

第九章 熱化學

- ◆ 探討化學反應伴隨之熱量變化
- ◆ 反應熱提供生活必需之能量及能源
- ◆ 人體靠食物代謝提供所需之能量
- ◆ 化石燃料提供工業能源及原料

第九章 熱化學

- ◆ 能源曾經蘊藏豐富；但因為大量消耗而逐漸耗竭
- ◆ 要尋找替代能源必需了解能量與化學的關係
- ◆ 燃燒化石燃料會造成空氣污染、溫室效應、酸雨等問題
- ◆ 本章將探討能量的基本概念、能源來源及環境污染

能量的概念

- ◆ 定義：作功或產生熱量的能力
- ◆ 功和熱可以使能量互相轉換
- ◆ 能量有許多不同形式，也可互相轉換
- ◆ 需遵守能量不滅定律：總能量不變

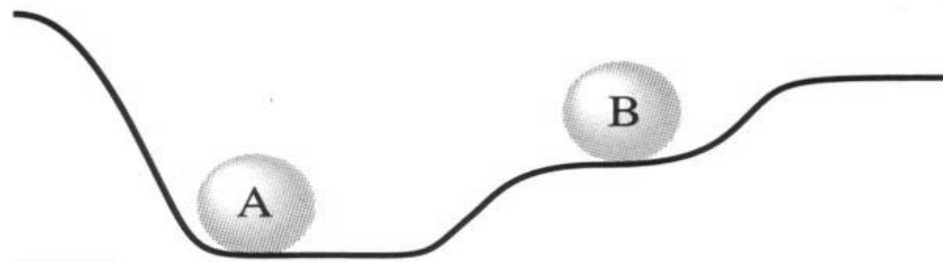
動能和位能

- ◆ 動能：物體運動所具有的能量 $KE = \frac{1}{2}mv^2$
- ◆ 位能：與位置或組成有關；
也和吸引力、排斥力有關
- ◆ 水力發電：水之位能轉換為電能
- ◆ 燃燒汽油釋放能量：反應物與產物之原子核及電子間吸引力不同所致

能量之轉換



(a) 初狀態



(b) 終狀態

最初：A球位置較高，B球在平台

最後：A球在平台，B球位置較最初之A球低

能量之轉換

A球損失的位能必定轉換為其他形式的能量
能量可以互相轉換，但必需遵守能量不減定律
這些能量如何分配？

- A 球滾下斜坡，位能轉為動能；部分動能轉為 B 球之位能，使其位置提高
- 最後 B球之位置此原先 A 球之位置低
- 其餘之能量轉為球和斜坡表面之磨擦熱

熱量與溫度

- ◆ 溫度：分子之平均動能
- ◆ 熱量：溫度不同之二物體間的能量轉移

- ◆ B球因為A球對其作功而獲得位能
- ◆ 功 = 力 × 位移
- ◆ 作功和熱量轉移都是能量轉換的形式

能量之轉換

- ◆ A球滾下斜坡停在底部，損失固定的位能
- ◆ 損失的位能如何分配於功和熱量與路徑有關
- ◆ 若斜坡表面極為粗糙，位能損失將全部變為磨擦熱，沒有作功

A球滾下斜坡極為緩慢，撞擊B球時已無力使其移動

- ◆ 若斜坡表面較光滑，磨擦熱較高，A球對B球所作的功較大，B球的位置就會較高
- ◆ 最後B球的位置不可能比原先A球的位置高
B球獲得的位能不可能超過A球損失的位能

能量之轉換

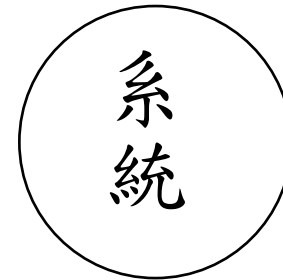
- ◆ 能量變化與路徑無關
- ◆ 功和熱量與路徑有關

- ◆ 狀態函數 (性質)：
只與系統之狀態有關，與路徑無關之性質

- ◆ 能量是狀態函數，功和熱量不是

化學能

- ◆ 上述概念也適用於化學能
- ◆ 系統：探討之對象
- ◆ 環境：系統以外之宇宙



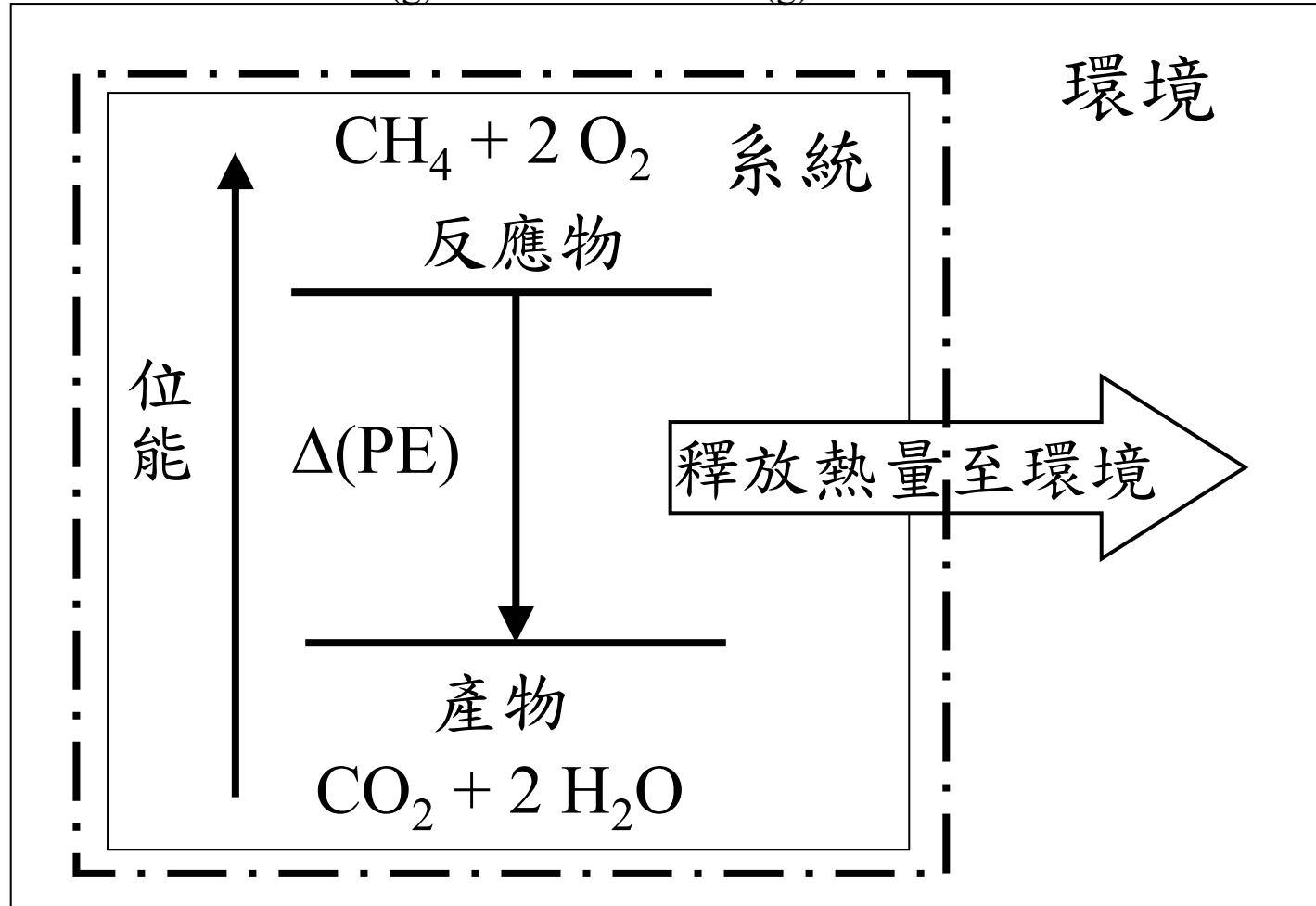
環境

放熱反應

- ◆ $\text{CH}_{4(g)} + 2 \text{O}_{2(g)} \rightarrow \text{CO}_{2(g)} + 2 \text{H}_2\text{O}_{(g)} + \text{熱量}$
- ◆ 熱化學方程式：反應物、產物、狀態、熱量變化
- ◆ 系統：反應物和產物
- ◆ 放熱反應：能量流出系統
- ◆ 放熱反應之能量來自何處？
 - 反應熱：反應物與產物之位能差異
 - 放熱反應：反應物位能高於產物

放熱反應

1 莫耳 $\text{CH}_4(\text{g})$ 和 2 莫耳 $\text{O}_2(\text{g})$ 的位能高於
1 莫耳 $\text{CO}_2(\text{g})$ 和 2 莫耳 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 的位能

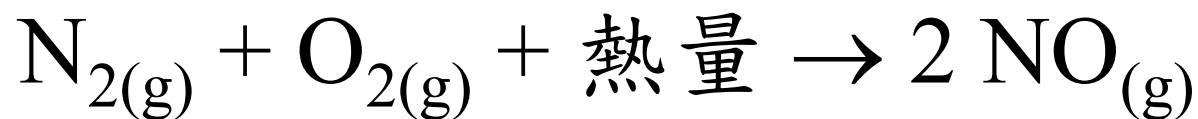


位能的降低 ($\Delta(\text{PE}) < 0$) 變為熱量釋放至環境中

放熱反應

- ◆ 儲存於化學鍵之能量轉為熱能 (分子之動能)
- ◆ 產物之化學鍵 (平均) 較反應物強
- ◆ 產物化學鍵形成所釋放的能量
大於反應物化學鍵斷裂所需的能量

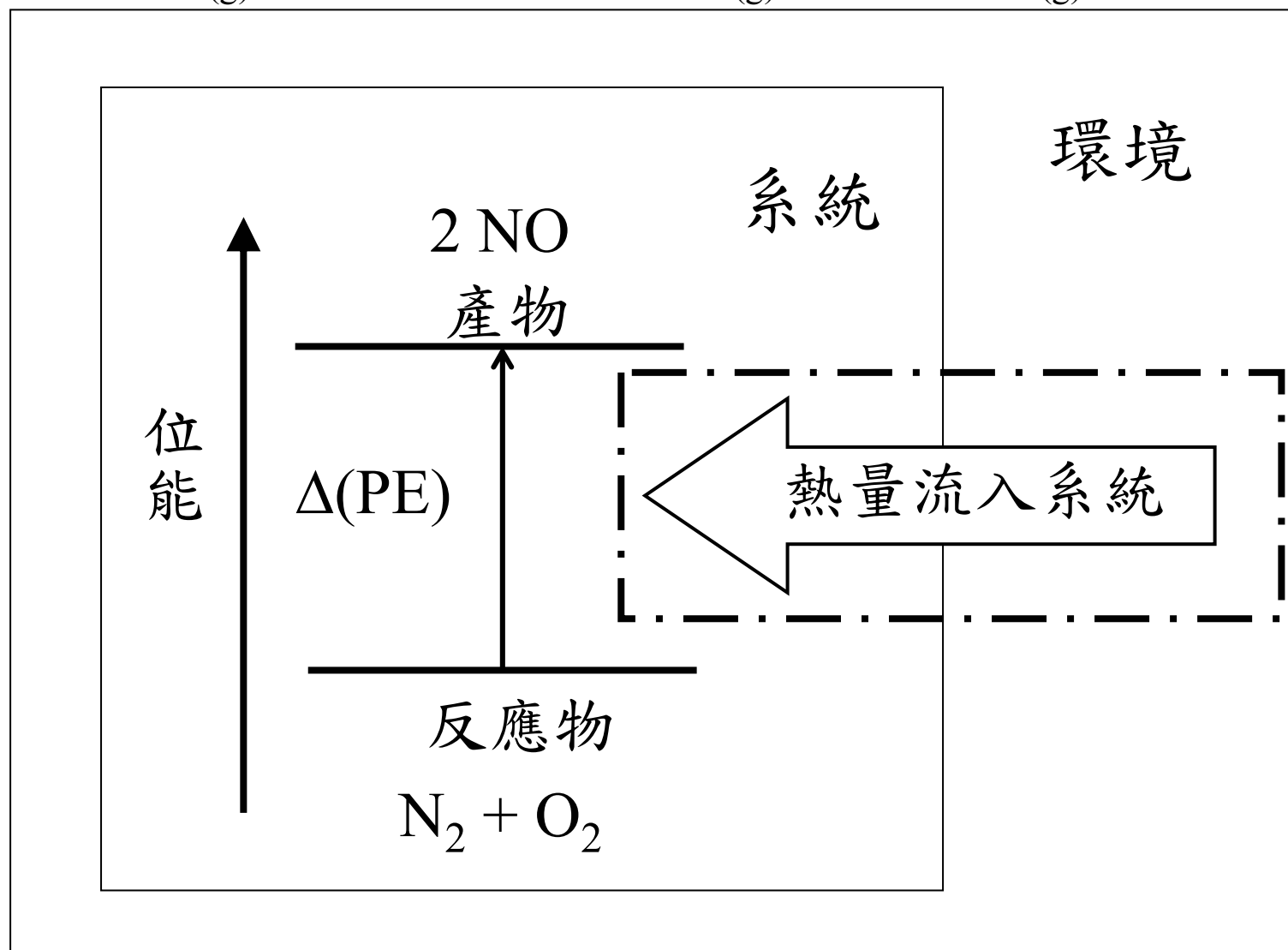
吸熱反應



- ◆ 吸熱反應：能量流入系統
- ◆ 產物位能高於反應物 ($\Delta(\text{PE}) > 0$)

吸熱反應

2莫耳NO_(g) 的位能高於1莫耳N_{2(g)} 和1莫耳O_{2(g)} 的位能



吸熱反應

- ◆ $\text{N}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} + \text{熱量} \rightarrow 2 \text{NO}_{(g)}$
- ◆ 產物之化學鍵較反應物弱
- ◆ 斷裂反應物化學鍵所需的能量
大於形成產物化學鍵所釋放的能量

熱力學：探討能量及其轉換

熱力學第一定律：

- ◆ 能量不滅定律：宇宙總能量不變
- ◆ 各種形式的能量可以互相轉換
 能量既不消失也不能創造

熱力學：探討能量及其轉換

內能 E ：系統所有粒子之動能和位能總和

◆ 功 w 和熱量 q 都能改變內能

◆ 熱力學第一定律

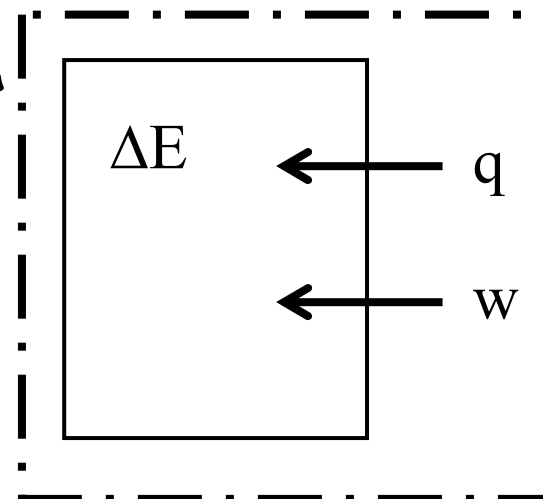
$$\Delta E = q + w$$

符號 (系統之觀點)：

◆ 正：系統能量增加 負：系統能量減少

◆ 正值：

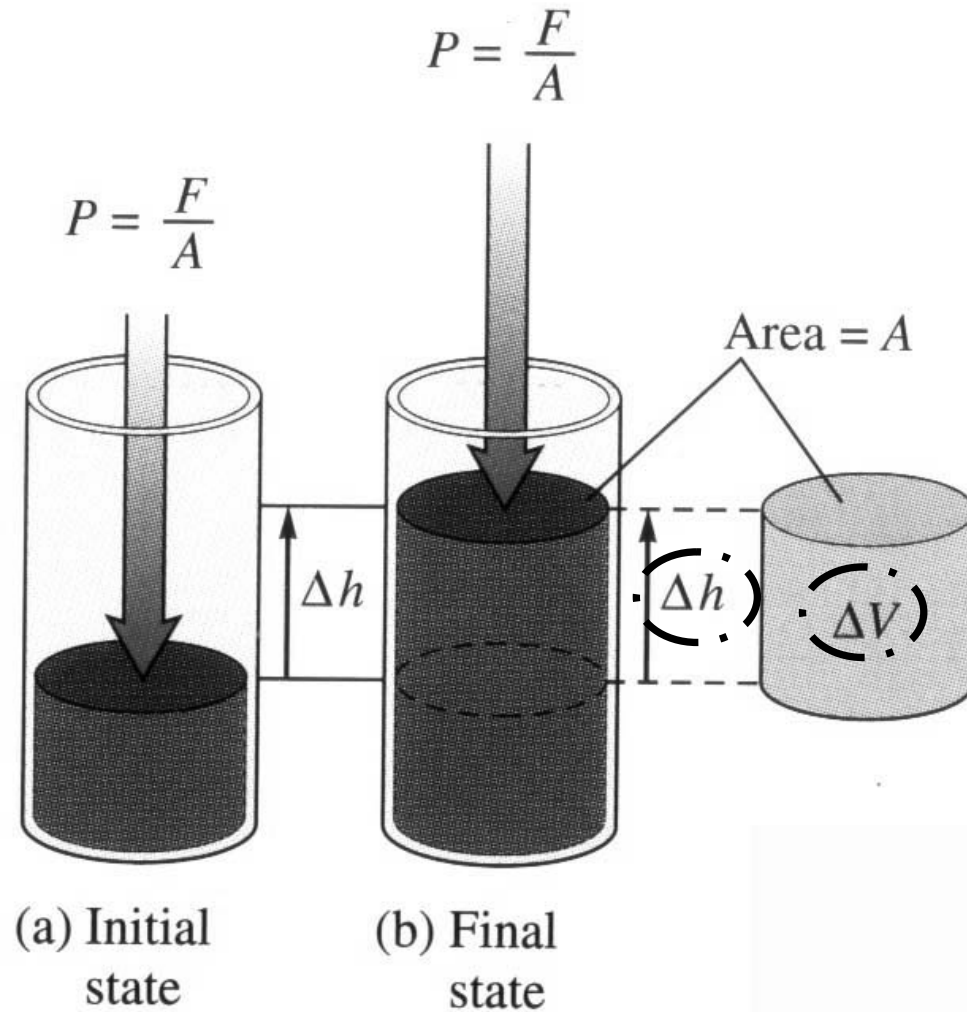
內能增加；熱量流入系統；環境對系統作功



熱力學：探討能量及其轉換

- ◆ PV功：氣體擴張或壓縮所作的功
- ◆ 汽車引擎：燃燒汽油放出熱量使氣體擴張並推動活塞，進而轉動輪軸使汽車前進

圓柱體容器內之氣體借由擴張或壓縮活塞而作功



圓柱體作功

- ◆ 功 $w = -F \cdot \Delta h = -(P_{\text{ex}}A) \cdot \Delta h$
 $= -P_{\text{ex}} \cdot \Delta V$ P_{ex} : 外壓

$$P_{\text{ex}} = F/A; \Delta V = A \cdot \Delta h$$

- ◆ 正功：環境對系統作功；

負功：系統對環境作功

- ◆ 擴張： $\Delta V > 0; w < 0$

壓縮： $\Delta V < 0; w > 0$

功

以 $1.3 \times 10^8 \text{ J}$ 的熱量加熱氣球使體積擴張 $5.0 \times 10^5 \text{ L}$ 需作功

$$\begin{aligned} \diamond w &= -P_{\text{ex}} \cdot \Delta V = -1 \text{ atm} \times 5.0 \times 10^5 \text{ L} \\ &= -5.1 \times 10^7 \text{ J} \end{aligned}$$

$$1 \text{ L} \cdot \text{atm} = 101.3 \text{ J}$$

$$\begin{aligned} \diamond q &= 1.3 \times 10^8 \text{ J} \\ \Delta E &= q + w = 8 \times 10^7 \text{ J} \end{aligned}$$

焓 (enthalpy)

- ◆ 焓 (enthalpy) : $H = E + PV$

E 、 P 、 V 、 H : 狀態函數

- ◆ 考慮定壓及只有PV功的過程

$$\Delta E = q_p + w \quad \text{第一定律；定壓}$$

$$\Delta E = q_p - P \Delta V \quad \text{只有PV功}$$

$$\Delta H = (E + PV) = \Delta E + P \Delta V \quad \text{定壓}$$

- ◆ $q_p = \Delta E + P \Delta V = \Delta H$

- ◆ 焓之改變 = 熱量之轉移

反應熱

- ◆ 反應熱 \equiv 焓之改變 定壓及只有PV功
- ◆ $\Delta H = H_{\text{產物}} - H_{\text{反應物}}$
- ◆ 吸熱反應：產物之焓大於反應物； $\Delta H > 0$
放熱反應：產物之焓小於反應物； $\Delta H < 0$

理想氣體之熱力學

- ◆ 高溫、低壓趨近理想氣體：
 $PV = nRT$ ； $(KE)_{\text{ave}} = 3RT/2$
- ◆ 溫度改變 ΔT 所需的能量(熱量) = $\frac{3}{2}nR\Delta T$
- ◆ 定容莫耳熱含量 C_v ：
每莫耳物質，溫度升高 1 K (1°C) 所需的熱量
- ◆ $C_v = 3R/2$ 單原子氣體
- ◆ 定容加熱理想氣體： $\Delta E = q_v = nC_v \Delta T$

理想氣體之熱力學

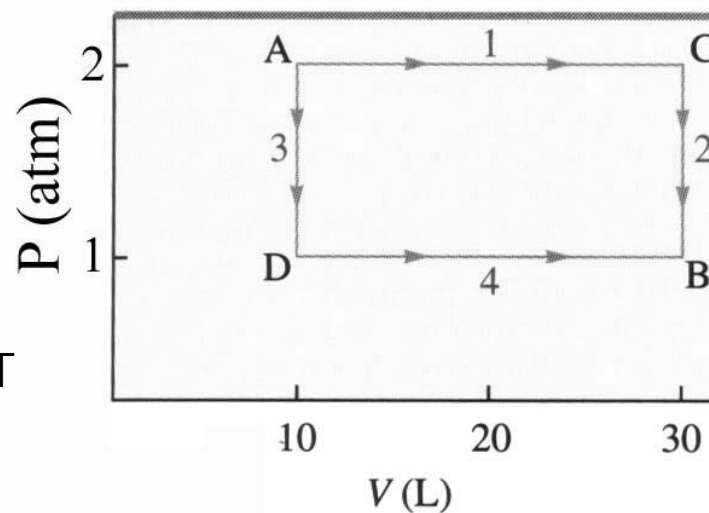
- ◆ 定壓： $P \Delta V = nR \Delta T$
- ◆ $q_p = \Delta E + P \Delta V = \frac{3}{2}nR\Delta T + nR \Delta T = \frac{5}{2}nR\Delta T$
 $= nC_p \Delta T$
- ◆ 定壓莫耳熱含量 C_p ： $C_p = \frac{5}{2}R$ 單原子氣體
- ◆ $C_p = C_v + R$ 適用於理想氣體
- ◆ 定壓加熱理想氣體： $\Delta H = q_p = nC_p \Delta T$

理想氣體之熱力學

- ◆ 理想氣體：E、H 只和溫度有關
- ◆ $\Delta E = nC_v \Delta T$ ； $\Delta H = nC_p \Delta T$ 與路徑無關
- ◆ $q = n C \Delta T$ $C = C_v$ or C_p ；視路徑而定

單原子理想氣體

計算 q 、 w 、 ΔE 、 ΔH



步驟 1 (定壓)

$$P\Delta V = R\Delta T$$

$$w = -P\Delta V = 40 \text{ L atm} = -4.05 \text{ kJ}$$

$$\Delta E = C_V \Delta T = (3R/2)(P\Delta V/R) = 6.08 \text{ kJ}$$

$$\Delta H = q = \Delta E - w = 10.1 \text{ kJ}$$

步驟 2 (定容)

$$W = 0 \quad \Delta PV = R\Delta T = -30 \text{ Latm} = -3.04 \text{ kJ}$$

$$q = \Delta E = (3R/2)(\Delta PV/R) = -4.56 \text{ kJ}$$

$$\Delta H = \Delta E + \Delta PV = -7.60 \text{ kJ}$$

單原子理想氣體

步驟 3 (定容)

$$W = 0; q = \Delta E = -1.52 \text{ kJ}; \Delta H = -2.53 \text{ kJ}$$

步驟 4 (定壓)

$$W = -2.03 \text{ kJ}; q = \Delta H = 5.08 \text{ kJ}; \Delta E = 3.05 \text{ kJ}$$

路徑 1、2 (A→C→B)

$$q = 5.5 \text{ kJ}; w = -4.05 \text{ kJ}; \Delta E = 1.5 \text{ kJ}; \Delta H = 2.5 \text{ kJ}$$

路徑 3、4 (A→D→B)

$$q = 3.6 \text{ kJ}; w = -2.03 \text{ kJ}; \Delta E = 1.5 \text{ kJ}; \Delta H = 2.5 \text{ kJ}$$

多原子氣體之熱含量

- ◆ 單原子氣體只有動能： $C_v = 3R/2$
- ◆ 多原子氣體除動能外，還有振動、轉動的能量： $C_v > 3R/2$
- ◆ 加熱氣體：溫度增加與動能增加成正比
- ◆ 增加振動、轉動能所需的熱量對溫度增加沒有貢獻 $\therefore C_v > 3R/2$
- ◆ 分子所含原子數目愈多， C_v 愈大

常見氣體之熱含量 (298 K)

氣體	C_v (JK ⁻¹ ·mol ⁻¹)	C_p (JK ⁻¹ ·mol ⁻¹)	$C_p - C_v$
He, Ne, Ar	12.47	20.80	8.33
H ₂	20.54	28.86	8.32
N ₂	20.71	29.03	8.32
CO ₂	28.95	37.27	8.32
C ₂ H ₆	44.60	52.92	8.32

- ◆ $C_p > C_v$ 兩者之差為氣體定壓擴張所需的功
- ◆ $w = -P \cdot \Delta V = -nR \Delta T \quad \therefore C_p = C_v + R$ (理想氣體)

卡計法

- ◆ 卡計法 Calorimetry :
由卡計溫度變化測定物體吸收或釋放的熱量
- ◆ 卡計熱含量 : $C = \frac{q}{\Delta T}$ $C \propto m$
- ◆ 比熱 s : $\text{J K}^{-1}\text{g}^{-1}$
莫耳熱含量 C_m : $\text{J K}^{-1}\text{mol}^{-1}$
 $C_m = s \times \text{分(原)子量}$
- ◆ $q = C \Delta T = m s \Delta T = n C_m \Delta T$

常見物質之比熱

物質	比熱(J K ⁻¹ g ⁻¹)
水	4.18
冰	2.06
鋁	0.89
鐵	0.45
銅	0.38
金	0.13
石墨	0.71

咖啡杯卡計 (定壓)

- ◆ 溶液反應 ($\Delta V = 0$; $w = 0$):

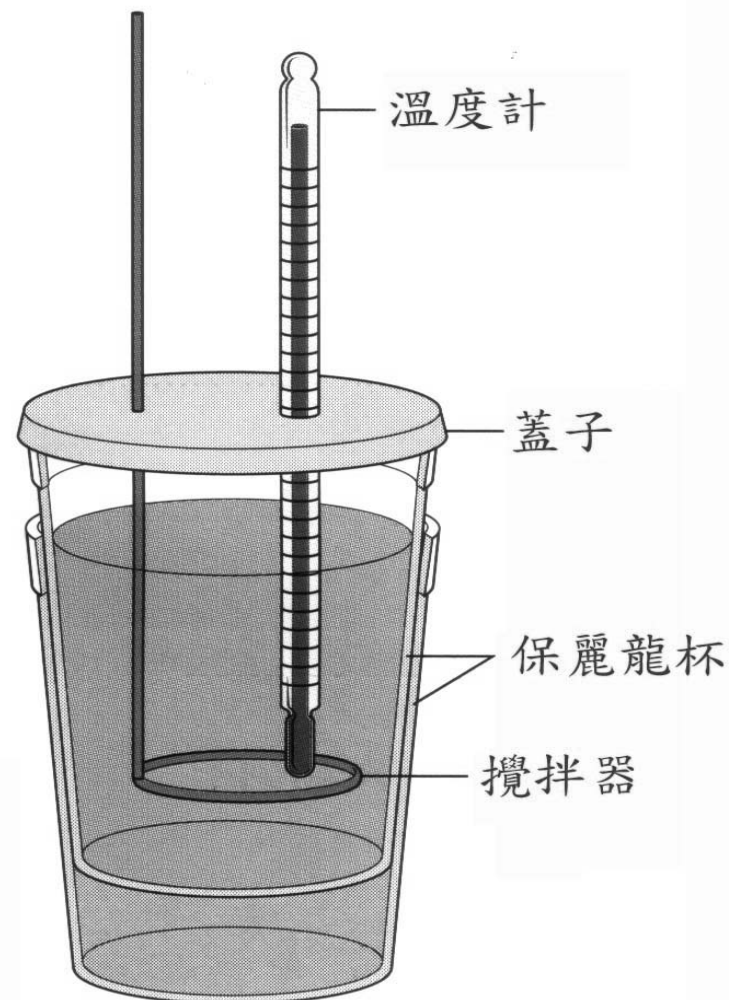
$$\Delta E = q_p + w = \Delta H$$

- ◆ 理想氣體反應

$$w = -P\Delta V = -\Delta n RT$$

$$\Delta E = \Delta H - w$$

$$= \Delta H - \Delta n RT$$



酸鹼中和所釋放的熱量

- ◆ 混合50 ml, 1.0 M HCl及50 ml, 1.0 M NaOH
- ◆ 溫度：25°C → 31.9°C
- ◆ 酸鹼中和所釋放的熱量：
(密度：1 g/ml； 比熱：4.18 J K⁻¹g⁻¹)

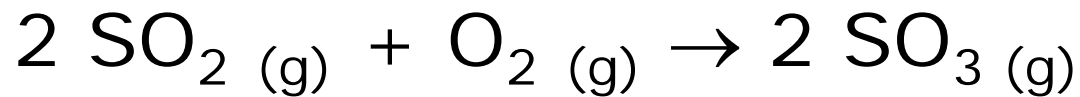
$$q = m s \Delta T = 100 \times 4.18 \times (31.9 - 25) \\ = 2.9 \times 10^3 \text{ J} = 2.9 \text{ kJ}$$



$$\text{H}^+ \text{和} \text{OH}^- \text{之莫耳數} : 1.0 \text{ M} \times 0.05 \text{ L} = 0.05$$

$$\text{莫耳中和熱} = 2.9 \text{ kJ} / 0.05 \text{ mol} = 58 \text{ kJ/mol}$$

範例

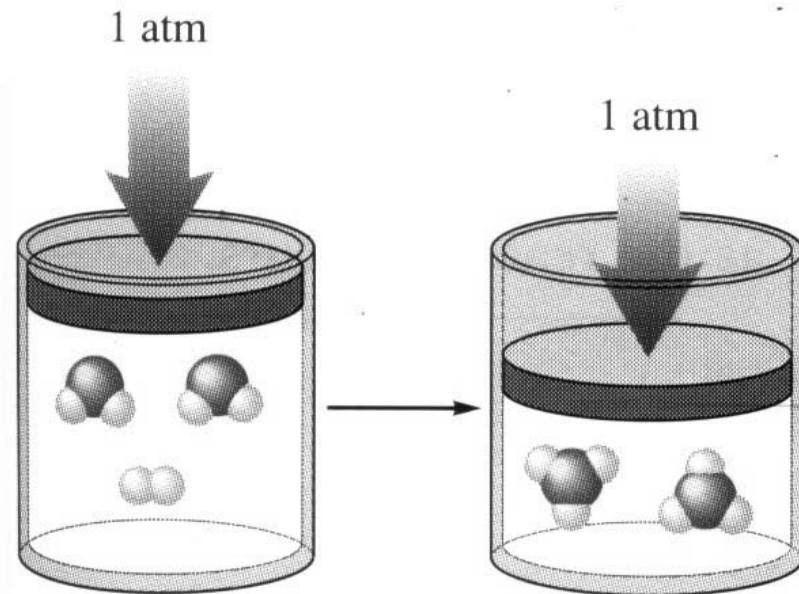


2 mol SO_2 和 1 mol O_2 在 1 atm, 25°C 反應
生成 2 mol SO_3 並釋出 198 kJ 的熱量

$$\Delta H = q_p = -198 \text{ kJ}$$

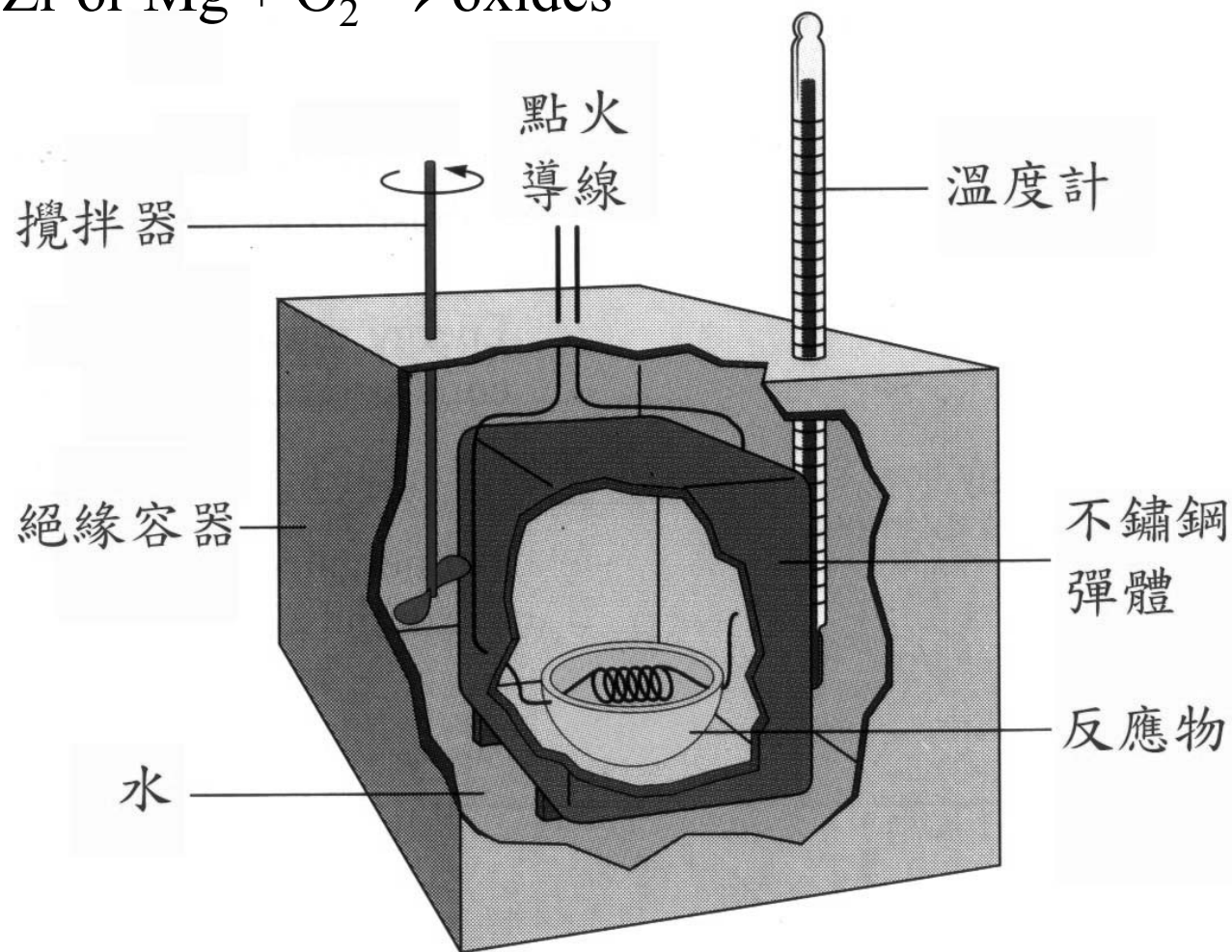
$$\begin{aligned} w &= -P\Delta V = -\Delta nRT \\ &= 8.314 \times 298.15 = 2000 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta H - w = \Delta H + \Delta nRT \\ &= -198 + 2 = -196 \text{ kJ} \end{aligned}$$



彈式卡計 (定容)

- ◆ $\Delta E = q_v$ $q_v = ms\Delta T$
- ◆ 閃光燈： $\text{Zr or Mg} + \text{O}_2 \rightarrow \text{oxides}$



卡計計算

- ◆ 完全燃燒0.5269 g 辛烷 (C₈H₁₈ ; 分子量114.2)
- ◆ 卡計熱含量 : 11.3 kJ/°C ; 溫度上升 : 2.25°C
- ◆ 辛烷莫耳燃燒熱 :

$$\Delta E = q_v = - \frac{11.3 \times 2.25}{0.5269 / 114.2}$$

$$= - 5.50 \times 10^5 \text{ kJ/mol}$$

$$= \Delta H$$

Hess 定律

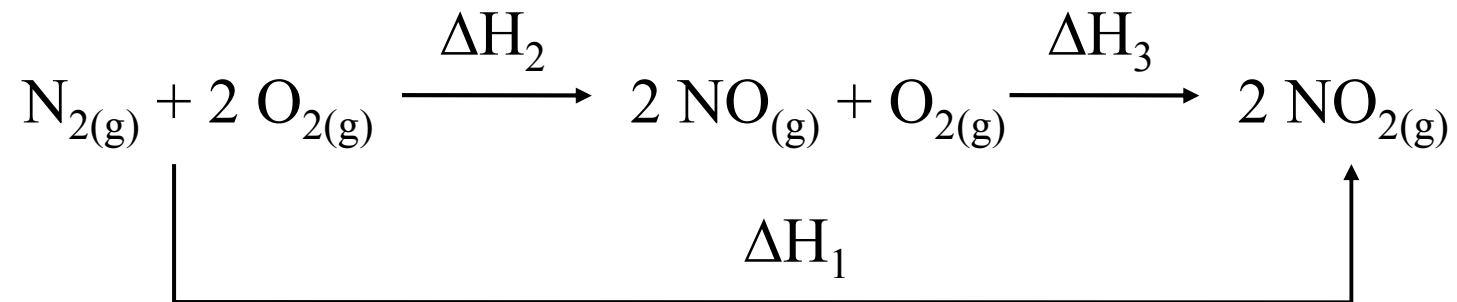
◆ H是狀態函數， ΔH 與路徑無關

◆ ΔH 之特性：

逆反應符號相反

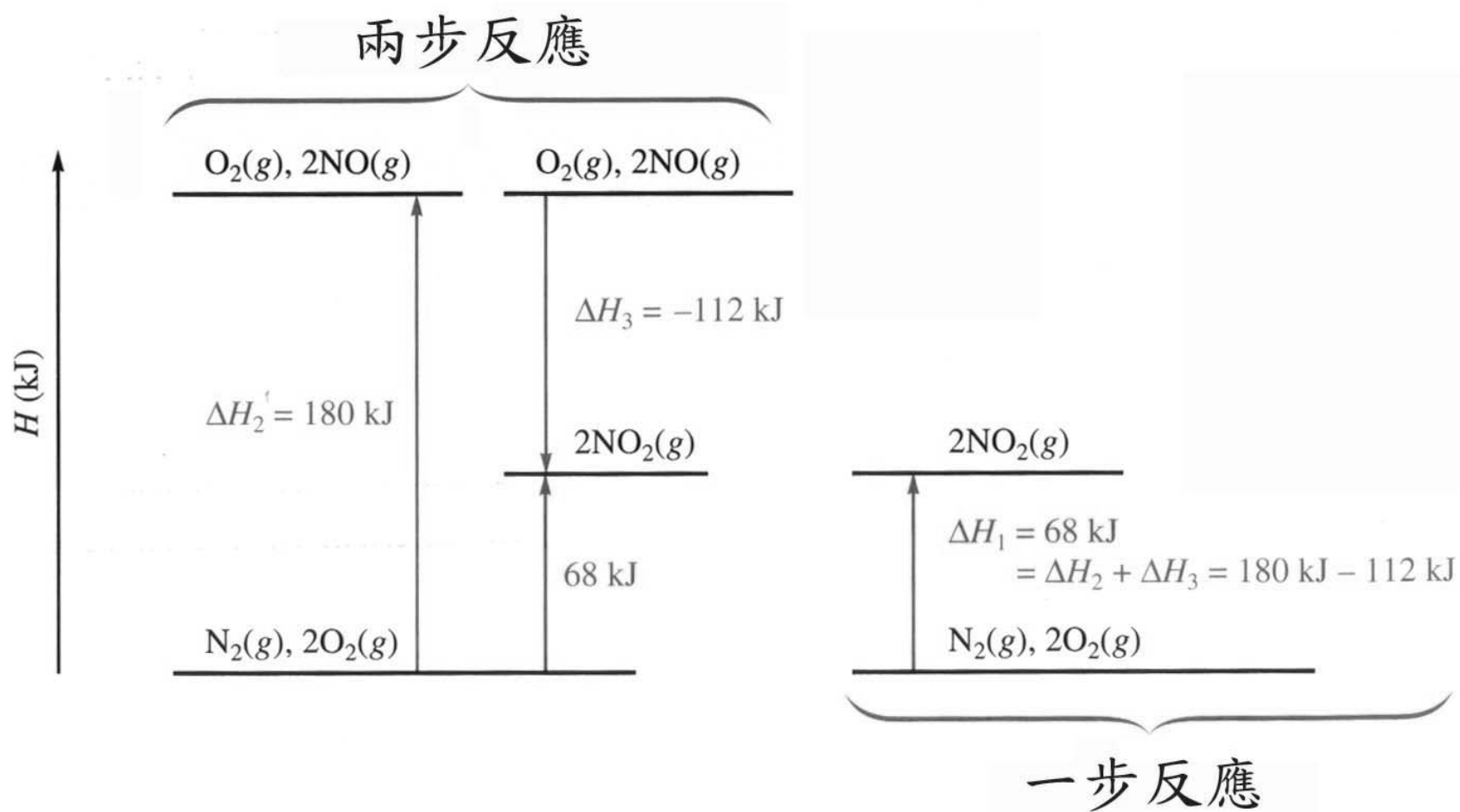
平衡反應式之係數乘一整數，

ΔH 亦需乘以該整數

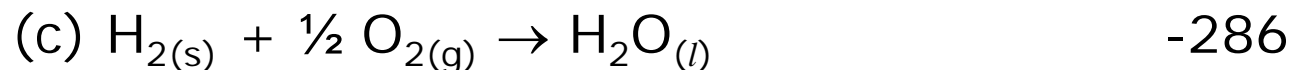
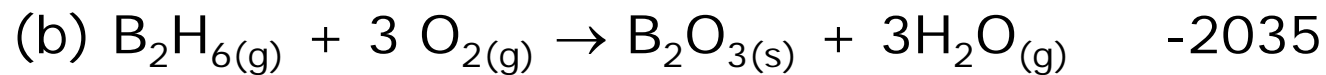
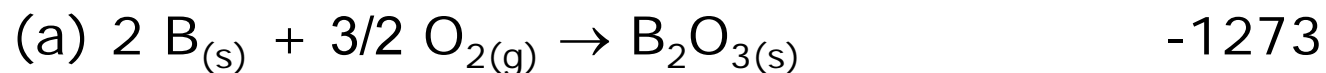
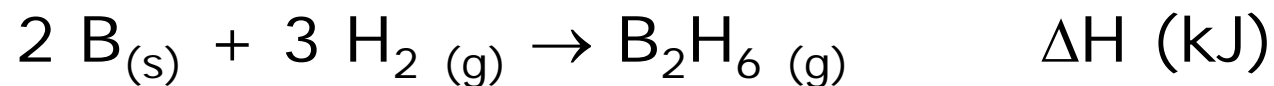


$$\Delta H_1 = \Delta H_2 + \Delta H_3$$

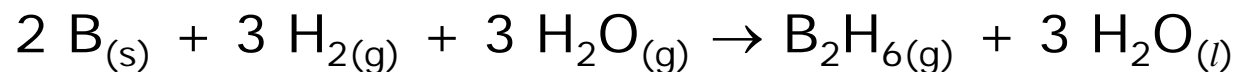
ΔH 反應熱



Hess 定律的計算



$$(a) - (b) + 3 (c)$$



$$\Delta H = (a) - (b) + 3 (c) + 3 (d) = 36 \text{ kJ}$$

標準形成熱 ΔH_f°

- 有些反應無法經由卡計測其反應熱
石墨 \rightarrow 鑽石
- 利用標準形成熱可以計算反應熱
- 成份元素 \rightarrow 1 莫耳化合物之反應熱
所有物質都在標準狀態
- 只能測定熱力學性質之變化，
需有共同之參考狀態

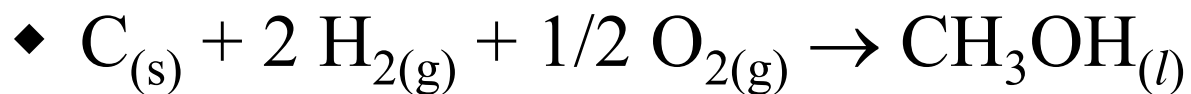
標準狀態

- ◆ 標準狀態：

氣體：1 atm

溶液：1 M (at 1 atm) 純液體或固體

元素：1 atm (25°C) 時，最穩定的狀態



$$\Delta H_f^\circ = -239 \text{ kJ/mol}$$

標準狀態：

碳：固態石墨； 氫、氧：氣態雙原子分子；

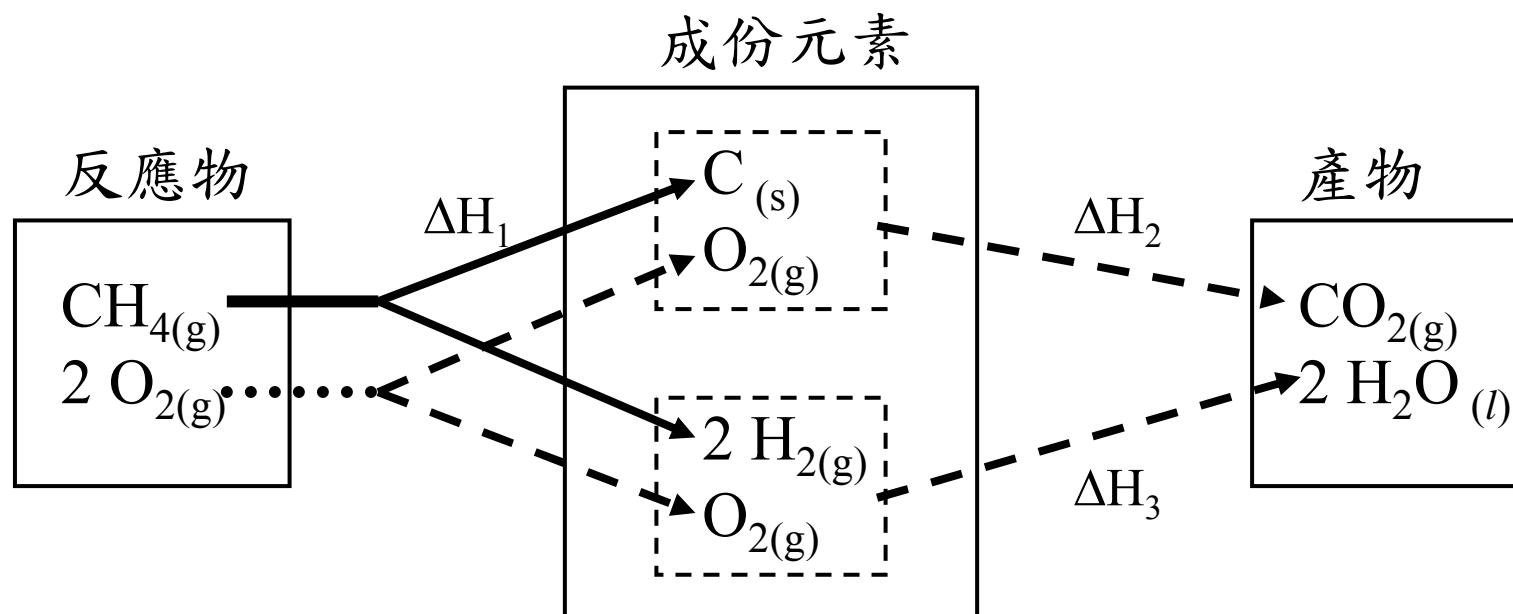
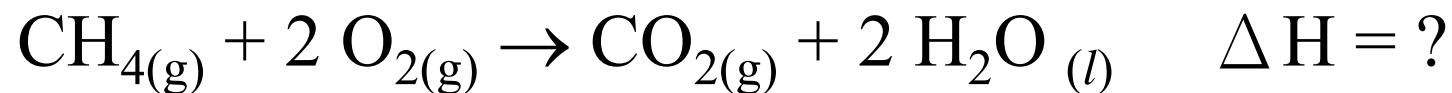
甲醇：液態

常見物質之標準莫耳形成熱 (25°C)

化合物	ΔH_f° (kJ/mol)
○ $\text{NH}_3(g)$	- 46
○ $\text{H}_2\text{O}(l)$	- 286
○ $\text{CO}_2(g)$	- 394
○ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(l)$	- 239
○ $\text{C}_8\text{H}_{18}(l)$	- 269
○ $\text{Fe}_2\text{O}_3(s)$	- 826
○ $\text{Al}_2\text{O}_3(s)$	- 1676

暖暖包

- 鐵粉、活性碳、氯化鈉、木屑、沸石粉
- 潮濕各成份物質
- 包在可通透氧氣之紙內
- 鐵生鏽放熱使暖暖包變熱
- $4 \text{ Fe} + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
 $\Delta H = - 1652 \text{ kJ}$
- 鐵粉生鏽速率較快
- 產生熱量可持續 6 小時



$$\Delta H_1 = -\Delta H_f(\text{CH}_4) \quad \Delta H_2 = \Delta H_f(\text{CO}_2) \quad \Delta H_3 = 2 \Delta H_f(\text{H}_2\text{O})$$

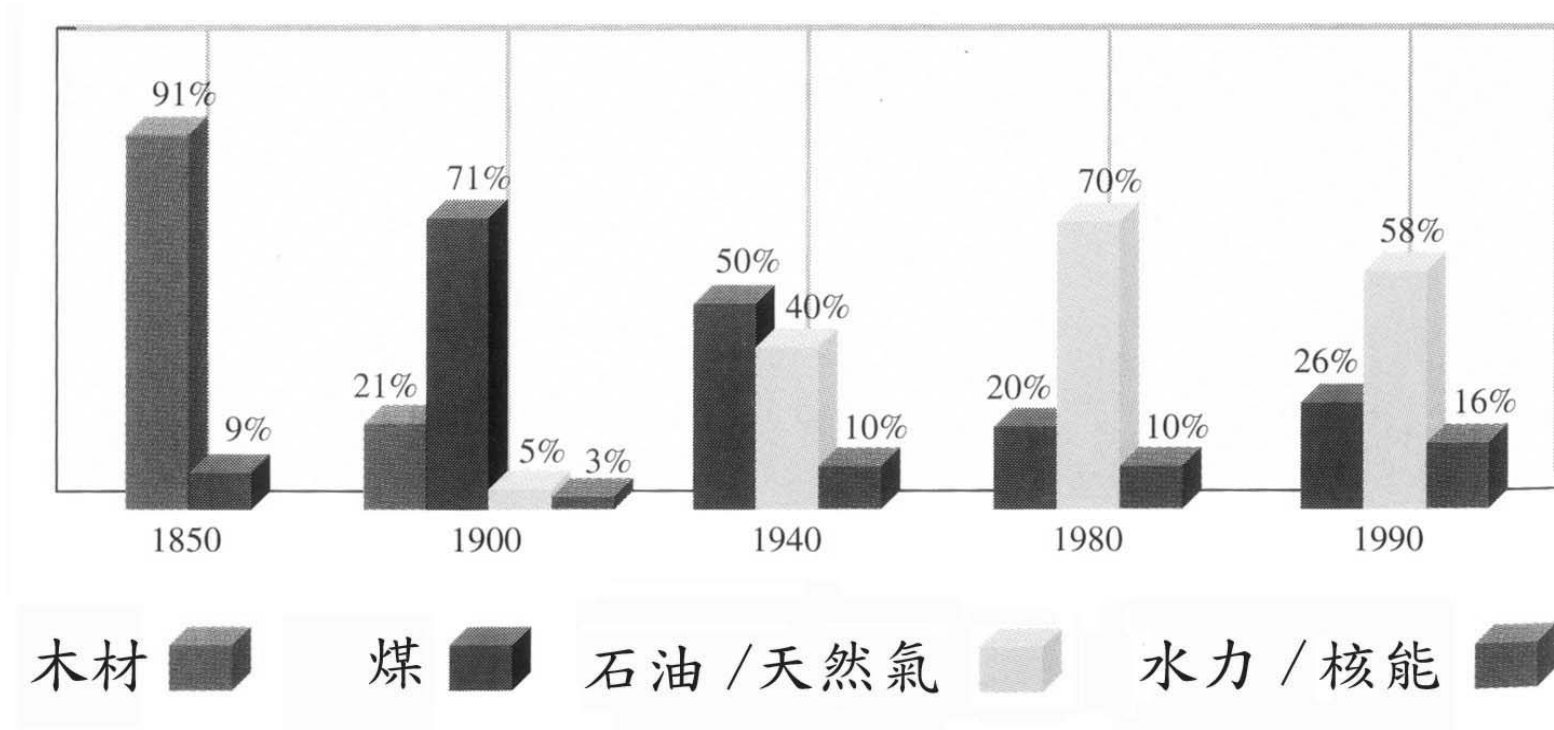
$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 = -891 \text{ kJ/mol}$$

計算反應熱：

$$\Delta H^\circ(\text{反應}) = \sum \Delta H_f^\circ(\text{產物}) - \sum \Delta H_f^\circ(\text{反應物})$$

目前之能源

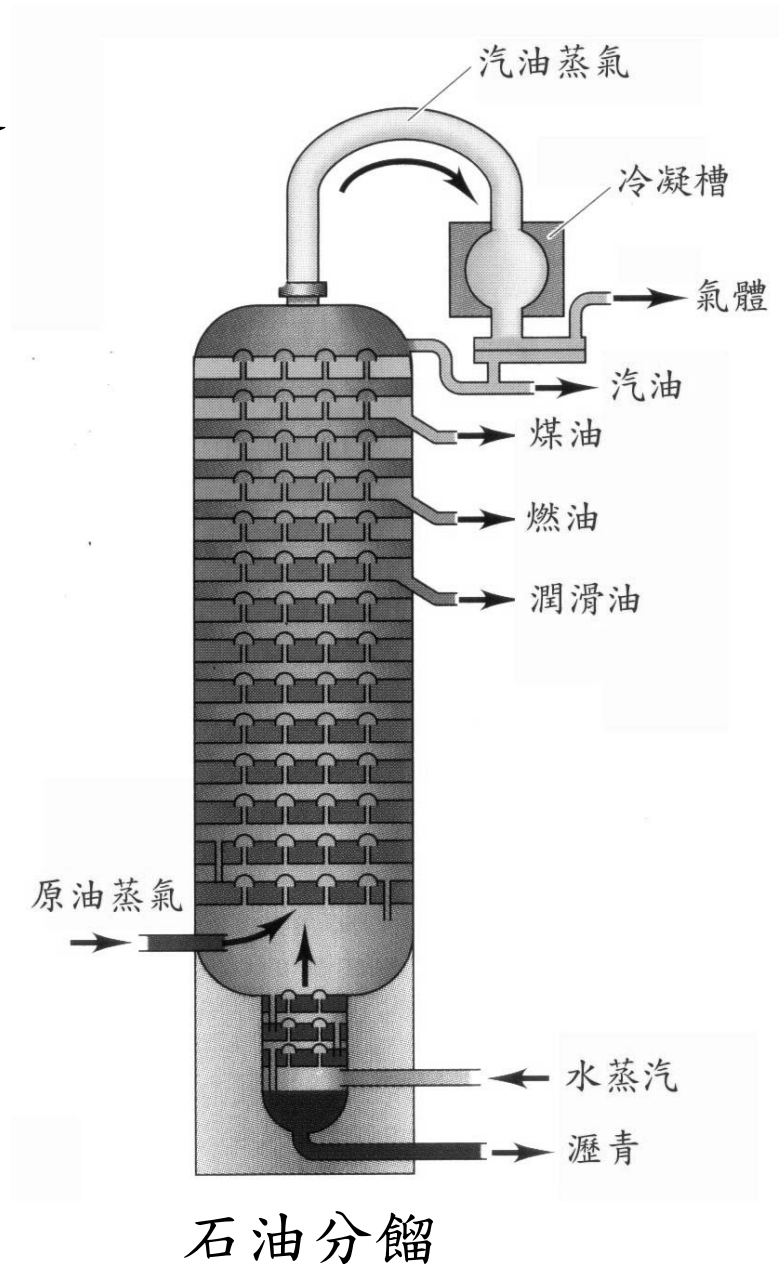
- ◆ 木材及化石燃料 (煤、石油、天然氣) 所蘊含之能量最初都是來自太陽
- ◆ 植物靠光合作用儲存太陽能



化石燃料

- ◆ 石油、天然氣：5億年前之海洋生物所形成
- ◆ 石油：碳氫化合物 (hydrocarbons)
- ◆ 天然氣：主要為甲烷；也含乙烷、丙烷、丁烷
- ◆ 石油成份及用途

碳數	主要用途
5-10	汽油
10-15	煤油、噴射機燃料
15-25	柴油、燃油、潤滑油
> 25	瀝青



常見碳氫化合物之名稱及分子式

中文	英文	分子式
○ 甲烷	methane	CH_4
○ 乙烷	ethane	C_2H_6
○ 丙烷	propane	C_3H_8
○ 丁烷	butane	C_4H_{10}
○ 戊烷	pentane	C_5H_{12}
○ 己烷	hexane	C_6H_{14}
○ 庚烷	heptane	C_7H_{16}
○ 辛烷	octane	C_8H_{18}

石油的使用

- ◆ 工業革命，開始了石油年代 (燈油)
- ◆ 1859年，Edwin Drake在賓州鑿出第一口油井
提煉出煤油 (C_{10} - C_{18}) 作為燈用油；
汽油 (C_5 - C_{10}) 則被丟棄
- ◆ 電燈發明使煤油燈沒落；
- ◆ 引擎發明使汽油需求量大增
- ◆ 需提高汽油產率
- ◆ William Burton 發明石油裂解法：
高碳數 → 低碳數；可以提高汽油產率
- ◆ 煤油加熱至約 700°C 變為碳數較少的汽油成份

石油的使用

- ◆ 爆震 (knocking)：汽油燃燒不均造成噪音及引擎損害
60年代汽油常添加3 克四乙基鉛/加侖作為抗爆震劑
四乙基鉛會損壞催化轉換器並造成鉛中毒，已經禁用
- ◆ 煤：植物埋在地底，經長期高溫、高壓而成
- ◆ 植物含纖維素($(\text{CH}_2\text{O})_n$; $n \sim 20000$)；
長期埋在地底，氫、氧含量逐漸降低
- ◆ 煤分為泥煤、褐煤、煙煤、無煙煤四種
- ◆ 含碳比例愈高，單位質量燃燒熱 (燃值) 愈大

煤

各種煤之重量百分比組成及燃值

種類	C	H	O	N	S	燃值(kJ/g)
泥煤	71	4	23	1	1	14-16
褐煤	77	5	16	1	1	18-23
煙煤	80	6	8	1	5	23-35
無煙煤	92	3	3	1	1	30-35

煤

- ◆ 煤是美國重要且充裕的能源 (~ 30%)
- ◆ 挖掘煤礦較昂貴且危險；
露天開採會破壞自然景觀
- ◆ 燃燒煤會造成污染問題 (酸雨、溫室效應)
- ◆ 新能源：經濟效益、氣候因素、供應問題
太陽能、核能、生物能 (植物)、合成能源

太陽能逐漸開發：暖氣、發電、汽車

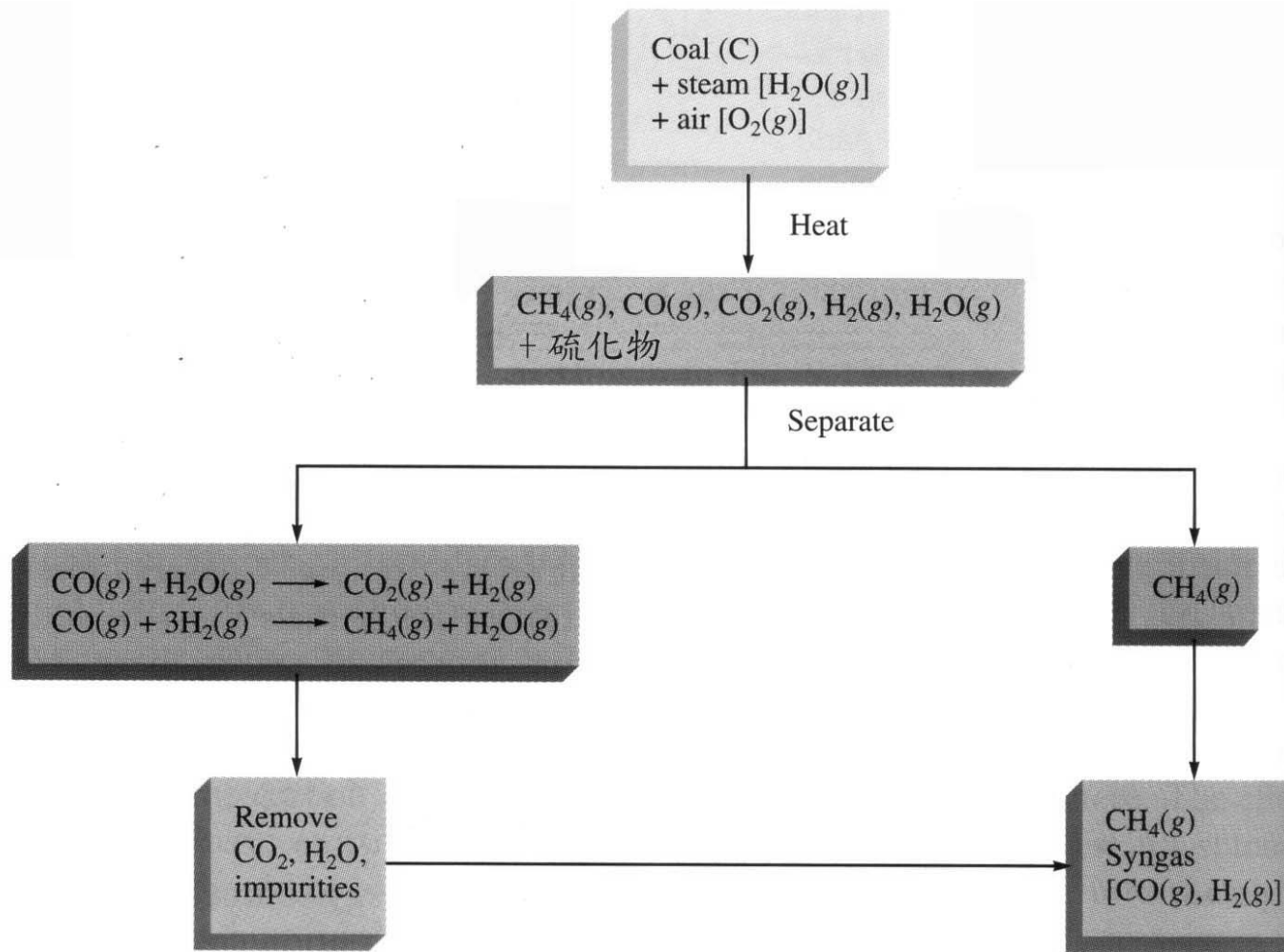


台大太陽能車

煤轉化

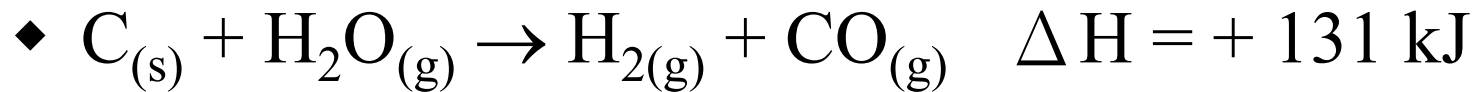
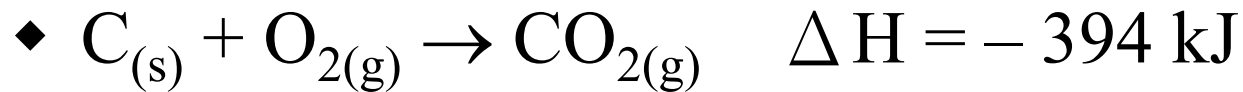
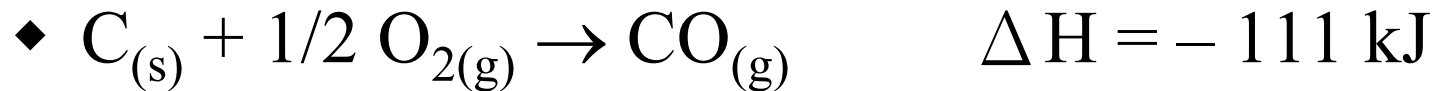
- ◆ 煤轉化：成為較有效率之燃料、易於運輸
- ◆ 用煤製造氣體燃料：
高溫斷裂煤之C-C鍵，形成C-O及C-H鍵
- ◆ 煤與水蒸氣、空氣一齊加熱；氣體產物分離
可得甲烷和水煤氣(CO、H₂)
- ◆ 三種氣體燃燒都可釋出熱量

煤製造氣體燃料



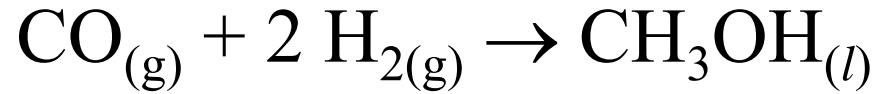
煤的處理

- ◆ 煤處理過程中，有些反應放熱，有些吸熱
適當調整煤、空氣和水蒸氣的比例，可維持一定溫度，不需補充能量



煤的應用

- ◆ 水煤氣可作為燃料或原料



- ◆ 甲醇可作為人造纖維、塑膠原料及燃料
(代替汽油)
- ◆ 南非有一半的汽油用甲醇代替

煤的應用

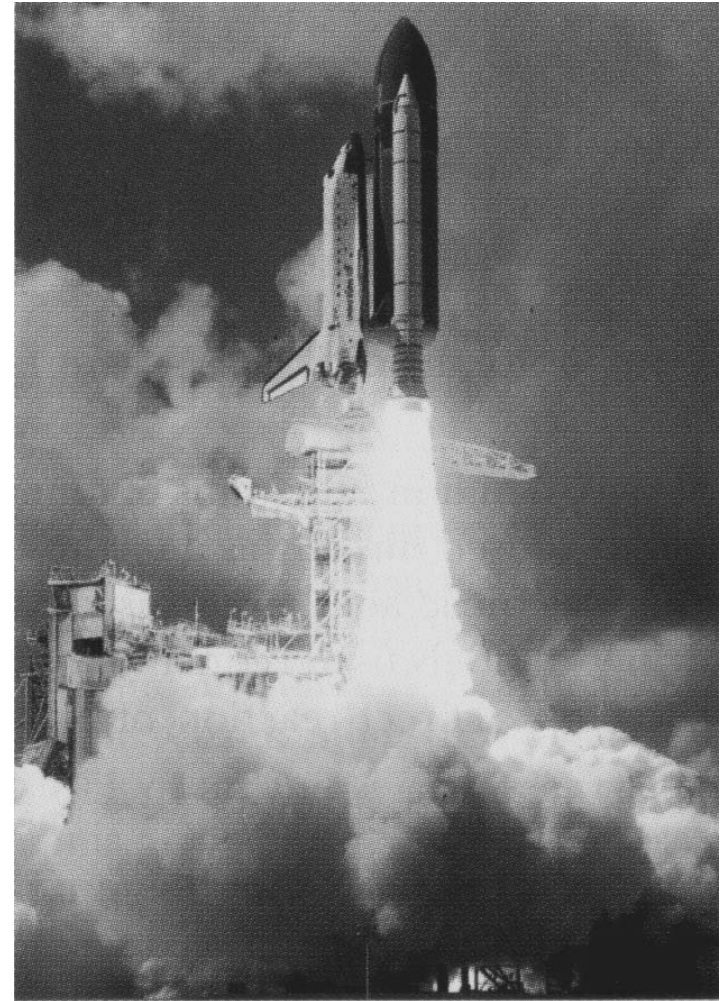
- ◆ 煤泥 (coal slurry)：另一種新用法
- ◆ 泥狀物：固體懸浮在液體中
- ◆ 將煤磨成粉再與水混合
- ◆ 處理及儲存方式、燃燒情形都與來自石油之燃油類似
- ◆ 可作為火力發電燃料，但耗費水資源較大

氫氣

◆ 氫氣：

$$\Delta H_c^\circ = -286 \text{ kJ/mol}$$

$\Delta H_c^\circ / \text{g}$ 為天然氣之2.5倍



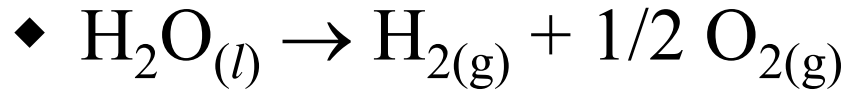
氫氣是太空梭之燃料

氫氣的應用

- ◆ 乾淨能源：唯一產物是水
- ◆ 需考量製造、儲存及運輸之成本
- ◆ 氫在自然界含量豐富，但極少以元素態存在
- ◆ 目前氫氣主要來源是用水蒸氣處理甲烷而得
- ◆ $\text{CH}_{4(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow 3 \text{H}_{2(g)} + \text{CO}_{(g)}$
 $\Delta H^\circ = 206 \text{ kJ/mol}$
- ◆ 高度吸熱；經濟效益低
- ◆ 直接燃燒甲烷較為經濟

氫氣的來源

- ◆ 水提供氫之豐富來源



$$\Delta H^\circ = 286 \text{ kJ/mol}$$

- ◆ 高度吸熱；經濟效益低

- ◆ 分解水的方式：

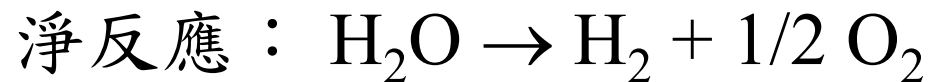
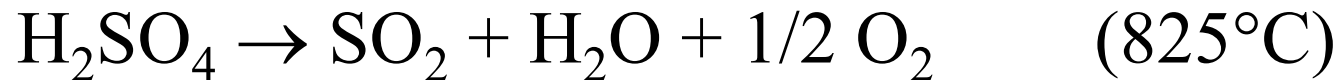
電解、熱分解、化學分解、生物分解

- ◆ 電解：成本太高；需開發充足及低廉之電力

氫氣的來源

- ◆ 熱分解：維持幾千度高溫成本很高 (即使有合適之熱源及容器)

- ◆ 化學分解：



- ◆ HI當催化劑；最高溫825°C；用核反應爐當熱源
- ◆ 需降低反應溫度直到可利用太陽能

氫氣的應用

- ◆ 生物分解：
- ◆ 光合作用： $\text{水} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{葡萄糖} + \text{氧}$
- ◆ 修飾光合作用過程使植物能夠利用水製造氫氣
- ◆ 在某些條件下，植物確實能夠製造氫氣，但產率仍太低

儲存及運輸會遭遇的問題

- ◆ 無法用金屬管線輸送高壓氫氣：
氫在金屬表面會分解成氫原子；氫原子極小，可滲入金屬內部，造成金屬結構改變而脆弱。
- ◆ 單位體積產生的能量較少 (約為甲烷之1/3)
要提供足夠的氫氣供汽車使用需極大的儲存槽
- ◆ 液態氫氣(沸點20 K)：
需有高度絕熱且能耐高壓之容器；昂貴且危險(易爆炸)

燃料體積的比較

- ◆ 密度：液態氫 0.071 g/mL；氫氣 0.0824 g/L
(1 atm, 25°C)；汽油 0.74 g/mL

- ◆ 假設氫氣單位質量之燃燒熱為汽油之3倍

- ◆ 相當於60 公升汽油之液態氫體積：

$$60 \text{ L} \times \frac{0.74}{0.071} \times \frac{1}{3} = 210 \text{ L}$$

- ◆ 所需氫氣體積：

$$60 \text{ L} \times \frac{0.74 \times 10^3}{0.0824} \times \frac{1}{3} = 180000 \text{ L (汽油之3000倍)}$$

氫氣的儲存

- ◆ 以金屬氫化物儲存: $M(s) + H_2(g) \rightarrow MH_2(s)$
- ◆ 鈀 Pd 可吸收其體積900倍之氫氣
- ◆ 需要時可加熱釋出氫氣: $MH_2(s) \rightarrow M(s) + H_2(g)$
- ◆ 金屬儲存氫氣作為汽車燃料還在測試階段



使用鐵-鈦氫化物為燃料之汽車

其他替代能源

油頁岩：

- ◆ 多孔岩石富含複雜含碳物質
- ◆ 蘊藏量極豐，但含碳物質不能直接抽取
- ◆ 需加熱至 250°C 以上才能分解產生氣體或液體燃料
- ◆ 昂貴且產生大量之廢棄岩石

其他替代能源

乙醇：

- ◆ 水果、穀類、玉米經酵母菌發酵而得
- ◆ 改造汽車引擎以使用乙醇或gasohol (添加10%乙醇之汽油)
- ◆ 純乙醇在低溫時揮發性太低，寒冷地區無法使用
- ◆ 適合在溫暖地區使用
- ◆ 巴西製造大量乙醇作為汽車燃料



Gasohol加油站

其他替代能源

甲醇：

- ◆ 已成功用作賽車燃料多年
- ◆ 加州已在評估用甲醇作為汽車燃料之可行性
- ◆ 研發可使用85%甲醇，15%汽油之汽車
- ◆ 有潛力成為長期、穩定之能源；
可幫助提升空氣品質
- ◆ 在Arizona及Colorado為主要之攜帶式能源

其他替代能源

種子油：

- ◆ 南非、澳洲已經使用葵花油代替柴油
- ◆ 用種子提煉出以碳、氫為主的生物柴油
- ◆ 燃料可以像農作物一樣種植



葵花油可代替柴油