省エネルギーから見た抄紙

十条製紙㈱ 石 黒 久三郎

Papermaking with Less Energy Requirement

Kyuzabro Ishiguro

Jujo Paper Co., Ltd.

Various surveys on energy use and save-energy technologies in the papermaking process are made in this paper, which are summarized as follows.

1. Perspective on energy availability and price in the future are outlooked both in Japan, America and Europe.

2. Present energy consumption in the papermaking process in Japan is not so much as that in America and Europe, with the future stringent energy outlook expected, however, continuous efforts should be made in reducing energy consumption in the papermaking process in Japan.

3. Several newly developed save-energy technologies are described on each part of a paper machine, with up-to-date examples illustrated.

4. In applying a save-energy technology in the paper making process, especially the quality of the paper product should be paid much attention as well as the amount of energy reduced.

5. Strengthening the dewatering capacity in the press part and the no-draw-press system improve the operation in the printing room as well as reduce the energy requirement in the papermaking process.

1. ま え が き

抄紙における省エネルギーについては、既に優れた報文¹⁾が数多く発表されているので、本文では重複を避ける意味で抄紙工程を中心にある程度焦点を搾り記述してみたい。

周知のごとくわが紙パ産業は、電力、化学に次ぐエネルギー多消費型産業のひとつで、その消費量は石油換算で1,000万kl/年に昇り、わが国エネルギー総使用量（石油換算で4.2億kl/年）の2.5%を占め、エネルギー費の高騰がわが国紙パ産業に及ぼした影響は計り知れないものがある。

図1²⁾³⁾は米国、スカンジナビア地区及びわが国の代表的紙品種エネルギー原単位の比較で、本図を見る限り米国の原単位は良くない。これに対しS. Sassamanは図2、3⁴⁾より米国は相対的に輸入エネルギーが図1

図1 Total Energy Consumption.

の諸国より小で、エネルギーコストの絶対値が安価なため、省エネルギーに対する努力が他国に比し欠除し

ているのではないかと指摘している。エネルギー総コストと比較すればともかく、エネルギー原単位でみる限り、わが国紙パ産業は善戦していると言えるかも知れないが、さらに一層の省エネルギーが要望されていることは言うをまたない。参考のため、図2、3と同一要領で図4⁵⁾を作成してみた。

なお、図2、3よりヨーロッパでは現在全体の53%を占めている輸入エネルギーは、2000年には46%に減少し、代わりに原子力発電が現状3%から約5倍の16%に伸長することを知り、また、米国では環境関係に問題が発生しないということを前提にはしているが、石炭転換が大幅に進み同じく2000年には全エネルギーの約1/3を占めるという予測も注目し値するものと思われる。

図5⁶⁾は代表例として日米ライナーボード価格のここ10年の推移で、断わるまでもなく第1、2次オイルショック時に価格が高騰し、同時に原料・人件費その他コストも高騰し、図6⁷⁾は米国の例であるが1978年には利益はほとんどなくなり、最近では売価が横ばいのため、コストが売価を上回っているのではないかとわれ、総体的に言って米国紙パ産業もわが国と同じ悩みを有しているようだ。

表1、2⁸⁾は1978年12月のデータで抄紙機各パートにおける脱水コストは表1よりワイヤーパートを1とした場合、プレスパート、ドライパートはそれぞれ58・220で、本表ではドライパートの脱水コストはプレスパートの約4倍であり、4～5倍というのが従来の一般的な指標であったが、最近の蒸気エネルギーの高騰はこれを20倍、ないしそれ以上に変貌させているものと思われる。表2は原料費、償却、金利等を除いた抄紙機純操業コストの内訳で、エネルギー費の総計が60%以上になっているが、最近の実績は同様にもっと高率であろう。

また、良く知られているようにプレスパートで湿紙水分を1%低下させると、ドライパートにおける乾燥用蒸気を4～5%節減出来、もっとも手取り早い省エネルギー対策であるが、反面、あまりにプレスパートに負担をかけ過ぎ

図2 U.S. energy demand and sources of supply.

図3 Europe energy demand and sources of supply.

資源エネルギー庁編 総合エネルギー統計
(54年度版)

図4 Japan Energy Demand and Source of Supply

ると(ニップ圧を大にしすぎると)、毛布寿命の短縮、これに伴う要具替頻度増加、及び故障多発による抄紙

機停止時間増加等により抄紙機ロスタイムが増し、経済的バランスを失う場合があり、図7、8はこの辺を概念的に示したものである。

抄紙機における省エネルギーは必要とする品質を維持することが前提であり、前記の経済的バランスとともに品質とのバランスを考慮し実施する必要がある。

2. ストックインレット、ワイヤーパートにおける省エネルギー

ストックインレット、ワイヤーパート周辺における省エネルギー対策の簡単な方法はストックインレット内濃度を上昇させ、送液原料の絶対量を減らすことで、図9にその概要を示した。本図より仮にストックインレットに0.5%濃度で送液していたものを0.7%に上昇させれば、送液量は約30%減少出来る計算となり、ファンポンプを始め、各原料ポンプ、スクリーン、クリーナー、脱気装置等の小規模化、省エネルギーが可能となりメリットは大きい。反面、除じん効率の低下、ワイヤーパート上における地合構成の不良を招き易いので、実

表 1

各セクション	建設費	脱水量 (%)	脱水量単位 体積 (m ³) 当りコスト
ワイヤーパート	1	98	1
プレスパート	0.75	1.25	58
ドライパート	1.7	0.75	220

米国：Price of 205 g/m² domestic linerboard 1970～1980

日本：Cライナー価格（但しレート 220 円/\$）

図 5 日米ライナーボード価格推移

施に当っては前述の品質とのバランスを充分に考慮し

図 6 米国における製紙コストと売価の関係

表 2

各セクション	動力費	蒸気費	要具費	労務費	その他	計
フローボックス	3.8	—	—	—	—	3.8
ワイヤーパート	8.9	—	7.6	2.5	2.5	21.5
プレスパート	5.1	—	7.6	2.5	1.9	17.1
ドライパート	8.9	30.3	6.4	2.5	1.9	50.0
カレンダーリール	1.3	—	—	2.5	—	3.8
ワインダー	1.3	—	—	2.5	—	3.8
計	29.3	30.3	21.6	12.5	6.3	100%

図 7

なければならない。

J. Eames⁹⁾によれば抄速 730 m/分、ワイヤー幅 6,000 mm の抄紙機で、品質上差支えない限りストックインレット濃度を上昇させたところ、上記のほかワイヤーパート駆動用エネルギーを 30%，すなわち、43 kW 節減出来たとしているが、この外、ストックインレット内原料の高濃度化は、ワイヤーサクショボックス使用個数の減少、及びクーチ出口湿紙濃度上昇に伴うプレスパート出口湿紙水分の低下等副次的なメリットが期待される。

本格的な高濃度抄紙法として、テストマシンを使用し高濃度スライスをダンディロール直前に設置し、濃度 2.5~3.5%，抄速 300m/分 で 100 g/m² のクラフト製袋用紙を抄造し、 α 方向強度の強い紙を得ることが出来たという報告¹⁰⁾があるが、高濃度抄紙法は省エネルギーの観点から、また、製紙連合会“業界共通の技術開発課題”のひとつに採用されているが、今後とも十分に検討に値するテーマだと思う。

ツインワイヤーマシンの場合、長網マシンと比べ、同一製品を抄造する場合、一般にウエットエンドの機構よりストックインレット内原料濃度を大にし得るので省エネルギー上有利であり、表 3 に両者を比較した。本表の場合、同一生産量の場合ストックインレット送液量を 16% 減少させる結果を得ている。

長網抄紙機の場合、地合改善・脱水向上・ピンホール防止等の目的で、ストックインレット前に脱気装置を設置している例があるが、使用停止を試み、品質確認を行い脱気装置使用可否の検討を行うのも省エネルギー対策のひとつと考える。ワイヤー幅 3,800 mm、抄速 600 m/分 クラスの抄紙機で脱気装置に必要なエネルギーは、エゼクターのみを使用し、真空ポンプを併用しない場合、原料配合にもよるが蒸気節減量は約 2 t/h と大きい。

一方、ツインワイヤーマシンの場合、脱気装置はそ

図 8

図 9

表 3

(ワイヤー幅 3,650 mm, 抄速 600 m/分)

マ シ ン 種 類	流 量 (m³/分)
長 網 マ シ ン	32
ツインワイヤーマシン	27

の紙層形成上ほとんど必須の設備であり（使用を停止すると泡地合となり製品とならない場合が多い）、またこれにより長網抄紙機では得られない品質特性を有する製品（特に表面強度の強い紙）を抄造し得る利点を有している。すなわち、脱気装置とツインワイヤーとの組合わせにより

1) スtockインレット中の原料に含有される空気量が長網に比し、著しく少ない（長網に比し 1/2~1/10 程度）。

2) 2 枚ワイヤーで原料が挟まれるので、大気に接触せず、また長網のようにワイヤー上における原料のスパウト現象（飛び跳ね現象……一種の曝気作用）がないので、ウエットシート中の空気含有量が長網に比べ著しく少ない。

3) 従って、紙層間の繊維結合（水素結合）を妨害する空気存在が少なく、紙層単位面積（体積）当たり、繊維結合面積が大となり、強度、特に表面強度の強い製品を抄造し易い¹¹⁾（図10参照）。

なお、ツインワイヤーの場合、脱気装置設置、真空ポンプ類の強化等ウェットエンドに関する限り長網に比べ多消費型となるが、抄紙機の生産性向上が期待できるので、紙生産t当たり消費エネルギーで比較すれば両者の差異はウェットパートで比べると表4の通りほとんど変わらないか、あるいはかえって小となる。

図11は B. Thorp¹²⁾ が示したもので良く引用されているが、フォイルの選択で省エネルギーが可能な例で、(B)型は(C)型に比し24%、また(A)型は(C)型に比し30%ワイヤー駆動用エネルギーを節減できた上に脱水能力は40%向上させることが出来たと報告している。

長網のワイヤーサクシヨンボックスの使用法を検討して省エネルギーを図った例として J. Eames¹³⁾ の報告があるが、結論は表5及び図12に示されている。

図10 セルロース分子同志を水分子がつなげているときの模式図

表5は合計8個のサクシヨンボックスを使用した場合、いずれも各ボックスの真空度の合計は水銀柱で24 in だが、本表最下欄の通り、ウェットサイドより徐々にドライサイドに真空度を上昇させるのがもっとも効果的で、図12では8個のうち3~4個のサクシヨンボックスを使用するのが、ボックス出口湿紙濃度、及び省エネルギーの点で有利であることを示している（この場合各ボックスの真空度の合計は24 in で、ウェッ

図11 Drag and drainage of several foil shapes.

表4 ツインワイヤーマシン、ウェットパートモーター kW 比較（改造前後）

				A m/c		B m/c	
				改 造 前	改 造 後	改 造 前	改 造 後
生 産 高 (t/日)	抄 途 (m/分)		130	156	289	378	
			600	720	700	900	
モーター負荷 (定格)	1 次 F P	260	250	350	500		
	2 次 F P		132	350	450		
	クー チ ロール	115	115	350	350		
	ター ニング ロール	115	115	350	350		
	パ キ ュ ーム P	412	669	1,090	1,320		
				55			
	合 計 (kW)	1,002	1,381	2,495	3,060		
紙 ton 当り設備 kW (t/日/kW)		0.13	0.11	0.11	0.12		

注：改造前長網，改造後ツインワイヤー。

表 5

Vacuum Trend	Flat box No.								Final sheet consistency (%)
	Wet				Dry				
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Decreasing	4	4	4	4	2	2	2	2	10.6
Constant	3	3	3	3	3	3	3	3	11.8
Increasing	2	2	2	2	4	4	4	4	12.1
Increasing (steeper)	1	1	1	2	3	4	6	6	13.1

トよりドライサイドに真空度を徐々に上昇させている)。

ワイヤーパートでは使用ワイヤー選択も製品品質、省エネルギーの観点から重要で、現在ブロンズ製ワイヤーに換わりファブリックワイヤーが多用され、特に製品肌合向上、リテンティング、及びリテンション改善等の目的で二重織ワイヤー (duplex fabric) が使用される場合があり、ツインワイヤーの場合、バックサイドに使用されるケースが多いが、本ワイヤー使用の場合一重織ワイヤー (monoplane fabric) に比し、ワイヤーについてまわる水量が多いため、クーチ出口湿紙水分が約2%多くなり (例えば80%位が82%位になる)、結局 プレス出口湿紙水分を増加させ、省エネルギー上問題を残したという報告¹⁴⁾もある。

3. プレスパートにおける省エネルギー

プレスパートは抄紙機において省エネルギーの“かなめ”であると同時に、製品品質、特に強度、表面特性等に関与するパートであり、毛布の選択、同洗浄装置を含め充分に配慮する必要がある。

最近のプレスパートの特徴は、ダブルフェルトプレス、ステンレスロール、4番プレスの採用、及び搾水機能の向上と製品品質の安定を目的とした毛布製造技術の進歩である。

図13は一番プレスにダブルフェルトプレスを設置した例で、3番プレス出口までオープンドロ (フリーラン) の箇所がなく、いわゆる“ノードロー”の型式である。ウエットシートの場合“ノードロー”方式にすると紙切れ回数が減少し、抄紙機の操作が安定するとともに下記の点で製品品質、特に強度関係に好ましい影響を与え好都合である。

- 1) 前項で記述の繊維間結合 (水素結合) が行われ

Drag : Final sheet consistency of a bank of flat boxes

図 12

図 13 Triple-nip, no-draw press section.

る前のウエットシートの湿紙強度は、木材繊維同志が、いわゆる“Campbell 効果”¹⁵⁾により水の表面張力により密着しその強度が保たれている。

この“Campbell 効果”により木材繊維間に働く接着力は

- 3/100 mm 径のフィブリル間で 6.1 kg/cm²
- 2/1,000 mm 径のフィブリル間で 38 kg/cm²
- 2/10,000 mm 径のフィブリル間で 174 kg/cm²

と、われわれの想像を超える程大きい。

2) 繊維間結合はこの“Campbell 効果”による水の表面張力により、木材繊維同志の密着が前提となり行われる。繊維間結合はパルプ品種、叩解度にもよるが、ウエットシートの状態で濃度がおおよそ25%位のところから始まる¹⁶⁾。

- 3) 従って“Campbell 効果”及び繊維間結合の初

期段階でウェットシートの湿紙強度が保たれている期間に外力（ドロー）を与えると、局部的にこれらを破壊し製品強度を弱める結果を招く。

4) ダブルフェルトタイプを使用し、湿紙水分の多い1番プレスで脱水を強め、繊維間接着、もしくは結合を強化し、ノードローで外力を与えないことは上記のごとく製品の強度を保つ上で好ましい。

図14¹⁷⁾はプレスニップ下における湿紙、毛布、及び圧力の状況を示したもののだが、ここで大変大胆な仮定として、ニップ下で湿紙、毛布よりの脱水がポアズイユの法則に従うものと仮定すると脱水量は次式¹⁸⁾で示される。

$$V = \frac{n r^4 \pi \Delta P}{8 \nu \Delta l} \times \Delta t \quad (1)$$

ただし、

V : 毛管を流れる量 cm^3

n : 単位面積当り毛管の数

r : 毛管の半径 cm

ΔP : 毛管内の圧力差 dyne/cm^2

Δl : 毛管の長さ cm

ν : 粘性係数 ポアズ $\text{dyne} \cdot \text{s/cm}^2$

t : ニップ下で加圧される時間 s

(1) 式より脱水量を大にするには

- 1) ニップ圧を大にし ΔP を大にする。
- 2) ウェットシートの温度を高め水の粘性係数を小とする。
- 3) ニップ通過時間 Δt を大にする。

図15¹⁹⁾はシングルフェルトプレス、ダブルフェルトプレスの差異を示したもので、ダブルフェルトプレスはニップ間に2枚の毛布が介在するため、シングルフェルトプレスに比べ同一ニップ圧 (kg/cm^2) 下でもニップ幅が大にとれ、さらに湿紙厚み方向中央部を境にし、表裏両面に対し脱水が可能となり、概念的にいてダブルフェルトプレスの搾水能力はシングルフェルトプレスに対し2倍以上あることになり、また、1番プレスでこれだけ多量に脱水しても砕けを発生する懸念が少なく、また、1番プレスにおける多量の搾水は、結局プレスパート出口湿紙水分の低下に結びつくので省エネルギー上有利となる。図16、17²⁰⁾²¹⁾はライナーボードの場合だが参考までに紹介した。

プレスは使用毛布により、製品品質、搾水能力に影響を受ける。

図14 The four phases of press dewatering.

図15 Double-felted pressing enables the sheet dewatering to occur from both sides of the sheet.

響を受ける。プレスに要求される毛布の基本的性質には、耐久性、表面性、搾水性、走行安定性の4要素が必要だが、製品品質に応じバランスを整え毛布を選択する必要がある。

毛布の選択、組合せによりプレス脱水効率に影響を与えることは良く知られているが、これに対しヒストグラムを記録し管理すると便利である。図18²²⁾は広幅、高速マシンにおける1例で、1月より7月までA、

図 16 Effect of double felting.

B, C, D, E, F の 6 種の毛布を PU, 1P, 3P に組合せて使用 (図 13 参照) した記録で、本図では PU, 1P, 3P と “D” 毛布を使用した場合もっとも問題が少なく、反面 “E”, “F” 毛布を使用した場合乾燥用蒸気原単位は上昇傾向にあり、本図より抄紙機には “D” 毛布選択が適当であることが分かる。蒸気原単位のほか、毛布の選択による紙切れ回数、生産高、抄速等の変動も同じくヒストグラムで記録すると操業に対する毛布の影響が判別出来便利である。

(1) 式の dt , すなわち、湿紙がニップを通過する時間 [Nip Residence Time (NRT)] を充分にとるように設計したプレスに Extended Nip Press (図 19)²³⁾ がある。これも一種のダブルフェルトプレスであるが、ボトムロールに換え、トップロールと同様の曲率半径と広幅のニップ幅を有するシューを使用し、毛布はゴムベルトを介し組入れられ、プレスよりの搾水はゴムベルトで外部に排出される。また、シューは油圧で加圧され、シュー幅の 1 例は 250 mm でニップ圧は 45 kg/cm² (500 ~ 600 kg/cm) と高い。

本プレスは板紙系マシンで使用されているが、通常のプレスに比しプレスパート 出口湿紙水分を 5~7% 低下出来るとされ、省エネルギー効果が期待出来る。

図 20, 21²⁴⁾ にニップ圧, NRT, プレス出口湿紙濃度の関係を示した。

(1) 式より湿紙を加温し、水の粘性係数を低下させプレスにおける脱水の強化を図ったものにスチームボックスがある。これはプレスロール附近にボックスを取付け (図 22), 湿紙温度上昇とともに湿紙水分プロフ

図 17 Effect of pressure on dryness of 204 g/m² burst strength liner (constant mullen).

図 18 Average steam consumption for various combination of press clothing. All telts are 100% synthetic letters A-F designate different manufactures.

ァイル是正を兼ね、プレス出口水分の低下を考えたもので省エネルギー効果を期待し得る。

プレスパート最近の傾向として、従来の合成ゴム被覆プレスロールに換わり、ステンレスグリーブドロールを採用する場合がある。

本ロールの特徴は

1) ゴム被覆ロールのように研磨、巻替などによるロール替えがほとんどない。また、ゴム剥離、クラック発生等の懸念がない。

2) ニップ幅が狭くなり (大雑ばにいて、ゴム被覆ロールの場合に比し 20~30% 減少する), 搾水時間

(NRT) が減少するが、反面比ニップ圧 (kg/cm^2) が大となり、トータルとしてプレス出口湿紙水分を減少させることが出来る。

3) 幅方向水分プロファイルが改善され、結果として蒸気原単位向上が期待できる。

4) ただし、比ニップ圧が高いので使用毛布の吟味が重要で、バウシング発生、毛布の損傷に対し常に細心の注意をもって管理する必要がある。

なお、パルプマシンのプレスの上下ロールにステンレスロールを使用した所、プレス出口シート水分を 50～53% まで低下し得たという報告²⁸⁾がある。

従来のゴム被覆ロールも

- 1) 幅広く毛布の選択が可能である。
- 2) ニップ幅が広くとれ、搾水時間 (NRT) を大にし得るので、脱水能力はそんなに劣らない。
- 3) 安価で操業管理も容易である。
- 4) ゴム被覆部の摩滅、劣化、損傷等は定期的にロール替えを実施すれば実害は防止出来る。

等の利点もあり、なお捨て難い特徴を有しているといえよう。

なお、ゴム被覆部に発生する内部発熱の問題は筆者が後記文献 27) で論じた。

4. ドライパートにおける省エネルギー

抄紙機ドライパートにおいては省エネルギー対策として格別斬新な方法はなく、製品品質に影響を与えることなく有効に熱エネルギーを使用し、また効率よく回収して再利用することに尽きる。

ドライパートにおける湿紙乾燥は、基本的にはドライヤーセルを通じ湿紙に対する熱伝導の問題と、湿紙より大気中に水分を蒸発させる物質移動 (mass transfer) の問題に大別され、図 23²⁸⁾ を参照し次式で示されるが、詳細は筆者が論じた後記文献 29) を参照されたい。

すなわち、前者に対しては

$$Q = UA(T_S - T_W) \quad (2)$$

ただし、

Q : セル内面よりセルを通じ湿紙を加温するに必要な熱量 kcal/h

U : 総括熱伝達係数 $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

A : 湿紙がセル表面に接触している面積 m^2

T_W : セル内蒸気温度 $^\circ\text{C}$

図 19

MOISTURE vs PRESSURE & NIP TIME

37 lb./3000 ft², Bleached Kraft, 470 CSF
62% Ingoing Moisture

図 20 Sheet moisture versus pressure and nip residence time.

図 21 Press moisture contour plot.

T_S : 湿紙温度 $^\circ\text{C}$

後者に対しては

$$W = KA(C_W - C_{AS}) \quad (3)$$

ただし、

W : 湿紙よりの蒸発水量 kg/h

K : 総括物質移動係数 m/h

A : 蒸発が行われている湿紙表面積 m^2

C_W : 湿紙表面における水蒸気濃度 kg/m^3

C_{As} : 周囲空気における水蒸気濃度 kg/m^3

(2), (3) 式ともシンプルな式だが、内容は大変複雑で簡単には記述し得ないが、湿紙乾燥に関する省エネルギーの観点からみれば理論的にはともかく、实际的に U (総括熱伝達係数), K (総括物質移動係数), 及び $(C_W - C_{As})$ の値が極力大になるように配慮すれば良い。

$U, K, (C_W - C_{As})$ に影響を与えるものに下記が考えられる。それぞれに対し記してみると次の通りである。

4.1 セル内ドレーン層の厚さ、挙動

セル直径 1.5m の場合、抄速 300m/分 以上になればドレーンはほとんどいわゆる“リム”状になるが、ドレーンの熱伝導率は鋳鉄の数分の一のためドレーンを円滑にセル外部に排除させ、“リム”の厚さを極力小に保つようにさせる必要がある。

一般に行われている方法は、ロータリーサイフォンを用い、その先端とセル内面との間隙を極力小 (1.5~3 mm) に保ち、また、遠心力にうち勝ってドレーンを円滑に外部に排出するため、適量のブロースルー蒸気を使用する方法である。ドレーン 1kg の有する遠心力はセル直径 1.5m, 抄速 500 m/分 で、計算上 9.3 kg³⁰⁾ となるため普通の差圧では外部に排出できないため、ドレーンに蒸気を混入気水混合体とし、小さな差圧 (0.3~0.5 kg/cm²) で外部に排出できるようにする必要がある。この蒸気がいわゆる“ブロースルー蒸気”で、この蒸気が多過ぎると結局熱損失を招くが、その量は抄速、米坪、乾燥用蒸気圧にもよるが、一般洋紙の場合でドレーン量の 10% もあれば充分である。なお、ブロースルー量を最小に、しかも一定に保つ目的で設計されたものに、フローコントロール方式があり、Union Camp 社 Montgomery 工場のライナーマシンで採用されている³¹⁾。

また、ドレーンの排出が確実でないとセル表面に経時的に変動する温度差の大きさは数℃、ないし 10 数℃に及ぶことがあり、製品に乾燥むらを発生させ、乾燥用蒸気原単位を悪化させると同時に、製品にカールを始め、種々紙くせを与える結果となり好ましくない。

図 22 スチームボックスの例

図 23 Conditions involved in drying on a steam-heated cylinder.

セル表面の温度むらの影響はドライパートウエットエンド側で大きく、ここでいったん発生した湿紙の乾燥むらは後続のドライパートでは是正することは極めて困難なので充分に注意を払う必要があり、一般的に言ってセル表面の温度むらは 5℃ 以内に抑えるのが良い。なお、セル表面温度を不均一にさせる原因としてドレ

図 24 カンバス張力とドライヤー乾燥能力の関係

ーンの影響のほか、湿紙乾燥用蒸気に過熱蒸気を用い、その過熱度が過大な場合に発生し易く、過熱度も 20°C 以内に抑えるのが好ましい。

いずれにせよセル内部よりドレーンを確実に排出することは、抄紙機ドライパート省エネルギーの根幹であり、紙くせの少ない良品質の製品を抄造する基本でもある。

4.2 セル内非凝縮性ガスの蓄積

乾燥用蒸気中に非凝縮性ガスが存在すると乾燥効率が著しく影響を与える。空気は密度は蒸気の約 2 倍あり、このため空気は遠心力によりセル内面の方に集まり一種の空気層を造る。空気の熱伝導率はセル（鋳鉄）の約 1/2,000 であり、セル内面に附着した空気層は一種の断熱材として働き熱伝導を阻害する。従って、乾燥用蒸気中の非凝縮性ガスは完全に除去する必要がある。ボイラー給水系における脱気装置が重要な役目を果たし、また薄葉紙マシン、あるいは一般抄紙機のドライパートウエットエンドの如く、セル内蒸気圧を大気圧以下で使用する場合は、非凝縮性ガスが膨張し一段と熱伝導を妨害するので配管系結合部より空気の漏入がないよう保守面での注意が肝要である。

4.3 セル外面湿紙間の空気

この空気層の存在も湿紙乾燥効率に影響を与えるが、これは使用カンバスの張力を大にし、湿紙をセル表面に密着させることにより小にすることが出来る。図 24³²⁾はカンバス張力と乾燥能力向上との関係だが、カンバス張力はその寿命、及びカンバスロールその他附属装置の機械的強度に影響を与えるので、おのずと制約があり 6~7 lb/in で使用するのが普通である。また、この数値以上で使用しても本図で示すごとく効果は横ばいとなり余り意味はない。

4.4 ドライヤーセル、肉厚

既設のドライヤーに対しセルの肉厚を論じては始まらないが、その基本的な考え方は次の通りである。

図 25 ドライヤーシリンダー材料の引張り強さと熱伝導率の関係

ドライヤーセル内に吹き込み得る使用蒸気圧の最大は次式で計算することが出来る。

$$P = \frac{200 \cdot t \cdot \sigma}{S_f \cdot D} \quad (4)$$

ただし、

P : ドライヤーセル内に吹き込み得る最大蒸気圧
kg/cm²

t : セル肉厚 mm

σ : セル材料の引張り強さ kg/mm²

S_f : 安全率

D : セル内径

ドライヤーセルの場合、材料組成の均一化、ピンホール存在、鋳造の際の材質的なむらなどを考慮し、 S_f は 20 倍位にとるのが普通である。また図 25³³⁾はセル材料の引張り強さと熱伝導率の関係で、本図よりセル材料の引張り強さが大になるにつれ熱伝導率は低下する関係にある。図 26³⁴⁾はセルの熱伝導率を $k_c = 35 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ と一定に保ち、引張り強さを変えセル肉厚とドライヤー乾燥能力（ドライヤー面長単位長さ当り紙生産能力）を求めたもので、本図よりセル材料に引張り強さの大なものを採用し、乾燥用蒸気圧を大にし、肉厚を薄くし伝熱量を高めるのが有利であることが分かる。要するにセルの肉厚は図 23、24 を総合し、材料強度、熱伝導率、セル乾燥能力、製造コスト等を勘案し決定され、引張り強さ 24 kg/mm² 程度、セル直径 1.5 m で肉厚 25 mm 程度にするのが普通である。

また、既設ドライヤーセルに加工することは出来ないが、図 27³⁵⁾の如くセル内面軸方向に三角溝をつけ、さらにこの三角溝を軸方向にこう配をつけ、ドレーンを遠心力により谷部に集め、山部をドレーンより露出させ U （総括熱伝達係数）が大になるように工夫したものもある。

ドライヤー径 5 m

” 表面温度 90°C

” セル熱伝導率 35 kcal/m·h·°C

シリンダー内蒸気とセル

内面との間の熱伝達係数 2,000 kcal/m²·h·°C

シリンダー材料の安全係数 15

図 26 ドライヤーシリンダー材料の引張強さ、セル肉厚とドライヤー乾燥能力の関係

4.5 ポケットベンチレーション、ドライヤーフード

ドライヤーポケット内空気の蒸気分圧を可能な限り低くし、また湿紙表面附近の空気の境界層 (Boundary Layer) の影響を小にするため、ポケットベンチレーションシステムが採用されている。熱風吹出装置としてはダクト型、ロール型とあるが、熱風温度は 100~120°C、風量はドライヤー面長 1 m 当り、10 m³/分・m 程度で、ドライヤー乾燥能力が 3~20% (平均的には 10~15%) 向上し、製品幅方向プロファイルが改善され、またフード出口排気温度が上昇するのでドライヤー排熱回収にも便である。

ドライヤーフードを全密閉化すれば、半密閉フードに対し換気用空気を 1/2~1/2.5 程度にすることが出来、熱経済となるとともにフードがドライヤーと作業床面と隔離するので、抄紙室作業環境改善に役立ち、排熱回収を行い易い。

ポケットベンチレーションの一種に Ross Grewin System が使用される場合があるが、これは広幅マシンには不向きで一般にワイヤー幅 3,800 mm 以下の抄紙機のドライパートに使用し効果が期待できる。

謝 辞

本文を記するに当たり十条製紙(株)技術本部 前田辰也、経沢 実両氏の協力を得たことに感謝する。

参 考 文 献

1) 例えば紙パルプ技術タイムス 56 年 4, 8 月号

図 27

2), 4), 6), 7) Tappi 64 (7) 63

3) 最新紙パルプ技術: 紙業タイムス社編

5) 総合エネルギー統計: 資源エネルギー庁編 54 年度版

6) 紙パルプ統計年報: 通商産業大臣官房調査統計部編 54 年度版

8) Paper Technology and Industry 19 (10) 329

9), 13) Southern Pulp & Paper Manufacture 36 (5) 32

10) Tappi 56 (7) 81

11) 紙パ技協誌, 33 (4) 1

12) Appita 33 (4) 284

14) Pulp & Paper 55 (1) 128

15) PTJ 125 (19) 84

16) Tappi 37 (12) 694

17) PPMC 70 (19) T 349

18) PPMC 61 (8) T 379

19) PTJ 164 (8) 30

20) Tappi 61 (4) 37

21) Pulp & Paper 50 (4) 78

22) Pulp & Paper 52 (6) 95

23) Beloit 社資料

24) PIMA 63 (2) 30

25) Valmet 社資料

26) Paper 193 (5) 31

27) 紙パ技協誌, 28 (8) 23

28) P. Casey: Pulp & Paper Vol. 2 1007

29) 紙パ技協誌, 28 (10) 38, 28 (11) 35

30) 紙パルプ技術タイムス, 24 (5) 43

31) Tappi 62 (11) 63

32) PPMC 68 (6) T 285

33) Svensk Paperstidning 65 (8) 322

34) Svensk Paperstidning 60 (19) 713

35) 日立造船資料

36) Pulp & Paper 54 (1) 160