

# 技術という面から環境問題に取り組む 視点について

片山 裕之<sup>1)</sup>・北村 寿宏<sup>2)</sup>・三谷 賢範<sup>3)</sup>・田中 暁巳<sup>3)</sup>・竹内 久雄<sup>4)</sup>

- 1) 島根大学総合理工学部材料プロセス工学科
- 2) 島根大学地域共同研究センター
- 3) 島根大学大学院総合理工学研究科
- 4) 島根大学総合理工学部材料プロセス工学科 学生

## Technical Approach for the Environment Problems

Hiroyuki KATAYAMA, Toshihiro KITAMURA, Masanori MITANI,  
Toshimi TANAKA and Hisao TAKEUCHI

### Abstract

The recent movement in activities of enterprises, legislation, economical system and the consciousness of consumers for formation of the circulating society was overviewed. Based on it, the technical subject for lowering the environment impacts effectively was investigated and next two were proposed for study; how to treat the wastes (dusts, ash and so on, which contain harmful heavy metals) and to store safely as the artificial resources and to make the tool for design engineers to plan the environment conscious product in routine work.

キーワード：循環型社会，リサイクル，重金属，ダスト，人工資源，環境配慮設計，設計ツール

## 1. はじめに

環境問題とは、近年、人類の活動の規模が自然の許容力を脅かす所まで拡大したことによって顕在化したものである。このまま進めば、近い将来に表 1<sup>1,2)</sup>で示すような『あってはならないこと』が予測されるに至っている。『人類は80年で滅亡する』<sup>3)</sup>という表題の本も出版されている。『そうならないようにするためにどうするか』という課題に対して、技術や社会システムなどいろいろな面から取り組みが始まっている<sup>4-8)</sup>。しかし、その努力の和として、人類に許された時間的余裕の中で、マクロ的に見て実効ある結果を出せるかという点では、かなり疑問がある。例えば、技術的な取り組みについても、その多くは単なる問題の置き換えであったり（ある問題を解決できるが、別の問題を引き起こすおそれがある）、また、社会で広く実用されて効果が出てくる道筋が見えてこないものであるように思われる。最近、『リサイクルしてはいけない』<sup>9)</sup> 脚注という本が出版されて話題を呼んでいるが、そのあたりの問題点を指摘したものと解釈することができる。

表1 21世紀の環境未来予想年表<sup>2)</sup>

2005年	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球温暖化の一つの原因とされている二酸化炭素の放出規制は、結局国際的な取り組みが無効のままとなる。</li> <li>日本国内において、廃棄物の最終処分地不足が顕在化する。</li> <li>ゴミ焼却が制限された。完全分別した単品の焼却のみ許可されるようになる。</li> </ul>
2010年	<ul style="list-style-type: none"> <li>世界的な食料供給危機が到来する。</li> </ul>
2020年	<ul style="list-style-type: none"> <li>原油価格が急騰する。エネルギー危機再来。</li> </ul>
2025年	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー源を石炭に依存し始めたために、酸性化が進む。同時に、バナジウム、マンガンなどの排出量が増加する。</li> </ul>
2030年	<ul style="list-style-type: none"> <li>先端電子機器による土壌汚染が問題に。ガリウムヒ素やその製造装置から出る廃棄物などの不適切な処置が問題。</li> <li>やっとのことで鉛が完全回収以外は使用禁止に。鉛に付随して産出する金属が不足する。</li> </ul>
2050年	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球温暖化が目に見えるようになってきた。海水面も50 cm程度上昇したようだ。モルジブなどの島国では被害が出ている。</li> </ul>

本報では、まず環境問題に関する現状の把握を行い、ついで技術的取り組みを見直し、それに基づいて、研究すべき課題の検討を行なった。

なお、本研究は、(財)マツダ財団の助成を得て行われたものの一部である。

## 2. 現在の環境問題への取り組み状況とその問題点の把握

まず、環境問題への取り組みの現状を、企業、官（国および自治体）、消費者（生活者）の3つに分けて概観する。

### 2.1. 企業の取り組み

1960年代には発生源が特定できる、いわゆる公害問題が頻発した。70年代までに、製造工程からの排出の濃度や排出量に対する規制が強化され、環境機器の設置などによって画期的な改善が進んだ。また、この時期、オイルショックによるエネルギー費高騰に対応するために省エネルギーが進み、両者あわせて量産技術の確立という点で世界のトップの座を確保するに至った。確かにその頃までは技術の進むべき方向がよく見えていた。1980年代後半からは地球温暖化、廃棄物、化学物質など、加害者が特定しにくい問題がクローズアップされたが、技術対応の具体的な方向が見えにくくなった。また、経済停滞の中で、明確な

脚注) 『リサイクルしてはいけない』<sup>9)</sup>の要旨：リサイクルの狙いは物質の有効利用を通して、環境への負荷を最小にすることである。目に見えるもののリサイクルだけでなく、労力、エネルギーを含めて総合的に環境負荷の最小化という点から見直すべきである。例として、ペットボトルなどは、無理にリサイクルするのではなく、燃焼して熱回収し、灰は人口鉱山に運搬して将来、必要な資源を取り出せるようにすべきであると提唱している。

対応が打ち出せない状態が1990年代中盤まで続いた。しかし、数年前から先進的な企業は、企業イメージを高める目的で、環境問題への対応を外部に積極的にPRするということが行なわれるようになってきた。その1つが各社の環境報告書の発行である。環境報告書を発行している企業数は、平成10年時点では、上場企業の約11%である<sup>10)</sup>。約150社の環境報告書を取り寄せて解析を進めているが、その一部を表2に示す。今、取り組みが行なわれている共通的なことは、ISO14000の実行（紙、ゴミ、電気の削減が中心）、工程の省エネルギー、排出物の有効利用、製品の環境配慮化などである。

図1は、最近、発表された環境対応に関連する技術に関するニュースを、省エネを狙ったもの、リサイクルしやすいように廃棄後の分離性向上を考えたもの、および従来の材料では環境の面で問題であったものを新しい材料〈エコマテリアル〉を開発することによって解決したものの3つに分類して、さらに着眼点に分けて示したものである。製品を通して環境問題に対応する企業の発想のアウトラインが伺える。ただし、環境配慮が一部で行なわれているだけでは、環境改善への効果は小さい。このようなことがニュースとして取り扱われるのではなく日常広く行なわれるようになって、はじめて実際の効果が期待されるのであって、まさに第1歩踏み出した状態に過ぎないと言える。

最近、リサイクル工学という観点から各関連学会の認識が示された<sup>11)</sup>が、それをまとめると表3のようになる。個々の業界内で対応策を進めるとともに、業界の壁を越えてやり取りを行い、全体として問題を解決する方向に期待が表明されている。

## 2.2. 法的取り組みとそれへの対応の問題点

2000年6月に閉会した第147国会で、環境基本法をはじめとする循環関連の6つの法律が成立した。それは循環型社会基本法（正式名称は循環型社会形成推進基本法）、廃棄物処理法（産業廃棄物処理特定施設整備法を合わせた改正）、資源有効利用促進法（再生資源利用促進法の改正）、建設資材リサイクル法、食品リサイクル法およびグリーン購入法であるが、基本法から個別のリサイクル法まで一体的に法律が整備されたことになる（図2）。

循環型社会基本法（2000年6月実施）は、これから形成すべき循環型社会の姿と実現のための施策を示したもので、

- (1) 廃棄物の処理の優先順序を、『①発生抑制（Reduce）→②部品などの再利用（Reuse）→③材料の再生（Recycle）→④熱回収→⑤適正最終処分』と明確に定めたこと
- (2) 事業者と国民は排出者責任、生産者は製品の廃棄後まで一定の責任（拡大生産者責任）を負うと明記したこと

の2点に特徴がある。これは、1994年に制定されたドイツの循環経済法を参考にしたものである。目的、理念はよく似ているが、責任の所在については、ドイツでは排出者責任（例えば、生活者もごみ処理の実費を負担しなければならない）および拡大生産者責任（製品の製造、使用段階から使用後の処理まで環境負荷に対する責任を生産者が負うという考え方）を徹底して要求しているのに対し、日本の方は製品ごとに必要な処置を適切に役割分担し、費用を適正かつ公平に分担するという考え方である点が異なる<sup>12)</sup>。

廃棄物の発生抑制（Reduce）、部品などの再利用（Reuse）、材料の再生（Recycle）を合

表2 環境報告書のまとめの1例

業種	項目	リストアップしている企業
建設	ISO14001実行	9/10
	代替型枠使用	7/10
	廃棄物再利用（下記内訳）	7/10
	➡コンクリート塊・アスファルト塊	7/10
	➡木材屑	6/10
	➡汚泥	6/10
	➡混合廃棄物	6/10
飲料	ビン回収	5/5
	副産物、廃棄物再資源化	4/5
	省エネ（CO <sub>2</sub> 削減）	4/5
	廃棄物削減	4/5
	缶・ビン・ペットの軽量化	3/5
鉄鋼	ISO14001実行	5/5
	省エネ	5/5
	SO <sub>x</sub> （硫黄酸化物）削減	5/5
	NO <sub>x</sub> （窒素酸化物）削減	5/5
	ばいじん削減	5/5
	スラグ再利用	5/5
	廃棄物の再資源化率	4/5
	水再利用	3/5
電力	CO <sub>2</sub> 削減（火力発電効率向上、送配電損失率低減）	9/9
	太陽光発電実行	9/9
	SO <sub>x</sub> （硫黄酸化物）削減	9/9
	NO <sub>x</sub> （窒素酸化物）削減	9/9
	ISO14001実行	8/9
	廃棄物再利用（下記内訳）	8/9
	➡石炭灰有効利用	7/9
	➡廃コンクリート電柱再利用	7/9
	➡脱硫石こう再利用	7/9
	➡金属屑再利用	7/9
	➡重原油再灰再利用	6/9
	➡廃プラスチック再利用	4/9
	風力発電導入	8/9
	SF <sub>6</sub> （六ふっ化硫黄）使用低減	7/9
	特定フロン使用削減	5/9

わせて3Rと呼ぶ。これらと、燃焼時の熱回収の4つを合わせたものが、従来、広い意味で『リサイクル』と呼ばれていたものである。以下でも『リサイクル』と書いた場合は、それ

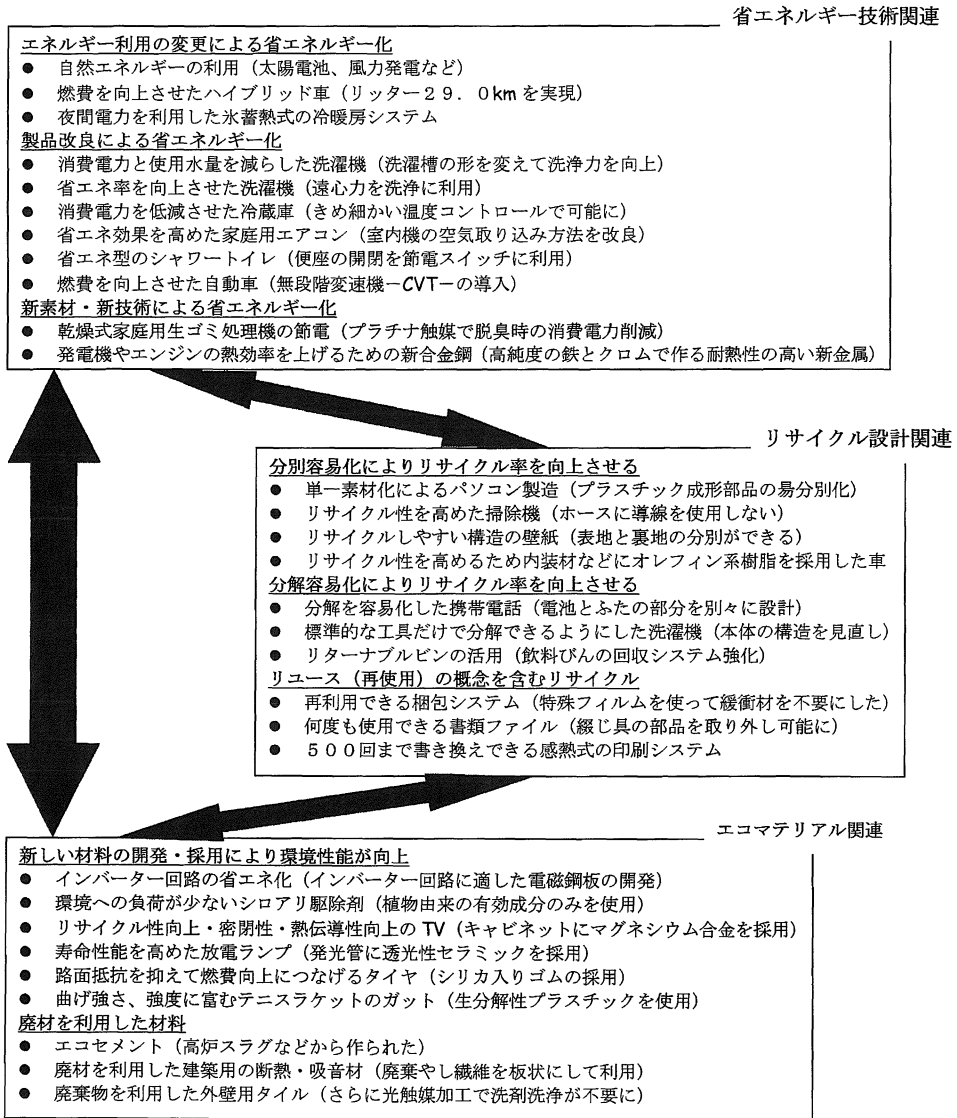


図1 最近発表された環境対応に関連する技術に関するニュース

らを合わせたものを指す。

次に、廃棄物処理法（2000年10月から施行）の主な改正点は

(1) 廃棄物を排出した事業者（処理業者でなく）の責任を強化する

廃棄物が適正に処理されていることの確認を怠り、問題を生じた場合には、廃棄物を

表3 リサイクル工学という観点から見た各業界の現状認識<sup>1)</sup>

業 種	一般的な認識	具体的課題
電子産業	リサイクルが遅れている。電子部品は多数の異種材料の複合物であるために、分離の容易化と、最終廃棄物の無害化が課題。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 鉛フリーはんだ、VOC（揮発性有機物）フリー化</li> <li>2. 環境配慮型設計（設計の時から解体容易性などを考慮）</li> <li>3. リサイクル市場の経済化や情報流通を可能とする「情報システムの整備」</li> </ol>
自動車産業	現在、自動車重量の約70～80%がリサイクルされている。さらに、リサイクル向上のために解体しやすい設計やシュレッターダスト処理技術の確立が課題。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. シュレッターダスト処理法</li> <li>2. 設計段階での解体容易化設計。ただし、近年ハイブリッド車や、新形式のエンジン開発など技術進歩が速く、解体などによる部品の再利用化率低下が懸念される。</li> </ol>
プラスチック産業	マテリアルリサイクルが難しい課題。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 熱エネルギーとして資源を再利用する（サーマルリサイクル）</li> <li>2. 生分解性プラスチックの開発など。</li> </ol>
鉄鋼業	高温技術を生かして、他産業のリサイクル問題を援助できる。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ダスト処理法</li> <li>2. トランプエレメントによる鋼材汚染対策（鋼材成分の見直し）</li> </ol>
土木業	廃コンクリートの再資源化が課題。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. コンクリートに要求される品質そのものを考え、再生材使用のコンクリートの品質改善を追求する。</li> <li>2. コンクリートを品質により使い分け、有効かつ経済的に活用。</li> </ol>
建築業	建築物は、耐用年数が長く、投資および資材の投入量や種類も圧倒的に多い。このような要因を考慮し、建築のライフサイクルを通じて総合的かつ適正に評価する必要がある。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建築生産に伴って出る廃材の量は多く、発生箇所が散在しており、回収に要する諸問題もある。</li> <li>2. 再生原料の品質が不安定であるので、品質をどう保証するか。</li> <li>3. 流通システム、JIS や関連指針の整備。</li> </ol>
下水道	汚泥の最終処分地絶対量が不足。下水汚泥については一層の減量化と資源化利用の推進が緊急課題。	コンポストなど有機肥料や土壌改良材に用いる緑農地利用や、レンガ、ブロックやセメント原料など土木・建築資材化が考えられているが含まれる重金属の問題がある。

排出した事業者に現状復帰の責任を負わせるなど

## (2) 地方公共団体の責任を強化

都道府県は廃棄物削減や適正処理推進の計画を作成する。地方公共団体が与して処理施設の整備を推進する

の2点である。排出責任の強化の狙いは、豊島問題などの原因になった不法投棄を防ぐために、排出元の企業が委託費の安さに惹かれて処理業者を選定しないで（不適切な処理をされると後で莫大な修復の費用を負担しなければならない危険があるので）、優良な処理事業

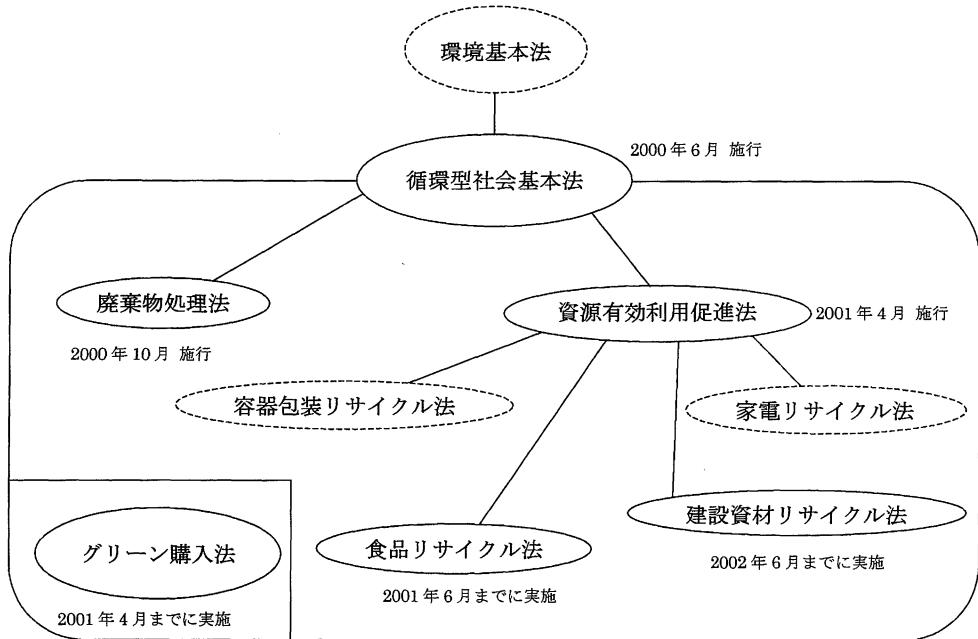


図2 2000年制定の環境関連6法（実線で囲んだもの）の位置づけ

者へと委託先を変えるように仕向けることにある。

資源有効利用促進法（2001年4月から実施）は、リサイクルの推進に向けたワク組みを作るもので

- (1) 使用後に廃棄される量が多い製品を指定し（自動車，パソコン，大型家電，ガス・石油機器など），省資源化や長寿命化のための設計，修理体制の整備を義務づける
- (2) 特定の製品（自動車，パソコン，複写機，パチンコ台など）に対する部品の再利用を義務づける
- (3) 特定の製品に対して回収，リサイクルを義務づける
- (4) 特定の業種（鉄鋼業，紙パルプ業，化学工業など）の工場などに，産業廃棄物の発生抑制とリサイクル推進の計画作成を義務づける

ものである。

それ以外のリサイクル法は個別の物品を対象にしたもので，すでに制定されている容器包装と家電に加えて，今回，とくに廃棄物排出量が多い建設廃棄物（年間6000万t排出）と食品廃棄物〈年間1600万t排出〉に関して以下のように定められた。

建設資材リサイクル法（2002年6月までに実施）では，リサイクルを促進するために，一定規模以上の解体工事や新築工事に対して，コンクリート，アスファルト，木材の分別解体を義務づける。また，食品リサイクル法（2001年6月までに実施）では，一定以上の食

品廃棄物を排出する食品メーカー、流通、外食などの事業者は、食品廃棄物の減量化と、飼料や肥料などの原材料としてのリサイクルに取組まなければならないと規定している。

さらに、グリーン購入法（2001年4月までに実施）は、環境配慮型製品の需要拡大をすることによって、リサイクル推進を支援するものである。国、地方公共団体は、グリーン調達の方針を作成し、調達実績を公表する。事業者や国民は、できるだけ環境負荷の少ない物品を購入する。また、国は環境負荷の少ない物品についての情報を提供するとしている。

これらの法律は、技術的あるいは経済的に実施できるか否かのボーダーにあることを要求することによって、当事者たちの考え方の変革と技術の革新をリードするという性格のもので、以前の公害防止関連法のように、その規制を守らなければ操業できないが、それをクリアすると、それ以上の改善をさせる推進力を持たないというものは異なっている。このような性格を持っているので、法律を制定すれば、すぐに実行されるという保障がないという弱点を持っている。すでに施行されている容器包装リサイクル法が、実施率の低迷という問題に直面しているように、今回の諸法も実施のためには以下のようなことが問題と考えられている。

(1) 3Rの見本になっているのは、主として法人を相手にし、レンタルという形で営業されている複写機業界である。今回、とくに打ち出された部品の再利用（Reuse）を進めるためには、

- ① 廃棄物を効率的に回収できること
- ② 高額製品で、部品を再利用する経済的メリットを出しやすいこと
- ③ 所有する喜びよりも、機能そのものが主な目的であるもの
- ④ 技術進歩がそれほど速くないもの

などの条件が必要であるが、複写機はこれらをほぼ満足している。複写機業界は、先頭に立ってこれを推し進めるために、技術的には新旧のモデルにまたがって部品を共通化すること、中古部品の耐久性を正確に把握する余寿命判定技術の確立を急いでいる。

一方、家電やパソコンでは、上記の4つの条件をほとんど欠いている。したがって、3R、とくに部品の再利用（Reuse）にどのように対応するか、見込みはほとんど立っていない状態である。ただ、これからの循環型社会において、耐久消費財は、物を所有するのではなく、機能を必要な時に買うという形に変わるべきで、複写機業界の営業形態こそこれから目指してゆく方向であるという意見も出始めている<sup>6)</sup>ので、少なくとも、これまでのように、修理をしたいと販売店に持ってゆくと、『新品を買った方が安い』と言われるような状態は改められることになるだろう。

(2) 日本の自動車メーカーは、排ガス浄化や低燃費技術では世界をリードしているが、改正リサイクル法が目指す3Rの分野では、欧米に比べて出遅れている。日本の自動車の平均寿命は9.6年であるのに対し、ドイツでは約12年、アメリカでは約15年と長い。したがって、欧米ではReduceを実現する長寿命と、それを支える中古部品の使用(Reuse)があたりまえになっている。これに対する日本の自動車業界の現時点では、『使用年数が短いのは消費者意識の問題であり、また、部品をリユースしろと言っても、安全と両立させることを考えると難しい』と消極的であるが、1部のメーカーでは、廃車から回



収した部品を修理用の交換部品に使うことや、回収した部品に手を加えて品質を保証できる形にしたものを再生部品〈リビルド〉として、新品より3割程度安く売り出すことなどを始めている<sup>13)</sup>。

- (3) 建設資材は不法投棄の9割を占めているので、まず、不法投棄を減らすことが重要で、ついで3Rに進むというステップが考えられている。建設資材を工場で製造する場合には、その工程から出る廃棄物は、例えば図3に示すように、49品種に別けて、23業者にリサイクルを委託することで、ゼロエミッション〈廃棄物ゼロ〉を実現している例もある<sup>14)</sup>。したがって、技術的には不可能ではないが、建築現場で問題になるものとして、分別回収しやすい手壊し方式では約2倍の費用を要すること(30坪の家では、約50万円高くなる。その費用は、結果的には、建て替えの施主の負担になる)、および分別回収しても運搬費が高いこと(効率化のためには共同で行なうべきであるが、法律では、排出者の責任を明確にするために、共同回収が認めていないため)などがあげられている<sup>13)</sup>。
- (4) 食品リサイクル法では、食品廃棄物の2割削減が排出事業者に求められている。農水省では、飼料や肥料にするなどの『再生利用』、脱水や乾燥による『減量』、調理方法の改善による『発生の抑制』という3つの方法を用意して、目標達成を実現しようとしているが、食品流通業界では、コストと技術の両面から、堆肥として利用する方法が中心になると考えられている。そのためには『良質な堆肥を生産農家に流通させること』が必要であるが、廃棄物から良質な堆肥を製造すること、およびうまく農家に流通させることの両方とも、問題が山積している。

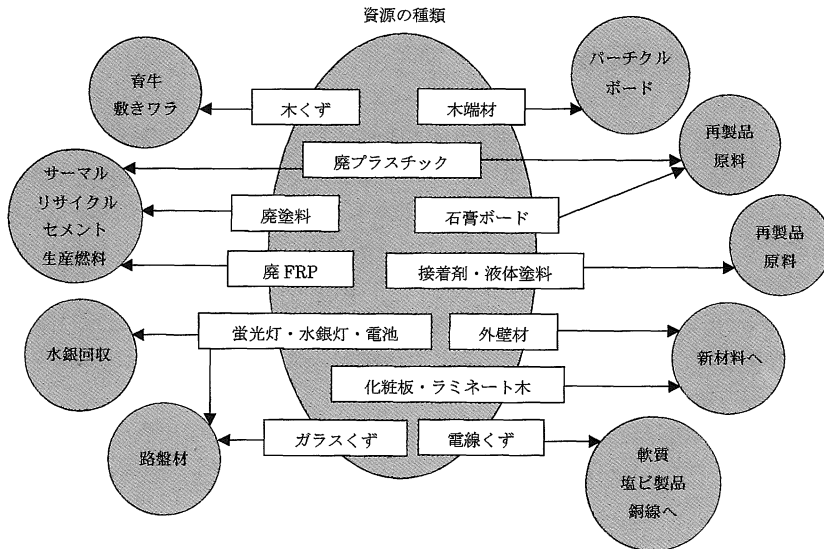


図3 建築廃材の利用の例<sup>14)</sup>

### 2.3. 経済面からの取り組みとその問題点

ある経済主体（企業や消費者）によって排出される汚染物質が、他の主体に及ぼす被害の費用を『外部費用』という。従来、製品の価格にはこの外部費用が含まれていなかった。このため製品の価格が外部費用を含む場合に比べて低くでき、需要の拡大を促進したが、逆に過剰生産・過剰消費の背景になっていた。また、汚染物質を排出しても、その対応のための費用を排出者が直接、負担する必要がなかった（税金という形で負担）ので、企業も消費者も汚染物質の排出を削減するような生産構造やライフスタイルを採用するというインセンティブを持たなかった。これを改めようとするのが、『環境関連費用の内部化』の動きである。

その1つは、循環型社会基本法に示された、事業者と国民は排出者責任、生産者は製品の廃棄後まで一定の責任を負うという制度である。すなわち、その製品を使用後のリサイクルや廃棄物処理に関連する費用を企業が負担する（結果的には製品の値段に反映されるので、その製品の直接の消費者が負担することになる）ということである。

もう1つは、環境税という、例えば炭酸ガスの発生量に応じて税金を払うこと（炭素税）である。また、リサイクル品使用を進めるために、バージン資源を使うと時にその使用量に応じて税金をかけるということも提案されている。これらは、各企業が同業者に対してコスト競争力を維持するために、省エネに努力することや、リサイクル原料を優先的に使おうとすることを期待している<sup>9)</sup>。

いずれも近視眼的に見れば、製品の値段が上がるので、購買力の減退や国際競争力の低下などが懸念されている。しかし、長期的視点に立てば環境に配慮することが必要であり、また、それには費用がかかるということ認識すれば、社会的公平感を保ちながら多くの企業や人に実行させるには上記のような経済政策を取ることは正しい方向である。課題はどのような数字を設定するかということであろう。

### 2.4. 消費者（生活者）側の取り組み

環境問題に対応するためには、『ライフスタイルを変える』ということがよく言われている。それは、平たく言えば、生活におけるエネルギーおよび『もの』の使用量を下げること、すなわち、生活のレベルを下げるということである。それを平時に、しかも自発的にやらせるというのは容易なことではない。しかし、この10年間に、すくなくとも大量生産・大量消費ということは過去のものとなった。「購買力の低下」ということも、「もの離れ」という、価値観の変更が徐々に進行しているものと積極的に評価することも可能である。このように、明らかに過剰部分であった部分を切り取ることは比較的容易に行なわれつつあるが、ごみ処理問題や、京都議定書に定められた炭酸ガス発生量削減などに対応するには、さらに意識した取り組みが必要である。

ごみ問題は、ごみ処理施設の新規立地が認められにくい雰囲気の中で、今のままでは、ごみ処理能力がパンクする日が数年先に近づいている。しかし、解決に至る具体策が見えていない。

炭酸ガス発生削減については、『2010年において1990年に比べて6%削減』というのが日本の約束事項であるが、1990年に比べて増え続けているので、1998年に比べて16%削減し

なければならない。炭酸ガスの発生量は民生部門が日本全体の約20%を占めているので、全体への影響が無視できない。また、産業界などはすでに省エネできることから実行に移しているので残された削減の余地はそう大きくない。したがって、日本全体として、目標達成のためには、民生部門で平均を越える削減率の達成が期待されている。実際に、モデル世帯で試算した結果では、取り組み前に比べて40%近くが削減することが可能とされている。また、それによって、年間15万円/世帯の光熱費が節約できるというメリットもある<sup>15)</sup>。しかし、エネルギー使用量はまだ、増え続けている状態で、目標達成を実現するための具体策は見えてきていない。

世界的にみれば、環境問題への取り組みは、現在の生活レベルを下げたくないという観点から消極的な先進国（アメリカなど）、および生活レベルを上げることの方が先行するという観点から消極的な発展途上国のグループと、国家的戦略として積極的に取り組んでいるヨーロッパの一部の国々（北欧、ドイツなど）という3つのグループに大別される。その中で日本はこれまであまりはっきりした姿勢を示していなかったように思われる。今後は、国としての発言力を大きくするためには、環境対応において積極策に転じる必要がある。その姿勢を実際に示すために、炭酸ガス削減についての京都議定書の目標達成など国を挙げて戦略的に取り組むべきであると思われる。

ライフスタイルを、使い捨てからの脱却して、ものを大事に使うように変えてゆくということは、嗜好の多様化と結びつくように思われる。製品生産やそのアフターケアを効率的に行なうということから考えられる画一化とは逆の方向である。この矛盾関係を解決するために切り札として漠と期待されているのはIT技術である<sup>4,5)</sup>が、課題は多い。

## 2.5. 小 活

企業には経営戦略として環境対応に積極的に対応する動きが見え始め、また、リサイクル関連法の整備や、3R 実行のための経済的インセンティブを与えるしくみ作りが始まり、循環型社会形成に向けてのフレーム作りは第1歩を踏み出したと言える。

しかし、ごみの問題のように差し迫った課題、炭酸ガス発生削減への対応のような国家的に考えなければならない課題など問題は山積している。また、生活者がものを大事に使うようにするには、嗜好の多様化という、効率化とは逆の方向が予測される。

この中で、3Rなどを効率的に行なってゆくことは、本来は矛盾関係にあったものを解決するという難易度の高い課題であることを十分に認識して、取り組む必要があると思われる。

## 3. 循環型システムを作る上で留意すべき技術的課題

人類が地球上で長く繁栄を続けるためには、資源から廃棄物への一方向の流れではなく、各種の循環が必要である。前項では、使える可能性があるものを、どのようにすれば多く循環使用できるかという点を中心に動向を述べた。それに対して本項では、循環型システムを作る上での陰の部分、すなわち、循環に伴って引き起こされるおそれがある問題とその防止のために留意しておかなければならないことを述べる。

廃棄物循環に関連した問題を扱う時に忘れてならない基本原則は次の3点である。

- (1) 廃棄物とは原理的に、入り混じったもの（エントロピーが高い状態にあるもの）である。この廃棄物を有効に利用するには（エントロピーを小さくするために）、大なり小なり『分離』という操作が必要である。
- (2) エントロピーを小さくするには、新たにエネルギーを加えることが必要である。そして使用するエネルギーのことも考えに入れると、全体としてのエントロピーは大きくなる（エントロピーの法則）。どれだけエントロピーが増えるかは、道筋（方法）に依存する。
- (3) 廃棄物に含まれていた原子は全て、どのような処理をしても消えてなくなる（質量不変の法則）。とくに、元素として毒性があるものが含まれている場合には、もとの濃度は低くても濃縮を伴うことがあるので、その行く先に注意する必要がある。

実際の循環プロセスにおいてとくに問題になるのは、『①発生抑制（Reduce）→②部品などの再利用（Reuse）→③材料の再生（Recycle）→④熱回収→⑤適正最終処分』という流れの中にさりげなく書かれている『適正最終処分』である。具体的な問題の例を挙げる。

#### (1) シュレッダーダストの問題

廃家電や廃自動車のリサイクルにおいては、部品として使えるものを取り外した後、シュレッダーという破碎機にかけて単体分離する。この際発生する粉塵（破碎室から吸引、捕集されたもの）をシュレッダーダストという。プラスチック類が主であるが、もとの製品に含まれていた各種微量元素（重金属類など）もこの中に移行している（表4）。シュレッダーダストは、従来、埋立て処理されていたが、嵩張るとともに重金属類の溶出などの問題があり、燃焼して減量してエネルギー回収するという方法が指向されている。この際、有機物類は燃焼するか、重金属類などはダストや焼却灰に移行して濃縮が起こる。その最終処分が問題となる。

#### (2) 生ごみ処理の問題

生ごみについても、埋め立て地の不足から、焼却によって減量するという方向が取られて

表4 各種廃棄物に含まれる重金属類やハロゲンの濃度（ppm）

	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Ni	Zn	Cl
シュレッダーダスト（廃自動車） <sup>18)</sup>	12.3	1.2	4.2	2700	167			
シュレッダーダスト（廃家電製品） <sup>18)</sup>	8.3	0.63	4.2	3100	8.3			
焼却ダスト <sup>9)</sup>	80	3.5	17	1800	210			
焼却灰 <sup>9)</sup>	11	0.25	3.2	420	98			
活性汚泥 <sup>19)</sup>	ND	1.1	1.9	8				
鉄鋼電炉ダスト <sup>20)</sup>				1900			2100	1900
石炭焼却ダスト <sup>21)</sup>	2.52	0.20	14.02	34.78	13.75	21.07		

きた。燃焼すると含まれていた微量の重金属類はダストや焼却灰に移行し（表4）、その最終処分が問題として残る。なお、最新式のごみ焼却炉であるガス化溶融炉においては、操業条件によっては（燃焼時の酸素ポテンシャルが高くする）、重金属類を溶融スラグに溶け込ませることができると言われているが、その場合は、スラグを別の用途に利用する時に、条件によっては重金属の溶出の不安がある。

一方、燃焼ではなく堆肥として利用しようとする、肥効成分とともに重金属と塩類が田畑に持ち込まれて汚染が拡散するおそれがある。海産物の廃棄物を飼料として使う場合も、カドミウムが問題になっている。それを除去する<sup>16)</sup>にしても、最終的にカドミウムを含むものをどう最終処分するかという問題が残る。

### (3) 活性汚泥の問題

水処理に用いられた活性汚泥にも重金属類が含まれている（表4）。高温加熱しないで堆肥として用いるとすれば、肥効成分とともに重金属が田畑に持ち込むことになり、一方、高温加熱処理すると、発生したダストの処理に問題が移る。

### (4) 焼却ダストの問題

高温で行なう鉄鋼精錬において、表4のような重金属類を含むダストが発生する。この中で亜鉛だけは回収しても経済的に成り立つが、それ以外は、最終処分が問題になっている。

また、石炭を燃焼すると、重金属を含むダスト（表4）が発生する。石油、天然ガスに比べて、石炭使用の問題点の1つはこの重金属を含むダストの処理にある。

以上で述べたことに共通な問題は、もとの廃棄物に微量含まれていた重金属の挙動である。長い地球の歴史の中で、人類は重金属と共存してきて、重金属を含む多くの元素は、ある量までは人体にとって必要成分になっている。したがって、いくつの金属成分は、食品を通して供給される量では不足するので、栄養剤などとして供給することが必要である（表5の第3列）。しかし、近年、産業が拡大するにつれて、土中から掘り出された天然資源の中に含まれていた重金属類が人類の生存環境に多く持ち出され、食物などを通して人体に摂取される量が増えた結果、許容限界に近づきつつあるのがいくつかある（表5の第4列）。これらは、摂取量が過ぎると、表6に示すような疾患の原因になる。また、これらの元素類は、人体の中に蓄積される傾向にあるので長い時間をかけて人体に悪影響を及ぼすおそれがある。以上のように、特定の重金属類は人体に悪影響を与えるので、これ以上、自然界に拡散させないようにすることが必要になってきている。

重金属が自然界に拡散するのを防ぐために従来取られてきたのは、濃縮したダストについてはできるだけ溶出しないような処理（キレート処理など）を行なった後、管理型処分場に埋めて外部への拡散を抑制するという方法と、逆にできるだけ重金属が希薄な状態にして自然界に出すという方法である。しかし、前者についても、処分地の余力がなくなりつつあることや、また、管理型と言っても、本当に外部に漏れることを防止できるかどうか懸念されるに至っている。

一方、重金属類は、資源としての寿命という点から見ると、表7に示すようにいくつかのものは、数10年後には枯渇のおそれがある。しかし、この廃棄物起因の重金属を、現時

表5 人体における各種金属の適正量<sup>22)</sup>

元素記号	体重1gあたりの体内濃度	現在の食事によると不足する元素	現在の食事によると摂取しすぎる元素
Ca	15 mg/g 体重	○	
K	2.0	○	
Na	1.5		
Mg	1.5	○	
Fe	85.7 $\mu$ g/g 体重	○	
Zn	28.5	○	
Pb	1.71		○
Mn	1.43	○	
Cu	1.14	○	
Cd	714 ng/g 体重		○
Hg	186		○
Se	171	○	
Mo	143	○	
Ni	143	○	
Cr	3 価	○	
	6 価		
As	28.5		○
Co	21.4		

表6 過度の重金属が人体に及ぼす悪影響<sup>19,22)</sup>

元素	影 響
As	貧血症, 胃障害, 肝臓症候, 潰瘍, 皮膚・肺癌, 奇形児, 不妊症
Cd	肺気腫, 肺類繊維種(子宮筋腫), 肝臓障害(結石), 腎臓障害, 血管系障害, 骨軟化
Hg	中枢神経障害, 肝臓・腎臓障害, 発癌性, 奇形児
Ni	皮膚炎, 腸疾患, 発癌性,
Pb	貧血症, 血管系障害, 神経障害, 発育不良, 胃腸障害, 発癌性
Cr	動脈硬化, 心臓発作

点で純金属の状態まで製錬して回収することは経済的にはなりたない。

重金属を含むものを人工鉱山に保管するという発想<sup>9)</sup>は、この矛盾を解決しようとするものである。重金属類を含むものをできるだけ濃縮した状態のまま、健康に悪影響を及ぼさないような状態まで処理して、将来、取り出して有効利用するという想定のもとで、保管するというものである。その具体的方法を検討する必要がある。

以上のように循環型システムを支えるために留意しなければならない第1の視点は、随伴する元素の中でとくに人体に有害な重金属類の拡散を防ぎ、安定化して保管し、できれば必要なときには利用できるようにすることである。

第2の視点は、できるだけ少ないエネルギー消費（すなわち、総合的なエントロピー増加を極力小さくできるように配慮しつつ）、循環を可能にするために、種々の配慮が必要である。まず、分別、そして輸送の効率向上である。さらに、製品設計の段階から配慮して、廃棄物段階で、できるだけ分離のためのエネルギーを少なくできるように、入り混じりを少なくすることである。これは、元素の混合から、相の混合、さらには、使える部品ははずしやすくしておくことなどの各種レベルのことを含んでいる。これが、環境配慮設計、エコデザイン、リサイクル設計などと呼ばれているものである。また、設計から廃棄後までのライフサイクルを通しての情報の高度化（ITの利用）は、効率的にものを循環させるには不可欠である。

表3に示した各業界での研究課題も、この2つに関係するものが多いことがわかる。すなわち、有害不純物の行方に着眼した適正最終処分方法、環境配慮設計およびITの利用は、循環型システムを作るための共通的な技術課題と言える。

#### 4. 研究すべき課題

##### (1) 重金属の動きに着眼した排出物処理の系統的検討

部品としての利用や、物質としての利用（マテリアルリサイクル）をできるだけ行なった後に、循環プロセスからの排出物されるものについて、『できるだけ有効利用するとともに、環境に拡散すると問題になるものについては最終の保管形態まで考える』という点から考えられるフローと研究課題を図4、図5に示す。

これに基づいて、主要な研究課題と主な着眼点を示す。

- (a) どの道を取るべきかは、排出物の形態や、重金属、随伴元素の含有量状況に依存する。その調査を行なって、類型化を行なう。
- (b) 燃焼熱の高効率利用法  
廃棄物燃焼時には各種の腐食性ガスを発生する場合が多いので、通常の設定材料では高温燃焼ができず、通常熱回収法では熱効率が低い。高温燃焼に耐える容器材料の開発、熱電変換などの新しい方法での熱回収法の開発などが望まれる。
- (c) 重金属や塩分を伴う排出物から肥料成分を分離して用いる方法のシステム化

地域から出ているガス化栽培という発想<sup>24)</sup>によると、肥効成分はガス化して土壌に吸収され、重金属や塩分は残渣中に残る。この原理を用いた家庭菜園についてはその可

表7 主な鉱物資源の埋蔵量と可採年数<sup>1),2)</sup>

元素記号	生産量	埋蔵量	可採年数 (年)	リサイクル率 (%)
As	5.51万 t	100万 t	18	
Ag	1.46万 t	28万 t	19	
Zn	733万 t	1.47億 t	20	13
Sn	21.1万 t	428万 t	20	8
Pb	333万 t	7000万 t	21	32
Au	1818 t	4.2万 t	23	
Hg	5156 t	13万 t	25	
Cd	2.02万 t	53.5万 t	26	
Ti	645万 t	1.73億 t	27	50
Sr	23.5万 t	680万 t	29	0
Bi	2770 t	8.95万 t	32	s
Zr	99.3万 t	3600万 t	36	33
Th	2.54万 t	91万 t	36	
Mn	2210万 t	8.12億 t	37	7
Cu	903 万t	3.52 億 t	39	47
U	5.0万 t	220万 t	44	
Se	1818 t	8.0万 t	44	38
Mo	11万 t	553万 t	50	25
Be	7138 t	38.2万 t	54	26
Ni	87.2万 t	4900万 t	56	81
Ta	376 t	2.18万 t	58	32
W	4.33万 t	257万 t	59	19
Fe	9.83億 t	661億 t	67	38
Co	4.34万 t	331万 t	76	23
Sb	5.27万 t	420万 t	80	25
Re	33.6 t	5.6万 t	82	49
B	290万 t	3.2億 t	110	s
Cr	1172万 t	13.6億 t	116	27
V	3.32万 t	427万 t	129	24
Al	1.14億 t	218億 t	192	55
Pt	287 t	5.6万 t	195	12
Nb	1.37万 t	354万 t	258	1



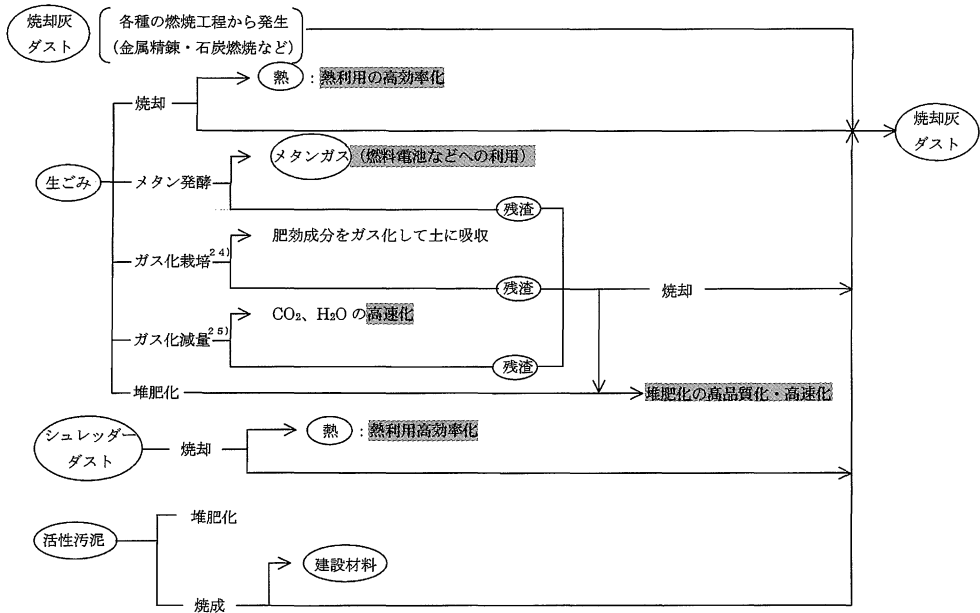


図4 循環プロセスからの排出物の処理フローと研究の課題

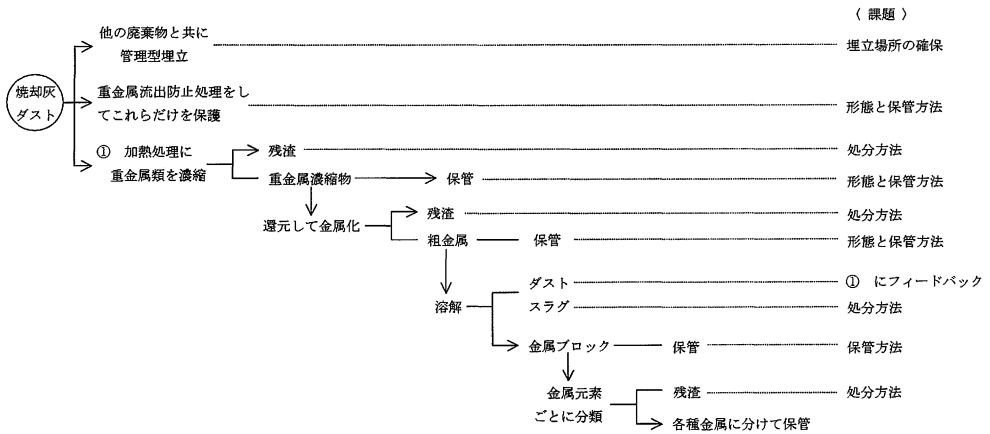


図5 重金属に着目した焼却灰・ダストの処理プロセス

能性の実証されている。大規模のごみ処理と栽培の連結システムを考えたい。

(d) 生ごみ分解や、堆肥化の促進方法

生ごみ処理において各種微生物の利用法が研究されているが、通常存在する微生物の働きをミネラル分を加えて助長し高速化できる可能性が地域から提唱されている<sup>25)</sup>。

堆肥化の促進についても検討してみたい。

(e) 焼却灰、ダストの人工資源化における最適条件の検討

現実の場で安全に保管するという言う点から、図5において、処理をどこまで行なうか、それぞれどのような条件で行なうか〈温度、酸素ポテンシャル、共存元素の影響〉、生成物（重金属濃縮物、スラグなどの副産物）の安定性（風化性、溶出性など）を実験的に検討する。そのようなデータは、人工鉱山を具体的に検討するために必要である。いま、想定しているプロセスの2つの例を以下に示す。

ケース A

- 加熱して、揮発性の重金属類が濃縮したダストと、熔融スラグの方に分離する。加熱条件は、スラグにできるだけ重金属類が移行しないような条件を選択する。
- このダストをできるだけ低い温度で加熱還元処理して粗金属塊を作り、保管する。発生ダストは、最初の工程に戻して処理する。

ケース B

自然界に存在している鉱石中での重金属類の存在形態を参考にして、スラグの中にできるだけ多量の重金属類を安定な形で溶かし込んで酸化物や硫化物として保管する。

(2) 環境配慮の設計ツール化

環境配慮しないで作られた製品が廃棄物になった後、その循環法を考えるのでは環境負荷低減に限界がある。製品設計の時から環境配慮をして、循環型システムを取りやすくしておくことが望まれることは言うまでもない。また、多くの製品に対して、広く系統的な環境配慮を行なわせるようにし、しかも、通常的设计作業の中でルーチ的に使えるものにしておけば、総合的に環境負荷低減効果を大きくできる。これが、『環境配慮の設計ツール化』の意味である。

現時点で設計ツールとして存在するのは、機械的な観点から見た組立て・解体性評価法が一部、実用化されている<sup>27)</sup>のと、プロセスや使用材料についての複数案を、LCA で比較評価する程度である。とくに、材料製作側と製品設計側の両方で相互理解、意志疎通が不足していると思われる。

そこで、設計者が思考の過程で求める支援手段として、とくに材料選択の所で役に立ち、設計の IT 化<sup>28)</sup>の中に位置づけられるものを目指す。

(ステップ)

- 図1に示したような環境配慮設計の例を集めて解析し、類型化するとともに、それを拡張して一般化する。(→データベースにあたるアイデア集を作る)
- 設計者が環境配慮を考える時の思考の流れ<sup>26)</sup>を類型化する。(仮説を作成して、設計者にアンケートを出して修正し、実像に迫ってゆく。)
- 設計されたもののライフサイクルにおける環境への影響の評価法(循環過程における有害元素の流れなどの取り込めるようにする)(評価手段の作成)
- まず、製品対象を絞ってソフトの作成、修正を行う(例:自転車)
- ソフトの一般化
- このソフトにより材料〈エコマテリアル〉と各種製品の設計との関係について検討する

(既開発のエコマテリアルの使用拡大, これから開発すべきエコマテリアルの絞込みなど)

20世紀の工学の反省を踏まえ, 21世紀に望まれる『未来型工学』は, 『有限地球感, 循環思想, 文明進化の多様化』の3つを踏まえて, 環境調和型社会システムの創生を目指すべきことが提唱されている<sup>29)</sup>. そして, 学際総合工学, 農学, 経済学, 社会学などの学際総合型アプローチが必要とされている. その中で環境調和型技術の例として,

- 環境モニタリング, 保全, 修復技術,
- 環境予測, 評価, シミュレーション技術
- エネルギー高効率高度化利用技術
- 物質エネルギー生産技術 (製品廃棄物のクローズドシステム化, 原料や溶媒に有害物を使用しないプロセス, 再生型の資源, エネルギー源を基礎とした循環型の生産技術体系の構築など)

などが挙げられている. これらといくつかの点で重なっているが, 本報で提案したものは

- プラスの要素をもったものを循環させる中で, マイナスの要素をもったもの (重金属など) を抜き出し安定化するという過程に注目すべきである
- 製品製造における環境配慮を広げ環境改善への効果を拡大するためには, 製品設計者がだれでも使えるような設計ツール化すべきである

という2つの目標を立てたことに特徴がある.

## 5. ま と め

循環型社会形成に向けて社会の各分野での取り組みが活発になり始めた. その総合として, 環境負荷改善効果を大きくするための共通的な技術課題は, 循環の中からはみ出す有害不純物を含んだ廃棄物 (シュレッターダスト, 活性汚泥, 焼却ダスト, 焼却灰および生ゴミ) の適正最終処分方法と, 製品設計の段階から環境配慮を取り込めるようにすることである. 前者については, 重金属類を環境に拡散させないとともに, 資源が不足した時には取り出せるような処理方法を求めるという点から, また後者については, IT を利用した設計のなかに位置づけられる設計ツール化を目指して, 今後研究を進めてゆきたい.

## 引 用 文 献

- 1) 安井 至編; 21世紀の環境予測と対策 (丸善)
- 2) 安井 至; 市民のための環境学入門 (丸善ライブラリー)
- 3) 西沢潤一; 人類は80年で滅亡する (東洋経済新報社)
- 4) 三井情報開発総研総合研究所; 産業のグリーン改革 (東洋経済新報社)
- 5) 三菱総合研究所; 21世紀日本のデザイン (日本経済新聞社)
- 6) 三橋規宏; 日本経済グリーン国富論 (東洋経済新報社)
- 7) 佐藤正之, 村松祐二; 静脈ビジネス (日本評論社)

- 8) 長谷川慶太郎；環境先進国 日本
- 9) 武田邦彦；リサイクルしてはいけない（青春出版社）
- 10) 監査法人大田昭和センチュリー；環境報告書ガイドブック（東洋経済新報社）
- 11) 日本学術会議 エネルギー資源工学研究連絡会 リサイクル工学専門委員会；リサイクル工学シンポジウム講演資料集（平成12年6月）
- 12) 日経エコロジー；2000年8月号 p. 42
- 13) 日経エコロジー；2000年9月号 p. 28
- 14) 西日本セキスイ工業資料
- 15) 島根県 島根県地球温暖化対策推進計画（平成12年3月）
- 16) 作田庸一ほか；帆立貝廃棄物からのカドミウム除去効率に及ぼす要因の影響；廃棄物学会誌，11（4）
- 17) 高月 紘，酒井伸一；有害廃棄物（中央法規）
- 18) 新環境管理設備事典編集委員会；廃棄物処理・リサイクル，P487（産業調査会マーケティングセンター）
- 19) 守富 寛；微量物質・環境リスク部会第2回ワークショップ資料（2000年6月）〈未踏科学技術協会エコマテリアル研究会〉
- 20) 金属系二次資源有効利用部会報告書（平成8年）（金属系材料研究開発センター）
- 21) 横山隆寿；微量物質・環境リスク部会第2回ワークショップ資料（2000年6月）〈未踏科学技術協会エコマテリアル研究会〉
- 22) 桜井 弘；金属は人体になぜ必要か（講談社）
- 23) 西山 孝；資源経済学のすすめ 中公新書
- 24) 特願2000-05123；有機ガスの脱臭方法および装置（㈱制電工業）
- 25) 特開2000-197873；有機廃棄物処理法（㈱八束物産）
- 26) 畑村洋太郎；設計の方法論（岩波講座 現代工学の基礎）
- 27) 山際康之；組立性・分解性工学（工業調査会）
- 28) 馬場鎮成；大丈夫か日本のもの作り（プレジデント社）
- 29) 中島常正編；工学は何を目指すか 東京大学出版会