**中国における電子廃棄物の適正処理と資源再生に関する****研究**

筑波大学大学院生命環境科学研究科　　李　　楊\*

筑波大学大学院生命環境科学研究科　　沈　　志宏

筑波大学大学院生命環境科学研究科　　氷鉋　揚四郎

**Study on the Treatment Method and Resource Regeneration for E-waste in China**

Yang LI\*　Zhihong SHEN　Yoshiro HIGANO

Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

**Abstract：**

More and more household appliances are produced in company with economic growth and living standard improved. There are growing amount of E-waste at the same time. It would be make pollution and bad for a containable and developmental national economy if randomly discarded or mishandled because of heavy metals and toxic chemical materials which exist in E-waste. This is a big problem which has to be settled urgently. Life cycle assessment（LCA）is an efficient method that could know about the resource expenditure and environmental impact of overall process of their activities, and also a environmental manage tool which is powerful and development in 21century.

**Keywords：** E-waste Life Cycle Assessment Resource Regeneration

**1．研究背景**

今や中国では経済発展や所得向上に伴い，廃棄された電子製品が大量に発生する時期が到来しているため，その処理が新たな問題となってきている。電子製品の中には鉄，銅，金などの多種の金属や樹脂が含まれており，適切に回収すればマテリアルリサイクル材料として再利用可能である。しかし，それらの有価物質は毒性があるため，不適切な分解や処理を行うと周辺の環境および人間の健康に害をもたらすものである。

貴嶼鎮は，広東省珠江デルタの東部に位置し，総面積は52平方キロメートル，総人口は139千人である。ここは毎年750千トン以上のE-wasteが運搬され，輸入されたのを加えて，毎年百万トン以上が処理され，世界最大のE-waste処理基地と言われている。2005年にグリーンピースは貴嶼鎮の手分解作業場で採集された土壌見本を見ると，土壌の鉛の含有量が中国土壌環境質量標準値の750倍まで上回り，E-wasteの手分解工程が生み出した重金属が，すでに許容量を超えており，現地の人間の健康に大きな被害をもたらしていると報告した1-2）。2007年，貴嶼鎮総合改善案3）が提案されたが，建設用地，技術などの問題で，いまだに実施されていない。

LCA（Life Cycle Assessment）は製品やサービスの環境への影響をその生涯にわたって評価する手法である。基本的なLCAの評価範囲は動脈系と静脈系の二種類がある。近年エコタウンと呼ばれる静脈産業の育成を目指した産業都市作りが行われており，使用済製品を再資源化することによって中国の資源消費量を低減しようという意図を持った試みがなされている。再資源化などが資源消費量低減にどのくらいの効果があるかを定量的に把握するには，静脈系に視点を置いたLCAを実施することがより効率的である。中国においては静脈系LCAに関する研究はあまり見当たらないといえる。本研究では静脈系LCA手法を用いて貴嶼鎮に運搬されたE-wasteの手分解から中間処理，再生処理，最終処分に至る全静脈系プロセスを考慮した環境影響評価を行った。主にE-waste処理にどれほどのエネルギーが投入され，どれほどの環境負荷物質が排出されているかについて分析する。

**2．実施評価の手順**

本研究において評価の手順は目的と調査範囲の設定（goal and scope definition），インベントリ分析（Life Cycle Inventory：LCI），影響評価（Life Cycle Impact Assessment：LCIA），経済評価という四つのフェーズから構成される。

**2.1　目的と調査範囲の設定**

LCAを実施する上で取り組むべき課題や前提を定義し，達成すべき目標を明確にするなど，LCAを行うための条件を設定するフェーズである。

**2.1.1　研究目的**

本研究では，貴嶼鎮のE-waste処理に着目し，静脈系LCA評価手法を用いて貴嶼鎮における現行のE-waste処理方法と想定した代替案の環境影響効果等を推定し，そのデータに基づいて現行の処理方法から代替案への改善を評価することを目的とした。

**2.1.2　調査範囲**

貴嶼鎮で2008年の1年間に排出された756,100tのE-wasteを処理することを前提とする。

**2.1.3　方案の設定**

現行の処理方法とは現行貴嶼鎮で実行されている処理方法である。図1に示すように，パソコン本体，小型家電，携帯電話は手で分解された後，基本的に金属，プラスチック（主にPP[[1]](#footnote-1)/PE[[2]](#footnote-2)/PS[[3]](#footnote-3)），電線（PVC[[4]](#footnote-4)と銅），中古部品，その他の廃棄物（ガラスなど）およびプリント回路板（PF[[5]](#footnote-5)とミックス金属）に分けられる。金属や電線は直接的に再生処理をされるか，または直接販売される。プラスチックはプラスチック工場に輸送され，そこの労働者が選別して，PP/PE/PS，PVCを工場で加工，処理し，PFを貴嶼鎮以外のプリント回路板製造工場に運搬し処理する。その他の廃棄物は燃料として貴金属リサイクル工場で使用される。プリント回路板は手で分解される。主な処理方法は，プリント回路板をストーブに載せた鉄板において石炭で加熱しハンダが溶けはじめてから，平らなところでたたく。部品が緩んだ後ピンセットで基板から取り外す。鉄板から地面に落ちてそのまま固形化したハンダも回収する。その他，プリント回路板を自製焼却炉（排気浄化施設無し）で焼却する場合もある。原始的な金属抽出方法を使っているため，環境汚染が非常に深刻である。

以上の現状をふまえて，代替案を想定した。最も重要な変化は二つあり，一つは



図1　現行の処理プロセス

プリントが解決方案として提案したE-wasteの分解センターの新設および鎮内の貴金属リサイクル工場の増築を想定した代替案も検討している。

**2.1.4　データの出所および計算のフロー**

データは，現地調査および中国企業使用エネルギー換算係数表4）により得られたインベントリデータを加え，日本国立環境研究所により発表された産業連関表による環境負荷原単位データブック5）の環境負荷原単位一覧表を用いた。計算はまず現行の処理方法と想定した代替案の各処理段階における環境負荷排出基準量を計算し，その基準量に基づいて年間の総環境負荷排出量を計算した。次に，両案の環境負荷排出量を比較，影響評価を行い，想定した代替案が環境負荷の視点から現行の処理方法より優れているかどうかを検討する。

**2.2　インベントリ分析**

調査或いはデータ収集の過程を示し，対象製品のライフサイクルに従い，そこに投入或いは排出される全ての原材料，エネルギー，廃棄物などの量を確定し，その一覧表を作成することである。インベントリ分析の手法は二つに大別することができる。一つは産業連関法といわれるもので，もう一つは積み上げ法，即ちライフサイクルの各段階において入力と出力を詳細に計算し集計することで全ライフサイクルにおける環境負荷を求めるものである。本研究では積み上げ法を用いた。

材料においては，両案によるE-wasteの投入部分は同じである。回収，再生の部分では，プラスチック処理方法の変更で，PP/PE/PSからのペレットが4,850t少なくなり，その代わりに，固形燃料が9,667t増えた。E-wasteの分解センターを新設し，またプリント回路板処理方法を変更したため，プリント回路板の鉛の回収量が12,600t，電線の銅が3,900t増えた。部品およびプリント回路板基板の下についている錫が回収されなくなり，それぞれ59,100t，4,200t減少した。また。貴金属リサイクル工場の増築に伴って，ニッケル，金などの再生貴金属が現行の2倍に増えた。

エネルギー消耗においては，現行と比べて，代替案の電力は29,480千kwh，石炭は30千トン減少した。一方，プリント回路板処理方法を変更し，RPF固形燃料技術を導入したため，軽油と軽油以外の化石燃料の使用量がそれぞれ4,380千リットル，3,200千リットル増加した。

**2.3　影響評価**

LCIAは環境負荷の発生を通じてどのような環境影響がどの程度発生し得るかについて，定量的に評価するための段階である。本研究では分類化，特性化，正規化，統合化の手順によって評価した。

**2.3.1　分類化**

LCI分析データを関連する影響領域に振り分ける作業を言う。この結果，一つの影響領域中に複数の物質が振り分けられる。本研究では$CO\_{2}，SO\_{2}，NO\_{x}$の物質を環境負荷の対象とし，$CO\_{2}$は地球温暖化に，$SO\_{2}，NO\_{x}$は酸性化に分類される。

各工程の負荷を合計すると，現行の処理方法では年間673,609t-$CO\_{2}$，1,277t-$SO\_{2}$，644t-$NO\_{x}$が各々排出され，代替案では243,630t-$CO\_{2}$，885t-$SO\_{2}$，594t-$NO\_{x}$が各々排出されている。そのうち，$CO\_{2}$の削減幅は最も大きく，63.83％に達した。続いて$SO\_{2}$が30.65％，$NO\_{x}$は7.80％である。

**2.3.2　特性化**

特性化では，同一の影響領域（impact category）に割り振られた複数の環境負荷物質が当該影響領域に及ぼす寄与の違いを考慮した上で，評価対象が及ぼす環境影響量について評価する。その計算は特性化係数とインベントリデータを利用して行う。本研究では地球温暖化の特性係数としてIPCC2001の100年係数を用い，酸性化の特性係数6）はHeijungs *et al* (1992)を用いた（表1）。

$$CI\_{i}＝\sum\_{s}^{}CF\_{i,s}×LCI\_{s}$$

ここで

　$CI\_{i}$：カテゴリーインディケータ（影響領域iにおける特性化結果）；

　$CF\_{i,s}$：特性化係数（物質sが影響領域iに及ぼす寄与度）；

　$LCI\_{s}$：インベントリデータ（物質sの環境負荷量）

1. 酸性雨に関する特性係数

|  |  |
| --- | --- |
| 化学式 | $$CF\_{i,s}$$ |
| HCl | 0.88 |
| $$NO\_{x}$$ | 0.70 |
| $$SO\_{2}$$ | 1 |

**2.3.3　正規化**

特性化によって影響領域ごとに評価結果が得られた。そこで，更に正規化によって，次元が異なる影響領域間について比較するための無次元化を行う。その計算は以下のようにして行われる。規格値は中国の文献資料7）（表2）のデータを利用した。

$$NI\_{i}＝\frac{CI\_{i}}{NV\_{i}}$$

ここで

　$NI\_{i}$：正規化結果；

　$CI\_{i}$：特性化結果；

　$NV\_{i}$：影響領域iの規格値；

$i$：影響領域

1. 中国における規格値および単一化係数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 影響領域 | 規格値$NV\_{i}$ | 規格単位 | 単一化係数$WF\_{i2000}$ |
| 東部 | 中部 | 西部 | 全国 | 中国 |
| 地球温暖化 | － | － | － | 8,700 | kg-$CO\_{2}$/人/年 | 0.83 |
| 酸性化 | 35 | 33 | 41 | 46 | kg-$SO\_{2}$/人/年 | 0.73 |

**2.3.4　統合化**

正規化では，影響領域の間の重要度について重み付けを行っていない。そのため統合化において，これらの重要度を考慮して重み付けを行う。ここでは，中国の文献資料（表2）における単一化係数を利用した。正規化結果に単一化係数を乗じ，それらの和が最終的な単一指標の計算結果となる。結果は無次元の単一指標で表示される。

$$SI＝\sum\_{i}^{}\left[\sum\_{s}^{}\left(LCI\_{s}×CF\_{i,s}\right)×\frac{1}{NV\_{i}}×WF\_{i2000}\right]$$

ここで

　$WF\_{i2000}$：影響領域iの単一化係数

図2　各処理工程の統合化指標の結果

各処理工程の統合化の結果より（図2），現行の処理方法は年間0.72（縦プラス），代替案は0.36となり，半分に削減されたことが分かった。即ち，代替案は環境負荷の削減には有効であると考察される。

現行の処理方法では，中間処理による環境負荷物質の排出量が最も多く，次いで再資源化，手分解の順となった。それに対し，代替案における環境負荷物質排出量は再資源化の占める割合が最も大きく，中間処理，手分解と続いた。そのため，現行の処理方法に比べ代替案による環境負荷物質削減は，中間処理工程による削減が最も効果的であった。それぞれの工程について理由を考察した。まず，手分解においては，現行の処理方法では石炭を燃焼し，プリント回路板のハンダを熔解するために年間30千トンの石炭が使用される。そのため$CO\_{2}$，$SO\_{2}$，$NO\_{x}$を多く排出してしまうものと考えられる。代替案では石炭の代わりクリーン焼却を導入したために，環境負荷が削減される。次に，中間処理においては，代替案ではプリント回路板を処理する時中国危険廃棄物処理基準を厳守するため，危険廃棄物を委託処理するという対策を提言した。そのため中間処理の環境負荷が大幅に削減されたが，運搬過程の環境負荷が増加した。最後に，再資源化においては前処理プロセスの変化およびRPFプラントの新設と貴金属リサイクル工場プラントの増築に伴って，この工程から発生する環境負荷は現行より増加した。

**2.4　経済評価**

本研究における経済評価では，両案において1kgのE-wasteを処理する時どの程度の利益が得られるのか，そしてコストの変化に伴って利益がどのように変化するのかを明らかにすることを目的とする。コストはE-wasteの購入費および廃棄工程の手分解から再生処理に至るまでのランニングコストから構成される。さらに再生材の販売収入を計算し，1kg当たりE-wasteをリサイクルする時どの程度の利益が得られるのかを推定した。

経済評価の結果，代替案による利益は1,104円/kg-E-wasteで，現行に対し約638円が多くなった。また，両案について，環境負荷の比較を行うと，二酸化炭素の削減率が最も多く，そして量に換算すると429,979tとなった．約64％に達した。この量の二酸化炭素を削減するために，代替案によって146,290千元[[6]](#footnote-6)の設備，1,264,122千元のエネルギー代および1,998,566千元のその他費用が増えた。増加したコストを削減された二酸化炭素の量で割り，二酸化炭素の削減コストを算出した。

削減コスト（円/kg-$CO\_{2}$）＝コストの増加量（千元/年）×為替レート÷$CO\_{2}$の削減量（t-$CO\_{2}$/年）＝3,408,977千元/年×13.19円/元÷429,979t-$CO\_{2}$/年＝105円/kg-$CO\_{2}$

環境面と経済面とも現行の処理方法から代替案への移行を実施するべきであることが明らかになった。

**3．まとめおよび今後の課題**

本研究では，中国貴嶼鎮のE-waste処理に着目し，貴嶼鎮における現行の処理プロセスの問題点を把握し，静脈系LCA評価手法を用いて，代替案（クリーン焼却プロセス，RPF固形燃料技術の導入および統合管理システムの確立）による環境・経済効果を評価した。結論としては，適切な処理プロセスと統合管理システムは環境負荷の低減と経済の向上に対して極めて有効で，その実行可能を明らかにした。

本研究では，環境負荷物質としては$CO\_{2}$，$SO\_{2}$，$NO\_{x}$だけを対象として分析を行い，その他の汚染物質を評価対象外とした。また，影響評価のなかの被害評価も対象外とした。今後の研究としては，E-wasteの処理がもたらす人間への健康，生物多様性への影響に関する分析を行い，より総合的に評価していくことが必要である。次に，本研究では代替案による処理施設の運営可能性について検討していない。また，中国政府の資金支援が得られた場合の，投資の回収期について検討する必要があると思われる。

**用語の説明**

（1）静脈系

製品システムにおいて，使用済品の手分解，中間処理，再生処理，最終処分に係わる単位プロセスあるいは技術の総称。

（2）中間処理

再生処理を行い易くするために行う処理。例えば，選別，破砕など。

（3）再生処理

上記の中間処理から排出される物品から，自製品システムや他製品システムの原材料として利用可能な材料を再生すること。

（4）最終処分

再生処理に回らなかった使用済品を，そこから新たな環境負荷が生じないように最終処理すること。例えば埋立，焼却など。

**引用文献**

1. Recycling of electronic wastes in China and India，2005，p.23
2. Yuan J，Chen L，Chen D，et al. Elevated serum polybrominated diphenyl ethers and thyroid-stimulating hormone associated with lymphocytic micronuclei in Chinese workers from an e-waste dismantling site，Environmental Science & Technology  2008，42，pp.2195-2200
3. 浙江省長三角循環経済技術研究院，広東貴嶼鎮電子廃棄物回収利用循環経済試点実施方案，2007，p.34
4. 中国企業使用エネルギー換算係数表，http://www.ajxzfw.com
5. 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター，産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）の環境負荷原単位一覧表，

http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/jpn/index\_j.htm

1. 社団法人産業環境管理協会，LCA概論，p.277
2. 曾敏，LCA手法における廃家電製品の資源化に関する研究，修士論文，広東工業大学，2006，p.50
1. PP：ポリプロペンpolypropylene [↑](#footnote-ref-1)
2. PE：ポリエチレンpolyethylene [↑](#footnote-ref-2)
3. PS：ポリスチレンpolystyrene [↑](#footnote-ref-3)
4. PVC：ポリ塩化ビニルpoly vinyl chloride [↑](#footnote-ref-4)
5. PF：フェノール樹脂Phenol resin Phenolic resin [↑](#footnote-ref-5)
6. 為替レート：1元＝13.19円（2009/11/01） [↑](#footnote-ref-6)