

機械パルプ製造の変遷

日本製紙株式会社 技術研究所

小柳 知章

	頁
はじめに	2
1. 機械パルプの概要	2
2. 機械パルプの製造フロー	4
2.1 GP	4
2.2 RGP	5
2.3 TMP (CTMP)	6
2.4 PGW	8
3. 機械パルプの特徴と課題	8
3.1 パルプ品質	8
3.2 省エネルギー	10
4. 今後の展望	13

この資料は、平成 21 年 10 月 6 日に開催された紙パルプ技術協会年次大会前日講演会「製紙産業技術 30 年の変遷」での講演記録を基にまとめたものである。資料中のすべての図の著作権は作成者に属し、無断使用・複製等をご遠慮ください。

講師略歴

1989 年 十條製紙株式会社（現 日本製紙株式会社）入社、伏木工場技術室
1992 年 米国ニューヨーク州立大学（ESPRI）留学
1993 年 日本製紙株式会社中央研究所紙パルプ第一研究室
1994 年 同 釧路工場原質部
2002 年 同 八代工場原質部
2007 年 同 技術研究所パルプ研究室

2008 年より紙パルプ技術協会パルプ技術委員会委員

はじめに

日本製紙の小柳です。機械パルプの30年の変遷というテーマで、入社して20年強の私にはややテーマが重いかと思います。技術者として、機械パルプへのかかわりがあったことからこのテーマを引き受けました。

私は、大学で機械パルプの退色に携わっていました。それで、メカニカルパルプを持つ会社に興味があり、当時の十條製紙に入社、伏木工場に配属になりました。この工場はRGPを持っていました。その後、幾つかの工場を経験しましたが、釧路工場ではGPとTMP、それから八代工場にもGPとTMPがありました。

現在は、RGPの伏木工場は閉鎖、釧路工場、八代工場のGPも停機になっています。その代替として、N-DIPを増産しています。私も、釧路工場ではGPの停機とDIPの増産に携わりました。

最初に概要として機械パルプの生産高、製造の歴史等を説明して、そのあとに製造フローを示しながら、各パルプの製造法と問題点、それからパルプ品質と特徴を示し、それに対応する技術としてどのようなものがあるのか、紹介していきます。

1. 機械パルプの概要

最初に生産高です。紙が約1,900万トン、板紙が約1,200万トンです。それに対応するセルロース源として、古紙とパルプがあります。古紙の消費量が約1,900万トンで約3分の2、その他をKP、機械パルプ等で占めますが、機械パルプは、100万トン弱と、全体の3%しかない状況です。この機械パルプの内訳は、約3分の2の60万トンをTMPが占め、残りをRGP、GPで半分ずつです。

消費量の推移を過去30年間追ってみました。30年前は、機械パルプの消費量は年間175万トン、88年ごろには240万トンまで増えています。その後、横ばいが続き、この10年は緩やかに減少しています。

次頁上図は世界のパルプの生産量の推移です。全体は1億7千万トンから1億8千万トンと増えていますが、機械パルプはほぼ横ばいです。

機械パルプは、従来から新聞巻き取り紙への配合が最も多く、60年代はGPが約8割を占めていました(次頁図)。その後、70年代にTMPが開発され、強度の弱い

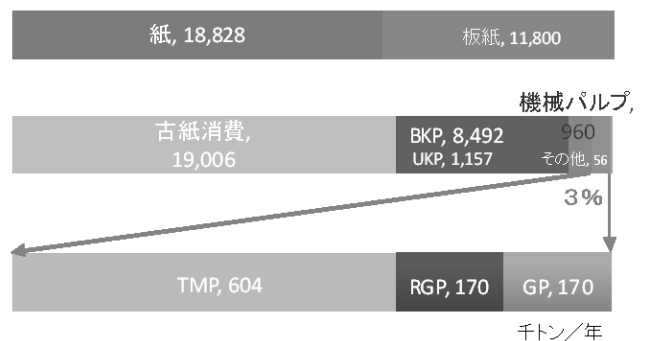
機械パルプ製造の変遷

日本製紙株式会社 技術研究所
小柳 知章

発表内容

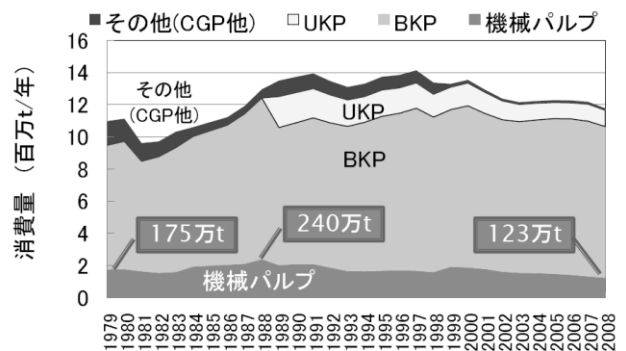
1. 機械パルプの概要
 - ◆機械パルプの生産高
 - ◆新聞用紙への配合推移
 - ◆機械パルプの歴史
2. 機械パルプの製造フロー
3. 機械パルプの特徴と課題
4. 今後の展望

古紙・パルプ生産高(2008)



資料: 紙・印刷・プラスチック・ゴム製品統計年報

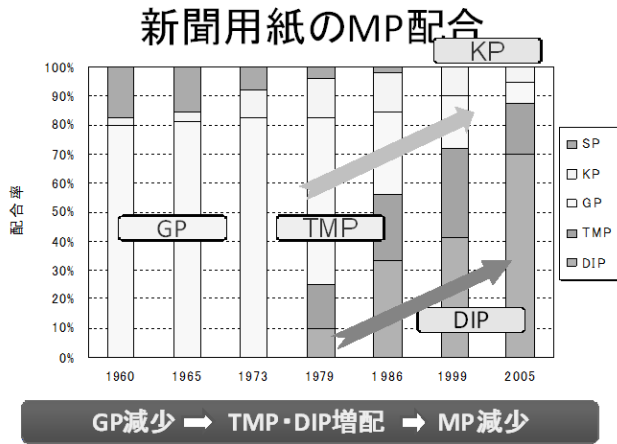
パルプ消費量の推移



機械パルプの消費量はほぼ横ばいだったが、緩やかに減少

資料: 紙・板紙統計年報(H20)、日本製紙連合会

GP を一部置き換えて少しずつ伸びていきました。このころから、DIP が生産され、ここ 10 年では、非常に品質の改善が進み、倍増しています。それに押されて、機械パルプの割合が減っています。



資料：紙パ技術協会 新聞用紙の軽量化

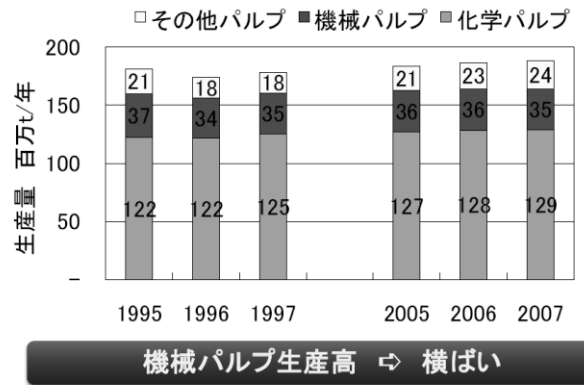
歴史的には、GP（グランドウッドパルプ）は1850年代に、製紙産業での最初の工業化パルプとして生み出されました。原木を砥石に押しつけてパルプ化する製法でしたので、白い柔らかい原木である針葉樹が使われています。その基本的な製造方法は、現在まで変わっていません。

その後、1950年代にRGP（リファイナーグランドウッドパルプ）が生まれました。これは、良質な原木の不足のため、焼却していた建材の廃材を利用するもので、繊維ボード等のリファイナーを用いて開発されました。

1970年代に、ここが一つブレイクスルーだと思いましたが、機械パルプの品質を改善するため、加圧下でリファイニングを行うというTMPが開発されました。同様に、グランドウッドパルプのほうも、加圧下で行うプレッシャーグランドウッドパルプが開発されています。TMPは薬品での処理を強化するCTMPに発展していきませんが、基本的にRGPもTMPも、30年前の製造法が現在も続いています。

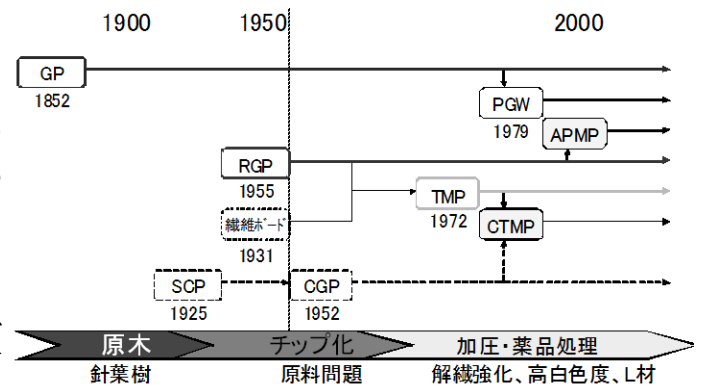
4種類の機械パルプのうち、グランドウッドパルプ（GP）、プレッシャーグランドウッドパルプ（PGW）は原木を原料とし、リファイナーグランドウッドパルプ（RGP）、サーモメカニカルパルプ（TMP）はチップを使用します。GPとRGPは大気圧で、PGWとTMPは加圧状態で磨砕を行います。化学パルプに対して、機械パル

世界のパルプ生産量



資料：紙パルプ産業白書(2009), 矢野経済研究所

機械パルプの歴史



機械パルプの特徴

	原料	圧力	繊維長	強度	不透明度	収率	電力消費
GP	原木	大気解放	短	弱	高	高	↓
PGW	原木	加圧	↓	↓	↑	↑	↓
RGP	チップ	大気解放	↓	↓	↑	↑	↓
TMP	チップ	加圧	長	強	↑	↑	大

↑ 高白化度 ↑ 印刷適性

ブの最も大きな弱点は強度が弱いことですが、製法上、繊維が非常に短いことに由来します。

一方、不透明度、収率に関しては、ケミカルパルプに対して、機械パルプは非常に高く、その中でもGPは不透明度、収率が高いです。大きな欠点は、非常に電力消費が大きいことで、その中でもTMPが大きいです。

2. 機械パルプの製造フロー

2.1 GP

GPは、グラウンドウッドパルプあるいはストーングラウンドウッドパルプと呼ばれますが、皮をはいだ原木をグラインダーと呼ばれる磨砕機に押し付けてパルプ化します。その後、粗選工程で木片、結束繊維などのシャイブを除去してリジェクトで再磨砕を行います。非常にシンプルなフローです。

グラインダーの種類は、少量生産のポケットグラインダーから、マガジングラインダー、ツーポケットグラインダー、それから、チェーングラインダーやリンググラインダーと呼ばれるものもあったようです。国内では、図のBとCが設置されていたと思います。

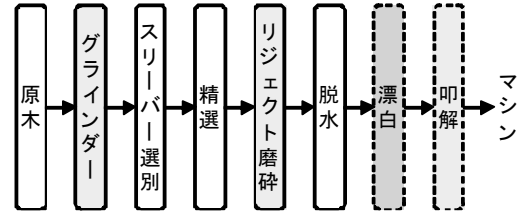
GPは、製造に非常に人手がかかり、自動化が難しい設備であったと思います。原木を土場に置き、ピッチ除去のためのシーズニング等を行なうので広大な面積を要しました。また、原料が天然なため、生産ラインの中に組み入れるのに人手がかかります。

丸太をポケットに詰め込む作業は人力です。原木の供給を自動化したものもありますが、天然物なので、人の監視がいるとか、機械的に負荷がかかるといったような問題があります。

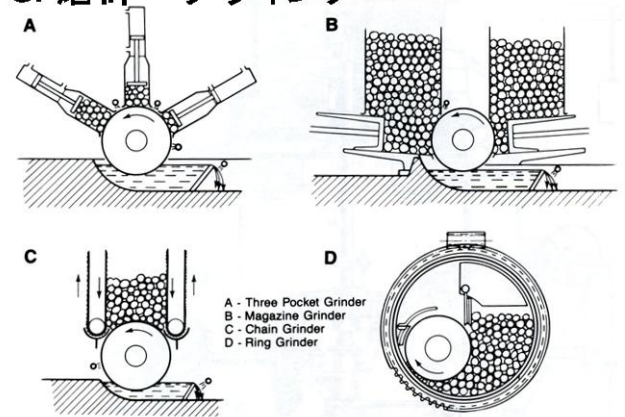
図はグラインダーの基本となるストーンの部分です。ストーンの表面にグリッドと呼ばれる部分を出して、それに木材を押し付けて、圧縮・非圧縮の状態を繰り返して解繊していきます。この砥石は、しばらくしますと滑らかになって、同じ電力量で生産量が出なくなります。そのために目立てと呼ばれる作業を人手でやることとなります。PGWでは、ウォータージェットシステムという目立ての自動化設備も出てきているようです。

GP (SGW)設備

- Groundwood pulp、Stone groundwood pulp
- 砕木パルプ
- 1850年頃、新聞用紙・中下級紙

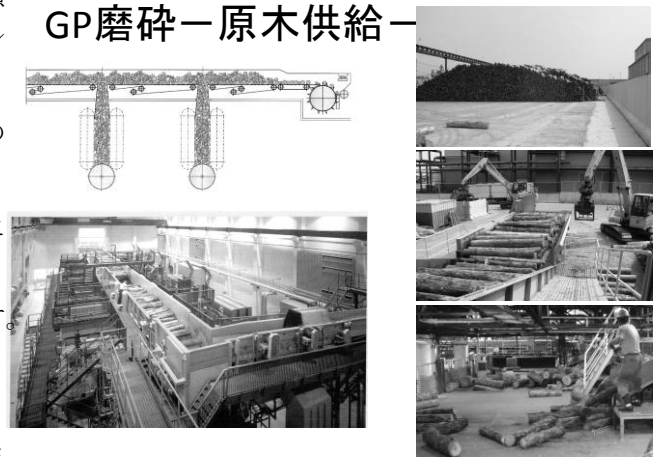


GP磨砕—グラインダー

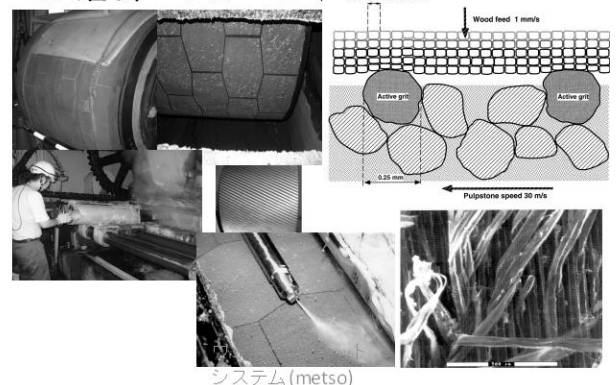


資料: CPPA & TAPPI, Mechanical pulping, 1987

GP磨砕—原木供給—



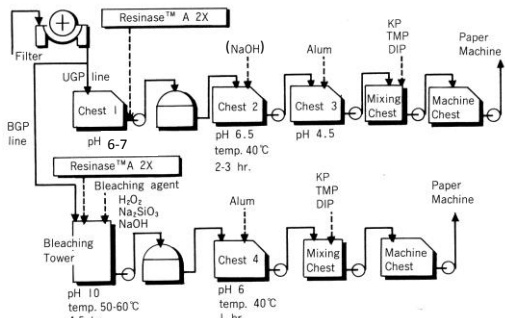
GP磨砕—ストーン目立て



日本製紙石巻工場では、GP のピッチトラブル対策として、ピッチ中のトリグリセライドをリパーゼ(酵素)で分解しています。その効果の例ですが、リパーゼを使うことによって紙面の欠陥数が減っています。これは現在も行っています。

リパーゼによるピッチ分解

- トリグリセライド、赤松GP



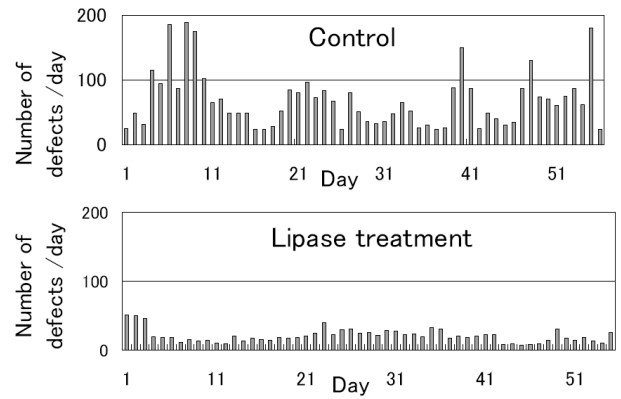
社領ら 紙パ技協誌 47(10)41 (1993)

2.2 RGP

次に、RGP 設備について説明します。原木からチップに転換したことが大きな特徴です。洗浄したチップは2段階の磨砕工程を経て、結束繊維等を取り除いて(これは再磨砕される)、必要に応じてヒドロサルファイトなどで漂白されます。元々、繊維ボード用のアスプルンド法と呼ばれる設備があり(リファイナーが使用されている)、あるいは GP のリジェクト処理で金属プレートを使ったリファイナーが出てきた等から、RGP が開発されました。図は初期のバウアー社の DDR と呼ばれるものですが、一對のプレートがあり、それぞれにモーターが付いており、チップはフィードスクリューで中に入れられ、ハウジング方向に出ていきます。

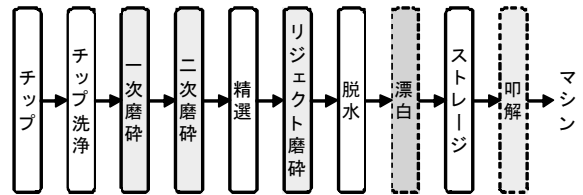
RGP は GP に対し、長繊維分が増えます。それによって、引き裂強度も大きく改善されます(例えば Morkved, L. et al, Tappi 52(8):1465-67(1969))。木材の構造は、それぞれの繊維の間に細胞間層(ミドルラメラ)があります。その次に、その細胞の1枚め(一番外側)に $0.1\mu\text{m}$ から $0.3\mu\text{m}$ ぐらいのプライマリウォール、(1次壁)、それから次に2次壁があります。この2次壁は、 $0.1\mu\text{m}$ ぐらいの S1 層、それからメインの S2 層が $1-5\mu\text{m}$ 、それから $0.1\mu\text{m}$ の S3 層からなっています。GP や RGP は機械的に繊維を解繊していきますので、

リパーゼの利用ー紙面欠陥

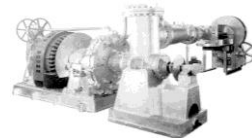


RGP設備

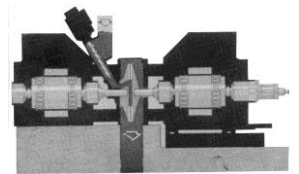
- Refiner groundwood pulp
- 1950年代、チップ、大気圧



RGP磨砕

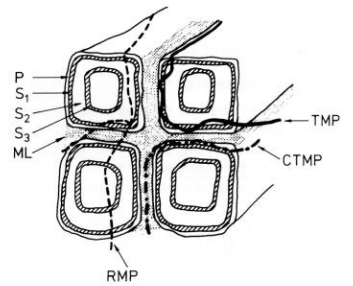
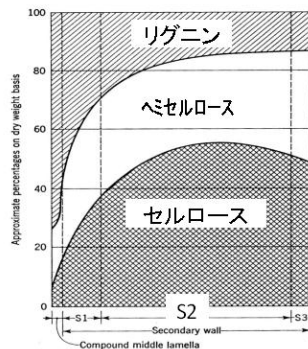


アスプルンド法 繊維ボード用



バウアーDDR

RGP磨砕



リグニンの軟化 → 解繊、繊維化に影響

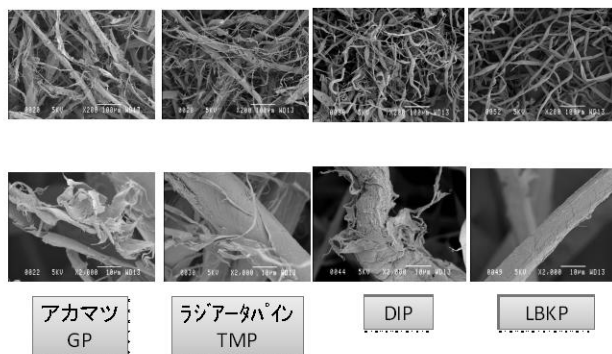
資料: FPEA & TAPPI, Mechanical pulping, 1999

残念ながら、繊維をきれいにほぐせずに、S2層を破碎した状態になってしまい、繊維長を短くしてしまいます。

TMPでは、加圧下で温度を上げることにより、1次壁及び中間層に多く存在するリグニン(繊維間の接着剤の役目をしている)を軟化することによって、よりきれいに解繊していきます。そのため、1次壁、あるいは2次壁の1層めで解繊され、それからS2層のフィブリル化が進みます。さらに化学処理を強めたCTMPでは、ミドルメラのところからも解繊されて、繊維本来の長さを保ったまま解繊できるようになります。

電顕写真で見えます。GPの場合は、繊維が縦方向(軸方向)に裂けてしまい、内腔が見えています。TMPは、1次壁等がむけて、2次壁の中層の部分が見えている。これから解繊が進めば、外部フィブリル化がどんどん進んでいきます。参考までに、LBKPは繊維そのままの状態を保っています。DIPでは、膨潤・収縮を繰り返していますので、非常に曲がった繊維等も見受けられます。

パルプ繊維の電顕写真



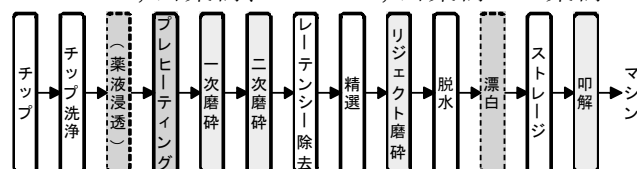
2.3 TMP (CTMP)

次にTMP、CTMPの設備について説明します。サーモメカニカルパルプ、あるいはケミサーモメカニカルパルプと呼ばれます。洗浄したチップを、CTMPの場合は薬液の浸透段があり、加温後、2段階の磨砕を行います。磨砕後に繊維が曲がった状態になっていますので(レイテンシーという)、高温でチェスト中で離解して、レイテンシーを取り除いて、そのあと結束繊維を再磨砕します。必要に応じて、過酸化水素水漂白等を行うフローです。メッツォ社の最新フローの例では、浸透段があり、その後2段階磨砕、精選工程、それからリジエクトの再磨砕があり、漂白は高濃度漂白を行っています。

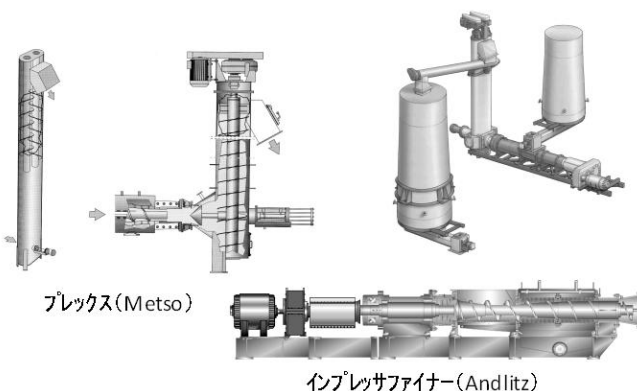
CTMPでは前処理が非常に重要で、チップを薬品で処理することによって解繊、あるいは繊維化をより容易にします。設備としては、メッツォペーパー社のプレックスあるいはアンドリッツのインプレッサファイナーで、磨砕の前についています。メッツォ社の場合、1対2から1対3にチップを圧縮、インプレッサファイナーの場合は1対4ぐらいに圧縮し、その後、亜硫酸ソーダ、あるいは苛性ソーダの液中に解放して、薬品

TMP(C-TMP)設備

- Thermo mechanical pulp、Chemi TMP
- 1970年代、チップ、加圧加温
- TMP；針葉樹、C-TMP；針葉樹+広葉樹



TMPチップ前処理



チップ圧縮と薬品前処理 → 解繊、繊維化を強化

を繊維の内腔の部分まで浸透させます。

に磨砕工程です。これはメッツォ社のシングルリファイナーです。これ以外にも DDR、あるいはツインリファイナーと呼ばれるものがあります。ツインリファイナーは、真ん中に回転刃があり、その外側に固定刃があります。

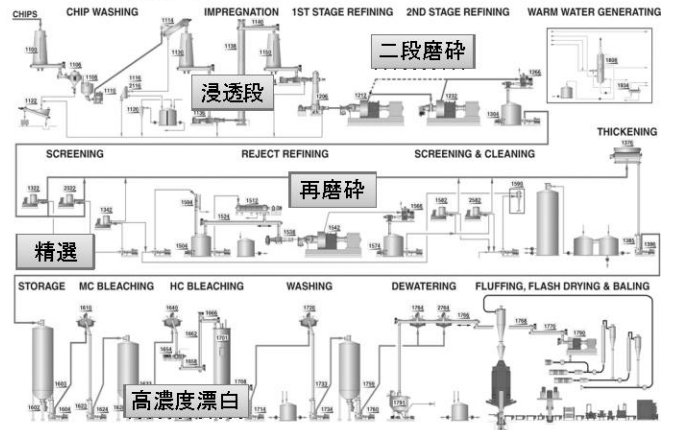
北欧や北米では、この磨砕機の大型化が進んでいます。大径化のため、ベアリングやモーターの冷却設備等が非常に改善されています。さらなる生産増のために、コニカル型も開発されています。ディスク径として、82 インチ、86 インチ等の 2 メートルぐらいのものが作られています。国内では TMP の配合があまり多くないこともあり、大径化した設備をつける流れはありません。

TMP の操業の中で非常に重要なのは、プレートの間隔です。プレート間の状況が、そのまま操業の負荷変動につながり、それが品質に影響します。従来のものは摺動部までの距離を固定部から測定することでギャップを計算しましたが、旧スズ社、メッツォのものは、プレート間の渦電流を測定する TDC (トゥルーディスタンスクリアランス) センサーを使って、正確なギャップを出しています。モーターとして 6,000 キロワット以上のものが付いてプレートを押し、実際のプレート間は 1 ミリ程度ですから、非常に繊細な操業をやっていることが分かります。アンドリッツ社も同様に RPGE といった渦電流を測るものを作っています。また、最近メッツォ社では、AGS と呼ばれる、操業中にもキャリブレーション可能なものを開発してきています。

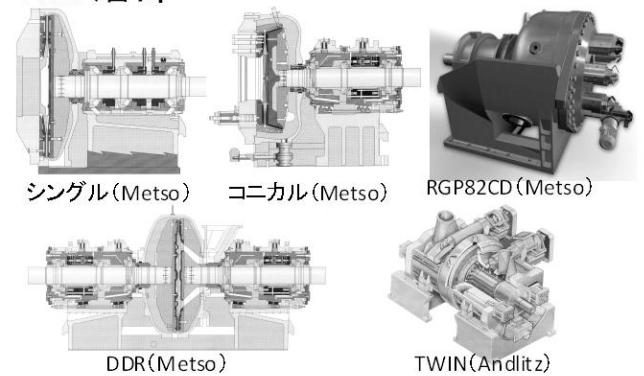
右図はアンドリッツ社のギャップセンサーの設置例です。プレートの一部に設置して、プレート間で発生する渦電流を測り、ギャップを表示し、負荷コントロールを行います。

コニカル型、シングル型、ダブルディスク型で、同じような電力原単位で磨砕した場合、コニカル型のほうが長繊維が多く、その効果で引き裂きが高いです。非散乱係数に関しては、ダブルディスクのほうが高い結果です。(Jackson M. et al., Design Features and

TMP製造フロー



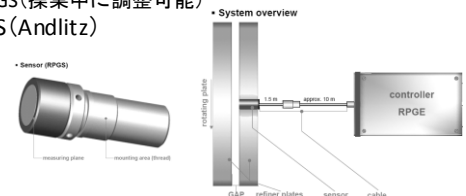
TMP磨砕



大径化、生産増 (付帯設備の改善)

TMP磨砕ーギャップセンサー

- プレート間の状況把握が重要
 - 品質、負荷変動
- 1. 摺動部を固定部から測定
- 2. プレート間の渦電流を検知
 - TDCセンサー (True Distance Clearance, Metso)
 - AGS (操業中に調整可能)
 - RPGE (Andlitz)



Pulp Quality Aspects of Single and Double Disk Refiners, Sunds Defibrator pamphlet, Sundvall, 1987)

2.4 PGW

PGWはプレッシャーグランドウッドパルプと呼ばれ、GPを加圧下で行うもので、1970年代にタンペラー社で開発されています。GPの弱点である強度を改善するのが目的です。

フローは、基本的にはGPと変わりません。ツーポケット型のグラインダーに丸太の供給のための部屋を設け、この部分が加圧下で行われます。

通常のGPでは、白水シャワーの温度が70度ぐらいで、実際の原料は90度ぐらいです。これを加圧下にすることによって、シャワー温度が90度ぐらい、パルプの温度が110度から120度に上がります。これによって、先に説明しましたリグニンの軟化を起こらせて解繊をよくします。工程の白水は熱交換をかけて、再度所定の温度でグラインダーに送られます。

GPとPGWの品質の比較では、電力原単位は、若干PGWのほうが高いデータが出ています。長繊維分はPGWのほうが高く、その効果で引き裂きが上がっています。高温になることにより白色は若干低下しています。

右図は、テックタイムス社の工場データブック最新版と、日本製紙連合会の設備調査報告書(H3.1)とを比較したものです。この円柱の一目盛は日産約100トンを示しています。破線のものは、20年前には記載があったのですが、最新版には記載がないところです。北海道や四国地方など、紙パルプの大規模一貫工場のある所に、機械パルプがあることが分かります。

機械パルプは、高不透明度や印刷適性がよいことで新聞用紙に配合されてきましたが、良質な原木の不足や、電力費が高く、総コストが高いことが問題点です。機械パルプの特徴である高不透明性が填料に置き換えられ、強度がDIPに置き換えられ、このことが機械パルプの減少につながっています。

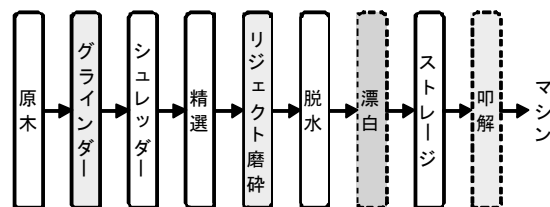
3. 機械パルプの特徴と課題

3.1 パルプ品質

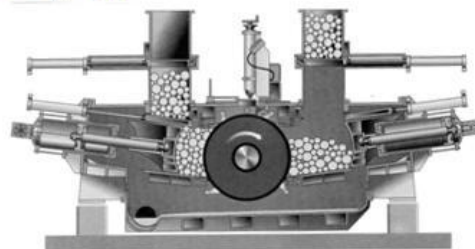
機械パルプは低いろ水度のものを得ることができま

PGW設備

- Pressure groundwood pulp
- 加圧碎木パルプ、1970s後半
- GPの強度改善



PGW磨砕



機械パルプ製造工場



資料：紙パルプ企業・工場データブック、テックタイムス社

機械パルプの30年間

- TMP,PGW以降に大きな製造の変化は無い？ APMP法などの改善
- 高不透明度、低密度、印刷適性良？ 新聞用紙に配合
- 良質な原木の不足、電力費によるコスト高
- 機械パルプの特長が他に置き換えられている
- 新聞用紙配合におけるDIPに比べてコスト高

機械パルプは減少傾向

す。低い水度は、非常にファインが多いことから、印刷適性、光学適性を悪化させます。一方、化学パルプに比べ非常に強度が弱い。

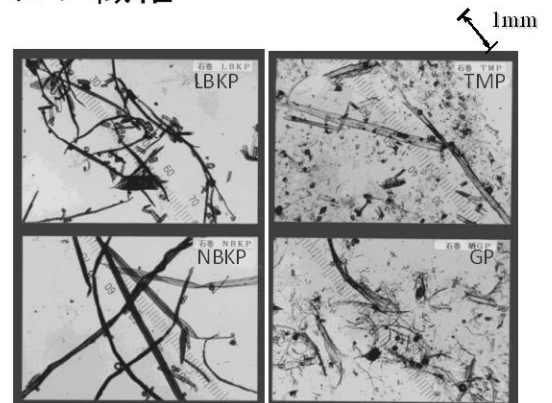
繊維長とファインの様子は、顕微鏡写真の比較でよくわかります。写真左はKPでファインはすくない。一方右側のMPはファインがみられる。またGPは繊維が短く、裂けているものも観察されます。

右図は繊維のふるい分け組成を示したものです。NBKPは、24メッシュの長繊維がほとんどを占め、椅子型をしています。LBKPは長い繊維はありませんが、42メッシュが最も多く、同じように椅子型です。GPは、長繊維がほとんどなく、最も多いのがファインで、逆の椅子型になっています。TMPは、このGPの強度を改善したものですので、24メッシュが3割ほどありますが、機械パルプという製法上、やはりファインも存在して、舟型になっています。

それらのことが基本的な強度に影響します。北米の例ですが、引裂度数では、GPが最も低く、次にPGW、TMPとなっています。NBKPが最も強度が高く、次がLBKP、CTMPはその近くにあります。国内材では、NBKPはもう少し下のほうにきます。そして、DIPが非常にTMPに近いところにあります。

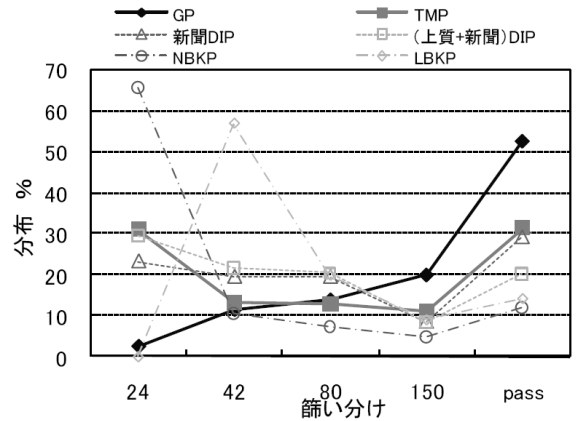
下図の左側は比散乱係数を示したものです。GPが最も高く、PGW、TMP、それからLBKP、NBKPです。ファインの多いGPが最も高く、PGW、TMP、それからLBKPの順番に減って行ってNBKPが最も低い。

パルプ繊維



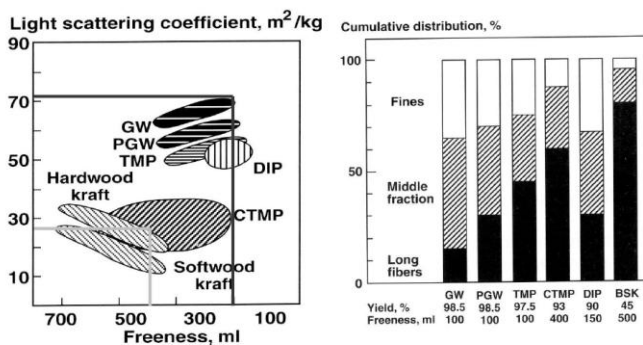
NBKP:長繊維、TMP・GP:ファインが多い

各種パルプの繊維分布



KP:イス型、GP:逆イス型、TMP:舟形

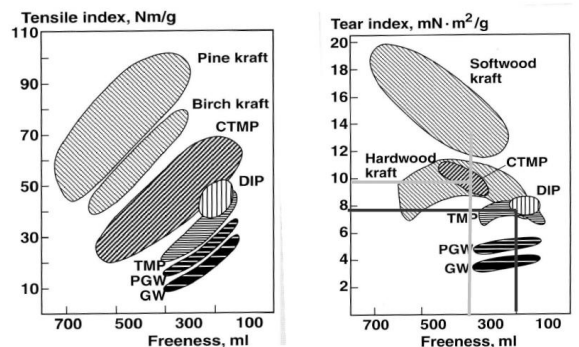
パルプ品質の比較—比散乱係数



NBKP < LBKP < CTMP < DIP ≅ TMP < PGW < GP

資料: FPEA & TAPPI, Mechanical pulping, 1999

パルプ品質の比較—強度



NBKP > LBKP ≅ CTMP > DIP ≅ TMP > PGW > GP

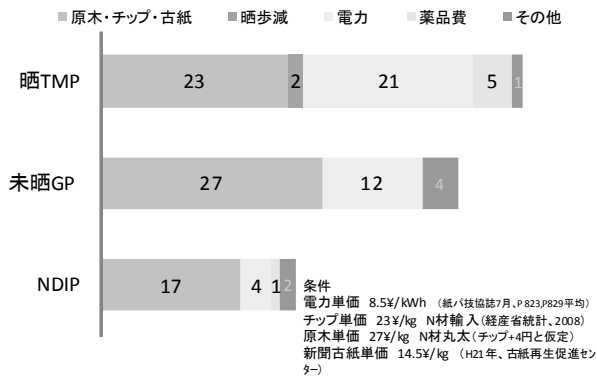
資料: FPEA & TAPPI, Mechanical pulping, 1999

機械パルプは非常に歩留まりが高く、90-95%、GPは95%以上になります。基本的に木材の構成物質をほ

とんど持っていることから、白色度が低くなります。そのため、白くて軟らかい原木、あるいはチップを選択せざるをえません。

右図は電力原単位の範囲を示しています。DIP を約 500 kWh/t としても、非常に高い電力原単位であることが分かります。総コストに占める割合を下図に示しますが、電力費が大きいことが分かります。

(参考) 総コストに占める電力費 (円/kg)



3.2 省エネルギー

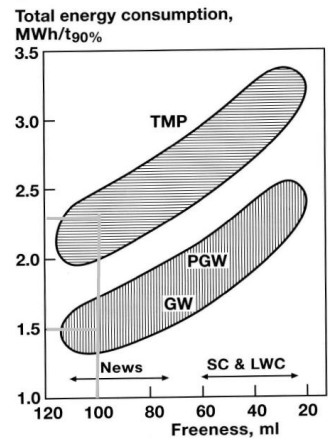
3.2.1 高濃度磨砕工程

それでは、エネルギー原単位削減への取り組みを紹介します。リファイナーメカニカルパルプのプレートパターンは、原料や磨砕機に合わせて、オーダーメイドで作られているのが現状かと思えます。その中で、省エネ型のプレートのパターンは、基本的に、滞留時間を短くし、繊維化（言い換えれば強度）を若干調整することによって、エネルギーを削減しています。最近では、強度を重視してきたヨーロッパの学会等でも、メカニカルパルプの省エネがテーマに挙がっています。一方、国内でも、新聞用紙での配合変化から (DIP 増)、強度が求められなくなっています。

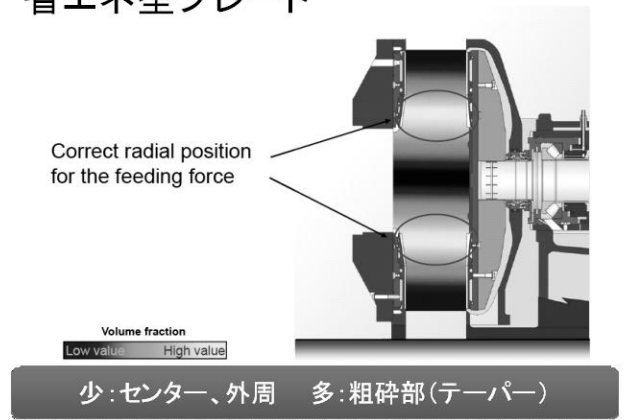
シングルディスクリファイナーでは、ローター側センターにセンタープレートがあり、チップが入ってきて、粗砕部、それから精砕部が続きます。反対側が固定のステーター側です。

チップ、あるいはパルプは、プレートの粗砕部分で渋滞し、その外側では面積も増え少なくなっています。実験データでも、粗砕部から精砕部に移るあたりの電力原単位が大きくなっています (M Illikainen et al, Paperi ja Puu, 88, 5, 2006, 293-297)。従来のプレートは、繊維に滞留をとり、電力をかけ、できるだけ強度

電力原単位



省エネ型プレート



TMPプレート

