

ガラス溶解炉における電気ブースティングの 技術動向

——特に数学モデルによるデザインの最適化——

*Glass Service, Inc.
**セラミックフォーラム㈱

Petr Jandacek*, 加藤石生**, Josef Chmelar*

Electric boosting technology for glass melting furnace

——Optimization of furnace design by mathematical modeling——

Petr Jandacek*, Iwao Kato**, Josef Chmelar*

*Glass Service, Inc.
**Ceramic Forum Co., Ltd

厳しい価格競争のなかで、顧客のニーズに合う商品を安価に製造することが、生き残りへの最大の武器である。こうした競争のなかで、ガラス溶解炉において、化石燃料をバーナーで燃焼させる加熱手段は電気より圧倒的に安価であるにも拘らず、電気が多用されているのは、コストの面からは驚くべきことでもある。ここでは、全電気溶融は他書にゆずり、電気ブースティングのみを取り扱う。

1. まえがき

世界中のガラス溶解炉の3分の1に、電気ブースティング(Electric Boosting; EBと略す)が設置されていると推定されている。EBは、大きな投資なしに、増産が可能な方法として知

られている。もし、このEBがないとすると、ガラスメーカーが増産を計画しても、その増産のための設備改造は、次期の冷修まで待つ必要がある。しかも、こうした改造は、非常なコストがかかり、最近のマーケットの不安定な状態を考慮するとそのリスクは大きすぎる。100 m²の溶解面積を有する近代的な炉において、60 t/日のプル増強をEBでやろうとすると、約300,000US\$ (約36,000,000円)の投資が必要であろう。この金額には、トランスから電極まで全ての費用、すなわち制御盤、工事費、試運転費用などが含まれている。例えば、ある壘ガラスメーカーが160 t/日の炉(バブラーを採用しているダークグリーン壘の炉)を195 t/日に増産するのに、EBを採用した。その時、必要な費用は、120,000US\$ (14,000,000円)であった。EBはこうしたコスト面だけでなく、例えば炉の上部構造の温度を低下させる効果があり、天井の熱的負荷を低減させる。さらに、プルを増やす際、上下の対流、炉内全体の

〒101-0043 東京都千代田区神田富山町5
セラミックフォーラム㈱
TEL 03-5256-5381
FAX 03-5256-5382
E-mail: kato@ceramicforum.co.jp

ガラスの流れ、バッチの動きをうまく制御することが可能で、ひいては、製品の品質向上に繋がる。通常、EBにより、設備費は24ヶ月以内に回収できると言われている。

このように、EBは空気燃焼や酸素燃焼と組み合わせて、プルを増やし、ガラス品位を向上させる。さらに、燃焼時の天井温度を下げる効果も認められる。

2. 燃焼と電気ブースティングの組み合わせ

このように、2つの性格の異なるエネルギー投入方法を組み合わせて、その最適化を達成するには、炉のサイズ、形状、深さ、温度分布、ガラスの特性など、多くの変動因子をきちんと捉え、設計する必要がある。EBの設計上のある因子をちょっと変えるだけで、EBと燃焼とのバランスを大きく変動させ、最適化の達成は難しくなる。

すなわち、うまく設計されたEBにより、上下の対流がうまく進み、その結果、燃焼空間部からの熱移動も効率が良くなり、最小滞留時間

が増加し、溶解の均質が進む。さらに、燃焼エネルギーの低減化にも、貢献するケースがある。

しかし、まずい設計によっては、上の成功例とは、全く反対で、燃焼熱との組み合わせが悪く、むしろ、最小滞留時間が減り、ガラス品位も低下し、煉瓦の侵食が進みすぎるなどの失敗例も多い。

こうした大きなギャップ（成功例と失敗例）は、EBの設計に加え、操業の最適化要因も入ってくる。すなわち、良いガラス溶解炉の設計者と優れた炉のオペレーターの協力は不可欠である。燃焼条件に加え、EB条件も加わり、操業は複雑になってくる。そのために、人間の力だけでは、困難になってくるため、優れた制御システムが必要になってくる。例えば、Glass Service, Inc.のAdvanced Control System ESII (Figure 1を参照)はそうしたニーズに答えるものである。

現在、操業中のガラス溶解炉での改善すべき課題やガラスメーカーの経営サイドからの生産増強、品質向上などに答える必要性によって、EBには色々のバリエーションがある。例えば、種瓦から電極を入れる形（サイドブース

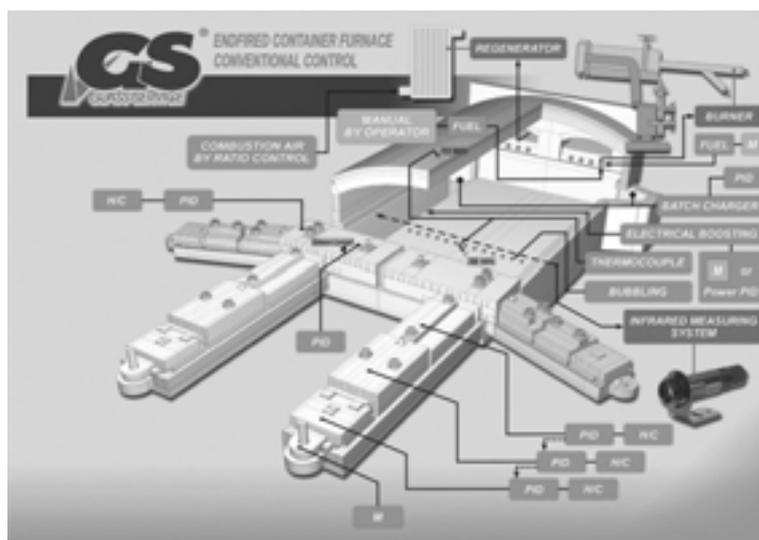


Figure 1 Glass Service社の制御システム

ティング；SB)や敷瓦から入れる形(ボトムブースティング；BB)などの設置方法の違いや、バッチ域での溶解EB、サーマルバリアEB、スロートEB、フォーフェースEBなど目的も色々ある。溶解EBやサーマルバリアEBはプルを増やし、対流効果で品質を向上させる。スロートEBは濃色ガラスの溶解炉を火上げする時、スロート内でガラスが固まり、詰まりを起こさないように準備するものである。さらに、電極、ホルダー、冷却方法などは、EBデザインで重要な因子である。また、EBの電力供給では、単相か？三相か？の選択も問題である。その結線方法も重要で、硝子の特性、特に比抵抗率に関わってくる。高抵抗率ガラスには単相が良いと言われている。また、炉の操業条件によっては、自動可変トランスが有効である。

さらに、EBは一般的にデザイン変更に対し、柔軟性がある。冷修でも、温修でも、より効率的な方法への変更が容易である。その際の設備投資は比較的少なく済む。例えば、従来、使用していたトランスを再利用するとか、色々の工夫がある。しかも、これらのデザイン変更の投資は、省エネ効果により、数ヶ月で回収することができる。操業の安定、品質の向上なども加わり、キャンペーンを通して莫大なコスト削減になるケースが多い。

3. モデリングによる電気ブースティングの最適デザイン

現在、ガラスメーカーは、市場の要求、ガラスの特性を考慮して、色々のガラス溶解技術を駆使している。また、ガラス溶解炉から排出する汚染物質の環境問題から、炉のデザイン、技術も大きく変わってきている。炉の設計者はこうした環境問題を無視して、設計することはできない。

蓄熱式や換熱式などの熱回収技術の採用は、省エネに関する大きな第1の転換期であっ

た。次に、全電気溶融やEBの採用が第2の転換期となった。しかし、さらに注目すべきことは、これらの重要な技術の本質的な理解に貢献したモデリング技術の発展であった。

物理モデルによる炉内の対流は1950年代に始まった。そして、1970年代には、この物理モデルの技術は深化し、硝子の流れ解析に利用され、さらに、電気溶融技術の発展に寄与した。これらの経緯は、1977年に出版されたStanek著の‘Electric Melting of Glass’に纏められている。これらの成果は、現在の物理モデル研究の基礎となっている。

最近では、この物理モデルより、数学モデルに重点が移ってきた。この数学モデルのおかげで、ガラス溶解炉の設計変更に対し、より便利で、速い回答を与えることが出来るようになった。

大雑把に言えば、数学モデルは、該当するデザインのガラス溶解炉内におけるガラス溶解の化学反応を経ながら流れる原料粒子の軌跡にそった滞留時間と遭遇する温度履歴を計算して、判断する方法である。この方法は原理的な方法であり、全てのガラス溶解(melting)や清澄プロセスが、溶解(solution)と拡散現象に依存していることを基盤としている。このことは、これらのプロセスが温度と時間の関数であることを示している。この固体 solution (melting)、清澄、均質化は同時に起こるが、それらは、異なるプロセスである。したがって、これらのプロセスは異なった速度で進む。炉のデザインとその炉のパフォーマンスの関係を実際面から検討するためには、ガラス溶解炉を溶解パートと清澄パートに分け、それぞれのパートで、滞留時間やその他の計算結果を比較することが、有効であることが、分かってきた。一般的に、最も重要な流れは最も短い滞留時間と最も低い履歴温度を持つもので、この流れを“Critical Path；臨界流れ”と称している。これは、この“臨界流れ”が硝子の品位を決定しているから、名付けられた。この考えが、溶解ガラスの流れの一番重要な点での最適条件を

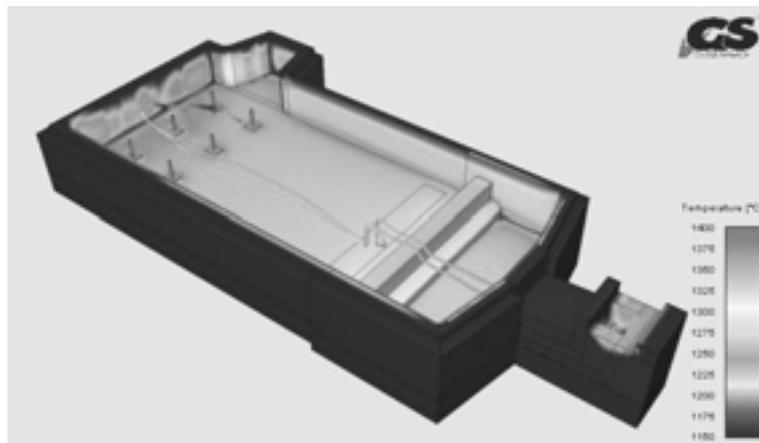


Figure 2 臨界流れの例

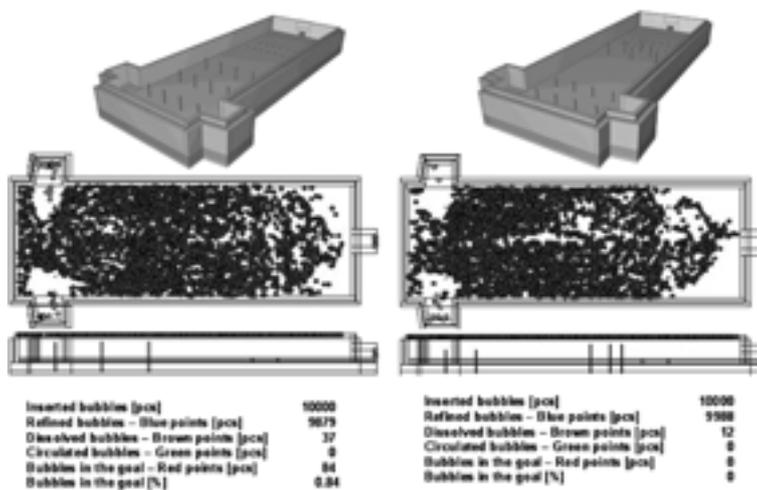


Figure 3 EBの配置による清澄効果の比較

見出すことにより、ガラス溶解技術を発展させてきた。Figure 2. に 80 t プルの曇ガラス溶解炉の“臨界流れ”を示した。

硝子の品質は、清澄効果の計算でも判断できる。230 t プルファイバーガラスでの計算例を Figure 3. に示した。ここでは、10,000 個の原料泡をドッグハウスから投入した。左側の炉では主に溶解 EB を意識した炉であるが、右側はスロート直前にサーマルバリア EB を設計した。両者とも、同じ電力量を投入しているが、

サーマルバリア EB のほうでは、スロート入り口で、泡がゼロと清澄効果が優れていることが分かる。実際炉でも、この改善効果は確認されている。

数学モデルを用いて、サイドブースティング (SB) やボトムブースティング (BB) による局所的な乱流を予測できる。その乱流を避ける設計をすることにより、溶解条件を改善し、滞留時間を増加することができる。例えば、SB の局所的な乱流は非常に早い対流を起し、1

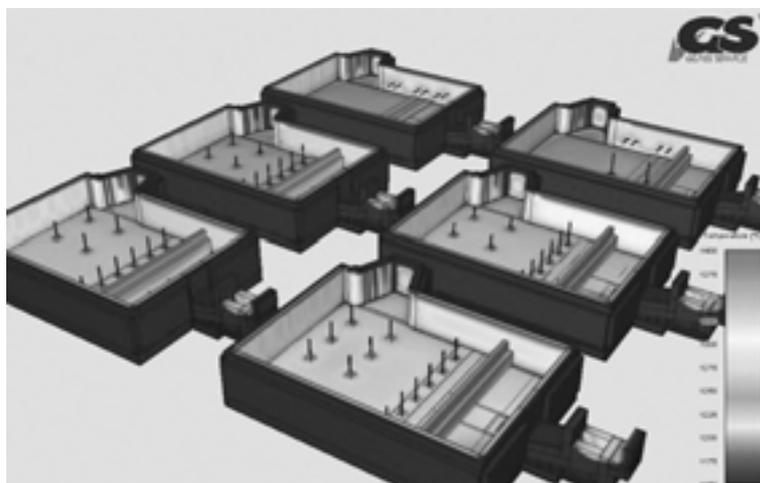


Figure 4 壘硝子における EB の最適化検討

部に高い温度域を生ずる。この高温域では煉瓦の侵食が激しくなり、炉の寿命を短くするので、避ける必要がある。

数学モデルは熱エネルギー分布の最適化を可能とする。その結果、炉内の対流を変化させ、最もその熱を必要とする部位に配置するように、種々のデザインを提案する。このテクニックで、非常に大きなブルでも、滞留時間を長くする工夫ができる。同様なアプローチでフォーファースブースティングも最適化することが可能である。

Figure 4. に壘ガラス炉での、EB の色々なデザインを示した。このように、数学モデルを持ちいて、EB ばかりでなく、色々なほかの技術も検証できる。例えば、バブラーの最適な位置を、EB の位置とのシナジー効果を考慮して、最適化できる。

ま と め

本文では、主に、炉のデザインと EB の関係を眺めてきた。省エネ、環境対策、品質向上は、今後ともエネルギー多消費製品であるガラスの宿命である。これらは、ガラス溶解炉のデザインに直結しており、EB はそのなかでも、

ますます、重要な地位を占めていくと予測される。しかし、やり方を一歩間違えると、上の 3 つの目標とは全く、逆の結果もありうる。その最適化には、単純な規則はない。それぞれのケースで、豊かな経験則と科学的なアプローチのもとに、解決するしかない。われわれは、ガラス溶解技術者の深い経験を尊重しつつ、数学モデルをベースに、硝子の高温物性測定、ガラス欠陥分析、ガラス溶解炉の測定技術を取り込んだ、より科学的な手段による問題解決を目指している。

参 照 文 献

- 主に、Glass Service, Inc. が、蓄積しているデータを使用した。下記の文献も参考にした。
- 1) J. Stanek, Glass Science and Technology 1, Electric melting of glass, 1977.
 - 2) W. Trier, Society of Glass Technology, Glass Furnaces—Design Construction and Operation, 1987.
 - 3) Richard A. Stormont, International Glass Review, Saving energy in electric melting and boosting, 2000.
 - 4) Colin Clark-Monks, International Glass Review, Glass melting furnaces—today, 2001.