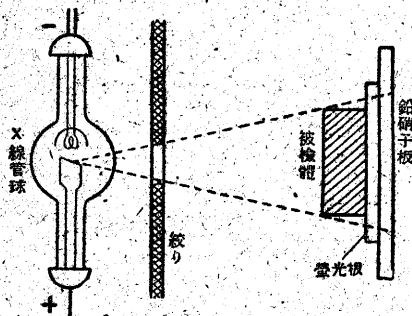


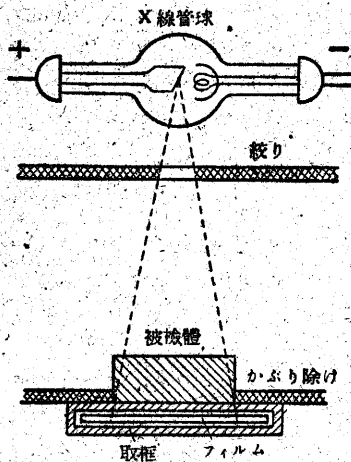
X線透過検査

~~~~~ 一 色 貞 文 ~~~~~

工業用材料、工業製品、構築物などにX線を当て、影繪を作り、缺陷部分を検出したり、外部からは見えない内部構造を検査して、製品や構築物の安全性や信頼性を高め、又これを作業管理に利用するのがX線透過検査の目的であつて、内科醫が呼吸器病の診断に利用したり、外科醫が骨折の診断に利用すると原理的には何等變る點はないのである。ところでX線はわれわれの視覺を直接に刺戟してくれないので、X線の檢出は間接的にならざるを得ない。たとえば螢光板を使つてX線のエネルギーを光に變えて肉眼で見る透視法(第1圖)とか、X線を寫眞フィルムに感光させ、これを現像して見る直接撮



第1圖 透視法

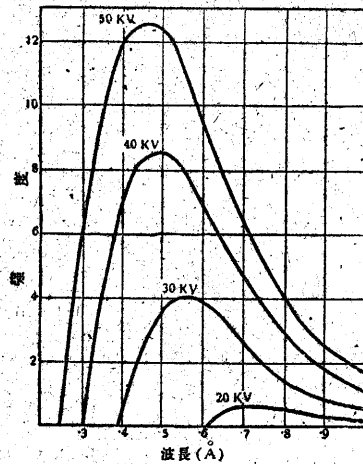


第2圖 直接撮影法

影法(第1圖)とかいつた種々の方法が行われる。どの方法をとるにしても、できるだけ小さな缺陷や僅かな肉

厚變化などを現わすようなよい像を作ること、その像をどのよう解釋するかということが透過検査を行うに當つての主題であるから、これらの問題の中、技術者として心得ていなければならない點や、今後研究を要する點などについて讀者諸氏とともに考えてみたい。

X線には2種類のものがある。その一つはX線管球を構成する對陰極(陽極)として使つている金屬(元素)に固有の波長をもつた特性X線(輝線スペクトル)であり、他の一つは波長が對陰極金屬の種類に關係しない白色X線(連続スペクトル)である。前者は波長が一定しているので結晶構造解析や分光分析に利用されるが、そのエネルギーは後者にくらべるとはるかに小さいので、透過検査にはもつぱら白色X線が使用される。白色X線の波長分布を支配するのは管球電壓であつて、第3圖からわかるように管球電壓  $V$  を高めると白色X線の全



第3圖 白色X線の強度分布

強度  $I_0$  (圖の曲線と横軸とで圍まれる面積) は  $V^2$  に比例して増大し、最強波長  $\lambda_{max}$  (各曲線の頂點) と最短波長  $\lambda_0$  はいずれも  $V$  に逆比例して短くなる。圖の各曲線につけた數値は管球電壓を示したものであるが、縦軸の強度は單に比較値を示したに過ぎない。

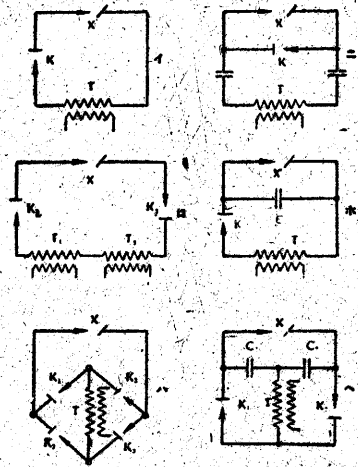
X線の透過力は波長が短い程大きいので、波長の短いものを「硬い」X線といい、反對に波長の長いX線は「軟かい」といわれているから、管球電壓を高めるほど白色X線の強度が増すと同時に性質が硬くなるということが出来る。X線管球に與える直流高壓を得る方法としては第4圖に示したように種々のものがある。ただしXはX線管球、Kはケプトロ管球、Tは高壓發生用の變壓器、Cは蓄電器を示

す。これらの整流を行つた場合にX線管球に興えられる電圧波形は第5圖に實線で畫いた曲線で表わされる。點線で示した曲線は變壓器の二次側線輪に發生する電圧波形である。脈動直流電壓を興えた場合に發生する白色X線のスペクトル分布曲線を求めるには、第3圖のような種々の電壓に相當する曲線を一週期にわたつて積分する必要がある。X線の強度は管球電壓に關係するほか、管球電流*i*と對陰極の金屬の原子番號ZAにも關係する。同一構造の管球で同一波形の直流電壓を興える場合には

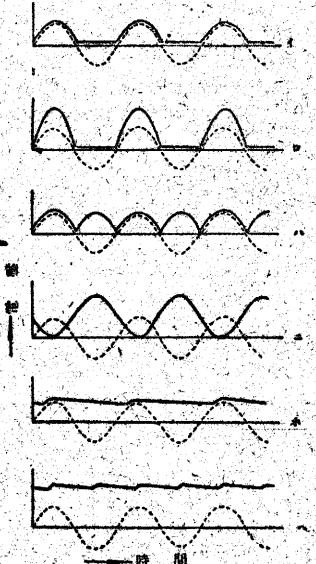
$$I_0 \propto V^2 i Z A \dots (1)$$

という關係が成立つ。つまり強いX線を得るにはVと*i*をなるべく大きくし、タンゲステン(ZA=74)のようになるべくZAの大きい金屬を使うことが必要である。

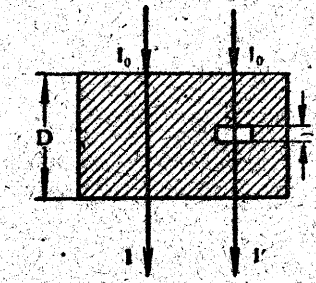
ここでまず被検査物體に對するX線の透過度を考えてみる。透過検査に使われるのは白色X線であるが、簡單のために一定波長λのX線を考え、厚さDcm.の物體に入る直前の強さをI<sub>0</sub>、透過直後の強さをIとすれば、(第6圖参照)



第4圖 直流高壓發生法  
 1. 單ケノトロン半波整流 2. 複ケノトロン半波整流 3. グレツツ式兩波整流 4. ヴイラー式整流 5. 單蓄電器定壓整流 6. グライナヘル式定壓整流



第5圖 第4圖の各種整流法に相當する電壓波形



第6圖 被檢體によるX線の吸収

$I = I_0 \exp(-\mu D) \dots (2)$   
 という關係が存在する。ただしμは波長λのX線に對するこの物質の吸收係數を示すもので、その物質の密度ρと原子番號Zとの間に

$$\mu = C \lambda^3 \rho Z^3 \dots (3)$$

の關係がある。Cは普遍恒數である。つまり検査する物質がきまればρとZはきまるから、波長が短いほどつまりX線が硬いほど吸收係數が小さくなり、従つてX線の透過度が増すことになる。

次にどれ位のきずが検出し得るかということ、つまり像のコントラストについて考えてみる。第6圖のようにD厚さの物體内に厚さdの空隙がある場合には、この部分を透過したX線の強さI'は

$$I' = I_0 \exp[-\mu(D-d)] \dots (4)$$

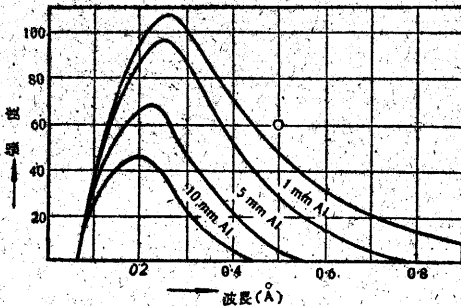
で興えられるから、(2)、(4) 兩式から

$$I'/I = \exp(\mu d) \dots (5)$$

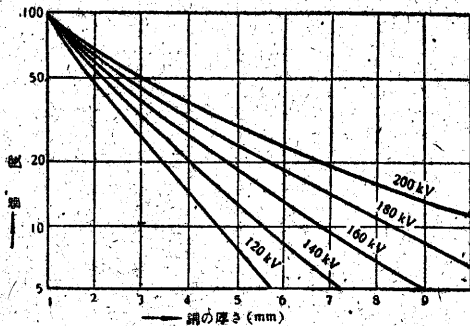
という關係が得られる。このI'/Iの値が像のコントラストを示すもので、この値が大きいほど、寫眞に現われる黒さの差、または發光板の明るさの差が大きくなり、従つて厚さdの空隙が一層明瞭に識別されることになるから、μをなるべく大きくすることが好ましい。それには軟かいX線を使えばよいということになる。これは透過度とは逆の關係である。X線像を鑑別するためにはI'を或る強さ以上にしないと十分の黒さをもつた寫眞や十分の明るさをもつた發光像が得られないから、I<sub>0</sub>はできるだけ大きくすることが好ましい。そこで(1)式からわかるように、Vと*i*とZAととを大きくしたいが、ZAには限度があつてZA=74のタンゲステンを使うことで満足しなければならない。*i*を大きくするのも管球によつて構造上限度がある。そこでI<sub>0</sub>を大きくするにはVを高めることに頼らざるを得ないが、Vを大きくすると強度が増すとともに平均波長が短くなるのでコントラストが悪くなるというやみがある。實際問題としては被検査物體の種類(μ)と厚さによつて許される限度までVを低くして、コントラストを強くするように心掛けるのである。

以上は波長一定のX線、すなわち単色X線について考えたのであるが、實際に透過検査に使われる白色X線の場合にはこれらの關係は複雑になつてくる。透過物質が同じでもμは波長によつて異り、波長が長い程μが大きくなつていく。そこで白色X線が物體を透過すれば、波長の長い部分の方が短い部分よりも吸收され方がいぢるしく、そのために透過後のX線の強度スペクトルの形が變つて平均有効波長が短くなる。第7圖はその状態をアルミニウムについて調べた結果で、白色X線は物體を透過するとともに漸次「硬化」して行くことがわかる。従つて白色X線が物體を透過して行くと第8圖のような状態で強さが減つて行く。この圖は種々の電壓で發

生させた白色X線が銅を透過する場合の強さの減少率を示したもので、最初は急激に減少し、厚さが増すとともに漸次緩やかとなり、遂には近似的に指数函数に従い、(2)式のように減少することがわかる。



第7圖 200 kV の定常電圧下で発生した白色X線が種々の厚さのアルミニウムを透過した後の強度分布



第8圖 銅を透過した白色X線の強さ

(5)式をみれば缺陷部分の厚さ  $d$  がきまれば  $\mu$  が一定、つまり電圧が一定であるかぎり、物体の厚さ  $D$  には無関係に同一のコントラストが得られることになる。たとえば厚さ1 mm の空隙が厚さ1 cm の物体中にあつても、また同じ缺陷が厚さ10 cm の物体中にあつても同一のコントラストが得られるということになる。しかし実際には後者の方がはるかにコントラストが悪い。それは透過物体中でX線が散乱する結果である。直進したX線のエネルギーが第6圖のように  $I$  および  $I'$  で與えられるとしても、物体中で散乱したX線のエネルギーがこれに加わってくる。ところで散乱X線の強さは大體場所に関係なく一様であると考えられるから、その強さを  $I_s$  とすれば、コントラストは(5)式で與えられる  $I'/I$  ではなく、 $(I'+I_s)/(I+I_s)$  となる。ところで  $I_s$  はX線に照射される物体の容積が大きいほど強くなる。従つて物体が厚くなるほど  $I_s$  の影響が大きくなり、コントラストが悪くなる。コントラストをよくするためにはできるだけ散乱X線の影響を小さくする必要があり、それには次の3つの方法がある。第一は第1圖又は第2圖に示した絞りを小さくして、X線の照射容積を小さくし、一つの物体を小さく區切つて幾回にも分けて検査する方法で

ある。第二は濾光板を使う方法である。つまり検査すべき物体と寫眞フィルム間に重金属 ( $\mu$  が大) の薄板をおくと、散乱X線はこの板を斜に通ずるために直進X線より吸収が多く、散乱X線の影響を小さくすることができる。この方法は厚い物体を硬いX線で透過検査する場合に特に有効で、厚さ0.8 mm の鉛と1.0 mm の錫を重ねた濾光板を使うことによつて、200 kV の電圧で50 mm の鐵板を検査した場合に、鐵板中の厚さ0.15 mm の缺陷を見出すことができた。第三はブレンデを使う方法である。これは濾光板の代りに同じ位置に高さ約20 mm 厚さ約1 mm の鉛板を2 mm 位の間隔で規則正しく並べたもので、これを使えば直進方向に極めて近いものだけしか通過しない。ブレンデの影を生ぜしめないためには、一様な速さで移動させてやればよい。

X線透過像を明瞭に出させるためには、コントラストを高めるとともに、像を鋭く出すことが必要である。缺陷部の厚さの變り方が緩やかであるとX線の強さの變り方も緩やかとなり、變り方が急な場合にくらべて判別が困難となる。被検査物体の厚さが連続的に緩やかに變化している場合には、この問題に對處する方法はないのであるが、X線管球の焦點が有限の大きさをもつために像の縁が不鮮明になる場合にも同様に判別性が悪くなる。たとえていえば電球からの光である物体の影繪を紙の上につす場合に、その物体と紙が密着していれば物の縁が明瞭に出るが物体を紙から離して電球の方へ近づけて行くと縁の部分に半影ができて、影繪がだんだんと不明瞭になつてゆき、特に物体の大きさが電球よりも小さいと眞影の部分が無くなって影がうすくなるのと同様の現象である。つまり缺陷部分の像は透視法における螢光板、または直接撮影法におけるフィルムの位置から距るほど縁が不鮮明になり、特に對陰極上の焦點より小さな缺陷ではコントラストそのものまでが悪くなる。實際に透過検査をする場合には物体をできるだけフィルムや螢光板に近づけ、かつX線管球と物体とを離すのであるが、物体の肉厚が大きいとフィルムに近い側の缺陷は明瞭に見え、反對側のものは不明瞭になるという點に留意しなければならない。

次に螢光板を使う方法やフィルムを使う方法などの特徴について考えてみたい。まず透視法(第1圖参照)についてであるが、この方法は像がすぐ肉眼で見えるという點を長所としている。例えてエレヴェーターとかケーブルカーなどを引つばる鋼索は直接に多くの人命に與かるものだけに抜取試験では十分な信頼が得られないので、鋼索の全長にわたつてX線透過検査が要求される。このような場合には透視法が便利であつて、固定した透視装置を用い、螢光板の前面で鋼索を移動させながら、缺陷の有無を検査する。透視法で一番重要なのは螢光板の性質である。螢光物質として廣く使われているのは、

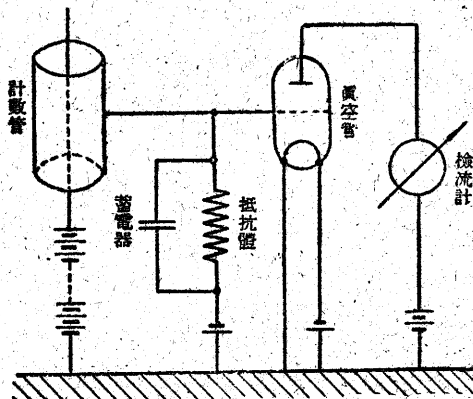
$CdWO_4$  と  $ZnSiO_4$  であつて、肉眼で見た色は前者は青色で後者は緑色である。軟かい X 線に對しては後者が明るく、硬い X 線に對しては前者が明るい。これらの物質は X 線の強さに應じて明るさが變るのであるが、X 線がある限界以上の強さをもたないと十分な明るさの像が得られない。X 線をフィルムに感光させる場合には、時間をかけることによつて弱い X 線のエネルギーをも蓄積させて黒い像を得ることが可能であるが、螢光板ではそういうことはできない。そこで透視法で検査する場合には、X 線を強くするために寫眞法の場合よりも管球電壓を上げねばならない。従つてコントラストが悪くなり、判別能力が劣る。また同じ装置を使う場合には透過し得る限界の厚さが寫眞法にくらべるとはるかに小さい。この 2 點が透視法の最大短所で、現在のものより一層明るい螢光板を作る研究が望まれるのである。

直接撮影法 (第 2 圖参照) は工業的透過検査として最も廣く行われている方法で、鑄造物や熔接物の検査に航空機工業や造船工業をはじめとして各種の工場で行われている。アメリカではフォーバーダムの總延長 122 km にわたる熔接部分をこの方法で検査したと報告されている。この方法は X 線の寫眞作用を利用したものであるが、硬い X 線はフィルムに吸収され難く感光度が低い。そこでフィルムの両面に増感紙を密着させて感光する。増感紙は  $CaWO_4$  のような螢光物質をぬつたもので、X 線の螢光作用を利用し、その螢光によつてフィルムを感光させるのであつて、X 線の硬さによつて違ふが、増感紙の有無によつて同一の黒さを興えるに要する露出時間は 10 倍乃至数十倍の差がある。しかし増感紙を使えば感光が二次的となるので像の鮮鋭度が落ちる。従つて肉の薄い物體の検査にはなるべく増感紙を使わないようにするが、肉の厚い物體になると、増感紙を使うことによつて管球電壓を下げるので、この結果得られるコントラストの向上が像の鮮鋭度低下を補つて餘りがある。そこで肉厚によつて増感紙を使うか使わぬかがきまつてくる。この場合にも鮮鋭度を高めるために、粒子が細かくてしかも増感率の高い増感紙を得るための研究が要望されている。

直接撮影法は透視法にくらべると透過し得る厚さの限界が高く、缺陷部の識別能力もよく、しかも後々まで記録が残るといふ長所をもつが、何といつても被検査物と同じ大きさのフィルムを使わねばならぬので費用がかさむ。そこで兩者の中間を行くものとして間接撮影法が発達してきた。これは醫療方面で健康診斷に利用されるようになったのと軌を一にする。この場合には第 1 圖の眼の位置にカメラをおいて 35 ミリ、又は 6×6 判のフィルムに螢光像をうつすのであつて、人體が X 線像に近づくことなくすむので、X 線の害をうけるおそれも少なく、

またフィルムの費用も少額で足りるが、識別能力の點で直接撮影法におよばぬことは論ずるまでもない。

X 線の強さを測るには寫眞作用や螢光作用を利用するよりも氣體の電離作用を利用する方が正確である。しかし普通の電離槽では電離電流が小さいので透過検査には利用し難いが、Geiger-Müller 計數管を使うと弱い X 線でも短時間に測定できるので、歐米では透過検査にもかなり利用されている。この場合には第 9 圖のような回路



第 9 圖 計數管による X 線強度の測定法

を作つて、計數管内の單位時間の放電回数に比例する電流を増幅して検流計で讀むのである。例えば一樣な厚さの板を透過した X 線を計數管に照射させると検流計は一定のフレを示すが、この板を移動させて行くと、途中で缺陷があれば検流計のフレが變るので、缺陷の存在が検出される。ただしこの方法では缺陷の形狀を直接知ることができない。

歐米諸國では規格として X 線透過検査を要求しているものが多い。わが國でも戰時中は航空機工場や軍工廠などでかなり透過検査が行われていたが、現在の工業界ではほとんど利用されていない。これは需用者がそこまで要求しないのが最大の原因と考えられるので、少なくとも人命に重大な關係をもつ部分からでも早急に規格化することを要望するとともに、更に進んで作業管理の部面までも透過法が進出して行く氣運を醸成して行きたいものである。

小川正義著「精密ねじに関する研究」

生産技術研究所報告 第 2 卷 第 1 號豫告

本號は多少増刷する豫定ですから、御希望の向は當所業務課宛申込めば、實費でお頒ちします。

既刊 (第 1 卷 第 1 號～第 9 號) についても御希望の方は御照會ねがいます。