

インフライト溶融のための熱プラズマ発生技術

九州大学 工学研究院

渡辺 隆行

Thermal Plasma Generation for In-Flight Melting Process

Takayuki Watanabe

Faculty of Engineering, Kyushu University

1. はじめに

プラズマには一萬℃以上の高温を有する熱プラズマと、温度が常温から数百℃程度の低温プラズマに大別できる。10年位前には、大気圧で発生するプラズマは熱プラズマのことを指しており、低圧で発生する低温の非平衡プラズマとは明確に区別されていた。この熱プラズマと低温プラズマを分けている温度とは、イオンや中性粒子などの重い粒子の温度を指しており、電子温度は両者とも数万℃になっている。

最近は大気圧で発生するプラズマとして、熱プラズマに加えて非平衡プラズマも注目されている。このプラズマは大気圧で発生するプラズマでありながら、電子温度のみが高く、重い粒子の温度は室温程度であり、低温プラズマとして分類されるものである。つまり、以前は大気

圧プラズマと熱プラズマは同意語であったが、最近は大気圧で発生するプラズマのなかに新たに非平衡プラズマが加わったことになる。

筆者は1980年代から熱プラズマの研究を続けているが、熱プラズマの産業応用分野はそれほど広がっていないように感じている。これは熱プラズマの高温という特長だけが産業的に利用されてきたためである。熱プラズマプロセッシングの今後の発展は、高温という特長だけではなく、熱プラズマが有する化学的活性という特長を活かして、熱プラズマの優位性を他のプロセスに対して示すことにかかっている。

本稿では、熱プラズマの発生方法とそれぞれの特徴をまとめ、熱プラズマの特長を活かしたガラスのインフライト溶融をはじめとした材料プロセッシングの課題を解説する。

2. インフライト溶融にはどの熱プラズマが使えるか

ガラスのインフライト溶融に熱プラズマが適している大きな理由は、電子のみならずイオン

や原子などの重い粒子も高温であり、かつエネルギー密度が大きいため、ガラス原料を短時間で高温にすることができるからである。また、化学反応速度は温度に対して指数関数的に増大するので、熱プラズマ中では反応速度が著しく大きくなることも材料プロセッシングには有利である。

さらに、熱プラズマでは特に急冷装置を用いなくても、プラズマ流に乗っているだけの状態で 10^6K/s 程度の冷却速度を得ることができるので、通常では結晶化しやすい物質をアモルファスとして合成することが可能である。

他にもプロセスのスタートアップやシャットダウンを迅速に行うことができること、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などから考えても、熱プラズマを用いる優位性がある。

さらに、熱プラズマの優位性は、雰囲気を自由に選べることにもある。通常は空気雰囲気のプラズマでガラスのインフライト溶融を行うが、アルゴンやヘリウムを用いた不活性雰囲気、酸素を用いた酸化雰囲気、水素を用いた還元雰囲気などを自由に選択できるので、材料プロセスの要求に応じた雰囲気の制御が可能となる。

(1) 直流放電による熱プラズマ

直流アーク放電を用いたプラズマの発生方法はすでに確立された技術であることから、多くの分野で用いられている。直流アークには非移行式と移行式の方式があり、インフライト溶融に使用できるのは図1に示すプラズマジェットと呼ばれる非移行式アークである。

直流放電を利用したプラズマジェット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。他の熱源と比較すると、出力の増大が容易であり、かつ設備費が比較的廉価であり、安定な放電を長時間持続できるという利点がある。このように装置や技術が簡単であるアーク放電の技術は高い汎用性を有している。

しかし、直流放電によるプラズマジェット

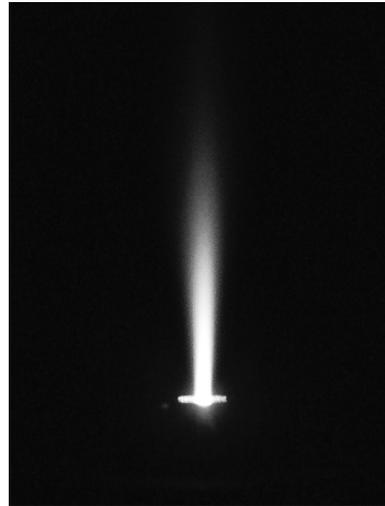


図1 直流放電によるプラズマジェット

は、プラズマが細く、流速が速いことから、限られた時間内での溶融をプラズマ中で完結させることが難しいので、インフライト溶融には適していない。

(2) 高周波放電による熱プラズマ

高周波 (RF) プラズマトーチの基本構成は、石英管等の絶縁材料でできた水冷トーチの一端にガス導入部を設け、トーチ外部の誘導コイルによりトーチ内のガスをプラズマ状態にするものであり、誘導結合型放電である (図2)。RFプラズマは無電極放電の一種であるので、電極物質が不純物としてプラズマ中に混入しないことが特長である。

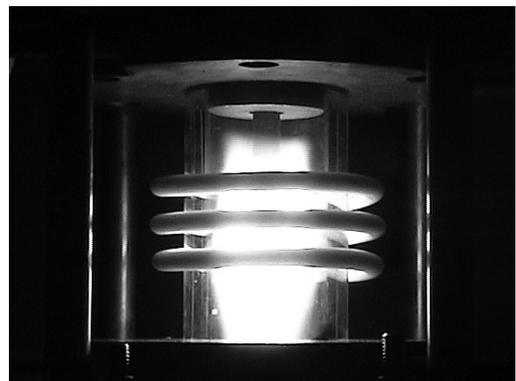


図2 高周波放電による熱プラズマ

また、RF プラズマの特色は、大きな直径（10 cm 程度）のプラズマであること、流速が直流アークに比べて1桁程度低いことである。そのためにプラズマ内での溶融時間を長くすることができる。直流放電プラズマ内の原料の滞留時間は1 ms 程度であるが、RF 熱プラズマの滞留時間は10 ms 程度である。よってプラズマ中で十分にインフライト溶融を行うことができる。

しかし無電極放電であるRF プラズマは、外的じょう乱には敏感であることが短所となる。RF プラズマでガラスのインフライト溶融を行う場合には、トーチに導入する原料によってプラズマが不安定にならないように、供給量が低い値に限定されてしまう。

(3) 多相交流放電による熱プラズマ

直流放電の代わりに多相交流放電を用いると、複数のトーチ間に大口径の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用いられているが、ガラスのインフライト溶融のために6相や12相などの多相交流放電を用いた新しいアーク炉が開発されている¹⁻⁶⁾。図3に示すように、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、高温領域が広く、かつ流速が遅いプラズマ領域を発生することが

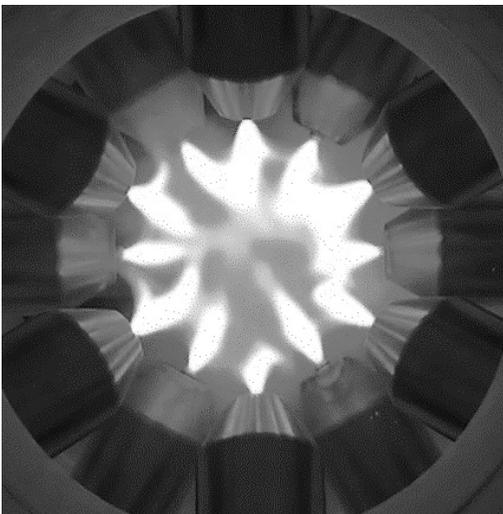


図3 多相交流放電による熱プラズマ

できる。多相交流アークは、直流アークよりもプラズマ体積が大きく、RF 熱プラズマよりも低コストで高効率という利点がある。

多相交流アークは、電極を放射状に配置し各々の電極に位相の異なる交流電圧を印加することにより、電極間に電源周波数によって回転するプラズマを発生させる新しい方式である。この方式では、電極間のどこかでプラズマが連続的に発生しているため、放電状態が常に持続されており、安定した連続放電が得られる。

(4) プラズマと燃焼炎との複合加熱技術

インフライト溶融には熱プラズマを単独で用いるよりも、エネルギー効率がよい燃焼炎と組み合わせることで、より大きなエネルギー削減効果が期待できる。酸素燃焼炎の温度は3000 K 程度であることから、インフライト中の時間内で原料の溶融を完結させることは難しいが、温度が10,000 K 以上の熱プラズマと組み合わせることによって、限られたインフライト時間内でも十分な溶融が可能となる^{7,8)}。

インフライト溶融に用いる多相交流アークと燃焼炎による複合加熱炉を図4に示す。多相交流アークの上部に酸素燃焼管を設置し、ガラス原料は酸素燃焼管の中心より空気をキャリアガ

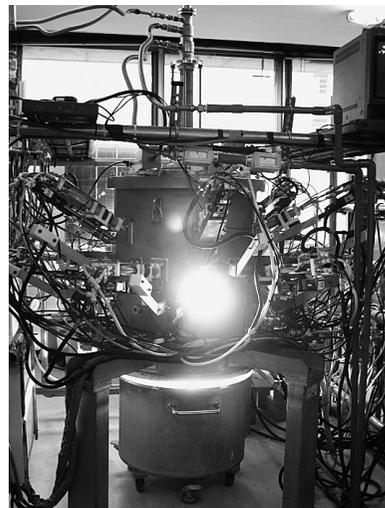


図4 多相交流アークと酸素燃焼炎の複合加熱によるインフライト溶融装置

スとして供給する。この複合加熱炉はプラズマと燃焼炎を単に組み合わせただけではなく、2種類の高熱源を複合させることによって従来にはない新しい高温場を生成していることが重要である。インフライト溶融ではプロセスのパラメータの制御が困難であるが、燃焼炎と熱プラズマはそれぞれの温度と流速が異なることから、パラメータ制御の自由度が大きくなる。

3. おわりに

プラズマ技術は材料合成における産業応用としての有力ツールとして注目されており、同時に廃棄物問題の解決のための新しい先端基盤技術のひとつとしても注目されている(図5)。

従来、熱プラズマはその高温という特長を利用しているものがほとんどであるが、熱プラズマには高化学活性という魅力的な特長がある。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、高化学活性を活かすことができれば、新しい材料合成プロセスを開発することが可能である。

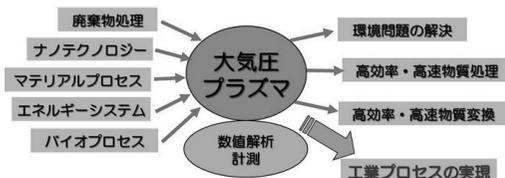


図5

このような特長を活かして、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が重要である。ガラスのインフライト溶融はこの好例であるが、他にも、焼却と灰溶融を一段のプロセスとして、熱プラズマによる都市ゴミのガス化で合成ガスを製造する行うプロセスがある。都市ゴミだけではなく、バイオマスのガス化なども熱プラズマで行うことによって、難分解のバイオマスでも合成ガスの原料とすることができる。

プラズマを用いるナノ粒子の製造法は、一段のプロセスで、安価でかつ大量にナノ粒子を製造することができるという長所を有するが、熱プラズマを用いる材料プロセッシングが産業界に広く使われるためには、熱プラズマ中における原料挙動の解明と、より制御されたプロセッシングの開発が必要である。

引用文献

1. Y.Yao, et al, Chem. Eng.J., 139, p.390(2008).
2. Y.Yao, et al, Sci. Technol. Adv. Mater., 9, 025013 (2008).
3. Y.Yao, et al, Plasma Chem. Plasma Process., 29, p.333(2009).
4. T.Watanabe, et al, Pure Appl. Chem., 82, p.1337 (2010).
5. M.Tanaka, et al, Current Appl. Phys., 11, p.S35 (2011).
6. M.Tanaka, et al, IEEE Trans. Plasma Sci., 39, p.2904(2011).
7. Y.Liu, et al, Thin Solid Films, 519, p.7005(2011).
8. M.Tanaka, et al, Thin Solid Films, 523, p.67 (2012).