

鉛ガラスから鉛を除く(2)

To Eliminate the Lead from Lead Oxide Containing Glasses (2)

寺井 良平
Ryohei TERAI

寺井ガラス技術事務所

問合せ/テライ リョウヘイ 〒567-0815 茨木市竹橋町11-11-303 TEL 072-626-9140 FAX 072-626-9140
E-mail/rterai@nifty.com

キーワード：WEEE（電気・電子機器廃棄物）、RoHS（有害物質規制）、EC/Directive94/62、ISO7086、鉛ガラス、低融ガラス、鉛フリーガラス、環境問題、VRAL（鉛・自主的リスク・アセスメント）、リサイクル増幅係数

11 家電器機の中の鉛ガラス

家電製品において、ガラスの成分として酸化鉛を最も多量に含む製品は、多分 CRT（ブラウン管）であろう。電子線に伴う X 線などの放射線を有効に吸収する元素・鉛は人体保護の役割を果たしている。ただしカラーテレビの前面パネルには、実は鉛は使われていない。鉛ガラスは放射線によって発生する構造欠陥（カラーセンター）によって映像の色を損傷するからである。鉛の代わりにストロンチウム（Sr）やバリウム（Ba）が使われる。また、ある場合にはジルコニウム（Zr）も用いられる。しかし背面の電子銃のファンネルやネックチューブにはそれぞれ 22-24%、33-35%の PbO、更に各パーツをつなぐ封着ガラスには 75-78%PbO を含むガラスが用いられている。図 2 に CRT のバルブを示す。

また、最近はやりのプラズマ・ディスプレイ・パネル（PDP）には、個々の発光画素に当たる放電単位の隔壁に 60-70%の PbO を含む低融ガラスが使われる。板ガラスの上に無機厚膜を融着するには鉛含有低融ガラスが極めて有効だからである。図 3 は PDP の構造を模式的に描いたものである。

次に問題になるのは、電球、蛍光灯などであろう。前述したように、電球・蛍光灯の電極をガラス管（球）に

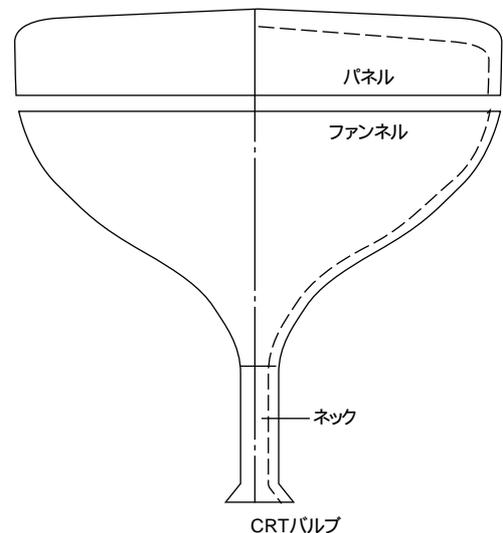


図 2 CRT バルブ

解説

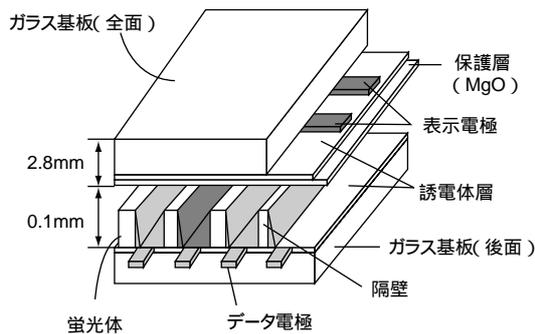


図3 PDPの構造(蛍光体を塗布した低融ガラス隔壁が並ぶ)

封着するステム部分に金属線と馴染みのよい鉛ガラスが使われる。これにはPbOが30%前後含まれる。また、電子回路部品には、セラミック基板の上に低融性鉛ガラスが絶縁目的に施釉されることが多い。このグレースにはPbO20%前後のものがよく用いられる。また、厚膜集積回路や厚膜オーバーコート用として、絶縁と接着にPbO60%の低融ガラスが使われる。LTCC(低温同時焼成セラミックス)には特性調整と結合用に鉛・ホウケイ酸ガラスがよく用いられている。

更に、各種カメラ、ビデオカメラ、デジタルカメラのレンズには、鉛を含む高屈折率ガラスが多用されてきた。これらの家電製品以外にも、食器用クリスタルガラスが鉛を含有していることはよく知られている。セミクリスタルでは、24%以下、通常のクリスタルガラスの場合には、その多くは24-32%のPbOを、あるいはそれ以上の鉛を含む。更に原子炉や原子力施設には、放射線防護用の窓材として鉛を高率に含んだガラスが用いられる。

12 鉛ガラスから鉛を除く

12.1 光学ガラスの場合

無鉛化の最も早い動きは、電子機器メーカーではなく、光学ガラス製造企業に現れた。光学ガラス・フリントガラスではPbOをほぼ50%程度含んでいたし、重フリントガラスになると約80%も含有するものがあった。

ところがWEEEの上げた規制対象となる品目のリストには、ビデオカメラは上げられているが、いわゆるカメラもデジタルカメラも規制リストにない。カメラが電

子機器でないという判断からであろうか、それでも光学ガラスの無鉛化は著しい速度で進み、既に鉛は我が国の光学ガラス製造企業のカatalogからは完全に消え去っている。

恐らく光学ガラスの場合は、カドミウム問題、トリウム問題など過去の苦い経験が事態の改善を急がせたと思われる。この両成分(Cd, Th)は、高屈折率を与えながら光の分散を抑える効果があり、高屈折低分散ガラスを作る成分として一時重宝された時期があった。しかし、前者はイタイタイ病、後者はその天然の放射線によるフィルム感光などの弊害のため今日では全く使用されていない。

長く使い続けられた鉛(Pb)も、Nb, Ta, W, La, Y, Csなどの高価な原料に代替されている。例えばカールツアイスの最近の〔特開2003-104752〕「無鉛光学重質フリントガラス」には多量のTiO₂とNb₂O₅、更にWO₃が導入されているし〔特開2000-344542〕〔特開2000-128568〕の「無鉛光学ガラス」ではLa₂O₃、BaO、更にWO₃、Nb₂O₅、Y₂O₃、Gd₂O₃、Ta₂O₅などが加えられている。この傾向は我が国においても同じである。

また、泡切れ剤として用いられたAs₂O₃も敬遠され、Sb₂O₃(0.1-0.5%)と少量のフッ化物(0.5%以下)などに取って替わられつつある。

12.2 低融ガラス(金属封着、グレース、セラミック複合)の場合

いわゆる封着用ガラス(はんだガラス:solder glass)は、今までPbO-B₂O₃-(SiO₂)を基礎組成として展開されてきた。何れも300-400℃という低いガラス転移点を持ち、接着する相手ガラスや周辺材料を損傷しない温度で封着できる特性が重宝され、金属封着用としても抜群の支持を得てきた。もちろんガラス(非晶質)のまま使われる場合と、これに各種セラミックス・フィラーを加えて、全体としての膨張係数や誘電率などの特性を調整する場合、及び作業工程中にガラス相を結晶化させ、最終的に結晶としての特性を与える場合の3通りのケースがあるが、何れもガラス細管あるいはガラス粉体をそのまま用いるか、または粉末を有機溶剤などでペースト化して使用される。

このようなガラスから鉛を除き、低融性を確保する試みは、

- ① Pb を Bi に置き換える
- ② Zn あるいは Sn を採用する
- ③ ガラスの基礎組成をリン酸塩系ガラスに変える
- ④ アルカリ・ホウ酸成分を増やす
- ⑤ フッ化物を導入する
- ⑥ 有機・無機複合（ゾルゲル法）系で作る

などの方法で行われており、最近の公開特許公報にも、この方策に基づく多くの提案が示されている。

① ビスマス導入ガラスの例

ビスマス導入ガラスには、焼成温度が 500℃ 以下の例として、日本電気硝子の〔特開 2000-128574〕がある。実施例 $37\text{Bi}_2\text{O}_3-39.3\text{B}_2\text{O}_3-7.2\text{BaO}-16.7\text{CuO}$ では、転移点が 373℃、膨張係数が 115×10^{-7} 、焼成温度が 500℃ となっている。日本山村硝子〔特開 2003-095697〕も 500℃ 以下の焼成温度の Bi 含有ガラスを提案している。その実施例には $65\text{Bi}_2\text{O}_3-25\text{ZnO}-7.5\text{B}_2\text{O}_3-2.0\text{Al}_2\text{O}_3-0.5\text{SrO}$ などが上げられている。このガラスの荷重軟化点は 450℃。この粉末 95% に 5% のコーゼライトをフィラーとして加えると、封着フロー温度：496℃、膨張係数： 78×10^{-7} となり、Bi 含有封着複合ガラスとしては適当な膨張係数を持つに至ると説明されている。

他にも結晶化ガラスの場合には旭硝子の〔特開 2002-308645〕がある。 Bi_2O_3 を 27-55% 含有する $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3$ 系を用いているが、軟化点は 560℃ と低く、ZnO の導入による結晶化で膨張係数が低下し、低膨張基板上の電子回路のオーバーコートに向くという。

また同社の〔特開 2002-362940〕では、 $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系ベースの結晶化ガラス粉末に、耐熱ウイスキーや顔料を加え、自動車窓用のセラミック・カラーを作っている。 Bi_2O_3 含有量は 50-62% である。他にもセラミック・カラー用としては、〔特開平 6-234549〕において、 SiO_2 : 14-35%、 Bi_2O_3 : 50-75%、 TiO_2 : 3-10%、 R_2O : 1-15% (R : Li, Na, K) の結晶化ガラス粉末 (65-96%) をベースに、着色耐熱顔料 (5-35%) や耐火物フィラー (0-10%) のペーストを用いるものを提案している。

② リン酸塩ガラスの例

リン酸塩ガラスは他成分に対する溶解度も大きく、低い溶融温度をもつので、鉛ガラスに代わる低融ガラスの基礎組成としてよく検討され、特許も多い。

一例を表 3 にあげる。

表 3 低融リン酸塩ガラスの組成例 (mol.%)⁹⁾

P_2O_5	Na_2O	CaO	BaO	Al_2O_3	B_2O_3
30~40	10~20	10~20	10~20	2~8	1~5

このガラスは転移点として 310~320℃、膨張係数として $140 \sim 160 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ をもち、封止ガラスなどの目的にかなう特性をもつ。また問題の化学的耐久性もかなりの高さを有するという。2 価, 3 価成分の導入が必須とされ、特にアルミナの添加は効果的だが、低融性をやや犠牲にする可能性がある。低膨張にするには、やはりフィラーの添加が必要となる。

日本電気硝子が開示する〔特開 2002-326838〕では、リン酸塩ガラスをベースとして、これに SnO が加えられ、更に通常のガラス形成酸化物である B_2O_3 、あるいは SiO_2 が添加される場合もあって、基本的に $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SnO}$ 系、 $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SnO}-\text{B}_2\text{O}_3$ 系、 $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SnO}-\text{SiO}_2$ 系からなる。CRT, PDP, VFD (蛍光表示管), FED (限界放射ディスプレイ), IC パッケージの封着用として十分な流動性をもち、レベリング (仕上がりの平坦性) も良好であるという。ただ SnO は酸化されると流動性を失うので、ペーストを作る時の有機溶剤 (ピヒクル) に注意が必要であると言及されている。

〔特開 2001-199740 : 旭テクノ他〕では、 $\text{CuO}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{RO}$ 系 (R : Zn, Ba, Ca, Mg, Sr, Sn, Ni, Fe, Mn) と無機充填材 (ジルコン, コーゼライト, アルミナ, ムライト) の複合系を提案している。軟化点を下げするためには Cu^{+1} の生成が必要であり、600℃ 以下で結晶化せず使えるという。PDP 隔壁にも用い得る。

③ アルカリ・ホウケイ酸塩ガラスの例

表 4 は Wedgwood の関連会社である CERAM Research が従来の鉛含有低融ガラスに代えて発表した新しい無鉛アルカリ・ホウケイ酸塩ガラスの組成を示している。比較のため、有鉛・無鉛の両者の組成が示されている。

このように、CERAM research 社では、最も無難な無鉛新製品としてアルカリ・ホウケイ酸塩ガラスを選び、それを製品化している。この組成で、複数のアルカリが同時に導入されているのは、いわゆる混合アルカリ効果によって、その電気伝導度を低く抑える効果を狙った

解説

表 4 CERAM Research の開発した無鉛低融ガラスと元のガラス組成 (%)⁷⁾

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	B ₂ O ₃	ZrO ₂	PbO
Glaze	無 Pb	59	13	8	5	3	1	10	1	
	有 Pb	55	6	10	3	2		8		16
Flux	無 Pb	53	5		7	10		20	5	
	有 Pb	27	3						3	64

ものである。

アルカリ・ホウケイ酸塩をベースとした低融ガラスの提案は数多い。各社いろいろ特許出願しているが、その基本は R₂O-RO-B₂O₃-SiO₂ 系である。問題は低い化学的耐久性をどうカバーするかという点に工夫が集中しているように思われる。

④ PDP 隔壁ガラスの例

CRT は今回の WEEE・RoHS 指令の規制を外されているが、未来のディスプレイといわれる PDP (プラズマ・ディスプレイ・パネル) に対しては無鉛化の要求が強いのであろう、PDP 用ガラス無鉛化に関する特許が非常に多い。PDP は板ガラス上に低融ガラス層を設け、これをサンドブラスト、またはフォトリソグラフィなどの方法によって、多数の細かな放電セルに加工される。したがって各セルの隔壁は低融ガラスからなり、その多くは鉛ガラスで作られる (図 3)。

表 5 に、例として、その代表的な PDP 隔壁用有鉛ガラス (旭硝子) と、無鉛化の要求によって生まれた無鉛ガラス (奥野製薬) の組成を比較して示す。

表 5 PDP 隔壁用低融ガラスの組成例

	鉛含有系 (旭硝子)	無鉛系 (奥野製薬)
ガラス	PbO 66	SiO ₂ 38
	SiO ₂ 24	B ₂ O ₃ 12
	B ₂ O ₃ 5	ZnO 36
	Al ₂ O ₃ 5	Na ₂ O 3
		Li ₂ O 5
		NaF 3
		V ₂ O ₅ 3
フィラー	アルミナ チタニア 顔料	アルミナ 球状シリカ 黒色顔料

何れも軟化温度が 550℃ で、基板ガラスを变形させずに、これに焼き付けることができる低融ガラスで

あるが、このような無鉛ガラスは旭硝子〔特開平 8-301631: P₂O₅-ZnO-SnO-R₂O-RO 系〕、東レ〔特開平 9-283035: SiO₂-B₂O₃-Bi₂O₃-ZnO 系〕、京セラ〔特開平 10-297937: B₂O₃-SiO₂-ZnO 系〕〔特開平 11-185629: B₂O₃-SiO₂-Al₂O₃-ZrO₂ 系〕、日本電気硝子〔特開平 11-079780: SiO₂-B₂O₃-ZnO-R₂O-RO 系〕、日本山村硝子〔特開平 11-092168: SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃-RO-R₂O 系〕などからも提案されている。これらのガラスには、リン酸系やビスマス含有系もあるが、概してアルカリ・ホウケイ酸系の選ばれていることが多い。

また、豊田らは SrO-ZnO-P₂O₅ 系ガラスとアルミナの複合体を、PDP に適合した特性をもつとして、その密度、微細構造、曲げ強度、熱膨張係数を評価し、10SrO-50ZnO-40P₂O₅ ガラスを推奨している¹¹⁾。

LTCC (低温同時焼成セラミック基板) のように、セラミックス (例えばアルミナ) 粉末と低融ガラス粉末とを同時焼成して電子回路用基板を作製する場合にも、今までは鉛ホウケイ酸ガラスが用いられることが多かったが、最近はこの無鉛化が進み、ホウケイ酸系ガラス、あるいはそれをもとにした結晶化ガラスが選ばれている。

13 ガラス無鉛化の問題点

① 安全性

鉛の代わりに用いられるビスマス (Bi) は果たして安全な元素であろうか。周期律表の上では、Tl, Pb, Bi が並んでおり、Tl (タリウム) は既に毒性のある元素として警戒されているので、Bi も要注意元素とする意見がある。これまでに Bi は鉛ほどの用途や使用例がなく、その害毒についても見過ごされてきた可能性があるからである。既に神奈川県環境関係機関では、適正管理の必要な規制物質となっている。

Sn (錫) はどうか？ 有機錫の危険性については、今までからも我が国ではよく検討されており、船底や魚網の塗料としての使用を規制している。最近ドイツにおいても、同じように船底塗料としての有機錫を規制する動きが本格化しつつある。無機錫は有機錫と異なるので必ずしも一概にいけないが、イオンとして溶け出した場合の有機化を問題視する人がある。したがって、今後のアセスメントが必要であると思われる。

Zn (亜鉛), Ni (ニッケル) などの金属についても、十分なリスク・アセスメントの必要性がヨーロッパにおいて議論され始めている。Ba (バリウム) さえ問題だとする意見がある。これらの具体的な障害例は報告されていないが、職業上の暴露にはリスク削減措置を講ずる必要があるという報告書が出されている。結局、鉛に替わるいろいろな金属も、安全性に関しては、鉛と同じような問題を抱えていることが分かる。

また、リン酸原料についても、産業衛生学会ではその許容濃度制限を行っており、リン酸 (H₃PO₄) のもつ腐食性ととも、P (リン) 資源の希少性も議論を呼んでいるように思われる。

② 耐水性

鉛 (Pb) は低融性に役立ちながら、かなり良好な耐水性を示す。これも Pb イオンの大きな分極性により、水分吸収を要求する不飽和結合をガラス表面に作らないという特徴からきている。鉛ガラスに代わる低融性のリン酸塩や多アルカリ・ホウ酸塩ガラスでは十分な耐水性が得られない場合が多い。つまりシリカの少ない B₂O₃ や P₂O₅ 主体のガラスは、その表面に水の侵蝕に抵抗する保護層が形成されにくく、ガラス本体が次第に水に溶け去る傾向をもつ。これを改善するにはシリカ、あるいはアルカリ土類や 3-4 価のイオンの導入が避けられず、結果として十分な低融性を得ることができない場合が生ずる。耐水性と低融性のどちらを優先するか、問題点の一つといえよう。

③ 加工性

リン酸塩、アルカリ・ホウ酸塩とともに、高温における粘性の温度変化がケイ酸塩に比べて急激である。つまり fragile なガラスである。溶融点の低いフッ化物ガラスも fragility が非常に大きい。少しの温度変化で粘性が急激に変化する、いわゆる加工の困難なガラスに属す

る。また、フッ化物は職場環境上も問題が多い。

高温における粘性、表面張力、それらと関連した作業加工性にはいろいろ問題があるとする意見が現場にある。特に封着の場合、金属線とのなじみの問題は、ガラスと金属の「濡れ」(表面張力)、両者の中間層となる金属酸化物層の役割、加工温度範囲全体に亘ってガラスと金属の膨張特性を一致させる工夫などが必要となる。つまり鉛ガラスが築き上げた鉛ガラスに適合する合金のように、無鉛ガラスに最適の金属・合金を探索しなければならないわけである。

また、Zn や Sn は、失透 (結晶化) 傾向や耐久性に問題があり、非晶質ガラスとして用いる場合には注意が必要であるという。

④ 経済性

光学ガラス用の酸化鉛 (PbO) は単価 (kg 当たり) が 250 円であるに比べて、代替原料・酸化ニオブ (Nb₂O₅) の価格は単価 6000 円、酸化ビスマス (Bi₂O₃) は 5000 円と桁違いの高さであり、酸化チタンでも 500 円はする。このコスト高をどこで吸収するかが問題となる。

また、この高値は原材料の不足、地球上での存在量の希少さ (クラーク数) に関係しているため、鉛同様、今後の資源枯渇に対する対応が重要となる。因みに関連元素のクラーク数は以下の通りである (表 6)。

表 6 関連元素のクラーク数

元素	多さの順	クラーク数 (%)
O	1	49.5
Si	2	25.8
Sn	30	4×10 ⁻³
Zn	31	4×10 ⁻³
Nb	34	2×10 ⁻³
Pb	36	1.5×10 ⁻³
B	41	1×10 ⁻³
Bi	67	2×10 ⁻⁵
Ag	69	1×10 ⁻⁵
Au	75	5×10 ⁻⁷

有機・無機複合体で低融化を目指すゾルゲル法についても、いろいろの検討が行われているが、やはり原料の高価な点に問題があり、具体的な実施例に乏しい。またホウケイ酸ガラスの主成分であるホウ素の貴重性を問題とする論調もある。

解説

14 EUの鉛に関する自主的リスク・アセスメント

EUのWEEE・RoHS指令に端を発した脱鉛ガラス問題は、「何が何でも即座に鉛を取り除け」という理不尽なものではなく、例えばCRTの鉛ガラスにはその存続が認められているように、科学的・技術的裏づけのある「リスク・アセスメント」が重要視されているように思われる。これからも「リスク・コミュニケーション」と呼ばれる総合的な協議体で、産業界の事情、環境保全、経済発展、代替物の安全性の確認など、いろいろな要因が時間をかけて検討されるものと推定される。それ故、指令の中で何度も科学的・技術的証拠の重要性が指摘されている。我が国においても、科学的根拠のない過剰な反応、無理な対応は避けるべきであろう。

現在、EU内に「鉛の自主的なリスク・アセスメント」(VRAL: voluntary risk assessment for lead)が鉛業界を中心に設立され、健康と環境の2部門について検討を重ねており、金属鉛、鉛酸化物(PbO, Pb₃O₄)、鉛安定剤など9種類を対象として、その生産・加工・製造・使用・リサイクル・廃棄の全段階について、水中、土中、地表、空中における生物や人間への影響を評価している。これは2004年中に完了するものと思われる。この春(2003年)の中間報告では、新たな使用規制に発展するような結果は出ていない模様で、ただ職場における鉛の暴露に関して一部に警告が出される程度であると見られている。このような冷静な自主的リスク・アセスメントの進展によって、鉛の使用制限は猶予されているのが現状であるといえる。

15 鉛ガラスの行方

しかし、やはり鉛は取り扱いに注意の必要な有害物質であることに変わりはない。その上、西山の指摘するように、非常に消耗の激しい金属の筆頭に上げられている。図4に西山の示す各種金属の利用率と耐用年数の関係を示す図を上げた。

このまま行けば、約20-50年ほどで鉛資源は枯渇するのではないかという観測さえある。安井は2030年以降、完全回収の条件を満足しない場合には、鉛は全面使用禁止になる可能性があるという。したがって、鉛は有害物質と貴重物質という両面から、その将来計画を考慮すべきであろう。

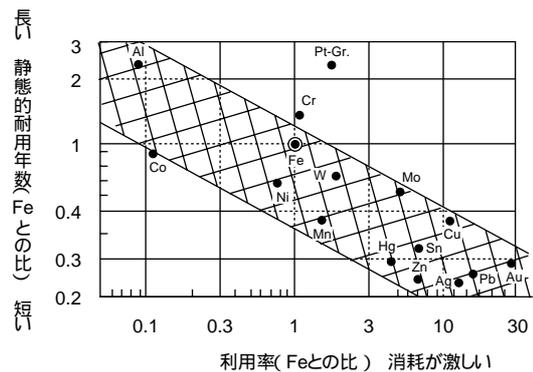


図4 鉄を基準とした相対的利用率と静態的耐用年数(西山)

先ず第一に、できるだけ鉛を使わないようにすることが考えられる。

つまりガラス中の鉛をできる限り他の成分で置き換えるのである。鉛よりも安全で、価格の比較的安い原料であれば、それは歓迎されるであろう。既にチタン、バリウム、ストロンチウムなどが検討されている。基礎組成としては、アルカリ・ホウケイ酸ガラスが重視され、これにアルカリ土類イオンなど耐水性を改善する成分が加えられるケースが増えている。リン酸塩を主成分とした場合には、アルミナなどの組み合わせで、その耐水性改善が図られている。

しかし、鉛以上に貴重な元素を使うことは資源経済学的にも望ましくない。例えば、ビスマスは鉛よりもその存在量が2桁も低く、その価格は20倍も高い。おまけにその安全性は十分確認されたものとはいえないのだから、これは避けるべき事例に属する。光学ガラスに用いられるNb₂O₅も一考を要するのではないか。

一方、鉛を止む無く使用し続ける場合はどうするか。

アルカリの多い鉛ガラスや鉛・ホウ酸塩ガラスなど、その化学的耐久性の特に乏しいガラスは別として、通常の鉛・ケイ酸ガラスは十分inertな材料であり、簡単にガラス本体から鉛が離脱するとは考えにくい。したがってそのまま使い続けることに支障はないと思われる。ただその処分の際に、これを完全分別回収し、カレットとしてガラスに再溶融する方法を確立すべきであろう。ガラスの分別はなかなか難しいが、CRTなどのファンネルやネックチューブなどは比較的簡単に分別できよう。この分別が完全であれば、新製品の品質劣化も余り問題ではなく、それほど「リサイクル増幅係数」も高く

ない上、溶融温度引き下げ効果なども期待できる。しかし、この鉛ガラスから単体としての鉛を回収することには疑問が残る。例えば、最近鉛ガラスから鉛を回収する方法として、融剤を加えて鉛ガラスを再溶融し、これを高温に保持して酸化鉛を揮発させ、分離回収しようという方法が提案されているが、これでは「リサイクル増幅係数」が驚くほど高くなる。

また、電球・蛍光灯、あるいは電子機器などの回路や基板に使われる低融鉛ガラス（封着用ガラスなど）の場合、鉛ガラスだけをデバイス本体から分離して回収することは不可能に近い。しかもこのガラスには鉛・ホウ酸塩などの非常に化学的耐久性の悪いガラスが多い。したがって、無鉛ガラスに代替することが望ましいが、止む無く用いる場合には、武田の提案するように、使用済み後完全回収し、一々分別などせずに、一括処分として「人工鉱山」に埋め立ててはどうか。無理にエネルギーを投入してリサイクルするよりも、将来の鉛資源枯渇に備えた方が得策と思われるからである。そして後年、鉛としての再生利用の技術が確立した段階で、新たな鉛資源として活用すればよい。但し使用済み蛍光灯の回収率は現在非常に悪い。これには水銀という有害物質も含まれているので、デポジット制などの完全回収の方法を確立する必要がある。

電気製品以外の鉛ガラスについてはどうするか。放射線遮蔽用の鉛ガラスはそのまま使い続けられればよい。光学ガラスも無理して無鉛化を押し進める必要はないものと思われる。これも完全回収はそれほど難しくない。ただ加工工程で発生する鉛含有粉塵や汚泥の処理には慎重な対応が必要となる。また、例えば、クリスタルガラスの場合、あの輝きや重量感、叩いたときの金属音、高い屈折率などの条件を満たす代替物が簡単に見つかるとは思われない。一時取沙汰されたチタン・クリスタルガラスもその後名を聞かない。恐らく製作が難しいのであろう。先にも述べたが、一旦ガラスとされた鉛成分は、それほど簡単には溶け出さない。したがって、食器として使い続けることに問題はないと思われるが、ガラスが破損した場合、捨てずにリサイクルすることが必要であろう。それには「高額で引き取る」などの方法を講ずることが考えられる。そして、再溶融によるリサイクルを行うのである。当然元のクリスタルガラスの値段も高くなるが、それはクリスタルガラスを楽しむためのコストと考えるべきであろう。

謝辞

本稿執筆にご協力頂いた和田正道、西野敦、谷上嘉則、橋間英和、大川英次、速水諒三の諸氏に感謝する。

[参考文献]

- 1) Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official Journal of the European Union (2003)
- 2) Directive 2003/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS). Official Journal of the European Union (2003)
- 3) ISO 7086. Glassware and glass ceramic ware in contact with food. Release of lead and cadmium. (2000)
- 4) Directive 94/62 on packaging and packaging waste. Official Journal of the European Community (1995)
- 5) 和田正道:「主要な工業用ガラス」 in 「ガラス工学ハンドブック」: 改訂版(編者: 山根ら)朝倉書店(1999)
- 6) 成瀬省:「ガラス工学」: 共立出版(1958)
- 7) I. Camphell: Lead and cadmium free glasses and frits: *Glass Technol.* **39** [2] 39 (1998)
- 8) E. Guadagnino & R. Dall'Igna: Heavy metal ions in glass and related legislation: *Glass Technol.* **37** [3] 76 (1996)
- 9) Lian Wen, et al.: Water resistance of a new nonlead phosphate sealing glass: *Phys. Chem. Glasses:* **43** [3] 158 (2002)
- 10) 安井至:「市民のための環境学入門」: 丸善(1998); 安井至:「リサイクル 回るカラクリ止まる理由」: 日本評論社(2003)
- 11) 豊田誠司他: SrO-ZnO-P₂O₅ ガラス-Al₂O₃ 複合材の作製とその特性: *J. Ceram. Soc. Jpn.* **111**, 497-501 (2003)
- 12) 萩原覚: 鉛ガラスに係る環境規制と対応: *New Glass*, **13** [3] (1998)
- 13) 西山孝:「資源経済学のすすめ」(中公新書)(1993)
- 14) 武田邦彦:「リサイクルしてはいけない」: 青春出版社(1998); 武田邦彦:「リサイクル幻想」: 文春新書(2000)
- 15) 1991 Data Book of Glass Composition (ガラス組成データブック): 日本硝子製品工業会(1991)
- 16) 金属鉱業事業団・HP: EU エコ・プリーズ(2000-2003)
- 17) (株)多摩分析センター・HP「WEEE 及び RoHS の動向と今後の対策」(2002-2003)
- 18) 小川晋永: 変わるガラス業界の周辺: *The Glass*, No.33 (1994)