表1 装 備 機 器 の 使 用 台 数¹⁾

名 称	医 療	教育・研究	民 間 企 業					
	1972	1972	1963	1968	1969 ⁴⁾	1970	1971	1972
照 射 器	479	347	168	336	422	514	565	580
厚 さ 計	—	46	124	647	503	654	537	639
レ ベ ル 計 ²⁾	—	19	146	498	643	739	494	593
密 度 計 ³⁾	—	85	28	190	161	230	242	304
水 分 計	—	67		195	98	122	137	161
気 圧 計	—	6		34	54	54	49	23
ガスクロマトグラフィ装置	—	690	0	42	53	77	99	179
イ オ ウ 分 析 計	—	47	0	48	81	100	88	147
そ の 他	—	28	38	85	62	77	84	105
合 計	479	1,335	538	2,095	2,077	2,562	2,269	2,726

1) 科技庁原子力局編 放射線利用統計より

2) 原文では液面計

3) 含泥率計を含む

4) 1969年より統計のとり方が異なった。

理, 構造だけでなく, これらいままでに記述のないもの
のなるべく多く取り入れて従来の総説, 紹介記事以

上のものを目標としてももらいたいと考える。

厚 さ 計 (1)[†]

清水 雅 美

富士電機製造株式会社

東京都日野市富士町1

1. 放射線透過形厚さ計

1.1 誤差と放射線源の関係

放射線透過形厚さ計は, 放射線源と検出器を測定物をはさんで対置させ, 測定物を透過してくる放射線量を測定することによって測定厚さを求めようとする方式で, その検出放射線量 F は, 測定厚さ x に対し,

$$F = F_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

なる指数関数として表わされる。ここで μ は吸収係数, F_0 は測定物がないときの検出量である。 F は, 測定物厚さ x の関数で, 厚さ計の方式によって変わり, その特徴を代表するので, 特性関数といわれる。

さて検出量 F には雑音が混入してくるので, 測定誤差を生じるが, 解析しやすいようにつぎのように分類して検討してみる¹⁾。

(1) 統計揺動誤差

放射線源より発する放射線量の統計的ゆらぎに起因するもので,

$$(\Delta x)_{\text{stat}} = \sqrt{\frac{2\langle q \rangle \{1 - (\sigma_q / \langle q \rangle)^2\} \langle F \rangle}{RC}} \cdot \left(\frac{1}{\partial F / \partial x} \right) \doteq \sqrt{\frac{2\langle q \rangle \langle F \rangle}{RC}} \cdot \frac{1}{(\partial F / \partial x)} \quad (2)$$

の形になる²⁾。ここで, σ_q は q の揺動の標準偏差, CR は回路の時定数である。

(2) 定数形誤差

検出器や測定回路に生ずる検出量に無関係な雑音に起因する誤差で, その雑音成分を $\Delta\beta$ とすれば,

[†] Nuclear Radiation Thickness Gage (1), Masami SHIMIZU: Nuclear Instrument Division, Tokyo Factory, Fuji Electric Co.Ltd., Fuji-cho 1, Hino-shi, Tokyo.

$$(\Delta x)_{\text{const}} = \frac{(\Delta \beta)}{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)} \quad (3)$$

となる。

(3) 比例形誤差

検出器や電子回路にはいつてくる雑音のうち、信号成分に比例する量で検出系の感度変化として現われてくる雑音に起因する誤差である。比例定数を α とすれば、

$$(\Delta x)_{\text{prop}} = \frac{\alpha F}{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)} \quad (4)$$

となる。

(4) 関数形誤差

(1)式で表わされる特性関数そのものが変化を受ける場合がある。これは線源、検出系の幾何学的配置や放射線束の変化などの原因が考えられ、みかけ上吸収係数の変化として表わされる。 μ の変化を $(\Delta \mu)$ とすれば

$$(\Delta x)_{\text{funct}} = \frac{\Delta \mu}{\mu} \cdot (x) \quad (5)$$

となる。

これらの誤差のうち(2)~(4)式で表わされるものは特性関数 F によって変化するので、(1)式を代入すると、それぞれ

$$(\Delta x)_{\text{stat}} = \sqrt{2 \langle q \rangle} \cdot \frac{\exp\left(\frac{\mu x}{2}\right)}{RC F_0 \mu} \quad (6)$$

$$(\Delta x)_{\text{const}} = \frac{\Delta \beta}{F_0} \frac{\exp(\mu x)}{\mu} \quad (7)$$

$$(\Delta x)_{\text{prop}} = -\frac{\alpha}{\mu} \quad (8)$$

となる。 $(\Delta x)_{\text{stat}}$ と $(\Delta x)_{\text{const}}$ は検出効率をあげ、使用 RI を増加して検出量 F_0 を大きくすれば小さくなり、それらの条件を一定にすると測定厚さ x のとき、誤差を最小にする吸収係数 μ_{opt} が存在し、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\text{opt}} &= \frac{2}{x} \cdots \cdots (\Delta x)_{\text{stat}} \text{ 最小} \\ &= \frac{1}{x} \cdots \cdots (\Delta x)_{\text{const}} \text{ 最小} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

となる。また $(\Delta x)_{\text{prop}}$ は放射線検出量には無関係で吸収係数のみの関数となる。

このように放射線透過形厚さ計では測定厚さに適した吸収係数 μ_{opt} をもった放射線を使用するのが有効であり、

$$\mu_{\text{opt}} \cdot x = 1 \sim 2 \quad (10)$$

であることがわかる。実用的な測定範囲としては

$$\mu x = 0.5 \sim 4 \quad (11)$$

程度が適当である。例として、3種類の β 線を透過形厚さ計に使ったときの測定厚さと誤差の関係を $\langle q \rangle$, τ , F_0 , $\Delta \beta$, α を固定して図示したのが、図1である。

1.2 β 線透過形厚さ計

β 線は γ 線に比較して透過力が小さく吸収係数が大

図1 β 線種の相違による誤差の変化

きいので、紙、プラスチックフィルム、金属ハク、薄銅板等の薄い物体の厚さ測定に応用される。

現在よく使用されている β 線源は ^{14}C 、 ^{85}Kr 、 ^{90}Sr 、 ^{147}Pm 、 ^{204}Tl 等である。

1・2・1 検出系

1・2・1・1 検出器

基本的には β 線を感度よく検出できるものならば何でもよいが、厚さ計用としては、高い β 線量でも測定できる($10^6 \sim 10^8$ 個/s)ように分解時間が小さく、検出感度の経時・温度変化が小さいことが重要になる。現在このような観点から、 β 線厚さ計の検出器は空気またはアルゴンを電離用気体にした電離箱が広く使われている。電離箱の特性は、ガスの種類、圧力、電極構造、材質などにより変わるが、大略の特性として、

β 線 1 個の検出によって生ずる電荷

$$q \approx 10^{-13} \text{ クーロン}$$

印加電圧 $50 \sim 300 \text{ V} / 10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ A}$

安定性 $\alpha = 10^{-3} / 10^\circ \text{C}$

の値をもっている。

1・2・1・2 検出系の安定性と方式

放射線源と検出器との距離を $l \text{ cm}$ とすれば、ここには

$$t_{\text{air}} = 12.9 \times l \text{ g/m}^2 \quad (12)$$

の空気の層が存在し、測定用 β 線は測定物にこの空気層 t_{air} を加えた厚さを測定している。しかし空気の密度は気温や気圧により敏感に変化するので、 t_{air} が変わり、比例形誤差の要因になる。

仮に l を 5 cm とすれば常温における比例形誤差の定数は、線源を ^{85}Kr として $-6.4 \times 10^{-4} (^\circ\text{C})^{-1}$ になり、これによる比例形誤差は、 $-0.2 (\text{g/m}^2) (^\circ\text{C})^{-1}$ になる。このように測定厚さが小さくなると空気密度変化が指示誤差に影響をおよぼすことになるので、これを消去してやらなければならない。

1・2・1・2・1 空気密度変化の長周期的補償法

(1) 温度補償法

α_{air} は気温と気圧の関数であるが、このうち気温を熱電対等の温度計で測定し電子的に厚さ指示信号に補正を行ない、気圧に関しては適当な周期で自動校正を行なって、測定物がない空気層のみの厚さに対応する放射線検出量がつねに一定となるべくゲイン調整をする方式が実用化している。この方式の系統図を図2に示す³⁾。この方式は急激な気圧変化にはついていけないが、次項の方式に比較して放射線源、検出器が1対ですむこと、線源容器、検出器間に塵埃や異物が付着した場合でも自動校正で補正してしまうことなどの

図2 温度補償形 β 線厚さ計の信号系統図

(1) 半固定式差動形厚さ計

(2) 零位式差動形厚さ計

図3 差動電離箱形厚さ計

利点をもつ。

(2) 差動電離箱形

これは放射線源と電離箱を2対使用し、一方で測定物厚さを、他方で放射線透過量を調節できるくさびの厚さを測定して、両方の電離箱出力の差を取り出す方式で、図3に半固定式と零位方式とを示す。この場合、線源検出器間距離は測定系、比較系で等しくするのはもちろん、その間に存在する空気密度も等しくし、電離箱も電離ガス圧、温度等の条件を同じにする必要がある。

半固定式は比較系のくさびを半固定にして用いるもので、測定厚さを x 、設定されたくさびの厚さを x_0 、測

定系および比較系の特性関数を F_m , F_r とすれば、系全体の電離電流出力で表わした特性関数 F は、

$$F = F_m - F_r \\ = F_{m0} \cdot f_m(x) - F_{r0} \cdot f_r(x_0) \quad (13)$$

となる。2つの系の F_{m0} , F_{r0} は等しくすることができて、それを F_0 とし、 x と x_0 との偏差は小さいものとして δx で表わせば、

$$F = F_0 \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x_0} \cdot \delta x \quad (14)$$

となる。2つの系の比例形雑音による効果が等しければ、比例形雑音は F に比例してくるので、比例形誤差は

$$(\Delta x)_{\text{prop}} = \frac{\alpha F}{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)} \\ = \frac{\alpha F_0 \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x_0} \cdot \delta x}{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)} \quad (15)$$

となり、単電離箱形に比較して $(\mu \delta x)$ 倍になることがわかる $(\mu \delta x < 1)$ である。

図3中の高抵抗は大概 $10^{10} \Omega$ の値をもっていて、現在のところ炭素被膜または金属酸化物被膜形で温度特性が $500 \sim 2000 \text{ ppm}$ 程度ある。この値は温度が変わればそのまま比例形誤差の比例定数になり、実用的な温度変化である $\pm 5^\circ \text{C}$ に対して 10^{-2} の大きさとなって単独では厚さ計としての性能が得られないことになる。そのため図2の例でも高抵抗は恒温そうに入れるなどしてその温度特性を抑制して使用している。

差動電離箱方式にした場合は高抵抗の変化に起因する比例形誤差は(15)式で表わされることになり、やはり単電離箱方式に比較して $(\mu \delta x)$ 倍に軽減され、実用的にも恒温そうを使用しなくてもよいようになる利点をもっている。

また電離箱の検出感度も電離ガスの圧力にほぼ比例して変わるので、単電離箱だと電離箱の気密が重要になるが、透過力の小さな低エネルギー β 線の検出には入射窓厚を小さくしなくてはならないので、技術的に困難になってくる。この点も差動電離箱にすれば、気密性は要求されなくなる利点をもつ。

しかし、統計揺動を調べると、

$$(\Delta F)_{\text{stat}} = \Delta(F_m - F_r)_{\text{stat}} \\ = \sqrt{2} (\Delta F_m)_{\text{stat}} \text{ または } \sqrt{2} (\Delta F_r)_{\text{stat}} \quad (16)$$

となって単電離箱に比較して大きくなる。実用的には比較系の信号はたびたび変動するものではないので、

図4 比較系の応答を下げて統計揺動誤差を減少させる差動電離箱方式

比較系の電離箱出力側のみに低域通過フィルタを入れて比較系の応答を下げることで、比較系の統計揺動を小さくする方式も考案されて、実用に供されている⁴⁾。図4に回路をあげておく。

零位方式は図3の(2)に示したように、差動電離箱出力をサーボ増幅器に結合して比較系のくさびの厚さを加減するサーボモータを駆動し、つねに差動電離箱出力が零になるようにフィードバックをかけるもので、厚さ出力はくさびの変位量で電気変換して取り出す。この方式であると、(14), (15) 式中の δx は零になるので比例形誤差は論理的には完全に除去しうることになる。欠点は系が複雑になることである。

1.2.1.2.2 空気密度変化の短周期的補償法

β 線厚さ計で感度を上げて厚さ測定を行なうと、放射線の統計揺動とはべつの揺動が指示に現われる。これも空気密度変化による指示の誤差で、この補償には通常ブローイングが効果がある。図5はブローイングの効果を実測した記録で⁵⁾、線源、検出器間に空気を吹き込むことにより、指示の揺動成分が減少するのがよくわかる。

図5 β 線厚さ計におけるブローイングの効果 (測定物、上質紙)

1.2.2 実用機と特性

β 線厚さ計の測定対象であるプラスチックフィルムや紙の製造中の幅は、1 m くらいから 10 m に近いものまで各種あり、全幅にわたる厚さ測定が要求される

表 1 一般的な β 線透過形厚さ計の性能

使用線源と測定範囲

 ^{147}Pm 2~160 g/m² ^{85}Kr 5~1,000 g/m² ^{90}Sr 50~6,000 g/m²

測 定 面 積 約50×140 mm

測 定 物 幅 1.4m以下 C形移動装置使用

1 m以上 O形移動装置使用

移 動 装 置 仕 様

	定点測定	スキャニング測定	プロフィール測定
スキャニング 幅 設 定	—	リミットスイッチ 付 電 子 式	電 子 式
移 動 速 度 (標準)	9 m/min	3 m/min 0.5~3 m/min 1~6 m/min	3 m/min 0.5~3 m/min 1~6 m/min
適用移動装置	C 形	C 形, O 形	C 形, O 形

電 源 AC 100 V, 50/60 Hz, 約 500 VA

精 度

各厚さにおける各誤差の例を示す

使用線源	測 定 厚 さ (g/m ²)	5	20	50	100	160	備 考
^{147}Pm 50mCi	短 周 期 誤 差 $\left(\frac{2 \text{ 秒}}{2 \sigma}\right)$	1.8	0.5	0.3	0.22	0.25	gap 10mm
	長 周 期 誤 差 $\left(\frac{10\text{H}}{7^\circ\text{C}}\right)$	4.4	1.1	0.44	0.23	0.15	時定数 2 秒
	パスライン誤差(± 2 mm)	1.2	0.5	0.35	0.32	0.32	
	ス キ ャ ン 誤 差	2.76	0.75	0.35	0.21	0.17	スキャン補 正なし

使用線源	測 定 厚 さ (g/m ²)	10	80	200	500	1000	備 考
^{85}Kr 40mCi または 1000mCi	短 周 期 誤 差 40mCi	2.3	0.32	0.16	0.11	0.11	gap 15mm
	(2 秒 2 σ) 1000mCi	0.89	0.13	0.10	0.05	0.05	時定数 2 秒
	長 周 期 誤 差 $\left(\frac{10\text{H}}{7^\circ\text{C}}\right)$	2.25	0.30	0.15	0.10	0.05	
	パスライン誤差(± 2 mm)	0.76	0.33	0.33	0.33	0.33	
	ス キ ャ ン 誤 差	2.76	0.37	0.18	0.10	0.07	スキャン補 正なし

使用線源	測 定 厚 さ (g/m ²)	200	500	1000	3000	6000	備 考
^{90}Sr 30mCi	短 周 期 誤 差 $\left(\frac{2 \text{ 秒}}{2 \sigma}\right)$	0.38	0.2	0.1	0.07	0.12	gap 15mm
	長 周 期 誤 差 $\left(\frac{10\text{H}}{7^\circ\text{C}}\right)$	0.52	0.22	0.12	0.06	0.05	時定数 2 秒
	パスライン誤差(± 2 mm)	0.82	0.47	0.3	0.2	0.12	
	ス キ ャ ン 誤 差	0.61	0.26	0.15	0.08	0.07	スキャン補 正なし

(注) ・精度は測定厚さによって異なるので数点の厚さに対する4つの誤差で規定します。
 ・精度は測定厚さの±%で示します。

ことが多い。2 m以上の広幅の測定には、O形移動装置が使われる。これは線源容器と検出器をそれぞれ平行な2本のレールに沿ってべつべつに周期的に駆動し、移動可能幅にわたって厚さ測定が可能である。O形移動装置は、スペースファクタはよいが、線源容器と検出器の相対的位置のずれによる指示誤差を抑えるように各種の注意を払わなくてはならない。

これに対し比較的狭い幅の測定物については、C形移動装置が使用される。これは線源容器と検出器とを堅固なC形のフレームで結合しているの、測定できる幅は実際上2 mくらいであるが、O形移動装置に比較して構造が簡単でスキャン誤差もなく、保守がしやすい等の利点をもっている。

1.2.2.1 性能

β 線透過形厚さ計の性能を表1にまとめておく⁶⁾。測定範囲や誤差の一部は、使用線源量により変動するので、本表の数値が必ずしも限界ではない。

1.2.2.2 プロフィール測定用厚さ計

製造中のシート状測定物の幅方向の厚さムラ管理は、品質保証上重要な問題であるが、この幅方向の厚さムラをとくに精度よく測定し指示するための厚さ計が開発されている^{7),8)}。またプロフィール(幅方向の厚さムラ)を何回か測定し、それらの平均プロフィールを得る形の厚さ計も実用化されている⁹⁾。

プロフィール測定用厚さ計は、線状線源を使用し、絞り孔や検出器入射窓をくふうして、静的測定面積の幅を極力小さくするようにするとともに、応答性をあげて測定ヘッドの速い移動速さにも指示が追従できるようにしている。指示にはX-Yレコーダを用い、測定物の幅方向を横軸に、厚さを縦軸にして記録し、プロフィールを視覚的にとらえ得るようにしているものが多い。図6にプロフィール厚さ計の空間的インディシャル応答の例を示す。

1.3 γ 線透過形厚さ計

γ 線は β 線に比較して透過力が大きいので、金属板などさらに厚い物体の測定に使用される。実用的な γ (X)線源は、⁵⁵Fe、⁶⁰Co、¹⁰⁹Cd、¹³⁷Cs、²⁴¹Amなどである¹⁰⁾。

1.3.1 検出系

β 線厚さ計の場合は測定厚さが小さいので、測定ギャップに存在する空気密度の揺動が指示に影響をおよぼしたが、 γ 線厚さ計では測定範囲が大きいほうへ移行するのでこの種の誤差は問題にならない。その代わり、設置される環境が金属板製造工場であり、測定物

図6 プロフィール厚さ計の空間インパルス応答の例

の温度、周囲の湿度なども高い場合が多いので、検出系の種類、構造に注意が払われている。また γ 線は透過力が大きいので、そのしゃへいも考慮されなくてはならない。

実用機に使用されている検出器はほとんど電離箱である。 γ 線検出にはNaIシンチレータのほうが10倍以上の高い検出効率をもっているのであるが、分解時間が 10^{-6} s程度であること、安定度が低い等のために特殊な場合しか用いられていない。安定度を補償する意味から、 γ 線変調方式や比較方式の例も発表されているが^{11),12)}、構造が複雑になるなどの原因で電離箱にとっかわるところまでいっていない。

電離箱には、Ar、Xeを数気圧以上つめて検出効率を高めている。とくにXeをつめた電離箱の低エネルギー γ (X)線に対する検出効率の向上は著しく、²⁴¹Amの γ 線(60 keV)に対しては30~60%程度になる。 γ 線厚さ計で使われる電離箱の一般的な特性は、

検出効率	$1 \sim 5 \times 10^{-12} \text{A}/(\text{mR}/\text{h})$ (¹³⁷ Cs γ)
	約1~5%
	30~60% (²⁴¹ Am γ)
印加電圧	50~500V

である。

1.3.2 信号処理器

検出器よりの出力は(1)式のように厚さの指数関数に

なって、直線関係にはなっていない。金属工業、主として鉄鋼業では γ 線透過形厚さ計を圧延ラインや検査ラインに設置して使用するが、最近は省力化が進んできて、圧延機は自動プログラム、検査の仕分けは自動選択機を採用し、電子計算機で総合的に管理するようになっている。そのため厚さの設定は外部より設定信号を受けて行なわれ、信号は10進3～4桁のデジタル方式が多く、したがって設定値もそれに合った方式が要求される。現在の γ 線透過形厚さ計のほとんどは、10進3～4桁のデジタル設定を採用している。設定方式にはログモジュールを使った対数化回路方式¹³⁾と帰還率設定方式が主として使用されている。

1.3.3 低エネルギー γ 線の吸収係数と吸収体組成
光電効果が顕著になる100 keV以下のエネルギーでは、 μ_{pe} は原子番号の5乗に比例するので、 ^{241}Am の γ 線などを利用する薄鋼板用厚さ計の場合などでは、測定物の組成の影響を十分に考慮しておかねばならない。低エネルギー γ 線の各物質による吸収係数の変化の様子を図7にあげる¹⁴⁾。

図7 低エネルギー γ 線の吸収係数の原子番号依存性 (一覧表の数値をグラフに改めたもの)

組成がわかると、吸収体の吸収係数は

$$\mu_{tot}/\rho = \sum_i (\mu_{tot}/\rho)_i \cdot r_i \quad (17)$$

で算定できる。ここで、 $(\mu_{tot}/\rho)_i$ は*i*なる元素についての全質量吸収係数、 r_i は*i*なる元素の重量成分比

である。

1.3.4 γ 線厚さ計の実際

^{137}Cs を線源とした厚さ計は、主として厚板鋼板の厚さ測定に使用されていて、測定範囲、鋼板で0～120 mm、応答性0.5～0.1 s、精度は0.05 mm～2 mm程度の性能をもっている¹⁵⁾。測定条件は熱間圧延工程が多く、水冷却装置、1000°C以上の測定物からの熱輻射による計器誤差(主として温度特性)を除くための補償装置、さらに高温、水、スケールの存在する悪環境下に耐えるための材質構造上の対策が施された測定ヘッドをそなえている。

^{241}Am を使用する厚さ計は、薄板鋼板、黄銅等の比較的薄い金属板の板厚測定に応用されている。

鋼板の厚さを例にとると、 β 線で測定できる最大厚さは ^{90}Sr で約0.5 mm ($^{106}\text{Ru-Rh}$ の β で約1.0 mmまで測定できるが半減期が1年と短いので、現在ではほとんど使われていない)、また上記の ^{137}Cs の γ 線での最小測定厚さは約5 mmであるので、約10年前までは0.5 mmから5 mmの厚さ測定に使用できるRIがなく、 β 線の制動放射を利用する¹⁶⁾とか、管球X線を利用するとかしていた。しかし β 線の制動放射線への変換効率はいかだか数%であるので¹⁷⁾大量の β 線源を必要とし、また管球X線発生装置は形が大きく複雑なうえに管球の寿命、電源電圧変動によるX線強度の変動などの点で、保守、安定性の面での欠点があり、低エネルギー γ 線を出すRIの出現が望まれていた。さいわい ^{241}Am が入手できるようになったのでここ5年ほどでこれを利用した厚さ計は急速に伸び、管球X線式厚さ計にとって代わろうとしている。

^{241}Am を使った鋼板用厚さ計の性能は、鋼板厚さ0～6 mm、応答性0.1 sで、誤差は $\pm 1 \sim 20 \mu$ 程度である。

1.3.4.1 特殊な応用例

1.3.4.1.1 H形鋼用厚さ計

断面がH形をした鋼材の形状測定の一方法として、図8のようにH形鋼の下の方凹部に γ 線源を設置し、2つのフランジの下部とウェブの3か所の厚さを同時に測定する熱間圧延用 γ 線厚さ計が実用化している¹⁸⁾。

この種厚さ計でとくに考慮しなくてはならないことは線源部で、測定物との衝突による破損およびそれに伴う放射線の危険性をさけるための安全機構である。

1.3.4.1.2 薄板用クラウン計

1.2.2.2項で述べたプロフィール測定用厚さ計の γ 線応用例である。鋼板では、板の両端の厚さが薄く、中高のかまぼこ形をしているので、そのプロフィールをク

図8 H形鋼用厚さ計測定ヘッドの配置

図9 クラウン計による測定値
横軸が板幅方向の位置、縦軸が測定厚さ

図10 散乱形厚さ計の原理

ラウンと呼んでいる。

厚さムラを感度よく測定するために ^{241}Am の線状線源とコリメータを使い、板幅方向の測定面積の幅を極力小さくしている。

図9はこの測定の一例で、横軸が板の幅方向位置、縦軸が厚さ指示でクラウン形状が視覚的にとらえられる¹⁹⁾。

2. 散乱形厚さ計

2.1 散乱形厚さ計の特徴

2.1.1 散乱形厚さ計の特性関数

散乱形厚さ計は、放射線を測定物に入射し、測定物によって散乱された放射線量を測定して測定物の厚さを知る方式を使う厚さ計である。図10の原理図に基づいて、 I_0 なる放射線が測定物の面への垂線から θ だけ傾いて入射し、同じく φ なる角度傾いて I の放射線量が散乱されるとすれば、 I は

$$I = \int_0^x I_0 \exp\left(-\mu \frac{t}{\cos \theta}\right) \cdot \beta \, dt \cdot \exp\left(-\mu' \frac{t}{\cos \varphi}\right) \\ = I_0 \frac{\beta}{\left(\frac{\mu}{\cos \theta} + \frac{\mu'}{\cos \varphi}\right)} \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{\mu}{\cos \theta} + \frac{\mu'}{\cos \varphi}\right)x\right\} \right] \quad (18)$$

で表わされる。ここで x は測定物の厚さ、 μ 、 μ' は入射および散乱放射線の吸収係数、 β は測定体の単位長さあたりの放射線散乱の確率である。測定物の厚さが十分厚いと I は一定値に収斂するが、これを I_{sat} とすると、

$$I_{\text{sat}} = \frac{I_0 \beta}{\left(\frac{\mu}{\cos \theta} + \frac{\mu'}{\cos \varphi}\right)} \quad (19)$$

となり、飽和后方散乱量という。実際には、

$$x_{\text{max}} = \frac{3}{\left(\frac{\mu}{\cos \theta} + \frac{\mu'}{\cos \varphi}\right)} \quad (20)$$

程度で I は飽和するので、厚さ測定範囲も x_{max} となる。

2.1.2 特徴

(20)式を透過形厚さ計の場合と比較するとちょうど $(\mu/\cos \theta + \mu'/\cos \varphi)$ が透過形の μ に対応していることがわかる。 θ 、 φ は0として使う場合が多く、 μ と μ' の値の相違もさして大きくないので、同一放射線を散乱形に使えば、透過形に比較してみかけ上吸収係数が2倍になったような特性になり、測定範囲も透過形の1/2と薄いほうへ寄ることになる。

図10からもわかるように散乱形厚さ計は測定物の片側から厚さ測定ができるので、タンクや船、建造物の壁のように片側からしか厚さ測定ができない物体に応用できる。

また、この形の厚さ計の大きな特長は、基板の上に異物が載っている場合、表面層のみの厚さを測定できることで、これが被ふく厚さ計に使われている。

2・2 β 線被ふく厚さ計

2・2・1 特性関数

図11に示す被ふく層のモデルに対して特性関数を計算すると

$$F = I_0' [K \{1 - \exp(-\nu x)\} + \exp(-\nu x)] \quad (21)$$

である²⁰⁾。ここで I_0 は基板による飽和後方散乱量 $\mu_1 + \mu_1' = \mu_1 + \mu_3' = \nu$ である。またこれを近似的に、

$$F = I_{\text{sat}} [1 - \exp(-2x/x_{1/2})] \quad (22)$$

と表わすこともある²¹⁾。ここで $x_{1/2}$ はこの β 線の半価層である。

図11 β 線散乱形被ふく厚さ計測定物モデル

2・2・2 β 線メッキ厚さ計の例

散乱形厚さ計の欠点の1つは、測定物の通過位置（パスライン）変動による誤差が大ききことで、線源、検出器系の構造にくふうして極力小さく抑える努力をしている。

また、 β 線の後方散乱量は鋼板の硬度によって変化するという報告がなされており²²⁾、筆者らも ^{85}Kr β 線を使った亜鉛メッキ厚さ計で亜鉛メッキ量換算 0.4 (g/m²)/ R_{30T} の値を得ている。ここに R_{30T} はロックウェル30Tの硬度単位である。

2・3 γ 線散乱形厚さ計

γ 線の散乱線について(18)式に相当する特性関数は

$$I = I_0 \frac{\sigma_e + \sigma_{\text{coh}}}{(\mu + \mu')} [1 - \exp\{-(\mu + \mu')x\}] \quad (23)$$

となり、その飽和後方散乱量は

$$I_{\text{sat}} = I_0 \frac{\sigma_e + \sigma_{\text{coh}}}{\mu + \mu'} \quad (24)$$

で表わされる。ここで σ_e はコンプトン散乱の吸収係数、 σ_{coh} はコヒーレント散乱による吸収係数である。また μ 、 μ' は入射および散乱線の吸収係数で、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成による吸収係数の和である。これらは γ 線のエネルギーと散乱体である測定物の原子番号によって変化する。 ^{241}Am の散乱線量

図12 ^{241}Am γ 線の後方散乱量の物質による相違

(1) 測定ヘッドの構造配置

(2) X線散乱形繊維厚さ計測定原理図

図13 X線散乱形繊維厚さ計

の物質による相違を図12に示す²³⁾。この特性をみると γ 線でも β 線と同様に2層になっている場合の被ふく層の厚さのみを選択して測定できることがわかる。

^{241}Am γ 線の散乱を利用すると軽合金で2~9mm、プラスチックで3~20mmと比較的薄い物の厚さを測

定するに適した厚さ計が得られる²⁴⁾。しかし鉄、銅のように原子番号が高くなると、散乱線が測定物内で吸収されて減衰するので測定範囲が著しく小さくなってしまう。

低エネルギーX線を合成繊維の細い束に当てて直角方向に散乱される線量を電離箱で測定して1000から4000デニール*の太さに対し¹²⁵I, 50mCiを使って1~2%の精度, 1sの時定数で測定した報告がある²⁵⁾。図13に測定ヘッドの構造と測定原理図を示す。

原理図について、測定物により直角方向へ散乱される放射線量 I を求めると、

$$I = I_0 \sigma \eta \rho L \int_0^x \int_0^y \exp(-\mu \rho x) [f_1 \exp(-\mu' \rho y) + f_2 \exp(-\mu' \rho(Y-y))] dx dy \quad (25)$$

となる。ここで I_0 は単位面積あたりの入射線量, σ は散乱吸収係数, η は検出器の効率, L は放射線束の繊維方向の幅, f_1 および f_2 は (x, y) 点での散乱線の左右の検出器方向についての線量の割合, μ, μ' は入射および散乱線の吸収係数, ρ は測定物のみかけの密度である。

低エネルギーX線が低原子番号物質と相互作用する場合は弾性散乱が大部分をしめるので $\mu = \mu'$ とみてよく左右の検出器間距離に比較して測定物の太さが十分に小さければ

$$f_1 = f_2 = \frac{\Omega}{4\pi} \quad (26)$$

となって散乱の位置 (x, y) には無関係になるので

$$I = K I_0 \{1 - \exp(-\mu \rho X)\} \cdot \{1 - \exp(-\mu \rho Y)\} \quad (27)$$

となる。 Ω は測定物からみた検出器の立体角である。また

$$K = \frac{\Omega \sigma \eta}{2\pi \rho \mu^2} \quad (28)$$

である。さらに吸収量が小さければ $\mu \rho Y \ll 1$ となるので (27) 式は測定物の単位長さあたりの質量 $m = \rho XY$ に比例し、断面形状には無関係になる。

3. 蛍光X線を用いた被ふく厚さ計

RIを線源とした蛍光X線分析は、半導体検出器、高分解能波高分析器をはじめ各種のフィルタを応用する非分散分析法の発達にともなって盛んになり、被ふく層の厚さ測定に利用されるようになってきた。しかし実用的には3.5keV以下のエネルギーのX線検出は簡単に行なえないので、オンライン機器で対象になる元素はCaまでである。

3.1 測定方式

3.1.1 被ふく層励起法

励起用放射線を測定物へ入射させ、被ふく層によって励起される蛍光X線強度を測定する方式で、検出量 I は

$$I = I_{\text{sat}} [1 - \exp\{-(\mu_e + \mu_f)x\}] \quad (29)$$

となる。ここで μ_e, μ_f は励起用放射線および被ふく層で励起された蛍光X線の被ふく層による吸収係数, I_{sat} は被ふく層による飽和出力で

$$I_{\text{sat}} = K I_0 \frac{\omega_K \tau_K}{(\mu_e + \mu_f)} \quad (30)$$

で表わされる。 ω_K は入射放射線の被ふく層物質のK殻による光電吸収係数, τ_K は蛍光イールド, I_0 は励起用入射放射線量で, I_{sat} を与える厚さ x_{sat} は、ほぼ

$$x_{\text{sat}} = \frac{3}{(\mu_e + \mu_f)} \quad (31)$$

とみてよい。

3.1.2 基板励起法

励起用放射線が被ふく層を通して基板に到達し、そこで励起される蛍光X線がふたたび被ふく層を透過して外に出てくる量を測定するもので、検出量 I は

$$I = I_{\text{sat}} \exp\{-(\mu_e + \mu_f)x\} \quad (32)$$

の形になる。 I_{sat} は基板で励起される蛍光X線の飽和値である。

3.2 励起用放射線

励起用放射線は、着目する物質の蛍光X線エネルギーより高いエネルギーをもっていることが必要であるが、とくに以下に記す特性をもつものが望ましい。

- 1) 特性X線発生効率が高く、散乱線などによるバックグラウンドが低い。
- 2) 小形で十分なイールドが得られる。
- 3) 必要なX線以外の γ 線や制動放射線が少ない。

励起用放射線のエネルギーが着目する物質の吸収端より少し高い値であるときに、蛍光X線の励起の効率は最大になり、KX線の場合の効率は $\omega_K \tau_K$ で与えられる。

通常、KX線のエネルギーが4~40keVの範囲にある低原子番号の物質についてはKX線励起が、LX線のエネルギーが5~20keVにある高原子番号の物質についてはLX線励起が使われる。

しばしば利用される線源は、²⁴¹Am, ⁵⁵Fe, さらに¹⁴⁷Pm-Al, ³H-Zr, ³H-Tiの制動放射線源である。最近では線源メーカーで制動放射線源として販売している。

* 1 デニール (denier) = 1.1 $\mu\text{g/cm}$

3・3 X線フィルタによるエネルギー選別

蛍光X線法の最大の特長は、エネルギー選別を行なうことにより着目する物質に関する情報を選択的に得られるので、 S/N を向上できることである。

RIを線源とする蛍光X線励起法は、RIからの放射線強度がX線管に比較して $10^{-3} \sim 10^{-6}$ と小さいので、分散分析によるエネルギー選別法は採用できない。

一方、検出器の窓を適当な物質でできた薄いハクでしゃへいするX線フィルタ方式が簡単で動作が安定であり、しかも高分解能が得られるので現在広く使用さ

れている。X線フィルタを使えば電離箱のような、単体ではまったくエネルギー分解能をもたない検出器が蛍光X線分析にも有効に使用することができる。X線フィルタには吸収係数フィルタ、吸収端フィルタ、平衡フィルタが応用されている。

3・4 応用例

蛍光X線被ふく厚さ計の応用例を表2に示す²⁶⁾。

亜鉛メッキ測定の場合を例にとると、被ふく厚さ変化に対する検出量変化の相対値 S は

表 2 蛍光X線被ふく厚さ計の応用例

用 途	線 源	強 度	検出線種	フ ィ ル タ	測 定 範 囲	精 度
電 気 Sn メ ッ キ	$^3\text{H-Zr}$ Brems.	2.5 Ci	FeK	な し	0.05~1.5 lb/basis box 0~1 μm	1%, 10^8
電 気 Zn メ ッ キ	"	"	"	Ni	5~500 $\times 10^{-6}$ in.	2%, 10^8
浴 Zn 侵	$^{241}\text{Am}(\gamma)$ $^{90}\text{Sr-}^{90}\text{Y}(\beta)$		ZnK β	Cu-Ni (平衡) Al	0.5~5 $\times 10^{-3}$ in.	2%, 10^8
クロムメッキ (鉄ベース)	$^{147}\text{Pm}(\beta)$	100 mCi	CrK	Cr		
Cu (鉄ベース) 電気メッキ	$^3\text{H-Zr}$ Brems.	2.5 Ci	FeK	Fe	$\sim 0.1 \times 10^{-3}$ in.	2%, 200^8
(鉄ベース) Al	$^{181}\text{W}(X)$	60 μCi	FeK	な し		
(鉄ベース) Cd	$^{147}\text{Pm-Al}$ Brems.	100 mCi	CdK	"	1~3 $\times 10^{-4}$ in.	
Cr (銅ベース) 電気メッキ	$^{90}\text{Sr-}^{90}\text{Y}(\beta)$	5 mCi	CrK CuK			
Ni (銅ベース) 電気メッキ	$^3\text{H-Zr}$ Brems.	2.5 Ci	NiK	Co	0.6~6 $\times 10^{-4}$ in.	2%, 100^8
(銅ベース) Cd	$^{90}\text{Sr-}^{90}\text{Y-Pb}$ Brems.	160 mCi	CdK			
(銅ベース) Au	$^{85}\text{Kr}(\beta)$	100 μCi	β		0.1~1 $\times 10^{-4}$ in.	
(ニッケルベース) Au	$^{85}\text{Kr}(\beta)$		β			
(銅ベース) Au	$^3\text{H-Zr}$ Brems. または $^{147}\text{Pm-Al}$ Brems.		NiK または CuK	Co または Co-Ni	$\sim 2 \times 10^{-4}$ in. Au $\sim 5 \times 10^{-4}$ in. Ni	
Pt (チタンベース) Au (チタンベース)	$^3\text{H-Zr}$ Brems.	2.5 Ci	TiK		0.2~5 $\times 10^{-5}$ in.	2%, 40^8
アルカリ土類金属 炭化物+Ni (ニッケルベース)	$^{147}\text{Pm-Al}$ Brems.	100 mCi	SrK	Al	1~5 $\times 10^{-4}$ in.	5%, 10^8

$$S = \frac{1}{F} \cdot \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \quad (33)$$

は、蛍光X線法のほうが β 線後方散乱法に比べて10倍ほど高い²⁷⁾、蛍光X線法は基板の硬度の影響や空気密度変化の影響もないので、前者のほうが理論的にすぐれている。しかし現在のところ安定度、実用性からみて検出器として比例計数管が主体であり、その時間分解能から高い線量測定ができず統計揺動誤差が大きくなり、応答性もあまりあげられないのが欠点である。

文 献

- 1) 三輪博秀, 清水雅美: 電気化学, **32**, 772(1964)
- 2) 小柳孝己: *Radioisotopes*, **18**, 299 (1969)
- 3) 守屋正寿, 他: 横河技報, **14**, 62 (1970)
- 4) 三輪博秀: 特許公報 (特許出願公告昭34-5396) (1959)
- 5) 丹下義信, 三輪博秀, 清水雅美, 沢口睦夫: 第4回日本アイソトープ会議報文集, 153 (1961)
- 6) 富士電機カタログ: β 線厚さ計, W2C23-01A
- 7) 三輪, 森田, 清水, 山本: 第6回日本アイソトープ会議報文集, 235 (1964)
- 8) 水越 慎: オートメーション, **12**, (2) 77 (1967)
- 9) 清水雅美, 沢口睦夫, 岡本英輔: *Fujitsu*, **22**, 477 (1971)
- 10) Clayton, C. G. and Cameron, J. F.: Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, Proceedings of a Symposium, Warsaw, 18-22 Oct. 1965, **1**, 38. IAEA, Vienna, (1966)
- 11) J. Guizerix: Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry, II, Conference Proceedings, Copenhagen, 6-17 Sept. 1960, 81, IAEA, Vienna (1962)
- 12) Б. Н. Васичев, et al.: 同上, 93.
- 13) 城戸 弘, 西脇文雄: 東芝レビュー, **29**, 1309 (1969)
- 14) Hanson Blatz, Ed. in Chief, Radiation Hygiene Handbook, 8-4~26, McGraw-Hill, New York (1959)
- 15) 藤井靖治, 第10回日本アイソトープ会議報文集, 340 (1971)
- 16) 押田 正, 三輪博秀, 清水雅美: 第2回日本アイソトープ会議報文集, 36 (1958)
- 17) J. F. Cameron, J. R. Rhodes: Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry II, Conference Proceedings, Copenhagen, 6-17 Sept. 1960, 23, IAEA, Vienna, (1962)
- 18) 宮川一男, 江頭武二: 第10回日本アイソトープ会議報文集, 343 (1971)
- 19) 山本格生, 寺井悦治: 神戸工業技報, No. 36, 73 (1968)
- 20) H. Miwa, T. Mizukoshi, M. Shimizu: Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, Proceedings of a Symposium, Warsaw, 18-22 Oct. (1965), **1**, 213, IAEA, Vienna, (1966)
- 21) C. G. Clayton, J. F. Cameron, 同上, 33.
- 22) W. A. Wilson: *ISA J.*, **64**, 68 ISA (1963)
- 23) C. G. Clayton, J. F. Cameron, 21) に同じ, 36.
- 24) 上柳英郎, 他: 第8回日本アイソトープ会議報文集, 351 (1967)
- 25) P. F. Berry, R. W. Tolmie: Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, Proceedings of a Symposium, Warsaw, 18~22, Oct. 1965, **1**, 505, IAEA, Vienna (1966)
- 26) 同上, 40.
- 27) J. Cavailles, P. Martinelli: 21と同じ, 227.