

研究ノート

4-in-1 PEN-Jet における内部電極放電電流の個別制御

豊橋技術科学大学

志岐 肇、齋藤春樹

桶真一郎、須田善行

滝川浩史

新東ブレーター

薄木英二

大研化学工業

大川 隆、山中重宣

栗田製作所

西村芳実、菱田茂二

Individual Control of Discharge Current of Inner Electrodes
in 4-in-1 PEN-JetHajime SHIKI, Haruki SAITO, Shinichiro OKE, Yoshiyuki SUDA, Hirofumi TAKIKAWA,
Eiji USUKI*, Takashi OKAWA**, Shigenobu YAMANAKA**, Yoshimi NISHIMURA***,
Shigeji HISHIDA***

Toyohashi University of Technology, *Sintobrotor Ltd., **Daiken Chemical Co., Ltd.,

***Kurita Seisakusho Co., Ltd.

Abstract

4-in-1 PEN-Jet (Plasma ENergized Jet) is a pulsed arc plasma jet with 4-inner electrodes in a body and a common nozzle electrode, generated at atmospheric pressure and jetted to open atmosphere. It sometimes has a problem that one of the inner electrodes is seriously eroded due to over-heating. In the present study, in order to suppress the over-heating of the inner electrode, a control system of individual discharge current passing through each inner electrode was developed with individual variable inductances connecting to the discharge circuits in series. It was found that as increasing the inductance, the arc current decreased. The red-hot condition was successfully disappeared by increasing the inductance.

Keywords: Atmospheric pressure plasma, 4-in-1 PEN-Jet, Discharge current control, Variable inductance.

1. はじめに

大気圧プラズマは、表面処理、ガス改質、環境汚染物質の分解など多岐の分野にわたり実用化が期待されている¹⁻²⁾。

筆者らは動作ガスに安価な空気を用いることができる大気圧パルスアーク放電を用いた2種類のプラズマ発生装置、すなわちグラディングアーク³⁻⁵⁾とPEN-Jet (Plasma ENergized Jet)⁶⁻⁷⁾とを開発してきている。また、1台の電源で複数のパルスアーク放電の発生を可能にしたマル

チ化回路技術を開発している⁸⁾。更に、このマルチ化回路技術をPEN-Jetに応用して、内部電極を4個持ち、4個のパルスアーク放電を同時に発生させ、生成プラズマをひとつのノズル電極から噴射するプラズマジェット、『4-in-1 PEN-Jet』を開発した⁹⁻¹⁰⁾。4-in-1 PEN-Jetは、内部電極が1本のPEN-Jetに比べ、4倍の電力を投入でき、その結果、表面処理効果が飛躍的に向上した。

しかしながら、4-in-1 PEN-Jetに比較的大きな

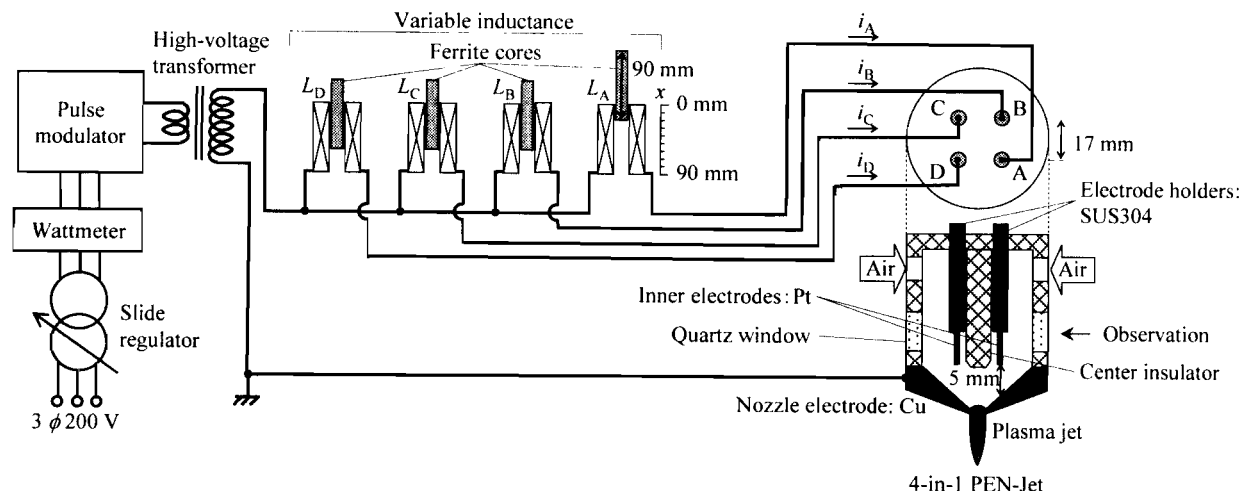


Fig.1. Schematic diagram of the 4-in-1 PEN-Jet system with variable inductances connecting to inner electrodes.

電力を入力した場合、4本の内部電極うち、どれか1本が赤熱し、他の電極より損耗が激しくなるという問題があった。その原因は、内部電極とノズル電極との距離・位置関係、電気回路定数、および冷却効率(ガス流による対流冷却、電極ホルダを通じた熱伝導冷却)などが4本の内部電極に対し全く同一になるように調節・調整するのが困難であるからであると判断している。例えば、内部電極とノズル電極の位置関係の調整は極めて微妙で、面倒な手間がかかり、同じように調整できたように見えても、赤熱が抑制できないことが多かった。また、電極ホルダを水冷してみたが、やはり赤熱を抑制することができなかった。

以上のような背景から、本研究では、電気的な解決策を練ることとし、各内部電極の放電電流を個別に調整することによって、赤熱を防止することを試みた。放電電流を制御するには、可変抵抗、可変キャパシタンス、または可変インダクタンスを内部電極と直列または並列に接続すればよいと考えられる。ある内部電極が赤熱した場合、その内部電極に接続されている電気回路素子の値を調整し、放電電流を調整するという発想である。しかし、可変抵抗の場合、抵抗損失が増加するため実用的でなく、可変コンデンサの場合、耐高電圧仕様のものは高価でかつ入手困難であるという問題がある。そこで、

本研究では可変インダクタンスを用いた制御法について検討した。

2. 実験

Fig.1に4-in-1 PEN-Jetの概略を示す。絶縁円筒内に4本の内部電極(白金(Pt)、直径:1.6 mm)を図のように配置した。電源は、スライドレギュレータ(松永製作所製、S3-2413: 5.2 kVA、200 V)、パルスモジュレータ(栗田製作所、6 kW、200 V)、および高電圧トランス(栗田製作所、6 kW、250/12 kV)で構成した。プラズマへの入力電力はパルスモジュレータへの入力電力とし、クランプ電力計(Hioki製、3166: クランプ電流プローブ(Hioki製、9694))を用いて計測した。

4-in-1 PEN-Jetでは、4個のアーク放電を発生させるため、高電圧トランスの出力を4分岐し、個別のインダクタンスを介して内部電極に接続している⁹⁻¹⁰⁾。本研究では、このインダクタンスに可変インダクタンスを用いた。可変インダクタンスは、コイル(20 mH、20 Ω)と円筒形可動フェライトコアとを用いて試作した。コイル内のフェライトコアの挿入深さを調整することで、インダクタンスを任意にかつ連続的に変化させることができる。

4-in-1 PEN-Jetへの動作ガスの供給は次のようにして行った。室内空気をドライヤ付きスク

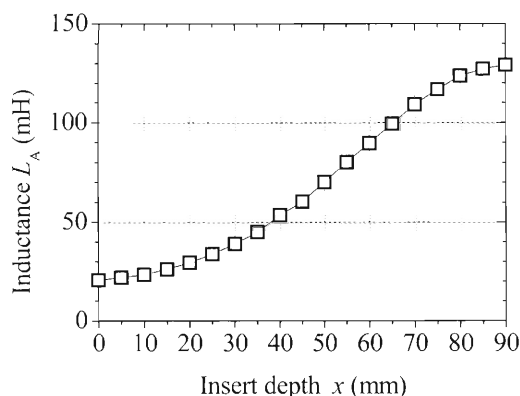


Fig.2. Inductance as a function of insert depth of ferrite core x .

ロール型コンプレッサ (Hitachi, PSD5.5A) でリザーバタンク (Hitachi, ST150C) に貯め、その貯留空気を、圧力レギュレータ、デジタル流量計 (Horiba Stec, SEF-21A)、および流量調整用ニードルバルブを介して 4-in-1 PEN-Jet へ供給した。

今回の実験では、4-in-1 PEN-Jet への投入電力: 500 W、パルス周波数: 30 kHz、パルス幅: 2.0 μ s: 空気流量: 90 l/min 一定とした。

3. 実験結果

まず、試作した可変インダクタンス (Fig.1 の L_A) のフェライトコアの挿入深さに対するインダクタンスの変化を、LCR メータ (カスタム、ELC-113A) を用いて測定した。その結果を **Fig.2** に示す。フェライトコアを挿入すると、インダクタンスが増加し、20~130 mH の間でインダクタンスを変化させることができた。 $L_B \sim L_D$ に関しても同様の特性であった。なお、内部電極 A は、赤熱する頻度が高い電極である。

次に、4 個の可変インダクタンスのうち 1 個を変化させた場合、各内部電極の放電電流がどのように変化するかを調べた。 $L_B \sim L_D = 30$ mH 一定とし、 $L_A = 20 \sim 60$ mH と変化させた。その結果を **Fig.3** に示す。同図から、 L_A が増加するに従い、 i_A は減少することがわかる。 i_A は、 $L_A = 20 \sim 32$ mH では $i_B \sim i_D$ より大きいかほぼ同じであったが、 $L_A = 34$ mH 以上では $i_B \sim i_D$ より小さくな

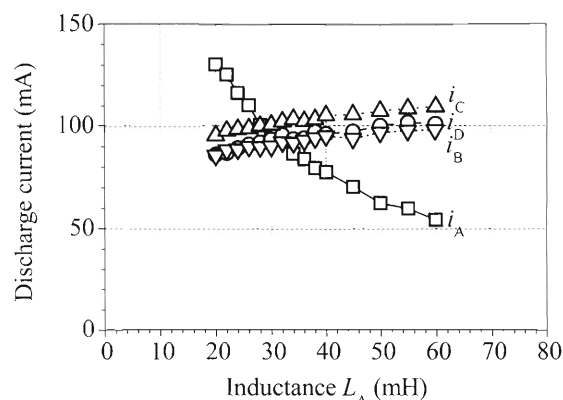
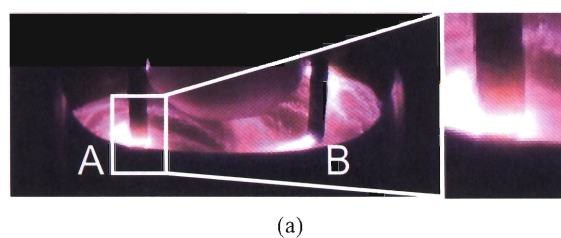
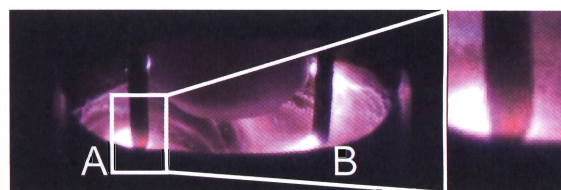


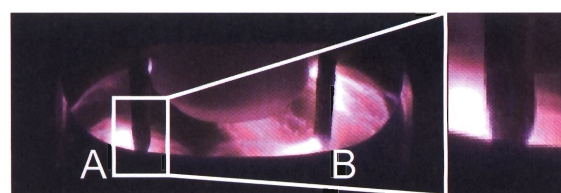
Fig.3. Discharge currents of inner electrodes. (Power supply: 500 W, 30 kHz, 2.0 μ s, L_{B-D} : 30 mH)



(a)



(b)



(c)

Fig.4. Photograph of pulse arc discharge at inner electrodes A and B. (a) $L_A = 20$ mH, (b) $L_A = 30$ mH and (c) $L_A = 40$ mH. (Power supply: 500 W, 30 kHz, 2.0 μ s, L_{B-D} : 30 mH)

った。一方、 L_A が増加するに従い、 $i_B \sim i_D$ が若干増加しているが、これは、 i_A の減少に伴って入力電力が減少したため、実験条件として入力 500 W 一定となるようにしたためである。

Fig.4 に放電中の内部電極 A の様子 (左図中左電極; 左図中の右は内部電極 B) を示す。 $L_A = 20$ mH では、内部電極 A が激しく赤熱している。 $L_A = 30$ mH では、 i_A は $i_B \sim i_D$ 電流よりほぼ同じかやや低いにもかかわらず、内部電極 A は

内部電極 B より赤熱しているのがわかる。 L_A をさらに増加させたところ、内部電極 A の赤熱は徐々に弱くなり、 $L_A = 40$ mH では、他の電極と比べて見た目ではほとんど差はなくなった。更に L_A を増加させると、 $L_A = 60$ mH で内部電極 A 以外の内部電極が赤熱し始めた。これは、内部電極 A 以外の放電電流が大きくなりすぎたためであると判断できる。

4. まとめ

4-in-1 PEN-Jet の内部電極の赤熱と赤熱による損耗を防ぐため、電極と直列に接続したインダクタンスの値を変化させ、内部電極に流れる放電電流を個別に制御する方法を考案した。具体的には、コイルと可動フェライトコアで構成した可変インダクタンスを用い、赤熱している内部電極の回路インダクタンスを増加させたところ、その内部電極の放電電流を減少させることができ、赤熱を抑制することができた。

本研究で考案した放電電流の個別制御法は、一台のパルス電源を用いて複数のグライディングアークや PEN-Jet を発生する場合にも利用できる。例えば、電極やガス流路の幾何学的調整などが不十分な場合でも、複数のプラズマジェットを均一に発生させたり、逆に、別々の回路条件を意図的に設定し、出力の異なるプラズマジェットを複数同時に発生させたりすることが可能となる。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム「インテリジェントセンシングのフロンティア」、豊橋技術科学大学未来技術流動研究センター重点研究プロジェクト、ベンチャービジネスラボラトリプロジェクト研究、未来ビークルリサーチセンタープロジェクト研究、独立行政法人日本学術振興会の拠点大学交流事業（日韓協力事業「次世代半導体開発」、および日中協力事業「プラズマおよび核融合」）などの支

援を受けて行われた。

References

- 1) C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, P. Leprince: Atmospheric pressure plasmas: A review, *Spectrochimica Acta Part B*, **Vol.61** (2006) pp.2-30.
- 2) A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, J. van der Mullen: Gas discharge plasmas and their applications, *Spectrochimica Acta Part B*, **Vol.57** (2002) pp.609-658.
- 3) A. Czemichowski: Gliding arc. Applications to engineering and environment control, *Pure and Applied Chemistry*, **Vol.66 No.6** (1994) pp.1301-1310.
- 4) A. Fridman, S. Nester, L. A. Kennedy, A. Saveliev, O. Mutaf-Yardimci: Gliding arc gas discharge, *Progress in Energy and Combustion Science*, **Vol.25** (1999) pp.211-231.
- 5) H. Shiki, J. Motoki, Y. Ito, H. Takikawa, T. Ootsuka, T. Okawa, S. Yamanaka, E. Usuki, Y. Nishimura, S. Hishida, T. Sakakibara: Development of split gliding arc for surface treatment of conductive material, *Thin Solid Films*, **Vol.516** (2008) pp.3684-3689.
- 6) J. Toshifuji, T. Katsumata, H. Takikawa, T. Sakakibara, I. Shimizu: Cold-plasma jet under atmospheric pressure for surface modification, *Surface and Coating Technology*, **Vol.171** (2003) pp.302-306.
- 7) H. Shiki, J. Motoki, H. Takikawa, T. Sakakibara, Y. Nishimura, S. Hishida, T. Okawa, T. Ootsuka: Electrode erosion in pulsed air-arc meso-plasma jet under atmosphere, *Transactions on the Institute of Electrical Engineers of Japan A*, **Vol.127 No.10** (2007) pp.567-573. (in Japanese).
- 8) H. Shiki, J. Motoki, H. Takikawa, G. C. Xu, T. Sakakibara, Y. Nishimura, S. Hishida, T. Nishi, T. Okawa: Pluralization technique of gliding arc plasma, *J. Institute of Applied Plasma Science*, **Vol.12** (2004) pp.41-46 (in Japanese).
- 9) H. Shiki, J. Motoki, Y. Ito, H. Takikawa, E. Usuki, T. Ootsuka, T. Okawa, S. Yamanaka, T. Sakakibara: Development of atmospheric-pressure plasma-jet with multi-inner-electrodes, *J. Institute of Applied Plasma Science*, **Vol.15 No.1** (2007) pp.23-28 (in Japanese).
- 10) H. Shiki, Y. Ito, H. Takikawa, E. Usuki, T. Okawa, S. Yamanaka, Y. Nishimura, S. Hishida: Fundamental properties of 4-in-1 Plasma ENergized-Jet at atmospheric pressure, *Vacuum*. (in press).