

穩定同位素比值質譜儀於鑑識科學之 應用與展望

The Applications and Perspective of Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer on Forensic Science

鄭昭欣、萬乃容、闕山仲

Chao-Hsin Cheng, Nai-Jung Wan, San-Chong Chyueh

穩定同位素比值質譜儀 (stable isotope ratio mass spectrometer, IRMS) 廣泛被運用於地質、海洋、環境變遷、環境汙染、醫藥及藥檢、農業、生態及鑑識科學等領域，本文將介紹 IRMS 的原理與操作方式，包含雙通道進氣、時序氣體進樣兩種進樣界面，元素分析儀、高溫轉換元素分析儀、氣相層析儀、高效液相層析儀、氣體架及預濃縮進樣等進樣系統，以及離子源、質量分析器及偵測器等部分質譜儀本體之操作原理，並將討論 IRMS 於鑑識科學領域之應用情形。

Isotope ratio mass spectrometer (IRMS) is a powerful analytical instrument applied on many fields like geology, oceanography, environmental changes, environmental pollution, medical science, drug testing, agriculture, ecology and forensic science. We introduce the theory and operational modes of IRMS in this article, including the sampling interface: dual inlet and continuous flow, and the options: EA, TC EA, GC, HPLC, gas bench and preconcentration, and the mass spectrometer: ion source, mass analyzer and detector. We also discuss IRMS applications on forensic science.

一、前言

1980 年代初期，儀器市場上出現了第一部穩定同位素比值質譜儀，因其具備分辨物質間微小差異之能力，非其他分析儀器所可取代，因此被廣泛運用於各種不同領域來源鑑析之研究。近 20 年來，隨著質譜儀及進樣系統設計之改良，對於碳、氫、氧、氮與硫等元素之穩定同位素質量量測均有長足的提升，進而促進各個研究領域投入於同位素

研究之深度與廣度，加深了我們對這些元素於自然環境中演化循環的了解。

穩定同位素之研究主要建立在同位素分餾效應所造成之同位素比值差異，例如在地質、海洋學領域上，透過雨水、河海水、有孔蟲、冰芯、鐘乳石及珊瑚礁等環境材料，建立連續性之 $\delta^{18}\text{O}$ 資料，可提供研究過去百萬年以來，冰期—間冰期交替、季風、洋流演化等全球環境變遷之記錄⁽¹⁻⁵⁾；在生態領域上，透過 $\delta^{13}\text{C}$ 之分析，可以了解植物於不

同季節中之生理機制⁽⁶⁾，分析魚類耳石的 $\delta^{18}\text{O}$ 數據，可以研究了解其生態習性⁽⁷⁾；在食品科學之應用上，透過分析蜂蜜中所含各種醣類之元素比例與同位素組成，可據以研判蜂蜜之真偽及可能產地⁽⁸⁾；製藥業可以分析藥品之同位素組成，藉以了解製藥原料及製程上之差異，進而分辨藥品之真實來源。目前利用穩定同位素比值質譜儀於同位素之相關研究，正處於方興未艾之情況下，本文主要目的在於介紹穩定同位素比值質譜儀的設計結構與相關應用，讓更多有意發展同位素研究之研究人員，能對這項研究工具有更進一步之認識與了解。

二、同位素介紹

1. 穩定同位素

同位素為原子序相同但質量數不同之元素，而不易發生放射性衰變之同位素稱為穩定同位素，大多數的非放射性元素皆存在包括有一個含量較豐的輕同位素(如 ^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{16}O 、 ^{32}S 和 ^1H)，和一個或兩個含量較少的重同位素(如 ^{13}C 、 ^{15}N 、 ^{17}O 、 ^{18}O 、 ^{33}S 、 ^{34}S 和 ^2H)。表 1 所列係常用於同位素比值質譜分析之元素，及其相關穩定同位素之相對含量⁽⁹⁾。穩定同位素普遍存在於自然界中，含量曾被認為不變，但由於質譜儀測量精確度逐漸提高，研究人員便發現不同來源或經不同過程所產生的同一化學物質，其同位素比值會因同位素分化作用(isotope fractionation) 而產生些微的差異現象。研究此種因同位素分化作用造成的穩定同位素組成差異，可進而幫助我們探討及了解大氣圈、水圈、岩石圈、土壤圈及生物圈等環境的變遷訊息，提供另類之示蹤研究方法^(10, 11)。2004 年 Meier-Augenstein 等人⁽¹²⁾ 提及測量分析含 4 個不同元素的某化合物同位素比值差異時，發現其結果比僅含一個的更好，易言之，一個化合物具有更多的不同同位素可供分析時，比值差異性將提升，提供較佳示蹤效果。

2. 同位素分餾作用

同位素分餾作用係指改變同位素比值的任一過程。穩定同位素存在於大氣層、地球及生物體中

表 1. 氫、碳、氮、氧、穩定同位素相對含量。

Element	Isotope	Relative abundance (%)
Hydrogen (H)	^1H	99.984
	^2H	0.0156
Carbon (C)	^{12}C	98.892
	^{13}C	1.108
Nitrogen (N)	^{14}N	99.635
	^{15}N	0.365
Oxygen (O)	^{16}O	99.759
	^{17}O	0.037
	^{18}O	0.204
Sulphur (S)	^{32}S	95.02
	^{33}S	0.76
	^{34}S	4.22
	^{36}S	0.014

⁽¹³⁾，其比值決定於地球形成時，以億年為期來看或許有些變化，但以萬年為期來看，除放射性元素，大部分同位素仍是穩定的。自然改變的同位素比值的過程常發生在較輕的同位素上(如氫、氧、碳、氮與硫等)，這種同位素分餾作用造成物質因其成分來源、純度或生產過程，而產生同位素比值差異。同位素分餾作用發生於化學、物理及生物反應過程中，有動力及熱力等 2 種同位素效應機制，說明如下。

(1) 動力同位素效應 (Kinetic Isotope Effect)

因輕重同位素的化學鍵結能量差異所造成，當同位素參與反應中，鍵結強度不同造成反應速率的些微差異，較輕的同位素因鍵結強度較弱，因此輕同位素較容易反應，造成產物及反應物中重同位素濃度增加⁽¹⁴⁾。以綠色植物所含碳同位素比值為例，綠色植物進行光合作用的型態有 C_3 、 C_4 及 CAM (Crassulacean acid metabolism) 之分，不同的光合作用途徑、 CO_2 擴散速率及碳代謝程度會造成不等的動力同位素效應，因而影響其碳同位素比值。自然界大約 85% 的植物均為 C_3 型光合作用植物(如小麥、黑麥、棉花等主要農作物)， C_3 型植物一般同位素比值介於 -2 至 -30‰ 間， C_4 型植物(如甘蔗、仙人掌、水草等一般作物)則落於 -10 至 -18‰ 間，意即 C_4 及 CAM 型植物與 C_3 型植物相

比，相對具有較多之 ^{13}C 同位素，而 C_3 型植物則相對含較多之 ^{12}C 同位素⁽¹⁵⁾。此種穩定碳同位素比值之差異，造就生態學家可以利用此碳同位素組成的特徵差異去鑑定植物的光合作用途徑。

(2) 熱力同位素效應 (Thermodynamic Isotope Effect)

因為輕重同位素自由能差異所造成，一般而言含較重的同位素的化合物具有較低自由能狀態，意即低能階狀態較為穩定⁽¹⁶⁾，當進行振動能反應現象時 (例如蒸發、熔解、紅外線吸收反應)，即會造成的同位素分化現象。水的氣液相變化現象即說明此種效應⁽¹⁷⁾，在水分子的蒸氣中 $^1\text{H}^1\text{H}^{18}\text{O}$ 和 $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ 的含量低於 $^1\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ 。

3. 同位素比值 δ

同位素比值就是以質譜儀分析同位素含量比，惟須注意若只測量樣品的同位素比值，則即使使用相同之質譜儀，不同實驗室或不同時間所測得之比值，難免因操作或儀器之誤差，造成測定值與真值間會產生些微差異，因此為使不同實驗室的測量值能互相比較，需有國際統一之參數標準或標準品，以消除儀器誤差。測量同位素比值係以同位素間的含量比與一標準品之差值表示，其測定值慣以 δ 值表示，一般以千分比為單位 (‰)，其公式為：

$$\delta = \frac{1000(R_{\text{Sample}} - R_{\text{Standard}})}{R_{\text{Standard}}}$$

其中， R_{Sample} 為檢品之重同位素與輕同位素比值， R_{Standard} 為標準品之重同位素與輕同位素比值。

4. 同位素分析參考標準品

國際使用之同位素比值測量參考標準品如表 2 所列。測量氫、氧同位素時，樣品間共同比對標準為 V-SMOW，其係國際原子能總署在太平洋赤道地區採集的海水；碳同位素測定標準 PDB，其係產自美國南加州 Pee Dee 地層中的白堊紀箭石化石內之碳酸鈣成分；硫同位素測定標準 CDT，其係取自 Canyon Diablo 隕石中的隕硫鐵 (troilite) 礦物；氮同位素測定標準，係大氣中之氮氣，此係因

表 2. 同位素比值測量參考標準品。

International standard	Isotope ratio of reference material
PeeDee Belemnite (PDB)	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 0.0112372$ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 0.0020671$
Atmospheric nitrogen (AIR)	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N} = 0.0036765$
Vienna standard mean ocean water (V-SMOW)	$\text{D}/\text{H} (^2\text{H}/^1\text{H}) = 0.00015576$ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 0.0020052$
Canyon Diablo meteorite troilite (CDT)	$^{34}\text{S}/^{32}\text{S} = 0.0450045$
Standard mean ocean chloride (SMOC)	$^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl} = 0.324$

大氣中氮氣係均勻混合且容易獲得，重複分析大氣中氮氣 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比值差異很小。

三、穩定同位素分析

質量較輕的元素如氫、氧、碳、氮和硫，因為具有自然改變同位素比值的特性，且其同位素質量變化差異較小，穩定同位素比值測量比質量重的元素容易，因此，穩定同位素分析研究主要即係利用穩定同位素比值質譜儀測定氫、氧、碳、氮和硫等元素之穩定同位素比值。穩定同位素比值質譜儀有氣相穩定同位素比值質譜儀之稱，儀器結構主要分兩大部分，一為樣品氣化進樣處理系統，另一為質譜儀分析系統。

四、樣品氣化進樣處理系統

樣品在進入同位素質譜儀離子源前，需先將樣品轉化成測量氣體，例如欲測量碳及氧同位素，須將樣品轉換成 CO_2 ；測量氮同位素，須轉換成 N_2 ；測量氫同位素，須轉換成 H_2 ；測量硫同位素，須轉換成 SO_2 ，再行導入，導入的樣品氣體不能破壞離子源和質量分析室的真空。同時為避免擴散，要求進樣系統要能設計形成黏滯性氣流，使氣體分子平均自由徑小於儲樣器和氣流管道的直徑，造成氣體分子形成一個整體。以現今市售之穩定同位素質譜儀機型，進樣系統有雙通道進樣 (dual inlet) 及時序進樣 (continuous flow) 二類。

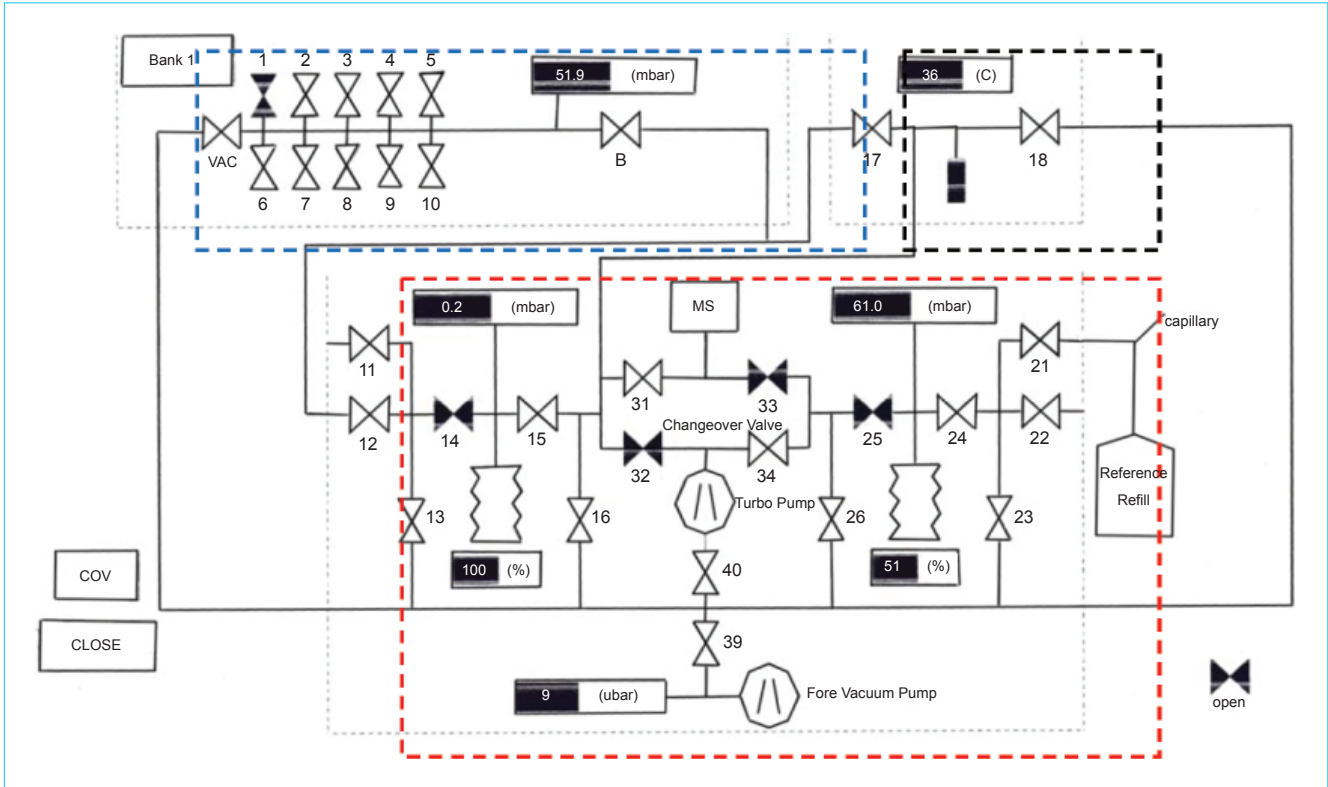


圖 1. 雙通道進氣系統示意圖。紅色虛線範圍內的為雙通道進氣系統的本體部分，藍色虛線為複口進樣系統，黑色虛線範圍內為微氣體進樣系統。

1. 雙通道進樣系統⁽¹⁸⁾

如圖 1 所示，樣品製備係在離線狀態，先將樣品氣化成氣體，由獨立進樣口導入樣品氣體，直接連接複口進樣系統，透過金屬細管連接碳酸鹽進樣系統、微氣體進樣系統，利用氣動閥門對樣品氣體及參考氣體做切換，進行穩定同位素分析。以這種技術設計而言，通常分析較為耗時，同時需要較多的樣品，分析成本較高，使用較不方便，但具有精確度較高之特性。

2. 時序進樣系統

時序進樣系統主要做為樣品前處理 (氧化、還原和高溫裂解) 以及氣體濃縮分離設備與質譜儀間的中介界面，由氮氣作為輸送氣體，將樣品氣體導入同位素比值質譜儀分析，具有操作簡單、分析樣品量少、可快速分析之優點，因而被廣泛運用。以下將對數種樣品前處理及氣體濃縮設備做簡單的介紹。

(1) 元素分析—同位素比值質譜儀⁽¹⁹⁾

如圖 2 所示，元素分析—同位素比值質譜儀除了可測量穩定同位素比值外，並可同時分析元素百分比含量，因樣品未做分離處理即全部燃燒氣化導入同位素比值質譜儀分析，故所得之同位素比值係代表全部樣品之同位素組成。元素分析—同位素比值質譜儀分析時，須先將固體或液體樣品置入銀或錫囊中稱重，封好後置入樣品盤中，由氮氣將樣品推送入元素分析儀中之燃燒爐，高溫進行樣品氧化燃燒產生 NO_x 、 CO_2 、 SO_2 或 H_2O 等氣體，接下來將氣化氣體還原，並特殊處理以減少干擾。例如分析碳、氮同位素比時，燃燒的氣化氣體由氮氣輸送到還原管時， NO_x 會被還原成氮氣，此時去除過量的氧氣及水氣後，再由氣相層析管分離出二氧化碳和氮氣，隨同參考氣體導入時序進樣系統及質譜儀進行分析。

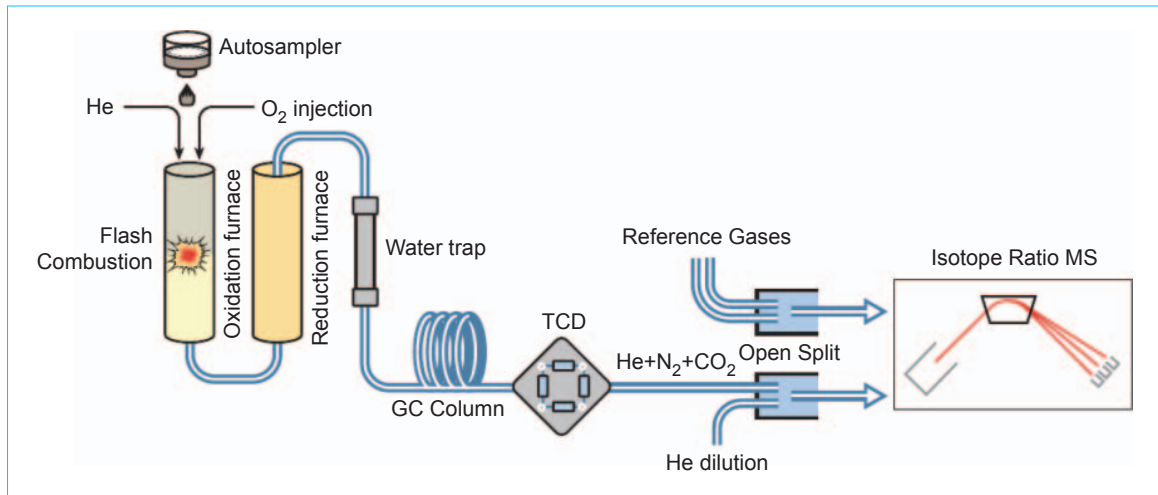


圖 2. 元素分析—同位素比值質譜儀分析流程圖。

(2) 高溫轉換元素分析—同位素比值質譜儀⁽²⁰⁾

如圖 3 所示，固體或液體樣品透過玻璃化碳 (glassy carbon) 於 1400 °C 缺氧環境下，進行高溫裂解反應產生氫氣及一氧化碳，反應氣體經過層析管柱分離後，導入時序進樣系統及質譜儀進行同位素分析。不同於上述元素分析儀用於分析 ¹³C/¹²C 及 ¹⁵N/¹⁴N 比值，高溫轉換元素分析儀則係用於分析 ¹H/²D 及 ¹⁸O/¹⁶O 比值。

(3) 氣相層析—同位素比值質譜儀⁽²¹⁾

如圖 4 所示，樣品溶於有機溶劑中，注射入氣相層析儀系統中進行分離，分離出之樣品依序通入填充有銅、鎳及鈀等成分之高溫 (1100 °C) 氧化管燃燒，產生 NO_x、CO₂、和 H₂O 等氣體，接著進入還原管將 NO_x 還原成氮氣，隨後經除氮及水裝置，純化出二氧化碳氣體，最後併同參考氣體一同進入同位素比值質譜儀進行 ¹³C/¹²C 及 ¹⁵N/¹⁴N 比值分析。經氣相層析儀分離出之樣品亦可依序通入缺氧環境下之高溫裂解管 (1450 °C) 進行反應，產生氫氣及一氧化碳，併同參考氣體一同進入同位素比值質譜儀進行 ¹H/²D 及 ¹⁸O/¹⁶O 比值分析。

(4) 高效液相層析儀—同位素比值質譜儀⁽²²⁾

如圖 5 所示，如同高效液相層析質譜儀，高效液相層析儀亦可串連時序進樣系統及同位素比值質譜儀，針對熱不穩定性或低揮發性之樣

品進行穩定碳同位素比值分析。液體樣品經過層析管分離後，進入溼化學氧化管 (wet-chemical oxidation interface)，溼化學氧化管內充填過二硫酸銨 (ammonium peroxodisulfate) 等氧化劑和磷酸、硝酸銀之催化劑，之後再經過毛細管氧化爐進行氧化生成二氧化碳氣體，接著進入薄膜交換分離器分離出二氧化碳與沖提液所產生之氣體 (如水氣、氧氣等)，經除水及排氧裝置處理後，由載流氣體氮氣將上述分離出之二氧化碳，併同參考氣體一起送入同位素比值質譜儀進行穩定碳同位素之分析。為減少干擾，液相沖提液必須避免含有可氧化物質，然而大部分液相沖提液多係有機溶劑或緩衝液，因此大幅限制液相層析—同位素比值質譜儀之運用。

(5) 氣體架—同位素比值質譜儀⁽²³⁾

如圖 6 所示，氣體架 (gas bench) 為一樣品前置處理系統，主要針對碳酸鈣、水平衡及大氣氣體樣品進行前處理，透過注酸或是水氣平衡的方式，由載流氮氣經過多迴路的氣體分離閥門及層析管柱由毛細管直接導入質譜儀，並不需要透過時序氣體進樣系統，因氣體架本身兼具樣品處理及進樣界面兩種特性。

(6) 預濃縮進樣系統 (Pre Con)⁽²⁴⁾

如圖 7 所示，預濃縮進樣系統是一個氣體分離的前置系統，其設計目的用途在於精準地量測大氣

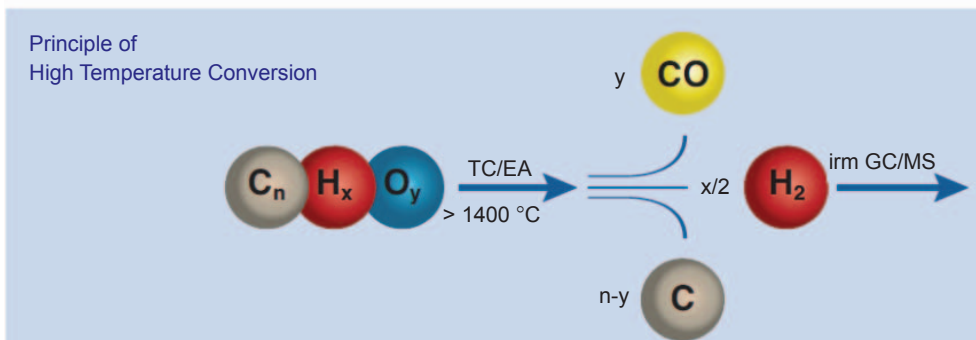
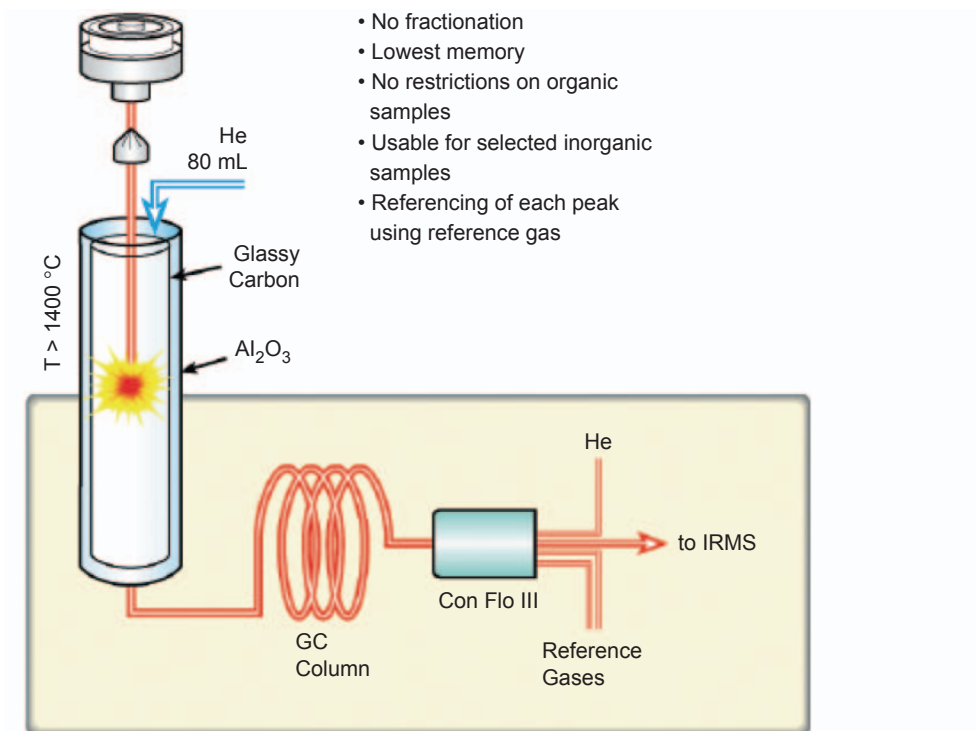


圖 3. (a) 高溫轉換元素分析—同位素比值質譜儀分析流程圖，(b) 高溫裂解反應示意圖。

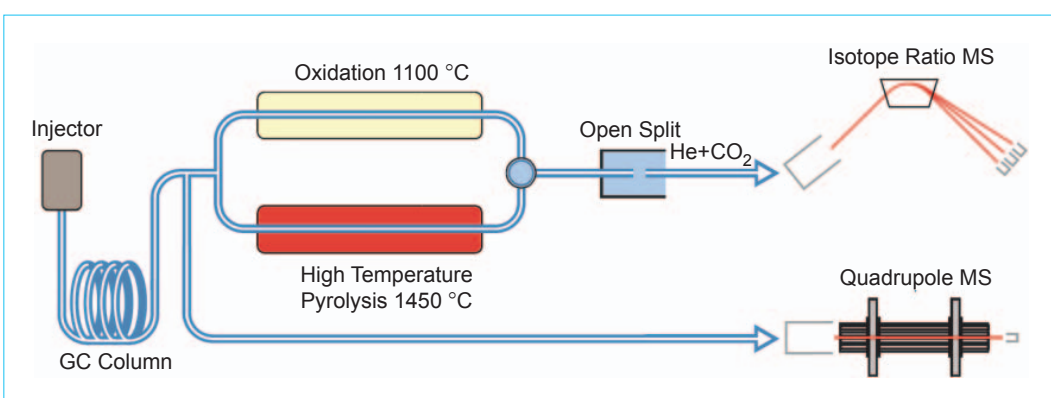


圖 4. 氣相層析—同位素比值質譜儀分析流程示意圖。

的微量氣體同位素，多用於 N_2O 和 CH_4 的氣體實驗。可串接於氣相層析儀或是氣體架之前，透過液態氮的冷卻系統分離在氣體迴路閥門內的物種。

五、同位素比值質譜儀基本分析原理

質譜儀常見之四極柱、離子阱、飛行時間等質量分析器，在測量微量差異之同位素含量比值時無

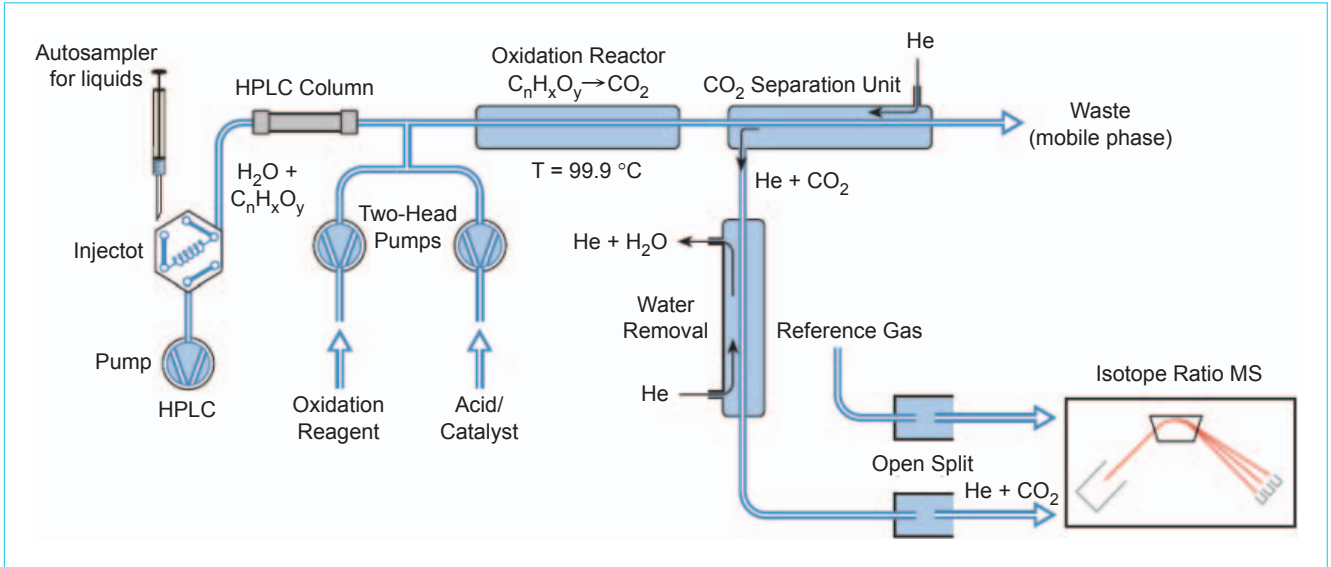


圖 5. 高效液相層析—同位素比值質譜儀分析流程示意圖。

法提供足夠感度及精確度。偵測同位素比值的儀器其突破性的發展始於 1948 年，Urey 首次設計出雙進樣系統的同位素比值質譜儀⁽²⁵⁾，可以精確穩定地測量同位素比，從那時起，更進步的設計及自動化進樣系統慢慢推陳出新，使得穩定同位素比值質譜儀得以商業化販售。一般而言，穩定同位素比值質譜儀的基本架構主要包含以下幾個主要的部分：進樣系統、進樣介面、離子源、質量分析器與偵測器，其中質譜儀本體如圖 8 所示，包括離子源、質量分析器、偵測器，負責氣體之同位素比值量測。

1. 離子源 (Ion Source)

離子源的設計需具備高靈敏度 (sensitivity) 及良好的線性 (linearity)，為了確保高靈敏度，離子源室必須維持在高真空的氣密狀態下。樣品氣體通過陶瓷管進入電離室，進入離子源室的樣品氣體必須通過一連串不鏽鋼葉片組合而成的許多小孔徑，並產生離子束後離開離子源室進入質量分析器，而這些孔徑的傳導率遠低於真空系統的抽氣效率，因此離子源室的壓力會是外界的 100 倍以上，也因此形成高濃度的離子束。同位素質譜的游離型式是電

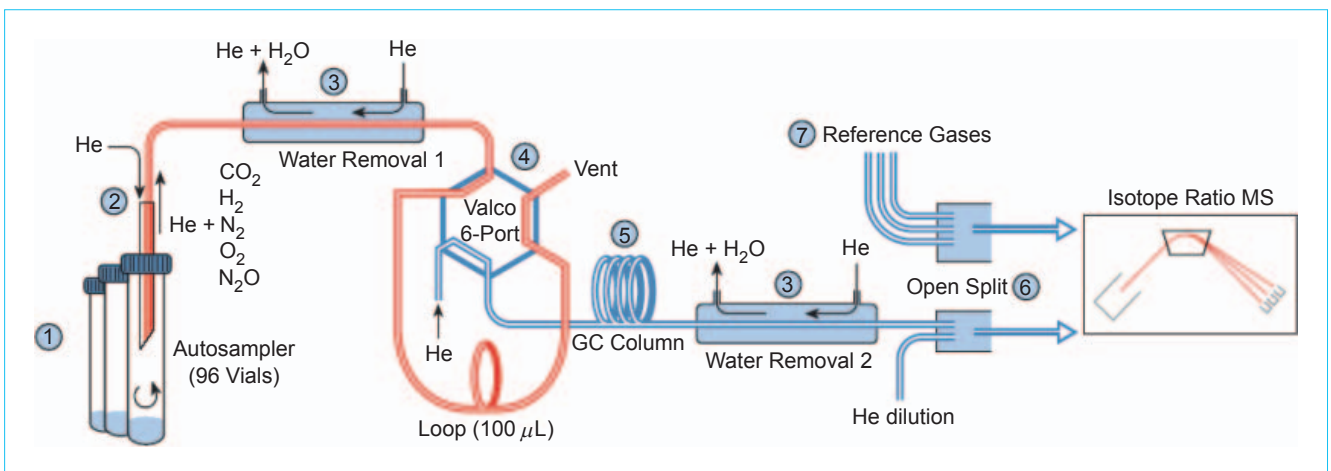


圖 6. 氣體架—同位素比值質譜儀示意圖。

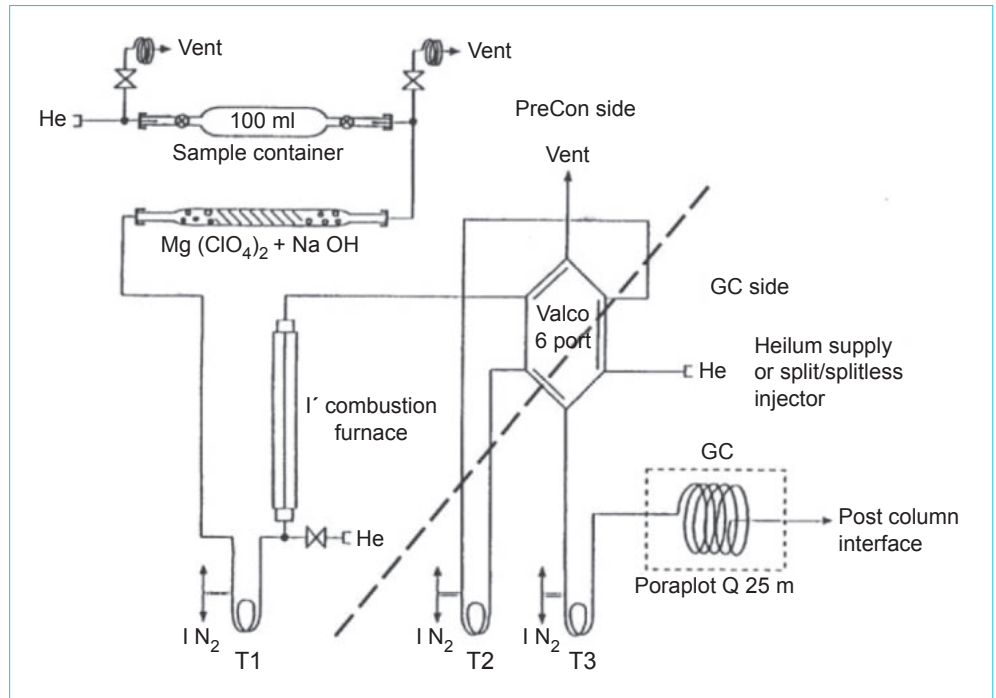


圖 7. 預濃縮進樣系統結構示意圖。

子撞擊式，這些用以撞擊分析氣體的游離電子則透過熱陰極產生，而游離電流是透過控制器來穩定提供，另外兩個小的永久磁鐵安裝在離子源室，產生一個磁場平行離子束，離子束會因為磁場的存在而沿著螺旋軌跡前進，從而增加電子碰撞機率提升游

離效率。游離電子的能量是由熱陰極與離子源室的電位差決定，一般多半在 70 到 124 eV。離子束透過相對燈絲另一側的正電位差的孔徑被捕捉並離開游離區，由加速電場提供 10 kV 的加速電壓讓離子束進入離子透鏡系統。

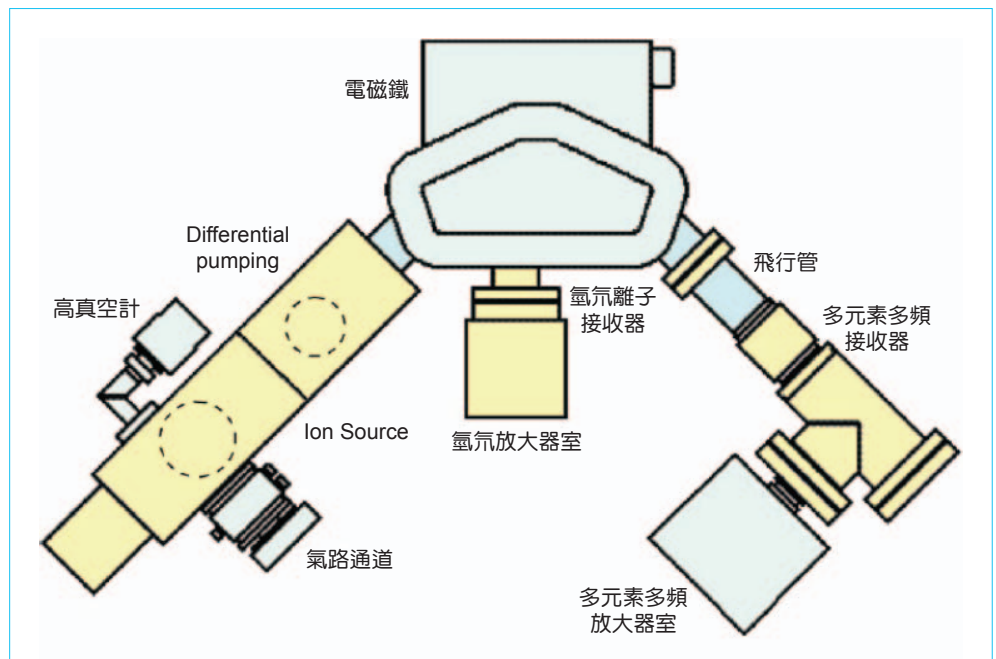


圖 8. IRMS (MAT253, Thermo Fisher) 元件示意圖。

2. 質量分析器 (Ion Deflection)

主體為一扇形電磁鐵，可提供最大達 0.75 特斯拉的離子偏轉磁場，透過改變電磁鐵的磁場強度，選擇欲進入彎曲飛行管之不同荷質比離子束，另外可透過改變加速電壓調整磁場可涵蓋的荷質比範圍。質量為 m 帶電荷 z 的粒子經電壓 V 之電場加速進入磁場強度 B 磁場後，運動軌跡會發生偏轉半徑 r ，其關係方程式為 $m/z = B^2 r^2 / 2V$ ，質譜收集過程在固定磁場的情況下，只需依一固定速率改變加速電壓，即可使每一 m/z 離子束由輕至重連續地飛行至偵測器上。

3. 偵測器 (Ion Detection and Collector System)

偵測器的目的在於接收來自質量分析器的離子束並加以放大訊號及記錄。偵測器可分為三個主要部分：離子接收器、放大器及計數器。在 10 kV 的加速電壓下，1.5 mm 寬的法拉第杯接收器能接收的範圍為 1 到 150 m/z ，解析度可達 $m/\Delta m = 200$ (10% valley)，每一個法拉第杯皆連接一組放大器及一組伏-頻轉換器 (voltage to frequency converter, VFC)，轉換器將類比的離子電流轉化為數位訊號，在一定積分時間內，電腦會計算所有計數器的訊號並計算離子束的比值。

六、穩定同位素比值質譜儀於鑑識科學界之應用

穩定同位素比值質譜儀於鑑識科學界之應用相當廣泛，例如利用穩定同位素比值質譜儀，可快速準確鑑別藥品之真偽，及是否來自同批次產品，可追溯天然植物及相關產製品之來源，進行飲料、香料、酒品、蜂蜜、食用油等食品鑑定，可有效控制食品品質，並辨別食品之真偽，可追溯汽油中 MTBE、TCE 等環境污染物來源，或追溯地下水中含氮有機物之來源，可進行蝴蝶、鯨魚、鳥類、大象等遷徙情形之研究，可針對玻璃、槍彈、毛髮、指甲、血液、膠帶、大理石、毒品、爆裂物等刑事證物進行來源比對鑑定等⁽²⁶⁾。

由以上穩定同位素比值質譜儀之應用情形可

知，穩定同位素比值質譜儀最主要之功能可提供辨識檢品與檢品間同位素組成之差異，做為檢品來源辨識或追溯之參考。例如不同人持有之愷他命 (ketamine) 毒品，經元素分析-穩定同位素比值質譜儀之鑑定結果，如圖 9 所示，可以發現被告 E 持有之愷他命毒品與其他被告持有之愷他命來源明顯不同。利用氣相層析-穩定同位素比值質譜儀分析茶葉中之咖啡因成分，可以發現區分茶葉之品種或來源，如圖 10 所示。

七、結論與展望

從進樣系統的增加與改良便可得知對於穩定同位素的研究趨勢已由早年著重的基礎科學逐漸往應用科學茁壯，穩定同位素質譜儀系統朝向一個多元的發展，站在原有如 HPLC、GC/MS 等設備所建立的基礎研究內容上，增添穩定同位素的分析，能對其研究本質有更深一層認識。而另一方面，對於原先的基礎科學領域，對於穩定同位素分析技術的要求更加嚴苛，希望能準確分析更稀有的穩定同位素如 $\delta^{17}\text{O}$ ，因此必須同時精確量測在不同自然豐度數量級下的氣體同位素，下一代的穩定同位素質譜儀將會朝更高的質量解析度及可調整接收器位置的多頻段偵測器發展。

參考文獻

1. H. Cheng, R. L. Edwards, W. S. Broecker, G. H. Denton, X. Kong, Y. Wang, R. Zhang, and X. Wang, *Science*, **326**, 248 (2009).
2. J. R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, and M. Stievenard, *Nature*, **399**, 429 (1999).
3. D. G. Martinson, N. G. Pisias, J. D. Hays, J. Imbrie, T. C. Moore, and N. J. Shackleton, *Quaternary Research*, **27**, 1 (1987).
4. K. David, M. Frank, R. K. O'Nions, N. S. Belshaw, and J. W. Arden, *Chem. Geol.*, **178**, 23 (2001).
5. M. McCulloch, S. Fallon, T. Wyndham, E. Hendy, J. Lough, and D. Barnes, *Nature*, **421**, 727 (2003).
6. C. Damesin and C. Lelarge, *Plant, Cell and Environment*, **26**, 207 (2003).
7. J. C. Shiao, S. W. Wang, K. Yokawa, M. Ichinokawa, Y.

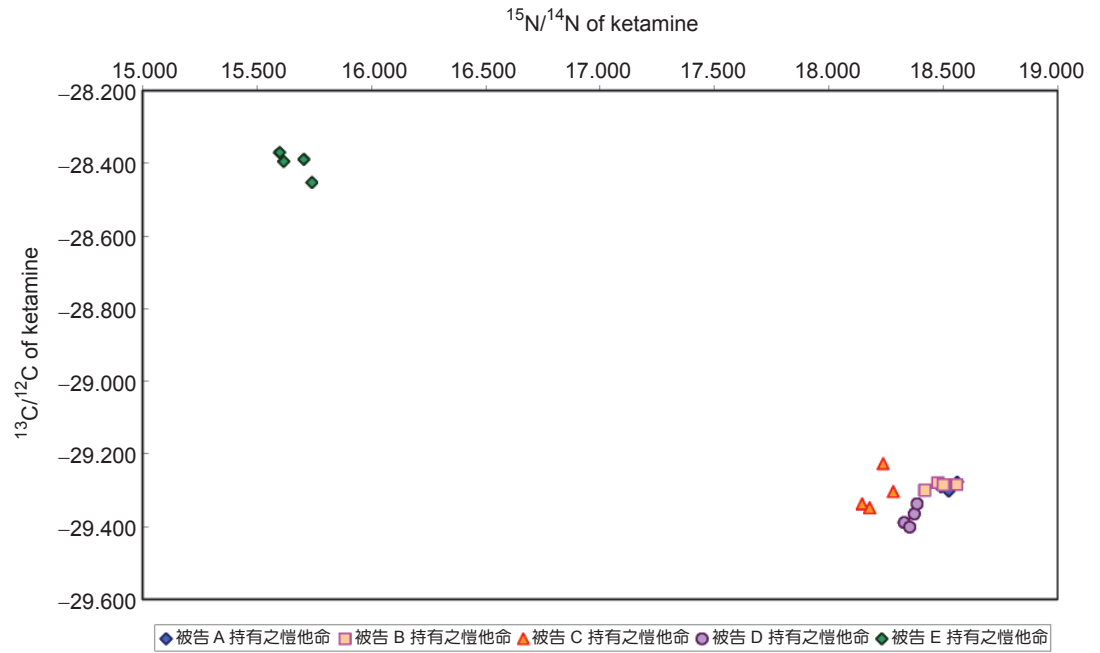


圖 9.
不同被告持有之愷他命同位素比值質譜鑑定結果。

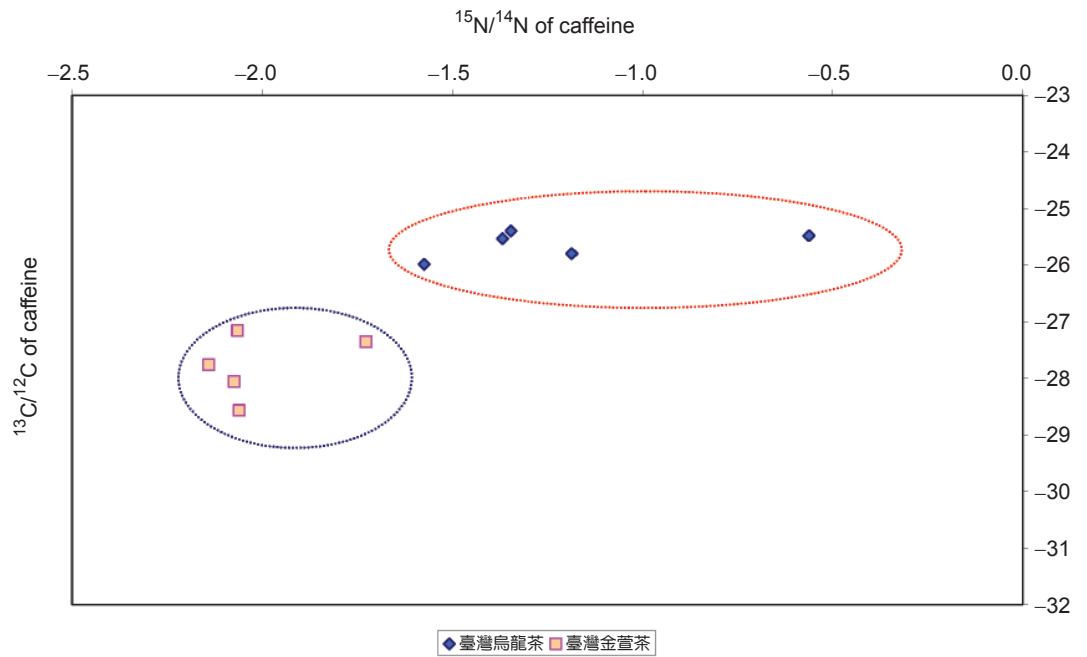


圖 10.
不同品種茶葉之咖啡因同位素比值質譜鑑定結果。

Takeuchi, Y. G. Chen, and C. C. Shen, *Marine Ecology Progress Series*, **420**, 207 (2010).

8. L. W. Doner and J. W. White, *Science*, **197**, 891 (2007).

9. F. Fourrel, "Forensic Applications in Continuous Flow IRMS Using the IsoPrime", *the Forensic Isotope Ratio Mass Spectrometry (FIRMS) Conference*, 16 (2002).

10. A. Barrie and S. J. Prosser, "Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry", *Mass Spectrometry of Soil*, New York: Marcel Dekker Inc, (1996).

11. 彭宗仁, 劉滄琴, 林幸助, 台灣農業研究, **55**, 79 (2006).

12. W. Meier-Augenstein and R. H. Liu, "Forensic application of isotope ratio mass spectrometry", *Advances in Forensic Application of Mass Spectrometry*, USA: CRC Press (2004).

13. A. Barrie, J. E. Davies, A. J. Park, and C.T. Workman, *Spectroscopy*, **4**, 42 (1989).

14. T. B. Coplen, J. K. Bohlke, P. De Bievre, etc., *Pure Appl. Chem.*, **74**, 1987 (2002).

15. L. L. Tieszen and T. W. Boutton, "Stable isotopes in terrestrial

- ecosystem research”, *Stable Isotopes in Ecological Research*, Berlin: Springer (1988).
16. E. M. Galimov, *The Biological Fractionation of Isotope*, Academic Press, Florida. (1985).
 17. K. E. Peters and J. M. Moldowan, “The Biomarker Guide Interpreting Molecular Fossils”, *Petroleum and Ancient Sediments*, New Jersey: Prentice Hall (1993).
 18. Thermo Finnigan MAT253 Operating Manual, Thermo Finnigan (2002).
 19. K. Oliver and H. Andreas, *Thermo Fisher Application Note*, AN30177.
 20. Thermo Electron Corporation TC EA Product Information, Thermo Electron Corporation (2005).
 21. Thermo Fisher Scientific GC-IsoLink Product Information, Thermo Fisher Scientific (2010).
 22. Thermo Fisher Scientific LC-IsoLink Product Information, Thermo Fisher Scientific (2008).
 23. Thermo Fisher Scientific Gas Bench Product Information, Thermo Fisher Scientific (2008).
 24. Thermo Finnigan Pre Con Operating Manual, Thermo Finnigan.
 25. H.C. Urey, *Science*, **108**, 489 (1948).
 26. S. Benson, C. Lennard, P. Maynard, and C. Roux, *Forensic Sci. Int.*, **157**, 1 (2006).



鄭昭欣先生為國立中興大學化學碩士，現任法務部調查局鑑識科學處調查官。

Chao-Hsin Cheng received his M.S. in chemistry from National Chun Hsin University. He is currently an investigator in the Department of Forensic Science at the Investigation Bureau, Ministry of Justice.



萬乃容先生為國立成功大學地球科學博士，現任樂盟科技公司工程師。

Nai-Jung Wan received his Ph.D. in earth sciences from National Cheng Kung University. He is currently a research engineer in the Joy Allied Technology Inc.



闕山仲先生為國立臺灣大學化學博士，現任法務部調查局鑑識科學處科長。

San-Chong Chyueh received his Ph.D. in chemistry from National Taiwan University. He is currently a section chief in the Department of Forensic Science at the Investigation Bureau, Ministry of Justice.