

■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

### ▲為婦女健康風險把關的乳房攝影 X 光診斷劑量標準

(原能會訊)

行政院原子能委員會核能研究所配合政府保障民眾輻射安全的政策，已完成建立國家級的乳房攝影 X 光診斷劑量標準，使受測婦女在安全劑量範圍內進行診斷，保障國內乳房攝影 X 光檢查的輻射安全品質。

台灣地區婦女罹患乳癌的比例已超過子宮頸癌，成為女性癌病發生率的第一名，每年約新增 7 仟 2 佰例乳癌患者，名列國人年度死亡原因的第 4 位，原子能委員會預計於 97 年 7 月發布施行乳房攝影醫療曝露品質保證相關作業，與衛生署國民健康局推動的「乳房 X 光攝影醫療機構認證」，都是為提升國內放射醫療品質，杜絕國人不必要的醫療曝露劑量而努力。

放射診斷的影像品質決定醫師能否在先期判斷癌病症兆，而輻射劑量品質則為保障病患接受高品質診斷影像的同時，也避免不必要的輻射劑量。核能研究所國家游離輻射標準實驗室，已完成乳房攝影 X 光輻射劑量相關的量測標準，包括乳房攝影劑量與乳房攝影 X 光公稱電壓(X 光機輸出管電壓的最大值)，並建構完整的放射診斷劑量校正追溯鏈等，可避免病患接受不必要的輻射劑量與確認乳房攝影儀的穩定性，以維持臨床診斷品質。

核能研究所配合政府政策，建立準確的乳房攝影 X 光輻射劑量標準，並建構完整的放射診斷劑量校正追溯鏈，不僅可確保全民醫療的輻射安全，消弭民眾對輻射曝露的疑慮，使民眾能更有信心、安心及放心地接受放射診療。

#### 【新聞小辭典】

1. 乳房攝影 X 光檢查：以 X 光造影技術及壓迫乳房的方式進行乳房病灶的檢查。
2. 劑量：輻射被物質吸收的能量。
3. 公稱電壓：X 光輸出管電壓的最大值。

4. 校正追溯鍊：透過校正的方式將量測的結果連結到國家標準。
5. 平行驗證比對：透過國際間的比對活動驗證各國家所建立量測標準的能力。
6. 輻射曝露：輻射的照射。
7. 醫療曝露品質保證作業：為提升輻射醫療品質，減少病人可能接受的曝露，主管機關訂定實施醫療曝露品質保證的相關規定，醫療機構依規定擬定醫療曝露品質保證計畫，報請主管機關核准後實施。

#### ▲有關放射性物質誤輸出乙案說明

(原能會訊)

96 年 10 月國內某工廠因內含放射性物質的測量控制用儀器故障，經請國外原製造公司派員來台檢修後，建議該工廠拆下儀器寄回國外維修，該工廠指派未具操作資格人員將儀器併同放射性物質拆下後寄送至國外。本會接獲國外的通知後，即進行調查處理，經查該放射性物質活度為 9.3GBq 的氬-85，該公司由未具操作資格人員拆卸放射性物質，且未經本會許可擅自將低風險的登記類放射性物質輸出至國外，係違反游離輻射防護法第 29 條擅自進行輻射作業之規定，本會乃依法處以新台幣壹拾萬元罰鍰，並要求該公司採取改善措施避免類似案件再度發生。

按該射源依國際原子能總署放射性物質的分類，係屬第五類低風險的射源，對人體不致造成輻射傷害，惟本會仍採嚴密的管制。

近年來國際間為防範輻射恐怖事件發生，對放射性物質的管制漸趨嚴謹，本會為確保放射性物質運送的安全，依游離輻射防護法第 6 條訂定放射性物質安全運送規則，規範放射性物質的包裝、包件、交運、運送、貯存作業及核准等事項，另本會對放射性物質的管理，除建立輻射管制電腦系統，對高風險放射性物質核發許可證或對低風險放射性物質同意登記予以分類管理，因此對其使用、輸出、輸入、停用及永久停用均可掌握其動態，此外，並要求設施經營者須每月網路申報放射性物質的現況，本會則不定期予以抽查，同時依規定高風險密封放射性物質者，應於進行密封放射性物質港埠啟運作業七日前通報本會，相關管制皆參考先進國家做法，俾建立嚴密管制體系。另本會亦於 95、96 兩年針對高風險的放射性物質連續執行專案稽查，其目的即在於確保放射性物質的安全管理。

雖本會針對放射性物質已有嚴密管控機制，惟檢討本案，仍發現業者有人為疏失與法令不熟悉情形，故近期本會將再舉辦法規宣導，除強調各項輻射作業應按法令規定執行外，並要求放射性物質的使用單位，務必加強其放射性物

質安全管理，本會並將不定期採抽查各單位輻射源的內部控管及網路申辦情況，以有效防止此類案件再度發生。

## ▲派介子漫談

(輻協訊)

### 一、前言

國際放射防護委會於 2007 年出版的 103 號出版物中明訂帶電的派介子( $\pi$  meson, pion)的輻射加權因數( $W_R$ )為 2，與質子相同。這在過去的游離輻射防護安全標準中未曾出現過。本文特加以介紹。

### 二、派介子的性質

派介子是準純量介子(pseudoscalar meson)的一種。所謂準純量(又稱膺標)介子是指具有自旋為零和負宇稱的介子，可用一個準純量的「場量」來加以描述。準(假或偽)純量指一種只有大小而無方向的量；在羅倫茲(Lorentz)變換下與純量相同，而在空間反射或時間反轉(或二者同時進行)時與純量差一正負符號。

自旋(J)宇稱(P)： $J^P = 0^-$

同位旋(I)宇稱(G)： $I^G = -1$

$\pi^+$ 的質量為  $273.3 m_e$  (139.6 MeV)， $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 互為反粒子。

$\pi^0$ 的質量為  $264.3 m_e$  (135 MeV)，其反粒子就是它本身。

$$\left. \begin{array}{l} \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \end{array} \right\} \text{壽命} \sim 2.603 \times 10^{-8} \text{秒}$$
$$\left. \begin{array}{l} \pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \\ \quad \rightarrow \gamma + e^+ + e^- \end{array} \right\} \text{壽命} \sim 0.83 \times 10^{-6} \text{秒}$$

註：1.  $m_e$ 為電子質量， $\nu$ 和 $\bar{\nu}$ 分別為微中子和反微中子。

2. 同位旋(isotopic spin)係量子力學的變量，在代數結構方面類似角動量向量，它的第三分量( $I_3$ )用以區別基本粒子群各個成員。例如，核子(質子和中子)在強核力中性能明顯相同，但具有不同的電荷。
3. 自旋(spin)為基本粒子或核的內稟角動量，即使粒子靜止，它仍存在，顯著不同於軌道角動量。
4. 羅倫茲(Hendrik Antoon Lorentz, 1853-1928)，荷蘭籍，獲 1902 年諾貝爾物理學獎。

[例 1]敘述各種  $\pi$  介子的性質。

[解]共有三種  $\pi$  介子，它們是  $\pi^0$ 、 $\pi^+$ 和 $\pi^-$ ， $\pi^+$ 和 $\pi^-$ 為正、反粒子， $\pi^0$ 的反粒子是它自己。三種  $\pi$  組成  $I = 1$  的同位旋三重態，它們的主要性質如表 1。

表 1  $\pi$  介子的性質

$\pi$ 介子名稱	質量 (MeV)	自旋	宇稱	C 宇稱	同位旋 I	$I_3$	G
$\pi^+$	139.6	0	-		1	1	-1
$\pi^0$	135	0	-	+	1	0	-1
$\pi^-$	139.6	0	-		1	-1	-1

註：C 宇稱(charge parity)為電荷共軛運算的本徵值。電荷共軛運算(charge conjugation operation)指把每個粒子變換成為其反粒子的運算。

### 三、鮑威爾發現派中子

鮑威爾(Cecil Frank Powell, 1903-1969, 獲 1950 年諾貝爾物理學獎), 1903 年 12 月 5 日生於英國肯特(Kent)郡的湯布里奇(Tonbridge), 父親是一位槍炮製造商, 長期從事這方面的貿易。祖父曾創辦一所私立學校。家庭的影響使他從小就有崇尚實踐和重視學術的素養。他 11 歲時就在當地的學校取得了獎學金, 後來又在社會上贏得了公開獎學金到劍橋大學的雪尼·蘇塞克斯(Sidney Sussex)學院學習。1924 年至 1925 年以頭等成績通過了自然科學學位考試, 1925 年畢業。1925 年至 1927 年作為拉塞福(Ernest Rutherford, 1871-1937, 獲 1908 年諾貝爾化學獎)和威爾森(Charles Thomas Rees Wilson, 1869-1959, 獲 1927 年諾貝爾物理學獎)的研究生, 在卡文迪西(Cavendish)實驗室做研究工作。1927 年獲博士學位。1928 年去布里斯托(Bristol)大學威爾斯物理實驗室(H. H. Wills Physical Laboratory)工作, 當丁鐸爾(A. M. Tyndall)的助手。後來升為講師和高級講師(Reader)。1936 年他參加地震考察隊訪問西印度群島, 研究火山活動。第二年回到布里斯托, 1948 年升任教授, 1949 年當選為英國皇家學會會員。1950 年代鮑威爾還擔任歐洲高空氣考察隊的隊長。1964 年擔任威爾斯物理實驗室主任。

所謂研究原子核過程的照相方法, 指的是運用特製的照相乳膠記錄核反應和粒子徑跡的方法, 這種特製的乳膠就稱為核乳膠(nuclear emulsion)。這是特別為觀測游離粒子如電子、質子、 $\alpha$  粒子以及其他帶電粒子所產生的個別徑跡而設計製造的一種乳膠。通常把核乳膠塗在玻璃板上製成照相底板稱為核乾板。其厚度比一般照相乳膠厚, 所含溴化銀較多, 且顆粒細、分布均勻, 幾乎全然沒有粒子間隙, 對帶電粒子的反應率很高。當帶電粒子通過時, 就會起反應而留下徑跡, 經過顯影和定影, 用顯微鏡觀察, 根據所記錄的徑跡的長度、黑化度, 能夠決定帶電粒子的能量、質量以及電荷。

鮑威爾研究核乳膠的照相方法以及用這方法發現介子(meson)而獲 1950 年諾貝爾物理學獎。所謂介子指次原子的質量介於電子和質子之間的總稱。

1947 年鮑威爾等人用這種方法進行宇宙射線的研究。在海拔 3000 米的山頂上, 直接記錄宇宙射線的輻射, 並通過對底板乳膠中射線徑跡的分析, 證實了  $\pi^+$  介子, 即日本湯川秀樹(Hidkei Yukawa, 1907-1981, 獲 1949 年諾貝爾物理

學獎)預測的介子的存在，以及  $\pi^+$  介子衰變成  $\mu^+$  子(muon)和微中子的過程。1949年又用這種方法發現了  $K$  介子(以前稱為  $\tau$  子)的衰變方式。

新版的游離輻射防護安全標準(2008年1月1日施行)明訂繃子( $\mu$ )的輻射加權因數( $W_R$ )為1。 $\mu$ 的質量約為電子的206.7倍，半衰期約為2.1971微秒，衰變後成為電子。是輕子(lepton)的一種，自旋量子數為1/2。

鮑威爾發明的核乳膠很快得到了廣泛應用。全世界的核物理實驗室紛紛採用他的方法，這方法一個時期內幾乎在核物理和粒子物理的實驗中占據了顯著地位。當然，核乳膠也有其侷限性，隨著時間的推移，大型加速器和對撞機紛紛建立，各種新型的儀器，諸如各種泡室(bubble chamber)、火花室(spark chamber)、多絲室(multi-wire chamber)、漂移室(drift chamber)取代了核乳膠，成了高能物理實驗研究中更為有效的偵測工具。

1969年8月9日鮑威爾在義大利米蘭附近逝世，享年66歲。

**[例 2]**  $\pi$  介子在乳膠原子核中產生「爆炸」，故在乳膠片中留下徑跡。但是，測量到動能在 5 MeV 以下的徑跡，僅僅發現  $\pi^-$  介子在乳膠中的銀核內產生「爆炸」的徑跡，為什麼未觀察到  $\pi^+$  介子在乳膠中產生「爆炸」的徑跡？

**[解]**  $\pi$  介子帶負電荷，很容易被原子核捕獲，最後到達核內和核子發生強作用形成「爆炸」的徑跡。而  $\pi^+$  介子帶正電荷，它和核有很強的庫倫排斥作用，它很難接近原子核，特別是低能的  $\pi^+$  介子，不能到達和核發生強相互作用的近距離，故看不到  $\pi^+$  介子在乳膠中產生「爆炸」的徑跡，也許有很個別的低能的  $\pi^+$  介子，它通過隧道效應到達核內，但這個機率太小了，所以，未觀察到  $\pi^+$  介子在乳膠中產生「爆炸」的徑跡。

**[例 3]**  $\pi$  介子如何產生？

**[解]** 產生  $\pi$  介子的主要設備是一個中等能量(500—1000 MeV)的強流質子加速器，使經加速的質子去撞擊一個靶，就可以得到很多的  $\pi$  介子。當然，能量更高的質子加速器，也可以產生很多的  $\pi$  介子。此外，高能的電子加速器也能產生  $\pi$  介子。 $\pi$  介子的用途不僅限於治療癌病，在許多和物理、化學、生物等有關的科技都可用到它。新竹市科學園區將新增建一座更大型的同步輻射加速器，也會產生  $\pi$  介子。

#### 四、其他

##### 1. 派介子素(pionium)

(1)一種外來的原子，由一個繃子繞著一個帶相反電荷的介子所組成。亦稱為派-繃原子(pi-mu atom)。(2)一種外來原子，由一個電子圍繞一個帶相反電荷派介子所組成。

##### 2. $\pi$ 介子化(ponization)

在高能質子-質子碰撞中，由於存在多重產生現象，碰撞後將有大量的次

級粒子產生，其中絕大多數是  $\pi$  介子。在碰撞質子質心系中看，這些  $\pi$  介子的動量都不大，形成一團  $\pi$  介子雲，這種現象稱為  $\pi$  介子化。

(本文取自美洲保健物理學會台灣總會簡訊 26，2008.6.1)

## □會議訓練報導

### ▲97 年度各項訓練班開課時間表

(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)	A3-06 月 11 日~18 日	(高雄)輻射偵測中心
	36 小時 許可類 設備	A4-06 月 23 日~27 日	(新竹)帝國經貿大樓
		A5-08 月 20 日~27 日	(高雄)輻射偵測中心
		A6-08 月 25 日~29 日	(新竹)帝國經貿大樓
		(B 組)	B10--06 月 04 日~06 日
	18 小時 登記備 查類 設備	B11--06 月 18 日~20 日	(新竹)帝國經貿大樓
		B12--07 月 09 日~11 日	(台北)建國大樓
		B13--08 月 06 日~08 日	(高雄)輻射偵測中心
		B14--08 月 13 日~15 日	(新竹)帝國經貿大樓
		B15--09 月 03 日~05 日	(台北)建國大樓
加開 07 月 23 日~25 日		(台中)文化大學推廣教育部	
輻射防護專業 人員訓練班	輻 防 員 (108 小時)	輻 防 師 (12 小時)	<b>師級 8 第五階段 &amp; 進階 8</b> 6 月 4 日~6 日 (進階 8-4) <b>員 13 期 &amp; 師 9 期</b> 第一階段—7 月 7 日~11 日 第二階段—7 月 14 日~18 日 第三階段—7 月 28 日~8 月 1 日 第四階段—8 月 4 日~8 日 (新竹)帝國經貿大樓
鋼鐵建材輻射 偵檢人員訓練班	鋼 1--06 月 19 日~20 日	高 雄	
	鋼 2--07 月 02 日~3 日	(新竹)帝國經貿大樓	
九十七年度 輻射防護教育訓練	6 月 13 日 (五) 3 小時	台北(月涵堂)	
	6 月 20 日 (五) 3 小時	高雄(偵測中心)	
	7 月 04 日 (五) 3 小時	新竹(帝國經貿大樓)	
	8 月 15 日 (五) 6 小時	台北(月涵堂)	
	8 月 29 日 (五) 6 小時	高雄(偵測中心)	
	9 月 11 日 (四) 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

### ▲參考物種輻射劑量評估方法發展現況簡介

「君子之於物也，愛之而弗仁；於民也，仁之而弗親。親親而仁民，仁民而愛物 - 孟子·盡心篇」

劉祺章<sup>1</sup>、林彥宏<sup>1</sup>、高億峯<sup>1</sup>、黃景鐘<sup>1</sup>、劉衛蒼<sup>2</sup>

1 原子能委員會 輻射偵測中心

2 陸軍化學兵學校核生化防護研究中心

近年來對於生態系統輻射防護的要求，隨著國際間對於環境保護的意識提升，物種保育及棲息地保持等關於生物多樣化的保證，已成為各國政府努力的目標。當前面對核能應用復興趨勢，如要考量未來核能工業的永續經營，勢必以實際行動宣告支持環境保護的決心。

現行的輻射防護架構在概念其實已包含了環境的考量。過去對於生物的輻射效應已有許多的探討，也確定哺乳類是對輻射最為敏感的物種，因此就科學面來說，當人類執行適當的防護體系，其他物種雖然有部分個體可能遭受輻射傷害，然而不致有物種因輻射應用面臨滅絕的威脅。不過，這樣的說法往往被誤導為太過於以人的價值為中心。因此，國際輻射防護相關機構都認為，因應環境保護相關議題提出明確且實務的保障宣言是很重要的。尤其是近年來世界各國已紛紛建立環境保護法規，所以基於現有環境保護精神，提出與人類相仿且能與毒化物防護協調一致的環境輻射防護架構的時機已近成熟。相關的概念已在國際輻射防護委員會第 91 號報告及第 103 號報告第 8 章中有詳盡討論。

完善的防護架構必須基於可接受的風險評估系統。在人類的輻防體系中，使用參考人及適當的假體模型，可提供實務上度量劑量的參考標準以彌補理論與實務中關於不同個體差異。

管理非人類物種可能接受的劑量，國際間傾向於使用近年來環境風險評估常用的層次性(Tiered approach)風險評估步驟來進行管理，而非直接於法規中作管制限值的訂定。所謂層次性評估即是訂定不同的整治管理目標，再依實務上環境的容忍度、技術及經費的限制等考量，取得不同的限制參考值。應用於輻射劑量的管理範例，首先為美國能源部(U.S.DOE)所提出的分級評估模式[1]。

該模式對體外曝露而言，首先假設任何曝露途徑(水、土及沉積物)為無限大且放射性核種分布均勻於其中，而受曝生物體非常小(小於射束的平均自由徑)，所以計算劑量轉換因子時，便只須考量每次衰變所釋出的輻射能量且能保守評估低能光子與貝他粒子的劑量。例如每次衰變釋出能量  $E$  的射源，體外曝露的劑量轉換因子推導

$$\left( E \frac{\text{MeV}}{\text{Bq} \cdot \text{s}} \right) \left( 1.6 \times 10^{-13} \frac{\text{Joule}}{\text{MeV}} \right) \left( 1000 \frac{\text{kg}}{\text{Joule}} \text{mGy} \right) \left( 86400 \frac{\text{s}}{\text{d}} \right) = 1.38 \times 10^{-5} E \frac{\text{mGy/d}}{\text{Bq/kg}}$$

處於射源瀰漫的狀況(如蚯蚓或老鼠在地洞內)的體外曝露的劑量轉換因子為

$$\text{DCF}_{\text{ext}} = 1.38 \times 10^{-5} E_{\text{photons+electrons}} \left( \frac{\text{mGy/d}}{\text{Bq/kg}} \right) \quad (1)$$

如果是鴨子在污染的水面上游泳，則劑量轉換因子為平面曝露，故僅為一半

$$\text{DCF}_{\text{ext}} = 6.9 \times 10^{-6} E_{\text{photons+electrons}} \left( \frac{\text{mGy/d}}{\text{Bq/kg}} \right) \quad (2)$$

就體內曝露而言，則是假設受曝露的生物體非常大，且污染的放射性核種均勻的分布在生物組織之中。並且也假設所有衰變釋出的能量都滯留於生物體內，阿伐粒子的輻射加權因數  $W_R$  保守假設與人類相同為 20。所以可如同體外曝露般的推導出每次衰變釋出發率  $Y$  能量  $E$  的射源，其體內劑量轉換因子

$$\left( \sum Y_j E_j W_{R,j} \frac{\text{MeV}}{\text{Bq} \cdot \text{s}} \right) \left( 1.6 \times 10^{-13} \frac{\text{Joule}}{\text{MeV}} \right) \left( 1000 \frac{\text{kg}}{\text{Joule}} \text{mGy} \right) \left( 86400 \frac{\text{s}}{\text{d}} \right) = 1.38 \times 10^{-5} \sum Y_j E_j W_{R,j} \frac{\text{mGy/d}}{\text{Bq/kg}}$$

$$\text{DCF}_{\text{int}} = 1.38 \times 10^{-5} \sum Y_j E_j W_{R,j} \left( \frac{\text{mGy/d}}{\text{Bq/kg}} \right) \quad (3)$$

美國能源部依據回顧文獻建議保守的劑量參考值如表 1。

表 1 建議生物曝露參考值

生物	mGy day <sup>-1</sup>	相當於mGy year <sup>-1</sup>
陸域植物	10	3650
水域動物	10	3650
陸域動物	1	365
人類(概略對照)	0.0027	1

利用曝露參考值與劑量轉換因子便可推導出生物參考濃度 (Biota Concentration Guides, 簡稱 BCG)。

$$\text{BCG} = \frac{\text{生物曝露參考值}}{\text{DCF}_{\text{ext}} + \text{DCF}_{\text{int}}} \left( \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right) \quad (4)$$

然而如此的推導過程是十分保守的，因此可以預見所推得的參考濃度比較低，只能作為初步的管理目標。如果污染程度在此範圍內是可以接受的，如果

無法達到則須進入第二級管理目標。在上述公式引入所謂的組合因子(Lumped parameters)如下式中的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。

$$BCG = \frac{\text{生物曝露參考值}}{\alpha \times (\beta \times DCF_{\text{ext}} + \gamma \times DCF_{\text{int}})} \left( \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right) \quad (5)$$

這幾個組合因子在不同的環境有不同的意義，對於體內劑量而言可以是生物濃度因子、攝食因子或核種遷移係數等，對體外劑量而言可以是吸收分率(absorption fraction, AF)、區域修正因子(Area correction factor)或佔用因子(Occupancy factor)等。在第一級管理目標中這些組合因子大多是保守假設為 1，在第二級管理目標推導時，則可參考現有文獻引入較合理佔用因子或生物濃度因子(為 0 到 1 之間)，以提高生物參考濃度。此外也建議在第一級管理評估時，污染濃度的考量為最高值，而進入第二級管理時可酌量增加樣品數並採用平均值作為污染濃度。

當污染高於第二級參考濃度管理目標時，則須採用第三級管理目標。第三級管理目標的推導須有對於各廠址的調查資料，定義適當的參考生物並依據實際調查的生物生理機制及體形特異性，方能定義實際的組合因子。例如探討體內劑量時必須考量污染濃度(水或土壤)進入參考生物的食物鏈的比例、生物攝食率及排出率等求得攝入生物體內的濃度比例。其中如生物的攝食量可由生物體大小及活動量推估，而排出率則會依污染核種化學成份的差異而有所不同。所以，每個修正因子都內含有許多可調整的參數。因此廠址的生態資料須十分完備才有可能在第三級管理目標的推導中放寬(提高)生物參考濃度。

由於上述評估方法並未明確指定參考生物種類以及所謂「源項-受體」相關性的曝露環境條件，在實務上雖具有彈性但也相對顯得模糊而使得實作人員無所適從，而引起爭議。因此歐盟支持發展的 ERICA 計畫(Environmental Risk from Ionizing Contaminations :Assessment and management tools)[2]建議在評估生態風險時須考量不同棲息條件的參考生物:包括 12 類淡水生物、14 類海域生物及 14 類陸域生物共計 40 類。生物體型大小  $10^{-6} \sim 10^3$  公斤，以圓形或橢圓形表示。基本上大部份的生物都在這個範圍內，因此可視為涵蓋全面性生態保護的指標。曝露的環境假設地上生物的體外曝露為污染 10 公分厚的土壤，地洞生物為 50 公分厚污染土壤的中間位置，如此便可使用蒙地卡羅推算劑量轉換因子。

就一般實務而言，不同的生物體型及輻射能量會有不同的吸收分率，因此上述體外曝露假設生物體很小而體內曝露假設生物體很大的公式(1)及公式(3)便須修正為

$$\text{體外：} DCF_{\text{ext}} = \sum Y_j E_j W_{R,j} (1 - AF(E_j)) \left( \frac{\text{mGy/d}}{\text{Bq/kg}} \right) \quad (6)$$

$$\text{體內：} DCF_{\text{int}} = \sum Y_j E_j W_{R,j} AF(E_j) \left( \frac{\text{mGy/d}}{\text{Bq/kg}} \right) \quad (7)$$

其中  $AF(E)$  為吸收分率，目前大多採用蒙地卡羅法計算。實務上若參考生

物與文獻不同便要重新計算吸收分率，而蒙地卡羅程式須花費較多的時間去評估，因此可利用經驗公式將已知 AF 資料作內差以得到特定生物體的吸收分率。[3]

ERICA 對於生物的曝露參考劑量值的設定與美國能源部的作法不同，採用的是物種敏感度分布法(Species Sensitivity Distribution method)。這種方法已有應用在許多毒化物的無效應劑量預估的案例。作法上，首先透過風險資料庫 FASSET(Framework for ASSESSment of Environmental impacT)的設立，建立統計風險分布資料，找出少於 5%物種產生低於 10%生物終點效應的輻射劑量，再除上 1~5 的安全係數作為生物曝露參考劑量值。評估結果建議為  $10\mu\text{Gy h}^{-1}$ ，約為美國能源部建議參考值  $40\mu\text{Gy h}^{-1}$  的四分之一，主要差異原因在於安全係數採用最保守的 5 及有效位數取捨所造成。假設無限大射源分布時，兩者的評估結果是相同的。

ERICA 在進行第一級管理目標推定時首先需界定是計畫曝露情境或既存曝露情境，如果是既存曝露情境評估則須輸入環境取樣量測所得的土壤或空氣活度濃度(陸域)及水或底泥活度濃度(水域)。計畫曝露情境則需輸入排放核種活度並建議採用國際原子能總署所建議的環境模式 SRS-19[4]推算介質的活度濃度進而推估生物劑量。40 類生物需依曝露情境一一評估所受劑量率會不會超過  $10\mu\text{Gy h}^{-1}$ ，只要有一種生物超過便要進入第二級管理目標的推導。與美國能源部建議的做法類似，依各廠址的狀況經適當的利害關係人參與討論，決定參考生物及環境參數的調整。如有必要進入第三級管理目標的推導時，同樣須經適當的利害關係人參與討論後，再重新定義廠址的參考生物體型及生活習性並檢討環境條件如沉積率、稀釋因子等。

國際輻射防護委員會(ICRP)統合各國代表意見建議的參考生物，如表二[5]。目前進度已接近定案，預計於 2009 年前發表為正式報告。選擇參考生物的条件是基於普遍可見、已有毒化物或輻射健康效應數據、生命週期與棲息習性可代表特定族群、可能曝露於輻射環境且容易鑑別輻射效應及未來方便作更細節研究探討的動物或植物。由於美國國家輻射防護委員會(NCRP)於 2005 年所發布第 150 號報告中提到，同類的生物經過生命週期歸一處理後，長期曝露效應的趨勢是近似的。所以只建議 12 類參考生物，劑量計算的模式與 ERICA 建議的類似，分別以圓形及橢圓形來代表不同的參考生物。以 ICRP 於 1987 年發布的第 38 號報告所列放射性核種，依所放出的輻射種類分率將各核種劑量轉換因子分為三分量的加總。重粒子如阿伐及分裂產物、能量低於 10keV 的貝他粒子與電子及高能電子與光子三類不同輻射種類的劑量加權因子，並未在此報告建議而將在未來另作探討，但是其所佔各核種的劑量分率可作為簡化未來探討輻射效應的參考。推導劑量轉換因子於該報告附錄 C。

在該份報告中並不建議採用劑量率限值，而是針對各參考生物設定一個所謂推定考量基準區域(Band of Derived Consideration Levels, DCL)，這個區域為輻射效應的灰色地帶，所以干預行動便應在這區域中依不同的曝露情境(計畫性、既存性或事故性)、污染範圍、生態分布、受曝族群分率及物種等因素加以考量，來設定法規建議的行動基準。考量基準的推定是依據世界各地背景輻射劑量的調查統計結果作為基礎，各參考生物的建議區域列於表 2。

目前非人類生物的劑量評估程式由早期美國所發展 LADTAP-2, LADTAP-XLS,到 BCG-CALCULATOR, RESRAD-BIOTA 及歐洲 EDEN, R&D128, ERICA 等，由於發展的基準不一所以程式設計的流程及內容都有差異，例如 LADTAP 及 ERICA 都有源項模式可做計畫性曝露的預估而 RESRAD-BIOTA 及 BCG-CALCULATOR 只就途徑監測(Pathway monitoring)分析數據做評估。各單位採用的參考生物也不盡相同，但是在 2007 年所作的比對測試中，針對特定能量及幾何形狀的劑量轉換因子推導，各程式都可得到類似的結果[6]。未來各程式都將會整合支援 ICRP 所建議的參考生物。就目前已經使用的狀況來看，由於使用簡單且具彈性，又符合目前美國能源部的建議，未來美國地區應該會以 RESRAD-BIOTA 為主。歐洲地區則會以 ERICA 作為主要的評估工具。

目前雖已有部分地區開始做非人類物種的劑量評估，但是實務作業還不成熟，還有許多問題尚待解決，例如輻射種類的加權因子，與人類輻射防護管理架構的結合進而探討風險管理的作業模式等都還需要許多努力的空間。已知 ICRP 規劃將在 2010 年以前完成物種相對生物效能的建議及防護架構的具體建議。屆時對於非人類物種劑量評估的方法與資訊將會更為完備，對於環境的輻射防護架構也將更為具體明確。

#### 參考資料

- 1.DOE (Department of Energy) (2002) A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota, DOE-STD-1153-2002.
- 2.<http://www.ERICA-project.org>
- 3.Ulanovsky, A., Pröhl, G. (2006) A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota, J. Environm. Biophysics 45,4,313
- 4.IAEA (2001) Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Safety Reports Series 19. STI/PUB/1102
- 5.ICRP Draft 4a (December 2007) Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. <http://www.icrp.org/news.asp#drafta>
- 6.Vivesi Batlle, J., Balonov, M., Beaugelin-Seiller, K., Beresford, N. A., Brown, J., Cheng, J-J., Copplestone, D., Doi, M., Filistovic, V., Golikov, V., Horyna, J., Hosseini, A., Howard, B. J., Jones, S.R, Kamboj, S., Kryshev, A., Nedveckaite, T.,

Olyslaegers, G., Pröhl, G., Sazykina, T., Ulanovsky, A., Vives Lynch, S., Yankovich, T. and Yu, C. (2007) Inter-comparison of unweighted absorbed dose rates for non-human biota. Radiat. Environm. Biophysics 46, 349

表 2 ICRP 建議參考生物考量劑量評估之基本資料。

生物體	長軸 (公分)	次長軸 (公分)	短軸 (公分)	質量 (千克)	棲息地	壽命	考量基準DCL (mGy day <sup>-1</sup> )
成年的鹿	130	60	60	245.0	陸域	15y	0.1-1
鼠	20	6	5	0.314	陸域	2y	0.1-1
鴨	30	10	8	1.26	水域/陸域	11y	0.1-1
鴨蛋	6	4	4	0.0503	陸域	30d	
蛙	8	3	2.5	0.0314	水域/陸域	10y	0.1-1
蛙蛋	1	1	1	5.24×10 <sup>-4</sup>	水域	10d	
蛙卵泡沫	20	6	5	0.314	水域	10d	
蝌蚪	1.5	0.75	0.75	4.42×10 <sup>-4</sup>	水域	100d	
鱒魚	50	8	6	1.26	水域	6y	1-10
鱒魚蛋/幼蟹	0.4	0.4	0.4	3.35×10 <sup>-5</sup>	水域	100d	
比目魚	40	25	2.5	1.31	水域	10y	1-10
比目魚蛋	0.2	0.2	0.2	4.19×10 <sup>-6</sup>	水域	15d	
蜂	2	0.75	0.75	5.89×10 <sup>-4</sup>	陸域	100d	10-100
蜂群(自然)	60	30	30	28.3	陸域	3y	
蟹	20	12	6	0.754	水域	15y	10-100
蟹黃	6.0	4.0	1.0	0.0126	水域	0.5y	
蚯蚓(拉長)	10	1	1	5.24×10 <sup>-3</sup>	陸域	5y	
蚯蚓蛋	0.5	0.5	0.5	6.54×10 <sup>-5</sup>	陸域	50d	10-100
松樹樹幹	1000	30	30	471	陸域	200y	0.1-1
草	5	1	1	2.62×10 <sup>-3</sup>	陸域	50d	1-10
草(分生組織)	無限大平面(10cm厚，密度13.7kg m <sup>-3</sup> )				陸域		
褐藻	50	50	0.5	1.25	水域	5 y	1-10

- 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。