

特集 資源リサイクル問題

廃棄物処理・リサイクルを考慮した製品アセスメントについて

Environment-Friendly Design for Industrial Products

永田 勝也*

Katsuya Nagata

1. まえがき

近年、生活レベルの向上にともなって廃棄物の排出量が増加する一方、地球環境問題に対する配慮から資源の有効活用が強く求められている。こうした情勢から国民全体で廃棄物の減量化・再資源化に取り組むリサイクル社会の構築が抜本的対策として掲げられ、いわゆる「リサイクル法」の制定や「廃棄物処理法」の改正へと展開するに至り、また最近では「産廃施設整備促進法」、「省エネ・リサイクル支援法」の成立を促した。

廃棄物を取りまくこうした状況は、わが国のみものではなく、先進諸国で共通した現象となっている。ドイツではすでに包装材（飲料のビンやカンを含む）についての規制が実施され、製造業者や販売業者に対してその回収・再資源化の義務付けが行われている。こうした規制を廃自動車や廃家電製品・電子機器、さらには新聞等の印刷物、建設廃材などに対して拡大させようとの動きが報じられている。

わが国でも「リサイクル法」では、再生資源としての利用促進がとくに必要な第1種製品として、すでに自動車や家電製品が指定され、さらに今年度に入ってニカド電池を使用する電導工具等16品目が追加された。こうした製品にあっては、リサイクルに有利な材料選択や構造の工夫、分別・分離への配慮等を設計時に事前評価することが求められている。

2. リサイクルシステムのあり方

従来の産業・社会体系は処女資源→素材→加工・生産→消費という一方通行の形態をとっていた。資源リサイクルは消費から、あるいは消費に至る中間過程から原料に戻すという、いわゆる負のプロセス（還元プ

ロセス、静脈ルート）を、これに付加するものであり、循環体系を形成させようとするものである。

エントロピーの概念を用いて、リサイクルシステムのあり方について考えてみる。エントロピーは、Clausiusによって導入され、過程の不可逆性の尺度を表すものと理解され、またBoltzmannによる統計的考察では、無秩序さの度合を示すものとして説明されている。不可逆過程はエントロピーを増大させ、また確率の大きな状態への移行は同じくエントロピーの増大につながる。

リサイクルの系統は図-1のようにまとめることができよう¹⁾。これらのリサイクルシステムでは、生産・排出源における処女資源→消費のプロセスへの循環点は、外側のサーキットほど処女資源側に近くなる。自家処理、再利用、再資源化、最終処分プロセスは、多くの処理工程を含む。これら処理工程は不可逆過程であり、秩序だった（分別された）再生原料を得るには、一般的にその工程が増えるほど、すなわち外側サーキットほどエントロピーの増大するシステムとなり、もとに戻すために消費されるエネルギーの増加を招くことになる。

また見方を変えれば、生産・排出源から負のプロセスへの循環点では、外側のサーキットほど、その回収物の無秩序さが増大しており、エントロピーの高い状態になっている。このことが上述の低エントロピーの再生原料の生産に多くのエネルギーを必要とすることにつながる。このように資源リサイクルでは、できるだけ短いサーキットで処理することが重要であり、このため古紙や空きビン、空きカン等の回収や分別収集等のような、排出源である家庭での低エントロピー化の努力が評価される。

3. 廃棄物処理・リサイクルを考慮に製品設計²⁾

工業製品の場合、これまでの「設計」は大きく経済性の枠組の制約を受けていたが、今後はさらに環境性

*早稲田大学理工学部機械工学科教授
〒169 東京都新宿区大久保3-4-1

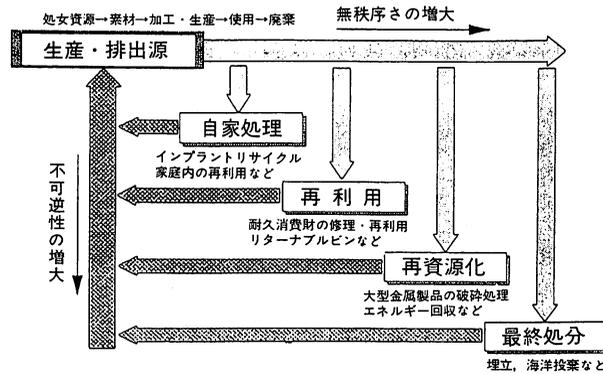


図-1 廃棄物循環システム

(文化的, 社会的, 政治的, 宗教的等の“環境”に投入された時のインパクト)が考慮されなければならない。製品が廃棄物になったときの処理容易性・リサイクル性は, この環境性におけるかなり比重の高い因子と認識されるべきものである。

製品が高エントロピーな状態では, 再生業者も低エントロピー化に必要なエネルギーやコストから再資源化の価値を認めないことになって, いわゆる使い捨て製品となる。このように製品設計においてリサイクル性を考慮することは, いかにして低エントロピー製品を設計するかということに尽きるといえる。

4. リサイクル型製品設計の要点

低エントロピー製品として設計する上での要点は, 不可逆過程の程度の縮小と無秩序さの改善, すなわち統一化, 統合化, 簡素化, 省エネ化であり, 具体的には素材, 部品, 製品の各レベルにおいて図-2に示すような対応が考えられよう。

すなわち素材レベルでは, 使用物質の量を減じるこ

と, 可能な限り同一の素材を用いること, 混合しても再資源化に支障のない素材の組合せを選ぶこと, 製品内において同一素材部を偏在させること, 再生可能素材を使用することなどである。

また部品レベルにあっては, 再利用やリサイクル処理の容易性から少数化(ユニット化, モジュール化), 規格化, 標準化やできるだけ分離させやすい結合方法の採用が望まれる。

さらに製品レベルでは, 部品の統合によって再利用や再資源化が可能な部分を取り出しやすくするとともに, 解体の方向性への配慮や使用工具の低減, 接合箇所への減少やその方法の改善を通じて, できるだけ解体しやすくすることが重要である。解体しやすい接合方法としてはスナップフィットが注目されており, デュポン社ではその設計のための支援コンピュータプログラムを販売している。このほか, リサイクル可能なものにはその素材がわかるようにマーキングすること, 輸送・運搬が容易なように大型の製品にあっては分割できる構造とすること, 破碎・選別・焼却といった現

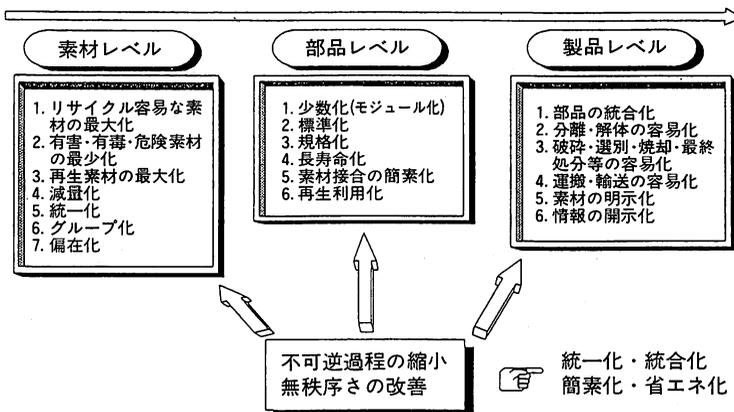


図-2 低エントロピー製品設計・生産の要点

表1 エントロピー製品設計・生産における各レベルの評価項目例

レベル	評価項目	備考	
素材レベル	リサイクル容易な素材の比率	高低、阻害材比率等	
	有害・有毒・危険物質の比率	高低	
	再資源化・中間処理阻害物質の比率	高低	
	再生素材の比率	高低	
	減量化の考慮	大小	
	種類統一化の考慮 偏在化の考慮	大小、グループ化の対応等 大小	
部品レベル	少数化（モジュール化等）の考慮	大小	
	標準化の考慮	大小	
	規格化の考慮	大小	
	長寿命化の考慮	大小	
	素材接合の簡索性 再生部品の活用	大小、複合材の多寡等 大小	
製品レベル	保守	長寿命化の考慮 保守（部品交換等）の容易性の考慮	大小 大小
	回収 集収	運搬・輸送等の容易性 運搬・輸送時の安全性	易難 安全・不安
	分離 ・ 解体	部品の統合化（交換・変更等）の考慮 部品結合の簡素化（少数化） 部品結合方法の簡易性 使用工具の種類 解体の方向性の考慮 解体時の安全性の考慮 大型部品の分離容易性 再利用可能部品の分離容易性 処理困難部品の分離容易性の考慮 有毒・有害・危険部品の分離容易性	大小 大小 はめ込み、ボルト、溶接等 多少、特殊工具の使用等 大小 大小 易難 易難 大小 易難
	再 資 源 間 化 処 ・ 理	破碎の容易性 破碎時の安全性 選別の容易性 焼却の容易性 二次公害防止の容易性	易難、対応装置の内容等 安全・不安 易難、対応装置の内容等 装置の内容等 易難、装置の内容等
	最 終 処 分	最終処分の容易性 最終処分量の減量化の考慮 有害物質の溶出性 地盤安定性	処理の有無 大小 なし、大小 大小
	そ の 他	素材の明示 塗装・印刷の影響 再資源化・処理処分等の情報の開示	実施状況等 実用、なし、大小 実施状況等

在のリサイクル処理に適するように難破碎部品を事前に取り出しやすくしたり、焼却の際に二次汚染物質が発生しないような配慮が必要である。以上の各レベルでの評価項目を整理したのだが、表1である。

こうした低エントロピー化の方策はリサイクルのみに寄与するものでなく、従来からの目標であった設計・生産における効率化にも貢献するものが多い。例えば、モジュール設計・生産方式は組立作業性の改善や生産リードタイムの短縮、自動化・品質保証での有利性から最近注目されており、また部品やユニットの規格化・標準化も設計や部品管理の負担軽減、生産効率の向上などに寄与できるものとして取り組みが進展している。

リサイクル法で第1種製品に指定された家電や自動車では、わが国においても各企業でリサイクル型製品

設計の実施の動きが見られ、こうした設計思想に基づいた製品も販売されるようになってきた。また欧米では、製品設計における解体容易性に対する考慮が、Design for disassembly³⁾あるいはDisassembly-oriented design⁴⁾として注目を集めている。こうしたなかにあっては、部品や材料としての再使用を、素材リサイクルやエネルギー回収に優先させる方向にあり、その前提として使用樹脂の種類の減少や熱可塑性の拡大、さらには複合材料をできるだけ避けることなどの方策が採られている。

5. リサイクル型製品の評価法

一つの評価法としては、素材構成をベースにする方法がある。次式に示されるように、情報理論のエントロピー概念を用いて、構成素材の混在の程度（無秩序

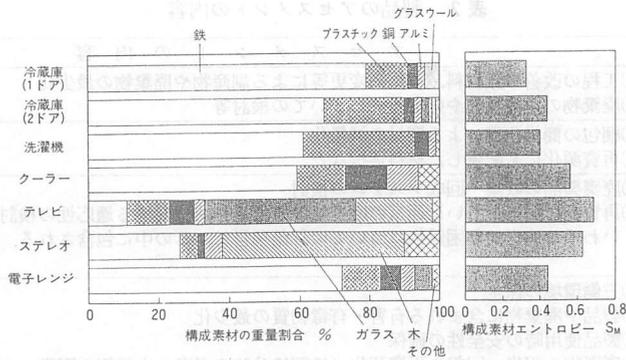


図-3 家電製品の素材構成と構成素材エントロピー (1982年度)

さ)を統一した基準とするものである。

$$S_M = \sum Mi \log Mi$$

S_M : 構成素材エントロピー

M_i : 材料の重量割合

この構成素材エントロピーを各種家電製品に対して計算した結果と再資源化率の関係を図-3, 図-4^{1,5)}に示すが、これから構成素材エントロピーが低いほど再資源化が容易であることがわかる。

この他の評価方法としては、①同様の方法を部品分割に適用する, ②同じく使用工具に適用する, ③結合解除容易性を評点として解体順序にしたがって合算する, などの方法が考えられている^{6,7)}。

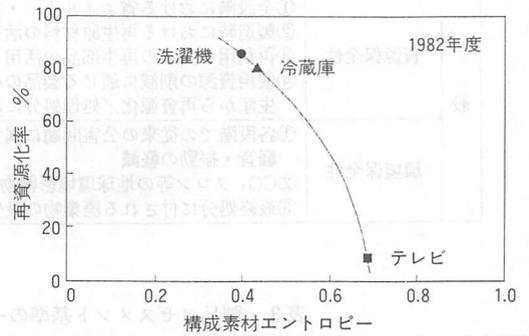


図-4 家電製品の構成素材エントロピーと再資源化率

6. 製品アセスメントとライフサイクルアナリシス

リサイクル法の制定以来、製品アセスメントが話題になっている。製品アセスメントの概念はきわめて大きく、一般的には「製品生産者が生産を行なう前に、当該製品の生産・流通・使用・廃棄・再資源化/処理処分の各段階における安全や資源、環境への影響を調査、予測および評価し、必要に応じて製品設計や生産法等の変更を行って影響の軽減を図る」とことと定義されている。このなかには、すでにテーマとして個別に進行している労働環境の改善、生産や使用時における省エネルギー、環境汚染物質の削減等も含まれることになる。

一般的な工業製品に対する製品アセスメントの枠組みを生産→流通→使用→廃棄→再資源化/処理処分の流れに従って図示したのが図-5である。各階段ごとのアセスメント内容では廃棄物関連項目を重点に示したが、このほか全段階に対して安全性、資源保全性および環境保全等が検討されなければならない。また、

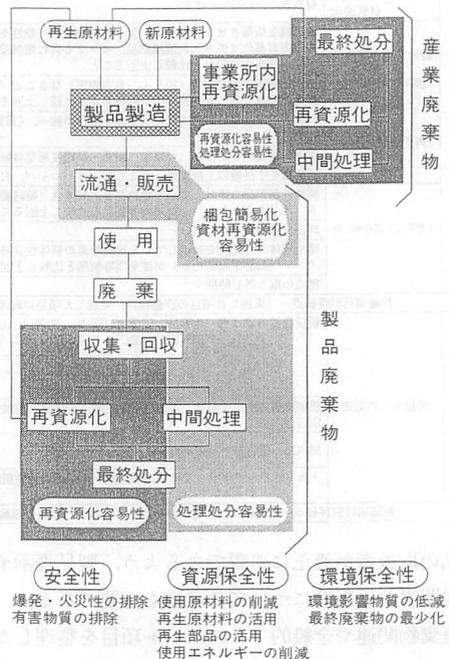


図-5 製品アセスメントの概要

表2 製品のアセスメントの内容

廃棄物/全般		アセスメントの内容
廃棄物 関連	生産段階	①工程の改善や原材料、製法の変更等による副産物や廃棄物の最小化 ②廃棄物の再資源化や処理処分についての検討等
	流通販売 段階	①梱包の簡易化等による資材の減量化 ②再資源化にも配慮した材料選択など
	再資源化/ 処理処分 段階	①廃棄製品の収集・回収システムの検討 ②再資源化処理あるいは通常の廃棄物の処理処分法に対する適応性の検討など いわゆる適正処理困難物についての評価項目は、この中に包含される。
全 般	安全性	①労働環境の保全 ②製品や廃棄物に含まれる有害・有毒物質の最小化 ③製品使用時の安全性の確保 ④廃棄物の収集・回収や再資源化/処理処分時の爆発・火災等の回避 ⑤最終処分時の有害物質溶出防止や地盤安定化など 化学物質の発ガン性や催奇性、有害性等のリスクアセスメントに関する内容も、この範ちゅうに入る。
	資源保全性	①全段階における省エネルギー・省資源に対する配慮 ②製造時における再生原材料の活用 ③再利用のための再生部品の活用 ④使用資源の削減に通じる製品の小型化、長寿命化、部品交換の容易化など 生産から再資源化/処理処分にわたるエネルギーアナリシスもこの範ちゅうに入る。
	環境保全性	①各段階での従来の公害問題に属する大気、水、土壌等の環境への汚染物質排出の低減。 騒音・振動の軽減 ②CO ₂ 、フロン等の地球環境影響物質の削減・廃止 ③最終処分に付される廃棄物の最小化など

表3 製品アセスメント基準の一例（コニカ：機器本体の一部を抜粋）

目的	評価項目	評価基準	評価方法				実施 項目	理 論 点	摘 要	備 考
			評価点+3	+2	+1	0				
3. 再資源化（リサイクル）	解体性	解体性各部品を締結している締結要素の解体性（締結要素のポイント（部品1点あたり）が従来同等製品と比較し上回ること）	10%以上減少	5%以上減少	現在のまま	現在より増加		3		
	単一材への解体性	汎用工具で同一材料に分離、分解できない樹脂部品数	—	20%以下	20%~40%	40%超		2		
	プラスチック部品に材質表示	材質表示（ISOマーク）	—	重量比90%以上	重量比90%~70%	重量比70%未満		2	必須	
	破砕処理の容易性（含む環境汚染防止）	破砕機を損傷させる硬質部品、目づまり発生の可能性を有する柔軟部品の除去容易化（焼き入れ機械部品、モータを含む電気部品の取り外し容易性が従来同等製品と比較し上回ること）	—	損傷部品なし	取り外し容易	取り外し困難		2		
		破砕処理時に環境汚染（粉じん、有害物質）なきこと（トナー・デベ、感光体の取り外し容易性が従来同等製品と比較し上回ること）	—	—	環境汚染がない	環境汚染がある		1		
	再生資源の利用	外装・トレー類の樹脂グレードを除く材質の統一、（重量比80%以上同一材料）	—	重量比80%以上	重量比80%未満	—		2		
		熱硬化性樹脂の不使用（ただし、耐熱・高精度部品は除く）	—	—	使用しない	—		2		
4. 使用材の安全性	再生紙	再生紙を1品種以上推奨紙とすること（ヨーロッパ、日本）	3品種以上	2品種	1品種	推奨しない		3		
	主要部品の取り外し性	解体性各部品を締結している締結要素の解体性（締結要素の評価ポイント（部品1点あたり）が従来同等製品と比較し上回ること）	10%以上減少	5%以上減少	現状のまま	現状より増加		3		
		部品交換時間（MTTR）	—	15分以下	15~30分	30分超		2		
		電池解体時各部品を締結している締結要素の解体性（締結要素の評価ポイント（部品1点あたり）が従来同等製品と比較し上回ること）	10%以上減少	5%以上減少	現状のまま	現状より増加		3		
		電池の取り外し時間	—	1分以下	1分~3分	3分超		2		
評価項目別評価点 = (実施した項目の評価点計 / 実施した項目の理論点計) × 100 (/) =										
4. 使用材の安全性	法規制への対応	新規物質の届け出：化審法、安衛法（国内）、TSCA（USA）、EINECS（EC）、DSL（カナダ）、AICS（オーストラリア）など（トナー・キャリア・インク・グリース・定着クリナー・ネジロック）	—	—	手続き済	手続き未了		1	必須	手続き未了では発売禁止
		規制物質の所定手続き：消防法、毒性法、安衛法、危険物輸送法、SARAなど	—	不要	手続き済	手続き未了		2	必須	手続き未了では発売禁止
		MSOS、警告ラベルの対応	—	—	あり	なし		2	必須	手続き未了では発売禁止
		メモリ・バックアップを除く内蔵電池（Ni-Cd）の使用禁止（ドイツ）	電池なし	取り外せる電池あり	メモリ用内蔵電池あり	内蔵電池あり		3	必須	
評価項目別評価点 = (実施した項目の評価点計 / 実施した項目の理論点計) × 100 (/) =										
合計										

製品の取扱者が適正に処置できるよう、製品表示や取扱説明書の妥当性についての考慮も必要である。

廃棄物関連や全般的アセスメント項目を整理したのが、表2である。リサイクルを中心とした製品アセスメントの基準の一例を表3に示す。この例では評価点法

を採用している。

最近、製品が環境や資源に与える各種の負荷（以下、環境負荷と呼ぶ）を、製品のライフサイクル全体にわたって定量・評価しようとする試みがライフサイクルアセスメント（Product Life Cycle Assessment /

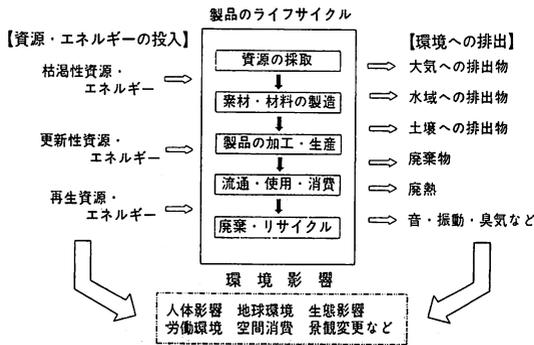


図-6 ライフサイクルアセスメントの概要

Life Cycle Assessment : LCAと略す) として注目されている。LCAは、製品アセスメントの評価項目をできるだけ定量化しようとするものであると理解することもできよう。この際、原材料の製造やそのための資源採取、さらには各段階間での輸送などを加え、製品のライフサイクルにわたるすべての行為が対象となり、また図-6に示すようにその環境影響も人体や生態さらには空間消費、景観変更など広範な内容に及ぶ。

LCAの対象は、製品に限ったことではなく、個別の製造システムや各種のサービス等もろもろの活動にわたる。

製品に対するLCA実施の目的は、

- ①同一目的をもつ複数の製品間での環境負荷に関する優劣の比較
- ②製品改良による環境負荷の軽減効果の評価
- ③環境負荷の基準値や目標値に対する新製品等の達成状況のチェック
- ④既存製品の改善点の抽出

などであり、その目標とするところは製品製造業での製品設計・生産法の改善や流通業者における品揃えの内容変更などを促すこと、さらには消費者へ商品選択に当たっての適切な判断資料を提供することなどである。

LCAについては現在わが国を含め、先進諸国でのその手法開発が活発に行われており、また国際標準化 (ISO) も進められている。これまで実施または提案されているLCAの主なもの、表4に示す。

表4 最近のライフサイクルアセスメント

呼称	ミグロス	ライデン大学	エコピラン	スウェーデン工業連合会
国名	スイス	オランダ	フランス	スウェーデン
開発主体	スイス連邦環境森林景観庁 (BUWAL) チューリッヒ連邦工科大学 ・プロセス冷凍工学研究所 ミグロス	ライデン大学・環境科学センター TNO環境・エネルギーグループ 燃料・資源庁	エコピラン	スウェーデン環境研究所 (IVL) スウェーデン工業連合会
目的	容器・包装材選択中心	汎用的な標準法	容器・包装材選択中心	汎用的な標準法
資源枯渇	エネルギー源	エネルギー源、物質資源	エネルギー源、物質資源	エネルギー源、物質資源、食料、生物資源、土地利用
カテゴリー	環境影響	大気、水、土壌、温暖化、オゾン層破壊、酸性物質、光化学スモッグ、人体有害物質、富栄養化、廃熱、騒音、臭気、放射線、生態影響、地形影響、労働環境	大気、水	大気、水、温暖化、酸性物質
	廃棄物負荷	廃棄物 (質量)	廃棄物 (体積)	廃棄物 (質量)
指標	統合化の程度	統一	細目カテゴリー別 (NO _x , SS等)	統一
	単位	エコポイント	エネルギー-EC (MJ), 大気UPA (m ³) 温暖化UGW (mg-CFC12eq)	エネルギー (MJ), NO _x (g) 等
使用例	ミルクパック、ヨーグルト容器、洗剤容器等の材料選択	なし	缶の材料選択	ボルボのパンパー材料選択
備考	<ul style="list-style-type: none"> 包装自体の加工、充填、再使用は考慮せず。 エコファクターは次式。これに排出量等を積算し合点してエコポイントとする。 $EF = \frac{1}{F_k} \times \frac{F}{F_k} \times 10^{12}$ F _k : 国内最大許容排出量 F: 国内実総排出量	<ul style="list-style-type: none"> 3訂までである カテゴリーの中には、まだ準備中のものも含まれる。 許容濃度やGWP, ODPを使い、次式で算出する。 $UPA = \sum \frac{Q}{C_M}$ Q: 排出量 C _M : 最大許容濃度 $UGW = \sum (Q \times GWP)$ GWP: 温暖化ポテンシャル (CFC-12換算)		<ul style="list-style-type: none"> ELUで統合化 3訂までである

ミグロスはスイス最大のスーパーマーケットチェーンであり、包装材の選択を中心に、BUWAL等の開発した手法を用いてLCAを実施している。環境負荷のカテゴリーとしては、エネルギー消費、大気汚染、水質汚濁、廃棄物量を取り上げ、さらに細目カテゴリーとして大気汚染ではNO_xやSO_x、非メタンHC、HCl、フロン、CO₂を取り込んでおり、また廃棄物では一般系、産業系を区別して扱っている。最終的にはカテゴリーを統合化して1つの指標とし、「エコポイント」単位で評価する。オランダではライデン大学を中心にして、汎用的LCA手法の開発を行っている。環境負荷のカテゴリーは、表に見られるように広範に及び、環境許容濃度や温暖化ポテンシャルを用いたカテゴリーごとの統一指標づくりを目指している。

フランスではエコビランが鉄鋼メーカーの依頼を受けてLCAの開発を行った。NO_xやSO_x、SSなど細目カテゴリーでの評価を目的としている。

先進的LCAの事例としてはスウェーデン工業連合会などによる方法が知られている。この手法はボルボ社でEPS (Environment Priority Strategies for product design)として設計に導入され始めている⁸⁾。

EPSでは、図-7に示すような各種の素材・材料やエネルギー源、大気ならびに水質汚染物質から土地利用や塗装、溶接作業等に至るまでの環境負荷の原単位ELI (Environmental Load Index)をELU (Environmental Load Unit) 単位で整理し、これをライフサイクルでの使用材料やエネルギーの量、面積あるいは作業点数等と積算集計することでELV (Environmental Load Value) を求めている。

ELIの設定では、環境負荷の回避のために支払う意志のあるコストを中心に、図中央に示したような事項が考慮される。

物質リサイクルは過度に強調すると、「何が本当に地球に優しいのか」を見失う危険性をはらんでいる。リサイクル型からさらに一歩進め、環境・資源保全型製品設計への指標づくりとして、上記のようなLCA開発の努力は今後も大いに推進されなければならない。

7. 環境保全を考慮した製品設計に関連する課題

リサイクルを含め、環境保全を考慮した製品設計に関してはまだ緒についたばかりであり、課題も多い。

これらのなかでは、まず環境保全型設計の普及と高度化およびその評価が上げられよう。このためには実施例を集積するとともに、評価方法を確立しなければならない。評価に当たってはリサイクルの実効性の確保を前提とし、また再資源化段階だけに注目するのではなく、製品の生産・使用・廃棄・再資源化にわたるライフサイクルでの判断が求められよう。このための基礎データの整備が望まれる。こうした点を通じて、物質回収かエネルギー回収かを含め、「何が本当に環境にやさしいのか」を明らかにしていかなければならない。次に望まれるのは環境保全型設計の裾野の拡大である。第1種製品ばかりでなく、他の製品に対しても環境保全型設計の導入を促進するために指針やマニュアル等を整備することが重要であろう。

リサイクルが高度に機能するためには、社会システムの整備とならんで、図-8に示す各段階での技術開発

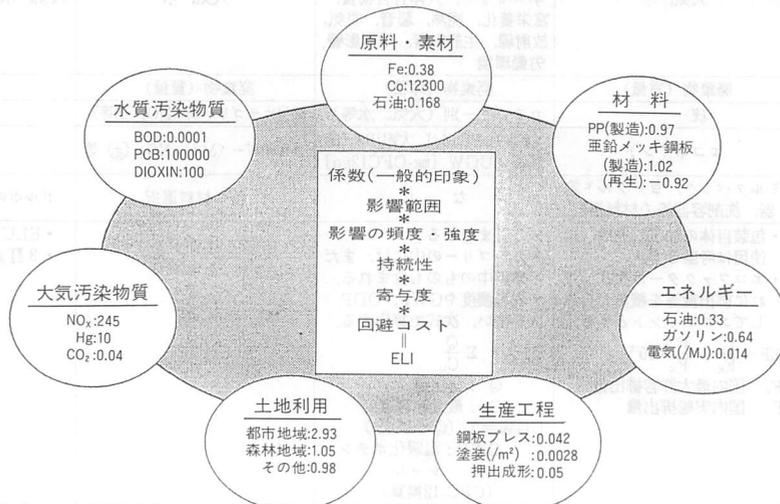


図-7 ELIの例と求め方 (単位: ECU/kg)

