資 料

RI・放射線の産業利用*

Ⅱ. 産業各分野における RI 等利用例

3. 紙・パルプ産業分野†

幸 一彦

王子製紙(株)技術部

104 東京都中央区銀座 4-7-5

Key Words : industrial use, radioisotope, pulp, paper, paper machine, thickness gage, quality control system, B/M system, basis weight, krypton-85, promethium-147

1. はじめに

日本の紙・板紙の生産量はアメリカに次いで世界第二位(約 28 000 千トン/年, 全世界の 11%)であり, ペーパーレス時代とはいえ日本は依然として製紙大国である。一方, 近年顧客の品質要求は多様化し, かつ高品質への要求は高まるばかりである。

そのような中, 紙パルプ業界は安定した高品質の製品を供給すべく日夜努力しているが, その品質管理に欠かせないのが RI 利用の測定機器である。具体的には紙パルプ製造工程では密度計, レベル計, 坪量* (つばりょう) 計 (B/M** 計) など多くの RI 利用測定機器が使用されている。また, X 線を利用した灰分*** 計や最近では紙の表面加工用として電子線照射装置, バイオ研究用のトレーサとして放射線や

RI が利用されている例もある。

本稿では, その中でも紙製品の最終品質をオンラインで測定する最も重要なセンサーである坪量計について紹介する。

2. 製紙用坪量計 (B/M 計)

2.1 概要・特徴

2.1.1 概要

坪量計とは, 紙の製造工程の抄紙・加工ラインに設置され, 製造中のウェブすなわち各種紙の坪量を計測する装置である。通常は紙のもう一つの重要な品質である水分を測定する近赤外線水分計とともに設置され, 一般に B/M 計と呼ばれている。さらに近年では, 紙のその他の重要品質である紙厚, 色相, 灰分, 光沢などをオンラインで測定するセンサーを搭載した総合品質測定, 制御システムとなっている。

図 1 には一般的な紙の製造工程を示す。本システムは通常図 1 に示す位置に挿入され, 紙の

† Industrial Uses of Radioisotopes and Radiation. II. Applications of Radioactivity etc. in Various Industry. 3. Aspects in the Pulp and Paper Industries. Kazuhiko SAIWAI: Technical & Engineering Dept., Oji Paper Co., Ltd., 4-7-5, Ginza, Chuo-ku, Tokyo 104, Japan.

* 本報告は, 日本アイソトープ協会理工学部会「放射性同位体等の産業利用専門委員会」(委員長: 小佐古敏荘(東大・原総センター))によって検討されたものである。

* 坪量: 単位面積当たりの紙の重量 (g/m^2)。紙パルプ業界では, 紙の密度は一定ではないので厚み計と呼ばず, 坪量計という。

** B/M: B は坪量の意味 (basis weight), M は水分の意味 (moisture)。

*** 灰分: 紙の固形量に対する紙中の無機質の重量割合 (%)。

図 1 紙の製造工程

図 2 B/M計の概要

品質をオンラインで測定するとともに、パルプ、填料、染料、薬品および蒸気電気などのパラメータを制御することにより、紙の流れ方向および幅方向の品質を目標値に維持するために用いられる。B/M計は図2のように構成されるが、測定信号を処理しオペレータとの対話、記録の保存、上位システムとの通信などの機能も合わせ持っている。

坪量計は紙の製造工程の中で最も重要なセンサーであり、 β 線を用いて紙を透過する際の β 線吸収量の変化により坪量を測定するセンサーである。

2・1・2 特徴

(1) 検出部は上下に分離されており、走査式測定である。下ヘッドの線源より放射線を出し、紙に吸収されなかった透過量を上ヘッドの検出器で検出する。検出部は紙幅方向に常時往復移動し、測定値と検出器の位置信号を同期させて幅方向の坪量プロファイルを測定する。このため上下ヘッドの相対位置ズレを最小にするフレームやヘッドの形状設計、駆動機能が要求される。ミスアラインメントに伴う誤差の概念を図3に示す。

S: 線源 D: 検出器 Δd : ミスアラインメント I: 出力

図 3 ミスアラインメント誤差の概念

(2) 本測定は非接触で、耐環境性が要求される。紙は1000 m/分 (60 km/時) 程度の高速で走行しており、非接触測定は不可避の要求である。さらに、紙と上下ヘッドとの空間距離の変動、紙のばたつきやシワ、紙粉や汚れの侵入や堆積、高温高湿度、静電気などの外乱に影響されにくいセンサー設計などが必要である。これらを補正する自動校正機能はシステムにとって不可欠である。

(3) サンプル測定である。

検出器は紙上を走査しながら常時測定するが、紙の走行方向に直角に走査するため、測定点の軌跡はジグザグ状でサンプリング測定とな

図 4 測定点の軌跡

る(図4)。したがって、紙の幅方向の測定値は信号処理により正しい情報に再現させる必要がある。最近では紙品質の幅方向プロファイル制御が一般的になっており、検出器に対し幅方向分解能や応答を最適化し、制御に結びつけることが要求されることが多い。

2・2 原理

放射性同位元素から放出された β 線が紙を

図 5(1) 坪量の測定原理

透過するとき、その β 線の減衰量が紙の坪量によって決まることを利用して坪量は測定される。

図5(1)のように、放射線源と β 線検出器の間に紙を置いたとき、紙を透過した β 線の強度は次式で表され、坪量との関係は図5(2)のようになる。

$$I/I_0 = \exp(-\chi_A \cdot BW)$$

I : 紙を透過した後の β 線強度

I_0 : 紙を透過する前の β 線強度

χ_A : 紙の質量吸収係数 (m^2/g)

(紙の原料組成によって決まる定数)

BW : 紙の坪量 (g/m^2)

2・3 構成と仕様

2・3・1 構成

坪量計(B/M計)は大きく分けて、測定部、データ処理部、制御部の三つの基本パートから成り、それらを専用のデータウェイで結んだ機能水平分散型の構成となっている(図6)。

(1) 測定部

放射線を使用した坪量計を含む紙品質測定センサーを搭載した上下ヘッド部、それを走行させる駆動機構を持つフレーム部およびセンサーの測定データを演算処理するCPU部からなる。走査速度は25 m/分の高速走行を実現するため、フレームは軽量かつ高剛性のモノコック

図 5(2) 坪量と β 線透過強度との関係(ポリエステル標準フィルム)

図6 B/M計システム構成

構造となっている。

(2) データ処理部

CRT、キーボード、CPU およびハードディスクからなり、測定したデータの演算処理を行う。さらに品質データの表示、目標値の入力などオペレータとの対話の役割をも合わせ持つ。最近ではオペレータの作業を支援するガイダンス機能の強化や銘柄変更制御機能の高度化が進められている。

(3) 制御部

測定した値を目標値に維持するための制御演算を行い、制御用操作端へ制御信号を出力する。制御演算を行うCPUはプロセスと直接関わりがあるため、CPUダウン時もシステム全体が停止しないようCPUは二重化されている。

2・3・2 特性

(1) 放射線源

β 線源は測定する坪量に応じて厚手のものはクリプトン⁸⁵(⁸⁵Kr)を、また薄手のものにはプロメチウム¹⁴⁷(¹⁴⁷Pm)の線源を選択使用する。

⁸⁵Krは坪量範囲10～1200 g/m²に適し、ルビジウム(⁸⁵Rb)へ崩壊するときに0.687 MeVの β 線を放射する半減期10.76年の気体状人

工放射性核種である。坪量計に使用される⁸⁵Krはチタン製の容器に密封されている。

¹⁴⁷Pmは坪量範囲10～100 g/m²に適し、サマリウム(¹⁴⁷Sm)へ崩壊するときに0.224 MeVの β 線を放射する半減期2.623年の固体状人工放射性核種である。坪量計に使用される¹⁴⁷Pmはステンレス鋼製の基板上にセラミックエナメルとともに焼き固められた状態で、容器に密封されている。

(2) 電離箱

電離箱は上ヘッド内に収められ、 β 線の強度に対応した電離電流を得る。電離箱の内部には乾燥気体が封入されており、印加電極と集電極の両電極間にはDC 300 Vの電圧が印加されている。測定対象物(紙)を透過してきた β 線は、アルミ蒸着されたポリエステルフィルム製の窓部から電離箱内に入射する。窓部の直径は90 mm、検出効率は約5%で定期的に自動キャリブレーションが実施される。

(3) 外乱対策

測定に影響を及ぼす外乱には、紙の温度、雰囲気温度湿度、紙粉ダスト、静電気などがある。坪量計では、空気層1 mmは坪量換算で1.3 g/m²に相当するため、線源と電離箱間の空気層の密度変動をいかに補償するかが重要なポイントとなる。そのため検出ヘッド全体を恒温化し、さらに恒温化されたエアで線源と電離箱間の隙間や測定窓をエアパージし、空気層の温度変動や測定窓に堆積するダストを最小限におさえている。また、上下ヘッド間の距離や空気層の温度や気圧を測定し補正を加えたり¹⁾、線源を回転ボディー内に組み込み従来のシャッター機構をなくして線源を電離箱に極力近づけてS/N比を向上させる工夫をしている例²⁾もある(図7)。さらに一定時間ごとに検出ヘッドをオフシートさせ、自動的にゼロとスパンを調整し、堆積ダスト量や線源の減衰の補正を行ったり、ベースシャーシに取り付けた自己放電式除電器で静電気を除去することにより、外乱に対して安定かつ高精度な測定が可能になっ

図 7 改良型シャッター機構（メジャレックス社の例）

ている。

(4) オンライン検定

紙の原料組成や設置条件（雰囲気温度湿度や紙のばたつきなど）が精度に影響を与えるため、設置後はオンラインでの測定値とサンプリングした紙の実測値を比較し、精度の検定を定期的実施している。

2・3・3 仕様

(1) 測定原理： β 線透過型厚み計

(2) 測定範囲： ^{85}Kr ：坪量範囲 10 - 1 200 g/m^2

^{147}Pm ：坪量範囲 10 - 100 g/m^2

(3) 線 源： ^{85}Kr 15.54 GBq (420 mCi) ^{147}Pm 12.95 GBq (350 mCi)

(4) 線源交換周期：推奨 5 年

(5) 検出器：電離箱

(6) 紙の測定面積：25 mm ϕ

(7) 測定環境：

紙 温 度 0 - 100 $^{\circ}\text{C}$ （紙からの垂直距離が 10 cm 離れた位置の温度が 50 $^{\circ}\text{C}$ 以下のこと）

周囲温度 0 - 50 $^{\circ}\text{C}$ （水冷ユニット使用の場合 90 $^{\circ}\text{C}$ まで可能）

周囲湿度 20 - 90% RH（ただし結露がないこと）

2・3・4 精度（以下の精度は 2σ 値を示す）

(1) 標準サンプルを基準位置で測定した場合の繰返し精度： $\pm 0.2\%$ （ただし 100 g/m^2 以下は $\pm 0.2 \text{ g/m}^2$ ）

(2) 検出ヘッドに標準サンプルを搭載し、走査した場合の 1 走査ごとの平均値データの繰返し精度： $\pm 0.2\%$ （ただし 100 g/m^2 以下は $\pm 0.2 \text{ g/m}^2$ ）

(3) 走行特性に起因する精度： $\pm 0.2\%$ （ただし 100 g/m^2 以下は $\pm 0.2 \text{ g/m}^2$ ）

(4) オンライン測定時の計器精度： $\pm 0.3\%$ （ただし 100 g/m^2 以下は $\pm 0.3 \text{ g/m}^2$ ）

2・4 導入・使用にあたっての留意点

2・4・1 留意点

(1) 設置位置について

a センサーの設置位置は熱によるフレームの歪みやケーブルの劣化を防ぐため、ドライヤ直後など 60 $^{\circ}\text{C}$ 以上の高温雰囲気の所は避けること。

b 紙のばたつきや紙端のカールが大きい場合は押えロールを付けるかフリーな紙パスを短くし使用すること。

c 通紙ロープや通紙装置と測定ヘッドが干渉しないよう設置位置を決めること。

(2) 紙サンプルをあらかじめメーカーへ送り、銘柄別に質量吸収係数を決定しておくこと。

(3) 設置後、オンライン検定を定期的実施することが望ましい。

(4) 線源は 5 年ごとに更新する。

(5) フレーム内の稼動ケーブルは 5 年ごとに更新する。

2・4・2 安全面での留意点

(1) 線源容器の安全性

線源容器の構造や性能、試験方法などについては、日本工業規格「放射線厚さ計の線源容器」(JISZ4614-1973)³⁾に規定されている。

a 線源容器の放射線遮蔽能力

シャッター閉の状態、容器外面から 50 cm の距離で $6\mu\text{Sv/h}$ 以下であること。

b 線源容器の機構的安全性

線源容器自体の機構はすべて安全サイドに作動すること。たとえば、シャッターは停電時もしくは温度ヒューズが切れた場合 (110°C 以上で断) はスプリングの力でシャッター閉となる。

c 線源容器の耐火災安全性

線源容器は β 線の場合、まず β 線を遮蔽するため低原子番号の物質で線源を囲み、次に発生する制動放射線を遮蔽するため鉛などの高原子番号の物質で囲み、これらの遮蔽体を耐火性のステンレス鋼でおおう構造になっている。ちなみに鉛の融点は 327°C 、ステンレス鋼は 1400°C である。

(2) 線源部に隣接した保守作業時の留意点

「放射線障害予防規定」を遵守すること。

特に以下の点に留意すること。

a 作業日時、内容を事前に放射線取扱主任者に連絡。

b フィルムバッジなど放射線測定用具を携行。

c 必要以上に線源部に近寄らないこと。

d 放射線障害を予防するため保護眼鏡など保護具を着用すること。

e 作業前に線源部のシャッター閉を確認。

f 線源が漏洩した場合は人命の安全を最優先とし、かつ工程停止や製品出荷停止など放射能汚染拡大の防止に努めること。

2・4・3 概算費用

(1) 坪量・水分計 (B/M 計) 約 4 000 万円～

フレーム 1 本

データ表示用操作画面 1 台

流れ方向坪量および水分制御

専用ケーブル

(2) 工事費用 約 400 万円～

据付・配線・配管工事

(3) 納期 約 6 か月

2・5 実施例

B/M 計の検出器と O 型フレームの外観の例を図 8 に示す。O 型フレームの内側を紙が走行し、紙をはさんで上側検出ヘッドと下側検出ヘッドが同期して横方向に往復走査する。

B/M 計が抄紙機に設置された例を図 9 に示す。本例では塗工機前と最終リール前に B/M

図 8 B/M 計外観 (横河電機製 BM7000XL の例)

図 9 B/M 計の抄紙機への設置例

計が 2 台設置されており、製品の坪量だけでなく 2 台の B/M 計の坪量差から塗工量も測定している。ここでは B/M 計は総合品質測定制御システムの中核をなしており、紙の流れ方向の坪量・水分・塗工量制御ばかりではなく幅方向の各種制御アクチュエータにより幅方向の坪量・水分・紙厚制御が可能になっている。

またコンピュータにより幅方向および流れ方向の各種品質が測定され、オペレータにわかりやすいように統計処理され操作画面に表示される。幅方向品質プロファイルの画面表示例を図 10 に示す。さらに測定された各種品質や抄紙機の操業条件は上位の製品管理コンピュータへ伝送される。そのほか銘柄変更制御やスタートアップ制御、品質の幅方向の空間周波数解析機能などによりオペレータの操業を支援している。

B/M 計のシステム構成例を図 11 に示す。

3. 紙パルプ産業における利用普及への提言

RI 利用の測定機器は、非接触かつ非破壊で外乱に強いという長所があるものの、法規制の拘束を受けるという短所がある。

横軸：紙巾方向位置 縦軸：測定値の平均からの偏差（中央が±0）
BW：坪量（水分含む） BD：坪量（水分なし） MP：水分率

図 10 紙幅方向品質プロファイル画面例

規制緩和や微弱 RI 利用測定機器の用途開発が進めば、さらに RI 利用測定機器の普及が見込まれるであろう。

3.1 密封線源による放射線利用の規制緩和
紙パルプ産業で利用される RI は密封線源であり、現在の規制緩和の趨勢の中、効率的で簡素な行政運用が望まれる。

図 11 B/M 計のシステム構成例

特に、密封線源使用に対する許認可手続きの簡素化と迅速化、放射線利用の監督官庁の業務の効率化などが挙げられる。

3・2 密封線源使用者の事故時管理体制の充実

密封線源使用者側が自主的に事故時管理体制の充実を図ることは当然のことである。少量の密封線源であっても、事故時は非密封状態になるわけで、日頃からの事故時管理教育、事故時管理体制および事故時管理マニュアルなどの充実が必要である。

3・3 微弱 RI 利用測定機器の用途開発

法規制値以下（数量 3.7 MBq 以下または濃度 74 Bq/g 以下）のため放射線取扱主任者や

法令による届出が不要な微弱 RI 利用測定機器の用途拡大が望まれる。低線量による精度不足を補うための高感度検出器の開発や電子回路技術、計算機処理技術の開発が待たれる。実際、低線量の密度計はすでに市販されるなど、低線量化への利用者のニーズは大きく、そこにビジネスチャンスも大きく広がっていると思われる。

4. おわりに

赤外線などの代替技術と競合する中、RI だけが持ち得る長所を十分に発揮し、RI 利用の測定機器がこれからも紙パルプ産業の一助として発展していくことを期待したい。

文 献

- 1) 明円 隆：山武-アキュレイ・スマート坪量計，紙パルプ技術タイムス，**36**，(9)，24 (1993)
- 2) 設楽久敬：MX Open の新しい計測技術—Precision PLUS—，同上，**36**，(9)，18 (1993)
- 3) 日本工業規格「放射線厚さ計の線源容器」JISZ 4614-1973，(財)日本規格協会，昭和48年8月1日制定
- 4) 石川宏俊：連載 B/M 計講座 第1回，紙パルプ技術タイムス，**32**，69 (1989) 他
- 5) “紙パルプ製造技術シリーズ⑩ 紙パルプ計装・制御システム”，紙パルプ技術協会 (1992)
- 6) 日本アイソトープ協会編：“ラジオアイソトープ基礎から取扱まで”，丸善，東京 (1991)
- 7) “放射線障害防止法解説と手続便覧”，日本原子力産業会議 (1990)
- 8) “放射線計測器ガイドブック”，(財)日本電気計測器工業会放射線計測器委員会 (1992)