

臺灣輻射防護史話

翁寶山 編著

中華民國九十二年十二月 第一版

目錄



序	i
目錄.....	ii
第一章 輻射科學的開始	1
§ 1.1 前言	1
§ 1.2 X 射線的發現	1
§ 1.3 放射性的發現	8
§ 1.4 電子的發現	15
§ 1.5 結語	17
第二章 原子時代的來臨	19
§ 2.1 前言	19
§ 2.2 丹麥傑出學者	19
§ 2.3 原子核型的結構	20
§ 2.4 波耳原子理論	21
§ 2.5 中子的發現	22
§ 2.6 原子核的分裂反應	24
§ 2.7 我國興建核反應器概況	31
第三章 單位與輻防的量	33
§ 3.1 前言	33
§ 3.2 國際單位制	33
§ 3.3 計量單位的說明	33
§ 3.4 輻射防護的量	37
§ 3.5 ICRU-60 兩個新量.....	43
§ 3.6 結語	47
第四章 防護安全標準的演變.....	49
§ 4.1 前言	49
§ 4.2 主管機關與法源	49

§ 4.3 母法與輻射防護	51
§ 4.4 防護標準的演變	54
§ 4.5 游離輻射防護法	68
§ 4.6 防護安全標準的趨勢	69
第五章 醫用放射學的發展.....	71
§ 5.1 前言	71
§ 5.2 發現 X 射線前的科技發展.....	72
§ 5.3 放射診斷	74
§ 5.4 影像醫學及介入放射學	79
§ 5.5 輻射腫瘤學	80
§ 5.6 核子醫學	84
§ 5.7 臺灣核子醫學簡史	92
第六章 醫用輻射防護.....	97
§ 6.1 前言	97
§ 6.2 國際上放射醫學及輻防史上的紀事.....	97
§ 6.3 我國放射醫學及輻防史上的紀事.....	101
§ 6.4 現行醫用輻防相關法規	104
§ 6.5 醫用輻防的專業性	104
§ 6.6 結語	112
第七章 學術界的輻防.....	115
§ 7.1 前言	115
§ 7.2 清華大學	115
§ 7.3 核能研究所	117
§ 7.4 同步輻射研究中心	120
第八章 核能發電的輻防.....	129
§ 8.1 前言	129
§ 8.2 核能發電的進度	129
§ 8.3 核能營運現況	131
§ 8.4 未來核能發展	140
§ 8.5 核發處保健物理課	141
§ 8.6 核一廠保健物理課	153
§ 8.7 核二廠保健物理課	157

目錄

§ 8.8 核三廠保健物理課	160
§ 8.9 核四廠保健物理課	165
第九章 輻射環境偵測	167
§ 9.1 前言	167
§ 9.2 輻射偵測中心	167
§ 9.3 放射試驗室	175
§ 9.4 其他機構	179
§ 9.5 環境測量中的問題	179
第十章 工業界的輻防	185
§ 10.1 前言	185
§ 10.2 國際上的作法	185
§ 10.3 射源選擇與執照統計	186
§ 10.4 射源分類	188
§ 10.5 放射照相術	189
§ 10.6 分析技術	191
§ 10.7 量規技術	193
§ 10.8 照射技術	199
§ 10.9 非密封放射性物質	202
§ 10.10 其他技術	203
§ 10.11 結語	207
第十一章 放射性廢棄物	209
§ 11.1 前言	209
§ 11.2 貯存與處置	209
§ 11.3 核能電廠廢棄物管制	210
§ 11.4 核四廠放射性廢棄物處理系統	215
§ 11.5 最終處置管制	217
§ 11.6 小產源放射性廢棄物管制	222
§ 11.7 豁免與清潔	223
§ 11.8 放射性廢棄物管理的新觀念	225
§ 11.9 未來展望	228
第十二章 低劑量生物效應	231
§ 12.1 前言	231

§ 12.2 確定效應與機率效應	231
§ 12.3 早期的生物效應	232
§ 12.4 原子彈倖存者的輻射效應.....	233
§ 12.5 BEIR-V 報告	234
§ 12.6 劑量與致癌效應的評估.....	235
§ 12.7 輻射激效	240
§ 12.8 生物效應機制	242
§ 12.9 核能發電的輻射效應研究.....	245
§ 12.10 其它輻射效應的研究.....	248
§ 12.11 大眾對輻射的恐懼	249
§ 12.12 放射性污染鋼筋事例.....	251
§ 12.13 結論	255
第十三章 持續曝露的新建議	259
§ 13.1 前言	259
§ 13.2 持續曝露的健康效應	260
§ 13.3 臺灣的自然背景	262
§ 13.4 ICRP-82 建議	266
第十四章 輻射防護百年回顧	279
§ 14.1 前言	279
§ 14.2 西元 1895 年以前	279
§ 14.3 西元 1895-1914 期間	279
§ 14.4 西元 1915-1939 期間	281
§ 14.5 西元 1939-1949 期間	284
§ 14.6 西元 1950-1956 期間	286
§ 14.7 西元 1957-1965 期間	289
§ 14.8 西元 1966-1977 時期	292
§ 14.9 西元 1978-1986 期間	294
§ 14.10 西元 1987 年迄今	296
第十五章 未來輻防的趨勢.....	299
§ 15.1 前言	299
§ 15.2 游離輻射防護法	299
§ 15.3 防護體系的新趨勢	301

目錄

§ 15.4 ICRP 未來新建議芻議.....	305
§ 15.5 結語.....	307
附錄一 臺灣輻射工作人員的劑量統計.....	311
§ A1 前言.....	311
§ A2 專有名詞.....	311
§ A3 輻射工作類別.....	312
§ A4 統計分析的結果.....	312
附錄二 氡問題的簡史.....	317
§ B1 前言.....	317
§ B2 肺疾病.....	317
§ B3 病因探討.....	317
§ B4 鈾礦開採及氡子核作用.....	318
§ B5 住宅內氡問題.....	320
§ B6 術語匯編.....	321
附錄三 游離輻射防護法.....	323
§ C1 總則.....	323
§ C2 輻射安全防護.....	324
§ C3 放射性物質、可發生游離輻射設備或輻射作業之管理.....	328
§ C4 罰則.....	330
§ C5 附則.....	333
附錄四 國家游離輻射標準實驗室.....	335
§ D1 前言.....	335
§ D2 大事紀要年表.....	335
§ D3 量測追溯體系.....	335
§ D4 X 射線原級標準.....	336
§ D5 銻、鈷的空氣克馬與鈷的水中吸收劑量.....	337
§ D6 校正服務.....	337
§ D7 活度標準的追溯與應用.....	337
§ D8 國際事務與活動.....	337
附錄五 有效等效劑量與有效劑量的銜接.....	341
§ E1 前言.....	341
§ E2 實用量和防護量的關係.....	342
§ E3 結論與建議.....	343

§ E4 國際經驗回饋.....	345
索引	349

第一章 輻射科學的開始

§1.1 前言

在 19 世紀末自 1895 至 1898 這 3 年間，從 X 射線(又稱 X 光)的出現至天然存在放射性元素釷、鐳的發現，人類開始接觸到用人工方法造成的輻射(在醫院多稱為放射線)以及天然放射性核種。輻射科技進展的迅速，難以想像。在這段期間內，影響最深遠的首推 X 射線。

§1.2 X 射線的發現

X 射線是一種短波的電磁波，具有很強的穿透本領。這種射線是由德國物理學家倫琴(Wilhelm Conrad Röntgen, 1845-1923)於 1895 年 11 月在維爾茨堡(Würzburg)大學實驗室裏發現的。X 射線的發現是對陰極射線長期深入研究的必然結果，並促進放射性和電子的發現。因此，倫琴的這一成就具有里程碑的意義。為了解 X 射線的發現過程及其對後來科學研究的深遠影響，首先有必要簡要介紹一下倫琴和他新發現的歷史背景。

1. 在研究而非在想

1845 年 3 月 27 日出生的倫琴是一個德國商人且為一呢絨廠負責人的

獨子，他 3 歲時舉家遷荷蘭。他小時候學習並不用功，父母希望他將來成為商人，以便繼承父輩基業。他在中學時代因嬉戲被開除，因而在後來想進入大專院校時，由於缺少中學文憑而招來許多麻煩。幸虧他在中學所讀自然科學學科的評語很好，1865 年才能獲准進入瑞士蘇黎世工業學校(Zürich Polytechnical School)，在機械系待了 3 年，德國籍克勞修斯(Rudolf Clausius, 1822-1888)是他的物理老師。1868 年畢業以後，他就在孔特(August Kundt, 1839-1894)的建議下蘇黎世仍在工業學校研究物理學。1869 年他向蘇黎世大學提出論文，同年 6 月 22 日獲蘇黎世大學頒予博士學位後，1870 年就隨孔特到維爾茨堡大學，並成為這位實驗物理學家的助手。後經多次輾轉，1894 年他當上維爾茨堡大學校長，翌年發現 X 射線，從此聞名於世。由於他的這一科學貢獻，他榮獲首屆諾貝爾物理學獎(1901 年)以及許多其他的榮譽。

倫琴的科學研究主要涉及氣體熱學性質、光的偏振、光和電的關係、以及電介質中的磁效應等。他一生酷愛晶體，一直在研究晶體熱電和壓電

現象。可是他沒有想到，正是他所喜愛的晶體，在他探討陰極射線性質的實驗中，向他閃爍著神秘的螢光，引導他去發現 X 射線這種看不見的東西。

侖琴的科學研究態度極端認真嚴謹。他從不馬虎從事，凡事喜歡自己動手。在做實驗時，他不喜歡帶個助手而是喜歡獨自一人，有條不紊地認真試驗。他為人謙遜，不喜作預言，也從不習慣於聲張自己的發現，且他總是無私地把自己的研究成果及時告知同業和朋友。他把獲得的諾貝爾獎金轉贈給維爾茨堡大學，以促進科學研究的發展。這位首屆諾貝爾物理學獎獲得者，也是第一位不作演講的科學家。他認為關於他的發現的一切要點，都在他的有關的 3 篇論文中詳述無遺。他也是生前吩咐在他去世後把他的手稿全部焚燒無遺的物理學家。他不習慣於詳述自己的研究過程。因此，有關他的重大發現的記載，多少帶有臆測的成分。他的研究工作的最大特點之一，與英國籍法拉第 (Michael Faraday, 1791-1867) 相似，往往以直觀形式提出理論物理的問題，侖琴的學生德國索末菲 (Arnold Sommerfeld, 1868-1951) 形容他不需要“數學的拐杖”。1923 年 2 月 10 日侖琴罹患腸癌過世，享年 78 歲。

2. 從陰極射線到 X 射線

X 射線的發現是對陰極射線深入

研究的一個直接的結果。因此，有必要簡要回顧一下在 X 射線發現前有關陰極射線的研究情況。

有關真空放電現象的研究由來已久，法拉第曾於 1836 年發現稀薄氣體的放電伴隨著色彩繽紛的輝光，並發現“法拉第暗區”。德國普呂克 (Julius Plücker, 1801-1868) 借助於較高真空度的放電管於 1860 年代進一步研究法拉第暗區，他發現與放電管陰極相對的管壁上(即陽極哪一端)呈現綠色螢光，這個光斑還會因外界磁鐵的移動而改變位置。後來，他的學生希托夫 (Johann Hittorf, 1824-1914) 獲得 10^{-5} 大氣壓的高真空度，他做了一個有趣的實驗，即在陰極和螢光斑之間插入其他物體，這時就呈現出這物體的投影，於是可以判斷放電是從陰極而來的現象，是一種射線。他後來還用彎管做實驗，從而判斷這種射線是直進的。德國物理學家戈德斯坦 (Eugen Goldstein, 1850-1930) 於 1876 年進一步從實驗證實這種射線的直線傳播性質和受外界磁場的影響將產生偏轉，並且發現，無論用什麼金屬材料製成的陰極，也不管陰極的形狀如何，所得結果都一樣。他第一次把這種射線稱為“陰極射線”。1879 年，英國物理學家克魯克士 (William Crookes, 1832-1919) 製成克魯克士管，其真空度達 10^{-6} 大氣壓，並發現克魯克士暗區。他還做了個轉輪實

驗，即在克魯克士管內安放一個小葉輪如圖 1.1 所示，當陰極射線射來時，它會轉動起來。此外他還發現陰極射線會使金屬箔產生熱效應。

這陰極射線究竟是什麼，它由什麼所組成？歷史上，人們曾對此作出許多猜想，並引起激烈的爭論。直到 1890 年代初期，逐步形成了兩種具有代表性的看法，一種是以德國物理學家赫茲 (Heinrich Rudolf Hertz, 1857-1894) 為代表的“以太振動說”，另一種是以英國物理學家克魯克士為代表的“粒子說”。而且，大部分德國科學家持前一種觀點，而大部分英國科學家則持後一種觀點。例如，赫茲通過實驗於 1892 年認定陰極射線是一種以太振動，他的學生和助手列納德(Philipp Lenard, 1862-1947) 於 1894 年做了一支列納德管，把陰極射線從管內通過一個薄鋁窗引到空氣中，獲得所謂列納德射線，他以此論斷陰極射線確實是一種以太振動，認為粒子是無法穿過這金屬窗口的。魏德曼 (Gustav Heinrich Wiedemann, 1826-1899) 等人也支持這種看法。而英國物理學家則堅信陰極射線是粒子流。例如，克魯克士從他的實驗中判斷這種射線是具有動量的“分子流”，1884 年英國物理學家舒斯特 (Arthur Schuster, 1851-1934) 指出陰極射線是帶負電的粒子流，可能是分子或原子射束。還有其他一些分析，但

不外是兩種不同見解。究竟陰極射線是什麼，這個問題一時難以下定論。侖琴認為已有的實驗結果並沒有得到合理的解釋，而且這些實驗果真如此嗎？他從不人云亦云，他要自己動手做實驗並檢驗列納德與克魯克士等人的實驗。這就是導致侖琴發現 X 射線的歷史背景。因此，從陰極射線的深入研究導致 X 射線的發現，這是一個科學史的必然性。

3. X 射線的發現過程

侖琴發現 X 射線的過程，一般的傳說是這樣的：侖琴為探索陰極射線的性質，曾經用列納德管重複赫茲和列納德所做的實驗，據說列納德曾經為他提供了一支優質列納德管。實驗時，侖琴為保證實驗的精確性，就設法使放電管不受外界的影響，因而他用錫箔和硬紙板包住放電管。當他接通電流並把塗有亞鉛氰化鋇的螢光屏移近列納德管的鋁膜窗口時，他發現螢光屏上出現螢光。於是，他仔細調

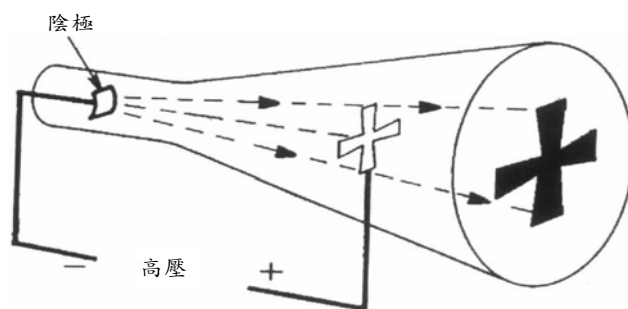


圖 1.1 早期克魯克士管(陰極射線管)的示意圖。放在射線穿行的路徑上以雲母做的馬爾他十字架(Maltese cross)，在管子螢光屏一端投下一陰影。

節螢光屏和鋁窗的距離，結果確證陰極射線可穿透空氣幾厘米遠。然後，他改用克魯克士管做實驗，也發現螢光，不過螢光顯得模糊不清，於是他繼續實驗。1895年11月8日星期五晚上，為了仔細觀察螢光屏上模糊的螢光，也為了排除外界的一切光線干擾，他關閉實驗室不使漏光，並且檢查克魯克士管是否用黑紙板包封嚴密。當他要著手實驗而接通高壓電源時，突然發現在實驗臺上放在克魯克士管附近的小螢光晶體閃爍著螢光，塗有亞鉑氰化鋇 [barium platinocyanide, BaPt(CN)₄] 的紙屏也閃爍著淺綠色的光。他驚訝極了，這種奇異現象可是從未見到也從未聽說過！於是他急切地重複實驗。他把螢光屏移開，直到2米多遠還隱約可以見到這種螢光。他似乎意識到這不可能是陰極射線，因為列納德管引出的射線只不過有幾厘米射程！對於這奇異現象，他開始探索這“看不見的射線”。從此，他廢寢忘食地在實驗室裏連續做了6個星期，全神貫注探索這種奇異射線的性質。他不聲張新的發現，除非徹底查清可能得到的一切結果，否則他是不向外界宣布的。最後，直到他確認這是一種聞所未聞的新射線時，才於1895年12月28日在

維爾茨堡醫學物理會上第一次報告自己的發現。他報告的論文題為「一種新的射線——初步報告」。在這個報告中，他介紹了實驗裝置和實驗方法。由於當時對這種新射線的本質尚不清楚，故稱為X射線，在這篇文章中還指出了X射線的某些性質。因為倫琴是德國人，所以德國科學家常把X射線稱為倫琴射線。他發現X射線在空氣中的射程有2米多而且是直線傳播的，他發現外界磁場不會使X射線發生偏轉；他發現X射線來自克魯克士管的相對於陰極的陽極。尤其使他感到驚奇的是這種射線有非常強的穿透本領。他拿上千頁的厚書來實

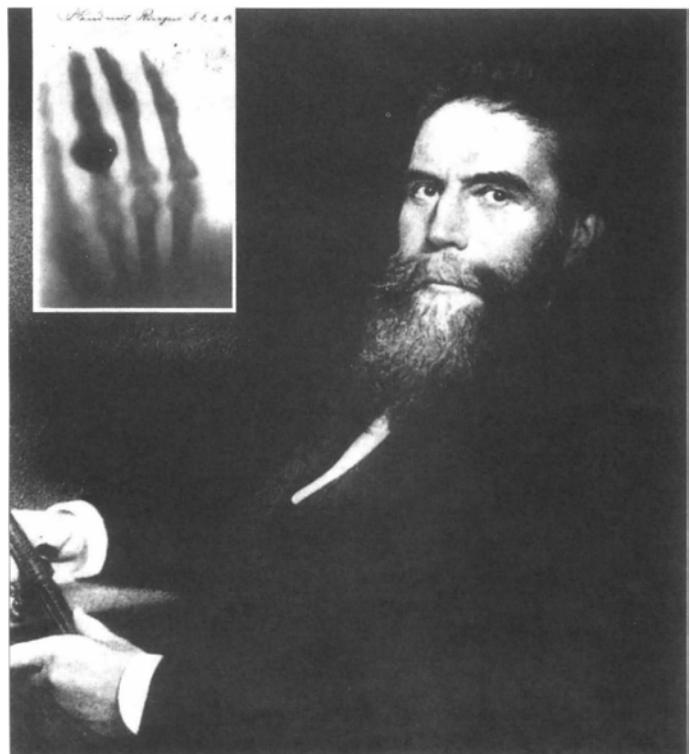


圖 1.2 倫琴攝於 1895 年，左上圖為 X 光拍攝倫琴夫人左手的照片，戒指清晰可見

驗，X 光透得過去；他拿幾厘米厚的硬橡皮來，X 光也透得過。它還能透過 2-3 厘米厚的木板或 15 毫米的厚鉛板。他拿鉛板來擋 X 光，發現效果很好，僅 1-2 毫米的鉛板就可以擋住 X 光。在置換這些擋光的東西時，倫琴驚訝地看到了自己手中的骨和輪廓。1895 年 12 月 22 日，倫琴把夫人帶進實驗室，用 X 射線拍了一張夫人的左手照片如圖 1.2 所示，照片骨肉分明，連結婚戒指也清晰可見。這張照片的複印件一直保留下來，印在許多書刊中。此外，倫琴還用 X 光拍攝了許多物體的照片，例如，裝天平砝碼的木盒、羅盤儀、繞在木軸上的紗包(金屬)線、金屬塊甚至房門等。

1896 年元旦，倫琴把他的(第一篇)論文和 X 光照片複印文件寄給他的國內外同行朋友，其中有德國實驗物理學家瓦堡 (Emil Gabriel Warburg, 1846-1931)、埃克斯納(F. Exner)及彭加勒 (Jules Henri Poincare, 1854-1912，法國數學家、物理學家和哲學家)等人。1896 年 1 月 4 日，瓦堡在柏林物理學會的一次會議上展出倫琴的幾張 X 射線照片，1896 年 1 月 5 日，奧地利物理學家列赫爾(Ernst Lecher, 1856-1926)的父親在維也納經辦的一家報社，以「聳人聽聞的發現」的大字標題在報紙上詳細報導了倫琴所發現的新射線。在國內及國外可謂出現了真正的“X 射線熱”！1896 年

1 月中旬，德皇得悉這種發現，就宣召倫琴進宮，展示 X 射線的穿透本領，並因此授予他二級普魯士勳章。

由於 X 射線的發現，應運而生的 X 光醫療器械相繼出現，因濫用 X 光而受傷害的事件更是時有發生，見表 1.1。

表 1.1 早期 X 射線傷害歷史摘要

年	輻射傷害	負責人或涉及人員
1896 年 1 月	手皮炎	戈魯貝(Grubbe)
1896 年 3 月	眼刺痛	愛迪生(Edison)
1896 年	脫毛	丹尼爾(Daniel)
1897 年	體質性症狀	瓦耳斯(Walsh)
1898 年	截癱與痙攣性肌肉收縮	羅得與貝丁(Rodet and Bertin)
1899 年	血管內皮變性	加斯曼(Gassman)
1902 年	X 射線潰瘍生癌	弗利本(Frieben)
1903 年	骨生長抑制	伯斯(Perthes)
1903 年	產生不孕症	阿伯斯-宋伯 (Albers-Schönberg)
1904 年	產生血液改變	米斯納與莫斯 (Milchner and Mosse)
1904 年	產生白血病	海格(Heincke)
1906 年	顯示骨髓改變	瓦新(Warthin)
1912 年	二位 X 射線工作人員發現貧血	貝克勒(Béclère)

清光緒 20 年(1894)9 月 17 日在黃海大東溝中日發生海戰，北洋海軍戰敗，翌年(1895)旅順大連保衛戰清廷海陸軍亦戰敗，同年 4 月 17 日李鴻章和日本伊藤博文在日本馬關春帆樓簽訂馬關條約，清庭將臺灣割讓給日本。西方 X 射線熱帶來的歡愉和東方戰爭帶來的悲慘遂成為一強烈的對比。

4. 深遠的影響

X 射線的發現，對物理學的進展和科學技術的進步產生了深遠的影響

響。

法國實驗物理學家貝克勒爾(Henri Antoine Becquerel, 1852-1908)於1896年初了解到倫琴的發現，這引起他極大的興趣並立即做X射線實驗。在實驗過程中，他發現了一種與X射線多少有些相似的現象，即由鈾鹽放射出的一種奇異的“鈾射線”，這就是1896年3月貝克勒爾首次發現物質的放射性。他的這一發現，為居里夫婦發現放射性元素鈾和鐳開闢了道路。由於放射性發現，他們分享了1903年諾貝爾物理學獎。

英國物理學家湯姆生(Joseph John Thomson, 1856-1940)和他的學生拉塞福(Ernest Rutherford, 1871-1937)從事於氣體導電性質的研究，也借助X射線作為工具，這一研究最終導致1897年發現電子。湯姆生獲1906年諾貝爾物理學獎，拉塞福獲1908年諾貝爾化學獎。

勞厄(Max von Laue, 1879-1960)於1912年揭開了X射線之謎。經由X射線在晶體中的繞射，他認為X射線可能是一種電磁波的預言終於被證實，並且由X射線的勞厄圖可以作晶體結構分析，為晶體物理學的研究提供了一種強有力的手段。他獲得1914年諾貝爾物理學獎。在此基礎上，英國物理學家布拉格(Bragg)父子利用X射線作晶體結構分析，並提出了著名的布拉格公式，大大促進了晶體物理

學的發展。這一對父子布拉格(William Henry Bragg, 1862-1942和William Lawrence Bragg, 1890-1971)共同榮獲1915年諾貝爾物理學獎。

瑞典物理學家西格班(Karl Manne Georg Siegbahn, 1886-1978)運用布拉格公式，從實驗中發現許多X射線的譜線，進而探明各元素的X光譜，寫出「X射線光譜學」一書，把X射線和元素的結構緊密聯繫在一起。他獲得1924年諾貝爾物理學獎。有關X射線光譜學的開拓性的工作，早在勞厄的發現之後不久就開始了，這就是英國青年物理學家莫塞萊(Henry Gwyn Jeffreys Moseley, 1887-1915)的工作。這位才智超群的年輕人在1913年就提出了“莫塞萊定律”，根據這個公式闡明了原子序數和原子構造有密切的關係，這是一大發現。可惜這位年輕人在第一次世界大戰的一次海戰中陣亡，他的科學業績到此為止，當時他才28歲。此外，英國物理學家巴克拉(Charles Glover Barkla, 1877-1944)，這位X射線光譜學的奠基者獲得1917年諾貝爾物理學獎，是由於他發現元素的二次X射線。他的工作是在莫塞萊協助下進行的。

美國物理學家康普頓(Arthur Holly Compton, 1892-1962)的研究受巴克拉的影響。在北京清華大學吳有訓教授(斯時為芝加哥大學的研究生)的參與下，康普頓於1923年前後發現

X 射線經輕靶散射後，產生波長移動，即發現康普頓效應，並進而揭示微觀世界中粒子碰撞過程依然遵守能量守恒和動量守恒定律。他獲得 1927 年諾貝爾物理獎。

X 射線在科學技術上的應用，特別是在醫學上的應用，那是人盡皆知的。近代的應用名目繁多，尤以“X 射線斷層掃描技術”為最著名。

5. 以侖琴命名的單位

任何一門學域裡，都有其專用術語與單位，以便於以極精簡明確的文字或符號，表示特定的意義與計測量。由於科技文明的日益精進，這些術語也隨測量技術的改進而擴充，其單位也更精確。例如在輻射劑量學裡使用很廣的單位“侖琴”便是一典型範例；侖琴為 X 輻射量的專用單位，係在空氣溫度為 0°C，氣壓為 76 cm 汞柱狀況下，適量 X 射線與 1 cm³ 空氣作用(此作用不受游離腔壁影響)，其所產生的二次電子，完全用以產生游離電流，而累積得一靜電單位(esu)的電荷量稱為 1 侖琴，並以英文字母小寫 r 為代表符號。在 1928 年，以當時的測量技術，這是對中等能量 X 射線所能提供的最佳曝露量定義。選擇空氣為標準參考物質，不僅由於方便(全世界都有)，亦由於空氣是 X 射線與生物體作用時相當適當的參考物質；因為就中等能量 X 射線而言，空氣的有效原子序數與人體軟組織的有

效原子序數相差不遠。但這定義並未明確的限定侖琴為何種輻射的輻射單位，因此自 1928 年後，侖琴定義經過多次修訂。1937 年為了配合鐳劑量測定術的應用，於是將侖琴的定義修訂成侖琴為 X 或 γ 輻射量，可使 0.001293 克空氣(即在標準狀態下 1 cm³ 空氣的質量)接受照射時生成一靜電單位的正或負游離電荷，並改以英文字母大寫 R 為代表符號。以上所說的侖琴定義都有吸收劑量的觀念，卻忽視了空氣對 X 或 γ 射線的吸收劑量與輻射的能量有關。其實早在 1929 年，梅尼奧(Mayneord)就發覺了侖琴的缺點，他認為符合邏輯的劑量單位應該是“爾格/體積”，而將劑量單位以游離方式表示，這是由於空氣與人體組織對 X 或 γ 射線吸收劑量相當近似。再者，侖琴的有效量測方法必須為其游離所產生二次電子在電子平衡(electronic equilibrium)條件下方能正確地進行。然而在空氣與人體組織交接面上，此種條件即不能達成。由空氣游離測得的吸收劑量與體表實體吸收劑量的差別在中能量光子時尚不嚴重，但在高能量光子時差別就十分可觀了。因此，在實用上，侖琴負有雙重任務，它不僅是輻射曝露的測量單位，同時亦暗示此被測的輻射為中等能量的 X 或 γ 射線。由於測量技術的困難，侖琴只適用於數 keV 至 3 MeV 能量範圍的光子。這種定義與一般物

理學所使用的單位有所不同。

對於其他粒子輻射，如貝他(β)、阿伐(α)射線或中子等輻射的度量，侖琴這單位就更不適用。因為通常 α 與 β 的游離比度(每單位長度產生的離子對)較光子高得多，故其二次電子達到電子平衡的範圍十分小，而實際上不易量測。為求定義一個與輻射生物效應及輻射化學效應更直接有關的物理量，吸收劑量(absorbed dose)的觀念逐漸受重視。1940年梅尼奧建議當一克空氣接受一侖琴曝露時的吸收能量為一克侖琴(gram-roentgen)，其值約為每立方公分空氣 84 爾格。1949年派克(Parker)將克侖琴的單位推廣至其他粒子輻射的吸收劑量單位，並定名為侖琴物理當量 [roentgen-equivalent-physics，簡稱侖卜(rep)]。其值為使人體組織產生 84 erg/cm^3 吸收劑量的任何游離輻射量稱為 1 rep。但一克液態人體組織對於一侖琴照射的吸收能量並不等於 84 爾格而約為 93 erg，故後來又將 rep 的值改為 93 erg/cm^3 的人體軟組織。至 1953 年國際輻射單位與度量委員會(ICRU)正式推薦以雷得(rad)為物質對輻射的吸收劑量單位，其值為任何輻射與物質作用時，每克作用物質吸收 100 erg 能量稱為 1 rad，並重新定義 X 或 γ 射線與空氣作用，使空氣產生游離的物理現象統稱為曝露量(exposure)，而曝露量的專用單位為侖琴(R)，其值為使

質量為 1 公斤的空氣產生 2.58×10^{-4} 侖琴的電量。ICRU 認為：觀念的澄清及量的定義是基本大事，至於單位的選擇並不很重要。假若所考慮的量可清楚地作說明，則混淆多可避免。雖然專用單位亦普遍的存在於其他學門領域裡，但 ICRU 仍然在輻射劑量學裡，強調專用單位不宜再增加。為了承認已存在的常用單位，他們建議專用單位須限制使用，例如：

侖琴(R)－限用於曝露量。

雷得(rad)－限用於比授與能 (specific energy imparted)，吸收劑量及克馬(kerma)又稱為比釋動能等。

居里(Ci)－限用於放射活度，為 1 克鐳 226 每秒的蛻變數目，其值為每秒蛻變 3.7×10^{10} 次。

§1.3 放射性的發現

1. 貝克勒爾出生於科學世家，祖父和父親都是法國享有盛譽的物理學家、法國科學院院士。他的家族出了許多著名學者，貝克勒爾(圖 1.3)從小受到科學知識的薰陶，這對他取得科學成就是至關重要的。他起初是學工程的，擔任過工程師的職位，曾在公路橋樑行政機構任職。

1888 年他以光的吸收方面的論

文獲得博士學位，1892 年成為巴黎自然史博物館教授。他也是法國科學院院士。他的早期研究主要是光學方面的問題，例如光的偏振及偏振面的旋轉、光的折射率、晶體對光的吸收以及地磁對大氣的影響等。後來，他主要從事螢光和磷光的研究並發現物質的放射性，這是他最重要的科學發現，榮獲 1903 年諾貝爾物理學獎。

貝克勒爾怎麼會從研究螢光而發現放射性呢？這裡有一段有趣的過程。1896 年元旦，侖琴把他發現 X 射線的論文和一些 X 射線照片複印文件分贈給國內外的物理同行朋友，其中有彭加勒。彭加勒在 1896 年 1 月 20 日的法國科學院每周例會上展示這些 X 射線照片，當時，貝克勒爾也在場，看到了這些新奇的照片。他深深受到吸引並馬上聯想到他的研究課題。他苦苦思索：螢光現象和 X 射線有關嗎？他在看到 X 射線照片的第二天就著手研究那些螢光物質能夠發出 X 射線。他把他祖父、父親和他自己研究過的一些螢光和磷光物質拿來做實驗，經過初步試驗，他感到失望，因為它們並不發射 X 射線。恰好在這不久，彭加勒發表一篇論文，提出那些會發出強烈螢光的物質是否會同時發射螢光和 X 射線的問題。貝克勒爾受到啟發，於是他就於 2 月下旬拿他父親所喜愛的鈾鹽 [硫酸鈾醯鉀，potassium uranyl sulfate, $K_2(UO_2) \cdot$

$(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$ 來做實驗。他把這鈾鹽

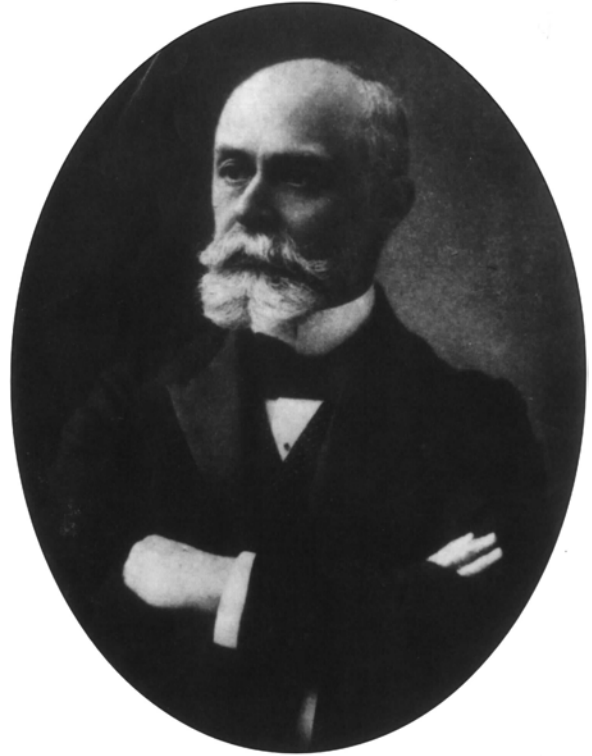


圖 1.3 貝克勒爾教授玉照

放在用黑紙包封嚴密的照相感光板上，然後放在日光下曬幾個小時。他這樣做是為了使鈾鹽激發螢光，並指望也放射 X 射線。果然，沖洗出來的底片上的確感光了！他重複實驗都得到同樣的效果，於是他認為彭加勒的設想是對的，即鈾鹽在陽光作用下發出了像 X 射線那樣的射線，這種射線穿透力強，透過黑紙使底片感光。1896 年 2 月 29 日，他向法國科學院報告了這個結果。此後，他想進一步重複實驗。當他做好實驗準備，瀝青鈾礦和照相底片都已包好只等日光曝曬，但因天氣轉陰無法實驗，他就把這些東

西一起堆放在抽屜裡，可是一直不見天晴。等到 3 月 1 日，他多少有些發急了，因為明天又是科學院每周例會，他原來打算在這次例會上宣布自己的發現和提出見解。於是，他不等日曬，先取出一張底片沖洗出來。底片顯影後他發現底片上有大塊黑斑，他納悶極了，因為這些鈾鹽並沒有受日光誘發螢光，而底片卻受到強烈的感光。這個意外的發現使他認識到，底片感光與日照無關也與螢光無關。那麼，究竟是什麼射線使底片感光呢？他猜想，可能是鈾鹽發出一種莫名的射線，這種射線的穿透能力似乎比 X 射線還要強。3 月 2 日，在科學院例會上他修正了原先的觀點，並報告了自己的最新發現。人們說不清這是一種什麼射線，就管它叫作“貝克勒爾射線”。

在這個基礎上，貝克勒爾進一步研究這種神秘射線的性質。他很有步驟地做了一系列實驗，發現鈾鹽所發出的這種射線還能使空氣成為導體，即有游離氣體的功效。此外，還發現外界溫度變化對它無影響。1896 年 5 月 18 日，在科學院例會上他明確指出鈾鹽這種物質有放射性，這種性質起因於原子內部。這個發現具有重大意義，人們不僅知道自然界中存在放射性現象，而且開始注意放射性與原子內部的關聯。貝克勒爾當時還不可能知道鈾射線的組成，後來的研究表

明，它是由三種射線組成的，即加馬(γ)射線、阿伐(α)射線和貝他(β)射線。 γ 射線是一種頻率高於 X 射線的電磁輻射，有很強的穿透本領； α 射線是氦原子核射束； β 射線是電子束。

2. 鐳的發現

瑪麗·居里 (Marie Curie, 1867-1934)，世稱居里夫人。她原籍波蘭，出生於華沙，原姓斯可羅多斯夫卡(Sklodowska)，後來，法國成為她的第二祖國。她是舉世公認偉大的女物理學家和化學家。19 世紀下半葉，她的祖國被併入俄羅斯帝國，在沙皇統治下強行俄羅斯化。波蘭受到沙俄的嚴密控制，對於波蘭的私立學校也嚴加監視，她父親因不順應而失去了華沙中等學校教數學和物理的教職，因此她家境十分貧寒。然而，她學習刻苦、努力進取，中學畢業時還得到金質獎章。她功課全面發展，還學會俄、法、德、英四種外語。可惜，在波蘭婦女沒有地位，加以家境清苦難得深造的機會。出於姐妹之情，瑪麗中學畢業後，主動去當了 6 年家庭教師，以資助她姐姐赴法國習醫。等到她姐姐畢業有了工作以後，她才於 1891 年 11 月辭別祖國和親人去法國，在巴黎的法國大學理學院學習自然科學。她學習勤奮，在 1893 年和 1894 年這兩年中間，她先後獲得物理學碩士和數學碩士兩個學位。1894 年 4 月，她第一次會見皮埃爾·居里

(Pierre Curie, 1859-1906)，他們志同道合，翌年結婚。皮埃爾·居里早年以發現晶體壓電現象以及磁性和溫度的關係而聞名，人們承認他是一位著名的實驗物理學家。當居里夫人被貝克勒爾的發現所吸引並全力以赴想去揭開放射性現象這個謎時，居里毅然擱下自己原先的研究題目，全心全意和居里夫人一起研究放射性這種既新穎又困難的課題。他們是從1898年春開始合作研究放射性的。

居里夫人一開始就關心除了鈾能夠發出射線以外，是否還有別的物质也能夠發出類似的射線。當她聽到施密特(Gerhard Carl Nathaniel Schmidt, 1865-1949)於1898年發現釷也有輻射的性質

時，就立刻做實驗核實。她還用居里以前用於物理測量的儀器和方法測出鈾的放射性強度與礦物中鈾的含量成正比的關係，而且發現這種放射性不受外界因素的影響。因此她開始猜測放射性是鈾物質本身的特性，原子的特性。她對各種氧化物等化合物做過測量，也對許多礦物做測量，她檢查輝銅礦樣品，又檢查瀝青鈾礦物。經過她反復檢驗，她發現了一種新奇的現象，瀝青鈾礦(pitchblende，含 U_3O_8

約75%)渣中放出的輻射，比起礦渣中預計的鈾或釷所放出的輻射強4倍。她開始懷疑這裏面存在某種未知的元



圖 1.4 居里夫人約攝於1920年
這張皮埃爾·居里教授的玉照為居里夫人最喜歡的一張

素，這種元素具有很強的放射性。雖然人們把她的這種設想譏為“異想天開”，但是這位性格堅強的女科學家對此置若罔聞，仍堅定地籌劃她的實驗。在居里的全力協助下，居里夫人按化學分析的程序對瀝青鈾礦渣作元素分離。由於礦物中所含元素複雜，而擬議中的未知新元素的含量微乎其微，因此分離工作是相當艱難的。經過艱苦勞動和認真測量，居里夫人終於在1898年7月18日前後，發現一

種新的放射性元素，為紀念她的祖國波蘭，她把這種元素定名為釷 (polonium, Po)。這是一種化學性質與鉍相同的黑色放射性物質，它的放射性比純鈾要強 400 倍。瀝青鈾礦渣的強烈放射性似乎不只是由於釷引起的，因為釷的輻射強度看來還不足以說明問題，莫非這礦渣中還含有放射性更強的物質？居里夫婦繼續他們的工作，他們付出更艱巨的勞力繼續分析殘渣。他們終於在同年年底，又發現了另一種新的放射性元素，它的輻射強度幾乎比鈾強二百多萬倍！居里夫婦將這元素命名為鐳 (radium, Ra)。鐳的發現是轟動整個科學界的偉大事件。他們是在 1898 年 12 月 26 日向科學院提出的報告中宣告這一重大發現的。

儘管居里夫婦發現了放射性物質鐳，但當時的一些保守學者仍有懷疑之心，他們要看到純鐳才算數！同時，居里夫婦為了對這種新元素進行觀察、定量分析和做各種實驗，他們也確實需要得到多一點的鐳化合物，當然最好是純鐳。因此，他們又踏上了人們難以想像的、更加艱難困苦的科学研究路途。首先，他們需要大量的瀝青鈾礦渣，何處可覓，經費何來？正在困難之際，朋友伸出了友誼之手。奧地利地質學家、維也納科學院院長休斯 (Edward Suess, 1831-1914) 向奧地利政府要到波希米亞 (Bohemia)

的契審斯達 (Joachimsthal) 的鈾礦的殘渣，成噸的礦渣雖然免費，但運費要自理。居里夫婦高興極了，但經濟負擔加重了清苦的生活。接著的問題是，提煉礦渣的地方在哪裡？居里出面向他任教學校的校長求助，希望借一間實驗室，校長聳聳肩說，如果這房間可以用，那你們就用吧。其實，這個房間哪裏是什麼實驗室，它是一間泥土地破屋頂被遺棄的木棚！這裡冬冷夏熱，實驗條件極端惡劣。在發現鐳的幾年後，德國物理化學家、唯能論的創導者奧斯特瓦爾德 (Friedrich Wilhelm Ostwald, 1853-1932) 曾來此參觀，他形容這木棚是“介於馬廄和土豆窖之間的某種東西，假如我不是看到裝有化學儀器的工作臺，那我會以為是在和我開玩笑”，剩下的問題當然是由這對夫婦充當冶煉工了。他們的艱辛工作不是我們所能形容的。為了不中斷實驗，他們經常吃住在這世上罕見的實驗室裏，日以繼夜疲憊不堪地工作著，一年、二年直到第四個年頭。偉大的工作終於得出豐碩的成果！1902 年 3 月，他們終於從數噸的瀝青鈾礦渣中提煉出約 0.1 克的純氯化鐳，這是一種如同食鹽一般的白色粉末——4 年的工作結晶，十分之一克。居里夫婦初步測出鐳的原子量為 225。

由於放射性現象這一劃時代的發現，居里夫婦和貝克勒爾共同獲得

1903 年諾貝爾物理學獎金。在回憶這段難以設想的艱苦工作的日子時，居里夫人說，他們常常在晚餐後到實驗室觀看那多年工作的結晶。當他們看到氯化鐳在黑暗中的微弱閃光時，總要引起“新的激動和讚嘆”。他們的工作極其艱苦，可是居里夫人卻說“在陳舊不堪的棚子裡，”“度過了我們一生中最美好最幸福的歲月。”他們的重大發現並沒有給他們帶來富裕，他們並不需要這些，他們從未想到要去獲取專利，按居里夫人的話說：“這是元素，它屬於整個世界。”她把多年獲得的所有的鐳，都奉獻給大學實驗室。這位偉大的女科學家，性格堅強、吃苦耐勞、生活清苦、不圖富貴，對於榮譽漠然以待，她曾把所得的獎章拿給小女兒伊倫娜(Irene)當玩具。愛因斯坦說，“在所有著名人物中，居里夫人是唯一不為榮譽所顛倒的人。”

正當居里夫婦的合作取得重大突破並亟待作進一步研究時，家庭卻給予他們災難。1906 年 4 月 19 日，皮埃爾·居里在巴黎的一個十字路口喪生於一輛大馬車的巨輪之下。他前一年才當上巴黎科學院院士，可是卻從此結束了他的科學生涯。居里夫人強忍喪夫的痛苦，堅韌不拔地繼續她的研究，還要帶著兩個年幼的女兒，生活的艱難是可想而知的。1906 年 5 月 1 日，居里所任教的巴黎大學請她來

擔任教學工作，兩年後她成為該校有史以來的第一位女教授。居里夫人從未放鬆對鐳的研究，她於 1907 年提煉出高純度的氯化鐳，並精確地測出鐳的原子量為 226.45。1910 年她又進一步用電解法分析出純鐳元素，並測定它的各種物理和化學的性質。後來她還測定氦以及其他放射性元素的半衰期，找到了放射性元素的某些衰變規律。由於她在鐳的研究中成績卓越，特別是由於分離出純金屬鐳，她榮獲 1911 年諾貝爾化學獎。她是連續兩次諾貝爾獎的第一位女科學家。她逝世後的第二年，她女兒伊倫娜·居里和女婿約里奧·居里由於首次獲得人工放射性元素而榮獲諾貝爾化學獎。人們為了記念居里一家對科學的偉大貢獻，1946 年美國加利福尼亞理工學院由人工製造出來的一種新元素，元素周期表中的第 96 號元素，特意命名為鐷(curium)。

鐳的發現具有非常重大的意義，彭加勒說，“偉大的革命家鐳”登上科學舞臺時，從根本上震撼了古典力學。人們看到了鐳可以不斷地發出射線，自發地釋放熱能，它可以使空氣游離，還能殺死細菌，這些奇異特性使人懷疑物理學的既有定律是否仍然有效，元素是否可以變化為別的什麼東西？傳統的觀念、物理學的定律面臨著重大的考驗。

1934 年 7 月 4 日，瑪麗·居里在

法國阿爾卑斯山療養院逝世。她患惡性貧血症，長期接觸放射性物質使她受到射線的傷害，血液病變，雙手也

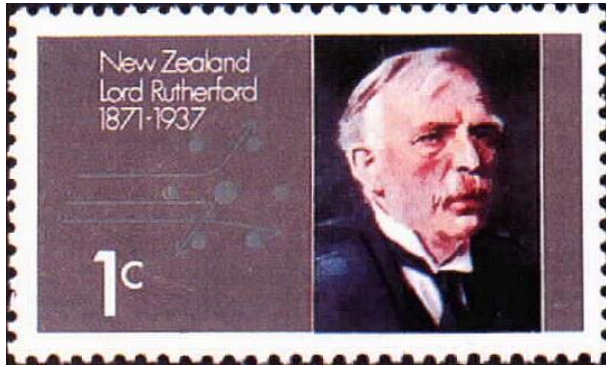


圖 1.5 1971 年拉塞福的出生地紐西蘭為他發行了一套百週年誕辰紀念郵票，並繪出拉塞福用 α 粒子撞擊金箔而被撞偏的情形。

被鐳灼傷。居里夫婦為檢驗鐳射線對人體生理的作用，從而判斷其危險性，他們不惜拿射線對著自己的皮膚作實驗，後來發展為“居里療法”——放射性治療。這樣，放射性進入醫學，大大推進了醫學治療的發展。

3. 元素自然蛻變理論

拉塞福 (Ernest Rutherford, 1871-1937) 是英國物理學家 (見圖 1.5)，他出生於紐西蘭的一個手工業工人家庭，大學畢業後，到劍橋大學卡文迪許實驗室學習，當湯姆生的學生和助理。1898 年到加拿大任教，1907 年定居英國，任曼徹斯特大學教授，1918 年繼湯姆生之後任卡文迪許教授。在他到劍橋的那一年，倫琴發現 X 射線，湯姆生指導一些助理從事這方面的研究，拉塞福參與其中。但他的主要注意力卻

放在放射性和原子結構方面。1899 年他發現放射性物質放出兩種射線，一種叫作 α 射線，另一種叫作 β 射線。這一年，貝克勒爾發現磁場能使 β 射線偏轉，居里夫人判斷它是帶負電的粒子，後來貝克勒爾測出其荷質比，終於斷定 β 射線是電子流。拉塞福於 1902 年利用強磁場使 α 射線偏轉，判斷它是帶正電的粒子，1906 年他測出其荷質比，認為它可能是氦和氦。他最初的合作者、年輕的化學家索迪 (Frederick Soddy, 1877-1956) 和英國化學家拉姆塞 (William Ramsay, 1852-1916) 從光譜分析中發現鐳輻射中含有氦譜線。經拉塞福和助理德國籍蓋革 (Hans Geiger, 1882-1945) 的進一步研究，確定 α 射線為氦離子流。在拉塞福發現 α 和 β 射線的第二年，法國化學家維拉德 (Paul Villard, 1860-1934) 發現鐳還放射出第三種射線，稱為 γ 射線，它不受磁場的影響。

拉塞福在加拿大任大學教授期間，於 1902 年和索迪合作，通過對鈾的放射性的研究，提出了原子自然蛻變的理論。這種理論認為，放射性現象是原子自發蛻變的過程。在蛻變過程中，一種元素的原子放出 α 和 (或) β 粒子，從而變成另一種新元素的原子，也就是說，原子是可以分割的，一種原子可變成另一種原子。這種理

論衝破了古典物理的陳規，促使物理學和化學的革命性變革，因此，這種理論具有劃時代的意義。由於拉塞福在放射性方面的研究作出卓越貢獻，他榮獲 1908 年諾貝爾化學獎。拉塞福於 1903 年進一步闡述原子自然蛻變理論，指出放射性物質是不穩定的，它將在放射某種射線的同時衰變為其他元素，並不斷進行下去，直至成為穩定元素。他發現放射性物質的衰變方程式

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.1)$$

式中的 N 表示 t 時刻的原子數； λ 表示單位時間的衰變機率，是放射性物質常數。這個方程式反映了放射性物質的放射強度隨時間按指數規律衰減。1913 年前後，索迪發現鐳、釷、釷等放射性物質的放射性轉化物最終都是鉛，這就為元素原子自然蛻變理論提供了有力的證據。

拉塞福不僅在放射性而且在原子結構方面的研究都作出了卓越貢獻。1911 年他根據 α 粒子的大角度散射實驗提出原子有核模型，1919 年他用鈾放出的 α 粒子撞擊氮，獲得氧的同位素，實現了歷史上第一次人工核反應。1920 年他預言原子核內存在某種不帶電的粒子，即存在中子。這一預言於 1932 年由他的學生、英國物理學家查德威克 (James Chadwick, 1891-1974) 所證實。查德威克是在用

α 粒子撞擊鈹等物質的實驗中發現中子的，他因此榮獲 1935 年諾貝爾物理學獎。

§1.4 電子的發現

1. 湯姆生的生平

湯姆生 (Joseph John Thomson, 1856-1940) 是英國物理學家 (見圖 1.6)，電子的發現者。他出生在英國曼徹斯特郊區，父親是書商和出版商。他 14 歲時到歐文學院學習工程。1876 年他進入劍橋大學三一學院，在他獲得學位之前他父親就去世了，他只好靠獎學金維持學業。他的數學修養很高，獲得第二名甲等數學優等生稱號，並獲得史密斯獎學金。後來他在卡文迪許實驗室工作，在瑞利的指導下，研究電磁理論和克魯克士的陰極射線。1884 年瑞利辭去劍橋大學卡文迪許實驗室主任的職務，28 歲的湯姆生被選為第三任卡文迪許實驗室主任 (首任是麥克斯韋，第四任是拉塞福)。這位年輕的科學家的中選使競選者吃驚，許多人感到意外，但是，人們對他智慧超群是普遍敬佩的。他主持卡文迪許實驗室工作一開始就顯示出非凡的管理才能。他重視實驗室設備的更新，不斷引進先進設備，採用新的實驗方法和技術；他重視系統的、有重點的研究工作，設立研究院；他最重視的莫過於人才的培養。他的門生中有一批傑出的物理學家，在湯

姆生的領導下，卡文迪許實驗室碩果累累，成就巨大，成為舉世矚目的物理實驗中心。在他任職期間所培養的科學家中，有 55 人成為教授，7 位諾



圖 1.6 湯姆生約於 1895 年攝於英國劍橋大學卡文迪許實驗室

貝爾獎獲得者。他自己最重要的成績是發現電子並測出其荷質比。他科學成果卓著，為表彰他在氣體放電的理論和實驗研究方面的巨大貢獻，他榮獲 1906 年諾貝爾物理學獎。

在發現電子後，湯姆生進而探索原子的結構，提出了所謂“湯姆生原子模型”。這個模型後來被他的學生拉塞福的有核原子模型所取代。他還研究氣態氙的分離、光學、電磁學、放射性、光電現象和熱離子，他的理論促使“熱離子管”的發明，他也研究 X 射線散射。這位物理大師曾經這樣描寫他十分幸運的一生：“我有好的雙親、好的教師、好的同事、好的門生、好的朋友、許多好的機會和好運氣以及健壯的體魄。”

2. 陰極射線是帶負電的粒子流

1890 年前後，湯姆生身為卡文迪許實驗室主任，他既要關心實驗室的全盤工作，但又明確選定了陰極射線

這個研究課題。他著手重複赫茲和麥克斯韋做過的實驗，測量電脈衝沿著導體的傳播速度，也測量電脈衝在低壓真空管中的傳播速度。他特製了一支 15 米長的真空管，並且用旋轉鏡來測定時間，測得電脈衝在真空管中的速度約為 $1.6 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。後來他又用這種辦法測得陰極射線的速度，測量值為 $1.9 \times 10^5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。實驗結果

使他懷疑陰極射線的傳播是電磁輻射的說法。後來他更用磁場偏轉的方法證實陰極射線是帶負電的。

3. 到處都有電子

自湯姆生於 1897 年發現電子以後，人們理解了帶電物質由“微粒 (corpuscle)”組成，因而就比較容易在許多現象中感覺到它的存在。在那個時期，拉塞福所發現的 β 射線被查實為帶負電的粒子射線，貝克勒爾於 1900 年利用磁場和電場偏轉的方法進一步測出 β 射線粒子的荷質比，他得到 $e/m \approx 1 \times 10^7 \text{esu/g}$ ，與電子荷質比同一數量級。後來查實這正是電子射束。

1899 年，湯姆生對光電效應所產生的光電粒子作測量。他用鋅板作陰

極，與陽極板相隔 1 厘米左右平行放置。當紫外光從鋅板擊出光電子後，經加速電場而到達陽極。此時，若用外磁場使粒子偏轉，並適當調節磁場強度，就可使光電粒子作圓弧運動。若圓弧不觸及陽極板，則光電子回到陰極，於是光電流就消失。這樣，湯姆生測得這種光電粒子的荷質比 $e/m \approx 0.76 \times 10^7$ esu/g，也與電子荷質比同數量級。於是，可以認為光電流也是電子流。他還用同樣的辦法測量熾熱金屬發出的帶電粒子流也是電子流。湯姆生以大量實驗結果闡明電子的普遍存在：陰極射線、 β 射線和光電流等都是電子流；電場可以激發出電子、紫外光可從金屬中擊出電子、加熱的金屬可發射電子，放射性物質鐳還可以自發地發射出電子。由此可見，電子是原子的組成部分，而且比原子小得多，它是帶電物質的最小荷電體。

4. 電子的發現具有劃時代意義

電子的發現，說明原子並非“不可分割”，原子必然存在內部結構，人們必將衝破千百年來認為原子是組成物質的最小單元的陳舊觀念，而去了解物質結構更深的層次。因此，這一發現，連同 X 射線和放射性的發現，極大地震動了古典物理學，把物理學帶到了變革的邊緣，成為新物理學革命的前奏曲。人們曾為 19 世紀末的“三大發現”即原子可再分割、X 射線及放射性，憂喜均有、疑信參半，

而現代物理學的建立和發展，“三大發現”卻是現代物理的催生婆和助產士。

§1.5 結語

在 19 世紀末葉，歐洲科學家們很積極地從事陰極射線的研究。德國科學家倫琴乃於 1895 年 11 月 8 日發現 X 射線。次年，法國科學家貝克勒爾發現天然的鈾化合物會發出一種不同於 X 射線，但也具有穿透能力能使照相底片感光的射線，稱它為鈾射線。兩年後，1898 年 7 月在法國巴黎，居里夫婦兩人首次自瀝青鈾礦渣中提煉出一種新元素，命名為釷，同年 12 月又成功地分離出另一種新元素鐳，這兩種元素都會自發放出輻射。居里夫人稱這種自然界自發產生輻射的現象為放射性 (radioactivity)。在短短 3 年間 (1895-1898)，人工輻射 X 射線與天然放射性核種先後問世，確為一大盛事。此處核種係指原子的種類。

從輻射防護的觀點，X 射線可藉時間(T)、屏蔽(S)、距離(D)所謂 TSD 原則作防護。放射性核種則利用其下列特性作防護：

1. 放射性核種能自發地放出輻射，並衰變成另一種核種：例如 ${}_{84}^{218}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} {}_{82}^{214}\text{Pb} \xrightarrow{\beta} {}_{83}^{214}\text{Bi}$ 。放出的輻射，常見的有 α 、 β 、 γ 等。
2. 放射性核種具有一定的半衰期($T_{1/2}$)：所謂半衰期是指某放射性核種的原子

數目衰減到它初始值一半所需要的時間，通常以 $T_{1/2}$ 來表示。每一種放射性核種都具有一定的半衰期，它不隨外界條件以及元素的物理、化學狀態而變。如 ^{238}U 的半衰期為 45 億年、 ^{60}Co 的半衰期為 5.27 年、 ^{198}Au 的半衰期為 2.69 天等。

3. 放射性核種的原子數目隨時間呈指數衰減：一般可用公式 $N=N_0e^{-\lambda t}$ 表示，此即為式(1.1)的積分結果，式中， N_0 為放射性核種初始的原子數目， N 為放射性核種經過時間 t 衰變後所剩下的原子數目， λ 為衰變常數。半衰期 ($T_{1/2}$) 與衰變常數 (λ) 的關係為 $T_{1/2} = 0.693/\lambda$ 。

參考文獻

1. 蘭宜申譯 原子科學史 藝文印書館 臺北板橋(1991)
2. 郭奕玲 沈慧君 物理通史 凡異文化事業公司 新竹市(1996)
3. 郭奕玲 沈慧君 物理學演義 凡異出版社 新竹市(1996)
4. 翁寶山 原子科學家列傳 行政院原子能委員會 臺北市(1996)
5. 翁寶山 原子科學導論 茂昌圖書有限公司 臺北市(1998)
6. 馬文蔚 周玄之 周永平 物理學發展史上的里程碑 凡異出版社 新竹市(1999)
7. 閻紫宸 從發現 X 射線的倫琴說起

第二章 原子時代的來臨

§2.1 前言

現代原子論的創始人首推波耳(Niels Henrik David Bohr, 1885-1962)，他是繼德國普朗克(Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858-1947)、美籍德人愛因斯坦(Albert Einstein, 1879-1955)之後的又一位量子理論奠基人。這位丹麥科學家早期的傑出科學成就是創立波耳原子理論，這也是他最主要的學術貢獻。他發展了量子概念，揭示了原子物理學的新途徑，他所提出的原子模型成

了原子時代的象徵。他於 1913 年提出關於氫原子的論文，宣告現代原子理論的誕生。他是近代物理學史中最著名、最重要的科學家之一、現代原子論的創始人；他也是一位大思想家、哥本哈根(Copenhagen)學派的領袖。他於 1922 年榮獲諾貝爾物理學獎，表彰他在原子結構和原子輻射的研究中所作出的貢獻，他從此聞名世界。圖 2.1 為波耳的肖像。

§2.2 丹麥傑出學者

波耳在 1936 年提出原子核的“液滴模型”，以後又和惠勒(William Morton Wheeler, 1865-1937)建立核分裂理論，這些都很出名。他還參與過美國曼哈頓(Manhattan)計畫的原子彈製造作為顧問，化名貝克(Baker)。波耳傑出的成就在國際上贏得崇高聲譽，這不僅由於他的個人學術成就突出，也不僅由於他的科學認識論獨特，而且還由於他在自己的祖國建立舉世矚目的國際物理學研究中心、物理學的“聖地”——哥本哈根大學理論物理研究所。這所研究所成立於 1921 年 3 月 3 日，後來，為紀念波耳 80 誕辰，於 1965 年將其正式改名

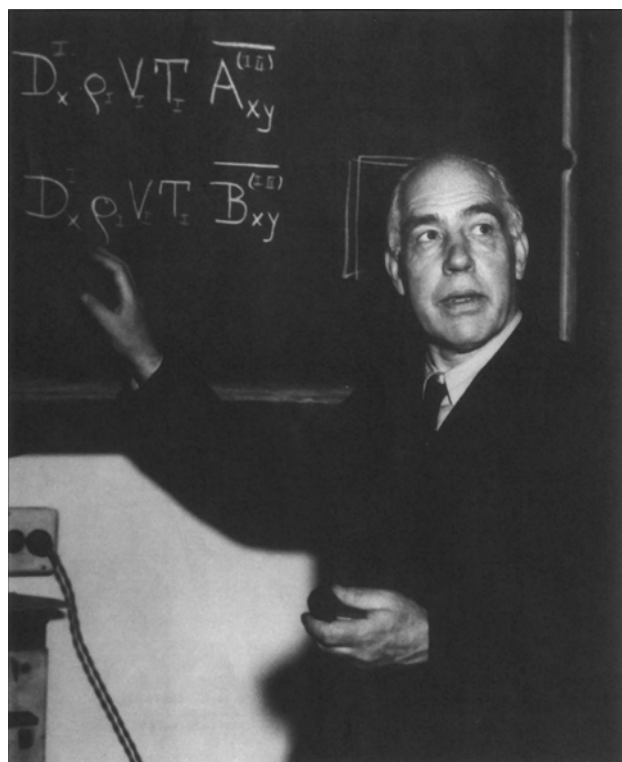


圖 2.1 留存於美國普林斯頓大學檔案中的波耳照片

為波耳研究所。

波耳出生於書香門第，父親是哥本哈根大學生理學教授，母親出身於教師家庭。他的弟弟哈拉德(Harald)是著名數學家，他的四子奧格(Aage)也是著名物理學家。波耳一生生活幸福、事業順利、家庭和睦、子孫滿堂，這恰與愛因斯坦形成鮮明的對照！他交友廣闊、待人誠懇、為人謙遜。前蘇聯科學家蘭道(1908-1968)曾經問過波耳：“你是怎麼把那麼多有才華的青年人團結在身邊的？”他風趣地回答說：“因為我不怕在青年人面前承認自己知識的不足，不怕承認自己是傻瓜。”波耳謙虛好學是他在科學上取得重大成就的一個主要原因。1911年他獲得哥本哈根大學哲學博士學位，以後曾到劍橋的卡文迪許(Cavendish)實驗室向湯姆生求教，幾個月後到曼徹斯特(Manchester)向拉塞福學習，拉塞福的工作給他很大啟發。1913年他是一位年輕的講師，給醫學院學生上物理課，就是在這一年，他提出了氫原子結構的新觀點，創立波耳原子理論。

§2.3 原子核型的結構

拉塞福這位湯姆生的學生、1908年諾貝爾化學獎獲得者，終於在前人思想的啟發下和在自己實驗的基礎上提出了著名的有核原子模型(即拉塞福核型原子)。他的原子模型的實驗依據是 α 粒子大角散射現象的發現。

拉塞福在放射性和原子結構方面的研究有卓越成就。1897年他從鐳輻射中發現 α 射線和 β 射線，1902年提出了自然蛻變理論，改變了原子不可分割的陳舊觀念，引起物理學和化學的革命性變革。他於1906年前後，在研究射線對物質作用時，發現有一種莫名的散射現象。他後來於1909年指導他的助理德國籍蓋革(Hans Geiger, 1882-1945)和學生馬斯登(Ernest Marsden, 1889-1970)，著重去觀測 α 射線的大角度散射實驗。他們把 α 射線射向極薄的金屬箔，然後觀測硫化鋅屏上的 α 粒子的閃爍。在大量的實驗觀測中，他們意外地發現了數目可觀的大角度 α 散射，而這種現象是無法用湯姆生原子模型來解釋的。拉塞福為此冥思苦想，他認定 α 粒子的大角度散射是受到一種很強的電場斥力引起的，祇有當正電荷集中在一個很小的區域內時才能產生這種強電場。這個小區域只有原子直徑的萬分之一，“好像一個大教堂裡的一隻蒼蠅”。他在理論計算時把原子內的正電荷“看成是集中在一點”，然後對 α 粒子施予電場力，使之在單次碰撞過程中畫出一條雙曲線軌道。1911年，他在「哲學雜誌」上發表題為「物質對 α 、 β 粒子的散射和原子構造」的論文，詳細闡述了蓋革和馬斯登的實驗以及他的理論推導和結論。他的理論認為原子內存在一個帶正電的核，這個核稱為原子核，帶負電的電子圍繞這原子

核轉動，整個原子呈電中性。這種原子結構和太陽系結構相似，人們把這種原子模型稱為拉塞福有核模型。後來，蓋革和馬斯登在拉塞福的建議下，做了一些實驗，檢驗拉塞福核型原子理論計算的結果。他們終於在 1913 年由實驗證實了拉塞福的理論，從此，核型原子取代了湯姆生原子模型。

§2.4 波耳原子理論

波耳於 1911 年完成關於電子論的博士論文後，就到“電子發源地”劍橋大學卡文迪許實驗室向湯姆生學習。幾個月後，於 1912 年他轉到曼徹斯特大學拉塞福實驗室，參與 α 射線的實驗。這個時期，拉塞福已提出有核原子模型，並且正在從實驗作進一步論證。波耳相信這位導師的原子模型是正確的，因此他到這實驗室來就不僅僅是研究 α 和 β 射線在物質中的穿透本領方面的理論，而是開始專注於原子結構的研究。他返回哥本哈根後，於 1913 年根據拉塞福核型原子模型提出氫原子結構的新觀點。在拉塞福的直接幫助下，他的論文「論原子和分子的結構」終於在「哲學雜誌」上發表(1913 年 7 月、9 月和 11 月連續發表三篇論文)。這三篇論文融合了普朗克、愛因斯坦和拉塞福的思想，並且把光譜學和量子論結合起來，形成獨具一格的波耳原子理論，這些論文具有劃時代的意義。拉塞

福核型原子模型無法回答原子穩定性問題，這是古典概念在原子模型中所反映出來的根本弱點。波耳爲了克服這一弱點，認爲唯一正確出路就是借助於量子條件。因此，他提出的原子模型最基本的構思就是拉塞福核型原子加量子條件。他自己形容這個模型是一個“小型機械系統，它一些主要特點像我們的行星系”，不過電子運行規律受量子條件的制約。

波耳在拉塞福有核原子模型的基礎上，提出兩條基本假設：第一，原子中電子在庫侖力作用下，在一些許可的軌道上運動。僅當電子的軌道角動量(L)為：

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad (2.1)$$

(其中 $n=1,2,3,\dots$, h 是普朗克常數)，這些軌道才是許可軌道。電子在這些軌道上運動不會發射電磁波，也就是說這是一系列定態。第二，當電子在這些許可軌道之間躍遷時，就會發出相對應頻率的光波，也就是說電子軌道躍遷將產生光輻射。波耳在接受 1922 年度諾貝爾物理學獎時，在他的講演中指出：“其實，第一條假設指出了原子的普遍穩定性，第二條假設指出了銳線光譜的存在”。

波耳當時只有 27 歲，他取得如此巨大的科學成就，固然有種種客觀原因，但是就主觀素質而言，他不受古典著作的約束，他思想大膽創新。他在科學探

索的道路上敢於改革，富有革命性。因此，不是普朗克而是波耳，成了原子力學的創建人、近代原子論的奠基者和“量子理論家”的真正領導人。不過，波耳的原子理論也並非一帆風順，開始時人們並不都贊成，視之為“令人驚異的雜交品種”。然而，波耳的導師拉塞福雖有懷疑，但卻真摯地支持和協助他，相信他會成功。還有像索末菲這位慕尼黑大學的理論物理權威，當時就認真閱讀波耳的論文，並表示非常贊賞。此後，索末菲又把這一理論向前推進了一大步，成為後人所稱呼的波耳-索末菲原子理論。

§2.5 中子的發現

電子、放射性和 X 射線的發現，就像給人類一把“金鑰匙”，打開了通往微觀世界的大門；拉塞福提出的“原子有核模型”，開創了人們正確認識原子結構的新紀元；量子論、相對論和量子力學的建立為人類認識微觀世界的運動規律提供了科學的理論基礎。20 世紀的物理學，已經超出了古典物理的範疇，並以穩健的步伐跨進了微觀世界的腹地，許多令人振奮的發現接踵而來。

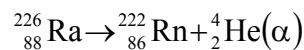
根據拉塞福的原子模型：原子有核，核外有電子；核電荷數與核外電子的電荷數相等；電子就像太陽系的行星那樣沿著各自的軌道繞核旋轉。所以，拉塞福的原子有核模型也稱為“行星模

型”。

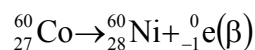
按照這個模型，人們十分關心的是：原子核電荷有多少？它和核外電子數有什麼關係？

首先，對原子核結構提出設想的是居里夫人，即瑪麗·居里。她在 1913 年布魯塞爾國際科學會議上提出：原子核應由帶正電的粒子和電子所構成的。這個設想，能夠解釋放射性物質既能放出 α 粒子，又能放出 β 射線的事實。

例如：



可見，鐳(${}_{88}^{226}\text{Ra}$)進行一次 α 衰變後變成氡(${}_{86}^{222}\text{Rn}$)，相當於它的原子序數減少 2，在元素周期表上的位置移前二個位置。還有鈷(${}_{27}^{60}\text{Co}$)的 β 衰變，如



鈷進行一次 β 衰變，使它的原子序數增加 1，它在元素周期表上的位置移後一位。

顯然，這種放射性元素的 α 或 β 衰變只能在原子核內發生。所以，居里夫人的設想在當時就得到不少物理學家的支持。

其次是質子的發現。許多科學家對於原子核的電荷發生濃厚的興趣，就是說原子核中荷電的是什麼東西？早在 1886 年，德國的物理學家戈德斯坦(Eugen Goldstein, 1850-1930)在研究陰

極射線時發現了一種“奇怪的射線”。這種射線是來自陽極，它和陰極射線的方向相反。如果在陰極上開個小孔，那麼這種射線還會穿透出來。後來，這個現象在 1907 年被湯姆生稱為“陽極射線”。這種“陽極射線”的進一步研究表明：它在磁場中會發生偏轉(說明它帶有電荷)，並且是粒子流；它的電荷和質量正好等於氫的正離子，即和氫原子核相同。1914 年拉塞福綜合了實驗事實後，提出了這種粒子就是氫原子核，叫做質子。

這個令人鼓舞的發現，促使當時的物理學界接受了原子核結構的“質子-電子”模型。按照這個模型可以估算出原子核內的質子數和電子數。例如：鈉原子，它的原子序數為 11，其核內有 22 個質子，11 個電子。顯然這個核所帶的正電荷為 $11e$ (e 為電荷單位，為 1.6×10^{-19} 庫侖)。從整體上來說，鈉原子呈中性，但卻無法符合“自旋的理論”。

這樣一來，“質子-電子”模型受到了嚴重的挑戰。由於這種難於調和的矛盾，促使勇於探索自然秘密的人們轉而注意 1920 年拉塞福提出的設想。拉塞福在第二次貝克講座中，提出可能存在質量和質子相仿的中性粒子。他認為，這個中性粒子是由於庫侖引力的作用，使質子和電子結合而產生的。1921 年美國的一位化學家哈金斯(William Darper Harkins, 1873-1951)把這個粒子命名為“中子”。這僅是一個猜想，因為當時

還沒有在實驗中找到過中子。

隨著科學技術的發展，在 1930 年，兩位德國的物理學家博思(Wahher Wihelm Georg Bothe, 1891-1957)和貝克爾(H.Becker)用 α 粒子撞擊金屬鈹時，發現了一種特別的輻射。這種輻射具有很強的穿透能力，甚至幾厘米厚的鉛板都能穿透。當時人們已經知道 γ 射線具有很強的穿透本領，並且在磁場中不會發生偏轉。博思把這種“輻射”放在磁場和電場中試驗，結果發現：它既不受磁場的作用，也不受電場的影響。所以，博思和貝克爾以為：他們發現的輻射是 γ 射線，並公布於眾。

當時，約里奧-居里(F. Joliot-Curie, 1900-1958)和他的妻子伊倫娜·居里(Irene Joliot-Curie, 1897-1956)對博思的實驗很感興趣，並且認真地重複了博思的實驗，還加以發展。他們讓這種“輻



圖 2.2 約里奧-居里夫婦攝於 1934 年

射”去作用石蠟，發現有粒子被打出。他們經過仔細的檢驗，發現這個粒子原來是從氫化合物中釋放出來的氫核——質子。可是，對於 γ 射線來說，儘管它的穿透能力很強，但不可能從石蠟中打出質子的。約里奧-居里夫婦(見圖 2.2)公布了這個研究結果。他們離發現中子已經不遠了。遺憾的是，他們失掉了一次機會。

約里奧-居里夫婦的研究結果，引起



圖 2.3 查兌克玉照

了拉塞福實驗室的密切關注。拉塞福的年輕學生，英國的物理學家查兌克 (James Chadwick, 1891-1974)對約里奧-

居里夫婦的實驗進行了更加深入的研究。他認為 γ 射線是沒有質量的，根本不可能從石蠟中打出質子。他用博思發現的這種“輻射”與硼作用，發現產生了新的原子核。查兌克通過測定，發現新原子核的質量增加了，並且證實這個增加的質量幾乎和質子的質量相等。這樣就可以斷定：博思發現的“輻射”實際上是質量與質子相等的粒子流。查兌克讓這些粒子流通過電磁場，沒有發現任何的偏轉現象，說明它們是呈現電中性的。經過艱苦的實驗和探索，查兌克(見圖 2.3)認為這些粒子流就是中子，並於 1932 年 2 月 17 日寫了封信寄給「自然」雜誌，發表了這一結果。這樣，人們尋找已久的中子終於被發現了！查兌克也就因為發現中子而獲得了 1935 年的諾貝爾物理學獎。

中子的發現具有深遠的意義。首先海森伯 (Werner Karl Heisenberg, 1901-1976)立即提出“質子-中子”模型，代替了“質子-電子”的模型。這樣，人類才認識到原子核是由質子和中子組成的；其次，人們對於原子量與原子序數的關係，以及原子核的自旋、原子核的穩定性等問題，有了新的認識；第三，人類對於中子的研究和應用，推動了核子物理的飛躍發展，開創著新的時代。

§2.6 原子核的分裂反應

二十世紀上半葉電能已經廣泛應

用，成為一系列新興工業的能源基礎。與此同時，在能源開發方面也正在發生深刻的革命，即人類掌握核能的時代到來了！

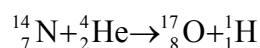
根據愛因斯坦的質能關係：

$$E = mc^2 \quad (2.2)$$

式中的 m 為物體的質量， c 為光速(3×10^8 米/秒)。質能關係式是從理論上預言了發掘強大能源的可能性。但是，人類真正掌握核能的開發技術，卻經歷了艱難曲折的過程。

1. 原子核反應的發現

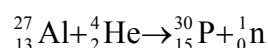
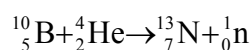
原子核反應比之人們熟悉的化學反應有著許多新的特點，是人類一個嶄新的課題。最早從事這方面工作的是英國科學家拉塞福。他用 α 粒子撞擊原子，才認識了原子的結構。他用 α 粒子撞擊氮核，發現氮原子核轉變成氧原子核(同位素 17)，同時釋放出一個質子(氫原子核)，即



顯然，這一過程的發生不是原子的反應，而是原子核的反應，即由於核的相互作用導致了新原子核的形成(氮核和氦核作用後變成了氧核和氫核)。拉塞福在 1919 年的這一發現，是人類第一次實現了原子核的人工蛻變。這個人工蛻變和以往的自然蛻變(天然放射過程)完全不同，具有深遠的意義。

隨著人們對原子核反應的繼續探

索，許多類似的核反應不斷被發現。在這中間，約里奧-居里夫婦發現，用 α 粒子撞擊硼和鋁，可以獲得人工放射性元素——氮和磷。這是他們的首次發現，取得了決定性的一步。反應方程式如下：



此式中的 ${}^{13}_7\text{N}$ 和 ${}^{30}_{15}\text{P}$ 都是放射性同位素。當停止 α 射線的撞擊後，它們還能繼續保持著放射性，但持續的時間不長。氮的同位素(${}^{13}_7\text{N}$)放出一個正電子後轉變為碳，大約經過 10 分鐘的時間，放射性強度減小一半(即半衰期)；磷的同位素(${}^{30}_{15}\text{P}$)放出一個正電子後轉變為矽，其半衰期為 2.2 分鐘。

約里奧-居里夫婦用人工蛻變的方法產生了放射性同位素，這一發現為人類探索和 research 核反應開闢了一個嶄新的領域。他們由此而獲得了 1935 年的諾貝爾化學獎。

然而，利用 α 粒子撞擊氮核、硼核和鋁核，由此引起的核反應的能力和效率不高，因而很難顯示出核反應過程中所蘊藏的巨大能量。這一個劃時代的問題怎樣解決呢？

當英國物理學家查兌克發現中子以後，引起了許多物理學家的重視，特別是義大利年輕的物理學家費米(Enrico Fermi, 1901-1954)立即採用中

子來產生放射性元素。鑒於中子是電中性的，它不受靶核的靜電排斥，所以中子肯定比 α 粒子(帶正電荷)容易打進靶核而引起反應，尤其是引起一些重元素的核反應。費米(見圖 2.4)基於上述的考慮，他和他的合作者們：阿瑪爾迪、達戈斯蒂諾(O.d'Agostino)、拉賽蒂(Franco Rasetti, 1902-)和埃米利奧·賽格雷(Emilio Segrè)，後來還有龐德科伏(B.Pontecorvo)，用鈹和鐳作為中子源，進行了三年的研究工作，首批發現了約 40 種新的放射性物質——同位素，取得了可喜的成就。

1934 年，費米等人在一次偶然的機會中發現：通過石蠟過濾後的中子，它產生的核反應要比直接從鐳+鈹的射源所產生的核反應要有效得多。這一現象，一經確認，費米就天才地提出了解釋，即中子通過石蠟，由於彈性碰撞的緣故使其放慢了速度。這種慢中子，在產生某種核反應上，它比快中子的能力將是成百倍地提高。費米抓住這個“慢中子”不放，進行了專門的研究，創造了中子慢化的數學理論，為開拓原子核物理方面作出了重大貢獻。費米因此而獲得了 1938 年的諾貝爾物理獎。

在 1934 年，費米等人已開始用中子撞擊鈾的實驗，發現反應物中存在一種新的放射性物質，但沒有檢測出來。德國化學家哈恩(Otto Hahn,

1879-1968)和奧地利的女物理學家邁特娜(Lise Meitner, 1878-1968)相信他們能夠找出這種“新的放射性物質”，因而在柏林進行實驗工作，開展了鈾核分裂的重大課題研究。他們合作得非常成功。

哈恩(見圖 2.5)生於 1879 年，誕生地是德國的法蘭克福。少年時的哈恩並不是非常優秀的學生，但他酷愛科學實驗，特別是化學實驗。他考入



圖 2.4 美國於 2001 年發行的費米紀念郵票
馬爾堡大學，又轉入慕尼黑大學。他當過威廉·拉姆賽(William Ramsay,

1852-1916，他在 1904 年，因發現惰性氣體獲得諾貝爾化學獎)、艾米爾·費歇爾 (Emil Hermann Fischer, 1852-1919，他得過諾貝爾化學獎)和拉塞福(1908 年的諾貝爾化學獎獲得者)的助理。他曾經發現過放射性鈾和錒，又和邁特納一起發現了放射性鐳，於 1928 年被任命為柏林皇家化學研究所所長。

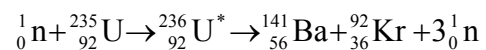
梅特娜(見圖 2.6)，是奧地利人。她是一位傑出的、具有猶太血統的女科學家。她是普朗克的助手，爾後在柏林皇家研究所成爲一名科學家。她在核物理方面作出過許多重要貢獻。她和哈恩一起從事鈾核分裂的研究工



圖 2.5 哈恩教授約攝於 1950 年作。由於希特勒的瘋狂排猶，儘管哈恩作了許多努力，她不得不於 1938

年逃離德國，到斯德哥爾摩避難。她和哈恩共同工作的結果，是製定了一套新的放射化學的實驗方法。正是這種方法使得哈恩和他的助理斯特拉斯曼(Fritz Strassmann, 1902-)在梅特娜逃亡後的幾個月內成功地發現了鈾分裂，取得了這項震驚世界的科研成果。

哈恩和斯特拉斯曼用中子撞擊原子序數為 92 的鈾，發現得到了原子序數為 56 的鋇，和原子序數為 36 的氙。這個分裂的反應方程式如下：



1938 年 12 月，哈恩等人把這個結果寄給德國「自然科學」發表，並獲 1944



圖 2.6 梅特娜教授玉照
年諾貝爾化學獎。

梅特娜在瑞典得悉這個消息後，

指出：“它揭開了人類歷史的新紀元。”她和侄子弗里希(Otto Robert Frisch, 1904-)一起進行重核分裂的研究。他們在英國「自然」雜誌上發表文章，給哈恩的實驗作了正確的解釋，並算出約有 200 MeV 的能量釋放出來。1939 年 1 月 16 日，他們又在同一雜誌上發表文章指出：“中子引起的鈾分裂：新型核反應”。他們對鈾核分裂的物理圖像、分裂的機制、分裂的產物，作出了準確的分析，特別是釋放的能量估算比較準確，並指出：在核分裂的過程中有一部分質量按照愛因斯坦的質能關係式轉變為能量，因此，重核分裂的過程一定伴隨著巨大能量的釋放。

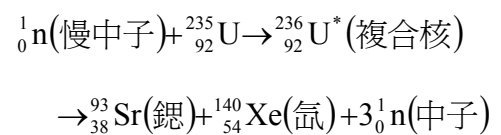
2. 鏈反應的產生、控制和核反應堆

匈牙利物理學家西拉德(Leo Szilard, 1898-1964)是最早考慮到實現鏈反應(核分裂反應)的可能性。他首先從理論上進行探討，設想一個中子引起一個原子核的分裂，在核反應的產物中又會產生一個以上的中子，使核的分裂反應繼續維持下去，這樣一來，原子核的分裂反應就像一根鏈條一樣，一環一環地持續下去。西拉德的設想，就是當時關於“鏈反應”的雛型。

哈恩和斯特拉斯曼發現了鈾核分裂後，受到西拉德設想的啟發，也很快意識到實現鏈反應的可能性。哈恩在 1939 年的「新原子」雜誌上，

指出：“根據計算，一個鈾原子取得一個中子，它的質量數(即核內質子與中子的總和)是 236，分裂後產生銩和氙，它們最穩定同位素的質量數分別是 136 和 86，兩者之和為 222，因此從鈾分裂為銩和氙的過程，多出了 12 個中子。”按照費米的理論，引起鈾核分裂的中子並不需要快中子(高能量)，那麼由鈾核分裂的產物——中子，就可以繼續引起其他鈾核分裂，以至出現“鏈反應”。當時已經從意大利移居美國的費米，也清楚地看到了實現這種“鏈反應”的可能性。

理論上提出鏈反應的可能性是十分重要的，而實驗則是檢驗理論正確與否的唯一標準。1939 年約里奧-居里等人，通過實驗找到了鈾核分裂的產物中確有中子存在，並且證實了一個中子引起一個鈾核(^{235}U)分裂的過程會同時釋放出 2 到 3 個中子。這個分裂過程表示如下：



這個實驗的意義很大，它證實了哈恩的基本設想，就是說利用慢中子撞擊鈾核後，分裂會持續下去。它使人類獲得核分裂的鏈反應有了實現的基礎。

這樣，鈾核分裂的“鏈反應”的圖像已經變得非常清晰。核的分裂開

始後，就由一個中子引起一個鈾核 (^{235}U) 分裂，而鈾核分裂產生的 2 到 3 個中子，它們分別引起兩個鈾核分裂，使鈾核分裂的數目不斷地急劇增加。一個鈾核分裂後，可以釋放出約 200 MeV 的能量，而且鏈反應的倍增時間(從一個鈾核分裂到它放出中子再引起另一個鈾核分裂的時間)一般平均不到 50 億分之一秒。理論計算表明，1 克鈾核分裂釋放的能量相當於燃燒 3 噸煤釋放的能量，況且這麼多的能量要在非常短的時間裡集中釋放出來，所以它具有十分強大的爆炸能力。

分裂的鏈反應有如此巨大的能量產生，是人類開發核能的基礎。但是，人類要應用核能，就不僅僅要獲得鏈反應，還要控制鏈反應，而且要有生產高純度核燃料的能力。這個偉大目標的實現，是以世界上第一座原子核反應堆(pile)的建成和正常投入運轉為重要標誌的。

1939 年初，波耳把歐洲完成核分裂的消息帶到美國後，引起了移居美的費米與西拉德的強烈回響。西拉德認為，鈾核分裂的鏈反應可能被用於製造新式炸彈，如果希特勒掌握了這種武器後，那將會給全世界造成可怕威脅。所以，西拉德和原籍匈牙利的物理學家威格納 (Eugene Paul Wigner, 1902-) 和泰勒 (Edward Teller, 1908-1999) 一起去找

愛因斯坦。他們的觀點得到了愛因斯坦的支持。1939 年 8 月 2 日，用愛因斯坦的名義寫了一封致美國總統羅斯福的信件(由西拉德等起草)。信中的主要內容如下：

我通過未經發表的文件獲知費米和西拉德最近的一些工作。這使我預料鈾這種元素在不久的將來可能變成一種新的重要能源。對於這一新情況的某些方面，看來政府應當引起重視，並在必要時迅速採取行動。所以我覺得有責任提請您注意如下事實及建議：

過去四個月裡，由於約里奧在法國所作的工作以及費米與西拉德在美國所作的工作，已經產生了這種希望，就是有可能在大量的鈾當中引起原子核的鏈反應，並由此產生巨大的能量以及大量類似鐳的新元素。現在看來在不久的將來實現這一點，幾乎是確定無疑的了。

這一新現象也可以用於製造炸彈，而且可以想像，這樣製造出來的將是威力極強的新式炸彈，...一顆這樣的炸彈在一個港口爆炸，就很可能將整個港口連同部分周圍地區一起摧毀。...

鑒於上述情況您當會認為，政府與在美國研究鏈反應的一批物理學家之間保持某種經常性的聯繫是合適的。...

我獲悉德國實際上已停止出售

它占領捷克斯洛伐克鈾礦所出產的鈾。...柏林的威廉皇家研究所，目前正在重複進行美國關於鈾的一些研究。

羅斯福收到信件後，於 1939 年 10 月 11 日下令組織“鈾顧問委員會”。美國總統羅斯福於 1941 年 12 月 6 日(珠港事件發生的前一天)批准了研製原子彈的“曼哈頓工程”計畫，並由此出現了“保健物理”術語。這項工程由美國新成立的軍事政策委員會領導。該委員會由國防研究委員會主席布希(V.Bush)博士任主席，成員有哈佛大學校長科南特(J.B. Cobant)，海軍少校帕內耳(W.R.E. Purnel)，陸軍後勤部參謀長史泰爾少將(W.D.Styer)和陸軍工程總負責人戈羅夫斯准將(L.R.Groves)。

為了驗證鏈反應的實際條件，美國決定建立一座原子反應堆，並委任費米為技術負責人。1941 年 12 月，費米來到芝加哥，領導一批物理學家在芝加哥大學斯塔格運動場的西看臺下，開始建造世界上第一座原子反應堆。

當時美國儲存的鈾非常地少，滿足不了需要。為了解決這個緊迫問題，美國愛阿華(Iowa)大學承擔了這個責任，具體由斯佩丁(F.H.Spedding, 1902-)領導並成立專門研究小組。他們採用離子樹脂交換法提純鈾，到 1942 年已分離出純鈾二噸，為實現曼

哈頓工程提供了最基本的條件。

在鏈反應中， ^{235}U 在慢中子作用下有 85%以上的分裂機率，而 ^{238}U 則吸收慢中子放出 β 粒子，並不發生分裂，所以要採取特殊方法把天然的 ^{238}U (占 99.3%)和 ^{235}U (僅占 0.7%)分離出來。由於 ^{238}U 和 ^{235}U 的性質相同，很難用化學方法把它們分開。這個難題是由美國化學家尤里(Harold Clayton Urey, 1893-1981)採用氣體擴散法解決的。這個方法的要點是根據 ^{238}U 和 ^{235}U 的氟化物(氣體)的原子質量相差 1.3%的特點，使它們的氣體分子擴散速度發生差異，讓它們通過 5000 道濾壁後，得到 ^{235}U 的濃縮氣體。

但是，這種氣體擴散法太花錢又費時，要獲得足夠的可分裂材料，必須另闢途徑。1940 年，美國的年輕物理助理教授麥克米蘭(E.M.McMillan, 1907-)在檢測分裂碎片時，發現有一種半衰期為 2.3 天的物質，經過鑒別，確認為原子序數為 93 的新元素命名為鏷($^{239}_{93}\text{Np}$)。這種鏷的生成是由鈾 238 捕獲一個中子，又經 β 衰變後產生的。同年，勞倫斯(Ernest Orlando Lawrence, 1901-1958)主持的加州伯克萊研究所的席博(G.T.Seaborg, 1912-1999)等人發現，經 β 衰變可以轉變成鏷($^{239}_{94}\text{Pu}$)。1943 年 3 月，他們成功地製造了鏷，並證實鏷 239 是很好的可分裂材料。因此，祇要把 ^{238}U 捕獲一個

中子經過兩次 β 衰變，即可得到鈾 239。這是一個重大發現，它使大量的 ^{238}U 轉變為鈾，對加快原子彈的製造起了很大的作用。

有了核燃料以後，集中目標解決的是控制鏈反應進行的問題。前面說過，要使鏈反應產生，慢中子要比快中子更好，分裂的機率更高，所以需要中子的緩和劑。開始時，約里奧-居里用重水(D_2O)的氘核作緩和劑。這種重水既不吸收中子，又有很好的減速作用，不過當核反應激烈時重水有被蒸發的危險。針對這個缺點，費米等人主要採用石墨作中子緩和劑，效果也很好。要使鏈反應產生，除了有慢中子外，還要求濃縮鈾(^{235}U)有一定的體積。這個體積的大小與鏈反應密切相關。這是因為鈾的體積越大，在反應中產生的中子被另一個鈾核吸收的機率也就越大，否則中子還未擊中鈾核時就逃逸出鈾塊之外，造成了中子的損失，使鏈反應無法進行。維持鏈反應進行的最小鈾塊的體積，叫做“臨界體積”。這個臨界體積和鈾(^{235}U)的濃度有關。

現在，有了核燃料，又有了緩和劑——石墨，還掌握了維持鏈反應的條件——臨界體積。除此之外，還必須嚴格控制中子的增殖速度，否則分裂的鏈反應必然是破壞性的爆炸。為此目的，費米等人發現，採用金屬鎘(Cd)棒作為控制中子增殖速度來說，

它是一個很好的材料。金屬鎘棒對於中子有很大捕獲截面，它能夠大量地吸收中子。這樣，可以把金屬鎘棒插入反應堆中，讓它大量吸收中子，使中子的增殖係數小於 1，致使核反應停止或者不能發生；改變金屬鎘棒插入反應堆的位置，使中子的增殖係數等於 1，則核反應就自持進行下去；拿出金屬鎘棒，使中子的增殖係數大於 1，則核反應激烈地進行，及至發生爆炸。

在費米的領導下，經過一年的努力，世界上第一座原子反應堆建成了。這個反應堆是石墨層和鈾層相間堆砌而成的，共計 57 層。它的高約 6.5 米，寬 9 米，長 10 米。1942 年 12 月 2 日，在費米的指揮下，開始抽出插入鈾堆中的鎘棒，經過一些時間，中子的增殖係數達到 1，使核反應處在自持階段。這座反應堆的功率祇有 200 瓦。但是，它已經說明人類掌握了原子核能的秘密，它標誌著原子核能的光輝時代已經到來了。

§2.7 我國興建核反應器概況

我國興建核反應器始於民國 48 年(1959)，先後興建 14 座，其中一座停用，兩座還在興建，兩座已除役，其興建的時間順序列於表 2.1。表中清華係指清華大學，核研所係指核能研究所。

表 2.1 我國興建核反應器的時序

編號	名稱	臨界或商業運轉 (民國)	除役或停用 (民國)
1	清華水池式反應器	50.4.13.	
2	核研所微功率反應器	60.2.2.	
3	核研所臺灣研究用反應器	62.1.3.	77 年停用
4	清華阿岡諾反應器	63.4.22.	82 年除役
5	清華移動教學反應器	64.11.19.	
6	第一核能發電廠一號機	67.12.	
7	第一核能發電廠二號機	68.7.	
8	第二核能發電廠一號機	70.12.	
9	第二核能發電廠二號機	71.11.	
10	核研所水鍋式反應器	72.2.23.	86 年除役
11	第三核能發電廠一號機	73.7.	
12	第三核能發電廠二號機	74.5.	
13	第四核能發電廠一號機	88.3.17.獲建廠執照	
14	第四核能發電廠二號機	88.3.17.獲建廠執照	

參考文獻

1. 翁寶山 **原子能研究的新發展** 幼獅書店 臺北市(1969)
2. 郭奕玲 林木欣 沈慧君 **近代物理發展中的著名實驗** 凡異出版社 新竹市(1996)
3. 楊昭義 歐陽敏盛 **核能發電工程學** 水牛圖書公司 臺北市(1997)
4. 翁寶山 **原子時代的小故事** 行政院原子能委員會 臺北市(2000)
5. 翁寶山 **臺灣核能史話** 行政院原子能委員會 臺北市(2001)

第三章 單位與輻防的量

§3.1 前言

歷史上，根據不同的需要，曾建立過許多種單位制。多種單位制的併存給科學技術、貿易和教育帶來了很大的困擾和麻煩。1948 年第 9 屆國際計量大會(CGPM)決定採用米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、克耳文($^{\circ}\text{K}$)和新燭光(cd)等 6 個單位為所要建立的新單位制的基本單位。1956 年國際計量委員會(CIPM)把由上述 6 個基本單位為基礎而命名為“國際單位制”。1960 年第 11 屆 CGPM 正式定名為國際單位制，其國際符號為 SI(法文)。當時的國際單位制包括 6 個基本單位，12 個詞頭，2 個輔助單位和 27 個導出單位。1967 年第 13 屆 CGPM 將熱力學溫度單位克耳文($^{\circ}\text{K}$)的符號改為(K)。1971 年第 14 屆 CGPM 將物質的量的單位克分子(mole，符號 mol)增加為國際單位制的第 7 個基本單位。同時，CGPM 還陸續增加了幾個詞頭和導出單位，並對一些導出單位賦予專門名稱。

§3.2 國際單位制

隨著計量科學技術的不斷進步，準確度不斷地提高。國際計量局(BIPM)通

過協調各國的計量科學研究工作人員，不斷地更新、充實和完善，包括基本單位在內的單位定義和復現方法。國際單位制也將不斷地修改、充實和完善。

1. 國際單位制的基本單位(見表 3.1)。

表 3.1 國際單位制的基本單位

量的名稱	單位名稱	單位符號
長度	米 (公尺)	m
質量	千克 (公斤)	kg
時間	秒	s
電流	安 [培]	A
熱力學溫度	克耳文	K
物質的量	克分子(莫耳)	mol
發光強度	新燭光	cd

註：括弧和方括弧的說明見表 3.2。

§3.3 計量單位的說明

1. 計量單位的符號

對單位的符號，CGPM 有統一的規定。一般原則上採用了這些符號，稱為國際符號。符號的形式如長度單位的 m，表示質量單位的 kg 等；另一種是附於數字右上角的符號，例如表示平面角的度($^{\circ}$)、分(')、秒(")等。

單位的中文符號由單位和詞頭的簡稱構成，例如“安培”的中文符號是“安”，“皮法拉(pF)”的中文符號是“皮法”等。

2. 基本單位

基本單位是指單位制中，選定作為構成其它單位基礎的單位。在國際單位制中，以米、千克、秒、安培、克耳文(kelvin)、克分子和新燭光(candela)等 7 個單位為基本單位。這些單位都有嚴格的理論定義，它們都能以目前科學技術所能達到的最高精度來復現和保存。

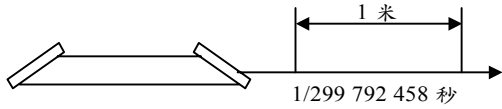


圖 3.1 長度單位米示意圖(1983 年)

由 CGPM 通過的 7 個基本單位的最新定義如下：

(1) 米

光在真空中於 1/299 792 458 秒時間間隔內所經路徑的長度稱為米，又稱公尺，見圖 3.1。

(2) 千克

千克是質量單位，等於國際千克原器的質量，又稱公斤，見圖 3.2。

(3) 秒

秒是與銫 133 原子基態的兩個超精細能階間躍遷所對應的輻射的 9 192 631 770 個周期的持續時間，見圖 3.3。

(4) 安培

安培是電流單位。在真空中，截面積可忽略的兩根相距 1 米的無限平行圓直導線內通以等量恒

定電流時，若導線間相互作用力在每米長度上為 2×10^{-7} 牛頓，則每根導線中的電流為 1 安培，見圖 3.4。

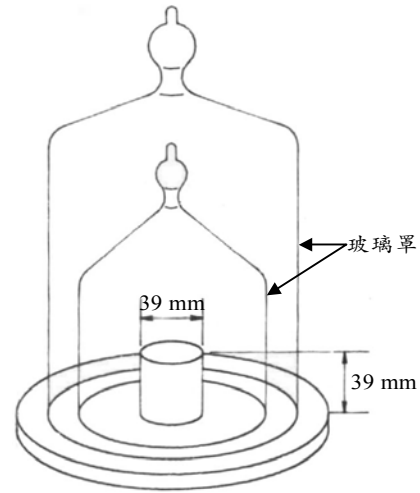


圖 3.2 千克原器示意圖(1901 年)

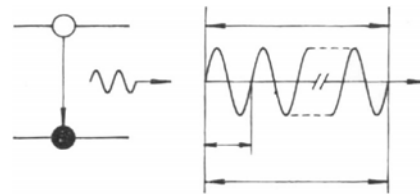


圖 3.3 秒定義示意圖(1967 年)

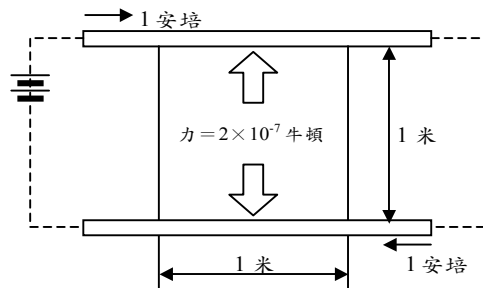


圖 3.4 安培定義示意圖(1948 年)

(5) 克耳文

克耳文是熱力學溫度單位，是水的三相點熱力學溫度的 $1/273.16$ ，見圖 3.5。

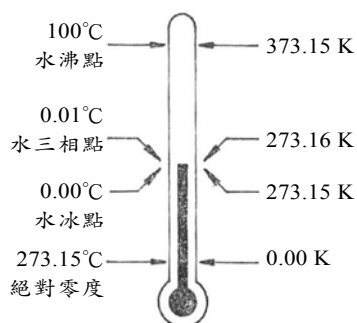


圖 3.5 克耳文定義示意圖(1967 年)

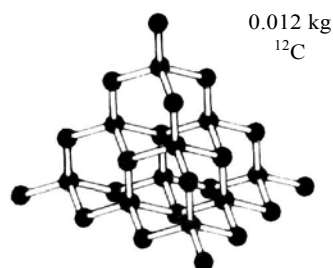


圖 3.6 克分子定義示意圖(1971 年)

(6) 克分子

克分子是一系統的物質的量，該系統中所包含的基本單元數與 0.012 千克碳 ^{12}C 的原子數目相等。使用克分子時，基本單元應予指明，可以是原子、分子、離子、電子及其它粒子，或是這些粒子的特定組合，克分子又稱為莫耳，見圖 3.6。

(7) 新燭光

新燭光是一光源在給定方向上的發光強度，該光源發出頻率為

540×10^{12} 赫茲的單色輻射，且在此方向上的輻射強度為 $1/683$ 瓦特每球面度。

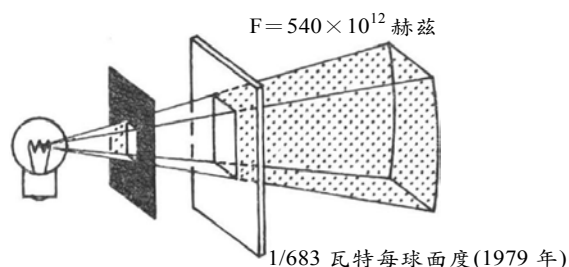


圖 3.7 新燭光定義示意圖

3. 輔助單位

CGPM 把表示平面角的單位以及表示立體角的單位另列為一類，稱為輔助單位。它們既可以用“1”表示如 $1^\circ = 60'$ 、 $1' = 60''$ ，也可以用給出的專門名稱“弧度”和“球面度”。在實際使用平面角和立體角的單位時，根據不同場合下的需要，既可用純數來表示它們，也可以用專門名稱來表示它們。

1980 年 CIPM 決定把國際單位制中的輔助單位解釋為無因次的導出單位。對此，CGPM 允許在國際單位制導出單位詞組中使用或不使用弧度和球面度的自由。

4. 導出單位

凡是由 7 個基本量通過函數關係導出的量，都稱為導出量。導出量的單位都是導出單位。例如速度的單位是米每秒，密度的單位是千克每立方米等。在大量的導出單位

中，有 19 個經 CGPM 認定給予了專門的名稱，稱為具有專門名稱導出單位。

5. 主單位

在國際單位制中，凡是沒有加詞頭的單位(千克除外)，都是主單位。加詞頭後則是 SI 單位的十進倍數或分數單位。(質量的主單位千克是個例外，分數、倍數單位是在 g 前加“k”以外的詞頭構成，g 也是分數單位。)主單位，包括基本單位和導出單位，都是獨立定義的單位。

在 SI 單位中，單位間關係式中的係數都等於 1，即滿足一貫性原則。例如：

$$\begin{aligned} 1 J &= 1 N \cdot m = 1 Pa \cdot m^3 = 1 W \cdot s \\ &= 1 V \cdot A \cdot s = 1 Wb \cdot A = 1 C \cdot V \\ &= 1 kg m^2 s^{-2} \end{aligned} \quad (3.1)$$

對於 SI 單位的分數、倍數單位，以上的關係就不再成立，即出現非 1 的係數。例如：

$$1 J = 100 N \cdot cm \quad (3.2)$$

6. 十進倍數和分數單位

在國際單位制中，單位都是十進的。一切倍數和分數單位，無例外地只能由詞頭加在主單位之前構成，而不應另給專門名稱。由詞頭加在 SI 單位之前構成的單位叫做 SI 單位的十進倍數和分數單位。

SI 單位的詞頭原有 16 個，1991 年第 19 屆 CGPM 上通過又增加了 4 個詞頭(見表 3.2)。SI 詞頭是整個 SI

單位的倍數單位和分數單位不可分割的部分，表示該單位增大或縮小的倍數。因此，詞頭既不是數，也不是詞，它不能單獨使用。只有加在 SI 單位或其它一些單位之前有意義。

表 3.2 用於構成十進倍數和分數單位的詞頭

所表示的因數	詞頭名稱	詞頭符號
10^{24}	約它(Yotta)	Y
10^{21}	塞它(Zetta)	Z
10^{18}	艾[可薩]，百京(exa)	E
10^{15}	拍[它](peta)	P
10^{12}	太[拉]，兆，萬億(tera)	T
10^9	吉[咖](giga)	G
10^6	百萬(mega)	M
10^3	千(kilo)	k
10^2	百(hecto)	h
10^1	十(deka)	da
10^{-1}	分(dec)	d
10^{-2}	厘(centi)	c
10^{-3}	毫(milli)	m
10^{-6}	微(micro)	μ
10^{-9}	納[諾]，輕，奈(nano)	n
10^{-12}	皮[可]，漠(pico)	p
10^{-15}	飛[母托]，毫漠(femto)	f
10^{-18}	阿[托]，微漠(atto)	a
10^{-21}	塞波托(zepto)	z
10^{-24}	約科托(yocto)	y

註：①周、月、年(年的符號為 a)為一般常用的時間單位。

②[]內的字，是在不致混淆的情況下，可以省略的字。

③角度單位度、分、秒的符號不處於數字後時，用括弧。

④升的符號用 L，小寫字母 l 為備用符號。

⑤r 為“轉”的符號，如轉每分(r/min)。

⑥人民生活和貿易中，質量習慣稱為重量，公斤為千克的通稱。

⑦公里為千米的通稱，符號為 km。

⑧ 10^4 稱為萬， 10^8 稱為億， 10^{12} 稱為萬億或兆，這類數詞的應用不受詞頭名稱的影響，但不應與詞頭混淆。

⑨上述詞頭中譯尚未統一。

§3.4 輻射防護的量

在早期由行政院原子能委員會公布的游離輻射防護安全標準，關於輻射防護的量不及後來修訂者明確。下列係依照公布的時間先後，說明輻射防護量的演變。並區分為第一版本、第二版本等。

1. 第一版本

我國「游離輻射防護安全標準」係於民國 59(1970)年 7 月 29 日由行政院公布實施。當時的標準係依據國際放射防護委員會 (International Commission on Radiological Protection, ICRP)1959 年的第二號建議(ICRP-2)暨 1966 年的第 9 號建議(ICRP-9)所建議的輻射防護哲理，並參考國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA)1967 年發行的輻射防護基本安全標準(安全叢書第 9 號，IAEA-9)及美、日等先進國家的防護標準訂定而成。時正值我國原子能的學術與應用由萌芽進入蓬勃發展的關鍵時期，本標準在輻射防護安全管制上發揮了相當大的功能，使國內原子能的研究與應用得以在安全中求進步，對國家經濟發展與社會繁榮的促進，貢獻良多。輻射防護的量如下：

- 吸收劑量(absorbed dose)指受游離輻射照射特定部位之單位質量所接受游離粒子之能量。吸收劑量之單位為雷得(rad)。1 公克質量接受 100 爾格能量為 1 雷得。

- 等效劑量(dose equivalent)指發生生物效應之游離輻射劑量。就數值言，為吸收劑量、射質因數(quality factor)、劑量分配因數(dose distribution factor)與其他必要調整各因數之乘積。就游離輻射防護之目的言，吸收劑量與射質因數相乘之積，已足以表示人員曝露於各種游離輻射後所接受之等效劑量。用於游離輻射防護之射質因數之數值見該版本附錄(二)第一、二、三表。等效劑量之單位為侖目(rem)。千分之一侖目為毫侖目。
- 居里(Ci)指放射度之單位。一定量之放射性核種在一秒鐘內發生衰變 3.7×10^{10} 次者，其放射度為一居里。千分之一居里為毫居里，百萬分之一居里為微居里。
- 中子通率(neutron flux)指在一秒鐘內落入於截面積為一平方公分之球面上中子之數目。
- 劑量積存(dose commitment)指由於侵入體內之放射性物質在五十年內對一器官或一組織所產生之總劑量。
- 遺傳劑量(genetic dose)指一地人口影響遺傳之年劑量(annual genetically significant dose)與平均生育年齡之乘積。本標準暫定平均生育年齡為三十年。影響遺傳之年劑量指對一地人口每年影響遺傳之

劑量，為個人生殖腺劑量之加權平均值，加權因數為曾受照射預期之子女數。

2. 第二版本

1977 年，ICRP 提出了關於輻射防護標準新建議(第 26 號建議，ICRP-26)，並於 1979 年發表了依據 ICRP-26 所訂定體內曝露管限制度的建議(第 30 號建議，ICRP-30)。隨後國際上各先進國家亦針對 ICRP 此項建議陸續修正發布其國家的輻射防護標準或法規。我國主管機關行政院原子能委員會亦因應此一趨勢，依據 ICRP-26 暨 ICRP-30 的建議，觀察多年來執行輻射防護管制的實務經驗，考量輻射防護相關科學知識與技術發展成果，參考 IAEA 於 1982 年發行的輻射防護基本安全標準(安全叢書第 9 號，IAEA-9 修訂版)暨美、日等先進國家的標準，將游離輻射防護安全標準修正為現行標準，並報請行政院於民國 80 年(1991)7 月 10 日公布施行。輻射防護的量如下：

- 劑量：指被物質吸收之輻射能量。
- 吸收劑量：指單位質量物質接受輻射之平均能量。吸收劑量之單位為戈雷(Gy)。一公斤質

量接受一焦耳能量為一戈雷(一戈雷等於一百雷得)。

- 等效劑量：指人體組織之吸收劑量與射質因數之乘積。用於輻射防護射質因數由原子能委員會公告之。等效劑量之單位為西弗(Sv)(一西弗等於一百侖目)。千分之一西弗為毫西弗，百萬分之一西弗為微西弗。
- 深部等效劑量 (deep dose

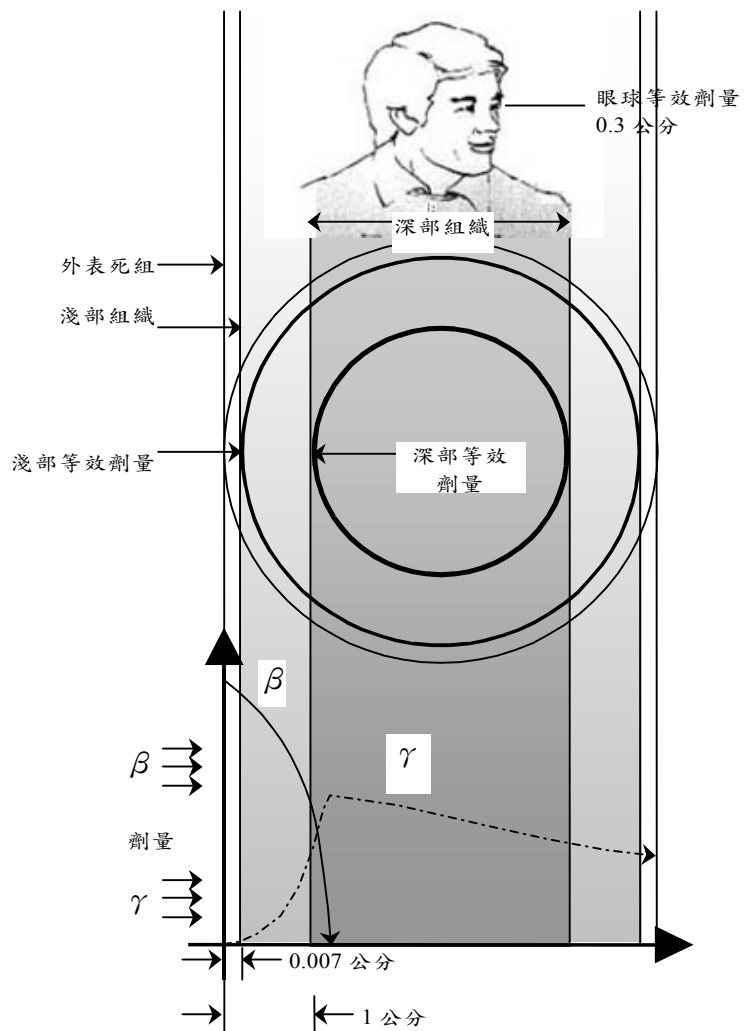


圖 3.8 深部及淺部等效劑量 (equivalent)：適用於全身之體外曝露，指身體一公分深處之等效劑

量。全身指包括頭部、身體軀幹、手肘以上之手臂、膝蓋以上之腿部等部位。

- 淺部等效劑量 (shallow dose equivalent): 適用於皮膚或四肢之體外曝露, 指 0.007 公分深處組織之等效劑量。
- 眼球等效劑量 (eye dose equivalent): 適用於眼球水晶體之體外曝露, 指 0.3 公分深處組織之等效劑量。

上述三種等效劑量如圖 3.8 所示。

- 有效等效劑量 (effective dose equivalent): 指人體中受照之各器官或組織之平均等效劑量與其加權因數乘積之和, 加權因數由原子能委員會公告之。
- 約定等效劑量 (committed dose equivalent): 指單次攝入放射性物質於體內後對某一器官或組織在五十年內將累積之等效劑量。
- 約定有效等效劑量 (committed effective dose equivalent): 指體內受曝露器官或組織之約定等效劑量與加權因數乘積之和。
- 集體劑量 (collective dose): 指特定人口曝露於某輻射源, 群體所受劑量之總和, 單位為人西弗 (人命目) (man-Sv, man-rem)。

3. 第三版本(未公布實施)

現行標準施行迄民國 87 年, 於此期間各事業單位在落實本標準過程中

發現本標準仍難免有所闕漏或窒礙難行之處等問題亟待改進。另隨社會民主化與多元化程度日益升高, 社會大眾的權利意識高漲, 對原子能科技應用所衍生的輻射安全問題日益殷切。此外, ICRP 亦在 1991 年再度提出更新的輻射防護標準的建議, 國內環保人士對儘早施行此項最新建議, 亦賦予高度期待。

近年來, 主管機關除對現行標準的疏漏詳加檢討外, 並就立即實施 ICRP-60 的可行性進行了深入且廣泛的評估。在審慎考量事業單位作業與主管機關管制實施的需求、社會上民意的期待暨輻射防護安全標準發展趨勢等主、客觀形勢並經廣徵意見後, 主管機關決定依下列原則對現行標準為適當的修正, 並於民國 87 年 6 月 30 日定稿。

- (1) 在不影響輻射安全暨維持本標準的穩定性的前提下修正標準的規定, 俾免因修正幅度過大造成事業單位調適困難反而對輻射防護品質造成負面影響。
- (2) 針對現行標準疏漏與規定不明確之處予以補充或修正, 使法規內容更加周延與完整, 符合實際需要。
- (3) 關於 ICRP-60 建議的採納, 鑒於該項建議與 ICRP-26 相比, 變動幅度甚大(例如: 輻射工作人員劑量限度管制周期由 1 年變 5 年), 且部分理論架構尚未發展完備, 例如:

管制體內曝露限度的建議(即 ICRP-30 的修正版, ICRP-60 建議為基礎者)要到西元 2000 年始發行。驟然施行,不但無助於輻射防護水準提昇,反而徒增困擾與問題。惟為順應民意的期待暨因應未來法規發展的趨勢,乃將 ICRP-60 中對經濟社會層面影響不大且有助於增進輻射防護成效的新觀念融入本次修正條文中。俾為未來新標準的推動建立共識,一旦全面採行新標準,將更為順利。輻射防護的量同第二版本。

4. 第四版本(未公布)

原能會鑒於國內原子能應用範圍隨經濟成長日益擴張,核能電廠設置、放射性物質及可發生游離輻射設備的應用亦日趨廣泛。為強化各項游離輻射防護管理與管制,自民國 87 年起推動制定游離輻射防護法的計畫,並依據 ICRP-60 的精神,參考先進國家相關法規文獻草擬游離輻射防護法草案。游離輻射防護法已於民國 91 年 1 月 4 日經立法三讀通過。在游離輻射防護法中並明定主管機關應訂定游離輻射防護安全標準。換言之,訂定游離輻射防護安全標準的法律授權依據將由原子能法變更為游離輻射防護法,且游離輻射防護安全標準各條規定,應與游離輻射防護法各相關規定的精神一致,不得有所牴觸。

除上述游離輻射防護法制變革外,我國的學術界與政府主管機關原能會近年來對 ICRP-60 及相關文獻如國際原子能總署 1996 年發行之安全叢書第 115 號(Safety Series 115, 簡稱 IAEA-115)游離輻射防護與輻射源安全之國際基本標準、歐洲共同體的游離輻射防護安全標準(Council Directive 96/29/EURATOM of 13 May 1996)、美國國家輻射防護與度量委員會第 116 號報告(NCRP-116)、日本放射線審議會對 ICRP-60 納入日本法規立場等的研究與評估亦不遺餘力,至今已擁有相當可觀的研究成果,並且也建立了一定程度的社會共識。主管機關除對現行標準的疏漏詳加檢討外,並就實施 ICRP-60 的可行性進行了深入且廣泛的評估。在審慎考量事業單位作業與主管機關管制實務的需求、社會上民意的期待暨輻射防護法制發展趨勢等主、客觀形勢並經廣徵意見後,主管機關決定現行標準為適當的修正,並於民國 89 年 12 月 1 日定稿。輻射防護的量如下:

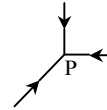
- 劑量: 為劑量學之量之總稱, 代表人體之組織器官吸收輻射之量度結果或其當量, 依管制或評估實際需要分別代表吸收劑量、等價劑量(equivalent dose)、有效劑量(effective dose)或其他適當之量。當無須明確指定使用之量或依上下文意可明白辨別所指之量時, 得省略

其修飾詞。

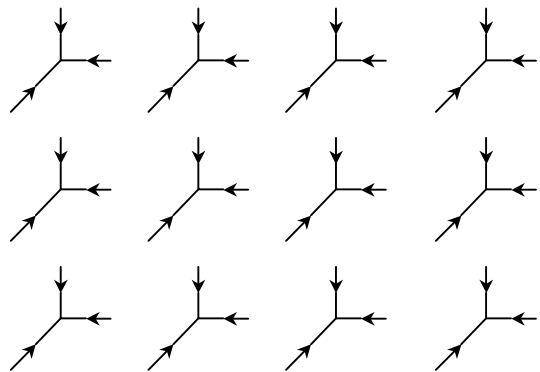
- 等效劑量：同第二版本。
- 吸收劑量：同第二版本。
- 周圍等效劑量 (ambient dose equivalent)：由國際輻射單位與度量委員會(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)所定義供地區監測需要之作業量。指輻射場中指定點之等效劑量，以 $H^*(d)$ 表示，為對應之擴展齊向場(見圖 3.9)在 ICRU 球內逆齊向場之徑向自球面起算深度 d 處所產生之等效劑量，對於強貫穿輻射， d 取一公分；對於弱貫穿輻射， d 取 0.007 公分；若考慮眼球水晶體之曝露， d 取 0.3 公分。周圍等效劑量之單位為西弗，一毫西弗為千分之一西弗，一微西弗為百萬分之一西弗。
- 周圍等效劑量率：指輻射場中指定點於單位時間內產生之周圍等效劑量，以 $\dot{H}^*(d)$ 表示。周圍等效劑量率之單位為西弗/小時、毫西弗/小時或微西弗/小時。
- 擴展齊向場：由國際輻射單位與度量委員會為供度量周圍等效劑量目的所定義之假設輻射場，由實際之輻射場導出。在此輻射場涵蓋體積範圍內，通量及能量分布與參考點上實際之輻射場相同，但通量為同向者。
- 定向等效劑量 (directional dose equivalent)：由國際輻射單位與度量

委員會所定義供地區監測需要之作

P 點的場(The field at point P)



擴展場(The expanded field)



擴展與齊向場(The expanded and aligned field)

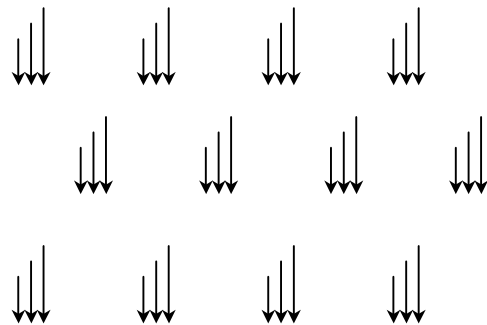


圖 3.9 在真正場的 P 點所導出假定的擴展場以及擴展齊向場的示意圖

業量。指輻射場中指定點之等效劑量，以 $H'(d, \Omega)$ 表示(見圖 3.10)，其定義為對應之擴展場在 ICRU 球內沿 Ω 徑向之自球面起算深度 d 處所產生之等效劑量。對於弱貫穿輻射， d 取 0.007 公分，若考慮眼球水晶體之曝露， d 取 0.3 公分；對於強貫穿輻射， d 取一公分。定向等效劑量之單位為西弗，一毫西弗為千分之一西弗，一微西弗

為百萬分之一西弗。

- 定向等效劑量率：指輻射場中指定點於單位時間內產生之定向等效劑量，以 $\dot{H}'(d, \Omega)$ 表示。定向等效劑量率之單位為西弗/小時、毫西弗/小時或微西弗/小時。
- 擴展場：由國際輻射單位與度量委員會為供度量定向等效劑量目的所定義之假設輻射場，由實際之輻射場導出，在此輻射場涵蓋體積範圍內，通量、角分布及能量分布與參考點上實際之輻射場相同。
- 有效劑量：指人體中受曝露之各器官或組織之平均等價劑量 H_T 與各該組織或器官加權因數 W_T 乘積之和，以 E 表示，其公式為：

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (3.3)$$

組織或器官加權因數 W_T 依該版本附錄一第二表之規定。

有效劑量之單位為西弗，一西弗相當於一公斤接受一焦耳之能量，一毫西弗為千分之一西弗，一微西弗為百萬分之一西弗。

- 等價劑量：指器官劑量與對應輻射加權因數 W_R 乘積之和，以 H_T 表示，其公式為：

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (3.4)$$

其中：

D_{TR} ：輻射 R 在組織 T 中產生之平均吸收劑量。

輻射加權因數 W_R 依該版本附錄一第一表之規定。

等價劑量單位為西弗，一毫西弗為千分之一西弗，一微西弗為百萬分之一西弗。

- 器官劑量(organ dose)：指單位質量之組織或器官 T 接受輻射授與之平均能量，以 D_T 表示，其公式為：

$$D_T = \frac{\epsilon_T}{m_T} \quad (3.5)$$

其中：

ϵ_T ：輻射授與組織或器官 T 之總能量。

m_T ：組織或器官 T 的質量。

器官劑量之單位為戈雷，一戈雷指每公斤質量吸收一焦耳之能量。毫戈雷為千分之一戈雷。

- 集體有效劑量：指特定人口曝露於某射源，群體所受有效劑量之總和，單位為人西弗，其定義為受到該特定射源曝露的人數乘該受曝露群組的平均有效劑量，以 S 表示，其公式為：

$$S = \int_0^{\infty} E \cdot \frac{dN}{dE} dE, \text{ 或} \quad (3.6)$$

$$S = \sum_i \bar{E}_i \cdot N_i \quad (3.7)$$

其中：

\bar{E}_i 為第 i 組人數 N_i 所受的平均有效劑量。

- 個人等效劑量：由國際輻射單位與度量委員會所定義供人員體外曝露監測

目的之作業量。指人體表面定點下深度 d 處軟組織之等效劑量，以 $H_p(d)$ 表示，對於強貫穿輻射 d 取 1 公分；對於弱貫穿輻射， d 取 0.007 公分；若考慮眼球水晶體之曝露， d 取 0.3 公分。個人等效劑量之單位為西弗。

- 約定有效劑量：指約定有效劑量 $E(\tau)$ 則為約定等價劑量 $H_T(\tau)$ 對器官及組織加權後之和，其公式為：

$$E(\tau) = \sum_T W_T \cdot H_T(\tau) \quad (3.8)$$

- 約定等價劑量：指組織或器官攝入放射性核種後經過時間 τ 所受之等價劑量稱為約定等價劑量 $H(\tau)$ ，為等價劑量率 $\dot{H}(t)$ 對時間區間 τ 的積分。應用於體內輻射防護時，對滿 17 歲之人， $\tau = 50$ 年；對未滿 17 歲之未成年人， $\tau =$ 自攝入時起至 70 歲為止。

5. 第五版本(未公布)

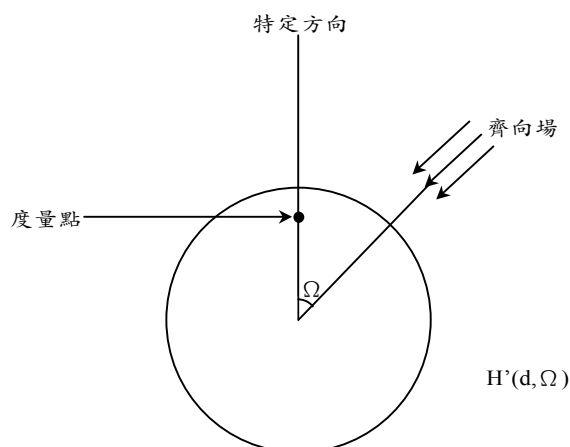


圖 3.10 齊向場中的 Ω 角

本版本係因應民國 88 年 2 月 3

日公布行政程序法而作暫時性的修訂，原則上仍以現行的標準為依據，故輻射防護的量未作更動，與第二版本相同。民國 90 年 3 月 23 日經原能會第 6 屆游離輻射安全諮詢委員會第 5 次會通過。

§3.5 ICRU-60 兩個新量

1. 本節介紹 ICRU 於 1998 年定義的兩個新量“沉積能”和“比轉換能”，並從最基本的量逐步推演。

(1) 單次相互作用

單次相互作用 (a single interaction) 是國際輻射單位與度量委員會 (ICRU) 60 號報告首次引入的新觀念，指入射的游離輻射 (粒子) 與物質相互作用發生的一次能量轉移。這次的能量轉移可造成原子的激發、游離、或(和)核反應。

(2) 單次事件

單次事件 (a single event) 是指入射的游離粒子與物質的相互作用而發生一系列的能轉移，這些能轉移是統計相關的，即單次事件由不小於一次的統計相關的一連串單次相互作用組成。

作圖說明：如阿伐粒子在其徑跡上產生一系列離子對的事件，如圖 3.11 所示。圖 3.11 中用 a、b 和 c 標示的 O 表示單次相互作用。在

[1]中單次事件 A 造成的 3 個單次相互作用 a、b 和 c 是統計相關的；在[2]中單次事件 A 形成的 2 個單次作用 a 和 b 統計相關，而事件 B 僅由相互作用 C 組成，且由於事件 A 和 B 之間統計無關的；在[3]中單次事件 A、B 和 C 分別引起統計不相關的 3 個單次相互作用 a、b 和 c。

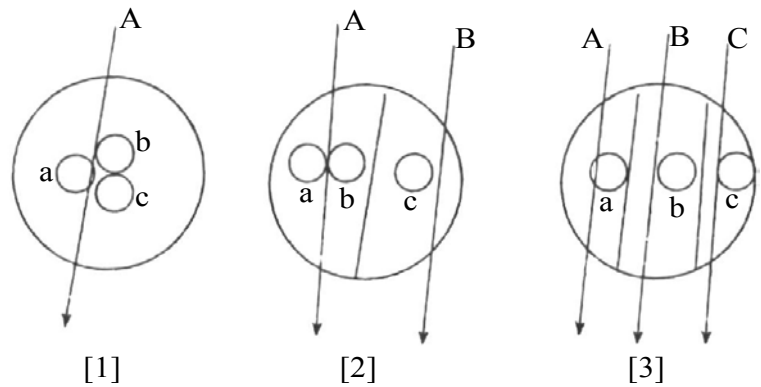


圖 3.11 單次相互作用與單次事件的示意圖

一般而言，由一個入射粒子造成的所有的單次相互作用，以及這些相互作用產生的次級粒子再引起的後續所有單次相互作用之間都是統計相關的。但如母代和子代關係遠且間隔時間長，則相互作用間的相關性弱，甚至可忽略其相關性。因此，一個入射游離粒子可以形至少一個單次事件(如果發生)，而一個單次事件至少可產生一個單次相互作用。

(3) 沉積能

沉積能 (energy deposit) 在 ICRU-60 中定義為在一單次相互作用 i 中所沉積的能量 ϵ_i ，可表示為

$$\epsilon_i = \epsilon_{in} - \epsilon_{out} + Q \quad (3.9)$$

式中 ϵ_{in} 為入射游離粒子的能量(不包括靜止能量)； ϵ_{out} 是離開這次相互作用點的所有游離粒子(既包括這個入

射粒子，也包括由於這次相互作用所產生的次級粒子)的能量之和(不包括靜止能量)；Q 為包含在這次相互作用中原子核和所有粒子的靜止質量的變化。若 $Q > 0$ ，意謂靜止能量減少； $Q < 0$ ，意謂靜止能量增加。沉積能的國際制單位(SI)為焦耳，也可使用電子伏。沉積能為一個隨機量。

根據游離粒子和生物體作用機制，其物理作用時間，即激發或游離，一般不會超過 10^{-14} 秒。沉積能 ϵ_i 可看作是沉積在相互作用點(即轉移點)的能量，即就在這一點，某一游離粒子損失了其動能。該位置的量子力學不確定度忽略不計，即可不受海森伯(Heisenberg)測不準關係式的約束。

(4) 線能

線能(lineal energy)強調單次事件，如圖 3.11 [1]中線能

$$y = \frac{\epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c}{\ell_1} \quad (3.10)$$

式中 ε_a 、 ε_b 和 ε_c 是 3 個單次相互作用的沉積能， $\bar{\ell}$ 是整個球形體平均弦長。而圖 3.11 [2] 中有兩個線能，一個為

$$y = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{\bar{\ell}_1} \quad (3.11)$$

另一個為

$$y = \frac{\varepsilon_c}{\bar{\ell}_2} \quad (3.12)$$

式中 $\bar{\ell}_1$ 和 $\bar{\ell}_2$ 分別為左右半球的平均弦長。線能的單位為焦耳/米。

線能和下面將討論的授予能都定義在一個給定體積內的多次沉積能，因此二者的體積絕不會小於沉積能所占的「體積」。線能和授予能均是多次沉積能之和，因此至少不會小於單次相互作用沉積能所用的時間 (10^{-14} 秒)。就輻射防護所感興趣的生物效應而言，上述的體積可近似為一個「點」，但是其體積為不可能零的物理點。

(5) 授予能

授予能(energy imparted)強調至少一次事件的沉積能量，因此對於圖(3.11)中的[1]、[2]和[3]，均有授予能

$$\varepsilon = \varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c \quad (3.13)$$

授予能的單位為焦耳。

(6) 比能

比能(specific energy)的定義

為

$$z = \frac{\varepsilon}{m} \quad (3.14)$$

式中 m 為質量。比能的單位為焦耳/千克。

2. 吸收劑量、比轉換能與比釋動能

吸收劑量(D)、比轉換能(c)、比釋動能(K)三者都是非隨機量，因此、單位相同，可用於各種受作用物質，其區分如下：

(1) 比釋動能

比釋動能(kinetic energy released in material，簡稱 kerma，符號 K)又音譯為克馬，只涉及電中性粒子在質量為 dm 的物質中轉移給次級電子的動能，不管這些動能將損失在何處，在哪裏被吸收，且未考慮束縛能。

(2) 比轉換能

比轉換能(converted energy per unit mass，簡稱 cema，符號 c)又音譯為西馬，則考慮帶電粒子在 dm 中因與核外電子相互作用所損失的能量，也不理會這些次級電子將如何損失它們的動能。

(3) 吸收劑量

吸收劑量及沉積在 dm 的平均能量，卻不管這些能量來自何方。

3. 吸收劑量與比轉換能的關係

圖 3.12 是在準帶電粒子平衡條件下吸收劑量(D)與比轉換能(c)二者關係的示意圖。所謂準平衡狀態是吸收

劑量與比轉換能之比近似為常數。儘管入射帶電粒子與電子碰撞後本身及其次級電子的運動方向是隨機的，甚至會有逆入射方向而行的粒子，但總體來看，其運動方向是順著入射方向的。

圖 3.12 中吸收劑量和比轉換能在介質中是處於準平衡狀態；曲線 D' 和 C' 說明吸收劑量和比轉換能由介質 1 進入密介質 2 後的變化，並在深度 x_1 處再次達到準平衡狀態；曲線 D'' 和 C'' 是二者由介質 1 進入疏介質 2 的變化，並在 x_2 處又達到新的準平衡狀態。 x_0 是介質 1 和介質 2 的分界面。嚴格地說，在分界面的左邊介質 1 中，也會有一定程度的邊界效應。即在靠近介質 2 中產生的次級粒子，甚至一些初級粒子會因碰撞後改變方向返回到介質 1。達到準平衡狀態後吸收劑量與比轉換能之比近似為常數。

次級粒子的產生幾乎是瞬時的，屬於物理作用階段，一般不大於 10^{-14} 秒。但這些次級粒子要經過多次碰撞、相互作用才能將其動能全部消耗掉，直到被另外一個原子吸收，並放出束縛能。因此能量的沉積要花費

較長的時間，就出現了 D 在 $x_0 - x_1$ 或 $x_0 - x_2$ 深度間的過渡過程，直到在深度 x_1 或 x_2 處達到新的準平衡狀態。

圖 3.12 中點 N 點對應深度處所吸收的電子能量，相當於來自深度較淺的地方，譬如說來自 M 點對應深度處產生的次級電子的初始動能。在準平衡狀態下，在某點沉積的能量大於從該點釋放出的能量。

4. 二階段論

不計制動輻射和原子核的彈性碰撞，帶電粒子將能量傳遞給受作用的物質可分使核外電子擺脫核束縛能並賦於這些次級電子以動能階段和次級電子通過游離、激發把從帶電粒子得到的動能再授予物質階段。分此兩階段並不意味著二者在數值上相等。比

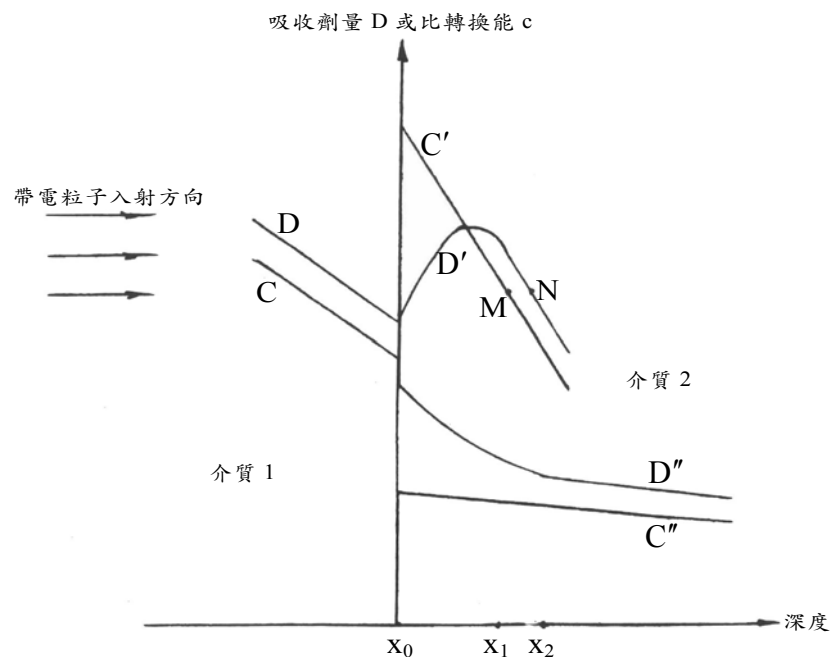


圖 3.12 吸收劑量(D)與比轉換能(c)在介質中變化的示意圖

轉換能對應上述的第一階段，也可稱為上游，而吸收劑量則是第二階段的結果，也可稱為下游。同理比釋動能 K 也是上游，但在計算時比釋動能用質量衰減係數 (μ/ρ) 而比轉換能用質量阻止本領 (S/ρ) 。日後比轉換能和比釋動能二者能否統一成為一個新的量，尚不得而知。

5. 比轉換能

比轉換能定義為 dE_C 除以 dm 所得的商，即

$$c = \frac{dE_C}{dm} \quad (3.15)$$

式中 dE_C 是帶電粒子與核外電子發生非彈性碰撞在質量為 dm 的物質中所損失的能量。其 SI 單位為焦耳每千克，專用名詞為戈雷。帶電粒子損失的能量包括兩部分：擺脫原子核束縛所需的能量和所釋放的電子(即次級電子)的所有初始動能之和。這些次級電子在後續相互作用中損失的能量不屬於 dE_C 之列。另原子激發和振動引起的能量損失也不在其中。

此轉換能也可用帶電粒子通量對能量的導數

$$c = \int \varphi_E \cdot \frac{S_{el}}{\rho} \cdot dE = \int \varphi_E \cdot \frac{L_\infty}{\rho} \cdot dE \quad (3.16)$$

式中 S_{el}/ρ 是給定物質對能量為 E 的帶電粒子的質量電子(碰撞)阻止本領，其下標 el 表示與電子碰撞。 L_∞ 是相對應的非限定直線能量轉移

$(L_\infty = S_{el})$ ， ρ 為物質密度。

對於高能帶電粒子，不可無視於其各種能量的次級電子的能量傳輸。有限比轉換能(restricted cema)可定義為積分：

$$c_\Delta = \int \varphi'_E \frac{L_\Delta}{\rho} dE \quad (3.17)$$

式中用直線能量轉移 L_Δ 代替 L_∞ ，而 φ'_E 的分布要包括動能大於 Δ 的次級電子。

若 $\Delta = \infty$ ，則比轉換能、有限比轉換能均與通量有關，意味著對給定物體，在自由空間的一點或其他物質中，其值可求。所以，可有空氣中組織比轉換能之說，類似於水假體中某點的空氣比釋動能的觀念。

c 和 c_Δ 可作為帶電粒子吸收劑量的近似。如果制動輻射能的損失和原子核彈性碰撞可忽略不計，且次級電子平衡成立，即吸收劑量與比轉換能近乎相等。若次級電子通量在其射程之內量是常數的，則次級電子平衡可在該點達到。惟電子平衡條件不易滿足，常使用準平衡的條件。

§3.6 結語

上述 5 種版本的我國游離輻射防護安全標準係以原子能法第 24 條的規定而訂定的。若審議中的游離輻射防護法能順利獲得通過，則須以該法為母法。在 5 種版本中，除了第 3 和第 4 版本係委託財團法人中華民國輻射防護協會(以下簡稱輻協)草擬外，其餘版本均係由原能會草擬。第 3 版本還在臺灣各地舉行 18 場

公聽會，使修法能符合實際的需要。

我國自第二版本開始，即使用 SI 單位。我國的度量衡國家標準實驗室，係設於新竹市由經濟部標準檢驗局委託財團法人工業技術研究院量測技術發展中心建立的；輻射有關量的標準實驗室則由標準檢驗局委託行政院原子能委員會所屬核能研究所保健物理組建立的。

參考文獻

1. ICRP Publication 22, **Implications that Doses be Kept as Low as Readily Achievable**, Pergamon Press, Oxford (1973)
2. ICRP Publication 26, **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, Pergamon Press, Oxford (1977)
3. ICRP Publication 30, **Limitations for the Intake of Radionuclides by Workers, Part I**. Pergamon Press, Oxford, (1979)
4. ICRP Publication 60, **1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, Pergamon Press, Oxford (1991)
5. IAEA Safety Series No. 115, **International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources**, International Atomic Energy Agency, Vienna (1996)
6. NCRP Report 116, **Limitation of Exposure to Ionizing Radiation**, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda (1993)
7. 96/29/EURATOM, Council Directive of 13 May 1996, **Laying Down the Basic Safety Standards for the Healthy Protection of Workers and the General Public Against the Dangers of Ionizing Radiation**, L159, Official Journal of the European Communications (29.6.1996)
8. ICRU Report 60, **Fundamental Radiation Quantities and Units for Ionizing Radiation**, Bethesda (1998)
9. 東征 **新編物理量單位基礎** 中國計量出版社，北京(1995)
10. 楊華庭 關於 ICRU 60 號報告中的兩個新量 **輻射防護** 21，123-127 (2000)

第四章 防護安全標準的演變

§4.1 前言

我國的游離輻射防護安全標準主要是參考國際放射防護委員會(ICRP)的建議以及國際原子能總署(IAEA)的安全叢書而訂定的，自民國 59 年(1970)7 月 29 日公布第一版的標準以後，30 多年來屢有更動。

§4.2 主管機關與法源

原子能和平用途發展，係民國 42 (1953)年 12 月 8 日美國總統艾森豪(Dwight D. Eisenhower)在聯合國第 9 屆大會上所倡議，期待把含有巨大能量的原子能移作為為人類謀福利的原動力。艾氏並提出兩點建議：

1. 舉行原子能科學會議，使國際間原子能學術得以交流。
2. 設立一國際原子能機構，以協助國際間原子能發展，且美國願意將原子能和平用途的知識與世界各國共享。

聯合國於 1955 年 8 月 8 日至 20 日於瑞士日內瓦召開了第一屆國際原子能和平用途會議(我國當時係聯合國會員國，亦應邀參加)。同年，我國政府鑑於原子能和平用途應用範圍廣泛，國

際間有關原子能的活動亦將日漸增多，為利統籌推廣國內有關原子能各項工作及代表政府參加國際間的相關活動，於行政院下成立了「原子能委員會」，以下簡稱「原能會」，正式展開了我國在原子能和平用途的活動。我國重要的原子能相關建設，如國立清華大學推動原子科技的研究及臺灣電力公司著手推展原子能發電(即核能發電)，也都是從同一年開始籌備。

原能會成立之初，係由教育部長兼任主任委員，其餘各委員亦由各相關部會指派高層人員及聘請原子能專家擔任。由於經常性事務較少，故未設辦公室及置專任人員，各項業務均由主任委員指派教育部人員兼辦。迄民國 55 年止，其間因業務擴充需要，亦僅由教育部次長以委員兼執行秘書身份及借調教育部人員協助推動相關業務。當時原能會的組織與職掌係依據民國 44 年 5 月 31 日由行政院發布的「行政院原子能委員會組織規程」來運作的。此項組織規程於民國 55 年依行政院第 971 次院會決議修正，並於民國 56 年第 1021 次院會通過實施，建立員額編制，任用專任人員，原能會也因而開始有專任的

工作人員及正式的辦公場所。

民國 57 年 5 月 9 日總統明令公布原子能法(即為母法)，其第三條規定：「原子能主管機關為原子能委員會，隸屬行政院，其組織以法律定之。」；第 6 條規定：「原子能委員會對外得代表政府，從事國際合作事宜。」，自此原能會有了法定地位及任務。原能會嗣後即擬具「行政院原子能會組織條例草案」，經行政院院會審查通過後送請立法院審議，復經立法院三讀程序通過後，於民國 59 年 12 月 3 日由總統以五九台統(一)義字第 796 號令公布施行。自此，原能會的組織與職掌的運作取得正式的法律依據。原能會組織條例曾因業務需要分別於 68 年 7 月及 81 年 11 月兩度修正，現行組織係依據 81 年 11 月 23 日華總(一)義字第 5659 號令公布施行的「行政院原子能委員會組織條例」設立及運作。

原能會現行組織在會本部設有五個處，分別為綜合計畫處、核能管制處、輻射防護處、核能技術處及秘書處，另依業務需要設有核能研究所、輻射偵測中心及放射性物料管理局等三個附屬機關。其中與輻射防護管制關係最為密切者為輻射防護處。茲將其法定職掌列舉於後，俾利了解該處在輻射防護法制架構下所扮演的角色。輻射防護處歷任處長為劉國鉞、黃呈元、楊義卿、陳為立、蘇明峰、蘇獻章諸先生。依據原能會組織條例第 6 條的規定，輻射防護處掌理的事項如下：

1. 核子反應器輻射防護及環境輻射之管制事項。
2. 放射性廢棄物貯存、處置場所輻射防護及環境輻射之管制事項。
3. 核子事故緊急輻射偵測之評估及督導事項。
4. 放射性物質及可發生游離輻射設備暨操作人員有關執照之核發事項。
5. 放射性物質及可發生游離輻射設備之管制事項。
6. 游離輻射場所及環境輻射之稽查事項。
7. 放射性物質安全運送之管制事項。
8. 輻射安全評估報告之審查事項。
9. 輻射安全管制規範之研訂事項。
10. 輻射防護人員之認可事項。
11. 輻射偵檢文件之核發事項。
12. 全國輻射背景及輻射劑量之管制檢查事項。
13. 放射線(即輻射)從業人員輻射防護能力鑑定及管制事項。
14. 其他有關輻射安全事項。

前述 14 項職掌為原則性規定，更明確的補充規定為依組織條例第 19 條規定訂定的「行政院原子能委員會辦事細則」，其中第 5 條明定了輻射防護處 5 個科的掌理事項。游離輻射防護安全標準的擬訂與修訂事項屬該處輻安評估科的職掌。

除輻射防護處外，原能會其他部門亦有部分職掌與輻射防護法制業務有關，茲列舉其重要(有直接關聯者)者說

明如下：

1. 依據原能會組織條例第 7 條第 5 款規定，核能技術處掌理事項之一為「核能法規及技術準則研訂事項」。
2. 依據原能會辦事細則第 8 條第 1 款之規定，原子能法規、技術規範及導則之彙整與研訂事項為核能技術處研究發展科之職掌。
3. 前項辦事細則第 14 條第 3 款規定，技監承長官之命，處理事務之權責包括原子能技術規範法令疑義之闡釋事項。
4. 前項辦事細則第 15 條規定，參事承長官之命，處理業務，其權責包括了：法案命令之會辦事項(第 1 款)、年度立法計畫之彙辦事項(第 2 款)、原能會主管法規疑義之闡釋會核事項(第 3 款)、法規研訂、修正及廢止案件之會核事項(第 5 款)、法規之發布事項(第 6 款)及出席相關法規審查研究會議事項(第 10 款)等。
5. 依據「行政院原子能委員會法規委員會組織規程」第 2 條之規定，法規委員會掌理之相關事項如下：
 - (1) 年度立法計畫審議事項(第 1 款)。
 - (2) 原子能法規制(訂)定案、修正案之研議或審議事項(第 2 款)。
 - (3) 原子能法規疑義之研議闡釋事項(第 3 款)。
 - (4) 原子能法規資料之蒐集、分析、研究及管理事項(第 6 款)。
 - (5) 原子能法規動態之登記、統計及

管制事項(第 7 款)。

- (6) 原子能法規令函解釋之整理及編印事項(第 8 款)。
- (7) 其他有關法制事項(第 9 款)。

法規委員會主任委員由原能會副主任委員一人兼任，另置委員 11 至 15 人，由會內高級人員及會外法律或核子科學學者、專家派兼或聘兼組成。

6. 依據「行政院原子能委員會游離輻射安全諮詢委員會設置辦法」第 3 條及「行政院原子能委員會游離輻射防護諮詢委員會組織及作業要點」之規定，此一諮詢委員會諮詢之相關事項包括：

- (1) 有關游離輻射防護之管制方針[設置辦法第 3 條第 1 款及作業要點 2 之(1)]。
- (2) 有關游離輻射防護之標準[設置辦法第 3 條第 2 款及作業要點 2 之(2)]。
- (3) 有關游離輻射環境安全之標準[設置辦法第 3 條第 7 款及作業要點 2 之(7)]。

游離輻射安全諮詢委員會置委員 15 人至 19 人，除主任委員由原能會主委指定外(現行辦法為委員互選一位主席主持會議)，餘均聘請會外專家學者擔任。

§4.3 母法與輻射防護

在原能會成立以前，我國最早有關

原子能法規是行政院在民國 37 年 3 月 18 日發布的「輻射礦產管理辦法」，此一辦法曾在 42 年 4 月修正過。這個法規也只是一個法規命令，且適用範圍相當狹窄。

原能會自民國 44 年成立後，為配合原子能事業的發展，在民國 45 年邀請專家成立小組，完成「放射性物質輸入及和平用途管制辦法」，於民國 46 年 2 月 19 日獲行政院核定後發布施行。民國 50 年又選派法律專家戈劍農先生赴美考察原子能立法；嗣後並蒐集美、歐、日有關原子能法規供編譯參考。民國 53 年 1 月，原能會又邀請有關專家，成立法規編訂委員會，每周集會一至二次，擬訂所需法規及標準。法規編訂委員會成立後最重要的工作是草擬有關原子能的基本法「原子能法」及與推展原子能與民眾權益有直接關係的「核子損害民事賠償法」(此一法律完成立法之正式名稱為「核子損害賠償法」)。原子能法草案擬訂完成報院審查後，經行政院轉會各部會簽署意見，再令原能會參照各部會意見重新整理修訂後再送原能會彙整。經行政院於民國 55 年 6 月 9 日第 971 次院會通過後送請立法院審議。立法院歷經多次開會審議，於民國 57 年 4 月 26 日三讀通過，完成立法程序，並由總統於同年 5 月 9 日明令公布施行。

原子能法自立法完成施行迄今，於民國 60 年曾予修正，僅增列第 33 條第

2 項，規定原子能委員會得徵收規費及訂定收費標準外，其他條文均未作任何變動。

原子能法是現行原子能法規體系中位階最高的法律，可視為原子能政策的基本法，舉凡原子能研究發展政策，原子能委員會在原子能發展及管制方面的角色定位及組織，游離輻射防護，核能營運的管制，核子損害賠償等等，莫不以原子能法為最高的指導綱領及依據的法源。原子能法中與游離輻射防護有直接關聯的章節為「第六章、游離輻射之防護」，主要相關條文如下：

第 24 條：為防止游離輻射之危害，以確保人民的健康與安全，原子能委員會應訂定防護游離輻射的安全標準，報請行政院公布施行。

第 25 條：關於放射性落塵之偵測，應由原子能委員會同內政部及國防部訂定計畫，並購置設備，配發有關單位使用；其偵檢紀錄，由原子能委員會統一審定發布。

第 26 條：游離輻射之防護，依下列之規定：

1. 放射性物質及可發生游離輻射設備之所有人，應向原子能委員會申請執照。
2. 可發生游離輻射設備之安裝、改裝，在工程完竣後，應申報原子能委員會作安全檢查及游離輻射測量。
3. 放射性物質及可發生游離輻射設備之操作人，應受有關游離輻射防護之

- 訓練，並應領有原子能委員會發給之執照。
4. 可發生游離輻射之設備，在使用前，應作游離輻射防護之安全檢查，檢查紀錄應存備查考。
 5. 原子能委員會對可發生游離輻射設備，應制定安全規則，並隨時派員檢查之。
 6. 放射性物質及可發生游離輻射設備之生產，其開始、停止或再開始，應申報原子能委員會核准。
 7. 放射性物質及可發生游離輻射設備之生產紀錄，應定期報送原子能委員會，原子能委員會並應隨時派員稽核之。
 8. 放射性物質及可發生游離輻射之輸入、輸出，非經原子能委員會核准發給證明書，並依照有關法令之規定，不得為之。
 9. 放射性物質之運送及儲存，應依原子能委員會之規定，原子能委員會並得派員稽查之。
 10. 放射性物質及可發生游離輻射設備之轉讓、廢棄及放射性廢料之處理，均應申報原子能委員會核准，原子能委員會並應派員稽核之。
 11. 一定限量以內之放射性物質得免予管制，其限量由原子能委員會訂定之。

在上述輻射防護主要相關條文中，第 24 條即為訂定游離輻射防護安全標準的法源依據。第 25 條為關於落

塵偵測的規定，在制訂原子能法當時，我國財政狀況似不甚富裕。從立法院立法公報刊載審議原子能法草案的文獻記載，雖然放射性落塵的偵測屬於原能會的職責，但立法院考量原能會經費有限，由原能會獨力購置設備，配發有關單位使用，恐難辦理，且當時亦認為防護工作攸關人民生命財產安全，不能因噎廢食，故建議修正為由原能會會同內政部及國防部共同承擔。目前，在實務上放射性落塵已與天然輻射源同被視為背景輻射的一部分，原能會亦設有專責機構(輻射偵測中心)負責環境輻射監測，落塵當然也是其中一部分，設備也是偵測機構自行購置，當年立法背景應已不復存在。至於第 26 條各款雖屬游離輻射防護領域，但大體上侷限在放射性物質及可發生游離輻射設備的管制，其主要執行細節，多規定於原子能法施行細則，僅第 11 款的放射性物質免予管制的限量係規定於游離輻射防護安全標準及其附表。罰則部分為第 32 條第 4 款，違反第 26 條規定者，處一年以下有期徒刑，拘役或科或併科三千元以下罰金，並沒收放射性物質。

原子能法立法時期，正值我國原子能科技發展的萌芽期，以後由於國內經濟成長快速，社會變動急遽，原子能的和平應用日漸蓬勃發展，如核能發電的推展，放射性物質及可發生游離輻射設備亦為醫、農、工、商及學術各界廣泛應用。且社會大眾對核能設施的安全、

游離輻射的防護及放射性廢棄物的管制事項漸漸成為主管機關亟待克服的難題。原能會鑑於原子能法在適用了將近 20 年後，有關前述問題的規定闕漏甚多，顯難發揮規範功能，亟需全面檢討修正，曾於民國 77 至 80 年間委託國立臺灣大學法律研究所進行一項原子能法的檢討與改進研究計畫，並於民國 80 年 6 月提出一份原子能法修正草案。原能會隨後以臺大法研所擬具的草案再邀集國內產官學各界廣泛討論後，於民國 83 年經行政院會通過後送請立法院審議。在草案中對輻射防護管制增加了許多規定，原能會有意藉修正原子能法，大幅強化輻射防護之職權與功能。惟此一法律案一直到民國 88 年 1 月立法院第 3 屆立法委員第 6 會期結束任期屆滿止都還未排入審議。自第 4 屆立法委員起依立法院職權行使法規定：「政府機關及立法委員提出之議案，每屆立法委員任期屆滿時，尚未完成委員會審查之議案，下屆不予繼續審議。」，行政院乃於民國 88 年 2 月 4 日函告相關部會，凡於第 3 屆立法委員任滿而尚未經委員會審畢的法案均視同廢棄，須重新審慎檢討後重擬報院，再送請立法院審議。因此，耗時近 10 年的原子能法修正作業終告功敗垂成。往後，游離輻射防護法制化的努力也因而將以另一個新面貌重新開始。

§4.4 防護標準的演變

原能會於民國 56 年實施新組織規程後，即籌劃成立安全委員會，先後召開三次會議，邀集內政部(當時衛生署尚未成立，醫政係由內政部主管)、國防部後勤參謀次長室第 2 處、國軍退除役官兵輔導委員會第 6 處、臺灣省衛生處、臺北市衛生局等單位代表、設有放射線部門的大型醫院(如臺大醫院、榮總、省立臺北醫院)等各放射部門主任、清華大學及核研所的專家研討，決定設立「輻射防護專門委員會」。該委員會成立後，即推定專家著手草擬「游離輻射防護安全標準」以作為輻射安全管制的依據，亦同時推動其他輻射防護相關的政策及教育訓練，俾使輻射安全納入正軌，以防止公眾遭受醫用及非醫用各種輻射的傷害。

第一版本

原能會於民國 56 至 57 年間完成「游離輻射防護安全標準草案」，係依據國際原子能總署 1967 年出版的安全叢書第 9 號輻射防護標準(此一標準係依據 ICRP-9 建議制定)擬訂者，經徵詢各相關單位意見後報院，經行政院審核通過後於民國 59 年 7 月 29 日以台 59 教字第 6736 號令核定發布施行。這是我國第一版本的游離輻射防護安全標準。

第一版本的專用名詞及意義如下：

1. 核種(nuclide)指原子核具有定數中子與質子之原子。

2. 放射性(radioactivity)指核種之自發衰變。
3. 放射毒性(radiotoxicity)指由體內放射性物質發出游離輻射所引起之毒性。
4. 體外游離輻射(external ionizing radiation)指體外照射於身體之游離輻射。
5. 體內游離輻射(internal ionizing radiation)指侵入體內之放射性物質所產生之游離輻射。
6. 天然游離輻射(natural ionizing radiation)指下列各種游離輻射。
 - (1) 宇宙線(cosmic ray)及天然存在於地殼與大氣中之放射性核種所產生之體外游離輻射。
 - (2) 身體組織中正常所含微量放射性核種及由天然環境侵入體內之其他核種與其衰變產物所產生之體內游離輻射。
7. 輻射專業人員(qualified radiation expert)指具有專業學識與訓練並經原子能委員會認可之人員；此人員應能提供防護措施及作業程序，使曝露於游離輻射下所有人員確能得到輻射防護之實效。
8. 管制地區(controlled area)指以管制個別人員游離輻射曝露為目的而劃定之地區；此地區應在具有專業知識與權責之人員監督下，實施適當之游離輻射防護規則。
9. 緊急曝露(emergency exposure)指在急迫情況下或有絕對必要時，作有計

劃之例外游離輻射曝露。

10. 意外曝露(accidental exposure)指由於不可預料之情況而致所受游離輻射劑量或侵入體內之放射性物質超過最高許可限度之曝露。
11. 吸收劑量(見 § 3.4)。
12. 等效劑量(見 § 3.4)。
13. 居里(見 § 3.4)。
14. 中子通率(neutron flux density)指在一秒鐘內落入於截面積為一平方公分之球面上中子之數目。
15. 劑量積存(dose commitment)指由於侵入體內之放射性物質在 50 年內對一器官或一組織所產生之總劑量。
16. 遺傳劑量(見 § 3.4)。
17. 年指連續之 12 個月。季指連續之 3 個月。

第一版本的防護安全標準說明如下：

輻射的生物效應有些是低限效應，可以求出其低限劑量；有些是非低限效應，無法求出其低限劑量。輻射的遺傳效應就是非低限效應，其劑量效應曲線是一條直線，下降至劑量為零，且其效應不因劑量率而改變，僅總劑量具有生物學的重要性。這就是說，每增加一次劑量，不論何種程度，均會增加不良效應的可能。目前尚無法知道何種劑量的輻射一定會有遺傳效應，何種劑量不會有遺傳效應，所以祇能假定為非低限效應，意即無論劑量小到何種程度都

可能有遺傳效應。因此在輻射安全上公認的原則是所有的輻射曝露都會產生生物效應，問題是如何制定職業性與非職業性的劑量限制。在過去的觀念是由紅斑劑量演變至用侖琴計算的耐受劑量。耐受劑量即指任何人可望無傷害而能忍受的劑量。當時的觀念是以曝露者所接受的輻射在其一生不產生可察覺的效應為標準。意即曝露者雖有傷害，但以不可察覺者為限。這種標準顯然未將遺傳效應估量在內，因為遺傳效應是出現於曝露者的後代子孫，而曝露者本身則可能不顯出任何可察覺的傷害。但是，輻射安全的標準如果考慮游離輻射的遺傳效應，則無人可曝露於任何輻射，這是不可能的事。

應用核能與游離輻射的利益是多方面的，問題是如何兩全其美，既可保障人類的健康，又可獲得核能與游離輻射的利益。國際放射防護委員會經慎重考慮，認為環境游離輻射的管制在使曝露限制於一種對個人及公眾僅產生一種可接受的危險性，進而形成最大許可劑量的觀念。因此輻射安全的目的在於防止又減少公眾的身體傷害及遺傳結構的退化至最低的程度。個人的許可劑量是根據現有的知識，使長期累積或一次曝露時發生重度身體傷害或遺傳傷害的機率減至無足輕重。此種劑量經資深醫學權威認為是可接受的。

輻射安全未來的目標。不能僅限於輻射傷害與利益的平衡，也不能止於使

危險達到現代日常生活中可以接受的限度；而應使輻射的危險減至最小程度與輻射的利益增至最大的程度。在這種目標尚未達到以前，目前的方法是強調防止所有不必要的曝露，限制日嚴，方能達到日趨於有效的地步。目前將遺傳效應估計在內的安全標準，實際上是最保守且較嚴格的標準。

民國 59 年 7 月 29 日行政院原子能委員會依我國原子能法第 24 條的規定，訂定游離輻射防護安全標準並發布實施。凡放射性物質的生產、使用、儲存、運送、廢棄、放射性廢棄物的處理，可發生游離輻射設備的操作和應用，均應遵守本標準的規定。標準為從事游離輻射工作的職業人員極重要的參考資料。

本標準對於曝露於游離輻射的(等效)劑量，加以限制，並規定工作人員的最高許可(等效)劑量。最高許可(等效)劑量為工作人員在規定的情況下許可遭受曝露的最高值。在環境許可下，實際所遭受的曝露，應儘可能使其低於此最高值。工作人員任何器官或組織的總(等效)劑量，為在工作時間內所接受的體外游離輻射及侵入體內放射性物質所造成(等效)劑量的總和。工作人員個人的全身、生殖腺、紅骨髓在一年內所接受的最高許可(等效)劑量為 5 侖日。其基本公式為

$$D = 5(N - 18) \quad (4.1)$$

式中

D = 累積總等效劑量，以侖目為單位。

N = 實足年齡。

於可控制的曝露下，各器官的最高許可(等效)劑量如表 4.1 所示。

本表以侖目為單位。每年 5 侖目相當於每周 100 毫侖目。若每周以 40 工作小時計算，則相當於每小時 2.5 毫侖目。16 歲以下的兒童，甲狀腺不得超過 1.5 侖目，此亦即於一般人那一欄上，3 加註*星號的原因。一般人的「最高許可劑量」現在稱為「劑量限度」。

表 4.1 最高許可(等效)劑量

危 急 器 官	職 業 人 員				一 般 人
	正 常 曝 露		計 畫 曝 露		
	一 年	一 季	一 次	一 生	
生殖腺、紅骨髓、均勻照射下全身	5	3	10	25	0.5
皮膚、甲狀腺、骨骼	30	15	60	150	3*
手、足、前臂、足踝	75	38	150	375	7.5
其他任一器官	15	8	30	75	1.5

一般人的曝露應比職業人員為低，其理由如下：

1. 一般咸信嬰孩、兒童對於輻射傷害特別敏感。嬰孩與兒童不包括於職業人員的類別。
2. 工作期間遭受的曝露時間遠較終身遭受的曝露時間為短。因此，個人在工作期間由於曝露而累積的(等效)劑量遠較其終身曝露於同一輻射水準

所累積的(等效)劑量為低。

3. 某種生物效應具有潛伏期。在晚年遭受曝露，效應出現的機會越低。反之，若在早年遭受曝露，則效應出現的機會較高。
4. 工作人員多少是經過某些程度的挑選，可避免有病的人參加工作而導致更易於受害。
5. 個人均有選擇職業的自由，至少在原則上是自願接受少量潛在的危險。
6. 在考慮一般人的遺傳時，對全人口的生殖腺曝露宜加以限制。

第二版本

民國 66 年(1977)，國際放射防護委員會發行第 26 號出版物，提出了新輻射防護建議。原能會為因應 ICRP-26 建議的實施，自民國 74 年起成立「修訂審覈小組」，著手修正 59 年發布施行的安全標準。小組成員包括學術界、醫學界、核子設施、主管機關與資深保健物理學家等，主要參考文獻有 ICRP 第 26 號及第 30 號出版物、國際原子能總署第 9 號安全叢書(1982 年修正版)及美國聯邦法規 10 CFR 20 游離輻射防護安全標準修正草案，歷經長達四年多的開會討論，並徵詢有關機關、機構及團體的意見後，於民國 79 年完成修正草案，報請行政院審查核定後於 80 年 7 月 10 日發布施行迄今。依此項修正標準第 65 條規定：「本標準修正施行前已設立的輻射作業，其不符合本標準者，應自修正施

行之日起兩年內完成改善，以符合本標準之規定。」換言之，此項修標準給予既存輻射作業設施兩年的緩衝期，正式全面施行的日期為民國 82 年 7 月 10 日。這項安全標準修正發布施行迄今已近 10 年，從 ICRP 建議到落實為國家的法規，通常需要 5 至 10 年或更長時間。近年來，除了核能發展的爭議外，輻射鋼筋的問題也對公共安全造成相當大的震撼，因而國內社會大眾對核能與輻射安全的期待與關切日益殷切，雖然問題的本質與安全標準的內涵並無直接關聯，但對於推動落實 ICRP 新建議的安全標準，成為主管機關無可避免的壓力，也是輻射防護法規發展必然的趨勢。

第二版本的專用名詞及意義如下：

1. 核種：指原子之種類，由核內之中子數、質子數及核之能態區分之。
2. 放射性：指核種自發衰變時釋出游離輻射之現象。
3. 游離輻射(簡稱輻射)：指直接或間接使物質產生游離作用之電磁輻射(如 X 射線、加馬射線)或粒子輻射(如阿伐、貝他、中子、高速電子、高速質子及其他粒子)。
4. 體外輻射：指由體外照射於身體之輻射。
5. 體內輻射：指由侵入體內之放射性物質所產生之輻射。
6. 輻射源(radiation source)：指產生或可產生輻射之物質或機具。
7. 活度(activity)：指一定量之放射性核種在某一時間內發生之自發衰變數目。活度之單位為貝克。每秒自發衰變一次為 1 貝克(1 貝克等於 2.7×10^{-11} 居里)。
8. 中子通量率：指 1 秒鐘內通過球截面積 1 平方公分之中子數目。
9. 曝露：指輻射之照射。
 - (1) 體外曝露：指來自體外輻射之照射。
 - (2) 體內曝露：指來自體內輻射之照射。
10. 天然輻射曝露：指下列各種輻射之照射。
 - (1) 宇宙線及天然存在於地殼與大氣中放射性核種所產生之體外輻射。
 - (2) 一般人體組織中所含微量放射性核種及由天然環境侵入體內之其他核種與其衰變產物所產生之體內輻射。
11. 醫用曝露(medical exposure)：指接受輻射診斷或治療之曝露。
12. 職業曝露(occupational exposure)：指工作人員於工作期間所接受之曝露。
13. 計畫特別曝露(planned special exposure)：指在正常運作中，因特殊狀況而又無其他較低曝露方法可替代時，經計畫後所作超過劑量限度之曝露。
14. 緊急曝露：指於急迫情況下作有計畫之例外曝露。

15. 意外曝露：指於不可預料情況下接受超過劑量限度之曝露。
16. 劑量：指被物質吸收之輻射能量。以下(1)至(9)的定義見 § 3.4。
 - (1) 吸收劑量。
 - (2) 等效劑量。
 - (3) 深部等效劑量。
 - (4) 淺部等效劑量。
 - (5) 眼球等效劑量。
 - (6) 有效等效劑量
 - (7) 約定等效劑量。
 - (8) 約定有效等效劑量。
 - (9) 集體劑量。
17. 年攝入限度(annual limit on intake, ALI)：為職業性體內曝露之推定限度，指參考人在 1 年內攝入某一放射性核種而導致 50 毫西弗(5 侖目)之約定有效等效劑量，或任一器官組織 500 毫西弗(50 侖目)之約定等效劑量之保守值。
18. 推定空氣濃度(derived air concentration, DAC)：為某一放射性核種之推定值，指該放射性核種在每 1 立方公尺空氣中之濃度。參考人在輕微體力之活動下，於 1 年中呼吸此濃度之空氣 2000 小時，將導致年攝入限度。
19. 輻射之健康效應區分如下：
 - (1) 機率效應(stochastic effect)：指其發生機率與所受劑量大小成比例增加，而與嚴重程度無關，此種效應之發生無劑量之低限值。
 - (2) 非機率效應(non-stochastic effect)：指其嚴重程度與所受劑量大小成比例增加。此種效應之劑量低限值可能存在。
20. 年指連續之 12 個月，自 1 月 1 日起算。
21. 合理抑低(as low as reasonably achievable, ALARA)：指儘一切合理之努力，以維持輻射曝露在實際上遠低於本標準之劑量限度。其要點為：
 - (1) 須與原許可之活動相符合。
 - (2) 須考慮技術現狀、改善公共衛生及安全之經濟效益、以及社會與社會經濟因素。
 - (3) 須為公共之利益而利用輻射。
22. 關鍵群體(critical group)：指公眾中具代表性之人群，對一已知射源或一群射源，其曝露相當均勻，且此群體之個人劑量為最者。
23. 輻射防護人員(radiation protection personnel)：指具有專業學識與訓練並經原子能委員會認可之人員。
24. 管制地區：指以管制人員輻射安全為目的而劃定之地區，此地區應在輻射防護人員監督下，實施適當之輻射防護。
25. 下水道系統(sewerage)：指為處理雨水、家庭污水及事業廢水而設之收集、抽送、傳運管線、處理及最後處置之各種設施。
26. 輻射作業場所(radiation work

第四章 防護安全標準的演變

place)：供輻射源作業或貯存，依本標準應予管制之場所。

27.場所主管：事業主或事業經營負責人。

第二版本的防護安全標準如表 4.2

所示，表中並附第一版本的標準作為對照。

第四版本

自第 3 至第 5 版本的防護安全標準

表 4.2 第二版本的防護安全標準

(單位：mSv)

組 織 或 器 官	職 業 人 員			一 般 人		
	機 率 性	非 機 率 性	第 一 版 本	機 率 性	非 機 率 性	第 一 版 本
全 身	50		50	5		5
性 腺		200	50		20	5
乳 腺		333	150		33	15
紅 骨 髓		417	50		42	5
肺		417	150		42	15
甲 狀 腺		1666(500)	300		167(50)	30
骨 表 面		1666(500)			167(50)	
眼 球 水 晶 體		150	150		50	15
其 他 五 器 官 之 一		833(500)	150		83(50)	15
骨 骼			300		50	30
皮 膚		500	300		50	30
四 肢		1666(500)	750		167(50)	75
計 畫 特 別 曝 露	一 次	全身年劑量限度的 2 倍	同左	任一年的年有效等效劑量不得超過 5 mSv，一生平均年有效等效劑量，不超過 1 mSv。		遺傳劑量為每人 30 年內不超過 50 mSv
	一 生	全身年劑量限度的 5 倍	同左			
婦 女		認定懷孕至嬰兒出生止，不得超過 5 mSv	10 mSv			

註：表中職業非機率性的括弧值 500 mSv 係為了限制非機率效應的危險度，一般人亦同但為 50 mSv。

準，原能會均尚未公布實施，其中第 4 版本係根據 1991 年出版的國際放射防護委員會第 60 號出版物而撰寫的，故特於此作介紹。至於第 3 與第 5 版本，仍以第 2 版本為基礎。後者係針對「行政程序法」而修訂，與第 2 版本差別不大。

我國在 ICRP-60 發行後，不論是主管機關原能會、學術界以及相關之產業界，為了因應落實 ICRP-60 的趨勢，也

做了很多奠基工作，主管機關原能會在近年來即有多項委託執行的研究計畫，例如：ICRP 及美國國家輻射防護與度量委員會(NCRP)相關文獻全文中譯或重點摘譯，ICRP-60 報告專門術語中譯等；財團法人中華民國輻射防護協會自 1994 年起亦多次舉辦 ICRP-60 或與 ICRP-60 相關文獻的研習會；另最令人矚目者為由國內輻射防護相關主管機關、學術機構及核能實業界共同主辦

的「1997 輻射劑量暨安全國際會議」及原能會配合此項國際會議而主辦的會前講習會，其中有關 ICRP-60 的議程與課程即佔了相當程度的比例，且同時引進了許多其他先進國家在因應 ICRP-60 方面的研發成果。前述這些重要活動，對於蘊釀一個落實 ICRP-60 的成熟環境，扮演著相當重要的催化角色。

第四版本的專用名詞及意義如下：

1. 游離輻射：指直接或間接使物質產生游離作用之電磁輻射，如 X 射線、加馬射線；或粒子輻射，如阿伐、貝他、中子、高速電子、高速質子及其他能使物質產生游離作用之粒子，簡稱輻射。
2. 主管機關：指行政院原子能委員會。
3. 輻射作業(practice)：指本法(指第四版本，下同)第二條第十二款所列舉之會導致增加曝露或排放放射性物質之人為活動。所稱導致增加曝露或排放放射性物質係指將因人為活動增加人類之整體輻射曝露或因而引進新射源、新曝露途徑、或改變射源與受曝露人間之途徑而使個人所受之曝露或受曝露人數增加。
4. 輻射源(以下簡稱射源)：指下列依本法第 2 條第 6 款所稱產生或可產生輻射之來源：
 - (1) 本法及其他法令所稱之放射性物質、可發生游離輻射設備、核子反應器、核子原料、核子燃料、放射性廢料。
 - (2) 受放射性污染之非放射性物料。
 - (3) 其他經主管機關指定或公告之產生或可產生輻射之物質或機具。
- 射源並不限於物理上之射源，一個射源可能經由許多途徑造成曝露；多個射源亦可能由相同之途徑造成曝露。
5. 意外事故：指輻射作業因操作錯誤、設備故障或損壞、射源失控或其他原因造成應採干預措施之突發意外事件或事件序列，此類事件或事件序列將確定或可能發生下列後果：
 - (1) 放射性物質在無法控制之情況下向輻射工作場所外環境釋放，致使公眾健康受到危害。
 - (2) 造成異常曝露。
6. 異常(abnormal)：指背景射源造成之曝露偏高、過去輻射作業或意外事故後殘留造成之長期曝露偏高、已流通市面之商品含放射性物質之濃度或量超過主管機關規定或主管機關認為之其他有使公眾健康受危害之虞而應採干預措施之事件。
7. 干預：指採取影響既存射源與受曝露人間曝露途徑之網絡以減少整體之曝露之行動。
8. 曝露：指人體受輻射照射或接觸、攝入放射性物質之過程，依造成曝露之射源與人體位置之關係區分為下列二類：
 - (1) 體外曝露：指人體受體外射源之照射。

- (2) 體內曝露：指攝入體內放射性物質對組織或器官之照射。
9. 異常曝露：指輻射工作人員或公眾中之個人因異常或意外事故所受可能超過劑量限度之曝露，區分為意外曝露或緊急曝露。
10. 意外曝露：指於不可預料情況下接受可能超過劑量限度之曝露。
11. 緊急曝露：指於急迫情況下為搶救生命、避免更多人員受急性曝露或為避免災難發生之目的而採行之例外曝露。
12. 急性曝露(acute exposure)：指在短暫期間內受到高劑量之曝露。
13. 長期曝露(prolonged exposure)：指長期持續存在之曝露。
14. 輻射程度：指體外射源釋放之輻射可能造成曝露之程度，通常以對指定位置之周圍等效劑量率或定向等效劑量率表示。
15. 放射性：指核種自發衰變時釋出游離輻射之現象。
16. 放射性物質：指能產生自發性核變化而釋放輻射之物質。
17. 放射性污染：在任何地點或位置(例如人體、地面、物料、水、空氣等)，出現不預期存在而具放射性之物質，其量或濃度可能使人員受到曝露之危害或令實驗、操作或度量失其準確之情況。放射性污染之度量或計算應依污染之實際情況採用下列不同之量與單位：
- (1) 體表污染或固體表面之附著污染程度，以每單位面積之污染物表面所含活度表示。
- (2) 固體之固著性污染程度以受污染物表面或附近一定距離處之輻射程度表示。
- (3) 空氣中與水中之污染程度以單位體積或質量之空氣或水所含放射性之活度表示。
- (4) 人體之體內污染程度以放射性之活度表示。
- (5) 其他適當或合理之方式表示。
18. 背景輻射(background radiation)：指下列輻射：
- (1) 宇宙射線。
- (2) 天然存在於地殼或大氣中之放射性物質釋出之輻射。
- (3) 一般人體組織中所含天然放射性物質釋出之輻射。
- (4) 因核子試爆或其他原因而造成含放射性物質之全球落塵釋出之輻射。
19. 核種：指原子之種類，由核內之中子數、質子數及核之態區分之。
20. 活度：指一定量之放射性核種在某一時間內發生之自發衰變數目。活度之單位為貝克，每秒自發衰變一次為一貝克。一貝克等於 2.7×10^{-11} 居里。
21. ICRU 球：指由國際輻射單位與度量委員會所規定之組織等效球體，其直徑為 30 公分，密度為每立方公分

- 1 公克，其質量組成為：
- (1) 氧：76.2%。
 - (2) 碳：11.1%。
 - (3) 氫：10.1%。
 - (4) 氮：2.6%。
22. 劑量：為劑量學之量之總稱。
23. 等效劑量(見 § 3.4)。
24. 吸收劑量(見 § 3.4)。
25. 周圍等效劑量(見 § 3.4)。
26. 周圍等效劑量率(見 § 3.4)。
27. 擴展齊向場(見 § 3.4)。
28. 定向等效劑量(見 § 3.4)。
29. 定向等效劑量率(見 § 3.4)。
30. 擴展場(見 § 3.4)。
31. 有效劑量(見 § 3.4)。
32. 等價劑量(見 § 3.4)。
33. 器官劑量(見 § 3.4)。
34. 集體有效劑量(見 § 3.4)。
35. 設施經營者：指本法第 2 條第 14 款所稱經主管機關許可、發給許可證或登記備查，經營輻射作業相關業務之自然人、法人、設有代表人或管理之非法人團體、其他依法律規定能為獨立法律行為或得為權利義務主體或行政機關。
36. 最適化(optimization)：指在考慮經濟及社會因素後，射源之設計、利用及其相關輻射作業造成之集體劑量、個人劑量、受曝露之人數及潛在曝露之發生機率應合理抑低。其判斷基準為：
再進一步採取降低危害的措施，無法顯著達成降低危害之目的或必須使用與降低危害之程度顯失均衡之資源始能達成，致不符合整體之社會利益時，該射源及其相關輻射作業可視為已達最適化。
37. 劑量約束(dose constraint)：指由主管機關針對指定射源及其相關輻射作業之特性造成個人曝露依最適化原則所定個人劑量之上限值，適用於對該射源及其相關輻射作業推動防護及安全最適化之約束。其要點為：
(1) 劑量約束之目的在於限制選擇防護方案之範圍，及限制因經濟及社會因素考量下所引起之不公平。
(2) 劑量約束並非限度，個人劑量超過劑量約束時，設施經營者應就指定射源及其相關輻射作業之防護最適化之程序再為評估，不視為違反本法及本標準之規定。
(3) 劑量約束值係指定射源及其相關輻射作業處於最適化狀況下達到之個人劑量基準。
38. 雇主：指本法第 2 條第 15 款所稱僱用輻射工作人員從事輻射作業相關業務之自然人、法人、設有代表人或管理之非法人團體、其他依法律規定能為獨立法律行為或得為權利義務主體或行政機關。
輻射工作人員為法人所僱用者，則該法人、該法人之代表人、管理人

或代理其權限之人負本法雇主之責任。

輻射工作人員為非法人所僱用時，則該團體之代表人、管理人或代理其權限之人負本法雇主之責任。

輻射工作人員為其他法律上能為獨立行為及得為權利義務主體所僱用者，則該主體、該主體之代表人、管理人或代理其權限之人負本法雇主之責任。

輻射工作人員為行政機關所任用或派用者，則該機關、該機關之首長或代理其權限之人負本法雇主之責任。

39. 輻射工作人員：指受僱經常從事輻射作業，並認知會接受曝露之人員。
40. 輻射工作：指輻射工作人員從事之一項或多項輻射作業。
41. 劑量限度：指由主管機關為輻射作業在正常情況下的人員所受之曝露規定一劑量基準。當劑量超過此一基準，對受曝露之個人造成之結果將為不可接受者。劑量限度之目的在防止確定效應，並將機率效應發生機率限制在可接受的程度，但並非安全與危險之界線。
42. 確定效應(deterministic effect)：指人體細胞因受輻射照射而死亡造成之效應，即劑量達到使足夠多之細胞喪失而導致組織或器官之功能有所損傷，其主要特點為：
- (1) 低劑量情況下，確定效應不致發生。
- (2) 若劑量高於臨床效應之低限劑量將確定發生。
- (3) 在低限劑量之上，效應之嚴重程度隨劑量增加而升高。
43. 機率效應：指人體細胞受輻射照射發生變化造成之效應，被改變之體細胞可能在一定的潛伏期後誘發成癌；變化發生於性細胞則可能會有不同類型及程度之效應表現在受曝露人的後代身上，是為遺傳效應。輻射誘發癌症與遺傳效應均屬機率效應。機率效應之主要特點為：
- (1) 假設機率效應無低限劑量。
 - (2) 機率效應發生的機率隨劑量增加而升高，但不必然發生，其嚴重程度與劑量多寡無關。
44. 輻射工作場所：指受設施經營者、雇主或其代理人指示處理有關輻射作業或輻射防護事務之人所能支配管理之場所。
45. 公眾中之個人：指任何自然人，其在本標準適用範圍內所受之曝露非屬職業曝露亦非屬醫療曝露者。
46. 危害(detriment)：指一群受特定射源照射而使該群體中之人員及其後代所受之總損害，包括可歸因致死癌症、可歸因非致死癌症、嚴重遺傳效應及危害發生之相對壽命損失。
47. 損害(damage)：指受輻射曝露造成臨床上可觀察到之有害效應。
48. 職業曝露：指本法第 2 條第 9 款所

- 稱從事輻射作業所受之曝露，包括下列二類曝露：
- (1) 輻射工作人員從事操作或接觸射源之作業所受之曝露。
 - (2) 指因職業上或工作上之需要進入輻射作業場所在其中停留期間所受之曝露。
49. 年：除另有規定外，指連續之 12 個月，以 1 月 1 日為起算日。
 50. 個人等效劑量：(見 § 3.4)。
 51. 公眾曝露：指公眾中之個人受射源或因輻射作業所受之曝露。但不包括職業曝露、醫療曝露、或背景輻射造成之曝露。
 52. 非限制區(unrestricted area)：指不採取任何輻射防護措施且任何人得自由出入及停留不受設施經營者管制或限制之地區。
 53. 輻射防護人員：指具有專業學識與訓練並經主管機關依本法第 7 條核發證書之人員。
 54. 輻射作業場所：指輻射工作場所內為特定輻射作業目的供輻射源作業或貯存所設置依規定應予管制之場所。
 55. 輻射作業場所負責人：指就特定輻射作業代表設施經營者或雇主於輻射作業場所管理、指揮或監督輻射工作人員從事輻射作業之人。
 56. 個別人員監測：指令輻射工作人員佩戴劑量計，定期或視需要度量其職業曝露之體外劑量；或對輻射工作人員之體內或排泄物之放射性核種定期或視需要進行度量，以監測該輻射工作人員之職業曝露狀況。
 57. 監測區(supervised area)：指在輻射工作場所界線內，管制地區之外之地區。設施經營者得以適當理由限制人員進入該地區，並應依規定對其該地區之輻射程度與放射性污染狀況加以監測，但不需實施管制區之輻射防護。
 58. 管制區：指在輻射工作場所內，以管制人員輻射安全目的，由設施經營者依本法第十條規定劃定之地區，此地區應在輻射防護人員監督下，實施適當之輻射防護。
 59. 空浮放射性物質：指以灰塵、煙、霧、微粒、蒸氣或氣體形式懸浮於空氣中之放射性物質。
 60. 微粒(particulates)：指單獨存在之微小固體或氣體粒子，懸浮於氣態介質中。
 61. 醫療曝露：指本法第 2 條第 10 款所稱醫療過程中病人及其協助者所接受之曝露，包括下列各類曝露：
 - (1) 病人因接受醫學診斷或治療所接受之曝露。
 - (2) 非接受職業曝露或公眾曝露，但知情而志願協助病人在接受醫療曝露過程中使其舒適之人所受之曝露。
 - (3) 志願參與生物醫學研究計畫作為受研究對象者於接受研究過

- 程中所接受之曝露。
62. 倫理審議委員會：指由獨立人員組成之委員會，負責審查生物醫學研究計畫施行醫療曝露之正當性及志願接受該項生物醫學研究計畫之人選，並就曝露條件及劑量約束事項提供建議。
63. 污水下水道：指為收集、抽送、傳送、傳運廢水或污水而設置之公共或專用之下水道系統。但不包括設施經營者擁有或營運之污水處理設施、腐化槽及過濾池。
64. 放射性廢棄物：指具放射性或受放射性物質污染之廢棄物，包括備供最終處置之用過核子燃料。
65. 訪客：指非因職業上之原因或工作需要而進入輻射工作場所之人員。
66. 商品：指在市場上流通但非供輻射作業目的使用之物品。含放射性物質之商品包括消防用之煙霧偵檢器、螢光錶盤或其他經主管機關認定之商品。
67. 潛在曝露(potential exposure)：指預期可能因操作錯誤、設備故障或損壞、射源失控或其他原因之事件或事件序列所引起但不必然發生之曝露。
68. 約定有效劑量：(見 § 3.4)。
69. 約定等價劑量：(見 § 3.4)。
70. 腸轉移因數：指攝入體內之放射性核種自胃腸道轉移至體液之量與攝入量之比值，以 f_1 表示。
71. 肺吸收類別：指國際放射防護委員會依其發展之呼吸道廓清模型將化合物粒子依經由呼吸攝入體內經由溶解或液化被血液吸收之吸收率所為之分類，區分為：
- (1) F 類：指將自呼吸道為血液快速吸收之沉積於體內之物質，其生物半衰期之預設值為：10 分鐘。
- (2) M 類：指將自呼吸道為血液以中速率吸收之沉積於體內之物質，其生物半衰期之預設值為：10%為 10 分鐘，餘 99%為 140 天。
- (3) S 類：指將自呼吸道為血液以慢速率吸收之沉積於體內之難溶物質，其生物半衰期之預設值為：0.1%為 10 分鐘，99.9%為 7000 天。
72. 廓清(clearance)：指物質以粒子轉移或血液吸收方式自呼吸道移除之過程。
73. 工作基準(working level)：指空氣中之氡或 之各種短壽命子核完全衰變時，所發生阿伐潛能濃度之計算單位，以 WL 表示。1 WL 指 1 公升空氣中發射出之阿伐粒子能量為 1.3×10^5 百萬電子伏。
74. 工作基準月(working level month)：指一個工作月期間(170 小時)曝露於氡或 一工作基準之濃度下，以 WLM 表示。1 WLM 相當於每立方公尺 3.54×10^{-3} 焦耳·小時，或 170 WL h。
75. 阿伐潛能(alpha potential energy)：指

氦子核完全衰變為鉛 210 或 子核完全衰變為鉛 208 時所釋放出阿伐粒子之總能量。

76. 氣膠(aerosol)：指含液體或固體微粒之氣態懸浮體。

第四版本的防護安全標準如下：

工作人員職業曝露之年個人劑量限度，依下列之規定：

1. 每一連續五年期間之平均每年有效劑量不得超過 20 毫西弗。
2. 有效劑量於一年內不得超過 50 毫西弗。
3. 眼球水晶體之等價劑量於一年內不得超過 150 毫西弗。
4. 皮膚及四肢之等價劑量於一年內不得超過 500 毫西弗。

前項第 1 款所稱每一連續五年期間指自主管機關指定期日起按日曆計算連續五年的周期。

前項第 4 款的劑量限度適用於受曝露部位 1 平方公分面積的平均等價劑量，與受曝露的面積無關。

為保護胎兒目的之懷孕女性工作人員劑量限度

懷孕之女性工作人員自依據第 22 條規定經雇主確認或主動向雇主告知懷孕事實之日起至胎兒出生之日止，其下腹部表面因體外射源的職業曝露累積之等價劑量，不得超過 2 毫西弗；攝入體內放射性核種之量造成之約定有效劑量不得超過 1 毫西弗。

未成年人之劑量限度

16 歲以上未滿 18 歲之人，得於經主管機關核可之輻射工作場所內接受輻射工作訓練。

前項未成年人依本法第 14 條規定接受輻射工作訓練之曝露所接受之劑量限度，依下列規定：

1. 有效劑量於 1 年內不得超過 6 毫西弗。
2. 眼球水晶體之等價劑量於 1 年內不得超過 50 毫西弗。
3. 皮膚及四肢之等價劑量於 1 年內不得超過 150 毫西弗。

前項第 3 款的劑量限度適用於受曝露部位任 1 平方公分面積的平均劑量，與受曝露的面積無關。

特別許可劑量限度

雇主或設施經營者對於已採取合理可行之努力仍無法使輻射工作人員之有效劑量符合第 10 條第 1 項第 1 款規定之有效劑量限度時，得報請主管機關審查核可，在核可期限內適用下列兩款特別許可劑量限度之一：

1. 輻射工作人員於自主管機關核准之基準日起連續 10 年期間平均每年有效劑量不得超過 20 毫西弗，每一年內有效劑量不得超過 50 毫西弗。
2. 輻射工作人員於自主管機關核准之基準日起連續 5 年期間內每一年有效劑量不得超過 50 毫西弗，不受第 10

條第 1 項第 1 款規定 5 年平均年劑量的限制。

前項特別許可劑量限度適用期滿，非有正當理由，報請主管機關審核可，不得延長。輻射工作人員之有效劑量應自適用期限期滿之日起，適用第 10 條第 1 項的規定。

公眾曝露的基本劑量限度

輻射工作場所因其輻射作業造成公眾中個人的劑量限度，依下列的規定：

1. 有效劑量於 1 年內不得超過 1 毫西弗。
2. 眼球水晶體的等價劑量於 1 年內不得超過 15 毫西弗。
3. 皮膚及四肢之等價劑量於 1 年內不得超過 50 毫西弗。

在特殊情況下，前項第一款年有效劑量限度，設施經營者經依主管機關規定報請許可，得在連續 5 年期間平均每年不超過 1 毫西弗的情況下酌予放寬。

§4.5 游離輻射防護法

原能會曾於民國 77 年至 83 年間草擬原子能法草案，並報請行政院審核通過後送立法院審議。但因迄民國 88 年 1 月至第 3 屆立法委員任期屆滿止都未完成審議，遭退回重新檢討。

原能會考量時序距離原子能法修正草案提出已事隔 6 年，國內外原子能發展的形勢已有相當變化，復因行政程

序法公布於民國 90 年 1 月 1 日施行，致使原能會原有若干欠缺法律依據且涉及人民權利義務的行政命令將因而失效，對管制工作恐將造成困擾。原能會總檢討認為原提原子能法草案已無法完全因應當前形勢，且當前立法趨勢多採管制業務單位依職權立法。乃將原子能法內與核子反應器設施管理，游離輻射防護及放射性物料等相關條文抽離，並參考原提原子能法修正草案對應部分依職權分別草擬法案，計分：核子反應器設施管制法、游離輻射防護法、放射性物料管理法及核子反應器事故緊急應變法等。這是原能會制定游離輻射防護法之主要緣由之一。

另一方面，早在民國 87 年，原能會鑒於國內原子能應用範圍隨經濟成長日益擴張，核能電廠設置、放射性物質及可發生游離輻射設備的應用亦日趨廣泛。為強化各項游離輻射防護管理與管制，而有制定游離輻射防護法的計畫。

游離輻射防護法的起草係由原能會輻射防護處主辦，並邀請國內學術界、醫學界、產業界及有關主管機關的相關學者專家共同組成游離輻射防護法的研修小組，其成員主要任務為審查主辦單位撰寫的條文草案，就學理及實務提供修正意見。歷經 15 次審查會議，於民國 88 年 7 月完成草案初稿，12 月完成原能會內部的法制作業程序後報請行政院審核，行政院於民國 89

年 5 月院會審查通過並已由立法院於民國 91 年 1 月 4 日三讀通過，並於 1 月 30 日由總統公布，是為輻射防護的母法。

依據原能會游離輻射防護法的總說明，本項法案係參考現行原子能法，原子能法修正草案(民國 83 年的行政院核定本)、國際放射防護委員會 1990 年提出的 ICRP-60 號建議、國際原子能總署安全叢書第 115 號(IAEA-115)、芬蘭的輻射法(Radiation Act)(1991)、英國 1985 年公布的游離輻射規則(The Ionizing Radiations Regulations)、瑞士 1991 年公布的輻射防護法及歐洲共同體 1996 年公布的游離輻射防護安全標準等國外法案等文獻草擬條文。由此可見，游離輻射防護法已將 ICRP-60 所揭示的精神納入。當然，輻射防護的原則與精神的發展有其傳承，現行輻射防護實務的運作如不違反輻射防護領域中公認的主流理念，仍然會在新法規中保存下來。立法院通過的法案條文計有 57 條，大致上把目前散見於原能會主管的法規命令或相關規章中涉及人民權利義務之重要規定納入，提升為法律位階，亦有將既有法令未作規定，但認為因管制或政策需要而新增的規定。在罰則方面亦大幅增加違反管制作為與不作為義務的處罰規定，處罰的方式亦不限於現行原子能法所規定的刑罰，而大量引進行政秩序罰與管制罰的規定。

目前，游離輻射防護管制位階最高

的法律依據為原子能法第 24 條至第 26 條，而最完整的法規(即游離輻射防護安全標準)其位階僅為法規命令，如今游離輻射防護法完成立法後，游離輻射防護管制的法律依據將不再是原子能法，而由游離輻射防護法取代。換言之，游離輻射防護法是游離輻射防護管制的主要母法。原則上，原能會訂定有關游離輻射防護管制的法規命令，應在游離輻射防護法的授權範圍內。這些法規命令主要功能在就游離輻射防護法的原則性規定於符合母法精神的前提及在母法授權範圍內作進一步具體的補充或詮釋規定，俾使游離輻射防護法的規定能充分落實。另一重要功能為游離輻射防護法中有關權利義務要件(包括處罰規定中違反作為及不作為義務行為構成要件)的補充規定。當然，這種補充規定同樣不能違反母法精神及授權的範圍。

§4.6 防護安全標準的趨勢

游離輻射防護安全標準是我國最重要的游離輻射防護法規，面對國內游離輻射防護法制變革及 ICRP-60 建議漸成為國際上輻射防護法規主流的趨勢，必然將有相當幅度的修正。未來游離輻射防護安全標準發展趨勢，可分下列幾方面來看：

1. 法律依據的變更及在新法制架構下的定位：

(1) 在游離輻射防護法完成立法後，游離輻射防護安全標準的法律依

據將不再是原子能法第 24 條，而由游離輻射防護法授權主管機關訂定此項標準。

- (2) 游離輻射防護安全標準依目前原子能法第 24 條的規定，係由原能會訂定，報請行政院發布施行。惟依目前游離輻射防護法的規劃，係授權主管機關自行訂定及發布游離輻射防護安全標準。
- (3) 游離輻射防護安全標準的具體規定將在符合游離輻射防護法規定的精神及在游離輻射防護法授權範圍內為之，不得有所逾越。
- (4) 游離輻射防護安全標準的訂定(修正)，發布與施行，均屬行政行為，應遵守我國行政程序法的有關規定，並符合行政程序法所揭示的法律原則。

2. ICRP-60 建議對未來游離輻射防護安全標準的影響：

ICRP-60 逐漸成為國際間及各國內游離輻射防護法規的主流，是一個無可避免的趨勢，我國游離輻射防護法亦已將 ICRP-60 作為主要立法依據文獻之一，因此游離輻射防護安全標準的修正勢必將 ICRP-60 精神納入，這方面的影響，主要有下列幾點：

- (1) ICRP-60 的精神與內容，勢將成為修正游離輻射防護安全標準架構及實體內容最重要的參考依據。當然，ICRP-60 是一項建議而非法

規範本，游離輻射防護安全標準未必要照單全收，仍需考慮國情，實務上的可行性及游離輻射防護法的授權及行政程序法的規定等因素，而為適當的取捨。

- (2) 國際上重要的相關法規文獻，如前面所介紹的 IAEA-115、96/29/Euratom、NCRP-116、美國核能管制委員會(NRC)的立場及日本放射線審議會對採行 ICRP-60 的立場等，都將是游離輻射安全標準修正考量的參考依據。
- (3) 現行游離輻射防護安全標準係依據 ICRP-26 建議所訂定，雖然將依 ICRP-60 建議作出相當大幅修正，但法規的發展與傳承有其延續性，而非跳躍式者，否則將使實務運作受到過大衝擊，不但達不到提昇輻射防護的品質與成效，反而可能付出過高的經濟及社會成本，妨礙了輻防實務的健全發展，甚至降低品質。因此在現行標準中運作順暢且不違反 ICRP-60 新建議精神的規定或作法，仍將在未來的安全標準中保留，並預留更進一步修正的彈性空間，以確保法規本身在過渡期間的穩定性，在推動落實新標準的過程中將使阻力減輕，更為順利，有助於輻射防護管制品質的提升。

參考文獻

1. 行政院原子能委員會 配合
ICRP-60 新建議研修現行游離輻射
安全標準(I) 計畫編號 89 200 DRP
015 臺北市(2000)
2. 魯經邦 游離輻射防護安全標準解
讀 迅通文化事業 臺北市(1996)
3. H.E. Johns and J.R. Cunningham, **The
Physics of Radiology**, 4th ed., Charles
C Thomas, Springfield, Illinois, USA
(1983)
4. 魯經邦 葉偉文 翁寶山 ICRP-60
與游離輻射防護安全標準發展趨勢
核研季刊 42 , 62-78 (2002)

第五章 醫用放射學的發展

§5.1 前言

在原子時代來臨(第二章)之前，游離輻射醫學應用的輻射防護已有相當的基礎，歷史也最為悠久，而且是最普及和最廣的領域。因此，要談輻射防護史必先就醫用的輻射防護著手。

德國物理學家倫琴於 1895 年 11 月發現 X 射線，數月後就首先在醫學上開始應用，開創了揭示人活體內部結構的先河。這一發現宣布了現代物理學時代的到來，使醫學發生了革命。20 世紀初形成了放射學(radiology)這門新學科。隨後放射學進一步分為 X 射線診斷學和放射治療學。X 射線診斷學廣為普及，始終占最大比例，有時亦仍稱為放射學。

隨著良性疾病的放射治療逐漸被淘汰，放射治療主要用於惡性腫瘤。這門專門研究腫瘤放射治療的分支學科現稱輻射腫瘤學 (radiation oncology)。輻射源至患者皮膚間距離大於 0.5 m 的各種體外輻射束放射治

療稱遠隔治療；而用一個或多個密封輻射源在患者腔內、組織間隙或淺表部位的放射治療稱近接治療。

加速器的問世開始了人工製備放射性核種，放射性核種示蹤技術被用於人體臟器顯像和功能測定等。於是核子技術與醫學相結合又產生了核子醫學 (nuclear medicine)。核子醫學包括基礎(實驗)核子醫學和臨床核子醫學。臨床核子醫學既有各種利用同位素顯像與功能測定的診斷檢查，又有以放射性藥物為主的核子醫學治療(見圖 5.1)。

隨著相關科學技術的不斷發展，X

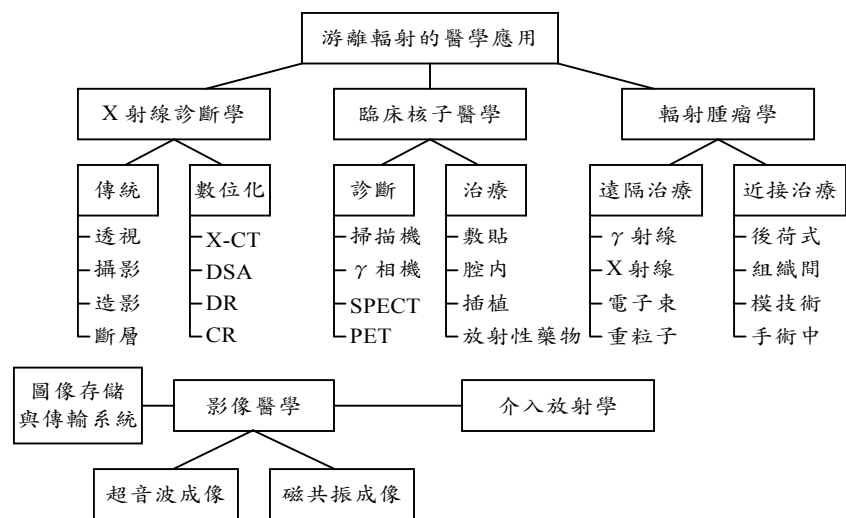


圖 5.1 醫用輻射各分支學科及其發展概況

X-CT 即 X 射線電腦斷層掃描攝影 DSA 即數位減影血管造影
DR 即數位攝影 CR 即電腦攝影 SPECT 即單光子發射電腦斷層掃描攝影 PET 即正電子發射電腦斷層掃描攝影。

射線診斷學、臨床核子醫學和輻射腫瘤學等游離輻射的醫學應用蓬勃發展，已成為現代醫學不可或缺的重要組成部分。

§5.2 發現 X 射線前的科技發展

1. 電磁學的興起

X 射線的發現需要電磁學的基礎，英國劍橋大學李約瑟指出：指南針、指南魚、司南勺以及它們在航海上的應用是中國物理學(磁學)最輝煌的部分，至少領先歐洲 100 年。到了 19 世紀，磁學蓬勃發展，而電學也是如此。

英國法拉第(Michael Faraday, 1791-1867)和馬克士威(James C. Maxwell, 1831-1879)基於德國歐士德(Hans Oersted, 1777-1851)研究的成果，即電流能產生磁場，加以發揚光大。法拉第的實驗顯示，電能和磁能都能轉變為機械能，而磁場的運動也能產生電流。這是後來發明電動機(通稱馬達)的基本原理。

馬克士威把數學心思引用到法拉第的電磁場實驗結果。馬克士威的電磁論指出：電能和磁能互相作用可產生一種新的能量稱為輻射能(radiant energy)，並預言電磁波的存在。馬克士威爾在 X 射線真正發現之前 20 年，便建立了 X 射線可以存在的理論基礎。馬克士威的方程式係於 1873

年提出，而侖琴係於同一年從事於實驗物理學的研究，可臆測彼此間互動的情形。

2. 電磁波的實驗

德國赫茲(Heinrich Hertz, 1857-1894)經由實驗證實電磁波的存在。1886 年 11 月赫茲在學校的物理陳列室看到一些感應線圈，從而啟迪他著手去實驗電磁波的存在。他在放電實驗中發現，放電電路附近的線圈也發生火花。同年 12 月，他把兩根細銅棒彎成兩個矩形的開端電路，開端電路的兩端各有一個金屬小球。當其中一個矩形的開端電路與感應線圈的次級相連接時，兩球間的空隙發生火花。這時，在附近的另一個矩形開端電路也有微弱的火花。1888 年赫茲還進一步從實驗中發現，如同光波一樣，電磁波也遵守反射與折射定律，也具有干涉、繞射和偏振現象。赫茲發現電磁波是在侖琴發現 X 射線之前 7 年。

3. 放電真空管

就 X 射線的發現而言，必須依賴玻璃真空管的製造技術，因為後來的 X 射線管係來自放電真空管的研究和改良。早在 1646 年德國葛利克(Otto V. Guericke, 1602-1686)發明抽真空的幫浦，但效果欠佳。1850 年德國卜勒可(Julius Plucker, 1801-1868)從改良玻璃管的品質著手，由蓋斯勒(Heinrich Geissler, 1815-1879)製造了可耐受高

度真空的玻璃。如今仍有人稱日光燈管及霓虹燈管為蓋斯勒管。

4. 電力供應

美國愛迪生(Thomas A. Edison, 1847-1931)曾發展一種可靠的方法提供電力，最後演變成發電機。真空管的放電、陰極射線和 X 射線的產生，需要一種方便的電力供應系統。1881 年愛迪生發現在真空管內有一股電流自熱燈絲流向陽極，即所謂熱離子發射(thermionic emission)又稱為愛迪生效應，這效應為真空管內部的構造和特性，提供了新的變化。

5. 陰極射源

在 19 世紀中葉，卜勒可和他的學生赫托夫(Johann W. Hittorf, 1824-1924)以及蓋斯勒等三位德國科技人員研究在 18 世紀中葉法國羅列特(Abbe Nollet, 1700-1770)所觀察到真空管放電時產生的火花流會變成一條帶狀的發光體。他們發現在高度真空時，這光帶會減退為不甚明顯的蘋果綠輝光(glow)。1860 年赫托夫發現這蘋果綠光會被磁力偏轉。

1876 年英國克魯克士(William Crookes, 1832-1915)在真空放電管的陰極看到一道光自陰極射出，因此命名為陰極射線。他設計一種真空管，陽極放在管身的側翼，使面對陰極的另一端只有玻璃壁，又稱為反陰極。當低於 0.00013 個大氣壓時，蓋斯勒的蘋果綠輝光會消失，而在陰極伸出

一條藍色的光。這道克魯克士藍光就是電子射線，也就是陰極射線，係電子撞擊氣體分子使之受激而發出的光。當陰極射線抵達反陰極的玻璃壁因熾熱而產生蘋果綠輝光。

在這個時期物理學家研究陰極射線，普遍採用赫托夫管，或稱為赫托夫 - 克魯克士管(Hittorf-Crookes tube)，為一端窄一端寬成梨狀形的管。窄端密封入陰極，寬端則密封入陽極，管壁為玻璃。

順便一提為在發現 X 射線前 4 年，史湯尼(G. Johnstone Stoney)在 1891 年使用“電子”這名詞作為電荷的自然單位，當時尚無指原子外圍軌道帶電粒子的概念。

6. 光化電和攝影技術

遠在 15 世紀便出現暗箱(camera obscura)，影像的製作係靠躲在暗箱內依針孔造像用手描繪。1727 年德國蕭茲(Johann H. Schulze, 1687-1744)首先發現受光的照射會使銀鹽變黑。一直到 1889 年伊士曼(George Eastman)開創了膠捲底片(roll film)，攝影技術才逐漸現代化。在發現 X 射線之前，亞鉑氰化鋇(barium platinocyanide)受光激發而發出螢光已有相當的認識。另一種對於光敏感但對於 X 射線卻不敏感的酮類(ketone)的物質對甲基苯十六酮(pentadecylparatolyketone)在當時係用於偵測陰極射線的螢光劑。侖琴對於使用酮醣與氰酸鉑鋇兩者都有經驗。

總之，由於科技的發展，X 射線的發現以及以後出現的輻射源在醫學上的應用係水到渠成，例如在疾病的診斷與癌病的治療上，對於全球廣大人群的保健工作，具有巨大和深遠的影響。

§5.3 放射診斷

說起來非常不可思議，雖然 X 光對骨折、鎗傷、肋膜積水等疾病的診斷價值，很早便被醫學界所肯定，但是即使在歐美，X 光的設備，初期往往不能順利安裝在醫院內，且不被視為醫院內必要的醫學部門。反而要病人到醫師(也可能是攝影師)的家裏或「X 光實驗室」作透視、攝影及沖洗底片等工作。只有少數有遠見的醫院主管，才在醫院分配攝影室、暗房及治療室等空間使用，並成立正式的醫學部門，任用專職醫師及工作人員發展業務。

1. 民國初年

侖琴於 1895 年底發現 X 光，一個



圖 5.2 郝濟時醫師攝於 1968 年美國佛羅里達大學醫學系，時年 75 歲。

新的醫學領域。開創時期，當時我國科學落後，直至 1915 年美國郝濟時 (Paul C. Hodges) 教授(圖 5.2)來中國後，開始介紹此項新的學科，算是首次在我國醫學園地中，種下第一顆放射線醫學的種苗。據郝濟時記述：第一個中國人照 X 光是李鴻章(圖 5.3)。李鴻章在 1895 年初於中日甲午戰爭後在日本馬關簽訂和約時為一日本浪人小山半太郎槍傷左頰。73 歲的李鴻章登時暈絕於地。一年後他出使歐洲，在德國照了一張 X 光片子，發現有一顆存留的子彈。那時是侖琴發現 X 光後僅 4 個月。郝濟時曾在李鴻章的故



圖 5.3 光緒 20 年(1894)北洋大臣李鴻章 (1823-1901)

鄉，安徽省慶州府(合肥)遊覽，於訪問李鴻章的宗祠裡還看到那張 X 光片。

在 1915 年，郝濟時(見圖 5.2)第一次到達上海時，上海滬江醫院及中法鐳錠醫院已裝設有 X 光機。紅十字醫院的一架美國 X 光機發生故障，還是他和一位德國技師幫忙修復的。1920 年，美國洛克斐勒(Rockefeller)基金會下面的中國醫藥基金捐建的北平協和醫學院正式展開作業。郝濟時被邀為放射科教授。在 1921-1927 這段時間的暑期裏，他召訓了一批來自外縣市各醫院醫師，總數約 50 人。受訓約六星期傳授他們如何操作及保養機器，如何閱片。受訓完畢再返回原醫院工作。郝濟時在協和醫學院時期中培植了許多人才，在他離開了以後接掌了他的工作。其後又有多人相繼進入協和醫學院。因此郝濟時實在可算是我國放射線醫學的先驅。

郝濟時對我國有深厚的感情，除了 1915-1927 這段時間在大陸外，之後他回到美國芝加哥大學主持放射科的工作。政府遷臺後，他在 1960-1964 這段時間又來到臺灣協助榮民總醫院放射科工作。他對發展我國放射線醫學實在貢獻最大。

2. 抗戰期間

在對日八年抗戰期中(1937-1945)是我國最艱苦的歲月。在當時後方因對外交通困難，政府經濟困窘，各醫院的 X 光設備普遍缺乏。所使用的也

僅是極簡陋的設備。在那時人民生活艱苦，營養不良，肺結核的患者特多。所以 80%以上的 X 光工作都是胸部透視，檢查有無肺結核病。當時結核病尚無化學治療，所以年青人一旦被 X 光檢出有肺結核就等於被判了有期徒刑或死刑。

抗戰期中，後方在放射科有兩個重鎮：貴州省的省會貴陽與四川省的省會成都。在貴陽郊外的圖雲關，由美返國的林可勝博士成立了衛生人員訓練所，擁有來自協和醫學院的一批專家。當時主持放射科的是榮獨山教授，在後方可稱是 X 光界第一人。他成立一個 X 光醫師訓練班，傳授來自後方各醫院的醫師 X 光知識。此外在貴陽有貴陽醫學院，放射科教授為楊濟醫師。

戰時後方第二個醫學重鎮為四川成都。那裡有中央大學醫學院、華西大學醫學院、協和醫學院、以及山東齊魯大學等聯合成立的醫學院。那時的成都空軍醫院，在抗戰時期三軍中，空軍為新的軍種，官兵人數較少，素質較高。當時空軍醫院的內外科主任都來自協和醫學院，X 光科的醫師則來自齊魯大學。醫師一星期中做兩次胸部透視檢查、X 光攝影，每日僅兩三人，故 X 光醫師工作是很輕鬆的。

3. 抗戰勝利後上海的 X 光界

民國 34 年抗戰勝利。在圖雲關包括榮獨山教授在內的一批專家也隨著

復員到了上海江灣。榮教授學識淵博且具有深厚的基礎醫學知識，在那時國內的放射線界稱得上第一人。他強調要做好放射線科的工作必須在生理、解剖及病理上有很好的基礎，否則僅憑 X 光片上的影像遽下診斷將流於膚淺。

上海為大陸第一大城，在上海的醫學院以上海醫學院為首，另外有同濟大學醫學院、聖約翰大學醫學院、同德醫學院及震旦大學醫學院。經由榮獨山教授發起組成一個和現在臺灣相似的聯合 X 光討論會，每月集會一次，各醫院參加的醫師有 20 餘人。

4. 臺灣放射學的發展

(1) 中華民國放射線醫學會的誕生

吳靜博士在民國 38 年自大陸來臺灣任國防醫學院物理醫學系主任。吳博士在民國 15 年(1926)就進入北平協和醫院放射科工作，畢生投入放射線醫學。吳博士德高望重，自從他主持國防醫學院放射科以後，放射線醫學開始為人重視。民國 40 年的夏天，由吳博士所發起的中華民國放射醫學會正式成立，並推舉吳博士為第一屆理事長。該會成立後，不久復加入國際放射線醫學會為會員國。

(2) 聯合放射線學術討論會

早在民國 42 年秋天，臺北市徐鈞醫師和臺灣大學姜藍章教授首先發起成立臺北地區 X 光聯合

討論會，按月舉行。將近 50 年來從未間斷，這是臺灣歷史最悠久的專科醫學會僅次於胸腔病醫學會。現更擴展到中南部地區，除病例討論外並有專題演講。

(3) 中華放射線醫學雜誌

早在放射線醫學會成立不久即有會員建議發行期刊，但當時考慮到會員人數不多，稿源有限且經濟條件不夠充裕，創辦期刊，將極為困難。在民國 65 年張遵理事長任內終於排除萬難推出第一期中華民國放射線醫學雜誌。如今(2002 年)該雜誌已有 23 年歷史，在國內專科醫學雜誌中有很高的水準。

(4) 放射線專科醫師制度

在民國 39 至 59 年期間。放射線醫學尚未受到臺灣醫界的重視。一般人的印象覺得放射科是仰人鼻息的小科，年青的醫師很少願意到放射科工作。民國 62 年統計當時中華民國放射線醫學會共有會員 91 人，平均年齡為 47 歲。其中有 18 人去國外工作，7 人轉行至其他臨床科工作。此項數字顯示：(a)放射科醫師人數太少，僅占當時執業醫師總人數 7,540 的 0.012%。(b)放射科對年輕醫師毫無吸引力，故會員平均年齡增大。(c)較資深的放射科醫師則感到在臺灣無英雄用武之地，故有 27%的

會員轉到國外工作，或是改行他科。在行政院原子能委員會游離輻射防護歷次會議中，與會代表常爭取專業放射科醫師的合法地位。在與主管衛生的官員接觸中，亦強調專科醫師制度的重要性。在專科醫院所制度未建立前，認為中華民國放射線醫學會的會員有專科醫師的資格。所以那時對會員資格的審查非常嚴格。第一屆會員資格甄審入會的條件為：接受過 3 年的放射科住院醫師訓練，現仍從事放射線醫師工作者。在民國 62 年經查合格的會員共有 91 人。以後在民國 71 年，正式成立專科醫師甄審委員會，再一次篩檢會員，按其工作範圍分為診斷、治療及核醫。另一審核條件必須在臺灣現仍從事放射線醫學工作。經甄審後共有 152 人符合條件。因係首次舉辦，無法舉行考試，乃直接發給專科醫師證書。其後申請專科醫師的資格更趨嚴格。資格審查合格後定期舉行考試，及格後乃頒發各類放射線專科醫師證書。考試分筆試及口試，另放射診斷考試 X 光片閱讀，治療增加臨床病例處理。現在醫界及朝野對放射線專科醫師已很重視。主管機關對公私立醫院購置價格昂貴的放射線設備必須附呈操作該項設備的合格放射線專科醫師姓名，始能被批准。放射線專科醫師

的身價更因此而大增。

醫用 X 光機到了 1971 年又有新的突破，出現了電腦斷層掃描儀，英文為 computed tomographic (CT) scanner。

CT 最早的名稱為英國 EMI Scanner，即 Electric and Musical Industries 有限公司所採用。由於該工廠的電子工程師豪斯菲爾(Godfrey N. Hounsfield)結合機械、電子工程、X 光和電腦技術及知識發明了 CT，在放射線領域內起了革命性的進步。1971 年在英國 Atkinson-Morelys 醫院裝好工作台，第一次掃描係在一婦人的大腦見到一相當大的囊狀腫瘤在左額葉。1972 年於不列顛放射學學會的大會(Congress of the British Institute of Radiology)發表成果並於 1973 年出版。在美國則取名為 CAT (computerized axial tomography)。在早期掃描時頭上要戴水袋，掃描時間很長，故一個檢查要數小時。

1974 年在美國喬治城大學(Georgetown University)發展全身型 CT。1975 年頭上水袋可以去除而掃描時間低於 20 秒，而全身 CT 已成為日常應用工具。

目前的快速 CT 腹部的檢查為 0.3 秒，做完一整系列檢查約 10 分鐘。頭部的檢查為 0.5 秒，做完一系列約 5 分鐘，已達到相當有效及快速的效果。

因為 X 光的黑白濃度分析為正負

數千個單位，水、空氣、血、鈣化、軟組織、脂肪可以清楚地分辨。又因不同的掃描面可看到不同的點，全身的病變均可以探測出。

1979 年豪斯菲爾與柯麥克(A.M. Cormack)共獲諾貝爾醫學獎。柯麥克的貢獻為在多年前發展影像重組的數學方法。

5. 臺灣放射學的現況

截至民國 91 年(2002)年 3 月 31 日在行政院原子能委員會領有醫用可發生游離輻射設備執照在診斷部分的統計如表 5.1 所示。

表 5.1 放射診斷設備執照統計

類 別	執 照 數
震波碎石機	87
牙科型 X 光機	7088
移動型 X 光機	923
電腦斷層攝影機	343
診斷型 X 光機	2787
巡迴車用 X 光機	109
骨質密度儀	260
乳房攝影 X 光機	112
合 計	11709

為便於比較，特引用聯合國 2000 年出版的報告如下：

聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)為綜合比較分析各國、各地區醫用輻射水平，選取每千人口的醫生數為參數，將各國、各地區的醫療保健水平(health-care level)分為 I、II、III、IV 級：I 級醫療保健水平的國家或地區為每千人口至少有 1 名以上醫生(即 1 名醫生所服務的人群

數小於 1000)；II 級為每 1000 至 3000 人口中有 1 名醫生；III 級為每 3000 至 10000 人口中有 1 名醫生；IV 級為每 10000 人口以上才有 1 名醫生。UNSCEAR 將廣泛收集的資料，按 1970-1979 年、1980-1984 年、1985-1990 年、1991-1996 年等 4 個時期統計平均，力求分析評估發展變化趨勢，並與其他人工游離輻射來源和天然游離輻射水平相比較。

在 20 世紀 80 年代末，全世界人口 52.9 億(1990 年)，共有 520 萬名醫生，其中放射科工作人員約 21 萬人。全世界大約擁有 72 萬台醫用診斷 X 射線機。抽樣調查表明，不包括牙科 X 射線檢查，全世界每年接受 X 射線診斷檢查達 16 億人次。即 X 射線診斷年頻度為每千人口 300 人次，其中 I、II、III、IV 級醫療保健水平國家或地區平均頻度分別為每千人口 860、140、70 和 9 人次。

在 20 世紀 90 年代中期，全世界人口 58 億(1996 年)，擁有 660 萬名醫生，其中放射科工作人員 40 萬人。大約有 70 多萬台醫用診斷 X 射線機，90 萬台牙科 X 射線機，4 萬台乳腺 X 射線機，3 萬 4 千台 X 射線 CT。平均每年接受 X 射線診斷檢查 19.1 億人次，牙科 X 射線檢查 5.2 億人次。即 X 射線診斷年頻度為每千人口 330 人次，按 4 級醫療保健水平統計年頻度分別為 I 級每千人口 920 人次，II 級

150 人次，Ⅲ級與Ⅳ級 20 人次。而牙科 X 射線檢查頻度為每千人口 90 人次，Ⅰ級每千人口 310 人次，Ⅱ級 14 人次，Ⅲ級和Ⅳ級平均 0.2 人次。

1991 年至 1996 年平均，全世界由 X 射線診斷的醫療照射所導致全球人平均年有效劑量為 0.4 mSv (1985 年至 1990 年間平均為 0.3 mSv)。按 4 級醫療保健水平統計，Ⅰ級 1.2 mSv，Ⅱ級 0.14 mSv，Ⅲ級和Ⅳ級 0.02 mSv。所導致年集體有效劑量為 2.33×10^6 人·西弗，占人工游離輻射來源的絕對多數份額。

§5.4 影像醫學及介入放射學

X 射線診斷隨著 X 射線機和配套設備與材料的更新而日益提高其診斷功能。但前 70 餘年係停留於傳統放射學階段。20 世紀 70 年代以來，X 射線 CT (computed tomography) 的問世引發了放射學的突破性進展，開闢了醫學影像數位化時代。近 20 多年，僅 X 射線 CT 已經歷 5 次升級換代。電子、電腦和生物醫學工程技術與醫學緊密結合，使醫用輻射三大分支(放射診斷學、放射腫瘤學、核子醫學)產生新的進展。

如圖 5.1 所歸納，傳統的與數位化的 X 射線透射型成像，加上臨床診斷核子醫學中新發展的發射型電腦斷層掃描造影(SPECT 和 PET)，以及非游離輻射的超音波成像[即時灰階 B 型超音波和

彩色都卜勒(Doppler)成像]、磁振造影(MRI)等各種醫學成像技術，彼此互補，相輔相成，相互交融形成可充分發揮綜合診斷優勢的影像醫學(medical imaging)。醫學影像已從形態學向組織學和細胞學水平發展。不僅顯著提高診斷品質，而且從根本上改變了醫學圖像採集、顯示、存儲、傳輸與處理的方法，並且可通過網路實現遠距放射學(teleradiology)和遠距醫學。如今電腦輔助診斷(computer aided diagnosis, CAD)、圖像存儲與傳輸系統(picture archiving and communication system, PACS, 見圖 5.1)等已投入使用並不斷地改善。

近代放射學不僅在疾病診斷上顯現出巨大功能，而且隨著醫學科學和導管、導絲等相關技術的發展，已經跨越診斷範疇延伸為介入治療。即以影像醫學為基礎，主要利用經血管或非經血管穿刺及導管等介入技術，在各種影像監視下代替傳統手術直接對一些疾病施行治療，或者採集活體標本進行細菌學、組織學、生理和生化診斷。融診斷治療為一體的介入放射學(interventional radiology)正在不斷拓展應用範圍。例如經皮穿刺腔內冠狀動脈成形術(percutaneous transluminal coronary angioplasty, PTCA)在國內、外已施行很多。近些年，為提高療效，改變介入放射學治療後冠狀動脈又再度狹窄，正探索採用放射性血管內支架。借助 β 射線

或者 γ 與 β 射線的照射抑制血管再狹窄。

游離輻射技術在醫學上的廣泛應用是 20 世紀引人注目的傑出科技成就。從醫用輻射三大分支的蓬勃發展到影像醫學及介入放射學的崛起，無疑為人類防病治病帶來了巨大利益，同時也提出了日益突出的輻射防護課題。為此輻射防護工作者必須深入實際，熟悉醫用輻射，掌握其發展趨勢以採取相應對策。

§5.5 輻射腫瘤學

1. 放射治療學

輻射(radiation)在醫院中多稱放射線，因此在本節中仍沿用醫院傳統的名稱。放射線腫瘤學(radiation oncology)的前身是放射線治療學(radiotherapy)，在德國物理學家倫琴於 107 年前也就是 1895 年發表了人造 X 射線的特性之後數年，便已誕生。先有淺部 X 光治療機，可以治療皮膚病及皮膚癌；後有深部 X 光治療機，放射線的穿透力增加，擴展了治療的領域。1898 年居里夫婦發現鐳產生加馬射線。在 20 世紀初年，鐳囊、鐳針以及用鐳的子代產物氡(radon)製成粒狀射源，相繼用在體腔及組織插種治療。不過早期由於深部 X 光

治療機的能量不夠高，放射線在深部腫瘤的劑量分布不足，癌病專科醫師訓練亦未制度化，科學的發展又受到兩次世界大戰的影響，進步較慢。放射線治療學並未普遍應用，只在少數歐美國家發展。但在第二次世界大戰以後，放射線治療學急速地發展。戰時秘密從事軍事用途如原子彈計畫的放射線科學家，投入原子能的和平用途行列，助長了放射線醫學的進步。例如影響最大的是核子反應器(俗稱原子爐)製造鈷 60 放射性同位素，並進一步製造鈷 60 放射線治療機，供放射線治療之用。第一部鈷 60 治療機係 1951 年在加拿大醫院首先應用，以後幾經改良，生產與使用日漸普遍。10 年之後，全世界已有鈷 60 治療機達 1100 部之多。後來還有新核種和機種出現，如銫 137、迴旋加速器、貝他



圖 5.4 民國 8 年夏天起，北平協和醫院便成立了放射線科，從事放射線的教學活動及診斷工作(圖為協和醫院主建築物)。

加速器(betatron)、直線加速器等治療機出現，產生高能 X 線和電子射束。隨著腫瘤學的進步，世界各國醫學院和醫院，紛紛成立放射腫瘤學系和放射腫瘤科，建立放射腫瘤科住院醫師制度，培養放射腫瘤科的師資和專科醫師，使癌病的放射治療服務，能普遍地設在綜合醫院。少數高水準醫院和研究院所，擁有新式高能加速器，提供中子、質子、負派(π)介子及其他粒子射線作癌病治療之用。醫用輻射防護亦應運而生。

放射治療在我國的發軔也很早。民國 9 年初，北平的協和醫學院(見圖 5.4)便有一部 100 kVp 的淺部 X 光治療機，由郝濟時醫師主持。不過那時電壓不穩定，尚未有科學的放射線劑量測量方法，皮膚癌也不多見，淺部 X 光治療機主要用來治療頭皮癬(tinea capitis)這一類的皮膚病。民國 12 年上海法國醫院有法國製的 200 kVp 的 X 光治療機，由巴黎訓練的 Lambert 醫師主持。協和醫學院另外有 500 毫克的鐳和放射性氦製造室，可以每天自鐳的蛻變收集氦氣，封裝以後製成氦粒，供作永久插種治療之用。當民國 16 年郝濟時醫師離開北平返回美國時，放射線醫學業務由謝志光醫師接掌，並添購美國放射線治療設備，聘用美籍放射物理師威廉斯(Marvin Williams)協助發展。威廉斯停留大陸多年，郝濟時醫師離開協和醫

院後，擔任芝加哥大學教授職務 30 年，郝濟時教授在芝大退休後，以國際醫學院客座教授身分，於民國 49 及 51 年兩次來臺，協助發展放射線診斷和放射線治療業務。

2. 放射線治療學在臺灣早年的發展

電力是 X 光發展非常重要的因素。臺灣在未割讓給日本之前，在 1885 年之時，臺北巡撫總理行衙門和若干街道，已有電力照明設備。這在當時的中國，堪稱先進。不過當第二次世界大戰日本戰敗，向國民政府投降並把臺灣歸還給我國時，全臺灣只有今天的省立嘉義醫院有一部堪用的 200 kVp X 光治療機。民國 38 年政府遷臺以後，臺北市陸軍第一總醫院和高雄市陸軍第二總醫院於民國 44 年由美援各得一部 Picker 深部 X 光治療機。可是那時放射治療尚未專業化，缺乏專科醫師執行與發展業務，該兩機閒置多年，只偶然使用。與此同時，臺大醫院獲得政府撥用相對基金而獲得美援物資 250 kVp 深部 X 光治療機兩部，淺部 X 光治療機一部，最先由李文興醫師主持業務。不過那時輻射防護的觀念非常淡薄，醫師門診檢查臺就在治療室裡，中間只隔一張白床單遮擋。若干年以後，李文興醫師得了慢性白血球過低症，最後放棄了放射治療工作，這是醫用輻射防護應加警惕之處。放射治療工作只好由放射診斷科醫師每三個月一

次輪流擔任。臺大醫院除了擁有最多 X 光治療機外，亦有鐳射源。部分鐳射源是日本人在中日戰爭時自中國大陸劫掠運送日本，於戰敗投降後運回臺灣，交還給中華民國政府，中央政府則將之撥歸臺大醫院使用。部分鐳射源因外形和強度不合臨床之用，後來運往美國鐳公司，委託重新改裝為強度適中的囊狀，由婦產科醫師作子宮癌的應用。

在鈷 60 治療機問世之前，放射治療的發展雖然受了機種和射線穿透力不足而深受限制，但臺灣地區私人診所和醫院的放射治療業務卻相當蓬勃。例如位於臺北南陽街的「臺北中央放射科」，於民國 39 年購買日製深部 X 光機治療癌病，營業鼎盛，三個月就把買機器的錢賺回來。翌年在高雄又另設「中央放射科診所」，同樣以深部 X 光線治療癌病。民國 42 年臺北市中山北路徐外科醫院附設深部射線治療機。不過數年之後，當鈷 60 治療機開始應用之後，深部 X 光治療機的用途便日漸萎縮。

在臺灣現代放射線醫學的發展，吳靜博士的功勞很大。他在國防醫學院物理醫學系擔任主任教授並兼任臺北市陸軍第一總醫院放射線科主任期間，熱心於放射線醫學的教學和臨床使用的推展，舉辦以醫師和技術員為對象的短期 X 光診斷訓練班，亦吸收優秀的醫學系畢業生，給予助教和住

院醫師的訓練，使原受戰亂影響而落伍的放射線醫學，奠定了日後成長和發展的基礎。民國 46 年，吳靜博士於內政部衛生司司長任內時，籌設原子醫學實驗院於臺北市郊大直。後因種種原因無法如期成立，吳靜博士赴美，所購得的西德西門子鈷 60 治療機和深部 X 光治療機撥歸臺北市省立中興醫院(現為市立中興醫院)，由李恆如醫師主持使用。李醫師是臺灣地區第一位獲得美國放射學學會(American College of Radiology)考試合格的放射線治療學(therapeutic radiology)專科醫師，李恆如醫師於民國 64 年退休。

現代放射治療業務，在臺大醫院、榮民總醫院和三軍總醫院等三個教學醫院的發展比較領先。臺大醫院於民國 47 年啟用第一部 2000 居里鈷 60 治療機，由黃淑珍醫師主持。黃醫師留學英國，30 多年來艱苦經營，培育了不少專科醫師，後來又增加了第二部鈷 60 治療機。自民國 65 年又啟用西門子馬伐衝(Mevatron) XII 型直線加速器，使用 10 MV(百萬伏)X 射線和 3 至 11 MeV(百萬電子伏)電子射束治療癌病。民國 60 年代後期及 70 年代，先後引進使用模擬攝影機(simulator)協助腫瘤定位，電腦化治療計畫系統，使放射線劑量在人體分布的計算和繪圖獲得精密、多樣和快速的服務。加上後來在遙控近接治療機

和技術的引進，使臺大醫院在放射線治療設備方面從此達到很高的水準。

榮民總醫院於民國 48 年開始收容病人，放射治療科的業務，在中、美醫師的合作下於民國 51 年初展開，為退役軍人(榮民)、現役軍人、公務員及民眾癌患，提供高品質的鈷 60、銻 137、淺部 X 光等治療機的遠隔治療和鐳囊對子宮頸癌作近接放射治療服務。

三軍總醫院放射線治療業務自民國 57 年使用銻 137 治療機開始，由中興醫院李恆如醫師兼任主持，民國 59 年添購加拿大 AECL 4000 居里鈷 60 治療機。自民國 63 年起由留美醫師林光大主持業務，並開始訓練住院醫師，先後採用後荷式鐳和後荷式銻治療子宮頸癌，亦添用模擬攝影機，醫療水準日益提升。自民國 67 年 12 月下旬開始應用馬伐衝 XII 型直線加速器，醫療業務穩定的發展，其時核能研究所協助完成了該部高能直線加速器的劑量校正，是為首次的全程校驗。

3. 放射學的新秀

目前放射線醫學界的新秀，如與 50 年前的放射科醫師生涯相比較，可說是非常幸福。在老一輩的醫師時代裏，設備簡陋，領導階層人力不足。加上生活條件貧乏，學習環境欠佳，要想在專業上有很好的成就非常艱難。在臺灣近年來，情勢有很大的改

變。因經濟繁榮，各醫院放射科的設備絕不遜色於歐美先進國家。新穎的設備如民國 82 年臺北榮民總醫院購置 6040 居里的加馬機(俗稱加馬刀)，民國 90 年成功大學附設醫院購置的電腦刀(Cyber knife)，以及擬議中長庚醫院的質子治療機及臺灣大學設在新竹縣生物醫學園區的質子治療機均在進行之中。例如截至民國 91 年(2002)3 月 31 日為止，臺灣的放射治療設備與醫用射源的執照數統計如表 5.2 所示。

表 5.2 放射治療的執照統計

類 別	執 照 數
醫用直線加速器	80
治療型 X 光機	3
遠隔治療	20
一般近接治療	3
遙控後荷式近接治療	48
合 計	154

此外領導的資深醫師人數眾多，加上醫師待遇提高，生活無缺。復有完善的圖書館，充沛的教學用器材，無數的醫學討論會，在此優裕的學習環境中，年青醫師接受到最好的訓練。因此目前在臺灣各大教學醫院的放射醫學專業人員及資深醫師所接受的專業智識較之老一輩的人不知道要強過多少倍。毫無疑問的，他們將是我國未來發展放射線醫學的主力，將為我國開拓一個新的境界。

4. 聯合國報告

根據上述 UNSCEAR-2000 的報告，放射治療是腫瘤治療的重要方法。據統計約有 50%-70%的腫瘤患者需要施以放射治療。凡需要放射治療者，不僅應對症採用合適的放射治療，而且必須力求施以最佳品質的放射治療，從而不斷追求高精度、高療效和低副作用。隨著放射物理學、輻射生物學、影像醫學、腫瘤學和電腦科學技術的不斷發展，放射腫瘤學得到飛速進步。放射治療技術和方法、各種放射治療設備和一系列放射治療輔助設備不斷更新，質子等重離子放射治療、立體定位放射治療等發展很快。尤其是射束強度調控的三維順形放射治療 (intensity modulated 3-dimensional conformal radiation therapy)已經成為重要發展方向。

就全世界而言，1985-1990 年間平均，施用遠隔和近接放射治療的年頻度為每千人口 0.9 例(I 級 2.4，II 級 0.6，III 級 0.1，IV 級 0.05)，即年接受放射治療患者 490 萬人。1991-1996 年間平均，放射治療年頻度為每千人口 0.9 例(I 級 1.7，II 級 0.7，III 級 0.5，IV 級 0.07)，即年接受放射治療患者 510 萬例。

§5.6 核子醫學

1. 核子醫學之父

在介紹核子醫學之前，先介紹在 1979 年被美國核子醫學雜誌譽為核子醫學之父的匈牙利籍赫畏希 (George Charles de Hevesy, 1885-1966)，見圖 5.5。他其實是一位物理化學家而非醫師，他利用放射性同位素作為示蹤劑進行生物醫學的研究。同位素一詞則為英國索迪 (Frederick Soddy, 1877-1956)於 1913 年首先使用。現今無論與核子醫學相關的放射免疫分析 (radioimmunoassay, RIA)及核醫影像定量分析，或者間接相關的分子醫學研究方法，去氧核糖核酸編序 (DNA sequencing)都是起源於這個概念。



圖 5.5 核子醫學之父匈牙利籍赫畏希

赫畏希在 1885 年 8 月 1 日出生於匈牙利布達佩斯，他的研究工作始於布達佩斯大學，1908 年完成德國 Freiburg 大學的博士學位，然後到英國曼徹斯特事師拉塞福教授。1935-1943 年間在丹麥哥本哈根波耳理論物理研究所進行動物實驗。1943 年在瑞典斯德哥爾摩大學建立有機化學研究所。他在 1943 年榮獲諾貝爾化學獎。

2. 發展核子醫學的人、時、物

以下陸續介紹在核子醫學發展過程中關鍵性的人和物。

(1) 放射免疫分析

放射免疫分析(RIA)的鼻祖為雅樂(Rosalyn Sussman Yallow)，其婚前的少女姓為 Sussman，雅樂係冠夫姓。她在 1977 年獲得諾貝爾醫學獎。她並非醫師而是一位醫學物理師。她的成就係來自於發展 RIA 技術，將放射性示蹤劑應用於臨床醫學上測量血液或體液中微量的藥理及生理物質的濃度。在 1959 年她首先應用這項技術測量成人糖尿病血液中的胰島素 (insulin)，此係胰臟分泌的一種荷爾蒙。

1921 年 7 月 19 日雅樂出生於美國紐約市，1941 年畢業於紐約韓特(Hunter)學院，得到物理和化學學位。二次大戰期間她進入伊利諾大學攻讀物理，1945 年獲得核

子物理博士。1950 年她全力投入位於紐約市布隆克斯(Bronx)區榮民署醫院的研究工作，與伯森 (Solomon Aaron Berson, 1918-1972) 密切合作，22 年來研究應用放射性同位素測量血容積、甲狀腺疾病的臨床診斷、以及碘代謝的動力學研究，然後延伸這項技術至其他的分析。目前，RIA 在全世界各個實驗室已經廣泛應用於包括肝炎病毒篩檢，決定藥物或抗體的有效劑量等好幾百種物質的測量。藉由 RIA 的技術，使內分泌學在近 40 年來成為醫學研究最熱門的領域之一。

(2) 直線掃描機從數字至影像

回顧歷史，直線掃描機發展的契機源於拉塞福等人發現高密度的透明晶體會吸收加馬射線並放出光子，於是在 1947 年卡爾曼 (Kallmann) 應用這個原理，將樟腦晶體連結光電倍增管製造出第一個閃爍偵檢器。在這之前輻射的偵測只能靠蓋革計數器。在當時，利用碘 131 進行甲狀腺機能檢查已經成為一項例行性的檢查，但受限於蓋革計數器的低偵測效率，必須給予病人高劑量的碘 131，而且要想得到甲狀腺的影像亦顯得不切實際。1949 年卡森 (Benedict Cassen, 1902-1972) 使用鎢酸鈣晶體 (目前用的碘化鈉要到 1951 年 Harshaw

化學公司才開始生產)黏在 RCA 公司出品的側窗式光電倍增管製造了第一部直線掃描機，其解像度可達 0.25 吋，並且具有比蓋革計數器更優越的靈敏度與偵測效率(以碘 131 為例，一般的蓋革計數器的偵測效率只有 1 到 2%，直線掃描機可以增加到 26%)，因此其應用於醫療極具潛力，後來卡森繼續改良為後窗式光電倍增管，成為傳統直線掃描機的雛形。

當時加州大學洛杉磯校區的醫院和醫學院尚未成立，因此卡森便和西洛杉磯榮民醫院的放射性同位素部門合作，與亞倫(Herbert Allen, Jr.)醫師等進行有關的研究。首先病人接受 100-200 μCi 的碘 131，然後將一塊劃分成 400 個區域的透明合成樹脂板子放置在病人的甲狀腺上，接著用手動的方式移動直線掃描機來偵測每一個區域的碘 131 輻射強度，藉此輻射分布情形描繪出甲狀腺的功能與型態(其實所產生的只是一連串排列整齊的數字，跟目前圖像的表現方式有點距離)，當時這樣一次檢查大概要花 1 到 2 個小時才能完成掃描，而且必須完全手動將直線掃描機一格一格移動。因此在 1950 年卡森(Cassen)，柯蒂斯(Curtis)以及瑞德(Reed)等人將其改裝至一台舊的 X 光機上，接上馬達、定位

器、電報發報機、打字機色帶，遂成為自動化直線掃描機。每當機器偵測到訊號時，便會啟動發報機在打字機色帶上印下一個記號(這時候產生的結果終於比較像是圖像的東西了)，這台機器後來在榮民醫院用了至少有 3 年半之久，但是因為這種印表系統常常會卡紙，所以在 1952 年又改裝成熱感應紙系統，產生的影像品質更好也更加精準。柯蒂斯及瑞德於 1950 年離開加州大學洛杉磯分校，創立了 RC 科學儀器公司。1951 年開始量產自動化直線掃描機，直線掃描機的時代宣告來臨。

直線掃描機的一次重要演進在 1956 年，當時在賓州大學放射線部擔任住院醫師的庫爾(David Kuhl)及其同事將直線掃描機接上可以曝光底片的裝置，使機器偵測到不同強弱的訊號時，可以在底片上相對應的位置產生濃淡不同的曝光程度。這種方法不但提供了比傳統使用的不透明紙張更豐富的資訊，也增強了直線掃描機的敏感度和解析度，而且其使用一般的 X 光底片，讓閱片者能夠直接在看片箱上判讀結果，使其更具親和力。

1950 年代早期的掃描侷限於甲狀腺，主要應用於描繪甲狀腺型態、估計重量以計算碘 131 劑量來治療甲狀腺機能亢進，還有部分利

用金 198 進行肝臟掃描，但這些檢查在臨床上只具有有限的應用。直到 1950 年代末期及 1960 年代初期，更多針對人體主要器官像腦、肝、腎、肺所發展的核醫藥物的問世，加上 Picker 公司結合了新發展的多孔聚焦式準直儀、3 吋碘化鈉晶體、及庫爾改良型直線掃描機，量產出新型的光子掃描器 (photoscanner)，使核醫檢查在臨床上得以大量推廣。據統計到 1973 年直線掃描機的發展達到顛峰，當年在美國所進行的掃描超過 250 萬人次，尤其腦部掃描(占 62%)在 X 光電腦斷層發明前更是不二選擇，核醫也從此在診斷醫學上占有重要的一席之地。

卡森的聰明才智與創造力將閃爍偵檢器化為直線掃描機，核醫的器官影像掃描才能踏出第一步；也由於眾人貢獻心血，將直線掃描機不斷改良演進，才使得核醫能夠在 20 幾年內快速發展，成為診斷醫學上一門重要的科別。雖然直線掃描機的重要性在 1970 年代末期被安格(Anger)發明的閃爍攝影機逐漸取代，但其對核醫的發展及病患的貢獻仍然不可磨滅。

卡森於 1902 年出生於紐約市，童年時期在康乃迪克州的煙草農場度過。1927 年自倫敦皇家科學學院物理數學系畢業，1930 年

以高電壓 X 光管為論文主題得到加州理工學院博士學位。從 1930 到 1932 年他擔任普林斯頓的國家研究委員會的研究員，1934 到 1939 年在底特律 Harper 醫院擔任醫學物理學家，接下來的 5 年他在賓州匹茲堡西屋公司研究室研究 X 光，最後在 1947 加入加州大學洛杉磯校區(UCLA)，直到 1972 年因心肌梗塞去世。

(3) 加馬攝影機

安格(Hal Oscar Anger)，於 1956 年發明了加馬攝影機(gamma camera)以及其他核醫相關的成就，進而促成了臨床核子醫學的長足進步。在 1994 年美國核醫學學會 (SNM) 頒給他卡森獎 (Benedict Cassen Prize)，安格從這項專利獲得利潤，而市場反應也顯示這種攝影機對於核醫造影極具重要性。

1920 年 5 月 24 日安格生於科羅拉多州丹佛市，很早就搬家到南加州，並在那兒接受小學及中學教育。二次大戰期間，他在加州大學攻讀電機學位時，對雷達產生了興趣，更建立了用於雷達中被稱為安格電路的裝置。大學畢業後，他進入哈佛大學繼續研究雷達，一直到大戰結束。

1946 年，他回到柏克萊 (Berkeley) 的唐納 (Donner) 實驗

室，並和生物物理學家多派阿斯(Cornelius Tobias)及實驗室的主持人勞倫斯(John H. Lawrence)共事，他們兩位係致力將原子能應用於放射治療及偵測放射性的強弱。1951年，安格發明了井型計數器(well counter)。在50年代早期，他開始進行放射性計數及造影技術的發展。1953年，他發表了全身掃描機(whole body scanner)。這個裝置是由一排偵測器組成，可以從病人的一側掃描至另一側。再將連續幾排的造影結果組合在一起，就可以得到全身放射性分布的情形。利用這種全身掃描機進行放射性碘 131 的全身造影，可發現很多甲狀腺癌症，病患可以提早偵測到轉移的病灶。

在這個時候，安格開始進行加馬攝影機原始機型的研發。1950年末期，他發表了有關第一部加馬攝影機的設計。這第一台機型是裝配4吋的小晶體，後來改良為8吋的晶體，但是兩者皆主要應用針孔準直儀攝影，因此有效視野都不大。後來安格改用11吋晶體的攝影機，19個光電管，並配備平行孔準直儀，這就是第一部我們現在熟悉的安格攝影機。不過，它的偵測頭是不動的，與病人表面間的距離是靠著病床的高度來調整。

事實上，是卡森的直線掃描機

先把影像帶進核醫領域，但是安格攝影機讓有效視野變得更大，還可以進行不同方向的攝影及動態造影，以觀察影像隨時間的變化。此外，照相的時間也縮短了許多，輸出影片明暗度、對比等較合乎臨床的需求。安格攝影機的設計是如此的精密，雖然它已經發明了30年以上，它的基本設計一直到好幾年前仍然是維持一樣。這和現代高科技，如基本電腦的設計似乎每月都在改變，相比起來實在是一個很大的成就。

(4) 唐納實驗室

美國加州柏克萊加州大學的唐納實驗室。是在1931年由勞倫斯(Ernest Orlando Lawrence, 1901-1958)所創立的，實驗室的主持人勞倫斯在1929年建造了世界第一座迴旋加速器(他本人也因為這項發明在1939年得到諾貝爾物理獎)。勞倫斯有一位兄弟名叫約翰·勞倫斯。他原本是一位血液學(尤其擅長於真性紅血球增多症)和內分泌學專家，當他一聽到他兄弟的實驗室可以產生具有放射性鐵時，立刻想到要做與真性紅血球增多症相關的研究工作，所以當時他毫不猶豫的辭去耶魯大學醫學院暨附設醫院的教職和工作，投身到唐納實驗室去進行與醫學相關的各種放射性同位素研究工作，並

且終其一身都致力於這個領域，沒有離開唐納實驗室。如果我們認為唐納實驗室是核子醫學的發源地，那麼約翰·勞倫斯則是這個實驗室最重要的導師之一。

約翰·勞倫斯在唐納實驗室首先利用鐵 59 來進行一連串的血液動力學研究，另外，他使用磷 32 來治療白血病患者。這個創新舉動，開啟了利用放射性同位素來治療病人的先河。除此之外，他還使用磷 32 來治療真性紅血球增多症病患，而這個方法在 1960 年以後今天依然出現在核子醫學的教科書裡面。除了磷 32 以外，他還嘗試使用鈉 24 來治療其他的癌症，雖然最後是失敗了，但是結果卻深深的影響了漢彌頓(Joseph G. Hamilton)，他對甲狀腺很有興趣，他一直希望能找到一個理想的放射性碘來做為甲狀腺疾病診斷或治療之用，無奈在當時只有碘 128 ($T_{1/2}$: 26 min) 可以使用，這是一個不太理想的放射性同位素。1938 年，漢彌頓請問唐納實驗室的同事席博(G.T. Seaborg)可否利用迴旋加速器製造出半衰期約在一周左右的放射性碘，碘 131 終於產生。碘 131 對核子醫學的影響以及重要性，每一位核子醫學的從業人員都很清楚。很不幸漢彌頓死於過量曝露，輻防人員

當引為戒。除了在前面所提到的鐵 59、磷 32 和碘 131 之外，目前傳統核子醫學還在使用碳 14、鉍 201、鎳 99m 以及 PET 所使用的氟 18 和氧 15 都是出自於唐納實驗室。

唐納的全名是 Joseph William Donner，他的父親是 William H. Donner，曾任國際癌研究基金會的總裁(這個基金會後來更名為唐納基金會)，因為他的兒子 Joseph William Donner 死於癌症，所以，他捐出大筆經費成立唐納基金會和唐納實驗室，其設立的宗旨是為了應用物理、化學、以及自然科學於生物和醫學。

由於迴旋加速器是製造同位素的重要工具，尤其是發射正子(正貝他)的放射性同位素，其運轉原理特說明於下。

近代物理學家為了探索原子核的基本構成物質，或者改變原子核的組成，形成新的核種，發展出各種加速帶電粒子的特殊裝置，也就是加速器。勞倫斯於 1929 年提出迴旋加速器的理論，隨後於加州大學柏克萊校區建造了第一座迴旋加速器。

迴旋加速器的原理為利用磁場使運動中的帶電粒子迴轉，並利用電極間交錯變換的正負電場，使粒子於迴轉中不斷地獲得能量。圖 5.6 顯示迴旋加速器的基本構造，包含有加速電

極(Dees)、射頻系統、氣體源、離子源、磁極、真空腔、及偏轉電極等。

加速的粒子始於氣體源的氣體，經離子源以高電壓將其離子化，產生加速用的帶電粒子，再經一偏壓電壓吸引進入加速器內部的真空腔。運動中的帶電粒子受到磁場的磁力作用，開始旋轉。同時，輸入此加速腔的射頻波，形成了電磁駐波，使加速電極間產生強電場，帶電粒子受電場加速而獲取能量。假如射頻波系統的振盪頻率與帶電粒子於磁場中迴轉的頻率相同，則當帶電粒子迴轉半圈後，二個加速電極間的電性正巧互換，使電場方向相反，因此帶電粒子又再次被加速。經反覆地變換加速電極極性，帶電粒子每迴轉一圈被加速兩次，故其能量越來越高，半徑越來越大，最後由偏轉電極導出而形成一高能粒子束。粒子束經導引撞擊靶內物質，可以產生新的核種。

早期的迴旋加速器使用導引電極

導出加速粒子，其效率僅約 70%，且導引電極長期受粒子束撞擊，會活化成為長半衰期金屬廢料。新型的迴旋加速器多為“負離子加速器”，也就是在加速的原子核外加電子，使其淨電荷為負值。以質子加速器為例，負離子加速器所加速的粒子為負氫離子，亦即 2 個電子環繞著一質子。負離子加速器導出粒子束的機制是一片非常薄的石墨膜，因負氫離子中的質子與電子間的鍵結非常微弱，故當其撞擊石墨膜後，電子被分離而僅質子穿透。此時被加速粒子的電性由負一價變為正一價，所受磁力方向改變，導致粒子往相反方向旋轉，離開加速器後撞擊靶體。相較於正離子加速器，負離子迴旋加速器產生極少量的放射性廢料，且有較高截取效率(大於 90%)，並可以同時截取出二道粒子束，因此新式的迴旋加速器都採此設計。

近年來，正子電腦斷層掃描逐漸受到重視，其常用的正子同位素如

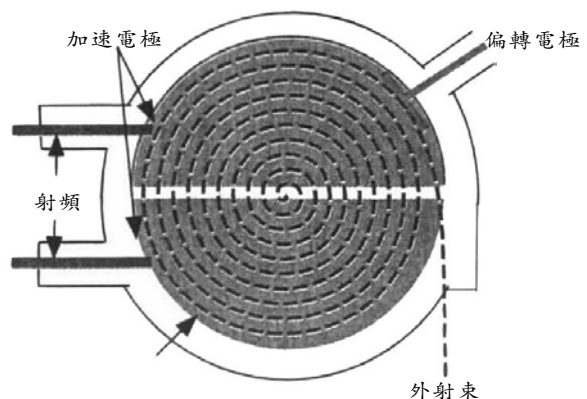
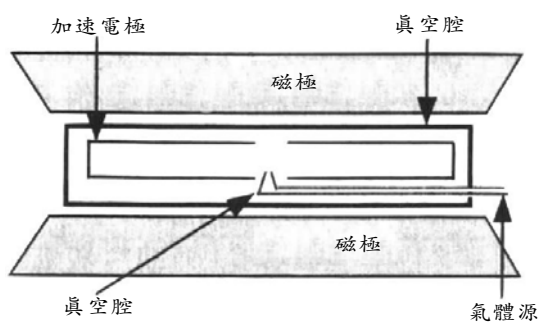


圖 5.6 迴旋加速器的基本構造：左為俯視圖

^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、及 ^{18}F 等，半衰期都很短(分別為 20、10、2 及 110 分鐘)，因此皆須於使用前當場製造。針對此用途而設計的迴旋加速器已廣泛地在醫院中設立。例如臺北榮民總醫院國家多目標醫用迴旋加速器已於民國 81 年正式啟用，稍後臺中市中山醫學院也啟用迴旋加速器。民國 90 年臺北新光醫院也引進迴旋加速器和 PET 設備。

註：Dee 係英文字母 D 的發音，亦為電極的形狀。故稱為 D 形極或半月形極。

5. 碘 131 與鎔 99m

席博在年僅 39 歲時就與麥米倫 (E.M. McMillan) 共獲得 1951 年諾貝爾化學獎，前後有九任美國總統聘其為顧問。他也是唯一在生前就有元素 (seaborgium; Sg, 原子序數 106) 以其名字命名的化學家。

他發現了讓原子彈爆炸的元素鈾 (Pu)，也參與曼哈坦計畫製造原子彈；但他更發現了許多放射性同位素，包括碘 131、鎔 99m、鈷 60，運用於醫學檢查及治療，更為核醫的領域開啟了一扇大門。這一位傳奇人物，也許在核醫的領域中並不為人所熟知，但在化學界可是被選為前三名最具有影響力的學術領袖。

1912 年瑞典後裔的席博出生在美國密西根州一個產鐵礦的小鎮 Ishpeming，10 歲舉家遷往洛杉磯郊

區。由於家境並不富有，因此雖然他的興趣為物理學，但是為了要容易找到工作養家，所以他放棄物理而選擇到加州大學洛杉磯校區主修化學，同時他也修習許多物理學的課程。也由於有這樣的背景，所以在往後的研究上能夠結合他的興趣與所長，並且和許多傑出的物理學家們有良好的合作默契。

1934 年他在亞當斯 (John Adams) 門下修讀原子物理學，從那裡得知勞倫斯等人在柏克萊發明了迴旋加速器，以及人造放射性核種，使他決心進入柏克萊研究所從事這方面的研究。當時放射性元素的研究正在起步，柏克萊可說是科學界的聖城，在那裡匯集了勞倫斯、奧本海默 (Robert Oppenheimer)、阿伐雷滋 (Luis Alvarez) 等傑出的核子物理學家，利用迴旋加速器製造出許多放射性同位素。同年 8 月席博來到柏克萊，一下子遇到這麼多的學術菁英，他決定比其他人更努力。當時柏克萊實驗室小組正利用剛啟用的 27 吋迴旋加速器進行許多研究，需要一位化學家來幫助他們分離實驗所產生的放射性同位素，結果他們找上席博合作。席博白天跟著名的化學家路易士 (Gilbert Lewis) 進行酸鹼的化學實驗，然後利用晚上課餘時間進行放射性同位素分離，用實驗室裡面簡單的儀器成功地完成這

項工作。這次成功的經驗，使席博大受鼓舞，也因此決定了其一生的志業。

獲得化學博士學位之後，席博繼續在路易士的實驗室進行研究，另一方面和物理學家李維固(John J. Livingood)合作研究放射性同位素。當時漢彌頓正在研究甲狀腺荷爾蒙的代謝途徑，但受限於碘 128 只有 25 分鐘的半衰期無法得到進展，便找上席博代為解決，他開出的條件是半衰期大約一個禮拜的碘放射性同位素。結果席博和李維固用氬撞擊碲靶產生了碘 131，半衰期比 8 天多一點點。他的母親、布希總統夫婦均用碘 131 治療突眼性甲狀腺腫，又稱為戈雷夫(Grave)氏病，戈雷夫為愛爾蘭醫師。

1938 年 10 月席博和塞格雷(Emilio Segrè)又發現銻 99m，為目前核子醫學檢查中應用最廣的放射性核種。席博始終未對人性感到失望，他說：「就所有我們的困難，生活在今天對於大多數的人是好得太多了。如果我們不僅開展新的知識，而且對於人心與精神有更大的信心和信任，則有可能未來是比從前更光明。」

正子掃描英文簡稱為 PET scan，即 positron emission tomography 的縮寫，亦即正子發射斷層攝影術。它是核子醫學掃描檢查的一種，利用正子掃描儀進行全身或局部的掃描檢查。

1974 年由美國華盛頓大學 Michel M.

Ter-Pogossian, Michael E. Phelps 以及 Edward J. Hoffman 等人共同發明的。1990 年以前一直被定位為研究工具。1997 年得到美國健康照護財務署(Health Care Financing Administration, HCFA)准予醫療保險給付，算是得到醫界一致的接受，在臨床上可以幫忙醫師解決所面臨的問題。

§5.7 臺灣核子醫學簡史

1. 開創期

民國 43 年(1954)10 月，臺大醫院高天成院長赴美考察醫學，並任杜克大學醫學院客座外科教授，於民國 44 年 10 月返國後，即有在臺大發展原子醫學的擬議。旋於民國 45 年著手籌設放射性同位素實驗室，附設於放射線科，在同年 4 月間，運用美國安全總署援助的美金 3000 元，購置計數器與吸取(uptake)檢查儀器。當時王光柱教授已由高天成院長於民國 44 年 7 月推介至杜克大學醫學院進修放射學，而囑王氏再赴橡樹嶺核子中心進修原子醫學 4 個月，而於民國 45 年 9 月學成返國，出任該院同位素實驗室主持人，是為我國核子醫學創設的嚆矢。迄 51 年與 55 年，始行先後添購造點型與攝影型閃爍掃描器，並有陳傳慶醫師加入工作。

另國防醫學院物理醫學系主任吳靜教授，於民國 44 年 6 月奉派赴日內

瓦參加原子能和平用途會議，會後考察歐美醫學，歷時經年，於民國 45 年 10 月始抵國門，接長衛生司，並即籌設中央原子醫學研究實驗院，由海軍撥付臺北市大直海軍總部土地的一部分為院址，受轄於內政部。惜以客觀條件未能配合，復因民國 47 年「八二三」砲戰後，政府財力困難，而裁併次要單位，該院由於需用預算龐大，政府不克負擔，乃被編併，而所遺人員與僅有的 2000 居里鈷 60 治療機，一併收編於臺北市省立醫院(現為臺北市立中興醫院)。在同一時期(自民國 45 年 12 月 27 日以迄民國 48 年 12 月 19 日)，葉鑫華醫師於吳靜教授指導下編撰「原子醫學特輯」，連載於臺灣醫學新聞，是為我國第一部核子醫學的系統性著述。

榮民總醫院的核子醫學起步稍遲，迄民國 54 年，始由美國醫藥援華會贈購基本計數器與閃爍掃描器等，置於柯柏館，由內科尹宗高醫師使用。三年後掃描器撥歸放射線部，並置同位素科，由張遵醫師接管。

2. 發揚期

民國 57 年夏，葉鑫華醫師自美返國，開創現代核子醫學，分別於榮總與三軍總醫院籌設「核子醫學中心」，自建築設計、器材採購、以迄人員訓練，筆路藍縷，慘澹經營，榮總核醫中心，終於民國 59 年 9 月 15 日正式開始作業；三總核醫中心，則於民國 62 年 5

月，始行正式作業，現代化核子醫學乃告引進我國。榮總於民國 63 年改制為核子醫學部，分設兩科兩室：即核醫科、放射製藥科、保健物理室與核醫儀器室，並於同年首次開展放射免疫分析，民國 66 年引進國內首部核醫專用電腦，民國 73 年首先購置單光子電腦斷層攝影機。國立陽明大學與國防醫學院，亦分別於民國 64 與民國 66 年，先後設置核子醫學科，開我國醫學院獨立核子醫學科系設立的先河。

推動核醫伊始，需及早納入正軌，以防泛濫，獲當時行政院原子能委員會秘書長鄭振華教授大力支持，我國核醫執業，乃得法定化。原子能委員會規定，醫師需在認可的教學醫院接受三年核醫專業訓練後，始能執業核子醫學，惟顧及當時實際情況，採分年漸進方式，而開我國醫學專科管制的先河，並為我國醫學專科法定化的雛型。榮總因而成為我國早期核子醫學各級人才培育的搖籃，陸續接受各醫院選送人員來院進修，漸次開創我國各醫院的核醫部門，諸如三總的陳維廉醫師、長庚的黃妙珠醫師、高醫的吳重慶醫師、馬偕的王朝弘醫師、海總的廖澍昆醫師、仁愛的許重輝醫師、中興的沈業有醫師、婦幼的阮正雄醫師、臺南的陳三泰醫師、花蓮的張平國醫師，及其他私人醫院選送人員，均為我國現代核醫草創先鋒。在此期間，曾凱元與楊光道二位

醫師，曾先後考取公費留學，分赴美國約翰霍布金斯與洛杉磯加州大學進修醫學物理與核子醫學，返國後分別接掌林口長庚與彰基核醫。榮總的王世楨與劉仁賢兩位醫師，亦已培育成材。分別接掌臺中榮總與臺北榮總的核醫科。

回顧開創初期，核醫亦曾網羅不少優秀人才，惟彼時出國風氣正熾，影響所及核子醫學人才亦難逃楚材晉用的命運，至為可惜。所幸繼起一群，卻能於專趕熱門的社會風氣下，捨熱門而選擇投入偏重學術的核醫行列，貢獻其才智。

3. 進軍國際

我國的核醫研究，以榮總為首，長庚、高醫與三總的加入，連年亦迭有卓著貢獻，進軍國際，尤以肝臟核子醫學占有一席之地，除歷年參加美國核子醫學會年會與核醫有關國際會議，參加競爭，宣讀論文，主持學術研討會外，並於歐美各國期刊刊載有關業績，在亞洲我國核醫學學術水準，僅次於日本。

對國際合作與學術交流，我國亦連年主動參與，積極貢獻，打進核心，成為國際核醫學學術組織的主要成員，也為世界核子醫學聯盟發起人，於民國 60 年(1971)簽署聯盟憲章，受聘為歷屆聯盟諮詢委員會委員，並代表我國出席歷屆世界核子醫學大會。復於民國 63 年 10 月 9 至 10 日，與 67 年

9 月 26 至 10 月 1 日，先後假臺北圓山飯店舉行第一屆與第二屆世界核子醫學大會會後學術研討會，各國核醫權威泰斗，欣然應邀來臺，盛況空前，非特有助我國核醫之帶動，且開我國舉辦國際學術會議風氣之先。

民國 63 年世界核子醫學聯盟主席兼第一屆世界核子醫學大會會長上田英雄教授，趁該大會在東京召開之便，發起亞洲大洋洲核子醫學聯盟之創設，我國亦為創始會員國。

4. 核醫學學會的成立

民國 75 年 12 月 2 日獲內政部臺(75)內社字第 45808 號函復核准籌組，乃於 75 年 12 月 23 日召開發起人會議及第一次籌備會議，於 76 年 1 月 23 日召開第二次籌備會議，通過 130 人入會，決議於 3 月 4 日召開第三次籌備會作最後審定工作，並訂於 3 月 8 日召開成立大會，假榮民總醫院會議中心第一會議室舉行。

近年來衛生署亦大力推展籌建專科醫師制度，初期仍採沿用分類，將核醫科歸類為放射科的次專門，當時核醫界人心惶惶，幸蒙有司明察，對核醫專門乃有所深入之瞭解，進而順應世界潮流，將核醫科定為該署定案的 18 個主專門之一，乃得獨立自主，使我國核醫得以繼續正常發展茁壯，避免前功盡棄之後果。截止民國 91 年 3 月 31 日在行政院原子能委員會領有醫用放射性物質(核醫)的執照統計

如表 5.3 所示。

表 5.3 醫用非密封放射性物質(核醫)執照統計

類	別	執照數
核子醫學		45
放射免疫分析		2
合	計	47

5. 展望將來

我國核醫，歷經近 20 年的共同奮鬥，迄今終告完全獨立，各種有關典章制度，亦已燦然大備，展望前程，無限美好。就核子醫學本身而言，在醫學發展史上，幾無任何學科堪與核醫比擬，能在短短 30 餘年內，一躍而為現代醫學上最富刺激而有莫大重要性學門之一。今後核子診斷方法，對臟器生理與生化有關臨床變化偵察的潛在發展，咸認一如過去，仍將以同一速率突飛猛進，諸如傳統放射製藥化學的推陳出新，核醫電腦應用的繼續發展，單株抗體放射免疫分析與核子造影的發煌，單光子電腦斷層造影的普遍化，以至隨迴旋加速器正子放射性同位素產生與正子放射性同位素電腦斷層攝影應用的肯定，核醫已進入活體生化造影的診斷新紀元。核醫治療，亦將因新型化合物的推陳出新與單株抗體的引用，而將步入另一新境界。以上諸端為今後核子醫學發展的新趨向，人類疾病可因核子診斷與治療，行將受惠無窮。

未來核醫界可在現有鞏固基礎

上，繼續努力，鍥而不捨，除進一步推展傳統臨床核醫以外，更須群策群力，引進迴旋加速器與正子放射性電腦斷層攝影技術，造福國內病患，為國培育高級科技與臨床人才，並以提升我國學術地位。核醫住院醫師與科技人才訓練與教育，尚需加強，包括清華原子科學系核醫高級科技人才的培育，並需繼續爭取陽明、國防、高醫與長庚以外各醫學院獨立核醫科系的設置與核醫必修學分的規定；全國核醫臨床與科技菁英的聯繫與合作，尤需加強，以增益現有臨床研究，並以提升我國基礎核醫研究水準。

6. 聯合國報告

臨床核子醫學相對年輕，其普及程度遠不如 X 射線診斷，但近 20 年來，發射型電腦斷層掃描顯像 (SPECT、PET) 在功能代謝成像方面大顯獨特優勢，同時放射性核種治療(如受體介導靶向治療、放射免疫治療、核種介入治療等)隨分子核子醫學的崛起均蓬勃發展。根據 UNSCEAR 報告，1985 至 1990 年間平均，全世界施行核醫學檢查的年頻度為每千人口 4.5 人次(I 級 16，II 級 0.5，III 級 0.3，IV 級 0.1)，即年核醫學檢查 2400 萬人次。放射性藥物治療的患者約 70 萬例。而 1991 至 1996 年間平均，全世界施行核醫學檢查的年頻度已增加至每千人口 5.6 人次(I 級 19，II 級 1.1，III 級 0.3，IV 級 0.02)，即年核醫學檢查

3250 萬人次，放射性藥物治療約 40 萬人。

參考文獻

1. 徐鈞 臺灣及早年中國大陸放射線醫學史話 **中華放射醫誌** 12, 191-197 (1987)
2. 葉鑫華 我國核子醫學發展之回顧與展望 **核醫雜誌** 1, 1-4 (1987)
3. 翁寶山 陳光耀 **醫用游離輻射防護導論** 行政院原子能委員會 臺北市 (1992)
4. 杜慶燾 **醫用輻射防護實務** 財團法人中華民國輻射防護協會 新竹市 (1994)
5. 雷德 丁禮莉 王博民 方麗麗 鍾娜娜 國立台灣大學附設醫院放射治療科的發展 **放射治療與腫瘤學** 2, 157-160 (1995)
6. 陳光耀 放射線診斷和治療學在中國大陸和台灣的發展史 **放射治療與腫瘤學** 2, 1-10 (1995)
7. 徐劍耀 自從 X 光發明以後——紀念 Roentgen Ray 發明 100 周年 **中華放射醫誌** 21, 73-75 (1996)
8. 陳光耀 X 光發現前的科學發展 **核研季刊** 20, 1-8 (1996)
9. 翁寶山 **原子科學家列傳** 行政院原子能委員會 臺北市 (1997)
10. 柴發順 正子造影系統的演進 **中山醫學院正子造影報導** 5, 5-6 (2000)
11. 閻紫宸 核醫之父—George Charles de Hevesy **核醫會訊** 6(4), 7-8 (2000)
12. 閻紫宸 核子醫學的誕生地——Donner 實驗室 **核醫會訊** 6(5), 6-7 (2000)
13. 蔡政謙 閻紫宸 I-131 與 Tc-99m——Glenn Theodore Seaborg **核醫會訊** 6(6), 10-11 (2000)
14. 張祐銓 閻紫宸 RIA 鼻祖——Rosalyn Sussman Yalow **核醫會訊** 6(7), 9-10 (2000)
15. 蔡政謙 Benedict Cassen 與直線掃描機——從數字到影像 **核醫會訊** 6(8), 12-13 (2000)
16. 張祐銓 閻紫宸 Hal O. Anger 與加馬攝影機 **核醫會訊** 6(9), 8-9 (2000)
17. 張寶樹 **醫用保健物理學** 俊傑書局 臺北市(2001)
18. 曾凱元 引進葡萄糖正子掃描 **長庚醫訊** 22, 16-17 (2001)
19. 鄭鈞正 **游離輻射醫學應用的輻射防護** 兩岸醫用游離輻射防護研討會 臺北市 2001 年 4 月 26 日
20. 張寶樹 **臺灣醫用游離輻射防護現況** 兩岸醫用游離輻射防護研討會 臺北市 2001 年 4 月 26 日

第六章 醫用輻射防護

§6.1 前言

主管醫用輻射防護的政府機關為行政院原子能委員會，下設輻射防護處(簡稱輻防處)，其所轄的醫用科則為處理醫用輻射防護的業務，這可由其下列職掌略窺一二：

1. 醫用放射性物質及可發生游離輻射設備的輻射劑量評估及管制事項。
2. 醫用放射性物質及可發生游離輻射設備安全規範的規劃及管制事項。
3. 醫用放射性物質及可發生游離輻射設備查驗登記的輻射安全審查事項。
4. 醫用放射性物質及可發生游離輻射設備操作人員考試資格的審查及執照的核發事項。
5. 醫用放射性物質及可發生游離輻射設備的生產、輸入、輸出、安裝、改裝、轉讓、停用、廢棄、運送等管制事項。
6. 醫用放射性物質及可發生游離輻射設備暨使用場所、貯存場所輻射安全評估及防護檢查有關事項。
7. 醫用放射性物質及可發生游離輻射設備執照核發事項。
8. 醫用游離輻射意外事故的評估及處理的督導事項。

9. 其他有關醫用游離輻射的管制事項。

§6.2 國際上放射醫學及輻防史上的紀事

1895年 德國倫琴發現 X 射線。

1896年

- 倫琴以 X 射線拍攝解剖學教授柯立克(Von Kolliker)的手成功，從此診斷放射學開始發展。目前診斷放射學又稱為醫學影像學。
- 法國貝克勒爾發現鈾鹽會發出輻射。

1898年

- 貝克勒爾由於鈾鹽引起的皮膚紅斑(skin erythema)而成為具輻射生物學 (radiation biology)實驗紀錄的人。
- 居里夫婦從瀝青鈾礦中提煉出釷和鐳。

1900年 美國倫琴射線學會(American Roentgen Ray Society, ARRS)成立。

1901年 居里重作貝克勒爾的皮膚紅斑實驗，以鐳燒傷他自己手臂的皮膚形成潰瘍。醫學上稱其為鐳潰瘍 (radium

- ulcer)，是為輻射生物學研究的開始。
- 1912 年
- 法楊(Kasimir Fajans)首次提出同位素(isotope)而英國索迪(Soddy)首次使用同位素這名詞。
 - 匈牙利人赫畏希(Hevesy)首次指出放射性同位素是一種指示劑(indicator)，又稱為示蹤劑(tracer)。他在 1979 年被美國核子醫學雜誌推崇為「核子醫學之父」。
- 1915 年 英國 侖琴射線學會 (British Roentgen Ray Society)通過對 X 射線防護的決議，被認為這是朝著輻射防護邁進的第一個有組織的步驟。
- 1920 年
- 臨床用的接地(grounded) X 光機問世。
 - 美國侖琴射線學會(ARRS)成立了輻射防護常設委員會。
- 1921 年 英國 X 射線和鐳防護委員會 (British X-Ray and Radium Protection Committee)成立。
- 1922 年 美國侖琴射線學會採用了英國的條例
- 1925 年 在英國倫敦召開了第一屆國際放射學大會，建立了國際輻射單位與度量委員會(ICRU)的前身國際 X 射線單位委員會(IXUC)。
- 1927 年 美國布魯加特 (Herrman Ludwig Blumgart)在美國波士頓首次完成放射性同位素的人體實驗。
- 1928 年
- 在(瑞典)斯得哥爾摩召開的第二屆國際放射學大會的贊助下成立了國際放射防護委員會(ICRP)的前身 ICXRP。
 - 國際輻射單位與度量委員會建議採用侖琴作為曝露量的單位。
- 1929 年 美國成立了 X 射線與鐳防護諮詢委員會 (Advisory Committee on X-Ray and Radium Protection, ACXRP)，為 NCRP 的前身。
- 1930 年 200 kV 深部 X 光治療機於 1930 年代問世。
- 1931 年 用侖琴作為 X 射線的輻射量單位。
- 1934 年
- 國際放射防護委員會推薦了日耐受劑量(daily tolerance dose)。
 - 義大利費米(Fermi)在羅馬用中子照射產生放射性碘。
- 1937 年 美國漢彌頓(Hamilton)、席博(Seaborg)研製出核子醫學常用的碘 131，席博等人再研製出現代核子醫學用的鎝 99m。

- 1939年 美國漢彌頓等人發表碘 131 的臨床論文。
- 1940年 在 1940 年代臨床證實碘 131 對甲狀腺病變確有療效。
- 1941年 ACXRP 推薦了第一個鐳的全身許可負荷量 (permissible body burden for radium)。
- 1942年 曼哈頓工程區 (Manhattan District) 開始研究製造原子彈，揭開了保健物理 (health physics) 成為一種專門性的職業。
- 1943年 柯斯特 (D.W. Kerst) 首先發展臨床用的電子加速器 (betatron)。
- 1946年
- 美國成立了原子能委員會 (U.S. Atomic Energy Commission)。
 - 隨著 ACXRP 的擴展，成立了美國國家輻射防護與度量委員會 (National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)。
- 1947年 美國國家科學院建立原子彈災害委員會 (Atomic Bomb Casualty Commission, ABCC)，開始長期對廣島和長崎原子彈倖存者進行研究。
- 1950年
- 在 1950 年代放射免疫分析 (RIA) 的觀念問世，迄今碘 125 仍使用於離體試管的 RIA 檢查。
 - 在 1950 年代百萬伏 (MV) 醫用直線加速器 (LINAC) 問世。
 - 在 1950 年代勞倫斯柏克萊國家實驗室開始研究重離子加速器的臨床應用。
- 1951年 鈷 60 治療機問世。
- 1952年 美國成立輻射研究學會 (Radiation Research Society)。
- 1953年 ICRU 引入吸收劑量 (absorbed dose) 的概念。
- 1955年
- 保健物理學會 (Health Physics Society) 成立。
 - 聯合國成立了原子輻射效應科學委員會 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)。
- 1956年 聯合國成立了國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA)
- 1958年
- 聯合國原子輻射效應科學委員會出版了曝露及生物傷害的研究 (Study of Exposure and Biological Hazards) (UNSCEAR 第一份報告)。
 - 核子醫學學會 (Society of Nuclear Medicine) 成立。
- 1959年 ICRP 推薦了公眾的影響遺傳

- 劑量 (genetically significant dose, GSD) 限值。
- 1960 年
- 美國醫學物理學家協會 (American Association of Physicist in Medicine, AAPM) 成立。
 - 美國保健物理委員會 (American Board of Health Physics) 開始了保健物理學家資格證書頒發制度。
- 1962 年 英國米勒(C.W. Miller)首次發表直線加速器的臨床治療應用。
- 1963 年 美國海默遜(J. Haimson)發表 6 MV 直線加速器的臨床治療應用。庫爾(Kuhl)和愛德華斯(Edwards)發展單光子發射電腦斷層掃描(SPECT)。
- 1964 年 國際輻射防護協會 (International Radiation Protection Association, IRPA) 成立。
- 1968 年 瑞典斯德哥爾摩 Karolinska 研究所完成加馬刀的裝置。
- 1969 年 人類登陸月球開始研究太空輻射。
- 1970 年 在 1970 年代，各種鎘 99m 的標誌試劑配合閃爍攝影機大量使用於臨床診斷。
- 1973 年 英國豪斯菲爾(Hounsfield)發明 X 光電腦斷層掃描儀(CT)。
- 1975 年 為了繼續對日本原爆倖存者進行研究，美日兩國成立輻射效應基金會(Radiation Effects Research Foundation, RERF) 取代了 ABCC。
- 1978 年 ICRP 採用了有效等效劑量 (effective dose equivalent) 術語。
- 1986 年 RERF 為原子彈倖存者研製出 1986 劑量學系統 (Dosimetry System 1986, DS86)。
- 1988 年 美國國家科學院游離輻射生物效應委員會(U.S. National Academy of Sciences, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, BEIR)第 4 號報告 “氦和其它 α 發射體體內沉積對健康的危害—BEIR IV” 出版。
- 1990 年 在 1990 年代，具有 201 顆鈷 60 高活度射源的加馬刀開啟放射手術(radiosurgery)或稱為立體定位聚焦放射治療 (stereotactic focusing irradiation) 的應用。此外，放射手術亦可使用 LINAC，但應具備多葉式準直儀(MLC)、電子驗證片影像系統(EPIS)與配有 CT 模擬機等。
- 1990 年 美國國家科學院游離輻射生物效應委員會出版第 5 號報告

“受低水平游離輻射曝露對健康的危害—BEIR V”出版。

1991 年

- 國際原子能總署發布關於 1986 年 4 月車諾比爾事故 (Chernobyl accident) 對健康影響的報告。
- ICRP 發布第 60 號出版物 “ICRP 1990 年建議書”。

1994 年 美國、烏克蘭 Balarus 鑑定協議書對 1986 年車諾比爾事故後 85,000 個兒童甲狀腺疾病進行 20 年追蹤研究。

§6.3 我國放射醫學及輻防史上的紀事

1896 年 5 月間，李鴻章因簽訂馬關條約在日本遭受槍擊而在德國拍攝了可能是中國第一張頭頸部的 X 光片。

1915 年 美籍郝濟時醫師，邀請德國西門子公司薛密特 (Schmidt) 工程師修復上海醫學院紅十字醫院的 Snook-Roentgen X 光機。

1919 年 北平協和醫學院成立放射學組，從事放射線的診斷工作與教學活動。

1920 年

- 郝濟時醫師主持北平協和醫學院一部 100 kVp 的淺部 X 光

治療機，以治療頭皮癬 (tinea capitis) 一類的皮膚病。

- 在 1920 年代北平協和醫院擁有 500 mg 鐳 (^{226}Ra) 和氡 (^{222}Rn) 製造室，進行氡粒的永久插種治療癌病。

1923 年 上海法國醫院由 Lambert 醫師主持一部 200 kVp 的 X 光治療機。

1927 年 郝濟時醫師離開北平返美，由謝志光醫師接掌協和醫學院的放射醫學業務，且有美籍放射物理師威廉斯 (Marvin Williams) 協助發展。

1945 年 抗戰勝利，臺灣光復，省立嘉義醫院有一部堪用的 200 kVp 的 X 光治療機。

1950 年 臺北中央放射科的私人診所購買日製深部 X 光治療機以治療癌病。

1951 年 高雄中央放射科的私人診所購買日製深部 X 光治療機以治療癌病。

1953 年 臺北徐外科醫院購買深部 X 光治療機以治療癌病。

1955 年 臺北市陸軍第一總醫院與高雄市陸軍第二總醫院各從美援獲得一部 Picker 的深部 X 光治療機。臺大醫院獲得二部深部 X 光治療機與一部淺部 X 光治療機的美援物資。臺大醫院放射線治療業務由李文興

- 醫師擔任。
- 1955年6月2日 行政院成立原子能委員會。
- 1955年7月1日 國立清華大學在臺復校並成立原子科學研究所。
- 1955年7月18日 簽訂「中美合作研究原子能和平用途協定」。
- 1956年 臺大醫院成立同位素實驗室。
- 1957年 內政部衛生司司長吳靜籌設原子醫學實驗院於臺北市大直。籌設失利後，後來將購得的德國西門子(Siemens)鈷 60 治療機與深部 X 光治療機交撥臺北市省立中興醫院李恆如醫師主持使用。吳靜在擔任國防醫學院物理醫學系系主任與臺北市陸軍第一總醫院放射線科主任期間，熱心放射學的發展與臨床使用的推廣，成立短期 X 光診斷訓練班，對日後的放射學的發展貢獻頗大。李恆如醫師為臺灣地區第一位獲得美國放射學學會(American College of Radiology)考試合格的放射治療學專科醫師。
- 1958年 臺大醫院啟用第一部 2,000 Ci 的鈷 60 治療機，由黃淑珍醫師主持。
- 1959年 臺北榮民總醫院設立放射線科。
- 1960年 美籍郝濟時醫師返臺任國防醫學院客座教授，協助發展放射治療訓練。郝濟時醫師被尊稱為中國放射醫學之父。
- 1961年4月13日 清華水池式反應器首次達成臨界，並設立保健物理組。
- 1962年 臺北榮民總醫院放射線治療科啟用一部美國 Picker 製 2,000 Ci 同心型鈷 60 治療機，一部 Picker 製 2,250 Ci 懸吊式鈷 60 治療機，一部 2,000 Ci 的銻 137(¹³⁷Cs)懸吊式治療機，一部 120 kVp 的淺部 X 光治療機與 41 顆的鐳錠。治療業務由江澤春醫師主持、美籍史傳亞(N.M. Strandjard)醫師協助。
- 1968年 臺北三軍總醫院使用銻 137 作遠隔治療，由李恆如醫師兼任主持。
- 1968年5月9日 總統令公布原子能法，為輻射防護的法源。
- 1968年7月1日 成立核能研究所，內設保健物理組。
- 1969年10月 與國際原子能總署(IAEA)簽訂雙邊核子保防協定。
- 1969年12月 立法院通過防止核武器蕃衍條約(NPT)。
- 1970年7月27日 修正行政院原子能

- 委員會組織條例，成立綜合計畫處，核能管制處及輻射防護處。
- 1970年7月29日 行政院令發布「游離輻射防護安全標準」。
- 1970年12月3日 總統令公布行政院原子能委員會組織條例。
- 1971年7月26日 公布「核子損害賠償法」。
- 1971年12月15日 發布「放射性物質安全運送規則」。
- 1971年12月 與國際原子能總署及美國簽訂三邊核子保防協定。
- 1972年12月 我國退出國際原子能總署組織。
- 1973年1月 核能研究所臺灣研究用反應器(TRR)達成臨界。
- 1973年2月26日 發布「醫用放射線管理辦法」。
- 1973年5月25日 中華民國核能學會成立。
- 1975年12月27日 行政院同意放射性待處理物料貯存場的規劃。
- 1976年 臺大醫院啟用西門子 Mevatron XII 型直線加速器，使用 10 MV 的 X 射線與 3-11 MeV 的電子射束治療癌病。
- 1978年11月16日 第一核能發電廠一號機首次併聯發電，臺電保健物理課開始拓展業務。
- 1980年 臺北榮總成立核子醫學中心。
- 1981年1月1日 成立臺灣輻射偵測工作站及放射性待處理物料管理處。
- 1982年5月20日 蘭嶼貯存場正式展開作業。
- 1982年11月19日 通過部分食品輻射照射的處理辦法。
- 1983年 臺大醫院啟用遙控後荷式(afterloading)近接治療機，以取代鐳 226 前荷式治療。
- 1984年 臺大醫院引進電腦斷層攝影掃描儀(CT)。
- 1990年6月5日 財團法人中華民國輻射防護協會成立。
- 1991年7月10日 公布游離輻射防護安全標準第二版本。
- 1992年11月21日 臺北榮總國家多目標醫用迴旋加速器中心落成。
- 1993年9月8日 核能研究所迴旋加速器落成。
- 1993年10月16日 同步輻射加速器中心落成。
- 1993年 臺北榮總啟用 201 顆鈷 60 (~30 Ci/顆)加馬刀。
- 1994年3月 中華放射腫瘤學會出版「放射治療與腫瘤學」季刊。
- 1996年4月6日 原能會放射性物料管理局成立。
- 1996年 中華民國醫學物理學會成立
- 2002年1月4日 立法院三讀通過游離輻射防護法，是為輻射防護的新法源。
- 2002年 臺灣大學在新竹縣成立生物

醫學園區，將設質子治療機。
2002年9月10日 美國保健物理學會
同意成立「臺灣分會」。

§6.4 現行醫用輻防相關法規

現行醫用游離輻射防護的相關法規如下所示：

1. 原子能法第 26、32 條及「原子能法施行細則」第 46、47、48、49、50、51、52、60 條與附件八「醫用游離輻射安全規定」。
2. 游離輻射防護安全標準第 3、4、7、8、9、15、16、17、18、24、25、26、27、28、29、30、31、32、33、34、44、57、61、62、64 條。
3. 醫用游離輻射防護委員會導則與學術機構輻射防護委員會導則。
4. 核子醫學輻射防護措施指引。
5. 醫用游離輻射安全規定包括：醫用診斷型、移動型、牙科型 X 光機及電腦斷層掃描儀查驗登記輻射安全審查要點，X 射線裝置之安全規定，同位素安全規定，密封射源安全規定，醫用線性加速器安全規定，原子能委員會游離輻射之管制作業，原子能委員會委請各地衛生主管機關協助查核列管事項，可發生游離輻射設備及放射性物質停用核驗注意事項，申請停用、恢復使用及廢棄放射性物質或可發生游離輻射設備須知，普查醫用放射性物質及可發生游離輻射設備實施要點，可發生游離輻射設備安裝(代理輸

入)廠商輻射防護措施指引，核醫藥品代理廠商輻射防護措施計畫指引，申請醫用可發生游離輻射設備及 X 光管球庫存廠商注意事項，申請醫用可發生游離輻射設備或放射性物質執照及人員操作執照作業要點，輻射工作人員體外劑量評定技術規範，非密封放射性物質輻射防護措施計畫指引，非醫用放射線從業人員操作執照申請要點，申請「非醫用放射性物質及可發生游離輻射設備」指引，可發生游離輻射設備安裝(代理輸入)廠商及有關放射性物質人員應注意事項等，其中非醫用部分適用於基礎醫學研究。

6. 游離輻射防護法已於民國 91 年(2002)1 月 4 日經立法院三讀通過；1 月 30 日由總統公布。

完整的醫用游離輻射防護的相關法規條文可在網路查詢原子能委員會的資料，網址為 <http://www.aec.gov.tw>。

§6.5 醫用輻防的專業性

1. 醫用輻射防護的重要性

醫用輻射的蓬勃發展並日益廣泛普及。一方面在疾病的診斷與治療中發揮了非常重要的作用，另一方面如何趨利避害，盡可能避免或減少醫用輻射可能產生的潛在危害，則日益引起社會各界普遍關注。

醫用輻射防護的重要性首先表現還是人，直接關係到受檢者與患者的

健康與安全，防護的重要性不言而喻。同時，醫用輻射防護包含豐富的內容。如圖 6.1 所示，它涵蓋工作人員所受職業曝露的防護，受檢者與患者所受醫療曝露的防護，還有公眾曝露的防護，包括保障眾多醫用輻射工作場所周圍環境的安全以及合理減少醫療曝露所導致公眾的輻射劑量負擔。國際放射防護委員會所區分的三類曝露(即職業曝露、醫療曝露、公眾曝露)的防護在醫用輻射防護中全都涉及到了。針對這三類不同曝露應具體運用 ICRP 防護體系的相應原則(見圖 6.1)

不僅如此，醫用輻射防護還要考慮潛在曝露的防護問題。在施行 X 射線診斷、臨床核子醫學診斷與治療、以及腫瘤放射治療中，輻射劑量的差錯以及各種醫療照射設備故障會給患者以有害的甚至是致命的曝露。這方面直至 20 世紀 90 年代，仍有過不少付出沉重代價的教訓。所以施行各類醫用輻射還必須十分注意防範事故性醫療曝露。

醫用輻射防護的重要性還呈現在它影響面很廣。據 UNSCEAR 統計，20 世紀 90 年代初，全世界約擁有 72 萬台醫用診斷 X 射線機，年接受 X 射線檢查達 16 億人次(尚不包括日益增加的口腔 X 射線拍攝牙片)，僅此就涉及全世界近 1/3 公眾，足見其影響面之廣。據 UNSCEAR 2000 年報告書，

1991 年至 1996 年平均，全世界年接受醫用輻射診斷檢查人次已近 25 億人次，年接受醫用輻射治療約 550 萬人。醫用輻射涉及全世界 43% 以上的公眾。這些充分反映，醫用輻射影響面非常廣，醫用輻射防護的重要性不言而喻。而且醫療曝露的防護最適化很有潛力，所以亟待加強醫用輻射防護。就職業曝露的防護而言，從事放射醫學工作人員是工作人員中最大的職業曝露群體。曾有人估算全世界輻射工作人員 70% 以上在醫界。因此，無論從醫療曝露防護，還是從職業曝露防護和公眾曝露防護考慮，以及基於控制潛在曝露危險和游離輻射的醫學應用，面廣量多的醫用輻射是輻射防護領域影響面最大的重要課題。

2. 醫用輻射防護的特殊性

如圖 6.1 所概括的，ICRP 輻射防

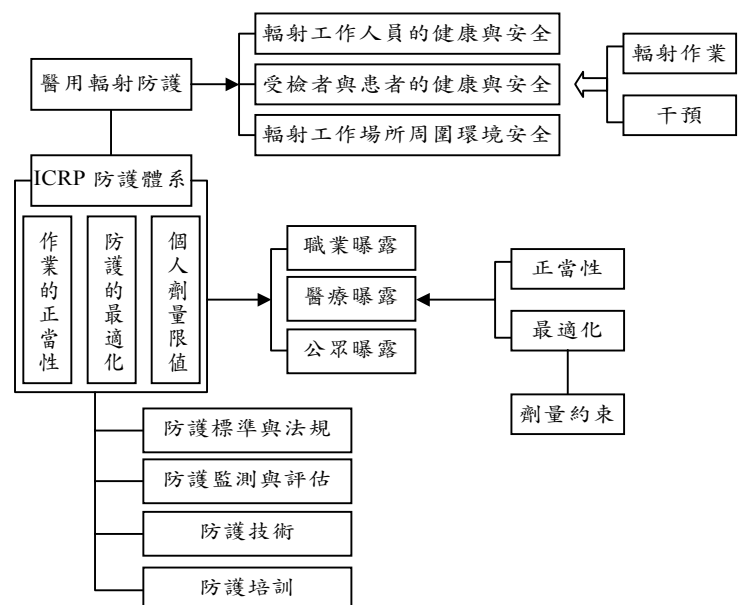


圖 6.1 醫用輻射防護體系

護體系是醫用輻射防護的指南。除了通用原則之外，應針對醫用輻射的特點採取相對應防護對策。

對放射醫學工作人員所受醫療曝露的防護，在有些醫用輻射作業中受到特定條件的限制。例如早期腔內近接放射治療，設備不能實現後荷式自動控制，須將鐳源用手工方式送入患者有關部位體腔內，工作人員所受職業曝露比較大。如今設備與技術的進步大大改善了防護。又如骨科整復，有時工作人員手部要在有用 X 射線束曝露下操作，應盡可能配戴便於操作的防護手套，並且注意間歇照射，合理控制受照劑量。X 射線診斷中的一些特殊檢查和施行介入放射學時，為保證放射學診治效果的實際需要，有關工作人員必須近台操作插導管等，或者在照射過程中用手按壓觸摸檢查部位等，顯然這就增加了對有關工作人員防護的困難。對此一方面要注重設備的更新並輔以配套防護設施，另一方面要注重操作中的各種防護措施。此類操作更應加強防護最適化。近些年介入放射學迅速發展，在介入放射學中，經皮穿刺腔內冠狀動脈成形術(PTCA)、經皮穿刺腔內血管成形術 (percutaneous transluminal angioplasty, PTA)、肝內門腔靜脈分流術 transjugular intrahepatic portosystemic shunt, TIPS)、射頻消融術(radiofrequency ablation, RA)和栓塞

術(embolization)等所導致輻射量較大，更須加強防護。醫用輻射的新進展給醫用輻射防護帶來了新問題。

受檢者與患者所受醫療曝露的特殊性，在於受檢者與患者自身係從曝露中直接獲得醫療效益，故其利益與代價的權衡比較特別。各類醫療曝露所導致劑量相差十分懸殊又顯著不均勻；同時醫療曝露易偏向注重醫療目的而忽視防護最適化。因此，醫療曝露的防護尤須加強。醫療曝露的防護只能遵守作業的正當性和防護的最適化原則，個人劑量限制不適用於醫療曝露。施行醫療曝露直接關係到受檢者與患者的健康與安全，務必特別強調避免一切不必要的曝露，並使確有正當理由的醫療曝露，在獲取不可缺的診斷資訊和恰到好處達到醫療目的的同時，把受檢者與患者所受的曝露控制在合理抑低水平。為針對醫療曝露的特點，增加防護最適化的可操作性，把劑量約束具體化，建立 X 射線診斷和核子醫學診斷的醫療曝露指導水平就是加強醫療曝露防護的新措施。對於腫瘤放射治療，要強調對病灶區施以準確的並且恰到好處的劑量，以達到治療的目的，同時盡可能減少對周圍正常組織的照射，突顯出合理性是患者防護的重要特點。近些年來，腫瘤放射治療中採用加馬刀和 X 光刀施行立體定位放射治療 (stereotactic radiotherapy)，還有提倡推廣應用 3 維強度調控順形放射治療 (intensity modulated radiation

therapy, IMRT)新技術，對提高放射治療品質大有好處，同時也對治療輻射防護提出了更高要求。

此外，醫用輻射所導致公眾曝露的防護，除了工作場所周圍環境安全的一般要求外，也有些特殊問題。例如臨床核子醫學中施行放射性藥物體內照射治療，以及個別給藥活度較大的放射性核種顯像檢查，患者在一定時間內其體內放射性活度較大，可能給親屬及其他公眾成員帶來不必要的曝露；這些患者的排泄物還可能污染環境。因此必須採取相對應防護管理措施。對接受碘 131 治療的患者，其體內放射性活度降至 400 MBq 之前不得出院。凡設置放射性核種治療的醫院，應有核子醫學病房(至少應有專用隔離觀察病室)，並應注意設患者專用衛生間等。必要時應向患者提供有關他與其他人間接觸時的防護措施方面的指南。另外，哺乳婦女如需要接受核子醫學檢查，應根據所用放射性藥物在乳汁中分泌情況

適當暫停授乳時間，以避免給嬰兒帶來不必要的照射。

3. 國際輻射防護領域的新進展

(1) 國際放射防護委員會重視醫用輻射防護

產生於國際放射大會的 ICRP，理所當然致力於倡導醫用輻射防護，其第 3 專門委員會就是專為醫學防護而設置。ICRP 把游離輻射曝露區分為職業曝露、醫療曝露、公眾曝露三類。ICRP 在其各個歷史階段的基本建議書中均論述醫療曝露防護問題(見表 6.1)。尤其 1991 年第 60 號出版物，明確提出“醫療曝露防護體系”。同時，ICRP 發表了許多與醫用輻射防護有關的專題報告。迄今(2002 年)仍有效的 ICRP 出版物中，用於指導醫用輻射防護的有 30 份。

表 6.1 ICRP 關於醫療曝露防護的基本觀點

出版物序號(年份)	關於醫療曝露防護的基本觀點
1 號(1959) 6 號(1964) 9 號(1966)	採用醫療曝露這個術語，以區別於職業曝露；曾考慮醫療曝露在全人口遺傳劑量中的分配額；發展至 9 號報告有 5 段述及醫療曝露，指出它是全人口游離輻射照射的主要人工輻射來源，應在不影響醫療效果的範圍內降低劑量。
26 號(1977)	占 21 段篇幅，較系統闡述醫療曝露的含義和應遵從正當性與最適化的管制原則，並說明與其他曝露的相關問題。此後發表了 33、34、44、52、53、41、49 號出版物等專題報告，並於 1983、1984、1985、1987 年會議聲明中及時補充有關建議。尤其「放射診斷中患者的防護」(34 號報告)、「放射治療中患者的防護」(44 號報告)和「核子醫學中患者的防護」(52 號報告)成為配套系列指南。
60 號(1991)	14 段述及醫療曝露。明確提出醫療曝露的防護體系，進一步強調醫療曝露作業的正當性和防護最適化，重申劑量限值不適用於醫療曝露。對正當性和最適化原則，乃至醫療曝露含義等均有新的補充和發展。特別是在防護最適化中建議考慮劑量約束。還進一步強調注意保護胚胎和胎兒。

直接用於指導醫用輻射防護的 ICRP 出版物有：

ICRP 73 號出版物「醫學中的放射防護與安全」(1996)

ICRP 57 號出版物「醫學和牙科工作人員的放射防護」(1990)

ICRP 62 號出版物「生物醫學研究中的放射防護」(1992)

ICRP 33 號出版物「醫用體外曝露源的游離輻射防護」(1982)

ICRP 34 號出版物「放射診斷中患者的防護」(1981)

ICRP 44 號出版物「放射治療中患者的防護」(1985)

ICRP 52 號出版物「核子醫學中患者的防護」(1987)

ICRP 53 號出版物「放射性藥物所導致患者的輻射劑量」(1987)

1992 年在發表 ICRP 62 號出版物的 Annals of the ICRP 後，又附加「放射性藥物所導致患者的輻射劑量，ICRP 53 號出版物補篇 1」

- 國際放射防護委員會關於現行放射診斷中患者防護原則的概述(1993)
- 國際放射防護委員會關於現行核子醫學中患者防護原則的概述(1995)

ICRP 80 號出版物「放射性藥物所致患者的輻射劑量，ICRP 53 號出版物補篇 2」(1998)

ICRP 84 號出版物「妊娠與醫用輻射」(2000)

ICRP 85 號出版物「避免由醫用干預步驟的輻射傷害」(2000)

ICRP 86 號出版物「病人經歷輻射治療防止意外曝露」(2000)

ICRP 87 號出版物「電腦斷層掃描病人劑量的管理」(2000)

除了上述 13 份編號和 3 份未編號出版物外，以下 6 份出版物從輻射生物效應角度與醫用輻射防護和放射治療密切相關。

ICRP 41 號出版物「游離輻射的非機率效應」(1984)

ICRP 49 號出版物「輻射對胚胎和胎兒腦發育的影響」(1986)

ICRP 58 號出版物「確定效應的相對生物效能(RBE)」(1989)

ICRP 59 號出版物「皮膚劑量限制的生物學依據」(1992)

ICRP 79 號出版物「癌的遺傳易感性」(1998)

ICRP 83 號出版物「多因素疾病的危險度評估」(1999)

當然，ICRP 通用出版物中有些與醫用輻射防護也緊密關聯。例如以下 11 份出版物：

ICRP 37 號出版物「輻射防護最適化的代價與利益分析」(1983)

ICRP 60 號出版物「國際放射防護委員會 1990 年建議書」(1991)

ICRP 64 號出版物「潛在曝露的防

- 護：概念架構」(1992)
- ICRP 74 號出版物「體外曝露放射防護中使用的換算係數」(1997)
- ICRP 75 號出版物「工作人員輻射防護的一般原則」(1997)
- ICRP 78 號出版物「工作人員攝入放射性核種的個人監測」(1997)
- ICRP 84 號出版物「妊娠與醫療放射線」(1999)
- ICRP 85 號出版物「從事醫療介入手續避免輻射傷害」(2000)
- ICRP 86 號出版物「病人接受治療的意外防止」(2001)
- ICRP 87 號出版物「電腦斷層攝影的病人劑量管理」(2001)
- ICRP 88 號出版物「攝取放射性核種的母親導致胚胎與胎兒劑量」(2001)
- (2) 國際基本安全標準(IBSS)強調醫療照射防護

國際原子能總署安全叢書 115 號(1996 年)發表的「國際游離輻射防護與輻射源安全基本安全標準」(IBSS)，由聯合國糧食與農業組織(FAO)、國際原子能總署(IAEA)、國際勞工組織(ILO)、經濟合作發展組織核能署(OECD/NEA)、泛美衛生組織(PAHO)、世界衛生組織(WHO)等 6 個國際機構聯合倡議制定，得到有關國際組織和世界各國支援。是國際輻射防護大合作的產物，

也呈現了輻射防護領域的新進展。IBSS 把醫療曝露防護放到很重要的地位上。在標準的詳細要求中，附件 II 醫療曝露的篇幅比職業照射、公眾曝露等其他 5 個附件的篇幅都長。並且把 ICRP 第 60 號出版物中關於醫療曝露防護最適化中引入劑量約束概念具體化，推薦建立放射診斷的醫療曝露指導水平用於推動醫療曝露防護。

(3) UNSCEAR-2000 報告書重視醫用輻射

聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)是 1955 年聯合國大會決定成立，並被授權負責廣泛收集和分析評述各種游離輻射來源的劑量水平與生物效應的權威機構。UNSCEAR 自 1958 年向聯合國提交第一份報告以來，迄今(2002)年已經正式出版了 14 份報告書。UNSCEAR 報告書是研究游離輻射水平與效應的重要文獻。報告書為輻射防護法規標準的研究制定與主管工作、為輻射風險評估、為相關學科科學研究等提供了很有價值的依據。UNSCEAR 報告書及時反映了游離輻射水平與效應研究的新進展。全世界各國、各地區各類型醫用輻射的基本狀況，應用頻度和劑量水平均包括在 UNSCEAR 報告書中。綜合分析顯

示，人類所受游離輻射曝露中，醫療曝露是最大的人工游離輻射來源。因此醫用輻射一直是委員會關注的重點之一。

UNSCEAR 2000 報告書「游離輻射來源與效應」是迄今 14 份報告書中篇幅最長的一部，英文版大 16 開本共 1220 頁，分 I、II 卷出版發行。第 I 卷按慣例先刊出委員會向聯合國大會的報告正文(17 頁)。隨後是內容非常豐富的關於游離輻射源的 5 個科學附件：A.劑量評估方法學(63 頁)，B.天然輻射源的曝露(73 頁)，C.人工輻射源對公眾的曝露(135 頁)，D.醫用輻射曝露(203 頁)，E.職業輻射曝露(157 頁)。第 II 卷刊出關於游離輻射生物效應的 5 個科學條件：F. DNA 的修復和突變(72 頁)，G.低輻射劑量的生物學效應(103 頁)，H.輻射和其他因素的複合作用(119 頁)，I.輻射致癌的流行病學評估(153 頁)，J.車諾比爾事故的曝露

和效應(115 頁)。僅從 10 個科學附件的篇幅看，附件 D.醫學輻射曝露遙居首位，反映了國際社會對醫療曝露這個最大且不斷增加的人工游離輻射來源的充分關注。

4. 健全醫用輻射標準體系

(1) 健全防護法規標準體系的要素

國際原子能總署等國際組織在總結各國輻射防護經驗基礎上，大力倡導加強各國輻射防護基礎結構建設。輻射防護基礎結構的第一要素就是建立健全輻射防護法規標準體系。這是因為輻射防護法規標準是：游離輻射劑量學、放射生物學、放射衛生學、放射損傷防治、輻射防護技術、防護管理學以及輻射應用等諸多相關學科科技成果的結晶，是輻射防護管理經驗的昇華，因而是指導所防護作業的依據。輻射防護法規標準的舉足輕重地位已得到普遍共識，成為加強輻射防護基礎結構的首要因素。

(2) 醫用輻射標準的內涵與作用

經由前述的分析可見，醫用輻射防護涉及面很廣。為醫用輻射防護提供指導依據的醫用輻射防護標準，顯然也必須包含放射醫學工作人員所受職業曝露的防護，受檢者與患者所受醫療曝露的防護，以及保障醫用輻射工作場所周圍環境的安全和減少公眾曝露。同時還應加強指導防範事故性醫療曝

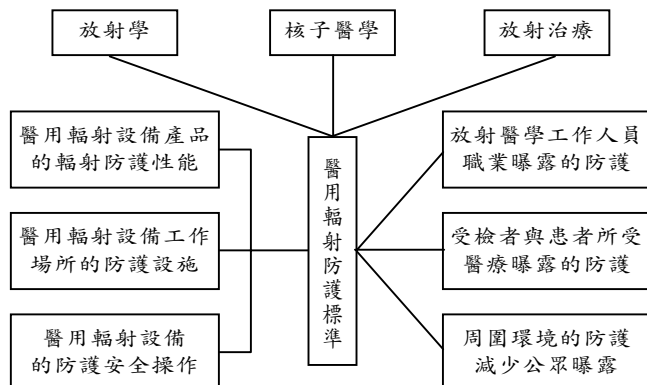


圖 6.2 醫用輻射防護標準的內涵與作用

露。醫用輻射防護標準要遵照基本標準原則，在具體指導各種醫用輻射作業中切實發揮作用，就必須從各類醫用輻射設備的防護性能、安裝各類設備工作場所的防護設施和相關設備的防護與安全操作等各方面規定具體要求。圖 6.2 概括歸納了醫用輻射防護標準的內涵與作用。

(3) 構建醫用輻射標準體系

標準是對重複性事物或概念所做的統一規定，它以科學、技術和作業經驗的綜合成果為基礎，以特定形式發布，作為共同遵守的準則和依據。而標準體系則是一定範圍內的標準按其內在聯繫形成的科學有機整體，它圍繞一個特定標準化目的構成層次分明、相互配套的科學的體系。如圖 6.3 所示，它是基本標準下層的次級標準體

系。新基本標準雖然突顯加強了管制醫療曝露的內容，但畢竟只能規定有關輻射防護的大原則。鑒於醫用輻射防護涉及面很廣，並有其特殊性，必須針對各類醫用輻射防護事項問題，把防護基本原則逐一具體化，分門別類制定一系列專項標準。這些標準科學實用、分類合理、相互配套，都圍繞醫用輻射防護這個目標形成醫用輻射防護標準體系。

這個體系並列 4 個分支：(1)醫用輻射防護基礎通用標準，(2)放射學(含介入放射學)輻射防護標準，(3)核子醫學輻射防護標準，(4)輻射腫瘤學輻射防護標準。第(1)分支的專項標準應有醫療曝露輻射防護術語、放射醫學工作人員的防護培訓規範、醫用輻射工作室屏蔽防護設計要求、防護材料屏蔽性能標準及檢測方法、志願者所受醫療曝露管制原則、生物醫學研究中的輻射防護等。第(2)、(3)、(4)三個分支是針對三大類醫用輻射分別制定專項標準系列。由於放射學(介入放射學)、臨床核子醫學、輻射腫瘤學各有自身分類(參見圖 5.1)，故三個分支系列標準專案數不求相同，但均可劃歸如圖 6.3 虛線所分列四方面標準化範疇。相關設備的產品防護性能以及安裝、使用中的防護要求在醫用輻射防護標準體系中必然占有相當比例。鑒於醫療曝露防護的重要性，

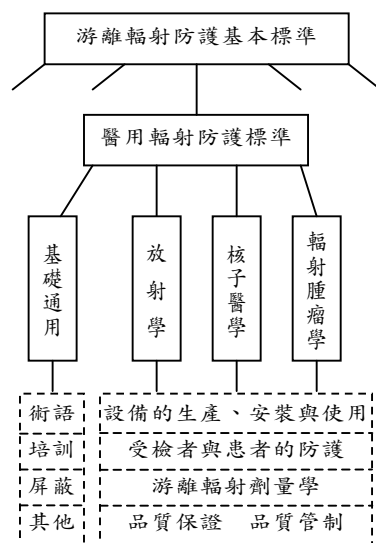


圖 6.3 醫用輻射防護標準體系架構

針對不同類型醫用輻射均應制定相應的受檢者與患者防護專項標準。為在各種診斷中合理減少受檢者劑量和在各種治療中給予恰當劑量，三大類醫用輻射均應有適合各自特點的游離輻射劑量學方面的專項標準。醫用輻射的品質管制與品質保證同輻射防護有共同目標，品質保證是從根本上改善受檢者與患者防護，所以醫用輻射防護標準體系還對應有一些相關的品質保證與品質管制的專項標準。第(2)、(3)、(4)三個分支按上述四方面範疇分別制定相對應專項標準，基本上包容了應規範的醫用輻射防護行為。按此架構形成的體系，應按輕重緩急和成熟程度逐步健全。各專項標準還應適時修訂，不僅從標準專案上，而且從內容上真正做到相互配套。健全醫用輻射防護標準體系無疑是推動醫用輻射防護的重要保證。

§6.6 結語

現代化的醫院體系一定有放射醫學的臨床應用與教學活動，從基本的 X 光片診斷到最先進的核醫造影、放射手術、三度空間順形治療(3-D conformal therapy)與數位遞減血管攝影(digital subtraction angiography，簡稱 DSA)等，都關係到醫療人員、病患與其家屬、周圍環境等的輻射安全，所以輻射防護應

確實融入放射學相關的科技，共同營造一個符合輻射安全的放射學臨床應用與教學活動的空間。

參考文獻

1. International Atomic Energy Agency, **International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources**, IAEA Safety Series No.115, Vienna (1996)
2. International Commission on Radiological Protection, Genetic Susceptibility to Cancer, ICRP Publication 79, **Annals of the ICRP 28**, No.1/2, 1 (1998)
3. International Commission on Radiological Protection, Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals, Addendum to ICRP Publication 53, also includes Addendum I to ICRP Publication 72, ICRP Publication 80, **Annals of the ICRP 28**, No.3, 1 (1998)
4. International Commission on Radiological Protection, Risk Estimation of Multifactorial Diseases, ICRP Publication 83, **Annals of the ICRP 29**, No.3/4 (1999)
5. International Commission on Radiological Protection, Pregnancy and

- Medical Radiation, ICRP Publication 84, **Annals of the ICRP 30**, No.1, 1 (2000)
6. International Commission on Radiological Protection, Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedure, ICRP Publication 85, **Annals of the ICRP 30**, No.2, 1 (2000)
7. International Commission on Radiological Protection, Prevention of Accidental Exposures to Patients Undergoing Radiation Therapy, ICRP Publication 86, **Annals of the ICRP 30**, No.3, 1 (2000)
8. International Commission on Radiological Protection, Managing Patient Dose in Computed Tomography, ICRP Publication 87, **Annals of the ICRP 30**, No.4, 1 (2000)
9. 鄭鈞正 游離輻射醫學應用的輻射防護 兩岸醫用游離輻射防護研討會 臺北市 2001年4月26日
10. 張寶樹 臺灣醫用游離輻射防護現況 兩岸醫用游離輻射防護研討會 臺北市 2001年4月26日
11. 張寶樹 **醫用保健物理學** 俊傑書局 臺北市 (2001)

第七章 學術界的輻防

§7.1 前言

輻射防護的教學和研究，學術界責無旁貸。在民國 49 年(1960)代初期，由於清華大學裝設核反應器及相關設施，因此陸續舉辦了輻射防護的短期訓練班，受訓學員遍及產、學、醫各界。正式把保健物理列入研究所的課程係於民國 51 年(1962)春季，任課老師為來自國際原子能總署(IAEA)的美籍專家布雷立(Frank J. Bradly)。當時清華大學原子科學研究所的學生人數並不多，但每堂課都座無虛席。

在研究方面清華大學的熱發光劑量計 (thermoluminescence dosimeter, TLD)、核能研究所的輻射度量標準、輻射偵測中心的環境偵測、以及近年來各相關機構配合醫學物理學的相關研究，屢有佳作。臺電的實務經驗回饋，也促成研究的好題目。

§7.2 清華大學

民國前 3 年(西元 1909)清廷設立遊美學務處，以美國退還的庚子賠款，選派學生赴美留學。1911 年設於北京清華園的「清華學堂」正式開學。1912 年改名為「清華學校」。1928 年改名為「國

立清華大學」。政府遷臺後，於民國 44 年(1955)行政院組設「清華大學研究院籌備委員會」，決定校址設於新竹市赤土崎，先設原子科學研究所。1956 年 9 月招考原子科學研究所首屆研究生 21 人。

1960 年核子工程館、反應器實驗館、以及同位素館陸續完工。保健物理組則設於反應器實驗館(1963 年改名為梅貽琦紀念館)。在 1960 年教學部門分為核子物理、核子化學、核子工程三組，技術部門則分為反應器組、同位素組、保健物理組、科學儀器組四組，同屬於原子科學研究所。

清華水池式反應器(俗稱原子爐)於 1961 年 4 月 13 日達到臨界，是年 12 月 2 日舉行落成典禮。

在清華水池式反應器於 1961 年 4 月 13 日達成臨界之前，國際原子能總署的保健物理專家美國籍 Per Grande 先生於 1960 年 3 至 9 月到清華大學任職。他於 1961 年建議在臺灣設立國家輻射防護處 (National Radiation Protection Service, NRPS)，並建議 IAEA 再派遣另一專家來華訪問島上的輻射產生設施。他復建議清華大學的保健物理組應具有相當的權限(authority)，以及所有放射化

學作業要在同位素實驗室進行。另在臺灣糖業研究中心建造一專用焚化爐以減少放射性廢棄物的體積。

在 1962 年 IAEA 派遣布雷立先生來清華，自 1962 年 5 月 21 日至 6 月 1 日他和李名立教授環島訪問所有的輻射用戶並作改善的建議。是時清華保健物理組已具有膠片佩章、環境偵測、地區監測、射源管制、以及廢棄物管制等能力。他又在清華大學原子科學研究所開課，介紹保健物理新知，為我國講授保健物理的第一人。布雷立的重要建議如下：

- 設立國家輻射防護處
- 在清華設立放射性廢棄物處理設施中心
- 在清華設立保健物理科系
- 為醫事人員設立安全使用游離輻射課程
- IAEA 可思考臺灣核能發電的可能性。

1975 年原子科學研究所招收保健物理學研究生。1984 年原屬於原子科學研究所的技術部門四個組獨立成為「原子科學技術發展中心」，惟保健物理組的業務仍保持原貌，科學儀器組則改名為儀器組，並兼負范氏加速器的運作業務。

1. 人事

自民國 49 年(1960)成立以來，保健物理組歷任主任(後來改敘為組長)為李名立、段維、翁寶山、董傳中、王天戈、歐陽敏盛、李四海、許俊男、

鄧希平、陳坤焙、趙君行諸先生。

2. 設備

- 熱發光人員劑量計實驗室
- 輻射偵檢儀器校正實驗室
- 全身計測實驗室
- 放射性核種分析實驗室
- 輻射劑量度量與應用研究室

3. 支援教學與研究

- 支援原子科學系有關環境、輻射度量、輻射應用、以及保健物理等課程的教學與講習。
- 在研究方面以輻射度量、校正、以及劑量評估為主。
- 在民國 79 年(1990)以前曾舉辦多次輻射防護訓練班，迨財團法人中華民國輻射防護協會(簡稱輻協)於民國 79 年成立後，訓練班的業務才轉移給輻協(見本章的附錄)。

4. 服務

- 對校外提供技術服務，包括人員劑量計讀、儀器校驗、放射性核種分析、輻射安全評估等。
- 在行政院原子能委員會尚未完全運作之前，於民國 56-60 年間支援原能會的技術性業務。

民國 81 年(1992)原子科學系成立，設立保健物理學程。

5. 研發特色

- 研製膠片佩章
- 熱發光劑量計的研發與劑量度量，圖 7.1 顯示貼上熱發光劑量計的假體在反應器量測中子與加馬劑量的情形。

- 高劑量度量技術的研發，如化學劑量計(例如 Frické)、輻射色染(radiochromic dye film, RDF)光子激化劑量計等。
- 放射性核種分析技術應用於環境科學、地球科學、天然放射性物質的研究。

清華大學在核能與輻射的教學與研究是臺灣的先驅，孫芳鐸教授的「調寄望江南」曰：

清華奮！
竹塹關榛蕪，
造福欣看驅核子，
鑄人努力鼓洪爐，
燦爛展新圖。

另前駐阿根廷大使王之珍先生也贈一對聯曰：

科技更新核能崛起迎時代，



圖 7.1 熱發光劑量計在清華水池式反應器量測劑量。

教學相長洪爐陶冶育英才。

核能研究所是從事原子能科技的研發機構。核研所係於民國 54 年 4 月始籌建，到民國 57 年 7 月 1 日正式成立，民國 77 年 10 月 1 日歸建於行政院原子能委員會。

全所在所長、副所長之下設置 11 個功能組(包括保健物理組)、兩個委員會及四個支援單位。匯集各類不同專業人才，以應用核能科技，增進民生福祉，確保核能安全為研究發展目標。保健物理組歷任組長為劉國鈺、蔡昭明、陳為立、蘇獻章、蘇明峰、邱志宏諸先生。

核研所位於桃園縣龍潭鄉，近鄰石門水庫，環境優美，所內研發設備齊全。

核能研究所的輻射防護與偵測的研究發展，其重點為輻射防護應用研究與精進輻射防護技術，包括五大項：

1. 輻射度量技術

建立及維持游離輻射標準，提供國內二級校正實驗室與放射治療所需的量測標準追溯，以及協助推動中華民國實驗室認證體系，執行能力試驗，使國內輻射偵測儀器校正與人員體外劑量偵測的技術與品質能趨於一致，由經濟部標準檢驗局於民國 80 年 7 月委託核研所建置實驗室的部分設備如圖 7.2 所示(見書末的附錄四)。此外，核研所也建立二級校正實驗室，提供各類輻射防護儀器與劑量計的校正服務，期使國內的輻射應用能更準確與更安全。

§7.3 核能研究所

2. 加強輻射劑量評估技術研究

源起於輻射屏蔽的計算評估技術，拓展至相關領域的應用，其主要項目為環境輻射劑量評估、核能設施緊急應變劑量評估及醫學物理劑量評估。在環境輻射劑量評估方面，配合環境保護意識提昇及輻射相關法規對環境輻射劑量限值的嚴格要求，建立輻射設施的直接輻射、向天輻射(sky shine)及其放射性氣、液體外釋的劑量評估技術。在核能設施緊急應變劑量評估方面，為健全我國完善的核能電廠緊急應變體系，建立核能電廠緊急應變劑量評估系統，結合即時預報氣象及外釋核種等事故資訊，進行環境民眾劑量評估，提供決策者關於的事故的早期民眾防護行動建議。在醫學物理劑量評估方面，除利用蒙地卡羅(Monte Carlo)計算方法，進行中子及光子體外照射防護劑量評估，並配合加強原子能科技在醫學診療的應用安全與效益，落實原子能科技在社會民生福祉與永續發展上的目標，積極發展體素(voxel)蒙地卡羅計算方法，應用於核子醫學、放射治療，可得到更精確的體內、體外輻射劑量結果，提昇醫療品質。

3. 輻射安全防護

核研所既隸屬原能會，除本身各項輻射作業場所及周圍環境的輻射安全管制外，仍須協助原能會處理國內各項輻安技術支援及異常事件規



^{60}Co 空氣克馬照射系統



^{60}Co 水吸收劑量校正系統



自由空氣游離腔(低能量)

圖 7.2 國家游離輻射標準實驗室部分設備

劃處理等。例如放射性污染鋼筋事件處理、輻射道路偵測評估、鋼鐵廠的輻射異常物接收處理、醫用 X 光機安全稽核，以及近期(民國 91 年)甚囂塵上的輻射源普查等，有效保障社會大眾安全。

為因應作業場所的輻射安全需求，核研所早期即已集合群力，完成游離輻射防護彙萃，培育國內輻防專業人員不計其數。民國 81 年(1992)訓練工作轉移給新成立的財團法人中華民國輻射防護協會(見本章附錄)。另為及時監督輻射作業場所異常應變，核研所已開發完成輻射監測中心，有效整合(1)輻射作業場所的監測系統，(2)人員輻射劑量管理系統，(3)環境輻射監測系統。不論是設施內的輻射異常狀況、工作人員接受劑量逾越規定仍進入管制地區工作、或環境監測系統示警，督導階層均能於第一時間接獲示警訊號，查核作業場所的應變品質。

4. 保健物理技術服務

核能研究所保健物理組為了服務國內輻射作業場所的輻射安全作業，已建立多項專業技術及實驗室。這些專業技術除支援核研所輻防安全領域的作業外，亦對國內輻射作業機構提供專業技術服務，服務項目包含：(1)人員體外劑量評估，(2)輻射偵檢儀器校正，(3)環境與生物試樣放射性核種分析，(4)防護面具與空氣濾層檢測，

及(5)人員染色體變異分析等。其中(1)至(3)項已獲得中華民國實驗室認證體系(Chinese National Laboratory Accreditation System, CNLA)的認證；第(4)項服務則獲得我國經濟部標準檢驗局 ISO 9002 認證。各項技術服務的計測品質獲得認可，且符合國際標準化組織的品質要求。此外，核研所保健物理組亦秉持“專業、技術、品質”的信念，為國內同業提供全方位高品質的服務。

5. 輻射偵檢系統儀具的研發

核研所偵檢儀器的開發，從偵檢器的製造到系統組裝，均達一定的水準。如碲化鎘偵檢器，掌上型輻射偵測儀，並已成功技轉民間產業製造、生產。核研所研發的熱發光劑量計及輻射偵測車有助於對輻射屋偵測。

民國 87 年 7 月 1 日核研所慶祝成立 30 周年所慶時，王培亭先生寫一首詩描述核研所的成就：

慘澹經營三十年，
輝煌成果史無前；
核能科技誰先導，
端賴吾儕猛著鞭。

由此詩可窺見核研所事蹟的端倪。

§7.4 同步輻射研究中心

民國 82 年(1993)10 月 16 日為我國科技史上一個重要的日子，耗資新台幣 28 億，費時 10 年，由國人自行設計興建的臺灣第一座同步輻射光源於這一天在新竹科學工業園區落成啟用了。行政院同步輻射研究中心(圖 7.3)籌建處在國內學術界與工業界的支持下，成功地完成了這部世界先進的大型實驗設施，使我國的科技研究環境跨入一個新紀元。

同步輻射研究中心，一個備受關注的大型開放式研究機構，已經跨越時空悄悄地將超新星(Supernova)的光芒帶入科技領域之中，迎接次微米(奈米)時代的來臨，開創國內原子能和平用途嶄新的一頁。本節將簡介同步輻射的特性、應用、籌建過程及運轉現況。另外亦介紹同步輻射研究中心在安全管理與輻射防護方面的作法。在籌備階段，中心的輻射及操作安全組長為江祥輝先生，民國 82 年由王昭平先生接任迄今(民國 91 年)。民國 91 年 5 月立法院三讀通過中心改制為財團法人國家同步輻射研究中心，自民國 92 年元旦起生效。

1. 同步輻射的原理

加速中的帶電粒子都會發出電磁波。在圓形軌道上以接近光速的速度運轉的帶電粒子，因為受到研場偏轉的作用，所以會沿著軌道切線的方向發出電磁波(圖 7.4)。這種輻射現象係於 1947 年首次在電子同步加速器(electron synchrotron)中被觀察到，故稱為同步加速器輻射，簡稱同步輻射。

其實在大自然中即存在著同步輻射光源，夜晚星空的蟹狀星雲(Crab Nebula)中的藍白色光，乃是高能電子在磁場甚弱的星雲中所放出的連續同步輻射光。由於質量小的帶電粒子較易產生輻射，因此目前的同步輻射均由最輕的帶電粒子(電子或正子)，經加速至趨近於光速時產生。



圖 7.3 行政院同步輻射研究中心鳥瞰圖

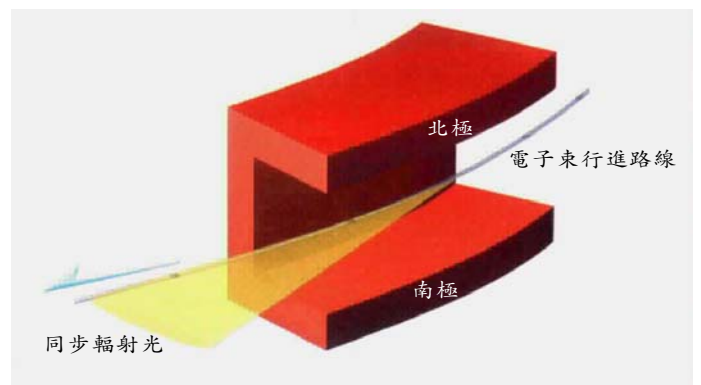


圖 7.4 在儲存環內作等速圓周運動的電子會沿著圓弧的切線方向輻射電磁波

西元 1947 年，美國通用電器(GE)

公司(又譯為奇異公司)的研究人員在其 70 MeV 的電子同步加速器裏觀察到電磁輻射，定名為同步加速器輻射(synchrotron radiation)，簡稱同步輻射。

同步輻射現象是高速電子受力加速必然的結果，也是電磁理論基本原理之一。遠在西元 1054 年，宋朝的觀察天象者，即留下了天關星附近超新星爆炸的紀錄，清楚地描述了高能電子在星雲磁場作用下放出藍白色光的情形。若非當時電磁理論尚未發展完成，同步輻射也許就該改稱為天關光源。在夜晚星空常見的蟹狀星雲，就是大自然的同步輻射，而宋朝先輩觀察到的天象就是它。同步輻射研究中心光束線尾看到的同步輻射，如經細心的觀察比較，可以發現兩者具有相當程度的類似。

同步輻射光源具備光斑小、亮度高、準直性好、具可調的真空紫外光至 X 光連續光譜、高偏振性、脈衝時間結構、超高真空環境等特性，是基礎和應用科學研究最好的探針。隨著科技不斷的進步，研究需求不斷的提昇，同步輻射設施已由 1970 年代附屬於高能物理實驗設施的第一代機器，演變為 80 年代專為同步輻射研究的第二代機器，再演變為 90 年代具有低發射度及長直段插件的第三代高亮度機器，持續在科技研究方面扮演重要的角色，引導人類不斷的創新與突破。

2. 同步輻射的應用

同步輻射應用的領域非常廣泛，舉凡物理、化學、生物、醫學、電子、材料等學門，都可以見到它傲人的成就。過去在科幻小說內常見的情節，如次微米矽晶片電路、高分子結構解析、X 光血管照相及微機械馬達等，都已成為同步輻射研究的成果。經同步輻射光照射後，電子顯微鏡下顯現的矽藻(diatom)內部結構圖像清晰，此類顯像實驗可以在很短的時間內完成，且在大氣中或氬氣中都可以進行，大大減少樣本被光源破壞的可能性，而且還提供了活體觀察的機會，對分子結構解析有很大的助益。利用同步輻射光進行心臟冠狀動脈血管照相經影像處理後，清晰的心臟血管照片，可以減低病人注射碘的劑量，縮短心臟顯影所需的時間，大大降低心臟檢查的不舒適性，是病患的一大福音。利用同步輻射光刻出的鍍齒輪，它的大小只有螞蟻手掌般大小，是微機械馬達問世的主要功臣。目前這種技術已臻成熟，國內新光人纖公司已和同步輻射中心建立合作計畫，共同研發製造超細纖維紡口，自行開發與改進抽取超細纖維的技術。

3. 籌設的始末

我國籌建同步輻射設施的構思始於民國 67 年間，主要的考量在建立最先進的基礎研究環境，吸引海內外人才，使科技根留臺灣，並得以迎頭趕

上國際科技水準。民國 70 年國科會成立「同步輻射可行性研究小組」，開始嚴謹評估設立同步輻射設施的可行性。歷經一年的可行性研究，研究小組提出國內有能力興建同步輻射設施的結論，為同步輻射研究中心的誕生跨出關鍵性的第一步。民國 72 年 7 月行政院核定設立「同步輻射研究中心」，並成立指導委員會，由袁家驩先生擔任主任委員，先後聘請丁肇中、李遠哲、吳大猷、吳健雄、浦大邦、張明哲、閻振興、鄧昌黎、蔣彥士、錢思亮、陳履安、夏漢民、郭南宏、劉兆玄、黃鎮台、翁正義、蔡清彥、魏哲和、史欽泰、沈元壤及陳長謙諸先生為委員，負責籌劃興建同步輻射研究中心的工作。民國 74 年 9 月「同步輻射研究中心籌建處」成立，負責興建同步輻射設施的團隊組成，正式展開軟硬體的建設工作。民國 75 年 8 月建址選定在新竹科學園區西北角，破土開始動工。民國 80 年組件量產開始，民國 81 年展開儲存環安裝，民國 82 年 8 月試車運轉成功，儲存環儲存電流超越設計規格，民國 82 年 10 月由李登輝總統按鈕正式啟用。民國 83 年 4 月起正式開放供學術研究機構使用。一連串的進展，使臺灣成為亞洲第一個擁有最先進同步輻射設施的國家，臺灣光源 (Taiwan Light Source) 設施，即同步輻射研究中心的同步光源系統也與歐洲的同步輻射設

施(ESRF, 6 GeV)、美國加州大學柏克萊校區的進步型光源實驗室(ALS, 1.5 GeV)及意大利的光源實驗室(Elettra, 2.0 GeV)並駕其驅，同為當時世界上運轉中的第三代同步輻射設施。韓國浦項光源設施(PLS, 2.0 GeV)也急起直追。

臺灣光源設施的主要系統包括一個 50 MeV 電子直線加速器，和一座 120 公尺長六邊對稱的超高真空儲存環，系統構造如圖 7.5 所示。臺灣光源設施目前可提供 4 到 15000 eV 的同步輻射光源給研究人員使用，可用的光束線數目為 20 條，不僅可進行的研究範疇更加的寬廣，臺灣科技及產業界也將獲得更多及更好的光源使用機會，從事跨時代的高科技探索。

臺灣光源設施運轉的模式可以概分為注射和儲存兩種。注射運轉時會有大量的電子損耗，是輻射劑量率最高的時候。注射的目的在將加速器加速後的高能電子注入儲存環，用以補充儲存環損耗的電子射束，目前約僅需不到三分鐘的時間即可注滿儲存環額定儲存電流 200 mA。儲存運轉時電子損耗的數量非常的少，高能電子幾乎都維持在儲存環超高真空環境下繞行，輻射劑量率微乎其微，研究人員可安全地利用光束線引出的高品質同步輻射進行實驗，這段期間約可維持 8 小時。

4. 安全管理

在任何一個研究或企業機構裏，安全應該是實驗過程及工作推展的一環，不應該是獨立或分離的業務。就像研究整合、科學定律及財政管理一

般，安全是文化和經營藝術結合的產物。

硬體的設備在安全防護上可以發揮很大的效果，例如消防系統、規

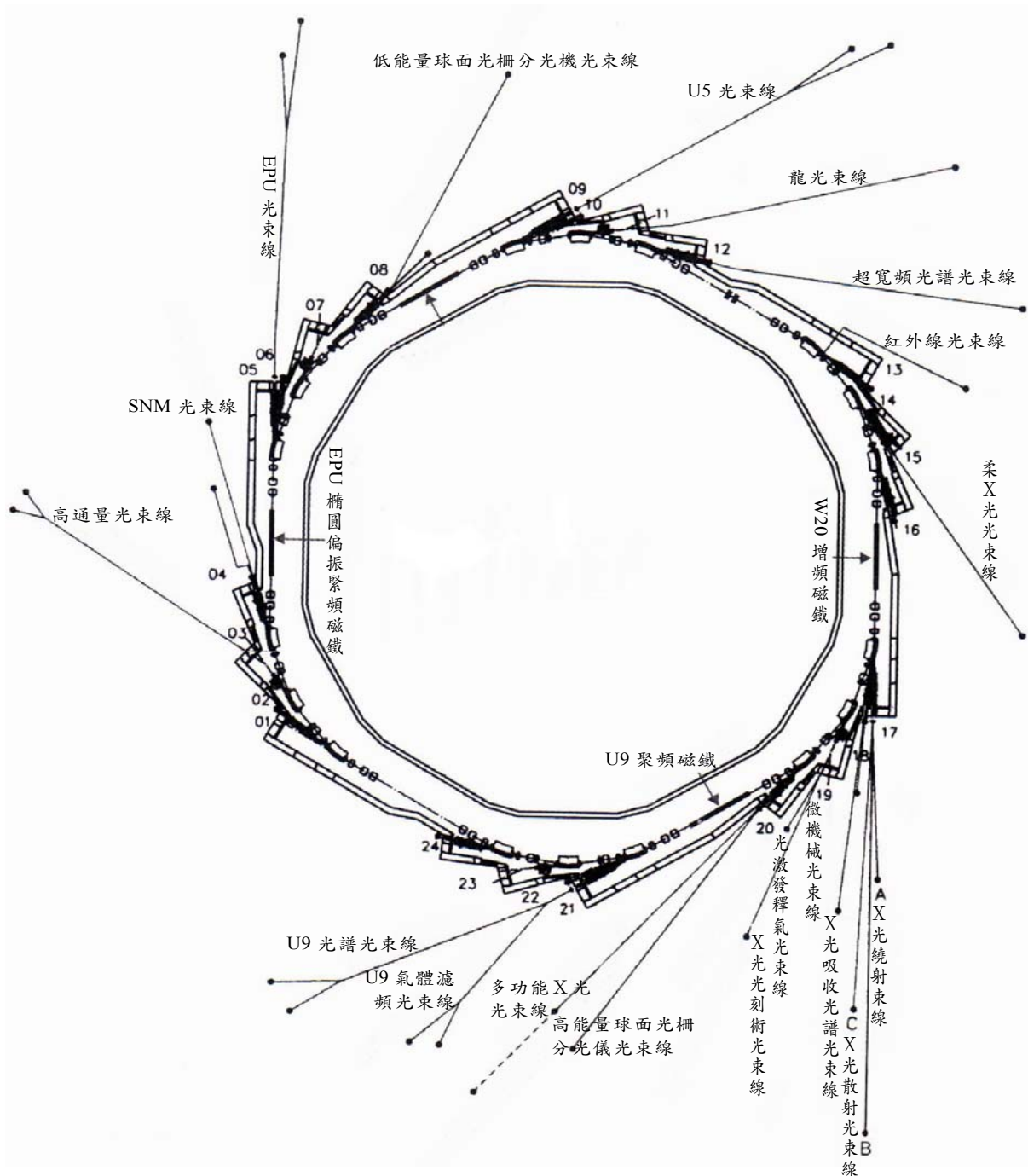


圖 7.5 光束線配置圖

劃良好的緊急出口、保全警衛系統及適當的工具等，都可以使意外發生的機會降低，傷害的程度減小。惟任何安全計畫最重要的部分是安全管理，它的目標是要讓安全融入工作之中，使員工們自動自發的注意且遵守安全守則，根本隔絕事故發生的機會。

對一個類似同步輻射研究中心的大型開放式研究機構而言，有一大部分的使用者並非中心的員工，他們擁有各自的想法與行為，對安全的要求有獨立的判定標準，加上有部分的研究設備，如光束線或實驗腔等，是由他們建造及管理的，並非中心的財產，無法行使強制規範的措施。如何使他們與中心員工一起接受標準相同的安全要求，是安全管理上必須考量的重點。

同步輻射中心的安全政策如下：

- (1) 對所有中心的員工、外來的用戶及參觀的訪客提供一個安全及衛生的工作場所。
- (2) 以公眾利益為依歸，嚴密監控有害物質的排放，將環境衝擊降至最低。
- (3) 建立緊急應變能力，確保意外事故發生時，不致危害中心的建築物與設備，且不會影響研究的進行。

而中心安全措施計畫的目標為：

- (1) 中心內任何的作業必須遵循所有

安全規範及政府法令的規定。

- (2) 所有牽涉到加速器系統、儲存環、光束線及建築物的增建與改建案，必須通過嚴謹的安全審查，方可展開。
- (3) 對員工、外來用戶、訪客、外包工作人員及週圍環境施予輻射監測，如發現劑量異常時，必須立即加以調查。對意外排放及外洩事件，應立刻追查原因，通報相關主管機關，並採取必要的補救措施。
- (4) 員工、外來用戶、訪客或外包工作人員遭致意外或職業傷害時，應進行事故調查，找出事故原因，防止事故的再發生，並報告主管機關。
- (5) 給予員工、外來用戶、訪客及外包工作人員緊急應變訓練，範圍必須包括緊急逃生常識及各種潛在危害。
- (6) 實驗研究及機器維修導致的輻射曝露必須合理的抑低。

中心亦已建立緊急應變任務編組，中心主任親任緊急應變指揮中心總指揮，每年配合新竹科學園區舉辦防災訓練及緊急應變演習，藉以強化緊急動員能力，落實緊急應變準備，降低意外災害損傷程度。

5. 輻射防護

和其他核能設施比較起來，中心可能產生的輻射危害相對的低很

多，主要的原因在加速後的高能電子都在超高真空環境下繞行，其與儲存環組件碰撞進而產生高能輻射及放射性活度的機會非常的低。因此美國能源部已將同步輻射設施歸類為非核設施(non-nuclear facility)，與核能電廠、核能工業及核醫設施等分開管理。

儘管如此，輻射防護仍是中心安全措施計畫最重要的一環，輻射防護業務仍是中心內外最關心的焦點。下面將針對屏蔽設計、輻射監測及安全連鎖等作一說明，施行的成效與問題也將一併介紹。

(1) 屏蔽設計

中心屏蔽設計採用表 7.1 的設計目標，每年輻射工作人員的劑量設計目標定為 2 毫西弗，非輻射工作人員的劑量設計目標定為 0.2 毫西弗，環境劑量設計目標則定為 0.1 毫西弗，合理抑低原則則列為參考準則。經引用國外常用的加速器屏蔽設計模式，並採用保守的運轉參數之後，各主要設施屏蔽設計的結果如表 7.2 所示。

(2) 輻射監測

中心在人員劑量監測方面，已建立獲國家標準實驗室認證通過的人員劑量實驗室，並自行計讀管制中心員工與外來用戶的人員劑量。絕大部分的人所接受的劑量均在背景劑量邊緣，並沒有因同步輻

射設施的運轉，額外接受大量的輻射劑量。

在廠區及環境劑量監測方面，中心已建立即時及被動型劑量監測系統，24 小時監測中心裏外劑量變動情形。即時劑量監測系統由分布於屏蔽體表面及廠區外圍的輻射偵檢系統組成，透過電腦網路的連線，資料與繪圖軟體的處理，將 10 秒鐘更新一次的最新監測數據送到劑量資料中心與連線的電腦。即時劑量監測系統量測的數據，可以真實而快速的反映中心注射及儲存期間劑量率分布的情形。

被動型劑量監測系統使用熱發光劑量計度量環境周圍累積劑量。為求公信，這項工作係委託國立清華大學原子科學技術發展中心協助。自民國 77 年 7 月同步輻射設施還沒開始運轉前，即展開長期環境輻射監測。

中心的安全連鎖系統分上、中、下三層系統，分別控制注射器與儲存環、光束線及光束實驗站的運轉。系統設計遵照失靈安全(fail safe)、多重性(redundant)、獨立性(independent)、可試驗性(testable)及簡單性(simple)等設計原則，經國外專家及中心技術評審委員會審查通過後，已併入注射器及儲存環控制系統，連線管制各項運轉與測試。如有任何違

反安全操作程序的動作，將急停 機器的運轉。

表 7.1 同步輻射研究中心輻射量設計目標

劑量設計目標	對 象	備 註
每年 2 毫西弗	工作人員	每年 2000 工作小時
每小時 500 微西弗	工作人員	注射期間屏蔽體表面
每年 0.1 毫西弗	環 境	每年運轉 6000 小時
每次事件 0.4 毫西弗	工作人員	意外事故
合理抑低(ALARA)	工作人員、環境	

表 7.2 同步輻射研究中心主體屏蔽結構表 (混凝土)

區 域	內 牆 (cm)	外 牆 (cm)	屋 頂 (cm)
傳 輸 線	30	30	40
儲 存 環	30	40	30

(3) 環境衝擊

設施的運轉必然帶來環境的衝擊，組件長久遭受高能輻射照射也將誘發放射活度。這是中心的責任，也是一種承諾，必須監測各項環境因素，設置各項管制措施，將環境衝擊降至最低。同時也應未雨綢繆，深入探討引發放射活度的機制與特性，因應將來必須面臨的廢棄物管理問題。

(4) 放射廢棄物管理

加速器設施長期運轉以後，部分組件如射束阻體(beam dump)、靶(target)、準直儀(collimator)、屏蔽體、冷卻水及補償濾層(compensating filter)等，會因高能制動輻射的撞擊，引發光核作用，產生活化現象，成為潛在的放射性

廢棄物。它們與一般核能設施產生的放射廢棄物略有不同，下列是一些較具代表性的特性：

- a. 由於高能制動輻射具有很強的穿透能力，一般偵測結果顯示，最大活性比度均位於活化體深層。以大型屏蔽體為例，即使表面能測到很高的劑量率，可移除或可擦拭的(removable or wipeable)表面污染量仍然低到無法測出。
- b. 大多數活化產物的半衰期都很短，加上表面污染的機會相當小，因此這些汰換下來的活化組件或設備可以利用自然衰減的方式，儲存一段期間後再重複的使用或丟棄，減少放射廢棄物處理的數量與經費。
- c. 冷卻水管路滲漏或維修時隨意將冷卻水排掉，有可能造成水中放射性物質的污染。要防堵這個污染源，冷卻水系統宜採用密閉迴路設計，熱交換器也應裝設混合離子床交換樹脂，以去除氬以

外的放射性同位素。另外，鎢等重金屬活化核種不溶於水，無法流經混合離子床交換樹脂，大部分會累積在管路較低位置，長久運轉以後，這些區域的管路，必須先行檢測再予維修。

同步輻射研究中心放射性廢棄物管理的問題對換裝下來的加速器組件與離子交換樹脂，全部用高靈敏度輻射偵檢器或高純度鍍偵檢器度量，確定無污染後才予放行，此種作法將延續下去，以根除輻射污染的可能管道。

安全並非口號，不是挑毛病，更不是找麻煩，安全是工作的一環，是文化和經營藝術結合的產物，也是設施機構形象的表徵。在管理階層及全體員工充份支持與配合之下，同步輻射研究中心安全文化已具雛形。期待亞洲第一的豪語不僅可用於第三代同步輻射的出光(把同步輻射光從光束線引出來)及應用，也可以用在安全方面。

參考文獻

1. 黃文松 游離輻射計量標準發展之回顧 **核研季刊** 28, 37 (1998)
2. 同步輻射研究中心 **同步輻射光源簡介** 新竹市(2000)
3. 翁寶山 **臺灣核能史話** 行政院原子能委員會 臺北市 (2001)
4. 徐葆耕 **紫色清華** 立緒文化事業公司 臺北新店 (2002)
5. 許彬杰 翁寶山 **實用固體熱發光劑量測定術** 合記圖書出版社 臺北市 (2002)
6. F.J. Bradley, "The International Atom: Evolution of Radiation Control Programs," **Health Physics** 83, 121-134 (2002)

第七章附錄

財團法人中華民國輻射防護協會

隨著核能發展與社會的需要，民間組織應運而生。這些團體在我國的發展史上，扮演著重要的角色。

財團法人中華民國輻射防護協會(簡稱輻協)，係由於國立清華大學原子科學院、行政院原子能委員會、核能研究所、臺灣電力公司等機構的學者專家，有鑑於長久以來輻射在社會上引起了各種問題，如環境、健康、法律等問題亟待解決，乃發起籌組輻射防護協會，以期結合各界的力量，從客觀立場貢獻心力。

輻射防護協會於民國78年1月舉行第一次籌備會議，歷經多次研討訂定協會的組織章程，並由各界認捐創立基金，推選出17位董事，5位常務董事，成立董事會，公推前清華大學原子科學院院長曾德霖教授為首任董事長。民國79年5月17日獲行政院原子能委員會

核准，民國 79 年(1990)6 月 5 日領到臺北地方法院登記證書，正式成立。依照輻協的組織章程，董事會分別於民國 82 年 6 月及 85 年 6 月、88 年 6 月、91 年 6 月改選董事成員。曾德霖先生獲推選，連任四屆董事長。第五屆董事長則由翁寶山先生接任，自 91 年 7 月 1 日生效。

輻協為非營利性的組織，其目的為協助政府及民間提昇輻射防護專業知識及技術，促進公眾與環境輻射安全。主要業務如下：

1. 提供有關輻射防護的評估、諮詢及技術服務(獲 ISO 9002 認證)。
2. 從事有關輻射防護的研究發展。
3. 辦理輻射防護相關的訓練及學術研討會。
4. 推動國內、外有關機構的學術交流合作，提昇輻射防護科技的應用。
5. 出版輻射防護教材、刊物、技術手冊、通識手冊及輻防簡訊等。
6. 辦理其它有關輻射防護的業務。

第八章 核能發電的輻防

§8.1 前言

溯自民國 44 年(1955)，即美國前總統艾森豪於 1954 年 12 月 8 日宣布開放原子能和平用途的次年，臺電就開始注意核能發電的技術及應用。民國 44 年 6 月成立原子動力研究委員會，負責核能發電技術的引進及做為發電替代能源可行性的研究。於 1964 年初，確認核能發電具有可靠、穩定及能源多元化等諸多優點後決定引進核能發電。

臺電於民國 59 年(1970)11 月在火力發電工程處轄下設立金山分處，開始第一座核能電廠的施工，展開臺灣核能發電新紀元。嗣後分別於 1974、1977 年陸續開始興建第二及第三座核能電廠，至 1985 年 5 月第三座核能電廠二號機宣布商業運轉後，臺電共擁有 3 座核能電廠 6 部機組，總裝置容量為 514 萬 4 千瓩，占臺電當時電力系統 32.2% 的裝置容量。

臺電基於核能計畫研究、核能電廠營運管理、品質保證制度、安全管制、放射性廢棄物處置及核能電廠緊急計畫業務需要，於民國 61 年(1972)成立原子動力處，隨著業務需要調整至目前(2002 年)的核能發電處、核能安全處、核能後

端營運處、核能電廠緊急計畫執行委員會及核能安全委員會等組織。

核能發電的輻防業務的主管機關為原能會輻防處保健物理科，其掌理事項如下：

1. 核子設施的輻射安全管制規範研訂事項。
2. 核子設施工作人員劑量評估、管制及合理抑低方案的審查事項。
3. 核子設施場區內輻射防護作業審核及稽查事項。
4. 核子設施放射性氣體、液體排放的管制與督導事項。
5. 核子設施放射性物質及放射性廢棄物貯運的輻射防護稽查與督導事項。
6. 核子設施的輻射安全評估報告審查事項。
7. 核子事故緊急輻射偵測工作的評估及督導事項。
8. 核子設施相關偵檢文件的核發事項。
9. 輻射防護人員的資格認可事項。
10. 其他有關核子設施輻射安全管制與督導事項。

§8.2 核能發電的進度

核能發電發展的進度，由歷年核能裝置容量及所占比例(簡稱為占比如圖 8.1)顯示出自第一核能發電廠 1 號機於 1977 年 11 月 16 日首次併入電力系統，占當年整個電力系統 9.1%後，其 2 號機於翌年亦加入發電；第二核能發電廠 1、2 號機也分別於 1981、1982 年併入系統發電，緊接著第三核能發電廠 1、2 號機分別於 1984、1985 年併聯發電。1977 年至 1985 年不到 8 年期間，可謂是核能發電的蓬勃發展期，也是核能最風光的時段，其裝置容量由 63 萬 6 千瓩隨著新機組併聯而增加至 514 萬 4 千瓩。這段期間縱然整個電力系統雖因電力需求而逐年增加，但核能發電的占比

明顯地由 9.1%增加至歷史上最高點，即 1984 年的 32.4%。雖然第三核能電廠 2 號機於 1985 年併入系統發電，核能總裝置容量為 514 萬 4 千瓩。但臺電當時電力系統大幅度增加，因此其占比略降為 32.2%。

核四廠初期規劃於 1982 年 7 月提出時，適逢全球經濟不景氣，經濟部考量臺灣地區電力恐有過剩之虞而暫緩興建核四廠。嗣後又因政治解嚴後反核運動如火如荼地展開，造成核能四廠興建的延宕。自民國 74 年(1985)迄今(2002 年)無新的核能機組併入系統發電，其占比亦逐年下降，1998 年已降為 19.3%。在核四廠 1 號機併聯發電(預

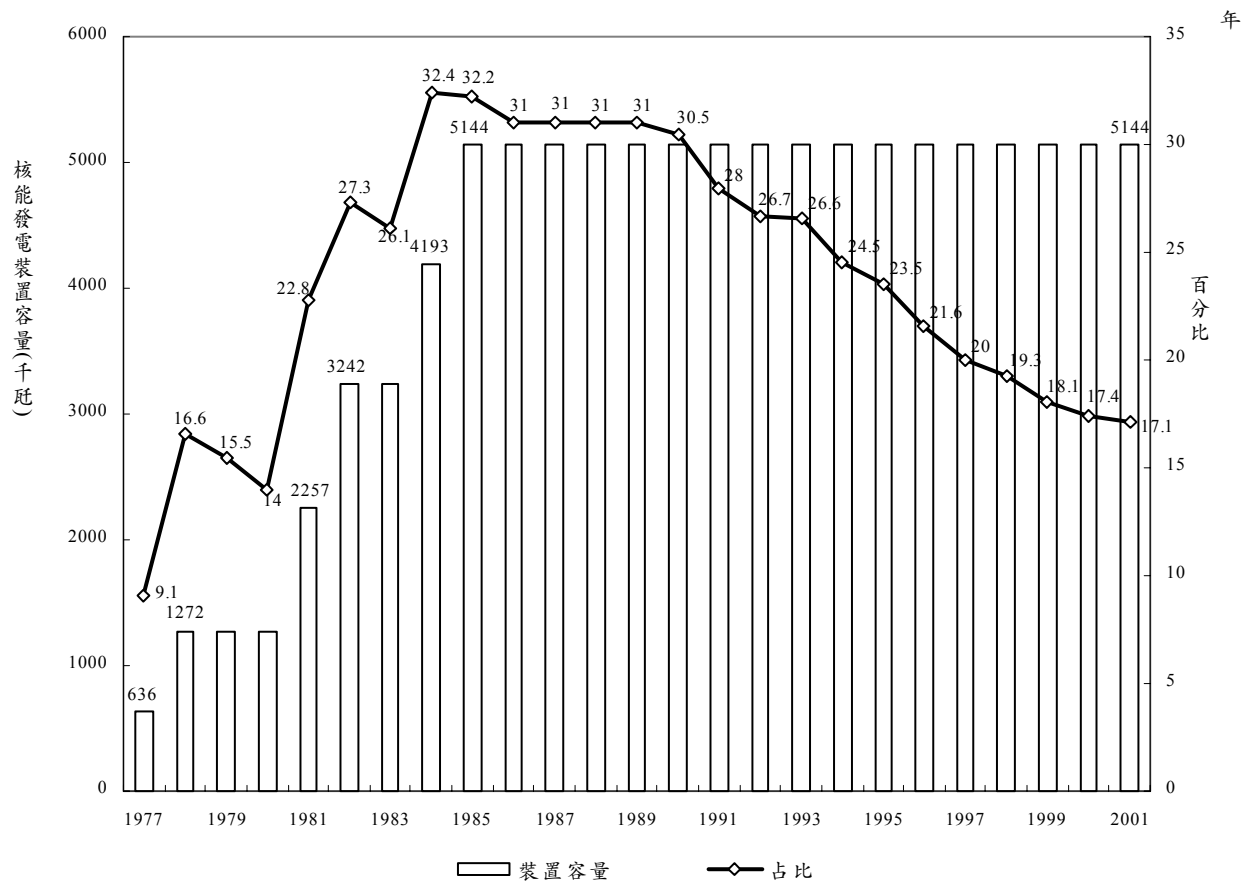


圖 8.1 歷年核能裝置容量及所占比例

訂公元 2006 年)前，預期該占比會再降低。故自 1985 至 1996 年期間屬核能發展停頓期。此一期間，3 座核能電廠營運面臨空前挑戰，主要任務係確保核能機組穩定運轉，並提昇營運績效以化解反核阻力，以做為推動核能四廠興建的基礎。

1996 年 10 月在主、客觀條件配合下，立法院終於通過核能四廠興建的預算案；原子能委員會亦於 1999 年 3 月 17 日核發建廠許可執照，使延宕多年的核四廠可開始動工興建。

§8.3 核能營運現況

安全與品質一向為核能營運的最高原則，在作業執行上同時注重核能安全、輻射安全及工業安全，以確保核能機組穩定運轉，並須顧及核能電廠員工及社會大眾安全。

為符合其經營理念的運作，核能電廠除與其它發電型式的水力、火力發電廠具有行政及工業安全系統外，另設有安全管制系統，以層層管制核能電廠作業，確保核能營運安全。有關核能電廠安全管理體系如表 8.1。

1. 安全管理

- (1) 核能電廠設有品質課，依據品質管制作業要求，對各項維修、施工、操作作業執行查證任務。核能電廠除了主管維護及運轉副廠長外，另

特別設有安全副廠長管理有關電廠安全事宜包括輻射安全。電廠另設一任務編組的運轉審查委員會 (Station Operation Review Committee, SORC)，負責審查電廠重要安全事項。

- (2) 核能安全處駐廠安全小組係獨立於電廠的組織，為電廠執行安全管制的現場單位，對電廠採取定期及不定期稽查以確保電廠安全營運。
- (3) 總公司核能發電處為各核能電廠的主管處，係電廠的行政管制單位，經由異常事件審查、機電事故檢討會、跳機後再起動審查、保健物理業務的推動及大修後再起動審查等方式來監督、管理各核能電廠營運安全。
- (4) 總公司核能安全處為獨立於營運單位對核能電廠負起安全管制的單位，經由年度核安稽查、跳機後再起動審查及大修後再起動審查等方式對電廠進行安全管制。
- (5) 核能安全委員會為臺電處理重大核能安全問題的最高諮詢單位，除臺電相關處長兼任委員外，另聘請外界專家學者為委員，獨立審查電廠重大安全事項。
- (6) 行政院原子能委員會代表政府監督核能機組營運，並執行安全管制作業。

表 8.1 核能電廠安全管理體系

管 理 體 系	主 管 機 關	台電總處主管部門	電 廠 主 管 單 位
行政系統 (營運及安全管理)	經濟部 (國營會)	核能發電處 其他相關單位	各課、股
安全管制系統 (核能安全管制包括輻射 防護與環境偵測)	行政院原子能委員 會	核能安全委員會 核能安全處 核能發電處保健物理課	運轉審查委員會 安全副廠長 品質課 保健物理課
工業安全系統 (工業安全衛生)	行政院勞工委員會 (檢查所)	工業安全衛生委員會 工業安全衛生處 核能發電處工安股	工安課

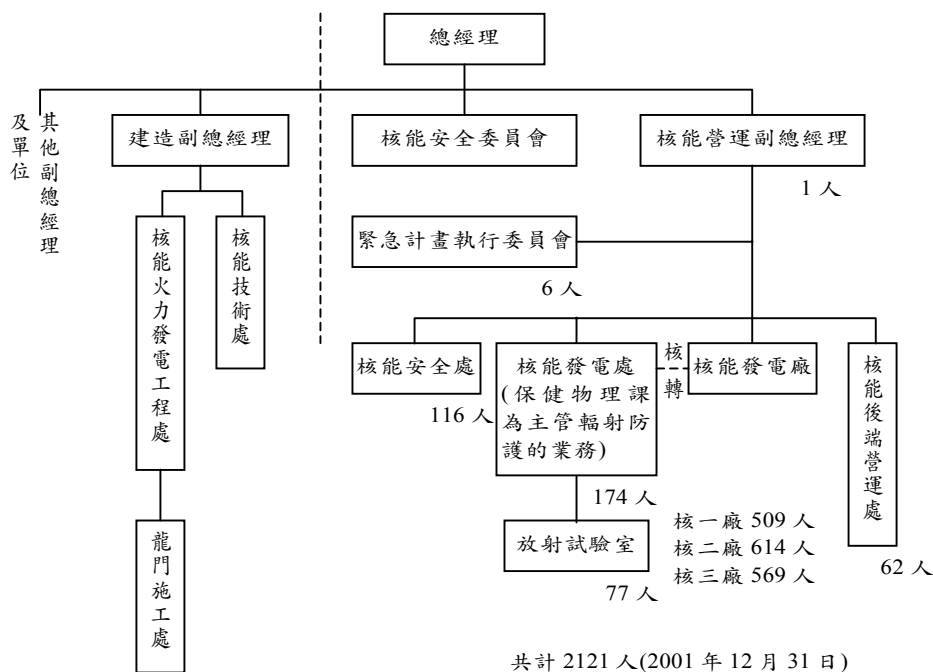


圖 8.2 核能營運組織

2. 核能營運組織

為執行前述的核能經營理念及組織分工原則，核能營運單位除目前三座核能電廠從事發電外，在總公司設有核能發電處為各核能電廠的主管處，係電廠的行政管制單位。該處轄下設有保健物理課，另又設放射試驗室及其分隊派駐各核能電廠從事人員

劑量及環境偵測工作。總公司核能安全處為獨立於營運單位，對核能電廠負起安全管制責任。核能後端營運處則負責放射性廢棄物的最終處置事宜。總公司設有任務編組的兩個委員會：核能安全委員會及核能電廠緊急計畫執行委員會，負責規劃核能電廠緊急計畫事宜。前述所有營運單位均

由一位核能營運副總經理統籌指揮管理。

新建核能電廠部分，係由核能火力發電工程處負責規劃執行，施工部分則由該處轄下的龍門(即核四廠)施工處負責，至於設計審查及執照申請工作則另由核能技術處負責。上述工程單位係另由一建造副總經理統籌指揮管理。有關核能營運組織及人力如圖 8.2。

3. 核能電廠簡介

臺電目前運轉中核能電廠共有 3 座，第一核能電廠位於臺灣北部沿海的石門鄉乾華村，三面靠山，一面臨海，係一天然山谷。共有 2 部機組，每部機的裝置容量為 63 萬 6 千瓩，分別於 1978 年底及 1979 年 7 月正式商業運轉，是當時十大建設之一。

第二核能電廠位於臺灣北端的臺北縣萬里鄉野柳村，共有 2 部機組，每部機的裝置容量為 98 萬 5 千瓩，分別於 1981 年 12 月及 1983 年 3 月宣布商業運轉，為目前臺電電力供應系統中最大的單部發電機組。

第三核能電廠位於臺灣南端的屏東縣恆春鎮南灣濱海地區的馬鞍山，有二部機組，每部機的裝置容量為 95 萬 1 千瓩，分別於 1984 年 7 月及 1985 年 5 月商業運轉。

3 座核能電廠 6 部機組的總裝置容量共 514 萬 4 千瓩，自首次併聯至 1998 年底的累積總發電量高達 5497 億度。有關臺電各核能電廠簡介如表 8.2。

表 8.2 臺電各核能電廠簡介

廠 址	核能一廠	核能二廠	核能三廠	合 計
	臺北縣石門鄉	臺北縣萬里鄉	屏東縣恆春鎮	
主要設備 型式及廠家	反應器： 沸水式 美國奇異公司 汽輪發電機： 美國西屋公司	反應器： 沸水式 美國奇異公司 汽輪發電機： 美國西屋公司	反應器： 壓水式 美國西屋公司 汽輪發電機： 美國奇異公司	
裝置容量 *機組數	63 萬 6 千瓩*2	98 萬 5 千瓩*2	95 萬 1 千瓩*2	514 萬 4 千瓩
首次併聯日期	1 號機 1977.11.16	1 號機 1981.05.21	1 號機 1984.05.09	
	2 號機 1978.12.19	2 號機 1982.06.29	2 號機 1985.02.25	
商轉日期	1 號機 1978.12.10	1 號機 1981.12.28	1 號機 1984.07.27	
	2 號機 1979.07.15	2 號機 1983.03.16	2 號機 1985.05.18	
首次併聯至 2001.12.31 累積 發電量/供電量 (億度)	1922.2/1833.38	2518.16/2435	2098.61/2007.55	6538.97/ 6275.93

4. 1998 年臺電電力系統

1998 年臺電電力系統裝置容量

共 2668 萬瓩，仍以燃煤、油的傳統火力為主，占 49.5%；核能發電僅占

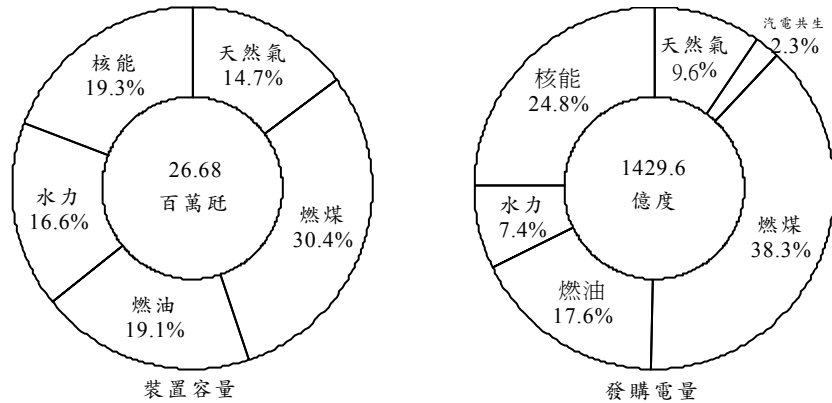


圖 8.3 1998 年臺電電力系統結構

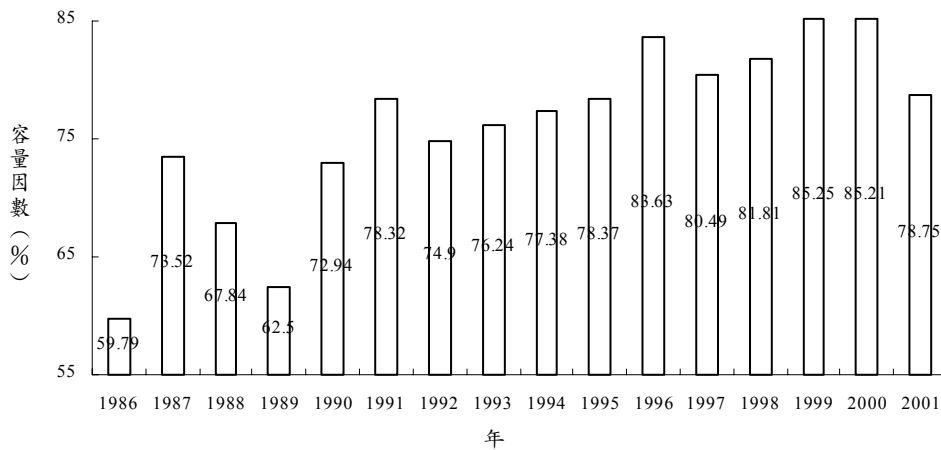


圖 8.4 歷年核能機組容量因數統計圖

19.3%。至於 1429 億度發(含購入)電量中，核能提供了 24.8%的發電量；其主要原因為核能電廠係基載運轉的設計且發電成本低，接受優先調度發電，因此核能對臺電電力系統提供發電量的所占比例高於裝置容量的所占比例。有關 1998 年臺電電力系統結構如圖 8.3。

5. 核能營運績效

(1) 世界核能發電協會 (World Association of Nuclear Operators,

WANO)營運指標方面

世界核能發電協會集合全世界專家於 1990 年研究出一國際通用的 10 項營運指標供世界所有核能機組採行參考，以衡量核能機組的營運績效。此 10 項營運指標涵蓋核能安全、生產績效、核燃料可靠度、放射性廢棄物產量及人員安全等綜合性領域。自 1990 年施行以來，臺電在 10 項指標中，有 7-8 項較世界平均值為佳，顯示臺電營

運實績在世界水準以上。有關過去 3 年的營運績效比較如表 8.3。

(2) 容量因數方面

衡量核能機組的生產績效概以容量因數為主要指標，其定義為核能機組在某一段期間內的平均出力與原設計額定出力的比數，該數值愈大表示生產績效愈好。由圖 8.4 顯示出臺電自 1989 年以來，三座核能電廠的容量因數呈穩定成長，尤其是 1996 年高達 83.63% 創最佳紀錄。整體而言，容量因數增加的主要原因為近年來核能機組的穩定性提升，即非計畫性停機、降載事件減少，另則為核能機組的大修由每年一次逐漸調整為每 18

個月一次。

(3) 跳機次數方面

核能電廠藉鈾燃料產生熱能，直接或間接將水加熱成蒸汽以推動汽輪發電機發電，再經由斷路器(俗稱開關)將電力傳送至電廠以外的電力網。一旦核能機組若有設備故障，為了避免設備進一步受到損壞，會自動打開發電機輸出斷路器，使發電機與廠外電力網隔離而停止供應電力，此種現象即稱為跳機。

跳機次數愈多，表示該機組不穩定，不但影響營運績效且衝擊臺灣地區的供電能力，尤其是在電力系統供應緊澀的夏季。若有一部大

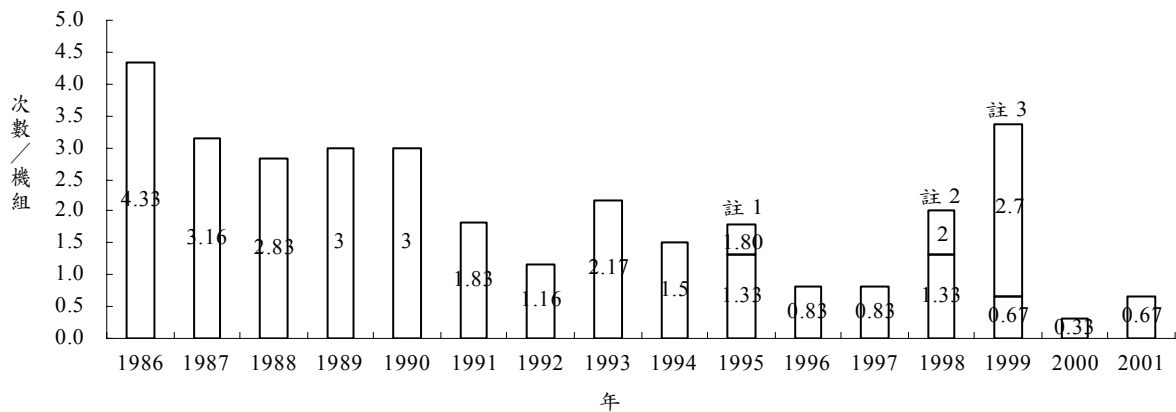


圖 8.5 歷年核能機組跳機次數統計圖

- 註：1.1995 年 8 月 5 日龍潭超高壓變電所內鐵塔遭受雷擊，造成輸電系統故障，引起南北解聯，北部電力供應嚴重不足，頻率急速下降，引起 12 部運轉中發電機組同時跳機；此事件造成核一廠一、二號機、核二廠二號機的同時跳機，非廠內因素所能控制，若不予列入則 1995 年度累積跳機次數為 6 次，跳機率為 1.0 次/年機組。
- 2.1998 年 10 月 16 日因瑞伯颱風侵襲，輸電線路故障，致核一、二廠四部機組跳脫，因非廠內因素所能控制，若不予列入，則 1998 年核能機組累積跳機次數為 9 次(平均 1.5 次/機組)，其中有一件係於 1998 年 10 月 21 日核一廠一號機因承包商載運廢土卡車不慎衝撞通往海水進水口泵室的直立電纜托架，致海水泵跳脫，反應器手動急停。
- 3.1999 年 4 月 30 日核一廠一號機輸電線路故障及 6 月 6 日核三廠兩部機因瑪姬颱風致輸電線路故障電力無法輸出而棄載跳脫並急停，又 7 月 29 日由於龍崎—嘉民海線及龍崎—中寮山線的 345 kV 輸電線路同時跳脫，引起核能六部機組反應爐急停(核三廠一號機手動解聯)；9 月 21 日集集大地震，造成輸電系統故障引起北部系統頻率下降，核一廠二號機及核二廠兩部機同時跳脫及反應爐急停，因非電廠所能控制，若不予列入，則 1999 年核能機組急停總次數為 4 次。

型機組如核能機組發生跳機情事，可能會造成電力供應不足而限電，不但影響臺電企業形象且衝擊臺灣地區的經濟發展。因此如何抑低跳機次數，一向列為核能營運的重要課題。

由圖 8.5 顯示出臺電核能機組跳機次數自 1986 年的每部機組 4.33 次至 1998 年的 1.5 次呈一下降趨勢，其中以 1997 年的每部機組 0.67 次，即 6 部機組共 4 次為最佳紀錄。另非人力可控制的是在 1995 年因輸電線路故障而造成核一廠一、二號機及核二廠二號機同時跳機；於 1998 年瑞伯颱風來襲，又因輸電線路故障而造成核一、二廠四部機同時跳機，上述跳機事件均非廠內因素所能控制。

表 8.3 臺電核能機組營運績效與世界核能發電協會平均值比較

項次 \ 年	1996	1997	1998
較優項次	8.8	8.3	8.5
較差項次	1.2	1.7	1.5
總項次	10	10	10

註：(1) 臺電近幾年營運實績優於 WANO 平均值者有 7-8 項，顯示臺電核能營運實績一直在世界水準之上。

(2) 1998 年臺電較 WANO 平均值為差的指標項目
 —沸水式反應器(BWR)化學指標
 —臨界 7000 小時非計畫自動急停次數

(4) 異常事件方面

核能電廠若發生設備不正常情事，依其運轉規範規定：不僅須完成 2 小時內的立即電話通報，並須於事件發生後 30 天內將該事件發生經過、事件原因及矯正措施的異常事件報告陳報原子能委員會。核能電廠異常事件件數概可做為核能機組穩定運轉、營運績效及核能安全的衡量指標。一般而言，異常事件少表示該電廠的運轉是具穩定良好的營運績效、核能安

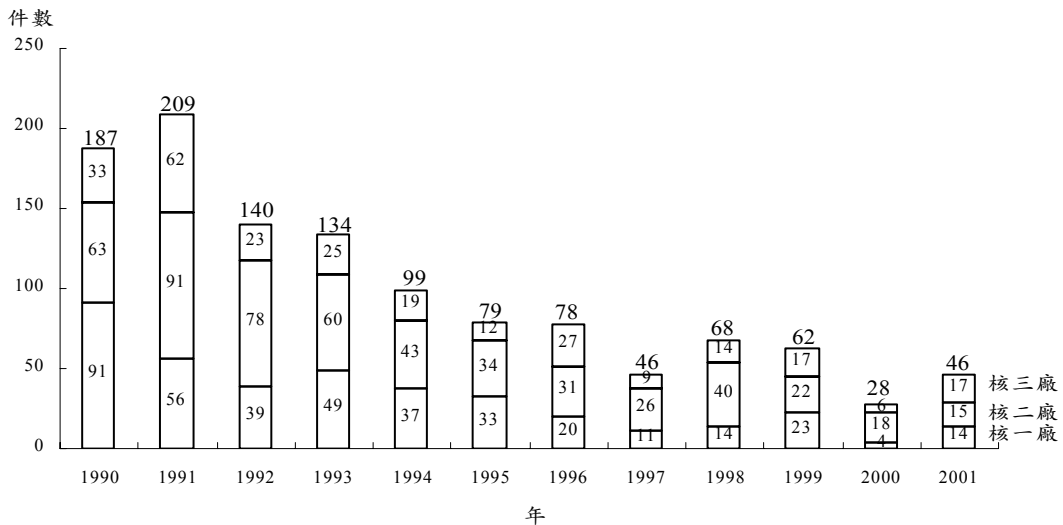


圖 8.6 核能廠歷年異常事件統計圖

全、以及輻射安全。由圖 8.6 顯示臺電各核能電廠異常事件總數自 1991 年的 209 件至 1998 年的 68 件呈一穩定下降趨勢，其中以 1997 年的 46 件為最佳。

(5) 發電成本方面

今日的核能發電，除確保核能安全、輻射安全、以及運轉可靠外，其發電成本亦列入重要的營運課題。尤其臺電面臨電力事業的自由化和民營化的挑戰下，唯有合理的發電成本，才具有競爭性。由圖 8.7 各類發電單位成本分析，顯示出核能發電成本自 1989 會計年的每度新臺幣 1.16 元逐年降低至 1998 會計年的每度新臺幣 0.84 元，而於 1989-1998 會計年間，臺

電平均發電成本為每度新臺幣 1.27-1.17 元，1998 會計年則為每度新臺幣 1.22 元。若以 1998 年核能總供電量 354.08 億度計，乘以與臺電成本差每度新臺幣 0.38 元，則可減少發電成本 134.55 億元，對臺電創造盈餘實有相當貢獻。

核能發電成本概可分成折舊、後端、其他營運、燃料、維護及利息等部分。目前以折舊占 25.09% 為最大，因核能電廠經濟壽命為 40 年且又採取加速折舊提撥，預期折舊部分的成本會逐年降低。其次高者為後端部分的成本，它是採固定提撥由每度發電量提 0.18 元，並每 5 年檢討其提撥率。

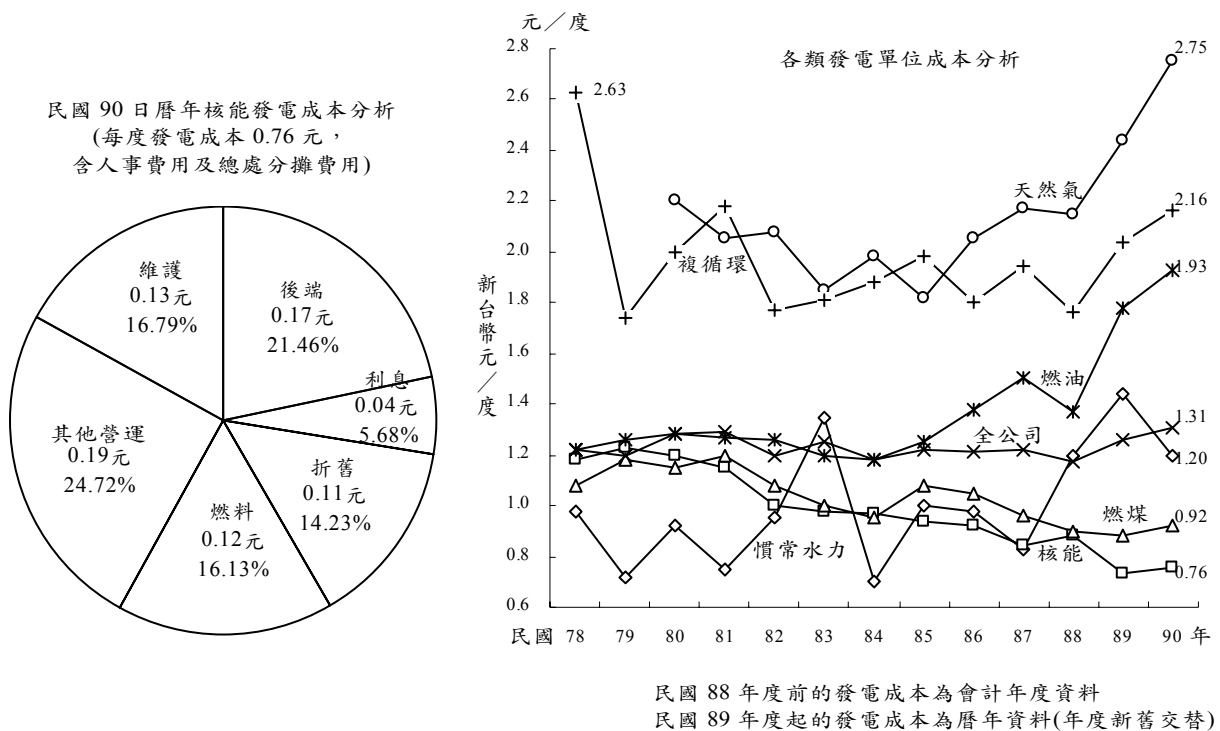


圖 8.7 各類發電單位成本分析

燃料部分的成本占 16.34%，歷年來的占比概為此一數字；維護及其他營運部分的成本則占 31.74%。

6. 核能營運績效增進策略

由前述的核能營運績效可瞭解臺電的核能營運實績，雖在世界水準之上且呈穩定進步，但為因應電力事業自由化、民營化的衝擊及追求卓越的原動力下，如何增進核能營運績效以提高競爭力，應為核能營運的重大課題。臺電訂定下列兩個方案作為努力方向：

(1) 落實推動核能安全文化強化方案

臺電引進國際原子能總署所提倡的重視安全及確保安全的企業文化，參酌臺電業務的實際需要，研訂核能安全文化 5 大原則及 12 實施要項，62 執行方案及 18 項量化指標，並於 1993 年各核能營運單位全面推動核能安全文化。

臺電核能營運單位推動核能安全文化後，由前述的核能營運的績效顯示出過去這幾年確屬大幅度且穩定進步，但仍偶有不符程序書的事件發生，文化氣質似未完全建立。為精益求精，進一步提高營運績效及抑低人員作業疏失，遂於 1997 下半年起著手此項核安文化 5 年總檢討；涵蓋制度架構及執行實務兩方面，以確定符合國際原子能總署所提出的核能安全文化本質並期能培養員工有自動自發

的敬業精神，將此一文化融入平日的工作、生活中。經過廣泛且深入總檢討後，以「核能安全文化強化方案」為未來加強改善的 6 大方向：

- (a) 宣示核能安全承諾，落實核安文化(包括輻射安全)
- (b) 落實「人員作業疏失防範措施」
- (c) 建立良好的作業程序書並使員工遵守程序書
- (d) 提高自我評估能力
- (e) 提高設備可靠度
- (f) 提高訓練績效。

(2) 執行「核能機組穩定運轉方案」

綜觀臺電 1998 核能營運與安全績效，大致上仍呈進步；惟跳機次數表現不佳，總共跳機 13 次；扣除因颱風所引起的 4 次，尚跳機 9 次，比前年的 4 次增加許多。跳機次數增多的主要因為老舊控制系統更新衍生的問題及電子零組件可靠性不足。臺電已慎重就跳機問題再做全面性徹底檢討，並研訂「臺電核能機組穩定運轉方案」，就(a)提昇大修品質管理；(b)設計修改作業程序改進；(c)電廠一般系統(balance of plant, BOP)引發跳機的關鍵組件的完整性檢討；(d)提升儀電維護品質；(e)電廠運轉審查委員會功能增進檢討 5 大主題，研提具體作法及作業時程，並列案追蹤責成各核能電廠確實執

行，以確保核能機組安全及穩定運轉。

7. 未來工作重點

(1) 核能機組設備老化研究與改善

第一核能電廠一號機自商業運轉以來，已超過 20 年；依核能機組 40 年的設計壽命而言，實已邁入中年，第二、三核能電廠亦將步入中年。因此有些設備面臨老化而影響其功能，進而衝擊核能機組運轉的可靠及安全，如開關場的斷路器、大型變壓器、類比控制等。

(2) 推動核能電廠延壽計畫

新建電廠推動不易下，現有運轉機組應善加利用。國外已有電廠經過嚴謹評估後可以超過原 40 年的設計壽命而延長運轉。臺灣地區的核能興建更不易，因此對核能電廠的延長壽命宜儘早規劃，即針對反應器重要組件等建立一套完整計畫予以監測及評估。

(3) 放射性廢棄物減量與貯存

放射性廢棄物的處置是核能發展必須面臨的嚴肅課題，臺電各核能電廠，針對低放射性廢棄物的處理，均先經焚化、壓縮減少體積或以水泥固化裝桶後存在廠區內或送至蘭嶼貯存場暫存，將來再進行最終處置。國際上多採淺地掩埋方式進行最終處置，臺電雖已評選烏坵島嶼做為境內低放射性廢棄物處置場址，也進行地質鑽探的評

估工作，惟可能生變。另臺電也積極尋求將低放射性廢棄物運往境外處置的可行性(詳見第十一章)。

臺灣地區面臨境內、外複雜的政治及社會環境，雖然境內、外低放射性廢棄物處置均在規劃執行中，但具體的進展實在難以掌控。因此放射性廢棄物的減量，即減少受到輻射污染的衣物、手套、鞋子及水處理產生的廢棄物等，更是刻不容緩的當務之急。臺電由過去每年生產一萬多桶大幅度地抑減至 2001 年的 963 桶左右。但在臺灣特殊的政治及社會環境下，低放射性廢棄物進一步的減量亦是未來必須全力以赴的。

(4) 持續加強核能溝通

臺灣地區自實施解嚴以來，民意高漲及自我意識抬頭，演變成民粹主義的風行。對於公共建設，無論其規模大小，甚至於小型焚化爐的興建，亦常見到民眾的陳情、示威及抗議，遑論核能電廠的興建。甚至於現有核能電廠的營運，受到地方人士及政治人物的關切。因此如何化解社會大眾對核能發電的疑慮，亦是臺電責無旁貸的工作。雖然臺電在幾年前成立核能溝通中心，負責核能溝通事宜，惟今已撤銷。核能溝通是持續性、全面性的，必須列為未來工作重點。期望獲得社會大眾的共識，祛除核能及

輻射疑慮轉而支持核能的開發。

(5) 因應自由化、民營化的挑戰

國營事業民營化及電力事業自由化，是時勢潮流且是既定的政策，其目的在於促進競爭以提昇經營績效。雖然自由化及民營化的時程及核能是否一併整體民營尚未完全確定，但這是個新趨勢。核能營運勢必受到衝擊與挑戰，核能發電在安全第一原則下，務必在發電成本上具有競爭優勢，即除增加發電量外亦進一步減少支出。另則面臨人力老化及如何晉用新進人員等均是未來工作重點。

§8.4 未來核能發展

1. 「全國能源會議」有關核能開發的結論

國際間由於普遍警覺溫室效應所帶來的危害及嚴重性，採取跨國合作以抑制溫室氣體排放的共識，乃逐漸形成。聯合國「氣候變化綱要公約」二氧化碳排放量的限制，即是在此共識下的產物。至於「京都議定書」規範工業國家應承擔的減量責任，我國並非聯合國會員國，雖未有減量義務，但身為地球村一份子，我國仍應擬定具體策略，設定合理程度的減量目標。因此行政院於民國 87 年(1998)5 月舉行全國能源會議，有關核能開發的結論為：

(1) 增建核能機組作為最後的選擇

(2) 到 2020 年為止，不增建第 5 核能電廠，核能在全國總電力裝置容量中所占比例以不超過 1998 年的現值為限。

2. 臺電電源開發方案

臺電主要發電方式包括火力、核能及水力三種，其中火力發電廠是產生二氧化碳(CO₂)的主要來源之一，其二氧化碳產生量約占全臺灣地區的 1/3。根據研究，在同樣運轉條件下，煤、油、天然氣及核能排放二氧化碳的比例為 1:0.78:0.59:0。因此，使用無碳的核能與水力，及推廣以低碳的天然氣取代含碳量高的煤與石油，對於降低二氧化碳的排放，將有相當大的助益。臺灣地區依全國能源會議結論，在產業結構要做若干調整，社會各界也要能配合積極推行各種節約能源措施。1998 至 2020 年經濟年平均成長率為 4.9%，需電彈性係數為 0.86。在電源開發方面，2020 年前估計需再開發 3350 萬瓩。除臺電目前已獲准與施工中的發電計畫，以及第一、二階段開放發電業部分獲選的民營電廠外，臺電電源開發計畫共分四案，其中核能電廠分別為不再新增機組、增設兩部機組(270 萬瓩)、增設 6 部機組(810 萬瓩)的規劃。

3. 結語

臺灣地區能源進口比率高達 95%，基於能源多元化政策，並考量和比較各

種發電方式的經濟性、環保要求和安全性後，在未來電源的開發中，核能發電雖不是唯一的選擇，但亦無法單獨擱置不用。

核能發電要在核能安全、輻射安全及工業安全確保下，強化核能經營體質以提昇經營績效，降低發電成本，迎接未來電力事業自由化及民營化的挑戰。

核能溝通是持續性且全面性的，須在良好的核能營運績效為基礎下，積極且整體性對社會大眾溝通，以消除核能發電與輻射安全的疑慮，進而獲得社會大眾支持，則現有核能電廠營運將更安全可靠，未來核能開發亦得以順利推動。

§8.5 核發處保健物理課

臺電核能發電處保健物理課主管核能電廠的保健物理業務，自民國 61 年(1972)成立以來已經歷 30 年。於此期間，自培養人才開始，已累積相當多的輻射防護實務經驗，使三座核能電廠的輻射防護已頗具成效。茲分述於下：

1. 輻防人員養成

臺電公司為因應國際發電趨勢，積極將核能發電引進國內，首先成立原子動力委員會。在 1960 年代確定核能發電的成熟與可行，選派人員赴美國橡嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)受訓，成員中具輻防專業以段維先生為代表，

在會中擔任輻防籌設諮詢工作。其後清華大學設立核子工程學系(1964 年 8 月)以及稍早成立的原子科學研究所(1956 年)，國外學成歸國學人陸續加入，輻防師資陣容漸形完備。在 1968 年為因應金山電廠籌設，培訓核能電廠的建廠及運轉營運人員，先後選派幾批人員，訓練分國內與國外兩部分。國內部分訓練在清華大學，課程包括基礎核工與輻防，為臺電初期輻防人才培育奠定基礎。其後為加速輻防人才培育，從兩方面著手：其一為臺電與臺北科技大學建教合作，師資部分由臺電受訓回國人員如凌大為、黃金益諸先生擔任，提供輻防技術人員來源，其二提供獎學金，接受清華大學畢業生加入，成為保健物理師的來源，使得以後陸續完工的國聖(核二廠)與馬鞍山(核三廠)核電廠所需輻防人才不慮匱乏。臺電各核電廠長期安全運轉，基於輻防嚴格管制及輻防人員的努力，優秀輻防人員養成實賴前輩們的傳承。

由於有了核電廠設立，才有輻防單位的建制，也就輻防人員的工作舞台。追溯臺電核能電廠能與先進國家同步引進設立，要歸功於朱故副總經理寶熙與劉故處長培鑒二位前輩籌畫與推動，奠定臺電核能電廠發展良好基礎。二位前輩行事風格，後人常留去思。臺電特假中華民國核能學會設立朱寶熙紀念獎，以激勵對於核能有

卓越貢獻的人士。

2. 保健物理課成立經過

為配合臺電首部核能電廠-金山電廠(核一廠)的興建，於民國 61 年(1972)正式成立原子動力處，保健物理課是其下 6 個課之一，設有輻射防護、廢料處理、環境工程三股，負責規劃核能發電有關輻射防護及放射性廢料處理業務。因核電廠建廠尚未完成，大都偏重在研發及規劃方面。至 1977 年 11 月 16 日第一核能發電廠一號機首次發電併入電力系統開始，才

有實際保健物理業務。當時核電廠的保健物理監督是由發電處核能課負責。為事權統一，於 1981 年 6 月隨著業務移轉，發電處的保健物理業務正式由原子動力處獨挑。其後，原子動力處基於業務推展需要，經過多次改組，名稱屢有變更：依次為核能發電處、核能發電安全處、又再更名為核能發電處。保健理課的組織亦因任務編織而有出入，從保健物理與放射化學合一，至保健物理與化學分開各司其職，其演變如表 8.4。

表 8.4 臺電總管理處輻射防護單位成立年鑑

民國 91 年 7 月 1 日止

時 間	重 要 紀 事	總 處 名 稱	課 名 稱	股 名	備 註
民國 61 年 (1972)以前	核能人員儲備	原子動力委員會			
1972	1972.1.28 成立原子動力處、建廠部分由火力工程處負責	原子動力處	保健物理課	輻射防護股 廢料處理股 環境工程股	
1974	1978 年核一廠商業運轉	原子動力處	保健物理課	同上	輻防規劃及法規研究
		發電處	核能課		督導電廠
1981	1981 年放射試驗室成立、1981 年核二廠商業運轉，發電處的核能營運業務歸併於原子動力處，發電處本身僅辦火力發電業務	原子動力處	保健物理課 放射試驗室	同上	
1982	1982.8.20 成立核能品質處				
1984	1984.7.1 原子動力處分成核能技術處、核能發電處與核能品質處，另成立核能人事室、會計室、總務室總稱核能部門。1986.9 核能發電處的燃料課併入燃料處	核能發電處	保健物理課	輻射防護股 廢料處理與放射化學股 環境工程股	
		核技處	核能課		包括核安與法規

續表 8.4

1989	1989.5.19 將核技處的核安與法規業務納入核發處成立核能發電安全處，核技處只負責核四廠建廠工作	核能發電安全處	保健物理課	輻射防護股 保健物理股 環境工程股	「保」「化」分家，另成立核能化學課
		核技處	放射試驗室		
1990	1990.7.4 成立核能後端營運處	核後端處	環保工安課		
1991		核能發電安全處	保健物理課	輻射防護股 保健物理股 緊急計畫股 環境工程股	
1992	1992.8.21 核能發電安全處的法規與核安業務與核品處的品質保證(QA)合併成立核能安全處，原來核能發電安全處改名核能發電處，核能品質處改名品質處負責全公司新建工程 QA 的業務	核能發電處	保健物理課	輻射防護股 保健物理股 劑量評估股 環境工程股	
			放射試驗室		
1992	1992.9.1 核能安全處成立，2001 年品質處大部分業務納入核能安全處，國際標準化組織(ISO)業務納入企劃處，取消品質處	核能安全處			

保健物理課歷任課長為王心明(1972.1—1973.2.16)、錢北辰(1973.2—1981.7)、凌大為(1981.7—1984.8)、王宜陵(1984.8—1989.6)、葉偉文(1989.6—1994.5)、黃金益(1994.5-2003.7)、何偉(2003.11 接任)。另總處核能部門因應業務發展，分別於民國 70 年成立放射試驗室(隸屬於當時的原子動力處)。於 1990.7.4 成立核能後端營運處。於 1992.9.1 成立核能安全處，均有保健物理人員加入與參與，輻防工作人員枝葉茂盛，可見一斑。

3. 保健物理課的組織

臺電公司保健物理課直屬核能發

電處核安副處長，協助處長督導核能電廠輻射防護事宜。保健物理課設有保健物理股、輻射偵測股、劑量評估股、輻射防護股四股。目前(2002 年)工作人員合計 12 人：計博士 3 人、碩士 2 人、大專 7 人，各股主要經辦事務如下：

(1) 保健物理股

- a. 放射性物質及可發生游離輻射設備的管制與查核。
 - 射源及可發生游離輻射設備管制作業查核訪問。
 - 核驗並轉陳非醫用放射性物質及可發生游離輻射設備半

- 年清點報表。
 - 射源及可發生游離輻射設備的輸出入、轉讓、報廢及相關執照更新等資料的審查與函轉原能會事宜。
 - 核燃料輸出入與運送相關配合事宜。
 - b. 工作人員體檢作業的執行事項
 - 核能人員體檢安排、報告審查及追蹤。
 - 各核能電廠核能體檢招標作業的推動。
 - c. 原能會輻射防護法規的彙辦事項。
 - d. 醫務監護作業合約的執行
 - 高雄醫學大學附設中和紀念醫院「南部輻射傷害防治中心」合約的執行。
 - 臺北榮總「輻射傷害防治中心」合約的執行。
 - 恆春基督教醫院「急救去污合約」計畫的執行。
 - 國軍醫學中心的「輻射傷害防治中心」合約的執行。
 - f. 編修各類輻射防護專業手冊及訓練教材製作事宜。
- (2)輻射偵測股
- a. 各核能電廠環境偵測資料的分析與陳報
 - 放射性物質排放造成廠外最大個人輻射劑量評估、報告製作與陳報(分年月季報)。
 - 環境輻射偵測報告、巡迴偵測報告的審查與陳報(分年月季報)。
 - 廠區放射性試樣偵測報告的審查(分年月季報)。
 - 環境輻射偵測作業年度計畫審查及陳報。
 - 「核能電廠環境輻射偵測簡介」的編製。
 - 「核能電廠排放年報」審查及陳報。
 - b. 核能四廠環境輻射偵測事宜
 - 環境輻射偵測布站作業規劃事宜。
 - 「核能四廠環境監督委員會」決議事項的追蹤處理。
 - c. 環保預算的審查與彙總。
 - d. 核能電廠氣象報表審查及風向、風速與溫度計校正品保計畫實施。
- (3)劑量評估股
- a. 各核能廠人員劑量、面具測試報告的審查與追蹤。
 - b. 人員劑量異常與佩章遺失報告的評估與審查。
 - c. 各核能廠緊急計畫演習配合事項
 - 「輻防項目」的規劃與執行。
 - 廠外民眾劑量評估分析的演練。
 - 輻傷救護的演練。
 - d. 各單位有關輻射防護訓練的安

排、彙總與陳報。輻射人員資格認可考照的辦理事項。

- e. 核能電廠居民飲食習慣調查。
- f. 核能電廠工作人員體內外劑量評估與分析作業。

(4) 輻射防護股

- a. 大修輻射防護報告暨各項輻射安全報告的審查與陳報。
- b. 國內、外輻射防護法規與相關文獻、資訊的蒐集與評估。
- c. 執行核能電廠大修輻射防護作業查證，及機組起動的審查。
- d. 推動「核能電廠呼吸防護面具性能檢測計畫」。
- e. 成立「游離輻射防護法制變革及ICRP-60建議納入游離輻射防護標準因應小組」。
- f. 「推動臺電個人輻射劑量管制登記簿」制度的施行。
- g. 輻射防護電腦化規劃、開發與程式認證作業。
- h. 輻射防護技術與經驗的蒐集、研析、應用推廣。

4. 保健物理課重要紀事

- 1976-1977年：全課人員調核一廠，以支援核一廠試料裝填及試運轉。
- 於1977年於臺北榮總合作設立輻傷中心，於1995.5.8年與高雄醫學大學附設中和醫院合作設立南部輻傷中心，於2001.7年與國軍醫學中心合作設立輻傷中心。
- 1980年：調派人員支援核二廠試運

轉。

- 1981年：調派人員成立金山放射試驗室。
- 1983年：由保健物理課推動在總公司26樓籌設「緊急指揮中心」。
- 於1987年在臺北舉辦第一次國際輻射劑量評估研討會(RDAS會議)，於1997年8月舉辦第二次國際RDAS會議。
- 1989年：籌建完成電廠與總公司電腦連線人員劑量管理系統。
- 1990年：推動完成核四環境評估報告編寫與審查。
- 各廠每10年一次執照更新的輻射安全報告編寫計畫。

5. 主要研發與籌建計畫

- (1)於1976年編訂「臺電公司非醫用放射性物質及可發生游離輻射設備管制作業守則」。
- (2)於1977年編訂「核能發電相關設施輻防工作守則」。
- (3)於1977年完成正常運轉廠外劑量評估系統。
- (4)於1995年核能工作人員「個人輻射劑量管制登記簿」正式實施。
- (5)於1995年完成核能電廠訪客「參觀須知」錄影帶製作。
- (6)於1996年底完成核能人員體檢綜合分析報告計畫。
- (7)於1996年完成燃煤電廠釋出天然放射核種的研究。
- (8)於1997年完成劑量評估程式引進

與認可計畫。

- (9)於 1997 年開始每年實施核能電廠環境偵測結果說明手冊的發行。
- (10)於 1997 年辦理「非醫用游離輻射防護研討會」召訓各單位射源的操作管理人員，以提昇該單位的輻防管制作業。
- (11)於 1997 年底完成「可忽略放射性的固體廢料及廢金屬管制規範」的計畫。
- (12)於 1998 年底完成核能電廠呼吸防護裝具管理及性能檢測作業的評估計畫。
- (13)每 5 年執行各核能電廠低密度人口區調查計畫。
- (14)於 1999 年完成放射性物質外釋環境輻射劑量評估模式修訂計畫。
- (15)於 2002 年更新完成事故廠外劑量評估及時顯示系統。
- (16)進行「財團法人北海岸金山醫院」的籌建計畫。
- (17)於 2001 年執行 ICRP-60 因應計畫
 - 成立 ICRP 工作小組，由核能相關單位代表組成，對原能會新修訂法規，從執行層面作必要了解、因應及建議。
 - 開辦法規研習課程，由公司內外專家講解，招訓相關單位人員，以作為在各單位負責推動相關因應工作宣導及擔任種子師資。

5. 回顧與展望

核能電廠與一般工業設施相較，並無較不安全之虞，其噪音小、通風冷氣完善、工作環境佳，劑量受嚴格控管(平均約僅為法規限值的 1/15)。每年體檢一次，健康有妥善照顧，一般人並不排斥在核電廠工作。

臺電 3 座核能電廠 6 部機組裝置容量為 5,144 MW，占總裝置容量 31,258 MW 的 16.5%。近年來由於民營電廠及汽電共生瓜分臺電盈餘，核電的基載運轉及低燃料成本，造就售電盈餘有超過一半以上來自核電。最早核一廠一號機已運轉 25 年，展望未來各國的核能發電比例居高不一，核能重要性自不言而喻。今日部分國人仍對核電廠持負面看法，肇因之一，國內拆船業導致放射性污染屋事件，讓核電廠廠遭池魚之殃，其二最終廢棄物貯存場未及早興建，使國人誤以為核廢棄物無法處理。任何設施能為



圖 8.8 核一廠外貌

大眾接受，前瞻性的規劃以及風險評估是相當重要的，核能發電事業亦是如此。

§8.6 核一廠保健物理課

民國 66 年(1977)10 月核一廠(圖 8.8)一號機開始裝填鈾燃料，我國的核能發電輻射防護史從此展開。保健物理課是核能電廠的特有組織，負責核能電廠的一切輻射安全事物，包括工作人員的劑量管制、環境輻射監測及污染管制。

核一廠是我國的第一座核能電廠，

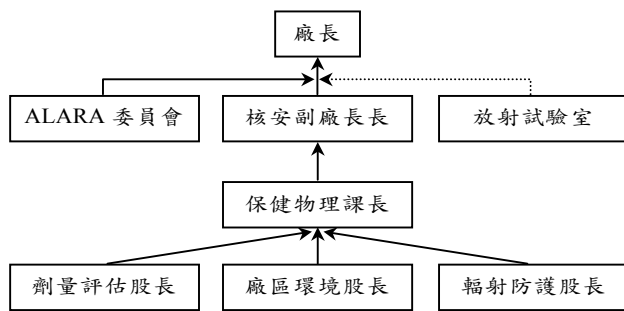


圖 8.9 核一廠輻射防護組織

是臺電有實際的核能電廠輻射防護經驗的開始。民國 68 年以前第一任保健物理課長是由錢北辰先生兼任，68-69 年間是由王耀璋先生擔任，69-78 年間是由黃金益先生擔任，78 年以後迄今(91 年)是由何偉先生擔任。

1. 保健物理課的組織

保健物理課直屬核安副廠長，協助廠長處理一切輻射防護事宜。另有屬總管理處管轄的放射試驗室支援核能電廠的環境監測、熱發光劑量計(TLD)佩章計讀、儀器校修及全身計測等輻射防護相關作業。對於重大輻射防護相關工作，電廠設有合理抑低(ALARA)委員會負責審查輻防相關議題，ALARA 委員係由維護及運轉相關課長擔任。保健物理課下設有劑量評估、廠區環境及輻射防護等三個

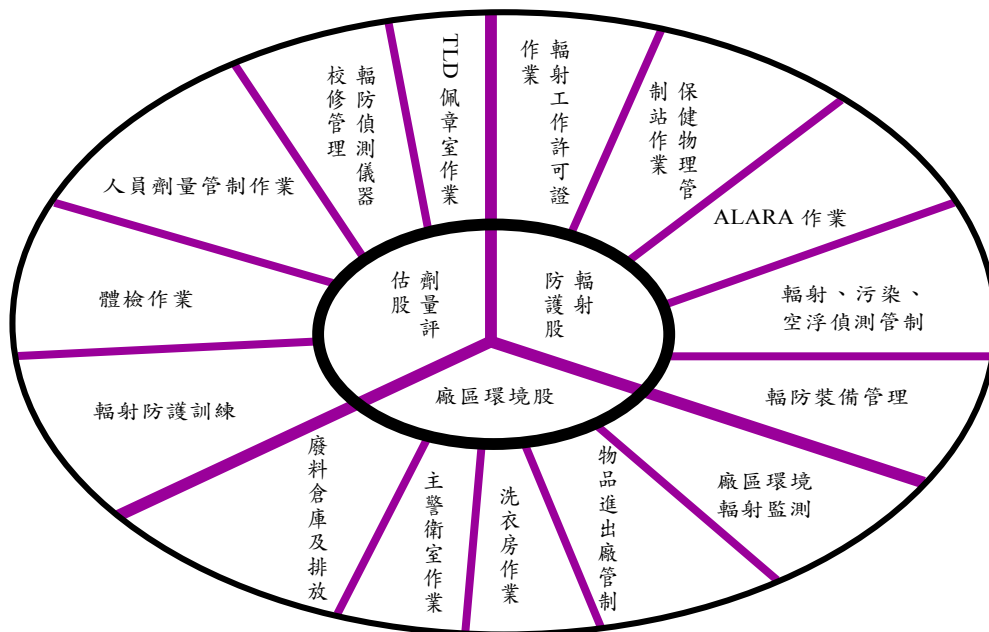


圖 8.10 核一廠保健物理課各股工作內容

股如圖 8.9，各股工作如圖 8.10 所示。輻射防護股的工作包括輻射工作許可證作業及各項動態管制作業。劑量評估股的工作包括 TLD 佩章作業、體檢作業及訓練。廠區環境股的工作包括環境輻射監測、物品進出廠管制作業及洗衣房作業。輻防人員經過原能會考試鑑定後可取得初級、中級及高級執照，表 8.5 為核一廠輻防人員學歷及輻防執照取得情形。保健物理課的崗位遍布全廠，其中機組管制站分為 4 班，實施 24 小時輻射安全管制；機組大修時得視工作需要臨時增設多個輻射安全管制站執行輻射安全。

表 8.5 核一廠保健物理人力資源

輻防執照	學	歷	職	等
高級	2 張	研究所	5 人	工程師 13 人
中級	7 張	大專	14 人	技術員 20 人
初級	19 張	高中	13 人	
		國中	1 人	
合計	28 張		33 人	33 人

2. 核一廠保健物理課大事記

- 民國 68 年 一號機執行第一次歲修。
- 民國 74 年 主警衛室設置保健物理管制站。
- 民國 78 年 電廠增設核安副廠長及廢料處理課，原屬保健物理課管轄的固體廢料作業交由廢料處理課管理，並新設置劑量評估股。
- 民國 79 年 啟用新洗衣廠房並設置

洗衣房管制站。

- 民國 80 年 廢氣廠房增設通風排氣監測系統。
- 民國 80 年 建立廠區環境輻射監測系統。
- 民國 81 年 主煙囪及廠房煙囪排氣監測系統更新。
- 民國 83 年 建立人員輻射劑量管制電腦聯線系統。
- 民國 84 年 廢氣排放由空氣循環式改為蒸汽稀釋式。
- 民國 88 年 壹號貯存庫啟用。
- 民國 89 年 設置包商貨櫃區輻防管制站。
- 民國 89 年 執行再循環管路化學除污。
- 民國 90 年 汽機廠房通風系統增設高效率濾器。
- 民國 90 年 實施輻射安全指標評鑑制度。
- 民國 91 年 游離輻射防護法宣導。
- 民國 91 年 實施加氫水化學(HWC)造成蒸汽管路輻射增強的輻防對策。

3. 重大輻射防護經驗

- 民國 68 年 反應爐蒸汽乾燥器修改
- 民國 70 年 抑壓池(torus)修改
- 民國 72 年 熱應力消除改善(IHSI)
- 民國 72 年 氬氣與廠房空調關係的研究。
- 民國 73 年 爐心探針的輻射特性研究。
- 民國 73 年 廢氣系統水封完整性與空浮的研究。
- 民國 74 年 非破壞檢驗(射線照相與超音波檢測等)輻防經驗。

- 民國 75 年 加馬能譜與輻射偵測儀器關係。
- 民國 76 年 銅管除污輻防經驗。
- 民國 77 年 再循環管路更換輻防經驗。
- 民國 78 年 再循環泵檢修輻防經驗。
- 民國 78 年 抑壓池塗裝工程。
- 民國 78-80 年 解決空浮肇因及改善。
- 民國 85 年 建立廠區加馬能量分布及偵測儀器轉換因子。
- 民國 86 年 低於法規關切 (below regulatory concern, BRC)輻防探討。
- 民國 88 年 燃料池水下更換燃料架的潛水俠輻防作業。
- 民國 89 年 增設汽機廠房輻射屏蔽。
- 民國 89 年 再循環管路及爐水淨化管路的化學除污作業。
- 民國 90 年 氬氣濃度變化與大型地震關係。
- 民國 91 年 建立管制站輻射狀況顯示電腦系統。

4. 核一廠保健物理課重要設備變革

(1)人員劑量計的演進

核能電廠設立之初採用游離腔式筆型劑量計作為每日劑量管制依據。由於是人工登錄不易查詢，後來採用數字型電子劑量計，可自動將每次進出管制區接受的劑量登錄於電腦。除了利於查詢

外，更可藉工作前設定警報值有效管制工作人員的劑量。

(2)人員污染監測器的演進

核能電廠早期使用的人員污染監測器為蓋革式手足偵檢器，其缺點為反應慢、對貝他射線不靈敏、只能偵檢手足，故目前均更新為充氣式比例型全身污染監測器。其優點為偵測器屬大面積充氣式比例型，對貝他射線反應靈敏，且可快速偵測全身。同樣的設計可用來偵測大面積的紙張或工具，用以取代傳統的手提式蓋革型污染偵測器。

(3)污染拭跡計測儀器的演進

污染拭跡偵測是核能電廠中一項重要的輻射防護作業，係將直徑為 2 吋拭紙擦拭可能受污染的地面或設備表面，再將拭紙置入閃爍計數器偵測。此種傳統計測方法一次僅可偵測一張拭紙，且須人工計算，無法快速有效計測大量試樣，因此目前已採用一次可計測 8 個以上樣品的計測系統。此計測系統採用充氣式比例型薄膜偵檢器，可將背景值抑至極低，因此靈敏度極高適合於作外釋管制偵測，且可由電腦自動計算活度。

(4)其他輻防設備變革

由於科技的進步，輻射偵測儀器日新月異，核能電廠為確保輻射安全的品質，不斷更新裝備

以期達到最佳的管制。過去用具屏蔽的四面型「廢棄物包」活度偵測儀，可計測物件的總活度及比活度。為提高偵測靈敏度降低最低可測值，現在改用六面型廢棄物包偵測儀。

為了加強核能電廠的污染管制，主警衛室除了設有閃鑠型門框偵測器外，亦增設有閉路電視監控設備。若門框偵測器警報動作時，會自動錄影以供追查。為了讓工作人員能隨時瞭解廠區輻射狀況及工作地點環境的輻射資訊，核一廠保健物理管制站設置有電腦輻射展示系統，更可藉由網路得知運轉各項資訊供輻射防護管制之用。

5. 核一廠輻射防護作業

(1) 核燃料循環輻射防護作業

核能電廠使用鈾作為發電的原料，新鈾燃料由國外船運至港口碼頭，保健物理人員即須至碼頭進行圍籬管制作業，並伴隨押運至電廠，此即為核燃料循環輻射防護作業的開始。新鈾燃料運抵電廠後，經過檢查後置入反應器中使用。通常鈾燃料可使用期間長達一年半，在這段期間，電廠屬於正常運轉發電狀況。鈾 235 分裂產生的熱能將爐水加熱成蒸汽，蒸汽再送至汽機推動發電機作功產生電力。於此同時含放射性的流體會隨各系

統的管路進入各廠房造成部分輻射區域。主要的輻射管路計有蒸汽系統、爐水淨化系統、餘熱移除系統及廢棄物系統，若有放射性物質洩露則會造成污染區或空浮管制區。為了維持核能電廠的正常發電，電廠須執行一些例行的維護檢查工作，而保健物理課的職責就是確保這些工作人員的輻射安全，包括劑量管制及抑低、工作區域輻射偵測、提供輻防衣物及裝備、管制污染或空浮、進出管制區的登錄及偵測、以及屏蔽的設置等。這些輻射防護工作經歷多年的經驗累積已形成許多管理制度，並已納入於程序書中執行。

(2) 核能電廠大修輻射防護作業

當鈾燃料燃耗至一定程度時須進行更換燃料作業，此時反應爐蓋須開啟，爐心組件須詳細檢查，汽輪機及發電機等主要設備拆解檢查，全廠各系統的泵閥亦視需要進行拆修，故工作人員須進入一些平時禁入的高輻射區，而拆解時設備本身亦屬放射性污染設備。同時大修時工作人數眾多工作繁雜，人員集體劑量較高。此時的輻射防護作業最困難也最重要，通常保健物理課會設置數個臨時管制站，負責各廠房的輻射防護作業，對於有潛在危險或劑量較高的工作，工作前須召開 ALARA 會議，做好完善的輻

防措施才可施工。

(3) 特殊輻射防護作業

有些維修工作性質特殊，需要特殊器具及裝備，有些維修工作劑量率甚高，輻射安全顧慮較多。核一廠是我國的第一座核能電廠，故累積了許多特殊的輻射防護經驗。重要的經驗計有：爐心內乾燥器的修改、抑壓池修改、熱應力移除改善(IHSI)、再循環管路換管、抑壓池塗裝、燃料架更新潛水作業、爐心側板檢修、爐心功率探針(TIP)檢修、非破壞性檢驗(射線照相、超音波檢測)、中子偵測系統檢修、加氫水化學等。

6. 輻射防護安全文化的演進

輻射防護作業是確保輻射安全的措施，要落實輻射安全的觀念則須具有安全文化的素養。核能電廠甚注重安全文化，且自民國 78 年起不遺餘力的推行了十餘年，不論在工安、核安或輻安上均頗具成效，例如工具箱會議(Tool Box Meeting, TBM)已成為任何輻射工作前必要的協調工作會議，各工作部門可提出有關工作細節及輻射防護相關的問題。指認呼喚是用手指指向有潛在危險或須注意的事物，大聲呼喊應注意的事項，以做好自我確認，此種工作習性已廣泛用於電廠輻射防護工作中。輻射工作許可證是管制輻射安全的有效制度，核一廠的輻射工作許可證依

其風險分為三個等級：具有潛在輻射安全顧慮的工作列為 ALARA 等級，工作區輻射強度逾 1 毫西弗/小時的工作列為高輻射級，其餘為一般級。各級輻射工作許可證須由不同層級審核及接受不同的輻防指令，自民國 90 年 10 月開始，核能電廠實施輻射安全績效指標評鑑制度，就職業曝露及民眾防護實施的成效進行考核，以綠白黃紅燈號作為績效良窳的指標，在此制度下輻射安全的品質更加提升。此外我國即將實施「游離輻射防護法」，採用更嚴格的 ICRP-60 的劑量限值，因此核能電廠的配套劑量管制措施須更嚴格執行。

§8.7 核二廠保健物理課

核二廠位於臺北縣萬里鄉，鄰近風景區野柳，如圖 8.11 所示。

1. 核二廠保健物理課大事記

民國 67 年(1978)3 月 15 日核二廠正式成立。

民國 68 年 7 月核二廠先期輻防人員至核一廠培訓。

民國 69 年 1 月核二廠保健物理課成立，王耀璋先生為第一任課長。組織包括輻射防護及廠區環境兩股，廠區環境股主要任務為固體廢棄物處理相關工作。

民國 69 年 8 月臺電公司保健物理大隊成立，成員至核一廠受訓。

民國 70 年設立核二廠保健物理主管制站 (access control station)，並開始全廠員工輻射防護訓練。

民國 72 年 7 月 11 日，開始第一次核二廠一號機工期 87 天的大修。現場各重要區增設臨時輻射防護安全管制站，提供歲修人員進出輻射安全管制。

民國 74 年 5 月 29 日，開始第一次核二廠二號機工期 46.96 天的大修。

在前 10 年輻射安全營運中，硬體方面的改善包括：

- 乾井內加裝半永久性屏蔽，降低工作環境輻射背景。
 - 全身污染監測器汰舊換新，替代舊型手足偵檢器。
 - 輔機一樓、三樓輻射管路加裝屏蔽改善。
- 軟體方面的改善包括：
- 劑量管制電腦化作業及跨廠連線作業。
 - 人員劑量合理抑低(ALARA)觀念的加強訓練。

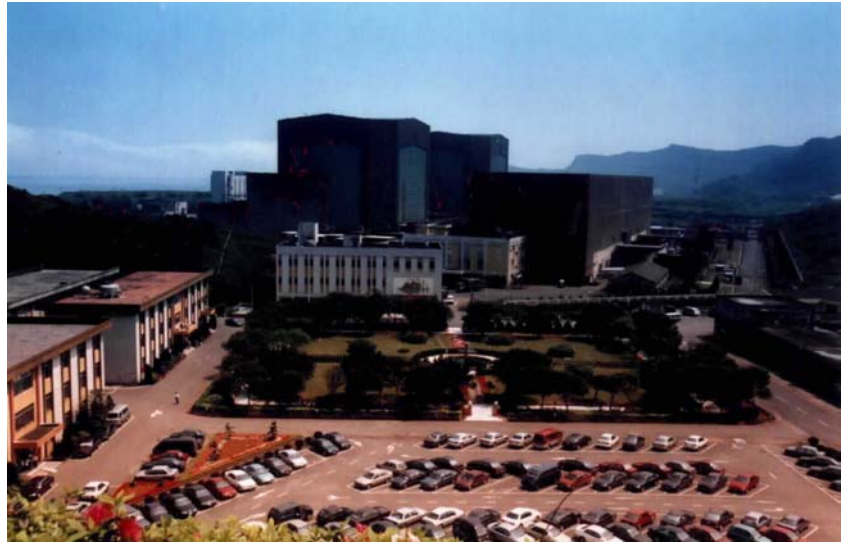


圖 8.11 核二廠外貌

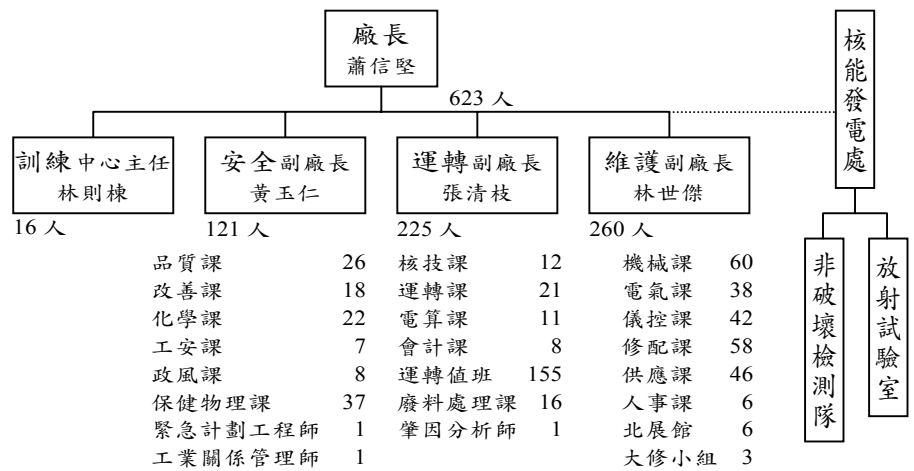


圖 8.12 核能二廠組織體系(民國 91 年 4 月)

- 輻射防護訓練教材的更新建立。

民國 78 年輻射防護課何偉股長調昇核一廠保健物理課長。

民國 78 年保健物理大隊核二分隊歸籍併入核二廠保健物理課。

民國 78 年 6 月核能部門改組，電廠組織新增核能安全副廠長，由放射試驗室黃主任玉仁先生調昇。保健物

理相關業務由運轉副廠長移轉其所屬管轄。彭永昌先生接第二任保健物理課長，保健物理課新增劑量評估股。保健物理課廠區環境股原負責的固體廢棄物處理業務移轉新成立的廢料處理課主辦。

民國 79 年 7 月彭課長調臺電核能後端營運處，改由王昭銘先生接第三

任課長。

民國 82 年 3 月 20 日，二號機第八次歲修期間，發生用過控制棒葉片 (control rod blade, CRB) 吊移工作人員劑量超曝露事件。肇因分析為：(1)CRB 掛勾(hanger)設計不當，(2)工作人員未注意高輻射的用過 CRB 不能上升到太接近水面，(3)區域輻射偵

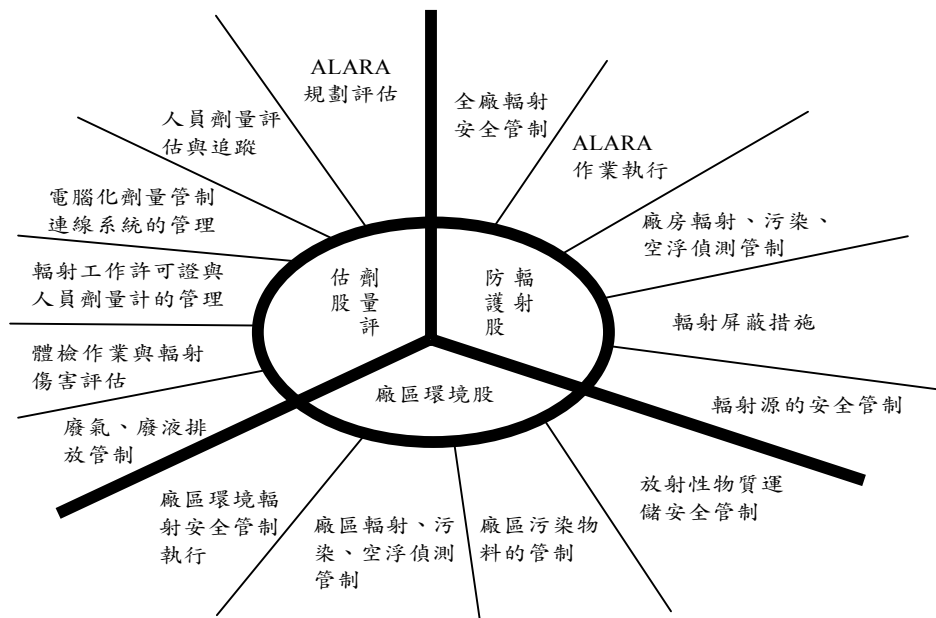


圖 8.13 核二廠保健物理課組織和職掌

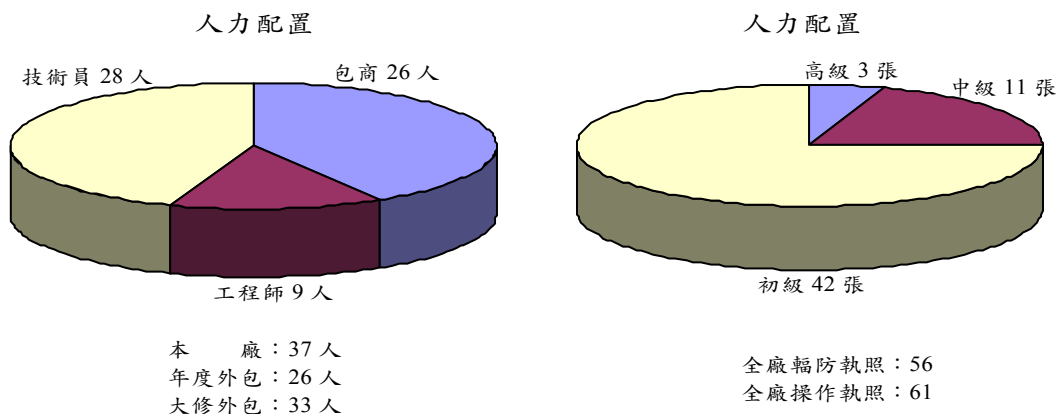


圖 8.14 核二廠輻防專業人力配置與統計(民國 91 年 6 月)

測器(area radiation monitor, ARM)因電纜破裂短路致警報失效。

民國 82 年 5 月起,全面推行嚴謹的輻射工作許可證 (radiation work permit, RWP)分類及分級執行潛在輻射風險的安全管制,廣泛使用移動式大面積數位顯示及電子人員劑量警報器 (electronic personal dosimeter, EPD),以提升工作現場示警功能,落實教育訓練強化實務以達「預防勝於追蹤」的輻射安全理念實踐。

民國 84 年執行輻射安全主管制站隔間及動向改善工程,以及劑量系統的自動化作業處理。

民國 84 年建立觸控式現場輻射污染顯示查詢系統。

民國 84 年 11 月為降低塑膠袋的使用量,製作兩種規格可重複使用的污染工具袋,供管制區內的非示警區與示警區使用。

民國 85 年執行輻射安全主管制站劑量系統與門禁作業管制結合。

民國 85 年 3 月鄭琨琮股長榮獲第三屆中華民國核能安全獎。

民國 86 年建置完成廠區電腦連線輻射監測系統及車輛偵檢器配置。

民國 86 年 9 月 24 日鄭琨琮股長調昇核二廠廢料處理課課長。

民國 90 年 2 月各系統與管路於檢修期間,要排除異物侵入(foreign material exclusion, FME)以避免造成水質不良,影響到系統的安全與增加

廢棄物,製作防止異物侵入罩供現場檢修課使用。

民國 90 年 6 月王昭銘課長退休。

民國 90 年保健物理辦公室遷出主警衛室(保護區)至第三行政大樓。

民國 90 年先後完成輻射工作許可證、門鎖申請及物料/化學品進廠房電腦化線上申請處理作業,簡化流程。

民國 91 年 7 月張繼聖先生就任保健物理課課長。

2. 核二廠組織體系

核二廠組織體系如圖 8.12 所示。

3. 核二廠保物課的組織和職掌

核二廠保健物理課的組織職掌如圖 8.13 所示。

4. 核二廠輻防人力配置

核二廠輻防人力配置如圖 8.14 所示。

§8.8 核三廠保健物理課

核三廠位於屏東縣恆春鎮南灣海邊(圖 8.15),占地 345 公頃。共計裝置 95 萬 1 千瓩核能發電機組兩部,裝置容量合計 190 萬 2 千瓩。反應爐是西屋公司製造的壓水式反應爐。

核三廠工程計畫係於民國 65 年 7 月獲行政院令正式核定,66 年 10 月核三分處正式成立,立即委請榮工處從事廠區整地開挖工作,於 67 年元月中旬完成。廠房結構物的建造由中華工程承

包，67年5月排紮首批鋼筋。69年7月10日核三廠設立。一號機於73年7月27日商業運轉，二號機於74年5月18日商業運轉。

保健物理課於民國70年4月設立，第一任課長葉偉文先生(72.7-77.1)，第二任課長邱秋華先生(77.1-85.8)，第三任課長孫元龍先生(85.8-現任)。

1. 保健物理人力資料

保健物理課初始設置輻射防護股及廠區環境股，工作人員有55人(91年9月員額30人)。早期各核能電廠機組歲修，各廠的保健人員都可派員相互支援。後來各核能電廠保健人員離退增多，彼此間就不再派員支援，由各歲修核能電廠招募短期「合作商」，施予訓練作支援人力。平時作業不足的人力，也以「協力商」依照電廠相關程序書的規定，施予訓練，經技能檢定合格後，支援輻防相關工作組。隨著對輻射安全的要求日漸重視，對放射性廢棄物的處理品質標準日益提升，復針對分工的專業及權責的專精，於民國78年9月增設劑量評估股，並設置「廢料處理課」專責各類放射性廢棄物的營運處理。保健物理課的除污作業及廢棄物固化作業移由「廢料處理課」辦理。

2. 輻射防護作業

核三廠是屬於壓水式反應器

核能發電廠，反應爐燃料束產生的熱量，經由反應爐冷卻水攜帶至蒸汽產生器，傳遞給二次側飼水，把二次側飼水加熱變成飽和蒸汽去推動汽輪發電機。二次側的系統沒有放射性，所以核三廠的汽機廠房不列入輻射安全管制區。

核三廠的輻射安全管制區包含圍阻體廠房、燃料廠房、輔機廠房、以及進出廠房與二部機組共用的廢棄物廠房。進入輻射安全管制區工作的人員，必須符合法令規章的規定佩戴輻防裝備。

核三廠的運轉系統，分成有放射性的一次側系統及沒有放射性的二次側系統。二次側系統的區域不列入輻射安全管制，但利用線上的各類儀器。即時監測二次側系統的運作狀況。確證二次側系統沒有放射性，運作正常。

3. 輻射防護作業改善

(1) 劑量管制系統電腦化



圖 8.15 核三廠外貌

核三廠發電初期，人員輻射劑量管制作業，全部依賴人工處理。當時使用游離腔式劑量筆，在表格上由工作人員填寫每次進出管制區受曝露的劑量與時間。為了提昇管制工作效率與有效掌握工作人員最新劑量資訊，由電算課自行設計電腦化劑量管制作業系統，使得每位工作人員在進入現場工作之前，可以在電腦銀幕上立即查知自己的核能體檢、全身計測、輻防訓練、面具測試、授權劑量剩餘值等基本資料。

歷年來的工作績效如下：

- 民國 73 年時，核三廠輻射安全管制站每天提供劑量管制紀錄表，第二天將其收回再把每個人受曝露的劑量轉登錄於每月登記表。
- 由於電腦逐漸普遍，暫改成每月登記表存入電腦，以方便查詢人員劑量相關資料。
- 後來核三廠電算課發展「人員劑量管制系統」，總公司又配合千禧年電腦危機，委託廠商設計「核能電廠輻射劑量管制系統」，如此才全面電腦化作業。
- 建立劑量管制系統以後，工作人員在領取「個人劑量警報器」準備進現場時，電腦立即核對當事人的授權劑量剩餘值、核能體檢、全身計測、輻防訓練、面具

測試等日期是否已逾期。以上的基本限制條件當中，任何一項不符合規定，就無法進入輻射作業場所工作。

- 個人劑量警報器讀取機與電腦連線，可隨時更新個人累積劑量，因此可有效掌控是否有劑量超曝露情形。若有特殊異常劑量出現，也可即時採行干預動作。
- 由於採用電腦化劑量管制系統取代人工作業，以前的各種紀錄表格都省略了，資料儲存改用光碟片，查詢劑量相關資料更是輕易可得。因此也獲得節省人力、減少資料倉儲壓力、不必浪費紙張、縮短管制劑量作業工時等優良績效。

核三廠於民國 89 年 10 月輻射防護作業全面施行無紙化。每日、每週、每月例行偵測報表的紀錄及審核，工作日誌的紀錄及審核，輻射工作許可證的申請及審核等各項作業採行電腦網路作業。

輻射防護文件作業採電腦網路無紙化作業，節省大量文件製作及資料保存之人力物力，資訊的傳輸更迅速普及化，增進工作效率。

(2) 數位式輻射偵測系統改善

數位式輻射偵測系統(digital radiation monitoring system, DRMS)

係美國(General Atomic, GA)公司為核子相關設施專業製造的產品，此系統的最大特色就在「數位」這個字上。簡單的說，整個 DRMS 系統全部採用電腦(迷你電腦或微電腦)來處理資訊，而電腦只能辨認兩種符號，0 或 1，所以整個系統所運作處理的訊息都是以 0 或 1 的組合來表示，故稱作數位式輻射偵測系統。

核三廠廠區內所有的重點區域共安裝有 80 多個輻射偵測器，每個偵測器都有它自己專用的微電腦，快速不斷地取樣、統計及處理儲存該輻射偵測器所量測到的輻射資料，並且藉著通訊電纜將所有資料連結到其心臟中央監控電腦整合，構成全廠完整的輻射偵測系統。本系統提供兩類輻射偵測器的線上資訊：

- 提供設備管路中的液體、氣體輻射強度。
- 提供各輻射區域地點的劑量率。

DRMS 所提供的線上資訊及警示信息，可供運轉員及輻射防護人員研判管路中流體的狀態正常與否，進而查知故障的系統，及早採取補救措施。

廠房內各空調的排氣出口均裝置有輻射偵測器，24 小時監測排放氣體的輻射強度。

全廠的液體匯流排放渠道亦裝

設有輻射偵測器，監控液體的排放狀況。若有異常，除產生警示提醒運轉員及輻射防護人員注意外，亦產生隔離信號可關閉排放來源。

核三廠數位式輻射偵測系統係配合電廠建廠施工時裝設，於當時輻射偵測系統而言，屬於劃時代的產品，近 20 年來對電廠安全運轉及輻射防護有很大的貢獻。然而，因資訊設備日新月異，系統心臟(中央監控電腦設備)的部分功能已不符電廠需求。故於民國 86 年委託核能研究所重新規劃設計，由核能研究所與原製造廠技術合作於民國 87 年 10 月完成中央監控電腦的軟硬體更新，並增加部分搜尋功能與簡便的操作介面，使本系統的功能更為強大，對運轉安全及輻射防護有更大的幫助。

(3)施行輕便型輻防衣

自民國 86 年 11 月 1 日開始實施，臺電員工及包商進入輻射管制區內需穿著輕便型輻防衣，並統一留在廠區內回收清洗，可抑減極少量的放射性物質散播。

(4)設置保健物理環測室

民國 78 年 8 月 1 日設置保健物理環測室。如此可提昇工作品質及時效，保障輻射安全防護作業。

(5)車輛偵檢器改善

原安裝於主警衛室旁的車輛偵檢器，是法國 BEFIC 公司 SAS-II

型的 NaI(Tl)閃爍偵檢器。由於使用年限久，原廠已不再生產，無備品且維修不易。核三廠乃自行研發，於民國 85 年 10 月利用舊的門框式偵檢器(DM-2 型)改裝成車輛偵檢器，取代 SAS-II 型偵檢器。

因此，偵測靈敏度提升 50 倍，SAS-II 型最低可測值為 10 μCi ，DM-2 型最低可測值則為 0.2 μCi 。節省購置成本 250 萬元。

(6) 廠區輻射偵測器改善

核三廠分布於廠區各方位的環境監測器，原係採用高壓游離腔型(HPIC)監測器。因使用年數已久，且偵檢頭屬高壓連續供電，致儀器設備漸趨老化，又老舊通信線路故障頻繁，造成維修及使用上的困擾，亟需汰舊換新。於民國 89 年經研發在增進工作效率、工作品質及減少成本支出的前提下，就現有的 900 G 型監測器瞭解其特性、功能等後，替代高壓游離腔型監測器。

工作績效

- 節省購置成本，增進維修時效，運用電廠既有人力經驗技術，以達到極價廉，可顯示各站輻射劑量率的監測設備。
- 增進維修時效，提昇自有技術。
- 更換 900 G 型監測器後，可提供快速、正確的輻射資料，確保環境輻射偵測品質，提高更穩定及

可靠的核能安全形象。

- 提供更多的功能，如當日最大、最小值、趨勢圖及歷史資料儲存功能等等。

(7) 反應器冷卻水泵維修運送高輻射率改善

笨重巨大的反應器冷卻水泵輻射劑量率高達 55 mSv/h，運送維修作業，工作人員會接受很高的劑量。原製造商西屋公司未提供屏蔽運送架，核三廠多次努力自行於民國 89 年 9 月研發 1 吋厚鉛屏蔽運送架，有效抑減工作人員的劑量。

(8) 蒸汽產生器渦電流檢測作業改善

核三廠是壓水式反應器核能電廠，設置有三座蒸汽產生器，每座蒸汽產生器有 5624 根 U 型熱交換管。民國 74 年執行 U 型熱交換管渦電流檢測，須耗費 4500 人工時，累積 90 人毫西弗的集體劑量。經由保健物理課與檢測隊不斷的研商討論，改善作業設備為自動化，大幅減少工作時數，抑低受曝露的累積劑量。民國 91 年作業，使用 1250 人工時，累積 37 人毫西弗的曝露劑量。

(9) 反應爐穴除污作業改善

民國 74 年反應爐穴除污作業耗費 800 人工時，累積 10 人毫西弗的集體劑量。經保健物理課與廢料處理課除污股不斷研商討論，改善

作業設備為半自動化，大幅減少工作時數，抑低受曝露的累積劑量。民國 91 年作業，使用 57 人工時，累積 0.86 人毫西弗的集體劑量。

(10)工作區域輻防電腦動畫展示系統製作

電廠內很多高輻射的工作區域，不適合工作人員長時間停留作工作討論。保健物理課和電算課於民國 86 年引用當時的電腦硬體及軟體功能，研發工作區域輻防電腦動畫展示系統。研發成功的工作區域輻射防護電腦動畫展示系統，方便工作人員直接使用電腦儲存的高輻射工作區域檔案展示資料，詳細作工作前的討論規劃，大幅減少在高輻射區的停留時間，有效抑低工作劑量。配合電腦硬體及軟體功能的增強，本套系統於民國 91 年已全面更新，提升作業功能。

§8.9 核四廠保健物理課

核四廠位於臺北縣貢寮鄉仁里村鹽寮地區，約在基隆市東南方 20 公里，臺北市東方 40 公里；宜蘭市東北方 33 公里處。廠址面積約 480 公頃，裝置容量每部機組 135 萬瓩，兩部機組合計 270 萬瓩。其蒸汽供給系統是由美國奇

異公司設計，額定熱功率輸出為 3926 MWe；汽輪發電機組是由日本三菱公司提供，額定出力為 1356 MWe；而放射性廢棄物處理系統則由日本日立公司設計製造(圖 8.16)，核四廠重要資訊摘要如表 8.6。

核四廠採用的反應器屬於第七代沸水式輕水反應器，叫做「進步型沸水式反應器」(ABWR, Advanced Boiling Water Reactor)，係美國奇異公司結合國際間沸水式反應器製造商，融合全世界過去 30 多年來累積的核電廠設計與運轉經驗；採用世界最先進的沸水式反應器技術，在「安全第一」的設計理念下，協力發展出來的。此種 ABWR 同時獲得美國及日本核能管制機關頒發「最終設計合格證書」。世界上第一、二部 ABWR 隸屬日本東京電力公司，已分別於 1996 年、1997 年在柏崎刈羽核能電廠進行商業運轉。

核四廠 ABWR 機組設計在抑減輻



圖 8.16 核四廠一號機(民國 91 年 8 月 2 日拍攝)

射劑量方面則有下列特色：

- 反應器壓力槽：採用抗腐蝕不銹鋼鍛造成型的鋼環製成，一方面減少鈷 60 的產生；另一方面省掉縱向焊道檢測，可降低工作人員輻射劑量。
- 反應器內部再循環水幫浦：省掉外部再循環管路，減少管路維修工作人員輻射劑量。
- 反應器爐水淨化系統：擴大反應器爐水淨化容量一倍，改善水質，減少放射性廢料，降低工作人員輻射劑量。

目前，核四廠是一個正在施工興建的電廠，截至民國 91 年 4 月，施工實際累積進度為 37.49%。依據核四廠建廠環境影響評估要求，核四廠應於一號

機初始燃料裝填前四年成立；因此，於民國 90 年 6 月 22 日臺電董事會通過派任徐懷瓊先生為核四廠首任廠長，同年 7 月 1 日派任蔡富豐先生為維護副廠長，8 月 8 日核四廠掛牌正式成立，由此開始進行核四廠建廠的籌組與建制工作；其重要設備資訊如表 8.6；核四廠建廠的內部規劃時程：民國 94 年 8 月一號機初始燃料裝填；95 年 5 月一號機開始商業運轉 96 年 5 月二號機開始商業運轉；其建廠重要紀事如表 8.7 所示，而其工程進度內部規劃時程與報經濟部整體計畫時程表 (integrated project schedule, IPS) 規劃時程如圖 8.17。

核四廠保健物理課的籌組，於民國

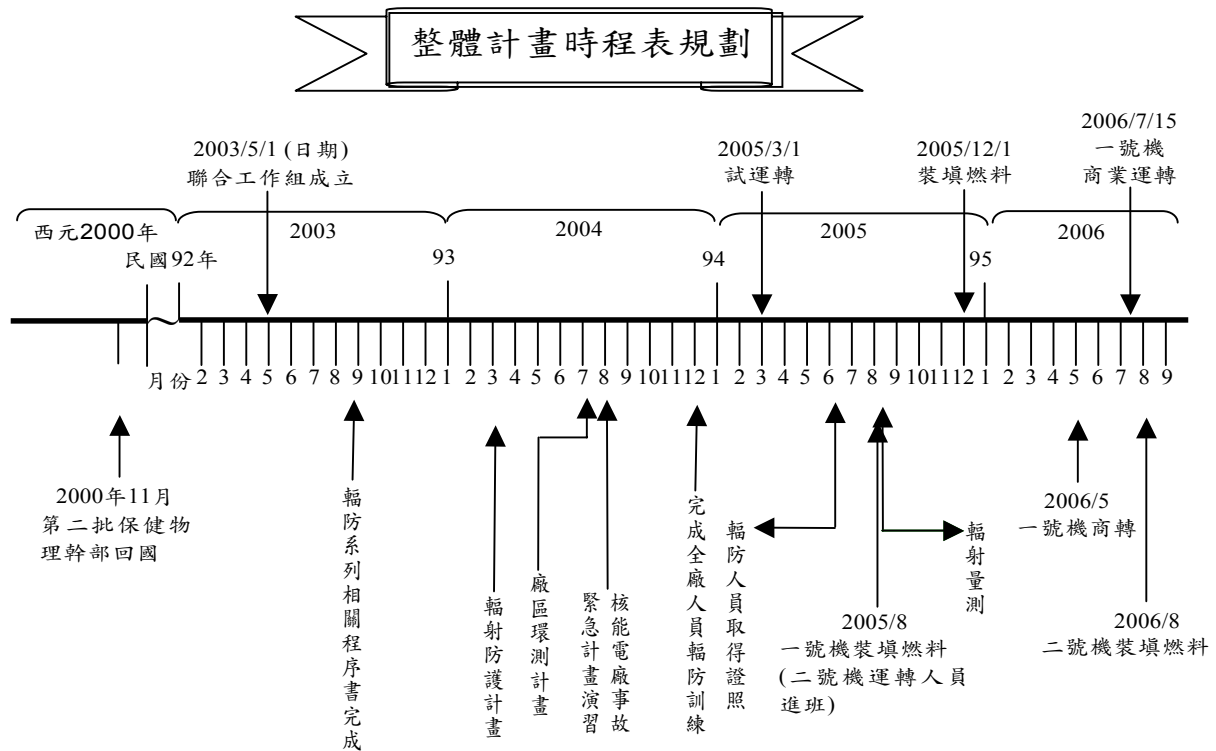


圖 8.17 核四廠保健物理課工作里程碑

91年3月間，徐廠長指派楊昌鵬先生擔任保健物理課長後開始進行保健物理課的規劃與建制。其建制規劃主要工作計有：(1)人力規劃及訓練，(2)工作規劃及建制兩項。

1. 人力規劃及訓練

民國88年11月臺電公司公布核四廠組織圖表如圖8.18，89年5月至11月核四廠選派楊昌鵬與行玉樹二先生赴美國日本接受保健物理訓練，90年10月規劃保健物理課人力需求如表8.8，91年3月規劃保健物理人員訓練，91年5月核四廠保健物理課各股人員訓練及證照要求如表8.9。

2. 工作規劃及建制

我國「游離輻射防護法」第一條立法精神，即在「防制游離輻射之危害，維護人民健康及安全」，要求輻射作業必須「合理抑低」輻射劑量。因此，核四廠保健物理課在臺電「核能發電輻射安全」政策聲明之下，協助廠長推動全廠的輻射防護管制工作。一方面提供全廠的輻射防護安全裝備與作業程序，並向全廠每一位工作人員宣導輻射防護作業；另一方面將保健物理業務劃分成輻射防護股、廠區環境股及劑量評估股三部分，其執掌分工如圖8.19。未來在配合公司精簡人力、提昇效能的政策下，將充分發揮互助合作與分層負責的精神，有效的執行及管制輻射防護作業，通力達成核四廠保健物理的工作目標：

- 工作人員所受的劑量滿足合理抑低原則，達成年集體等效劑量不超過1人西弗/機組；最大個人年有效劑量不超過20毫西弗及單位發電量的集體等效劑量抑低至1.5人·毫西弗/百萬瓦年·機組。
- 人員、區域及設備的放射性污染管制，滿足合理抑低原則；達成每年工作人員全身計測及尿樣分析檢測結果：達0.1%年攝入限度紀錄基準的人次不超過100人次，達1%年攝入限度調查基準的人次不超過2人次。
- 輻射防護人員具備充分的知能與技術以執行輻射防護管制作業。達成持有原能會核發的高級輻防專業證書至少3張，初級輻防專業證書至少10張。

工作規劃時程有：

- 民國92年9月 完成程序書編寫作業
- 民國93年3月 完成輻射防護計畫
- 民國93年7月 完成廠區環境偵測計畫
- 民國93年8月 完成核能電廠事故警急計畫演習
- 民國93年12月 完成全廠人員輻防訓練
- 民國94年6月 完成輻防人員取得證照
- 民國94年8月 完成輻射量測

表 8.6 核四廠重要設備資訊摘要

主要項目	內容概要	
廠址位置	臺北縣貢寮鄉	
土地面積	480 公頃	
裝置容量	135 萬瓩兩部	
主要設備形式	進步型沸水式反應器	
年平均使用燃料	81 公噸	
投資金額	1697 億元(評估修訂中)	
顧問公司	美國石威公司(Stone Webster)	
反應器製造商	美國奇異公司(GE)	
汽機製造商	日本三菱公司(MHI)	
放射性廢料處理製造廠	日本日立公司(Hitachi)	
預定完工時間	一號機	2006 年 7 月 15 日
	二號機	2007 年 7 月 15 日

表 8.7 核四建廠重要紀事

民國 88 年 6 月-12 月	第一批運轉維護幹部出國訓練
民國 88 年 10 月	臺電 462 次董事會通過核四廠組織
民國 89 年 3 月 1 日	第一批維護幹部支援龍門施工處
民國 89 年 6 月 1 日	試運轉籌備小組進駐工地
民國 89 年 6 月-12 月	第二批維護幹部出國訓練 (其中包含保健物理幹部楊昌鵬與行玉樹二先生)
民國 89 年 10 月 27 日	行政院宣布核四暫停興建
民國 90 年 2 月 14 日	行政院宣布核四恢復興建
民國 90 年 6 月 22 日	臺電董事會通過派任徐懷瓊先生為廠長
民國 90 年 7 月 1 日	派任蔡富豐先生為副廠長
民國 90 年 8 月 8 日	核四廠正式掛牌成立
民國 90 年 8 月 20 日	第二批維護幹部支援龍門施工處 (保健物理幹部楊昌鵬、行玉樹、陳有賢、闕志修諸先生陸續調入支援施工處)
民國 90 年 12 月 1 日	第二、三批運轉幹部出國訓練
民國 91 年 1 月 9 日	調入第一批大專新進人員
民國 91 年 1 月 14 日	廠辦第一期進步型沸水式反應器技術(ABWRT)開訓
民國 91 年 3 月 15 日	派任楊昌鵬先生為保健物理課長

表 8.8 核四廠保健物理人力規劃

(1)人力規劃表*

保物課	公司內			公司外(包商-輻防員)		合計	
	職員	技術員	合計	平時	大修	平時	大修
課長	1	0	1	—	—	—	—
輻防股	4	14*	18*	15	35	33*	53
劑量股	4	4	8	5	15	13	23
廠環股	4	4	8	5	15	13	23
合計	13	22	35	25	65	59	99

*輻防股含保健物理(HP)值班人力(每部機組：每值 1 人，1 天 24 小時 4 值，兩部機組共 8 人)km

續表 8.8

(2)人力進用時程表

擬配置人力	民國 90 年	民國 91 年	民國 92 年	民國 93 年	民國 94 年	民國 95 年	合計
職員	3	3	2	2	2	1	13
技術員	0	2	20	0	0	0	22

- 註 1. 民國 95 年 4 月 30 日商業運轉。
- 2. 民國 94 年 8 月 31 日燃料裝填。
- 3. 民國 92 年 6 月招考技術員；9 月進用並受訓半年；93 年 4 月進廠工作。
- 4. 龍門施工處隨著工程增加，射線照相檢測(radiographic test, RT)作業也進入高峰期。輻防人力需求也隨著增加。

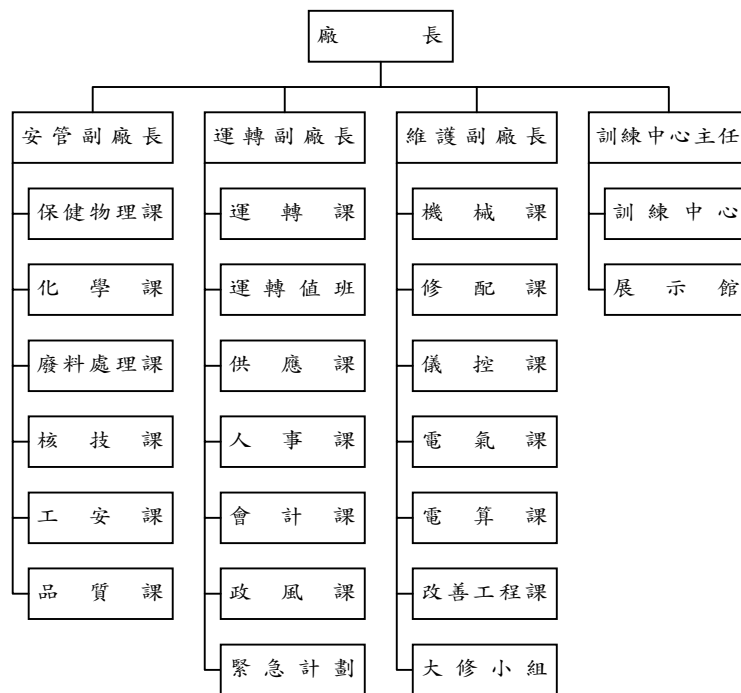


圖 8.18 第四核能發電廠組織圖

表 8.9 核四廠保健物理課各股人員訓練及證照要求

各類科目或證照	輻射防護股					廠區環境股					劑量評估股				
	股長	主辦工程師	協辦工程師	領班	技術員	股長	主辦工程師	協辦工程師	領班	技術員	股長	主辦工程師	協辦工程師	領班	技術員
ABWRT (共同基本科目)	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
一般共同科目	工安/品質	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	輻防保健核安	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	核能法規	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	政府採購法規	T	T	T	T	O	T	T	T	O	T	T	T	T	O

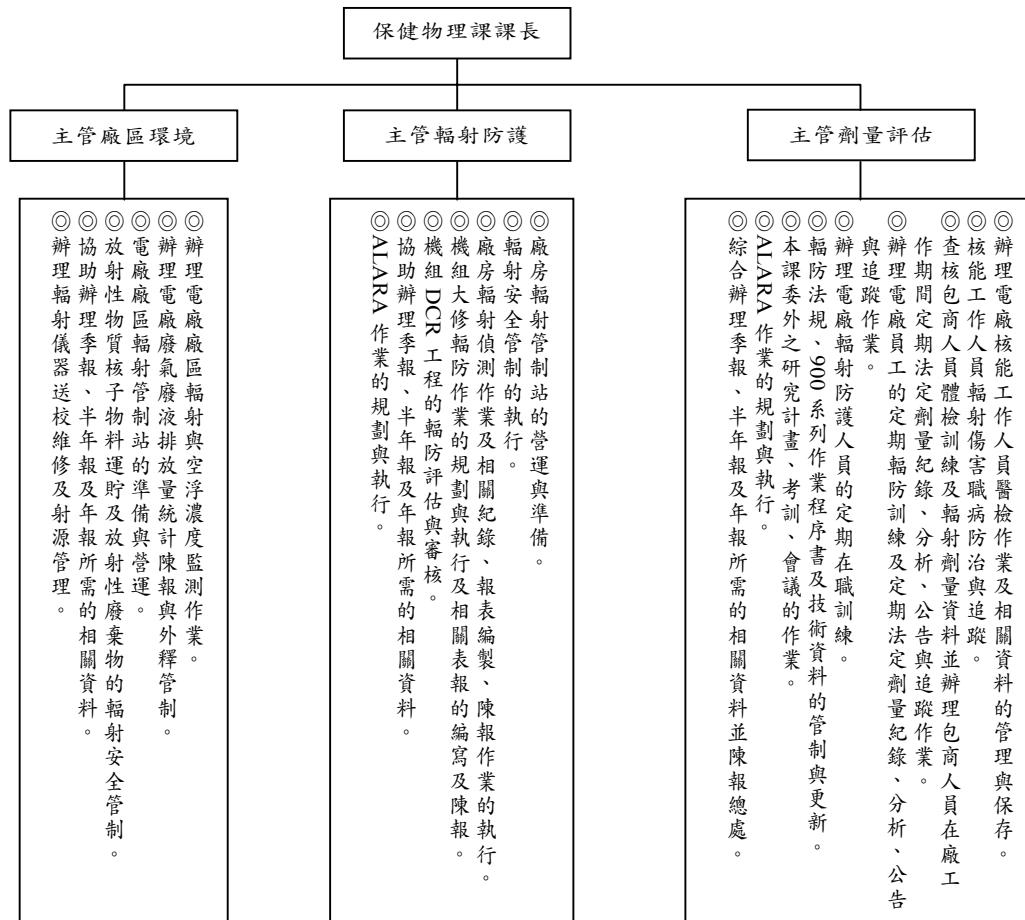
續表 8.9

保健初始必修科目	游離輻射防護法安全標準及相關法規	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	非醫用管制作業守則	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	核能電廠輻防工作守則	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	核能電廠 900 系列作業程序書	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	輻射偵檢與儀器應用	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	輻射防護概論	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	核能電廠緊急計畫	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
保健進階專業科目	輻射防護與 ALARA	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	輻射屏蔽及輻射生物效應	T	T	T	T	T	T	T	T	O	T	T	T	T	O	
	空浮放射性及管制	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	O	O	
	核電廠的外釋與監測管制	T	T	T	T	O	T	T	T	T	T	T	T	O	O	O
	外釋劑量評估	T	T	T	O	O	T	T	T	T	O	T	T	T	T	T
	體外劑量評估	T	T	T	T	O	T	T	T	O	O	T	T	T	T	T
保健進階專業科目及證書	體內劑量評估	T	T	T	O	O	T	T	T	O	O	T	T	T	T	T
	環境偵測劑量評估	T	T	T	O	O	T	T	T	T	T	T	T	T	O	O
	多頻道核種定性定量分析	T	T	T	T	O	T	T	T	T	T	T	T	T	O	O
	放射廢液、氣處理系統	T	T	T	T	O	T	T	T	T	O	T	T	T	O	O
	區域及流程輻射偵測系統	T	T	T	T	T	T	T	T	T	O	T	T	O	O	O
	最新輻防法規趨勢	T	T	T	T	O	T	T	T	T	O	T	T	T	T	O
	輻防經驗回饋	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	中級輻防執照*	L	L	O			L	L	O			L	L	O		
	初級輻防執照*			L	L	L			L	L	L			L	L	L
	基層主管人員訓練	T	T	O			T	T	O			T	T	O		
	中階主管人員訓練	T	O				T	O				T	O			

註 1. 代號：T-訓練 L-執照 O-選項 空白-不適用

2. 人員輪調依輻防股→廠區股→劑量股順序執行；輪調前後依上表安排訓練或取照

3. 初級、中級輻防人員自民國 92 年元月輻防法施行後，將分別改為輻射防護員*、輻射防護師



註：DCR = design change report (設計變更報告)

圖 8.19 核四廠保健物理課組織暨職掌分工

參考文獻

1. 翁寶山 臺灣核能史話 行政院原子能委員會 臺北市(2001)
2. 林德福 臺電核能發電概況與展望 核能簡訊 76, 5-9 (2002)
3. 沈保良 通訊請益 臺電核發處保健物理課 臺北市 (2002)
4. 何偉 通訊請益 核能一廠保健物理課 臺北縣 (2002)
5. 鄭琨琮 張繼聖 通訊請益 核能二廠廢料處理課 臺北縣 (2002)
6. 陳布燦 通訊請益 核能三廠 屏東縣 (2002)
7. 楊昌鵬 通訊請益 核能四廠保健理課 臺北縣 (2002)

第九章 輻射環境偵測

§9.1 前言

輻射環境偵測主管機關為原能會輻射防護處環境科，而執行技術性監測則為原能會輻射偵測中心。臺電的執行機構為核能發電處保健物理課與放射試驗室。原能會環境科的職掌如下：

- 游離輻射安全防護標準的擬訂與修訂事項。
- 放射性物質安全運送法規研訂事項。
- 全國輻射從業人員輻射劑量的管制事項。
- 天然放射性物質輻射劑量管理的督導與管制事項。
- 民生相關物資放射性含量的督導及管制事項。
- 輻射生物效應及流行病學調查的研究與督導事項。
- 輻射偵測、計量技術的應用及推廣督導事項。
- 游離輻射安全服務業有關輻防作業的督導及管制事項。
- 輻防管制資訊交流的規劃及執行事項。
- 其他有關輻射安全評估事項。

行政院原子能委員會於民國 63 年 2 月獲准設置臺灣輻射偵測工作站，執行國內有關環境輻射偵測業務，以維護國民的輻射安全，並於同年 9 月即正式接辦全國放射性落塵偵測作業。歷任主任為林友明、蔡昭明、連清宏、葉錦勳諸先生。民國 65 年新建大樓完成。民國 69 年奉總統令公布「臺灣輻射偵測工作站組織條例」，在業務推展方面，同年即著手進行全國環境背景輻射調查，核能一、二、三廠、蘭嶼放射性廢料貯存場與研究用核反應器的環境輻射監測。至民國 85 年 7 月 7 日再奉總統令修正公布



圖 9.1 輻射偵測中心(高雄縣鳥松鄉大華村)
「行政院原子能委員會輻射偵測中心」

§9.2 輻射偵測中心

組織條例，以強化環境輻射偵測的功能；成為「全國環境試樣放射性分析的中心實驗室」；加強分析技術及品質保證作業；積極參與國際性的比較實驗與技術交流；建立輻射偵測數據的公信力為目標。輻射偵測中心的外觀如圖 9.1 所示，歷年的重要記事如下。

民國 63 年 2 月，行政院原子能委員會奉准設置「臺灣輻射偵測工作站」，接辦全國放射性落塵偵測業務。

民國 69 年 11 月，「臺灣輻射偵測工作站組織條例」公布，負責核能一、二、三廠，蘭嶼放射性待處理物料貯存場及研究用核反應器周圍的環境輻射監測業務。

民國 74 年 2 月，舉辦「環境輻射偵測技術研討會」。

民國 74 年 10 月，開始進行臺灣地區室內外宇宙射線強度的調查，歷時一年。

民國 75 年 5 月，林友明主任與日本分析中心(Japan Chemical Analysis Center, JCAC)濱口博理事長簽訂「環境輻射度量技術合作協議」，每年定期舉辦環境試樣放射核種分析比較實驗迄今。

民國 76 年，完成臺灣地區天然背景輻射調查工作，歷時 3 年。

民國 77 年 8 月，參加美國環保署(EPA)所舉辦的放射性核種分析比較實驗，迄民國 83 年止。

民國 78 年 6 月，開始進行放射核種標準分析方法的編撰，計有「銻分析法」

等 12 種，歷時 6 年。

民國 78 年 12 月，開始進行臺灣地區室內氬活度調查計畫，歷時 2 年。

民國 79 年 4 月，完成核能電廠周圍環境輻射監測顯示系統，初期僅設置 5 站，後逐年增設並結合電腦科技，形成監測網路系統。

民國 80 年 3 月，舉辦「第二屆環境輻射偵測技術研討會」。

民國 81 年 3 月，完成氬校正室的建立。

民國 82 年 5 月，舉辦「第三屆環境輻射偵測技術研討會」。

民國 82 年，參加國際原子能總署(IAEA)主辦的「亞熱帶地區放射性核種遷移研究計畫」，歷時 4 年。

民國 84 年 4 月，舉辦「第四屆環境輻射偵測技術研討會」。

民國 85 年 3 月，參加美國能源部環境度量實驗室(EML)所舉辦的放射性核種分析比較實驗迄今。

民國 85 年 7 月，「行政院原子能委員會輻射偵測中心組織條例」修正公布。

民國 86 年 3 月，第五屆環境輻射偵測技術研討會併於「1997 輻射劑量暨安全國際會議」的環境組內舉行。

民國 86 年 7 月，輻射偵測中心「加馬劑量校正室」獲中華民國實驗室認證體系通過。

民國 88 年 3 月，舉辦「1999 年環境輻射偵測技術研討會」。

民國 89 年 2 月，參加美國「亞太地

區核能透明化專案計畫」，偵測中心輻射監測網路系統與美國 Sandia 國家實驗室網站完成連線作業。

民國 90 年 6 月，偵測中心「環境偵測實驗室」獲中華民國實驗室認證體系通過。

民國 91 年 9 月，完成環境輻射偵測作業流程電腦化。

輻射偵測中心(以下簡稱偵測中心)負責掌理環境中天然及人造游離輻射的調查及監測等工作，設有輻射偵測技術組、放射化學分析組。為因應業務需求，增設綜合計畫與輻射監控二個任務編組，如圖 9.2 所示，以負掌理之責：

- (1) 環境輻射偵測計畫的擬訂、策劃及推動。
- (2) 環境中天然輻射的偵測。
- (3) 放射性落塵的偵測。
- (4) 食品及飲用水放射性含量的偵測。
- (5) 核設施及游離輻射作業場所周圍環境輻射的監測。

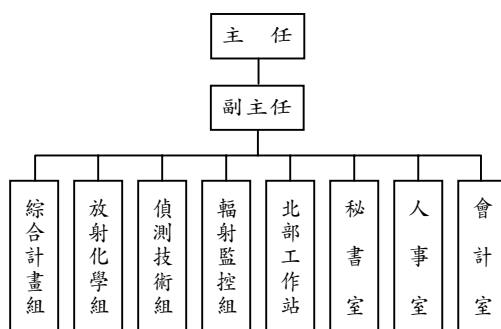


圖 9.2 輻射偵測中心組織圖

- (6) 放射性廢料處理、貯存、運輸、最終處置等場所周圍環境輻射的監測。
- (7) 核設施及游離輻射作業場所意外事

故的輻射偵測及放射性污染評估。

- (8) 國民輻射劑量的評估。
- (9) 環境輻射偵測技術的研究發展。
- (10) 輻射偵測結果異常情形的立即發布事項。
- (11) 其他有關輻射偵測及服務事項。

以下略述偵測中心 90 年全年的業務概況：

1. 放射性落塵偵測

為建立我國環境背景輻射資料及瞭解國外核子試爆或核設施意外事故所產生的全球性放射性落塵對我國所造成的影響，在全國各地設置放射性落塵收集站，採取環境試樣進行放射性分析，評估國人所接受的輻射劑量，全年共計分析 620 餘件次，各項偵測結果簡述如下：

以熱發光劑量計度量全國各地的直接輻射，全年輻射劑量率介於 0.036—0.087 微西弗／小時。另以抽氣、水盤及雨水等方法收集降落於我國地表的放射性落塵，加以偵測分析，表 9.1 為我國放射性落塵警戒值及因應措施。抽氣法全年總貝他活度最高測值為 1.19 毫貝克／立方公尺，其活度遠低於警戒值 9 貝克／立方公尺，水盤法全年總貝他活度最高測值為 15 貝克／平方公尺·月，均在環境變動範圍內。另臺北、高雄地區整月雨水分析結果總貝他活度最高測值為 679 毫貝克／升，水盤法鋇 90 活度最高測值

表 9.1 放射性落塵警戒值及因應措施

階段	地表落塵 (總貝他活度)	空浮微粒 (總貝他活度)	對應措施
第一階段	3×10^3 (貝克/平方公尺·日)	9 (貝克/立方公尺)	加強放射性落塵的偵測。
第二階段	3×10^4 (貝克/平方公尺·日)	90 (貝克/立方公尺)	1. 加強放射性落塵的偵測。 2. 葉菜類須洗淨，雨水須經處理後才可供食用。 3. 加強管理食品的生產及變動。

資料來源：民國 88 年 8 月 12 日行政院原子能委員會所制定「環境輻射偵測規範」，附錄說明 11 放射性落塵(表 5)。

為 0.02 貝克/平方公尺·月，加馬能譜分析僅測得鈹 7 及鉀 40 等天然放射性核種。

2. 環境試樣放射性分析

為瞭解臺灣地區環境試樣中放射性含量的變動情形，採取土壤、河沙、草樣、茶葉及水樣(飲用水、湖水、河川水、地下水、海水)等進行各項放射性核種分析。分析結果僅在部分試樣中測得微量銻 90 與銻 137 等人造放射性核種，惟其放射活度均在環境變動範圍內。另為加強我國主要河川中河沙試樣的放射性偵測，在基隆河、大甲溪及高屏溪河床採取河沙試樣進行加馬能譜分析，分析結果僅測得微量銻 137 核種，活度最高測值為 1.68 貝克/千克·乾重。綜合以上各項環境試樣分析結果與歷年偵測結果比較，測值均在環境背景變動範圍內。

3. 食品與飲水中放射性含量偵測

為確實瞭解與掌握我國食品及飲水中放射性含量的變動情形，評估國

人由攝食所造成的輻射劑量，針對國產食品、進口食品及飲水(含礦泉水)等三部分進行採樣偵測，偵測結果簡述如下：

(1) 國產食品

在臺北、臺中及高雄三大都會區採取米、蔬菜、水果、海產物、肉類、蛋類、麵粉及鮮奶等 11 種國人主要消費食品與魚蝦類(花枝又名墨魚、蝦類、鰻魚、鮪魚、旗魚、虱目魚等)、貝類(蛤蜊、牡蠣等)及藻類進行放射性分析。分析結果總貝他活度最高測值為 474 貝克/千克·乾重，銻 90 活度最高測值為 0.06 貝克/千克·鮮重，銻 137 活度最高測值為 0.31 貝克/千克·鮮重，牛奶試樣未測得放射性碘 131 核種。各類試樣的偵測結果均在環境背景變動範圍。評估民國 90 年國人因攝食所造成的體內劑量為 0.38 微西弗/年，遠低於一般人每年 5000 微西弗(5 毫西弗)的輻射劑量限值。

(2) 進口食品放射性分析

進口食品的調查項目包括大宗進口冷凍肉類及奶粉等，皆由經濟部標準檢驗局抽樣送測，全年進口食品放射性含量分析共計 250 件，主要來自紐西蘭、澳洲、丹麥及法國等國家。另為加強進口食品放射性含量檢測工作，每二個月至消費市場購買各類進口食品，包含嬰兒食品、海產罐頭、乾果、蔬果、乳製品及飲料等 6 項食品計 121 件，進行放射性含量檢測，檢測結果均符合我國進口食品放射性管制標準(370 貝克/千克)。

(3) 飲用水放射性分析

為確保國人飲水的輻射安全，定期採取全國 35 個主要給水廠飲水試樣及自消費市場採購國產及進口礦泉水進行放射性分析，各類水樣中的總阿伐與總貝他活度均符合我國飲水放射性含量限制要點(如表 9.2)最大許可濃度的規定。

4. 核能電廠環境輻射偵測

為確保核能電廠周圍公眾的輻射安全，偵測中心針對現有三座核能電廠執行環境輻射監測，其作業方式有：(1)設置熱發光劑量計及高壓游離腔監測站度量環境直接輻射劑量率，(2)定期採取環境試樣進行放射性分析，全年共計分析 1800 餘件次，偵測結果簡述如下：

(1) 環境直接輻射

使用熱發光劑量計度量核能電廠周圍環境中直接輻射劑量率，核一、二、三廠的偵測結果介於 0.041—0.093 微西弗/時，均在環境背景輻射變動範圍內，其中地表天然游離輻射及宇宙射線仍是環境中直接輻射最主要的來源。

(2) 環境試樣放射性分析

- a. 空浮微粒：在核能一、二、三廠的上、下風向地點設置定流率連續抽氣機，每週取回抽氣濾紙試樣進行放射性分析。全年總貝他活度低於放射性落塵警戒值 9 貝克/立方公尺，加馬能譜分析未測得任何人造放射性核種。
- b. 水樣：我國核能電廠均利用海水作為冷卻水，因此定期採取海水及淡水(飲用水、河川水、地下水、池水)進行各項放射性分析。其中總貝他活度小於 0.15 貝克/升，氡活度最高測值為 75 貝克/升，在海水中均未測得人造放射性核種。
- c. 農畜產物、海產物：在核能電廠所在地選擇奶類、肉類、葉菜類、甘藷、海魚及季節性農作物試樣進行放射性分析。在肉類、葉菜類、甘藷、海魚、葉菜類樣品中測得微量銫 137，活度最高測值為 0.68 貝克/千克·鮮重，其餘試樣的放射活度皆在環境

表 9.2 飲用水放射性含量限制要點

分析項目	管制標準	因 應 行 動
總阿伐	550 毫貝克/升	1. 超過 200 毫貝克/升時，須進行鐳 226 分析。 2. 鐳 226 管制標準為 100 毫貝克/升。
總貝他	1800 總貝克/升	1. 超過 550 毫貝克/升時，須進行加馬能譜分析及鐳 90 分析。 2. 鐳 90 管制標準為 300 毫貝克/升。

資料來源：民國 88 年 1 月 19 日行政院原子能委員會(88)會輻字 01147 號函。

背景變動範圍內。

- d. 累積試樣：土壤、岸沙、草及指標植物(相思樹)的分析旨在瞭解放射性核種在環境中長年累積的變動情形。土壤及海底沉積物試樣中測得微量鈷 60 及銻 137 核種，活度最高測值分別為 0.5 及 22 貝克/千克·乾重，核能二廠出水口的岸沙試樣，測得微量錳 54、鈷 60 及銻 137 核種，活度最高測值分別為 0.37、2.7 及 0.3 貝克/千克·乾重。草及相思樹均未測得人造放射性核種。

5. 環境輻射自動監測網

民國 75 年前蘇聯發生車諾比爾核子意外事件以後，即時的环境輻射監測網，益顯其重要性。

偵測中心目前在核一、二、三廠及核研所共設置 16 座環境加馬輻射自動監測站，全天候 24 小時進行監測。另於人口稠密的石門、金山、萬里、恆春、後壁湖等 5 個監測站設置大型動態顯示板如圖 9.3，顯示內容包括輻射劑量率、時間、溫度、風向、風速等；同時將偵結果經數據網路自

動傳送至位於高雄的偵測中心監管。此項網路系統所收集的加馬輻射劑量率數據，除受天災、電力中斷、儀器故障等因素影響外，回收率高達 95% 以上。同時為加強全國背景輻射偵測，再於人口密集都會區設置 5 座監測站，以建立全國的環境輻射監測網。環境加馬輻射自動監測系統全年共收集 7000 多筆數據(1 天 1 件次計)，各項數據顯示，環境加馬輻射劑



圖 9.3 監測站動態顯示板

量率，均在環境自然背景輻射變動範圍內。

6. 研究用核設施周圍環境輻射偵測

國內研究用核設施包括位於桃園縣龍潭鄉核能研究所、新竹市國立清華大學及同步輻射中心。前者為零功率反應器，中間者為水池式反應器，後者為直線加速器及同步輻射加速器，主要作為研究及教學的用途。偵測中心執行研究用核設施周圍環境輻射偵測，其目標有下列三項：

- 評估研究用核反應器周圍民眾所接受的輻射劑量。
- 瞭解環境中放射性核種累積的變動情形。
- 評估核反應器異常的放射性物質排放對周圍環境的影響。

偵測項目包括直接輻射、水樣、累積試樣、植物及農畜產物等，全年共計分析 300 餘件次，偵測結果簡述如下：

(1) 直接輻射

於核能研究所、清華大學及同步輻射中心周圍共設置 20 個熱發光劑量計，度量環境直接輻射劑量率。全年偵測結果為核能研究所輻射劑量率介於 0.059 – 0.089 微西弗/時，清華大學介於 0.046 – 0.079 微西弗/時，同步輻射中心介於 0.041 – 0.081 微西弗/時，均在環境背景輻射變動範圍內。

(2) 水樣

在研究用核反應器周圍環境採取飲用水、地下水、湖水及河川水進行各項放射性分析，其中三坑仔氚活度最高測值為 137 貝克/升。

(3) 生物試樣

在植物及農畜產物等部分試樣測得微量銨 137 人造放射性核種，其活度最高測值為 0.22 貝克/千克·鮮重。

(4) 累積試樣

在研究用核反應器周圍環境的土壤試樣中測得微量銨 137 人造核種，其活度最高測值為 9.58 貝克/千克·乾重。

由土壤、飲用水、農畜產物等試樣的分析結果，評估各研究用核設施周圍公眾所接受的輻射劑量均遠低於法規的劑量限值。

7. 蘭嶼地區環境輻射偵測

蘭嶼貯存場位於蘭嶼的東南角，自民國 71 年 5 月開始貯存全國低放射性固體廢棄物，而輻射偵測中心(前臺灣輻射偵測工作站)自民國 66 年 7 月起即開始蘭嶼貯存場的背景輻射調查；偵測中心在蘭嶼地區執行環境輻射監測作業，計設置 14 個熱發光劑量計度量環境直接輻射，並定期採取飲水、海水、地下水、土壤、草樣、岸沙及農漁產品等環境試樣進行放射性分析。全年共計分析 200 餘件次，偵

測結果簡述如下：

(1) 直接輻射

熱發光劑量計的直接輻射劑量率介於 0.032—0.067 微西弗／時，均在環境背景輻射變動範圍內。

(2) 飲水、海水及地下水

在東清村、朗島村、椰油村及紅頭村等原住民居住的部落採取飲水，另在貯存場排水口與裝卸貨櫃專用碼頭採取海水，也在貯存場內四口深井採取地下水試樣進行放射性分析，分析結果均未測得人造放射性核種。

(3) 生物試樣

在植物及農畜產物等部份試樣測量微量銫 137 人造放射性核種，其活度最高測值為 0.9 貝克／千克·鮮重。

(4) 土壤、排水口沉積土及岸沙

土壤及岸沙對於放射性核種具有吸附作用，可作為長期累積效應的觀測指標，土壤試樣的分析結果除天然存在的鉀 40 及釷系、鈾系衰變子核種外，亦測得銫 137 人造放射性核種，其活度最高測值為 9.32 貝克／千克·乾重；另於貯存場排水口 SS502 處採取的沉積土試樣，分析結果亦測得微量銫 137 核種，活度最高測值為 9.92 貝克／千克·乾重。

根據所採取飲水、地下水、海

水、芋頭、海藻、海魚的分析結果，評估蘭嶼貯存場周圍民眾每年所接受的輻射劑量均遠低於法規的劑量限值。

8. 品質保證

近年來國內各環境實驗室積極進行品質保證作業與實驗室認證，以期提升實驗室分析數據品質及建立公信力。輻射偵測中心主管全國環境輻射偵測業務，其偵測數據品質與國人生活環境的輻射安全有著密切的關係。為確保各項偵測分析結果的準確及精確性，於民國 80 年 1 月訂定實驗室「品保手冊」並公布實施，以為分析人員從事放射性分析計測作業時所共同遵循的規範，並已於民國 90 年 4 月獲得中華民國實驗室認證體系游離輻射領域評鑑委員會通過為環境試樣放射性分析的認證實驗室。

民國 75 年起偵測中心即與日本分析中心(JCAC)簽訂技術交流協議書，雙方針對環境放射性分析技術研發精進、人員的相互交流及環境輻射資訊交換等事項進行討論，期能更加促進彼此間的合作關係。每年並定期舉辦環境試樣放射性分析之相互比較實驗研討會。

多年來偵測中心積極參與國際間各項比較實驗計畫，民國 77 年至 83 年間參加美國環保署(U.S.EPA)所舉辦的放射性分析比較實驗計畫。爾後

並於民國 85 年起參加美國能源部 (U.S.DOE) 環境度量實驗室 (Environmental Measurement Laboratory, EML) 主辦的品質保證方案 (Quality Assurance Program, QAP)，皆獲得良好的成果。

§9.3 放射試驗室

放射試驗室係屬於臺電核能發電處，負責核能電廠廠區外的環境偵測與人員劑量測定。遠在民國 61 年 8 月即開始籌建，民國 63 年正式成立，下設 4 股。民國 70 年 3 月擴大編制成 4 課、復增加核二工作分隊、核三工作隊、品管電算股及供應股，亦即為現行的組織如圖 9.3 所示。

放射試驗室位於臺北縣乾華村小坑，與第一核能發電廠相鄰接。歷任主任為：錢北辰(核發處課長兼至民國 70.7.5)、錢北辰(70.7.6-73.6.30)、黃玉仁(73.7.1- 78.6.20)、沈建庭(78.7.10-82.11.4)、葉偉文(82.11.5 迄今)。

重大事蹟包括：

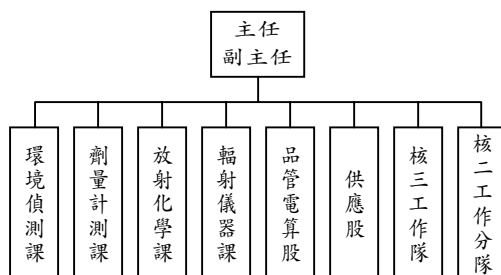


圖 9.3 放射試驗室組織圖

(1) 民國 77 年人員劑量計通過美國國

家志願實驗室認證方案 (National Voluntary Laboratory Accreditation Program, NVLAP)。民國 88 年(1999) 參加美國商務部 NVLAP 能力試驗，獲最佳能力獎。

- (2) 自民國 81 年 6 月 15 日起，人員體外劑量評估作業、環境偵測課、放射化學課、核二工作分隊、核三工作隊等均先後獲中華民國實驗室認證體系的認證。
- (3) 民國 85 年 3 月 22 日人員體外劑量評估作業通過標準檢驗局國際標準化組織認證(ISO-9002)。
- (4) 民國 90 年 12 月獲第二屆全國標準化獎。

放射試驗室的工作內容分述於下：

1. 放射性物質排放管制

有關臺電各核能電廠(包括減容中心)氣、液體排放管制作業，係依據行政院原子能委員會訂定的「游離輻射防護安全標準」中第 20 條：「輻射作業場所外圍空氣中與水中之放射性核種不超過原子能委員會公告之參考濃度」。

各核能電廠對於發電過程產生的廢液，先經過廢棄物處理系統處理，儘量考慮回收利用為原則。少量無法回收者，均須再執行取樣分析，確認放射性濃度符合前述安全標準的水中參考濃度後，始可排放。否則送往濃縮器加熱減容後，加以固化裝桶。

上述管制程序，各廠皆有相對應

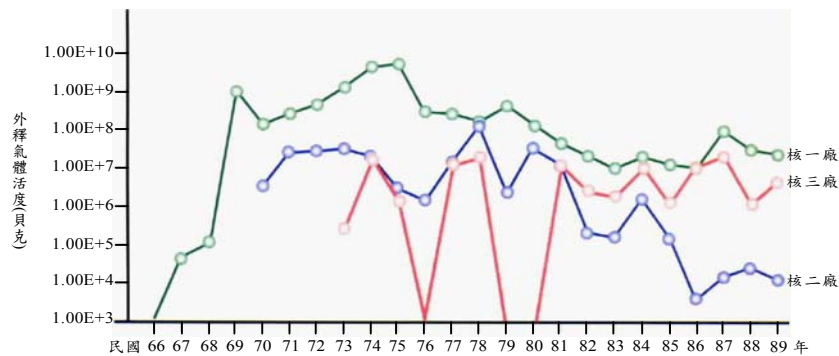


圖 9.4 核能電廠歷年放射性氣體(微粒)外釋活度趨勢圖

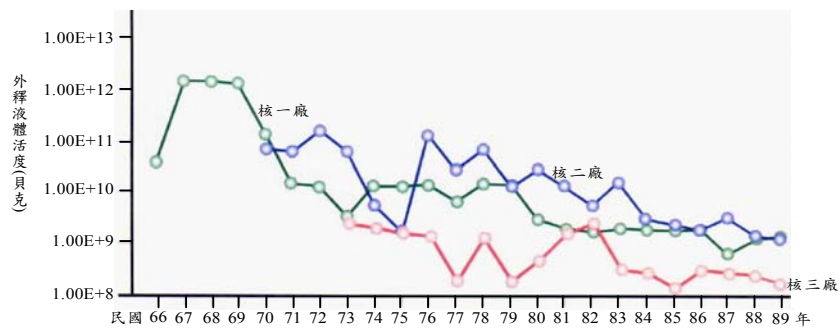


圖 9.5 核能電廠歷年放射性液體(分裂活化產物)外釋活度趨勢圖

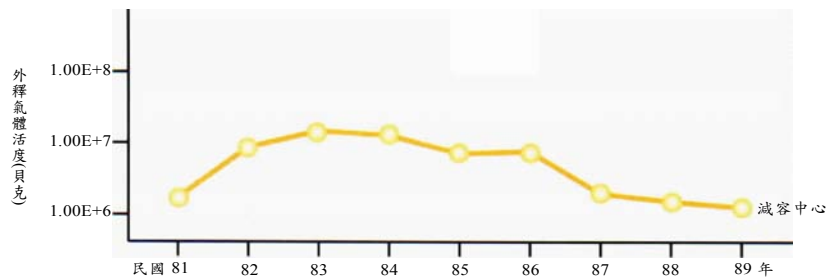


圖 9.6 減容中心歷年放射性氣體(微粒)外釋活度趨勢圖

的操作及品管作業程序書，確切落實執行。此外，臺電依據原子能委員會訂定的「核能電廠放射性物質排放管理規範」、「核能電廠劑量設計規範」及「低放射性廢料處理設施管制規範」規定，每月、季、年定期統計分析各廠的放射性核種實際排放量(每月、季、年)及造成廠外民眾劑量影響評估(每季、年)陳報原能會。

近年來各核能電廠(包括減容中心)極力推行減量排放，且不斷改善廢料處理系統，歷年來放射性氣、液體排放活度均呈下降趨勢，資料詳如圖 9.4 至圖 9.6 所示。

2. 輻射偵測項目與範圍

為了確保核能電廠的運轉安全及維護環境品質，並符合行政院原子能委員會所訂定的相關法規要求，臺電

於民國 63 年成立放射試驗室，專司各

表 9.3 民國 89 年核能電廠環境偵測項目

試樣別	試樣站數			取樣頻度	分析類別／頻度
	核一	核二	核三		
直接輻射					
熱發光劑量計	44	34	32	連續	加馬劑量／季
高壓游離腔	5	5	5	連續	加馬劑量／季
空氣					
空氣微粒	21	19	24	連續	總貝他、加馬能譜 ¹ /週、加馬能譜/季、銾 89;90 ²
空氣碘	12	12	15	連續	放射性碘／週
落塵	1	1	1	連續	加馬能譜／月
水樣					
海水	9	8	10	季	加馬能譜 ³ 、氡 ³ ／月、銾 89;90 ²
飲水	7	7	8	季	加馬能譜、氡／季、銾 89;90 ² 、放射性碘 ⁴
河水	2	4	2	季	加馬能譜、氡／季、銾 89;90 ²
池水	5	3	3	季	加馬能譜、氡／季、銾 89;90 ²
地下水	2	3	2	季	加馬能譜、氡／季、銾 89;90 ²
定時雨水	2	2	1	月	加馬能譜／月、氡／季、銾 90;90 ²
定量雨水	2	2	1	下雨時	加馬能譜
生物					
牛、羊奶	1	1	各 1	季(半月)	放射性碘、加馬能譜／季(核三廠:半月)、銾 89;90 ²
稻米	2	3	4	半年(收穫期)	加馬能譜／半年、銾 89;90 ²
蔬菜	6	5	6	半年(收穫期)	放射性碘、加馬能譜／半年、銾 89;90 ²
茶葉	5	—	—	半年(收穫期)	加馬能譜／半年、銾 89;90 ²
果類	2	2	—	年	加馬能譜／年、銾 89;90 ²
根菜	3	3	2	年(收穫期)	加馬能譜／年、銾 89;90 ²
芋頭	1	1	—	年(收穫期)	加馬能譜／年、銾 89;90 ²
莖菜	1	—	1	年(收穫期)	加馬能譜／年、銾 89;90 ²
家禽	3	3	4	年	加馬能譜／半年、銾 89;90 ²
海菜	2	2	2	季	放射性碘、加馬能譜／年、銾 89;90 ²
海生物(海魚)	4	4	5	月	加馬能譜／季、銾 89;90 ²
指標生物(相思樹)	1	1	1	月	加馬能譜／月
土壤、岸砂試樣					
岸砂	9	12	11	季 ⁶	加馬能譜／季
土壤	19	20	22	半年	加馬能譜／半年
海底沉積物	4	4	4	半年	加馬能譜／半年

註：1. 每週空氣微粒總貝他分析結果超過 4 毫貝克／立方公尺時，方執行加馬能譜分析。

2. 加馬能譜分析中發現銾 137 大於原能會規定的可接受最小可測量要求值時，方執行銾 89;90 分析。

3. 海水加馬能譜和氡分析僅於對照、出、入水口三站按月執行，當分別發現電廠排放核種或氡活度大於原能會所規定的可接受最小可測量要求值時，分別於其餘各站全面執行上述加馬能譜分析或氡分析。

4. 發現空氣中有碘活度時，方執行放射性碘分析，對照站亦同時分析。

5. 核一廠莖菜取茭白筍，核三廠莖菜取洋葱。

6. 核一廠出水口西 600 公尺、核二廠出水口及核三廠出、入水口站按月執行。

核能電廠廠界外周遭環境的輻射監測(距離核能電廠 50 公里內的環境範圍)。考量當地氣象、水文、人口分布等條件，大規模地設置取樣站，包含核能一、二廠鄰近的臺北、基隆、宜蘭等地區，以及核能三廠所在的屏東、高雄等地區，進行直接輻射、空氣、水、生物樣、土壤、岸砂等項目的輻射偵測。以民國 89 年為例，進行的取樣偵測分析項目如表 9.3 所示。

放射試驗室在核能電廠廠界外裝置許多輻射偵測儀器，隨時監測以掌握環境的輻射狀況。行政院原子能委員會除對該環測作業予以嚴密查核外，另要求其所屬的輻射偵測中心亦執行平行監測。

一般的情況，經過一整年的監測，核能一、二、三廠運轉期間，各類環測試樣的放射性核種含量與直接輻射偵測結果皆小於「環境試樣放射性分析行動基準」的提報值。其對附近民眾劑量均遠低於法規限值(小於千分之三)。

(1)加馬直接輻射

加馬直接輻射偵測，是以熱發光劑量計度量直接輻射累積劑量，另以高壓游離腔度量直接輻射劑量率。

(2)空氣樣品分析

環境中的空氣樣品是以連續抽氣裝置收集，用以分析空氣中懸浮微粒的總貝他輻射及碘 131 的含

量，而一般所稱的空浮放射性物質就是指任何以灰塵、煙、霧、蒸氣，或氣體形式散布於空氣中的放射性物質。按分析結果顯示，總貝他輻射均低放運轉前背景值，而碘 131 的含量均小於儀器的最低可測值。

(3)水樣分析

定期採取海水、飲水、河水及池水等樣品，經處理後進行分析，以瞭解電廠附近各類水樣放射性核種的含量。加馬能譜分析結果均僅測得自然核種，而氡分析結果均遠低於原能會規定的提報值。

(4)生物試樣分析

依據農、漁、牧產位置分析，定期採取各類樣品，進行碘 131 及加馬能譜分析，以瞭解各類樣品中放射性物質含量。經分析結果，牛、羊奶及蔬菜等試樣所含碘 131 均低於儀器的最低可測濃度值，而加馬能譜分析結果也低於提報值。

(5)累積效應試樣分析

定期採取土壤及岸砂樣品進行加馬能譜分析，以瞭解放射性物質在環境中的累積效應，而分析結果均遠低於原子能委員會規定的提報值。

(6)輻射劑量評估

依「核能設施環測結果民眾劑量估算導則」的評估方法，利用各類環境試樣分析結果，及不同方位熱發光劑量計的偵測值，扣除自然

背景輻射後，而求得電廠運轉造成廠外民眾最大個人劑量值。

3. 輻射偵測品質

為了確保採樣分析結果的準確度與可靠性，放射試驗室的相關人員，均須經過嚴格的職前訓練與在職訓練，以培養熟練的分析能力。同時亦不斷的吸取最先進的專業資訊，以提昇環境輻射的偵測技術。對於核能電廠環境輻射偵測作業的採樣、處理、計測、分析、記錄等過程，放射試驗室均備有品質管制作業程序，以確保偵測結果的可信度與準確度。由於其多年來的表現，已獲中華民國實驗室認證委員會(CNLA)認證通過。

此外，放射試驗室亦積極參加國內外實驗室間的計測能力比較，例如，美國能源部環境度量實驗室(EML)的「實驗室間環境分析計畫」及原能會輻射偵測中心辦理的國內實驗室間分析比對。由比較結果及獲得國內 CNLA 認證，可證實放射試驗室輻射偵測的能力，已達到相當的水準。

4. 結語

臺電素以「誠信、品質、服務」為理念，除了提供可靠穩定的核能電力外，也重視社會大眾關心的輻射安全問題，以及廠外環境的保護工作。從歷年環境樣品的輻射偵測及分析結果，可知各核能電廠運轉所排放的放射性物質，均能符合行政院原子能委員會核能法規的要求，且遠低於法規限值，對環

境的輻射影響非常微小。未來臺電將繼續維護核能電廠的運轉安全，提供充裕、乾淨的能源，以促進國家經濟發展，提高人民生活水準。

§9.4 其他機構

其他機構包括國立清華大學、行政院原子能委員會核能研究所、財團法人國家同步輻射研究中心等均有較小規模的輻射環境偵測，但各具特色。清華大學早在 1961 年環境偵測已略具規模，並且最早引用熱發光劑量計用於環境偵測以及氫、氬的計測技術。核能研究所由於實驗室種類眾多，使用放射性核種的種類也繁多。因此，環境偵測包括鈾元素。同步輻射研究中心則加強宇宙射線的計測。

§9.5 環境測量中的問題

由於輻射環境測量工作的組織和實施常會涉及到法規、技術、經濟、社會心理等諸多因素的影響，國際上近 10 年來在環境測量上有了較大的進展，主要的表現為：

- 有關技術規範更加完善
- 更重視公眾的心理要求(測量目的)和早期警報(方案設計)
- 重視測量資訊的即時傳遞
- 測量方法或技術方面的較大進展。

表 9.4 列舉某些技術進展的領域，下面幾個受關注的問題特別提出來：

表 9.4 輻射環境監測方面的一些技術進展

領 域	技 術 進 展	目 的
實驗室 測量	自動化和電腦化數據處理	改進可靠性和記錄性能
	更嚴格品質保證	改進可靠性
	更廣泛採用 γ 能譜儀系統	複合核種快速識別
	多樣品低背景測量系統	更高效率
	離子色層法分離 β 核種	分離更快、更好
	質譜儀分析超鈾核種	簡單、靈敏
	裝備有關地域描圖設備的車輛，全球最新定位系統的採用 發展了更多快速分析方法	取得污染分布更多資訊，定位更快速、精確 更快獲得結果，適應事故監測需要
現場 測量	可攜帶 γ 能譜儀	更快獲得核種資訊
	簡單的總 γ 測量儀	可由非專業人員篩測大批樣品
監測 網路	在線上 γ 能譜儀或能區測量儀	盡早實時識別核種或盡量識別人工污染
	完整的監測和資訊系統	事故情況下的早期警報或輻射強度的變化趨向預期
	分站與國家網路之間數據傳輸接口標準化	大範圍內資訊即時交流
	開發簡單的、可攜的、便於操作的在線上儀器	更多就地測量，有利於安撫公眾

1. 偵檢器類型的選擇

從國際上的經驗看，美國用高壓游離腔 (HPIC)，日本早期用碘化鈉 (NaI) 閃爍計數器，後來改用 HPIC。歐洲一些國家用比例計數器和 G-M 管。臺電則採用 HPIC。比較而言，HPIC 靈敏度較好，背景較低，能量回應、角回應以及線性均較佳。G-M 管則具有價格便宜、輕便、較易維護、數據傳輸方便以及環境適應性強等優點。但是為了克服角回應不好的缺點，G-M 往往需要 2 根甚至多根管子聯合使用，可能會增加故障率。另外，G-M 管對宇宙射線回應不像 HPIC 那樣可以經由計算來確定，它需要在大水面上和其他的參考儀器一同進行測試。其背景大小還和材料、設計等因素有關，校正也不太容易。核能電廠附近(小於 1 公里)有時會面臨 6 MeV 左右高能輻射[例： $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ ，其加

馬能量為 6.13 MeV 占 69%及 7.11 MeV 占 5%]，由於角回應和能量回應(高能過回應)的原因，G-M 管不太合用，最好使用 HPIC。

如果聯合使用 HPIC 和 G-M 管，例如在核設施周圍和重點地區使用 HPIC，其餘則用 G-M 管，可能是比較理想的方案。HPIC 通常量測空氣克馬率(nGy/h)，G-M 則量測周圍等效劑量率(nSv/h)，故量測值要求統一。

2. 對某些核種的測量問題

在環境測量中，大多數分裂產物或活化產物是比較容易量測的，但也有少數不易量測的核種，例如 ^{14}C 和 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 。在臺灣 ^{14}C 的量測並未計入於環境測量之中， $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的量測則偏重於廢棄物。 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的加馬能譜包含有 10 多種加馬能量的複雜能譜，這就要修正「符合(coincidence)相加損失」，

否則會低估計測的結果。其次，進入環境的 ^{110m}Ag 的形態可能不同，使得其在環境行為各異。因此，在對它進行量測時，必須從取樣、貯存到分析各個環節，小心選擇合適的器具、步驟和方法。又發現通常用於一般分裂產物加馬核種的濃集方法，並不一定適用於對 ^{110m}Ag 的濃集。因此，若未採用合適的 ^{110m}Ag 濃集分析，也不修正對活度量測中的「和峰(sum peak)損失」，可能使濃度量測低估一個量級以上。

3. 偵檢下限的處理

在環境偵測中常遇到的偵檢下限

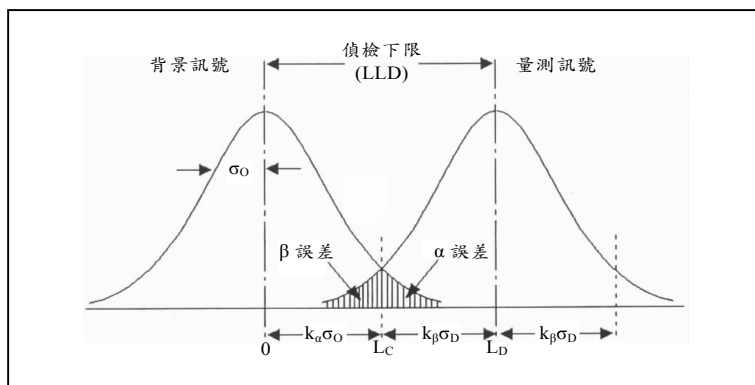


圖 9.8 基於考慮第 I 型(α)誤差和第 II 型(β)誤差的偵檢下限圖示

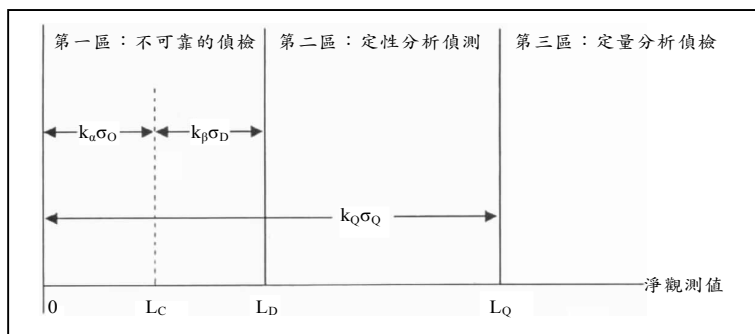


圖 9.9 不同基準或限值相關的三個重要的分析區域

(lower limit of detection, LLD)、最低可測活度(minimum detectable activity, MDA)、最低可測基準(minimum detectable level, MDL)等均屬於同義的名詞，而基準(level)和限(limit)亦同義且常交換使用。此外，判斷限(critical level, L_C)、探測限(detection level, L_D)、決定限(determination level, L_Q)等與 LLD 的關係如圖 9.8 和 9.9 所示。此處 $L_D = LLD$ 。

在圖 9.8 中， k_α 和 k_β 分別為常態分布中橫坐標對應單邊的機率為 $1-\alpha$ 和 $1-\beta$ ，而 α 為第一型誤差， β 為第二型誤差。 σ_0 係觀測值為背景值的標準差， σ_D

係觀測值為 L_D 時的標準差。

在圖 9.9 中， k_Q 係期待最大相對標準差的倒數， σ_Q 係觀測值為 L_Q 時的標準差。

當淨觀測值等於或小於 L_C 時，可假設未有觀測值。當淨觀測值大於 L_C ，則可能有觀測值出現。LLD 即 L_D 只是區別背景值和有觀測值的機率而非所謂切割(cut-off)值。就管制而言，LLD 為最低可接受偵檢能力的近似導則，如果要指明定量最低的觀測值，適當表示的量應為 L_Q 。

當觀測值超過 L_C ，雖然它低於 LLD，但是它們還是已經以較大的信賴度提供了「有放

射性存在的統計訊息」。此時若用簡單的 $<LLD$ 來表示，就似乎說明未偵檢到放射性，因而引進了錯誤的判斷。

有關 LLD 的不同處理如下：

- 我國係參考日本分析中心(JCAC)的做法，分析結果與計測誤差的3倍值互相比較，如果分析結果大於3倍計測誤差，則列入環測報告。反之，分析結果比3倍計測誤差小，意指此樣品的活度很低，已無法明顯測出，因此不予登錄，僅以符號「—」表示，並以「零」值作計算。
- 也有主張讓 L_c 和 LLD 參加統計。假如觀測結果數足夠多(包括負值數據)，最好根據它們的分布來估算它們的期望值。目前對小於 LLD 的數據參與總平均的簡化處理方式計有： $1/2$ (LLD)、 $1/3$ (LLD)、或 $1/10$ (LLD)來替代小於 LLD 的數。此外，這類小於 LLD 的結果數目在全體數據中所占的比例有關。總之，不要隨便處理，也不可一概而論。

4. 對背景輻射調查工作的要求

背景輻射調查工作所採用的方法和技術要有更嚴格的品質管制，更好的靈敏度和可靠性，以及更可靠的測量方法。樣品量要多，測量時間要長一些。其次盡可能選擇穩定的環境條件。

參考文獻

1. K. Becker, Rose H. W. Lu and P. S. Weng, "Environmental and personnel dosimetry in tropical countries," Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry, Riso Report No. 249, Part III, pp. 960-984, Denmark (1971)
2. P. S. Weng, C. M. Tsai and T. C. Chu, "Environmental radioactivity and radiation measurements in Taiwan, Republic of China," The Natural Radiation Environment II, CONE-720805-P1, pp. 375-392, Houston (1972)
3. P. S. Weng, "The preoperational environmental radioactivity surveillance program for the first nuclear power plant in Taiwan," Proceedings of the International Symposium on Nuclear Power Technology and Economics, Vol. II, pp. 735-747, National Science Council, Taipei (1975)
4. P. S. Weng, Y. M. Lin and T. C. Chu, "Measurement and monitoring of radioactivity in aquatic environment including precipitation on Taiwan," Proceedings of the Colloquium on Aquatic Environment in Pacific Region, pp. 290-309, Academia Sinica, Taipei (1978)

5. T. Y. Chang-Mei, C. F. Wu and P. S. Weng, "Monitoring of environmental radon-222 in selected areas of Taiwan Province of the Republic of China," First International Congress of the International Radiation Protection Association, Book of papers, Vol. III, pp. 327-330, Jerusalem (1980)
6. C. Furetta and P. S. Weng, **Operational Thermoluminescence Dosimetry**, World Scientific, Singapore (1998)
7. 許彬杰 翁寶山 **實用固體熱發光劑量測定術** 合記圖書出版社 臺北市(2002)
8. F. J. Bradley, "The International Atom: Evolution of Radiation Control Programs," **Health Physics** **83**, 121-134 (2002)
9. 夏益華 陳凌 對環境監測中某些關注問題的討論 **輻射防護** **22** , 240-245 (2002)
10. 葉偉文 通訊請益 放射試驗室 臺北縣(2002)

第十章 工業界的輻防

§10.1 前言

各種型式和不同活度的輻射源廣泛用於工業界，而且逐年在增加。在1960年代我國工業界以量規裝置(gauging devices)開始，射源的活度不大(10^8 至 10^{12} Bq)，且有良好的屏蔽，屬於密封射源(sealed sources)。所以只需要考慮體外曝露，以及設置障壁及警示牌，則不易接近這一類的輻射源。定期的檢修維護以及藉手提式的儀器偵檢周圍的輻射水平，便可管制輻射。

經濟的繁榮促進非破壞檢測業的發達，工業界的輻射防護逐漸受到重視，也衍生一些問題。原能會在維護非破壞檢測業者的身心安全，十分注意；除經常督導外，還舉辦各種訓練班，介紹輻防新知。

§10.2 國際上的作法

國際原子能總署(IAEA)提出分析樹技術(analytical tree technique)以描繪複雜的操作輻射防護方案，並提出一個7步驟的架構以協助促成這方案的最適化(合理抑低)。圖10.1為這方案的6個主要成份：

如果再分下去則很多，僅以第6個成份「實施品質保證」作為例子如圖10.2所示。

原能會主管工業的輻射防護為輻防處非醫用科，其掌理事項如下：

- 非醫用放射性物質及可發生游離輻射設備安全規範的規劃及管制事項。
- 非醫用放射性物質及可發生游離輻射設備執照之核發事項。
- 非醫用放射線從業人員輻射防護能力之測驗事項。
- 非醫用放射線從業人員操作執照的核發事項。
- 非醫用放射性物質及可發生游離輻射

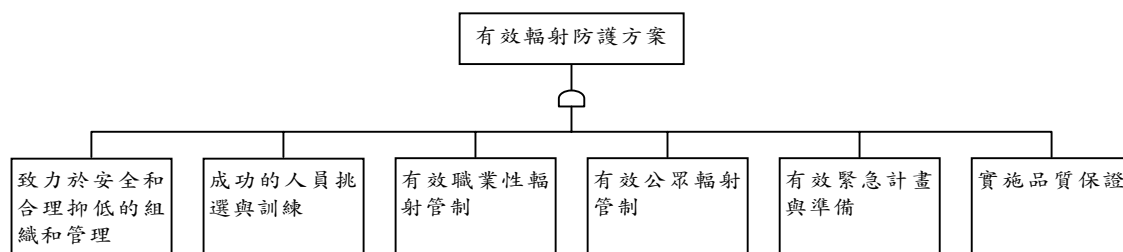


圖 10.1 輻防方案的6個主要成份

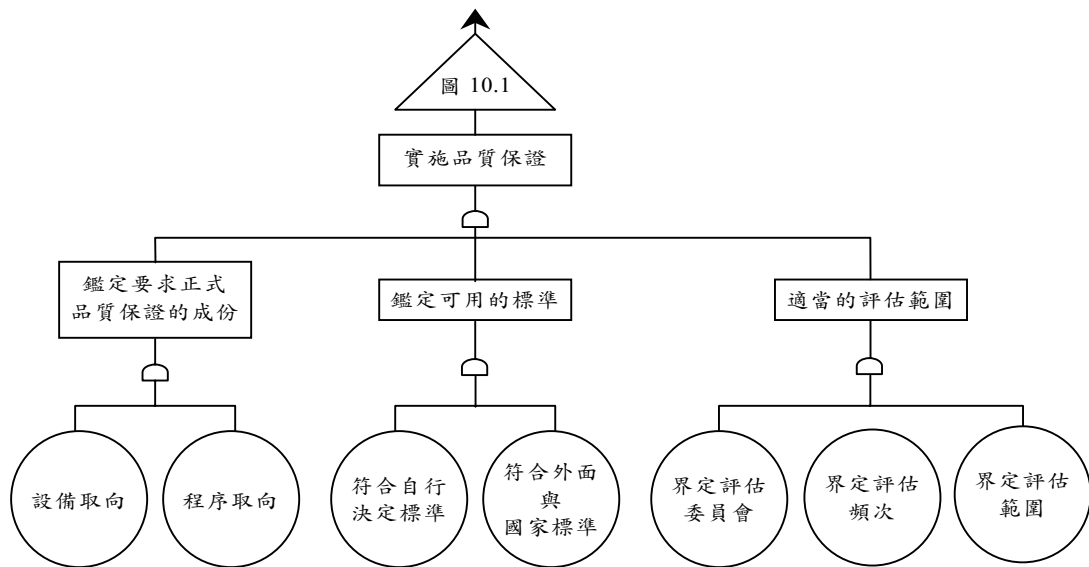


圖 10.2 實施品質保證

設備的生產、輸入、輸出、安裝、改裝、使用、轉讓、停用、廢棄、運送等管制事項。

- 非醫用放射性物質及可發生游離輻射設備及使用場所、貯存場所的輻射安全防護措施與作業程序的稽查事項。
- 非醫用游離輻射意外事故的評估及處理的督導事項。
- 其他有關非醫用游離輻射管制事項。

§10.3 射源選擇與執照統計

現有射源和執照統計如表 10.1 至

表 10.1 非醫用放射性物質執照統計表

民國 91 年 5 月 31 日止

測量控制(固體)	287	分析鑑定	118
測量控制(氣體)	86	避雷針	13
校正用	74	攜帶式測量儀	100

10.3 所示。

如何選擇實用的輻射源，牽涉問題極為廣泛，必須對所完成工作的性質、射源本身特性、射源與物質可能發生的作用、工作場所環境、工作精度要求、工作時限要求等有深切的瞭解，才可以作最佳的選擇。

輻射源和它附屬的照射設備，通常多由國外進口，售價昂貴。在第一次選購輻射源時，必須作慎重的考慮。購得某種輻射源以後，則應考慮如何利用現有的輻射源，以圓滿達成所負的業務。

密封停用	5	學術研究	52
製造裝配業	5	銷售業	9
照相檢驗	290	總計	1039

表 10.2 非醫用可發生游離輻射設備執照統計表

民國 91 年 5 月 31 日止

製造業	14	校正用	2	照相檢驗	898
行李檢查儀	226	分析鑑定	851	牙醫用 X 光機	8
加速器	17	獸醫 X 光機	94		
學術研究	134	測量控制	60	總計	2304

表 10.3 非醫用操作執照統計表

民國 91 年 5 月 31 日止

	初級	中級	高級
密封放射性物質	2971	97	20
非密封放射性物質	2783	206	10
可發生游離輻射設備	3018	108	13
動物用 X 光機	260	0	0
總計	9032	411	43

1. 如何選擇工業用 X 光機

工業上作非破壞檢驗用的 X 光機，通常都屬於攜帶型。輕便堅固是一般的要求。但是這兩個要求具有若干互斥性，只有根據工作性質與工作環境作最佳的選擇。

(1) 管電壓的影響

影響 X 光品質的是 X 光機的管電壓。管電壓越高，所產生 X 光的波長越短，對物質的穿透能力也越大。應根據工作性質選適當的管電壓。

(2) 管電流的影響

X 光機管電流的大小，和 X 光的輸出，有直接的關係。管電流大的，輸出 X 光數量較多，可以減少照射的時間。雖工業用 X 光

機的管電流變動的範圍不大，選擇時仍應加以注意。

(3) 焦點大小的影響

另一影響 X 光照片品質的 X 光焦點的大小。焦點越小，照出的影像鑑別率越高。

這些條件自然會影響 X 光機的價格。條件越高的，售價也越高，在選購 X 光機時這也是一個值得考慮的因素。

2. 如何選擇工業用輻射源

輻射源因含有放射性物質，無論使用或不使用，都按照一定的蛻變率，放出游離輻射。它不像 X 光機那樣可以非常方便的把機器關掉，所以不管射源是否在使用，都應該小心處理。

即使用的是密封射源，也應注意它仍有破損而使放射性物質沾污身體的可能。所以按照法規規定，密封射源應由適當人員，定期做擦拭檢查，看看是否有破損。當然強的射源，必須具有適當的設備，才可以進行這種檢查。

- 射源的發射率(emission rate)應不受照射時間的影響。
- 射源使用前的準備，和其發射率要易於控制。
- 能發出所需要的純淨輻射。
- 能發出單一已知能量的輻射。
- 具有高的輻射發射率。
- 發出的輻射是各向等性。
- 射源容易搬運。
- 射源體積要小。
- 射源本身的自吸收及散射要小。
- 射源應容易操作。

§10.4 射源分類

從輻防的觀點，建議使用者分類如下，且在相對應的期間內作例行的視察：

- A 類：高度安全風險：每 1-3 年
- B 類：中度安全風險：每 3-5 年
- C 類：低度安全風險：每 5-10 年

在正常的情況可分類如下：

- | | |
|-----------------|-----|
| 工業加馬與 X 射線放射照相術 | |
| • 在場地上 | A 類 |
| • 混合裝設 | B 類 |
| X 射線螢光 | C 類 |

- | | |
|-------------|-----|
| 電子捕獲 | C 類 |
| 中子捕獲和活化分析 | B 類 |
| 射透量規(貝他和加馬) | B 類 |
| 貝他回散射規 | B 類 |
| 加馬回散射規 | C 類 |
| X 射線螢光機 | C 類 |
| 光子開關(位規) | B 類 |
| 加馬散射 | B 類 |
| 中子的熱化 | B 類 |
| 輻射滅菌 | A 類 |
| 食品保存 | A 類 |
| 放射性同位素示蹤劑技術 | B 類 |
| 自發光裝置(製造) | A 類 |
| 放電的增強(製造) | B 類 |
| 鈾的使用(製造) | A 類 |
| 靜電消除器 | C 類 |
| 煙霧偵檢器(製造) | B 類 |
| 露點計(製造) | B 類 |

分類應向上移至更高一級的風險種類，如果：

- 所使用的活度高於平均值或使用射源的數目很大。
- 使用相當高活度的阿伐發射體。

以上的建議僅指例行視察的頻度。附加的視察是必需的，例如在事故或事件之後，或主要人員有了重要的變動。

緊急應變能力

主管機關可維持執行有效監視的能力以回應事故或其他涉及放射性物質的立即災害。在許多的情形，持照者或其他經許可的使用者可對這情勢作出回應以及適切地保護健康與安全。然

而，在其他的情形，事故會超出能力所及，主管機關必須作出回應。這回應可包括災害的評估、防護的行動以圍阻放射性物質及防止曝露、災害的消除、以及任何有災害的物質或污染的移除與處置。以下為對緊急應變能力所建議的要素：

- 如事故告知主管機關，隨後要有書面的程序
- 人員要受訓以回應輻射緊急情況
- 警告標誌、輻射偵檢儀器、以及有關設備可立即使用
- 認定在其他組織的專家以便請求協助
- 鑑定主管機關、員工、以及第三者在回應緊急情況時的責任及功能。

§10.5 放射照相術

1. 工業加馬與 X 射線照相術(非破壞檢測)

記錄加馬或 X 射線通過調查中的樣品(圖 10.3)而射出的輻射束，傳統上係在感光膠片上，但藉螢光的方法卻在增加之中。通常係用影像增強器以及可能用電視記錄技術(有時稱為真時放射照相術)。樣品中的不完整、空泡、或腐蝕，由其衰減輻射束與樣品的主體不相同的程度，因此可顯示記錄到影像細目。

典型的輻射源

視調查中的樣品而定，輻射源可為一具 X 射線機(來自大範圍的 X 射線能量)，一具加速器或一個加馬射

源(再一次來自可用的能量範圍)。典型的射源與應用係示於表 10.4。

典型用途

用途包括非破壞檢查：

- 焊接的接合處(管路、鍋爐、貯存槽、處理廠等)
- 鑄件(閥、機器組件等)
- 輪胎結構(常用螢光術和影像增強器作為輔助)
- 行李與包裹(使用斷層 X 射線技術，配以影像保持與增強系統，是在逐漸增加之中)。

表 10.4 工業放射照相術的典型輻射源

X 射線	至 8 MV	140-300 kVp	60-140 kVp
加馬射線源	鈷 60	銩 192	銩 170
典型	100 GBq	數十個 GBq 至 1 TBq	
至：	100 TBq	10 TBq	1 TBq
材料	最適化的工作厚度		
鋼	50-150 mm	10-60 mm	2.5-12.5 mm
輕合金	150-450 mm	40-190 mm	7.5-37 mm
其他	40-120 g · cm ⁻²	10-50 g · cm ⁻²	2-10 g · cm ⁻²

註：G=吉(10⁹)、M=百萬(10⁶)、T=兆(10¹²)、V=伏特、kVp=千伏顯值

輻射防護

在固定的裝設，工作通常應在一有屏蔽的圍場或房間內執行，在所有的進出處提供「失靈安全」的互鎖。就開放的工作間或場地的放射照相術，應仔細管制和劃分特定區域，在工作的四周圍必須維持。當可能時，輻射束必須準直以限制不必要的曝露。必須提供聽覺或視覺警告在曝露

引發之前及經過整個時程。在加馬射源使用遙距曝露的容器之處，於每一曝露之後必須用一可靠的輻射偵測器以確保射源已正確地退回容器。此類容器必依照嚴格的維護程序，使射源輸送機械失效的機率為最低。在大部分的情況，它們應符合運送容器 B 型(乙型包件)的準則，因為它們將用於運送射源。

2. 貝他放射照相術

貝他粒子射透樣品，其射出輻射束的強度由單位樣品面積的質量作決定，一般係記錄於感光膠片上(圖 10.4)。

典型的輻射源

所選擇的貝他射源能量係視調查的樣品而定。典型的聚甲基丙烯酸甲脂(polymethylmethacrylate, PMMA)片裝有均勻碳 14，活度均為 40 kBq g^{-1} ($100 \mu\text{Ci g}^{-1}$)，在約 15 小時內可產生厚為 6 mg cm^{-2} 樣品的影像(近似於新聞紙的厚度)。

典型的用途

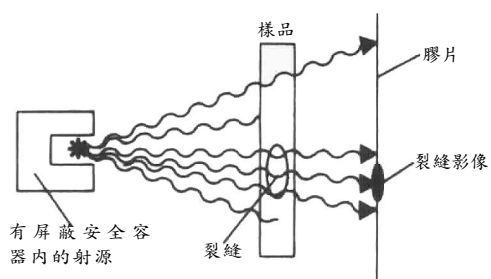


圖 10.3 非破壞檢驗

雖不普遍卻可遇到，此方法已用於鑑定紙中水印的細目以及鑑定歷

史性論著和音樂稿件的年代考古。較真正 X 射線放射照相術可能更接近類似於此用途者，為低能量 X 射線作圖畫的檢查。

輻射防護

必須用仔細的操作技術以防止直接曝露於射源的活性面和移除表面活度。

3. 中子放射照相術

熱中子射透樣品(圖 10.5)及射出的輻射束經轉換即可用電子方法或膠片記錄。從樣品所記錄的細目係依恃於由低原子序數物質從輻射束散射出的熱中子，或具有高的中子截面物質中的中子吸收。

典型的輻射源

射源質量常為 $100 \mu\text{g}$ 至 10 mg 的鈔 252。來自反應器或中子產生器的熱中子也能使用。

典型的用途

這技術不是普遍可遇到，但係用於樣品含有輕元素或金屬的非破壞檢測。例如維修飛機組件、汽輪機葉

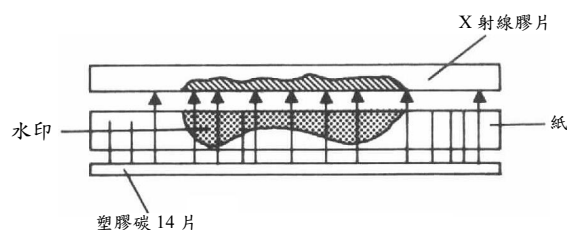


圖 10.4 貝他放射照相術

片、以及閥的整件。

輻射防護

原則上防備與 X 射線及加馬射線的放射照相術相似，但在實際上從可接近中子源處的劑量率是遠較為低。

§10.6 分析技術

1. X 射線螢光

X 射線管或低能量光子源是用於激發調查中樣品的螢光 X 射線。由 X 射線的特定能量可產生樣品中存在元素的資訊，其強度則提供每一元素的定量方法(圖 10.6)。

典型輻射源

大型常為自動的實驗室儀器，且已大部分取代濕式分析化學，並係利用 X 射線管在 40-60 kVp 範圍，管電流在 20-60 mA 的範圍內操作。可攜式儀器係用低能量光子，活度常在 40 MBq 至 40 GBq (1-1000 mCi)範圍。適用的射源包括：

同位素 激發最高的元素原子序數 Z
鐵 55 釩 23

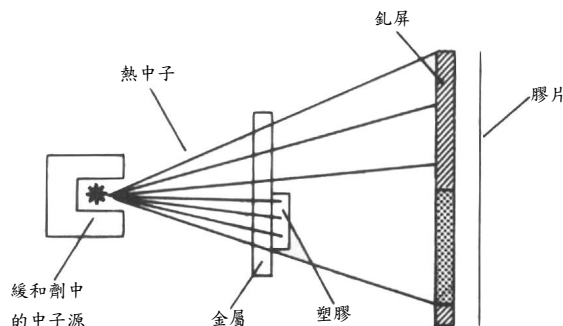


圖 10.5 中子放射照相術

鈾 238 39
147(制動輻射) 60

鎵 241	鈹	69
鎳 109	鉛	82
釷 153		87
鈷 57	鈾	98

典型的用途

典型的用途包括：

- 例行的化學分析作為生產管制的一部分
- 示蹤元素分析
- 田野中礦石的分析
- 合金的組成

輻射防護

所用低能量光子是相當易於屏蔽，但必須要小心以防止直接曝露於主輻射束，特別是靠近儀器。良好設計與維持的鄰近裝置(proximity device)，能防止安全活門的開啟，除非探頭是與調查中的樣品接觸。必須細心運用，避免射源的正面受損傷。

2. 電子捕獲

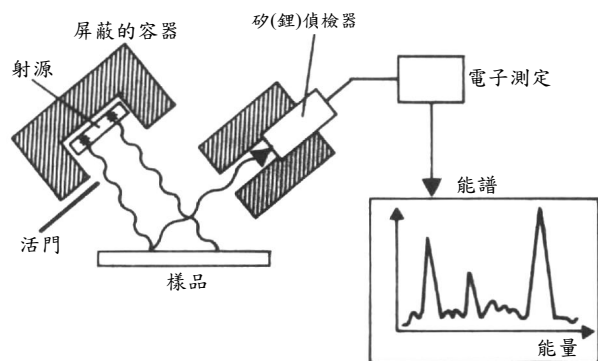


圖 10.6 X 射線螢光圖

氣體從一層析術管柱通過一游離腔，腔內併入一低能量貝他射源

(圖 10.7)。當一化合物進入且具高的電子親和力，腔中游離則電流下降，且可從腔中輸出的微量電位提供鑑定的方法。

典型輻射源

所用的射源包括：鎳 63 約 400 MBq (10 mCi)或約 20 GBq (500 mCi) 的氬。

典型的應用

典型的應用包括量測鹵化殺蟲劑 (至 10^{-12} g)以及做為炸藥的偵測器。

素經歷(n, γ)、(n, p)或類似的反應。然後這些元素發射瞬發或遲延加馬射線與核反應產物，它們能被分析而以能量、衰變率與強度作表示，因此提供定性與定量的元素鑑定(圖 10.8)。

典型的輻射源

所用的射源包括：鈾 241-鈹自 40 GBq 至 4 TBq (1-100 Ci)、鈾 252 的量約 1-1000 μ g、14 MeV 中子產生器與核反應器。

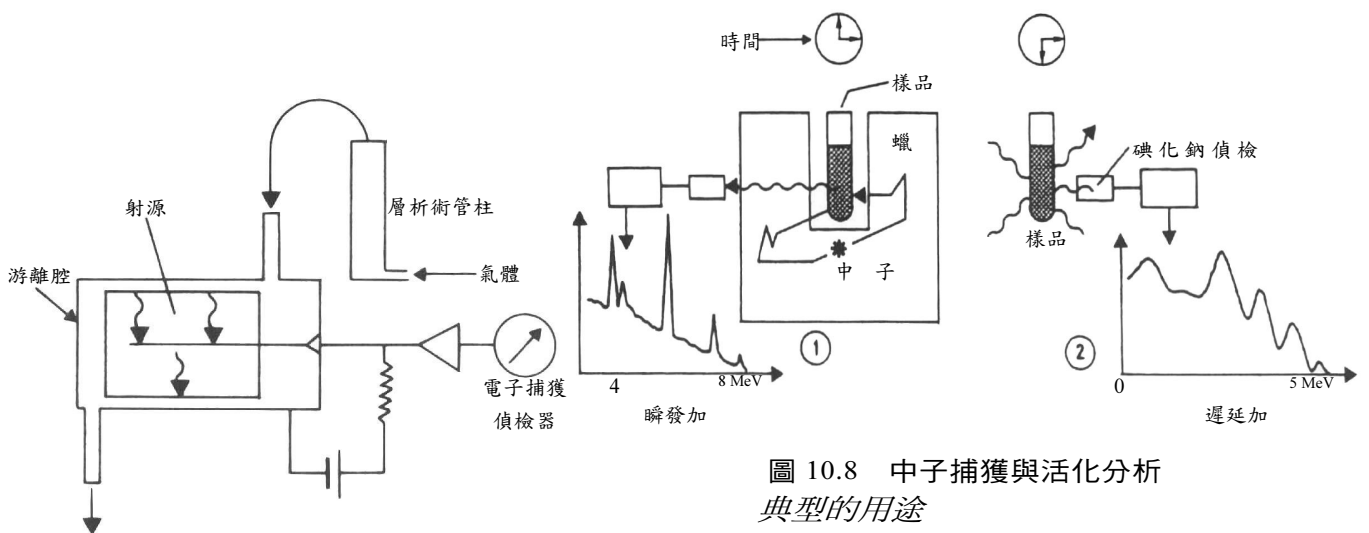


圖 10.7 電子捕獲

圖 10.8 中子捕獲與活化分析
典型的用途

輻射防護

所用的射源為非密封，且少量的放射性物質會存留與積存於靠近游離腔的出口處。定期的清潔和偵測系統可防止顯著的累積程度。使用氬源的溫度必須限制以防止氬氣過量的釋出。

3. 中子捕獲與活化分析

快或慢中子在調查樣品中的元

典型的用途包括：

- 痕量元素分析至 ppm 程度(例如於法醫科學)
- 污染分析
- 在礦石的分析、量測矽、鉻、鋁等
- 在鋼的生產管制中氧的量測
- 鑽孔分析

輻射防護

屏蔽和適當的安全裝置係以防止曝露於主要照射的射源。操作工具

和合適的運送容器會使來自照射樣品的曝露減至最低。在執行任何操作之前，就所有新照射的樣品應作劑量率的查核。

§10.7 量規技術

1. 射透規(貝他和加馬)

在這種應用，輻射源與偵檢器係在調查樣品相對的兩面(圖 10.9)。輻射射透過樣品，被吸收的程度為厚度或密度直接的量測。輻射的品質和強度係就每一種特殊用途作調整。

典型的輻射源

視應用而定，輻射源可為貝他射源、加馬射源、或 X 射線管。典型的例子為：

貝他射源通常的範圍係自 40 MBq 至 40 GBq (1-1000 mCi)，而光子源通常係在 0.4-40 GBq (10-1000 mCi)範圍之內。

典型的用途

典型的用途包括：

(a)貝他射透規

- 塑膠、紙、薄金屬片、橡膠、紡織品等的厚度量測
- 香煙內菸含量的測定
- 濾紙樣品上灰塵與污染物水平的量測

(b)光子射透規

- 金屬片(鋼滾軋機)、玻璃、塑膠、橡膠等的厚度量測。
- 在輸送器上或管路內物質整體流量的偵測。

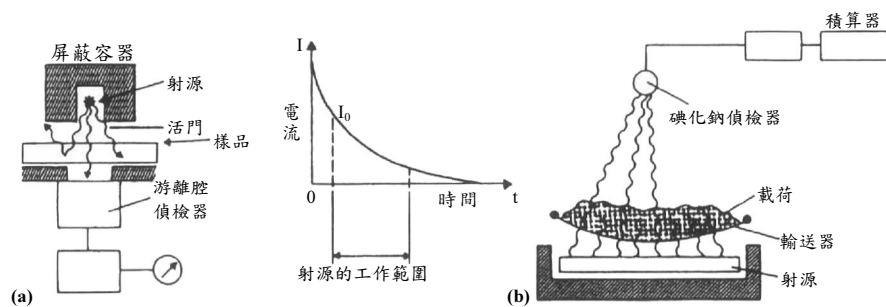


圖 10.9 射透規：(a)連續片狀樣品，(b)樣品藉輸送帶稱重

輻射源	有用的量測範圍
鉅 147	1-15 mg · cm ⁻²
氬 85	5-100 mg · cm ⁻²
鈾 204	7-150 mg · cm ⁻²
銻 / 90	25-500 mg · cm ⁻²
中等電壓 X 射線	至約 20 mm 鋼
鈾 241	至 10 mm 鋼
銻 137	至 100 mm 鋼

- 骨密度的量測以診斷骨質疏鬆。

輻射防護

必須提供與布置具有屏蔽與快門的容器，當無樣品存在時能使活門自動關閉。必須提供與維持清楚的標示，以指示活門的情況。在靠進量規的位置，進出需要限制。可

能要用平版附在射源與偵檢器二者的外殼上 [稱為引導板 (guide plate)]。當量測量規附近的劑量率時必須小心區分貝他和制動輻射，特別是用高能量貝他源的量規。在正常操作和清潔期間也必須小心以避免射源的損壞。

2. 貝他回散射規

射源與偵測器係在樣品的同一邊，常把射源置於偵檢器的下方 (圖 10.10)，從薄樣品回散射的輻射強度給出樣品的厚度和 / 或原子序數。

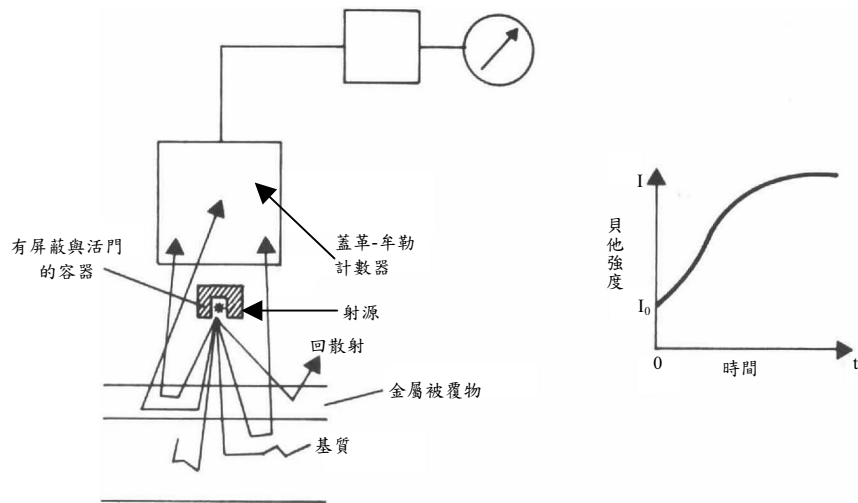


圖 10.10 貝他回散射規

典型輻射源

最普遍使用的同位素為鉅 147、氮 85、鉍 204、以及錒 90 / 90，就射源活度常落在 40-200 MBq (1-5 mCi) 的範圍內。

典型的用途

典型的用途包括：

- 紙、塑膠、橡膠等薄樣品的厚度量

測。

- 基質上被覆物厚物的測定，假設這兩種物質在密度上或原子序數上有足夠的差異。

輻射防護

就生產線上的使用，必須提供與布置具有屏蔽與快門的射源容器，如無樣品時能使快門自動關閉。必須提供與維持清楚的標示以指示快門情況。在靠近量規的位置，進出需要限制。特別是使用較高能量貝他射源的量規，當在量規的附近量測劑量率必須小心分辨貝他和制動輻射。就實驗

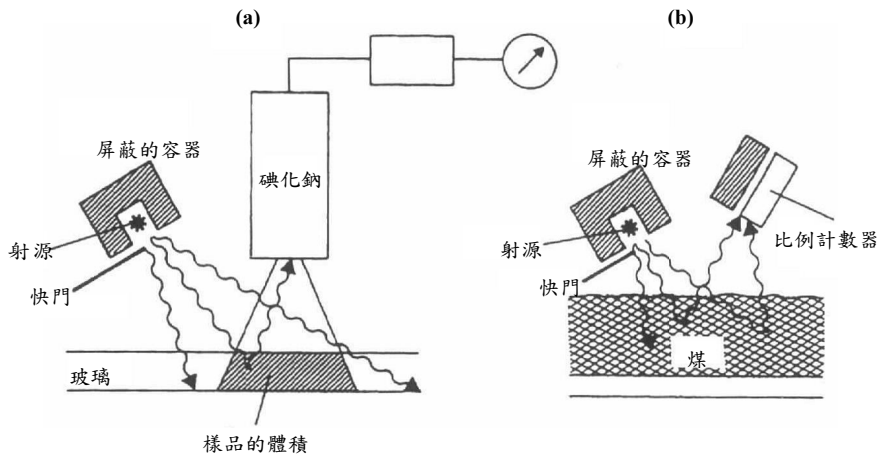


圖 10.11 加馬回散射規：(a)厚度；(b)平均原子序數

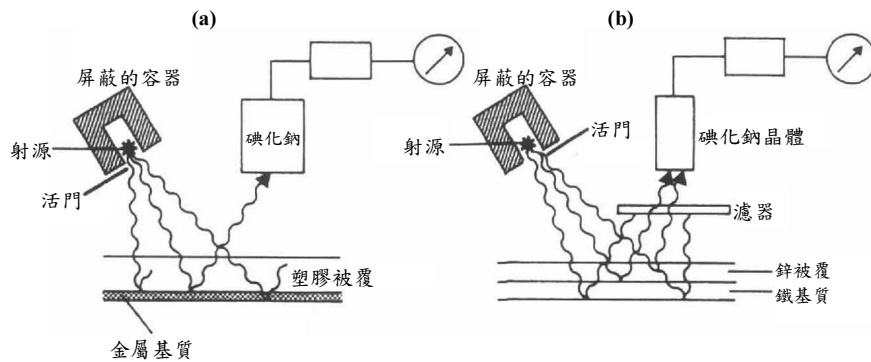


圖 10.12 X 射線螢光規

作。

3. 加馬回散射規

射源與偵檢器以及樣品係裝在同一邊，散射的輻射即為樣品的厚度或物質平均原子序數的量測。這方法是用於量測低原子序數的物質，因為射透量測不靈敏(圖 10.11)。

典型的輻射源

射源包括：

同位素

鈾 241[4 GBq (100 mCi)]

鈾 137[2 GBq (50 mCi)]

鈾 238[1 GBq (25 mCi)]

鈾 241[4 GBq (100 mCi)]

典型量測範圍

玻璃 1-10 mm
塑膠 1-30 mm

玻璃大於 20 mm

煤中的灰，2-45%範圍

典型用途

典型用途包括：

- 輕金屬、玻璃、塑膠、橡膠等的厚度測定，超過貝他射源能量測的範圍
- 管路、槽、處理容器等的壁厚量測
- 煤中灰含量的量測(灰會增加平均

原子序數)

- 在自動煤切割機的煤偵測探頭。

輻射防護

必須提供與布置有屏蔽和活門的射源容器，如無樣品存在時活門能自動關閉。必須提供和維護清楚的標示以指示活門的情況。在可攜式量規的情況，應提供鄰近裝置以避免活門的開啟，除非樣品是正確地定位於量規的對面。

4. X 射線螢光規

用低能量光子源以激發在調查中物質的基質或被敷物質的螢光 X 射線示於圖 10.12(a)。來自金屬基質的螢光 X 射線通過塑膠被敷物時被吸收，而結果的強度即為被敷物的厚度量測。在圖 10.12(b)，在基質和被敷物二者均被激發出螢光 X 射線，但藉使用適當的濾器可移除來自基質的螢光 X 射線。結果的 X 射線強度為被敷物厚度的量測。

典型的輻射源

使用的射源包括：

同位素	典型量測範圍
鐵 55 [200-800 MBq (5-20 mCi)]	0.25 μm 塑膠在鋁上
氚 [40 GBq (1 Ci)]	<0.1 至 10 μm 鋅在鐵上
鈾 238 [1 GBq (25 mCi)]	1-100 μm 鋅在鐵上
銻 241 [4-40 GBq (100-1000 mCi)]	1-100 μm 鋅在鐵上

典型的用途

典型的用途包括：

- 量測在金屬上塑膠被覆物的厚度
- 量測在其他金屬上金屬的厚度，在此處二金屬之間原子序數只有小的差異，例如：錫和鋅在鐵上面，貴金屬在銅上面。

輻射防護

必須提供與布置有屏蔽和活門的射源容器，如無樣品存在時活門能自動關閉。必須提供和維護清楚的標示以指示活門的情況。在可攜式規的情況，應提供鄰近裝置以避免活門的開啟，除非樣品是正確地定位於量規的對面。

5. 光子開關(位規)

加馬或 X 射線從容器或槽的一端射透至裝於另一端的偵檢器，有時係自槽內的射源而至槽外的偵檢器。到達偵檢器的輻射強度視槽內容物的位置而定。在最簡單的形式[圖 10.13(a)]，單一射源與單一偵檢器給出直截了當的「過」／「不過」的位置指示。在更成熟的型式[圖 10.13(b)]，一排的射源與／或偵檢器能給出在槽內位置的仔細資訊。

典型的輻射源

射源包括：

- 低至中等能量的 X 射線(罐中的液體)
- 銻 241 [4 GBq (100 mCi)](玻璃容器中的液體)
- 銻 137 和鈷 60[活度依容器的尺寸和內容物而定，常在 2-80 GBq (50

mCi 至 2 Ci)的範圍]。

典型的用途

典型的用途包括：

- 包件偵測器，提供未裝滿的罐子、瓶子等的拋棄。
- 大的槽、漏斗等內容物的過程管理，例如，槽中的液體、漏斗中的煤。
- 至焦炭爐上推擠器(pusher)與容器的對準。

輻射防護

必須提供有屏蔽、活門與準直的射源容器。由於重量為容器設計的限制，在所裝容器的四周圍可能需要有附加的防護，在這種情形簡單的機械防衛就能防止靠近進入處。必須提供和維持清楚的標示以指示活門的情況。進入到槽的內部，在其上裝有此類的量規，必須禁止，除非活門是關的。可攜式量規要求一「鄰近裝置」以防止量規的開啟，除非射源的容器是與被查核的槽接觸。良好的維護程序是特

別的重要，因為這些量規內例如活門的機械常裝在工廠上具有顯著惡化的情形下。在槽內使用的射源，其容器必須作適當的保護，以對抗為槽內的內容物所損傷。

6. 選擇性加馬吸收

特定能量的 X 射線或加馬射線射透調查中的樣品(圖 10.14)，輻射能量的選擇使在樣品中的吸收，對於一種化合物或元素的靈敏度能占優勢(通常為在其他低原子序數物質中的高原子序數物質)。

典型的輻射源

使用的射源包括：

- 銻 241/銀 [400 MBq (10 mCi)]作為油中硫的量測
- 鐵 55 [800 MBq (20 mCi)]作為紙中灰的量測。

典型的用途

典型的用途包括：

- 量測油中的硫
- 量測石油中的鉛
- 量測紙中的灰。

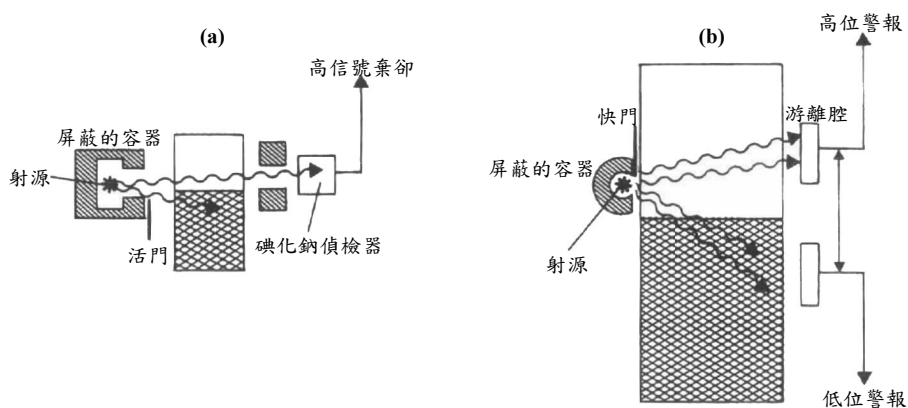


圖 10.13 光子開關位規

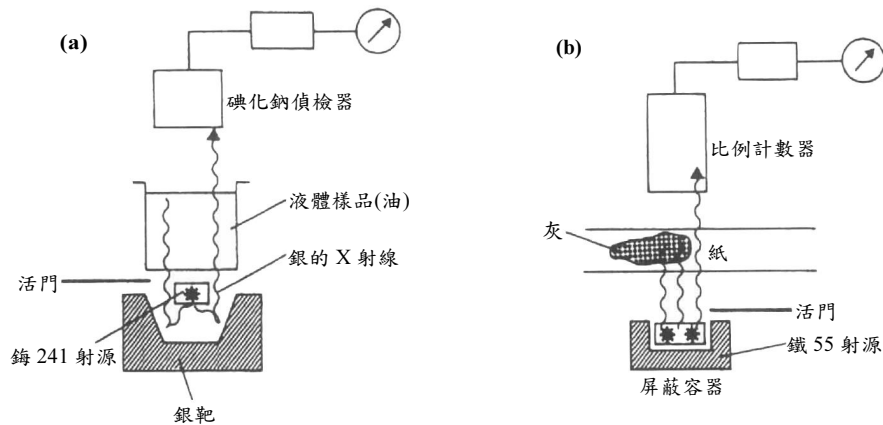


圖 10.14 選擇的加馬吸收

輻射防護

必須提供有屏蔽和活門的容器，當活門打開時應有防止操作人受到曝露的預防措施。這些預防視用途而定，最可能涉及者為活門機械關閉的互鎖。必須提供與維持清楚的標示以指示活門的情況。

7. 加馬散射

當來自高能量加馬射源的加馬射線從一介質作回散射時，其強度可給出介質整體的密度與孔隙度的量測。

典型的輻射源

在大部分的應用，典型可找到的射源為銻 137 或鈷 60，活度約為 20 GBq (500 mCi)。

典型的用途

典型的用途包括在鑽孔中[圖 10.15(a)]及在地面[圖 10.15(b)]二者油密度的量測。這技術係典型用於開礦及油的探勘，以及營造業的地基調查。儀器也能併入一中子源，可結合

密度和濕度的量測。

輻射防護

因為這儀器必須為可攜式，重量嚴重地限制裝於內部的屏蔽。附屬的容器，為符合運送法規且併入更多的屏蔽，一般係要求為了運送與貯存。顯著的劑量率，可能是瞬間，可能會發生，因而要求在一管制和劃分的區域內儀器的仔細使用。在每一次量測之後而使用儀器的探頭型式，必須查核以確保射源是正確地退回其容器。

8. 中子的熱化

藉與樣品中的氫或其他輕元素的碰撞使快中子和樣品介質起互相作用而減速至超熱或熱中子。減速下來中子的強度給出這些元素的濃度量測。

典型的輻射源

所用的射源包括：

- 銻 241- 鈹 [1-800 GBq (30 mCi-20Ci)]

- 鈾 235 ($0.1 \mu\text{g}$)

典型的用途

典型的用途包括：

- 在農業及營造業的土壤濕度量測 (偵檢潮濕中的氫含量)。中子也可結合加馬射源提供密度的量測。
- 探油(主要係偵檢油礦的氫含量)
- 生產管制量測如木塊與燒結混合焦炭材料的氫含量。

輻射防護

就鑽孔的應用，見圖 10.16。生產線上的用途要求有屏蔽的容器且有辦法能移動射源至一完全屏蔽的

吸收或散射將射透的射束移走。射透的結果強度給出在樣品中的元素，因其有高的截面或者為中子吸收或者為中子散射。

典型的輻射源

所使用的射源包括：

- 銻 241-銻 [$10\text{-}40 \text{ GBq}$ ($0.25\text{-}1 \text{ Ci}$)]
- 鈾 235 (約 $10 \mu\text{g}$)

典型的用途

典型的用途包括：

- 清潔劑、玻璃等硼含量的量測
- 過程管制的整體元素分析，例如水、鋰、硼、鎘

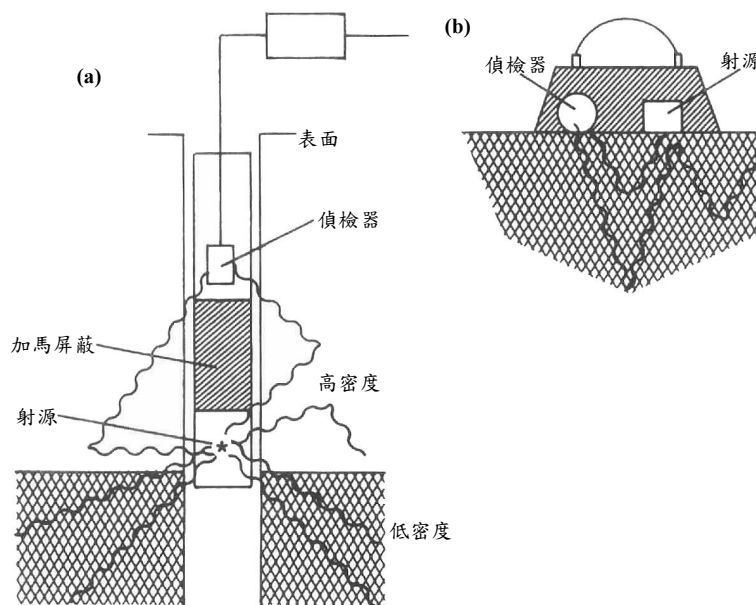


圖 10.15 加馬散射：(a)鑽孔探頭；(b)地面偵測器

位置。當儀器是在使用中，必須提供與維持清楚的警告作指示。在儀器的附近進出需要受到限制。

中子射透

熱中子射透過調查中的樣品，藉

- 炸藥稱重。

輻射防護

正常的預防為限制操作人員的曝露。

§10.8 照射技術

1. 輻射滅菌、交聯、熟化、接枝

輻射的直接游離效應係為數種目的而使用(圖 10.18)：

- (a) 殺死或鈍化病毒或細菌(滅菌)
- (b) 藉誘發化學反應連接到個別大分子之間，以修正聚合物的性質(交

所使用的射源包括：鈷 60 至 400 PBq 與銻 137 至 600 PBq (註： $P=10^{15}$) 主要係為滅菌技術；來自加速器高能量電子束(至 10 MeV)幾乎全為輻射交聯；低能量電子(0.15-0.30 MeV)則為熟化與接枝。

典型的用途

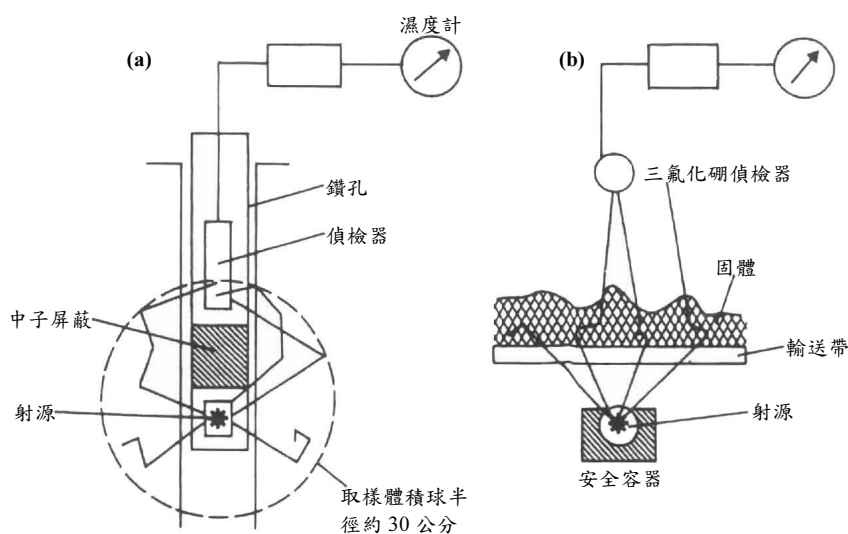


圖 10.16 中子熱化：(a)鑽孔探頭；(b)生產線應用

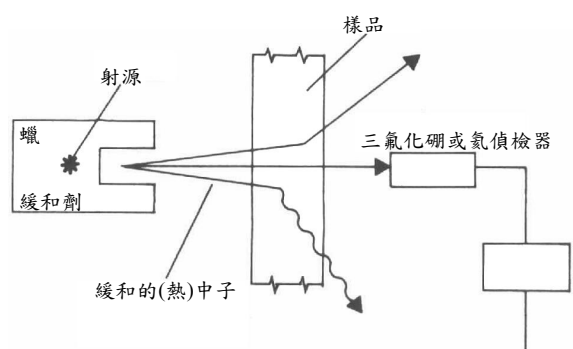


圖 10.17 中子射透

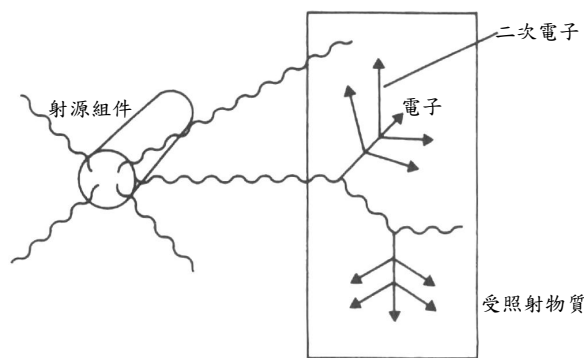


圖 10.18 輻射的直接游離效應

聯)

- (c) 在特別被覆物中引發聚合(熟化)
- (d) 活化表面使引發結合(接枝)。

典型的輻射源

工業上的設備是特別用於醫務產品的滅菌，例如可棄置的注射器、繃帶等。給予劑量超過 35 kGy。

其他的用途有許多且不相同，並

在繼續地發展之中；它們包括：

- 提昇電線和電纜的絕緣，為了用於較高的溫度
- 生產熱縮材料為了用於包裝
- 不硬化橡膠的輻射交聯
- 生產木塑膠的合成物以改善機械性質
- 熟化墨水與黏著物，例如於紙、金屬、木、以及塑膠上面
- 被覆或黏合紙、膜、箔
- 熟化錄音帶與錄影帶的磁被覆。

輻射防護

因為在這些用途輸出極高的劑量，主要優先為確保所有人員係在照射區外面，除非射源整件是在完全的屏蔽位置中，或電子射束的加速器是在停機之中。這可藉結合高品質的安全裝置與行政管制而達成，輔以警告系統與連續操作的輻射警報偵測器。此類設施的設計者應知道安全系統的輻射損傷(例如傷及電線的絕緣)會先減低此類系統的可靠性，而維護的時間表應可反映出。所有安全特點應設計與布置成「失靈安全」。射源的更換操作具潛在的災害，只使用特別為此目的設計的設備(寧受製造者供應與操作)。

2. 食品保存

直接照射(圖 10.19)能用於保護食品對抗不同的損失例如昆蟲的蹂躪、有害的微生物、以及其他損壞例如發芽和自然成熟過程。這過程能同樣的用於整體農作物

或包裝的產品，在後者的情況是不太可能有隨後的再污染。

典型的輻射源

所用的射源包括：

- 來自鈷 60 或銻 137 至 400 PBq 的加馬射線
- 電子束的產生不超過 10 MeV
- X 射線產生不超過 5 MeV

典型用途

典型的用途包括：

- (a) 照射至 1 kGy
 - 抑制根農作物的發芽
 - 在數種不同農作物的昆蟲蹂躪
 - 延遲成熟，特別是水果
- (b) 照射自 1 至 10 kGy
 - 延長貯藏壽命，特別是肉類
 - 在不同的食品減少微生物的負擔
 - 改良食品的技术發展

輻射防護

因為在這些用途輸出極高的劑

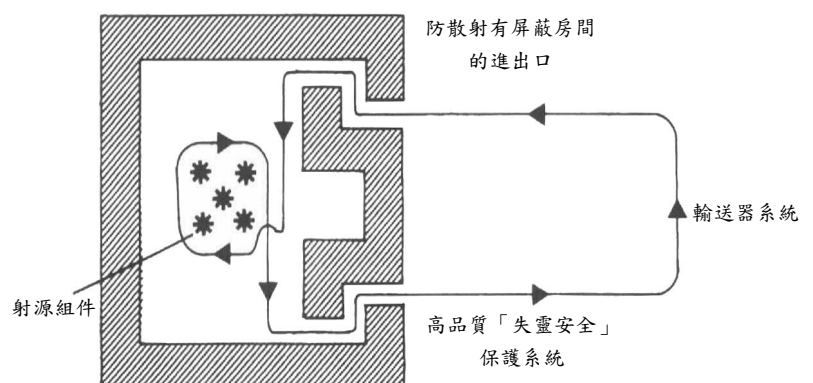


圖 10.19 食品照射

量，主要的應優先確保所有的人均在照射區之外，除非射源整件是在完全屏蔽的位置中，或電子射束的加速器

是在停機之中。這可藉結合高品質的安全裝置與行政管制而達成，輔以警告系統與連續操作的輻射警報偵測器。此類設施的設計者應知道安全系統的輻射損傷(例如傷及電纜的絕緣)會先減低此類系統的可靠性，而維護的時間表應可反映出。所有安全特點應設計與布置成「安全失靈」。射源的更換操作具潛在的災害，只使用為此目的而設計的設備(寧受製造者供應與操作)。

§10.9 非密封放射性物質

放射性同位素示蹤劑技術

一般原理

示蹤劑調查的原理是標誌一個系統的一部分，究為工業過程或生物功能，然後經由此系統用靈敏偵檢器去追蹤標誌的項目，或取自這系統的樣品作定量分析。示蹤劑的基本要求為：

- (a) 它與調查中物質的行為相同
- (b) 它在低濃度時能容易地且不會混淆地作偵檢
- (c) 注入、偵檢與／或取樣應可達成而不會干擾此系統
- (d) 剩餘的示蹤劑濃度不應有不當地損害此系統。

放射性同位素示蹤劑易符合於此要求者，係受限於適當選擇，且有時於半衰期、比活度、所發射輻射的型式與能量、以及化學及物理形式之間作協調。

1. 工業與研究應用

典型工業應用包括：

通風－流率

－過濾效率

混合－液體、粉狀物、泥漿、氣體

流動－管路中的速度

－物質的遷移

相的改變(例如從液相至氣相)

滲漏－從處理廠

－地下管路的偵檢

－充氣管線的試驗

磨損－引擎的磨損率

－處理廠的腐蝕

普遍使用的同位素包括氫、碳 14、鈉 24、磷 32、硫 35、氫 41、鎘 45、鈾 46、鎂 68、砷 76、溴 82、氬 85、氫 133、鏷 140、金 198、以及汞 203，活度則視用途而定。典型的研究用途與上述各項有密切的關聯，或與醫療用途相比可為更直接的關聯，例如放射藥物的研究。

2. 自發光裝置

放射性物質與螢光物質一起使用以產生光而不需要外來的電源。這裝置係常在一玻璃容器內含有放射性氣體，在其管壁敷塗磷光物質。另一種係用「發光漆」，放射性物質可為氫化多苯乙烯含在漆中的形式。

典型的輻射源

氫為最普通的放射性核種，但鉅 147 及氬 85 也可使用。典型的小射源為 1-8 GBq (25-200 mCi)。大的射

源可含 400 GBq (10 Ci)或甚至更多。

典型的用途

許多的用途是很普通的，例如光源與替代低強度的電燈。小射源係用於時計、儀器標度盤、以及光學系統。較大的射源是用於緊急標誌，可能含有不同形狀玻璃容器的排列。

輻射防護

輻射主要為貝他輻射，其有最小的體外災害。射源必須加以防護以對抗損害，因為滲漏射源代表著潛在的災害。好的射源料帳程序是很重要的，以確保最後的安全處置。

3. 放電增強

當電位差到達某一值，兩電極之間將會發生放電，視其分隔及其中的氣體而定。如果一游離射源是很靠近於電極的位置，則發生放電的電壓值是較能重現的。此類裝置能含有放射性氣體，或放射性物質能併入於電極。

典型的輻射源

所用的射源包括：

氣體：氦 85	50 kBq (1.2 μ Ci)
氘	1 MBq (25 μ Ci)
固體：鈾 238	50 MBq (1.2 mCi)
鉅 147	200 kBq (5 μ Ci)

典型的用途

典型的用途包括：

- 改進某種電子閥型式的回應時間
- 改進大型電壓防護器的操作一致性，例如用於無線電傳送器及電話設備。

輻射防護

只使用少量的放射性物質，但此裝置必須加以標誌以指示其存在，並確保其最後安全處置。在維修期間要注意到，特別是如果玻璃裝置破裂。

4. 鈦的使用

雖然不太涉及輻射，鈦的應用仍有數個工業用途，因為有它的物理、化學、或冶金性質。在所有情況下，應有效地作處理，因係使用非密封放射性物質以及強制實施適當的放射安全程序。

用途

用途包括下列：

- 在氣罩內的白熾光材料
- 低濃度的成份，例如在航空引擎套件中的鎂合金
- 在一些白熾燈陰極中的電子發射材料
- 光學鏡片的表面敷塗物
- 一些焊條的組成部分。

輻射防護

由於年攝入限度(ALI)及隨後鈦的推定限度是很低的結果，需要特別的小心使空氣污染為最低。

§10.10 其他技術

1. 靜電消除

在非導體表面的靜電，藉來自放射性源的阿伐粒子所產生的游離空氣途徑，被誘導而漏出(圖 10.20)。

典型輻射源

鈾 210 是一成不變地使用，或是成為箔源的形式或是併入鈾 210 於小的「微球」而置於黏著的基質上。在靜電消除棒，典型地係併入達 8 GBq (200 mCi)的鈾 210。

典型的用途

在工業上製造過程有許多用途，特別是在哪些情況，非導體的表面須迅速從第二個不同的材料分開。例如製造塑膠紙以及橡膠，材料迅速從轉輪分開。因此這些消除器並無動力源，假定溶劑不會侵襲到射源的結合，它們特別適用於有可燃性溶劑問題的區域。

類似的應用是附屬的裝置併入達 30 MBq (750 μ Ci) 的鐳 226 或釷 241 於閃電導體棒的頂端。曾宣稱這些射源在閃電導體上會產生游離粒子流，可吸引閃電火焰。

輻射防護

防護主要係關切維持放射性源的完整性以及查核鬆散放射性物質的任何可能溢出。損害的可能原因為機械震動及有機蒸氣的效應。

2. 煙霧偵檢器

兩個平衡的游離腔含有小的輻射源，在每一腔內產生恆定的游離電流。有一腔

是關閉的，另一腔是開放的而接通於大氣使煙霧可以進入。進入的煙霧會導致游離電流的改變，因此改變了兩腔之間的平衡，所以能觸發警報器(圖 10.21)。另一種方法為進入的煙霧至單一個游離腔內改變了游離電

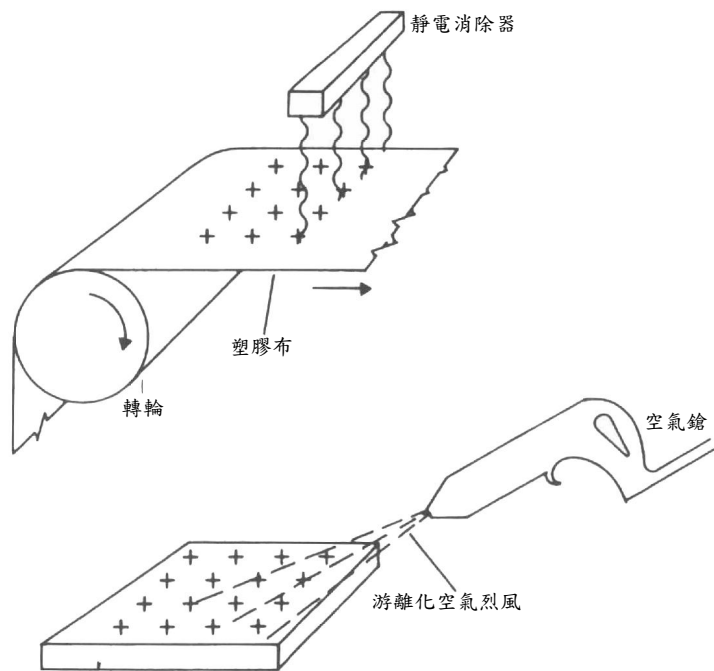


圖 10.20 靜電消除器

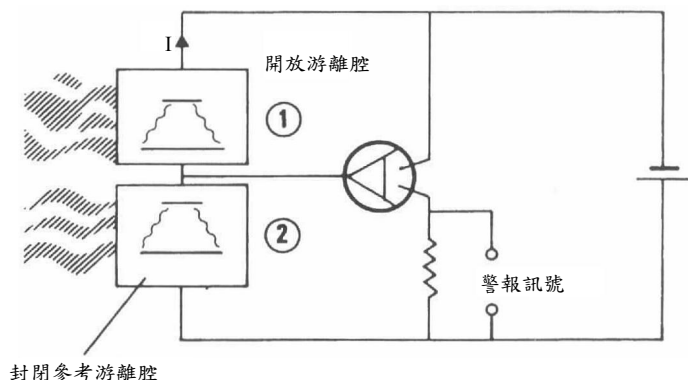


圖 10.21 煙霧偵檢器

流，因而觸發警報。

典型輻射源

現在鐳 226 幾乎全部為銻 241 所取代。工業的煙霧偵檢器能併入達 4 MBq (100 μ Ci)的銻 241，而家庭用產品通常係在 20-100 kBq (0.5-2.5 μ Ci)的範圍。

典型的用途

在公共場所與工業界例如工廠、旅館、戲院等係廣泛使用這些裝置。它們用於家庭範圍現在也是大量地增加。

輻射防護

在正常使用時這些裝置並不呈現顯著的災害，但在大數量的貯存處則需要最起碼的預防。在維修中涉及工業用游離腔的清潔，應作查核以確保放射性污染不會存在，良好的料帳程序是很重要的，為了確保最終的安全處置。

3. 閃電警告系統

在含有貝他射源的游離腔中量測電流，即可決定在很靠近的區域中大氣的電位梯度。大的電位梯度存在於附近的雷雨中，導致電流的增加。

典型的輻射源

通常係使用含達 1 GBq (25 mCi)的氡箔。

典型的用途

大氣電位梯度的量測是用於工業界，在此處閃電會造成火災或爆炸。例子為軍火工廠或炸藥操作場地。

輻射防護

由於氡箔的性質，將會發生放射性物質的一些損失。在維護期間，必須特別注意不觸摸射源，以避免實體的損傷。

4. 露點計

如果游離腔內的壓力可以變動，則能產生凝結。開始凝結的溫度和壓力會與腔內氣體的露點有關。如果置一小的阿伐射源於腔內，水氣將較無射源存在時，能凝結於粒子上，更成為一致的形態。

典型的輻射源

通常的射源是銻 241，典型者為 200 kBq (5 μ Ci)，在過去曾使用鐳 226 者，但如今是受到勸阻。

典型的用途

露點計是用以決定氣體的潮濕內容。

輻射防護

雖然只使用相當少量的放射性物質，裝置必須用合適的警示清楚地加註，使不知存有放射性射源的人，不會打開游離腔。在維護程序時必須小心，於曾使用鐳 226 之處，特別要謹慎對付氦子核的污染。

5. 核子電池

如果在二成份間建立溫度差，藉與熱偶相同的原理能產生電。某些放射性射源在一裝置內能用於提供熱，則可執行與電池相同的功能，但卻有較長壽命的優點。

典型的輻射源

所用的射源包括：

- 銥 90 達 1 PBq (20 kCi)
- 鈷 60 達 1 PBq (20 kCi)
- 銻 238 達 1 TBq (35 Ci)
- 鉅 147 達 2 TBq (70Ci)

典型的用途

鉅 147 和銻 238 係用於產生電功率，做為心臟的心律調整器。銥 90 和鈷 60 係用於做為低功率的光源與發報機，其必須能長期操作而不必維護，例如在海上的航海輔助器。

輻射防護

就心律調整器而言，必保留接收人姓名和地址的紀錄為了要管制處置，心律調整器的設計必須能抵抗可信的事故(例如飛機的撞機)或火葬。在遙距動力源的情況，於其有用壽命期終了之前，必須能收回，以許可放射性物質的安全處置。

5. 疏忽的放射性濃縮

在若干工業製程涉及所使用的材料，含有不必要的少量天然存在放射性同位素的成份，但最後會有影響的，通常鈷或銻及它們的子核。常常是原有物質的放射性幾乎不會有影響，但它變成濃縮於製程中的一些點，使某些程度的防護成為必需的。

磷酸工廠

疏忽濃縮的主要例子為磷酸工廠(肥料和清潔劑)，在此處磷酸岩石，即鹼性磷酸鈣，會與硫酸起反

應。由於在原來物質中的少量銻污染引進了不必要的硫酸鹽沉澱。硫酸鹽是附著於工廠的內面，結果為顯著體外劑量率(常為 0-10 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ 而偶爾會高達 50 $\mu\text{Sv h}^{-1}$)。很清楚地，相關的問題為在工廠維修期間有受污染的可能性。

在油和天然氣中的放射性

天然放射性的存在(鐳 226、鈾 232 及其子核產物)於油田和氣田中已被認定超過 30 年。因為生產條件的改變，涉及用水注入的技術，天然放射性能濃縮與併入於垢，堆積於與生產有關聯的工廠和管線的內表面。這些垢會引起兩種災害，在工作環境中的體外輻射災害，以及當工廠為維修而開啟，從接觸到鬆散的垢，會有引起體內輻射災害的可能性。在英國的量測，垢的活度濃度自 0.5 至 5000 Bq g^{-1} 不等，在中等結垢工廠的外表面可引起輻射的等效劑量率為數十微西弗每小時。

貴金屬的礦石

許多這些礦石含有少量但最後卻有顯著量的銻和鈷。放射風險的問題係存在於萃取過程的某些點，且放射性物質常會富集於礦渣。這些礦石的例子為：

- 鈦鐵礦(鈦的主要來源)
- 獨居石(稀土族的主要來源)
- 燒綠石(銻的主要來源)

鎳-鈾觸媒

若干工業的製程涉及鎳-鈾觸媒的使用，在製造及使用這些材料期間必須作一些預防，以防衛對付放射風險。

輻射防護

輻射防護的主要要素，是認知潛在問題的存在。可建立相當簡單的預防使個人曝露於體外或體內危險為最低。這些預防包括良好的管理整頓原則，以圍阻少量的放射性物質及防止顯著的個人污染。

6. 疏忽的 X 射線產生

在未注意到當使高速電子停止時，必將不可避免地會產生 X 射線，則本文將為不完整。顯然地這正是 X 射線管的意圖，但在其他的情況也會發生，而此 X 射線卻是不必要的。事實上能證實此確為困擾，因為需要屏蔽。相似地，真空與高電壓的組合也能導致 X 射線的疏忽產生。

這些情況的例子為

- 電子顯微鏡
- 電子束焊機
- 質譜儀
- 陰極射線
- 高壓電子閥
- 高電壓真空裝置
- 高電壓絕緣試驗器。

§10.11 結語

工業界的輻射防護，非破壞檢測 (non-destructing test, NDT) 一向很受矚

目，因其工作人員職業曝露的劑量較高，且屬於可移動性和開放性。因此，以下將針對 NDT 業者提出討論。

游離輻射防護法已定於民國 92 年 (2003) 元旦日正式實施，此法對於採行放射照相檢驗的 NDT 業界可能產生下列的衝擊：

1. 職業曝露的限值降低——全身劑量限值由每年 50 毫西弗降為平均每年 20 毫西弗，連續 5 年期間不得超過 100 毫西弗，其中任何一年不得超過 50 毫西弗。
2. 工作場所應劃分為管制區及監測區——管制區除應依照標準圍籬外，並應派人在管制區外的監測區負責監測和警戒，其意為每工作組至少設置兩人。
3. 產生輻射的機具(含加馬射線、X 射線、土壤密度儀)10 部以下應設輻射防護員 1 名，每增加 5 部應增設輻射防護員 1 名，21 部以上者應設輻射防護師 1 名，輻射防護員 3 名。
4. 輻射防護人員及操作人員的證照有效期間 4 年，舊法未有期限的規定。
5. 罰則頗重。

茲引用游離輻射防護法的相關條文如下：

- 第七條：輻射防護人員之設置，輻射防護計畫之擬訂。
- 第八條：輻射作業應確保對工作場所以外不造成超限之輻射強度。
- 第十條：工作場所應劃分為管制區及

監測區。

- 第十三條：發生例如劑量超限或射源遺失等事故時，應通知主管機關。
- 第十四條：輻射工作人員之年齡及教育訓練等規定。
- 第十五條：輻射工作人員之劑量監測。
- 第十六條：輻射工作人員之健康檢查。
- 第二十九條：放射性物質及設備、輻射作業之申請許可。
- 第三十一條：輻射工作人員之證照及有效期限。
- 第三十二條：放射性物質及設備許可證之有效期限五年。
- 第三十三條：許可證內容變更之申請。
- 第三十四條：放射性物質及設備之停用及再使用規定。
- 第三十五條：放射性物質及設備之永久停用規定。
- 第三十六條：放射性物質及設備視為永久停用之規定。

新法較原來的原子能法嚴謹，但也是轉機，可行的因應之道如下：

- 高成本的時代已經來臨，必須摒除以往以量制價的觀念。本法對 NDT 業的衝擊均直接反應到成本的提高。當務之急，建議公會儘速邀集業者及專家就放射照相檢測(radiographic test, RT)的成本予以評估(含直接，間接成本)，訂出合理的參考單價範圍，其

結果由全體業者簽名確認。若可行的話，以公會名義行文業主說明。對於業者不合理的報價，由公會通知主管機關加強檢查。

- 新法的罰則明確，業者對文書作業及現場作業宜確實執行。以往原能會檢查的缺失每一項未來都代表罰款，業者宜認真檢討以往缺失並予以改善。
- 依國內射源的使用狀況研判，輻防法的罰款大多數將來自 NDT 業，業者必須調整心態，趁新法的實施，合理調整單價，並在合理的價格下，依照法規及安全作業程序從事輻射作業，方為永續經營之道。

參考文獻

1. International Atomic Energy Agency, **Operational Radiation Protection – A Guide to Optimization**, IAEA Safety Series No. 101, Vienna (1988)
2. International Atomic Energy Agency, **Recommendations for the Safe Use and Regulation of Radiation Sources in Industry, Medicine, Research and Teaching**, IAEA Safety Series No. 102, Vienna (1990)
3. 翁寶山 **臺灣的輻射源與應用** 五南圖書出版公司 臺北市(1999)
4. 張志堅 **游離輻射防護法對輻射照相檢驗業之影響及因應之道** **輻射防護簡訊 56**, 3-4 (2002)

第十一章 放射性廢棄物

§11.1 前言

放射性廢棄物的處理，是原子能發展不可或缺的一環，也是國內民眾最關心的核能議題之一。雖然廢棄物是不受人們歡迎的東西，但國內核能電廠與其他醫學、農業、工業及研究單位所產生的放射性廢棄物，係已是既存的事實。因此，我們必須予以妥善處理與管理，使國人在享受核能和輻射所帶來的福祉之餘，也能避免對現代與後代子孫及生態環境造成影響。

在原子能和平用途的過程中，放射性廢棄物的處理與處置為無可避免的課題。放射性廢棄物區分為低放射性廢棄物與高放射性廢棄物兩種。要廢棄的用過核子燃料或其再處理所殘留的廢液歸類為高放射性廢棄物，其餘的所有廢棄物則歸類為低放射性廢棄物。此分類法為目前國際上多數國家所接受。依此分類，低放射性廢棄物的活度較低，半衰期也較短，但其數量較多。高放射性廢棄物則活度較高，量卻非常少，然含有半衰期很長但活度不高的超鈾元素核種。

§11.2 貯存與處置

放射性廢棄物貯存是暫時性的，其目的有二：一為在廢棄物管理時作為時間上和空間上的緩衝，二為提供短半衰期核種的衰變，使活度減少，俾便於處理時降低工作人員的輻射劑量。處置 (disposal) 則是將廢棄物永久隔離棄置的意思，沒有再取出的打算，故又稱為最終處置，但如需要仍有再取出的可能。低放射性廢棄物因含有半衰期長達 30.04 年的銫 137 和 28.74 年的銾 90 核種，一般放置 7-10 個半衰期，亦即需要放置約 300 年可使放射性衰變到安全無虞之值。高放射性廢棄物因含有量極少但半衰期卻很長的超鈾元素核種，所以需要放置千年乃至萬年以上的時間才能達到安全值。至於其處置需要千年或萬年，與用過核子燃料是否再處理的作法有關。放射性核種的活度與其半衰期係成反比關係，也就是半衰期越長，它的活度就越小。我們每天所踏的土地其所含的天然放射性鈾 232 和鈾 238，它們的半衰期就分別長達約 140 億年和 45 億年，而含於每個人體內的鉀 40，其半衰期也長達約 13 億年。因半衰期只是我們評估安全的指標之一，並不一定半衰期越長就越危險。

國內目前係針對低放射性廢棄物處置場加以選址，因此先談低放射性廢棄物。廢棄物處置的目的在於將廢棄物自人類生活圈永久隔離，但處置場無論多堅固終將因風化破損而無法永久完好無缺，事實上也無此必要，其理由是放射性核種具有壽命。重要的是要保證當廢棄物中的放射性核種因地下水等媒介而遷移到人類的生活圈以前，已衰變減少到不致危害到人類及生活環境的程度。

§11.3 核能電廠廢棄物管制

1. 產量管制

放射性廢棄物的安全管理，為核能發展的重要議題，而減廢工作則是

安全管理的重要一環。推動各核能電廠放射性廢棄物減量工作，不但符合環境保護原則，且極具經濟效益，並能紓解放射性廢棄物的倉貯壓力，同時對核能電廠而言，也是一項重要的敦親睦鄰措施。

依據民國 79 年(1990)訂定的「核能電廠低放射性廢棄物減容策略」，分階段設定減廢目標值。民國 82 年及 87 年又修訂「放射性廢棄物減量策略」，以 6 年分二階段執行減量計畫，其目標值如表 11.1。

為更有效管理放射性廢棄物內核種的變化，積極開發「放射性廢棄物核種活度分析管理系統」，建立完備、

表 11.1 核能電廠放射性固化廢棄物產量目標值

單位：桶(55 加侖)

廠 別	基 準 值	目 標 值	
		民國 88—90 年	民國 91—93 年
核一廠(636 MWe)	1100	700	550
核二廠(985 MWe)	1300	900	800
核三廠(951 MWe)	350	300	200

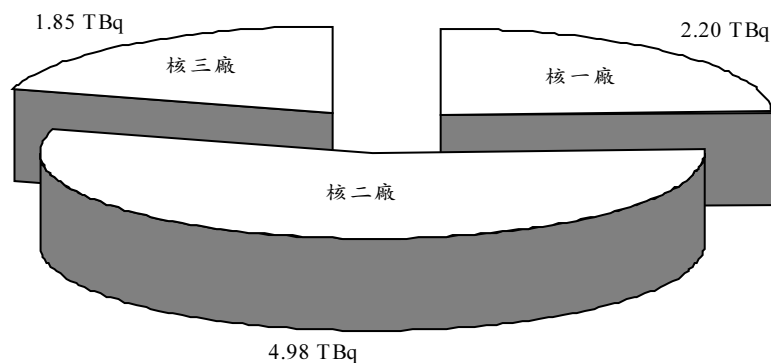


圖 11.1 民國 90 年 3 座核能電廠固化廢棄物與脫水樹脂放射性核種活度
(註：T = tera = 10¹²)

新穎的放射性廢棄物資料庫，確保檢驗放射性廢棄物中核種分析的正確性，迅速、正確地統計出各放射性廢棄物產量與活度等資料，增進管制成效。民國 90 年 3 座核能電廠固化廢棄物與脫水樹脂放射性核種活度，經「放射性廢棄物核種活度分析管理系統」統計分析後，分別為核一廠 2.2×10^{12} 貝克、核二廠 4.98×10^{12} 貝克 (4.98 TBq)、核三廠 1.85×10^{12} 貝克 (1.85 TBq)，如圖 11.1 所示。

核電廠放射性廢棄物的減量工作，近幾年來一直深受原能會與臺電的重視，經由產、官、學、研各界的努力，近幾年來固化廢棄物年產量已逐年下降。根據統計，臺電各核能電廠的固化廢棄物產量最多為民國 72 年的 11,814 桶，而民國 80 年的固化廢棄物產量亦達 7,026 桶。民國 90 年各核能電廠固化廢棄物產量，核一廠為 260 桶，核二廠為 685 桶，核三廠 18 桶，合計 963 桶，核電廠固化廢棄物產量首次跌破千桶。核一、二、三廠的廢棄物產量均低於減量策略目標值外，核一廠的廢棄物年產量為目標值的 37.1%，核二廠則為 76.1%，核三廠的廢棄物年產量僅為目標值的 6%。與民國 89 年產量 1,081 桶比較，民國 90 年約為 89 年產量的 89%，顯示

廢棄物減量計畫已有了成效。

2. 處理管制

放射性廢棄物處理管制的重點，在於保障廢棄物處理系統運轉正常，減少廢水排放及達到廢棄物減量、減容，並確保廢棄物品質能符合規範要求，以便後續貯存、運輸、處置的安全順利進行。

核能電廠低放射性廢棄物，主要是運轉期間的污染衣物、工具、零組件、耗乏樹脂及廢液殘渣等。可燃的污染衣物皆以金屬內分櫃承裝(圖 11.2)，以增進貯存安全。核一、二廠的可燃與可壓廢棄物，皆送往減容中心焚化壓縮後，再以鍍鋅鋼桶盛裝，以減少廢棄物體積。各核能電廠內都擁有廢氣處理系統、廢液處理系統、以及廢棄物固化系統，用來妥善處理電廠所產生的低放射性廢棄物。

3. 貯存管制

核一、二、三廠運轉所產生的低放射性廢棄物中，乾性廢棄物經分類



圖 11.2 可燃與可壓廢棄物以金屬內分櫃承裝

後暫存於各廠倉庫內，以後再另外進行焚化或壓縮處理，以減少其體積與數量。濕性廢棄物則加水泥固化後封入鍍鋅鋼桶內，在各核能電廠廢棄物倉庫內貯存。

目前我國尚無低放射性廢棄物的最終處置場，為確保貯存安全，放射性物料管理局(簡稱物管局)已要求各核能設施於民國 88 年底之前，停止使用代用倉庫貯存放射性廢棄物固化桶，並要求應以耐蝕性較佳的鍍鋅鋼桶盛裝固化廢棄物。核一廠興建

完成的現代化倉庫，於民國 87 年 6 月啟用，貯存容量為 23,000 桶廢棄物。核二廠興建完成的 40,000 桶現代化倉庫，已於民國 85 年 7 月啟用。此外，為因應未來貯存需要，核一、二、三廠各另有一座廢棄物現代化倉庫新建計畫，均經物管局審查核准。核一、二廠於民國 90 年 2 月 13 日開始施工，核三廠則於 90 年 2 月 1 日申請建照，預計於民國 93 年底完工。各核能電廠現存的低放射性廢棄物(至民國 90 年底)如表 11.2 所示。

表 11.2 核能電廠低放射性廢棄物貯存現況(至民國 90 年底)

單位：桶(55 加侖)

廢棄物種類	核一廠	核二廠	核三廠
可燃性廢棄物	9,235	440	4,536
可壓縮廢棄物	6,329	2,999	988
脫水樹脂	2,208	1,843	1,182
固化廢棄物	6,049	23,858	2,379
其他廢棄物	8,575	8,181	0
總計	32,396	37,321	9,085

4. 蘭嶼貯存場管制

蘭嶼貯存場係以多重障壁概念進行規劃興建，集中貯存全國醫、農、工、學、研與核能電廠所產生的低放射性固化廢棄物。貯存場現有 23 座貯存壕溝，採鋼筋混凝土建造，可存放 98,112 桶低放射性廢棄物。民國 71 年正式展開廢棄物接收作業，迄民國 90 年已存放低放射性固化廢棄物共 97,672 桶。

低放射性廢棄物的多重障壁雖較高放射性廢棄物處置簡單，但二者

理念一致。在概念上仍可區分為工程障壁和天然障壁。前者為選擇已知障壁性質良好的材料，利用人工方式構築而成的人工障壁。後者則利用天然的岩石、土壤所具有吸附放射性核種的特性，並刻意避開地下水等不利情況而成的天然障壁。工程障壁除廢棄物固化體本身以外，還包括鋼桶容

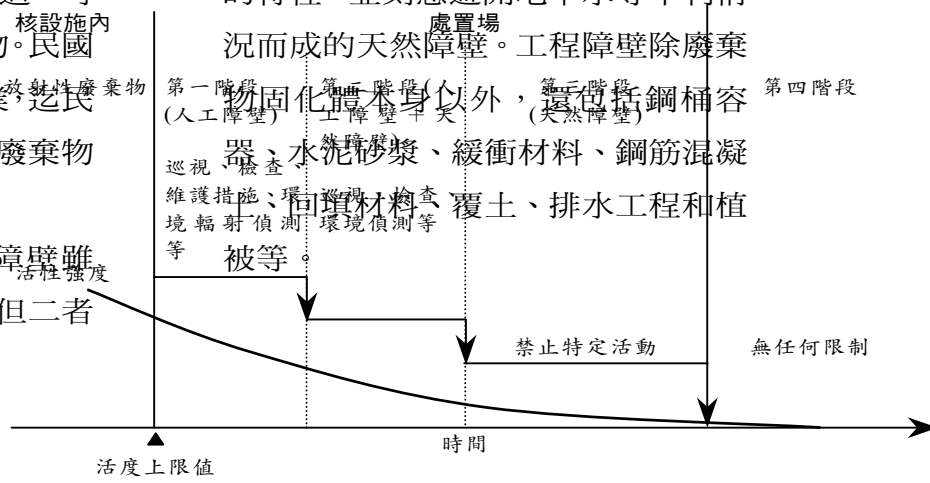


圖 11.3 低放射性廢棄物處置的階段性管制概念圖

低放射性廢棄物淺地處置場於封閉之後，其多重障壁的防護功能如圖 11.3 所示可以分為四階段，今分述如下：

第一階段是靠工程障壁的功能，作業內容包括巡視、檢查、維護措施和輻射偵測。第二階段是靠工程障壁和天然障壁的功能，在此階段，廢棄物容器可能已部分腐蝕而需要借助部分天然障壁功能，以遲滯核種的外移；作業內容包括巡視、檢查和環境偵測。第三階段則是靠天然障壁的功能，在此階段，工程障壁已因風化而喪失功能且核種活度已衰變至可接受程度，需要完全借助天然障壁功能，以遲滯核種的外移；作業內容為禁止在處置場址進行特定的活動。進入第四階段時，由於放射性核種已衰變殆盡，故在此階段可完全解除管制，讓處置場回歸大自然。由第一階段到第四階段估計前後約需要 300 年，但較為重要的應是處置後的前 50-100 年。

為確實掌握貯存場對當地輻射安全的影響，物管局除要求臺電應依規定提報環境輻射監測報告送審外，另由原能會所屬輻射偵測中心定期偵測，偵測點計 51 點，項目包含直接輻射、飲用水、地下水、海水、土樣、岸砂、草樣、魚類、海藻等。每季分析 85 件試樣，分析件數達 310 件，可隨時掌握環境輻射變化。民國

90 年輻射偵測中心對蘭嶼地區輻射偵測結果顯示，該地區的環境直接輻射劑量在 0.036 至 0.067 微西弗／小時之間，並無異常情形。

蘭嶼原住民達悟族(又稱阿美族)於民國 91 年 5 月 4 日與經濟部部長林義夫達成協議，籌設「推動貯存場遷場管理委員會」與「蘭嶼社區總體營造委員會」。蘭嶼貯存場的經營可能生變。另瑞士、荷蘭、德國的地表長期貯存，可讓營運者或一般民眾進入察看，對地質要求不像最終處置場那麼嚴苛，也可作為選項之一。

5. 運輸管制

臺電的低放射性固化廢棄物運輸作業，是將三座核能電廠產生的固化廢棄物桶置於特製貨櫃中，以拖板車運至專用碼頭，裝入電光一號專用船舶運至蘭貯存場貯存。而低放射性乾式廢棄物的運輸，則是將核能電廠可燃或可壓廢棄物分類包裝，以專用貨櫃送往減容中心處理。依現行作業規定，放射性廢棄物的運送，應先提報運送計畫及緊急應變計畫，經物管局審查核准後執行。各核能設施預定執行實際運輸工作前，應備妥申請文件送物管局審核。海運作業前應提送未來三天的氣象資料及相關碼頭水深資料；作業期間物管局均派員檢查運輸作業。

由於民眾抗爭，蘭嶼貯存場民國 85 年 5 月起停止接收固化廢棄物

桶，核一廠乾式廢棄物送往減容中心處理，也受到部分民眾的抗爭。惟已撰擬完成「放射性物質安全運送規則介紹」，以加強廢棄物運送管制。

6. 用過核子燃料管制

核子燃料在核子反應器內使用一段時間後，因其效能與效率降低即必須更換，退出核子反應器而不再使

用的核子燃料，即稱為「用過核子燃料」。當其剛從核子反應器退出時，具有較高的放射性及熱量，必須先放置於廠內的用過核子燃料池中冷卻，待其放射性及熱量降低後，再進行後續的處理。截至民國 90 年 12 月 31 日止，我國三座核能電廠用過核子燃料池的貯存情形如表 11.3。

表 11.3 核能電廠用過核子燃料池貯存容量統計表(至民國 90 年 12 月 31 日)

機組	商轉年 (民國)	貯存容量 (燃料元件)	現存量	預估可用年限 (民國)(註 1)	每一週期退出量 (註 2)
核一廠	1	3083	2092	97	130
	2	3083	1976	98	130
核二廠	1	4237	2812	98	220
	2	4237	2676	99	220
核三廠	1	2151	792	114	72
	2	2159	745	115	72

註 1：目前核一、二、三廠燃料循環周期約為 18 個月。

註 2：依原能會規定，用過核子燃料池應具備反應器全部燃料元件的貯存空間，以因應緊急事件時，須將核子燃料自反應器移出所需的空間。核一、二、三廠反應器使用的燃料元件數分別為 408 件、624 件及 157 件。因此，估算燃料池可用年限時，須先扣除該部分的貯存量。

表 11.4 輕水式反應器新舊燃料核種成分(原子%)

新燃料		用過燃料	
核種	百分比	核種	百分比
²³⁸ U	96.7	²³⁸ U	94.3
²³⁵ U	3.3	²³⁵ U	0.81
		²³⁶ U	0.51
		²³⁹ Pu	0.52
		²⁴⁰ Pu	0.21
		²⁴¹ Pu	0.10
		²⁴² Pu	0.05
		分裂產物	3.5

用過核子燃料中，約有 96%為殘存的鈾，3%是高放射性的分裂產物及活化產物，1%是鈾轉變成鈾，如表 11.4 所示。由於用過核子燃料可經

再處理回收鈾與鈾等有用資源，而僅含 3%的高放射性廢棄物，各國依其國情與社會環境，而有不同的選擇。因此，美國、芬蘭等國家將其視為廢

棄物而直接處置，法國、英國、日本等認為是資源，經再處理提煉鈾及鈾，製成混合燃料再使用；我國用過核子燃料管理政策的規劃，曾就技術、安全、經濟、政治、人文社會與自然環境等因素，經學者專家評估考量後，決定以「近程採廠內水池貯存，中程採廠內乾式貯存並適時評估再處理的可行性，長程推動最終處置」的策略，對我國最為有利。

核能一、二廠用過核子燃料中期貯存計畫的環境影響說明書，業經行政院環境保護署審查通過。目前臺電正辦理「核一廠用過核子燃料中期貯存設施採購帶安裝案」重新招標作業的資格標審標及規格標的邀標文件審查與修訂，並預計民國 92 年提出建造許可申請，96 年完成設施的建造。核二廠部分，隨後亦將辦理招標採購作業。

設置在核能電廠廠界內的中期貯存設施，其造成的廠界外居民的年有效等效劑量不得超過 0.05 毫西弗(法規設計標準為 0.25 毫西弗)，為民眾的輻射安全劑量標準(每年 5 毫西弗)的 1%。

§11.4 核四廠放射性廢棄物處理系統

核四廠進步型沸水反應器係採 GE/ABWR 設計，與日本已運轉的柏崎

刈羽電廠六、七號機(K-6/K-7)為同型機組。此處 GE 係奇異電氣(General Electric)公司，ABWR 為進步型沸水反應器(Advanced Boiling Water Reactor)。ABWR 放射性廢棄物處理系統主要可分為放射性廢液處理及放射性固體廢棄物處理二個子系統，其主要的功能分述如下：

1. 放射性廢液處理系統

ABWR 放射性廢液區分為機件設備洩水(高純度廢液)、地面洩水及化學廢液(低純度廢液)。因此，廢液處理系統由高純度廢液處理系統與低純度廢液處理系統兩個支系統構成，且每部機組各有一組高、低純度廢液處理系統，以並聯方式連結組成，可相互支援。高純度廢液處理系統是由設備洩水收集槽、中空纖維過濾器(hollow fiber filter)、除礦器、活性炭過濾器及取樣槽串聯構成。兩組除礦器可並聯運轉亦可串聯運轉，重置(redundancy)的過濾器及除礦器也可相互支援。低純度廢液處理系統是化學廢液收集槽及蒸發器所組成；蒸發液送往高純度廢液處理系統，濃縮廢漿則送往固體處理系統的乾燥器處理。

2. 放射性固體廢棄物處理系統

ABWR 放射性固體廢棄物處理系統用以收集、焚化、固化、包裝及貯存核能電廠操作及維修所產生的放射性固體廢棄物。固體廢棄物處理

系統可處理濕性及乾性兩種固體廢棄物。濕性固體廢棄物是過濾器與除礦器所產生的濾渣及濃縮器所產生的濃縮物，先用乾燥器加以粉末化，再以水泥固化後運送至貯存庫貯放。乾性固體廢棄物先焚化或壓縮後，再以水泥固化後運送至貯存庫貯放。

核四廠放射性廢液、固體廢棄物處理系統主要的設計目標是：

- 減少放射性核種釋放至環境。
- 減少放射性廢棄物的產生。
- 減少放射性廢棄物的體積。
- 確保放射性廢棄物體處置所需的長期穩定性。

因此，核四廠放射性廢液及固體廢棄物處理系統採用了部分的新式設計，在廢棄物產生源頭上進行改善，例如，冷凝水處理作業使用纖維過濾器及深床式除礦器樹脂不再生等，這些措施均可大量減少廢液產生量。另外，廢液處理系統沉澱槽改採中空纖維過濾器，不採用樹脂再生廢液蒸發處理。濕性固體廢棄物先加以乾燥粉末化後，再以水泥固化處理。廢樹脂或其他可燃廢棄物以焚化處理，不可燃廢料則採高壓壓縮處理。一切均在確保運轉安全下，達成每一機組每年廢棄物固化體產量少於 250 桶的目標。

臺灣與日本同屬太平洋島嶼區域，人文地理環境大致相同，如地狹

人稠、海島地形、地震、地質斷層等。日本核能發展及放射性廢棄物處置政策明確，按部就班分層執行，尤注重民意的溝通宣導，做好敦親睦鄰的工作，以減少地方民眾的疑慮，化解不必要的抗爭，正是臺電核四廠借鏡努力的地方。

§11.5 最終處置管制

最終處置係將放射性廢棄物與人類生活環境長期隔離，是目前解決放射性廢棄物最適切的方法。放射性廢棄物的最終處置，須全盤考量放射性廢棄物特性、處置場自然條件、工程技術、社會環境及經濟因素等，以決定最佳的處置方式。臺電的放射性廢棄物最終處置計畫，分成高放射性廢棄物與低放射性廢棄物兩種處置方案，並分別展開相關作業。

民國 86 年行政院核定的「放射性廢棄物管理方案」，係我國推動放射性廢棄物最終處置作業的指導原則，其重點如下：

1. 放射性廢棄物之處理、運送、貯存、最終處置，應以目前可行之技術為基礎，針對我國實際需要，繼續研究發展，以確保安全。
2. 放射性廢棄物之處理、運送、貯存及最終處置，應由產生廢棄物者自行或委託政府核准之機關(構)為之，並支付所需之各項費用。
3. 放射性廢棄物之管理應考慮國民之

安全與環境保護，並應尊重有關國際公約。

4. 放射性廢棄物之最終處置，採境內、境外並重原則，積極推動；不論境外是否可行，仍應在境內覓妥處置場址備用。
5. 放射性廢棄物之貯存場或處置場，應儘量設於人口稀少地區，以不妨礙周圍地區資源永續使用及保育為準。
6. 加強推動低放射性廢棄物境內處置計畫，儘速完成環境影響評估與安全分析。繼續推動低放射性廢棄物之境外處置計畫，並應遵守國際規範，確保運送及處置作業的安全。
7. 繼續執行用過核子燃料及高放射性廢棄物最終處置方案的規劃，儘速提出先期可行性方案及實施方案。

經濟部已設置「核能發電後端營運基金」，從核能發電的電費中收取定額費用，供未來核能發電後端營運使用，其範圍包括核能電廠的除役與放射性廢棄物管理、最終處置所需費用。截至民國 90 年底該基金已累積達 1,272 億元，每年約以 100 億元在增加。

為推動放射性廢棄物最終處置技術的研究發展，物管局組成「高放射性廢棄物最終處置矩陣專業小組」與「低放射性廢棄物最終處置矩陣專業小組」，進行最終處置國外技術資料、資訊蒐集、整合與法規研析。

民國 90 年 9 月物管局又籌劃「推動放射性廢棄物處置長程方案」規劃小

組，經邀請核能、地質、經濟、化工、大氣科學及傳播方面等的專家學者參與規劃作業。

1. 低放射性廢棄物最終處置

低放射性廢棄物最終處置設施在輻射安全目標方面，有關處置場的設計應採多重障壁的安全措施，使其對任何民眾個人的年輻射劑量小於 0.25 毫西弗，為游離輻射防護安全標準 5 毫西弗的 1/20。在環境保護目標方面，處置場的設置，應以不妨礙周圍地區資源永續使用及保育為準，並充分考量場址土地的再利用。

處置場由選址、場址確認、施工、啟用、到功成身退後的封閉監管，將經歷下列的 5 個管制過程如下：

- (1) 場址篩選階段：物管局已訂定「低放射性廢棄物陸地最終處置管制規範」並提「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」，明定各項場址準則，排除高人口密度、地質水文條件複雜、生態保護、史蹟保存及重要天然資源等地區。
- (2) 環境影響評估階段：處置場於規劃時即應實施環境影響評估，俟環境保護主管機關審查通過後，才能進行處置場的開發。
- (3) 建造階段：處置場興建之前，臺電應提出處置場的安全分析報告向物管局申請建造許可。取得建造許可後，才可動工興建。

- (4) 運轉階段：處置場興建完成後，臺電應提出最新版的安全分析報告、試運轉計畫及測試報告，向物管局申請處置場的正式使用。運轉期間，物管局將派員執行安全檢查及環境監測，以確保廢棄物處置的安全。
- (5) 封閉監管階段：放射性廢棄物處置完畢且處置場封閉作業完成後，處置場便進入一段長時間的監管。待放射性衰減至無害程度時，處置場的土地可以再利用作為公園或其他公共設施等。

臺電已於民國 87 年 2 月選出烏坵鄉小坵嶼為「優先調查候選場址」，並於民國 89 年 11 月提出「小坵低放射性廢棄物最終處置場址開發計畫環境影響說明書」送環保署審查。民國 90 年 5 月環保署決定應進行第二階段環境影響評估，並至少考慮二處其他候選場址的替代方案。有關第二階段的環境影響評估作業，臺電依據環境影響評估法及其施行細則的規定，於民國 90 年 7 月起，於烏坵鄉辦理環境影響說明書公開陳列 30 天，並於 10 月 26 日舉辦公開說明會。環保署並於 12 月 18 日召開範疇界定會議。

民國 90 年 6 月臺電提出「小坵低放射性廢棄物最終處置場開發計畫投資可行性研究報告」，送經濟部審查。經濟部國營會於 90 年 9 月函

請原能會協助審查，並於 10 月 9 日召開審查會議，會中決議請臺電依各委員意見修改及補充後，再依程序報行政院核定。前兩項報告經審查通過後，即可進行細部設計、建造與運轉申請等作業，臺電尚須提出處置設施的安全分析報告，送原能會審查核可後，方可進行施工。待最終處置設施興建完成開始接收廢棄物後，核電廠廢棄物即可陸續送往處置。小坵嶼低放射性廢棄物最終處置場的處置概念為海床下坑道處置方式，分兩期開發。第一期工程處置 30 萬桶運轉廢棄物，預計於民國 102 年施工完成，並開始營運。第二期工程處置 68 萬桶除役廢棄物，預計於民國 112 年施工完成。

低放射性廢棄物的最終處置，因在技術層面上要求不若高放射性廢棄物那麼高，選址自較容易，惟如何讓民眾充分瞭解並能從較宏觀的角度去思考進而接受才是關鍵。愛這塊土地是我們的共通語言，如何將人類的基本生存需求(經濟)與永續經營地球(環保)的零和對立轉化成二者的相輔相成更是我們應努力的目標。行車和登山會不會有危險？與其因有危險性而不行車走路或登山，倒不如考慮如何讓大家遵守交通規則或做好登山準備及加強登山裝備來得務實可行。同樣地，如何才能做好放射性廢棄物處置更值得我們去關心。

2. 高放射性廢棄物最終處置

2001 年國際上於推動高放射性廢棄物最終處置有了突破性進展，芬蘭國會於 5 月 18 日通過了於歐基羅托(Okiluoto)核能電廠廠址，並確定高放射性廢棄物處置場的場址。此項突破已引起各國的重視，紛紛探詢該國如何能克服覓妥場址的難關。

此外，儘管地方居民強烈反對，美國眾議院於 2002 年 5 月 10 日以 306 票對 117 票通過一項在美國西部內華達州(Nevada)建立一個大型國家高放射性廢棄物處置場的計畫。

這通過的決議案，支持布希(Bush)總統在內華達州的雅卡山(Yucca Mountain)底下穿鑿地道，存放這些大部分來自美國全國 103 座核能電廠的放射性廢棄物的決定。

民主黨眾議員丁基爾說：「放射性廢棄物到處漂泊，目前它分散於全國各地，對你、我的選區都構成傷害。」

儘管內華達州居民激烈反對，不過美國國會於 2002 年 7 月 10 日仍通

過一項計畫，將在內華達州設置核廢棄物永久處置場。

美國參議院以 60 票對 39 票，推翻內華達州州長吉恩的否決案。吉恩州長的否決案，禁止核廢棄物運送到加州邊界附近內華達州西南雅卡山底下的處置場。

美國眾議院 2002 年 5 月也駁回吉恩州長的否決案。

參院的表決使布希總統的政府得以推動核能管制委員會所核發的正式核准案，在雅卡山挖掘坑道設置核廢棄物永久處置場。

雅卡山核廢棄物處置場預料可儲存來自全國 103 座核能發電廠與軍事設施的 77,000 噸核廢棄物。

美國聯邦政府已花了將近 20 年和 70 億美元，研究設置此一處置場，並已確定沒有更好的辦法得以解決核廢棄物問題。

據能源部長亞伯拉罕(Spencer Abraham)說，核廢料散落在全國各地構成安全顧慮，尤其是 2001 年九一一恐怖攻擊之後。

高放射性廢棄物係指備供最終處置的用過核子燃料或其經再處理所產生的萃取殘留物，我國目前並未將用過核子燃料進行再處理，所以高放射性廢棄物主要指用過核子燃料。對於高放射性廢棄物的最終處置，國際間一致採行「深地層處置」方式，藉多重障壁概念將高放射性廢棄物置放於地表下數百公尺或更深

燃料的長程處置計畫。經多年的研究，已初步研判臺灣地區具備適合的處置母岩，目前正進行潛在母岩特性調查與評估作業，未來將進行工程障壁、岩層阻隔能力、處置概念設計等的研究。由於長程處置計畫執行至今，國內外主客觀環境已有變異，物管局要求臺電修改工作規劃書，依民國 89 年 10 月核定的「我國用過核子

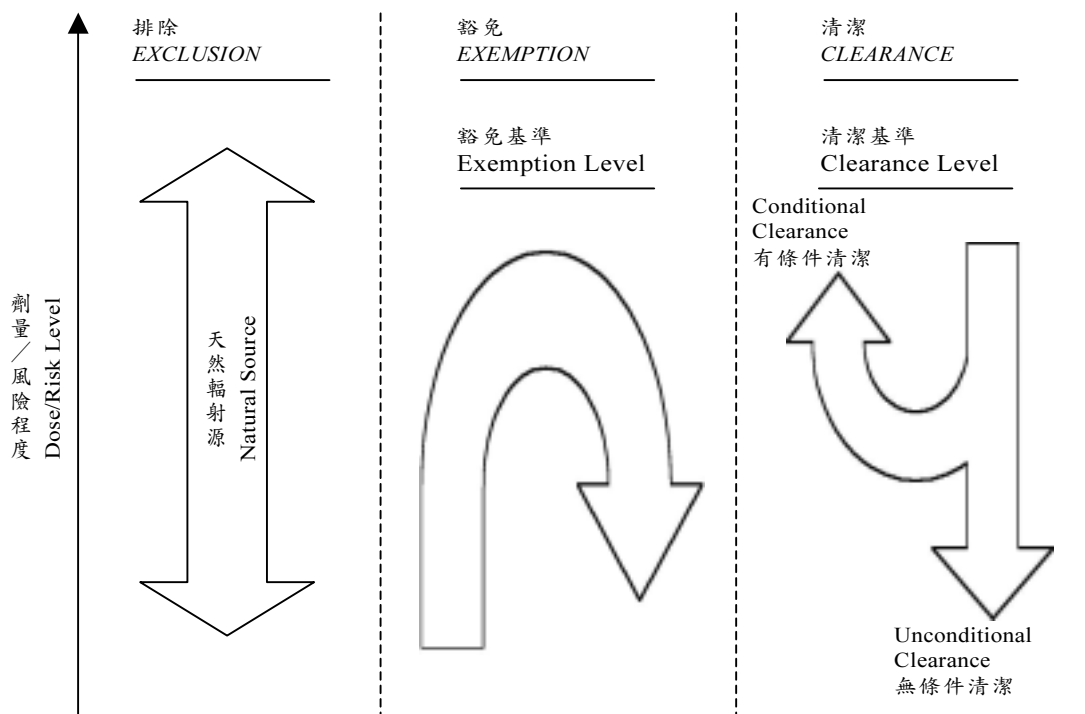


圖 11.4 排除、豁免以及清潔觀念圖示

處的穩定地層中，經由廢棄物本體、包封容器、工程障壁及處置母岩等構成層層保護，以阻滯放射性核種的遷移，使放射性核種在到達人類可接觸的環境前，便已衰變至法規限值可接受的程度。至於長程計畫，已邀請工研院能源及資源研究所、核能研究所及清華大學參與，正式展開用過核子

燃料長程處置全程工作規劃書(民國 90 年修正版)」，確實執行，並規定逢國曆歲次雙數年，臺電應於三月底前提報前一年工作成果摘要報告；逢單數年，於三月底前提報近二年的中英文詳細工作成果報告及下兩年的詳細工作計畫書，以便適時調整執行的方法及內容，契合處置計畫整體的

發展。

臺電的「用過核子燃料長程處置全程工作規劃書」係將計畫分成四階段，循序進行：

- (1) 潛在母岩特性調查與評估階段 (1999-2007 年)
 - a. 確認優先調查場址。
 - b. 建立全系統初步功能及評估的能力。
- (2) 詳細場址調查與確認階段 (2008-2018 年)
 - a. 完成候選場址可行性研究報告，送經濟部審查。
 - b. 完成候選場址環境影響說明書 (Environmental Impact Statement, EIS)，送環保署審查。
- (3) 細部設計與執照申請階段 (2019-2023 年)
 - a. 完成申請建場執照所需的安全分析報告 (Safety Analysis Report, SAR)。
 - b. 完成建場執照申請程序，並取得建照。
- (4) 處置場建造與試驗階段 (2024-2031 年)
 - a. 完成處置場的建造，提出最新版的安全分析報告、運轉技術規範及意外事件應變計畫等申請試運轉所需要的資料。
 - b. 完成處置場的試運轉。
 - c. 完成運轉執照的申請與取得。

為督促我國高放射性廢棄物最

終處置計畫，物管局已研訂「放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則(草案)」，作為臺電推動最終處置計畫的管制依據。民國 90 年 10 月物管局邀請產、官、學、研等學者專家，歷經 12 次會議討論，歸納國內放射性廢棄物問題的根源在於「未能妥善進行最終處置」。經整合國內推動放射性廢棄物最終處置的政策理念及基本方針，考量未來環境發展，復參考歐、美、日等國的發展經驗及相關法令，確立加速推動我國放射性廢棄物最終處置的基本策略為「建立計畫執行之法制基礎」與「籌設權責相符之營運組織」，並積極研擬處置條例草案。

專案小組經多次討論，初擬放射性廢棄物最終處置條例草案 22 條條文，其內容包括明定立法的宗旨在於促進放射性廢棄物最終處置，保障國民健康，維護環境生態品質；確立處置的基本方針(代間倫理、境內優先、產生者付費、資訊公開、國家責任等)；籌設營運專責機構負責執行處置計畫；廢棄物產生者支付處置所需費用；處置計畫的管理、核定及資訊公開；處置場址的選擇及核定；公眾溝通與回饋及地方參與監督；以及現行處置相關業務的銜接與移轉等。

安全處置放射性廢棄物是政府責無旁貸的任務，為追求國家永續發展，加速推動放射性廢棄物最終處

置，遂成為當前政府積極進行的重點工作。本條例草案未來立法施行後，配合專責機構的設置，將使國內未來推動放射性廢棄物最終處置相關作業具備法源基礎，復經由公開透明的選址程序、積極主動的公眾溝通與地方監督、合宜的回饋機制等，期有效化解處置計畫推動的阻力，儘早解決放射性廢棄物問題，達成確保民眾健康及維護環境生態品質的目標。

此長程計畫的規劃，預計於民國 105 年選出高放射性廢棄物最終處置計畫的候選場址，民國 120 年展開處置作業。

§11.6 小產源放射性廢棄物管制

小產源放射性廢棄物係指醫、農、工、學術及研究等單位所產生的少量放射性廢棄物及廢射源，並包含天然放射性物質廢棄物。截至民國 90 年 12 月底止，全國小產源廢棄物產生的單位總計有 393 家，分布遍及全國。目前，除臺電所屬單位產生的放射性廢棄物由各核能電廠負責處理外，其餘各業界產生的放射性廢棄物及廢射源，則由原能會指定的專業單位負責統籌接收處理。未來將併同臺電所產生的低放射性廢棄物的管制，對相關機構的放射性廢棄物處理、貯存等作業，除每年兩次定期檢查外，尚有不定期及專案檢查。

核能研究所擁有現代化放射性廢液處理廠 1 座，及現代化廢棄物貯存庫

2 座，其低放射性廢棄物先經收集、處理、裝桶或固化裝桶後，暫存於所內的現代化倉庫內，待未來最終處置場正式啟用後，再轉送至處置場。截至民國 90 年 12 月底止，所內共計貯存 13,224 桶低放射性廢棄物。

天然放射性物質原本就存在於自然界中，只是各地區含量有高、低之別而已。天然放射性物質經由工廠處理過程，可能產生濃縮作用，造成所製的成品或廢棄物的放射性殘留問題，即所謂技術增強天然放射性物質 (TENORM)。原能會曾於桃園縣內發現部分道路有天然輻射背景變異現象，經查其肇因係該等道路鋪設的瀝青混凝土級配料中含有天然放射性物質之故，也加以管制。

原能會已接收可再利用的各業界報廢射源強度，數量如表 11.5 所示，各業界可依規定重新申請再使用。

為配合原能會全面加強管理檢查醫療院所及學術研究機構使用非密封放射性物質所產生的放射性廢棄物，保障民眾健康，物管局於民國 89 年 8 月起配合原能會輻防處執行該項業務。

§11.7 豁免與清潔

當應用最適化的原則時，為了再抑低個人和集體劑量所要付出的成本代價，其利與弊似乎不易達到平衡。尤其是輻射源僅有很低的危險度，要藉管制的程序加以限制約束，是一種資源的浪

費。因此，在這種情況下，輻射源可藉

表 11.5 可再使用的各業界報廢射源(枚)

核種	A < 1 μCi	1 μCi ≤ A < 10 μCi	10 μCi ≤ A < 100 μCi	100 μCi ≤ A < 1 mCi	1 mCi ≤ A < 10 mCi	10 mCi ≤ A < 100 mCi	100 mCi ≤ A < 1 Ci	1 Ci ≤ A < 10 Ci	A ≥ 10 Ci
鈉 22	2	0	0	0	0	0	0	0	0
鐵 55	0	1	0	0	0	10	0	0	0
鈷 57	8	6	4	1	0	0	0	0	0
鈷 60	18	0	4	40	41	8	0	1	1
鎳 63	0	0	0	0	3	2	0	0	0
氬 85	0	0	0	0	2	23	50	0	0
錒 90	2	0	0	1	8	3	0	0	0
鎘 109	0	1	2	5	0	0	0	0	0
碘 125	1	0	0	0	0	0	0	0	0
碘 129	5	0	0	0	0	0	0	0	0
銻 137	3	0	4	1	82	86	34	19	1
147	0	2	32	6	0	5	2	0	0
釷 153	0	0	0	0	0	1	1	0	0
釷 192	2	0	1	0	0	0	0	0	0
鐳 226	1	2	2	6	29	10	0	0	0
鐳 226/銻	0	0	0	0	3	0	0	0	0
釷 232	0	2	0	0	0	0	0	0	0
錒 241	2	7	2	0	0	5	5	0	0
錒 241/銻	0	0	0	0	0	8	6	0	0

註：1Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

「豁免」或「清潔」而免於管制的要求。

在某些狀況下，輻射源或放射性物質不需要予以管制，例如位於地表的宇宙射線(高空飛行則要管制)及部分天然放射性物質，由於根本無法控制，因此各國在制定輻射防護規範與措施時，均不將其考慮在內，稱為排除(exclusion)。此外，有些微量輻射源或放射性物質，由於其所可能引起的危險度非常小，並不值得浪費有限的資源加以管制，稱為豁免管制(exemption from regulatory control)。這種情況又可細分為兩類：第一類是有些微量輻射源，因在設定限值以下，從開始即言明不予管

制。換言之，這些輻射源從未進入管制圈內，稱為豁免(exemption)。例如，某些供校正用標準射源及供研究用的微量示蹤劑等。另一類係原本在管制之列，但經由處理或蛻變後，其輻射強度已達設定限值之下，因而從管制圈中釋出，不需再予管制，稱為清潔(clearance)。此一情況，端視對釋出的物件是否設限，又可細分為無條件清潔(unconditional clearance)與有條件清潔(conditional clearance)兩種。以上幾種情況，可從輻射劑量觀點表示如圖 11.4。如此比較嚴格的定義方式，係最近幾年才被提出，在此之前，一般觀念比較模

糊，尤其豁免與清潔混用情形，十分普遍。

現行的「游離輻射防護安全標準」規定如下：

第 48 條 放射性物質造成個人之年有

獻所列的經公式如下：

$$\left[\frac{1}{E_\gamma + 0.1E_\beta}, \frac{ALI_{inh}}{100}, \frac{ALI_{ing}}{100000} \right]_{取最小值} \quad (11.1)$$

式中

E_β 和 E_γ 分別每次蛻變的有效貝他

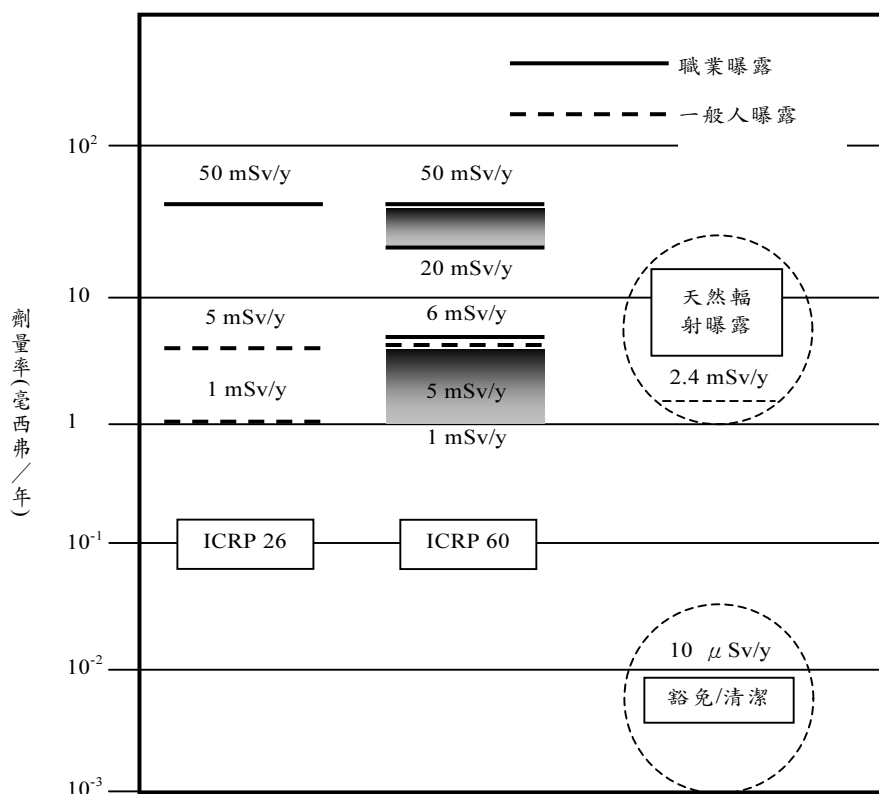


圖 11.5 IAEA 豁免/清潔準則與 ICRP 26 和 60 建議的比較

效等效劑量不超過 0.01 毫西弗(0.001 倫目)，年集體有效等效劑量不超過 1 人西弗(100 人倫目)者為可忽略微量，其廢棄經報請原子能委員會核准者，得免適用第 47 條及第 49 條之規定。

清潔基準則參考 1996 年國際原子能總署出版的 IAEA-TECDOC-885 號文

和加馬能量(MeV)，這些能量的值可來自國際放射防護委員會出版物 ICRP-38 (1983)，而 ALI_{inh} 為吸入年攝入限度最嚴格的值(貝克)， ALI_{ing} 為嚥入年攝入限度最嚴格的值(貝克)，可參閱 ICRP-61 (1991)及 ICRP-68 (1995)。

試以鈷 60 為例，由式(11.1)可得無條件清潔基準為 0.2 Bq/g，介於 0.1 與 1.0 Bq/g 之間，取其幾何平均

$\sqrt{0.1 \times 1.0} = 0.3$ Bq/g，是為鈷 60 的清潔基準。除了 Bq/g 外，尚可用 Bq/cm²，Bq/y，噸/年，或其單位的組合。若係多核種，則每一核種的濃度(Bq/g)與其清潔基準的比值總和應小於 1。如屬於有條件的清潔基準，則應管制最終的用途，限制曝露的途徑。適當的管制點應為產生廢棄物的機構。

早在 1988 年時國際間已達成共識，因此 IAEA 在安全叢書 SS89 號文件中建議：

1. 當任一豁免管制輻射作業所造成的最大個人劑量在 $10 \mu\text{Sv/y}$ 或更小時，可視之為可忽略劑量。
2. 如果初步分析顯示某豁免管制輻射作業所造成的集體劑量負擔 (collective dose commitment) 小於 1 man-Sv/y，則該豁免管制輻射作業已符合最適化要求，否則即須進行最適化評估工作。

圖 11.5 所示係將 IAEA SS89 所建議豁免管制劑量限值，與世界平均自然背景輻射，以及 ICRP 26 與 60 號文件所建議的工作人員劑量[其中 $6 \text{ mSv/y} = 3/10 \times (20 \text{ mSv/y})$]與一般人劑量限值，做一比較。由圖中可以看出 ICRP 60 號報告所建議的一般人劑量限值已在自然背景輻射範圍以內，而豁免管制的劑量限值更只有其 1%，的確是非常微量的輻射劑量，而可予以忽略不計。

依 IAEA 建議，滿足上述 SS89 兩項標準者，即可豁免管制，但為了進一

步避免錯誤與意外，於執行豁免管制作為時，尚可適度加額外措施，例如：

1. 對每年可釋出的總活度設限；
2. 對豁免管制放射性物質的物理與化學形式加以限制；
3. 對豁免管制外釋的物質應送達的目的地加以限制等。

§11.8 放射性廢棄物管理的新觀念

放射性廢棄物是一種特殊的游離輻射源，特別是對於長壽命放射性廢棄物的安全管理，ICRP-60 的普遍性要求對此存在困難，新的安全管理觀念乃應運而生。

1. 管理方面的新觀念

(1) 全程管理

全程管理涉及廢棄物「最少化」與廢棄物產生和管理「各步驟相依性」。要使放射性廢棄物產生量保持在可實現的最小量，就要通過適當的設計措施、運轉、以及除役使廢棄物的活度和體積兩方面都為最小。減少廢棄物的方法包括對材料的選擇和控制，材料循環使用、復用以及採用合適的運轉程序，對不同形態廢棄物和材料進行分類處理。因此，要實現廢棄物最少化就必須對廢棄物實施全程的管理。

各步驟相依性也要強調全程管理。每兩個步驟及所有多步驟之間存在著相互聯繫。在某一步驟作

出管理決定會妨礙後續步驟的選擇或產生影響。因此要強調在整個放射性廢棄物管理中，使管理的安全性和有效性得以平衡考慮。

放射性廢棄物實施全程管理，最終才可實現管理的安全性、有效性和經濟性。

(2) 產生廢棄物是生產的一部分

廢棄物管理和處置是產生廢棄物的不可分割的一部分。有些人員認為花費錢處理放射性廢棄物缺少效益，將放射性廢棄物的處理和處置活動視為脫離其生產活動的一項獨立的作業。所以應強調放射性廢棄物安全管理是產生廢棄物的一部分，要通過對產生廢棄物的全程管理來管好放射性廢棄物。

(3) 以安全處置為準繩

放射性廢棄物的管理策略，在處置方面分為「稀釋和瀰散」與「濃集和滯留」，如圖 11.6 所示。這兩種方式都不可能避免導致放射性核種遲早向環境的排放。此外，這兩種處置方式不是相互排斥的。如果存在選擇時，兩種策略的平衡是一個輻射防護的問題。如果採用「稀釋和瀰散」這種處置方式，ICRP 推薦的防護體系可直接

適用。如果採用「濃集和滯留」策略處置長壽命固體放射性廢棄物，主要的防護問題是如何防止在遙遠的未來發生(也可能不發生)的曝露問題，即潛在曝露問題。一個有效的處置系統應在廢棄最有害的期間將其滯留住，只有殘存的少量放射性核種在遙遠的未來有可能進入人類生活環境。

無論採取何種處置策略，核心是公眾和環境於現在以及將來的安全，廢棄物管理各環節之間以及廢棄物管理與生產操作之間的相依性，處置前各階段的管理都必須以有利於最後的安全處置為準繩。

2. 技術方面的新觀念

(1) 有約束的最適化

最適化係以合理抑低(ALARA)為依歸，這個程序應通過限制個人劑量的約束(dose constraint)進行控制，以便限制因經濟和社會判斷中可能產生的不公平。有約束的最適化過程包括情節(scenario)分析：天然過程和人為侵入，如圖 11.7 所示。對於天然過程，評估核心是個人對射源相關的約束。正常曝露情況上界值(upper bound)為

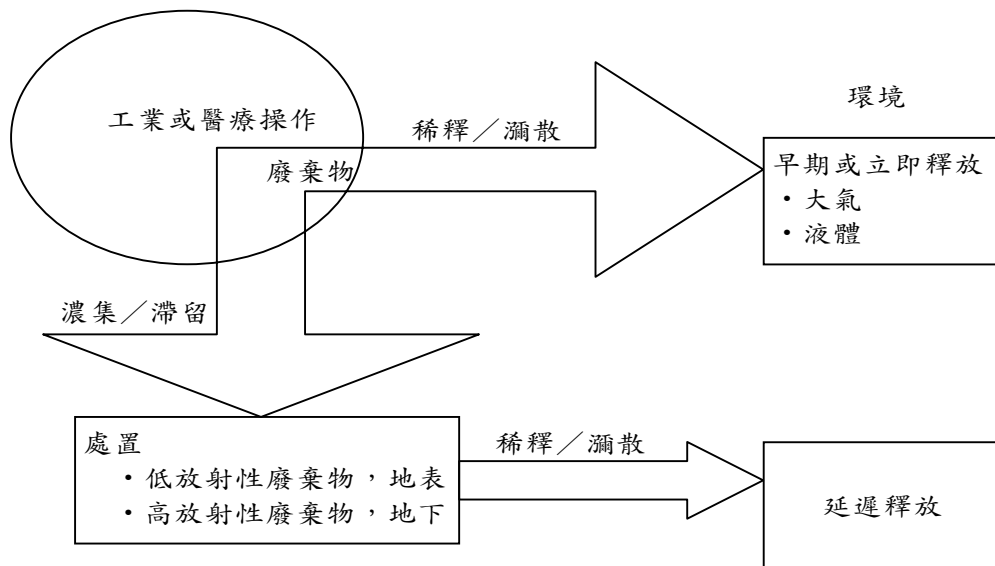


圖 11.6 放射性廢棄物產生及處置策略

0.3 mSv/a，相對應的危險度約束為每年 10^{-5} 的量級。關於人為入侵的情節，現在不能控制，決策者應對典型的仿真入侵情節進行分析，採取干預幾乎總是正當的話，應採取措施減少入侵的機率和後果。既存年劑量 (annual existing dose) 10 mSv 可作為一種參考基準，低於它干預不大可能是正當的。若現存年劑量大於 100 mSv，則干預總是正當的。註：所謂既存年劑量是考慮在持續曝露，於給定的情況下，所有持久存在持續曝露的射源所引起的劑量。

(2)最適化是判斷過程

ICRP-81 強調兩點：最適化的執行是判斷過程，而最適化判斷是定性的。ICRP-77 指出防護最適化是使每個對輻射曝露管制負責的

人員形成一種思想，要不斷地思考一問題：是否我已做了全部可合理的減少輻射劑量的事？

(3)集體劑量的限制

在長壽命放射性廢棄物處置方面，於長時間內確定集體劑量困難是其確定性。關於劑量和危害之間的關係，現在的判斷對未來的群體可能不適用。例如，如果癌症被攻克了，現在所遵循的機率效應基礎便發生重大的變化，則集體劑量估算的準確性也失去了意義。

(4)關鍵群體是虛擬的

由於要考慮長時間尺度，關鍵群體的習性及特徵，以及所處的環境是假定的。因此，任何這類關鍵群體必然是虛擬的。在所考慮的比人壽命長得多的時間內，從處置場釋放出的放射性核種對生物圈造成的污染應保持相對穩定。因此，計算個人一生中平均的年劑量／

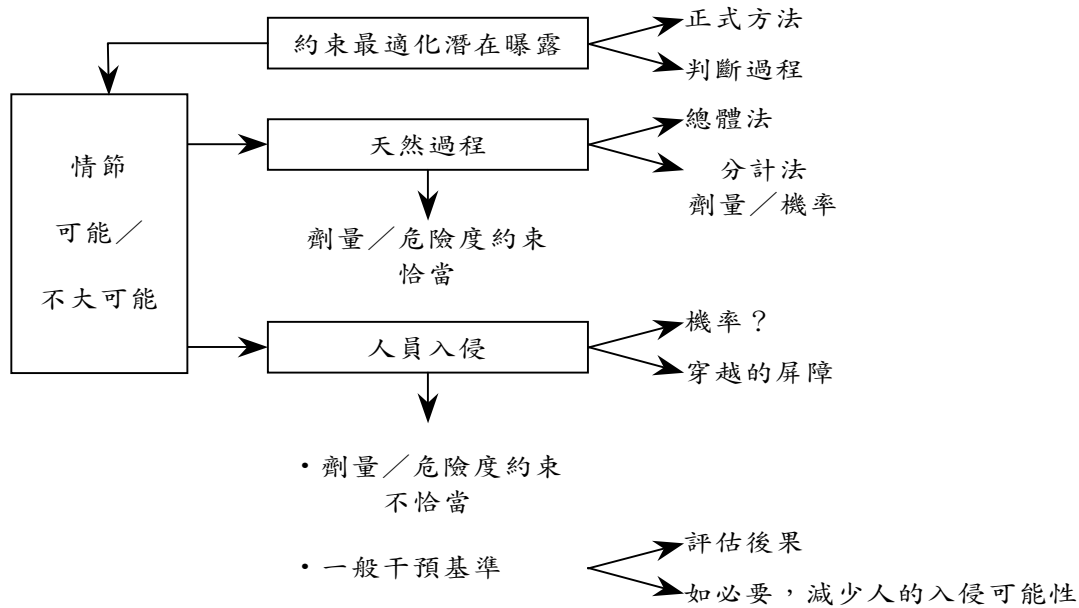


圖 11.7 方法選擇

- 註 1.天然過程需要考慮地震特性、滯留能力、容器設計、對於人的入侵需要考慮存在的天然資源、有組織的控制、處置場深度的選擇。
- 註 2.對於天然過程，得到的劑量或危險度要與劑量或危險度約束進行比較，以確定與人相關曝露的可接受性。惟此約束值不適用於入侵事件，而入侵穿越的屏障已成為最適化的一部分，故應設法減少入侵的機率。
- 註 3.總體法是指把劑量和機率結合起來的總體危險度；分計法是對每一種曝露情況分別給出劑量及相對應的發生機率。這兩種方法都可以達到相同的防護程度。

危險度是合理的，不必算出不同年齡組的劑量。

3. 結語

在新觀念中，強調全程管理，而不應把放射性廢棄物管理視為脫離產生廢棄物活動獨立作業。在技術方面，提出有約束的最適化觀念，明確最適化的執行是定性的判斷過程，對集體劑量的使用提出限制以及對關鍵群體給出了新的涵義。此外，約束劑量只是作為一種可接受性指示，而不是對健康危害的預測，以及現存年劑量引入等新觀念。

§11.9 未來展望

為達到保障民眾的安全，維護環境生態品質，避免現代及後世受到放射性不利影響，除應積極建立健全的管制法規體系外，並嚴密監督放射性物料(核子燃料及放射性廢棄物)的營運安全，以及作長遠規劃，期使放射性物料的安全管理更臻完善。展望未來，國內放射性物料的各项重點管理工作計有：

- 1.繼續推動放射性物料管理法的立法，並配合行政程序法的法定程序，完成放射性物料管理法施行細則、放

射性廢棄物最終處置安全管理規則等十項子法的研訂工作，以健全放射性物料管理法規體系。

2. 繼續推動放射性廢棄物減容減量，定期檢討減容減量措施，並促使核能電廠引進新技術及增添新設備，使廢棄物產量繼續減少至優於國際平均水準。
3. 促使臺電放射性廢棄物減容中心及核三廠焚化爐的運轉作業順暢，審查核一廠焚化爐設置計畫，確保設施正常運轉，並符合輻射防護及相關環保排放標準。
4. 加強蘭嶼貯存場的安全管制及其地下水水位與放射性核種監測，促使臺電積極執行檢查重裝計畫，以提升蘭嶼貯存場的貯存安全。
5. 促使臺電積極進行低放射性廢棄物最終處置計畫，於民國 94 年底前，完成第二階段的环境影響評估作業及「小坵低放射性廢棄物最終處置場開發計畫投資可行性研究報告」的審查；並提出安全分析報告，分別送請經濟部及原能會審查，以順利處置國內各界產生的低放射性廢棄物。民國 91 年 5 月 16 日報載原能會有異議，此計畫可能生變。
6. 厚植審查技術，以利審查核能一廠用過核子燃料中期貯存設施的興建申請，並加強相關作業的安全檢查，以確保用過核子燃料的貯存安全。
7. 促使用過核子燃料最終處置計畫的推動與相關技術的研究發展，審查各階段的工作報告，並積極推動高放射

性廢棄物最終處置技術的國際合作，以引進最新管理技術。

民國 91 年 7 月送行政院討論的「放射性廢棄物最終處置條例」草案中，其中最重要的一條就是「放射性廢棄物之最終處置，應由行政院或其指定之部會，籌設專責機構，負責執行」。這專責機構應是類似公司的公法人組織，所有費用將從原本就為處理放射性廢棄物的臺電核後端基金中支出。

參考文獻

1. International Commission on Radiological Protection, “Recommendations of the ICRP,” ICRP Publication 26, **Ann. ICRP 1**, 1 (1977)
2. International Commission on Radiological Protection, “Radionuclide transformations: energy and intensity of emissions,” ICRP Publication 38, **Ann. ICRP 11**, 1 (1983)
3. International Atomic Energy Agency, “Principles for the exemption of radiation sources and practices from regulatory control,” **IAEA Safety Series No.89**, Vienna (1988)
4. International Commission on Radiological Protection, “1990 Recommendations of the ICRP,” ICRP Publication 60, **Ann. ICRP 21**, 1 (1991)

5. International Commission on Radiological Protection, "Annual limits on intake of radionuclides by workers based on 1990 recommendations," ICRP Publication 61, **Ann. ICRP 21**, 4 (1991)
6. International Commission on Radiological Protection, "Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers," ICRP Publication 68, Pergamon Press, Oxford OX5 1GB, UK (1995)
7. International Atomic Energy Agency, "Clearance levels for radionuclides in solid materials." **IAEA-TECDOC-855**, Vienna (1996)
8. International Atomic Energy Agency, "International basic safety standards for protections against ionizing radiation and for the safety of radiation sources," **IAEA Safety Series No.115**, Vienna (1996)
9. 許俊男 談低放射性廢料的處置理念 **核能環保人 85** , 3 (2002)
10. 行政院原子能委員會放射性物料管理局 **九十年放射性物料管理報告書** 臺北板橋(2002)
11. 劉文忠 進步型反應器(ABWR)廢料處理系統設計研討會後記 **核能環保人 90** , 2(2002)
12. International Commission on Radiological Protection, Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste, ICRP Publication 77, **Ann. ICRP 27** (Supplement) (1997)
13. International Commission on Radiological Protection, Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 81, **Ann. ICRP 28** (4), (1998)
14. 趙亞民 吳浩 劉華 趙永明 放射性廢物管理中值得關注的一些新概念 **輻射防護 22** , 26-30 (2002)
15. 林善文 通訊請益 原能會物管局 臺北板橋(2002)
16. J. K. Shultis and R. E. Faw, **Fundamentals of Nuclear Science and Engineering**, Marcel Dekker, New York (2002)

第十二章 低劑量生物效應

§12.1 前言

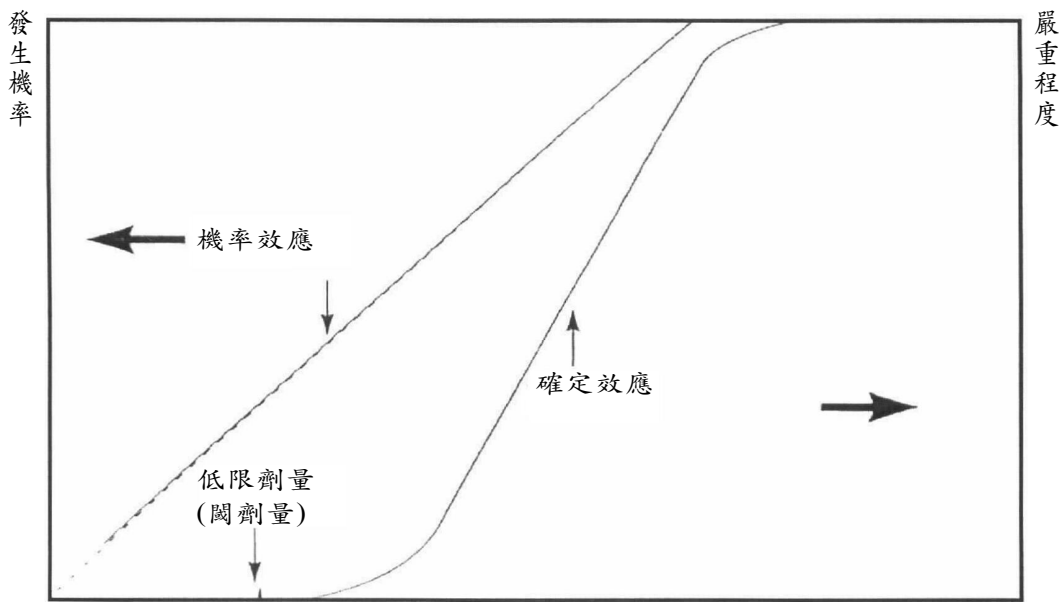
游離輻射是指直接或間接使物質產生游離作用的電磁輻射或粒子輻射。其生物效應可分為兩類：機率效應(例如癌症)及非機率效應(如皮膚紅斑)，後者已改稱為確定效應。由輻射對生物體所造成的傷害反應時間快慢，亦可分為急性症候群及慢性症候群。急性症候群是指人在短時間內接受一次大劑量的全身輻射曝露，造成組織和器官同時受到損傷，在這方面輻射對人體的效應已有相當多的資料。但是低水平曝露對人體所引起的慢性症候群，由流行病學調查迄今的數據仍未能獲得很好的結論。以往多年來認為低水平曝露對人類群體的最大危害是遺傳效應，現今的焦點則是在低水平曝露所引起的機率效應會有多大的致癌機率。在本章中，針對近 50 年來對低水平曝露所引發致癌風險的爭論，概括地作個整理，包括日本的廣島和長崎事件、BEIR-V 報告、放射性污染鋼筋事件、以及核能電廠事故等。

§12.2 確定效應與機率效應

1. 確定效應：肇因於受照射的細胞被殺死，亦即劑量大到使足夠多的細胞喪

失而導致組織或器官的功能有所損傷。

- 低劑量情況下，確定效應發生的機率將為零。
 - 若劑量高於一定的量(臨床效應的低限劑量)，則發生機率將迅速升高到 100%。
 - 在低限劑量之上，危害程度隨劑量增加而升高。
 - 低限劑量通常為數戈雷，或劑量率為在每年 1 戈雷的一定比例以上。
 - 懷孕婦女的胎兒受高劑量曝露造成心智遲滯為一確定效應。
 - 以往此類效應稱為「非機率效應」，惟在曝露初期細胞的變化是機率性的。由於引發臨床上可見的非機率效應時涉及大量的細胞，而使得這種效應具有確定性的特徵，故稱之為「確定效應」。
2. 機率效應：肇因於受照射細胞被改變而非殺死，被改變的體細胞可能在一定的潛伏期後誘發成癌。若傷害發生於性細胞，則可能會有不同類及不同程度的效應表現在受曝露者的後代身上，即遺傳效應。輻射誘癌與遺傳效應均屬機率效應。



有效等效劑量(機率效應)現改稱有效劑量
 等效劑量(確定效應)現改稱等價劑量

圖 12.1 機率效應和確定效應與劑量的關係圖

- 機率效應的發生假設沒有低限劑量(又稱為閾劑量)。
 - 機率效應發生的機率隨劑量增加而升高，但不一定會發生，發生癌症後的嚴重程度與劑量多寡無關。
 - 細胞中亦存有修補與防衛機制，俾使細胞傷害難以發生。
- 確定效應與機率效應的圖示如圖 12.1 和表 12.1 所示。

表 12.1 機率效應與確定效應

效 應	低 限 劑 量	與 劑 量 的 關 係	子 例
機率效應	無	效應發生機率與劑量成正比	癌症、遺傳效應
確定效應	有	效應發生的嚴重程度隨劑量而增加	皮膚紅斑、脫毛、白內障、不孕

§12.3 早期的生物效應

在 1895 年之前並不了解什麼是輻射防護，因為當時沒有人知道輻射的存在與游離現象。然而輻射有害的特性在貝克勒爾(Becquerel)發現放射性物質之前就有紀錄。這段歷史起始於 15 世紀，在現今捷克與德國邊境一個稱為爾茲堡(Erzgebirge)的地方，該地方卡泊申

(Carpathian)區過去曾開採銀礦後來改採鈾礦。當地的礦工深為一種肺病所苦，稱為高山症(Bersucht)。16 世紀初，一位德國年輕人名叫鮑爾(Georg Bauer)被派作為當地的醫療官員，他於日後以拉丁姓名亞戈里可拉(Agricola)成名。他發明了使用獸力或水力驅動的精巧風箱，來改善礦坑的通風，並鼓勵礦工的

妻子幫丈夫們縫製細密濾網的口罩。現在，我們已經了解所謂高山症是因吸入氫的子核種所引起的肺癌(Bergkrankheit)。

由輻射防護的觀點來看，第一次世界大戰以前對輻射傷害都假設只有確定效應，也就是輻射劑量必須超過某一閾值。因為早期射源是屬於低穿透力或是像鏽只在短距離內有危險，所以首先被觀察到的有害效應就是皮膚傷害，而且往往十分嚴重甚至須截肢。同樣足以威脅生命的造血器官傷害則是另一個早期所發現的嚴重狀況。

§12.4 原子彈倖存者的輻射效應

低水平曝露對人體的影響一直是備受爭議的話題，在 1980-1990 年代有一系列的報告在討論此影響，也引起了一股對低水平曝露的生物效應作重複實驗的熱潮，但卻未能獲得決定性的結論。在這麼多對於人的輻射效應數據，最重要的來源是 1945 年後對於廣島、長崎原子彈爆炸後倖存者的追蹤研究成果。由原子彈災害委員會(Atomic Bomb Casualty Commission, ABCC)負責進行壽命期研究，在美國與日本科學家的努力下，開始於 1945 年秋天蒐集流行病學資料，但在低水平曝露的輻射效應，資料仍不夠完整。在廣島、長崎事件中約有 82,600 倖存者，其中超過一半的人受到低於 0.1 戈雷的曝露，而少於 10%的

人受到高於 1 戈雷的曝露。在 1995 年有人提出事件中平均存活的人所受的曝露為中等劑量，約 0.25 戈雷，但也有一些高達 6 戈雷。

一直到 1970 年代後期原子彈倖存者仍是低水平曝露生物傷害重要的資料來源，美國主計處(General Accounting Office, GAO)在 1981 年初評論：“仍未出現眾多有力的結論可以推斷出，低水平游離輻射曝露與腫瘤有關聯”。因此，為了考慮所有的不確定性，對於科學界及政界制定的輻射防護規則已糾纏在大眾的爭論之中。科學上的爭論則是針對 1979-1980 年美國國家科學院游離輻射生物效應委員會第 III 號報告(BEIR-III)所指的核爆後輻射傷害，其所提出的傷害尚包括其它的射源。1981 年羅倫斯利物莫國家實驗室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)的 William E. Loewe 及 Edgar Mendelsohn 利用電腦模擬的技術重建長崎、廣島原子彈事件造成的曝露影響，他們發現原子彈釋放出來的輻射資料被誤解，尤其在廣島的輻射是以加馬射線為主，中子的部分卻為少數，這與以往的認知不同。LLNL 的研究認為在廣島所造成的輻射死亡及傷害是由加馬射線所引起的。新爭論的轟動，使輻射效應研究基金會(Radiation Effects Research Foundation, RERF) (前身為 ABCC, 1975 改制)所資助的美國及日本科學家在廣島及長崎也進行了一系列的實驗來探討更多有關輻射劑量的

資訊。

另外，還有洛色拉莫士國家實驗室 (Los Alamos National Laboratory, LANL) 複製一顆以 ^{235}U 為燃料的原子彈(如廣島爆炸的原子彈)來實際了解原子彈的輻射影響。因為 ^{235}U 的設計只在廣島使用過一次，關於它的產率以及它所釋出的輻射，如與較 ^{239}Pu 彈相比較，所知道的很少。鈾彈曾在第一次原子彈試爆、長崎以及二次世界大戰後試爆。科學家們所複製的 ^{235}U 原子彈只容許燃料產生分裂，但並未達到爆炸點，經由這個方法他們得到了許多關於在廣島爆炸的原子彈所釋出的輻射。 ^{235}U 的新實驗在 1987 年發表結果，支持了 Loewe 和 Mendelsohn 的發現，顯示在廣島只有少量中子輻射釋出，同時也證實了早期在長崎的輻射評估，並指出在廣島的大部分癌症跟長崎一樣都是來自於加馬輻射。在 1985 年，這兩城市因為癌症和白血病死亡的人數估計約 525 人，超過在 1950-1978 年間的正常發生率。雖然超出的死亡人數其死因未被確認，但科學家們假設其死因係來自原子彈的輻射是合理的，而且新的證據也顯示加馬射線是主要的輻射。新資料也顯示有很多倖存者在爆炸後所接受的劑量也比原先預測的低。縱使如此，仍含有相當的不確定性。

§12.5 BEIR-V 報告

由於 BEIR-III 報告被質疑，1980 年開始著手再評估 BEIR-III 報告，在 1989 年 12 月國家科學院游離輻射生物效應委員會發表了 BEIR-V 報告。與以往的不同點在於它評估曝露於低水平輻射的致癌風險是 BEIR-III 報告所提到的 3-4 倍，而且在 BEIR-V 中加入了多重混合的判斷。它接受線性假設用於實體腫瘤，而二次線性模式(linear-quadratic pattern)可用於白血病。對於原子彈倖存者，BEIR 推論出一種線性無閾值的癌症風險模型(白血病除外)，報告中也指出它的風險評估在用於非常低的劑量會變得更不確定。如與 BEIR-III 報告備受爭論的處境比起來，BEIR-V 委員會表示此次的發現並不會引起異議。不管癌症風險評估的實質上意義是什麼，BEIR 主席 Arthur C. Upton 強調 BEIR-V 的結論不應該會引起過度的反應，因為它們並沒有提出革命性的變化。他並且指出 BEIR-V 再次申明了輻射防護專業化在執行上的需要性，以及所有的劑量都應該要遵守合理抑低的精神。Upton 還建議：由於大部分的個人所接受的輻射曝露很低，平均來說民眾不應該視輻射為重大關切的來源。

1990 年 11 月國際放射防護委員會 (ICRP) 宣布了職業曝露上劑量限度的變動，全身的年劑量限度從 50 mSv 降到 20 mSv，而美國環境保護署 (Environmental Protection Agency, EPA) 及核能管制委員會 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) 則加重了輻射防護

風險評估上的比重。在 BEIR-V 發表之前，這兩個機關就致力於輻射標準的制定，雖然 EPA 在 1987 年並沒有設法去修訂職業上的劑量限度，但 BEIR-V 仍在清潔空氣法(Clean Air Act)修正案的射源管制上占有很重要的影響力，而聯邦管制法規(CFR)第 20 編的修訂在幾經考量下對低水平輻射風險還是沒有下定論。

在 BEIR-V 發表後數年，有一些學者針對它的結論提出意見，1996 年 RERF 提供了日本原子彈倖存者新的數據，證實了 BEIR-V 的估計。又資料顯示低於 50 mSv 的劑量，其實體腫瘤死亡率是有沿著線性模式的趨勢。當然不確定度還是有，尤其是怎麼由廣島及長崎事件的倖存者應用到低水平輻射的生物危害？但是它畢竟提供了對於少於 50 mSv 的低水平職業曝露的線性假設。只有這個基金會所發表的數據與 BEIR-V 所言者相符，但其他的學者卻不認同。1992 年新的話題圍繞在廣島 ^{235}U 原子彈上，Tore Straume (LLNL 的一位生物物理學家)，聯合了美國及日本的科學家分析從廣島收集來的混凝土樣品，發現到在廣島原子彈爆炸時有大量的中子成份。若事實確是如此，這其中暗喻著這些倖存者接受了比 BEIR-V 所估算的還要高的劑量，尤其是中子。也就是說，使腫瘤發生的劑量高於 BEIR-V 所假設的。這些新的發現不一定可信，但若它是真實的話，則輻射風險的

再評估就需要重新修訂了。

William Loewe 認為 Straume 的結論針對較舊的 BEIR-III 的評估是對的。因此，根據原子彈倖存者所提供的輻射風險仍然是屬於重要的機率效應資料的來源。

§12.6 劑量與致癌效應的評估

確定效應通常是短時間內曝露於大劑量情形下造成的，因此效應與劑量間的關係至為明顯。相反的，機率效應發生的時間較長(即所謂遠期或遲延效應)，其間因其他因素的影響很難加以隔離，因此劑量與效應間的關係較難確定。目前主要的輻射效應證據，大多是得自第二次世界大戰日本受原子彈爆炸倖存者的研究統計資料以及進行生物實驗的研究結果。由於低劑量輻射所引起的遺傳與致癌的機率性效應很小，很難由實驗獲得劑量與效應的關係，故只能從較高劑量的數據用外推法推算。

經由上述外推法推算輻射致癌的劑量與效應關係，可由以下公式表示：

$$F(D) = (a_0 + a_1 D + a_2 D^2) \exp(-b_1 D - b_2 D^2) \quad (12.1)$$

式中 $F(D)$ 是輻射致癌的機率， D 是輻射劑量， a_0 是自然發生癌症的機率， a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_1 及 b_2 皆為正的係數，其中 a_1 及 a_2 與低劑量的效應有關， a_1 為劑量與效應的線性關係反應， a_2 則為二次的關係反應。

式(12.1)中的指數反應部分，係說明細胞在高劑量下的死亡效應。在低劑量時此指數項的值趨近於 1，故可將式(12.1)式化簡成二次線性關係式

$$F(D) = a_0 + a_1 D \quad (12.3)$$

或化簡成二次關係式

$$F(D) = a_0 + a_2 D^2 \quad (12.4)$$

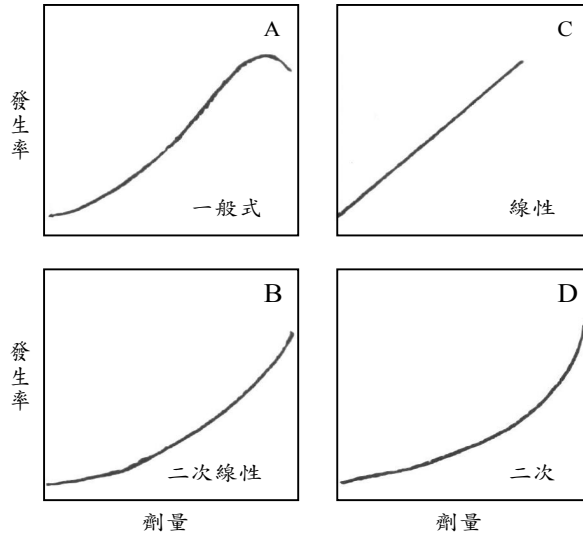


圖 12.2 輻射劑量與致癌效應的關係式

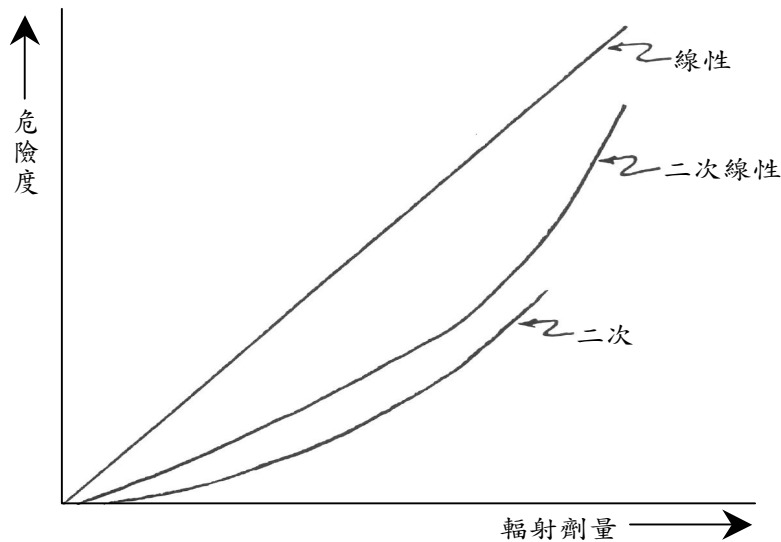


圖 12.3 輻射致癌危險度與輻射劑量的關係

$$F(D) = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 \quad (12.2)$$

也有輻射生物專家主張將式(12.2)簡化成線性關係式

以上式(12.1)至(12.4)的輻射劑量與生物效應的關係，可分別以圖 12.2 中的 A、B、C、D 四條曲線表示。

1. 輻射致癌危險度的關係式

式(12.2)至(12.4)的輻射劑量與生物效應的關係式中，若不包括自然癌症發生的機率 a_0 項，就成為輻射所引起增加的致癌危險度。如以 $E(D)$ 表示輻射致癌的危險度，則式(12.2)至(12.4)可分別化簡成致癌危險度與輻射劑量的關係如下：

$$\text{二次線性關係} \quad E(D) = a_1 D + a_2 D^2 \quad (12.5)$$

$$\text{線性關係} \quad E(D) = a_1 D \quad (12.6)$$

$$\text{二次關係} \quad E(D) = a_2 D^2 \quad (12.7)$$

以上式(12.5)至(12.7)的輻射致癌關係，可由圖 12.3 表示。可知應用線性關係理論估算輻射危險度時，其估算結果將得到危險度的上限值。二次關係理論則可得到危險度的下限值，而二次線性關係所得到的危險度值則介於上述兩者之間。

2. 絕對危險度與相對危險度

人體自然發生癌症的危險度，隨著年齡增加而增加。至於輻射致癌的危險度是否也同樣地隨年齡而增加，或是在曝露之後即保持一定的危險度，目前尚無定論。因此輻射致癌的危險度，通常分成「絕對危險度」與「相對危險度」兩種表示法，又稱相加危險度與相乘危險度。

對一群公眾而言，絕對危險度係指受曝露公眾比未受曝露公眾所增加的輻射致癌數；相對危險度則為受曝露公眾增加的輻射致癌與其自然癌症的比值。舉例而言，1945 年日本廣島地區原子彈爆炸倖存 5300 人中，10

歲以上民眾所受輻射劑量平均每人約為 113 cSv。經過 20 年來長期觀察的結果，發現共有 12 人罹患白血病而死亡。若按一般日本民眾的自然白血病罹患率來計算，則此 5300 位接受追蹤民眾應僅有 5.3 人(千分之一)死於白血病。由此數據可估算輻射所致白血病的絕對危險度如下：

$$\begin{aligned} \text{公眾(集體)劑量} &= 5300 \text{ 人} \times 113 \text{ cSv} \\ &= 6.0 \times 10^5 \text{ 人} \cdot \text{cSv} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{輻射白血病率} &= (12 \text{ 人} - 5.3 \text{ 人}) / 20 \\ & \quad \text{年} = 0.335 \text{ 人} / \text{年} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{絕對危險度} &= (0.335 \text{ 人} / \text{年}) / (6.0 \times \\ & \quad 10^5 \text{ 人} \cdot \text{cSv}) = 0.56 \times 10^{-6} \text{ 人} / \text{年} \cdot \\ & \quad \text{人 cSv} \end{aligned}$$

若為方便起見，以一百萬人 \cdot cSv 為統計基準，則輻射白血病的絕對危險度為 0.56 人/年 \cdot 百萬人 \cdot cSv。即 10^6 人 \cdot cSv 的集體劑量，預期在 20 年期間每年約會有 0.56 人死於白血病。至於相對危險度，若以每 1 cSv 劑量所增加輻射白血病的百分率表示，則

$$\begin{aligned} \text{相對危險度} &= \frac{\text{絕對危險度}}{\text{自然危險度}} \times 100 \quad (\% / \\ & \quad \text{cSv}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{自然白血病率} &= 5.3 \text{ 人} / 20 \text{ 年} = 0.265 \\ & \quad \text{人} / \text{年} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{一百萬民眾的自然白血病率} &= \\ & \quad 0.265 \left(\frac{10^6}{5300} \right) = 50 \text{ 人} / \text{年} \end{aligned}$$

$$\text{相對危險度} = \frac{0.56 \text{ 人/年}}{50 \text{ 人/年}} \times 100 = 1.1 \text{ \% / cSv}$$

絕對危險度是認為輻射致癌危險度與自然發生癌症的危險度無關，即在癌症誘發期階段，輻射致癌危險度保持一定值。相對危險度則認為輻射致癌危險度與自然發生癌症的危險度成比例關係，故在癌症誘發期階段，輻射致癌危險度將隨年齡而增加。在劑量與效應的線性關係模式下，此兩種危險度可分別以下式表示

絕對(相加)危險度 $R = R_0 + f \cdot D$ (12.8)

相對(相乘)危險度 $R = R_0(1 + g \cdot D)$ (12.9)

式中

- R = 輻射曝露後的總危險度
- R_0 = 自然發生癌症的危險度
- D = 輻射劑量(cSv)
- f = 絕對危險度係數，即單位輻射劑量的致癌危險度(癌症數 / cSv)
- g = 相對危險度係數，即單位輻射劑量所增加的致癌百分率(% / cSv)

由於相對危險度的輻射致癌率隨年齡而增加，而絕對危險度則保持一定值如圖 12.4 所示，故在計算受曝露者的終生致癌危險度時，相對危險度的計算值將高於絕對危險度者。

3. 輻射遺傳傷害評估

(1) 劑量與遺傳效應的關係

人類的輻射遺傳效應，迄今仍缺乏明顯的數據。故對於輻射劑量與遺傳效應之間的關係，通常是得自動物(如果蠅、老鼠等)實驗的結果，藉由觀察受照射的曝露組與未受照射的比較組之間的繁衍差異，即可獲知輻射劑量與遺傳效應的關係。通常欲觀察出兩組間的差異，實驗時的輻射劑量率至少需在每分鐘 10 微西弗左右，才能顯現出差異情形。可見此種實驗的劑量率，約相當於年劑量 5 西弗，遠大於一般人所能接受法定輻射劑量的範圍。

由於目前尚缺乏直接數據，說明低劑量輻射所產生的遺傳傷害，故只能利用上述高劑量實驗的

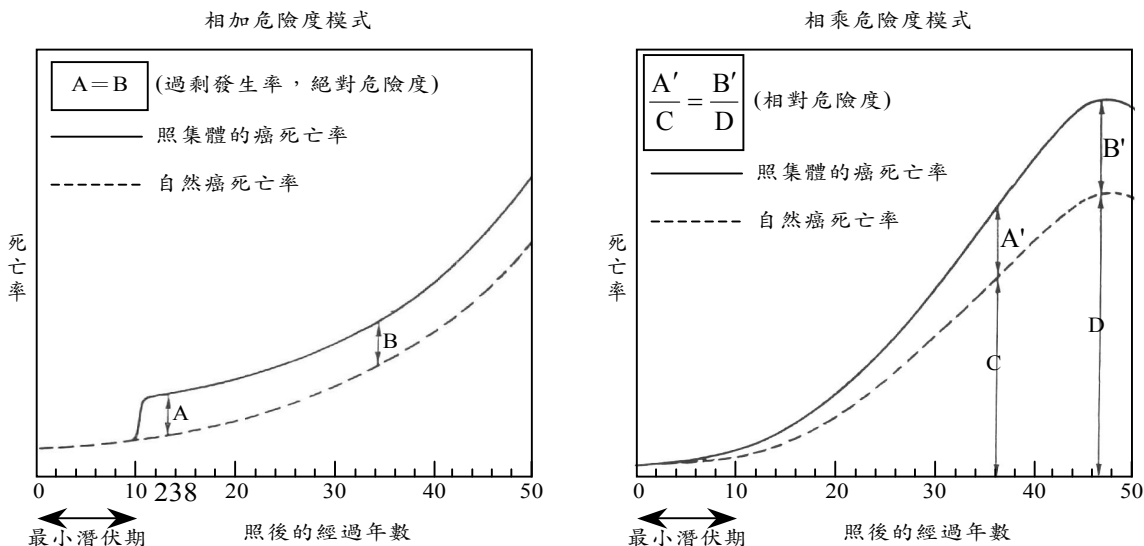


圖 12.4 絕對和相對危險度

外推值推算。目前根據各種生物實驗的結果，認為基因突變數與劑量大小成正比已無疑義，即輻射劑量與遺傳效應係呈線性比例關係，且假設此遺傳效應為無低限的統計性效應。

(2) 相對突變危險度與倍增劑量

輻射對人體誘發的遺傳突變，與自然發生的突變形式沒有兩樣。輻射作用於人體後，會使遺傳突變率隨之增加。但突變率與人口發生的遺傳傷害之間的關係，目前仍缺乏明確的資料，意即要以輻射的「絕對突變危險度」(absolute mutation risk)來表示遺傳傷害的程度，事實上有困難。故一般皆以自然發生的突變率為基準，採用「相對突變危險度」(relative mutation risk)作表示。所謂相對危險度，即每 cSv 輻射劑量所誘發的自然突變率的增加分數。例如相對突變危險度為每 cSv 0.02，表示每 cSv 輻射劑量所誘發的突變率為自然突變率的 0.02 倍。相對突變危險度的倒數，通常被稱為倍增劑量(doubling dose)，意即輻射所誘發的突變率等於自然突變率時，所需的輻射劑量大小。

人類自然發生的突變率可經由生命統計分析得到，其值約為每一世代(30 年)每單位基因 5×10^7 到 5×10^8 的範圍。至於人類的輻射相對突變危險度，則來自老鼠和生

物實驗所獲得的結果。根據 BEIR-III 報告綜合各種實驗所得到的結論，認為人類的輻射相對突變危險度為每 cSv 劑量 0.004—0.02，即人類的倍增劑量為 50—250 cSv 範圍，亦即 $1/0.02—1/0.004$ cSv。由於細胞在成長各階段對輻射的敏感性不同，卵母細胞在不同成長階段所對應的輻射遺傳突變率就有所差異，故無法明確的以單一輻射劑量來表示倍增劑量。

4. 危險度評估、機率係數與危害

(1) 危險度評估

- a. 依據：聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)及 BEIR 等機構的評估結論。
- b. 資料時間：至 1985 年止累積的資料。
- c. 評估方式：以相乘模型及修正的相乘模型評估終生的致癌危險度。
- d. 評估結論：對低直線能量轉移(LET)輻射而言，最可能的劑量回應關係為二次線性者。

(2) 劑量與劑量率效能因數(dose and dose rate effectiveness factor, DDREF)：

- a. 低劑量與低劑量率的情況下，其線性係數係由高劑量與高劑量率下估算危險度除以 DDREF
- b. ICRP-60 選定的 DDREF 為 2
說明：

- 二次線性劑量回應關係即式(12.5)再寫於下：

$$E(D) = a_1 D + a_2 D^2$$

- 大量的實驗數據顯示：在 $D > 1 \text{ Gy}$ 的情況下， $a_1 D \approx a_2 D^2$ ，在低劑量($D \ll 1 \text{ Gy}$)下， $E(D)$ 由線性項決定，故效應要減半，即 $DDREF = 2$ 。

- 各機構建議的 $DDREF$ 約在 2 – 10 間。

c. $DDREF$ 依據：

- 動物實驗。
- 人類的流行病數據(主要來自放射治療)

(3) 標稱機率因數：指每單位有效劑量引起危害的機率因數。

(4) 危害(detriment)

- a. 指一群體受特定射源照射而使該群體中的人及其後代所受的總危害。
- b. 健康的危害：
 - 可歸因致死癌症機率
 - 可歸因非致死癌症的加權機率
 - 嚴重遺傳效應
 - 危害發生的相對壽命損失
- c. 健康危害只是總危害的一部分，惟 ICRP 只引用了健康危害，並建議在應用決策技術如最

適化研究時，應考慮其他形式的危害。

- d. ICRP-60 中所稱的「危害」係專指健康危害的術語。

§12.7 輻射激效

適量的食鹽對健康有益，多量則有害。1980 年美國米蘇里大學的洛基(Thomas D. Lukey)教授，對於微量的輻射仍然有害於身體的基本想法提出疑問，而於 1982 年 12 月在美國保健物理期刊發表輻射激效(hormesis)的論文，並附有 200 多件以上的參考資料。他認為：「低劑量的生物效應與高劑量迥異，反而對生理有刺激活化的效果」，如圖 12.5 所示。

下圖的縱座標表示生物效應，以背景輻射的反應度為 100%，高於 100%者表示有益，低於 100%者表示有害。

- a. 零當量點 (zero equivalent point, ZEP)：表示其效應與背景值相當，即正(好的)效應與負(壞的)效應剛好抵消。
- b. 在曲線的頂端，對健康效應最佳，劑量約為背景值的 50 – 100 倍。

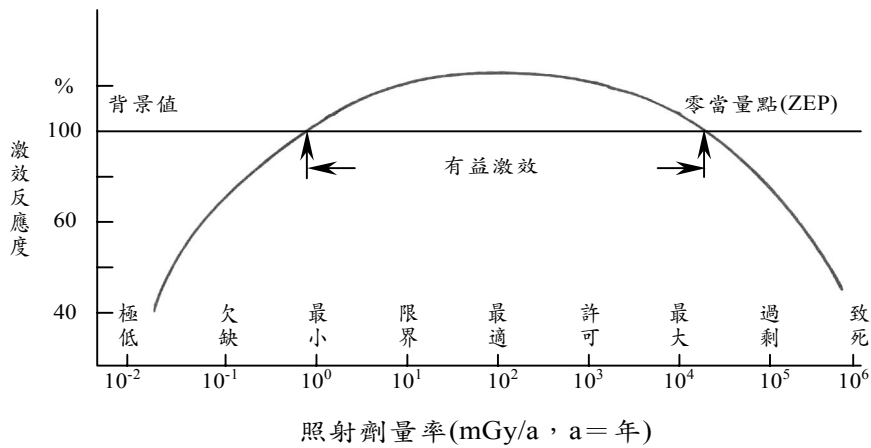


圖 12.5 完整的劑量效應曲線

在以往，均認為即使極低的輻射，仍然對身體有害的想法，是因為低劑量的效應難於評估，所以全部以高劑量的效應作為比例(外推法)來推論。但由於生化的分析技術有了顯著的進步，對於低劑量效應的重新檢討已成為重要的趨勢，ICRP 亦認為有再調查的必要。

人類自古以來就在自然輻射的環境中生活。生物對溫度、光等自然現象都

會逐漸適應下來，當然對於自然存在的環境低劑量輻射的刺激亦有演化的可能，亦即人體對於低劑量的輻射應具備有適應的能力。因此，輻射刺激效應是有充分的可能性。

洛基教授是米蘇里大學醫學院的生化專家，非常瞭解少量的毒物會對生物起活化作用，故對游離輻射的激效現象極具信心，才會擺脫一般對輻射影響「零假說(外推法)」的範疇。

他整理有關輻射激效的具體事例後，認為：“微量的輻射，反而對動植物的成長、生殖、健康、壽命、抗病菌感染等，會有良好的影響，”因而提出如圖 12.5 所示具有益激效現象部分的比較完整的劑量－效應關係。

在 1993 年美國美洲核能學會 (American Nuclear Society, ANS) 年會主題亦對「低劑量輻射效應」諸多探討。決定低劑量 (<1 西弗) 輻射效應可有四種假設(如圖 12.6)。

實線代表已確定的高劑量致癌效

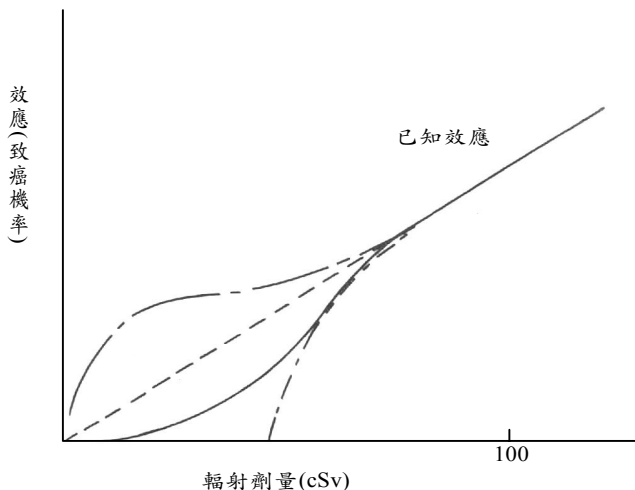


圖 12.6 低劑量輻射效應的假設

應，虛線部分可分如下四種。

1. 直線假設：致癌危險度在低劑量與高劑量成比例減少。
2. 二次式假設：低劑量每 cSv 的傷害小於高劑量。
3. 低劑量閾值假設：低於某閾值劑量則無致癌後效(激效現象應在此假設內求證)
4. 超直線假設：低劑量每 cSv 造成的傷害大於高劑量。

2. 由宇宙射線生成的放射性核種(主要係從大氣中的氮和氧分別所生成的¹⁴C 及 ³H)。
3. 從地球形成以來繼續存在於地殼的放射性核種(如 ⁴⁰K、⁸⁷Rb 及鈾系、錒系、釷系的各核種)。

從這些來源所放出的輻射，造成體外曝露及由食物或呼吸而進入人體內的體內曝露。表 12.2 為聯合國原子輻射效應科學委員會所發表接受天然輻射一年的劑量。

由表 12.2 可知天然輻射源造成的年有效劑量的典型值為 2.4 毫西弗。如乘

§12.8 生物效應機制

生物從誕生之前即開始不斷地接受天然輻射的照射但卻能生存。天然輻射的來源為：

1. 來自太陽及銀河系的宇宙射線。

表 12.2 天然輻射源所致平均輻射劑量(2000 年)

輻射源	世界範圍平均年有效劑量(mSv)	典型範圍(mSv)	高值(mSv)
體外曝露			
宇宙射線	0.4	0.3 – 1.0 ^a	2.0
地面加馬射線	0.5	0.3 – 0.6 ^b	4.3
體內曝露			
吸入(主要是氡)	1.2	0.2 – 10 ^c	10.0
食入	0.3	0.2 – 0.8 ^d	—
總和	2.4	1 – 10	

^a：從海平面到高海拔地區

^b：取決於放射性核種在土壤和建築材料的含量

^c：取決於室內氡氣累積

^d：取決於放射性核種在食物和飲水中的含量

表 12.3 相當於典型的天然輻射源的照射時間

輻射源	基礎	相當時間
醫學曝露	以現有的水準照射 1 年	90 天
核武器試驗	迄 1993 年全部的試爆	2 – 3 年
核動力	迄 1993 年全部的發電	10 天
	以現有的水準照射 1 年	1 天
嚴重事故	迄 1993 年所有事故	20 天

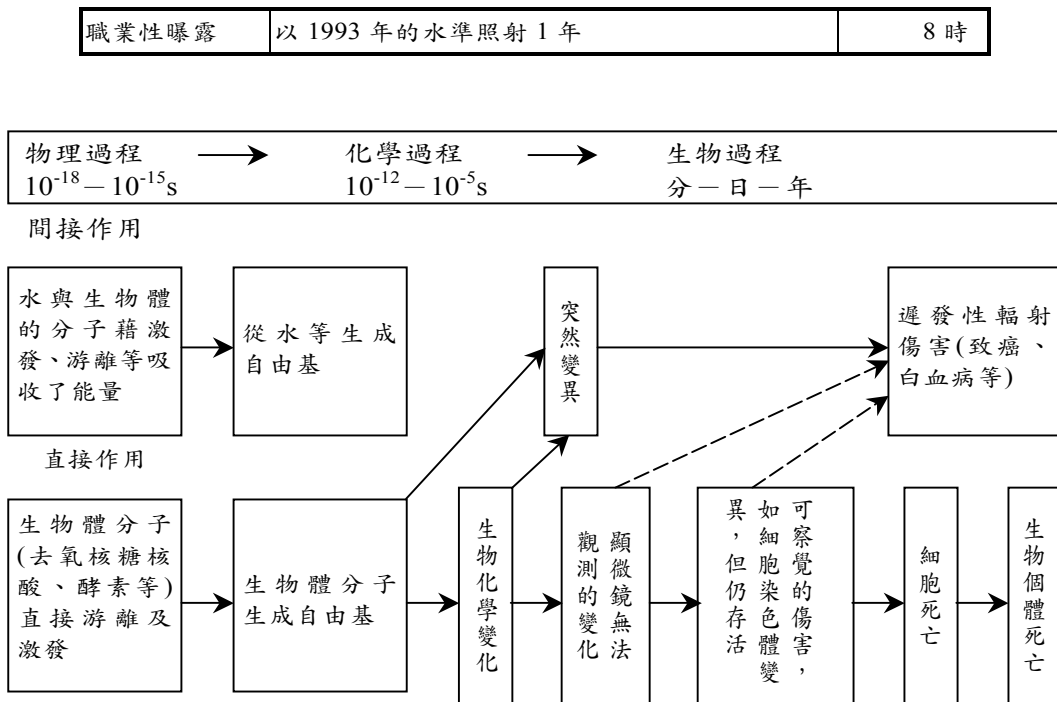


圖 12.7 輻射生物效應過程

以全球 53 億人口，則集體的年有效劑量為 13×10^6 人·西弗。人工輻射源相當於天然輻射源的照射時間則如表 12.3 所示如下：

生物體接受輻射的照射，雖然所吸收的能量不是很多但仍會引起效應。其影響與生物的種類有關，而同一生物亦隨器官或組織的種類不同其效應亦不同。生物效應的不同乃因生物體吸收能量的過程複雜，各器官組織、細胞的恢復能力也不相同的緣故。

1. 生物效應的過程

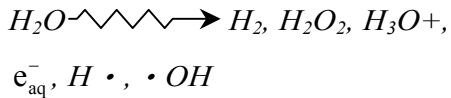
生物體複雜的能量吸收過程以圖 12.7 的三階段表示時較容易瞭解。

(1)物理過程

輻射照射生物體時，由於游離作用引起生物體內的分子或原子起游離作用及形成激發態。此外，輻射與原子或分子的彈性碰撞使原子回跳。此時生成的離子或二次電子帶有數電子伏到 10 電子伏的能量成為下一階段化學反應的活化能。此階段的作用時間很短，約 10^{-18} 到 10^{-15} 秒。

(2)化學過程

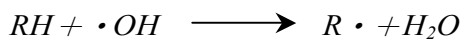
游離的離子對或激發分子等在分子內或分子間進行能量的交換。在能量的重排時，分子會釋出氫或質子或電子形成自由基。例如約占生物體 70% 的水，受到輻射照射後生成多分子、離子及自由基。



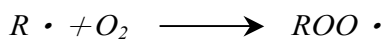
註：a. 具有一個(含)以上能形成化學鍵的不成對電子的原子或分子稱為自由基，如上式中的 $H \cdot$ 。

b. e_{aq}^- 為水合電子，即水在游離後所生成的電子與水分子結合而成的。

有機物質(RH)遇到自由基(例如 $\cdot OH$)



生成的 $R \cdot$ 遇到氧時生成過氧化自由基。



這些無機及有機自由基或過氧化自由基等，進一步與生物體起作用而發生化學反應，會影響生物體的正常機能。

(3) 生物過程

生成的自由基在生物代謝時，對構成細胞的去氧核糖核酸(DNA)、胺

酸(又稱氨基酸)、蛋白質等會產生生物化學損傷。此損傷包括抑制生物化學合成過程、染色體的斷裂等、細胞的分裂停止、細胞死亡或異常繁殖，惟細胞也可能修復。生殖細胞的染色體被輻射照射而斷裂時可能產生遺傳的傷害。

2. 輻射對人體的影響

輻射對人體的影響可分為，對受照射者的軀體效應(somatic effect)及影響到子孫的遺傳(hereditary)效應兩大類。圖 12.8 為輻射對人體影響的影響分類。

表 12.4 表示國際放射防護委員會(ICRP)所提出每一西弗的劑量致死癌的機率。

輻射如何致癌並不瞭解，也無法說出究竟某種癌是由輻射引起，或是由某些其他的原因引起的。實際上大部分的病變是由許多因素彼此間的互相作用而引起的。例如，身體的一般狀況、遺傳特性、年齡、性別、以及曝露於其他致癌物如吸煙等，是少數的可能互相作用的因素。輻射致癌的

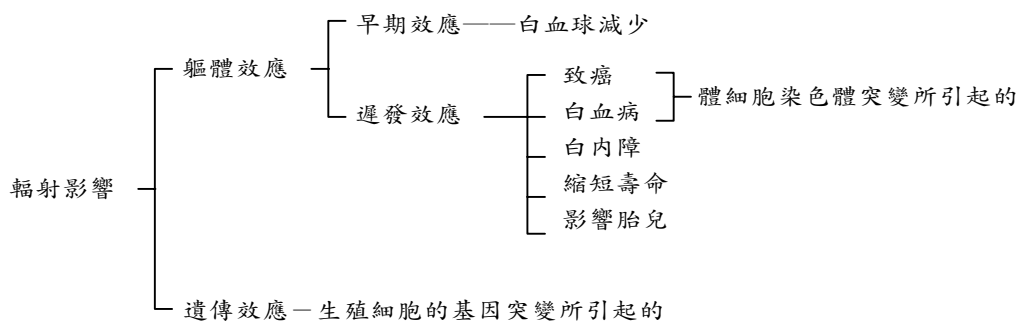


圖 12.8 輻射對人體的影響

說法有三：

(1) 輻射會活化了人體內既存的病毒，這病毒會侵襲正常的細胞，導致細胞快速地成長。

(2) 輻射會削弱人體對於既存病毒的抵抗力，這病毒會繁殖並傷害細胞。

(3) 輻射會傷害細胞中的染色體，使致

表 12.4 全人口致死癌的推估機率(即標稱機率係數)

器 官	輻射劑量 1 西弗致癌機率(人／萬人)
胃	110
肺	85
結腸	85
紅骨髓	50
膀胱	30
食道	30
乳房	20
肝	15
卵巢	10
甲狀腺	8
骨表面	5
皮膚	2
其他	50
合 計	500

癌基因被活化或使抑癌基因被抑制，使細胞朝向異常的模式成長。

人體受輻射照射的效應亦可從被照射的時間分為急性曝露(acute exposure)及慢性曝露(chronic exposure)。受輻射照射時間短促的為急性曝露，而長時間連續被照射的為慢性曝露。通常處在同一輻射劑量時急性曝露的影響較慢性曝露為大。表 12.5 為急性曝露時人體所發生的症狀。

以吸收劑量為單位，1—5 Gy 對造血器官造成傷害，5—10 Gy 產生胃腸傷害，10 Gy 以上則中樞神經系統

會受損。在 10 Gy 以下因造血器官的骨髓受損，導致白血球減少所引起的細胞感染和血小板減少所引起的出血，約在 20 天內會導致骨髓死亡。劑量在 10—100 Gy，因腸胃的損傷發生脫水，引起營養補給困難及細菌入侵等現象，經過約 18 天會死亡。劑量在 100 Gy 以上，因中樞神經系統受損傷引起痙攣，會在數分至數小時內死亡。

UNSCEAR-2000 的其他相關劑量統計係列於表 12.6、12.7 及 12.8。

§12.9 核能發電的輻射效應研究

如果從長崎、廣島事件的研究報告來評估輻射曝露的影響，其結論還是模糊不清的話，那麼，從其它的射源對於低水平輻射的研究，其可信度不就更低了嗎。美國三哩島(Three Mile Island)、

前蘇聯車諾比爾(Chernobyl)、其它核能電廠和輻射危害的流行病學分析一系列研究，也未能提供明確的結果，並且引起了不少爭論。

表 12.5 全身急性曝露的劑量與臨床症狀

劑量，戈雷(雷得)	臨床症狀	備註
~0.25 (25)	幾乎沒有症狀	作染色體分析能偵檢出變化的最低劑量為 0.02 Gy，偵檢出臨床症狀約為 0.25 Gy。 50%致死劑量 致死劑量
0.5 (50)	淋巴球減少	
1(100)	嘔吐、疲倦、淋巴球急劇減少	
1.5(150)	50%人輻射宿醉	
2(200)	白血球長期減少	
4(400)	60 天以內有 50%死亡(即 D _{50/60})	
7(700)	100%致死	

表 12.6 醫學診斷 X 射線檢查所致輻射曝露

保健水平	人口數 / 醫生	年 X 射線檢查次數 / 1000 人	年平均有效劑量 (mSv)
I	<1000	920	1.2
II	1000 – 3000	150	0.14
III	3000 – 10000	20	0.02
IV	>10000	<20	<0.02
世界範圍平均		330	0.4

表 12.7 職業輻射曝露

輻射源 / 輻射作業	受監測的工作人員數(千人)	平均年有效劑量(mSv)
人工射源		
核燃料循環(包括鈾礦)	800	1.8
輻射工業應用	700	0.5
國防活動	420	0.2
輻射醫學應用	2320	0.3
教育 / 獸醫	360	0.1
總計	4600	0.6
增強的天然射源		
採礦(除煤礦外)	760	2.7
空中旅行(機組人員)	250	3.0
煤礦開採	3910	0.7
礦物加工	300	1.0
地面以上工作場所(氫)	1250	4.8
總計	6500	1.8

表 12.8 2000 年天然和人工輻射源所致年均個人有效劑量

源	世界範圍個人年均有效劑量(mSv)	曝露的範圍和趨勢
自然背景	2.4	典型範圍為 1–10 mSv，這與具體地點的環境有關，也有相當多的人口所受劑量達到 10–20 mSv。
醫學檢查	0.4	範圍在 0.04 mSv(最低健康醫療水平)和 1.0 mSv(最

大氣核試驗	0.005	高健康醫療水平)之間。 已從最大的 1963 年的 0.15 mSv 逐漸降低，北半球相對較高，南半球相對較低。
車諾比爾事故	0.002	已從最大的 1986 年的 0.04 mSv(北半球的平均值)逐漸降低，事故現場附近較高。
核能生產	0.0002	隨著核能計畫的發展而增加，但又隨著技術的完善而降低。

有人推斷三哩島事故造成了在電廠附近大量因癌症而死亡的例子，曾引起了大眾的恐慌。賓夕法尼亞州衛生局(The Pennsylvania Department of Health)在電廠週圍以 20 哩為半徑的範圍進行了癌症死亡研究的初步實驗(1974-1983 年)，並在 1985 年公布在三哩島事故發生後 5 年內，癌症死亡的比例並沒有超過正常值。其次考慮到癌症的潛伏期，接著又進行另一個實驗，針對住在電廠 5 哩半徑內的居民進行調查，也沒有發現過量癌症的發生。

對於三哩島事件的衝擊，可是拿來與 1986 年 4 月發生的車諾比爾事故作比較。此次釋放的活度(估計約 10^8 居里， 3.7×10^{18} 貝克)遠大於三哩島(約 15 居里， 5.55×10^{12} 貝克)，可想而知其曝露的範圍也大得多。因此科學家利用廣大範圍的分析方法來評估幾十年後癌症致死人數，採樣人數也從幾千人擴展到超過十萬人之多。在車諾比爾事故過後 10 年，流行病學的資料並沒有顯示如長期輻射影響效應所聲稱的，卻在 1992 年發現了兒童甲狀腺癌的病例急劇增加，尤其是位在反應器北邊的 Belarus。這些甲狀腺的病例促使世界衛生組織(WHO)

發表聲明：“輻射外洩所造成的致癌影響遠大於先前所估計的”。雖然發生了甲狀腺癌不幸的事件，但出乎人意料之外，世界衛生組織在車諾比爾事故之後(1993 年)，發現白血病的患者並沒有增加，這是一件很令人驚奇的事。因為白血病在長崎和廣島一直是輻射長期效應的早期特徵，而科學家本來還預期此病在 1991-1993 年間會發生在車諾比爾事故倖存者的身上。

車諾比爾事故後，儘管各方爭論不休，科學家們同意從資料的重要性來瞭解低水平曝露的影響；的確也出現了以低水平曝露風險的流行病學資料來取代原子彈倖存者的研究。在 1986 年科學(Science)期刊中，參加此次研討會的國際原子能總署(IAEA)代表們同時表示：“車諾比爾事件提供了一個絕佳的機會來瞭解眾多人口和大範圍輻射所造成的影響”。

另外有些科學家對核能電廠附近進行致癌率的研究，這方面的研究由美國國家癌研究所(National Cancer Institute, NCI)做的最廣泛。他們研究了有核能電廠或設施的縣或其附近的城市多達 107 個縣，每一個縣則有另三個

縣當作對照組。這些核能設施包括 52 個商用核能電廠以及 10 個能源部的設施。在 1990 年 NCI 發表結論：“沒有任何證據可支持白血病或其它癌病例的發生率高於對照組的縣”。但有些人認為這個結論是有限制性的，很明顯地，NCI 只針對死亡率而非罹患率，而且 NCI 只針對整個縣作評估而非一小群人；另科學家認為 NCI 的做法反而引起了更多的問題，也不可能消除醫療界對核能工業的疑慮。當然也有不少學者認同 NCI 的研究。

爭論了這麼多年也作了很多研究，對於低水平曝露的輻射效應仍然沒有結論，原因也許是癌症的發生純粹是一種機率反應，沒有低限值，再加上相關的資料來源不足，關於它對人體的影響實在難以下結論。近年來還有學者提出輻射激效一詞，認為少量的輻射反而對人體有益，但也沒有絕對的論點，所以對於低水平曝露這方面的探討，還有不少努力的空間。

§12.10 其它輻射效應的研究

在流行病學研究中對於低水平輻射影響討論最熱烈的首推英國。1983 年一位英國電視記者 James Cutler，注意到有個小鎮名叫 Seascale，在 1954-1983 年間兒童(小於 10 歲)罹患白血病的病例有 5 件，但在統計上其期望值應小於 1。距離 Seascale 附近三哩處有再處理廠及數

座核能設施(位於 Sellafield)，而且 Sellafield 在 1957 年曾發生輻射事件外洩至環境中。Cutler 發布了這個消息後，英國立刻組織了一個委員會，由流行病學家 Martin J. Gardner 和幾位同事針對 Seascale 地區白血病病例與 Sellafield 的核能設施作調查，以探討兩者是否有關聯。1990 年 Gardner 等人在考慮了種種的可能因素後，提出兩者是有關聯的，因為其中有 4 位兒童的父親皆在 Sellafield 工作，而且接受了相當的劑量(雖然是在劑量限值內)，他們在 6-7 年的累積劑量約為 0.1 西弗(在白血病發現之前 6 個月約為 0.01 西弗)。如果 Gardner 等人所稱是對的，那麼輻射防護的範圍就太大了。Gardner 還指出這是遺傳傷害，這種論調在先前長崎、廣島事件後 40 年的流行病學研究中所沒有發現的。

當然，Gardner 的發現引起了很大的爭論，Science 期刊還刊登了個誇張的標題“英國的輻射研究使得科學家陷入瘋狂”，在當時也鼓舞了不少的研究調查，稱為“Gardner 假說”。1993 年一份由英國衛生與安全執行委員會(British Health and Safety Executive)的報導指出，他們在監控工業衛生與安全後，發現在 Seascale 小孩白血病的比率是國家平均值的 14 倍。但另外也有指出，只有很脆弱的證據支持孩童的白血病與父親的職業曝露有關，也許可以解釋為兒童對於罹患白血病較敏感。

圍繞著三哩島、車諾比爾、Sellafield、和其它核能電廠的爭論也出現了職業曝露的風險調查，但有一些職業方面的研究顯示低水平曝露致癌風險幾乎無關。有一份由約翰霍浦金斯(John Hopkins)大學的學者，針對 8 座造船場的工作人員進行 13 年的研究，發現並沒有增加癌症的風險。另一派的說法認為兩者是有關聯的，北卡羅來納(North Carolina)大學 Steve Wing 在 1991 年的論著中指出，橡嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)的工作人員會有較高的致癌風險是來自於輻射。這也解釋了低水平輻射和致癌風險的關聯(在此之前他也曾發表了三哩島事件的受影響者有超過正常的致癌風險)。稍後，Alice Stewart(曾在 1950 年代首先證明子宮的 X 射線曝露與兒童白血病的關聯性)與同事 George W. Kneale 發現 1944-1978 年間在漢福特(Hanford)工作的員工有 3% 死於職業上的輻射曝露，縱使這些輻射都在可接受的水平。Wing 和 Stewart 的研究都受到不少學者攻擊，認為他們的樣本數太少，不足以下這樣的結論，而且他們也沒有考慮到偵測到這麼高癌症率的其它因素。

若要以 Wing 和 Stewart 的研究來當作輻射標準，其論點可能太過於鬆散，所以沒被採納。Stewart 在 1992 年評論說：“很明顯地在 BEIR-V 和其它團體所訂出的輻射安全標準在本質上就低估了在職業曝露的致癌風險”。因為由線性

假設的推論來看，縱使是劑量很小仍有可能造成 DNA 的鏈斷裂和突變，引發癌症。但在那些輻射防護規則中，NRC、EPA 和其它的機關都是假設線性無低限的模式是可以存在的。不料在 1990 年代中期，有些學者非常堅持線性假設過份地誇大了低水平曝露的傷害以及輻射防護標準的不確定性。他們從流行病學的追蹤調查，認為在工作場所或醫院或原子彈中輕微曝露者(小於 50 mSv)，低水平的劑量幾乎是沒有傷害的。他們的看法是，細胞有一種“驚奇地複雜”修復的機制，在低水平曝露時可以自動修復。新的發現指出，若輻射劑量超過細胞修復的能力，還是會發生癌症。一位從加州大學舊金山校區退休的教授，同時也是 NRC 的顧問 Myron Pollycove 堅持：“線性模式傷害了保健、研究、核技術的優點、以及每年浪費了數百萬的經費來探討這些理論上的風險”。他和幾位研究者建議可以完全不用理會低水平劑量，因為那對人體是有益的(又名輻射激效)。可想而知，這樣的論調引起了不少抗議。

對於低水平劑量的戰爭一直在持續著，但整體來說，針對長崎、廣島以及車諾比爾事件，接受高劑量倖存者的研究較多，而低水平曝露的研究較少(至少不能提供強而有力的證據)。畢竟對於輻射所造成的效應來說，這 50 年的觀察還是太短了。

§12.11 大眾對輻射的恐懼

長期下來，對於低水平曝露效應的模糊推論，當然會引起大眾的恐懼。1978 年在美國奧勒崗(Oregon)州，針對婦女投票者聯盟(League of Women Voters)及大學生所作的調查，顯示人們對核能電廠的恐懼大於意外死亡(每年約數以千計的死亡)。若從死亡恐懼的排名來看，核能也是第一名。這也反映出來一般人都有個錯誤的觀念，以為核能電廠爆炸就會像原子彈爆炸一樣(1975 年 Harris 民調顯示有 39%的認為會發生核能事故)。

一位執業的精神病醫師 Robert L. Du Pont，其專長為恐懼症，認為恐懼來自於過度不真實的危險，並且認為在 1980 年代對核能所引起的大眾恐懼感，是對其它傷害的恐懼無法比得上的。研究人員對於大眾的恐懼提供了很多不同的解釋，也帶來了不少對核能的反感。1957 年世界衛生組織所主持的報告指出，因為輻射是看不到、聽不到、聞不到、嗅不到、感覺不到，所以容易導致幻想。另一種說法是由核能設施釋出的輻射所造成的危機是一種無意識的，而且沒有訂定所謂危險的標準，好像一切都是超出控制之外。這與一般有意識的危險如開車、抽煙比起來，當然就危險多了。還有一種說法是每次一發生核能事故就會傷害很多人，比普通的一般事故多了許多。這些悲劇主導大

眾對於技術上安全的態度。這些的調查的確有助於我們對大眾恐懼輻射的瞭解，但不能完全解釋對輻射的態度，因為並沒有很清楚地分辨出傷害的分類。有些人是害怕化學、電磁波、紫外線，因為一直到生病或受害都無法察覺。比較之下，其實工業所製造的污染像化石燃料、食物添加劑、基因改造產品，還有有毒氣體的排放、飛機失事、水患等，這些危險所帶來的災害，遠超過在有效控制下的輻射安全。

雖然大家熱烈地討論大眾的恐懼感能增加我們對大眾恐懼輻射的瞭解，但缺乏了對輻射歷史的探討，使我們對大眾恐懼感仍無法完全掌握。一直到二次世界大戰後，由歷史的探討才區分出輻射的傷害跟其它傷害的差異性。

其實大眾的恐懼在 1930 和 1940 年代之前，早在 x 射線、鐳、含鐳塗料就有了。在二次世界的前幾十年就引起了大眾的關注，當時的報章雜誌，描述放射物質具有延長壽命及損害生命兩種不同的看法，所以無論是影響流傳或是大眾的恐懼，也都提到了。大眾的恐懼是到原子彈的爆炸(廣島、長崎事件)後才被完全散布出來，一開始大家只是注意到在爆炸後短時間內所造成的影響，後來由於媒體(如小說、文章、漫畫、電影)的過度強調輻射對生命或遺傳造成的傷害，在這大量的爭論下才使得公眾的恐懼爆發出來(1950 年代後期 1960 年代初期)，也使得輻射安全規則第一次遭受重

大的衝擊，同時也嚴重地破壞了人們對美國原子能委員會 (Atomic Energy Commission, AEC) 的信任度。

美國內華達(Nevada)州蓋了放射性廢棄物處置場後，輻射影響的爭論又再度興起，這次是針對住在內華達州下風處的地方有較高的致癌率，在 1970 年代後期及 1980 年代早期提供了不少議題給學術界作研究(如 BEIR III)。就在這些爭論原子彈事件的同時，1980 年代中期較高的氬氣在一些城市被發現，如賓州、新澤西州、紐約和其它地方，氬氣會引起肺癌。但是它與其它的輻射效應一樣，並不能確定它威脅的程度。在 1980 年代後期和 1990 年代早期一系列的輻射外洩的報導充斥，包括核子武器工廠的設立引來的混亂以及原子能委員會的公告。頗負盛名的漢福特武器工廠也釋放大量的碘 131 及其它放射性氣體到大氣中，以試驗環境監測方法及探討放射性落塵的特性，當然引起了大眾的責難。

大氣試爆造成大量放射性落塵危害民眾健康，一直到 1963 年由美、英、蘇三國同意中止在大氣層舉行核試，簽訂“局部禁試”條約，才有效地平息眾怒，但並未停止大眾對低水平曝露的爭論。最明顯的是在 1960 年代反對核能電廠的興建，到 1960 年代後期核能電廠的經營增加，對輻射的恐懼更是在這些爭論中占很大的部分。1970 年代初期 Gofman、Tamplin 及其他評論家宣告核

能電廠必使得每年有數千人死於癌症的消息居然登上報紙頭條。

追溯 1945-1974 年間的個體報導，在 1993 年後期及 1994 年早期達到最高峰。在 1997 年的夏天另一個類似的研究是追溯 1950-1960 年的大氣層核試爆，在國家癌研究所(NCI)報告稱，內華達州所作的實驗，遠離爆炸點相當遠的地方仍散布相當高濃度的碘 131，並在新英格蘭州、中西部、愛達荷州、蒙他那州、南北達科塔州等地方出現熱點(hot spots)。雖然強調碘 131 與甲狀腺癌並沒有關聯，但在實驗中指出，被污染的牛奶可能會引起美國 10,000-75,000 件甲狀腺癌的病例。

但於 1999 年早期，在西雅圖 Fred Hutchinson 癌研究中心提供了一份關於碘 131 的消息，說明在漢福特被碘 131 照射的 3000 多人當中，並沒有發生甲狀腺癌，這是個很令人振奮的消息。

§12.12 放射性污染鋼筋事例

自放射性污染鋼筋事件發生後，行政院原子能委員會(簡稱原能會)除採取必要的處理措施外，並採公開化的做法，對受到放射性污染的建物與住戶，除儘速進行全面性的偵測與劑量評估外，並提供改善建議及協助進行改善措施，同時亦安排居民接受身體檢查，使民眾可能受到的影響降到最低。此外，由於放射性污染源可能係廢棄的射源隨

著進口廢鐵一併熔製成鋼筋所致，故原能會除針對放射性污染鋼筋的流向展開追查外，並積極與各有關機關研商加強對進口廢鐵的檢驗與管制措施，以防再發生放射性污染鋼筋問題。

1. 已發現的污染建物

原能會於民國 81 年(1992)7 月 31 日起，查出臺北市民生別墅的鋼筋受放射性污染後，先後共發現十起含有放射性污染鋼筋的建物及一起放射性污染鐵門，計 134 戶房屋受到污染。除了污染鐵門位於臺中市外，其餘十起污染建物均位於臺北市，且均為民國 71 至 73 年間的建物。污染建物在民國 82 年的輻射劑量，最高者為每年 67 mSv，大部分在每年 20 mSv 以下，而半數以上每年均小於 10 mSv。

2. 採取的處理措施

(1) 協助污染住戶進行改善

- 對於污染鋼筋建物的改善，原能會正依「住戶劑量評估及改善建議報告」，繼續協助住戶進行改善措施。
- 已有數棟建物抽換污染鋼筋及數棟建物拆除污染鋼門。

(2) 追查可能受污染的建物

為保障民眾住家安全，原能會仍繼續追查是否有其他建物受到污染：

- 請臺灣省政府及北、高兩市政府提供民國 71 至 73 年建物的資料，原能會主動寄發熱發光劑量

計 (thermoluminescence dosimeter, TLD) 給住戶。

- 根據營建資料及 TLD 計讀結果，原能會會派員前往偵檢。由原能會設置兩條電話熱線，一般住戶對建物有疑慮時，可向原能會申請 TLD 予以偵測。

(3) 安排住戶接受體檢

為確保民眾的健康，凡經評估其過去 9 年(民國 72 至 81 年)中任一年可能接受超過 15 mSv 劑量的住戶，皆安排其至臺北榮民總醫院接受身體檢查，檢查項目包括血液、生化及染色體變異分析等共 58 項。原能會已邀請各醫學中心核醫、放射腫瘤及血液科專家，針對體檢報告進行判讀。

(4) 追查污染鋼筋的來源及流向

原能會已掌握 7 家鋼鐵公司，並派員積極追查，希望能掌握污染鋼筋的來源與流向。然因原能會並無司法偵查權，加以事隔多年，公司大多已結束營業，或因人事已有所異動，而無法提供證據以供研判。為求突破調查瓶頸，原能會除請警政署協助查詢外，已將全案移請檢調單位偵辦。

3. 今後採取的防範措施

由於國內大部分煉鋼廠所使用的原料為廢鐵，為澈底防止廢鐵中可能夾雜有廢棄的射源，原能會已協調有關機關及鋼鐵業者共同採取防範措

施：

- (1)已洽妥經濟部商品檢驗局，同意對進口鋼筋的檢驗作業中，增列「輻射偵檢」項目。對於進口的半成品亦列入檢驗之列。
- (2)輔導國內鋼鐵業者，對鋼鐵材實施輻射污染偵測作業。由原能會協助業者進行人員訓練並提供技術支援。
- (3)原能會已研訂「輻射污染鋼鐵材鑑定暫定標準」與「鋼鐵業偵檢輻射污染作業要點」，提供各有關單位及鋼鐵業者做為偵檢作業的準則。
- (4)原能會自民國 82 年 7 月起，會同經濟部商檢局及工業局普查臺灣地區鋼鐵廠，普查結果將對社會大眾公布，以落實防範措施。

4. 善後處理方案

原能會為協助民眾解決問題，經擬具具體方案陳報行政院後，依行政院核復的處理原則，凡年輻射劑量超過 15 mSv 的房屋，由原能會先估算需要救濟的金額後，依下列原則擇一與屋主進行協議，如協議不成，屋主得循司法程序解決：

- (1)政府給予救濟金，包括一次體檢費用在內，一次解決；惟在輻射劑量降至安全標準以下之前，不得出租或出售作為居住之用。
- (2)其房屋願出售者，政府以合理價格予以購買。
- (3)其房屋願重建者，政府除給予部分

補助外，並協助其對放射性污染物的處理。

原能會遵照處理原則，立即成立「善後處理小組」積極和有關住戶展開協議。

迄民國 82 年 15 mSv 以上的污染住戶中，已有部分與原能會達成出售房屋的協議。對達成出售房屋協議者，行政院已核准動用第二預備金，住戶將可立即解決其問題。至無法獲致協議之住戶，則依法律程序處理。

5. 責任歸屬與處理原則

(1)依法原能會並無稽查鋼鐵廠或將鋼鐵製品列管的權責。對房屋建造過程及使用執照的核發，亦無稽查監督的權責。

(2)自民國 72 年(1983)起，國外陸續發生 30 餘起鋼筋等建築材料受放射性污染的案件，各國才正視此問題，而採行預防管制措施。我國於民國 72 年間發生輻射鋼筋問題之前，國外極少案例可供借鏡以為警示。直到民國 72 年之後，才針對此項漏洞採取預防措施。

(3)原能會於民國 74 年 4 月初知悉民生別墅的啟元牙科診所所有放射性鋼筋問題，迄民國 91 年 3 月 25 日原能會宣布接受民國 91 年 1 月 30 日臺灣高等法院判決國家應賠償民生別墅受災戶共 55,300,000 元。

6. 居民體檢結果的初步評估

民生別墅及其他居民體檢方面，

原能會已安排至臺北榮總接受體檢，在已接獲的體檢報告中，發現部分民眾有甲狀腺功能較低、貧血、白血球減少、非典型淋巴球增加、白內障等，據文獻報導可因多種原因或輻射引起的症狀，但並未發現任何因高劑量造成的急性輻射病變現象。而前述異常症狀是否與輻射有關，則需再作複檢及相關的詳細檢查與追蹤，並配合輻射生物劑量評估，及輻射劑量模擬推算資料，由輻射生物及輻射醫學專家綜合研判。

原能會已邀請各醫學中心核醫、放射腫瘤及血液科專家，針對部分體檢報告進行判讀，認為有需要進行複檢。原能會也安排其再至臺北榮總複檢，而複檢原因不見得和輻射有關。此外，原能會與衛生署協調辦理所有體檢者的長期健康追蹤事宜。

7. 疏散居民的考量

根據國際放射防護委員會建議，對於意外事件採取干預行動的時機、方式及規模，應基於「正當化」與「最適化」兩項原則，也就是由干預行動所獲得的效益大於所有的付出，且要獲得最大的效益。基於某些意外事件的發生及其規模事前無法預估，所以國際放射防護委員會認為不可能對所有意外事件的干預行動均先預訂劑量限值，而僅對特定可能發生的意外事件，建議其干預行動的參考劑量值。例如對於核能電廠發生

意外事故時，執行廠外民眾撤離的參考劑量為 5 至 50 mSv。目前我國及日本等國現行的「民眾防護行動準則」，是以民眾可能於短時間內接受 100 mSv 以上的輻射劑量時，始考慮採取民眾疏散行動。

由於自然背景輻射變化很大，如巴西的火山岩地區，人口約 30,000，其年自然背景輻射約 16 mSv，日本有三處人口達 3×10^6 以上的地區，其年自然背景輻射也在 7.7 至 10.5 mSv 之間。民生別墅污染最嚴重的房屋，以最保守的方式評估，目前的輻射劑量最高者為每年 67 mSv，大部分均在每年 20 mSv 以下，雖較游離輻射防護安全標準的一般人劑量限度為高，惟並不表示已有立即的危險，故尚無立即撤離民眾的需要。

8. 對認為民生別墅為災區的看法

(1) 民生別墅污染最嚴重的房屋，民國 82 年的輻射劑量最高者為每年 67 mSv，大部分均在每年 20 mSv 以下。就輻射劑量最高者而言，其繼續居住一年，依據 ICRP-26 的係數估算，所增加的終生輻射致癌率為萬分之八 (8×10^{-4})，而一般民眾的終生自然癌症發生率為 (25%)，故並無立即的危險性。按職業人員的輻射安全標準為全身每年 50 mSv，此種劑量範圍不會有立即的危險性。

(2) 民生別墅的輻射劑量是最保守

的方式估算，係假設居民一年 365 天，一天 24 小時均留在家裡，全時間接受高輻射曝露的情形。事實上，居民不可能一整年足不出戶，故其實際劑量將比估算值小很多。

- (3) 輻射的偵測、評估、防護為一專業性工作，輻射的危險性應依據科學的立論，而輻射的傷害亦應尊重醫生和專家們的綜合研判。社會大眾對輻射不盡瞭解，對輻射存有莫名的恐懼心理，這是可以理解的，但輻射的危險程度不能憑心理感受而認定。

9. 結語

從放射性污染鋼筋事件的觀點，要避免今後再度發生類似事件，唯有從阻絕污染源著手，有效強化有關單位配合偵檢及管制措施，才能防範於事件。原能會宜加強對廠商的稽查作業，以期預防與管制措施能真正落實，從而確保民眾的輻射安全。

§12.13 結論

輻射防護組織及政府機關根據他們的建議合理地來保護輻射工作人員和公眾，避免受到來自工業、醫院或其它應用的低水平曝露。早在 1930 年代，國際放射防護委員會(ICRP)、美國國家輻射防護與度量委員會(NCRP)和其它團體利用可得到的科學資訊，使他們能建議可接受的曝露標準。他們運用現有的知

識，以大範圍且保守的評估方式，涵蓋職業及公眾的曝露，並且根據新的知識不斷地作修訂。到了 1970 年代，合理抑低 (as low as reasonably achievable, ALARA) 觀念才被接受，往後的幾年輻射防護組織及政府機關也將這個準則具體化。

訂定這些輻射標準的困難在於要平衡反對聲浪，縱使可接受的劑量是在多方安全考慮及理智分析後才決定的，但它並不是無懈可擊的，到底要訂在什麼劑量才算是“夠安全”也是值得爭論的。

在大氣層核試爆後的幾十年，AEC、NRC 和其它的機關所訂定的輻射防護標準常被批評為不夠嚴謹。然而在 1990 中期，現有的輻射防護標準又被批評為太過嚴格。一些輻射學家認為，以不足夠的流行病學資料及半經驗式的論證來推論低水平曝露與健康危害，用在輻射防護是過時的，同時他們認為線性無低限模式是不可行的，這種爭論猶未中止。

總之，在整個人類生活的自然環境，自古以來就是一個所謂的低劑量輻射環境，而人類對於低輻射劑量加諸於他們的影響卻並不熟悉。如果依照大劑量輻射造成的生物傷害，直接推論到低劑量輻射傷害性生物效應的必然性，那麼人類似乎處於一個充滿輻射危害的逆境。但是如果換另一個角度去思索，輻射是否也如空氣、陽光、水一般為生物所必需，那麼輻射對人類而言應是延續

生命的動力。但以目前的科技尚不能釐清這個問題，科學界對低輻射劑量的研究仍嫌不足，也無絕對的低劑量定義，僅以概約定義劑量低於 0.5 西弗的低直線能量轉移(linear energy transfer, LET) 輻射(例如 X 射線、加馬射線等)為低劑量。

目前的低劑量輻射生物效應有以下三種假說：

1. 廣島、長崎原子彈爆炸與動物實驗的推論——外推延伸推論證據顯示，在較大劑量的輻射曝露時，輻射曝露的劑量愈大，其生物效應的發生率或傷害程度也愈大。因此依據這種曲線外推延伸而推論傷害生物效應的必然性，即低劑量輻射亦會造成傷害。
2. 閾值模式——以為輻射劑量低於某值(即閾值)時，就不會有生物效應。閾

值又稱為低限值。

3. 零當量點的假說——有人認為上述直線外推的推論，誤導很多人的想法，所以主張低劑量的輻射劑量的「劑量—回應曲線」與高輻射劑量者有所不同。高劑量屬於生物負性(bionegative)，低劑量則屬於生物正性(biopositive)，二者方向恰好相反，其臨界點即是所謂的零當量點。小於零當量點的輻射劑量所造成的生物效應，會異於所熟知的傷害性的生物效應，如圖 12.8 所示。

如 § 12.2 所述，輻射的生物效應，依其對健康所造成的影響而言，可以區分為機率和非機率效應又稱為確定效應兩類。機率效應是指其發生機率所接受輻射劑量的大小成比例增加，而與其產生效應的程度無關，這種效應的發生沒

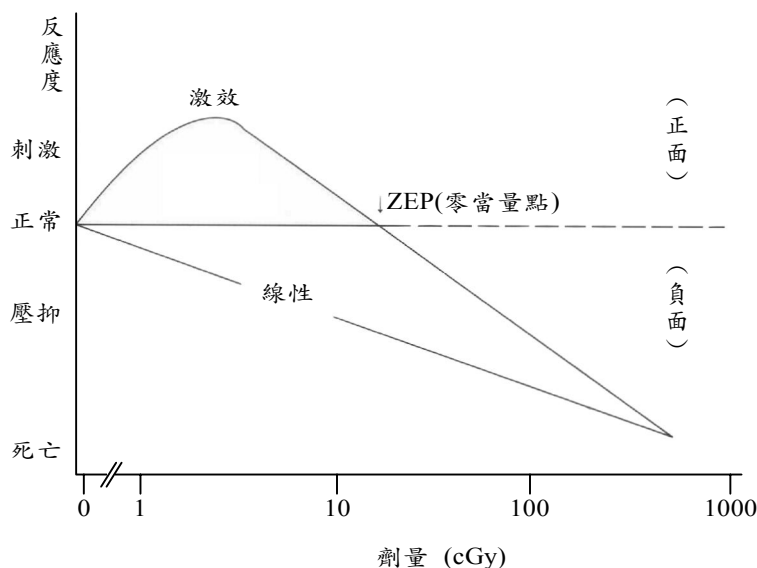


圖 12.8 低劑量輻射的生物效應的三種假說：橫軸代表劑量，縱軸為生物體的反應，激效曲線顯示小於零當量點時生物有正面的刺激效應，閾值曲線則主張低於零當量點時對生物無效應，線性理論認為僅在「零輻射」時才是正常

有劑量低限值。確定效應則指其受到傷害的程度與所接受輻射劑量的大小成比例，且有劑量低限值存在。前者例如癌病誘發(致癌效應)或基因突變(遺傳效應)，後者如急性輻射症候群(急性效應)或白內障、不孕症(延遲效應)等。無論是機率效應的發生率(如罹癌風險)或確定效應的效應程度皆可以如劑量—回應曲線表示其與輻射的相關情形。就目前已知的證據顯示在較高劑量輻射曝露時，此一曲線皆呈正比相關，亦即輻射劑量愈高，其生物效應的發生率或傷害程度也愈大。因此依據這種曲線外推延伸而推論傷害性生物效應的必然性，即低輻射劑量亦會造成傷害。但卻無具體的實證，僅是假說與臆測。因此，低劑量的生物效應並不明確，尚未成定論。

參考文獻

1. Committee on Biological Effect of Ionizing Radiation, **The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation**, BEIR III, National Academy of Sciences, Washington, D.C. (1980)
2. 朱鐵吉譯，**原子、輻射、與輻射防護**，民全書局有限公司，台北市(1998)。
3. 翁寶山，**輻射防護史**，第一版，財團法人中華民國輻射防護協會，新竹市(1999)。
4. E. J. Hall, **Radiobiology for the Biologists**, 3rd ed., J. B. Lippincott Company, New York (1988)
5. Committee on Biological Effects of Ionizing Radiation, **The Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation**, BEIR V, National Academy of Sciences, Washington, D.C. (1990)
6. International Commission on Radiological Protection, **Recommendations of the ICRP**, ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford, UK (1991)
7. J. Samuel Walker, **Permissible Dose, A History of Radiation Protection in the Twentieth Century**, University of California Press, Berkely, CA, USA (1999)
8. W. L. Chen, "The Radiation Survey and Equivalent Dose Assessment for ⁶⁰Co-contaminated Rebar Buildings," **App. Radiat. Isotopes** **56(6)**, 901-906 (2002)

第十三章 持續曝露的新建議

§13.1 前言

本章提供了 ICRP-82 輻射防護體系應用於輻射所導致持續的(prolonged)曝露導則。持續曝露是指公眾在長時間內所遭受的附加性和持久性曝露。公眾成員可以在一些並不意識到的情況下遭受到這類曝露。從持續曝露帶來的平均年劑量或多或少是恒定的，或者在幾年長時間內緩慢地減少。短暫性質公眾曝露不包括在本文之內，職業曝露和醫用曝露也被認為不屬於持續曝露。在此處“持續”取代慢性(chronic)。持續又稱為“長期”。

典型的持續曝露是由所謂“天然”輻射源釋出的輻射所致，例如宇宙輻射和衰變鏈中原生放射性核種釋出的輻射。某些“人工”輻射源也可引起持續曝露，例如來自人類活動的長壽命放射性殘存物是持續曝露的通常原因。應指出放射性殘存物可以含天然的和人工的放射性核種。在持續曝露情況下，很難把來自人工成份的曝露與由天然成份所導致的曝露分開；然而，針對人工成份的防護措施可以影響由天然成份所導致的曝露，反過來也是。這包括民國 83 年(1994)8 月發現的所謂輻射

馬路在內的天然成份與放射性落塵中半衰期大於 10 年的人工放射性核種，例如銫 137。

放射性殘存物可以在受到管制的活動終止以後被遺留下來，這類活動增大了人類受到的總曝露，被稱作為輻射作業或實踐。另外，那些過去沒有受到管制的活動或發生的事件，也會產生放射性殘存物。在人類棲息地早已存在，事實上天然輻射源和放射性殘存物所導致的曝露，它可以通過所謂“干預的過程”的防護活動加以限制，這些活動旨在減少人們總的曝露。許多由天然輻射源所導致持續曝露以及幾乎所有由放射性殘存物所導致持續曝露是可控制的，即能用防護措施加以限制。基本上不能控制的(例如在人體內起代謝作用的天然放射性核種如鉀 40 所導致的曝露)或者不適合於控制的(例如宇宙輻射所導致的曝露)持續曝露，通常排除在輻射防護的管制範圍以外。

因此，可控制的持續曝露源包括自然界中許多原生放射性核種和長壽命放射性殘存物。受管制的輻射作業和其它不受任何控制的或者在低於現行管制要求下進行的活動，在其營運和除役

之後都會在人類棲息地留下這些殘存物。向環境釋放長壽命放射性核種的事件(例如事故)，也可造成這些殘存物。含放射性物質供公眾使用的消費品也可以是引起持續曝露的一個原因。

圖 13.1 代表了持續曝露各種來源的圖解性說明。除了宇宙輻射，列出的所有輻射源一般是可控制的。它們包括了許多天然的和人工的輻射源。在人類棲息地出現的輻射源所引起全部曝露，導致生活在此棲息地的個人受到現有曝露。這些敘述是基於聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)所提供的資料。

§13.2 持續曝露的健康效應

ICRP 關於由輻射所導致的健康效



圖 13.1 各種持續曝露源的圖解表示

註：NORM: naturally occurring radioactive material，天然發生放射性物質

應的目前政策總結如下：游離過程必然

使原子發生變化，至少是暫時的，從而改變了包含該原子的分子的結構。如果受影響的分子是在活細胞中，則該細胞本身有時會被損傷，或者是由於該分子對細胞的功能是關鍵的從而造成直接損傷，或者間接地由於在鄰近分子引起化學變化而造成損傷，例如生成自由基。在輻射引起的在細胞內的各種損傷之中，最重要的是去氧核糖核酸(DNA)的損傷。DNA 損傷可能會阻止細胞的存活或繁殖，但這種損傷常常被細胞修復。如果修復不完善，就可能得到一個可存活但是改變了的細胞。改變了的細胞的發生與繁殖很可能受到細胞在受照以前或以後的其它變化的影響。這類影響是常見的，其中包括受到其它致癌劑或致突變劑的曝露。如果在一個器官或組織中有足夠的細胞被殺死或不能繁殖和發揮其功能，則將喪失器官的功能，ICRP 稱作為確定效應。受影響的細胞數愈多，則功能的喪失就愈嚴重。一個改變了的軀體細胞可能仍保持其繁殖能力，而可能造成一個改變了的細胞克隆(clone)，它們最終可能會導致癌。性腺中一個改變了的生殖細胞，具備傳遞遺傳訊息給受害者後代的功能，可能傳遞了錯誤的遺傳訊息，從而引起對某些後代的嚴重損害。這種可能由一個改變了的細胞引起的軀體或遺傳效應，稱為機率效應。由於從懷孕發展到胚胎和胎兒涉及很複雜的過程，對於尚未出生的嬰兒的產前確定與機率效應作分開地

討論較為方便。有些實驗證據顯示輻射可以刺激多種細胞功能，包括增殖和修復。這種刺激未必是有益的，這些效應目前稱作為刺激效應(hormesis)，簡稱為激效(見 § 12.7)。有關這些效應的大多數實驗資料尚未定論，主要由於低劑量下的統計學困難。而且，很多是關係到癌與遺傳效應以外的其它生物學終點(end point)的，關於刺激效應可供利用的資料目前還沒有到在輻射防護中要加以考慮的程度。

因此，ICRP 建議的發展一直與輻射可以引起的兩種健康效應(確定效應和機率效應)緊密地聯繫起來。確定效應僅見於輻射劑量超過劑量閾值時受照的個體，效應的嚴重程度隨劑量而增加，在臨床上可見到這種受到影響的個人。機率效應僅能在大的人群中通過流行病學調查而測出，它們是作為在受照人群中和他們的子代中軀體和遺傳效應正常發生率的改變而發現的，只有在集體劑量足夠大到統計學上能辨明時才行。此外，健康效應也可由於所謂胎內曝露的結果而引起，這些曝露發生在出生前，但其效應可表現在出生前、存活的人員及他／她的子代。ICRP 建議應謹慎地考慮，因為由於持續曝露引起的輻射健康效應的科學資料很有限，尤其是關於確定效應和胎內曝露的效應。

關於機率和確定效應前已述及，在此僅補充出生前的健康效應如下。

“輻射對胎兒照射的效應取決於

懷孕的時期內何時受到照射。在懷孕後頭 3 個星期胚胎受照不會導致出生後的確定效應或機率效應。在主要器官發生階段(懷孕後 4—14 周)，動物資料顯示可以引起受照時間正在發育的器官發生畸形。這些效應具有確定特徵，由動物實驗估計人的閾值在 0.1—0.5 Gy。從妊娠後 3 周直到懷孕終止整個時期，看來輻射曝露能引起機率效應，例如癌症發生機率增加。可供應用的數據也不是相互一致的。然而，ICRP 假設標稱致死機率係數約與兒童的相同。已報導子宮內受到曝露的廣島和長崎一些兒童中其智商(IQ)低於預期待值，這個數據與隨曝露的劑量增大，IQ 值的分布通常向下偏移是一致的。ICRP 假設此偏移正比於劑量。懷孕後 8—15 周期間胎兒受照每 Sv 劑量約下降 30 IQ。據此係數，約 100 mSv 劑量能引起個人 IQ 的改變不會大於 3 IQ 點。IQ 小的偏移在臨床上是不能確定的。在妊娠後 16 周到 25 周受照的 IQ 效應不太明顯，而在其它時期受照還未觀察到這種效應，所有關於 IQ 的觀察均與高劑量和高劑量率有關。”

在缺乏其它證據的情況下，甚至要尋找可供利用的關於出生前曝露的資料也是極難的(尤其是關於發育中腦的子宮內曝露)，ICRP 以前已經指出，在持續曝露年劑量低於 100 mSv 時，這是一般的持續曝露情況，出生前曝露不是一個需要特別加以防護的例子，因為：

- 對低於 100 mSv 持續年劑量來說，在妊娠後頭 3 周的子宮內照射所引起的兒童超額白血病或癌症(在存活的兒童中)的機率十分低。
- 對於 100 mSv 的胎兒劑量，即低於約 100 mSv 的持續年劑量，預計不會發生器官的發育畸形。
- 在持續照射年劑量為數百 mSv 時，假設發育障礙效應有一個特別的閾值。因為這些效應可測出的閾值是 100 mSv，而在懷孕敏感時期恰好是一年的分數，以及
- 由於類似的理由在出生前受照的兒童，其機率效應的個人終生危險度應該低於一般居民，因為標稱死亡機率係數(全人口 = $5 \times 10^{-5}/\text{mSv}$)是在一個較小的範圍(如年齡分布)而且出生前受照的時間(<10 個月)要小於一般人群預計持續的受照時間。

13.3 臺灣的自然背景

人類原本就生存在天然輻射場中，自然背景輻射主要來自宇宙射線和地殼存在的鈾系、釷系及鉀 40 等核種所造成的體內和體外的輻射曝露。宇宙射線隨高度和緯度不同而變化，臺灣地區位處低緯度，且大部分居民均住在平原地區，故每年接受宇宙射線劑量較世界平均值為低。在 2000 公尺高的山上，宇宙射線劑量率(6×10^{-2} 微西弗/小時)約為海平面(3×10^{-2} 微西弗/小時)的兩倍。若搭乘國際航線飛機在

10,000 公尺高空飛行，其劑量率(2 微西弗/小時)約為海平面的 70 倍。依臺灣地區人口分布與居住高度加權平均每人每年接受宇宙射線造成的有效劑量為 0.25 毫西弗，另外評估不同飛航路線旅客所接受的宇宙射線劑量列於表 13.1。嘉義市民若想遷居阿里山上，每年將多接受 0.26 毫西弗的宇宙射線劑量。

地殼存在的天然放射性核種所發出的加馬射線會對人體造成體外曝露，若將放射性核種攝入體內，則造成體內曝露。依據臺灣輻射偵測工作站(後來易名為輻射偵測中心)歷年來的測量結果，地殼加馬輻射對國人造成的劑量率在室內為 0.072 微西弗/小時，在室外則為 0.041 微西弗/小時，室內外比值為 1.76。這是因為臺灣地區住宅多使用磚、砂石及混凝土所致。這些建材也都含有天然放射性核種，表 13.2 為臺灣本土建材所含天然放射性核種活度。由於各地地質略有不同，故臺灣地區各縣市地表加馬輻射劑量率亦略有差異，詳如表 13.3 所示。依 80%時間在室內活動的占用因數作估計，臺灣居民每人每年接受的體外加馬輻射為 0.58 毫西弗，其中室內輻射占 0.51 毫西弗。

此外，岩石、土壤所含鈾、釷的衰變過程中會放出放射性氦氣，它會逸入空氣中被吸入肺部，造成體內曝露。臺灣地區室內外氦活度平均分別為 10 及 4 貝克/立方米，遠比中緯度國家為

低，這是因為臺灣地質含鈾少，且室內通風良好所致，平均每人每年因吸入氡氣所造成的劑量為 0.44 毫西弗。

人體每天攝食的食品也含少量天然放射性核種，其中最重要的是鉀 40

和碳 14。依聯合國原子輻射效應科學委員會 1993 年的報告分類，全球人口平均的年劑量為 2.4 毫西弗，台灣地區約 1.6 毫西弗，詳如表 13.4 所示。

表 13.1 國內外航線旅客所受宇宙射線劑量

航線 (往返)	有效劑量 (微西弗)
臺北↔美國紐約	156
臺北↔荷蘭阿姆斯特丹	99
臺北↔美國洛杉磯	93
臺北↔南非約翰尼斯堡	72
臺北↔澳洲雪梨	48
臺北↔新加坡	15
臺北↔金門	0.67
臺北↔高雄	0.48
臺北↔臺南	0.23
臺北↔蘭嶼	0.13
高雄↔馬公	0.07

表 13.2 我國建材的放射性含量和評估室內劑量率

建材種類	放射性核種活度(貝克/千克)			劑量率 (微西弗/小時)
	鉀 40	鈾 238 系	鈾 232 系	
紅磚	551	30	45	0.10
鑽磚	673	41	60	0.14
磁磚	1102	71	91	0.22
空心磚	500	13	29	0.07
	399	18	31	0.07
石棉瓦片	449	54	56	0.13
白砂	26	4	4	0.01
黑砂石	144	4	11	0.02
黏土	73	6	8	0.01
混凝土	207	39	17	0.08
東南水泥	370	64	29	0.10
品牌水泥	223	69	24	0.09

註：鑽磚類似磁磚(燒結 1000°C)，但因加入重金屬，燒結溫度達 1300—1400°C，硬度好且耐磨。

表 13.3 臺灣地區地表加馬輻射劑量率

地 區	偵 測 點 數	平均劑量率 (微西弗／小時)
金門縣	18	0.061
南投縣	8	0.053
宜蘭縣	8	0.053
彰化縣	10	0.053
臺中縣	10	0.051
雲林縣	10	0.051
臺北市	6	0.048
臺中市	4	0.048
苗栗縣	7	0.046
基隆市	7	0.046
臺北縣	15	0.045
屏東縣	10	0.045
嘉義縣	7	0.045
桃園縣	7	0.044
高雄市	5	0.043
高雄縣	10	0.043
新竹縣	7	0.042
臺南縣市	7	0.041
臺東縣	8	0.036
花蓮縣	6	0.029
澎湖縣	30	0.023

註：臺灣地表輻射偏高地點為臺北市北投地熱谷及臺南縣將軍鄉馬沙溝海灘，劑量率分別為 0.144 及 0.216 微西弗／小時。

表 13.4 臺灣地區天然輻射劑量統計

來 源	年有效劑量(毫西弗)		差 異
	臺 灣	全 球 平 均	
宇宙射線	0.25	0.38	-34%
宇宙射線產生核種	0.01	0.01	—
地表體外曝露	0.58	0.46	+26%
體內放射性核種曝露	0.28	0.23	+22%
吸入氬 222	0.36	0.20	-70%
吸入氬 220	0.07	0.07	—
攝入氬 222	0.005	0.005	—
合 計	1.56	2.4	-35%

註：臺灣數據為 1995 年評估，全球平均取自聯合國原子輻射效應科學委員會 1993 年報告。

1. 天然背景輻射異常地區

由於世界各地地質、高度、緯度、建築型式及生活習慣等不同，故各地的民眾所受劑量亦相異，尤其少數地質特殊地區，所含天然鈾、釷偏高，造成地表加馬輻射劑量率偏高，表 13.5 及表 13.6 分別列出我國及世界地表天然輻

射偏高地區，劑量率最高的瑞典花崗岩礦區達 100 微西弗／小時，約為臺灣地區平均 0.054 微西弗／小時的 2000 倍，但從流行病學的調查研究顯示，在這些天然輻射偏高地區的居民健康並未受影響。長期低劑量的天然背景輻射對人類健康有益或有害目前尚無定論。

表 13.5 我國地表輻射劑量率較高地區

地 區	地 點	地 表 劑 量 率 (微西弗／小時)	備 註
中 國 大 陸	河 北	0.209	面積約 200 平方公里
	福 建 鬼 頭 山	0.432	面積約 2 平方公里
	廣 東 陽 江	0.139	面積約 500 平方公里
	廣 西 花 山 姑 婆 山	0.205	面積約 500 平方公里
	四 川 降 札 溫 泉	3.94	面積約 60 平方公里
臺 灣	臺 北 市 北 投 區	0.18	地熱谷公園內
	臺 南 縣 將 軍 鄉 馬 沙 溝	0.27	含獨居石

註：臺灣地區地表輻射劑量率平均為 0.054 微西弗／小時。

表 13.6 全球地表天然輻射劑量率較高地區

國 別	地 名	地 表 劑 量 率 (微西弗／小時)
瑞 典	花崗岩礦區	100
伊 朗	Ramsar 市	30
肯 亞	Mombasa	12
印 度	Kerala	0.2—4
印 度	恆河三角洲	0.26—0.44
巴 西	Espirio Santo	0.1—4
巴 西	Minas Gerais	0.1—3.5
埃 及	尼羅河三角洲	0.02—0.4
美 國	弗羅里達州磷礦區	0.03—0.10

上表資料來源：聯合國原子輻射效應科學委員會報告(1993)。

2. 人類活動所增加的天然輻射劑量

天然輻射可以說是無所不在，而且隨地而異，因此人類日常生活上的活動就會造成所受劑量的增減。例如目前國人出國觀光的活動相當普遍，從臺北搭機赴紐約來回一趟將受 0.156 毫西弗宇宙射線劑量，為桃園輻射道路附近居民所受最大年劑量 0.13 毫西弗的 1.2 倍。輻射道路因所含天然放射性物質而增高輻射，稱為技術增強天然放射性物質 (Technologically enhanced NORM, 簡稱 TENORM)。另一例為氧化鈦(TiO_2)塗料工業中天然放射性核種。

同樣的道理，住在嘉義市的居民若想移居阿里山上，則每年將因宇宙射線的劑量增加一倍而多接受 0.26 毫西弗的劑量。但一個心儀高山地區秀麗風景的人，他絕不會將宇宙射線劑量加倍的因素列入遷徙的考量因子。

在高雄地區有很多居民來自澎湖，由於澎湖屬於玄武岩的地質，天然背景輻射偏低，室外加馬輻射平均劑量率僅 0.023 微西弗/小時，比高雄市低 0.02 微西弗/小時(參見表 13.3)。由澎湖移居高雄將使室外年劑量增加。另外，澎湖傳統建築多使用

石為建材，它的放射性較低(參見表 13.2)，估計其室內加馬輻射劑量率比混凝土配紅磚低 0.022 微西弗

/小時，移居高雄每年亦將增加劑量，會不會有人把遷徙所增加的輻射劑量納入考慮因素呢？一般民眾每人每年接受額外輻射不得超過 5 毫西弗的劑量。桃園輻射道路所增加的最大個人劑量每年 0.13 毫西弗，約僅法規限值的 1/40。

目前臺灣地區居民大部分都使用鋼筋混凝土為建材，這會使室內劑量率比室外增加 0.76 倍，每人每年因此增加 0.22 毫西弗劑量，約為輻射道路的 1.7 倍。

人體內含有鉀 40，它會發出 1.33 百萬電子伏的貝他射線及 1.46 百萬電子伏的加馬射線，日常飲食均含少量鉀 40，造成體內劑量約 0.16 毫西弗/年，其加馬射線會由體內發出而向四周發射。

近年來生活水準大幅提高，幾乎家家戶戶有冷氣，吹冷氣時為了節約能源而關上門窗，如此一來可能使室內氬氣濃度提高數倍。假設每年吹冷氣 5 個月，氬濃度提高一倍，則室內氬所增加的劑量為每年 0.13 毫西弗。

人類活動會改變他們所受的輻射劑量，僅舉上述幾個例子。由此看來桃園輻射道路造成輻射劑量實在微不足道。

§13.4 ICRP-82 建議

本節概述國際放射防護委員會

(ICRP)第 82 號出版物提出的建議。該報告可能對處理公眾受較低水平游離輻射持續曝露這一難題的決策人員有深遠影響。該報告題為：“在持續輻射曝露情況下公眾的防護——ICRP 輻射防護體系應用於由天然輻射源和長壽命放射性殘存物引起的可控制輻射”。

1. 持續曝露

公眾偶然性和持續性受到持續曝露，這種曝露多發生在公眾可能自己發覺到的情況。多年來，與持續曝露有關的年平均劑量大體上穩定或在緩慢減少(該報告未涉及公眾的瞬時曝露，也未涉及職業性曝露和醫療曝露，這些情況不被視為持續曝露)。典型的持續曝露是由宇宙輻射和原生放射性核種衰變鏈等所謂天然輻射源所產生的曝露。某些人工輻射源也會造成持續曝露，例如人類活動所產生的長壽命放射性殘存物即是造成持續曝露的一種常見原因。值得注意的是，放射性殘存物可能兼含天然和人工兩類放射性核種。

(1) 輻射作業和干預

輻射防護體系以輻射作業又稱為實踐以及干預這兩個概念為基礎，這兩個概念完全適用於持續曝露情況。在受監管的活動結束後可能殘存放射性殘存物，這就增加了人類所受輻射曝露的總劑量；這些活動稱作輻射作業或實踐。此外，過去的非受控活動和事件也會產生

放射性殘存物。可通過一種稱作干預的過程(其目的旨在減少人類所受曝露的總劑量)對人類生存環境中實際上已經存在的天然輻射源和放射性殘存物產生的曝露，實施防護行動。

(2) 可控持續曝露

天然輻射源的許多持續曝露和放射性殘存物所導致的幾乎所有持續曝露，都是可以控制的。基本上不可控持續曝露(例如人體內具有代謝作用的天然放射性核種的曝露)一般不屬於輻射防護管理的範疇。因此，可控持續曝露源包括其曝露適於控制的某些實際上的原生放射性核種和長壽命放射性殘存物。一些受監管的輻射作業和在失去任何控制或在實施的監管要求不如當前所適用的要求嚴格的情況下進行的其他活動，在這些輻射作業、活動和除役後放射性殘存物可能殘存於人類生存環境之中。放射性殘存物也可能源於諸如向環境釋出放射性核種的事故之類的事件。含有放射性物質的公眾消費品也可能是造成持續曝露的一種原因。

(3) 劑量含義

該報告建議的評定持續曝露情況的相關量為曝露所導致年(有效)劑量。輔助量為某一確定人類生存環境中所有產生持續曝露的

持久射源所導致年劑量的總和；該量稱作既存年劑量 (existing annual dose)。既存年劑量中因輻射作業而增加的年劑量稱作附加年劑量 (additional annual dose)。既存年劑量中因干預而減少的年劑量稱作被防止的年劑量 (averted annual dose) [如擬指因某種預期的干預而可能防止產生的年劑量，則使用術語可防止的年劑量 (avertable annual dose)]。

2. 防護的體系

(1) 輻射作業的正當性

說明某一產生持續曝露的輻射作業的正當性，要求在實施該輻射作業之前考慮所有相關持續因素。相關因素是那些與預計將向環境中排放或在該輻射作業除役後仍作為放射性殘存物，存在於人類生存環境中的長壽命放射性物質有關的因素。這些因素將包括預計由排放和殘存物所導致的個人和集體的附加年劑量中的持續部分。

(2) 防護最適化

防護最適化要求根據普遍的社會經濟情況選擇適用於各種輻射源的最適輻射防護方案。預計該最適化方案將在考慮經濟和社會因素的同時導致“合理可行盡量低又

稱合理抑低” (或 ALARA) 劑量。於產生持續曝露的正當性輻射作業中，在其最適化過程中應考慮所有相關持續因素。可採用 ICRP 建議的最適化技術實施上述過程。

(3) 輻射作業中應用

關於輻射作業的輻射防護體系的原則，是關於輻射作業範圍內的任何輻射源輻射作業的正當性、輻射防護最適化、以及輻射作業所導致個人劑量限值。這些原則應當可預見地在任何輻射作業 (包括那些預計將產生持續曝露的輻射作業) 的規劃階段，適用於輻射作業及其射源的設計、運轉和除役。在產生持續曝露的輻射作業開始實施之前有一個既存年劑量；在該實踐除役之後其所造成的附加持續年劑量仍然存在 (見圖 13.2)。上述原則適用於控制這種原因所導致的附加年劑量，但不適用於既存年劑量。在某些條件下可對正當的輻射作業所用的射源免於監管要求，條件是該射源所導致個人附加年劑量低於約 0.01 mSv。

(4) 個人劑量限值

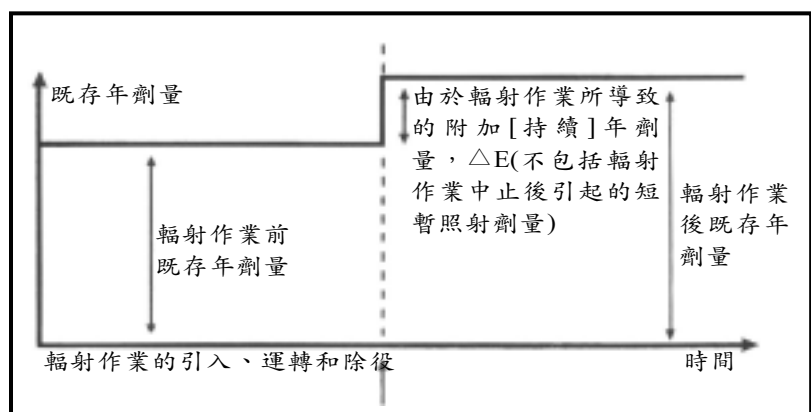


圖 13.2 輻射作業前後既存年劑量示意圖

對輻射作業實施正當性和最適化的原則應採用個人的不公平性考慮，在涉及持續曝露時該不公平性很重要。這種不公平性源於持續曝露的可能廣泛立體分布，包括輻射作業的非直接受益者；也可能源於持續曝露的潛在長期瞬時分布，可影響子孫後代(然而，該報告注意到不同代之間的不公平性這一概念比在確定時間內不同個人之間的不公平性更難以表述)。為了限制這種不公平性並考慮多個射源的持續輻射作業和過度輻射作業，該報告建議對預期由每個射源所產生的持續曝露和對預計由所有受監管輻射作業所聚焦的持續曝露，實行嚴格的個人劑量限制。射源的曝露限制稱作劑量約束；輻射作業的曝露限制稱作劑量限值。

(5) 劑量約束

就劑量約束而言，該報告再次確認 ICRP 的建議，即在每個射源的輻射防護最適化中所採用的劑量約束其最大值應小於 1 mSv/a，且該值以不大於約 0.3 mSv/a 為宜。該報告還強調應當考慮在射源產生持續曝露時可能發生的過度曝露與持續曝露並存或累積等曝露情況。在這些情況下，該報告建議：證實為確保符合既定劑量約束，採用了適

當的劑量評定方法；這種評定應考慮任何可合理設想的曝露組合和累積。倘若在特殊情況下，上述關於符合情況的證實不可行，該報告認為：通過對射源工作壽命期內的任一確定年份設定 0.1 mSv 量級的劑量約束來限制該射源所導致個人劑量的持續成分是明智的。

(6) 劑量限值

就劑量限值而言，該報告也再次確認 ICRP 的建議，即應當把所有受監管活動所產生的持續曝露與過度曝露的總和，限定在劑量限值为 1 mSv/a。該報告還強調有關國家主管機關以及適當相關

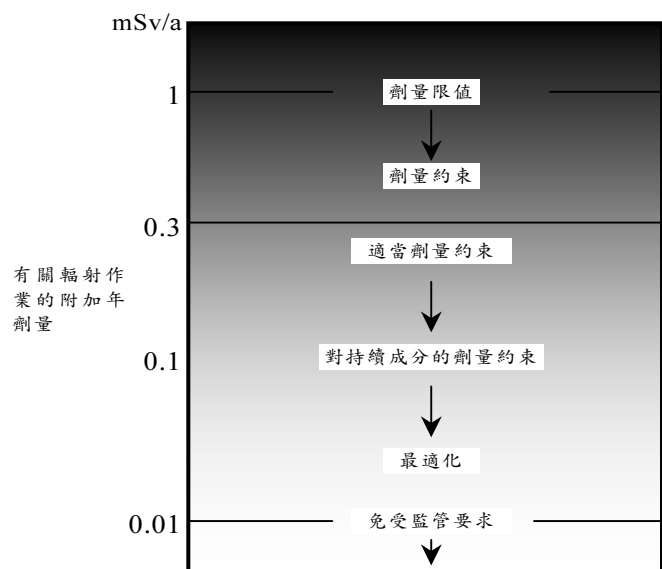


圖 13.3 有關輻射作業的劑量約束和劑量限值的數值的建議

國際組織應當考慮由於不斷輻射作業所造成的持續曝露成份可能

的累積情況。其目的應是防止目前所有輻射作業所產生的個人附加年劑量的聚集和預測今後劑量限值超過 1 mSv/a 的輻射作業。圖 13.3 表示關於輻射作業的劑量約束和劑量限值的數值建議。

3. 干預

關於干預的輻射防護體系的原則是干預的正當性和防護行動最適化。這些原則應適用於實際上涉及可控持續曝露的任何曝露情況，在這些情況中存在現存年劑量，而既存年劑量的一部分可通過干預防止(見圖 13.4)。

有關持續曝露情況下的干預的正當性應借助一種輔助決定過程來評定，該過程要求實際權衡與輻射防護有關的所有相關持續特徵(除可避免的個人和集體兩類年劑量外，其他特

況所引起的憂慮的減少、干預所提供的再保證以及實施防護行動可能產生的社會費用、危害和破壞)。上述輔助決定過程的結果應當用作對決策過程的投入，決策過程可包括其他一些考慮，並可涉及有關各方的參與。

4. 防護行動最適化

防護行動最適化可根據 ICRP 就輻射作業所建議的防護最適化總體方案來實施。防護行動的最適化形式、規模和持續時間應根據正當的干預方案來選擇。對某些持續曝露情況而言，限制對人類生存環境的使用可能就是最適化過程的一個結果。

(1) 特殊參考基準

國家主管機關(以及適當相關國際組織)應當對應進行干預的特殊持續曝露情況預定出特殊參考基準(special reference level)例如

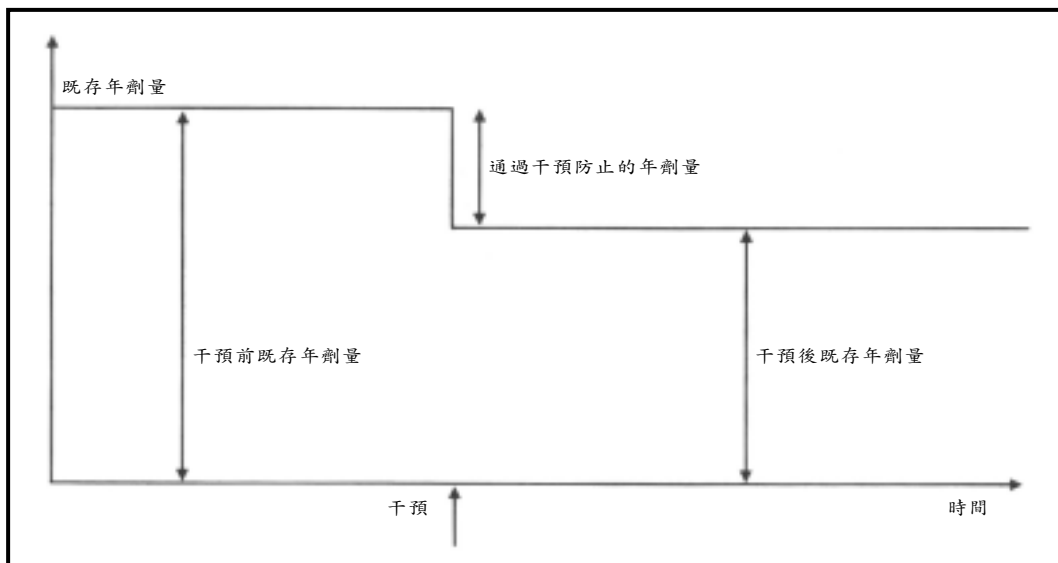


圖 13.4 干預前後既存年劑量示意圖

徵包括如下內容：預期對持續曝露情

干預基準、行動基準和干預豁免

基準。這種干預基準可採用可防止年劑量或有關輔助量簡便地表示。利用預定的特殊參考基準便於及時作出干預決定，也便於有效調配資源；但用之不當也會導致與正當性和最適化原則不符。

(2) 一般參考基準

該報告還建議對干預採用一般參考基準。這類基準可用現存年劑量簡便地表示。它們特別適用於在諸如較高天然背景輻射曝露和遙遠的過去所遺留放射性殘存物所導致輻射曝露等一些情況下考慮干預。但該報告提醒利用一般參考基準應特別謹慎。如果現存年劑量中某些可控成分明顯占主要地位，則一般參考基準的利用，不要妨礙為減少這些主要成分而採取的防護行動。無論是特殊參考基準，還是根據關於干預的輻射防護體系的要求逐例作出的決定，都可能引起防護行動。一般參考基準的利用，也不要鼓勵在現存年劑量中各成分之間“犧牲”防護行動。低水平既存年劑量，未必意味著不要對其任何成份實施防護行動；相反地，高水平既存年劑量也未必需要進行干預。

根據以上所述，該報告認為

既存年劑量約 10 mSv 可用作一般參考基準，低於此基準時對某些持續曝露情況進行干預可能不適當。在該基準以下，旨在減少既存年劑量中主要成分的防護行動仍可選擇，可能仍然合理。在這些情況下，針對具體成分的行動基準，可根據所建議一般參考基準的適宜比例來確定。在低於某一基準時干預可能不適當，而在這一基準以上，干預可能是必要的，應逐例加以說明其正當性。在可能超出對有關器官產生決定性影響的年(等價)劑量閾值的情況下，應當要求干預。既存年劑量增加至 100 mSv 時干預幾乎總是正當的，可用作在幾乎任何可能的情况下，確定防護行動的一般參考基準。圖 13.5 表示建議的一般干預基準。

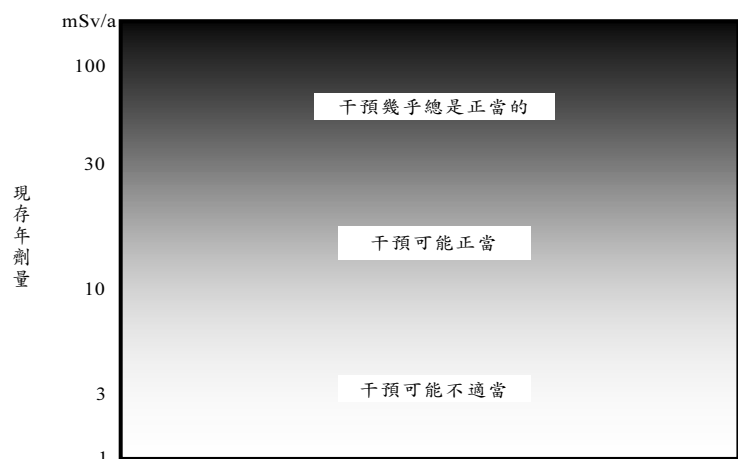


圖 13.5 以既存年劑量表示的建議的一般干預基準

5. 特殊情況中應用

(1) 高天然背景輻射

該報告認為那些存在高天然背景輻射且曝露可控的持續曝露的情況是有挑戰性的。這種情況之一是惰性氣體同位素氦 222 在環境和室內的水平已在升高。該報告認為 ICRP 關於“住宅和工作場所氦 222 的防護(ICRP-65)”的建議仍然有效，並完全適用於控制住宅中氦 222 的持續曝露。另一種情況是建築材料和土壤中存在發射加馬射線的天然放射性核種。有關國家主管機關和適當相關國際組織可考慮報告所提出的關於含放射性物質的商品的建議，提出有關建築材料中特殊放射性核種放射性濃度豁免干預的標準基準(見下文)。對於受土壤中高基準天然加馬輻射源的可控曝露的地區，該報告建議採用建議的既存年劑量一般參考基準的適當份額，作為解決實際問題的導則。

(2) 放射性殘存物

該報告確認的其他棘手的持續曝露情況，是由存在於人類生存環境中的放射性殘存物所造成的。這些殘存物可能源於某一受監管輻射作業的停止和除役，也可能源於包括事故在內人類過去的其他的活動和事件。對於受監管輻射作業，建議的劑量約束和劑量限值應可預見地適用於預計在該實踐停止後——例如在已除役設施廠址——仍然存

在的持續曝露。一般而言，預計所適用的劑量約束將不高於輻射作業階段採用的劑量約束。然而也未必有一個共同性，在此基礎上假設在停止輻射作業前後所適用的劑量約束相等；如果運轉劑量約束非常低，則在除役後階段要保持該值會引入一種不合理的限制。對源於不是作為輻射作業來監督的人類過去其他的活動和事件的放射性殘存物，防護行動的必要性、形式、規模和持續時間應予逐例確定。這方面工作應根據建議的關於干預正當性和防護行動的最適化原則而非通過預選的個人劑量限制來進行。必要時可利用建議的既存年劑量一般參考基準作為導則。但是，這種曝露情況的起因可以追蹤，且仍可對產生殘存物的有關方面追究其應承擔防護行動責任。國家主管機關可考慮對殘存物所導致個人劑量實施具體限制，以將所導致劑量限制在最適化過程所得的水平以下。為此可要求造成這種曝露情況的有關方面，採取額外防護行動。但上述具體劑量限制可能高於適用於輻射作業的劑量約束和劑量限值(見圖 13.6)。對那些被視為無需採取防護行動的殘存物不應作進一步限制。

(3) 熱粒子：持續潛在曝露

在某些情況下，放射性殘存物通常可能作為“熱粒子(hot

particles)”非常稀疏地分散在環境中，從而產生持續潛在曝露情況。這些情況雖然具有發生曝露的可能性但不一定實際上就發生。對於此類情況，該報告建議：根據公眾因這種曝露情況而誘發機率性致命健康影響的無條件機率，來導出行動基準。這種機率

應結合下述幾種機率進行評定：受熱粒子曝露機率；由於這種曝露的結果熱粒子進入體內的機率；由熱粒子進入體內而產生某一劑量的機率；以及該劑量誘發機率性致死效應的機率(應在所有情況下和在所有可能的劑量範圍內綜合上述機率)。在確定上述行動基準時，應當考慮由於熱粒子進入體內也會在局部產生確定性影響的可

能性。

(4) 事故

在發生向環境排放放射性物質的事故後，可能需要採取一些破壞性防護行動，例如撤離人類“正常”生活條件或該條件下的其他限制(見有關此類情況下年劑量變化的圖 13.7)。為了最終回歸

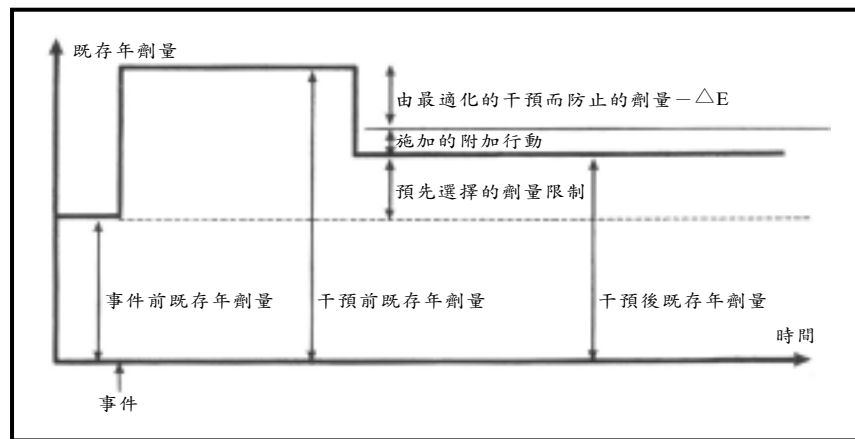


圖 13.6 可追溯事件中的額外防護行動(至最適化)

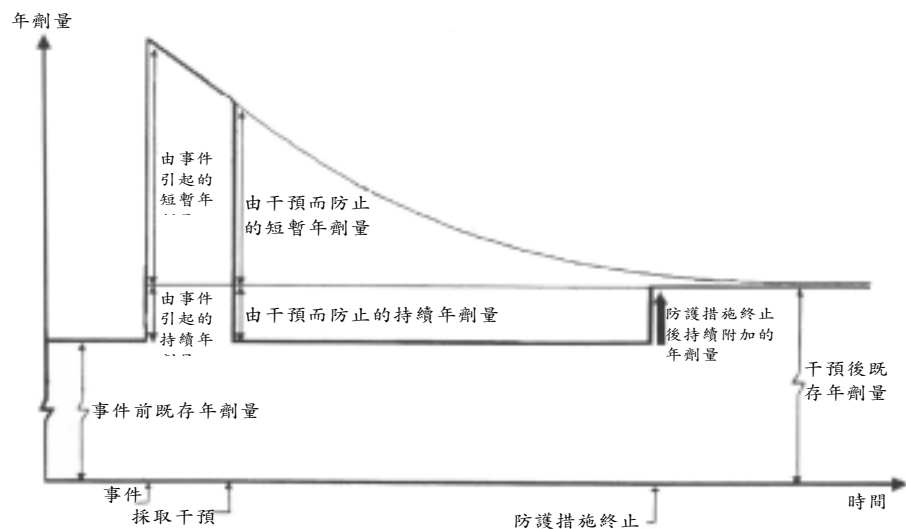


圖 13.7 在一次事故後接著進行干預，最後終止防護行動的既存年劑量演變圖

“正常化”，可能需要在某個階段就終止上述行動，儘管仍然存在殘餘持續曝露。判定在事故後終止干預的最直接依據，是確認曝露已降至應促使進行干預的行動基準。倘若將曝露降至此基準不可行，則既存年劑量一般參考基準(低於此值時干預可能不適當)可提供終止干預的依據。然而，可能很難終止那些多年來一直在實施的防護行動：終止決定可能不會被受曝露的公眾所接受，而社會壓力也會置終止干預的益處而不顧。在這些情況下，利益攸關者(stakeholder)方參與決策過程就變得至關重要。在干預終止之後，最終的現存年劑量即使高於事故之前受影響地區的普遍水平，也不應影響該地區的正常生活條件(包括有關開始實施新輻射作業的決定)。

(5) 商品

持續曝露的一種原因是在公眾使用的商品中存在長壽命放射性核種。如果這些放射性核種源於某一輻射作業，則應根據關於輻射作業的輻射防護體系原則控制其在商品中的水平。在其他情況下，這類放射性核種在概念上應屬受干預範疇。主要由於市場全球化，商品中放射性核種的干預豁免基準不能得以逐例確定；

恰恰相反地，需要使這類基準標準化。不可能幾種類型的商品同時是其他已知個人的高劑量持續曝露的來源。根據這種設想，該報告建議，對於預計由一種主要類型商品(例如在某些情況下可能構成持續曝露主要來源的一些建築材料)所導致的個人年劑量，一般干預豁免基準為約 1 mSv。根據這一建議，有關國家主管機關和適當時相關國際組織，應對每種商品尤其是對特種建築材料針對不同放射性核種而導出干預豁免基準。該報告指出，不應利用干預豁免基準公開或暗中放寬對實踐中可能排放的放射性核種活度所施加的限制；特別不應利用該基準批准重複利用輻射作業除役後所產生的材料(最好利用關於輻射作業的豁免標準處理這類情況)。

受事故產生放射性排放物影響的地區所生產的並含有源於這些排放物的放射性物質的商品，引起一種異常艱難的情況。如果其相對應活度水平高於毗鄰地區生產的產品，則會產生市場接受問題——尤其是在商品跨越邊境運輸的情況。(WHO/FAO 營養法典委員會通過了關於事故後食品中放射性核種的一般干預豁免基準。此處 WHO=世界衛生組織，

FAO = 聯合國糧食與農業組織。該基準已納入國際輻射防護標準。此類基準可使食用上述食品者的個人劑量升高達幾 mSv/a。) 倘若受事故影響地區的年劑量因干預策略得以最適化而可被接受，那麼該受影響地區以外的地區其情況也應能被接受，因為其他地區由於使用受影響地區生產的商品所產生的個人年劑量通常不會高於受影響地區。如果對受事故影響地區所生產商品的限制尚未解除，則可重開有關生產。如果建議增加產品產量，則在經適當正當性說明後可進行。在作為回歸“正常”生活的決定而解除限制的情況下，在受影響地區恢復生產和可能增加生產應被視為該決定的一部分，而不需要進一步考慮。

6. 關於定量建議的概述

該報告提出的定量建議概述於表 13.7。有關資料以非常簡單的形式表示，因而不作對比。該表的上部分說明以個人現存年劑量表示的定量建議；下部分說明以個人附加年劑量表示的定量建議。所以，在這兩部分中以不同的數值表示劑量範圍，因而不可進行對比。此外，該表不包括對任何有關被避免的年劑量或集體劑量，作特殊干預和行動基準方面的論述。

(1) 貫徹建議

該報告認為，若不認真考慮曝露量估計方面的若干問題，其定量建議將難以貫徹。一般預計可根據關鍵群體的平均年劑量來評估持續曝露。但應當注意的是該劑量有時比可辨認的“最大”受照射個人的劑量更難估計。必須確定持續方案，以說明受照射個人及其受照射方式的特徵。對非確定性的定量應作為年劑量估計的不可分割部分。在任何可能和適當的情況下，年劑量都應作為可能的數值分布而不是作為單個點數值。應當牢記放射性殘存物通常呈不均勻分布，並造成非均勻持續曝露情況。必須通過切實地設想人類所受曝露的方式來逐例討論這些情況。對評估非均勻曝露方法的選擇，將取決於所評估的情況和目的。關於持續曝露情況中年劑量的評估，一般應以設想非限制性使用受影響場址或商品為基礎；這種設想意味著應對今後實際上隨時可能確實存在的所有曝露途徑予以說明。

(2) 展望

ICRP 報告中的建議係以與持續曝露水平有關的健康危險度和針對各種曝露情況的輻射防護特性的客觀評定為基礎。然而，相對於天然輻射源的輻射危險度而

言，公眾(以及有時其政治代表)對產生持續曝露的人工射源所造成的輻射危險度，可能有其個人的迥然不同的觀點。這往往導致明顯不同的回響需求和不同的防護規模。當輻射源是技術副產物時，對防護的要求，一般比認為曝露是由於天然原因所導致的要強烈。天然輻射源所造成持續曝露的典型增加往往被社會所忽視，而人工長壽命放射性殘存物相對地較小的持續曝露，卻是人們擔心的原因，有時還會引發不必要的行動。這種社會和政治特

徵的現實情況，一般與輻射防護無關，但卻往往影響有關持續曝露防護水平的決定。因此，ICRP報告審慎地認為應當把這種現實情況，視為主要以輻射防護的科學考慮為依據之外的輔助決定建議，預期其提出的建議將用作對最終(其範圍往往更廣泛)決策過程的投入，該過程可能包括其他一些社會有關的問題和考慮。有關持續曝露環境中公眾輻射防護的決策過程可包括利益攸關者而不只是輻射防護專家的參與。

表 13.7 定量建議

概 念	劑量種類	劑量值(mSv)
干預幾乎始終正當情況下的一般參考基準 (高於此基準時干預應被視為幾乎總是正當的)	既存年劑量 [在給定場所由所有持續曝露源所導致的全部(持續)年劑量之和]	< ~100
干預不太可能是正當的一般參考基準 (低於此基準時干預雖可選擇但不太可能是正當的，而高於此基準時可能需要進行干預)	既存年劑量 [在給定場所由所有持續曝露源所導致的全部(持續)年劑量之和]	< ~10
對商品干預的豁免 (有關建築材料之類的主要商品導出干預豁免基準的標準)	附加年劑量 (主要類型商品所導致的年劑量)	~1
用於輻射作業的劑量限值 (適用於所有相關輻射作業所導致的個人劑量)	(合計)附加年劑量 [所有相關輻射作業所導致的所有年劑量(短暫的和持續的)之和]	1
用於輻射作業的劑量約束 (適用於某一輻射作業中某一射源所產生的個人劑量；它用於射源的防護最適化)	附加年劑量 [由某一輻射作業中某一射源所導致的所有(短暫的和持續的)年劑量之和] (持續成分) ⁽¹⁾	< ~1 與 ~0.3 (~0.1)
有關輻射作業的豁免 (有關輻射作業範圍內的射源導出豁免基準的標準，應使射源的防護最適化，該射源應該是正當化輻射作業的一部分) ⁽²⁾	附加年劑量 [由某一輻射作業中某一射源所導致的所有(短暫的和持續的)年劑量之和]	~0.01

(1)當確保在任何設想的劑量組合情況下，一致性的劑量評估方法不適用時，則可考慮此劑量值；

(2)該標準一般也適用於批准排放含有實踐所產生放射性物質的材料，從而在公眾中使這類材料重複使用可以不加限制使用的商品。

參考文獻

1. International Commission on Radiological Protection Publication 82, "Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure — The Application of the Commission's System of Radiological Protection to Controllable Radiation Exposure Due to Natural Sources and Long-lived Radioactive Residues," **Annals of the ICRP 29** (1/2), 1 (1999)
2. 林友明，林培火，黃景鐘，陳清江，**臺灣地區天然游離輻射調查與國民輻射年劑量評估**，輻射偵測中心，高雄縣(1987)
3. P.S. Weng and C.F. Chen, "Cosmic-ray Ionization in the Lower Atmosphere," **Health Phys.** **52**, 347-352 (1987)
4. C.Y. Lan and P.S. Weng, "Body K and ^{40}K in Chinese Subjects Measured With a Whole Body Counter," **Health Phys.** **57**, 734-738 (1989)
5. M. Shimo and T. Tsujimoto (ed.). **Environmental Radon**, Proceedings of the '91 Radon Symposium, Electron Science Institute, Osaka, Japan (1992)
6. Commission of the European Communities, **Radiation Protection, Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment**, Tutorial Sessions, Report EUR 14411 En, ECSC-EEC-EAEC, Brussels and Luxemburg (1993)
7. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, United Nations, New York (1993)
8. J. Sabol and P.S. Weng, **Introduction to Radiation Protection Dosimetry**, World Scientific, Singapore (1995)
9. P.K. Hopke (ed.), **The Natural Radiation Environment VI, Environment International 22, Supplement 1, S1** (1996)
10. P.S. Weng, "Distribution of Naturally Occurring Radionuclides in the Mountainous Areas in Taiwan," **Environment International 22, Supplement 1, S49-S54** (1996)
11. C.Y. Chen and C. Chung, "Low Intensity Cosmic Neutron Measurements Using a Portable BF_3 Counting System," **Nucl. Instrum. Meth. In Phys. Res. A397**, 155-161 (1997)

第十三章 持續曝露的新建議

第十四章 輻射防護百年回顧

§14.1 前言

本章係比較主觀地選擇一些人、事、物均類似的情況，依年代舉出一序列對於輻射防護有重大影響的事蹟。

§14.2 西元 1895 年以前

在 1895 年之前並不了解什麼是輻射防護，因為當時完全沒有人知道輻射的存在與游離現象。然而輻射有害的特性在貝克勒爾發現放射性物質之前就有紀錄。這段歷史起始於 15 世紀，在現今捷克與德國邊境一個稱為爾茲堡 (Erzgebirge) 的地區，該地卡泊申 (Carpathian) 區過去曾開採銀礦，後來改採鈾礦如圖 14.1 所示。當地的礦工深為一種肺病所苦，稱為高山症 (Bersucht)。16 世紀初，一位德國年輕人名叫鮑爾 (Georg Bauer, 1494-1555) 被派定作為當地的醫療官員，他於日後以拉丁名亞戈里可拉 (Agricola) 成名如圖 14.2。在他的鉅著金屬礦物的本質 (De re metallica) 中描述了當時開採銀礦的工作狀況。他發明了使用獸力或水力驅動的精巧風箱，來改善礦坑的通風，並鼓勵礦工的妻子幫丈夫們縫製細

密濾網的口罩。現在，我們已經了解所謂高山症是因吸入氫的子核種所引起的肺癌 (Bergkrankheit)，所以，亞戈里可拉可被稱為是首位輻射防護官員。

§14.3 西元 1895-1914 期間

倫琴發現 x 光後，很快的就有貝克勒爾發現放射性，居里夫人發現鈾，居里夫婦發現鐳，普朗克發表了光量子理論，愛因斯坦解釋光電效應。其他還有發現阿伐、貝他、加馬輻射，發現包括宇宙射線在內的天然輻射所具有的重要特質，拉塞福發現原子核及波耳倡議的原子模型。在這 20 年內完全改變了人們對物理定律的觀點。

新的發明很快就為全世界所接納使用。x 光機能以驚人的速度散布使用，主要是因為並不需要花費太高的代價就可熟悉操作。鐳則因價格太貴只限於較大的醫院才用得起。x 光機以令人難以置信的速度被廣為使用，可由邱吉爾 (Winston Churchill) 年輕時所描述的一個例子中得到應證，圖 14.3 示邱吉爾的肖像。1897 年夏天，也就是倫琴發現 x 光一年半後，邱吉爾以戰事通信員的身份參與英國遠征軍，以對抗印度

西北方靠近阿富汗邊境的背叛部落。一位名叫藍姆(Lamb)的中校腿部中了一顆子彈。為了確定子彈位置以方便取出

無前例的發明作任何深刻印象的表示。

由輻射防護的觀點來看，第一次世界大戰以前對輻射傷害都假設只有確



圖 14.1 捷克契審斯達(St. Joachimsthal)礦區，捷克文寫成 Jáchymově。

子彈，一具移動式 x 光機組送到了前線，不過因運輸過程造成損壞而無法使用。

定性效應，也就是輻射劑量必須超過某

這段插曲被描述於邱吉爾的第一本書馬拉幹野戰軍故事(The Story of the Malakand Field Force)，這本書是他在 1897 年聖誕節前於印度所寫的。他似乎認為在侖琴發現 x 光沒多久，就能在那與世隔離的偏遠地區(現今巴基斯坦北部山區)使用到可移動式的 x 光機組是十分自然的，所以並沒有對這項史



圖 14.2 亞戈里可拉(Georgius Agricola, 1494-1555)

一閾值。因為早期射源不是穿透力低就是像鐳只在短距離內有危險，所以首先被觀察到的有害效應就是皮膚傷害，且往往十分嚴重甚至須截去手或手臂。同樣足以威脅生命的造血器官傷害則是另一個早期所發現的嚴重狀況。

很早就有人瞭解到防護警戒的必



圖 14.3 邱吉爾(Winston Churchill, 1874-1965)曾任英國首相並獲 1953 年諾貝爾文學獎。

要性，在美國一份期刊西方電機師(Western Electrician)，於 1896 年 12 月 12 日出版時有一篇由福克斯所寫(Wolfram Fuchs)的論文。雖然福克斯低估了皮膚灼傷的問題，可是他給了讀者一些簡單的建議以防止灼傷：

- (1)曝露時間盡可能短。
- (2)不要讓 x 光管靠近人體小於 12 英吋(30 公分)。
- (3)仔細在皮膚塗擦凡士林並在會曝露的部位保留一層。

§14.4 西元 1915-1939 期間

這一時期為誤用的時期，所以也是

輻射防護組織形成的時期。在診斷上對於使用 x 光的無知和不小心，造成醫生和護士受到輻射傷害。他們或她們把手臂置於主射束中，或曝露於來自病人所散射的輻射。在戰爭期間大量使用簡陋的 x 光設備，使傷害的病例達到最高點。

在 1913 年德國倫琴學會發表一強烈的輻射防護建議，說明只要遵守這些建議便可防止許多傷害和死亡。在 1915 年英國倫琴學會發表一篇警告性的聲明。到了 1921 年這學會成立了英國 x 射線和鐳防護委員會，由羅勒斯頓(Humphry Rolleston)擔任主席。這委員會於 1921 年 7 月發表了初步的報告，到了 12 月發表第二個備忘錄。

於 1920 年代的初期，有數個國家準備了輻射防護的指令。在挪威，1922 年便設立了一工作小組以起草輻射防護的要求。在義大利和蘇聯，防護法令係於 1925 年公布。在德國和美國有數個小組致力於輻射防護的建議。早在 1907 年丹麥對於 x 光使用者要求持有執照，到了 1930 年丹麥已有管制使用 x 光的法律。

在 1925 年於倫敦舉行第一屆國際放射學大會(ICR)時，主要的議題為度量與單位。由於這一原因，大會成立了現在稱為國際輻射單位與度量委員會(ICRU)，在當時的名稱為國際 x 射線單位委員會(IXUC)。其姊妹團體即現在稱為國際放射防護委員會(ICRP)，係在 3

年後在倫敦構思中誕生的。

當 1928 年第二屆國際放射學大會於斯德哥爾摩召開時，正式成立了 ICRP，惟當時的命名為國際 x 射線和鐳防護委員會 (IXRPC)。ICRP 的成立如與 ICRU 的成立相比較，注意的人不多。在當時基於 x 射線對於空氣造成游離，ICRU 建議一用於度量 x 射線的單位，稱為侖琴，並以小寫 r 表示。它比我們今天所謂劑量的度量，在描述入射的輻射量，於觀念上較為模糊。這就是我們在使用名詞「劑量」作為劑量的量時，在教育上仍有問題。

第一屆 ICRP 由 7 位成員組成，而第一屆 ICRU 卻有 24 位成員，這說明了對於輻射的度量和單位感興趣。推動會務者為英國國家物理實驗室的凱厄 (G.W.C. Kaye)。凱厄對於倫敦大會的組織貢獻良多。另為尊重地主國，第二位成員為 32 歲的瑞典籍西弗 (Rolf Sievert)，他被任命為主席，但作為名譽秘書的凱厄實際上係在指導會務。第三位成員為來自美國國家標準局的泰勒 (Lauriston Taylor)，他後來成為一位最具影響力的主角(圖 14.4)。

在瑞典斯德哥爾摩舉行大會時，ICRP 依據英國的主張發布建議，認定潛在的傷害要防護，其措詞如下：要保護已知的效應為：(a)對表皮組織的傷害，(b)體內器官的干擾和在血液內的變化。這些建議並未包括劑量限度但卻建議限制工作時數及延長假期。另建議 x

射線裝置的防護障壁及安全操作並藉屏蔽和遙控防護鐳。

就在此時，雖未反映在第一個 ICRP 的建議，鐳的誤用卻越來越普遍。塗料含有鐳的發光化合物，用於儀器的刻度盤及步鎗的瞄準器，特別是在第一次世界大戰的期間。有一家在新澤西州的美國鐳公司雇用了成千的女工從事於發光塗料的工作。她們用嘴舔刷子以弄尖，因此每一次都食入少量的鐳。她們累積了大量全身負荷的鐳，終於導致骨癌和其他致命的效應。當事件的原由披露時，刻度盤塗料工人的命運成為廣大渲染的主題。

首先將鐳視為保健和治療的源頭，導致廣泛誤用的消費品會在黑店裏銷售。最壞的例子為庸醫的藥方 Radithor。在 1925 至 1930 年間，賣出 400,000 個小瓶。據說可治癒約 150 種毛病，包括胃的問題、性無能、以及高血壓。當一位出名的百萬富翁和運動員拜耳斯 (Eben Byers) 在消耗多於 1000 瓶後，死於嚴重的輻射損傷，使它的危險



圖 14.4 泰勒約於 1958 年攝於前美國國家標準局

性質變得很明顯，這個情況對於使用鐳為醫用目的，出現了應加限制的態度。鐳的誤用經驗對於建立體內攝入的限度，提供了良好的資訊。

即使劑量的觀念仍未成熟，在 1920 年代期間紛紛提出各種不同的劑量限度。皮膚紅斑劑量(SED)即為一種參考值，即產生皮膚紅斑的 x 射線劑量。在 1924 年美國物理學家睦薛勒(Arthur Mutscheller)對於 x 射線的工作人員，他倡議用耐受劑量並以皮膚紅斑劑量作為表示。他的倡議為每月 0.01 SED。在 1925 年西弗(Sievert)個人倡議每年 0.1 SED 應為無害的。到了 1928 年國際上同意曝露單位用 r 以後，曾致力於說明 SED 可用游離作用作度量。數個作者倡議 1 SED 應相當於 600 r，因此年耐受劑量 0.1 SED 係對應於 60 r，即每天 0.24 r，1 工作年=250 天。這假定與 1929 年成立的美國 x 射線和鐳防護諮詢委員會於 1934 年建議的每天 0.1 r 限度稍為落後。選擇每天 0.1 r 而非 0.2 r 是因為後者所隱含的準確度並無根據。

至 1930 年 ICRP 在巴黎召開會議，1934 年又在蘇黎世召開會議。在後一會議中建議耐受劑量為每天 0.2 r，這是第一個定量性的劑量限制由委員會建議的。用現今的符號這對應於一年 500 mSv，而與現在的限度相比較，委員會如今的建議為一年 20 mSv。在二次世界大戰之前，ICRP 於 1937 年在芝加哥召開。但是在休會期間 ICRP 並不活

躍，其召開的時間係與國際放射學大會召開的時間相同。

在 1930 年代有一值得注意的文件如今幾乎忘記。1931 年國際聯盟設立了一個委員會以探討使用輻射源的健康效應。這就是 UNSCEAR 的早期版本，而 UNSCEAR 係在 24 年後才設立的。這委員會請了二位德國放射學家文茲(Herman Wintz)和藍卜(Walther Rump)以此題目撰寫報告。這報告於 1931 年以英文出版作為國際聯盟的文件 CH-1054，題目為由於使用鐳、x 射線和紫外射線的危險防護措施。這是很先進的報告，仍有許多良好卓越的勸告。

在 1934-1939 這五年期間，起了新的科學發現浪潮，甚至超越過了侖琴、貝克勒爾以及居里夫婦等的發現。至 1932 年查兌克(James Chadwick)發現中子以後，約里奧(Frédéric Joliot)與居里(Irène Curie)利用中子於 1934 年產生人造放射性並研製放射性磷。費米(Enrico Fermi)在羅馬藉中子加入於鈾以尋找超鈾元素。想不到它們卻導致核分裂，這是德國科學家諾達克(Ida Noddack)所提出的結論，但卻無人相信。在柏林的哈恩(Otto Hahn)以他自己的化學技術和長期的經驗卻認為是對的。他發現用中子照射鈾後，神秘的產物其化學性質與鋇相同的確是鋇。在物理上解釋分裂係由當時在瑞典的同事邁特娜(Lise Meitner)和她的姪兒弗利胥(Otto Robert Frisch)提出的。人類從此步入核子時

代，對於輻射防護有更強烈的要求。

§14.5 西元 1939-1949 期間

在這段期間適逢第二次世界大戰，故致力於生產和使用核子武器。生物效應仍被認為屬於確定性的；如果輻射超過閾值，任何傷害的危險度就會存在。

1939年1月19日丹麥物理學家波耳(Niels Bohr)搭乘瑞典至美洲航線的輪船抵達紐約，他從弗利胥聽到哈恩發現核分裂的令人振奮的消息。這消息迅速傳開使美國的物理學家憂喜參半。這些物理學家多半係來自歐洲的移民、德國的難民、以及逃離義大利獨裁者的科學家。費米(Fermi)來自義大利、特勒(Teller)和韋格勒(Wigner)來自匈牙利，以及拉比(Rabi)來自波蘭。他們和波耳一樣的興奮，但卻憂慮某些事，也是波耳不願意看到的。如果核分裂產生的中子多於那些用於產生分裂者，也就是中子增殖，則將會有無法控制的鏈反應及巨大的爆炸，即有產生原子彈的可能性。如由德國科學家海森伯(Werner Heisenberg)領導的科學家為希特勒(Adolf Hitler)製造了這樣的彈，那將會發生什麼事呢？

費米和西納德(Szilard)不久在他們的實驗中發現中子增殖的方法，但卻保持秘密。然而還是辦不到，因為約里奧與他在巴黎的同事於4月22日的自然(Nature)期刊報告中子增殖的程度，每

次分裂平均產生 3.5 個中子。

在另一方面德國的害怕不是沒有根據的。在漢堡(Hamburg)兩位年青德國科學家哈特克(Paul Harteck)和戈羅(Wilhelm Groth)閱讀了約里奧的論著後，於1939年4月22日寫信給德國作戰辦公室，呼籲他們注意製造核子武器的可能性。在同一天德國著名的物理學家約斯(Georg Joos)教授寫信給教育部，呼籲注意約里奧的論著。

在美國西納德和韋格勒說服愛因斯坦寫他那封著名的信給羅斯福總統，警告德國製造原子彈的可能性。這封信並沒有帶來立即的效果但卻快速導致曼哈頓(Manhattan)工程區的開始(現在常稱為曼哈頓計畫)。這代號指巨大的工業組合，其設計係要較德國人急速製造核子武器。在許多人努力之下，於漢福特(Hanford)建造和運轉生產鈾的反應器，於柯林頓(現在的橡嶺)建造大型的同位素分離工廠以產生武器級的鈾 235，早期的英國工作代號為管合金(Tube Alloys)者，也鼓勵了美國人，不久英美整合在一起努力工作。

在德國於軍事的控制下，核子研究在1939年10月已開始。但是卻為了一些理由進展緩慢，從未運轉一座反應器或產生顯著量分離過的鈾 235。在德國和在美國，科學家均熟知於處理分裂產物和鈾所涉及的危險度，故採取不尋常的步驟以保護工作人員，並常念及刻度盤漆工及其他曝露於鐳的悲慘命運。在

曼哈頓計畫內，在舊金山放射學家史東 (Robert Stone) 的領導下成立了保健部門。這組織再分組為醫務監護、生物研究、以及輻射防護，後者遂稱為保健物理迄今，以便與其他兩組作區別。輻射防護涉及物理度量與評估。在橡嶺負責這項工作者摩根 (Karl Z. Morgan)。在其他地區的負責人為漢福特的派克 (Herbert Parker)，為英籍的物理學家 (圖 14.5)；在洛色拉莫士 (Los Alamos) 為漢伯曼 (Louis Hempelmann)。

在那時可用的標準為從 1934 年美國諮詢委員會建議的體外曝露耐受劑量 0.1 r/天以及在 1941 年從美國國家標準局工作小組建議的身體鐳含量超過 0.1 μ g 則認為是不安全的，並假定其相對應的阿伐活度也可指出銻的不安全水平。史東不相信耐受劑量可提供一個大的安全餘裕，因而改變術語為「最高許可劑量」，隱含較低的劑量會更佳。

為對付德國威脅所製造的彈最後投於廣島和長崎而結束了戰爭。這災禍帶給人類莫大的苦難，彈的毀滅力大大地影響公眾對游離輻射的態度至今。雖然不值得慶幸，但這二城市倖存者的命運卻帶來最可靠輻射致癌效應的資訊。

就輻射防護而言，戰後並未恢復到正常的情況。在戰前輻射防護的工作是要保護醫生、護士、以及病人免除 x 射線和鐳的有害效應。戰後及進入「冷戰」期，新的團體有了更有力的資源。政府機關也涉入，成為新的武器工業。資訊

的傳播受到了限制。

在美國成立了新的政府機關原子能委員會 (AEC) 兼顧所有的核子活動，但以發展新的核子武器為最優先。在 1946 年老的諮詢委員會重新建立，現在的名稱為國家輻射防護與度量委員

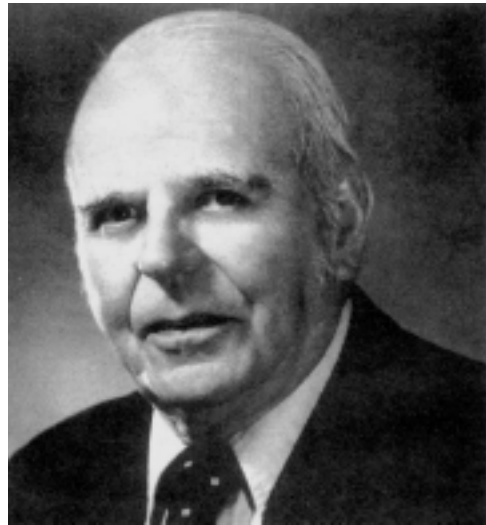


圖 14.5 派克玉照



圖 14.6 菲拉攝於哥倫比亞大學

會 (NCRP)，主席為泰勒 (Lauriston Taylor)。

NCRP 有幾個小組委員會、紐約紀念醫院的物理學家菲拉 (Giacchino Failla)(圖 14.6)主持關於體外曝露的限度，而摩根則主持體內曝露的小組。菲拉領導的小組決定減少所建議的最高許可劑量自每日 0.1 至 0.05 r 而非用每周 0.3 r 作表示。減少的理由之一係有漸多的明證指出輻射也會導致遺傳傷害。

摩根領導的小組建議放射性物質在空氣中與水中的最大許可濃度(MPC)為一導出限度。這件工作拖延了很久，直到 1953 年方告完成。

在 1949 年來自美國、英國與加拿大的專家在白堊河舉行第一屆的三國會議以討論劑量限制化，並且也是第一次討論公眾的劑量限制。接著又有兩屆的三國會議舉行，1950 年在哈威爾 (Harwell)和 1953 年在紐約的哈里曼 (Harriman)。在最後一次會議，同意就公眾中的成員每年為 1.5 r 的限制，並就礦坑中氡曝露的限度定為每升 100 pCi，此相對應於 12 工作基準月 (WLM)。現行 ICRP 建議的限度為在 5 年內平均每年 4 WLM，其中任何一年為 10 WLM。

在戰後英國醫學研究委員會立即設立一輻射防護委員會，在 1946 年設立耐受劑量小組，由梅尼奧 (W. V. Mayneord)教授擔任主席。這對於在第

六屆國際放射學大會於 1950 年在倫敦舉行有影響，大會主席為派得遜 (Ralston Paterson)。在 1937 年芝加哥舉行國際放射學大會時原來預期可從大會的前任主席克利斯第 (Arthur Christie) 得到一份定位的報告。至 1947 年克利斯第與泰勒聯繫，請求要一份 ICRP 與 ICRU 的工作報告。當他被告知只有 ICRP 和 ICRU 的執行委員會的泰勒和西弗仍存在時，克利斯第建議派得遜請求泰勒重建 ICRP 和 ICRU。派得遜照做並請求梅尼奧和泰勒共事以組織這兩個委員會，因而成為今天的 ICRP 和 ICRU。新的 ICRP 的第一任主席為洛克-卡寧 (Sir Ernest Rock-Carling)，秘書為泰勒。

§14.6 西元 1950-1956 期間

在這期間，冷戰引起了公眾對於在大氣層中頻繁的核試爆表示關切。輻射防護界體會到需要新的輻射防護方法。在 1950 年重新改組的 ICRP 於倫敦舉行時，預期提出每週最高許可劑量為 0.3 r 以取代自 1934 年以來老的耐受劑量每天 0.2 r。這項建議雖被倫敦會議接受但卻未作廣大的宣傳。在那時 ICRP 的會議仍只舉行一天。泰勒身兼 ICRP 和 ICRU 二會的秘書，但在會後他在倫敦只專任 ICRU 的秘書，而 ICRP 的秘書一職由秉克斯 (Walter Binks) 繼任。

在瑞典西弗 (Rolf Sievert) 逐漸對於天然輻射產生興趣。他覺得若非知道每

人由天然輻射所接受的年劑量，要訂定一地人口公眾的曝露將會有困難。他和在里茲(Leeds)的史比爾斯(F.W. Spiers)教授密切合作，度量從人體、地上、以及建材的加馬輻射。當時對於天然人體含鐳量有了爭論，並有了兩個矛盾的估計。一為在羅徹斯特(Rochester)的赫斯(John Hursh)和蓋茲(Gates)，一為在緬恩(Main)法蘭克福(Frankfurt)凱撒維廉生物物理研究所的克雷布斯(A. Krebs)。克雷布斯的值比赫斯和蓋茲約大百倍。西弗的全身度量顯示人體的加馬輻射來源係得自鉀 40 而非鐳的子核，故赫斯和蓋茲的估計是正確的。

在 1952 年西弗和赫畏希(George de Hevesy)(圖 14.7)發起 ICRP、ICRU、以及聯合國教科文組織(UNESCO)放射生物聯合委員會在斯德哥爾摩舉行聯合會議。這是一個很獨特的會議，實際上每一位在輻射防護重要人物都參加。有一張出席者的著名照片可看到在輻射單位的人名戈雷和西弗並肩而立。討論的主題為從遺傳的觀點看許可劑量以及在正常的工作狀況下血液計數的用處。遺傳學家牟勒(Hermann Muller)(圖 14.8)建議在生育年齡生殖器官的個人劑量的總限值要小於 20 r。

國際放射學大會的次一會議係於 1953 年在哥本哈根舉行。這次會議的建議係於 1954 年修訂，並於 1955 年出版的英國放射學期刊上作為補充材料第 6 號。這 92 頁的文件為 ICRP 的第一

個真正的出版物，共 92 頁，但卻不列入以後的出版叢書。這份報告包括委員會的報告以及小組委員會的報告。新的名詞要求許可劑量的定義，係指游離輻射的劑量，根據現有的智識，預期不會導致一個人在他一生中的任何時刻會有可察覺的人體傷害。任第一小組委員會的主席，菲拉就不同的器官提出許可劑量的建議，而最低值(0.3 rem/周)係為生殖腺與造血器官。在委員會的引言，可讀到「鑒於數值係基於不完整的證據，再加上某些輻射效應為不可逆和累積的智識，故強烈建議應盡一切努力以減少各種型式的曝露至最低的可能程度。」

由摩根任主席的第 2 小組委員會，提出 90 多種放射性核種的最大許可濃度的數值表格，是摩根在 NCRP 小組委員會的最後工作結果。

在 1950-1956 期間，美、英、蘇三國舉行一系列的核裝置試爆。如與日後的試爆比較大多數都算是小規模的。但在 1954 年核試系列在比基尼環礁



圖 14.7 赫畏希約攝於 1907 年

(Bikini Atoll)附近的「城堡作戰」為例外的。1954年3月1日這系列以爆炸熔合彈稱為「暴徒」揭開序幕，藉鈾的分裂加強，較以前的爆炸釋放出數十倍多的分裂產物。這就是污染日本鮪魚拖網船福龍丸和倫吉頓普(Rongelap)小島的居民那一次試爆。

全球均可量測到從這次爆炸的放射性殘留物，導致公眾的憂慮因而有了政治上的影響。美國國家科學院與英國醫學研究委員會就輻射的危險度發布再確定的報告。聯合國大會與其科學委員會 UNSCEAR 以及第一屆聯合國的核能和平用途於 1955 年在日內瓦召開。在 1956 年芝加哥的米勒(C.E. Miller)和馬里內尼(L. Marinelli)能度量人體內的銻 137，留下關心輻射防護的人深刻印象。

以下是具有影響的事件。除了有價值的正文外，英國醫學研究委員會所出版「核與相關輻射對於人的災害」包括某些重要的附錄。庫爾得布朗(W.M. Court Brown)和都爾(Richard Doll)撰寫關於白血病的危險度，這可從觀察日本倖存以及用 x 射線治療關節僵直脊椎炎的病人獲得，史比爾斯(F.W. Spiers)回顧來自天然輻射源的知識。奧斯邦(S.B. Osborn)與史密斯(E.E. Smith)提出第一份報告關於來自醫用和職業曝露的影響遺傳劑量(GSD)。

在日內瓦的第一個原子和平會議為核能工業產生的標記，過去列入機密

的文件今均可公開。

在瑞典休微斯特(Bengt Huitqvist)研究住宅內的輻射並於 1956 年出版，發現意料之外的高加馬輻射劑量率以及頗高濃度的氬，但卻無危險度估計的依據。

ICRP 於 1956 年於日內瓦開會，建議職業的最高許可劑量的 10% 為非職業曝露的最高許可劑量。為引導計算最大許可濃度的修訂組，決定應基於每周最高劑量 0.3 rem，生殖腺的情況除外，其根據應為每周 0.1 rem。委員會警告說這些建議是暫時性的，更成熟的建議預期於 1958 年提出。

日內瓦會議之後，西弗繼承洛克-卡寧出任 ICRP 的主席，菲拉為副主席。秉克斯以健康的理由卸去祕書的職

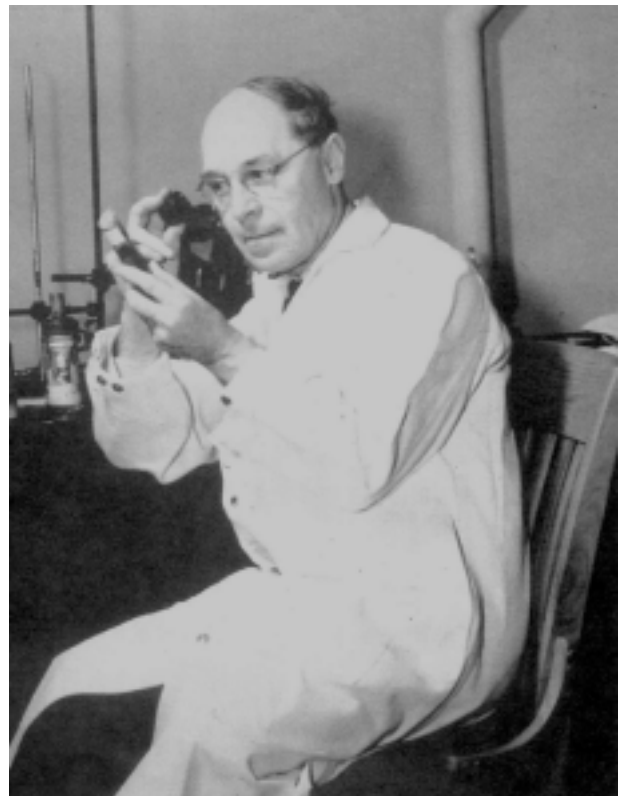


圖 14.8 牟勒在美國印地安那大學審視果蠅

務，由史密斯代理秘書直到 1957 年，當林德(Bo Lindell)繼承他擔任臨時秘書時，他於 1959 年被指派為秘書。

UNSCEAR 於 1956 年開始其工作，雇用數位專職的科學秘書撰寫第一份報告。在這幾位秘書中，日籍田島(Eizo Tajima)推導出估計影響遺傳年劑量(GSD)，其定義為如果有一劑量為一地人口中每一成員所接受，預期對這人口產生的總遺傳傷害，與各個個別成員實際所接受劑量的遺傳傷害相同。

首次使用 GSD 意味著偏離基於確定性效應及閾劑量的防護政策。遺傳效應假定為機率性的性質而無閾劑量。但仍太早去假定癌危險度，例如白血病的機率，應以同樣的方式處理。朝向這方向邁進的是史帝瓦(Alice Stewart)，她觀察到當母親作 x 射線檢查，在子宮內受到曝露而生的小孩，有較高的白血病危險度。她的結果受到質疑，但是到了 1962 年麥馬宏(Brian McMahon)加以證實。

1956 年 11 月，UNSCEAR 邀請 ICRP 與 ICRU 共同撰寫一份報告：病人接受醫用輻射時其劑量應如何估計與記錄。為了這項工作設立了一聯合研究群，史密斯出任秘書。從這兩個委員會提出的報告於 1957 年 10 月刊登於醫學與生物的物理學。這項研究的重要結論為，不建議有系統地記錄和登記每個人接受的輻射劑量。這份報告也包括基於解剖型式對放射檢查作分類的建議。

就在這一段期間，我國行政院於民國 44 年(1955)6 月 2 日正式成立原子能委員會，著手擬定我國核能的發展計畫，包括輻射防護在內。

§14.7 西元 1957-1965 期間

在這一段期間 ICRP 和 UNSCEAR 均相當活躍。輻射防護逐漸變成關切機率效應，但是仍未有定量的危險度數據。塞拉(Francesco Sella)繼埃波雅(Raymond Appleyard)擔任 UNSCEAR 的秘書。

在 1957 年發生兩件重大的核子事故。一在英國文治克耳(Windscale)用石墨緩和的生產鈾反應器一號機失火，導致釋出各種分裂產物，並在 500 平方公里的範圍內有相當數量的牛乳受到碘 131 的污染。整個歐洲可偵檢出空氣中的碘 131。然而更嚴重者為前蘇聯烏拉山區(Urals)在車利雅秉斯克(Chelyabinsk)和基須帝姆(Kystym)附近的馬雅克(Mayak)化學工業區由於高放射性廢料儲存槽的爆炸，導致嚴重的銻 90 污染，使成千的公眾必須安置。還有，馬雅克的例行運轉曾導致嚴重的放射性污染，因其釋入於帝洽(Techa)河，形成高的輻射劑量。然而在 1950 年代卻無此事故的公開資訊。

在 1957 年設立了國際原子能總署(IAEA)於維也納。在其核子安全組內輻射防護的活動係在各方面連接 ICRP 的建議與其實際的應用。在同一年位於紐

約的 UNSCEAR 祕書處開始活躍地草擬其 1958 年的報告，由加拿大籍埃波雅主其事。在這一段期間，射源關聯「劑量負擔」的觀念被構思為評估未來年劑量的工具，如果一些實踐(如核子武器試爆)還要繼續許多年。註：實踐又譯為輻射作業。在放射生態學的評估，UNSCEAR 後來的作法係利用環境轉移係數也奠定下基礎。UNSCEAR 的第一份報告係於 1958 年出版，從此每隔幾年的期間就出版完整的報告(有些超過 700 頁)以回顧輻射水平以及輻射效應的現行知識。

與 UNSCEAR 祕書處的工作相平行者為 ICRP 的編輯組正在草擬新的 ICRP 建議。這組的主席為菲拉教授，其他的成員包括安德森(Elda Anderson)，林德、羅西(Harald Rossi)、以及索比(David Sowby)。這份報告於 1958 年被委員會採用，是帕葛曼(Pergamon)出版社為 ICRP 出版的叢書中首先用褐色封面的，雖未編號但可指名為第 1 號出版物，因為下一個出版物標記為第 2 號出版物。

在這一本出版物，ICRP 首次討論劑量閾值以與線性劑量回應而無閾值作對比：最保守的的作法係假定無閾值也不能恢復，在這種情況下對於一些敏感的個人於低的累積劑量仍會誘發白血病，而其罹患率可與累積劑量成比例。

因為不能再假定在閾劑量下有完

全的安全輻射劑量，故有了警告的詞句：應強調本節所建議的最高許可劑量為最高的值，委員會建議所有的劑量應實際抑低(ALAP)，任何不需要的曝露應避免。在第一號出版物，ICRP 放棄每周限度，使用的最高許可劑量係以年計。以前的一週 0.3 rem 相對應於一年 15 rem。當遺傳效應和誘發白血病為無閾值者也併入考慮，仍懷疑這是否足夠安全。ICRP 因此採用美國對於年齡按比例分配的公式 $D = 5(N - 18)$ ，為劑量 D (rem) 累積至 N 歲在生殖腺和造血器官的建議。這公式再以許可在任何連續 13 週的最高劑量為 3 rem 作為補充。就體內器官而言，生殖腺和造血器官以外者的週劑量為 0.3 rem 仍建議可作為計算最大許可濃度值的基礎。

就公眾中的成員個人，ICRP 建議年最高許可劑量為 0.5 rem。也建議最大許可濃度的值應除以 10 可用於公眾曝露，惟此勸告不被認為妥當，因為單位攝入的劑量在兒童與成人不同。委員會又建議自然背景與最低實際上來自醫用曝露的貢獻除外，最高許可遺傳劑量為 5 rem。

在委員會的建議後不久，摩根的小組委員會提出修訂最大許可濃度值的報告(第 2 號出版物)當委員會於 1959 年在墨尼黑聚會，菲拉退休，由英國波金(E.E. Pochin)繼任副主席，開始很活躍地在 ICRP 工作。至墨尼黑的會議，委員會首次請求設置觀察員，在這情況

下，來自國際原子能總署道氏(Hussein Daw)博士任觀察員。至於與世界衛生組織的正式關係業已建立。

在 1959-1960 年，三方會議(代表工作人員、雇主、以及政府)由國際勞工組織在日內瓦召開，主席為傑梅(Henri Jammet)，這會議係為工作人員的游離輻射防護會議作準備。在國際勞工組織會議輻射工作人員被認定為兩類，即直接從事於輻射工作與工作人員受到曝露，但非直接從事於這件工作。

在 ICRP 的建議中相當的特色為管制地區的觀念，即在一地區中輻射曝露是在一位輻射防護人員監督之下。依照 ICRP 第 1 號出版物，在人員會接受超過 1.5 rem/年(最高許可劑量的 30%)應建立管制地區。國際勞工組織分類「直接從事」係對應於在管制地區工作的人員。對於這些工作人員，國際勞工組織要求特別的醫務檢查與人員監測。然而國際勞工組織並不要求特殊的工作時數或延長假期。

在 1961 與 1962 年蘇聯在諾伐亞·占拉(Novaya Zemla)試爆最大的核子裝置，導致全球落塵水平達到最高峰。這也使公眾的關切達到最高點，故在 1963 年美、英、蘇三國同意中止在大氣層舉行核試。

在 1962 年 ICRP 設立一個新的第 4 委員會，由傑梅擔任主席以及數位有力的成員如班尼森(Dan Beninson)與丹斯特(John Dunster)。這新的委員會提供應

用 ICRP 建議的勸告。同年波金繼承西弗為 ICRP 主席，索比接替林德為祕書，成為委員會第一位員工。

在 1964 年國際輻射防護協會(IRPA)在巴黎成立，這是摩根發起的，他在 1955 年協助建立保健物理學會，這學會發行保健物理期刊，因此提高其他國家建立輻射防護社團的興趣，例如在西弗發動之下在斯德哥爾摩成立北歐輻射防護學會，這是發生在 IRPA 成立半年之前的事。

國際輻射防護協會就目前許多國家和地區的社團作了很重要的聯繫。這些社團有的已成長為大規模又活躍的社團，諸如保健物理學會與德國的輻射學會，而 IRPA 定期舉行的大會曾吸引輻射防護社團的興趣，這在早期只限於國際放射學大會。

第 1 號出版物曾作若干修訂，委員會因此合併這些修訂出版了修訂版，這文件是為 ICRP 第 6 號出版物。不久又有了更重要的修訂，於是指定一新的編輯組。前任的編輯組主席菲拉不幸於 1961 年在芝加哥死於車禍。波金遂被邀擔任這新編輯組的主席，成員包括林德、樓弟(John Loutit)、以及索比。樓弟接替菲拉成為 ICRP 第 1 委員生物效應的主席。波金團隊起草一文件於 1965 年 9 月被委員會採用並出版成為 ICRP 第 9 號出版物。平常的警語(在第 52 段)為：任何曝露會涉及某些程度的危險度(又稱為風險)，委員會建議任何不必要

的曝露應避免，所有的劑量應保持易於達成的低值，經濟與社會影響要列入考慮。但仍無導則指出如何應用這建議。委員會逐漸懷疑誘發癌症的閾劑量。第 7 段為：委員會就輻射防護的目的，看不到實際上可取代在劑量和效應之間線性關係的假定，劑量的作用是累積的。委員會知道無閾值與所有劑量的完全相加性的假定可能不正確，但卻表示可接受的，因為它們不可能會導致低估危險度。

ICRP 第 9 號出版物藉更新輻射防護的哲理，由確定效應進入機率效應，區分正常操作及意外事故，後者的曝露只能藉補救行動作量的限制。放棄按年齡成比例的公式，最高許可劑量就生殖腺與造血器官而言現在表為年劑量 5 rem (50 mSv)。引進術語「劑量限度」而公眾曝露的年限度建議為 0.5 rem。

主要關切者變成機率效應，危險度的觀念也引進。危險度有許多意義，但常視為數種成份，包括多種有害事件的機率與如果發生的後果。考慮癌的危險度，ICRP 的主要關切為死的後果，因此有一段時期危險度係與死亡的機率同義。這導致在其他領域的致命危險度，索比於 1965 年在保健物理期刊發表一前端評述：「輻射與其他危險度」。

§14.8 西元 1966-1977 時期

在這一段期間，主要感興趣的領域在於核能工業的發展。防護的哲理明確

地定形於直線劑量－回應關係而無閾劑量的假定。UNSCEAR 是多產的，在 1966、1969、1972、以及 1977 提出報告，其評估放射性落塵的劑量方法已改進。

在草擬 ICRP 第 9 號出版物的期間，波金和樓弟在編輯組內留意關於機率效應的危險度有許多不同的意見。委員會因此邀請羅素(R. Scott Russel)擔任一工作小組的主席以考慮曝露於輻射伴隨的軀體與遺傳危險度，其評估可達到何種程度。

這小組的報告於 1966 年出版為 ICRP 第 8 號出版物。這是一份值得注意的文件。這是第一次在 ICRP 的出版物中，總和軀體與遺傳效應的輻射危險度，且較 UNSCEAR 的報告更為有效。在吸收劑量為 1 rad (10 mSv) 的加馬輻射罹患白血病的機率估計為每百萬受曝者有 20 個病例。其他型式的癌症總和假定與白血病的機率約略相同為一錯誤的假定。

羅素小組感到估計的不確定度是如此的大會被誤導為似乎 20 病例為正確的數目，因此建議用術語危險度的階次(orders of risk)。每百萬有 20 的頻率對應於 1×10^{-5} 至 10×10^{-5} 之間的機率，即為第 5 階次(5th order)的危險度，也是第一次建議顯示年齡別的死亡率 [龔伯茲(Gompertz)曲線] 可用以說明危險度的相對變化，這觀念在 25 年後為 ICRP 第 60 號出版物採用。在 1969 年加拿大籍史帝瓦(Gordon Stewart)繼承

波金博士為 ICRP 的主席。

在 1960 年代肺癌的危險度來自鈾礦中的氡開始廣泛的被認定，而在某些國家如瑞典，在非鈾礦也發現大問題，這導致住宅中氡的問題。

在瑞典黑格蘭(Arne Hedgran)與林德於 1970 年倡議單位實踐的集體劑量限制，作為來自擴展實踐而控制未來劑量的方法。同樣的表示型式也用於 1972 年的 UNSCEAR 報告，在此處核能工業的職業劑量係用每百萬瓦年(MWY)的 man-rem 作表示。

1970 年在布林頓(Brington)舉行的國際輻射防護協會的大會時，有兩篇論著探討為消除單位輻射劑量應合理支付多少金錢。丹史特(John Dunster)與麥林恩(Andrew McLean)自保險公司計算人類生命的價值推導出一值。黑格蘭(Hedgran)和林德報告關於人們願意支付的調查。

在 1972 年聯合國環境會議於斯德哥爾摩舉行。UNSCEAR 的一小組由加拿大籍代表巴耳特(Gordon Bulter)主其事提出一篇報告稱，環境劑量評估的方法也可用於一些非放射性的污染物。

在 ICRP 第 9 號出版物很重要的第 52 段建議，所有劑量應保持易於達成的低值，經濟與社會的影響應考慮進去，需要有進一步的導則。委員會因此指定一工作小組由美籍羅傑斯(Lester Rogers)主其事以提供建言。這工作小組發現防護的最適化水平可用微分代價

—利益分析中求出，而敘述於第 52 段的原則即為防護最適化的原則。這小組的報告於 1973 年出版為 ICRP 第 22 號出版物。

在 1973 年國際原子能總署召集一專家小組以研究首次被稱為「安全接受放射性物質的環境容量」。這很快就獲得協議，因其係反映舊的觀點，未考慮機率效應的危險度。這份報告的最後名稱係在 1978 年出版於 IAEA 安全叢書第 45 號「放射性物質釋入於環境中建立限度的原則」。這是一份注入數種新觀念的文件。除了應用 UNSCEAR 轉移係數與使用每單位實踐的劑量負擔及集體劑量負擔外，它還描述在各種放射性核種混合排放的情況下要符合的條件。

在 1974 年 UNSCEAR 祕書處從紐約遷移至維也納，其祕書勢拉(Francesco Sella)由班尼森(Dan Beninson)繼承。在那時間 ICRP 有了新的編輯組以修訂第 9 號出版物，主席為波金博士，其他成員包括班尼森、傑梅、林德、以及索比。這小組倡議數個重大的改變。拋棄「危急器官」的觀念。如今對於數個器官已感到有足夠的知識可計算加權的全身劑量。在雅哥比(Wolfgang Jacobi)的論著中已建議基於作如此加權的量，但在委員會的新建議只介紹加權的步驟而未提出新的量。這是在 1978 年的聲明，於當時引進有效等效劑量名詞。

新的報告於 1977 年出版後成為 ICRP 第 26 號出版物。有了許多新的觀念和建言。單位西弗取代侖目。引進輻射健康危害(detriment)的觀念並以防護最適化作為代價－利益評估的基礎。三個基本規則為：實踐的正當化、防護的最適化、以及個人劑量的限制化。術語劑量限度現在取代最高許可劑量在職業曝露亦同，但維持 1 年 50 mSv (5 rem) 的值。委員會長久以來爭論公眾成員個人的年劑量限度。如果保留仍為 5 mSv，但有強烈的意圖減至 1 mSv 的值。結果為了折衷而用模糊的文句維持 5 mSv，但如果實際的作劑量評估，不應超過終生年平均為 1 mSv。

廢棄了危急器官的觀念而用有效等效劑量於限制，所有的最大許可濃度值必須重新作計算。如不這樣作，恐怕國家的主管機關會猶豫地去接受第 26 號出版物及有效等效劑量。這是 ICRP 第 2 委員會繁重的工作，主席為溫納特 (Jack Vennart)，他的處境尷尬，他要到別的實驗室催促工作者，主要係在橡嶺，加緊為 ICRP 免費工作。結果為完整的 ICRP 第 30 號出版物「工作人員攝入放射性核種的限度」，共有三部分和一厚厚的補充資料。第 2 號出版物的修訂不但廢棄危急器官，還廢棄最大許可濃度作為二次限度的地位，而以年攝入限度(ALI)取代。

§14.9 西元 1978-1986 期間

在這一段期間，核能工業在許多國

家遭受到公開的反對，特別是在三哩島和車諾比爾這兩件事務之後。在 1979 年班尼森離開 UNSCEAR 的祕書處而由西利尼(Giovanni Silini)繼任。

瑞典的量測結果顯示，在某些建築物中含有很高濃度的氡。這不僅是由於建築材料中含有較多的鐳，而且氡也會由地面釋入於建築物裏面。於是他們指定了一個特別委員會以制定住宅中氡的行動基準。據瑞典的專家表示，其他的國家一旦採取全面的測量也會發現類似的問題。一直到 1977 年，UNSCEAR 的報告就一些危急器官的劑量提出評估。在 1982 年的報告，第一次對於氡的問題作全面的處理，也提供評估有效等效劑量。這事實明白表示室內氡的重要性，而由天然輻射源造成的年劑量突然由約為 1 mSv 增至 2 mSv。

在 1979 年 3 月 28 日三哩島核能電廠的二號機發生事故。雖然反應器遭受毀損，但只有很少量的放射性物質釋入於環境。這事故造成全球在核能受公眾接受的程度上，受到了很大的衝擊。也導致危險度和機率的觀念受到重視，在獨特的例子中，它們的意義就在一特定核反應器的情況表現出來。

美國國家科學院在 1980 年出版了 BEIR III，對於輻射的危險度有了新的評估。致癌危險度估計在 1977 年的 UNSCEAR 報告也提出，但卻未包含於其 1982 年委員會的報告。

在核能的辯論中，增加對核廢棄物的關注，特別是對長半衰期的核種如碘 129。在 1979 年經濟合作與發展組織 (OECD) 核能署任命一專家小組，由羅埃 (W.D. Rowe) 擔任主席。這專家小組回顧這問題並於 1980 年出版了他們的報告。這報告建議對於長半衰期核種造成的集體劑量進行評估，如果其計算是為了防護最適化的目的，只應考慮一萬年的期間。因為在較長的期間保留這些核種並不見得會有效。剩餘的劑量就所有的防護選擇均相同，不會影響最適化。

在 1980 年 ICRP 和 ICRU 成立了新的聯合工作小組，也由羅西任主席，成員包括班尼森、林德、羅西、辛克萊 (Warren Scinclair)、以及喂焦夫。這新的任務是回顧輻射防護的量，因為新近的放射生物發現指出，目前的輻射防護建議對於高直線能量轉移 (LET) 的輻射未能如同低 LET 的輻射提供相同程度的防護。這小組的報告就兩種防護的方法作區分如下。在限制化的方法中，不需要另作生物上的假定，除了在劑量限度上危險度為可接受的假定。在評估的方法中，假設一定量性的劑量－回應關係，便能於任何劑量水平可判斷其可接受性與使防護最適化。這小組建議增加中子的射質因數。「在輻射防護的射質因數」是於 1986 年出版，成為 ICRU 第 40 號報告。

ICRP 第 26 號出版物逐漸地為全世

界所接受，由另一國際組織國際原子能總署形成據以修訂其基本安全標準的基礎。在 1981 年中國大陸和日本邀請 ICRP 前往討論高接受度的輻射防護政策。

建築物中氡的高曝露清楚地指出，由天然輻射造成的劑量不可能從輻射防護考慮中排除。在稍早自然背景是被忽略的，部分認為它是相當恆定但最主要的是因為假定它是不可控制的。現在當發現曝露於室內氡的變化為數個數量級而且不難於控制，必須提供一些導則。第一個建議係於 1983 年隨 ICRP 第 39 號出版物而來「限制公眾曝露於天然輻射源的原則」。它用了上界 (upper bound) 的觀念，從前係 IAEA 為著其他目的而引進的。對於曝露於住宅射源相關的上界作了建議，但與 ICRP 的劑量限度無關，因該限度從未意圖包括來自天然射源的劑量。

防護最適化的程序涉及單位集體劑量的成本。由含義看來，也意味著挽救一個人的生命 (具統計上的意義) 所支付的金額總數，定為 $A = \alpha / r$ ，此處 α 表示去除單位集體劑量的適當金額， r 為單位劑量可歸因的死亡機率。當準備基本安全標準時，這含義導致從倫理觀點的關切，梵諦岡質疑「設定一個人生命的價格」的倫理正當化。由於這個原因，在教宗科學院召集了專家小組開會，其報告的結論稱，改進低於劑量限度的防護以挽救可能為最多人的生命並非無倫理的。為了挽救生命

的目的而造成金錢的分配涉及倫理的問題，而非使用金錢最適化的方法。

在 1983 年於西雅圖舉行的國際原子能總署會議期間與稍晚的 ICRP 第 46 號出版物「固體放射性廢棄物的處置的輻射防護原則」討論到高放射性廢料最終處置的防護策略。在 1984 年國際原子能總署開始「RAPAT」任務的實踐，即輻射防護諮詢團訪問願邀請的國家，並對邀請國的輻射防護組織提出建議。第一隊由班尼森、林德、以及索比組成，於 1984 年 11 月訪問中國大陸。1985 年班尼森繼林德擔任 ICRP 的主席，不久索比由長時期擔任祕書的崗位退休。國際原子能總署設立了新的諮詢小組，修訂限制放射性流出物排放至環境的原則，即更新安全叢書第 45 號，而修訂後的文件即為安全叢書第 77 號，於 1986 年出版。國際原子能總署另一諮詢小組準備安全叢書 67 號「於穿越邊界的輻射曝露指定值」，也在 1985 年出版。這份報告是基於以下的原則「對於防護國界外的人口由於放射性物質排放的策略和標準，至少於防護人口應如同在放射性物質的排放處具同樣的嚴格。」這意味著以代價－利益評估最適化的防護時，國界外單位集體劑量的價值必須與國界內的價值一樣地高。然而有一問題仍存在。在一個防護企圖心很低的國家，可能在它的國界外保持同樣低的水準。因此，這份報告建議在這種情況要用單位集體劑量最

小的價值。

1986 年 4 月 26 日發生車諾比爾事故，它導致全球性的放射性污染和公眾很大的關切。直到那時，緊急計畫是與核反應器周遭的地區有關，並未預期在較遠的地區和國家會有如此巨大的衝擊。匆匆忙忙地建立干預污染食品的行動基準，而且在國與國之間未作太多的協調。在這經驗之後，IAEA、ICRP、OECD/NEA、以及 WHO 共同出版了對於緊急計畫及補救行動的更新建議等報告，在 1986 年 8 月來自蘇聯的專家在 IAEA 安排的會議中，提出一份對於意外事故很開放又很安全的報告。各種國際諮詢團包括來自 IAEA 和 WHO 的小組，隨後訪問污染最嚴重的地區，並觀察其健康效應。IAEA 及 UNSCEAR，現在由班內得(Burton Bennett)接替西利尼(Giovanni Silini)擔任祕書的職務，在數據蒐集和評估方面互相合作。

§14.10 西元 1987 年迄今

在 1986 年以後的期間，車諾比爾事故的經驗有很大的影響。UNSCEAR 在 1988、1993、以及 1994 年均提出報告。

1987 年在巴西戈安尼亞(Goiania)市從醫用治療機中被偷的小丸內含銫 137，導致放射性物質廣泛地污染及許多人受到高劑量，最後有 4 人死亡。這悲劇事件促使加強努力以找出避免意外曝露的防護政策。

當 ICRP 於 1987 年在義大利北部柯莫(Como)與各小組委員會開會，決定設立新的編輯組草擬建議以取代 1977 年第 26 號出版物。這編輯組包括委員會的主席(班尼森)和副主席(傑梅)、祕書[現在為史密斯(Hylton Smith)]，小組委員會的主席[辛克萊、門荷(Charles Meinhold)、林尼厄基(Julian Liniecki)、以及丹史特]，克拉克(Roger Clarke)(他在 1989 年成為第 4 委員會的主席)，以及榮譽委會林德。丹史特接受起草正文的任務。

在建議書出版前，ICRP 在過去從未正式諮詢其他組織。考慮到委員會只有一位科學祕書要處理所有的聯繫，諮詢並非一件容易辦的事。然而，委員會的建議逐漸達到相當高的地位，而其建言越來越顯得重要，因此在出版新的建議時，這一次委員會舉行廣大的諮詢，涉及其他國際、國家、地區以及主管當局的組織。曾經收到成千的講評與建議，均由丹斯特與史密斯列入考慮。

新的建議與以前的建議不同之處在於所補充的附錄提供背景資料、參考文獻、以及建議的基礎。新的建議於 1990 年為委員會採用，而於 1991 年出版為 ICRP 第 60 號出版物。職業劑量在 5 年期間的平均由每年 50 mSv 降至 20 mSv。公眾曝露的限度一年為 1 mSv，但只要在 5 年期間的平均不超過 1 mSv，可有較高年曝露的可能性。

與以前的出版物相比較，ICRP 第

60 號出版物談到曝露於天然輻射源的地方較多，並明顯探討來自潛在曝露的危險度。它引進區分為實踐(引進時增加劑量)及干預(旨在減少劑量否則會發生)二類。在 ICRP 第 26 號出版物未出現的上界(upper bound)觀念如今也引進而稱為約束(constraint)。這建議以輻射加權因數， W_T ，取代以前的平均射質因數的許可近似值，而以較簡單的量「等價劑量」取代等效劑量，其定義為問題中器官的平均吸收劑量乘以輻射加權因數。有效劑量取代有效等效劑量，名稱的改變主要係組織加權因數指定給較多的器官。

在 1993 年，ICRP 第 65 號出版物「在住宅與工作場所防護氡 222」對於肺癌危險度估計與住宅行動基準以及在職業曝露的年劑量限度作建議。在同年英國國家放射防護委員會(NRPB)的主管克拉克接替班尼森為 ICRP 的主席，門荷為副主席。依序傑梅接替班尼森為第 4 委員會的主席。目前各分組委員會的主席為(1)辛克萊於生物效應，(2)高爾(Alexander Kaul)於二次限度，(3)傑梅於醫務防護，(4)班尼森於委員會建議的應用。目前主要的工作為公眾成員年齡別的劑量及探討潛在曝露機率性評估政策的方案。在 ICRP 之外，曾致力於糧農組織、國際原子能總署、國際勞工組織、經濟合作與發展組織/核能署、泛美衛生組織、世界衛生組織等機構準備基本安全標準，以及在歐洲共同

體的「指令歐洲標準」，以保護公眾與工作人員對付游離輻射的危險。

我國於這一段期間[民 80 年(1991)7 月 10 日]，由行政院公布第二版的游離輻射防護安全標準，內容與 ICRP 第 26 號出版物相似。自民國 87 年(1998)起又草擬輻射防護法，91 年 1 月完成立法。另根據部分 ICRP 第 60 號出版物的新防護安全標準，已於 91 年 9 月 12 日完成並通過審查。

參考文獻

1. B. Lindell, "The History of Radiation Protection," **Radiat Protect. Dosim.** **68**, 83-95 (1996)
2. R.L. Kathren and P.L. Ziemer (ed.), **Health Physics: A Backward Glance**, Pergamon Press, New York (1981)

第十五章 未來輻防的趨勢

§15.1 前言

國際放射防護委員會於 1990 年 11 月提出一項關於輻射防護的新建議，這項建議在 1991 年以 ICRP 第 60 號出版物(ICRP-60)發行，比各國當時採用的 ICRP-9 或 ICRP-26 建議更嚴謹，引起了輻射防護界相當程度的注意。

ICRP-60 出版之後將近 10 年，世界上主要的射防護相關組織暨先進國家均先後對這項新建議有熱烈回應，在公元 2000 年後，許多國家已陸續施行以 ICRP-60 建議為基礎的輻射防護法規。

§15.2 游離輻射防護法

本法已於民國 91 年(2002)1 月 4 日經立法院三讀通過，同年 1 月 31 日經總統公布，民國 92 年 2 月由行政院公布實施。其全文係列於本書末的附錄三，而其總說明則列於下。

我國於民國 44 年(1955)間與美國簽訂原子能和平用途的雙邊協定，隨後於國立清華大學設置教學用核子反應器一座，除進一步促進國內原子能科學的研究外，亦奠下放射性同位素在農

業、工業及醫療應用的發展基礎。有鑑於原子能的和平應用日漸蓬勃發展，更於民國 57 年頒布「原子能法」，制訂我國原子能的基本國策，並從法律面保障大眾健康。然自原子能法發布實施至民國 88 年已 31 年，國內原子能應用範圍隨著經濟成長而日益擴張，如三座核能電廠的設置，工、研、醫用放射性物質及可發生游離輻射設備使用日益廣泛，如何加強各項輻射作業的游離輻射防護管理工作，並確實要求經營者管制其放射性物質或可發生游離輻射設備，以提昇生活品質，增進人民福祉，追求國內經濟的永續發展，實有必要制定游離輻射防護法。藉著周延而配合時勢的法規，以保護輻射工作人員及公眾，防止其接受游離輻射的危害，從而使原子能的應用為眾人造就最大效益。

本法案的草擬，乃參考現行原子能法、原子能法修正草案(行政院核定本，民國 83 年)、國際放射防護委員會 1990 年提出的 ICRP-60 號出版物、國際原子能總署於 1996 年發行的 IAEA-115 與芬蘭的輻射法(Radiation Act, 1991)、英國的游離輻射法規(The Ionising Radiations Regulations, 1985)、

瑞士的放射防護法 (Radiological Protection Act, 1991) 及歐洲共同體公報 L-159 等國外法案，並依據輻射防護基本原則：輻射作業的正當性、防護措施的最適化與人員劑量應限制，制訂條文。

本法案共分 5 章，計 57 條，茲分述其重點如下：

1. 明定本法的立法目的、用詞定義、主管機關及不適用本法的規定。(第 1 條至第 4 條)
2. 明定游離輻射防護安全標準及放射性物質安全運送規則，揭示輻射防護實務上的標準。(第 5 條至第 6 條)
3. 明定經營者從事輻射作業，應訂定輻射防護計畫，實施輻射防護管理，確保輻射工作場所外輻射強度等應符合規定，實施輻射工作場所管制及環境輻射監測，接受檢查，採行緊急曝露及遭遇重大意外事故報告與處理的義務，以確實落實輻射防護作業。(第 7 條至第 13 條)
4. 明定人員從事輻射作業的年齡限制及防護，輻射工作人員劑量的監測、度量、紀錄、保存及輻射工作人員的體格檢查、健康檢查與特別醫務監護，以保護輻射工作人員健康。(第 14 條至第 16 條)。
5. 明定醫療機構於其使用的放射性物質、可發生游離輻射設備或相關設施，應實施醫療曝露品質保證工作，使接受醫療曝露的病患或志願協助

病患人員得到更好的安全防護，以提昇輻射在醫療上的效益。(第 17 條至第 18 條)

6. 明定主管機關應實施環境輻射監測並公告監測結果，於公私場所或商品所含輻射對大眾健康有影響之虞時得進行檢查或偵測，對建築材料或建築物得採取防範放射性污染的措施及限制商品添加放射性物質，以加強公共安全措施。(第 19 條至第 27 條)
7. 明定放射性物質、可發生游離輻射設備或其輻射作業應申請許可或登記備查，生產放射性物質或製造可發生游離輻射設備及其設施建造須經許可及人員操作放射性物質或可發生游離輻射設備須持有執照或經訓練。(第 28 條至第 30 條)
8. 明定許可證的有效期限與其換照及許可、許可證或登記備查記載事項的變更登記規定。(第 31 條至第 32 條)
9. 明定放射性物質、可發生游離輻射設備的停止使用或其生產製造設施停止生產製造須報請核准，永久停止使用或運轉及視同永久停止使用或運轉的處理。(第 33 條至第 35 條)
10. 明定核子原料、核子燃料或放射性廢棄物不適用第 3 章的規定。(第 36 條)
11. 明定違反本法所規定義務的懲處罰則。(第 37 條至第 49 條)
12. 明定主管機關得委託有關機構辦理事項、收取規費及訂定豁免管制標

- 準。(第 50 條至第 52 條)
13. 明定軍事機關的放射性物質、可發生游離輻射設備或其輻射作業，由主管機關會同國防部另定輻射防護及管制辦法作管理。(第 53 條)
14. 明定本法公布施行前已持照者的改善及補正。(第 54 條至第 55 條)
- 「游離輻射防護法」授權的法規

命令已經訂定。依本法授權訂定的法規命令如表 15.1 所示，以配合本法的公布施行。另上述「輻防法」第 23 至 25 條關於放射性污染鋼筋的法條正在修訂。

表 15.1 游離輻射防護法授權訂定的法規命令表

項次	法 規 名 稱
1	游離輻射防護法施行細則
2	游離輻射防護安全標準
3	放射性物質安全運送規則
4	輻射防護管理組織及輻射防護人員設置標準
5	人員輻射劑量評定機構認可及管理辦法
6	輻射防護人員管理辦法
7	嚴重污染環境輻射標準
8	商品輻射限量標準
9	放射性物質與可發生游離輻射設備及其輻射作業管理辦法
10	輻射防護服務相關業務管理辦法
11	輻射工作場所管理與場所外環境輻射監測作業準則
12	放射性物質或可發生游離輻射設備操作人員管理辦法
13	放射性物質生產設施運轉人員管理辦法
14	高強度輻射設施種類及運轉人員管理辦法
15	軍事機關輻射防護及管制辦法
16	輻射源豁免管制標準
17	游離輻射防護管制收費標準
18	放射性污染建築物事件防範及處理辦法

§15.3 防護體系的新趨勢

我國現行游離輻射防護安全標準係參考 ICRP-26，其所提出的「劑量限制體系」主要的設計是應用於正常操作。民國 92 年元旦即將開始實施的新游離輻射防護法所參考的 ICRP-60 則涵蓋更廣，包括：(1)建築物內氬氣的防護，(2)核子事故後緊急應變公眾的防

護，(3)固體廢棄物處置(曝露不一定會發生，且事件發生是機率性的，即潛在曝露)。

但目前現行的體系也造成一些困惑，例如：(1)輻射防護術語(terminology)的複雜，缺乏「簡單定義」的一致性，使公眾及決策者對輻射防護體系的信心下降，(2)集體劑量的評估成本效益使

用，將許多無限小的劑量對無限大人口經由地質的長時間累加起來，造成今日承諾以巨大的資源以防護未來世代而引起的爭議等。

總和，且經常被誤解，因為一個限值有時會被認為是安全與不安全的邊界。尤其是公眾的曝露，當室內氡氣行動基準被設定為 3 至 10 毫西弗／

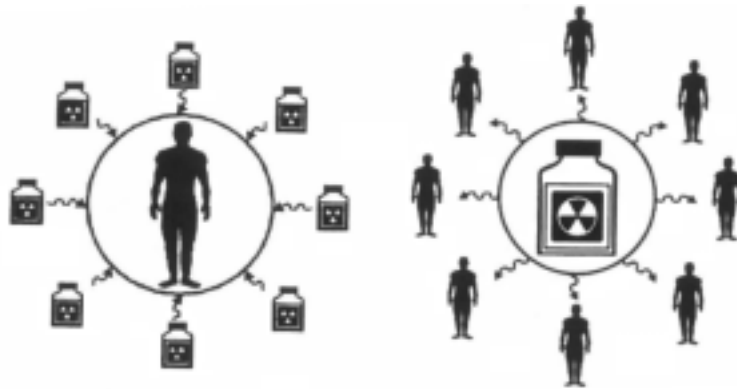


圖 15.1 受到許多射源照射的單個個人的個人相關防護(左圖)和受到單一射源照射的許多個人的射源相關防護(右圖)的概念說明

1. 防護體系的困惑

對射源的曝露限制稱為劑量約束，約束是個人相關(見圖 15.1)的準則，但應用於單一射源，以確保不會超過劑量或危險度限值，強化個人防護的考量。ICRP 現在建議的最大約束值為 0.3 毫西弗／年。對輻射作業的曝露限制稱為劑量限度，輻射作業的執行須考慮正常操作及潛在的意外事故曝露。當評估一幅射作業時，事故及緊急情況將視為潛在曝露的來源。若其發生時，可能須採行干預。干預一般不能應用在射源，而必須應用在環境或公眾。

ICRP 已釐清目前防護系統的輻射作業(增加劑量與危險度)與干預(抑減劑量與危險度)的不同。劑量限制應用於一組受限制的射源或環境的劑量

年，公眾的年劑量限值為 1 毫西弗就帶來一些困惑。發生意外事故時，當公眾期待有了好的防護時，劑量限制並未立即被應用，且也未採行干預，直到劑量可能在 5 至 50 毫西弗的範圍。

2. 未來曝露的控制

過去 ICRP 接受一個社會的倫理政策，使用以設施為基礎(utility-based)的準則，而使用集體劑量的加總，尤其是在成本效益分析的應用，以決定一個射源控制的最適化花費。現在發展的是一更以個人為基礎(individual-based)的倫理哲學，一個以公平為基礎(equity-based)的準則。基本原則是對曝露最高的個人健康危害的危險度若是可接受的，則總危險度也是可接受的，而與多少人受

到曝露沒有關係。

個人劑量的單一範圍是未來一個實際可行的方法，其建議值如表 15.2 說明。現行的防護體系，無論對輻射作業的職業曝露或干預的公眾

曝露，均在數十毫西弗時採取行動。很顯然劑量大於此水平者，僅為不可控制的意外事故，或是為了救命而需要採取緊急行動的醫療程序。

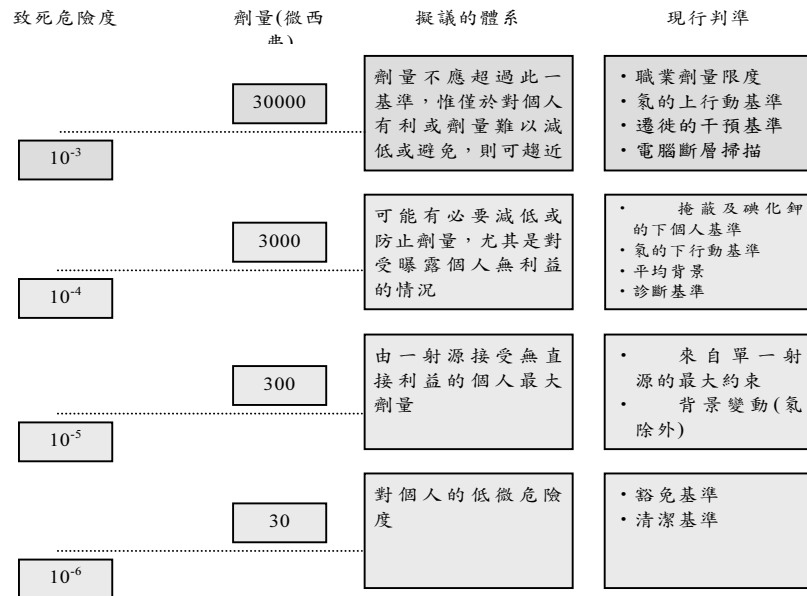


圖 15.2 柯拉克於 1999 年提出的可控制劑量示意圖

表 15.2 建議的個人劑量等級(individual dose scale)

程度	劑量(毫西弗)
嚴重(Serious)	30-300
高(High)	3-30
中(Moderate)	0.3-3
低(Low)	0.03-0.3
低微(Trivial)	< 0.03

表 15.1 係 ICRP 主席柯拉克(R. Clarke)於國際輻射防護協會第 10 屆大會(IRPA-10)提出的建議，會議地點為日本廣島。另以實際活動(endeavour)取代輻射作業 (practice)。此處 Endeavour 係取自探險澳洲的一艘船名「奮進號」。有一太空梭亦名奮進號。

稍早柯拉克於 1999 年提出可控制劑量(controllable dose)的概念如圖 15.2 所示。

3. 防護體系的新趨勢

合理抑低(as low as reasonably achievable, ALARA)與成本效益分析及集體劑量的使用有了密切的關

聯，而需要被個人劑量作為決定準則所取代。未來防護原則可能成為：(1) 控制最高曝露群體中最具代表成員的劑量，(2) 確保最終劑量是合理可行抑低 (as low as reasonably practicable, ALARP)。

防護體系的簡化與無法區別輻射作業與干預的困惑移除，且無

需再區分職業、公眾及醫療曝露；相同的指引可對各種分類的防護作相同的應用。對未出生胎兒的防護也涵蓋在數毫西弗調查基準的分數約束中，無需有公眾的 1 毫西弗／年的劑量限制存在。個人劑量控制的可能管制體系詳如表 15.3 說明。

表 15.3 個人劑量控制的可能管制系統

類別	量	有效劑量(毫西弗)
行動基準	既存的劑量(existing dose)	~30
調查基準	既存的劑量	~3
單一射源約束	附加的劑量(additional dose)	<0.3
豁免基準	附加的劑量	≤0.03

從表 15.3 中可看出無論是在工作中的輻射作業或是公眾的干預，採取行動基準為較天然背景值高約 10 倍。相同地，個別射源的管制值約為天然背景值的 1/10，豁免管制值設定為天然背景值的 1/100。

4. 未來的防護理念

使用輻射 100 年來，過去建議主要是針對其危害效應作防護，而不希望限制其效益。從 19 世紀末直至 20 世紀中葉，防護是考慮保持個人劑量低於確定效應的低限值。低劑量的輻射視為有益的，且大多數是含放射性的消費產品。從 1960-1990 年期間 ICRP 致力於處理機率性的危險度，此機率性的危險的危害機率正比於劑量。危險度的

可接受度成為問題點，因沒有低限值(即低於此值為零危險度)，這可接受度由 ALARA 來決定，而其方法係利用集體劑量來做成本效益分析，原則上其重點為社會的防護，惟個人也被適度地防護。

最近 10 年 ICRP 建議控制個人最大機率性危險度，此反映了從設施或社會為基礎的價值觀，轉向公平的或個人為基礎的政策，亦即更關心個人的福祉。目前線性無低限 (linear non-threshold, LNT) 模式的使用(預測低劑量的危險度)面臨挑戰，這似乎是對關切受污染廠址的除污費用及使用空間和時間無任何限制的集體劑量作回應。

未來 ICRP 將利用射源的可控制

性(controllability)概念，即個人為基礎的理念。這將使得防護機率及確定性兩種效應，可提供一個單一的防護基準。此優點類似其它管制非放射性污染物的方法，因除了可提供一完整政策的可能性外，也允許環境及人類以外物種對輻射危害的防護向前發展。

§15.4 ICRP 未來新建議芻議

被適當的主管機關視為正當化的輻射源，其輻射防護的原理為：

- 就每一輻射源，基本的防護標準係用於最受曝露的人們，因此也可保護社會——約束。
- 進一步的責任為減少劑量，當切實可行時，可達成高層次的防護。這是導致授權基準——最適化。

1. 防護系統基本概念

- (1)可控制射源(controllable source)：指本身或造成的曝露可以合理控制的射源。
- (2)可選擇射源(optional source)：指其存在及特性是由人為選擇所產生的可控制射源。
- (3)不可避免射源(unavoidable source)：指存在及特性與選擇無關的可控制射源。
- (4)防護行動基準(protection action level)：指採取防護行動的個人劑

量基準，取代現有的劑量限度、劑量約束、行動或干預基準。

2. 實際活動的正當性原則

- (1)實際活動(endeavour)：取代輻射作業(practice)一詞。
- (2)實際活動的正當性：指判斷引進實際活動或繼續進行一項實際活動是否正當的原則。
- (3)現行系統正當性原則的內涵：

- a. 利多於弊(do more good than harm)。
- b. 判斷原則：成本與效益的量化平衡。

(4)新系統適用對象

- a. 新建議僅適用於可控制射源或(及)可控制個人劑量的途徑。
- b. 原則上僅適用已被認定為正當的可選擇射源(justified optional sources)及不可避免射源的防護。

3. 防護行動基準

- (1)指特定的個人劑量基準，當劑量超過各該基準時，即要求採取一切可行步驟以降低劑量。此術語可能被廢止。
- (2)關切個人年有效劑量的區分(bands)
 - a. 以背景輻射的倍數及分率為指標。
 - b. 如表 15.4。

表 15.4 個人年有效劑量的關切區分

第十五章 未來輻防的趨勢

關切水平	有效劑量(mSv)
高(high)	> 100
升高(raised)	> 數 10 個
低(low)	1-10
很低(very low)	< 1
無(none)	< 0.01

註 1：全球年平均自然背景來自所有輻射源的有效劑量=2.4 mSv (UNSCEAR-2000 年)

註 2：ICRP-60 改變了劑量限度的定義：劑量限度為一邊界值，高於此值其結果的危險度視為不可接受的。

(3)新建議可能改變之處如表 15.5 所示。

表 15.5 新建議預期主要改變的簡要摘錄

議 題	現 行 建 議	新 建 議
線性	線性無低限(LNT)	澄清觀念及可用範圍，高於數 mSv/a (a=年)
有效劑量	是	是
輻射加權因數	ICRP-60	修訂質子和中子的值
組織加權因數	ICRP-60	新值是基於修訂危險度因數和簡化的基礎
標稱危險度因數	ICRP-60	總的癌致命數目相似，但個別器則改變，遺傳係用 UNSCEAR-2001 年
限度	ICRP-60 工作人員與公眾	併入修訂的約束值
約束值	見表 15.4	減少數目和複雜性
集體劑量	ICRP-60	解集並以加權矩陣取代
正當性	ICRP-60	保留並延伸至病人的曝露
最適化	ICRP-60	利益攸關者參與
豁免	ICRP-60	以「排除」取代
「個人」定義	ICRP-29	作新的考慮
輻射作業	ICRP-60	保留
干預	ICRP-60	併入約束值
環境(非人類)	ICRP-60 假定可保護	清楚講明
天然輻射源	只論氡 222	全盤處理

註：LNT = linear non-threshold

利益攸關者 = stakeholder

UNSCEAR = United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 聯合國原子輻射效應科學委員會

解集 = disaggregation

個人 = individual

排除 = exclusion

4. 防護最適化

- (1)最適化的意義：採取所有合理行動以降低曝露的過程。
- (2)合理抑低(ALARA)修正為合理可行抑低(ALARP)。適用於剩餘劑量，即預期劑量減去可避免劑量。

(3)ALARP 適用個人及群體。

(4)最適化要求，選擇的判斷不依據集體劑量。

(5)集體劑量概念的修正

- a. 群體劑量(group dose)——接受特定劑量及時間間隔的群體的

總劑量。

- b. 整體工作人員劑量(workforce dose)——適用於職業曝露的群體劑量。

§15.5 結語

質，可直接分泌進入血液，在身體遠端部位發揮特定的效應。1997 年美國環保署定義為：「內分泌分裂者為一外生劑，會干擾生產、釋出、體內運送、結合、功能或分解體內擔負維持體內環境的恆定(homeostasis)以及調節發育和生殖的過

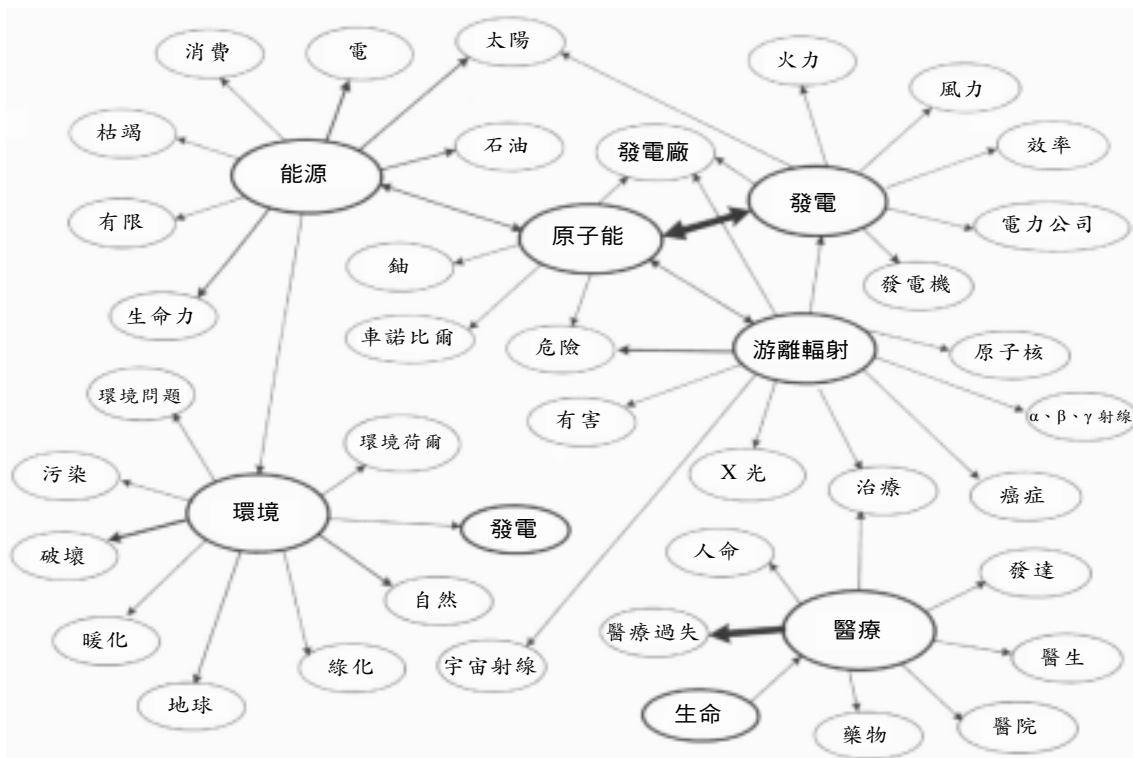


圖 15.3 游離輻射和發電、能源、環境三者的關係 (資料來源：本章參考文獻 6)

游離輻射的相關科技以及涉及非科技部分的範圍很廣，因此，輻射防護的範疇也很廣。為方便說明起見，特以圖解的方式作說明，如圖 15.3 所示。圖中係闡述游離輻射和發電、能源、環境三者的關係，且以最普遍且為眾所熟知的項目列明。另第十章工業應用尚未包括在內。註：環境賀爾蒙(environmental hormone) 舊稱內分泌分裂者(endocrine disruptor)。賀爾蒙係指由內分泌腺產生的化學物

程。」因此，它是一種有害劑，會擾亂了我們的分泌的功能以及對我們的後裔有不良的影響。內分泌為賀爾蒙促成生殖、發育、成長、以及行動的舞台，故不稱為內分泌分裂者而改稱為環境賀爾蒙。苯環(benzene ring)即為環境賀爾蒙的一種。環境中常見的殺蟲劑及除草劑，如兩者結合起來，其總效應要比個別的效應高 1000 倍，可能導致有害於內分泌系統。

由圖 15.3 和第十章的內容，不難

想像輻射防護是一種專門知識和職業，範圍廣而分支多，極具挑戰性。主導輻射防護未來的發展，學術研究仍是最堅實的基石。自民國 44 年(1955)成立原子能委員會開始計起，在過去 48 年，臺灣的輻射應用與防護從萌芽至今日的蓬勃發展，是產、官、學各界密切合作和共同努力的結果。今後更應在學術研究上深耕，使輻射防護成爲年青人嚮往的事業。

ICRP 把現行近 30 種不同情況下的劑量限值簡化爲 4 種，且把重點放在輻射源而非來自所有輻射源的劑量限值。新的標準劑量約束值是來自單一輻射源所能耐受的劑量基準，因此，ICRP 建議：

一般人的劑量約束值是 1 mSv/a，
工作人員或居家的氡的劑量約束
值是 20 mSv/a，

排除基準爲 0.01 mSv/a，

終生劑量達 500 mSv 爲疏散的干
預基準。

一般人的劑量約束值 1 mSv 具特別的意義，它也是劑量限度。稍早的建議爲來自單一輻射源的劑量約束值爲小於 0.3 mSv。這兩者的差異對於公眾曝露於核能工業的營運沒有太大的影響，但是對於除役的廠址就具有不同的意義。它代表清理工作可以更實事求是，不必花費昂貴的代價去清除低微水平的放射性核種。

參考文獻

1. International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, **Annals of the ICRP 21 (1-3) 1**, (1991)
2. National Council on Radiation Protection and Measurements, **Limitation of Exposure to Ionizing Radiation**, NCRP Report 116, Bethesda (1993)
3. International Atomic Energy Agency, **International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and the Safety of Radiation Sources**, IAEA Safety Series No.115, Vienna (1996)
4. R.H. Clarke, "Control of Low-level Radiation Exposure: Time for a Change?" **J. Radiol. Prot. 19(2) 1**, (1999)
5. 魯經邦 葉偉文 翁寶山 ICRP-60 與游離輻射防護安全標準發展趨勢 **核研季刊 42**, 62-78 (2002)
6. I. Urabe, "Some Consideration on the Relevance Concepts Based on the Probability Distribution of Words Reminded by Stimulus Terms Concerning Atomic Energy and Radiation Utilization," **Jpn. J. Health Phys. 37**, 128-135 (2002)

7. R. H. Clarke, “Radiological Protection at the Start of the 21st Century: A Progress Report,” **Japanese Journal of Health Physics** **37**, 56-58 (2002)
8. I. Urabe, “Some Consideration on the Relevance Concepts Based on the Probability Distribution of Words Reminded by Stimulus Terms Concerning Atomic Energy and Radiation Utilization,” **Japanese Journal of Health Physics** **37**, 128-135 (2002)
9. R. Clarke, “The Evolution of the System of Radiological Protection: the Justification for New ICRP Recommendations,” **J. Radislo Prot.** **23**, 129-142 (2003)

附錄一 臺灣輻射工作人員的劑量統計

§A1 前言

截至民國 89 年(2000)統計為止我國輻射工作的人數已接近有 3 萬人，每年平均增加比率為 5.5%。依據「游離輻射防護安全標準」第 31 條的規定，於甲種狀況下的工作人員均應實施個別人員劑量偵測。有關工作人員劑量的偵測，佩帶人員劑量計為一適當的偵測方法，目前輻射工作人員劑量評定機關(構)共有 8 個，分別為行政院原子能委員會核能研究所、國立清華大學原子科學技術發展中心、臺灣電力公司放射試驗室(室本部、核二分隊及核三工作隊)、行政院同步輻射研究中心、財團法人中華民國輻射防護協會、以及貝克西弗公司等，分別儲存了各自所服務的人員劑量資料。為能掌控國內輻射工作人員與劑量資料，達到輻射安全管制的目標，行政院原子能委員會乃指定核能研究所建立全國輻射工作人員劑量資料庫中心(簡稱劑量中心)，進行彙整與統計分析我國輻射工作人員與劑量等資料。各劑量評定機關(構)定期將劑量資料包括：佩章使用單位、佩章使用人員資料、體外、

中子、以及肢端等劑量資料送至劑量中心，經確認後匯入劑量資料庫中，以建立全國劑量資料的統計年報。以上措施除能配合輻防安全管制作業外，也能達到「游離輻射防護法」規定，建立劑量資料庫中心。

§A2 專有名詞

1. 年集體有效劑量 S

$$S = \sum_{i=1}^N E_i \quad (A1)$$

式中 E_i 是第 i 個工作人員接受的年有效劑量， N 是工作人員的總人數。註： E 是在一年中由體外照射劑量加上由攝入的約定劑量。在實用上， S 是經由整理過的劑量區間計算而得，故可表為另一形式如下：

$$S = \sum_{j=1}^r N_j E_j \quad (A2)$$

式中 r 是有效劑量的區間數， N_j 是有效劑量區間內的人數，其平均年有效劑量為 E_j 。UNSCEAR(英文全名見 §A3)早期報告係用 M 而非 S ，年齡取自 18 歲至 69 歲。

$$E = \frac{S}{N} \quad (A3)$$

2. 人數分布比(number distribution ratio, NR)

$$NR_E = \frac{N(> E)}{N} \quad (A4)$$

式中 $N(>E)$ 是工作人員接受年劑量超過 E mSv 的人數。由於 N 的界定不明確，是指受監測(monitored)或受曝露(exposed)者，會導致誤解。UNSCEAR 建議採用 SR， E 則取 1、2.5、5、10、15、20 mSv。

3. 年集體劑量分布比(annual collective dose distribution ratio, SR)

$$SR = \frac{S(> E)}{S} \quad (A5)$$

式中 $S(>E)$ 是年集體有效劑量中個人年劑量超過 E mSv 者。UNSCEAR 早期報告係用 MR 而非 SR。 E 則取 1、2.5、5、10、15、20 mSv。

§A3 輻射工作類別

依據聯合國原子輻射效應科學委員會(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)的輻射工作別分類為：核子燃料循環、醫用、工業用、天然輻射源、其他等 5 類。然而，細部類別為：反應器運轉、核燃料循環研究、放射診斷、放射牙科、核子醫學、放射治療、所有其他醫學應用、工業照射、工業放射照相、發光應用、放射性同位素製造、測井、加速器運轉、所有其他工業應用、

民用飛行、石油與天然氣工業、教育機構、獸醫、其他等 19 類。

行政院原子能委員會發布的「輻射工作人員體外劑量評定技術規範」則分為：研究用類、醫用類、非醫用類、以及核能電廠類等 4 類。細部類別為：政府單位、學術單位、研究應用、放射治療、放射診斷、核子醫學、非破壞檢測、消費品、其他非醫用類、以及核能電廠的運轉、維護、保健物理、化學、一般輻射、其他核能電廠與臨時工等 16 類。

§A4 統計分析的結果

臺灣輻射工作人數每年平均約 25000 人，且逐年有增加的趨勢，增加主要來自醫用及非醫用工作別的輻射工作人員，西元 2000 年較 1999 年增加約 2000 人。每年人員劑量徽章平均使用數量約 226,000 枚，逐年亦有增加的趨勢。2000 年較 1999 年增加約 14000 枚，有劑量值人數從 1995 至 2000 年比例則逐年降低。每年總集體劑量值平均 14.06 人·西弗，主要的劑量值來源為非醫用類、核燃料循環類及工業用類。有劑量值人員的平均劑量隨年集體劑量而變動，從 1995 至 1998 年有降低趨勢，從 1998 至 1999 年則上升 23%，而 1999 至 2000 年則下降 13%。平均劑量經對數轉換後評估歷年之間是否有統計上顯著的差異，只有在 1995 與 1996 年及 1998

與 1999 年間有差異，如圖 A1 所示。此處的平均值是經由對數轉換，以使有劑

量值的劑量分布成近似常態分布，應用統計 t 檢定分析。

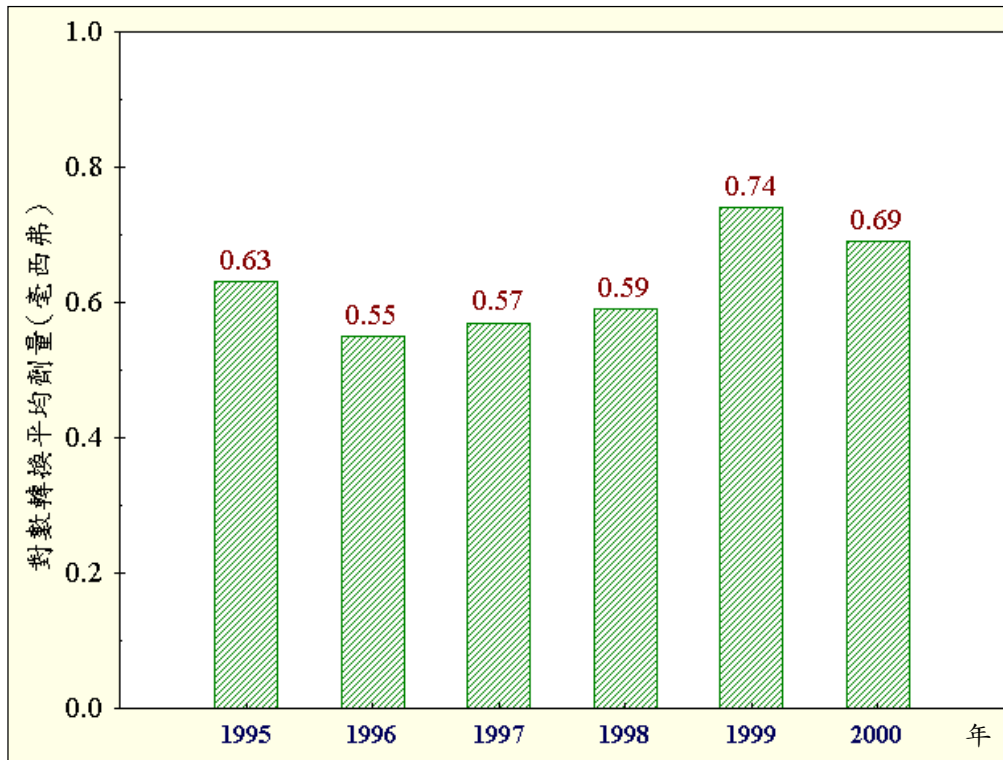


圖 A1 對數轉換平均劑量值的統計 t-檢定

表 A1 及表 A2 為歷年 16 個劑量區間人數與集體劑量的分布情形。從 1995 至 2000 年，在小於最低可測值部分逐年增加，這可歸於佩章使用人數也逐年增加。它們的分布係在 75%至 81%之間，而其他區間歷年分布大致相近。使用科拉斯格爾－華力士(Kruskal-Wallis)無母數統計檢定得知歷年的劑量分布是有少許差異，但無顯著的趨勢。註：科拉斯格爾－華力士檢定法是科拉斯格爾和華力士於 1952 年提出用來檢定 k 個不同的獨立樣本是否來自同一母體的檢定法。所有樣本的數值依大小排列，虛無假設為樣本來自同一母體，其

對立假設則否。

圖 A2、圖 A3 為 SR 值、NR 值分布結果，得知在高劑量區間之累積劑量相對減少，歷年分布趨勢相近。圖 A4 為輻射工作人員個人年劑量大於法規限值 50 毫西弗的人數統計結果，在 1995、1996 及 1998 年為 1 位，在 1999 及 2000 年均為 2 位，而在 1997 為 0 位。輻射工作人員個人年劑量大於 20 毫西弗的人數歷年分布在 91 至 161 位之間。

參考文獻

1. 陳德照 翁寶山 職業性體外曝露的分析 核子科學 21, 27-32 (1984)

2. P.S.Weng and T.C.Chen, "Occupational Radiation Exposure in Taiwan, 1962-1983," **Health Physics** **48**, 411-418 (1985)

3. 謝錦隆 全國輻射工作人員劑量資料之調查與統計分析 核能研究所執行原能會(90)會輻字第 1894 號報告, 桃園龍潭(2002)

表 A1 各劑量區間偵測人數與平均劑量(1995 至 2000 年)

各劑量區間 (毫西弗)*	1995 年		1996 年		1997 年		1998 年		1999 年		2000 年	
	人數	百分率%	人數	百分率%	人數	百分率%	人數	百分率%	人數	百分率%	人數	百分率%
小於最低可測值(LLD)	16557	74.93	18284	76.02	20661	80.28	21542	81.24	21351	79.98	23293	80.73
劑量值≤1	3285	14.87	3652	15.18	3133	12.17	3031	11.43	2985	11.18	3298	11.43
1-2.5	858	3.88	813	3.38	823	3.20	790	2.98	888	3.33	891	3.09
2.5-5	537	2.43	517	2.15	429	1.67	496	1.87	567	2.12	549	1.90
5-7.5	286	1.29	255	1.06	221	0.86	196	0.74	306	1.15	272	0.94
7.5-10	145	0.66	154	0.64	134	0.52	135	0.51	160	0.60	191	0.66
10-15	186	0.84	132	0.55	165	0.64	148	0.56	222	0.83	169	0.59
15-20	97	0.44	85	0.35	80	0.31	71	0.27	91	0.34	90	0.31
20-25	60	0.27	63	0.26	38	0.15	40	0.15	51	0.19	47	0.16
25-30	35	0.16	49	0.20	23	0.09	23	0.09	34	0.13	26	0.09
30-35	24	0.11	24	0.10	19	0.07	26	0.10	19	0.07	15	0.05
35-40	17	0.08	13	0.05	7	0.03	13	0.05	11	0.04	8	0.03
40-45	6	0.03	10	0.04	3	0.01	6	0.02	4	0.01	3	0.01
45-50	3	0.01	1	0.00	1	0.00	0	0.00	3	0.01	0	0.00
50-100	1	0.00	1	0.00	0	0.00	1	0.00	1	0.00	2	0.01
>100	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	0.00	0	0.00
總偵測人數	22097		24053		25737		26518		26694		28854	
有劑量值人數	5540	25.07	5769	23.98	5076	19.72	4976	18.76	5343	20.02	5561	19.27
總集體劑量(人西弗)	15.38096		14.65146		12.12737		12.48639		15.59198		14.11856	
平均劑量 (毫西弗)	0.70		0.61		0.47		0.47		0.58		0.49	
(有劑量值人數)	2.78		2.54		2.39		2.51		2.92		2.54	

*「劑量區間」定義：大於最小區間值，小於等於最大區間值；例如『1-2.5』表示劑量值大於 1 毫西弗，小於或等於 2.5 毫西弗。
(註)劑量值已包含部分使用中子佩章的劑量。

表 A2 各劑量區的集體劑量(1995 至 1999 年)

各劑量區間 (毫西弗)*	1995 年		1996 年		1997 年		1998 年		1999 年		2000 年	
	集體劑量	百分率%	集體劑量	百分率%	集體劑量	百分率%	集體劑量	百分率%	集體劑量	百分率%	集體劑量	百分率%
小於最低可測值(LLD)	0.00000	0.00	0.00000	0.00	0.00000	0.00	0.00000	0.00	0.00000	0.00	0.00000	0.00
劑量值≤1	0.92104	5.99	1.00598	6.87	0.87717	7.23	0.89542	7.17	0.92875	5.96	1.01187	6.49
1-2.5	1.39437	9.07	1.30862	8.93	1.32150	10.90	1.26887	10.16	1.44515	9.27	1.47061	9.43
2.5-5	1.94872	12.67	1.82723	12.47	1.52000	12.53	1.77007	14.18	2.05599	13.19	1.95885	12.56
5-7.5	1.75453	11.41	1.56462	10.68	1.34330	11.08	1.19066	9.54	1.88263	12.07	1.69295	10.86
7.5-10	1.22458	7.96	1.35559	9.25	1.15414	9.52	1.17094	9.38	1.38883	8.91	1.64312	10.54
10-15	2.28575	14.86	1.60850	10.98	2.00442	16.53	1.81033	14.50	2.71291	17.40	2.03879	13.08
15-20	1.71517	11.15	1.47259	10.05	1.39867	11.53	1.23656	9.90	1.54880	9.93	1.51291	9.70
20-25	1.32474	8.61	1.39571	9.53	0.85117	7.02	0.89316	7.15	1.13045	7.25	1.05287	6.75
25-30	0.95219	6.19	1.34201	9.16	0.62301	5.14	0.63038	5.05	0.93647	6.01	0.70887	4.55
30-35	0.77064	5.01	0.77381	5.28	0.60803	5.01	0.84891	6.80	0.60564	3.88	0.47669	3.06
35-40	0.63852	4.15	0.48308	3.30	0.25599	2.11	0.47223	3.78	0.40377	2.59	0.29736	1.91
40-45	0.25522	1.66	0.41593	2.84	0.12217	1.01	0.24296	1.95	0.16741	1.07	0.13134	0.84
45-50	0.14295	0.93	0.04595	0.31	0.04780	0.39	0.00000	0.00	0.14185	0.91	0.00000	0.00
50-100	0.05254	0.34	0.05184	0.35	0.00000	0.00	0.05590	0.45	0.05298	0.34	0.12233	0.78
>100	0.00000	0.00	0.00000	0.00	0.00000	0.00	0.00000	0.00	0.19035	1.22	0.00000	0.00
總集體劑量(人西弗)	15.38096		14.65146		12.12737		12.48639		15.59198		14.11856	

*「劑量區間」定義：大於最小區間值，小於等於最大區間值；例如『1-2.5』表示劑量值大於 1 毫西弗，小於或等於 2.5 毫西弗。
(註)劑量值已包含部分使用中子佩章的劑量。

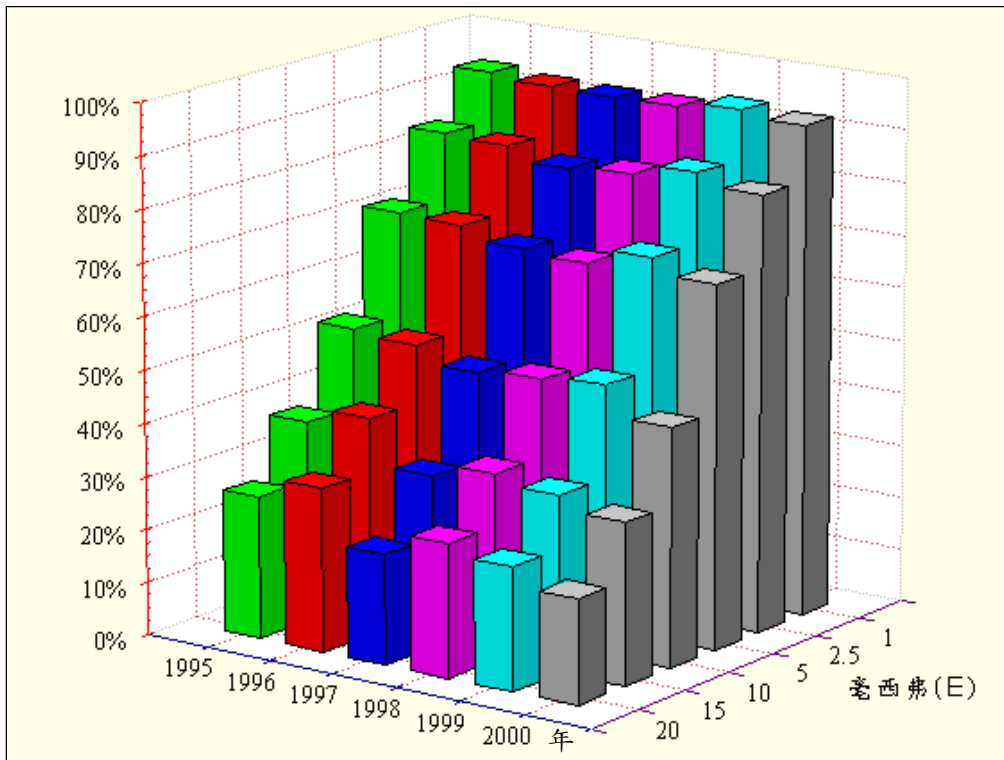


圖 A2 輻射工作人員 SR_E 值分布

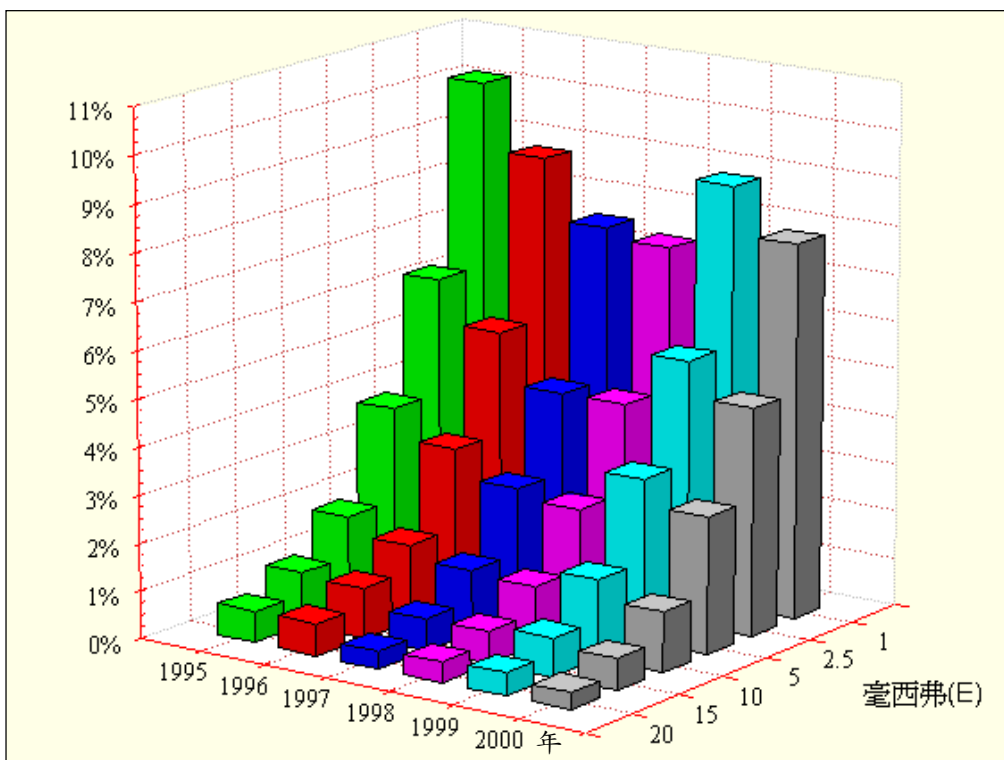


圖 A3 輻射工作人員 NR_E 值分布

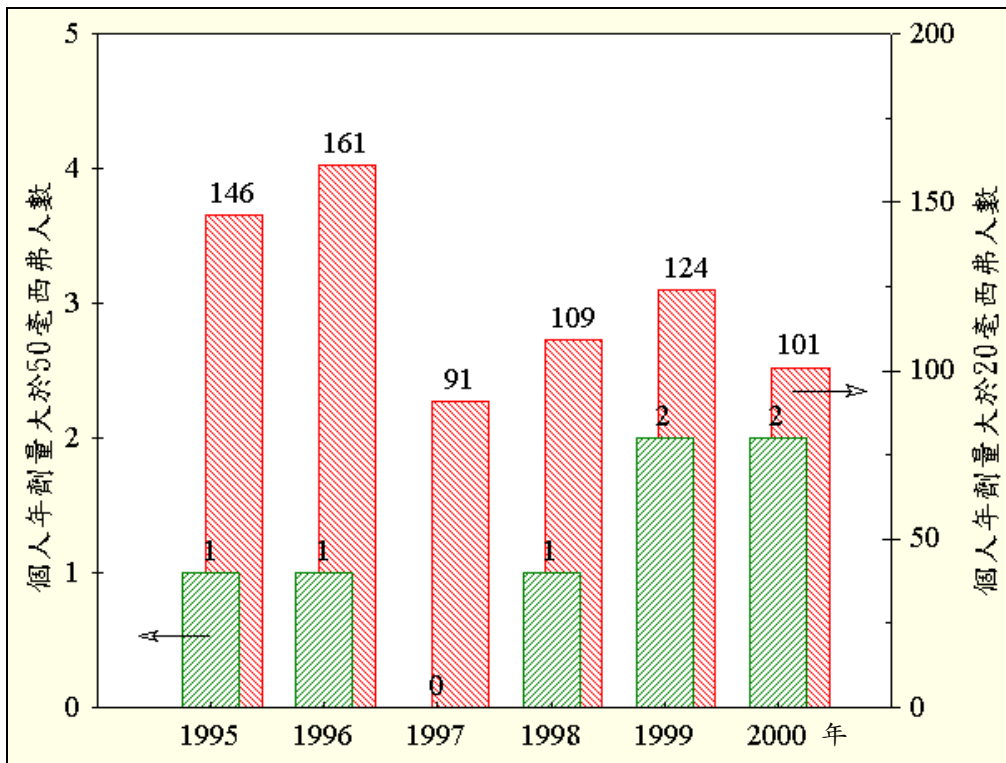


圖 A4 個人年劑量大於 50 及 20 毫西弗的人數

附錄二 氡問題的簡史

§B1 前言

氡問題的歷史根源可追溯到 15 世紀，雖然在臺灣尚未發現礦山和住宅內氡的問題，但它畢竟是歷史上最早的體內曝露問題，應可從這歷史中吸取教訓。

§B2 肺疾病

大約於 1470 年在 Erzgebirge (Ore Mountains) 北坡德國薩克森(Saxony)的一個小城斯尼伯格(Schneeberg)地區開始大規模開採銀礦。大約於同時，在此山脈之南的波希米亞(Bohemia)一側的契審斯達[Joachimstal, 現在的亞希莫夫(Jachymov)]地區也開採銀。德國人 Georg Bauer (1494-1555)的拉丁名字亞戈里可拉(Agricola)描述並說明了 16 世紀初在這兩個地區所採用的開採技術，他被稱為礦物學奠基人。他的名著「金屬礦物的本質(De Re Metallica)」由美國採礦工程師胡佛(Herbert C. Hoover)夫婦從拉丁文譯成英文。胡佛後來成為美國第 31 任總統。亞戈里可拉指出，在亞希莫夫銀礦的開採位於地表或近於地表，而在斯尼柏格已在較深

處開採礦石，某些礦井深度約達 400 公尺。亞戈里可拉於 1527-1533 年作為一位醫生在契審斯達工作。

16 世紀初在斯尼伯格地區的礦工中觀察到較年輕的工人肺疾病死亡率罕見的高。第一份報告來自巴拉色沙斯(Paracelsus, 1493-1541)的「關於 Bergsucht 及其他礦工疾病」一書，而 Bergsucht 一詞是在礦工中所觀察到的肺疾病的總稱。巴拉色沙斯於 1537 年寫完這本書，但在其死後才出版。

這種肺疾病——後來稱為斯尼伯格肺疾病(Schneeberger Lungenkrankheit)——的發生率在 17 和 18 世紀增加，當時正加緊開採銀、鈷和銅。該疾病最後被 Haerting 和 Hesse 二人(1879)確認為肺癌。最初，假定該疾病為淋巴肉瘤，發生於支氣管淋巴結處，而稍晚些時候被歸類為支氣管癌。Haerting 和 Hesse 指出，大約在此時，斯尼伯格地區 75%的礦工死於肺癌；現有的報告表明，在契審斯達礦工中該百分數可能低些。

§B3 病因探討

巴拉色沙斯把「斯尼伯格肺疾病」

稱為 Mala Metallorum，假定肺癌是由吸入的含各種金屬的礦塵引起的。認為促癌因子包括結核病及礦塵砷的存在。

1898 年，居里夫婦從亞希莫夫礦石中提出鐳(^{226}Ra)和釷(^{210}Po)，所謂鐳射氣，後來稱為氡(^{222}Rn)，被確認為鐳衰變產生的放射性惰性氣體。從 Elster 和 Geitel 二人進行的首次氡測量開始，接著觀察到斯尼伯格和亞希莫夫礦下空氣中氡濃度很高。於 20 世紀初報導了鐳輻射的 X 射線引起的第一批癌症，尤其是皮膚癌。

根據這些研究結果，假定了肺癌與這些礦中高氡含量之間的關係，Schuttman (1988)認為薩克森的茨維考 (Zwickau, Saxony) 礦礦長 H.E.Müller，是識別出該病因聯繫的第一人。H.E.Müller 得出結論，斯尼伯格肺癌是一種特殊的職業病，由這些礦中的礦石鐳含量及空氣中高氡含量所引起，吸入後這些物質在肺氣道中引起致癌過程。

20 世紀 20 年代，在斯尼伯格和亞希莫夫礦中進行的較準確的氡測量支持了這一假說。然而，氡的作用被看作是斯尼伯格肺癌的病因並沒有普遍被接受。在 1926 年發表的德國德勒斯頓 (Dresden) 市的病理學家小組的匯總報告中，所闡述的看法是，這類癌可能是由吸入有毒礦塵引起的，後來 Lorenz (1944)認為，砷和其他礦中污染物以及礦工健康狀況不良是主要原因。

由美因 (Main) 河畔法蘭克福 (Frankfurt) 的 Kaiser-Wilhelm 生物物理研究所(後來的 Max-Planck 研究所)中的 B. Rajewsky，於 1936 年開始的德國的一個研究項目進一步闡明了氡濃度與肺癌之間的關係。這個綜合性的研究包括，斯尼伯格附近礦中氡測量，組織樣品中 α 活度測量，以及死於肺癌的礦工肺組織的組織病理學分析。那時，在斯尼伯格大多數礦中平均氡濃度範圍為 70-120 kBq m^{-3} ，而在一個礦中觀察到，其平均值約為 500 kBq m^{-3} 。已知這個礦的大多數工人死於肺癌，該礦被稱為「死亡礦」。根據這些觀察結果及有力的生物學研究得出結論，在斯尼伯格的礦中，吸入氡必定是斯尼伯格地區礦工中肺癌發生率高的可能原因。

下面概述 1945 年該領域的知識範圍，從斯尼伯格和亞希莫夫所獲得的數據中不能給出氡曝露量與肺癌之間關係的定量估計。此外，尚未認識到吸入短壽命氡子核可能起到的作用。

§B4 鈾礦開採及氡子核作用

20 世紀 40 年代為軍用目的開始大規模開採和加工鈾，當時主要來源是比屬剛果(Congo)，現在的薩伊(Zaire)又稱查日、加拿大及美國科羅拉多的鈾礦床。1946 年，在蘇聯政府指揮下，於東德斯尼伯格的奧厄(Aue)舊開採區開始加緊開採鈾。繼在亞希莫夫開始鐳的生產以後，於 1948 年在波希米亞開始

鈾的開採。同時，在法國開始開採鈾。

在鈾礦開採的早期，很少注意工作人員的輻射防護問題。當時認為，在這些新礦中的氡水平比在 Ore 山脈老礦中的低得多，在此期間只報導了少數幾個氡測量結果。在美國科羅拉多 (Colorado) 礦中，1950 年前未取過氡樣品，在東德鈾礦中，只在 1955 年以後才有氡的數據。

在此期間，劑量學研究及吸入氡可能產生效應的放射生物學研究正在繼續，然而，僅用氡氣吸入來解釋肺癌發生的所有嘗試均宣告失敗，直到美國羅徹斯特 (Rochester) 的 William F. Bale (1951) 提出關於氡衰變產物可能是致病因素的想法。John Harley (1953) 用測量結果證實了空氣中存在高濃度氡衰變產物。Bale 在其備忘錄中指出：在這些及其他過去與氡有關的危害評估中，看來幾乎完全忽略了一個極其重要的事實，即在有氡存在的大多數條件下空氣中氡衰變產物產生的輻射劑量。可以想像，該劑量可能遠超過氡氣本身及在支氣管內的氡形成的衰變產物所產生的輻射劑量。

在其後的年代裏，在羅徹斯特大學及美因河畔法蘭克福 Max-Planck 生物物理研究所中，完成了有關吸入的氡和鈾射氣衰變產物在肺中沉積和滯留的實驗研究。這些研究結果可給出吸入氡衰變產物所致支氣管上皮平均 α 劑量的定量估計。還提出了沿支氣管通道活

度和劑量分布評估的肺劑量學模型。從這些不同的研究中得出結論，預計呼吸道段支氣管靶細胞的 α 劑量最大，吸入短壽命氡衰變產物——現在稱為氡子核——的肺劑量學仍是一個重要的並有爭論的研究領域。

由於這些研究結果，接著提出更為可靠的礦下氡子核監測方法。在美國，提出了空氣中氡子核 α 潛能濃度的概念，即所謂的「WL 概念」，實踐經驗進一步證實，這一簡化的概念對於監測及評估礦工氡子核曝露量都是合適的。

約在同時，美國公共衛生局職業衛生處完成一項於科羅拉多鈾礦工健康狀況及其與輻射曝露關係的研究，初步結果表明，在這些礦工中肺癌顯著增加。1967 年美國國會原子能聯合委員會 (Joint Committee on Atomic Energy of the Congress) 聽取意見以後，美國聯邦研究委員會 (Federal Research Council, FRC) 通過了鈾礦開採輻射災害控制修改導則。

Lundin 等人 (1971) 發表了 1950-1967 年間美國鈾礦工隊列 (cohort) 研究的第一份定量分析報告。一年以後，報導了有關捷克斯洛伐克鈾礦工的相似研究結果。這兩份研究結果得出結論，肺癌危險度 (risk) 隨氡子核累積曝露量呈單一性增加，而劑量-回應關係的斜率對於捷克礦工要高得多，此後追蹤訪問調查了其他幾個鈾礦工的隊列。ICRP 第 65 號出版物中，匯總了現有最新的有

關追蹤約 30,000 鈾礦工的所有研究結果。

將這些研究結果平均，得出的肺癌超額相對危險度大約為 3。值得注意的是，這一超額危險度明顯地高於廣島和長崎原爆倖存者壽命研究中，所有類型癌症給出的超額相對危險度。應當強調，流行病學隊列研究只包括一小部分鈾礦工。例如，已獲得的資料表明，東德鈾礦中，在 1946-1955 年的關鍵年代，約有 250,000 人在井中工作，其氡子核平均曝露量估計約為每年 100-200 WLM，但迄今還沒有從這些研究中獲得流行病學數據。因此，可以假定，從 1945 年至 1992 年全世界總計約有 500,000 人在鈾礦工作。

在非鈾礦山也觀察到高氡水平，這些採礦隊列的某些流行病學調查指出，例如，在加拿大紐芬蘭(Newfoundland)燧石礦工、中國錫礦工及瑞典鐵礦工中，肺癌危險度增加。

§B5 住宅內氡問題

與礦山情況相比，最近才發現氡對公眾肺癌危險度可能帶來的影響。發現氡後一年，Elster 和 Geitel (1901)的測量結果顯示出，氡(那時稱為鐳射氣)是大氣中普遍存在的組成部分。在提交給 1907 年 4 月加拿大會議的題目為「有關放射性的某些宇宙問題」的文章中，拉塞福(Ernest Rutherford)指出，「我們必須記住，我們大家均不斷地吸入鐳和

鈾射氣及其產物。還有游離空氣，某些人認為，放射性物質和被游離的空氣的存在可能在生理過程中起一定作用」。值得注意的是，在其後的年代裏開始了氡的浴療學利用，1912 年，在德國巴特克羅伊茨納赫(Bad Kreuznach)啟用了第一座鐳吸入設施(更恰當地說應稱為氡吸入設施)。

早期環境氡測量大多限於室外空氣。Hultqvist (1956)發表了瑞典 225 所住宅室內氡第一批測量結果，由西弗(Rolf Sievert)開始的這一研究表明，在用鐳含量高的明礬頁岩混凝土建造的幾所房屋內氡水平非常高。這一發現沒有引起國際上的注意，因當時認為這是一個瑞典的局部問題。

大約 20 年以後，在幾個國家中進行了規模較大的室內氡的調查，其結果匯總在 UNSCEAR 報告中(1977, 1982, 1988, 1993)。這些研究表明，居室內氡水平變化極大，從幾 $Bq\ m^{-3}$ 直到 100000 $Bq\ m^{-3}$ ，這意味著，某些公眾成員所曝露的室內氡水平高的居室內，其主要來源不是建築材料，而是氡從土壤中對流進入。該發現對於設計有效的干預措施以降低氡水平是非常重要的。

根據這些國家的研究，室內氡子核水平平均值範圍以平衡等效濃度來表示約為 5-50 $Bq\ m^{-3}$ 。UNSCEAR-1988 假定，全球平均值約為 15 $Bq\ m^{-3}$ ，支氣管上皮歸因的等效劑量平均值約為每年 15 mSv，該值約是其他所有天然

輻射源所致肺以外組織平均劑量的 10 倍。因此，按全世界平均，天然輻射源所致總有效劑量中大約一半是吸入住宅內氡子核引起的。

目前，室內氡子核照射可能產生的肺癌危險的估計是基於曝露於氡的地下礦工的流行病學數據。Stidley 和 Samet (1993)指出，由於其他混淆因素的嚴重影響，直接的地理學或生態學相關研究看來價值不大，最近發表的有關奧地利蒂羅爾(Tyrol)的一個小村庄烏姆豪森(Umhausen)肺癌發生率的研究結果可能是個例外。在幾個國家中有關室內氡的病例-對照研究是較有希望的，已發表了一些較小的該類研究的初步結果。儘管這些初步研究結果展示了室內氡水平與肺癌之間的正相關性，且與礦工數據範圍一致，但統計學誤差範圍是大的。

總之，對住宅內氡問題的認識有三點：(1)室內水平變化範圍大；(2)敏感的支氣管上皮所受等效劑量較高；(3)有關曝露於氡的礦工肺癌超額危險度其令人信服的流行病學證據。關於室內氡及其子核的照射所產生致癌效應的評價，包括吸煙的協同影響，仍有較大的不確定性，對這個重要問題尚待可靠的定量解答。

§ B6 術語匯編

行動基準(Action level)：建議採取干預以降低住宅或工作場所中照射的

氡濃度。

支氣管樹(Bronchial tree)：從氣管到肺中氣體交換的入口或肺區的呼吸道的支氣管氣道。

凝聚核(Condensation nuclei)：能作為蒸氣凝聚點的任何小粒子或離子。

劑量約定轉換(Dose conversion convention)：根據同等危害將用 WLM 表示的氡子核曝露量與用 mSv 表示的有效劑量聯繫起來的方法。

平衡等效濃度(Equilibrium equivalent concentration) C_{eq} ：氡的放射性濃度，與其處於平衡的短壽命子核同實際的不平衡混合物具有相同的 α 潛能濃度。

平衡因子(Equilibrium factor) F ：平衡等效濃度與氡氣濃度之比值。

α 潛能濃度(Potential alpha energy concentration) C_p ：用完全衰變到鈾 214 期間所釋放出的 α 能量來表示的空氣中短壽命氡子核的濃度。

α 潛能曝露量(Potential alpha energy exposure) $P_p(T)$ ：個體所曝露的空氣中 α 潛能濃度 C_p 在給定時間 T 內例如 1 年的時間積分。

氡子核(Radon progeny)：氡 222 衰變產物，在更局限意義上講這裏所用的是從鈾 218 至鈾 214 的短壽命衰變產物。

氡易析出地區(Radon prone)：由於地面特徵使其具有比一般地區多的建築物含有升高的氡水平的地區。

參考基準(Reference level)：用以建立諸如紀錄基準或調查基準等測出的量的數值，超過此值就應採取某些規定的行動或決策。

危險度(Risk)：這裏一併分類有關危險度的術語。

危險度：在 ICRP-65 中，為致死性肺癌發生的機率。

相對危險度(Relative risk)：受照人群的危險度與相似的非受照人群的危險度之比值。

超額相對危險度(Excess relative risk)：相對危險度減 1。

絕對危險度(Absolute risk)：致死性肺癌發生的機率。

超額或歸因危險度(Excess or attributable risk)：由於曝露而引起的絕對超額或歸因危險度。

危險度係數(Risk coefficient)：單位曝露量的危險度。

危險度預測模式(Risk projection model)：描述危險度隨曝露時間變化的模式，它可能以一個因子與年齡別基線危險度相關聯(相乘)或加到基線危險度上(相加)。

土壤氣體(Soil gas)：在土壤體積內部自由空間中的氣體。

未附著份額(Unattached fraction)：未附著在環境氣溶膠上的短壽命氦子核 α 潛能濃度的份額。

工作基準(Working level, WL)：導致發射 1.3×10^5 MeV α 潛能的一升空

氣中短壽命氦子核的任何組合。

工作基準月(Working level month, WLM)：吸入濃度為 1 WL 的大氣一個工作月(170 h)所產生的累積曝露量。

參考文獻

1. 翁寶山 建築物內氡含量的探討
核子科學 30, 219-229 (1993)
2. International Commission on Radiological Protection, Protection Against Radon-222 at Home and at Work, ICRP Publication 65, **Annals of the ICRP** 23 (2), 1, Pergamon Press, Oxford (1993)

附錄三 游離輻射防護法

中華民國九十一年一月三十日華總一義字第○九一○○○一九○○○號
總統令制定公布全文五十七條

§C1 總則

第一條 為防制游離輻射之危害，維護人民健康及安全，特依輻射作業必須合理抑低其輻射劑量之精神制定本法；本法未規定者，適用其他有關法律之規定。

第二條 本法用詞定義如下：

- 一、游離輻射：指直接或間接使物質產生游離作用之電磁輻射或粒子輻射。
- 二、放射性：指核種自發衰變時釋出游離輻射之現象。
- 三、放射性物質：指可經由自發性核變化釋出游離輻射之物質。
- 四、可發生游離輻射設備：指核子反應器設施以外，用電磁場、原子核反應等方法，產生游離輻射之設備。
- 五、放射性廢棄物：指具有放射性或受放射性物質污染之廢棄物，包括備供最終處置之用過核子燃料。
- 六、輻射源：指產生或可產生游離輻射之來源，包括放射性物質、可發

生游離輻射設備或核子反應器及其他經主管機關指定或公告之物料或機具。

七、背景輻射：指下列之游離輻射：

- (一) 宇宙射線。
- (二) 天然存在於地殼或大氣中之天然放射性物質釋出之游離輻射。
- (三) 一般人體組織中所含天然放射性物質釋出之游離輻射。
- (四) 因核子試爆或其他原因而造成含放射性物質之全球落塵釋出之游離輻射。

八、曝露：指人體受游離輻射照射或接觸、攝入放射性物質之過程。

九、職業曝露：指從事輻射作業所受之曝露。

十、醫療曝露：指在醫療過程中病人及其協助者所接受之曝露。

十一、緊急曝露：指發生事故之時或之後，為搶救遇險人員，阻止事態擴大或其他緊急情況，而有組織且自願接受之曝露。

十二、輻射作業：指任何引入新輻射源或曝露途徑、或擴大受照人員範圍、或改變現有輻射源之曝露途徑，從而使人們受到之曝露，或受到曝露之人數增加而獲得淨利益之人類活動。包括對輻射源進行持有、製造、生產、安裝、改裝、使用、運轉、維修、拆除、檢查、處理、輸入、輸出、銷售、運送、貯存、轉讓、租借、過境、轉口、廢棄或處置之作業及其他經主管機關指定或公告者。

十三、干預：指影響既存輻射源與受曝露人間之曝露途徑，以減少個人或集體曝露所採取之措施。

十四、設施經營者：指經主管機關許可、發給許可證或登記備查，經營輻射作業相關業務者。

十五、雇主：指僱用人員從事輻射作業相關業務者。

十六、輻射工作人員：指受僱或自僱經常從事輻射作業，並認知會接受曝露之人員。

十七、西弗：指國際單位制之人員劑量單位。

十八、劑量限度：指人員因輻射作業所受之曝露，不應超過之劑量值。

十九、污染環境：指因輻射作業而改變空氣、水或土壤原有之放射性物質含量，致影響其正常用途，破壞自然生態或損害財物。

第三條 本法之主管機關，為行政院原

子能委員會。

第四條 天然放射性物質、背景輻射及其所造成之曝露，不適用本法之規定。但有影響公眾安全之虞者，主管機關得經公告之程序，將其納入管理；其辦法，由主管機關定之。

§C2 輻射安全防護

第五條 為限制輻射源或輻射作業之輻射曝露，主管機關應參考國際放射防護委員會最新標準訂定游離輻射防護安全標準，並應視實際需要訂定相關導則，規範輻射防護作業基準及人員劑量限度等游離輻射防護事項。

第六條 為確保放射性物質運送之安全，主管機關應訂定放射性物質安全運送規則，規範放射性物質之包裝、包件、交運、運送、貯存作業及核准等事項。

第七條 設施經營者應依其輻射作業之規模及性質，依主管機關之規定，設輻射防護管理組織或置輻射防護人員，實施輻射防護作業。

前項輻射防護作業，設施經營者應先擬訂輻射防護計畫，報請主管機關核准後實施。未經核准前，不得進行輻射作業。

第一項輻射防護管理組織及人員之設置標準、輻射防護人員應具備之資格、證書之核發、有效期限、換發、補發、廢止及其他應遵行事項之管理辦法，由主管機關會商有關機關定

之。

第八條 設施經營者應確保其輻射作業對輻射工作場所以外地區造成之輻射強度與水中、空氣中及污水下水道中所含放射性物質之濃度，不超過游離輻射防護安全標準之規定。

前項污水下水道不包括設施經營者擁有或營運之污水處理設施、腐化槽及過濾池。

第九條 輻射工作場所排放含放射性物質之廢氣或廢水者，設施經營者應實施輻射安全評估，並報請主管機關核准後，始得為之。

前項排放，應依主管機關之規定記錄及申報並保存之。

第十條 設施經營者應依主管機關規定，依其輻射工作場所之設施、輻射作業特性及輻射曝露程度，劃分輻射工作場所為管制區及監測區。管制區內應採取管制措施；監測區內應為必要之輻射監測，輻射工作場所外應實施環境輻射監測。

前項場所劃分、管制、輻射監測及場所外環境輻射監測，應擬訂計畫，報請主管機關核准後實施。未經核准前，不得進行輻射作業。

第一項環境輻射監測結果，應依主管機關之規定記錄及申報並保存之。

第二項計畫擬訂及其作業之準則，由主管機關定之。

第十一條 主管機關得隨時派員檢查輻射作業及其場所；不合規定者，應

令其限期改善；未於期限內改善者，得令其停止全部或一部之作業；情節重大者，並得逕予廢止其許可證。

主管機關為前項處分時，應以書面敘明理由。但情況急迫時，得先以口頭為之，並於處分後七日內補行送達處分書。

第十二條 輻射工作場所發生重大輻射意外事故且情況急迫時，為防止災害發生或繼續擴大，以維護公眾健康及安全，設施經營者得依主管機關之規定採行緊急曝露。

第十三條 設施經營者於下列事故發生時，應採取必要之防護措施，並立即通知主管機關：

一、人員接受之劑量超過游離輻射防護安全標準之規定者。

二、輻射工作場所以外地區之輻射強度或其水中、空氣中或污水下水道中所含放射性物質之濃度超過游離輻射防護安全標準之規定者。本款污水下水道不包括設施經營者擁有或營運之污水處理設施、腐化槽及過濾池。

三、放射性物質遺失或遭竊者。

四、其他經主管機關指定之重大輻射事故。

主管機關於接獲前項通知後，應派員檢查，並得命其停止與該事故有關之全部或一部之作業。

第一項事故發生後，設施經營者除應依相關規定負責清理外，並應依

規定實施調查、分析、記錄及於期限內向主管機關提出報告。

設施經營者於第一項之事故發生時，除採取必要之防護措施外，非經主管機關核准，不得移動或破壞現場。

第十四條 從事或參與輻射作業之人員，以年滿十八歲者為限。但基於教學或工作訓練需要，於符合特別限制情形下，得使十六歲以上未滿十八歲者參與輻射作業。

任何人不得令未滿十六歲者從事或參與輻射作業。

雇主對告知懷孕之女性輻射工作人員，應即檢討其工作條件，以確保妊娠期間胚胎或胎兒所受之曝露不超過游離輻射防護安全標準之規定；其有超過之虞者，雇主應改善其工作條件或對其工作為適當之調整。

雇主對在職之輻射工作人員應定期實施從事輻射作業之防護及預防輻射意外事故所必要之教育訓練，並保存紀錄。

輻射工作人員對於前項教育訓練，有接受之義務。

第一項但書規定之特別限制情形與第四項教育訓練之實施及其紀錄保存等事項，由主管機關會商有關機關定之。

第十五條 為確保輻射工作人員所受職業曝露不超過劑量限度並合理抑低，雇主應對輻射工作人員實施個別

劑量監測。但經評估輻射作業對輻射工作人員一年之曝露不可能超過劑量限度之一定比例者，得以作業環境監測或個別劑量抽樣監測代之。

前項但書規定之一定比例，由主管機關定之。

第一項監測之度量及評定，應由主管機關認可之人員劑量評定機構辦理；人員劑量評定機構認可及管理之辦法，由主管機關定之。

雇主對輻射工作人員實施劑量監測結果，應依主管機關之規定記錄、保存、告知當事人。

主管機關為統計、分析輻射工作人員劑量，得自行或委託有關機關(構)、學校或團體設置人員劑量資料庫。

第十六條 雇主僱用輻射工作人員時，應要求其實施體格檢查；對在職之輻射工作人員應實施定期健康檢查，並依檢查結果為適當之處理。輻射工作人員因一次意外曝露或緊急曝露所接受之劑量超過五十毫西弗以上時，雇主應即予以包括特別健康檢查、劑量評估、放射性污染清除、必要治療及其他適當措施之特別醫務監護。

前項輻射工作人員經特別健康檢查後，雇主應就其特別健康檢查結果、曝露歷史及健康狀況等徵詢醫師、輻射防護人員或專家之建議後，為適當之工作安排。

第一項健康檢查及第二項特別醫務

監護之費用，由雇主負擔。

第一項體格檢查、健康檢查及第二項特別醫務監護之紀錄，雇主應依主管機關之規定保存。

第二項所定特別健康檢查，其檢查項目由主管機關會同中央衛生主管機關定之。

輻射工作人員對於第一項之檢查及第二項之特別醫務監護，有接受之義務。

第十七條 為提昇輻射醫療之品質，減少病人可能接受之曝露，醫療機構使用經主管機關公告應實施醫療曝露品質保證之放射性物質、可發生游離輻射設備或相關設施，應依醫療曝露品質保證標準擬訂醫療曝露品質保證計畫，報請主管機關核准後始得為之。

醫療機構應就其規模及性質，依規定設醫療曝露品質保證組織、專業人員或委託相關機構，辦理前項醫療曝露品質保證計畫相關事項。

第一項醫療曝露品質保證標準與前項醫療曝露品質保證組織、專業人員設置及委託相關機構之管理辦法，由主管機關會同中央衛生主管機關定之。

第十八條 醫療機構對於協助病人接受輻射醫療者，其有遭受曝露之虞時，應事前告知及施以適當之輻射防護。

第十九條 主管機關應選定適當場

所，設置輻射監測設施及採樣，從事環境輻射監測，並公開監測結果。

第二十條 主管機關發現公私場所有遭受輻射曝露之虞時，得派員攜帶證明文件進入檢查或偵測其游離輻射狀況，並得要求該場所之所有人、使用人、管理人或其他代表人提供有關資料。

前項之檢查或偵測，主管機關得會同有關機關為之。

第二十一條 商品非經主管機關許可，不得添加放射性物質。

前項放射性物質之添加量，不得逾越主管機關核准之許可量。

第二十二條 商品對人體造成之輻射劑量，於有影響公眾健康之虞時，主管機關應會同有關機關實施輻射檢查或偵測。

前項商品經檢查或偵測結果，如有違反標準或有危害公眾健康者，主管機關應公告各該商品品名及其相關資料，並命該商品之製造者、經銷者或持有者為一定之處理。

前項標準，由主管機關會商有關機關定之。

第二十三條 為防止建築材料遭受放射性污染，主管機關於必要時，得要求相關廠商實施原料及產品之輻射檢查、偵測或出具無放射性污染證明。其管理辦法，由主管機關定之。前項原料、產品之輻射檢查、偵測及無放射性污染證明之出具，應依主管

機關之規定或委託主管機關認可之機關(構)、學校或團體為之。

第一項建築材料經檢查或偵測結果，如有違反前條第三項規定之標準者，依前條第二項規定處理。

第二項之機關(構)、學校或團體執行第一項所訂業務，應以善良管理人之注意為之，並負忠實義務。

第二十四條 直轄市、縣(市)主管建築機關對於施工中之建築物所使用之鋼筋或鋼骨，得指定承造人會同監造人提出無放射性污染證明。

主管機關發現建築物遭受放射性污染時，應立即通知該建築物之居民及所有人。

前項建築物之輻射劑量達一定劑量者，主管機關應造冊函送該管直轄市、縣(市)地政主管機關將相關資料建檔，並開放民眾查詢。

放射性污染建築物事件防範及處理之辦法，由主管機關定之。

第二十五條 為保障民眾生命財產安全，建築物有遭受放射性污染之虞者，其移轉應出示輻射偵測證明。

前項有遭受放射性污染之虞之建築物，主管機關應每年及視實際狀況公告之。

第一項之輻射偵測證明，應由主管機關或經主管機關認可之機關(構)或團體開立之。其辦法，由主管機關定之。

前項之機關(構)或團體執行第三項所

訂業務，應以善良管理人之注意為之，並負忠實義務。

第二十六條 從事輻射防護服務相關業務者，應報請主管機關認可後始得為之。

前項輻射防護服務相關業務之項目、應具備之條件、認可之程序、認可證之核發、換發、補發、廢止及其他應遵行事項之管理辦法，由主管機關定之。

從事第一項業務者執行業務時，應以善良管理人之注意為之，並負忠實義務。

第二十七條 發生核子事故以外之輻射公害事件，而有危害公眾健康及安全或有危害之虞者，主管機關得會同有關機關採行干預措施；必要時，並得限制人車進出或強制疏散區域內人車。

主管機關對前項輻射公害事件，得訂定干預標準及處理辦法。

主管機關採行第一項干預措施所支出之各項費用，於知有負賠償義務之人時，應向其求償。

對於第一項之干預措施，不得規避、妨礙或拒絕。

第二十八條 主管機關為達成本法管制目的，得就有關輻射防護事項要求設施經營者、雇主或輻射防護服務業者定期提出報告。

前項報告之項目、內容及提出期限，由主管機關定之。

§C3 放射性物質、可發生游離輻射設備或輻射作業之管理

第二十九條 除本法另有規定者外，放射性物質、可發生游離輻射設備或輻射作業，應依主管機關之指定申請許可或登記備查。

經指定應申請許可者，應向主管機關申請審查，經許可或發給許可證後，始得進行輻射作業。

經指定應申請登記備查者，應報請主管機關同意登記後，始得進行輻射作業。

置有高活度放射性物質或高能量可發生游離輻射設備之高強度輻射設施之運轉，應由合格之運轉人員負責操作。

第二項及第三項申請許可、登記備查之資格、條件、前項設施之種類與運轉人員資格、證書或執照之核發、有效期限、換發、補發、廢止及其他應遵行事項之辦法，由主管機關定之。第二項及第三項之物質、設備或作業涉及醫用者，並應符合中央衛生法規之規定。

第三十條 放射性物質之生產與其設施之建造及可發生游離輻射設備之製造，非經向主管機關申請審查，發給許可證，不得為之。

放射性物質生產設施之運轉，應由合格之運轉人員負責操作；其資格、證

書或執照之核發、有效期限、換發、補發、廢止及其他應遵行事項之辦法，由主管機關定之。

第一項生產或製造，應於開始之日起十五日內，報請主管機關備查；其生產紀錄或製造紀錄與庫存及銷售紀錄，應定期報送主管機關；主管機關得隨時派員檢查之。

第一項放射性物質之生產或可發生游離輻射設備之製造，屬於醫療用途者，並應符合中央衛生法規之規定。

第三十一條 操作放射性物質或可發生游離輻射設備之人員，應受主管機關指定之訓練，並領有輻射安全證書或執照。但領有輻射相關執業執照經主管機關認可者或基於教學需要在合格人員指導下從事操作訓練者，不在此限。

前項證書或執照，於操作一定活度以下之放射性物質或一定能量以下之可發生游離輻射設備者，得以訓練代之；其一定活度或一定能量之限值，由主管機關定之。

第一項人員之資格、訓練、證書或執照之核發、有效期限、換發、補發、廢止與前項訓練取代證書或執照之條件及其他應遵行事項之管理辦法，由主管機關會商有關機關定之。

第三十二條 依第二十九條第二項規定核發之許可證，其有效期間最長為五年。期滿需繼續輻射作業者，應於屆滿前，依主管機關規定期限申請換

發。

依第三十條第一項規定核發之許可證，其有效期間最長為十年。期滿需繼續生產或製造者，應於屆滿前，依主管機關規定期限申請換發。

前二項許可證有效期間內，設施經營者應對放射性物質、可發生游離輻射設備或其設施，每年至少偵測一次，提報主管機關偵測證明備查，偵測項目由主管機關定之。

第三十三條 許可、許可證或登記備查之記載事項有變更者，設施經營者應自事實發生之日起三十日內，向主管機關申請變更登記。

第三十四條 放射性物質、可發生游離輻射設備之使用或其生產製造設施之運轉，其所需具備之安全條件與原核准內容不符者，設施經營者應向主管機關申請核准停止使用或運轉，並依核准之方式封存或保管。

前項停止使用之放射性物質、可發生游離輻射設備或停止運轉之生產製造設施，其再使用或再運轉，應先報請主管機關核准，始得為之。

第三十五條 放射性物質、可發生游離輻射設備之永久停止使用或其生產製造設施之永久停止運轉，設施經營者應將其放射性物質或可發生游離輻射設備列冊陳報主管機關，並退回原製造或銷售者、轉讓、以放射性廢棄物處理或依主管機關規定之方式處理，其處理期間不得超過三個月。

但經主管機關核准者，得延長之。

前項之生產製造設施或第二十九條第四項之高強度輻射設施永久停止運轉後六個月內，設施經營者應擬訂設施廢棄之清理計畫，報請主管機關核准後實施，應於永久停止運轉後三年內完成。

前項清理計畫實施期間，主管機關得隨時派員檢查；實施完畢後，設施經營者應報請主管機關檢查。

第三十六條 放射性物質、可發生游離輻射設備或其生產製造設施有下列情形之一者，視為永久停止使用或運轉，應依前條之規定辦理：

- 一、未依第三十四條第一項規定，報請主管機關核准停止使用或運轉，持續達一年以上。
- 二、核准停止使用或運轉期間，經主管機關認定有污染環境、危害人體健康且無法改善或已不堪使用。
- 三、經主管機關廢止其許可證。

第三十七條 本章有關放射性物質之規定，於核子原料、核子燃料或放射性廢棄物不適用之。

§C4 罰則

第三十八條 有下列情形之一者，處三年以下有期徒刑、拘役或科或併科新臺幣三百萬元以下罰金：

- 一、違反第七條第二項規定，擅自或未依核准之輻射防護計畫進行輻射作業，致嚴重污染環境。

二、違反第九條第一項規定，擅自排放含放射性物質之廢氣或廢水，致嚴重污染環境。

三、未依第二十九條第二項、第三項規定取得許可、許可證或經同意登記，擅自進行輻射作業，致嚴重污染環境。

四、未依第三十條第一項規定取得許可證，擅自進行生產或製造，致嚴重污染環境。

五、棄置放射性物質。

六、依本法規定有申報義務，明知為不實事項而申報或於業務上作成之文書為不實記載。

前項第一款至第四款所定嚴重污染環境之標準，由主管機關會同有關機關定之。

第三十九條 有下列情形之一者，處一年以下有期徒刑、拘役或科或併科新臺幣一百萬元以下罰金：

一、不遵行主管機關依第十一條第一項或第十三條第二項規定所為之停止作業命令。

二、未依第二十一條第一項規定，經主管機關許可，擅自於商品中添加放射性物質，經令其停止添加或回收而不從。

三、違反第二十二條第二項或第二十三條第三項規定，未依主管機關命令為一定之處理。

四、未依第三十五條第二項規定提出設施清理計畫或未依期限完成清

理，經主管機關通知限期提出計畫或完成清理，屆期仍未遵行。

第四十條 法人之負責人、法人或自然人之代理人、受雇人或其他從業人員，因執行業務犯第三十八條或前條之罪者，除處罰其行為人外，對該法人或自然人亦科以各該條之罰金。

第四十一條 有下列情形之一者，處新臺幣六十萬元以上三百萬元以下罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業；必要時，廢止其許可、許可證或登記：

一、違反第七條第二項規定，擅自或未依核准之輻射防護計畫進行輻射作業。

二、違反第九條第一項規定，擅自排放含放射性物質之廢氣或廢水。

三、違反第十條第二項規定，擅自進行輻射作業。

四、違反第二十一條第一項規定，擅自於商品中添加放射性物質。

五、未依第二十九條第二項規定取得許可或許可證，擅自進行輻射作業。

六、未依第三十條第一項規定取得許可證，擅自進行生產、建造或製造。

七、違反第三十五條第二項規定，未於三年內完成清理。

第四十二條 有下列情形之一者，處新臺幣四十萬元以上二百萬元以下罰

緩，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業；必要時，廢止其許可、許可證或登記：

- 一、違反主管機關依第五條規定所定之游離輻射防護安全標準且情節重大。
- 二、違反主管機關依第六條規定所定之放射性物質安全運送規則且情節重大。
- 三、違反第八條、第十條第一項、第十三條第四項或第三十四條規定。
- 四、規避、妨礙或拒絕依第十一條第一項、第十三條第二項、第三十條第三項或第三十五條第三項規定之檢查。
- 五、未依第十三條第一項規定通知主管機關。
- 六、未依第十三條第三項規定清理。
- 七、違反第十八條規定，未對協助者施以輻射防護。
- 八、商品中添加之放射性物質逾越主管機關依第二十一條第二項規定核准之許可量。
- 九、規避、妨礙或拒絕主管機關依第二十二條第一項規定實施之商品輻射檢查或偵測。
- 十、違反第二十九條第四項或第三十條第二項規定，僱用無證書(或執照)人員操作或無證書(或執照)人員擅自操作。
- 十一、未依第三十五條第二項規定提

出清理計畫。

第四十三條 有下列情形之一者，處新臺幣十萬元以上五十萬元以下罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業：

- 一、違反第七條第一項、第十四條第一項、第二項、第三項、第十七條第一項或第二項規定。
- 二、未依第十三條第三項規定實施調查、分析。
- 三、未依第十五條第一項規定實施人員劑量監測。
- 四、未依第二十九條第三項規定經同意登記，擅自進行輻射作業。
- 五、違反第三十一條第一項規定，僱用無證書(或執照)人員操作或無證書(或執照)人員擅自操作。
- 六、未依第三十五條第一項規定處理放射性物質或可發生游離輻射設備。

第四十四條 有下列情形之一者，處新臺幣五萬元以上二十五萬元以下罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業：

- 一、違反主管機關依第五條規定所定之游離輻射防護安全標準。
- 二、違反主管機關依第六條規定所定之放射性物質安全運送規則。
- 三、未依第十四條第四項規定實施教育訓練。

四、違反主管機關依第十五條第三項規定所定之認可及管理辦法。

五、違反第十六條第二項、第三項或第二十七條第四項規定。

六、違反第二十三條第一項或第二十四條第一項規定，未依主管機關或主管建築機關要求實施輻射檢查、偵測或出具無放射性污染證明。

七、違反第二十五條第三項開立辦法者。

八、違反第二十六條第一項規定或主管機關依同條第二項規定所定之管理辦法規定。

九、依本法規定有記錄、保存、申報或報告義務，未依規定辦理。

第四十五條 有下列情形之一者，處新臺幣四萬元以上二十萬元以下罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業：

一、依第十五條第四項或第十八條規定有告知義務，未依規定告知。

二、違反第十六條第一項、第四項或第三十三條規定。

三、規避、妨礙或拒絕主管機關依第二十條第一項規定實施之檢查、偵測或要求提供有關資料。

四、違反第三十一條第一項規定，僱用未經訓練之人員操作或未經訓練而擅自操作。

第四十六條 輻射工作人員有下列情

形之一者，處新臺幣二萬元以下罰鍰：

一、違反第十四條第五項規定，拒不接受教育訓練。

二、違反第十六條第七項規定，拒不接受檢查或特別醫務監護。

第四十七條 依本法通知限期改善或申報者，其改善或申報期間，除主管機關另有規定者外，為三十日。但有正當理由，經主管機關同意延長者，不在此限。

第四十八條 依本法所處之罰鍰，經主管機關限期繳納，屆期未繳納者，依法移送強制執行。

第四十九條 經依本法規定廢止許可證或登記者，自廢止之日起，一年內不得申請同類許可證或登記備查。

第五十條 依本法處以罰鍰之案件，並得沒入放射性物質、可發生游離輻射設備、商品或建築材料。

違反本法經沒收或沒入之物，由主管機關處理或監管者，所需費用，由受處罰人或物之所有人負擔。

前項費用，經主管機關限期繳納，屆期未繳納者，依法移送強制執行。

§C5 附則

第五十一條 本法規定由主管機關辦理之各項認可、訓練、檢查、偵測或監測，主管機關得委託有關機關(構)、學校或團體辦理。

前項認可、訓練、檢查、偵測或監測

之項目及其實施辦法，由主管機關會商有關機關定之。

第五十二條 主管機關依本法規定實施管制、核發證書、執照及受理各項申請，得分別收取審查費、檢查費、證書費及執照費；其費額，由主管機關定之。

第五十三條 輻射源所產生之輻射無安全顧慮者，免依本法規定管制。前項豁免管制標準，由主管機關定之。

第五十四條 軍事機關之放射性物質、可發生游離輻射設備及其輻射作業之輻射防護及管制，應依本法由主管機關會同國防部另以辦法定之。

第五十五條 本法施行前已設置之放射性物質、可發生游離輻射設備之生產、製造與其設施、輻射工作場所、已許可之輻射作業及已核發之人員執照、證明書，不符合本法規定者，應自本法施行之日起二年內完成改善、辦理補正或換發。但經主管機關同意者得延長之，延長以一年為限。

第五十六條 本法施行細則，由主管機關定之。

第五十七條 本法施行日期，由行政院定之。

附錄四 國家游離輻射標準實驗室

§D1 前言

民國 80 年(1991)核能研究所受經濟部標準檢驗局的委託成立國家游離輻射標準實驗室 (National Radiation Standards Laboratory, NRSL)，主要任務為建立及維持全國最高輻射量測標準與追溯體系，傳播與推廣量測標準資訊，以及建立全盤檢校追溯體系。游離輻射的量測標準含光子、貝他、中子等的輻射劑量以及射源活度等 4 種標準。

§D2 大事紀要年表

民國 80 年 經濟部標準檢驗局(前中央標準局)委託核研所成立國家游離輻射標準實驗室，同年並執行第一次人員劑量計能力試驗。

民國 81 年 成立第一期五年的建立與維持國家游離輻射標準計畫。

民國 82 年 以自製圓柱型游離腔，建立 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 空氣克馬率的原級標準。

民國 83 年 以自製球型游離腔建立 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 空氣克馬率的原級標準。

民國 84 年 建立輻射源 $4\pi\beta-\gamma$ 符合計測的原級標準。

民國 85 年 以自製自由空氣游離腔建立 X 射線 50-300 kV 空氣克馬率的原級標準。

民國 86 年 成立第二期五年的建立與維持國家游離輻射標準計畫，同年並完成 100 keV-3 MeV 單能中子通量率的原級標準。

民國 87 年 擔任亞太計量組織／游離輻射技術委員會 (APMP/TCRI) 的主席 (1998-2000 年)。

民國 88 年 申請加入亞太計量組織 (APMP)。

民國 89 年 於泰國主辦亞太地區第一次的游離輻射技術委員會會議。

民國 90 年 實驗室通過中華民國實驗室認證體系 (CNLA) 的認證，同年新實驗室(035 館)落成啟用。

§D3 量測追溯體系

在上一節所論及的 4 種標準，透過

區域性與國際性的雙邊比對，將量測標準追溯到國際度量衡局。圖 D1 為量測追溯體系。

§D4 X 射線原級標準

1. 低能量 10-50 kV

• 構造

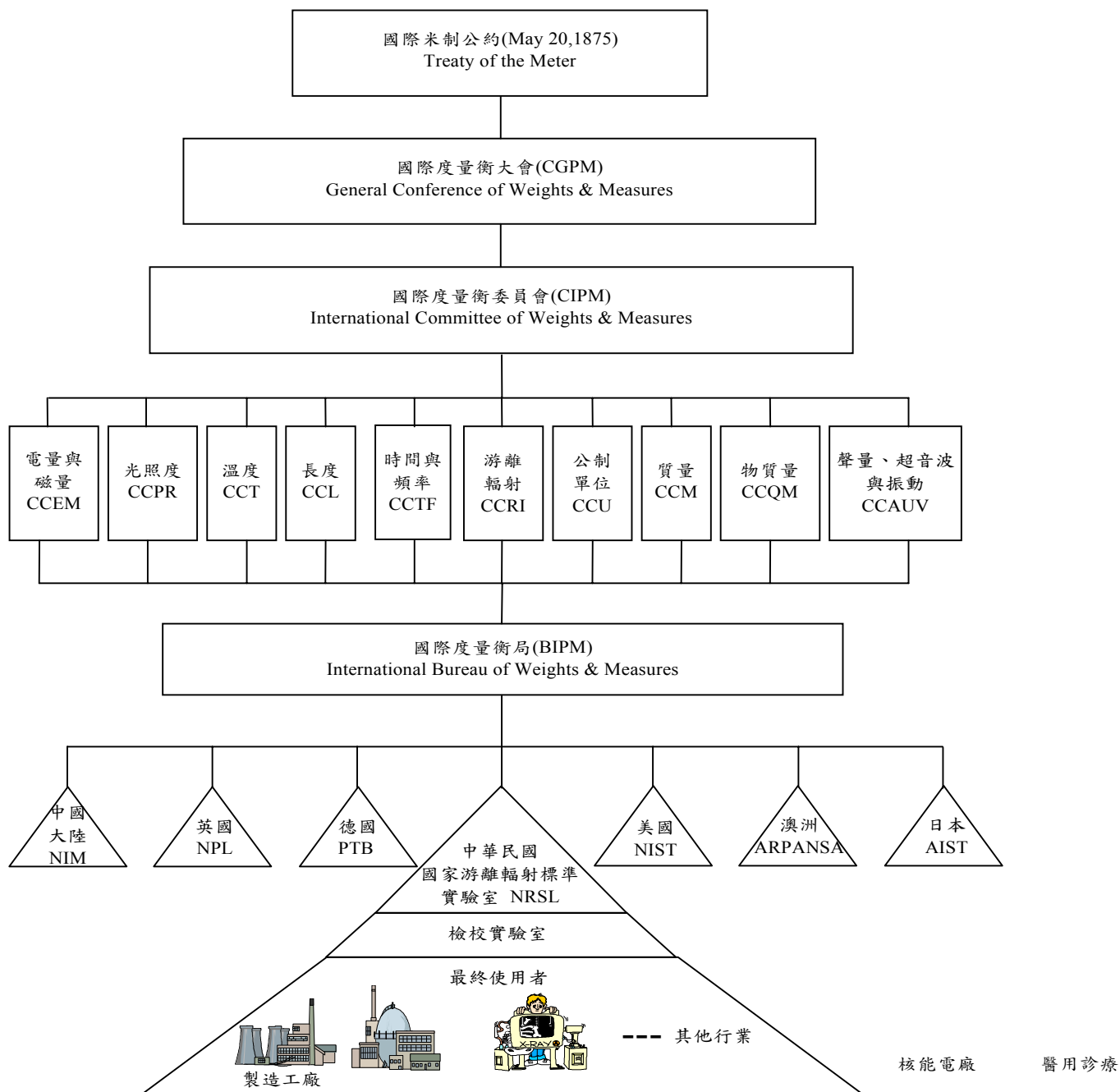


圖 D1 量測追溯體系(traceability of measurement)

三筒式自由空氣游離腔，一個 140

mm 的固定中心鋁圓柱筒，及兩個可前後移動 70 mm 的鋁圓柱筒。

- 尺寸

30 cm × 13.5 cm × 13.5 cm

- 量測原理

在電子平衡狀況下，利用全開信號減去全關信號來量測電子於空氣中游離的電荷量，以決定 X 射線場的空氣克馬(air kerma)。

- 射質

NIST M 及 H 系列，此處 M 及 H 系列為美國國家標準與技術研究所(NIST)對射束的編號，例如測試輻射防護級的低能光子係用 M50 射束。

- X 光機為 Pantak 100 kVp

2. 中能量 50-300 kV

- 構造

三筒式自由空氣游離腔，一個 300 mm 的固定中心鋁圓柱筒，及兩個可前後移動 150 mm 的鋁圓柱筒。

- 量測原理

在電子平衡狀況下，利用全開信號減去全關信號來量測電子於空氣中游離的電荷量，以決定 X 射線場的空氣克馬。

- 射質

NIST M 及 H 系列

BIPM 100、135、180 以及 250 kV

- 對外服務項目：

標準游離腔校正，人員劑量計校正，輻射偵檢儀器能依性測試。

§D5 銫、鈷的空氣克馬與鈷的水中吸收劑量

1. ¹³⁷Cs 和 ⁶⁰Co 的空氣克馬原級標準

利用自製的球型游離腔，材質為高純度的石墨，體積為 3 cm³、10 cm³ 及 30 cm³ 來決定 ¹³⁷Cs、⁶⁰Co 加馬輻射場的空氣克馬率。

2. ⁶⁰Co 的水中吸收劑量原級標準

利用自製的圓餅型游離腔，材質為高純度的石墨，體積為 8.4 cm³，來決定水中深度 5 g/cm² 的 ⁶⁰Co 吸收劑量。

§D6 校正服務

- 醫用直線加速器的游離腔校正
- 貝他組織吸收劑量校正
- 醫用直線加速器衍生的中子劑量度量 (利用活化 P₂O₅ 粉末)
- 中子偵檢儀器校正
- 放射性藥物活度的量測與校正
- 阿伐和貝他粒子發射率校正

§D7 活度標準的追溯與應用

輻射源活度標準的追溯和應用列於圖 D2。

§D8 國際事務與活動

目前國際度量衡局(BIPM)正積極推動多邊相互承認協定(MRA)，透過國際度量衡委員會(CIPM)或各區域計量

組織舉辦的國際量測比對活動，使全球各國的計量標準能趨於一致，達到世界各國計量標準相互認可的目的，見圖 D3。為達 MRA 之目的，國家游離輻射標準實驗室積極參與各項國際量測比對

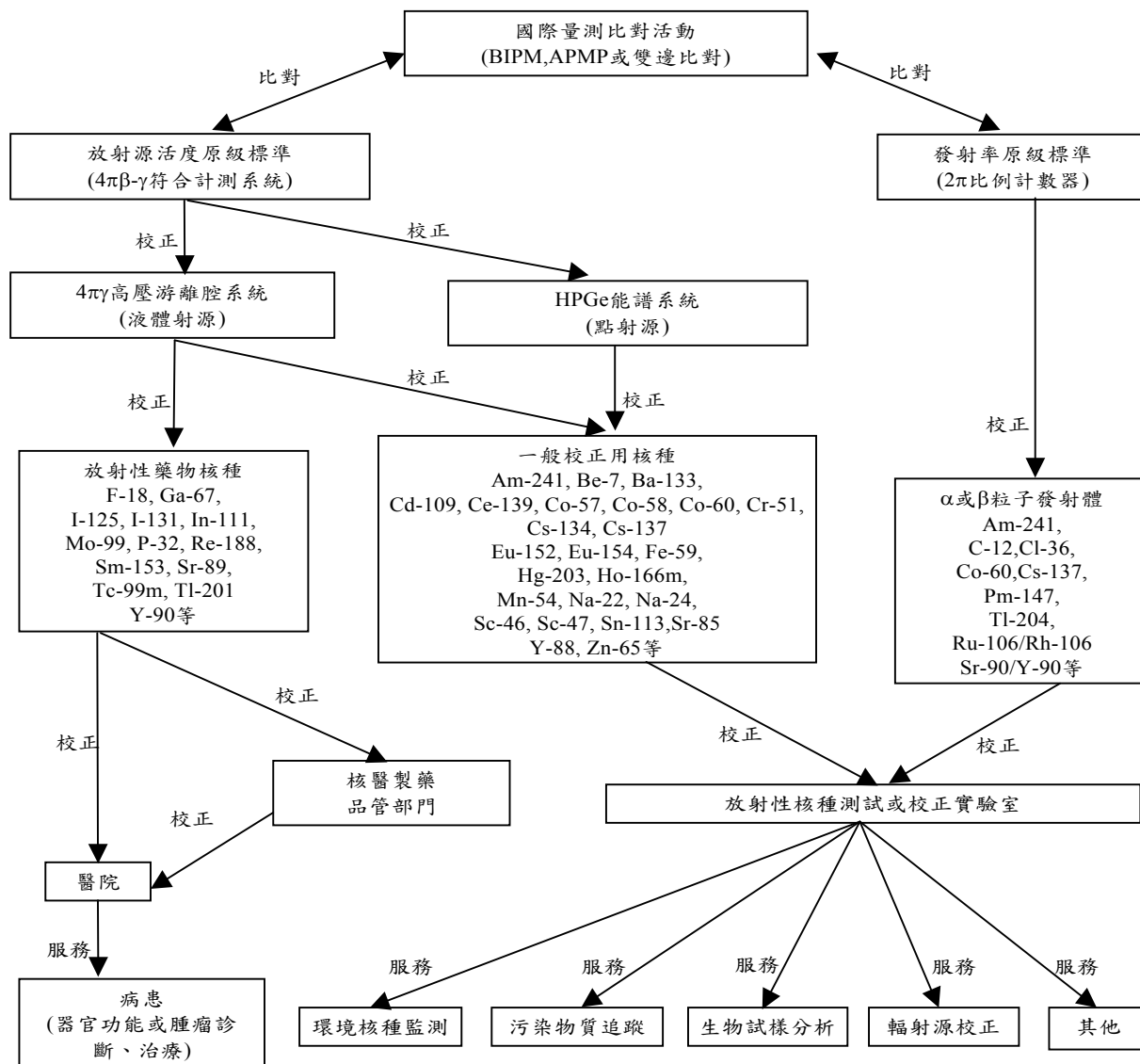


圖 D2 國際量測比對活動

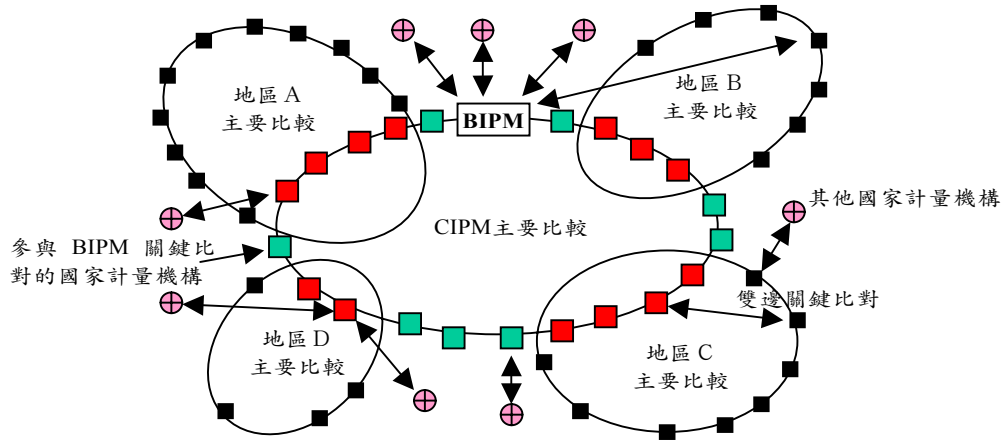


圖 D3 相互承認協定

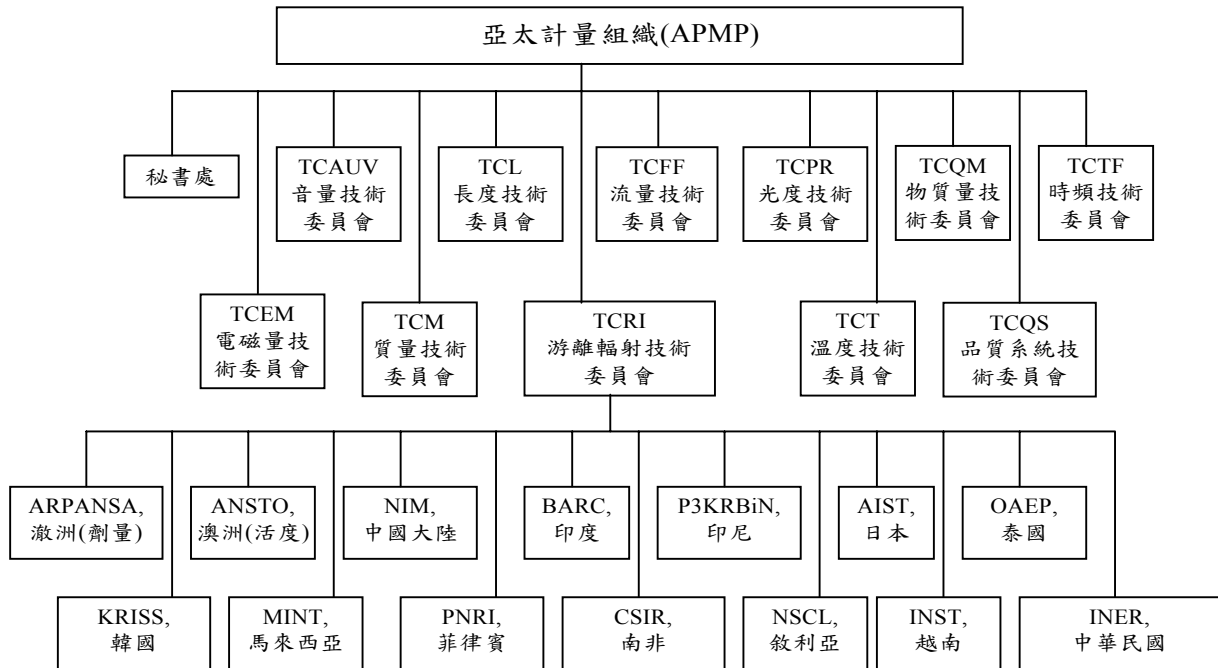


圖 D4 亞太計量組織圖

活動及加入區域性計量組織，並於 2001 年順利加入亞太計量組織(APMP)成為其會員國，並參與游離輻射技術委員會(TCRI)的各項活動，見圖 D4。

參考文獻

1. 黃文松 個人請益 核能研究所保健
物理組 桃園龍潭(2002)

附錄五 有效等效劑量與有效劑量的銜接

§E1 前言

自從國際放射防護委員會(ICRP-26)1977年的建議書發表以後，國際輻射單位與度量委員會(ICRU)提出了一套可以度量的實用量(operational quantity)，用來補充由ICRP建議用於人體的哪些劑量學的量[有時將這些量稱為防護量(Protection quantity)]。ICRP-60在1990年的建議書中又對這些防護量的定義做了若干修改。因此，成立了由ICRP和ICRU組成的聯合工作小組，主要的任務是確定這些實用量例如周圍、

當地代表以下的防護量例如器官吸收劑量、器官等價劑量、有效劑量。其結論是：除了一些對輻射防護無關緊要的特殊情況下，實用量仍能實現其預定的目標。ICRP 74號出版物是提供一套廣泛而具有權威性的數據，把描述輻射場的量、實用量和防護量聯繫起來。它們將有助於輻射防護工作人員的方便使用。又ICRP與ICRU兩個委員會雙方於1995年8月同意正式批准的最後報告在ICRP 1996年報中出版，兼作為ICRU的一份報告。

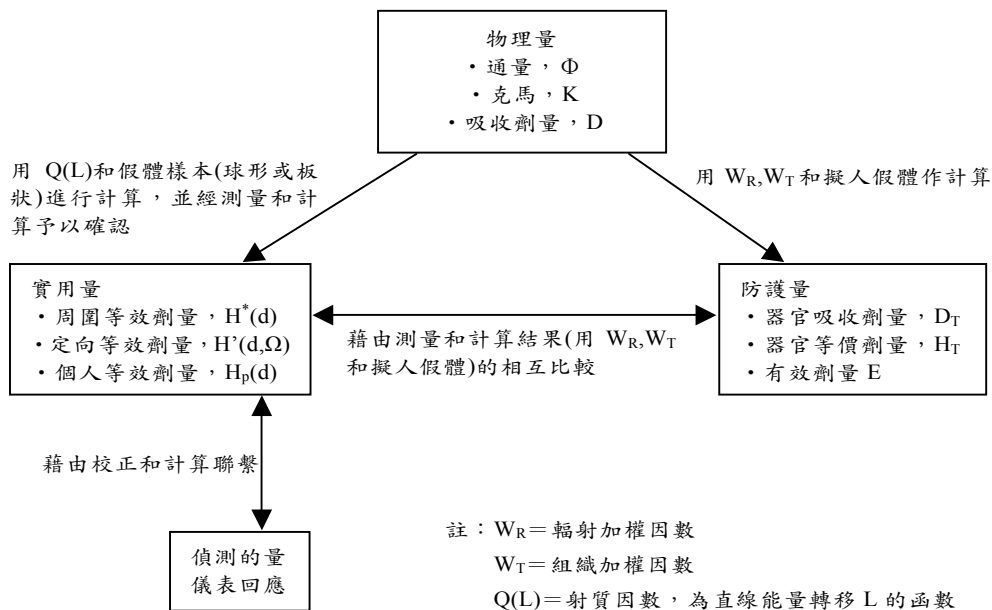


圖 E1 為輻射防護偵測目的所用的各種量之間的相互關係

定向、個人等三種等效劑量是否仍能適

§E2 實用量和防護量的關係

實用量和防護量的關係如圖 E1 所示，計算和實驗的結果則如圖 E2 至圖 E4

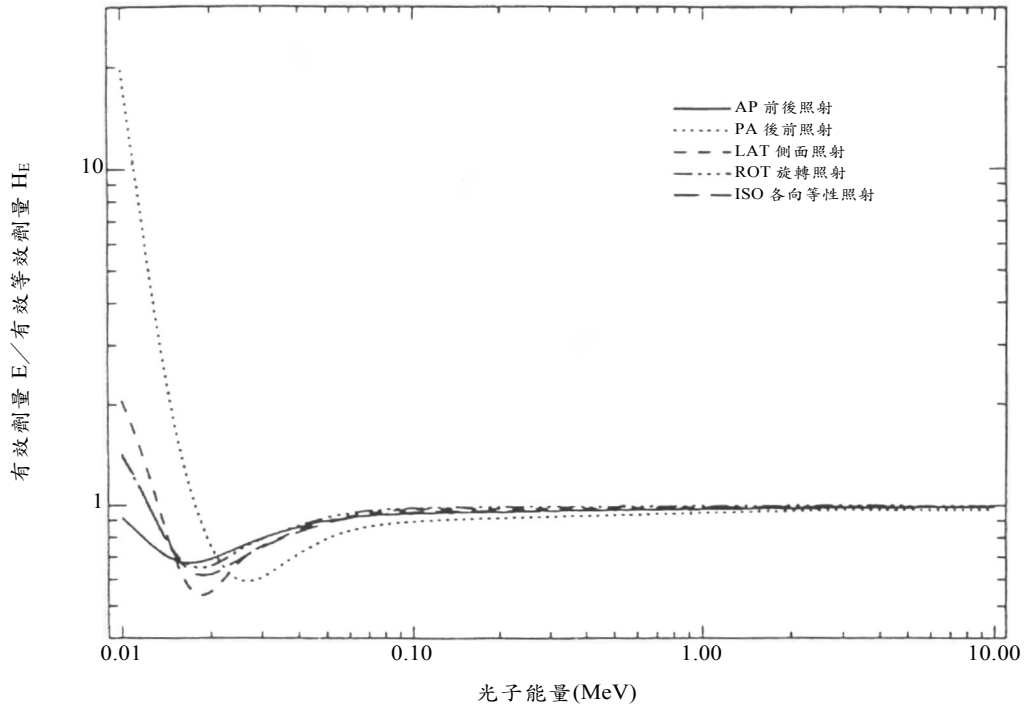


圖 E2 就一些照射幾何條件， E/H_E 為光子能量的函數

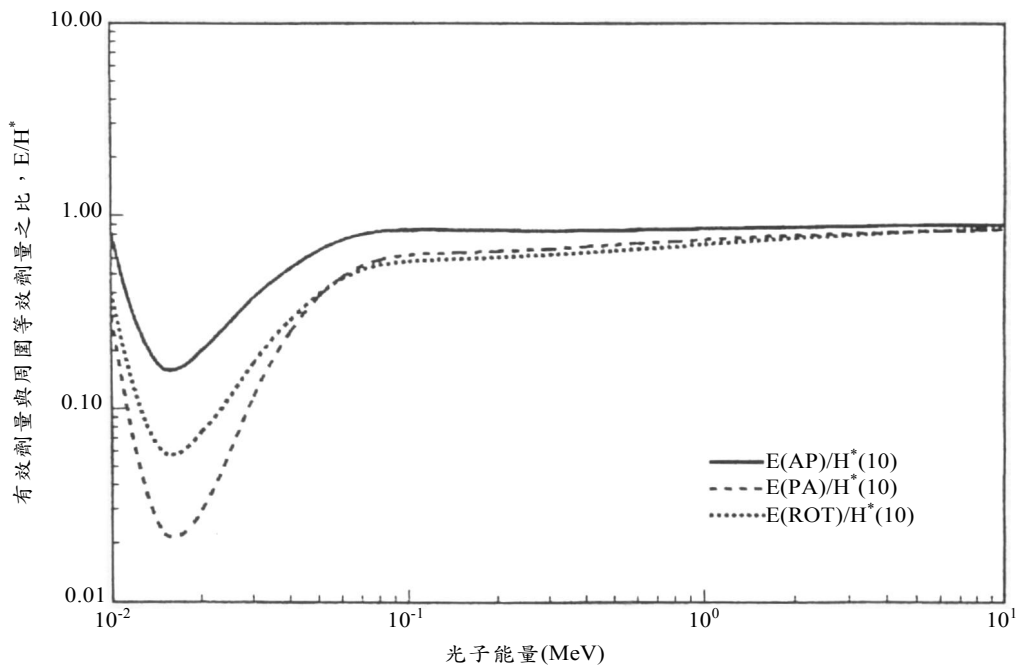


圖 E3 就不同的照射幾何條件， $E/H^*(10)$ 為光子能量的函數

所示，惟僅以光子與核能電廠作為例子，

化幾無影響，因此這也是國外核能

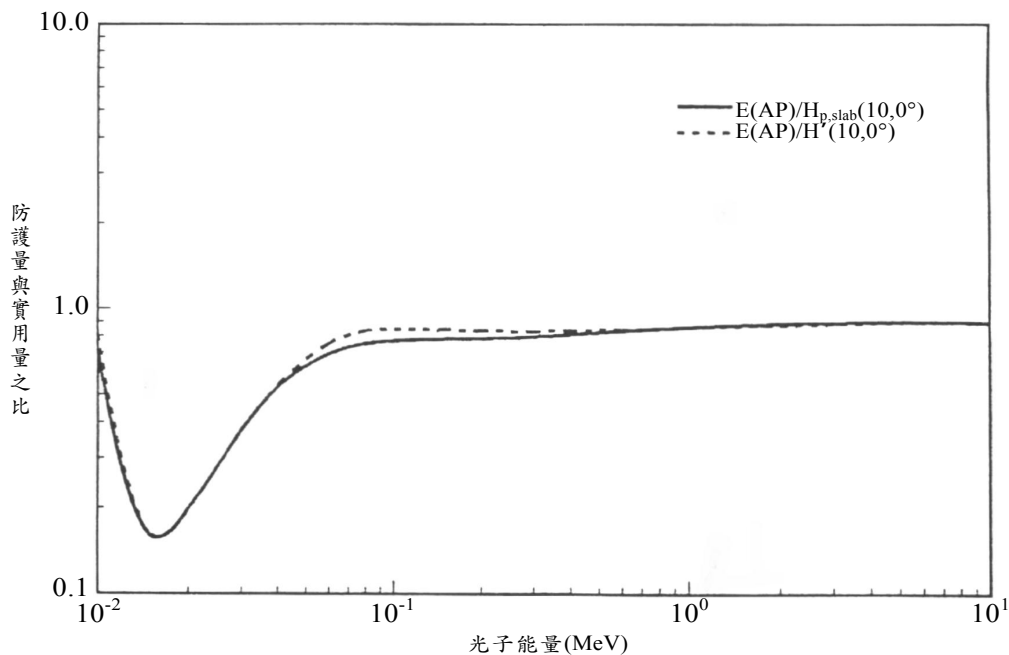


圖 E4 在前後照射的幾何條件下， $E/H_{p,slab}(10,0^\circ)$ 與 $E/H'(10,0^\circ)$ 之比，為光子能量函數

註：個人等效劑量符號中的 slab 係指 ICRU 板狀假體，30cm×30cm×15cm，0°係指垂直於板狀假體入射，10 指人體 10 mm 深處。

並以最重要的實驗結果為主，中子和電子須參照 ICRP-74 本文。

§E3 結論與建議

1. 綜合前面的論述，可以得到下列結論：

- (1) 對於 100 keV 以上所有能量的光子，在所有照射條件下，有效劑量 E 與有效等效劑量 H_E 的差異，不超過 12%，且在 1 MeV 以上時， E/H_E 值對所有照射條件而言都趨近於 1。一般核能電廠加馬能量分布在數百 keV 至數 MeV，雖然核能電廠輻射場為貝他與加馬射線混合者，但貝他射程甚短，占有有效劑量的比例極低，對舊劑量間的變

電廠在實務上將體外曝露造成的新舊制全身劑量以 1:1 換算的主因。故對核能發電廠劑量管制實務而言，貝他與加馬射線體外曝露造成的有效劑量與有效等效劑量間採 1:1 換算是合理可接受的。

- (2) 對眼球水晶體、皮膚及四肢而言，管制眼球水晶體、皮膚及四肢的確定效應，過去所用的等效劑量及現在採用的等價劑量，雖然名稱不同，但本質上為等同者。故在劑量管制實務上，新舊劑量間應毋需換算，可直接比較與加成(即視為 1:1)。

- (3) 一般國外來我國核能設施工作的人員所提出的供銜接管制的劑量紀錄幾乎都是體外劑量，且劑量的來源絕大多數都來自加馬射線。因此國外工作人員劑量紀錄若未特別聲明包括中子劑量、貝他劑量或體內劑量，在劑量銜接管制實務上，得視為來自加馬射線的體外劑量。故若須將有效劑量 E 與有效等效劑量 H_E 比較或換算，得視為 1:1。
- (4) 對中子來說， E 與 H_E 之間確有極為顯著的差別，且在不同能量區間 E 與 H_E 的比值變化極大(最高可達 7 倍多)，除了對 10 MeV 以上的高能中子外， E 與 H_E 不宜視為 1:1。在劑量管制實務上須將新舊制劑量換算的機會微乎其微。惟萬一有特殊狀況而涉及新舊制劑量換算，不宜逕自以 1:1 換算，應依據相關中子能量估算。若中子能量資訊不充分，宜採合理保守的假設。
- (5) 在核能電廠的管制區內並無純貝他(電子)的輻射場，在貝他與加馬混合的輻射場，貝他粒子由於射程短，在體外劑量所占的比例微乎其微。故就劑量管制實務而言，原則上無需考慮新舊制貝他劑量換算。
- (6) 關於體內曝露，由於 ICRP 相關文獻已提供了相當完整的資料，通常可以按照適用的法規體系(ICRP-60 或 ICRP-26)，分別計算

其體內劑量(約定有效劑量 E_C 與約定有效等效劑量 $H_{E,C}$)，且一般國外來我國核能設施工作的人員所提出的供銜接管制的劑量紀錄幾乎都是體外劑量，故正常情況下並無換算的需求。若萬一有換算需求時，可按 ICRP 相關文獻建議估算(例如 ICRP-68)。

2. 建議劑量管制實務上處理新舊制劑量換算的程序如下：

(1) 國外人員來我國核能設施工作時

- 適用於已施行 ICRP-60 劑量系統的國家派來的人員。
- 國外工作人員劑量紀錄若未特別聲明包括中子劑量、貝他劑量或體內劑量，視為來自加馬射線的體外劑量。劑量紀錄上的有效劑量 E [或 $H_p(10)$]與我國法規有效等效劑量 H_E (或深部等效劑量)視為 1:1；眼球水晶體、皮膚及四肢的等價劑量 [$H_p(3)$ 及 $H_p(0.07)$]與對應等效劑量之間亦視為 1:1，並據以銜接管制。
註：ICRP-60 劑量系統落實在法規實務上，是以個人等效劑量 $H_p(d)$ 代表體外劑量，在核能電廠因輻射場是以中高能量的光子為主，故 $H_p(10)$ (即 $d=10$ mm，對應於舊制的深部等效劑量)可代表體外有效劑量； $H_p(3)$ (即 $d=3$ mm，對應於舊制的眼球等效劑量)代表眼球水晶

等價劑量； $H_p(0.07)$ (即 $d=0.07$ mm，對應於舊制的淺部等效劑量)代表皮膚及四肢等價劑量。在以低能光子輻射場(尤其是 20 keV 以下)為主的輻射場，體外有效劑量必須考慮同時考慮 $H_p(10)$ 及 $H_p(0.07)$ 。

- 若國外工作人員劑量紀錄中有中子劑量的紀錄，且經保健物理部門判斷對工作期間的有效等效劑量管制實務有影響而有換算必要時，應依 ICRP-74(或 ICRU-57)所提供的新舊制劑量比值資料換算。若相關輻射能量資訊不充分時，得採合理保守的假設。
 - 若國外工作人員劑量紀錄中將約定有效劑量與體外有效劑量分項且合併計算時，則應將其體內攝入量按我國游離輻射防護安全標準附錄五規定的公式計算其與年攝入限度之比值，或依 ICRP-30 提供的劑量轉換係數計算其約定有效等效劑量，再與體外劑量合併並據以銜接管制。
- (2)我國人員赴國外核能設施工作且依對方要求提供換算為新制劑量的紀錄時
- 由熱發光劑量計偵測所得的體外深部等效劑量、眼球等效劑量及淺部等效劑量均以 1:1 分別換算為新制實用量 $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 及 $H_p(0.07)$ 。

- 若當事人的體外有效等效劑量紀錄含有中子劑量者，中子劑量部分應依 ICRP-74(或 ICRU-57)所提供的新舊制劑量比值資料換算修正。
- 若當事人的總有效等效劑量在紀錄上為體內外合併者，則體內劑量部分，應將其體內攝入量依 ICRP-68 提供的劑量係數計算其約定有效劑量作修正。

§E4 國際經驗回饋

據透過 WANO 國際組織和其他核能電廠資訊顯示，劑量名詞表示的使用，對實務管制工作的變革以體內劑量的評估較具差別。體外劑量部分則因仍使用原體外評估的 TLD 或其他人員劑量計，應有的誤差及劑量轉換係數，除低能量的光子、中子(原有的誤差就很大)有差異外，較高能量的光子(尤其核電廠常見核種的光子)， E/H_E 差異不大，仍以等效劑量 $H_p(1)$ 及 $H_p(0.07)$ 表示人員的劑量，並將新舊劑量視同相等，不做重新計算。區域和環境的量測則是按 ICRP-60 及 ICRP-74 的建議採用新的實用量及防護量。體內劑量評估部分，日本已採用 ICRP-68 新的劑量轉換係數；歐盟的西班牙電廠 Cofrentes 亦按新的呼吸模式及採用套裝軟體 INDAC 作體內劑量評估。韓國水力及核能(Hydro & Nuclear)公司亦僅還在技術標準研議階段，但據其表示 2003 年將可按新建議值

實施。WANO 莫斯科中心的資訊稱，體內劑量表示及計算的改變，是在將過去不可測量的量如等效劑量轉換為較具實務可測量的量如等價劑量。根據蘇聯衛

生部門公告的指引，新舊的比例換算為 1，電廠實用則以 0.8 作為管制。表 E1 為國際經驗回饋匯總。

表 E1 國際經驗回饋匯總

國家及核電廠	新法規實施經驗
日本關西電力公司 Kansai Electric Power 日本九州電力公司 Kyushu Electric Power	已採用 ICRP-60 (2001 年 4 月) 體外劑量 1. 採用 ICRP-74 劑量轉換係數 2. 仍使用原 TLD 3. 未做新舊量的加成或重新計算 體內劑量 1. 採用 ICRP-68 劑量轉換係數及 ICRP-74 劑量係數。
莫斯科 WANO 中心	已採用 ICRP-60 體外劑量 1. 採用 ICRP-74 劑量係數 2. 仍使用原 TLD 3. 未做新舊量的加成或重新計算 體內劑量(觀念上以不可測的量改為可測的量) 1. 採用劑量轉換係數 1/0.8 2. 輻射安全標準規定各種劑量管限制值
韓國水力與核能公司 Hydro & Nuclear	已採用 ICRP-60 體外劑量 1. 採用 ICRP-74 劑量係數 2. 仍使用原 TLD 3. 未做新舊量的加成或重新計算 體內劑量 1. 仍採用 ICRP-26/30 劑量轉換係數。 2. 正草擬體內劑量評估指引，預計 2003 年採用。 3. 現用 IAEA IBSS(國際基本安全標準)，1996 年。
西班牙 Cofrentes (BWR-6)	已採用 ICRP-60 體外劑量 1. 採用 ICRP-74 劑量係數 2. 仍使用原 TLD 3. 未做新舊量的加成或重新計算 體內劑量 1. 採用 ICRP-60/66 新的呼吸模式及劑量轉換係數。 2. 使用套裝軟體(INDAC)作劑量評估。

參考文獻

1. International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation, ICRP Publication 74, Pergamon Press, Oxford, UK (1997)
2. 魯經邦 個人請益 臺灣電力公司核能發電處，臺北市(2002)
3. 張繼聖 個人請益 第二核能發電廠，臺北縣(2002)

索引

二畫		公眾曝露	65,67
人數分布比	312	五畫	
三畫		西弗	288
下水道系統	59	生物正性	256
工作基準	66,322	生物負性	256
工作基準月	66,286,322	生物效應機制	242-245
上界值	226	未附著份額	322
干預	61,267,270,272,274,275,324	加馬攝影機	87
四畫		比能	45
介入放射學	79	比轉換能	45,47
中子通率	55,58	比釋動能	45
公平為基礎	302	可控制射源	305
不可避免射源	305	可控制劑量	303
可防止的年劑量	268	可發生游離輻射設備	323
分析技術	191	可選擇射源	305
分析樹技術	185	主管機關	61
中華民國放射醫學會	76	平衡因子	321
中華民國核能學會	103	平衡等效濃度	321
中華放射線醫學雜誌	76	六畫	
天然背景輻射	272	年	55,59,64
天然游離輻射	55,58	年集體有效劑量	311
天然輻射曝露	58	年集體劑量分布比	312
公眾中之個人	64	年攝入限度	59,225
		亞戈里可拉	279,280

索引

污水下水道	65	放射性污染	62
污染環境	324	放射性污染鋼筋	251-255
西弗	324	放射性物料管理局	103
同步輻射研究中心	119-127,179	放射性物質	62,323
宇宙線	55,58,62	放射性待處理物料管理處	103
有效等效劑量	39	放射性殘存物	272
有效劑量	42,63	放射性廢棄物	66,323
危害	64	放射免疫分析	85
合理可行抑低	303,306	放射毒性	55
合理抑低	226,255,303	放射照相術	189
危險度	321	放射試驗室	175-179
防護行動基準	305	放射學	71
七畫		非限制區	65
貝克勒爾	5,8,9,97	非密封放射性物質	202
吸收劑量	8,37,45,55,59,63,99	非破壞檢測	207
低限劑量	232	非機率效應	59
技術增強天然放射性物質	222	非醫用科	185
克魯克士	2-4	空浮放射性物質	65
克魯克士管	73	長期曝露	62
車諾比爾事故	101,110	直線加速器	81
沉積能	44	直線能量轉移	256,295
八畫		侖琴	1-5,7,9,56,97,98,281
其他技術	203	周圍等效劑量	41,63
附加年劑量	270	周圍等效劑量率	41,63
阿伐潛能	66	九畫	
居里	10-13,17,22-24,37,55,97	氦	317-322
定向等效劑量	41,63	既存年劑量	227,268-273,275
定向等效劑量率	42,63	相加危險度	237
放射性	17,54,58,62,323	相乘危險度	237
		相對危險度	237,322
		肺吸收類別	66

約束	228,271	原子能法	52-54,102
急性曝露	62	原子能委員會	36,49-53,56,102-104
約定有效等效劑量	39,59		167,179,308
約定有效劑量	43,66	原子能委員會(美國)	287
約定等價劑量	39,59	原子彈災害委員會	99,233
軍事機關	333	特別許可劑量限度	67
活度	58,62	被防止的年劑量	268
耐受劑量	56,98	倫理審議委員會	65
保健物理科	129	迴旋加速器	90
保健物理課	141-147	財團法人中華民國輻射防護委員會	
保健物理學會	99		60,103,127,128
美國保健物理學會臺灣分會	103	倍增劑量	239
計畫特別曝露	58	氣膠	66
背景輻射	62,305	郝濟時醫師	101,102
紅斑劑量	56		
持續曝露	261		
		十一畫	
十畫		推定空氣濃度	59
核一廠保健物理課	147-151	商品	66
核一廠廢棄物	212-215	訪客	66
核二廠保健物理課	151-154	設施為基礎	302
核二廠廢棄物	212-215	設施經營者	63,324
核三廠保健物理課	154-159	曼哈頓工程區	99
核三廠廢棄物	212-215	排除	220,223
核四廠保健物理課	159-166	深部等效劑量	38,39,59
核子醫學	71,84,85,92	淺部等效劑量	39,59
核種	54,58,62	異常	61
核醫學學會	94	異常曝露	61
個人為基礎	304	眼球等效劑量	39,59
個人等效劑量	43	清華大學	49,115-117,179
個人劑量等級	303	處置	209
個別人員監測	65	情節	227
		國家科學院游離輻射生物效應委員會	

索引

	100,233-235
國家游離輻射標準實驗室	335-340
國際放射防護委員會	39,56-58,98,99 105,107,108,246,283-285,288-306
國際原子能總署	37,57,99,102 103,109,185,290,297
國際輻射防護協會	100,293
國際輻射單位與度量委員會	8,41,98 281,288-298

十二畫

雇主	63,324
單次相互作用	43
單次事件	43
場所主管	59
等效劑量	37,38,41,55-58,62
等價劑量	42,63
量規技術	193
最終處置	218-221
最適化	63
絕對危險度	237-320
游離輻射	58,61,324
游離輻射防護安全標準	49,53-57, 103,104,111
游離輻射防護法	103,104,207,208, 301-303,323-334
集體劑量	42,63
集體劑量負擔	225
稀釋	226

十三畫

鈷 60 治療機	80,82,83
意外事故	62
意外曝露	55,58,62
損害	64
滯留	226
照射技術	199
微粒	65
電腦斷層掃描儀	77
腸轉移因數	66
群體劑量	306

十四畫

齊向場	43
管制地區	55,59
管制區	65
罰則	330
赫畏希	287
廓漬	66
臺灣輻射偵測工作站	103,167

十五畫

確定效應	64,235
緊急曝露	55,58,62,323
熱粒子	274
熱發光劑量計	252
監測區	65
實用量	341
實際活動	305
影像醫學	79
影響遺傳劑量	100,288

十六畫

聯合國原子輻射效應科學委員會	99,109,242,263,285,312
潛在曝露	66
線性無低限	306
線能	44
器官劑量	42,63
輻射工作	64
輻射工作人員	64,324
輻射作業	61,324
輻射作業場所	59,65
輻射作業場所負責人	65
輻射防護人員	59,65
輻射防護處	50,68,103
輻射效應基金會	100
輻射專業人員	55
輻射偵測中心	167-175
輻射程度	62
輻射腫瘤學	71,80
輻射源	58,61,324
濃集	226
劑量	38,41,58,62
劑量約束	63
劑量限度	64,324
劑量與劑量率效能因數	240
劑量積存	37,38,55
機率效應	59,64,243
遺傳劑量	37,55
整體工作人員劑量	306

十七畫

關切區分	305
關鍵群體	59,230
豁免	223-228,306
環境科	167
環境賀爾蒙	307

十八畫

醫用科	97
醫用曝露	58
擴展場	41,42,63
擴展與齊向場	41,63
職業曝露	64
醫療曝露	65,323

十九畫

職業曝露	58,323
曝露	58,61,323

二十畫

瀰散	226
蘭嶼貯存場	103

二十三畫

體內游離輻射	55,58
體內曝露	58,61
體外游離輻射	55,58
體外曝露	58,61

索引

英文

A 類	188
B 類	188
C 類	188
F 類	66
M 類	66
S 類	66

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺灣輻射防護史話 / 翁寶山編著. --臺北縣

永和市 ; 原能會, 民 92

面 ; 公分

ISBN 957-01-6260-0(平裝)

1. 輻射防護

448. 9

92023648

書名:臺灣輻射防護史話

編著者:翁寶山

出版機關:行政院原子能委員會

電話:(02)8231-7919

地址:臺北縣永和市成功路一段 80 號二至八樓

網址:<http://www.aec.gov.tw>

出版年月:中華民國 九十二年十二月

定價:NT\$750

展售處:國家書坊台視總店

地址:臺北市八德路三段 10 號 B1 電話:(02)2578-1515#643

三民書局重南店

地址:臺北市重慶南路一段 61 號 電話:(02)2361-7511

三民書局復北店

地址:臺北市復興北路 386 號 電話:(02)2500-6600

五南文化廣場

地址:臺中市中山路 6 號 電話:(04)2226-0330

新進圖書廣場

地址:彰化市中正路二段 5 號 電話:(04)725-2792

青年書局

地址:高雄市青年一路 141 號 3 樓 電話:(07)3324910

GPN:1009204346

ISBN:957-01-6260-0