β線厚さ計について

ナノグレイ株式会社 代表取締役社長　宮下 拓

1. はじめに

β線厚さ計は、X線厚さ計とともにオンライン厚さ計の主流となっている。完全な非接触計測ができ、特に搬送系で他方式に比べ安定した測定ができるのが最大の特徴である。

X線管を発生源とするX線厚さ計は、一定の要件を満たせば資格者や管理区域の運用も不要となり[1]取扱いが楽であるので急速に普及しているが、X線厚さ計では目的が達成できない分野を中心にβ線厚さ計も根強い需要がある。β線厚さ計の方が優れている点は、

1）X線厚さ計に比べて薄い測定対象物で精度が得やすい
2）X線厚さ計と違って測定対象物の元素組成に依存せず、通常1つの校正条件で済む
3）発生源が放射性同位元素（アイソトープ）のため、X線管のように突然切れることがない

などが挙げられる。

β線厚さ計は、β線源としてクリプトン85やストロンチウム90などのアイソトープが装備されているので、使用にあたって原子力規制委員会の許可や放射線取扱主任者、さらに管理区域が必要なことが普及の妨げになっていたが、弊社は、微弱なβ線源を用いたβ線厚さ計について原子力規制委員会より「表示付認証機器」の認証を取得し、管理区域や資格が不要なβ線厚さ計を製造している。[2]「表示付認証機器」のβ線厚さ計の精度は十分ではないが、許可が必要なβ線厚さ計の用途の一部を置き換えたり、新規の用途に使用されたりしている。



図1. β線厚さ計 SB-1100（ナノグレイ（株）製）

2. 測定原理

β線の実体はアイソトープから発生する高速の電子の流れである。β線を発生するアイソトープ（β線源）を検出器と対向させて配置し、その中間にフィルムなどのウェブを置くと、β線はそのウェブでの散乱によって方向が曲げられることなどにより、検出器に入射するβ線の量は減衰する。

ウェブの厚さをt、密度をρとすると、

$$N = N_0 \cdot exp(-(\mu / \rho) t \rho) \quad 1)$$

μ / ρ：質量減弱係数 [m^2/kg]

t：ウェブの厚さ [m]

ρ：ウェブの密度 [kg/m^3]

という式で表される。μ / ρは質量減弱係数という値である。質量減弱係数は、β線の最大エネルギーによって定まり、物質の種類（元素）にはほとんど依存しないとされる。

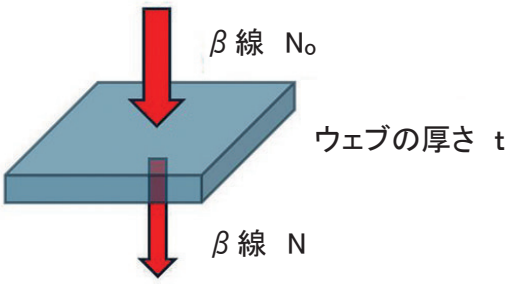


図2.　β線の透過(式 1）の説明)

SB-1100では信号は入射したβ線の数に比例した直流電流として得る。これを検出部の増幅回路で電圧値に変換する。得られる電圧値もβ線の入射数に比例するので、上の式のNをV、N_0をV_0に置き換える。

$V = V_0 \cdot exp(-(\mu / \rho)\ t\ \rho)$　2)

V：透過してきたβ線の検出電圧

V_0：ワークが無いときのβ線の検出電圧

さらに、測定対象物の密度ρが一定の時は、定数$\mu = (\mu / \rho)\ \rho$として、厚さt [m]を変数とすると、

$V = V_0 \cdot \exp(-\mu\ t)$　3)

μ：線吸収係数

となり、また密度、厚さが変化する場合は単位面積あたりの重量(坪量、面密度) T [kg/m^2]= t ρとしてこれを変数とし、

$V = V_0 \cdot exp(-(\mu / \rho)\ T)$　3')

となる。μ及びV_0は定数であるので、電圧Vを測定することにより厚さtあるいは重量Tが算出できる。

SB -1100ではパラメータV_0とμは、厚さtの判っている複数のサンプルに対する検出電圧Vから式 3）の連立方程式を使って求める。この作業が校正である。

上記の校正の際に、式 3') で示すように、サンプルの坪量(目付) で値付けすれは、SB -1100は坪量(目付) 計となる。つまり、同じ装置で校正方法を変えるだけで、厚さ計としても坪量(目付) 計としても使用できる。

厳密に言うと式 3）は密度ρが一定であることが前提なので、本質的にはSB-1100は坪量(目付) 計であり、サンプルの密度が一定である場合には厚さ計としても使用できるというのがより正確である。

一般的にこのような説明は難しいので、SB-1100をフィルム業界に対しては「β線厚さ計」と説明し、製紙業界、電池(電極) 業界に対しては、「β線目付 (重量)計」と説明している。

3.　β線厚さ計の原理的な特徴

1）完全な非接触計測

X線厚さ計でも同様であるがβ線厚さ計の原理的な最初の特徴は完全な非接触計測である。測定部が高速で搬送されるウェブにひっかかったり傷をつけたりする恐れがない。それ以外にも以下のような特徴がある。

2）搬送系での優れた安定性

搬送系での計測誤差の要因は、フィルムなどのウェブの搬送による振動である。例えば、レーザ変位計を上下に挟み込んで、それぞれの変位計からウェブ上面・下面までの距離を測定して残りをウェブの厚さとする測定法の場合、ウェブが搬送により数十～数百μmの上下動をしているので測定するタイミングによって各変位計の数値が大きくバラつく、従ってウェブ厚さの算出には上下それぞれの変位計の測定タイミングを完全に一致させることが必須となるが、現実にはわずかなタイミング差が残るのでどうしても誤差が生じてしまう。反射式赤外厚さ計も同様に搬送の影響を受ける。

ではβ線厚さ計での搬送による振動の影響は？β線厚さ計は測定対象のウェブの上下に配置されたβ線源と検出器の間の坪量(目付) を透過で見ている。a)ウェブとβ線源の間の空気層の坪量(目付)、b)ウェブの坪量(目付)、c)ウェブと検出器の間の空気層の坪量(目付) これら a)+ b)+ c)の３つの合計を計測している。搬送の振動によって a)と c)はそれぞれ変動するが、透過測定なのでa),b),c)の測定タイミングは完全に一致し、a)+

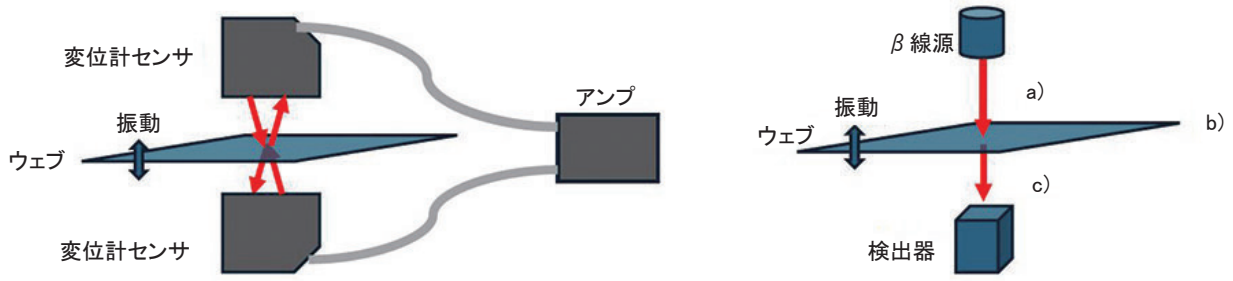


図3.　搬送系(振動) の影響(変位計 (左)とβ線厚さ計(右))

c)は一定となる。つまり b)本来の坪量(目付）のみが残り、搬送による坪量(目付）の変動は打ち消されてしまう。これが搬送系でのβ線厚さ計の優れた安定性の理由である。

3）薄い測定対象物で精度が得やすい

β線の実体はアイソトープから発生する高速の電子の流れである。電磁波であるX線に比べて透過性が低く、わずかな厚さの差でも透過性に違いがでるので、薄い測定対象物で精度が得やすい。

4）測定対象物の組成に依存しない。

「2. 測定原理」でβ線厚さ計の検出電圧が測定対象物の単位面積当たりの重量にしか依存していないと説明した。X線厚さ計では元素の種類にも大きく依存するので校正曲線がいくつも必要になる場合があるが、β線では元素の種類に依存しないので、校正曲線は通常１つで済む。

5）異種の積層フィルムも測定できる

異種の積層フィルムの成形中の厚さをインライン測定する場合、層比が変化するとX線厚さ計では大きな誤差となるがβ線厚さ計ではわずかな誤差に留まる。

例えば、ポリアミド(PA、厚さ 50μm）とポリエチレン(LDPE、厚さ 50μm）からなる総厚さ 100μmの２層フィルムを共押出したフィルムの厚みを成形中に測定する場合を考える。成形中には全体の厚さや各層の比率が変化する。全体の厚さが 100μmから 120μmになった場合、厚さは 100μmのままで各層の比率が50%/50%から 40%/60%あるいは 60%/40%になった場合の、X線厚さ計やβ線厚さ計の(層比 50%/50%で校正した場合の）理論的な測定値を図１に示す。各層の比率は 50%/50%で維持したまま全体厚さが 120μmとなった場合は、X線厚さ計とβ線厚さ計の測定値に違いはない。

一方、厚さ 100μmを維持したまま、各層の比率を変化させると、ポリアミドの方がポリエチレンより密度が高いため、厚さは変わらないのに目付が変化するためβ線厚さ計で 2%ほど見かけの誤差が出る。X線厚さ計では、この目付による誤差に加えて、組成依存性の影響で誤差が 5%ほどに拡大される。

4. ナノグレイ製β線厚さ計の特徴

上記のようにβ線厚さ計は優れた特徴を有するが、さらに弊社のβ線厚さ計 SB-1100にしかない特徴を以下で説明する。

1）高精度と安全性を両立

β線厚さ計の検出器としては電離箱が一般的である。電離箱は入射したX線が内部のガスを電離させ、発生する微弱な電流を検出する。ガスは密度が低いので、大半のβ線が透過してしまい検出効率は悪い。

ナノグレイの SB-1100は、検出器として固体シンチレータと光電子増倍管の組み合わせを採用している。

シンチレータはβ線が入射すると発光し、その光を光電子増倍管によって電気信号に変えて検出する。固体シンチレータは、ガスよりはるかに密度が高いためβ線の検出効率は高く、電離箱方式に比べて低出力のβ線管でも同等の精度が得られる。結果として漏洩線量が少なく安全な装置となる。

2）塗工端部が見やすい

塗工されたウェブを測定する場合には重要な点の１つである。

例えば、電池の電極製造工程には、金属箔上に一定間隔で電極薬剤を数 cm幅で複数塗工する方式がある（ストライプ塗工と呼ばれる)。塗工厚さ(重量）は数cmの塗工幅全部について検査したいが、電離箱のような大きな検出器では、塗工幅と検出エリアサイズがほぼ同じで、隙間に被ることなく数 cmの塗工部のみを見るのが困難であり、塗工パターンが正しく測定できない。

表1. 2層フィルムの層比とβ線厚さ計、X線厚さ計の指示値

層構成(PA/LDPE)(μm)	50/50	60/60	40/60	60/40
層比(PA/LDPE)(%)	50/50	50/50	40/60	60/40
実際の総厚さ(μm)	100	120	100	100
β線指示値(μm)	100	120	98.0	102.0
X線指示値(μm)	100	120	94.9	105.2

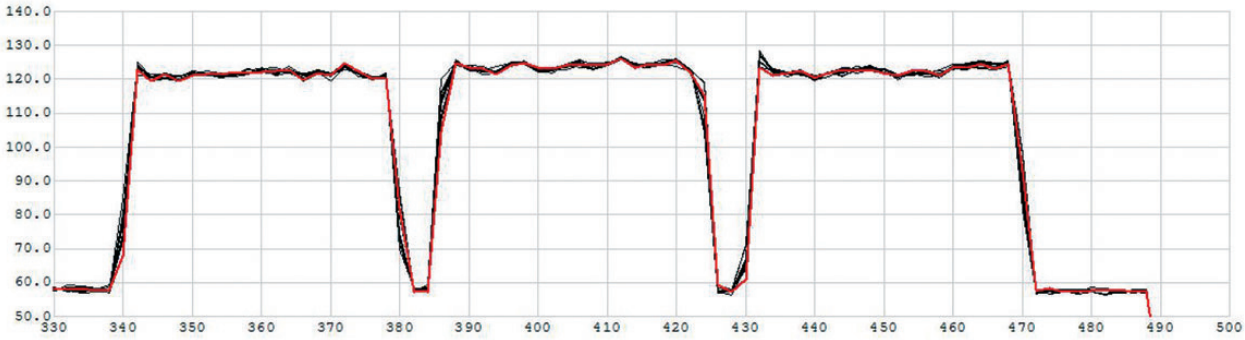


図4. SB-1100による電池電極測定例（幅方向の重量分布）

SB-1100のシンチレータ検出器では、検知エリアを絞ることで塗工パターンを正しく再現でき、正確な厚さ（重量）を測定することができる。（図4）

5. 最後に

このようにβ線厚さ計は他の計測法では実現できない特徴があり、資格や管理区域が必要であるのにもかかわらず引き続き使用されている。さらに、資格や管理区域の不要な「表示付認証機器」のβ線厚さ計は、これまでβ線厚さ計が使われていなかったプリプレグなどの新分野で使用が増えてきている。これからもβ線厚さ計に対する理解を広げていきたい。

参考文献

1）昭和 64年 1月 1 日基発第 1 号　第 2 細部事項　Ⅲ 新設･改正した規定について　36 第 46条関係、平成 8 年 12月 16日東基発 916号、平成 8年 12月 26日基収第 917号、労働安全衛生規則及び電離放射線障害防止規則の一部を改正する省令の施行等について　平成 13 年 3 月 30 日基発第 253 号　第 3 細部事項.
2）宮下　拓: ウェブジャーナル , 23(5),p.24 (2017).