

# 輻射防護簡訊 87

中華民國96年10月1日

- 出版單位：財團法人中華民國輻射防護協會
- 地 址：新竹市光復路二段295號15樓之1 ■ 電話：(03)5722224 電傳：(03)5722521
- 編輯委員：王昭平、尹學禮、何 偉、李四海、施建樑、  
翁寶山、張寶樹、董傳中、趙君行、蘇獻章 (依筆劃順序)
- 發行人：翁寶山 ■ 主 編：劉代欽 ■ 編 輯：李孝華
- 印刷所：大洋實業社 地址：新竹市建功一路95號  
行政院新聞局出版事業登記證局版北市誌字第柒伍零號

## □輻防消息報導

### ▲96年核安演習圓滿結束

(原能會訊)

民國96年核安演習已於8月21、22日(週二、週三)在核能二廠及其周圍的緊急應變計畫區舉行。本次演習參演單位除包括核子事故中央災害應變中心的成員(國防部、內政部、衛生署、交通部、原能會)外，尚包括臺北縣政府所屬單位、金山鄉公所、萬里鄉公所、輻傷責任醫院及台電公司所屬的核能二廠、緊急計畫執行委員會與放射試驗室等，約1000名應變人員及600名在地民眾參與演習。

本次演習主要目的有：

1. 提升編組人員對應變措施的熟稔程度，達成強化核子事故緊急應變能力。
2. 驗證災害防救能力，作好防範措施，確保核能安全。
3. 驗證核子事故緊急應變作業程序書。
4. 促進地方首長(縣長、鄉長)熟悉應變機制。
5. 擴大民眾參與、落實防護行動，建立正確的防災觀念及應變能力。

今年演習有5項重點，其中第3項為實兵示範演練：

1. 核能二廠緊急應變計畫完整項目演練。特殊項目包括：
  - (1) 於全迴路模擬器演練故障設備搶修作業。
  - (2) 廠區保安及反恐作業演練(保警參與演練)。
  - (3) 搶救工作人員輻傷除污及後送三級輻傷醫療演練。
2. 中央災害應變中心疏散決策程序演練。
3. 地方災害應變中心疏散示範演練。
4. 輻射監測中心輻射偵測及核種分析作業無線傳輸運作演練。
5. 支援中心人員除污站運作演練。

本次演習規劃具有以下特色：

1. 首度進行核能二廠完整項目演練，徹底檢驗綜合應變能力。
2. 核能二廠保警首度參與廠區保安及反恐作業演練。
3. 中央災害應變中心及輻射監測中心依實際計算所得及數據，進行深度演練，強化決策功能。
4. 各中心同步演練，務實測試縱向及橫向的指揮、支援、協調與聯繫能力。
5. 由地方災害應變中心規劃、執行第 8 次實兵示範疏散演練（600 人）。
6. 支援中心前進指揮所於後山營區演練，將平時與戰時情況結合。

經由核安演習平台的訓練，一方面可檢驗各級政府緊急應變能力，也可藉此發掘潛存問題，並進一步檢討改善，以消除各項支援與救災行動的盲點。透過演練，各應變單位及人員得以更深刻了解其權責，團隊工作默契得以更強化。民眾親身參與，使民眾對政府處理核災的防救能力更具信心。

## □會議訓練報導

### ▲96 年度各項訓練班預定開課時間表

(輻協訊)

| 班 別                    | 組 別                       | 期 別 及 日 期  | 地 點                 |
|------------------------|---------------------------|--|---------------------|
| 放射性物質或可發生游離輻射設備操作人員研習班 | (A 組)                     | A8---11 月 27 日~ 12 月 4 日   | (高雄)輻射偵測中心          |
|                        | 36 小時<br>許可類<br>設備        | A9---12 月 11 日~ 18 日   | (新竹)帝國經貿大樓          |
|                        |                           | (B 組)  | B18---10 月 3 日~ 5 日 |
|                        | 18 小時<br>登記備<br>查類<br>設備  | B19---11 月 7 日~ 9 日  | (台北)建國大樓            |
|                        |                           | B20---11 月 14 日~ 16 日  | (高雄)輻射偵測中心          |
|                        |                           | B21---11 月 21 日~ 23 日  | (新竹)帝國經貿大樓          |
| B22---12 月 19 日~ 21 日  |                           | (台北)建國大樓   |                     |
| 輻射防護專業人員訓練班            | 輻防師(108 小時)<br>輻防師(12 小時) | 師 7 期& 進階 7 (36hr)<br>96 年 9 月 14 日<br>96 年 10 月 12 日<br>96 年 11 月 16 日<br>96 年 12 月 5~7 日 | (新竹)帝國經貿大樓          |
| 鋼鐵建材輻射偵檢人員訓練班          |                           | 鋼 3--12 月 5 日~ 6 日   | 高雄                  |
|                        |                           | 鋼 4--12 月 20 日~ 21 日   | (新竹)帝國經貿大樓          |
| 九十六年度輻射防護教育訓練          |                           | 10 月 26 日---3 小時   | 台北(清華大學月涵堂)         |
|                        |                           | 11 月 13 日---3 小時   | (高雄)輻射偵測中心          |
|                        |                           | 11 月 30 日---3 小時   | (新竹)帝國經貿大樓          |
|                        |                           | 11 月 02 日---6 小時   | (新竹)帝國經貿大樓          |

◎ 以上各項訓練班簡章備索詳細內容網址為 [www.rpa.org.tw](http://www.rpa.org.tw)，電話：(03)5722224。◎

## □ 專題報導

### ▲ 動態模擬在輻射防護的分析與應用

(核研所保健物理組 王文樺)

#### 一、前言

系統動態學討論系統內變數的數值隨時間變化的趨勢，其原理是運用基本觀念與定律以建立各變數與函數的關聯圖形，再視問題的難易，分別運用微分方程式或聯立微分方程式求解。一般而言，吾人實際面對的問題甚為複雜，因此，許多動態模擬工具軟體便應運而生，並持續推陳出新。常為各界學者專家廣泛採用的動態模擬工具軟體計有 Powersim Studio、Vensim、Stella、Simile 及 GoldSim 等。

雖然系統動態學最早推出時是用來解決人文及社會科學的問題，但由於許多複雜的科技問題也都能應用其方法與動態模擬工具軟體迅速有效的加以模擬，求得最佳解並展示變動過程；這些模擬工具軟體甚至能依使用人所建構的模式自行產生程式碼接著運用電腦求解，極有助於專家學者集中精力於邏輯思考與物理現象的分析，因此西歐的德國及瑞典等大學的物理課程已積極推廣系統動態學的應用<sup>(1)(2)</sup>。目前我國已廣泛應用此一專門技術的領域，計有水資源管理、環境保護、藥物在體內的吸收、生物科技等研究及放射性廢棄物核種傳輸分析<sup>(3)</sup>，至於輻防界尚待推廣應用。

#### 二、動態模擬工具軟體的作用原理

各式各樣的動態模擬工具軟體的作用原理，係利用少數幾種功能互不相同的元件，組合成分析模式，使用人則依據各元件間的相互關聯與損益關係，賦予關聯；再運用電腦(結合 Euler's 或 Runge-Kutta Method)解微分方程式或聯立微分方程式。以 STELLA 軟體為例，其所使用的元件及開啟視窗，如圖 1 所示。該軟體可自 [www.bockyttech.com.tw/products/STELLA.htm](http://www.bockyttech.com.tw/products/STELLA.htm) 網頁下載試用版；至於各元件的功能及特性參數說明如表 1：

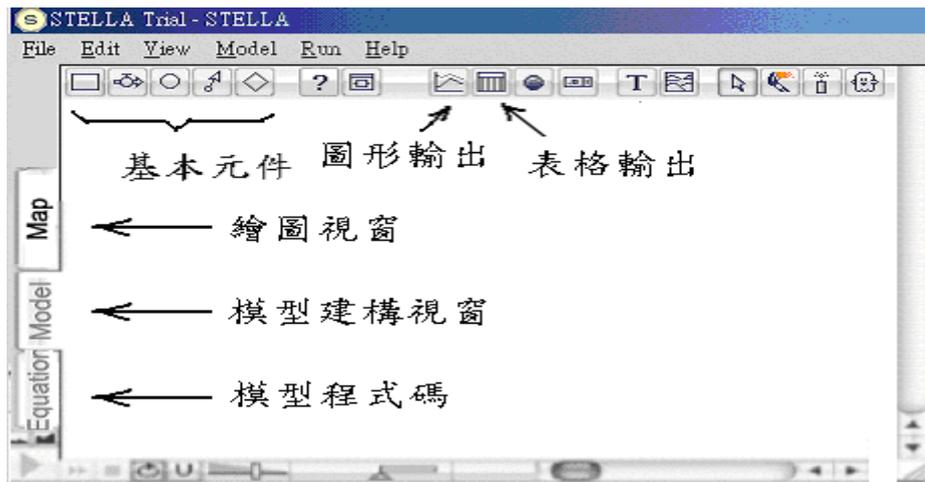


圖 1 STELLA 軟體所使用的元件及開啟視窗

表 1 STELLA 軟體中主要元件

| 圖   | 形名       | 稱           | 明                     |
|---|----------|-------------|-----------------------|
|  | 存量       | (stock)     | 系統內隨時間及變數的改變所累積的淨值    |
|  | 流率(flow) |             | 流入或流出 stock 的流率       |
|  | 變數       | (converter) | 控制 stock 與 flow 數值的變數 |
|  | 聯結       | (connector) | 聯結變數與流率或存量之間的關係       |

### 三、系統動態學分析與評估的方式

本文先以放射性衰變為例，簡介系統動態學的應用，再以較複雜的範例說明其應用的實務。

#### (一)簡單的模型

茲以吾人所熟知的放射性核種的衰變為例，說明動態模擬工具軟體的分析與評估方式如下：

已知放射性核種的衰變率是

$$-dN(t)/dt = \lambda N(t) = A(t) \quad (1)$$

其中，N 為母核種在時間 t 時的原子數

A 為母核種在時間 t 時的活度

t 為時間

$\lambda$  為衰變常數

若以 STELLA 軟體求解，其過程如下：

- (1) 於 STELLA 繪圖視窗，利用拖曳的方式，建構放射性核種衰變作用的簡單關聯圖形，如圖 2 所示。
- (2) 進入模型建構視窗後，使用者依放射性核種的衰變率，建構變數與函數的數學關係，並輸入起始值或參數，如圖 3(a) 所示。
- (3) STELLA 軟體能依使用者所建構的變數與函數關係，自行產生運算放射性核種衰變作用的電腦程式碼，如圖 3(b) 所示。
- (4) 設定繪製圖表的參數後，按下運跑按鈕；程式運跑結果，可得各變數隨時間變化的圖形與數據。圖 4 的曲線顯示母核種活度的變化：

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

其中， $A_0$  為最初時刻的活度起始值。

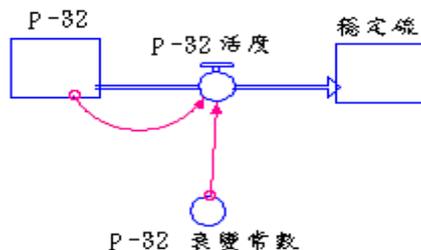


圖2. 以STELLA 建構放射性核種衰變作用的簡單模型

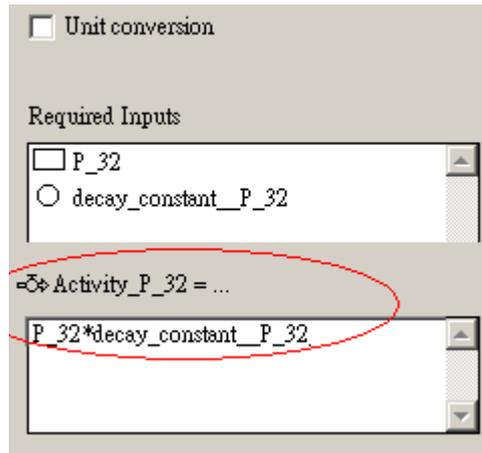


圖 3(a) 建構 converter 變數與函數 stock 的數學關係，或輸入起始值或參數

- $P_{32}(t) = P_{32}(t - dt) + (- \text{Activity}_{P32}) * dt$   
INIT P\_32 = 1  
OUTFLOWS:  
      $\text{Activity}_{P32} = P_{32} * \text{decay\_constant\_of\_P}_{32}$
- $S_{\text{stable}}(t) = S_{\text{stable}}(t - dt) + (\text{Activity}_{P32}) * dt$   
INIT S\_stable = 0  
INFLOWS:  
      $\text{Activity}_{P32} = P_{32} * \text{decay\_constant\_of\_P}_{32}$
- $\text{decay\_constant\_of\_P}_{32} = 0.693/14.26$

圖3(b) STELLA 軟體能依圖2所建構的變數與函數關係，自行產生圖上所示的電腦程式碼以運算放射性核種衰變作用

經研判運算結果無誤後，可對各變數進行靈敏度分析(sensitivity analysis)，以評估變數變動對原運算結果(例如圖4中的曲線)的影響程度。若選用slider bar以評估變數變動的影響，STELLA 軟體能依使用人的調整，自動以動態畫面展示函數曲線連續變化的效果。

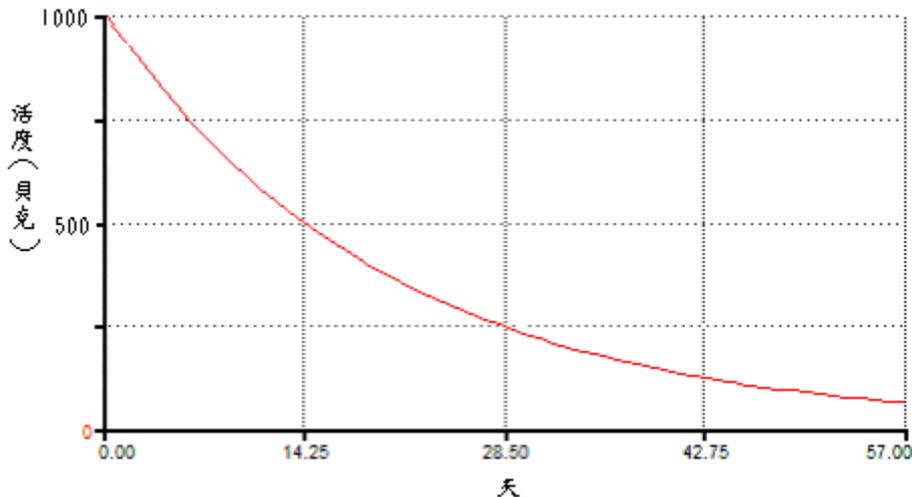


圖 4 以 STELLA 軟體分析 P-32 衰變模型的結果

## (二) 複雜系統的分析

自前述範例可以得知：以微分方程式來描述複雜的系統往往會遭遇到求解的困難；若採用STELLA等動態模擬工具軟體，則可輕易且快速地進行複雜模型的分析與模擬。茲進一步應用動態模擬工具軟體以處理較複雜的放射性核種衰變系列<sup>(2)</sup>或分析藥物在體內的劑量<sup>(4)</sup>，如圖5、6所示。

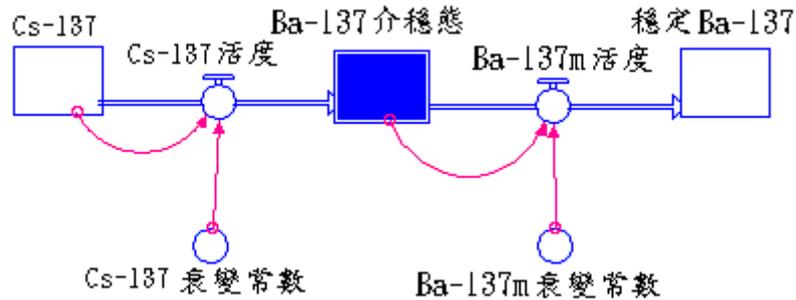


圖 5 以銫-137 衰變為例，說明以系統動態學建構放射性核種衰變鏈模型

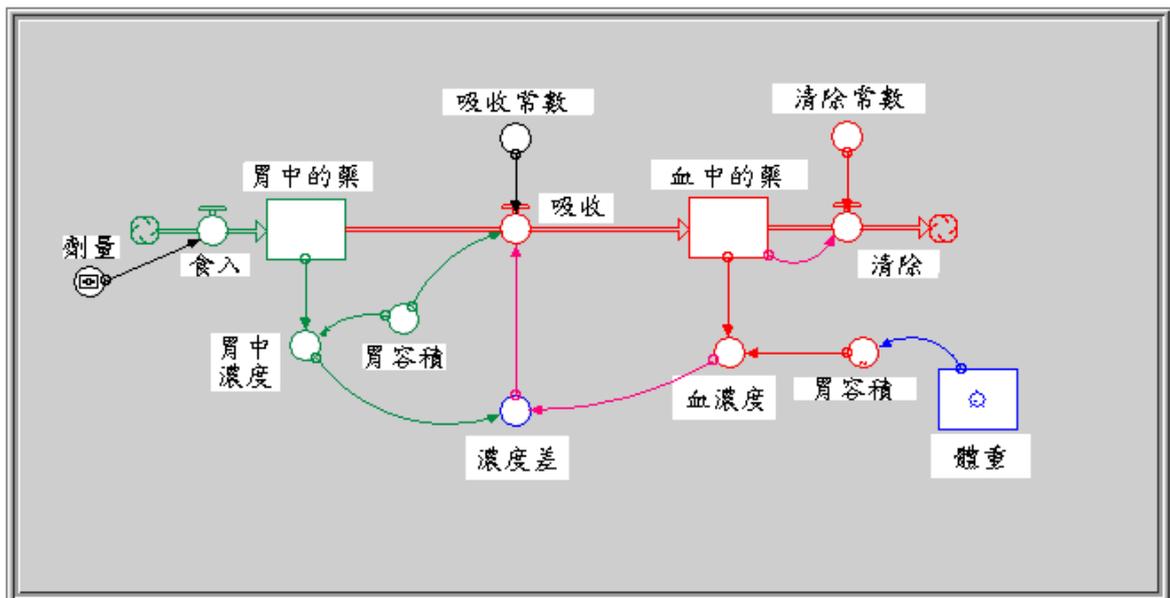


圖 6 服用藥物與劑量分析的動態模型

## 四、推廣與應用

系統動態學自1950年問世以來，歷經推廣已廣泛地被國內外人文、社會、企業管理、物理、生物、環保等學術界所採用。美國能源部(DOE)、日本原子力研究開發機構(JAEA)與西班牙的放射性廢棄物營運公司(Enresa)都曾提撥專款，共同支助 GoldSim 科技公司依據系統動態學研發污染物傳輸模組 (Contaminant Transport Module) 及專用軟體，並已成功應用至雅卡山(Yucca Mountain)等計畫<sup>(5)</sup>。吾人由此可概略得知系統動態學在核能與輻防界的應用潛力。

## 五、結語

本文已介紹動態模擬工具軟體對放射性核種衰變估算、體內劑量計算、放

射性廢棄物核種傳輸分析等應用；推廣其應用範圍，凡是能以隔室模型 (compartment model) 描述的問題，例如複雜的體內劑量計算、放射性核種衰變鏈、輻射作業場所通風系統設計或室內空浮濃度變化等輻射防護問題，都可運用此技術模擬並求解。

總之，動態模擬工具軟體能運用使用者建構的變數與函數關係圖、起始值與公式，模擬動態變化的過程與結果。其自行產生程式執行碼等功能，能自動、快速且正確地完成所有程式碼撰寫作業；至於靈敏度分析、變數與函數的動態變化過程與結果的模擬，更能幫助吾人掌控全局並求取最佳解；其整體功能誠屬優異，吾人可推廣應用於核醫藥物的體內劑量、放射性核種在環境的遷移或輻射作業場所空浮濃度等輻射防護領域的分析或研究。

#### 參考文獻

1. Horst P. Schecker<sup>1</sup>, System dynamics in physics education, University of Bremen, Germany (2000).
2. Hans U. Fuchs, The continuum physics paradigm in physics instruction, Zurich University of Applied Sciences, Switzerland (1998).
3. Shin-Jon Ju, Fu-Lin Chang and Li-Min Chi, Case study on release from a deep geologic repository for spent nuclear fuel disposal by GoldSim, Institute of Nuclear Energy Research, Taiwan, R.O.C. (2003).
4. High Performance Systems, Inc., STELLA 7 demo kit, High Performance Systems, Inc., Lebanon, USA (2002).
5. GoldSim Technology Group, GoldSim contaminant transport module (user's guide), GoldSim Technology Group, Washington, USA (2006).

### ▲全球核能伙伴計畫－防止核擴散與推展再處理的矛盾

(清華大學 許俊男)

#### 【接續 86 期】

#### 17. 美國物理學會的意見

剛開始可不必聚焦於再處理，先予中間貯藏，然後進行研究。如果再處理真的可以，屆時再作下去。如果有問題，則可從最終處置場再取出就可以了。

「即使雅卡山處置場再怎麼推遲，在乾式護箱的中期貯存—置於現在的電廠場址、幾個地區性的設施、或者單一的全國性設施—至少 50 年期間，可以安全且經濟的形態進行貯存。再者，置於雅卡山處置場的用過核子燃料，即使經數十年，也可維持於可回收的形態供再處理。就美國而言，開始再處理、開發下一個國家處置並不存在緊迫性。」

#### 18. 用過核子燃料的「自我防衛」

用過核子燃料即使取出數十年，人如果在距 1 米處，於 1 小時內就會死亡。

當用過核子燃料在 1 米處的距離放出劑量率 1 戈雷/小時的輻射時，被認為具有「自我防衛性」。至少有 100 年係處於這種狀態。

### 19.由 UREX+法 回收的鈾的「自我防衛」

美國能源部 AFCI 的 Collins 博士指出，即使以 UREX+法 一起回收鈾和其他的超鈾元素，也不具「自我防衛性」。超鈾元素距離 1 米的劑量率為 0.01 西弗/小時，為上述 1 戈雷/小時的 1/100。是取出後 50 年用過核子燃料劑量率的 1/1000。

也就是說，於再處理回收的超鈾元素混合物到手之後，以化學處理單獨分離出鈾並非難事。也有論文指出，在高溫再處理法以分裂產物生成的鐳系元素雖也一併取出，但因其中較長壽命的鈾 154 (Eu-154) 並未一起取出，所以核擴散防止性並沒那麼高。

### 20.「自我防衛」高是否就好？

對於提高到具有實質意義的「自我防衛」能力以前，能源部 AFCI 的 Collins 博士指出，「核子燃料製造・搬運的成本已有相當大上漲。」又同為能源部 AFCI 的 Magwood 指出，「對於鈾與其他幾種物質一起分離的化學技術，並不確信其具有核擴散防止性高的形態，也不認為在經濟上可用可行的形態加以應用。」

### 21.混合的超鈾元素是否就絕不能用於核武器？

Lawrence Livermore 國家實驗室主任 Bruce Goodwin 指出，因為幾乎所有的超鈾元素都是由核爆所引起，隨著高科技的擴散，從混合的超鈾元素也不難製造核武器。

### 22.從搖籃到墳墓

GNEP 計畫提出將世界分成「燃料供應國」與「核反應器使用國」兩個群組。使用國使用由供應國所提供的核子燃料，其用過核子燃料再送回供應國的所謂租賃體系(lease system)。使用國交換放棄與核擴散有連帶關係的鈾濃縮與再處理，接受穩定的燃料供應，但對於用過核子燃料再處理之後的頭痛問題如何解決並未觸及。供應國回收用過核子燃料後予以再處理而作成「再循環」燃料，以供其先進型燃燒爐之用。但是，如前所提，此先進型燃燒爐迄今並未誕生。俄羅斯在「國際燃料庫構想」中指出，再快也只是開始接受用過核子燃料。但是，畢竟直接面臨處置場問題的美國，接受用過核子燃料的有效利用、大幅減量廢棄物的目標迄未建立，也無從開始接受用過核子燃料。法、日兩國是要加入供應國群組，還是加入使用國群組而將用過核子燃料委由供應國處理，處置將面臨抉擇。

在 GNEP 首頁，有如下的說明：

「在從搖擺到墳墓的燃料接收方法，供應國之這一方提供置於使用國的另一方之一般型核能電廠新的燃料。在典型的作法上，就是進行鈾濃化。這些所謂的一般型核能電廠，包含既有的核能電廠、下一代核能電廠（例如核四的 ABWR）、或者在 GNEP 計畫下所開發的新小型核能電廠。其用過核子燃料則送回燃料循環國，使用不能生產分離鈾的程序予以再循環。經再循環的燃料，可在燃料供應國的先進燃燒爐使用。此處 ABWR 為進步型沸水反應器。

將來在再循環技術完全驗證可行的階段，如果用過核子燃料被同意回收，則在經濟上有相當的誘因。原因是核反應器使用國無論在價格上、安全性上、或保障措施上可避免多重的重大負擔。

對於貢獻「燃料庫」表示關心的已有多個國家。因為開發支撐在 GNEP 計畫所構想「從搖擺到墳墓」的燃料接收方法所需的技術需要時間，美國為了沿襲 GNEP 的目的欲建構暫定的可信賴的燃料服務而徵求國際性伙伴的合作。」

### 23.我國的因應之道

無疑的台灣是屬於 GNEP 的計畫中所分類的「核反應器使用國」，依現有國情推測，在可預見的未來，台灣建造新核能電廠的可能性不大，所面臨的是由目前買斷核子燃料所生的既有用過核子燃料，而非在租賃體系下新購核子燃料產生的。此既有的用過核子燃料將來如何處理和處置，以及如果 GNEP 計畫可行的話，其處置是擺在該計畫的那一階段，恐都不是我們現在檯面上的人所能躬逢其盛的。比較可能的是對美國較有商業利益的新電廠先賣，其他有求於美國的既有用過核子燃料則慢慢談。可以想見的，越往後推遲則美國所能要到的價碼就越高，因為這時是屬於美方或「燃料供應國」所壟斷的市場。不論是高或低放射性廢棄物的處置，「使用者付費」以及「自己的廢棄物自己處置」是目前世人的最大共識，所以 GNEP 計畫下的用過核子燃料（高放射性廢棄物的一種，另外一種為用過核子燃料經再處理後的殘餘物）將來如何處置還有得「喬」。因為對美國人來說，台灣的用過核子燃料是屬於外國的高放射性廢棄物。如果美國開的是天價，高放射性廢棄物處置在台灣是不是就完全排除也未免太武斷。就像前此在核能界談再處理就色變一樣，認為台灣的用過核子燃料再處理是不可能的事。還有，當大眾逐漸正確瞭解放射性廢棄物之後，不再把放射性廢棄物視為洪水猛獸之時，也有可能化阻力為助力。當年曾經認為美國不可能賣 F-16 戰機給台灣，可是當 IDF 研發成功之後，卻變為可能。也就是說，世事沒有什麼是不可能的。還有，等我們那一天需要與美國談判用過核子燃料處置費用時，如果我們沒有這方面的人才，也就是什麼都不清楚，是不是就準備當剝子？還有，當 GNEP 計畫有些選項時，我們是不是要有自己的決策能力？

台灣是一個小型海島，凡事講求立竿見影之效，只著眼於解決眼前的問題，例如中小型企業間橫向的合作無間，創造了今天新竹科學園區的成功經驗模式。特點是應變能力強，但也因此常缺乏有深度的思考和永續經營的規劃。

這次美國 GNEP 計畫一提出，立刻見識到決策單位應變之快，翻臉如翻書，令人訝異。但可預期的是，將來如又有風吹草動，又要跟著變，永無寧日。GNEP 所畫的餅如果能實現，固然是美事一樁。但是我們是不是可以先冷靜下來把事情弄清楚，然後集思廣益地加以分析，擬訂出一套穩紮穩打、可大可久的永續核後端營運政策。在這過程中，如果夾雜著本位的門戶之見及/或個人不相關領域發展的考量，勢將無法客觀地擬出良好的永續經營政策。

經歷了七年的「非核家園」非理性紛擾，好不容易地於歐陽主委的努力之下(因他已交棒，可以無欲則剛了)，在給足了執政黨「面子」的技巧下無聲無息地轉換成「非核害家園」，但代價是台灣因核四的停建損失了數千億台幣，以及這七年來核能人才培育的後繼無力。

在核的這塊領域裡好像很窄，但其實因為它是一門分工很細又高度整合的科技，所以隔行如隔山這句話在此也應該適用。也就是說即使是核能圈內人，每個人所看到的其實也只是他個人領域的一部分，對非自己領域部分，不見得有深入的瞭解，所以在擬定政策的過程，參與的每個人懷抱著謙卑的心情、虛心地去集思廣益至為重要。

在這資通爆炸的時代，眼前世界的瞬息萬變勝過過去幾世紀的改變。歷史是延續與傳承的，無法用孫子兵法裡所謂的鋸劍法予以切割，也不是核廢棄物的禍延子孫。每個人都在享受前人努力的成果，並踏著前人的肩膀像爬樓梯似地往上爬。在核後端營運上，既然在每度電費上都有後端營運基金的徵收，我們是不是也應該早日擬定一個不變的政策，例如不應該把後端營運基金用於解決與後端營運無關的計畫上或問題上，或者不應該抱著只要在我任內不出紕漏而採拖延政策地把核廢棄物的解決，寄望在比我們更聰明的後代子孫身上。因為這種努力應是有延續性的、經驗累積、與傳承性的，而不是可切割的、可中斷的。所謂滾動的石頭不生苔，如果政策缺乏延續性與傳承性，則以前所有的努力都將是以作虛工一場而結束，形成國家資源一再浪費的惡性循環，懇請有權決策者三思。大象踩到一隻螞蟻是沒有感覺的，但踩死一隻螞蟻是事實，居高者怎能不如覆薄冰、謹言慎行，以天下蒼生為念？

(本文改寫自網路 <http://kakujoho.net/rokkasho/GNEP.html>)

日本 核情報：国際原子力パートナーシップ(GNEP)構想--米国核拡散防止政策と再処理推進の矛盾，謹此致謝)

### ▲輻射色染劑量計簡介

(清華大學原科中心 許彬杰)

### 前 言

游離輻射與設備及放射性物質相繼問世後，已廣泛應用於農業、工業、放射醫療與診斷、地質與礦物分析、地下水文流向測定、古物年代測定與古物保存及商業產品等輻射照射。影響輻射照射成敗的主要關鍵因素，為如何正確給

予受照射物的輻射劑量。不同的輻射照射應用場所對照射物所給予的輻射劑量，其差異相當懸殊可高達  $10^8$  倍以上，可適用於各類輻射照射劑量度量的劑量計種類繁多，如游離腔劑量儀、膠片劑量計與熱發光劑量計等。目前用於高劑量(率)輻射照射場劑量度量，典型常見的主要劑量計有液態的硫酸亞鐵 ( $\text{FeSO}_4$ )化學劑量計與固態的輻射色染(radiochromic dye film: RDF)劑量計。

硫酸亞鐵化學劑量計對輻射的反應機制，是藉由輻射的游離作用，使亞鐵離子( $\text{Fe}^{2+}$ )氧化成鐵離子( $\text{Fe}^{3+}$ )，其劑量線性反應範圍僅約 20 戈雷 (20 Gy)，須自行調配，劑量計的體積較大，且易受環境溫度與可見光等因素影響，現已被固態的輻射色染劑量計取代。

輻射色染(RDF)劑量計，是由碳、氫、氧、氮等低原子序數物質所構成。其組成成分與含量，分別為碳( 63.7 %)、氫( 9.5 %)、氧( 14.8 %)、氮( 12.0 %)[1,7,14]。RDF 劑量計具有(1)高輻射劑量率與高劑量反應特性; (2)具有良好的穩定性、再現性與可重覆計測; (3)其組成結構為固態(密度:  $1.15 \text{ g / cm}^3$ )，計測操作簡單無需前處理; (4)不受環境相對濕度與大氣壓變動影響;與(5)價格低廉等優點，現為鈷 60 輻射照射場劑量度量評估的主要劑量計。

### RDF 劑量計的輻射反應機制

RDF 劑量計對輻射的反應機制，是藉由其所含三氨基苯乙睛【hexa (hydroxyethyl) amino-tri- phenyl aceto-nitrile (HHEVC)】的有機染料與輻射或光等的反應作用。三氨基苯乙睛的單分子結構，如圖 1-(a)所示，當其受到輻射或光等照射後，產生輻射化學或光化學的反應作用，並誘導引發三氨基苯乙睛有機染料結構分子的電子，產生轉位重新組合形成一有深度藍色的穩定物質，如圖 1-(b)所示。RDF 劑量計對輻射反應所呈現藍色的色澤深度變化，隨其所接受的輻射劑量(或光照度)多寡，呈線性正比反應。

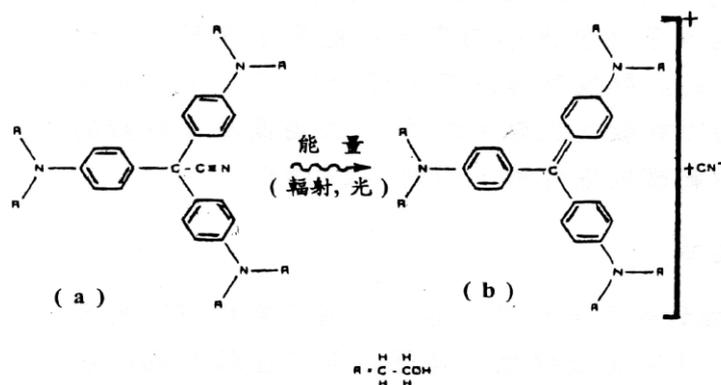


圖 1.三氨基苯乙睛的單分子結構(a)與對輻射的反應機制(b)。

### RDF 劑量計的種類與結構

目前已商業化的 RDF 劑量計是美國遠西技術公司( Far West Technology Inc ; FWT )的產品，主要有二種系列的 RDF 劑量計，分別為型號 FWT – 60 – 00(簡稱 FWT – 60) RDF 劑量計與 FWT – 70 系列的 RDF 劑量計。型號 FWT – 60 RDF 劑量計為一片狀，其尺寸規格為 10 mm × 10 mm，厚度約為 50 μm，如圖 2(a) 所示。用於度量鈷 60 加馬劑量，由於其厚度並未達到電子平衡所須厚度( 5 mm 厚的水介質)，因此必須置於一相當於 5 mm 厚水介質的電子平衡罩介質內，此電子平衡罩介質內最多可放置 10 片型號 FWT – 60 RDF 劑量計如圖 2(b) 所示，一般電子平衡罩介質為 PE 或鐵弗龍材料。

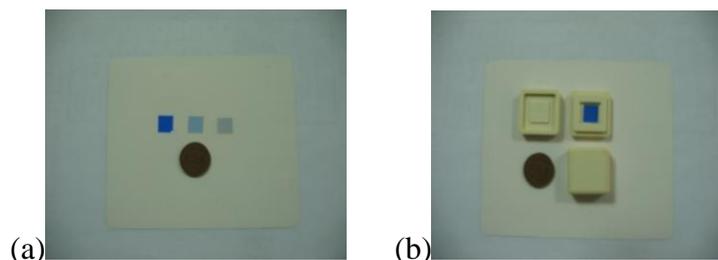


圖 2 . 型號 FWT-60 RDF 劑量計(a)與度量鈷 60 加馬劑量用電子平衡盒(b)。

FWT – 70 系列 RDF 劑量計為一棒狀結構，由一長 50 mm、直徑 3 mm、管壁厚 0.5 mm 的中空塑膠材質構成光波導管，內含重量 0.235 ~ 0.302 g 的三氨基苯乙睛液態膠狀有機染料所構成，如圖 3 所示。光波導管兩端各裝置一顆直徑 3.0 mm 的透明塑膠球，此透明塑膠球除具有防止三氨基苯乙睛液態有機染料洩漏外，並具有將穿透三氨基苯乙睛液態有機染料的光作聚焦功用。FWT – 70 系列的 RDF 劑量計在度量鈷 60 加馬劑量時，一般以每 5 根棒狀 FWT – 70 系列的 RDF 劑量計，裝入一直徑 12.8 mm、長 51.5 mm、管壁厚 1.5 mm 的中空塑膠材質所構成的電子平衡套管內，並作為評估劑量的度量標準差。

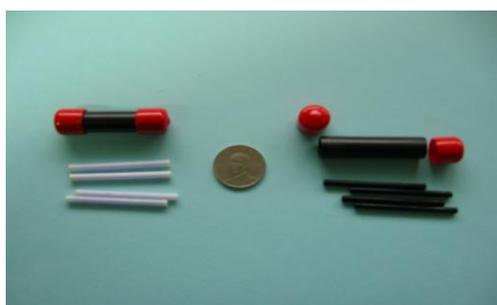


圖 3. FWT-70 系列 RDF 劑量計與度量鈷 60 加馬劑量用電子平衡套。

【型號 FWT-70-40(M) RDF 劑量計(白色);型號 FWT-70-83(M) RDF 劑量計(黑色)】

### 【下期待續】

- 1.歡迎賜稿，稿件請寄新竹市光復路二段 295 號 15 樓之 1 或電傳(03)5722521 輻防協會編輯組收。來稿一經刊登，略致薄酬(政令宣導文章，恕不給稿酬)。
- 2.本刊因篇幅限制，新聞類每則請控制在 500 字以內，專題類每篇以 2000 字內為佳。
- 3.歡迎訂閱(每年六期 180 元)。請洽：李孝華小姐 TEL：(03)5722224 轉 314。

FWT - 70 系列的 RDF 劑量計有兩種型號，分別為 (1) 型號 FWT - 70 - 40(M) RDF 劑量計，此型號 RDF 劑量計內含重量  $0.302 \pm 0.007$  g 的三氨基苯乙睛液態膠狀有機染料，在外觀上其光波導管為白色塑膠材質。(2) 型號 FWT - 70 - 83(M) RDF 劑量計，此型號 RDF 劑量計內含重量  $0.235 \pm 0.006$  g 的三氨基苯乙睛液態膠狀有機染料，在外觀上其光波導管為黑色塑膠材質，如圖 3 所示。

RDF 劑量計對計測光波長的敏度反應，視其是否接受輻射照射而異，未接受加馬照射的 RDF 劑量計，於 350 nm 至 700 nm 的計測光波長中，計測光波長對 RDF 劑量計的穿透率隨計測的光波長增長而增加，由約 75 % 增至 90 %。當 RDF 劑量計接受加馬照射後，當計測光波長介於 350 ~ 600 nm 之間，其對 RDF 劑量計的穿透率隨計測光波長的增長而減少，於 600 nm 光波長的穿透率達最少(吸收率最高)，隨後其穿透率則隨計測光波長的增長而增加。此穿透率與計測光波長的變化反應現象，並不受其所接受的劑量多寡變化而有所影響，如圖 4 所示。顯示，RDF 劑量計對計測光波長的敏度反應與計測光波長，呈現顯著的依恃性關係，且與其是否接受輻射照射有顯著的相關性。此近紅綠光的 600 nm 光波長為用於計測 RDF 劑量計的主要計測光波長。此外，對型號 FWT-60 RDF 劑量計而言，其另有一輔助用計測光波長，此輔助用計測光波長為 510 nm。對 FWT - 70 系列 RDF 劑量計而言，其另一輔助用計測光波長為 656 nm。此輔助用計測光波長除用於驗證主計測光波長所評估的劑量外，另一方面具有延長 RDF 劑量計對高劑量度量範圍的功能。

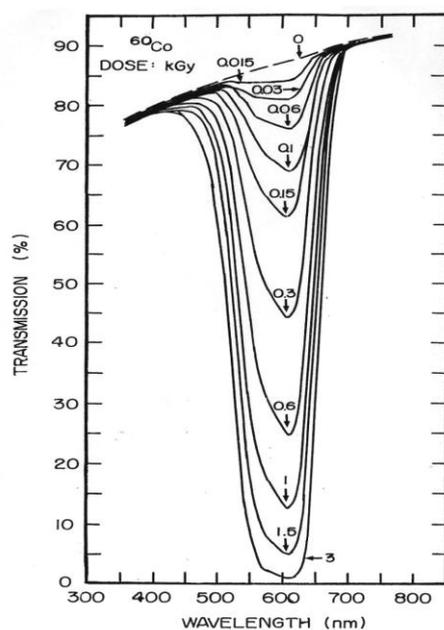


圖 4. 在不同的輻射劑量曝露下，RDF 劑量計對可見光的吸收反應。

### RDF 劑量計的計測系統

用於計測型號 FWT-60 RDF 劑量計與 FWT-70 系列的 RDF 劑量計的計測儀，如圖 5 所示，同樣均為美國遠西技術公司的產品，分別為：型號 FWT-92；型號 FWT-100；與型號 FWT-200 光密度計測儀，其結構簡圖，如圖 6 所示。



圖 5. 不同型號 RDF 劑量計的計測系統。

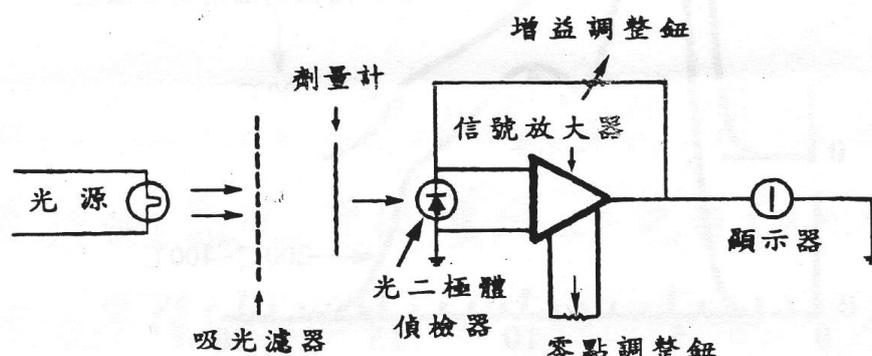


圖 6. FWT-RDF 劑量計光密度計測儀結構簡圖。

型號 FWT-92 光密度計測儀，為一非自動扣除劑量計背景值的計測儀，如圖 5 (a)所示；型號 FWT-100 與型號 FWT- 200 光密度計測儀，則為一可自動扣除劑量計背景值的計測儀，如圖 5(b)與(c)所示。型號 FWT-92 與型號 FWT-100 光密度計測儀，僅可用於計測型號 FWT-60 RDF 劑量計；型號 FWT-200 光密度計測儀，亦僅能用於計測 FWT-70 系列的 RDF 劑量計。

型號 FWT-92 與型號 FWT-100 光密度計測儀，均藉由內置的光波濾器介質，可提供 510 nm 與 600 nm 兩種不同計測光波長的光源，供型號 FWT-60 RDF 劑量計與光密度參考標準膠片計測選擇。藉由光偵檢器( photodiode detector )度量穿透型號 FWT-60 RDF 劑量計與光密度參考標準膠片的光密度(optical density; OD)值。

型號 FWT - 200 光密度計測儀，藉由內置的光波濾器介質，可提供 600 nm 與 656 nm 兩種不同計測光波長的光源，供 FWT - 70 系列 RDF 劑量計的計測選

擇。但在計測光密度參考標準膠片時，不但提供 600 nm 與 656 nm 計測光波長，且另提供一 750 nm 光波長供計測。此型號光密度計測儀，是藉由光二極體偵檢器度量穿透 RDF 劑量計的光密度值，以度量其所接受的輻射照射劑量。

型號 FWT-100 與型號 FWT - 200 光密度計測儀所量測光密度值的可靠度與穩定度，均可藉由遠西技術公司所提供經光密度標定驗證，編號 FWT-160 S/N 1181 的三片高(編號 1181C)、中(編號 1181B)、低(編號 1181A)光密度值的光密度參考標準膠片加以驗證，如圖 7 (a)所示。型號 FWT-92 光密度計測儀，其所量測的光密度值可靠度與穩定度，則藉由遠西技術公司所提供，經光密度標定驗證編號 FWT-82C S/N 139 的高(藍色標示)、中(綠色標示)、低(黃色標示)三片不同光密度值的光密度參考標準膠片，加以驗證，如圖 7 (b)所示。



(a)



(b)

圖 7. 不同型號 RDF 劑量計計測系統用，光密度參考標準膠片。

(a)型號 FWT-100 與型號 FWT-200 光密度計測儀用

(b)型號 FWT-92 光密度計測儀用

編號 FWT-160 S/N 1181 的三片高(編號 1181C)、中(編號 1181B)、低(編號 1181A)光密度值的光密度參考標準膠片，於型號 FWT-100 光密度計測儀所顯示的計測值，隨計測光波長的變化而改變並不顯著，如圖 8(a)所示。但在型號 FWT-200 光密度計測儀所顯示的計測值，隨計測光波長的增長而降低，且隨其光密度值增加變化越顯著，如圖 8(b)所示。

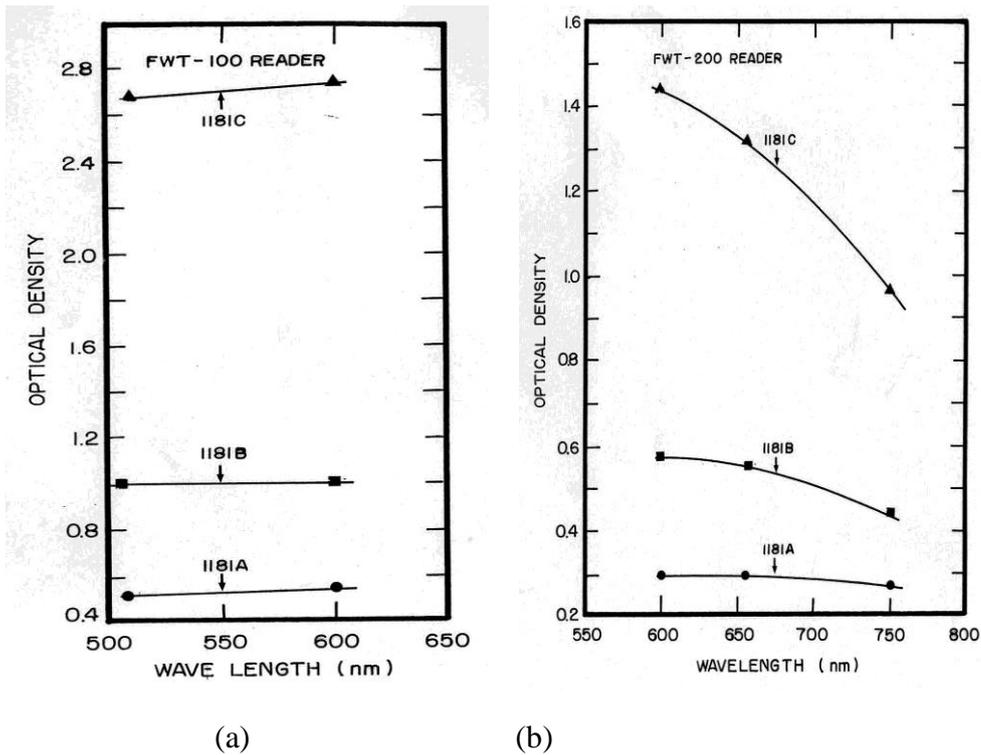


圖 8. 編號 FWT-160 S/N 1181 光密度參考標準膠片，於不同型號 RDF 劑量計計測值變化反應

編號 FWT-82C S/N 139 的高(藍色標示)、中(綠色標示)、低(黃色標示) 三片不同光密度值的光密度參考標準膠片，於型號 FWT-92 光密度計測儀所顯示的計測值，隨計測光波長的變化而改變並不顯著，如同編號 FWT-160 S/N 1181 光密度參考標準膠片，於型號 FWT-100 光密度計測儀所顯示的反應。

### RDF 劑量計對輻射劑量反應

RDF 劑量計對輻射劑量的度量與其線性反應範圍，視其所度量的輻射類別、能量、照射的劑量率與 RDF 劑量計本身的結構及所含三氨基苯乙晴有機染料的多寡，有顯著的依恃關係。

對鈷 60 加馬劑量反應而言，型號 FWT-60 RDF 劑量計對鈷 60 加馬劑量度量範圍，介於 0.5 ~ 300 kGy，其線性劑量最低反應限值為 1 千戈雷(1 kGy)，如圖 9 所示<sup>1)</sup>。對型號 FWT-70-40(M) RDF 劑量計而言，其對鈷 60 加馬劑量度量範圍，介於 0.01~1 kGy，線性劑量最低反應限值約為 20 Gy。對型號 FWT-70-83(M) RDF 劑量計而言，其對鈷 60 加馬劑量度量範圍，則介於 0.1~ 20 kGy，線性劑量最低反應限值約為 25 Gy。

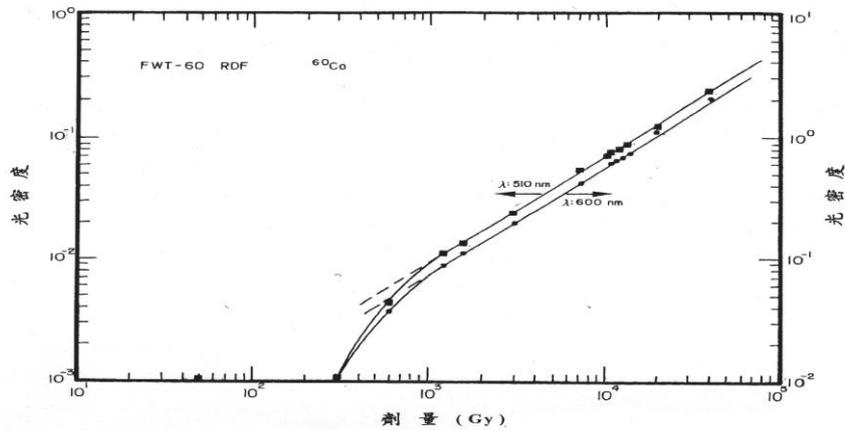


圖 9 型號 FWT- 60 RDF 劑量計對鈷 60 加馬劑量的線性反應。

對電子射束劑量反應而言，型號 FWT - 60RDF 劑量計對能量 3.2 MeV 電子射束反應而言，在高達 30 Gy 的劑量照射下，並未產生任何反應。對型號 FWT-70-40(M) RDF 劑量計而言，其對電子射束的線性低限劑量反應值約為 8 Gy，如圖 10 曲線 a 所示。對型號 FWT-70-83(M) RDF 劑量計而言，其線性低限劑量反應值則約為 20 Gy，如圖 10 曲線 b 所示。

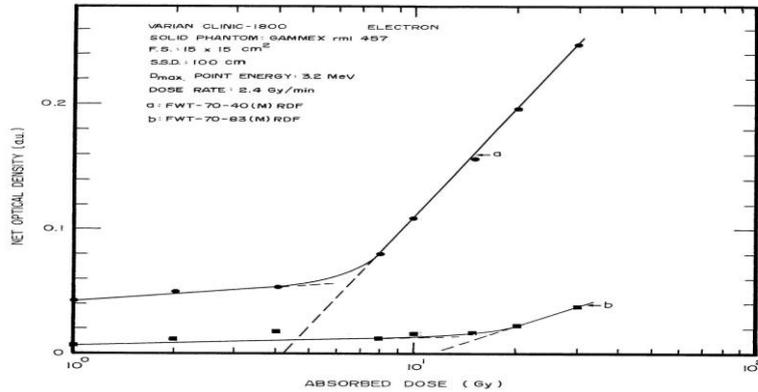


圖 10. FWT-70 系列的 RDF 劑量計，對能量 3.2 MeV 電子射束的劑量反應。

型號 FWT-70-40(M) RDF 劑量計對電子射束的敏感度反應為 0.0099 OD/Gy; 型號 FWT-70-83(M) RDF 劑量計對電子射束的敏感度反應為 0.0015 OD/Gy。顯示型號 FWT-70-40(M) RDF 劑量計對電子射束的敏感度反應，約 6.5 倍於型號 FWT-70-83(M) RDF 劑量計對電子射束的敏感度反應。

### RDF 劑量計對輻射能量的敏感度反應

RDF 劑量計對加馬射束敏感度反應是否會受到加馬射束能量變動影響，由於射源活度與劑量(率)因素的限制，目前並無相關實驗數據可加以驗證。但

RDF 劑量計對電子射束敏度反應確會受到電子射束能量變動影響，對 FWT-70 系列 RDF 劑量計而言，其對不同能量電子射束的敏度反應與電子射束能量，呈現不同程度的依恃性反應，且隨電子射束能量增高而增加，如圖 11 所示。對型號 FWT-70-40(M) RDF 劑量計而言，其對能量介於 3.2 ~ 12.6 MeV 電子射束的敏度反應變動達 30 %，如圖 11 曲線 a 所示。但對型號 FWT-70-83(M) RDF 劑量計而言，其變動僅約 3 %，如圖 11 曲線 b 所示。顯示，型號 FWT-70-40(M) RDF 劑量計對電子射束的敏度反應，受電子射束能量變動的影響程度，高於型號 FWT-70-83(M) RDF 劑量計對電子射束的敏度反應，受電子射束能量變動的影響程度。

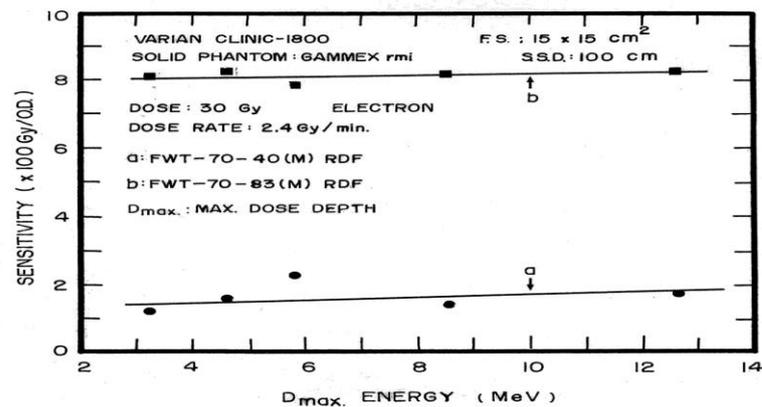


圖 11. FWT-70 系列的 RDF 劑量計，對不同能量的電子射束敏度反應。

### RDF 劑量計對照射劑量率的敏度反應

型號 FWT-60 RDF 劑量計對加馬敏度反應，受照射劑量率變動影響並不顯著，如圖 12 所示。

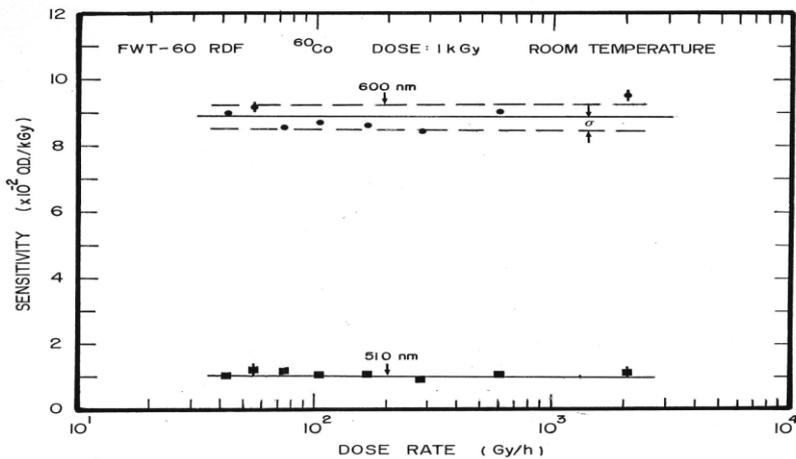


圖 12. FWT-60 RDF 劑量計，對不同劑量率照射的加馬敏度反應。

FWT - 70 系列 RDF 劑量計對不同照射劑量率的電子射束敏度反應，以能量 3.2 MeV 電子射束為例，其對電子射束的敏度反應與照射劑量率均呈現依恃性反應關係，且隨照射劑量率的增高而降低，如圖 13 所示。在每分鐘 0.8 Gy 至 4.0 Gy 劑量率照射下，型號 FWT-70-40(M) RDF 劑量計對不同劑量率照射的電子射束敏度反應變化相當顯著，敏度反應變動高達 200 %，如圖 13 曲線 a 所示。型號 FWT-70-83(M) RDF 劑量計對不同劑量率照射的電子射束敏度反應變化雖亦顯著，但敏度反應變動僅約 60 %，如圖 13 曲線 b 所示。

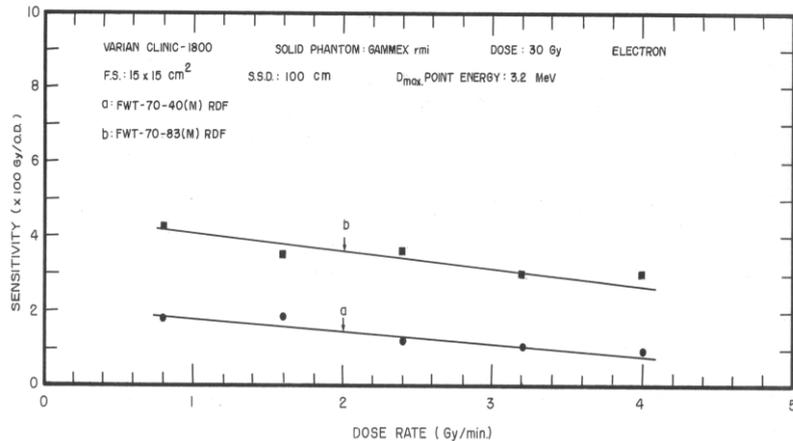


圖 13. FWT-70 系列的 RDF 劑量計，對不同劑量率照射的電子射束敏度反應。

## 結 論

型號 FWT - 60 RDF 劑量計對鈷 60 加馬的線性劑量反應最低限值為 1 千戈雷(1 kGy)，但其對高能量電子射束敏度反應甚低，即使在高達 30 Gy 劑量照射下，亦無產生有意義的反應。因此，型號 FWT - 60 RDF 劑量計僅適用於度量高劑量和高劑量率的高能量光子劑量度量，如鈷 60 輻射照射與用過核燃料劑量度量的劑量計，但並不適用於作為醫用遠隔放射治療電子射束劑量度量的劑量計。

型號 FWT - 70 - 40 (M) 與型號 FWT - 70 - 83(M)的 FWT-70 系列 RDF 劑量計，對高能量光子與電子射束均具有很好的敏度與線性劑量最低反應限值，顯示，FWT-70 系列 RDF 劑量計，除可應用於度量高劑量(率)的高能量光子劑量外，亦可應用於高能量、高劑量(率)電子射束輻射場的劑量度量。因此，FWT-70 系列 RDF 劑量計可供作為醫用遠隔放射治療機電子射束劑量輸出度量的劑量計，一如游離腔劑量儀與固體熱發光劑量計，用於遠隔放射治療機劑量輸出度量，以確保醫用遠隔放射治療電子射束劑量輸出的輻射醫療曝露品質。

## 參考文獻

- (1) Barrett JH, Glover KM, McLaughlin WL, Sharpe PH, Watts MF, Whittaker B:A high-dose intercomparison study involving red 4034 perspex and FET-60-00 radiochromic dye films. Radiat. Phys. Chem. 1990; 36: 505 -507.
- (2) Humpherys KC, Kantz AD:Radiachromic: a radiation monitoring system. Far West Technology Inc. Goleta, California;1993.
- (3) 許彬杰 翁寶山：游離輻射防護與偵檢。合記圖書出版社 台北市 2006: 233-

- (4) 張富東,許彬杰,蔡文祺,劉鴻鳴,王昭平,江祥輝:探討 FWT- 60 RDF 輻射色染劑量計對鈷 60 加馬輻射敏度反應. 工程月刊 2006; 79: 118 – 134.
- (5) 許彬杰,黃逢裕,陳炳茂,鄭秀成,曾鑠鑠,翁寶山: 探討 FWT-70 系列輻射色染劑量計對能量 3.2~12.6 MeV 電子射束的敏度反應. 放射治療與腫瘤學 2007; 14:(出版中)