

# 碳的自述

蘇明德

「碳」的名字大家耳熟能詳，從遠古到不可知的將來，  
「碳」永遠為人類美好的未來服務。

「碳」的英文是 carbon，法文是 charbon，還有德文或其他西方語言全都是由拉丁文「carbo」衍生而來，原意是「木炭」。這麼多語言用字相似，是因為我「碳」可說是少數幾個自遠古時代就發現的元素之一。

我「碳」在地殼中的含量雖僅有 0.09%，且我「碳」的存在量在地殼上排列第 15 名，並在全宇宙中排列第 4 名，名列在氫、氦、氧之後，但是我「碳」卻是地球上與生命關係最為密切的元素。正由於我「碳」元素非常充沛，再加上我「碳」在地球環境中所產生的化合物種類繁多，如果檢測組成植物和動物的成分，不難發現幾乎所有這些生命體分子中都含有我「碳」元素，因此我「碳」是地球上所有生物的化學根本。

事實上，在構成人體的元素中，我「碳」就占了 18%，也就是說拿掉水分後，剩下的體重超過一半都是我「碳」。當然不只是人，從小細菌到大恐龍，所有生物的基礎構成都是由我「碳」所擔負的。因此有人這麼說：「把自然界中各種型式的『碳』集合起來所形成的東西，就叫『生命』。」

碳化合物是地球上所有生物的化學基礎。雖然我「碳」擁有近千萬種的化合物，但我「碳」在一般條件下的化學性質並不活躍。在標準溫度和壓力下，我「碳」能夠抵抗幾乎所有的氧化劑，只會與最強的氧化劑反應。無論是硫酸、鹽酸、氯還是任何鹼，都無法侵蝕我



碳

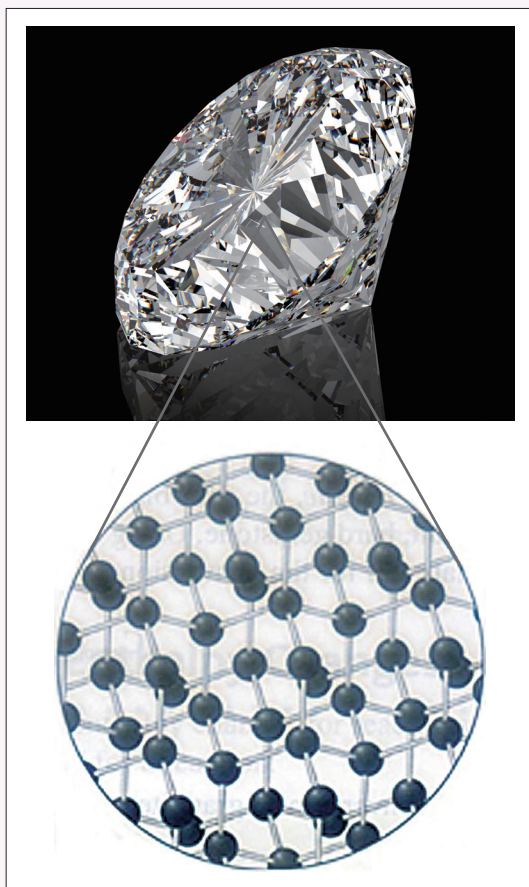
「碳」。在高溫下，我「碳」還會和氧反應形成碳氧化物（CO、CO<sub>2</sub>），我「碳」也會把金屬氧化物還原為純金屬。

化學的一個完整分支基本上是以我「碳」化合物為主的有機化學，目前有紀錄的有機化合物總數近一千種，但這只是所有可能存在的「碳」化合物中的冰山一角而已，其中包括碳氫化合物、煤和石油產品、香料、蛋白質、苯、酶（又稱「酵素」）、碳水化合物，以及數量巨大而無法一一提及的其他含有我「碳」的化合物。

我「碳」之所以能在有機化合物中占有主要中心地位，是因為我「碳」原子間能夠相互連接形成長鏈，這種長鏈有直鏈也有支鏈。我「碳」鏈起骨架作用，其他元素的原子連接在我「碳」鏈上，進而形成無數的含「碳」化合物分子。像是：去氧核糖核酸（DNA）就是一種這樣的長鏈分子，它存在於所有生物體的遺傳物質裡。DNA 儲存大量蛋白質的結構訊息，這些蛋白質由動植物細胞合成，它可以自我複製。DNA 也存在於動植物細胞的細胞核中，是生物組織再造的基礎。

除了以有機化合物的型式存在外，我「碳」還能以幾種不同的結構存在。如果一種元素在自然界中以幾種不同的結構型式出現，這幾種結構就統稱為「同素異形體」（即同樣的元素卻形成不同結構形狀的分子）。

我「碳」的同素異形體共有 4 種：「碳」的四面體結構（著名例子：金剛石俗稱鑽石）；「碳」的平面體結構（著名例子：石墨）；「碳」的圓球體結構（著名例子：C<sub>60</sub>）；「碳」的空心管結構（著名例子：奈米碳管）。我「碳」的這些同素異形體彼此之間的物理性質，包括外表、硬度、導電率等，都有相當大的差異。雖是如此，



金剛石的三度空間結構（圖片來源：種子發）

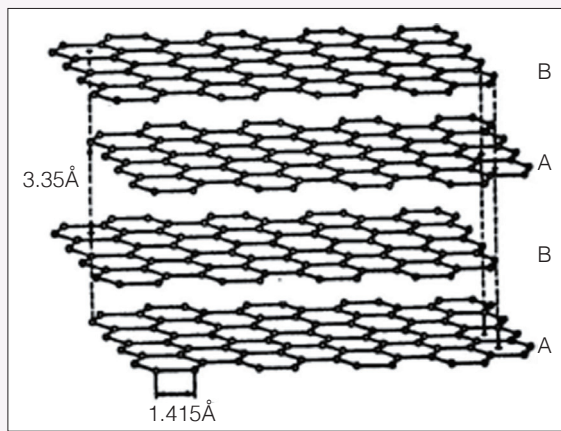
所有我「碳」的同素異形體在一般條件下，都是以固態型式出現。

金剛石中的每一個我「碳」原子都與另外 4 個「碳」原子相接，形成堅固嚴密的三維結構，因此質地很堅硬，莫氏硬度高達 10，是已知自然界中硬度最大的物質，堪稱硬度之王。

不過，我「碳」也能以石墨的型式存在。石墨中的碳原子以層狀排列，其中每個「碳」原子又與周圍 3 個「碳」原子結合在一起，形成六邊形的平面片狀結構，就像書本裡的書頁一樣。但由於層與層間



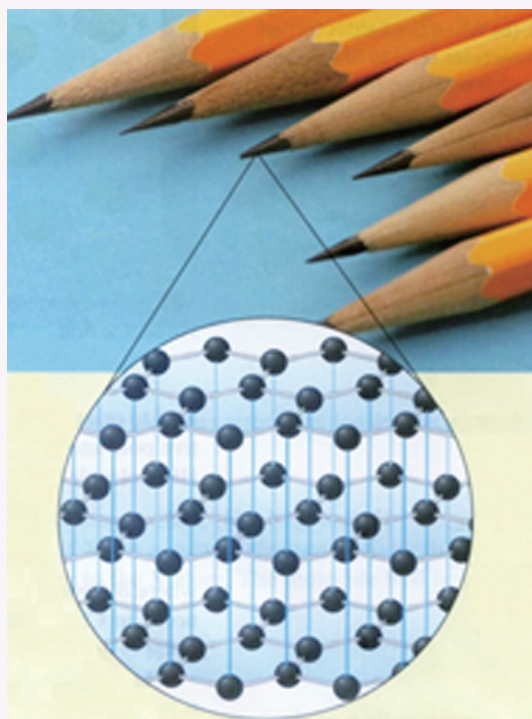
石墨及其層狀結構



作用力不強，因此石墨的硬度不大，易相互滑動，又軟又光滑。這種性質使石墨既可做為潤滑劑使用，也可做為書寫材料像是鉛筆。

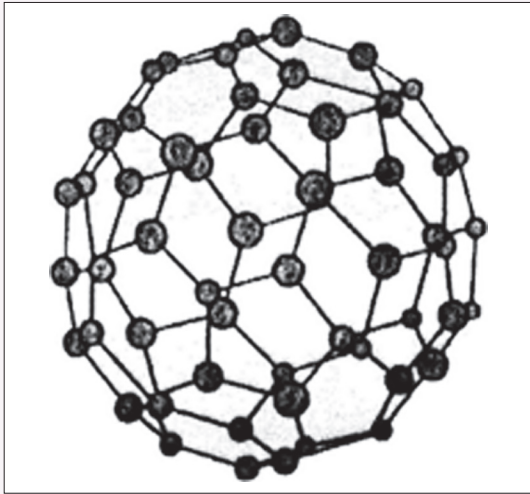
很難想像裝在每枝鉛筆裡的石墨會與金剛石的組成材料相同，都是由我「碳」元素組成的。金剛石可以用石墨在高溫、高壓下製成，用上述方法製成的合成金剛石不如天然金剛石美麗，但它們的硬度幾乎一樣。其實金剛石是世界上硬度最高、也是導熱率最大的物質，這不禁使人聯想：是否硬度和導熱率間有某種程度上的關係？其在工業上的應用是基於金剛石具有極佳的耐磨性。

其實在我「碳」的所有類型的同素異形體中，石墨的熱力學穩定性最高。也就是說，即使經過千萬年後，石墨仍是石墨，但其他的金剛石、巴克球和奈米碳管都早已轉變成石墨。因此，相反的轉化過程（例如：由金剛石變成石墨）也是可行的。事實上在自然界中，這種轉化過程的確自發性地進行著。值得慶幸的是，這個過程進行得非常緩慢，金剛石需要數百萬年時間才能轉變成石墨。



鉛筆的筆芯就是用「石墨」做為原料。

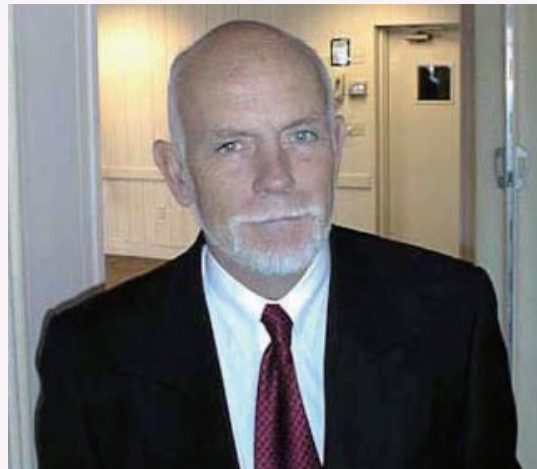
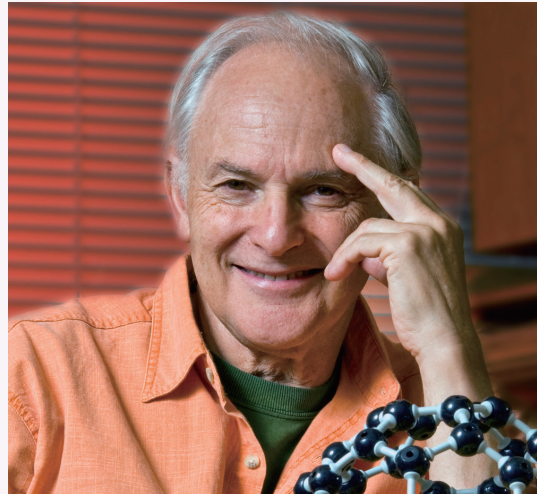
在〈氫的自述〉（本刊 532 期）一文裡曾提到：氫燃料是利用氫氣與氧氣燃燒會產生水和能量的原理達成的（ $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ），因其產物只有水，所以不會



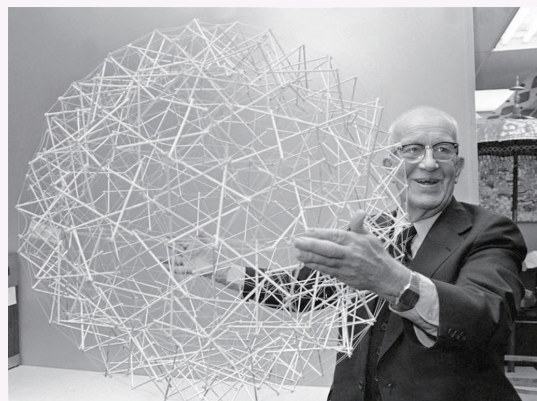
含有 60 個碳原子的圓球體（寫為  $C_{60}$ ）。

有任何汙染，然而儲氫效率不佳是它的缺點。加拿大與德國的科學家提出了一種新的儲氫技術，就是利用石墨層與層之間的奈米級（1 奈米 =  $10^{-7}$  公分）間距來儲存氫氣，這與其他儲氫材料（如奈米碳管）相較，石墨具有便宜、無毒、製備容易等優點，因此石墨的奈米層狀結構就可能應用於能源使用效益的改進。

1985 年製造出我「碳」的一種新的圓球狀同素異形體，曾讓全世界科學家激動不已，它含有 60 個碳原子（寫為  $C_{60}$ ），排列結構與足球相似。 $C_{60}$  是由英國的克羅特（Harold Walter Kroto, 1939-）和美國的斯馬利（Richard Errett Smalley, 1943-2005）用雷射氣化石墨製得。他們用美國建築設計師富勒（Buckminster Fuller, 1895-1983）的名字把它命名為 buckminsterfullerene，富勒以設計結構似足球的網格球頂建築而著稱。不喜歡長名字的化學家就逐漸把這種特殊的分子簡稱為 bucky balls（中文叫巴克球）。



$C_{60}$  是由英國的克羅特（上）和美國的斯馬利（下）用雷射氣化石墨製得。



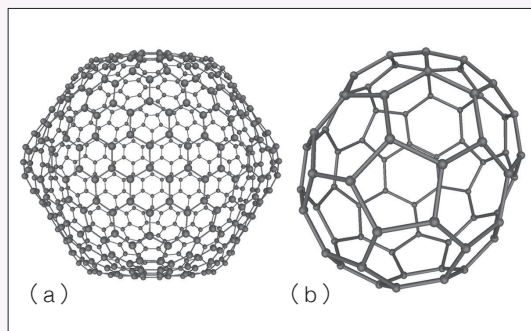
美國建築設計師富勒以設計結構似足球的網格球頂建築而著稱

包括含有 70 個以上碳原子（現已找到  $C_{70}$ 、 $C_{82}$ 、 $C_{120}$ ）的這些分子系列都已先後證實存在，並且有證據顯示這類圓球狀的分子還有很多，這個由上述化合物組成的日益壯大的家族統稱為 **fullerene**（因富勒的名字而得名）。有跡象顯示一些 **fullerene** 是好的導電體，在接近室溫時甚至成為超導體。超導體對電流沒有任何阻力，是效率非常高、非常經濟的導電體。多數材料卻只能在攝氏零下數百度時才能成為超導體。

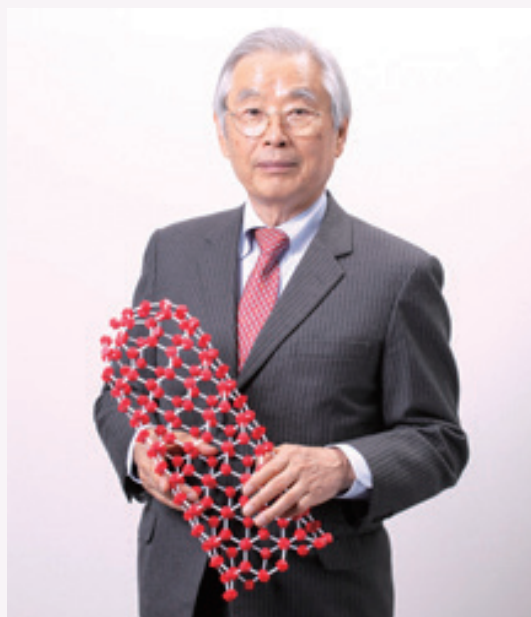
科學家發現巴克球不會被人體的胃酸腐蝕，也不會被免疫系統當作入侵體內的異物而遭吞噬。加上它顆粒小（比一般生物體的細胞小），容易穿透細胞膜，因此可製成各種抗體藥物，也用來對抗愛滋病毒，它能使愛滋病毒的酵素失去複製能力。此外，它中空的構造可以攜帶藥物，做為超小型膠囊。

當科學家紛紛投入巴克球的研究時，日本的飯島澄男博士（Sumio Iijima, 1939-）在 1991 年用電弧放電製造  $C_{60}$  時，無意中在炭灰內發現了多層結構的奈米碳管（multi-walled carbon nanotubes，簡寫成 MWNT），也就是觀察到碳原子會排列成中空管狀，因而發現了「碳」的第四類同素異形體—奈米碳管。隨後飯島與 IBM 的白頌（Donald S. Bethune）各自獨立製造出單層結構的奈米碳管（single-walled carbon nanotubes，簡寫成 SWNT）。

奈米碳管可視為由石墨層捲曲成的中空構造，直徑在幾奈米至幾十奈米之間，長度可達數微米（1 奈米 =  $10^{-3}$  微米 =  $10^{-7}$  公分）。根據管壁層數的不同，可分為單壁奈米碳管和多壁奈米碳管，它們都是理想的奈米單元材料。其實，早在 1940 年代，在電爐邊就曾發現直徑達數奈米至數微米的細碳絲，但數量非常少，因此在當時沒有



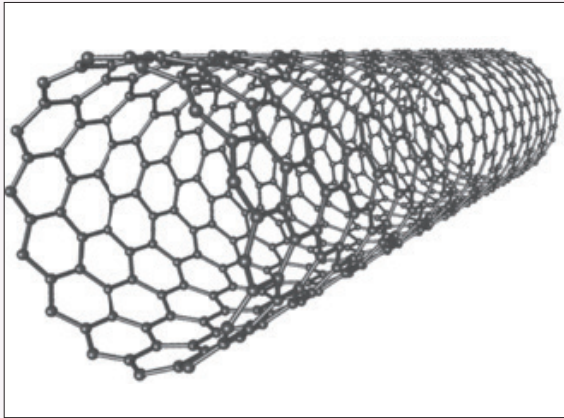
「fullerene」的種類：(a)  $C_{540}$ ；(b)  $C_{70}$ 。



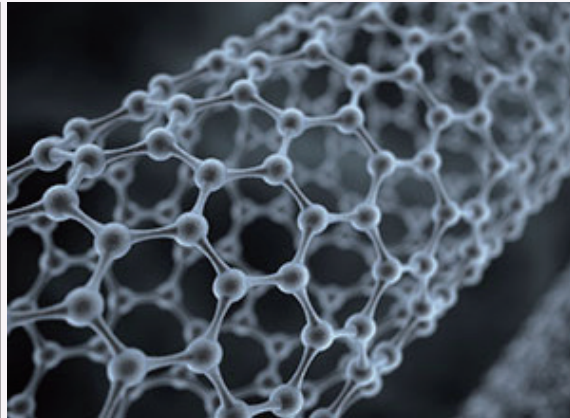
飯島澄男博士在 1991 年用電弧放電製造  $C_{60}$  時，無意中在炭灰內發現了多層結構的奈米碳管。

被重視。但隨著奈米碳管的發現，奈米科技時代終於到來。

雖然「奈米碳管」跟木炭、石墨、鑽石都屬於同一祖先—我「碳」，奈米碳管卻比它們厲害。奈米碳管是目前人工合成最細的管子：它具有良好的導熱性質，密度只有  $1.3 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ ；它的強度卻是鋼



奈米碳管的電腦立體結構假想圖



的 100 倍；它的彈性很好，受力後會彎曲，但外力除去後又可以恢復成原來的形狀；它的韌性也很高，受到很大的力也不會斷裂；它也很穩定，在真空中，抗熱分解溫度可高達攝氏 2,800 度；也有很好的抗蝕性；導電性好，隨著它的結構不同，會分別具有金屬的導電性與半導體特性；在很小的電壓下，就可以放出電子，因此奈米碳管可用在平面顯示器中。

正由於奈米碳管具有強度大、韌性強、密度小、柔軟度佳、導熱好、物性穩定、電性多樣性這些優點，因此奈米試管、奈米溫度計、奈米秤、奈米鑷子、奈米鼻、奈米碳管顯示器、氫燃料的儲存裝置，如雨後春筍被科學家開發出來。而最令科學家雀躍的是，奈米碳管未來可能可以幫助人類上太空，因為奈米碳管具有十分優良的力學性能，這種超級纖維材料猜測可以做為通往月球的電梯繩索。雖然如此，可以想見還有很多技術上的問題有待克服。

最近還有一種很有名的奈米碳料，叫做石墨薄膜或石墨烯（graphene）。石墨薄膜是由我「碳」原子連結成厚度僅一個原子的薄片，而許多層薄片重疊後形成石墨，



製造出單層結構的奈米碳管的白頌

也就是鉛筆中筆芯的主要成分。這種純淨（無雜質）且毫無瑕疵的晶體，在室溫下的導電性高於其他各種物質。工程師預言石墨薄膜可用於製作許多種產品，例如超高速電晶體等。物理學家也發現，這種材料有助於驗證某些現象奇特的理論，這些現象以往只能在黑洞和高能粒子加速器中觀察。

因為石墨烯的研發成功使得蓋姆（Andre Konstantin Geim, 1958-）和諾佛謝洛夫（Konstantin Sergeevich Novoselov, 1974-）拿到 2010 年諾貝爾物理獎。其實他們兩人原先以土法煉鋼的原始方式，一層一層地把石墨剝開，終於得到了僅有一層的石墨烯。由於只有一層原子厚，可說是史上最薄的材料。這材料不僅期待應用在電子裝置及現今的電腦與手機上，有人說「21 世紀是碳的世紀」這句話，便是因為人們對這些新材料抱著高度的期待。

煤是我「碳」和各種其他化合物的混合物，其中所含的我「碳」是以非晶態（又稱為「不定形」）的型式存在。前面說過，鑽石裡的我「碳」原子是以固定且整齊的三度空間晶格狀態存在，因此鑽石會光彩奪目。相反地，由於煤裡的我「碳」原子雜亂無章的排列，因此始終看起來黑黑的。

煤是工業和家用的重要能源。人們認為煤與石油和天然氣一樣，都屬於礦物燃料，它們是動物和植物的遺體經過數百萬年演變而成的。硬煤或無煙煤是比較古老的一種煤，大約有 2.5 億年的歷史，含「碳」量約 80%。煙煤或軟煤只含有約 40 ~ 50% 的我「碳」，是較年輕的一種煤。冶煉鋼鐵需要大量的焦炭，焦炭是煤在隔絕空氣條件下加熱得到的，在這個過程中，幾乎所有易揮發的物質和雜質都被燒掉，留下近乎純淨的我「碳」。

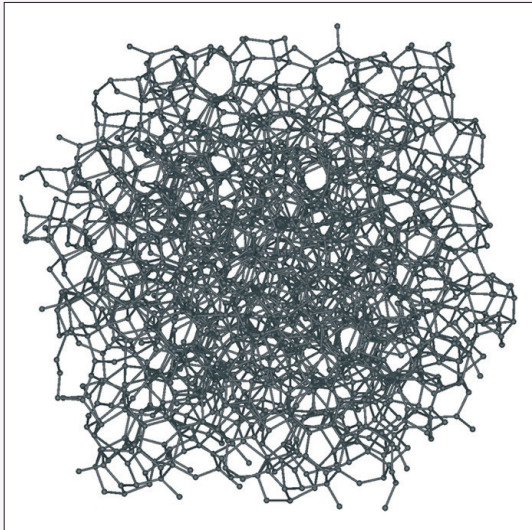
在古代人們便知道焦炭，因為用焦炭生的火比普通木材生的火要熱，焦炭對古代煤鐵的發展有著重要的作用。但是煤炭的歷史大概也是從羅馬人開始，13 世紀的僧侶萊里耳（Reinier of Liège）曾記載用「黑土」鍛燒金屬，到 18 世紀歐洲工業革命，瓦特（James von Breda Watt, 1736-1819）發明蒸氣機後，「煤」才成為主要的燃料。



因為石墨烯的研發成功而獲頒 2010 年諾貝爾物理獎的諾佛謝洛夫（上）和蓋姆（下）。



煤

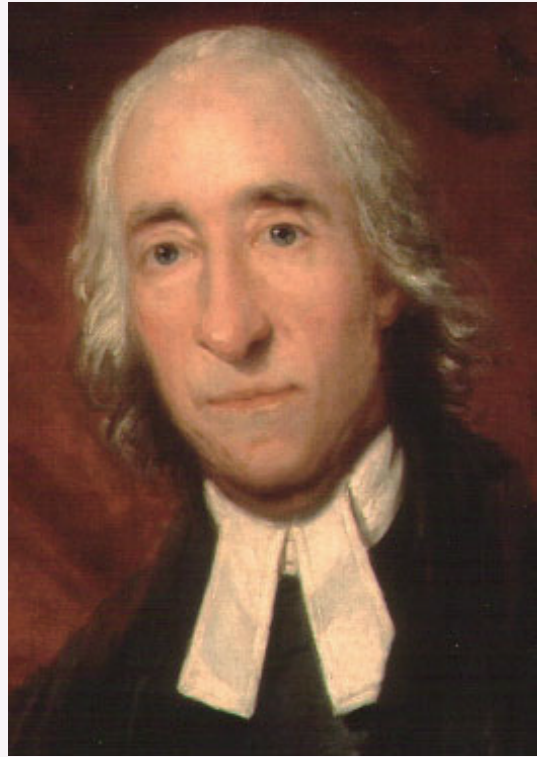


「不定形」的碳。

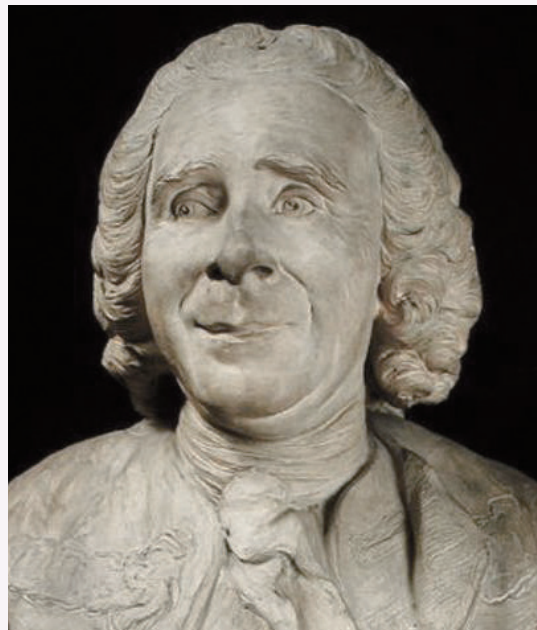
煤製成的焦炭多用於金屬冶鍊，煉鋼廠以焦炭做為燃料及還原劑，煤燃燒到 800 度以上的高溫同時產生一氧化碳，可使鐵礦（氧化鐵）還原成金屬鐵。1722 年雷歐姆（René Antoine Ferchault de Réaumur, 1683–1757）證明煉鋼是鐵中滲入了一些物質，後來才知道就是我「碳」元素。

利用煤或其他礦物燃料做為能源有許多問題，其中之一是這些礦物燃料同時是生產塑膠、藥品等一系列重要產品的原材料。按目前做為燃料使用的消耗速度估計，現有的石油和天然氣資源將在幾十年內耗盡。不過目前更受關注的是，我「碳」的燃燒產物是大量二氧化碳，是造成環境污染的主要來源，因為二氧化碳和雨水混合會形成酸雨。二氧化碳是一種無色無味的氣體，當我「碳」在空氣中燃燒時就生成二氧化碳，二氧化碳的產生會加劇全球氣候的暖化。

除了我「碳」在空氣中燃燒會產生二氧化碳外，動物的新陳代謝也能產生二氧化碳。所有動物在呼吸過程中吸入氧氣呼



發明蒸氣機的瓦特



證明煉鋼是在鐵中滲入了一些物質（後來才知道是碳元素）的雷歐姆。



出二氧化碳，而且，當動植物死後其分解過程中也會產生二氧化碳。

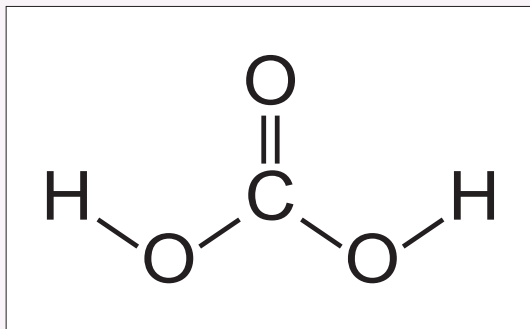
人們通常不認為火山是汙染物，但火山爆發也是二氧化碳的一個主要來源。儘管有這麼多二氧化碳來源，幸運的是植物可以通過光合作用把二氧化碳轉變成碳水化合物，因此直到今天，二氧化碳的產生和消耗始終處於動態平衡，空氣中二氧化碳含量基本上不發生變化。然而有跡象顯示，隨著工業化的加速發展，固體燃料消耗量不斷增大，空氣中二氧化碳的濃度正在穩定增長中。

二氧化碳的增多會形成溫室效應，影響地球上的溫度。就像溫室裡的玻璃屋頂一樣，大氣中的二氧化碳可以使大部分太陽輻射的能量到達地球，同時它也像溫室的玻璃一樣，可以阻隔被加熱後的地球發出的紅外輻射，於是使地球變得更熱。因此，大氣層中二氧化碳持續增長產生的後果令人擔憂。

一些環境學家擔心溫室效應會導致冰山和冰川融化，這將使海洋的水位升高並淹沒沿岸地區。人們也擔心這種溫室效應帶來的全球氣候巨變，將使目前肥沃的土地變成荒涼的沙漠。全世界都已對溫室效應警惕起來，很多已開發國家正在採取措施，設法降低因燃燒礦物燃料所產生的二氧化碳和其他廢物的數量。

儘管地球大氣層中的二氧化碳帶來了很多麻煩，但它仍有不少有益的用途。像是：二氧化碳是合成氨過程中的一個副產品，氨是農業肥料不可或缺的原料。又當你喝汽水時，實際上是在喝含溶解二氧化碳的水。地球上所有水源也都含溶解的二氧化碳，只是量多或量少而已。

二氧化碳會在水中形成碳酸。從結構上看，碳酸由 2 個氫離子和 1 個碳酸根離子



碳酸的結構



乾冰

組成，每個氫離子帶 1 個單位正電荷，表示為  $H^+$ ，每個碳酸根離子帶 2 個單位負電荷，表示為  $CO_3^{2-}$ ，因此溶有二氧化碳的水成弱酸性。由此看來，曾經被水覆蓋的地方往往有碳酸鹽沉積也就不足為怪了。地殼中的碳酸鹽主要是方解石、石灰石、白雲石、大理石和白堊，通常山洞裡的鐘乳石和石筆由溶於地下水中的碳酸鹽結晶而成。

當二氧化碳凝固時，人們稱它為乾冰。乾冰是一種冷凍劑，由於其結冰溫度（即冰點）是攝氏零下 78 度，因此乾冰比水結成的冰要冷得多。乾冰受熱時不經液態直接從固態變成氣態，這種性質使乾冰成為優良的冷凍劑。化學家把固態物質在受熱時不經液態直接變成氣態的過程稱為昇華。

例如，從美國東部往美國西部運送牛排時，就是用乾冰做為冷凍劑，避免使用冰時產生的水處理問題。

不過，在高壓下加熱乾冰使其熔化還是可能的。在這情況下，乾冰於攝氏零下56度左右從固體轉變成液體。液體二氧化碳可做為溶劑從咖啡中提取咖啡因，進而得到不含咖啡因的咖啡，用乾冰做溶劑的很大優勢是它在咖啡中無殘留。

二氧化碳很重，密度約是空氣的1.6倍。它易於在地面上通風不良的地方積聚，把空氣擠走進而給人們造成危害。每年都有一些工人在清理船上密封的儲存艙時，因二氧化碳引起窒息而死於非命。但就驅逐空氣的功能而言，二氧化碳在滅火時大有用途。滅火器中往往加有壓縮的二氧化碳，一旦打開，噴射出的二氧化碳隔開了火焰燃燒所必需的空氣，進而達到滅火的目的。

我「碳」在缺氧情況下燃燒會生成一氧化碳氣體。在工業上，一氧化碳主要用做燃料，不過它也用於冶金工業，用來從金屬的氧化物礦石中冶煉金屬。與二氧化碳不同，一氧化碳毒性很大，它能與血液中的血紅蛋白細胞結合，阻止血紅細胞把氧氣運送到身體組織中，即使少量的一氧化碳也會使人昏迷和嚴重頭痛。通風不良的汽車間或氣體加熱器會產生大量足以讓人窒息而死的一氧化碳。汽車和摩托車的車尾排氣時也含有一氧化碳，這已成為大城市空氣污染的一個主要來源。

活性炭是表面積很大的木炭，可達每公克就有1,000平方公尺的表面積。這麼大的表面積足以有效地吸附污染分子，而得到純淨的空氣或水。

天然氣是一種含我「碳」的氣體，是由地下腐朽的動植物沉積物產生的。在幾

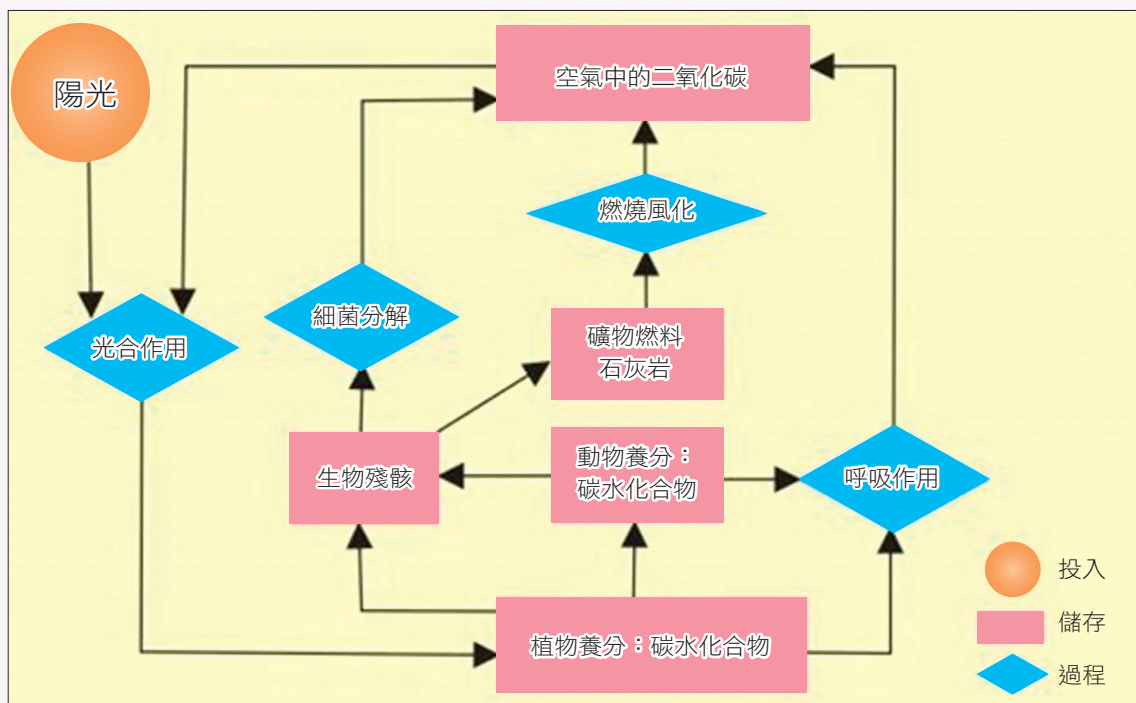


金剛砂

乎毫無空氣的情況下，在特殊的爐子中燃燒一氧化碳會生成一種粉末狀的「碳」，人們稱為碳黑或炭黑。炭黑為人們所知所用已有數千年之久，古埃及人用炭黑做成墨水，這種墨水可在莎草紙上書寫，現代印刷業仍在利用它。炭黑還用於一般汽車輪胎生產中，以延長輪胎使用壽命，炭黑與適當的黏合劑配用可製成各種特殊需求的輪胎。乾電池中做為電極的碳柱也由炭黑製成。

把我「碳」和矽一起加熱到較高溫度會形成一種叫碳化矽的化合物，人們通常稱其為金剛砂。金剛砂的硬度幾乎與金剛石相同，在對玻璃和金屬拋光時常用做研磨劑。

我「碳」和氮化合產生一種叫氰化氫（HCN）的有機化合物。氰化氫有一種杏仁香味，劇毒，是死刑室執行死刑常用的氣體。當空氣中的氰化氫體積含量達千分之一或千分之二時，就可對人體產生致命損害。氰化物的毒性之所以如此強，是因為



碳循環

它會嚴重影響人體內含鐵分子的正常工作，因而能使體內負責新陳代謝的一個關鍵功能失效，導致人體窒息並在幾分鐘內死亡。

在地球上並不容易發生元素間的轉變，因此地球上的我「碳」的存在量基本上是守恆的。任何使用到我「碳」的物理及化學過程，都必須從一處取得我「碳」，並在過程後轉移到另一處。

環境中的我「碳」所遵循的路徑稱為碳循環，或者說，碳循環是指碳元素在大氣、土壤、岩層與生物間循環的過程。例如，植物從周圍環境中吸取二氧化碳，用以增加自身重量。動物可能會進食一部分植物體，並再以二氧化碳的型式把我「碳」還原到環境中。整個「碳循環」實際上非常複雜，比如一些二氧化碳會溶解在海洋中，動植物死亡後也會成為石油或煤，再經焚燒把碳還原到大氣中。

我「碳」的同位素碳-14 在確定殘留遺物和考古物品的年代方面是一種非常有用的工具。美國的化學家威拉德·F. 里貝 (Willard Frank Libby, 1908–1980) 首創這方法，他因這工作而榮獲 1960 年諾貝爾化學獎。

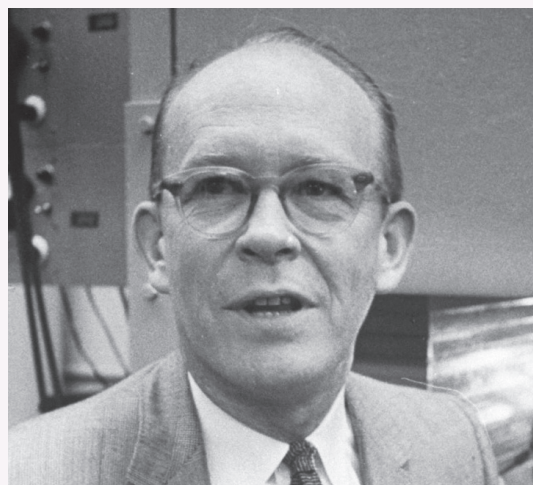
我「碳-14」具有放射性，「半衰期」是 5,730 年。來自外太空的高能粒子與地球大氣層中的氮分子相互作用，不斷地在大氣層上層生成碳-14。這種如雨點般落下的高能粒子稱為宇宙射線，是地球上的棲居者一直要承受的背景輻射的一部分。

在上述過程中形成的放射性碳-14 與普通碳的化學性質相似，都能與氧化合形成二氧化碳。不過這種二氧化碳具有放射性，當植物通過「光合作用」吸收這種二氧化碳後，其生物組織就會有輕微的放射性。進食這種植物的動物吸收了這種放射性

同位素，然後做為廢物排出。實驗證明這種循環的結果，發現到：在所有生物體內放射性的碳-14 與普通的碳的比例很穩定。

當動物或植物死亡後，由於放射性衰變，體內碳-14 不斷地減少而得不到補償。動植物遺體中碳-14 與普通碳的比例開始不斷減小，減小的速度取決於碳-14 的半衰期。這個比例變化就像一個時鐘，可用來準確測定動植物生命終止的時間。這技術目前已用於確定古代的燒火灰、羊皮紙、屍骨及織物的年代。

我「碳」的介紹其實不僅僅如此，還有很多很多沒寫出來。希望讀者您能正面地看我「碳」，一些關於我「碳」的負面消息，像是「節能減碳」，其實這都是人類的自私和貪婪所造成的。雖是如此，我「碳」本身是無罪的，還是會以純真、實用的本性繼續為人類美好的未來服務。



首創以碳-14 確定殘留遺物和考古物品年代的美國化學家威拉德·F. 里貝，他因該工作而榮獲 1960 年諾貝爾化學獎。

蘇明德  
嘉義大學應用化學系

#### 深度閱讀資料

佐藤健太郎(民104)，*改變歷史的元素之王—碳* (楊雨樵譯)，城邦文化出版社，台北。

蘇明德(民106)，*氫的自述*，科學發展，**532**，54-65。

蘇明德(民88)，*從製造鑽石說起*，科學月刊，**32**，54-65。

