

核放射線を用いた厚み計

加 藤 正 夫 ・ 武 谷 清 昭

1. 序 言

放射性同位元素が原子炉の完成によって容易に利用できるようになってから、長い年月を経ている今日、その利用価値が認識されて科学の全領域において目覚ましい成果を挙げている。工業的に放射性同位元素を利用する研究やその現場への適用は、出足が遅れた感がなきにしもあらずであるが、一度その有用性が認められると、その利用者達はさらに他の方面にも利用するようにいろいろな考慮をするようになる。放射性同位元素が工業的にどのように利用されているかについては本誌にも著者が既に述べた。今回はその中の一分野である核放射線(nuclear radiation)による厚み計、一般的に物理的量の測定装置を主体にして述べてみよう。

放射性同位元素を工業的に応用する場合、その使用方法によって大きく二つに分けられる。すなわち放射線をイオン化の線源として利用する方法と、追跡子(tracer)として利用する方法とである。さらに詳しく分類すると、

放射線源

固定線源……ラジオグラフィ・厚み計・液面計
密度計

移動線源……管中液体の流れ

追 跡 子

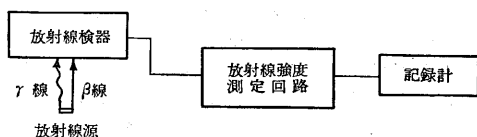
分析の方法

物理的な移動の研究……摩耗試験、固体中の拡散
化学物理的な移動の研究……表面処理法、浮遊選

鉱法 防蝕方法

反応機構の研究……触媒機構、フィッシャー合成、
コークス中の硫黄

この分類法で厚み計、液面計、密度計は放射線による物理的量の測定装置として、共通な構成をしている。すなわちそのブロックダイアグラムを第1図に示す。 β 線あ



第 1 図

るいは γ 線の放射線源を入れた線源容器と、これら放射線の検出器である、一般的にこれには β 線の場合

には電離管を、 γ 線の場合はガイガーミュラー(G-M)管あるいはシンチレーションカウンタを使用する。検出器からの直流出力あるいはパルスの出力は、増巾器およびレートメーター回路に入り、さらにその出力が記録計および自動制御装置に入る。このように放射線を利用した測定器は工業生産の生産過程において、従来の方法では困難かあるいは不可能であった測定を行いうるので、品質管理の手段として重用されている。

2. 測定方法の基礎

これら測定装置に利用されている β 線、 γ 線が、被測定物質によって吸収あるいは散乱される性質を巧妙に応用したのがこの厚み計の特徴ともいえる。

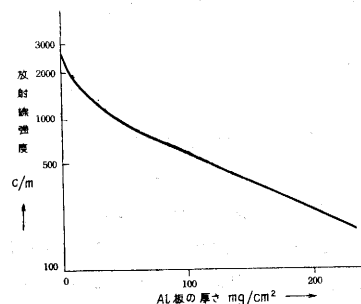
1) 物質による β 線の吸収

β 線の吸収に関して、次のような実験を行って見た。すなわちアルミニウム板によって P^{32} の β 線がどのように吸収されるかを測定したのである。われわれが入手した P^{32} は $H_3P^*O_4$ の水溶液として入手したが、この P^{32} は次のような放射特性を持っている。

	半減期	最大エネルギー
P^{32}	14.3日	1.71 Mev

この $H_3P^*O_4$ 液を $1\mu c$ 程度採取してマイカ箔の上に滴下して、これを赤外線ランプによって乾燥したものを放射線源とした。放射能検出器はG-M管を用い、100進スケalerによって測定した。アルミニウム板の厚さと β 線強度の減衰との関係を測定し、その結果を厚さと強度を両軸として第2図に示した。すなわち吸収物質の厚さが増すにつれ

て、放射線強度は減少してゆく。これから物質の厚さと強度の関係式を求めると、 β 線のエネルギーのスペクトルは連続スペクトルであっ



第 2 図

て、最大エネルギーの β 粒子の物質中の吸収は、吸収の初期において近似的には次の式によって与えられる。

$$A = A_0 e^{-\mu d}$$

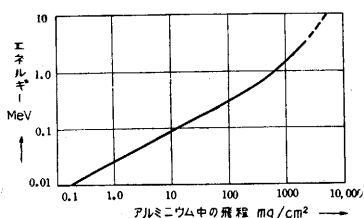
ここで A_0 および A は、それぞれ物質に投射された β 線の測定強度および厚さ d の物質を透過した後におけるその測定強度とする。 μ は β 線の吸収係数とする。しかしこの式が成立するためには、吸収物質と検出装置はできる限り密着させておかななくてはならない。吸収係数 μ を密度 ρ で割った μ/ρ を質量吸収係数といって、

$$\mu/\rho = \mu_m$$

で表わされ、吸収物質の性質にはほぼ無関係であって、さらに正確には原子番号と質量数の比によって変化する。また A が A_0 の半分になる厚さ d を半価層(half thickness value) といって $d_{1/2}$ によって表わす。そこで次の関係が求められる。

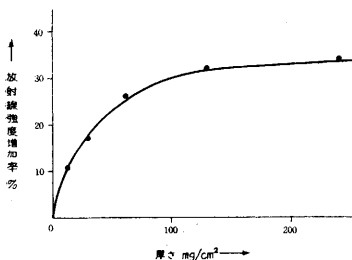
$$d_{1/2} = \ln 2 / \mu = 0.693 / \mu$$

β 線の吸収の実験で吸収物質の厚さを次第に厚くしていくと、急激に β 線強度が減少しほぼ 0 になる。すなわち最大エネルギーの β 粒子の飛程 (range) が物質中で一定であって、それ以上は透過しえないことを示している。あるエネルギーの β 粒子の飛程は、一般にいて最初の半価層の 5~10 倍である。アルミニウム中の β 線の最大飛程とエネルギーの関係を第 3 図に示す。



第 3 図

前に述べた実験装置を用い、吸収物質を置かないで、マイカ箔の β 線源の背面にいろいろな物質を置いた場合の背面散乱量を G-M 管によって測定した。散乱物質が同じ原子番号であるアルミニウムを用い、その厚さを次第に変化させてゆき、後方散乱放射線強度の測定実験を行い、えられた結果をまとめて第 4 図に示した。すなわち背面のアルミニウムの厚さが増すにつれて、後方散乱放射線の量は増加するが、ある程度以上は増さない。次に散乱物質の原子番号を変えた場合、すなわちアルミニウム、銅、錫

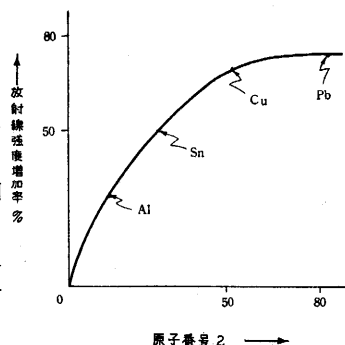


第 4 図

および鉛の四種類の物質について、同じように後方散乱放射線量を測定した。その結果を第 5 図に示す。それによると散乱物質の原子番号が増加するにつれて後方散乱量は増す。

β 線源の背面に物質があると、 β 粒子である電子は、

物質の原子核あるいは核外電子によって散乱される。物質に投射された β 線の大部分は、一回あるいは数回散乱して跳ね返ってくる。反射量は物質の厚さの増すにつれて増加するが、 β 粒子の飛程の 5 分の 1 程度



第 5 図

以上厚くなると変化しない。この状態を飽和後方散乱 (saturation back scattering) という。そしてこの後方散乱量は物質の原子番号の増加に伴って増大する。上にえられた数値は、測定装置の幾何学的配置によって変化することはいうまでもない。もしこれらの一つでも違った条件で測定すると、よくある放射能測定の場合にぶつかる解釈のつかない混乱が測定結果に生じてくる。

3) 物質による γ 線の吸収と散乱

γ 線の吸収に関しては、鉛の箔を吸収物質として Co^{60} の γ 線強度減衰を測定した。 Co^{60} は Co^*Cl_2 溶液として入手したが、次のような放射特性を持っている。

	半減期	β 線	γ 線 (MeV)
Co^{60}	5.3 年	0.3	1.1, 1.3

この溶液を濾紙の上に滴下し乾燥させ、ローリツェン (Lauritzen) 検電器の試料棚に置き、さらにその上に鉛箔を置いて指針の移動の速度を測定した。その結果を吸収物質の厚さと指針の移動速度、すなわち放射線強度の対数を両軸とした曲線を描くと直線性がえられる。それはほぼ第 2 図と同じであるので省略する。

物質による γ 線の吸収は β 線の場合と同じで、上に述べた実験から知られる如く対数的減衰をすることが確かめられている。そこで γ 線の吸収については β 線と同じ表現方法が用いられて、

$$A = A_0 e^{-\mu x}$$

と表わされる。同じように半価層 $x_{1/2}$ も

$$x_{1/2} = 0.693 / \mu$$

で表わされる。 γ 線の質量吸収係数 μ_m も同じ定義で用いられている。 γ 線の質量吸収係数の値を、吸収物質と γ 線のエネルギーが相違した場合を次に示す。

質量吸収係数 (cm^2/g)

エネルギー (MeV)	水素	炭素	アルミニウム	鉄	銅	鉛
0.03	0.39	0.25	1.17	8.45	11.4	32.0
0.12	0.28	0.13	0.14	0.20	0.23	2.1
0.51	0.16	0.08	0.08	0.05	0.07	0.07
1.2	0.11	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07
2.4	0.07	0.03	0.03	0.03	—	0.04

γ 線が物質に吸収される場合に二次電子が生ずる現象があるが、この二次電子が γ 線によるイオン化能として放射線検出装置によって検出される主因となっている。二次電子が生ずる主要な過程は、光電吸収、コンプトン (Compton) 反跳および電子対創成である。この三つの現象の総合効果として γ 線の吸収現象が生ずる。もっとも電子対創成現象は γ 線のエネルギーが 1.02Mev 以下では起きないが、 γ 線のエネルギーが相違すれば、主役を演ずる現象は異なる。すなわちエネルギーの低い γ 線の吸収は主として光電吸収により、エネルギーが高くなるにつれてコンプトン反跳、電子対創成と主役は変っていく。これらの三つの現象は、吸収物質の原子番号 Z とは相関の係数が相違するために、量吸収係数 μ_m はエネルギーによって相違する。

γ 線の散乱については、主原因となる現象は吸収の場合と同じであり、放射線検出器が二次電子検出装置であることによって、物質の表面からの散乱二次電子をも測定する。

3. 放射線測定装置

現在われわれが追跡子 (tracer) 実験において核放射線を検出する装置として用いているのは、Geiger-Mueller counter, Ionization chamber および Scintillation counter が主なものである。この三つの検出器は何れも核放射線にイオン化作用があることによって初めて可能である。厚み計の場合にも同じくこの三つの測定装置が使用されているが、これらの構造、機構、性能は共通な点もあれば相違する点もある。

この測定装置の検出器は G-M 管である。G-M 管は β 線検知や測定には一般に使用されていて、円筒状陰極と中心線陽極とでできていて、1000V 程度の高圧を加えて使用する。放射線が両極間で内部につめた気体を僅かにイオン化する。それが電子雪崩を誘起して放電する。この放電衝激波 (pulse) によって放射線が検知せられる。構造が簡単な点に特徴があり、G-M 管内に入った β 線を 100% 検出する能力がある。しかし γ 線に対して、その効率是一般的にいて 1% 程度である。パルスが生じた後 G-M 管が再び内部的にせよ外部的にせよ、次の放射線を検出しようとする正常の状態に戻るため、すなわち消滅する (quenching) ために $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 秒を必要とする。この間放射線を検出しえないので不感時間 (deadtime) という。

Geiger-Mueller counter を用いた一般的な厚み計を構成する放射線検出装置、電気的回路および記録計は第



第 6 図

6 図に図式的に示す。放射線検出器によるパルスの発生は、放射線の宿命的な性質である時間的に不規則な現象であるために、抵抗 R とコンデンサー C を含んだタンク回路のレートメーターを必ず含んでいる。初め pulse equalizer によって一つ一つのパルスはエネルギーが等しくされ RC 回路で積分されて、不規則なパルスの時間的平均値が求められる。すなわちこの値が放射線強度を示すことになる。通常工業的計器であるため、この値は次の記録計に記録される。

Ionization chamber

相対した陰陽両極によって構成される電離函に適当な圧力を加えると、飽和電流に相当する一定電流 (毎秒のイオン対 $\times 1.60 \times 10^{-19}$ アンペア) が流れる。この状態で両極の間に気体をイオン化する能力をもった放射線が飛来すると、放射線によって生じたイオン対に相当する電流がさらに多く流れるために、この電流を測定した値が放射線強度を表わしている。Ionization chamber の中に飛来する放射線粒子が同時に 2 個以上あっても、全電離電流を測定するために、放射線強度が大きくなれば電流は時間的に著しく不規則な値を取らない。それ故に Geiger-Mueller counter の場合の如き、レートメーター回路を必要としない。しかし何分にもイオン電流が微小であるために、増巾装置全般に難点が多く含まれている。電離函自体も電氣的漏洩防止のために外気と遮断したり、乾燥剤を入れたりいろいろ工夫をしてある。直流増巾用真空管も 2532-B や 2E35 を用い、電源としては工業的計器ですら蓄電池を用いる場合もある。そのため増巾が容易である振動容器型の電離函を研究したりして、計器の安定化を計っている。

Scintillation counter

放射線のイオン化能を蛍光物質の発光に利用し、生じた光を二次電子増倍管 (photomultiplier) によって、電氣的なパルスに変化させる。発生したパルスは Geiger Mueller counter の場合と同じくレートメーターによって平均されて、放射線強度を検出する。この蛍光物質は γ 線に対して著しく高い感度を持っている。蛍光物質の β 線および γ 線に対する検出効率を G-M 管のそれと共に示すと、

検出体	検出効率%		不感時間sec.
	β 線	γ 線	
NaI: Tl	20	20	10^{-7}
Stilbene	6	6	10^{-9}
G-M管	100	0.1	$10^{-3} \sim 10^{-4}$

である。このように γ 線に対する感度が高いために非常に有効な手段であるが、構造の点でデリケートなために連続的に四六時中使用するには注意を必要とすると考えられる。

4. 実用されている厚み計

β 線と γ 線の性質およびそれらに対する検出器の性質性能についてこれまでに述べた点から想像される通り、 β 線は厚さの薄い物質あるいは単位面積当りの重量の軽い物質の測定に利用し、透過力のある γ 線は厚さの厚い物質の測定に利用されると考えられる。これに対し検出器は測定者の要求から、Geiger-Mueller counter あるいは Ionization chamber 何れか適当な方を使用する。

1) 使用される放射線源

β 線線源

そのエネルギーによって高感度で測定可能な厚さが相違し、半減期の短い放射性同位元素では使用中に放射線強度の変化をきたすので、使用の目的によって適当な放射性同位元素を選択する必要がある。次に一般に使用される β 線だけを放射する同位元素の半減期とそのエネルギーを示す。

元素名	半減期	エネルギー (MeV)
C ¹⁴	~5500年	0.155
Sr ⁹⁰	19.9年	0.53 (Y ⁹⁰ の親である)
Y ⁹⁰	61 時	2.2
Cs ¹³⁷	33 年	0.55
Tl ²⁰⁴	3.5年	0.87

われわれが入手するこれらの放射性同位元素の多くは化合物の水溶液であるため、線源とするための準備操作をしなければならないが、英国の Radiochemical centre では板状の Sr⁹⁰ を厚み計用として販売している。

γ 線線源

γ 線では、そのエネルギーによって半価層が相違するために、適当なエネルギーを選ばなくてはならない。半減期の点については β 線の場合と同じである。次に主な γ 線線源を示すと、

元素名	半減期	エネルギー (MeV)
Co ⁶⁰	5.3年	1.1, 1.3
Sb ¹²⁵	2.7年	0.035, 0.64
Cs ¹³⁴	2.3年	0.8
Ra ²²⁶	1622年	0.19

である。

2) 厚み計に関する実験について

前に挙げた放射線検出装置の中で、Geiger-Mueller Counter およびプレートメーター回路を製作して行った実験結果の一部を示す。使用した放射線線源は Sr⁹⁰ と Co⁶⁰ であって、測定した物質はアルミニウム箔および鉄板である。放射線源と検出器の幾何学的配置は前述の実験装置と同じであるが、散乱放射線を除くための考慮を加えてある。第8図に Sr⁹⁰ によってアルミニウム箔を測り、えられた結果から箔の厚さとメーターの振れを、また第9

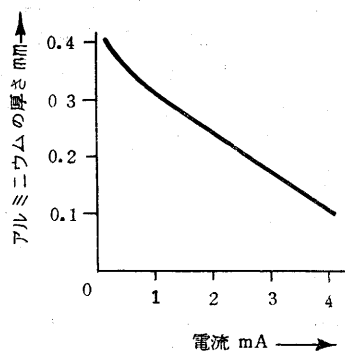
図に Co⁶⁰ を用い鉄板の厚さを測定した結果を示した。

3) 工業計器としての厚み計

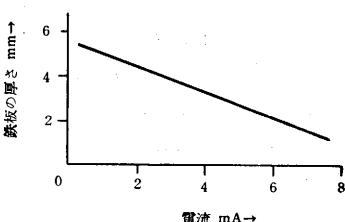
以上に述べた事柄を総合して、現在各国において実用化されている厚み計について述べる。透過型 β 線厚み計としては第9

図に示すような形式をもっており、その用途は次のようである。

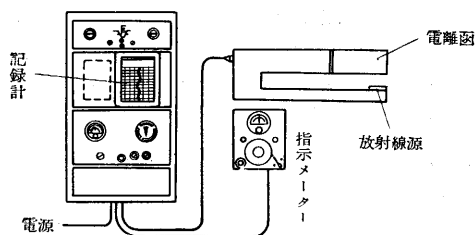
金属箔およびシート
紙および板紙
硝子板



第 7 図



第 8 図

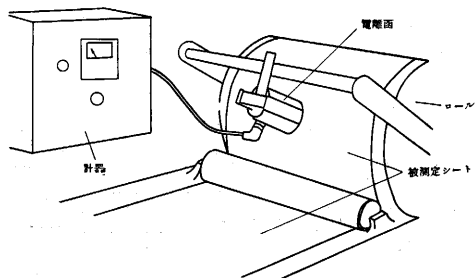


第 9 図

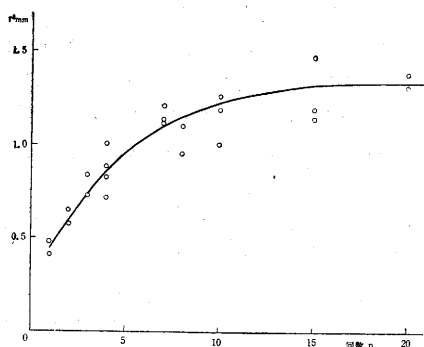
ゴムシートおよび多孔性ゴム
プラスチックのフィルターおよびシート
写真用フィルムのベース材料

また反射型 β 線厚み計の使用例は

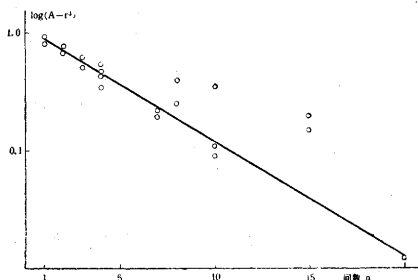
鋼材の上の錫あるいは亜鉛の被膜
金属表面のペンキあるいはラッカー
写真用紙の上に塗った硫化バリウム被覆
鋼材の上の銅あるいは真鍮メッキ
クラッド金属の被覆厚さ
腐蝕されたパイプの厚さ
ゴムおよびプラスチックのシートあるいはフィルム



第 10 図 (12頁へつづく) *



第11図 アルミニウム, 落差 10cm. 落錘 2000g



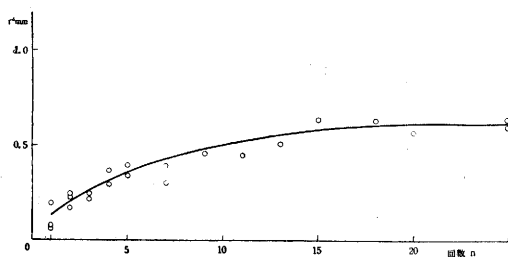
第13図 アルミニウム, 落差 10cm. 落錘 2000g

以上の結果は、同一材質で作った円錐と平盤の組合せに荷重をかけた場合、その荷重が静的であっても、又、かなりの高速度であっても、よく比例するというを示している。ところが、始めにも示したように、一般に、重量物を高速度で或る物質に衝突させるような場合、両物体の弾性及び塑性の如何によって、その衝突過程中に及ぼされる最大抗力の大きさはちがってくる。すなわち、衝突する双方が、上の円錐と平盤そのものであるような場合には、その円錐と平盤の材質によって衝突中の最大抗力が決定される。従って、そのような衝突を何回も繰返した後、最後に残った、つぶれの大きさだけからは、その一連の衝撃の中での最大荷重を求めること

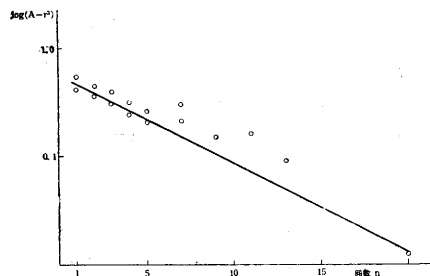
* (16ページよりつづく)

しかし反射型が透過型の目的に使われることも勿論ある。この方が感度が高い場合があるからである。何れの測定の場合にも Ionization chamber を用いている。第10図に反射型厚み計を示してある。放射線源の容器は使用中以外はシャッターを閉じて、常時は安全放射線許容量内に抑えてある。この容器から被測定物を経て検出器に入った放射線は直流出力に変換される。この出力のスケールは、一合で希望する厚さに対する変動率を \pm 、一何れの方に示すことも可能であり、また厚みを直接指示することも可能である。なお電子管によって構成されているために、5乃至8時間おきに零点調整を行う必要があるまた放射線源が減衰するため、年一回程度の補正が必要である。

こうした調整の面倒さはあるが、物質の単位当りの重



第12図 アルミニウム, 落差 10cm. 落錘 460g



第14図 アルミニウム, 落差 10cm. 落錘 460g

はできない。このことは、この種の検圧器を重量物の繰返し衝撃による最大抗力の検出に適用しようとする場合には十分に注意しなければならない。

なお本実験、並びに本原稿をまとめるに当って多大の御指導を戴いた平田森三先生に謝意を表する。

(1954. 1. 7)

文 献

- 1) 平田森三, 高木 豊, 長崎誠三 昭和19年10月21日 日本数学物理学会 学会講演
- 2) 平田森三 捕鯨船舶装備改善委員会報 1951. 5. 21日号, 12。 1951. 10. 16日号 6。 1953. 5. 6日号 4, 10。

量に比例した指示量を示し、直接に接触しないで厚さを測定しうる特徴がある。現在では 0.005mm のプラスチックを測定したり 0.001mm の鋼材の厚さを測りえて、しかもその誤差は 1~2% である。この測定装置は劃一的なものではなく、個々の要求に応じて設計をする方がより有効である。

5. 結 言

以上で最近多方面に亘って利用されて来た、核放射線による測定装置の一分野である厚み計について述べたが現在わが国においても数工場において、現場生産の品質管理のために、透過型および反射型の β 線厚み計を使用あるいは試作研究している。そこで今後この方面に興味をもつ人々に対して、本稿が核放射線厚み計の理解に少しでも役立つことがあれば望外の幸である (1954. 3. 1)