

エネルギー収支、環境影響を考慮した廃棄物のリサイクルに関する研究

A Study on Recycling Wastes from the Perspective of Energy Consumption and Environmental Effects

代表研究者	横浜国立大学・東京大学教授	中西準子
	Professor, Yokohama National University and The University of Tokyo	
共同研究者	東京大学教授	尾鍋史彦
	Professor, The University of Tokyo	
	東京大学教授	平野敏右
	Professor, The University of Tokyo	
	東京大学助教授	鶴田 俊
	Associate professor, The University of Tokyo	

It is examined whether recycling of some wastes are appropriate measures in order to consume energy and natural resources and to minimize environmental effects. Used paper, used plastics and used dry cell are chosen as subjects of the study. Recycling of used paper is useful to reduce water pollution due to pulp production and also from the perspective of the integrated value of environmental protection and resources conservation. In addition, technological measures are investigated for enhancement of recycled pulp quality. Production of recycled plastics is less economical than virgin plastics production. Thermal recovery is, however, economically acceptable. The conditions under which electricity generation is appropriate are discussed.

研究目的

廃棄物の再資源化・再利用は、地球環境保全と資源枯渇防止の点から大きな課題になっている。その総論は正しいとしても、各論になると再資源化のためのエネルギー消費量、またその過程での環境影響、市場での acceptance など検討すべきことが多い。本研究は、再資源化にともなう環境影響、エネルギー消費量、品質への影響などを調べ、廃棄物資源化の最も望ましい姿を求めることを目的としている。その過程で、環境影響とエネルギー消費量という二つの異なる物性値を統合する手法を開発する。古紙、乾電池、プラスチック製品を研究対象にする。

また、地球モデルについての研究結果を地域モデルに生かし、大学の活動で生ずる廃棄物の資源化に対して大学がとるべき対策について考える。本研究グループは、大学内での廃棄物対策を提案する実務的な委員会をベースに作られたもので、この点も重要な目的である。

研究成果

1. 古紙の再資源化についての検討

1. 古紙の利用と水質汚濁制御効果*1)*2)

産業起源の水質汚濁負荷の2分の1は紙・パルプ産業である。したがって、紙・パルプ産業の

水質汚濁対策は、我が国の水質汚濁対策の上で極めて重要である。1970年から1989年までの19年間の紙パ産業の水質汚濁対策の内容を検討した。その結果、COD で表現される排出負荷は、ほぼ1/11に、単位生産高当たりの COD 排出負荷は1/22.5に低下していることが分かった。

COD 削減のためにとられた手段とその寄与率は、以下の通りであった。製品・原料の転換が58%、黒液燃焼率の向上が26%、廃水処理が16%であった。各手段について COD1kg 削減のための費用は、社会的割引率を5%と仮定し、1989年の貨幣価値で表現して、製品・原料の転換がゼロまたはマイナス（利益を生んでいる）、黒液回収率の向上が3円、廃水処理が128円であった。

第一の製品・原料の転換が COD 削減効果の点でも、費用の点でも大きな役割を演じた。パルプ1トン当たり生産するとき生産ラインの最後で排出される COD 負荷は、1970年当時 KP（クラフトパルプ）85kg、古紙を原料とする脱墨パルプ（DIP）36kg、やはり古紙を原料とする離解パルプ12kg で、その他のパルプが300~400kg であることと比較すると極めて低かった。増産高のほとんどがこの3種で占められた。1970年には全パルプ生産高12973トンの内、古紙パルプは26.2%であったが、1989年には全生産高26,809トンのうち45.2%を占めた。1970年から始まった水質汚濁削減策の中で、古紙を原料とする紙の生産は極めて大きな役割を担った。古紙利用は森林資源の節約だけでなく、排水対策としても有効であることを示しており、途上国での排水対策を考える上で極めて示唆に富んでいる。

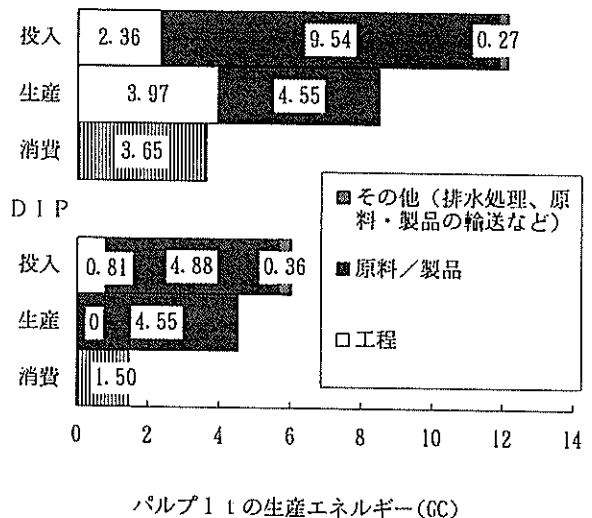
2. 古紙利用の統合環境影響評価*3)

一方、パルプの方でも COD 負荷の削減と COD 成分を利用した熱回収が進んだ。COD のみならず、エネルギー消費量、森林資源への影響、紙ごみ・スラッジなどによる環境影響を総合的に評価し、その上で古紙の資源化が真に

総合的な意味で環境影響（環境の質的な劣化と資源消費とを総合評価的に評価したもので、統合環境影響とよぶことにする）を低下させ得るか否かを検討した。ここでは、パルプの代表である KP と古紙パルプの代表である DIP について比較した結果を示す。

まず、複数の質の違う環境影響を比較するための手法を開発し、それを用いて比較を行った。共通の尺度として熱量の単位（GC、キログラム）を用いた。まず、環境への影響では COD（水質）、大気汚染、固形廃棄物の発生量を調査し、その環境影響を一定のレベルに下げたためのエネルギー使用量と費用を算出し、費用も GC の単位で表現する方法を提案し、それを用いて二つの項の和で、KP と DIP の製造過程と使用後の廃棄物による環境影響の違いを評価した。さらに、生産工程で使用されるエネルギー消費量とエネルギー産出量（廃熱利用による）を GC の単位で算定した。また、原料の木材と製品であるパルプの環境と資源の面からの価値評価として、その燃焼熱を用いた。

クラフトパルプ



このような仮定をおいたとき、原料からパルプ生産に至る過程での KP と DIP のエネルギー・資源・環境の収支は図に示す通りである。「投入」は生産工程で必要になるエネルギーと、原料の木材、生産工程での環境対策に用いられたエネルギーを表し、「生産」は生産過程で生ずるエネルギー（廃熱利用による）と製品のパルプの資源価値を、「消費」は「投入」と「生産」の差で、資源・エネルギー・環境の消費量を示す。生産工程だけのエネルギーバランスを考えると、KP では $3.97-2.36=1.61$ GC エネルギーを余分に生産していることになり、DIP の 0.81 GC 消費に比べ省資源的に見えるが、原料に用いられる資源価値を考えると KP が 3.65 GC の消費に対し、DIP は 1.50 GC であるので、やはり古紙パルプは省資源である。さらに、固形廃棄物の環境影響とその処分のためのエネルギー消費量を評価した。考慮されたものは生産工程で生ずるペーパースラッジと紙の使用後の紙ごみである。KP では使用後の紙はすべてごみになるが、DIP ではすべ

て再利用され紙ごみを生じないと仮定すると、その評価は KP で 4.69 GC、DIP で 1.02 GC である。先の生産工程での値と合算した統合環境影響値では、KP では 8.07 GC、DIP では 2.52 GC であった。統合的な評価でも、古紙パルプはバージンパルプに比較して、環境保全的な効果大きい。その計算の根拠となる数値を表 1 に示す。

3. 古紙パルプの品質に関する研究*4)*5)*6)

環境・エネルギー的な考慮の他に、リサイクル品の品質向上についての努力は必須である。ここでは、古紙パルプの品質について、①白色度と②再膨潤特性の二つの面から検討した。

①白色度について：新聞紙を原料試料にして、洗浄法とフローテーション法を用い、また各種脱墨剤を用いて白色度の変化と、化学変化との関係、さらには人の視覚認識と残留インキ粒子の大きさとの関係について実験を行った。この結果洗浄法ではフローテーション法より効果が大きいこと、印刷後長期保存した試料では脱墨が困難になること、人間の視覚認識は残留イン

表 1：エネルギー・資源使用量のエネルギー評価原単位

単位 10 ⁶ kcal/t		工程で 使用 (a)	エネルギーと して回収 (b)	原料と製品 のエネルギー差 (c)	全エネルギー 損失 a-b+c	
生産工程	木材→パルプ	2.48	3.11	4.05	3.42	
	古紙→パルプ	0.60	0.00	0.33	0.93	
	パルプ→紙・板紙	2.52	0.00	0.34	2.86	
環境対策	排水	木材→パルプ	0.098	—	—	0.098
		古紙→パルプ	0.268	—	—	0.268
		パルプ→紙・板紙	0.220	—	—	0.220
	排ガス 臭気 (カラフトパルプのみ)	0.030 0.081	— —	— —	0.030 0.081	
輸送	木材・チップ	0.062	—	—	0.062	
	紙・パルプ	0.070	—	—	0.070	
	古紙	0.057	—	—	0.057	
	紙ごみ	0.018	—	—	0.018	
紙ごみ焼却		0.00	0.33	4.09	3.76	

生産工程、環境対策については製品あたり、輸送については輸送量あたり、紙ごみ焼却については焼却量あたりの値である。

ク粒子に大きく影響されることなどが明らかにされた。

②再膨潤能について：古紙パルプでは再膨潤能が低下することが知られている。ここでは、熱処理と水熱処理で温度、処理時間、パルプの性質と保水値(WRV)との関係を調べた。WRVの減少は、安定な分子間及び分子内の水素結合の生成に起因している。様々な条件とWRVの変化を考察した。これらを基に、品質のいい古紙パルプ製造の条件を見つけることが可能になる。

II. プラスチック廃棄物の資源化についての評価*7)

プラスチックのリサイクルの妥当性について、経済的な評価を試みた。

1. リサイクルと廃棄物処理の経済性を比較した。マテリアルリサイクル(再生利用)、運搬費用は、1kg当たりPETボトルでは263円、PSPトレイでは408~758円、EPSで200~420円、農業用ビニルでは(60+ α)円であった。これらをパルプ原料からの商品の市場価格と比較すると、0~733円市場価格より高い。一方、熱回収ではこの赤字幅は1kg当たり42~76円程度に縮まる。赤字であることに変わりないが、マテリアルリサイクルと比べると、その赤字幅は小さい。しかも、この赤字幅は廃棄物の焼却・埋め立てに使われている費用とほぼ同じなので熱回収は経済的にも十分見合うことである。

2. つぎに、産業廃棄物の熱回収について、焼却のみの場合、蒸気回収をおこなった場合、発電まで行った場合などの場合のそれぞれについて、焼却炉の規模と廃棄物の発熱量の異なる8ケースについて経済性評価を行った。その結果、焼却のみの場合より蒸気回収を行う場合の方が経済性は良くなることが明らかになった。しかし、発電まで行う場合の方が、焼却のみより経済的であるとは限らない。発電を伴う方が経済的になる条件を求め、検討した。

III. 乾電池・空き缶の資源化についての検討(省略)

IV. 東京大学での廃棄物対策への適用

以上の調査結果を下に、東京大学では古紙については全面的な回収、再利用を目指すことにした。乾電池についても、別途回収し、金属の資源化を目指すことにした。飲料用空き缶については、商品配達車で回収できる場合のみ資源化が合理的であるとした。

発表論文リスト

- 1) 中西準子、「水の環境戦略」、岩波書店(1992)
- 2) J. Nakanishi, "Technological Measures for Pollution Reduction and their Evaluation from the Perspective of Risk Management", Proceeding of International Symposium on Environmental Issues of Ceramics, organized by The Ceramic Society of Japan and International Ceramic Federation Science Council of Japan (1995).
- 3) 中西準子、桜井健郎、「紙の再生利用の評価」、第3回廃棄物学会研究発表会講演論文集、179~182頁(1992)
- 4) 松本圭、尾鍋史彦、「古紙パルプ中の残存インキ粒子と人間の視覚認識」、繊維学会予稿集、G-105(1995)
- 5) Y. Matsuda, A. Isogai and F. Onabe, "Effects of Thermal and Hydrothermal Treatments on the Reswelling Capabilities of Pulps and Papersheets", J. Pulp and Paper Science, vol.20, No.11, pp.J323~J327(1994).
- 6) Y. Akishima, A. Isogai, S. Kuga, F. Onabe and M. Usada, "Kinetic studies on enzymatic hydrolysis of calluses for evaluation of amorphous structures", vol. 19, pp.11-15(1992)
- 7) 朝米野晃茂、土橋律、「リサイクルの妥当性についての検討—プラスチックの場合—」、燃焼の科学と技術、3巻(1995)印刷中