



小特集 マテリアル工学およびエネルギー・環境工学を進展させる熱プラズマの生成と計測

5. 熱プラズマプロセッシングの今後の展望

5. Future Prospects for Thermal Plasma Processing

渡辺 隆行

WATANABE Takayuki

九州大学大学院工学研究院

(原稿受付：2018年9月16日)

今回の小特集では、熱プラズマの1万 K 以上の高温を活かして、次世代のマテリアル工学やエネルギー・環境工学分野に寄与が期待できる熱プラズマの新たな展開を紹介した。熱プラズマは、溶射をはじめ、プラズマ溶解や製錬、ごみ処理で発生する焼却灰の熔融固化において活用されてきた。現在の熱プラズマプロセッシングは、このような従来のアーク技術の延長として、熱プラズマの高温を利用した研究が中心である。

熱プラズマを発生する方法のうち、直流放電のプラズマジェットやプラズマアークは高出力化や高密度化が可能な実用的な高温熱源である。プラズマジェットの流速は100–1000 m/s と速いことを利用したプロセッシングがプラズマ溶射である。しかし、この高速という特徴は、プラズマ中の処理物質の滞留時間を数ミリ秒以下と非常に短くしてしまう。処理物質をプラズマ中で十分に加熱することが困難であることから、粉体を処理するプロセッシングにはプラズマジェットは適していない。

次世代のプロセッシングに寄与できる熱プラズマとして、2章では高周波熱プラズマ、3章では多相交流アークを紹介した。高周波熱プラズマは無電極放電の一種であり、電極物質が不純物としてプラズマ中に混入しないという利点がある一方で、プラズマ中に供給された物質によってプラズマが不安定になるという欠点がある。高周波熱プラズマを利用して様々な機能性材料の合成が報告されているが、これらの実験室レベルの材料合成が産業应用到結びついた例がほとんどないのは、プラズマ発生エネルギー効率が悪いことも理由である。大電力高周波インバータ電源の開発は、電源効率の大幅な改善を意味しており、産業応用の展開が期待できる。また、円筒管内での発生に限定されていた従来の高周波熱プラズマであるが、高周波インバータ電源の開発によってプラズマ生成の自由度が高くなり、制御性の改善にも役立っている。

3章で紹介した多相交流アークは大面積のプラズマを効率よく発生できる方法であり、材料プロセッシングへの展開が大きく期待されている。多相交流アークの物理・化学現象は複雑であるが、実験的アプローチによってプラズマ

中の現象が解明されつつある。特に高速度カメラとバンドパスフィルターを用いることで、プラズマの温度や活性種分布の変動現象や電極の物理現象を可視化することが可能となっている。

熱プラズマプロセスの本質は、高温を利用することに加えて、高温から一挙に常温までの冷却過程を活用することである。熱プラズマプロセッシングでは、プラズマが有する高温を利用して原料を蒸発させ、目的物質を得るための各種の反応を起こす。このときにプラズマの流れの状態による加熱や冷却過程が重要な役割を果たしている。高速クエンチングを利用することによって、熱プラズマ中の非平衡状態を生み出し、通常では合成しにくい非平衡相や準安定相を得ることができる。3章と4章で紹介した高速度カメラの計測システムは、このような高速の物理・化学現象を解明することに役立つ。

高速クエンチングは熱プラズマによる廃棄物処理でも重要である。従来は熱プラズマの高温を利用して廃棄物を単に分解・無害化するだけであったが、水をプラズマ化することによって、ゴミから水素を取り出すプロセスが可能となる。4章では水プラズマの生成とその特徴、および水プラズマを搭載したプラズマトラックの例を紹介した。水プラズマによる廃棄物処理において、高速クエンチングは副生成物の生成阻止において重要な機構となっている。

このように考えてみると、熱プラズマは単に高温の熱源としてではなく、熱プラズマが有する非平衡性の活用が重要であることがわかる。熱プラズマは高温部分においてはほぼLTEが成り立つと考えられているが、熱プラズマでも非平衡性を有する空間が広い。熱プラズマの高温という特長を保持しながら、そこに非平衡性を導入することによって、材料プロセッシングで重要な役割を果たすラジカル等の活性種濃度を増大させることができる。

本小特集では扱うことができなかったが、熱プラズマを用いる重要なプロセッシングとしてはナノ粒子合成がある。熱プラズマによるナノ粒子合成は、一つのステップで原料供給からナノ粒子合成までを実現する効率的なナノ粒子量産システムであり、産業的に期待されているプロセッ

シングである。廃棄物処理でもナノ粒子合成でも、熱プラズマプロセッシングは従来からコストが高いものとして扱われてきた。しかし、熱プラズマが有する高温と高化学活性という特長を活用すれば、システム全体としてのコストを低減できる可能性がある。また、コストの点だけではなく、

熱プラズマにしか実現できないプロセスがあることも重要な点である。熱プラズマの高化学活性という特長を活用した非平衡効果によって、新しい材料や特異構造を有する材料の合成が可能となり、工業生産技術につながるプロセッシングの新たな展開を拓くことができる。

小特集執筆者紹介



むら かみ とも ゆき
村上 朝之

成蹊大学理工学部教授。1998年東京工業大学大学院・博士（工学）。東北大学・英国クイーンズ大学ベルファスト等を経て、2017年より現職。電力エネルギー、低温大気圧プラズマに関するモデリングが主なテーマ。



た なか やす のり
田中 康規

金沢大学電子情報通信学系・教授。1998年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年4月金沢大学助手。2002年8月同大学助教授（2008年准教授）。2005-2007年アメリカカリフォルニア大学サンディエゴ校客員研究員。2007年カナダトロント大学客員研究員。2010年4月から現職。工学博士。主として、熱プラズマの基礎・診断・応用、アーク遮断現象に関する研究に従事。



た なか まなぶ
田中 学

2010年3月東京工業大学 大学院総合理工学研究科 創造エネルギー専攻 博士後期課程短縮修了。同年4月同化学環境学専攻 特別研究員。2013年4月同特任助教。2014年1月九州大学 工学研究院 化学工学部門 助教、現在に至る。主として、熱プラズマ基礎現象、診断・計測・可視化、アーク放電現象、電極現象に従事。最近は、9歳と1歳の息子たちに囲まれ慌ただしく過ごしなが、着実に育児協力不足による奥様の恨みを買っています。



わた なべ たか ゆき
渡辺 隆行

九州大学大学院工学研究科教授。熱プラズマプロセッシングの材料合成や廃棄物処理の応用をめざして、プラズマの現象の解明を行っています。2013年に九大に異動してから、九州の大学や企業でプラズマの研究が盛んであることを実感し、九大での研究を楽しんでいます。ソウルやブルースのレコードを昔は集めていましたが、最近では中州のソウルバーに通ってCDを聞くことが多くなりました。