

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	Le Hoang Long
論文題目	Evaluation of Recyclability and Recycling Efficiency of Metals for Waste Printed Circuit Boards (廃プリント基板からの金属の回収並びに回収効率の評価)		
(論文内容の要旨)			
<p>家庭電気製品、電子機器の廃棄物量が世界的に増加する中、これらの中から有用な物質をリサイクルすることがすすめられている。しかし、全ての物質を再利用することは経済的にも技術的にも困難であり、さらに再精製時に生ずる環境負荷についても考慮すべきである。このようなリサイクル過程を評価する指標について幾つか提案がなされているが、資源枯渇の観点を考慮した指標は殆どない。本論文は、環境負荷と資源枯渇の観点から客観的に統合した指標MEMRECS (Model for Evaluating Metal Recycling Efficiency for Complex Scraps)を提案し、それをを用いて特に発展途上国における廃プリント基板からの適切なリサイクル法について評価したものであり、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、これまでになされた関連研究について概観し、本研究の目的、構成について述べている。</p> <p>第2章では、廃プリント基板に含まれている金属元素とそのリサイクル、多基準意思決定法、ライフサイクル評価手法についての過去の研究を概説し、本論文に必要な手法について述べている。</p> <p>第3章では、環境影響評価と資源枯渇性評価をエントロピー重み付け法により統合した新しい指標MEMRECSの計算手法について説明している。また、それをを用いて廃プリント基板に含まれる金属元素量をCRTテレビ、デスクトップPC、携帯電話について分析を行い、関連指標であるMRE (Material Recycling Efficiency), RRE (Resource Recovery Efficiency), QWERTY (quotes for environmentally WEighted Recyclability) との違いについて調査し、MEMRECSの特徴について述べている。</p> <p>第4章では、環境影響評価について幾つか代表的なEco-indicator 95, 99, EDIP2003, IMPACT 2002+で与えられるインベントリーデータを用いてMEMRECSを計算し、用いる環境影響評価手法の違いがどのようにMEMRECS指標に反映するかについて比較している。その結果、用いたインベントリーデータによって絶対値は異なるものの、製品間の相対値は似た値を示しており、MEMRECSを実際に適応するには目的に応じた環境影響評価指標を選択する必要があると結論づけている。</p> <p>第5章では、世界最先端のポリデンとユミコア社のリサイクル工場についてMEMRECSをCRT-TV, PC-Monitor, PC, DVD, 携帯電話の廃プリント基板に適用し、両者のリサイクル手法をQWERTYとMEMRECSを用いて比較検討している。その結果、QWERTYを用いた場合については両社のリサイクル手法に差は殆どないが、MEMRECSを用いて評価した場合についてはユミコア社の方が優れているという結果を得ている。その要因は、ユミコア社ではすずのリサイクルが有効に行われているのに対し、ポリデン社では回収をしているが製品化していないことに起因しており、MEMRECSが資源枯渇という観点からすずのリサイクルを重要視していることが結果に反映していると分析してい</p>			

る。

第6章は発展途上国における廃プリント基板からの金属資源リサイクルについて述べている。発展途上国では、手作業でプリント基板を選別、分離回収してきたが、環境影響を配慮して、近年では経済的に有利である主に金や銅などの貴金属回収を目指して、廃プリント基板を銅精錬所への投入に移行しつつある。本章では、その有効性についてMEMRECSを用いて評価した。その結果、リサイクル性は含まれている金の濃度に依存しており、金が多く含まれる携帯電話の廃プリント基板においては高い評価が得られるが、金濃度の低いCRT TV等の廃プリント基板に対しては低い評価である。これらの結果を踏まえて、金濃度の低い廃プリント基板については手作業、あるいは機械的破砕によりすず（主に半田）を回収し、その後銅製錬所で希少金属を回収するプロセスを提案している。

第7章では、特にベトナムを対象としてMEMRECSを用いた廃プリント基板からの金属資源回収評価についてシナリオ分析を行っている。評価した3つのシナリオは、中国への輸出、国内の銅精錬所の利用、日本における他金属精錬プロセスであり、結果は中国への輸出は最低の評価であり、日本におけるリサイクルが日本への輸送中の環境負荷を考慮しても最も大きく評価している。但し、金含有量の多い携帯電話の廃プリント基板についてはベトナム国内におけるリサイクルもほぼ同等の評価を得ている。

第8章は結論であり、第1章から第7章までについて要約した後、結論を述べている。さらに、本論文で調査できなかった資源枯渇データの感応度分析、他の客観的多基準意思決定手法との比較検討、MEMRECSの廃プリント基板以外への適用などについて検討の必要性を述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

家庭電気製品、電子機器の廃棄物量が世界的に増加する中、これらの中から有用な物質をリサイクルすることがすすめられている。しかし、全ての物質を再利用することは経済的にも技術的にも困難であり、さらに再精製時に生ずる環境負荷についても考慮すべきである。このようなリサイクル過程を評価する指標について幾つか提案がなされているが、資源枯渇の観点から考慮した指標は殆どない。本論文は、環境負荷と資源枯渇の観点から客観的に統合した指標MEMRECS (Model for Evaluating Metal Recycling Efficiency for Complex Scraps)を提案し、それをを用いて特に発展途上国における廃プリント基板からの適切なリサイクル法について評価したものであり、主な成果は以下の通りである。

- 1、 環境影響と資源枯渇のそれぞれについて関係者の合議により主観的に重み付けされた QWERTY 指標に対して、エントロピー重み付け法を用いて客観的に統合した MEMRECS 指標を新たに提案し廃プリント基板中の各種金属のリサイクル性について適切に評価できることを示した。
- 2、 MEMRECS を先進国の最先端リサイクル工場（ポリデン社、ユミコア社）で行われているプロセス評価に適応し、すずのリサイクルの有用性について指摘した。
- 3、 発展途上国における廃プリント基板のリサイクル法について考察し、すず含有物を銅製錬所に送る前に予備回収することによりリサイクル性が増すことを提案した。
- 4、 ベトナムにおける廃プリント基板のリサイクル法についてシナリオ分析を行い、金が多く含まれている携帯電話からの廃プリント基板についてはベトナム国内の銅製錬所で、それ以外は日本などの先進国でリサイクルを行うことが、輸送時における環境影響を考慮しても最も優れていることを示した。

以上の研究は、廃プリント基板の金属リサイクルについて環境影響と資源枯渇とを評価した新しい統合指標MEMRECSの開発とその適用を検討しており、今後増加する廃プリント基板の有効な処理方法について実用化に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年9月19日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降