ニューガラス関連学会

溶融シミュレーション研究会活動報告

井原築炉工業(株) 技術本部開発部

片山 豊

Activity report of Melting simulation study group

Yutata Katayama

Ihara Furnace Co., Ltd., Devlopment Department Engineering Division

1. ガラス溶融炉と省エネルギー技術

現在最も多く使われているガラス溶解炉は、19世紀中ごろにシーメンスが発明した蓄熱室を備えた連続式タンク炉と同じ原理を用いている。ガラス溶解炉の形式は、その他にもあるが、調合した粉体原料とカレットを溶融状態にあるガラス素地面上に投入し、1450℃~1600℃の高温に加熱することで溶融ガラスを生成するというプロセスは、どの形式の炉であっても殆ど同じである。その為、ガラス製造の原価に占めるエネルギー費は非常に大きいので、エネルギー原単位を下げる努力が積み重ねられてきたという歴史がある。ガラス溶解炉(サイドポート炉)の一般的な構造と設備を図1に示す。

ガラス溶解炉の省エネルギー対策について、 以下の3つの観点でまとめた。

1) ガラス溶解炉の形状 (基本設計)

引き上げ量を同一とした場合, ガラス溶解炉はより小さい方が熱効率は良いが, 小さくし過ぎると品質が悪くなるという事は周知の事である。ガラス溶解炉の形状が品質に大きく影響す

る。ルノへ俗肝がツルルが面貝に入さ、影音・

〒531-0074 大阪市北区本庄東 3-5-21

TEL 06-6372-3206 FAX 06-6372-3727

E-mail: katayama-yutaka@ihara-furnace.co.jp

るので、品質を上げる設計が省エネルギー対策になるのは当然である。しかし、ガラス溶解炉の内部は高温であり、ガラスの温度分布や流れを測定することは非常に困難であるので、定量的な評価が出来なかった。その為、ガラス溶解炉の設計や操炉は、統計的な計算や経験と勘に頼らざるを得ないのが実情となっている。井原築炉工業株式会社はニューガラスフォーラムが主催する溶融シミュレーション研究会に参加しており、同会より提供を受けているシミュレーションソフトGICFLOWを使ってガラス溶解炉の形状についての評価を試みたので、それについては後述したい。

2) ガラス溶解炉を構成する材料及び設備

ガラス溶解炉は、炉本体と多くの付帯設備で 構成されている。炉の運転はこの設備の機能と 性能に左右される為、設備導入と改善は省エネ ルギーに大きく関わってくる。表1は、この内 容をまとめたものである。「設備付加による省 エネ」として上げている設備は、ガラス溶解炉 にとって必須の物ではないが、導入することで かなりの効果が期待されるものである。バブ ラーと電気ブースターについては、既に多くの ガラス炉で導入しているが、原料・カレット予 熱装置は、世界的に見てもまだ殆ど導入されて おらず、今後の課題となっている。

硝子溶解炉主要設備 Main Equipments of Glass Furnace

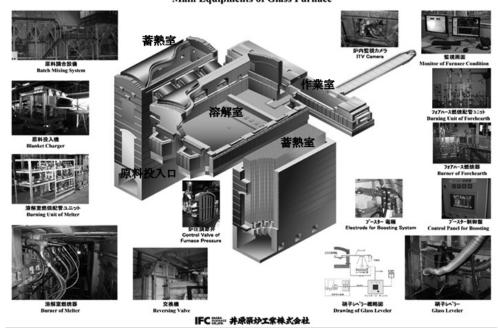


図1 サイドポート炉概略図

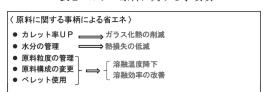
表 1 ガラス溶解炉を構成する材料及び付帯設備に関 する事項

〈設備改良による省エネ〉	
● 耐火物	断熱の強化
● 熱交換装置	熱回収効率の改善(燃焼空気の高温化)
● 燃焼制御装置	燃焼空気比の最適化(排ガス損失熱の低減)
● 燃焼装置	1次及び3次空気の低減、燃焼フレームの安定化
● 炉圧制御装置	炉内への外気流入防止
● 原料投入装置	伝熱面積を増加させ溶融効率の改善
〈設備付加による省エネ〉	
↑ バブラー	ガラスの対流促進による溶融効率の改善
● 電気ブースター ―――	ガラスの対流促進
	及び 直接加熱による溶融効率の改善
● 酸素燃焼	燃焼雰囲気からの熱伝達量の増大
	及び排ガス損失熱の低減
● 原料・カレット予熱 ⇒	排ガスからの熱回収・溶融効率の改善

3) ガラス原料

ガラス原料に関する省エネルギー対策は、各 ガラス製造メーカーのノウハウある。ガラス溶 融プロセスにおいて、炉内温度を下げる事がで きれば、大幅な省エネルギーが実現できるが、 着色や泡、ブツの発生などの危険がある。ま た、バッチ混合の状態が悪く、搬送中にセグリ ゲーションなどの問題を起こしていると原料の 溶融効率が低下するので、原料調合設備の設計

表2 ガラス原料に関する事項項



段階での改良も省エネルギー対策の一つとして 考えられる。

以上のように、ガラス溶解炉の省エネルギー対策には様々な方法があるが、比較的導入に対する効果が評価し易いものについては、既に可能な範囲で実施されている。その為、従来のような検討方法では、今後、大幅な原単位の向上は見込めない。

2. シミュレーション技術の活用

シミュレーションには,実物または相似模型 を使い現実に模した実験を行うことで解を求め る物理モデルシミュレーションや,複雑な事象 を簡単な数式モデル・論理モデルに置き換え.



図2 GICFLOW スタート画面

コンピューターによって数値解を求める数値シミュレーションなどがある。物理モデルによる 実験は古くから行われているが、数値シミュレーションは、物理モデル実験がその規模・環境・経過時間などの条件において実施できない場合や、測定の手段がないなどの際に、補助的な位置付けで活用されていた。数値シミュレーションは、近年、シミュレーション技術とコン ピューター環境の目覚ましい進歩もあって,簡便さとコストの優位性により,産業の各分野で広く利用されるようになった。その為,今日では単にシミュレーションと言えば,数値シミュレーションを指すまでになっている。

各種産業界のものづくりにおいて数値シミュレーションは、開発工期の短縮とコストの削減の他に不具合の発見や耐久性の確認などの目的でその役割が非常に大きく、なくてはならない存在になってきている。しかし高付加価値のガラスを除いて一般のガラス製造ではまだ殆ど利用されていない。近年、ガラス溶解炉の寿命が延びるにしたがって、省エネルギー対策としての設計の重要性が増し、シミュレーションへの期待が高まっている。

以下はニューガラスフォーラムが提供しているシミュレーションソフト GICFLOW (図 2)

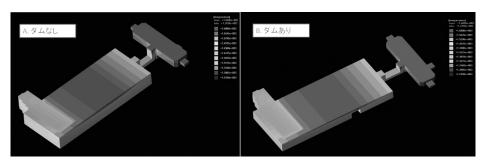


図3 ダムウォールの設置なし(左)と有り(右)

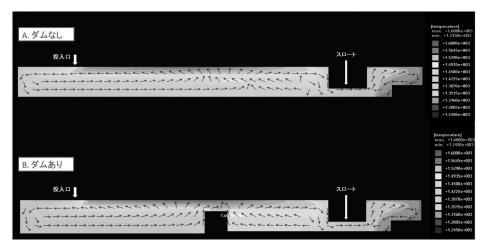


図4 ダムウォールの設置なし(上)と有り(下)

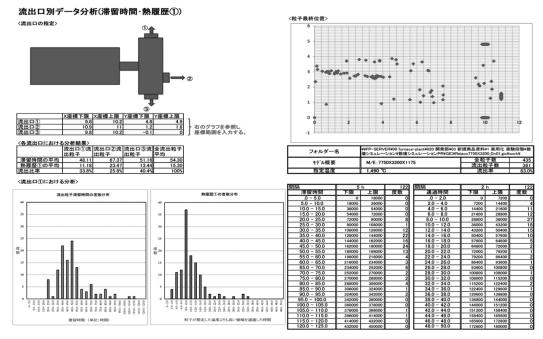


図5 粒子移動計算による粒子履歴の分析

を使って、引き上げ量30 Ton/Day のガラス溶解炉におけるダムウォール設置を検討した例である。詳細は省略するが、ダムウォールの有無でガラスの温度分布と流れを比較すると、ダムウォールの設置によりスロート前の温度が上がり、投入口付近の温度が低下するとの結果(図3、図4)が出ている。また、GICFLOWが持っている粒子移動計算モデルで、ガラス炉の性能について定量化(図5)もおこなっている。このように、今まで経験と勘により判断していたものに、可視化と定量化による判断を加えて検討することが可能となった。

3. 溶融シミュレーションにおける課題

数値シミュレーションで得られる結果を現実 に近づける為には、詳細な条件設定やデータの 入力と細かな計算メッシュの設定を行う必要が ある。実際起こっている現象では、多くの物理 現象が相互に影響し合っているので、個々の現 象のモデル化とそれらモデル群の連成も必要と なる。しかしながら、データ・条件の入力と計 算メッシュの設定数を増やすほど掛かる時間と コストが増えることになるので、ガラス溶融プ ロセスのシミュレーションにおいて、どの程度 の精度を必要とするのか, 許容範囲を見極める 必要がある。GICFLOW では、溶解槽の熱流 動のみに着目し、境界条件に温度を変数とした 多項式を用いることや数値を代入することで. 大幅な時間短縮が可能となっている。因みに. 前述の引き上げ量 30 Ton/Day のガラス溶解炉 の解析で要した時間は、インテル® Core™ i7 プロセッサーのノートパソコンを使って24時 間程度であった。シミュレーションはあくまで も模倣であって、その結果で予想される事象 が、現実と同じ状態を示すとは限らないので、 結果を如何に理解し評価するかが問題となる。 更なる問題として、溶融シミュレーションに携 わる技術者は、①ガラス原料とガラス製品に関 する知識②ガラス溶解炉に関する知識③流体力 学や燃焼工学などに関する基礎知識(4)モデル化 される数理モデルを離散化しコンピューターで 解析を行うための計算科学に関する知識、など

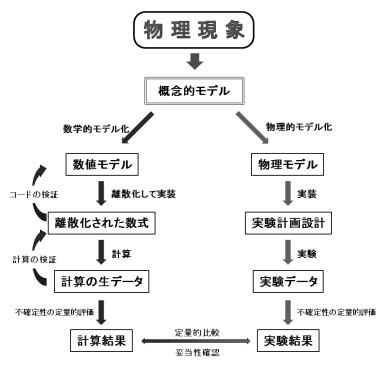


図6 ASME V&V 概念図

の高度な知識が必要になる。しかし、常時ガラス製造の現場で、シミュレーション技術を利用したいと考えている者は、ガラス溶融プロセスの知識が豊富であっても、シミュレーションを取り扱う計算科学などの知識を殆ど持っていない。従って、多くの物理現象を数理モデル化し構成されている複雑なシミュレーションソフトは、製造現場の技術者にとってブラックボックス化しているので、解析結果に対しての検証が十分に行われていなければ、大きな問題を引き起こす恐れがある。図6は2006年10月に米国機械学会(ASME: American Society of Mechanical Engineers)において発表されたシミュレーションソフトの品質保証(ASME V&V

10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics)に関する概念図である。溶融シミュレーションに関しては、実験モデルによる妥当性確認は難しいが、シミュレーションの結果が許容しうる不確かさの範囲で現実を模倣していることを保証する為に、今後更なるガラス溶融技術者と解析技術者の連携による取り組みが必要と考える。

参考文献

- (1) 山根正之ら,「ガラス工学ハンドブック」初版 第1刷 朝倉書店 (1999).
- (2) 日本ガラスびん協会 ホームページ
- (3) ニューガラスフォーラム ホームページ
- (4) 日本機械学会ホームページ