



財團法人 中華民國輻射防護協會

輻射防護簡訊

第 160 期

出刊日期 109 年 12 月 15 日

本期內容

CONTENT

淺談中子與光子混合輻射場之輻射劑量評估技術

1

現今各種放射治療技術，如質子或重粒子治療、硼中子捕獲治療等，是利用其具有高線性能量轉移(LET)特性的輻射，以殺死腫瘤細胞。而這些治療技術除了主要治療射束外，亦會產生中子的二次輻射。中子輻射產生後通常會伴隨產生光子(加馬)輻射，對於中子與光子等多種輻射混合之劑量評估，評估過程通常較為繁瑣。本文針對國際間常使用於評估中子與光子混合輻射場之輻射劑量技術作一彙整介紹。

電廠除役之難測核種分析技術與比例因數評估方法介紹

9

核電廠除役之核種複雜且多樣性，要以全面取樣分析難測核種是不太可能的事。因此，國際上作法是由部分取樣將各核種測出後，計算難測核種相對於易測核種的比例關係(比例因數)，之後即可由比例因數計算得到難測核種活度。本篇針對除役與放射性廢棄物中難測核種的分析技術，及比例因數評估方法進行介紹。

訓練班課程

14

公告本會各項訓練班開課時間

輻協新聞廣場

15

各項證照考試資訊、國內產官學界最新消息、以及近日全球輻防新聞

天然氡浴(radon spa)療法—氡的另類應用

19

天然氡浴是一種利用大自然產生的氡氣以減輕慢性疼痛和疲勞的方法，因為氡是鐳變產物，也稱為鐳療法。氡浴在歐洲是傳統水療的一部分，有悠久的傳統，可追溯到希臘人和羅馬人時期。而溫泉(拉丁語中的 Thermae)被認為是神聖可以治療慢性疾病的方法。

鋼鐵輻射異常物相關回收與熔煉作業人員之輻射劑量評估方法介紹

23

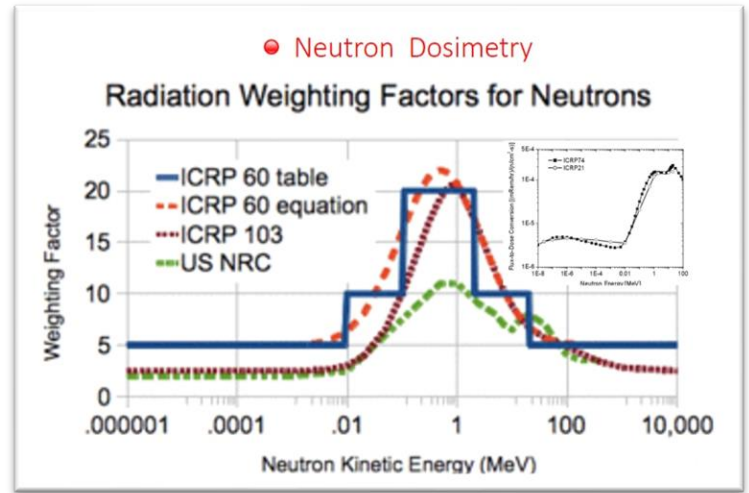
為防範放射性污染建築物事件的發生，原能會積極輔導國內的煉鋼廠建立輻射偵測與檢查制度，統計歷年發現輻射異常物之數量，總計約有 1100 件。本文對接觸輻射異常物之鋼鐵業者，或是資源回收業者、運送司機等人員之輻射劑量的評估介紹與探討。

淺談中子與光子混合輻射場 之輻射劑量評估技術

作者 許芳裕 博士

國立清華大學原子科學技術發展中心 核能技術師

國立清華大學生醫工程與環境科學系 兼任教授



前言

現今放射腫瘤治療技術正朝向多元化發展，除了傳統的直線加速器外，各種治療設備與技術如質子治療、硼中子捕獲治療乃至於重粒子治療等，在國內已達臨床或是人體試驗或驗證階段。這些新穎的治療技術是利用具有高線性能量轉移(LET)的高游離能力輻射如質子、阿伐粒子或重荷電粒子進行癌症治療，以殺死腫瘤細胞，降低對正常組織之傷害。而這些治療技術除了主要治療射束外，亦會產生中子二次輻射，對於這些新穎的治療方式與技術而言，中子輻射劑量的評估亦是極為重要的。

中子輻射產生後通常會伴隨產生光子(加馬)輻射，對於中子與光子等多種輻射混合之劑量評估，較一般傳統光子或電子輻射的評估更困難與複雜。測量中子與光子混合場之個別輻射的劑量貢獻，通常需分別使用至少兩種偵檢器，其一為僅對一種輻射靈敏(如僅對光子靈敏)而對另一輻射不靈敏(如對中子不靈敏)，再使用另一對二種輻射

均靈敏之偵檢器進行量測，最後再將二者之測量結果相運算(相減)處理後得到個別輻射的劑量貢獻，此評估過程通常較為繁瑣[1]。本文針對國際間常使用於評估中子與光子混合輻射場之輻射劑量技術作一彙整介紹。

中子與光子混合輻射場之人員劑量測量技術

常用於評估人員劑量之熱發光材料如 $\text{LiF} : \text{Mg} \cdot \text{Ti}$ 和 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Mn}$ ，可以通過改變天然 Li 或 B 的同位素濃度，濃縮成 ^6Li 或 ^{10}B ，此二元素具有較高之中子捕獲反應的截面(cross section)及反應： $^6\text{Li} (n, \alpha) ^3\text{H}$ 和 $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$ 。因此，使用 $^6\text{LiF} : \text{Mg} \cdot \text{Ti}$ 或 $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Mn}$ 熱發光劑量計(thermoluminescent dosimeter, TLD)可以用於熱中子和低能量中子的劑量測定[2-3]，具有相當好的能量響應來測量深部個人等效劑量 $\text{Hp}(10)$ ；但是，這些材料對快中子的響應及偵測效率非常低[4]，在快中子區域，更有效的能量傳遞機制是中子與氫發生彈性散射而產生回跳質子。此外，徑

跡蝕刻偵檢器(Etched Track Detectors)如 CR-39 亦可作為中子人員劑量計，用於評估快中子等劑量。

熱發光劑量計法(Thermoluminescent Dosimetry)

TLD 通常可非常有效的偵測光子輻射劑量，故在中子與光子混合場中若使用 $^6\text{LiF} : \text{Mg} \cdot \text{Ti}$ 和 $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Mn}$ 可同時檢測中子和光子輻射；而 ^7Li 或 ^{11}B 元素具有較低的捕獲截面，故 $^7\text{LiF} : \text{Mg} \cdot \text{Ti}$ 或 $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Mn}$ 僅對光子敏感。將兩種類型同位素的劑量 $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Mn}$ 和 $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Mn}$ 配對，每對 TLD 均對加馬輻射有相似的靈敏度，而具有 ^6Li 或 ^{10}B 的劑量計將可另外檢測中子。應用差異方法(difference method)可以分離中子與光子輻射的貢獻，並通過應用相應的校正因子來估算總個人等效劑量。

分離中子和光子劑量的另一方法，可依據某些熱發光材料(如 $\text{LiF} : \text{Mg} \cdot \text{Ti}$)中不同輝光曲線(glow peak)能峰對不同直線能量轉移(LET)輻射的靈敏度不

同。(Pradhan 等, 1985)。不同輝光曲線峰值下的強度或面積可以估算兩種輻射的相對貢獻。

TLD 通常用作中子劑量計的反照劑量計(albedo dosimeter)。反照技術的開發是為了克服 TLD 偵測快中子的困難。入射在人體上的中子會與人體組成元素的原子核作用而散射和緩速，由於這些作用，部分中子回跳離開了人體表面。相對於入射中子，回跳中子(反照中子)的能量較低，轉變為熱中子並可被 TLD 測量。反照劑量法主要測量的是自人體回跳的中子而不是入射中子，通常將 TLD 放置在熱中子吸收材料(如鎘片或硼)的後面，從而消除入射的熱中子，但 TLD 需靠近人體表面以測量回跳的中子[5-6]。

光刺激發光中子劑量計(optically stimulated luminescence neutron dosimeter, OSLN)

光刺激發光劑量計(OSLD)與 TLD 為國內主要使用的人員劑量佩章，美國 Landauer 公司生產之中子劑量計 OSLN 為目前國際間使用的主要光刺激發光中子劑量佩章，OSLN 佩章中有四個 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 晶片，其中第二個晶片材料除了使用 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 外，亦包覆

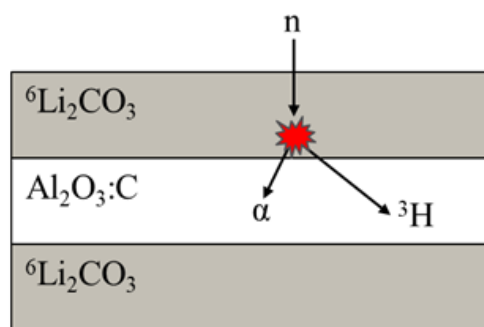


圖 1 ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ 與 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 結構示意圖

一層 ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ [7]。OSLN 的作用方式為使用 ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ 吸收熱中子進行核反應分裂出二次粒子和 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 作用(如圖 1)。一片 OSLN 佩章有 4 顆劑量計，其中有 3 顆是 Al_2O_3 ，對光子和電子敏感；另一顆是含 ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ 的 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ ，對光子、電子、中子均敏感。

徑跡蝕刻偵檢器

通過對由中子產生之二次帶電粒子形成的軌跡進行計數，用於中子檢測的材料如聚烯丙基二甘醇碳酸酯(Poly Allyl Diglycol Carbonate, PADC 或 CR-39)。CR-39 氫含量使快速中子散射產生的質子反跳產生，產生徑跡，徑跡數目正比於快中子劑量[8-9]。用包含 ${}^6\text{Li}$ 或 ${}^{10}\text{B}$ 的材質層覆蓋，亦可以量測熱中子。此外，CR-39 對光子不

敏感，因此可以在混合場中很好地區分中子劑量。實際上，CR-39 已與 TLD 一起用於反照劑量計中，以補充其各自的功能，TLD 用於測量中低能中子，CR-39 用於測量快中子[10]。

空間劑量測量技術

在光子、中子(包括熱中子與快中子等)混合輻射場的空間輻射劑量量測上，一般以 TLD 或游離腔等偵檢器直接測量光子劑量；熱中子劑量的評估則常使用金箔的中子活化分析或以 TLD-600(對熱中子及光子均靈敏)及 TLD-700(僅對光子均靈敏)包覆與不包覆鎘片的方法進行；而使用雙游離腔法則可分別度量出快中子與光子的劑量。圖 2 為以金箔包或不包鎘片(左)及雙游離腔(右)之圖片。

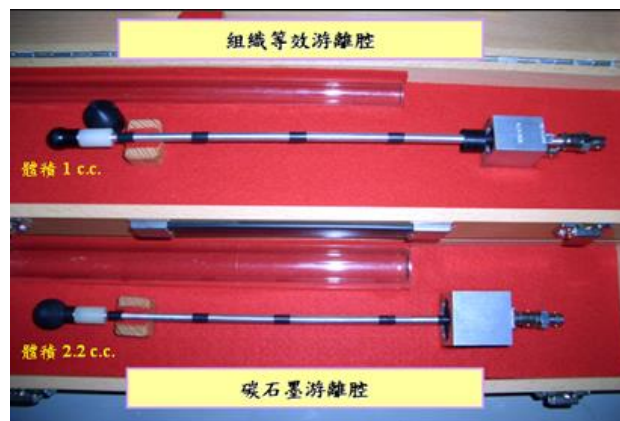


圖 2 以金箔包或不包鎘片(左)及雙游離腔(右)之圖片

熱中子劑量評估：金箔中子活化分析

金原子具備了熱中子活化的特性，受中子活化的金原子(¹⁹⁸Au)在衰變時會釋出 411 keV 能量的加馬射線(豐度為 95.5%)，使用高純鍺加馬能譜分析儀(High Purity Germanium Gamma-Ray Detector，簡稱 HPGe)計讀該處之峰值，可獲得光子量，再由 95.5% 的光子量反推，即可求得 ¹⁹⁸Au 之活度，根據中子活化金原子之條件可求得熱中子通量，進而評估熱中子劑量 [11-12]。金原子捕獲熱中子之反應式為 ¹⁹⁷Au(n, γ) ¹⁹⁸Au，¹⁹⁷Au 之原子量為 196.97 g/mole，與熱中子之反應截面為 98.80 邦(barn, b)，經中子活化後產生之 ¹⁹⁸Au 的半衰期為 2.69 天，衰變常數(λ)為 2.98 10⁻⁶ s⁻¹。金箔吸收熱中子後被活化成 ¹⁹⁸Au，衰變時會放出加馬射線，利用 HPGe 度量加馬射線之量，推算 ¹⁹⁸Au 的活度，可進一步推算熱中子之通量，再利用通量-劑量轉換因子即可求得熱中子劑量。藉由度量金箔被中子誘發活化後之加馬總計數，可計算出活化後金箔(¹⁹⁸Au)之飽和活度 A_{sat} (單位 Bq)，其計算公式如下[11]：

$$A_{sat} = \frac{\lambda C}{[\varepsilon \times (1 - e^{-\lambda t}) \times (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})]} \quad (1)$$

上式之λ = ¹⁹⁸Au 之衰變常數。

C = 金箔被中子誘發活化後之加馬總計數。

ε = 偵測效率。

t = 總照射時間(sec)。

t₁ = 開始偵測時間。

t₂ = 結束偵測時間。

中子之通量率可由上式求得的飽和活度推算，其計算公式如下：

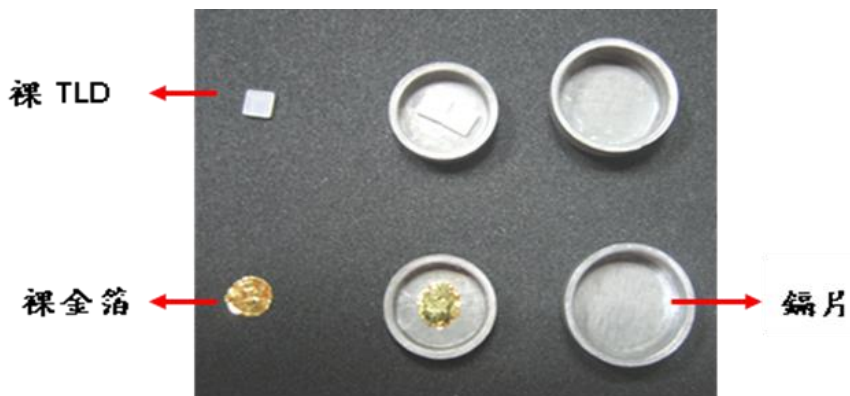


圖 3 包覆與不包覆鍍片之金箔

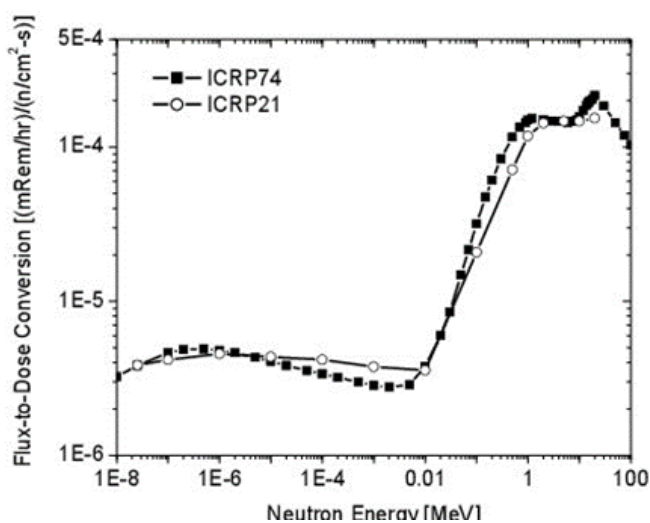


圖 4 ICRP 21 (1973)及 ICRP 74 (1996)之中子通量-劑量轉換因子[12]

$$\phi = \left[\frac{M}{A \nu \times \sigma} \right] \times \left(\frac{A_{sat}}{m} \right) = \left[\frac{M}{A \nu \times \sigma} \right] \times \left[\left(\frac{A_{sat}}{m} \right)_{bare} - F_{cd} \left(\frac{A_{sat}}{m} \right)_{cd} \right] \quad (2)$$

上式中 φ = 中子之通量率，單位為 cm⁻²s⁻¹。

M = ¹⁹⁷Au 之原子量 196.97 g/mole。

Aν = 亞弗加厥常數(6.02 × 10²³)。

m = ¹⁹⁷Au 之重量(單位為 mg)。

σ = ¹⁹⁷Au 與熱中子作用之作用截面

98.8 barn (即 9.88 × 10⁻²³ cm²)。

F_{cd} = 鍍的修正因子 (cadmium corrected factor)。

因鍍(¹¹³Cd)與熱中子作用的捕獲截面很大(21000 barn)，鍍之截止低限能(cadmium cutoff energy)約為 0.4 eV，故使用鍍片來吸收熱中子，則通過鍍片之中子為快中子與超熱中子。以裸之金箔照射求得的總劑量扣除掉包覆鍍片之金箔所求得的快中子與超熱中子劑量，即為熱中子之劑量 [11]。包覆與不包覆鍍片之金箔示於圖 3。

熱中子劑量(D)可由熱中子之通量率推算，其計算公式如下[11]：

$$D = K \times \phi \quad (3)$$

式中 K 為中子通量-劑量轉換因子 (neutron flux-to- dose equivalent conversion factor) · K 直可藉由 ICRP 等報告獲得[12-13](如圖 4)。

雙 TLD 方法(評估光子與中子劑量)

使用 TLD 600 ($^6\text{LiF} : \text{Mg}、\text{Ti}$)及 TLD 700 ($^7\text{LiF} : \text{Mg}、\text{Ti}$)二種劑量計晶片，搭配使用裸的 TLD 和包覆鎘的 TLD 所測得信號可計算評估的光子和中子劑量[14]。依據金箔活化法求得量測點之熱中子通量，再經由通量-劑量轉換因子換算成為熱中子劑量[11,13]。比較相同照射位置與照設條件下 TLD-600 之熱中子電量計讀值，可得到 TLD-600 之熱中子劑量響應(電量-劑量轉換因子)。

由於 TLD-700 中的 ^6Li 含量極少，受到照射後所產生的螢光反應可視為均來自於光子的劑量貢獻。在混合場中相同照射條件下，TLD-600 獲得的光子劑量與 TLD-700 大致相同，TLD-600 之總電量值扣除掉本身的光子電量值即為 TLD-600 的中子電量貢獻。此外，利用鎘片會吸收熱中子或將快中子及超熱中子減速的特性，包覆之 TLD 無法量到原來之熱中子(因其已被鎘所吸收掉)，但可度量到被緩速的部分快中子與超熱中子，而裸 TLD 則可度量到熱中子與部分快中子及超熱中子；使用包覆材料之 TLD 與裸 TLD 同時度量，可以分出熱中子與能量高於熱中子之快中子及超熱中子之 TLD 讀數貢獻，其關係如公式 12 至公式 18 [14]。

最後再以熱中子之電量乘上熱中子的電量劑量轉換因子，即可獲得欲知的熱中子劑量。

$$C_{6_{Li}} = C_6^{th} + C_6^{ath} + C_6^\gamma \quad (4)$$

$$C_{7_{Li}} = C_7^{th} + C_7^{ath} + C_7^\gamma \quad (5)$$

$$C_{6_{Li}} - C_{7_{Li}} = C_6^{th} - C_7^{th} + C_6^{ath} - C_7^{ath} (\because C_6^\gamma \cong C_7^\gamma) \quad (6)$$

$$C_{6_{Li,Cd}} = C_{6_{Cd}}^{ath} + C_{6_{Cd}}^\gamma \quad (7)$$

$$C_{7_{Li,Cd}} = C_{7_{Cd}}^{ath} + C_{7_{Cd}}^\gamma \quad (8)$$

$$C_{6_{Li,Cd}} - C_{7_{Li,Cd}} = C_{6_{Cd}}^{ath} - C_{7_{Cd}}^{ath} \quad (9)$$

$$C_6^{th} \cong (C_{6_{Li}} - C_{7_{Li}}) - (C_{6_{Cd}} - C_{7_{Cd}}) (\because C_6^{th} \gg C_7^{th}) \quad (10)$$

式中之 $C_{6_{Li}}$ ：混合場照射對裸 TLD-600 所造成的總電量； $C_{7_{Li}}$ ：混合場照射對裸 TLD-700 所造成的總電量； C_6^γ ： γ -ray 對裸 TLD-600 所造成的電量； C_7^γ ： γ -ray 對裸 TLD-700 所造成的電量； C_6^{ath} ：超熱中子及快中子對裸 TLD-600 所造成的電量； C_7^{ath} ：超熱中子及快中子對裸 TLD-700 所造成的電量； C_6^{th} ：熱中子對裸 TLD-600 所造成的電量； C_7^{th} ：熱中子對裸 TLD-700 所造成的電量； $C_{6_{Li,Cd}}$ ：覆鎘之 TLD-600 照射後所造成的總電量； $C_{7_{Li,Cd}}$ ：覆鎘之 TLD-700 照射後所造成的總電量； $C_{6_{Cd}}^\gamma$ ：覆鎘 TLD-600 受 γ -ray 照射所造成的電量； $C_{7_{Cd}}^\gamma$ ：覆鎘 TLD-700 受 γ -ray 照射所造成的電量； $C_{6_{Cd}}^{ath}$ ：包覆鎘 TLD-600 受超熱中子及快中子照射所造成的電量； $C_{7_{Cd}}^{ath}$ ：包覆鎘 TLD-700 受超熱中子及快中子照射所造成的電量。

雙游離腔(測量光子與快中子劑量)

雙游離腔(paired ion chamber 或 dual ion chamber)包含了兩支度量不同輻射之游離腔，其中一支對光子與快中子皆敏感，如組織等效游離腔(tissue equivalent ion chamber)；另一支則僅對光子敏感，如碳石墨游離腔

(carbon graphite ion chamber)。碳石墨游離腔外殼腔壁為石墨所構成，具有導電性，腔壁厚約為 0.30 cm，腔內需填充 CO_2 氣體。組織等效游離腔其腔壁與腔內填充之氣體皆為組織等效物質，外腔壁為組織等效之 A-150 塑膠製成，其成分為聚乙烯(polyethylene)、尼龍(nylon)、碳(carbon)及氟化鈣(calcium fluoride)，腔內填充組織等效氣體，成分為甲烷(methane, CH_4) 64.4%、二氧化碳(carbon dioxide, CO_2) 32.5%及氮氣(nitrogen, N_2) 3.1%。

當分別使用兩支游離腔進行量測後，可以由電量計上得到分別的總電量值，將碳石墨游離腔所量測到的總電量值稱作 Q_{CG} ，單位為 μC ；而組織等效游離腔量測到的則稱為 Q_{TE} ，單位為 μC 。在公式(11)中可以使用所測得之 Q_{CG} 與校正後求得之 A_{CG} 值之乘積而得到混合場中之光子劑量值(D_γ)， A_{CG} 為碳石墨游離腔之光子讀值-劑量轉換因子。另一個 Q_{TE} 值代表了光子在組織等效游離腔中造成的電量值($Q_{TE,\gamma}$)與快中子在組織等效游離腔中造成的電量值($Q_{TE,n}$)之總和，如公式(12)；因此公式(13)中， $Q_{TE,n}$ 等於 Q_{TE} 減掉 $Q_{TE,\gamma}$ ，而兩支游離腔皆是使用相同的照射條件進行量測，因此，接受到的光子劑量應相同，故可將 $Q_{TE,\gamma}$ 改寫成 D_γ/A_{TE} ，其中 A_{TE} 為組織等效游離腔之光子讀值-劑量轉換因子。組織等效游離腔之總電量 Q_{TE} 扣除掉純粹因 γ -ray 照射所得到之電量 $Q_{TE,\gamma}$ ，即可獲得 $Q_{TE,n}$ 。可引用 Rogus 在 1994 年文獻中之實驗值 $(B/A)_{TE}$ 約為 0.95 [11]，而求得 B_{TE} 為 27.17 Gy/ μC ， B_{TE} 為組織等效游離腔之光子讀值-劑量轉換因子，將其代入公式 14 中，與 $Q_{TE,n}$ 作乘積

即可求得快中子在混合場中之劑量 D_n [15]。

$$D_\gamma = Q_{CG} \times A_{CG} \quad (11)$$

$$Q_{TE} = Q_{TE,\gamma} + Q_{TE,n} \quad (12)$$

$$Q_{TE,n} = Q_{TE} - Q_{TE,\gamma} = Q_{TE} - \frac{D_\gamma}{A_{TE}} \quad (13)$$

$$D_n = Q_{TE,n} \times B_{TE} \quad (14)$$

組織等效比例計數器 (tissue equivalent proportional counter, TEPC)

在傳統的劑量學中，是以 LET 來表示輻射的質，而以吸收劑量來表示輻射的量。微劑量學主要在探討游離輻射在微小體積物質中之能量沉積數量、大小與沉積事件之空間分佈情形。由於高游離密度的粒子輻射(如質子、中子、重離子等)在微小細胞中靶分子內的微觀劑量乃呈現極大之分佈，其平均值即為巨觀的吸收劑量，若吸收劑量相同，其微觀之劑量亦有可能不同。因此要評估各種輻射殺死癌細胞的輻射品質與劑量，若以傳統劑量學的方法評估會造成極大的誤差，必須從微劑量學的觀點加以研究。微劑量學的特色在於採用機率量(機率量為一微觀物理量，其量測結果，可能每次

都不同，故常以其分佈表示)，以線性能量(lineal energy, y)及能量比度(specific energy, z)來表示輻射的質與量[16-17]，詳細探討靶分子內吸收能量的分佈。線性能量(y)定義為輻射在一微小體積中由單次事件所造成的能量沉積與穿過該小體積的平均弦長之比。對於任何一個凸面體而言，若其表面積為 A ，體積為 V ，則其平均弦長 = $4V/A$ 。能量比度(z)的定義為單次或多次輻射作用事件在小體積中單位質量的總能量沉積。

使用組織等效材料製成並充填組織等效氣體的組織等效比例計數器(tissue equivalent proportional counter, TEPC)，可用於度量人體細胞之微劑量學特性[16-17]，理論上，可利用由單位體積內的細胞分子個數(即其密度)，控制比例計數器內部之氣體密度，藉由降低氣體密度，增加比例計數器的體積，以模擬相同密度的細胞[17-18]。近年來，國際間有些劑量評估專家已開始使用 TEPC 來評估光子與中子混合場之個別輻射的劑量貢獻，並有愈來愈多的趨勢使用在如太空或飛航(宇宙射線)劑量評估及前述之高能粒子放射治療的劑量評估[19-20]。TEPC

是最常被用來度量如光子、中子、重離子等不同 LET 輻射之單一事件能量沉積參數如(y 、 z)分佈的微劑量偵檢器。對於高 LET 輻射而言，因其在短距離內會有大量的游離事件發生，因此對生物體的傷害程度較低 LET 輻射(如光子)不同。目前國際間多利用 TEPC 量測混合輻射場之微劑量能譜，經由生物加權因數轉換，可評估得到治療射束之有效相對生物效應值(effective RBE)，作為輻射品質評估依據。

因為 TEPC 可測得混合輻射場中不同 LET 輻射之微劑量(微觀能量沉積)能譜特性，使得 TEPC 具有可於一次同時測得不同 LET 輻射的能量沉積特性，藉由此特性之測量結果即可同時評估混合輻射場中不同 LET 輻射(如光子與中子)之劑量貢獻，因此以 TEPC 評估混合輻射場(特別是有光子與中子同時存在)之各別輻射劑量貢獻相較於傳統方法來的更加便利，而使得此法於國際間逐漸受到青睞與使用。

利用 TEPC 測得混合輻射場之線性能量 y 分布能譜後，可利用以下公式計算出吸收劑量 D 與等效劑量 H ：

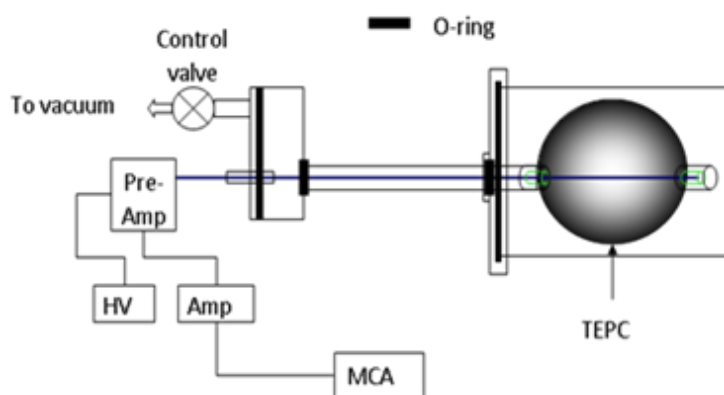


圖 5 組織等效比例計數器 TEPC 之(左)內部結構示意圖及(右)實體照片

表 1 組織等效固體之組成成分

組成成分 (重量百分比)						
	H	C	N	O	F	Ca
ICRU Tissue	10.1	11.1	2.6	76.2
A-150 Plastic	10.2	76.8	3.6	5.9	1.7	1.8

表 2 組織等效氣體之組成成分

組織等效氣體(丙烷 · Propane based)組成成分 (密度=1.82628×10 ⁻³ g/cm ³)						
組成元素成分 (重量百分比)				組成氣體成分 (壓力百分比)		
H	C	N	O	C ₃ H ₈	CO ₂	N ₂
10.3	56.9	3.5	29.3	55	39.6	5.4

$$D = \sum_i y_i f(y_i) \cdot c \quad (15)$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum_i y_i f(y_i) \cdot Q(y)}{\sum_i y_i f(y_i)} \quad (16)$$

$$H = D \cdot \bar{Q} \quad (17)$$

其中 f(y) 則為機率密度(probability density)·亦稱為線性能量分佈(lineal energy distribution)·C 則為每單位線能之劑量轉換因子(包括效率修正因子)·單位為 Gy per keV/ m·表 1 及表 2 分別為組織等效固體之組成成分及組織等效氣體之組成成分。

手持式中子輻射偵檢器-緩速式儀器 (Moderator based instruments)

手持式中子輻射偵檢器-緩速式儀器·一般也稱為侖目儀(rem-counter)(如圖)·是中子空間劑量測量最常用的儀器·它們由一個中央熱中子偵測器組成·由一個含氫材料(通常是聚乙烯)製成的球形或圓柱型減速層(moderator)材質包圍·偵測器通常是

BF₃或³He比例計數器·這類儀器測量中子能量響應並利用中子通量(flueunce)對周圍等效劑量 H*(10)·在一定的中子能量範圍內·儀器的讀數與 H*(10)成正比·

氣泡偵檢器(bubble detector)

氣泡檢測器與著名氣泡腔(bubble chambers)具有相同的物理原理·其

偵檢器中之超熱液體(superheated liquid)曝露於中子時·可由二次帶電粒子與其相互作用而引發沸騰而產生肉眼可見的氣泡·可被用作高能物理中的粒子偵測器·中子氣泡偵檢器由帶電粒子攜帶的能量可以轉移到液滴中而引起汽化·最終形成氣泡·為了有效汽化·必須傳遞足夠的能量·以使氣泡達到臨界尺寸·否則·氣泡將



圖 6 常見之手持式中子輻射偵檢器-侖目儀(rem-counter)

不再凝結，而會重新回到液態[21-22]。

一般而言，氣泡檢測器對光子完全不敏感。對於光子貢獻高但需要確定中子劑量的應用來說，這是一個很好的特性。原則上，形成的氣泡數量與中子注量成正比，並且具有合理恆定的能量依賴性和良好的各向同性。氣泡檢測器沒有背景，因此最小劑量是對應於一個氣泡的最小劑量，似乎約為 $0.5\mu\text{Sv}$ 。這是一個相當低的劑量。氣泡檢測器的弱點與溫度依賴性問題，操作特性的重現性和一致性差以及響應與存儲時間的依賴性有關。

氣泡檢測器有兩個系列，即所謂的氣泡損傷檢測器（Bubble Damage Detectors, BDD）和過熱液滴檢測器（Superheated Drop Detectors, SDD）。BDD 使用非常粘稠的介質，迫使氣泡保留在產生氣泡的位置，即使用肉眼也可以計數。BDD 可以通過加壓重置，劑量計為此配備了一個活塞蓋，再加壓過程可以重複有限次數的循環使用。SSD 使用粘性較低的凝

膠，可將氣泡移動到表面。氣體積聚在偵檢器的頂部，用指示劑量的光掃描來計算氣泡數量，氣泡數量與中子劑量成比例關係，因此可以作為主動劑量計之個人劑量計使用。圖 7 為一種帶重新加壓蓋的氣泡偵檢器[1]。

結語

對於中子輻射之劑量評估，較一般傳統光子或電子輻射的評估更困難與複雜，如何在中子與光子混合場中可以準確地評估混合場中各別輻射的劑量貢獻，在選擇量測方法上，能確實了解所選用偵檢器及技術之原理與適用性是極為重要的。本文所介紹大部分量測方法可測得並區分光子與熱中子或光子與快中子劑量；而組織等效比例計數器(TEPC)具有一次同時測得不同 LET 輻射的能量沉積特性，可同時評估混合輻射場中不同 LET 輻射(如光子與中子)之劑量貢獻，此方法相較於傳統方法便利，近年於國際間逐漸受到青睞與使用。本文針對國際間常用之中子與光子混合場劑量量測與評估方法，提供簡要之說明與介紹，但礙

於篇幅，仍有部分方法(如以波納 Bonner Spheres 多球體評估中子通量法及其他半導體偵檢器評估中子之技術等)未能述及，待日後有機會再介紹。

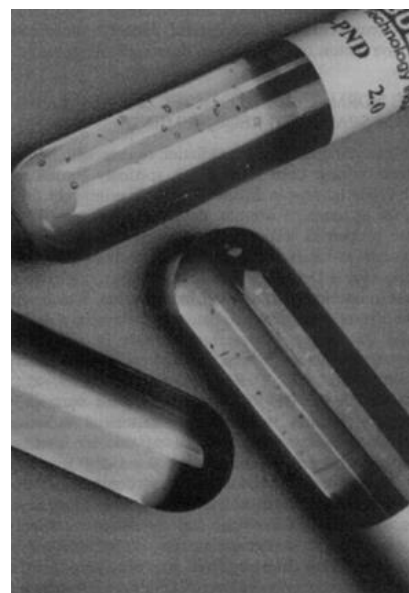


圖 7 作為中子劑量度量之氣泡偵檢器 (Bubble Detectors)[1]



參考文獻

- [1] Delgado, A. (2001). Mixed Field Dosimetry, Proceedings of the 10th international congress of The International Radiation Protection Association, IRPA-10.
- [2] Francesco d'Errico, Bos, A.J.J. (2004). Passive detectors for neutron personal dosimetry: State of the Art, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 110, Nos 1-4: 195-200.
- [3] Obryk, B., et al., (2009). Development of a method for passive measurement of radiation doses at ultra-high dose range, IEEE Trans. Nucl. Sci. 56, No. 6: 3759-3763.
- [4] Bartlett, D.T., Tanner, R.J. and Thomas, D.J. (1999). Active Neutron Personal Dosimeters-A Review of Current Status. Radiat. Prot. Dosim. 86: 107-122.
- [5] Alberts, W.G. (1999). Active Neutron Personal Dosimetry. Radiat. Prot. Dosim. 85: 27-30.



參考文獻

- [6] Obryk, B., et al. (2010). The response of TL lithium fluoride detectors to 24 GeV/c protons for doses ranging up to 1 MGy, *Radiat. Measurements* 45: 643-645.
- [7] Liamsuwan, T. et al. (2017). Investigation of the response characteristics of OSL albedo neutron dosimeters in a 241 Am-Be reference neutron field. *Journal of Physics Conference Series* 860(1): 012021.
- [8] Ahmad, S. and Stejny, J. (1997). Polymerisation, Structure and Track Recording Properties of CR-39. *Nucl. Traks Radiat. Meas.* 19: 11-16.
- [9] Sahoo, G. S. et al. (2014). Neutron dose estimation via LET spectrometry using CR-39 detector for the reaction ${}^9\text{Be}(\text{p}, \text{n})$. *J Med Phys.* 39(4): 225-230.
- [10] Piech, E. and Burgkhardt, B. (1988). Albedo Dosimetry System for Routine Personnel Monitoring. *Radiat. Prot. Dosim.* 23, 117-120.
- [11] Rogus, R.D. et al. (1994). Mixed field dosimetry of epithermal neutron beams for boron neutron capture therapy at the MITR-11 research reactor. *Med. Phys.* 21 (10): 1611-1625.
- [12] Weltz, A. et al. (2015). A Real-Time Personal Neutron Dosimeter using Microstructured Solid-State Neutron Detectors. *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 113:505-508.
- [13] ICRP. (1996). Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74.
- [14] Hsu, F.Y. et al. (2008). Estimation of photon and neutron dose distributions in the THOR BNCT treatment room using dual TLD method, *Radiation Measurements*, Vol. 43 (2-6):1089-1094.
- [15] Attix F.H. (1986). *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. John Wiley & Sons INC, 463-501.
- [16] European Commission, (1995). Design, construction and use of tissue equivalent proportional counters, *Radiat. Prot. Dosim.* 61(4).
- [17] Rossi, H., Zaider, M. (1996). *Microdosimetry and its applications*, Springer, NY, USA.
- [18] Hsu F. Y., Tung C. J. and Watt D. E. (2003). Microdosimetric spectra of the THOR epithermal neutron beam for boron neutron capture therapy, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 104, No. 2, pp.121-126.
- [19] Nam U.W., Park W.K. Lee J. et al., Calibration of TEPC for CubeSat Experiment to Measure Space Radiation. *J. Astron. Space Sci.* 32(2), 145-149, 2015.
- [20] Nam UW, Lim CH, Lee JJ, Pyo J, Moon BK, et al., Development and Characterization of Tissue Equivalent Proportional Counter for Radiation Monitoring in International Space Station, *J. Astron. Space Sci.* 30, 107-112, 2013.
- [21] DE rrico, F., Alberts,W.G., Curzio, G. Guldbakke, S., Kluge,H. and Matzke, M. (1995). Active Neutron Spectrometry with Superheated Drop (Bubble) Detectors. *Rad. Prot. Dosim.* 61, 159-162.
- [22] D Errico, F. (1995). Fundamental Properties of Superheated Drop (Bubble) Detectors. *Radiat. Prot. Dosim.* 84, 55-62.

電廠除役之難測核種分析技術與比例因數 評估方法介紹

作者 許芳裕 博士

國立清華大學原子科學技術發展中心 核能技術師

國立清華大學生醫工程與環境科學系 兼任教授

作者 趙尹行 博士



前言

國內核能一廠已開始進行除役工作，核能二廠的除役計畫送主管機關進行審查，也即將審查結束。除役工作之輻射偵檢與場址調查 (Radiation Survey and Site Investigation – RSSI) 過程的偵檢方式包括範圍、特性調查、改善行動輔助與最終狀態偵檢。其中範圍與特性調查輻射偵檢的目標包含確認場址污染物、決定污染物的相對比值，與建立污染物導出濃度指引基準(DCGL)值與條件。針對國內核電廠除役過程可能造成劑量影響之關鍵核種中，有些核種的測量方法容易，可直接且快速的測量(如以加馬能譜分析技術測得)，即所謂的易測核種；但也有些核種的測量，需進行取樣、溶解、分離純化等複雜處理程序後才能以儀器進行測定，因此稱這些核種為難測核種。

由於電廠除役之核種複雜且多樣性，要執行全面取樣分析難測核種是不太可能的事。因此，國際上的經驗會藉由部分取樣將各核種測出後，計算難測核種相對於易測核種的比例關係(比例因數)，之後只需藉由測得之易測核種之活度，即可由比例因數計算得到難測核種活度。難測核種活度之決定，必須運用這些核種與其它基本易測核種(如 Co-60、Cs-137 等)之相互比例關係之比例因數以推算其活度。然而比例因數會隨設施而異，因此如何合理、正確的評估與決定比例因數亦是除役過程中輻射偵檢與場址調查極為重要的工作。本文探討國際上目前針對除役與放射性廢棄物中難測核種的分析技術，及比例因數評估方法進行介紹。

國外難測核種分析技術

國際上放射性核種的分析技術，主要

應用於地球科學與環境科學上的研究，其中相關的核種包括天然放射性核種釷(^{232}Th)與鈾(^{235}U 與 ^{238}U)系列及其子核種，碳(^{14}C)與氯(^{36}Cl)等。另外，因過往核爆落塵，核電廠事故與核設施運轉期間所外釋之人工放射性核種，基於民眾之輻射安全應予以監測，亦可作為環境科學的研究。至於核電廠於運轉與除役期間所產生之放射性廢棄物，基於廢棄物分類的需求，亦發展出相關的核種分析技術。

發展於環境試樣之放射性核種分析技術多可應用於放射性廢棄物的核種分析，如固體廢棄物中混凝土試樣可比照環境中的土壤，含有機質成份的試樣則可比照環境中的生物試樣。但放射性廢棄物中亦有特殊的基質，如金屬，活性碳等，則須有不同之化學前處理方式。由於環境試樣分析應用的分析低限值極低，故其技術能輕易滿

表 1 國際上常見之難測核種及相關之化學分析方法與量測系統

難測核種	化學分離方法	量測系統/測量儀器
H-3	燃燒/氧化成 H ₂ O	液體閃爍計測儀
C-14	燃燒/氧化成 CO ₂	液體閃爍計測儀
Fe-55	沉降法	液體閃爍計測儀
Ni-59	離子交換層析/DMG 沉澱	低能量光子偵檢儀
Ni-63	離子交換層析/DMG 沉澱	液體閃爍計測儀
Sr-90	沉澱/溶液萃取/離子交換層析	液體閃爍計測儀 貝他計測儀
Nb-94	Nb 氧化物沉澱/離子交換層析	加馬能譜核種分析儀
Tc-99	離子交換層析/溶液萃取	耦合電漿質譜儀 液體閃爍計測儀 貝他計測儀
I-129	鹼熔/溶液萃取	中子活化/加馬能譜核種分析儀 低能量光子偵檢儀
超鈾核種(TRU)	沉澱/離子交換層析/溶液萃取	阿伐能譜儀/耦合電漿質譜儀

足放射性廢棄物的分析低限需求。國際上有關放射性核種分析技術的參考文獻繁多，包括應用於環境試樣與放射性廢棄物試樣的核種分析，且多屬於難測之放射性核種。近年來最具代表性的專書為「Chemistry and Analysis of Radionuclides」(by Jukka Lehto and Xiaolin Hou, 2011)[1]，其收錄彙整曾發展於期刊的論文與技術報告，幾乎涵蓋所有的難測放射性核種分析技術。

電廠除役期間所須檢測的關鍵難測核種及其與關鍵易測核種(加馬核種)所建立的比例因數，是用於推導 DCGL 以作為除役作業場址劃分與外釋的依據。這些難測核種多與廢棄物分類所

須分析的難測核種雷同，在分析技術上亦會相同。此外，若其核種來源屬性相同，運轉期間例行放射性廢棄物核種分析所建立的比例因數或可應用於除役期間所產生的物件與廢棄物。因此，電廠除役期間對於放射性廢棄物之難測放射性核種活度濃度分析，大多亦可參考目前運轉中電廠之放射性廢棄物難測核種分析技術，此技術乃因放射性廢棄物處置作業之廢棄物分類需求，此分類規範於「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」(原子能委員會放射性物料管理局)[2]，其乃依據美國核能管制委員會(NRC)所訂之 10CFR61 報告[3]以測定

廢棄物中指定的關鍵難測核種的活度做為放射性廢棄物分類的標準，常見之關鍵難測核種列於表 1。

針對除役與放射性廢棄物中難測核種的分析技術，國際上現存的化學分離方法與量測儀器之概況亦彙整於表 1 中。

依據美國多部會輻射偵檢與場址調查手冊(MARSSIM)文件，在輻射偵檢設計時，包括現場直接量測、掃描等之儀器與取樣後帶回實驗室進行樣品分析之偵檢儀器等選用策略，選擇可信賴的儀器有適當的量測靈敏度/最小可測濃度 (MDA 或 MDC)，一般選擇儀器介於 DCGL 值的 10~50 % [4]。

比例因數的使用

比例因數法(scaling-factor method)或稱為經驗比例因數法(empirical scaling-factor method)，是一種基於難測核種與易測核種之間的相關性，根據易測核種的放射性來評估難測核種的放射性之方法。為達此評估目的，了解核種的產生機制，核種的物理與化學行為並觀察放射化學分析數據非常重要。統計計算是一種補充技術，用於對放射化學數據分組中的縮放因子參數進行定量評估。

1. 比例因數的決定與放射性活度的估算流程

依據國際標準組織(ISO)與國際原子能總署(IAEA)提出之比例因數方法[5,6]，應用放射性廢棄物中難測核種與其對應的易測核種(如 Co-60)之間的比例關係，用以估算該難測核種的活度濃度。此方法的應用可依下列程序進行，比例因數的決定與放射性活度的估算流程如圖 1 所示，依其流程可分為四個步驟[6]，分述如下。

(1) 採樣計畫的擬定(Step 1)

首先要瞭解核能電廠特性與其產生放射性廢棄物類型，以供採樣進行核種分析，重要的核能電廠特性如下：

- (A) 反應器型式
- (B) 反應器組件材料
- (C) 燃料功能歷史
- (D) 放射性核種生成機制
- (E) 放射性廢棄物類型
- (F) 反應器冷卻水化學影響
- (G) 電廠運轉歷史

(2) 採樣與分析(Step 2)

依上述資料可選擇適當的放射性廢棄物類型與核種，以進行採樣與核種分

析。進行適當的採樣並建立分析結果數據庫非常重要，用於收集放射性數據的基本概念，是比例因數方法的基礎。確保採樣為代表性樣品的兩種常見方法是均勻採樣(homogenized sampling)與累積採樣(accumulated sampling)。

(A) 均勻採樣

均勻採樣適用於可以視為均質的廢棄物/廢料，為了確保樣品中包含的放射性均勻分佈，在採樣之前或在採樣過程中將廢棄物/廢料充分混合。即使對於從少量樣本獲得的比例因數，也可以確保令人滿意的準確性。

均勻採樣常用方法為將廢棄物/廢料均勻攪拌並從儲罐中取樣，或可通過按比例混合廢棄物/廢料來製備複合樣品。

(B) 累積採樣

此方法以合適的數量或方式收集廢棄物/廢料樣品，以代表大量廢棄物/廢料樣品的特徵，適用於均質廢棄物/廢料和異質廢棄物/廢料。

在累積採樣的情況下，對確定的廢棄物/廢料進行採樣時，重要的是要獲得具有大範圍活度濃度的放射性廢棄物/廢料樣品，以確保難測核種與該廢棄物/廢料中的易測核種之間的有效關聯。如果在分析結果中發現異常值，則應根據數據分佈和數據來源研究、確定原因，並更正或放棄該異常值。如果無法確定此類異常值的原因，則可以選擇應用統計方法來排除異常值。

(3) 適用性評估(Step 3)

(A) 依據核種分析的資料，以對數圖進行難測核種與某易測核種的相關性

分析，以尋找具顯著相依性者。若無顯著者，則分析資料再細分為不同程序的放射性廢料類別進行探討。

(B) 基本上，幾何平均數(geometric mean/log-mean)比算數平均(arithmetic mean)更具代表性，更適合作為比例因數平均值的計算。

(4) 比例因數的決定與放射性活度的估算(Step 4)

(A) 比例因數(SF)依幾何平均值(log-mean)決定，以回歸分析(regression analysis)成對的核種資料，以確立難測核種與易測核種間的比值，這些比例因數均依電廠特性與廢棄物類型而特性化。

(B) 易測核種的活度乃透過加馬能譜核種分析，或廢棄物表面劑量率的測量而決定。如此，難測核種活度即可依比例因數而被計算出。

2. 比例因數的評估

通過將比例因數乘以易測核種的放射性可以預測難測核種的放射性(如公式 1)。比例因數為分析值的幾何平均值。

$$a_d = f_{SF} \times a_k \quad (\text{公式1})$$

其中

a_d 是難測核種的活度濃度，以每單位質量的活度(Bq/kg)或每單位體積的活度(Bq/m³)為單位。

f_{SF} 是比例因數，請參見公式 2；

a_k 是易測核種的活度濃度，以每單位質量活度(Bq/kg)或每單位體積活度(Bq/m³)為單位。

難測核種放射性(活度濃度)與易測種放射性(活度濃度)比之幾何平均值可使

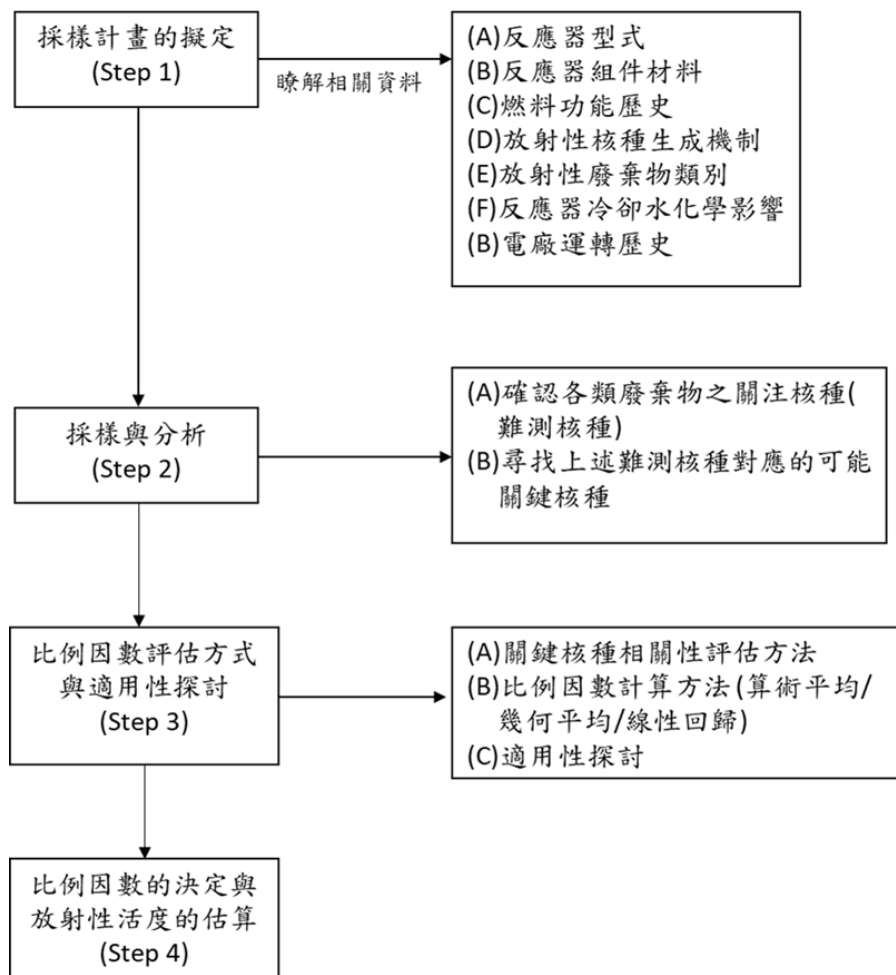


圖 1 比例因數的決定與放射性活度的估算流程[5]

用以下方式計算(公式 2)，其值即比例因數：

$$f_{SF} = \sqrt[n]{(a_{d,1}/a_{k,1} \times \dots \times a_{d,i}/a_{k,i} \times \dots \times a_{d,n}/a_{k,n})} \quad (\text{公式2})$$

其中

$a_{k,i}$ 是樣品 i ($i = 1 \dots n$) 中易測核種的活度濃度；

$a_{d,i}$ 是樣品 i ($i = 1 \dots n$) 中難測核種的活度濃度；

n 是樣本數。

3. 易測核種的選擇

根據以下因素選擇用於評估難測核種活度濃度的易測核種。發射加馬射線的核種應滿足基本特性，建議它們至

少滿足下列特性之一。

(1) 基本特性：

–如果存在於廢棄物/廢料包中，則可以通過非破壞性方法進行測量。

–活度水平高於最低檢測值 MDA。

–與所需的難測核種相關。

–具有相對較長的半化期（例如：幾年，而不是幾天）。

(2) 其他特性：

–具有類似於難測核種的核種產生機制。

–具有與難測核種相似的物理性質（尤其是溶解度）。

具體而言，通常將 ^{60}Co 用作反應器冷卻劑產生的腐蝕產物核種和活化產物核種的易測核種，將 ^{60}Co 或 ^{137}Cs 用作分裂產物核種和 α 發射核種的易測核種。

4. 比例因數準確性

比例因數的準確度受幾個因素的影響，包括代表性的採樣和實驗室分析。應採用以下兩種方法之一，以確保用於確定廢棄物/廢料包放射性濃度的比例因數的準確性。

–通過均質採樣確保準確性。

–採用累積採樣時，以下三種方法之一足以確保準確性。透過考慮不確定性或對多個樣本記錄應用平均方法來獲得對各個比例因數的可信度。

(A) 考慮影響比例因數不確定性的參數。

(B) 獲得適當數量的分析數據。

(C) 考慮適當的抽樣方式。

結語

電廠除役期間所須檢測的關鍵難測核種多與廢棄物分類所須分析的難測核種雷同，在分析技術上亦會相同。可參考目前運轉中電廠放射性廢棄物之難測核種分析技術，運用難測核種與其它基本易測核種(如 Co-60 、 Cs-137 等)之相互比例關係之比例因數以推算其活度。然而比例因數會隨設施而異，因此如何合理、正確的評估與決定比例因數亦是除役過程中輻射偵檢與場址調查極為重要的工作。本文介紹國際上目前針對放射性廢棄物中難測核種的分析技術、相關化學分離方法、量測儀器及比例因數評估方法，提供一般民眾對國內核電廠除役作業中難測核種分析技術之進一步認識。



參考文獻

- [1] Jukka Lehto and Xiaolin Hou (2011) Chemistry and Analysis of Radionuclide. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, Germany
- [2] 「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，2019年，原子能委員會放射性物料管理局。
- [3] 10CFR Part 61- Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste.
- [4] MARSSIM 2002. Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (Revision 1). NRC NUREG-1575 Rev. 1, EPA 402-R-97-016 Rev. 1, U.S. DOE EH-0624 Rev. 1.
- [5] International Organization for Standardization, ISO. (2007). Nuclear energy - Nuclear fuel technology - Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants. ISO 21238.
- [6] International Atomic Energy Agency, IAEA. (2009). Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants), IAEA NW-T-1.18.



訓練班課程(109 年度)

放射性物質或可發生游離
輻射設備操作人員研習班

A 組 36 小時-許可類

A01 高雄 文化大學推廣部

1 月 12 日 ~ 1 月 19 日

A02 新竹 帝國經貿大樓

1 月 26 日 ~ 2 月 2 日

B 組 18 小時-登記類

B22 高雄 文化大學推廣部

11 月 18 日 ~ 11 月 20 日

B23 台北 建國大樓

11 月 25 日 ~ 11 月 27 日

B 24 新竹 帝國經貿大樓

12 月 9 日 ~ 12 月 11 日

B25 台中 文化大學推廣部

12 月 23 日 ~ 12 月 25 日

110 年度

B01 台北 建國大樓

1 月 6 日 ~ 1 月 8 日

B02 高雄 文化大學推廣部

1 月 20 日 ~ 1 月 22 日

B03 新竹 帝國經貿大樓

2 月 3 日 ~ 2 月 5 日

輻射防護專業人員訓練班：
輻防員(108 小時) / 輻防師
(144 小時)

員 38 期 (因人數不足未開
課)

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

12 月 14 日 ~ 18 日

第二階段

12 月 21 日 ~ 25 日

第三階段 (110 年)

1 月 11 日 ~ 15 日

第四階段

1 月 18 日 ~ 1 月 21 日

進階 23

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

8 月 12 日 ~ 8 月 14 日

第二階段

8 月 17 日 ~ 8 月 19 日

輻射防護繼續教育訓練班
(3/6 小時)

台北 建國大樓

11 月 10 日 (上午&下午)

新竹 經濟部專研中心

11 月 17 日 (上午&下午)

高雄 科學工藝博物館南館

12 月 3 日 (上午&下午)

**鋼鐵建材輻射偵檢人員訓
練班**

鋼 3 新竹 帝國經貿大樓

9 月 23 ~ 9 月 24 日

上課地點

台北

建國大樓：台北市館前路
28 號

新竹

帝國經貿大樓：新竹市光復
路二段 295 號 20 樓
經濟部專研中心：新竹市光
復路二段 3 號

台中

文化大學推廣部：台中市西
屯區台灣大道三段 658 號

高雄

國立科學工藝博物館-南館：
高雄市三民區九如一路
797 號
文化大學推廣部高雄教育
中心：高雄市前金區中正
四路 215 號 3 樓

課程安排問題，請聯絡本會，電話 (03) 572-2224

分機 313 李貞君 (繼續教育)；

314 林珽汶 (專業人員)；

315 邱靜宜 (鋼鐵建材、放射物質與游離輻射設備)

傳真 (03) 572-2521315



輻防新聞廣場

最新證照考試日期與榜單

- ➔ 行政院原子能委員會公布 109 年第 2 次輻射防護專業測驗與輻射安全證書測驗及格人員名單。[訊息連結](#)

「109 年第 2 次輻射防護專業測驗與輻射安全證書測驗及格人員名單」已公布於本會網站，請點選下方(附檔下載)即可下載瀏覽。

附檔下載

- [109 年第 2 次輻射防護專業測驗及格人員名單](#)
 - [109 年第 2 次操作人員輻射安全證書測驗及格人員名單](#)
- (發布日期 109 年 11 月 23 日)

國內新聞

- ➔ 寰宇新聞網報導「研究核爆放射父母對二代影響日本分析 900 組目標對象」[訊息連結](#)

日美聯合調查原子彈爆炸受害者健康狀況的日本廣島市和長崎市的放射線影響研究所(以下簡稱放影研)正在著手展開，以約 900 組核爆受害者與核爆二代為研究參考對象開展基因組解析。這次研究目的是詳細分析父母遭受輻射後對子女健康所造成的影響。

共同社報導，在過去針對核爆二代的相關健康調查中，未發現癌症導致的死亡、先天性異常增加與生活習慣病的證據，經由基因組解析發現嚴重基因變異的可能性一般被認為較低。不過理事長丹羽太貫再次強調這次研究所代表的意義，他說，「如果讓社會正確認識風險，將有助於減輕苦於歧視和偏見的核爆受害者與核爆二代的心理負擔。」

這次的研究案或許也可以應用於弄清楚核電站事故、醫療與職業輻射對於下一代所可能產生之影響。另一方面，在基因組這種終極個人訊息的管理方面與未來若是發現患病風險，即使在稍有增大時，該如何告知本人和社會大重，這些問題點都還存在著。

放影研也公布了這次研究對相的分組內容，主要是父母與戰後出生子女所產生分組。除了雙親都受過核爆影響的 40 組、雙親其中一人受過核爆影響的 460 組之外，也設定了雙親或期中一人曾受過不足 10 毫戈瑞，相當於在廣島核爆中心 2.5 公里的無遮蔽場所受到影響的低輻射量的約 400 組參加。

放影研將對 1985 年以後提供的血液中採取基因訊息，在獲得同意的前提下，進行相關資料的解析。若發現變異體產生，就會進一步展開是否對整體健康有影響的研究，也將嘗試預測對未來幾代人之後是否尚有存在風險。

雖然本次研究目的在於讓社會大眾對於輻射方面有更正確的了解，也讓受過相關影響的族群們的心理負擔能夠因此得到減輕，不過若是未來受到核爆影響的

下一代確實有變異被發現，如何不引起新一波的歧視，相關單位必須負起相關社會責任妥善處理。。(發布日期 109 年 10 月 20 日)

➔ 聯合新聞網報導「孕期可照 X 光？放射師：醫師不會無故濫用」[訊息連結](#)

許多孕婦在準備懷孕或懷孕的期間，對診療時需照 X 光相當擔憂，深怕會傷害到孩子，對此衛生福利部桃園醫院醫事放射師魏嘉佑今天分別解釋 3 種婦女最憂心的階段，傳達醫療資訊，幫準媽媽們灌輸醫療知識。

第 1 種是準備懷孕時照 X 光，魏嘉佑表示，未避孕的婦女最好避免在排卵期之後接受 X 光檢查，萬一有疑慮非照不可放射師也會以鉛板或是鉛衣遮蔽腹部，他建議可使用「10 日法則」選在月經算起 10 日內照射 X 光，較無疑慮。

魏嘉佑指出，第 2 種為懷孕期間照 X 光，孕婦腹中胎兒細胞分化不完全，對輻射較敏感，尤其懷孕初期 3 個月內的胎兒，若接受輻射易產生畸型及生殖細胞骨髓的病變。

魏嘉佑解釋，身體各部位細胞對較小劑量輻射傷害具有修復能力，但不同的細胞具有不同的忍耐力，生長快速的組織對輻射較敏感，較易受輻射傷害的器官有生殖細胞、骨髓、肺、乳腺和眼睛(水晶體)等。

大多數診斷用的輻射暴露，其劑量對胎兒的影響都是在可忽略範圍，魏嘉佑說，但基於輻射防護的核心觀念，能不要接受的輻射檢查都應避免，並盡可能的調降暴露劑量或採取無輻射檢查替代。

第 3 種是哺乳期照 X 光，魏嘉佑表示，照 X 光後，X 光並不會停留在人體內，不會影響其他人，不像接受核醫藥物的診療，放射性物質會短期停留在體內而不會對旁人照射或藉由哺乳影響嬰兒。

魏嘉佑強調，正確認識 X 光後就不會如此緊張與驚慌，相信醫師一定是在有需要的情況下，才會使用 X 光檢查，不會無故濫用。(發布日期 109 年 11 月 11 日)

➔ 健康醫療網報導「癌症治療會產生輻射傷害？醫師解析放射線治療常見 3 迷思」。[訊息連結](#)

「醫師，我的朋友在接受癌症治療中，主治醫師要他去放射腫瘤科接受什麼什麼刀、請問會痛嗎？會流血嗎？會使病人有輻射嗎？」診間常聽見諸如此類的疑慮，顯示「放射治療」對大多數人仍存在許多誤解，其實目前的放射治療已經不像多年前那麼多副作用，現在放射線可提供照射範圍內不同劑量(腫瘤劑量較高、正常組織較少)；對於不規則形狀的腫瘤可以正確的打在病灶上，效果更好。

放射治療+影像導航 精準度高、治療效果佳

恩主公醫院放射腫瘤科鍾道生主任表示，常聽到的螺旋刀、電腦刀、真光刀大多數的「刀」不代表手術，它代表的是高精準劑量。而放射治療除了射束調控，位置也要精準，所以會加上影像導航(IGRT)，應用於臨床醫療上，即治療中取得即時影像，治療床校正病人移動位置，以提供病人高精確的放射治療。

因為精準度高，能縮小治療的誤差範圍，藉此降低周邊正常組織副作用；臨床長期追蹤證明使用影像導航放射治療在攝護腺癌上副作用差距在 20 到 30% 以上。

放射治療應用廣 乳癌、淋巴癌、腸癌都能增加存活率

而其他常見癌症也有輔助效果，例如乳癌，早期乳癌以往只有全乳癌切除一途，經過國際長達 25 年的追蹤證明，局部切除加上術後放射治療(乳房保留手術)與全乳房切除有著同等的治療效果及存活率；目前乳癌保留手術已是早期乳癌標準療法之一。

針對高風險病人(淋巴轉移)放射治療更可以降低復發率、延長生命(存活率)；還有像是對於局部晚期直腸癌，以往只有切除及人工造口選擇，美國放射腫瘤學會(ASTRO)在 2020 年更新的指引指出，對於二、三期的直腸癌，為了減低局部復發的風險，強烈建議使用手術前輔助治療(化療+放療)，以及延長手術等待的間歇期、以達到增加腫瘤縮小程度進而提高器官保留(保留肛門比率)、最終延長存活率。

第四期不等於末期 放射線輻射僅在治療出現

至於第四期是代表有遠端器官轉移，但有轉移不代表是末期，目前可透過立體定位放射治療(SABR/SBR)來處理。根據 2019 的臨床研究顯示，不只可以維持生活品質，甚至可以延長無惡化存活率從 28 個月延伸到 41 個月；另放射治療中會不會使病人有輻射，鍾道生主任說，其實放射治療就像 X 光機器開關一樣，只有在治療中放射線經過身體，治療後便沒有放射性的產生。(發布日期 109 年 11 月 25 日)

➡ 中央通訊社報導「日大飯核電廠 2 機組被判取消許可 311 以來首例」。[訊息連結](#)

日本大阪地方法院今天判決撤銷福井縣大飯核電廠 3 號機與 4 號機的設置許可，理由是兩部機組未考量大地震的耐震性。這是 2011 年 311 大地震導致福島核災後，首例判決撤銷核電許可。

日本放送協會(NHK)、讀賣新聞等媒體報導，福井縣與大阪府等關西地區約 130 名居民主張，關西電力公司經營的大飯核電廠 3 號機與 4 號機對大地震的耐震性不足，向法院提起訴訟，要求撤銷原子力規制委員會核准的兩部機組設置許可。

報導指出，福島核災後對核電廠採取較嚴格的新標準，這是針對核電廠新標準提起訴訟的第 4 例判決，卻是首例判決取消設置許可。

大飯核電廠兩部機組訴訟的主要爭點，是關西電力評估機組耐震性時，設定的「基準地震動」數值是否妥當。

大阪地方法院本案裁判長森鍵一表示，關電設定的「基準地震動」數值，是由過去發生的地震平均值，來設想將來發生的地震規模，但新的核電廠標準規定，應設想未來可能發生超過平均值的大地震。

他說，關電設定基準地震動時，應檢討是否要將數值提高，原子力規制委員會沒有審查這點，是違法的，因此判決取消兩部機組設置許可。

現在大飯核電廠的 3 號機與 4 號正在進行定期檢查而沒有運轉，關電原規劃 4 號機明年 1 月恢復運轉，3 號機則因管線發現受損，尚未決定重啟日期。

這次的判決並非假處分，若日本政府提起上訴，在判決確定前，將不會對機組運轉產生立即的影響。(發布日期 109 年 12 月 04 日)

聯合新聞網報導「核食會是萊豬
續集嗎」。 [訊息連結](#)

因為美國萊克多巴胺豬肉與日本核食進口，同屬政府與美日經貿談判的熱門議題，也關乎雙邊或多邊貿易協議未來發展。外界也認為，等萊豬告一段落，政府會處理日本核食進口。筆者認為，政府為了急於向美國老大哥輸誠，已演出一場全民共憤的爛戲，接下來若同套戲碼演出日本核食進口秀，將引起更大民怨。

目前我國對進口牛肉萊克多巴胺殘留最大容許量為零點零一 ppm，和國際食品法典委員會 (Codex) 的十 ppb 相當，其他多數國家也採此標準，將來我國若允許進口含萊劑豬肉，亦將採此標準。

相對而言，各國進口日本食品輻射管制標準有很大差異。以放射性銫為例，我國一般食品每公斤一百貝克、乳製品與嬰兒食品五十貝克、飲用水十貝克，日、韓也採這標準，歐盟則是一般食品六百貝克、乳製品與嬰兒食品五十貝克，美國不分食品一律一千二百貝克，Codex 則是一千貝克。這和萊克多巴胺各國一致採用 Codex 標準，有很大的不同。

食品輻射安全容許值的決定，是根據每人的輻射曝露年劑量限值，再考慮民眾每年的特定食品攝取量，以及各國從日本進口特定食品的量計算出來的。其中每人輻射年劑量限值，是根據國際原子能總署訂定每年一毫西弗，但是因各國從日本進口特定食品量和飲食習慣不同，才導致各國食品輻射安全標準產生差異。由此可知，食品輻射安全標準，有考慮國人飲食習慣，而萊劑最大容許量則直接採用 Codex 標準，並未考量國人的飲食習慣。

萊劑是否對人的健康有害，及多少劑量以下才安全？目前為止沒有定論，二〇一二年 Codex 的安全標準值十 ppb 是投票決定的，且正反票數只差一票。反觀，輻射年劑量限值每年一毫西弗，是科學家從二戰後追蹤核彈效應，及天然輻射的流行病學研究，累積超過七十年科學數據結果。加上福島事故後，近十年來日本、聯合國和我國食品輻射檢驗數據，及國際衛生組織輻射健康效應研究佐證。很顯然萊豬和核食的食安風險的科學證據，無法等量齊觀。

筆者認為，是否允許日本核食進口議題，應優先於進口萊劑美豬；可是因政府把進口美豬列為優先，且在缺乏配套措施情況下「先決定再溝通」，引起民怨，已影響日本核食討論空間。最近有一說，政府可能在明年美豬進口定案後啟動進口日本核食，且為了在福島事故十周年前向日釋出善意，進口時間會在明年三月，若屬實，勢必重演美豬爭議戲碼，對政府威信將再次傷害，也非國家和人民之福！

(發布日期 109 年 12 月 11 日)

天然氡浴(radon spa)療法

— 氡的另類應用

作者 陳清江

義守大學醫學影像暨放射科學系 兼任副教授

什麼是氡浴療法？

氡浴療法是一種使用自然產生的氡氣以減輕慢性疼痛和疲勞的醫學治療方法，有時也稱為鐳療法。氡是一種放射性氣體，因為氡是鐳的直接蛻變產物，在歐洲氡療法是具有數百年歷史的傳統水療法（讓病人洗澡、喝水）的一部分。溫泉療法在歐洲有悠久的傳統，其起源可追溯到希臘人和羅馬人，他們尋找溫泉來恢復健康和舒緩身心。溫泉（拉丁語中的 Thermae）被認為是神聖的，而接觸礦泉水被認為可以治療慢性疾病。

輻射「激效」理論

現代氡浴療法學理上的根據就是輻射「激效」（hormesis effect）理論。所謂輻射「激效」是指少量的輻射劑量反而對人體有益的效果。有點類似打疫苗，當我們直接被高量的活性致病菌感染時，可能會產生嚴重的病情；可是，如果先透過疫苗，將少量的去活性致病菌送入體內，反而能激發身體產生抗體，增強對於致病菌的免疫力。

1996 年日本中央電力研究所以白鼠做

實驗，發現若先對白鼠照射低劑量輻射，再對其照射足以致死的高劑量輻射，生存率提高 2 倍。同年 5 月 29 日，日本近藤宗平教授在台灣輻射防護界聯合舉辦「低劑量輻射效應研討會」中，發表其於中國廣東省陽江地區，生活於高背景輻射居民長達二十年的流行病學調查研究，發現該地區居民的染色體變異約高出 3 倍，但其罹癌機率卻較對照組地區為低。

低劑量輻射對人體有害？有益？或沒有影響？以目前對輻射激效的認知仍未有定論，輻射激效值得作嚴謹的科學探索，低劑量輻射效應流行病學研究很難以統計學方法來確認。有些研究顯示在低劑量輻射曝露後使癌症發生率降低，多數的輻射激效研究顯示證據薄弱或無證據。低劑量輻射可能刺激修復或非酵素自由基清除（調適反應），調適反應可能支持低限值的觀念。

在眾多輻射激效的研究中，有一項歷史悠久、受曝人數最多也最貼近大眾生活的案例就是氡浴療法（radon spa therapy）。氡療法可能是人類最古老的療法之一。在歐洲，使用氡含量高的溫



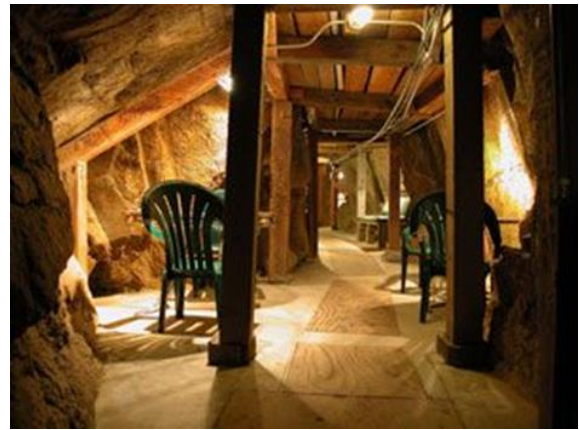
泉可以追溯到大約 6000 年前。人們享受了許多放射性溫泉，例如在日本的美爽爽（Misasa）和玉川（Tamagawa）溫泉。如今，歐洲有 75,000 多位尋求天然關節炎治癒的患者僅為了吸入氡氣的目的，就前往現代化的氡療法診所和地下藝廊。奧地利、德國、捷克共和國、波蘭、匈牙利、亞美尼亞和俄羅斯等歐洲國家/地區設有醫學監督的診所（脾療法 speleotherapy-利用天然鹽礦坑的傳統治療方法）。這種療法的大部分是有醫學規範的，並通過醫療保險計劃予以報銷。這些國家/地區的臨床，雙盲和隨機對照研究報告的結果證實了疼痛和症狀緩解的主張。

在日本，中央電力工業研究院（CRIEPI）與國立癌症研究所和國立放射科學研究所（NIRS）合作，在許多大學中發起了“興奮劑”研究的組織。研究人員針對低劑量輻射對哺乳類動物的影響進行了實驗活動，並發現了全面的生化反應和隨後的顯著生物學反應的證據。低劑量放射療法的有益用途如下：

- 通過增強免疫系統和抑癌基因進行癌症治療。



氡浴治療的地上氡室 “radon room”



氡浴治療的地下藝廊 “radon gallery”

- 無線電波適應反應增強了基因酶的合成，從而防止了 DNA 損傷，修復了 DNA – 細胞凋亡的效率。
- 使細胞恢復活力，例如減少脂質過氧化物和增加細胞膜通透性，以及普遍增強 DNA 修復。
- 通過增加保護酶，如超氧化物歧化酶 (SOD) 和穀胱甘肽 (Gpx)，增強細胞的損傷控制系統，以防止自由基的氧化攻擊。
- 通過增加關鍵酶和荷爾蒙對神經傳遞和思維繫統的影響。

為了治療疾病，低劑量輻射的治療應用始於優化人體的天然荷爾蒙（內啡肽，腦啡肽，腎上腺素，胰島素，組織胺控制疼痛和緩解壓力。SOD 和 Gpx 的反應明顯保護細胞並抑制自由基的氧化攻擊。細胞膜通透性增加，使關鍵荷爾蒙穿過細胞壁。DNA 修復和細胞恢復在研究結果中也很明顯，一個關鍵的腫瘤抑制基因-P53-被激活，輔助 T 細胞通過抑制細胞的減少而增強。

總之，可以期望停止或抑制疾病進程的進展，然後恢復健康。通過進一步的綜合研究，將來會發現用於預防疾病措施，健康維持，手術後康復和受傷癒合的最佳個體劑量率，以及各種疾病過程。

以下是美國蒙大拿州博爾德 (Boulder) 自由企業氡保健礦山 (Free Enterprise Radon Health Mine) 氡氣療法介紹。

<https://www.radonmine.com/>

為什麼要進行氡治療？

人體全天曝露於各種壓力源，人體的免疫系統利用適應性細胞反應來調節和保護自身。曝露於低劑量輻射下是輕度的刺激源，可刺激細胞防禦機制發揮功能，例如 DNA 修復和抑制炎症反應。

輻射劑量為何如此重要？

每個人每天都曝露在背景輻射下，對人體輻射的研究遵循一種荷爾蒙模型。這意味著存在一系列低劑量輻射，可觸發細胞中重要的防禦機制，這是低劑量輻射的好處。氡刺激身體抑制炎症，這對於抵抗所有自身免疫性疾病和增強天然癌症屏障至關重要。

在自由企業氡保健礦山 (Free Enterprise Radon Health Mine)，人體對氡作出反應，氡是地質層中鈾自然蛻變鏈產生的一種氣體。對於許多因疾病或傷害而遭受慢性疼痛的人，氡浴刺激治療被發現可以帶來有益的長期效果。此外，這種方式對（但不限於）表一情況和症狀有效：

收費標準是每次一小時 8 美元，包套治療為 275 美元/療程。

注意事項

該礦山設施是一種療養勝地，可供尋求替代或補充治療關節炎疼痛緩解和其他疾病症狀治療的人使用。儘管這不是一項州法律，但建議 18 歲以下的兒童在探訪 (visiting) 之前獲得有執照醫生的書面處方，懷孕的婦女可能需要諮詢醫生。我們認為懷孕期間進行探訪是絕對安全的，但是如果有疑慮，請不要在懷孕初期進行探訪。在此設施中，逗留 10 天的 32 小時曝露劑量大約等於 6 mSv。

這個數字大約是全球平均每年接受天然背景輻射劑量的 2~3 倍。從更進一步的角度來看，有些在高背景輻射區生存和繁衍的年曝露劑量超過 260 mSv。快樂寡婦 (merry widow) 礦坑有一個傳說，有一隻患有關節炎的狗跟隨主人一跛一跛的走進礦坑，出來的時候怯是走路正常，這一消息傳開後，該礦坑聲名大噪，許多患有關節炎遊客慕名而來體驗。

歐洲的自然療法和疼痛緩解可參考下列網站

<https://www.spadreams.com/healing-holidays/healingtherapies/radon-treatment/>

表一 氡浴改善慢性症狀

<ul style="list-style-type: none"> • 強直性脊椎炎 (AS) • I 型和 II 型糖尿病 • 偏頭痛 • 關節炎 (OA · RA · JRA 等) • 濕疹 • 移動性 • 哮喘 • 肺氣腫 • 多發性硬化症 (MS) • 纖維肌痛 • 脊髓灰質炎後綜合症 (PPS) • 支氣管炎 • 痛風 	<ul style="list-style-type: none"> • 前列腺 (BPH) • 滑囊炎 • 花粉過敏 • 銀屑病 • 癌症 (乳腺癌) • 高血壓 • 硬皮病 • 腕管症候群 • 鼻竇炎 • 慢性疼痛 • 狼瘡 (SLE) • 潰瘍性結腸炎 • 血液循環
---	---

探索氡氣治療的世界

在此頁面上，您將找到有關氡治療的所有重要信息：氡治療的定義，起源，經典治療領域、如何以及在何處享受氡治療的健康假期。

網站中的快速訪問手冊內容包括：

[什麼是氡療法？](#)

[您可以在哪裡體驗天然氡療法？](#)

[為什麼氡治療有效？](#)

[氡療法涉及什麼？](#)

您可以在哪裡體驗天然氡療法？

在歐洲，事實上我們不斷地被微量無害地曝露在氡中。例如在鈾礦，磷酸鹽岩，花崗岩和石灰石中，它們會堆積在洞穴或水中，氡的含量較高。由於離源頭越遠，它就會迅速消失，氡的活度會隨季節和大氣條件而有很大變化。某些泉水和溫泉中也會發現高濃度的氡，礦泉水的氡濃度必須為 74 kBq / m³ 以上才能歸類為氡礦泉水。

在歐洲，有幾家著名的氡氣治療旅館：

• 雅克莫夫 (Jáchymov) - 捷克共和國：坐落在山間山谷中，這裡曾經是一座銀礦和一個含氡的溫泉。

• Bad Gastein-奧地利：該鎮位於高陶恩山 (Tauern) 區，以其美女時代風格 (Belle Epoquestyle) 的酒店而聞名，因氡氣治療藝廊以及其美麗的瀑布而聞名。(“Bad”是指“洗澡”)

• 魏森施塔特 (Weißenstadter) - 德國：這家巴伐利亞小鎮位於美麗的魏森施塔特湖 (Weißenstadter) 湖邊，距 Fichtel 山脈不遠，是氡氣來源和許多出色的水療法所在地。

• Świeradów-Zdrój-波蘭：這個溫泉小鎮坐落在綠色的 Jizera 山脈之中，也是高品質氡療法的故鄉。

• 巴特克羅伊茨納赫 (Bad Kreuznach) - 德國：在萊茵蘭-普法爾茨州起伏的丘陵之中，這座溫泉小鎮擁有美麗的自然風光和專門的藝廊。

下面是一些氡氣治療旅館照片和網址。

氡浴療法常與其他療法同時進行，



氡浴治療的地下藝廊 “radon gallery”

例如浴療法 (Balneotherapy)，溫泉、泡浴、乾浴、氡浴等，宣稱適用於皮膚疾病、退化性關節疾病、發炎等。

洞穴療法及鹽療法 (speleotherapy, halotherapy) 氣候治療、負離子等宣稱適用於呼吸道疾病、過敏、氣喘、神經系統、免疫系統等疾病。食療 (herbal, drink therapy) 草藥、花茶、礦泉水 (聖泉)。

宣稱適用於腸胃道疾病、神經系統、免疫系統等急性感染、心理疾病、懷孕及兒童、腫瘤、癲癇，若有開放性結核病、器官嚴重急性症狀、傷口感染、血液疾病及飲酒皆不宜進行氡療法。

氡致癌的疑慮

WHO 和國際癌症研究機構，都宣布氡是天然致癌物質，美國國家癌症研究所和環境保護局將氡視為環境中僅次於吸

菸的致肺癌物質。因此，在宣傳氡浴治療的健康益處與廣泛宣傳的住家中氡的危害之間存在明顯的矛盾。因此有些氡浴治療的場所不再大肆宣導氡浴治療的好處，只強調溫泉對人體的好處。

Bad Gastein 的解說資料顯示，氡浴治療藝廊中的氡水平為 44 kBq/m^3 。如果您進入藝廊的山中一個療程 10-12 次，每次 1 小時，劑量為 1.8-2.2mSv，比照 1 張 CTX 射線獲得劑量還少。



百樂酒店健康與水療中心★★★★

波蘭 Jizera 山 Bad Flinsberg / Swieradow Zdroj



德國 Siebenquell GesundZeitResort ★★★★★S



鐘宮 捷克共和國西波希米亞 Jachymov (聖約阿希姆山谷)



巴特克羅伊茨納赫 (Bad Kreuznach) -德國

鋼鐵輻射異常物相關回收與熔煉作業人員之輻射劑 量評估方法介紹

作者 賴柏倫

財團法人中華民國輻射防護協會 助理研究員



本圖引用自行政院原子能委員會輻射防護簡報資料

前言

自從發生放射性污染建築物事件之後，行政院原子能委員會(以下簡稱原能會)根據「放射性污染建築物事件防範及處理辦法」規範的第二章第3條「國內設有熔煉爐以生產鋼筋、鋼骨之鋼鐵業者，應實施其原料及產品之輻射偵檢...」[1]，積極輔導國內的煉鋼廠建立輻射偵測與檢查制度，以避免含有放射性元素的儀器或受污染的廢鐵進入熔煉爐。圖1顯示東和鋼鐵苗栗廠所使用的直流電弧爐。



圖1. 東和苗栗廠使用的直流電弧爐

(資料來源：<https://www.tunghosteel.com/>)

若鋼鐵廠設置的門框式輻射偵檢系統偵測到輻射異常物，依據原能會於2008年6月發布的「鋼鐵業者發現輻射異常物之通報及處理作業導則」[2]，鋼鐵業者應採行下述措施，首先，先將輻射異常物隔離，於四周設置臨時圍籬及輻射警示標誌，防止無關人員接近，並於四十八小時內以電話通報原能會，同時，填寫異常輻射狀況報告表及檢附該輻射異常物照片，以電子郵件方式傳送至原能會。一般來說，輻射異常物的後續處理依其來源而異。舉例來說，若其

來源為進口，則不管發現之輻射異常物所含的放射性元素是天然的(如釷系)或人工的(如鈷60)，通常會直接退運回國外給原售出廢鐵之廠商處理。若原廠拒絕接收，則由鋼鐵廠向主管機關報備後，送至核能研究所(以下簡稱核研所)處理。若來源為國內，則由鋼鐵廠向主管機關報備後，將其送至核研所處理。

在原能會積極輔導國內的煉鋼廠建立輻射偵測與檢查制度之下，依據通報資料統計歷年發現輻射異常物之數量[3]，自1995年統計至2018年，來自國內之輻射異常物約500件，來自國外之輻射異常物約有600件，總計約有1100件，平均每年發現約50件，而近10年之平均約為57件，最多為2007年的116件，最少為1996年的5件。其中，輻射異常物之放射性元素屬於天然核種的件數約有八百餘件，主要是鋼鐵管路內沉積的污垢，輻射異常物之放射性元素屬於人工核種的件數約有兩百餘件，主要是廢棄射源。此對於接觸輻射異常物之工作人員，或是經手鋼鐵異常物之資源回收業者、運送司機等相關人員，其輻射劑量需進一步評估與探討。

輻射異常物之體外輻射劑量評估方法與曝露情節

體外輻射劑量的評估方法有很多種，常見的方法有點核仁法(Point Kernel method)與蒙地卡羅法(Monte Carlo method)，前者如 RESRAD 系列程式的 RECYCLE[4,5,6]與 MicroShield[7,8]，後者如 MCNP[9]等。其中，MicroShield 與 MCNP 是一般化的輻射劑量評估程式，而 RESRAD-RECYCLE 則是特化的輻射劑量評估程式，評估標的主要是受污染物或設備再利用的潛在輻射劑量和風險。

以下簡述 RESRAD-RECYCLE 評估流程：

首先，RESRAD-RECYCLE 將污染物或設備的再利用分為四類，如圖 2 所示：

(1) 直接再利用(Direct reuse)：污染物或設備以原始形式再利用，不經熔煉過程。可直接再利用的材料和設備包括機械和測量工具、辦公家具以及除役建物。

(2) 非限制性再利用(Unrestricted

reuse)：污染物或設備回收後，運送到商業冶煉廠，用於生產諸如汽車、煎鍋和飲料罐等產品。

(3) 限制性再利用(Restricted reuse)：污染物或設備回收後，運送到許可的冶煉廠生產特定的產品，以最大程度地減少公眾曝露，例如，爐渣用於道路。此類別通常是數量龐大且半衰期短的污染物，當其活度低於外釋標準時，即可作為公共產品的再利用。

(4) 管制再利用(Controlled reuse)：此類別通常是半衰期較長的污染物，回收後為避免公眾曝露，因此，歸類為管制再利用，具代表性的再利用情節為製成屏蔽塊(Shielding block)或放射性廢棄物貯存容器，以供核設施使用。

接著，為了進行輻射劑量評估，RESRAD-RECYCLE 將曝露情節分為三大類：

(1) 工作人員情境：評估處理回收材料的人員劑量和風險

a. 步驟 1，廢料運送：將放射性廢金屬從產地運送到冶煉廠

b. 步驟 2，廢料冶煉：工業產品金屬錠的冶煉和製造

c. 步驟 3，鑄錠運送：將金屬錠運送到產品製造廠

d. 步驟 4，產品製造：產品製造

e. 步驟 5，產品分銷：產品分發

(2) 產品用途情境：評估使用或以其他方式接觸回收的放射性物質所製造產品的人員劑量和風險

a. 消費產品

b. 公共產品(人行道、橋樑和建築物)

c. 受控產品(屏蔽塊和放射性廢棄物容器)

d. 受表面污染的重複使用產品(工具和受污染的建築物)

(3) 運送情境：評估運送放射性廢金屬對一般民眾的劑量和風險

由於每一大類又細分不同的曝露情節，RESRAD-RECYCLE 依據曝露情節的描述與研究報告給出計算所需之參數，

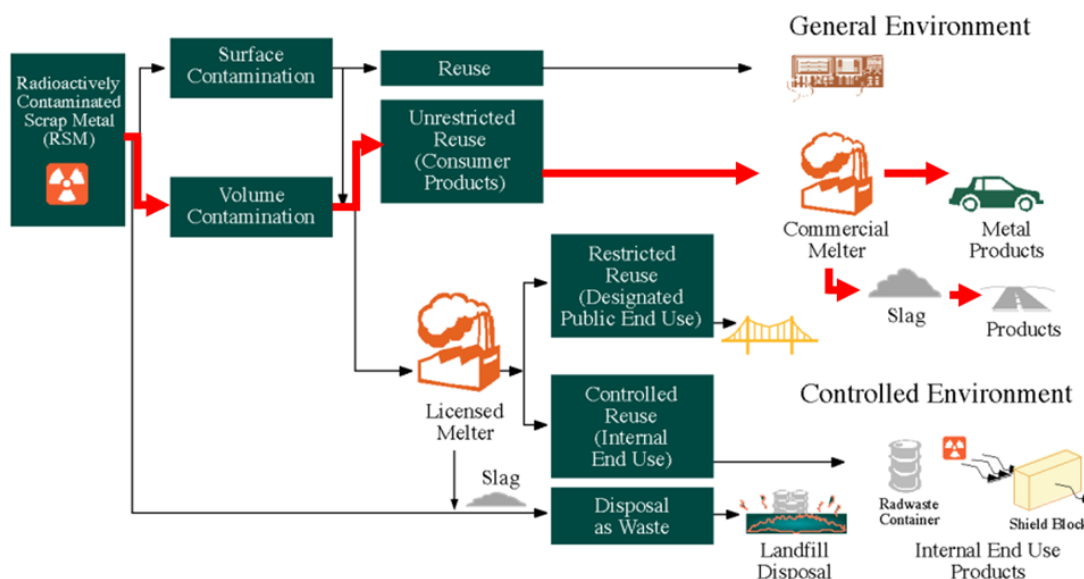


圖 2. RESRAD-RECYCLE 對污染物的再利用分類
(資料來源為 RESRAD-RECYCLE manual)

Recycle Step	Scenario	Source Geometry	Mass (t)	Density (g/cm ³)	Thickness (cm)	Radius (cm)	Distance (cm)	Time (h)	Medium Concentration Used for the External Pathway ^a	Medium Concentration Used for the Internal Pathway ^b	Default Internal Pathway ^c	Dust Loading (g/m ³)	Number of Workers
Scrap delivery	Scrap cutter	1 half cylinder	0.50	3.93	90	30	200	12	Scrap	Scrap	inh, ing	5 × 10 ⁻⁴	3
	Scrap loader	1 half cylinder	25	3.93	253	127	400	4	Scrap	Scrap	inh, ing	5 × 10 ⁻⁴	2
	Scrap truck driver	1 half cylinder	20	3.93	900	60	200	4	Scrap	Scrap	None	0	5
Scrap smelting	Scrap processor	1 half cylinder	0.50	5.90	60	30	200	12	Scrap	Scrap	inh, ing	1 × 10 ⁻⁴	3
	Smelter yard worker	1 half cylinder	100	5.90	351	175	1,000	80	Scrap	Scrap	inh, ing	1 × 10 ⁻⁴	10
	Smelter loader	1 half cylinder	50	5.90	279	139	400	4	Scrap	Baghouse	inh, ing	1 × 10 ⁻³	5
	Furnace operator	1 full cylinder	100	7.86	253	127	300	5	Scrap	Baghouse	inh, ing	1 × 10 ⁻³	3
	Baghouse processor	1 full cylinder	1.0	2.00	100	40	200	1	Baghouse	Baghouse	inh, ing	1 × 10 ⁻³	1
	Refinery worker	1 full cylinder	90	7.86	228	127	300	5	Ingot	Baghouse	inh, ing	1 × 10 ⁻³	3
	Ingot caster	1 full cylinder	10	7.86	100	64	150	2.5	Ingot	Ingot	inh, ing	1 × 10 ⁻³	2
	Small object caster	1 full cylinder	1.0	7.86	1	201	100	50	Ingot	Ingot	inh, ing	1 × 10 ⁻³	2
	Slag worker	1 half cylinder	10	2.70	45.5	228	150	25	Slag	Slag	inh, ing	1 × 10 ⁻³	1
Ingot delivery	Ingot loader	1 half cylinder	50	7.86	100	201	400	2	Ingot	Ingot	None	0	2
	Ingot truck driver	1 full cylinder	20	7.86	200	64	200	5	Ingot	Ingot	None	0	5
Initial fabrication	Storage yard worker	1 half cylinder	50	7.86	100	201	1,000	40	Ingot	Ingot	None	0	10
	Sheet maker	1 half cylinder	0.047	7.86	0.2	138	100	1	Ingot	Ingot	inh, ing	1 × 10 ⁻⁴	15
	Coil maker	1 full cylinder	10	7.86	122	58	150	1	Ingot	Ingot	inh, ing	1 × 10 ⁻⁴	1
Final fabrication	Sheet handler	1 half cylinder	0.047	7.86	0.2	138	100	1	Ingot	Ingot	None	0	20
	Coil handler	1 full cylinder	10	7.86	122	58	150	80	Ingot	Ingot	None	0	5
Product distribution	Product loader	1 half cylinder	50	7.86	100	201	400	20	Ingot	Ingot	None	0	2
	Product truck driver	1 full cylinder	20	7.86	200	64	200	8	Ingot	Ingot	None	0	5
	Sheet assembler	1 half cylinder	0.047	7.86	0.2	138	100	20	Ingot	Ingot	None	0	20
	Warehouse worker	1 half cylinder	0.28	7.86	1.2	138	600	2,000	Ingot	Ingot	None	0	5

^a Radionuclide concentrations in ingot, slag, or baghouse are calculated by using the corresponding mass and radionuclide partitioning factors.
^b The medium is either the material handled by a worker or the material from which airborne dust particles originate. Concentrations in the medium are calculated by using the corresponding mass and radionuclide partitioning factors. The medium concentration, multiplied by the dust loading factor, gives the concentration of radionuclides in air.
^c If by default no internal pathway is considered, "none" is listed. However, the user can elect to consider the internal pathways. In that case, radionuclide concentrations in the air are calculated by using the medium concentrations listed in the column immediately to the left. Here, "inh" denotes inhalation and "ing" denotes ingestion.

圖 2. RESRAD-RECYCLE 對污染物的再利用分類
 (資料來源為 RESRAD-RECYCLE manual)

圖 3 顯示 RESRAD-RECYCLE 針對廢鐵的曝露情境給出的劑量評估的一般化參數，使用者可依問題調整表列參數。

輻射異常物體外劑量評估：問題描述

本案評估標的如圖 4 所顯示，輻射異常物於 109 年 6 月由鋼鐵廠通報，當時情況為載運進口廢鐵的 40 呎貨櫃車進入鋼鐵廠時，經廠區門框式偵檢器掃描，即被偵測出輻射異常，由廠區相關人員指引貨櫃車司機將載運含輻射異常物之廢鐵運至輻射異常廢鐵存放區卸貨，並於翌日上午 11 時找出輻射異常物，依

規定將輻射異常物隔離暫貯。

輻射異常物的描述如下：重量為 490 克，形狀為圓柱形棒狀，尺寸為直徑 0.7 公分、長 50 公分，表面 5 公分劑量率經清華大學團隊以 AT1121 輻射偵檢器量測結果為 0.82μSv/h，量測當下的背景劑量率為 0.122μSv/h，故淨劑量率為 0.698μSv/h，其中，AT1121 輻射偵檢器量測的劑量為周圍等效劑量，H*(10)。輻射異常物經 RML-OS-02/純鎂加馬能譜分析儀分析，分析結果顯示輻射異常物所含的放射性元素為

Th-232，比活度為 49.7 Bq/g，總活度為 24353 Bq。Th-232 屬天然的放射性元素，衰變圖途徑如圖 5 所示，其子核包含具有放射性的 Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208, Po-212，與穩定的 Pb-208。需特別留意的是，在子核的衰變中，Po-212 與 Tl-208 是經由 Bi-212 衰變生成的，兩者的比例約是 6:4，因此，在鈾系元素到平衡時，Po-212 與 Tl-208 的活度與其他放射性元素的活度是不一樣的。

輻射異常物的後續處置選擇退運處理，包件重量為 5.78 公斤，包件尺寸為長 67 公分、寬 19 公分、高 15 公分，包件表面 5 公分劑量率經 AT1121 輻射偵檢器量測結果為 0.25μSv/h，量測當下的背景劑量率為 0.1μSv/h，故淨劑量率為 0.15μSv/h。



圖 4. 輻射異常物外觀

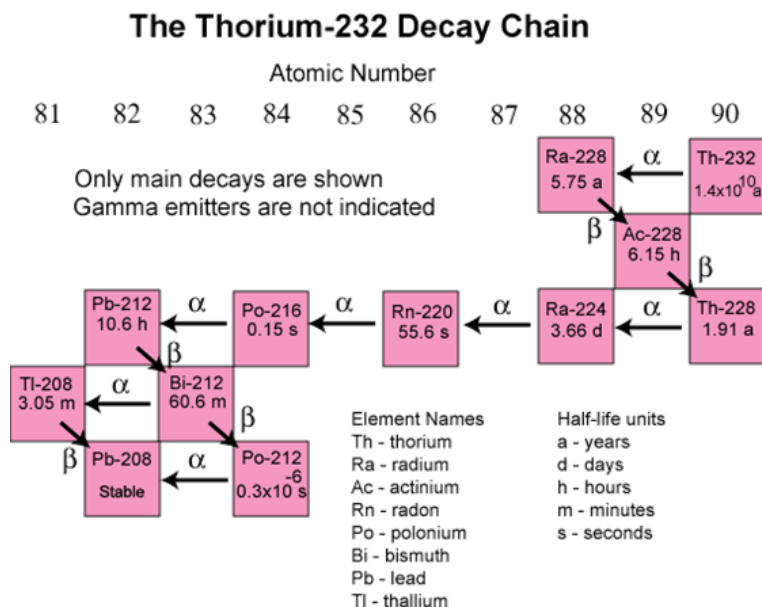


圖 5.鈾-232 衰變系列(資料來源為 <https://pubs.usgs.gov>)

輻射異常物體外劑量評估：曝露情節

關於輻射異常物的體外輻射劑量評估，本研究評估的輻射曝露情節(以下簡稱曝露情節)包含實際情況與假想情況兩種。實際情況的曝露情節係依據事件發生後之各項處置流程而定，但是為了全面地評估接觸者可能之輻射劑量，本研究將所有可能之曝露情節納入輻射劑量

的評估並彙整至表 1。假想情況則是本研究假設輻射異常物進入鋼鐵廠的電弧爐中鑄煉，其曝露情節會比實際情況複雜許多，本研究依據輻射異常物的屬性將假想情況的曝露情節彙整至表 2，或可參閱圖 2 的粗體紅色路徑。

靈敏度測試：放射性元素對劑量評估的影響

一般來說，在評估輻射劑量時，放射性元素的選擇被視為是關鍵參數之一，尤其是半衰期非常長且衰變鏈複雜的放射性元素。由儀器分析結果顯示輻射異常物的放射性元素為 Th-232，活度是由其子核 Ac-228 定量推估的。為了瞭解在劑量評估時，考慮母核與考慮母核及其子核對輻射劑量的影響有多少，以及這項參數是否為本案的關鍵參數，本研究將對此議題進行靈敏度測試，計算的參數彙整至表 3，其中，量測值是由清華大學團隊提供，計算值分為射源項僅考慮母核的對照組，以及射源項考慮母核及其達到平衡之子核的實驗組，靈敏度測試使用的輻射劑量評估程式為 MicroShield Pro (v12.08)。表 4 給出靈敏度測試的結果，僅計算母核 Th-232 之對照組結果與量測值相差 4 個數量級，而計算母核加平衡子核之實驗組結果與量測值數量級是一致的，除了 100 公分處。上述的結果符合本研究的預期，原因是輻射異常物的放射性元素活度是透過子核定量的，這暗示了在計算時使用者亦需要考慮子核的貢獻。

表 1.實際情況的曝露情節與程式評估項目

工作人員情景	說明
廢料運送：廢料裝載	港口, 將裝有廢料的貨櫃裝載至運輸車輛
廢料運送：司機	港口至鋼鐵廠
廢料冶煉：廢料處理	鋼鐵廠, 搜尋輻射異常物
廢料運送：廢料裝載	鋼鐵廠, 將輻射異常物裝載至運輸車輛
廢料運送：司機	路線 1. 鋼鐵廠至港口
廢料運送：司機	路線 2. 鋼鐵廠至核研所

表 2. 假想情況的曝露情節與程式評估項目

工作人員情景	說明
廢料運送：廢料裝載	於港口將裝有廢料的貨櫃裝載至運輸車輛
廢料運送：司機	港口至鋼鐵廠
廢料冶煉：冶煉廠工作人員	鋼鐵廠, 倉儲人員
廢料冶煉：冶煉廠裝載	
廢料冶煉：熔爐操作員	
廢料冶煉：袋式除塵器操作員	
廢料冶煉：爐渣工作人員	
廢料運送：爐渣裝載	鋼鐵廠, 將廢料裝載至運輸車輛
廢料運送：司機	鋼鐵廠至水泥廠
消費產品：停車場	
消費產品：房間/辦公室及房屋外牆	
公共產品：鋪路	

表 4 給出靈敏度測試的結果，僅計算母核 Th-232 之對照組結果與量測值相差 4 個數量級，而計算母核加平衡子核之實驗組結果與量測值數量級是一致的，除了 100 公分處。上述的結果符合本研究的預期，原因是輻射異常物的放射性元素活度是透過子核定量的，這暗示了在計算時使用者亦需要考慮子核的貢獻。因此，本研究認為放射性元素的選擇將是影響劑量評估的關鍵參數並建議在輻射劑量評估時，應將其子核貢獻納入。此外，100 公分處之實驗組計算結果與量測值的差異，本研究推測是評估目標的劑量率與背景值

(0.122 μ Sv/h)在同一個水平，要準確的度量這麼小的淨劑量率是不容易的；而對照組與量測值在三個量測距離的差異是顯著低估的。

靈敏度測試：放射性元素對活度推估的影響

輻射異常物的放射性元素活度，可以直接進行核種分析而得知。由於準確的核種分析必須藉由取樣送回實驗室進行分析，而無法在發現輻射異常物的現場進行分析。因此實務上必須建立由劑量率量測值推估放射性元素活度的方法。推估的原則是藉由量測的物理量與單位活

度計算結果的比值而得到，其中，物理量可以是空氣吸收劑量或周圍等效劑量等。對於衰變鏈較複雜的放射性元素而言，如鈾系或鈾系元素，從量測得到的物理量推估的活度與實際量測活度的差距有多少，此與輻射劑量的評估有著密不可分的關係。為此，本研究將對此議題進行靈敏度測試，計算的參數可參考表 3，其中，依據上一小節的結論，本研究對於放射性元素的選擇考慮母核及其子核，即表 3 的實驗組，其活度由表 3 的 24353Bq 變更為 1Bq，靈敏度測試使用的輻射劑量評估程式為 MicroShield Pro (v12.08)。

表 3.放射性元素的選擇對劑量率的影響之靈敏度測試的計算參數

項目	對照組	實驗組
放射性元素	Th-232	Th-232 & daughters
活度	24353 Bq	
射源幾何	Cylinder Volume – Side shields	
射源尺寸	半徑 0.35 cm × 高 50 cm	
射源材料	Iron	
射源材料密度	7.874 g/cm ³	
射源與偵檢器距離	5 cm, 30 cm, 100 cm	
增建因子	Air gap	
體射源積分數	MAX.	

表 4.放射性元素的選擇對劑量率的影響之靈敏度測試的計算結果

射源與偵檢器 距離	量測淨劑量率(μSv/h)	計算劑量率(μSv/h)	
	AT1121 偵檢器	對照組	實驗組
5 cm	0.698	8.748×10^{-5}	0.852
30 cm	0.038	9.119×10^{-6}	0.077
100 cm	0.030	1.006×10^{-6}	0.008

表 5 給出靈敏度測試的結果，活度的推估值與量測值的比值依序約為 0.8、0.5、3.6，評估結果與預期相符，且由 5 公分處推估而得的活度與實驗室分析結果差異約為 20%，此差異在本研究中是可接受的。本研究建議本案採用表面 5 公分處之量測值來推估活度，理由是 30 公分處與 100 公分處的劑量率小至背景波動範圍，推估的活度不確定度

較高，不建議採用。最後，關於活度推估的方式，期望未來有更多的案例可以驗證本研究建議的方式。

輻射異常物體外劑量評估：計算參數與評估結果

由於美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory) 已停止對 RESRAD-RECYCLE 程式進行更新與維護，本研究採用其曝露情節的一般化計

算參數，並以 MicroShield 作為計算引擎，進行輻射異常物的劑量評估，相關計算參數彙整於表 6，描述如下，本研究基於靈敏度測試的結果，考慮 Th-232 及其子核的光子能譜作為體外輻射劑量評估的射源項，並依據 RESRAD-RECYCLE 的建議，假設輻射異常物的放射性元素在冶煉後的產品分布主要集中在爐渣，占比約 99%，少部份會飄逸

表 5.放射性元素的選擇對活度推估的影響之靈敏度測試的計算結果

射源與偵檢器 距離	量測活度	推估活度	比值
	(Bq)	(Bq)	(推估/量測)
5 cm	2.4353×10^4	1.995×10^4	0.82
30 cm	2.4353×10^4	1.195×10^4	0.49
100 cm	2.4353×10^4	8.792×10^4	3.61

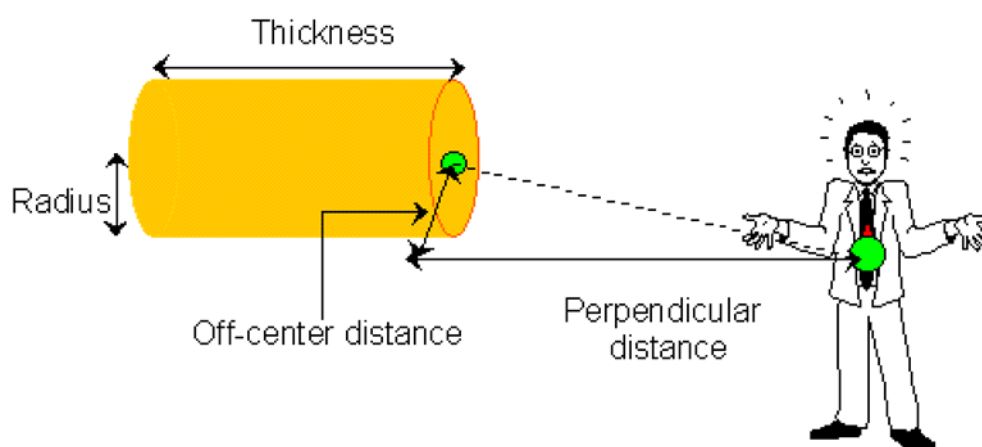


圖 6.體射源與偵檢器之相對位置(資料來源為 RESRAD-RECYCLE manual)



圖 7.攤平的廢鐵中(紅色虛線方框)搜尋輻射異常物

表 6. MicroShield 計算資訊

	工作人員情景	幾何	半徑/邊長	厚	材料	密度	射源至偵檢器距離	曝露時間
			(cm)	(cm)		(g/cm ³)		
實際情況	廢料運送：廢料裝載	RV	225	201	Steel	3.93	400	1.6
	廢料運送：司機	RV	106	900	Steel	3.93	200	1.38
	廢料運送：廢料裝載	RV	225	201	Steel	3.93	400	1.6
	廢料運送：司機	RV	106	900	Steel	3.93	200	1.4
	廢料運送：司機	RV	106	900	Steel	3.93	200	1.15
假想情況	廢料運送：廢料裝載	RV	225	201	Steel	3.93	400	1.6
	廢料運送：司機	RV	106	900	Steel	3.93	200	1.38
	廢料冶煉：冶煉廠工作人員	RV	310	351	Steel	5.90	10000	80
	廢料冶煉：冶煉裝載	RV	246	279	Steel	5.90	400	4
	廢料冶煉：熔爐操作員	CVES	127	253	Steel	7.86	300	5
	廢料冶煉：袋式除塵器操作員	CVES	40	100	Steel	2.00	200	1
	廢料冶煉：爐渣工作人員	RV	404	45.5	Steel	2.70	150	25
	廢料冶煉：爐渣裝載	RV	225	100	Steel	3.93	400	0.8
	廢料運送：司機	RV	106	900	Steel	3.93	200	3.9
	消費產品：停車場	CVES	3433	10	Concrete	2.70	100	62
	消費產品：房間/辦公室/房屋外牆	CVES	300	0.2	Concrete	2.70	100	2000
			300	0.2			200	
300			0.2	250				
公共產品：鋪路	CVES	3433	10	Concrete	2.70	100	6	

表 7. MicroShield Pro 評估實際情況曝露情節的體外輻射劑量

工作人員情景	說明	MicroShield Pro (v12.08) / (μSv)
廢料運送：廢料裝載	於港口將裝有廢料的貨櫃裝載至運輸車輛	3.35×10^{-05}
廢料運送：司機	港口至鋼鐵廠	2.53×10^{-05}
廢料冶煉：廢料處理	鋼鐵廠, 搜尋輻射異常物	1.40×10^{-03}
廢料運送：廢料裝載	鋼鐵廠, 將輻射異常物裝載至運輸車輛	3.35×10^{-05}
廢料運送：司機	路線 1. 鋼鐵廠至港口	2.57×10^{-05}
廢料運送：司機	路線 2. 鋼鐵廠至核能研究所	2.11×10^{-05}

散步到空氣中被收集至集塵袋，此部份佔比僅 1%。在幾何設定方面，體射源與偵檢器之相對位置如圖 6 所示，為求保守估計，本研究不考慮離軸距離 (Off-center distance)。

在運送相關的參數設定方面，為了保守評估司機的體外輻射劑量，不考慮貨物以及車輛的屏蔽效應，運送路線參考 Google Map 提供的道路資訊，選擇路徑最長的方案作為運送路線，行車時間係依據 Google Map 提供的路徑長與行車速度等資訊推估的。在表 6 中，RV 為 Rectangular Volume，CVES 為 Cylinder Volume - End shields，MicroShield 的幾何以體積等效的方式近似 RESRAD-RECYCLE 的設定；例如，在 RESRAD-RECYCLE 的計算中，若體射源的幾何為半圓柱，由於 MicroShield 沒有半圓柱的幾何選項，因此，本研究的作法是在厚度不變的前

提下，讓 $\pi r^2 \times h = r^2 \times h$ 式中的 $\pi r^2 = r^2$ ，且面對偵檢器的射源面積為 r^2 。MicroShield 的增建因子 (Buildup factor) 均為 Air gap。關於體射源積分 (Integration) 設定，對於所有的曝露情節，本研究經過測試後，採用預設值的 10 倍可以得到收斂的數值；但是，消費性產品與公共產品的情節除外，其值為程式的最大值。

基於表 1 與表 2 的曝露情節，表 7 與表 8 分別給出以 MicroShield 作為計算引擎之體外輻射劑量評估。為了確認 MicroShield 計算結果的可靠程度，本研究採用目前公認最準確的蒙地卡羅粒子遷移計算基程式，MCNP，在計算參數一致的前提下，挑選幾個曝露情節進行體外輻射劑量的比較。在兩種不同計算方法下得到一致的計算結果，顯示 MicroShield 的計算結果是可信的。

一般來說，體外劑量的多寡與射源的大小、射源與偵檢器的距離和曝露的時間成正相關。在表 7 中，實際情況下的體外輻射劑量最高的曝露情節是「廢料冶煉：廢料處理」，理由其實不難想像，因為射源與偵檢器的距離是最短的，曝露時間是最長的。其中，該情節是描述工作人員手持輻射偵檢器在攤平的廢鐵中搜尋輻射異常物，搜尋的情況可參考圖 6 紅色需線方框所示。在表 8 中，假想情況下的體外輻射劑量最高的曝露情節是「消費產品：房間/辦公室及房屋外牆」，歸因於其曝露時間是所有其他曝露情節中最高的。另外，在表 8 中，相較於其他曝露情節而言，「廢料冶煉：爐渣工作人員」的劑量也不小，原因是輻射異常物的放射型元素在冶煉後主要集中在爐渣當中，而此曝露情節的工作人員與爐渣的距離是相對較短的，且曝露時間是相對較高的。

表 8. MicroShield Pro 與 MCNP 評估假想情況曝露情節的體外輻射劑量

工作人員情景	說明	MicroShield Pro (v12.08) (μSv)	MCNP6 (v1.0) (μSv)
	於港口將裝有廢料的貨櫃裝載至運輸車輛	3.35×10^{-05}	
廢料運送：司機	港口至鋼鐵廠	2.53×10^{-05}	
廢料冶煉：冶煉廠工作人員	鋼鐵廠, 倉儲人員	8.22×10^{-07}	
廢料冶煉：冶煉廠裝載		4.01×10^{-05}	
廢料冶煉：熔爐操作員		7.16×10^{-05}	
廢料冶煉：袋式除塵器操作員		3.16×10^{-06}	
廢料冶煉：爐渣工作人員		9.84×10^{-03}	
廢料運送：爐渣裝載	鋼鐵廠, 將廢料裝載至運輸車輛	3.33×10^{-05}	
廢料運送：司機	鋼鐵廠至水泥廠	7.08×10^{-05}	
消費產品：停車場		8.86×10^{-04}	8.30×10^{-04}
消費產品：房間/辦公室及房屋外牆		2.09	2.11
公共產品：鋪路		8.57×10^{-05}	8.03×10^{-05}

備註：MCNP 計算結果之統計誤差在一個標準差之內均小於 1%

結語

關於輻射異常物的體外輻射劑量評估，RESRAD-RECYCLE 雖然提供完善的處理流程資訊與合理的曝露情節計算參數，然而，美中不足的是它已經停止更新與維護，與前者一樣是基於點核仁法計算方式的 MicroShield，其在輻射異常物的體外輻射劑量評估中，經與準確但耗時的 MCNP 比較後，本研究認為其可提供可信的結果與合理的計算時間。綜合考量所有因素之後，對於輻射

異常物的體外劑量評估方法，本研究建議採用 RESRAD-RECYCLE 的曝露情節的一般化計算參數，採用 MicroShield 為計算引擎。透過案例的評估，了解體外輻射劑量相對較高的幾個曝露情節，分別是廢料冶煉：廢料處理(輻射異常物的搜尋)、廢料冶煉：爐渣工作人員、消費產品：房間/辦公室及房屋外牆。需要特別留意的是，影響體外輻射劑量的因素很多，除了射源與偵檢器的距離和曝露時間之外，更重要且關鍵的

是輻射異常物的放射性元素及其活度的大小。本研究透過案例評估建議輻射異常物的體外劑量評估方式，評估結果並非適用於每一個輻射異常物。

本文介紹輻射異常物的處理流程，包含輻射異常物的發現到最後處置，以及輻射異常物的誤熔狀況發生時接觸者的曝露情節與體外劑量評估的方式，提供一般民眾對於國內處理輻射異常物的作業有進一步的認識。



參考文獻

1. 行政院原子能委員會，放射性污染建築物事件防範及處理辦法，中華民國 83 年 6 月發布(107/08 修正)。
2. 行政院原子能委員會，鋼鐵業者發現輻射異常物之通報及處理作業導則，中華民國 97 年 06 月發布。
3. 行政院原子能委員會，107 年游離輻射應用與管理統計，中華民國 108 年 08 月發布。
4. [HTTPS://resrad.evs.anl.gov/](https://resrad.evs.anl.gov/)
5. Bakr W.F., Assessment of the radiological impact of oil refining industry, J Environ Radioact. 2010 Mar;101(3):237-43. doi: 10.1016/j.jenvrad.2009.11.005. Epub 2009.
6. Cheng J.J., Kassas B., Yu C., et al., RESRAD-RECYCLE: A Computer Model for Analyzing the Radiological Doses and Risks Resulting from the Recycling of Radioactive Scrap Metal and the Reuse of Surface-contaminated Material and Equipment, ANL/EAD-3, 2000.
7. The MicroShield Team, MicroShield User's Manual, Version 5, Grove Engineering Inc., Rockville, Maryland, 1996.
8. [HTTP://WWW.RADIATIONSOFTWARE.COM](http://www.radiationsoftware.com)
9. Goorley T., James M., Booth T., et al., Initial MCNP6 release overview, Nucl. Technol. 180 (2012) 298–315.

發行人

張似瓌

執行編輯

林珏汶

編輯委員

尹學禮

江祥輝

劉代欽

蔡惠予

魯經邦



出版單位

財團法人中華民國輻射防護協會

行政院新聞局 出版事業登記證

局版北市誌字 第柒伍零號

地址

30017 新竹市光復路二段 295 號 15 樓之 1

03-5722224 電話 | 03-5722521 傳真

01486683 統編

rpa.newsletter@gmail.com 電郵 | www.rpa.org.tw 網站