

第1章 条鋼加熱法

1. 燃焼理論の基礎

(1) 燃焼の定義

燃焼とは、可燃物が酸素と化合する一種の酸化反応が、高温で熱と光をとめないながら、自動的に進行する現象である。

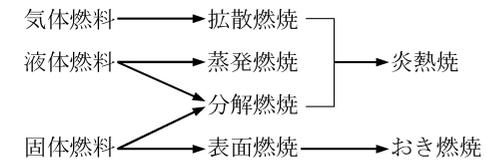
燃焼を開始するには、まず外部から熱を与えて、その着火温度まで熱しななければならない。着火温度とは、燃料が外部から点火を要しないで、自然に燃え始める最低の温度である。これは燃料の周囲にあるのが空気か酸素か、またそれらの接触条件によって異なる。空気を使用した場合の着火温度を表1-1に示す。

表1-1 燃料の着火温度

燃 料	着火温度℃	燃 料	着火温度℃
薪 (硬 木)	250~300	重 油	530~580
木炭 (白 炭)	320~370	瀝青炭タール油	580~650
木炭 (黒 炭)	350~400	水 素	580~600
泥炭 (空気乾燥)	225~280	一 酸 化 炭 素	580~650
褐炭 (")	250~450	メ タ ン	650~750
瀝 青 炭	325~400	エ タ ン	520~540
無 煙 炭	440~500	エ チ レ ン	525~540
半成コークス	450~500	ア セ チ レ ン	400~440
ガスコークス	550~600	タール蒸気	250~400
コ ー ク ス	550~750	発生炉ガス	700~800
炭 素	約 800	コークス炉ガス	650~750
硫 黄	630	高 炉 ガ ス	700~800

燃焼を起すために必要な第二の条件として、空気または酸素の供給が必要である。この空気の量は、燃料の種類などによって異なる。

燃料には、固体、液体および気体燃料があるが、これらはどれも、おなじような燃焼をするとは限らない。燃焼を大別すると、炎燃焼と、おきの状態で燃えるいわゆるおき燃焼に分類される。



ここでは、加熱炉の燃焼で一般的な炎燃焼について説明する。

炎燃焼は基本的には、可燃気体中に空気または酸素が拡散混合して燃焼するもの（このような燃焼を拡散燃焼ともいう）であって、一般にその燃焼は可燃気体と空気または酸素との混合割合が一定の範囲に達したときに始めて起り、その混合範囲外では起らない。そしてこの範囲は、一定条件すなわち一定の圧力、温度のもとでは可燃気体の種類によってその値が定まっている。このような燃焼や爆発を起しうる濃度の範囲を燃焼範囲または爆発範囲と呼んでいる。可燃気体または蒸気の燃焼範囲を表1-2に示す。

表1-2 空気と混合した可燃気体または蒸気の燃焼範囲
(1気圧)(容量%)

可 燃 気 体	燃 焼 範 囲 C ₁ ~C ₂	可 燃 蒸 気	燃 焼 範 囲 C ₁ ~C ₂
水 素	4.1~75	メチルアルコール	7~37
一 酸 化 炭 素	12.5~75	エチルアルコール	3.5~20
メ タ ン	5.0~15	エ ー テ ル	1.7~48
エ タ ン	3.0~14	ア セ ト ン	2~13
プ ロ パ ン	2.1~9.5	イ ソ ペ ン タ ン	1.3~
ブ タ ン	1.5~8.5	正 オ ク タ ン	1.0~
エ チ レ ン	3.0~33.3	ベ ン ゼ ー ル	1.4~9.5
プ ロ ピ レ ン	2.2~9.7	ト ル オ ー ル	1.3~7
ブ チ レ ン	1.7~9.0	シ ク ロ ヘ キ サ ン	1.3~8.5
ア セ チ レ ン	2.3~82	ガ ソ リ ン	1.4~8

燃焼（爆発）範囲内の混合可燃ガスに着火すれば炎を生じ、ある速度で炎が伝播して、ついに全混合ガスに燃焼（爆発）が及ぶ。この炎の伝播速度を燃焼速度あるいは火炎伝播速度といい、気体の種類、混合割合などで異なる。各可燃気体の燃焼が最高の速度を示すときの空気量は、実測によれば理論的に燃焼に要する空気量（理論空気量）より少ないところで起り、一般にガスの方が15~20%過剰なときであるといわれている。

一般に、気体燃料が一定した状態の炎となって燃える場合は、燃料がバーナ

またはそれに類するものから一定の速度で噴き出され、その噴出速度と燃料の燃焼速度とが互いに釣合った時であって、一定の形状の炎をつくって燃える。この燃焼が炎燃焼の代表的な場合である。そして炎の形はブンゼンバーナで見られるように、基部が太く先端に進むにつれて次第に細くなっている。この理由は、バーナの火口からは可燃ガスが層流の状態で噴き出されており、外側から拡散により浸透してきた空気に次第に酸化されて燃えていくため、炎の中心ほど空気に触れにくく燃焼が遅れて、炎が一番長く延びることになるのである。

(2) 燃焼計算

実際の燃焼装置では、燃焼反応の過程を問題にせずに関前後の変化を比較することが多い。ここでは燃料の発熱量、燃料の燃焼に必要な空気量、生成燃焼ガス量および燃焼後のガスの温度について計算する方法を述べる。

a. 燃料の発熱量

水素や水分を含む燃料の発熱量を熱量計を用いて測定する場合には、生成ガスの水蒸気が凝結するときに放出する潜熱をも含むことになり、その値を総発熱量あるいは高位発熱量 (Hh) という。しかし実際に燃焼させて、その発熱量を利用する場合には、一般には加熱炉内で水蒸気は凝結せず、排ガス中に含まれて外部に出るから、水蒸気の潜熱は利用されない。したがって、総発熱量から発生水蒸気の潜熱を差引いた値を真発熱量あるいは低位発熱量 (Hl) という。

燃料の発熱量は、熱量計を用いて測定する必要があるが、その組成が与えられる場合は、つぎのような式で近似値を求めることができる。

(a) 気体燃料

気体燃料の標準状態における単位体積あたり (1 Nm³)^{注1}の総発熱量および真発熱量は、次式で計算できる。

$$Hh = \frac{1}{22.4} \{285,900(H_2) + 285,500(CO) + \sum(C_xH_y)qh\} \quad (1-1)$$

$$Hl = \frac{1}{22.4} \{241,100(H_2) + 285,500(CO) + \sum(C_xH_y)ql\} \quad (1-2)$$

C _x H _y	発熱量 (kJ/kmol)	
	総 (高位) qh	真 (低位) ql
C ₁ H ₄ (メタン)	893,700	803,300
C ₂ H ₄ (エタン)	1,558,500	1,422,800
C ₂ H ₆ (エチレン)	1,398,100	1,307,700
C ₂ H ₂ (アセチレン)	1,306,000	1,251,600
C ₃ H ₈ (プロパン)	2,222,800	2,042,800
C ₆ H ₆ (ベンゼン)	3,229,500	3,093,900

ここに Hh: 気体燃料の標準状態における総発熱量 (kJ/Nm³)
 Hl: 気体燃料の標準状態における真発熱量 (kJ/Nm³)
 H₂, CO, C_xH_y: 気体燃料 1 Nm³の水素、一酸化炭素、各種炭化水素の各体積 (Nm³/Nm³)
 qh, ql: 炭化水素の総発熱量および真発熱量 (kJ/kmol)

(b) 液体あるいは固体燃料

液体あるいは固体燃料の 1 kgあたりの総発熱量および真発熱量は、次式で計算できる。

$$Hh = 33,900C + 143,200(H - \frac{1}{8}O) + 10,500S \quad (1-3)$$

$$Hl = Hh - 2,500(9H + W) \quad (1-4)$$

ここに

Hh: 液体あるいは固体燃料の総発熱量 (kJ/kg)

Hl: 液体あるいは固体燃料の真発熱量 (kJ/kg)

C, H, O, S, W: 燃料 1 kg中に含まれる炭素、水素、酸素、いおうおよび水分の各重量 (kg/kg)

b. 空気量および燃焼ガス量

実際の燃焼装置では、使用燃料に対して必要な空気量および生成燃焼ガス量を求める必要がある場合が多い。この場合には化学量論の計算によって、つぎのように求めることができる。

(a) 燃焼に必要な空気量

ア. 気体燃料の場合

気体燃料は、一酸化炭素、水素、メタンガスなどの各単純ガスの混合

注1 1 Nm³とは標準状態 (0°C、760mmHg) における 1 m³のこと。

物であるので、これらの各ガスの燃焼反応を別々に考えて必要な空気量を合計すればよい。すなわち、ガス燃料において各成分ガスの容積が与えられている場合、ガス燃料 1 Nm³あたり必要な理論空気量は次式で計算すればよい。

$$A_0 = \frac{1}{0.21} \left\{ \frac{1}{2} (\text{CO}) + \frac{1}{2} (\text{H}_2) + \sum (x + \frac{y}{4}) (\text{C}_x\text{H}_y) - \text{O}_2 \right\} \quad (1-5)$$

ここに、A₀: 必要な理論空気量 (Nm³/Nm³)

CO、H₂、C_xH_y、O₂: ガス燃料 1 Nm³中の一酸化炭素、水素、炭化水素および酸素の各ガスの体積 (Nm³/Nm³)

イ. 液体あるいは固体燃料の場合

燃料の元素組成が明らかな場合、燃料 1 kgあたり必要な理論空気量は、次式で計算できる。

重量値は

$$A_0 = 11.5C + 34.5 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4.3S \quad (\text{kg/kg}) \quad (1-6)$$

体積値は

$$A_0 = 8.8C + 27.6 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3.3S \quad (\text{Nm}^3/\text{kg}) \quad (1-7)$$

ここに、A₀: 理論空気量 (kg/kgあるいはNm³/kg)

C、H、O、S: 燃料 1 kg中の炭素、水素、酸素、いおうの各重量 (kg/kg)

実際の燃焼装置では、完全燃焼するために理論空気量より多い空気量を用いる必要がある。この場合、(1-6)式に示すように、実際に使用する空気量と理論空気量の比を**空気比**または**空気過剰係数**という。

$$m = \frac{A}{A_0} \quad (1-8)$$

ここに、m: 空気比 (空気過剰係数)

A、A₀: 実際空気量、理論空気量 (Nm³あるいはkg)

また (m-1) を**過剰空気率**という。

空気比mは、燃焼ガスの分析値により、特定成分のバランスからも求めることができる。

いま煙道ガス中の酸素、窒素、一酸化炭素の分析値をそれぞれ (O₂)

%, (N₂)%, (CO)%とし、燃料中の窒素は微量で無視でき、酸素がすべて過剰空気からくるものとすれば、これにともなう窒素は

$$\frac{79}{21} (\text{O}_2) = 3.76 (\text{O}_2) \%$$

である。しかし未燃分の一酸化炭素を含むため、実際に過剰空気からきた窒素は

$$3.76 \{ (\text{O}_2) - 0.5 (\text{CO}) \} \%$$

となる。よって次式により求めることができる。

$$m = \frac{(\text{N}_2)}{(\text{N}_2) - 3.76 \{ (\text{O}_2) - 0.5 (\text{CO}) \}} \quad (1-9)$$

(b) 燃焼ガス量

燃焼ガスは燃料の可燃元素である炭素、水素、いおうなどが完全燃焼して生ずるCO₂、H₂O、SO₂のほか、供給されたO₂のうち燃焼に供されなかった過剰のもの、供給された空気中のN₂、燃料中に最初からあるN₂、CO₂などの不燃性ガスおよび燃料や空気中の水分などから成っており、不完全燃焼の場合は、すす、CO₂、H₂、C_xH_yなどの未燃物も含む。

ア. 気体燃料の場合

気体燃料 1 Nm³を完全燃焼した場合に生ずる燃焼ガスの各成分ガス量および全ガス量は、次式により求められる。

ただし空気は乾燥状態とする。

各成分ガス量はおのこの、

$$\text{炭酸ガス量: } G_{\text{CO}_2} = (\text{CO}_2) + (\text{CO}) + \sum_x (\text{C}_x\text{H}_y) \quad (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3) \quad (1-10)$$

$$\text{水蒸気量: } G_{\text{H}_2\text{O}} = (\text{H}_2\text{O}) + (\text{H}_2) + \sum_y \frac{1}{2} (\text{C}_x\text{H}_y) \quad (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3) \quad (1-11)$$

$$\text{窒素量: } G_{\text{N}_2} = (\text{N}_2) + 0.79 A_0 \quad (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3) \quad (1-12)$$

$$\text{過剰空気量: } G_{\text{EA}} = A - A_0 = A_0 (m - 1) \quad (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3) \quad (1-13)$$

であるので、全燃焼ガス量は次のようになる。

$$\text{乾き全燃焼ガス量}^{\text{注1}}: G' = G_{\text{CO}_2} + G_{\text{N}_2} + G_{\text{EA}} \quad (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3) \quad (1-14)$$

$$\text{湿り全燃焼ガス量}^{\text{注1}}: G = G' + G_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3) \quad (1-15)$$

^{注1} 燃焼廃ガス中には、燃料中の水分や燃焼によって生成される水蒸気を不飽和の状態を含んでいる。これを**湿り燃焼ガス**という。水蒸気を除外したガスを**乾き燃焼ガス**という。一般に燃焼廃ガスの分析は乾き燃焼ガス中の組成割合で示される。