

# 氫能源

能源與科技  
Ch. 15 再生能源(II)



# 第 15 章 氫

- 15.1 簡介
- 15.2 氫的性質
- 15.3 製氫的方法
- 15.4 氫的儲存與運輸
- 15.5 氫內燃車
- 15.6 燃料電池
- 15.7 燃料電池汽車
- 15.8 氫：現狀與未來
- 15.9 各種交通技術的效率
- 15.10 摘要

## 15.1 簡介

- ◆ 氫是一種能量儲存機制，就像電池一樣。雖然製造氫的有機過程看起來有點像製造生物燃料的過程，但氫並不是一種初級能源，因為自然界中並沒有天然存在之氫的明顯來源。
- ◆ 像所有產生可用能量的方法一樣，氫氣的使用從生產到最終應用，必須詳細觀察才能充分理解其在未來能源經濟中的可行性。

- ◆ 氫具有很大的燃燒熱：每莫耳的氫氣燃燒成水，可釋放出 $285.8 \text{ kJ/mol}$ 。
- ◆ 反過來，事實是其逆反應將水分解為氫與氧時，就需要輸入每莫耳 $285.8$  千焦耳(18克的水裝成2克的氫氣)的能量。在電解水所需的能源不可能是憑空而來！
- ◆ 而且事實上，電解水產氫的效率只約有 $50\sim 80\%$ ，引擎將燃燒熱能轉換成動能的效率也不到一半，合計只有約 $25\sim 40\%$ 的效率。即使以效率較高的燃料電池將氫轉換為電，再用電動馬達，整體效率也只有約 $40\sim 60\%$ 。所以這種循環只是不斷地耗損能量的負能源而已！（沒有“加水就能跑的車”！）
- ◆ 氫的燃燒熱這麼大，代表水的化學位能很低，化學性質很穩定。水無法額外再提供能量，因此水當然不是能源。氫的活性大，地球上自然存在的氫幾乎都是氧化後的化合物，氫氣只存在大氣層頂端，無法收集成為可用之能源，因此氫也不能當成能源（energy sources），只是一種潛在的能量儲存機制，充當儲能的媒介或能源載體。

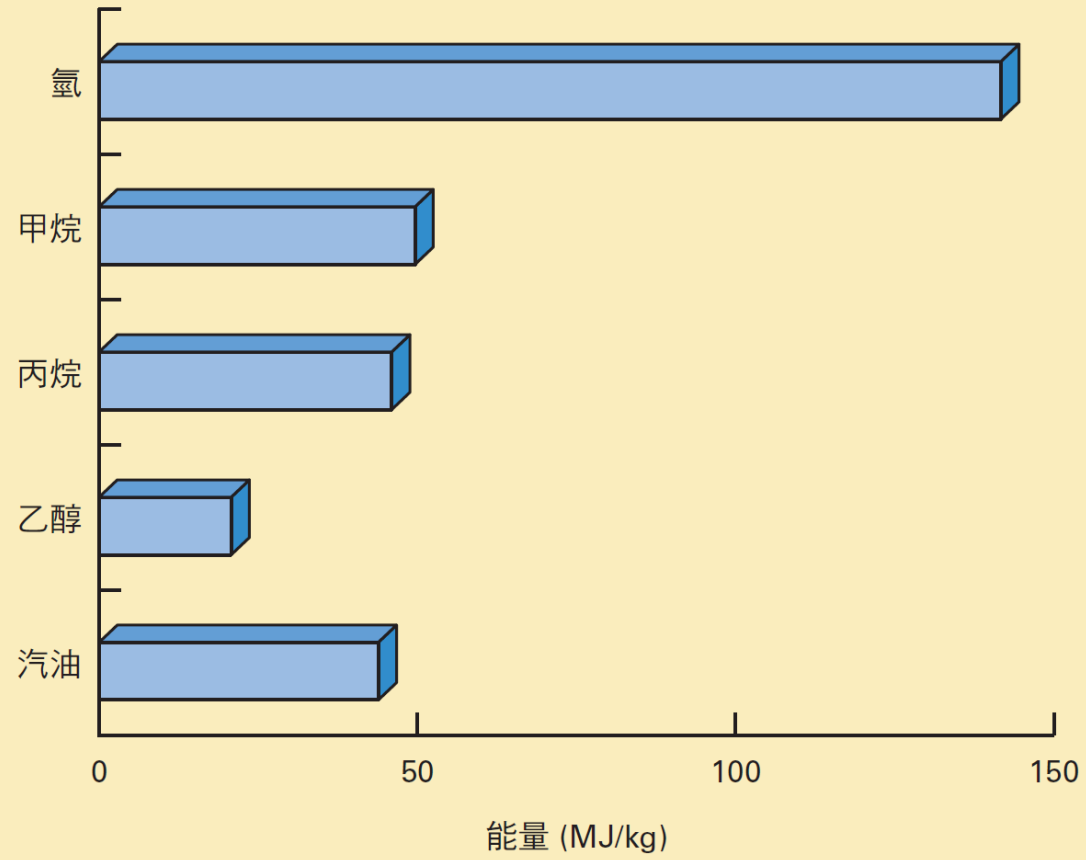


## 15.2 氫的性質

- ◆ 將氫與氧結合而形成水可以產生能量：



- ◆ 氫在標準溫度和壓力（STP = 室溫 $0^\circ\text{C}$ 且壓力為 101 kPa，約1大氣壓）下是氣體，而且占了大量的體積。（1公斤氫氣約為 11.2 公升）
- ◆ 有一種方法就是將氫氣壓縮，同時將溫度維持在室溫。另一種方法是將氫氣液化成為液體，在 1 大氣壓下，氫的沸點為 20.3 K，氫氣必須冷卻到這個溫度以下才能變成液體。並須花高成本將其維持在很低的溫度（如液氫中，低於4K，即零下 $-169^\circ\text{C}$ ）。



© Cengage Learning 2015

圖 15.1 各種燃料的能源含量（每公斤）。

## 15.3 製氫的方法

◆ 製氫有四種基本方法：

1. 電解
2. 水的熱分解
3. 化學反應
4. 生物過程

- 以氫取代傳統的化石燃料做為新的能源載體，有幾個優點：（1）氫是自然界中最普遍存在的元素。宇宙物質有 75% 是氫元素，而氫和氧結合的物質—水—是地球上最普遍存在且分布均勻的物質，因此氫能源是一種不受資源限制的能源；（2）氫本身無毒。氫燃燒時會生成水和少量的氮化氫，並不會像燃燒化石燃料一樣生成一氧化碳、二氧化碳、碳氫化合物、鉛化物等汙染物質，可以避免溫室效應的加劇和環境的汙染；（3）氫熱值高。每公斤的氫氣可產生142,000,000焦耳熱量（可以使1,000 kg的水升高攝氏34.08度），是化石燃料的3倍以上。[每公斤氫氣(142 J)可抵 3.19 公斤汽油的能量。]

**表 15.1** STP 下汽油和氫的比能量和體積能量密度。

燃料	每公斤能源 (MJ)	每立方米能源 (MJ)
汽油	44.5	34,800
氫	142	11.8

© Cengage Learning 2015



## ■ 水分解新方法

- 科學ONLINE - 國立臺灣大學生命科學所周愛鵬/國立臺灣大學科學教育發展中心陳藹然博士責任編輯
- 可再生永續能源一直是各國所追求的發展計劃，而其中氫氣因燃燒時僅產生水，對環境友善，被認為極具發展潛力。
- 現今生產氫氣有幾個主要的方法，像是
  - 藻類或是細菌的生物產氫、
  - 利用電力將水分解等方法、
  - 結合傳統的熱化學產氫法和太陽能，讓熱化學產氫法的熱來自取之不盡用之不竭的太陽能，配合金屬氧化物催化水分解成氫氣，稱為太陽熱能水分解系統。
  - 採用天然氣做原料，通過Steam Reforming Process（蒸汽重整）來產製氫氣

## 熱化學產氫法

- 傳統熱化學產氫法分為兩階段，先進行還原再氧化，兩階段必須在不同溫度下進行，所以系統需要反覆升溫降溫，這中間除了浪費了許多能量，也伴隨耗損觸媒壽命等問題。
- 兩階段的熱化學產氫法，如溫度擺盪觸媒水分解系統，金屬氧化物觸媒會在 $1200\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 的高溫下進行還原反應，釋出氧氣；而還原態的觸媒會在溫度降低 $400^{\circ}\text{C}$ 時和水進行氧化反應，伴隨氫氣產生，而觸媒也回到原先的金屬氧化物狀態；系統就在升溫降溫中循環進行還原和氧化反應。

- 科羅拉多大學波爾得分校的查爾斯·馬斯格雷夫(Charles B. Musgrave)和愛倫·維莫(Alan W. Weimer)所帶領的團隊突破傳統的窠臼，首次發展出一套可在等溫系統下運作的兩階段熱化學產氫法，研究結果發表在2013年8月的《科學》雜誌裡。在新的等溫水分解系統，利用組合兩種不同的金屬氧化觸媒—鐵鋁循環來破解兩種溫度的限制，觸媒會在1350°C還原，釋出氧氣，而系統在相同溫度下就可隨之將水分解成氫氣同時氧化觸媒。此循環在毫無滯礙的情況下不斷進行，等溫系統明顯得比溫度擺盪觸媒水分解系統的舊方法還具有效率，但也期待更多研究加以驗證。

- 蘇黎世聯邦理工學院頂尖的太陽能專家，奧爾多·斯坦菲爾德(Aldo Steinfeld)相當推崇此技術，他表示這個新技術除了大幅提升產氫的效率以外，也擴大了太陽能轉換成可儲存能源的規模，同時還符合經濟效益。
- 德國科隆太陽能研究所的太陽能產氫技術專家，馬丁·羅伯(Martin Roeb)認為此新技術有很大的機會可以將溫度擺盪觸媒水分解系統拋在腦後，而美國加州理工學院材料工程及化學工程教授索西娜·海爾(Sossina M. Haile)掩不住興奮的說：「這個設計暨精簡又可降低系統機械壓力，同時大幅提升產氫的效率，真是傑出的工作！」



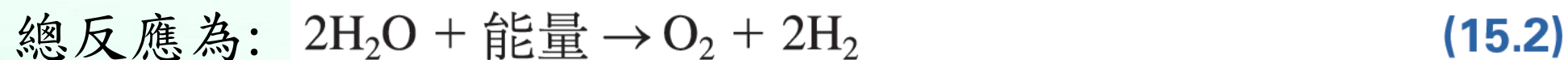
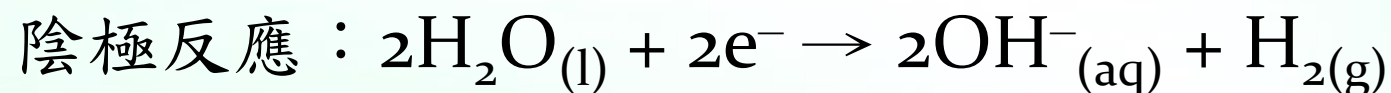
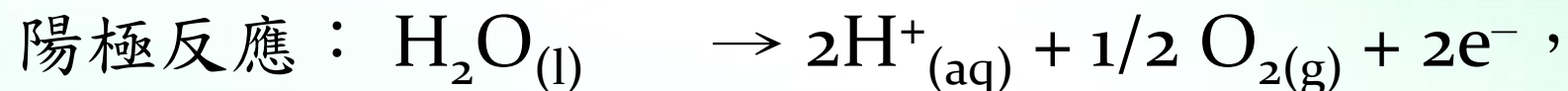
- 另一方面也有人指出隱憂。安大略大學的王兆麟(Zhaolin Wang)教授說明，若除去溫度變動確實可以增加觸媒的壽命，同時簡化系統操作步驟和提高氫氣產量。但王教授也提及**氫氣、氧氣和觸媒在同一個槽裡反應，這有引發爆炸的危險性**，不過愛倫·維莫有信心此設計可以排除這個疑慮。
- 現今**太陽能產氫法的氫氣的價格仍遠高於傳統的石化燃料**，所以難以普及，但若此突破性的等溫系統可以大量節省能源消耗又兼備高效率的產氫能力，科學家們希望可藉由這個機會推展氫氣能源的規模，為發展永續能源提供一條新捷徑！



## 15.3 製氫的方法

### 15.3a 電解

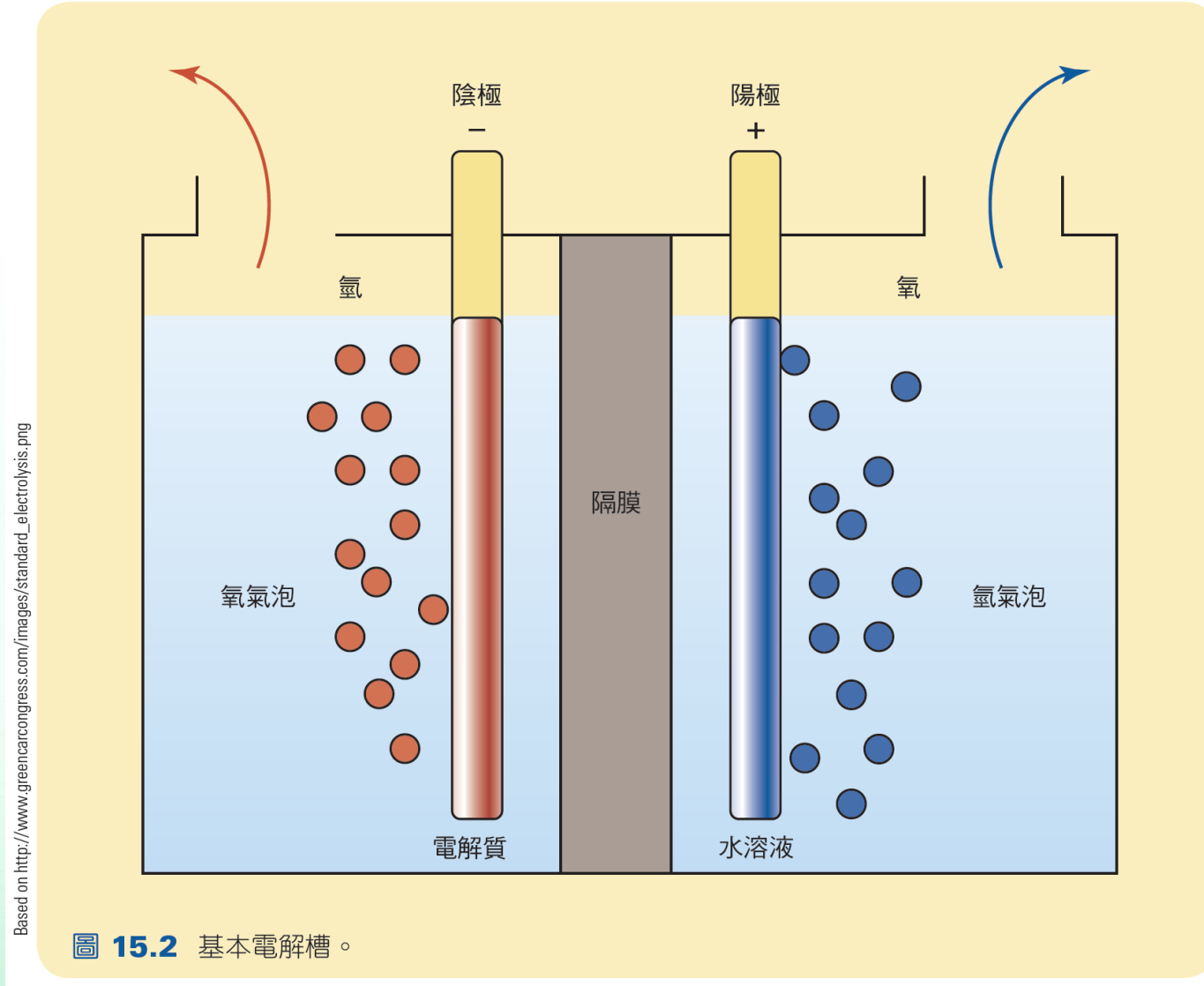
◆電解是製氫最為人所知的方法。它利用電來將水分子分解為氧原子和氫原子。



◆氫氣是藉著下列的反應在陰極（負電極）上由水分解而形成



水的導電率會因離子化合物如  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{KOH}$  等溶解所產生的帶電離子而增加。



## 15.3 製氫的方法

### 15.3a 電解

◆帶負電荷的  $\text{OH}^-$  離子被陰極排斥並經由水而流到陽極，發生下列反應



◆1.0 kg 氫氣需用 100 度的電（約為NT 250元），而

◆3.2 kg 汽油約為 NT 110 元）

## 15.3 製氫的方法

### 15.3b 水的熱分解

◆ 水的熱分解對應於方程式 15.2 中所給出的反應，其中的不同在於能量是以熱能而非以電能的形式提供。



◆ 一種常見的方法就是硫-碘熱化學循環。開始時是先將硫酸加熱，導致下列反應



## 15.3 製氫的方法

### 15.3b 水的熱分解

◆ 二氧化硫再與碘和水結合，加上更多的熱後形成如下反應



◆ 所產生的硫酸用於燃料反應，碘化氫則被進一步加熱而得到碘

◆ 碘再用於燃料反應最後產生淨氫。





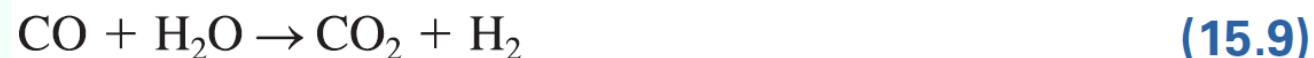
## 15.3 製氫的方法

### 15.3c 化學反應

◆ 蒸汽重整（steam reforming）是一種氫氣在甲烷與水的高溫反應期間產生的過程



◆ 此反應隨後通常是一氧化碳與水的反應



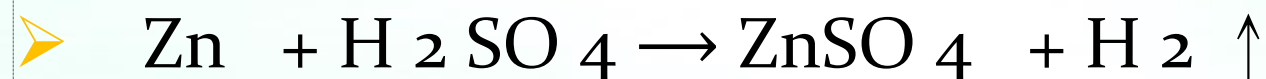
◆ 產生氫氣的另一種常見反應是水與碳的高溫反應



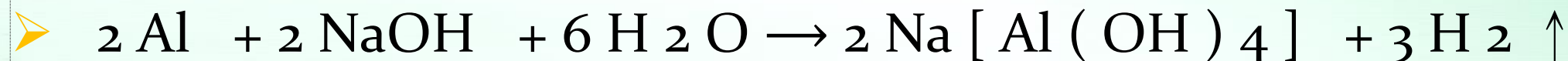
# 實驗室製備

## ◆ 金屬加水製氫

◆ 在實驗室里，氫可以通過活潑金屬和稀酸反應，或者兩性金屬和鹼的溶液反應得到。



或



## 15.3 製氫的方法

### 15.3d 生物過程

- ◆微生物燃料電池（microbial fuel cell，縮寫MFC）
- ◆MFC過程類似於烴產生的生物過程，亦即生物燃料產生的過程。
- ◆MFC是一種生物電化學的電池系統，使用自然界細菌及仿真細菌交互作用產生電流。一般可分為兩類——使用質子交換膜者及無膜式（membrane-less）。第一顆微生物燃料電池於20世紀初期展示，使用質子交換膜藉由細菌透過電池陽極進行電子轉移。無膜式的系統是屬於新型的發展，可追溯於1970年代；這類型的電池，細菌通常具有電化學活性可氧化還原蛋白質（如細胞色素其外膜），可以直接傳送電子至陽極。21世紀後，微生物燃料電池已可應用於廢水處理使應用於生物感測器等商業用途。

-維基百科

### 15.3d 生物過程

- 使用自然光合作用的一種方法是生產生物燃料，這是一種間接過程，其能源轉化效率低（由於光合作用自身將陽光轉化為生物質的效率低），收割和運輸燃料的成本，由於土地對糧食生產的需求日益增加而引起衝突。人工光合作用的目的是通過使用直接過程，從日光中產生可以方便地存儲並在無法使用日光時使用的燃料，即產生太陽能燃料。隨著能夠複製光合作用主要部分的觸媒發展，水和陽光最終將成為清潔能源生產的唯一來源。其唯一副產物氧，太陽能燃料的生產潛力可能比汽油便宜。
- 建立清潔和負擔得起的能源供應的一種方法是開發在太陽光下分解光催化水。這種可持續製氫的方法是發展替代能源系統的主要目標。



## 氫的顏色 – 綠氫、藍氫、灰氫、褐氫怎麼區分？

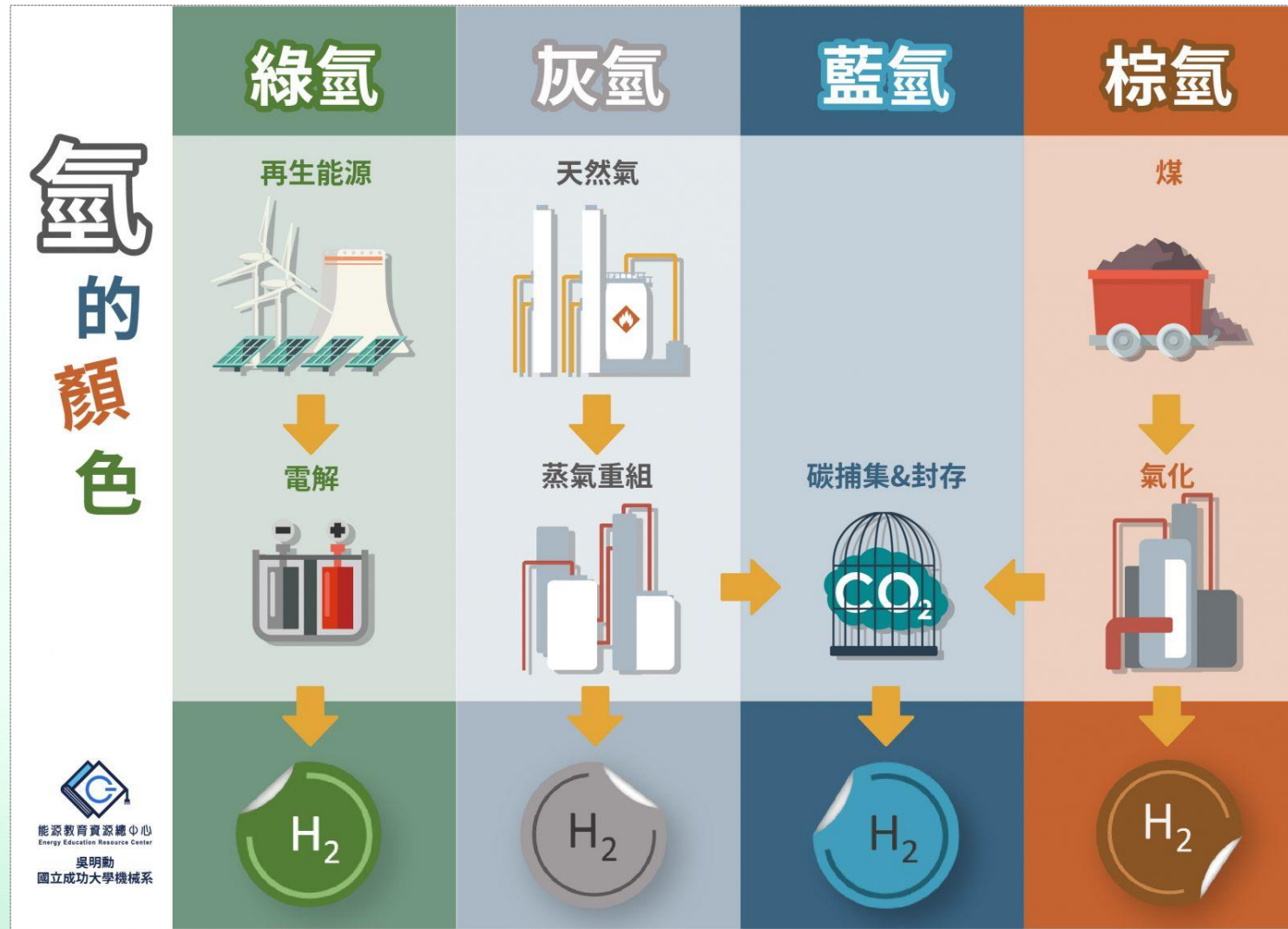
- ◆ 氫氣由於分子結構中不含碳，因此在零碳或低碳之能源願景中將扮演重要腳色。但由於氫原子的高活性，氫氣不存在自然界中，而是以化合物，如水、甲烷之形態存在。氫氣可由碳氫燃料重組(reforming)獲得，或由生質料氣化、熱裂解、水解、電解水等非重組(non-reforming)方式獲得。也就是說雖然氫氣本身雖然不含碳，但獲得氫氣的原料或轉換製程仍會衍生碳排，其來源將影響減碳效益。因而氫氣本身雖為無色氣體，但常以顏色標稱來區分來源的不同。



## 氫的顏色 – 綠氫、藍氫、灰氫、褐氫怎麼區分？

- ◆ 由碳氫燃料重組獲得的氫氣稱之為**灰氫(gray hydrogen)**。目前有80-85%的氫氣透過水蒸氣重組(steam reforming)獲得，其碳排為12 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>。
- ◆ 煤氣化、熱裂解、水解等方法獲得的氫氣稱之為**褐氫(brown hydrogen)**，製程轉換效率39-56%，所產生之碳排為5 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>，較灰氫為低。
- ◆ 利用再生能源或核能進行電解水製得得氫氣碳排最低，例如以風電電解水產氫之碳排僅0.37 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>，因此被稱為**綠氫(green hydrogen)**，又稱P2G(Power to Gas)；轉換效率40-70%。
- ◆ 而若將氣化或蒸氣重組過程中之碳排經由碳捕集及封存避免排放到大氣，這種方式產出的氫氣則稱之為**藍氫(blue hydrogen)**。

# 氫的顏色 - 綠氫、藍氫、灰氫、褐氫

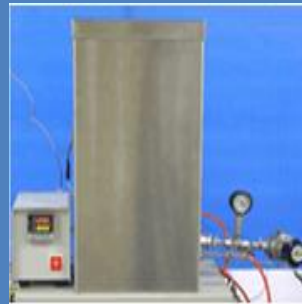


# 我國氫能發展趨勢

1. **產氫技術**：包括以化石燃料蒸汽重組技術為主之工業規模產氫；小型重組反應器技術；薄膜反應器、電漿重組技術及再生能源轉化等較先進產氫技術。
2. **儲氫技術**：包括工業儲氫皆利用高壓儲氫槽；低壓儲氫罐及金屬儲氫材料製作，開發先進儲氫材料。
3. **定置型燃料電池系統**：開發天然氣、甲醇及液態石油氣(LPG)重組器，可整合定置型燃料電池系統發電。



Pd/Ag membrane enhanced hydrogen reformer (ITRI)



Membrane enhanced methanol reformer (Green Hydrotec)



Hydrogen storage (H Bank)



3 kW NG reformer (ITRI)



1kW methanol reformer (ITRI)

## 15.4 氫的儲存與運輸

◆ 氫氣一旦產生，就必須轉運到配送和 / 或使用它的地點，因而它必須以一個很適當的形式儲存起來。

◆ 有三種可能的方法：

1. 壓縮氫氣 (CHG)
2. 液態氫 ( $\text{LH}_2$ )
3. 貴重金屬氫化物 ( $\text{MH}_2$ )

## 例題 15.1

一個體積為  $1 \text{ m}^3$  的氫氣槽，在  $100 \text{ MPa}$  壓力下被用來透過熱機燃燒發電，熱機以  $15\%$  的總效率驅動發電機。試問總可用電能為多少千瓦時？

解答



## 解答

從圖 15.3 可得知，氫氣在 100 MPa 壓力下的密度約  $40 \text{ kg/m}^3$ 。從表 15.1 可知氫的能量含量為  $142 \text{ MJ/kg}$ 。因而  $1 \text{ m}^3$  體積的氫可產生的電能為

$$(40 \text{ kg}) \times (142 \text{ MJ/kg}) \times (0.278 \text{ kWh/MJ}) = 1580 \text{ kWh}$$

以效率 15% 計算，可產生的總電能是

$$(1580 \text{ kWh}) \times (0.15) = 237 \text{ kWh}$$

## 15.4 氫的儲存與運輸

- ◆在相對低的壓力下，密度-壓力曲線非常符合理想氣體關係式

$$PV = nRT \quad (15.11)$$

- ◆T 表絕對溫度.此式可以用密度  $\rho$  表示而改寫成

$$\rho = \frac{nM}{V} = M \left( \frac{P}{RT} \right)$$

- ◆其中n為氣體的莫耳數, V為體積, R 為通用氣體常數 ( $R = 8.315 \text{ J/K-mol}$ )
- ◆這個式子表明，密度 和壓力P之間有一種線性關係。

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (15.12)$$

## 15.4 氫的儲存與運輸

- ◆ 隨著壓力的增加，密度-壓力關係會偏離理想氣體定律，因為它忽略了分子間交互作用的存在。
- ◆ 隨著壓力的增加，理想氣體定律會變得越來越不適用。
- ◆ 壓力越高，就需要越強固的密封容器，以便能安全地儲存氫氣。

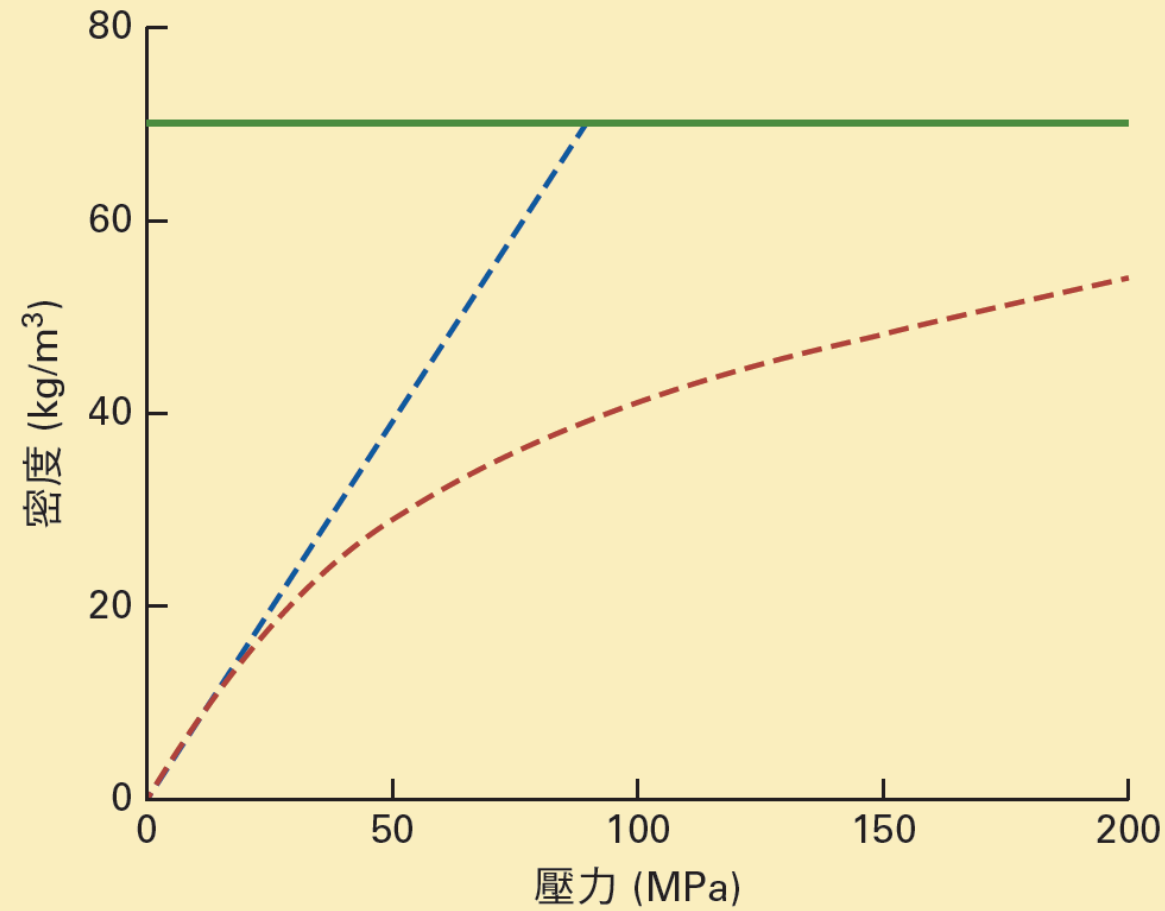


圖 15.3 氫氣的密度壓力關係，顯示氫氣的密度（紅線）以及理想氣體定律關係式（藍線），綠線表示液態氫的密度。

## 15.4 氫的儲存與運輸

- ◆ 在 1 大氣壓下，氫的沸點為 20.3 K，氫氣必須冷卻到這個溫度以下才能變成液體。
- ◆ 需要考慮的兩個重要因素：
  1. 液化氫氣需要多少能量
  2. 如何將它儲存以防止它沸騰

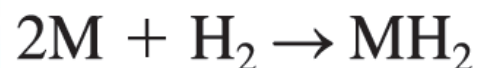


## 15.4 氫的儲存與運輸

- ◆ 關於液態氫的傳輸，傳輸管必須密封良好，以避免液態氫和空氣之間的接觸。
- ◆ 空氣（主要成分為氮和氧）的沸點比氫更高，兩者之間的接觸會使空氣凝結而污染了液態氫。（氫炸的風險）

## 15.4 氫的儲存與運輸

- ◆最後一個儲存氫氣的方法是以金屬氫化物的形式儲存。此方法依賴於氫與某些金屬之間如下的反應



(15.13)

- ◆氣態儲氫—氫密度低，不安全，液化儲氫—氫耗高，對儲罐絕熱性能要求高；固態儲氫—體積儲氫容量高，不需高壓及隔熱容器，安全性好，無爆炸危險，可得到高純氫，能提高氫的附加價值。1964年發現Mg<sub>2</sub>Ni合金的儲氫特性的開展金屬氫化物儲氫材料研究的序幕。這種固態金屬合金的儲氫密度是氫氣的1,000倍左右，和液體氫相同或超過液體氫，且沒有爆炸的危險，並有零損耗的優點，能長時間儲存氫氣，不用複雜容器就可儲存，還可獲得高純氫，是一種經濟有效的儲氫方法。目前使用固態儲氫燃料的能量密度應以達到重量百分比 6wt%（即每公斤儲氫材料可以儲存60克氫氣）未來還可能提高更多。

## 例題 15.2

試計算可以儲存在  $1 \text{ m}^3$  鈦中之氫的質量。注意：鈦的密度為  $4510 \text{ kg} / \text{m}^3$ 。

解答

**例題 15.2**

試計算可以儲存在  $1 \text{ m}^3$  鈦中之氫的質量。注意：鈦的密度為  $4510 \text{ kg/m}^3$ 。

**解答**

在  $\text{TiH}_2$  中有三分之二的原子是氫。使用氫的近似原子質量  $1 \text{ g/mol}$  以及鈦的  $48 \text{ g/mol}$ ，氫與鈦的重量比為

$$\frac{2 \text{ g/mol}}{48 \text{ g/mol}} = 0.042$$

因此， $1 \text{ m}^3$  或  $4510 \text{ kg}$  的 Ti 含有

$$(4510 \text{ kg}) \times (0.042) = 188 \text{ kg 的氫。}$$

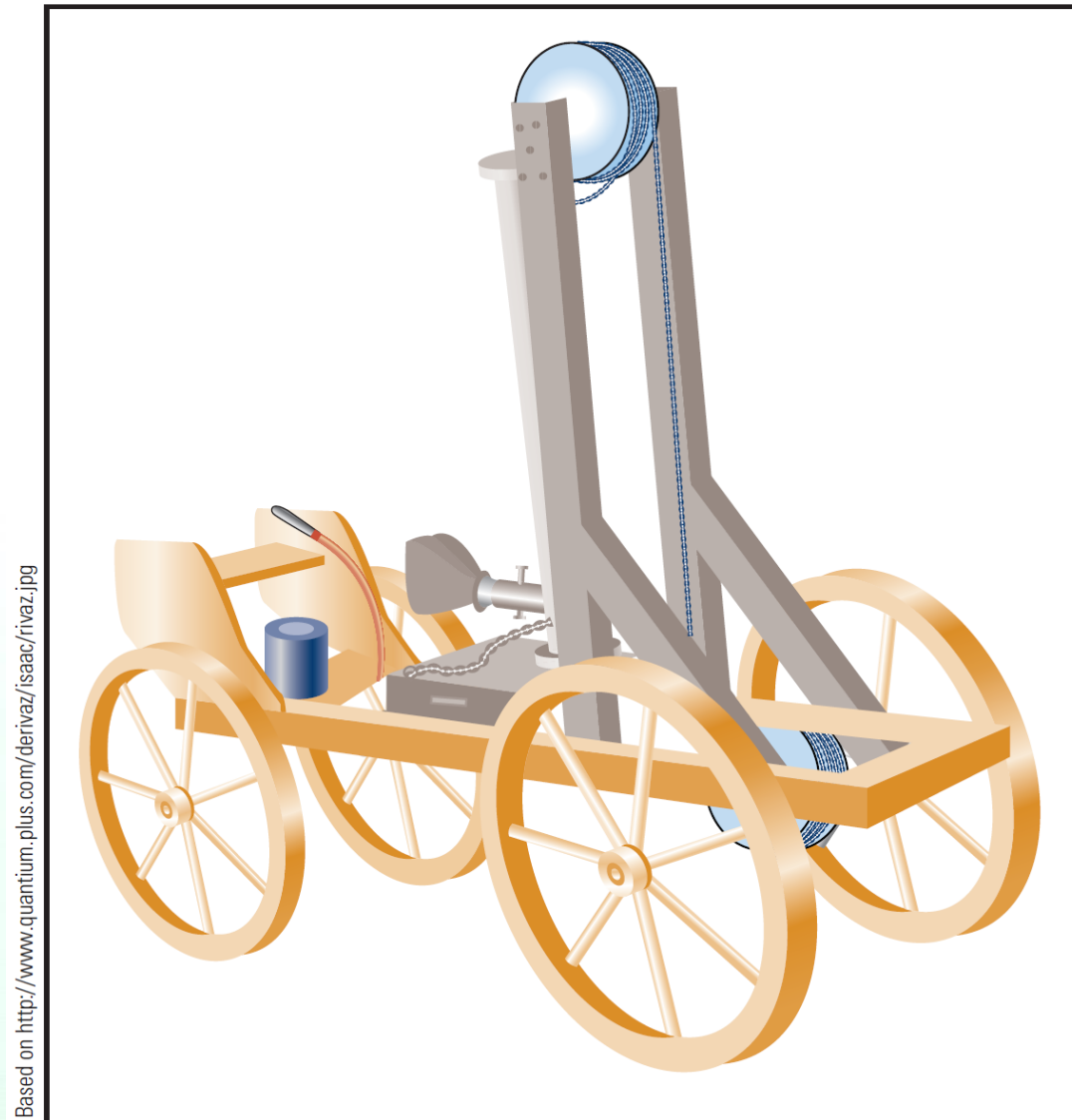
## 15.4 氫的儲存與運輸

- ◆ 氫氣可以經由管道跨陸輸送或以油罐車運送壓縮氫氣體CHG。它也可以用適當隔熱的卡車以  $\text{LH}_2$  的形式冷鍊運送。
- ◆ 氫氣是一種潛在的能量儲存機制，能將遠海所產生的能量運送給陸地上的使用者。
- ◆ 能源轉換效率的問題非常重要，特別是像 OTEC 那種已經達到高邊際效率的方法。



## 15.5 氫內燃車

- ◆ 世界上的第一輛自動車使用以氫為燃料的內燃機（ICE）是1807年Isaac de Rivas製造了首輛氫內燃車。可惜該設計甚不成功。雖然用於一般用途時不是很實際，它示範了自動車的操作原理。氫內燃機汽車是以汽油動力車的生產為基礎。汽油內燃機只要小小的修改就可在氫氣上運行。
- ◆ 氫內燃車是內燃機直接燃燒氫，不使用其他燃料或產生水蒸氣排出。這些車的問題是氫燃料很快耗盡。載滿氫氣的油缸只能行駛數英里，很快便沒能量。



Based on <http://www.quantum.plus.com/derivaz/isaac/rivaz.jpg>

圖 15.4 第一輛自動車是瑞士的弗朗索瓦（Francois Isaac de Rivaz）於 1807 年建造的。它利用壓縮氫氣作為燃料，並且使用由電池所產生的電火花點火。

## 15.5 氫內燃車

- ◆ 氫汽車的一個主要問題是：如何在狹窄的空間中攜帶足夠的氫氣，足以提供一個可用的續航力。
- ◆ 在氫內燃機汽車的情況下，因為引擎可設計成能使用氫或汽油的雙燃料引擎，合理的替代燃料是汽油，而且燃料系統所輸送的兩種燃料可以在車輛中合併使用。

## 15.5 氫內燃車

- ◆ 寶馬的氫內燃車有更多的力量，比氫燃料電池車更快。寶馬的氫能車以三百公里每小時創下了氫能車的最高速記錄。
- ◆ 寶馬 Hydrogen 7 是從 760Li 汽油動力寶馬衍生的一款豪華車，使用一個修改後能在氫氣或汽油上運行的 6.0 公升 V-12 內燃機。
- ◆ 這個特性需要發展一種專門隔熱的氫燃料箱，以及一種合適的添加機制。



© ZUMA Press, Inc./Alamy

圖 15.5 BMW Hydrogen 7 配備以汽油或液態氫 ( $\text{LH}_2$ ) 運行的雙燃料內燃機作為動力。



**表 15.2** 兩種氫內燃機（ICE）車輛的規格。

© Cengage Learning 2015

製造商	型號	燃料	氫續航力 [km]	汽油續航力 [km]
寶馬	Hydrogen 7	LH <sub>2</sub> /汽油	200	480
馬自達	RX-8 RE	CHG/汽油	100	530

## 15.5 氫內燃車

- ◆馬自達已在開發燒氫的轉子引擎。該轉子引擎反覆轉動，故氫從開口在引擎內的不同部分燃燒，減少突然爆炸這個氫燃料活塞引擎的問題。馬自達 RX-8 RE 使用壓縮氫氣作為燃料。這幾乎是所有氫動力汽車的共同特徵，也需要開發一種安全且重量輕的高壓儲氣筒。
- ◆在設計一輛內燃機車輛時，只利用氫作為唯一燃料來源且要有足夠的續航力是很困難的。
- ◆氫可能最好是用在燃料電池中以作為車輛的燃料。



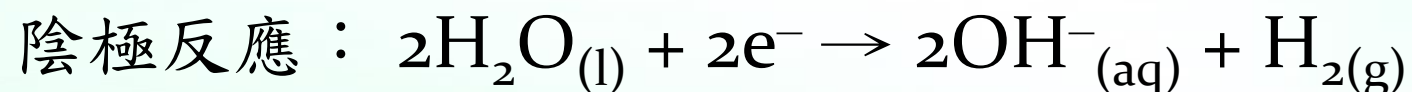
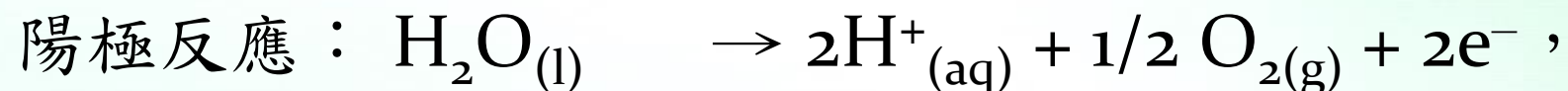
© BG Motorsports/Alamy

圖 15.6 馬自達 RX-8 RE 搭備以汽油或壓縮氫氣（CHG）運行的雙燃料內燃機作為動力。

## 15.3 製氫的方法

### 15.3a 電解

◆電解是製氫最為人所知的方法。它利用電來將水分子分解為氧原子和氫原子。



◆氫氣是藉著下列的反應在陰極（負電極）上由水分解而形成

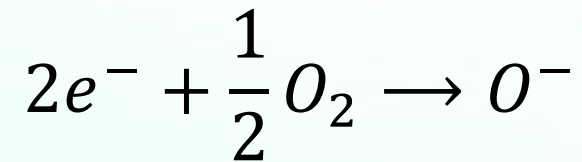


## 15.6 燃料電池

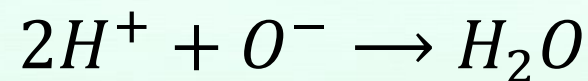
◆ 燃料電池是一種能夠催化方程式 15.1 的反應並產生能量的裝置。



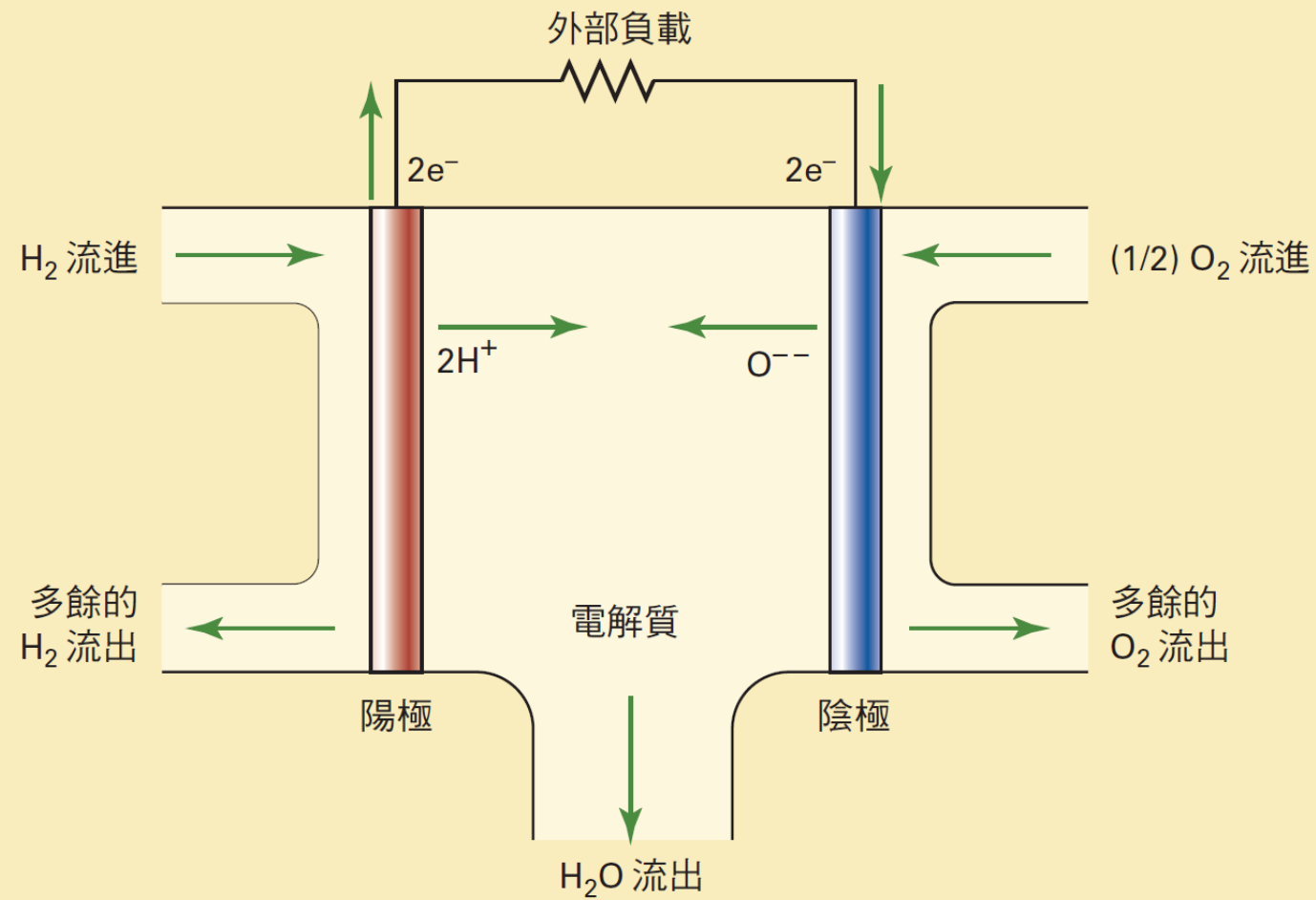
◆ 在陰極上，兩個電子與氧原子會依照下列反應結合且會釋放具有兩個多餘電子的氧原子到電解質裡。



◆ 在陽極上的反應是







© Cengage Learning 2015

圖 15.7 一般常用之氫燃料電池的示意圖。

## 15.6 燃料電池

- ◆ 表 15.3 列出了常見類型之燃料電池的特性。這些不同類型的燃料電池，主要的區別在於它們所使用的電解質。
- ◆ 燃料電池組可以串聯和 / 或並聯起來，以提供特定應用時所需的電壓和電流。

## 15.6 燃料電池

### 15.6a 磷酸燃料電池

- ◆今日的磷酸燃料電池類似，比較昂貴，就像大多數的燃料電池一樣，因它們使用鉑作為催化劑。
- ◆像許多燃料電池一樣，磷酸燃料電池可在高溫下運作。這具有一定的缺點，因為它必須使用部分能量來加熱電池，以便在使用它之前先暖機。

## 15.6 燃料電池

### 15.6a 磷酸燃料電池

- ◆ 這種燃料電池和其他某些燃料電池的高溫操作卻有一個好處，就是所產生的水實際上是水蒸汽。
- ◆ 如果蒸汽的熱含量能被充分利用，磷酸型燃料電池的總效率可高達 85%。這種蒸汽利用稱為**熱電聯產**（cogeneration，又稱**汽電共生**）。

## 15.6 燃料電池

### 15.6b 鹼性燃料電池

- ◆ 鹼性燃料電池曾被 NASA 用來作為太空船的能源。
- ◆ 這些燃料電池最吸引人的一個特點是，所產生的水純度夠高可以飲用。
- ◆ 燃料電池提供了太空人所需的電力以及飲用水。能在廣大範圍的低溫下運作也是太空應用上的一項優點。



## 15.6 燃料電池

### 15.6c 熔融碳酸鹽燃料電池

- ◆ 這些磷酸燃料電池燃料電池相當大，而且可以提供很大的功率，因而適合於固置式備用電源的應用。
- ◆ 一個額外優點（也是一個缺點）是，它們可以利用氣態化石燃料中的氫氣。
- ◆ 這些燃料電池會排放溫室氣體。在高溫下運作，所以可以使用熱電聯產，並且效率可提高到大約 85%。

## 15.6 燃料電池

### 15.6d 固體氧化物燃料電池

- ◆ 固體氧化物燃料電池與熔融碳酸鹽燃料電池類似。它們也可以利用烴基的氫氣源，如天然氣或甲烷。
- ◆ 固體氧化物燃料電池的價格相較昂貴（每千瓦時輸出）。

## 15.6 燃料電池

### 15.6e 固體聚合物燃料電池

- ◆ 固體聚合物燃料電池使用聚合物電解質膜（PEM，又稱質子交換膜），因而通常被稱為聚合物電解質膜燃料電池。
- ◆ 當供給氫氣和氧氣作為燃料時，它會產生電和水。但當供給水和電力時，系統又好像是一個電解池會產生氫氣和氧氣。

## 15.7 燃料電池汽車

- ◆ 許多主要的汽車製造商都有燃料電池汽車的發展計畫，燃料電池產生的電力被用來提供動力給使用電動馬達的車輛。這些車輛幾乎全部是氫電混合動力汽車。
- ◆ 許多最近的燃料電池車都是建立在現有汽油車的平台，且全部使用壓縮氫氣作為儲存機制。

**表 15.4** 氫燃料電池車的一些規格。

製造商	型號	儲氫	質量 [kg]	車輪功率 [kW]	輔助能量儲存	續航力 [km]
Ford	Focus FCV	25 MPa CHG	1727	65	鎳氫電池	280
Honda	FCX Clarity	34.5 MPa CHG	1625	95	鋰離子電池	430
Kia	Borrego FCEV	69 MPa CHG	2250	109	超級電容器	680

© Cengage Learning 2015



## 15.8 氫：現狀與未來

- ◆ 燃料電池汽車通常有較大的續航力，比起以往的電動汽車，如通用汽車 EV1 或豐田 Rav4 EV，動力也差不多或更大。
- ◆ 氫運輸是一種新技術，而且仍有許多需要加以解決的問題，其中主要的是安全、基礎設施和成本。



© Jim West/Alamy

**圖 15.8** 福特 Focus FCV 在發動機隔室中的燃料電池系統，採用鎳氫電池作為輔助能源。



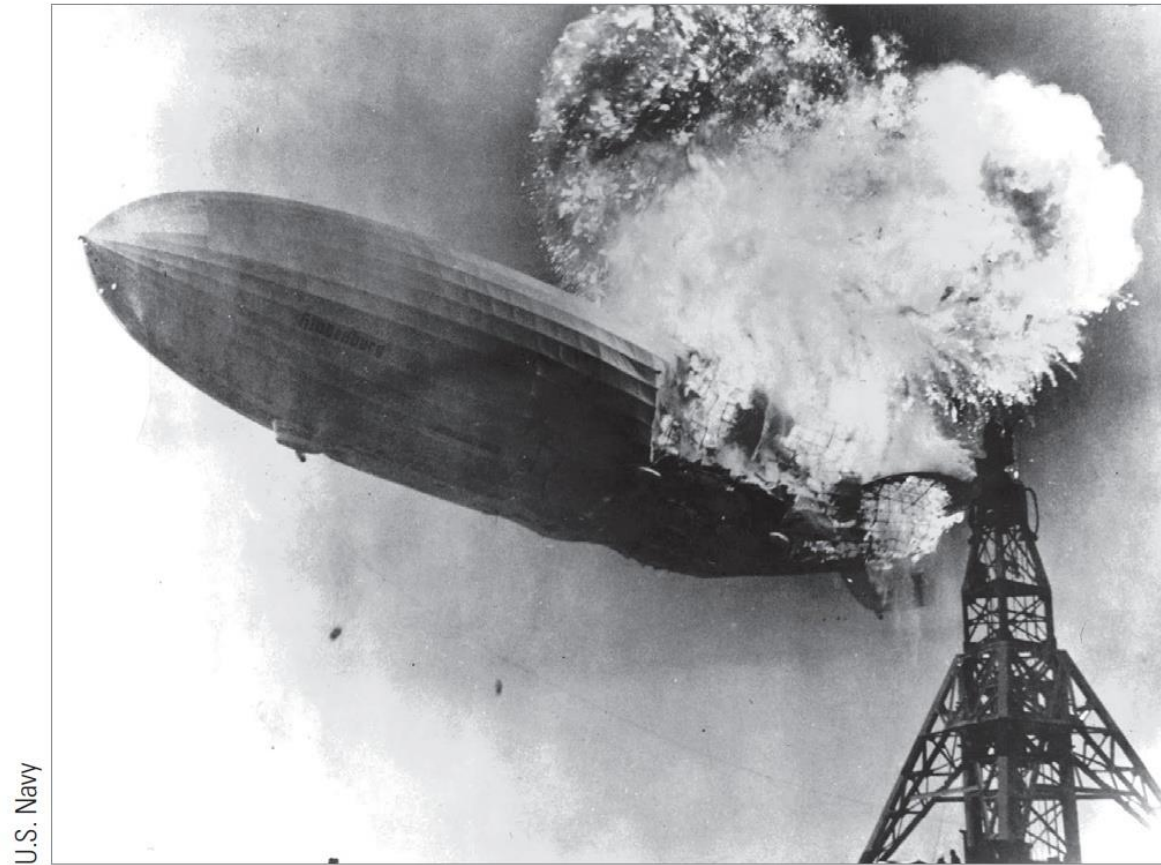


圖 15.9 本田 FCX Clarity 採用鋰離子電池作為輔助能源。



圖 15.10 Kia Borrego 採用超級電容器作為輔助能源。





U.S. Navy

**圖 15.11** 1937 年 5 月 6 日在紐澤西萊克赫斯特上空燒毀之德國興登堡飛艇。本起意外事件中，97 名乘客有 35 人死亡，且地上也有 1 人死亡。



## 15.8 氫：現狀與未來

◆使用氫氣作為運輸燃料所需的基礎設施牽涉到加氫站的建立，加氫站是為了補充氫氣或最終要取代加油站以及柴油站的地位。



© ARCTIC IMAGES/Alamy

圖 15.12 加氫站。這家加氫站在冰島雷克雅未克（Reykjavík），於2003年開始營運，是世界上第一座公共加氫站。

## 15.9 各種交通技術的效率

- ◆ 使用任何能源時，其中最重要的考慮因素就是效率。如車輛是初級能源（例如石油、煤炭、太陽能、風能等）轉換成傳遞到車輪上之機械能的效率。
- ◆ 因為在將汽油燃燒所產生的熱量轉換成機械能時，卡諾循環有其內稟的限制，使傳統汽油車的效率相對地較低。

## 15.9 各種交通技術的效率

- ◆ 將化石燃料能源轉換為車輪上之機械能所必要的程序數量會使得程序的整體效率變得非常低。
- ◆ 發展電池電動汽車（比起燃料電池或氫內燃機汽車）具有下列幾項優點：
  1. 減少二氧化碳排放量 2 倍左右
  2. 使碳封存更容易
  3. 允許使用相對豐富的煤來發電

Based on data from R. A. Dunlap, *Energy and Environment Research* "A simple and objective carbon footprint analysis for alternative transportation technologies" 3 (2013): 33–39.

**表 15.5** 以汽油為動力之內燃機汽車的效率分析，顯示初級能源（汽油）轉化為傳遞到車輪上之機械能的淨效率。

過程	效率 (%)
化石燃料→機械能	17
淨效率	17



Based on data from R. A. Dunlap, *Energy and Environment Research* "A simple and objective carbon footprint analysis for alternative transportation technologies" 3 (2013): 33–39.

**表 15.6** 電池電動車的效率分析，顯示初級能源（汽油或煤）轉化為傳遞到車輪上之機械能的淨效率。

過程	效率 (%)
化石燃料→電力	40
電力→機械能	85
淨效率	34

Based on data from R. A. Dunlap, *Energy and Environment Research* "A simple and objective carbon footprint analysis for alternative transportation technologies" 3 (2013): 33–39.

**表 15.7** 以氫為動力之內燃機汽車的效率分析，顯示初級能源（汽油或煤）轉化為傳遞到車輪上之機械能的淨效率。

過程	效率 (%)
化石燃料→電力	40
電力→氫氣	70
氫氣→ CHG 或 LH <sub>2</sub>	80
CHG 或 LH <sub>2</sub> →機械能	17
淨效率	4

Based on data from R. A. Dunlap, *Energy and Environment Research* "A simple and objective carbon footprint analysis for alternative transportation technologies" 3 (2013): 33–39.

**表 15.8** 以氫燃料電池為動力之汽車的效率分析，顯示初級能源（汽車）轉化為傳遞到車輪上之機械能的淨效率。

過程	效率 (%)
化石燃料→電力	40
電力→氫氣	70
氫氣→CHG	80
CHG→電力	70
電力→機械能	90
淨效率	14

## 15.9 各種交通技術的效率

- ◆ 使用更環保的初級能源（如風能、太陽能），而且碳排放的問題可以解決，則在比較電池電動車與燃料電池或氫內燃機汽車的效率後，仍然顯示輸入車輪的淨能量（與初級能源總輸入相比）偏袒電池電動汽車。
- ◆ 美國能源部（USDOE）還在繼續研究固點使用的氫燃料電池。這些系統可用於備用電源或作為遠程地點上的能量儲存機制。

## 15.10 摘要

- ◆ 氫不是初級能源，僅只是一種能量儲存機制。
- ◆ 氫在標準溫度和壓力下是氣體。其燃燒熱量為  $142 \text{ MJ / kg}$ ，汽油則約  $45 \text{ MJ / kg}$ 。
- ◆ 氫氣在許多化學反應裡會被釋放出來，而把水分解也可以得到氫氣和氧氣。



## 15.10 摘要

- ◆ 液態氫必須存放在隔熱槽裡，以減少蒸發（儘管無法完全消除）。壓縮氫氣必須儲存在強固得足以承受高壓的儲氣筒裡。
- ◆ 氫內燃機汽車由汽油內燃機汽車改造而成，是典型的混合式動力汽車，因可以使用汽油，多少能補充由氫每單位體積的低能量所導致之續航力的不足。

## 15.10 摘要

- ◆ 燃料電池汽車通常也是混合式動力汽車，因為它們能併用電池或超級電容器以增加續航力，並將再生制動所產生的電能儲存起來。
- ◆ 對氫作為燃料的完整分析必須包含氫是如何產生的，以及從初級能源到可用的最終產品能量之間這個能量生產過程的總效率。

## 15.10 摘要

- ◆ 如果氫是透過化學方法產生的，則該方法的碳足跡在決定溫室氣體的總排放量上很重要；如果氫是經由電解產生的，則用電的來源在決定碳排放量上很重要。
- ◆ 製氫新技術的發展將是使該技術能與電池電動車競爭的一個重要步驟，而改進燃料電池的效率和成本可能會引導這個方法走向商業上的使用。

## 王孟源：【再談氫經濟】

- 過去五年中，汽車工業界已經放棄了氫動力和柴油，準備在2030年之前把應對環保壓力的重點轉移到電動汽車上。這一波氫經濟公關要宣傳的，其實是我在《[永遠的未來技術](#)》的正文和留言討論中簡單提到的（例如這句話：“用氫來儲能，以備尖峰用電時發電，或許是可行的”），工業化集中處理氫氣，作為電網儲能的一部分，所以它並不是無的放矢的吹噓。

[13” 08] [【工業】](#) [【能源】](#) [再談氫經濟](#)

- 作者：王孟源 2020/02/14

- **王孟源認為：**目前最便宜、最可靠、最安全、最有可擴展性的新技術，還是儲能，也就是把多餘的電力儲存起來，到需要的時候再釋放出來。
- 電力供應傳統上是幾乎完全沒有容許時間上的餘裕的，這一秒多出來的電不能留給下一秒用。現有唯一的例外是水電，可以在供過於求的時候，反轉渦輪，把水打回水庫裏。但是大部分國家（包括中國在內）的水電存量都遠遠不足以滿足消費，而且反轉渦輪的效率不好，再加上水庫的存放水決定往往受其他因素（例如灌溉、乾旱或泄洪，水庫淤積）影響，所以水電不可能是最終的答案。



- **王孟源：**先回顧一下，氫能源在工業應用上的短處和困難。這其中最嚴重的，當然是安全性問題。氫氣非常容易爆炸，天然氣與之相比都溫和得不得了，要在城市裏普建加氫站實在不是明智之舉；即使爲了政治或商業迷思而硬幹，也必然會在幾年內被現實打臉。事實上，當前世界只有極少數的消費者加氫站，但是已經不斷發生嚴重的爆炸案；只看2019年，就有六月在美國加州Santa Clara和挪威的Oslo一連爆了兩次，到了九月南韓的五個站中也爆了一個。這樣的出事機率是每年百分之幾的級別，而且還是在大公司不惜工本來直營的背景下發生的；如果加氫站如同美國的加油站一樣，隨便哪一個個體戶都可以開，那麼其危險程度可想而知。

- **王孟源：**氫是除了氦之外尺寸最小的。工業上一般應用的金屬材料，包括碳鋼、不鏽鋼、鋁合金、鈦合金、鎳合金和鋳合金，晶格間隙都容許氫分子的滲透，很快就會造成機械性能的嚴重退化，這叫做“氫脆” “Hydrogen Embrittlement” 作用。另一方面，氫氣管道的密封隔離也格外困難；再加上氫氣密度太低，儲存起來不是極高壓就是極低溫，使得如氫氧火箭發動機的設計與製造上就是麻煩不斷。在航天這種高價值特殊用途還可以勉強忍受（即使如此，新一代的燃料火箭或海上集運貨櫃船仍然是以甲烷為研發熱點），在一般能源供應上，氫的儲存筒和運輸管道，規格和價位都遠超天然氣，也就沒有經濟上的競爭力。

- **王孟源**:其次，許多科普文章喜歡吹捧的PEM（Proton Exchange Membrane，質子交換膜）燃料電池，其實非常地不實用。而且經過幾十年的研究發展，專利智財多集中於日美大財團，雖然名義上有60%的效率，至今仍然無法可靠地將壽命延長到超過幾個月的連續使用，所以基本也沒有什麼經濟性可言。
- 軍事上德國勉強把質子交換膜燃料電池用在212型潛艇上，但這又是因為特殊軍事用途，對高昂成本的承受力比民用工業高得多，潛艇的AIP（絕氣推進）系統也不須要365天24小時持續運作。

## 王孟源：【再談氫經濟】

- **王孟源**：第三，氫氣生產和使用過程的效率低得驚人。直接用水電解的話，陰極、陽極、電解液都很容易失效，以致於目前能工業化大量持續生產的最高能量效率只有25%！做為對照，大型工業馬達在電能和動能之間的轉換效率已經達到99%以上。所以現在石化工業遇到非得用上氫氣的化學反應時，反而是採用天然氣做原料，通過效率大約70%的Steam Reforming Process（蒸汽重整）來產製氫氣（灰氫）；這也就是人類目前要生產氫氣最具經濟性的方法。接下來如果要長期儲存，壓縮氫氣會損失15%的能量，使用時減壓釋放再損失5%，這樣一來，就算未來有了技術突破，能解決PEM質子交換膜燃料電池的耐用性問題，從生產-儲存-釋放-發電的氫氣發電總效率也不會高於34%，這只堪比小汽車上燒汽油的內燃機，更別提直接燒天然氣的聯合循環燃氣渦輪（Combined Cycle Gas Turbine，CCGT）發電站早已經有實用化的64%總效率。



- 因此我們說儲能，最後還是要靠電池。不過現有常見的鋰電池是為隨身使用而優化的，它很輕便、能量密度高，但是這不是電網儲能的需要。電網儲能的要求是  
1) 便宜；2) 可以幾乎無限擴充；3) 可以幾乎無限循環；4) 安全，不會爆炸；  
5) 儲能的效率高。鋰電池在前四方面都很糟糕，所以不用考慮。
- 目前有兩個技術很有希望，我尤其喜歡全釩氧化還原液流電池（或釩液流電池 Vanadium Redox Battery，縮寫：VRB）。它滿足所有前述的五項要求，而且在物理和工程上都是很簡單而無重要障礙的。目前所需要的，是為商用做最後一些實用化細節的微調和優化，如果有足夠的政策支持，幾乎可以確定在2025年前能搞定。



- 另一個技術用的是氫氣。電力供過於求的時候，電解水來產生氫，供不應求的時候，再用燃料電池（Fuel Cell）來發電。我以前解釋過，氫氣化學活性非常高，很容易爆炸，所以它的安全性是有問題的，但是因為這裏只須要儲存氫氣而不須要運送，還是有可能克服這個安全問題，效率上還可以。
- 尤其是如果和高溫氣冷核裂變反應爐結合，後者可以先把水加熱到 $900^{\circ}\text{C}$ （目前的中國技術）或者甚至 $1100^{\circ}\text{C}$ （如果改用氫氣直接推動渦輪），那麼電解所需的電力更少，效率會更高。

- 對氫能源的保留態度，主要源自於技術上的相對不成熟，氫氣儲存、結合高溫氣冷核裂變反應爐的電解和高效燃料電池都會比全釩氧化還原液流電池更複雜、更花時間、更危險。但是這些仍然是工程上可以解決的問題，所以氫儲能做為一個技術備份，準備在2035年左右商用普及化，還是很值得投資的一個選項。
- 對成功機率是以物理學人的態度來做估算，也就是只要求到數量級級別的精確。換句話說，是分類為：99%，90%，50%，10%，1%，0.1%。。全釩氧化還原液流電池是我所知唯一在50%那一級的，氫儲能則是在10%那一級。我說在2035年之前電網儲能技術會有大的突破，正是因為我相信還有許多在10%或1%級別的技术會被嘗試。

## 全釩氧化還原液流電池(VRB)

### 全釩氧化還原液流電池

比能

10–20 Wh/kg (36–72 J/g)

能量密度

15–25 Wh/L (54–65 kJ/L)

充電/放電效率

75–80%<sup>[1] [2]</sup>

時間耐久性

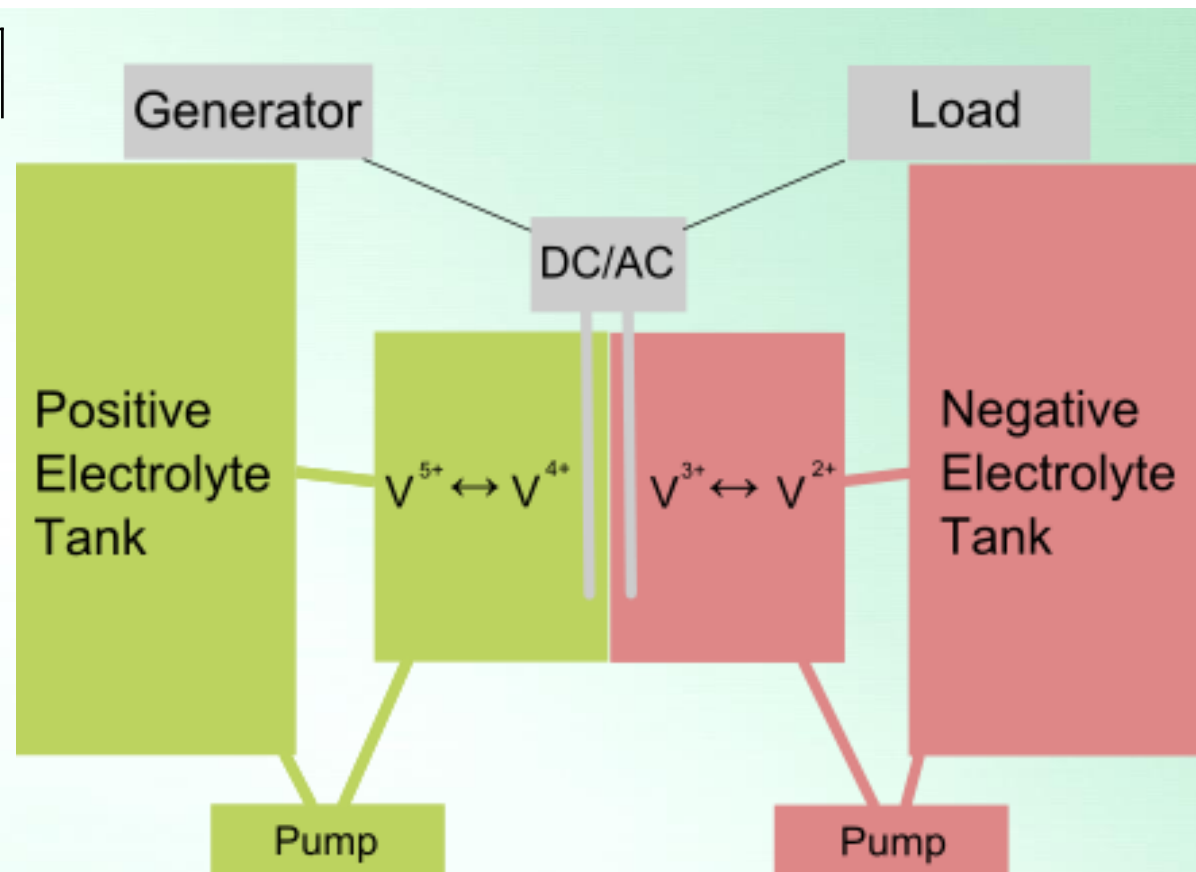
10–20 年

循環耐久性

>10,000 充電周期

標稱電池電壓

1.15–1.55 V

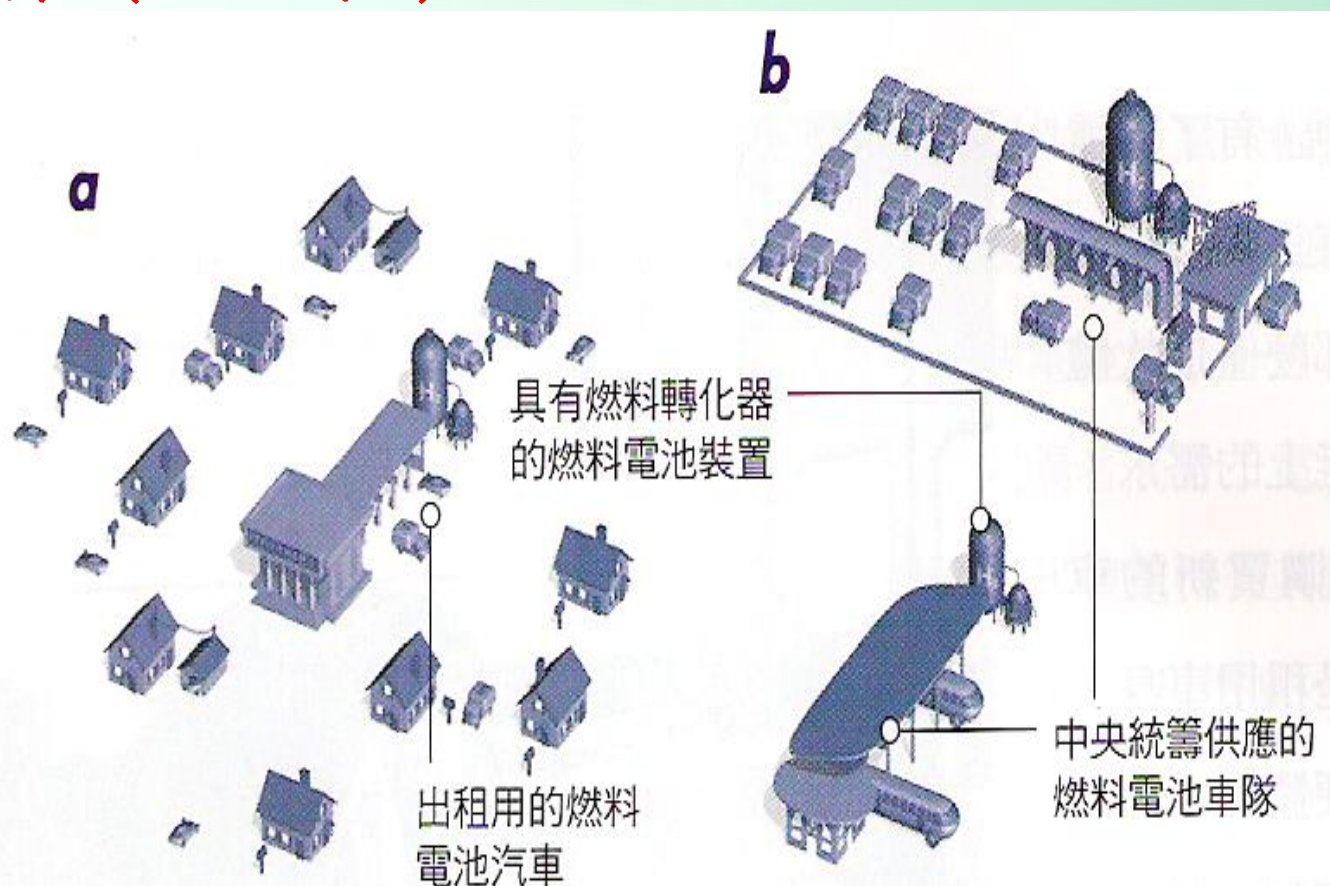


# 邁向氫能源社會(願景)

數年內

**a** 少數正在進行測試的原型車，可以租用給居住在氫燃料站附近的居民。

**b** 每天都會返回車庫的運輸用及商業用車隊，例如公共汽車、郵件貨車及快遞貨車等，開始由各地的中央氫燃料站補充燃料。



[4:09] [氫氣製造原理](#)



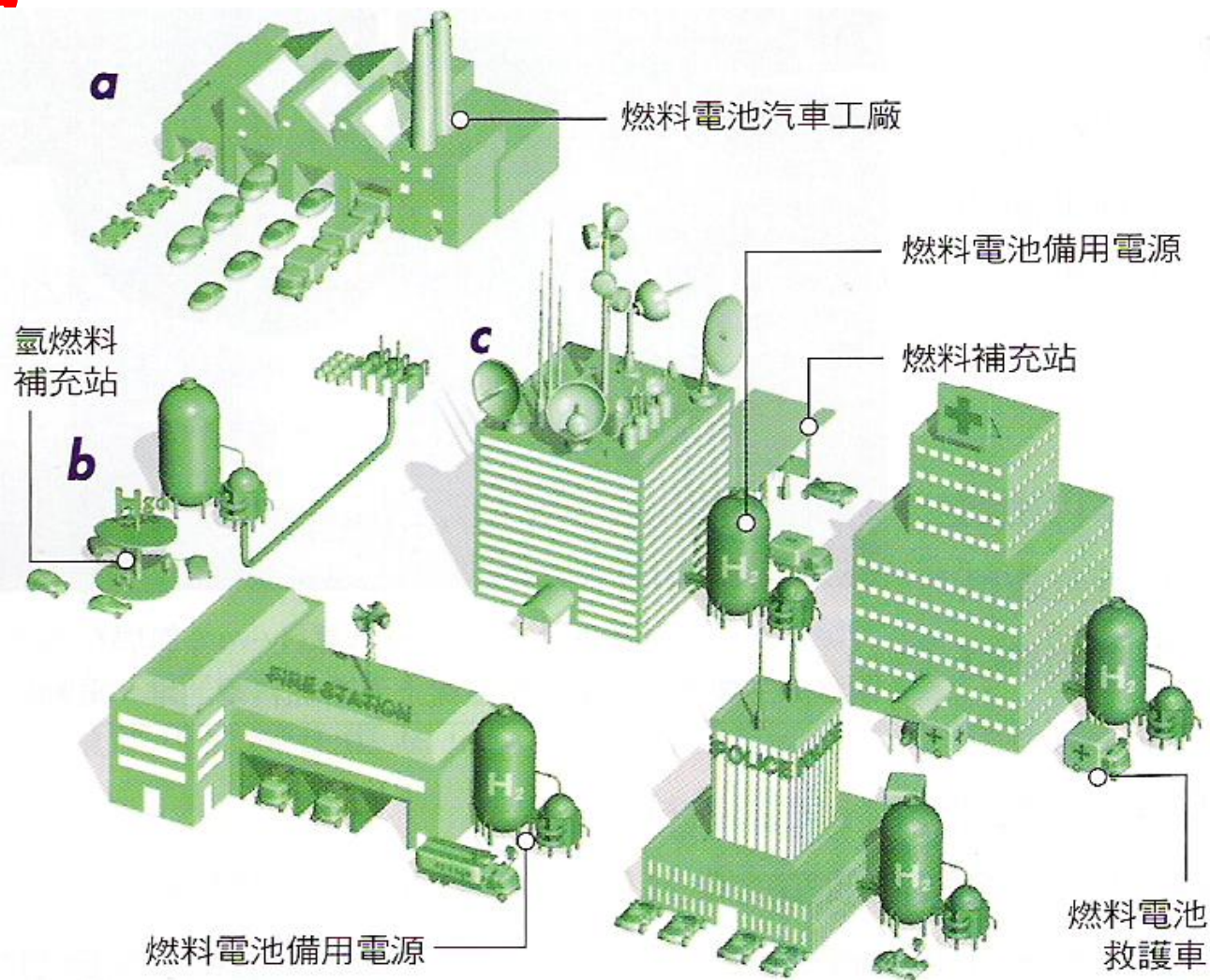
# 邁向氫能源社會

10年內

**a** 車廠製造出以燃料電池為動力的「滑板型」底盤及數款「扣上式」車身。

**b** 建有天然氣轉化器（化學裂解裝置）的氫燃料站，為初期生產的汽車提供氫燃料。

**c** 能夠將天然氣轉化為氫氣並供給燃料電池使用的固定式電力產生裝置，開始裝置在需要高度可靠、「優質」能源的企業中，提供給資料通訊、連續生產線或緊急醫療等方面使用。舉例來說，救護車及緊急用車輛就可在醫院的燃料電池裝置補充燃料。





# 邁向氫能源社會

10年後

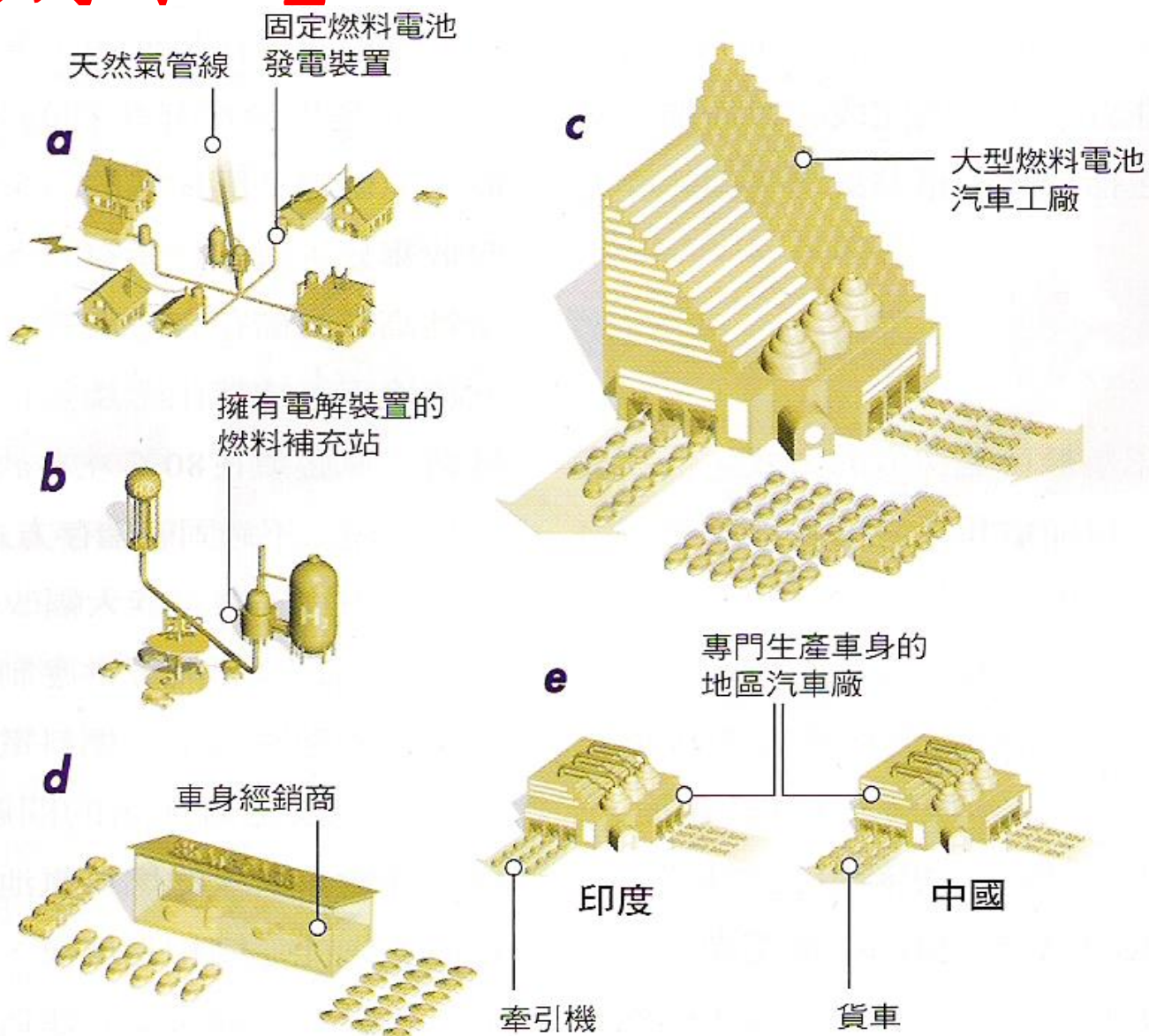
**a** 固定式轉化器及燃料電池裝置普及到更多企業中，最後，每個家庭還可將多餘的電力賣給所謂「分散式電力系統」中的電力網路。這些裝置將開始在各地為員工提供氫燃料。

**b** 有更多使用電解器的氫燃料站陸續成立。

**c** 大型組裝工廠推出三種大小的燃料電池滑板型底盤（小型、中型、大型）。

**d** 經銷商銷售各種形式的新車身，供車主用於自己原本使用的滑板型底盤。

**e** 各地區的工廠製造各種車身供應當地市場（例如在印度或中國生產牽引機與貨車）。



## 翻譯名詞註解：

- 太陽熱能水分解系統(Solar Thermal Water-Splitting, STWS)
- 熱化學產氫法(two-step thermochemical cycle)
- 溫度擺盪觸媒水分解系統(temperature-swing catalytic water splitting)
- 科羅拉多大學波爾得分校(University of Colorado, Boulder)
- 等溫水分解系統(Isothermal Water Splitting, ITWS)
- 鐵鋁循環(hercynite cycle)
- 德國科隆太陽能研究所(Institute of Solar Research, in Cologne, Germany)
- Tags: [Alan W. Weimer](#), [Charles B. Musgrave](#), [再生能源](#), [太陽能](#), [愛倫·維莫](#), [查爾斯·馬斯格雷夫](#), [氫能源](#), [觸媒轉化](#)