

技 術 資 料

非破壊検査について

野 坂 康 雄*

On Non- Destructive Testing.

Yasuo Nosaka

は し が き

金属材料の内部欠陥の検査には従来各種の機械試験や破壊検査に頼っていたが、実際に使用する材料についてはあくまで推定の域をでない。これに対して材料には何ら損傷を与えずに検査できる技術、すなわち非破壊検査法が最近急速に開発された。非破壊検査には後述のような各種の方法があるが、いずれも材料にエネルギーの流れを加え、それに対する材料の挙動から内部欠陥を判断するものである。

方法を大別して(1)放射線によるもの、(2)超音波によるもの、(3)電磁気的方法、光を利用するものが現在実用になっているが、これらをさらに細別してそれぞれに概要を示したのが第1表である。

非破壊検査はすでに古くから行われているハンマテストのごときものもあるが、精度はわるい。大部分はここ十数年間に発達した他の新技術の助けを得て開発されたものである。特に第二次大戦を機会にその利用価値は高く評価され、材料の信頼度が次第に高まった。それに伴い非破壊検査法は独立した重要な技術として確立したの

第1表 代表的な非破壊検査法

非破壊検査方法	検査法の原理	応 用 例	装置名称等
放射線検査	X線, γ 線の透過度の比較	熔接部, 鋳物の欠陥検出	各種工業用X線装置等
超音波検査	超音波の伝播, 減衰, 反射, 屈折, 共振を利用する.	材料内部の欠陥検出, 材質の判定, 厚さおよび腐蝕測定	レフレクトスコープなどの超音波探傷器 レフレクトゲージなどの超音波厚さ計
磁粉検査法	磁性体を磁化し鉄粉の付着状況を見る	鋼製品の表面クラック検出	マグナブラックスなど
滲透法	特殊な滲透液をクラックに滲透させる	鋼, 非鉄表面クラック検出	カラーチェック, ダイチェックなど
蛍光を利用する方法	磁粉または滲透液に蛍光物質を混ぜ重外線でみる	磁粉および滲透法に同じ	マグナグロウ, ザイグロウ
静電粉体法	荷電粉体が表面につく状況を見る	非金属の表面傷	スタティフラックス
電磁誘導法	磁性体の磁化状況の変化から内部欠陥, 硬度, 焼入等を測定する	丸棒, ワイヤロープの欠陥検出, ベアリングボールの探傷と選別	シグマテスト, マグナテストなど多種あり
電流法	材料内の電流分布, 電圧降下の異状を測定する	表面附近の傷の深さ測定	
静電界, 静磁界法	電界または磁界中の電位, 磁位分布	主に厚さ測定	
熱的方法	熱起電力を利用する	金属の判別	

* 八幡製鉄, 八幡製鉄所管理局

である。

現在世界各国とも非破壊検査の利用について非常に熱心で、技術の交流も国際的となり、すでに二回の国際会議が開かれるにいたつた。(第一回は 1955 年ブリュッセル, 第二回は 1957 年シカゴ) 各国中, 米国, 西ドイツおよび日本ではこれよりさらに非破壊検査協会が組織され最も活潑な動きをしている。そして来る 1960 年 3 月には第 3 回国際会議が東京で開催されることに決定しており, 日本の非破壊検査が非常に盛んであることをよく物語っている。

以下各種の方法につき原理と応用を述べるが, 実用されている程度に主眼をおき, 最初に放射線関係, つぎに超音波関係, つぎにその他の電磁的方法を一括して述べ, 最後に結論を記すことにした。

II. 放射線検査法

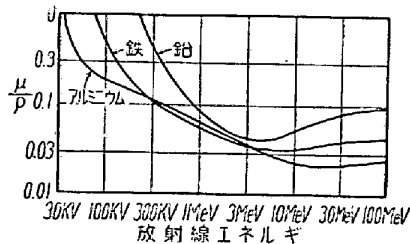
1. 放射線検査の原理と方法

こゝで用られる放射線はほとんど X 線と γ 線である。X 線は高速電子が物質に衝突したとき発生する電磁波であり, γ 線は天然または人工の放射性同位元素から放射されるさらに短波長の電磁波である。これらの放射線が物質に照射されるといろいろな物理現象を起すが, 材料の内部検査に利用するのは透過と吸収である。

単一波長で強度 I_0 なる放射線が厚さ t なる物質を透過したあとの強度が I になつたとすると, つぎの関係が成り立つ。

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (e \text{ は自然対数の底})$$

μ を吸収係数と呼び第 1 図のごとく, 物質の種類により固有なものであるが, 密度の大きいほど, 放射線エネルギーが低いほど大きい。



第 1 図 放射線に対する吸収係数

通常使われる放射線はいろいろな波長の成分を含むので, 物質中を透過するにつれ, 波長の短い (μ が小さく吸収され難い) 成分が多くなる。これを硬い成分といふ逆に吸収されやすいものを軟い成分という。

材料内に欠陥があると, この部分は母材より密度が小さいので (気泡, スラグ, 介在物など) こゝを透過した放射線は健全部を通つたものより強度が大きい。したがつてこの差違を指示できれば内部欠陥の検査ができることになる。

現在最も広く用いられているのは X 線と写真フィルム

による X 線写真法であるが, 最近では材料の厚みも増加し, かつ探傷の目的も精密になつたので, いくつかの新しい方法が考案されている。つぎに主な放射線検査の方法を示し, 各論におよぶ。

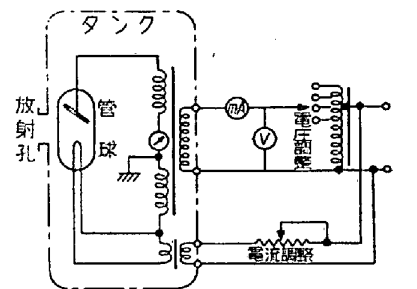
- (1) X 線写真法
- (2) X 線透視法
- (3) 高エネルギー X 線法
- (4) 特殊 X 線法
- (5) γ 線写真法
- (6) 特殊 γ 線検査法

2. X 線写真法

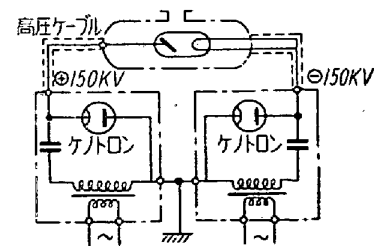
1) 工業用 X 線装置

X 線装置は管球, 高压電線, 制御器から成る。電源で発生した数 100KV の高压が管球の両極間に加わると, ターゲットというタングステンの小板から X 線が発生する。この部分の有効面積を X 線の焦点といい, 焦点が小さいほど, 像は鮮明となる。管球電圧は尖頭値 (KVP) で表わし, 小型可搬式では 100~250KVP, 大型では

300~400KVP である。また管電流は 5~10mA が多い。電源にはいろいろの方法があるが, 第 2 図 (a) は最も簡単な自己整流型で小型携帯用, (b) は大型据置用のピラード方式である。制御器は電圧調整器および露出時間調節用タイマからなる。X 線管から発生する X 線の波長とエネルギーは第 3 図のごとく電圧によつて定る連続スペクトルを示す。



(a) 自己整流型 X 線装置 (One tanke type)

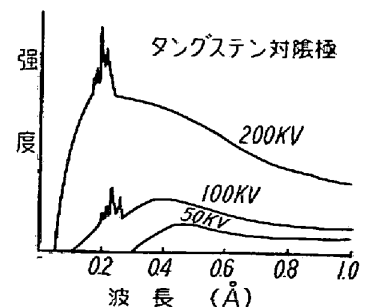


(b) ピラード型整流回路 (300KV の場合)

第 2 図 工業用 X 線装置の回路

2) フィルムと増感紙

X 線用の特殊フィルムを使用する。X 線に対する感度 (黒化の程度) は標準がないので大略の比較値で表わす。性能上



第 3 図 X 線スペクトル

大切なのは像のコントラストが高く、直線性をもっていなければならないことである。X線フィルムのみでは吸収が低く、感度がわるいので、撮影のときにフィルムを増感紙にはさんで感度を上げる。増感紙としては蛍光物質を塗った蛍光増感紙または薄い鉛箔が用いられる。

3. X線撮影法

(1) 適当なX線源を撰ぶ

材料の種類と厚さによってX線源の強さ(電圧)を定めるが、第2表は高エネルギーX線、 γ 線を含めた場合の厚さと適用電圧の見当を示すものである。一つの装置で電圧を広範囲にかえられないので、厚物用と薄物用は別々の装置を備えることが望ましい。

第2表 放射線の強さと性能の限界

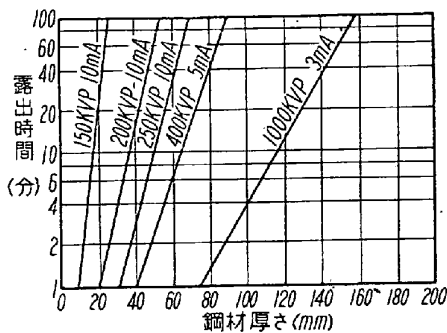
最大電圧 (KVP)	増感紙	検査可能厚さの限界
X線 50	なし	木材, プラスチック
100	なし	50mmアルミ, 75mmマグネシウム
150	なしまたは鉛箔	25mm鋼, 140mmアルミ
250	螢鉛箔	38mm鋼または相当材
400	螢鉛箔	50mm鋼
1000	鉛箔	75mm鋼
2000	螢鉛箔	100mm鋼
γ 線 Ra	鉛箔	125mm鋼
Co60	鉛箔	175mm鋼
		225mm鋼
		200mm鋼
		200mm鋼

(2) フィルムと増感紙

線源, 材料の厚さ, 露出時間, コントラストによつてフィルムを使いわけろ。増感紙も同様であるが, 螢光増感紙は分解能を下げる。

(3) 適正露出

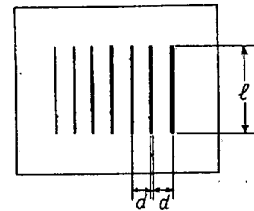
線源, 被検材料, フィルムが定ると露出時間は管電流に反比例, 距離の自乗に比例する。実際にはパラメータを変えた数種の表から直読できるようにしてあり, 第4図に板厚と管電圧との関係を示した。



第4図 鋼材厚さと露出時間との関係 (フィルム濃度 1.0)

(4) 透過度計 (ペネトラメータ)

X線写真の分解能と濃度を判定するために被探傷材の表面において同時に撮影する標準物体を透過度計といい日本と欧州では細線を, 米国では丸孔型を用いる。第5図は JIS に規定されたものである。透過度計を規定の位置においた場合, 板厚の 0.2% の太さの線が分離できなければならない。

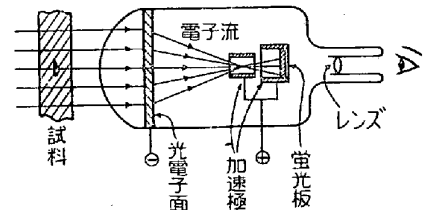


型	試験部厚さ	線径	線長 l	線間距離 d
1	20mm >	0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35	35mm	2~5mm
2	5~50	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6	40	3~6
3	40~100	0.7 0.8 0.9 1.0	45	4~7
4	>100mm	1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0	50	5~8

第5図 JIS 透過度計

3. X線透視法

写真フィルムの代わりに螢光板をおき, これに現われる像を直視する探傷法である。線源は強いものが必要なので危険防止上軽合金や組立品に適する。また多数の製品を流れ検査するにもよい。しかしこれでも危険が伴い, 疲労も多いので, 最近ではイメー



第6図 イメージンテンスファイア

ジーンテンスファイアが考案されて能率を上げている。これは第6図のごとく, 螢光像を光電面で電子流に変換し, これを高電圧加過して別の螢光板に約 1000 倍も明るい像を結ばせ, 観測を容易にしたものである。

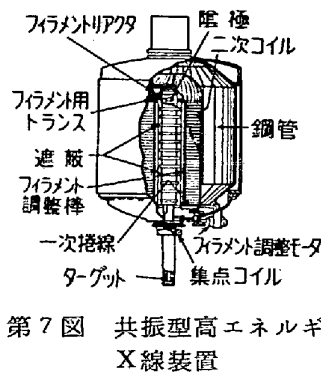
4. 高エネルギーX線検査

工業用X線装置のエネルギーは 400KVが限度で, これでは実用上厚さ 100mm 程度以下の鋼板の検査しかできない。これに反して最近のボイラ, 原子炉など高压容器の板厚は 100mm 以上のものが増加したため, 種々の高エネルギーX線源が考案され, 実用になった。その一つは第7図に示す共振変圧器型である。これは高压フレオンガス中で共振コイルによつて高電圧を発生し, それによつて加速された電子流をターゲットに当てる方式で, 現在 1000KV または 2000KV の装置が実用に

なっている。第4図からみると同一条件で400KVの場合より露出時間が数十分の一ですむ。

他の一つはベータトロンである。これはドーナツ型の円形管路で電子を加速しターゲットにあてる方式で6~30MeVという高いエネルギーのX線が得られる。

鋼板用としては15 MeVのものが作られている。ベータトロンは単に高エネルギーであるのみならず、X線発生効率が高く、かつ焦点を小さく(約0.2mm)できるので小型装置で鮮明な写真が得られる。高エネルギー成分が多いと、吸収が少なく二次線によるカブリがないのでコントラストの点でも有利となる。



第7図 共振型高エネルギーX線装置

5. 特殊X線法

1) 拡大撮影法

被検体とフィルムの距離を大きくとり、焦点の小さい管球を用いて欠陥像を拡大する方法。

2) ステレオX線法

X線管の位置をずらして二枚の写真をとってステレオで見る。複雑な構造のものに適する。

3) 間接撮影法

透視像を普通のカメラで撮影する方法。通常の蛍光像では微細な欠陥は検出できないが、イメージインテンシファイアを使うと直接法に劣らぬ結果が得られる。

6. γ 線写真法

天然のラジウムで材料の探傷をした例はそう新しいことではなかったが、最近のように普及したのは戦後ラジオアイソトープが容易に入手できるようになってからである。 γ 線源としては多数あるが、実用上半減期が長く、エネルギーが適当なものが重要である。第3表に代表的なものを示すが、特に探傷用としてはCo 60, Ir 192, Cs 137, などが最もよく使われている。Co 60のエネルギーは1~1.5 MeVのX線に相当し、厚さ150mmの鋼板の検査ができる。 γ 線源の強さはキューリ(C)で表わし、強いほど露出時間は短くなるが、危険防止上あまり多量のものを使わない。0.5~数キューリのものが多い。

γ 線写真法の技術はほとんどX線の場合と同様であるが、X線に比しつぎのような点が異なるので目的を考えた上で撰択する必要がある。

(1) 高エネルギーの放射線が安価に得られるが、エネ

第3表 代表的な γ 線源 (エネルギー順)

放射性同位元素名	半減期 (h時) (d日) (y年)	γ 線エネルギー MeV
ランタニウム	40h	2.9
ナトリウム	14.9h	2.76
アンチモン	24	2.06
プラセオジウム	124	1.59
銀	110	1.516
カリウム	42	1.51
イリジウム	194	1.43
銅	64	1.34
コバルト	60	1.33
臭素	82	1.31
鉄	59	1.3
タantal	182	1.237
ユーロピウム	152	1.2
ケ	154	1.2
亜鉛	65	1.11
ルビジウム	86	1.08
スカンジウム	46	0.89
セシウム	134	0.79
ロジウム 106(ルテニウム 106共存)	30秒	0.73
ジルコニウム	95	0.708
タンゲステン	187	0.68
バリウム 137(セシウム 137共存)	37y	0.662

ルギの調節ができない。したがって厚さによつて線源の種類を適当に撰定しなければならない。

(2) 停電、断水によるトラブルはなく小型であるが露出時間は非常に長い。

(3) 放射線が常時出ているので危険防止に注意を要する。

(4) 線源の寸法がそれほど小さくないので像の鮮明度はやゝわるい。

実際の撮影はX線のごとく一品ずつ行つてもよいが、放射方向が全方向なることを利用して多数の品物を同時に検査する方が能率的である。

7. 特殊 γ 線検査法

透過した γ 線を写真撮影する代わりに、イオン函、GM管などで検出することが研究されている。強い線源を用いると移動する材料でも連続探傷することができる。

III. 超音波検査法

1. 原理

音響を用いて材料内の欠陥を検出することはそれほど新しい方法ではない。車軸や外輪をハンマでたたき、反響から良否を判断するなどがそれである。しかしこの方法では欠陥の検出精度は低く、よほど大きなものでないと対象にならない。それはいかなる理由かというに、耳に感ずる音(振動数で約20~16000 サイクル/秒)では波長が長く、たとえば鋼の内部では数10cmに達し、数mm程度のクラックやラミネーションの検出はとうてい

できない。その解決は音波の波長を数 mm 程度まで短かくすることに帰するが、このような音波はすでに超音波 (Ultrasonics) の範囲になるのである。材料の種類が定まれば、波長と振動数 (周波数) との間には一定の関係があり、第4表は主な材料について示したものである。

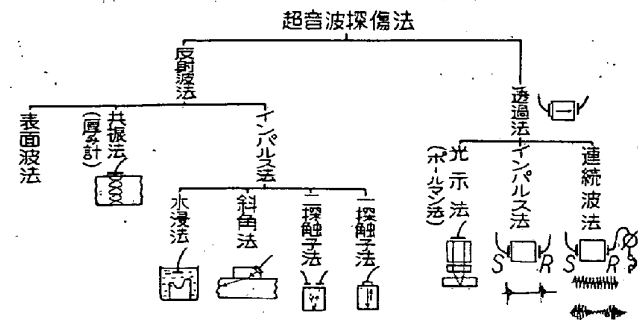
第4表 種々の材料内の音速と波長

材 料	音速 m/s	波 長 mm				
		0.5 MC	1.0 MC	2.5 MC	3MC	5MC
アルミニウム	6,220	12.44	6.22	2.49	2.07	1.25
鋼	5,810	11.62	5.81	2.32	1.93	1.16
真鍮	4,430	8.86	4.43	1.77	1.47	0.89
水	1,460	2.92	1.46	0.58	0.97	0.29
空気	330	0.66	0.33	0.13	0.22	0.066
鋼 (S波)	3,200	6.4	3.2	1.3	1.07	0.64

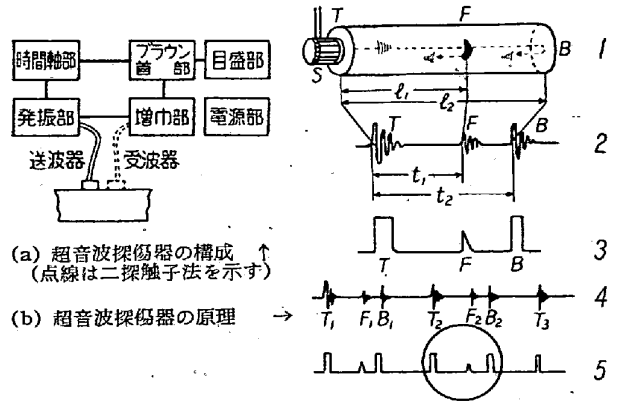
実用的な超音波の発生は今世紀の初期に端を発するが始めて金属材料の内部検査に応用されたのは 1930 年頃であった。

当時は検査装置そのものが実用的でなく、あまり普及しなかつたが 1940 年頃からエレクトロニクスを利用して簡便な装置が考案され、とくに戦後になつて急速に普及し実用化されるようになった。

現在超音波探傷法といわれている技術には第8図のごとき各種の系列があるが、この中でもつとも広く使われているものはインパルス反射波法であつて、超音波探傷器といえほとんどこの方法によるものが多い。この装置は第9図 (a) のごとき部分からできているが、(b) 図のようにまず材料の一端面 T に音源 S を当てきわめて短時間 (10⁻⁵~10⁻⁶秒) に区切られた超音波 (インパルス超音波) を送りこむ。この超音波の伝播は光と同様で材料内を直進し、欠陥 F があればそこから一部は反射してふたたび音源にもどる。同様に他面 B で反射した部分も音源にかえる。この時最初のインパルス T と反射波 F または B との間には時間遅れを生じ、材料内での音速を



第8図 超音波探傷法の種類



第9図 超音波探傷器の原理

Cm/s とすれば、

$$F \text{ からの反射の遅れ } t_1 = 2l_1/C$$

$$B \text{ " " } t_2 = 2l_2/C$$

鋼の場合 C=5810 m/s だから、 $l_1=100\text{mm}$ とすれば $t_1=34 \times 10^{-6}\text{s}$ となる。実際の装置では (b)-4 のごとく一定周期でインパルス T₁, T₂, T₃……をだすので反射波も F₁, F₂, F₃……のように一定周期でくり返して現われる。これをブラウン管オシログラフで見れば (b)-5 円内の図形が得られるから、図形上の目盛りを用い、欠陥からの反射遅れ、すなわち表面からの欠陥までの深さを知ることができる。超音波探傷器ではこのようにして欠陥の有無、もしあればその位置を知ることができるのである。

2. 各種の探傷法

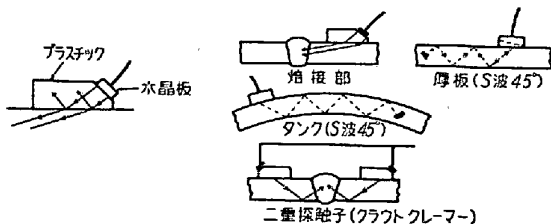
超音波探傷の対象は鋼、鋳鉄、真鍮、銅、アルミ、ガラス、碍子、黒鉛、コンクリートなどと広く、また欠陥の種類も多岐にわたっているので、いろいろの方法が考察されている。主なものを第8図にしたがつて述べる。

1) 一探触子法と二探触子法

音源として普通は水晶板を用いるが、水晶板を適当な保持器に収め、ケーブルをつけるようにしたものを探触子という。発振器から送られる高周波インパルスがケーブルを通つて水晶板の両面間に加えられると、水晶の圧電逆効果によつて超音波インパルスを発生するのである。反射波が水晶板に当たると圧電効果により、高周波電圧に変換される。送波用と受波用の探触子を共用した方法を一探触子法、別にした方法を二探触子法という。一探触子法の方が便利であるから広く用いられる。二探触子法は材料の形状や欠陥の位置が特殊な場合または材料の超音波減衰を正確に測る場合に適する。

2) 斜角法 (アングルビーム法)

第10図のごとく水晶板と材料表面の間にプラスチック (有機ガラス) のくさびを入れると、超音波は図のよ

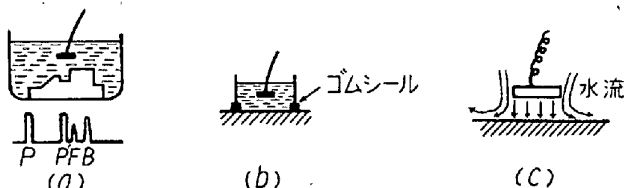


第 10 図 斜角探傷法

うに斜に入射する。溶接部のごとく直接上部から探傷ができぬ場合に非常に便利である。また板や管を一端から全面を一度に探傷することもできる。

3) 水浸法

超音波探傷で問題となるのは探触子と材料表面の接触の良否である。凸凹であつたり、形状が複雑で接触部がせまい場合には通常の方法ではよい結果がでない。水浸法とは材料を水中におき、探触子は水の層を介して音波を送りこむ方法で、かくして接触の問題は解決する。同時に探傷精度が上り、また探触子を高速に移動できるので自動探傷が行える利点もある。変形として第 11 図の (C) ごとく探触子の周囲から水を出し、水流によつて同じ効果をねらつた方法もある。これは大型の鋼板などに適する。



第 11 図 水 浸 法

4) 透過法

直接探傷するという目的にはやや不適當であるが、反射法ではうまく探傷できぬ薄物などに適する。また厚物でも超音波の減衰だけで材質または傷の有無が判別されるものでは簡便に用いられる。同一形状で寸法のそろつた品物を多数検査するにもよい。装置としてはインパルス式でもよいが、連続波式で簡単なメータ指示方式のものもある。欧州製のもので探触子の形状に工夫を加わえ、種々の形状の材料によく接触するようにしたものがある。

5) 光示法

インパルス法より古い技術であるが、まだあまり実用されていない。この装置は第 12 図のごとく、液槽中に材料 X、音源 Q、音波レンズ L、スクリーン P を配置し X 内を透過した音波は L で収束し、P に結像する P は特殊な懸濁液で横から光をあてると図のような X 内部の欠陥の模様を知ることができる。現在人工的にあけたドリ

ル孔が判別できる程度である。

6) 共振法 (超音波厚さ計)

第 13 図のごとく厚さ d なる板に超音波を送り、その周波数 (波長) を適当に選ぶと、板の中に定在波を (共振) を生ずる。この時につぎの関係式がなりたつ。

$$d = n \cdot c / 2f$$

c は音速、 f は周波数、 n は正の整数

定在波の存在は電気的に容易に検出できるので、その時の周波数を知れば厚さ d を知ることができる。ただし $n = 1$ の場合は 1 回の測定でよいが、 $n \neq 1$ の場合は相隣る二つの共振点から計算で求められる。実際の厚さ計では共振点の検出をレーザまたはブラウン管で行う。レーザ式のものゝは軽量で携帯式にできる。ブラウン管式のものゝは厚さの直読ができるようにしたものもある。

この厚さ計の特長は板の片側から厚さが測定できることゝで、材料の音速が正確にわかつていれば精度 2% 以下で厚さを知ることができる。厚さ計は厚さ測定のみならず、他面の凹凸や腐蝕の程度、内部のラミネーションの検出にも利用される。この場合には予想される共振が全く消えるか、あるいは共振が弱まることによつて判断するのである。超音波探傷器では探傷できない 2~3mm 以下の薄板のラミネーションの検出、タンク、タービンケーシングの腐蝕検査などに適當である。

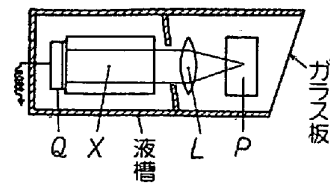
3. 超音波探傷法の実際 (主としてインパルス反射法)

1) 超音波探傷器の準備

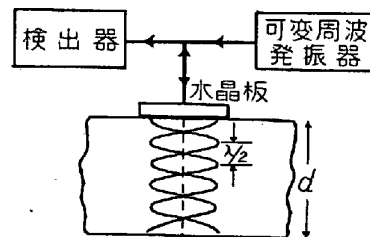
超音波探傷器本体はエレクトロニックスを使用しているので、部品、構造が良好で精密に調整されていなければならない。いくつかの調整ダイヤルの調整範囲がわるいとよい結果が得られないから注意を要する。

2) 周波数の選定

現在超音波探傷器に使用する周波数は 1~5 メガサイクル/秒 (MC) であるが、特殊な場合は 1MC 以下、および 5~25MC 程度も使われる。周波数は対象となる被検材料の種類、大きさ、減衰の多少、欠陥の大きさなどから適當に選ぶ必要がある。第 5 表は主に鉄鋼材料に



第 12 図 光 示 法



第 13 図 超音波厚さ計の原理

第 5 表

検査対象	適用周波数 MC	検査方式
大型鍛鋼品	2~5	インパルス反射式
小型鍛鋼品(精密検査)	3~25	〃〃 (水浸法)
パイプ, 砂傷	2~7	インパルス反射式
ゴースト(クラック有り)	2.5~4	〃
ゴースト(偏析のみ)	5~10	〃
白点	3~7	〃
車軸, ロール	1~3	〃
鋼塊, 大型鋳鋼品	0.5~3	反射式, 透過式
小型鋳鋼品、	1.5~5	インパルス反射式
鋳鉄	0.5~1	反射式, 透過式
鋼板ラミネーション	2~5	反射式, 斜角 厚さ計
鋼管	2~8	厚さ計
クラッドスチールの接着	1~4	厚さ計, 透過法
減衰による材質判定	1~7	反射式, 透過式
熔接部	2~5	反射式, 斜角

について適用周波数範囲を示したものである。一般に小さな欠陥ほど高い周波数を用い、また減衰の大きい材料には低い周波数が適当である。

3) 探触子

周波数が定れば探触子はその周波数に固有のものを用いなければならぬ。ただ目的に応じてその大きさを適当に選ぶ。すなわち大きな水晶板を用いれば音波ビームの指向性がすどくなり、局部的精密探傷に適する。小さい水晶板は逆に指向性が広がり、広範囲探傷によい。探触子面の形状は円形が多いが、時には正方形、長方形のものも使われる

4) 表面状況および音源との接触

被検材の表面はできるだけ平滑で、スケールなどが無い方がよい。こまかい凹凸でも感度は低下し、かつ探触子をいためやすい。超音波はごくわずかな空隙にも遮断されるから、ほとんどの場合探触子と表面の間には油(マシン油のごとき)または水の膜を作つて音響的に完全な接触をしなければならない。曲面の場合には別にプラスチック製のアタッチメントを用いるとよい。

5) 探傷図形と実際の欠陥の推定

ブラウン管にでる反射波の図形は単なる信号であつて欠陥の大きさや形状とはなんら関係はない。しかし種々な対象について数多くのデータを求め、ある程度の推定をすることができる。欠陥からの反射は音源からみた見かけの面積が大きいほど、入射面との平行度が大きいほど強い。巾の広い板状の傷を直角方向に探傷するのがもつとも容易で、逆に大きな欠陥でも尖端部をねらうとほとんど反射が得られない。大型品をのぞき底面反射も利用される。直接欠陥反射がでない時、材質不良、散在するブローホールなどの場合には底面反射の減衰から間接

に判断することができる。

6) 探傷器の感度規正

もともと超音波探傷器は傷の検出器であつて、傷の大きさを測定する定量的なものではない。しかも探傷器個々の間の感度はバラバラであるから、手放して探傷結果の比較をしてもなんら意味がない。しかし特別な場合とか、社内データの比較などの必要からどうしてもある程度の定量的比較をする必要がある時には、探傷器相互間または探傷の都度感度を規正しなければならない。社内的には対象となる欠陥に類似の人工傷を以つて対比標準を作ることができるが、それを使うためには探傷器自体を規正しなければならない。現在わが国では学振で審議決定したアルミ試験片がその目的で作られた。これはあくまで探傷器の感度を規正するためのもので、傷の標準ではない。

4. 超音波探傷の実例

超音波探傷(厚さ計を含む)を利用して効果をあげているものにはつぎのように非常に多い。

(1) 機械部品

車軸, 外輪, 歯車, クランクシャフト, ロータ, ロール, タービンブレード, ケーシング, 熔接部など。傷の種類はクラック, ブローホール, 砂疵, 白点, 偏析, ラミネーション, 疲労傷などである。

(2) 金属材料素材

鋳鉄, 鋳鋼, 真鍮, アルミ, 軽合金

(3) 半成品および鋼材

ビレット, スラブ, 鋼塊, 鍛造品, 鋳造品, 鋼板, 鋼管

(4) 加工中の探傷

大型シャフト, ロールなどの旋削中, 鋳造または鍛造直後

(5) 金属材料の物理冶金学的検査

結晶粒度, 異状組織, 熱処理効果などの判定, 弾性率の測定

(6) 肉厚, 腐蝕, 接着状態の検査

鋼板, 鋼管の肉厚または偏肉測定, 管路, パイプの腐蝕, クラッド鋼板の接着

(7) 非金属材料

高圧ピン碍子, 懸垂碍子の焼き割れ, 黒鉛電極の焼き割れ, コンクリートダムの亀裂検出

IV. 電磁気その他の方法

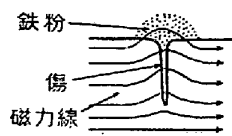
ここに述べる検査法は電流, 磁束, 電磁誘導, 静電気, 光などを利用する方法であるが、非常に種類が多く、同

一原理でも目的を異にしたものもあるほどである。また同じく非破壊検査といつても、放射線や超音波が主として欠陥の発見を目的としているのに対し、これらの方法では欠陥検出のほかに材質の判定や厚さ測定をも目的としているものが多いという点が違っている。

現在もつともよく使われるのは磁粉探傷と滲透探傷で最近実用化された電磁誘導法がこれにつぐ。前二者は探傷といつても実は肉眼では非常に見にくい表面傷をみやすくする方法といつた方がよい。つぎにこれらの方法を述べ、終りにその他の方法も簡単に記すことにする。

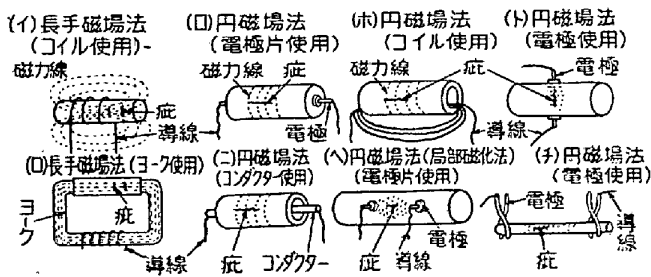
1. 磁粉探傷法

第 14 図のごく表面に現われたクラック部分に磁束を通すと、磁束の一部はクラックの両がわに極をつくる。そこに磁性粉体をかけるとクラックの部分にだけ磁粉が残つて、表面傷の長さ、形状をはつきり見ることができる。



第 14 図 磁粉探傷の原理

したがって強磁性体にも適用できる方法である。磁化の方法には第 15 図のごとく直線磁場法と円形磁場法とがあり、前者はコイルまたは別の界磁で磁化し、後者では被検体に直接電流を流して磁化を行う。いずれの場合でも磁力線と直角な傷が検出されるので、傷の方向によつて磁化の方法を適当にきめなければならない。また磁粉をかける場合、磁化をしながら(通電のまま)行う連続法と、磁化したら電流を断ち残留磁気を利用する残留法とがある。



第 15 図 磁気探傷法の各種

1) 磁化用電源

電源としては直流の大電流を発生させるものならなんでもよいわけであるが、実用的には (1) 直流発電機、(2) 大電流変圧器と整流器、(3) 放電管式磁化装置がよく使われる。電源の得られぬ野外などでは蓄電池を用いることもある。変圧器を用いると大電流が容易に得られ、数万アンペアの装置もできる。放電管式は交流の半サイクルのみ通電し、数千アンペアの電流が小型軽量の装置から得られるが、残留法に限られる。表面だけの探傷なら交流磁化でもよいが、回路のリアクタンスに対

する考慮が必要である。品物に通電する場合はとくに電極における接触抵抗を下げるのが大切である。残留磁気をきらう時には検査後脱磁装置を通す。

2) 磁粉と検査液

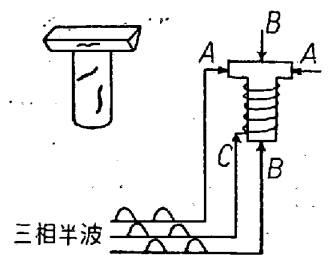
磁粉としては化学的に作つた酸化鉄が用いられる。材料表面との対比をよくするため、輝面には黒または褐色その他には白または赤のごとく各種の色をつけてあるのが普通である。磁粉と表面が乾いた状態で検査するのを乾式法といい、磁粉を溶液中に浮遊させ、材料をこれに浸けてみる方法を湿式法という。この検査液には灯油を用い、1 l に対して 7~10 g の磁粉をまぜる。

磁粉の中に螢光物質をまぜたものを使い、暗室で紫外線をあてると普通の方法より感度よく検査できる。これを螢光磁粉法という。

3) 磁粉探傷の実際

検査面はできるだけ平滑、清浄にする。組立品の検査ではあとで磁粉が取り除き難いものは検査を行つてはならない。なるべく組立前にすべきである。検査法はまず目的の箇所を十分磁化し検査液または磁粉をかける。小さなものは検査液に浸ける。形が複雑なものを検査する時には端や角になる部分やこまかい凹凸のある部分で傷によらない磁粉模様を生ずることがあるので注意を要する。また薄い純鉄の小板に種々の深さの細溝をつけた試験片を表面にはりつけて同時に磁粉模様を作り検査の信頼性をあげることができる。

特殊な装置によつて多数の品物を流れ検査することも考案されている。また第 16 図のごとく種々の方向の傷がある部品に対して、三相半波の電流で磁化すると、一回の操作ですべての方向の傷の磁粉模様を作ることができる。これをデュオベック法といい、タービンブレード、クランク、ピンなどに応用されている。



第 16 図 デュオベック法

2. 滲透探傷法

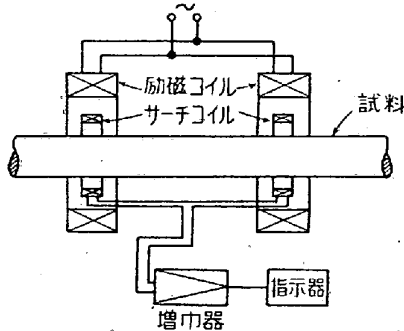
検査面にアルコールまたは石油系の浸透液を塗り、クラック内部に滲透させる。つぎに表面を洗つて余分の滲透液をのぞき、つぎにマグネシアまたは炭酸カルシウムの粉末の懸濁液につけ、クラックにしみ込んだ滲透液を吸い出す。滲透液に鮮明な色をつけておけば磁粉法同様に欠陥の検出ができる。滲透液に螢光材料をまぜた螢光滲透探傷法もよく用いられる。強磁性体に限らず応用

できる。

3. 電磁誘導法

被検材料が回路の一部になるように励磁回路を組み立て、電磁誘導によつて材料に電流を流す。その時に起る電圧分布、磁束分布

電圧波形の変化から内部の欠陥や材質の変化を検出する方法である。第 17 図はその一例で、材料 Q を二つの励磁コイル



第 17 図 電磁誘導法の一例

中におき、別にサーチコイルで誘起電圧の変化をみるようにしてある。材料に欠陥があると誘起電流の分布が変わり、サーチコイルから見たインダクタンスが変化するのでこれを増巾器を介して検出する。すなわちこの方法では同一材料の健全部と比較しているわけである。棒や線の検査に適する。材料を一定の速さでサーチコイル内を通過させ、欠陥部の誘起電圧の変化から探傷することも考察され、ワイヤロープを 30~200cm/s の速度で検査できるものもある。

このような方法にはこの他に多くの考案があるが、いずれにしても交流磁化にともなう表皮効果やヒステリシス損失（強磁性体の場合）渦流損失があるので、欠陥による変化よりもこれらの変化（材質変化による）が大きく、よほどうまく使わないと欠陥検出に失敗することが多い。たとえば第 17 図の方法はそのまま強磁性材料には適用できないのである。むしろ材質的な変化を比較法により迅速に検出し、自動選別的手段として使用した方がよい場合がある。その意味で最近つぎのような方法が新らしく考えられ、かなり広く実用されるようになった。

1) 渦流法

ドイツの Förster によつて開発されたもので、その原理は被検材の渦流によるインピーダンス変化を二つにわけて測定するものである。すなわちリアクタンス分は材料とコイルの幾何学的寸法を表わし、抵抗分は材料の導電率（材質による）を表わすことから、この二成分をベクトル的にブラウン管上にかかせ、簡単に材質の比較をすることができる。この装置を用い、たとえばベアリングボールをまず材質（硬度）で選別し、つぎに寸法で選別することができる。この種の装置はこのほかに種々あり、欧州で相当広く使われている。

2) 磁気ヒステリシス法

炭素鋼、珪素鋼、その他の合金鋼の合金成分または熱

処理の結果を迅速に知ることを目的とする。標準試料と被検材のヒステリシス曲線の差をブラウン管で直視し、あらかじめとつておいたデータと比較して判断する方法である。

3) 高周波コア損失法

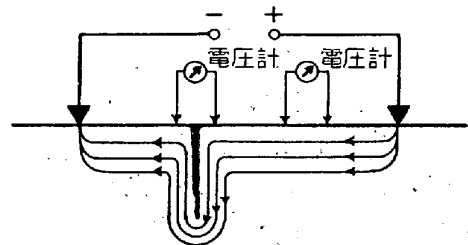
高周波電流を通じてあるコイル内に金属試片を入れるとヒステリシスと渦流のために損失を生ずる。渦流損失の変化（固有抵抗の変化）は組織の変化に伴つて起るので、このような測定から金属の組織の判定ができる。硬度の判別、硬化層の測定などのほか、引張、疲労、塑性変形過程の研究にも用いられている。実用されている装置にサイクログラフがある。

4. 静電探傷法

非金属の表面に帯電した炭酸カルシウム粉末を付着させ、磁粉探傷と同様に表面のクラックを検出する方法。日本のように高湿の所ではあまり使用できない。

5. 電流法

第 18 図のごとく一様な材料に一定電流を通じておくと、もし欠陥があればその部分の電圧降下は健全部と異なっている。電流端子と電圧端子をそれぞれ摺動式にして連続探傷をすることができる。スペリー式レール探傷車はこの原理による。またこの方法で欠陥部の電圧降下と欠陥の深さは比例関係にあるので便利である。最近はとくにクラックの深さ測定用のものも考案された。



第 18 図 電流法による傷の深さ測定

V. 非破壊検査の応用例

実際の使用状況について詳細な説明をする紙面がないので、おもに鉄鋼業を中心に概略を述べたいと思う。

1. 鉄鋼業における応用例

1) 鋳鋼品、鍛鋼品

小型のものは放射線が使えるが、大型になると超音波でなければ探傷できない。高圧バルブ、歯車、鑄造クラック、タービンケーシングなどの内部欠陥は X 線または γ 線で探傷することが多い。とくに形の複雑なものや厚さが異なるものには Co 60 による γ 線検査が有利となる。高エネルギーの X 線装置は造船、造機のようには使われていないが、将来は恐らく必要になると思われる。

鋳鋼品は一般に組織が粗いから超音波探傷で小さな傷を検出することは容易でない。しかし有害の程度の高い傷を対象にするならばむしろ簡単に素材検査ができて便利である。この場合の周波数は1~2 MC であるが、とくに大型品の場合には0.4~0.5 MC を使わねばならない。鍛鋼品は大型が多く、鋳鋼に比べて超音波検査が楽なため機械工場出荷前にあらゆる角度から探傷を行つている。表面の傷に対しては磁粉がもつぱら用いられ、バルブフランジの付け根など傷の発生しやすい所を集中的に検査する。ステンレスバルブは浸透探傷を行う。いずれの場合でも表面が粗いから、できるだけ大電流で磁化し、乾式法で磁粉を吹きつける。

鋼塊の超音波探傷も試みられたが、困難な問題が多く実用にはなっていない。1 トン以下の小型鋼塊のパイプ検出が試験的に行われた程度である。

2) 特殊鋼

特殊鋼は使用場所も高温、高圧部が多いから嚴重な検査を行い、ほとんどが全数検査である。放射線、超音波ともに用いられる。Cr-Mo 鋼の肉厚パイプを斜角超音波探傷で簡便に試験した例がある。また最近発達したクラッドスチールの接着の良否を超音波で検査して好い結果を得ているが、この場合はむしろ厚さ計が便利である。

3) 圧延鋼材

鉄鋼メーカーとしては特殊品をのぞきほとんど行っていない。現在対象にしているのはボイラ用厚板がほとんどで、超音波探傷法がもつぱら用いられている。主としてラミネーションと介在物の検出を目的とし、2~3 MC を用いている。日本では大部分が一点づつ手動で探傷しているが、大型水槽を用いた自動水浸探傷法や水流接触による自動探傷が欧米では採用されている。

4) ロール

鉄鋼業にとつて非常に重要なものであるから、自家製造、購入の場合は製造時中間検査または受入検査に、使用中は疲労破壊の監視について非破壊検査は大きな役割を果たしている。磁粉を用いることもあるが、ほとんど超音波によつている。鋳鉄ロールでは0.5 MC 程度、鋳鋼ロールでは1 MC 程度がよく使われる。分塊ロールの胴に生じたクラックの成長を数日おきに監視し、折損前に予定交換をして能率を上げている例がある。チルドロールのチル深さの測定も試みられたが成功していない。

5) 機械装置の保全用

製鉄所で使用する機械設備は大型品が多く、応力も高いので、非破壊検査による折損事故防止は大きな意味が

ある。放射線は特別必要の場合以外は不便であるから、磁粉や超音波が用いられる。圧延機減速歯車、中間軸、ロールガングのステップローラなどは定期的に点検する。また熔銑運搬用ボギー車軸を超音波検査して転覆事故を防いだ例もある。

6) 物理冶金的研究用

介在物の分布や結晶粒度の判定に使われている。また減衰測定と組織との関係や熱処理効果との関係も研究された。粒子の大きさと波長との関係で異状反射を起すことも認められている。

2. 造船・造機

造船でもつとも重要な対象は熔接部と大型部品である。ボイラーなど高圧容器の熔接部はかならず放射線検査を行うことになっているが、X線装置も高エネルギーとなり、ベータトロンも進出している。船体の熔接部は特殊艦艇では全線、普通の場合は抜取検査を行つている。これには小型の one tank 式X線源がよく用いられる。船尾材の熔接部はγ線が適している。タービンロータ、中間軸、プロペラ、ラダストックは主として超音波探傷をするが、形状が複雑で適用が困難な箇所は磁粉または浸透法を使う。

発電機用ロータ、クランクシャフトなどは加工前、加工中も超音波探傷を行う。最近の球形タンクの高張力鋼板の熔接部もX線で全線検査しなければならない。タービンブレードは磁粉や浸透探傷法が適用される。

3. 鉄道・自動車工業

鉄道での最大対象は車軸および軌条である。日本でも外国でも車軸の超音波探傷は早くから採用されて、折損事故の防止に大きな効果をあげてきた。現在国鉄ではさらに修繕工程に各種の非破壊検査法をとり入れ、車軸、電機子軸は超音波、ピストン棒、連桿、ピニオン、弁、歯車などには磁粉および浸透法を、ボイラ、空気溜、熔接部にはX線を活用し、車軸の安全運転に万全を期している。ドイツ国鉄では高速自動探傷車を作り、超音波で使用中のレールの欠陥の検出を行い、脱線事故防止につとめている。

自動車関係では鉄道のように普及はしていないが、応力のかかるピンやスプリングを磁粉探傷した例がある。またボディー用薄板を素材の状態超音波厚さ計で試験して、ラミネーションの検出を行い、プレスの保護と留歩向上に効果があつた。

4. 航空関係

航究機部品は安全係数が小さく、しかも信頼性は極めて高いことが要求されるから、非破壊検査の重要性はと

くに大きい。他の工業に比べて抜取率は高く、全数検査するものも多い。方法としては磁粉、螢光滲透および放射線の三者を用い、必要に応じて超音波を使う。対象としてはボルト、ナット、リベットにいたる **hard ware** から、翼などの機体全般を検査する。軍用機ではとくに厳格な規準が必要で、日本では米国の MIL 法にしたがつている。旅客機でもオーバーホールその他の点検はこれに準じて行っている。

5. 化学工業、石油工業

パイプライン、高压容器、バルブなどの腐蝕が一番問題になる、腐蝕の検査には主に各種厚さ計が使われ、超音波式、電磁式も用いられる。最近アメリカではアイソトープを利用した小型携帯式のもの作られて野外の油送管などを対象に使われている。

VI. 結 言

以上述べた種々の非破壊検査法はそれぞれ一長一短があり、効果もおのおので異つている。したがつて実際にこれらの方法で材料の探傷を行う場合には、はじめによく検討していずれの方法が最適であるか、あるいは二つの方法を併用するとか、他の破壊試験を併用するかを決める必要がある。しかしそれ以上に大切なことは、非破壊検査の効果の限度をよく知つておき、誤つた使い方をしたり、むやみに無理な条件下で適用することは絶対に避けたいものである。特に材料や製品の取引の場合に非破壊検査法を採用するときにはよほど慎重にすべきである。つぎにこのような問題に関係ある点に簡単にふれておく。

1. 各種非破壊検査の比較

第6表に主な試験法の比較を示した。内部欠陥の検出の能力は超音波が最大であるが、欠陥の形状や大きさはわからない。放射線では傷の形状がはつきりするが、比較的薄いものに制限される。超音波では表面傷の検出が困難であるから、その時は磁粉または滲透法がまさる。

2. 非破壊試験の結果の判定

欠陥の存在が確實となるとそのために材料あるいは製品の採否を判定しなければならないことが多い。これは実に厄介な問題であつて、非破壊試験法が実用になつてかなりの年月を経ているにかゝらず、まだどの方法にもこれといった判定の基準はない。実際の経験を重ね、多数のデータを蓄積して個々の場合についてその都度考慮しているのが現状である。さらに問題となることは放射線でも超音波でも試験装置そのものがまだ性能的に統一されていないことで試験装置や試験者が変わる毎に十分な注意をしなければならない。そしてつと大切なことは欠陥が検出された場合にその有害の程度を先ず前提において試験結果の等級をつけるべきである。すなわち同じ傷でもその材料の使用目的や使用箇所あるいは設計上の安全計数のとり方等で判定の方法も自ら異なる筈であり、一律に一番嚴重な方法で判定することは材料メーカーにとつても、使用者にとつてもコストその他決して有利ではなく、折角の非破壊試験の効果を失うことにもなつてしまう。この点は各国とも苦心しているところで、将来はなんらかの線に到達するであろうが、現在では標準化の問題はやつと緒についたばかりである。今まで規定または基準として決められたのは、判定基準ではなく、非破壊試験のやり方を統一するためのとりきめである。例えば ASTM で放射線や超音波探傷法に関する **Recommendation** として公表されているものがこれである。日本ではごく最近 JIS で放射線関係、超音波探傷、磁粉探傷、螢光滲透法、航空機用磁粉探傷が制定されている。

3. 非破壊試験の効果と将来

非破壊試験の効果をまとめてみるとつぎのごとくになる。

(1) 全数検査が可能で、信頼性がいちじるしく向上する。現在全数検査が行われていないのは試験装置の不備な点と経済的理由からであるが、もし材料や成品の全数検査を行えば信頼度は 100% となり、しかも大巾な材料の節約が可能となる。

第6表 各種非破壊検査法の比較

	X 線	γ 線	超音波	磁粉	滲透
探傷範囲	鋼で 100mm 以下	鋼 100~200mm 迄	鋼で 1cm~数m	表面附近	表面のみ
欠陥指示法	平面的	同左	立体的	表面の	同左
検査速度	遅い	最も遅い	速い	速い	比較的速い
検査一般性	小型のみ	良	良	小型のみ	良
装置格価	高価	安高	中	高	高
検査費	高価	価	安	中	中
記録法	写真が残る	同	別に写真撮影	同	同
検査面性	接触仕上不要	同	仕上を要す	同	同
危険性	大	大	なし	なし	なし

(2) 製造工程途中の検査ができる。

欠陥を早期に発見できれば、以後の製造工程における無駄を排し、合理的な加工工程を組むことができる。多量生産の品物については自動連続探傷によつて品質管理と生産管理はいちじるしく増大する筈である。

(3) 製造技術の改善、品質の改善に効果的である。

従来の実例からいつて金属材料の熔製、鑄造、圧延、熔接などの技術向上に大きな効果があつた。また物理冶金的研究にもなくてはならぬものとなつた。

(4) 使用中の機械の信頼度を向上させる。

種々の機械の疲労や摩耗、鉄道車輛、ボイラ、タービンなどは分解することなく検査できるので、安全性がいちじるしく向上した。また消耗的な機械部品では寿命の予測ができるので、生産工程を合理的にすることができる。

以上のように非破壊検査の効果が工業上に益する程度は実に大きいことがわかつた。それだけに検査技術はも

つともつと改善されなければならない。現状では非破壊検査技術はやつと確立したばかりで、これから愈々本当に実用化する段階といつてよいであろう。例えば全数検査がごく簡単に行えるような装置の発達とか、自動連続探傷がもつと広範囲に行えるような方法の考案といつたようなことは一日も早く実現されるべきである。熱間圧延中のインゴットやピレットの切捨量でも自動探傷で制御される時が来るのもそう遠い将来ではないであろう。タービンロータや大型ボイラドラムのような重要品だけが非破壊検査の対象ではないという強い要求こそ非破壊検査を健全な発達に導く指標であると考えられる。

付 記

本文では非破壊検査について基本的なことを主にして述べたため、最近実際に行われている状況を詳細に記す余裕がなかつた。またX線による応力測定、超音波表面波法、厚さ計などについては割愛したことをおことわりしておく。(昭和34年6月寄稿)

会 誌 掲 載 広 告 料 金 に つ い て

本会々誌広告掲載各位におかれましては、本会事業のため、かねて多大の御支援を賜わり厚く御礼申し上げます。

さて会誌は内容の充実と改善に伴い最近発行部数もいちじるしく増加しておりますので、さらに一段の改善を期し、本年9月号より表紙の紙質もアート紙と致しました。ついで表紙広告料金を下記の通り変更し会誌昭和35年1月号掲載分より実施致したく存じますので御了承の上今後も引き続き御掲載下さるよう。あらかじめ御通知旁々お願い申し上げます。

会 誌 「鉄 と 鋼」 広 告 掲 載 料

表紙の4	1 ページ	25,000 円 (新掲載料)
表紙の2	1 ページ	22,000 円 (〃)
表紙の3	1 ページ	20,000 円 (〃)
前 付	1 ページ	16,000 円 (従来通り)
後 付	1 ページ	14,000 円 (〃)
綴 込	B 5判1枚	14,000 円 (〃)

なお、本会誌の広告は下記において取り扱つておりますので、掲載御希望の方はいずれかへお申しつけ願います。

協 会 通 信 社 東京都千代田区神田小川町1~10 三勢ビル3階 電 (25) 8656~9
 広 和 堂 東京都中央区銀座西8~3 小鍛冶ビル5階 電 (57) 6836