

特集

熱プラズマプロセッシング

プラズマには一百度以上の高温を有する熱プラズマと、温度が常温から数百度程度の低温プラズマがある。熱プラズマは局所熱平衡状態に近く、高エネルギー密度および高温を有している。さらに高温状態からの急冷によって、生成物の制御が可能である。

最近は大気圧非平衡プラズマの産業応用が盛んであり、本誌でも2011年6月号に「大気圧プラズマが拓くあたらしい技術」の特集が企画された。この企画では熱プラズマが扱われていないが、熱プラズマの産業応用としての歴史は長く、産業規模は非平衡プラズマに比べると圧倒的に大きい。

特に環境問題の解決のための先端基盤技術のひとつとして熱プラズマ技術が注目されており、材料合成の分野では熱プラズマによるナノ粒子合成システムの研究が産学で盛んにおこなわれている。本号では熱プラズマを用いたプロセッシングの基礎から応用までを解説する。

(編集担当：渡辺隆行)†

熱プラズマプロセッシングの展望

渡辺 隆行

大気圧で発生する熱プラズマは1万度以上の高温を有する熱流体であることが重要な特長である。この高温を利用するという観点から、広く産業的に展開されているのがプラズマ溶射¹⁾である。他にもプラズマ溶解や製錬²⁾、さらに最近はごみ処理で発生する焼却灰を熔融固化するプロセス³⁾において活用されている。現在の熱プラズマを用いたプロセッシングは、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。

熱プラズマが本質的に非平衡プラズマと異なる点は、高温から一挙に常温までの冷却過程をプロセスとして活用できることである。熱プラズマを反応場として材料プロセッシングに用いる場合には、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とができるが、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。熱プラズマを用いるプロセッシングでは、蒸気の冷却速度を $10^5 \sim 10^6$ K/s程度にすることができるので、この高速クエン

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、通常では合成ににくい非平衡相や準安定相を得ることができる。

熱プラズマは大気圧下においてはほぼ熱平衡状態にあることも非平衡プラズマと異なる点である。中性粒子、イオン、電子の温度がほぼ等しく、組成も平衡状態に近いプラズマの状態を局所熱平衡 (LTE, Local Thermodynamic Equilibrium) と呼んでいる。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、熱プラズマでも実際は非平衡性を有した空間が広く、最近の熱プラズマプロセッシングではこのような非平衡性をいかにうまく使うかが注目されている。つまり、熱プラズマの高エネルギーという特長を保持しながら、そこに非平衡性を導入し、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化学種濃度を増大させることができるので、新しい材料や特異構造を有する材料の合成技術の開発が期待されている。

熱プラズマを発生する方法として、直流放電、交流放電、高周波放電、マイクロ波放電がある。このうち、本特集ではまず直流アークについて解説する。直流放電を利用したプラズマジェットおよびプラズマアークは高出力化や高密度化が可能な実用的かつ工業的な高温熱源であり、発生方法が手軽であることから、各種のプロセッシングに広く用



Research Trends of Thermal Plasma Processing
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 九州大学大学院工学研究院 教授
連絡先：〒852-0395 福岡市西区元岡744
E-mail watanabe@chem-eng.kyushu-u.ac.jp

2014年2月25日受理

† Watanabe, T. 平成25, 26年度化工誌編集委員(5号特集主査)
九州大学大学院工学研究院

いられている。他の熱源と比較すると、直流アークは出力の増大が容易であること、設備費が比較的廉価であること、直流アークを発生する装置や技術は確立しており簡単であること、安定な放電を長時間持続できること、被加熱物質の加熱が効率よくできることなどの利点がある。

次に、交流放電アークのうち、特に多相交流放電について解説する。直流放電の代わりに多相交流放電を用いると、複数のトーチ間に容易にアークを発生させることができる。3相アーク放電は産業的に広く用いられているが、最近では6相や12相などの多相交流放電アークを用いた材料プロセスの研究がおこなわれている。12本の電極に位相の異なる多相交流を印加することにより、電極先端部で囲まれた領域全体にアークを発生させることができる。このような多相交流放電アークは3相アークとは根本的に異なり、多数の電極間で均一な放電領域を形成する放電方式である。

3番目に高周波プラズマに関して解説する。高周波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。さらに、高周波プラズマは、大きな直径(5~10 cm程度)のプラズマであること、ガス流速が直流アークに比べて1桁程度低いことも特長である。そのためにプラズマ内における処理物質の滞留時間を長くすることができる。プラズマジェット内の物質の滞留時間は1 ms程度であるが、高周波プラズマの滞留時間は10 ms程度である。よってプラズマ中の加熱や分解反応の進行を充分おこなうことができる。さらに各種の反応性ガスを使用して、酸化雰囲気や還元雰囲気を自由に選択することができる。

これらの熱プラズマの現象は複雑であるが、数値シミュレーションによってプラズマの物理化学現象を理解する研究がおこなわれている。材料プロセスの機構解明を目的としたプラズマ流の数値解析では、プラズマの熱流動現象、原料の熱伝達現象、ナノ粒子などの材料合成過程の3つの物理現象を正確に定式化しなくてはならない。これらを1つの方程式系として定式化するには、流体力学のみならず、電磁気学、伝熱学、化学反応速度論など多岐に渡る物理モデルを現象とプロセスのタイプに応じて体系化する必要がある。ここでは熱流体としてのプラズマ流の数値解析とプラズマ中のナノ粒子の生成過程のモデリングの研究動向について解説する。

実験的アプローチによってプラズマ中の物理現象を解明する研究も重要である。熱プラズマの温度計測手法として多く利用されている分光的計測法、電子密度や中性粒子密度の計測方法の基礎と最新の研究動向を解説する。

熱プラズマを用いる重要なプロセス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スである。そこで、要求される粒径や物性を持つナノ粒子を正確かつ大量に生産するための研究、および新しい機能性ナノ粒子の合成などの最新の研究動向について解説する。

熱プラズマは環境保全に関する先端基盤技術であり、従来の方法では処理できない難処理物質や廃棄物を分解することができる。熱プラズマによる廃棄物処理では、高温の状態から急冷することによって、有害な副生成物の生成を阻止することができる。プロセスの迅速なスタートアップやシャットダウンが可能であることも廃棄物処理に適している理由である。また、他の廃棄物処理方法に比べてガスの使用量が少ないので、排ガスシステムへの負担が小さいことから考えても熱プラズマには優位性がある。実社会でのプラズマプロセスによる廃棄物処理の好例として、高周波水蒸気プラズマによるフロン分解事業について解説をする。続いて、プラズマ熔融分解炉にPCB汚染物を投入し、プラズマアークおよび熔融スラグ浴の相乗効果によって効率良くPCB汚染物等を容器ごと熔融する技術について解説する。

熱プラズマの高温を利用するだけの技術開発には限界があると考えられてきたが、最近になって開発されたインフライト熔融によるガラス製造⁴⁾のように、高温を利用するプロセスでも、インフライト処理中の粒子内の物質移動、反応、熱移動を制御することによって、新しい工業的技術への展開が可能であることが示唆されている。

熱プラズマプロセスを実用化するのに重要な点はコストである。熱プラズマプロセスは従来からコストが高いものとして扱われてきたが、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。熱プラズマに存在している荷電粒子やラジカルを上手に利用して、高化学活性であるという特長を活用した非平衡効果によって、工業生産技術につながる材料プロセスの新たな展開を拓くことができる。プラズマプロセスにおける将来の舵取りとして、化学工学の重要性は益々大きくなると認識されている。

参考文献

- 1) Fauchais, P. : *J. Phys. Appl. Phys.*, **37**, R86(2004)
- 2) Taylor, P. R. and S. A. Pirzada : *Adv. Perform. Mater.*, **1**, 35(1994)
- 3) Heberlein, J. and A. B. Murphy : *J. Phys. Appl. Phys.*, **41**, 053001(2008)
- 4) 伊勢田徹, 渡辺隆行 : 化学工学, **77**, 188(2013)