



碳十四同位素定年

文・圖／林夏玉（物理研究所博士班）

關於碳十四同位素鑑定法，目前最常知道的用法是在於空氣污染指標與文物年代鑑定，但是它的源由發展卻鮮為人知。1896年法國物理學家貝克（H.Becquerel）首先發現天然鈾同位素的放射性，因而開啓原子科學的研究。同位素是指同一種元素原子核內質子數相同而中子數不同，有些同位素相當安定，不會放出輻射能，而有些同位素在原子核發生蛻變時，會放出游離輻射能，因此被稱之為「放射性同位素」或「放射性核種」。1907年間，Rutherford與Boltwood利用鈾同位素衰變所產生的釷同位素與鉛同位素含量，建立起鈾－鉛定年法（U-Pb dating method），是為同位素定年的起端。

1949：發現碳十四同位素定年法

1949年，阿諾與利貝（Arnold & Libby）利用已知年代的考古物證明碳十四定年的可行性，一般我們所常知的碳是指具有6個質子與6個中子，質量數為12的碳十二，而碳十四比碳十二多了兩個中子，其元素大部分的物性、化性都極為相似，但不同的是碳十四會隨著時間產生衰變與釋放出輻射能，在衰變的過程中產生帶電粒子，而再形成氮十四的同位素。

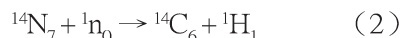
放射性物質有所謂的半衰期（half-life），半衰期就是質量衰退到原來的量的一半所需要的時間，不同的元素其半衰期也不同，例如碳十四的

半衰期是5,730年，則物質中碳十四的含量 $C(t)$ 隨著時間 t （以年為單位）而衰減：

$$C(t) = C_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{5730}} \quad (1)$$

其中 C_0 是原來的碳十四含量，它是個常數，考古學家以今天活著的爬蟲類（或鳥類）體內的碳十四含量當作 C_0 ，並以化石中測得的碳十四含量代入上式，來估計化石的年代。

碳十四同位素的產生是由空氣中的氮受到宇宙射線中的中子撞擊產生：



中子絕大多數來自宇宙射線高能粒子與大氣穩定同位素的碰撞，少部分直接來自宇宙射線本身。這種形成自高空大氣的碳十四同位素，是自然界碳十四的唯一來源。在大氣層高空形成的碳十四原子不可能單獨存在很久，它會很快的氧化成二氧化碳，由於 $^{14}\text{CO}_2$ 與 $^{12}\text{CO}_2$ 的化學性質相同， $^{14}\text{CO}_2$ 很快就會和大氣中的二氧化碳混合在一起，並且參加自然界碳的交換循環運動。

植物藉由葉綠體吸收大氣中二氧化碳而行光合作用，草食動物又以植物為生，因此動植物組織中的碳直接或間接都來自大氣中二氧化碳，所以也滲有碳十四同位素。生物活著的時候會藉著呼吸作用與自然界不斷作碳之交換，然而當生物死

亡停止與外界碳之交換後，生物遺骸就成一封閉系統，隨著時間的增加，遺骸中的碳十四逐漸衰變而減少。碳十四定年一般適用的時間為五萬年以內的樣品，同時為了準確估計同位素成分，所選用的標本也必需富含 ^{14}C 的生物化石為主，至於礦物類的定年則由於沒有以上的放射性碳衰減過程，無法適用。碳十四鑑定是以美國國家標準局所訂定的以某種木材所提煉的 NBS 草酸作為標準。

1947：啟動台大原子核實驗室

而台灣碳十四的研究卻是由儀器自製開始起步，時間回溯到台灣光復時，台大剛由帝國大學轉變而來，當時已有物理系，師資中有部分是外國籍教授，如德國籍的克洛爾與日籍太田賴常，1947 年夏，學期結束在即，物理系系主任戴運軌急著要找一個懂電路、電氣，並能操作高壓電的助教，和戴公交情不錯的化學系助教張荅旭（許雲基在台中一中的同學），便自告奮勇來找許雲基。光復前一年，許雲基還是京都帝國大學電氣系的學生，因為二次世界大戰結束，許雲基束裝回台，轉入台大電機系就讀。當時局勢仍亂，加上二二八事件餘波盪漾，雖然畢業在即，家境富裕的許雲基尚未考慮未來的出路，本來想回大甲家中休息一陣再做打算，既然張荅旭熱心介紹工作，也就爽快答應了。

許雲基的工作是在太田賴常助教授指導下，進行原子核擊破實驗。太田賴常在台北帝大時期跟隨荒勝文策，於 1934 年完成鋰原子核擊破實驗；荒勝因此獲京都帝大聘任，帶著加速器和助手木村毅一上任，台大原子核實驗就此擱置。1947 年，要進行原子核實驗，再造加速器、抽真空技術，是最大成敗關鍵。10 月許雲基向太田報到後，就被安排住到氣象館後面的紅磚屋，先從抽

■ 從出土遺骸的碳十四衰變量，可測得其生存年代。圖左為樹木化石，右為貝殼化石，均為定年常用標本。（攝自劉聰桂教授「碳十四定年實驗室」）



真空學起，許雲基認為這是難度最高的部分，因為真空狀況不佳的話，高速荷電粒子就會撞擊殘留氣體分子而電離，導致真空放電，而無法維持實驗所需的高壓電，光是抽真空這項技術，許雲基就練習了半年的時間。當時許多設備都必須自製，所以實驗室成員還包括周木春、擅長電機電路的林松雲，及後來加入的玻璃技工許玉釧；車床、零件製作則委託農化系金工廠的陳秋鴻和黃水金配合。太田雖然經常笑臉迎人，工作起來卻是拚命三郎，經常三更半夜將許雲基挖起來練習抽真空，在大家夜以繼日努力下，1948 年 5 月，完成了第一台 Cockcroft-Walton 式直流高壓加速器，產生 24 萬伏特的高壓電，也成功進行了人工撞擊鋰原子實驗，讓系主任戴運軌欣喜不已，陸志鴻校長也慰勉有加。隔年，約定留用兩年的時間到了，太田返日到神戶大學任教，實驗室就交由許雲基主持。

許雲基接手後的首要任務，就是改造加速器，以便產生高能的中子，提高原子核反應的層級。即必須加速重氫離子，利用 T(d,n)He^4 反應產生 14.1 MeV 的高能中子，來研究 14.1 MeV 中子所引起的子核反應。當時，重水是美國嚴加管制的物質，因此，必須自行製造；即要得到重氫，先要有重水。經過一年左右的努力，實驗小組終於成功製作出 98% 的重水。至於製造重水所用的水銀整流管，是利用 pyrex 的燒杯和中廣報廢的高功率真空管的電極改造而成的；該玻璃工作都由許玉釧一手完成。能輸出直流 100V, 150A 的水銀整流

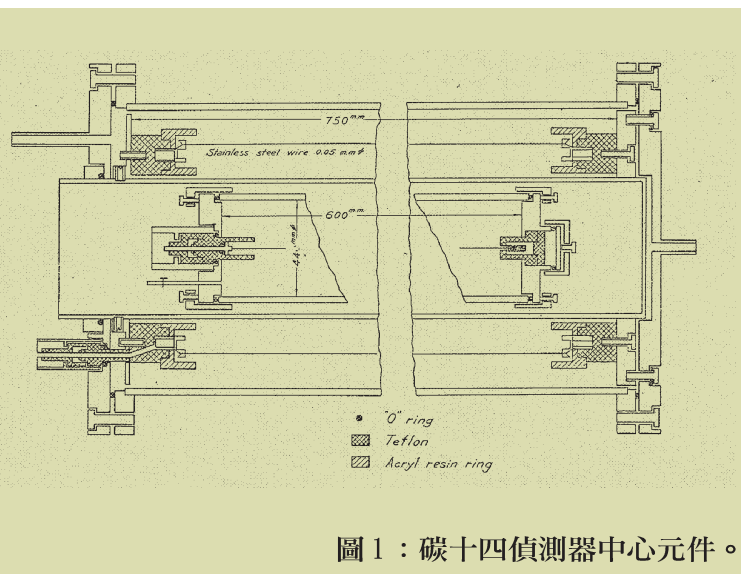


圖 1：碳十四偵測器中心元件。

管，發出如同白晝般的燦爛光芒，不僅讓路經館外的學生好奇想一窺究竟，更點燃工作小組的鬥志，讓小組成員長久來的艱辛得到回報，更賣力投入下一階段的工作。

利用上述中子充當高能粒子源，而為了進行原子核反應研究，實驗小組還必須自製各種的輻射線測量器，例如：大型Wilson Chamber, GM Counter 及有關電路等。其中還有值得一提的就是：自製碳十四偵測器（如圖 1、圖 2 所示）。

1946：台大自製碳十四偵測器

當時並沒有太多的儀器可供使用，甚至連放大器、電源供應器都需自製，而碳十四定年的方法只能從文獻上得知，靠著過去自組儀器的經驗與毅力，物理系許雲基師生於 1946 年從偵測器開始製作，整個偵測器系統分為內外兩個部分，內部的偵測器是用銅製作，內徑 4.4 公分、長度 60 公分，外部的偵測器則是由不鏽鋼製成，長為 75 公分、直徑 12.8 公分，整體外圍再用厚達 25 公分的鐵板屏蔽住，除了偵測器，標準試片的氣體也必須自製而得，待測物在量測之前也必須先作一些處理，樣品的置備方法如下：

先去除表面的雜質，如果樣品是碳，則先以酸化處理成二氧化碳，如果是有機物則用燃燒的方式處理，產生的二氧化碳溶於氨水後，再加入溫的氯化鈣溶液使之沈澱為純的碳化鈣，再用大量清水清洗殘餘的氫離子（50 克的沈澱物與 30 公升的水，氫化銀可以用來檢驗有無氫離子殘留），取 15 克的碳化鈣放在石英管加熱至 500 °C，樣品處理的流程如圖 3 所

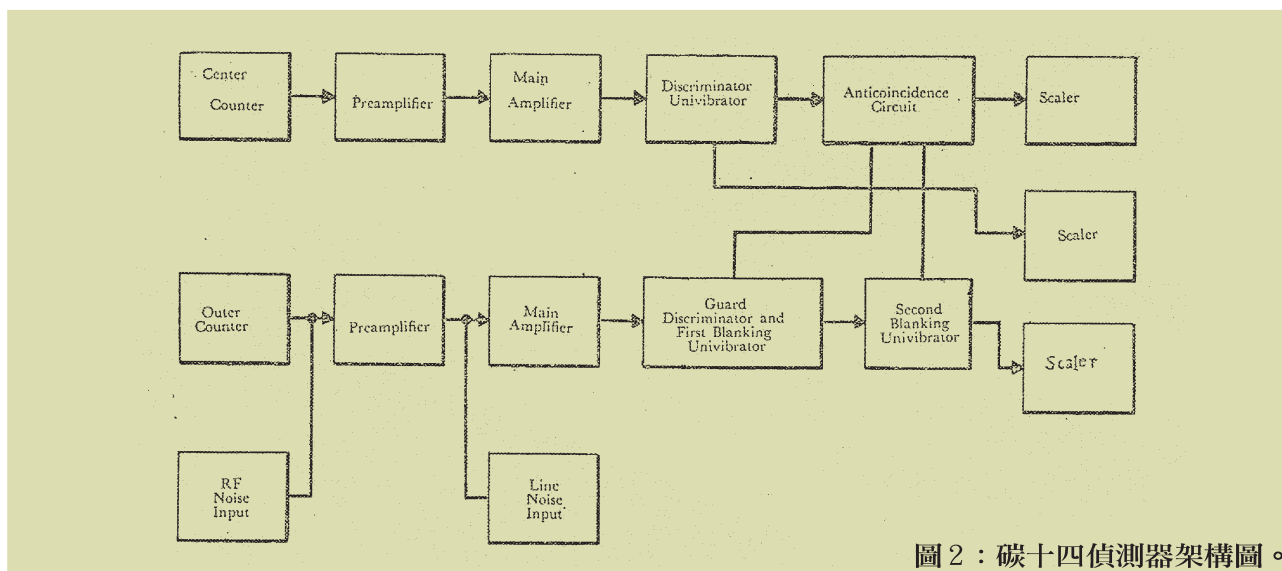


圖 2：碳十四偵測器架構圖。

示，經過五小時的抽真空，壓力到達 10^{-3} mmHg，再將溫度提升到 750°C ，產生的水氣遇到乾冰會被吸附，經抽氣 10 分鐘後，水與氧氣即可被抽乾，再將溫度提升到 900°C ，此時純的二氧化碳及可由碳化鈣釋出，收集到 U 型管後，再注入球型燒瓶儲存。

而關於標準樣品置備：30 克的草酸溶於 300 毫升的水，並溶於的硫酸 160 CC、6N，一邊通入氧氣，一邊加入的高錳酸鉀，反應所得的二氧化碳氣體溶於氨水，其後的處理步驟就跟待測物相同。將 NBS 草酸與待測物都製作成二氧化碳氣體，利用比重對氣體壓力的線性關係來做判別。

當時的研究時空背景是爲了瞭解二次大戰後核彈爆炸後對台灣稻米輻射量的影響，因爲原爆、核爆與核子工業所產生的 ^{137}Cs 、 ^{135}Cs 、 ^3H 等微量同位素；在 1965 年大氣層核試爆開始，出現後才大量存在於地表，隨沈積作用或降雨而由大氣圈下沈到沈積物或地下水中，其比值與含量用於研究現代沈積作用、侵蝕作用與地下水。

1949：台灣同步應用碳十四定年

許雲基等人曾經用這套系統量測台灣樹木裏的放射性碳的含量（如表 1 所示），學者 Hamada 等人曾提出：島嶼若是環海，則大氣中的放射性碳含量會減少，顯然由表 1 的結果得知，台

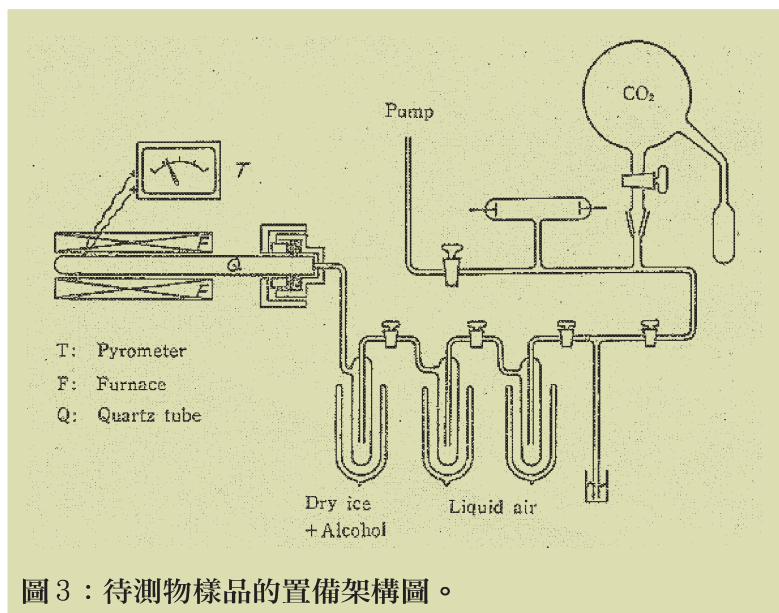


圖 3：待測物樣品的置備架構圖。

灣樹木中的放射性碳含量比歐洲的結果要高。

定年法還用於量測苗栗地區高地出土的軟體動物、阿公店溪的珊瑚、台北地區出土的泥碳，根據定年的結果分別測出時間爲： $8,415 \pm 433$ 年、 $7,532 \pm 482$ 年、 $4,429 \pm 281$ 年。碳十四定年法適用於植物、動物纖維、碳酸鹽類礦物、湖泊沈積物，此種以生物遺體做碳十四定年的工作，對考古學、環境科學與地下水等方面之研究工作十分有用。但需要特別注意的是，自從 1860 年工業革命以來，大氣圈與地表環境遭受嚴重污染，因此各地區碳十四活性差異，十分顯著，以致於影響定年方法的結果。



■ 台灣最早的碳十四偵測器，由許雲基教授主持之原子核實驗室所組成，2005 年在台大核物理博物館重現，惟僅餘部分組件。（提供／中華民國物理學會）




表 1：碳十四含量的比例（樹木相對於草酸）。

Intervals of grown of tree ring	the ratio of the number of counting of the contemporary wood sample to that of NBS(%)
1841-1861	96
1861-1891	96
1911-1941	96
1949	99

除了土壤、稻米，也幫當時的考古人類學系（今人類學系）作文物鑑定與地質系的師生作化石研究，這時國科會尚未撥款補助地質系購買商用碳十四鑑定儀，是為國內碳十四鑑定的濫觴，這套設備運作了將近四十年，一直到許老師退休後，礙於物理系空間不足而被拆除，2005 年因應學校成立原子核博物館又再度將部分零件組裝起來，只可惜完整的架構只能留付印象中了。

現今我們所知的碳十四已經被廣泛應用在地球環境變遷、考古學與新期地體構造運動等方面的研究。也許在經費充裕的現代，很難想像當時物

資極度缺乏下的實驗室，是怎麼繳出這樣的成績單。1957 年，因為楊振寧和李政道獲得諾貝爾物理學獎，在台灣掀起了研究物理的熱潮，當時聯考成績前三百名學子，幾乎都將台大物理系填為第一志願，因此台大物理系早期人才濟濟，現今在國內外學術界都發揮相當大的影響力；相對的，堅守原子核實驗的許雲基益顯孤單。總結三十八年的教職生涯，許雲基的感想只有兩句話：「很困難的時代，但大家很認真。」這無疑是台大原子核物理實驗室的最佳寫照。

參考資料

- [1]鄭伯昆，〈民國 40 年前後在台大二號館的原子核實驗室－述許雲基先生早期的工作及其貢獻〉、〈再談早期台大核子物理實驗室〉、〈光復初期台大物理系史實的研究及保存文物〉，《物理雙月刊》。
- [2]黃琦芬，〈許雲基教授與台大原子核物理實驗室〉，《一九七〇年年台灣物理系所的發展》，中華民國物理學會出版，2005。
- [3]S. C. Lu et al., Chinese Journal of Physics 2, 1(1965).
- [4]Y. C. Hsu et al., Chinese Journal of Physics 3, 1(1965).
- [5]T. Hamada and C. Fujiyama, Rikenhokoku(理研報告) 50,309 (1964).
- [6]W. F. Libby, Radiocarbon dating, University of Chicago Press, Chicago (1952).
- [7]<http://www.gl.ntu.edu.tw/>，國立台灣大學地質系劉聰桂教授「碳十四定年實驗室」網頁。



■ 台大碳十四鑑定儀，係國科會補助，於 1987 年設置。（劉聰桂教授「碳十四定年實驗室」提供）