

放射性同位元素コバルト 60 による γ 線透過検査

一色 貞文 ・ 丸山 温

は し が き

γ 線による金属材料の透過検査は 1930 年ごろから主として米独両国において実用化されてきたが、1945 年ごろまでは γ 線源として、ラジウム、ラドンおよびメソトリウム種の天然放射性元素が使われていた。価格はラジウムが最も高く、次いでメソトリウムで、ラドンは比較的安い。一方それらの寿命、つまり半減期はラジウムが約 1600 年、メソトリウムが 25 年、ラドンは僅か 3.8 日である。ラドンはラジウムから生ずる気体で、主として米国で使われていた。これらの元素はいずれも生産量が少なく、かつ高価であるため、 γ 線の工業的透過検査への利用は特殊な場合に限定されていたが、戦後人工放射性同位元素が比較的安価に、多量に生産されるようになるとともに、 γ 線による透過検査も急速に普及されてきた。現在主として利用されているのはコバルト 60 で、その半減期は 5.3 年で比較的長く、放射する γ 線のエネルギーは 1.17 および 1.33 MeV の 2 種でラジウムが放射する γ 線とはほぼ等しい硬さをもつ。このほかセシウム 137、タンタル 180、イリジウム 192 などによる透過検査の研究が進められている。第 1 表は γ 線源として

第 1 表

元 素	半減期	γ 線のエネルギー (MeV)
Ra	1590年	0.60, 1.12, 1.76
Co ⁶⁰	5.3年	1.17, 1.33
Cs ¹³⁷	33年	0.66
Ta ¹⁸⁰	113日	1.22, 1.13
Ir ¹⁹²	74日	0.4

使われる放射性元素の半減期とエネルギーを示す。 γ 線の量子エネルギーが大きいかほど透過力が大きいので厚肉物体の検査には都合がよいが、反面エネルギーが大きいとコントラストが悪くなるので、材質の種類に応じて放射源の元素を使い分けるのが望ましい。

γ 線による工業的透過検査を行って好結果を得ている対象としては、ボイラー、船体、橋梁などの熔接箇所や厚肉の鋳造物、鍛造物などがある。

 γ 線の減衰

単一な放射性物質の放射能の強さは時間とともに指数

函数的に減衰することが実験的に確かめられている。このことは放射性原子が確率的に変脱を行っていることを示すもので、 t なる時刻に N 箇の放射性原子があるとし、その変脱の確率を λ とすれば、単位時間における変脱原子数は $N\lambda$ で与えられるから

$$-\frac{dN}{dt} = N\lambda$$

となり、積分すると

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

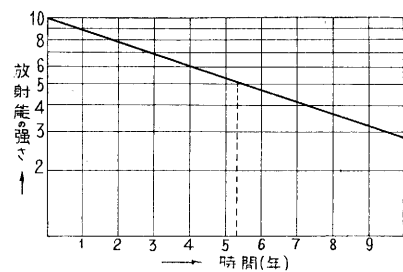
が得られる。放射能の強さは $-\frac{dN}{dt}$ に比例するから、

$$-\frac{dN}{dt} = N_0 \lambda e^{-\lambda t}$$

となり、強さは指数函数的に減衰することとなる。ここに λ は壊変常数を示し、 N_0 は $t=0$ のときの放射性原子の数である。最初の強さの $1/e$ になるまでに要する時間 $1/\lambda$ を平均寿命 τ といっているが、実用的には最初の強さの $1/2$ になる時間、すなわち半減期を用い、これを T で表わすと

$$T = 0.693/\lambda$$

で与えられ、コバルト 60 では $T=5.3$ 年となる。第 1



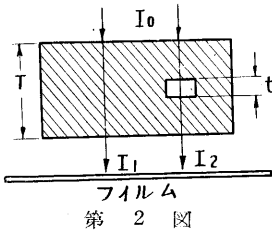
第 1 図

図はコバルト 60 の変曲線を示すもので、最初の強さを測定しておけば、任意の時刻における強さを知ることができ

る。透過検査を行う場合には、その時の強さを図から求めて露出時間を決定する。

放射性物質の強さを表わすにはキュリー (c) という単位が使われているが、1 キュリーは毎秒 3.70×10^{10} の原子崩壊を行う放射核種の量をいう。 γ 線の線量の単位には X 線の場合と同様にレントゲン (r) が使われている。1 レントゲンというのは空気 0.001293 g (0°C, 1 気圧, 1 cm³) から 1 静電単位の正負イオンを生ぜしめる X 線または γ 線の量である。

ここで物体による γ 線の減衰について考えてみる。い



第 2 図

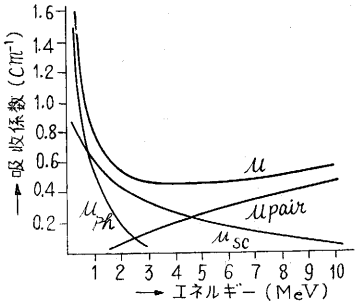
第 2 図のように厚さ T cm の物体を γ 線が透過する場合、透過前の強さを I_0 とし、透過後の強さを I_1 とすれば

$$I_1 = I_0 e^{-\mu T} \dots (1)$$

で与えられる。こゝに μ

は減衰係数と呼ばれ、透過物質の種類と γ 線の波長で定まる定数で

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_{sc} + \mu_{pair}$$



第 3 図

に分解される。 μ_{ph} は光電効果による真吸収係数、 μ_{sc} 散乱係数、 μ_{pair} は γ 線と原子核との相互作用の結果生ずる正負の電子対創成に基く吸収係数である。第 3 図は種々のエネルギーの放射線の鉛に対する μ の値を示したものである。 μ_{ph} は X 線の範囲のようにエネルギーが小さいときは著しく大きい、エネルギーが増すとともに急速に減少する。 μ_{sc} も同様であるが、0.5 MeV 以下では μ_{ph} に比して遙かに小さく、 γ 線の範囲になると μ_{ph} よりも大きくなる。なお γ 線の範囲では Compton 効果が大きく、散乱の結果エネルギーが小さくなる。 μ_{pair} は 1 MeV あたりから始まりエネルギーとともに増大するが、コバルト 60 の場合はほとんど考慮する必要がない。以上 3 種の吸収係数を総合した μ は 2~3 MeV に極小点をもつ。他の金属の吸収係数も同様の傾向を示すが、透過物質の原子番号が小さくなるほど μ の極小点はエネルギーの大きい方に移動する。たとえば鉄では 5~6 MeV に極小点をもつ。

次に第 2 図のように、物体内に厚さ t cm の空隙があったとすれば、この部分を透過した γ 線の強さ I_2 は式 (1) と同様に

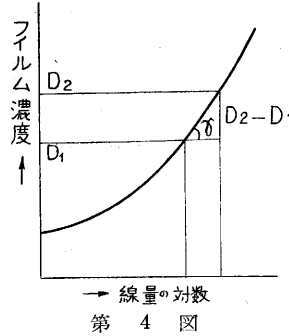
$$I_2 = I_0 e^{-\mu(T-t)} \dots (2)$$

で与えられるから、(1)、(2) 両式の比をとれば

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{\mu t} \dots (3)$$

となる。すなわち空隙のある部分と無い部分を透過した γ 線の強さの比は物体の厚さ T には無関係で、空隙の厚さ t と減衰係数 μ だけの函数となる。

実際に透過検査を行うときには多くの場合、写真フィルムに感光させるのである。いま第 4 図のような特性曲線をもつ X 線フィルムに、ある時間露出を与え、これを現像したものの I_1 および I_2 に対応するフィルム



第 4 図

濃度をそれぞれ D_1 および D_2 とし、特性曲線の勾配を r で表わせば、

$$\log \frac{I_2}{I_1} = \frac{D_2 - D_1}{r} \dots (3)$$

という関係が成立し、(3)、(4) 両式から、

$$D_2 - D_1 = 0.4343 \mu r t \dots (4)$$

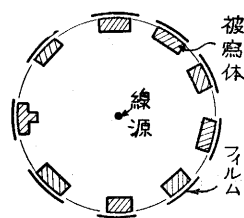
が得られる。従って厚さ

t の空隙が存在するときは、 μ と r が大きいほど写真コントラスト $D_2 - D_1$ が大きくなり、欠陥の判別が容易になる。 μ を大きくするにはエネルギーの小さい γ 線を使えばよいが、これは透過能力とは逆の関係になる。コバルト 60 を使うとすれば、同一物質に対しては μ が一定となるから、判別度を高めるためには r の大きいフィルムを使うことが必要である。しかし判別度の良否は写真コントラストだけの問題ではなく、フィルムの粒状性、増感紙によるばけならびに散乱線の影響が関係してくるので、実際問題は簡単でない。

線源および検査装置

われわれの用いた γ 線源はカナダの Atomic Energy 社から購入した 500 mc (ミリキュリー) の点線源で、その大きさは高さ、直径とも 1.95 mm の円柱状で六角形のアルミニウムのカプセルに収められ、その上部には鉄片がはりつけられているので、磁石のついたハンドルで遠方から持運びできるようになっている。

γ 線遮へい用の容器としては肉厚 80 mm の円筒形鉛容器を作り、実験にあたっては容器をコンクリート製のピットに入れ、上方に γ 線を放射させるようにし、使用後は厚さ 80 mm の鉛の蓋をしておく。この設備についてはすでに本誌速報²⁾に掲載してあるので参照せられたい。工場などの現場で検査を行う場合には持運びの容易なポータブル容器を使用する。 γ 線源は X 線装置より運



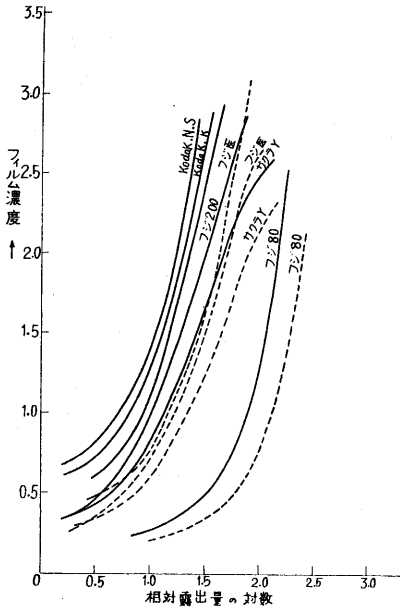
第 5 図

搬が容易であるから、場所的条件の悪い箇所の検査には X 線に代って γ 線が使われることが多い。また容器から線源をとり出して、その周囲に多くの被検査物体をおき、同時に多くの検査を行うこともできる (第 5 図参照)。

フィルムの特性曲線

γ 線による透過検査を行う場合にはフィルムの特性が一つの重要な因子となる。コバルト 60 のような高エネルギーの γ 線を使うと、被写体のコントラスト I_2/I_1 が小

さいので、特にフィルムのコントラストが大きいものを使う必要がある。X線やγ線に使うフィルム（通常単にX線フィルムと呼ばれる）には国産および外国産の幾種ものものが市販されているが、それらのうち数種についてコバルト 60 のγ線に対するフィルムの特性を調べた。



第 6 図

その方法は厚さ 17 mm の軟鋼板 10 枚を階段的に並べ、これを透過して露出を行い、得られた濃度階段から特性曲線を求めた。その結果を第 6 図に示す。横軸は露出量(γ線の強さと露出時間の積)の相対値の対数を示し、縦軸は濃度計で測定したフィルム濃度を示す。

第 7 図はこの実験で得られた結果の一部を示すもので、横軸には透過した鋼板の厚さを示してある。フィルムとしてはフジ 80、フジ 200、フジ医療用、

サクラ Y、コダック K、コダックノースクリーンの各種 X線フィルムで、実線は増感紙として鉛箔を使った場合、点線は増感紙を使わない場合である。

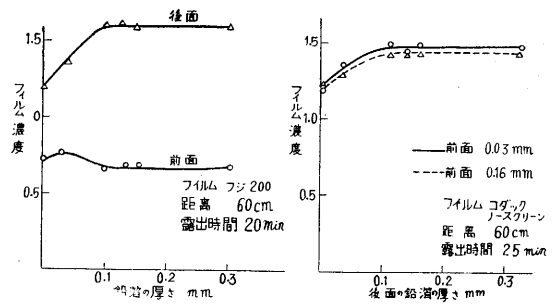
一般に高濃度のフィルムは粒子が粗大でコントラストが低く、逆にコントラストが高くて粒状性の良いフィル

ムは感度が低い。

増 感 紙

X線やγ線を直接フィルムに露出させた場合には感度が低いので、透過検査を行う場合には増感紙を使うことが多い。この増感紙には鉛箔増感紙と蛍光増感紙がある。X線フィルムは感度を高くするため両面に乳剤が塗布されているから、いずれの増感紙もフィルムの両面に密着させて使用する。

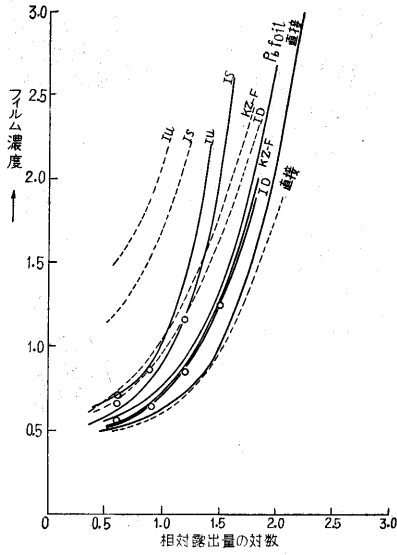
鉛箔増感紙は厚さ 0.01~0.3 mm の鉛箔を厚紙にはりつけたもので、鉛箔(金その他の重金属箔を使うこともある)の増感作用の主なものγ線によって鉛から放出される 2 次電子によるものであるが、これには 2 種あり、その一つは光電効果によって原子の K 殻または L 殻から飛出した電子によるものであり、他の一つはコンプトン効果によって加速された外殻電子によるものである。前者の作用は原子番号の大きい物質で著しく、後者は原子番号の小さい物質で著しい。鉛箔の増感作用はフィルムの前面(放射線源に近い側)に置いた場合と後面(遠い側)に置いた場合とで異なり、またその厚さも影響するので、前面または後面に単独に置いた場合と両面に置いた場合について、箔の厚さを種々変えたときの増感度の変化の様子を調べた。その結果を第 8 図に示す。縦軸は



第 8 図

フィルム濃度で示した。いずれの場合でも箔の厚さが増すと増感率が増すが、前面に置く場合は箔が余り厚くなると吸収が多くなるので、0.03 mm 付近で増感度の極大点をもつ。前面の箔は散乱線の吸収にも役立っている。後面の箔は厚い方が増感度が高いが、0.1 mm を越すと変化がない。この結果コバルト 60 に対しては前面に 0.03 mm、後面に 0.1~0.2 mm の鉛箔を使うのが最も有効であるといえる。

蛍光増感紙はタングステン酸カルシウムを主体とした蛍光物質を厚紙に塗布したもので、これに X線やγ線があたって発生する蛍光によってフィルムが感光する。蛍光増感紙は X線のようなエネルギーの低い放射線に対して特に有効で、増感紙を用いたときの露出時間は用いない場合の 1/10 ないし 1/200 に短縮される。しかしγ線



第 9 図

と、蛍光増感紙 KZ-F (極光), ID, IS, IU (以上東芝) を併用した露出に対する特性曲線を求めた結果である。フジ 200 では蛍光増感紙の効果が少ないが、フジ 200 では増感紙の効果が相当認められる。第 2 表は各種フィルムの濃度に対する各種増感紙のコバルト 60 による増感度を示したものである。

第 2 表 増 感 率

増感紙	フジ 80	フジ200	フジ400	フジ医療用	サクラ Y
鉛 箔	1.7	1.8	1.7	1.9	1.8
KZ-F	1.9	1.7	2.7	2.8	4.3
ID	—	1.9	3.2	—	—
IS	—	2.4	10	—	—
IU	—	3.0	17	—	—

一般に増感率の高いものはそれだけ露出時間が短縮できて都合がよいが、反面において像のぼけが大きくなるので、欠陥判別度の点から増感紙の種類を選択をきめなければならない。

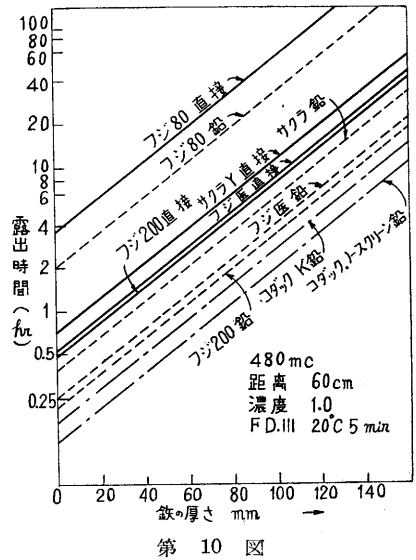
露 出 線 図

一般に透過検査に使用される露出線図は、被検査物体の厚さと一定のフィルム濃度を得るために要する露出量 (放射線の強さと露出時間の積) との関係を示すものであるが、 r 線を利用する場合は線源の強さを一定として露出時間を縦軸にとる方が便利である。第 10 図は 500 mc のコバルト 60 で検査する場合の鉄に対する露出線図で、これは露出時間を種々変えた第 6 図のような線図から、濃度 1.0 に相当する点を求めて作製した。これは線源とフィルムの距離を 60 cm としたもので、距離が変ればその自乗に逆比例した数値をかければよい。濃度を

のような高エネルギーの放射線に対しては、蛍光増感紙はそれほど有効ではない。

第 9 図は蛍光増感紙用フィルム、フジ 400 (点線) と直接露出用フィルム、フジ 200 (実線) を用いた場合、直接露出と、鉛箔増感紙を併用した露出

別の値にしたいときはフィルムの特性曲線から換算することができ。フジ 200 の X 線フィルムに鉛箔増感紙を併用して露出するとき、厚さ 160 mm の鉄の場合に 20 時間、120 mm の



第 10 図

120 mm の場合に 6 時間、60 mm の場合に 1 時間で濃度 1.0 の黒さが得られる。この露出時間は随分長いと思われるが (X 線の場合は通常 10 分以内)、X 線の場合とちがって、 r 線の露出中はなんら装置の調整を行う必要がなく、単に放置すればよいのであるから、露出時間の長いことはそれほど問題にならない。

被 写 体 コ ン ト ラ ス ト

(4) 式からわかるように、透過写真のコントラスト $D_2 - D_1$ はフィルムのコントラスト r と被写体コントラスト (I_2/I_1) の対数との積で与えられる。フィルムのコントラストはその種類によってちがうが、被写体コントラストはフィルムの特性に無関係で、放射線のエネルギーだけに関係するから、写真コントラストの代りに被写体コントラストについて考えてみる。被写体の厚さ T_1 の部分と T_2 の部分を透過した r 線が同一のフィルム濃度を与えるに必要な露出時間の比が被写体コントラストであるから、言い換えれば同一濃度を得るに必要な放射線量の比となる。

コバルト 60 で鉄の透過写真をうつした場合、 $T_1 - T_2$ が 17 mm のとき、 T_1 の値にはほとんど無関係に 1.6 という値が求められた。これはコバルト 60 から放射される r 線が単純であるため、被写体を透過した後もエネルギー分布がほとんど変化しないためである。このコントラストの値は X 線の場合に較べると遙かに小さい。1例として 200 kVP の X 線による被

第 3 表 被写体コントラスト

板厚の差	Co ⁶⁰	X線 (200 kVP)
5 mm	1.17	2.3
10 "	1.31	5.2
20 "	1.71	27
30 "	2.24	—
40 "	3.01	—
50 "	3.91	—

写体コントラストとコバルト 60 による被写体コントラストを測定した値を第3表に示す。透過検査にγ線を使うと、一般に被写体コントラストが低いので、小さな欠陥の判別は困難である。しかし反面において、肉厚に著しい差のある物体の写真が比較的小さい濃度範囲に収められるので、見易い写真が得られるという利点もある。このことを数字で表わすと第4表のようになる。この表は濃度差がそれぞれ1.0および0.5になるような厚さの差を示すもので、コバルト 60 のγ線については鉛箔増感紙を併用した場合と併用しない場合の両方、X線については鉛箔増感紙を併用した場合の数値である。フィルムの種類によって多少の差はあるが、コバルト 60 のγ線では、200 kVP のX線に比較して5~7 倍の肉厚の差が

第4表 一定濃度差に対応する鉄の肉厚の差

フィルム の種類	$D_1-D_2=1.0$ ($D_1=2.0, D_2=1.0$)		$D_1-D_2=0.5$ ($D_1=1.5, D_2=1.0$)			
	γ線 (Co ⁶⁰)		X線 (200 kVP)		γ線 (Co ⁶⁰)	
	鉛箔	直接	鉛箔	鉛箔	直接	鉛箔
フジ 80	28 mm	—	4.2mm	16 mm	—	2.3 mm
フジ 200	37 "	32 mm	6.6mm	21 "	18 mm	3.5 "
フジ医療用	47 "	44 "	—	26 "	24 "	—
サクラ Y	41 "	36 "	—	33 "	21 "	—

同一のフィルム濃度差を与えることがわかる。

肉厚の差の著しい例として、写真1および写真2に

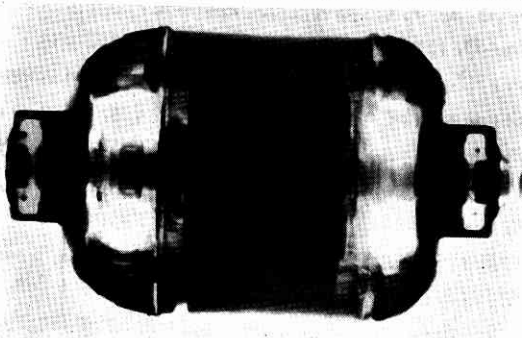


写真 1

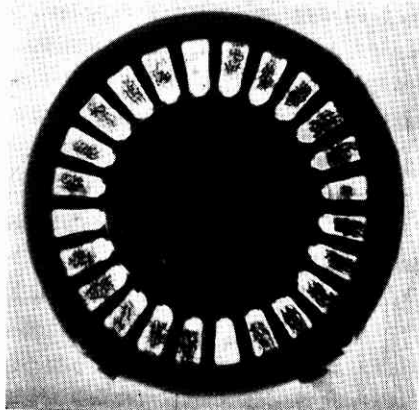


写真 2

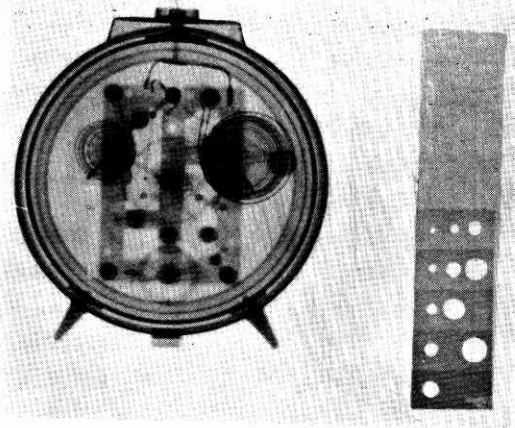


写真 3

馬力の誘導電動機を横方向および縦方向からコバルト 60 のγ線でうつした透過写真を示す。写真3は目覚時計と透過度計の直接透過写真である。このような物体を軟かいX線でうつすと黒白の差が大きすぎ、薄い部分はハレーションを起し、厚い部分は素抜けになってしまう。

写真4および写真5は厚さ 30 mm の軟鋼板の溶接箇所の透過写真で、欠陥として前者には



写真 4

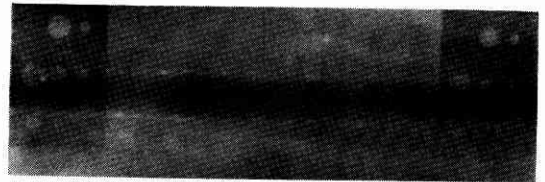


写真 5

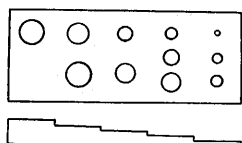
縦割れが、また後者には融合不良が見られるが、このような欠陥に対してはコバルト 60 の被写体コントラストが小さいので、X線の場合に比して写真コントラストが不足している。

透 過 度 計

透過写真から欠陥の存在を検知するには肉眼観察による。ところで人間の視覚が識別し得る最小の濃度差は0.02 であると言われているから、第7図の曲線について0.02 の濃度差に対応する厚さの差を求めると、これが判別し得る欠陥の最小の厚さに相当するはずである。しかし実際には放射線源が幾何学的な点でなく有限の大きさをもつために像がぼけてくる現象や、散乱線のために

コントラストが低下する現象などが関係してくるので、上述の厚さより遙かに大きな欠陥が存在しないと検知することができない。

そこで実際的には透過度計を被検査物体上に重ねて露出し、透過写真上に透過度計の像を焼込んでおき、その結果から判別し得る最小の欠陥の厚さを決定する。X線透過検査に関する JIS 規格（近く制定される）では太さの異なる幾本かの針金を組合せた透過度計を用いることになっているが、 γ 線透過写真の欠陥判別度はX線に比



第 11 図

べて劣るので、筆者等は第 11 図のような透過度計を試用した。これは厚さ 1.0 mm から 5.0 mm までの 1.0 mm 間隔の鉄の階段と、厚さ 1.5 mm から 5.5 mm まで

の同じく 1.0 mm 間隔の階段の 2 箇からなり、それぞれの段には、その厚さを t とした場合、直径 t , $2t$ および $3t$ の穴をあけてある。実際の様子は写真 3 に見られる。このような透過度計を厚さ T の被検査物体上において同時に露出したとき、認められる最小の穴の直径が $2t$ であったとすれば、 $(t/T) \times 100\%$ の値をもって欠陥判別度とする。コバルト 60 の γ 線による鉄の欠陥判別度の 1 例を第 5 表に示す。

第 5 表 欠 陥 判 別 度

鉄の厚さ	フジ 80	フジ 200	フジ医療用	サクラ Y
34 mm	2.9%	5.8%	4.4%	4.4%
68 mm	1.5 "	2.9 "	3.7 "	3.7 "
102 mm	1.5 "	—	3.0 "	—

フィルムの種類によって欠陥判別度には大きな差がある。最も判別度の高いフィルムは高コントラストで微粒子のフジ 80 であるが、このフィルムは感度が最も低いので、露出には長時間を要する。最も良好な状態で透過写真をうつしても、被検査物体の厚さが 30 mm 以下の場合には 3% の欠陥を判別することは困難であるが、厚さが増すと 2% 程度の欠陥まで判別し得るようになる。

む す び

コバルト 60 の γ 線による透過検査はX線の場合と異なり、放射線のエネルギーは物体を透過した後も変化せず、かつそのエネルギーはX線に比して遙かに高いので透過力が大きい。従って厚肉物体の検査に適している。一方被写体コントラストが小さいので、細かい欠陥の判別は困難であるから薄肉物体や軽合金などの検査には向かないが、コントラストが小さいことは、複雑な形状の物体の写真が適当な濃度範囲に収められるという利点をもつ。コントラストを高めるためには、セシウム 137 やイリジウム 192 のような比較的低エネルギーの γ 線が今後実用に供される可能性がある。また γ 線源はX線管球に比して遙かに小さいので容易に持運びができる利点もっている。しかしながらコバルト 60 の γ 線は透過力が大きいので、鉛を使っても半価層が 20 mm となり、かなり厚い容器に入れても完全に γ 線を遮ることができないので、放射線障害予防の見地から、取扱いに際しては十分の知識をもつことが必要である。(1955. 10. 8)

文 献

- 1) I. Berman, "Radiography Units and Radiography", Nondestructive Testing Fall, 1950.
- 2) 一色, 丸山, 生産研究 7 卷 2 号

東京大学生産技術研究所報告第 5 卷第 6 号 刊行

高橋武雄・木本浩二・桜井 裕 著

「Organic Microanalysis by Cerimetry」(セリウム滴定法を用いる有機微量分析法の研究)

有機物の工業分析において Ce^{IV} による酸化反応を利用する分析法は試薬が高価なため今日なお余り発展していない。よって電量滴定法を応用し、試薬を繰返し使用する方法につき研究し、その結果をとりまとめたものである。極めて酸化され易い有機物の定量においては、電解酸化により Ce^{IV} を生成させ、直ちに有機物に反応させ終点を電位変化により決定した。また過剰の Ce^{IV} の存在の下に加熱を要する有機物の定量においては Fe^{III} の存在でまず過剰の Ce^{VI} を電解生成させ、反応後残留せる Ce^{IV} を $Fe^{III} \rightarrow Fe^{II}$ を利用して Ce^{III} に電解還元させ、電位変化により終点を決定した。この 2 つの方法に Ce^{III} の反復使用を試み、電解条件、反応条件、再生処理法等に亘り詳細に実験を行った。なお本報告の前半において、第 2 セリウムの各種有機物に対する酸化反応に関し著者等の従来の研究の概要が述べられてある。

(1955年11月末刊行)