

## 研究展望

# ライフサイクルインパクト分析手法の現状

THE PRESENT CIRCUMSTANCE OF LIFE CYCLE IMPACT ANALYSIS

伊坪徳宏<sup>1</sup>・山本良一<sup>2</sup>

Norihiro ITSUBO and Ryoichi YAMAMOTO

<sup>1</sup>正会員 東京大学生産技術研究所

(〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

<sup>2</sup>正会員 東京大学生産技術研究所

**Key Words:** LCA (Life Cycle Assessment), LCIA (Life Cycle Impact Assessment), valuation method

製品の全ライフサイクルの物質・エネルギー収支を用いて環境負荷を定量化して評価を行い、その低減方策のための有用な情報を与える手段として、LCA（ライフサイクルアセスメント）が注目されている。しかし、LCAはまだ発展途上のツールであり、現段階において世界的に合意された手法は存在しない。現在LCAの手法開発に向けて活発に研究が国内外問わず進められている。特にLCAの最重要な段階である、インパクト分析については、欧米を中心に様々な手法が提案されている。本稿では、LCA研究の現状をインパクト分析手法を中心に概説する。

## 1. 緒言

地球サミットの合意により、世界的に持続可能な発展に向けた取り組みが行われている。環境問題については、社会の幅広い主体がそれぞれの立場から環境に関心を持つことが重要であり、環境保全の促進のためには、我々が、環境にどのような負荷を与え、それにより環境の状況がどのような状態にあるかを的確に把握することが前提かつ必須条件となる。LCA (Life Cycle Assessment) は工業製品を主として生産等に関わる環境負荷物質を算定し、それによる環境への影響を評価する手法であり、この評価を用いて製品設計者は環境負荷の少ない製品の開発に利用し、消費者は製品を購入するためのツールとして用いることが可能となる。LCAの評価は一般に(1)目的の明確化、(2)インベントリ分析、(3)インパクト分析、(4)改善評価の四段階が相互に関連しつつ進められる。現在の環境問題は特定の原因による地域的な問題から、社会活動全般に起因する地球的規模に広がりを持つものまで多様に存在しており、これらの問題を正確に把握し、かつ持続可能な発展に貢献するためには、膨大なデータを必要とするとともに、環境に与える異なる影響（例えば温暖効果とオゾン層破壊など）間の関係をどのように位置づけるのかが問題となり、環境が受ける影響を評価するためのインパクト分析手法の開発が特に重要視されている。

現在国際的に環境指標等の利用により、総合的、長期的な環境問題を定量的に把握するための研究等が国際的に活発に行われている。本稿では環境に関わる多種多様

のデータを一定の着目によりまとめて表し、複雑な環境問題の把握を可能にするインパクト分析手法の現状と将来について概説する。

## 2. インパクト分析の手順

インパクト分析は、インベントリ分析で認識された環境負荷による影響を分析評価することである。SETAC (環境毒物化学学会) が発表した“Code of Practice”<sup>1)</sup>によれば、インパクト分析の手順は以下の四段階に分類される。

1. Classification : 分類
2. Characterisation : 特徴付け
3. Normalisation : 標準化 or 規格化
4. Valuation : 統合評価

分類では、評価対象である製品あるいはプロセスのライフサイクルにおける資源消費や、排出物の総量を環境が受ける影響に基づくインパクトカテゴリー（温暖化、オゾン層破壊、酸性化等）に振り分ける。

特徴付けでは、各インパクトカテゴリー内における影響物質（例えば温暖効果なら、CO<sub>2</sub>やメタン等を言う）の相対的な役割を定量的に表す。

標準化では、評価対象である製品等が、現在の環境全体に対して与えられる負荷に対してどれだけ寄与しているか判断するために、各インパクトカテゴリーの現状を捉え、環境に対するの評価対象の位置づけを行う。

統合評価では、以上の結果に基づき、それぞれのインパクトカテゴリーの重要性を相対的に評価し、統合的な

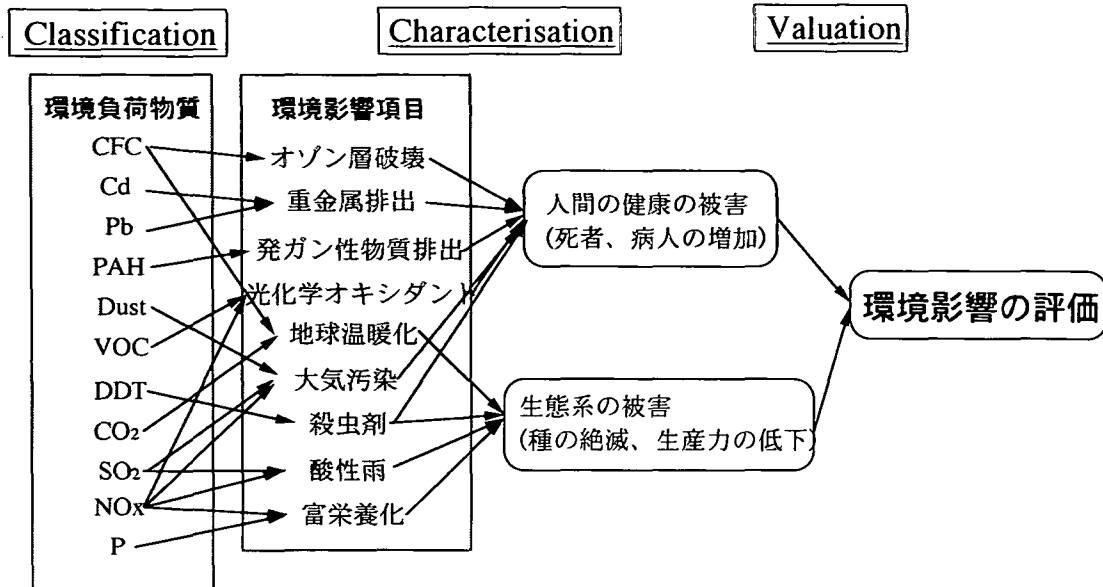


図-1 インパクト分析手法

表-1 資源枯渇，人間への健康への影響，生態系への影響の三種類のカテゴリーを更に細分化したインパクトカテゴリーのリスト

- |                          |                                          |
|--------------------------|------------------------------------------|
| A. インプットに関連するインパクトカテゴリー  |                                          |
| 1.                       | 生物資源                                     |
| 2.                       | 非生物資源                                    |
| 3.                       | 土地                                       |
| B. アウトプットに関連するインパクトカテゴリー |                                          |
| 4.                       | 地球温暖化                                    |
| 5.                       | オゾン層破壊                                   |
| 6.                       | 人間の健康に対する毒物の影響<br>(作業環境における従業員への影響を除く)   |
| 7.                       | 人間の健康に対する毒物以外の影響<br>(作業環境における従業員への影響を除く) |
| 8.                       | 従業員の健康に対する影響                             |
| 9.                       | 生態系への毒物の影響                               |
| 10.                      | 光化学オキシダント                                |
| 11.                      | 酸性化                                      |
| 12.                      | 富栄養化                                     |
| 13.                      | 生息地の変化，種の多様性への影響                         |
| 14.                      | その他対象域外からの影響                             |
| 15.                      | その他対象域外に与える影響                            |

環境負荷値の算出を行う。

インパクト分析の一連の流れをまとめたのが図-1である。インパクトカテゴリー中に資源枯渇を含めるかどうかについては，議論が分かれるところであるが，生態系への影響，人間の健康の被害についてはこれらをまとめて，最終的には単一の指標で表記することが望ましいという認識が広まりつつある。

以下各段階について概説する。

### 3. 分類

分類は，インベントリーデータをインパクトカテゴリー毎に振り分けて，環境への負荷という視点から，再構成を行う段階である。この段階では，環境負荷物質の放出により，どのような影響が生じるかを検討しておく必要がある。Nordic Guideline では，主に以下の三種のインパクトカテゴリーを要するとしている。

- ・資源の枯渇
- ・人間の健康への影響
- ・生態系への影響

これらのインパクトカテゴリーはさらに細分化される(表-1)，現在は以下の15種類にまとめられる。他にも騒音や，景観の悪化，不慮の事故等も含めることも考えられる。しかし資源の枯渇等の上記三種類のインパクトカテゴリーが被害を受ける場合の負荷について評価するならば，例えば，騒音や景観の悪化が人間の健康に影響を及ぼすことの因果関係ははっきりしないこと，不慮の事故は環境負荷物質の排出により発生するとはいえないことなどの理由から，インパクトカテゴリーに含めて考えるべきでない。ただし，道路舗装等による土地の消費については，生息地の変化，土地資源の消費等で考慮されるべきであり，これらを排除するものではない。

この段階で注意すべきことは，複数の影響にまたがる影響物質があるときの取り扱いである。例えば，オゾン層破壊物質として有名なCFCs (chlorofluorocarbons) は，同時に温室効果ガスでもある。また，オゾン層が破壊されると，それによるUV-Bの放射の増加が，白内障や皮膚癌などの人間の健康に影響を及ぼすため，間接的

に人間の健康への影響を及ぼすといえる。このような場合、オゾン層破壊の二次的な効果である人間への健康被害についてもカウントすると、二重にカウント（ダブルカウント）することになるため、これについては考慮すべきでないとしている。ただし、これはCFCsの排出が、直接人間への健康に影響を及ぼす場合とは異なるものである。一方、温室効果との関係については、これらの影響間において因果関係はなく、両者が独立して発生し得るので、双方のインパクトカテゴリー-影響物質として考えるべきである。

#### 4. 特徴付け

分類により、インパクトカテゴリー毎に振り分けたデータを利用して、評価対象が各インパクトカテゴリーに対して及ぼす寄与度について計算を行う段階である。

比較に用いる複数の製品の各インパクトカテゴリーに振り分けられたデータが、両者ともカテゴリー中に一種類しか存在しない場合には、そのデータがカテゴリーを代表するデータとしてこれらの製品を比較することが可能である。しかし、カテゴリー中に複数のデータが存在する場合、各物質がそのインパクトカテゴリーに寄与する度合いを考慮しなければ、比較は意味をなさなくなる場合がある。つまり、ここではインパクトカテゴリー内の比較を行うための重み付けを行う段階であるということが出来る。

具体的に行われる計算についてまとめる。インパクトカテゴリー*i*に寄与する環境負荷物質*j*（例えばCO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>等）の排出データによる*i*への潜在的影響度を考慮した集計値*C<sub>ij</sub>*は、個別排出量の総計*E<sub>j</sub>*と重みづけ係数*W<sub>ij</sub>*を用いて以下のように計算される。

$$C_{ij} = E_j W_{ij} \quad (1)$$

これを用いてインパクトカテゴリー全体の集計値*C<sub>i</sub>*はインパクトカテゴリー内の影響物質の総計として算出される。

$$C_i = \sum_j C_{ij} = \sum_j E_j W_{ij} \quad (2)$$

ここで用いられる重みづけ係数*W<sub>ij</sub>*はインパクトカテゴリーにより異なる。以下各インパクトカテゴリーで主に用いられる重みづけ係数について説明する。

#### 地球温暖化

温室効果ガスは地球温暖化の原因となり、海面上昇、生態系の衰退、台風などの突発的気象現象、伝染病の増加等を招く危険性がある。温室効果ガスには、CO<sub>2</sub>の他、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CFCs、CF<sub>3</sub>Br、CHCl<sub>3</sub>等が挙げられる。このカテゴリーにおいての重み付けはIPCC (Intergovern-

mental panel on Climate Change=気候変動に関する政府間パネル)で検討されたGWP値(Global Warming Potential=地球温暖化指数)が用いられる。これはCO<sub>2</sub>を1として全ての温暖効果ガスによる影響をCO<sub>2</sub>等量で表そうとするものである。温暖効果ガス排出後*T*年経過後における温暖効果ガス*I*のGWPは以下のように計算される。

$$GWP_I = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} \quad (3)$$

ここで*a<sub>i</sub>*は1単位質量あたりの温暖化の促進度、*c<sub>i</sub>(t)*は大気放出後、*t*時間経過したときの*I*の濃度を示す。代表例を挙げると、CO<sub>2</sub>=1、CFC-11=3400、メタン=11、N<sub>2</sub>O=270等がある。つまり、CO<sub>2</sub>とメタンが同量排出された場合、メタンの方が11倍温暖化に寄与するというを示す。

#### オゾン層破壊

オゾン層破壊物質の放出はオゾンホール形成を招き、それにより人間の健康被害、生態系の发育衰退等の恐れがある。このカテゴリーにおける代表物質はCFCs、ハロン、CCl<sub>4</sub>等が挙げられる。

重みづけ係数は、「改正モントリオール議定書(オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書)」に示されたODP値(Ozone Depleting Potential=オゾン層破壊係数)が採用される。これはCFC-11を1として表す相対的パラメータである。

$$ODP(x) = \frac{O_3(x)}{O_3(CFC-11)} \quad (4)$$

*O<sub>3</sub>(x)*は物質*x*単位質量あたりの放出により、分解するオゾン量であり、*O<sub>3</sub>(CFC-11)*はCFC-11単位質量あたりの放出により分解するオゾン量である。GWPの代表値としては、CFC-11=1、CFC-12=1、HARON-1201=1.4、HCFC-141b=0.11がある。

#### 酸性化

酸性化影響物質の放出は、酸性雨の原因となり、土壌の酸性化による森林への影響、湖沼などの水生生物などへの影響、建造物などの影響が考えられる。主に欧米で問題意識が高いカテゴリーであったが、最近では日本でも酸性雨が観測されており、この状況が続くと、酸性雨による問題が表面化するものと予想されている。

このカテゴリーにおける代表物質は、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、HCl等で、大気中に排出されると酸になるものと、排出物質そのものが酸であるものが含まれる。

ここでは酸性化寄与物質の分子量に対する水素イオン

表-2 各国でこれまでに開発された重みづけ手法

重み付け手法	機関・考案者・文献	等 価 手 法
Energy requirement	Franklin, アメリカ	エネルギーの必要量で比較
MIPS	Wuppertal 研究所, ドイツ 9)	材料の消費総量で比較
SPI	TU Graz, A	空間消費で比較
Abatement energy	TNO MEP, オランダ 10)	環境負荷軽減のためのエネルギーをも含めたトータルのエネルギー消費量で比較
Abatement costs	ECN, オランダ 11)	国家の目標に従った放出量軽減のためのコストをモデル化して比較する
Abatement costs	Tellus 研究所, アメリカ 12)	人間に対する毒性物質の放出を避けるために要するコストを鉛の場合との比較から推定
DESC	TME, オランダ 13)	インパクトカテゴリー毎の国家の目標に基づいて, 負荷を軽減するために見積もったコストで比較
EPS	IVL L, スウェーデン 14)	システムの変化による生態破壊, 人間の健康, 資源, 景観を復旧するための支払う意思 (Willing to pay) で比較
Mole fraction	Basel 大学, スイス 15)	環境負荷物質に対する各媒体の臨界体積値を算出して比較
Critical Volume	EPF, ドイツ 16)	主観的に決定した臨界体積量により比較
Critical Surface-Time	EPFL, スイス 17)	主観的な重み付けによる臨界排出量で比較
Ecoscarcity	BUWAL, スイス 18)	政府基準との差で比較
Distance to Target	VROM, オランダ 19)	政府基準との差 (主観的な重み付け有) で比較
NSAEL	CE, オランダ 20)	持続可能のために設定した目標の超過度で判断
Eco-indicator	Pre, オランダ 21)	科学・政策的に定めた目標との差の比較
Iso-utility function	TNO STB, オランダ 22)	専門家による判断
Iso-preference approach	CML Leiden 大学, オランダ 22)	専門家が優先と認めるものの順位付け
Delphi	Landbauk, イギリス 23)	専門家により判断された値を実際の負荷と推定
Questionnaire	早稲田大学, 日本 25)	産業・科学の専門家によるインパクトカテゴリー毎の判断
Panelquestionnaire	IVAM ER, オランダ 20)	インパクトカテゴリー間の比較を専門家が判断
Structural dialogue	PI DTU, デンマーク 26)	専門家間の議論に基づいて重み付け
Argumentative evaluation	UBA, ドイツ 27)	専門家による環境問題の重み付けを生産プロセスの判断に適用
Expert panel prioritisation	CAU, ドイツ 28)	規格化データと専門家による基準値を用いて生産システムの判断

の量を酸性化への寄与度として, 二酸化硫黄を 1 として相対的に算出した酸性化係数 AP 値 (Acidification Potential) が用いられる。AP 値を求めるにあたっては, 単位質量当たりに放出されるプロトンの量の比較で表される。

$$AP_i = \frac{\text{potential}H_i^+ / m_i}{\text{potential}H_{SO_2}^+ / m_i} \quad (5)$$

AP の代表例としては,  $SO_2=1$ ,  $NO_x=0.7$ ,  $HCl=1.6$ ,  $NH_3=1.88$  がある。

### 富栄養化

このカテゴリーの代表物質は, 窒素, リン等の栄養塩類である。これらの物質の放出により, 水道水の異臭, 赤潮や青塩の発生, 漁業への影響, 透明度の低下などの問題の発生があり得る。

このカテゴリーでは, バイオマスを形成する能力の尺度として用いられる富栄養化ポテンシャルを用いて決定される。これはリン酸の陰イオン基との比較で表される。

$$NP_i = \frac{N_{\text{equivalents}_i} / m_i}{N_{\text{equivalents}_{PO_4^{3-}}} / m_i} \quad (6)$$

ここで  $N_{\text{equivalents}_i}$  は, 物質 I 1 モル放出時の富栄養化ポテンシャルを,  $N_{\text{equivalents}_{PO_4^{3-}}}$  はリン酸 1 モルの放出時の富栄養化ポテンシャルである。NP の代表例を挙げると, Phosphate (リン酸)=1,  $N_{\text{total}}=0.42$ ,  $COD=0.022$  等がある。

### 光化学オキシダント

このカテゴリーに関連する影響物質は,  $NO_x$ , HCs であり, これらの物質の排出は, 光化学スモッグの原因となり, 粘膜への刺激, 呼吸器への影響, 農作物などの影響を及ぼす。ここで重みづけ係数として用いられる POCP 値 (Photochemical Ozone Creation Potential) は, ある揮発性有機化合物の放出による光化学オキシダント生成の変化を, エチレンの放出による光化学オキシダント形成量の変化との比較により表される。

$$POCP = \frac{a/b}{c/d} \quad (7)$$

ここで,  $a$  はある揮発性有機化合物 (VOC) 放出によ

る光化学オキシダント形成量,  $b$  は算定時の揮発性有機化合物の放出量,  $c$  はエチレンの放出による光化学オキシダント形成量,  $d$  は算定時のエチレンの放出量である。POCP 値の代表例としては, エチレン=1, アセトン=0.178, ベンゼン=0.189, フェノール=0.761 がある。

## 5. 標準化

標準化は参照地域の環境が受ける影響と製造システムを関連づける手段であり, 特徴付けと統合評価との間の任意的な段階として考えられる。参照地域としては, 地球全体のデータを用いる方が好ましい。しかしながら, グローバルレベルの環境問題について用いるデータに制限があるときは, 標準化はより小さな参照地域に限定して行うことになる。一連の標準値の対象地域が一致しないときは, 参照地域に含まれていない部分については, 他のデータから推定するか, あるいは統合評価の段階でその不一致を考慮に入れて行うかのいずれかを選択して評価することになる。

## 6. 統合評価

SETAC の Code of Practice では, LCIA のバリエーションは, “異なるインパクトカテゴリー間の比較ができるように, 各インパクトカテゴリーの寄与を重み付けすること”と定義している。この段階で使われる“重み付け”は異なるインパクトカテゴリー間の重みづけを言うのであって, 特徴付けにおいて用いる重み付けとは性質が異なるものであることに注意されたい。

この段階での目的は, インパクト分析におけるそれぞれのインパクトカテゴリーの影響データをまとめて, 統合的な影響評価を行うことで, 分析結果の解釈を容易にする事である。そのためには, 環境に与える総合的な影響を点数で表すことが有効である。

LCA を用いた環境問題の重み付けをする方法は非常に多くの手法があり, 普遍的な統合評価手法 (Valuation Method) を開発するのは困難である。最近になって, 統合評価を含むインパクト分析の研究が盛んに行われている<sup>27)~29)</sup>。ここでは, 近年行われている統合評価手法をまとめてみたいと思う。

はじめに, これまでに開発された手法における, それぞれのインパクトカテゴリーの等価方法について述べる。等価方法は, 統合評価手法毎により異なるが, 現時点では以下の五種類に類別できる<sup>3)</sup>。また, これらを複合して行う手法もある。

- ・ proxy (代理する指標を用いる方法)
- ・ technology (環境負荷低減するための科学技術に置き換えて評価する方法)

- ・ monetarisation (貨幣換算による方法)
  - ・ authorised target/standard (ある者が定めた目標値・基準に基づいて評価する方法)
  - ・ panels (審査委員の決定による方法)
- これらの特徴については以下に述べる。  
表-2に, 重み付け手法についてまとめたものを示す。

### (1) 重み付けの特徴

#### a) 代理指標によるアプローチ (proxy approaches)

この方法は, 定量的に測定が可能な一種あるいは少数の単位をもって, 全体の環境負荷や持続可能性の判断する際の指針としようとするものである。Groot W.T<sup>29)</sup> はエネルギーと空間消費を持続可能性の指標として用いている。この方法による結果はインプットにより決定される。これはエミッション等のアウトプットにより影響を受ける生態系への毒性や, オゾン層破壊のような環境問題に対しては, これらの指標で正確に表現しようとするのは, 問題があるといえる。しかし, マクロなレベルで全体を概観する場合や, LCA の結果を審査する際に用いる場合に有効であろう。

#### b) 負荷削減技術によるアプローチ (technology abatement approaches)

この手法による結果は, 環境負荷を軽減するために用いられる技術に依存する。このような負荷を削減するための技術は, 環境問題の深刻さを直接測定するものではない。本手法では, 例えば問題を削減する技術を実践する際のエネルギーが間接的に指標として用いられる。しかしながらこの指標が, 問題の重要性を示すだけでなく, それぞれの環境問題を取り扱う機関によって異なってしまうことが問題点として挙げられる。この方法は負荷を削減するための取り組みを参照することにより, 評価しがたい環境問題を算定項目からははずすことを避けることができることが長所である。

#### c) 貨幣換算による手法 (Monetarisation)

この方法はあらゆるインパクトカテゴリーを金額と関連づける方法である。これらのインパクトカテゴリーへの寄与は全て同じ単位即ち, ECU や, US ドルで表現される。従って本手法では経済のメカニズムが重み付けのためのガイドラインとして考えられる。ここでは資源減少の防止, リサイクルあるいは生態系の保護を, 資源の市場価格や環境に役割を果たすものの保全にかかる実際の価格等のコストで測定し, この結果を評価に利用する<sup>30), 31)</sup>。

従って, 経済価値を利用した重み付けは以下の前提に基づくことになる。

- ・ 人間が優先する価値によって測定される。
- ・ 支払い/許容意欲は好みの測定値である。
- ・ 環境保全の価値が他の日用品に置き換えられる。

特に最後の点については議論の余地がある。一方日頃常に用いられる一つの指標で表すことが出来るのは魅力があるともいえる。

#### d) 目標や基準に基づく評価 (Authorised goals or standards)

このアプローチは、大気への放出量を所定の大気の基準で割ることで、臨界量まで害された空気の体積を求める Critical volume 法の包括的概念である<sup>4),32)</sup>。本手法による統合評価において採用される基準や目標は、排出物質やインパクトカテゴリーを重みづけるのに用いられる。また政府が発表する削減目標が使われる場合もある。この手法では、現在の排出量による影響は、これらの目標との関連から評価するものであり、Distance-to-Target 法ともいわれる。この一般的な方法は、標準化した影響値と、現在の負荷による影響と目標の場合の影響の比との積で表される。目標や基準は、会社内、地方、国内、国際的等、範囲を選択して設定することが可能である。ほとんどの製品のライフサイクルが会社の壁を越えて、国内又は国際的に関わるため、広範囲に設定する方が好ましい。目標の設定は困難であり、評価結果は目標を設定するプロセスに支配的であるといえる。しかし国レベルで設定した目標を用いることにより、政策を決定する際に受け入れられる可能性がある。

他に科学的に求めたサステナブルレベルを利用する場合がある。しかし持続可能の意味の解釈について問題があるので、評価する主体がこの評価手法の重要な地位を有することになる。従って、目標を用いることが常にわかりやすいとは言えない場合がある。目標が科学的に設定される場合、科学的な背景に関する情報がより重要視される。

現在行われている DiT 法のさまざまな手法について、より詳細に述べる。もっとも単純な DiT 法は、特徴付けを行うのに、臨界量の式を用いて ( $S_i = M_i / T_i$ ;  $M_i$  = 環境負荷物質の排出量,  $T_i$  = 負荷物質 I の排出の目標量), これと主観的な重みづけ係数  $W_j$  をかけることで求める<sup>10)</sup>ものである。このとき重みづけ係数がない場合は、それぞれの問題の重み付けが等しいものとして扱うことを意味する<sup>15)</sup>。オランダ環境庁のプロジェクトでは、製造物に関する政策において、重みづけ係数を決定するのに、臨界量の式 ( $M_i / T_i$ ) をインパクトカテゴリーに適用して ( $S_j / T_j$ ;  $S_j$  = インパクトカテゴリー  $j$  における影響値,  $T_j$  = インパクトカテゴリー  $j$  の影響の目標値), 予備的に全ての重みづけ係数 ( $W_j$ ) を 1 とした。この式はエコインディケータ 95<sup>33)</sup>でも採用されている。エコインディケータ 95 では、三種の保護題目 (人間の死亡, 人間の健康, 生態系の衰退) を設定し, 100 万人のうちの 1 人の死亡と, 5% のエコシステムの損失を等価 ( $W_j = 1$ ) と見なし, 同様に用いている。Ecoscarcity 法は Ahbe

ら<sup>18)</sup>により確立された手法であり, 過重に環境に負荷を与えている行動に注意を喚起し, 改良を促すために,  $W_j$  を  $A_j / T_j$  の二乗を用いて重み付けを行う ( $X_j = S_j / A_j \cdot (A_j / T_j)^2$ ;  $X_j$  = インパクトカテゴリー  $j$  が全体の環境への影響を示す環境指標に対する寄与度,  $A_j$  = ある期間, 地域において実際に発生している影響  $j$  の度合い)。

#### e) パネル法 (authoritative panels)

これは環境への影響を改善する優先順位を, 回答者等の調査を基に決定するものである。優先順位の決定は, 専門家でない一般の人による場合, 専門家による場合, 科学者による場合, 政府や国際機関による場合等がある。このアプローチは, 個人やグループと直接コミュニケーションを取ることで, 最も主観的であり, 結果の自由度が最も大きいものとして考えられる。従って科学的な情報等を示す式や, 科学的見地に基づく目標も存在しない。しかし, 科学的情報が示す事実により, 優先順位の決定に何らかの影響を及ぼすことも考えられる。算定手法を明確にするには, パネリストが, 重み付けの基準となる順位を設定するに至った経緯について説明をすることや, 有益な科学情報を用いて明確化することが必要である<sup>20)</sup>。いずれにしても評価主体が算定結果に及ぼす影響は大きい。Volkwein<sup>28)</sup>によれば, パネル評価の信頼性を以下の三つにより向上させることが出来るとしている。

- (1) パネリストとして様々な分野の LCA の専門家を集めること
- (2) わかりやすい評価基準, 順位決定法を検討すること
- (3) 最終的な統合評価に至るまでの議論についての書類を開示すること

## 7. 重みづけ手法の標準化について

重みづけ手法は現在多種に渡り存在するため, LCA の結果は重みづけ手法の選択により異なるものになる可能性がある。LCA の最も主観的な部分について, 意見の一致が欠けていることが, LCA の結果の信頼性を向上させることの障害となっている。信頼性ある LCA を得るためには, 多様に存在する重み付けの手順を収斂させることが, 重要である。そのために必要な事項を SETAC 等の報告からまとめたのを以下に示す。

### あらゆる手法において必要なこと

- ・一般的な重み付けの特徴を反映していること
- ・LCA の目的に沿っていること
- ・影響間の重みづけも可能ならすべきである。
- ・不確実性を評価に含めること
- ・現存する全ての環境問題を評価に包含すること

- ・新たな問題を含める柔軟性があること
- ・明確で透明性があること、即ち用いる基準が明確であり、重み付けの結果を確認することが可能であること

手法によっては必要で無い場合がありうるが、一般的に必要であること

- ・単純で理解しやすい手法であること
- ・科学的な情報を応用できること
- ・地域と時間が異なるとき区別して評価する。
- ・単一の値や指標を用いて表現すること
- ・社会思想を反映すること

重み付け手法を開発する際には、透明性の確保等のため、製品特有の問題については、環境問題の重み付けと切り離して評価すべきである。環境に関連しない、製品特有の科学的な情報については、環境問題の重み付けをする際の一つの基準として含めるべきである。このような基準は例えば、環境が受ける影響を削減したり、環境が受けた被害を修復するのに必要なコストを削減し、影響を無害化するためにかかる時間を短くするのに貢献する場合があるからである。

重み付け手法は、現在の問題や今後発生し得るリスクの不正確な認識が、結果に大きく影響を及ぼすことが大きな問題点であり、今後のLCAの発展のための最重要課題とも言える。異なる一連のインパクトカテゴリーの分析結果を適当に解釈する場合、主観的に重み付けが決定される場合が多く、パネル法に代表されるようにあらゆる分野の専門家の学識を結集して行うことが問題解決の一手段として考えられる。

重みづけ手法の統一化を図る場合、手法論の基本的な部分については、少なくとも合意に達しているべきである。環境問題について重み付けをする場合に用いる基準あるいは目標の設定の仕方が、問題点の一つとして考えられる。この問題については様々な議論が行われており、重み付けをする際には、以下の基準を最低限考慮に入れるべきであるとされている<sup>6), 34), 35)</sup>。

- (1) トータル負荷(実際のフロー)と実際に生態系や人間が受ける被害の度合いの間の関係についての科学的な情報
- (2) 将来の動向を予測できること
- (3) 受けた被害の回復の可能性(回復するのにかかる時間を含む)
- (4) 被害を受ける対象の重要性(影響の規模や代替可能性も含む)
- (5) 被害の不確実性の度合い

## まとめ

本稿では、LCAの中でも最重要と言われるインパクト分析の現状を重みづけの方法を中心に概説した。LCAの結果の信頼性を向上させるには、インパクト分析手法の統一化が必要不可欠であるが、現在はまだ合意にいたってはいない<sup>36)</sup>。特にインパクトカテゴリー間の重みづけ、即ちValuation Methodについてはまだ、世界的に合意に至るまではまだ時間がかかると言える。しかし、例えば、多数のレアメタルがこの20~30年の内に枯渇する可能性があること、地球温暖化はもう既に始まっていること、南極にはオゾンホールが確認されており、それは年々拡大する傾向があることを考えると、残された時間は多いとは決して言えず、早急なる評価手法の規格化と、それに基づいた正しい問題に対する対処が望まれる。

## 参考文献

- 1) SETAC: Guidelines for Life-Cycle Assessment; A 'Code of Practice', 1993.
- 2) Braunschweig, A., Forster, R., Hofstetter, P. and Muller-Wenk R.: Evaluation und Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden für Okobilanzen - Erste Ergebnisse. IOW-HSG Diskussionbeitrag N2. 19, St. Gallen Switzerland, 1994.
- 3) Grisel, L., Jensen, A.A. and Kloppfer, W.: Impact Assessment within LCA. SPOLD, Belgium, 1994.
- 4) Nordic Council of Ministers: Impact Assessment. LCA-NORDIC Technical Report No 10, TemaNord 1995.
- 5) Kloppfer, W. and Renner, J.: Methodology of Impact Assessment within the framework of Life Cycle Assessment, taking into account environmental categories which can not (or only with difficulty) be quantified. CAU no. 92147/UBA no. IOO OI IO2 (in German. In: Methodik der produktbezogenen Okobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung-, UBA texte 23-95, ISSN 0722-186X, 1995.
- 6) Giegrich, J. et al.: Endbericht Bilanzbewertung in produktbezogenen Okobilanzen, Evaluation von Bewertungsmethoden, Perspektiven. In: Methodik der produktbezogenen Okobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung-, UBA texte 23-95, ISSN 0722-186X, Germany, 1995.
- 7) Powell, J.C. and Pidgeon, S.: Valuation within LCA: a multi criteria approach. In: Integrating Impact Assessment into LCA. SETAC-Europe, Brussels, Belgium, 1994.
- 8) Braunschweig, A., Forster, R., Hofstetter, P. and Muller-Wenk R.: Developments in LCA valuation. St. Gallen, Switzerland, 1996.

- 9) Schmidt-Bleek, F.: *Wieviel Umwelt braucht der Mensch?* Birkhauser Verlag, Berlin, Germany, 1994.
- 10) Cramer, J., Quakernaat, T. Dokter et al.: *Theory and practice of integrated chain management* (in Dutch), TNO Apeldoorn, The Netherlands, 1993. EU: Externe, externalities of energy, ETSU (comp.), DG XII SRD, EUR 16520 EN, 1995.
- 11) Kroon, P., Ybema, J.R., Slanina, J. and Arends, B.G.: *Weighting factors for air emissions* (in Dutch). ECN R 94-006, Petten. The Netherlands, 1994.
- 12) Tellus Institut: *The Tellus Packaging Study*, Boston, MA, USA, 1992.
- 13) Krozer, J.R.: *Decision model for Environmental Strategies of Corporations (DESC)*. TME, The Hague, The Netherlands, 1992.
- 14) Steen, B.A. and Ryding, S.O.: *The EPS enviro-accounting method*. IVL, Gotenborg, Sweden, 1992.
- 15) Schaltegger, S. and Sturm, A.: *Methodik der ökologischen Rechnungslegung in Unternehmen*. WWZ-studien nr. 33, Wirtschaftswissenschaftliches Zentrum der Universität Basel, Switzerland, 1991.
- 16) Kohlert, C. and Thalmann, W.R.: *Optimicrung von Verpackungen hinsichtlich ökologischer Gesichtspunkte*. *Blick durch Wirtschaft und Umwelt* 9, 44-49, 1992.
- 17) Jolliet, O.: *Critical surface-time: an evaluation method for LCA*. In: *Integrating Impact Assessment into LCA*. SETAC-Europe, Brussels, Belgium, 1994.
- 18) Ahbe, S., A. Braunschweig, R. Müller-Wenk: *Methodik für Okobilanzen*. BUWAL 133, Bern, Switzerland, 1990.
- 19) Corten, F.G.P., v.d. Haspel, B., Kreuzberg, G.J., Sas H.J.W. and de Wit, G.: *Weighing environmental problems for product policy. Phase I* (in Dutch), Delft, The Netherlands, 1994.
- 20) Kortman, J.G.M., Lindeijer, E.W., Sas, H.J.W. and Sprengers, M.: *Towards a single indicator for emissions - an exercise in aggregating environmental effects*. IVAM ER/CE/Infoplan, Min. VROM Publications Product Policy nr. 1994/12, Zoetermeer. The Netherlands, 1994.
- 21) Goedkoop, M.: *Beyond distance to target*. Paper for the expert workshop on LCA Improvement and applications, Hanko, Norway, 1995.
- 22) Tukker, A.: *Iso-utility functions as a tool for valuation in LCA*. In: *First Working Document on Life-Cycle Impact Assessment Methodology*, SETAC-Europe WIA workshop, ETH, Zuirich, Switzerland, 8-9 July, 1994.
- 23) Heijungs, R., Guinee, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A., Sleswijk, A., Ansems, A.A.M., Eggels, P.G., van Duin R., and de Goede, H.P.: *Environmental life cycle assessment of products - Guide*. CML, TNO and B&G. Leiden, The Netherlands, 1992.
- 24) Wilson, B. and Jones, B.: *The Phosphate report*. Landbank Environmental Research & Consulting, London, UK, 1994.
- 25) 永田勝也, 横田隆一郎, 股部君弥, 嬉野通弥: 「LCAにおける指標統合化への試み」*廃棄物学会第6回研究発表会講演論文集*, pp. 114-117, 神戸, 1995.
- 26) Weidema, B.: *Product Life-Cycle Impact Assessment as a communication issue*. In: *First Working Document on Life-Cycle Impact Assessment Methodology*. SETAC-Europe WIA workshop ETH, Zurich, Switzerland, 8-9 July, 1994.
- 27) Schmitz, S., Ocls, H-J. and Tiedemann, A.: *Eco-balance for Drink Packaging*, Federal Environmental Office, III 2.5, revised edition 7 June, 1994.
- 28) Volkwein, E., Kloppfer, W. and Gihl, R.: *The valuation step in LCA. Part II: A formalized method of prioritisation by expert panels*. Submitted to *Int. J. LCA*, 1996.
- 29) *Environmental Science Theory, Concepts and Methods in a One-World, Problem-Oriented Paradigm*. *Studies in Environmental Science* 52, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- 30) *Functions of nature, evaluation of nature in environmental planning, management and decision making*. Wolters-Neerhoff, The Netherlands.
- 31) Groombridge, B., ed.: *Global biodiversity, status of the earth's living resources*. WCMC, Chapman & Hall, 1992.
- 32) Habersatter, K.: *Okobilanz von Packstoffen stand 1990*. *Schriftenreihe Umwelt* No 132, BUWAL, Bern, Switzerland, 1991.
- 33) Goedkoop, M.: *Eco-indicator 95*. Pre & DUJIF Consultancy, Amersfoort, The Netherlands, 1995. Graedel, T.E. and Allenby, B.R.: *Industrial Ecology*. AT&T, Prentice-Hall, New Jersey USA, 1995.
- 34) Lindeijer, E.: *The valuation within LCA: aim, criteria and procedure*. In: *First Working Document on Life-Cycle Impact Assessment Methodology*, SETAC-Europe WIA workshop at ETH Zurich. 8-9 July 1994, September 1994, 1994.
- 35) Muller-Wenk, R.: *Main structure of valuation step*. In: *First Working Document on Life-Cycle Impact Assessment Methodology*. SETAC-Europe 8-9 July 1994 WIA workshop, ETH Zurich, Switzerland, 1994.
- 36) 伊坪徳宏, 森実, 山本良一: *安全工学*, Vol.35, No.4, 271-282, 1996.

(1997.6.24 受付)