

LCA 手法による環境負荷評価

Evaluation of Environmental Impact by LCA Method

坂村 博康*・宇都野 太*・安井 至*

Hiroyasu SAKAMURA, Futoshi UTSUNO and Itaru YASUI

産業活動によって発生する環境負荷をより包括的に、より定量的に評価する方法として、LCA (Life Cycle Assessment or Life Cycle Analysis) がある。LCA とは、製品が原料採取から廃棄されるまでの全プロセス中にわたって投入される物質、エネルギー量と排出されるさまざまな環境負荷量を算出し、全体的に評価して環境負荷低減を目指すための環境負荷評価の一手法である。LCA の現状と実施方法の概略について述べる。

1. はじめに

近年、産業活動によって生じる環境負荷の低減化が求められているが、そのためにとられた対策がどの程度環境保護に貢献しているか明確でない場合が多い。環境負荷低減のために行った処置がある面では効果的ではあるが、他面では逆に環境負荷を増加させているかもしれない。一方向からの環境影響評価は事態を見誤る恐れがある。産業活動によって生じる環境負荷には海面下の氷山のように直接的には見えない部分が大きく存在している。たとえば、同じ目的に使用する PET ボトルとガラス瓶の飲料容器について考えてみよう。エネルギー消費量とそれに関連する二酸化炭素発生量だけで見ると、確かに PET ボトルの方が環境に対して優れているといえるかもしれない。しかし原料の枯渇性、リサイクル性、廃棄後の土壌汚染などを考慮すれば、どちらの方が環境負荷が小さいかは簡単に判断することはできないであろう。またリサイクルはすべて環境負荷低減につながるとは限らない。リサイクルによって水の使用が増大し、水質汚濁が広がったり、多量のエネルギーを消費することもある。グレードの低い製品となって使用目的が制限されたり、廃棄するまでの時間が短くなるかもしれない。産業活動によって生じる環境負荷影響を評価する場合、もっとも注意すべきことは、表面に現れてくる部分を重点的に評価し、見えにくい部分を無視するのではなく、あるいは評価しやすい部分のみで環境負荷を検

討するのでもなく、地球資源採掘から生産、使用、廃棄までのライフサイクル全般にわたって環境への負荷を評価しようとする心構えである。このような心構えが LCA (Life Cycle Assessment) という考えにつながっていく。

2. LCA 的考え方の基礎

産業活動による環境負荷をより包括的に、より定量的に評価する手法の一つとして、LCA (Life Cycle Assessment or Life Cycle Analysis, 製品のライフサイクルにわたる環境負荷評価) と称する環境負荷評価法がここ数年の間に注目されだしてきた^{1~6)}。LCA とは、製品が製造、使用され、環境中に廃棄されるまでの全プロセスにわたって発生する環境負荷をできるだけ定量的に評価する手法である。すなわち、ある製品が原料採取—生産—使用・消費—リサイクル・廃棄されるまでの一連の過程に生じるインプット量 (資源の投入) とアウトプット量 (環境への排出) を分析して数値化し、環境負荷低減への判断材料にしようとする考え方である (図 1 参照¹⁾)。ここでいう製品とは、工業製品だけでなく、農林漁業、鉱業などの第一次産業生産物も含まれる。またエネルギー産業 (電気、ガスなど) や土木工事、さらに形として生産物がない流通産業やサービス業も LCA の対象とすることができる。すなわち LCA は、理論的にいえば、人間活動によって環境への負荷が生じるすべてのものを対象とすることができるはずである。

LCA は、上述したように、製品のゆりかごから墓場までのライフサイクル全体にわたる環境負荷を検討し、負荷

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

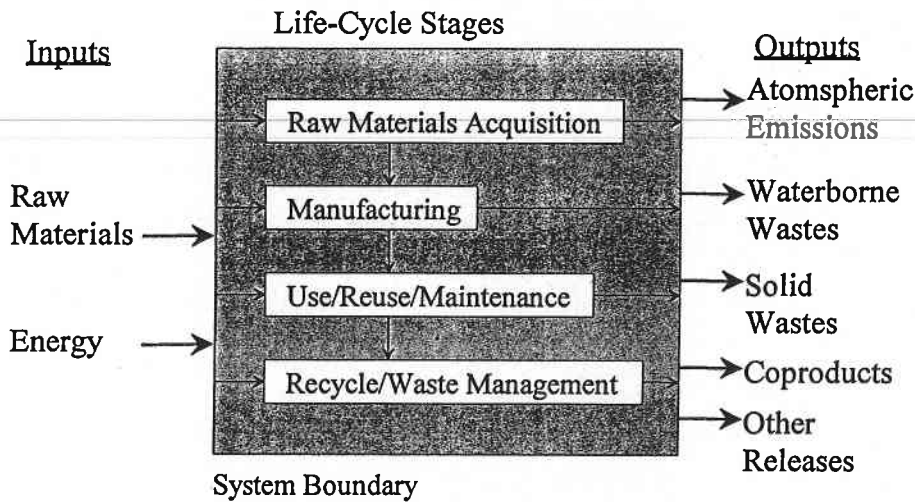


図1 製品のライフサイクルの概念図⁵⁾

の低減対策の指標となることを主目的としているが、企業サイドからみても、消費者サイドからみても有用な環境負荷評価法であると思われる。すなわち企業サイドでは製品設計の判断材料、原料の見直し、製造プロセスの改善、流通機構の改革などの判断材料として、また消費者サイドにおいても、環境負荷の低い製品の選択や使用・廃棄の改善など消費者のライフスタイルを見直す指標ともなり得るのである。前述したPETボトルとガラスびんの比較でも、LCAを用いれば一面的な見方でなく多面的かつ総合的に評価することが可能となるであろう。

3. “積み上げ法”と“産業連関表法”

LCAの解析手法としては、大別して2つの方法がある。一つは個々の製品から得られる各プロセスの生のデータを分析して加えていく“積み上げ法”と称されているものである。もう一つの方法は産業連関表を利用する方法で、ここでは“産業連関表法”としておく。産業連関表は、異なる産業部門間の完成品はもちろん、原材料や中間製品の取り引きを金額にしてマトリックスの形でまとめた表のことをいい、我が国では11の省庁が関係し、5年ごとに作成されている⁷⁾。この産業連関表を利用し、財貨の流れをエネルギーに換算することによって対象としている製品にかかわるプロセス中のエネルギー消費量を算定して、二酸化炭素排出量やその他の環境負荷量を推算しようとする考え方である。“産業連関表法”は簡便であり、エネルギー消費量およびそれにほぼ対応関係のある二酸化炭素排出量にはかなり有効な方法といえるが、その他の環境負荷項目は何らかの補正係数が必要となり、十分注意して行わないと実際とかけ離れた結果となる恐れがある。また現在の産業連関表に取り上げられている部門分類数が最大でも400強に

すぎず、類似の製品は推測値しか求めることができないのも欠点の一つといえよう。しかしすべてのプロセスについて一度に計算でき、簡便的に結果をだそうとするなら、大いに有効な方法といえる。産業連関表を用いて自動車⁸⁾や建築⁹⁾によるエネルギー消費と炭素排出量の環境負荷評価の研究が発表されているが、その他の負荷項目は入っていない。産業連関表を用いた総合的な研究が望まれる。“積み上げ法”の実施手順の概略は後述するが、“産業連関表法”の実施方法は参考とする文献があまりなく、詳細が不明なため、今回は省略する。なおLCAといえば、少なくとも海外においては、“積み上げ法”を指しているのが一般的である。

4. LCAの歴史と現状

LCAの研究には、対象としている製品に関係している企業から得られる情報が絶対に必要である。したがって、公的機関、団体や大学などと企業が共同作業という形でLCAの研究を進めていくのが一般的な方法である。LCAに関連した研究としては、1969年コカコーラ社の委託によるフランクリン研究所の飲料容器に関する環境影響評価の研究が初期のものとして知られている。その後地球環境に対する関心の高まりとともに本格的なLCA研究が行われるようになってきた。LCAの歴史は日本エコライフセンターによって表1のようにまとめられている³⁾。非常によく作られているので、そのまま示した。

LCAの研究はヨーロッパ諸国(オランダ、スイス、スウェーデンなど)やアメリカで発展してきた²⁾。オランダではオランダ環境省の支援のもとにライデン大学環境科学センターがLCAの実施方法のマニュアルを作り、製品のライフサイクルにわたる資源使用量、エネルギー使用量、

表 1 LCA 研究の歴史³⁾

年	事 柄
1969	MRI (現フランクリン研究所) はコカコーラ社の委託で飲料容器に関する環境影響評価研究を実施し、LCA 研究の基礎を築く
1970~75	エネルギー消費を中心として環境影響評価が行われ、米国環境保護庁 (EPA) で REPA としてまとめる
1978	西ドイツで商品のエコラベル制度を導入
1979	SETAC 設立
1981	(社)化学経済研究所から新素材のエネルギー分析の報告
1984	スイス・連邦内務省環境局 (BUWAL) が研究報告書「包装材料のエコバランス」を発表
1985	EC 環境委員会は液体食品容器指令 (EC Directive 85/339) を可決
1988	米国でゴミが大きな社会問題化し、REPA が見直される
1990	EPA、WWF などの主催による LCA フォーラム開催 米国及びベルギーで SETAC と P & G の主催によりシンポジウムを開催 Franklin & Associates 社からポリエチレン製包装材に関する報告書 スミス・ミグロスからエコベースに関する報告
1991	オランダ・ライデン大学・環境科学センターが LCA 手法マニュアルを作成 SETAC から LCA の方法論を発表 (社)プラスチック処理促進協会においてプラスチック製品の LCA 評価 日本生活共同組合連合会が容器・包装材について研究
1992	日本 LCA 研究会発足 環境庁が日本エコライフセンターに委託し「環境への負荷の評価に関する予備的検討」を実施 (社)化学経済研究所が 1981 年研究の見直しに着手
1993	エコマテリアル研究会発足 科学技術庁・エコマテリアル研究プロジェクトで発電プラントや家電製品などの材料に関するエコバランス研究を開始 ISO・TC 207 の会合をカナダで開催 (社)産業環境管理協会に LCA 分科会発足 環境庁が LCA 等に関する国の支援策及び事例の研究を開始 ニューマテリアルセンター・エコマテリアル研究開発促進のための調査委員会発足

水質汚濁物質排出量、大気汚染物質排出量、酸性化原因物質排出量、固形廃棄物排出量などの環境負荷項目に関してデータベース化し、LCA 用汎用ソフトを開発している。スイスではスイス連邦内務省環境局 (BUWAL) が国内最大の生協、ミグロスの協力のもとに容器・包装材の LCA を行い、それに関するデータベースを開発、公開している。スウェーデンではスウェーデン環境研究所、スウェーデン産業連盟、ボルボ社の共同で LCA に似た EPS (Environment Priority Strategies for Product Design) という環境インパクト計算システムを開発している。アメリカではアメリカ環境保護局が、バツェル研究所およびフランクリン研究所と共同で LCA 手法のガイドラインをまとめている。日本でもここ数年の間に地球環境問題を重視する企業の増加に伴って LCA の取り組みが活発になってきた。プラスチック処理促進協会では石油製品の LCA を行っており、その他化学経済研究所、日本生活共同組合連合会、日本エコライフセンターなどでも、各企業の協力を得て LCA の研究を進めている。現在、日本 LCA 協会お

よびビールビンに関連する製造から販売までの各企業が協力してビールビンの LCA を構築中であり、当研究室でもその手助けをしている。LCA の実施手順を説明する前に、ビールビンを例題として LCA 的な見方で検討をしてみた。

5. LCA 的な見方の事例

積み上げ法による LCA の実施手順は幾つか提案されているが、その概略を述べる前にビールビンを例題として LCA 的考察をしてみたい (図 2 参照)。ビールビンの LCA を行う目的としては、たとえば、改善すべき部分の明確化と改善状況の確認、同じ目的として製品化されているワンウェイビンやアルミカンの比較などが考えられる。一般的に LCA は目的によって結果や評価が異なってくる。したがって始めに LCA を行う目的を明確化しておかなければならない。次に基準とする製品を決めなければならない。ここでは製品単位としてリターナブルの 633ml の大ビン一本とする。すなわちリサイクル可能なビール大

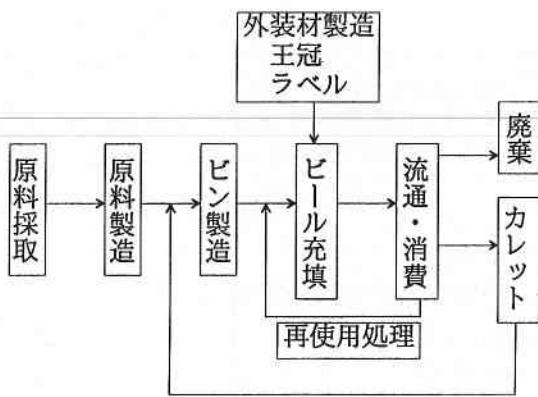


図2 ビールビンのライフサイクルのフローチャート
(ポリケースの部分は省略)

ビン一本の製造、流通・使用、廃棄までの全プロセス中に発生するさまざまなインプット量とアウトプット量を調査することになる。ビンの主原料のうち、珪砂、ソーダ灰、石灰石は採掘、精製そして工場までの輸送も調査項目となるであろう。排煙脱硫装置によって出てくるぼう硝はガラス原料として再び製造ラインに還元される。したがって固形排出物として処理することはできない。カレットは工場内で発生するものと市中で回収されるものとはインプット量もアウトプット量もかなり異なると予想され、区別して調査しなければならないであろう。ガラス製造時におけるカレット比も重要な問題点となる。原料中のカレット量が多いほど投入エネルギー量が少なくなるが、カレット回収などの他のプロセスで負荷が増えると予想される。またカレット投入量の増加により製品の歩留まりも悪化するかもしれない。ガラス溶解タンクのレンガは少しずつ消耗していく。ビン一本あたりに消耗するレンガの量もデータとして必要である。また製ビン装置の寿命も算定する必要がある。さらにラベルと王冠の製造プロセスから発生する環境負荷量も考慮しなければならない。環境負荷に敏感に反応するプロセスはビンのリサイクル回数と洗ビン工程における水使用量であろう。リサイクル回数によってLCA結果が大きく変わると推測され、リサイクル回数の算定は重要である。物流関係では、運搬、販売、ビン回収方法などが問題となる。運搬にはポリパレットおよびポリケースが用いられているが、ラベルや王冠と同様、製造プロセスから発生する環境負荷量も必要データである。さらにその使用回数と廃棄後のプラスチックのリサイクル率も調査しなければならない。ビールは冷やして使用するものであるから、その保存状態（冷蔵庫の電気量）も考えるべきかもしれない。プロセス間を繋ぐ輸送も当然考慮の対象となる。輸送道具（自動車、船、コンベアー、パイプラインなど）の償却、輸送距離、単位距離移動するのに要するエネル

ギー量、排出ガス量などのデータも必要である。上記のように検討しても図2はすべてを網羅したLCAの流れ図ではなく、枝分かれの行き先がまだまだ存在している。評価対象範囲の境界線をどのあたりに引くかということも大きな検討課題となる。

LCAの結果は固定したものではない。データは入手場所や方法（特定の工場、地域や国の平均値など）によっても異なるものであるから、データの出所や数値の代表性も注意しなければならない。また入手した年度によってもデータは変化する。たえず新しいデータを取り入れ、古いものとの比較も重要な評価項目となるであろう。さらに同じデータを使用しても、研究母体などの違いにより解析方法が異なれば評価も異なってくる。このように、ビールビンのような比較的単純な製品でも、LCAを実施するには非常に複雑な調査と解析が必要であり、大きな困難が伴うことが想像できる。

6. LCAの一般的な解析方法

それではどのような手順でLCAを実施していったらよいか。方法論はいくつか提案されているが¹⁻⁶⁾、それらにほぼ共通した部分を中心にして検討してみたい。一般的にLCAは、(1)目的の明確化 (Goal Definition)、(2)範囲の設定とデータ収集 (Scoping and Inventory)、(3)データの解析 (Impact Analysis)、(4)総合評価、改善方法等の検討 (Evaluation, Improvement Analysis)、の四つのステップを踏んで行われる (図3参照)。以下順に概観してみる。

(1) 目的の明確化 (Goal Definition)

前述したように、LCAは目的によって解析結果や評価が異なってくる。したがってまず第一段階として、対象としている製品のLCAの目的を明確にしなければならない。たとえば、森下は(1)使用目的が同じ複数製品の比較、選択、(2)製品およびプロセスの改良効果の把握、(3)負荷低減の目

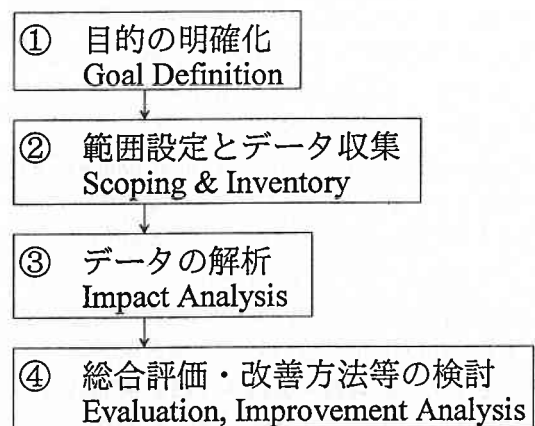


図3 LCAの一般的な実施方法の概念図

標値を達成するためのライフサイクルにわたるチェック、(4)改善部分の抽出および改善すべき優先順位の決定、(5)製品にかかわる各主体間のコミュニケーションの促進、などを取り上げている。その他に、(6)生活によって発生する環境負荷の低減のための指標、さらに多数の製品のLCAが解析されれば、それらを積み重ねることにより(7)各種産業の環境負荷量の予測、(8)全産業の地球環境負荷量の予測、(9)全負荷量に対する当該製品の負荷量比の予測など色々な目的に適應でき、地球規模での環境負荷評価などに使用できるものと期待される。

(2) 範囲設定 (Scoping) とデータ収集 (Inventory)

まずデータを収集する前に製品の単位を決める。たとえばセメントや板ガラスのような素材類であれば製品1トン、飲料容器なら1リットルのPET容器、自動車なら2000ccの乗用車1台、テレビなら20インチのテレビ1台のように設定する必要がある。次に評価対象範囲を設定し、どこまでデータを収集すればよいかを明確にしなければならない。対象としている製品のプロセスを最後まで追い求めるのが理想的なLCAと言えるであろうが、実際には不可能であろう。たとえばエネルギー源である電力を考えてみよう。製品を製造するには電力が必要であり、発電には発電所や重油が必要である。したがって製品に投入される電力のプロセスを追い求めると、発電所の設置、維持、寿命、またエネルギー源である重油や石炭にかかわるデータが関与し、さらにコンクリートのようなダムや火力発電所の構成材料のデータもかかわってくる。その他のエネルギーや原材料

も同様に考えると膨大なデータ量となり、製品にかかわるすべてのデータを集めることはほとんど不可能であろうことが想像できる。また目的や評価対象範囲の設定の仕方によっては必要としないデータも出てくるであろう。したがってデータを収集すべき範囲を明確に設定することが必要となる。

範囲を設定してからデータ収集になるが、設定した範囲内のデータがすべて収集できるとは限らない。実際には完全な状態でデータが得られる可能性はほとんどない。データが直接得られなかった部分に対しては、それに関連するデータを収集解析して推算値を出すことになる。もちろんのようにして推算したかも明らかにしておかなければならない。LCA結果に大きく影響を与えないと予想されるならば、空欄にしておく方がより客観性が保たれることもあるであろう。前述したように、データの入手場所、入手時期、データの精度(代表性)など注意すべきことは当然である。

(3) データの解析 (Impact Analysis)

収集したデータは、一般的に環境負荷項目ごとに分け、一覧表の形で表示する。一覧表はLCA実施者によって異なり、一般的な規格はない。ときにはツリースタイルで図式化することもある。一覧表の一例を表2に示した。環境負荷項目としてどのような項目分類をするかは統一の見解はなく、LCA実施者の判断によっているが、一般的には大気汚染物質、水質汚濁物質(健康項目)、水質汚濁物質(生活環境項目)、オゾン層破壊物質、温室効果ガス、固形

表2 データ収集一覧表の一例²⁾

環境負荷項目	個別項目例	単位	資源採取	輸送	原料製造	中間製品製造	加工	組立て・製造	輸送・頒布	使用	回収・解体	リサイクル	廃棄	合計
大気汚染物質	NOx													
	SOx													
	CO2													
	ばいじん													
水質汚濁物質	COD													
	SS													
	油分													
	フェノール													
枯渇性資源消費	シアン													
	石油													
	石炭													
	Cu													
固形廃棄物	Pb													
	Fe													
	エネルギー消費													
	固形廃棄物													
	...													

廃棄物、枯渇資源投入量、再生資源投入量などに分類している。この環境負荷項目の中に個別項目がある。たとえば大気汚染物質では、SO_x、NO_x、ばいじん、フロンなど、水質汚濁物質では、SS (Suspended Solid)、COD、BOD、油分、シアン、ベンゼンなどの有機物質、カドミウム、ナマリ、クロム、砒素などの有害重金属、枯渇エネルギー資源では、石油、石炭など、再生資源では、木材、水などがそれぞれの範疇に入る。

このような表をもとにして環境評価を行うことも可能ではあるが、一般的には個別項目に重みづけ係数を乗じて集計している。たとえば環境負荷項目の大気汚染物質の場合、SO_x、NO_x、ばいじんなど各個別項目の環境に対する影響は異なり、有害元素でもCd、Pb、Cuなどを同レベルで評価することはできない。したがって調査したデータ値そのままよりも重みづけ係数を掛け合わせた値を使用する方がより明確な環境影響評価ができると考えられている。重みづけ係数は規制されている基準や許容限界の逆数などをもとにして算出することが多い。国による規制基準の違いから、研究母体によって重みづけ係数が異なることは十分有り得ることである。

(4) 総合評価・改善方法等の検討 (Evaluation, Improvement Analysis)

以上の手順により算出された結果をもとに、最初の目的に沿って LCA による製品の環境負荷評価を行う。LCA は環境負荷低減対策の有効な手段の一つとなり得るものであるが、データ収集の方法やプロセスによって得られる結

果が異なり、現在基準化した LCA 解析法はない。したがってある研究母体が出した結果を別な目的のためにそのまま用いて評価すると、実際と大きくずれるという危険性もある。既存の LCA を用いようとするならば、どのような手法で行われたのか十分に注意する必要がある。

7. 当研究室の LCA に対する基本姿勢と現在の取り組み

LCA を行う目的はいろいろ考えられるが、当研究室では LCA は地球環境影響評価の有効な手段の一つと考えており、できるだけ簡略化した手法で多くの製品について LCA を行い、それらを積み重ねることでより明確な地球環境影響評価を行うことを目指している。不備な点は多々あるが、現在行っている手法の概略を示す (図4 参照¹⁰⁾。

製品が原料から完成するまでのプロセスを一つのユニッ

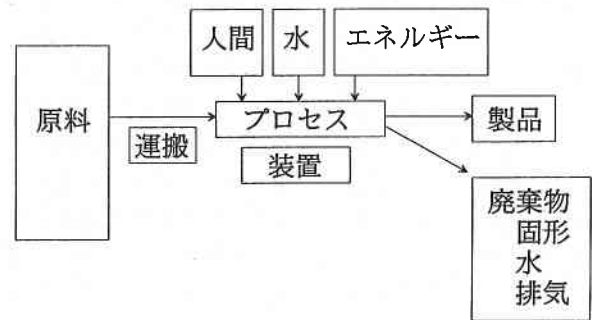


図4 ユニットプロセスにおける物質・エネルギー収支のテンプレート

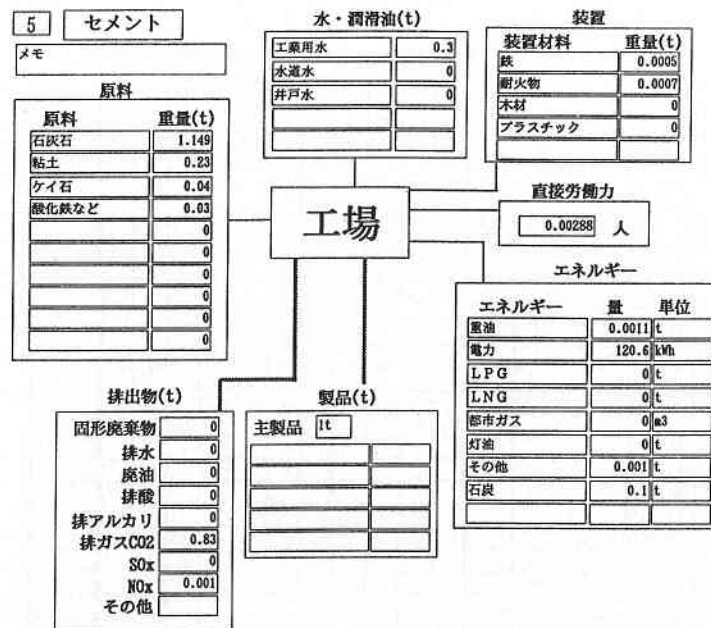


図5 物質・エネルギー収支のテンプレートの実施例 (セメントを例とする)

トとし、そのプロセスに係わるインプット量、アウトプット量を調べる。その前後に係わる部分は別のユニットとして完全に切り放す。すなわち原料も一つの製品とし、原料の製造に関しては別ユニットとして当該製品と分離して解析する。同様に、重油、電気などエネルギーや水に関しても別ユニットとする。製造後の流通・使用、さらにその先の廃棄に関する部分も別ユニットとする。ただし製造装置の寿命は考慮する。そのまま廃棄されずになんらかの形で再利用されるものは排出物とせず、副製品とする。なお当研究室ではマンパワーもインプット量に入れている。環境負荷項目の重みづけは客観性を失う恐れがあるため、当面行わない予定である。

当研究室の手法により実際に LCA を検討した例としてセメントの結果を図 5 に示す¹⁰⁾。セメントを 1 トン製造するときのインプット量とアウトプット量を示してあるが、原料である石灰石、粘土などエネルギーである石炭、重油、電気など、また再生資源である工業用水を製造するときのインプット量とアウトプット量はすべて別ユニットであり、セメントの LCA プロセスには入れずに切り放す。ただし製造装置の寿命と修理は考慮し、セメント 1 トン製造するためにどの程度の物質が失われるかは算定した。このようにして単純化したプロセスの形でデータ収集を行い、できるだけ多くの製品について解析をする。ある製品に関する LCA の実施は、その製品に関連するプロセスを積み重ねる方法により可能であると考えている。この方法で注意することは、データを重複して入力することである（とくに輸送のデータは注意しなければならない）。この手法を用いて、比較的単純な素材産業について調査し、さらに次の段階としてより複雑な製品へと調査を進めている。解析した結果の数はまだわずかではあるが、構築中のデータベースに順次入力している。まだ試験段階であり、改良す

べき点は数多く存在しており、現在、検討中である。

8. ま と め

対策を行うことなく現在の状態で環境負荷が増加していくと、将来の地球環境はどのような状況になるのであろうか。また対策を行えば環境負荷をどこまで低減できるのだろうか。このような問いに答えるには、LCA が必要条件となる。本格的な LCA の研究はその緒についたばかりであり、まだ課題が数多く残っている。しかし現状のまま人間活動が進めば、近い将来に人類の生存が危ぶまれる地球環境となることが予想される。環境負荷を低減させるためには LCA は不可欠な研究の一つであり、できるだけ多くの製品に対する LCA の実施が切望される。

(1999年3月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 森下 研, 産業と環境, 1993, p 38-41
- 2) 日本エコライフセンター編, 環境への負荷の評価に関する予備的検討, 1993, p 16
- 3) エコマテリアル研究会編, 日本における LCA 研究の現状と将来の課題, 1994
- 4) プラスチック処理促進協会, プラスチック製品の使用量増加が地球環境に及ぼす影響評価報告書, 1993
- 5) EPA (Environmental Protection Agency, U.S.A.), Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles, 1993
- 6) I. Boustead, Eco-balance methodology for commodity thermoplastics, A Report for the European Centre for Plastics in the Environment, Brussels, 1992
- 7) 総務庁, 平成 2 年 (1990) 産業連関表 (速報), 1993
- 8) 森口祐一, 近藤美則, 金属, 1993, p 48-54
- 9) 酒井寛二, 漆崎 昇, 環境情報科学, 21, 1992, p 130-5
- 10) 安井 至, 金属, 1993, p 42-7