

技術紹介

トランジスタ式プラズマ設備における 大気圧プラズマ着火

新井 亮*

Atmospheric Pressure Plasma Ignition in Transistor Plasma Facility

Akira Arai

当社既存のトランジスタ式電源は金属熱処理以外にも、プラズマ発生装置用の電源としても使用されている。今回、客先より真空管式電源からトランジスタ式電源への入れ替え依頼を受けた。客先仕様により、大気圧下にてプラズマ着火させる必要があった。トランジスタ式電源でのプラズマ着火は、大気圧下であること、周波数が低いことからプラズマ着火は困難と予想された。大気圧下かつ低い周波数でプラズマ着火させるため、トーチ形状の検討や、トランジスタ式電源の負荷回路の見直しを行い、大気圧着火に成功した。最後に、大気圧着火後の加工テストを実施したところ、製品化に向けた課題も見つかった。

Our transistor power supply is used not only for metal heat treatment, but also for plasma generators. This time, we received a customer's request to switch from a vacuum tube power supply to a transistor power supply for a plasma generator. According to customer specifications, it was necessary to ignite the plasma under atmospheric pressure. Plasma ignition with a transistor power source was anticipated to be difficult because it is under atmospheric pressure and the frequency is low. To ignite the plasma at a low frequency under atmospheric pressure, we studied the shape of the torch and reviewed the load circuit of the transistor power supply, and generated plasma under atmospheric pressure. Finally, we conducted a processing test after atmospheric pressure ignition and found some issues for commercialization.

1. はじめに

当社既存プラズマ設備と客先設備の違いについて説明する。高周波電源を入れ替えるにあたり、一番の問題はプラズマ着火方法であった。

当社既存プラズマ設備の場合、上部のトーチと呼ばれるガラス管の内部でプラズマを生成する(写真1)。トーチ構造を図1に示す。中央のガラス管内は真空引きできる構造となっており、着火の際は 10^2Pa 程度の真空度とすることで、トーチ内部に電離しやすい状態を作ることができる。トランジスタ式電源を使用し、コイルに400kHz程度の高周波電流を流すことでグロー放電が発生し、そこへアルゴンガスを投入することで容易に熱プラズマへと移行

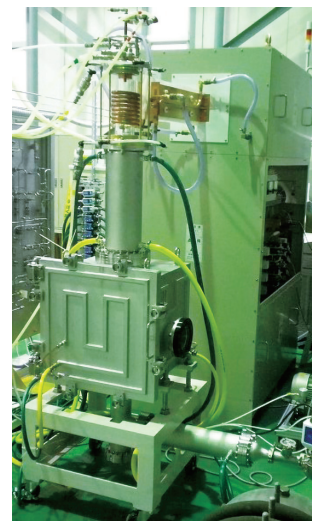


写真1 当社従来プラズマ機

* 高周波統括部 開発部

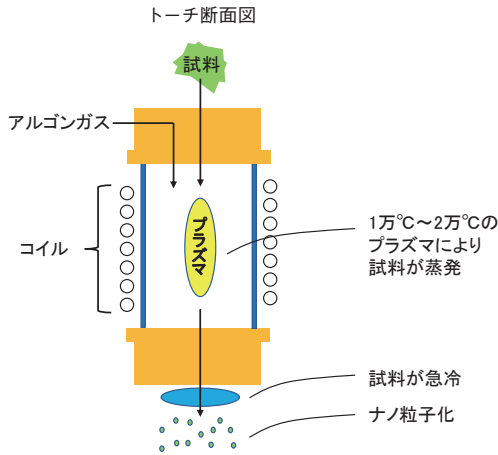


図1 トーチ構造

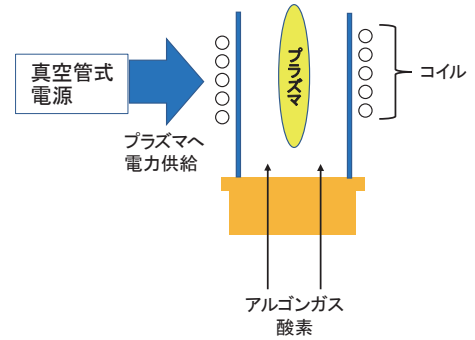


図2 客先プラズマ設備

非常に困難な環境でのプラズマ着火が今回の課題となる。

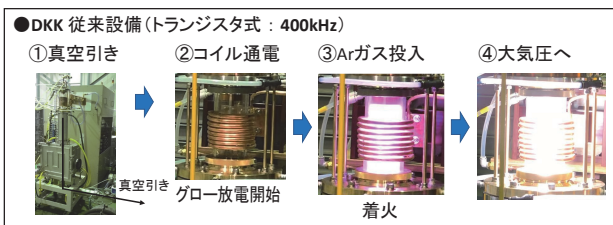


写真2 当社既存プラズマ設備着火手順

その後、アルゴンガスの投入を継続することで徐々にトーチ内圧を上げ、大気圧プラズマとなる(写真2)。このように発生させた熱プラズマは約1万℃～2万℃の高温であるため、上から投入された試料は瞬時に蒸発し、トーチ下部で急冷され、ナノ粒子化される。このようなナノ粒子をはじめ、様々な分野で当社既存の従来プラズマ装置は使用されている。

対する客先現行設備を図2に示す。ガラス管内でプラズマを発生させる点では、当社既存プラズマ設備と同様であるが、アルゴンガスを下から投入しトーチ上面は開放されているという点では異なる。着火の際は、アルゴンガスをトーチに投入しつつ、コイルに通電することでトーチ内の電極からアーク放電が発生する。その状態を数秒維持すると着火させることができる。真空管式電源を使用することで、トランジスタ式電源よりも高い高周波電流を発生させることができるため、トーチを真空引きすることなく熱プラズマへの移行が可能となっている。

今回は客先現行設備と同様の構造をしたトーチを使用し、トランジスタ式電源の限界である400kHz程度の高周波電流にて、熱プラズマの着火が求められた。すなわち、大気圧下かつ400kHz程度という

2. 大気圧着火テスト

2.1 トーチ径の検討

最初のテストとして、客先現行トーチと当社既存トランジスタ式電源を組み合わせ、プラズマ着火を試みたところ、アーク放電は発生するが、着火には至らないという結果であった。そこでトーチの径について検討した。下記の式はうず電流の浸透深さを表しており、高い周波数であるほど電流が表面のみを流れるという表皮効果現象を表している。

$$p = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad [m]$$

ここで μ [H/m]は透磁率、 ρ [Ω m]は電気抵抗率、 f [Hz]は周波数である。

アルゴンガスの抵抗率は1000 [μ Ω /m]、周波数は400[kHz]を適用し、うず電流の浸透深さは25mmと計算される。トーチ中心部でうず電流が干渉し合わない程度の、十分なトーチ径が必要であること。また、必要以上にトーチ径が大きい場合、うず電流密度の低下により着火が不利になることなどを考慮すると、トーチ内径は約110mmが適当と予想した(表1)。

表1 トーチ径の推定

	Arガス抵抗率 ρ ($\mu\Omega \cdot m$)	周波数 f (kHz)	浸透深さ p (mm)	プラズマ直径 D (mm)	トーチ内径 (mm)
トランジスタ方式	1,000	400	25	88	110

2.2 負荷回路の検討

実際に内径 110mm のトーチを製作しテストを実施した。その結果、コイルターン間やリードでの異常放電が多く発生した。これはコイル径を拡大させたことと、トーチ内に安定した磁束を発生させるため多ターンコイルを使用したことで、コイル付近が高電圧になることが原因と推察された。アーク放電が発生するコイル電圧は 7500V 以上であり、コイルターン間等にて異常放電が発生しないコイル電圧は 12000V 以下であることがわかった。この電圧範囲内にて、最も電流を流すことができる 10 ターンコイルを選定した。

また、トランス、コンデンサ、コイルから成る負荷回路を検討することで、コイル電圧の抑制を図った(図 3)。通常、コイルに高周波電圧を印加した際に、抵抗となる成分インダクタンスが弊害となり、コイルに高周波電流を流すことができない。そのインダクタンスを打ち消すため、コイルと直列にコンデンサが設置され、その後トランスにより電圧電流バランスが調整される構造となっていることが、高周波設備として一般的である。トランジスタ式電源出力後の、これらトランス、コンデンサ、コイルから成る回路を負荷回路と呼ぶ。図 3 において、当初はコイルに対し片側にコンデンサ 1 のみ設置することで回路を構成していたが、コイルを挟み両サイド

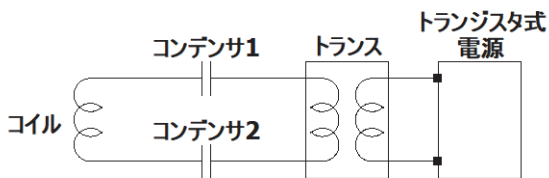


図 3 コンデンサ配置回路図

にコンデンサ 1、コンデンサ 2 に分けてコンデンサを設置する構造とした(写真 3)。これにより、当初は図 4 左のようにコイル上部が 0V 電位、下部が 12000V 電位となるところ、右図のようにコイル中央を 0V 電位にし、コイル上下に電圧を分散し、電圧を抑制した。

2.3 アルゴンガス放出防止の検討

トーチの上にフタを設置して着火を試みたところ、安定した着火が可能となることが判明した(写真 4)。これは標準状態のアルゴンと空気ではアルゴンの方が重いから、トーチ内に滞留し漏れ出ることはないが、トーチ内でアーク放電を継続させるとアルゴンガスは熱せられ、160℃に達するとアルゴンは空気よりも軽くなる性質がある。そのため、このフタにより放出が防がれ、安定した着火が可能となると推察される。以上のような検討と実験の末、400kHz のトランジスタ式電源を使用し、安定した大気圧プラズマ着火が可能となる。

2.4 サンプル加工テスト

プラズマを使用して、サンプル加工テストを実施した。サンプル加工に入る前に、アルゴンガスに酸素を加えるとともに、より電力を投入し火炎を大きくする。この状態で、プラズマ直上にガラス棒を設

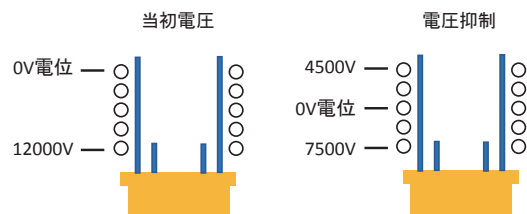


図 4 コイル電位の調整

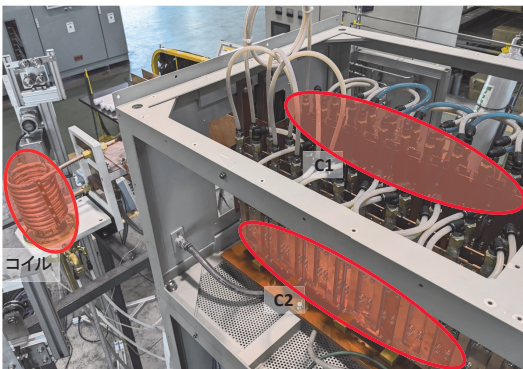


写真 3 コンデンサの配置位置

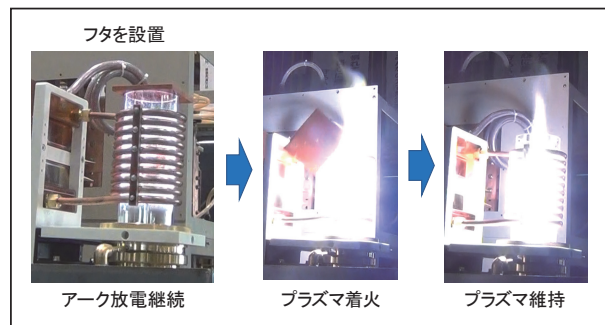


写真 4 フタ付きの状態での着火

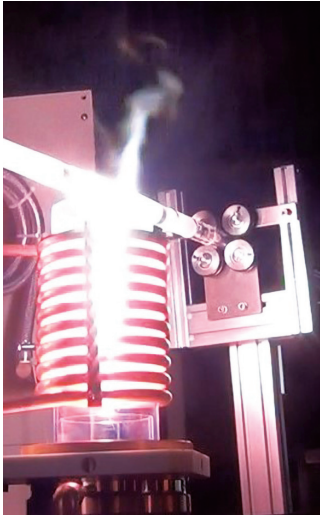


写真5 サンプル加工の様子



写真6 サンプル加工結果

置し変化を見る(写真5)。結果、30秒程度で透明化が始まり、50秒で完全に透明化させることに成功した(写真6)。しかし、今回の実験結果は、客先現行機と比べ透明化に要する時間や幅にも違いがあることがわかった。ガラスの透明化はできたことから、プラズマの温度帯は現行真空管式と同程度の温度であると思われるが、トーチ径を変更したことで、プラズマも大きくなり、プラズマのエネルギー密度が低下したと思われる。

3. むすび

400kHz程度のトランジスタ式高周波電源を使用し、大気圧下でのプラズマ安定着火に成功した。400kHz程度であれば、トーチ内径Φ110mmのトーチが着火しやすく、周波数に対してプラズマ着火に最適なトーチ径が存在することが推測された。また、

コイルにはなるべく多くの電流を流した方が着火には有利であるが、それに伴いコイル電圧も上昇するため、コイル形状やインバータの出力電力には制限が発生する。その制限内で最適なコイル形状を決める必要がある。また、プラズマ着火の前段階であるアーク放電の状態を一定時間続け、アルゴンガスを温める時間がプラズマ着火には必要と思われる。そのため、トーチにフタを設置し、アルゴンガスを滞留させる必要があることが分かった。これらのノウハウについては特許を申請中である。

今後の課題について、トーチ径を細くするもしくは、出力を上げるなどしてプラズマ火炎を細く高密度にする検証を実施する。次に、プラズマを安定的に着火させるためにフタを設置して実験を実施したが、製品化を見据えフタの自動開閉機構を検討する必要がある。最後に、プラズマが維持している間、客先現行機ではほぼ無音であるのに対し、今回の実験で使用したトーチからは大きな音が発せられていた。トーチ形状を変更するなどして、音の原因を追究し、軽減する必要がある。

4. 営業担当窓口

本製品に関するお問い合わせは、下記にて承ります。

〒100-0005

東京都千代田区丸の内三丁目3番1号 新東京ビル
電気興業株式会社 営業統括部 高周波営業部
TEL : 03-3216-9433 FAX : 03-3216-1669

☆☆



新井 亮

平成23年入社
高周波統括部 開発部
高周波誘導加熱装置の研究・開発に従事