

地球環境特集 特集記事3

LCAの現状と課題

原田幸明

Kohmei Halada

金属材料技術研究所 エコマテリアルチームリーダー

Current Stage of Life Cycle Assessment

1 はじめに

製品や材料の環境負荷を評価する適切な方法としてLCAが注目されている。LCAはエネルギー分析を技術的背景に持ちながら1960年代の末期に飲料容器の環境影響評価方法として誕生したが、現在は広範な製品などの環境負荷を科学的に評価する方法として定着してきつつあり、ISO14000番台として国際標準化の作業が進められている。ISOでの検討の詳細は他にゆずるとして、ここでは、LCAの概略、方法論上の課題と到達点を述べ、さらに材料への適用の可能性について言及してみたい。

2 LCAの概要

LCAとは、一口で言えば、ある製品について、そのライフサイクルの始めから終わりまで（原料の取得から製造、加工、運搬、使用、再生、廃棄、処理・処分にいたる一生）の間に発生する環境への負荷（資源・エネルギー消費量、固形廃棄物発生量、大気汚染物質排出量、水質汚濁物質排出量など）を定量的に調査・分析し評価する方法である。従来の環境負荷分析では、ある製品の使用時なら使用時、廃棄時なら廃棄時のみと限定した条件での負荷が議論されていたのに対し、ある製品なら製品の係っている総ての負荷を考慮して評価しようとするものであり、まさに、現在の広範に広がった環境問題に対応しうる評価方法である。LCAを概念的に示したものが図1であり、その目的と対象を設定するgoal definitionと、インベントリー(Inventory)、インパクト分析(Impact Analysis)、解釈(Interpretation)の3つのフェイズにより構成される。

2.1 Inventory

Inventoryでは、製品が原料から製造・加工され輸送・頒布されて使用・メンテ・再使用され、リサイクルもしくは廃棄されるまでのシステムのフローを明らかにし、それぞれの要素工程での、エネルギー・資源消費量、大気汚染物

質排出量、水質汚濁物質排出量、固形廃棄物発生量などの環境負荷を調査する。図2にアルミニウム缶のInventoryの例¹⁾を示した。アルミニウムの直接的な原料であるアルミナやボーキサイトのみならず、岩塩や石灰石などもシステムの流れに入ってくるため調査の対象となる。もちろん製品や廃棄物の輸送も調査対象となっている。このInventory Dataは全ライフサイクルにわたって積算される。図3は図2のデータをもとにアルミニウム缶をリサイクルしないですべて処分した場合と75%がリサイクルされた場合のそれぞれの環境排出物の積算である。積算に当たっては、Inventoryでi工程でのj要素の環境負荷値を x_{ij} 、i工程の生産物が次工程に引き渡される量を m_i とすると、j要素の総環境負荷 X_j は、 $X_j = \sum x_{ij} \times m_i$ (1) で表される。図4のようにリサイクル等のループのある場合も同様であり、点線の中で

$$X_j = X_{j,A} \times m_A + X_{j,B} \times m_B + X_{j,C} \times m_C + X_{j,D} \times m_D + X_{j,E} \times m_E + X_{j,F} \times m_F + X_{j,H} \times m_H \text{ (2)}$$

のようになる。

2.2 Impact分析

こうして得られた値は各負荷要素毎に持っている数字の意味や重みが異なり、それだけでは比較や判断することはできない。Impact分析ではこれらの数値を解釈しやすいよ

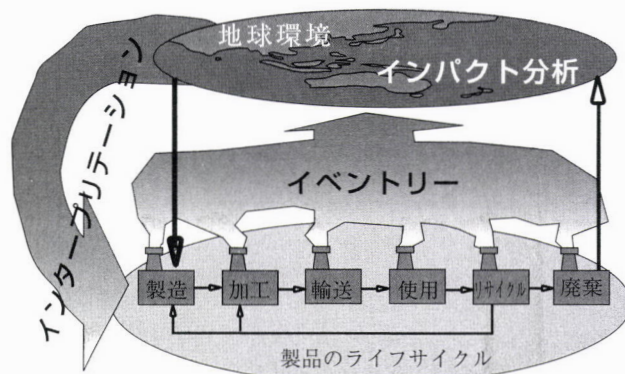
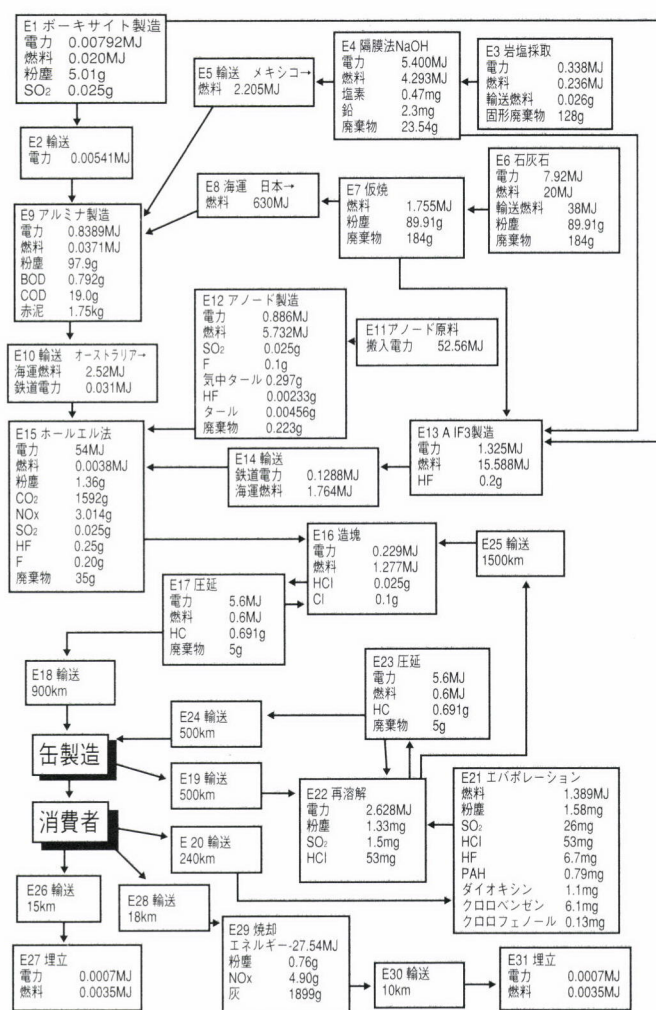


図1 LCAの3つのフェイズの概念図

図2 アルミニウム缶のインベントリーツリーの例²⁰⁾

うに整理し、その影響を評価する。Impact分析の方法に関しては現在の時点では定式化されたものはなく、さまざまな評価方法が目的に応じて採用されている。

代表的な方法には、以下の3つがある。

- Classification (分類)：環境影響のカテゴリー毎に分類
- Characterization (特性分析)：物理学、化学、生物学、毒性学などの知見を活用してカテゴリー全体の影響を評価
- Normalization (重要度分析)：対象システムのもたらす影響が実際環境においてどの程度重要度を有するのかを分析

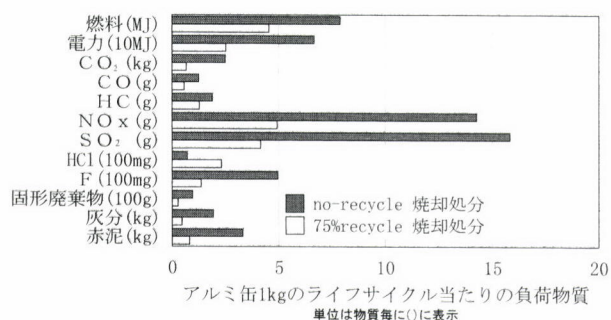


図3 アルミニウム缶のインベントリー積算の例

その中でもよく行われている方法がClassificationとCharacterizationの組み合わせである²⁾。この場合、環境負荷要素 X_k は「地球温暖化」「酸性雨」「オゾン層破壊」等のように影響項目 k 毎に分類され、それぞれの項目 k について各負荷要素毎に与えられた影響因子 $f_{k,j}$ を用いて、

$$k\text{項目の環境影響} = \sum X_j \times f_{k,j}$$

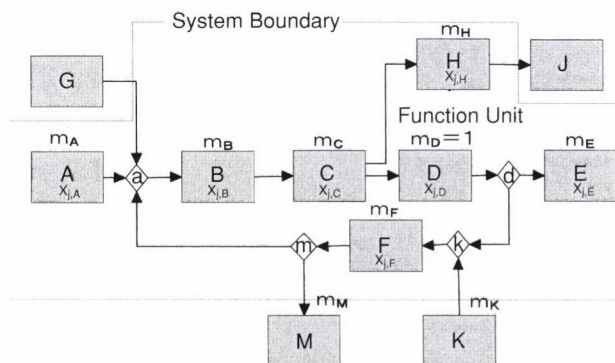


図4 インベントリーツリーの基本例

A,E,G,J,K,M: material, B,C,D,H,F: process, a,d,k,m: select, 点線で囲んだ部分: システム境界、Dの単位操作を規準値(=1)とすると、Dの単位操作(消費・使用も含む)の機能がFunction Unitになる。

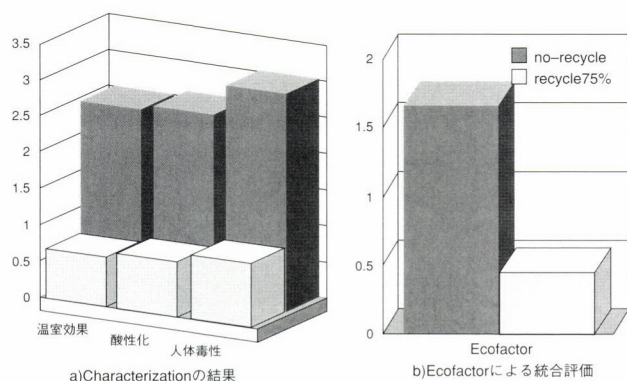


図5 環境影響評価・解釈の例
縦軸の数値は比較のための相対値

としてあらわされる。ここで、影響因子 f_{kj} があらかじめ定義されていなければならずガイドも検討されているが³⁾、現在では、国や研究者によっての任意性が大きい。

図5のa)は先の結果をCharacterizationして示したものである。Inventoryテーブルの段階(図3)ではリサイクルによりHClの増加が認められたが、Characterizationによって、温室効果、酸性化、人体毒性という点では共通に負荷要素全体での削減の影響が大きくHClの増加は無視できることがわかる。Normalizationは最近登場した概念であり、対象とする製品の生産や消費に伴う環境負荷がその地域での全排出量や環境容量に対してどのくらい影響するかを表現しようとするものである。手法的にはまだ未確立であるが、例えばアリゾナの砂漠でのSOxと新宿でのSOxをどのようにして比較するかなど工場立地による違い等を加味できる手法として期待できる。

2.3 Interpretation (解釈)

Interpretationでは、その名のとおりImpact分析の結果を解釈する。以前には、この段階はImprovement分析と呼ばれ、これらの結果を用い材料の選択や設計、運用の方法、輸送、廃棄の方法などの変更による環境負荷改善の方向を分析するとされていたが、システム境界以外の価値判断の領域が入ってくることを排除し、Inventory分析のみの結果も対象として、客観的な分析の解釈の方法を確立していく方向に変わってきている。具体的な方法はむしろこれからの課題となっているが、その方法として、Valuation(統合数値評価:各影響カテゴリーや負荷をランク付けもしくは加重付けすることによって影響全体を評価)がある。その中でも地理的境界内部(地球全体、地域、国など)の環境容量を用いて加重付けをするEcofactor法がしばしば用いられる。例えば、オランダ全土ならオランダ全土のj項目の環境容量を G_j 、現時点での対象領域の負荷量を g_j とすると、 $Ecofactor = \sum x_j \times (1/G_j) \times (g_j/G_j)$

となる。図5b)は、先の結果をオランダの環境容量データ⁴⁾をもとにEcofactorとして算定したものである。この場合一目で

リサイクルの効果が見て取れるようにEcofactorはLCAの結果を簡単に解りやすく表示するが、そのもととなる環境容量が日本や地球規模に対して求められていない等の問題が残っている。また、ValuationをImpact分析の一部ととらえる議論もあり、まだLCAの基本的枠組みに関する議論は山積している。

2.4 システム境界とGoal Definition

これらの3フェーズを実行する前提としてLCAの内容を決める最も重要な過程がGoal Definitionである。ここでは、評価・解析の対象を決め、比較する際の機能単位Function Unitと解析の対象とする領域の範囲System Boundaryを定める。Function Unitは、例えば飲料容器なら、「〇〇mlの××飲料を入れておく」機能というように定めるもので、比較対象の同一性を規定する。System Boundaryは比較の対象となるプロセスの領域や環境負荷項目の範囲である。LCAでは、これらは解析・評価の目的の違いで適当に設定することを許しているのが大きな特徴である。すなわち、LCAは手続きが存在しそれに従っていくことで解が得られる手順型の評価手法ではなく、目的に従属して手続きも変化するgoal-orientedの評価システムなのである。

3 環境パフォーマンス・ツールとしてのLCA

LCAは様々な環境負荷評価のなかでも製品の流れという動的な視点からの関連付けを行い、かつライフサイクル全体を範疇に置く、対象物指向の包括性の強い分析である。それゆえ、LCAは製品の製造・販売・消費を中心に動いている現代社会においては様々な利用方法が存在する。表1にLCAの用途を列挙した。

複数製品の比較は、包装材料の選択など古典的に用いられてきた⁵⁾用途であり、同一機能の製品をLCAで比較してより環境負荷の少ないものを選択しようというものである。使用・処理条件の比較は、製品や設備・システムの使用方法や、使用後のリサイクル方法などを比較する。先に紹介したアルミ缶の例は、リサイクルシステムの有無を比較した好例である。プロセス改善点の抽出は同一機能の複数対象の比較ではなく、ある製品に対する単一のプロセスをLCAで解析し環境負荷の比重の大きい部門を抽出する使い方である。これは、LCAのひとつの応用型といえる。製品改良効果の比較は、同一対象の改良前、改良後を比較するやり方であり、製品やプロセスの改良効果を定量的に把

表1 LCAの用途

・複数製品・プロセスの比較
・使用・処理条件の比較
・プロセス改善点の抽出
・製品改良効果の比較
・エコラベリング、グリーン調達 の指標

握・表現する際に用いる。今後の活用の方向として注目されるのは、エコラベリングやグリーン調達への利用である。エコラベリングもISO14000シリーズの対象とされており、幾通りかの方法が検討されている⁶⁾が、そのなかのタイプⅢ（第三者認定による定量的ラベリング）ではLCAを用いる事も検討されている。また、製品やサービスの購入時に環境への負荷の少ないものを優先購入しようとするグリーン購入⁷⁾においても自発的なLCAの結果の表示が求められる方向に向かっている。

LCAは一見客観的な比較や絶対的規準を与える評価方法のように捉えられる場合が多い。しかし、先述したように、LCAはgoal-orientedな評価方法であり、絶対的な規準や指標を与えうる性格のものではない点に注意しておく必要がある。すなわち、LCAでは目的によってシステム境界も規準の取り方も異なっているため異なるLCA間の結果は比較不能であり、科学的に比較が可能となるのは同一の目的にそったLCAの手続きの中でしかありえないことを留意しておくべきである。このような限界性を持ちながらなぜLCAが広く使われるようになったのかという点が重要であり、それは、従来「環境にやさしい」と主観的にしか表現できなかった環境負荷低減の努力を定量的に表現できる手法だからである。

このようなLCAの性格を現時点で最も生かしている使い方は、「製品改良効果の比較」をより目的を鮮明にさせた「環境負荷低減努力の表現ツール」として用いることである。即ち、LCAによる比較や評価結果に基づき選択するのではなく、あらかじめ「環境負荷低減に貢献できる」と期待した製品の改善やプロセスの選択、システムの提案を、LCAによって定量的に裏付けするという使い方がそれである。例えば、白紙の状態で車のバンパーについて複合材料と亜鉛メッキ鋼板を比較するのではなく、それなりに選択の方向があり、それをLCAで環境負荷の面からバックアップするというやり方である。この場合には何をどこで比較するかが明確でありgoal-orientedのLCAの性格と合致している。今や、この方法は、製品や部品の選択のみでなく、廃棄物処理プラントの提案や電気自動車開発への国家的資金補助に対する議論などの政策規模でも見られるようになっており、サービスやマネジメントにLCAを拡張しようとの動きとあいまって、今後ますます多用されるようになってくるものと思われる。

もちろんこの場合には「LCAで評価したから正しい」ということは許されず、LCAの内容が他の選択に基づくLCAと競われてその適切さを問うかたちで議論が深化され、それによって初めて選択の正当性が認められることになる。日本ではまだこのような競合関係のLCAは行われていないが、欧米でLCAが多用されている背景には、このようなパフォーマンス性に富むツールであることがあることに注意

を払っておく必要がある。

4 LCA methodologyの未解決点

ISOで国際標準化の検討が進んでいるが、それはあくまで手続論的な標準化であり、評価手法としてのLCAにはまだ発展途上の課題が残っている。そのなかの大きなものは、1)Impact分析方法、2)Inventory tree表記法、3)リサイクルの取り扱い、4)Allocation、5)Data Qualityの各問題である。Impact分析については、前に簡単に触れたので、ここでは、主としてInventoryに係る後の4者について述べる。

4.1 Inventory Treeの表記法

Inventory Treeの表記法の問題とは、図4のようなInventoryの記述において基本となる共通の表現様式が無いことである。この問題はあまり明確に意識されず単に統一表記のない不便さとして扱われている場合が多い。しかし、実はシステム境界や後に述べるAllocation問題などを適確に表記すべき手続きであり、システムの捉え方の本質に係る。一般に、化学プロセス工学的手法がこれまでInventory分析の中心となっていたため、類似した表現方法が採られる場合が多い。節点をProcess、Material、Select、Branchの要素に類別しこれら要素の操作量とマテリアルバランスでフロー量とシステムを記述する提案⁸⁾も基本的にはこの枠内である。

しかし、LCAで対象とするシステムの場合は、このような量の引渡しよりも質の引渡しサブプロセス間で行われる場合が多い。例えば、1tの溶銑が粗鋼となり圧延され薄板となってメッキ鋼板へと処理されていく場合、分留りなどの量的な変化よりも材質や形状などの質的転換が問題である。この質的転換に注目した新たなプロセス記述手法の確立が望まれる。

4.2 リサイクルの問題

LCAではよくリサイクル性を評価することが期待される。しかし、現在のLCAでは同一製品にリサイクルシステムを導入することのメリット、もしくは、同一機能の製品をリサイクル型に転換することのメリットは表現しうるが、ある材料や製品がリサイクル性に富むか否かを判定することはできない。

このことは、LCAの分野で「Closed-loop Recycleは容易に取り扱えるがOpen-loop RecycleではAllocationの問題が生じる」と表現されていることと同一である。ここでclosed-loopとは図4でM,Kを除外しFのみで総てシステム境界内部で循環する場合であり、Open-loopとはMのようにシステム外部に取り出されてカスケード利用や転用のある場合を指す。システム内部に総て含まれるclosedの場合問

題無いことは自明であるが、openの場合は系外との量的および質的なやり取りが問題となる。リサイクル性はこのリサイクルに伴い系外部に持ち出さるもの(M)、および系外部から補給せざるを得ないもの(K)のフローをこそ問題とするのであり、そこをAllocation問題等として解析者が自己定義するのでは自己撞着に陥ってしまう。リサイクルを議論する場合には、あくまでカスケードリサイクルがある場合も含めてシステム境界内部に解析対象を入れる必要がある。具体的には、先述したリサイクル型の転換の解析等では、リサイクルを行わない場合にリサイクル時と同等の二次製品をバージンプロセスで作出すシステムも境界内部に置いて比較を行う⁹⁾等の手法が取られている。一方で、LCAにたよらずリサイクル性を二次地金等の製造で与えられる属性として定義しようとする試み^{10,11)}もある。リサイクル性の考え方は、今後、材料工学の技術者や研究者の積極的な参入が期待されている分野でもある。

リサイクルに関してはもう一つ、“再生アルミのパラドックス”とでも呼ぶべき問題がある。水力を電力源として製錬したアルミニウムを使い捨てて埋め立てる場合と再溶解して使用する場合を比較すると、現在のLCAではリサイクルすればするほど環境負荷は増加してしまう結果になる。これは、水力発電の場合の環境負荷および埋め立ての環境負荷を見積もり評価する方法が確立しておらず、一方で再溶解プロセスの環境負荷は容易に見積もられること、すなわち負荷の数値化の難易度に起因している。リサイクルは、製造や廃棄にともなうある種の環境負荷を別種の環境負荷に変えるシステムとも言えるから、異種の負荷要因間の統合評価が組み込まれていく必要がある。

4.3 Allocation(負荷の配分)の問題

Allocation問題とは図4のCのようにあるプロセスが二つ以上の生産物を提供する場合に負荷をいかに割り振るかということである。このAllocation問題は特に工学系の技術者がLCAの科学性に疑問を呈する部分でもある。LCAでは一般的に負荷のAllocationは、

- 1)生産物間の価値が大きく異なる場合には、価格で比例配分…ダイヤモンドと土砂etc.
- 2)類似した価値の場合は、生産量で比例配分…原油の分留etc.
- 3)一方が発生物等の二次利用の場合は、主産物に総て配分…牛乳と糞etc.

などの方法がとられている。経済変動の影響を受ける1)は言うまでもなく、2),3)の考え方でも方法やプロセスの分割の方法で大きく異なり、場合によっては環境負荷の値が100倍も異なるケースも試算されている¹²⁾。分配そのものの問題の中には、a)要素プロセスの理解が不十分で分割可能

表2 定性的DQI (Data Quality Indicator)

●	Applicability/Suitability/Compatibility :
	データタイプ、取得時期、使用されている技術に関するクオリティ
●	Accessibility : 秘密保護方法、保管方法
●	Consistency : LCAの方法との一致性、プロセス構成との一致
●	Comparability : 異種ソースからのデータとの共用性
●	Representativeness : データの代表性
●	Reproducibility : 他研究者による再現性
●	Stability : 首尾一貫性、時間的再現性
●	Transparency : オリジナルへの遡及可能

なものやデータを一つで扱ったことに起因するものも多いが、b)道路や運河、集中廃水処理のような共用の施設・プロセスの建設や運用にかかわる負荷、c)電気分解の両極での生成物などの分離プロセスなど、アプリオリに分配基準を定義せざるを得ないものも存在しており、LCAの実行に当たっては各プロセスでのAllocationの方法を明確に提示しておくことが、現時点では科学性を保証する唯一の方法である。

4.4 Data Qualityの問題

最近注目されている問題にData Qualityの問題がある。かつてはLCAの基となるInventoryデータは解析者が聞き取り調査などで集めていたが、現在のようにLCAが普及し対象も多様かつ複雑になるにつれて、手工業的なデータの取得では間に合わず、データベースなど様々なかたちで散在している精度やレベルの異なるデータを用いざるを得なくなったことにより、問題意識が強くもたれるようになってきた。データの信頼区間や分散などの定量的な指標はもちろん、表2に例示したような定性的な指標(Data Quality Indicator)が提案されている。しかし、これらをどのように表現してLCAの解析自体の信頼性を表現するかに関しては検討が始まったばかりであり、Inventoryデータの標準的な表記方法にDQIの項を設けて第三者の判断のための情報として整理する¹³⁾という段階であり、方法論として組み込まれるに至っていない。

定量的なData Qualityの例として、図6に伸銅の工程からの水質汚濁物質としてCuおよびZnの生産当たりの排出量の例¹⁴⁾を示した。表だけからは数値的に大きなひらきがあ

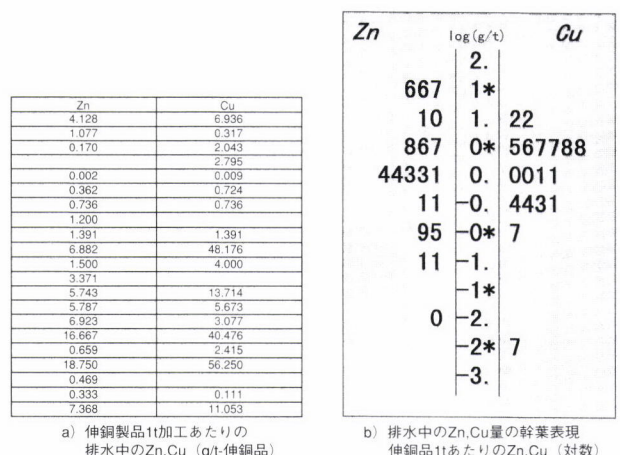


図6 工場の違いによる水質データの分布例

り代表値の取り方に困る。これを対数で表現しさらに幹葉表現¹⁵⁾を用いる事により図のように表され、こうして得られるなだらかな分布から近似的に対数正規分布の平均値 (Zn:2.58g/t, Cu:1.42g/t) を代表値とすることができる。また、その分布の標準偏差を用いれば、信頼性区間も表現可能となり、例えば対数正規分布で85%の信頼区間の値を「上方推定値」としてZn:21.9g/t, Cu:10.7g/tのように併記することにより定量的なData Quality表現にすることもできる。

5 データベースとLCAの改良

LCAは以上のような方法論上の問題に加えて、LCAの実施の際に、1)全領域に渡るプロセスの全体に関する総合的知識の必要性、2)システム全体を貫くデータの扱いや負荷項目に関する一貫性、3)集約し積算する手続きの煩雑さ、4)プロセスの欠落や材料などの識別性の問題など、多くの実施上の問題点が存在している。それらに対して、方法の改良やデータベースの整備が進んできている。

方法的アプローチのひとつは、産業連関表（産業構造の関係をとり引き統計で数値的に表した表）を用いる方法である¹⁶⁾。しかし、現在の産業連関表は、金銭の流れに基づくものであり、これをLCAに用いられるような物流に基づく資源連関表へとする提案もある。問題をInventoryの積み上げを優先した演繹型の方法論の問題に原因をもとめ、逆に環境影響評価を優先させようとする試みもある。Impact指向Inventory¹⁷⁾とでも呼ばれるべきもので、環境影響評価の視点のリストアップ、環境Impact項目の抽出、Inventory分析のフレームの検討、特性分析のフレームの検討、評価フレームの検討という手順ですすめInventoryのデータ収集を環境影響評価に意味のあるものを集中的に行なおうとするものであり、効率的なLCAの実施方法として注目される。

データベースはそのData Qualityを考慮して、Foreground DataとBackground Dataに使い分けて整備されつつある。表3にその違いを示したが、従来からデータベースと言われていたものが後者で、公開されたデータである。一方でForeground Dataは解析対象に即したInventoryデータであり、LCAの主体となるが、重要でなくかつ直接的情報の得られない部分を補うデータとしてBackground Dataを使用しようというものである。

この考え方をさらに進めるとpreliminary LCAの考え方になる。これは、産業連関表や生産統計などから得られたData Qualityの低いデータを先述した上方推定値とともに

表3 データの種類

Foreground Data	Background Data
● 主要対象のデータ	● 未知部分のデータ
● 事業所・ライン毎のデータ	● 業界平均等
● 計測データ	● 産業連関表等も使用

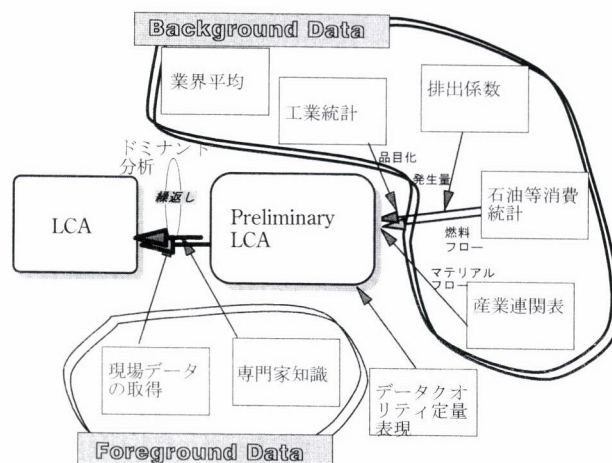


図7 データベースを使い分けたPreliminary LCAの概念図

用いて粗いLCAを行い、ドミナント分析、即ち負荷の大きいプロセスの抽出、を行い、そのプロセスに対してはよりData Qualityの高いデータ収集や計測を行なっていくという手順で、順次精度の高いLCAに接近していく方法である。簡単な概念図を図7に示した。

現在は、LCAが普及していく上での問題点が洗い出され様々な側面から検討が始められようとしている段階である。今年の11月に行われる第二回エコバランス国際会議には、そのような様々な取り組みが報告され議論される予定であり、4月末の時点で2年前の初回の倍を超える120件近くの発表申し込みがなされており、今後の展開が期待される。

6 素材・プロセス分野でのLCAの展開

材料は直接単独で消費者の前に現れることはなく、加工・アセンブルの過程を経てそれぞれに固有の使用機能をもつ製品として現れる。その性格ゆえに、素材・材料技術分野でLCAを適用する場合、LCAの解析・改善対象をどこにしているのかで大きく方法が異なってくる。ひとつは、使用目的となる製品やシステムの設計にポイントを置いたLCAであり、いまひとつは、個々の構成要素としての材料の開発・設計・製造プロセスにポイントを置いたものである。包装材料の選択や車のバンパー材料の選択など材料をターゲットとしたように見えるものでも基本的には製品設計の一部としての材料選択であり、これまで殆どのLCAは前者に属している。この場合、材料は製品のライフサイクルの一部として捉えられ、その結果、材料部門はInventoryデータ提供としての側面が強調される。いくつかの先進的取り組みもあるが素材分野のLCAがわが国で飛躍的に展開していない背景には、アセンブラー等にデータを提供したあげく比較選択を委ねてしまうことに対する警戒もひとつの要因であろう。

この問題は、LCAの持つ本来的な特徴ではなく、LCAを製

表4 LCAにおける材料と製品の相違

	材料	製品
Life Cycle	recycle可能	one-cycle
Process Tree	枝型(distribute)	根型(gather)
Function Unit	材料特性(property)	使用目的(object)

品を中心としたLCA(Product Life Cycle Assessment:PLCA)として狭く適用しているところに問題がある。材料開発者が、PLCAを通じて環境負荷の低減に貢献することはそれはそれで重要な役割であるか、材料の開発・設計・製造プロセスでの環境負荷低減の努力を評価し、表現する努力が必要である。筆者らは、そのためのLCAをMLCA(Materials Life Cycle Analysis /Assessment)と呼んでいる。

材料を対象とした場合と製品を対象とした場合の相違点を表4に示した。ライフサイクルの相違は明瞭であろう。製品は、その使用目的が終了した場合、廃棄過程で解体され製品自体としての特質を失い一つのライフサイクルで考える事ができる。他方で材料の場合には、製品解体後も要素材としての特性を保持して再使用が可能であり、リサイクルを含めると最終廃棄まで複数の製品の中でその生命を保ち続けることができる。次いで異なる点は、プロセスツリーの構造である。製品の場合は、上流部門がそれぞれの原料に応じて細かく分岐し、製品に向かって集合していく、「根」型の構造となるが、材料では、若干の原料の合流の後、様々な用途の製品に向かって拡散的に広がっていく「枝」型の構造をとる。この問題はFunction Unitの問題と関連する。製品ではFunction Unitは使用目的に対応するが、材料では使用目的を実現するための材料特性がFunction Unitであり、それが満たす用途に対して材料は拡散的かつ繰り返して使用される。すなわち、MLCAでは、解析の主軸になるFunction Unitを、使用目的ではなく、材料の特性で考えていくことが最も重要である。

材料の特性で考えると、代替型、対応型、向上型の3つのアプローチが考えられる。代替型のアプローチは同一特性をより低い環境負荷で製造・処分できる材料やプロセスの評価である。対応型は、高効率操業等で高度化する材料特性の要求に応じた材料の開発でトータルの環境負荷の視

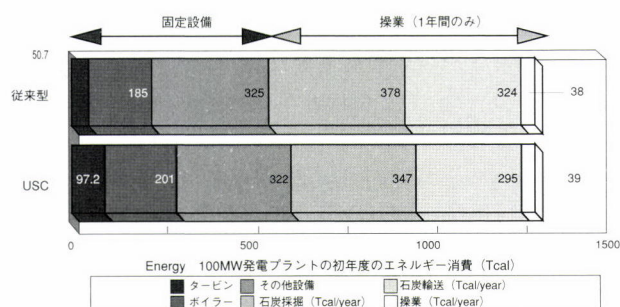


図8 材料開発を加味したUSCと従来型火力発電の環境負荷の比較
設備建設および1年間の操業に限定、エネルギー消費で環境負荷を代表した例

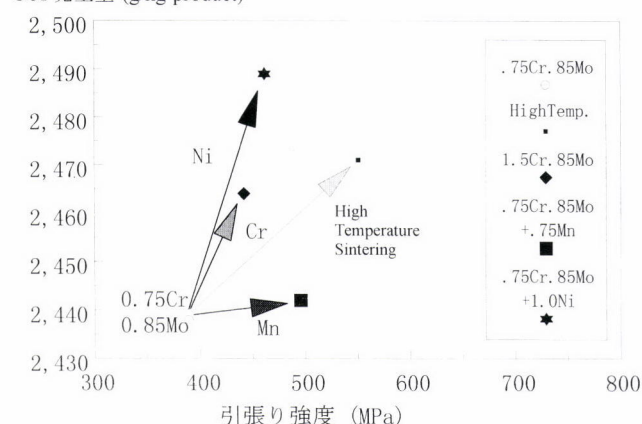
CO₂ 発生量 (g/kg-product)

図9 鉄系焼結材料の組成・プロセスの相違に対する、強度とCO₂発生量の関連

点からの評価である。いまひとつの向上型は、材料特性と環境負荷の双方を考慮した材料の開発方向を探索していくガイドである。対応型のアプローチの例として、超々臨界圧発電(USC)に対応する材料の転換の環境負荷評価の例と、向上型アプローチの例として、鉄系焼結材料の開発方向の探索への適用例を示す。

USCにより、発電自体の効率は4%ほど増加するが、そのために必要な操業温度の上昇に伴い従来の火力発電の条件で使用できた鋼種は、オーステナイト系ステンレス鋼などのように、より製造時の環境負荷の大きい鋼種へと転換していかなければならない。材料開発が効率改善分をキャンセルしたのでは、トータルとしての環境負荷軽減の意味が失われてしまう。それを比較してみた¹⁸⁾のが図8であり、ここでは、環境負荷としてエネルギー消費量をとっている。材料の製造に伴う負荷は図のボイラー、タービンの部分に示すようにUSCで増大しているが、この負荷の増大は一年間の運転による効率の改善で取り戻す事ができる。実際の火力発電プラントの寿命は、20~30年であるから、USC用に開発された材料は、高効率化による環境負荷低減の要請に全体として貢献していると主張することができる。

図9は、各種の組成や焼結温度を変えて開発されている

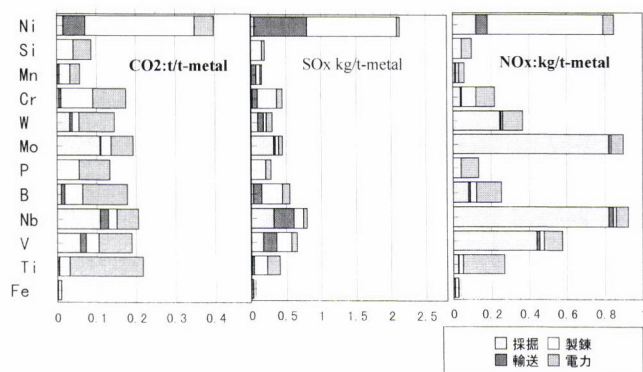


図10 添加合金成分1%当たりの環境負荷(鉄1t)
採掘、輸送、製錬、間接電力(日本を仮定) 毎に積み上げ

表5 LCAの適用の可能性のある材料プロセス分野

LCAを適用する改善事項	主な影響部分
材料開発への適用	
・材料特性の改善	必要量、使用効率
・リサイクル適合材料	循環量、リサイクル
・廃棄後の管理	処分プロセス
プロセス改善への適用	
・操業原単位軽減	原料・燃料製造
・排出負荷低下	当該プロセス
・発生物の副産物化	廃棄物処理
・原料の転換	原料採取、輸送
材料設計への適用	全体

粉末冶金合金を強度とCO₂発生量でプロットしたものである¹⁹⁾。この場合、組成や処理条件をどのように変えれば環境負荷を抑えて特性を向上できるかを明らかにして今後の開発の方向を探索することができる。そのような試みのために必要となるデータが整えられつつあり、図10には、その一部として合金添加元素1%に相当するCO₂、SO_x、NO_xの発生量を示した。これらは、インターネット (<http://www.nrim.go.jp:8080/ecomat/Welcome.html>) を介してアクセスできるように整備されつつある。

MLCAによる解析の可能性はこれらの例に留まらない。部分的な環境負荷軽減の努力を評価する場合においても全体システムとの関わりでチェックすることが必要であり、また、それにより定量的な表現として負荷低減の有効性を示す事ができる。その適用の可能性の例を表5に示した。今後、多くの技術者研究者がLCAをエネルギー分析やコスト分析と同じように使うようになれば、これ以外にもますます適用対象が広がってくるであろう。

ここまで見てきたように、LCAは新しい視点を提供し、さまざまな可能性を持っている評価方法であるが、まだ発展途上のツールである。LCAの難しさは解析に着手する者の責任ではなくLCAの方法としての未成熟さに起因している場合が多い。そのため躊躇せず、まず解析者が現在理解できる範囲で実行してみる事が重要である。あらゆる生産や消費の局面で環境負荷低減の努力を行なった場合は、積極的にLCAで表現していくことにより、それらの努力もそしてLCA自体もより有効なものへと深まっていくに違いない。

引用文献

- 1) “Packaging and the Environment”, Chalmers Industriteknik(1991)
- 2) “Environmental life cycle assessment of Products, Guide”, National Reuse Waste Research Program Report9266,(1992)
- 3) 「環境への負荷の評価に関する予備的検討」日本エコライフセンター,(1993)
- 4) SimaPro Ver.2 manual, Pre consultant (1992)
- 5) 「容器包材の環境評価に関する中間報告」, 日本生活共同組合連合会(1993)
- 6) 山田国廣: リサイクル文化, 46(1994), 36
- 7) 日本環境協会: グリーン購入ネットワーク設立趣意書 (1996)
- 8) 原田幸明, 井島清, 八木晃一: 材料とプロセス, 8(1995), 1142
- 9) 和田安彦, 中野加都子ら: 環境負荷評価システム構築のための基礎調査報告, 未踏科学技術協会, (1995)
- 10) 原田幸明, 井島清, 八木晃一: 材料とプロセス, 8(1995), 1143
- 11) 原田幸明: エネルギー資源, 17(1996), 165
- 12) 原田幸明: 安全工学, 34(1995), 78
- 13) A.Singhofen, “Introduction into a Common Format for Life-Cycle Inventory data”, SPOLD, (1996)
- 14) 原田幸明, 井島清, 八木晃一, 材料とプロセス, 9(1996), 254
- 15) 渡辺洋, 鈴木規夫, 山田文康, 大塚雄作: “探索的データ解析入門”, 朝倉書店(1985)
- 16) 吉岡完次, 早見均: 日本の科学と技術, 35(1994), 38
- 17) 乙間末広, private communication
- 18) 内山洋司: エコマテリアルプロジェクト成果報告会資料, (1995), 11
- 19) 原田幸明, 皆川和己, 八木晃一: 粉体および粉末冶金 41(1994), 1383
- 20) 原田幸明: 日本の科学と技術, 35(1994), 50

(1996年5月7日受付)