



講座 大気圧プラズマを点けてみよう

3. 大気圧プラズマを準備しよう

野崎智洋, 高木浩一¹⁾, 浪平隆男²⁾, 北野勝久³⁾, 金 載浩⁴⁾, 野村信福⁵⁾,
市川紀充⁶⁾, 富田 一⁶⁾, 林 信哉⁷⁾, 岩尾 徹⁸⁾
東京工業大学, ¹⁾岩手大学, ²⁾熊本大学, ³⁾大阪大学, ⁴⁾産業技術総合研究所, ⁵⁾愛媛大学,
⁶⁾労働安全衛生総合研究所, ⁷⁾佐賀大学, ⁸⁾武蔵工業大学

(原稿受付: 2007年10月10日)

近年のプラズマ生成技術の飛躍的な向上によって, 大気圧以上の高密度媒体で形成される反応性プラズマ, いわゆる”大気圧プラズマ”が大きな注目を集めるようになり, 基礎から応用にいたる様々な研究が学際横断的に行われている。本講座では, 代表的な大気圧プラズマとして, コロナ放電, 誘電体バリア放電, パルスアーク放電, 大気圧グロー放電, 液中プラズマを取り上げ, 学部・大学院生などの初学者を対象に, 種々の大気圧プラズマを安全かつ簡単に発生させるための基本原理, 実験装置, 注意点などを紹介する。また, 大気圧プラズマを発生させる上で重要となる, 高電圧発生方法, 高周波回路の設計, 取り扱いについても概説し, 実験の指針とする。最後に, 感電, 有毒ガスの発生など実験に際しての注意事項, 安全対策について述べる。

岩尾 徹 (武蔵工業大学)

Keywords:

atmospheric pressure plasma, corona discharge, DBD (Dielectric Barrier Discharge), streamer discharge, atmospheric pressure glow discharge, sonoluminescence, liquid phase discharge, pulsed discharge, RF plasma, microwave plasma, safety measure

3.1 高電圧・大電流・パルスプラズマの生成

3.1.1 コロナ放電・誘電体バリア放電

コロナ放電は, かつては送電線の高電圧端子などで頻繁に観察された。電波障害の原因となることから, 当時は「コロナ放電を発生させない技術」が興味の対象であった。現在は, 電気集塵機, ポリマーフィルムの連続表面処理など, 「積極的にコロナ放電を発生」させて利用するための技術に大きな注目が集まっている。一方, 誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge: 以下 DBD と称する) はオゾンナイザー放電とも呼ばれ, 1857年, Siemens がオゾン合成するための方法として考案したことに端を発する (オゾンの発見は1840年) [1]。現在では, 空気清浄機などの家電製品に必須の機能として装備され, また有害物質の除外装置をはじめとするエネルギー・環境分野への産業応用が急速に進展している [2, 3]。さらに近年では, 新領域における反応性プラズマの生成, バイオメディカル応用, 新物質創成など, 最先端のプラズマ科学を支える基本技術として重要な役割を果たしている [4, 5]。ところが, 最近になるまで, プラズマ, 放電, 高電圧工学等に関する成書に, DBD に関する詳しい記述はあまり見あたらなかった。これは, DBD がほぼ独占的にオゾン合成法として, 換言すれば放電化学の1分野として利用されてきたことに起因すると考えられる。

本稿では, 簡単な実験装置を使って大気中でコロナ放電, 誘電体バリア放電を, 安全かつ簡単に生成する方法を紹介する。ここで紹介する実験装置, またはその一部をもとに独自の工夫を凝らせば, 新奇な大気圧プラズマプロセスを創り出すことができるかもしれない。本章ではこのような点も意識しながら, コロナ放電, 誘電体バリア放電の作り方, 使い方を概説する。

(1) コロナ放電

コロナ放電を形成するための実験系を図1に示す。針-平板電極のように著しい不平等電界を形成する電極系に高

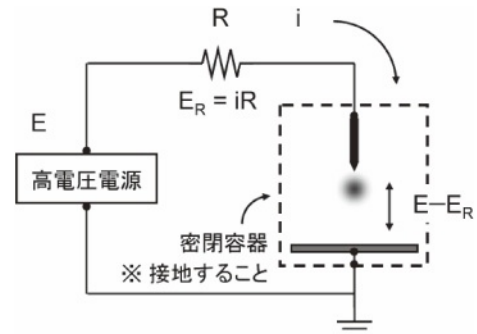


図1 針-平板電極を用いたコロナ放電の実験系。R: バラスト抵抗, E: 電源電圧。

Let's Obtain an Atmospheric Pressure Plasma 3. How to Practice

NOZAKI Tomohiro, TAKAKI Koichi, NAMIHIRA Takao, KITANO Katsuhisa, KIM Jaeho, NOMURA Shinfuku, ICHIKAWA Norimitsu, TOMITA Hajime, HAYASHI Nobuya and IWAO Toru

電圧を印加すると、激しい閃光と音を発する火花放電ではなく、針電極近傍でのみ部分的に気体が絶縁破壊した持続放電が形成される。これをコロナ放電と称する。針-平板電極以外にも、球-平板、線-平板、線-線、コイル-円筒など、目的に応じて多種多様なコロナ電極系を構成できる。高電圧電源には、かつては巻き線式のネオン変圧器(磁気漏れ変圧器)がよく用いられた。現在は、インバータ式の小型ネオン変圧器や、半導体スイッチを使った安価でコンパクトなパルス電源が数多く市販されている。これらの電源に先に述べたコロナ電極系を直結すれば、複雑な整合器を用いなくとも簡単にコロナ放電を発生させることができる。実際に実験を実施するにあたって、コロナ放電と直列に $10\text{ k}\Omega\sim 1\text{ M}\Omega$ の抵抗(バラスト抵抗と呼ぶ)を挿入することを奨励したい。バラスト抵抗を用いれば、放電電流が流れることによって電極間電圧 ($E-E_R$) に負のフィードバックが作用するため、気体が絶縁破壊したあと安定にコロナ放電を維持できる。バラスト抵抗は過大な放電電流が流れるのを防ぎ、安全性向上にも重要な役割を果たす。

針電極の先端に電界が集中するため、比較的低い電圧で容易に気体を絶縁破壊することができる。放電部の発光は微弱であるため、放電を確認するために暗膜などが必要になる場合もあるが、通常は放電にともなう“音”や大気中であれば“オゾン臭”でコロナ放電が開始したことを確認できる。ただし、オゾンは有害物質であるため、充分換気を行うか放電部分を密閉容器の中に封じて実験しなければならない。また、図1に示した平板(接地)電極がなくとも、無限遠の接地物に対してコロナ放電が生じる場合があるので、感電などの安全対策には充分な注意が必要である。

針電極に負の直流電圧を印加すると、針電極の近傍に限定された膜状のコロナ放電が形成される。これは、主に正イオンに起因した空間電荷によって針電極近傍の電界が増強されるためである(図2(a))。針電極より充分離れた領域では逆に電界が弱められるためコロナ放電は伸びにくく、針電極を覆うように小さな発光領域が形成される。一方、正の直流電圧を印加するとコロナ放電は伸びやすくなる。これは、空間電荷によって針電極より離れた領域の電界が増強されるためである(図2(b))。正コロナのように、線状に良く伸びるコロナ放電を広義に“ストリーマコロナ”と称することがある。電極間の広い範囲を電離するために

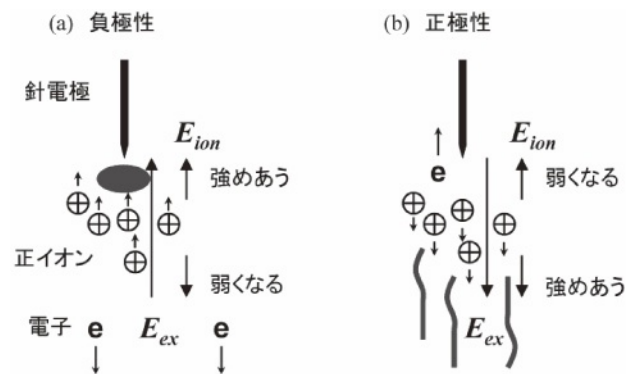


図2 直流電圧の極性がコロナ放電におよぼす影響。 E_{ex} : 外部電界, E_{ion} : 空間電荷が作る電界。

は正コロナが適しているが、化学反応に応用した場合、比投入エネルギー(ガス流量あたりの消費電力で定義されるパラメータ)で原料転換率などの諸量が決まることが多く、物質変換効率は正・負極性で大差ない[6,7]。交流電圧を用いる場合、図2(a)と(b)が交互に入れ替わるような放電が生じる。

(2) 誘電体バリア放電

一対の金属電極間に絶縁物を挿入することが必須であるため、誘電体バリア放電(Dielectric Barrier Discharge: DBD)と呼ばれる。誘電体を含む電極系は一種のコンデンサとみなせるため、DBDを形成するためには交流電圧を印加しなければならない。図3に、平行平板電極を用いてDBDを形成するときの実験系を示す。図3では、下側電極にのみ誘電体を挿入しているが、コロナ放電と同様、電極配置の自由度は高く、同心円筒タイプ、沿面放電タイプなどがよく用いられる[1,2]。誘電体には、ガラス、アルミナ、ポリマーフィルムなどを用いることができる。下側の金属電極を液体(純水、電解質液など)に浸漬すれば、液体をバリア層としたDBDを発生させることもできる。このように、溶液と相性が良いのが大気圧プラズマの特徴で、減圧プラズマでは不可能なプラズマ反応系を構築できる。なお、図3にはDBDと直列に抵抗を挿入しているが、これは万が一誘電体が破損したとき、大電流が流れて電源やオシロスコープなどにダメージを与えるのを防ぐためである。

空気絶縁破壊電界強度は約 35 kV/cm であるから[8]、例えば電極間距離 (d_1+d_2) が 2 mm の場合、目安として約

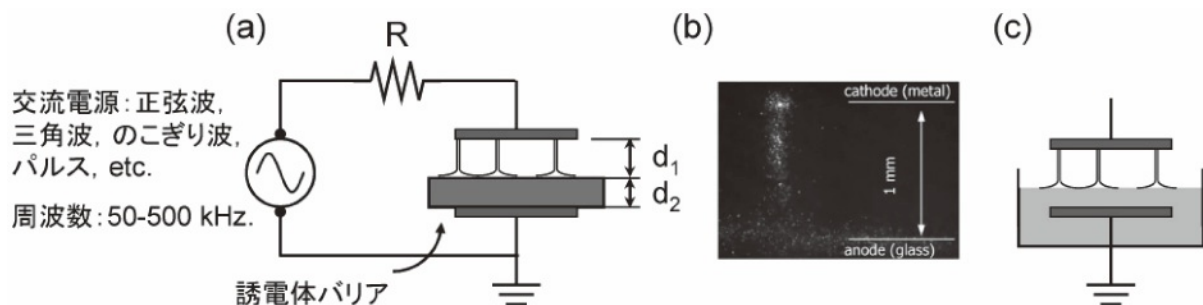


図3 誘電体バリア放電の実験系。(a) ガラスやセラミックスを誘電体層として用いる場合、(b) 同図(a)に示した実験系で形成されたストリーマのスナップショット(露光時間 10 ns)、(c) 電解質などの液体を誘電体層として用いる場合。

7 kV(ピーク値)の交流電圧を印加しなければならない。空隙に作用する電圧が放電開始電圧に達すると、大気圧ではストリーマ形式の絶縁破壊が生じ、直径約 100 μm の微細放電柱が時間・空間的にランダムに生成と消滅を繰り返し、電極間の広い範囲を電離する(図 3 (b))。誘電体によって放電電流が急激に抑制されると同時に、誘電体に蓄積した電荷が逆電界を形成するため、ストリーマは 1–10 ns の極短時間で消滅する。誘電体はストリーマを電極間に広く分散させる働きも持つが、処理するガスの種類によって誘電体表面に突起物や導電性の膜が付着すると、その部分でストリーマが局在化しやすくなる。ストリーマが消滅した後も、電極間には残留イオンによる導電性のチャンネルが取り残されている。イオンが拡散して消滅するより高い周波数で電圧を印加すると、同じ場所でストリーマが発生し定在しやすくなる。

DBDはストリーマの集合体である。個々のストリーマはナノ秒で生成と消滅を繰り返すことから、ストリーマの集合体と電源はほとんど結合しておらず、商用から高周波まで様々な交流電源を使って簡単にDBDを形成できる。個々のストリーマにおける電子密度は $10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、電子エネルギーは最大で 1–10 eV と言われているが[9]、原料ガスと誘電体を含むリアクタ構成でストリーマ 1本あたりの電気的、化学的性質が決まれば、プロセス全体の性能は概ね把握することができる。周波数、印加電圧波形、電圧波高値などの外部パラメータは、単位面積、単位時間あたりに発生するストリーマの発生頻度を変えるだけで、ストリーマ内の電子数密度や電子エネルギーまで制御するには至らないことが多い。化学反応装置として見たDBDの最適化は、電気特性よりむしろ温度管理、ガス混合過程に依存する。得られたデータは比投入エネルギー(前述)で整理すれば、異なる反応器、研究者の結果を統一的に評価できる。

(3) 誘電体バリア放電の新しい展開

空隙(d_1)を 50 μm まで短縮したユニークなオゾナイザー(DBD)が考案された[10]。このマイクロギャップオゾナイザーの特徴は、pd積(p :圧力, d :空隙距離)がパッシェンミニマムに近いことで[11]、実効的な電子温度を増大させ、オゾンの高濃度化を実現できることが示された。パッシェンの法則はタウンゼントの火花放電理論から導出されるが、ストリーマ形式の絶縁破壊、累積電離がある場合なども含めて、極めて広い範囲(圧力 = $10^{-2} - 2400 \text{ Torr}$, 空隙 = $5 \times 10^{-4} - 20 \text{ cm}$, ガス温度 = $-15 - 860^\circ\text{C}$, 不平等電界)で成立することが証明されている[11]。一方、超臨界流体など特殊な環境では、パッシェンの法則(相似則)が成立しないことがある[12]。このように、特殊な環境下で反応性プラズマを作り出すことが、新しいプラズマプロセス、新物質創成につながるとして、多方面で基礎・応用研究が行われている[5]。

実用的な観点から、不平等電界を形成するコロナ電極系やパルス電圧を組み合わせたDBDが多く利用されている[13, 14]。これにより、(1)放電開始電圧を低くできる、(2)放電空間を広く取れるため電極間に触媒や吸着剤を充填でき

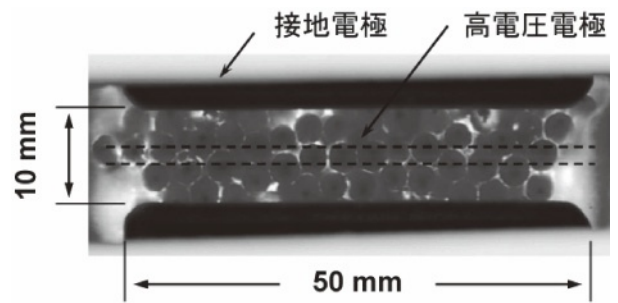


図 4 触媒充填層の中で形成した誘電体バリア放電。直径 3 mm の Ni 系触媒を内径 20 mm のガラス管の中に充填しており、 $\text{N}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$ 混合ガス中で DBD を形成している。ガラス管の中心には、直径 3 mm の高電圧電極が埋め込まれている。

る、(3)電極間の広い領域を効率よく電離できる、など反応器の設計に大きな自由度を持たせることができる。図 4 は触媒ペレットを充填したガラス管の中で DBD を形成したときの写真で[15]、燃料改質や排ガス浄化に絶大な効果を発揮している。ほかにも、スクラバー、電気集塵機などのハイブリッド機種も環境浄化技術では多々見られる[3]。

誘電体バリア放電の特殊な例として、「大気圧グロー放電」が1980年後半、上智大学の岡崎・小駒らの研究グループによって考案された[16]。(1)誘電体バリア放電と同じ電極系を用いる、(2)原料ガスをヘリウムで大希釈する、(3)数 kHz 以上の電源周波数を用いる、などの工夫により、大気圧でも電極間で均一なグロー状過渡放電を形成することが可能となる。この技術を用いれば、ガス処理だけでなく CVD やエッチングなどの表面処理が可能となることから、メカニズム解明から用途開発まで幅広い研究が行われている。しかし、プラズマの形成条件が限定されているだけに、ストリーマ形式の DBD より難易度が高い技術であるといえる。大気圧グロー放電の基礎と応用は、文献に詳しくまとめられているので参照されたい[4, 17]。

野崎智洋(東京工業大学)

3.1.2 パルスアーク放電

化石燃料の燃焼火炎先端温度の約 2,300 K 以上のガス・イオン温度を有するプラズマは、熱プラズマと規定される[18]。火炎先端の 2,000 K 近傍で、原子や分子は振動して衝突を繰り返し、熱電離が起こる。一般に、アーク放電は熱プラズマであり、電離機構と二次電子放出機構は、それぞれ熱電離および熱電子放出となる[19]。特徴は、グロー放電と比較して陰極降下電圧が 8–20 V と小さいこと、放電電流が 1 A 以上と大きいこと(陰極輝点の電流密度で $10^{10} - 10^{11} \text{ A/m}^2$) などである[20]。アーク放電は、熱平衡性が不要なため、パルス電源を用いることなく生成できる。パルス電源を用いる場合として、1)大電流高密度プラズマの生成、2)衝撃波の生成、3)反応時間や熱の制御が必要となき、があげられる。衝撃波は材料加工やリサイクル[21, 22]、水処理[23]など、反応時間や熱の制御は材料プロセスなどで利用される。

パルスアーク放電発生装置は、図 5 に示すように、通常コンデンサとスイッチなどの単純な回路で構成される[24]。パルス幅は、パルスストリーマやバリア放電が数 ns

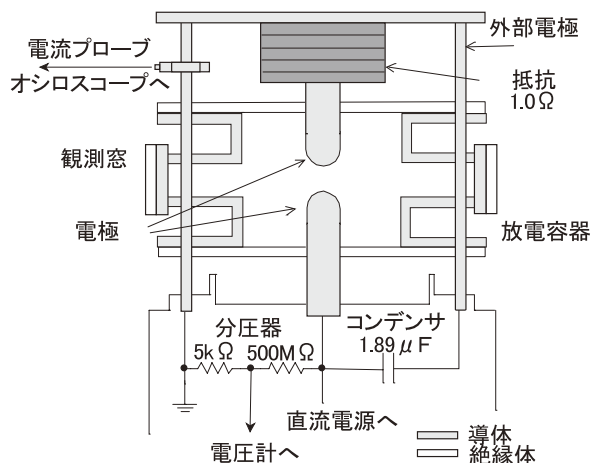


図5 パルスアーク放電発生装置の構成例[24].

～数十 ns と短いに対し、数 μs ～数十 μs と長めに設定される。電流は、数百 A～数十 kA と直流や交流アークに対して大きいのが一般的である。一例として、棒対平板電極間にて生成されたパルスアーク放電を図 6 に示す。高輝度の発光を伴うアークプラズマ柱が形成される[25].

アーク放電が発生すると、電流は急激に増加し、電圧は減少する。この様子を図 7 に示す。一般に、パルスアーク放電の電子密度は 10^{24} m^{-3} 程度と大きく[26, 27]、プラズマの導電性は高い。このため、アーク放電の発生に伴い電極間インピーダンスは急激に低下し、放電電流の最大値や波形は、主に放電回路のコンデンサの容量、回路インダクタンス、抵抗などのパラメータにより決定される。また、アークプラズマ柱の直径は衝撃波の進展により決定される[28, 29]。このため、電極間インピーダンスの時間変化は、衝撃波の進展速度により制限を受ける[30]。衝撃波の進展速度は、放電回路のパラメータや放電領域のガス種によって変わる。電極間電圧は、パルスアーク放電の発生後、おおよそ一定になる[31]。この電圧を実験的に求めておくことで、振動波形に対するアーク放電の消弧時間の見積りなども可能となる[32].

パルスアーク放電による化学反応制御の一例として、乾燥空気からの一酸化窒素生成の特性を、図 8 に示す[33]。パラメータはエネルギー蓄積コンデンサの容量である。パルス繰り返し周波数の増加に伴って単位時間あたり的高温持続時間の割合が増加するため、NO 濃度は繰り返し周波数へ比例して増加し、また、エネルギー蓄積コンデンサ容量の増加に伴い一放電あたり的高温持続時間が増加するため、同一繰り返し周波数においてはコンデンサ容量が大きい場合に高濃度の NO が生成される。

高木浩一 (岩手大学)

3.1.3 高電圧・大電流・パルス発生電源・回路

3.1.1 節にコロナ放電および誘電体バリア放電の簡易発生法として、不平等電界を形成する放電電極に対するバラスト抵抗を介した高電圧印加や平等電界を形成する電極間へ誘電体を挿入した放電電極に対する高電界印加が紹介されている。これらの発生方法は、バラスト抵抗による電流制限や誘電体表面への蓄積電荷による電界消失の効果を利

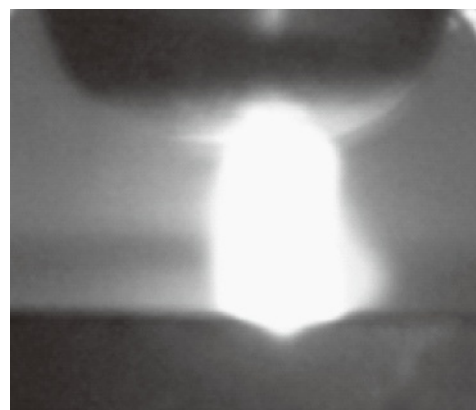


図6 パルスアーク放電の様子 (コンデンサ容量: 2 nF, 充電電圧: 14.5 kV, 電極形状: 棒対平板, 電極間隔: 5 mm, 電極間ガス: 乾燥空気) [25].

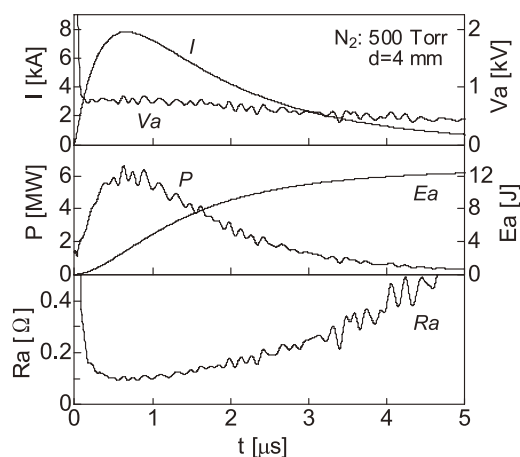


図7 パルスアーク放電の電流、電圧、電力、消費エネルギー、抵抗の時間変化 (コンデンサ: 1.89 μF , 電極間隔: 4 mm, 電極間ガス: 窒素, 気圧: 500 Torr) [24].

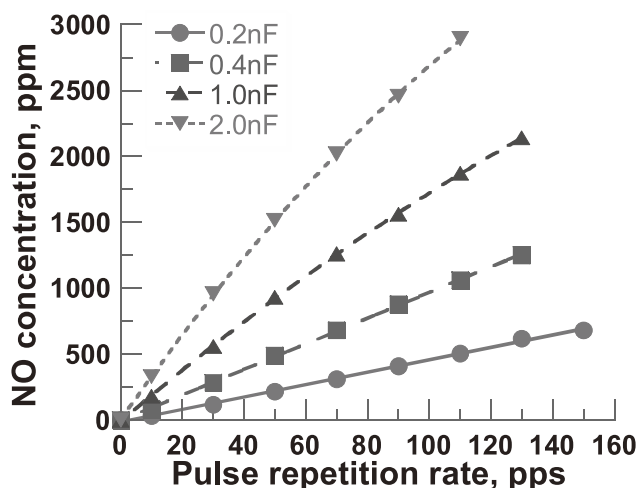


図8 パルスアーク放電による一酸化窒素生成 (充電電圧: 14.5 kV, 電極間隔: 5 mm, 電極間ガス: 乾燥空気, 流量: 300 mL/min) [25, 33].

用することで、放電状態をアーク放電 (熱平衡プラズマ, サーマルプラズマ) へ転移させることなく、コロナおよび誘電体バリア放電 (非熱平衡プラズマ, コールドプラズマ) を持続させている。一方、電極への電圧印加時間をパルス

化することで、放電状態のアーカ放電への転移を防ぐことも可能である。この高電圧・大電流パルス印加による放電は、パルス電源・発生回路がやや複雑であるものの、過電圧率（電極の直流絶縁破壊電圧に対する印加電圧の比）を大きく取れる、放電空間に対する電力密度を大きく取れる、誘電損失がないなど多くのアドバンテージを有する。ここでは、マルクス発生回路、磁気パルス圧縮回路、パルス形成線路、パルス形成回路など数あるパルス発生方式の中でも、非熱平衡プラズマの発生へよく利用される簡易なパルス電源について紹介する。なお、他のパルス発生方式については参考文献を参照されたい[34-37]。

図9に比較的容易に製作可能なブルームライン線路+パルストランスにより構成される高電圧パルス発生器の回路図を示す[38, 39]。本発生器はブルームライン線路（回路）により電圧パルスを形成し、その電圧パルスをパルストランスにより昇圧することで高電圧パルスを発生する。なお、図9に示される両発生器は正極性の高電圧パルスを発生する回路であり、利用したい電圧時間幅により2つの回路を使い分けることとなる。一般的には数10 nsから500 ns程度までの電圧時間幅に対して図9(a)に示される同軸ケーブルを用いた回路、500 ns以上の電圧時間幅に対して図9(b)に示されるコンデンサとコイルを用いた回路を使用する。各回路の電圧時間幅 T は次式にて定義される。

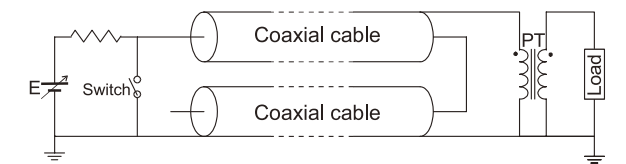
$$\text{図9(a)の回路} \quad T = 2\ell\sqrt{\epsilon\mu} \quad (1)$$

$$\text{図9(b)の回路} \quad T = 2N\sqrt{LC} \quad (2)$$

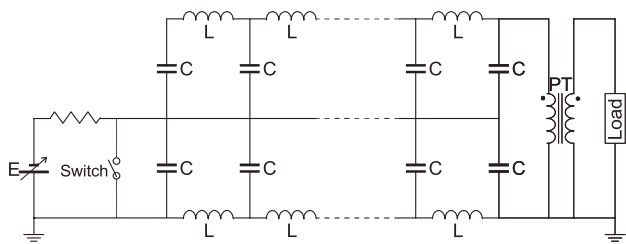
ここで、 ℓ , ϵ , μ はそれぞれ同軸ケーブルの長さおよび同軸ケーブルへの充填絶縁体の誘電率、透磁率であり、 N , L , C はそれぞれLC回路の数およびコンデンサのキャパシタンス、コイルのインダクタンスである。また、各回路のインピーダンス Z および整合負荷時の出力電圧 V は次式にて定義される。

$$\text{図9(a)の回路} \quad Z = 2Z_{\text{cable}}n^2 \quad (3)$$

$$\text{図9(b)の回路} \quad Z = 2n^2\sqrt{L/C} \quad (4)$$



(a) 同軸ケーブルを用いたパルス発生回路



(b) コンデンサとコイルを用いたパルス発生回路

図9 ブルームライン線路+パルストランスにより構成される高電圧パルス発生器。

$$\text{図9(a), (b)の回路} \quad V = nE \quad (5)$$

ここで、 Z_{cable} , n , E はそれぞれ同軸ケーブルの特性インピーダンスおよびパルストランスの昇圧比、充電電圧である。また、本発生器に使用されるスイッチとしては、スパークギャップや電界ひずみ、サイラトロンに代表される放電型スイッチからサイリスタやIGBT, MOSFETに代表される半導体パワーデバイスまで、要求される耐圧やスイッチ電流、寿命により多くの種類が利用されている。パルストランスの磁性体としては、近年、高周波への応答が良いアモルファス系やナノ結晶系の合金がよく利用されており、特に日立金属株式会社製のFINEMET®は高周波応答性が高くよく利用されている[40, 41]。なお、ここまで述べてきた発生器は昇圧にパルストランスを使用しているが、パルス形成回路であるブルームライン線路を積み重ねることで昇圧することも可能であり、こちらもよく利用されている[41-44]。

浪平隆男（熊本大学）

3.2 高周波・マイクロ波プラズマの生成

3.2.1 グロープラズマ

(1) 大気圧グロープラズマとは

イオンと電子からなる混合気体であるプラズマは、高い運動エネルギーや高い化学反応性を持っており、様々な産業分野で利用されている。特に半導体の製造産業にとってプラズマプロセスは必要不可欠であり、低温プラズマと呼ばれる熱非平衡なプラズマが用いられ、エッチングや薄膜堆積などに利用されている。それらは静電結合 (CCP: Capacitively-Coupled Plasma) や誘導結合 (ICP: Inductively-Coupled Plasma) などの方式により減圧した真空容器内で生成されたプラズマを利用しているが、近年、真空装置を必要としない大気圧グロープラズマに大きな注目が集まっており、放電機構と応用に関する研究が共に精力的に進められている[17, 45-47]。一般的に、プロセスプラズマは電離度が(密度も)核融合プラズマに比べて非常に小さく、中性ガスが混在していることが前提となっている。低下下のプラズマでは平均自由行程が長いことから、電子温度に比べてガス温度やイオン温度が低い熱非平衡状態にある低温プラズマであるが、圧力が上がると粒子間の衝突頻度が高まることにより、電子から中性ガスへエネルギーが移動して熱平衡状態に近づき、熱プラズマになりがちである。代表的な熱プラズマであるアーカプラズマでは、中性ガス温度が高いために被照射物を破壊する恐れがあるため、大気圧中で安定したプラズマプロセスを行うためには、熱非平衡なグロープラズマが適している。

1987年に、岡崎、小駒らがHeとDBD(Dielectric Barrier Discharge)を用いた大気圧グロープラズマ(APGD: Atmospheric Pressure Glow Discharge)に関する報告を行い、生成に必要な条件を以下のように示した[16, 48, 49]。

- (1) 希釈ガスをHeにする。
- (2) 電源周波数は、最低でも1 kHz以上とする。
- (3) 金属電極間に少なくとも1枚以上の誘電体を挿入する。

空間的に均一かつ低温なプラズマを比較的容易に得られるために、これまで真空容器内で行われてきたプラズマプロセスの多くが大気圧下でも実行可能になり、応用分野も大きく広がった。

ヘリウムのイオン化エネルギーは 24.5 eV と全ての気体の中で最も高い値を持つが、約 20 eV の辺りに長寿命の準安定状態が存在するために、連続した放電ではイオン化のためにはたかだか約 4 eV 程度のエネルギーしか必要としない。そのため、大気中での放電開始電界強度は全ての気体の中で最も低くなっており、放電のためには低い電界の印加で十分である。それに加えて、ヘリウムが持つ高い熱拡散性が、プラズマがストリーマへ転移せず空間的に一様なグロープラズマが得られる理由である。特性が多少悪くなるもののアルゴンも同様の特性を持っており、価格が安いために広く用いられている。

このような方法により生成された大気圧グロープラズマを肉眼や通常の CCD カメラで観察すると、空間的に一様に拡散した放電形状をしているが、実際には過渡的な放電現象の繰り返しから構成されている。誘電体バリアの表面電荷の影響により、数 kHz 程度の高電圧を印加したときの立ち上がり時に数 μsec 以下の鋭い電流波形が観測される。このパルス状の放電が半周期に 1 度だけ規則的に生じており、電極の平行方向に均一なプラズマが着火しているという特徴を持っている [50, 51]。低圧のグロー放電では時間的に一様にプラズマが着火しているが、粒子間の衝突頻度の低さにより非熱平衡状態が維持されている。それに対して、大気圧グロー放電では時間的に不均一な放電が行われることにより、熱的な非平衡状態が実現されている。岡崎らが提唱した方法以外にも大気圧中でグロープラズマを生成する方法は数多くあり、以下に簡単に紹介する。

誘電体バリア放電では、2つの電極の空隙に片側の電極に接するように誘電体バリアを挟んでいたのに対し、Resistive Barrier Discharge (RBD) と呼ばれる方法では、高抵抗シート (数 $\text{M}\Omega/\text{cm}$) を挿入した電極構造になっている [52]。この放電形式では、興味深いことに高圧の直流電圧を印加した場合でも、電流波形は周期的なものになる。放電が開始して電流がある一定以上に増えると高抵抗シートでの電圧降下が大きくなり、電極間 (高抵抗シートと対向電極) の間に放電を維持するのに十分な電圧が印加されなくなり放電が停止し、そして、低抵抗なプラズマが電極間から消えて電流が流れなくなると、十分な電圧が電極間に印加されて放電が再開する。このような機構により、自発的に電流がオンオフして、非平衡状態のプラズマが生成される。


誘電体バリア放電ではコンデンサという受動素子により電流制限が行われているが、電源側に工夫を凝らすことにより能動的に電流制限を行い、アーク放電への移行を防止してグロープラズマを生成するパルスグロー方式もある [53, 54]。この方法では、数 mm 間隔の平板電極間に 10 ns 程度のパルス電圧を印加することにより、プラズマがストリーマへ進展する前に放電を停止させている。この方法を利用することにより、窒素ですらグロー状のプラズマが着

火可能となっている。

市販されている大気圧プラズマ装置で数多く用いられている方式に、アフターグロータイプのプラズマジェットがある [55]。一般に高周波電源の周波数が高くなるとプラズマは熱化しやすく、また DC 電源を用いたアーク放電は完全な熱プラズマであるが、このような電源を使ってトーチ内部で熱プラズマ (である必要はないが) を生成し、それをガス流により外部へ押し出して冷却されたプラズマを利用するリモートプラズマ方式である。直流アーク放電を利用したものや、RF 電源を用いた CCP, ICP によるプラズマや、マイクロ波を用いたタイプが開発されている [17]。寺嶋らにより開発された熱電子援用プラズマジェット (TEMP: Thermo-electron-enhanced micrometer-scale plasma) では、誘導結合型プラズマにタングステンワイヤからなる熱電子供給源を組み合わせることにより比較的低温なプラズマが安定して生成可能になっている [12]。

(2) RF を用いた大気圧グロープラズマの発生方法

ここからは、13.56 MHz の RF (Radio Frequency) を用いた誘電体バリア放電型の大気圧グロープラズマ発生装置の実施例を具体的に紹介する。岡崎らの大気圧グロー放電装置で用いられる 10 kHz 程度の LF (Lower Frequency) 電源による放電とは異なり、RF を用いた放電では電子の移動速度よりも十分に早い時間スケールで極性が反転するために時間的に連続的な放電となる。ただし、この場合でも電流が流れすぎてストリーマ化するのを防ぐために誘電体バリアは必須である。また、13.56 MHz では波長が約 22 m になり、実験装置のサイズに比して無視することのできない大きさになっているために、RF 電源と負荷 (誘電体バリア電極) の間にはインピーダンス整合装置を挿入して高周波の反射を防ぐ必要があり、LF 電源を用いた放電装置よりも装置構成が少々複雑になる。整合器には 2つの可変コンデンサを用いる π 型が使われる場合が多く、通常、産業用では自動調整機構が組み込まれている。

通常の誘電体バリア放電では、 に示すように、1対の平行平板型の電極の片側もしくは両側に誘電体 (材質としては耐スパッタ性、耐熱性の点から石英ガラスもしくはセラミックが好ましい) を挿入した構造をしている。まずはプラズマが着火しないような低出力にて、高周波電源への反射波を最小 (同時に整合器から出力電圧が最大になる) になるようにインピーダンス整合装置の調整を行った後に、電源出力を上昇させて放電を開始させる。このとき、電極間にプラズマが着火することにより電源から見て負荷側のインピーダンスが変化するために、整合条件が多少ずれることがあるが、一般的には放電維持する条件は放電開始する条件よりも緩いため、いったん放電を開始すると多少整合が取れていなくてもそのまま放電が維持されやすい。

放電開始条件に関して有名なパッシェン則によると、放電開始電圧はガス圧力 p と空隙の距離 d の積で決まり、この積が一定の値の時に放電開始電圧が最小値を持つのだが、これは RF の場合にもほぼ同様の関係が成り立っている [56]。この高周波放電におけるパッシェン則によると、

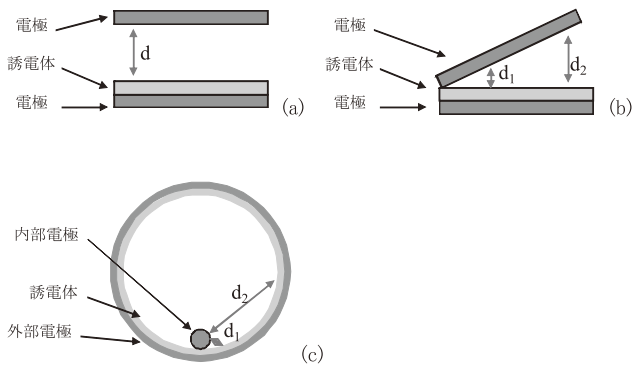


図10 誘電体バリア放電の電極構造配置。(a) 空隙の距離が一定である平行平板の場合、(b) 空隙の距離に分布を持つ場合、(c) 偏芯電極構造。

大気圧のような圧力が高い領域では最適な空隙の距離はサブ mm オーダになってくる。このようなサイズのプラズマはマイクロプラズマと呼ばれ、近年、生成方法、診断方法、プラズマ応用などの各方面から盛んに研究が進められている[57]。このように電極サイズが小さくなった場合、負荷のインピーダンスも小さくなり、一般的なインピーダンス整合器の調整可能範囲を超えている場合があるので実験を行う際には注意が必要である。

誘電体バリア放電として一般的である平行平板電極構造をした図10(a)に示すような電極構造を用いた場合には、基板に対する均一な処理が可能であるものの、パッシェン則によると放電可能圧力範囲は限られたものとなる。近年注目されている液体に対するプラズマ照射実験を行うためには、このように平行平板である必要はなく、北野らは図10(b)に示すような電極間距離に分布を持つ誘電体バリア構造を用いることで、幅広い圧力レンジで放電を可能にした[58]。電極間距離は分布を持っており、パッシェン則に基づいて自発的に放電経路が決定されるため、気相中に液体からの蒸気が混入するような条件下においても、安定した放電が可能になっている。

実際には図10(c)に示すような偏芯した電極を利用することで上記の電極配置を簡易に実現している。図10(c)は上方から見た図であるが、石英製ガラス管($\phi_{\text{inside}}=40$ mm)内部に円筒状のSUS製の内部電極($\phi=5$ mm)を設置し、そのガラス管の周囲にテープ状の金属電極を貼り付けた構造をしている。これを鉛直方向に設置し、下部に液体を導入できるようにし、上部の気相部分でプラズマを生成する。空隙の距離は、内部電極が接触している部分でほぼ0 mmとなり、最大でガラス筒の内直径から内部電極の直径を引いた35 mmに相当する距離の範囲を取り得ることが出来る。このように分布した構造を持っているおかげで、図11に示すように一つの電極構造にもかかわらず、0.01 気圧から2.0 気圧という幅広い圧力範囲で放電が可能になっている。圧力が高くなるほど短い放電経路、すなわち内部電極の近傍のみでプラズマは維持されている。実際に水やエタノールを入れて、各圧力で放電実験をしたところ、安定したグロー状の放電が維持されている。

大気中グロープラズマは、真空容器を必要とせず一様な

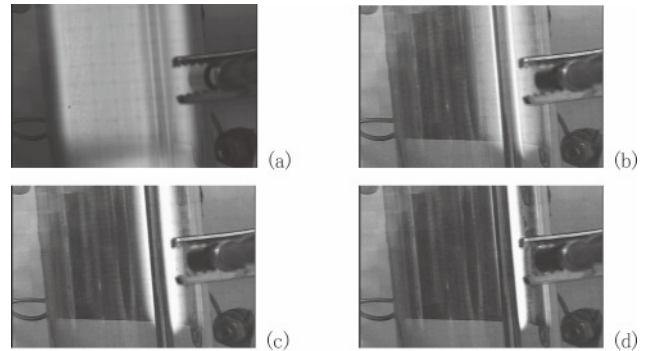


図11 偏芯構造電極による大気圧グロープラズマ生成。それぞれ圧力を(a) 0.01 atm, (b) 0.5 atm, (c) 1.0 atm, (d) 2.0 atm に変えて撮影した。

安定したプラズマが得られることから、応用範囲が広く、また製造現場で連続処理が可能という特徴もあるが、大気中の窒素や酸素からのコンタミネーションの問題点もある。生成手法にはまだまだ開拓余地があり、多数の論文、特許が出し続けられており、ますます熱非平衡なプラズマが生成可能になってきている。極端な例では、燃料ガスを冷却しておくことにより、液体ヘリウム温度程度の中性ガス温度を持つプラズマですら生成可能になっている。大気圧グロープラズマは、ガス温度が室温程度であるにもかかわらず、電子温度が高く化学活性があるという特徴を生かし、その被照射物はポリマーを始め人体にまで広がりつつあり、固体表面に留まらず液体中でのプラズマプロセスの研究が注目されており、今後の研究の進展が期待される[59]。

北野勝久 (大阪大学)

3.2.2 高周波・マイクロ波プラズマ発生電源と回路

本稿では、高周波・マイクロ波を用いてプラズマを発生させるための電源と回路の構成について説明する。電源や回路の動作原理については紙面上の制限から参考文献に譲る[60-67]。なお、用語として、高周波とマイクロ波は波長により区別されているが、ここでは、波長が実験室内の回路の寸法より十分長い場合は高周波、短い場合はマイクロ波と呼ぶ(1 GHzの空気中波長は30 cm)。

高周波とマイクロ波では電源と回路の構成素子が大きく異なる。マイクロ波は伝送回路の長さ比べてその波長が短く、寸法の影響を大きく受け、また、不連続部において反射波が発生して伝送特性に大きな影響を与える。高周波の特性は集中定数回路として、マイクロ波の特性は分布定数回路として扱う必要がある。

プラズマを発生させるための高周波・マイクロ波の電源と回路の構成の基本を図12に示す。以下では、それぞれの構成要素について注意点を述べる。

- (1) 電源 (発振器)：まず、周波数を決めよう。13.56 MHzの高周波と2.45 GHzのマイクロ波が多く使われている。その他、VHF帯とUHF帯の高周波、数十GHzのマイクロ波も使われている。一般には電波に関わる法律において工業用としての使用が許されている周波数が用いられる。高周波にはLC型発振器や水晶発振器などが、マイクロ波には大電力用としてマグネトロン

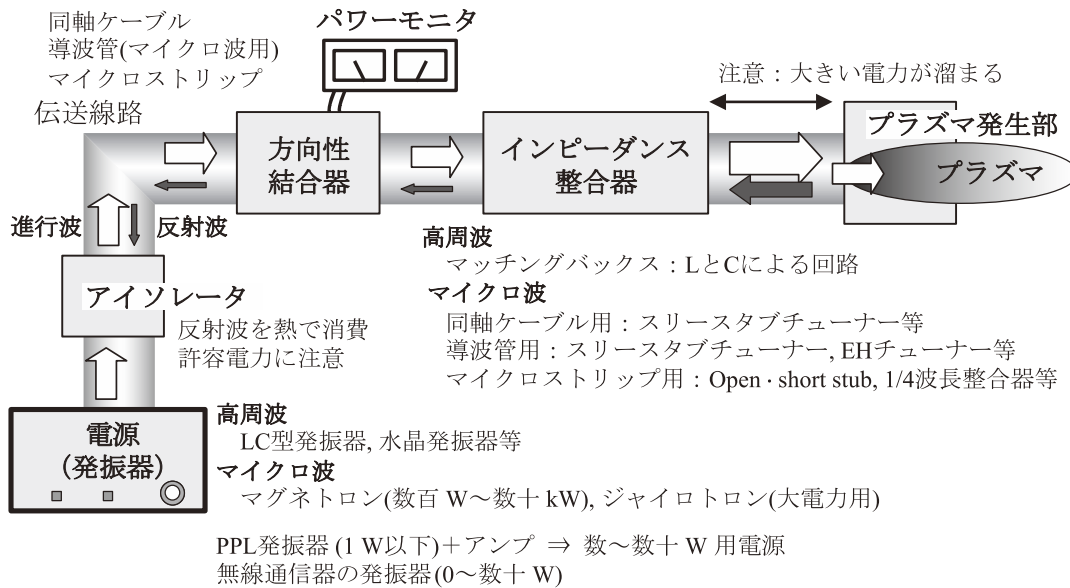


図12 プラズマを点けるための高周波・マイクロ波電源と回路の構成図(特にマイクロ波電源を想定)。

ン, ジャイロトロン発振器などの電子管が使われている。しかし, 最近ではマイクロ波発振器でも固体化が進んでおり, PLL (Phase Locked Loop) 発振器にアンプをつなげた小電力(0~数十 W)の可変周波数電源(数百 MHz~数十 GHz)もある。無線通信機の発振器を取り出して使うこともできる。

- (2) 伝送線路: 高周波では同軸ケーブルを使う。マイクロ波では一般的に導波管を使うが, 200 W 以下用のマイクロ波同軸ケーブルもある。小型プラズマ装置での小電力運転の場合には無線通信技術で標準的に使用されているマイクロストリップ線路も使える。
- (3) アイソレータ: 発振器の出力部に設置し, 発振器を反射波から保護する。発振器へ向かう反射波をダミーロードにより吸収, すなわち, 熱として消費させるので, 過熱しないように冷却と許容電力に注意する必要がある。通常, 反射が100%となる事態を想定して, 電源の最大電力と同じ許容電力のものを使う。
- (4) 方向性結合器・パワーモニタ: 電源からプラズマへの入力電力をモニタするためにアイソレータとインピーダンス整合器の間に設置する。場合によっては負荷と整合器の間に入れて, 負荷の反射を測定することもあるが, 負荷の反射が大きい場合には整合をとると内部循環電力が増大するので検出器を破損する危険がある。
- (5) インピーダンス整合器: プラズマ発生部の入射口に設置する。高周波ではコイルLとコンデンサCよりなる集中回路素子のマッチングボックスが, マイクロ波では同軸ケーブル用の3スタブ型チューナ, 導波管用の3スタブ型チューナ, あるいはEHチューナなどが使える。マイクロストリップ線路の場合はオープン・ショートスタブ, 1/4波長整合器などがあるが, スタブの長さ調整が容易であるオープンスタブを推奨する。

最後に, 特にマイクロ波電源を用いたプラズマ発生のカギとも言えるインピーダンス整合についていくつかコメントしておきたい。① 特性インピーダンスが変化する場所, すなわち構造が不連続となる場所では反射が起こる。伝送線路とコネクタなどの回路構成素子はそのインピーダンスを回路の特性インピーダンスと一致させて反射波の発生を阻止する。② プラズマは変動インピーダンスを持っている。すなわち, プラズマ着火前後, またプラズマ維持条件によりインピーダンスが変わる。それに対して整合器を調整する必要がある。③ 整合器の回路を自作する際にはスミスチャートをうまく使おう。整合器を調整しても完全な整合ができない場合は, 整合器とプラズマ発生部との距離を調整してみる。④ 整合器によりインピーダンス整合ができたというのは, プラズマからの反射がゼロになったという意味ではないことに注意して欲しい。プラズマからの反射波を整合器が完全反射させていることである。すなわち, 整合器とプラズマの間では大きい電力が進行と反射を繰り返して蓄積されており, その一部(=電源からの出力電力)がプラズマに吸収されている状態である。このような場合は整合器とプラズマの間の伝送線路が過熱したり, 伝送線路内で異常放電が起こったりする可能性があるので注意してほしい。

金 載浩 (産業技術総合研究所)

3.2.3 ソノルミネッセンス

(1) ソノルミネッセンスを見てみよう

超音波によって圧力変動を受ける液体中の単一気泡が発光する現象, 単泡性ソノルミネッセンス (Single-Bubble Sonoluminescence, 以後 SBSL と呼ぶ) は, 1980年代の終わりから1990年代にかけて発見された[68, 69]。SBSL は, 超音波による定在波音場中に, 数 μm 程度の微小気泡をトラップさせたとき, その気泡が超音波の圧力変動にともなって膨張収縮を繰り返し, 気泡収縮のたびに正確に50ピコ秒程度以下のパルス発光を刻む現象である。この光は

なぜ起こるのか？ 多くの研究者がこの発光のメカニズムの解明に取り組んだ。最初は単なる電子の励起によるものではないかと思われていたが、その後、荷電粒子の衝突によるプラズマ発光現象であるという説が報告された[70]。そうであれば、液体中の気泡の中にプラズマが発生しているという現象がおもしろい。さらに、この気泡の中で核融合が発生できるという著者にとっては想定外の実験結果までが報告されて[71]、ソノルミネッセンスの研究は一気に加熱した。現在もバブル核融合の可能性については議論されている[72-74]。ここまでくると、小さな1個の気泡内の話ではあるが、ソノルミネッセンスも立派な大気圧プラズマの一つであると言えるのではないだろうか。

では、気泡が光るようなエネルギー場をどうやって作り出すのだろうか？これがいたって簡単にできることがまた驚きなのである。これまでに様々な雑誌でSBSLの発生方法が紹介されているが、ここでは、一度も経験のない学生がいきなりチャレンジしても確実に観察できる方法を紹介しよう。実験装置の概略図を図13に示す。作り方のキーワードは脱気水、弱い超音波、微小気泡の発生と捕捉である。SBSLを見るためにはちょっとしたコツがある。液体には脱気水を用いる。脱気方法はなんでも構わない。アスピレーターやポンプなどを利用した減圧装置を使ってもよいし、沸騰させて溶存ガスを抜いてもよい。脱気水を用いるのは超音波振動によってキャビテーションを含む余計な気泡が発生することを防ぐためである。図13の装置では、容器の大きさは、長さ60 mm、幅60 mm、高さ130 mmであり、これに減圧沸騰により脱気した液体を入れている。

超音波の発生は、発振器から振動子の共振周波数に近い波形を増幅器で増幅して超音波振動子に入力することで超音波が発生する。発振器の周波数を適当に調整してやれば共振周波数近辺で超音波が発生する。超音波の照射パワーは基本的には微小気泡がトラップできる程度の弱いパワーで十分である。これをキャビテーション気泡が発生するような大きなパワーをかけてしまったら、SBSLを見ることはほとんど不可能である。図13の実験装置では、共振周波数が28 kHzの超音波を使っているが、せいぜい5 W程度の

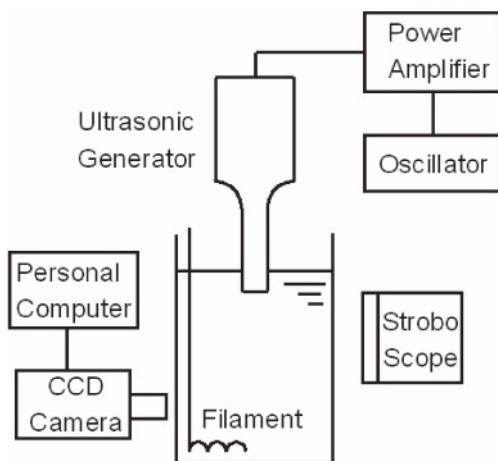


図13 実験装置。

電力である。

次に、微小気泡をどのように音場内にトラップさせるかである。著者の経験から言うと気泡が浮力によって液体中を浮上するので、超音波は上方から下方に向かって照射すると容易に気泡を音場中に保持させることができる。したがって、超音波振動子にホーンを取り付け（これも結構いい加減な設計でいい。最終的な共振は発振器の周波数で調整する。）容器上部から挿入する方法をとっている。微小気泡を簡単に発生させる方法としては水面を注射器の針で軽く突く方法があるが、より効果的に気泡を発生させるには蒸気気泡を利用するとよい。装置下部にフィラメントを置いて、フィラメントをジュール加熱し、多数の蒸気気泡を発生させ、蒸気気泡が発生すると同時に加熱をやめる。高いパルス電圧をかけて数秒以内で加熱できるようにしておく方法がよい。蒸気気泡のほとんどは、液体を上昇し消滅するが、幾つかの微小気泡が定在波内にトラップされる。この状態で、周りを暗くしていくと、トラップされた気泡の幾つかからの青白い発光を確認することができる。図14はSBSLの撮影結果である。トラップされた気泡が光っているのがわかる。このとき、300 Hz付近でストロボ同期させることにより、CCDカメラを用いて気泡の挙動を撮影すると、超音波による高速現象をスロー再生画像で見ることが可能である。図15は気泡の最大膨張時と最小収縮時の画像である。このとき、気泡の最大直径は約78 μm、収縮時の気泡直径は約4 μmであった。たとえば、300 Kの環境下で、気泡が78 μmから4 μmまで収縮するとき、断熱変化の式から温度を概算すると、以下の結果を得る。

$$T = \left(\frac{78^3}{4^3} \right)^{\frac{7}{5}-1} \times 300 \cong 10600 \text{ K.} \quad (6)$$

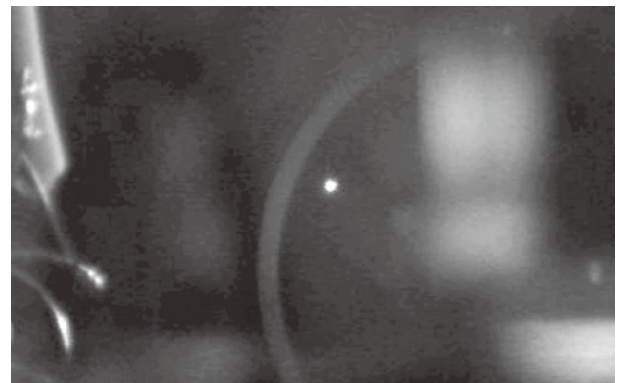


図14 水中の単一気泡ソノルミネッセンス。

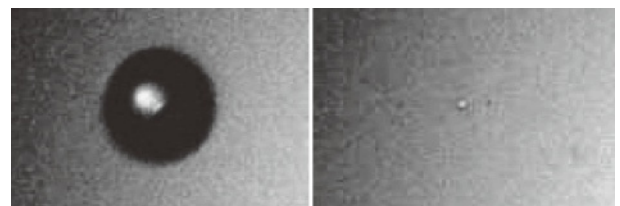


図15 ストロボ発光を用いた単一気泡の画像。気泡は定在波音場の腹の位置で膨張と収縮を繰り返す。

(2) ソノルミネッセンスから液中プラズマプロセスへ

SBSLの研究は液体の気泡中を高温度のプラズマプロセスの反応場として利用できる可能性を示唆していた。液体中をプラズマプロセスの反応場として利用することができれば、液体は気体と比べて分子密度が高く、さらに、液体自身の冷却効果が期待できるので、熱に弱い材料への高速成膜が可能となることが期待できる。SBSLの現象からヒントを得て、液体中の気泡内にプラズマを安定に発生させればよいという発想から、高周波やマイクロ波プラズマを発生させる液中プラズマ技術(in-liquid plasma technology)が開発された[75-77]。図16は大気圧下の水中に発生している27.12 MHzのプラズマ発生の様子である。高周波の出力は約200 Wである。電極先端の気泡内にプラズマが発生しているのが確認できる。エネルギーの供給源はマイクロ波や高周波などであり、特殊な大型装置を用いることなく室温大気圧中で液中プラズマを利用することができるようになってきた。本液中プラズマ法は、従来の気相プラズマプロセスと同様に電気的な制御で様々な形態のプラズマを液中環境下で生成することができるので、幅広い分野への適用が期待できる。

野村信福 (愛媛大学)

3.3 大気圧プラズマ生成時の安全対策

大気圧プラズマの生成に用いる高電圧・大電流電源などの充電部に作業者が接近・接触すると、感電する可能性がある。感電が原因で心室細動を引き起こすと、死亡災害が発生することもある。また、強い電磁界は人体に影響を及ぼす可能性がある。大気圧プラズマの生成に用いる電源は大電力を使用することから、周囲の電磁界強度の安全確認が必要である。さらに、プラズマの生成から利用・応用に至るまでは、多くの場合に反応性ガスが用いられることが多いため、爆発・火災・有毒ガスへの対策が不可欠である。本節では、大気圧プラズマ生成時の安全対策について述べ、大気圧プラズマの準備を行う上での注意を記す。

3.3.1 感電の防止

大気圧プラズマの生成に用いる高電圧や大電流は、時と



図16 27.12 MHzの高周波を用いた大気圧水中プラズマの発生。反応容器は石英ガラスであり、大きさは内径55 mm、高さ83 mmである。

して感電災害の原因になる可能性がある。人体は、数十ボルト以上の電圧に帯電した充電部に近づくことで感電し、人体中を数十mA以上の電流が流れ続けると心室細動を引き起こして死亡することがある。感電に起因する死亡災害は、毎年20件ほど発生している。この災害は、発生件数こそ少ないものの、死傷者数に対する死亡者の割合が約13% [78] (平成13年から15年までの3年間の平均) であり、全労働災害のなかでも死亡する可能性が大きいことが知られている。したがって、実験などで高電圧・大電流を扱う際は、作業中に感電しないように取扱いに注意する必要がある。

感電による人体の反応は、人体中を流れる電流の大きさと通電の時間によって異なる。国際電気標準会議の報告書(IEC479-1[79])では、感電による人体の反応を図17と図18で説明している。図17は、人体中を流れる交流電流(15 Hz~100 Hz)と人体の反応の関係を表している。この図から、次のことがわかる。人体中を流れる電流が増加すると、手足の自由がきかなくなるため自力では充電部から離れることが難しくなり、心室細動を起こす可能性が大きくなる。また交流電流の周波数が高くなると、発熱作用により高温症になることもある。一方、図18は人体中を流れる直流電流と人体の反応を表している。図17と図18を比較すると、感知電流(しびれや痛みを感じる電流)は直流電流よりも交流電流の方が低くなる傾向にあることがわかる。

実験中の感電災害を防止するには、“充電部に近づかない、触らない”、“無理をしない”ことが必要である。電気は肉眼では見えないことが多いため、充電部に近づいたり接触したりすると絶縁の劣化した箇所から放電し、感電することがある。労働安全衛生規則(安衛則)の第344条には、充電電圧(使用電圧)に対する接近限界距離が表1のように定められている。このように高電圧を扱うときは、安全距離(接近限界距離)を守る必要がある。また実験を長時間行くと集中力が低下して予期せぬ事故(人体の一部が充電部に接触するなど)が起こることもあり、適宜休憩をと

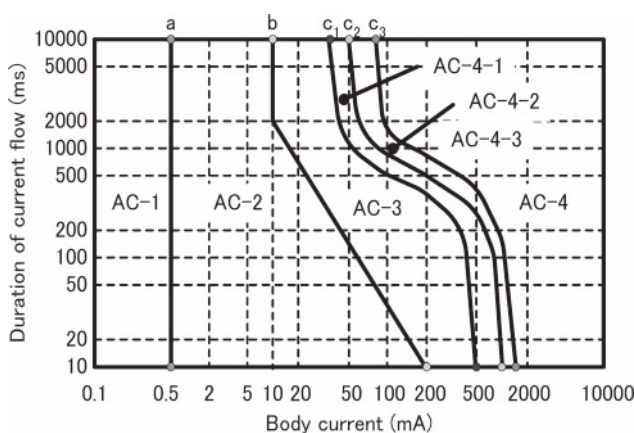


図17 交流電流(15Hz~100Hz)に対する人体の反応(IEC479-1)。AC-1:通常無反応, AC-2:通常有害な生理的影響はない, AC-3:電流が2秒以上継続して流れるとけいれん性の筋収縮や呼吸困難の可能性があり, AC-4:心停止,呼吸停止または重度のやけどといった病理生理学上の危険な影響が起きることがある(AC-4-1:心室細動の確率は約5%以下, AC-4-2:約50%以下, AC-4-3:約50%以上)

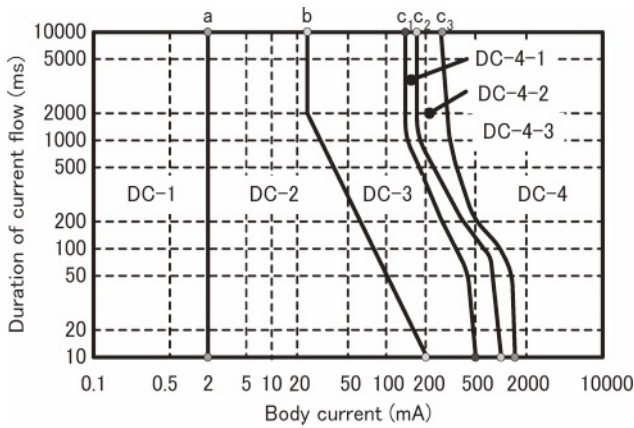


図18 直流電流に対する人体の反応(IEC479-1). DC-1:通常無反応, わずかに刺すような痛み, DC-2:通常有害な生理的影響はない, DC-3:心臓に回復可能な障害と伝達障害が起きる可能性がある, DC-4:危険な病理生理学上の影響, 例えば重度のやけどなどが想定される (DC-4-1:心室細動の確率は約5%以下, DC-4-2:約50%以下, DC-4-3:約50%以上).

表1 充電電圧(使用電圧)に対する接近限界距離(安衛則344条).

充電電圧 V (kV)	接近限界距離 d (cm)
$V \leq 22$	20
$22 < V \leq 33$	30
$33 < V \leq 66$	50
$66 < V \leq 77$	60
$77 < V \leq 110$	90
$110 < V \leq 154$	120
$154 < V \leq 187$	140
$187 < V \leq 220$	160
$V > 220$	200

り集中力を維持することも必要である。実験を始める前に、まずテスターなどを用いて必ず接地されているか、絶縁の劣化している箇所はないかなどを確認する。また高電圧・大電流の電源などの充電部に触るときは、主電源を停止し、接地棒などを用いて必ず放電させ、充電されていないことを確認する。これらの安全確認は、感電を防止するための基本であるが、守らないと大事故につながる可能性がある。

感電を防止するには、安全マニュアル(作業手順書)を作成し、安全教育(電気の安全な取扱い方法、緊急時の対応など)を定期的に行うことがもっとも効果的だと思われる。先に述べたように、感電災害は死亡する可能性が大きい労働災害である。電気の世界だからといって過信せず、基本を守って作業してほしい。

市川紀充(労働安全衛生総合研究所)

3.3.2 電磁波による人体や測定機器への影響

強い電磁界は人体に影響を及ぼす可能性がある。大気プラズマの生成に用いる電源は大電力を使用することから、周囲の電磁界強度の安全確認が必要である。周波数が数 Hz から 1 kHz の範囲では、 100 mA/m^2 を超える人体への誘導電流密度は、中枢神経系の急性変化および視覚誘発電位の反転などの急性影響の閾値を超えるものである。一方 100 kHz から数 GHz の範囲での確立された生物学影響お

よび健康影響は、 1°C 以上の体温上昇と関連している。 4 W/kg の全身 SAR (比吸収率) を生ずる電磁界への暴露は、体の熱調節機能を破綻させ、生体組織に有害なレベルの加熱を生ずる可能性がある。生体組織で最も感受性が高い組織の不可逆的影響の閾値は通常的环境下では 4 W/kg 以上である。このような電磁界の生体への影響を防止するために、電磁界の暴露制限がガイドラインとして示されている[80]。制限値には基本制限と参考レベルがあり、基本制限は確立された健康影響を根拠としている。

基本制限は 1~10 MHz では神経系への対策として電流密度が、100 kHz~10 GHz では全身的な熱ストレスや局部加熱対策として SAR が用いられている。100 kHz~10 MHz では電流密度と SAR の限度値が用いられる。10 GHz~300 GHz では体表面あるいは体表面近くの加熱を考慮して電力密度の限度値が定められている。基本制限値には職業的暴露と公衆の暴露に分けられ、職業的暴露は 4 Hz~1 kHz での 100 mA/m^2 に安全係数を 10 として 10 mA/m^2 を用いている。公衆の暴露基本制限値は職業的暴露の 1/5 ($=2 \text{ mA/m}^2$) としている。10 MHz~数 GHz での職業的暴露に対する基本制限値は 4 W/kg に安全係数を 10 として、 0.4 W/kg を採用している。公衆の暴露基本制限値は職業的暴露に安全係数を 5 として 0.08 W/kg と定めている。基本制限を超えるかどうかを決定する目的で、実際の曝露評価を行うために設けられたものとして図19に示す参考レベルがある。関連するすべての参考レベルが満たされれば、基本制限が満たされると考えられる。仮に測定値が参考レベルを超えたとしても、必ずしも基本制限を超えていることにはならず、より詳細な分析が必要となることを意味している。

一方、高周波加熱装置などから発生する電磁波ノイズによって電気・電子機器が誤作動したり、測定器への影響で測定結果に影響する場合がある。電磁波ノイズには電源線、信号線を伝播する伝導性と空間を伝播する放射性に大別される。伝導性ノイズ対策には電源フィルタ、チョークコイル、サージアブソーバ、バイパスコンデンサなどの対策部品が使用され、機器への電磁波ノイズ侵入を低減する。放射性ノイズ対策には金属導体板、導電性塗料などの電磁シールド材が使用され、電磁シールド材での電磁波ノ

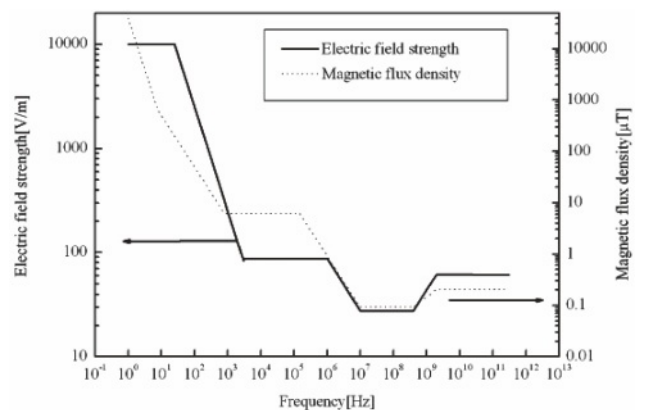


図19 時間的に変化する電界および磁界への公衆暴露に関する参考レベル(無擾乱 rms 値)。

イズの反射と材料内部での減衰の作用を用いている。

電磁波ノイズを発生する ISM 装置(産業, 科学, 医療, 家庭用および類似目的のために無線周波数エネルギーの発生および局所的用途のための装置)等については CISPR11[81]で発生電磁界の上限値が定められている。上限値はグループ区分ごとに分けられ, グループ 2 ISM 機器には材料の処理に意図的に無線周波エネルギーを発生または使用する機器が該当する。またクラス区分でクラス A は家庭用以外の施設で使用される機器に適用される。図20にはグループ 2, クラス A 機器に対する電源端子妨害電圧限度値を示す。

なお我が国においての高周波利用設備にかかる法規制としては電波法第100条があるが, 技術基準は CISPR11とは異なる。大気圧プラズマの生成に用いる電源や装置から発生する電磁界の対策には, 取扱説明書で定められた安全対策を遵守し, 実験前の点検を確実にを行い, 基本的な安全対策を確実に履行願いたい。

富田 一 (労働安全衛生総合研究所)

3.3.3 爆発・火災・有毒ガスへの対策

プラズマの生成から利用・応用に至るまで, 一部の基礎研究を除けば多くの場合に反応性ガスが用いられる。特に, 現在応用研究が盛んな大気圧プラズマにおいては, 様々な種類のガスを混合して活性化・反応させる。その意味で, 大気圧プラズマ研究は化学そのものと言える。しかしながら, 放電・プラズマ研究に従事している方の多くは筆者も含め, 化学以外が専門ではないかと推察される。一方で, 大気圧プラズマ生成用電源および放電回路等の取り扱いについても慣れからくる油断は禁物である。1991年に発生した大学研究室におけるプラズマ CVD 実験中の爆発死亡事故は, モノシランボンベにパージ用の亜酸化窒素が混入, 爆発したものであった。事故の直接の原因は亜酸化窒素のラインに設置された逆止弁が亜酸化窒素に対応したのではなく腐食し動作しなかったことであるが, 真の原因は電子工学の学生や研究者にとって不慣れな物質に対す

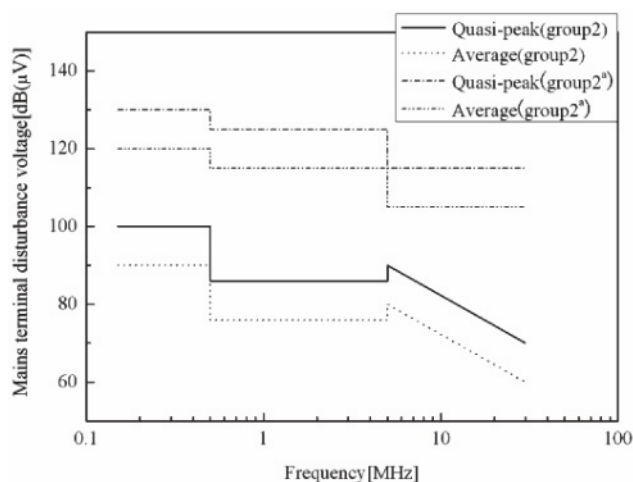


図20 試験サイトで測定したクラス A 機器の電源端子妨害電圧限度値。* CISPR 電圧プローブまたは適切な V-ネットワーク (LISNまたは AMN) を使用している場合, 1 相あたりの 100 A を超える電源供給電流。

る知識と調査の不足と思われる (JST「失敗知識データベース」より)。このような事故を二度と繰り返さないために, 本稿ではプラズマ生成時の安全性について, 特に化学の観点から大気圧プラズマ生成時に注意すべき点, 把握すべき事柄について述べる。紙面の関係で詳細な説明は省くが, 読者におかれては少しでも気になる事柄があれば事前に十分に確認していただきたい。

(1) プラズマ生成用原料ガス: 大気圧プラズマでは, 低気圧プラズマの場合と比較して原料ガスの密度が高く使用量も多いために反応性や毒性が大きく, 取り扱いには十分な注意が必要である。特に近年盛んになりつつある大気圧プラズマプロセッシングでは, 反応性ガスの使用量が低気圧プラズマと比較して格段に多い。また, 保管についても法令等 (例えば労働安全衛生法および関係法令) で定められた方法で貯蔵しなければならない。ガスを購入する際には製品安全データシートも入手し, 取り扱い方法を確認するように心掛けたい。実験を準備・遂行する際に調査・把握しておくべき原料ガスに関する危険性について一部を以下に記す。

- 引火性, 爆発性, 助燃性: 水素, 水素化物(シラン, メタン等), 揮発性有機化合物(石油類), 酸素, オゾン, 亜酸化窒素, 等。
- 毒性: 揮発性有機化合物 (ベンゼン, 酸化エチレン等), フッ化物 (フッ素, フッ化水素), 金属カルボニル類, 等。

(2) 副生成物として発生する有害ガス: プラズマ中では, 目的とする単一の反応のみが生じるだけでなく, 複数の副反応が生じるのが一般的である。したがって, 起こり得る反応を事前に調査する必要があるとともに, 予想外の反応による副生成物の発生に十分注意すべきである。大気圧プラズマ生成の際に注意すべき副生成物の一例を挙げる。後述のアジ化物 ($-N_3$), オゾン (O_3) 以外にも, 揮発性有機化合物 (VOC), 窒素酸化物 (NO_x), 一酸化炭素 (CO), シアン化合物 (CN) 等がある。窒素を含む雰囲気中での放電により発生する可能性があるアジ化物には注意が必要である。窒素化合物であるアジ化合物の中には, アジ化水素やアジ化ナトリウムといった青酸並みの猛毒を示すものがある。毒性の低い物質でも長時間の吸引により障害が発生する。特に空気等の酸素を含むガス中での放電により生成されるオゾンに関しては, 数百 ppm 以上の高濃度オゾンを吸引すると肺に重篤な障害が起こることが知られている。加えて, オゾンは人間の臭覚を麻痺させることから, 時間の経過とともに高濃度のオゾンの存在にも気づきにくくなる。その結果, 低濃度のオゾンであっても無意識に長時間の吸引を続けてしまい, 大きな障害を被ることになる。このような事態を避けるためには, オゾンの発生しやすい実験においては十分な換気は当然ながら, オゾン計等でモニタすることも考慮すべきである。また, 大気圧プラズマでは液体を用いる場合もあり, 反応後に残存した液体の取り扱いにも注意しなければならない。プラズマ中で生成されたガスが液体中に溶解した結果, 液体が強酸性や強アル

カリ性を示すことがある。また、有機溶媒中での放電により、有毒な揮発性化合物が発生する場合がある。

(3) ガス・ボンベの取り扱い：大気圧、低気圧に限らずプラズマの実験の安全性において最も重要なのはガスの取り扱いおよび実験室内の換気である。原料ガスのうち、引火性、爆発性のガスについてはシリンダキャビネットに保管しガス漏れ警報機の設置が義務づけられている（高圧ガス保安法および関係法令）。警報機自体の定期的な点検は言うまでもないことである。ガスボンベおよびガス配管には複数のバルブが設置されているが、いずれのバルブも圧力計、流量計を見ながら慎重に操作するのは当然ながら、バルブ操作の手順を毎回確認するようにしたい。ガスボンベには最大で150気圧もの高圧ガスが封入されていることを常に忘れてはならない。また、ガス配管は使用するガスや発生するガスに耐腐食性の材質のものを選択し、配管後はジョイント部を石鹼水等によりリークチェックをしなければならない。前述の事故の例からも、配管中のガスの圧力や流れには常に十分な注意を払うべきであることがわかる。特に大気圧プラズマ実験の場合、配管中各所での圧力差が小さくガスの逆流が発生しやすい。ガスが混合した結果、爆発性のあるガスが生成される場合もある。常に配管内でのガスの流れの方向を把握するとともに、配管中に適切な逆止弁を設置してガスの逆流を抑える対策が必要である。

(4) 室内換気、ガス排気の重要性：真空容器に封入された低気圧プラズマの場合と異なり、大気圧プラズマはオープンな環境で発生させる場合があり、実験従事者が発生ガスと接触するのを避けるために十分な換気設備が不可欠である。有害なガスを使用する時には、ガス検知器を備えるとともに装置上にフードを備えた強制排気装置等や除害設備が必要となる。除害設備では多くの場合吸着剤が封入されたフィルタが用いられるが、ガスの適用性、使用期限、回数等を把握および厳守することが重要である。すでに吸着機能が失われたフィルタを知らずして使い続けることほど恐ろしいものはない。機器に異常を感じない場合でも定期的な点検は必須である。

プラズマの実験研究を行うにあたっては、化学から電気回路まで様々な知識が必要である。少しでも不明な点があれば必ずその分野の専門家に尋ねるよう心がけてほしい。

林 信哉 (佐賀大学)

参考文献

- [1] U. Kogelschatz, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **23**,1 (2003).
- [2] 電気学会技術報告第679号 (放電プラズマ化学における反応粒子とそのエネルギー) (1998年).
- [3] 大久保雅章：大気圧非平衡低温プラズマを応用した環境改善技術に関する最近の成果, *プラズマ・核融合学会誌* 投稿中 (2007).
- [4] 小駒益弘監修：大気圧プラズマの生成制御と応用技術 (サイエンス&テクノロジー, 2006年).
- [5] 橘 邦英, 寺嶋和夫監修：マイクロ・ナノプラズマ技術とその産業応用 (シーエムシー出版, 2006年).
- [6] F. Tochikubo and H. Arai, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1* **41**, 844 (2002).
- [7] T. Nozaki, N. Muto, S. Kado and K. Okazaki, *Catalysis Today* **89**, 57 (2004).
- [8] 電気学会：電離気体論 (オーム社, 1986：第18版).
- [9] B. Eliasson, M. Hirth and U. Kogelschatz, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **20**, 1421 (1987).
- [10] J. Kitayama and M. Kuzumoto, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32**, 3032 (1999).
- [11] 本多侃士：気体放電現象 (東京電機大学出版局, 1987：第19版).
- [12] T. Ito and K. Terashima, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 2854 (2002).
- [13] 水野 彰：応用物理第 **72**, 457 (2003).
- [14] 山本俊昭：応用物理第 **69**, 284 (2002).
- [15] T. Nozaki, H. Tsukijihara and K. Okazaki, *Energy & Fuels*, **20**, 339(2006).
- [16] S. Okazaki, M. Kogoma, M. Uehara and Y. Kimura, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26**, 889 (1993).
- [17] 小特集「大気圧グロー放電の発生と応用」, *プラズマ・核融合学会誌* **79**, 1000 (2003).
- [18] J.S. Chang *プラズマ・核融合学会誌* **82**, 682 (2006).
- [19] J.R. Roth, *Industrial Plasma Engineering*; vol.1: Principles (1995, IOP Publishing) p. 354.
- [20] A.E. Guile, *Proc. IEE, IEE Reviews* **118**, 1131 (1971).
- [21] H. Bluhm, W. Frey, H. Giese, P. Hoppe, C. Schulteiß and R. Straßner, *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation* **7**, 625 (2000).
- [22] 秋山秀典, 中司 宏, 浪平隆男, 勝木 淳：応用物理 **69**, 434 (2003).
- [23] 佐藤正之：応用物理 **69**, 301 (2003).
- [24] K. Takaki, H. Akiyama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 979 (2001).
- [25] 高木浩一, 浪平隆男：電気学会誌 **126**, 784 (2006).
- [26] T. Ito, Y. Ueda, H. Komura and T. Nitta, *Proc. IEEE* **59**, 573 (1971).
- [27] W.D. Kimura, M.J. Kushner, E.A. Crawford and S.R. Byron, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **14**, 246 (1986).
- [28] S.I. Braginskii, *Sov. Phys. JETP* **34**, 1068 (1958).
- [29] M.J. Kushner, W.D. Kimura, S.R. Byron, *J. Appl. Phys.* **58**, 1744 (1985).
- [30] K. Takaki, T. Kobayashi, T. Fujiwara, *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 1548 (2000).
- [31] R. Montano, M. Becerra, V. Cooray, M. Rahman and P. Liyanage, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34**, 1610 (2006).
- [32] R.T. Robiscoe, A. Kadish and W.B. Maier II, *J. Appl. Phys.* **64**, 1744 (1988).
- [33] T. Namihira *et al.*, *Proc. 16th GD*, **2**, 657 (2006).
- [34] 原 雅則, 秋山秀典：高電圧パルスパワー工学 (森北出版, 1991).
- [35] 京都ハイパワーテクノロジー研究会：パルスパワー工学の基礎と応用「プラズマ・レーザー・粒子ビーム・X線の発生と応用 (近代科学社, 1992).
- [36] 八井 浄, 江 偉華：パルス電磁エネルギー工学 (電気学会, 2002).
- [37] 秋山秀典：高電圧パルスパワー工学 (オーム社, 2003).
- [38] H. Tamaribuchi, D. Wang, T. Namihira, S. Katsuki and H. Akiyama, "Effect of pulse width on ozone generation in pulsed streamer discharges", 2007 IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference, Albuquerque, USA, 2007. (in print)

- [39] Z. Li, S. Sakai, C. Yamada, D. Wang, S. Chung, X. Lin, T. Namihira, S. Katsuki and H. Akiyama, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34**, 1719 (2006).
- [40] 佐久川貴志, 山口貴弘, 山本邦博, 崔再九, 喜屋武毅, 浪平隆男, 勝木 淳, 秋山秀典: *電気学会論文誌 A* **126**, 703 (2006).
- [41] 佐久川貴志, 浪平隆男, 勝木 淳, 秋山秀典, 長田俊宏, 小金澤竹久: *プラズマ・核融合学会誌* **81**, 350 (2005).
- [42] T. Namihira, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam and H. Akiyama, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **31**, 1091(2003).
- [43] T. Namihira, S. Tsukamoto, D. Wang, H. Hori, S. Katsuki, R. Hackam, H. Akiyama, M. Shimizu and K. Yokoyama, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **29**, 592 (2001).
- [44] T. Namihira, S. Tsukamoto, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam, H. Akiyama, Y. Uchida and M. Koike, *IEEE Trans. Plasma Science* **28**, 434 (2000).
- [45] D. Trunec, A. Brablec, F. Stastny, *Contributions to Plasma Physics* **38**, 435 (1998).
- [46] E.E. Kunhardt, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28**, 189 (2000).
- [47] J. Laimer and H. Stori, *Plasma Process and Polym.* **4**, 266 (2007).
- [48] S. Kanazawa, M. Kogoma, T. Moriwaki and S. Okazaki, *Proc. Japan Symp. Plasma Chemistry* **3**, Tokyo, (1987) 1839.
- [49] S. Kanazawa, M. Kogoma, T. Moriwaki and S. Okazaki, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21**, 828 (1988).
- [50] F. Massines, A. Rabehi, P. Decomps, R. B. Gadri, P. Ségur., C. Mayoux, *J. Appl. Phys.* **83**, 2950 (1998).
- [51] T. Nozaki, Y. Unno and K. Ozaki, *Plasma Sources Sci. Technol.* **11**, 431 (2002).
- [52] M. Laroussi, I. Alexeff, J.P. Richardson and F.F. Dyer, *Plasma Sci. IEEE Trans.* **30**, Issue 1, p.158 (2002).
- [53] X. Duten, D. Packan, L. Yu, C.O. Laux, and C.H. Kruger, *IEEE Trans. Plasma Science* **30**, 178 (2002).
- [54] K. Takaki, H. Kirihara, C. Noda, S. Mukaigawa and T. Fujiwara, *Plasma Processes and Polymers* **3**, 734 (2006).
- [55] A. Schutze, J.Y. Jeong, S.E. Babayan, J. Park, G.S. Selwyn and R.F. Hicks, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26**, 1685 (1998).
- [56] A.D. MacDonald and S.C. Brown, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 411 (1994).
- [57] 橘 邦英: *応用物理学会誌* **75**, 399 (2006).
- [58] K. Kitano, H. Aoki and S. Hamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 8294 (2006).
- [59] 小特集「医療バイオ分野へのプラズマ応用」, *プラズマ・核融合学会誌* **83**, 594 (2007).
- [60] 鈴木茂夫: *わかりやすい高周波技術入門* (日刊工業新聞社, 2003).
- [61] 広畑 敦: *高周波技術センスアップ101* (CQ 出版社, 2006).
- [62] 産業創造研究所・マイクロ波応用技術研究会編: *初歩から学ぶマイクロ波応用技術* (工業調査会, 2004).
- [63] 森 栄二: *マイクロウェーブ技術入門講座 [基礎編]* (CQ 出版社, 2003).
- [64] 阿部英太郎: *マイクロ波技術* (東京大学出版会, 1979).
- [65] 電気学会・マイクロ波プラズマ調査専門委員会編: *マイクロ波プラズマの技術* (オーム社, 2003).
- [66] 小西良弘: *実用マイクロ波回路設計ガイド* (総合電子出版社, 1996).
- [67] Fawwaz T. Ulaby, *Fundamentals of Applied Electromagnetics* (Prentice Hall, 2004).
- [68] D.F. Gaitan, L.A. Crum, R.A. Roy and C.C. Church, *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 3166 (1992).
- [69] B.P. Barber and S.J. Putterman, *Nature* **352**, 318 (1991).
- [70] D. J. Flannigan and K.S. Suslick, *Nature* **434**, 52 (2005).
- [71] R.P. Teleyarkhan, C.D. West, J.S. Cho, R.T. Lahey Jr., R. I. Nigmatulin and R.C. Block, *Science* **295**, 1868 (2002).
- [72] D. Shapira and M. Saltmarsh, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 104302 (2002).
- [73] R.P. Taleyarkhan, C.D. West, R.T. Lahey, Jr., R.I. Nigmatulin, R.C. Block and Y. Xu, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 034301 (2006).
- [74] C.G. Gamara, S.D. Hopkins, K.S. Suslick and S. J. Putterman., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 064301 (2007).
- [75] S. Nomura and H. Toyota, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4503 (2003).
- [76] S. Nomura, H. Toyota, S. Mukasa, H. Yamashita, T. Maehara and M. Kuramoto, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 211503-1 (2006).
- [77] T. Maehara, H. Toyota, M. Kuramoto, A. Iwamae, A. Tadokoro, S. Mukasa, H. Yamashita, Ayato kawashima and S. Nomura, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 8864 (2006).
- [78] 市川健二: 「感電災害の特徴と傾向」, *電気と工事*12月別冊“災害防止のための現場安全読本”, 第1章, 感電災害の防止 (2006), p.5.
- [79] IEC technical report-type 2, "Effects of current on human beings and livestock, part1: general aspects", IEC479-1 (1994), third edition.
- [80] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (April 1998).
- [81] CISPR 11:2003, Industrial, scientific and medical(ISM) radio-frequency equipment- Electromagnetic disturbance characteristics -Limits and methods of measurement, International Electrotechnical Commission.

著者紹介



のぎき とも ひろ
野崎 智洋

1995年豊橋技術科学大学エネルギー工学専攻修士課程修了。石川島播磨重工業株式会社(現:IHI)(微粉炭燃焼), 岐阜大学工学部(工業用熱交換器)を経て, 現在, 東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻助教。博士(工学)。ミネソタ大学機械工学科在外研究員(2003.3-2004.2)。大気圧プラズマを使った材料合成, エネルギー・環境分野への応用に関する研究に従事。



たか き こう いち
高木 浩一

1988年熊本大学大学院修士課程修了。大分工業高等専門学校助手および講師を経て, 現在, 岩手大学工学部電気電子工学科准教授。2000年10月~2001年9月マクマスター大学客員研究員。博士(工学)。高電圧, 放電, パルスパワー工学に関する研究(排気ガスの大気圧プラズマ処理, 表面処理用プラズマ源の開発など)に従事。趣味は登山。



なみ ひら たか お
浪平 隆男

1997年熊本大学工学部卒業, 1999年熊本大学大学院修士課程修了, 2003年熊本大学より博士(工学)を授与。1999年熊本大学工学部助手, 2003年米国テキサスステック大学パルスパワー・パワーエレクトロニクス研究所客員教授, 2004年熊本大学工学部助手, 2006年熊本大学大学院自然科学研究科准教授を経て現在, 2007年熊本大学バイオエレクトロニクス研究センター准教授。IEEE, 電気学会, 静電気学会, プラズマ・核融合学会, 応用物理学会, 各会員。研究分野: 固体・液体・超臨界流体・気体中におけるパルス放電の物理と産業応用に関する研究に従事しており, 現在はナノ秒パルスプラズマによる高効率プロセスおよびコンクリート内パルスパワー放電によるコンクリートリサイクル, パルスプラズマを用いた医療機器の開発に注力している。



きた の かつ ひさ
北野 勝久

大阪大学大学院工学研究科附属原子分子イオン制御工学センター助教。2001年3月大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程修了。同研究員を経て2004年4月より現職。大学院から研究員時代まで磁場反転配位プラズマの研究に係わってきたが, 現在の主な研究テーマは大気圧低温プラズマを用いた液中プラズマプロセスである。マイクロプラズマ生成に関する物理研究をベースに, 液中における無機・有機反応, 滅菌などへのプラズマ応用研究を行っている。一方で, テラヘルツ時間領域分光法を用いたプラズマ診断法の開発などの研究にも従事している。



キム ジェ ホー
金 載 浩

2004年東京大学大学院新領域創成科学研究科博士課程修了。博士(科学)。2004年4月東京大学大学院新領域創成科学研究科助手。2006年10月産業技術総合研究所ナノカーボン研究センター産総研特別研究員, 2007年4月より同研究員, 現在に

至る。マイクロ波を用いた低圧大面積プラズマおよび大気圧マイクロプラズマ源と応用の開発, ナノカーボン材料合成に関する研究に従事。



のむら しん ふう
野村 信福

1993年豊橋技術科学大学工学研究科総合エネルギー工学専攻博士課程修了。博士(工学)。愛媛大学工学部助手(1994), 助教授(1999), ワシントン大学応用物理研究所訪問研究員(2005)を経て, 現在, 愛媛大学大学院生産環境工学専攻教授。ソノプロセス, 液中プラズマプロセス, 医療工学に関する研究に従事。



いち かわ のり みつ
市川 紀充

2000年工学院大学卒業。2002年芝浦工業大学大学院修士課程修了。2005年東京農工大学大学院博士(後期)課程単位取得満期退学。2004年日本学術振興会特別研究員, 2005年産業安全研究所(現, 労働安全衛生総合研究所)入所。現在, 同研究所電気安全研究グループ研究員。感電災害の防止に関する研究に従事。



とみ た はじめ
富田 一

1980年東京工業大学大学院修士課程修了。1984年労働省産業安全研究所入所。1988年10月~1989年9月サウサンプトン大学客員研究員。現在, 独立行政法人労働安全衛生総合研究所電気安全研究グループ統括研究員。安全装置等の電磁妨害対策, 可燃性物質の着火危険性の解明, 感電災害の防止に関する研究に従事。



はやし のぶ や
林 信哉

佐賀大学理工学部電気電子工学科講師。1997年九州大学大学院総合理工学研究科博士(理学)後期課程修了。博士(理学)。1997年佐賀大学理工学部電気電子工学科助手を経て, 2004年より現職。1996年4月~1997年3月学術振興会特別研究員。主な研究分野は, プラズマのバイオ応用, プラズマ滅菌器の開発, プラズマによる大気環境・水環境改善技術。一方, スペースプラズマにおける非線形波動現象の解明等のプラズマ基礎研究にも従事している。応用物理学会, 日本物理学会, プラズマ・核融合学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会, プラズマ応用科学会, 各会員。



いわ お とおる
岩尾 徹

2000年中央大学大学院博士課程後期修了。中大ポスドク, 学振特別研究員PDを経て, 2004年武蔵工業大学講師。現在に至る。博士(工学)。アーク放電, 雷放電, プラズマによる有害物処理, プラズマの画像処理に関する研究に従事。2005~06年度本誌編集委員会委員。2006年度本誌編集委員会プラズマ応用部門主査。趣味は, 野球観戦。