

技 術 資 料

鉄鋼業におけるオンライン超音波探傷の進歩*

土 門 齊**

Developments of On-Line Ultrasonic Testing Apparatus in Iron and Steel Industries

Hitoshi DOMON

1. ま え が き

超音波探傷法は 1950 年頃よりボイラー用厚板の検査に用いられその有用性のきわめて大きいことが認められた。その後探傷結果の判断方法が問題となり、1954 年鉄鋼メーカー各社とユーザーとの協同研究会が発足し、探傷法、探傷器の特性、探傷結果と内部欠陥の関係などにつき、種々研究の結果、1960 年厚板の探傷法に関する統一的な基準をとりきめることができた¹⁾。一方日本学術振興会製鋼第 19 委員会超音波探傷法協議会が 1951 年に発足し超音波探傷の進歩に貢献してきたが、1965 年厚板の超音波探傷の自動化に関する研究の提案が行なわれ、鉄鋼メーカー 7 社、装置メーカー 4 社、中立委員 7 名の構成で実施され、その結果が 1967 年 7 月と 1968 年 10 月に報告されている²⁾³⁾。これらの経験を基にして(旧)八幡製鉄(株)と東京計器(株)は共同でこの開発にのぞみ数度にわたるオンライン実験の結果、1969 年 1 月に国産初の厚板のオンライン探傷装置が、新日鉄八幡製鉄所に設置され稼働を開始した⁴⁾。諸外国においては 1962 年に Krautkrämer 社によつて開発されているが⁵⁾、わが国でも住友金属和歌山製鉄所に同社の設備が設置されている⁶⁾。これらの探傷装置はいずれも比較的大きな欠陥を探傷する装置として開発されたものであるが、さらに微細な欠陥を探傷するために、オフライン自動探傷装置が開発されているが、日本鋼管(株)ではこの装置を UO 鋼管の製造ラインに設置しオンライン探傷を行なっている⁷⁾。

薄板の超音波探傷に関しては 1950 年頃から、フォルクスワーゲン社の工場で板波法による連続探傷装置が稼働している。その後 Krautkrämer 社⁸⁾、Lehfeldt¹⁰⁾ 社¹⁰⁾、Smith 社、IRSID などて実用装置が開発され、1960 年頃より冷延薄板だけでなく熱延鋼板の酸洗直後、酸洗ラインの中でも探傷が行なわれている。わが国においてはこれより数年遅れてようやく 1965 年頃よりオンライン探傷が行なわれた¹¹⁾。外国より数年遅れたのは国

内での探傷装置、とくに探触子、距離補償回路、記録方式の技術レベルが低かつたためである。しかしその後日本非破壊検査協会の 202 委員会などを通じて、板波探傷法の研究を行ない、また装置も米国との技術提携によるが、回転探触子の改良、距離補償回路の改良などがあり、十分実用可能となつた。さらに現在は熱延板の探傷が同様な方法でシアライン、酸洗ラインの直後に行なっている¹²⁾。また板波の理論的解明が尾上¹³⁾らにより行なわれており、実用面、理論面ともに諸外国に劣らない状況にある。海外では板波のモードにより欠陥の検出能が異なる点に注目して同時に多数のモードで探傷するために、周波数変調による方法¹⁴⁾、音響レンズによりフォカスされた探触子¹⁵⁾などが採用されており注目すべき方法と考えられる。さらに溶接鋼管の素材の探傷が要求され、電縫鋼管¹⁶⁾¹⁷⁾、スパイラル鋼管の製造ラインで実施されている。

鋼管に関してはラインパイプなどその使用条件がシビアで欠陥のある場合には重大事故に発展する可能性があるため、早くからオンラインでの超音波探傷が実施されておりとくに中径電縫管¹⁸⁾¹⁹⁾、スパイラル鋼管²⁰⁾、UOE 鋼管²¹⁾でオンライン超音波探傷が実施されており、現状では製造設備の一部となりつつある。ただし鋼管関係については電縫管を除いては輸入の装置が採用されており、今後国産の技術による開発が望まれる。

条鋼関係では Krautkrämer 社によつて開発された装置が使用されており、また最近では、Hauts Fournaux de la Chies 社²²⁾での実施例が報告されている。国内においては現状ではオフラインでの探傷が主となつており、今後オンライン化していく必要がある。

線材関係については磁歪振動を用いた超音波探傷装置が Krautkrämer 社によつて開発され、伸線機に取り付けられ探傷が行なわれており、注目すべき方法である。

そのほか圧延直後の高温でのオンライン探傷²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾が試みられており、今後の発展が期待される。

* 昭和45年11月26日 受付 (依頼技術資料)

** 新日本製鉄(株)技術研究所

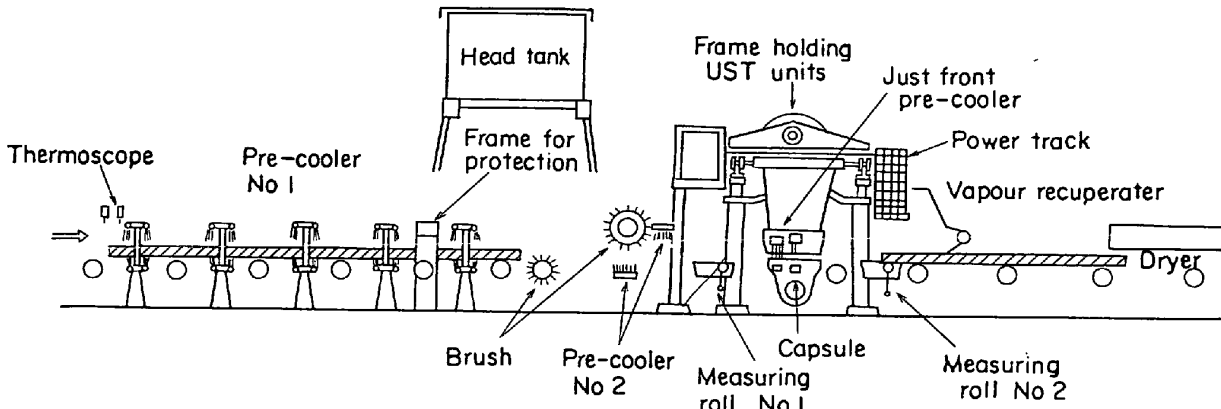


Fig. 1. Schematic view of on-line UST apparatus.

以上鉄鋼業における適用状況の概要を述べたが、以下各種の方法について詳述する。

2. 厚板のオンライン超音波探傷

厚板の探傷法には反射法と透過法が考えられるが、前者は主として精密探傷に、後者はオンライン探傷に用いられている。

2.1 厚板製造ライン上でのオンライン超音波探傷

Krautkrämer 社で開発した探傷装置は水ジェット方式の連続波透過法を採用しているが²⁾、新日鉄で開発した装置はパルス透過法を採用している。その概要⁴⁾を次に説明する。

2.1.1 主仕様

- (1) 被検査材; 厚さ, 5~40 mm, 幅 4 000 mm max, 温度 300°C max, 速度 60 m/min max
 - (2) 感度; 10m/m 長さの人工欠陥および完全なラミネーションを検出
 - (3) 方法; パルス透過法, 100 mm ピッチで c 方向に 40 個のプロブを配置し, L 方向に被検査材を移動しながら検査する。
 - (4) プロブ; 水柱接触, 水柱長さ上面 100 mm, 下面 50 mm, 使用水量 1.2m³/min, ノズル径 10 mmφ, 周波数 5 MHz, 繰返し周波数 1 KHz
 - (5) 記録; デジタルプリンター方式で 100 mm を一単位として, これを 10 区間に等分し, 1 区間のみに欠陥がある場合は 1 をカウントし, 100 mm 全体に欠陥がある場合には 9 をカウントする。これを 40 個の探触子について連続的に記録する。同時にトップからの長さ, スラブ No, チャージ No, 板厚, 製造年月日などがタイプアウトされる。
 - (6) 冷却システム; 直前予備冷却, 各サイド 1 セット, 水量 1.5 m³/min, 予備冷却; No 1, 10 セット, 0.8 m³/min No 2, 2 セット, 0.3 m³/min
- 以上の探傷ラインの全体図を Fig. 1 に, そのブロックダイアグラムを Fig. 2 に示す。Photo. 1 がその全景,

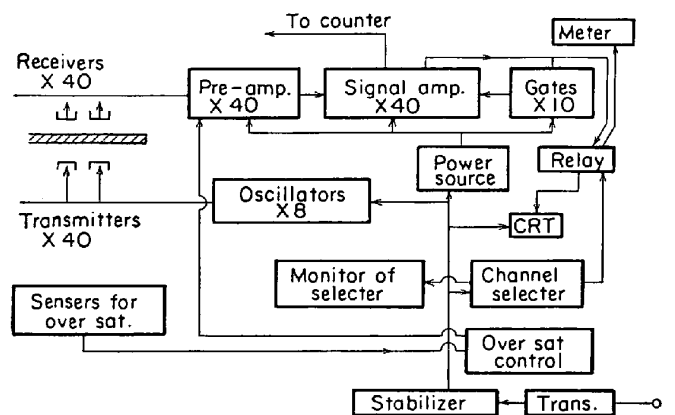


Fig. 2. Block diagram of on-line UST apparatus.

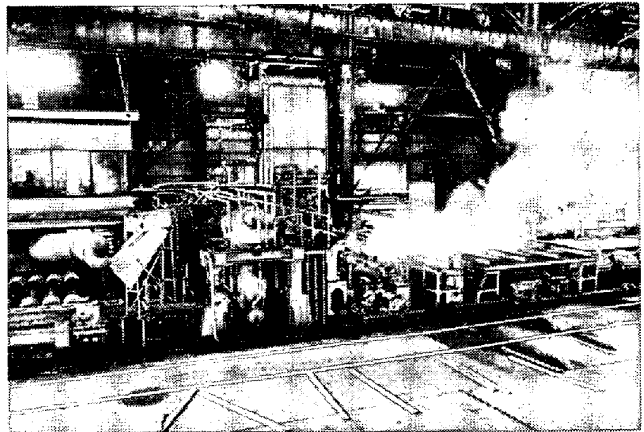


Photo. 1. On line UST station of the Yawata Steel Works.

Photo. 2 がノズルと水柱接触の状況である。

2.1.2 開発上の問題点

- (1) カプセル; 水柱接触方式を採用する場合に最も重要な点は安定した水柱を得るためのカプセル構造である。学振, およびわれわれ自身でこの点について検討した結果現在使っているのは Fig. 3 に示すごとく内部に #ゲタタイプのストレーナをもち, exponential curvature をしたノズルである。この場合の使用水量は 6~10 l/min head であり透過エネルギーの変動は 2 dB 以

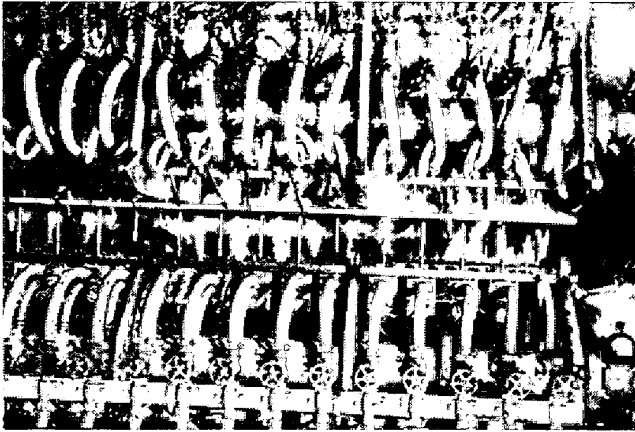


Photo. 2. Nozzles and water jets of on line UST.

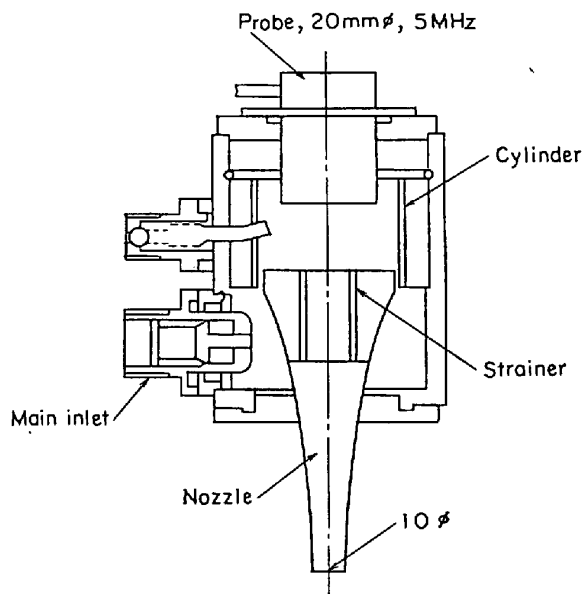


Fig. 3. Structure of capsule.

下である。

(2) 予備冷却; 高温で検査するためには、鋼板表面で蒸気によつて生ずるノイズに考慮を払う必要がある。Fig. 4に示すように鋼板温度が約 220°C になるとノイズが急激に増加する。学振などで研究の結果、主ノズルの直前に予備冷却装置として 12 mm 間隔で 3 mmφ の孔より 10 l/min の水を供給することにより Fig. 5に示すように温度限界を 70~90°C 高めることができた。またノイズ対策としては 2~2.5 MHz より 5 MHz のほうがよい結果が得られた。しかし直前予備冷却だけではただちに復熱し、表面温度が 100°C をこえるために安定した音響結合を得ることは困難である。また水冷のアンバランスによつて板が曲がる恐れがあるため、ある時間表面がぬれている必要がある。これらの問題を解決するには、検査点からかなり離れた点で水冷を開始すべきである。400°C 近くでの鋼表面における熱伝導度は非常に大きく、それだけにスプレーによる予備冷却は効果的

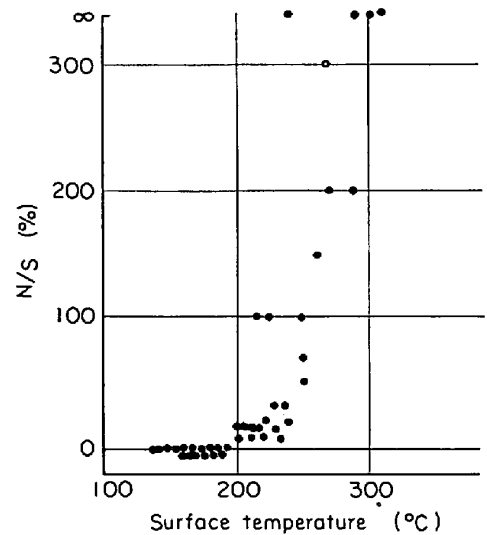


Fig. 4. The relation between N/S and surface temperature.

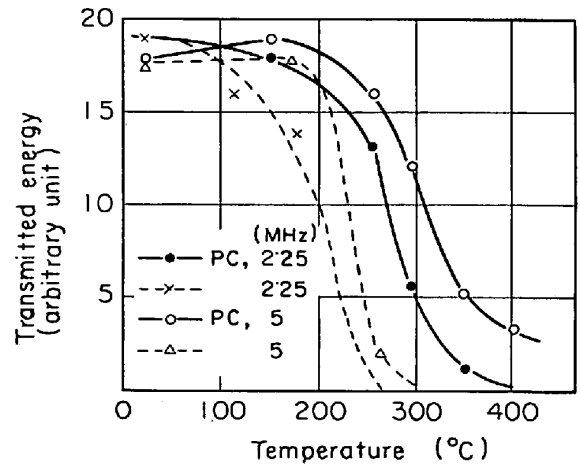


Fig. 5. The relation between surface temperature and transmitted energy.

PC(Pre-cooling): 10 holes of 3 mm φ, 12 mm apart, at just front of the main water jet. Total water, 10 l/min.

である。以上よりわれわれは検査点前 10m にわたつて予備冷却を行なっている。

(3) ブラッシング; 水冷のためスケールの部分的な剝離が起こり、これが音響結合をさまたげる。とくに 30 mm 以上の厚板ではスケールが厚くその影響が大きい。そのためにワイパーと回転ブラシで浮きスケールや水のごみを除去している。この結果ノイズ信号が減少し、信頼性が向上した。

(4) カウントダウン; これらの対策をこうしてもノイズが残るため、透過パルスが連続して 4 コ以上消失した場合に欠陥と認めるようにしている。

2.1.3 オーバーサチュレーション

厚板が厚く、温度が高いと超音波透過エネルギーは急激に減少するために、ノイズの発生が多くなる。これら

Table 1. Over saturation.

Temp.(°C)	(dB)			
300	18	18	24	24
200	12	12	18	24
100	12	12	18	18
0	12	12	18	18

の変動量を見かけ上取り除くためにレコーダーの飽和点以上に利得を上げることをオーバーサチュレーションといい、オーバーサチュレーションの値が大きければ検出能力が低いことを意味している。実用上 Table 1 に示すオーバーサチュレーションをかければ欠陥とノイズとの識別は十分可能である。

2.1.4 反射法、透過法、欠陥サイズとの関係

反射法で探傷する場合の欠陥の区分は通常 F_1/B_1 で行なっているが、これと透過法で探傷した場合との対応は²⁾、透過法で検査された欠陥を次のように区分する。

- ◎ No flaw
- Flaws under 10 dB attenuation
- X Flaws between 10-20 dB
- Y Flaws between 20-30 dB
- Z Flaws over 30 dB

また同一場所を反射法で検査し、次のように区分する。

- F Flaw echo only
- X $F_1/B_1 > 100\%$ or $B_1 \leq 50\%$
- △ $100\% > F_1/B_1 \geq 50\%$ or $F_1 > 50\%$
- $50\% > F_1/B_1 \geq 25\%$

条件; 5 MHz, 20 mmφ 直接接解プローブ, 感度, NDI-STB-N₁=50% Rejection off の結果次

のごとき対応づけができる。

Transmission	◎	○	X	Y	Z
Reflection	G	○	△	X	F

これより Table 1 に示したオーバーサチュレーションであれば $F_1/B_1 > 100\%$ の欠陥はほとんど検出できる。実際の欠陥サイズとの関係は

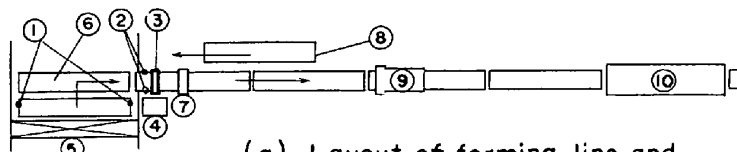
Transmission	◎	○	X	Y	Z
Flaw length (mm)	0	5	10	20	30

したがって 10 m/m 以上のラミネーションは、上記オーバーサチュレーションでほとんど検出可能である。

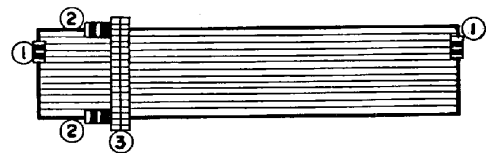
2.2 UOE 鋼管用厚板のオンライン超音波探傷⁸⁾

ラインパイはその使用条件が厳しいため各種の非破壊検査を使つて厳しい品質保証を行なっているが、まず第一に、有害な内質欠陥のない鋼板を使用することが必要である。そのため通常はオフラインで手動探傷を行なうか、最近開発されたオフラインでの自動探傷装置で探傷を行なっているところもある。第6図(a)に示すものは日本鋼管に設置されたもので鋼管の前処理ラインに設置されているものである。その全体配置図を Fig. 6 (a) に示す。探触子は Fig. 6 (b) のように配置し、四周を Edge tester と End tester で探傷し、中央は板幅方向に 6 in 間隔で探傷するようにしている。探傷装置は多チャンネル切換装置で各探触子に切換、分配された超音波パルスを順次探傷器に接続して連続探傷を行なう方式である。

この場合使用する探触子は分割型探触子で局部水浸式反射法を採用している。これは板厚の薄いものに適し Fig. 7 (b) にその構造を、Fig. 7 (a) にその特性を示す。図に示すように振動子は送信、受信が別々になっており、かつ小さな傾斜角をもっている。振動子と材料の



- (1) "End tester"
- (2) "Edge tester"
- (3) "Inside tester"
- (4) Testing operation cabin
- (5) Plate yard
- (6) Plate feeding table
- (7) Dryer
- (8) Plate delivery car
- (9) Edge trimmer
- (10) U-ing press



(b) Arrangement of probes and searching positions (●: face; ○: back)

Fig. 6. Arrangement of automatic ultrasonic testing equipment.

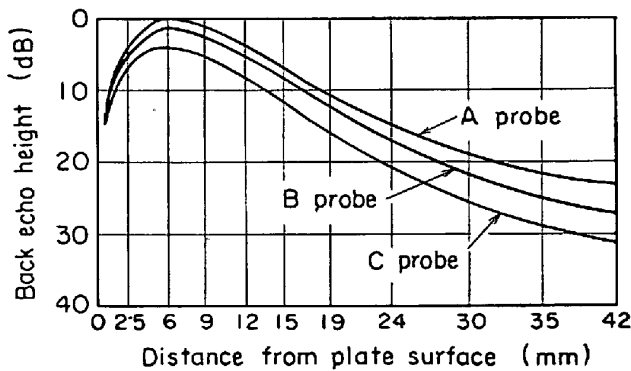


Fig. 7. (a) Distance sensitivity characteristics.

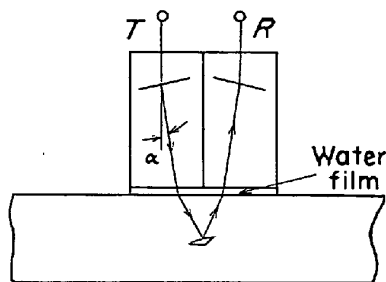


Fig. 7. (b) Double crystal probe.

間に遅延材がありこれで探傷器の追込み現象の影響をなくし、また傾斜により表面エコーを小さくしている。その特性は表面からの深さにより感度が異なり焦点にあるとき最高感度となる。また傾斜角を大きくすれば焦点が表面に近くなり、より薄い板の探傷が可能となる。欠陥検出能は Fig. 8 に示すようになるが、実際作業では $d=5.8$ 以上の欠陥をリジェクトするようにしている。

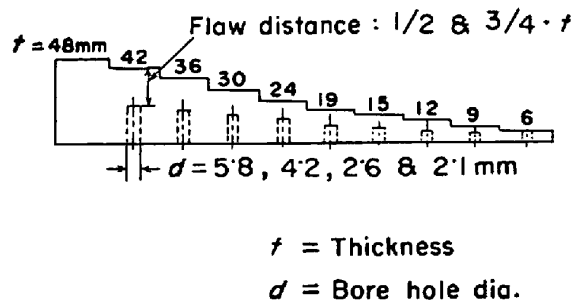
以上が現在使用されている代表的な厚板のオンライン探傷装置である。そのほかさらに高温での探傷方法としてロールで厚板を圧加して音波を通過させて探傷する方法が試みられている²⁷⁾。

3. 薄板のオンライン探傷

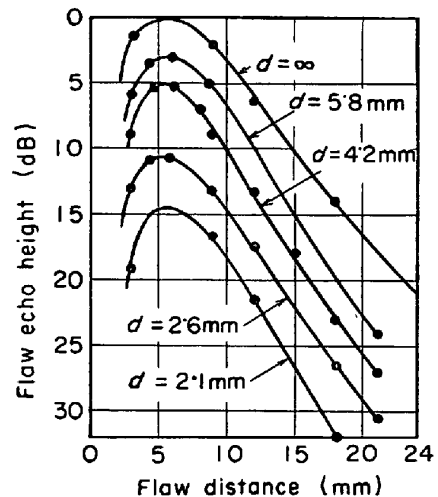
薄板には、0.5~2.3 m/m 厚の冷延薄板から 2.3~16.0 m/m 厚の熱延板まで含まれるが、代表的な探傷方法を示すと Table 2 のとおりとなる。実際にはほとんど板波探傷が用いられているので、これについて説明する。

薄板のように波長に近い厚さの場合には面の影響をうけて特殊な波動のみをよく伝える。粒子の振動方向は、縦波、横波成分のいずれもがあり、粒子は楕円状に動く。

これを板波と称している²⁸⁾。板波を強く出すためには、板の表面の振動と同調させて力を加えればよい。Fig. 9 に示すように、板中の音の1波長 B とくさびの接触面での振動とが一致するようにくさびの角度 θ を選ぶと板波を発生させることができる。したがって板波がよく伝わる条件は、板の厚さと周波数との積によつて定ま



(a) Reference specimen with flat-bottomed bore holes



(b) Flaw detection sensitivities depending on flaw distance

Fig. 8. Flaw detection sensitivities on flat-bottomed bore holes.

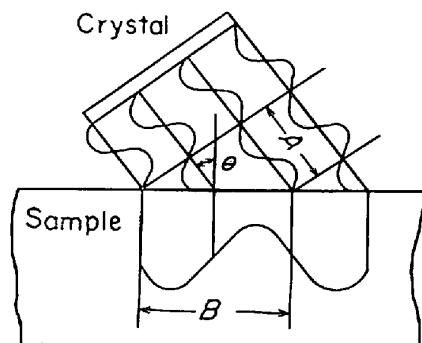


Fig. 9. Principle for generating plate wave.

り、一般に多数の形式が同時に存在しうる。板が波を打つような伝わり方の斜め対称モード (a モード) と、板がふくらんだり細くなつたりして伝わる対称モード (S モード) に大別できる。

Fig. 10 に水を用いて鋼板中に板波を発生させる場合、ある板厚、周波数のとき音波の入射角と発生する板波モードとの関係を示す²⁹⁾。

板波を用いた薄板の探傷は海外では Lehfeldt¹⁰⁾, Krautkrämer, IRSID など探傷装置が開発され 1957 年頃よりオンライン化されていたが、わが国では 1965 年頃より八幡製鉄所の冷延工場で実用化されたのが始まりで

Table 2. Ultrasonic test methods for thin sheet.

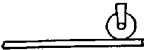
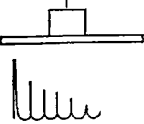

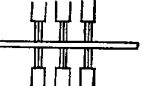
Methods	Adaptive thickness (mm)	Detectable width by a probe (mm)	No of probes for inspecting 1 300mm width sheet	Non-inspectable width % or mm	Detectability	Application
Plate wave method 	0.3~16.0	700~1 500	1~2	100~150 mm (Both edge)	very good	<ul style="list-style-type: none"> • Cold strip mill • Shear line • Pickling line
Multiple echo method 	3.0 up	20	26 (50 mm pitch)	60%	normal	• not yet applied
Double crystal probe method 	5.0 up	20	86 (50 mm pitch)	60%	very good	• Pipe mill
Through transmission method 	40 below	10	26 (50 mm pitch)	80%	normal	<ul style="list-style-type: none"> • Plate mill • Pipe mill (Edge testing)

Table 3. Suitable modes for plate thickness.

Thickness (mm)	Modes	Attenuation coefficients (dB/cm)
0.2~0.9	S_0	0.18~0.20
1.0~1.4	A_1	0.13~0.15
1.5~2.1	S_1	0.20
2.2~3.0	S_2	0.18~0.23
3.1~4.5	S_3	0.25

Frequency : 2.25 MHz

ある¹¹⁾。板波探傷の場合には板波のモードにより検出感度が異なる。われわれが使用しているモードは Table 3¹¹⁾のとおりである。減衰は距離補償回路によつて補償している。板波のエコー高さは、そのモード、周波数、板厚、介在物の質と形状ならびに板面よりの深さ、ビームに対する欠陥の方向などに関係するが、欠陥エコーと実在欠陥寸法との間にははつきり一対一の関係は¹¹⁾ない。しかし探傷結果と深絞り性との間にはある程度の傾向が認められるので、キズエコー高さとその長さおよび頻度などを組み合わせたデータより統計的に取り扱うようにすれば品質管理上非常に有効である¹¹⁾。当初国内では探傷装置、とくに探触子、距離補償回路に問題があり、ま

た研究も遅れていたためにあまり使われなかつたが、その後日本非破壊検査協会の 202 委員会などが中心となつて研究を行なつた結果、最近では熱延板にも適用され、オンライン探傷が行なわれている。新日鉄広畑製鉄所での設置状況を¹²⁾ Fig. 11, Fig. 12 に示す。探傷周波数は 1 MHz, 式は 2.25 MHz, 探傷モードとしては入射角 17~29° が用いられる。探傷速度としてはリコイリングラインが最も速く 400 m/min である。探傷板厚はシアラインが最も厚く 1.6~6.3 m/m である。

従来の板波探傷法は単一の周波数を用いているので、板厚変動の際には厳密な角度調整などが問題となるが、この対策として E. J. KUBIAK らは周波数変調をした板波法を用いて探傷を行なつている¹⁴⁾。この方法では、(1) 板厚を測る、(2) ラミネーションとクラックを検出する、(3) 介在物を検出する、(4) 熱処理と結晶構造の差を検出する、(5) 欠陥の差を検出できる、(6) ±2% の再現性をもつと報告されている。この方法は周波数を変えることにより多数のモードで探傷する方法であるが、これと同じ目的に、R. POHLMAN らは音響レンズを使った板波透過法を用いている。Fig. 13 に示すようにレンズで絞つた場合、音波の入射角は 5~35° となり、同

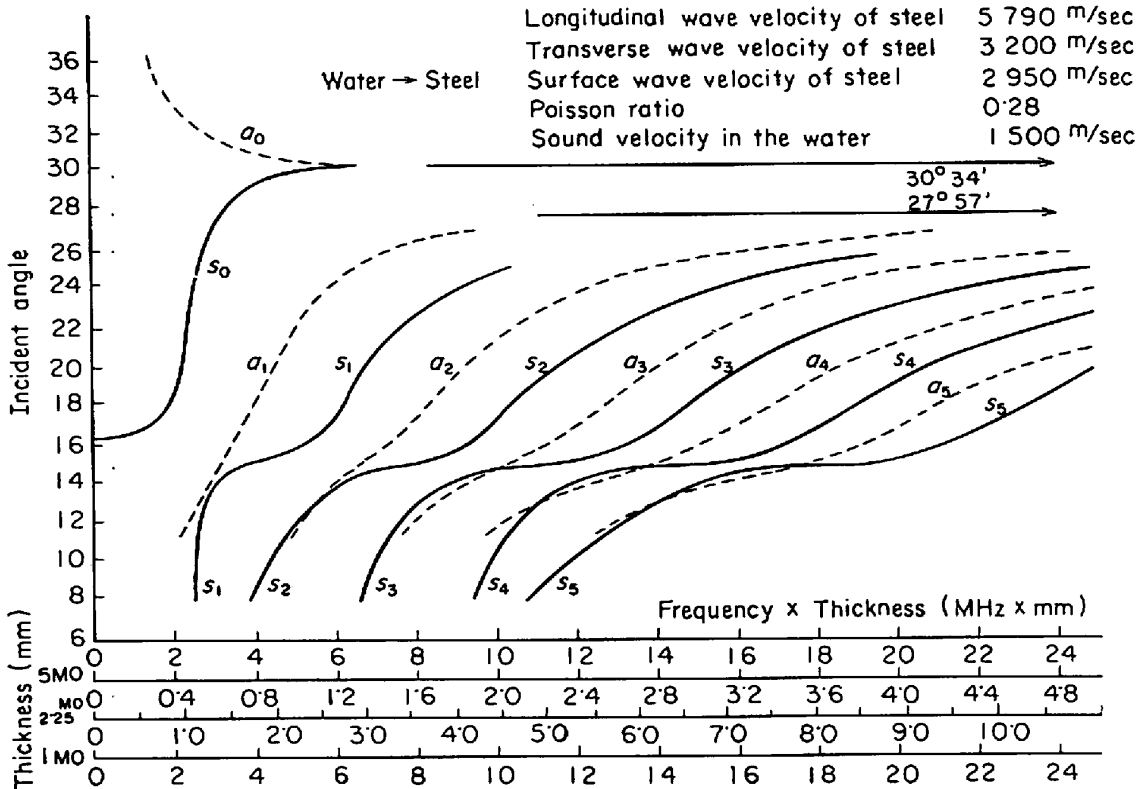


Fig. 10. Generating modes of plate wave according to frequencies and plate thickness.

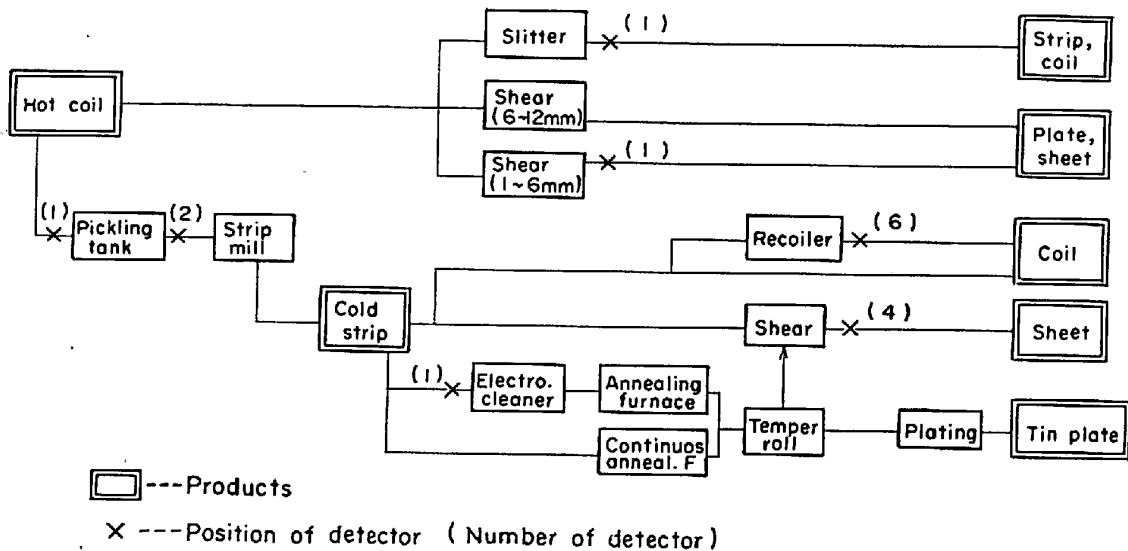


Fig. 11. Location of on-line flaw detection apparatus.

時にいくつかのモードが励振される。2 mm 厚、2.8 MHz で A_0, S_0, A_1, S_2 を同時励振する。この装置では、角度調整が不要で、減衰だけをみればよく、広中酸洗槽の前で 600 m/min で探傷できたと報告されている。

また R. POHLMANN¹⁵⁾ は板波で 30 m/m 厚までの鋼板を探傷するための基本的問題の解明を行ない、大きな励振長さを取り送信パルス幅を大きく正確な共振角をとつたとき板波が励振される、実際に実験に使用した装置は振動子が 130×130 m/m ジルコン酸鉛で 0.4 MHz、

送信パルス 2~200 μ sec である。

鋼管の素材(熱延板)の中央部の探傷方法としては主に回転探触子による板波探傷が用いられている。Photo. 3 はスパイラル鋼管のレバラーの後で板波探傷を行なっている例である。その他2分割探触子を振動させる方法、透過斜角探傷装置¹⁸⁾を振動させる方法なども用いられている。

エッジ部の探傷方法としては主として水注ジェット方式による透過法¹⁶⁾¹⁷⁾が用いられているが、比較的厚いほ

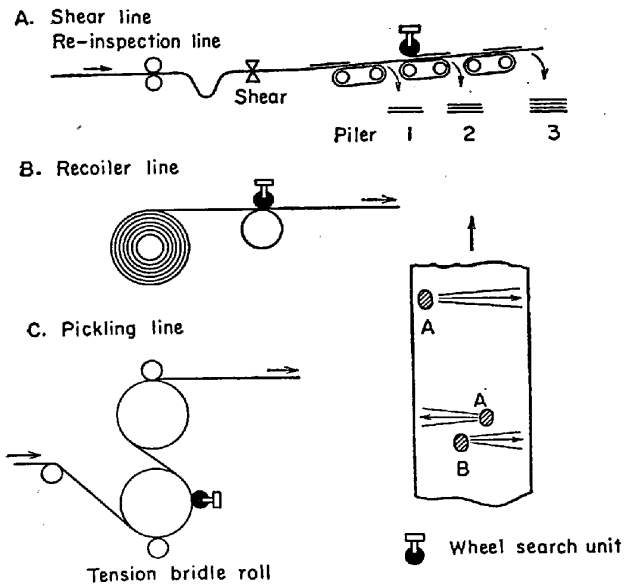


Fig. 12. Classification of probe-contacting method.

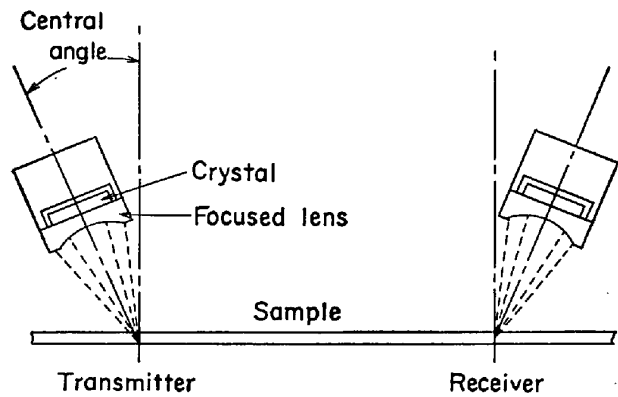


Fig. 13. Generation of plate wave by focused probes.

うでは2分割探触子¹³⁾が用いられる。いずれも製管のオンラインに設置されている。

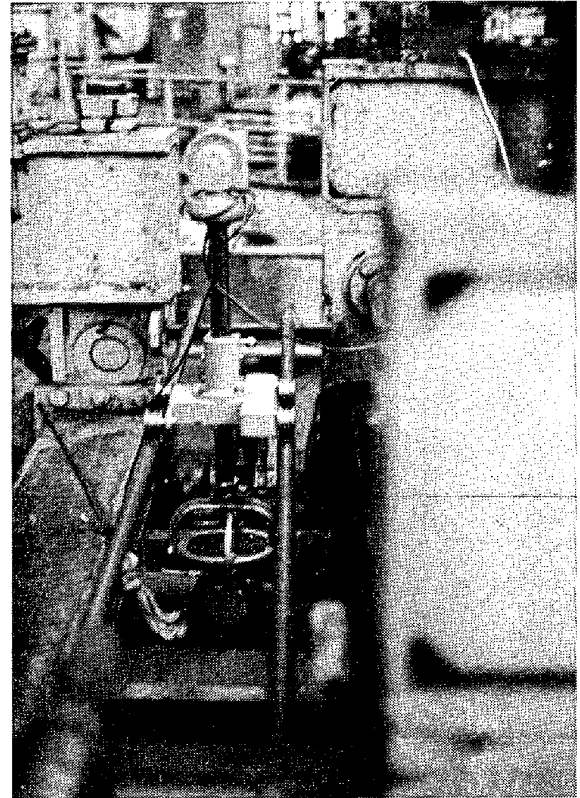


Photo. 3. Plate wave testing on the spiral mill.

4. 鋼管のオンライン探傷

鋼管はその製造法、寸法などによつて種々の非破壊検査が行なわれている。とくにボイラーチューブ、ラインパイプは事故が発生した場合の危険および損害が大きいため、他の鋼材にみられない厳密な非破壊検査が要求される。溶接鋼管については溶接部の品質保証のためにとくに重視され、機械構造用、小径配管用を除くほとんどすべての製管ラインでオンライン探傷が行なわれている。

鋼管に対する各種探傷法の適用状況を Table 4 に示

Table 4. Different NDT methods for pipes.

Kinds of pipes	Outside diameter (mm)	UST	Eddy current	Magnetic	X-ray	Penetrant
Seamless pipe	89.1φ under	◎	◎	○	—	△
	89.1φ up	◎	○	○	—	△
Electric resistance welded pipe	89.1φ under	◎	◎	○	—	△
	89.1φ up	◎	○	○	—	△
Sub-merged arc welded pipe	—	◎	—	△	◎	△

◎ : Very good applicable
 ○ : Good applicable
 △ : Only sampling test
 — : Not applicable

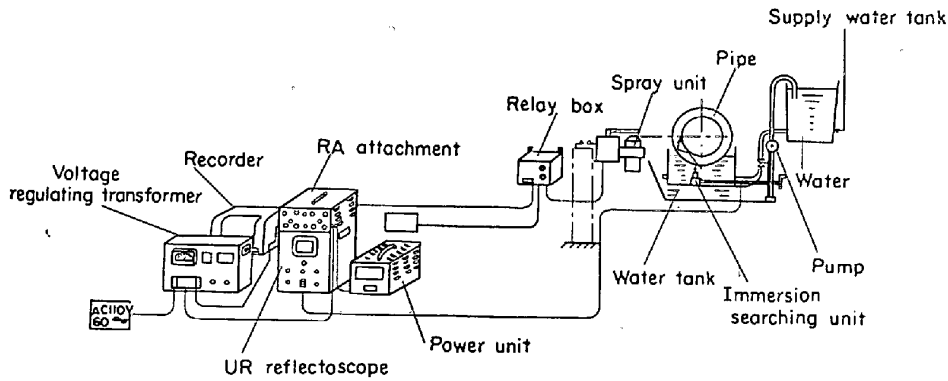


Fig. 14. Ultrasonic immersion pipe detector diagram.

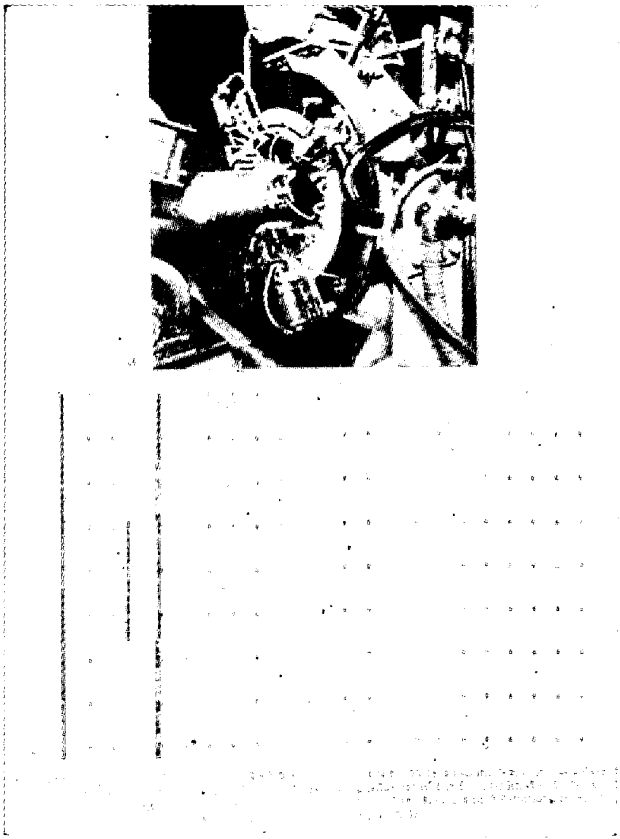


Photo. 4. Pipe testing instrument using revolving probes.

す。

この表よりもわかるように超音波探傷が最もよく使われている。ただし鋼管のオンライン超音波探傷装置は電縫管用の一部を除いてはすべて輸入品である。今後は国産探傷装置の開発に力をそそぐ必要がある。

継目無鋼管は全面探傷を行なう必要があるため探触子を高速で回転するか、鋼管を回転する必要があるため、現在はおもにオフラインで寸法、品種別に区分して探傷を行なっている。しかし最近 Krautkrämer, Stewards & Lloyds など高速で探触子を回転する装置が開発され、製管機の速度に合わせてオンライン探傷を行なっているようである。

Steward & Lloydsでの実施例を Photo. 4 に示す。探傷方法はパルス反射法、水柱ジェット接触、探触子の回転数は 100~150 rev/min, 探触子の数 8 個, 探傷速度 1~30 m/min, で板厚も垂直探傷法により測定し Photo. 4 (b) のように記録される。

小径管の場合には種類が多いため設備上の経済的な理由から現在ではあまり普及していない。

ケーシング、チュービング、などについては全数検査が要求される傾向にあり、今後はさらに高速な探傷装置の開発が必要である。

電縫鋼管のオンライン超音波探傷はわが国では1960年より中径電縫管の成形機の途中で探傷する方法が実用化され、その後すべての中径管ミルに採用されている。小径電縫管では超音波探傷よりも渦流探傷法が用いられており、高級電縫管のラインで実施されているだけである。

電縫管の探傷は通常、溶接直後と、水圧試験後の 2 回実施される。前者は主として品質管理用に、後者は品質保証用で使用される。探傷方法としてはいずれもパルス反射法、接触方法としては、シューによる方法、水柱ジェット方式、部分水浸方式などが用いられる。代表的な装置を Fig. 14, Photo. 5, Photo. 6 に示す¹⁹⁾。この検出感度としては API 規格に基づいて、肉厚の 10% 深さのスリットキズが十分検出できる必要がある。この場合

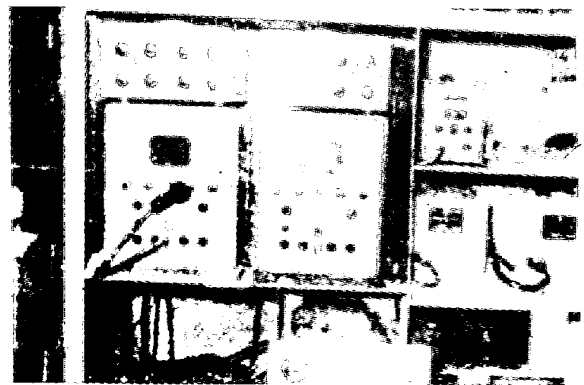


Photo. 5. A view of ultrasonic testing apparatus for ERW.

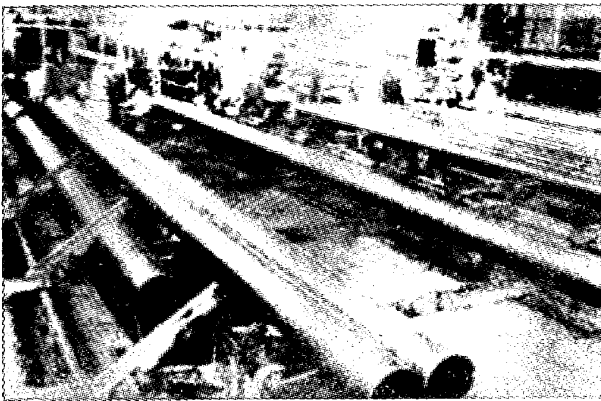


Photo. 6. A view of conveyor line for ERW.

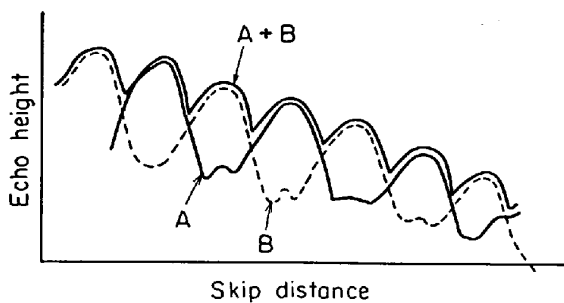


Fig. 16. Relation of skip distance to echo height.

問題となるのは検査中に溶接シーム位置が変動するため、探傷感度が変わることである。

その対策として Fig. 15 に示すように探触子 2 コを用いて変動分を補償するようにする。その関係を Fig. 16 に示す。

探触子を増加すればさらにフラットな特性を得ることが出来る。また距離による減衰は距離補償回路により補正できる。以上は溶接部の探傷であるが、最近では Stewards & Lloyds のように母材の探傷も同時に行なう。回転プローブ方式が中径管にも採用される傾向にある。

電弧溶接管は主としてラインパイプに使用されるが、その使用条件は厳しくなっているため、その品質保証態勢も十分なものが要求される。従来電弧溶接部の探傷は X線が主として使われていたが、最近探傷器の性能、とくに分解能、感度の向上によりブローホール、スラグ捲込みなども検出可能となつたため、オンラインに使用されるようになった。海外では Krautkrämer など装置が進歩していたために比較的早くからオンライン化されていたが²⁹⁾、わが国では 1965 年スパイラル鋼管用として採用されたのが始めてである²⁰⁾。その後超音波探傷の有効なことが認められ、またユーザーの要求もあり、ほとんどすべてのラインに設置されている。Fig. 17 に UOE 鋼管の製造工程を示す。拡管前と後で 2 度オンライン探傷を行なう。No 1 UST は不良溶接部を補修するために使用し、No 2 UST は拡管で発生する欠陥の検

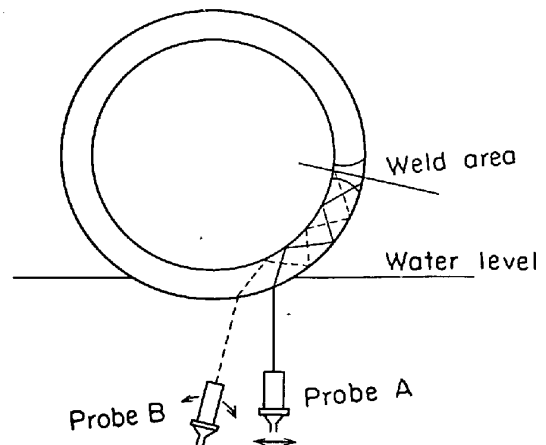


Fig. 15. Probe arrangement for ERW pipe testing.

出、および品質保証用である。

スパイラル、UOE、あるいはゲージフォーミング鋼管では鋼管外径が非常に大きくなるため通常探触子だけを局部水浸にして探傷する。探触子の配置には Fig. 19 に示すように 3 つの方法が考えられる。(a) は装置として簡単があるが調整がむずかしいためあまり使われていない。(b) は縦方向の欠陥の検出用として使われる。この方法は Hoesch が開発した方式で、電子的切替装置により探触子と被検材のカップリング状況をチェックできるようになっている。その探傷状況を Fig. 19, Fig. 20 にブロックダイアグラムを Fig. 21 に、その装置を Photo. 7 に示す。肉厚が厚くなつた場合には Fig. 22 に示すように超音波ビームが溶接部全体をカバーできなくなるので Fig. 18(c) のように縦方向の欠陥用として 2 組、さらに横方向の欠陥用に 1 組計 3 組使用している。大径鋼管の場合には Fig. 17 にも示すように超音波探傷、X線探傷などを総合して品質管理を行なっているのが特徴である。

5. 条鋼の超音波探傷

条鋼関係に関するオンライン探傷は比較的少なく、ビレット、線材に 1 部採用されている程度である。Fig. 23 は Krautkrämer が開発したビレットの連続探傷装置²⁴⁾である。この方式は 1 探触子法を 2 組組み合わせる方法である。Hauts²³⁾ Fournaux de la chiers では 1 面より超音波を入射し、4 面でこれを受ける。これを 4 面にわたつてくりかえし、ここに得られる 16 の探傷結果を電子計算機を使つて総合して欠陥の種類、拡がり求めて切捨てかどうかの判定をして、ビレットの分類を行なっている。探傷方法としてはきわめて理想的な方法であり、今後の探傷方法の開発の方向を示している。

引抜き線材の探傷方法としては Krautkrämer が開発した磁歪振動を使用した探傷装置がある。この方法は中間に接触媒質が必要なく、被検材自身を振動させる方法である。その探傷方法を Fig. 24 に示す²⁴⁾。この方法で

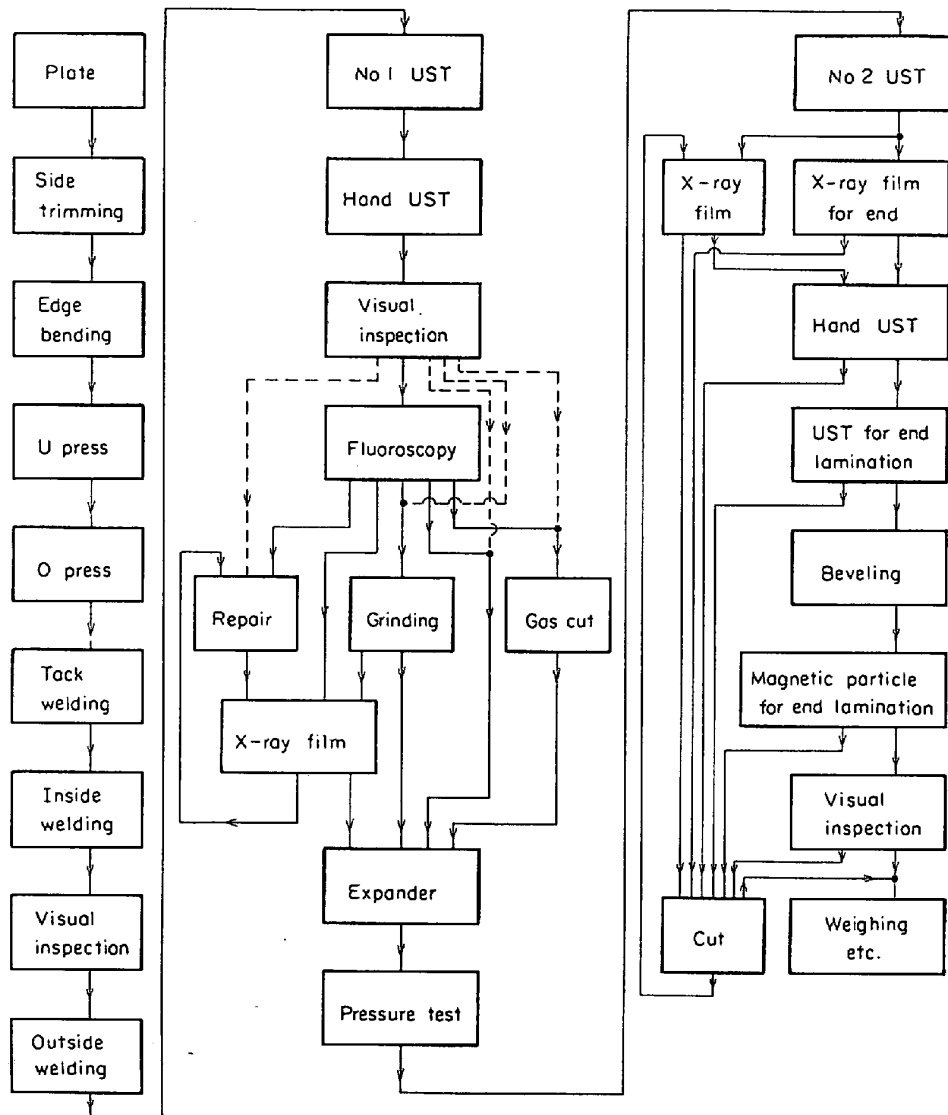


Fig. 17. Flaw detecting sequence for manufacturing UOE pipe.

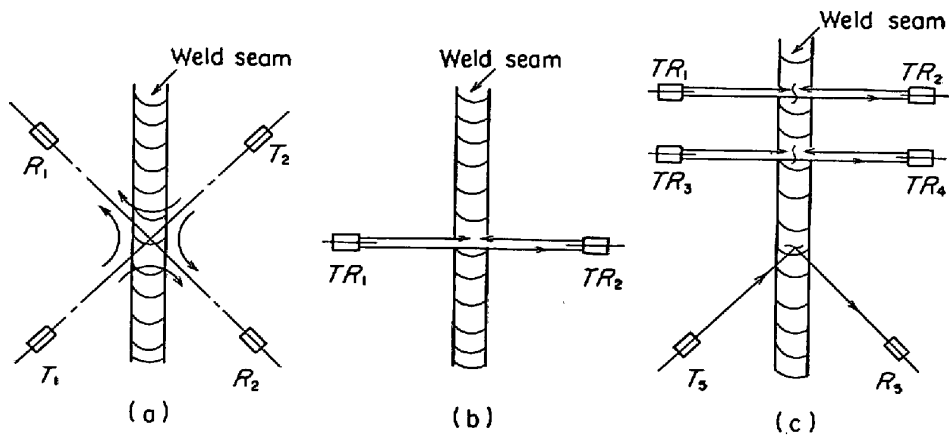


Fig. 18. Various probe arrangement in UST of welded joints.

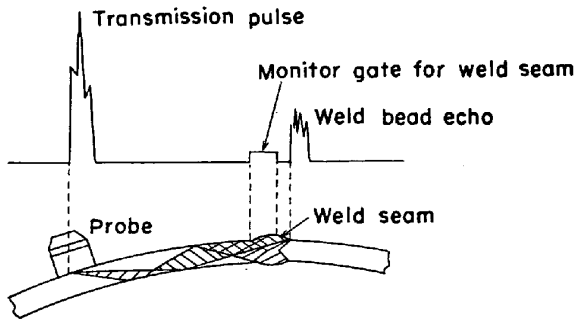


Fig. 19. Relationship between weld bead echo and monitor gate for weld seam.

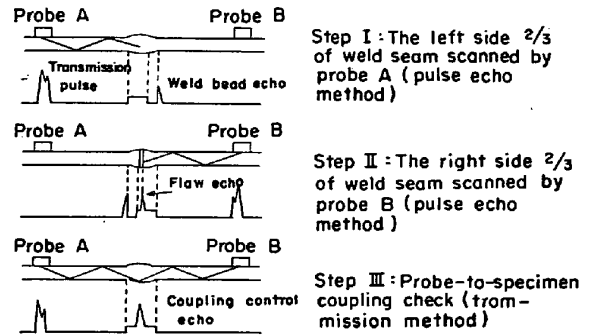


Fig. 20. Method of weld inspection using by electronic switching device.

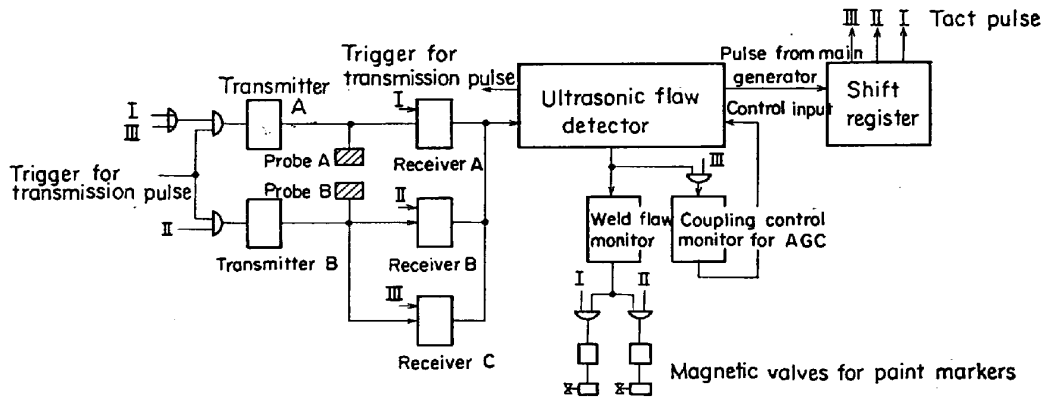


Fig. 21. Block-diagram of ultrasonic flaw detector for weld inspection using by electronic switching device.

の欠陥の検出能は深さ 20 ミクロン、長さ数 mm の欠陥も検出可能であり、検査速度は 10 m/s まで可能である。

6. 今後の方向

現在の探傷法では得られる情報が比較的小さいため実用上問題が多い。そのため今後はできるかぎり多くの情報を組み合わせ、たとえば電子計算機を利用してより精密な判断をして、切断あるいは手入などを自動的に行なう方向に進むと考えられる。超音波探傷で得られる information としては、周波分析による方法、delta method にみられるように散乱した音波をとらえる方法、探触子を多数用いる方法、acoustic emission などが考えられ、これらの研究が進むにつれてオンライン探傷方法も進歩すると考えられる。もう一つの方法としては引抜き線材にみられるように接触媒質の必要のない探傷法の開発である。最近では磁歪振動、電磁機械力¹⁸⁾による超音波探傷の研究も進められており今後の成果が期待される。また超音波、磁気、渦流、光などの各種探傷法を組み合わせたより完全な検査を行なう方法が今後とられるであろう。

オンライン探傷は生産の高速化に応じて、より完全な品質保証をするため、また鉄鋼業で最も合理化の遅れて

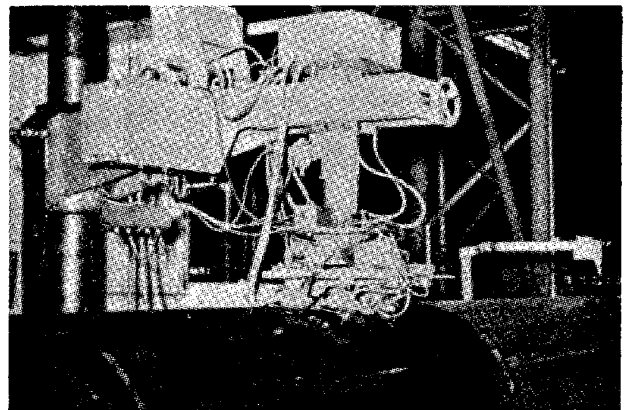


Photo. 7. A view of on line scanning mechanism for spiral mill.

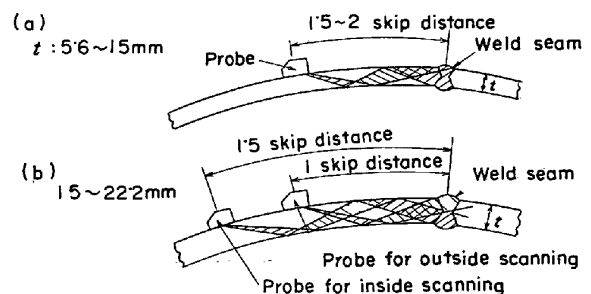


Fig. 22. Principle of scanning from a constant distance by 70° angle probes.

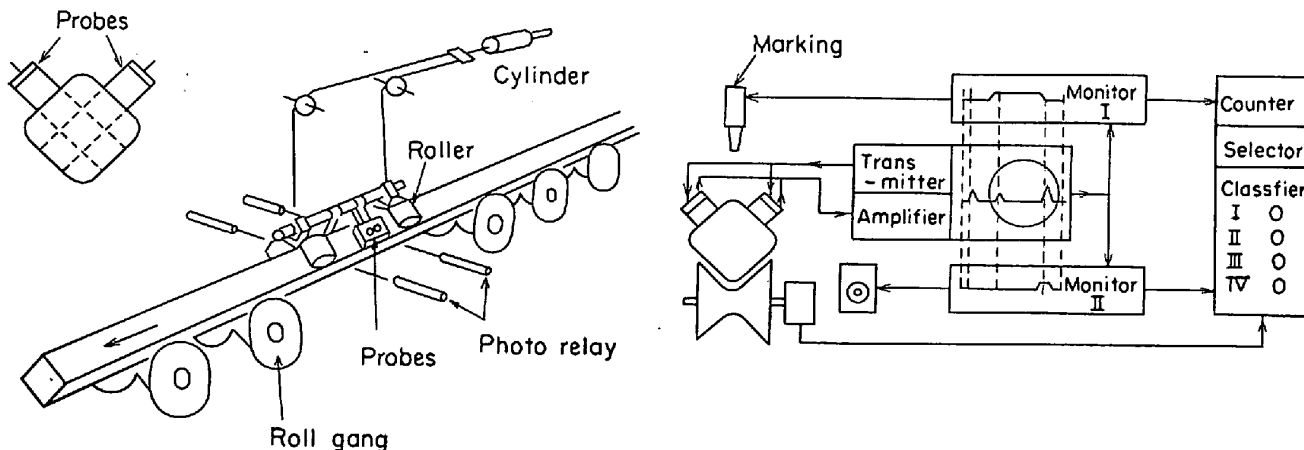


Fig. 23. Billet testing apparatus (Niederrheinische Hütte).

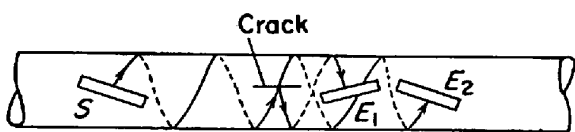


Fig. 24. Testing round stock by magnetostrictive excitation according to KAULE[173].

S transmitter; E_1 receiver for crack echoes; E_2 receiver for sound transmission pulse.

いる整精検査部間の合理化のためにも今後ますます採用されるであろう。

終わりに今後のオンライン探傷装置は大型化するために開発に多額の費用を要するため、とかく輸入に頼りがちとなるが、学振の厚板探傷法の開発にみられるような共同開発を行ない、海外にもみられない自主技術の開発を今後行なうべきと考える。

文 献

- 1) 厚板超音波探傷研究会, 超音波探傷の実際
- 2) 日本学術振興会, 厚板の自動超音波探傷法研究報告書
- 3) 同上, 同上第2次研究報告書
- 4) 新日鉄, 八幡技研 学振の自動探傷の発展 (厚鋼板の連続自動探傷について) 学振第19委員会提出資料 9157
- 5) H. KRAUTKRÄMER: Mat. Eval., 22 (1964), p. 464
- 6) K. FINK: Stahl u. Eisen, 85 (1965), p. 353
- 7) 田村ほか, 住友金属, 21 (1969), p. 197~202
- 8) 武藤ほか, 日本鋼管技報,
- 9) H. KRAUTKRÄMER: Mat. Eval., (1964), Sep. p. 404~403
- 10) H. J. KOPINACK ほか: Stahl u. Eisen, 77 (1957) 11, p. 727~734

- 11) 関野: 学振製鋼 19 委員会提出資料, 7852
- 12) 磯野ほか, 第6回非破壊検査国際会議論文集 Report No K 3
- 13) von K. BERNER ほか: 同上 Report No K 6
- 14) E. J. KUBIAK ほか: 同上 Report No K 5
- 15) R. POHLMANN: 第6回非破壊検査国際会議論文集 Report No K 7
- 16) 山本ほか: 住友金属, 19 (1967) 2, p. 187~194
- 17) 三輪ほか: NDI, vol 14, No 2
- 18) H. WUSTENBERG, 第6回国際会議論文集, Report No B 4
- 19) 片倉ほか: 住友金属, 17 (1965) 3, p. 259~267
- 20) 土門: 非破壊検査の自動化と高能率化に関するシンポジウム, (1967) p. 11~18
- 21) 山本ほか: 住友金属, 20 (1968), 4 p. 404~409
- 22) KRAUTKRÄMER: Ultrasonic Testing of Materials, p. 344~346
- 23) R. V. HUSARK ほか: 第6回非破壊検査国際会議論文集, Report H 1
- 24) KRAUTKRÄMER: Ultrasonic Testing of Materials, p. 342~344
- 25) M. ATKINS ほか: JISI, 204 (1966) 6, p. 607~608
- 26) I. TAZIRI ほか: Yawata Technical Report, (1964) No 245, 4585
- 27) 魚住ほか: 第6回非破壊検査国際会議論文集, Report No L 8
- 28) 日本非破壊検査協会: 非破壊検査便覧 p. 551~555
- 29) API symposium on NDI at Chicago (1963) Non-Destructive Testing in some European Factories
- 30) von K. Fink: Stahl u. Eisen, (1965) 6, p. 353~372