

2016 年諾貝爾化學獎—— 分子機器的設計與製造

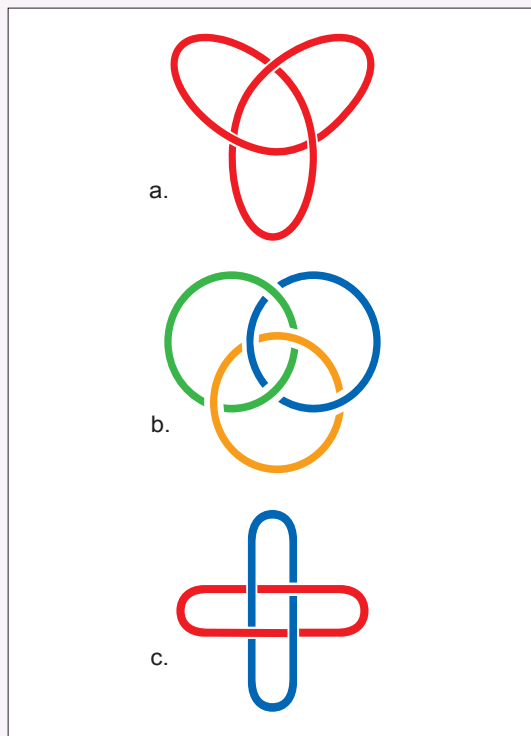
蕭世裕

獲頒 2016 年諾貝爾化學獎桂冠的 3 位科學家的貢獻是：
利用化學合成的方法製造出比頭髮更微細千倍的分子機器。

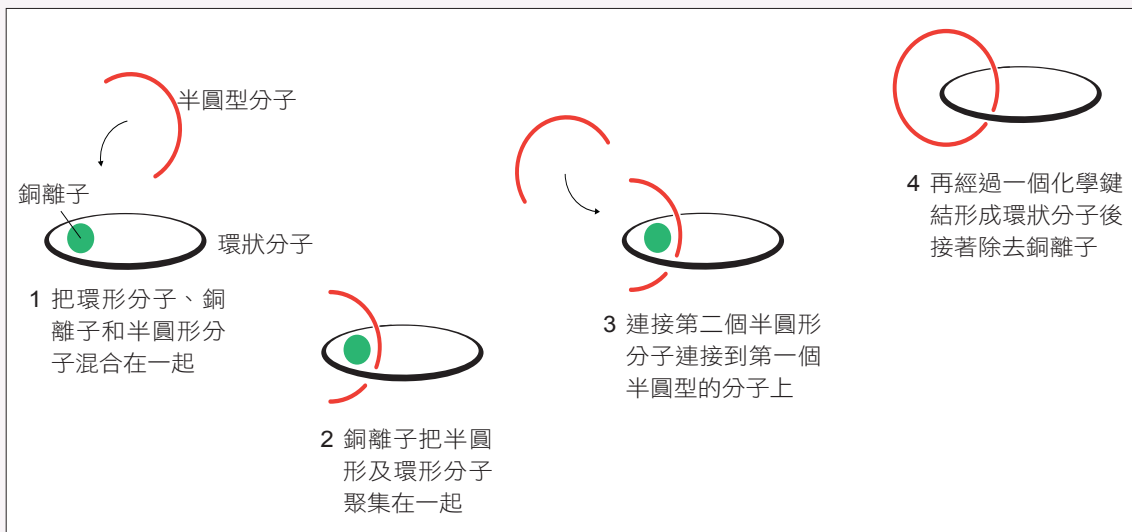
從 18 世紀末肇始的工業革命，以蒸氣機的力量取代了人力、水力和風力來推動各式各樣的機器。人類生活的方式因此徹底改變，工廠不再因需要水力而設在河邊，大型船隻不再仰賴風力就可以隨意行駛，笨重的火車可以輕快地做更長途的行駛，工廠的機器不必仰賴人力就能日夜不停地工作，而大幅增加了產量。至今隨著科技的進步，機器的種類越來越多元化、自動化和微小化，而推動機器的力量也從蒸氣機、內燃機、電動馬達、核能，演進到太陽能驅動馬達。

分子機器的起源

到底能製造出多小的機器呢？1950 年代諾貝爾獎得主費因曼（Richard Feynman）就堅信製造出奈米大小的分子機器是可能的。其實這類機器早已存在於自然界中，例如人體內所含的約兩萬多種蛋白質，每一種蛋白質都是一部具有特定功能的分子



a. 索瓦製造了一個三葉草型的分子結；b. 史托達特製造了波羅緬環；c. 史托達特與索瓦合成分子版的所羅門結。（圖片來源：2016 年諾貝爾化學獎新聞稿）



索瓦利用一個銅離子的幫助把兩個環透過機械力串聯而互鎖在一起（圖片來源：2016年諾貝爾化學獎新聞稿）

機器，而且這些分子機器正是維持人體正常生理功能的要件。

2016年諾貝爾獎化學獎頒給索瓦（Jean-Pierre Sauvage）、史托達特爵士（Sir J. Fraser Stoddart）和費倫加（Bernard L. Feringa）3位科學家，以表彰他們在設計和合成分子機器方面的貢獻。索瓦設計的分機肌肉，史托達特設計的分機區間車和分機電梯，以及費倫加設計的分機馬達，都是利用化學合成的方法，把不同的小分子以機械力量互鎖在一起，然後利用改變化學因子（例如離子濃度或種類）、溫度或提供太陽能或紫外線來驅動這些微小的分機機器。

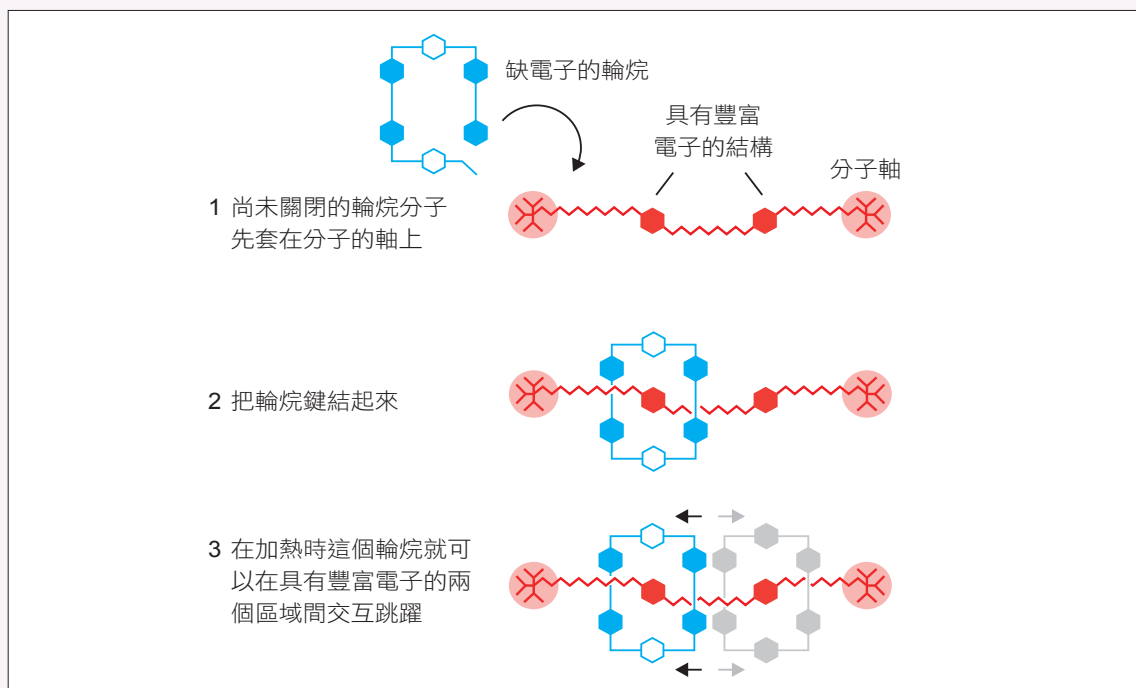
這些研究成果代表科學家已朝著微小化機器的方向邁出了第一步，目前雖看不到它的應用與價值，但以1830年代發明的電動馬達為例，當初科學家也沒料到這些以電能驅動的旋轉輪軸，後來竟然可以用來製造各式各樣的電動機械，例如洗衣機、電風扇、果汁機等，造福人類多多。

克服把小分子串在一起的難題

現在就來談談這些比頭髮還要細上千倍的分子機器是如何製造的？首先面對的第一個挑戰是以人類粗大的手掌，如何製造出那種小到要利用電子顯微鏡才看得到的分子機器呢？這的確很難，要把兩個圓形的分子串聯在一起，不能靠眼睛和手，而要靠這兩個分子間的吸引力。

1983年法國化學家索瓦所領導的團隊利用一個銅離子把一個圓形和一個半圓形的分子吸引在一起，然後再利用另外一個半圓形的分子與它反應，而製造出由兩個圓形分子以機械力串聯在一起的雙環分子結構。這是邁向設計和製造分機機械的第一步，即把兩個分子以「機械互鎖」的方式結合在一起。

隨後索瓦的團隊繼續用類似的方法製造出更多元的鏈鎖分子，例如三葉草形分子、波羅緬環和所羅門環，這些鍊鎖分子



史托達特製造出以熱能驅動的分子區間車（圖片來源：2016 年諾貝爾化學獎新聞稿）

是把兩個或三個環狀的分子以更複雜的方式串聯在一起。以這個為基礎，索瓦更進一步製造出可以利用外加能量來控制其中一個環狀分子轉動，就這樣他替非生物型的分子機器開啓了第一扇門。

熱能驅動的分子區間車

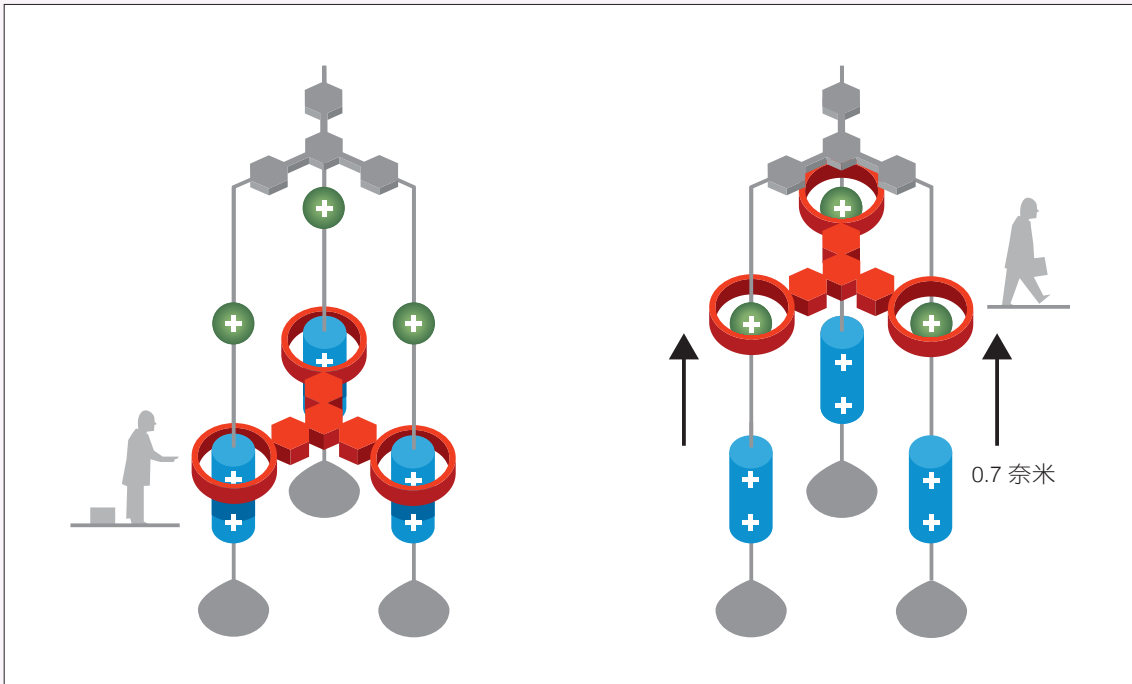
1991 年英國化學家史托達特和他的團隊把分子機器的製造技術更往上提升，他們做出了一輛分子區間車，可以在一個輪軸上靠外加的熱能來移動。怎麼做的呢？

首先他們把一個缺電子的開環分子和一個具有兩個多電子端的輪軸放在水溶液中，這時缺電子的開環分子會被多電子的輪軸吸引進而套在輪軸上。下一步他把開環分子以化學反應鍵結，讓環狀分子能以機械互鎖方式留在輪軸上，這個環狀分子

又稱為輪烷（rotaxane），可以沿著輪軸自由轉動和移動。當加熱時，輪烷環狀分子就會像一個微小的區間車般在兩個多電子端的輪軸間前後跳動。

到了 1994 年，他們已能完全掌控輪烷移動的方向，進而發展出更多種類的分子機械，包括一台分子電梯，它可以升降 0.7 奈米，和一個分子肌肉，它可以折彎金箔片。史托達特甚至以輪烷為基礎，更進一步與其他科學家合作開發出分子電腦晶片，雖然他開發出的 20 kB 分子晶片仍無法與現有的電晶體晶片相比，但這已替分子晶片開拓出一片新領域。

2000 年時，索瓦也進一步研究輪烷的潛力，把兩個具有輪烷的分子套在一起，利用輪烷與水溶液不同離子形成不同的錯合物來拉動這兩個分子，製造出類似人體肌肉纖維具有彈性的結構。



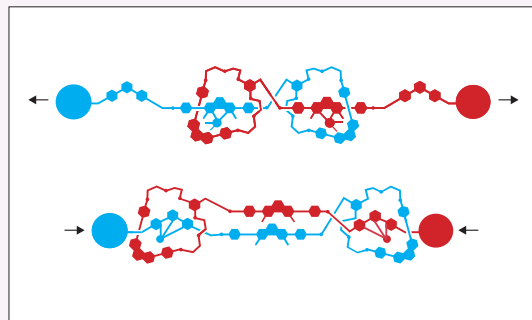
史托達特製造的分子電梯（圖片來源：2016 年諾貝爾化學獎新聞稿）

分子機器的核心：分子馬達

分子馬達是分子機器研究的另一個核心技术。一般來說分子的移動是隨機的，以旋轉運動為例，往左和往右旋轉的機率是一樣的。在 1999 年，費倫加設計出第一個往單一方向旋轉的分子馬達，他是如何做到的呢？

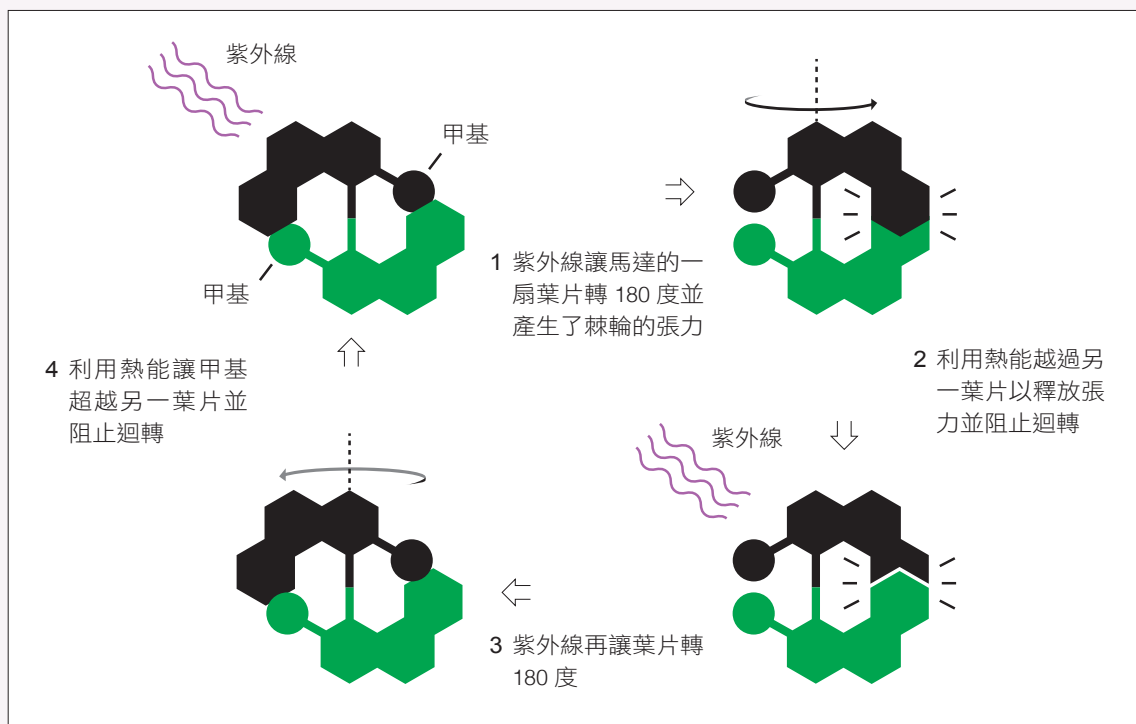
首先他設計兩個旋轉葉片，這兩個葉片由具有平面結構的分子所組成，葉片間以碳、碳雙鍵結合在一起並做為旋轉時的輪軸，葉片上部分的芳香族結構和一個甲基做為強迫葉片只能往同一方向旋轉的棘輪（ratchet）。

當分子馬達接受紫外線照射時，會短暫打斷葉片間的碳、碳雙鍵，利用單鍵的自由度旋轉 180 度後，棘輪互相推擠產生分子間張力而停止，這時提供熱能可以協



索瓦把兩個分子的輪烷串聯在一起，這時改變輪烷與不同金屬離子的配位可以伸長或縮短這個分子肌肉。（圖片來源：2016 年諾貝爾化學獎新聞稿）

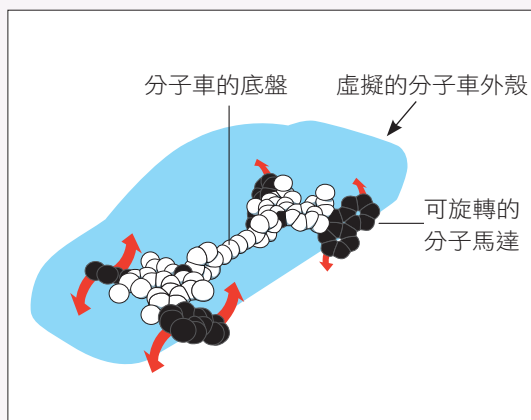
助棘輪越過張力障礙並恢復葉片間的雙鍵。接著下一道紫外線再打斷碳、碳雙鍵，葉片再次以單鍵方式繼續旋轉 180 度遇到棘輪間張力而停止。如此不斷地提供分子馬達紫外線和熱能，葉片就不斷地朝同一方向旋轉。



費倫加製造的分子馬達，它利用紫外線為動力，棘輪為阻力，限制馬達只能往一個方向轉。（圖片來源：2016 年諾貝爾化學獎新聞稿）

這是第一個利用紫外光能和熱能驅動的分子馬達，最初的旋轉速度並不快，但經過改進之後，在 2014 年做出的分子馬達已可以達到每秒鐘一千兩百萬轉的高速運動。在 2011 年，費倫加團隊建造了一個四輪驅動分子車，車子的底盤與四個分子馬達接在一起，當馬達轉動時車身就開始移動。在另外的一個實驗，他們利用分子馬達去推動比分子馬達大一萬倍的玻璃棒。這又是如何做到的呢？

首先他把分子馬達與液晶（一種具有晶體結構的液體）以 1 比 100 均勻混合，然後啟動分子馬達，液晶的晶型受到馬達的推動而改變。這時把一個長 28 微米的玻璃棒放在液晶表面，就會因分子馬達的影響而轉動。



費倫加的四輪驅動分子車（圖片來源：2016 年諾貝爾化學獎新聞稿）



2016 年諾貝爾化學獎的 3 位獲獎人利用化學合成的方法製造出分子機器，開拓了人造分子機器的新領域。

生物體內的分子機器

2016 年諾貝爾化學獎的 3 位獲獎人利用化學合成的方法製造出分子機器，開拓了人造分子機器的新領域。但是不要忘了生物體內早已有成千上萬的生物型分子機器在維持著生物體的正常功能，生物型分子機器包括蛋白質類、核醣核酸類、去氧核醣核酸類、醣類、脂肪類和一些生物有機分子。這些分子機器掌管營養源的吸收和分解、生物能量的生成、各式各樣生物分子和分子機器的生產和製造、生物資訊的儲存和傳遞、抵抗外來病毒、細菌或物質的侵襲等。

生物體內任何一個分子機器若出毛病很可能就會產生病變。諾貝爾獎從 1901 創立至今已達 115 年，其中研究生物型分子機器的科學家幾乎囊括生理醫學獎和超過三分之一的化學獎，由此可知生物型分子機器研究的重要性。未來當我們設計人造的分子機器時，模仿研製生物體內的分子機器應是一個重要的方向。

蕭世裕
成功大學化學系
