

## 資源・環境の問題と，エコマテリアル工学， 資源循環プロセス工学の研究課題

片山 裕之，吉延 匡弘，上原 徹，田中 千秋  
木下 叙幸

材料プロセス工学科

### Present Problems on Natural Resources and Environment, and Subjects of Ecomaterial Engineering and Recycling Process Engineering

Hiroyuki KATAYAMA, Masahiro YOSHINOBU, Tohru UEHARA, Chiaki TANAKA  
and Nobuyuki KINOSHITA

*Natural resource processing engineering*

(Received December 31, 1996)

#### 概 要

時代と社会の要請を受けた新たな学問領域であるエコマテリアル工学，資源循環プロセス工学について，課題と研究の進め方が検討された：リサイクル技術の本質的課題，リサイクルの種類とそれぞれの位置づけ，主要三材料（金属，木材，プラスチック）のリサイクル技術の現状と課題，リサイクルを容易にするという意味でのエコマテリアル化の狙いと実例，すでに着手している研究例。

#### Synopsis

On ecomaterial engineering and resource recycling process engineering, which are new research fields to meet with the demand of time and society, subjects are studied; an essential subject of recycling technology, sorts of recycling, present technology of recycling of three main materials (metal, wood and chemicals) and remained subjects, ecomaterial for simplifying recycling process and an example of making various materials and products of environment conscious, and examples of subject under studying.

#### 1. 緒 言

本学総合理工学部発足とともに材料プロセス工学科の機械加工プロセス大講座の中で取り扱われることになったエコマテリアル工学，資源循環プロセス工学について，それが必要とされる社会情勢と研究課題の調査結果，および一部，すでに研究を始めていることについて述べる。

## 2. 資源・環境問題とは

『限りある地球』ということが1972年にローマクラブの報告書<sup>1)</sup>で言われ出した。その頃、日本では大量生産・大量消費を謳歌していたが、やがて1985年以降、不況とごみ問題の顕在化によって反省期に入り、上記の報告書の意味することが実感として受け止められるようになった。

また、国際的には、中国など発展途上国の経済発展によって、資源、エネルギーの消費と環境の悪化が地球規模で心配されるようになり、このまま進むと、後の世代に『負の遺産』、すなわち、使用可能な資源・エネルギーの欠乏、および劣悪な環境を残すことになりかねないことが懸念されるようになった。

例えば、非再生資源である金属類では、これまでのペースで消費が進めば、表1<sup>2)</sup>に示すように、経済的に採取できる資源が数10年で尽きてしまうものが出てくることになる。

このような状況の中で『持続性のある発展』という考え方が提唱された<sup>3)</sup>。これは、先進国ではいまの文明生活のレベルを落とさず、発展途上国にはある程度の生活レベル向上を認めつつ、同時に後生の人に必要な資源・エネルギーと、良好な環境を残すということである。地域間および世代間の平等の実現という高邁な理念と、限りある資源・エネルギーという現実の制約の間の矛盾があるから、きわめてむつかしい目標である。その定義が100以上あることからわかるように、文字通りの実現は不可能と言ってもいいが、むつかしさはわかった上で、各々の立場でその目標にすこしでも近づくべく努力をすることが責務であると思われる。

そのためには、図1に示すように、資源のリサイクルという考え方が必要条件になる。

## 3. リサイクル技術の本質的課題

それまでは廃棄されていたものを原料に戻すことができれば、『資源枯渇の問題』と、『ごみの問題(言い換えると、『廃棄物による環境汚染』)の問題』を同時に解決できるというのが、『リサイクル』の基本的な考え方である。

しかし、リサイクルの対象になるもの(これを『スクラップ』と呼ぶことにする)は、種々の材料が入り混じったものである。入り混じった状態を熱力学では『エントロピーが高い状態』というが、これを再び材料として使用できるようにするには、できるだけと材料ごとに分けること、すなわち『エントロピーを低い状態にすること』が必要である。この際、『エネルギーが必要』というのが、熱力学の法則である。

『リサイクル技術』とは、簡単に言えば『種々

表1. 主要金属元素の資源量

金属元素	可採年数(1990年時点)
アルミニウム	192年
鉄	67
チタン	27
マンガン	37
ジルコニウム	36
バナジウム	129
クロム	116
ニッケル	56
亜鉛	20
銅	39
鉛	21
モリブデン	50

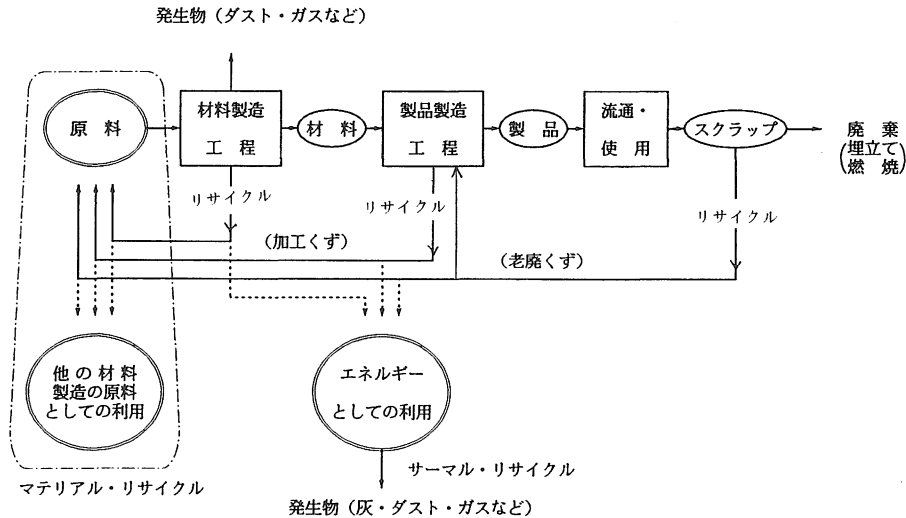


図1 リサイクルの概念

の材料が混じり合ったものを、できるだけ材料ごとに分離して、分けられたものが利用できるようにする』ことである。そのためには、作業場に輸送したり、機械を使ったり、加熱したりして、石油や電気などのエネルギーを消費する。さらには人手がかかる。

地球と宇宙との間の物質的交流は無いに等しいので、物質は原理的には循環使用によって持続性を実現することは可能である。しかし、エネルギーはそれとは異なり、その究極的な源はほとんど太陽に限られており、地表で様々な経路を巡った後、宇宙に放射して失われる。今、人類は過去の太陽エネルギーの遺産である化石エネルギーを利用して必要なエネルギーの大半を得ているが、それが枯渇してその時点の太陽エネルギーだけで生活するとなると、世界人口が78億人の場合は江戸時代並の生活、アメリカ並の生活だと7億人が限度と言われている<sup>4)</sup>。すなわち、リサイクルのためにエネルギーを使い過ぎると、エネルギーの不足の方が『持続性の維持』のネックになる。

これとは別に、廃棄物のなかには、微量のものまで数えると、数10以上の元素が含まれている（例えば、塗料の中に含まれている重金属類など）。多くの場合、この微量の元素が環境にとっては問題である。経済的に回収して有効利用される対象になるのは、せいぜい3元素程度で、残りのものは、廃ガス、煤塵、灰、スラッジ、スラグなどと呼ばれる副生物になる。これが、もし環境に悪影響を及ぼすようであれば、工業プロセスとして許されることではない。

すなわち、今、要求されている『リサイクル』とは、廃棄物の中から利用できるものだけを拾い上げるような姿勢のものではなく、各種の副生物を含めて、すべての元素について

- ・望ましくは、原料として高く評価されるものを作ること、
- ・それが無理な場合でも、少なくとも、環境に悪影響を与えない安定なものにすること

まで考えることが必要である。しかも、これを、エネルギーと人手をできるだけ掛けないで実現しなければならない。これが、リサイクル技術の本質的な課題である。

#### 4. リサイクルの方法と課題

リサイクルの方法は次のように大別される（図1）。

##### (i) マテリアルリサイクル

###### ① 真のリサイクル

アルミ缶スクラップはアルミ缶の材料に戻すなど。

###### ② 品質要求が緩いものを作るための原料に戻す（カスケード利用）

アルミ缶スクラップはアルミ鋳物の原料にするなど

##### (ii) サーマルリサイクル

木やプラスチックなどを燃やしてエネルギーとして利用する。

これまで実用されているリサイクル方法は、多くの場合、カスケード利用である。それは水が上から下に流れるように自然の摂理になつたもので、通常、もっともエネルギー使用量が少なく実行できるもので、いわゆる『巧妙な方法』である。なににリサイクル使用するかに着想が勝負のポイントである。ただし、巧妙な利用方法も利用先の量に限りがある場合が多い。例えば、不純物の含有量が低いアルミ缶のスクラップを集めてきて溶かし、不純物の制限が緩いアルミ鋳物にする方法では、アルミ鋳物の需要から、発生するスクラップ30%程度しか利用できない。

利用されるサイクルが短いもの、需要のないもの、あるいは価値の低いもの（例えば、プラスチックのスクラップから作った植木鉢）に無理やりリサイクルしたとすれば、『ごみからごみを作る』だけで、エネルギーの無駄使いに終わるおそれもある。また、一旦、なにかにリサイクル使用したと言っても、利用寿命が短いものでは、その後、スクラップになつた後のことも考えておかなければならない。

以上のように、技術的には、よりきびしい要求のものにリサイクルできるよう、できれば、もとの原料に戻すことができるように、常に技術開発が要求される。勿論、品質要求のきびしいものに戻そうとすると、通常『エントロピーを一層、低くしなければならない』のでエネルギーは余分にかかるため、それをいかに低減するかが課題である。

一方、エネルギーリサイクルの技術も決して、安易な方法として軽視できない。いくら工夫をしてリサイクルをしても、最後は埋め立てか燃焼に回さざるをえないものが発生し、日本では埋め立てには限度があるからである。その場合、燃焼自体も、発生するエネルギーを有効利用、廃ガスに有害物が含まれないようにすること、灰の問題など、要求レベルは日々きびしくなっており<sup>5)</sup>、技術課題が多い。

以上のように、リサイクルは、技術としては、真のリサイクル、カスケード利用、およびエネルギーリサイクルの組み合わせとしてのして実施され、技術的には、

- ・うまいカスケード利用法を見つけること、
- ・真のリサイクルへの努力を続けて行くこと、および

- ・エネルギーリサイクルをエネルギー回収効率，環境対策を含めてよりよいものにしてゆくこと

が主要な課題である。

これまでは，上記の課題の解決を，スクラップを与えられたものとして対応を考える場合が多かった。しかし，それでは十分な解を得ることが難しい場合，あるいは方法はあっても使用エネルギーあるいはコストの点で問題がある場合には，材料を使った製品を設計する段階から，リサイクルしやすいように考えておこうということが提唱され出した<sup>6)</sup>。これが『エコマテリアル』という考え方である。

## 5. エコマテリアルとは

『エコマテリアル』という用語の由来には，2つの系統がある。1つは，環境関連材料，環境修復，天然材料，生物分解プロセスなどで Ecological Material の略の系統である。もう1つは，未踏科学技術協会の活動の中で東京大学 山本良一教授によって提唱された Environment Conscious Materials の略の系統がある<sup>6)</sup>。本報では後者の意味で用いている。

その意味する所は，簡単にいえば，スクラップをよりリサイクルしやすくするという目的のために，製品あるいはその構成材料を

- (1) 取りはづしやすくする
- (2) 使用する材料の種類を絞る
- (3) 問題となる微量成分を含むものをできるだけ使わない。

などの手法を製品設計段階から反映すること，および，リサイクルに適したプロセス全体を指している<sup>7)</sup>。言い換えれば，『エコマテリアル』という特別な材料があるというよりも，すべての材料，製品，プロセスを『エコマテリアル化してゆく』ことに意味があるという考え方である。

資源循環を推進しようという狙いをもっている専攻／講座を有する大学は数多くあるが（例；東北大学素材工学研究所の化学再生プロセス研究部，鳥取大学社会開発システム工学科など）が，現在，材料系では大学の中で『エコマテリアル工学』という表現をしているのは，本学の外は熊本大学知能生産システム工学科があるだけである。

エコマテリアル工学は，目的は明確であるが，技術の全貌が定義されていない，これからの学問領域であるが，資源循環プロセス工学と表裏をなすものと言える。

## 6. 主要な材料のリサイクルの現状と技術課題

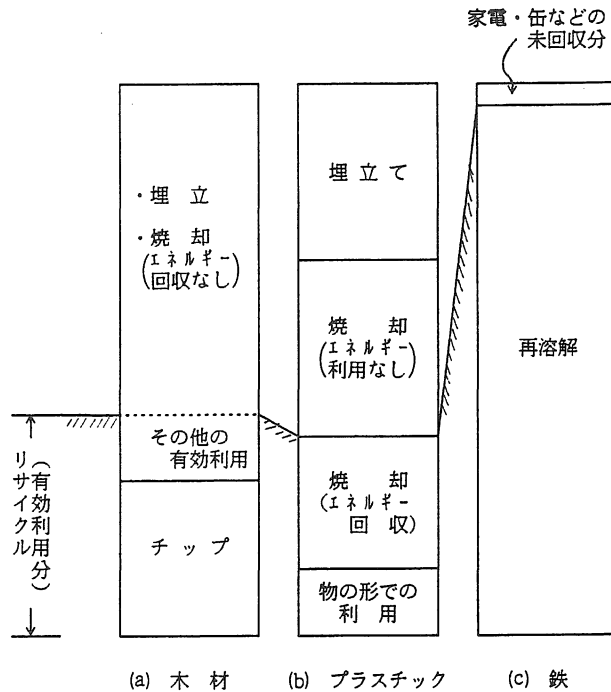
現在の世界で使われている材料は，全部で80億 t（1989年の統計）でそのうち土砂・岩石・セメントが約80%，金属が約10%，木材が約6%，化学製品が約3%である<sup>8)</sup>。金属，化学製品，木材は容積で言えば，ほぼ同じレベルにあると言える。使用量が多い上に『限りある資源』であるという意味で，金属，木材，プラスチックなどの化学製品を取り上げ，リサイクルの現状と技術課題を簡単に述べる。

## (1) 金 属

鉄などの金属は、収集したスクラップを加熱して溶かし直し、成分調整すれば新たな材料として使えるので、昔からリサイクルが行われており、利用率は95%以上である(図2-c)。最近までは、スクラップの発生量が、成分規制の緩い土木建築用の棒鋼や型鋼の生産量と見合っていたので、不純物成分の問題をあまり気にしないで、そのような鋼種に無理なくカスケード利用できていた。しかし、1995年頃から老廃スクラップの発生量が増え始め、当分、この傾向が続くと予想されることから、成分規制の厳しい薄板などにもスクラップを使用しないと、発生スクラップが消化できなくなると考えられている。この場合に成分面でとくに問題になるのは、銅(主として、自動車などのモーターコアの混入に起因する)と錫(錫メッキ缶のリサイクルに起因する)である<sup>9)</sup>。これに関する研究状況については、別報にまとめている<sup>10)</sup>。

もう1つの大きい課題は、スクラップに伴って持ち込まれる微量の不純物に起因するダスト、廃ガスなどが環境に悪影響を及ぼさないようにすることである。ダストには、鉛、カドミウムなど有害微量重金属が含まれている<sup>9)</sup>ので、その対策が必要になっている。また、スクラップに塩化ビニルなどの塩素含有有機物が含まれていると、廃ガスに白煙、異臭などの問題を生じ、また、場合によってはダイオキシンなどの極微量有害物が含まれることがある。

環境規制値は厳しい方向に進んでいるので、プロセスとしての課題は、どんどんむつかし



(a) 木材 (b) プラスチック (c) 鉄

図2 リサイクル(有効利用)の現状

くなっている。

(2) 木 材

日本の木材の使用量は年間1億 m<sup>3</sup> (約5000万 t) で、廃木材量 (木材工業で発生する廃材は含まない) は約2200万 m<sup>3</sup> (約1100万 t) である<sup>11)</sup>。廃木材のリサイクル率は30%弱と推定される (図2-a)。

廃木材の種類，リサイクル用途およびリサイクル率を抑制している要因を表2にまとめている<sup>11-14)</sup>。現在，量的に最も多い用途は燃料チップである (約100万 t/年)。燃料チップは，オイルショック時に石油に比べて安価であるという利点が着目され，専用のボイラーが設置された。しかし，最近では石油の値段が下がってコスト的な魅力がなくなり，一方，石油に比べてハンドリングしにくいこと，灰処理が必要なことから，使用量は減少方向に向かっている。したがって，廃木材のリサイクル利用率を上げるには，それ以外の用途の利用を大きく増加させる必要がある。

表2. 廃木材有効利用の制約要因

廃木材の種類	リサイクル用途	リサイクルの制約要因
a) 建物の解体，新築現場からの発生物	建築用材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・再利用できるように解体するために作業費が増す。</li> <li>・釘，変色部，欠陥部の除去，補修など作業費が増す。</li> <li>・3.5寸角の柱では再利用時に強度が問題になることがある。</li> <li>・需要と供給を結ぶ流通ルートができていない。</li> </ul>
b) 土木工事現場などで発生する足場，型枠材などの廃木材	集成材用材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・古くぎやびり割れ中に入っている砂などの異物除去の問題が残る</li> <li>・現在は寸法精度の点から製材後プレーナーを通していているのでコストが高い。(製材のままが必要精度が出せるようになることが望まれる。)</li> </ul>
c) 土木加工，製品製造工場で発生する廃木材	チップ化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・古釘や砂などの異物のための切削工具の損傷が起りやすく，コストアップの要因になっている。</li> </ul>
d) 梱包材料，パレット，枕木，電柱などの廃木材	木質ボード材用…	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各種ボード (ファイバーボード，パーティクルボード，セメントボードなど) の需要増加しつつある。</li> </ul>
	製紙用……………	<ul style="list-style-type: none"> <li>・異物混入など品質条件を満足できていないので，利用度が低い。</li> </ul>
e) 家具など市町村が収集する粗大ゴミの中の廃木材	燃料用……………	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石油にくらべて燃料として扱いにくく，利用量が減少傾向にある。</li> </ul>
	木炭化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料以外の用途がふえている (土壌改良材，活性炭など)。処理コスト低下が望まれる。</li> </ul>
	ガス化 糖 化 油 化 など	<ul style="list-style-type: none"> <li>・他の原料から製造されるものよりコストが高いという問題がある。</li> </ul>

建築用材として再利用するのは最も好ましいが、解体の作業費増し、手入れ費用などの問題を克服することが必要であるので、利用量を大幅に増すことは容易ではないと思われる。

製品チップの利用方法としては、ファイバーボード、パーティクルボードのほかに、木毛セメント板、プラスチック再生ペレットと木片との混合／押し出し成型板などがある。最近の利用量は、約30万t／年程度であるが、製品需要の拡大、および原料中のリサイクル品の比率向上が期待できるので近いうちに100万t／年に達すると思われる<sup>15)</sup>。

チップ製造時の問題としては、異物混入である。砂、釘が混入すると工具寿命を短くする原因になる。また、製品チップにプラスチックの混入することが、廃木材チップが製紙用にほとんど用いられない最大の問題とされている（紙の表面に半透明のスポットとなって現れるため<sup>12)</sup>）。

リサイクルしても最後は焼却することになる。木材自体は燃焼しても環境への悪影響は小さいが、混合物や加工物では、灰や発生ガスに問題を生じる場合がある。例えば、神戸の震災の後処理でも問題になったように、塩化ビニルが混入すると、有害な有機塩素ガスの発生のおそれがある。CCA（銅、クロム、砒素を含む薬剤）で防腐処理したものは燃焼すると、灰への重金属の混入が問題になる<sup>12)</sup>。したがって、将来は、最終の焼却時にも、廃ガスの処理や、ダスト、灰の安定化処理（溶融処理など<sup>16)</sup>）が必要になってゆくと思われる。すなわち、大掛かりな設備を備えた所でないとは焼却できないということになる。エネルギー回収法も含めて、どのように考えてゆくか課題である。

木材を利用する際には、丸太原木―製材品・木質素材―木質材料という流れにおいて何らかの切削加工が行われるが、この時に小片状、繊維状、粉末状の切削屑（木屑）が生じる（図3）。木材加工場で発生する切削屑は、工場設備によっては石や砂が混入しているが、異物混入量の低減は可能であり、廃木材に比べて再資源化しやすい筈である。しかし、現在の所、切削屑はパルプ・ボード用チップ、あるいは農業・畜産業における堆肥、苗床、キノコ菌床、家畜用ベッドなどに1部が利用されているが、大部分は燃料焼却、処分焼却されている。この有効利用法の開発が課題である。

### (3) プラスチック

日本でのプラスチックの年間製造量は、約1200万t（うち、ポリ塩化ビニルが約200万t）である。一方、廃プラスチックの量は622万t／年（1991年）という数字があり、このうち、サーマルリサイクルも含めて有効利用されたものは約28%である<sup>17)</sup>。

プラスチックのリサイクル率を上げにくくしている理由は表3のようにまとめられる<sup>14-18)</sup>。リサイクル率を上げるためには、

- (i) 同一銘柄のスクラップが集められるようにして、それを一級品にリサイクル使用することと、
- (ii) 混合したものには、できるだけ効率高くエネルギー回収できるようにサーマルリサイクルの方法を検討すること

の2つが主流になるとと思われる。



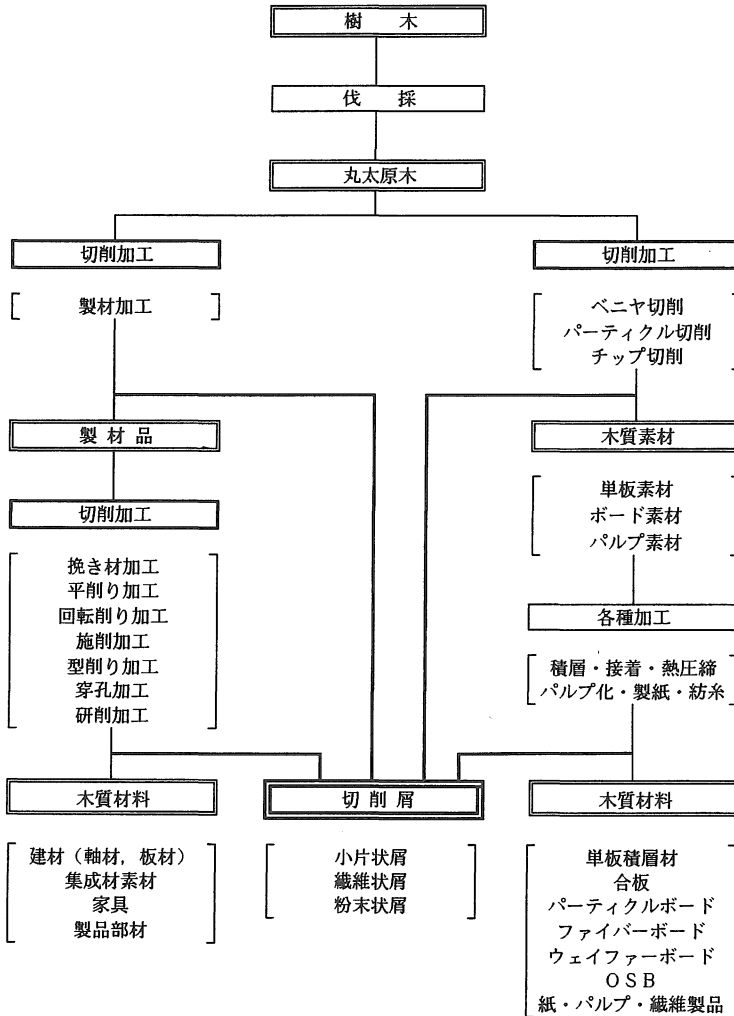


図3 木材加工における切削屑の発生過程

## 7. エコマテリアル化の技術の現状と課題

### (1) 評価方法

これまでは、製品や製造プロセスの評価は、『必要な品質を確保できていて、コストが最も安いものはなにか』という形で行われてきた。この方法は、はっきりした答えが出され、その評価が劣ったものはどのどん淘汰されていった。

エコマテリアルであるかどうか、すなわち、資源、エネルギー、環境のことをどれだけ考えているかを定量的に評価するとなるとそう簡単ではなく、今でも『地球にやさしい』

表3. 廃プラスチックのリサイクルの制約要因

	リサイクルの種類	制 約 要 因
マテリアル リサイクル	再度プラスチック製品に戻す	<ul style="list-style-type: none"> <li>・加工時の発生くずは、分別回収すれば、利用可能。</li> <li>・老廃くずは、分別が不十分なため、杭、ふたなど用途が限られ、需要量、売値の両面で経済的になりたちにくい。</li> </ul>
ケミカルリ サイクル	分解してモノマーに戻す	廃 PET ボトル、廃 6 ナイロンプラスチックなどに特定品種でのみ開発されている。
	熱分解して油やガスを回収する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ポリエチレンなど炭化水素系樹脂では技術的に可能。</li> <li>・塩化ビニールや酵素、炭素保有量の多いものでは収率が低く、経済的になりたない。</li> </ul>
サーマルリ サイクル	燃焼してエネルギーとして回収する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃焼時、発熱量が高すぎる、すすが発生するなどの問題があり、燃焼装置として専用のものが必要。</li> <li>・有機塩素系樹脂を含んでいると、装置腐食、HIC 発生、熱効率をあげられないなどの問題を生じる。</li> </ul>

という情緒的であいまいな表現がまかり通っている。

しかし、『どちらがすぐれているか』、『どのように改善して行ったらよいか』を明らかにするには、定量的な評価方法が必要ということで、用いられるようになっていたが、LCA (ライフ・サイクル・アセスメント: Life Cycle Assessment) と呼ばれる方法である<sup>19)</sup>。

この方法は、ある製品について、原料から最終の段階まで全寿命を通して、どれだけのエネルギーを使ったか (炭酸ガス発生量)、どれだけの有毒ガス (例えば硫酸化合物) を発生したか、また、廃棄物を発生したかなどについて、個々の項目ごとに積み上げ計算して行くものである。おのおのの項目ごとに比較する所までは問題はないが、全体としてはどちらがすぐれているかを議論すると、問題がある。たとえば、建築材料として、木材と鉄がどちらが環境にやさしいかということ LCA 法で評価すると、炭酸ガスや硫酸化合物の発生量は木材の方が少ないが、廃棄物は鉄の方が少ないという結果になり、どちらが環境のためにすぐれているかを議論するには、別の判断基準を加える必要がある。項目ごとに係数をかけて、足し合わせて総合点で評価する方法などが提案されているが、係数の決め方には異論がある。したがって、LCA 法を用いて、どちらがすぐれているかを議論しているものは、その結果を疑ってかかる必要があるが、ある製品、ある製造プロセスについて環境に対して、改善点はどこにあるかを知る上では、有効な方法になりうる。

## (2) エコマテリアル化の例

まだ緒についたばかりであるが、代表例としては以下のようなものがある<sup>7)</sup>。

### ① 金属材料関連

・鋼材の材質の制御はこれまでは合金元素の添加量の調整に依存してきた点が多いが、

できるだけ加工・熱処理の方法で行い，合金元素の添加は最小限に止める。

- ・缶塗装を，従来の有機塗料から水性塗料に，印刷インキは，従来の高温焼き付け型から紫外線硬化型に代えて，有機ガスの発生を抑制する。
- ・はんだを従来の錫—鉛系から錫—銀系，錫—亜鉛系などへの置き換えて，脱鉛化する。ただし，従来のはんだの機能を1つで満足するものは見つかっておらず，いくつかのものを使い分けるといった方法に向かうと見られている。

## ② 木材関連

- ・木材の高寿命化，高性能化  
WPC（木材・プラスチック複合体），WIC（木材・無機質複合体）など。
- ・燃料以外への木炭の有効利用（湿度調整用，吸着用など）

## ③ 有機材料関連

- ・生分解性プラスチック
- ・接着剤；溶剤型から無溶剤型（水系，ホットメルト，反応型）への転換。ただし，接着性能低下などの問題が十分に解決されていない。スクラップ解体の容易化のために特定処理条件ではがれる接着剤（ある力以上，ある温度以上で剥がれるなど）。
- ・フロン代替洗浄剤
- ・塗料；有機溶媒蒸発を抑制する観点から，溶剤の有機物量の減少（ハイソリッド型）あるいは水性化，粉体塗料化。錆び止めなどの特殊機能顔料として用いられる鉛化合物の置き換え（モリブデン酸塩系，リン酸塩系など）。

## ④ 無機材料関連

- ・エコセメント；都市ごみ焼却灰，下水汚泥焼却灰などを用いたもの。
- ・アスベスト代替；ロックウール，アルミナ系繊維，炭素系繊維など。

## ⑤ 土木建築関連

- ・アスファルトの常温塗装法

## ⑥ 生活関連製品

- ・エコマーク壁紙（ベースを紙とし，アクリル樹脂やオレフィン樹脂で撥水加工したもの）
- ・金属缶；在来のはんだに代わるナイロンを用いたナイロン接着缶，金属素材の大幅節減を可能にした絞りしごき缶（DI缶）PETフィルムラミネート鋼板を用いたTURC缶など。

## ⑦ 電気電子機器関連

- ・解体性向上設計（掃除機のホース部のワイヤレス化など）
- ・省エネルギー化（エアコンのコンプレッサー改善，洗濯機のバスケットをプラスチックからステンレスに代えて脱水性能を上げて，乾燥エネルギーを下げるなど）

## ⑧ 自動車関連

- ・材料の工夫  
リサイクル容易な材料に代える（スポイラーの熱硬化性樹脂から熱可塑性への変更）。構成材料統一による解体不要化（インストルメントパネルのオールオレフィン化）。単純構成化による異物混入回避（サイドモールの塗装省略）など。

・解体性改善のための構造の工夫

部品点数の削減，ボデーへの締結点数の削減，部品同士の接合構造の工夫（ボルト締結から振動溶着へ）など。

ただし，自動車，家電とも，スクラップを破砕した時に生成するフラフと呼ばれるプラスチックを主体とする破砕片（各種重金属が共存する）の処理が課題として残されている。

## 8. エコマテリアル工学，資源循環プロセス工学の研究課題の例

すでに着手している研究課題としては次のようなものがある。

### (1) 製鉄分野での微量元素問題への対応プロセス

ダストの中の亜鉛は貴重な資源であるが，ダストの中の亜鉛の亜鉛回収を，廃ガス処理条件も含めて総合的な見地から見直さないといけない時点にきている。そこで，従来の『乾式集塵（廃ガス温度140℃以上に保持して水の凝縮を防ぐ）⇨外部のウエルトツキルン）工場に運んで亜鉛分を回収⇨残渣は廃棄』というプロセスに代わるものプロセスを検討する。着眼点は，廃ガス温度を水が凝縮する領域まで下げた場合の問題を解決し，各種微量元素の処理まで組み込んだ湿式処理工程を確立することである。

### (2) プラズマを利用したプロセス

プラスチックを含む廃棄物を焼却したり，金属製錬工程に加えて処理する場合には，廃ガスの中に含まれる有害有機ガス成分を安定して下げる技術が必要である。いくつかの対策が検討されているが，プラズマによる分解機能<sup>20)</sup>に着目して，プラズマを組み込んだ廃ガス処理プロセスを検討する。

また，プラズマを用いて材料の表面改質を行い，品質を維持ながらリサイクルしやすくする方向を検討する。

### (3) 木材加工において発生する切削屑の利用方法

切削廃材に化学加工を行って付加価値の高いものに変換する。

例；・切削屑（主としてセルロース分子）へエーテル化・エステル化して，水あるいは有機溶媒に対する膨潤性を付与し，利用—廃棄—再資源化時に環境への負荷が小さい塗料の開発

・切削屑（セルロース分子およびリグニン分子）への合成高分子のグラフト共重合による，接着剤を使用しない自己融着型ボードの開発

### (4) 廃木材の炭化プロセスと，環境改善への利用法

木炭の燃料以外の種々の利用法が注目されているが，今後，廃ガスや灰などの環境規制が厳しくなり，廃ガス処理設備を完備しなければとなると，小規模の独立した炭化設備ではコ

スト低減がむつかしくなり、需要拡大が制約されると思われる。そこで、製鉄工程と組み合わせて、大量に使用できるプロセスを検討する。組み合わせによって得られる効果の着眼点は、製鉄 廃熱を利用した炭化、廃ガス処理設備の共用、得られた木炭を製鉄の環境対応材（例；廃ガスの吸着材として）としての使用、吸着材としての役目を終わった後、最終的には高温冶金炉の中で燃やして副燃料としてして使用し、灰はスラグの中に溶かし込んで安定するなどの諸点である。このようなプロセスを想定して高い吸着能を持つ木炭を製造するための条件を研究する。

#### (5) 環境に悪影響を及ぼさない接着剤の接着性能改善

エチレン酢酸ビニル共重合体やポリエチレンを主成分とする ホットメルト接着剤は熱軟化やクリープ変形を起こすので、接着強度が要求される場所へは利用できないという欠点を持つ。この欠点を、ポリマー構造を直鎖状から網状に変化させることで熱硬化性を持たせ、接着性能を改善する。

## 9. 結 言

『持続性可能な発展』という人類の大目標に向けての最近の環境という視点からの全産業技術の見直しの動きは、第二の産業革命とも言える大きなものである。

その根幹をなすのは、本稿の中で述べたような条件を満足する真の意味でのリサイクル技術の確立であって、その実現のためにエコマテリアル工学と資源循環プロセス工学は表裏をなして対応してゆく学問分野である。ただし、リサイクル技術というのは、あくまで必要機能をもった製品を対象とするものであって、個々の材料、製品を研究対象とする他の研究分野との連携は不可欠であることは言うまでもない。力を合わせて時代と社会の要望に応じてゆきたい。

## 参 考 文 献

- 1) D. H. メドウズほか（大来佐武郎監訳）；『成長の限界』，ダイヤモンド社，1972.
- 2) 西山 孝；『資源経済学の進め』中公新書，1993.
- 3) 大来佐武郎監訳；『地球環境と経済』p. 15，中央法規，1990.
- 4) Hiroshi Mizutani； Proceedings of 2nd Inter. Symp. on Ecobalance, p. 141, (1996), Tsukuba.
- 5) 柳下正治；廃棄物学会誌，6(1995) 1, p. 3.
- 6) 山本良一；まてりあ 33(1994), p. 509.
- 7) エコマテリアル研究会編集；エコマテリアル事典，サイエンスフォーラム，1996.
- 8) D. G. Rogich； Speech at the RCO's 15th Annual Conf., (1995). Hamilton.
- 9) 日本鉄鋼協会循環性元素分離研究会；鋼スクラップ中のトランプエレメント分離法に関する基礎的検討，日本鉄鋼協会，1996.
- 10) H. Hiroyuki, N. Sano, M. Sasabe & S. Matsuoka; 本誌
- 11) 木材学会第4期研究分科会編；分科会報告書，I-88（平成7年6月）.
- 12) 木質廃棄物再資源化技術開発事業報告書（I），（平成5年3月），同Ⅲ（平成6年3月），（日本住宅・木材技術センター）.

- 13) 高橋 徹, 鈴木正治, 中尾哲也編; 環境 (木材科学講座 5), (1995年10月) (海青社).
- 14) 村田 徳治; 最新リサイクル技術の実際, (1993年 7月) (オーム社).
- 15) 菊地雅史; 建築の技術と施工, 74 (1993年 3月).
- 16) 平岡正勝, 酒井伸一; 廃棄物学会誌 5 (1994) 1, 3.
- 17) 日本の科学と技術, 35, (273) p. 2 (1994).
- 18) 釜江誠一; 廃棄物学会誌, 4(4) p. 33 (1993).
- 19) 未踏科学技術協会編; 『LCA のすべて』, 工業調査会, 1995.
- 20) 北村寿宏, 片山裕之; 本誌