

インフライト溶融によるガラス製造のための 熱プラズマ発生技術

東京工業大学

渡辺 隆行

Thermal Plasma Generation for In-Flight Glass Melting Technology

Takayuki Watanabe

Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

現在の大規模ガラス製造には約 150 年前に発明されたシーメンス型溶解炉が今でも最も広く用いられている。ガラス製造の省エネルギーにはガラス原料の溶融過程の見直しが効果的であり、今までに様々なガラス溶融技術が考案されている。シーメンス型溶解炉の高効率化だけではエネルギーコストの削減には限界があることから、これからの低炭素社会に対応するには、シーメンス型溶解炉からの脱却が必須である。

NEDO「革新的ガラス溶融プロセス技術開発」については本誌 92 号¹⁾で紹介されており、ガラス原料溶解に必要なエネルギーを可能な限り削減することを目的としている。すなわちプラズマと燃焼炎などの熱源を用い、かつ、熱源から原料への熱伝達効率を良くするため、高温熱源中に原料を直接投入するインフライト溶融という方法でガラス溶解を行う。高温熱源中に顆粒状バッチが投入され瞬時に高温にするので、原料の溶解は気中の飛翔時間（数十

～百 ms 程度）にほぼ完結し、これにより大幅な溶解炉の小型化が可能となる。ガラスのインフライト溶融は今までにない新技術であるので、革新的新技術として位置づけている。

ガラスのインフライト溶融は、シーメンス炉の複雑な原料溶解過程を一本の加熱源で置き換えてしまう方式なので、熱伝達の高効率化、設備の省スペース化、プロセスの飛躍的な単純化が可能となる。この結果、大きな溶解炉に高温の融液を長時間保持しておくことができなくなり、その分のエネルギーが削減できる。

2. インフライト溶融に用いる熱プラズマ

熱プラズマの最大の特徴は、電子のみならずイオンや原子も高温であることである。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。さらに熱プラズマのエネルギー密度が大きいことは、被加熱物質を短時間で高温にすることができることを示す。

第 2 の特徴は熱プラズマ中に存在する電子やイオンなどの荷電粒子をプロセッシングに活用できることである。電子やイオンは電磁場の影響を受けるので、外部からの電磁場によってプラズマをプロセスに応じて制御することができ

〒226-8502 横浜市緑区長津田 4259-G 1-22

TEL・FAX 045-924-5414

E-mail: watanabe@chemenv.titech.ac.jp

る。

第3の特徴はラジカルの存在である。プラズマ中では電子の衝突によってラジカルなどの活性種を容易に生成することができるので、ラジカル反応を利用した材料プロセッシングが可能となる。

第4の特徴は雰囲気自由を選べることである。アルゴン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、材料プロセッシングには好都合である。

材料プロセッシングには、アーク放電を利用した熱プラズマと高周波電磁場を利用して誘導的に発生させる熱プラズマが主に用いられる。それぞれの熱プラズマの特徴を把握して、材料プロセッシングで要求される内容によって適切な種類のプラズマを選択することが大切である。

(1) 直流アーク

直流アーク放電を利用したプラズマは高出力化や高密度化が可能な実用的な高温熱源であり、容易に高温、高速、高活性の熱プラズマ流を得ることができる。直流プラズマトーチには、図1に示すようにプラズマジェットと呼ばれる非移行式と移行式がある。移行式アークはノズルから離れた所に置かれた導電性の物質に主たる正電位を印加する。移送式アークは陽極上に置かれた原料の加熱に適しているが、導電性の低いガラスの溶融には適していない。

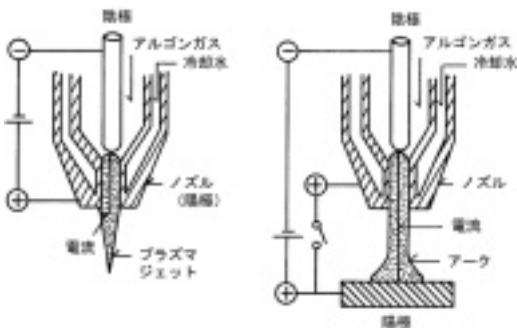


図1 非移行型アーク（プラズマジェット，左）と移行型アーク（右）。

非移行式アークはプラズマジェットと呼ばれ、陽極部と陰極部の間で発生したアークをノズルから噴出させた高温領域を材料プロセッシングに用いる。移行式アークのようにトーチ外部に陽極が存在しないので、インフライト溶融に用いることは可能である。しかしプラズマジェットの温度や速度には半径方向および軸方向に急激な勾配が存在しているため、プラズマジェット内で原料を均質に加熱することは本質的に困難である。また、高温領域が小さく、流速が速いプラズマジェットはインフライト溶融には適していないと考えられる。

(2) 誘導結合型プラズマ

高周波（RF）プラズマは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。RFプラズマは無電極放電な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からガラス溶融に適している。しかし無電極放電は外的擾乱には敏感なので、プラズマ内に供給する原料

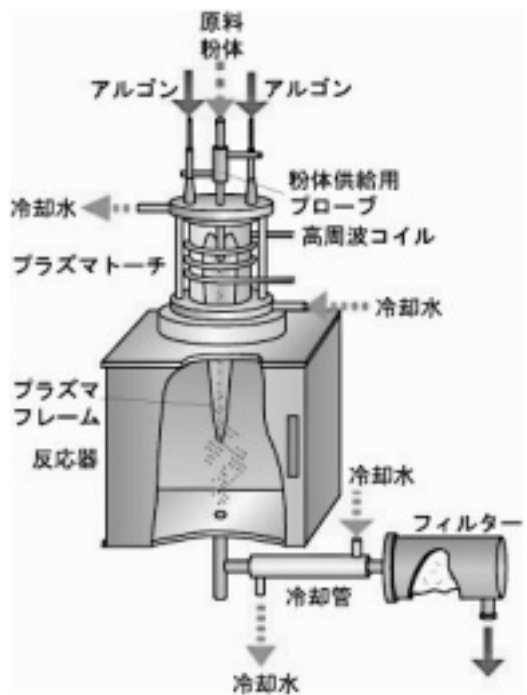


図2 RFプラズマによるインフライト溶融装置。

物質によってプラズマが不安定にならない範囲での原料供給量に限定されてしまう。

RF プラズマによるインフライト溶融の構成を図2に示す。このプラズマの重要な特色は、大きな直径（10 cm 程度）のプラズマであること、およびガス流速が直流アークに比べて1桁程度低いことである。直流プラズマ内の物質の滞留時間は1 ms 程度であるが、RF 熱プラズマの滞留時間は10 ms 程度であるので、インフライト溶融を行うには充分である。

(3) 多相交流アーク

直流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。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プラズマ発生法である²⁾。

多相交流アークは電力から熱プラズマへのエネルギー変換効率が高く、プラズマ流速が遅いことから粒子の飛翔過程での加熱効率が高いこと、出力の大きいものが実現可能であることなどの利点を有しており、ガラス原料のインフライト溶融に適していると考えられる。

しかし多相交流アークに関する研究例がまだ少なく、現在は長時間の安定運転の達成が課題となっている。多相交流アークを安定に発生するには電極現象の解析が重要であることから、高速度ビデオカメラによる多相交流アークの放電現象の解析が行われている。12本の電極において、位相の順に反時計回りに並べた場合と、任意に並べ換えた場合の高速度写真を図3に示す³⁾。多相交流アークの放電の順番を変えることによって電極間の高温領域を制御することができ、目的に応じたインフライト溶融プロセスを制御できることが示唆されている。

ガラスのインフライト溶融では、装置上部に取り付けた水冷式粉体供給ノズルから原料を投入し、電極間で放電したアーク中に原料を供給する。ガラス化反応がどの程度進行したかのを

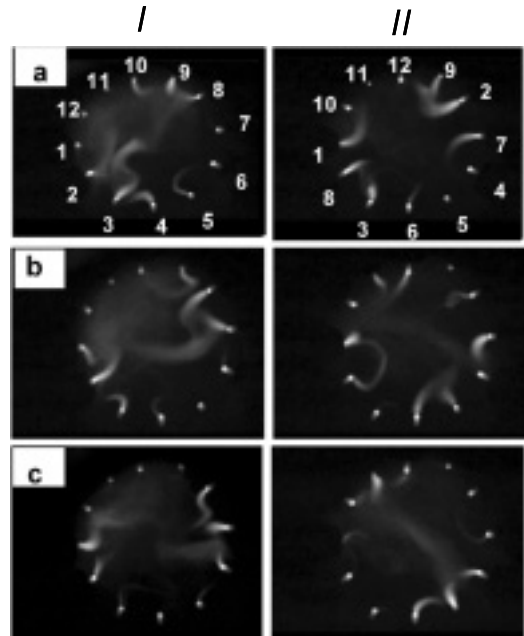


図3 12相交流アークの様子。反時計回りの位相(左), 任意に並べ換えた位相(右)。(a)0 ms, (b)4 ms, (c)8 ms.

定量的に評価するために、X線回折法による結晶性珪砂の残存量評価を行った。RFプラズマや12相交流アークによるインフライト溶融粒子の内部に残存している珪砂の量を測定したところ、図4に示すように珪砂結晶格子による回折線が消失していることがわかる⁴⁾。

以上の実験結果は、ガラス原料造粒体がプラズマ中を飛翔する非常に短い時間で、ガラス化反応を終了させることが可能であることを示している。これらのガラス液滴が下部にあるガラ

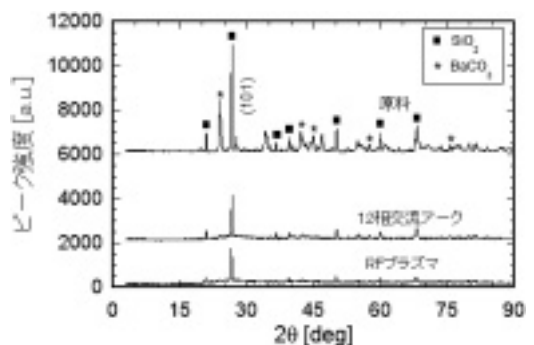


図4 RFプラズマと12相交流アークのインフライト溶融によるガラス化率。

融液表面に堆積する過程では、分解ガスの発生による気泡の発生を抑制でき、後工程でのガラスの均質化、高品質化に必要な時間を短くすることができる可能性があることも示している。ガラス製造プロセスにおいて、エネルギー使用量の低減を大幅に進める上では、インフライト溶融という新しい溶解方法はキーテクノロジーの一つとなり得るものと考えられる。

(4) 多相交流アーク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のみを用いるよりも、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、気中の飛翔時間内で原料の溶解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、限られた飛翔時間内で十分な溶解が可能となる。

インフライト溶融に用いる多相交流アーク炉を図5に示す。多相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スとして供給する。電極はタングステンを用い、熱的保護のため電極ホルダーで水冷冷却している。また、タングステンの酸化防止のために電極周りにアルゴンシールド

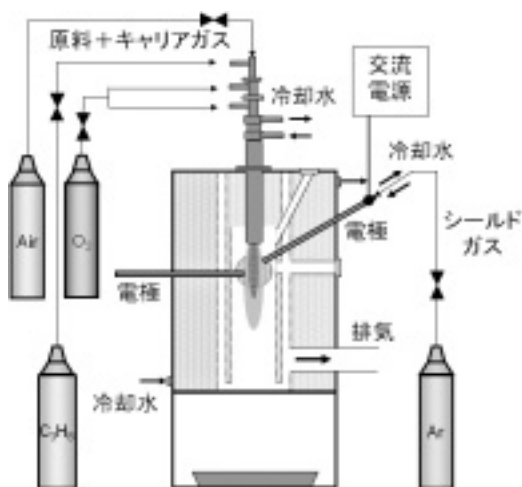


図5 多相アークと酸素燃焼炎の複合加熱によるインフライト溶融装置。

ドガスを流している。6相を2段で30°毎にずらして12相交流アークとし、アーク領域を上下方向にも拡大している。

異なる高温熱源を組み合わせる他の方法としては、RFプラズマとDCプラズマジェットを組み合わせたハイブリッドプラズマの例がある⁹⁾。このハイブリッドプラズマはそれぞれのプラズマを単に組み合わせただけの高温熱源ではなく、2種類の高温熱源を複合させることで従来にはない新しい高温場を発生していることが重要である。本研究の多相交流アークと燃焼炎の複合加熱源も、単に異なる熱源を組み合わせただけではなく、燃焼炎と熱プラズマのそれぞれの特徴を活かして、インフライト溶融に適した高温熱源をつくることを目的としている。

プラズマと燃焼炎の相互作用という観点から、プラズマ・核融合学会専門委員会「プラズマ科学と燃焼科学の融合」においてプラズマ支援燃焼に関する研究が盛んに行われている。多相交流アークと燃焼炎の複合加熱技術は、インフライト溶融によるガラス製造への応用だけではなく、プラズマと燃焼炎の相互作用という科学的な意味でも重要である。

3. おわりに

ガラス原料をプラズマという高温場を飛翔させて短時間で溶解を終了させるインフライト溶融による新規のガラス溶解技術については、超高温場でのガラス原料の反応に関する研究はこれが初めてのものであり、工業的な意味だけでなく、学術的な観点からも非常に興味深いものとなっている。超高温場の飛翔プロセスについては、まだ不明な部分が多く、また、過度の加熱は成分の揮発、減少をもたらすため、検討すべき課題は多い。しかし、本プロジェクトによる新規のガラス溶解技術が低炭素社会の実現に対して役に立つ技術として確立されることが期待されている。

なお、本研究は、経済産業省の「革新的ガラス溶融プロセス技術開発」として、新エネルギー

ギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託を受けて実施されたものである。

引用文献

1. 伊勢田徹, NEW GLASS, 24(1), p. 55 (2009).
2. T. Matsuura, et al., Thin Solid Films, 515(9), p. 4240 (2007).
3. T. Watanabe, et al., Proc. 19 th Inter. Symp. Plasma Chem., P 2. 11. 25 (2009).
4. Y. Yao, et al., Plasma Science and Technology, 10 (3), p. 344 (2008).
5. T. Yoshida, et al., J. Appl. Phys., 54(2), p. 640 (1983).