

特集

各種副産物のリサイクル技術

紙パルプ産業におけるサーマル・リサイクル技術

Thermal Recycling Technology of the Pulp and Paper Industry

窪田 光 昭*

Mitsuaki Kubota

1. はじめに

紙パルプ産業はエネルギー多少費型産業である。過去2回のオイルショックを契機として省エネルギー、自給エネルギーの有効利用、自家発比率の向上等を進めてきた。

近年、廃棄物や副産物のリサイクル問題がクローズアップされているが、ここでは紙パルプ産業における各種リサイクルの内サーマル・リサイクルに的を絞って、黒液回収ボイラーとスラッジ・ボイラーについて述べる。

2. 紙パルプ産業のエネルギー使用状況

2.1 製造業における紙パルプ産業の位置づけ

1995年度の石油等消費動態統計年報を見ると、紙パルプ産業のエネルギー消費量は原油換算で14,031×10³klで全製造業の8.0%を占めており、鉄鋼、化学、セメントと並んで四大エネルギー多少費型産業の一つと言われている(表1)。

2.2 エネルギー原単位の推移

紙パルプ産業は積極的に省エネ対策に取り組み、著

しい原単位向上を達成してきたが近年は横這い状態にある。

1980年(昭和55年)を100とすると95年は71.6となっている(図-1)。

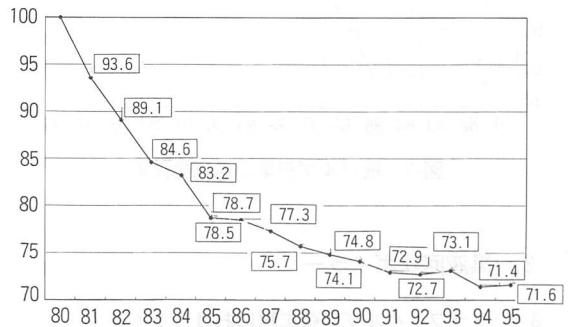


図-1 エネルギー原単位(全エネルギー消費量/紙・板紙生産量)の推移

2.3 エネルギーの構成比

紙パルプ産業は自給エネルギーの比率が高く、回収黒液は全エネルギーの32.7%、廃材は1.2%を占めている(図-2)。

これらの利用は化石燃料の削減という点で貴重なエ

表1 業種別エネルギー消費量

	エネルギー消費量	
	原油換算10 ³ kl	%
化学	66,080	37.8
鉄鋼	56,748	32.4
紙・パルプ	14,031	8.0
セメント	10,623	6.1
その他	27,369	15.7
合計	174,851	100

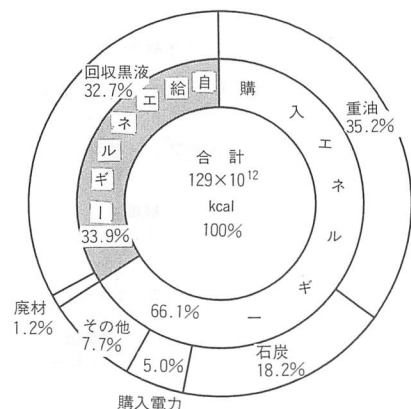


図-2 紙パルプ産業のエネルギー源

* 日本製紙(株)技術本部設備技術部主席技術調査役
〒100 東京都千代田区有楽町1-12-1 新有楽町ビル

エネルギー源である。

2.4 自家発比率の推移

紙パルプ産業ではパルプ化工程や抄紙工程で多量の蒸気及び電力を使用するため古くからコージェネレーション（熱電併給システム）が発達していた。特に1985年以降は割高な購入電力を削減するため積極的に自家発電設備を増強し、95年は76.3%となり全産業中最も高い自家発比率を誇っている（図-3）。

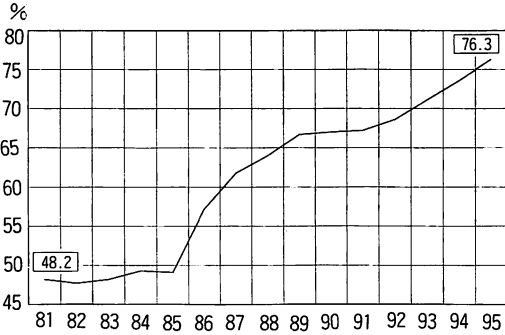


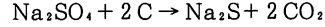
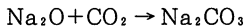
図-3 紙パルプ産業の自家発比率

3. 黒液回収ボイラー

3.1 クラフトパルプ回収工程におけるサイクル

クラフトパルプ回収工程は次の各工程に大別される。

- 1) 木釜内でチップをパルプ化する蒸解工程
- 2) パルプから黒液を分離するためのパルプ洗浄工程
- 3) 黒液を燃焼可能な濃度まで濃縮する濃縮工程
- 4) 薬品及び熱回収を行う回収ボイラーでの燃焼工程
無機ソーダ分の炭酸ソーダへの変化及び、ぼう硝の還元反応式



- 5) 燃焼により生成した無機物質熔融物（スメルト）を溶解する緑液の生成工程
- 6) 緑液中の炭酸ソーダ (Na_2CO_3) を蒸解に必要な苛性ソーダ ($NaOH$) に変えるための苛性化工程
苛性化反応式
 $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$
 $Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow NaOH + CaCO_3$
- 7) 白液中に含まれている石灰泥（炭酸カルシウム： $CaCO_3$ ）を分離するための白液清澄化工程
- 8) 石灰泥（炭酸カルシウム）の、焼成による生石灰（ CaO ）の回収
ロータリー・キルンでの反応式
 $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

以上の様なリサイクルを前提とした製造プロセスである（図-4）。この中で、回収ボイラーは黒液中のソーダ分を回収し、ぼう硝 (Na_2SO_4) を蒸解能力のある Na_2S に還元すると同時に、黒液に含まれる木材から溶出した有機物を熱エネルギーとして効率良く回収することを目的としている。

3.2 ボイラー効率向上

回収ボイラーの効率向上の歴史を振り返りながら、最新技術について述べる。

1960年代の回収ボイラーはカスケード・エバポレータ (C/E) を併設したアメリカン・タイプ (A形) と呼ばれるものであったが、その後約30年の間に幾多の技術開発を経てボイラー効率は飛躍的に向上した。C/Eはボイラー排ガスと黒液を直接接触させ、加熱・濃縮する装置であるが、このとき黒液中の硫化水素やメチルメルカプタン等の臭気成分がガス側へ移行し、

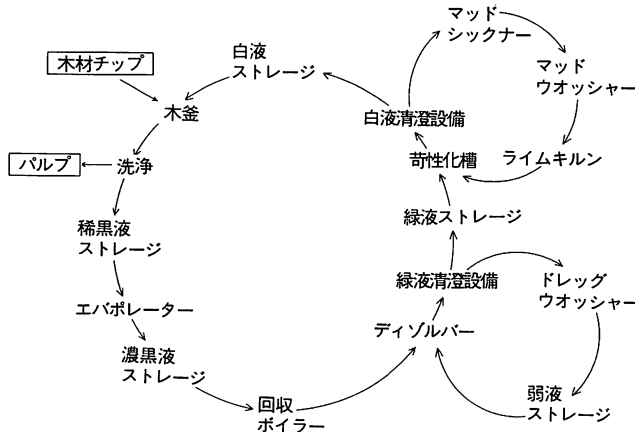


図-4 回収工程上のサイクル

クラフトパルプ工場特有の臭気問題となっていた。

この対策としてスカンジナビア・タイプ（S形）と呼ばれるラージ・エコマイザー（L・Eco）を設置したボイラーが開発され、排ガスの熱回収強化によるボイラー効率向上を達成すると同時に排ガスと黒液の直接接触は無くなった。

3.3 黒液の濃度アップ

黒液濃縮装置は当初チューブタイプであったが、伝熱面の焼き付きによるスケール生成のため濃度アップは難しく、またスケール除去のため酸洗浄やジェット洗浄を行うなど苦労していた。その後、薄膜降下型（フォーリングフィルム）の開発もあったが、何と言っても現在の高濃度化を可能にしたのは、プレート表面の多数の凹凸によりスケール生成を防止するプレート型伝熱面の開発であった（図-5）。

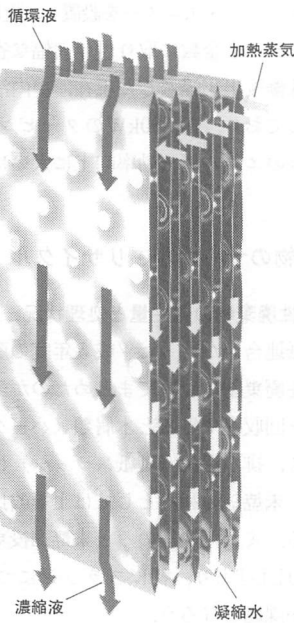


図-5 プレート型伝熱面

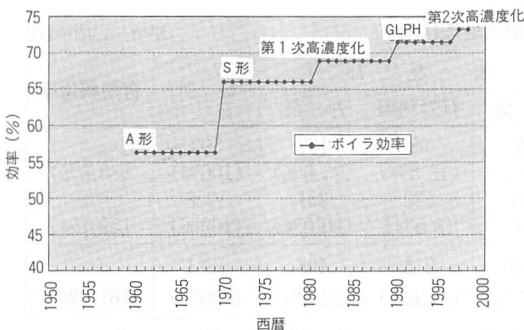


図-6 ボイラー効率の変遷

表2 代表的設計条件

	黒液濃度	排ガス温度	備考
A形	60%	ECO出口275°C	C/E入口は50%
S形	63%	ECO出口175°C	1970年頃
第1次高濃度化	70%	ECO出口175°C	1981年頃
GLPH	70%	GLP出口120°C	1990年頃
第2次高濃度化	75%	GLP出口120°C	1997年頃

これに対してボイラー設備としては

- 1) 燃焼室温度上昇による腐食増大に対する防止対策
- 2) 高濃度化によるNO_x上昇に対する低NO_x燃焼技術
- 3) 蒸気ドレン混入による濃度低下防止と黒液性状の安定化のための間接式黒液ヒータの採用
- 4) 黒液の粘度上昇による難ハンドリング性に対しては2軸スクリーポンプの採用

等により、高濃度黒液の燃焼技術を確立していった。

この間のボイラー効率の変遷を図-6に示す。但し、その算定根拠は表2の代表的設計条件とした。

3.4 その他の効率向上

従来、排ガス温度は低温腐食のため175°C以下にはなかなか下げられなかったが、耐食性のあるガス式低圧給水加熱器（GLPH）の開発により120°Cまで熱回収できるようになった。材質は鉛被服管、SUS管があり最近チタン管が採用されている。

また、所内動力削減のため押込ファン、誘引ファン、給水ポンプ等の大型補機にはインバータが広く採用され省エネルギーを図っている。

3.5 回収ボイラーの高温・高圧化

回収ボイラーはその燃料の特殊性と腐食環境の厳しさのため長い間低温・低圧の蒸気条件であったが、近年の発電プラントとしての発電効率向上の要請を受け

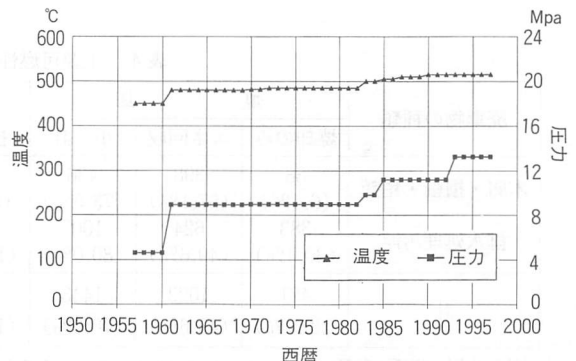


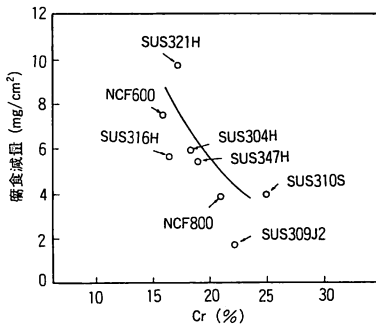
図-7 回収ボイラーの変遷

徐々にではあるが高温・高圧化を実現してきた(図-7)。

高温・高圧回収ボイラー(一般には発生蒸気が10MPa×500℃超級)が克服すべき課題は主に腐食対策であるが次の様な技術開発があった。

- 1) 炉底水管の腐食対策としてSUS310Lコンポジットチューブ(二重管)または18Cr肉盛管の採用
- 2) 過熱器には耐触性の高いSUS309J2を採用(図-8)
- 3) 燃焼空気の投入方式の違いによるガスのフローパターンを解析し、ガス流れを均一化
- 4) 過熱器管をパネル内及び炉幅方向で交差させ蒸気温度の平準化を図り局部温度上昇を防止
- 5) ダストトラブル防止対策としてバッフルのない板形化エコノマイザーの採用

等々により高温・高圧化を達成してきた。



試験条件
600℃×20時間
K=16.2% Cl=3.9% S=0.4%

図-8 過熱器管の腐食量

3.6 世界最大の高温・高圧回収ボイラー

本年3月、高温・高圧型としては世界最大容量の黒液固形分処理量2700t/Dの回収ボイラーが当社岩国工場で稼働した(表3, 図-9)。

表3 ボイラー・タービン仕様

ボイラー型式	単胴水管式自然循環ボイラー		
固形分処理量	2,700 t/D		
蒸発量	425 t/H		
蒸気圧力	(過熱器出口)	10.3MPa	
蒸気温度	505℃		
黒液濃度	75%		
タービン型式	衝動式2段軸気復水タービン		
出力	70,000kW		
回転数	3,600rpm		
蒸気圧力	(タービン入口)	10.0MPa	
蒸気温度	(タービン入口)	502℃	
排気真空度	93.3KPa		

本ボイラーは4缶あった回収ボイラーを1缶に集約したもので、炉内監視のためのチャーベド・モニターやキャリオーバー・モニターを設置し、更にエアポート・クリーナーを全数に取り付け大幅な省力化を図った。また稼働後半年経過した現在、炉内清掃なしで順調に運転しており、70,000kWのタービン発電機と合わせて工場のエネルギー効率向上に大いに寄与している。

4. 廃棄物のサーマル・リサイクル

4.1 可燃性廃棄物の発生量と処理状況

日本製紙連合会が行った平成5年度の廃棄物調査の内、可燃性廃棄物についてまとめたのが表4である。エネルギー回収率で見ると木屑類(パルク他)の67.1%に対して、排水汚泥(製紙スラッジ)は49.6%と低い。一方、未焼却の利用としては土壌改良剤、有機肥料等がある。また、焼却のみと未焼却投棄分を合わせると約61万BDTあり、特にスラッジについて今後の有効利用が課題となろう。

表4 主要可燃性廃棄物処理状況

単位 1,000BDT

廃棄物の種類	焼 却			未 焼 却			合 計	有効利用率
	焼却のみ	エネ回収	小 計	投 棄	有効利用	小 計		
木屑・損紙・粕類	38 (6.4%)	398 (67.1%)	436 (73.5%)	59 (9.9%)	98 (16.5%)	157 (26.5%)	593 (100%)	(83.6%)
排水処理汚泥	383 (30.4%)	624 (49.6%)	1007 (80.0%)	131 (10.4%)	120 (9.5%)	251 (20.0%)	1258 (100%)	(59.1%)
計	421 (22.7%)	1022 (49.6%)	1443 (78.0%)	190 (10.3%)	218 (11.8%)	408 (22.0%)	1851 (100%)	(67.0%)

[注] 木屑, 損紙, 粕類……パルク, ソードダスト, チップダスト, 調木粕, チップ粕, 紙屑, 損紙, 古紙粕, パルプ粕
有効利用率はエネルギー回収分と未焼却有効利用分の和

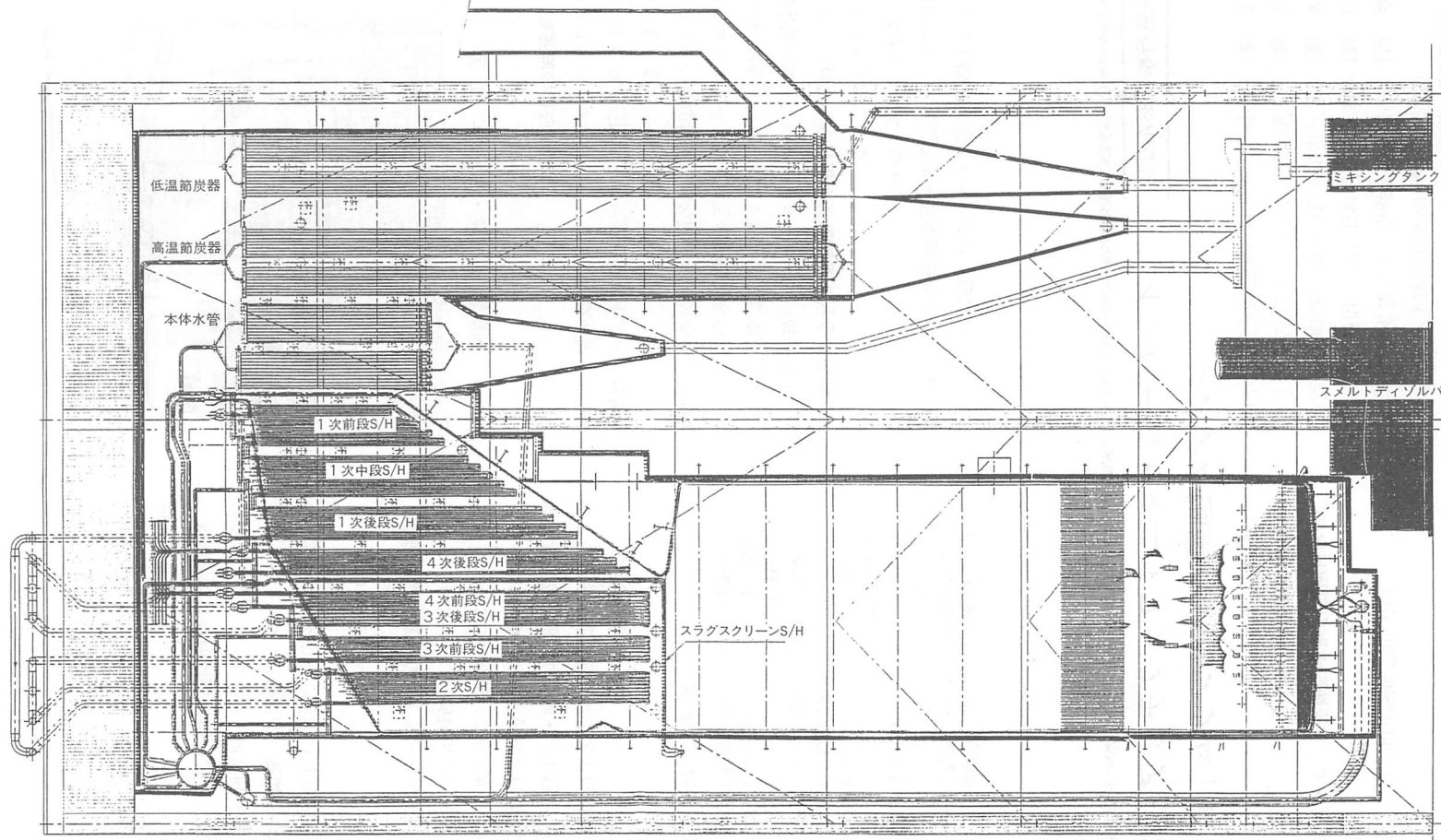


図-9 KJ型回収ボイラー組立図

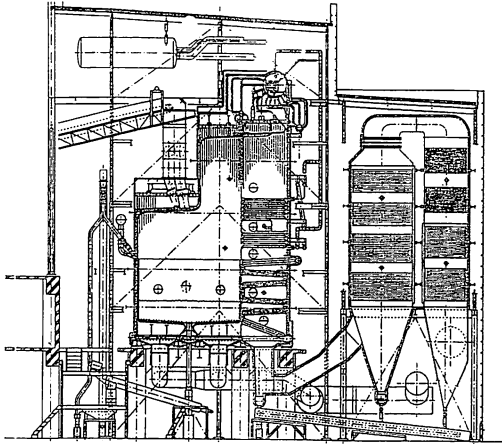


図-10 スラッジ・ボイラー構造図

4.2 廃棄物の焼却設備

バーク・ボイラーはストーカ式や階段火格子の固定床炉が主だが、石炭ボイラーや重油ボイラーに混焼するものもある。

スラッジの焼却設備には各種のものがあり、小型焼却炉やロータリー・キルン等の焼却のみのもの、エネルギー回収を行うサイクロン型、多段炉型、固定床、流動床等のスラッジ・ボイラーがあり、最近では更にエネルギーの効率化を目指して発電まで行う本格的プラントが導入されている。

4.3 スラッジ・ボイラー

製紙スラッジは高含水・低発熱量であり、これを燃料とした本格的発電ボイラーには一般にパブリック型

流動床が採用されている。

スラッジ・ボイラーでは起動時のために流動床部をセル分割し、炉底部には不燃物などを抜き出し分級する設備を設置している。また、排ガス中のダスト濃度は高濃度であるため、プロテクター等の磨耗対策が必要である。

参考までに当社釧路工場の45 t/H×10,000kWの発電用スラッジ・ボイラー組立図を図-10に示す。本ボイラーは平成4年稼働後、廃棄物の減量化とサーマル・リサイクルの点で所期の目的を果たしている。

5. おわりに

本稿では黒液回収ボイラーとスラッジ・ボイラーについてエネルギーの有効利用という観点でサーマル・リサイクルについて述べてきたが、今後はサーマル・リサイクルのみならず、古紙の有効利用や紙パルプ産業における各種の廃棄物・副産物のリサイクルを可能にする持続可能な循環型産業を目指さなければならないと考えている。

参考文献

- 1) 通商産業省；石油等消費動態統計年報（1995年）
- 2) 高橋 確；紙・パルプ産業のエネルギー事情（1995年）、紙パ技協紙51巻8号
- 3) 小島哲朗；紙パルプ産業のエネルギー事情、第2回省エネルギーセミナー講演会資料（1997）
- 4) 石田晃三他；クラフトパルプ・非木材パルプ、紙パルプ技術協会編
- 5) 松田孝男、樹田武治；川崎K J形高压高温ソーダ回収ボイラーについて、紙パルプ技術タイムズ（1997年9月）
- 6) 日本製紙連合会 環境保全委員会；紙パルプ工場の産業廃棄物実態調査、紙パ技協紙49巻3号

共催行事ごあんない

「インバース・マニュファクチュアリング・システム国際シンポジウム」について

〔主 催〕 名古屋市、名古屋商工会議所 他（予定）

〔参加費〕 5,000円

〔共 催〕 名古屋大学工学部、化学工学会他（予定）

〔参加申込・問合せ先〕

〔後 援〕 通産省中部通商産業局、愛知県他（予定）

（名古屋都市産業振興公社 産業部産業育成課

〔日 程〕 平成9年11月18日（火）、19日（水）

担当：水野、富永

〔場 所〕 名古屋国際会議場 1号館3階131～135

TEL 052-265-2008, FAX 052-265-2044

（名古屋市熱田区熱田西町1-1）