

輻射防護簡訊 100

中華民國98年12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、
張寶樹、董傳中、趙君行、鄧希平、蘇獻章（依筆劃順序）
- 發行人：鄧希平 ■ 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

▲100 期簡訊

財團法人中華民國輻射防護協會（簡稱輻協）在民國七十九年九月完成法定程序正式成立。為能提供國內關心輻射防護人士一個交流平台，輻協董事董傳中教授提出發行輻防簡訊的構想，輻協隨後於同年十一月出版了輻射防護簡訊創刊號是為第 0 期，並於民國八十年四月一日出版第一期，預定每季出刊，提供輻射工作相關人士免費索取。

一份贈閱的刊物維持相當不易，需要有充足的人力、稿源及經費支援。輻防簡訊曾在第二期出刊後停了二年，至民國八十二年十月一日再發行第三期，並從季刊改為雙月刊。在輻協歷任董事長曾德霖教授、翁寶山教授以及現任鄧希平教授擔任發行人的全力支持下，輻防簡訊將於本期邁入第 100 期的里程碑。在這近二十年的時間裡，輻協也曾面對許多的起伏與困難，但始終以本著輻協成立時推廣輻射防護的初衷，更加努力。為能繼續維持輻防簡訊的出刊，請關心與支持輻射防護的國內外學者專家，繼續支持輻協並賜稿，讓輻防簡訊朝第 200 期前進。

另為響應環保節約紙張，本簡訊將自第 101 期起停止現行紙本發行，請愛護輻防簡訊之讀者採取上網閱讀方式，連結至本協會網站www.rpa.org.tw 閱讀，謝謝大家對此一環保措施之配合。

▲98 年第 2 次「輻射防護專業測驗」及「輻射安全證書測驗」成績統計結果 (原能會訊)

行政院原子能委員會委託元培科技大學辦理 98 年第 2 次「輻射防護專業測驗」及「輻射安全證書測驗」，業已於 98 年 10 月 24 日測驗完畢，並於 11 月

23 日於行政院原子能委員會網站（www.aec.gov.tw）公布及格人員名單及寄發成績單。

本次報考各項測驗的人數計有：輻射防護師 371 人、輻射防護員 226 人及輻射安全證書 327 人；另各項測驗的及格人數計有：輻射防護師 50 人、輻射防護員 43 人及輻射安全證書 232 人；統計本次各項測驗的及格率分別為：輻射防護師 16.8%、輻射防護員 24.7%及輻射安全證書 73.7%。（詳細統計資料如附表）

另預計 99 年第 1 次「輻射防護專業測驗」及「輻射安全證書測驗」，將於 99 年 4 月 25 日辦理，測驗相關最新訊息與公告，請於測驗前三個月連結行政院原子能委員會網站查詢。

98 年第 2 次「輻射防護專業測驗」及「輻射安全證書測驗」成績統計表

	報名人數	到考人數	及格人數	及格率(%) (及格人數 / 到考人數)
輻射防護師	371	297	50	16.8%
輻射防護員	226	174	43	24.7 %
輻射安全證書	327	315	232	73.7%

▲治療大腸直腸癌新利器：奈米標靶癌症治療新藥開發

(原能會訊)

-提昇癌症治療品質與功效-

核能研究所藥物研發團隊積極進行奈米標靶癌症治療新核醫藥物開發，將放射性同位素包覆在奈米藥物內，使用靜脈注射方式，將放射性奈米藥物傳輸到腫瘤細胞血管新生(angiogenesis)處，除了可以阻斷其供應養分通路外，並放出 β 射線，殺死癌細胞，達到治療腫瘤目的。如銻-188 微脂體於轉移性大腸直腸癌的治療，目前已完成動物試驗，證明效果十分理想。

腫瘤細胞快速生長，靠著血管新生吸收人體養分，使其快速生長，然而在血管新生過程中，因血管發育不全，產生許多漏洞，其大小約微米左右，放射奈米藥物藉著在體內血液循環過程，就會掉入漏洞內，並滯留在腫瘤細胞血管新生附近，若放射奈米藥物內包覆著放射出 γ 射線核種同位素，則可以做為造影診斷用，若包覆著放射出 β 射線核種同位素，則可做為治療用。此放射奈米藥物使用同位素為銻-188，其物理特性：半衰期 16.9 小時，放射出能量為 2.12 百萬電子伏特(MeV)之 β 射線及 155 千電子伏特(KeV)之 γ 射線，故可做為診斷及治療雙功效同位素。

目前放射奈米藥物研發工作進度，包括：

- (1)已完成放射奈米藥物製程及品管分析，並將在轉譯醫學實驗室進行試產，做為新藥(Investigational New Drug, IND)臨床試驗用。
- (2)已完成放射奈米藥物臨床前藥理試驗。

(3)正在進行放射奈米藥物毒理實驗，同時也將進行放射毒理實驗室(good laboratory practice, GLP)認證工作。

核能研究所開發新藥，完全依照衛生署法規進行，期能對國人醫療照顧貢獻乙份力量。

【新聞小辭典】

1.體內放射治療

此類治療是將開放型放射性同位素或其標幟藥物打入體內，其治療原理是利用高度選擇性聚集在病變部位的放射性同位素或放射性標幟藥物所發射出射程很短的 β -粒子，對病變進行集中照射，產生足夠的游離輻射生物學效應，達到抑制或破壞病變組織的目的，而鄰近的正常組織和全身輻射吸收劑量很低。

2.血管新生(angiogenesis)

血管新生(angiogenesis) 是一個生理上新的微血管發展成一個血流供應系統的過程。在生長或是發育上扮演重要的角色，例如在傷口癒合、女性經期、胎兒生長發育。近年來科學家們也發現它和癌症的發展有密切的關係。血管新生對腫瘤的生長非常重要，需要靠血管新生來獲取養份。腫瘤的新生血管常常是很不規則的，它們的管徑大小不一，角度任意彎曲，缺乏完整的血管結構。因此新生血管中的血流遲滯，而血管的通透性較正常血管為大。這些特性造成臨床上腫瘤的水腫現象(edema)，以及放射線檢查時的顯影增強(contrast enhancement)現象。

3.轉譯醫學(Translational medicine)

轉譯醫學 (Translational medicine)，是指連接基礎研究和臨床醫學之互動性研究，強調治療性藥物的早期試驗與評估，促進從「實驗枱到臨床(bench to bedside)」的研究。在過去，傳統的基礎研究、藥品開發、和臨床醫學往往是三個各自獨立發展的領域。但是隨着生物科技技術發展，讓研究標的得以大規模進行，並且藉由生物資訊的統計分析，讓這三個分開的領域得以快速連結。這也是所謂轉譯醫學的內涵。讓以往疾病研究上的基礎病理機制研究成果，能夠直接運用於臨床治療。轉譯醫學研究範圍包含生技醫藥相關領域的藥物開發及新療法的研究運用、臨床到實驗枱銜接的相關性研究等。轉譯醫學之研究已經被證明是一個推動臨床研究的有利過程，但是一個強而有力的基礎研究團隊才能夠加強及加速這個臨床研究重要部份。

□ 會議訓練報導

▲ 98 年度各項訓練班開課時間

(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)	99 年 A1-- 1 月 27 日~2 月 3 日	(高雄)輻射偵測中心
	36 小時	99 年 A2-- 1 月 25 日~29 日	(新竹)帝國經貿大樓
	許可類 設備		

18 小時 登記備 查類 設備	(B 組)	98 年 B20--- 12 月 2 日~ 4 日	(高雄)輻射偵測中心
		98 年 B21--- 12 月 22 日~ 24 日	(台中)文化大學推廣部
		99 年 B1-- 2 月 2 日~ 4 日	(台北)建國大樓
		99 年 B2 -- 2 月 24 日~26 日	(新竹)帝國經貿大樓
		99 年 B3 -- 3 月 3 日~ 5 日	(高雄)輻射偵測中心
輻射防護專業 人員訓練班	輻 防 師 ($\frac{1}{2}$ 小時) 輻 防 員 (100 小時)	員 16 期 第一階段-12 月 14 日~ 18 日 第二階段-12 月 21 日~ 25 日 第三階段-99 年 1 月 4 日~ 8 日 第四階段-99 年 1 月 11 日~ 14 日 進階 11 99 年 1 月 20 日~ 22 日 (進 11-1) 99 年 2 月 3 日~ 5 日 (進 11-2)	(新竹)帝國經貿大樓
鋼鐵建材輻射 偵檢人員訓練班		鋼--98 年 12 月 3 日~ 4 日	高雄
		鋼--98 年 12 月 10 日~ 11 日	(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，電話：(03)5722224。◎

□專題報導

▲等價劑量的發展

(輻協訊)

前言

等價劑量(equivalent dose)是一防護量，在 ICRP-60(1991)中提出，更進一步的在 ICRP-103 中(2007)建議持續採用。此一防護量的前身為等效劑量(dose equivalent)，是在 ICRP-26 (1977)報告中所提出。從輻射防護目的，為某一器官或組織內的機率效應的發生機率被假定為正比於器官或組織內的等效劑量。

等效劑量簡單的說為射質因數(Q)與吸收劑量的乘積，考慮到不同類型輻射的不同有效程度，它代表著就若干生物學終點而言，對給予輻射所具有的不同相對生物效應係數所作出的經過考慮的判斷。射質因數被假定為研究的組織內每單位平均徑跡長度授與的能量，而與效應的類型和生物學終點無關。

輻射防護中使用的基本劑量是吸收劑量，吸收劑量是用每單位質量中吸收的能量來表示，ICRP 建議把以組織及器官作為最小單位的平均吸收劑量，以作為劑量評估的基礎。吸收劑量乘以輻射加權因數所得的劑量稱為等價劑量。這與等效劑量基本上是沒有變化的，名稱之改變是因為現在用輻射加權因數來代替過去用的射質因數。

吸收劑量

吸收劑量是對人體不同組織或器官的平均，在低劑量情形下，為了限制機率效應而用來針對防護量的定義，以線性無低限劑量(LNT)反應關係假設為基

礎，允許體外與體內曝露相加。人體組織與器官吸收劑量的平均與其加權的總和，作為防護量定義的基礎。此一觀念是就輻射防護目的所考慮的可接受近似值，首次由 ICRP-9 所提出，後來在 ICRP-26 及 ICRP-60 持續被採用，不過名稱及定義作一些修正。

人體接受游離輻射曝露，輻射效應的劑量反應間關係，在輻射防護上是以危險度估計為基礎，因此，必須有一個基本的量來描述游離輻射效應。吸收劑量是在輻射防護中所定義的基本物理量，是在人體組織體積內能量分布的平均，亦可完整地定義在物質中可測量的任一點。在輻射生物學、臨床放射學與輻射防護，吸收劑量 D 是基本的物理劑量的量，使用在所有游離輻射形式與任何受照射的幾何形狀。

吸收劑量 D 為

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \quad (1)$$

此處的 $d\bar{\varepsilon}$ 是由游離輻射授予到質量 dm 物質的平均能量，國際單位是 $J kg^{-1}$ ，其專有名詞為戈雷。吸收劑量就基本物理量有科學上嚴謹的需求，意味著考慮輻射場以及在物質特定體積內部與外部所有的交互作用，而不是考慮與物質的原子結構交互作用的機率本質。

等價劑量

器官與組織對不同的輻射有不同反應，因而呈現不同的放射敏感度，在 ICRP-26 使用射質因數與組織加權因數，在 ICRP-60 使用輻射與組織加權因數，個人有關的因子包括性別，年齡與個人敏感度亦將影響其危險度。

在低劑量範圍輻射防護主要關切的防護是輻射誘發癌與遺傳疾病，這些疾病稱為機率效應，他們的本質是機率的，假設是任何曝露皆能夠引發效應，並無低劑限劑量，此即所謂線性無低限理論(LNT)。其主張是不可能消弭機率危險度，且劑量限之設定可抑制其發生，並因此防止不可接受的危險度水平。作為此一指標 ICRP 發展了有效劑量，藉由使用加權因數（輻射與組織）做為評估的基礎。

然而在輻射防護體系中劑量值較高的情形下，特別是意外情況，輻射曝露可能引發確定效應，此效應導致器官與組織之完整及功能的損害，臨床上可觀察到損傷發生在低限劑量之上，雖然任何損傷的範圍取決於吸收劑量與劑量率以及輻射品質。傷害的表徵隨著一個組織或器官到其他而不同，取決於細胞的敏感度、不同分化程度細胞的功能、細胞組成與細胞再生能力。細胞再生能力喪失，纖維化過程的發展與細胞死亡為大部分組織反應的病因的主要角色。某些非常敏感的組織對應到早期組織反應，如分裂速率很快細胞系統，包括血液組織，消化道系列細胞，皮膚的基底細胞及男性精細胞。延遲組織反應亦可能在部分血管或所有器官與組織產生功能本質的要素結締組織以及眼球水晶體損傷，此類損傷可能在曝露後數個月甚至數年出現。在這個情形下，等價劑量是

用來描述此一效應的量。

過去在 ICRP-26 不同游離輻射品質考慮的量是等效劑量，等效劑量 H 定義為

$$H = DQN \quad (2)$$

此處 D 是在特定組織中的一點的吸收劑量， Q 是在這特定點中指定組織的射質因數， N 是就輻射劑量包括任何其他修正危險度的因數，然而沒有此種修正被指定，因此 H 的定義隨後就改成

$$H = DQ \quad (3)$$

輻射防護所關切的是控制游離輻射曝露，以防止組織反應及機率效應的風險，限制在可接受的水平之下。防護量是用來指定曝露的限度，以確保機率的健康效應風險，保持在可接受的水平，並避免組織反應。防護量的定義是以輻射形式 R 在特定器官或組織 T 體積內的平均吸收劑量 $D_{T,R}$ 為基礎。輻射 R 所給定的型態與輻射能量，是由入射到身體的體外曝露或身體內的放射性核種所發射體內輻射。器官或組織等價劑量 H_T 的防護量，定義為：

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} \quad (4)$$

W_R 是輻射 R 的輻射加權因數，總和是由整個所涉及的輻射形式來決定。等價劑量的單位是 $J\ kg^{-1}$ ，專有名詞是西弗。 W_R 數值是針對特定輻射形式及輻射能量而設定。ICRP-103 所建議的輻射加權因數如表 1 所列。 W_R 值的選擇係依據相關的機率效應大範圍的 RBE 實驗值為判斷基礎，RBE 值隨劑量的遞減增加升高至最大值。RBE 值的獲得在經驗上取決於參考輻射的選擇。

輻射加權因數

輻射防護量的定義中，輻射加權因數的概念從 1960 年代早期就已被使用，在 1991 年前使用特定的 $Q(L)$ 函數 (ICRP, 1977) 來取得射質因數。輻射加權因數 W_R ，從 ICRP-60 開始指定為防護量的定義，其所建議的輻射加權因數如表 2。他們是在任一組織或器官中的平均吸收劑量乘上不同輻射形式相對於光子輻射引起危害原因的因子， W_R 數值被指定為輻射形式與能量的項，而不論其入射到人體或是由身體中放射性核種的發射。故輻射加權因數 W_R 的相同數值，是應用在身體所有組織與器官，與歸因於一次輻射衰減及不同輻射品質的二次輻射產生，與實際輻射場與變動事實無關。因此 W_R 的數值被視為一個代表整個身體不同組織與器官的輻射品質的 averages 的因子。

表 1 ICRP-103 輻射加權因數的建議

輻射型態	輻射加權因數 W_R
光子	1
電子及繃子	1
質子及荷電 π 介子	2
阿伐粒子、核分裂碎片、重核	20

輻射加權主要是基於不同輻射對應的機率效應的相對生物效能(RBE)去評估，RBE 是使用在放射生物學中就不同的輻射生物效能的特徵。RBE 值是由兩種輻射形式在同一照射條件下，產生相同特定生物效應的吸收劑量之比(參考輻射劑量值除以所考慮輻射引起相同程度效應所對應的劑量值)。

射質因數與輻射加權的概念是不同輻射形式，以初始的荷電粒子沿著徑跡其能量留存性質不同的生物效能的差異為基礎。就輻射防護的應用，在組織中荷電粒子徑跡的複雜結構，僅藉由單一參數的特性來表示，是一種簡化的作法。非限制線性能量轉移 L_{∞} (通常以線性能量轉移 LET 或 L 來表示)與射質因數 Q，定義在不同的 ICRP 與 ICRU 報告中。

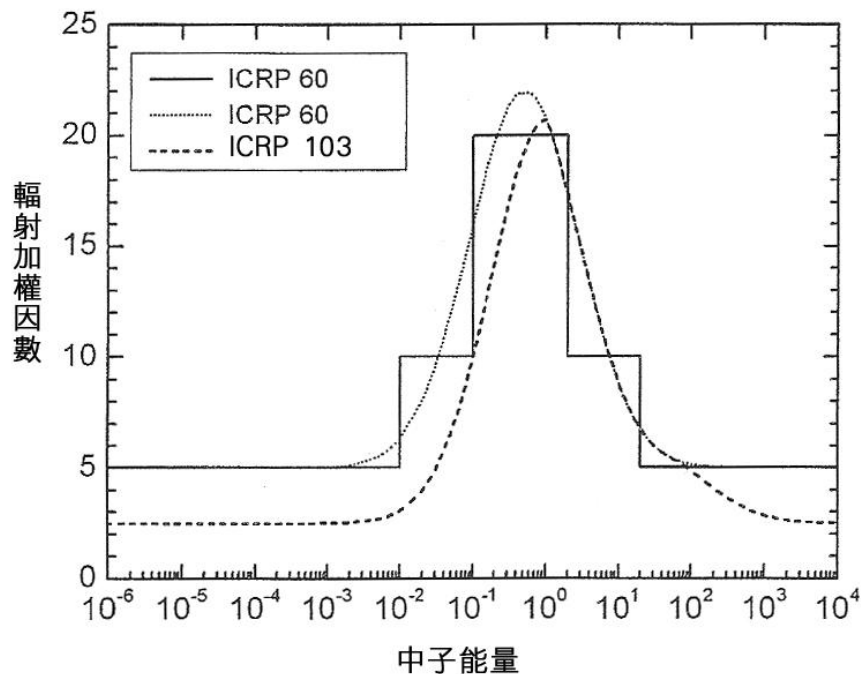


圖 1 不同中子能量的輻射加權因數 W_R ，階梯函數與連續函數為 ICRP-60。

W_R 值的決定，主要是依照來自體內有關機率效應調查 RBE 數據為基礎。當細胞在體外研究調查中，就有關致癌的基本機制的瞭解有重要的貢獻，RBE 值可在此類研究中獲得。在許多例子中，從動物體內研究可用的有限的數據是針對輻射防護所感興趣輻射品質的範圍。因此， $Q(L)$ 函數主要是使用來自體外實驗數據為基礎。RBE 數值獲得是在實驗上的參考輻射選擇，一般來說，低線性能量轉移輻射被用來作為參考，大部分是 ^{60}Co 與 ^{137}Cs 的加馬射線，或大於 200kV 的 X 射線。

低 LET 輻射的輻射加權因數

ICRP-60 對所有的光子採用 1 的輻射加權因數，在 ICRP-92 提出相同的看

法。不同能量的光子 RBE 數據的平均就輻射防護所建立 W_R 值是最適當的判斷，這個方法不意味對於不同能量光子的生物效能沒有差異存在。

表 2 輻射加權因數 (ICRP 1991b)

輻射種類與能量區間	輻射加權因數 W_R
光子，所有能量	1
電子及 μ 介子，所有能量之	1
中子，能量 < 10 keV	5
10 keV 到 100 keV	10
> 100 keV 到 2 MeV	20
> 2 MeV 到 20 MeV	10
> 20 MeV	5
質子能量 > 2 MeV，回跳質子除外	5
阿伐粒子，分裂碎片，重核	20

光子、電子與 μ 介子是低 LET 輻射，LET 小於 10 keV/ μ m 的值，低 LET 輻射通常輻射加權因數建議為 1。在 1991 年以前是藉由對 $L < 3.5$ keV/ μ m 設定 $Q(L)=1$ ，ICRP-60 針對這類輻射定義則是對於 $L < 10$ keV/ μ m 時，設定 $Q(L)=1$ 與 $W_R=1$ 的數值，這主要是針對實務上理由所決定的，但也無法就輻射危險度因子，估計大量不準確性的考量有更詳細描述判斷。故針對所有光子與電子有效劑量的計算，保持單一的 W_R 值是在輻射防護實務上的選定。

總括的說，針對一般輻射防護目的就所有低 LET 輻射持續使用 $W_R=1$ 是可行的，重要的是此一簡化僅針對評估有效劑量評估的應用。例如就劑量限度、劑量的評估與管制。來自輻射曝露並不企圖就機率效應的個人危險度做回溯性的評估。個人回溯性的劑量評估的情形，必須考慮輻射場(包括低 LET 輻射形式)與適當的 RBE 值更詳細的資訊。

中子的輻射加權因數

入射到人體的中子的生物效能與中子能量關係密切，原因是二次輻射與其能量的變動，下列的效應是重要的考慮項目

- 在組織中隨中子能量減少而增加其中子的吸收而產生的二次光子。
- 回跳質子的能量隨中子能量增加而增加。
- 高能中子的重荷電粒子的釋出。
- 非常高能量中子，原子核分裂的過程。

在 ICRP-60 針對中子的輻射加權因數採用 2 種方式，藉由階梯函數(step function)區分 5 種中子能量範圍，其 W_R 值分別為 5,10,20,10 與 5，如圖 1 所示。 W_R 值如果不是一般使用在輻射作業中等價劑量計算時，連續函數通常被採用。在輻射場中的中子常常具有較寬的能譜，在估算劑量時要使用能量依存的

轉換係數來計算，所有國際間所建議的轉換係數，包括在 ICRP-74 也是以連續函數為基礎。因此，連續函數在此就中子的輻射加權因數定義，必須加以註明連續函數的使用，僅就實務上與計算上考量為基礎，並不意含目前已有更精確數據。

ICRP-60 中子的 W_R 值最大為 20，ICRP-92 指出中子能量區間接近 1MeV 時， W_R 最大值約為 20，最新的建議認為此仍是可接受的近似值。此一判斷不是基於特定的實驗數值，而是反映一個代表性的值，是考慮致癌與壽命縮短的實驗分析所得到的大範圍的 RBE 值。當人體受曝露小於 1 MeV 能量的中子，吸收劑量顯著的部分是由來自 $H(n,\gamma)$ 反應二次光子的貢獻。在這個能量範圍中，中子所產生二次荷電粒子的 LET 分布的改變，是 RBE 值較高的主要原因 (主要是質子)。

ICRP-92 建議輻射加權因數依中子能量而改變，必須以在 ICRP-60 定義的 $Q(L)$ 函數為基礎，計算人體的平均射值因數 q_E 的平均與加權因數間有下列的關係

$$W_R = 1.6(q_E - 1) + 1 \quad (5)$$

這個方程式保留中子能量在接近 1 MeV 的 W_R 值約為 20 的數值，考慮劑量在人體中的分布與不同器官與組織的組織加權因數的使用， q_E 的計算有下式關係

$$q_E = \sum_T w_T Q_T D_T / \sum_T w_T D_T \quad (6)$$

此處 Q_T 是組織或器官 T 的平均射質因數， D_T 對應到平均吸收劑量，由於器官與組織不同的 w_T 值，不是對稱分布在體內， q_E 值取決於輻射入射到身體的方向性。

小於 1 MeV 能量的中子輻射加權因數有相似的能量依存性，主要是取決於二次光子的劑量分布。能量低於 1 MeV 輻射加權因數的定義為

$$W_R = 2.5 + 18.2 \exp\left[-(\ln E_n)^2 / 6\right] \quad E_n < 1 \text{MeV} \quad (E_n \text{ 以 MeV 表示}) \quad (7)$$

圖 1 顯示中子能量範圍在 1MeV 以下， W_R 的值是較 ICRP-60 為低，這個函數完全反映身體中二次光子的效應以及與 ICRP-92 的平均射質因數 q_E 。

能量範圍在 1MeV 以上需要不同的考量，因為在這個能量範圍，幾乎沒有動物調查新的數據可以使用。所有存在的實驗數據，不論是動物或細胞，清楚的顯示中子能量增加時 RBE 是下降的，這是以 $Q(L)$ 函數為基礎。針對中子能量高於 50MeV 並沒有發表新的動物實驗數據，在人類淋巴球染色體雙中節的誘發，某些 RBE 的數據顯示整個人體的平均射質因數，其中子能量增加時而減少到小於 5 的數值。針對中子連續的加權因數函數亦使用到能量 50MeV 以上，其 W_R 值隨能量上升而下降，從 50MeV 的 5.5 到 10GeV 約 2.5。總括來說，下列連續函數用來針對中子的輻射加權因數的計算

$$W_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6} & E_n < 1\text{MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6} & 1\text{MeV} \leq E_n \leq 50\text{MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6} & E_n > 50\text{MeV} \end{cases} \quad (8)$$

ICRP-103 所提到就中子延伸的討論 W_R 能量依存的重要本質，中子新的建議採用的 W_R 函數是以第 92 號出版物為基礎，但要考慮額外的數據。

針對中子的 W_R 函數是使用下列準則來推導：

- 選定連續函數取代階梯函數，此一決定不是從放射生物學數據較高準確度結果而得到的，是以實用上考量為基礎。
- 大約 1MeV 的中子 W_R 為最大值，保留大約為 20 的數值。
- 中子能量小於約 1 MeV，針對 W_R 能量依存性曲線的形狀，一般是以相關的平均射質因數 q_E 為基礎。
- 能量高於 50MeV，針對物理上的理由 W_R 應以趨近方式，其值接近於質子(針對某些存在放射生物學的數據)，在中子能量高於 1GeV，一個漸近的值選定為 2.5。

質子與 π 介子的輻射加權因數

針對質子的曝露中僅有體外輻射源必須考慮，ICRP-60 除了回跳質子外所有能量高於 2 MeV 的質子輻射加權因數建議為 5。最近幾年，質子輻射受到較多的關注，由於針對太空飛行工具中的空勤人員與太空人的曝露，增加了許多這類人員的劑量評估的研究，在這些情況中，體外質子輻射曝露是來自太陽與宇宙射線，在其輻射場中，主要是高能量質子。但是數 MeV 能量的質子其所增加的生物效能，因其射程在組織中很淺，且大部分在皮膚被吸收，在體外輻射的防護顯得較不重要。

針對高能量質子的大部分有關於宇宙射線研究下，而在輻射防護上對所有能量的質子採用單一 W_R 是適當的。針對質子大部分 RBE 值量測在 1 到 2 之間。100 MeV 質子阻擋本領 (stopping power) 在組織中平均射質因數的計算值小於 1.2，接近 1 GeV 非常高能的質子，從核反應的二次荷電粒子變得較重要，其平均射質因數上升增加到約 1.8。故質子的輻射加權因數採用新的建議值為 2。

π 介子是帶負電、正電或中性的粒子，大氣層高度中所遭遇，來自一次宇宙射線(高能質子居大多數)於與原子核交互作用的結果，因此對空勤人員與乘客的曝露有所貢獻(大概 0.4%的 $H^*(10)$)。它們也被發現在高能粒子加速器的屏蔽後複雜輻射場的一部分，對加速器工作人員的職業曝露有所貢獻(上升到 0.4%的 $H^*(10)$)。 π 介子的質量約相當於 273 倍電子質量、約 1/7 的質子質量，荷電 π 介子損失其能量主要是經由庫侖交互作用，當負電荷 π 介子通常被原子核捕獲達到靜止狀態，此時蛻變放出多種的高 LET 粒子。

π 介子的蒙地卡羅計算針對整個人體的平均射質因數評估是能量的的函

數。結果顯示針對 50 MeV 以上的正電 π 介子與負電 π 介子的平均射質因數在 1 到 2 間。考量在真實輻射場 π 介子的能量分布，是非常寬廣與複雜的高能量場中整體曝露貢獻是很小的觀點，建議對所以荷電 π 介子使用加權因數值為 2。

阿伐粒子的輻射加權因數

人類曝露於阿伐粒子主要是來自體內曝露，例如從吸入氦子核或吸入阿伐發射的核種就像銻、釷、鐳、釷與鈾的同位素，有許多流行病學的研究，提供吸入或靜脈注射阿伐發射體的危險度資訊。放射性核種分布和劑量估計與其在組織和器官中分布是非常複雜，且與其使用模式有關。劑量分布一般非常的不均勻，且劑量計算伴隨其本質不確定度。針對這個原因流行病學以及實驗的研究，雖然他們能提供有價值的指引，但不能僅用來針對阿伐發射體 RBE 的評估基礎。在組織中阿伐粒子與 $Q(L)$ 函數使用阻擋本領數據去計算，6 MeV 阿伐粒子在組織中減速的平均射質因數，估計約為 20。

阿伐發射體放射性核種可以得到的人類與動物 RBE 數據，指出 RBE 取決於所考量的生物學終點。針對相同終點的核種間的 RBE 值變動主要歸因於組織中發射體位置的不同。人類數據的限制，阿伐粒子對於肺與肝癌 RBE 值估計的建議值約為 10~20，但骨癌與白血病有較低的值。從動物與體外研究，就癌症相關效應與體外低 LET 輻射相比較，阿伐發射體 RBE 值約在 10 左右或更高。在狗骨癌誘發的研究，針對不同趨骨的阿伐發射放射性核種，建議有不同 RBE 值。然而，這些比較是以平均骨骼劑量與大部分可能歸因於骨中放射性核種不同位置的差異。人類與動物數據建議阿伐發射體留存在骨中白血病的危險度的 RBE 值小於 20。故針對阿伐粒子可以得到的數據與 W_R 值選定的判斷，最近的數據沒有強烈的支持針對阿伐粒子的輻射加權因數需要去改變， W_R 值建議仍為 20。

重離子與分裂產物的輻射加權因數

分裂產物的劑量就輻射防護是重要的主要是體內劑量學，且輻射加權因數情況可以視為與阿伐粒子相似的，由於他們是短射程，在器官與組織內的生物動力學分布是非常重要的，且強烈影響其生物效能。輻射加權因數為 20 在與阿伐粒子相等，可視為概略保守的估計。在組織中分裂產物射程短且高能量轉移，因此，對小體積組織導致在這一點非常高的區域劑量，在此種情形下，平均器官或組織劑量的概念應用時，必須要有特定劑量分布的考量。

在體外曝露中重離子主要是在高能加速器輻射場中附近、在飛行高度與太空遭遇，針對重離子少數的 RBE 數據大部分是體外實驗。在染色體變異與突變的體外研究中，提供了重離子的 RBE 隨 LET 上升而增加的證據，一直升到 100~200 keV μm^{-1} 附近，粒子的輻射品質是重離子沿著入射到人體與停留在身體中的徑跡而強烈地改變，可能選擇平均值去推導 W_R 。針對重離子所有形式與能量，選定單一 W_R 值為 20，是在輻射防護一般應用下適當的判斷。

結語

低劑量範圍的輻射防護主要考量的是針對輻射誘發癌症與遺傳疾病的防護。這些效應本質上被認為是機率性的、沒有低限、增加的機率正比於輻射劑量。對有效劑量的定義與計算，建議以輻射加權因數，提供各種不同的輻射效應中引發機率效應的差異；與組織加權因數，提供輻射在不同器官與組織輻射敏感度誘發的機率效應。輻射加權因數是以輻射的高線性能量轉移作描述，亦即高 LET 輻射在低劑量下的機率效應而推導出來的。

在高劑量(特別是意外事故)的情境下，輻射曝露可能導致確定效應(組織反應)，高於低限劑量在臨床上可觀察到的損傷發生。其損傷的程度取決於吸收劑量、劑量率、輻射的品質以及組織敏感度。一般而言，於低劑量時高線性能量轉移輻射所引發組織反應的相對生物效能的值，被發現比其得到機率效應的值要低，組織相對敏感度亦不相同。等價劑量與有效劑量不得用於較高輻射劑量或需要任何治療有關組織反應的決策。在這種目的下，劑量應以吸收劑量評估，涉及高 LET 輻射(例如：中子或阿伐粒子)，應使用吸收劑量以適當的相對生物效能作加權。

防護量(等價劑量與有效劑量)，不能直接用在輻射監測，他們不可直接度量，以作業量來取代 E 與 H_T 評估，針對體外作業的曝露，定義等效劑量作為區域與個人監測，區域監測器可藉在自由空氣中量測來執行，以及佩帶在身體上個人劑量計。工作場所體外曝露有效劑量通常被認定為量測個人等效劑量 $H_p(10)$ ，假設全身均勻曝露視為可接受的評估。從放射性核種攝入約定有效劑量，由所考量的放射性物質的嚥入與吸入來評估。輻射防護中使用防護與作業量體系如圖 2 所示。

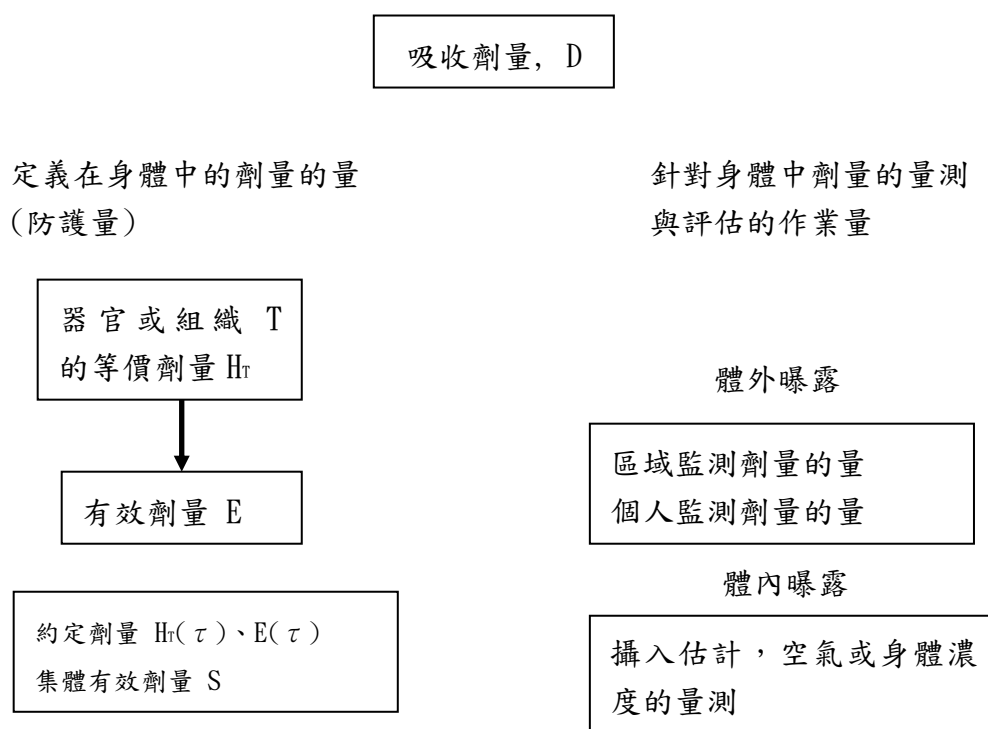


圖 2 輻射防護中使用防護與作業量體系

- 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。