日立造船と富岡機械のリファイナー

日立造船株式会社

日立造船富岡機械株式会社

Refiners of Hitachi Zosen Corporation and Hitachi Zosen
Tomioka Machinery Co.*Hitachi Zosen Corporation**Hitachi Zosen Tomioka Machinery Co., Ltd.*

Hitachi Zosen Corporation manufactures Double Disc Refiners for mechanical pulping under license from Andritz-Sprout-Bauer and handles single refiners of this brand as a part of refining systems. This paper introduces outline of the Double Disc Refiner (DDR) together with its feeding systems, Twin Refiner and Single Disc Refiner (SDR).

On the other hand, Hitachi Zosen Tomioka Machinery Co., Ltd. manufactures DDR and conical refiners mainly for stock preparation under license from Sulzer Escher Wyss GmbH of Germany. Second half of this paper presents their outlines followed by a literature on effective use of the refining energy written by Dr. Siewert and Mr. Selder of Sulzer Escher Wyss.

緒 言

日立造船株式会社は TMP など機械パルプ製造用にダブルディスクリファイナーをアンドリッツ・スプラウト・パワー社との技術提携により製作してきた。またア社のシングルリファイナーとツインリファイナーをシステムに組み込むこともできる。ここに第1部として両系統のリファイナーについてその概要を紹介したい。また日立造船富岡機械株式会社はスルザー・エッシャー・ウイス社との技術提携により主として原料調成用ディスクリファイナーとコニカルリファイナーを製作しているが、これについて第2部で紹介し、あわせてリファイニング・エネルギーの経済的な利用についてのエ社論文の全訳をご参考にする。

—第1部—

日立造船／アンドリッツ・スプラウト・パワーのメカニカルパルピング用リファイナー

日立造船株式会社 プラント計画部

1.1 ま え が き

当社は1963年に大昭和製紙(株)白老工場殿へメカニカルパルピング用リファイナーの第1号機としてCGP用Hi-Dリファイナーを納入し、その後1969年にCE・パワー社とダブルディスクリファイナー(DDR)の製作・販売の提携を結び、以来約70台のDDRを国内外のユーザーに納入している。

そのうち、当社実績の最大級のものは装備動力11,000 hp、ディスク径56 inである。大型リファイナーで生産されるTMP、CTMPパルプは我が国の高い電力コストにもかかわらず、すぐれた品質特性により新聞紙をはじめ中下級印刷用紙などに使用され、近年

リファイニング技術 I	45 (11)	43
〃	II	45 (12) 52
〃	III	46 (2) 49

その生産量は急速に増加している。また CTMP はケミカルパルプに比べ歩留が高いことから、これの代用として使用され、森林資源の保護の点からも期待されている。特に最近では原料として使用できる樹種が増え、各ユーザーの最終製品の多様化も進み、BCTMP、APMP（アルカライン・パーオキサイド・メカニカルパルプ）などの各プロセスをはじめ、1次と2次リファイニング間の中間洗浄などプロセスのバリエーションも増えていることから、広範囲の運転条件で安定運転のできるリファイナーが要求されている。

アンドリッツ・スプラウト・パウアー（ASB）社はシングルディスクリファイナー（SDR）、ツインリファイナーおよびDDRをはじめ、紙パルプ製造機器を製作・販売している。当社はDDRに関し技術提携を結ぶとともに、他の形式のリファイナーで構成されるメカニカルパルピングシステムについても協力関係にある。本文では当社がユーザーの協力を得て最近実施しているDDRの高濃度リファイニングのための新技術、さらにASB社の大容量・高濃度リファイニング用ツインリファイナーおよび最近開発された新型SBシングルディスクリファイナーを紹介する。

1.2 TMP および CTMP プロセス

ASB 社が最近採用している CTMP プロセスの代表的なフローシートを図 1-1 に示す。チップはウオッシング後、プレスチーミング、インプレグネーション、スチーミング、リファイニングと処理される。本プロセスは使用される材種、要求されるパルプ品質に応じ

て各工程での処理条件、温度および時間が最適になるよう設定する。また最近では2段インプレグネーション、1次、2次リファイニング間での洗浄なども採用されている。TMP の場合にはインプレグネーション工程が省略される。リファイナーは処理量、熱回収の条件、目標とするパルプ品質などにより、その形式、設備動力、運転条件が決められる。1次、2次リファイナーとも加圧型で、リファイニングでの発生蒸気を回収する場合の ASB 社の TMP システム例を図 1-2 に示す。

1.3 DDR における新技術

1.3.1 DDR での高濃度リファイニング

DDR は ASB 社の大型リファイナーのうち、我が国で TMP、CTMP プラント用として最も多く使用されている機種であるが、回転ディスクを介して原料を供給するという構造上の制約から、高濃度リファイニングの実現が困難であった。DDR 用新型原料供給装置として開発されたトップワインダーフィーダーおよびコアキシャルフィーダーはアメリカ、カナダをはじめ海外では 10 年以上前に既設 DDR への取付がはじまり、今では DDR の標準装置となっている。我が国では一定の運転時間の経過後にディスクを逆回転させ、リファイニングプレートの両エッジを使用するという運転方法が取られているため、リボンスクリュー型コアキシャルフィーダーを主軸に取付けることは、ディスクの回転方向を限定することになり、リファイニングプレートの寿命が短くなることと、パルプ品質の低下

図 1-1 CTMP プロセス

図 1-2 TMP プロセス

などが懸念され普及が遅れていた。

1.3.2 新型原料供給装置

海外での運転結果を参考に、当社では各ユーザーに本コアキシャルフィーダーの取付を推奨し、ユーザーの協力を得て 1988 年に第 1 号機の取付を行った。

取付後の運転結果では、パルプ品質上の問題もなく、負荷動力が安定し、約 30% の高濃度リファイニングが達成できた。また取付前よりも広いプレート間隙での運転のため、両エッジを使用する場合よりもプレート寿命が伸びたとの報告もあり好結果を得ている。

1) コアキシャルフィーダー

コアキシャルフィーダーおよびトップワインダーフィーダーを図 1-3 に示す。コアキシャルフィーダーは原料供給側のリファイナー主軸に取付くりボン型スクリューで、主軸と同じ回転数で回転する。本フィーダーは原料をリファイニングゾーンへ均一に供給するとともに、リファイニングでの発生蒸気を空間部から排出させる。戻り蒸気がスムーズに排出されるため、ブローバックが解消され、負荷が安定し従来型のように多量のプラグワイパー水を供給する必要がなく、その分リファイニング濃度が高くなる。コアキシャルフィーダーは加圧型、大気圧型、1 次、2 次に関係なく大型 DDR に取付けが可能である。

2) トップワインダーフィーダー

トップワインダーフィーダーは、従来のツインスクリューフィーダーの代りに使用する。このリボン型スクリューフィーダーは発生蒸気を原料の流れと逆方向にスムーズに排出し、コアキシャルフィーダーへ原料

図 1-3 トップワインダーフィーダー

を安定して供給する。コアキシャルフィーダー、トップワインダーフィーダーとも加圧、大気圧 DDR に取付けられるが、ファイバーに比べ比重の大きいチップを扱う 1 次リファイナーではコアキシャルフィーダーのみを設け、トップワインダーフィーダーは設ける必

図 1-4 ツインリファイナーの構造

要がない。

1.4 ツインリファイナー

1.4.1 ツインリファイナーの構造

ツインリファイナーでは図 1-4 に示すように、回転ディスクの両側にリファイニングプレートが取付く。

本リファイナーは 1 台で SDR 2 台分のリファイニングゾーンを持つユニークな構造のリファイナーである。回転ディスク両側がリファイニングに利用でき、同じ径のディスクを持つ他の形式のリファイナー、SDR および DDR に比べ約 2 倍のリファイニング面積となる。従ってディスク径を基準にすれば、他の形式のリファイナーの 2 倍の処理能力となり、また他の形式のリファイナーと同じモーターを装備すれば、同じ負荷が 2 倍のリファイニング面積でかけられ、リファイニング・インテンシティー（単位プレート面積当りの負荷動力）が少なくなり、高品質のパルプが得られる。

1.4.2 稼動状況

ツインリファイナーは我が国では TW-50 型 3 基が輸入され、CTMP および RGP 用として使用されているにすぎないが、本機は今までの主力機種で、海外では 45 in から 60 in のディスク径のツインリファイナー約 150 台が稼動している。最大のものは、22,000 hp のモーターで駆動され、1 系列で約 400 t/d の CTMP を生産している。

1.4.3 ツインリファイナーの特長

1) スラスト力のバランス

回転部分はディスクが中央にあり主軸両端がラジアル軸受で支持される。プレート間隙は静止側プレートホルダーを油圧シリンダーで移動させ調節する。本構造のディスクには両側から等しい力が加わるためスラスト力が相殺される。ディスクには曲げ応力も発生しない。従って加圧下、大気圧下のどのようなリファイニング圧力条件下でも、スラスト力によるディスクおよび機械の変形が発生せず、プレートの平行度が確実

に維持され均一な品質のパルプが得られる。また大型スラスト軸受を設ける必要がなく、リファイナー本体が非常にコンパクトであり、潤滑システムも小型である。

2) 原料供給装置

原料はロードセンシング・コンベヤーを通り、リボンフィーダーへ供給される。ロードセンシング・コンベヤーは左右のリボンフィーダー上部に取付けられ原料切れや詰まりを検知する。従ってリファイニングゾーンでの原料切れが発生する前に信号によりプレートホルダーが後退し、軽負荷によるプレートの接触が防止できる。主軸に取付くリボンフィーダーはディスクと同じ高速回転で原料を供給すると同時にリファイニングにより発生する蒸気を排出する。高速回転リボンスクリューの遠心力により、原料はスクリュー外周側を通り中央部には十分な空間ができる。高濃度リファイニングで発生する多量の蒸気も原料供給を妨げることなく排出される。また大型、高速リボンフィーダーは効率よく蒸気と繊維を分離し、蒸気排出口が 2 ケ所あることも回収蒸気中に同伴するパルプを少なくする。

3) その他、本リファイナーは次の特長がある。

- ・左右対称形の機械であるため、熱膨張による変形が少ない
- ・中央部が大きく開く構造のため、プレート交換が容易で所要時間も短い

1.5 新型シングルディスクリファイナー (SDR)

ASB 社の SDR はディスク径 22 in から 50 in、最大装備動力 6,700 hp であった。最近、今までの各形式のリファイナー製作経験に基づき、コンパクトであらゆる用途に使用できる新型 SDR が開発された。

本リファイナーは SB 型と名付けられ、ディスク径

図 1-5 SB 型シングルディスクリファイナー

60 in の SB-150 型と 66 in の SB-170 型の 2 機種がある。本リファイナーの構造を図 1-5 に示す。

本機は既にフランスの Feldmuhle Beghin 社, Papeteries de Golbey 社などから合計 6 基 ASB 社が受注し, うち 3 基は稼働している。

1.5.1 リファイニング条件

最大のパルプ強度を得るためには 30~55% の高濃度リファイニング, 一方, 優れた光学的特性を確保するには 30% 以下の低濃度リファイニングが推奨されている。高濃度リファイニングでは多量の発生蒸気をスムーズに排出しながら, 原料を安定して供給することが重要である。一方, 低濃度リファイニング, 特にディスク径の大きい SDR では, 遠心力により原料がリファイニングゾーンを速く移動し, リファイニングプレート間に存在する原料の量が少なくなるため, プレート間隔を狭くする運転が必要である。SB 型リファイナーはこのような設計コンセプトのもとに開発され, 低濃度から高濃度までの広い濃度域でプレート間隙を正確に維持し, 安定運転を可能とする頑丈なりファイナーである。

1.5.2 特 長

1) スラスト力対策

プレートギャップの調節は図 1-6 に示すように固定側プレートホルダーに取付く油圧シリンダーにより回転ディスクを固定側プレートホルダー側に引き寄せて行う。このユニークな構造のため, ベースにはスラスト力が発生しない。しかもコンパクトであるため機械

図 1-6 SB 型シングルディスクリファイナーの構造図

の変形が少なく, プレートの平行度が確実に維持される。スラスト軸受は大型スベリ軸受を使用し, リファイニングで発生する全スラスト力が受けられる。従ってディスク前後 (リファイニング部とケーシング側) にスラスト力を減少させるための差圧を取る必要がなく, リファイナーの運転条件が自由に設定できる。この差圧を調節することにより, リファイニング時間が変わり, パルプ品質を変えることもできる。

2) 原料フィーダー

原料供給用リボンフィーダーは主軸に直接取付けられ, ディスクと同じ速度で回転する。本フィーダーはツインリファイナーのリボンフィーダーと同様, スクリュー羽根が大きく高速で回転する。原料は逆流する

図 1-7 SB 型シングルディスクリファイナーの原料フィーダー

発生蒸気に妨げられることがなく、安定してリファイニング部へ供給される。リボンフィーダーへ原料を供給するサイドエントリーフィーダーは図 1-7 に示すようにディスクに近い位置に取付けられている。発生蒸気の排出口はサイドエントリーフィーダーよりも後方にある。この配置関係から回収蒸気中への繊維の同伴が最小になる。

3) ローターの支持

回転ディスクは径の大きい主軸の中央に組込まれ、回転部は両端 2 ケ所のラジアル軸受で支持される。オーバーハング部がなく、非常にシンプルな構造であり、軸心の狂いがなく良好な動バランス特性をもっている。

4) 軸 受

ベアリングハウジングが大型でカートリッジ式の取換方式を採用している。万一、軸受を取換える場合にも回転部を抜出す必要がない。

5) プレート間隙調節装置

プレート間隙は油圧サーボ制御システムで調節する。本システムはリファイニング状況の変化に迅速にตอบสนองして正確な制御を行い、均一なパルプ品質が得られる。プレート間隙制御には差圧コントロールと位置コ

ントロールの 2 種の選択ができる。またプレート間隙センサーも取付けられる。ケーシングはリファイナー中央部にあり、原料供給側のケーシングが大きく後退するため、プレート取換時に広いスペースが確保されプレート交換が容易に行える。

以上述べたように、本リファイナーはコンパクトで高性能、あらゆる使用条件に対応できる新型リファイナーである。外形および機長を図 1-8 に示す。

1.6 SDR と DDR の比較

現在では各リファイナーメーカーが SDR と DDR の両形式のリファイナーを販売するため、この比較は大きな問題ではなくなったが、形式選択上での当社の考えを述べる。

1.6.1 原料供給方法

DDR は回転しているディスクに設けられた開孔から原料を供給し、SDR は静止ディスク側から原料を供給する。ディスク間で発生した蒸気は DDR、SDR とも原料の供給と逆方向に排出させるが、DDR においては蒸気も回転するディスク開孔から逃す必要がある。従って DDR における原料供給は SDR のそれと比較して複雑なものとなり、DDR の構造上の問題点であ

図 1-8 SB 型シングルディスクリファイナーの外形図と寸法

る。

1.6.2 インレット部シールの問題

DDR においてはフィードエンドの回転ディスクとハウジングの間をシールする必要があるが、運転時の熱膨張のため、このシールを適正に調整することが難しく、リファイニングされたパルプ中の結束繊維含有率が多くなる。従って後工程のスクリーニングが重要となる。一方、SDR においてはこれに相当するシール部分がないため、結束繊維含有率の少ないパルプが得られる。

1.6.3 ディスク間における原料の挙動

1) 両ディスクの相対速度

一般に DDR は 60 Hz, 50 Hz の電源周波数でそれぞれ 1,200, 1,500 rpm, SDR は 1,800, 1,500 rpm で運転されている。しかし相対速度の観点からは、DDR は 2つの回転するディスクを持っているため、それぞれ 2,400, 3,000 rpm で運転されていると言える。従って同一条件下（周波数、プレート間隙、プレートパターン等が同一）の運転では DDR の方がディスクの相対速度が大きく、リファイナーに与えられたエネルギーはよりマイルド、かつ頻繁にチップに伝わり、マイルドなリファイニングが期待できる。

2) プレート間の原料に働く遠心力

原料は遠心力によってプレート間を移動すると言われる。DDR では両側のディスクが互いに逆方向に回転しているので、各々のディスクで発生する遠心力はある程度まで相殺され、原料はゆっくりとプレート間を移動する。従って同一条件下の運転では DDR の方が SDR よりプレート間隙を広く運転できるため、より大きな繊維間摩擦作用が得られ、この差が生産さ

れるパルプ品質の違いになると一般に理解されている。

1.6.4 プレート間隙とリファイニング濃度

高品質の機械パルプは繊維とプレートの接触によってではなく、繊維同志の叩解作用によって得られると言われている。プレート間隙を増すと繊維間の作用は増え、繊維とプレートの接触は少なくなる。その結果、より大きなフィブリル化と、より少ない繊維の切断となる。これはより柔軟な繊維を作り、結合力を増加させることになる。パルプ強度はリファイナーに加えられるエネルギーに直接関係するが、極端にプレート間隙を小さくするとパルプ強度が損なわれる程の繊維の切断を引起す。濃度を高くして嵩高な状態にすることにより、プレート間隙を大きくすることができる。広く認められているように、リファイニング濃度を上げるほど、より高品質のメカニカルパルプが得られる。高濃度で繊維はより大きな摩擦係数を持ち、エネ

表 1-1 日立造船 アンドリッツ・スプラウト・パウアーダブルディスクリファイナー

型 式		プレート径 (in/mm)	最大設備 動力(hp)	機器重量 (ton)
加圧型	大気圧型			
485-23	489-23	65/1,651	20,000	77
485-22	489-22	60/1,524	15,000	77
485- 8	489- 8	56/1,422	12,000	68
485- 6	489- 6	52/1,321	10,000	59
420-P	420-A	40/1,016	4,000	20
418		36/ 914	3,000	12
	413	44/1,118	3,000	22
	412	40/1,016	2,000	12

表 1-2 アンドリッツ・スプラウト・パウアーシングルおよびツインリファイナー

	型 式		プレート径 (in/mm)	最大設備動力 (hp)	機器重量 (ton)
	加 圧 型	大 気 圧 型			
新型シングル ディスクリファイナー	SB-150		60/1,524	16,000	30
	SB-170		66/1,676	20,000	35
ツインリファイナー	TWIN 60		60/1,524	22,000	45
	TWIN 54		54/1,372	16,000	28
	TWIN 50		50/1,270	14,000	27
	TWIN 45		45/1,143	10,000	18
シングルディスク リファイナー	50-1CP	50-1C/B	50/1,270	6,700	
	45-1CP	45-1C/B	45/1,143	4,500	
	42-1CP	42-1C/B	42/1,067	3,000	
	36-1CP	36-1C/B	36/ 914	1,000	

ギーをより多く吸収できるからである。一方、リファイニング濃度が20%を割ると、繊維の切断がおこり強度が損なわれる。これらのことはSDR, DDRの両リファイナーにおいて言える。SDRの方がDDRよりも相当に高濃度で運転され、これがSDRの持つ大きな利点の一つだとされている。DDRでは回転ディスクから蒸気を逃がさなくてはならないという問題から、高濃度リファイニングにはいくつかの困難があった。しかし現在では、本稿に記述しているとおり、DDRにトップワインダー、コアキシャルフィーダーを装備することにより、約30%の高濃度リファイニングが可能となっている。

1.6.5 適切なリファイナーの選定

とにかく両形式のリファイナーとも、必要とする品質のパルプを造ることが可能と言える。SDRは構造が非常にシンプルで大型化しやすい。一方、DDRは高散乱係数を有し、ファインを多く含んだ嵩高でないパルプを製造するのにより適したものになる。またDDRではシーリングの問題から結束繊維含有率が高くなるが、これはスクリーン設備で除去しなければならない。各形式、サイズのリファイナー一覧表を表1-1, 2に示す。

ま と め

以上3機種のリファイナーを紹介させて頂いた。

DDR, SDR, ツインリファイナーはそれぞれ特長があり、プロセス、樹種及び製造されるパルプ品質により、適切な機種を選定することが重要であると考えられる。当社およびASB社では各形式のリファイナーの開発、改善の努力を続け、ユーザーのニーズに応じたメカニカルパルピングを供給していく所存である。

今後とも皆様方のご指導とご鞭撻をお願いしたい。

—第2部—

日立造船富岡機械／スルザー・エッシャーウイスの原料調成用リファイナー

日立造船富岡機械株式会社 原調開発部

2.1 はじめに

日立造船富岡機械株式会社はドイツのスルザー・エッシャーウイス社との間に全面的な技術提携を行い、抄紙機、原料調成および古紙処理機器を製造している。

この中にはダブルディスクリファイナーとコンカルリファイナーが含まれており、表2-1に示す概略仕様となっている。スルザー・エッシャーウイス社はヨーロッパを中心に数多くの実績を有しており、世界的に

評価を得ている。同社は日々研究開発を進め、非常にユニークな高性能機器を発表し、さらに標準化を進めている。リファイナーについても同様で、実験結果から生れたジーヴァート、ゼルダー両氏による論文を同社のリファイナーに対する考え方の一端を示すものとしてご参考に供する次第である。

2.2 パルプのリファイニングにおけるエネルギーの経済的利用

スルザー・エッシャーウイス社

W.H.ジーヴァート, H.ゼルダー

2.2.1 ま え が き

これまでは繊維懸濁液のリファイニングを検討する場合、常に抄紙特性に主眼が置かれてきた。これは当然最も重要ではあるが、エネルギーの観点だけからリファイニングを分析してみるのも我々にとって注目の価値があるように思える。それはリファイニングが、実は繊維懸濁液の物理的特性を変化させるためにエネルギーを加えることを意味するからである。主に検討するのは次の事柄である。

- ・全生産コストに対するエネルギー必要度の重要性
- ・エネルギーを最も効果的に使う方法、例えば機械的、流体力学的、超音波等
- ・エネルギーがいかに有効にパルプ懸濁液の性質に変化をもたらすか
- ・リファイニングエネルギーを低減するにはどのような可能性があるか

2.2.2 生産コストに対するリファイニングエネルギーの重要性

調査によると¹⁾1980年にはドイツの製紙工場での電力、蒸気を合わせた全エネルギーコストは技術水準や製品にもよるが生産コストの約12~17%を占めていた。これはさほど大きな割合ではない。さらにこれを分析してみると、ティッシュではリファイニングが全エネルギーコストの約7%を占めるのに対して、液状でリファイニングする紙では35%にもなる。従ってリファイニングは全生産コストの約1~6%ということになる。この値は小さいようであるが、工場の利益率が低い場合、節約源が潜在することは紙生産の経済性に直接大きな影響をもたらす得るため、リファイニングは重要な要素なのである。

2.2.3 リファイニングへのエネルギー付加の可能性

色々な物理的原理をリファイニングに応用した科学論文が多数出されている。そのいくつかを例として取り上げて見よう。JaymeとRosenfeld²⁾は800 kHz付

表 2-1 日立造船 スルザー・エッシャーウイスダブルディスク
およびコンカルリファイナー

	型 式	最大設備動力 (kW)	回 転 数 (rpm)	処 理 流 量 (l/min)
ダブルディスク リファイナー	DSR 1	250	1,000/ 900	300- 1,800
	DSR 2	450	750/ 720	500- 3,500
	DSR 3	750	600/ 600	800- 5,000
	DSR 4	1,400	450/ 450	1,600-10,000
コンカルリファイナー	R 1	15	1,500/1,800	50- 180
	R 2	110	1,000/ 900	200- 1,100
	R 3	200	750/ 720	500- 2,000

近の超音波で繊維の弛緩が達成できることを立証した。しかしエネルギー消費が通常の方式の数百倍も高いのでこの方法は実用的でない。キャピテーションに関するあるソ連の文献³⁾によれば、繊維の抄紙上の挙動にある程度の効果があるが、エネルギー消費の原単位には触れていない。Pav, Slabina, Soucek は流体力学的な振動発生器によって原料ジェットの動エネルギーを転換し、10 kHz の振動周波数で繊維を同様に弛緩できたと報告している⁴⁾。エネルギー原単位はほぼデフレーカーのものと同等であるが、純振動エネルギーによる効果はごく一部分でしかないと報告者たちも言っており、それが正しいであろう。機械的流体力学的な要素も大きな影響があったはずであり、そうでなければ Jayme と Rosenfeld の得た結果との大差が説明できない。リファイニング効果はポンプ輸送できる濃度の繊維原料懸濁液と、動く機械要素の間の剪断応力によっても同様に達成出来る。コンカルリファイナーを用いてフィリング間の隙間 0.6 mm の時、またデフレーカーで隙間 1.5 mm の時の実験結果がある^{5,6)}。この隙間はフィリングが機械的作用を起こしてモーターの負荷が明確に増加する時の値より 2 ないし 10 倍大きい。強度水準では非常に高い一方、エネルギー消費量は今日工場で普通に見られる値の約 10 倍であった。20%以上の高濃度において繊維間の摩擦力と剪断力は非常に高い⁶⁾。ここでは流体力学的損失は全モーター動力のうち小さい割合しか占めないで、エネルギー必要量は前記の例に比べて非常に低い。必要エネルギー量はここでも通常のリファイニングの 2 倍である。バーのエッジを使って繊維を機械的に処理することは一般的に用いられる技術として確立された。この原理を用いて抄紙特性を最小のエネルギー消費で得ることができ、この特性は多くの場合要求に合致したものである。従って経済的に妥協した点が存在する。

2.2.4 エネルギー消費量の分析

リファイニングに使用したエネルギーは三つに分類できる。

- ・有効リファイニングエネルギー
- ・機械の可動部分による無負荷エネルギー
- ・システム関係のエネルギー

有効リファイニングエネルギーはフィリングと運転方法によって決まる。無負荷動力は設計、寸法、速度、フィリングの状態によって決まる。速度、フィリングは機械の設計とレイアウトによる。システムに関連するエネルギーは生産パターンとこれに関連したシステムの対応による。この最後の要素はプラントの多様性が増すとますます重要になる。

2.2.5 有効リファイニングエネルギー

まず有効リファイニングエネルギーから始める。リファイナープラントを調整する作業を計算するベースになる項目は次のものがある (図 2-1)。

- ・フィリングの形式。抄紙品質特性の変化パターンを決定する主要要素である。
- ・エッジ負荷原単位 Bs (Ws/km)。ある特定のフィリング形式に対する抄紙品質特性の変化パターンを決定する。
- ・有効リファイニングエネルギー原単位 (kWh/100 kg)。リファイニングの必要程度を性格づける。ある

図 2-1 リファイニングの結果に影響する主要要素

特定の抄紙特性の発達について一定のポイントを設定する。

これらの概念は図 2-2 のように定義づける。前に説明したように、バーエッジがリファイニング作用の大部分を行い、一方、バー表面の作用など他の影響は証明はできるものの重要性が低い。厳密に言えば有効リファイニングエネルギー Ne は次式で定義される。

$$Ne = Nek + Nef \text{ (kW)}$$

ここに Nek はエッジの、また Nef は表面の有効リファイニングエネルギーを表す。どの程度までエッジと表面で実際にリファイニングエネルギーが伝達されるかという疑問が生じる。エッジが全くない滑らかなフィリングはリファイニング表面の全有効リファイニングエネルギーを原料に伝達し(図 2-3)、この場合次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \text{有効リファイニングエネルギー } Ne \text{ (kW)} \\ = \text{モーター負荷 } N \text{ (kW)} - \text{無負荷エネルギー } Nl \text{ (kW)} \end{aligned}$$

$$\text{毎秒あたりのエッジ長さ } Ls \text{ (km/s)}$$

$$= (n/60) \cdot Z_R \cdot Z_{St} \cdot l$$

$$\text{リファイナー回転数 } n \text{ (1/min)}$$

$$\text{ローターバー数 } Z_R$$

$$\text{ステーターバー数 } Z_{St}$$

$$\text{バー長さ } l \text{ (km)}$$

$$\text{有効リファイニングエネルギー原単位 (kWh/100kg b.d.)}$$

$$= Ne \text{ (kW)} / \text{通過量 (kg b.d./h} \times 100)$$

$$\text{エッジ負荷原単位 } Bs \text{ (Ws/km)}$$

$$= Ne / Ls$$

図 2-2 式の定義

$$Ne = Nef$$

バーエッジの数が増加すると、表面によって伝達されるリファイニングエネルギーの割合は減少し、理論的には厚さが小さい有限数のエッジだけが存在するという極端な場合にいたる。ここでは

$$Ne = Nek$$

有効リファイニングエネルギーの変動によってカーブは平行移動する。しかし実用上はバーエッジがリファイニング工程で最も重要な影響を持つため、有効リファイニングエネルギーを全部バーエッジに関係づけることで十分であることが立証された。

色々なバー幅やバー本数を持つフィリングによる実際の知見からこのことが確認されている。同程度の変動について、同じモーター負荷の場合、リファイニング表面の大きいフィリングは(摩擦にさらされる質量が大きいにも係わらず)毎秒当りのバー長さの大きいフィリングよりも寿命が短いことが分かった。このことは、前述のようにエッジ負荷原単位がより重要な要素であることを示している。そこでリファイナーの寸法と台数はフィリングとその負荷条件だけによることになる。図 2-4 の左上は低角度のカッティング用フィリングと、広角度のフィブリル化用フィリングで同じバー材質のものでフリーネスで表したリファイニング結果が異なった負荷に対しどう変化するかの一例を示す。ある与えられたフリーネス値についてカッティング作用のあるフィリングは常にそのバー角度と負荷原単位のためにエネルギー所要量が小さいことが分かった。従ってカッティング作用はエネルギー消費が低い。しかしエッジ負荷原単位は無制限に増加させることは

図 2-3 有効リファイニングエネルギー Ne のバー表面とエッジへの分布想定

図 2-4 色々な運転条件下でのリファイニング挙動

できない。グラフの右半分はエゾマツの未晒クラフトパルプにおける関係を示す。パルプはまず負荷条件 $B_s=600$ から $2,200 \text{ Ws/km}$ の間でリファイニングし、極端な場合は $3,600 \text{ Ws/km}$ まで上げた。最初リファイニングエネルギー原単位の節減量は増加したが、負荷が増大するにつれて次第に減り、ついには損失にさえなったことが明かに分かる。

従って各パルプについてリファイニングエネルギーの効果的な利用には最適点があり、それぞれの場合の原料性状による。繊維長が短く、弱いパルプでは負荷 $B_s=1,000 \sim 2,000 \text{ Ws/km}$ の範囲でリファイニング出来るが、長繊維クラフトパルプでは $B_s=4,000 \text{ Ws/km}$ まで負荷がかかる。これがリファイニングの用法と経済性に関係してくるが、これについては後で触れる。リファイニングした原料の抄紙特性も当然異なる。図 2-5 に引張、引裂、長繊維成分によりこれを示す。フィブリル化用フィリングおよび負荷の低いフィリングはあるフリーネスについて強度が常に高い。しかしこれはエネルギー消費が高い状態で達成された。これに加えてフィリングの材質がリファイニングエネルギーに対して重要な要素になる。

これを示すために、松の未晒クラフトパルプを色々な材質のフィリングでリファイニングした。同じ材質

でも冶金学的な前処理の相違による変動があった。図 2-6 はその結果の様態である。ある特定のフリーネスを得るためのエネルギー所要量は約 40~60% 変動する。前と同様にこれは抄紙特性に大きな相違をもたらす。エネルギー所要量が最も高いリファイニングでは強度が最も良い。この理由はテスト中連続して変化を観察したエッジのところに見られる。テストは絶対的に比較可能な条件下で行われた。図 2-7 はリファイナーバーとその表面のテスト後の拡大写真である。先端は非常に異なった形状になっているのが明確に分かる。ブロンズのフィリングは鋭いエッジであるのに、オーステナイト系鋳鉄は丸くなっている。あらゆるリファイニングテストの結果はこの条件で分類するとうまく行く。他の材料特性、例えば機械的、物理的性質や材料分析に関係づける試みは観察結果を満足に説明出来なかった。結局、バーエッジの形状が事実上エネルギーを支配しており、エネルギー所要量と抄紙特性に関してリファイニング結果の決定的要素であることを仮定せざるを得ない。さらにこのことから、バーエッジが常に鋭く保たれるように、経済的なフィリングで急速に摩耗させることが必要であると結論づけることができる。長い寿命を持つフィリングはエッジの進行方向先端が丸くなり一方、後端は長持ちする。

図 2-5 松 BKP のリファイニング挙動

図 2-6 フィリング材質選定がエネルギー消費とリファイニング効果に与える影響

これはエネルギー経済の面からは不利である。さらに摩耗したフィブリング化用フィリングを用いてリファイニングテストを行った(図2-8)。連続運転中の材料

摩耗のため、エッジ先端は半径約1mmに丸くなっていたが後端は鋭い。フィリングを正逆両方向に回転させリファイニングの様子を観察した。あるフリーネス

図 2-7 リファイナー・バーの拡大写真

図 2-8 運転方法がエネルギー消費とリファイニング効果に与える影響

に達するまでに、丸いエッジの方が鋭いものよりはるかに多くのエネルギーを消費することが再び示され、その差は30～50%になった。抄紙特性については変動は前述の場合よりもかなり小さかった。これはいずれの場合でも強いフィブリル化作用をもつフィリングの効果エッジの変形によりさらに進行することがないためである。しかし、前と同じようにエッジ先端が丸いと、より穏やかなリファイニングが行われる傾向にあることが分かる。集約すると有効リファイニングエネルギーは広い範囲で変えることが出来るが、常に抄紙特性の同時変動に結び付く。だが生産上の要求の方がエネルギー節減より常に優先されるから、リファイニングの経済性はここではあまり影響を与えることが出来ない。

2.2.6 無負荷エネルギー

しかしながら、あるリファイナーについて無負荷エネルギーに関しては状況がまた異なる。この無負荷エネルギーの明確な定義を得るために、リファイニング効果をもたらさないエネルギー消費要素すべてを無負荷エネルギーと決め、機械を空の状態でもわすエネルギーと、滴水状態でまわすエネルギーすなわち無負荷エネルギーをリファイニングエネルギーから差し引く(図2-9)。しかし原料で満たされた状態でリファイナーを運転するときの無負荷エネルギーは、我々の定義によればリファイニングエネルギーの一部として算定されている。その理由はこのエネルギーによってある程度のリファイニング効果が繊維に与えられ、またこの値はリファイニング中にいつも変動し、ほとんど

図 2-9 リファイニング・エネルギーの分布

図 2-10 DDR の無負荷エネルギー

正確に記録できないからである。無負荷エネルギーは色々なパラメーターによって影響される(図 2-10)。その一つはフィリングの圧力関係である。

ある流体通過量に対して、圧力が高まると無負荷エネルギーは図 2-10 の左半分に角度の大小について示すように大きく増加する。通過量が増すと圧力上昇は減るが、処理流量が大きいとためモーターの負荷はなお増大する。このグラフはまたリファイナーのポンプ効率が悪くことをも示していて興味深い。ある流量に対して一定の圧力上昇のためには、ポンプはダブルディスクリファイナーの 1/20 しか動力を要しない。

従って、常にポンプ作用はポンプに任せ、リファイナーは最小の圧力上昇で運転することを推奨したい。

但し前述のように、無負荷エネルギーは一定値を取らず、フィリングの使用期間に従って変動する(図 2-10 右)。溝の深さと無負荷エネルギーの間には直線関係が存在する。従ってダブルディスクリファイナーでは、エネルギー効率を最も高くするにはバーは 2 mm まで摩耗させるべきである。前段のポンプが圧力の変化を補えるならば通過量の低下は起こらない。しかしこれはグラフに示すように平均無負荷エネルギーに大きく影響する。バーが摩耗した結果、平均無負荷エネルギーは新しいフィリングの時の 73.5% になる。

溝が深いと寿命が長くなるため、フィリングのコストは最小になるが、一方では同時に無負荷エネルギーにはマイナスの影響が生じる。従って設計には経済上の最適点があるに違いない。最適化計算(図 2-11)によれば、通常の条件下で運転するダブルディスクリファイナーの場合、最も経済的な溝深さは 6 から 7 mm のところにある。これはもちろん動力コストと材

料コストにもよる。動力コストが低い場合には溝を深くする方向に変わり、材料コストが低いと反対の方向になる。

しかしカーブの合計が相対的に平らであるという性質から、標準フィリングでどの客先にも対応することが出来る。無負荷エネルギーは回転数の約 3 乗に比例するが、毎秒あたりのエッジ長 L_s は前に示したように正比例する。速度を低下させると N_e/N_l の関係がより好ましい方になって行く。これを $B_s=1,000$ および $3,500 \text{ Ws/km}$ の時の例で示す。

一方で有効リファイニングエネルギー原単位は増加する。二つの影響要素は総合すると全リファイニングエネルギー原単位には小さな差しかもたらさないで、全エネルギーの消費原単位を大きく変えることなく速度を 1:2 の範囲で変化させることが可能である。

図 2-12 はまたどの程度まで最大許容リファイナー負荷がその結果同時に変化するかを示している。

トルク関係からくる許容リファイナー軸負荷の変化は直線である。無負荷エネルギーは回転数の 3 乗で変化するから、機械的な観点からは高いリファイナー負荷原単位が低い回転数範囲で得られる、すなわち一定のフィリング負荷原単位に対して最大許容軸負荷から離れる安全性が高い。低速域は従って特定の高エッジ負荷原単位用に設計されたフィリングに適しているのに対して高速域は低エッジ負荷原単位に向いており、不満足なリファイナー使用法を少しでも改善するのに役立つ。前述の例では 450 rpm と $B_s=1,000 \text{ Ws/km}$ の時、リファイナーはモーター負荷がわずか約 9 kW であるのに、 $3,500 \text{ Ws/km}$ では 220 kW になる。 900 rpm ではいずれの場合も可能なモーター負荷は 2 倍になった。しかし N/N_l の比は悪い方に動き、 $B_s=$

図 2-11 DDR フィリングの運転コスト最適化

図 2-12 速度変化が負荷と効率に与える影響

図 2-13 直径と速度の変化が負荷と効率に与える影響

3,500 Ws/km の場合 7% から 25% に、また $B_s=1,000$ Ws/km では 17% から 50% になった。運転上の理由で全リファイナーエネルギーが例えば 500 kW 必要な場合（必要生産量、ある抄紙特性に対する特定のエッジ負荷原単位によるリファイニングエネルギー原単位および与えられたフィリングの組合せによって算出される）例えば 1 台で 900 rpm にして投資上有利にするか、2 台にしてそれぞれ 450 rpm にしてよりエネルギー節減を計るかという疑問を生じる。グラフはまた 1 組のフィリングでは低負荷原単位の場合、リファイ

ナーの潜在能力が完全には引き出せない危険があり、また一方では高負荷原単位の場合、能力をオーバーしてしまう危険があることも示している。

この理由のために、どのリファイナーサイズにも色々な直径のフィリング数種を常備している。あるリファイナーの、ある速度について直径を大きくして行くと、その表面の変化の 2 乗に比例して無負荷エネルギーが増すが回転数の 3 乗に比例して増加する毎秒あたりのエッジ長 L_s の変化よりは小さい（図 2-13）。

エッジ負荷原単位 B_s が低い場合、リファイナーの

負荷可能率は高くなり、同時に N/N_1 比もより好ましいものになる。グラフはまたどの負荷範囲が今日使われている各種のフィリング形式、速度に重なるかをも定義している。これはある特定のリファイナー形式と、特定のエッジ負荷 B_s に対して当てはまるものである。リファイナー使用の最適値に到るには、フィリングと速度を慎重に選ぶことによって必要なリファイナー負荷への最善の策を見出すことにある。例えば 300 kW の負荷で図に示したフィリング 3 種はいずれも使用出来るが、450 kW では 30 in のフィリングは完全に負荷をかけることが出来ないため使用出来ない。実用上、リファイナーはそれぞれ数種類の用途に対して設計されているから、あらゆる第 2 義的な要素を盛り込んだ結果限界にぶつかることがよくある。限界とはリファイナー運転の最適方法について妥協を受け入れなければならないことである。従うべき基本原則はリファイナー負荷が最大許容値に出来るだけ近い状態で運転出来るようにフィリングを選定することである。これによってエネルギーがもっとも効率よく利用出来る。

2.2.7 システム関連のエネルギー

これまでに検討したリファイナー自身の内部ですべて処理でき、ある特定の運転条件にすべて関連するエネルギー節減方法とは別に、この運転状態がどれほど実際に起こるのかということも考慮するべきである。既存のリファイナー能力は工場で実際に必要なものと対応しないことが多い。その結果、かなり長期の生産期間にわたって、リファイニング能力が過剰となり、最大許容負荷で運転しないから使い方がまずくて使用効率が悪くなる。何台かを停止するか、速度を変えて

リファイナー能力を実際の運転状況に合わせて調整することが必要になる。数台を数段階にわけて停止するには小型機を数多くもたなくてはならないが、速度を変えることは連続、無段階変化で速度に比例する毎秒あたりのエッジ長 L_s の調整が変えられる。このことはレイアウトを最適にするのに適当な策である。

生産計画に大きな幅がある場合には、効率を最適に保ちながらリファイナー能力を調整出来る。速度調整はリファイニング効果の均一性についても有利である。

既に示したように、ある特定の抄紙特性を得ることは特定のエッジ負荷 B_s とリファイニングエネルギー原単位に対応する。今日、通常のリファイナー負荷制御(図 2-14)は実際のリファイナー負荷を測定し設定値と比較する。設定値との偏差をフィリング間の隙間を再調整して補正する。これはエッジ負荷原単位を変え、従って抄紙特性を変える。さらに加えて、例えばチェスト液面の変動による通過量の変化はリファイナー負荷が一定であってもリファイニングエネルギー原単位の変化の原因となり抄紙特性の変化になる。

実用上は例えばリファイナーの大多数を一定負荷、すなわち一定のリファイニング進行で運転し、1 ないし 2 台のリファイナーで負荷と通過量の総量によって大体一定のリファイニングエネルギー原単位を保つように運転することによってこの影響に限界を与えることが試みられている。これは負荷制御に通過量制御を重ねることに基づいている。しかし今日では制御コンピューターが濃度とモーター負荷から絶乾通過量制御を可能にしており、これから設定値とするリファイニングエネルギー原単位を計算できるようになっている。

図 2-14 通過量に基づくリファイナー制御

なお残っているのは制御調整がなされた場合の毎秒あたりのエッジ負荷の差による抄紙特性の変化である。

コンピューターでの計算に一旦速度を取り入れれば、リファイニングエネルギー原単位と毎秒あたりのエッジ負荷の両方を必要全範囲にわたって適合するように調整出来る。あるリファイナーのモーター負荷と速度の調整係数は当初コンピューターに与える無負荷エネルギーの指数関数変化と通過量に比例して変化するリファイニングエネルギー原単位から計算される。調整値はほぼいつもモーター負荷から計算される。リファイニング工程の指標としての有効リファイニングエネルギーは間接的に計算され、プログラムに定数として与えなくてはならない。今起っている実際のリファイニング条件を計算するためにモーター効率を用いることは今日まだ広くは行われていない。表 2-2 は色々な制御方式とその影響のまとめである。これらのシステムの経済性を表 2-3 に示す。ここにプラント稼働率 80% と 60% の場合の無負荷コスト原単位をリファイナーと駆動装置の投資額と比較してみた。リファイナー全数に可変速度制御を取付けても、償却期間は相対的に短くて 1.6 および 2.6 年である。

1 台だけに可変速駆動を設けても、設備コストの増加はある合理的な限度内に納まり、償却は 2.6 年が

1.3 年と早くなる。リファイナーの速度を用いてリファイナー能力を実際に必要な運転能力に調整することの可能性とは別に、リファイニングを調整してエネルギーの有効使用を達成する他のシステム要素が考えられる。例えばシングルパスと多数回パスの比較、または品種別、混合リファイニングについては各種の文献で論じられているのでここでは取り上げない。一方、分級した繊維懸濁液のリファイニングはまだ正しく明確になっていないため特に興味深い。分級した繊維の性質については多くの発表がなされている。ここでは Arlov⁷⁾ のものをまず取り上げる。分級した各繊維の強度値はリファイニング工程と繊維長次第で未分級繊維のものよりも高くも低くもなることを彼は示した。Schmut⁸⁾ はある特定の最終条件に近づいた後の分級繊維のリファイニングは各級間の移動しか起らず、各級それぞれの性質に変化は起らないことを示した。Szwarcztajn と Przybysz⁹⁾ は微細繊維の影響に関する色々な異なった説は、正確には定義づけられていない粒子寸法の分布に起因することを主に強調した。

リファイニング未処理のパルプ中にある「1 次」微細繊維はリファイニングには測定可能な影響を及ぼさないことをも彼らは指摘している。この微細繊維はフリーネスと原料の結合能力にわずかな変化しか与えな

表 2-2 通過量に基づくリファイナー制御

制 御 形 式	リファイニング エネルギー原単位	エッジ負荷 原 単 位
モーター負荷	変 動 偏 差	直線過比例偏差
モーター負荷およびリファイニング エネルギー原単位 — 無負荷の定数	一 定	直線比例偏差
リファイニングエネルギー原単位 およびリファイナー速度	一 定	一 定

表 2-3 コスト検討

平 均 運転率	可変速 リファイ ナーの 台数	設 備 投 資 額 1,000 ドイツマルク (リファイナー+駆動)			無負荷コスト ドイツマルク/トン			回 収 期 間	
		定 速	可変速	差	定 速	可変速	差	運転時間	年
80%	3	630	810	180	7.1	3.8	3.3	20,500	2.6
	1	630	690	60	7.1	4.9	2.2	10,200	1.3
60%*	3	630	810	180	9.5	2.3	7.2	12,500	1.6
	1	630	690	60	6.3	4.9	1.4	21,400	2.7

*リファイナー 2 台運転のとき。

DSR 2 型リファイナー 3 台のリファイニングシステムの例

い。一方、リファイニング中に生じる「2次」微細繊維は特にフリーネスに決定的な影響を与える。これを除去すると引裂は良くなるが引張は悪化する。フリーネスと引張の利益, 不利益を天秤にかけると, 微細繊維を除去するほうが有利という結論になる。フリーネスパターンの評価は残念ながらリファイニング期間でしか定義できないが, 原料の繊維分は同等の引張または引裂を得るのにかなり長い間リファイニングしなくてはならないという結論である。同時にこのことは非常に高いエネルギー所要量原単位が要ることをも意味する。従って分級リファイニングの利点は微細繊維の除去にあるのではなく, 弱目のリファイニングで長繊維のフリーネスを高目にしておき, これに微細繊維を加えることにある。この技術を組み込んだプロセスはかなりの投資を要するため, 今日この基準によるプラントはまだ少数である。さらに分級に用いる機器の機能から生じる容積分布に存在する問題のため工程内に余裕がない。スルザーエッシャーウイスでは特にリファイニング用に分級した分量を調整する方法を準備しているが, その説明は本稿の範囲を外れるので省き, そのシステムは高濃度スクリーニングですでに成功している制御原理を基本にしているとだけ述べておく。システム調整によるエネルギー節減は今日リファイニングを減らし薬品を使うことによっても達成出来る。ここでは繊維の変化を機械的方式によらず, 低リファイニングの繊維の結合力を外部の影響により増加させている。

引用文献

- 1) Results of statistical investigations.
- 2) G. Jayme and K. Rosenfeld, Changes in property of pulps by using ultrasonics. *Das Papier* 9, 296-303 (1955) No. 13/14, *Das Papier* 9, 423-429 (1955) No. 17/18.
- 3) L. A. Gorbatschew, M. W. Ospischtschewa, J. W. Kosulin, N. W. Birbrower, L. I. Makowa, M. N. Wolmann, I. I. Sidorwa, Influence of hydrodynamic forces on the intensity of fibre stock treatment, *Bumaschnaja Promyshleynost* 3-4 (1976) No. 5.
- 4) J. Pav, M. Slabina, M. Soucec, Some results using generators of mechanical oscillations, *WfP* 93, 52-55 (1965) No. 2.
- 5) W. H. Siewert, Dissertation Darmstadt 1966.
- 6) K. Rosenfeld and J. Hoffmann, A new process for refining at high consistencies above 20%, *Das Papier* 19, 58-66 (1965) No. 2.
- 7) A. P. Arlov, Beater performance as studied by means of fibre fractionation experiments, *Norsk Skogindustrie* 474-481 (1959) No. 12. Load elongation properties of paper sheets made from Bauer-McNett fractions of beaten sulphite pulp, *Norsk Skogindustrie* 342-350 (1959) No. 10.
- 8) R. Schmut, Fibre fractionation and paper properties, *Southern Pulp and Paper Manufacturer* 90 ft (1959) No. 10.
- 9) E. Szwarcstajn and K. Przybysz, Some aspects of pulp and waste paper fractionation, *Das Papier* 29, 295-300 (1975) No. 7.