

特集

熱プラズマプロセッシング
の現状と未来

熱プラズマプロセッシングの現在と今後

渡辺 隆行

Present and Future of Thermal Plasma Processing

1. はじめに

大気圧で発生するプラズマには一万K以上の高温を有する熱プラズマと、常温から数百K程度の非平衡プラズマがあり、それぞれプロセッシングの開発が行われている。熱プラズマはほぼ熱平衡状態であり、高温を利用するという観点からプラズマ溶射や溶接として産業的に用いられてきた。高温を利用するプロセッシングに加えて、ラジカルを活用したプロセッシングへの展開は、2014年5月号に特集「熱プラズマプロセッシング」で解説されている。

今回の特集「熱プラズマプロセッシングの現状と未来」では、熱プラズマの高温・高活性を活かして、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する熱プラズマプロセッシングの新たな展開を解説する。環境問題解決の分野では熱プラズマプロセスが先端基盤技術のひとつとして注目されている。また、マテリアル工学の分野では熱プラズマによるナノ粒子合成の研究が産学で盛んである。

熱プラズマプロセッシングは多岐に細分化されて展開されていることから、プロセスをブラックボックスとして扱う研究には限界がある。計測や数値解析をもとに、化学工学の移動現象や反応工学などにもとづき、プロセスの物理・化学現象を解明することが工業生産技術として必要である。

2. 熱プラズマシステムの開発

熱プラズマを工学的に応用するために第一に重要なことは、プロセスの要求に応じた適切なプラズマシステムを開発することである。これについては、本特集の「熱プラズ

マ生成の最新動向」で解説する。

直流放電アークは、高出力化や高密度化が可能な実用的な高温熱源である。溶融金属に対してアークを発生する方法は、ニッケルナノ粒子製造として産業的に成功している。脱炭素化を背景に、鉄鋼業では電炉を大型化する研究が進められている。

従来の直流放電アークは電極間の10 mm程度の短い空間によって、プロセッシングが制限されていたが、数十倍の長さを有するロングアークが開発されている。ロングアークを用いたガス処理が実用化されており、本特集「半導体製造工場の排ガス処理におけるプラズマ応用」で解説する。これはプロセスの要求に応じてプラズマシステムを開発して実用化に成功した好例である。

熱プラズマシステム開発におけるマイルストーンとしては、多相交流アークの開発があげられる。従来の交流放電による熱プラズマは産業応用が限定的であったが、複数の電極間にアークを発生させることで、プラズマシステムの大型化が容易である多相交流アークが開発された¹⁾。

3. 熱プラズマの診断と数値解析による基礎現象解明

熱プラズマ流は数十mmで数万Kから数百Kの急峻な温度分布を有し、それに伴って流速やラジカル濃度も大きな勾配を持つ。これは、プラズマ流の特性を知らないと、適切なプロセス設計ができないことを示している。

プラズマ中の物理・化学現象を解明するための計測技術については、本特集「プラズマ可視化技術の最新動向」において解説する。熱プラズマ中の現象解明には、熱プラズマ流を可視化することが有効な手段であるが、熱プラズマには高輝度のアーク光が存在するため、プラズマ現象を可視化することは容易ではない。特定の波長を透過するバンドパスフィルターを用いる計測手法は様々な現象を理解することに役立つ。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温度変動や電極蒸発現象を可視化することが可能となった²⁾。



Takayuki WATANABE (正会員)
1986年 東京工業大学大学院理工学研究科化学工学専攻修士課程修了
現在 九州大学・工学研究院 化学工学部門・教授
連絡先；〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744
E-mail watanabe@chem-eng.kyushu-u.ac.jp

2024年9月2日受理

熱プラズマ流の複雑な現象解明には、数値解析も有効である。本特集では、「熱プラズマ流動シミュレーション—熱プラズマ誘発乱流が関係するナノ粒子生成およびアーク消弧プロセス—」と「アーク溶接における複雑系基礎現象の数値シミュレーションの最新動向」において、数値解析の最近の研究動向を解説する。

4. 熱プラズマによるナノ粒子合成

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る。本特集では、「熱プラズマによる粉体加工とその応用」および「プラズマ合成微粒子の抗ウイルス材への応用」において、工業生産技術としての現状を解説する。

熱プラズマによるナノ粒子合成では、リチウムイオン電池に用いる各種ナノ材料の合成の研究が活発である³⁻⁵⁾。リチウムイオン電池は次世代の社会インフラの主要技術として期待されている。そのため、高い充放電サイクル効率を維持しつつ、現行よりも高い電池容量、安全性などの要件を満たす電池の開発が行われている。

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。熱プラズマの流れによ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。この現象は μs ~ ms スケールの物理現象であることから、ナノ粒子の生成・成長過程を実験的に計測することは困難である。そこで、数値計算を用いた熱プラズマにおけるナノ粒子の生成機構が検討されている⁶⁾。

酸化物ナノ粒子や窒化物ナノ粒子など複雑な反応を伴う場合には、金属または化合物のどちらが核生成するのか、気・液・固相のどの相状態で化学反応が進行するか、など未解明な点が多い。そこでプラズマ中の酸化物ナノ粒子前駆体である金属蒸気と酸化物分子の可視化に関する手法が開発されている⁷⁾。

5. 熱プラズマによる環境応用プロセス

熱プラズマプロセスの高速クエンチングは、副生成物の抑制に有効であることから、廃棄物処理プロセスでも重要である。熱プラズマの高温を利用して廃棄物を単に分解・無害化するプロセスが主であったが、豊富なラジカルを有する熱プラズマの高化学活性を活用した廃棄物処理の実用化が進められている。

ラジカルを活用する熱プラズマシステムとして、水プラズマがある。水はプラズマ状態になるとO, H, OHラジ

カルなどを多く含んだ化学的に活性な反応場となる。特にOHラジカルは強い酸化力を有するため、水プラズマ全体として酸化雰囲気の利用ができる。

水プラズマの発生方法の特徴は、電極をアークの熱から保護するための冷却水を放電領域に直接吹き込み、プラズマガスとして使用することである。これにより、冷却水による熱損失を有効利用できるため、高いエネルギー効率を得ることができる。このような多くの利点を有する水プラズマ発生技術は、基礎現象⁸⁾と応用⁹⁾の観点から研究が行われている。

6. 熱プラズマによる水素製造プロセス

現在の水素製造は天然ガスの水蒸気改質が主流であるが、水素製造時にCO₂を排出するという問題がある。天然ガスを熱プラズマで熱分解する方法では、プロセス由来のCO₂の排出はない。水素に加えて、有価な固体炭素を副産物として製造することによって収益を期待できることから、他の水素生成技術よりも相対的に低コストで水素を生産できる可能性を秘めている。

熱プラズマによるターコイズ水素の成功例として、Monolith社の米国ネブラスカ州のOlive Creek 1のプラントがある。このプラントは2020年に操業を開始し、600 kg/hの水素製造能力と年間14 ktのカーボンブラックの生産能力を有している。

7. まとめ

熱プラズマは材料合成や廃棄物処理において、非常に高いポテンシャルを有しており、多くのプロセッシングに利用するための研究が産学で行われている。複雑なプロセスに対して化学工学の基本である移動現象をもとにした実験と理論の両面でのアプローチにより、工業生産技術につながる新たな展開を拓くことができる。

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し、熱プラズマにしか実現できないプロセスを開発することは重要である。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、新しいプロセスが開発されつつある。

参考文献

- 1) Watanabe, T., et al. : *Pure Appl. Chem.*, **82**(6), 1337-1351(2010)
- 2) Watanabe, T., et al. : *SPIE Proc.*, **10328**, 1032812(2017)
- 3) Xiaoyu, Z., et al. : *J. Chem. Eng. Jpn.*, **55**(1), 22-28(2022)
- 4) Wang, Y., et al. : *J. Phys. Chem. C*, **137**(20), 996409972(2023)
- 5) Ohta, R., et al. : *J. Phys. D*, **54**(49), 494002(2021)
- 6) Shigeta, M., A.B. Murphy : *J. Phys. D*, **44**(17), 174025(2011)
- 7) Tanaka, M., et al. : *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**(SH), SHHC08(2020)
- 8) Kim, S.H., et al. : *J. Chem. Eng. Jpn.*, **54**(6), 277-282(2021)
- 9) Duan, C., et al. : *J. Hazardous Mater.*, **430**(15) 128381(2022)