

■ ショート・ノート ■

マテリアルリサイクルかサーマルリサイクルか—紙のリサイクルのエネルギー評価—

Material Recycle vs Thermal Recycle-Energy Analysis in Case of Paper

藤野 純一*・進藤 晋一***

Junichi Fujino Shinichi Shindo

山地 憲治**・山本 博巳****

Kenji Yamaji Hiromi Yamamoto

1. はじめに

近年、地球環境問題、ゴミ減少対策、省資源といった広範囲な視点から、回収される古紙の量は増え続けている。一方、円高等による木材チップ、パルプ価格の下落、消費者のバージンパルプ嗜好により、再生紙の需要は伸びず、全国各地で古紙が山積みされる事態になっている。

このような現状に対して、古紙を再生紙にするだけでなく、古紙を燃やしてエネルギー回収するサーマルリサイクルを積極的に行うことが提案されている。

そこで、我が国における紙の生産・消費・リサイクルの過程をエネルギーで表現した紙のエネルギーフローを作成し、マテリアルリサイクル、サーマルリサイクルの定量的な比較検討を行う。

2. 紙のエネルギーフロー

2.1 構造

パルプとしてクラフトパルプ (KP), メカニカルパルプ (MP), 古紙パルプの3種類を設定した。KPは薬品処理によりリグニンなど(黒液)を溶出除去し繊維だけを取り出して作られるパルプであるため、収率は約50%と低いが、副産物である黒液から薬品と熱を回収することができる。一方、MPは木材を機械的に磨砕して作られるパルプで収率は95%前後と高いが、磨砕のために大きな電力を必要とする。

古紙に対するリサイクルシステムとして、マテリアルリサイクル、サーマルリサイクル、廃棄処分(リサイクルを行わない)の3種類を設定した。

* 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻

** " " 教授

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

*** 東海銀行

〒460-8660 名古屋市中区錦3-21-24

**** 財団法人電力中央研究所 経済社会研究所主任研究員

〒100-8216 東京都千代田区大手町1-6-1

2.2 データ

(1) 重量バランス (表1)

KP製造工程の重量バランス(表1)では、リグニンを主成分とする黒液は薬品処理により生成したNa塩などの無機分を含むため、出力(パルプ+黒液)が入力(パルプ材)よりも大きくなっている。なお、絶乾とは含水率0%のことである。一方、MPの生産効率は95%程度と言われているため、パルプ材消費の5%のロスが生じるものとした。

表1 KP製造工程の重量バランス(1995年度)^{1) 2)}

	原材料	パルプ	黒液
重量(含水率)[百万t]	17.83(0%)	9.43(10%)	14.06(0%)
絶乾重量比(パルプ1)	2.10	1.00	1.66

(2) 発熱量 (表2)

KPはセルロースのみから構成されるとし発熱量として14.1GJ/t(含水率10%)を用いた。MPはパルプ材と組成が変わらないとし15.0GJ/t(含水率20%時)とした。

表2 発熱量の推定値³⁾

	発熱量 (GJ/t)
パルプ材(含水率20%)	15.0
パルプ材, MP(含水率0%)	18.8
KP(含水率10%)	14.1
KP(含水率0%)	15.7
回収黒液(含水率0%)	12.5

(3) 工程に投入されるエネルギー量 (表3)

各工程のエネルギー原単位(表3)から各工程に投入されるエネルギー量を算出した⁴⁾。このうち植林や輸送に用いられるパルプ材へのエネルギー投入は、パルプ材のライフサイクル1周期におけるエネルギー収支比14.0から算出した⁵⁾。古紙回収に伴うエネルギー

表3 各工程のエネルギー原単位 (紙1t製造時)

工程	種類	投入エネルギー量		
		[GJ/紙-t]		
パルプ材(MP)			2.8	
KP : パルプ材からKPの製造	キルン燃料	45.1[t/t]	1.9	
		蒸気	2.52[t/t]	7.5
		電力	385[kWh/t]	3.6
	小計		13.0	
パルプ材(MP)			1.4	
MP : パルプ材からMPの製造	蒸気	0.087[t/t]	0.3	
		電力	1681[kWh/t]	15.9
	小計		16.2	
古紙P : 回収古紙から古紙Pの製造	蒸気	0.105[t/t]	0.3	
		電力	278[kWh/t]	2.6
	小計		3.0	
紙 : パルプから紙の製造	蒸気	2.65[t/t]	7.9	
		電力	682[kWh/t]	6.4
	小計		14.3	

投入は考慮していない。なお、パルプ材の多くは残さや廃材であり、森林を伐採する場合でも殆ど再植林されているので、パルプ材は太陽エネルギー入射などと同様に再生可能資源であると考え、その発熱量は投入エネルギーの計算に含めていない。

2.3 エネルギーフロー図 (図-1)

製造された紙1 [t] のうち、x [t] がマテリアルリサイクル、y [t] がサーマルリサイクル、残りの

z [t] が廃棄されるとする ($x+y+z=1$ [t])。これと2.1の構造、2.2のデータからKP、MPのエネルギーフロー図を作成した ((図-1) 紙面の制約からKPのみ掲載)。

2.4 エネルギー収支

(1) KPのエネルギー収支 (図-1)

・パルプ材の植林、伐採から抄紙工程の間に投入されるエネルギー量 (投入量正)

$$(2.8+13.0+14.3-20.8)(1-x)=9.3(1-x) \text{ [GJ/t-紙]}$$

・廃棄された古紙をマテリアルリサイクルし、古紙パルプ、再生紙の製造工程に投入されるエネルギー量

$$3.0x+14.3x=17.3x \text{ [GJ/t-紙]}$$

・サーマルリサイクルにより得られるエネルギー量を含めたフロー全体のエネルギー収支 E_k [GJ/t-紙]

$$E_k=9.3(1-x)+17.3x-15.7y=8.0x-15.7y+9.3 \text{ [GJ/t-紙]}$$

(2) MPのエネルギー収支

KPと同様に求めたMPのフロー全体のエネルギー収支 E_m [GJ/t-紙]

$$E_m=31.9(1-x)+17.3x-18.8y=-14.6x-18.8y+31.9 \text{ [GJ/t-紙]}$$

(3) 現状のエネルギー収支

1996年の生産実績を反映しバージンパルプの80%はKP、20%はMPであると仮定したフロー全体のエネ

表4 各ケースにおける紙のエネルギー原単位 [GJ/t-紙]

	KP	MP	現状
完全なマテリアルリサイクル ($x=1$)	17.3	17.3	17.3
完全なサーマルリサイクル ($y=1$)	-6.4	13.1	-2.5
全て廃棄 ($z=1$)	9.3	31.9	13.8

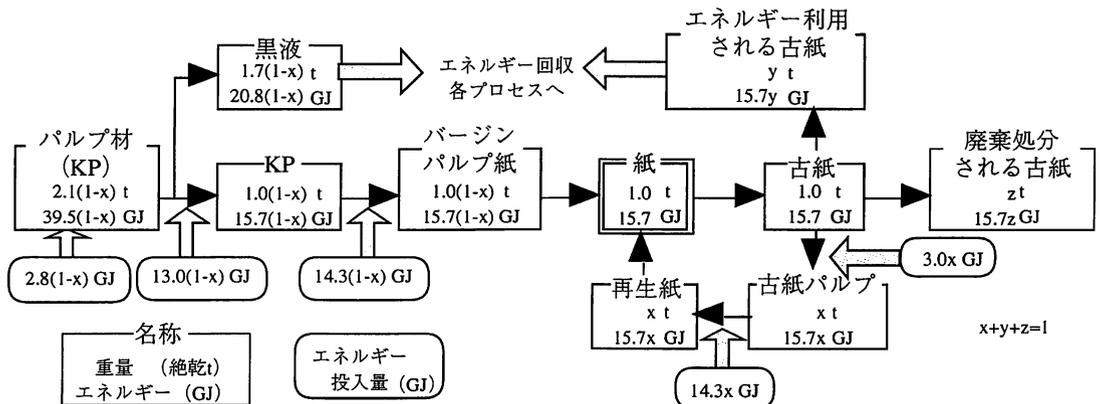


図-1 KPのエネルギーフロー (紙1t製造時)

ルギー収支 E_t [GJ/t-紙]

$$E_t = 3.5x - 16.3y + 13.8$$

2.5 評価

2.4の各式からそれぞれのケースにおける紙のエネルギー原単位が得られる(表4)。

(1) KPから紙を製造する場合、黒液によるエネルギー回収が行なわれるため、完全なサーマルリサイクルケースではエネルギー原単位が負になる。古紙を全て廃棄するケースでも黒液によるエネルギー回収のため、完全なマテリアルリサイクルケースよりエネルギー原単位は小さい。

(2) MPから紙を製造する場合、黒液によるエネルギー回収がないため、完全なマテリアルリサイクルケースの方が古紙を全て廃棄するケースよりもエネルギー原単位が小さく、マテリアルリサイクルケースとサーマルリサイクルケースの差も4.2 [GJ/t-紙] と小さくなる。

(3) 現状では、主にKPのエネルギー収支の影響により、マテリアルリサイクルを行うよりも廃棄処分した方がエネルギー収支的に有利であり、さらに完全なサーマルリサイクルを行うとエネルギー原単位が負になる。

3. おわりに

我が国の紙の生産・消費・リサイクルの過程をエネルギーで表現することで、紙の総合的なエネルギーフローを作成し、マテリアルリサイクル、サーマルリサイクルの定量的な比較検討を行った。

この結果、一次エネルギーベースで見たエネルギー収支では、クラフトパルプを製造する際に発生する黒液がエネルギー利用できるため、マテリアルリサイクルは廃棄処分よりエネルギー収支的に不利であり、完全なサーマルリサイクルを行うとエネルギー原単位が負になることが示された。しかし、これはあくまでも一次エネルギーベースで行った解析であり、より詳細な比較検討を行うためにはエネルギーの質を考慮したエクセルギー的な解析が必要である。

なお、現在パルプ材の多くは残材や低質材であり、森林を伐採する場合でもほぼ100%が植林されているので、評価においてそれぞれのケースに必要なパルプ材の量については触れていない。ただし、少数の樹種で構成される大規模植林を行うことで、種の多様性の宝庫である自然林が失われることも忘れてはならない。

参考文献

- 1) 日本製紙連合会林材部編：パルプ材便覧(1997)
- 2) 高橋確：紙・パルプ産業のエネルギー事情(1995年)，紙パ技協誌，Vol.51，No.8，(1997.8)
- 3) J. Woods and D. O. Hall：Bioenergy for Development：Technical and environmental dimensions，FAO Rome(1994)
- 4) 紙パルプ技術協会エネルギー委員会：第6回エネルギー実態調査報告(1988年)，紙パ技協誌，Vol.44，No.3(1990.3)
- 5) 山本，山地：世界土地利用エネルギー・モデル(GLUE)によるバイオエネルギー・ポテンシャルの評価，電力中央研究所研究報告Y96001(1996)

