

技術報告

UDC 531.717 : 669.14-122

放射線厚さ計の厚さ指示に与える諸条件の影響*

山本育郎**・堤 洋志**・田宮 進**・寺田元一**

Effect of Various Factors on Radiation Thickness Gauge

Ikuro YAMAMOTO, Hiroshi TSUTSUMI,
Susumu TAMIYA, and Motokazu TERADA

Synopsis:

Thickness measurements by radiation are influenced by various factors: steel compositions, water film on the surface of steel strip, location of steel strip, temperature variation, and heat treatment. We have performed factory tests to determine the effects of the above factors.

Results are summarized as follows:

- (1) The effect of the composition can be calculated theoretically, and the theoretical results agree with those obtained in the factory tests.
- (2) The compensation for strip temperature variations varies in each mill. It can, however, be neglected in the range of $\pm 50^\circ\text{C}$.
- (3) Effects of steel density change due to the hot rolling could not be detected in these tests.

(Received July 1, 1972)

1. 緒 言

ホットストリップライン、およびコールドストリップラインに設置する放射線厚さ計に要求される精度はきわめて高いものである。しかるに放射線厚さ計はその測定原理からみて種々の測定条件の影響を受けるものであり、これらの諸条件の影響を定量的に把握することが放射線厚さ計による板厚管理を行なう上で重要になつてくる。

本稿では種々の測定条件のうち、被測定物の材質の違いによる影響、被測定物の表面の水膜の影響、線束方向の被測定対象物の冷却過程、および冷延鋼板の焼鈍過程の差による放射線厚さ計の見掛け指示の差についてX線厚さ計および γ 線厚さ計について調べた。

2. 厚さ計の一般的な仕様

この実験に用いたX線厚さ計、 γ 線厚さ計の仕様を下記に示す。

3. 測定対象物の材質の差による影響

3.1 実験方法

本実験では Table 1 に示すチタン鋼板を普通鋼の材

仕様	X線厚み計	γ 線厚み計
メーカー 型 名	東 芝 TOSGAGE306	東 芝 TOSGAGE 154
線 源	X線発生器 160KVP	Am 241 Ici
測定範囲	0~15 mm	0~5 mm
測定空間	1 000 mm	200 mm
線源部→測定板の高さ	250 mm	100 mm
線束の太さ	50 ϕ mm	10 ϕ mm

質補正を行なっているX線厚さ計および γ 線厚さ計で板厚測定を行ない材質の違いによる影響を調査した。

供試チタン鋼板の公称厚みは 200 mm \times 200 mm 供試板の4辺のマイクロメータ実測値の平均値である。

3.2 実験結果およびその考察

X線および γ 線は物質中を透過すると(1)¹⁾²⁾式に示すように指数関数的に吸収される。

$$I(x) = I(0)e^{-\mu x} = I(0)e^{-N\sigma x} \dots\dots\dots (1)$$

$I(0)$: 入射線強度

μ : 吸収係数 ($=N\sigma$)

N : 単位体積当たりの原子数

σ : 入射線の吸収および散乱の1原子

* 昭和47年7月1日受付

** (株)神戸製鋼所加古川製鉄所

Table 1. Titanium sheet thickness test sample.

Sample No	1	2	3	4
Nominal (thickness (mm))	0.998	1.994	2.958	4.132

についての全断面積

放射線厚さ計は(1)式の $I(x)$ を測定することによって、透過物質の厚みを知るものであるが(1)式に見る通り $I(x)$ は透過物質の吸収係数によつて変わる。また吸収係数は単位体積当たりの原子数、すなわち密度と後述するように透過物質の原子番号および入射線のエネルギーによつて変わる¹⁾²⁾。

本実験では普通鋼の密度で補正したX線およびγ線厚さ計でチタン鋼板を測定し、その指示値と公称厚みの差から比を求めたもので、その結果を Table 2 に示す。

本測定に用いたX線厚さ計のX線エネルギーは 0.05 MeV~0.10 MeV またγ線厚さ計の線源 241 Am のγ線エネルギーは 0.59 MeV であり³⁾、このエネルギー範囲での物質の吸収係数 μ は、光電効果およびコンプトン効果によるものと考えてよい⁶⁾。光電効果による吸収係数 μ_p は $\mu_p = N\sigma_p$

$$= N\phi_0 \frac{4\sqrt{2}}{137^4} Z^5 \left(\frac{m-c^2}{n\nu-I} \right)^{7/2} \dots\dots\dots (2)$$

コンプトン効果による吸収係数 μ_c は KLEIN-仁科の式から

$$\begin{aligned} \mu_c &= NZ\sigma_e \\ &= NZ\phi_0 \frac{3}{4} \left[\frac{1+\nu}{\nu^3} \left\{ \frac{1+\nu}{1+2\nu} - \log(1+2\nu) \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\nu} \log(1+2\nu) - \frac{1+3\nu}{(1+2\nu)^2} \right] \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

- N : 1 cm³ 当たりの原子数
- ϕ_0 : Thomson 断面積 (6.65×10^{-25} cm²)
- Z : 原子番号
- m : 電子の質量
- h : Plank 定数 (6.62×10^{-27} ergs)
- c : 光速
- I : 電子の結合エネルギー

ν : 入射電磁波の振動数

$$\nu : hV/mc^2$$

となり全吸収係数 μ は

$$\mu = \mu_p + \mu_c \dots\dots\dots (4)$$

γ線厚さ計のγ線エネルギーは線スペクトル (0.059 MeV) であるから(2)式(3)式(4)式の吸収係数は一義的にきまる。γ線厚さ計について上記各式より Fe, Ti について吸収係数を求めると

- a) Fe について $\mu_p = 1.7 \text{ cm}^{-1}$
 $\mu_c = 7.5 \text{ cm}^{-1}$

したがつて Fe の全吸収係数 μ_{Fe} は

$$\mu_{Fe} = \mu_p + \mu_c = 9.2 \text{ cm}^{-1}$$

- b) Ti について $\mu_p = 0.45 \text{ cm}^{-1}$

$$\mu_c = 2.90 \text{ cm}^{-1}$$

したがつて Ti の全吸収係数 μ_{Ti} は

$$\mu_{Ti} = \mu_p + \mu_c = 3.35 \text{ cm}^{-1}$$

したがつて、補正比 $= \mu_{Ti}/\mu_{Fe} = 0.362$ となり実験値と一致する。一方X線厚さ計のX線エネルギーは測定対象の厚さによつて変化させるので各材質について吸収係数は一義的に定まらないが Fig. 1 に見るとおり測定範囲に相当するエネルギー範囲では $\mu_{Ti}/\mu_{Fe} = 0.360$ となりこれも実験結果と一致する。

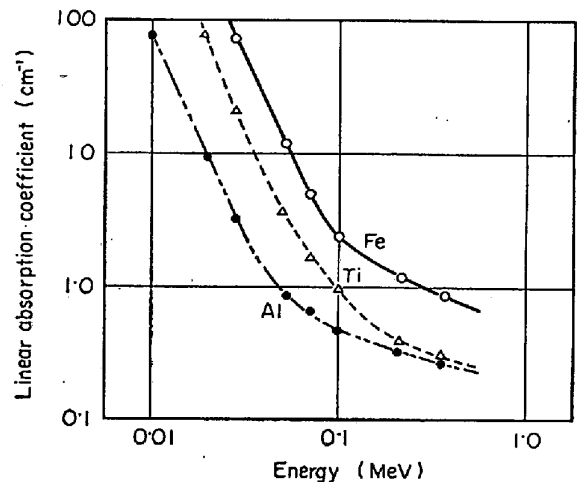


Fig. 1. Relationship between absorption coefficient Fe, Ti and Al vs. energy.

Table 2. Compensation ratio=Indication of gauge/Nominal thickness of titanium.

Nominal thickness of titanium plate (mm)	Thickness indication of X-ray gauge (mm)	Thickness indication of γ-ray gauge (mm)	Compensation ratio for X-ray gauge	Compensation ratio for γ-ray gauge
0.998	0.350	0.350	0.351	0.355
1.994	0.710	0.713	0.356	0.356
2.958	1.065	1.059	0.360	0.358
4.132	1.485	1.466	0.360	0.355

したがって材質の異なる物質の厚み測定を行なう場合その補正比を理論計算で求めてもなんら支障がないと言える。参考までに Fig. 1 にアルミニウムについても同様な補正化を示す。

4. 被測定物表面の水膜の影響

4.1 実験方法

ロール冷却水やデスケリングによる熱間圧延中の材料表面の水は膜沸騰状態もしくは核沸騰の状態にあると考えられるが本実験では普通鋼試料板表面に 1 mm から 5 mm まで間隔で静的な水膜を張り X 線および γ 線厚さ計で実測した。

4.2 実験結果および考察

圧延ラインの放射線厚さ計はミル AGC への応答性を

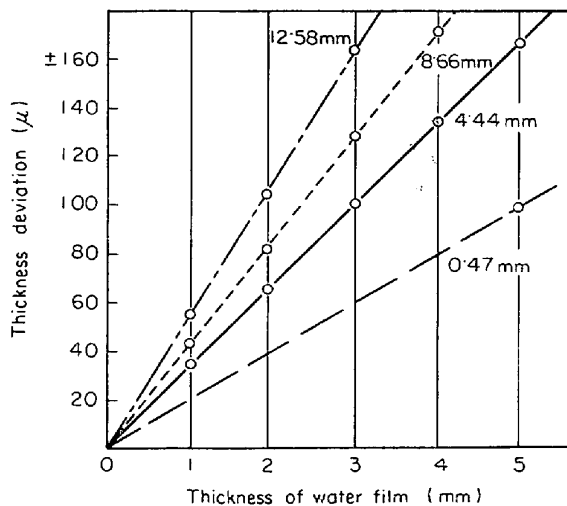


Fig. 2. Effect of water on the surface of specimens (X-ray).

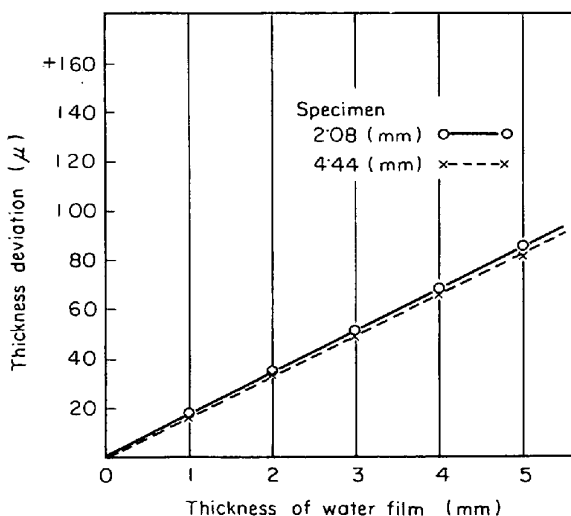


Fig. 3. Effect of water on the surface of specimens (γ -ray).

よくするためミル直後に設置する 경우가多い。このため熱間圧延では冷却水またはデスケリング水が圧延材料表面に浮遊することが多い。

本実験では X 線および γ 線厚さ計について、普通鋼試料表面に 1 mm から 5 mm まで 1 mm 間隔で水膜厚さを変え厚さ計の指示変化を実測した。この結果を Fig. 2, Fig. 3 に示す。

γ 線厚さ計では指示値は試料の厚さによつてほとんど変化しないのに対し、X 線厚さ計では相当変化する。これは 3.2 項で述べた通り、 γ 線は線スペクトルであるのに反し X 線厚さ計では測定板厚によつて X 線エネルギーを変えるため各エネルギーで試料と水の吸収係数の比が変化するためである。Fig. 4, Fig. 5 に鉄および水の

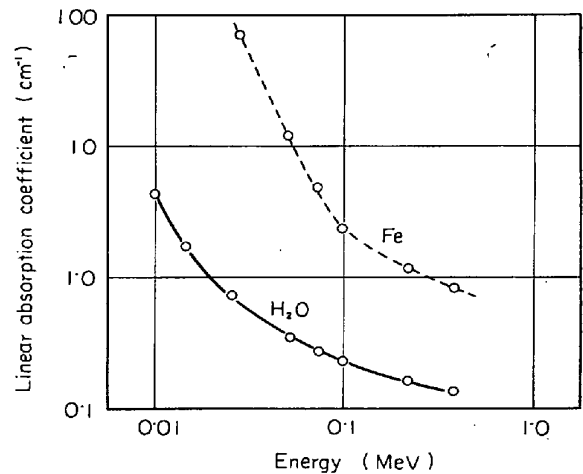


Fig. 4. Relation between γ energy and absorption coefficient.

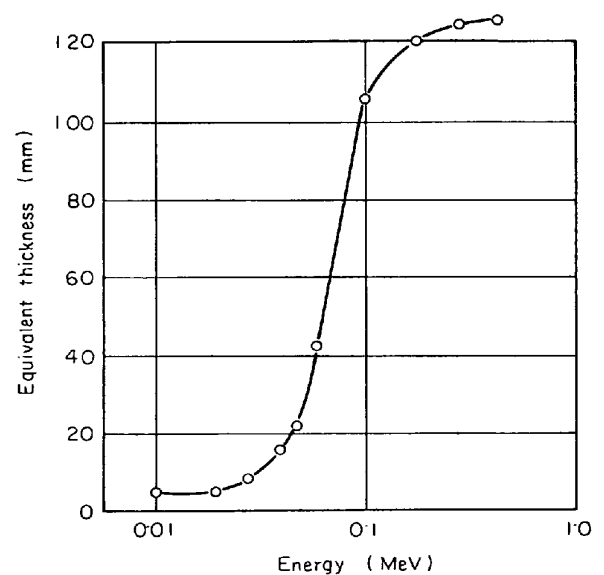


Fig. 5. Equivalent thickness of Fe for 1 mm water film.

吸収係数と 1 mm の水膜の鉄の等価厚さを理論的に求めた結果を示す。

5. 被測定物の線束方向の位置および傾斜の影響

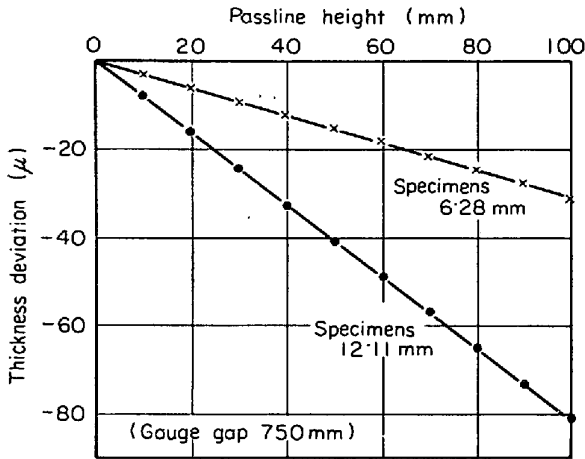


Fig. 6. Effect of passline height on X-ray gauge.

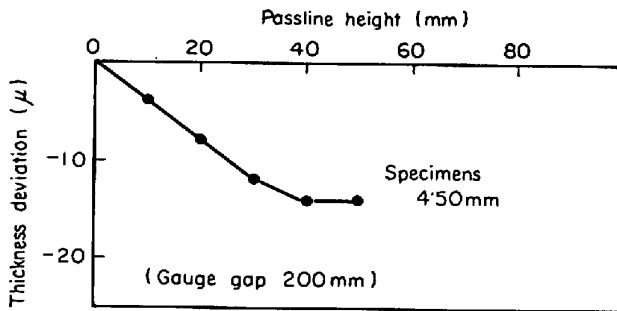


Fig. 7. Effect of passline height on gamma-ray gauge.

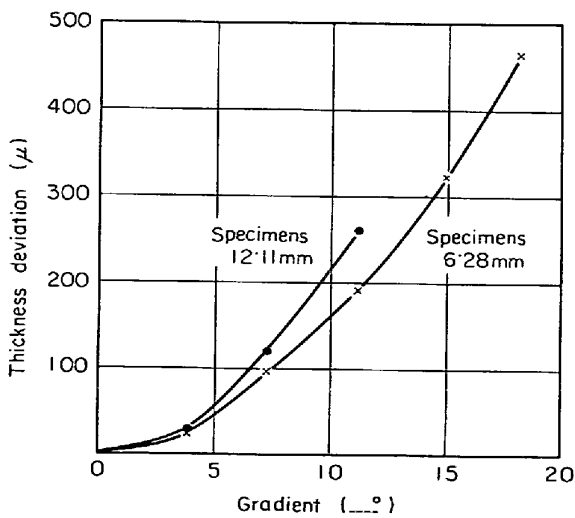


Fig. 8. Effect of gradient of sample on X-ray gauge.

5.1 実験方法

圧延ラインに設置したオンライン用の厚さ計では、圧延中のストリップのパスライン変動による影響を受けることはよく知られている。本実験では試料の測定位置を線束方向にかえた場合と線束方向に対して傾斜させた場合、指示値に与える影響を調査した。

5.2 実験結果および考察

5.2.1 線束方向の位置の影響

被測定物の線束方向の位置をパスラインから上方に 0 ~ 100 mm 変化させたときの X線および gamma線厚さ計の指示値の変化を測定した結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。

被測定物の高さを増すにともない厚み偏差が負の方向に増大する。すなわち見掛け厚さは薄くなる。これは被測定物を放射線検出部に近づけることによつて前方散乱線の検出部への入射率が増大すると考えられる。gamma線厚さ計の場合は被測定物を検出部に近づけるほど厚み偏差は負方向に増大し、見掛け厚さは薄くなる。

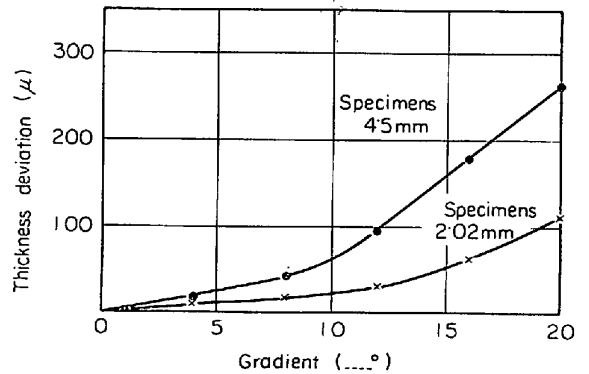


Fig. 9. Effect of gradient of sample on gamma-ray gauge.

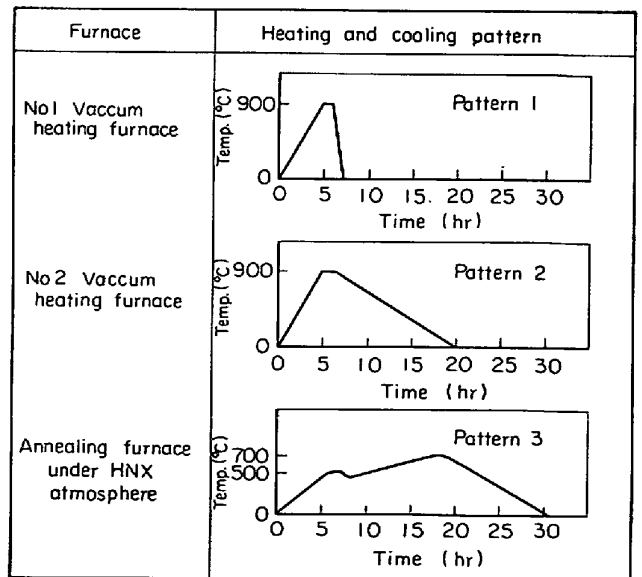


Fig. 10. Heat treatment of specimens.

これはX線厚さ計の場合と同様であるが、ある点以上では飽和現象が見られる。この原因は今回測定に使用した厚さ計の測定空間が小さいため、ある点以上になると前方散乱線の検出部への入射率が飽和するためと考えられる。

5.2.2 測定対象の線束方向の傾きの影響

Fig. 8, Fig. 9 にX線厚さ計および γ 線厚さ計について測定対象の傾斜角と指示値の変化を示す。

傾斜角とともに厚み偏差は正方向に増大するが、これは測定対象を傾斜することにより幾何学的に垂直方向厚さが増大することおよび前方散乱線が減少することによるものと考えられる。

6. 冷却過程および焼鈍過程による影響

6.1 実験方法

本実験ではホットストリップのホットランテーブル上の冷却過程、およびコールドストリップの焼鈍過程の差による放射線厚さ計の見掛け指示の差をみるためFig. 10の各加熱冷却パターンについて実験した。

6.2 実験結果および考察

加熱冷却過程の違いにより金属学的性質が変化し、それにもなつて密度変化を生じる恐れがある。その変化量を実験用真空焼鈍炉および焼鈍炉において加熱冷却方式を変えて、その前後の密度変化を求めた。その結果をTable 3に示す。

この結果過熱冷却過程による密度変化は厚さ計に対してほとんど無視できる程度のものであることが明らかとなった。

7. 被測定物の温度が指示値に与える影響

7.1 実験方法

高温の材料は熱膨張による密度変化のため、放射線厚さ計による測定には補正が必要である。本実験では試料を800°Cに加熱しその冷却過程中の温度と放射線厚さ計の指示の変化を実験した。試料の温度はCAの素線をサンプルに埋込むことにより連続的に測定し、サンプルの加熱はポータブル式のエレマ炉を使用した。実験方法はFig. 11に示す。

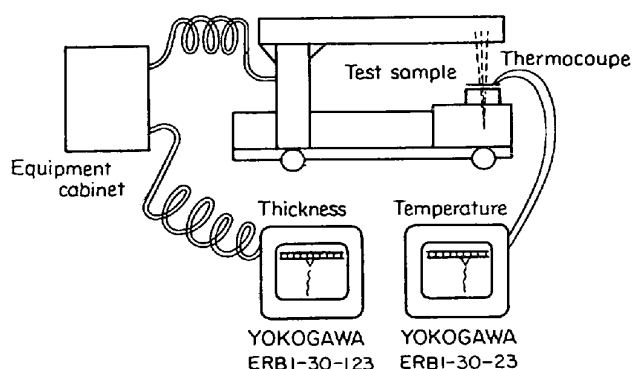


Fig. 11. Method for measuring the effect of temperature variance of the test sample.

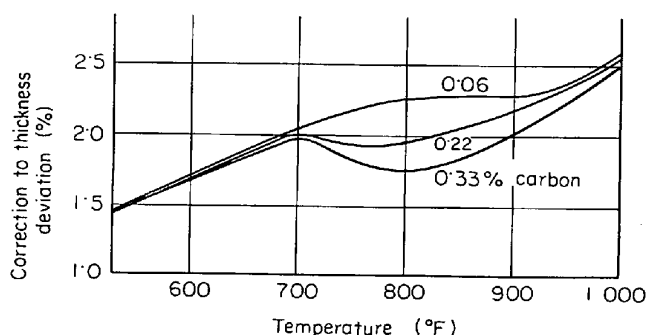


Fig. 12. Temperature compensation value at above 600°C (by Weston Instruments).

7.2 実験結果および考察

被測定物を熱間で放射線厚さ計により測定する場合温度補正を行わなければならない。これは熱膨張により板の水平方向の単位面積当たりの原子数が減少するため放射線の透過率がよくなりあたかも実際の板厚よりも薄く指示するためである。鋼板の冷間時および熱間時の単位面積当たりの原子数を N_0 , N とすれば、

$$N = N_0(1 - \alpha T)^2 \dots\dots\dots (5)$$

α : 線膨張係数

T : 鋼板の冷間, 熱間の温度差

(5)式より $\alpha^2 T^2$ の項を無視できるので原子数の比は

$$N/N_0 = 1 - 2\alpha T$$

すなわち熱間においては $-2\alpha T$ の補正をせねばならない。700°Cではほぼ2.1%の補正が必要である。また600°C以上の熱間補正值についてはFig. 12, Fig. 13の報告がある。

Table 3. Change of density by heat treatment.

Heat patten	Specimens	~-0.2%	-0.2% ~0.1%	-0.1% ~0.1%	0.1% ~0.2%	0.2%~
1	10	1	2	6	0	1
2	5	1	0	3	1	0
3	20	2	1	15	1	1

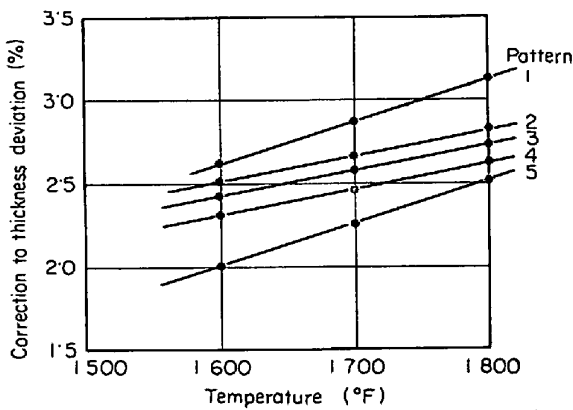


Fig. 13. Temperature compensation value at above 1600°F (by Bethlehem Steel).

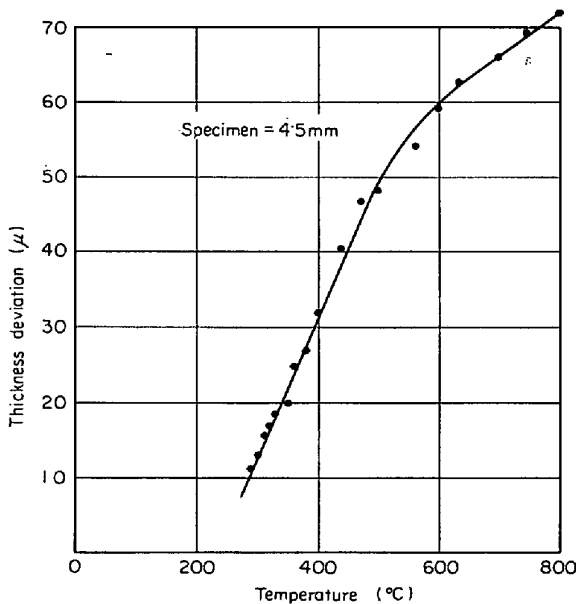


Fig. 14. Effect of temperature on X-ray gauge.

Fig. 14 に試料を 800°C に加熱しその冷却過程における温度と厚さ計指示値を示す。実際の熱間圧延時においては圧延材の温度は鋼種により変えると同時に圧延条件によっても変化する。

いま圧延材温度が 50°C 変化した場合、誤差を Fig.

12, Fig. 14 の実験結果より求めると 0.10~0.15% 程度であるが、これは現在使用中の厚さ計の精度内である。±50°C 以下の変化では、一定の補正值で実用上ほとんど問題はないが、これ以上の温度変化がある場合はその都度補正值を変えるべきである。

7. 結 言

放射線厚さ計はその測定原理から被測定物の材質、位置その他諸条件の変化が測定精度に影響を与える。これらを定量的に求めたが、その結果をまとめると次のとおりである。

(1) 材質が異なる場合は各物質の放射線の吸収係数が異なるため材質補正をしなければならない。

本実験の結果は理論値とほぼ一致するものであった。

(2) 水膜の影響は放射線のエネルギーによつてその影響度が異なりエネルギーの低い方が影響が少ないことがわかった。

(3) 被測定物の位置、傾斜については実際にはある程度避け難い現象であるが、これらの影響は他のものに比較して非常に大きい。そのため被測定物の状態を把握しておく必要がある。

(4) 過熱冷却過程による密度変化の厚さ計指示値に与える影響は、厚さ計自身の精度に比して小さいため実用上は問題とならない。

文 献

- 1) FERMI: Nuclear Physics
- 2) HEITLER: Quantum Theory of Radiation
- 3) 日本放射性同位元素協会: ラジオアイソトープ手帳, p. 98
- 4) ELMANGAN: X-Ray Thickness Gages For Bethlehem Steels Computer Controlled Hot Strip Mills Iron Steel, May (1971), p. 47
- 5) W. ARNOLD: Temperature Compensation for X-Ray Gages Measuring Hot Steel, p. 3
- 6) W. T. PRICE: Nuclear Radiation Detection, p. 30