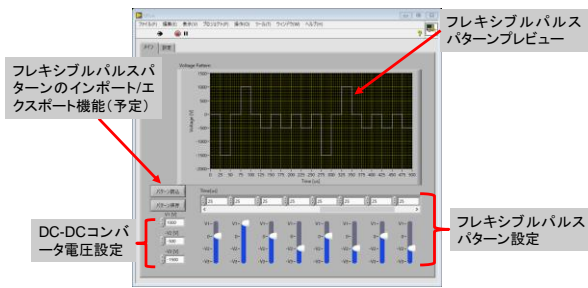


図16 PC用ソフトウェアの画面

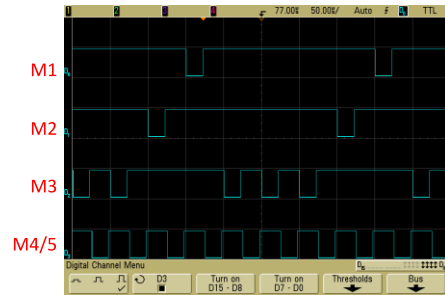


図17 ゲート信号

また、操作インターフェースとしてタッチパネルを用いた操作システムも構築した。図18に、タッチパネル操作インターフェースの画面例を示す。シングルボードコンピュータのOSとしてスマートフォンで採用されるOSと高い親和性があるAndroid thingsを採用したため、ユーザにとっても慣れ親しんだ操作方法を利用できる。

一方、異常電流検出時は DC-DC コンバータおよびパルス発生回路にて検出した電流・電圧値、およびリアルタイムコントローラにて保持している設定情報を一定時間 USB ストレージに保存する。これにより、異常電流発生とそれによる DC-DC コンバータ故障時の原因解析の有力な手段となる異常電流検出直前のデータを記録できるようにした。



図18 タッチパネルインターフェースの表示例

図19に、システムコントローラで制御したときのパルス電源出力波形の一例を示す。これを見ると、(-1500V, +800V, -500V) の3値パルスが得られており、フレキシブルパルス電源として機能していることがわかる。

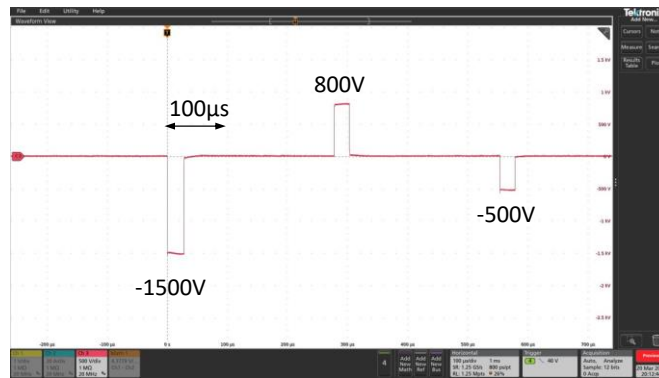


図 19 システムコントローラでパルス電源を制御したときの出力波形の例

最終章 全体総括

3-1 研究開発成果まとめ

以上、高品位成膜技術として近年注目されているHiPIMS法に適用するためのフレキシブルパルス電源の開発を行った。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) フレキシブルパルス発生回路の開発

-1500V, 1000V, -500Vの正負の3値パルスを生成可能な回路を考案し、研究開発向けに5kW級のパルス電源（ α 版と称する）と、生産ライン向けに50kW級のパルス電源（ β 版と称する）を試作した。出力パルス電圧の立ち上がりと立下りの時間はいずれも $0.1\mu\text{s}$ であり、短時間に大電力を投入するHiPIMS法に適した性能であることを確認した。さらに、主パルスのほかに、主パルスと同期したパルスを基板に印加する回路を開発した。これは、スパッタ等での成膜品質の向上に有用な手段になる。

(2) 高効率DC-DCコンバータの開発

フレキシブルパルス発生回路の入力直流電源であり、ここではトランスを使用した絶縁型DC-DCコンバータを採用した。小型軽量化と高効率化のために、SiCトランジスタとSiCダイオードを使用し、スイッチング周波数85kHzで最高効率96%のDC-DCコンバータを開発した。さらにトランスとリアクトルの小型化によって、装置容積30%削減を達成した。

本機の定格出力は500V-10A-5kWであり、複数台を直並列で使用できるため、パルス電源の出力に応じて柔軟にシステムを組むことができる。

(3) 異常放電保護回路の開発

スパッタ装置で生じる異常放電による過電流を制限するために、高速電流遮断器を開発した。これは、半導体デバイスによる双方向スイッチと電流制限抵抗で構成され、電流が正負のいずれの方向でも動作可能である。双方向スイッチには高速性と低損失が要求されるため、近年注目されているSiCトランジスタとSiCダイオードを使用して過電流を検出してから約200nsで遮断が可能であることを確認した。さらに、永久磁石と鉄心で構成される限流器を提案した。双方向スイッチと限流器を併用すれば、突発的な異常放電に対してもシステムを確実に保護できる。これらの発明について国内特許出願を行った。

(4) フレキシブルパルス電源のシステムコントローラの開発

低コストでシステムの制御・監視・通信・操作を実現するために、myRIOをベースとしたリアルタイムコントローラを開発するとともに、安価なシングルボードコンピュータとタッチパネルを用いた操作システムを構築した。さらに、IoT対応を目的として、遠隔操作ソフトウェアを一般的なPCで使用できるように整備し、ユーザ所持のPCにて遠隔操作できるようにした。

(5) 解析・設計手法の確立

本研究では、回路シミュレータの一つであるSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) を活用して、パルス発生回路、DC-DCコンバータ、双方向スイッチ、および限流器の解析モデルを構築した。特に限流器の解析では鉄心の非線形磁気特性を精度よくモデル化する手法を提案した。これらの成果は、フレキシブルパルス電源の特性予測と最適設計、ならびに開発期間の短縮に有用なものである。

3-2 研究開発後の課題

今後の取り組み課題として、以下が挙げられる。

- 川下企業へのPR
- 追加研究（装置の実装技術の改良、設備の低コスト化）

3-3 事業化展開

本研究成果に係わる製品として以下の4点を想定している。

- ① HiPIMS用フレキシブルパルス電源：本研究では実用規模のパルス電源の製作と同期化パルスの開発を行い、最大の特長である3値のパルス波高値が得られること、瞬時大電力を供給出来ることを確認した。また、半導体を用いた双方向性スイッチとその制御回路を開発し、数百nsのオーダーで過電流遮断が可能であることを実証した。小容量の α 版パルス電源については、企業や大学にプラズマ試験を実施していただき、高い評価を得た。以上より、本事業によって、成膜品質の良好なHiPIMS用フレキシブルパルス電源の実用化が加速されるものと期待する。
- ② フレキシブルパルス電源：上記の研究成果をもって事業化を行い、競合他社製品に対して国産化、コストパフォーマンスの良さ、アフターケアの充実をモットーに売上アップを図る。
- ③ ジュール制御スパッタリング電源：ハードディスク製造用スパッタリング電源にジュール制御機能を付加したもので、前項④の制御装置の成果を基に事業化したい。
- ④ 陽極酸化用パルス電源：本研究成果を従来製品に適用することにより、高性能且つ価格競争力のある陽極酸化用パルス電源の製品化が可能となる。

以上