

廃電気電子機器の処理に関連したヨーロッパにおける研究動向

産業技術総合研究所、エネルギー利用研究部門、炭化水素循環・利用研究グループ
〒305-8569 つくば市小野川 16-1 tohru-kamo@aist.go.jp

加茂 徹、小寺 洋一

【はじめに】昨年施行された容器包装リサイクル法は、一般家庭から排出されるゴミの大半を占めていた紙やプラスチックの回収・処理を定めたものであり、まだ多くの問題を抱えてはいるが、廃プラスチックのリサイクルという視点からは一歩前進と評価出来る。一方、今年4月に施行された家電リサイクル法やパソコン等を対象とした資源有効利用促進法は、リサイクル率が20～60%と低いため、事実上金属やガラス等の無機材料が主な対象であり、プラスチックは今後の課題とされた。これに対してEUでは昨年、廃電気電子機器指令(WEEE, Waste Electrical and Electronic Equipment)および特定有害物質の使用制限指令(ROS, The Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances)が欧州委員会で採択され、現在、欧州議会・理事会での採択および加盟国での法制化に向けて最終段階に入りつつある。この二つの法律案はほぼ全ての廃電気電子機器を対象にリサイクルの目標とシステムを定めたものであり、当然プラスチックも視野に入っている。またエネルギー回収もリサイクルと認めたことは、現実的で妥当な選択だと考える。著者らの研究グループは今年初め、廃電気電子機器の処理に取り組んでいるヨーロッパのいくつかの研究機関を訪問する機会を得たので、その概要をここで報告する。

【プラスチックリサイクルから見た廃電気電子機器】 家電製品に占めるプラスチックの割合は、カラーテレビで約20%、冷蔵庫や洗濯機で約40%を占めており、製品の軽量化およびデザイン重視の流れから増加する傾向にある[1]。しかし嵩密度が低く、原料の原油と同程度の発熱量しかないためエンタルピー的な利点は少なく、多種類の素材が混在しているためにエントロピー的に不利で、難燃剤等の有害なハロゲン化合物を含むためにプラスチックは金属等に比べてリサイクルし難い材料の一つと言える。

現在、米国を震源とする情報通信革命により、パソコン等の電子機器は急速に普及している。特に今後、広域帯の使用による通信速度の飛躍的な増加は、ノートパソコン、携帯電話、携帯情報端末(PDA, personal digital assistance)の需要を爆発的に増加させると予想されている。例えば日本での携帯電話の総契約数は既に固定電話数を越えて6000万件以上に達し[2]、インターネット接続用携帯電話(Iモード)は発売から僅か数年で2000万件を上回っている[3]。これらの携帯用電子機器は、軽量化を図るために従来の家電製品に比べてプラスチックの使用割合は高い。情報電子機器の急速な発展と普及は一方で旧型の電子機器の大量廃棄をもたらしており、日本での携帯電話の平均使用期間は僅か1.4年であり、近い将来年間5700万台の携帯電話[4]および8万トン(約500万台)のパソコンが廃棄されると予想されている[5]。しかし現状では大部分の電気電子機器は焼却あるいは埋め立てられ、一部の機器に対して焼却後の残渣から金、銀、パラジウム、銅を回収しているに過ぎない。

【電気電子機器を取り巻く情勢】EU では、廃電気電子機器による大気や土壌の汚染を防ぎ、資源の有効利用を図るため、昨年の6月13日に廃電気電子機器指令および特定有害物質の使用制限指令を採択した。廃電気電子機器指令とは、EU 加盟国で販売されたほぼ全ての電気電子機器の回収・リサイクルを製造者などに義務づけるもので、最終的に特定有害物質の使用制限指令と分離して採択された。これは廃電気電子機器に対して加盟国が独自により厳しい規制を導入できるのに対し、特定有害物質の使用制限に対しては指令以上に厳しい規制を課せないことを意味する。日本で実施されている家電リサイクル法等と最も異なるのは、製品の範囲が極めて広く、医療機器関連、監視・制御機器、自動販売機を除くほとんど全ての電気電子機器が対象となる点である。また一般家庭から回収する場合は無料であり、回収施設以降の再生利用にかかる費用についてはメーカーが負担することが明記されている。さらに廃棄物に対する再使用率あるいはリサイクル率および再生率（エネルギー利用を含む）は、表1に示すように50～80%と高く、2006年までに達成することが求められている。特定有害物質の使用制限指令では、今後の科学的検証にもよるが、基本的に2008年までに鉛、水銀、カドニウム、六価クロム、PBB（ポリブロモビフェニル）、PBDE（ポリブロモジフェニルエーテル）の使用を原則禁止している。これらの指令に対し、産業界と環境NGOの意見は真っ向から対立しているが、主な問題点は、(a)指令の一本化、(b)対象範囲、(c)開始期限、(d)再使用率／リサイクル率、(e)回収における費用負担責任、(f)これまでの製品に対する費用負担責任、(g)特定有害物質の範囲に整理することができる。また、費用負担責任については、メーカーごとの個別責任と業界団体の全体責任の考え方があり、家電メーカーと情報電子機器メーカーとの対立も大きく、今後の展開が注目されている[6]。

表1 廃電気電子機器の再生率および再使用／リサイクル率

	再生率 (エネルギー利用を含む)	再使用率／リサイクル率
大型家電	80%	75%
小型家電、民生機器等	60%	50%
情報通信機器	75%	65%
ガス放電ランプ	—	80%
CRT付廃電気電子機器	75%	70%

EUは、さらに電気電子機器についてライフサイクル・アセスメント(LCA)を用いて製品の設計、製造、保守、修理、解体までを評価する電気電子機器環境影響指令案(EEE指令)を提示し、機器の製造から廃棄までを含めてエネルギー消費および環境負荷を最小にすることを検討している[7]。

【廃電気電子機器に対する各機関の取り組み】

1)カールスルーエ環境技術研究センター (Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt、カールスルーエ)

本研究センターはかつて原子力利用関連の研究所であったが、現在では環境、エネルギー、マイクロシステム/医療技術、基礎研究の4分野を中心としている。職員数約3500人の内の1/3が研究員で、年間約5.3億DMの予算で運営されており、ドイツ連邦政府が90%、州政府が10%出資しているドイツ国内でも最大級の研究所である。また、カールスルーエ大学、ハイデルベルグ大学、シュツットガルト大学等45の大学、12のドイツ国立研究機関、30の国内研究機関および43カ国の国外研究機関と共同研究を行っている。

カールスルーエ環境技術研究センターは環境関連では焼却設備の研究が有名であり、TAMARA（焼却実験プラント）やTHERESA（廃棄物燃焼施設）等の大規模な実験設備を有している。TAMARAは炉長3.2m、全高10mの下記に示す様なストーカ式燃焼設備であり、高い環境基準内での経済的な焼却や環境基準に関わる基礎データを取得する目標で1987年に設置された。最近の成果としては、(a) 空気の供給量を適正化させることによるNO_x発生量の低減、(b) ハロゲン、硫黄、重金属の焼却プラント内での分離、(c) ダイオキシン類（PCDD/F）の発生抑制、(d) フィルター内煙道中での酸化剤添加によるダイオキシン類（PCDD/F）の分解、(e) 電子線照射によるダイオキシン類（PCDD/F）を分解、(f) 有機水銀及び無機水銀の回収システム等がある。

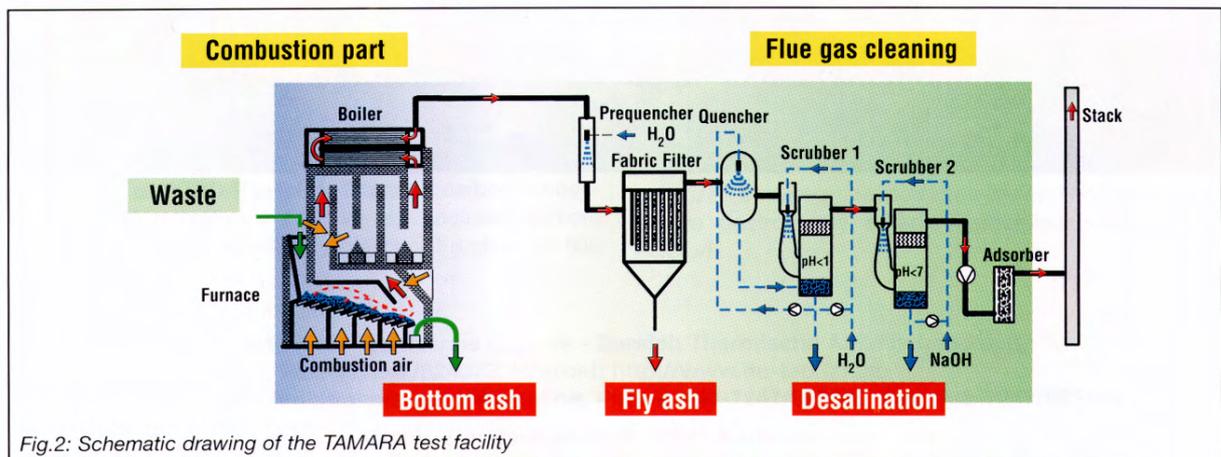


Fig.2: Schematic drawing of the TAMARA test facility

TAMARA模式図

THERESA は昨年から運転を始めた直径約2m長さ約4mのロータリーキルン型の大型燃焼実験施設であり、危険物の焼却処理において環境負荷と経済性との両立を目指したものである。本装置は、大型のロータリーキルンとしては珍しく傾斜角を可変できるので、単位時間当たりの処理量や供給空気量を変えることにより、広範囲な実験条件を設定できる特徴を有している。

カールスルーエ環境技術研究センターでは、この他に水の超臨界条件下におけるバイオマスのガス化等の研究を紹介されたが、詳細は割愛する。

2) カールスルーエ大学（University of Karlsruhe、カールスルーエ）

カールスルーエ大学は1825年に創立されたドイツ最古の工科大学であり、H. Hertz（電磁波の

発見) や F. Haber (アンモニア合成法の開発) といった歴史的に著名な科学者を輩出している。化学工学科は、全ヨーロッパにおいても最大規模 (教授数 18 名, 学生数約 700 名) を誇る。現在、同学科ではプラスチックを 400°C前後で反応させる熱分解から、800~1000°C付近で分解させるガス化、酸素を加える 1000°C以上で反応させる燃焼と、プラスチックの処理に関して反応動力学を用いた幅広い研究を行っている。訪問した研究室ではスクリーフィーダーと回分式反応器を組み合わせ、回分反応器内に攪拌のためにさらに小型のスクリーフィーダーを組み込んだ実験装置を用いて PE,PP,PVC の分解に関する研究を行っていた。また、スクリーフィーダーと反応器の組み合わせを三段に改造したのを用い、PVC や臭素含有プラスチックの分解に関する研究を行っている。一段目、二段目、三段目の温度がそれぞれ 330°C、380°C、440°Cに設定されており、PVC の分解では、一段目の反応装置において約 94~99%の塩素が除去される。これに対して廃電子基板を反応に供した場合、一段目では塩素が 60%、臭素が 75%程度除去されるに過ぎないと報告している。また同研究室では、カールスルーエ環境技術研究センターと共同で、廃電子基板の熱分解を小型ロータリーキルンおよびパイロットスケールのロータリーキルンを用いて行っている。

3) フラウンホッファー化学技術研究所 (ICT, Fraunhofer Institut Chemische Technologie, プフィンツタル)

フラウンホッファー協会 (本部: ミュンヘン) は 1949 年に創設された非営利の研究機関であり、ドイツ国内に 48 の研究所を有する非営利目的の研究組織であり、現在、アメリカに 5 ヶ所、アジアに 3 ヶ所の研究所がある。就業者数は約 9,600 名で、ドイツ国内の研究所の全予算は 7.6 億ユーロ (約 850 億円) である。研究予算のうち、国や州からのものは約 3 分の 1 しかなく約 3 分の 2 は産業界との共同・受託研究あるいは公的機関が募集する研究プロジェクトによって賄われている。フラウンホッファー化学技術研究所はカールスルーエから 10km ほど離れたプフィンツタルにあり、ドイツ国防省と州政府が 50%ずつ出資金して運営されており、約 300 名の職員を擁している。同研究所はドイツ国防省下の唯一の化学関連研究所であり、冷戦時には多くの爆薬開発の研究が行われた。しかし冷戦終了は環境や民生品の開発研究が増加し、自動車のエアバックもこの研究所の成果である。また、現在のプラスチックの加工およびリサイクル技術は、冷戦下のプラスチック爆薬開発の延長線上にあるとの説明は興味深かった。

フラウンホッファー化学技術研究所は、世界に先駆けて超臨界水を反応に応用し、これまでに排水・スラッジ処理、セラミックの脱脂、PVC の脱塩素、プリント基板に含まれるエポキシ樹脂の抽出や臭素系難燃剤の除去、フィルターや樹脂部品の洗浄などの広範な研究が行われている。しかし近年ドイツでは廃棄物の処理コストが低下傾向にあり、超臨界水の廃棄物への利用は困難になりつつある。

4) フラウンホッファー環境・安全・エネルギー技術研究所 (UMSICHT, Fraunhofer Institute for

Environmental, Safety and Energy Technology、オーバーハウゼン)

1990年に設立された比較的新しい研究所であり、2500万DM(約15億円)の予算で約100人の職員を擁し、環境技術、安全技術、エネルギー技術を担当している。ドルトムント大学の教官により設立された経緯があり、今でも同大学と強い関係を保っている。また、日本企業との共同研究で、酸化鉄触媒を用いたのダイオキシン及びNO_x抑制技術の開発も行っている。

同研究所では、プラスチックをいったん液体窒素で冷却した後に微粉碎し、物理的な手法を用いて素材ごとに回収・分離する技術を開発している。液体窒素等を大量に消費するため、エネルギーおよびコストの上で問題もあるが、車のバンパーの塗装と母材との分離等に適用することを目指しているようである。

5) ブリージ大学 (Vrije University、ブリュッセル)

ブリージ大学は学生数 8000 人程度の中規模な大学であり、主なキャンパスはブリュッセル市内の Etterbeek にある。訪問した研究室は実験施設を持たず、実際の燃焼炉内のダイオキシン濃度を測定し、その分布と炉形状からの反応をシュミレーションする手法や、企業に対する環境対策の相談、研究プロジェクトの取りまとめ等を行っている。訪問した研究室が関与している主なプロジェクトは、MINIDIP(熱および産業プロセスにおけるダイオキシン発生量の最小化)、CYCLEPLAST(プラスチックおよびその混合物の化学リサイクルおよびマテリアルリサイクル)、UPCYCLE(飛灰の無害化および利用技術の開発)、ハロフリー(廃電気電子機器からの臭素系難燃剤の除去)であった。ハロフリーは最も新しいプロジェクトであり、その詳細については聴取することが出来なかったが、廃電気電子機器からの脱ハロゲンがダイオキシン処理等と同様に重要なテーマになっていることが示唆される。

6) BSEF(Bromine Science and Environmental Forum、ブリュッセル)

BSEF とは、臭素系化学物質を製造販売している Albemarle 社、Dead Sea Bromine グループ、Great Lakes Chemical 社、東ソが出資して 1997 年に設立された団体であり、臭素化合物の環境評価、臭素系難燃剤の開発等を主な目的としている。臭素系難燃剤は、テレビやパソコン等の身近な電気製品の筐体や基板に多く含まれており、過電流に起因する出火を防ぐ意味で大きな役割を担っている。一方、臭素系有機化合物は古くから人体への有害性を指摘されており、特に最近では内分泌攪乱物質の一つとして注目されており、世界中の環境団体から厳しい批判を浴びている化学物質の一つである。

西ヨーロッパ内で難燃剤は全体として 36 万トン使用されており、そのうち最も多く使用されているのがアルミナハライドの 16 万トンで、次いで有機燐系化合物の 7 万トン、臭素系難燃剤は 5 万トンである。難燃剤の総生産量は現在増加しており、市場割合としては、塩素系難燃剤が減少しつつあり、それを補完する形で有機燐系難燃剤が伸びており、臭素系難燃剤の割合はほぼ横這いと言える。特定有害物質の使用制限指令で使用禁止される難燃剤は既に生産されておらず、主要な臭素系難燃剤は TBBPA(テトラブプロモビスフェノール A)、HBCD(ヘキサブプロモシクロ

ドデカン)、PBDE (ペンタブロモジフェニルエーテル) の3種である。臭素系難燃剤の主な用途は、電子機器が56%を占め、次いで建築用断熱材に31%使用されており、電子機器では主に筐体と基板に使用されている。現在、有機リン系化合物や金属系化合物等さまざまな形態の難燃剤が提案されているが、抑止効果、価格、安全性、環境負荷等の点で、臭素系難燃剤に代替可能な製品は完成されていない。

臭素系難燃剤を考える上で重要な点は、化学物質としての危険性評価、使用することによる製品の安全性や寿命の向上、廃棄物の処理あるいは難燃剤の回収、再利用技術の開発にある。BSEFでは、前述したカールスルーエ環境技術研究センター等に依頼して燃焼の際の臭素系ダイオキシンの発生量の確認や、臭素系難燃剤を含むプラスチックのマテリアルマテリアルリサイクル等多くのプロジェクトに取り組んでいる。特に臭素系難燃剤を銅の精錬行程に投入し、スラグとして排出される臭素化塩をセメント等材料として使用する銅製錬法は、臭素系難燃剤の最終処分方法として有望である。

7) ノキアリサーチセンター (NOKIA Research Center、ヘルシンキ)

携帯電話の製造販売において世界的に大きな市場占有率を誇っているノキアは、ノキアモバイルフォン、ノキアネットワークおよびノキアリサーチセンターの3つの会社からなる。ノキアリサーチセンターはノキアの研究開発の一翼を担う組織であり、ヘルシンキに最大の研究所がある。ノキア全体の研究開発部門には14ヶ国で17000人がおり、総売上の8.9%に相当する年間17.7億米ドルの予算を投入している。リサーチセンターでは新しい筐体や基板材料の開発等については熱心に研究しているが、廃プラスチックのリサイクル関連の研究はほとんど行っていない。廃電気電子機器指令により携帯電話の製造会社としての回収責任は十分認識しているが、廃プラスチックのリサイクルについては当分は情報収集に専念すると考えられる。

【おわりに】

プラスチックのリサイクル等の話題では必ずドイツのDSDが引用され、理想のシステムとして宣伝される場合が多い。しかし現地ではその高コスト体質が批判の対象とされ、日本で考えるのとは趣を異にする。廃電気電子機器のリサイクルについてはEU全体としての法規制が進みつつあり、政治的な紆余曲折はあるものの、2005~2008年に間に実行されると考えられる。はんだに含まれる鉛については、鉛フリーの代替物の見通しがついたために特に問題はないが、難燃剤については流動的なところが大きいと思われる。ヨーロッパの研究所を見渡しても、廃電気電子機器のプラスチックを回収・再利用する実用的な技術は存在しない。ライフサイクル・アセスメント等の手法を用いたシュミレーションが盛んになり、リサイクルに対してもエネルギー効率、資源効率、経済性を重視した厳しい評価が行われつつある。しかし評価は所詮技術の後追いであり、廃電気電子機器に含まれるプラスチックをどう利用して行くかは、我々研究者の頑張りに期するところが大きいと考える。

【引用文献】

- 1) 「廃棄物ハンドブック」廃棄物学会、(1996).
- 2) 電気通信事業者協会発表データ、(2000).
- 3) NTT ドコモ発表データ、(2000).
- 4) 酒井伸一、浅利美鈴、平井康宏、高月紘、第 11 回廃棄物学会発表講演論文集(2000).
- 5) 「使用済みコンピュータの回収・処理・リサイクルの状況に関する調査報告書」、日本電子工業振興協会、(2000).
- 6) 「海外環境関連情報雑誌, environment update」、日本機会輸出組合、2(6), (2001).
- 7) 片瀬裕文、衣笠和郎、JMC, 9, 24(2000).