

# パルスプラズマが拓く新しい技術 ～プロセスから環境・バイオまで (プラズマエレクトロニクス分科会)

京都大学 江利口 浩二  
パナソニック(株) 奥村 智洋

現代社会においてプラズマは、様々な場面に登場し、その応用範囲は広く、基盤技術の1つとしても重要な役割を担っている。プラズマを記述する主要な物理量としては、密度(正イオン、負イオン、電子、中性粒子、活性種など)や温度(電子、イオン、中性粒子など)があり、“プラズマを応用する視点”に立てば、それら物理量を最適化・安定化・制御することが重要である。パルスプラズマ技術は、プラズマを記述する物理量を空間的・時間的平均(定常状態)として考えるだけではなく、各物理量の時間的変化(非定常的な過渡応答)の違い、つまり“陽”に現れない過渡応答係数の違いも積極的に利用するものである。装置・機器側からのインプットパラメータ群に、新たに“時間軸”を加えることにより最適化手法をより柔軟にし、反応場での広義の温度や反応粒子密度の理想的なバランスを実現する道を拓いた。例えば、インプットパワーのパルス化によりプラズマの低温化・大気圧形成などのメリットを活かせ、結果として、製造プロセス分野から環境・バイオ・医療分野に至るまで、パルスプラズマの応用範囲は拡大してきている。パルスプラズマの生成・反応メカニズムの理解を深めるとともに、その応用例を幅広く概観すること目的とし、プラズマエレクトロニクス分科会では、本シンポジウムを開催した。各応用分野で活躍されている先生方に、大気圧パルス放電、パルスプロセスプラズマなどのメカニズムから様々な応用例について講演いただき、その課題を参加者とともに概観・共有した。参加者はおおよそ130名程度であった。

東京大学の寺嶋和夫先生によるプラズマエレクトロニクス賞受賞記念講演”超臨界流体プラズマ”につづき、パルスプラズマの必要性・優位性(今回の企画の趣旨)について、江利口がイントロダクトリートをを行った。その後、7名の講演者から、基礎から応用について、興味深い話題が示された。

まず、東京工業大学の石井彰三先生から、ステンレスノズルと金属メッシュ間に生じる3つの異なる形態のパルス放電(DCグロー放電、矩形パルスによるグロー放電、DC正コロナ放電)について報告があった。矩形パルスの発生において、ひとつのパルスを非線形伝送回路に入力することで多数のパルス列を発生させる方法を用いたこと、また、絶縁破壊を通したアーク放電では、電極表面の平滑性や、短いパルス幅(<60ns)が重要であり、それらパラメータがアーク放電安定性を決定していることなどが報告された。さらに、正コロナにおいては電流と発光が同期していることやガス流最適化の重要性などが報告された。参加者からは、アークへの移行を抑制するために電極表面粗さをどれくらいまで小さくする必要があるか(平滑性<100 $\mu$ m)、ステンレスノズルの直径はどこまで太くできるのか、といった質問がなされた。

次いで、首都大学東京の栃久保文嘉先生より、大気圧パルス放電現象に関する理論、シミュレーション及びNO除去への応用について報告された。気体が絶縁破壊に至る現象を記述する理論としてストリーマ放電理論(Meekの理論)とグロー放電理論(Townsendの理論)が解説された。パルス放電においてとくに重要なストリーマにおけるフィラメントの進展が、電子なだれの発生→ストリーマの生成→放電路の完成というステップで起きること、また、ストリーマには1次ストリーマと2次ストリーマがあり、2次ストリーマは電子とイオンのドリフト速度の違いから生じる電荷分離に起因する電界の歪みによって生成され陽極へ向かうこと、2次ストリーマの方がラジカルは多く発生するものの電力効率は悪いこと、プラズマ界面でのラジカル発生がパルス放電機構を決定することなどが示された。会場からは、電力効率へのパルス幅の影響や、基材温度上昇への要因ごとの寄与割合などに関する質問がなされた。

熊本大学の勝木淳先生からは、パルス高電界のバイオ応用に関して、とくに細胞へのストレス刺激について報告がなされた。真核細胞を単純化したモデルにおいて電界シミュレーションを実施することにより、印加電界の周波数を高めるに従い細胞内に強い電界を作用させることが可能なこと、逆に、周波数を低くすることで、細胞膜のみに電界を与えて細胞内部を刺激することなく細胞膜を破壊できることなど、細胞を擬似的に”誘電体”として捉えたコンセプトに基づいたユニークな研究内容が示された。高周波の応用例としてタンパク質や DNA の変性、がん細胞のアポトーシス誘導が、また、低周波の応用例として細胞内部の物質を細胞外部へ取り出す方法など、バイオ・医療分野への応用例が紹介された。参加者からは、高周波電界が DNA 単体と細胞内 DNA へ与える影響の違いや、パルス電界のエネルギー密度などに関する質問があった。

次に、岩手大学の高木浩一先生より、種々のパルス電源を用いた大気圧プラズマの生成と応用についての報告があった。LC 回路とスイッチング回路からなるパルス電源を用いて、放電形態を制御する話があった。パルスプラズマの制御を高度化するため、5kV 以下の 1 次電源電圧で 100kV 程度の 2 次駆動電圧を発生させる技術、グロー転移を抑制できるようファーストリカバリーダイオードを用いてパルスの立下り波形を急峻にする技術など、種々のパルス電源に関する技術が紹介された。また、環境分野への応用例として、NO 除去に関して、グロー放電と比較して、短パルスを用いたコロナ放電の電力効率が優れていることが示された。パルスパワー技術のバイオ分野への応用例としては、椎茸、なめこ、霊芝などのきのこ類の生育を電圧印加などで促進する実験についての紹介があった。参加者からは、きのこ類への電力供給の方法や、電源に用いるダイオード素子の効率などについて質問がなされた。

神戸製鋼の玉垣浩氏からは、ハイパワーパルススパッタ(HPPS)によるスパッタ粒子のイオン化を利用した成膜技術について報告があった。実効ピーク電力を  $1\text{kW}/\text{cm}^2$  にまで高めることで高イオン化率を実現する方法が紹介され、Ti イオンの発光測定の結果が示された。HPPS 法によれば、真空アーク法におけるドロッププレットの発生、ホローカソードマグネトロン法における材料利用効率の低減などの従来方法の欠点を克服できること、また、パルスのデューティー比が 1%程度であれば平均投入電力は実用的なものであることなどが説明された。また、成膜速度が 30%程度低下するという課題についての議論もあった。圧力を高めてイオン全体に占める  $\text{Ar}^+$ イオンの割合が増した場合にどうなるか、ハードコーティングの前処理としての有効性、などの議論があった。

次いで、東北大学の寒川誠二先生より、パルス時間変調プラズマを用いた超低損傷微細加工プロセスについて報告された。半導体製造工程としてのプラズマプロセスにおいて問題となっている電荷蓄積によるゲート絶縁膜破壊と紫外線照射による欠陥・界面準位生成を抑制するため、数十・sec で投入電力を ON/OFF する技術について紹介された。OFF 期間に電子密度の急速な低下と電子付着による負イオン密度の急激な上昇が起きるため、基板バイアスに低周波電力を用いることで正負イオンによるエッチングが生じ、電荷蓄積の抑制が図れることが示された。負イオン効果の理解が今後重要であることが議論された。また、紫外線強度は電子エネルギーと同程度の時定数で減衰するため、OFF 期間での照射ダメージ抑制が可能なが述べられ、その応用例としての CCD 素子の特性劣化低減の事例が示された。さらに、パルス時間変調により、中性粒子ビーム技術において中性粒子ビーム生成の効率が向上することが紹介された。参加者からは、紫外線の進入深さや低周波バイアス電力との同期、中性粒子が本来持っている運動エネルギーによるダメージ、などに関する質問がなされた。

最後に総括として、九州大学の白谷正治先生から、パルスプラズマを活かすには、反応性プラズマにおける種々の時定数の差をうまく利用することが重要であることが述べられ、基板温度低減、ダスト発生低減をはじめ、パルスプラズマ活用の有効性、将来性が強調された。

今回のシンポジウムのテーマであるパルス制御は、先にも書いたように、これまでも度々議論されている内容である。また、製造プロセス、環境、バイオをはじめとするいろいろな場でも実用化されている技術である。本シンポジウムにおいて、新しい展開テーマも含め、パルス制御の基礎、原理、応用、長所・短所など

を講演者とともに、再認識することができた。熊本大学の勝木淳先生の”細胞への刺激”の例や、岩手大学の高木浩一先生の”きのこ”の例など、違った分野と思われる場面でも(パルス)プラズマは活躍している。参加者にはプラズマ応用技術の気づかなかった生活に密着した活躍の場を認識してもらえた、と信じている。

しかしながら一方で、プラズマに携わってきた研究者にとっても、パルス放電、ストリーマなど、基礎的な理解はまだ不十分であることが再認識された場であったと思われる。プラズマを応用し使いこなす、という立場だけでなく、プラズマ諸現象の物理を解明する、という立場の参加者にとっても本シンポジウムがおのの研究の方向付けの場となる機会となったのであれば、企画者として幸いである。