開

綠色化學，

在日常生活中，「化學」可說是如影隨行地跟著我們：打從早上起床穿的衣服，到晚上睡覺前使用的牙膏與牙刷，
化學都為我們帶來方便，但也帶來相對的不便與煩惱。
十八世紀中歐洲的工業革命，隨著蒸氣機的發明，機械取代了大量人力，也促成生活品質的大幅提高；
二十世紀石油化學工業的發展，更使得我們生活周遭的日用品相繼為化學產品取代，
大量生產、價格低廉且耐用美觀，正是這波化學產品最好的描述。
但是，這些化學產品被大量使用後，所衍生出的化學汙染卻也相對影響我們的生活與環境，
酸雨、溫室效應及地球氣候變化等，環境問題逐漸浮現在我們生活中，
不禁令我們要問：「化學究竟帶給我們是好還是壞？」
最近十年中，因環保意識的抬頭，人們察覺到化學汙染環境的嚴重性，
在西元 2001 年《京都議定書》中，人們開始限定二氧化碳的排放量，並訂定未來的減量計畫，
之後化學產品的製造過程及其產生的環境影響，逐漸為人們提出討論。
「綠色化學」的觀念也在這波新的環保運動中被提出。

而什麼是「綠色化學」呢？
綠色化學就是利用環保觀念，設計較能省能源、低汙染的反應過程，
來製造化學產品，並減低化學反應對環境的衝擊，當然這也包括新能源、新反應及相關節能產品。
1998 年 Panl Anastas 也提出綠色化學的 12 項原則，來落實綠色化學的實施：
1. 防止及預防化學廢棄物的產生；2. 設計低毒性的化學產物；
3. 降低化學合成的危險性；4. 使用再生及可回收的原料；
5. 使用催化劑而非當量試劑；6. 設計可分解的化學品；
7. 充分利用化學反應物的所有原子；8. 使用更安全的溶劑及反應條件；
9. 提升能源的使用效率，反應條件以常溫常壓為主；10. 設計可分解的化學產品；
11. 生產過程嚴格監控、減少汙染發生；12. 慎選化合物，以降低意外的發生。
最近歐美各先進國家為國家的永續經營，無不盡全力，以發展綠色化學及綠能源，
例如：巴西現正在使用的乙醇石油、美國發展的氫氣電池及可用於淨米的超臨界流體，
還有最近為科學家所重新提起的核能等，都是新近與綠色化學有關的產物。
所以本專輯將以「綠色化學知識網路」「綠色化學溶劑」「綠色（再生）能源」及「綠色核能」等方向，
為各位讀者介紹此一為世界各國所重視的綠色主題。

王伯昌：任教淡江大學化學系

啟地球永續的扉頁

通往綠色化學的任意門

趙奕姿

清潔的水、充足的食物、唾手可得的能源、日新月異的醫藥、光鮮亮麗又輕便的衣料與塑膠用品。百年前的古人若來到現代世界，看到滿足人類基本需求的項目有了驚人的躍進，生活的舒適度與壽命大為增加，必定會好奇什麼是背後的推手？而在時光隧道與古人相遇的現代科學家，會毫不猶豫地告訴他們，這魔術般的變化，倚靠的是蓬勃發展的化學與化學工業。

然而載舟之水再怎麼迷人，亦有覆舟之虞。在化學工業造成汙染的地區，人類與其他生物的生存受到威脅。因此，化學雖是提高人類生活品質的大功臣，在社會大眾心目中的印象卻是負面的。問題的癥結在於：多年來化學工業並不排斥使用或生產有危險性的化學物質，總是自恃於有將其侷限於一隅的能力，認為這樣便可以把危險降到最低。但意外總有發生的時候，現代資訊發達，不論哪個國家的化學工廠發生事故，即刻便傳遍全球，工廠產生的廢水與廢棄物更是惡名昭彰。因此，化學就算帶來再多的便利，提到化學工廠，無人不皺起眉頭提高警覺。

綠色化學意識抬頭

上世紀末，國際社會已經體認到人類社會如欲永續發展，化學工業必須重新設定思考原點。美國環保署提出的「綠色化學」便著重於自源頭預防或降低汙染，也就是鼓吹少用、少生產毒害物質，如此可以直接降低汙染的機率。綠色化學的道理說起來再簡單不過，在實際上卻考倒接受傳統訓練的化學家；就如同在一個慣於生產廉價衣物的地區，忽然要當地的服裝設計師設計出國際一流的精品，沒有扎實的訓練，實在無法立刻夢想成真。因此雖然綠色化學（在許多地區稱為永續化學）已被提出十幾年，2006 年美國教授 Michael C. Cann 統計 141 本化學類教科書，卻僅有 33 本提及綠色化學，其中大多還只是將相關資料安排在補充教材的部分，與其重要性完全不成比例。用先前服裝設計的例子來比喻，目前的狀況是連訓練教材都仍在發展階段，遑論普遍的扎實訓練，雖然偶有幾件設計作品令人驚豔，提供了幾款流行叫座的款式可供後進參考，但離全面地提高設計水準，仍有段極大距離。

在這樣的大環境下，無論是教授或是學生，其實是站在差不多的起跑點上，思考要如何進入一片陌生的知識森林，並在其中披荊斬棘走出一條光明大道。稱之為光明大道一點也不為過，在環保意識高漲的歐洲（化學工業在此雇用了170萬人，為歐洲第三大工業），人們深刻地體驗到：旨在降低汙染、節約能源、節省物料、鼓吹使用可再生原料的永續化學，不僅對社會有益，也是未

來化學工業保持競爭力的核心。有鑑於此，歐洲化學工業委員會（Cefic）與歐洲生化工業委員會（EuropaBio）一起成立了以永續化學為願景、並強調創新的「歐洲永續化學科技平台」（SusChem）。

雖然現在大家認為永續化學攸關競爭力，但當初願意往這方面努力的化學家，僅是抱持著促進人類社會永續發展的理想色彩，例如：美國緬因州的John C. Warner教授發揮化學家的專業角色，研究如何將馬鈴薯澱粉轉化為可用來製造食物包裝及布料的生化高分子（biopolymer），這樣一來，當地盛產但有一半賣相不佳的馬鈴薯，便可以得到更好的利用。這位說過化學發明可以拯救世界的學者，甚至遠赴南非，與非洲化學家與藝術家討論綠色化學與永續發展；化學家可以思考如何解決當地的問題，減少對外的依賴，而藝術家可以幫忙在識字率不高的社區，傳達永續的概念。

入世理想家留下的寶藏

正因早期跳入綠色化學研究範疇的化學家，大多有一份入世的情懷，常將他們整理好的資料放上網路，而各國的化學學會認知到綠色化學的重要性，亦主動提供許多訊息與內容，因此在網路上可以找到不少自學的素材。例如：有「綠色化學之父」之稱的Paul T. Anastas介紹綠色化學的PowerPoint檔案、美國奧勒岡大學綠色化學的實驗內容，美國化學學會在2007年召開的永續議題會議，更是全程錄影供人下載；美國化學會最令人訝異之舉，則是將公開販售的英文版綠色化學實驗課本，翻譯成簡體中文版，供人免費下載。

若是讀者偏好中文方面的資料，則需要加強閱讀簡體中文的能力，因為目前綠色化學的中文網路資料以簡體中文為主，例如：中國大陸四川大學、中山大學正逐漸把綠色化學的授課內容上網。在台灣方面，台灣大學劉廣定教授亦於2008年初將其「永續化學概論」的課程內容全部上網。如欲瀏覽頂尖的綠色化學研究或工業應用，可至美國總統綠色化學挑戰獎的網站，瀏覽過去得獎紀錄的介紹。根據美國化學學會出版的*C&EN*雜誌所載，自1995~2007年得獎的57項突破性技術，每年可減少1億4500萬磅有害化學品的使用、5700萬磅二氧化碳的釋出，並省下5500萬加侖的水。

目前，許許多多與綠色化學相關的資料或訊息，散落於不同角落，這種情形讓有心進入綠色化學世界的人，得要各顯神通，也難怪綠色化學被提倡了超過15年，卻仍處於需要大大推廣的階段。若希望讓化學家在設計化學反應時，有工具可以迅速地判定每個環節是否符合環保，不必一一查詢資料，讓教育者快速地接觸到前人發展的教材，不必重頭來過，讓有心提倡綠色化學的人，可

國際重要化學組織建立之綠化學網站

1. IUPAC Green Chemistry Directory：
   http://www.incaweb.org/transit/iupacgcdir/INDEX.htm
2. Green Chemistry Network：
   http://www.chemsoc.org/networks/gcn/
3. ACS Green Chemistry Institute：
   由 http://portal.acs.org 進入美國化學會後，在「Emerging Science」的部分可找到「Green Chemistry Institute」之連結。

國科會化學研究推動中心建立的「綠色／永續化學網路資源共享網」。

潮下，找到立錐之地。目前首要之務便是推廣綠色化學，增加施行綠色化學的人口。對新興學門而言，網路上的資訊是很重要的一環，假如能從網路上的大量資訊中挑選適合的材料，並利用網路來推廣綠色化學、降低進入綠色化學的門檻，無形中將節省許多人力。問題是，誰來挑選所謂的「適合的材料」？網路上維基百科（Wikipedia）的成功崛起，提供了一個很好的思維方式：人人可以使用、人人可以貢獻；在互助的模式下，維基百科迅速地取代了傳統的百科全書。

以找到共同努力的夥伴，「資料庫」與「專家系統」的建立勢在必行。事實上，具有上述功能的資料庫與專家系統在美國都已逐漸成形，並且可以在網路上免費使用或下載，雖然功能或內容尚不完整，但未來的發展值得關注。

台灣化學界的人口與世界其他地區比起來不算多，在有限的人力下，不可能像美國那樣創造大量資訊，但只要掌握與運用資訊，仍可能在全世界追求綠色化學的這股浪

台灣的綠色化學平台

隸屬於國科會的化學研究推動中心，提供了一個基於互助概念的網路平台，讓使用者可以提供連結，有助於他人連結至經典或是有趣的綠色化學資訊（綠色／永續化學網路資源共享網：http://www.sinica.edu.tw/chem/gc/）。

這個平台與世界上大部分綠色化學網站

資料庫與專家系統

1. 美國環境保護署發展的 The Green Chemistry Expert System（GCES）：
   http://www.epa.gov/greenchemistry/pubs/tools.html#expert
2. Green Chemistry Assistant（GCA）可計算原子經濟度、查閱化學物質之物理性質與安全資料：
   http://fusion.stolaf.edu/gca/
3. Greener Education Materials for Chemists（GEMs）集結教材資訊，並建立 Green Chemistry Map，讓全世界關心綠化學的教育者或研究者可以顯示其所在位置與關心之主題：
   http://greenchem.uoregon.edu/gems.html
   http://greenchem.uoregon.edu/Pages/MapDisplay.php
4. University of Minnesota Biocatalysis/Biodegradation Database（UM-BBD）提供與微生物酵素催化相關之訊息：
   http://umbbd.msi.umn.edu/index.html

不同之處，在於它儘量將藏在層層連結之下的有用資訊，以較平面的方式呈現出來；在首頁即點出「教育」「合成」「觸媒」「溶劑」「反應源」「生質能」「分析」「毒性」等主題，而每個主題下的連結，以「引言」「實例」「書籍」「回顧論文」「新聞」「重要網站」「資料庫」「演講內容」「獎項」等方式分類。

本文前述的各大網站都可以由這裡連結。這個平台就如同大家共同擁有的筆記本，下次拜訪時，若想再度瀏覽同樣內容，只需經過兩個頁面（首頁與主題頁）即可到達，不需苦苦回憶當初是用什麼關鍵字才找到這筆資料。否則網路資訊網網相連，有時還真回想不出某筆資料是如何連結過去的。

目前這個網站有一部分的連結，是需要付費的電子期刊內容，這部分除了大專院校與研究機構的人員外，一般大眾可能無緣觀看，但其他部分均屬公共財，所有人都可以閱讀。有興趣的讀者不妨造訪一番。光是瀏覽主題頁下的引言與連結標題，便可感受到綠色化學概念在化學各領域上帶來的影響與造成的改變。

網路這個神奇的媒介，藉著群體的力量，將資訊由書本中解放出來，送到每一個使用者的面前，知識的學習已經越來越沒有特權階級的存在。在現在這個時代，沒有想法就不可能跑在前面，對於眾多攸關人類永續發展的課題，就算手邊沒有教科書，也可以想辦法累積自己的知識、整理出一套認知與想法。對於綠色化學而言，網路上的資料量已經累積到一個有利於自學的臨界點，有志於此的讀者不妨上網試試；等到逐漸有了心得，也別忘了上網貢獻回饋，讓綠色化學這個雪球能夠越滾越大，促使永續的人類社會早日降臨。

趙奕姼：任職中研院化學所

諾貝爾的榮耀

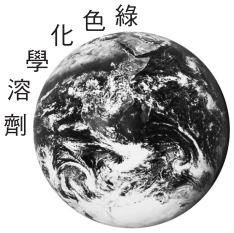
天下文化 www.bookzone.com.tw

完整收錄歷年科學桂冠的獲獎事蹟
讓您更貼近大師敏銳的心靈
掌握最新的科技脈動

諾貝爾的榮耀——物理桂冠 定價350元
諾貝爾的榮耀——化學桂冠 定價330元
諾貝爾的榮耀——生理醫學桂冠 定價320元
科學月刊 著　2005年4月25日出版

一年一度的諾貝爾獎，不僅是全球科學界每年最大的盛事，更代表了科學成就的頂峰。科學家沒有一天不在挖掘你意想不到的事實，《物理桂冠》為你介紹大至宇宙結構、小至夸克作用的近代物理學精華。《化學桂冠》告訴你科學家如何利用「雷射飛秒光譜學」偵測化學反應；電影中複製恐龍的PCR技術竟是出自諾貝爾化學獎得主！《生理醫學桂冠》讓你掌握生物科技的最新動向，看看科學家如何突破器官移植的重重關卡；如何揪出狂牛症的罪魁禍首。此外，你可以從這套書中，了解楊振寧、李政道、丁肇中、李遠哲、朱棣文、崔琦等華人科學家的耀眼成就。(WS073、WS074、WS075)

★ 歷年諾貝爾科學桂冠的獲獎事蹟與珍貴照片，一次完整呈現
★ 收錄數十幅黑白解說插圖，圖文對照，更貼近大師的科學風采
★ 由《科學月刊》邀請各領域的學者專家執筆
★ 台大物理系教授高涌泉、台大化學系教授周必泰、長庚大學生命科學系教授周成功、國立自然科學博物館前館長周延鑫 專序推薦



高效環保尖兵 化學反應好幫手

鄧金培、曾茹薏

許多製造化學藥品所需的化學反應，通常是在有機溶劑的環境下進行，或是在分離純化的過程中，需要使用較多量的有機溶劑。因此，從對環境友善的觀點來看，避免使用有機溶劑，改用「綠色化學溶劑」來取代有機溶劑的角色，是有益於環保的。採用綠色化學溶劑的目的不僅是減少傳統揮發性溶劑的危害，有時還可提高整個反應的速率和產率。離子液體（ionic liquids）和超臨界流體（supercritical fluids）則是目前最常被使用的兩種綠色化學溶劑。

提升反應速率的離子液體

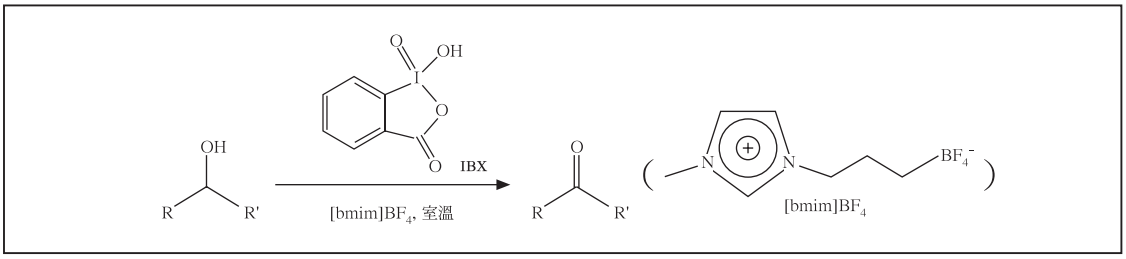
離子液體是由陰離子及陽離子所組成的有機鹽類，通常陽離子的部分是由有機分子構成（例如：四級銨鹽），而一般常見的鹽類則是屬於無機鹽類（例如：氯化鈉）。兩者不同之處在於，低溫時氯化鈉會形成固態晶體；而離子液體則仍以液態的形態存在；造成兩者物理性質差異的主要原因是：來自離子液體的離子堆積，不像氯化鈉晶體那麼整齊，所以在離子液體的分子之間，允許溶質分子分散於其中。

由於離子液體具有熱穩定度、極低蒸氣壓，且不可燃，對於有機或無機物質都有極佳的溶解度，因此可以取代傳統有機溶劑。例如：相較於使用傳統的極性溶劑（水、乙酸乙酯），在親水性離子液體[bmim]BF_4為溶劑的條件下，醇類化合物可以更快速地被碘酰基苯甲酸（iodoxybenzoic acid, IBX）氧化成醛類產物（圖一）。同時，副產物亞碘酰苯甲酸（iodosobenzoic acid）在離子液體[bmim]BF_4的回收是非常容易的。另外一方面，以PF_6陰離子取代BF_4陰離子的[bmim]PF_6離子液體，也在烷基化反應（alkylation）中扮演溶劑的角色（圖二）。產物的結構分析證實，烷基化反應幾乎只在「氮原子」的位置上發生，這顯示以離子液體為溶劑，有助於提高烷基化反應的選擇性。

近年來，為了使聚合反應所產生的高分子能有較窄的分子量分布，通常會加入過渡金屬化合物（例如溴化亞銅）和鹼性配位基（base ligands），以控制初期形成的高分子鏈與尚未參與反應單體（monomers）的連鎖聚合反應速率。若是進一步以[bmim]PF_6取代傳統的有機溶劑（例如甲苯），則可在更低的反應溫度下，得到更窄的分子量分布。

百變的「超臨界流體」

「超臨界流體」是物質在所處環境的外界溫度和壓力，已超過了本身的臨界溫度和臨界壓力下，所呈現的汽、液共存狀態。若以二氧化碳為例：在溫度為 31.1℃與 72 大氣壓下，二氧化碳即呈現超臨界流體狀態



圖一：以親水性離子液體[bmim]BF_4為溶劑，可使醇類化合物更快被氧化成醛類產物，且副產物在 [bmim]BF_4中回收容易。

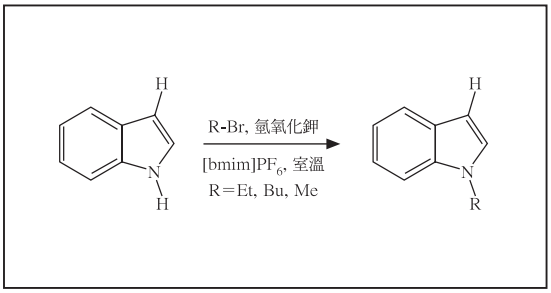
（圖三）。相較下，氨則有較高的臨界溫度和臨界壓力（132.4℃與111.7大氣壓）。只要溫度和壓力高於臨界點，超臨界流體所需的性質可藉由改變溫度和壓力來任意調整。

目前為止，最常被廣泛使用的超臨界流體之一為二氧化碳。這是由於它的臨界溫度與臨界壓力比起其他物質低，且對許多低極性的物質來說，有很好的溶解能力。並且二氧化碳是無毒、不助燃、低活潑性，且容易取得。超臨界流體二氧化碳目前最廣泛的應用，是在咖啡豆處理過程中去除咖啡因（decaffeination）的過程；在使用超臨界流體二氧化碳之前，二氯甲烷（CH_2Cl_2）是這個萃取步驟所採用的有機溶劑。雖然沒有直接的證據顯示二氯甲烷會殘留在萃取後的咖啡豆內，但是對身體健康仍有潛在性的風險。因此，目前所採用二氧化碳去除咖啡因的方法，是較符合健康與環保的。

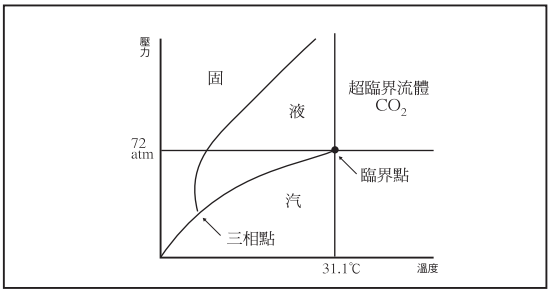
另外，使用過的二氧化碳可以再回收運用，是較經濟的做法。至於化學反應的部分，許多氫化反應很早就採用這種超臨界流體二氧化碳作為溶劑；最主要原因是，相較於有機溶劑，超臨界流體二氧化碳與氫氣有更高的互溶性，藉由這個特性，可使氫化反應不受限於氫氣的溶解度，並可以控制整個反應的速度。

以過渡金屬鈀（Pd）和銠（Rh）所催化的氫化反應為例，一般的做法是利用高分子當作保護劑和載體，先將金屬錯合物還原成奈米金屬粒子，包裹在高分子內，然後再加入反應物，最後是導入超臨界流體二氧化碳和氫氣以進行反應（圖四）。因為氫氣的濃度非常的高，所以所需的反應時間大約可控制在一小時內。另外，雖然利用鈀催化的Heck和Suzuki反應是形成C－C鍵常用的方法，卻有催化劑難以分離的隱憂。在不使用有機溶劑的情況下，超臨界流體二氧化碳便可以解決這棘手的問題，達到催化劑回收的目的。

除了上述的幾個均相反應的例子（需要溶劑的參與），仍有許多的化學反應不需要溶劑的參與，例如：非均相的催化反應。特別是固相－氣相的催化反應，對石化工業和空氣汙染防治占有非常重要的地位。另一方面，有機化合物汙染源（例如C_xH_yCl）便可以藉由光分解的催化反應，完全轉變成對環



圖二：用 PF_6 陰離子取代了 BF_4 陰離子的[bmim]PF_6 離子液體，是一種溫和的溶劑，並可以有效促進烷基化反應（alkylation）的進行。



圖三：二氧化碳是最常被廣泛使用的超臨界流體，在溫度為31.1℃與72大氣壓下，二氧化碳即呈現超臨界流體狀態。

境無害的無機物（例如CO_2、H_2O、HCl）。這個類型的光催化反應，在廢水處理和空氣汙染防治方面，具有極大的應用潛力。

以市面最常見的二氧化鈦光觸媒為例，應用的原理就是利用二氧化鈦奈米粒子吸收外界所供給的紫外線後（例如太陽），價帶（valence band）的電子吸收紫外線，會躍遷到導電帶（conduction band）而產生電洞，此時的二氧化鈦就具有氧化的能力，可以將空氣中的汙染源完全氧化成二氧化碳和水。如果將非常細的二氧化鈦粉末塗在外牆的玻璃表面上，就可以藉由太陽所照射的紫外線，將附著在二氧化鈦表面的汙染源完全清除，達到自我潔淨的功能，並且節省原本清洗所需的水量。

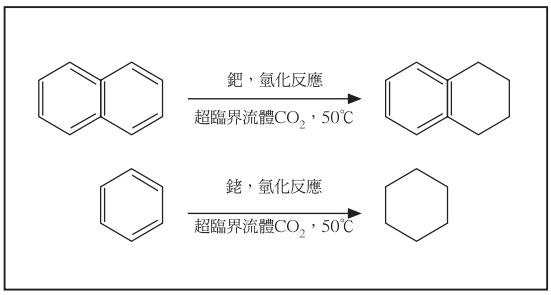
近年來很熱門的奈米金粒子（Au），也有不少研究是關於它在固相－氣相的催化反應；其中被研究最透徹的例子，便是利用氧氣將一氧化碳氧化成二氧化碳。這個催化系統最吸引人的地方是，整個反應在低溫下仍然可以進行。奈米金粒子通常被負載在固體金屬氧化物（例如二氧化鈦）的載體上，一氧化碳吸附在奈米金粒子的表面，而氧氣則吸附在金屬氧化物表面；實際發生反應的位置，可能是在奈米金粒子與被吸附金屬氧化物的界面（圖五）。許多貴重金屬的催化反應容易受到一氧化碳的毒化金屬表面而失去活性，如果將奈米金粒子的催化系統和其他貴重金屬的催化系統結合或串聯，或許可解決一氧化碳毒化的問題，進而使貴重金屬的催化系統在綠色化學中發揮更大功能。

參考資料

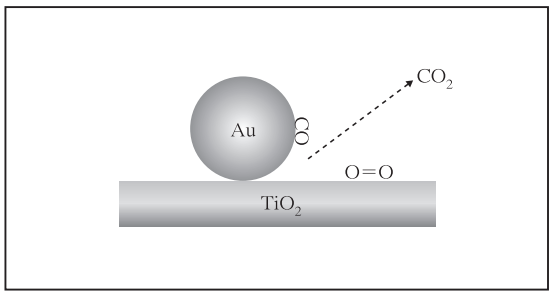
1. Mike Lancaster, *Green Chemistry, the Royal Society of Chemistry*, 2002.
2. J. S. Yadav, B. V. S. Reddy, A. K. Basak, A. Venkat Narsaiah, Recyclable 2nd generation ionic liquids as green solvents for the oxidation of alcohols with hypervalent iodine reagents, *Tetrahedron*, vol. 60, 2131~2135, 2004.
3. M. J. Earle, P. B. McCormac, K. R. Seddon, Regioselective alkylation in ionic liquids, *Chem. Commun.*, 2245~2246, 1998.
4. A. J. Carmichael, D. M. Haddleton, S. A. F. Bon, K. R. Seddon, Copper(I) mediated living radical polymerisation in an ionic liquid, *Chem. Commun.*, 1237~1238, 2000.
5. H. Ohde, M. Ohde, C. M. Wai, Swelled plastics in supercritical CO_2 as media for stabilization of metal nanoparticles and for catalytic hydrogenation, *Chem. Commun.*, 930~931, 2004.
6. M. Haruta, When Gold Is Not Noble: Catalysis by Nanoparticles, *Chemical Record*, vol. 3, 75~87, 2003.

鄧金培： 任教淡江大學化學系

曾茹薏： 就讀東吳大學化學系



圖四：由過渡金屬鈀（Pd）和銠（Rh）所催化的氫化反應，不需使用有機溶劑，因超臨界流體二氧化碳與氫氣有更高的互溶性，因此可使氫化反應不受限於氫氣的溶解度，並控制反應的速度，也可以輕鬆達到催化劑的回收。



圖五：在奈米金粒子（Au）催化下、由氧氣（O_2）將一氧化碳（CO）氧化成二氧化碳（CO_2）的過程中，奈米金粒子與被吸附金屬氧化物的界面（二氧化鈦TiO_2），很可能是反應發生的場所。

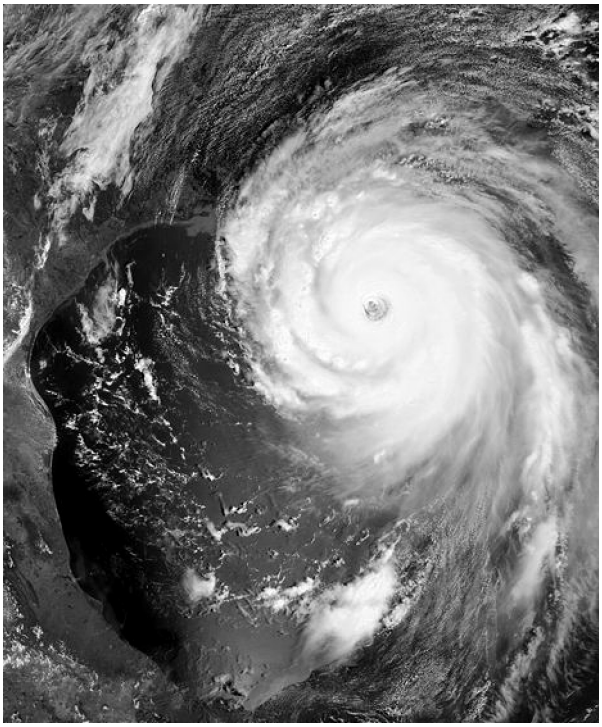
源源不絕 才能生生不息

呂世伊

人類活動所造成的全球暖化正提高海水的溫度，同時加速海水的蒸發。這兩個因素使暴風的數目與強度愈發不可想像!全球暖化是正在進行中的事實：日漸消失的冰河，越來越強烈的暴風，越來越熱的夏天，越來越薄的極地冰帽。解決氣候變遷的關鍵是科技，單獨提升能源的使用效率，並不能使導致全球暖化重要因素之一的溫室氣體釋放減少。

經濟成長需要消耗能源：更多的煤，更多的汽油，更多的天然氣……；年復一年，人類越來越快的將碳從地下轉移到天空，到2050年，開發中國家人民的渴望將使全球經濟規模成長四到六倍；而此同時，溫室氣體的釋放不能再增加，甚至要進一步減少，否則對全球氣候一定會造成傷害。 2007年4月，美國最高法院決議，溫室氣體如二氧化碳視為空氣汙染物，政府可以規範溫室氣體的排放，車輛與電廠的排氣都將面臨法律的約束。2007年7月9日國際能源總署公布的「中期石油市場報告」提到，從2007到2012年，全球石油需求每年將上升2.2%，到2012年，全球每年將消耗石油9580萬桶，遠多於2007年的8610萬桶。根據環保署之資料顯示， 2006年台灣二氧化碳總排放量接近26萬公噸，占全球總量的1%，全球排名為22位。若以人均排放量排名則高居第三名，達到11.9公噸，僅次於美國和澳洲，遠超過全球人均排放量，這其中的主因都在於對原油過度依賴。提高再生能源的使用比例，可以降低對石化燃料與核能發電的依賴，增加能源的安全性，減少原油價格波動對物價的影響。因此，潔淨之再生能源的發展已成為當前重要且迫切之課題。

再生能源的利用技術存在已久， 1970年代石油危機，歐、美、日各國開始進行再生能源技術的開發，但是直到最近幾年，因為國際油價居高不下，各類環境汙染問題於世界各地浮現，人民環保意識萌起，對於能



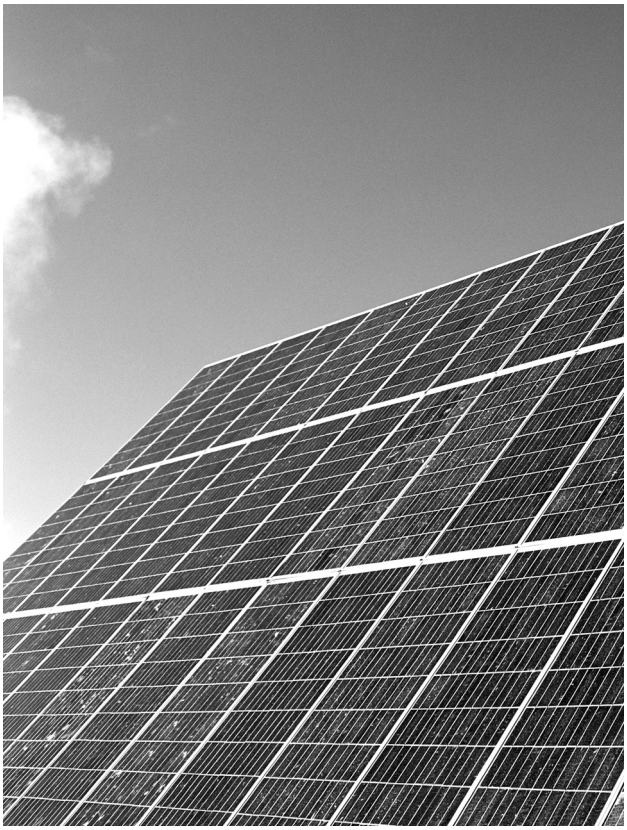
（圖片來源：維基百科）

颶風卡崔娜（Hurricane Katrina）在美國紐奧良造成嚴重破壞。全球暖化與颶風強度、持續時間，有著密切的關連。

源利用所帶來的汙染排放應加以限制，已多有共識等因素，才有戲劇性的巨大改變，開始投入大量研究經費以改良現有技術並開發新技術，驅使各國積極研發替代能源。本文將就太陽能、風力能、生質能與氫燃料電池進行介紹。

燃燒吧！太陽系的中心—太陽能

太陽能是來自太陽的輻射能，是地球上生命的泉源。假如收集照射在地表的陽光40分鐘，所得到的能量將可以供應全人類一年所需。然而太陽能是稀薄的能源，需要廣大的接收面積；而且季節與天氣的變化以及夜晚的影響，使得太陽能無法連續供應。因此需要發展高效率的集能與儲能設備才能有效利用太陽能，但這些因素都會提高使用太陽能的成本。另一方面而言，太陽光照射的面積散布在地球大部分角落，為自產能源，不必仰賴進口，而且極其龐大，無汙染亦無危險性，安全性高，這些是其優點。近年來由於半導體材料的快速發展，對太陽能的吸收效率不斷提昇，造就了太陽能熱力及發電的廣泛應用。轉換太陽能的兩種最常用的方法是採用光電電池（photovolatic cell）和太陽能轉換熱能。太陽能轉換熱能作為供應大型能源的來源有較大潛力，而光電電池則適合為遠離輸電線路的建築物提供電力。



太陽能發電池。太陽能是來自太陽的輻射能，需要廣大的接收面積。

太陽能的應用範圍則包括太陽能熱水器、太陽熱能發電、太陽能電池等。太陽能熱水器的基本原理是利用真空管集熱，使管內的水溫高於水箱內的水溫，利用熱水與冷水的對流，使水箱中的溫度達到使用所需的溫度。這樣的系統已長期被使用來提供熱水給家庭與工廠使用，而且也能在不使用光電電池的情形下來產生電力—太陽熱能發電。太陽熱能發電則是利用布滿地面的反射鏡，將陽光集中在引擎中，此引擎中的流體在高低溫的兩個熱庫間循環，推動活塞及驅動渦輪而發電。光電電池則可以把光能轉換成電能，主要是利用半導體材料，薄的n型半導體置於較厚的p型半導體上方，當光子撞擊該裝置的表面時，p型和n型半導體的接合面有電子擴散，利用上下兩端的金屬導體即可將電流引出利用。

太陽能發電的效率與成本

太陽能電池的製造材料從傳統且主宰目前市場的多晶矽晶圓（multicrystalline silicon wafers）到薄膜矽電池（thin-film silicon cells）及包含塑膠或有機半導體的元件。薄膜光電電池生產成本比晶矽晶圓來得低，但是在將光能轉成電能的效率較差。在

實驗室的測試，晶矽晶圓的轉換效率約為百分三十或更高，目前的商業產品的轉換效率則約為百分之十五到二十。

由於太陽能的發電成本為再生能源中較高者：每一千瓦一時（kilowatt-hour）的成本約為20到25美分，而燃煤電力約為4到6美分，天然氣電力約為5到7美分，生質能電力約為6到9美分（核能發電的成本較難估計，因為專家在必須加入那些費用於成本中的看法仍然不一致，一般估計值約為2到12美分）；故太陽能發電的使用量目前仍偏低，但由於其能量普及，應用極富彈性，可與電力網併聯做為民生輔助電力，許多國家均提供補助加以推廣。 2007年5月美國能源部編列2270萬美元來贊助研究單位改善太陽能的利用率、轉換率及使用方法，主要的研究計畫執行者為學校及專業研究機構，以各項基礎研究來大力提升太陽光能的利用，使太陽能可以進一步輔助或部分取代傳統石油，降低傳統能源危機的威脅。

在夏季電力需求與太陽能同達尖峰的台灣，太陽光電可提供尖峰供電以降低台電調度成本，其效益已廣泛獲得認同。此外，太陽電池模版與建築結合更具應用價值，已陸續開發許多建材一體型模版，如屋瓦、外牆、窗戶、遮陽棚等，配合綠建築之理念，更開啟未來廣大的市場。

轉吧！風力發電機—風能

人類使用風力能源的歷史悠久，數千年前即已懂得利用風力推動船隻航行以及利用風車汲水、灌溉及磨碎穀物；在中世紀歐洲，風車更是重要的動力來源；然自十八世紀工業革命，煤炭、石油等化石燃料及蒸氣機的大量使用，傳統風車被取代而逐漸式微；而近年來由於傳統發電產生的汙染問題，潔淨的風力再度受到重視與利用。現在風力發電已是再生能源中最經濟、成長最迅速的技術之一，尤其在歐洲，風能已經是非常重要的電力來源。截至2005年底，全球風力發電總裝置容量已近6萬MW；歐洲的發展更是快速，已經由1994年的1700 MW成長到2005年的4萬 MW，特別是展現強烈企圖心的德國就擁有1萬8000 MW。

風力發電機。風力發電具有普遍性，永久性及無汙染性等優點。

風力發電具有普遍性，永久性及無汙染性等優點：風力發電為自產能源，全世界10公尺高度的風能密度足以使風力發電系統運轉的地區，約占三分之二；據估計，全球風能蘊藏量很大，可達 1.3×10^{12} 千瓦，約為目前世界化石燃料產生能量的3000倍；風力發電除了在運轉的過程中，產生少量的噪音外，並不會像傳統的化石燃料或核

能發電產生空氣汙染及核廢料的問題，可以說是一種潔淨又安全的能源。但是也有穩定性差及受地形影響顯著等缺點：因風速不固定，風力發電的輸出會有不穩定的現象，對風能的利用是非常不利的因素，連帶使得風能的發電量受到限制。

無人電廠的發展與前景

風力發電的原理是利用風力帶動風車葉片旋轉，再透過增速機將旋轉的速度提升，驅動發電機發電。以目前的風車技術而言，大約是每秒三公尺的風速，便可以開始發電。風車並不能將所有的風力能源轉換成電力，理論上最高轉換效率約為 59%。目前商業化風力發電機皆由電腦監控，可隨風速、風向的變化而自動啟動、關機與迎風轉向，並具遠距監控及異狀保護功能。正常狀況下可自動運轉，不需人員操作，因此有「無人電廠」的稱呼。由於風速會因地表障礙物的影響而減弱，所以離地面愈高風速愈大，因此為擷取更多風能，除須改進扇葉氣動性能及傳動發電系統效率外，也要增加塔架高度以提高迎風風速，或增大葉輪直徑以增加受風面積，因此風力機乃不斷地朝大型化發展。對於國土面積小的國家，提供風力機的設置場所是非常難以克服的問題，所以近年來風力場的設置，都朝向離岸式發展；一方面沿海地區的風能較豐富，另一方面也可使陸地上的資源獲得更好的規劃與應用。風力發電場在適當的配置下，可使當地的景觀更有特色，甚至有景觀再造的功效。根據歐洲國家調查顯示，風力發電場附近有超過 80%的居民支持風力發電，認為使當地風景更具特色。但是對景觀的影響卻也無可避免，在美國即面對所謂 NIMBY-ism（「NIMBY」是 Not in My Backyard 的頭字語縮寫，可中譯為「別在我家後院」），這也影響風力發電在美國的發展。

台灣位於最大陸塊與最大海洋交界處，明顯的東北季風與西南季風季節交替，加上中央山脈與福建武夷山系形成「狹管」的地型效應，使得台灣的季風特別強勁。由於地理位置得宜，台灣的風力資源非常優渥，主要分布於西部沿海與澎湖離島地區，在高度 50 公尺左右之平均風速達 7 公尺／秒，且風向穩定，非常適合大型風車的設置，也是政府近期大力推動風力發電方案的主軸。在台灣地區，冬季時東北季風強勁，使得風力發電量甚為可觀，但夏季缺電時，卻因為西南季風微弱而發電量有限，因此風力發電在現階段僅能做為輔助性能源，無法完全取代傳統發電。同時，台灣內陸地區人口稠密，地表建物複雜，沿海近鄉鎮及都會區的地區廣大，風力資源雖豐富，但風受地形、地物影響，風速稍減，亂流頻繁，風向不穩定，並不適合大型風車系統的設置。都會型風車（urban wind turbine）能適應這種特殊環境，將是最佳的選擇，也是近年來歐美及日本風能市場積極推展的新概念。

廢棄物得以重生—生質能

生質能是轉換生質（biomass）所獲得的可用能源，是一種兼顧環保並可永續經營的能量來源，也是人類最早使用的能源，亦為當今國際間公認最廣泛使用的再生能源，約占世界所有再生能源應用的三分之二。舉凡木材、水生藻類或小麥、玉米等植物或能源作物以及有機廢棄物等，經由焚化、氣化、裂解及發酵等技術，得以轉換為燃油、燃氣與電力等能源皆屬於此範疇。

轉換生質能源可藉由直接燃燒廢棄物以產生熱能與電力，例如大型垃圾焚化廠，以焚化垃圾產生的熱來進行發電獲取能源；亦可以採用化學／生物轉換技術，經醱酵、轉酯化等生物化學程序來產生沼氣、生質柴油、氫氣、酒精等，作為引擎、發電機與燃料電池的燃料，例如垃圾掩埋場廢棄物、工業或畜牧廢水經醱酵產生的沼氣可以用來發電；又如廢食用油經轉酯化反應可產製生質柴油（生質柴油不含石油成分，但可和石油以任何比例混合作為車輛燃料，而且不需大幅修改引擎結構，同時具有可分解性與無毒等特性，特別是不含硫與芳香族化學物質），作為汽車的替代燃料等；或可由熱轉換技術，把廢棄物利用氣化與裂解等過程產生合成燃油或燃氣（瓦斯），作為燃燒與發電設備的燃料，例如從廢保麗龍或廢塑膠可回收燃油作為鍋爐的燃料，又如稻殼、能源作物或廢紙渣可產製合成燃氣，進行燃氣發電。在人口密度低的國家如美國、北歐等，開始朝向種植快速生長之能源作物（如白楊樹），以進行發電或熱利用，或利用玉米等農作物發酵產生酒精、以大豆生產生質柴油，甚至以藻類發酵製氫等；雖目前價格仍偏高而市場有限，但因其可替代石油產品，不限用於發電或加熱，故成為眾所矚目的明日之星。

推動生質柴油的使用

傳統生物燃料作物也有負面效應：價格高，需大面積種植而影響食物的正常供給；例如最近美國對乙醇需求的增加，已經使玉米的價格上升；歐洲對棕櫚油需求的增加，使得東南亞的雨林被砍伐並釋放出幾百萬噸的二氧化碳。台灣因地狹人稠而較難發展需大量土地的能源作物與酒精汽油，但廢棄物數量可觀，如果可以將廢棄物再資源化，轉換成有價值之物質，不但可以減少產業製造成本、降低環境衝擊，並可以協助解決廢棄物處理問題，達到減量化、安定化、無害化之效果。台灣目前在各級政府推動使用生質能源下，高雄市公車處已是第一個全面使用生質柴油的車隊，嘉義縣的補助申請案也於2007年6月29日審查通過，加入使用生質柴油的行列。能源局並整合農委會、環保署、經濟部等部會主管機關資源，透過各類補助與輔導措施，

（圖片來源：維基百科）

巴西的加油站。左：汽油；右：酒精。

（圖片來源：維基百科）

加州酒精汽油標示。

從原料自產、生質柴油自製、油品配銷等面向建構完整的生質柴油 B1（市售柴油內添加 1%的生質柴油）供應體系。自 2007 年 7 月 27 日開始，在桃縣及嘉義縣市加油站可加到生質柴油 B1 ，鼓勵柴油車輛使用生質柴油。能源局計劃在 2008 年強制中油、台塑等公民營加油站供應的柴油，須摻添1%以動植物或廢食用油脂轉化產生的生質柴油；2010年將摻添比例提升至2%，屆時生質柴油使用量將達到每年十萬公秉左右，約占國內柴油用量的 2%。

小型電廠—氫燃料電池

燃料電池直接將燃料的化學能轉換為電能，與傳統火力發電系統先產生蒸汽再發電的方式不同，是一種持續提供電力之裝置，具有低汙染、低噪音、壽命長、免充電、適用範圍廣以及可以分散式供電等優點。這種高效率與產物零汙染的優點促使燃料電池成為能源產業的新興技術，吸引各國加入研發的行列。燃料電池的應用範圍很廣，包括使用於手機、家用電器的攜帶式小型燃料電池或運輸方面的燃料電池汽車。此外，燃料電池對環境的汙染低且占地小，如同離散型的小型電廠，在都市化明顯的地區，可以解決長程的電力傳輸造成大量的電力損耗，避免供電不足、區域限電的問題。

在氫燃料電池中，以氫氣為燃料，在陽極與陰極之間夾著一層電解質：陽極以氫作為反應物，半反應式為 $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ ，所產生的電子經由陽極傳導至外接電路形成電流；另一方面，產生的氫離子透過可導離子性質（電子絕緣體）之電解質，抵達陰極。在陰極方面，空氣中的氧分子會與從陽極反應槽傳遞過來的氫離子以及由外電路傳遞過

（圖片來源：維基百科）

日本日野燃料電池巴士。

來的電子進行電化學反應，產生水及 1.229 伏特之電壓。陰極半反應式為 $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ 。氫燃料電池的直接效率可接近55~60%，若包括回收餘熱，整體效率可超過 80%。由此觀之，氫氣有極大的潛力可以成為燃料與能量的來源，但要就技術發展的角度來看，這個潛力要完全發揮仍有一大段路要走。氫是地球存在最普遍的元素之一，例如水分子中含有三分之二的氫，但是就本質上看，氫都是以與其它元素結合的方式存在，如果要讓氫氣成為車輛的動力來源，取代天然氣及發電，需要將氫氣從化合物分離出來，而這個分離過程多半要使用其他能源，也會釋放出二氧化碳。

氫燃料電池的改良與應用

目前大部分氫氣是由天然氣及石油經高溫過程而得到，大約消耗全球百分之二的能源來生產，同時比例正在快速成長。如果將目前生產的氫氣全部用在氫燃料電池上，可以提供150萬部車輛的動力，這個數字約占全球車輛總數的百分之二十。由石化燃料生產氫還是會釋放出二氧化碳，例如如果使用由天然氣生產的氫氣及有效率的燃料電池，汽車每行駛一公里仍會釋出約110公克的溫室氣體(不過使用一般汽油的車輛約會釋放

出150公克的溫室氣體）。氫燃料電池的終極目標當然是能夠在不釋放溫室氣體的情形下，生產氫氣並使用。一個方法是將生產過程產生的二氧化碳回收，再將其引導到地底或海洋；這個方法可以大量生產氫氣，成本不高，但是技術與環境安全因素必須考慮。另一個方法是加熱木材與農作物等有機物，以產生氫氣及一氧化碳，優點是所釋放的碳會被樹木與農作物在成長過程中以二氧化碳的形態被吸收，所以整個過程不會釋放溫室氣體；第三種方式是使用再生能源(如太陽能)產生的電來電解水以製造氫氣。當然也可以使用核能來電解水製造氫氣，但核能發電的成本與安全及環境問題仍爭議過大，不如使用較乾淨的再生能源。

1950年代就已設計出用燃料電池驅動的汽車，但由於成本太高而無法順利推廣，到了1960年代才成功應用於太空計畫：燃料電池不僅提供電力外，發電所產生的副產物——純水，也提供太空人飲用。目前溫哥華、芝加哥等地公車，多已改為燃料電池驅動。使用氫氣補充汽車燃料或許會終結汽油的消耗與碳的排放，但這仍然需要時間。

展望未來

再生能源目前在全球能源的使用上，與石化燃料相比仍占極低的比例。推廣再生能源在技術上，經濟上與政治上都必須解決許多困難，才能與石化燃料競爭。例如，太陽能電池的價格必須再降低，才能有與燃煤電廠競爭的能力；又如風力電廠必須處理環境議題與居民的關切。

綠色能源開發與利用可減低對進口石油、煤炭等的依賴，且促進能源多元化，在國家安全考量上有其戰略意義。另外在經濟與社會層面，可製造工作機會，例如其零組件的生產、運輸、組裝、維護等，都可帶來相當的就業機會。然而，再生能源發電技術現階段仍需額外獎勵措施以符合經濟效益。在利用方式的創新、技術的發展演進、量能擴大達經濟規模、及能源利用之外部成本廣泛內部化後，再生能源將可與傳統發電方式在開放市場上競爭，雖部分技術仍因其本質問題而無法完全替代傳統化石能源與核能，但無庸置疑再生能源可為主要能源之一。

我們可以期待一個依賴風力及太陽來發電，使用以生質燃料與氫燃料電池驅動車輛的乾淨世界。

參考資料

1. 綠色能源與環保教育師資培育養成教育之教材，國立台灣師範大學技術職業教育研究中心：http://www.yfes.tn.edu.tw/environment/main4.htm
2. 工業技術研究院,能源與環境研究所網站：http://www.itri.org.tw/chi/other_websites/EEL_inter.jsp
3. 氣候變化綱要公約資訊網：http://sd.erl.itri.org.tw/fccc/index.htm
4. 行政院環境保護署網站：http://www.epa.gov.tw
5. Scientific American, Energy's future：Beyond Carbon, Special Issue, September 2006.
6. 化學中心 綠色／永續化學網站： http://www.sinica.edu.tw/chem/gc/

限於篇幅，無法刊登所有參考資料，如欲參考完整的資訊，請與作者連繫，電子郵件：sylen@mail.scu.edu.tw

呂世伊：任教東吳大學化學系

再生能源外的另一種選擇

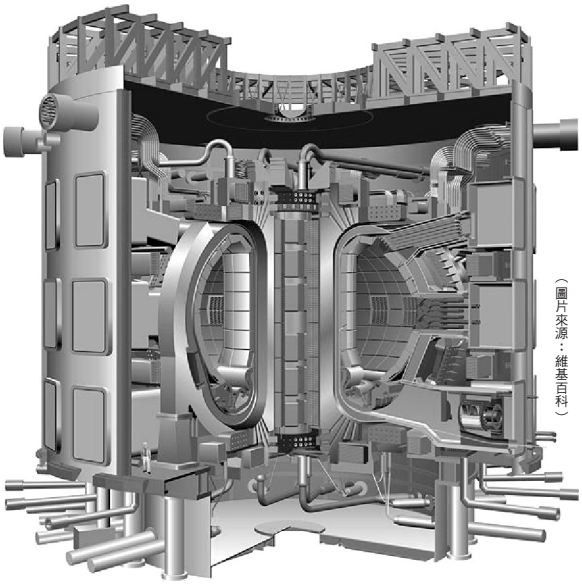
林琦玉

工業革命後，大量使用機器來代替人力，造就人類文明的快速進步與發展。各國經濟發展與生活水準的提高，石油、天然氣與燃煤消耗量亦隨之遞增。「能源危機」及「油價上漲」早已是近年來大家耳熟的名詞。因大量地使用化石燃料，衍生出環境汙染、資源浪費、生態衝擊與氣候變遷，甚至使整個地球面臨溫室效應、南北極冰帽融化、海平面上升、颶風災害（2005年在中美洲和美國奪走了3000多人的生命，超級颶風的數目較過去十年成長一倍）、沙漠擴張及物種瀕臨滅絕等危機。隨著綠色觀念的推廣、環保意識與永續生存發展的興起，「綠色化學」也因而成為重要議題。

各式再生能源

為了解決溫室效應，近年來提倡節約能源，並發展再生能源，其主要目的均是希望利用化學原理，從源頭消除環境汙染，並以此為基礎，設計安全的化學品或化學反應過程，以取代危險物質的使用，例如減少並消除這些危險物質對環境的衝擊、發展無碳的再生能源、推廣低碳潔淨能源使用等，而這類將原本會浪費掉，但重新再利用所生的能源，稱為「再生能源」（renewal energy），常見的再生能源有：水力發電、風力發電、太陽能發電、地熱發電以及潮汐發電等。雖然各國積極開發「再生能源」，但是再生能源需仰賴各國本身的地理環境。一般而言，再生能源的使用並非全面性，以台灣為例，政府大力推動再生能源，目標期望能從2004年的5.56%，提升至2010年的10%。

其他各國也陸續發展乙醇作為汽油中添加成分，或以氫氣為燃料的氫氣電池作為動力，這樣的車輛僅釋放出水蒸氣，而非二氧化碳或是其他有害氣體，是一種相當好的創新。除了排出的廢氣成分不同外，其安靜無聲的特性也令人期待；而巴西為世界上最早推廣乙醇汽油的國家，目前不再販賣一般的汽油，僅販賣乙醇汽油，巴西的成功促使許多國家(如：菲律賓、美國許多州、中國大陸許多省分、歐盟國家與日本)立法推廣乙


（圖片來源：維基百科）

國際熱核融合實驗反應器：托卡馬克（Tokamak），是一種利用磁約束來實現受控核融合的環性容器。

醇汽油的法案，以當地製糖業生產的乙醇做為汽油中的添加成分，製成所謂的E10及E20汽油（E10表示燃料中有90%汽油及10%乙醇，E20則表示乙醇成分是20%），若使用E10乙醇汽油，車輛不須改裝即可直接使用，最大的優點則是可以減少溫室氣體排放、穩定地球氣候。此外還有另一項無碳能源可作為解決的方法。

核能的使用

根據2003年的統計，人類使用的能源有6%來自核能，其中84%集中在先進國家，由於核能不藉由燃燒來取得能量，所以不會有排放二氧化碳的疑慮，目前部分研究認為，使用核能可以緩和氣候變遷。而許多國家如：英國、瑞士、韓國、日本、法國等，則認為核能可作為達成《京都議定書》不可或缺的因應方案。

核能所利用的物理原理，係發展於1938年德國的科學家奧圖・哈恩（Otto Hahn, 1879~1968）與費茲・史特斯曼（Fritz Strassmann, 1902~1980）發現的重要現象。核能的應用主要是作為發電用途，而目前核能發電係利用鈾235（鈾的三種同位素之一）為燃料產生核分裂反應，所生成的能量，可以將水加熱成為蒸汽，再推動蒸汽機與發電機產生電力，而核分裂產生的能量，來自反應前損失的質量。根據愛因斯坦的相對論，微小的質量可以創造巨大的能量，因此在核能發電所使用的燃料體積小，運儲方便；又因為核能發電成本中，燃料成本所占的比例低，故發電成本穩定，受國際能源價格的影響亦小。由於核能發電有上述的兩大優點，故能源的依賴進口國家均將核能視為「準自產能源」。

在天然鈾中的鈾235含量僅占0.7%，其他的則為鈾238。依照目前核能發電的使用方式，鈾235的蘊藏量足夠讓人類使用數百年。若將核能發電中用過燃料內的鈽239、剩餘的鈾235與鈾238回收再利用（即所謂的用過核燃料再處理），還可以再多用上數百年，如果鈾235的資源無法滿足需求，還可以利用「快滋生反應器」（fast breeder），大幅延長鈾燃料供給。快滋生反應器的特色是：雖然會消耗部分可分裂燃料，但卻也產生新分裂燃料，（如：釷232轉化為鈾233，鈾233可以維持核分裂連鎖反應，或在消耗鈾235的同時，可以把更多的鈾238轉化為鈽239，利用鈽239可以維持核分裂反應），使產生的比消耗的燃料更多。快滋生反應器的發展，可使人類利用蘊藏量比鈾多出數十倍的釷作為燃料，並可充分利用鈾燃料的礦藏。據估計，快滋生反應至少可以提供世界數千年的能源需求。

核融合是永續能源的最後寄託；比起現在的核分裂反應，核融合的燃料取之不盡、用之不竭，而且幾乎不產生核廢料。然而，核融合目前仍有技術上的瓶頸尚未獲得突破，雖然，先進國家仍然持續不斷地投入研發經費，發展國際熱核融合實驗反應器（International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER），但在短時間內，核融合可能還無法取代其他能源成為主要能源來源。

以目前趨勢看來，核能將是真正的永續能源，可以確實解決地球的溫室效應。地球的問題也正提醒大家共同來注意，並非只是環保人士關心的議題。期許大家共同努力，節約能源，讓我們與下一代都能有個舒服的居住環境。

林琦玉：任職台灣電力公司

重重關卡—核能發電安全設計

葉偉文

由於數年前，台灣各界對核能應用這個主題，有過激烈的論戰，最後做成所謂「非核家園」的立場。但當時雙方使用的，並非科學性的論述，有點各說各話的意味。因此，相信很多人對核能的應用，仍存在相當的疑慮。現在又提起核能的應用，有必要把一些容易引起大家關切的議題，在此做個說明。

首先是核能安全的問題。有人以為核能電廠會像原子彈一樣地爆炸。事實上，現在用來發電的核子反應器絕對不會發生這樣的事情。因為在原子彈裡，使用的材料含超過90%的可分裂物質。而且原子彈的設計就是希望它能在最短的時間內，放出所有的分裂能量。但核能電廠裡使用的燃料，只含有3~5%的可分裂物質。而它的設計又是盡量避免能量的同時釋放。以前有個比喻，說核能電廠所含的核燃料比例，和啤酒裡的酒精濃度差不多，是不可能爆炸的，就像啤酒不能點火一樣。

另外，也有人擔心核能電廠的爐心會因為產生的巨大熱能而解體，使放射性物質跑出來，汙染我們的環境，就像位於烏克蘭的車諾比爾核能電廠那樣。其實這種擔心也是不必要的，因為西方使用的核能電廠形式(台灣也是用這種核反應器)，是使用水做緩和劑，它和車諾比爾使用的石墨做緩和劑，特性完全不同。這兩者的差異，筆者也用一個比喻——就像雞和鴨是不一樣的。因此，台灣現在使用的核反應器，一定不會發生車諾比爾核電廠這一類的事故。這是核能專家們一致的看法。

大家關心的第二個議題，就是核分裂之後產生的分裂產物。分裂產物含有很強的放射性，而且在它衰變的過程中，會產生大量的衰變熱。這些衰變熱在核分裂停止之後，並不會立刻減少。因此核能電廠必須設計一些特殊安全系統來移除這些衰變熱。這種系統有很多項，我們無法一一介紹，只在這裡說明一下它們的設計準則：

第一項設計準則是多重配置。這是用很多套的系統來完成同一項功能。如果其中一套系統發生故障，只靠另一套系統亦足以發揮需要的安全功能。核能電廠裡的許多重要系統，都有兩套以上。舉例來說，電源對核能電廠非常重要，很多設備的運轉都需要電源。因此，核能電廠除了有三套以上各自獨立的外部電源之外，還裝有兩套柴油發電機。在所有外部電源都故障之後，還可利用自己的柴油發電機供電。

第二項設計準則是多樣性。它是以不同的系統來達成同樣的功能，可以避免由於同一個因素失效，使全部的各套系統均喪失功能。舉例來說，核能電廠除了兩套各自獨立的控制棒之外，還有一套液體的硼酸控制系統。如果燃料棒因地震而變形，控制棒無法插入爐心，就可以打入液體的硼酸，使反應器停機。

第三項設計準則是分散性。將各套重要設備分別安置在不同的場所，避免當某個區域因火災或淹水時，把所有重要安全設備全部損壞。

第四項原則是可測試性。因為很多特殊安全系統，在平時是不需運轉的，因此在設計之初，就必須考慮可以隨時來測試這些系統與設備，看看它們是否能隨時發揮功能。

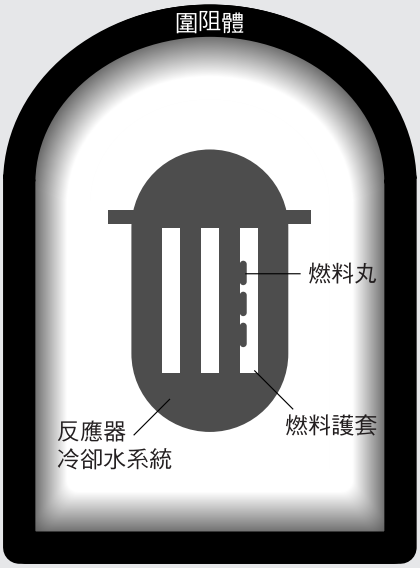
第五項原則是故障安全(或失效安全)。也就是系統和設備在故障或失效時，它的動作會朝安全的方向及狀態操作。我們以控制棒為例。將控制棒抽出爐心，是利用電磁線圈通電，產生磁力把它拉出來。在斷電的時候，電磁線圈就沒有磁力。控制棒會因本身的重量，插入爐心，使核反應器安全停機。

因此，核能電廠在設計上，是相當周全的。至於如何防止放射性分裂產物進入我們生活的環境裡，核能電廠使用的是深度防禦策略。將放射性物質放在一層層安全保護的屏蔽物質當中。第一層屏蔽是燃料丸。因為核分裂產物均帶大量電荷，平均的移動距離非常短。除了少量氣體之外，均滯留在陶瓷材質的燃料丸之內。如果第一屏蔽失效，還有第二層等可以依賴。使放射性物質跑出來的機會降至最低。

第二道防禦是燃料棒。它是密閉的鋯合金管。燃料丸一粒粒裝填在燃料棒之內。只要燃料棒沒有破裂，氣體的分裂產物及碘都被密封在燃料棒之內而不會跑出來。第三層的屏蔽是厚實的反應器壓力容器和密閉的冷卻水系統。若燃料棒有少量的破裂，放射性物質會進入密閉的冷卻水循環系統，而在這個系統裡，會有水的淨化系統，可以把水裡的放射性物質過濾或移除。

最後一層屏蔽是圍阻體。在西方輕水式反應器中，這是一道非常重要的安全屏蔽。車諾比爾核電廠亦缺乏這道設計，才使事故的後果雪上加霜，無法收拾。

大家關切的最後一個問題是核廢料的處理。核廢料其實並不全是核能電廠產生的，在核能的醫療及工業用途上，亦產生一定數量的核廢料。基本上，核能電廠產生的核廢料分成兩大類，即所謂的低階及高階核廢料。



輕水式反應器核能電廠深度防禦之多重屏障。燃料丸是層層防禦的最前線，燃料丸裝入鋯合金燃料護套成為第二道防禦，第三道防禦是反應器壓力槽和相連密閉冷卻水系統，最後一道防線是厚實鋼筋混凝土的圍阻體結構。

低階核廢料主要是由核能電的運轉及維護過程產生的放射性廢料。由於其放射性並不太強，衰變的時間也不會太長久，目前是以淺層的地表處置為主要方式，加上一些水泥牆或壕溝式的地表設施，讓廢料和我們生活圈阻隔數百年，即可無虞。

至於高階核廢料則是燃料再處理所產生的放射性廢料。由於它的衰變期很長，放射性又很強，目前傾向以深層地質處置為考慮方向。只是在用過核燃料裡面，還有許多可以用來分裂的鈽，究竟應不應該直接把它丟掉，目前還沒有達成一致的看法。因此，這部分的政策是暫時放著，並不急著做最終處置。

總之，放射性廢料的處置與處理，技術上的問題很容易解決及克服。但社會層面上的牽涉卻很廣、很複雜。目前韓國及日本都通過民調與溝通，取得場址，展開作業。在台灣則仍待有識之士的努力。

葉偉文：任職台灣電力公司