

爐設計に関する計算圖表の應用

(日本鐵鋼協會 第9回講演大會講演)

佐藤慶二郎

THE APPLICATION OF NOMOGRAPHS TO FURNACE DESIGN.

by Keijiroh Satoh.

SYNOPSIS:— A rational design of a furnace needs some operations of calculation. But a troublesome computation may often be a cause of giving up the rational design and of adopting a simple judgement which tends to go amiss without full experiences.

Rough calculation generally will do for a furnace design, because so many variable conditions in working a furnace would depart from the accuracy of calculations made for the designing.

Nomographs, or computation charts, are quite suitable for a furnace design. We can roughly compute by the aid of them very easily, in a short time, and without any mistake in the place.

The author has constructed many nomographs applicable for a furnace design, among which he introduces several charts.

CONTENTS:—

- 1) Sensible Heats of CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , H_2 and CO .
- 2) Combustion Chart for Coal (Bujun).
- 3) Combustion Chart for Oil Fuel.
- 4) Combustion Chart for Coal Tar.
- 5) Combustion Chart for Producer Gas.
- 6) Air supply theoretically required and Amounts of Waste Gases produced for Fuels.
- 7) Dimensions of Heating Chambers and Flues.
- 8) Chimney Chart.
- 9) Time for Combustion of Flames from Coals.
- 10) Maximum Local Temperature of Flame.
- 11) Maximum Average Furnace Temperature.
- 12) Another Combustion Chart for Bujun Coal.

内 容

緒言 1) 二酸化炭素、水蒸氣、窒素、酸素、水素及一酸化炭素の現熱 2) 石炭(撫順)の燃焼状態圖表 3) 重油の燃焼状態圖表 4) コールタールの燃焼状態圖表 5) 發生爐瓦斯の燃焼状態圖表 6) 固體及液體燃料の理論的空氣量及廢氣量 7) 燃焼室及煙道の寸法 8) 煙突圖表 9) 石炭の焔の燃焼時間 10) 焔の局部的最高溫度 11) 爐内の最高平均溫度 12) 撫順炭の燃焼状態圖表 結語

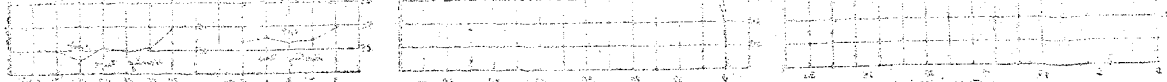
緒言 爐を合理的に設計するには計算を避ける譯に行かない。しかし計算が餘り複雑になつて來ると誤る恐れもあるし免倒な爲めに計算を止めて單なる見込に陥り易い。見込の設計は充分な經

験ある人で始めて出来る事である。

爐を嚴密に正確な計算の下に設計しても。作業時の調整し得べき條件が頗る多いために先づ一般には概略の計算で充分であらう。

計算圖表は爐の設計計算に最も適當してゐる。概算ではあるが極めて容易に短時間中に而かも位取を間違える危険がない。

著者は之まで多くの圖表を作つたが爐設計に應用し得べきものから十數個を選んで茲に紹介する。御教示に依て漸次完成の域に近づけたいためである。



(1) 二酸化炭素、水蒸氣、窒素、酸素、水素
及一酸化炭素の現熱 燃焼廢氣の現熱の計算は、
Malard 及 Le Chatelier の値に據るのが便利
である。其の一般式は、

$$h = V(at + bt^2)$$

但し、 h = 現熱 (t カロリー)

V = 瓦斯の容積、 m^3 、 t = 溫度 $^{\circ}C$ 、

a) = 定數
b) = 定數

	CO_2	H_2O	N_2, O_2, H_2, CO
a	0.37	0.34	0.303
b	0.00027	0.00015	0.000027

第 1 圖には、上の表の三つの群に分けて夫々
圖表を作つたものである。之等を用ひて計算をす
るには一般に知られてゐる方法の通り既知の二つ
の値を結びつける直線を引き此の直線が求める第
3 の値の目盛の交點に所要の答を讀むのである。
セルロイドの透明な薄い定規があれば一番便利で
ある。

圖では點線で計算の例を示した。例へば二酸化
炭素の場合では容積 $1.5m^3$ の瓦斯が $250^{\circ}C$ の溫
度なる時の現熱は、點線との交點を讀んで約 165
t カロリーとする。

又は現熱と溫度とが分つてゐて容積を求める事
も出来る。他の二つの圖についても同様である。

(2) 石炭の燃焼狀態圖表 石炭の成分、過剰空
氣の割合に依つて廢氣成分 CO_2 の %、燃焼溫
度、從て廢氣の現熱も異なる。之等を一目に分る様
に見るには網目の圖表が適當で比較するに便利で
ある。第 1 圖の様な直列圖表 (Alignment Ch-
art) では一寸比較に不便である。

そこで第 2 圖では縦座標に過剰空氣の割合を
横座標に現熱を取つた。然るに過剰空氣が増減し
ても CO_2, H_2O の量は變らないで N_2 と O_2

とが増減するだけである。過剰空氣の割合に比例
して N_2, O_2 の現熱が増減するのであるから廢氣
溫度を一定とすれば其の關係を表はす曲線は直線
になる。直線は最も描き易く誤差も少い、此の種
の現熱や燃焼強度 (Calorific Intensity) を表
はす圖表は外に多いが曲線のために頗る見憎いも
のがある。

廢氣溫度を $100^{\circ}C$ と假定すると過剰空氣が 0
% の時と 100 % の時の二つの場合について廢氣
成分を計算し第 1 圖に依て現熱を計算すれば第 2
圖に一つの直線を引く事が出来る。之は廢氣溫度
 $100^{\circ}C$ の時の過剰空氣の割合と現熱の關係を示
す。同様に $200^{\circ}C, \dots, 1,600^{\circ}C$ と廢氣溫度を
定めて、夫々同様な直線を引く事が出来る。

然るに現熱の目盛の下に此の石炭の有する發熱
量 (低値) に對する割合を % で表はして記して行
くと 100% の點で發熱量全部が廢氣に吸収され
た事になる。燃焼瓦斯が廢氣と假りに同一成分と
考へると此の 100 % 現熱の點で所謂 Calorific
Intensity (燃焼強度) が分る事になる。例へば
第 2 圖で過剰空氣 50 % の時の燃焼強度が $1,520^{\circ}C$
となる。勿論、燃焼強度は、發生した熱が
爐壁に吸収されぬ事、燃焼が瞬間に起きる事と假
定しての最高溫度を示すもので、實際の爐の最高
溫度とは幾分縁の遠いものである。過剰空氣が
50%乃至 100% 位の範圍で燃焼が速かに起きる
時に實際に近づく。0 % の時の燃焼強度は實際最
高溫度に比し非常に高過ぎる。之は後に述べる。

過剰空氣と空氣所要量、 CO_2 の % 廢氣容積と
の關係は夫々次式で表はされる。

$$A = V_a(1 + E/100),$$

$$CO_2(\%) = CO_2(m^3) \times 100 / (V_0 + V_a E/100),$$

$$V = V_0 + V_a E / 100,$$

但し

$$V = \text{廢氣容積}(m^3/kg \text{ of fuel}),$$

$$A = \text{空氣所要量}(m^3/kg \text{ of fuel}),$$

$$V_a = \text{燃料 } 1 \text{ kg を燃焼させる理論的空氣量}(m^3),$$

$$E = \text{過剩空氣率}(\%),$$

$$V_0 = E \text{ が } 0 \text{ \% の時の廢氣量}(m^3/kg \text{ of fuel})$$

燃料の成分が一定ならば V_a , V_0 , CO_2 の量はどれも一定となるから A , CO_2 (%), V はどれも E の函數である。そこで之等を E の縦座標と平行に夫々計算した値を點表して行くと第2圖が出来上る。之を見ると、 E が 50 % の時は廢氣中の CO_2 が約 11.3 % で廢氣容積が $12.2m^3$ 空氣所要量が $12.6m^3$ 等と一目して分る。Orsat で CO_2 を分析した結果を圖に比較すると大體 E の値が分る。大體と云ふのは燃焼中の石炭成分と圖表に作つて置いた成分とは嚴密には一致し難いからである。

(3) 重油の燃焼狀態圖表 重油についても、其の構成方法は少しも變つてゐない。第3圖に示したものは米國重油燃焼機協會規格第6號の重級燃料油 (A.O.B.A.No.6, Fuel Oil, Heavy) 即ち $12 \sim 18^\circ Be$ のものである。成分は純油と假定し有得べき割合を選んだ。圖表を使用するには此の點に注意を要する。

(4) コールタールの燃焼狀態圖表 爲替相場の關係で、重油の使用が幾分下火になつて來ると同時にコールタールを代用する事が最近成功を見てゐる。

第4圖は第2圖同様の要領で作つたものである。然るに重油と云ひ、コールタールと云ひ何

れも燃料及び空氣を豫熱して燃焼させる場合が多く石炭でも空氣を豫熱する事少くない。之等の圖表は何れも燃料と空氣とを豫熱する場合のものが必要となる。此の場合の圖表の構成方法は次の項で述べる。

(5) 發生爐瓦斯の燃焼狀態圖表 此の燃料は冷たい儘で燃される事は殆んど無い。又空氣も廢氣で豫熱されて後、供給される事が多い。そこで、圖表の現熱の目盛も發熱量以上に大きくする必要がある。其の範圍は勿論豫熱溫度に依るが第5圖では最大の場合を瓦斯、空氣双方を $1,400^\circ C$ に豫熱するものとした。

今、豫熱溫度を一定にし過剩空氣の増減に伴ひ現熱が如何に變化するかを考へると CO_2, H_2O の量は一定であるから (空氣の濕度を無視) 現熱は過剩空氣の割合に比例する。それで其の關係曲線は直線になる。瓦斯、空氣双方を豫熱する場合、瓦斯又は空氣のみ豫熱する場合、何れも直線を得るが瓦斯のみ豫熱する際には過剩空氣が増減しても熱の出入がないので現熱には變化がない従つて縦軸に平行な直線の群となる。

此の圖表でも前の三つと同様現熱が發熱量と等しい點に於ける廢氣溫度は燃焼強度と等しくなる。發熱量は 1,474 カロリーであるが現熱の此の値に相當する點で縦軸に平行な直線を引き之と廢氣溫度の線との交點は瓦斯と空氣とが冷たい儘で供給される時の燃焼強度を示す。例へば過剩空氣が 120% に於ける燃焼強度は $1,100^\circ C$ となる。

豫熱の場合の燃焼強度は廢熱溫度の直線其の儘を採用してゐる譯で、之は 100% 發熱量に相當する現熱の點を常に超過するからである。例へば、過剩空氣 190% で燃焼強度を $1,500^\circ C$ とする場

合には、過剩空氣の目盛を見て之を右方に廢氣溫度 1,500°C の直線との交點を求め。此の交點の近くを通る豫熱溫度の直線を見ると、空氣のみ 1,000°C に豫熱するか、瓦斯と空氣とを 800°C 餘に熱すればよい事がわかる。猶、瓦斯のみ豫熱しては 1,500°C の燃燒強度は得られぬ事も分る。

廢氣現熱は、豫熱の有無に拘らず、求め方は同様である。

(6) 燃料の理論的空氣量及廢氣量 燃料が夾雜物を有しないと假定すれば、炭素、水素及び酸素の三成分から出來てゐると考へられる。即ち

$$C+H+O=100\%$$

但し、 C, H, O = 夫々炭素、水素、酸素の割合、然るに炭素 1 kg を燃すに要する空氣量

$$=1.15 \text{ kg}$$

水素 1 kg を燃すに要する空氣量

$$=34.5 \text{ kg}$$

酸素 1 kg 存在すれば、4.3 kg の空氣不要

之を式で書けば、1 kg の燃料に就いて、

$$\text{空氣量(kg)} = 1.15 C + 34.5 H - 4.3 O,$$

然るに、 $O = 100 - C - H$ であるから、

$$\text{空氣量(kg)} = 1.15C + 34.5H - 4.3(100 - C - H)$$

$$= 1.58C + 38.8H - 431$$

となる。之を直列圖表にしたのが第 6 圖である。

又、炭素 1 kg を燃した廢氣 = CO_2 が 1.85m

水素 1 kg を燃した廢氣 = H_2O が 11.1m³

空氣に伴ふ窒素量 = 空氣の 3.31/4.31

此の關係を夫々炭素の割合、水素の割合及び空氣の量の目盛の側に刻んで置くと、一つの圖表で空氣の所要量と廢氣成分とが一度に見られる。

此の圖表を用ひるには、燃料の成分を、必ずしも、三元素の純粹なものに換算する必要はない。何となれば、換算しても、其空氣量乃至廢氣量を、再び元の成分の割合に直すには同じ係數を用ひて、結局餘分の手數を掛けるに過ぎぬからである。

第 6 圖の點線は、例として、

$$C \cdots 83\%, H \cdots 12\%, \text{其他 } 5\%$$

なる燃料(重油)の場合を示した。此の時は。

$$\text{空氣量} = \text{燃料 } 1 \text{ kg に付 } \begin{cases} 13.4 \text{ kg} \\ 10.3 \text{ m}^3 \end{cases}$$

廢氣成分 = 燃料 1 kg に付

$$CO_2 \cdots 1.54 \text{ m}^3$$

$$H_2O \cdots 1.35$$

$$N_2 \cdots 7.80$$

$$10.69$$

と見當をつける事が出来る。

(7) 燃燒室及煙道の寸法 Prof. Groume-Grjimailo は 爐の燃燒室や煙道の大きさを決定するために、水力學的に考察して次の如き式を Prof. Yesmann の助力に依て求め得た。

$$H = A \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 t}}$$

但し、 H = 流動瓦斯の深さ、 m ., Q = 毎秒流動する瓦斯の量、 m^3 ., B = 流動瓦斯の堰の幅、 m ., t = 瓦斯の溫度、°C., A = 定數 (h と B とに依て異なるが、2.97 乃至 3.62)

A が變化するので圖表にするのに複雑になる著者は、同様の考察に依て、次式を得た。(衛生工業協會誌第 1 卷第 4 號 pp. 15-22)

$$Q = 0.176B \sqrt{H^{3t}}$$

Prof. Groume-Grjimailo 及 Yesmann の式に於ける A の値に相當するものは 3.15 となり大差がない様に思はれる。著者の式を直列圖表と

すれは第 7 圖の様になる。

點線で示した例では煙道の高さを 0.5 m、其の断面に於ける平均温度を 700°C とし瓦斯流量を毎秒 0.87m³ とすれば幅 0.5m を得る。

此の圖表は元來小さい爐のために作つたものであるが更に大きいものが必要の時 Q は B に比例するから $1/2Q$ を圖表に取り得た B の値を 2 倍すればよい譯である。

(8) 煙突圖表 米國のマサチューセツ工業大學機械學教室で多くの實驗を重ねた上、煙突の通風力温度及び高さの關係を次式で表はした。

$$T_2 = T_1 [(H_2/3)0.96 - 1] / 0.32(H_2 - 3),$$

及び $d = 0.192(0.075 - 41.2/T_2)(H_2 - 3).$

但し、

- T_2 = 煙突頂上に於ける廢氣の絶對温度、°F、
- T_1 = 煙道の中心點より 3 呎上の點に於ける廢氣の絶對温度、°F、
- H_2 = 煙突の高さ、(呎)
- d = 通風力、水柱(吋)

以上の二式を一つに纏め、幾分の近似法を用ひると次式の様になる。

$$d = [0.0144 - 8.8/(t + 461)](H_2 - 3) \dots (1)$$

$t = (T_1)$ に相當する温度、°F、

又、理論的に流動瓦斯の速さと通風力との間には次の關係がある。(衛生工業協會誌第 1 卷第 5 號 p. 13)

$$d' = 18S^2 / (t' + 273) \dots (2)$$

d' = 通風力、水柱 mm., S = 瓦斯の速さ、毎秒 m., t' = 瓦斯の平均温度、°C.,

別に、煙突の摩擦、瓦斯の收縮を無視すれば、

$$Q = Sa \dots (3)$$

Q = 毎秒流出する瓦斯量、m³ S = 瓦斯の速さ、毎秒 m., a = 煙突の自由面積、m²、

以上の 3 式を一つの圖表に纏め上げると第 8 圖の様になる。或部分では實驗的、他の部分は理論的では些か鵠式の嫌はあるが最後の部分に有効面積の考を採用して適當な割合に大きくすれば先づ實用には無難であらう。

圖の點線で示した一例では、

煙突温度 = 200°C, 所要通風力 = 水柱 10mm,

瓦斯流量 = 毎秒 5 m³

の場合に必要な煙突は

高さ = 30 m, 直径 = 0.63 m

であつて瓦斯の速さは 16.3 m となる。

煙突は、爐の最大瓦斯量、最大通風力に應じ得る様に設計して置き平素はダムパーで調節するのは勿論の事である。

(9) 石炭の焰の燃燒時間 數年前、著者が石炭燃燒爐の設計のために、石炭の性質を調べてゐるうち、之等は實に困難な仕事と痛感して比較的信頼の置ける方法で餘り經費のかゝらぬ方法を選んだ。それは從來諸權威者の行つた化學分析其の他の研究を或る視角から見て之を統計的に取扱ひ自分の希望する方面に於て結論を引出さうとしたのである。之等の企ては一括して衛生工業會誌第 1 號より第 6 號まで連載されてゐる「石炭燃燒爐の設計に就て」に纏めてある。しかし統計的研究法と云つても數個の假定を作らねばならなかつたし其の假定のうちには稍大膽なものもあり、且つ結論を廣い範圍まで外挿した嫌ひもある。しかし兎も角得た結論を見ると吾人の經驗に極めて近いものがあるので現在に到るまで、夫等の結論を石炭爐の設計に應用してゐるが之れまで大した矛盾撞着を感じた事がない。従つて一見大膽な數個の式を以下數項に亘つて、再び公表するに決した。

楮て石炭の焰の燃焼時間は眞の完全燃焼の程度までには頗る長時間を要するので 0.3% の残留可燃物までの燃焼を以て燃焼が完了したものと認めた。燃焼完全時間は、焰の長さに関する事云ふまでもない。石炭の質に依て焰の長い短いを稱へられるものがある。無烟炭は短く褐炭も短く中間の質の石炭では焰が長いと稱せられる。即ち同一條件の下に燃焼せしめても石炭の質に依て燃焼完全時間が異なる。焰に關する石炭の質を表はすに「焰の係數」なる數値を導いた。之は最も發熱量が多く最も密集した状態で燃え最も揮發分の多い石炭は最も焰が長いと云ふ考から發足した。

又、燃焼完全時間は過剰空氣の割合、燃焼率及び空氣と瓦斯の混合程度に依る事勿論である。しかし混合程度を數量的に云表はす事は頗る困難で其の data も無い。従つて此の條件を一定とせねばならない。斯くの如くして著者が諸權威の實驗から得た結果は次式である。

$$Z = \varphi / [0.062(9.8E + 1)(\sqrt{37.2 - \varphi} + 1)W] + 10$$

茲に、Z = 燃焼完全時間(秒) φ = 石炭の焰の係數
E = 過剰空氣の割合、% W = 燃焼率、毎時 m^2 に付 kg

第 9 圖は此の式を直列圖表に作つたもので圖に明らかな如く焰の係數 φ は瀝青炭の瓦斯炭と砂炭との中間に於て最大となつてゐる。此の部位に撫順炭がある。又焰の係數の小さな石炭では燃焼率を多くすれば埋炭が出来る事が分る。

(E が負でも燃焼する。)

點線で示す例では $\varphi = 29$ なる石炭(半無烟炭又は褐炭)を E = 50%、燃焼率 = 100 kg/m²/hour として焚けば焰は 0.3 秒で殆んど燃え盡す事を示す。

(10) 焰の局部的最高溫度 前にも述べた如く廢氣成分と其の比熱並びに燃料の發熱量から計算される燃焼強度 (Calorific Intensity) は實際上の最高溫度とは狭い範圍で一致するだけで先づ縁遠いものである。過剰空氣を 0 とすれば燃焼強度は甚だしく大きくなるが實際上、過剰空氣が相當ある場合よりも低溫度である。又、過剰空氣を多くすれば局部的に甚だ溫度の高い部分が出来ることが、焰の一つの斷面に平均すれば差程高くなる。此の局部的最高溫度の値は燃焼強度に關係ある事勿論であるが更に燃焼完全時間にも關する筈である。何となれば燃焼が同一状態で短時間に完了する方が長時間掛るよりも熱の集中度、即ち溫度高くなる譯である。以上の考察よりして著者の得た値は

$$T_r = \theta^{0.55} / [(7.08 \times 10^{-18}) Z^{0.86}] + 1,250$$

T_r = 局部的最高溫度、°C., θ = 燃焼強度、°C.,
Z = 燃焼完全時間、秒、

第 10 圖は此の式を圖表にしたもので點線で表はす例では θ が 1,900°C となる場合に 2 秒間に燃焼が完了する様な場合に焰の局部的最高溫度は 1,490°C になる事を示す。

(11) 爐内の最高平均溫度 局部的最高溫度の點を含む爐の斷面について其の平均溫度を最高平均溫度とすれば之を見積る事が爐設計のために必要である。此の値は若干の假定に依て次の如き結果を得た。

$$T = \theta - [Z(T_r - 1,250)^{1.164} \cdot 9 \times 10^{20}] / T_r^{6.6}$$

茲に T = 最高平均溫度、°C., θ = 燃焼強度、°C.,
 T_r = 局部的最高溫度 °C., Z = 燃焼完全時間 秒、

之を圖表にしたものが第 11 圖である。

(12) 撫順炭の燃焼状態圖表 以上石炭の焔の

燃焼時間以下各項に於ける値は與へられた data の範圍内では近似値を表はすものであるが外挿法も其の範圍に依つては近似値を表はすものと見られる。假りに撫順炭が此の近似値の範圍内にありとすれば第 9 圖以下の圖表に依て撫順炭の燃焼状態を表はす一つの圖表を得る。之が第 12 圖である。

例へば、撫順炭を過剰空氣 100% で燃すと燃焼率 100 kg/m²/hour の場合に、

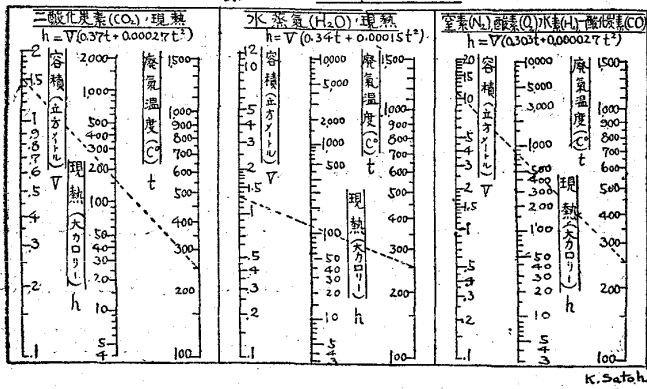
$$T_r = 1,290^\circ\text{C}, T = 1,260^\circ\text{C}, Z = 0.67 \text{ 秒}$$

となる。之が適否は漸次、機會ある毎に調査中で

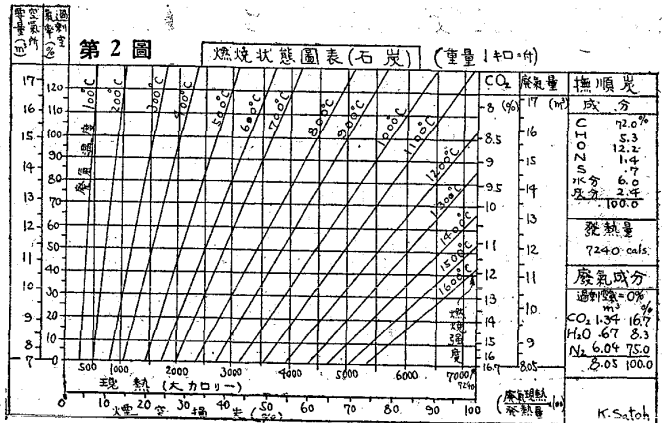
ある。

結語 茲に掲げた圖表の多くは、日常の計算を簡便にし得るために作られたものである。第 9 圖以下の圖表については、著者の獨斷が多く入過ぎてゐるかも知れない。之が使用については、著者の誘導方法について吟味を惜まるゝ事なく、色々御教示を受けたいと思ふものである。只、現在のところ、何も指針なき場合に、正確ではなくとも、幾分近似な値を得るものとの趣意から、之等の圖表をも著者は自ら使用してゐる事を申上げて置きたい。(昭 7. 7. 30 稿) (終)

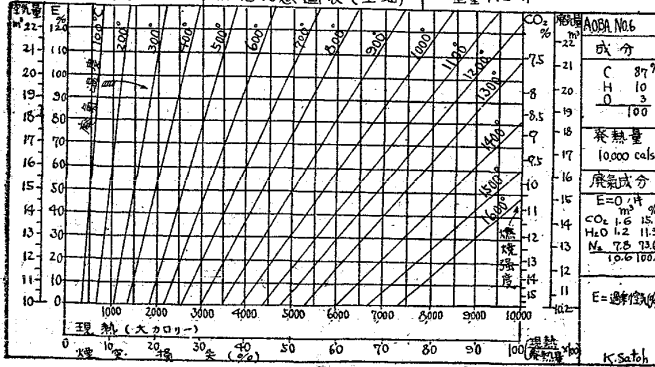
第 1 圖 廢氣・現熱



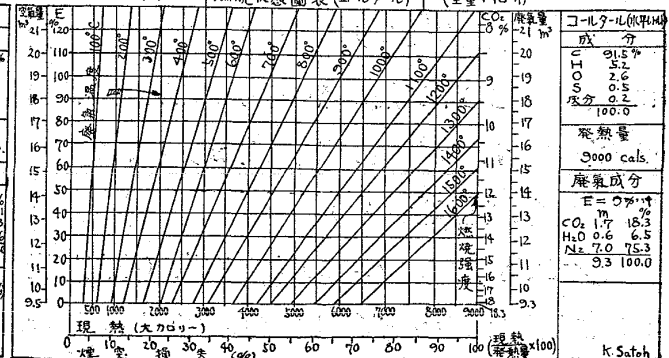
第 2 圖 燃焼状態圖表(石炭) (重量1kg当り)



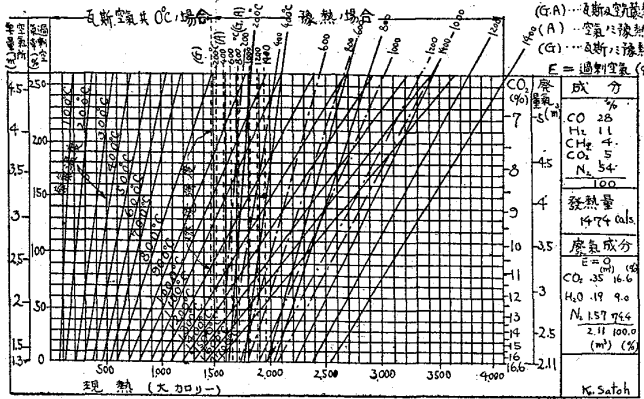
第 3 圖 燃焼状態圖表(重油) (重量1kg当り)



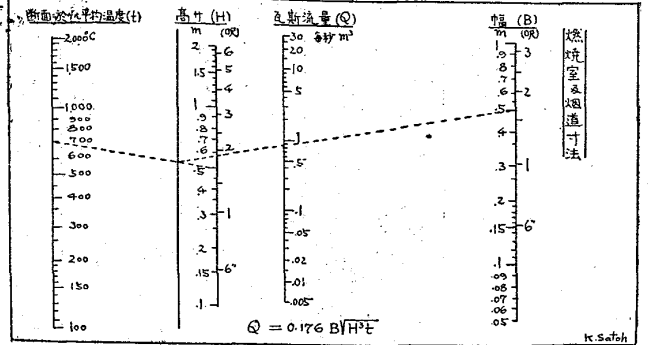
第 4 圖 燃焼状態圖表(コークス) (重量1kg当り)



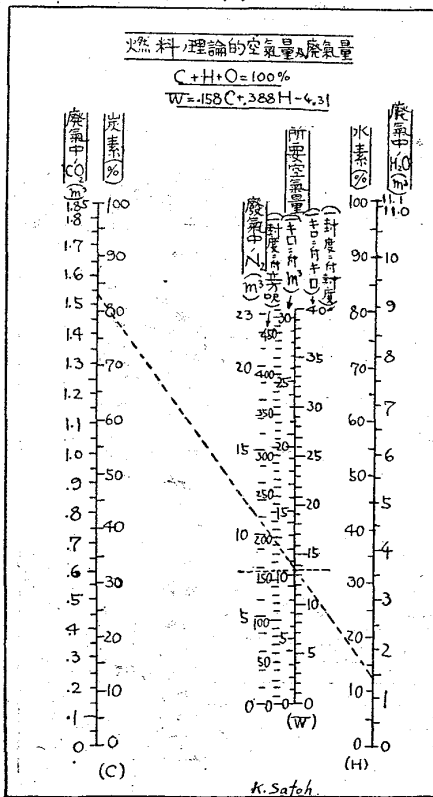
第5圖 燃燒狀態圖表(發生爐瓦斯) (每1m³)



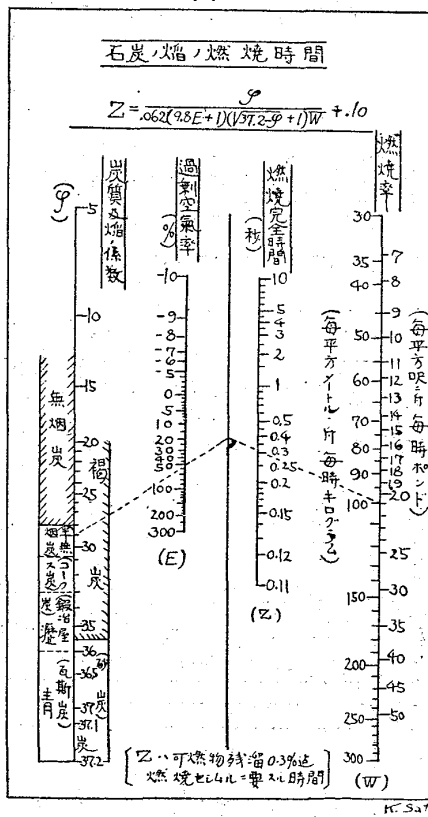
第7圖



第6圖



第9圖



第10圖

