

# LCAにおけるリサイクルと廃棄物処理 処分の評価手法とその適用

和田安彦<sup>1</sup>・三浦浩之<sup>2</sup>・中野加都子<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

<sup>2</sup>正会員 関西大学助手 工学部土木工学科 (同上)

<sup>3</sup>関西大学研究員 工学部土木工学科 (同上)

素材、製品や社会サービスなどの環境に与える負荷を定量的に評価できる手法として注目を集めているライフサイクルアセスメント(LCA)を用いて、製品等のリサイクルの環境面における効果を評価する手法を提案する。リサイクルプロセスと廃棄物の中間処理および最終処分プロセスにおける環境負荷を詳細に調査・評価し、その結果をもとにリサイクルによる環境負荷の低減量を、製品等をリサイクルせずに廃棄した場合の処理・処分による環境負荷とリサイクルにより得られる再生品をバージン資源から製造する場合の環境負荷の和と当該製品をリサイクルする際の環境負荷との差から求めた。本手法を洗濯機に適用し、リサイクルが環境負荷低減に効果的であることを示した。

**Key Words :** Life Cycle Assessment(LCA), recycle, environmental impact, refuse, waste final disposal

## 1. 結論

最近、紙や鉄などのリサイクル事業は、これらの再生資源の市場価格が極端に低下して、回収事業・活動が経済的に成立しなくなっている。このため、再生資源を分別している事業者、分別回収している自治体では、費用を支払ってリサイクル事業を継続しているところも少なくない(いわゆる「逆有償」リサイクル)。これは、リサイクル自体は経済活動であり、経済的に採算が成り立たなければリサイクルが存続できないからである。現在のリサイクル事業は、回収・再生して得られる鉄や紙などの市場価値が低く、輸入バージン資源から製造される鉄、紙の方が市場価値が高いこと、国内で回収・再生するよりも材料を輸入して製造した方が低コストになること等から、経済的に不利な状況下にある。このため、地球環境保全面からの個人のリサイクルへの意欲が高くても、現実的にはリサイクルが低迷している。

このようにリサイクルは市場経済の面で不利な状況に追い込まれており、この問題を解決するために、今後、経済的な側面からのアプローチが必要である<sup>1)~4)</sup>。一方で、リサイクル活動を進めるには、「環境基本法」においても指摘されたように、製品等の環境への負荷をその全生涯(ライフサイクル)において定量的に評価して、環境保全面のリサイクルの効果を明確に示す

こと及びこれを社会経済システムに反映することが必要である<sup>5)・6)</sup>。この環境に与える各種の負荷を定量的に評価する有力なツールがライフサイクル・アセスメント(LCA)である。これは製品を対象とした場合には、その原材料の抽出と加工、製造、輸送、使用、再使用、保守、リサイクル、最終処分の全過程における環境への影響を総合的に評価する手法である。国際的にはISO(国際標準化機構)においてもLCAの国際的規格化が行われている。LCAの中でも廃棄物処理やリサイクルは、製品のライフサイクルにおける最終段階として重要な意味を持つと位置づけられているが、欧米の企業で行われてきたLCAは廃棄の評価は廃棄物量のみであり、日本でも評価範囲に廃棄過程を含めている研究事例<sup>7)</sup>はあるが、実際にインベントリを行っているものはほとんどない。

このため、現時点ではマテリアルリサイクルやサーマルリサイクル等様々な方法で行われているリサイクルを定量的にかつ的確に評価する手法は確立されていない。さらに、最終処分することによる環境負荷としては

- ①最終処分場に埋め立てる際に使用する機器の運用に伴う環境負荷
- ②最終処分場に埋め立て後、対象廃棄物から排出される物質による環境負荷
- ③最終処分するために、ある空間を占有すること

による環境負荷（自然環境の一部分の占有により失われた環境資源）

を考えるべきであるが、①以外の環境負荷についての評価はほとんど行われていない。

本論文は、現時点でLCA手法のうちで最も不確実なリサイクル・再資源化と廃棄物の最終処分環境負荷面からの評価方法について検討するものである。

## 2. リサイクルの環境面からの評価手法

### (1) リサイクルの評価の考え方

リサイクルは単なる廃棄物問題でなく、資源消費問題でもあり、資源・エネルギーの節約、環境への負荷の軽減からも評価する必要がある。したがって、リサイクルの評価においては次の点を考慮すべきである。

- ①再生資源の原材料としての使用による環境汚染、自然環境破壊のインパクトの減少
- ②廃棄物処理・処分における環境負荷の軽減
- ③最終処分地の寿命の延命化による環境負荷の軽減
- ④バージン資源消費量の減少

リサイクルを環境面から評価する場合には、以上の視点を範囲に入れることが必要である。

### (2) リサイクルの環境面の評価

#### a) リサイクルの環境面の効果の評価式

ある製品のリサイクルの環境面への効果を次式により評価する。

$$ER = EIV + EID - EIS \quad (1)$$

ここに、

$ER$  : リサイクルによる環境負荷低減量

$EIV$  : バージン資源を用いた製品の全ライフサイクル（廃棄後の処理処分を除く）の環境負荷

$EID$  : 廃棄物処理・処分による環境負荷

$EIS$  : 再生資源を用いた製品の全ライフサイクル（廃棄後の処理処分を除く）の環境負荷

製品のリサイクル方法には、再生資源を同じ製品の原材料として再び用いる方法（クローズドループリサイクル）と他の製品の原材料として用いる方法（オープンループリサイクル）とがある。ここで提案する評価式は、再生資源を用いて製造する製品の全ライフサイクルにおける環境負荷を評価するものであるため、どちらのリサイクル方法も評価できる。なお、ここでは問題を単純化しリサイクルの効果に焦点を当てるため、再生資源を用いた製品とバージン資源を用いた製品は同一の性能、品質であると仮定する。式(1)の評価範囲を図-1に示す。

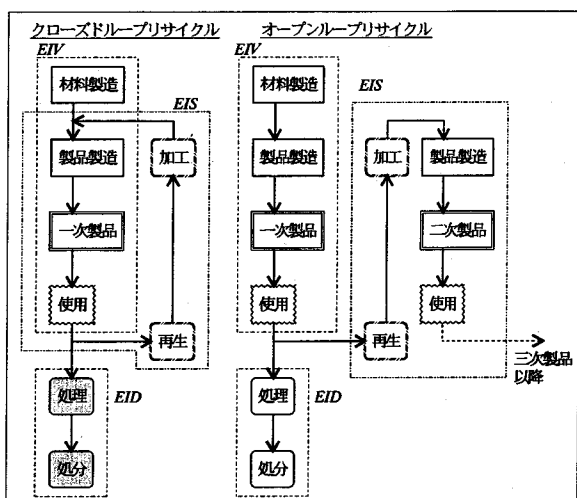


図-1 リサイクルの環境面の効果の評価の考え方

これまで行われているLCAは主にバージン資源を用いた製品の全ライフサイクルの環境負荷の定量評価であり、①廃棄物処理・処分による環境負荷、②再生資源を用いた製品の全ライフサイクルの環境負荷の定量評価はあまり行われていない。そこで、次にこれらの環境負荷の定量評価方法について検討する。なお、関連する施設の建設、設備の製造や社会資本整備に係る環境負荷が個々の施設、設備毎に大きく異なること、および、これらの環境負荷の製品への割り振り方が未定義であることから、評価対象としない。したがって、廃棄物処理・処分及び再生品製造における直接的な環境負荷のみを評価対象とする。

#### b) バージン資源を用いた製品の全ライフサイクルの環境負荷

バージン資源を用いた製品の全ライフサイクルの環境負荷は次式で評価する。

$$EIV = E_f + E_n + E_{TMV} + E_{MV} + E_{TGV} + E_{GV} + E_{TSV} + E_s + E_{TU} + E_U \quad (2)$$

ここに、

$E_f$  : バージン資源を確保するために破壊される環境資源・アメニティの損失による環境負荷

$E_n$  : バージン資源の採掘における環境負荷

$E_{TMV}$  : 材料製造地までの輸送時の環境負荷

$E_{MV}$  : 材料製造時の環境負荷

$E_{TGV}$  : 材料製造地から対象物製造地までの輸送時の環境負荷

$E_{GV}$  : 対象物製造時の環境負荷

$E_{TSV}$  : 対象物製造地から販売店までの輸送時の環境負荷

$E_s$  : 対象物の販売に伴う環境負荷

$ETU$  : 販売店から消費者までの輸送時の環境負荷

$EU$  : 対象物の使用に伴う環境負荷

なお、各プロセスから排出される廃棄物に係る環境負荷は、各プロセスの環境負荷に加える。

### c) 廃棄物処理・処分による環境負荷

廃棄物処理・処分による環境負荷としては、処理・処分するための収集作業に伴う環境負荷と、各施設間の輸送に伴う環境負荷、及び、処理・処分に伴う環境中への各種排出物による環境負荷とがある。

中間処理には焼却処理と破碎処理があり、それぞれ設備・機器の運用に伴う環境負荷と処分時に環境中に排出される環境負荷がある。

最終処分の供用時の環境影響を「廃棄物の最終処分場に係る環境影響評価技術指針（厚生省）」や実際の最終処分場計画における環境影響評価から抜き出すと次のようになる。

- ・処理水放流による水質、植物・動物への影響
- ・整地用機械による騒音・振動の発生
- ・埋め立て廃棄物からの悪臭の発生
- ・廃棄物の埋め立てによる地形・地質への影響
- ・地形の変更などによる植物・動物・景観・野外レクリエーションへの影響

環境へ負担を強いるものではない景観と野外レクリエーションへの影響を除いて、以上の環境影響を整理すると次の3つとなる。

#### ①最終処分場への埋め立て作業に必要な機器の稼働に伴う環境影響

廃棄物の埋め立て処分には、ブルドーザー、ダンプが用いられている。これら機器を運用することによって、化石燃料が消費され、大気汚染物質が排出される。

#### ②最終処分場埋め立て物質からの排出物による環境影響

最終処分場に埋め立て後、対象廃棄物からは浸出水と温室効果ガス（メタンガス、 $CO_2$ 等）が排出される。

#### ③最終処分場建設による環境資源の喪失

最終処分するために、ある自然環境地形を変更することにより、そこに存在していた自然環境資源が失われる。

これより、廃棄物処理・処分による環境負荷は次式で評価する。

$$EID = ECP + EP + ETC + ED + EE + EA \quad (3)$$

ここに、

- $ECP$  : 収集時の環境負荷
- $EP$  : 中間処理（焼却または破碎）時の環境負荷
- $ETC$  : 中間処理施設から最終処分場までの輸送時の環境負荷

表-1 評価対象洗濯機のマテリアル構成

材料名	プラスチック槽	ステンレス槽
鉄類	17.28	19.58
アルミニウム	0.32	0.32
PP	9.28	8.88
PS	0.96	0.96
その他	4.16	2.26
合計	32.00	32.00

(単位 ;kg)

$ED$  : 最終処分場に埋め立てる際に使用する機器の運用に伴う環境負荷

$EE$  : 最終処分場に埋め立て後、対象廃棄物から排出される物質による環境負荷

$EA$  : 最終処分するために、ある空間を占有することによる環境負荷（自然環境の一部分の占有により失われた環境資源）

### d) 再生資源を用いた製品の全ライフサイクルの環境負荷

再生資源を用いた製品の全ライフサイクルの環境負荷は次式で評価する。

$$EIS = ER + ETM + EM + ETG + EG + ETS + ES + ETU + EU \quad (4)$$

ここに、

$ER$  : 再生資源の回収・選別等に伴う環境負荷

$ETM$  : 材料再生地までの輸送時の環境負荷

$EM$  : 材料再生時の環境負荷

$ETG$  : 材料再生地から対象物再生地までの輸送時の環境負荷

$EG$  : 対象物再生時の環境負荷

$ETS$  : 対象物再生地から販売店までの輸送時の環境負荷

$ES$  : 対象物の販売に伴う環境負荷

$ETU$  : 販売店から消費者までの輸送時の環境負荷

$EU$  : 対象物の使用に伴う環境負荷

なお、各プロセスから排出される廃棄物に係る環境負荷は、バージン資源を用いた製品の場合と同様に、各プロセスの環境負荷に加えて評価する。

## 3. 評価対象と評価範囲

### (1) 評価対象

評価対象は最近リサイクル性を考慮して洗濯槽をプラスチック（PP）からステンレスに転換しつつある洗濯機とする。リサイクル効果に加えてこのリサイクル性を考慮した材質変更の効果を評価するため、洗濯容量が同一で、洗濯槽の材質だけが異なる洗濯機を、実機種を元にモデル的に設定した（表-1）。

### (2) 評価範囲

表-2 廃棄物収集のシナリオ

プロセス	輸送車両	積載量	輸送距離
販売店 →回収業者	2tトラック 8.0km/l	1.2t	30km
回収業者 →中間処理業者	4tトラック 6.5km/l	3.2t	50km
中間処理業者 →最終処分場	10tトラック 3.5km/l	8.0t	10km

以下、このリサイクルの環境面の効果の評価式で必要となる各ライフサイクルの環境負荷の定量評価方法について検討していく。

なお、バージン資源を用いた製品の製造プロセスまでのライフサイクルの環境負荷の評価はいくつかの事例がある。ここでは、基礎素材のエネルギー解析調査報告書<sup>8)</sup>の値を用いる。

#### 4. 廃棄物処理・処分による環境負荷の定量評価方法

##### (1) 中間処理による環境負荷の定量評価方法

###### a) 収集

廃棄物処理・処分のための収集の環境負荷は、収集車が収集作業で消費した化石燃料の量とその燃焼に伴う大気汚染物質排出量により定量評価できる。

収集作業の内容や収集車は各自治体により異なるため、定量評価するには具体的な作業内容と方法を次のいずれかの手段により設定する必要がある。

①評価対象地域を定め、その収集実態より設定

②収集に関する適切なシナリオを設定

本研究では②の方法を用いる。シナリオを表-2に示す。なお、化石燃料の燃焼に伴う大気汚染物質排出量は、各燃料固有の排出原単位を用いて定量化する。

###### b) 破碎減容化処理

ごみの破碎処理は埋立地の延命化のためのごみ減容化のために行われ、有価物回収のための選別の前処理ともなる。通常、一般家庭から出る粗大ごみ(タンス、冷蔵庫、洗濯機、畳、カーペット、布団、繊維製品等)建築廃材、プラスチック製品などは上部が開放になっている2軸式破碎機で破碎され、自動車等の大型ごみをスクラップするような場合には3軸構造の粗破碎機が用いられる<sup>9)</sup>。破碎機は電気により稼働するため、破碎時の環境負荷としては消費する電力をつくるために費やされた資源量と発電時の大気汚染物質排出量を定量評価する。さらに、破碎時に生じる微細ダストや破碎機冷却水の消費とこれに含まれる汚濁物質も定量評価する。

破碎時の環境負荷は処理されるごみの性状よりも破碎機の性能に左右される。このため、環境負荷は個々

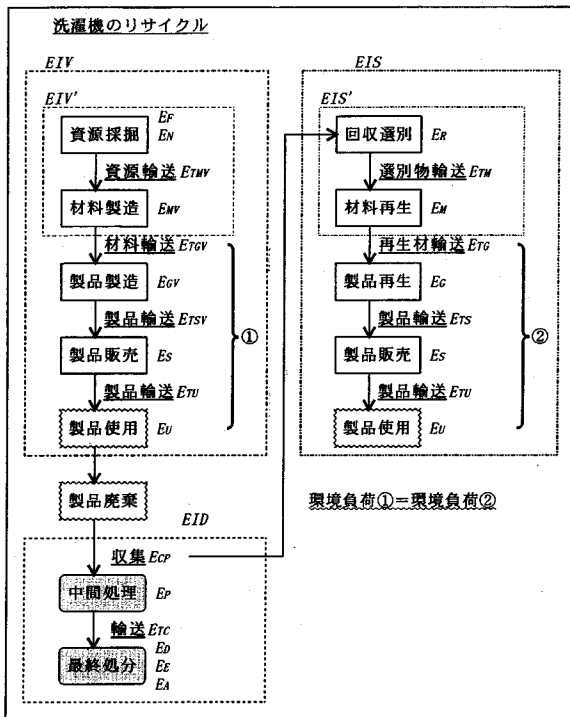


図-2 洗濯機リサイクルの環境面の効果の評価範囲

洗濯機を使用者が廃棄した以降を評価範囲とする。

廃棄された洗濯機は、販売店から回収業者を経て中間処理業者へ輸送され、ここで破碎された後、くず鉄が磁選され、これを原料に鉄が再生される。

ここで、バージン資源から製造される材料と同じ性能を有する材料を回収鉄により作ると考え、材料製造より後のプロセスは同一と考える。これより先に示したリサイクルによる環境負荷低減算出式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 ER &= EIV' + EID - EIS' \\
 &= (EF + EN + ETMV + EMV) \\
 &\quad + (ECP + EP + ETC + ED + EE + EA) \\
 &\quad - (ER + ETM + EM)
 \end{aligned} \tag{5}$$

ここに、

$EIV'$  : バージン資源を用いた製品の製造プロセスまでのライフサイクルの環境負荷

$EIS'$  : 再生資源を用いた製品の製品製造プロセスまでのライフサイクルの環境負荷

また、式(5)の評価範囲は図-2に示すものとなる。

鉄をリサイクルする場合でも洗濯機に使用されている非鉄金属やプラスチック樹脂はごみとなる。これについては、破碎し、可燃物は焼却して、最終処分されるものとする。したがって、再生資源を用いた製品の製品製造プロセスまでのライフサイクルの環境負荷には、これらの処理・処分における環境負荷が加わる。

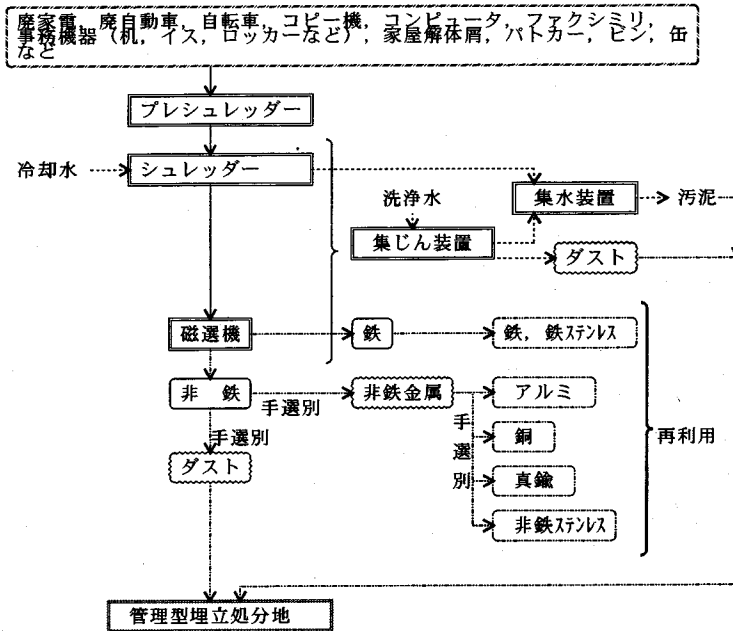


図-3 破碎・選別フロー

表-3 破碎設備の概要

全搬入量	約 1,000 トン/日
消費 電力 軽油	1.55 万 kwh/日 600 ㍓/日
排出物 集塵ダスト (汚泥) ダスト	0.91 m <sup>3</sup> /日 約 200 トン/日

1. 電力の消費；シュレッダー等の稼働用
2. 軽油の消費；油圧ショベル等の稼働用

表-4 破碎・選別時の環境負荷原単位

投入物	排出物
電力 1.55 × 10 <sup>-2</sup> kwh/kg (146 kJ/kg)	CO <sub>2</sub> 2.7 × 10 <sup>-3</sup> kg-C/kg
軽油 6.00 × 10 <sup>-4</sup> l/トン (23.0 kJ/kg)	NO <sub>x</sub> 7.4 × 10 <sup>-6</sup> kg/kg
	SO <sub>x</sub> 5.0 × 10 <sup>-6</sup> kg/kg
エネルギー消費量 1.69 × 10 <sup>2</sup> kJ/kg	ダスト 2.0 × 10 <sup>-1</sup> kg/kg
	汚泥 9.1 × 10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> /kg

の破碎処理ケース毎（施設毎）に定量評価する必要がある。そこで、ここでは日本の代表的な都市にある破碎処理施設における実態を代表値として用いる。

当該施設の破碎・選別フローを図-3に、設備の概要と消費電力、各種排出物などの状況を表-3に示す。

この値から破碎選別時の環境負荷を求めるに当たり、次の仮定を行った。

エネルギー消費：

処理廃棄物の重量に比例

集塵ダスト：

1. 集塵ダストとなる微小なダストの量は処理する

廃棄物により異なるものと考えられるが、処理廃棄物（製品）よりどれだけの微小ダストが生じるかは不明

2. 中間処理施設全体から発生する集塵ダストを処理廃棄物重量に比例すると考える。

再生資源回収量：

対象洗濯機の金属材料のうち9割を回収・再生ダスト：

1. 中間処理により有価物を回収した後に発生するダスト量は、処理する廃棄物により大幅に異なる。
2. このため、廃棄物の中間処理により生じるダスト量をその材料構成より推定する。
3. ダストはプラスチック類に加えて、鉄、アルミ等の金属類の中で有価物として回収できるある一定の大きさ以上のもの以外の金属類が含まれる。
4. そこで、処理廃棄物の金属材料の内、9割は回収・再生可能であり、残りはごみとして処分すると考える。

これより、環境負荷原単位は表-4の通りとなる。

#### c) 焼却処理

ごみ中の紙、厨芥、プラスチック類、繊維等の可燃物を焼却処理するとCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等の地球温暖化ガス、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）、硫黄酸化物（SO<sub>x</sub>）、ばいじん等が発生する。また、塩素を含む塩化ビニル系プラスチック類やゴム、皮革類および塩類を多量に含んで

表-5 ごみ1kg焼却処理時の環境負荷  
(設備能力; 200t/日×3基)

		環境負荷原単位
助燃剤 (都市ガス)		$4.8 \times 10^{-4} \text{ Nm}^3 / \text{kg}$
排ガス量		3.3 Nm <sup>3</sup> / kg
排ガス濃度	ばいじん	$3.3 \times 10^{-5} \text{ kg / kg}$
	SOx	$3.3 \times 10^{-2} \text{ kg / kg}$
	NOx	$3.1 \times 10^{-1} \text{ kg / kg}$
	HCl	$1.6 \times 10^{-4} \text{ kg / kg}$
排ガス処理 薬品消費量	NaOH	$5.5 \times 10^{-3} \text{ kg / kg}$

いる厨芥類により塩化水素が発生する<sup>10), 11)</sup>。これらがごみ焼却処理時の直接的な環境負荷となる。

これらの環境負荷の発生は燃焼反応によるため、焼却するごみの組成(製品の材料構成、元素構成)や燃焼条件、焼却方式によりその発生量、排出濃度は異なる<sup>11)</sup>。そのため、環境負荷を定量評価するには、対象物毎の材料構成、元素構成とその燃焼に関するデータ及び焼却処理方式に関するデータが必要である。

CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>の排出については、都市ごみ処理に伴う排出量調査研究結果<sup>12)</sup>や、平均的な都市ごみ組成を想定し、簡単な焼却炉熱精算を行って焼却時の物質収支を求めた研究<sup>13)</sup>がある。また、対象物中の炭素量より化学反応式を用いてCO<sub>2</sub>排出量を求める方法もある。本研究では、通常、評価しようとする製品の元素構成を知ることは困難であることから、実施設における排出量調査結果を基にする。

NOxの生成には焼却しようとする物の窒素含有率と燃焼ゾーンの酸素濃度が関与するため、ある対象物の焼却処理時のNOx排出量を求めるには、対象物中の窒素量と燃焼条件の関係を定量評価しなければならない<sup>11)</sup>が、これは実際上困難である。このため、通常、発熱量あるいは処理量ベースのNOx排出係数が用いられるが、排出係数はごみ質、炉構造、燃焼方法等により異なる。そこで、本研究では、文献等で示されている排出係数(例)1.1 kgNO<sub>x</sub>/ton<sup>14)</sup>を参考の上、実施設における排出量調査結果から排出値を設定した。

SOx排出濃度はごみのS分含有率から推測できるが、この値はごみのS分含有率から理論的に計算できる値よりも一般的に低い<sup>11)</sup>ことから、これも実施設における排出量調査結果から排出値を設定した。

HClガス発生量は、対象物中の塩素含有量と燃焼状況により推定できる<sup>10)</sup>が、必要となるデータが揃わないため、実施設の実績値を代表値として用いる。

ここで、環境への負荷として考える場合には、環境中への排出が問題であることから、排ガス処理後の各汚染物質ガス排出量を評価すべきである。この場合、

ガス排出量は排ガス処理設備の性能に影響を受けるため、施設によるばらつきが生じる。すなわち、環境負荷としてのガス排出量の評価は、評価する対象物がどのような焼却処理施設において処理されているかを考えておく必要がある。また、排ガス処理には薬品等を消費するが、これも環境負荷に加えて評価する。

以上より焼却処理時の環境負荷を表-5のように設定する。

また、焼却処理後の灰分量に関して次に示すようなデータがある。

- ①生ごみを焼却すると重量は1/6、容積は1/10～1/20になる<sup>15)</sup>。
- ②A市の焼却処理施設(全連続燃焼方式、処理能力; 900t/日)の設計基準における熱灼減量は乾燥状態において4%以下。
- ③A市における実績(H5年度)
 

処理量	632,993 t	} 焼却灰分 14.8%
焼却残さい	93,400 t	
- ④PS、PP容器の燃焼後灰分量<sup>16)</sup>

PSP容器	0.9%
フィルターPS容器	1.7%
フィルターPP容器	40%

これらより、プラスチック樹脂など可燃分の焼却処理後の灰分量は各種データの平均的な値として10%とする。

評価対象洗濯機では、使用しているPP、PSを焼却処理し、焼却後の灰分を埋め立て処分すると考えた。

## (2)最終処分による環境負荷の定量評価

### a)最終処分場への埋め立て作業に必要な機器の稼働に伴う環境影響

廃棄物の埋め立て処分には、ブルドーザー、ダンプが用いられている。これら機器を運用することによって、化石燃料が消費され、大気汚染物質が排出される。廃棄物の埋め立て処分におけるブルドーザー、ダンプの稼働に伴う環境負荷は、ある都市の最終処分地における受入廃棄物量と埋め立てに伴う各種作業で消費した軽油量より算出できる。すなわち、単位重量の廃棄物を埋め立て処分することによる燃料(軽油)消費量を求め、この消費量にCO<sub>2</sub>、NOx、SOx排出係数を乗じることで大気汚染物質排出量を求める。

ここでは、実際の埋立処分場における処理廃棄物量と関連機器の稼働により消費される燃料の量を調査し、この値とCO<sub>2</sub>等の排出係数より、単位重量の廃棄物を埋め立て処分することによる軽油消費量とCO<sub>2</sub>等排出量を求めた(表-6)。

排出係数としてCO<sub>2</sub>では「地球温暖化対策地域推進モデル計画策定調査報告書(北九州市 平成4年)」

表-6 埋め立て作業時の環境負荷原単位

投入物	排出物
軽油 $9.4 \times 10^{-4}$ l/kg	CO <sub>2</sub> $6.7 \times 10^{-4}$ kg -C/ kg
工機具-消費量	NOx $7.5 \times 10^{-6}$ kg/kg
36 kJ/kg	SOx $3.0 \times 10^{-6}$ kg/kg

等が、NOxでは「道路事業環境影響評価に用いる排出係数(案)について(建設省 平成2年)」等を参考にした。

b) 最終処分場埋め立て物質からの排出物による環境影響

最終処分場からの環境負荷としては浸出水と廃棄物の分解によるガス発生がある。

陸上埋立地では降雨の浸透水による浸出水の発生があり、海面埋立地ではこれに残留海水による浸出水が加わる。一般に浸出水量・水質の変動は激しく、埋め立て廃棄有機物の分解が起こるため埋め立て初期は高濃度の有機物が浸出し、数年後には生物分解が困難な有機物の浸出が大半となる<sup>19)</sup>。

浸出水量は降雨量、埋め立ての段階(埋め立て作業中か埋め立て終了後か)、埋め立てごみ及び覆土中の水分保有量、表面の状態(浸透のしやすさ)等に影響され、不確定なパラメータが多いため、実地調査に基づいて浸出水量を定量評価するのが望ましい。これが困難な場合にはタンクモデル<sup>20)</sup>等を用いて浸出水量を予測する。

一方、浸出水水質は主に埋め立てるごみの質により決定されるが、埋め立て構造、埋め立て作業、埋め立て地規模、埋め立て期間等の違いによって変化する<sup>21)</sup>。しかし、環境中へ排出される際には、処理施設によって処理が行われているため、環境影響としてはこの処理後の浸出水に含有される汚濁物質の量を考える。さらに、処理を行う時に消費されるエネルギー、薬品等も考慮する。

発生ガスとしては埋立処分場からは埋め立て有機物の好気性分解に伴ってCO<sub>2</sub>が、嫌気性分解に伴ってメタンガスが発生する。発生ガスの濃度についての測定は行われているが、発生量の測定は少なく、これに関する研究は多くない。一方、ガスの発生源である埋め立て物中の易分解性有機物の量や比率が明らか場合には、その分解速度式を用いてガス発生量を予測する<sup>22)</sup>ことができる。

しかし、対象とする洗濯機の易分解性有機物の量が明らかでないため、ある都市の最終処分地において独自に調査等を実施して、実データを得ることにより評価する。

埋立処分場からの浸出水に含有される汚染物質等は、埋立処分場内に埋め立てられたすべての廃棄物を発生

表-7 埋立処分場浸出水の環境負荷原単位

投入物	排出物
電力 $2.0 \times 10^{-3}$ kWh/kg	CO <sub>2</sub> $3.0 \times 10^{-4}$ kg -C/ kg
工機具-消費量 18.8 kJ/kg	NOx $3.4 \times 10^{-7}$ kg/kg
	SOx $4.0 \times 10^{-7}$ kg/kg
FeCl <sub>3</sub> $1.3 \times 10^{-4}$ kg/kg	BOD $2.8 \times 10^1$ mg/kg
高分子 $2.6 \times 10^{-6}$ kg/kg	COD $6.8 \times 10^1$ mg/kg
メタ-ル(50%) $8.5 \times 10^{-5}$ kg/kg	SS $6.0 \times 10^1$ mg/kg
活性炭 $1.6 \times 10^{-4}$ kg/kg	CN $2.0 \times 10^{-1}$ mg/kg
	Cd $2.0 \times 10^{-3}$ mg/kg
	Pb $1.0 \times 10^{-2}$ mg/kg
	Cr <sup>6+</sup> $4.1 \times 10^{-2}$ mg/kg
	As $1.0 \times 10^{-3}$ mg/kg
	Hg $1.0 \times 10^{-3}$ mg/kg
	7種Hg $1.0 \times 10^{-3}$ mg/kg
	PCB $1.0 \times 10^{-3}$ mg/kg
	汚泥 $1.6 \times 10^{-3}$ m <sup>3</sup> (Wet)/ kg

源とするが、ここでは便宜的に「ある年度に埋め立てられた廃棄物よりその年度の浸出水・汚染物質及びガスが発生した」と考えて、受入廃棄物量当たりの浸出水量、浸出水負荷、発生ガス量を求めた。また、同時に浸出水処理で消費される電力、薬品や処理により発生する汚泥量も求めた(表-7)。

c) 最終処分場建設による環境資源の喪失

これは最終処分するために、ある空間を占有することによる環境負荷(自然環境の一部の占有により失われた環境資源)の喪失による環境負荷である。

最終処分場の建設に伴い失われる環境資源として、陸上埋め立て時に失われる緑を対象とする。

森林や草地、農地の環境的価値には次のものが考えられる<sup>23)~27)</sup>。

- ①光合成によるCO<sub>2</sub>の吸収と酸素の供給
- ②水の保持と洪水緩和
- ③木材、食料、工業原材料の提供
- ④動植物の生息環境の提供
- ⑤水質保全

これらは緑地の状態により影響を受けるため、その定量評価は難しい。そこで、最終処分場建設による環境資源の喪失については、森林によるCO<sub>2</sub>固定量と酸素供給量により定量評価した。この際、最終処分を行うことにより失われる面積は、埋め立て容量と埋め立て面積及び受入廃棄物量より、受入廃棄物単位重量当たりの平均埋め立て面積を求め、これを受入廃棄物重量に乗じることから求めた。

森林としては最終処分場を建設するような比較的低い山地において最も一般的である落葉広葉樹林とした。

光合成による1年間のCO<sub>2</sub>吸収量と酸素供給量は平均的な1haの日本の森林において次の値(単位; ton/ha/年)である<sup>25)</sup>。

表-8 各種森林の炭酸ガス固定能(概算)

森林型	年間生産量 (ton/ha/年)	炭酸ガス固定能	
		資料 <sup>25)</sup> (ton/ha/年)	資料 <sup>26)</sup> (t-C/ha/年)
熱帯降雨林	22	32.3	9.90
熱帯季節林	16	23.5	7.20
乾燥疎林	3.4	5.0	
常緑広葉樹林	13	19.1	5.85
落葉広葉樹林	12	17.6	5.40
亜寒帯疎林	8	11.8	3.60
杉人工林	18	26.6	
松人工林	14	21.8	

	CO <sub>2</sub>	酸素
光合成	-144	+108
呼吸	+96	-72
収支	-48	+36

また、各種森林の炭酸ガス固定能として表-8の値が報告されている。

これらの値を用いて森林によるCO<sub>2</sub>吸収量と酸素供給量を定量評価する。

### 5. 再生資源を用いた製品の全ライフサイクルの環境負荷の定量評価方法

再生資源を用いた製品の全ライフサイクルの環境負荷としては、回収した鉄くずから鉄を再生するまでのプロセスを考える。

#### a) 再生資源の回収・選別等に伴う環境負荷

再生資源の回収及び選別に伴う環境負荷は、先に示した廃棄物の収集と同じである。

#### b) 材料再生地までの輸送時の環境負荷

中間処理施設において選別された鉄くずは製鉄メーカーに運ばれる。この輸送に伴う環境負荷については、表-9のシナリオを設定して評価した。

#### c) 材料再生時の環境負荷

電炉・連続鋳造(再生鉄の製造工程)による粗鋼製造プロセスの物質収支フローを図-4に、消費エネルギーを表-10に示す<sup>8)</sup>。エネルギー消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量は、各エネルギー源の消費量にエネルギー源別のCO<sub>2</sub>排出原単位を乗じて求める。再生鉄製造時の環境負荷としては、これら値を用いる。

### 6. リサイクルの環境面の効果の定量評価

#### (1) 定量評価結果

以上の方法により求めた環境負荷をプラスチック槽の場合を図-5~8に、ステンレス槽の場合を図-9~12に示す。リサイクルによる効果を明確にするため、バージン資源を用いた製品の製品製造プロセスまでのライフサイクルの環境負荷と廃棄処理・処分による環

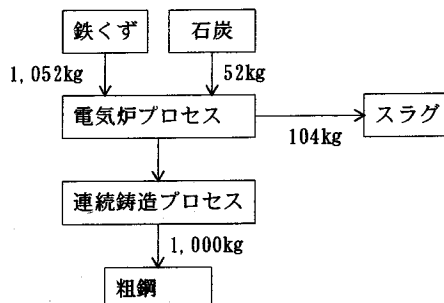


図-4 電炉・連続鋳造による粗鋼製造の物質収支フロー

表-9 鉄くず輸送のシナリオ

プロセス	輸送車両	積載量	輸送距離
中間処理業者 →製鉄メーカー	20tトラック 1.0km/l	20.0t	40km

表-10 再生鉄製造時のエネルギー消費量(粗鋼1t当たり)

エネルギー源	使用量	エネルギー消費量
コークス	2 kg	60.3MJ ( 14,400 kcal)
コークス炉ガス	7 Nm <sup>3</sup>	140 MJ ( 33,600 kcal)
蒸気	27 kg	88.2MJ ( 21,060 kcal)
酸素	(32 Nm <sup>3</sup> )	-
電力	469 kWh	4,417MJ (1,055,250 kcal)
その他	-	184MJ ( 44,000 kcal)
合計	-	4,889.5MJ (1,168,310 kcal)

注1 酸素は発生に必要な電力量として電力の使用量及び熱量変換値に加算した。

注2 エネルギー源のその他は上記表に示した以外の各種エネルギーであり、エネルギー消費量への換算は個々のエネルギーを換算した値の合計値として示した。

境負荷を足し合わせたものを、再生資源を用いた製品の製品製造プロセスまでのライフサイクルの環境負荷と比較した。また、評価結果は前者の環境負荷を1とした相対値で表している。ただし、エネルギー消費量については前者の総エネルギー消費量を100とした相対値とした。

#### (2) リサイクル効果

リサイクル効果を天然資源消費量、エネルギー消費量、大気汚染物質排出量、水質汚染物質排出量毎に図に示している。基本的な傾向は洗濯槽の材質が異なっても同じである。

天然資源消費量では焼却時の排ガス処理で用いるNaOHを除くすべての資源の消費量を減少化でき、リサイクル時の資源消費量はバージン資源使用時の約7-15%である。



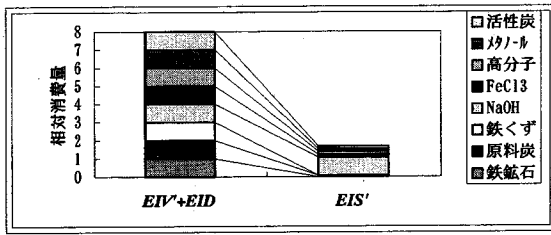


図-5 鉄リサイクルの効果 [プラズマ槽]  
(天然資源消費量)

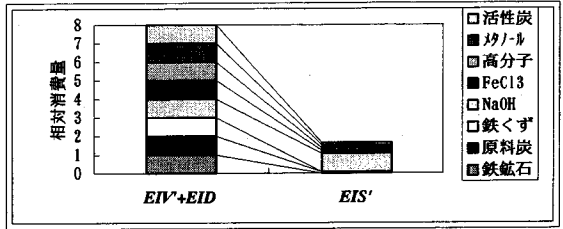


図-9 鉄リサイクルの効果 [ステンレス槽]  
(天然資源消費量)

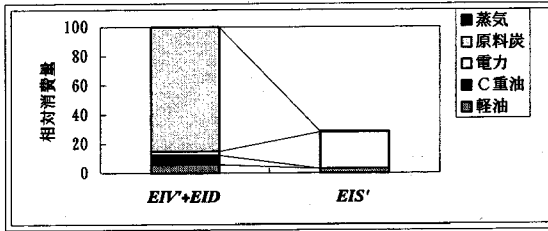


図-6 鉄リサイクルの効果 [プラズマ槽]  
(エネルギー消費量)

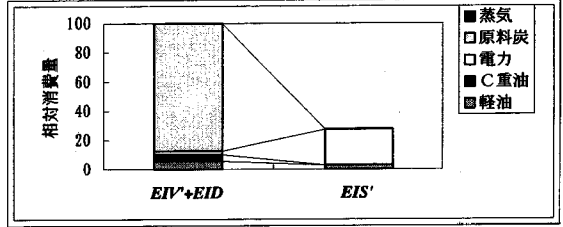


図-10 鉄リサイクルの効果 [ステンレス槽]  
(エネルギー消費量)

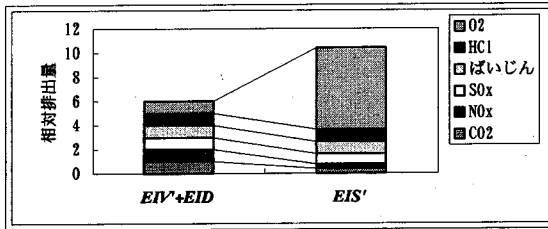


図-7 鉄リサイクルの効果 [プラズマ槽]  
(大気汚染物質排出量)

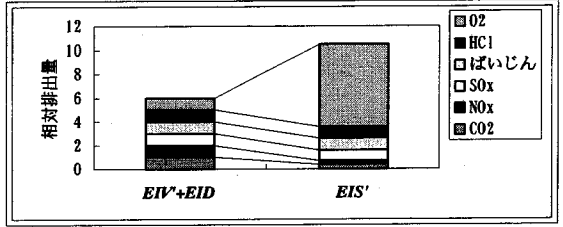


図-11 鉄リサイクルの効果 [ステンレス槽]  
(大気汚染物質排出量)

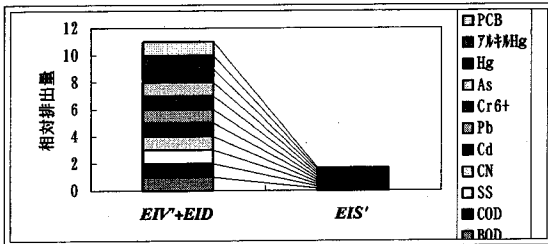


図-8 鉄リサイクルの効果 [プラズマ槽]  
(水質汚染物質排出量)

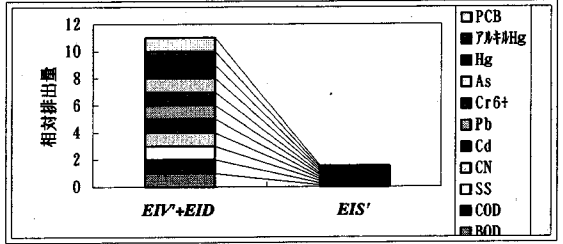


図-12 鉄リサイクルの効果 [ステンレス槽]  
(水質汚染物質排出量)

エネルギー消費量ではリサイクル時には電炉により鉄くずを溶解するため電力消費量が増えるものの、原料炭の消費量がなくなるため、リサイクルによりバージン資源使用時の約30%のエネルギー消費で済む。

大気汚染物質排出量ではCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>排出量はバージン資源使用時の30-40%に減少化できるが、SO<sub>x</sub>、ばいじん、HClは焼却時の排出量の比率が相対的に高いためリサイクルによる減少化効果は少ない。なお、酸素については最終処分による森林伐採によって供給されなくなる酸素量の差を相対的に表しているが、リサイクルすることによって森林からの供給酸素量の減

少を約1/7に抑えられている。

水質汚染物質は最終処分地からの浸出水に起因し、その量が埋め立て量に比例すると設定しているため、リサイクルによって最終処分するごみ量が減少したことにより浸出水起因の水質汚染物質も減少化できている。しかし、現実的には鉄自体から図中に示したような水質汚染物質がすべて浸出するとは考えられず、最終処分時の浸出水含有汚染物質の評価については、個々の廃棄物(製品)毎の浸出実験等に基づいた排出汚染物質の特定とその排出量の定量的評価が必要である。

また、本論文では埋立処分地による空間消費の環境影響を森林によるCO<sub>2</sub>固定量と酸素供給量のみで評価しているため、環境影響を過小評価している。このため、より多くの環境影響を考慮すると、リサイクルによる環境影響低減化効果はより大きなものとなる。

### (3) 製品構成材料の違いによるリサイクル効果の相違

環境に配慮した製品づくりとして洗濯槽をプラスチック槽からステンレス槽に変更することが行われているが、全ライフサイクルの環境負荷における効果からみた場合、洗濯槽の材質変更はあまり環境負荷の削減に寄与していない。これは洗濯機全体の鉄使用量からみて洗濯槽の占める割合は約13%と少なく、大幅な環境負荷の低減化が望めないためである。

すなわち、種々の環境影響（例えば、資源消費と大気汚染物質の排出）を同質、同ウエイトのものと考えれば、洗濯機に代表される家電製品の全ライフサイクルにおける環境負荷低減化には、材質変更よりもリサイクルシステムの構築の方が効果的であることになる。

## 7. 結論

地球規模の環境問題が今後世界で取り組むべき重要課題の一つであるという認識が一般に広まり、リサイクルへの関心、参加も増加しているが、リサイクルシステムの確立は遅々として進んでいない。その要因はバージン資源を用いて製品などを製造する方が再生資源を用いるよりも経済的であるためである。この問題を解決する方法として期待されているのがLCAである。本研究では、現在までのLCAでまだ十分な検討が行われていない製品などが廃棄された後の環境負荷の定量的な評価方法について検討した。すなわち、従来より提案されてきたリサイクルの経済的な面での効果の評価手法を参考に、環境面におけるリサイクルの効果定量的に評価する評価式を提案した。評価式による定量評価に必要な各種原単位を、実地調査を主に、部分的には文献調査結果により補うことにより定量化した。その上で、日常的に使われている耐久消費財の一つである洗濯機を事例として、リサイクル効果の定量評価を行った。

提案した評価式には未考慮の環境影響があり、排出係数の設定にも改良の余地があるものの、洗濯機を対象とした事例研究により、リサイクルの実施は天然資源消費量、大気汚染物質排出量の低減化において効果が高いことを明らかにできた。また、一部の材質変更による環境負荷低減化よりも、リサイクルシステムを構築する方が、その製品の全ライフサイクルにおける環境負荷を低減化できることも明らかにした。

今回、提案した評価式を用いれば、鉄以外の材料のリサイクル実施による効果も定量的に評価可能となり、低環境負荷型製品の開発に有用な情報を提供できると考える。ひいては、社会全体の低環境負荷型への変革にも寄与できるであろう。

課題としては、今回の事例評価において評価できなかった、①バージン資源を確保されるために破壊される環境資源・アメニティの損失による環境負荷、②焼却処理時と埋め立て処分時における対象製品そのものから環境中に排出される汚染物質の定量的評価、③森林によるCO<sub>2</sub>固定と酸素供給以外の最終処分を行うことによる環境資源の損失の評価がある。これらについては、工学者だけでなく、生態学者や農学者等が環境の価値の定量的評価をさらに研究していくことにより解決されていくことを期待する。

謝辞：本研究の遂行にあたり貴重な資料を提供して下さいました関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 寄本勝美：省資源・リサイクル社会の構築，2. リサイクルをめぐる公共政策と経済的手法，ぎょうせい，1994.
- 2) 郡嶋 孝：リサイクルの採算性をめぐる諸問題，廃棄物学会誌，Vol.2，No 2，pp.124-130，1991.
- 3) 植田和弘：廃棄物とリサイクルの経済学 大量廃棄社会は変えられるか，有斐閣選書，497，1992.
- 4) Turner, R.K., "An Economic Evaluation of recycling schemes," in O'Riordan, T. and R.K. Turner (eds.), *Progress in Resource Management and Environmental Planning*, Vol.3, John-wiley & Sons, 1981.
- 5) 山本良一：「LCA～地球へのやさしさの尺度～環境への負荷の定量的評価法」に向けて，日本の科学と技術，Vol.35，No 273，pp.18，1994.
- 6) 永田勝也：環境をまもり育てる技術，9. 製品アセスメントと事業活動の環境管理，ぎょうせい，1994.
- 7) 例えば，松藤敏彦，田中信寿，永谷かおり：ライフサイクルアセスメントにおける廃棄物処理の評価，第5回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.103～105，1994. など
- 8) 基礎素材のエネルギー解析調査報告書，(社)化学経済研究所，1993.
- 9) 山室秀司，今井基久：破碎技術の現状と課題，都市清掃，Vol.46，No 197，pp.11-15，1993.
- 10) 中村一夫，勝見潤子，高月 紘，田中 勝：処理コストに着目した処理困難性の評価，都市清掃，Vol.47，No 200，pp.240-247，1994.
- 11) 昭和57年度・環境庁大気保全局委託，大気汚染物質排出原単位解析検討調査報告書，2-2 廃棄物焼却炉における排出係数の取扱いについて，1983.
- 12) 安田憲二：廃棄物処理に伴う二酸化炭素，メタンの排出とその対策，都市清掃，Vol.43，No 175，pp.145-150，1990.
- 13) 化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査，新エネルギー・産業技術総合開発機構，(財)地球環境産業技術研究機構，(社)化学工学会，1994.

- 14) 昭和 56 年度・環境庁大気保全局委託，大気汚染物質排出量総合調査に係る基本解析調査報告書，1982.
- 15) 田中勝著，廃棄物学入門，中央法規，pp.84-86，1993.
- 16) エフピコ資料
- 17) 地球温暖化対策地域推進モデル計画策定調査報告書，北九州市，平成 4 年.
- 18) 道路事業環境影響評価に用いる排出係数（案）について，建設省，平成 2 年.
- 19) 古田秀雄：最終処分場での浸出水処理対策の現状と課題，PPM，Vol.24，No 7，pp.27-35，1993.
- 20) 中島重旗，吉田秀雄，吉田すみか，平畑 肇：廃棄物最終処分場における浸出水量及び調整設備容量計算に関する研究，廃棄物学会論文集，Vol.2，No 4，pp.65-73，1991.
- 21) 厚生省生活衛生局水道環境部監修：廃棄物最終処分場指針解説 - 1989 年版 -，（社）全国都市清掃会議，pp.112-196，1989.
- 22) 小林栄己，田中綾子，松藤康司，花嶋正孝：埋立構造の違いによる温室効果ガスの発生 (4)，第 5 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，1994.
- 23) E.P.ODUM 著，三島次郎訳，生態学の基礎（上）原書第 3 版，培風館，1981.
- 24) 山岸 宏著，現代の生態学，第 3 版，講談社サイエンティフィック，1989.
- 25) 小島紀徳編著，地球環境セミナー 5 緑がつくる地球の環境，1993.
- 26) 日本林業技術協会編，森林の 100 不思議，東京書籍，1988.
- 27) 電力中央研究所地球環境研究グループ著，地球を守るテクノロジー，プラネット，1991.

(1995. 6. 26受付)

## QUANTITATIVE EVALUATION METHOD OF ENVIRONMENTAL IMPACT OF RECYCLING AND REFUSE DISPOSAL FOR LIFE-CYCLE ASSESSMENT

Yasuhiko WADA, Hiroyuki MIURA and Kazuko NAKANO

Recently, Life-Cycle Assessment (LCA) has been attracting people's attention who have been concerned in the global environmental problems as an method that can assess the environmental impacts of materials, products, several social services and so on. LCA is a tool to evaluate the environmental impacts of a product or activity, across its entire life. But the conventional LCA can not assess the effect of use of recyclable materials into the products adequately. A purpose of this study is to propose a new evaluation method of the process of recycle. The new evaluation method assess the environmental impact of the following three processes; a)Process of waste disintegration, waste incineration and final waste disposal, b)Process of a product manufacturing from natural resources, c)Process of re-manufacturing a product from recycled materials. An effect of the recycle of an electric washing machine on the reducing environmental impacts is evaluated with our evaluation method. It became clear that if we use the new evaluation method, we evaluate reducing the environmental impact by recycle more adequately than before.