

直流電源を用いた安定なコロナプラズマの発生

Generation of Stable Corona Plasma with DC Power Supply Source

佐藤 康宏

Yasuhiro SATO

Key Words: NO_x Control Technology, Non-thermal plasma, Corona discharge

1. はじめに

産業活動などによって排出される環境汚染物質の被害が近年問題になっている。とくに化石燃料やディーゼルエンジンなどから排出される窒素酸化物 (NO_x) や硫黄酸化物 (SO_x) による被害が深刻になっている。現在はこれらの排ガスの無害化処理には化学的プロセスによる方法が用いられる事が多く、これらにより排煙状態は大幅に改善されている。しかし設備が大型になること、処理プロセスが複雑になることなどの欠点も多い。一方、簡便な方法として放電プラズマのエネルギーを用いて排ガスを無害化処理する方式の可能性についての研究が行われているが、反応の物理についてはまだ十分に解明されているとはいえず、基礎研究の段階にある。

本研究室では、NO_x の無害化処理など高速電子や各種活性ガスを有効に利用することを念頭においたコロナ生成に関する研究を行っているが、新しい工夫による安定かつ強力なコロナ生成方式を開発したので報告する。

2. コロナ研究の必要性について

先鋭な形状をもつ電極に絶縁破壊に達しない電圧を印加した場合、先鋭端側電極近傍に局所的な高電界が作られて部分的な絶縁破壊を起こし、微弱な発光と可聴音を生じるが、それが全体に及んでいない状態がコロナ放電である[1]。コロナ放電は、不平等電界が避けられない高電圧条件下では重要な現象であり、高電圧送電線系統では無視できない電力の損失を生じたり、絶縁物の表面に絶縁劣化を生じたり、通信系統に対して妨害を与えるなど、様々の障害を引き起こす要因となっている。

一方、コロナ放電はガス温度が常温でありながら電子温度が数万度に達するような熱的に非平衡なプラズマ (コロナプラズマという) の生成に適しており、その活性的な性質から、電気集塵、オゾン生成、空気清浄、殺菌などへの応用分野が広がっている[2]。最近では特に、従来の化学的方法に比べて、簡便で経済性にも優れた方式になりうる可能性を持っていることから、コロナプラズマを窒素酸化物 (NO_x) や揮発性有機化合物などの環境汚染物質を無害化処理する手段として使用する基礎的研究が行われている[3, 4]。

窒素酸化物を含むガス中でコロナ放電を行った場合、コロナプラズマ中の高速電子が窒素分子や水蒸気分子と衝突解離することにより、N原子やOHなどのラジカル (活性分子) を生成し、これがNO_xと反応する。このとき、NO_xの酸化反応と還元反応の両方が考えられる。酸化反応の場合は、NO₂、HNO₃、HNO₂などが生成されるが、生成されたNO₂にアンモニア (NH₃) を添加して硝酸 (NH₄NO₃) として回収したり、HNO₃、HNO₂を吸着・中和反応により除去するなどの2次的処理が必要である。一方、還元反応の場合はNO_xが直接分解されて最終生成物のほとんどがN₂、O₂となるので、2次的処理を行わずに除去処分が可能になる。さらに、イオンを加熱しないので、コロナプラズマ生成のためのエネルギーは少なく済む。したがってコロナプラズマを用いた還元反応が主体となる動作条件を明らかにすれば、2次的処理が不要で簡便かつ効率の良い処理システムの構築が可能になる。そのためには、コロナプラズマの生成や安定な維持条件などの諸特性を明らかにすることが重要である。

コロナ放電の生成条件としては、高温で活性な電子とほぼ常温の原子又は分子からなる非平衡プラズマを安定で効率良く、かつ出来るだけ大量に作るようにすることが望ましい。エネルギー効率の点からみると、電極へ電圧が印加されて数10~100ナノ秒でほとんどの電子が加熱されると考えられるので、印加

電圧の1回あたりのパルス幅としてそれ以上は必要でないことになる。また、直流コロナは抵抗が大きいので大きな電流が得られないが、パルスまたは高周波コロナの場合は、等価的に抵抗回路を小さくできるので電流値を大きく取ることが出来る。そのため、高周波コロナを生成するシステムとして半導体素子を用いて100~200ナノ秒のパルス電圧を繰り返し(数10~1000Hz)印加して目的とするパルスコロナを生成することが行われる[5]。しかしながら半導体スイッチを用いる方法は、トリガ回路や保護回路が必要になるなど、システムが複雑かつ高価になる。

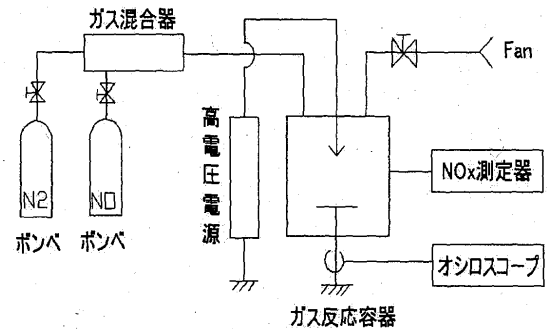


図1 実験装置のシステム構成

3. 新しい回路方式について

従来のコロナプラズマ生成方式に関しては、文献[6]などに詳述されているので参照されたい。コロナ放電を安定に持続するためには、尖鋭端側電極近傍のガスが部分的に絶縁破壊される電界を印加するとともに、①平板側電極近傍の電界がガスの絶縁破壊電圧を超えないようにすること、②印加電圧が絶縁破壊電圧を超えても印加電圧のパルス幅がアークの進展時間以内に収まるように制御すること、または、③電極間に絶縁物を挟むかキャパシタを電極と直列に挿入することによって物理的にコロナ電流がアークに進展しないようにすること、などの方法がある。

①は一般的な針-平板電極において直流電圧を印加して直流コロナを得る方法であり、最も単純な方法である。ただし、安定なコロナ放電を維持するには、針電極付近の電界がガスの破壊強度よりも大きく、かつ全路破壊に至らないように電極間電圧を制御する必要がある[7]。

電極間に絶縁破壊を超えるような過電圧が印加されても、アーク電流が電極間を進展する前に電圧を下れば絶縁破壊に至らないので、②の方法が採用される場合がある。一般的にストリーマの進展速度は $10^5 \sim 10^6 \text{ m/s}$ といわれている[8]。従って、現在我々が行っている実験システムで考えると、電極間隔が30mm程度なので、電圧パルス幅が30~300nsを越えなければ絶縁破壊に至ることはないと考えられる。またパルスの電圧印加方式だと、重いイオンを加速しないで電子だけを選択的に加速するので、エネルギー利用効率が改善されるという利点がある。しかしながら、急峻な立ち上がりの高周波パルス電圧を制御しながら発生させる必要があるため、スイッチなどの設備費が高価にならざるを得ない欠点がある。

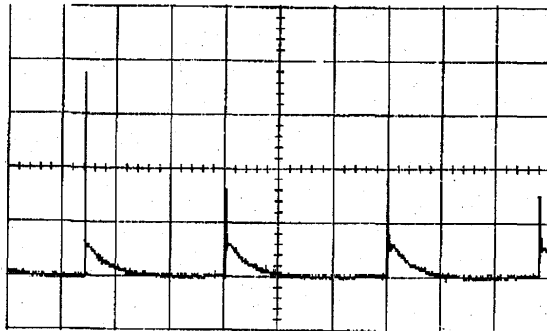
③の方法はバリア放電(または無声放電)といい、交流電源を用いて簡便に安定なコロナ放電を大きな面積で持続させることが可能である。すなわち放電によって運ばれてきた電荷が誘

電体バリアまたはキャパシタに蓄えられるとそこで放電電流が切れる。蓄積された電荷が再結合して消えると再度放電が開始される、と言う繰り返しでコロナ放電が持続する。

我々は、コロナプラズマの基礎的特性を求めめるために、針-平板電極と直流電源を用いた①の方法によるコロナ生成の実験を行っていた。図1に実験装置の概略を示す。密閉されたガス反応容器中に針-平板構造の電極があり、電極間に40kVまでの直流電圧を印加できるようになっている。そして電極部付近に生成したコロナと模擬排ガスを反応させて還元無害化を図る。あるとき平板側電極をアース回路に接続せずに実験を行ったところ、今までになく安定で強力なコロナプラズマの生成が確認された。このとき反応容器の足(平板電極側電位)と接地された実験台(金属製で表面に薄い絶縁膜)の間にコロナ放電が生じていた。この時測定したコロナ電流波形を図2に示す。図からわかるように、電流はパルスのように流れており、パルスの繰り返しはほぼ一定の周期であった。また、パルスの周期は印加電圧の上昇とともに短くなっているが、パルス電流のピーク値はほぼ一定であった。以上の現象をみると、電極間に絶縁破壊される前に電極間電圧とコロナ電流が抑えられるように回路機能が働いていると考えられる。

このときに生じていた現象を図3に示す等価回路を用いて以下に説明する。反応容器足と実験台間の薄い絶縁シートは、ある電圧までは絶縁性を保つが、閾値(V_{bd})を越えると絶縁シートの微細な穴を通じて絶縁が破壊される機能(ツェナーダイオードまたはバリスタと同等の機能)を有していると考えられる。したがって足部と実験台間の構造的な静電容量(C_{ex})とツェナーダイオード(ZD)が並列に接続された回路構成になっている。回路電流がほとんど流れていないときは、反応容器への印加電圧が、電極間の構造的キャパシタンス(C_{e1})と C_{ex} で分圧される。しかし足部電位が V_{bd} を超えるとシートの絶縁が破られて、両キャパシタンスによって分圧されていた足部電

(a) 電源電圧=20kVの場合



(b) 電源電圧=30kVの場合

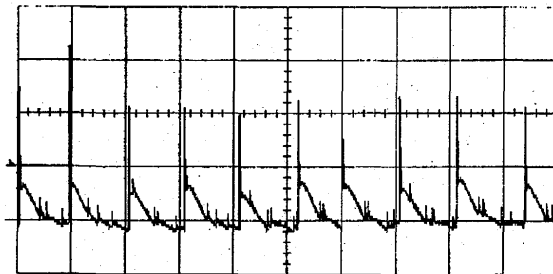


図2 実験装置におけるコロナ電流の測定値
縦軸:1mA/div, 横軸:1ms/div

位がほぼ接地電位になる。そのため電極間電圧が電源電圧近くまで上昇し、コロナ発生電圧を超えると電極間にコロナが生じるとともにコロナ電流が流れ始める。一方、 C_{ex} の蓄積電荷が放電されるとシートの絶縁性は回復されるため、ふたたび足部電位は上昇を始め、回路電流はほとんど流れなくなる。この繰り返しによって、パルス的にコロナ電流が流れるため、絶縁破壊に至ることはない。

以上の仮定を確認するために、回路電流の変化を過渡現象解析用プログラムATP[9]を用いて計算した。本プログラムは電力系統における定常現象および過渡現象などの解析用に、米国のエネルギー省ボンネビル電力局において開発されたEMTP (Electro-Magnetic Transient Program) のパソコン版で、広く世界に公開されている。一般的な電気回路または電気回路で表現できるすべての現象に対して計算が可能となっている。

おもな回路パラメータとして、電極部と足部のキャパシタンス C_{e1} と C_{ex} は、実測値に近い 200 pF および 50 pF を用いた。 V_{bd} は絶縁シート厚によって変わるが、気中破壊電圧である約 3 kV/mm を採用すると、我々の場合 0.5 mm の絶縁シ-

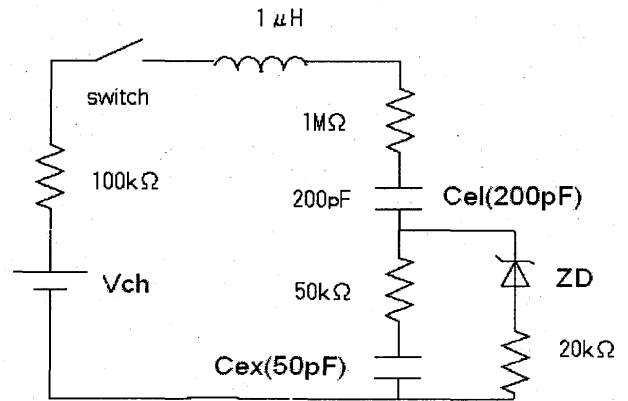


図3 コロナ放電用電源システムの等価回路

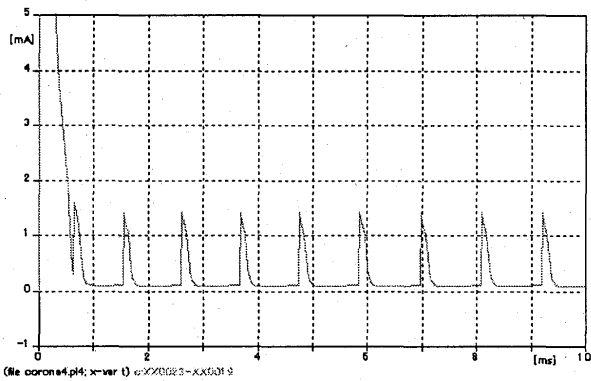
トを用いているので、最初は $V_{bd} \sim 1.5 \text{ kV}$ を用いた。また電源電圧 (V_{ch}) などの動作条件は図2を測定した時と同様にした。

回路電流の計算結果を図4に示す。電源電圧を 20 kV とし、 V_{bd} が 1.5 kV の場合 (図4a)、始動時は過渡的な電流が流れているが、定常状態に落ち着くと、ほぼ 0.9 ms の周期でピーク値 1.4 mA のパルス電流が流れている。しかしパルスの周期が実験値よりも小さいため、 $V_{bd} = 2.5 \text{ kV}$ として再計算したところ、電流ピーク値が 2.3 mA に増えるとともに、周期は 2.5 ms になって、実測に近い値になった (図4b)。実測データでパルス幅や電流ピーク値にばらつきがあるのは、パルス毎の V_{bd} が少しずつ変化しているからであろう。電源電圧を 30 kV にした場合 (図4c)、パルスの周期は短くなっているが、ピーク値は 2.3 mA で変わらず、実験結果との整合性を損なっていない。

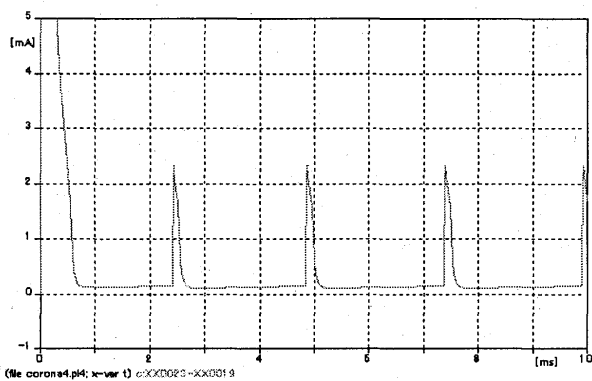
4. まとめ

NO_x の無害化処理など高速電子や各種活性ガスを有効に利用することを念頭においたコロナ生成に関する研究を行っているが、新しい工夫による安定かつ強力なコロナ生成方式を開発した。本方式は簡便な針-平板電極と直流電源を用いたコロナ生成装置に穴のあいた絶縁シートを追加することにより、安定で強力なパルスコロナ放電の生成を可能にした。またこの時の動作メカニズムについて推定したが、この推定による等価回路をもとに過渡現象解析ソフトウェアを用いて計算した回路電流波形が実験結果と良く一致し、推定の妥当性が確認できた。

(a) $V_{bd}=1500V$ の場合



(b) $V_{bd}=2500V$ の場合



(c) 同上, ただし電源電圧=30kV の場合

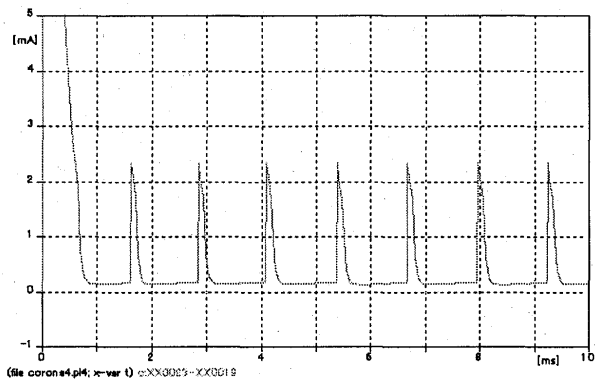


図4 実験条件におけるコロナ電流の計算結果

縦軸: 1mA/div、横軸: 1ms/div

5. 参考文献:

- [1] 室岡:「コロナ放電」コロナ社 (1989)
- [2] 菅井:「プラズマエレクトロニクス」オーム社 (2001)
- [3] 「放電プラズマの環境改善への応用」, 電気学会技術報告第 810号(2000)
- [4] 稲葉, 岩尾;「熱プラズマによる有害気体処理」, 電学誌, 123 巻, 2号, pp. 85-88(2003)
- [5] 藤原, 谷本, 遠藤, 天野, 春日:「窒素原子注入法による排煙脱硝に関する研究」, 環境保全研究成果報告書(2001)
- [6] 佐藤:「負極性コロナの特性評価」, 都立工業高等専門学校研究報告第40号(2004)pp63-67
- [7] 今西, 鷲見, 京兼:「改定 高電圧工学」コロナ社 (2003)
- [8] N. L. Allen, A. Ghaffar: J. Phys. D: Appl. Phys. 28(1995)331
- [9] 雨谷, 長岡, 馬場, 菅:「EMTP入門」電気学会 (2003)