

UDC : 666.15 : 127'15

1. 板ガラスのリサイクル Recycling Flat Glass

工藤 透*
Tooru Kudo

製品となって市中に出回った板ガラス製品を回収し、リサイクルすることは、環境負荷低減に貢献すると見られているが、一部を除きそれほど活発に行われていない。本稿においては、廃棄されている板ガラス屑や、解体建築物、廃棄自動車からガラス屑を回収し、板ガラス原料のカレットとしてリサイクルすることが、その商品のLife Cycleでの環境負荷を低減するかについて検証した。また、種々の板ガラス製品について、それらを生リサイクルする上での技術的課題についてまとめた。板ガラス製品の使用後のリサイクルを実現するための社会的課題をまとめ、今後の取り組みについて、概要を報告したい。

Collecting and recycling of flat glasses which are once manufactured and used as products are considered to contribute to the reduction of environmental burdens. However, they have not been actively performed except for some cases. In this report, we examined whether environmental burdens decrease in the life cycle of the products by collecting wasted glass scraps and glass wastes from demolished buildings or abandoned vehicles and recycling them as cullet material of flat glass. In addition, technical problems of recycling them as various kinds of flat glass product were summarized. We will provide a summary of social challenges and actions to be taken in the future for the realization of recycling of these glass scraps.

1. はじめに ～ガラスのリサイクルと法規制～

ガラスのリサイクルは、容器リサイクル法と家電リサイクル法でリサイクル義務の対象となっているビンガラスやブラウン管用ガラスについてはある程度、市中からの回収リサイクルが進んでいるといえる。

しかしながら、建築用や自動車用の板ガラスや、液晶やプラズマテレビのフラットパネル用ガラスについては、リサイクルはそれほど進展していない。建設廃材リサイクル法では、建築用の板ガラスはリサイクル義務の対象とはなっておらず、廃車リサイクル法でも窓ガラスはシュレッターダストの一部として扱われている。

本稿においては、廃棄されている板ガラス屑や、解体建築物、廃棄自動車からガラス屑を回収し、板ガラス原料のカレットとしてリサイクルすること

が、その商品のLife Cycleでの環境負荷を低減するかについて検証し、それを実現するための技術的課題や社会的課題をまとめ、今後の取り組みについて、概要を報告したいと考える。

2. カレットリサイクルは環境負荷を低減するか

リサイクルへの取り組みを説明する前に、そもそも廃ガラスリサイクルが環境負荷を低減するかについて考察してみる。

建築用と自動車用に使用されている板ガラスはソーダライムガラスで、安定な無機化合物であり、珪素の比率が高いものの、地球表層部の元素の成分を示すクラーク数の構成によく一致している (Table 1)。しかも、ガラスは酸化物として安定であり、一部の製品を除き、鉛やカドミウムといった有

*板ガラスカンパニー CSR室 (E-mail : tooru-kudo@agc.co.jp)
Flat Glass Company CSR Office

害とされる重金属類をほとんど含まない。

すなわち、最終廃棄物として埋め立て処分するものとして最適な物質であるといえる。実際に、あるゼネコンに対するヒヤリング調査の結果では、ビル解体時には、割ると危険な廃板ガラスを最初に取り外した後で、まとめて破碎し、敷地の穴の埋め戻し材として使用しているという実例があった。確かに、リサイクルや廃棄の為に運搬したり、埋め戻しのために別途砂利を採掘して運搬することを考慮すると、もっとも環境負荷が低そうである。

Table 1 Clark number and typical glass composition

order	Atom	Clarke number	Sheet glass
1	Oxygen	49.5	34.4
2	Silicon	25.8	45.9
3	Aluminum	7.6	1.0
4	Iron	4.7	0.1
5	Calcium	3.4	5.7
6	Sodium	2.6	9.6
7	Potassium	2.4	0.8
8	Magnesium	1.9	2.4
Sum up to No.8		97.9	99.9

また、容器ガラスと異なり、製品サイクルが長く、特に自動車用では車種毎に形状も異なり、そのリユースは非現実的であるので、カレットとしてマテリアルリサイクルを考えざるをえない。

LCAをする上で考慮しなければならない幾つかの環境側面が有るが、ここではカレット回収と板ガラス原料リサイクルを行った場合のエネルギー使用量及び排出炭酸ガスについて考察した。

(1) 板ガラスのライフサイクル

板ガラス原料の採掘・搬送工程

板ガラスのライフサイクルを考慮するうえで、最初の段階は、その原料の採掘・搬送工程である。経済産業省「窯業・建材統計」によると国内板ガラス製品の年間生産量は、1991～2000年の平均で約140万tonである。市中の板ガラス製品からのカレット回収リサイクル量がほとんど無視できる現状の国内においては、原料のガラス化率を83%とすると、169万tonのVirgin原料（合成ソーダ灰や高炉スラグも使用されているが、大半は珪砂やドロマイト等の天然鉱石である。）が使用されていることになる。

これらの原料は、ビンガラスと共通することが多いため、その採掘・搬送工程の環境負荷は、そのデータを借用できると考えられる。国内の板ガラス製造業では、特に珪砂とソーダ灰を海外から輸入する場合があります、その環境負荷は大きくなる。

カレットリサイクルが行われた分だけ、これらの原料の採掘・搬送の環境負荷は低減されることとなる。

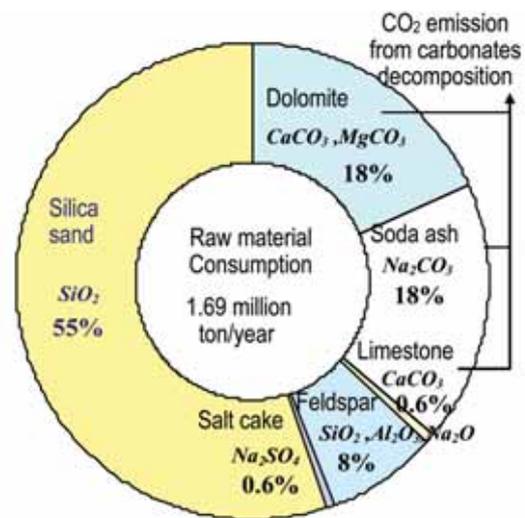


Fig. 1 Typical constitution of raw materials for sheet glass

板ガラスの溶解工程

板ガラスのライフサイクルでもっとも環境負荷が大きいのは、重油などを燃焼し1600 程度の温度でガラスを溶解・均質化・清澄を行う、この工程であると考えられる。また、燃料を使用することによる環境負荷発生だけではなく、上記のように原料の1/3以上が炭酸塩であるため、ガラス化する過程で分解することで炭酸ガスを排出する。

Fig. 1に示した原料構成における原料粉体のガラス化の化学反応に必要なエネルギーを、Krögerの式を参考にして求めると約713MJ/ton-glassである。これを重油換算すると17.4l/ton-glassであり、これによる炭酸ガス排出量はCO₂換算で51.0kg/ton-glassとなる。一方で、原料粉体中の炭酸塩の分解で放出される炭酸ガスは、186kg/ton-glassであるので、製造工程において、1tonのガラス分の原料粉体をカレット1tonに置き換えれば、237kg/ton-glassが削減されることとなる。

実際には、板ガラス製造においては、槽窯温度保持のために多大なエネルギーを必要とするため、カレット使用比率を変えた場合のガラス1ton製造するための工程内排出炭酸ガスは、Fig. 2のようになる。

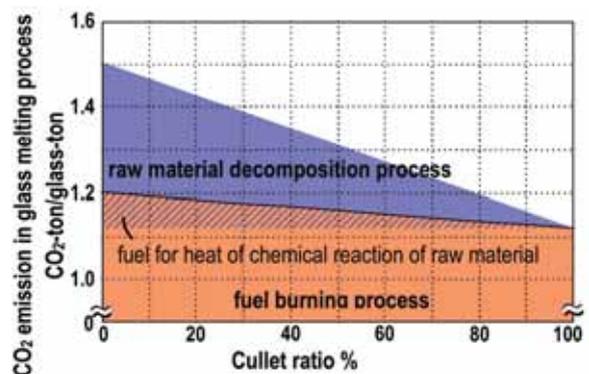


Fig. 2 Relation between cullet ratio and CO₂ emission in glass production stage

板ガラス製造における現在のカレット使用は、工程内循環カレット等が主で原料の約40%を占めている。ところで、COP3の京都議定書では、日本の地球温暖化ガスの削減目標は6%である。例えば板ガラス製造工程排出炭酸ガスを現状から6%削減するためには、62%までカレット比を上げればよいこととなる。これは、廃車や建設廃材から年間47万tonのカレットが回収されて水平リサイクルが可能となれば達成できるレベルである。

カレット回収工程における環境負荷

上記までに示したように、ガラスの原料をカレットに置換することで環境負荷は低減する。しかし、一方で、カレットリサイクルに伴う環境負荷、すなわち建築物及び廃車解体-ガラス取り出し&分別、洗浄工程やカレット搬送による環境負荷は増加する。

自動車からガラスを取り出す工程については、既に社団法人日本自動車工業会において詳細に検討されている。その内容は、Internet上で公開されている。それら及びそれ以外の工程の環境負荷に関しては、現状で不明な部分は多い。

しかしながら、例えば搬送に伴う環境負荷の試算は可能である。自動車解体業者団体リスト等にある日本全国の廃車解体工場39ヶ所から、自動車用板硝子製造拠点までの平均距離を400km程度とすれば、燃費3.5km/lのディーゼル10tonトラックに積載率60%での搬送を仮定すると、排ガス排出量は以下のようになる。

カレット1ton当りは400/6 = 66.5km走行分の環境負荷に相当する。従ってTable 1によると、例えば炭酸ガスであれば、CO₂換算で49kg/glass-tonの排出量であり、上記で述べたカレット1ton使用当たり削減可能な炭酸ガスの1/5程度である。カレットが回収リサイクルされなければ、相当分の原料の採掘、

Table 2 Air pollution load in transporting stage

	Gas mileage km/l	CO ₂ kg/km	SO _x kg/km	NO _x kg/km
10t truck	3.5	0.742	0.00091	0.00229

運搬量が増加（板ガラスの原料は海外から調達される場合もある。）し、さらにはカレットの廃棄処分場までの運搬による環境負荷も発生するので、実際にはカレットリサイクル進展に伴い搬送による環境負荷は低減するものと考えている。

廃車カレットを板ガラス原料としてリサイクルするためには、後述するような品質確保が非常に重要となる。従って、回収工程においてカレットの選別、分別の工程が必ず必要となる。例えば、自動車のフロントガラスに使用されている安全ガラスは、2枚のガラスの間に有機化合物であるポリビニルブチラール（PVB）をサンドウィッチした構造になっているが、この有機化合物を除去する工程が発生する。この中間膜除去プラントでこの除去処理を行うために、おおよそ60kWh/tonの電力を消費すると言われている。この電力発生に伴う炭酸ガスは、CO₂換算で23kg/glass-tonの排出量であり、上記で述べたカレット1ton使用当たり削減可能な炭酸ガスの1/10以下である。

以上のように、まだすべての工程の環境負荷を算定したわけではないが、どうやら廃車カレットの板ガラス原料へのリサイクルは、環境負荷を低減することに貢献しそうである。

以下の項で、実際に開発検討したガラスリサイクル工程での環境負荷について説明する。

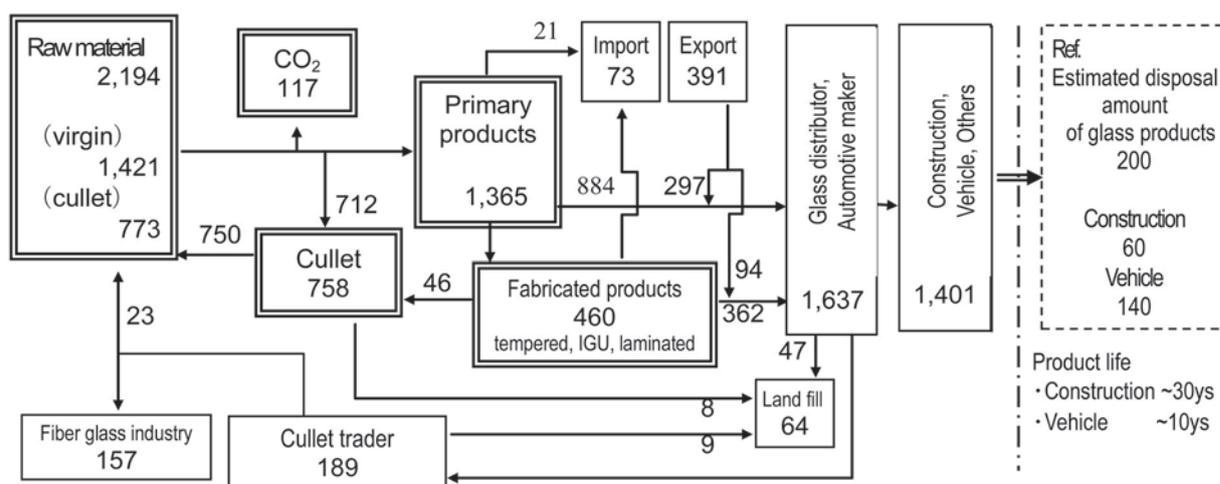


Fig. 3 Material balance of sheet glass cullet in 2004 Japan (Source; Flat Glass Manufacturer Association) Unit; thousand ton

- * 1 : Cullet recycle ratio inside plant is over 99%. (; means the process inside plant)
- * 2 : Cullet generation ratio from distribution process for sheet glass is estimated 20%.
- * 3 : Cullet recover ratio from distribution process for sheet glass is estimated 80%.

3. 板ガラスリサイクルの現状

板ガラスは、その製造段階において多量の化石燃料を消費し、使用後においては、廃棄されていることが多い。市中に出回った板ガラス製品のリサイクルは、一部を除きそれほど活発には行われていない。特に廃車解体時にシュレッダーダストとして廃棄されているのが現状である。

板硝子協会にて、カレット業者と呼ばれるガラス屑のリサイクル業者からヒヤリング調査した結果をまとめた、日本国内の板ガラスのリサイクルに関するマテリアルバランスを、Fig. 3に示す。板ガラスメーカーでは、カレット業者が市中の端切れを有償回収したものを年数万ton購入しているが、微量といえる。板硝子協会の報告では、ガラス店から年間24万ton端切れが発生し、20万ton強がカレット業者に回収され、板ガラスメーカーに10万ton、ガラスビーズやファイバーガラスメーカーに9万tonリサイクルされている。

建築用板ガラスは、そのほとんどが無着色であるため利用価値が高く、板ガラス生産においてカレット使用は省エネにもなるため、積極的に使用したいが、経済的な理由と品質確保の理由で、従来利用されることが少なかった。

旭硝子の板ガラスカンパニーでは、フロートガラスの端切れに限定し、板ガラスを供給している弊社関連会社加工拠点からの直接回収を、数年前から開始している。品質レベルが安定し一定の発生量が見込まれる、同様の拠点からの回収を進めていきたいと考えている。

一方、自動車用ガラスの回収も同様にリサイクルが進んでいるとはいえ、廃車解体時にシュレッダーダストとして廃棄されているのが現状である。こうした状況を打開するために、各自動車メーカーや板ガラスメーカーは、廃棄自動車用ガラスのリサイクルに向けて取り組みを行ってきている。

さらには、今後需要が急激に増大していくと推測される太陽電池に使用されるガラスについてもそのリサイクルを検討する必要があると推測される。

4. カレットリサイクルの技術的な課題

(1) 一般的な不純物混入問題

この項では、回収された板ガラス製品のカレットをリサイクルする場合の技術的な課題をまとめたい。板ガラス製造では、鉄鋼精錬などのように製造中に精製が行われることはない。したがって、その原料に異物が混じることは厳しく避ける必要がある。板硝子協会では、リサイクルカレットに要求されるスペックを定めているが、それが非常に厳しい条件である理由は、下記のような理由がある。

ガラス以外の不純物としては、金属関係：鉄、銅、

亜鉛、アルミ、ニッケルや、有機化合物などが上げられる。基本的に、ガラスは酸化物の混合物であり、酸素が過飽和状態の過冷却液体であるため、それら金属や有機化合物のような還元性の異物は、欠点の原因となる。

代表的な金属について、その混入による不具合現象および原因をまとめる。

鉄

鉄は建設資材として、あるいはあらゆる機械・設備に母材として使用されているため、市中から回収した場合、混入の機会が多い。一方で、鉄は、酸化物としてガラスの緑色着色材として、0.02~0.8Wt%の濃度で使用される。従って、制御されずに未知量混入した場合、重要な製品品質のひとつである光学特性規格の維持が出来ない。また、金属鉄の状態に混入した場合、その還元作用で、茶色の筋欠点の要因となる。

銅、銀などの貴金属類

銅は、青色着色要因となるため、大量に混入した場合、光学特性規格の維持が出来ない。また、フロート成形の場合、溶融錫バス内の強還元雰囲気下で表層の銅イオン、銀イオンが還元し、赤色あるいは黒色発色する現象が観測される。

さらには、これらの貴金属類が、金属としてある程度の大きさでガラス原料に混入した場合、ガラス融液中で溶解拡散できずに、金属液滴として沈降する可能性がある。その場合、メタルドリルと呼ばれるガラス溶解槽の炉材を侵食する現象が発生し、窯の寿命を著しく短くする恐れがある。それは、あたかも溪流の大岩の表面にある小さい小石が水により回転しながら岩を磨耗し、大きな窪みを形成するような現象であり、炉材のレンガに穴を深くあけて行くというものである。金属銀や金属銅がガラスに使われている例としては、鏡、自動車のリヤガラスの防曇用発熱体、太陽光発電モジュールのバスバー材などがある。

亜鉛、アンチモン

亜鉛やアンチモンなどは、フロート成型の溶融錫バス内の強還元雰囲気下で表層のイオンが白濁することが知られている。亜鉛は、ブリキなどの合金中に含まれているため、回収リサイクルしたカレットに混入する可能性がある。また、ガラスの種類によっては、酸化剤としてアンチモンを含む場合がある。

アルミニウム

酸化アルミニウムはガラスの原料として使用される場合もあるが、金属アルミニウムはガラス製造業にとって、忌避物質である。それが原料に混入すると非常に強い還元性によってガラス主成分の酸化珪素が金属珪素に還元され、大きな粒状欠点を多発させることとなる。この金属珪素の粒は品質欠点としてだけではなく、その熱膨張率がガラスと大きくことなるため徐冷中の板ガラスが割れて製品が取れない原因となる。金属アルミニウムは、建築材料とし

てガラスとともに使用される場合が多いため、回収リサイクルする場合注意が必要である。また、飲料容器のアルミ缶として一般的であるため、カレット缶などの回収容器に混入する恐れも高い。さらには、太陽光発電モジュールには防湿材としてアルミ箔が使用されている場合があり、自動車用フロントガラスにはアルミ箔を使用した車検シールが貼られている場合があるため、これらを回収リサイクルする場合には、除去を徹底する必要がある。

ニッケル

ニッケルは、そのイオンをガラスの着色剤として使用することもあるため、大量に混入した場合、光学特性規格の維持が出来ない。しかもっと深刻なのは、硫化ニッケルの結晶の生成である。ニッケルはガラスの熔融過程で硫化物イオンと反応して、難溶解性の硫化ニッケルを生成する場合がある。この結晶は強化ガラス製造工程で高温形態となり、使用中に低温形態に徐々に変化することにより体積膨張し、強化板ガラスが自然破損する原因となる。ステンレスには、ニッケルを含有している場合が多い。これらのステンレスがガラス溶解窯に混入した場合、金属ニッケルがガラス中の硫黄（清澄剤として含有する場合が多い。）を還元し、自らは酸化されて硫化ニッケルを生成する。ガラス融液中の硫化ニッケルは溶解拡散せずに、液滴として流出し、ガラスの固化とともに結晶化する。

有機化合物

次に、有機化合物について、その混入による不具合現象および原因をまとめる。有機化合物とは、紙や木片、ゴム（ウェザーストリップ）、プラスチック破片、フィルム等、あるいはそれらが燃えて出来たカーボンなどが考えられる。また、塗料、印刷の塗膜なども含まれる。

それらの物質は、ガラス溶解時に燃焼して除去されるため、ガラス製品品質への影響がなさそうであるが、実際には、ガラス熔融素地中の溶存酸素濃度を局所的に低下させる。このことは、ガラスの酸化還元度すなわち、ガラス中の遷移金属イオンや硫黄の価数に大きく影響する。酸素不足となると、例えば、鉄は下記の平衡がより還元側の右側に片寄り、青く強く着色するFeOの比率が増加する。



さらに混入量が増え還元度が増すと、ビールピンのような茶色の着色欠点が発生する。すなわち、製品の光学品質を維持するためには、これら有機化合物を分別除去し、その混入量を低下させる必要がある。筆者の検討では、光学品質を維持するためには、カレットに混入する有機化合物を100ppm程度に抑える必要がある。

また、この溶存酸素濃度の低下は局所的に発生するため、熔融ガラス中に酸素濃度のムラが発生する。素地中の着色金属イオンの酸化還元平衡に影響を与えることで、色ムラの原因となる。酸素濃度の異なる熔融ガラスが接触する界面では泡が発生するため、

泡欠点の原因となる。また、有機化合物のような還元性物質がガラス原料中に混入していると、ガラスの原料のひとつである芒硝（硫酸ナトリウム）と熔融初期の段階で反応し、低温分解させてしまう。芒硝は、清澄剤あるいは珪砂熔融助剤でもあるので、泡欠点や未熔融珪砂による砂利欠点が出やすくなる。

(2) 板ガラスの品種間及びメーカー間の組成差

板ガラスの主成分は、多い順に、SiO₂、Na₂O、CaO、MgO、Al₂O₃であり、建築用、自動車用の板ガラスでは、製造メーカーが異なってもおおむね類似した構成となっている。しかしながら、天然原料を使用するため、その組成特にCaO/MgO比や混入するK₂O濃度等は板ガラスメーカーによって微妙に異なっている。特徴的なのはAl₂O₃の含有量であり、気候風土によって耐候性を考慮した組成となる傾向が有り、0.2～2.0Wt%と大きく異なっている。日本の板ガラス組成は欧米に比べて高温多湿の気候を反映し1.5～2.0Wt%と最も高いが、それほどばらついているわけではない。

いずれにしろ現状では、その板ガラス製造においては自社組成カレットを使用することが多い。市中から回収されるカレットは、主に国内の板ガラスメーカーの製品が混合された状態（しかもその混合比率が変動しながら）で回収されてくると想定され、そのメーカー別の分別は技術的には可能でも非現実的と考える。

一方で、組成が異なることによる製造工程や製品品質への影響については以下のように考えられる。窓ガラスには、外側の景色が正確に見えることが要求される。すなわち、ガラスの透視歪みを小さくすることが、品質スペックのひとつであり、特に自動車用窓ガラスでは安全上その歪みが小さいことが要求される。

透視歪みが小さいガラスは屈折率が均質であることを意味するが、異なった組成のガラスどうしは熔融状態にあっても混じり合い難いという特性を持つため異組成のカレットが大量に混じったりすると、屈折率に分布が生じ透視歪みが悪化する場合がある。

したがって若干組成の異なるメーカーのガラスが混合されている状態でも、リサイクル可能とするための均質化の技術開発が必要である。

組成が大きく異なるガラスが比率不定で混入した場合、板ガラス（特に自動車用）としての光学特性（透視歪み）を維持できなくなるので、リサイクル可能な量が非常に制限される。

日本国内の板ガラスメーカー3社間においては、それほど組成差が無いため、網・線入りガラスを除けば、ガラス原料としてリサイクルするために分別する必要はないと考えられる。しかしながら、海外メーカー品や太陽電池用の板ガラスの場合、組成の差に由来する屈折率の差異が大きくなる傾向がある。

(3) 建築用ガラスリサイクル特有の問題

建築用板ガラスの場合は、フロート板ガラスと型板・磨板ガラスの間に、その成形プロセスに要求される物性の違いから若干組成差がある場合もあるが、ガラス以外の不純物混入がなければ、特に問題はなく原料としてリサイクルが可能であると考えられる。建築用の場合、着色ガラスは比率も少なく着色剤濃度も低いので混入は可と考えている。

建築用の網入、線入ガラスの場合は、網や線を除去する必要がある。特に、製造先によっては、線材としてニッケル含有のSUSを使用しているため、他社の網、線入りガラスは、徹底した分別が必要となる。

強化ガラス（安全ガラス）のリサイクルについては、基本的には、粉碎して、フロートガラスと同じ扱いで構わないと考えらる。

上記の建築用板ガラスは、単板ガラスであるため、異物混入に注意すれば、リサイクルが可能で、既に社内及び弊社関連加工拠点からの回収リサイクルは、既に実施している。網入、線入についても、粉碎・網、線除去というプロセスは必要だが、同様に原料として使用している。

ただし、市中から回収・リサイクルする上で、注意する必要があるのは、透明防火ガラスである。この製品群は、硼珪酸ガラスや、アルミノリチア系の透明結晶化ガラスを使用したものがある。これらの製品は、その組成、物性が大きく異なるため、通常の板ガラス原料に混入した場合、リム等の発生原因となる（表*参照）。破碎・混合したもから取り除くことはほとんど不可能であるため、回収時に混入を防ぐ必要がある。

一方で、ここ数年の省エネ志向や、防犯・防災意識の高まりによる複層ガラス、合わせガラスといった建築用機能ガラスの需要が増大しつつある。これらの製品は、異種複合材料であるため、そのリサイクルは簡単にはいかない。

合せガラス（ガラスとガラスの間にPVB等の有機膜をはさんだもの）

有機化合物である膜が許容濃度以下に除去されれば、フロート板ガラスと同じ扱いが可能であるが、板ガラス原料としてはリサイクルされている例は少ない。

一部のカレット業者にて、一部粉碎&膜除去（比重差選別）されて板ガラス以外のガラスメーカー（例えば、グラスファイバーやピンガラス）にリサイクルされている場合があるが、それ以外は廃棄されている可能性が高い。

複層ガラス

複層ガラスは、複数枚の板ガラスの間にアルミスペーサーやシーラントゴムを挟んだ構成となっている。したがって、スペーサー及びその中の乾燥材を分別除去し、有機化合物であるシーラントゴムが許容濃度以下に除去されれば、単板ガラスと同じ扱いが可能である。現在は、カレット業者にて、ブルドーザー等の重機で踏みつけるなどして粉碎し、ス

ペーサーを除去して、ガラスカレット選別ラインに流し、板ガラス以外のガラスメーカー（例えば、グラスファイバーやピンガラス）にリサイクルされている場合がある。

こうした状況を踏まえ、板硝子協会が中心となって進めてきた、これら建築用機能ガラスのリサイクルへの取り組みについては、別途説明する。

(4) 自動車用ガラスリサイクル特有の問題

日本自動車工業会のデータによると推定廃車台数は年間約400万台なので、自動車一台当たりの板ガラスの使用重量を32kg程度とすると、年間13万tonのガラスが国内で廃棄されている可能性がある。その廃棄のされ方も、Fig. 4に示されるような構成のシュレッダーダストに混入する形で廃棄されている。

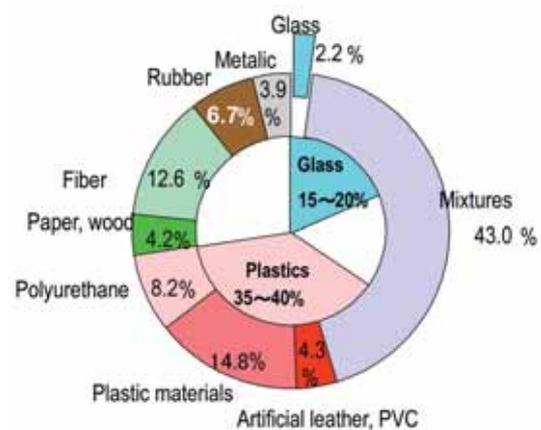


Fig. 4 Typical constitution of automotive shredder dust

すなわち、ガラスは最終廃棄物として埋め立て処分するものとして最適な物質であると前述したが、実態はガラス以外の種々の物質と混合されて廃棄されており、その廃棄による環境負荷は大きいといえる。数年前に社会問題化した瀬戸内海の豊島での産廃大量投棄は、主はこのシュレッダーダストであるとされている。

この項では、廃車カレットを使用することにより発生すると予測される自動車用の板ガラス製品品質への影響についてまとめたいと思う。

自動車用の窓ガラスには、以下のようなガラス製造や製品品質に大きく影響すると考えられる材料が使用されている。

セラミックプリント（黒セラ，Black enamel）

自動車のフロントガラスやリヤガラスの室内側外周囲に黒く着色されたドットパターンの部位は、無機化合物顔料を含むセラミックプリントである。板ガラスを曲げたり強化したりする加熱工程で、同時に焼き付けを行っているもので、容易に剥離できるものではない。外周にあるので、それほど多量に塗布されているようには見えないが、実は全ガラス面積の15%程度がこのセラミックプリントに覆われて

いる。

問題は、このセラミックプリントが付着したガラスが、板ガラス原料に混じた場合の影響である。セラミックプリントメーカーにより差は有るが、一般的に使用されているものの無機化合物顔料は、酸化クロムや酸化銅であることが多い。現在ではそのほとんどが無鉛化されているが、数年前まではプリント材の主成分は鉛ガラスであった。Table 3に代表的なセラミックプリントの焼成後の成分を示す。

Table 3 Typical composition of black enamel (Wt%)

	PbO	Bi ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	CuO	B ₂ O ₃	Others
Lead base	30~40	-	15~25	15~20	7~12	5~10	0~10
Lead free	-	10~50	10~40	5~30	1~10	0~15	0~15

Others; Li₂O, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO₂, SnO₂, ZrO₂

この表の成分の中で特にCr₂O₃やCuOが大量に板ガラス原料中に混入すると、緑や青に着色され製品の光学特性管理が困難になる。筆者の計算や実験結果によると、酸化クロムがガラス中に数十ppm混入すると、可視光透過率が1%程度も低下する。焼成後のセラミックプリントの重量を50~60g/m²程度とすると、一般的な乗用車の窓ガラス面積3.3m²強の約15%に付着しているセラミックプリントの総重量は25~30g程度である。すなわち、例えばTable 3に示す組成のセラミックプリントが使用されていた場合、全窓ガラスの重量32kg中混入する酸化クロムの重量比率は150~200ppm程度に及ぶことになる。すなわち、安全のために透視性が重視される自動車用ガラス製造では、セラミックプリントの付着したカレットを分別除去せずに廃車ガラスを板ガラス製品原料にリサイクルすることは不可能であるといえる。

ガラスカレット中から異物を除くために光学センサーと排除システムを連動させた装置が使用されることが有るが、セラミックプリントはガラス片の1面にしか付着しておらず、センサーを通過するときの角度によっては検出されない場合があり、非常にやっかいである。

従って、廃車回収カレットからセラミックプリントを分別除去するための技術開発は非常に重要である。

防曇熱線（銀ペースト）

リヤガラスに曇り止めの加熱線が付着していることが多いが、その主成分は銀である。また、その加熱線と電源をつなぐ端子部分には、鉛や錫を主成分とするハンダが使われている。

上述したように、銀はガラス溶解炉の寿命を短くすると考えられるので、カレットから除去する必要がある。一方、銀は貴金属であるので、ガラスから分別回収されればそれなりの価値が発生すると考えられるので、廃車回収カレットからの銀の分別回収技術の開発が期待される。

合わせガラスの中間膜（PVB）

自動車のフロントガラスには、合わせガラスが使用されており、建築用合わせガラスと同じ問題がある

紫外線吸収ガラス、プライバシーガラス

自動車用窓ガラスの種類には、1990年代以降急激に需要を増大した紫外線カット機能を持つ紫外線吸収ガラスと、リヤウィンドウに使用されることの多い非常に濃い色のプライバシーガラスがある。

紫外線吸収ガラスはその機能を得る為に、酸化セリウムや酸化チタンを1%程度も含有していることが特徴的である。特に希土類である酸化セリウムは世界的にその供給が限られている為、資源として非常に貴重であるといえる。また、酸化セリウムは重元素でもあるため、その使用によりガラスの比重を大きくする作用がある。例えば、一般的に紫外線吸収ガラスは3.5mmの厚さで紫外線を90%以上吸収する為に、酸化セリウムを1.5Wt%近く含有しているが、これにより密度は1%近くも増加する。

また、プライバシーガラスは、非常に高濃度の着色剤を含有していることが特徴である。したがって、そのカレットは色の薄いガラスを生産するときには、光学特性を維持するために、その混入を厳密に管理する必要がある。

すなわち、紫外線吸収ガラスやプライバシーガラスを他のガラスと分別して回収することは、以下の2つの理由から必要であると考えられる。

自動車用ガラスの透視歪み、光学特性品質を阻害しないため。

貴重な資源である酸化セリウムを有効にリサイクルするため。

プライバシーガラスは、明らかに色が異なるため、廃車から回収する段階で分別することはできそうであるが、紫外線吸収ガラスは、見た目での分別は困難である。板硝子協会3社では、紫外線吸収ガラスの分別リサイクルが簡易に推進することを狙って、UV cutのマーキングが行なわれている。

（4）太陽光発電モジュール用ガラス特有の問題

太陽光発電モジュールは急速に需要を増大している段階であり、まだ廃棄物として大量発生する段階には無い。しかし将来的にはそれが予測されるため、現時点でそのリサイクル技術について検討しておくことは、メーカーの生産者拡大責任の一つであると考えられる。

実際に、筆者らが自動車用の新組成ガラスを開発していた当時、そのリサイクル時の上述の問題についてまったく考慮に入れていなかったことは、大いに反省しなければならない点である。

現在、太陽光発電モジュールには、大きく分けて以下の3種類がある。

結晶シリコン型；結晶シリコンと電極、バスバーを有機フィルムで挟み込み、板ガラスに貼り付け、

裏面をアルミ箔やPETフィルムで防湿した構成
薄膜シリコン型；ガラス基板上に薄膜シリコンを
形成し、裏面を同様に防湿処置した構成
CIS型太陽光発電層を板ガラス上に積層し、合
わせガラスのように2枚のガラスで挟んだ構成

使用後のこれらモジュールをリサイクルするため
には、ガラス以外の物質（シリコンやフィルム類、
CIS層、バスパー材など）を除去する必要がある。
シリコンは、粗粒でガラス原料に混入すると、粒状
欠点となったり、ガラスを局部的に還元したりする
ので、取り除いたほうがよい。また構成材料中で
もっとも部材単価が高いので、回収・リユースされる
ことが望ましい。金属銅を主成分とするバスパー材、
有機化合物であるフィルム類については、混入によ
る影響はすでに述べた。

5. カレットリサイクルの取り組み

この項では、これまでに主に筆者が参加して検討
してきた板ガラスのリサイクルの取り組みについて
まとめる。

(1) 廃車回収ガラスリサイクルの取り組み

廃車回収ガラスリサイクルのポイントは以下の3
点である。

廃車解体工程でいかに他の異物を混入させずにガ
ラスを分別回収できるか。

合わせガラスのフィルム、セラミックプリント等
のガラス付着物質をいかに除去するか。

紫外線吸収ガラス、プライバシーガラスをいかに
分別するか。

は、廃車解体業者の協力が必要である。社団法人
日本自動車工業会と板硝子協会の取り組みで、
1999年度に実際に廃車解体工場からフロントドアの
ガラスカレット（紫外線カットガラスを除く）を回
収し、リサイクルのテストを行っている。日本自動
車工業会の指定した廃車解体工場から、愛知県にあ
る板ガラス製造工場に60tonを回収し、カレット品質
の調査、実際のガラス溶解窯での原料使用テストを
実施した。このテスト結果からは、ガラス以外の異
物混入がないように管理された状態で回収されたカ
レットであれば、製品品質に影響を与えること無く
十分使用可能であることが判明している。実際、回
収されたカレットを数tonのロット単位で分析したと
ころ、ほぼ国内3社の板ガラスメーカーの生産比率
に応じた混合比率の組成を示し、バラツキも予測し
ていたほど大きくはなかった。逆にいえば、回収・
解体段階でのシャッフリング機能が重要であるとい
える。

この取り組みの際は、解体工場にて廃車を解体す
る前に一番最初に窓ガラスを回収するという方法で
回収している。実際の方法は、合わせガラスである
フロントガラスは振動カッターで黒セラの内側を切
り取る方法で、強化ガラスであるドアガラスはドア

全体を回収用布袋で覆った後でポンチで割りると
いう方法を採用している。こうした方法が異物混入
を避けるためには有効であったと考えられる。シュ
レッダーダストのように種々の混合物の状態（Fig.
4参照）からガラスだけを取り出すのは非常に困難
であると考えられる。この場合は、ガラス原料とし
てリサイクルするより、路盤材等のカスケードリサ
イクルする方がリーズナブルであると考えられる。

については、自動車ガラスカンパニーにて
NEDOの補助金を受けて、破碎・風力比重差選別工
程を伴うリサイクル設備を愛知工場で検討してい
る。自動車用ガラス原料のスペックを出すためには、
粉碎粒度管理が重要であるため、フィルム細片を含
む微粉ガラス屑が比較的多く発生し、その処理費用
が高いため、あまりうまくいかなかった。

のうち、黒セラ付着部分の除去や 紫外線吸収
ガラスの分別について評価を行った結果、光学レー
ザーセンサーによる識別・分離テストは、ほぼめど
がついたといえる。

これらについては、NEDO開発報告に詳しい。

(2) 建築用機能ガラスリサイクルの取り組み

建築用板ガラスの場合、その廃棄物は、自動車や
家電製品のように、解体工場に集められそこでガラ
ス屑がまとまって発生するわけではない。すなわち、
一戸一戸が建設されている場所、家屋解体現場で少
量ずつ発生することになる。したがって、いかに少
量のガラス屑を効率的に集めるかが、ひとつの課題
となる。一方で単板ガラスのカレットについては、
ちょうど30年前の日本で子供たちが小遣い稼ぎのた
めに一升瓶やビール瓶を回収していたように、すで
に市中のカレット業者およびその協力業者により、
少量回収の仕組みはあった。

協力業者が小規模の量のガラス屑を集めて、ガラ
ス選別設備を持つカレット業者に売却し、カレット
業者にて、経済的に見合う選別・カレット品質の作
りこみを行い、板ガラス、ファイバーガラスなどの
メーカーに品質保証の上で売却（あるいは埋立て廃
棄）しているのが実態である。

一方で、4(3)で述べたように、建築用において
は、従来一枚の板ガラスの窓から、合わせガラス、
複層ガラスといったガラス以外の部材が使用される
製品が増えている。

板硝子協会では、これら機能ガラス製品のリサイ
クルのための社会システムやリサイクル技術は、メ
ーカーの製造者拡大責任の一つであると捉え、
2004年に協会内にリサイクルワーキンググループを
設置し、これらの課題に対し取り組みを開始した。

リサイクルの社会システムとしては、流通工程の
卸店、販売店の事業団体の協力を得て、回収と費用
負担の仕組みを構築し、2007年末には、廃棄物およ
び清掃に関する法律の特例である広域認定制度を3
社共同で取得した。

また、板ガラス製造設備とリンクすることで熱回

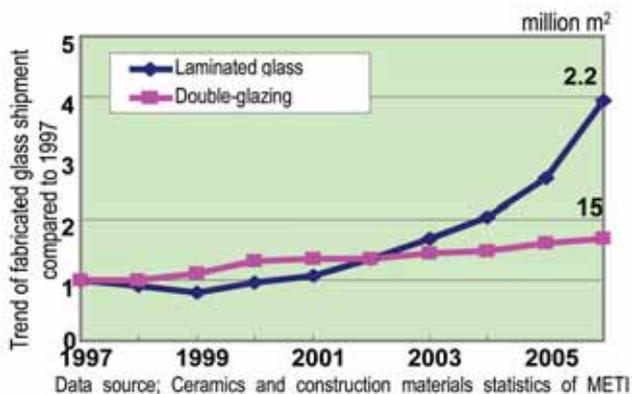


Fig. 5 Market growth of the fabricated glass products in Japan

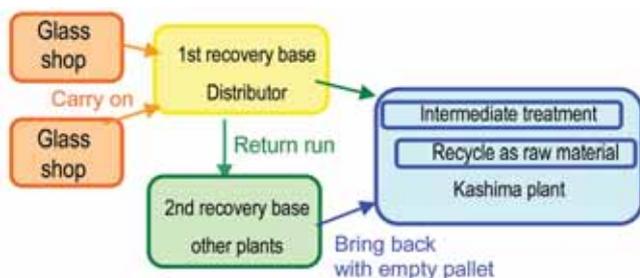


Fig. 6 Recovery system for the dismantled laminated glass

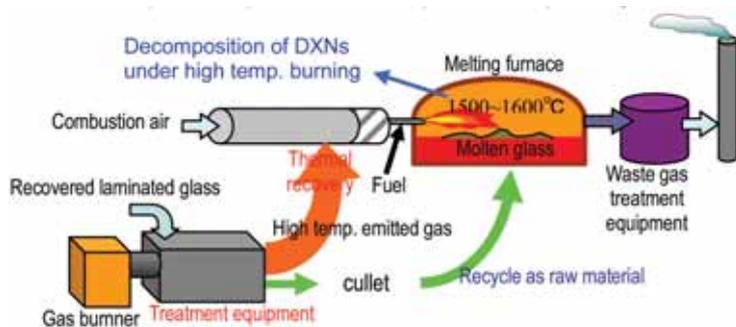


Fig. 7 Scheme of recycle equipment for laminated glass

収や排ガス処理を行う板ガラスメーカー特有の処理技術というコンセプトで、3社共同で合わせガラス処理設備開発を行い、2007年初に鹿島工場に初号機

を設置した。合わせガラスの使用量、回収システムおよび処理設備の概略をそれぞれFig. 5, 6, 7に示す。

こうした活動により、2008年から流通工程で発生する合わせガラス廃材を回収しリサイクル事業を開始した。板硝子協会では、この活動を複層ガラスにも拡大して推し進めている。

6. 結 言

現在、住宅用や自動車用の板ガラス製品の回収リサイクルは、カレット業者を中心に行われているが、その量は決して多くない。特に、廃車のガラスはシュレッダーダストの一部として廃棄され、瀬戸内海の豊島のような環境問題を起こした事例もある。また、現在の自動車用ガラスには板ガラス原料のカレットとしては使用できないセラミックプリント付着部分があり、建築用ガラスも合わせガラスなどの機能ガラス製品の増加、さらには太陽光発電モジュールのような複合部材製品の需要の増加が見込まれる。

こうした中で、製造した製品のリサイクルについて検討することは製造者拡大責任のひとつと捉えるべきである。もちろん、水平リサイクル以外のリサイクルの方途も開発する必要はある。しかしながら、一般的には家庭ゴミ同様に、可能な限り分別回収することが有効なリサイクルにつながる。

原料と燃料を輸入して加工製品を輸出することで成り立っている日本の産業構造を考えれば、廃棄物の有効利用、究極的にはゼロエミッションを目指すことは、日本の産業戦略の一つと捉えることもできる。

また、従来の大気汚染物質、地球温暖化ガス、産業廃棄物などの社内事業所から直接排出される環境負荷を低減する活動に加えて、自社製品のライフサイクルでの環境負荷低減を考慮すべきである。すなわち、エコガラスのような環境負荷低減型の製品の開発供給とともに、それら製品の使用後のリサイクルについても環境戦略の一つとして重要視し、取り組みを継続する必要がある。