

鐵 と 鋼 第二十五年 第十一號

昭和十四年十一月二十五日發行

論 說

熔鋼温度測定に關する二、三の研究

(日本鐵鋼協會第 21 回講演大會講演 昭和 14 年 4 月)

菅 野 猛*

STUDIES ON MEASURING TEMPERATURE OF MOLTEN STEEL

Takesi Sugeno.

SYNOPSIS:—No satisfactory method of measuring temperature of a steel bath, when in the open-hearth-furnace or the arc-furnace, has yet been devised.

Usually, for convenience, the temperature of steel baths is conjectured indirectly from the values that obtained by an optical pyrometer as the temperature of the liquid steel in the spoon at sampling. This procedure is, however, quite unreliable, in accordance with the lack of knowledge about the personal error of an observer, the emissive power of liquid steel in the spoon, a fall of the temperature of the spoon under ladling from the furnace, etc., that we can hardly know the accurate temperature of the steel bath.

The author has attempted to improve the method and has made several studies on the points just mentioned above. The results are as follow:

1) The personal error was determined by the simultaneous use of a standard lamp and a standard optical pyrometer. In addition to this, the degree of skill of the observer was assumed from the dispersion of data.

We cannot neglect the effect of personal errors which attain $\pm 10^\circ$ in the maximum.

We find also that the degree of skill of the observer does not depend neither on the age nor on the duration of practice.

2) The true temperature of liquid steel in the spoon was measured by the special *Fe-W* thermocouple, which was of a direct immersion type and formed a hot junction through the liquid steel. The heat capacity of this thermocouple is very small and the measurement can be finished in 3-5 seconds.

We compared the true temperature by the *Fe-W* thermocouple with the brightness temperature by the optical pyrometer, and obtained the emissivities of each kind of steel in the spoon. Namely, in case of the arc-furnace, the average values are 0.55 for *Ni-Cr* steel, 0.56 for *Cr-Mo* steel, 0.53 for *Ni-Cr-Mo* steel and 0.52 for carbon steel. In the case of the open-hearth-furnace, where the data are not enough, the total average value is 0.52.

3) The cooling of the liquid steel in a spoon during ladling was determined from the evaluation and the experiments. The fall of temperature is affected by the thickness of slags which cover the spoon. While the thickness of slags varies from 0.4 to 1.0 cm, the fall of temperature takes the value from 40 to 20°C.

目 次

I 緒 言

II 光高温計を使用する測熱 I の個人誤差

- 1 装置及方法 2 結果及夫れに對する考察

III 柄杓内熔鋼の輻射率 (Emissivity)

- 1 輻射率 2 従來の研究 3 著者の實驗結果

IV 柄杓内熔鋼の冷却

- 1 研究の方針 2 冷却理論式の誘導 3 測定結果

V 總 括

I 緒 言

始めにお断りして置くが茲に述べる熔鋼温度測定とは實驗室に於ける研究では無くして、現場(平爐工場亦是電氣爐工場)で如何にしたら正確に熔鋼の温度を測れるかと云ふ事に就て研究した二、三の結果を發表するのである。

現場に於ける熔鋼温度測定に關しては既に多くの人達が研究して居り、文献にも表はれて居るが、近來特殊鋼の缺點問題等が喧しくなるに及び益々重要視されて來るに至つた。本邦でも既に佐々川博士の吳式熱電對、田所博士の田

* 住友金屬工業會社製鋼所

所式熱電對等に依る實驗結果が發表されて居て製鋼作業の改善に大いに貢獻して居る。茲では現場に於ける熔鋼溫度測定の内、特に光高溫計を用ゐて鋼浴溫度を測定する普通行はれて居る方法即ち柄杓に熔鋼を汲んで其の溫度を光高溫計で測定する場合に就て二、三の研究結果を述べる。

當所に於ては最初柄杓を爐の中に入れて可成豫熱してから其の表面に充分鋼滓を被覆させ次に柄杓一杯に鋼滓ごと熔鋼を汲み之を爐の外に取出し其の表面の鋼滓を撥ねのけると同時に豫め柄杓の直上約 1m 位の所で光高溫計を目に當てて待機して居た測熱工が現はれた熔鋼面の溫度を迅速に測定して、其の讀みの値から鋼浴溫度を間接に知ると云ふ方法に従て居る。此の際鋼浴の溫度を正確に知る爲には

- 1) 光高溫計の溫度目盛が充分正しく合て居るか如何か
- 2) 測熱工が正しく溫度を測て居るか如何か。
- 3) 讀みの溫度と眞溫度との差は何度位か。即ち柄杓内の熔鋼の輻射率 (Emissivity) の値は如何程になるか。
- 4) 柄杓に鋼湯を汲んでから測定する迄の間に柄杓内の熔鋼は何度位冷却するか。換言すれば鋼浴の溫度と柄杓内の熔鋼の溫度の差は何度位になるか。

と言ふ様な事が問題になる。扱 1) に就ては既に日本學術振興會第 19 小委員會に依て所定の光高溫計溫度目盛校正装置が立案されて居るので之に就ては茲に述べる事を省いて 2) の測熱工に關する問題から説明する事にする。

II 光高溫計を使用する測熱工の個人誤差

光高溫計を使用して溫度を測る場合計器の性質上相當個人的要素が加はつて來るので計器の較正と並行して之を使用する測熱工の眼の較正も行ふ必要がある。其處で當所に於ける現場の測熱工に關し次の様な項目に就て調査した。

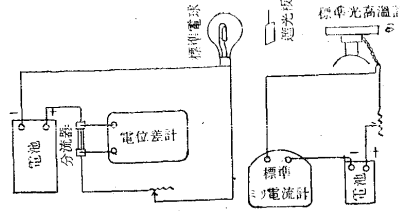
- a) 個人的差異の程度
- b) 熟練巧拙の程度
- c) 年齢及測熱の經驗と巧拙との關係

之等の結果に依り現場の各測熱工の技能程度が判明すれば現場に於ける熔鋼溫度測定に對して一層の正確さが得られる事とならう。

1) 装置及方法 個人誤差測定方法の原理を簡単に述べれば次の様になる。即ち標準の測定器を以て標準光源の溫度を讀めば測定者の眼に誤りがない限り兩者の溫度値は一致す可きである。然るに實際は測定者の目に誤差があるので一致しない。其處で兩者の溫度の讀みの差を求めると之が測定者の人的原因に依る誤差と考へても良い事になる。

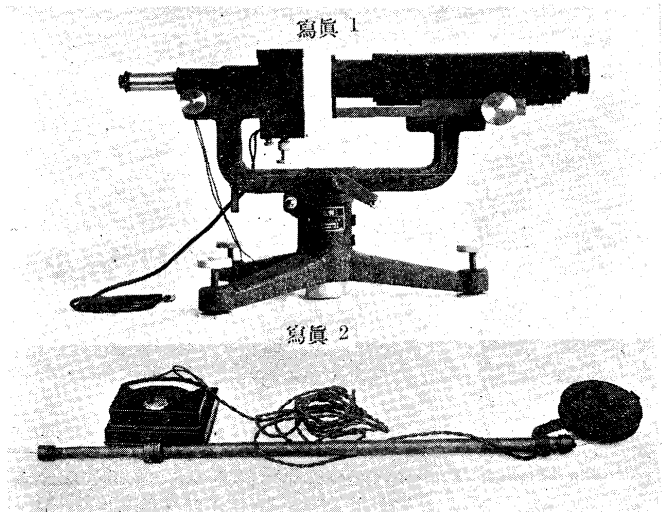
從て上の原理に基き後述の如き装置を用ゐて實驗した。其の装置の大略は第 1 圖に示してある。

第 1 圖 個人誤差測定装置



標準光源としては現在光高溫計の較正に使用しつゝある日本學術振興會第 19 小委員會所定の東京電氣會社製標準電球を使用し標準測定器としては日本學術振興會第 19 小委員會第二分科會第 4 回會議にて西川甚太氏の報告された横河製實驗室用光高溫計を用ゐた。

後者に就て一寸説明を加へると之は寫眞の如く實驗室型



であつて、望遠鏡、電球が一つの装置として臺に取り付けられてあり、此の外に抵抗器、標準型ミリ・アンメータが導線に依り電池と連結されて居る。視野が大きく鮮明な爲普通のピロプト型の手持式光高溫計に比して遙かに測定し易く精確度も大である。尙フフィルターは望遠鏡の後部にあつて取外し出来る様にされて居る。此の光高溫計も東京電氣製の標準電球も共に商工省中央度量衡檢定所の檢定を受けて居り、標準計器としての資格のあるものである。標準電球の溫度は、精密級電位差計及分流器を用ゐて電球に流れる電流を正確に測定し商工省の檢定に依る溫度—電流曲線を参照して之から求めた。

標準光高溫計の方は標準型ミリ・アンメータに流れる電流を測定して、前と同じく溫度—電流曲線から溫度を求めたのである。之等兩方の値を比較する事に依て誤差を求め事が出来る。測定は各人の平常の慣習に従て、夫々暗い方から明るい方へ、又は其反對の向きに光高溫計の電

球の明さを變へて行く様にしたが、殆ど皆が前者の方法を採た。測定の時間は現場に於ける柄杓内の熔鋼の溫度測定の時間に一致する様、一測定5秒間以内に限定した。今其方法に就き、具體的に述べると次の様になる。即ち最初に標準光高溫計の電球の明さが測定す可き溫度より約20°位低い所に來る様豫め抗抵器を加減して其位置に印を付けて置き、測定を始める前に此の位置迄抵抗刷子を動かして置く。次に標準電球の方は前以て遮蔽して置いて合圖と共に遮蔽を取除き5秒過ぎたらば測定者が測定を終了したと否とに拘らず遮蔽を元に戻す。そして其時の溫度の讀みを取るのである。又測定回数は40回であつたが、10回毎に約10分間休憩して測定者の疲勞に依る誤差を除いた。尙標準電球の讀みは *m.v.* で、標準光高溫計の讀みは *m.a.* で現はれ最後に較正曲線から溫度に換算するので、實驗終了迄測定者自身には幾何の溫度を測り幾何の誤差があるのか見當も付かず。意識的に手加減を加へる餘地は全然無かつたと言て差支へない。

實驗は普通現場で試料採取時に測定する際の光高溫計の讀みと一致せしめて 1,470~1,530°C で行た。標準光高溫計が其の構造上 1,500°C 以下はフィルターを用ひず、1,500°C 以上はフィルターを必要とするので、實驗も 1,500°C を境として 1,500~1,530°C で2ヶ所、1,470~1,500°C で2ヶ所、1ヶ所に付き10回宛計40回測定を行た。然してフィルターを使用した部分の測定20回と使用しない部分の測定20回を夫々一組として2つに分けて結果の整理を行たのである。

2) 結果及夫れに對する考察 今標準電球の溫度を T_i 、光高溫計の讀みの溫度を T_i' とすると各測定の誤差は

$$T_i' - T_i = \delta_i$$

となる。今各誤差の算術平均即ち

$$\Delta = \sum \delta_i / N = \sum (T_i' - T_i) / N \quad (N \text{ は測定回数})$$

を以て各測定者の個人誤差 (Personal error) と定め、上述の如く 1,500°C 以上と 1,500°C 以下とを分けて計算した、

次に各人の測定の巧拙の程度は其の測定値の撒布の程度を以て表はす事とし、

$$\sigma = \sqrt{\sum (\Delta - \delta_i)^2 / N}$$

なる測定誤差の標準偏差を平均測定溫度

$$T_M = \sum (T_i / N)$$

で除して之を100倍した値

$$V = 100 \sigma / T_M$$

を以て各人の巧拙度を測る尺度とした。調査した人員は總てで17人で、内6人は平爐工場附屬、10人は電氣爐工場附屬、1人は鍛造工場附屬である、又此の内1人は全然の未経験者であるが他と比較して参考に供する爲實驗を行はせた。

測定者の視力、色盲の有無等も同時に調べたが、色盲、亂視者は1人もなく近視者が僅か1人丈居たに過ぎない。結果は第1表に示してある通りであるが簡単に概括すると次の様になる。

第1表 測熱工調査結果一覽表

測定者	年齢(歲)	経験ヶ月	個人誤差		撒布度		平均撒布度	標準偏差	
			1,470~1,500°C	1,500~1,530°C	1,470~1,500°C	1,500~1,530°C		1,470~1,500°C	1,500~1,530°C
A	21	4	-2.5	+10.2	0.35	0.31	0.33	5.2	4.8
B	18	10	-7.0	+1.8	0.37	0.16	0.26	5.5	2.5
C	16	2	+2.4	+7.5	0.14	0.23	0.19	2.1	3.5
D	21	3	+4.3	+10.5	0.33	0.47	0.40	4.9	7.1
E	21	9	0	+4.9	0.14	0.15	0.15	2.2	2.3
F	18	0	-3.4	+10.7	0.18	0.29	0.23	2.7	4.5
G	20	8	+0.7	+1.3	0.10	0.17	0.13	1.5	2.5
H	20	34	+6.3	-5.0	0.52	0.13	0.33	7.7	2.0
I	24	12	+7.6	+10.4	0.41	0.31	0.36	6.1	4.7
J	20	1	+1.8	+5.0	0.25	0.20	0.22	3.7	3.0
K	31	17	-2.9	+8.3	0.15	0.37	0.26	2.2	5.6
L	18	22	+6.8	+10.6	0.21	0.15	0.18	3.1	2.4
M	32	11	+5.2	+11.0	0.20	0.19	0.20	3.0	5.0
N	17	11	-2.1	+2.7	0.15	0.20	0.18	2.3	3.1
O	22	1	+0.5	+11.2	0.27	0.23	0.25	4.1	3.6
P	19	35	+4.9	+7.6	0.21	0.18	0.19	3.2	2.7
Q	24	14	+5.8	+7.1	0.15	0.18	0.16	2.3	2.7

a) 個人誤差 1,500°C 以下の方に就ては正負の値が殆ど相半して居て最小0°から最大±7°位迄ある。全體の算術平均を取ると +1.5°C になり幾分か溫度を高く讀む傾向のある事を示して居る。

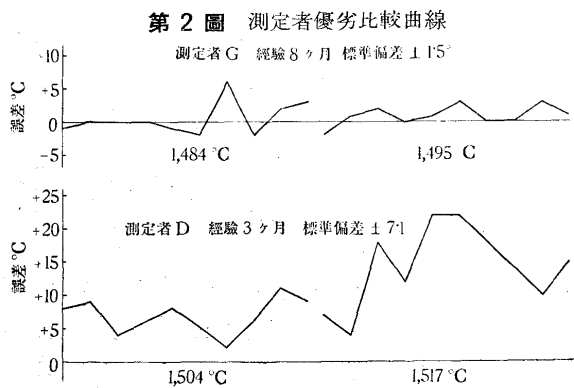
1,500°C 以下の方に就て見ると最小+1°から最大11°迄あり殆ど全部が正值で平均を取ると +7°になる。之の原因として考へられるのはフィルターがあつて測定が難しくなつたのと、又何の測定者も測定の方法が皆光高溫計の電球の明さを暗い方から明るい方へ變へて行く遣り方に從て居るからであらう。殊に 1,500°C 以上、以下の何れの場合も正の方に偏倚する傾向の有るのは後者の理由に依るものと思はれ、夫れがフィルターのある場合に限り特に目立て表れて來たものと考えられる。

現場で實際此の結果を使用するには、各測熱工の測定値に夫れに相應した個人誤差を補正值として加へるなり引くなりすれば良いのであるが、但し此の際注意を要するのは次に述べる撒布度の問題で、撒布度の餘り大なる者では茲に出した個人誤差の意義が不明瞭となつて、補正值を加へ

ても無意味である。

b) 撒布度 1,500°C 以上と 1,500°C 以下と別々に計算して平均した。撒布度の小さいと言ふ事は要するに誤差の變動が少い事で測定の巧な事を示し、撒布度の大きいと言ふ事は誤差が酷く散て居て測定 of 拙劣な事を示す。即ち譬へ個人誤差は +10° であつても、常に正確に眞の値よりも 10° 丈高く讀むならば撒布度は 0 で、讀みの値から 10° 丈引けば必ず眞の値となり、個人誤差 10° と言ふ事に意味が生じて來るが、若し個人誤差として求めた平均の誤差の値が 0° であつても、之が或は +10° となり或は -10° となつた誤差の合計が 0 であつたのでは、其の測定者の讀みの値に幾何程の値を加へて眞の値となす可きか見當が付かず、即ち個人誤差の決定に撒布度を重視する所以である。

表に依れば撒布度の最小値は 0.10 最大値は 0.52、之に匹敵する標準偏差の値は ±1.5 及 ±7.7° である。今比較の爲此の二つの場合を圖に表はすと第 2 圖の様になる。



今の場合光高温計は既述の如く實驗室型で、現場で使用して居る光高温計よりも遙かに測定し易く、又周圍の状況も一定で測定に影響を及ぼす要素も比較的少いが、現場で測定する場合には色々な困難の爲に撒布度も此の數倍乃至拾數倍の程度に迄増加するのであらうと考へられる。更に現場に近い條件の下に實驗を行ふ積りで居る。

c) 年齢及測熱の經驗と巧拙との關係 測熱工として養成するに如何なる人間が適當であるか、年齢と巧拙との間に何等かの關係があるか、又誰でも練習に依り一樣に上達し得るものか如何かと言ふ様な事は實際上仲々重大問題であるが、簡単に判斷する方法が無かつたので今迄等閑に附されて來た様である。又現在測熱に従事して居る者の内でも果して誰が上手で誰が下手であるか一寸識別出來ないので、通例は便宜上年月の経た者即ち巧者と考へて遣て來た様に思ふ。其處で果して夫れが適當であるか如何かを

判定する一つの方法として、年齢及測熱の經驗と撒布度との關係を第 3 圖に圖示して見た。

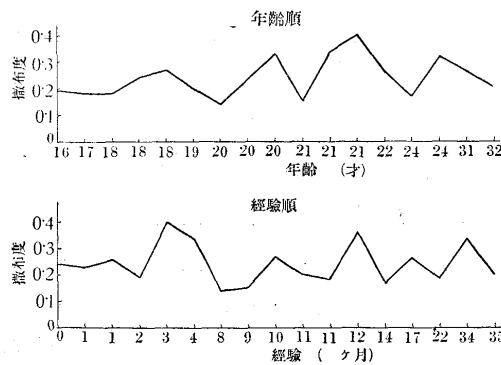
圖は横軸を年齢又は經驗順に取り（左を小とする）、縦軸に撒布度の値を取た。

之で見ると測定 of 巧拙は年齢にも經驗にも全然無關係と言ふ結論を得る。即ち未経験者が平均撒布度 0.23 であるのに三、四ヶ月の經驗のある者が之よりも劣て居て、平均撒布度 0.33 と言ふ結果を示して居る。從て光高温計に依り測熱を行ふ場合には之に適する人間と適しない人間とが先天的に區別される事となり、若し誤て適しない人間が之に従事した場合は測定値に大きな誤差を伴ふのみならず、練習に依り熟達する事も殆ど不可能であるから、光高温計を使用する測熱工の撰定には特に注意が肝要である。

3 ヶ月も測熱に従事して尙一向に進歩の跡の見えない様な者は先づ光高温計の使用に堪へぬ者と考へて良いであらう。

III 柄杓内熔鋼の輻射率 (Emissivity)

第 3 圖 撒布度曲線



1) 輻射率 光高温計を使用して温度を測定する場合普通最も厄介な事は輻射率の問題であらう。

一般に熱輻射に関しては Planck が 1900 年に提出した Planck の公式があり、之に依

れば物體の温度と其の物體から輻射される或る一定波長の輻射線の強さとの關係は一義的に定まつて居る、織條消失型光高温計（以下單に光高温計と書く）の測定原理は、要するに此の關係を用ゐて輻射エネルギーの相體的の強さを測定する事に依り、被測體温度を知らうとするのであるが、其の具體的方法は、周知の如く光高温計の望遠鏡部を通じて被測體の像を比較測定用電球の織條の上に重ね合せて生ぜしめる。此の際光高温計附屬のフィルターは被測體からの輻射線の内或る一定波長の光のみを通す役目をする。普通はフィルターとしては 0.56μ の波長の光を通す赤硝子を用ゐる。次に織條に電流を通じて像と織條の輝度 (Brightness) を比較して、織條の輝度が像の輝度に等しくなつた時、即ち肉眼で織條を認める事が出來ない様になつた時の織條に流れて居る電流の値を測て之から間接に被測體よりの輻射エネルギーの強さを知る。若し豫め光高温

計を黒體爐 (Black body furnace) 又は夫れに相當するもので較正して置けば、直讀的に溫度を測る事が出来る。通常の光高溫計の目盛は概ね溫度目盛が施されて居るが、之は上述の如く黒體爐で較正してあるものである。

扱上に述べた Plank の公式並に夫れから誘導される關係は總べて輻射が黒體輻射 (Black body radiation) の場合にのみ成立つのであって、實際の多くの輻射物體に就ては成立しない。特に輻射體が金屬の時は其の偏差が著しい。従て無暗に熔鋼の溫度等を光高溫計で測定しても、出て來た溫度は熔鋼其のもの溫度とは凡そ關係のない値を表して居る事になる。即ち此の時の溫度値は被測體が黒體輻射をすると考へた場合の溫度であり、熔鋼に於ては實際の溫度より遙かに低い。其の意味で光高溫計に依る見掛上の溫度は、通例輝度 (Brightness temperature) 又は黒體溫度 (Black body temperature) と言はれて居る。

一般の輻射と黒體輻射との間には Kirchhoff の法則と呼ばれる次の様な關係がある。 $E_\lambda = \epsilon_\lambda E_{\lambda b}$ 。 E_λ は熱輻射をする物體の波長 λ の時輻射エネルギー、 $E_{\lambda b}$ は其の物體が同じ溫度で黒體輻射をすると考へた時の波長 λ に關する輻射エネルギーで、 ϵ_λ は物質の性質、輻射線の波長、溫度等に依り定まる 1 より小なる常數である。之が普通輻射能 (Emissivity power) 又は輻射率 (Emissivity) と言はれて居るもので、 $\epsilon_\lambda = 1$ になつた時は最も輻射の能率が良く黒體輻射に等しくなり、 $E_\lambda = 0$ では其の物體の溫度如何に拘らず λ なる波長の光は全然輻射しない結果になる。

今後 λ としては光高溫計の赤硝子の透過光の波長 0.65μ を使用する事とし、 ϵ_λ は單に ϵ と書く事にする。 ϵ の値は既述の如く物質の性質に依り變るが、就中輻射しつつある表面の状態に依り大いに左右される。

今 Plonck の法則、Kirchhoff の法則から輻射體の眞溫度と輝度溫度との關係を求めると (假に ϵ は溫度に依り餘り變化せぬとして)

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{S} + \frac{\lambda M}{C_2} \log_{10} \epsilon$$

$$\epsilon = \text{Emissivity} \quad \lambda = 0.65 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

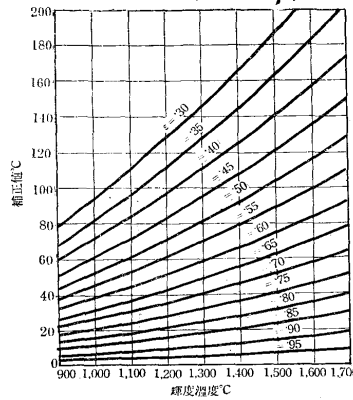
$$S = \text{輝度溫度} + 273^\circ\text{C} \quad C_2 = 1.432 \text{ cm. grad}$$

$$T = \text{眞溫度} + 273^\circ\text{C} \quad M = \log_{10} e = 2.303$$

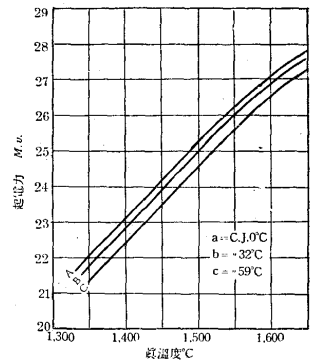
となる。T, S は絶對溫度であつて夫々眞溫度及輝度溫度を示す。λ, M, C₂ は凡て常數であるから ϵ が分て居れば

輝度溫度に或る補正值を加へる事に依り直ちに眞溫度が得られる。 ϵ の値と輝度溫度に加ふ可き補正值との關係は第4圖に示す如くである。

第4圖 輻射率 ϵ に依る較正溫度 ($\lambda = 0.65\mu$)



第5圖 鐵・タンクステン熱電對較正曲線



ϵ の値は前にも述べた様に表面の状態に依り非常に異る。今特に鋼の場合に就て考へれば、第一に鋼の成分に依り表面の状態が異るのは當然で従て ϵ も異る。又高溫にあるので空气中では鋼の面は容易に酸化すると考へられるが、酸化して居る面と純金屬の面とでは ϵ の値が大變違ふ。尙同じ成分の鋼でも熔融状態にある場合には固態の時と ϵ の値が違て來る。故に光高溫計で鋼の溫度を測定するには各々の場合に就き ϵ を定めて置か無ければならぬ。

然し之等 ϵ の値は實驗室に於ては殆ど研究済みで大抵の場合の ϵ の値は表に掲載されて居る。

扱此處に問題として居るのは現場の熔鋼特に柄杓中の熔鋼の輻射率に就てであるが、現場に關しては實驗室とは又別の見方を必要とする。即ち現場に於ては出鋼時にしろ鑄込時にしろ。熔鋼の表面状態が或單一な条件下にあると言ふ場合は少くて、寧ろ色々な條件が錯雜して入り込んで居る場合が多いと考へられる。然して實驗室で之等の錯雜な條件を再現する事は殆ど不可能であるから、現場で使用する可き ϵ の値はどうしても其の場所多數の測定を行て之から統計的に求めなくてはならない。

又現場に於ては實驗室と異り、空気中には多數の塵埃が浮遊し、且金屬蒸氣や煙等が存在するので、被測體からの輻射エネルギーは光高溫計に入る迄に可成吸收される。之は丁度被測體の輻射率が小になつたと同じ結果を與へる。尙其の外に室の明るさ、測定す可き熔鋼の量、器物の深さ被測體の面に對する測定時の角度等に依ても、光高溫計の讀みの溫度に加ふ可き補正值は變化して來る。

之等の事を總括して考へるに、現場に於て輝度溫度に加ふ可き補正值を定める際には、初めに述べた物理的意味

での輻射率とは別に、其の他の凡ゆる条件を含めた“工場内に於ける輻射率”とも言ふ可きものを各測定場所、各成分の鋼、各測定状態（例へば出鋼、鑄込、試料採取時等の如き）に就て定めて置かねばならぬ事になる。此の場合單に實驗室で定めた ϵ の値を持って來て使用する事は無意義である。

斯くの如き見地からして多くの輻射率に関する實驗データが既に存在して居るにも拘らず、當工場に於ても改めて實驗する事の必要を感じて少し許りの測定を行つて見た。特に柄杓内の熔鋼の輻射率に関する今迄の測定方法は殆ど總べて間接的であり、中に直接測定したものでも輻射を利用して居て熱電的に測つた例が無く、此の點後に述べる如き方法に依る測定も又何等かの新しい意味を持つて考へて良いと思ふ。

2) 従來の實驗結果 今著者の實驗結果を述べる前に柄杓内熔鋼の輻射率に関する従來の研究を一寸簡単に概括して参考に供しやう。先づ最初に現場の實驗から柄杓内熔鋼の輻射率を定めたものに E. Schröder¹⁾ の報告がある。實驗の方法としては Osann Jun 及 E. Schröder に依り考案された *W-Mo* 熱電對²⁾ を用ゐて、之で鹽基性平爐の鋼浴の溫度を測定し、其の直前又は直後、爐中より柄杓に熔鋼を汲み出して其の溫度を光高溫計 ($\lambda=0.65\mu$) で測り兩方の値を比較して之から ϵ を定めたのである。但し此の際柄杓で熔鋼を汲み出してから測定する迄に 25°C 丈熔鋼の溫度が冷却すると假定して居る³⁾。結果は平均で $\epsilon=0.50$ になつたと報告して居るが現場の實驗に依り直接柄杓の ϵ を求めたのは之を以て嚆矢とするので、 $\epsilon=0.50$ なる値は一般的廣く用ゐられ、Blaurock の論文⁴⁾ にも柄杓の ϵ として此の値が採用されて居る。(此の實驗方法を見るに、冷却溫度を簡単に 25° とした事 *W-Mo* 熱電對に依り測定せる鋼浴の部分と柄杓に依り汲み出した鋼浴の部分が必要しも一致して居ない事、兩測定の間時間的に差のある事等を除けば眞に妥當な實驗と考へられ、今迄單に實驗室で定めた ϵ の値を柄杓の場合にも應用して居た事に比べれば、 $\epsilon=0.50$ なる値を採用する事は一大進歩と云て差支へないであらう)。

此の後 1937 年に至り G. Leiber⁵⁾ は Schröder の

W-Mo 熱電對を更に改良したものを使用して鹽基性平爐鋼浴の溫度を測定し、且 Schröder の場合と全く同じ様にして柄杓に汲み出した熔鋼の溫度を“*optix*”光高溫計で測定して兩者の値を比較し、平均に於て $\epsilon=0.45$ なる結果を得た。尙此の實驗に於ても矢張り柄杓の冷却溫度は 25°C としてある。

以上は熱電對を使用した場合の實驗結果であるが、之とは又別に熔鋼の色溫度を測定して夫れから直接眞溫度を求める方法が可成以前から研究されて居た。1936 年 K. Guthmann は G. Naeser⁶⁾ に依り發明された色光高溫計“*Biopix*”を始めて現場に使用して色々な場合の熔鋼溫度を測り其の結果を報告した⁷⁾。其の内柄杓中の熔鋼の溫度に関しては光高溫計と“*Biopix*”の双方で同時に測定した値が比較してあるが、之から輻射率を求めると普通の炭素鋼では平均 0.53 なる値を得る。其の後 1937 年に至て同氏は更に詳細な溫度測定結果を發表したが⁸⁾ 柄杓に関する結果を普通炭素鋼 S2 ケの熔解の平均に就て書くると第 2 表の様になる。

第 2 表 色溫度計に依る測定結果(Guthmann)-普通鋼

鋼種	眞溫度 ⁽¹⁾	輝度溫度	ϵ
平爐鋼	1,680	1,540	0.42
電氣爐鋼	1,655	1,530	0.45
高周波爐鋼	1,610	1,520	0.55
S2 熔解の平均	1,670	1,545	0.46

(1) 但し原文の表は眞溫度中に柄杓の冷却溫度として 30°C 加へたものが書いてあるので此の度は柄杓夫れ自身に就て測定した眞溫度即ち元の表の値から 30°C 差引いたものを記入した。

次に特殊鋼に就てはデータの数が少く餘り確實でないが其れの一部を第 3 表に示す。

第 3 表 色溫度計に依る測定結果(Guthmann)-特殊鋼

鋼種	眞溫度 ⁽¹⁾	輝度溫度	ϵ
平爐鋼(合金鋼)	1,640	1,510	0.43
電氣爐鋼(低合金鋼)	1,750 1,600	1,595 1,495	0.40 0.50
電氣爐鋼(高合金鋼)	1,610	1,490	0.45
Cr·Mo 鋼	1,590	1,535	0.70
Ni·Cr 鋼	1,605	1,490	0.47

(1) 第 2 表の場合と同じ

Guthmann の實驗は柄杓内熔鋼の眞溫度を直接測定したと言ふ點に於て注目す可きであり、今迄の他の實驗結果とは異た意味を持つ。但し熔鋼溫度測定の場合“*Biopix*”に依る色溫度は我々の實驗に依れば、眞溫度よりも

1) Stahl u. Eisen 53 (1933) S. 881

2) Arch. Eisenhüttenwes. 7 (1933/34) S. 89/94.

3) 後述する

4) Arch. Eisenhüttenwes. 8 (1934/35) S. 517/32.

5) Arch. Eisenhüttenwes. 11 (1938) (63/66).

6) Arch. Eisenhüttenwes. 9 (1935/36) S. 483.

7) Stahl u. Eisen 56 (1936) S. 487.

8) Stahl u. Eisen 57 (1937) S. 1269.

大分高い値が出る様に思はれ、其の結果輻射率が實際より幾分小さくなるのではないかと言ふ氣がする。

譬へば現に Guthmann の測定結果中にも、柄杓内熔鋼の眞溫度が 1,700°C を越へて居るものが多數見受けられるが之等に就ても再検討を要するであらう。

3) 著者の實驗結果 柄杓内熔鋼の輻射率を決定する方法として、我々は直接眞溫度を測定して得られた値と光高溫計に依る測定値とを比較し之から計算で求める方法を用ゐたが、眞溫度決定には Guthmann が色溫度計を使用したのに對し我々は特殊な熱電對を使用した。

扱柄杓内の熔鋼は急速に冷却しつゝあるので其の溫度の測定は極めて迅速に完了しなくてはならない。一般に光高溫計を使用する場合は表面の鋼滓を拂ひ除けて後約 3~5 秒位の間に熔鋼の溫度を測定し終るを普通とする。

所が現在使用されて居る各種の熔鋼溫度測定用熱電對は概ね耐火物の保護管を必要とする種類のものか、或ひは保護管は不要であるが熱容量が甚だ大きいものかの何れかである。前者は熱電對の接點が熔鋼の溫度に等しくなる迄に最短のものでも約 1 分位の time lag を伴ひ⁹⁾ (尤も完全に保護管の内外の溫度が等しくなる場合は稀である)。現在の目的には不適當である。又後者は勿論柄杓内に於ける如き小容量の熔鋼の溫度測定には適さない。

其處で我々は 5 秒以内に測定が完了出來、而も熱容量の小なる熱電對として純鐵線及純 W 線の二つの element を熔鋼に直接浸漬し、熔鋼を介して溫接點を形成せしむる如きものを考案した。(寫眞 2) 以下に述べる柄杓内の熔鋼の眞溫度測定は總べて此の熱電對を使用して行たものである。此の直接浸漬型 Fe-W 熱電對に就ては、既に會社の研究報告¹⁰⁾に詳細發表して置いたから、此處で重複して述べる事を避けるが、測定時間は 5 秒以内で足り、又再現性 (Reproducibility) も良好で充分今の目的に適ふものである。其の較正曲線を第 5 圖に示す。

圖には冷接點の溫度を三通りに變へた場合の較正曲線が示してあるが、冷接點の溫度は常溫の範圍では測定値に餘り影響を及ぼさぬので、此の熱電對は冷接點に特殊な恒溫裝置を使用せず。其の時の室溫に依り此處の三つの較正曲

線から内插法で該當する測定溫度を求めるのである。

此の熱電對と織條消失型光高溫計とを同時に使用して兩者の讀みから柄杓内熔鋼の輻射率を計算した。

實驗は主として電氣爐に就て行ひ各鋼種毎に平均の輻射率を求めた。尙使用した光高溫計は豫め正確に較正して置き、測熱工としては個人誤差の少い熟練した者を選び、各測定毎に充分注意して次の事項を守らせた。即ち(1)測熱工は測定前柄杓の來る可き位置の直上約 1m 位の所で焦點を合はせ、電球の織條を略測定溫度附近に迄豫熱して待て居る事。(2)柄杓が置かれたらば表面の鋼滓を拂ひ除けると同時に其の溫度を測定する事。(3)對物並に接眼レンズは一回の測定毎に充分拭いて塵埃等の附着物を取除き置く事。(4)特殊の差物(フェロシリコン、フェロマンガ、アルミニウム等)をした直後の測定は見合わせる事。(5)測定は風上の向きから行ふ事等である。

結果は第 4 表から第 9 表迄に示してある通りである。酸性平爐の測定結果は數が少いので、鋼種別にせず一括して

柄杓内熔鋼の輻射率(第 4 表から第 9 表迄)

第 4 表 鹽基性電氣爐還元精鍊期 (Ni·Cr 鋼)

Fe-W 熱電對に依る眞溫度 °C	光高溫計に依る輝度溫度 °C	兩者より計算したる輻射率 ε	Fe-W 熱電對に依る眞溫度 °C	光高溫計に依る輝度溫度 °C	兩者より計算したる輻射率 ε
1,625	1,510	0.472	1,556	1,465	0.533
1,541	1,450	0.526	1,556	1,480	0.593
1,556	1,470	0.555	1,572	1,490	0.574
1,596	1,480	0.472	1,567	1,490	0.592
1,551	1,487	0.567	1,587	1,500	0.469
1,593	1,487	0.492	1,599	1,510	0.556
1,572	1,495	0.594	1,520	1,440	0.564
1,561	1,485	0.591	1,526	1,455	0.604
1,561	1,490	0.592	1,583	1,500	0.576
1,577	1,490	0.554	1,599	1,500	0.517
1,572	1,490	0.574			
1,577	1,495	0.576			
			平均值		0.552

第 5 表 鹽基性電氣爐還元精鍊期(特殊 Ni·Cr 鋼)

Fe-W 熱電對に依る眞溫度 °C	光高溫計に依る輝度溫度 °C	兩者より計算したる輻射率 ε	Fe-W 熱電對に依る眞溫度 °C	光高溫計に依る輝度溫度 °C	兩者より計算したる輻射率 ε
1,626	1,524	0.517	1,688	1,500	0.540
1,636	1,529	0.504	1,556	1,470	0.555
1,620	1,519	0.519	1,610	1,530	0.595
1,620	1,524	0.537	1,593	1,510	0.577
1,620	1,519	0.519	1,582	1,500	0.555
1,583	1,505	0.593	1,572	1,470	0.555
1,615	1,520	0.538			
			平均值		0.546

第 6 表 鹽基性電氣爐還元精鍊期(Cr·Mo 鋼)

Fe-W 熱電對に依る眞溫度 °C	光高溫計に依る輝度溫度 °C	兩者より計算したる輻射率 ε	Fe-W 熱電對に依る眞溫度 °C	光高溫計に依る輝度溫度 °C	兩者より計算したる輻射率 ε
1,610	1,515	0.537	1,560	1,480	0.578
1,568	1,485	0.567	1,572	1,490	0.574
1,592	1,510	0.568			
1,555	1,470	0.555			
			平均值		0.563

⁹⁾ F. H. Schofield が考案した“迅速浸漬法”用の石英鞘附白金-白金ロヂウム熱電對でさへ測定時間 10~20 秒を要する (Seventh Report on Heterogeneity of Steel Ingots Section VII p. 222)

¹⁰⁾ 住友金屬工業研究報告 Vol. 3 p. 323.

第7表 鹽基性電氣爐還元精鍊期 (Ni·Cr·Mo 鋼)

Fe~W 熱電對に 依る眞温 度°C	光高温計 に依る輝 度温度 °C	兩者より 計算した る輻射率 ε	Fe~W 熱電對に 依る眞温 度°C	光高温計 に依る輝 度温度 °C	兩者より 計算した る輻射率 ε
1,589	1,503	0.564	1,599	1,510	0.556
1,589	1,497	0.540	1,637	1,490	0.382
1,600	1,503	0.526	1,587	1,505	0.579
1,604	1,505	0.512	1,600	1,503	0.526
1,621	1,515	0.501	1,551	1,477	0.592
1,626	1,515	0.489	1,598	1,510	0.561
1,591	1,500	0.544	1,593	1,505	0.557
1,587	1,505	0.579	1,572	1,490	0.574
1,587	1,500	0.469	1,561	1,460	0.496
1,582	1,495	0.562	1,541	1,445	0.507
1,593	1,500	0.516	1,551	1,460	0.530
1,593	1,510	0.568		平均值	0.531

第8表 鹽基性電氣爐還元精鍊期 (炭素鋼)

Fe~W 熱電對に 依る眞温 度°C	光高温計 に依る輝 度温度 °C	兩者より 計算した る輻射率 ε	Fe~W 熱電對に 依る眞温 度°C	光高温計 に依る輝 度温度 °C	兩者より 計算した る輻射率 ε
1,582	1,500	0.576	1,649	1,517	0.429
1,597	1,490	0.488	1,597	1,515	0.575
1,606	1,505	0.512	1,601	1,487	0.470
1,602	1,515	0.565	1,649	1,517	0.429
1,615	1,520	0.538	1,581	1,500	0.576
1,575	1,485	0.543	1,562	1,485	0.575
1,561	1,585	0.578		平均值	0.524
1,597	1,505	0.543			

第9表 酸性平爐

Fe~W 熱電對に 依る眞温 度°C	光高温計 に依る輝 度温度 °C	兩者より 計算した る輻射率 ε	Fe~W 熱電對に 依る眞温 度°C	光高温計 に依る輝 度温度 °C	兩者より 計算した る輻射率 ε
1,530	1,440	0.526	1,497	1,405	0.505
1,545	1,450	0.513	1,501	1,415	0.530
1,570	1,475	0.522	1,628	1,530	0.532
1,618	1,520	0.529	1,625	1,525	0.524
1,631	1,525	0.506	1,638	1,530	0.500
1,637	1,530	0.504	1,575	1,480	0.524
1,618	1,515	0.511	1,600	1,505	0.533
1,632	1,530	0.519	1,612	1,515	0.531
1,638	1,535	0.518		平均值	0.519
1,481	1,395	0.523			

表にして置いた。表中 Ni·Cr 鋼とあるのは C 0.3%, Ni 3%, Cr 0.8% 前後の普通言はれて居る Ni·Cr 鋼であり Cr·Mo 鋼及 Ni·Cr·Mo 鋼も同様に Cr 1%, Mo 0.5% 及 Ni 3%, Cr 1%, Mo 0.5% 程度の合金元素を含有するものである。特殊 Ni·Cr 鋼は Ni, Cr の外に二, 三の合金元素を含有して居り, 炭素鋼とあるのは C 0.6~0.8% 位の寧ろ高炭素鋼に近い種類のものである。

第4表 Ni·Cr 鋼の場合を見るに ε の値は 0.47~0.60 の間に撒布して居て其の平均値は ε=0.55 となつて居る。之を Fry¹¹⁾ の結果と比較すると (同氏の實驗は柄杓に就て行はれたものでなく此處に引用するのは少しく不適當であるが) Ni·Cr 鋼の熔融状態の輻射率は酸化膜のない時が 0.5, 酸化膜の有る時が 0.7 となつて居て 0.55 なる値は其の中間の數値となる。但し Guthmann が柄杓内

熔鋼の輻射率として得た値 ε=0.46 に比べれば一寸大きい様である。

第5表の特殊 Ni·Cr 鋼に就ては比較的撒布程度が小で輻射率の値は 0.50~0.59 の間に入居り, 平均値は前と同じく 0.55 である。

第6表の Cr·Mo 鋼に關してはデータが少なく結論が下せないのであるが, 平均で ε=0.56 となつて外のものよりも大きい値を示して居るのは Guthmann の場合の Cr·Mo 鋼の輻射率 ε=0.69 と比べて何か偶然で無い様にも考へられる。

第7表は Ni·Cr·Mo 鋼で平均の輻射率は ε=0.53 となつてゐる。此の表を見ると ε の値は可成廣く散居る。

第8表は炭素鋼で輻射率は平均 0.52 である。炭素鋼に關するデータは今迄多く出て居るが, F. Korber¹²⁾ 及 R. Hare¹³⁾ に依れば酸化膜の存在しない場合の熔鋼の輻射率として ε=0.36 及 ε=0.44 を夫々與へて居り, 更に薄い酸化膜のある場合は同じく Hase に依り ε=0.61 と與へられて居る。之を我々の値 ε=0.52 或ひは Schröder の ε=0.50, Guthmann の ε=0.46 等と比較するに柄杓内の熔鋼の輻射率は丁度酸化膜の全然存在せぬ場合と薄い酸化膜がある場合との中間の値を示して居る事が判る。

第9表は酸性平爐鋼の場合であるが前述の如くデータの數が少いので, 全部一括して平均を求め ε=0.52 を得た。

扱上述の實驗結果から柄杓内の輻射率に就き考察して見るに第一に可成輻射率の値にバラッキがある事, 第二に平均の値は表面が酸化膜のある場合と全く酸化膜の無い場合の中間の値を取居る事が判る。現場に於ける熔鋼の輻射率が其の表面の酸化の程度に依り色々異なるであらうと言ふ事は A. Fry¹¹⁾, G. Hase,¹³⁾ G. Schröder,¹⁾ K. Guthmann⁷⁾ 等の諸氏に依り繰返し言はれて來た事であるが, 特に柄杓の場合には其の時々の條件の變化に依り此の影響が大きく利いて來て, 表に見る如きバラッキを呈するであらう。

第二の問題に就ては既に Schröder¹⁾ が柄杓内熔鋼の表面は鋼滓を拂ひ除けた直後には完全な金屬の面でなくて非常に薄く酸化膜に覆はれた状態であり。酸化膜の厚さは時

¹²⁾ Mitt. Kaiser-Wilhelm-Institut. f. Eisenforsch. Band XII S. 365 (1930)

¹³⁾ Arch. Eisenhüttenwes. 4 (1930/31) S. 261.

¹¹⁾ Stahl u. Eisen 44 (1924) S. 1398.

間と共に變化すると述べて居るが、現在の場合も同じ説明が可能であると思ふ。

更に成分の相違に依り ϵ の値に大小を來すのは、成分其のものに及ぼす直接的原因に依る許りで無くて、成分の相違が表面の酸化の進行程度に及ぼす影響如何に依るのであらう。此の事は Guthmann⁷⁾ が銑鐵の輻射率と Mn 及 Si の含有量の關係に就て同様な考へを述べて居る。

IV 柄杓内熔鋼の冷却

1) 研究の方針 柄杓を用ひて鋼浴溫度を測定する場合第一に誰もが氣附く事は爐から汲み出して測定する迄に柄杓内の熔鋼は相當冷却するに相違ないが、一體何度位冷めるものであらうかと言ふ事である。

E. Schröder¹¹⁾ は 3kg の柄杓中に 1.5kg の熔鋼と 0.8kg の熔滓がある場合、其の冷却を Stefan-Boltzmann の法則から計算すると、鋼浴溫度を 1,500°C とした時冷却する溫度は 29~31°C になると言ふ事を計算の方法は全然省略して述べて居る。然して同氏は $W-Mo$ 熱電對に依り鋼浴の溫度を直接測定し、同時に柄杓内熔鋼の溫度を光高溫計で測定して其の讀みの値に $\epsilon=0.50$ の補正值を加へ兩者を比較した所、柄杓内熔鋼冷却の溫度として平均 20°C なる結果を得、上の計算に依る値を参照して冷却溫度を 25°C と定めた。

目下の處では之以外には信憑す可きデータが發表されて居ないので、大抵の製鋼工場に於て柄杓の冷却溫度として 25° 又は 30° を使用して居る様である。

所が實際現場で柄杓に熔鋼を汲み取る際熔滓の粘度は必ずしも常に一定では無く、從て熔鋼を覆ふ鋼滓の厚さには色々な場合が出て來る譯で、之が柄杓内熔鋼の冷却状況を左右する有力な原因の一つとなり得るとも考へられる。尚熔融状態でその溫度傳導度は鋼體に依て色々異なるであらうが、之も又冷却溫度に影響を及ぼすのは當然である。此の外柄杓内熔鋼の冷却に關係する原因としては澤山存在するであらうけれども、今は特に柄杓を覆ふ鋼滓の厚さに注目して、厚さを色々變へた場合に就て計算と實驗の双方より柄杓の冷却溫度を求めて見た。但し鋼種は Ni 及 Cr を含む特殊鋼に限定してある。

冷却溫度の求め方は、柄杓を爐から取出した瞬間を起點として時間を測り、夫れから 10 秒目、20 秒目、30 秒目等の柄杓内熔鋼の眞溫度を測定する。次に此データから冷却曲線を作り此の曲線を逆に延長して $t=0$ の軸との交

りに於ける溫度を求めれば之は柄杓を汲み出す瞬間の溫度になり、即ち鋼浴溫度に外ならない。今汲み出してから測定する迄の時間が判れば、此の曲線より冷却溫度を知り得る事になる。

扱原理は上述の如く甚だ簡單であるが、之を實行するには少しく工夫を要する。何となれば實驗は其の性質上柄杓に汲み出してから出来る丈迅速に測定を行つても尙得られる溫度は數秒後のものであり、鋼浴の溫度に比して可成冷却した溫度値が測定されるに過ぎない。而も冷却は最初の 1~2 秒に於て最も急激なのが普通であるから、得られたデータから extrapolation に依つて $t=0$ の時の溫度即ち鋼浴の溫度を求めるとしても單に直線的な extrapolation や、見た所の感じで行ふ様な extrapolation は絶対に不可である。此處に於て上の様な方法でやる限り、實驗のみから鋼浴溫度を求めやうとする試みは遂に行き詰るより外無いのであるが、我々の場合は其の打開策として、少し大膽な遣り方かも知れぬが、理論上から求めた計算式を利用する事にした。初めに理論上から冷却曲線を求める方法に就て述べる事にする。

2) 冷却理論式の誘導 今計算の便宜上柄杓の形を圓壙とし圓壙型の熔鋼の表面に一樣に鋼滓が薄く被て居ると考へて、柄杓の材料其のものは無視する事にする。即ち換言すれば、圓壙型をなせる熱の良導體の表面が薄き熱の不良導體を以て覆はれて居る場合の冷却の問題を取扱へば良い事になる。此の場合の微分方程式を圓壙座標を用ひて書けば

$$\partial u / \partial t = \kappa^2 (\partial^2 u / \partial r^2 + \partial u / r \partial r + \partial^2 u / \partial z^2) \dots (1)$$

但し u は溫度、 r は動徑、 z は圓壙の軸、 t は時間を示し、座標の取り方は圖の如く定めた。尙溫度は軸對稱と假定してある。此處に κ は熔鋼の溫度傳導度で

$$\kappa = k_1 / \rho c \dots \dots \dots (2)$$

ρ は熔鋼の密度 c は熔鋼の比熱

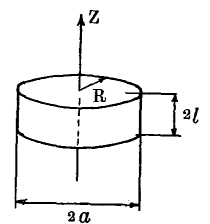
k_1 は熔鋼の熱傳導度

又爐から汲み出した瞬間に於て、柄杓内の熔鋼の溫度は一樣であると考へて、初期條件を

$$\text{初期條件 } t=0 \text{ の時 } u = u_0 \quad u_0 \text{ は const. } \dots (3)$$

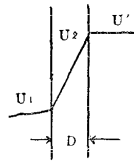
とする。

次に境界條件に就て考へる。表面を覆て居る鋼滓の溫度を u_2 熱傳導度を k_2 、熔鋼の溫度を u_1 熱傳導度を k_1 とし、鋼滓と熔鋼との境の面で溫度は連續で且つ熱の發生又



は吸収が無いものとすれば、兩者の境界面で次の式が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} k_1(\partial u_1/\partial z) &= k_2(\partial u_2/\partial z) \\ k_1(\partial u_1/\partial r) &= k_2(\partial u_2/\partial r) \\ u_1 &= u_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$



今鋼滓の厚さ D は柄杓の半徑に比して非常に薄いから u_2 は D なる厚さの間で直線的に變化して居ると假定しても差支へ無いとする。又鋼滓の熱傳導度が鋼の夫れに比して遙かに悪い爲、鋼滓と熔鋼との接觸面が熔鋼の溫度に等しいにも拘らず、鋼滓の表面は殆ど空氣の溫度に等しくなつて居ると考へれば、表面では空氣の溫度を u' として $u_2 = u'$ となり、從て上の假定から $\partial u_2/\partial z$ 又は $\partial u_2/\partial r$ は $(u_1 - u')/D$ で置き換へられる。 $u_1 - u' = u$ と書けば (4) 式の境界條件は次の様になる。

$$\left. \begin{aligned} \text{境界條件 } (\partial u/\partial z)_{z=\pm D} &= (k_2/k_1 D)u \\ (\partial u/\partial r)_{r=a} &= (k_2/k_1 D)u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

但し $2l$ は圓壻の高さ、 a は半徑である。尙今後は空氣の溫度を總べて無視して u 即ち熔鋼の溫度と考へて計算を行ふ事にする。此處に於て問題は(1)式を(2)なる初期條件及(5)なる境界條件の下に解けば良い事になつた。然し之は極く初歩的な問題で解法に就ては改めて説明をする必要もないから、以下の計算は略して結果のみを書く事としよう

$$k_2 a / k_1 D J_0(x) = x J_1(x) \dots\dots\dots (6)$$

の根で小さい値のものから大きさの順に番號を付けて、 x_n で表はし (J_0, J_1 は零次及一次のベッセル函數)

$$(k_2 l / k_1 D) \cot x = 2x \dots\dots\dots (7)$$

の根で上と同じく小さい値のものから順に番號を付けて、 x_m で表せば(1)式の解は

$$u = u_0 \sum_n A_n \exp(-\kappa^2 x_n^2 t / a^2) J_0(x_n r / a) \times \sum_m B_m \exp(-4\kappa^2 x_m^2 t / l^2) \cos(2x_m z / l) \dots\dots (8)$$

但し此處に

$$\left. \begin{aligned} A_n &= (2k_2 a / D) / (x_n^2 + k_2^2 a^2 / D^2) T_0(x_n) \\ B_m &= 2(4x_m^2 + k_2^2 l^2 / D^2) \sin x_m / (4x_m^2 + 2k_2 l / D + k_2^2 l^2 / D^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

となる。

3) 實驗結果 實驗方法は初めに簡単に述べて置いたが、此處で今一度具體的に説明する。實驗は凡て鹽基性電氣爐で行ひ鋼種は Ni, Cr を含む特殊鋼である。溫度測定用熱電對としては既述の Fe-IV 熱電對を用ひ、柄杓は普通の半球形の鐵製のものを使用した。熔鋼の汲み方は何處でもやって居る様に最初柄杓を爐内に入れて少しく豫熱し

次に其の内外の面に充分熔滓を塗り付けてから略爐の中央部の位置で熔鋼を熔滓ごと汲み取る。

此の時豫め他の實驗工がストップ・ウォッチを持って待て居て、汲み取りと同時にストップ・ウォッチを押す。適當な時間が経過したら合圖に依り表面の鋼滓を拂ひ除けて溫度を測る。引續き直ちに他の柄杓に依り同一條件の下に熔鋼を汲み取り、前の場合より稍々多く時間が経過してから溫度を測る。斯くして數回續けて實驗を行ふ。全實驗に要する時間は約 3~5 分間である。尙此の場合各測定毎に柄杓表面の鋼滓の厚さを數箇所測定して其の平均値を記録して置く。此の様な實驗を 20 組許り行たが、此處には其の内の主なものの數個に就て説明する事にする。

第 10 表 柄杓内熔鋼冷却の實驗結果

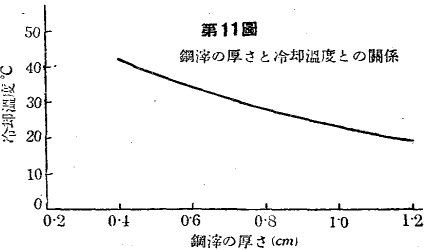
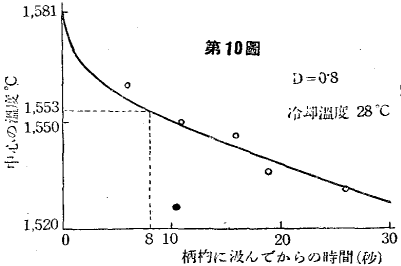
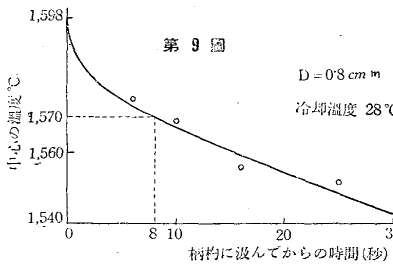
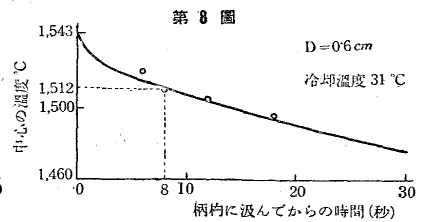
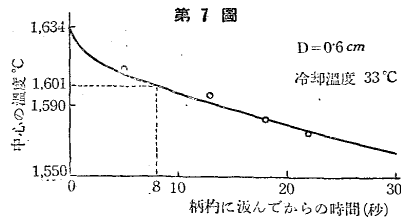
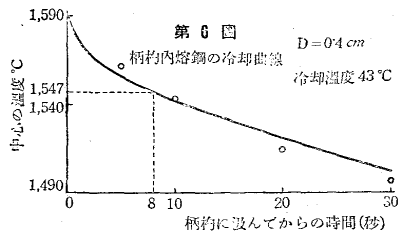
1) D=0.4 cm		4) D=0.8 cm	
柄杓内熔鋼溫度 °C	爐中より汲み出してからの時間 s/c	柄杓内熔鋼溫度 °C	爐中より汲み出してからの時間 sec
1,561	5	1,575	6
1,543	10	1,569	10
1,515	20	1,556	16
1,497	30	1,551	25
2) D=0.6 cm		5) D=0.8 cm	
1,600	5	1,560	6
1,595	13	1,550	11
1,583	18	1,546	16
1,575	22	1,533	19
3) D=0.6 cm		D は鋼滓の厚さ	
1,521	6		
1,510	8		
1,505	12		
1,496	18		

第 10 表 (1)~(5) は上述の如くして得た實驗データである。D は平均の鋼滓の厚さを示す。但し鋼滓の厚さは非常に不均一で此處に示した値は極く大體の平均値に過ぎない。此のデータを見ると明かに鋼滓の厚さの大なる場合は小なる場合に比して冷却の程度が少いのであるが、此のデータ丈からでは具體的に數値で之を言ひ表す事は困難である。其處で既述の如く(2)に誘導された理論式を利用して extrapolation を行ふ事にした。

扱理論式を利用すると言ても、其の中に表れて來る種々の常數とか數値とかを如何に定めるかが問題である。熔鋼に関する各種の常數は幸既に發表された値があるので夫れを用ゐる事とした。

$$\begin{aligned} \text{即ち } \kappa^2 &= k_1 / \rho c = 0.058296. \quad k_1 = 0.071 \text{ C,G,S.} \\ \rho &= 6.92 \text{ C,G,S} \quad c = 0.176 \text{ C,G,S.} \end{aligned}$$

然るに鋼滓の方は熔融状態の時の色々な常數の値が殆ど判て居ない。現在必要なのは 1,500°C 位の溫度に於ける鋼滓の熱傳導度であるが、之も常溫の時の値は別として此の様な高温の場合に就ては未だ測定されて居ない様である



其處で今は已むを得ず次の様な方法に依た。全實驗 20 回の内鋼滓の厚さ $D=0.6\text{ cm}$ 前後のものが最も多く、總數の $2/3$ を占めて居るので $D=0.6\text{ cm}$ として計算した冷却曲線が鋼滓の厚さ 0.6 cm 前後の時の實驗データに成可く一致する様に鋼滓の熱傳導度を定める事にした。斯うして求めた熱傳導度の値は平均で

$$k_2 = 0.00148 \quad (1,500 - 1,600)^\circ\text{C}$$

となる。但し此の時の鋼滓の成分は大體次の通りである。

CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃
50~60	20~30	1.5~3	5~7	0.2	0.2~1.0	0

k_2 の値は鹽基性鋼滓 50°C の時の熱傳導度 $0.000991^{14)}$ の約 $3/2$ 倍の値となつて来る。此の値を D の異なる場合にも使用して見たが實驗結果と大體一致した。

扱次に實際の柄杓は略半球形であるにも拘らず計算は圓壩型として行てあるから、成可く實際と一致する様に a, l 等の數値を定める必要がある。現在は柄杓の断面と底面積を等しくし、且柄杓の容量と等しい容量を持つ圓壩を考へる事にした。實測の結果は平均で

柄杓の半径	5.75 cm
柄杓内熔鋼の重量	2.5 kg

となるので之から

$$a = 5.75\text{ cm} \quad l = 3.08\text{ cm}$$

と定めた。第 6 圖から第 10 圖迄に $D=0.4, 0.6, 0.8\text{ cm}$ とした時の冷却曲線の數個の例が示してある。但し D の値は必ずしも正確に 0.4 とか 0.8 とか言ふのでは無く、大體其の程度の値を取て計算したと言ふ意味である。

圖中柄杓に汲んだ瞬間から丁度 8 秒後の柄杓内熔鋼の温

度を點線で示してあるが、之は通常當所の電氣爐では、柄杓に熔鋼を汲んでから光高温計で其の温度を測定する迄に平均約 8 秒を要するので、柄杓に汲み出してから 8 秒間に冷却する温度を以て柄杓内熔鋼の冷却温度と定める事とし斯く點線で示したのである。

冷却する温度値は D の値に依るのみならず初めの鋼浴の温度に依て左右されるので、一概に何度と言ひ切る事は難しいが圖を見れば判る様に大約 $20 \sim 40^\circ\text{C}$ 位の間の値を取る。今鋼浴温度を $1,650^\circ\text{C}$ として計算から鋼滓の厚さと冷却温度との關係を求めて見ると、大體第 11 圖の如くである。之で見ると鋼滓の厚さが $0.4 \sim 1.0\text{ cm}$ と變化した時、冷却温度は $45 \sim 20^\circ\text{C}$ に變る事が判るであらう、從て現場での操業中鋼浴の温度を正しく求める爲には、其の時の柄杓に附いて居る鋼滓の厚さに依り冷却の補正値を適當に變へる必要が起て来る。更に何時も同一の條件で熔鋼を柄杓に汲み出して居ると假定するならば、柄杓を覆ふ鋼滓の厚さは主として鋼滓の粘性に依り決定されると考へても良いので、鋼滓の固い時と軟い時とで冷却温度を變へなくてはならぬと言ふ結論になる。

當所に於ては冷却温度としては、鋼滓の粘性其の他の狀況に應じて $25, 30, 35^\circ\text{C}$ の三つの値を適宜使用する事に定めて居る。

V 總 括

普通現場では柄杓内の熔鋼の温度を光高温計で測定して之から間接に鋼浴温度を求める方法を取て居るが、今迄の經驗に徴するに、測定の困難其の他の原因に依り仲々正確を期し難い現状にあるので、之に改良を加へて更に適確

¹⁰⁾ 田所博士, 東北帝大理科報告 10 (1921) p. 339.

に鋼浴温度を知り得る様にしようと言ふ目的で此の研究を行た。其の具體的方法は誤差の主要な原因となる可き次の三つの場合即ち

- I) 測熱工に依り生ずる各種の誤差。
- II) 柄杓内熔鋼輻射率の値の取り方に因る誤差。
- III) 柄杓内熔鋼の冷却に原因する誤差。

の一つ一つに就て、實驗又は計算から現場の條件に應じて誤差を最少ならしめる様工夫したのである。其の結果を概括すると次の様になる。

I) 測熱工の個人誤差並に巧拙度

(1) 個人誤差の値は最大 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 迄あつて無視するには少し大き過ぎるから是非とも各測熱工に就き決定して置く必要がある。

(2) フェルターのある場合の方が一般に個人誤差が大になる傾向がある。尙個人誤差の値が正の方に偏て居るのは測定の方法が光高温計の電球の明さを暗い方から明い方へ變へて行く遣り方に依て居るからであらう。

(3) 測熱工の巧拙度を測定値の散布の程度から求めたが人に依り可成の差異があるのを見受ける。然して經驗の有無及年齢の大小は測定の巧拙と全然相關關係が無い。即ち測定の巧拙は先天的に定まつて居て年齢又は經驗と無關係である。従て上手なものは最初から上手に測れると言ふ事になり測熱工の撰定上注意を要する。

II) 柄杓内熔鋼輻射率の取り方

(1) 物理的意味の輻射率とは別に“工場内に於ける輻射率”とも言ふ可きものを各工場、各測定場所、各鋼種、各測定狀況に就て定めて置く必要があるとの考への下に、直浸式 $\text{Fe}\cdot\text{W}$ 熱電對及光高温計を使用して電氣爐並平爐の試料採取時に於ける柄杓内熔鋼の輻射率を測定した。

(2) 測定結果の平均値を各鋼種別に表にすれば第 11

第 11 表 柄杓内熔鋼輻射率平均値比較

鋼種	ϵ
A 當所の實驗結果	
鹽基性電氣爐($\text{Ni}\cdot\text{Cr}$ 鋼)	0.55
同上 (特殊 $\text{Ni}\cdot\text{Cr}$ 鋼)	0.55
同上 ($\text{Cr}\cdot\text{Mo}$ 鋼)	0.56
同上 ($\text{Ni}\cdot\text{Cr}\cdot\text{Mo}$ 鋼)	0.53
同上 (炭素鋼)	0.52
酸性平爐鋼	0.52
B 外國の實驗結果	
Schröder 氏	0.50
Leiber 氏	0.45
Guthmann 氏 (平爐鋼)	0.42
同上 (電氣爐鋼)	0.50
同上 ($\text{Cr}\cdot\text{Mo}$ 鋼)	0.70
同上 ($\text{Ni}\cdot\text{Cr}$ 鋼)	0.47

表の如くである。但し平爐の結果はデータの数が少いので各種の鋼を一括して平均した。尙参考の爲外國に於ける主な實驗結果も併せて記して置く。

(3) 當所の實驗結果を見るに輻射率の平均値は熔融純金屬の面に於ける値と全く酸化した面に於ける値との中間値を示して居る。之は柄杓内熔鋼の表面状態が測定時に於て丁度其の中間の状態を呈して居るものと考へて良いであらうと思ふ。尙合金鋼の場合は炭素鋼の場合よりも輻射率の値が大である。

III) 柄杓内熔鋼の冷却

(1) 爐内の熔鋼を柄杓に汲み出してから測定する迄に熔鋼の温度が何度冷却するか、柄杓で測た温度と爐内鋼浴温度との間に何度開きがあるかを知る爲に、 $\text{Fe}\cdot\text{W}$ 熱電對に依り柄杓内熔鋼の冷却具合を測定し、そのデータ並に冷却の理論式から冷却曲線を作り、此の曲線を時間軸の起點迄逆に延長して、之から鋼浴の温度及冷却する温度の値を求めた。

(2) 現在は柄杓内熔鋼の量及鋼種を一定として實驗したが、其の結果冷却温度は柄杓を包む鋼滓の厚さに依り大いに影響を受ける事を知た。鋼滓の厚さが $0.4\sim 1.0\text{cm}$ の時に冷却温度は $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 位變化する。

以上述べた如く正確に較正された光高温計を用ひ、且測熱工より起る人的誤差に充分注意するのは勿論、更に鋼浴温度測定に際しては現場の實際の測定場所に就て屢々柄杓内熔鋼の眞温度を測定する事に依り其の輻射率を確めて置き、又其の時の鋼滓の固さ程度に従て柄杓の冷却の爲の補正值を加減すれば、現場に於ける熔鋼温度測定は一段の正確さを期待し得る様になるであらう。

出鋼時、鑄込時等の熔鋼温度測定に關しては目下更に研究中である。

終に此の報告の發表に關して指示を與へられた住友金屬工業株式會社製鋼所の幹部の方に感謝致します。又研究に就て屢々適切なる指導を與へられた當所室井嘉治馬氏並種々の御便宜、御援助を賜た電氣爐工場、平爐工場及研究部の職員各位に對して、厚く感謝の意を表します。