

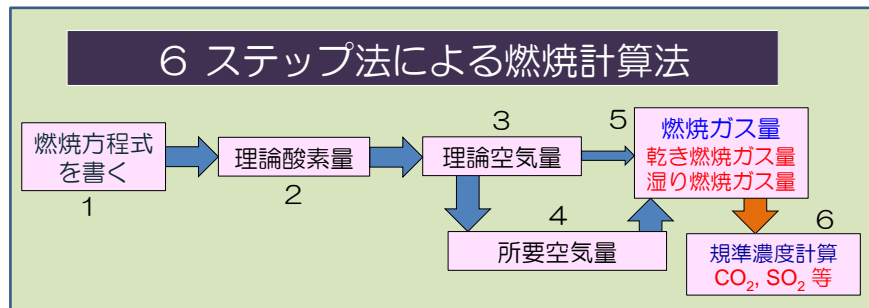
2. 燃焼計算

■ 燃焼計算の意義

- 燃焼反応前後の収支計算 → 燃焼空気量, 燃焼ガス量, CO₂濃度等を計算
- 量的計算による燃焼の適正管理

■ 燃焼計算の基礎

- 燃焼反応：燃料と酸素が反応(酸化反応)し、光と熱を同時に発する現象
- 燃焼計算の順序



2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

■ 用語 (要理解)

| | |
|-----------------------------|--|
| 理論酸素量 (O_0) | 単位の燃料(気体燃料:1m ³ , 固体・液体燃料:1kg または 1 kmol) を完全燃焼するのに必要な最小酸素量 |
| 理論空気量 (A_0) | 単位の燃料(気体燃料:1m ³ , 固体・液体燃料:1kg または 1 kmol) を完全燃焼するのに必要な最小空気量 |
| 所要空気量 (A) | 実際に供給された空気量(理論空気量だけでは完全燃焼が困難。実際には、理論空気量より多くの空気を供給する。) |
| 空気比又は空気過剰係数 (m) | $m = A / A_0$ 所要空気量 A と理論空気量 A_0 との比 |
| 湿り燃焼ガス量 (G) | 単位量当たりの燃料の、水蒸気を含めた燃焼後の全ガス量 |
| 理論湿り燃焼ガス量 (G_0) | 理論空気量で完全燃焼したと仮定したときの湿り燃焼ガス量 |
| 乾き燃焼ガス量 (G') | 燃料単位量当たりの、水蒸気を除外した燃焼後の全ガス量 |
| 理論乾き燃焼ガス量 (G'_0) | 理論空気量で完全燃焼したと仮定したときの乾き燃焼ガス量 |
| 最大二酸化炭素量 ($(CO_2)_{max}$) | 理論空気量で完全燃焼したときの乾き燃焼ガス中の二酸化炭素濃度 (%) |
| 湿り／乾き燃焼ガス基準濃度 | 着目する成分のガス量が、湿り／乾き燃焼ガスに占める体積割合 |

2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

■ 燃焼式 (要理解 or 暗記)

| 燃料名 | 分子式 | 燃焼反応方程式 |
|-------|--------------------------------|--|
| 炭素 | C | $C + O_2 = CO_2$ |
| 硫黄 | S | $S + O_2 = SO_2$ |
| 水素 | H ₂ | $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$ |
| 一酸化炭素 | CO | $CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$ |
| メタン | CH ₄ | $CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$ |
| プロパン | C ₃ H ₈ | $C_3H_8 + 5 O_2 = 3 CO_2 + 4 H_2O$ |
| ブタン | C ₄ H ₁₀ | $C_4H_{10} + \frac{13}{2} O_2 = 4 CO_2 + 5 H_2O$ |
| エチレン | C ₂ H ₄ | $C_2H_4 + 3 O_2 = 2 CO_2 + 2 H_2O$ |

公害防止管理者受験学習ファイル

15

2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

■ 燃焼方程式の作成方法

■ プロパン (C₃H₈) の燃焼方程式の場合 (例)

【基本事項】

燃焼前 → 燃焼後

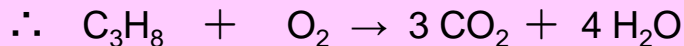
C → CO₂

H → H₂O

燃料(C₃H₈)中の数 燃焼後

C : 3個 → 3 CO₂

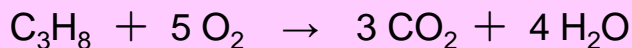
H : 8個 → 4 H₂O



反応前後で各原子の数が一致しなければならない

反応後の O (酸素) の合計 → 反応前の O の数を導く

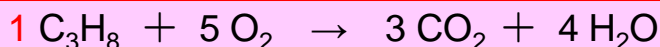
3 CO₂中にO : 6個 + 4 H₂O 中にO : 4個 = 10個



公害防止管理者受験学習ファイル

16

■ 燃焼方程式の解釈



- 物質の前の数字：反応に関与する又は反応で生じる“物質の量”
- “物質の量”の単位：モル(mol)（工業的にはキロモル(kmol)）
- 物質の前の数字（係数）が“1”の場合は一般に省略する

燃焼反応の説明

- ① 1モルのプロパンと5モルの酸素が反応して（燃焼して）
- ② 3モルの二酸化炭素と4モルの水(水蒸気)が生成する
- ③ 反応方程式の係数（物質の量）は係数の比率で反応・生成する

モルとは何か

- ① 物質の量を表す単位 最終的には ----- 重量・体積 で示す
- ② 1モル(mol) = 分子・原子 6.02×10^{23} 個の“重量又は体積”
- ③ 同じ1molでも大きな分子・原子では“1molの重量は大”
- ④ “気体”の体積は分子の大小に関係なく“1 mol = 22.4L”
- ⑤ “気体”の体積は分子の大小に関係なく“1 kmol = 22.4m³”

■ 物質の量（mol・モル）の質量への換算

■ 原子の場合：1 mol = (原子量) g

- 炭素 C：12 (g/mol) 窒素 N：14 (g/mol)
- 水素 H：1 (g/mol) 硫黄 S：32 (g/mol)
- 酸素 O：16 (g/mol) 塩素 Cl：35.5 (g/mol)
- いずれも 6.02×10^{23} 個の集合体の“質量”

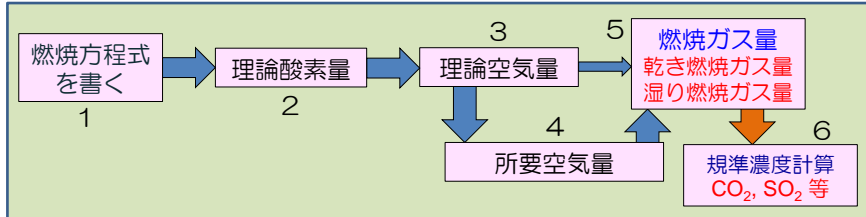
■ 分子の場合：1 mol = (構成全原子の合計原子量) g

- (例1) $\text{H}_2\text{O} = \text{H}:2\text{個} + \text{O}:1\text{個} = 1 \times 2 + 16 = 18 \text{ (g/mol)}$
- (例2) プロパン (C_3H_8)
 $\text{C}_3\text{H}_8 = \text{C}:3\text{個} + \text{H}:8\text{個} = 12 \times 3 + 1 \times 8 = 44 \text{ (g/mol)}$
- (例3) 水素ガス (H_2) $\text{H}_2 = \text{H}:2\text{個} = 1 \times 2 = 2 \text{ (g/mol)}$
- 気体の場合： H_2 (1mol=2g=22.4L), C_3H_8 (1mol=44g=22.4L)

■ 燃焼計算で用いられる数値

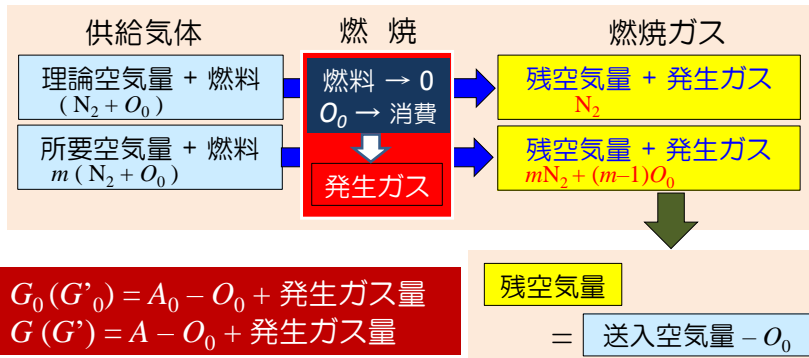
- 空気の組成（体積比）：酸素 (O_2) 21%、窒素 (N_2) 79%

■ 6 ステップ法による燃焼計算



1. 燃焼方程式を書く（最低要件）
 - 燃料の係数が 1 となるような反応方程式
 - 係数の意味：気体の場合 → mol 数 (kmol数) , m³ でも可
固体、液体の場合 → mol 数
2. 理論酸素量 (O₀) を求める：反応方程式から酸素の mol数 (m³数) を読み取る
3. 理論空気量 (A₀) を求める：理論酸素量 (O₀) から計算
 - $A_0 = O_0 \times 100/21$ (空気中の酸素濃度 = 21%)

4. 所要空気量 (A) を求める：理論空気量 (A₀) から計算
 - $A = m A_0$ (m：空気比又は空気過剰係数)
5. 燃焼ガス量 (G₀, G'₀, G, G') を求める
 - 理論空気量で燃焼した場合：理論燃焼ガス (G₀, G'₀)
 - 所要空気量で燃焼した場合：燃焼ガス (G, G')



2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

■ 発生ガス量の評価

発生ガス量は反応方程式の係数から読み取る：生成物は通常気体

H₂O：水 ----- 液体の場合と気体（水蒸気）の場合がある

湿り燃焼ガス ----- 水蒸気（気体）として扱う → 水蒸気量を発生ガス量に算入

乾き燃焼ガス ----- 水（液体）として扱うため、体積はゼロ → 生成する水を無視（発生ガス量に算入しない）

6. 基準濃度の計算

$$\text{基準濃度 (\%)} = \frac{\text{成分ガス量}}{\text{燃焼ガス量}} \times 100$$

燃焼ガス = 乾き燃焼ガス
→ 乾き燃焼ガス基準濃度

$$\text{基準濃度 (ppm)} = \frac{\text{成分ガス量}}{\text{燃焼ガス量}} \times 1,000,000$$

燃焼ガス = 湿り燃焼ガス
→ 湿り燃焼ガス基準濃度

$$\text{(例) CO}_2\text{乾き燃焼ガス基準濃度 (\%)} = \frac{\text{CO}_2\text{ガス量}}{\text{乾き燃焼ガス量}} \times 100$$

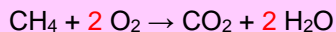
2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

■ 例題 1：単一気体の燃焼

メタンを空気比 1.05 で完全燃焼させた場合、乾き燃焼ガス中の CO₂ 濃度(%) はおよそいくらか。

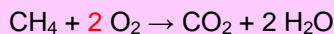
■ 例題 1 の解

Step1：反応式を書く



係数は mol 数を表すが、気体燃料の場合、m³ と考えてもよい

Step2：理論酸素量 (O₀) の計算



理論酸素量(O₀)：1molのCH₄に対して2molのO₂が必要

Step3：理論空気量 (A₀) を求める

理論空気量(A₀)：理論酸素量を供給できる空気量、

酸素濃度 = 21%

$$A_0 = 2 \text{ mol} \times \frac{100}{21} = 9.52 \text{ mol} \quad \text{CH}_4 \text{ 1m}^3 \rightarrow 9.52 \text{m}^3$$

補足：比例式

$$\frac{A_0}{\text{O}_2} = \frac{100}{21} = \frac{x \text{ mol}}{2 \text{ mol}}$$

$$21 x = 200$$

$$A_0 = x = 200/21$$

m³ での計算も同様

2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

Step 4: 所要空気量 (A) の計算
 所要空気量 = 空気比 × 理論空気量
 $A = m A_0$
 $= 1.05 \times 9.52 = 9.996$

これを計算してみます
 $CO_2 \% = 1 \text{ mol} \times 100/9.52$
 $= 10.50\%$ (誤り解答)
 また注意: 空気比=1 なら正解

Step 5 乾き燃焼ガス量 (G) の計算
 燃焼ガス量 = 所要空気量 - 理論酸素量 + 発生ガス量
 ① 乾き燃焼ガス量なので H_2O は発生ガス量に含めない
 ② 発生 CO_2 は CH_4 と等モル (1 mol)
 $G' = A - O_0 + 1$

実際に計算してみる
 発生ガス量 = CO_2 1 mol
 乾き燃焼ガス量
 $= 9.996 - 2 + 1$
 $= 8.996 \text{ (mol)}$

Step 6 CO_2 の乾き燃焼ガス基準濃度の計算
 発生 CO_2 は CH_4 と等モル (1 mol)
 CO_2 の乾き燃焼ガス基準濃度
 $= \text{発生 } CO_2 \text{ 量} \times 100 / \text{乾き燃焼ガス量}$
 $= 1 \times 100 / 8.996 = 11.1 \%$

11.1% ----- 正解

2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

- 例題2: 混合気体の燃焼
 プロパン 70vol%, ブタン 30vol% の混合ガスを空気比 1.1 で完全燃焼させる場合、乾き燃焼ガス中の CO_2 濃度(%) はおよそいくらか。
- 例題2の解

Step 1: 反応式を書く
 $C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O$ $C_4H_{10} + 6.5 O_2 \rightarrow 4 CO_2 + 5 H_2O$

Step 2: 理論酸素量 (O_0) の計算
 C_3H_8 (70vol%), C_4H_{10} (30vol%) 体積比 = mol 比
 $O_0 = (0.7 \times 5) + (0.3 \times 6.5) = 3.5 + 1.95 = 5.45$

燃料中の炭化水素の体積比
 = mol 比になっている
 $C_3H_8 = 0.7 \text{ mol}$
 $C_4H_{10} = 0.3 \text{ mol}$
 Total = 1.0 mol
 と考える

Step 3: 理論空気量 (A_0) の計算
 $A_0 = O_0 \times 100/21 = 5.45 \times 100/21 = 25.95 \text{ mol}$

Step 4: 所要空気量 (A) の計算
 空気比 m , 理論空気量 A_0 , 所要空気量を A とする
 $A = m A_0 = 1.1 \times 25.95 = 28.55$

係数は mol 数を表すが、気体燃料の場合、 m^3 と考えてもよい

2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

Step 5 : 乾き燃焼ガス量 (G') の計算

理論空気量を A_0 , 所要空気量を A , 理論酸素量を O_0 とすると

発生ガス量も燃料の mol 比 (体積比) に比例する

$CO_2(P)$: プロパンの燃焼で発生する CO_2 量

$CO_2(B)$: ブタンの燃焼で発生する CO_2 量

$$\begin{aligned} \text{乾き燃焼ガス量} = G' &= A - O_0 + \text{発生ガス量} (CO_2(P) + CO_2(B)) \\ &= 28.55 - 5.45 + (3 \times 0.7) + (4 \times 0.3) = 26.4 \end{aligned}$$

Step 6 : CO_2 の乾き燃焼ガス基準濃度の計算

$$\begin{aligned} CO_2 \text{ の乾き燃焼ガス基準濃度} &= CO_2 \text{ 量} \times 100 / \text{乾き燃焼ガス量} \\ &= (0.7 \times 3 + 0.3 \times 4) \times 100 / 26.4 \\ &= 12.5 \% \end{aligned}$$

12.5 % ----- 正解

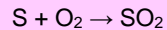
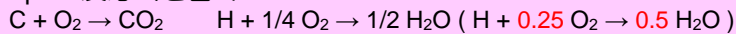
2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

■ 例題3 : 液体燃料の燃焼

炭素 87%, 水素 12%, 硫黄 1% の重油を空気比 1.2 で完全燃焼させる場合、乾き燃焼ガス中の CO_2 濃度(%) および SO_2 濃度 (ppm) はおよそいくらか。ただし、重油中の硫黄はすべて SO_2 になるものとする。

■ 例題3の解

Step1 : 反応式を書く



① 液体燃料全量を 1 kg とし、C -- 87%, H -- 12%, S -- 1% の質量を計算

② 質量比をモル比 に変換 液体、固体燃料では、反応式の係数 \rightarrow mol 数

③ $C = 870 \text{ g} = 870 / 12 \text{ mol} = 72.5 \text{ mol}$

$$H = 120 \text{ g} = 120 / 1 \text{ mol} = 120 \text{ mol} \quad S = 10 \text{ g} = 10 / 32 \text{ mol} = 0.31 \text{ mol}$$

Step2 : 理論酸素量 (O_0) の計算

C (72.5 mol), H (120 mol), S (0.31 mol)

$$O_0(C) = (72.5 \times 1) = 72.5 \text{ (mol)} \quad O_0(H) = (120 \times 0.25) = 30 \text{ (mol)}$$

$$O_0(S) = (0.31 \times 1) = 0.31 \text{ (mol)} \quad O_0(C), O_0(H), O_0(S): C, H, S \text{ の理論酸素量}$$

$$O_0 = O_0(C) + O_0(H) + O_0(S) = 72.5 + 30 + 0.31 = 102.81 \text{ mol}$$

2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

Step3：理論空気量 (A_0) の計算

$$A_0 = O_0 \times 100 / 21 = 489.6 \text{ mol}$$

Step 4：所要空気量 (A) の計算

空気比 $m = 1.2$ $A = m A_0 = 1.2 \times 489.6 = 587.5 \text{ (mol)}$

Step 5：燃焼ガス量の計算（乾き燃焼ガス量 (G')）

$$\text{乾き燃焼ガス量 (G')} = A - O_0 + \text{発生ガス量}$$

発生ガス量：① C と等モルの $\text{CO}_2 \rightarrow 72.5 \text{ mol}$ の CO_2

② S と等モルの $\text{SO}_2 \rightarrow 0.31 \text{ mol}$ の SO_2

$$\text{乾き燃焼ガス量： } G' = 587.5 - 102.81 + 72.5 + 0.31 = 557.5$$

Step 6： CO_2 , SO_2 の乾き燃焼ガス基準濃度の計算

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ 乾き燃焼ガス基準濃度} &= \text{CO}_2 \text{量} \times 100 / \text{乾き燃焼ガス量} \\ &= 72.5 \times 100 / 557.5 = 13.0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 \text{ 乾き燃焼ガス基準濃度} &= \text{SO}_2 \text{量} \times 1,000,000 / \text{乾き燃焼ガス量} \\ &= 0.31 \times 1,000,000 / 557.5 \\ &= 560 \text{ ppm} \end{aligned}$$

CO_2 乾き燃焼ガス基準濃度 13.0%、 SO_2 乾き燃焼ガス基準濃度 560ppm ---- 正解

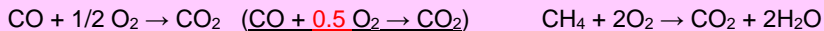
2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

■ 例題4：混合気体の燃焼（応用問題）

一酸化炭素とメタンの混合ガスの理論湿り燃焼ガス量が $8.61 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 場合、混合ガス中の一酸化炭素の割合（体積%）はいくらか。

■ 例題4の解

Step1：反応式を書く



$\text{CO} \text{ --- } x \text{ mol (or } x \text{ m}^3\text{), CH}_4 \text{ --- } y \text{ mol (or } y \text{ m}^3\text{), と考える}$

Step2：理論酸素量 (O_0) の計算

$\text{CO (} x \text{ m}^3\text{), CH}_4 \text{ (} y \text{ m}^3\text{) の混合気体 } 1 \text{ m}^3 \text{ を燃焼, } x + y = 1 \text{ m}^3_{\text{N}}$ (以下 N は省略)

$$O_0(\text{CO}) = (0.5x) = 0.5x \text{ m}^3 \quad O_0(\text{CH}_4) = 2y \text{ m}^3 \quad \text{念のため単位を赤字で表示}$$

$$O_0 = O_0(\text{CO}) + O_0(\text{CH}_4) = 0.5x + 2y \text{ m}^3$$

Step3：理論空気量 (A_0) の計算

$$A_0 = (0.5x + 2y) \times 100/21 = 2.38x + 9.52y \text{ (m}^3\text{)}$$

Step4：所要空気量の計算（本問では計算の必要はありません。）

2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

Step 5：混合ガス 1m³ に対する理論湿り燃焼ガス量 (G₀) の計算

理論湿り燃焼ガス量 = 理論空気量 - 理論酸素量 + 発生ガス量(水蒸気含む)

発生ガス量：CO と等モル (同体積) の CO₂ CO₂(CO) = x m³
 CH₄ の 2 倍モル (体積) の CO₂ CO₂(CH₄) = 2y m³
 及び CH₄ と等モル (同体積) の H₂O H₂O(CH₄) = y m³

$$G_0 = 2.38x + 9.52y - (0.5x + 2y) + x + 2y + y$$

$$= 2.88x + 10.52y = 8.61 \text{ m}^3 \text{ (題意より)}$$

Step 5 (追加部分)：これらの結果から x (単位 m³) を求める

$$\begin{aligned} x + y &= 1 && \text{----- ①} \\ 2.88x + 10.52y &= 8.61 && \text{----- ②} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} x + y &= 1 \\ 2.88x + 10.52y &= 8.61 \end{aligned}} \right\}$$

①より $y = 1 - x$ これを②に代入して

$$2.88x + 10.52(1 - x) = 8.61$$

$$-7.64x = -1.92 \quad \text{これより} \quad x = 0.251 \text{ (単位: m}^3\text{)}$$

25.1% ----- 正解

2. 燃焼計算 燃焼計算の基礎

■ 発熱量と理論空気量及び理論燃焼ガス量との関係

■ 発熱量

燃料の単位量 (気体燃料：1 m³_N、固体・液体燃料：1kg) が完全燃焼するとき発生する熱量 (kJ) **高発熱量と低発熱量がある**

| | | |
|--------|--------|-------------|
| (凝縮熱) | (蒸発潜熱) | (総発熱量) 高発熱量 |
| (真発熱量) | 低発熱量 | |
| H_l | H_h | |

高発熱量 (総発熱量)：燃料中の水分、燃焼で生じる水分の蒸発潜熱を含む熱量

低発熱量 (真発熱量)：実際の燃焼では燃焼ガス中の水分は水蒸気として排出されるため蒸発潜熱は利用できない

熱量計：高発熱量を測定

気体燃料 (2.0：水の蒸発潜熱・MJ/m³)

$$H_l = H_h - 2.0 \text{ (発生水分(m}^3\text{))} \quad (\text{MJ/m}^3\text{)}_N$$

液体・固体燃料 (2.5：水の蒸発潜熱・MJ/kg)

$$H_l = H_h - 2.5 \text{ (発生水分(kg) + 含有水分(kg))} \quad (\text{MJ/kg})$$