

奈米科技與工業革命

自 18 世紀 60 年代起，英國棉紡織業使用瓦特製成的改良蒸汽機，大幅度增加了棉紗產量，並在極短時間內改良蒸汽機，應用到採煤、冶金及交通運輸等各行各業，這就是俗稱的工業革命。此後二百多年之中，人類除了經歷蒸汽機時代的第一次工業革命，實現產業機械化以節省人力，更經歷電機時代、原子時代、太空時代的第二次工業革命，及在二十世紀中末期，電子計算機與電腦資訊網路時代帶領我們進入第三次工業革命。而在我們繼續邁開腳步進入二十一世紀的同時，第四次工業革命 - 奈米科技將伴隨而來。展望未來，人類將會再一次傾倒於自己親手發起的革命，再一次沉醉於自己親手創造的文明。

馬遠榮

一、工業革命與奈米科技

工業革命實際性質上是技術的革命，它表現以機器替代人力，以大規模的機器製造生產，於是工廠替代以手工生產的方式，不但大大降低了生產成本，更提高了勞動效率。在 1840 年之後，英國以蒸汽機生產的工場取代以手工生產的工場，蒸汽機廣泛的應用，促進了紡織業、毛紡業及採煤業等輕工業的發展。這時無論在生產力和生產關係方面都發生了重大變革，各式機器的製造與改良如雨後春筍般的發展起來，引起機器製造業的興盛，而逐漸發展成為機械等重工業。至此工業革命基本完成，英國成為世界上第一個工業國家，工業革命也使得傳統經濟生活發生了無與倫比的巨變。

整個工業革命以英法德美俄為主，法國的工業革命起自於十八世紀初到十九世紀中完成，而德

國、美國、俄國一直到十九世紀八十年代才陸續完成工業革命。這個工業革命的波段被稱之為第一次工業革命，是以蒸汽機為主要標誌。工業革命的影響力席捲整個歐洲的政治、經濟、社會、文化、科學、藝術，尤其對於數學、物理、化學、機械的相互影響，更是直接地貢獻於工業革命的持續創造與發展，進一步地使輕、重工業的製造均發生巨大變革。

由於熱力學與電磁學的物理理論發展完備，十九世紀末期的工業革命，主要以內燃機與發電機代替蒸汽機。由於內燃機與發電機藉由燃燒煤或石油，而產生穩定和大量的電力，使電力成為現代文明主要的能源，支配著整個社會經濟生活的脈動，這個波段稱為第二次工業革命。電力的優點在於容易傳輸與可作訊息的傳遞，因此電力時代主要表現在電力的使用和訊息傳輸兩方面。在電力使用方面，有發電機、電動機和電燈等發明，在訊息傳輸方面，有電報、電話、電視和電腦網路等傳播工具。隨著電（發電機）汽（內燃機）的廣泛應用，石

馬遠榮先生為英國諾丁漢大學物理學博士，現任國立東華大學物理系助理教授。

油、電力與汽車等工業成為二十世紀最大產業，而掌握石油、電力與汽車等工業即掌握世界的資源與財富。英、法、美、德、俄、日等典型的工業國家，均視石油為國家生存命脈，至今仍不惜對因戰爭而破敗的阿富汗戰爭，名為反恐實為掌控中東石油區而戰，與 90 年美對伊拉克的戰爭相同均為石油而戰。

石油化學工業帶來各式各樣的商品，如塑膠產品，提供人類新的使用材料替代傳統衣服用料、容器用品與各式工具的附屬品，這些石化材料常與高附加價值機器緊密結合在一起，如汽車、飛機等交通工具，賺取大量的財富，這就是台灣台塑公司為什麼汲汲營營涉足油品市場與汽車工業。隨著電力的方便取得，各式家電產品如雨後春筍般的發展起來，家電產品的方便性與功能性，使我們日常生活的各個方面都必須仰賴它的服務，再也不需耗費大量勞力。至此，古老社會結構徹頭徹尾的改變，人類的文明似乎將達到空前的進步。綜合石油工業時代的特點，(1) 以使用石化產品為原料基礎、(2) 電器機器的精密化及 (3) 大量販賣的商業行為，這些特點造成現代商業都市的形成與工業區工廠的集中，使人類脫離鄉村的自然環境，而生活於人造的水泥叢林中。

進入二十世紀中後期，人類開始使用電子計算機 (calculator，第一台電子計算機 ENIAC 是由美國賓州大學於 1945 研製成功，又稱電腦 computer) 及資訊傳遞技術，文明演變的過程速度更加猛烈，自此為第三波的工業革命。人們本以為可以藉由電子計算機與資訊網路的傳遞，更方便規劃自我的人生與他人的溝通，但是實際結果，卻更加封閉於窄小空間與外界接觸。電子計算機發展於二十世紀中期，是一種以機械與電子元件的組合機器，可以做數學運算、數據處理及記憶，其運算速度快、誤差小、數據處理量大及數據記憶長久，如現在美國英代爾 (Intel) 公司的 Pentium 4 型中央處理器 (CPU) 的運算頻率可達 1×10^9 赫茲 (1 GHz) 以上，大大地取代本需人腦服務的工作，如龐大的電腦文書與繪圖軟體可替人類做私人秘書，為電子計算機的應用良好範例。而軟體製造業也悄悄地取代石油與汽車工業，成為世上最大的產業，如美國微軟公司

(Microsoft Corporation)。稍後二十世紀末期，資訊傳遞技術的突破與成熟，可將文字、圖畫、語音快速傳遞至遠處，成為二十世紀末最偉大的成就。以電腦為媒介的虛擬網路產業已為此時期的新興產業，其影響力迅速地席捲各個產業，替經濟投入一份活力，也替不少年輕人創造無可倫比的財富，如雅虎的楊致遠。雖然網路產業因全球不景氣與投資過多而泡沫化，但網路產業仍為未來經濟發展的主軸之一，因為掌握新的資訊就掌握先機，故以電話為工具的電信產業正積極加入網路產業。

電腦資訊網路化能力已經成為綜合國家力量的主要標誌之一，現今我們正處於一個前所未有的時期，然而在經歷三波的工業革命之後，接下來又將會進入一個怎麼樣的時代呢？現在我們使用的電腦與家電用品講究輕、薄、短、小和多功能性，希望越來越精密準確的電子儀器和高速網路通道。故體積小傳輸高的下一代電子產品，正將我們推向另一波工業革命的高潮，而奈米科技就是二十一世紀的工業革命，也是第四波的工業革命。全球視奈米科技為下一波產業技術革命，為製造工業下一階段的核心領域，也將會重劃未來全世界高科技競爭的版圖，更可能替人類生活帶來不可避免之衝擊。

二、奈米科技為什麼被稱為二十一世紀工業革命

奈米科技主要包括：(1) 奈米物理學或介觀物理，(2) 奈米化學，(3) 奈米材料學，(4) 奈米生物學，(5) 奈米電子學，(6) 奈米加工學，(7) 奈米力學等七個獨立相對的分支領域，故奈米科技可謂是二十一世紀科學的總稱。簡易說，奈米科技實為奈米尺寸下的科學技術。奈米英文是 nanometer，是長度的單位，數學符號為 nm。nano 在希臘文原是「侏儒」的意思。一奈米為十億分之一公尺 ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$)，相當於 3 到 4 個原子串聯起來長度，以一公尺比為地球直徑，一奈米大約為一個玻璃彈珠的直徑。在奈米尺度下，一般傳統科學理論、技術均已不適用。因為奈米尺寸的物理性質與普通尺寸的物理性質是截然不同的，一旦物質尺寸小到一奈米至一百奈米範圍，常會產生新的特性與現象，例

如，最近研究結果已知，蓮花表面之奈米結構使污泥無法沾附⁽¹⁾、金的顆粒大小在 5 奈米時熔點大幅下降⁽²⁻³⁾、奈米尺寸的二氧化鈦 (TiO₂) 的導電性數倍於普通尺寸的二氧化鈦等⁽⁴⁾。

超小物質的研究起自 1970 年代，即所謂超微粒 (ultra-fine particle) 研究。因超微粒的大小多半為微米尺寸，微米英文是 micrometer，是長度的單位，數學符號為 μm 。一微米為百萬分之一公尺 ($1\ \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6}\ \text{m}$)，再小下去就為奈米尺度，故至 1980 年代超小物質的研究自然變成奈米尺度材料 (即所謂奈米材料) 的研究，但研究者也發現許多奈米材料的物理性質已與同一材料普通尺寸的物質大不相同，既不能用傳統物理 (即古典物理，如力學、電磁學) 解釋，也不能用量子物理 (二十世紀初期所發展出的物理理論，用來解釋原子、分子與電子的行為) 解釋。

由於傳統物理多半解釋物質整體的行為，屬於巨觀行為，而量子物理解釋原子、分子與電子的行為，屬於微觀行為。奈米尺寸剛好介於普通尺寸與原子尺寸 (原子尺寸單位為埃，英文為 angstrom，數學符號為 \AA ，1 埃 = 1×10^{-10} 公尺) 之間，故用以解釋奈米材料或奈米科技的新物理理論，稱之為介觀 (mesoscope) 物理。故當進入 1990 年代後至今，由奈米科技發展出的新史觀 - 介觀物理，將主導奈米科技或奈米材料所衍生的應用，現今世界各先進國家為了在這場新世代的產業革命中搶得先機，無不積極投入大量的金錢與人力，除了奈米科技本身的誘人前景外，現在奈米科技的發展速度令人吃驚而引起國際注目。如單電子電晶體，英文為 single electron transistor，縮寫為 SET，與傳統電晶體不同的地方為單電子電晶體是控制一個個電子的運動，而傳統電晶體是控制電流的運動。而單電子電晶體僅能於低溫下發揮功能，若能於室溫下工作，則目前正在研發室溫的單電子電晶體⁽⁵⁻⁶⁾ 將達到最大的應用價值。

早在 1959 年，著名物理學家諾貝爾獎得主費曼 R. Feynman 曾設想：「如果有朝一日，我們能把百科全書全儲存在一根針大小的空間內，並能移動原子，那麼這將會給科學帶來什麼？」

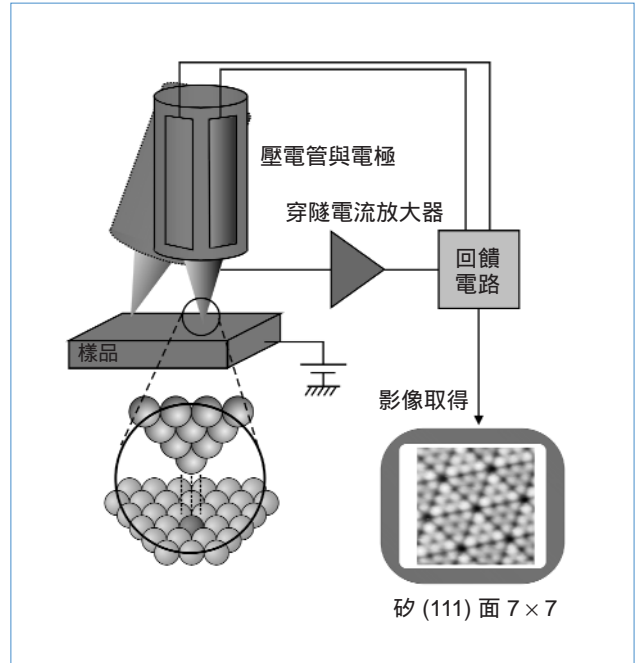


圖 1. 掃描穿隧式顯微鏡的操作原理與矽 (111)-7 × 7 重構影像圖。

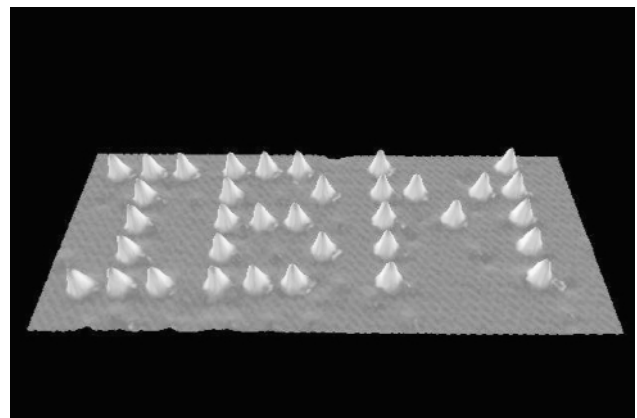


圖 2. 利用掃描穿隧式顯微鏡的探針將 35 個氫原子於鎳 (100) 面上排成 IBM 三個英文字母。

1981 賓伊 G. Binnig 與勞爾 H. Rohrer 於瑞士 IBM 公司，發明掃描穿隧式顯微鏡 (scanning tunneling microscope, STM) (如圖 1 所示)⁽⁷⁾，主要是利用一根探針的針尖來探測物體表面形貌，此儀器可輕易觀測物體表面原子排列，六年後 (1986) 二位科學家榮獲諾貝爾獎。再三年後，1990 年 D. Eigler

於美國 IBM 公司利用掃描穿隧式顯微鏡探針，將 35 個氙 (xenon, Xe) 原子排列成 IBM 三個英文字母 (圖 2)⁽⁸⁾，這是人類首次操縱原子，用原子或分子製造機器已不再是夢想。這開啟了微小世界裡人為技術的濫觴，而形成今日的奈米技術。雖然奈米技術還有一大段路要走，但奈米技術成為新世紀主導科學先驅已是不爭的事實。

前美國總統柯林頓在 2000 年宣佈一項美國國家 2001 年科研計畫 - 「國家奈米技術創新 (National Nanotechnology Initiative, NNI)」⁽⁹⁾ 投資四億九千七百萬美元於奈米技術，被投資的國家單位包括國家科學基金會 (National Science Foundation)、國防部 (Department of Defense)、能源部 (Department of Energy)、國家太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA)、商業部 (Department of Commerce)、國家衛生院 (National Institutes of Health) 等，與美國國家 2000 年科研計畫比較，各單位投注的金額均大幅上漲，國家太空總署的漲幅更高達 400%，如表 1 所示。

由表 1 所列金額表示的意義不難看出奈米科技不只限於基礎科學研究，它的應用價值在其他領域的開發也是廣受注目的。該投資金額僅次於生物醫學計畫的十億美元，故在面臨二十一世紀高科技發展的競爭中，奈米科技的發展將會是國家高科技發展政策中不可或缺的一環。未來可以將美國國會圖書館所有資料放在一個方糖大小記憶體內的費曼幻想，希望終有實現的一天。

三、奈米技術目前的應用與對未來的影響

1966 年由維奇 R. Welch 主演的好萊塢電影科幻片 - 驚異大奇航 (fantastic voyage)，敘述人類首度進入人體的奇妙旅程，當時大大賣座，成為票房新寵，那個時候進出人體還真的只是科技神話。但在三十五年後的今天，乘著縮小的潛水艇進到人體腦部，清除血管中的血塊，避免中風或死亡，這般夢幻的情節，現在不只是在好萊塢電影上看見，在現實生活中，也將逐漸實現。

當我們因為癌症而做化學治療或放射線治療

表 1. 美國聯邦 2000 - 2001 年會計年度投資國家奈米技術創新 (NNI) 預算書 (百萬美元為單位) 及成長率。

部 / 署	2000	2001	成長率
國家科學基金會	97	217	124%
國防部	70	110	57%
能源部	58	96	66%
國家太空總署	4	20	400%
商業部	8	18	125%
國家衛生院	32	36	13%
總計	270	497	84%

時，往往因為化學藥劑或放射線除了殺死癌細胞外，也跟著殺死人體原本健康的細胞，所以會有憔悴、掉頭髮等副作用，甚至引起後天性心臟病等。根據美國《科學》雜誌的報導，前年底 (2000 年) 美國科學家 C. Montemagno 領導一群美國康乃爾大學的科學家，應用奈米技術成功地製造出與病毒大小差不多的生物分子推進器⁽¹⁰⁾。生物分子推進器分為三部份，以鎳 (nickel, Ni) 為軸，以 F₁-腺嘌呤核苷三磷酸合成酵素 (F₁-Adenosine triphosphate synthase, F₁-ATPase) 為馬達和螺旋槳。螺旋槳長 750 至 1,400 奈米、直徑 150 奈米，以合成酵素為燃料推動螺旋槳，轉速最大每秒可轉 8 次，續航力 150 分鐘，如圖 3。你能想像它在你身體裡活動嗎？無須懷疑，日後若加以改良，這台生物分子推進器載運醫療器材與藥品可望放進人體，在不致於影響人體下，進行清理血管、抵抗病菌等醫療行為。

生物分子推進器在未來醫學上的第一項優點是免開刀：可直接到達病人的患部作治療，免於傳統開刀破壞人體；第二項優點是免吃藥：藥物直接用於病處，將藥力祇侷限於患部，或針對人體內病變的壞細胞而摧毀，不損壞原本好的細胞，免於影響人體各器官；第三項優點是專人醫師：生物分子推進器使用酵素為燃料，可取之於人體內，用之於人體內，可使醫療潛水艇長期停留於體內做健康的觀測，就如同奈米醫生機器人進入體內做診療。

由於 DNA 的大小剛好為奈米尺寸等級，故奈米生物學為奈米技術應用的另一個重要分支。將生

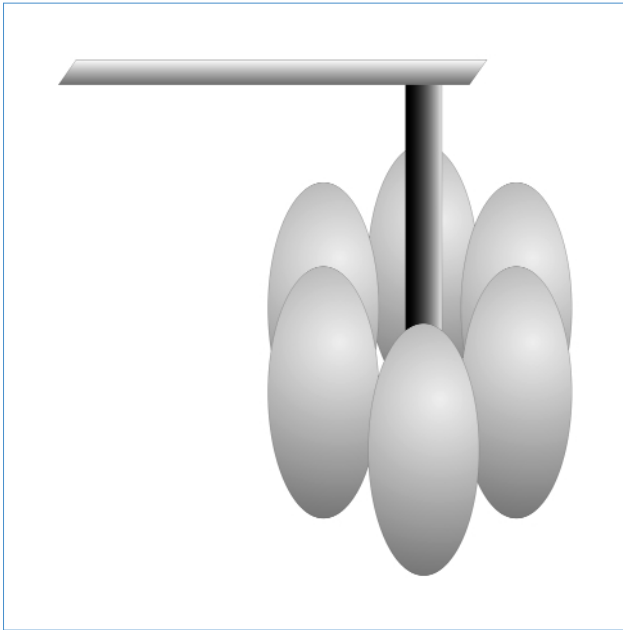


圖 3. F_1 -腺嘌呤核苷三磷酸合成酵素的分子推進器。

物大分子精細結構和其功能聯繫，進而按自己的意志剪裁嫁接，如圖 4，製造具有特殊功能的生物大分子，這就是未來奈米生物學的發展。奈米技術使人類能夠更加清楚描繪基因圖譜，可以控制基因的改變，且能改善缺陷的基因，迎刃而解目前人類的各種疾病，甚至利用此基礎創造更完美的人，與上帝比美。故基因工程使我們可以創造自己所需要新的生物，製造許多種多樣的生物「產品」。目前基因工程已與農業、食品化學工業結合，而大量製成基因食品，人類的食品結構也將隨之發生變化，基因食品雖然豐富我們食品的種類和數量，卻將帶給我們未知的潛伏危險。

由於 1982 年的掃描穿隧式顯微鏡 (STM) 發明⁽⁷⁾ 以後，研究原子分子世界的學門迅速轉變為奈米科技的先驅，再者 1990 年使用掃描穿隧式顯微鏡 (STM) 移動與操縱原子及分子為特定的排列⁽⁸⁾，直接地引發以分子或者原子來製造特定功能之電子產品為最終目標。例如：還在實驗階段的量子電腦，用少許的原子⁽¹¹⁻¹²⁾ 為元件讓電腦體積大幅縮小、運作更快、更節省能源。在速度方面預估一年後，2003 年量子電腦只要數分鐘，即可完成目前電腦要花上數百年才能完成的計算。或許於不久的未來，將超微小的電腦植入人腦，幫助人腦工作已不

再是夢想。

奈米技術也已應用在光碟片的製作，光碟片 (CD) 是以人造點陣來儲存記憶資料，光碟片上每個儲存點大小為 500 奈米、儲存密度為 108 bit/cm²，每片光碟儲存容量約為 640 MB (MB 為 mega bit 的縮寫，數量單位，1 MB = 1 × 10⁶ bits)。而 DVD 光碟片的儲存容量是一般光碟片的 8 - 16 倍，約 4.7 - 8.5 GB (GB 為 giga bit 的縮寫，數量單位，1 GB = 1 × 10⁹ bits)，已可將二小時的電影儲存十部以上。若奈米技術持續進步，儲存點縮小十分之一，達到 50 奈米，則儲存容量可擴大一百倍，一片光碟就有 64 GB 的容量。若進一步以一個原子當作一個儲存訊號，則每片光碟儲存密度可達 1,014 bit/cm²，容量就大到 640 TB (TB 為 tera bit 的縮寫，數量單位，1 TB = 1 × 10¹² bits)，是現在光碟的一百萬倍。

奈米材料的出現，其有別於傳統材料的特性引起了材料界的關注，例如奈米碳管⁽¹³⁾ 抗斷裂的能力比一般鋼鐵材料高十二倍，蓮花表面之奈米結構使污泥無法沾附⁽¹⁾、金的顆粒大小在 5 奈米時熔點大幅下降⁽²⁻³⁾、奈米尺寸的二氧化鈦 (TiO₂)⁽⁴⁾ 之導電性數倍於普通尺寸的二氧化鈦等，電阻溫度係數甚至可以下降到負值，奈米銅材料⁽¹⁴⁾ 比普通銅要堅

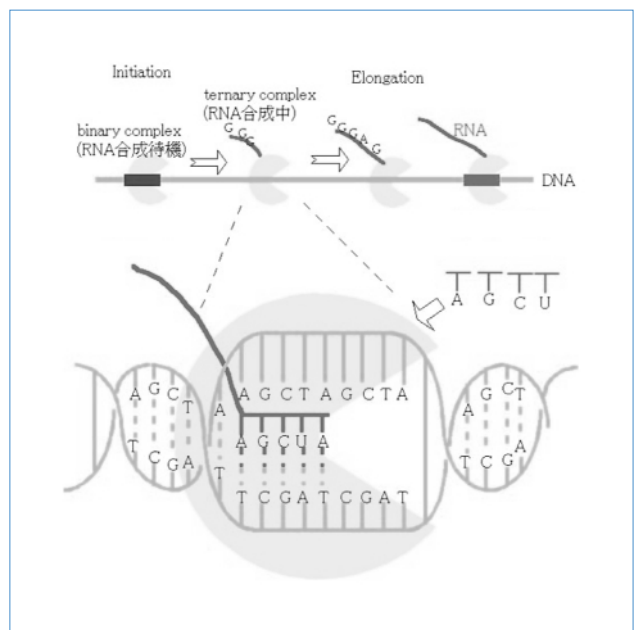


圖 4. DNA 的剪裁嫁接。

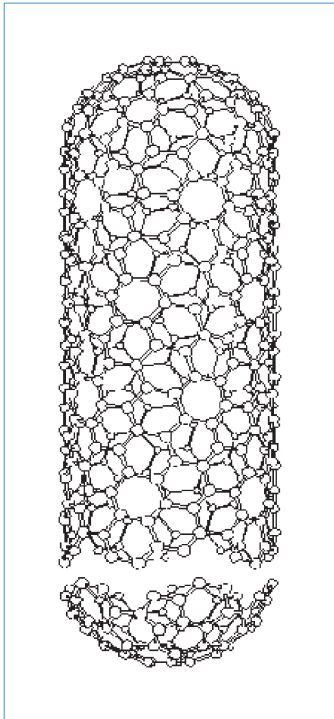


圖 5. 奈米碳管。

固數倍以上等。奈米材料的製作主要集中在顆粒奈米化，形成奈米晶體及奈米非晶體等，以及由它們組成的薄膜，或將絲、管、和微孔都奈米化。如目前日本出現許多抗菌的日常用品，就是將抗菌物質進行奈米化處理，在生產過程中添加進去，抗菌內衣、抗菌茶杯便生產出來了。又如於玻璃表面塗一層奈米化二氧化鈦的薄膜⁽¹⁵⁾，那麼普通玻璃馬上就變成具有自己清潔功能的自淨玻璃，而不用人工清洗。

現在電腦材料普遍奈米化，如半導體加工業台灣積體電路公司與聯華電子公司可將元件製成線寬僅 130 奈米，所以現在的電腦已不可同日而語，體積遠比現在筆記型電腦還要小很多，桌上型電腦縮小成筆記型電腦，筆記型電腦縮小成掌上型電腦。電池材料的奈米化⁽¹⁶⁾則可以使很小的體積容納很大的能量，且能量轉換的效率更高，用奈米碳管做成的電池，比傳統電池持久一倍，重量卻只有傳統電池的一半。未來使用奈米電池的電動車將全面取代汽車或柴油車，不但節省能源也可潔淨空氣，一舉數得。

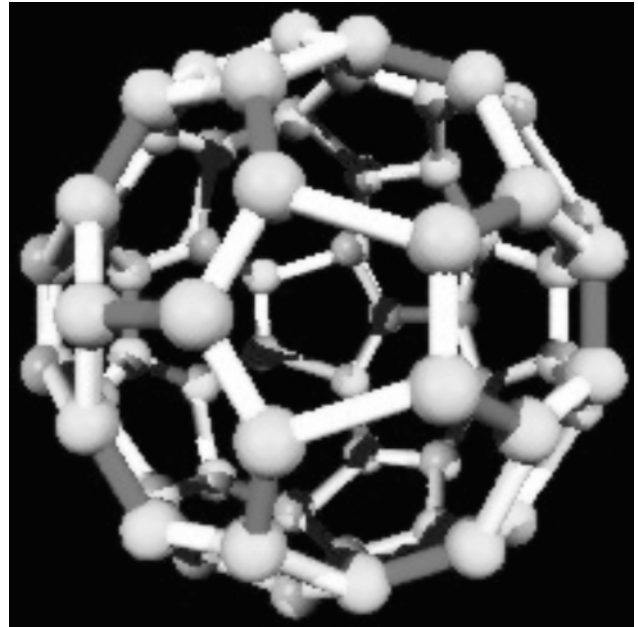


圖 6. 碳六十。

在奈米材料裡，奈米碳管(圖 5)⁽¹³⁾是最知名的一種奈米材料，奈米碳管的中空結構是第 3 種純碳結構，此種中空結構筆者稱為「碳簇 (fullerene)」，大陸學者譯為「富勒烯」。第 1 種純碳結構是石墨結構，而第 2 種是鑽石結構。在介紹奈米碳管前，先介紹碳簇的開山祖師 - 碳六十，如圖 6。碳六十原祇在太空中所發現的物質，1985 年英國化學家柯爾托 H. Kroto 成功地解釋出碳六十的結構⁽¹⁷⁾，顧名思義，碳六十為 60 個碳原子組成的中空球體，而直徑僅為 1 奈米長。碳六十英文學名為 buckminsterfullerene，化學符號 C₆₀，因其形狀剛好好像一顆足球，故又稱 buckyball (中文譯為巴克球)，可稱為奈米世界的足球。筆者於英國留學時，深感英國人對足球的熱愛，於是和同事利用掃描穿隧式顯微鏡的探針來移動碳六十(圖 7)⁽¹⁸⁾，踢了一場世上最小的一場足球比賽。美國化學家 R. E. Smalley 首先在地球用雷射激光於石墨上製造出碳六十⁽¹⁹⁾，另一位德國化學家 W. Kratschmer 可以一次製造數克重的碳六十⁽²⁰⁾，後來三位化學家合拿 1997 諾貝爾化學獎。爾後科學家們又製造出碳七十、碳八十四，甚至碳一百多的碳球。1991 年日本 NEC 公司研究員飯島澄男 (S. Iijima) 在研究碳

簇時發現一種直徑 1 - 30 奈米的圓筒形碳材料，稱之為奈米碳管⁽¹³⁾，英文為 carbon nanotube。奈米碳管是目前自然界中所發現最細的管子，具熱傳導性、導電性，強度佳，化學性穩定，而且又柔軟。因碳六十等碳球與奈米碳管有相似的化學結構，故凡是有此種中空的純碳結構，我們截去碳六十冗長的英文名字 buckminsterfullerene 的一半，統稱為 fullerene。

在商業用途上，奈米碳管可用於電視、個人的平面電腦顯示器⁽²¹⁻²²⁾ 與記憶晶片⁽²³⁾。美國 Molecular Electronics 公司預定為兩年後，將做奈米碳管的記憶晶片，這種奈米碳管晶片的開關 (switch) 的速度將是傳統電晶體的 100 萬倍。奈米碳管顯示器的厚度如同紙張，將比傳統陰極電視及液晶螢幕顯示器薄千萬倍，省電是不在話下，且奈米碳管顯示器可捲曲性質，將大大地減低搬運的困難，目前已進入試作階段，飯島澄男預估，2005 - 2010 年左右就可製造出省電、厚度僅數公釐的大畫面奈米碳管顯示器。韓國三星公司在 1999 年 4 月公開展示奈米碳管顯示器的原型機，如圖 8，2000 年底已做出 15 吋螢幕的原型機。據《財星》預估，奈米碳管顯示器市場大餅約為 400 億美元。此外，奈米碳管也被作為新的複合材料應用於各處。奈米碳管有極佳的儲氫能力⁽²⁴⁻²⁵⁾，可拿來製造氫汽車燃料或電池等，可說是一種蘊藏無限可能的夢幻材料。另外，碳六十似乎也為愛滋病帶來一線曙光，碳六十的足球狀化學結構的鍵結，能快速地與 HIV 病毒結合，減低毒素與阻止 HIV 病毒擴散⁽²⁶⁾，這將促使生技醫藥公司開發新的碳六十藥物。繼矽取代石油和煤之後，奈米碳管有可能取代矽，成為尖端產業的主要材料。

R. E. Smalley 與人共同創辦了奈米科技公司 Carbon Nanotechnologies Inc. (CNI)。史莫利在接受《財星》採訪時說「奈米碳管可以用來製造強度是鐵的 100 倍的光纖，而且重量只有鐵的六分之一」。他又推銷奈米碳管：「如果將奈米碳管和銅纜編織成支架，強度可以支撐一個位於 2 萬 2,000 英哩高空上的太空平台」，其著眼點就在奈米碳管驚人的性質與應用，和商業化潛力。CNI 預估，奈米碳管市場大餅每年可達 1,000 億美元。如果價格降低到

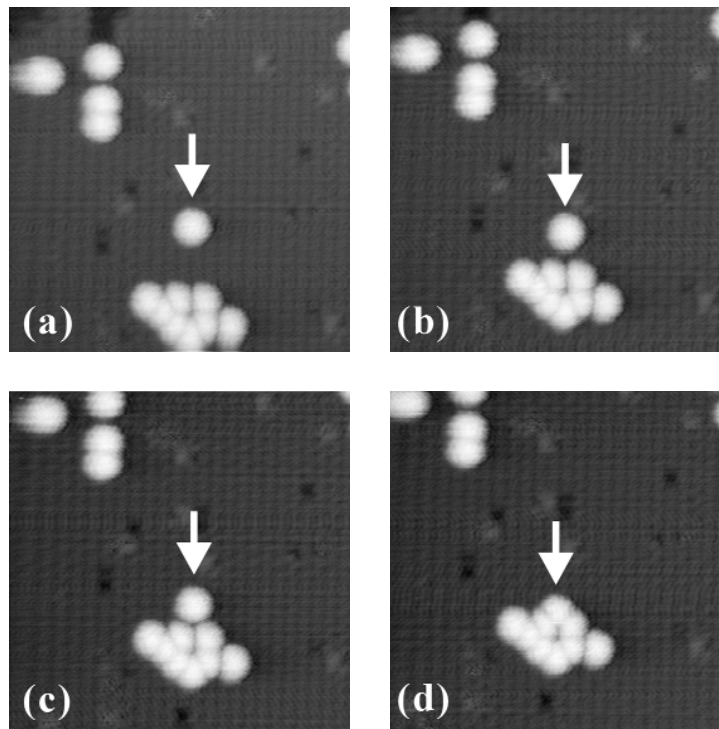


圖 7. 碳六十的分子操縱。

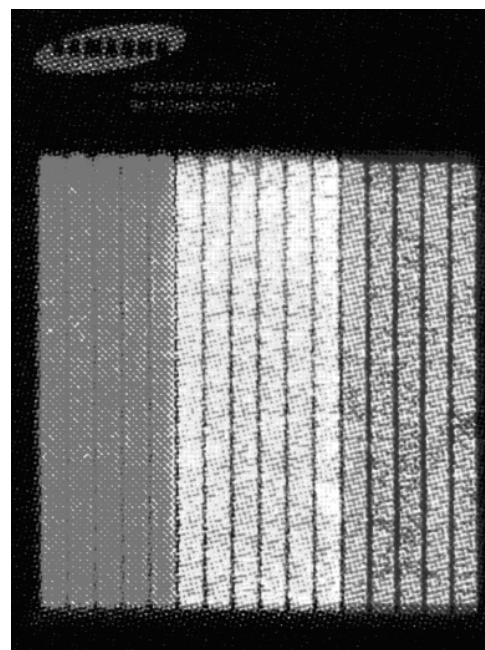


圖 8. 韓國三星公司的奈米碳管螢幕顯示器。

每公克 33 美元，而且年產量可達 1 噸，將可供應產值達數十億美元的電腦及電視顯示器。如果價格降低到每公克 22 美元，則更多產業都能運用，例如

可做雷達無法偵測的隱形飛機的機殼。如果降到 4.4 美元，則可運用於一般日常生活用品，例如作手機、筆記型電腦、PDA 的材料，可以防電磁干擾。然而美國最大創投雜誌《Red Herring》預估，要實現這樣的美夢，看來還要花好幾年的時間。到了 2003 年奈米碳管價格才可能降低到每公克 5 美元。此外，量產技術也有待克服，目前能「量產」的 CNI 每日也只能製造 25 公克，年營業額達 400 萬美元。其他有能力量產奈米碳管的公司不多，日本三菱和兩家美國公司各出三分之一資金成立的公司 Fullerene International，目前每日僅能製造 30 公克。

以奈米技術或奈米材料為產業是一種全新的高科技產業，它不同於一般產品，可以進行直接的生產和銷售，而是必須先深入研究與生產試驗，才能進入市場。對於普通產品的生存，關鍵是在生產的快速與低廉，及銷售的手法與策略，而現階段奈米產業注重研究，然而奈米產品多半具有極高的附加價值，且被複製難度高，所以其應用發展可帶動半導體工業、機器製造業、化學石油工業及各原料業等傳統產業的另一春天，也可以帶動生物、醫學等許多新興產業的發展，可以說奈米科技整合了各個產業的發展。

四、結語

美國前總統柯林頓先生於 2000 年總統任期最後一年，宣佈該國科學研究預算已近 5 億美元將投資於奈米科技的研究上，等於宣佈二十一世紀進入奈米技術時代，全球科技趨勢從微米轉入奈米，奈米技術的創新將帶來下一波的工業革命，奈米技術將大大的改變我們的生活方式，甚至我們還未料想到的瘋狂事物，都會受到影響，進而影響到現存的文明與經濟。

未來奈米技術的廣泛應用將使得各個研究領域產生重大變化，故奈米科技所帶來的不單單只是技術上和經濟上的革命，應是人類對自然的憧憬，對自然資源的利用更加珍惜，與對自然和諧共存的尊重。

參考文獻

1. W. Barthlott and C. Neinhuis, *Planta*, **202**, 1 (1997).
2. K. Akamatsu, and S. Deki, *J. Mater. Chem.*, **8**, 637 (1998).
3. S. Deki, K. Sayo, T. Fujita, A. Yamada, and S. Hayashi, *J. Mater. Chem.*, **9**, 943 (1999).
4. S. H. Chung, Y. Wang, L. Persi, F. Croce, S. G. Greenbaum, B. Scrosati, and E. Plichta, *J. Power Sources*, **97** (8), 644 (2001).
5. Y. Takahashi, M. Nagase, H. Namatsu, K. Kurihara, K. Iwadate, Y. Nakajima, S. Horiguchi, K. Murase, and M. Tabe, *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet.*, 938 IEEE, New York (1994).
6. K. Matsumoto, M. Ishii, K. Segawa, Y. Oka, B. J. Vartanian, and J. S. Harris, *Applied Physical Letters*, **68**, 34 (1996).
7. G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 57 (1982).
8. D. M. Eigler and E. K. Schweizer, *Nature*, **344**, 524 (1990).
9. <http://itri.loyola.edu/nano/final/>
10. R. K. Soong, G. D. Bachand, H. P. Neves, A. G. Olkhovets, H. G. Craighead, and C. D. Montemagno, *Science*, **290**, 1555 (2000).
11. G. P. Berman, GD Doolen, V. I. Tsifrinovich, *Superlattices Microsc.*, **27**, 89 (2000).
12. J. J. R. Tucker and T. C. Shen, *Int. J. Circ Theor App.*, **28**, 553 (2000).
13. S. Iijima, *Nature*, London, **354**, 56 (1991).
14. S. T. Oh, M. Sando, T. Sekino, and K. Niihara, *Nanostruct. Mater.*, **10**, 267 (1998).
15. C. B. Ng, B. J. Ash, L. S. Schadler, and R. W. Siegel, *Adv. Compos. Lett.*, **10**, 101 (2001).
16. J. Yang, Y. Takeda, N. Imanishi, and O. Yamamoto, *Electrochim. ACTA*, **46**, 2659 (2001).
17. H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, and R. E. Smalley, *Nature*, London, **318**, 162 (1985).
18. J. R. Heath, S. C. O'Brien, Q. Zhang, Y. Liu, R. F. Curl, H. W. Kroto, F. K. Tittel, and R. E. Smalley, *J. Am. Chem. Soc.*, **107**, 7779 (1985).
19. Y.-R. Ma, M. D. Upward, P. H. Beton, and D. Teehan, *Semicond. Sci. Technol.*, **13**, A47 (1998).
20. W. Kratschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, and D. R. Huffman, *Nature*, London, **347**, 354 (1990).
21. Y. Saito and S. Uemura, *Carbon*, **38**, 169 (2000).
22. Y. Saito, S. Uemura, and K. Hamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **II** **37**, L346 (1998).
23. B. I. Yakobson, C. J. Brabec, and J. Bernholc, *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 2511 (1996).
24. O. N. Srivastava, R. K. Karn, and M. Misra M, *Int. J. Hydrogen Energy*, **25**, 495 (2000).
25. H. Tributsch, *Appl. Phys. A-Mater. Sci. Proc.*, **73**, 305 (2001).
26. E. Nakamura, H. Tokuyama, S. Yamago, T. Shiraki, and Y. B. Sugiura, *Chem. Soc. JPN*, **69**, 2143 (1996).