

総論： 人と環境に優しいガラス

兵庫県立大学

矢澤 哲夫

Friendly glass to man and environment

Tetsuo Yazawa

University of Hyogo

1. はじめに

近年における著しい人口増加や経済活動の拡大によってもたらされる地球規模の環境汚染（いわゆる地球環境問題）に対して警告が発せられてから久しい。この間にベラジオ会議、トロント会議、気候変動枠組条約締約国会議等の多くの国際会議が開催され、この問題に対して、特に先進国の間で真摯に議論されてきた。

今日、地球環境問題の解決は単なる技術論の域を超えて人類の生存をかけた重大問題に発展しつつあることも人口に膾炙して久しいが、これには3つの大きな側面があるかと思われる。ひとつは、社会の倫理観、価値観とも関連するライフスタイルのあり方、もうひとつは行政のあり方、それから本稿の主題である技術開発である。この中でライフスタイルのあり方（例えば大量生産、大量消費等）のような社会全体の価値観と関連するようなものは、これを一朝一夕に変えるのは非常に難しいものがある。二

番目の行政は、当該問題解決のために非常に大きな役割を演ずる。即ち、1990年代初頭の冷戦構造の崩壊によって、殆どの人類は市場経済の中で日々に生活を営んでいる。こうした状況下にあつては、環境低負荷という価値をいかに製品に価格として反映していくかが一つの大きな鍵となる。環境低負荷という価値は、公共財的な側面があるので、製品そのものの価格としては反映しにくい点があるが、もしこれを価格としてインプットできれば、市場という非常に強力なツールによって環境問題をより効率的に解決することが可能となるであろう。要するに、環境低負荷技術を開発した企業がより大きなメリットを享受することによって環境低負荷技術がより一層加速されるような市場の土俵整備に行政の果たす役割は大きいということである。いわゆる新規エコビジネスの創成である。これについては、炭素税やバージン税などの環境税の検討や各種リサイクル法、グリーン購入法の整備等が既に行われつつある。本稿のもうひとつのテーマである、安全安心については、製品に比較的価値としてインプットされやすいので、時代の要請に比較的容易に対応すること

〒671-2201 姫路市岩手 2167

TEL 0792-67-4896

FAX 同上

E-mail : yazawa@ong.u-hyogo.ac.jp

が可能であるが、長期に亘る安全性については、表面上見えにくいので環境問題と似た側面も有している。ここでは、上記のことを念頭におきつつ環境低負荷化や安全安心に係わる比較的新しい技術開発について代表的なものについて概観する。本稿では、ガラスそのものの環境低負荷化（省エネルギー、省資源）、安全安心とガラスによる環境低負荷化に係わる技術というカテゴリーに分類したが、勿論、相互に関連したものであり、特に省エネルギー、省資源に係わる技術は、ガラスがエネルギー多消費産業であることを考えると、相互に深く関連している。

2. ガラスの省エネルギーに係わる技術

1973年のオイルショック以来我が国産業は、30%程度の省エネルギーの実をあげてきた優等生であるが、まだまだ省エネルギー技術に関して改善する余地が大きく、環境低負荷化には省エネルギー技術の寄与が最も大きいといわれている¹⁾。ガラス産業が使用している総エネルギーは、我が国産業が消費しているエネルギー全体の1%程度を占める。我が国のGDPに占めるガラス産業の比率が0.4%程度であることを勘案するとエネルギー多消費産業といえる。

これまで当該技術に関して取り組まれてきた技術開発は、ガラスの製造プロセスに関する省エネルギー、省エネルギー機能を有するガラスの開発がある。前者については、省エネルギー的なガラス溶融プロセスや減圧脱法の開発がある。後者については、建物に使用される窓ガラスの省エネルギーが重要である。自動車の窓ガラスの省エネルギーもほぼ同様の技術の延長線上にある。

2.1 建物に係わる省エネルギー的窓ガラスの開発²⁾

建物からの熱の出入りは窓ガラスからが40%にも及んでいるので、窓ガラスに関する省エネルギー技術の開発は重要である。これまで熱線吸収ガラス、熱線反射ガラスの研究開発がおこなわれてきた。熱線吸収ガラスとは、2

価の鉄イオンやコバルトイオン、ニッケルイオンを入れて熱線（主として1~2 μm の赤外域）を吸収するものであり、熱線反射ガラスとは、ニッケルやクロムなどの金属を蒸着したガラスによって熱線（主として可視域~近赤外域）を反射するガラスである。これらを使用することにより外部からの熱の流入量を1/4程度にまで減らすことが可能となり、夏季の冷房負荷を著しく軽減することができる。また、主として暖房の効果を大きくするためには複層ガラスが断熱ガラスとして開発されている。これは勿論、夏季の冷房の効果も大きくする。複層ガラスの中空層には、乾燥空気が密封されているが、乾燥空気よりも熱伝導率の小さなアルゴン、クリプトンなどを封入する場合もある。最近ではLow-E複層ガラスのようなものも開発されている。これは、複層ガラスの内面に酸化物質—銀—酸化物質のような多層膜をコートしたもので、赤外域での反射率が高くなるので寒冷地の暖房効果を大きくすることに特長があったが、最近では温暖地でも省エネルギー効果が得られる高遮熱Low-E複層ガラスが開発されている。また、断熱材としてのガラス繊維の効用も重要であるがこれは、本号にて別稿があるので割愛させていただく。

2.2 ガラスの製造プロセスに係わる省エネルギー的技術開発

2.2.1 減圧脱泡技術

減圧脱泡とは減圧下（0.6~0.8気圧）でガラス融液中の気泡を成長浮上させる脱泡技術であり、我が国で精力的に研究開発が進められ実用化に向けた開発段階にきている。1600 $^{\circ}\text{C}$ までの昇温が必要でなくなるので、消費エネルギーを従来の30%程度減らすことができる。

2.2.2 酸素富化燃焼

酸素燃焼法とは重油を燃焼させてガラスを融解加熱する際に、従来の空気に替えて酸素ガスを使用する方式である。酸素の供給法として、かつてはシリコン系の有機高分子膜による空気中からの酸素分離も検討されたが、現時点で

はゼオライト、特にリチウム系ゼオライトを用いる圧力スウィング吸着 (PSA) という方式による空気からの酸素分離による酸素の製造が用いられている。この方式では、ガラス熔融に係わるエネルギーを約 40% 程度低減できる著しい省エネルギー効果がある。また、NO_x の発生を大幅に低減でき、排ガス中の二酸化炭素を 50% 低減できるなどの環境低負荷効果もある。

上記の他に、炉内のガラス融液の流れや溶解過程、清澄プロセスに関するコンピュータシミュレーションによって省エネルギー的なガラス溶解炉を設計しようとする研究開発も推進されている^{3), 4)}。

3. ガラスの省資源に係わる技術開発

3.1 ガラス瓶のリサイクル技術

2. で述べた省エネルギー技術とオーバーラップするところも多くあるが、ここでは一応、省資源という観点を中心にして述べる。

基本となるガラスの成分は、クラーク数 (地殻の構成元素の存在割合) の大きな元素であり、貴重なレアメタル等を多用しているわけではないが、省資源によってガラス製造に係わる省エネルギーを推進し、ガラス廃棄物の減量にも貢献するので重要である。1992 年に発効した国際条約であるバーゼル条約は、廃棄物の輸出を固く禁じているので、いかに高コストであっても自国の廃棄物は自国で処理しなければならない。ここにリサイクル産業のエコビジネスとしての重要性がある。ガラスと関連深いリサイクル法としては、容器包装リサイクル法、家電リサイクル法、建設リサイクル法、自動車リサイクル法がある。

リサイクルの前にリユースがあるが、ガラス瓶はリユースの優等生と考えられている。酒瓶やビール瓶はその殆どがリユースされており、通常、年 3 回くらい回転し 8 年、計 24 回程度リユースされている (総計で 10 回程度という試算もある) と思われる。容易に想像されるこ

とではあるが、通常、リユースがリサイクルよりも環境低負荷化に貢献する。特にガラス瓶はその堅牢さからプラスチックや紙と比較してリユースに適していると考えられる。リユース瓶のシェア低下は各国共通の事態になっている中で、欧州ではこうした点 (ガラス瓶の利点) が重視され、特にドイツでは容器包装政令によってリユース瓶の使用比率を 72% 以上に設定し、これを下回るとワンウェイ容器に対して強制デポジット制度を導入している⁵⁾。リユースに対する環境低負荷化の指標としてライフサイクルアセスメント (LCA) の手法を導入して数値化する研究も精力的に推進されており、国民に対する有効な説得材料になるものと思慮される。

次にリサイクルであるが、リサイクル技術を考える場合、分別回収が非常に重要である。俗に“ゴミは分ければ宝の山”といわれるゆえんである。ガラス瓶の分別回収は、無色、茶色、その他の色という三つに分別されて回収されているが、種々雑多な色が混ざる。また、瓶にはラベルが貼付されており、金属片や陶磁器の混在もある。特に陶磁器の混在は失透などガラスの品質に重大な影響を与える。ガラス瓶のリサイクルの前処理としては、ラベルはがし、金属探知器及び磁選機による金属及び磁性物の除去を経て、陶磁器や色別選別を行う。当該装置は、赤外線、可視光線によるスペクトル認識と画像認識を組み合わせたもので、選別のスピードは非常に大きく、既に市販品があり、ガラスカレットの選別に実用されている。また、透明結晶化ガラスやホウケイ酸ガラス (パイレックスガラス) の分別も重要であるが外見上区別がつきにくいので難しい。前者については、NEDO によって、パルスレーザ光の照射によって生ずる発光スペクトルによる結晶化ガラスの分別に関する研究開発が行われた⁶⁾が、処理スピード等に問題があり実用には至っていない。

色別の分別回収が不要な着色瓶に関する研究

開発も行われている。基本的なコンセプトは、使用時だけ必要な着色があり、使用後は透明瓶になるというものである。具体的には、透明瓶の表面に着色層をコーティングし、使用後当該コーティング層を焼成することにより透明ガラス瓶を再生するもの⁷⁾、紫外光やX線によって着色し、使用後同じく焼成することにより透明ガラス瓶を再生する⁸⁾という二種類がある。

透明瓶の上に着色層をコートする場合、ポリウレタン系及びアクリル系の有機ポリマーをコートするものと、最近開発されているゾルゲル法に基づくものがある。前者は炭酸飲料用瓶に対する安全性のために開発されてきた経緯があるが、簡易に種々な色調を出せるので化粧品用の瓶を中心に汎用されている。ワインの瓶等、もう少し大型でリユースも視野に入れたものとして表面硬度を上げたゾルゲル法が適当である。この方法は、モル吸光係数の大きなフタロシアン系等の有機色素をシリコンアルコキシド中へ分子分散させたものである。表面硬度は有機ポリマーコートのものよりも大きい。紫外光やX線による着色は、製造工程中に有機溶媒等を使用しないので、当該物質による環境汚染（いわゆる VOC の発生による環境汚染）の懸念がなく、レーザー光を用いれば種々な描画をガラス表面に施すことが可能となる。さらに、表面硬度もコート層がないので、ガラス自体の硬度とすることができる。

着色ガラスは、コバルトやクロムといった遷移金属イオン等で着色されているので、他の色へ変更する際にはカレット化（カレットとは屑ガラスのことである）が困難であるとともに色替えに伴って排出されるガラスがムダとなる。ガラスにおいてカレットの役割は重要で、単に省資源に貢献するだけではなく、炭酸塩等の原料からガラスを作成する場合とガラスを全てカレットから作成する場合と比較すると後者は前者の約25%程度の省エネルギーとなるので、着色ガラスのリサイクル技術は省エネルギーにも大きく貢献するものとなる。

3.2 軽量瓶の開発⁹⁾

軽量瓶の開発、特に軽量なりターナブル瓶の開発が行われている。これは、基本的には、瓶の外表面に酸化スズあるいは酸化チタンによる保護膜を蒸着することにある。蒸着は、製瓶機と除冷窯の間で行う。現在、従来の瓶よりも21%も軽いガラス瓶の開発が進められており、これは運輸コストの低減にも繋がるので、省エネルギー技術でもある。

上記以外に、混色カレットを90%以上使用したスパークボトルの開発や道路の舗装材等への多目的利用が図られている。この場合、ガラスは、ガラス to ガラスへのリサイクルが至適であることを念頭におきつつ、ガラスのカスケード的な有効利用を推進する必要がある。

4. ガラスの安全安心に係わる技術

通常のガラス組成は、クラーク数の大きなものを使用している点で安全であり、ひところ騒がれた、いわゆる環境ホルモンに対する安全性も高い。この認識が最も一般的にゆきわたっているのは、上記したようにドイツで、ガラス容器に対する信頼感の高いものがある。こうしたことをふまえつつ、ガラスの安心安全に対する技術開発を今後一層積極的に推進していく必要があるのは勿論である。

4.1 ポイズンフリーガラスの開発¹⁰⁾

ポイズンフリーなガラスを得るための技術に関するものである。これは、ガラス製品中のポイズンフリーとガラス製造プロセスにおけるポイズンフリー化がある。欧州では、廃電気電子機器指令（WEEE）、廃自動車指令（ELV）、特定有害物質使用禁止指令（RoHS）、化学物質の登録・評価・認可制限に関する規則案（REACH）などのいくつかの規制が既に検討されており、この中でも2006年7月から実施予定のRoHS指令に対する対策が、欧州への輸出品を中心とした局面で喫緊の課題となる。当該指令は、カドミウム、鉛、水銀、六価クロム、ポリ臭化ビフェニール、ポリ臭化ジフェニ

ルエーテルの六物質を規制の対象としており最大許容量は、カドミウムは 100 ppm、それ以外の物質は 1000 ppm である。ガラスの組成分析に関する JIS は存在するが、ガラス中の微量分析については、ないのが現状であるので、何らかの標準化が喫緊の課題と考えられる。特にクロムの 6 価と 3 価の識別は重要であり、メッキ業界でも真剣に検討されているようである。最近、兵庫県の西播磨にある SPring-8 を使用しての XAFS 分析（特に XANES による分析）によって数十から 100 ppm のレベルでクロムの 6 価と 3 価の識別が可能であるとの報告がある¹¹⁾。

ポイズンフリーガラスにおいて最も歴史が古くかつ精力的に研究が進められてきたのが鉛フリーガラスの開発である。光学ガラスについては、鉛に替えて酸化チタン、酸化ニオブ、酸化タングステン等が使用されている。また、低融ガラス（ハンダガラス）については、従来 PbO-B₂O₃系がベースであったが、ピスマスを導入したものやリン酸塩系のガラスに代替されつつある。さらに、ガラスの清澄過程におけるポイズンフリー化の研究開発も推進されている。ガラスの優れた清澄剤であるヒ素化合物である亜硫酸について、これを硫酸ナトリウムや炭素によって代替することは板ガラス製造では 25 年以上前から行われてきたが、非定常な溶融や小規模な溶融に対して亜硫酸に替わる、Sb₂O₃と少量のフッ化物のような清澄剤の開発やガラス排ガス中の亜硫酸の除去についても研究開発が行われている¹²⁾。

ガラスからの有害物除去や、最近のアスベスト問題を考えるとガラス繊維の健康安全性等も重要であり、これについては本号に別稿があるので割愛させて頂く。

4.2 割れないガラスの開発

割れないガラスの創製もガラスの安全安心という観点からは重要である。割れないガラスというのは、ガラスに関する永遠の課題でもあるので研究開発の歴史も古い。風令強化のような

物理的方法、ガラス表面層のイオン交換のような化学的方法につけ加えて、最近、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のナノガラスプロジェクトでは、フェムト秒レーザーによる異相析出によるガラス強化に関する研究開発が精力的に推進されている。また、ガラス表面の新規なコート法の開発も重要であろうと思われる。破壊に関する地道な基礎研究に基づく技術開発が一層望まれるところである。

5. ガラスによる環境低負荷化に係わる技術

5.1 廃棄物のガラス固化

ガラスは剛性液体としての性質を有しているために種々な物質をある程度溶解できることに加えて固体でもあるので、それ自体で安定であるという側面がある。原子力発電に伴って必然的に排出される高レベルの放射性廃液を、そのまま貯蔵することは、当該物質の貯蔵タンクからの漏洩等を引き起こす可能性があり非常に危険である。従ってこれを固化する方法がこれまでに種々提案されてきた。金属埋め込み法、セラミック化法、ガラス固化法など 20 を超える処理法が検討されてきた。この中で、ガラス固化法が最も歴史が古く、また現在実際に稼働している唯一の方法である。ガラス組成としてはリン酸塩ガラス、高シリカガラス、ホウケイ酸ガラス等が検討されたが、固化プロセスの実現性、化学的耐久性（浸出率）、廃棄物の含有量、耐放射性、熱的安定性などの比較評価の結果、各国においてホウケイ酸ガラスが選定されており、我が国においても昭和 59 年、原子力委員会によってホウケイ酸ガラスが選定されている^{13), 14)}。

上記の研究を背景として、下水から排出される汚泥や都市ゴミのガラス固化に関する研究開発も行われている。汚泥のガラス固化については、本号にて述べられる予定なので詳述しないが、道路の舗装材や建材としての利用も検討されているようである。都市ゴミについては、特にその焼却飛灰の溶融が電気溶融について検討

されている¹⁵⁾。

また、トリハロメタン、ダイオキシン等の有機塩素化合物や有害重金属による汚染土壌の処理にジオメルト法がある。この方法は、汚染した土壌を原位置にてガラス固化するもので、ガラス固化には汚染土壌中に電極を挿入する電気溶解にて行う。当該法は、汚染土壌の運搬における環境中への飛散防止、運搬容積の低減に寄与するものである。当該法の適用し得る土壌の条件として、1. 金属含有量は40 wt%以下で固化ガラス物の長さは電極間隔の90%以下、2. 瓦礫の含有率は20 wt%以下、3. 可燃性物質の含有量は10 wt%以下というような制限があるようである¹⁶⁾。

5.2 ガラス分離膜

細孔を有するガラス分離膜によって二酸化炭素、SO_x、NO_x、トリクロロエチレン、重金属イオン等の環境汚染物質を除去したり、水素や酸素等のガスを回収することは、環境低負荷化に寄与する。膜分離は他の分離法、例えば吸着、吸収、蒸留などと比較して分離操作を連続して行うことができ、分離装置も比較的簡便なのでオンサイトの利用が可能である。高効率な分離装置を開発するためには高効率な分離膜の開発は重要である¹⁷⁾。ガラスは膜にするための成形性が良好でかつ耐熱性があるので有望な分離膜材料のひとつである。高効率な分離膜を得るためにはナノメートルオーダーでの細孔径の制御とその薄膜化が重要である。また、ガラス膜の透光性を活かして当該ガラス膜中に光触媒を担持した分解リアクターの開発等も重要な応用であると思われる。さらに、最近、燃料電池用の固体電解質膜の研究開発が非常に精力的に推進されているが、これもイオン（多くの場合、プロトン）分離膜のひとつと考えることができる^{18), 19)}。

ここまで縷々、環境低負荷、安全性に係わるガラスの技術開発について述べてきたが、現下の社会経済状況を鑑みるに、これらの技術をステップとして新たな技術群が、市場性を持ちエ

コビジネスとして社会に定着する日はそう遠くないであろうと思われる。

参考文献

- 1) 小宮山宏：“地球持続の技術”，岩波新書（1999）。
- 2) 斉藤栄亮：“NEW GLASS”，Vol. 14, No. 2 pp. 25-30, ニューガラスフォーラム（1999）。
- 3) Petr Jandacek, 加藤石生, Josef Chmelar：“NEW GLASS”，Vol. 18, No. 3 pp. 24-28, ニューガラスフォーラム（2003）。
- 4) 田中千禾夫：“NEW GLASS”，Vol. 14, No. 2 pp. 70-74, ニューガラスフォーラム（1999）。
- 5) 廃棄物学会編：“新版ごみ読本”，pp. 277, 中央法規（2003）。
- 6) 川村武也：“[生活産業廃棄物等高度処理・有効利用技術研究開発]，[リサイクル等環境技術開発]及び[リサイクル技術等実用化支援研究]平成9年度終了プロジェクト成果報告会概要説明会予稿集”，pp. 107-114, NEDO（1998）。
- 7) 中澄博行：“NEW GLASS”，Vol. 17, No. 2 pp. 15-19, ニューガラスフォーラム（2002）。
- 8) 角野広平, 矢澤哲夫：ibid., Vol. 17, No. 2 pp. 39-43, ニューガラスフォーラム（2002）。
- 9) 横倉修一：ibid., Vol. 9, No. 4 pp. 40-44, ニューガラスフォーラム（1994）。
- 10) 寺井良平：“マテリアルインテグレーション”，Vol. 17, No. 1 pp. 51-55（2004）。
- ibid., Vol. 17, No. 2 pp. 55-61（2004）。
- 11) 高野敦：“NIKKEI MONOZUKURI”，11月号，pp. 30-31（2005）。
- 12) 和久井満：“NEW GLASS”，Vol. 18, No. 3 pp. 19-23, ニューガラスフォーラム（2003）。
- 13) 寺井良平：“マテリアルインテグレーション”，Vol. 15, No. 5 pp. 67-71（2002）。
- 14) 五十嵐寛：“NEW GLASS”，Vol. 11, No. 3 pp. 11-19, ニューガラスフォーラム（1996）。
- 15) 鈴木守也：“廃棄物学会論文誌”，Vol. 7, No. 1 pp. 18-27（1996）。
- 16) 三谷一石, 村岡元司：“NEW GLASS”，Vol. 11, No. 3 pp. 25-30, ニューガラスフォーラム（1996）。
- 17) 矢澤哲夫：“工業材料”，Vol. 49, No. 5 pp. 94-97（2001）。
- 18) 野上正行, 大幸祐介：“セラミックス”，Vol. 40, No. 5 pp. 374-377（2005）。
- 19) 蔵岡孝治, 菊川敬, 矢澤哲夫：“化学と工業”，Vol. 57, No. 1 pp. 41-44（2004）。

また、ガラス産業連合会発行の“ガラス産業技術戦略2025年改訂版（2002年3月発行）”は本稿を通じて全般的に参考にさせて頂いた。記して謝意を表す。