X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

X線厚さ計は、β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。ただβ線厚さ計はクリプトン85やストロンチウム90などの放射性同位元素（アイソトープ）が装備されており、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る。

一方、X線厚さ計も以前は使用にあたってX線作業主任者の資格や管理区域が必要であったが、昭和64年の法改正[1)]により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、現在では取扱いが随分楽になっている。

以下に弊社のX線厚さ計SX-1100を例にして、測定原理や他の測定法にない特徴などを説明する。

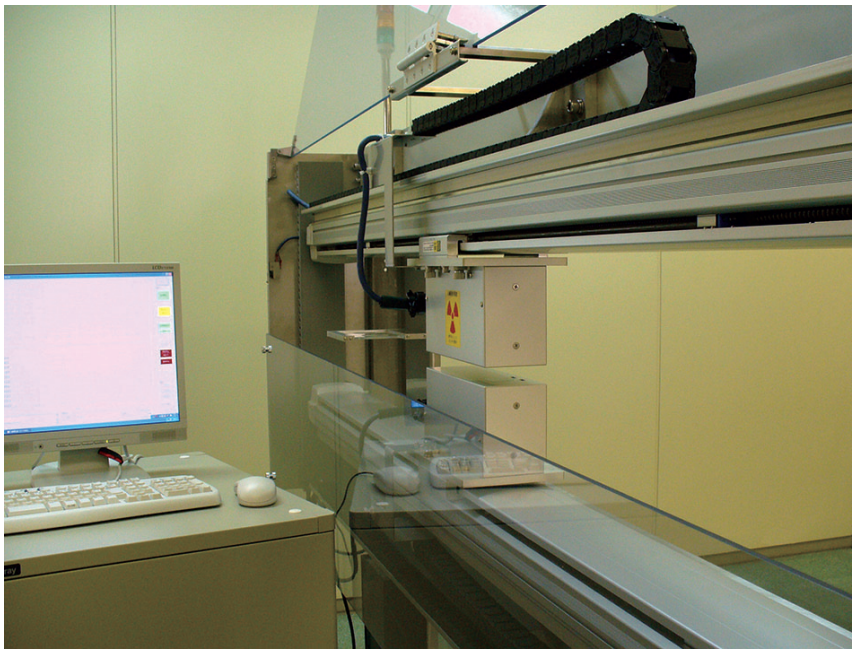


図1．X線厚さ計　SX-1100（ナノグレイ（株）製）

2.　測定原理

X線は光や電波と同じ電磁波である。高電圧で加速した電子をターゲットにたたき込むことによって放出される電磁波をX線と呼ぶ。X線は電磁波であるとはいえ、1Å（オングストローム）以下と波長が短いため、物質に照射すると、あるものは衝突して止まりあるものは透過するという粒子的な振る舞いをする。この透過するX線の量Nは照射する物質に含まれる元素、密度、厚さによって変化する。含まれる元素が一様で変化しない場合、透過するX線の量は厚さtに依存し、

$N = N_0 \cdot exp\left(-\left(\mu / \rho\right) t \rho\right)$　　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、X線のエネルギーと測定対象物を構成する元素によって決まる定数（線吸収係数）を密度ρで割ったものである。

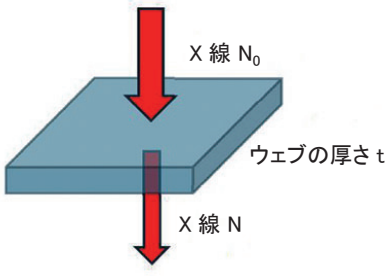


図2．X線の透過（式1）の説明）

一般の放射線計測では、一つ一つの放射線をパルス式により計数するが、SX-1100 では単位時間あたりに検出器に入るＸ線の数が多いため、信号は入射したＸ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Ｘ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Ｘ線の検出電圧

V_0：ワークが無いときのＸ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] ＝ｔρ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。

SX-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、SX-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 SX-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、SX-1100 をフィルム業界に対しては「Ｘ線厚さ計」と説明し、製紙業界、電池（電極）業界に対しては、「Ｘ線目付（重量）計」と説明している。

3.　Ｘ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Ｘ線厚さ計での搬送による振動の影響は？　Ｘ線厚さ計は測定対象のウェブの上下に配置されたＸ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Ｘ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) ＋ 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Ｘ線厚さ計の優れた安定性の理由である。

３）測定対象物に制約がない

「２．測定原理」で検出電圧が測定対象物の構成元素、密度、厚さにしか依存していないと説明した。これは、測定対象物の色や表面状態などに関係なく測定できることを示す。黒色物でも金属などでもＸ線が透過できれば測定できる。

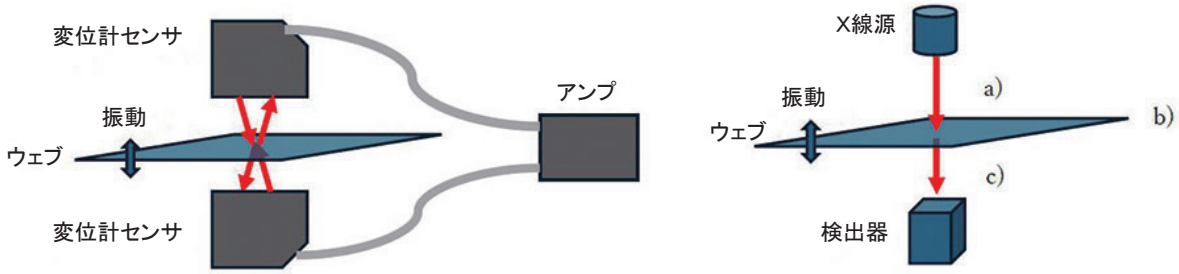


図3. 搬送系（振動）の影響（変位計（左）とX線厚さ計（右））

4. ナノグレイ製X線厚さ計の特徴

上記のようにX線厚さ計は優れた特徴を有するが、さらに弊社のX線厚さ計SX-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

X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線が電離箱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X線が透過してしまい検出効率は悪い。

ナノグレイのSX-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X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軟X線の検出効率は高く、電離箱方式に比べて低出力のX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）測定対象物が広い

「2．測定原理」の式1)にも示したように、X線の透過性はX線のエネルギーに依存し、エネルギーが高いほど透過性は高くなる。また測定対象物の元素にも依存する。図4に示すように原子番号に従って、X線の減衰は急激に大きくなる。フィルム用途のX線厚さ計のX線管は管電圧10kV弱程度のものが使用されているが、SX-1100は5kV~40kVまで管電圧を変えられるX線管を採用し、発生するX線のエネルギーを広く制御できる。これにより、測定できる元素の種類が大幅に拡大し、測定対象物の範囲が広くなる。

3）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。

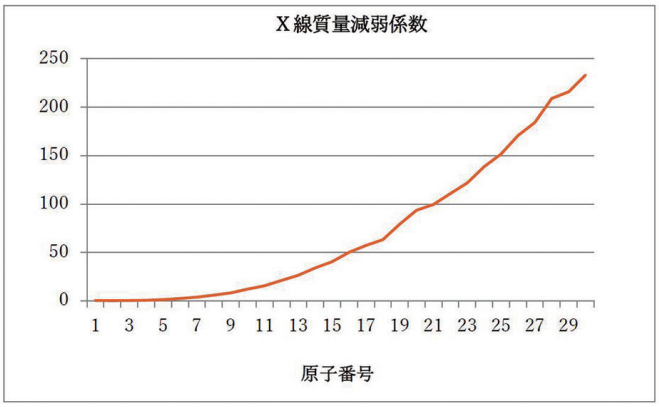


図4．X線減衰の元素依存性
（10keVにおけるX線質量減弱係数（μ／ρ））

（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。SX-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5）

5. 最後に

このようにX線厚さ計は他の計測法では実現できない特徴があるので、これにさらに弊社独自の技術を加えることでその特徴をより活かす製品を提供していきたい。

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.

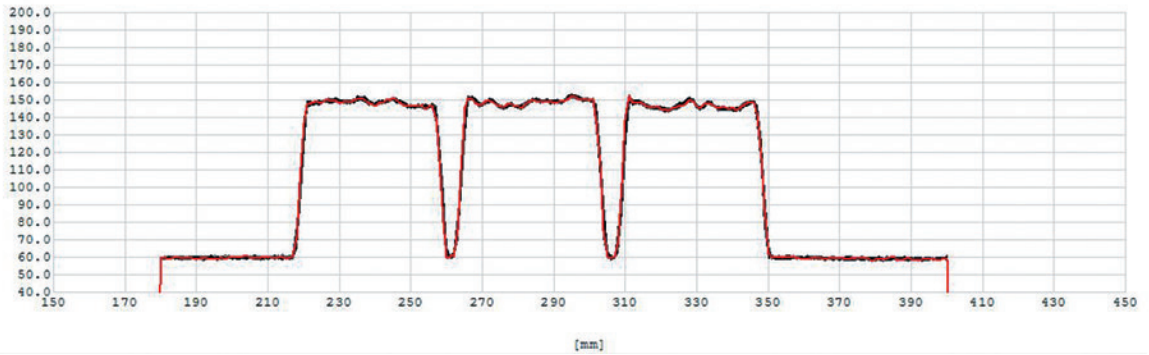


図5．SX-1100による電池電極測定例（幅方向の重量分布）

nanoGray ナノグレイ株式会社
〒562-0035　大阪府箕面市船場東 1-11-16
Tel.072-726-4000　　Fax.072-726-4010
URL https://www.nanogray.co.jp/