

陽光+水=燃料

利用麻省理工學院化學家造出的觸媒，美麗的陽光可以將水化為氫氣。這個過程如能擴而大之，也許有一天太陽會成為我們的主力能源。

文布利斯 (Kevin Bullis) 攝影 哈廷 (Christopher Harting)
譯 羅耀宗

「我要給各位看的東西，沒給任何人看過，」麻省理工學院 (MIT) 的化學教授諾伽拉 (Daniel Nocera) 於2008年五月，對坐滿大禮堂的科學家 and 美國政府能源官員這麼說。他請大禮堂管理員把燈光轉暗，然後開始播放影片。「看得到嗎？」他指著浸在水裡的一片材料冒出的氣泡，興奮地問。「氧氣從這塊電極湧出，」然後有點神秘地補充，「這就是未來，我們已經找到那片葉子。」

諾伽拉展示的是從水產生氫氣的反應，就像綠色植物行光合作用那樣，所以他稱之為「葉子」。這樣的成就，在能源的辯論上，可能具有深遠的含意。這個反應在他開發出來的觸媒協助之下進行，是將水分解，產生氫氣的第一步，也是最困難的一步。諾伽拉相信，用高效率的方法從水產生氫，將有助於克服太陽能目前無法成為電力主要來源的重要障礙之一：現在還找不到

符合成本效益的方法，把太陽能板收集的能源儲存起來，好在晚上或陰天使用。

太陽能有它的獨特潛力，能夠產生大量的乾淨能源，不致造成全球暖化。但是如果缺乏儲存這種能源的便宜方法，太陽能電力就無法大規模取代化石燃料。在諾伽拉設計的情境中，陽光會分解水，產生多種容易儲存的氫燃料，送到內燃發電機燃燒，或者在燃料電池中和氧重新結合。更大的野心，是應用這種反應分解海水：讓氫通過燃料電池，除了產生電力，也造出淡水。

科學家從70年代初期以來，就試著仿效光合作用，儲存來自太陽的能源，尤其想要複製綠色植物分解水的方式。化學家當然已有能力分解水，只是這個過程需要高溫之下，用到刺鼻的鹼溶液，或者稀有和昂貴的白金等觸媒。諾伽拉設計出一種便宜的觸媒，能在室溫底下，從水產生氧，而且不必用到腐蝕性化學物

本刊獨家取得美國麻省理工學院

Technology Review 期刊圖文授權

Technology Review, Published by MIT.

TECHNOLOGY REVIEW

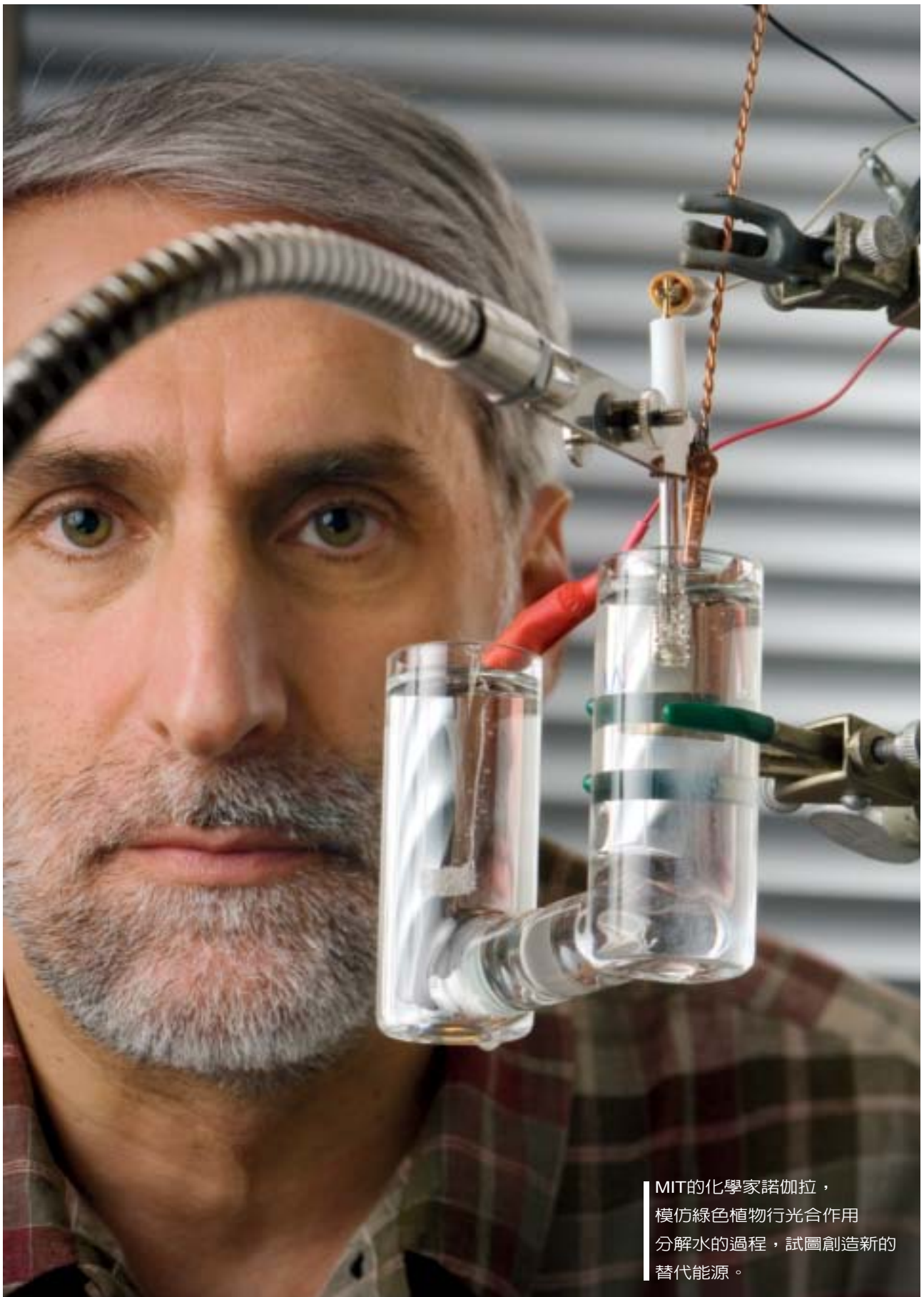
Internet URL: www.technologyreview.com

Technology
PUBLISHED BY MIT
Review

——就像光合作用般的溫和。另外還有幾種相當有可為的觸媒，包括諾伽拉發展出來的另一種，可用來完成這個過程，並且產生氫氣。

諾伽拉認為，有兩種方法可以利用他的突破性研究。第一種方法是，藉傳統的太陽能板捕捉陽光來產生電力，電力驅動電解器，電解器用他的觸媒分解水。第二種方法是運用比較像葉子結構的系統，將觸媒置於設計來吸收陽光的特殊染料分子旁邊；染料捕捉的能源，將驅動水的分解反應。不管是哪一種方法，太陽能都將轉化成氫燃料，很容易儲存，等到夜晚或者任何需要的時候使用。

諾伽拉大膽宣稱他的研究進展十分重要，但是化學家通常不喜歡在同儕面前做這種事；許多專家果然起而質疑他的系統能否擴大應用，以及經濟性有多好。諾伽拉卻不退縮，「有了這個發現，我徹底改變了現狀，」他告



MIT的化學家諾加拉，
模仿綠色植物行光合作用
分解水的過程，試圖創造新的
替代能源。

訴全場聽眾，「以前所有的主張都可以丟到窗外。」

太陽的黑暗面

陽光是世界上最大的再生能源潛在來源，但那種潛力很容易化為烏有。太陽能板不只晚上不能運作，白天當雲朵飄過頭頂，電力也會忽高忽低。所以今天大部分的太陽能板——不管是電力公司蓋的太陽能電廠，還是住家和企業安裝在屋頂上的——都和電力網格（electrical grid）連接。艷陽高照時，太陽能板以尖峰容量運轉，屋主和企業可以將多餘的電力賣給電力公司；但是到了晚上，或者雲影遮住太陽，他們通常就必須依賴電力網格。

這套系統能夠運作，只是因為太陽能電力只占整體電力生產的一小部分：在美國只滿足總需求的1%。隨著太陽能供應的電力所占百分率提高，它的不可靠會是更加嚴重的問題。

在加州柏克萊的勞倫斯柏克萊國家實驗室（Lawrence Berkeley National Laboratory），研究電力市場的科學家萊恩·懷哲（Ryan Wiser）說，如果太陽能電力增加到能夠提供總電力的至少10%，電力公司就需要考慮：萬一在尖峰需求時段烏雲罩頂，那該怎麼辦？為了因應這種狀況，它們需要另外設立天然氣發電廠，迅速增加發電，以彌補減

少的電力。或者，他們必須投資於能源儲存設施，目前以第一個選項較為便宜。懷哲說：「電力的儲存真的很貴。」

但他表示，如果我們對太陽能的依賴，占總電力需求到達20%以上，太陽能就會開始成為所謂的基本負載電力（base load power），也就是滿足最低需求所需的電量。可是基本負載電力（目前大多是由火力發電廠供應）必須以相當穩定的費率供應；太陽能還沒辦法用於這個目的，除非不論晴雨，它都能大量儲存，供一天二十四小時使用。

簡單地說，太陽要成為主要的電力來源，那就需要龐大且便宜的儲存系統。加州理工學院（Caltech）化學系教授內森·李維士（Nathan Lewis）說，不只太陽能，科學家現在還找不到切實可行的方法，大量儲存替代能源的電力。目前最不昂貴的一種方法，是用電力先把水抽到高處，以後再放水流經渦輪機，產生電力。一公斤水上抽一百公尺，可以儲存約一個千焦耳（kilojoule）的能源。相較之下，一公斤的汽油儲存約四萬五千個千焦耳。想用前面說的方式儲存夠多的能源，將需要數量龐大的水庫和巨大的貯水池，每天流光之後再充滿。另外，在日照特別充足的亞利桑納州和內華達州，要找到夠多的水談何容易。

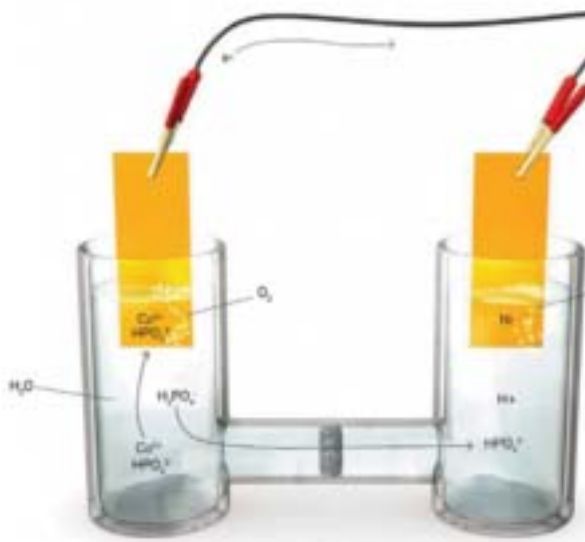
電瓶也是很昂貴的裝置：一般家用太陽能系統可能因此增加一萬美元的成本。而且，雖然電瓶不斷改良，儲存的能源仍然遠低於汽油和氫等燃料以化學鍵的形式儲存的能源。李維士說，最好的電瓶每公斤儲存約三百瓦特/小時的能源，而汽油每公斤儲存一萬三千瓦特/小時。「從數字看得很清楚，化學燃料是能夠儲存大量能源，唯一的能源密集方式，」李維士說。這些燃料當中，氫不只比汽油乾淨，而且依重量來看，它儲存的能源高出許多——約為三倍，但因為它是空氣，所以占用較多的空間。

想要利用來自太陽的能源，我們面對的挑戰，是設法讓這種燃料便宜且有效率。諾加拉希望藉由模仿光合作用，做到這件事。

以植物為師

綠色植物在真實的光合作用過程中，用葉綠素捕捉來自陽光的能源，然後驅動一連串複雜的化學反應，把水和二氧化碳轉化成澱粉和糖等富含能源的碳水化合物。不過，許多研究人員最感興趣的一點，是這個過程中前面的一個步驟，也就是蛋白質和無機觸媒結合起來，以很高的效率協助將水分解成氧和氫離子。

人工光合作用的領域起步得很快。1970年代初期，東京大學的研究生藤嶋昭和他的論文指



燒杯中的光合作用

諾加拉模仿行光合作用的植物所處的良好狀況，設計的實驗顯示，我們可以用一個簡單，且可能相當便宜的方式生產氫氣。

施加電壓之後，溶液中的鈷和磷酸鹽（圖左）會沉積在電極上，形成觸媒，在電子經由電極流出後，從水裡釋出氧氣。氫離子流經一片薄膜；之後在另一邊，鎳金屬觸媒就產生氫氣（諾加拉也用白金當觸媒）。

導教授本多健一指出，用二氧化鈦（白漆的一種成分）製成的電極，在明亮的五百瓦氙氣燈照射之下，會慢慢把水分解。由於這個發現，人們知道光可以在植物以外的地方分解水。1974年，北卡羅萊納大學教堂山分校（University of North Carolina, Chapel Hill）的化學教授湯瑪斯·梅耶爾（Thomas Meyer）指出，以鈦化合物為基底的染料，受到光線照射，會產生化學變化，把水氧化，或從它拉出電子——這是水分解非常重要的第一步。

不過最後兩種技術都證明不可行。二氧化鈦沒辦法吸收夠多的陽光，而梅耶爾的染料，受光激起的化學狀態太過短暫而不實用。但是這方面的進展，刺激了科學家的想像力。「你可以放眼未來，看看要往哪裡走，而且，至少原則上，可以把各個部分拼湊起來，」梅耶爾說。

接下來數十年，科學家研究了植物中吸收陽光和儲存其能

源的結構與物質。他們發現，植物非常審慎地設計水分子、電子和氫離子，也就是質子的移動。但是確實的機制到底如何，仍有許多不明之處。後來到了2004年，倫敦帝國理工學院（Imperial College London）的研究人員確定一組蛋白質和金屬的結構，和植物能從水釋出氧有很重要的關係。他們指出，這種觸媒複合物的核心是一組蛋白質、氧原子，以及錳和鈣，並以特定的方式交互影響。

「我們一看到這個發展，就能開始設計系統，」諾加拉說。他自1984年以來，一直試著徹底了解光合作用背後的化學反應。看了這張「地圖」之後，他的團隊便著手按照植物所用的方式，管理質子和電子——但只使用無機材料，因為它們比蛋白質牢靠和穩定。

諾加拉起初並沒有著手處理最大的挑戰，也就是把氧從水抽離出來。反之，「就像學騎腳

踏車，先在後輪裝兩個輔助小輪，」他從逆向反應做起：結合氧和質子與電子，形成水。他發現，以鈷為基底的若干複合化合物，是引發這種反應不錯的觸媒。因此，等到要嘗試分解水的時候，他決定使用類似的鈷化合物。

諾加拉知道，在水裡用這種化合物可能有問題，因為鈷會溶於水。果然不出所料，他說，「幾天之內，我們就發現鈷從精心製作的化合物中掉出來。」初步的嘗試失敗之後，他決定改用不同的方法，不再使用複合化合物，而是測試已經溶解的鈷的催化活動；他加了一點磷酸鹽到水裡，協助促進反應。「我們覺得，不妨忘掉精心製作的那個東西，直接用鈷算了，」他說。

實驗結果比諾加拉和他的同事預期得好。當電流通到浸在溶液中的電極，鈷和磷酸鹽會沉積在上面，形成一層薄膜，僅僅幾分鐘就有相當密集的一層氣泡形成。進一步測試，證實這些氣

泡正是分解水釋出的氧。「運氣很好，」諾伽拉說，「我們根本沒有理由想到單純的鈷加上磷酸鹽，相對於把鈷放在一種複合物中，得到的效果會那麼好。我不可能料到會有這種事，從化合物掉出來的東西，竟然正是我們需要的。」

「現在我們想了解它，」他繼續說道，「我想知道為什麼這層薄膜中的鈷那麼活躍；我也許能夠改良它，或者改用更好的不同金屬。」在此同時，他希望開始和工程師合作，把這個流程最適化，做出高效率的水分解電池，裡面有觸媒，能夠同時產生氧和氫。「我們對基礎科學真的很感興趣，我們能夠發展出一種觸媒，在光合作的條件下，運作得很有效率嗎？」他說，「我們辦得到，我們真的就快要擁有設計電池的技術。」

催化爭議

諾伽拉的發現引來很多人注意，當然不是每個人都讚譽有加。許多化學家認為他的說法太過誇張；他們不質疑他的發現，但懷疑會有他想像的那種結果。「說這就是人工光合作用所要的答案，未免瘋狂，」諾伽拉的業師梅耶爾說。他表示，雖然諾伽拉的觸媒「在技術上可能證明很重要」，往前推進的卻是「研究發現」，「不保證能夠擴而廣之付

諸應用，或甚至有其他更大實用的價值」。

許多批評者的反面看法，集中在諾伽拉的實驗室分解水的速度，比不上商業電解器那麼快。系統速度愈快，產生一定數量氫和氧的商業化單位愈小。而系統愈小，一般來說愈便宜。

要比較不同的觸媒，一個方法是看它們效率最高時的「電流密度」——也就是每平方公分的電流，電流愈高，觸媒產生氧的速度愈快。諾伽拉最早報告的結果是每平方公分1毫安培，但後來增加到10毫安培，商業電解器通常是每平方公分1,000毫安培左右。「至少他到目前為止發表的數字，絕對比不上商業電解器的標準，因為商業電解器目前的密度比他高800到2,000倍，」科羅拉多州高登市（Golden）國家再生能源實驗室（National Renewable Energy Laboratory）的研究員約翰·特納（John Turner）說。

也有專家質疑把陽光化為電力，然後轉成化學燃料，再轉回電力的整個原理。他們表示，雖然電瓶儲存的能源遠低於化學燃料，效率卻還是高得多，因為用電力製造燃料，再用燃料產生電力，會在每一步都浪費能源。他們說，專心改善電瓶技術或者其他類似的電力儲存形式，比開發水分解器和燃料電池要好。就像

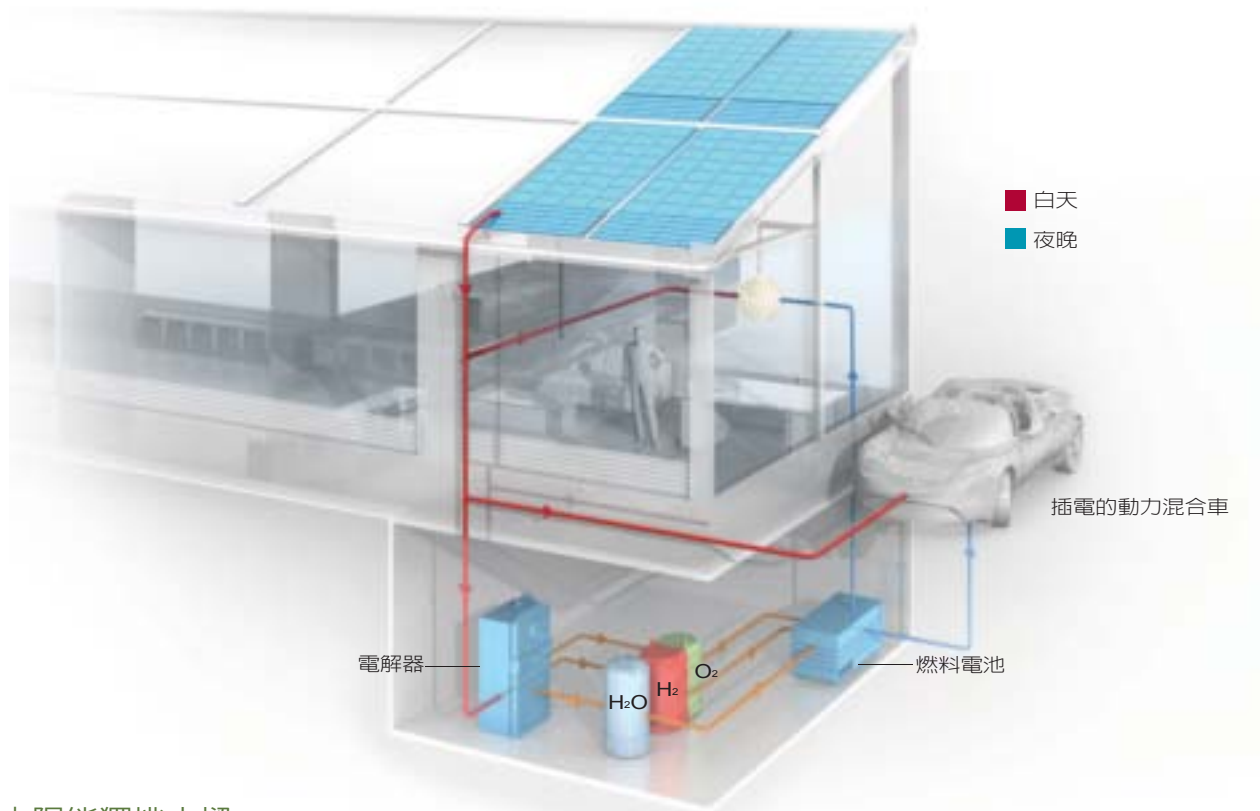
勞倫斯柏克萊國家實驗室的懷哲說的：「電解（現在）效率差，為什麼要做它？」

人工葉子

不過，邁可·葛雷徹（Michael Grätzel）也許有聰明的方法，能將諾伽拉的發現實用化。葛雷徹是瑞士洛桑（Lausanne）的聯邦理工學院（École Polytechnique Fédérale）化學與化學工程教授，諾伽拉很早就找葛雷徹談他的新觸媒。「他非常興奮，」葛雷徹說，「他帶我到一家餐廳，點了一瓶貴得要命的紅酒。」

1991年，葛雷徹造出很有可為的一種新型太陽能電池，用到含鈦的一種染料，作用很像植物中的葉綠素，能吸收光和釋出電子。但是葛雷徹的太陽能電池中，電子不會激發水分解反應；相反的，它們是由一層二氧化鈦薄膜收集起來，引導通過外部電路而產生電力。葛雷徹現在認為，他可以把自己的太陽能電池和諾伽拉的觸媒整合起來，成為單一的裝置，捕捉來自陽光的能源，用它來分解水。

如果他的看法是對的，我們就會跨出重要的一大步，造出在許多方面都很像一片葉子的裝置。葛雷徹的構想是，用他的染料取代諾伽拉的系統中，讓觸媒在上面形成的電極；染料本身受到光線照射，就會產生促使觸媒



太陽能獨挑大樑

人工光合作用提供了務實可行的方法，可以用來儲存太陽生產的能源，一般人的住家再也不必連上電力網絡。上圖中，來自太陽能板的電力驅動電解器，把水分解成氫和氧。氫儲存起來；晚上或者陰天時，再把氫送進燃料電池，產生電力，供電燈、家電，甚至電動汽車使用。晴天可以直接使用若干太陽動力，跳過製造氫的那一關。

成形的電壓。「染料的作用就像分子導線，把電荷送走，」葛雷徹說，觸媒接著在需要的地方，也就是在染料上面形成；觸媒形成之後，染料吸收的陽光就會驅動分解水的反應。葛雷徹表示，和另外使用太陽能板、電解器比起來，這種裝置可能更有效率，也更便宜。

諾伽拉正在探究的另一種可能，是他的觸媒能不能用來分解海水。初步的測試中，他的觸媒在有鹽存在的情況下表現得很好，他正在做進一步的測試，觀察它處理海洋中其他化合物的情

形。如果行得通，諾伽拉的系統將不只可用於因應能源危機，還有助於解決全球日益嚴重的淡水短缺問題。

人工葉子和能夠產生燃料的海水淡化系統，聽起來像是浮誇的承諾，但在許多科學家看來，這種可能性似乎近在咫尺。致力於尋找新能源技術的化學家，遭人奚落了數十年，但植物輕而易舉，便能利用陽光把豐富的材料化為富含能源的分子。「這件事就在我們身邊到處發生，我們卻辦不到，」加州大學柏克萊分校的化學與材料科學教授保羅·

艾利維薩托斯 (Paul Alivisatos) 說。艾利維薩托斯正領導勞倫斯柏克萊國家實驗室利用化學方法模仿光合作用的研究。

但是就像諾伽拉說的，借用大自然本身的藍圖，人類或許不久就能利用太陽「從一杯水造出燃料」。這個想法很美，任何化學家都會拍手叫好——每個人應該也都會覺得，希望成真的可能性很高。(作者 Kevin Bullis 是 Technology Review 的能源線記者。)

Copyright © 2008, Kevin Bullis. All Rights Reserved.