

シームレス鋼管用熱間肉厚計の開発*

Development of On-line Wall Thickness Gage for Seamless Steel Tubes

船 生 豊**
Yutaka Funyu

奥 村 精***
Tadashi Okumura

松 岡 逸 雄****
Itsuo Matsuoka

村 上 昭 一*****
Shoichi Murakami

Synopsis:

Through the joint efforts of Kawasaki Steel Corporation and Fuji Electric Co., Ltd., an on-line wall thickness gage was successfully developed for the first time in the world, and introduced into the medium diameter seamless tube mill of Kawasaki Steel's Chita Works.

The gage is of the multi-beam type utilizing γ rays, with its epoch-making feature for measuring the wall thickness of pipe to an accuracy of 0.1 mm and a response speed of 0.1 sec. with no physical touch to the pipe and by continuously scanning multiple points on the circumference of the pipe over its entire length while it is still hot.

With the introduction of this equipment, the rolling line has been automated to a great extent, and the instant feed back of measured values to the mill by the process computer has resulted in marked improvements in quality and yield.

1. 緒 言

知多製造所において、1978年より稼動を開始した新中径シームレス鋼管工場は、プロセスコンピュータや各種のオンラインセンサーを大幅に採用した高度な自動化システムを導入することにより、品質、歩留りおよび生産性等の面で大きな成果をあげてきた。

当社はさらにこの自動化システムをよりグレードアップするため、富士電機製造(株)と共同で世界で初めてパイプ熱間肉厚計の開発に成功し、このほど前記中径シームレス鋼管工場に導入した。これにより熱間オンラインでパイプの肉厚を即座に知ることができるという、シームレス鋼管操業

技術者の長年の夢が初めて実現された。

以下に、熱間肉厚計の開発についてその概要をのべる。

2. 開発の方針

中径シームレス鋼管工場は Table 1 に示すとおり、7" (177.8mm ϕ)~16 $\frac{3}{4}$ " (426.0mm ϕ)までのシームレス鋼管が生産できるプラグミル方式の最新鋭工場である。当工場は前述のようにプロセスコンピュータを導入し、各ミルに温度計、ロードセル、外径計および長さ計等の精度のすぐれたオンラインセンサーを配置し、全ミルを完全自動制御化している。

しかしこの自動制御システムは、熱間オンライ

* KAWASAKI STEEL TECHNICAL REPORT
(1981) 4, 14~22 に掲載
**** 知多製造所設備部部長

** 知多製造所設備部設備技術室主任(課長)
*** 知多製造所設備部設備技術室主任(掛長)
***** 知多製造所企画部部長

Table 1 Specification of main equipment

Equipment	Maker	Specification
Shot blasting machine	Shinto Industries Co., Ltd.	Type: Billet not turned, Motor: 37 kW×6 Projection density: Max. 50 kg/m ²
Billet cutting	Wagner-Tsune Machine Tool Co.	Type: Round saw blade, Main motor: 45 kW Cutting speed: Max. 164 m/min
Rotary hearth furnace	Daido Special Steel Co., Ltd.	Number of zone: Pre-heating 1, Heating 5, Soaking 2, Extracting 1 Capacity: 160 t/h, Furnace temperature: Max. 1 350°C Diameter of centerline circle of hearth: 12 m
Piercer	Demag-Meer, Mitsubishi Heavy Industries Co., Ltd.	Type: Vertical roll, Main motor: DC 3 500 kW×200 400 r.p.m.×2 Diameter of roll: Max. 1 350 mm, Feed angle: 5-14 deg.
Elongator	Ditto	Ditto
Plug mill	Aetna Standard, IHI Co., Ltd.	Type: Single groove, Main motor: AC 3 000 kW Outlet speed: Ave. 3 m/s
Reeler	Ditto	Type: Barrel roll, Main motor: DC 370 540 kW×2×2 Diameter of roll: Max. 1 000 mm
Reheating furnace	Daido Special Steel Co., Ltd.	Type: Walking beam, Furnace temperature: Max. 1 000°C Capacity: 160 t/h
Sizer	Aetna Standard, IHI Co., Ltd.	Type: 2 rolls, Stand: 8 Motors: DC 175 kW×480/1 200 r.p.m.×8
Cooling bed	Sumitomo Heavy Industries Co., Ltd.	Type: Roller chain conveyor with water-tank Total length of table: 400 ft.

ンにおける鋼管の肉厚だけは直接測定できないため、ビレット重量と各ミルでの長さおよび外径の測定値から間接的に演算される平均肉厚を用いてきた。

2.1 肉厚測定の困難性

熱間オンラインにおけるパイプ肉厚測定については、品質や歩留りの点からその重要性が認識されているにもかかわらず、世界的にみて実施例もなく、測定原理すら確立されていない状況にあった。その理由は、次のとおりである。

- (1) パイプの断面が閉じた形状をしているため、通常知られている透過型厚さ計などでは、いわゆるダブルウォールしか測定できないこと。(鋼管断面の相対する2つの肉厚を同時に測定する)
- (2) 約1 000°Cの高温熱間ラインで悪環境下にあること。
- (3) パイプが長手方向に2～7 m/sの高速で走行し、かつ場所によっては回転していること。

など難かしい条件が多い事に起因しているものと考えられる。

2.2 肉厚計の開発方針

品質や歩留りの一層の向上を図る方策の一つとして、熱間オンラインにおける肉厚測定計を開発

すべく検討し、以下の条件を前提とした。

- (1) 測定対象が高温でかつ走行状態にあるため、接触によるキズ発生防止の上から非接触測定で高い応答速度を確保すること。
- (2) 熱間で粉塵、水分などの悪環境下で連続的に長時間使用できる高い信頼性と耐熱性を有すること。
- (3) 肉厚は間接的に演算により求めるのではなく直接的に測定できること。
- (4) パイプ1本の平均肉厚ではなく、パイプ全長にわたる長手方向と円周方向の肉厚変動について、正確な測定値が得られること。
- (5) 肉厚測定値をミル制御に迅速にフィードバックするために、熱間でリアルタイムに測定できること。
- (6) プロセスコンピュータを介してミルへのフィードバックのための最適な信号処理を実現できること。

3. 測定方式の開発

3.1 開発の経緯

Table 2 に現在までの開発経過を示す。1978年に開発に着手して以来1981年まで足掛け4年間を

Table 2 Process of development

Item	1978	1979	1980	1981
1. Survey and pre-study	4	12		
2. Development of scanning method (1st step)	Basic study Simulation Experiment by trial device	3 7 12		
3. Development of multi-beam method (2nd step)		Basic study Experiment by trial device	2 7 10 12 Study of pipe fluctuation effect Prediction of practical device	
4. Design and manufacture of practical use device			Design Manufacturing	2 9 On-line

要した。以下に開発の経緯を説明する。

従来の鋼管の片肉だけを測定する、いわゆるシングルウォール肉厚計として存在するものは、いずれも冷間において超音波の反射、放射線の反射を利用したもの、或は管端約1 mのみに放射線源を挿入し、放射線の透過を利用して冷間で測定するものであり、熱間ラインには適用出来ない。近年その応用が話題になっている電磁超音波については、将来の発展性は考えられるものの、検出用コイルと被測定物との距離を高々2 mmまでしか離すことが出来ず、いわば半接触式であり、熱間では問題が多い。以上の調査から我々は、非接触式、熱間オンライン用としては、放射線透過方式しかないとの結論に達した。放射線種としては、被測定物の肉厚などを考慮して、 γ 線とし、線源は ^{137}Cs を選択した。放射線透過方式については、管端挿入方式が熱間でも考えられるが、挿入式であるための安全対策、熱対策が困難であり、また、管端の測定だけに限定され、その有用性に疑問がある。

3.2 シングルビームスキャン方式

前述した欠点を克服したものが、Fig. 1に示すシングルビームスキャン方式（以下スキャン方式と略す）である。本方式は、ある方向に沿ってのパ

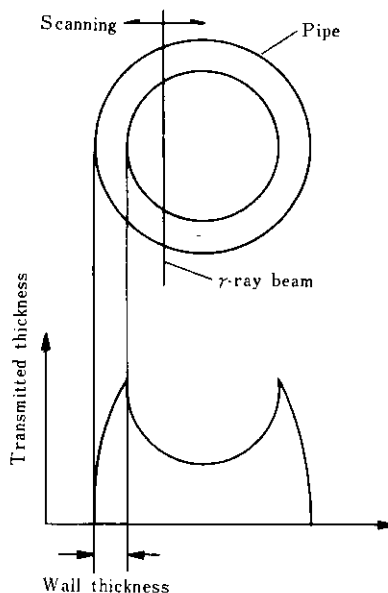


Fig. 1 Principle of measuring wall thickness by single-beam scanning method

イブのダブルウォールの肉厚分布を測定すれば、その方向と直角方向の外径と内径に相当する点で、肉厚分布が急変する原理を利用するもので、以下のような長・短所を有する。

(1) 利点

(a) シングルウォールの測定が可能である。

(b) 装置をパイプ内に挿入しなくてよい。従って安全上および熱対策上有利である。

(c) パイプの中心に対し、検出器の位置合せをする必要がない。従って真円度が悪い場合でも測定出来る。

(d) パターン方式のため、検出器のドリフト、吸収係数の変動の影響を受けない。従って熱間ラインでの温度補正、材質補正の必要がない。

(2) 欠点

(a) 肉厚測定値は、スキヤニングにより多点のデータから求めるので応答が比較的遅くなる。

(b) スキヤンする移動量そのものが、肉厚に換算されるため、高精度の移動装置、位置検出器を必要とする。

Fig. 2 に、放射線源として、 ^{137}Cs 0.8Ci を用いた試作装置でのパイプの測定例を示す。この試作

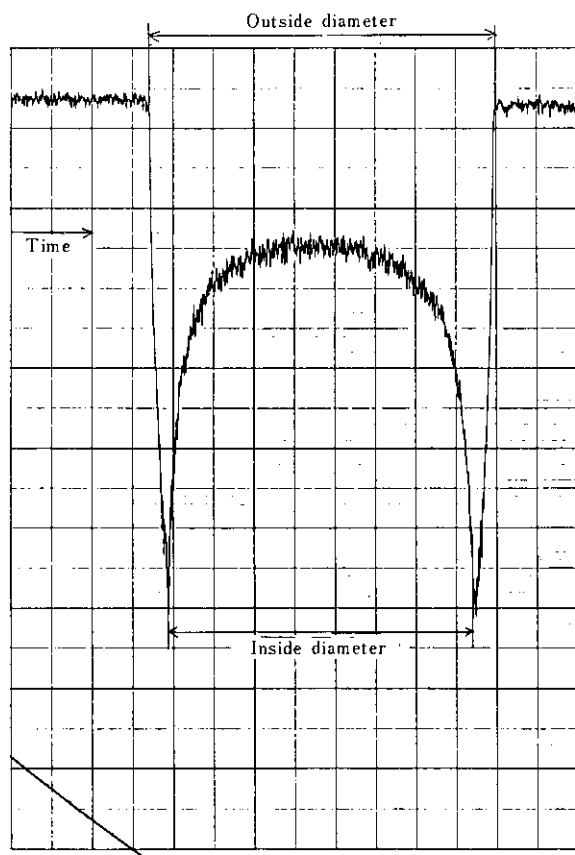


Fig. 2 An example of recorder chart by single-beam scanning method

装置による各種実験とコンピュータシミュレーションによる各種誤差要因の評価を行った結果、線源 3.2Ci, γ 線ビーム幅 2 mm, スキヤン速度 100 mm/s で、要求精度 0.1mm とした場合、応答が 4 秒となり、現在の検出器等の技術レベルでは、これ以上の応答速度向上は不可能であり、中径シームレス用としては、応答の面で不充分であるとの結論に達した。

3-3 マルチビーム方式

ここで、さらに次の測定方式を模索し、以下にのべるマルチビーム方式を考案した。マルチビーム方式の原理を Fig. 3 に示す。本方式も、スキヤン方式と同じく γ 線を使用し、図に示したように、 γ 線ビームをパイプの円周に 3 点以上配置し、どの測定点も、 γ 線ビームの入射角を変え、少なくとも 2 回 γ 線ビームをパイプ肉厚内で透過させることにより、 γ 線検出器の出力信号 I と、パイプ肉厚 X との間には、一般的な γ 線透過形厚さ計の基本式として、下式の関係式が成立する。

$$I_1 = I_{10} \exp \{-\mu K(X_1 + X_2)\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$I_2 = I_{20} \exp \{-\mu K(X_2 + X_3)\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$I_3 = I_{30} \exp \{-\mu K(X_3 + X_1)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 μ は使用した γ 線のパイプ材質による吸収係数であり、 K は測定点を透過する γ 線ビー

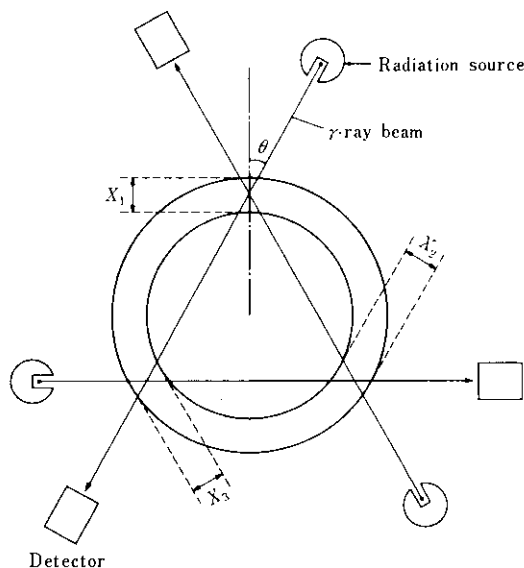


Fig. 3 Principle of multi-beam method

ムのパイプ肉厚における実際の透過長さをその点におけるパイプ肉厚 x で割った数である。

(1)(2)(3) 式を連立方程式として、その解を求めると、

$$X_1 = \frac{1}{\mu K} \cdot \frac{1}{2} \ln \left(\frac{I_{10} \cdot I_2 \cdot I_{30}}{I_1 \cdot I_{20} \cdot I_3} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$X_2 = \frac{1}{\mu K} \cdot \frac{1}{2} \ln \left(\frac{I_{20} \cdot I_3 \cdot I_{10}}{I_2 \cdot I_{30} \cdot I_1} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$X_3 = \frac{1}{\mu K} \cdot \frac{1}{2} \ln \left(\frac{I_{30} \cdot I_1 \cdot I_{20}}{I_3 \cdot I_{10} \cdot I_2} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。 γ 線ビームの検出器出力信号は連続的に測定可能であるから、(4)(5)(6) 式を演算すれば、パイプ肉厚 X_1, X_2, X_3 を求めることができる。この測定原理をマルチビーム方式と呼んでいる。

この方式は、 γ 線ビームが必ずしも3本である必要はなく、 n 本が可能である。 n 本の場合を行列で表わすと下式となる (Fig. 4 参照)。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_{n-1} \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$b_n = \frac{1}{\mu K} \ln \frac{I_{n0}}{I_n}$$

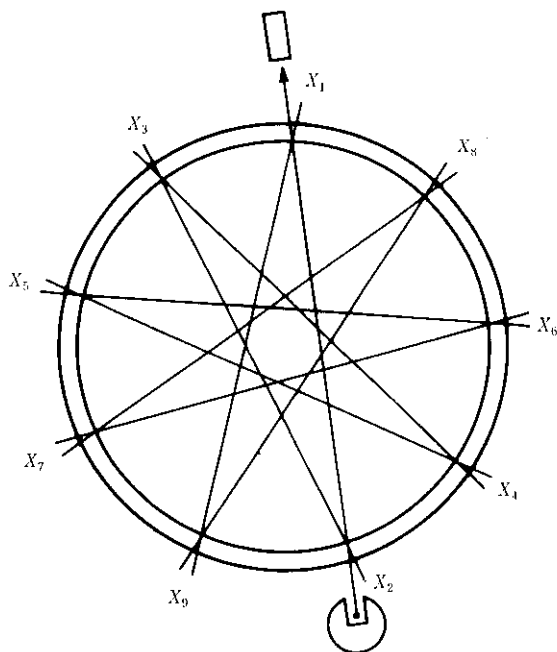


Fig. 4 Principle of multi(n)-beam method

n が偶数の場合は、(7) 式は特定の解をもたない。以上よりマルチビーム方式は奇数本の γ 線ビームでなければならないので、パイプ円周方向の奇数点のパイプ肉厚の測定が可能である。

4. 実用化技術の開発

4-1 パイプ芯振れ (揺動) とピンチロールの採用

マルチビーム方式の原理は2本の γ 線ビームがパイプ肉厚内でクロスすることが大前提である。所が実際の圧延ラインではパイプの曲り、搬送テーブルの構造の問題で必ずしもパイプが理想状態で搬送されるわけではなく、何らかの手段でパイプの芯振れを抑止しなければならない。我々は種々の抑止方法および補正方法を検討したが、結局パイプの芯振れを機械的に拘束することにした。熱間肉厚計の両側に走行中のパイプを拘束するピンチロールを配置しパイプと γ 線ビームの相対的位置関係がパイプ肉厚の測定中常に一定となる様にした。このピンチロールは熱間ラインに使用されるのでパイプを拘束する荷重は一定範囲内に設定可能とし、パイプに疵が発生しない構造としている。

4-2 コンプトン散乱の影響

γ 線源と検出器間はある一定の距離を保つことは肉厚測定精度を確保するために必要であるが、測定すべきパイプの外径、肉厚は極めて多種類であり、また、パイプのバスラインセンタも外径に応じて変動する。マルチビーム方式では γ 線はパイプの肉厚を必ず2回透過するので、板厚測定で経験した2枚板の影響が肉厚測定精度低下とならないか危惧された。この現象は γ 線のコンプトン散乱により同じ厚さの板1枚に比べて2枚に重ねた方が γ 線の見掛けの吸収係数が小さくなる現象である。マルチビーム方式の場合 γ 線ビームはパイプ肉厚を2回透過すること、および傾斜方向の肉厚を透過することによりコンプトン散乱の影響を経験した。これを解決するために次の2点の対策を実施した。

(1) γ 線線源側および検出器側の両方にコリメー

タを設け散乱した γ 線の検出が最小となる様配慮した (Fig. 5 参照)。

(2) 検出器計数率の波高弁別電圧の設定を Fig. 6 の計数率-弁別電圧特性の a ~ b 間に選択することで検出器そのものの散乱による誤計数を最小とした。Fig. 6 の実線は検出器の計数率特性でありこの特性曲線を弁別電圧で微分すれば点線の曲線が得られる。この点線曲線の a の部分はコンプトン散乱による部分であり b の部分は γ 線エネルギーによる部分である。

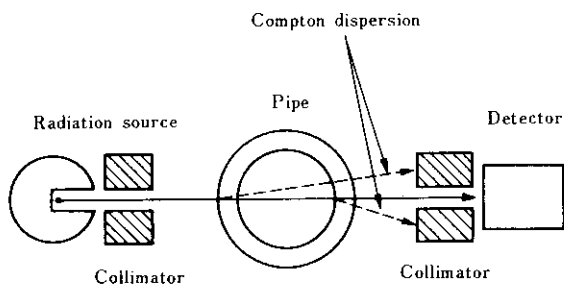


Fig. 5 Schematic diagram of Compton dispersion

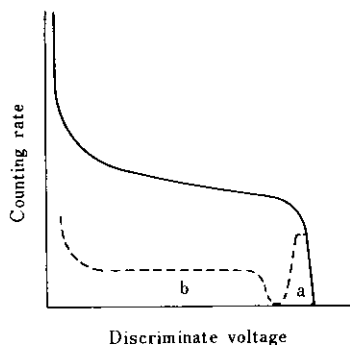


Fig. 6 Characteristics of discriminate voltage and counting rate

4.3 γ 線ビーム幅と測定精度

前項で述べた通り γ 線はコリメータによりほぼ平行ビームとなっているがビーム幅と測定精度に関係があるか否かが実験した。ビーム幅を絞ると γ 線エネルギーおよび検出可能エネルギーが減少する。従ってビーム幅を絞れば絞るほど γ 線源容量を増加させる必要がある。これは安全性、経済性で不利となるのでこの点からも検討する必要があった。オフラインで実際に γ 線ビーム幅をコリメ

ータのスリットにより 5 mm から 20 mm に可変させてパイプ肉厚を測定した所 Fig. 7 に示す特性が得られた。この特性から次の事が判明した。ビーム幅は狭い方が高い測定精度が得られるが、我々が開発目標とした 0.1 mm の測定精度を実現するにはビーム幅は 20 mm まで許容できる。以上の結果より中径シームレス用の熱間肉厚計の γ 線ビーム幅は 20 mm を採用した。

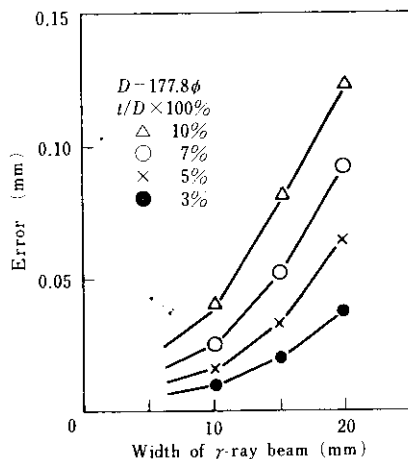


Fig. 7 Comparison of γ -ray beam width

5. 肉厚計の構成

熱間肉厚計は Fig. 8 に示す様に実際にパイプを測定するラインに据付けられる検出装置 A、検出装置に実装される γ 線ビーム位置をパイプ外径、肉厚に応じて移動させるシーケンス制御装置 B、 γ 線量計数値を肉厚値に演算する信号処理装置 C、パイプ長手方向の肉厚パターンを解析する解析装置 D、パイプ 1 本分の肉厚を連続記録する記録計 E、コンピュータインターフェイス F および操作盤 G より構成されている。

検出装置は鋼製構造物であり熱間ラインでの長期使用に耐えられかつ精度維持が可能な精密構造となっており、全体は冷却水で常時冷却されている。また、検出装置のメンテナンスが容易に行なえる様台車方式を採用している。

γ 線ビーム 3 本はパイプの外径肉厚に応じて適宜移動し位置決めしなければならない。オペレータ

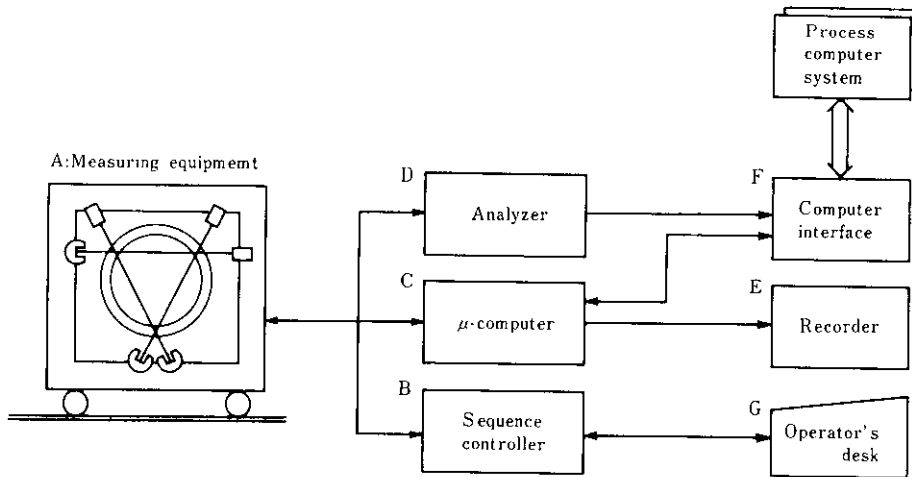


Fig. 8 Schematic diagram of wall thickness gage

は外径肉厚値を操作盤で設定すれば自動的に目的の位置へ γ 線ビームを位置決めするAPCを採用しオペレータミス防止および高精度化を図っている。

γ 線源としては、 ^{137}Cs 、検出器は高速応答性およびコンパクト化を考慮しプラスチックシンチレータを採用した。このシンチレータの信号はシンチレーションカウンタを経由し肉厚演算を行う信号処理装置へ導かれる。同時に解析装置へも導かれパイプ長手方向全体の肉厚パターンを解析する。信号処理装置および解析装置はマイクロコンピュータを採用し高速、高精度で演算が可能よう配慮した。演算された肉厚値はD/A変換しアナログ記録計に連続記録する。オペレータはこの記録により肉厚状況が迅速に判断可能である。オペレータデスクはオペレータ室に設置され熱間肉厚計の総ての操作監視が可能である。特に γ 線源シャットおよび冷却水の監視は安全性の点で重要であるから充実した監視機構を採用しており、オペレータとの対話が可能である。

熱間肉厚計の総ての測定データはプロセスコンピュータへ伝送が可能である。中径シームレスラインでは圧延制御用プロセスコンピュータへ測定データを伝送しておりこれらのデータを有機的に利用可能なシステムとなっている。

6. 熱間肉厚計の性能

熱間オンラインで連続測定する測定装置は肉厚計に限らず高速応答性が要求される。理由はパイプの先端から後端までもれなく全長に渡って測定したいからである。しかし無限に速い応答性を得ることは不可能であるから測定の目的とハードウェアの技術レベルに応じて決めなければならない。熱間肉厚計の開発に際しこれらを検討した結果応答性0.1秒を目標とした。 γ 線源容量はシームレス圧延ラインの特性上大容量とすることは安全上不適当であり10Ci/ビーム以下を目標とした。

以上述べた条件で測定誤差のシミュレーションおよび性能の設計を行った結果Table 3の性能が実現した。このTableは線源容量が10Ci/ビームの場合であるが3Ci/ビームの場合は短周期誤差が約 $\sqrt{3}$ 倍となり総合誤差は若干大きくなる。

7. オンライン測定結果

中径シームレスミルラインに設置された熱間肉厚計の検出装置をPhoto. 1、マイクロコンピュータ内蔵の制御盤をPhoto. 2、そしてオペレータデスク概観図をPhoto. 3に示す。

熱間肉厚計でパイプ肉厚を実測した結果をFig. 9に示す。肉厚の変化に高い応答で測定しているの

Table 3 Error estimation table at 10 Ci

(mm)

Diameter(mm)	177.8(7")			273.1(10¾")			406.4(16")		
Thickness/Diameter(%)	3	5	10	3	5	10	3	5	10
Thickness(mm)	5.3	8.9	17.8	8.2	13.7	27.3	12.2	20.3	40.6
Calibration error	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.07	0.04	0.06	0.10
Position error of γ -ray beam	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04
Pipe size error	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03
Pipe fluctuation effect	0.10								
Stochastic error	0.08	0.10	0.19	0.10	0.14	0.38	0.13	0.23	0.99
Total error	0.13	0.15	0.22	0.15	0.18	0.40	0.17	0.26	1.00



Photo. 1 Front view of wall thickness gage

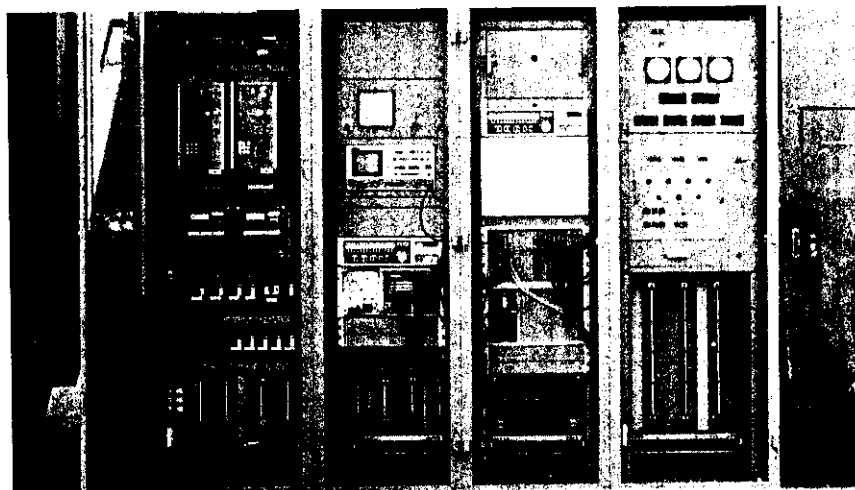


Photo. 2 View of control panel arrangement

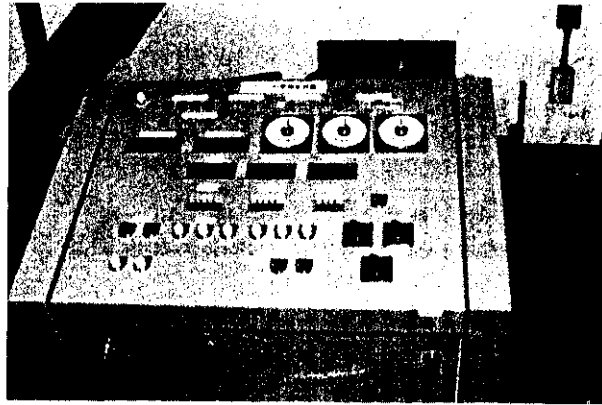


Photo. 3 View of remote operator's desk

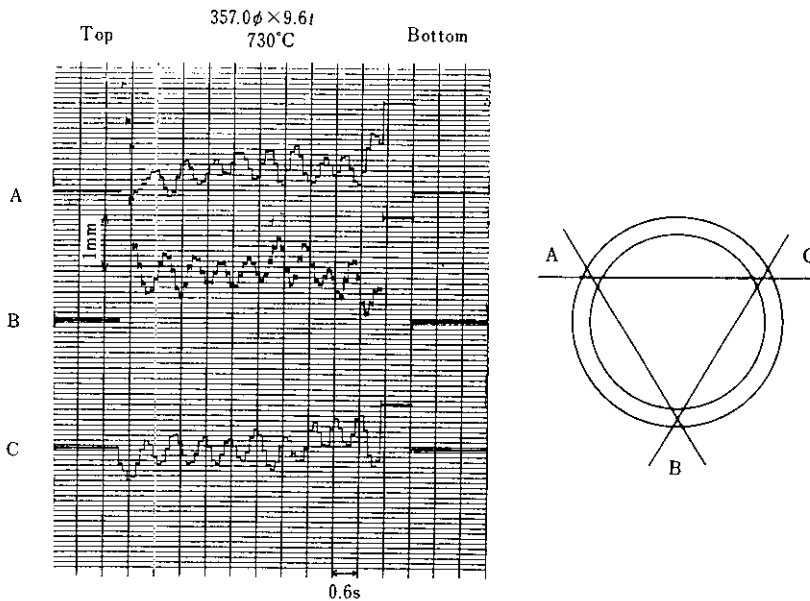


Fig. 9 An example of recorder chart by multi-beam method

が良く判かる。

8. 結 言

中径シームレス工場は、今後ますます生産量の拡大と品質歩留りの向上を要求されており、我々はそれらを自動化技術、センサー技術などによってバックアップし、推進しなければならない。

本熱間肉厚計は、多くの関係者の努力によって完成されたものであり、今後もさらにオンライン機能の充実と応用のレベルアップを図ってゆくつもりである。また、今回の開発によって得られた技術の蓄積をもとに、小径シームレスパイプへの適用についても積極的に取組んでゆく方針である。おわりに、富士電機製造(株)東京工場関係各課に深く感謝致します。