ライフサイクルインベントリにおけるマテリアル リサイクルの取り扱い方法

中 島 謙^{1,*} 井 野 博 満² 原 田 幸 明³

¹筑波大学大学院工学研究科

²法政大学工学部機械工学科

³独立行政法人物質・材料研究機構

J. Japan Inst. Metals, Vol. 66, No. 7 (2002), pp. 701-707

© 2002 The Japan Institute of Metals

Methodology of Material Recycling in Life Cycle Inventory

Kenichi Nakajima^{1,*}, Hiromitsu Ino² and Kohmei Halada³

¹College of Engineering, Tsukuba University, Tsukuba 305-8577

²Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Hosei University, Tokyo 184-8584

³National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047

A methodology for the evaluation of material recycling in the life cycle inventory (LCI) was established. In this study the concept of “material” is introduced, by which the system is extended to the cases that the materials are transferred from outside to inside or vice versa of the boundary of the system. The extension of the system should be performed by means of the same way of the circulation one, in accordance with the principle of consistency of the function unit and the each system boundary. Based on this method the environmental loads of recycled materials such as secondary aluminum, casting aluminum and EAF steel were reasonably calculated and the effect of recycling was properly evaluated.

(Received December 17, 2001; Accepted May 10, 2002)

Keywords: life cycle assessment, inventory analysis, recycle, energy consumption, carbon dioxide emission, air pollutions

1. は じ め に

LCA (Life Cycle Assessment) とは、製品 (サービスを含む) のライフサイクルにおける資源消費あるいは環境負荷を定量的に算出し、それらによる地球や生態系への環境影響を評価する手法である。LCA は既存の製品システムの評価手法としてだけでなく、製品システムの設計あるいは、リサイクルシステムやエネルギーシステムといった社会システム構築の際にも有効であると考えられる。

鉄やアルミニウムといった金属素材のリサイクルは既に社会に定着しており、それに対する LCA によるリサイクルの評価も多く行われている。しかしながら、リサイクルの効果を比較するといった場合において実施者によって異なった結果が得られるなど、LCA の客観性に関して問題が呈されている。これは、リサイクルの評価に LCA を使用する場合の方法論が未だ確立していないことに起因している。ISO においてもそのテクニカルレポート¹⁾で『システムの拡張』等の例を示しているが、その方法のガイドラインも不明確である。本研究では LCA の基本原則を再確認することにより、LCA をリサイクル評価に用いる場合の方法論を明確にする

ことをめざした。

2. LCA の原則の再確認

LCA におけるインベントリの基本はシステム境界内部の各プロセスからの環境負荷発生量の総和によるシステムのライフサイクル環境負荷の積算である。それ故に、LCA で最も重要な要素は、積算対象のサービスと範囲を決めること、すなわち、①機能単位 (function unit) および、②システム境界 (system boundary)、を設定することである。この 2 者を明確に定義することによって初めて LCA の定量的な議論が保証される。「比較」用途の際の LCA の基本原則は、これら両者が明確に定義されそれぞれの機能単位とシステム境界が一致していることである。つまり LCA での積算は機能単位当たりの環境負荷やエネルギー消費量の積算である。

LCA を行う場合の理想的なシステムは、全てのプロセスがシステム境界内部に記述できるシステムである。つまり、無限に連関する全てのプロセスを積算対象とすることである。プロセス i における単位量当たりの環境負荷発生量を x_i 、プロセス量 (occurrence) を p_i とすると、システムの環境負荷 X は、各プロセスからの環境負荷発生量の総和で表され、

* 筑波大学大学院生 (Graduate Student, Tsukuba University)

Fig. 1 Illustration of a typical product system.

$$X = \sum_{i=1}^n p_i x_i \quad (1)$$

となる。

しかしながら、実際には、全てのプロセスを積算対象とすることは困難であり、Fig. 1 に示されるように、システム境界外部とのやり取りを有する評価となり、

$$X = \sum_{i=1}^b p_i x_i + \sum_{i=1}^n p_i x_i \quad (2)$$

($b \in \text{system boundary}$, $n \notin \text{system boundary}$)

で表される取り扱いとなる。ここで、第1項はシステム境界内部の各プロセスからの環境負荷の積算を、第2項はシステム境界外部の各プロセスからの環境負荷の積算である。現実の算出の際には、環境負荷の小さいプロセスをシステム境界外部に設定し、その環境負荷をゼロとするなどの取り扱いがされている。しかしながら、この第2項をどのように取り扱うかの明確な方法は未だ確立されていない。

3. システム境界一致の原則

LCA による積算は、システム境界内部における各プロセスからの環境負荷発生量の総和である。これらの結果に基づき比較を行う際には、機能単位と積算の範囲であるシステム境界が一致していなければならない。これは上記式(2)における第2項が比較対照するシステム同士で一致していることを意味する。これが、『システム境界一致の原則』である。これに関しては、著者の1人である原田が既に述べている²⁾。

しかしながら、この原則が守られずに誤ったシステム間での比較が行われている場合がある。Fig. 2 にこうした誤ったシステム間での比較の例を示す。M は素材製造工程、P は製品製造工程、U は使用、W は廃棄物処理工程、R はリサイクル工程を示す。ここで、システム1における機能単位は製品1の生産に対し、システム2の機能単位は製品1および製品2の生産となっている。比較するシステムの機能単位が異なるため、この両者の間での比較は出来ない。

比較を行う場合には、システム1において製品2を代替製造するプロセスを考慮することにより両者の機能単位が一致し比較が可能となる。また、それに伴いシステム境界が変化する。そこで、Fig. 3 に機能単位を一致させた際の概念図を示す。ここで、システム1'とシステム2'の機能単位は、

Fig. 2 Two systems with different function unit, which cannot compare in each other.

Fig. 3 Two systems with the same function unit, which can compare in each other.

共に製品1と製品2を合わせたものとなり一致している。これにより両者の比較が可能となる。

この『システム境界一致の原則』は、環境負荷がゼロでない物質やエネルギーのシステムを越えたやりとりを含めて考えなければならない。

4. リサイクルの取り扱いの原則

『システム境界一致の原則』を考える際、LCI(Life Cycle Inventory)におけるマテリアルリサイクルの取り扱いには注意を要する。これらの取り扱いが、評価対象であるシステムの機能単位やシステム境界に影響を与えるためである。

従来、リサイクル材などのシステム外部とのやり取りを含む製品システムの評価が多く行われている。その際には、上記式(2)の第2項の取り扱いとして、システム境界を出入りする物質に環境負荷を割り付けて評価が行われてきた。『スクラップの環境負荷をゼロとする』、『リサイクルされた鉄がシステム外部へと出て行くのでその分の環境負荷を差し引く』等の取り扱いである。誤った算出例として、Table 1 に2次アルミニウムのインベントリデータを示す。

ここで、タイプ1においては、2次アルミニウムは原料を100%スクラップとして再溶解のみにより製造されるものとした。その時、スクラップの環境負荷としてゼロを割り付けているので、再溶解時の環境負荷のみとなっている。2次アルミニウムのエネルギー消費は、新地金製造の3%という

Table 1 Different assumption leads to different results, in cases of calculation of environmental loads for 1 kg secondary aluminum.

	Energy consumption (MJ)	CO ₂ (kg-CO ₂)	NO _x (g)	SO _x (g)
Type 1 : $X_{\text{scrap}} = 0$	6.54	0.45	0.21	2.63
Type 2 : $X_{\text{scrap}} = X_{\text{primary}}$	188.69	9.11	9.48	16.93

データの多くはこの種の扱いによる。次に、タイプ2は、2次地金の環境負荷を1次地金製造と同等に評価したものである。算出の際には、NEDOのデータ^{3,4)}を用いた。いずれの場合もマテリアルフローを反映した算出ではない。この物質への環境負荷の割り付け方にリサイクルの効果がLCAの結果に適正に反映されない場合の問題点が潜んでいると考えられる。

そこで、LCAの基本に立ち返り、リサイクルの効果を考える。リサイクルプロセスを含むLCAの理想的な取り扱いには、リサイクル材をシステム境界の外部とやり取りがないようにシステム境界を設定することである(理想的クローズドループシステム)。この理想的取り扱いにおいては、リサイクルのための特別な手法は必要ない。つまり、機能単位を満たすための全てのプロセスがシステム内部に記述できる場合、システム的环境負荷は、各プロセスからの環境負荷発生量の総和により表される。

Fig. 4に示すのは、クローズドループ・リサイクルの単純なモデルである。リサイクルプロセス(R)がR1とR2に分割されているのは、リサイクルプロセスの中に、システム分割ポイントとなる時点が存在していることを示す。すなわち、廃棄物ではなくリサイクル原料として価値が発生する時点である。

ここで、リサイクル処理の環境負荷は $x_R = x_{R1} + x_{R2}$ である。リサイクルのない場合とある場合のシステム的环境負荷 X, X' はそれぞれ、

$$X = p_M x_M + p_P x_P + p_W x_W \quad (3)$$

$$X' = (p_M - p_R) x_M + p_P x_P + (p_W - p_R) x_W \quad (4)$$

で表される。したがって、リサイクルの効果 ΔX は、

$$\Delta X = X - X' = p_R x_M + p_R x_W - p_R x_R = p_R (x_M + x_W - x_R) \quad (5)$$

で表される。

また、カスケードリサイクルなどオープンループリサイクルと呼ばれるものであっても、『システム境界一致の原則』に照らし合わせるにより同様に解析が可能となる。すなわち、システムを拡張し、対象プロセスを全てシステムの中に含ませることにより、理想的クローズドループシステムと同様に取り扱うことが出来る(拡張クローズドシステム)。この場合の概念図をFig. 5に示す。ここで2つの製品の生産量 p_{P1} および p_{P2} を合わせたものをシステムの機能単位とすると、リサイクルのない場合、上流側(リサイクル材供給側)と下流側(リサイクル材需給側)の環境負荷 X_1 と X_2 はそれぞれ、

$$X_1 = p_{M1} x_{M1} + p_{P1} x_{P1} + p_{W1} x_{W1} \quad (6)$$

$$X_2 = p_{M2} x_{M2} + p_{P2} x_{P2} + p_{W2} x_{W2} \quad (7)$$

Fig. 4 Schematic illustration of systems with and without closed loop recycling.

Fig. 5 Comparison of the production systems with and without recycling process.

で表され、システム全体の環境負荷 X は、 $X = X_1 + X_2$ で表される。

また、リサイクルのある場合のシステム的环境負荷は、

$$X' = (X_1 + X_2) - p_R x_{W1} - p_R x_{M2} + p_R x_R \quad (8)$$

と表される。したがって、リサイクルの効果 ΔX は、

$$\Delta X = p_R x_{W1} + p_R x_{M2} - p_R x_R = p_R (x_{W1} + x_{M2} - x_R) \quad (9)$$

で表され、単純なクローズドループ・リサイクルの場合と同様な結果となる。

以上の結果から、リサイクルの効果のみを評価する際には、上流側の廃棄物処理工程、下流側の原料製造工程およびリサイクル工程の環境負荷およびプロセス量が判れば十分であることが判る。また、その効果はリサイクル材の量に比例することを示す。

ここで、上記式(5)、式(8)においてリサイクル材の投入量の変化に伴う x_{P1} , x_{P2} , x_R の変化は無視出来るものとしている。一般にリサイクル原料およびリサイクル材の投入量

Fig. 6 An example of consistent model for taking into account environmental loads of input and output materials.

が変化することにより、混入する不純物の影響でプロセスの環境負荷が変化することが予測される。算出の際には、必要に応じてこれらの影響を考慮する必要がある。

実際には Fig. 6 のようにシステム外部からの入力および出力がある複雑なモデルとなる。リサイクルのない場合とクローズドループ・リサイクルの場合のシステムの環境負荷 X , X' はそれぞれ、

$$X = p_1x_1 + p_2x_2 + p_3x_3 + p_4x_4 \quad (10)$$

$$X' = p'_1x_1 + p'_2x'_2 + p'_3x_3 + p'_4x'_4 + p'_5x'_5 + p'_6x'_6 \quad (11)$$

で表される。しかし、リサイクル材の生産・使用においてシステム外部とのやり取りが生じる際には、システムの環境負荷 X'' は、

$$X'' = X' + Y_1 - Y_2 \quad (12)$$

となる。ここでは Y_1 および Y_2 はシステム外部とのやり取りが生じた際、拡張が必要となるシステム相当分の環境負荷である。LCA の結果に原料製造や廃棄物処理が不要となった際の環境負荷を適切に反映させる場合には、 Y_1 および Y_2 の取り扱いに矛盾が生じないように定める必要がある。

5. 『マテリアルとしてのシステムの拡張』

システムの拡張は、全ての場合において必要となるわけではない。上述のように、システム外部とのやり取りが生じる場合にシステムの拡張が必要となる。しかしながら、そのシステムの拡張方法に一貫性ある方法が未だ確立されていない。そこで、本研究ではシステムの拡張を要する場合の簡明で現実的な考え方として、『マテリアルとしてのシステムの拡張』を提案する。

つまり『マテリアルとしてのシステムの拡張』とは、システム境界を出入りする物質に環境負荷値を割り付けることで、実質的にシステムの拡張をしないで、システムの拡張を行った際と同等の結果を得るものである。物質に環境負荷を割り付ける点では、従来の LCA におけるアロケーションと同様の考え方である。しかしながら、従来の経済価値や物理的パラメータ等の属性で配分するのではなく、参照先のシステムを反映する数値を割り付ける。この点からは、システムの拡張と言えるため、本研究では『マテリアルとしてのシステムの拡張』とした。

Fig. 7 Extension of the down-stream system by “materials”.

この取り扱いは、物質に環境負荷を割り付けるといった既存の評価におけるスクラップやリサイクル材の取り扱いと同様である。しかしながら、従来は、その割り付け方に一貫性がなく、また『システム境界一致の原則』に基づくものでもなかった。本手法は、『システム境界一致の原則』に基づきシステムを反映する数値を割り付ける。ここに、本手法の導入の意義がある。リサイクルの効果は、リサイクル材の量に比例するのでシステム境界を越えてやり取りのある物質に、環境負荷値を割り付けシステムを拡張することにより、リサイクルの効果の正当に LCA の結果に反映することができ。以下に、ここで導入した『マテリアルとしてのシステムの拡張』が、従来のシステムの拡張の手法と同等の意味をもつことを検証する。

Fig. 7 に下流システム側を評価対象とした際の概念図を示す。図中の material とは、系外部から持ち込まれるリサイクル材を示す。このマテリアルに割り付ける環境負荷値を Y_{in} とすると、下流側の環境負荷 X'_2 は

$$X'_2 = (p_{M2} - p_R)x_{M2} + p_{P2}x_{P2} + p_{W2}x_{W2} + p_Rx_{R2} + Y_{in} \\ = X_2 - p_Rx_{M2} + p_Rx_{R2} + Y_{in} \quad (13)$$

で示される。それとは別にリサイクル材の流用元である上流側のシステムが存在している。したがって、上流側システムと下流側システムをあわせた環境負荷 X' は

$$X' = (X_1 + X_2) - p_Rx_{M2} + p_Rx_{R2} + Y_{in} \quad (14)$$

で表される。取り扱いに矛盾が生じないためには、式(8)の X' と式(14)の X' は等しくなければならない。したがって、下流システム側では、マテリアルの環境負荷として

$$Y_{in} = p_R(x_{R1} - x_{W1}) \quad (15)$$

を割り付けシステムの拡張を行う。すなわちリサイクル(R1)に要する環境負荷から上流システムで不要となった廃棄物処理分の負荷を差し引いたものを割り付け、システムの拡張を行う。

Fig. 8 に上流システム側を自己の評価対象とした際の概念図を示す。ここで、系外部へと持ち出されるリサイクル材に割り付けられる環境負荷値を Y_{out} とする。同様に、上流側の環境負荷 X'_1 は、

$$X'_1 = p_{M1}x_{M1} + p_{P1}x_{P1} + (p_{W1} - p_R)x_{W1} + p_Rx_{R1} + Y_{out} \\ = X_1 - p_Rx_{W1} + p_Rx_{R1} + Y_{out} \quad (16)$$

で表される。この場合も別にリサイクル材の流用先である下流システムが存在する。したがって、上流側システムと下流

Fig. 9 Materials flow for secondary aluminum production in Japan, 1992.

Fig. 10 Materials flow for casting aluminum production in Japan, 1993.

Fig. 11 Materials flow for EAF steel production in Japan, 1993.

分が、電気炉で製造した鋼に AOD などの炉外精錬による処理を行うことにより製造される。電炉鋼を製造する際の主な原料は、ステンレススクラップ、銑鉄、その他添加元素である。単位質量当たりの電気炉鋼の環境負荷は、以下の式により算出される。

$$30294ES = 31031(scrap + car) + 1907PI + 4OE + 32942EF \quad (23)$$

$$ES = 1.02(scrap + car) + 0.06PI + 1.09EF \quad (23')$$

ここで、 ES : 単位質量当たりの電気炉鋼の環境負荷物質発生量、 PI : 単位質量当たりの銑鉄の環境負荷発生量、 SA : 単位質量当たりのアルミ 2 次地金の環境負荷発生量、 OE : 単位質量当たりの他添加要素の環境負荷発生量、 EF : 単位質量当たりの電気炉工程の環境負荷物質発生量、 car : 単位質量当たりの物質輸送時に発生する環境負荷物質発生量である。

インベントリの結果を Table 2 に示す。また、参考のためにアルミニウム 1 次地金および銑鉄の環境負荷も示した。本研究による結果は、『マテリアルとしてのシステムの拡張』を行った結果であり、Table 1 に示した 2 次アルミインベントリ結果では反映されていなかった、リサイクル材製造のマテリアルフローの反映、および、廃棄物のリサイクルを行うことによる廃棄物処理が不要となった分の環境負荷の反映がされている。铸造用アルミ、電気炉鋼に関しても同様な結果となった。

アルミニウム 2 次地金が展伸材用と铸造用において値が異なるのはリサイクル原料であるスクラップの違いによる。展伸材用 2 次アルミでは、加工屑を主なりサイクル原料としているのに対して、铸造用 2 次アルミでは老廃屑を多く

Table 2 Evaluation of environmental loads of 1 kg recycled materials based on the new concept in this study.

	Energy consumption (MJ)	CO ₂ (kg-CO ₂)	NO _x (g)	SO _x (g)
Primary aluminum	188.7	9.11	9.48	16.93
Pig iron	21.07	0.56	2.39	1.33
Secondary aluminum for rolling	30.23	1.63	2.33	5.21
Secondary aluminum for casting ①	30.21	1.63	2.33	5.21
Secondary aluminum for casting ②	27.25	1.42	2.23	4.01
Secondary aluminum for casting ③	-0.48	-0.89		
Casting aluminum ①	59.64	3.12	3.63	8.95
Casting aluminum ②	56.86	2.93	3.55	7.83
Casting aluminum ③	31.01	0.78		
EAF steel*	6.72	0.89	0.52	0.37

* weight average of carbon steel and special steel

用いるので評価値が小さくなる。なお、鋳造用アルミは、その成分の調整用として 1 次アルミを利用しているため値は大きくなる。

また、2 次アルミニウムや鋳造用アルミの評価において、前提とする廃棄処理方法が異なると値が異なってくることに注目されたい。不法投棄され、環境負荷の大きい処理方法で廃棄処理を行わなければならない屑をリサイクルする際には、リサイクル材の評価値は小さい結果となる。本研究ではこれら屑の品位が反映された結果となっている。

ここで、投棄物処理分控除の結果について補足する。これが適用される場合は「リサイクルされないアルミニウムは投棄される」という前提に基づく。したがって、汚泥などをリサイクル処理した際に投棄物処理分を控除分とする際には適しているが、既にリサイクルシステムが社会に定着しているアルミニウム処理に適用するにはふさわしくない。シュレッダーダストに紛れ込んだ際の物質を適正処理した際の値などがより現状に即した値となるであろう。

7. 結 論

廃棄処理や原料製造が不要となった分の環境負荷といった

リサイクルの効果を LCA の結果に適切に反映するためには、以下の原則が満たされていなければならない。

第 1 に、比較対象となるシステムにおいて、機能単位の一致および『システム境界一致の原則』が満たされていること。第 2 に、クローズドループ・リサイクルといった循環型での表記方法の場合と一致したシステムの拡張が行われていること。そして、第 3 に、リサイクル材のシステムを反映した『マテリアルとしてのシステムの拡張』が定量的に行われていること。『マテリアルとしてのシステムの拡張』とは、システム境界を出入りする物質に環境負荷値を割り付けることで、実質的にシステムの拡張をしないでシステムの拡張を行った際と同等の結果を得るものである。

本研究では、上記の原則の適用例として、2 次アルミニウム、鋳造用アルミニウム、電気炉鋼の環境負荷を算出例として示した。上記の原則が守られることにより、リサイクルの効果を、LCA の結果に適切に反映することが可能となる。また、リサイクルされる屑の品位を反映させることが可能となる。

本研究を進めるにあたり科学技術庁金属材料研究所エコマテリアル研究チームの井島 清氏、皆川和己氏には貴重なご助言を頂くとともに、データの探索に協力して頂きました。

アルミ缶リサイクル協会の矢野一也氏にはアルミリサイクルに関する貴重なデータを提供していただきました。厚く御礼申し上げます。

現在、ご指導を頂いている筑波大学の内山洋司教授に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) JEMAI, LCA-Inventory analysis & Examples of application-(2001) pp. 118-179.
- 2) Materials and Science Society of Japan: Global environment and materials (1999) pp. 144-147.
- 3) NEDO, International Investigation on establishment of energy consumption evaluation procedure (1995).
- 4) NEDO, International Investigation on establishment of energy consumption evaluation procedure (1996).
- 5) The Society of Non-Traditional Technology, Fundamental investigation on establishment of environmental load evaluation procedure (1995).
- 6) K. Nakano, H. Miura and Y. Wada: Proceedings for 4th int. Conf. EcoBalance (2000) pp. 325-328.