

81.61
677

改訂增補

燃 燒 工 學

附、熱 精 算 法

工 學 博 士 黒 川 眞 武

熱 管 理 叢 書





燃 烧 工 学

定 価 金 250 円

昭和 23 年 2 月 20 日 初版発行

昭和 29 年 5 月 30 日 6版発行

著 者 黒 川 真 武

発行 兼 著 大 沼 正 吉

東京都港区赤坂溜池 5

印刷 所 株式会社 技 報 堂

東京都港区赤坂溜池 5

発行所 株式会社 技 報 堂

東京都港区赤坂溜池 5

電話赤坂(48) { 5 0 6 7

3 8 3 4 番

1 7 1 6

掛 替 口 座 東 京 1 0 番



自然科学書協会会員

工学書協会会員

2,20

知 賢

PDG

216/12
序

工場に於ける熱管理の基盤とする處は各工場の熱の運營狀態を精査し之れに應じて合理的に對處することであるが、その科學的根據となるものは熱精算であり、それを求めるには是非共燃燒工學の裏付けが必要である。かような目的のために取扱う燃燒工學の範圍は燃料の燃燒によつて生ずる熱を工業的の加熱に利用する場合であつて燃燒、燃燒に必要な空氣量及び燃燒ガス量並びにその組成、燃燒ガスの溫度、熱效率、通風及び熱精算等が關係する。

従つて本書に集録されている部分は上述の事項を含み、その程度は甲種の熱管理士の技術の線に沿うて居るが本文中各所に例題を附して理解に努め又種々關係深い計算圖表を掲げ實務に關係する方々の便宜なようにしてある。それであるから乙種の熱管理士の讀者にも充分理解して頂けるものと確信している。又熱管理士を志す方々ばかりでなく既に熱管理士になられた方々でも工場の熱管理上良き伴侶であり相談者となるであらう。

本書はこのような目的で編輯したのであるが著者の公務の寸暇を利用して、執筆したものであるから意に滿たぬ點が多々あるし又誤謬もあることであろう。これ等は幸に讀者各位の御指摘によつて次第に完璧を期していきたいと心から念願している次第である。

出版に當つて本書の公刊を極力慫慂された長友野口清氏に深謝の意を表し併せて校正、圖面等に幾多の助力を與えて下さつた藤原光三、黒須善作の兩氏に感謝する。なお終りに本書執筆に當り參考とした文獻を次に掲げそれ等の著者に對し心から深謝の誠を捧げる。

Haslam and Russel: Fuels and Their Combustion.

Brückner: Handbuch der Gasindustrie.

Koppers: Handbuch der Brennstoff Technik.

Archiv für Wärmewirtschaft und Dampfkesselwesen.

Verein Deutschen Eisenhüttenleuten: Anhaltszahlen für den Energieverbrauch im Eisenhüttenwerken.

香坂要三郎氏: 發生爐ガス及水性ガス

矢木 榮 氏: 工業蒸爐

吉原 英夫氏: 最近燃料工學大系卷一

千谷 利三氏: 燃燒及爆發

黒川 眞武氏: 熱精算

燃料協會: 實用燃料便覧及び燃料協會誌

燃料及燃燒等

昭和 23 年 1 月

著 者 識

新學社

PDG

重 版 に 際 し て

昭和 23 年本書が発行されるや熱管理関係技術者に意外の反響を呼び今回その 5 版を重ねるに至った。終戦後熱管理の動向にもかなりの變遷があり石炭の量的問題より質的問題に重點を置くようになった。殊に昭和 26 年熱管理法が制定せられて以來燃料資源の開發保全とその有効利用を目的として指定工場に熱管理が法律に基いて實施せられ多大の効果を擧げつつあることは周知の事實である。同法の精神よりすれば熱管理は單に指定された工場以外でも凡そ燃料を使用するあらゆる工場乃至は家庭に於てすらもこれに準じて行ふ必要がある。

炭鑛の合理化は選炭を強化せしめ高級炭の生産と共に低級炭も、これに伴つて多量に生産されるようになった。更らに石炭の比較的高價であるに乘じ重油の進出も著しい。これらの間にあつて熱技術者は各自の熱裝置に適正なる燃料を選びそれぞれの性狀に應じ完全に燃燒を行い燃料の有する特性を十二分に活かさねばならない。高發熱量の燃料を要求する部面には高級炭を使い、必ずしも高發熱量の燃料を要求しない處にはなるべく低級炭を使用しそれぞれ立派な燃燒を行つて燃料を活用し作業の合理化を圖るべきである。従つて今こそ熱管理技術者の働き甲斐のある最もよい機會といえよう。

本書は發行以來熱管理技術者の伴侶となつてきたが上述のような燃料事情によつてその必要性が重加されてきたので技報堂主の熱心な希望により重版することとなつた。2, 3 の誤謬を訂正すると共に附録末尾に熱管理技能試驗問題を追加し熱管理試験の受験者の便宜を圖つた。幸に各位の活用を念願して本書をその机上におくる次第である。

昭和 28 年 6 月

著 者

PDG

目 次

第1章 燃料及び熱量..... 1

第1節 燃 料.....	1
第2節 熱量及び温度.....	2
第3節 比熱及び顯熱.....	3
第4節 蒸發熱及び融解熱.....	5
第5節 露點及び凝縮熱.....	6
第6節 着火温度及び着火熱.....	7
第7節 燃燒熱及び發熱量.....	9

第2章 燃 燒.....19

第1節 燃燒に必要な條件.....	19
第2節 燃燒條件の理論的考察.....	21
第3節 燃燒の種類とその特性.....	27
第4節 燃燒の化學的機構.....	34
第5節 燃燒に關係ある反應式.....	38
第6節 燃燒反應の平衡と温度との關係.....	42

第3章 燃燒に關する計算法.....47

第1節 可燃元素の燃燒に要する空氣量、燃燒ガス量.....	47
第2節 固體及び液體燃料の燃燒に要する空氣量.....	50
第3節 固體及び液體燃料よりの燃燒ガス量.....	64
第4節 固體及び液體燃料よりの燃燒ガスの組成.....	68

第5節 燃燒ガス成分相互の關係	72
第6節 氣體燃料の燃燒に要する空氣量，燃燒ガス量	76
第7節 L_o 及び G_o と發熱量との關係並びに溫度，壓力，濕 分の影響	84
第4章 燃燒に伴う損失熱と効率	95
第1節 損 失 熱	95
第2節 效 率	102
第3節 熱効率の解析的考察	103
第5章 燃燒溫度と燃燒室溫度	111
第1節 燃 燒 溫 度	111
第2節 燃 燒 室 溫 度	114
第6章 自 然 通 風	120
第1節 通 風 壓 力	120
第2節 煙 突 の 高 さ	121
第3節 煙 突 の 太 さ	126
第7章 熱精算の一般	127
第1節 燃料の保有する熱量	130
第2節 空氣又は水蒸氣の保有する熱量	132
第3節 被熱物の持込む熱量	133
第4節 被熱物の持出す熱量	133
第5節 化學變化による熱量	134

第6節	排ガスの持出す熱量	134
第7節	不完全燃焼による損失熱量	136
第8節	燃焼による損失熱量	136
第9節	輻射傳導等による損失熱量	137
第8章	物質精算の一般	142
第1節	炭素精算	142
第2節	水素精算	143
第3節	酸素精算	144
第4節	物質精算例とその應用	144
第9章	熱精算に關する計算法	147
第1節	ランカシヤ汽罐の熱精算	147
第2節	鍋塊加熱爐の熱精算	152
第3節	トンネル窯の熱精算	157
第4節	各種燃焼裝置の熱精算結果	167
第10章	熱精算圖	173
第11章	熱精算結果よりの熱効率の吟味	176
第1節	ランカシヤ汽罐の熱効率の吟味	176
第2節	鍋塊加熱爐の熱効率の吟味	178
第3節	トンネル窯の熱効率の吟味	181

附 録

第 1.	燃焼及び熱の計算に必要な関係式.....	187
(1)	燃焼の計算に使用した記號.....	187
(2)	燃焼に係ある計算式.....	188
(3)	熱の計算に使用した記號.....	192
(4)	熱に係ある計算式.....	193
第 2.	燃焼の計算及び熱精算に必要な表.....	194
第 3.	燃焼工學及び熱精算に係する熱管理技能試験問題.....	198



第1章 燃料及び熱量

第1節 燃 料

燃料とはその燃焼に際して發生する熱を経済的に利用することが出来る可燃物質であつて**固體燃料**、**液體燃料**及び**氣體燃料**の3種に大別出来る。

固體燃料の代表的なものは石炭、コークス、亜炭、木炭、薪、等であり、液體燃料には重油、ガソリン、また氣體燃料には石炭ガス、發生爐ガス、水性ガス、天然ガス等がある。

而して之等の主成分は孰れも炭素、水素及び少量の酸素等よりなり、燃料の燃焼は主としてこの中の炭素及び水素の燃焼である。

燃料の個別的説明は茲には省略するが、各種燃料の一般的性狀を表示すれば第1表の如くである。

第1表 各種燃料の一般

固 體 燃 料

	主 成 分	發 熱 量 (kcal/kg)	主 用 途
石 炭	C, H, O(N, S)	5000~7500	汽機、加熱爐焚用、ガス、コークス製造用、家庭用
亞 炭	" "	3000~4500	汽機、加熱爐焚用、コーライト製造用、家庭用
草 炭	" "	3000~4000	家庭用
木 炭	C (H, O)	6700~7500	家庭用、自動車用
コ ー ク ス	" "	6500~7000	製鐵用、鑄物用、水性ガス製造用、カーバイト用
半成コークス	" "	6500~7000	家庭用、自動車用
亜炭コーライト	" "	6000~7000	家庭用
薪	C, H, O	3500~4300	家庭用、自動車用
煉 炭	C, H, O(N, S)	3500~4000	家庭用、鐵道用

液 體 燃 料

	主成分及び沸点 範圍	發 熱 量 (kcal/kg)	主 用 途
B 重 油	C, H ₂₅₀ ~350°C	9000~10000	低速ディゼル用
C 重 油	" 300~360°C	" "	汽罐焚用, 加熱爐用
輕 油	" 200~300°C	" "	高速ディゼル用, 燒玉機關用
ガソリン	" 50~200°C	11000	自動車用, 航空機用

氣 體 燃 料

		成 分 (%)							發熱量 kcal/m ³	產氣量 m ³ /t	主用途
		CO ₂	C _m H _n	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂			
石炭ガス	レトリトガス	2.5	3.2	0.4	10.3	51.3	30.8	1.0	5300	290	家庭用及び工業用
	コークス爐ガス	2.0	2.6	0.4	7.4	54.0	20.0	5.6	5000	320	" "
	低温ガス	4.0	5.5	0.5	4.0	30.0	52.0	4.0	6300	110	工業用
發生爐ガス	石炭使用	5.2	—	—	20.3	13.0	3.1	53.4	1300	3800	"
	コークス使用	7.0	—	—	25.2	13.3	—	54.5	1200	4300	"
水性ガス		4.5	—	0.2	38.0	52.0	—	5.3	2600	1400	"
混成ガス		5.5	1.8	—	29.8	44.1	11.0	7.8	3600	1250	"
熔鐵爐ガス		11.0	—	—	27.0	2.0	—	60.0	900	—	"
木炭ガス		0.8	—	0.4	30.0	10.0	—	58.8	1210	4000	"
薪ガス		13.0	0.3	0.6	20.0	15.0	1.5	50.6	1300	—	自動車用
天然ガス		2.0	3.8	1.6	—	—	88.8	3.8	13800	—	家庭用及び工業用 自動車用

第2節 熱量及び溫度

熱は物質分子の運動に基ずくエネルギーの一種であつて、物體中で増減するから量として取扱われる。即ちこれが熱量である。

熱量の単位としてはカロリーを使う。英、米では BTU を用いる場合が多い。

標準気圧の下に純粋の水 1g の温度を 1°C 高めるに要する熱量を 1 カロリー (cal) という。これは温度により幾分の相違があるが厳密に言えば 0°C の水を 1°C 上昇する場合の熱量であるが實用上には 14.5°C より 15.5°C まで上げる熱量で取扱う。又實際には前記の 1000 倍を 1 kcal として廣く用いる。

温度は物體の寒暖を示す度合であつて測定の尺度には攝氏 ($^{\circ}\text{C}$) 及び華氏 ($^{\circ}\text{F}$) が使われる。この兩者の關係は

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{C}} &= \frac{5}{9} \times (t_{\text{F}} - 32) \\ t_{\text{F}} &= \frac{9}{5} t_{\text{C}} + 32 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.1)$$

理想氣體が一定壓力で温度を下げて體積が零となる點を假想してこの温度を 0 度として表わした温度を絶對温度といい $^{\circ}\text{K}$ を以て示す。従つて 0°C の絶對温度は 273.16°K となり絶對温度 T は攝氏及び華氏の度で示せば

$$\left. \begin{aligned} T &= t_{\text{C}} + 273 \\ T &= t_{\text{F}} + 460 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.2)$$

となる。

第3節 比熱及び顯熱

比熱は單位質量の物質を 1°C 上昇させるに必要な熱量で工業的には固体又は液体の場合には $\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ 、氣體の場合には $\text{kcal/Nm}^3^{\text{1)}}^{\circ}\text{C}$ を以

1) Nm^3 は 0°C , 760mm に於ける 1m^3 の體積

て示す。またある場合には分子熱即ち 1 kmol の物質を 1°C 上昇する熱量 kcal を以て表わすこともある。

比熱は温度により變化しその絶対温度 T による變化の關係は次の如くである。

$$c_p = a + \beta T + \gamma T^2 + \dots \dots \dots (1.3)$$

茲に c_p は温度 T に於ける比熱 a, β, γ 等は物質固有の値である。

比熱には定積比熱 c_v と定壓比熱 c_p とがあり後者は熱膨脹のため外部に對してなすべき仕事の量だけ前者より大きい。

固體及び液體ではこの量は極めて小でその差異は少いが氣體の場合には當然區別して考える必要がある。理想氣體では 1 kmol につき

$$c_p - c_v = R \quad (1.98 = 2 \text{ kcal/}^\circ\text{C kmol}) \quad \dots \dots \dots (1.4)$$

となる。但し R は氣體恒數である。

固體及び液體の比熱は第 2 表、又氣體の比熱は第 3 表のようである。

第 2 表 固體及び液體の比熱 (kcal/kg°C)

物 質 名	比 熱	物 質 名	比 熱	物 質 名	比 熱
アルミニウム	0.22	黒 鉛	0.20	アルコール	0.58
水 銀	0.035	コンクリート	0.27	エーテル	0.54
錫	0.056	スレート	0.18	ベンゾール	0.4
鐵, 鋼	0.115	石 炭	0.31	ガソリン	0.7
銅	0.094	石 灰 石	0.21	石 油	0.5
鉛	0.031	モルタル	0.21	機 械 油	0.4
ニッケル	0.11	木 材	0.6	硫 酸	0.34
硫 黄	0.18	木 炭	0.20	海 水	0.94
ガラス	0.20	灰	0.20	水 (15°C)	1.00
コークス	0.20	煉 瓦	0.20	水 (50°C)	0.9996

第3表 各温度に於ける主な気体の定圧比熱

温度 °C	c _p m kcal/kg °C							c _p m kcal/Nm ³ °C		
	CO ₂	SO ₂	水蒸気	O ₂	N ₂ , CO	空気	H ₂	CO ₂ , SO ₂	水蒸気	C ₂ H ₄ , N ₂ , H ₂ , CO, 空気
0	0.202	0.139	0.462	0.218	0.249	0.241	3.445	0.397	0.372	0.312
200	0.230	0.158	0.470	0.224	0.256	0.247	3.534	0.452	0.378	0.320
400	0.257	0.177	0.481	0.229	0.262	0.253	3.624	0.505	0.387	0.328
600	0.275	0.191	0.499	0.235	0.269	0.260	3.713	0.547	0.401	0.336
800	0.289	0.199	0.521	0.241	0.276	0.266	3.802	0.568	0.419	0.344
1000	0.297	0.204	0.551	0.246	0.282	0.272	3.891	0.583	0.444	0.352
1200	0.302	0.208	0.594	0.252	0.289	0.278	3.981	0.595	0.418	0.360
1400	0.307	0.211	0.644	0.257	0.296	0.285	4.070	0.603	0.578	0.368

ある物体が温度 t_1 より t_2 まで加熱された時、その間の各温度の比熱に應じて吸収する全熱量をその温度 (t_2) に於ける顯熱という。質量 Mkg の物体の比熱 c kcal/kg°C の場合なればその顯熱は

$$cM (t_2 - t_1), \text{ kcal} \dots\dots\dots (1.5)$$

である。そしてある物体の温度 1°C 上昇する顯熱を熱容量という。従つて熱容量 C kcal/°C は cM に相當するから前記物体の顯熱は $C(t_2 - t_1)$ ともなる。

第4節 蒸發熱及び融解熱

一定壓力で液體が蒸發して氣體になる時に必要な熱を蒸發熱といい、固體から液體になる時に採る熱を融解熱という。このように物体の狀態が變化する時に出入する熱を總稱して潜熱という。従つて前者を氣化の潜熱、後者を融解の潜熱と呼ぶこともある。又逆に氣體から液體に、液體から固體

になる時はそれだけの熱を出す。これ等の潜熱の単位は kcal/kg 又は kcal/kmol を用う。水の 1 気圧, 100°C に於ける潜熱は 539.5kcal/kg である。猶水の 1 気圧に於ける 0~100°C の蒸發熱は附録第 4 表に示してある。又 100°C 以上の水の潜熱は蒸汽表を見れば分る。計算による場合は水の 200 気圧, 365°C までの蒸發熱 r は次の式による。

$$\text{蒸發熱 } r = \left[a + b \left(\frac{\delta}{100} \right)^{1.15} + c \left(\frac{\delta}{100} \right)^{6.5} + d \left(\frac{\delta}{100} \right)^{50} \right] \\ \times (\delta_k - \delta)^{0.365}, \text{ kcal/kg} \dots \dots \dots (1.6)$$

但し

δ = 蒸發溫度 °C

δ_k = 374.2°C (水の臨界溫度)

$a = 68.596$ $b = 0.8162$ $c = -1.375 \times 10^{-3}$

$d = -0.02 \times 10^{-15}$

一般に蒸發熱は壓力が高くなる程又溫度が高くなる程, 減少する。

第 5 節 露點及び凝縮熱

氣體が 100°C 以下で過剰の水蒸氣と接するとこれによつて飽和される。この場合に水蒸氣がその氣體内で保有する分壓を飽和壓といいその時の溫度を飽和溫度又は露點という。溫度が露點以下に下ればその氣體内にある水蒸氣がそれに相當するだけ凝縮しいわゆる凝縮熱を出す。

t°C, 1 気壓の飽和氣體の單位體積中の水蒸氣量を w_1 としその分壓を p_w (mmHg) とすれば

$$w_1 = \frac{18}{22.4} \cdot \frac{p_w}{760} \cdot \frac{273}{273+t}, \text{ kg/m}^3 \dots \dots \dots (1.7)$$

又氣體の體積を 0°C, 1 気壓に換算する時この中に含まれる水蒸氣量 w_2 は

$$w_2 = \frac{18}{22.4} \cdot \frac{p_w}{760}, \quad \text{kg/m}^3 \dots \dots \dots (1.8)$$

更に 0°C, 1 気圧の乾き氣體に換算した時の 1m³ 中に含まるべき水蒸氣量 w_3 は

$$w_3 = \frac{18}{22.4} \cdot \frac{p_w}{760 - p_w}, \quad \text{kg/m}^3 \dots \dots \dots (1.9)$$

水蒸氣の飽和溫度と飽和壓, 並びに水蒸氣の含有量 w_3 の關係は附録第 4 表を参照されたい。

第 6 節 着火溫度及び着火熱

着火溫度とは空氣又は酸素氣中で外部から點火しないでも自然に可燃物が燃え始める最低の溫度であつて燃料により略々一定である。(第 8 表参照)

燃料を最初の溫度からこの着火溫度まで加熱するに要する熱量を**着火熱**という。これは燃料の着火溫度を知ることによつて計算出来る。着火溫度に就ては後に詳述してある。

【例題 1】水分 0.90%, 灰分 16.8%, 可燃分 82.3%, 眞發熱量 (HI) 5930kcal/kg の石炭がある。この着火溫度を 450°C とし燃焼に使用した空氣量を石炭 1 kg に對し 9.08Nm³/kg とすればその着火熱を計算せよ。

【解】空氣の比熱を 0.32kcal/Nm³, 灰の比熱を 0.22kcal/kg, 可燃分の比熱を 0.3kcal/kg とし 20°C より着火溫度までに溫度を上げるに要する熱量は石炭 1 kg 當り次のようになる。

$$\begin{aligned} & (0.32 \times 9.08 + 0.22 \times 0.168 + 0.3 \times 0.823) \times (450 - 20) \\ & = 1250 + 16 + 106 = 1372 \text{kcal/kg} \end{aligned}$$

次に水分の蒸發及び加熱に要する熱量は蒸汽の全熱量を過熱蒸汽表より求めて 807.8kcal/kg とし室溫を 20°C とすれば(附録第 6 表参照)

$$0.0090 (807.8 - 20) = 7.1 \text{ kcal/kg}$$

故に石炭 1 kg の着火熱は

$$1.372 + 7 = 1379 \text{ kcal/kg} = 0.232 \text{ HI}$$

一般に着火熱は固体燃料の眞發熱量の 20~35% に相當している。

次に参考として各種の固体燃料の着火熱を示すと第4表の通りである。

但し空氣の比熱を $0.32 \text{ kcal/Nm}^3\text{C}$ 、灰分の比熱を $0.22 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ 、可燃分の比熱を $0.3 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ とし室温 20°C よりの熱量である。

第4表 各種燃料の着火熱 (kcal/kg)

		無煙炭	瀝青炭	褐炭	亞炭	コークス
眞發熱量	kcal/kg	6810	5930	4890	4160	6200
水分	%	3.50	0.90	7.72	18.73	3.85
灰分	%	13.12	16.80	8.66	8.81	19.03
可燃分	%	83.29	82.30	73.62	72.50	77.12
着火温度	$^{\circ}\text{C}$	650	450	250	250	650
燃燒所要空氣量	Nm^3/kg	10.45	9.08	7.70	7.70	10.07
20 $^{\circ}\text{C}$ から着火温度まで熱するに要する熱量	灰分 kcal	18	16	4	5	26
	可燃分 "	158	106	51	50	146
	空氣 "	2106	1250	507	472	2030
水分の蒸發加熱に要する熱量	水分 "	30	7	122	129	34
着火熱	kcal/kg	2312	1379	684	656	2236
發熱量に對する	%	34	23	14	16	36

第4表の結果は無煙炭及びコークスの着火熱が一番大で亞炭、褐炭は小であつて大凡着火温度の大小に關係していることを示している。着火熱として一番多く與えなければならぬ熱量は燃燒用空氣に對してであつて從つて空氣を豫熱すれば着火が速になる。

例えば瀝青炭の場合に空氣を $100\sim 400^{\circ}\text{C}$ まで各種の温度に豫熱して與