

# 應用放射性同位素氚測定地下水之年齡

## Application of Tritium of Dating Ground Water

國立臺灣大學農業工程學系副教授

林 俊 男

Chun-Nan Lin

### 摘 要

地下水定年之資料為地下水生態極有價值之資訊。地下水中之放射性同位素氚全來自降雨，在地層中僅進行蛻變。本文介紹應用地下水中自然放射性同位素氚進行地下水之定年理論、測定程序及分析方法，並推導二種混合來源之定年方法。

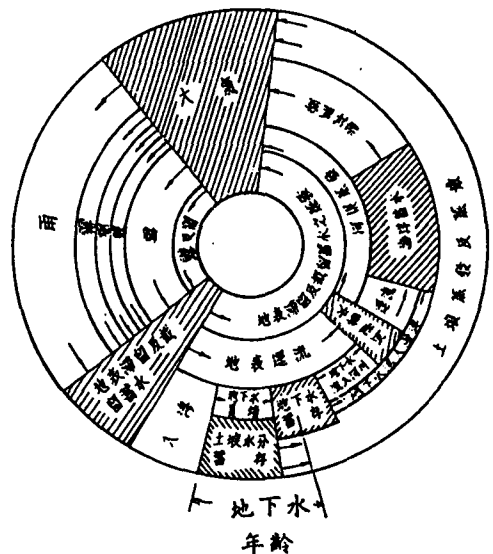
### ABSTRACT

The age of ground water is a very valuable information for the ecology of ground water. Tritium in the ground water all comes from the precipitation. It then decays only in the subterranean zone. The theory, technique and the procedures of measurement introduced and the dating of two mixing sources is derived.

### 壹、前 言

地層之母岩，因物理或化學之作用，因而產生水，如火成岩結晶，排出水份遺留在地層孔隙中，成為地下水之一部份，此類內在水（Juvenile Water）為極少數。絕大部份之地下水為水文循環中之一環（圖一），由大氣層之水份，凝結成雨、雪、霜、霧……等，入滲至地層空隙之外來水（Connate Water）。由於自然環境之差異，與勢能之作用，自入滲開始流至當地，時間參差不齊，此段時間稱之為地下水之年齡（Ground-Water Age）。推斷此時間之長短，是為定年（Dating）。

地下水定年之資料，可判定該地區地下水之流向，地下水之補注區域、地下水傳能力等等，進而提供地下水合理利用或生態保有等重要訊息。日本地下水調查應用此技術甚多，如 Kumamof



圖一 水文循環圖

Plain, Sagami Plain, Komagome, Sanuma,

Niigata Plain, Gunma ……等等。

地下水定年技術，其實為追蹤技術。追蹤技術因示蹤劑之不同，可分為二類。一類為人工投置示蹤劑，追蹤其軌跡。此類有動植物示蹤劑、陰離子示蹤劑、染料示蹤劑、放射性物質……等（表一）。另一類為天然示蹤劑，以地下水中原有之物質作為追蹤指標。如放射性同位素之  $^3\text{H}$ ， $^{14}\text{C}$ ， $^{90}\text{Sr}$  等。

表一 地下水常用人工示蹤劑  
(Davis, et al, 1985)

類 別	種 類
動 植 物	孢子，細菌，Viruse
陰 離 子	氯離子，溴離子
染 料	Rhodamine WT, 螢光劑
放射性物質	氫-3, 碘-131, 銻-51, 溴-82
其 他	Fluorocarbons, Organic anions

地下水定年工作，需考慮下列之因素：

1. 示蹤劑是否會被地層母岩吸附？
2. 示蹤劑是否會造成污染？
3. 示蹤劑是否為地下水中唯一存在之物質？若不是，應考慮如何分離？
4. 若追蹤面積大，距離遠，示蹤劑是否被稀釋而儀器無法檢出？
5. 地下水流流向是否應先預知？
6. 時間、人力、費用之考量。

利用地下水中天然之放射性同位素氫 ( $\text{H}^3$ ) 作為示蹤劑，進行定年工作可解決以上諸問題。因

1. 天然同位素氫，本已存在地下水中，無污染之問題。
2. 氫之性質與氫完全一樣，無吸附之問題。
3. 地下水中之氫，全來自地面水，母岩不會產生氫。
4. 可利用液態閃爍計量測氫之濃度，且以 TU 為單位。1 TU 即表示每  $10^{18}$  個氫即有一個氫，靈敏度高。
5. 就分析技術而言，不必預知上下游之關係（容後述）。

放射性同位素氫之應用，大多作為人工示蹤劑

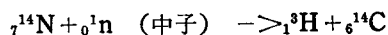
進行追蹤試驗，尤其應用於動植物之生理、病理示蹤。1970 Ravoire l. 等測定南極深層雪中之氫濃度為判定雪之年齡。日本 Takahashi (1963)，落合敏郎 (1968)，木村重彥 (1972) 等應用時徑對比法 (Temperal Correlation Method) 檢定地下水之年代，國內謝蒼明君 (1989) 亦應用時徑對比法檢定數處雲彩地區地下水之年代。

本文介紹天然同位素氫定年技術之原理，及時徑對比法外，並導引來自二種不同混合地下水定年之分析法，以供參考。

## 貳、地下水放射性氫之來源

氫之來源有三：

1. 由宇宙輻射襲擊大氣層所產生



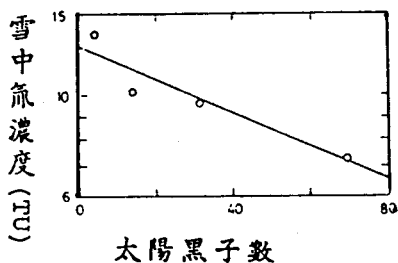
(符號代表：質量數 Z 中子數)

此氫與氧結合須成重水，重水隨著降雨滲入地下成為地下水。此方式所產生之氫據 Ravoire, l. 等之統計與太陽黑子數有關。(圖二)

$$Y = \text{EXP} (2.540 - 0.0083X)$$

X : Wolf 太陽黑子數

Y : 雨水年平均氫濃度



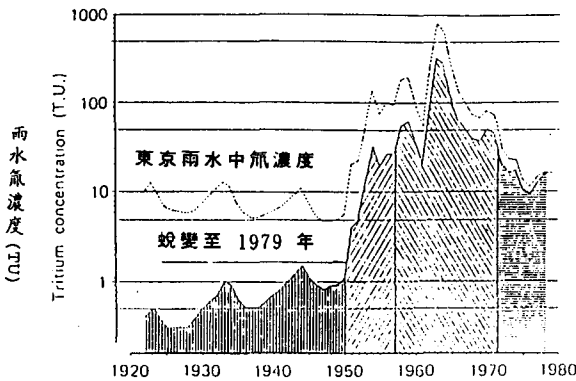
圖二 南極當年雪中氫濃度與當年太陽黑子數之關係 (Ravoire, l. et al, 1970)

2. 人工製造

美蘇二國於1953~1963大量核子試爆。核爆所產生之氫存在大氣層中，因此1953年以後，雨水氫濃度增加不少。(圖三)

3. 核能發電廠之廢水

核能發電廠之廢水中亦有極少量之氫。



Tritium concentration in precipitation of Tokyo

圖三 東京雨水中氚濃度

(THE 4TH INTERNATIONAL SEMINAR FOR LIQUID SCINTILLATION ANALYSIS)

地下水絕大部份來自地面水，當含有氚之雨水由地表入滲成地下水，因地層不產生氚，無其他氚之加入，來自雨水之氚僅進行蛻變 (Decay)。因此由地下水氚蛻變之程度及雨水氚濃度變可化作爲地下水之定年工作。

### 叁、氚之特性

1. 氚爲放射性同位素
2. 半衰期 12.33 年
3. 蛻變時 100% 放射出  $\beta^-$  粒子 (陰電子)
4. 釋出能量由 0 至  $Q_{max}$  呈連續分佈 (圖四)。
5.  $Q_{max} = 18.6 \text{ keV}$

$Q_{ave} = 5.7 \text{ keV}$  (Kev: 千電子伏特)

由於其能譜相當低，而且天然地面水地下水氚之濃度亦極少，因此普通液態閃爍計無法直接檢出。樣品需先進行濃縮，且計數器需高靈敏度之低背景值液態閃爍計 (Low Level Liquid Scintillation Counter)。

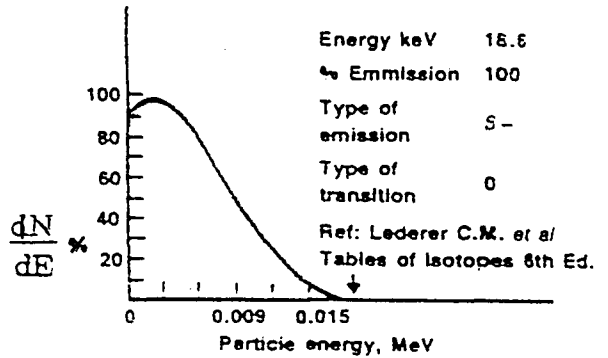
### 肆、定年分析之原理

依放射性核種蛻變法則

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$\text{即 } N = N_0 e^{-\lambda t}$$

${}^3\text{H}$   
Avg.  $\beta$  energy 5.7 keV



能量 (百萬電子伏特)

圖四 氚能譜

$N_0$ :  $t=0$  時之放射性核種之原子數

$N$ :  $t=t$  時之放射性核種之原子數

$\lambda$ :  $\frac{\ln 2}{T_{1/2}}$  蛻變常數

$T_{1/2}$ : 半衰期

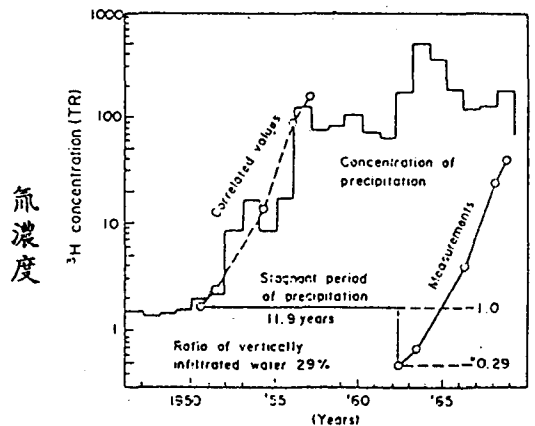
(一) 地下水來自單一地面水源

令  $N_1$  爲  $t$  時地下水氚濃度

$N_2$  爲  $T$  時雨水中氚之濃度

則  $\ln N_1 - \ln N_2 = -\lambda (t - T)$

若時間數列所採取之地下水氚濃度  $N_1$  皆符合固定之  $t - T$  值。則  $t - T$  爲地下水之年齡。此爲『時徑對比法』 (圖五)。



氚濃度

圖五 時徑對比法

(二) 地下水來自二種混合地面水

若一部份  $\alpha$  來自 T 時之雨水，其氫濃度為  $N_2$   
 另一部份  $1-\alpha$  來自 T\* 時之雨水，其氫濃度為  $N_3$   
 目前 t 地下水之氫濃度為  $N_1$

則

$$N_1 = \alpha N_2 e^{-\lambda(t-T)} + (1-\alpha) N_3 e^{-\lambda(t-T^*)} \dots (1)$$

若時間數列所採取之地下水氫濃度  $N_1(t)$ ，皆符合固定之 t-T 及 t-T\* 且時間數列中之  $\alpha$  值變異不大時，此時 t-T 及 t-T\* 即為地下水之年齡。

若  $N_3=0$  表示地下水中  $\alpha$  部份來自地面之滲入水，另  $1-\alpha$  來自古老之滯留土層中之水。 $\alpha$  值越小亦可顯示出此地層中地下水之生態補注能力越小。

### 伍、樣本處理程序及液體閃爍計測定程序

由於氫釋出  $\beta^-$  粒子能量甚低，在觀測井濾水管處，直接採取之地下水樣本 (500cc) 直接置於計數器中無法檢測出其活性，因此需進行前處理。

(每一樣本前處理約需6-7天) 其步驟如下：

- (1) 完全蒸餾，取 300cc
- (2) 加入電解劑  $Na_2O$  或  $NaOH$  1g

(3) 於濃縮設備中 (圖六) 進行電解至剩下十分之一左右

(4) 通  $CO_2$  氣，去除電解液中之 Na

(5) 再一次完全蒸餾

(6) 取 10cc 蒸餾液，再加 10cc 之閃爍劑 (Pico-Fluro LLT) 於鐵氣龍測定瓶 (copper-shielded teflon counting vials)

(7) 置於低背景值液體閃爍計計數十分鐘，每一樣本重覆十次

(8) 以下列之公式換算氫活性

$$TU = \frac{CPM - BG}{E} \times \frac{1000}{V} \times \frac{1}{F} \times \frac{1}{2.22} \times \frac{1}{3.22}$$

CPM: 閃爍計數值 (COUNTER PER MINUTE)

BG: 背景值

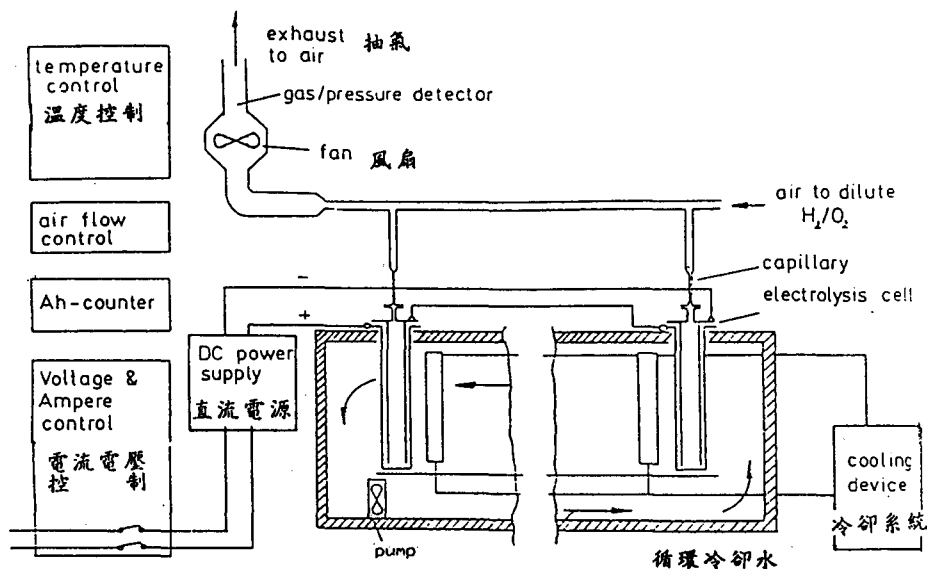
E: 閃爍計數效率

V: 測定瓶 (vial) 樣本水體積 (c.c.)

F: 濃縮係數 (enrichment factor)

1 PCi: 2.22 DPM (disintegration per minute)

1 TU: 3.22 PCi/1



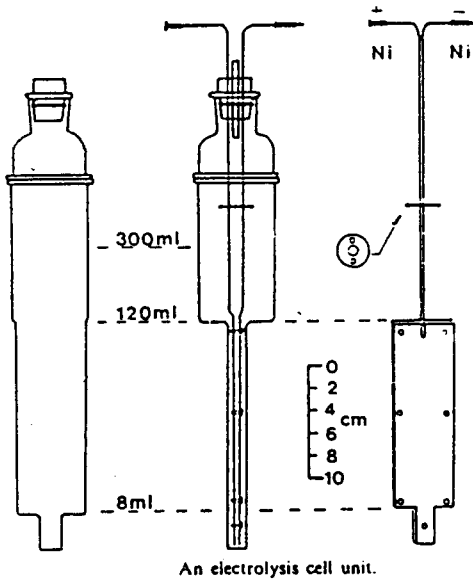
圖六-1 氫濃縮設備

### 陸、臺灣地區歷年降雨氫之濃度

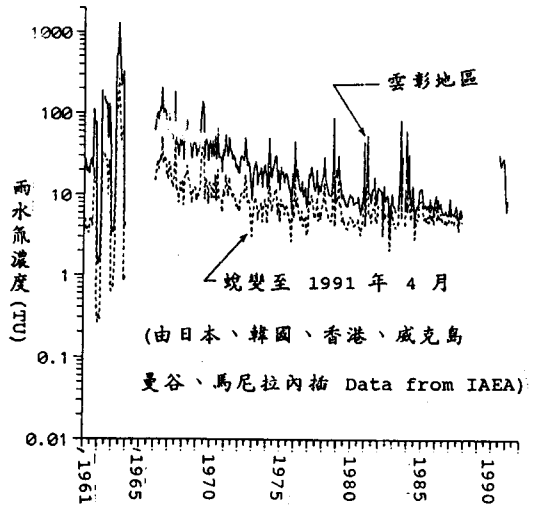
雨水或地面水氫濃度為重要依據之資料，臺灣地區無此方面之資料，因此利用歷年來 IAEA 之香港、日本、南韓埔城、威克島、馬尼拉、曼谷等地區以經緯度內插，其資料如圖七。

### 柒、應用

臺灣某地區近一、二年來地下水氫濃度測定之資料如表二。先假設一 T 值及 T\* 值，利用(1)式尋求時間數列之  $\alpha$  值。此試誤法經電子計算機計算之結果，其地下水年齡 6-29 年(表二)。依表二之資



圖六—2 氙濃縮設備之電解瓶及電極板



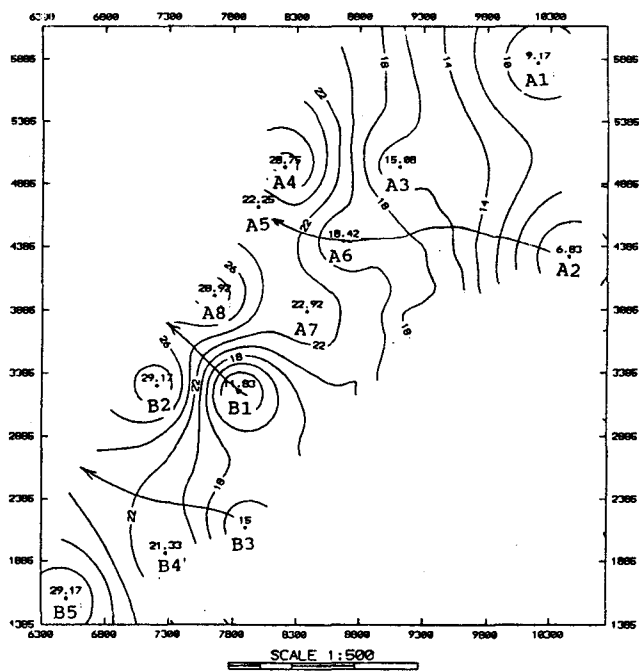
圖七 雲影地區雨水氙濃度

表二 地下水氙濃度 (單位 TU)

日期 測點	79.8	79.9	79.10	79.12	80.2	80.4	t-T (年)
A 1	5.63 (0.901)			4.25 (0.874)	19.25 (0.885)	22.43 (0.860)	9.17
A 2				17.87 (0.829)	24.85 (0.812)	29.38 (0.803)	6.83
A 3	59.24 (0.805)			21.37 (0.783)	14.91 (0.768)		15.08
A 4		67.74 (0.756)	36.29 (0.706)	11.63 (0.798)			28.75
A 5	36.41 (0.922)		14.74 (0.906)	15.63 (0.930)	11.00 (0.886)		22.25
A 6				12.57 (0.883)	18.82 (0.904)	12.97 (0.927)	18.42
A 7			19.92 (0.965)	7.97 (0.986)	19.50 (0.944)	15.12 (0.981)	22.92
A 8			20.19 (0.950)	5.60 (0.956)	2.90 (0.953)		28.92
B 1				14.94 (0.958)	11.23 (0.962)	25.24 (0.924)	11.83
B 2			6.45 (0.592)	10.50 (0.601)		16.77 (0.587)	29.17
B 3	56.47 (0.812)		11.03 (0.808)		6.08 (0.831)		15.00
B 4			32.58 (0.905)	24.70 (0.909)	8.11 (0.998)	17.36 (0.911)	21.33
B 5			4.91 (0.992)	20.34 (0.976)	7.22 (0.848)	5.67 (0.922)	29.17

註：( ) 為  $\alpha$  值

料繪其等值圖(圖八)，可瞭解此一地區地下水之主流向(參見圖八)。



(單位 10 a)  
圖八 地下水年齡等值圖及主流向

### 捌、結論與建議

利用地下水原有之放射性氬分析此地區之地下水定年資料，無污染、被吸附之疑慮。上述之方法，理論上適用於穩定流狀態。欲瞭解一地區之地下水定年資料，應長期觀測分析。木村重彥博士建議至少七年以上為宜。

本省缺少雨水地面水氣濃度長期資料，雖利用國外資料內插可得，但雨水或地面水氣濃度之區域性誤差將造成結果之精確度。

國土資源之資訊提供越多越正確，如含水地層之分佈、地下水年齡、地下水流向等越有利於該地區之地下水之利用、開發及發展。且此類資訊可供百世子孫之利用。地下水定年之資料對於地下水之利用、保育及生態調查極有幫助，可惜本省此方面之資料尚待加強。

### 玖、參考文獻

1. "GROUND WATER TRACERS" S. N. DAVIS ET AL, National Water Well Association Worthington, Ohio, 1985
2. "THE 2ND INTERNATIONAL SEMINAR FOR LIQUID SCINTILLATION ANALYSIS" PROCEEDING, TOKYO,

JAPAN, 1988

3. "THE 4TH INTERNATIONAL SEMINAR FOR LIQUID SCINTILLATION ANALYSIS" PROCEEDING, TOKYO, JAPAN, 1990
4. "Behavior Analysis of Subsurface Water Using Radioisotopes Contained in It" 木村重彥, 農業土木試驗場報告 No. 25, 1986
5. "人工の放射性追跡子による地下水の流れの研究" 木村重彥等, 農業土木試驗場報告 No. 7, 1969
6. "Tritium as an Indicator of Groundwater Age in Central Wisconsin" Kenneth R. Bradburg, Ground Water Vol 29, No. 3, 1991
7. "雲林地區地下水年代及流向之研究" 謝蒼明, 臺大農業所碩士論文, 6月, 1989
8. "Environmental Isotopes in Hydrologic Studies" 楊穎哲, 同位素在水文方面之應用講習班, 4月, 1989
9. "Tritium content in a firn core from Antarctica" Ravoire, I., et al, J. Geophys. Res., 75, 1970

收稿日期：民國80年12月13日

修正日期：民國81年 2月12日

接受日期：民國81年 2月27日