

# 翻譯

## 鋼塊及び鋼塊鑄型の熱關係

T. F. Russell: Thermal Relations Between Ingot and Mould,

*Iron and Coal Trades Review*, 142 (1941) 509~513, 516

前田六郎 酒井傳三郎\*譯

鋼塊不均一性委員會並に平爐委員會の鋼塊鑄型小委員會に於ける鑄型壁の應力に關する協議事項に、若し可能ならば鋼塊鑄型壁に起る應力の程度を注型中並に注型後の溫度勾配其の他の條件より數學的に分析することを記してゐる。勿論、之には先づ鑄型の溫度分布に關する既知の公式を十分に検討することが必要である。English Steel 會社の冶金研究所に於ては多數の測定を行つてゐる。著者は許可を得て、之より本論文を起草した。鋼塊及び鑄型の溫度分布と冷却開始後の時間との正確な數學的關係を決定するには複雑な困難があつて、齋藤及び Lightfoot の研究結果より更に一步前進するには恐らく數年の歳月を要するであらう。この進歩の障礙は、鋼の溫度傳導率が溫度と共に變化することに歸因する。鋼の熱特性に關する合金鋼委員會の熱拔小委員會の研究の如く、正確な函數關係が決定出來ても、數學的にこの函數を取扱ふことは、不可能でない迄も非常に困難である。現在迄の理論的研究はすべて溫度傳導率が一定であるとして行つてゐる。

此の外、本論文に於ける純理論的考察を妨げる原因は下記の如く多々あり、約 20 年前の齋藤氏が行つた解を一步前進せしめることは著しく困難である。事實、鑄造法並にピット作業が現在の如くであり、冶金學者が數學者にこの問題を正確に傳へることが出來ない限り、確實な數學的解決は永久に不可能であらう。然し、實際に近い理論的假定に基き是等の公式は、十分検討しなければならぬ。依つて作業經驗と比較し得べき基本理論を樹立し、又は鑄型の或る位置に於ける時間・溫度曲線の理論値と測定値との比較をなすべきである。此の比較に依り理論と實際の相違、障礙となる點が判明し、又或る場合にはこの障礙因子を無視し得るや否やが明瞭となる。讀者はこの判断をすべきである。

既知の公式が何故今迄十分検討されなかつたかと言へば、之は疑もなく下に示す方程式の根の圖式解法が満足なものでなく、又この式を算術的に解決するには非常な勞力が必要だからである。然しこの計算はモンロー 8 桁計算器、British Association for the Advancement of Science 發行の Mathematical Tables Vol. I (圓函數), Vol. 6, Pt 1 (ベッセル函數) に依り行ひ得た。

記 號

$T_1$  = 鋼の初溫度

$T_0$  = 鑄型及び周圍の初溫度

$T$  = 鋼塊又は鑄型内の任意の位置の溫度

$$U = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0}$$

\* 日本製鐵株式會社技術研究所

$t$  = 冷却開始よりの時間

$Q$  = 熱量

$c$  = Newton の冷却法則に於ける比例常數

$k$  = 溫度傳導率

$$h = \frac{c}{k}$$

$2b$  or  $2w$  = 丸又は矩形鑄型の内徑又は長さ

$2B$  or  $2W$  = 同上外徑又は長さ

$H = hb$

$r$  = 丸型鋼塊又は鑄型の任意の位置の中心よりの距離

$x, y$  = 矩形鋼塊又は鑄型の任意の位置の座標、鋼塊中心を原點とし、軸を側面に平行に採る。

$\sigma$  = 鋼塊及び鑄型材料の比熱

$\rho$  = 鋼塊及び鑄型材料の密度

$$a^2 = \frac{k}{\sigma \rho} = \text{溫度傳導率}$$

$J_0$  = 零次ベッセル函數

$J_1$  = 一次ベッセル函數

### 熱公式の基礎的假定

數學的興味はあるが、實際とは縁の遠い場合を取扱つた公式はここでは不必要である。例へば、外周が斷熱的な鑄型内で鋼塊を冷却するとか、無限の鑄型の中で有限の鋼塊を冷却するとか、有限の鋼片に半無限鋼塊を接觸冷却するとか言ふ場合である。上述の場合には有限の鋼塊が有限の鑄型内で表面より熱を失ふ場合の極端な或る特別な例に過ぎない。

以下に記す公式は次の如き假定に基く。

(1) 凝固潜熱なく又固態に於ける相變化の潜熱がないとの假定。

實際はこの潜熱は存在する。齋藤氏は相變化の際の潜熱を研究したが、鋼片又は圓筒の外部を  $0^\circ\text{C}$  に一定した場合の冷却を取扱つてゐるのみであるから、彼の公式は鋼塊及び鑄型には適用されない。又 Lightfoot は凝固潜熱を取扱つてゐるが、主として熔鋼の凝固速度に及ぼす潜熱の影響に關するものである。この問題は非常に難解で、半無限熔鋼の境界  $x=0$  の溫度を  $0^\circ\text{C}$ 、又は接觸する半無限鋼體を  $0^\circ\text{C}$  と假定した場合のみ解決出来る。固態に於ける相變化の潜熱を考慮すれば、凝固潜熱問題は益々複雑となる。何となれば兩者の潜熱並に放熱が行はれる溫度範圍は冷却速度に依存するからである。又同一の鋼塊、特に合金鋼塊の場合、鋼塊は局部的な  $Ar'$  及び  $Ar''$  に依つて放熱を示し、或は  $Ar'$  と  $Ar''$  の溫度範圍に互つて放熱が起るのである。斯る場合を數學的に取扱ふことは不可能に近い。

(2) 初容積を變化せず、鋼塊は冷却中常に鑄型と接觸するとの假定。

然しこの容積は冷却中に變化し、鑄型に接觸してゐる熔鋼が僅かに凝固しても隙が生じ、この空隙は鋼塊と鑄型の間で厚さが變化する。Lightfoot 及び McCane は空隙の影響を研究し、この空隙が鋼塊の冷却、鑄型の加熱を緩徐とすることを明かにしてゐる。

(3) 熔鋼は水平位置にて静止状態にあるとの假定。

この假定は眞でない。一部分でも熔融状態であれば必ず対流があるからである。熔鋼の流動は注型方法、ガス発生、熔離及び凝離に依る移動、凝固時刻の差に依る結晶子の沈降運動等に依つて起るのである。

(4) 熱傳導は鋼塊軸心に直角な平面に常に平行な面にのみ行はれ、軸を横ぎつて流熱しないとの假定。

(3) に述べた如く、対流に依り各層間に熱交換がある。然し冷却速度に及ぼす全影響は無視してよい。又底盤に依り底部への熱流がある。この問題は定量的に考へねばならないが、底盤から十分離れてゐる位置を考察するならば、底盤冷却の影響は極めて小である。空氣に接觸する層からの熱損失は、 $T_1$  の値を變化し、又層が鋼塊の頂部に非常に近い場合には重要となる。

(5) 熔鋼は初め均一な温度に保たれ、鑄型は周囲温度と等しいとの假定。

鑄型を充すには時間を要し、この時間中熔鋼は取鍋中で冷却し、取鍋から注型中に空冷されるから熔鋼の温度は鋼塊の底部から上部に上昇するに従つて低下する筈である。鋼が鑄型と接觸開始時の温度を  $T_1$  とし、初めの鑄型温度を  $T_0$  とする。

(6) 熔鋼、凝固鋼、鑄鐵鑄型の温度傳導率は同一で、温度と無關係であるとの假定。

既述の如くこの假定は正適でない。併し、パーライト鋼と鑄鐵の温度傳導率は任意の温度に於て大なる相違はない。従つて或る温度範囲の平均値を採用する。

(7) 鑄型面の温度勾配はパーライト鋼と鑄鐵の温度傳導率に比例すると假定し、全温度範囲の平均値を採用する。

是は Newton の冷却法則の型で、表面からの熱移行速度はその表面と周囲との温度差に比例するとの Newton の冷却法則に基づく。即ち  $T$  を任意の時間に於ける鑄型の温度とすれば

$$\frac{dQ}{dt} = k \left( \frac{dT}{dr} \right)_s = -c (T_s - T_0),$$

但接尾の  $s$  は鑄型面に於ける量を示す。

$$U_s = \frac{T_s - T_0}{T_1 - T_0}$$

と置けば、

$$\left( \frac{dU}{dr} \right)_s = \frac{dT_s}{dr} \cdot \frac{1}{T_1 - T_0} = -\frac{c}{k} \cdot \frac{T_s - T_0}{T_1 - T_0} = -hU_s,$$

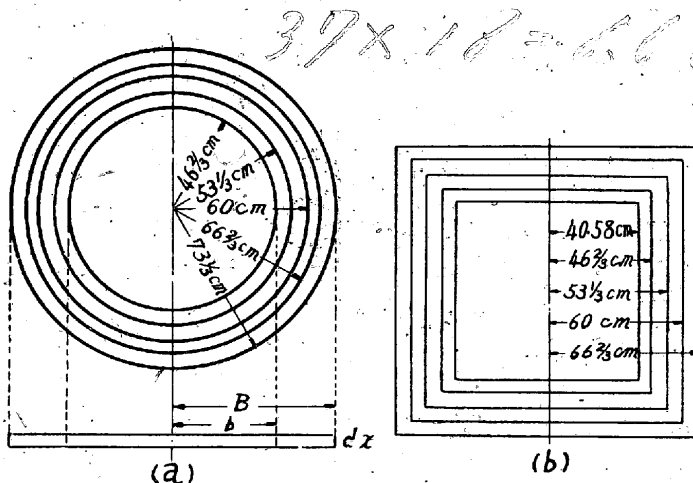
但  $h = \frac{c}{k}$  である。

Newton の法則は温度差が小なる時に成立し、熱傳導率  $k$  は温

度と共に變化するからこの理論的假定は完全に正しいとは言へない。(7) の假定が理論的に正しいとしても、 $h$  の値が天候、ピットの形状、他の鋼塊鑄型の存在する場合等の周囲條件で何等の變化も受けないと考へられぬ。齋藤氏は輻射常數として、 $4.3 \times 10^{-5} \text{ erg/cm}^2 \text{ deg}^4$  及び熱傳導率として  $0.09 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} (\text{°C cm}^{-1})$  を用ひ Stefan の 4 乗輻射法則の近似法から理論的に  $h$  (齋藤氏の記號では  $h/k$ ) の値を誘導した。是に依れば平均温度  $610^\circ\text{K} (337^\circ\text{C})$  の時  $h = 0.0102$  となる。English Steel 會社の實驗室では、直径  $1/2 \sim 6 \text{ in}$  の各種鋼棒の空冷に關して實驗し、 $700^\circ\text{C}$  から常温迄の温度範囲で  $h$  の平均値として  $0.015 \text{ c. g. s.}$  單位を得てゐる。著者は爾後の計算にこの値を採用する。後述の如く、 $h$  の如可なる値を示す曲線に就ても定量的に計算することは容易である。 $h$  の値を  $0.015 \sim 0.010$  に變化し、鑄型温度曲線に及ぼす影響を示す一例は第 29, 30 圖である。

### 計算に使用する式

取扱ふ鋼塊並に鑄型は何れも丸又は矩形の場合である。現在迄には他の場合を取扱つたものはなく、簡単に思へるものでも伸々難解である。隅を丸めたもの、邊を凹凸の曲面としたものは、表面に近い程影響が大で、表面からの距離の増すと共に減少する。故にスラ



第 1 圖 考案した鋼塊及び鑄型寸法

ブ型鋼塊は同一形状の長方形断面と同一の取扱をし、多角形鋼塊は丸型鋼塊と同一と見做す。何れの場合も、鑄型比が同一であるとす。鑄型比 (mould ratio) とは鋼塊の單位面積に對する鑄型の斷面積、即ち第 1 圖 (a) の  $(B^2 - b^2)/b^2$  と定義する。鑄型比は鑄型と鋼塊の寸法比を示すと考へる丈では不十分で、鋼塊と之と幾何學的に同一の外部寸法を有する鑄型とを比較する爲にのみ使用すべきである。是は、鋼塊の冷却は鑄型に接する鋼塊表面積、外氣に曝露された鑄型の面積及び鑄型壁の厚さに依るとの事實からである。角型鋼塊と丸型鋼塊の斷面積が同一で、同一鑄型比を有するとすれば、角形鑄型は鋼塊と  $2/\sqrt{\pi}$  倍の接觸面を持ち、外氣に  $2/\sqrt{\pi} = 1.128$  倍の曝露面積を有することとなるが、壁の厚さは丸型鑄型の  $\sqrt{\pi}/2 = 0.886$  であるに過ぎない。幾何學的に同形の鑄型で、長邊が短邊の  $n$  倍の矩形鋼塊の比較をなせば、矩形鑄型は丸型鑄型よりも  $(1+n)/\sqrt{\pi n}$  倍の曝露面積を有し、鋼塊との接觸面は  $(1+n)/\sqrt{\pi n}$  倍となる。長邊側の肉厚は丸型鑄型の  $1/2\sqrt{\pi/n}$  倍で、短邊側の厚さは  $1/2\sqrt{\pi n}$  倍であることが解る。使用した式は主として齋藤氏の導いたものである。矩形鋼塊及び鑄型の式は座標の原點を鑄型の隅から鋼塊中央部へ移した。之に依り計算を簡

特集

單ならしめ、式に融通性を與へることが出來た。

**丸型鋼塊及び鑄型** 鋼塊又は鑄型中の任意の點  $r$  の温度は次式で與へられる。

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} A_n' e^{-\frac{\mu_n^2 a^2 t}{B^2}} J_0 \left( \mu_n \frac{r}{B} \right),$$

但  $\mu_n$  は次式で與へられる。

$$H = \frac{\mu_n J_1(\mu_n)}{J_0(\mu_n)}$$

又

$$A_n' = 2 \frac{b}{B} \mu_n \frac{J(\mu_n \frac{b}{B})}{J_0^2(\mu_n) \{ \mu_n^2 + H^2 \}}$$

時間  $t$  に於ける鑄型中の熱を初全熱の fraction で示せば

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n' e^{-\frac{\mu_n^2 a^2 t}{B^2}} 2 \left( \frac{B}{b} \right)^2 \frac{1}{\mu_n} \left\{ J_1(\mu_n) - \frac{b}{B} J_1 \left( \mu_n \frac{b}{B} \right) \right\},$$

時間  $t$  に於ける鋼塊中の熱は同様に

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n' e^{-\frac{\mu_n^2 a^2 t}{B^2}} 2 \frac{B}{b} \cdot \frac{1}{\mu_n} J_1 \left( \mu_n \frac{b}{B} \right)$$

上式中、 $b$  及び  $B$  は鑄型の内径及び外径を示し、 $a^2$  は温度傳導率である。

**矩形鋼塊及び鑄型** 鋼塊又は鑄型内の任意の點  $(x, y)$  に於ける温度は次式で與へられる。

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n' A_m' e^{-\frac{n^2 \mu_n^2 t}{B^2} - \frac{m^2 c_m^2 t}{W^2}} \cos \left( \frac{x}{B} \mu_n \right) \cos \left( \frac{y c_m}{W} \right)$$

但  $\mu_n$  は  $\mu_n \tan \mu_n = hB = H'$ ,  $C_m$  は  $C_m \tan C_m = hW = H''$  で與へられる。

$$A_n' = \frac{2 H' \sin \frac{\mu_n b}{B}}{\mu_n (H' + \sin^2 \mu_n)}$$

$$A_m'' = \frac{2 H'' \sin \frac{C_m W}{W}}{C_m (H'' + \sin^2 C_m)}$$

任意の時間  $t$  に於ける鑄型の熱は

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n' A_m'' e^{-\frac{n^2 \mu_n^2 t}{B^2} - \frac{m^2 c_m^2 t}{W^2}} \frac{BW}{b w \mu_n C_m} \sin \mu_n \sin C_m$$

任意の時間  $t$  に於ける鋼塊中の熱は

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n' A_m'' e^{-\frac{n^2 \mu_n^2 t}{B^2} - \frac{m^2 c_m^2 t}{W^2}} \frac{BW}{b w \mu_n C_m} \sin \frac{\mu_n b}{B} \sin \frac{C_m W}{W}$$

上式中  $2B, BW$  は鑄型外側の寸法、 $2b, 2w$  は内側の寸法である。

使用した記號は、熱の fraction 以外は既に定義してある。若し丸型鑄型及び雰囲気温度が  $T_0$  で、鑄型が  $T_1$  なる温度で熔鋼を充たされたとすれば、鑄型の單位長さに對する入熱は

$$\pi b^2 \sigma \rho (T_1 - T_0)$$

但  $\sigma$  は比熱、 $\rho$  は密度である。この熱量は鑄型を通つて大氣中に失はれる。之は任意の時間に於ける鋼塊及び鑄型の熱量の fraction で、之は計算した。この熱に  $(T_1 - T_0)$  を乗ずれば鋼塊と鑄型の平均温度が得られる。この種の研究では、數値は特別な場合に適用するので、本論文中には省いたが、必要ならば之を利用された。

**凝固速度に及ぼす鑄型厚さの影響**

(a) **丸型鋼塊及び鑄型**

凝固速度に及ぼす鑄型厚さの影響及び爾後の鋼塊冷却の理論的研究の爲第1表に示す4つの場合を考察した。

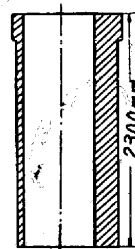
第1表 丸型鋼塊及び鑄型の寸法

H (=h×B)	0.8	0.9	1.0	1.1
b, 鋼塊半徑, cm	46 7/8	46 7/8	46 7/8	46 7/8
B, 鑄型外径, cm	53 1/2	60	66 7/8	73 1/2
b/B	7/8	7/8	7/8	7/11
鑄型比	0.306	0.653	1.041	1.469
鋼塊直徑 in	36.75	36.75	36.75	36.75
鑄型厚 in	2.625	5.249	7.874	10.499

總ての鋼塊は直径が等しく、之を厚さの異なる鑄型に鑄込むものと假定する。次に曲線を引くに必要な計算をする。hの値は總て0.015とする。然し鋼塊及び鑄型寸法を適當に變化すれば、任意に假定したhの値に對しこの曲線を適用出来る。例へば正確なhの平均値がh=0.0010であるとすれば、初めの鋼塊のH=0.8に對する鑄型の新しい直径B<sub>1</sub>は、B<sub>1</sub>=0.80/0.01=80cmとなる。鑄型比が一定とすれば、鋼塊半徑はb<sub>1</sub>=70cm、又(a<sup>2</sup>t)<sub>1</sub>の値はa<sup>2</sup>t×B<sub>1</sub><sup>2</sup>/B<sup>2</sup>である。幾何學的に同一の鋼塊と鑄型に就て、或る部分を或る温度範圍冷却するに要する時間は距離の2乗に比例することは間違である。h、Bの積Hが一定の場合にのみこの説は正しい。

時間・温度曲線では、座標はU(デimension無し)とa<sup>2</sup>t(c. g. s. 單位)で、後者はa<sup>2</sup>の最良平均値が未知なる爲用ひる。

この曲線を詳細に検討する。討議の對象は、鋼塊の凝固速度に及ぼす鑄型厚さの影響である。既刊文献を検討すると2つの考へ方が



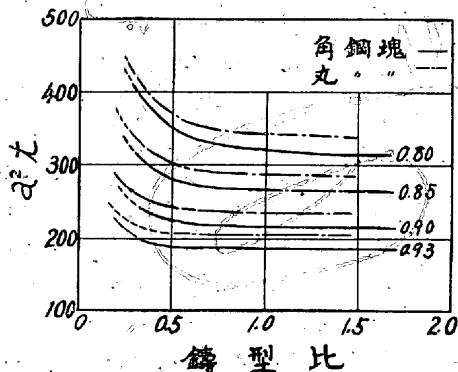
第2圖 granat 及び Bezdenezhnykh の實驗用鑄型

ある。此の1つは鑄型の厚さが増せば凝固速度も増すと實驗の根據に依るもの、他は同じく鑄型厚さは凝固速度に何等影響せずとの實驗的根據に依るものである。又熱は厚い鑄型よりも薄い鑄型に依り迅速に奪はれるとの論文があつたが、之は實驗的にも又理論的にも妥當でない。之に就ては後述する。尙上述の相對立する見解を一致させることは可能である。この問題は鋼塊中央部の凝固所要時間に及ぼす鑄型厚さの影響、又は一定時間に於て鋼塊より奪取される全熱量に對する鑄型厚さの影響の兩者又は一方より接近せしむることが出来る。凝固潜熱及び或る程度の過熱は

許容せねばならぬ。潜熱は初温度の増加と假定し、この假定を用ひてゐる。丸型鋼塊中央部の温度降下を示す第2圖に依れば、Uが1から0.8迄降下するに要する時間は、鑄型比が0.3の時よりも0.65の時の方が可成短いことが解る。鑄型比が1.0迄に比すれば、時間は稍短い、又1.47に増すと僅に短くなる。U=0.8では固相線の1450°Cに接近し、鑄型温度を25°Cとすれば、潜熱と過熱との兩者の影響は固相線以上356°Cの初温度に相當する。即ち、

$$\frac{1,450-25}{(1,450+356)-25} = 0.8$$

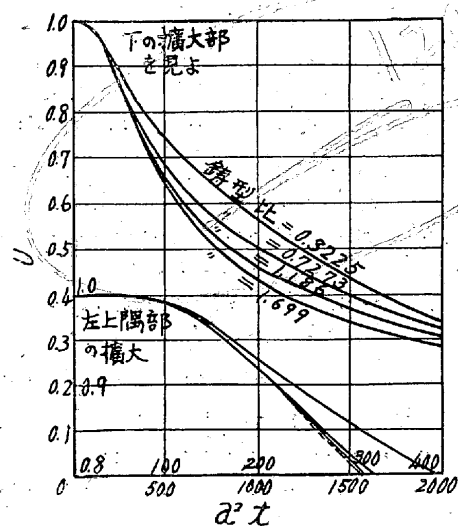
鋼塊中央部の凝固に要する時間に及ぼす鑄型比の影響は第3圖に明示されてゐる。圖は鋼塊中央部がU=0.93, 0.90, 0.85, 0.80に達



第3圖 鋼塊の凝固時間に及ぼす鑄型比の影響 (U=0.93, 0.90, 0.85, 0.80に至る迄)

するに要する時間(a²t)と鑄型比を軸としてある。鋼塊の凝固速度を早める観点からは、鑄込温度が従来より極度に異なる場合でも、鑄型比を通常の0.8以上1にすることは理論的に有利でない。第3圖に依れば厚い或は薄い鑄型の何れが凝固速度を早めるかの議論に曙光を投ずるものである。若し或る研究者が鑄型比0.5以上及び1.0以上の2個の鑄型に同寸法の鋼塊を鑄込んで検査すれば、必ずや厚い鑄型が好成绩であると報告するであらう。又かなり厚さの違つた2個の鑄型が鑄型比0.8以上であれば、厚い鑄型は有利でないと結論するであらう。同一理由は底部から上部へ凝固を早める目的で肉厚を大した傾斜鑄型に鑄込んだ平行側面の鋼塊にも適用出来よう。この種の鑄型は第3圖の資料に基いて設計すれば恐らく有効であらう。

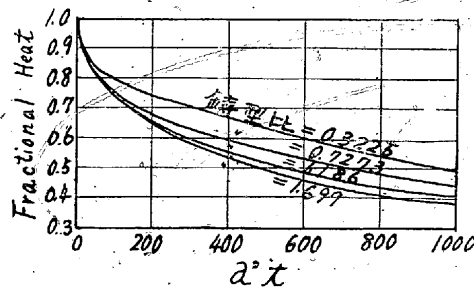
Granat及びBezdenzhnykhに依れば、鋼塊は鑄型が薄肉な程迅速に冷却するを示してゐる。之は著者の知る限り唯一の文献である。彼等は特別な設計の鑄型を用ひた、第2圖はこの寸法である。



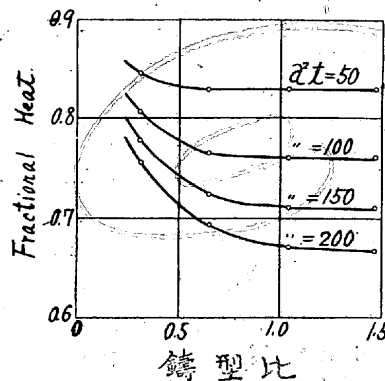
第4圖 丸型鋼塊中心部の温度降下

彼等は熱電對を鑄型の最も薄い部分及び最も厚い部分より熔鋼中に33mm挿入した。この位置の時間・温度曲線を求めたが、この鑄型では疑もなく最も肉薄の面に近い熔鋼は、厚い面に近い熔鋼よりも迅速に冷却することを知つた。然し厚さ一定の鑄型中では常に同一の影響があ

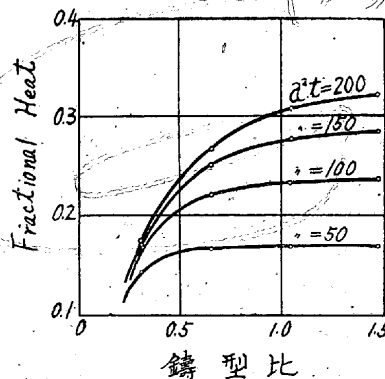
ると結論するのは非論理的である。後者では熱は鑄型の輻射に依り空中に失はれるが、前者ではかなりの熱量が薄肉部より厚肉部へ傳導する。故に鋼の冷却中薄肉部は人工的に冷却され、厚肉部は加熱される影響を生ずる。



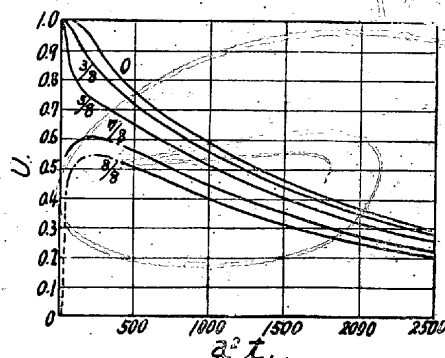
第5圖 丸型鋼塊の熱量



第6圖 丸型鋼塊に於ける鑄型比と熱量との關係



第7圖 丸型鑄型に於ける鑄型比と熱量との關係

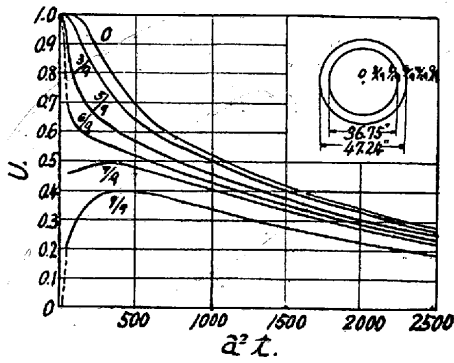


第8圖 鑄型比0.306の丸型鋼塊の直径上の各位置に於ける冷却曲線

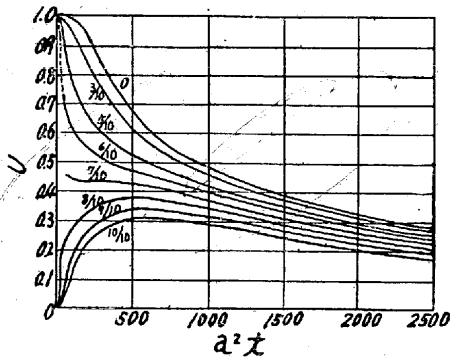
第5圖は初熱のfractionとしての鋼塊の全熱及び時間を軸とするものである。U=0.93に於て凝固が完了すれば、第4圖より鑄型比1.04, 1.47の鋼塊はa²t=210に於て凝固するを示し、第5圖は鑄型比を1.05より1.47に増せば全熱量が僅か0.665より0.660に低下するを示す。特別の場合、例へばU=0.80, a²t=370の場合でも鋼塊の全熱量は0.58より0.572に低下するのみである。

第6圖は別個の方法でこの一般的狀況を示すもので、一定時間に於ける鋼塊の全熱及び鑄型比を軸としてゐる。又第7圖は鑄型の全熱を同様の曲線で示すものである。

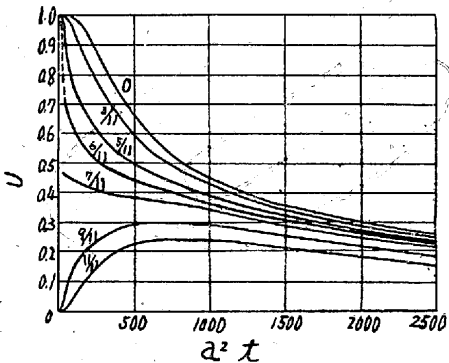
鋼塊及び鑄型の直径上の各點の時間・温度曲線は第8~11圖に示す。鋼塊及び鑄型断面を通じての温度分布は第12~15圖に示されてゐる。温度分布曲線は各鋼塊に就



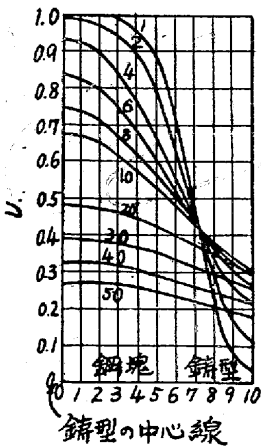
第9圖 鑄型比 0.653 の丸型鋼塊の直径上の各位置に於ける冷却曲線



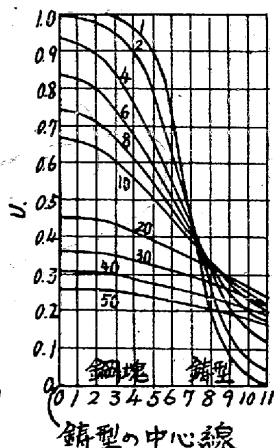
第10圖 鑄型比 1.041 の丸型鋼塊の直径上の各位置に於ける冷却曲線



第11圖 鑄型比 1.469 の丸型鋼塊の直径上の各位置に於ける冷却曲線

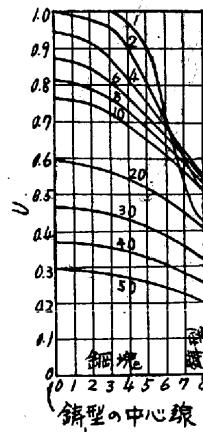


第12圖 鑄型比 0.306 の場合、鋼塊及び鑄型の温度分布

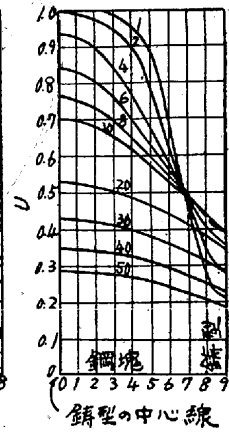


第13圖 鑄型比 0.653 の場合、鋼塊及び鑄型の温度分布

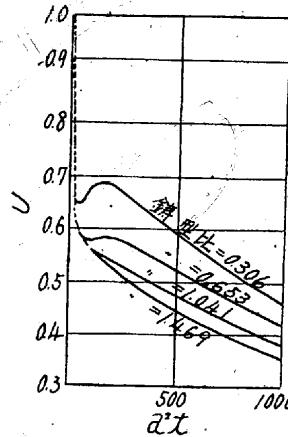
て同時刻を示すものであるから、鑄型厚さの影響は容易に知り得る。單位時間は  $a^2t=50$  であるから、20と記してある曲線は冷却開始後  $a^2t=1,000$  の時刻に相當するものである。是等の曲線に表れた興味ある點は鑄型比 0.306 及び 0.653 (第 12 ~ 13 圖) のものは、鑄型壁に近い鋼塊の或る部分は初め温度が低く、冷却終了前に再び上昇することである。鑄型比 1.041 及び 1.469 では鋼塊の全部が順調に冷却するが、鑄型に近い部分は  $a^2t=50$  より  $a^2t=500$  の時刻に互り極めて緩慢な冷却を示してゐる。齋藤氏は計算に依り、肉厚 20 cm (7.87 in) の鑄型に半径 80 cm (直径 63 in)、鑄型比 0.5625 の丸型鋼塊は鑄型壁に近い



第14圖 鑄型比 1.041 の場合、鋼塊及び鑄型の温度分布



第15圖 鑄型比 1.469 の場合、鋼塊及び鑄型の温度分布



第16圖 丸型鋼塊の鑄型面より 2 cm の位置に於ける冷却速度に及ぼす鑄型比の影響

部分がかかる温度経過を取るを發見した。鑄型壁から 2 cm の距離にある鋼塊の冷却に及ぼす鑄型厚の影響は第 16 圖に示してある。鑄型面からこの距離にあるものの温度上昇は、鑄型比 0.653 の場合に明かである。

(b) 角形鋼塊及び鑄型

考察した角形鋼塊は既述した丸型鋼塊と大體同一断面積のものである。初めこの鋼塊を丸型鋼塊と同じ鑄型比の 4 個の鑄型に入れようとしたが、H の値が不確實であつたので、鑄型比の違ふことを覺悟で、簡単な H の値 (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) を用ひることとした。依つて

丸型及び角形鋼塊の直接的な比較は、鑄型比と主要な値を取つて圖示する方法に據つた。鋼塊及び鑄型の詳細は第 2 表に示す (第 1 圖 (b) 参照)。

第 2 表 角形鋼塊及び鑄型の寸法

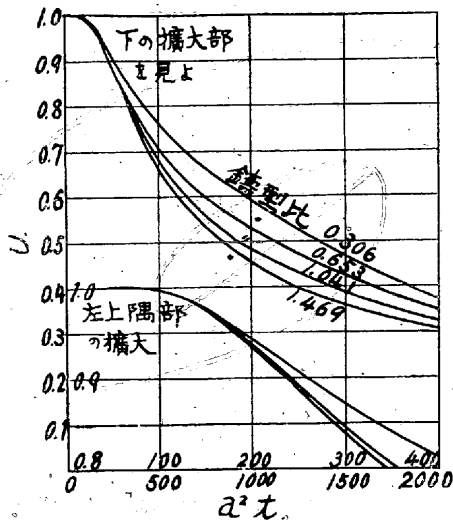
H (=h×B)	0.7	0.8	0.9	1.0
b, 鋼塊片面長さの 1/2, cm	40.58	40.58	40.58	40.58
B, 鑄型外側長さの 1/2, cm	46 3/4	53 1/2	60	66 3/4
鑄型比	0.323	0.727	1.186	1.699
鋼塊の邊の長さ, in	31.95	31.95	31.95	31.95
鑄型肉厚, in	2.396	5.021	7.646	10.270

第 17 圖は各鋼塊の中部の時間・温度曲線で、第 18 圖は鋼塊中に残留する初熱の fraction と時間との關係を示す。

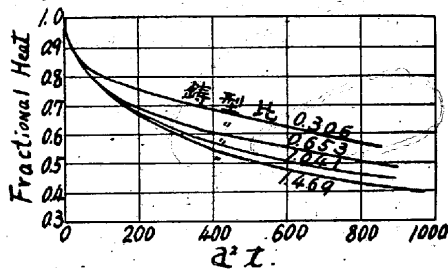
第 19 圖は鋼塊中の残留熱、第 20 圖は鑄型中の熱と鑄型比との關係を示す。

第 3 圖は鋼塊中央部が U=0.93, 0.90, 0.85, 0.80 に對應する温度に達するに要する時間と鑄型比を兩軸として圖示したものである。

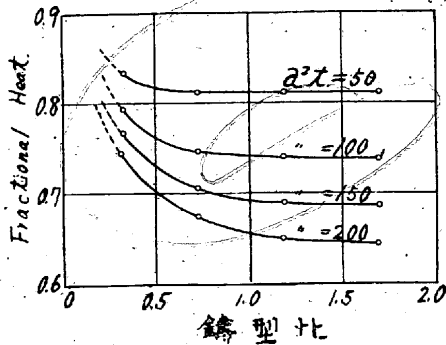
是等の曲線は同一断面積及び鑄型比の鑄型に於ては角形鋼塊が丸型鋼塊に比し更に迅速に凝固するを示してゐる。例へば第 3 圖より、鑄型比が 1 ならば、中央部が U=0.93 に降下するに要する時間は角形鋼塊では  $a^2t=186$ 、丸型鋼塊は  $a^2t=205$  であるを知る。



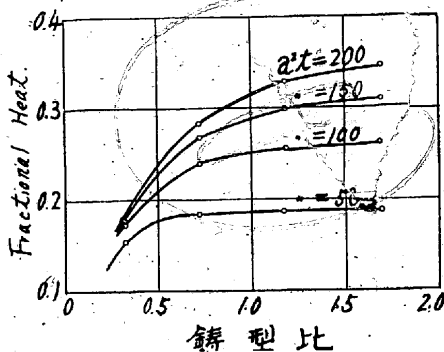
第17圖 角型鋼塊中心部の冷却曲線



第18圖 角型鋼塊の熱量

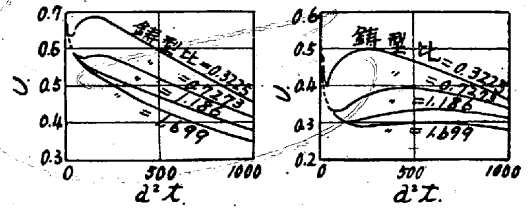


第19圖 角型鋼塊に於ける鑄型比と熱量との關係



第20圖 角型鑄型に於ける鑄型比と熱量との關係

之は角型の鑄型厚が丸型の厚さの0.886 であるといふ事實に反するものである。従つて迅速な凝固は鋼塊と鑄型の接觸面積の大きさに依るもので、空氣に曝露する面の大きさには大した關係はないと言へるであらう。鋼塊の鑄型壁に近い部分は先づ温度が低下し、次で上昇し、鑄型比が小なる場合は再び降下する現象が丸型鑄型に起るが、角型鋼塊の或る部分特に隅に近い部分でもこれと同様な温度變化を生ずる。第21圖は鋼塊面中央部より2cmの位置に於ける時間・温度曲線と鑄型比との關係を示すもので、第22圖は角型鋼塊の各面から2cmの距離にある角隅部の曲線である。



第21圖 角型鋼塊の肌より2cmの位置に於ける冷却速度に及ぼす鑄型比の影響  
 第22圖 角型鋼塊の肌より2cmの角隅部に於ける冷却速度に及ぼす鑄型比の影響

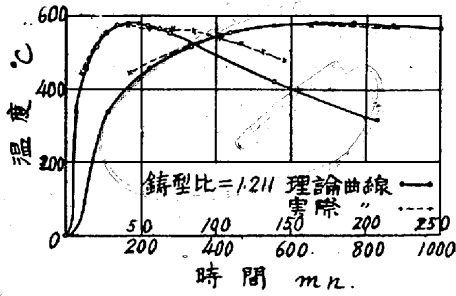
### 計算と實測との比較

理論は實際に試験して見なければ、その價値は不明である。著者の知る範圍ではこの理論と實際との比較を行つたのは僅かに2論文あるのみであるが、之も満足なものではない。齋藤氏は半径27及び40cmの鑄型外側の中央部に於て、初温度1,500°C、温度傳導率0.0974として温度上昇を計算し、之を菊田氏の實測した結果と比較した。この結果の一致は可能であるが、更に温度傳導率の低い値を用ひたならば曲線は更によく一致するものと思はれる。Matuschkaは鋼塊鑄型中の4點に於ける温度上昇を測定し、實測の結果は齋藤氏、Lightfootの方法で計算した曲線と良く一致したと言ふが、計算の詳細並に曲線を示してゐない。Matuschkaの曲線の或るものは再検討したが、之は後述する。

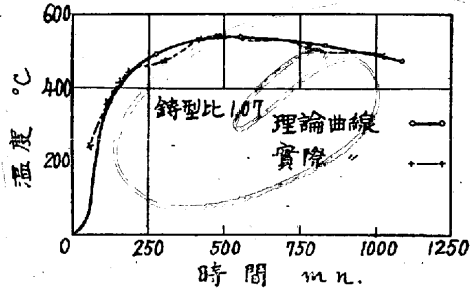
鑄型の或る位置に於ける時間・温度曲線は種々測定され、又鋼塊内の鑄型壁に近い位置の冷却曲線も測定されてゐる。この内或るものは理論的に考察されてゐる。

1931年にEnglish Steel會社Vickers工場に於て鑄型温度に關する2實驗が行はれた。この1つは對邊距離36inの8角形鋼塊に就て行はれ、温度は鋼塊鑄型の中央部で測定した。面積計で測定すると鑄型比が1.211であることが解つた。8角形鋼塊と同一面積の丸型鋼塊を計算し、又同一の鑄型比の鑄型の寸法も計算した。この値を $h=0.015$ と假定すれば、 $H=1.047$ である。時間温度曲線は常法に従ひ、 $U$ 及び $a^2t$ を軸として畫いた。種々實驗した結果、鑄型温度50°Cの時、實測に最も良く適合する初温度及び温度傳導率は夫々1650°C、0.06であることが解つた。是等の曲線は第23圖に、時間目盛を異にした2組の曲線で示してある。是等の曲線は最高温度に達した後或る時刻迄はよく一致するが、その後離れる。 $h=0.015$ は高値に過ぎることを意味するものである。

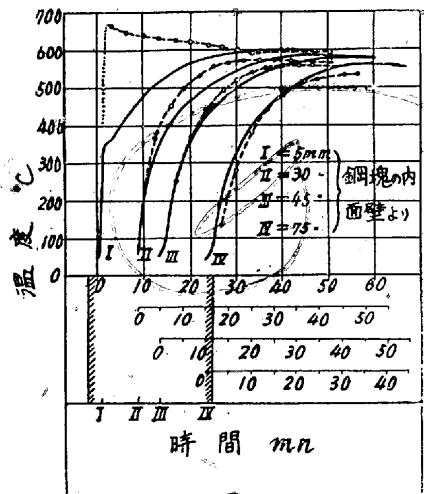
第2の實驗は約5倍の斷面積を有する鋼塊に就て行つた。この鋼塊は80in/77inの8角形鋼塊で、鑄型比は1.07である。之は上記の鋼塊と全く同一の方法で取扱ひ、 $h=0.015$ の時、 $H=2.183$ を得た。初温度を1,650°C、鑄型温度を50°C、温度傳導率を0.06とした場合の計算と實測の曲線は第24圖に示してある。温度は17時間後迄測定してゐる。



第23圖 對邊距離 36 in の 8 角形鑄型の時間・溫度曲線



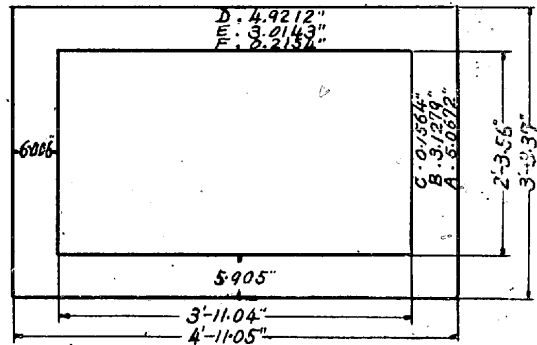
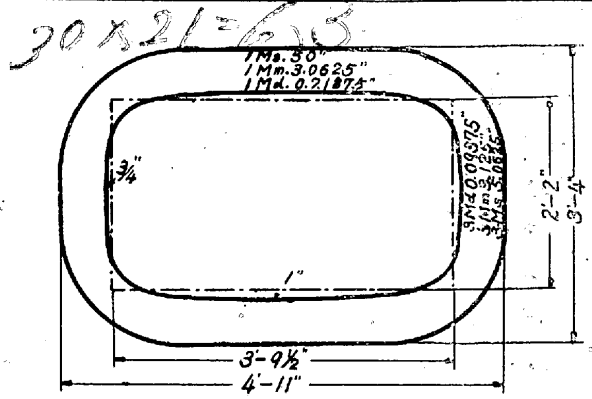
第24圖 對邊距離 78 1/2 in の 8 角形鑄型の時間・溫度曲線。Matuschka の實驗結果 (實線)



第25圖 鋼塊徑 250 mm, 鑄型厚 80 mm 注型溫度 1360°C (補正せず), 鑄型溫度 40°C 點線は計算に依る

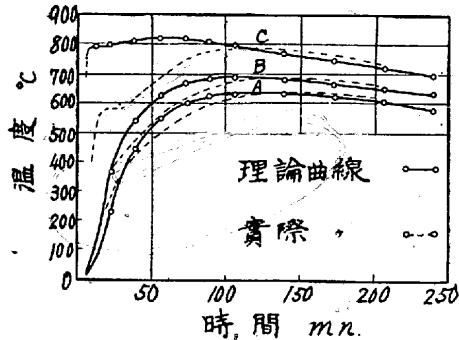
第23圖及び24圖に依れば,  $h$ , 最高溫度及び溫度傳導率を適當に選べば, 鑄型内の溫度分布を大略知り得る見込がある。之を試験する爲に Matuschka の結果を検討した。

既に考察した鑄型と比較すると, Matuschka の丸型鑄型は直徑 250 mm (9.84 in), 鑄型厚 80 mm (3.15 in) で非常に小さい。従つて鑄型比は 1.65 である。鑄型内面より 5, 30, 45, 75 mm の位置の溫度が測定されてゐる。Matuschka の曲線は第25圖に示してあるが, 圖の點線は  $h=0.015$ , 最高溫度 1,650°C, 鑄型溫度 40°C, 溫度傳導率 0.05 c. g. s. 單位の場合である。II, III, IV の曲線は大して悪くないが, 鑄型内側より 0.2 in に相當する I の曲線は一樣でない。鑄型と鋼塊の空隙の影響を是等の曲線に依り知ることが出来る。鑄型が各部分最高溫度に達する時間迄は, 計算と實測の溫度差は内壁近くで著しく, 内壁からの距離が増せば次第に減少する。



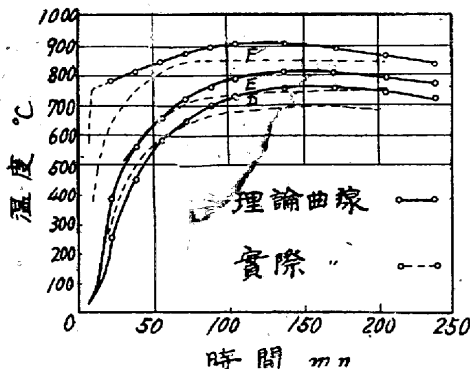
第26圖 鋼塊鑄型小委員會報告中のスラブ形鑄型の寸法

Appleby-Frodingham Steel 會社と鋼塊鑄型小委員會との協同研究に依るスラブ形鑄型の實驗結果も検討した。第26圖は使用したスラブ形鑄型の中央部の寸法及び之と等しい矩形鑄型の寸法である。A から F に至る點は熱電對の位置又は計算に用ひた點の位置であり, 鑄型内面からの距離を記してある。この位置は端の影響を除去する爲に鑄型中央部としてゐる。

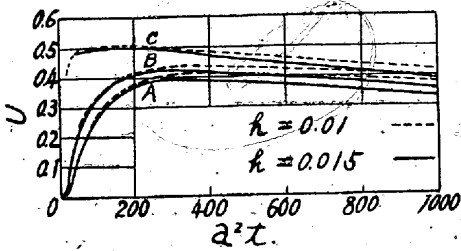


第27圖 スラブ形鑄型, 狭い面の中央部に於ける實測値と計算値

第27~28圖は狭い面と廣い面に於ける實測(第1回試驗)及び計算に依る曲線であるが, 兩者の零は注型開始前 68 に取つてある。計算は  $h=0.015$ , 初溫度 = 1,600°C, 鑄型溫度 25°C, 溫度傳導率 = 0.05 c. g. s. 單位の假定に基く。この結果を見れば, 鑄型内壁に近い C 及び B の位置に於ける曲線の初めの方が, 理論と實測と相當差のあることが解る。一般に狭い面は廣

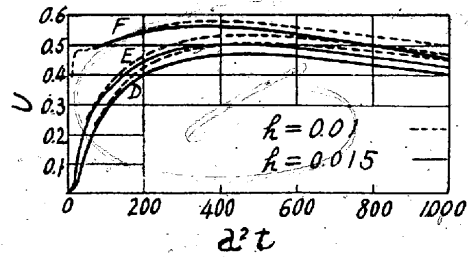


第28圖 スラブ形鑄型, 廣い面の中央部に於ける實測値と計算値



第29圖 スラブ形鑄型、狭い面の中央部、hの影響

い面に比して両者が一致し易い。即ち A, B と D, E を比較すれば判る。h の値の變化の影響を知る爲に A~F の各點に就て  $h=0.010$  とし再計算し、之を



第30圖 スラブ形鑄型、廣い面の中央部、hの影響

となる如く後退せしめれば、鑄型内面に近い位置の温度は先づ極大に達し、次で急激に減少し、再び第2の極大に達するであらう。残念ながら British Association

のベツセル面數表では 8 桁以上の値、或は  $\mu_m$  の値を正確に求め難く、又 8 桁では之を證明するには十分ではないから、計算例を示すことは容易でない。併し鑄型内面に近い或る位置の温度上昇が遅鈍となり、或は降下する時刻を以て鑄型壁より鋼塊の分離する時間を決定することは十分な方法でないと言ひ得る。

第 29~30 圖に示した。

C 及び F 點に於ける加熱速度が急激に減少してゐることは注意に値する。若し實測で斯かる曲線が表れるとすれば、加熱速度の急激な減少は、鑄型と鋼塊との接觸が失はれたことに原因するものである。然るに理論は両者が常に接觸してゐるものと假定してゐる。鋼塊と鑄型の接觸面たる  $r/B = 7/9$  の曲線を時刻零に於て  $U=0.5$

## 加熱爐築造上の指針

(Theodor Stassinot: St. u. Eisen, 1940, Sept. 12. S. 809)

\* 佐々木茂弉譯

(内容): 加熱爐操業に對する耐火材内張の重要性; 加熱材表面層及びスケール層の温度並に天井及び爐床の温度との關係; 固状或は流動狀態の滓除去; 爐床の鹽基性或は酸性内張及び斷熱と冷却; 均熱爐と連續式加熱爐に於ける鍛接爐床の荷重狀況; 滓除去に便なる加熱爐構造と操業方法の重要性; 爐の壁及び天井の内張; 迫天井と吊天井; 爐天井の斷熱、水冷せし抽出形金物に關する試験; 水冷却及び非水冷却式滑軌係配置上の指針

加熱爐を操業結果より批判し、その命數に影響する條件に關し述べたものとしては A. Rotter の報告を措いては他に詳細な記述は見當らない。爐の装置及び其と關聯のある加工作業を經濟的に見た場合、之は唯作業時間中の能率のみならず爐の装置の利用性と深い關係があるのであらうからこんな事では遺憾である。多くの場合爐の構築狀態並に機械的熱的、化學的の操業の諸要求に對する抵抗の程度が良商品の生産を高めるために重大なる役割を演ずるものである。其故すべて操業者にとつて重要な關係がある事をよく認識した上で熱技術者、爐専門家及び歴延技術者よりなる Düsseldorf の動力經濟及び作業經濟研究所の爐委員會が度々會合して主に耐火材と加熱材の移動裝置に關する問題を討議した。會議は狭い範圍に限られたものであるが、兎も角最近絶えず幾多の研究費を要し多くの反撥を受けねばならなかつた加熱爐の新設及び改良に於ける缺陷を確める事が出來たので會議の結果は注意に値する。之等の理由からしても現在は凡ゆる材料を極度に節約し、或は設備能率を最高度に發揮する事が要望せられる時代であるから、爐委員會の専門的討議に依る詳しい事項の摘要を今こゝに報告する。この報告の作製に參與せられたる諸賢に對し滿腔の感謝を捧げるものである。

### I. 爐床の内張

1. 一般事項 加熱爐の耐火材内張(裏付)をなす場合特別な困難は主として温度約  $1000^{\circ}\text{C}$  以上の範圍に先づ起るのである。該温

度は均熱爐、肌燒爐に於ては爐床全面に及び、又連續式加熱爐及び轉がし式加熱爐(Rollöfen)の場合には連續作業下にある抽出爐床(Ziehherd)及び鍛接爐床(Schweisst.erd)に擴がつて居る。この爐の各部の蒙る作業條件は、爐床上に於て静止し或は移動する加熱材の壓力、衝擊及び摩擦によるものであり、温度分布、加熱材と爐床耐火材より形成された滓の化學的侵蝕とによるのである。

第1表に機械的荷重の尺度の標準として爐床に存する加熱材の爐床面積當りの壓力が示されて居る。その壓力は鋼塊或は板状鋼塊が均熱爐に於て直立して居る場合に最も大である。スケール量は燃燒ガスが加熱材を熱化學的に侵蝕するために生ずるのであらうから今之を爐床の煉瓦に加はる作用の尺度と見ることが出来る。第1表に爐床面積平方米、1時間當りのスケール重量の尺度で記入されて居る。其に依ると均熱爐の爐床のスケール脱落量と連續式加熱爐及び轉がし式加熱爐(Rollöfen)の抽出爐床に於けるスケール脱落量とが大約同程度であるから後者は全爐床面積の荷重が遙かに小さい。第1表の示す内容は次の事柄に該當する。即ち爐床面積平方米、毎時當り  $400\sim 1500\text{ kg}$  まで裝入量を有する均熱爐の效率は僅に約  $100\sim 400\text{ kg/m}^2\text{h}$  の連續式加熱爐及び轉がし式加熱爐の效率よりもずつと高いことを示す。しかしスケール脱落量のみならず又その聚合狀態とスケールによつて形成された滓は固状であつても又流動状にあつても何れにしても爐の命數と作業にとつて標準となる。これ等の兩者は詳しく後述する所の温度と關係を有するものである。爐床上の爐内温度分布は次の事項に依つて形成される。

1. 爐天井の温度と燃燒ガス温度。
2. 加熱材表面の温度。
3. 加熱材スケール層の温度。
4. 爐床の温度。

熱の移動の法則に従つて常に燃燒ガスの温度、天井、スケール層、鋼塊表面並に爐床の温度との間には温度差が存する。その爲に

\* 日本鋼管會社技術研究部