



未來的 氫能經濟

氫的來源（水）取之不盡，用之不竭，
而且燃燒後的產物也是水，非常乾淨。

但生產氫需要耗費很多能源，
也產生了環保的問題，且能源轉換技術有待提升，
供需系統也尚未建立。

■ 柯賢文

能源問題

自從 1970 年代的石油危機發生以後，先進國家對替代能源的尋找轉趨積極，氫能尤其受到重視。因為氫的來源（水）取之不盡，用之不竭，而且燃燒後的產物也是水，非常乾淨，絕對符合環保要求。

2001 年發生的 911 慘劇，使美國警覺到不可以太依賴回教世界的能源，因此美國能源部於當年 11 月在華府舉辦一個氫能源會議，目標在為美國未來尋找一種更安全和更乾淨的能源，結果一致認為氫氣是未來重要能源之一。

這次會議的結論大致如下：（1）減少對進口石油的依賴是一個國家安全問題；（2）必須降低排放會產生空氣污染及溫室效應的氣體；（3）氫氣是美國解決未來能源問題所必需的；（4）所謂的氫能經濟已經來臨，但可能需數十年才能轉換成功；（5）即使使用氫能的機具都已成熟，內部的運作系統仍有待建立；（6）氫能經濟的發展會面臨「雞生蛋、蛋生雞」的問題。

美國每天消耗約 2,000 萬桶的石油，其中有三分之二使用在驅動超過 2 億輛的機動車輛上，因此氫能的主要目標就是取代汽油，本文也會以這為討論重點。氫能看似一片美好，但卻有很多問題待澄清、討論和解決，因此所謂的「氫能經濟」可能需數十年才能轉換成功，故目標訂在 2030 年之後。這些問題包括生產、輸送、儲存、轉換、安全、成本、環保、以及運作系統等，每一項都是重要的關鍵技術，在沒有解決之前無法達到所謂氫能經濟的目標。

國內的石油完全依賴進口，卻幾乎每一家庭都有一輛汽車。中國大陸人口 13 億，近年來經濟快速成長，使汽車的需求急增，車輛總數達到一千多萬輛。如果有朝一日中國大陸機動車輛的數目達到先進國家的一半，對石油的需求及環境的衝擊令人不敢想像。另一個人口超過 10 億的大國印度，近年來的經濟發展也緊追在中國之後。希望擁有汽車以帶來生活方便是人之常情，因此，石油的供給以及尋找可能的替代品，是非常急迫的問題。由前一陣子石油價格的飆漲，可見與氫



攝影：張志銘

水是大自然中的重要資源，無論景觀、嬉戲、清潔、養殖、維持生命，沒一樣少得了它。現在科學家正嘗試由水取得氫，以解決能源短缺的問題。



汽車是現代生活中不可或缺的代步工具，但是駕駛汽車所需要的石油卻越來越難取得，這個問題相當嚴重。

能相關的問題應及早深入思考。

目前全球氫氣的產量每年約 5,000 億立方米，以美國為例，主要的用途包括氮的固定以生產氨氣供肥料的製造，不飽和油脂的氫化使液體的植物油固化，焊接，生產鹽酸，冶金還原，超導等低溫研究，以及太空計畫等。

可見當今氫工業的重點在化學品、石化工業、金屬冶煉及電子製程等，而生產氫氣應用在能源上仍處在實驗及萌芽階段。和氫工業相關的技術有生產、傳輸、儲存和轉換，以下逐項加以討論。

氫的生產

氫是結構最簡單的原子，只有 1 個帶正電的質子和 1 個帶負電的電子，宇宙大霹靂瞬間最先形成的原子

就是氫，因此它仍然充斥在宇宙間，估計占有 90% 的原子數及 75% 的質量。在地球上，氫是含量僅次於氧和矽的元素，但並沒有游離的氫氣存在。現今美國每年約生產 900 萬噸的氫（分子），其中 95% 是由水蒸氣和碳氫化合物反應而得。一般的方法是在高溫下使水蒸氣通過附有鎳基催化劑的含碳化合物，然後加壓吸附，就可分離氫氣。常用的含碳化合物是煤炭和天然氣，與水蒸氣作用的生成物是氫氣和二氧化碳。如何提升催化劑的效率及降低反應溫度以便把生產成本降低，是最重要的問題。

碳氫化合物的氧化是另一種熱反應生產方法，它是把限量的氧氣在高溫下，通過碳氫化合物。最常用的碳氫化合物是甲烷，反應生成物是氫氣和二氧化碳。由於需要純氧，所以成

本較高。上述方法都會產生大量的二氧化碳，造成溫室效應的環保問題。

電解水則是一種較為簡易的方法，氫離子在陰極被還原產生氫氣，氫氧離子在陽極被氧化產生氧氣。這確是一種簡易乾淨的方法，但耗電量太大。電解水的電極電壓是 1.23V，因此生產 1 公斤氫消耗的電量約 32.9 度，1 度電等於 3.6 百萬焦耳。因此電解水生產氫，只適合在電力便宜如水力發電區和離峰時段，或在實驗室中進行。

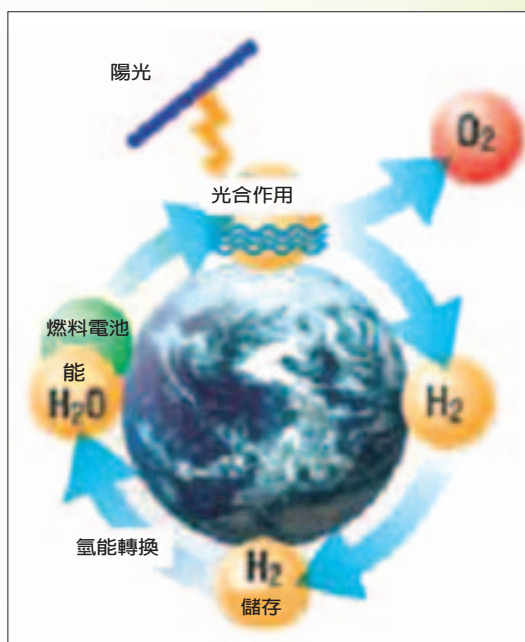
氫的價格如何呢？利用水蒸氣裂解天然氣生產氫的成本約每公斤 1 美元，但運費高達 2~4 美元，視路途的遠近而定，因此氫的價格約每公斤 3~5 美元。1 公斤的氫能大約相當於 1 加侖的汽油，目前的汽油每加侖約 2 美元，因此氫引擎汽車的燃料費用是

難以和汽油競爭的。以上都是先前在 2004 年所做的估計，現應相對漲價。如果以氫燃料電池驅動車輛，能源效率大約是引擎的兩倍，則氫的燃料費用是具有競爭力的。

可見氫的生產雖然是一個成熟的工業，但欲達到氫能的經濟效益，仍有下列問題待解決：(1) 價格太高，使消費難具誘因，(2) 需求量不足，這和價格是雞生蛋、蛋生雞的問題，(3) 產生大量的二氧化碳，(4) 新的生產技術有待研發。

研發中生產氫的方法，有以核能或太陽能熱裂解水、光電化學反應分解法、以及生質物的熱裂解法等，目標不外是降低成本及對環境的衝擊。水取之不盡用之不竭，因此由水分解產氫應是合理的思考途徑。分解水的能源必須很便宜，核能、太陽能還有風力都在考慮之列。

採用集中生產或分散生產的方式也須加以考



理想的氫能循環使用

慮，前者須選擇在遠離人煙的地區，可以採用多樣的生產技術，效率較高，但運送成本也較高，

後者則可以就地使用，運送不成問題。遠期的研發構想是建立氫養殖場 (hydrogen farm)。藻類的光合作用會產生氧氣，但科學家正在研究如何抑制氧的產生，以生成氫。

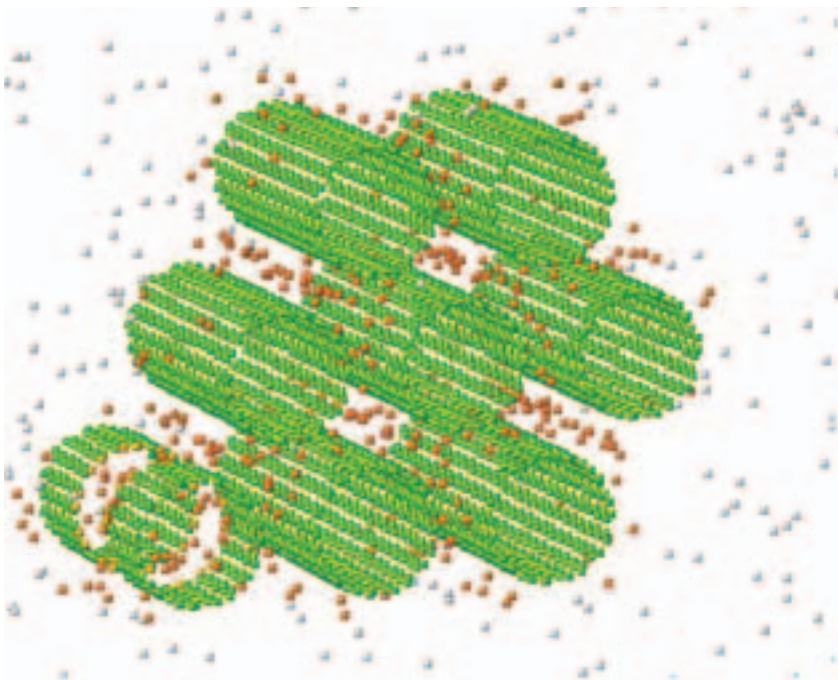
氫的傳輸

氫 (分子) 是最輕的化合物，它的沸點很低 (20.27 K)，單位重量的體積很龐大，再加上安全問題，運輸的成本非常昂貴。由於現今氫氣最大宗的用途是化學工業，因此大多就地生產，直接以管線傳輸供應工廠。管線的材料一般使用碳鋼，但它會和氫發生氫脆 (hydrogen embrittlement)，有安



李鼎雄攝

水取之不盡用之不竭，因此由水分解產氫應是合理的思考途徑。



氫氣在奈米碳管上的吸附

全的問題，必須嚴加注意。

遠地的傳輸則須把氫氣加壓或液化，然後以特殊的罐裝拖車運送。不管是以何種方式運送，都需要經過加壓的過程，這是非常耗費能源的。經過估算，加壓至 80 大氣壓的氫氣，含有的能量只有等壓等體積天然氣的三分之一。一輛能裝載 2,400 公斤天然氣的罐裝拖車，只能載運不到 300 公斤的氫。液態氫的裝卸容量可以 5 倍於高壓氫，但液化過程是非常費事的，而且只適合於短距離的運輸。

氫的儲存

由於氫的密度很小，再加上安全的考量，它的儲存一直是一個頭痛的問題。氫可以用氣體、液體或固態化合物 3 種形態儲存。

壓縮氫氣 氫氣可以經壓縮後儲存在加壓罐內，氣體的壓縮或液化是一種很昂貴的過程，壓力可以高至 400 大氣壓，因此需要定期檢查它的安全。

液態氫 氫分子的正常沸點是 20.27 K 或攝氏零下 253 度，液化的

以一部汽車須具有足夠行駛 500 公里的油箱來衡量，目前的氫能儲存方式都無法和汽油箱相提並論。因此必須尋找一種質量輕、體積小、價格便宜，而且使用安全的氫儲存方法，否則氫能經濟難以推廣。

過程需要壓縮和冷卻，會用掉很多能源。由於溫度超低，液態氫的儲存需要特殊的低溫裝置，有些還是以雙層絕熱，外層存有液態氫，以減少氫氣的蒸發。另一個問題是蒸發氫氣的排放，也需要妥善的處理。

固態形式 這並不是以固態氫的形式儲存，一般是使氫氣吸附在金屬氫化物或奈米碳管上加以儲存。金屬氫化物有很多種，氫的吸附率大多是本身重量的 1~2%，有些可以高達 5~7%。金屬氫化物也會透過化學吸附的方式吸附其他氣體，但不釋放，因此釋放出來的氫氣是很純的，惟金屬氫化物會因受污染而使存放壽命減少。

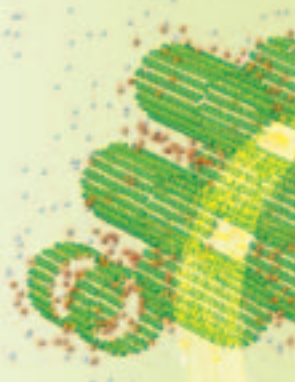
奈米碳管的管徑由數個至數十奈米都有，空孔的比率很高，是一種理想的儲氫材料，理論上可以儲存本身重量的 4.2~65%。奈米碳管及其儲氫技術仍在研發階段。固態儲氫方式的最大優點就是安全和方便。

3 種儲氫方式的能力比較，表內數據尚未把容器估算進去

儲存形式	氫原子/cm ³ (× 10 ²²)	氫重量比 (%)
氫氣，200大氣壓	0.99	100
液態氫，20K	4.2	100
氫化鎂 (固態)	6.5	7.6
鎳鎂氫化物 (固態)	5.9	3.6
鈦鐵氫化物 (固態)	6.0	1.89
鎳鐳氫化物 (固態)	5.5	1.37

一些化學反應的反應熱或燃燒熱

化學反應	燃燒熱
氫氣和氧氣反應產生水	285.8 KJ/mole
碳和氧氣反應產生二氧化碳	393.5 KJ/mole
甲烷和氧氣反應產生水和二氧化碳	890.3 KJ/mole
辛烷和氧氣反應產生水和二氧化碳	5,511.7 KJ/mole
甲醇和氧氣反應產生水和二氧化碳	726.5 KJ/mole
乙醇和氧氣反應產生水和二氧化碳	1,500.0 KJ/mole



未來的氫能經濟

燃料能量密度的比較

燃料	能量密度 (J/Kg)
氫	1.43×10^8
燃煤	0.33×10^8
甲烷	0.56×10^8
庚烷	0.48×10^8
甲醇	0.23×10^8
乙醇	0.32×10^8

以一部汽車須具有足夠行駛 500 公里的油箱來衡量，氫能不管是以高壓、低溫或金屬氫化物的方式儲存，都無法和汽油箱相提並論。因此必須儘快尋找一種質量輕、體積小、價格便宜，而且使用安全的儲存方法，否則氫能經濟難以推廣，高壓或低溫只適用於特定用途。解決之道，近期内須加速提升金屬氫化物的儲氫密度，長期則奈米碳管似乎是最為恰當的儲氫材料。

氫能含量

不管氫能是以何種形式使用，最終產物都是水，也就是被氧化成水。它到底存有多少能量呢？

根據氫和一些常用碳氫化合物的反應熱或燃燒熱的分析，氫確實有遠高於其他燃料的能量密

「油井到車輪」(well to wheels) 不同驅動方式及燃料組合的能源效率

內燃機	
汽油	12%
天然氣	12%
氫氣	12%
燃料電池	
氫氣	8% (電解水)
氫氣	22% (蒸汽裂解)
汽油	18%
甲烷	16%
乙烷	10%
汽電共用	17%

度，1 公斤氫約相當於 3.0 公斤的汽油。但這只是理論值，其他周邊設施如儲存箱並未考慮進去。實際上氫不管是以壓縮的氣體或超冷的液體存放，容器的體積都是非常龐大而笨重的。

能源效率

前述的燃料反應熱或能量密度只是一個理論值，既然石油的最大宗消耗是驅動機動車輛，而氫能未來的使用也以此為研發目標。燃料驅動車輛的方式有兩種，汽車以燃燒方式帶動內燃機，

電動車則由燃料電池放電，以電力帶動馬達。內燃機不管是燃燒汽油、天然氣或氫氣，效率約只有 12%。燃料電池放電帶動馬達，轉換為車輛的動力，其效率則約達 22%。

這些數據顯示燃料電池對傳統的內燃機是有競爭能力的，尤其是以蒸汽裂解產生氫氣更具有優勢。在氫氣儲存問題尚未合理

解決之前，發展氫氣內燃機似乎是必經之路，市區公車及卡車是適用的對象，因為它們有足夠的空間置放氫儲存箱，而且行駛路線固定，可設立統籌的加氫站。芝加哥公車已經使用氫能，而世界各大車廠也積極參與氫能車的研發。

氫能燃料電池是一個理想的使用方式，既安靜又無環保問題，以電力驅動馬達帶動車輛的效率是內燃機的一倍以上。燃料電池有多種型式，使用質子交換膜的氫能燃料電池可在低溫下運作（攝氏 60~100 度），目前的轉換效率約 40~50%，未來的目標必須提升至 80%。但不要忘記，電動車的電池也有多種選擇。傳統的鉛酸電池技術已非常成熟，鎳氫電池可以安慰的是它使用氫能，燃料電池則可以使用天然氣或甲醇，它們都是不可忽視的競爭者。

可攜式的小型氫能燃料電池已經發展成功，可使用於手機及筆記型電腦，只要儲存問題解決，長時間使用不是問題。就能源總量而言，它

雖微不足道，但附加價值高，而且數量龐大。

溫室效應

由於工業的發展及生活方式的改變，大量燃燒石油及煤，產生過量的二氧化碳，使大氣的生態失去平衡。太陽照射至地球的能量和地球表面輻射至太空的能量應達到一平衡狀態，但過量的二氧化碳吸收太多地球輻射的紅外線，減少散熱而造成暖溫的效果。尤其是近半世紀來，可以明顯地偵測出大氣溫度逐漸上升的趨勢，造成所謂的溫室效應。

氫氣的燃燒產物只有水，初看是絕對符合環保的要求，但實際上是否

如此呢？地球上並沒有游離的氫氣可供開採，現階段 95% 是由水蒸氣和碳化氫化合物反應而得，副產品就是二氧化碳。一般天然氣井本身就含有約 9% 的二氧化碳，相當可觀，使用前必須加以分離。即使是電解水生產氫氣，仍須消耗大量的電力，而我國大部分的電力來自火力發電，間接產生的二氧化碳很可觀。因此使用氫能並非沒有溫室效應的問題。

使用裂解氫的氫燃料電池雖然可減少二氧化碳的排放，但也不是完全

車輛每行駛 1 公里的二氧化碳平均排放量

CO ₂ 排放量	直接 (克)	間接 (克)	總量 (克)
驅動方式			
汽油引擎	325	94	419
柴油引擎	256	31	287
天然氣內燃機	256	94	350
氫氣內燃機	0	350	350
汽電共用	228	63	291
柴電共用	225	41	266
汽油燃料電池	188	53	241
甲醇燃料電池	169	63	232
裂解氫燃料電池	0	163	163
電解氫燃料電池	0	488	488

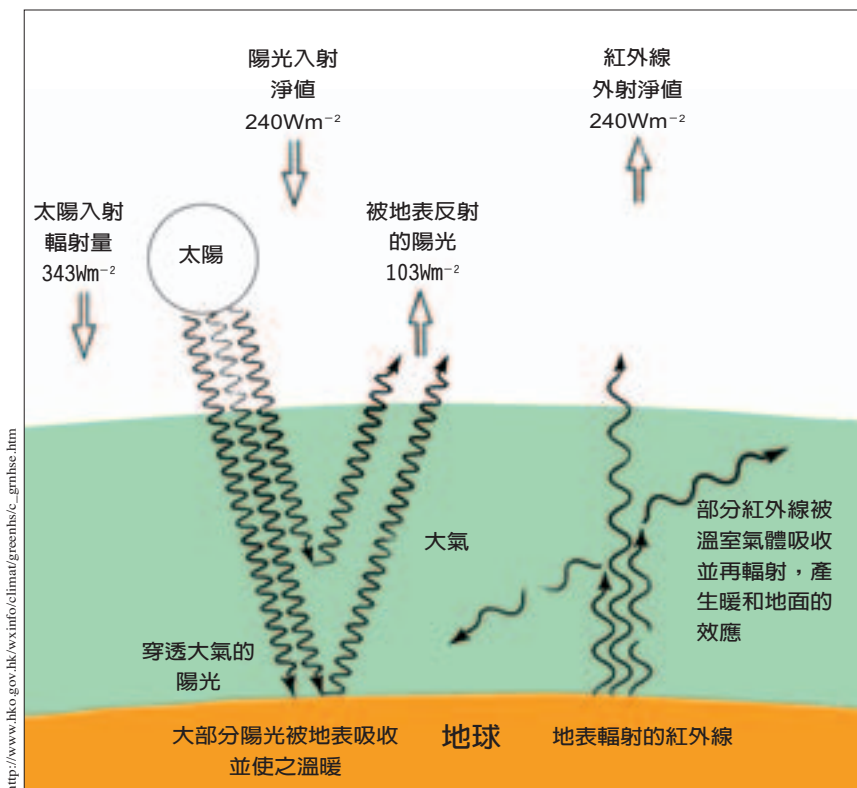
乾淨，製造的二氧化碳大約是傳統汽油引擎的 38%。唯一可以安慰的是這些二氧化碳排放入人煙稀少的發電廠或生產工廠，不會造成都市的空氣污染，但對地球的溫度效應是同等的。

安全問題

氫在常溫下是一種無色、無臭、無毒的氣體，甚至燃燒的火焰都是無色的，很不容易察覺它的存在。它的問題出在很容易燃燒和爆炸，氫在低至 20 K 的溫度就達到引燃點 (flash point)，其混合氣體的引爆範圍非常廣，在空氣中含有 3~75% 體積的氫氣都可引發氣爆，而天然氣的範圍是 5~15%。

除了前述可能的氫脆問題之外，由於氫是分子量最小的氣體，運動速度非常快，滲透性也最強，因此所有的管線或儲存槽的界面連接都須非常嚴緊，氫氣閥需要特別設計，否則很容易產生漏氣問題。一般天然氣的規範已不適用，氫氣的處理另有它的安全規範。

任何含有高能量的燃料都具有危險性，只要有適當的安全措施，氫並



溫室效應 假若沒有大氣層，地球表面的平均溫度不會是現在合宜的攝氏15度，而是十分低的攝氏零下18度。這溫度上的差別是由溫室氣體所造成的，這些氣體吸收紅外線輻射而影響地球整體的能量平衡。在現況中，地面和大氣層在吸收太陽輻射後，會釋放紅外線輻射到外太空。但受到溫室氣體的影響，大氣層吸收紅外線輻射的分量，比釋放到太空外的還多，使得地球表面溫度上升，這現象可稱為「天然的溫室效應」。但由於人類活動釋放出大量的溫室氣體，結果讓更多紅外線輻射折返到地面上，加強了「溫室效應」的作用。



張照輝

人類大量地超用地球寶貴的石油資源，但石油終有用盡的一天，氫是最可行的替代能源。

不比其他燃料危險。實際上氫氣燃燒得很快，去的也快，不會有延燒的問題。一旦發生意外，後果是不會比汽油等更嚴重的。

歷史上發生兩件眾所周知的氫爆炸意外事件。一是1937年的興登堡飛船降落時發生的爆炸，事後的調查發現是火花先引燃氣囊材料的結果。死亡37名中有35名是跳船而死的，只有2名是被燒死的，而其原因是外套附著有飛船上的柴油。另一事件是1988年太空梭升空時發生的意外，由於連接液態氫燃料箱的墊圈出現裂縫使氫氣外漏，在這種情況下，任何一種燃料可能發生的後果應是沒有差別的。

未來展望

人類大量地超用地球寶貴的石油資源，儘管數十年來常有驚人的發現，開採技術也不斷地提升，外海油井已開挖深至18,000英尺，附在泥沙上的焦油也具精煉價值，一時使人有油源不成問題的錯覺，因此從90年代起大功率的休旅車開始盛行。但石油終有用盡的一天，問題在開採量何時到達頂峰。美國能源部已於2001年的能源會

議中有了共識：必須減少對石油的依賴，而氫是最可行的替代能源，因而有必要建立一個供需架構使其達到氫能經濟的規模。

建立一個氫能供需架構的各相關問題，已在文中論及，可確定的是短期內無法達到具誘因的氫能經濟規模。國內在發展氫能工業時必須詳加分析，能量轉換技術只是眾多問題的一個環節，供需架構系統的建立才是氫能經濟的關鍵。因此氫能經濟的建立，初期有賴政策的鼓勵，欲到達這目標，需要依循路圖（road map）建立氫的生產技術、氫的運送技術、氫的儲存技術、氫能的轉換技術、建立全球的共識、建立相關安全規範、以及教育民眾、企業界及政府官員氫能的重要性及優點。

循著這條路，可以使參與氫能經濟開發的工作人員，思考如何規劃近期、中期及遠期的計畫。

柯賢文

中山科學院材料暨光電研究所



未來的氫能經濟