

# 古紙由来トイレットペーパーの実態調査に基づくライフサイクル分析

志水章夫<sup>1</sup>・花木啓祐<sup>2</sup>・荒巻俊也<sup>3</sup>

<sup>2</sup>学生会員 修(環) 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 東京大学講師 先端科学技術研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

本論文では、バイオマス資源利用のリサイクルシステムの評価を目的として、トイレットペーパー（古紙利用率100%）のライフサイクル分析を行った。現実のシステムの評価を行う為に日本のトイレットペーパー製造メーカーの実態調査を実施し、調査結果に基づいて解析を行った。調査結果から、実際の工場内プロセスでは用水、立地や環境基準など外部要因が強く、また品質面を重視する現在の消費傾向が再生プロセスの古紙品種や歩留りに制約を与えていることが分かった。ライフサイクル分析では、紙リサイクルの場合、特にバイオマス由来のCO<sub>2</sub>排出とエネルギー消費が化石燃料の使用を含めた全体のバランスで見て大きな比重を占めることが示された。

*Key Words* : LCA, recycling, toilet roll, biomass energy, carbon stock

## 1. 背景と目的

環境問題が深刻化し、工業活動に対する社会的要求が増々強まっている。そこで注目されてきたのが環境マネジメントシステム（EMS）であり、その一つ、定量的な判断材料を提示する為の環境影響分析ツールとしてLCA (Life Cycle Assessment or Analysis)<sup>1)</sup>がある。一方、持続可能な循環型社会システムへの転換に向け、日本でも容器包装リサイクル法などリサイクル制度が整備されつつある。それと共に注目されているのが再生可能なバイオマス・エネルギー<sup>2)</sup>の利用であるが、どちらも環境にプラスな面ばかりではない。環境負荷削減と持続的システム構築をより効率的に実施するには、その環境影響をLCAで定量的に把握し、科学的根拠に基づく客観的な判断を行う必要がある<sup>3)</sup>。

容器包装廃棄物のリサイクルを対象にしたLCA研究<sup>4)</sup>やごみ発電、RDFなどバイオマス燃料利用<sup>5,6)</sup>に関するLCA研究は日本でも盛んに行われるようになってきた。しかしバイオマス由来資源のリサイクル及びバイオマスエネルギー利用に関する評価手法・概念はまだ十分に定まっていない。これはリサイクルの環境影響がシステムや評価範囲の設定、シナリオ選択などで分析結果が異なる上に、バイオマス資源のもつ炭素固定能やそのストックの評価など不確実性の高い項目が多い事が要因である<sup>7)</sup>。

紙・パルプは再生可能な天然バイオマス資源であ

る木材を利用して紙を製造し、さらにその紙を再生する代表的な循環型産業である。このような実在のリサイクルシステムを解析する事は、今後の循環型リサイクル社会を構築する上で非常に意義がある。

紙・パルプ産業におけるLCAの事例はいくつかあるがどのような評価法をとるべきか議論も多い<sup>10)</sup>。また、日本の紙・パルプ業界でも議論は行われているものの、実績データに基づくLCA研究事例は少なく、実態調査に基づいた分析・評価を行い、情報を蓄積する必要がある。

そこで本研究では日本の古紙リサイクルシステムの典型的な例として、古紙由来トイレットペーパー（主原料として古紙利用率100%、略称：R-TP）に着目し、製造プロセスの実態調査を行って環境負荷原単位の整理と企業の環境対策の水準について検討を行った。またその結果を元にLCAを実施し、バージンパルプ由来トイレットペーパー製品（略称：V-TP）との比較も行い、バイオマス由来資源のリサイクルをどのように扱うべきか検討を行った。

## 2. トイレットペーパーの概要と評価手法

### (1) 日本のトイレットペーパー製品の現状と問題点<sup>11)</sup>

トイレットペーパー(略称：TP)は衛生用紙に分類され、平成9年の生産量は900,217 t、衛生用紙の約52%、紙・板紙全体の約3%を占め、需要も増化傾向にある。衛生用紙、TP市場ともに従来は古紙製品

表-1 トイレットペーパー製品の白色度\*の推移

|     | 10年前 | 5年前 | 現在     |
|-----|------|-----|--------|
| 再生紙 | 60%  | 70% | 75%以上  |
| パルプ | 75%  | 80% | 82-83% |

\*JIS規格に定めるハンター方式による測定例

主体であったが、年々バージン製品の占める割合が増大し、現在ではV-TPのシェアが30%以上に達した。

主要な衛生用紙としてTPの他にティッシュペーパーがある。技術的には古紙で製造が可能なもののほぼバージン製品で占められる。このティッシュペーパーの需要増大により、衛生用紙全体の50%以上をバージン製品が占める結果となった。

リサイクル製品の需要が伸び悩むのは、消費者の選好が品質や価格に対して強く働いている為である。現状では環境面の優位性だけで市場の優位性を確保することは難しく、リサイクル製品であってもその品質・価格面での競争力が要求される<sup>12)</sup>。

TP市場ではR-TPがV-TPよりも安価である。技術面でも白色度の改善等を行う(表-1参照)などしてV-TPに近い品質を得ている。一方、日本の製紙業界は大手企業がバージン製品、中小企業は古紙再生製品が中心で資本や経営戦略で大きな相違がある。ブランド名、知名度の点で大手製品が優位に立つ。これが消費者にバージン製品を選択させる大きな要因となっている<sup>13)</sup>。

## (2) トイレットペーパーのライフサイクル

日本の製紙産業では古紙と木材チップの両方を主原料にして多種多様な紙製品が生産・利用されている。またクラフトパルプへの移行により1997年で熱源の30.1%を黒液から得ている。また最近では余剰古紙からの熱回収も検討されている。紙の製造・利用システムはバイオマス資源と廃棄物に大きく依存し、バイオマスの資源・エネルギー利用、及びマテリアル・サーマルリサイクルを行う複合系システムである。

TPの場合もそれと同様の特徴を持つが、システムとしてはより単純である。製品の構成はR-TPとV-TPの2種類、製造プラントもそれぞれ独立である。また古紙原料に紙製品を用いるカスケード型で、消費後は廃棄され、紙製品には再生されない。

そこで、図-1にR-TP及びV-TP(クラフトパルプの例)のライフサイクルプロセスフローを示した。

右側がR-TP、左側がV-TPのフローである。V-TPではパルプ化プロセスで発生する黒液からの熱回収で自家発電・蒸気生産を行っているのに対し、R-

TPでは化石燃料を主要な熱源としている。また、V-TPは木材、R-TPは古紙を主原料とする為、原料調達のプロセスが異なる。パルプ化された後は品質・機能ともにほぼ同等で廃棄処理方法も同じである。

各プロセスは機能別に以下の5つに分類した。

- 1) 原料採取：木材伐採～チップ化、古紙回収～処理など主たる原料の製造プロセス(上流側)
- 2) 製造プロセス：パルプ化、抄造、加工、出荷など主たる製品製造プロセス
- 3) エネルギー関連：用水、蒸気生産、黒液からの熱回収などエネルギー関連プロセス
- 4) 環境関連：廃水処理、汚泥処理など製造プロセスから発生する廃棄物(環境負荷)処理プロセスとその下流
- 5) 消費・廃棄：製品の消費からそれ以降、下水処理などの廃棄処理プロセス

## (3) バイオマス資源利用とリサイクルの位置付け

木材に代表される有機系バイオマス資源の持つ優れた特徴は、再生可能性、炭素ストック機能(CO<sub>2</sub>固定能)、エネルギー資源(バイオマスエネルギー)となることである。

なかでも木材は他のバイオマス・エネルギー資源と比べて、環境面でも全般的に優れており<sup>14)</sup>、今後も重要な炭素ストックもしくはエネルギー資源の一つとなることが予想される。

木材から作られる紙も、その廃棄物である古紙も有機系バイオマス資源としての特徴を備えている。古紙は他の一般廃棄物と比べ燃焼エネルギーが高くフランスを始めサーマルリサイクルも行われている。日本でもプラスチック系廃棄物と混合して固形燃料化するRPFも考案されるなど<sup>15)</sup>、今後は低質古紙を中心にその需要が増すものと予測される。しかし、エネルギー利用により貯蔵された炭素ストックが放出される為、状況によっては地球温暖化に影響する可能性もある。

そこで、TPのライフサイクルで排出・固定化されるCO<sub>2</sub>の流れを見る為、図-1では化石燃料などの主要なエネルギー資源の燃焼から出るエネルギー資源由来CO<sub>2</sub>(E-CO<sub>2</sub>)と、木材・紙の燃焼・焼却時に放出されるバイオマス由来CO<sub>2</sub>(B-CO<sub>2</sub>)について<sup>16)</sup>それぞれ分けて示した。

TPのライフサイクルにおけるB-CO<sub>2</sub>発生源には、黒液の燃焼、パルプスラッジの焼却処理、下水汚泥の焼却処理がある。またバイオマスのエネルギー利用はV-TPにおける黒液消費のみで、それ以外は化石燃料・購入電力に依存し、消費に伴いE-CO<sub>2</sub>が発生する。

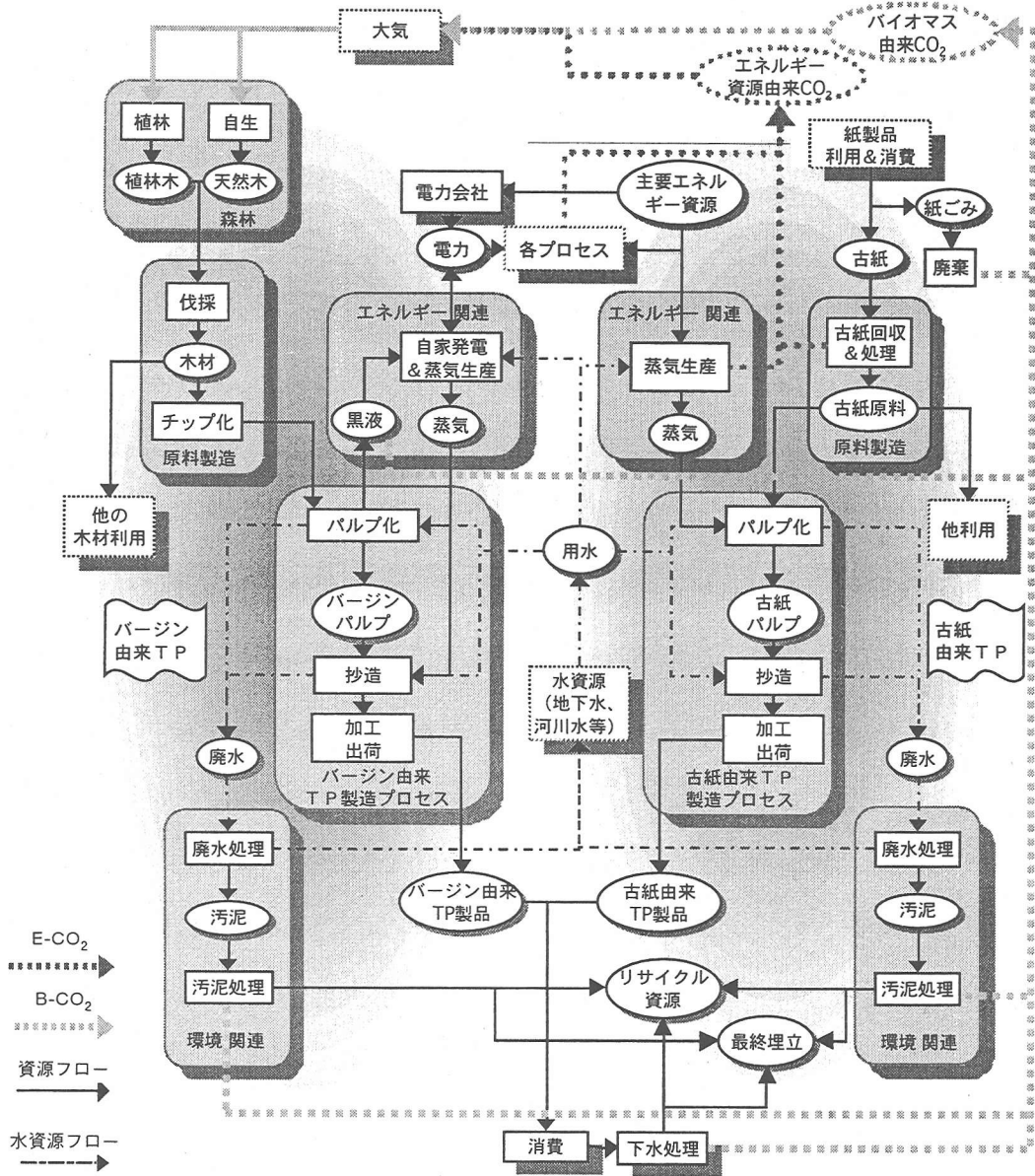


図-1 トイレットペーパーのライフサイクルプロセスツリー

枯渇性エネルギー資源から発生するE-CO<sub>2</sub>は大気中CO<sub>2</sub>濃度の増大を招く。一方、再生産可能なバイオマス資源から発生するB-CO<sub>2</sub>は、持続的再生産を行うことで放出炭素分は再固定化され、炭素収支はネットでゼロとみなせる。エネルギー収支も炭素収支と同様である。木材資源利用の場合、森林経営の水準や天然林伐採がどのような状況にあるかが問題となる。森林の炭素固定量と抽出可能な木材との量的関係は十分に明確でなく、LCAにおけるB-CO<sub>2</sub>のカウント方法も様々である。

そこで、主な計算方法とその特徴について表-2と

してまとめた。

表の(a)～(c)はインベントリー分析の際の計算方法である。(a)～(b)は簡易計算方法としてはメリットがあるが、バイオマスに大きく関わる紙のシステムの場合、(c)のように各プロセス毎に負荷値を計上するのが望ましい。

また、(d)、(e)はその評価の為のオプション計算である。バージンパルプ製品の場合、特に(d)の再生産性が問題となるが、既存の紙製品のLCA<sup>9,16)</sup>をみても定まった手法は今のところない。ただし、温暖化対策の取り組みが進み、森林の固定化についてガイ

表-2 バイオマス資源利用とそのリサイクルに関する炭素・エネルギー収支の計算方法について

|          | 計算方法                                   |                                   | 必要なシナリオ設定、その他  | メリット   | デメリット   |
|----------|--|-----------------------------------|--|--|---|
|          | 炭素収支                                   | エネルギー収支                           |  |  |   |
| 基本的な計算方法 | (a) カウントしない                            | エネルギー資源として計上しない(環境負荷に含まない)        | ・バイオマスの全量が再生産されることを想定<br>・バイオマスとの関連がない場合                       | ・調査・計算の簡略化   | ・バイオマス利用・リサイクルのメリットが過大評価<br>・バイオマス、リサイクルの評価困難                                       |
|          | (b) 採取時に炭素分の全量をCO <sub>2</sub> 排出にカウント | エネルギー資源として計上しない(エネルギー源となり得る場合を除く) | ・バイオマス採取により炭素ストックが全て放出される最大負荷量の設定<br>・再生を保證できない天然の資源を利用する場合    | ・調査・計算の簡略化<br>・バイオマス利用による負荷量の簡易把握                              | ・バイオマス利用の炭素ストックが過小評価<br>・バイオマスエネルギー利用が過大評価<br>・リサイクルの評価が困難<br>・環境改善効果の評価には(d)の計算が必要 |
|          | (c) 各プロセス毎にCO <sub>2</sub> 排出を計上       | プロセス毎に消費量を計算(エネルギー源となり得る場合)       | ・通常の物質収支計算と同様に計算   | ・システム内の物質収支が把握可能<br>・データの再利用・拡張が容易                             | ・必要なデータ量・計算が増大<br>・バイオマス・リサイクルの評価には(d),(e)の計算が必要                                    |
| オプション計算  | (d) バイオマス資源の再生産量を考慮                    | 再生率に応じて消費可能量を考慮                   | ・消費先の森林別に炭素固定化量を計上<br>・シミュレーションモデルの設定により値を算出<br>・持続的経営分を排出から控除 | ・バイオマス資源の枯渇性を評価可能<br>・バイオマス生産地域の特性を評価可能                        | ・バイオマスの再生産に関する物質収支の定量的データの複雑さ、不確実性<br>・森林の治水機能や生態系効果等の評価が難しい                        |
|          | (e) 固形物中の炭素量をプロセス毎に計上                  | エネルギー収支、保有エネルギーを計算(エネルギー源となり得る場合) | ・フロー内のストックを含めた物質収支計算を行う場合<br>・副産物への環境負荷量の配分等で物質特性を把握する必要がある場合  | ・バイオマスの固形物利用及びマテリアルリサイクルによる炭素ストック量を評価可能<br>・原料や製品の持つフロー特性を評価可能 | ・リサイクルについてライフタイムの特定が難しい<br>・エネルギーは形態によって保有量が異なり、ばらつきも大きい                            |

ドライン<sup>10)</sup>を制定するなどして国・地域単位での原単位の整理が進んでいる。

一方、(e)は伐採された木材が固体として長期利用される場合に顕著になる炭素ストック効果<sup>17)</sup>で、製品寿命の長い木材の建築材料利用の場合<sup>18)</sup>などではカウントするケースがある。紙製品は木材と比べてライフタイムは短い、システム内のフロー規模が大きければ炭素ストック効果も期待できる。特にマテリアルリサイクルはフロー内への原料ストックにより省資源効果を得ている。その効果を評価するには(e)の計算が必要となる。

そこで、本解析では(c)の計算方法を基本として、さらに(e)の概念を一部導入することで炭素ストック、バイオマスエネルギー利用に伴う影響の評価を試みた。なお、(d)の森林の効果については簡単なシナリオ設定での比較を行った。

次の3章ではまず、著者らが行ったR-TP製造の環境負荷原単位に関する実態調査の結果を述べ、4章においてそのデータをもとに行ったライフサイクル分析の結果を示す。

### 3. 古紙由来トイレットペーパー製造時の環境負荷原単位の調査

#### (1) 調査の概要

本調査は、静岡県家庭紙工業組合に協力を得て、1998年3月より約1年程度でデータの集計を行ったものである。

調査対象は組合員(30社)で、組合を通じてアン

ケート票を送付した。アンケート回収率は50%の15件で、その15件について、必要に応じて個別にヒアリング調査を行った。また、製造時に各工場が発生するペーパースラッジ(ペーパースラッジ:以下略称PS)が一部共同処理施設で処理されている為、その共同処理施設についても調査を行った。以下のデータはその15件とそれに関連するPS共同処理施設1件の実態調査の結果である。

データの集計内容は基本的に工場単位での直近決算年度(1997年~1998年)の実績値もしくはその平均値で、実際の使用量・排出量に基づいている。トイレットペーパー以外に白ちりを製造するメーカーも多いが、形状が異なるだけのため、トイレットペーパー製品に含めて集計した。それ以外の紙製品を製造するメーカーは1件含まれるが、この場合は製造メーカー側で各製品の生産量等でアロケートした値を用いている。

各工場の生産規模は300~2000t/月でまちまちである。集計15社全体の生産量はV-TP製品及び白ちりを含めた全国生産量の約20%、V-TP製品を除く古紙再生製品のみで約30%を占める。サンプルは全て静岡県に立地しているので、環境負荷の排出基準や用水の制限など、地域環境に依存する部分では差が生じる可能性もあるが、R-TP製造プロセスについての日本の現状をある程度把握できているものと思われる。調査項目の概要は以下の通りである。

1)原料・資材等、薬品等の使用量と各々の輸送手段・距離(古紙品種別使用量、包装資材、その他)

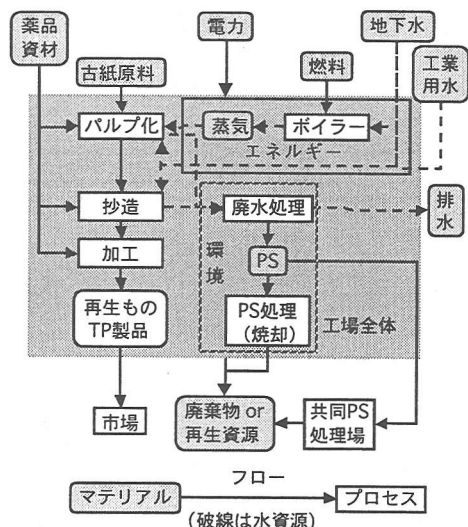


図-2 工場内のプロセスフロー

- 2) 電力、用水、蒸気使用量とその為の燃料・設備等
- 3) 廃水処理、廃棄物処理での負荷処理の状況
- 4) その他：製品の出荷量、品質、工場の規模・設備

### (2) 工場内プロセスフローの原単位

製造データは図-2に示す工場内の範囲の実績値であり、ほとんどの企業がこのプロセス構成でR-TPの製造を行っている。調査ではエネルギー・環境対策の状況を見る為に、エネルギー関連設備と環境対策設備を工場内の製造関連プロセスと分割した。

最終的に次のプロセスに分けて集計を行った。

- 1)パルプ化：原料調整、脱インクを含む再パルプ化工程)
- 2)抄造：抄紙によるTP原紙の製造。
- 3)加工：加工、裁断、梱包など。
- 4)エネルギー(関連)：蒸気生産用のボイラ設備、用水関連施設。
- 5)環境(関連)：廃水・廃棄物処理施設。

R-TP製品1kg製造にともなう主な資源・エネルギー利用及び排出物の工場内フローの原単位を表-3に示す。数値欄の左が単純平均で、右側は生産量で重み付けした加重平均である。なお、表-3中の汚泥は図-2中のPSを意味しており、共同処理では後述のPS共同処理施設まで輸送する場外処理量を、自家処理では焼却など自社工場内での処理量である。ただし共同処理施設の処理データについては表-3には含まれていない。

表-3中の生産量加重平均から集計地域の環境負荷排水準が推定できる。ただし、投入原材料を詳細にみると、全メーカーで共通して使用されているものはほとんどなく、各工場で特性が異なる。従っ

表-3 古紙由来TP製品1kg製造時における各種原単位

| 項目    | unit        | Sample |     | 平均値<br>/有効中 | 標準<br>偏差 | 加重<br>平均 | 最大値   | 最小値   |       |
|-------|-------------|--------|-----|-------------|----------|----------|-------|-------|-------|
|       |             | 有効     | 該当  |             |          |          |       |       |       |
| 製品    | 月生産量        | t      | 15  | 15          | 1063     | 615      | 1386  | 2100  | 300   |
|       | 白色度平均       |        | 15  | 15          | 0.77     | 0.03     | 0.77  | 0.83  | 0.70  |
| 原料    | 模造          | kg     | 15  | 11          | 0.206    | 0.280    | 0.149 | 0.857 | 0     |
|       | 上見当         | kg     | 15  | 14          | 0.524    | 0.350    | 0.487 | 1.07  | 0     |
|       | 込頁          | kg     | 15  | 11          | 0.226    | 0.220    | 0.247 | 0.774 | 0     |
|       | 色上          | kg     | 15  | 14          | 0.355    | 0.280    | 0.444 | 0.976 | 0     |
|       | ミックス古紙      | kg     | 15  | 4           | 0.059    | 0.130    | 0.055 | 0.444 | 0     |
|       | 牛乳バック       | kg     | 15  | 3           | 0.058    | 0.150    | 0.065 | 0.429 | 0     |
|       | 古紙計         | kg     | 15  | 15          | 1.427    | 0.090    | 1.447 | 1.566 | 1.259 |
| 資材    | ダンボール       | kg     | 14  | 10          | 0.086    | 0.040    | 0.084 | 0.56  | 0     |
|       | ポリ袋         | 枚      | 14  | 13          | 0.46     | 0.14     | 0.52  | 0.83  | 0     |
|       | PPバンド       | kg     | 14  | 11          | 0.004    | 0.270    | 0.003 | 0.042 | 0     |
| 薬品    | か性ソーダ       | g      | 14  | 11          | 25.2     | 0.1      | 20.2  | 309.7 | 0     |
|       | 亜硫酸ソーダ      | g      | 14  | 7           | 3.5      | 0.0      | 2.6   | 22.5  | 0     |
|       | 過酸化水素       | g      | 14  | 5           | 3.6      | 0.0      | 1.9   | 42.9  | 0     |
|       | 粘剤          | g      | 14  | 13          | 0.6      | 0.0      | 0.7   | 1.9   | 0     |
|       | 消泡剤         | g      | 14  | 10          | 0.3      | 0.0      | 0.4   | 1.0   | 0     |
|       | スライムコントロール剤 | g      | 14  | 6           | 0.1      | 0.0      | 0.1   | 0.6   | 0     |
|       | 染料          | g      | 14  | 5           | 0.0      | 0.0      | 0.1   | 0.3   | 0     |
|       | 塩化アルミ       | g      | 14  | 13          | 31.3     | 0.0      | 15.7  | 120.0 | 0     |
|       | 硫酸バンド       | g      | 14  | 4           | 14.4     | 0.0      | 22.1  | 126.0 | 0     |
|       | 塩化鉄         | g      | 14  | 1           | 0.4      | 0.0      | 0.3   | 5.0   | 0     |
|       | 電力          | 全購入電力  | kWh | 15          | 15       | 0.90     | 0.05  | 0.97  | 1.24  |
| バルビング |             | kWh    | 7   | 7           | 0.21     | 0.05     | 0.21  | 0.28  | 0.13  |
| 抄造    |             | kWh    | 7   | 7           | 0.52     | 0.15     | 0.58  | 0.78  | 0.33  |
| 加工    |             | kWh    | 7   | 7           | 0.07     | 0.05     | 0.08  | 0.17  | 0.00  |
| 消費    | エネルギー       | kWh    | 7   | 6           | 0.01     | 0.01     | 0.01  | 0.03  | 0.00  |
|       | 環境          | kWh    | 7   | 7           | 0.06     | 0.03     | 0.07  | 0.12  | 0.02  |
| 燃料    | 蒸気          | kg     | 15  | 15          | 3.28     | 0.80     | 3.30  | 5.38  | 2.00  |
|       | A重油         | L      | 14  | 2           | 0.013    | 0.050    | 0.028 | 0.176 | 0     |
|       | C重油         | L      | 14  | 4           | 0.044    | 0.080    | 0.052 | 0.246 | 0     |
|       | 灯油          | L      | 14  | 1           | 0.003    | 0.010    | 0.001 | 0.039 | 0     |
|       | L P G       | kg     | 14  | 6           | 0.057    | 0.080    | 0.044 | 0.23  | 0     |
|       | L N G       | kg     | 14  | 1           | 0.012    | 0.040    | 0.017 | 0.17  | 0     |
|       | 都市ガス        | Nm3    | 14  | 4           | 0.036    | 0.060    | 0.027 | 0.179 | 0     |
| 廃PE   | kg          | 14     | 3   | 0.043       | 0.120    | 0.062    | 0.46  | 0     |       |
| 燃料計   | kcal        | 14     | 14  | 2056        | 592.26   | 2157     | 2988  | 1032  |       |
| 用水    | 地下水         | L      | 15  | 14          | 121.1    | 29.7     | 103.1 | 269.6 | 0.0   |
|       | 工業用水        | L      | 15  | 12          | 57.9     | 327.4    | 56.4  | 242.7 | 0.0   |
| 廃水    | 廃水          | L      | 15  | 15          | 178.1    | 68.4     | 158.3 | 363.6 | 90.2  |
|       | COD(原廃水)    | g      | 9   | 9           | 74       | 29.7     | 79    | 132   | 33    |
|       | SS(原廃水)     | g      | 9   | 9           | 412      | 327      | 391   | 1111  | 20    |
|       | COD         | g      | 14  | 14          | 13.4     | 7.2      | 11.5  | 32.0  | 6.0   |
|       | SS          | g      | 14  | 14          | 3.3      | 1.9      | 3.0   | 8.7   | 0.8   |
| 固形    | 汚泥(絶乾)      | kg     | 13  | 13          | 0.34     | 0.07     | 0.37  | 0.46  | 0.20  |
|       | 含水率         | %      | 13  | 13          | 0.53     | 0.05     | 0.55  | 0.60  | 0.40  |
|       | 廃PE         | kg     | 15  | 3           | 0.02     | 0.06     | 0.02  | 0.18  | 0     |
|       | 共同処理        | kg     | 13  | 9           | 0.40     | 0.33     | 0.25  | 0.95  | 0     |
|       | 自家焼却        | kg     | 15  | 5           | 0.34     | 0.44     | 0.58  | 1.05  | 0     |
|       | その他産廃       | kg     | 15  | 15          | 0.01     | 0.03     | 0.009 | 0.024 | 0     |

て、平均や加重平均値は対象エリア全体の状況を示すものであり、ここで得られた数値が必ずしも標準的な工場を示すのではないことに注意が必要である。

### (3)ペーパースラッジ処理の共同処理プロセス

図-2で示したように、PSには場内処理と場外処理の二通りがあり、小規模の製造メーカーは共同処理を利用し、規模の大きなメーカーのほとんどが自家処理を行っている。また、その両方を行っている企

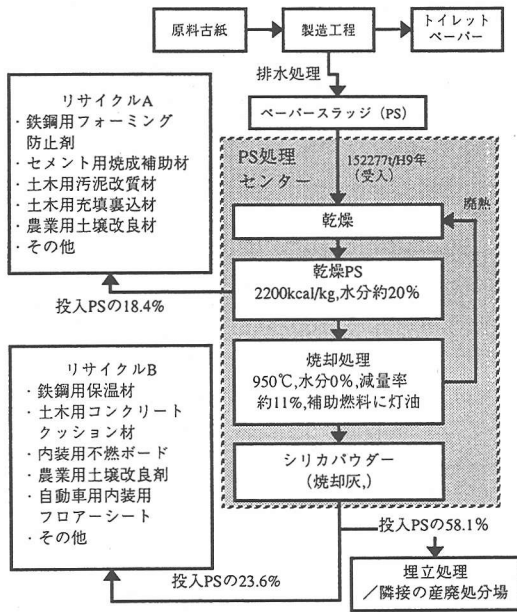


図-3 ペーパーセラッジ共同処理場の処理フロー

業もある。今回行った調査データはプラント1件分であるが、実際には同様の設備がもう一つあり計2ヶ所で稼動している。

PS共同処理施設のフローを図-3に示す。この施設はPS乾燥・焼却処理と再生原料化を同時に行っている。燃料の灯油は初期稼働時のみに投入される程度で、PS乾燥の熱源はほぼ乾燥PSの燃焼からの熱回収でまかなわれている。また再生処理用として砂やドロマイト等の資材が投入されている。この処理プラントでは再生化プロセスは不可分のため、リサイクル原料製造の工程も含む汚泥処理プロセスのケースとなる。

このプラントでの年間のリサイクル率は処理汚泥全体の50.8%であった。共同処理場に輸送されず自家処理されたPSのリサイクル率（主に焼却灰）はそれら自家処理分全体の35%程度であった。

また調査年度の乾燥PSリサイクルは18%であった。処理PSの平均含水率62%であったが、排出源の各工場内での脱水を進め含水率をより低下させれば、輸送効率の向上も含めより効率的に乾燥PSを生産することが可能である。

PSは品質が比較的安定しており、資源化に関しては乾燥PS、焼却灰（シリカパウダー）とも土木・建築用資材など実用性は高い。また、設備能力から見て乾燥PSの比率を増やすことは可能であるが、その受入先を十分に確保できない為にリサイクル率が伸ばせないのが現状である。焼却灰も技術的には全量リサイクルが可能であるが、出荷できない

表-4 古紙原料消費と歩留りに関する解析結果

|                | 一般系古紙                      |                | 産業系古紙          |                |    |
|----------------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----|
|                | 牛乳パック                      | ミックス古紙         | 模造・上見当         | 込頁・色上          |    |
| 古紙損失<br>(標準誤差) | kg/kg-WP<br>0.21<br>(0.12) | 0.45<br>(0.14) | 0.28<br>(0.02) | 0.32<br>(0.03) |    |
| 加工時損質          | kg/kg-TP<br>0.080          |                |                |                |    |
| パルプ化時歩留まり      | %                          | 84             | 61             | 77             | 74 |

分を加湿した後、隣接の最終処分場で埋立している。現在のところリサイクル資源の受入先確保がリサイクル率向上の為の最重要課題である。

#### (4) 原料使用について

TPの古紙原料は、上質で色刷りのない模造古紙と上見当(ケント)、上質系だが色刷りのある色上、模造と色上が混在する込頁など上質系古紙が中心で、その他メーカーによってはミックス古紙(産業古紙、オフィス古紙等で正規の古紙回収ルート、古紙規格で収集されていないもの)、牛乳パック(フィルムでラミネートされた古紙)などが使用される。

古紙品種の中では模造が最も高品質で価格が高く歩留りもよい。色上などカラー印刷された古紙は脱インク処理の関係で歩留りが悪く、薬品使用量も増大するといわれる。一方、牛乳パックなど飲料系ラミネート加工紙は、フィルム分を剥離すれば品質がほとんどバージンパルプとかわらない高収率の古紙である。ただし設備を新たに導入しなければならない。牛乳パックを利用する場合、重量比で約12%<sup>9)</sup>の剥離フィルムが主たる廃棄物となる。

古紙原料の利用で問題となるのはその歩留りである。今回調査したデータでは、製品1kg(加工後の重量)に古紙を1.44kg投入、歩留りで70%であった。また、調査データから古紙品種毎の古紙損失を重回帰分析から求めたのが表-4である。

表-4では模造と上見当、込頁と色上を同じ古紙品種に分類した。色刷りのない牛乳パック、模造、上見当は歩留まりがよく、色刷りのある色上、込頁、分類が不十分なミックス古紙は歩留まりが悪い。従って、牛乳パックや模造古紙は白色度の高い製品もでき、リサイクルしやすい古紙品種と見なせる。ただし、歩留りのよいものほど価格が高く、製造単価を低くする為に歩留りの悪い色上などを使用しているのが現状である。白色度を落とせば歩留りを向上できるというメーカーの見解もあった。

白さを求める消費者選好が、古紙の品質の制限と歩留り悪化を招き、リサイクルにおける資源制約と循環効率の面でマイナスに働いているといえよう。

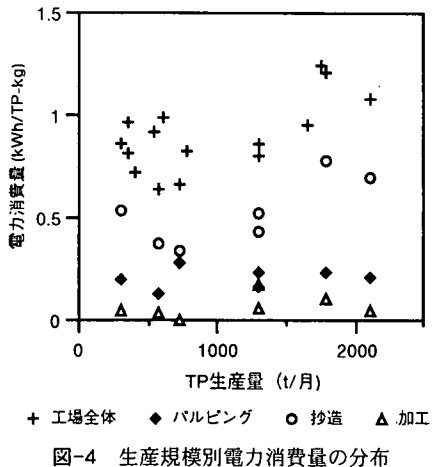


図-4 生産規模別電力消費量の分布

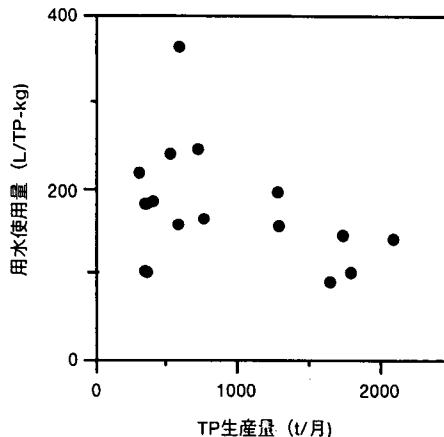


図-5 生産量と水使用量の相関関係

#### (5) エネルギー、蒸気の使用について

パルピング、抄造、加工、エネルギー、環境の5区分の電力消費量については表-3中に示した。また、電力消費の分布を図-4に示す。各工場で設備構成が異なる為に電力消費は必ずしも一定ではない。調査結果からは、比較的設備が共通のパルピング、抄造はばらつきが小さく、製品構成・品目数で違いの大きい加工設備の電力消費はばらつきが大きい傾向がみられた。エネルギー、環境関連も各工場設備が異なり、ばらつきが大きかった。

工場全体では、抄造、パルピング設備での消費割合が大きい。パルピングは生産規模であり変動しなかったが、抄造は生産量が2000t/月規模の工場やや高めな値であった。

電力以外のエネルギー消費は蒸気発生用ボイラーでの燃料消費がある。重油系燃料よりガス系燃料の利用割合が多い(表-3参照)が、都市ガスのインフラ整備の進行状況にあわせ、さらにガス系ボイラーへの転換が行われている。ガス系ボイラーは熱効率の改善、SO<sub>x</sub>削減などのメリットがある。

ボイラーで生産された蒸気(130℃前後)はパルピングと抄造関連設備のドライヤーパートで利用される。またパルパー設備を持つ工場ではパルピングでの蒸気消費は0に近く、一部は温水(38℃前後、熱量で蒸気換算し蒸気と合算して計上)が利用されている。加重平均値での消費比率はパルピングが9%の0.28kg/TP-kg程度で、残りは抄造で利用されており、電力、燃料ともに抄造プロセスが最もエネルギー消費量が多い結果となった。

#### (6) 水資源利用及び廃水・汚泥処理について

製品単位当たりの水使用量は、単純平均で178L/TP-kgであるが、最大で363L/TP-kg、最小で90L/TP-kgとばらつきが大きい。その要因として

は、先に述べた原料による制約条件(脱インクと洗浄水の関係や設備の違い)の他に、COD規制や水使用量の制限など外的要因による違いがある。

そこで生産量と水使用量の関係を示したのが図-5である。生産量の増大に従って水使用量が減少している傾向がわかる。水源として地下水と工業用水があるが、量的には地下水が多く、水消費量に規模的制約を与える要因の一つになっている。

水消費量変化のその他の要因としては、TP品種、環境基準、立地条件などもあり、環境対策の水準によっても差が生じる。本事例では全体としてより生産規模の大きなメーカーの水消費が低く押さえられている傾向が見られたが、小規模のメーカーでも節水対策を進め100L/TP-kgの例も存在した。

また、処理汚泥量についてはそれほどばらつきはみられず、再生されなかった古紙は廃水処理でほとんどが汚泥として排出されたと考えられる。ただし、牛乳パック(ラミネート紙)の場合は剥離フィルムが固形廃棄物として排出される。

### 4. 古紙由来トイレットペーパーのライフサイクル分析

#### (1) 集計範囲と環境負荷の算出方法

この分析では、先の調査結果で企業ごとにばらつきの少ないエネルギー消費や原料消費など主要マテリアルフローについて集計した。環境負荷としてはエネルギー消費、CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>の値を計上した。R-TPのライフサイクルと境界条件は図-6に示す領域である。

使用したデータは、古紙問屋からの製造メーカーまでの古紙原料の納入、パルプ化、抄造、加工・出荷、エネルギー関連(工場内)、環境関連(PS共

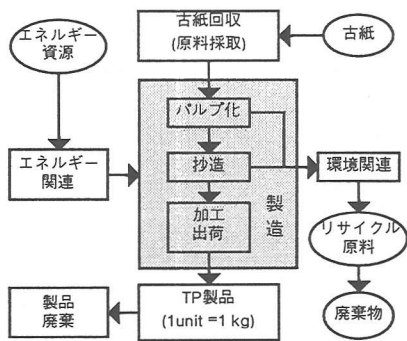


図-6 R-TPのライフサイクル分析の範囲

表-5 電力の消費に伴う環境負荷原単位の設定

| 電力1kWh当り | 熱量   | CO2   | SO2    | NO2    |
|----------|------|-------|--------|--------|
|          | kcal | g     | g      | g      |
| 環境負荷     | 2250 | 365.5 | 0.0301 | 0.3415 |

同処理場データを含む製造メーカー関連のプロセス)については先に述べた実態調査の結果から、その他のデータは文献データによる<sup>20)~24)</sup>。

電力消費に伴う負荷は、文献<sup>25)</sup>を元に1996年度の日本の電源構成比を用いて算出した(表-5)。製品廃棄については東京都の下水道処理に関わる燃料消費とその処理量<sup>26)</sup>から、使用後のTPが汚泥となって焼却処理されたとしたときの原単位を求めた。ただし処理汚泥の含水率が平均96%、また汚泥の絶乾重量とTPの重量が等しいものとして計算した。

調査データでは実測値がある場合を除き、燃料や廃棄物の燃焼時に排出される環境負荷の値に、環境庁でまとめた排出原単位<sup>19)</sup>を用いて、燃料性状及び炉のタイプ別に算出した。電力、ボイラー(工場調査データは除く)、廃棄物の焼却等については煤塵、脱硫等の除去率を考慮した値である。

古紙に含まれる炭素分は、牛乳パックから発生する廃PE以外はバイオマス由来として扱った。炭素量の配分は、原料古紙とTPの炭素比率が等しいものとし、PSの炭素量には古紙損失相当の炭素分を割り当てた。炭素分は焼却時に全量CO<sub>2</sub>として排出されるものとしたが、焼却処理されず固形のままだりサイクルされる乾燥PSについてはCO<sub>2</sub>は排出されないものとして計算した。なお、牛乳パックから出る廃PE燃焼はエネルギー由来とみなせるが、個別集計では別途計上した。

## (2) 古紙回収時の環境負荷について

日本の古紙回収業者に関する定量的な調査研究はほとんど行われておらず明確には分らない。TPに多く使用される産業系古紙は製紙関連業者、印

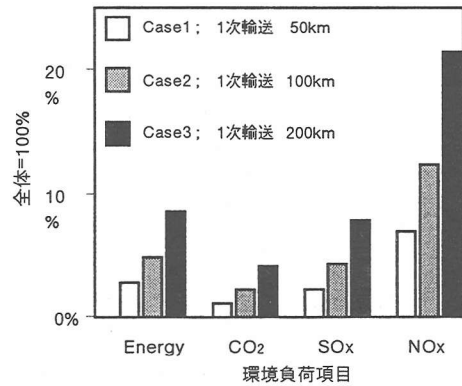


図-7 R-TPのライフサイクルにおける古紙回収プロセスの環境負荷比率

刷、製本、出版関連業者などの特定排出源から発生し、一つの排出源からの発生量も多い。そのため不特定多数で小規模な発生源が多い自治体の資源回収ルートを通るよりも輸送距離が短いと予想される。

自治体回収を想定し牛乳パックの回収時負荷を算出した研究事例<sup>6)</sup>では、2tトラックでの一次輸送が168.50km/WP-tであった。R-TPに使用される古紙原料も同水準かそれ以下であると推測される。そこで一次輸送(排出源から古紙卸問屋まで)距離を2tトラック古紙1tあたり50km/WP-t: Case1, 100km/WP-t: Case2, 200km/WP-t: Case3と設定した。

二次輸送(製紙メーカーまでの納品)は製紙メーカーのヒアリングを元に、仕入れ先までの距離を算出した。入荷先は東京都周辺と静岡県内で、最長で片道350km、生産量加重平均で167kmであった。各シナリオの古紙回収の原単位は一次輸送の負荷量に、プレス電力消費<sup>6)</sup>と二次輸送の負荷量を加えた値である。

これをもとに、R-TPのライフサイクルでの古紙回収の環境負荷の排出水準について設定した3つのシナリオを比較したのが図-7である。図-7の負荷量は各シナリオの古紙回収プロセス負荷がライフサイクル全体で占める割合を示す。

図-7を見ると、負荷の最も大きいCase3でNO<sub>x</sub>が全体の21%、最も小さいCase1でも7%と、NO<sub>x</sub>排出でウェイトが大きい。それ以外の環境負荷量はCase3でも9%以下で、シナリオの違いによる影響はそれほど顕著には現れなかった。現状値に近いと思われるCase2は、NO<sub>x</sub>で全体の12.5%、それ以外は5%以下であった。なお、これ以降の解析では古紙回収原単位としてCase2の値を用いた。

## (3) R-TPのライフサイクルでの環境負荷

古紙回収にCase-2を選択した際のライフサイクル



表-6 R-TPのライフサイクルにおける環境負荷の算出（プロセス別）

|                   | 古紙回収  | 製造プロセス |        |       | エネルギー<br>関連 | 環境関連   | 製品廃棄   | 合計     |
|-------------------|-------|--------|--------|-------|-------------|--------|--------|--------|
|                   |       | パルプ化   | 抄造     | 加工・出荷 |             |        |        |        |
| Energy kcal       | 276.6 | 488.2  | 1339.9 | 250.2 | 2191.4      | 1038.7 | 99.2   | 5684.2 |
| %                 | 5%    | 9%     | 24%    | 4%    | 39%         | 18%    | 2%     | 100%   |
| CO <sub>2</sub> g | 75.7  | 79.3   | 217.6  | 50.3  | 577.9       | 705.9  | 1667.4 | 3374.1 |
| %                 | 2%    | 2%     | 6%     | 1%    | 17%         | 21%    | 49%    | 100%   |
| SO <sub>x</sub> g | 0.089 | 0.007  | 0.018  | 0.029 | 1.830       | 0.080  | 0.003  | 2.056  |
| %                 | 4%    | 0%     | 1%     | 1%    | 89%         | 4%     | 0%     | 100%   |
| NO <sub>x</sub> g | 0.225 | 0.074  | 0.203  | 0.094 | 0.583       | 0.562  | 0.063  | 1.806  |
| %                 | 12%   | 4%     | 11%    | 5%    | 32%         | 31%    | 4%     | 100%   |

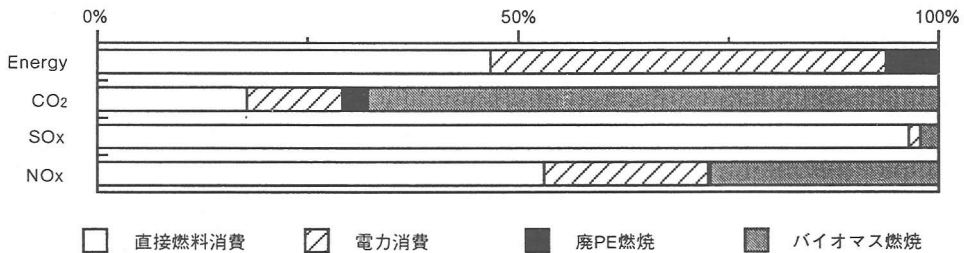


図-8 R-TP製造のライフサイクルにおける環境負荷の由来別割合

での環境負荷について示したのが表-6である。古紙回収、製造工程（パルプ化、抄造、加工・出荷）とエネルギー関連、環境関連、製品廃棄のプロセス別負荷量とその比率が示してある。

エネルギー資源利用では、製造・エネルギー関連プロセスが最も環境負荷の排出比率が大きかった。またSO<sub>x</sub>は全体の89%がエネルギー関連からの発生である。従って、製造プロセスの省エネルギー対策はライフサイクル全体でも有効な対策である。ガス燃料系ボイラーへの転換は、特にSO<sub>x</sub>で大きな削減効果が期待される。

また、NO<sub>x</sub>は古紙回収以外のプロセスからも比較的均等に排出されており、負荷削減には全プロセスで取り組む必要がある。

エネルギー消費、SO<sub>x</sub>は製造関連の負荷量が多いが、CO<sub>2</sub>では環境関連や製品廃棄に伴う排出量が多い。そこで各環境負荷の由来別内訳を図-8に示した。排出由来についてはボイラーなどの燃料の直接燃焼由来、購入電力の発電由来、廃PEの燃焼由来、バイオマス資源の燃焼由来の4つに分類した。

図-8を見ると、エネルギー消費、SO<sub>x</sub>はエネルギー資源由来がほとんどであったが、CO<sub>2</sub>はバイオマス由来（B-CO<sub>2</sub>）が68%とE-CO<sub>2</sub>の排出を上回る結果となった。

#### (4) バージン製品との比較

R-TPとV-TPの環境負荷量について比較を行っ

た。ここでは抄造以降のフローは同一と見なし、原料採取からパルプ製造までの上流フローについて、LC-Enery, LC-CO<sub>2</sub>による比較を行った。

V-TPの原料にはクラフトパルプを用いる事とし、その製造に伴うエネルギー及びCO<sub>2</sub>排出について、既存の文献<sup>(6,24),27),28)</sup>を用いて木材原料、電力、蒸気、黒液、重油使用量の原単位を算出した。

V-TPの原料輸送に関して、実際には輸入材、国産材を輸入して生産を行う場合と、海外生産されたパルプを日本に輸入して製造を行う3つのケースが考えられる。ここでは平成9年度のバージンパルプ全体の構成比<sup>17)</sup>に応じて輸送時の燃料消費を割り当てた値を代表値とした。

古紙パルプについては、製品加工時の損紙分だけ考慮し、パルプ1kgあたりの古紙消費量1.33kgとした。また、発生したPSは全て燃焼されるものとし、熱源となる廃PEの発生量は牛乳パック消費量分のみとなるよう修正を行った。

以上の設定により算出された古紙パルプとバージンパルプ製造のインベントリー表がそれぞれ表-7、表-8である。負荷項目は正の数値が負荷の増大、負の値は負荷の削減を示す。また、バージンパルプで黒液からの回収熱量の余剰分は全て電力になり、購入電力分の負荷量が削減されるとした（表-8の負荷項目で化石燃料、P9の欄参照）。また、バイオマス由来の環境負荷収支では、原料の初期値としてそれぞれの熱量、炭素含有量（CO<sub>2</sub>換算量）を与えた

表-7 古紙パルプ製造におけるライフサイクルインベントリー

|              |             | P1    | P2      | P3      | P4     | P5    | P6     | M1    |      |
|--------------|-------------|-------|---------|---------|--------|-------|--------|-------|------|
| unit/pulp-kg |             | 原料採取  | パルプ製造   | 蒸気生産    | 廃PE熱回収 | 汚泥処理  | 場内電力   | 古紙パルプ | 制約条件 |
| F1           | 古紙 kg       | 1.33  | -1.33   |         |        |       |        |       | 0    |
| F2           | 古紙パルプ kg    |       | 1.00    |         |        |       |        | -1.00 | 0    |
| F3           | 蒸気 kcal     |       | -0.28   | 0.28    |        |       |        |       | 0    |
| F4           | 廃PE kg      |       | 0.01    |         | -0.01  |       |        |       | 0    |
| F5           | PS kg       |       | 0.32    |         |        | -0.32 |        |       | 0    |
| F6           | エネルギー kcal  |       | -488.25 | -185.55 | 69.35  |       | 604.46 |       | 0    |
| M1           | パルプ kg      |       |         |         |        |       |        | 1.00  | 1    |
| 負荷項目         |             |       |         |         |        |       |        |       | 計    |
| 化石燃料         | ENERGY kcal | 144   |         | 161     |        |       | 604    |       | 909  |
|              | CO2 g       | 39    |         | 41      |        |       | 98     |       | 178  |
| バイオマス        | ENERGY kcal | -5279 |         |         |        | 1279  |        | 4000  | 0    |
|              | CO2 g       | -2177 |         |         |        | 527   |        | 1650  | 0    |
| 廃PE          | ENERGY kcal | -69   |         |         | 69     |       |        |       | 0    |
|              | CO2 g       | -23   |         |         | 23     |       |        |       | 0    |
| 計            | ENERGY kcal | -5135 | 0       | 161     | 0      | 1279  | 604    | 4000  | 909  |
|              | CO2 g       | -2139 | 0       | 41      | 0      | 527   | 98     | 1650  | 178  |

表-8 バージンパルプ製造におけるライフサイクルインベントリー

|              |             | P1           | P2            | P3            | P4    | P5    | P6    | P7    | P8    | P9   | M1    |      |
|--------------|-------------|--------------|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| unit/pulp-kg |             | 原料採取<br>(国内) | 原料採取<br>(海外1) | 原料採取<br>(海外2) | 原料選択  | 製造    | 蒸気生産  | 黒液回収  | 汚泥処理  | 場内電力 | パルプ   | 制約条件 |
| F1           | 国内チップ kg    | 0.55         |               |               | -0.55 |       |       |       |       |      |       | 0    |
| F2           | 海外チップ kg    |              | 1.11          |               | -1.11 |       |       |       |       |      |       | 0    |
| F3           | 海外パルプ kg    |              |               | 0.44          | -0.44 |       |       |       |       |      |       | 0    |
| F4           | パルプ原料 kg    |              |               |               | 2.10  | -2.10 |       |       |       |      |       | 0    |
| F5           | バージンパルプ kg  |              |               |               |       | 1.00  |       |       |       |      | -1.00 | 0    |
| F6           | 蒸気 kcal     |              |               |               |       | -1891 | 1891  |       |       |      |       | 0    |
| F7           | 黒液 kg       |              |               |               |       | 1.04  |       | -1.04 |       |      |       | 0    |
| F8           | PS kg       |              |               |               |       | 0.01  |       |       | -0.01 |      |       | 0    |
| F9           | エネルギー kcal  |              |               |               |       | -1012 | -1891 | 3120  |       |      | -217  | 0    |
| M1           | パルプ kg      |              |               |               |       |       |       |       |       |      | 1.00  | 1    |
| 負荷項目         |             |              |               |               |       |       |       |       |       |      |       | 計    |
| 化石燃料         | ENERGY kcal | 191          | 961           | 179           |       | 446   |       |       |       |      | -217  | 1561 |
|              | CO2 g       | 38           | 243           | 45            |       | 129   |       |       |       |      | -35   | 420  |
| バイオマス        | ENERGY kcal | -1935        | -3890         | -1525         |       | 188   |       | 3120  | 42    |      | 4000  | 0    |
|              | CO2 g       | -763         | -1533         | -601          |       |       |       | 1230  | 17    |      | 1650  | 0    |
| 計            | ENERGY kcal | -1744        | -2929         | -1345         | 0     | 634   | 0     | 3120  | 42    | -217 | 4000  | 1561 |
|              | CO2 g       | -725         | -1291         | -556          | 0     | 129   | 0     | 1230  | 17    | -35  | 1650  | 420  |

(各表のP1参照)

バイオマスと廃PEの負荷項目について、それらが保有している熱量と炭素ストック量(CO<sub>2</sub>換算)は原料採取で投入されるものとし、逆にパルプ製品になった段階でそれらは消費・排出されるとした。このような条件下ではライフサイクル全体での炭素ストック・エネルギー収支はゼロとなる。

エネルギー資源由来の負荷量を比較では、バージンパルプはエネルギー消費で1.7倍、CO<sub>2</sub>で2.3倍と古紙パルプの負荷量を上回り、バージンパルプの原料輸送の負荷が大きく影響した結果となった。

バイオマスの負荷項目の収支をみると、バージンパルプがよりバイオマスを活用していることがわかる。バージンパルプ製造(蒸気生産含む)に要する熱量は古紙パルプの4.3倍であるが、バイオマスからの熱回収によって、全体でも古紙パルプの1.7倍まで負荷量を大きく軽減している。

(5) リサイクルとバイオマス資源利用による環境影響の考察

リサイクルによる主な環境負荷削減効果：BRには、廃棄物処理の回避：BWとバージン資源(代替資源)の節約：BVがある。そこで、リサイクルに伴って発生する負荷量；ERとして、ライフサイクル全体での純環境負荷NERを次式のように定義する。

$$NER = ER - BR = ER - (BW + BV) \quad (1)$$

ただし、各数値の符号についてBR, BW, BVは削減効果がある場合を正、NER, ERは負荷増大を正にとっている。

R-TPの場合、BWは古紙の廃棄処分回避分、BVはV-TPの負荷削減分である。日本の場合BWは通常焼却処理であるが、サーマルリサイクルや紙以外への古紙利用も促進されており、それら環境対策やリサイクル水準によって値が変化する。計算では表-7の

表-9 R-TPにおけるシナリオ別ネット環境負荷量の算出

|       | 廃棄物<br>負荷軽減 | バイオマス<br>再生 | ネットの負荷量：NER |             |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|       | BW          | BB          | Energy      | CO2         |
|       | ○あり,×なし     | ○あり,×なし     | kcal/TP-kg  | g-CO2/TP-kg |
| シナリオ1 | ○           | ○           | -652        | -242        |
| シナリオ2 | ○           | ×           | -8002       | -3140       |
| シナリオ3 | ×           | ○           | 4695        | 1958        |
| シナリオ4 | ×           | ×           | -2655       | -940        |

PIで与えた原料の負荷量の変化で与えられる。ここでは原料のエネルギー・炭素保有量分をその効果として計上した。

V-TPの場合、バイオマス資源利用による負荷削減効果：BBが存在する。従って、ライフサイクルでのネットの負荷量NEVはバージンパルプの製造エネルギーをEVとして、次のように定義できる。

$$NEV = EV - BB = BV \quad (2)$$

表-8では、BBもBWと同様に原料分をその効果として計上した。シナリオとしては、木材が持続的に再生産されている場合である。BBの値は森林管理の状態によって変化する。

TP市場全体では式(1)のNERはバイオマス利用の効果BBを含めて次のように表せる。

$$NER = (ER - EV) - (BW - BB) \quad (3)$$

括弧で括った右辺第1項はV-TPとR-TPの製造に要する負荷量の差、第2項はリサイクルの効果とバイオマスの効果の差分である。

そこでBW、BBの効果がありなしのみの単純な4つのシナリオを設定し、エネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出についてNERを算出したのが表-9である。

この設定では、BW、BBの効果を含む場合がバイオマス・廃棄物由来の負荷量をネットでカウントしない結果となる。シナリオ1は表-2で示した計算方法(a)に、シナリオ2は木材伐採時以降は負荷をカウントしない計算方法(b)（エネルギー資源として扱う場合）と結果が等しくなる。

BBの効果は森林の持続的経営が行われている場合に○、BWはリサイクル水準が非常に高い場合に×となる。その点から見ると、持続的森林経営及びリサイクル導入が最も遅れた社会水準のシナリオ2でリサイクルによる負荷削減効果が最も大きく、社会水準が最も高いシナリオ3ではリサイクルの際に負荷が排出される結果となる。

全体の傾向としてNERは負の値をとり、古紙製品がバージンパルプを上回っている結果となった。ただし厳密な判断するにはBW、BVの負荷量をより正確に把握する必要があるだろう。

## 5. まとめ

本論文では、古紙由来トイレットペーパーの実態調査に基づき、そのバイオマスとしての特徴を考慮しながらライフサイクル分析を行った。その結果、以下の知見が示された。

- 1) R-TPの製造プロセスにおいてボイラー燃料の節約とガス系燃料へ転換はライフサイクル全体でもエネルギー消費・SO<sub>x</sub>の削減に有効な対策となる。NO<sub>x</sub>削減には全体での取り組みが必要である。
- 2) 海外原料に依存するV-TPは、黒液からの熱回収効果を含めても、国内生産を行うR-TPのエネルギー消費・CO<sub>2</sub>排出量を上回り、日本の現状が反映される結果となった。
- 3) TPのライフサイクルにおいて、CO<sub>2</sub>排出でバイオマス由来の発生が非常に大きく、計算方法、社会水準の設定によってネットの負荷量が大きく変動する。
- 4) 製品への消費者側からの品質及び価格要求が、製造メーカーにとって古紙原料の品種選択の決定、古紙の歩留り悪化、汚泥処理の増大など、リサイクル促進の制限要因になっている。

解析で用いた古紙回収、V-TPの原単位については今後実測データを用いるなどして精度を高める必要がある。また、用水や薬品の使用量等に関してLCAの解析に盛り込んでいない。これら情報をより正確に描写するには、規模規模効果や立地などバックグラウンドデータとプロセス原単位との相関関係をより明確にする必要がある。

また、バイオマス利用、リサイクルの効果について検討を行った。本評価手法によって、適正なリサイクル・バイオマス資源利用の水準を把握することができると期待される。ただし、理論面やデータの精度面でさらに改良を行う必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、多大なる御協力をいただいた静岡県家庭紙工業組合SITIAとその組合員の皆様に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) Lars-Gunnar Lindfors, IVL, Sweden: LCA-NORDIC Technical Reports No. 10 and Special Reports No 1-2, Nordic Council of Ministers, 1995.
- 2) Netherlands Agency for Energy and the Environment: Eco-Indicator 95, NOH, 1995.
- 3) L C A 実務入門編集委員会: L C A 実務入門, 産業環境管理協会, 1998.

- 4) OECD国際エネルギー機関（日本語訳）：地球環境とエネルギー，電力新報社，1990.
- 5) 石川雅紀：リサイクルとLCA，廃棄物学会論文誌，Vol.9, No. 4, pp. 328-336, 1998.
- 6) 包装容器のリサイクルに関する定量的分析研究会：包装廃棄物のリサイクルに関する定量分析，野村総合研究所，1995.
- 7) 劉庭秀，安田八十五：一般廃棄物を用いた固形燃料化システムの有効性の評価，廃棄物学会論文誌，Vol.10, No. 2, pp. 67-76, 1999.
- 8) 乙間末広，森保文，麻生知宣，鮫島良二：高効率化ごみ発電におけるエネルギー回収とCO<sub>2</sub>排出量削減効果の推定，廃棄物学会論文誌，Vol.8, No. 7, pp.335-341, 1997.
- 9) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1996.
- 10) 日本製紙連合会：「持続可能なペーパー・サイクル」調査報告書，1996.
- 11) 志水章夫，花木啓佑：紙のリサイクル市場と消費行動に関する分析，環境システム研究，Vol.26, pp. 95-102, 1998.
- 12) 栗山浩一，石井寛：リサイクル商品の環境価値と市場競争力，環境科学会誌，Vol.12, No. 1, pp. 17-26, 1999.
- 13) Hirohisa Kishino, Kazunori Hanyu, Masako Yamashita, Chikio Hayashi: Recycling and consumption in Germany and Japan: a case of toilet paper, *Conservation and Recycling* No.26. pp189-215,1999.
- 14) Kaltschmitt, M.: Life cycle analysis of biofuels under different environment aspects, *Biomass and Bioenergy*, Vol.12, No. 2, pp. 121-134, 1997.
- 15) 安田八十五，志水章夫：環境負荷削減の対策と問題点，日本マクロエンジニアリング学会誌，Vol.10, No. 2, pp. 53-60, 1998.
- 16) Yrjö Virtanen and Sten Nilsson: Environmental Impacts of Waste Paper Recycling, *International Institute for Applied Systems Analysis*,1993
- 17) UNFCCC: Climate Change Information Kit, 1999.
- 18) 大熊幹章:炭素ストック，CO<sub>2</sub>収支の観点から見た木材利用の評価，木材工業，Vol.53, No.2, pp54-59,1998
- 19) 環境庁：環境影響評価における原単位の整備に関する調査報告（1），官公庁公害専門資料，Vol.30, No. 6, pp. 1-77, 1995.
- 20) 環境庁：「気候変動に関する国際連合枠組条約」に基づく国別報告書，官公庁公害専門資料，Vol.30, No. 2, pp. 1-50, 1995.
- 21) 通商産業大臣官房調査統計部：平成9年紙パルプ統計年報，通産統計協会，1998.
- 22) 和田安彦，三浦浩之，中野加都子：LCAにおけるリサイクルと廃棄物処理・処分の評価方法とその適用，土木学会論文集，No.539/II-35, pp. 155-165, 1996.
- 23) プラスチック処理促進協会：プラスチックなどの包装材料の環境影響評価（LCA），1995.
- 24) エネルギー使用合理化手法国際調査委員会：冷蔵庫のライフサイクルインベントリー，環境管理，Vol.31, No. 7, pp.91-97, 1995.
- 25) 日本下水道協会：平成9年下水道統計，1998.
- 26) 紙パルプ技術協会：第4回環境セミナー，1997.
- 27) 紙パルプ技術協会：紙パルプ技術便覧，1992.

(1999. 7. 30 受付)

## LIFE CYCLE ANALYSIS SURVEY OF TOILET ROLL MANUFACTURING FROM RECYCLED PAPER

Akio SHIMIZU, Keisuke HANAKI and Toshiya ARAMAKI

We targeted Japanese Toilet Roll Production from recycled paper as the most typical and simple model of Biomass recycling system. To aim at calculation of the life cycle energy and carbon stocks as token of biomass resources, the production plants surveyed in detail. As the result, the toilet roll manufacturing was limited by the location and some environmental standards about water treatments in one side, and had severe restricts to select waste paper materials not to inferior the production's qualities in the other side. Then the result of Life Cycle Analysis for the production, the paper-owned carbon stock and biomass energy is more sensitive factors compare with the influence of fuel resources consumption.