

革新的ガラス溶解技術が拓くガラス産業の未来

(独) 物質・材料研究機構 外部連携部門 学術連携室

井 上 悟

Future of Glass Industry through Advanced Glass Melting Technique

Satoru Inoue

National Institute for Materials Science

External Collaboration Division, Academic Collaboration Office

1. はじめに

NEDO エネルギー使用合理化技術戦略開発先導研究プロジェクト「直接ガラス化による革新的省エネルギーガラス溶解技術の研究開発」において、コア技術である革新的ガラス気中溶解技術の有効性が確認され、平成 20 年度から NEDO 新規技術開発プロジェクト「エネルギーイノベーションプログラム／革新的ガラス溶融プロセス技術開発」が開始され、平成 24 年度末をもって終了した。プロジェクトの生み出した研究開発成果は将来の革新的ガラス溶解技術開発の基礎データとなり、ガラス産業の新たな展開を推進する駆動力となると期待される。本稿では、開発の背景や歴史を振り返りながら、新規気中溶解技術が拓くガラス産業の未来について展望する。

2. 省エネルギー型ガラス溶解技術開発

2.1 開発の方向

ガラス製品の製造エネルギーの削減は環境問題だけでなく製造コストの削減にも直結する研究項目である。その方策としては、1) より低温度で溶解できる実用ガラス組成の開発、2) 廃熱回収によるガラスバッチの前処理による溶融エネルギー削減、3) 加熱源からガラス原料や融液への熱伝達効率の向上、4) 炉材の改良による保持所用熱量の削減などが考えられる。1) は組成設計の問題であるので溶融技術と直接関係しない。計算機の組成シミュレーションなどにより取り組むべき問題である。2)、3)、4) は溶融技術と直接関係し、現行のシーメンズ炉で限界が見え始めている以上新たな溶融方式を考える必要がある。

米国のガラス産業の組織する工業会である GMIC の 2002 年の調査報告 (Glass Industry of the Future—Energy and Environment Profile of the U. S. Glass Industry – April 2002, p 53)

の炉タイプ別の省エネルギー達成率期待値を見ると、蓄熱方式であるシーメンス炉型が高々20%程度であるのに対して、蓄熱や熱回収をせずに酸素燃焼バーナーなどを用いて原料溶解・均質化に必要なだけの燃焼エネルギーを供給して溶解する方式、即ち直接加熱型で熱回収を行わない炉によるガラス溶解に必要なエネルギーのみを投入する方式においては、更に40%程の省エネルギーが期待されると報告されている。

GMICの米国内調査によるガラス溶融炉の形式別操業数統計によると、我が国より電気料金が安く酸素製造コストが低いこともあり、近年、容器ガラス製造等の中規模炉において、酸素燃焼バーナー直接加熱型のガラス溶解方式の普及が進んでいる。我が国では、電気料金が酸素ガス価格を押し上げるため、高付加価値製品製造以外への普及は余り進んでいない。また、炉材の改良や各種センサーを駆使したきめ細かな操業などによる更なる省エネルギー化は不可能ではないものの期待値は小さく、シーメンス炉を脱却することから始めなければ大幅な省エネルギーを達成するブレークスルーは生まれない段階まで来ている。

2.2 非シーメンス型ガラス溶融技術

先人の代表的な試みをまとめると以下のようになる。

1) 酸素燃焼バーナーを用いたガラス溶融炉例 その1 (SCM: Submerged Combustion Melting)

現在も研究が進められている例の一つである。液中で酸素燃焼バーナーを燃やして加熱源からガラス原料や融液への熱伝達効率を大幅に改善しようとする例である。炉上部からバッチを投入し下から空気—燃料あるいは酸素—燃料の燃焼により加熱する方式である。現在はプル量1トン/dayであるが、2008年までに4トンにスケールアップする方向で開発が進められている。省エネルギー達成の可能性は示されている

が、融液への不純物混入、特に耐火物寝食による不純物混入が最後まで問題になりそうである。詳しくは引用文献の1)を参照されたい。

2) プラズマを用いた溶融炉の例

これも現在開発進行中の例である。熱源として直流アークプラズマを用いた例である。ガラスバッチ上部にアークプラズマを発生させて高温で溶解する方式である。無アルカリのE—ガラスの試験溶解を実施している。プラズマを使用した場合に問題となるのが高温による成分の揮発である。また、電極保護のために還元側の雰囲気としているので2価の鉄分が約2倍に増加した。我が国に於いては、電力価格が米国よりかなり高いためプラズマ加熱だけの溶融はコストの点で適用可能なガラス製品に限られる。

3) 酸素燃焼バーナーを使用したガラス溶解炉 例その2

少し古い例であるが Avco Research Laboratory Inc., Gas Research Institute などにより考案実験された AGM (Gas-Fired Advanced Glass Melter) である。ガス酸素燃焼バーナーにガラスバッチを投入して炎の中で溶解する方法である。原料の粒径は10~150 μ mであった。原料バッチと火炎が直接接触するため熱伝達はかなり改善される。テストプラントを実施するには至らなかった。推定溶融時間は約50msと報告されており、火炎中での溶解と言うよりは炉内の金属製コーン表面での加熱溶融である。火炎の中に原料を投入する点でかなり革新的な方法であったといえる。詳しくは引用文献の2)を参照されたい。

3. 革新的ガラス気中溶解技術

革新的ガラス気中溶解技術は、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おり、前節に紹介した欧米の先人の試みの欠点を十分考慮して考案した溶解方式の開発を目的とした。即ち、プラズマと酸素バーナーの複合熱源を用い、なおかつ、熱源か

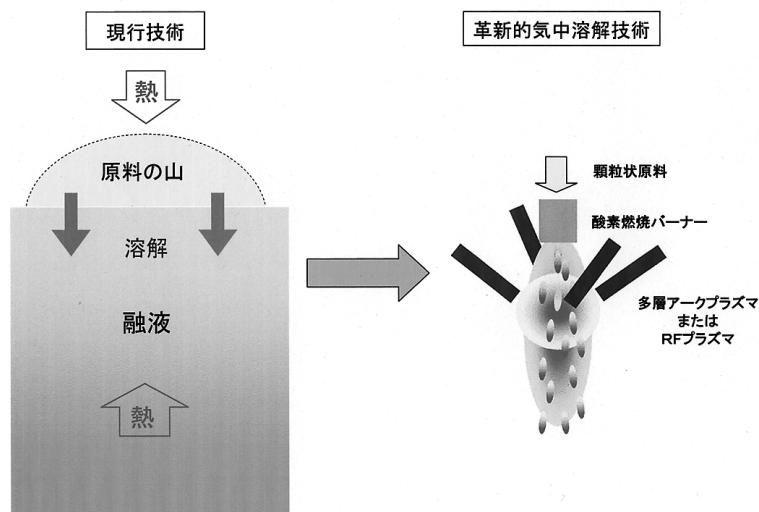


図1 革新的気中溶解技術と現行技術の比較模式図

ら原料への熱伝達効率を良くするためプラズマ中に原料を投入する。複合加熱源により顆粒状バッチが気中で溶解することとなり、溶解時間は原料粒の空中飛翔時間（1秒以内）となり、これにより大幅な溶解槽体積の削減が可能となる。また、本方法の革新性は、均一な融液化促進のため、顆粒状バッチは微粒原料から造粒して作製され、個々の顆粒が溶解した時に最終ガラス組成となるよう工夫する点にもある。大きな溶解槽に長時間高温の融液を保持しておくことが無くなり、その分のエネルギーが削減できる。図1右側に本プロジェクトで使用している複合加熱源のモデル図を示した。図の左側に示してあるガラス溶解のモデルは、シーメンス炉においてバーナー輻射加熱で原料を溶解・融液化する過程である。新規のガラス気中溶解は、このシーメンス炉の原料溶解過程を一本の複合加熱バーナーで置き換えてしまう方式である。熱伝達の高効率化、設備の省スペース化、そして結果的にプロセスの単純化が飛躍的に進むことになる。この結果、大幅に溶解槽の体積が削減され、大きな溶解槽に長時間高温の融液を保持しておくことが無くなり、その分のエネルギーが削減できる。現在のシーメンス炉における平均的な融液の溶解槽内滞留時間は、短くて

1.5日、長い場合は7日と推定されている。かなり長時間ガラス融液が溶解槽の中に滞在している。したがって、品質を保持して滞留時間を少しでも短縮できれば省エネルギーにつながる。

プラズマを用いる点で Plasmelt Glass Tech 社の方式に似ているが、プラズマ中に原料を投入する点で大きく異なる。酸素バーナーを用いる点で SCM 方式と同様であるが、液中燃焼ではなく火炎中に原料を投入する点で大きく異なる。火炎中に原料を投じて溶解時間を短縮するという点からすれば上述の AGM に近い方法である。しかし、AGM の溶解が気中ではなく落下後の液だまりで発生するので、本技術の気中溶解とは異なる。また、大きく異なる点は、現行のようなガラスバッチを用いるのではなく、火炎中での溶解に適した顆粒状原料に加工して用いることである。したがって、AGM と異なり原料が空中の高温場を通過する非常に短い時間内に全て溶解させてガラス化反応を終了させることができる。今までにない新技術であるので、本技術を気中溶解（In Flight Melting）と呼んで革新的新技術として位置づけた。本プロジェクトでは一般的なソーダ石灰ガラス組成の酸素ガスバーナー溶融において目標としていた

900 kcal/kg-glass の燃料原単位を達成し、また、同様のバーナーにより液晶ディスプレイ等使用されている無アルカリホウケイ酸塩系ガラスを目標 3000 kcal/kg-glass に対して 2800 kcal/kg-glass の燃料原単位で溶解し得ることを 1 t/day 規模のテストプラントにより実証した。気中溶解技術により大幅なガラス溶融エネルギー削減が可能となった。

4. 気中溶解技術が拓くガラス産業の未来

気中溶解法により顆粒状原料を効率よく溶融してガラス化出来ることは明らかとなったが、実際のガラス製品生産に適用するには、製品の品質レベルに応じて造粒法、余熱法、溶融法、そして必要に応じて清澄・脱泡法などの最適化が必要である。気中溶解の3つの要の技術、造粒法、余熱法、溶融法は幅広く改造・調整が可能である。気中溶解技術のもたらす効果は省エネルギーだけではない。1つは溶炉サイズ的大幅な減少であり、2番目は加熱源として様々な設計が可能であること、そして3番目は原料の顆粒化による効果である。期待される効果を以下にまとめる。

1) 炉サイズの縮小によるメリット

- ・ 炉建設コストの削減。試算では 100 t/day クラスで約半分となる。
- ・ 素地替えの短時間化・低損失化。製造コストの削減となる。
- ・ 一つの炉に一つの成形ラインが可能となり、生産調整も容易となる。
- ・ 廃炉時のコスト削減が可能となる。

2) 様々な加熱源が使用可能

- ・ バーナー+プラズマ複合加熱、または、プラズマ加熱による高温溶融が可能。本プロジェクトで世界に先駆けて開発された A C アークプラズマは、加熱体積を非常に大き

くでき、また、多数組の対電極を使用するため多様な高温場創製ができ、気中でのガラス溶融に適している。難溶融性特殊ガラスの工業生産も期待される。

- ・ 酸素バーナーには様々な形式が可能であり、溶解条件に応じて調整可能。

設計によっては運転中の調整も可能。使用するガスはコストに応じて選択することも可能となる。

3) 顆粒原料を使用する利点

- ・ 均質化の促進と品質の安定化に効果大。最終的に製品の歩留まりと品質向上に寄与。

これらは著者が期待できると考えているメリットであり、中には実現がかなり難しいものもある。一方、ガラス製品の需要には波があり、一つの製品が爆発的に売れ続けるというケースが将来あまり期待できず、他品種少量生産を強いられるのが現状である。短時間かつ低コストで生産ラインを建設したり、止めたり、廃棄したりといった切り替えが容易な製造システムの開発はガラス産業の構造改善上必要と考えられる。また、気中溶解は、その構造上スケールアップによる省エネルギーは余り期待できないと考えられる。シーメンス型炉に合わせた現在の製造システムではない新たな気中溶解製造システムの開発としてガラス産業界に展開されて行くことを切望する。

最後に、NEDO 研究開発機構「エネルギーイノベーションプログラム・革新的ガラス溶融プロセス技術開発プロジェクト」にご協力いただいた皆様に謝意を表し結びと致します。

引用文献

- 1) David Rue, Gas Technology Institute, Submerged Combustion Glass Melting, 66th Glass Problems Conf., Oct. 26 (2005).
- 2) J. Am. Ceram. Soc., 71 (9), p. 749 (1988).