

■出版單位：財團法人中華民國輻射防護協會
■地址：新竹市光復路二段406號2樓 ■電話：(03)5722224 電傳：(03)5722521
■編輯委員：王嵩峰、李四海、林友明、邱賜聰、翁寶山、許文林
陳為立、董傳中、劉仁賢、蘇明峰（依筆劃順序）
■發行人：曾德霖 ■主編：游澄清 ■文編：李孝華
■印刷所：大洋實業社 地址：新竹市光復路二段376之9號
行政院新聞局出版事業登記證局版北市誌字第柒伍零號

□輻防消息報導

▲ICRP 60號報告併入各國法令的現狀及動向 (輻協 李貞君譯)

國際原子能總署 (IAEA) 等國際機構以國際放射防護委員會(ICRP)第60號報告為依據所決定的輻射防護基準，就管理的適合性、合理化以及國際性管理基準的一致性的觀點來看，應該極力推崇。各國在研修相關法令時當如何採用此號報告，是大家所關切的。這裏先介紹ICRP 60號報告併入各國法令的現狀及動向。

1、國際性基準的改訂及修正

1) IAEA 等有關輻射防護之基本安全基準的改訂：

糧農組織(FAO)、國際原子能總署(IAEA)、國際勞工組織(ILO)、經濟合作與開發組織核能署(NEA-OECD)、泛美衛生組織(PAHO)、世界衛生組織(WHO)等單位聯合審議，以IAEA安全叢書第115號刊行。

2) 歐洲聯合閣員理事會指令的改正(1996年5月13日)：

加盟的15個國家，在2000年5月13日前都將遵守相關法令。

2、採行ICRP 60號報告制訂法令的國家及生效日期

- 1) 芬蘭：輻射防護法令（1992年1月1日）。
- 2) 瑞士：輻射防護令（1994年10月1日）。
- 3) 瑞典：輻射防護基準（1995年1月1日）。
- 4) 俄國：聯邦輻射防護法（1996年1月9日制定，2000年1月1日施行，只限定ICRP 60號報告所指定的職業人員及一般人的劑量限度）。
- 5) 澳洲：與職業曝露限值相關的國家基準（1995年6月）。

3、以ICRP 60號報告為依據的各國諮詢機構的報告

- 1) 英國國家放射防護委員會的聲明【英國國家放射防護委員會(NRPB)文件卷4第1號，1993】。
- 2) 美國國家輻射防護與度量委員會(NCRP)的報告。

4、主要法令項目所採行的狀

(1)職業曝露有效劑量的限值

歐洲加盟國家基本上所採行的是「5年內100毫西弗，1年內不超過50毫西弗」，但按照歐盟閣員理事會指令，年限度的數值最好在50毫西弗以下。此外，美國國家輻射防護與度量委員會提出了1年

50毫西弗和10毫西弗×年齡（累集有效劑量）二項建議。

(2)對於女性職業曝露的劑量限值

一般對於女性並沒有特別設定劑量限值，且對於可能懷孕的職業人員也廢止了每季的劑量限值。只有瑞典對於具生育能力的婦女採行10毫西弗／2個月的有效劑量限值。但由於加盟的歐盟國，目前正重新評估檢討相關法令。且美國國家輻射防護與度量委員會(NCRP)認為，萬一在懷孕的危險期受到50毫西弗的劑量，其危險性仍然很小，因此撤回長久以來對可能懷孕婦女「曝露時間要均分」的建議。對已確定受孕婦女的曝露限制有以下幾項：

1)IAEA等的基本安全基準：

- 女性從業人員一旦發現懷孕應告知雇主（建議）。
- 雇主對於胎兒防護標準應與一般民眾劑量限值相同（義務）。

2)歐洲聯合閣員理事會指令：

- 一旦通知業者已身懷孕，其胎兒就應該像一般民眾般來作保護。
- 懷孕期間的胎兒所受曝露應維持在不超過1毫西弗。

3)美國NCRP的建議：

- 一旦知道懷孕，其胎兒的劑量限值為0.5毫西弗／日（建議）。

4)芬蘭及瑞士的法令：

- 到生產前，對於體外曝露腹部表面的等值劑量不超過2毫西弗，體內攝取的有效劑量不超過1毫西弗。

5)瑞典：

- 胎兒的體外曝露是5毫西弗／懷孕期間（確定懷孕後是0.5毫西弗／日）。

- 體內曝露是0.01年攝入限度（ALI）（確定懷孕後）。

6)澳洲：

- 告知懷孕後，胎兒應採行與一般民眾相同程度的防護標準。

7)加拿大：（核能管理規則修正案）

- 當初提議腹部表面劑量為2毫西弗，一般建議更改為4毫西弗。

(3)職業人員的區分及個人劑量佩章

照歐洲聯合閣員理事會指令，輻射職業人員（工作時所受曝露易超過一般人的劑量限值者）依照劑量佩章的目的可區分為2種狀況。超過6毫西弗／年有效劑量或眼球水晶體、皮膚、手足超過劑量限值的3／10的職業人員（甲種狀況）應佩戴個人劑量佩章。

(4)作業場所的區分

管制區域、監視區域的設定及其基準，各國的運用方式皆不同，無法很簡單的作比較，但都傾向於依照ICRP 1990年報告的建議，以現場的判斷為主。

1)IAEA等的基本安全基準：

從特別的防護對策或安全上規定的必要性，建議設定管制地區、監督地區，但不用數值表示。

2)歐洲聯合閣員理事會指令：

按照輻射防護的目的，1年內可能超過1毫西弗的作業場所必須區分管制地區及監督地區。主管機關須制定分類相關方針，而業者須斟酌作業的條件。依照理事會指令，只規定對於管制地區與監督地區的最低要求（不含數值）。

3)芬蘭：（核能發電從業人員的輻射防護指針）

- 通常，超過2.5微西弗／小時的區域稱為管制地區。
- 4) 瑞士的法令：
 - 就屏蔽等的基準而論，在管制地區外不得超過0.02毫西弗／周（不常停留時是這個值的5倍）。
 - 5) 瑞典：
 - 管制地區外的個人有效劑量不超過每年5毫西弗，且無輻射污染發生。
 - 6) 澳洲：
 - 管制地區、監督地區的界線，一方面須考慮劑量和放射性物質的攝入標準及其變動，以及事故發生的可能性；另一方面也取決於操作經驗及判斷能力。
 - 7) 英國國家放射防護委員會的指導：
 - 根據射源固有的安全性，可以不必設定管制地區，只須重視監督地區內監督作業條件的進行。計算在監督地區內可以使用多少量的非密封射源。
 - 關於在監督地區外的劑量1毫西弗／年，則強調在其場所內的占有因數（occupancy factor）的考量。
 - 8) 美國：
 - 並無所謂的「管制地區」的概念。在輻射防護規則（10 CFR Part 20）裏，定義了「輻射地區」，即距離射源或輻射表面30公分處的劑量超過1小時0.05毫西弗的場所。
- 超過年劑量限值的緊急作業是依志願者而採行（軍人例外）。
 - 2) 歐洲聯合閣員理事會指令：
 - 加盟國須設定超過劑量限度時干預措施的劑量標準。
 - 這個標準必須是操作指引（operational guides），只可在救人命時使用，惟對志願者則屬例外。
 - 3) 芬蘭：
 - 在可能的範圍內，有效劑量為0.5西弗、皮膚為5西弗（不適用於孕婦）。
 - 4) 瑞士的法令：
 - 在異常狀態中為了保護居民安全、救人命的重要場合下，可超過劑量限值。
 - 事故恢復時的有效劑量，在最初的1年是50毫西弗，與保護居民安全、救人命有關時，須小心不超過250毫西弗。
 - 5) 瑞典：
 - 緊急時期的救助其劑量可高至年劑量限值的2倍，但是困難的緊急狀態時，會接受更高劑量的曝露（只限志願者）。
 - 6) 澳洲：
 - 必須限制在救人命或處理事故時所受到的劑量不會產生確定效應（針對志願者）。
 - 7) 美國NCRP的建議：
 - 限制在緊急狀態下的職業曝露，救人命者除外，有效劑量為0.5西弗，皮膚為5西弗。

(5) 緊急曝露

以ICRP 1990年建議的「不超過有效劑量約0.5西弗，皮膚約5西弗」（救人命者除外）為基準而加以採行。

1) IAEA等的基本安全基準：

- 應致力於維持在年劑量限值的2倍以下。另外，在救人命時為年劑量限值的10倍以下。

註：歐盟包括15個會員國如下：比利時、德國、法國、義大利、盧森堡、荷蘭、丹麥、愛爾蘭共和國、英國、希臘、葡萄牙、西班牙、奧地利、芬蘭、瑞典。

【摘譯自日本保健物理學會企畫委員會研討會紀錄東京電工館(1997)】。

▲考試消息

(原能會)

考試類別	報名日期及方式	考試日期	考試地點	備註
操作執照	87年元月8、9日 親自或指定代理人	02月19日(四) 上午八時卅分	台北(國家考場) 高雄(正修工專)	測驗簡章已寄發。請洽原能會非醫用科 (02)23634180-512

▲核三廠放射性廢料產量近期內可望大幅降低 (物管局 劉東山)

台電公司核能三廠「低放射性廢液高減容固化工程申請案」，已於 86 年 11 月 28 日獲原能會物管局核准通過，該工程預定可於今(87)年六月底前完工，完工後核三廠低放射性固化廢料產量可望大幅減少 75%，由近幾年來之每年 400 桶減少至 100 桶左右。

由於核三廠係壓水式核電廠，因此放射性廢料產量先天上較核一、二廠之沸水式電廠為少。根據歷年統計，核三廠自 73 年開始商業運轉以來，至 86 年 11 月 30 日為止，低放射性固化廢料累計產量為 8433 桶，平均年產量約為 600 桶。從其最近六年(1990--1996) 固化廢料產量顯示，已優於世界同類型電廠之平均值，表現良好。但核三廠仍不以此為滿足，近年來仍投下相當多之人力、經費，追求更卓越的廢料減量目標，值得嘉許。

目前核三廠正進行之「低放射性廢液高減容固化工程」，係採用核能研究所化工組黃慶村博士所研發成功的先進處理技術，以取代現行的水泥固化法。其最顯著效益在於能使固化廢料體積減少三到五倍，同時提昇廢料固化體品質，進而提高廢料貯存的安全性，可謂一舉數得。核能研究所此項技術已獲得世界十多國之專利，正積極推廣使用中，有助於推動本土科技的國際化。此項高減容固化工程完工

後，核三廠固化廢料年產量，可望躋身世界優良排名前三分之一。

至於國內沸水式電廠(核一、二廠)部分，亦積極在推動放射性廢料減量工作，其中核二廠業已委託核能研究所進行「核二廠濕性廢料高減容固化先導系統建立合作研究」中，為期二年。如一切進行順利，預計 89 年可開始進行高減容固化工程，90 年年底完工啓用，屆時核二廠固化廢料也可望進一步大幅降低。由於「進步緩慢，就是落伍」，看來核一廠如果再沒有大動作，不出數年，在廢料減量績效方面，恐怕會被遠遠拋在後頭。

□期刊書籍報導

▲新書介紹～「原子、核能、輻射」即將出版 (輻協)

原子科學一般給人們的印象是一門深奧艱深的科學，而坊間所出版有關原子科學的書籍大多以教科書為主更加深了人們對科學的距離感。而清華大學工程與系統科學主任王天戈博士為了使大家對原子科學不再陌生，以淺顯易懂的筆法撰寫了「原子、核能、輻射」這本書。本書雖專為青少年所寫的通俗科學書籍，但只要對科學有興趣的讀者，看了本書相信都會非常有興趣的。在架構上本書分成五個篇幅，分別為「世界是什麼構成的」、「輻射奧秘」、「不可捉摸的世界」、「核子時

代」及「輻射知多少」相信藉由本書的介紹，讀者對於原子科學必有新的體驗及瞭解，更能讚嘆科學的偉大。本書是由台灣書店印行，內容共 194 頁，對於輻射從業人員而言是一本不可多得的優良讀物。

□會議訓練報導

▲ICRP-60的現況與展望研討會

(輻協)

本協會訂於87年03月20日(星期五)假清華大學原科系演講廳免費舉辦為期一天的研討會。邀請清華大學董傳中教授、高

雄醫學院連熙隆教授、核能研究所邱志宏博士、台電公司黃金益課長及本協會翁寶山執行長主講。會議內容包括：目前各國法規採用ICRP-60號報告的現況、ICRP-60號報告重要內容探討與未來執行應注意事項、採用ICRP-60號報告對核能發電輻射防護的影響、採用ICRP-60號報告對醫療輻射防護的影響、採用ICRP-60號報告對研究機構輻射防護的影響。名額120人(依報名順序)。歡迎報名參加。連絡人：李孝華小姐。電話：(03)5722224 FAX：(03)5722521。

▲八十六年度輻協各項訓練班預定時間表

(輻協)

班 別	訓 練 日 期	上 課 地 點	聯 絡 人
鋼 材 班	87年02月17日至18日	高雄	邱靜宜
"	87年05月14日至15日	新竹	邱靜宜
非 醫 用 班	87年03月10日至17日	清華大學	李貞君
"	87年04月14日至21日	清華大學	李貞君
"	87年05月05日至12日	高雄	李貞君
"	87年05月19日至26日	清華大學	李貞君
"	87年06月02日至09日	高雄	李貞君
"	87年06月16日至23日	清華大學	李貞君
輻 防 班	87年03月02日至03月27日	聖經學院	邱靜宜

◎以上各項訓練班簡章備索，電話：(03)5722224◎

□專題報導

▲台灣地區職業曝露劑量之評估

(輻射偵測中心 林培火、陳清江)

我國游離輻射安全標準第三條第十二款「職業曝露」之定義係指工作人員於工作期間所接受曝露，而在國際放射

防護委員會(ICRP)第60號報告中，委員會認為實踐的防護體系「只有當工作時所接受曝露可以被合理地認定係有營運管理責任時才視為職業曝露」，比我國現行之游離輻射防護安全標準規定之定義更為明確。職業曝露劑量評估的目的在於瞭解各種職業別所造成的劑量以作為國民輻射劑量評估的依據。

職業曝露的分類可分為人造及天然輻射源照射等幾類工作人員。台灣職業曝露所分的類別較少，係因產業領域不同所致，在人造輻射源中核燃循環僅有核反應器運轉，並無核武器及核動力船艦之國防活動。另外，天然輻射源採礦業亦只有地下開採煤礦，航空業僅有飛行員及空服員的職業曝露。以下簡述民國79~84年期間台灣地區各項職業曝露劑量評估結果。

台灣地區人造輻射源造成職業曝露的分類為核電廠、工業應用、醫學應用及研究應用共四類。根據原子能委員會資料在民國79~84年期間，從事輻射工作人員總平均人數為22215人，總平均年集體劑量為19人·西弗，個人總平均年劑量為0.85毫西弗，各類及其分項之人數、年集體劑量變動範圍及其平均值、個人年劑量變動範圍及其平均值的統計結果，如表 1所示。

表 1台灣地區人造輻射源所造成職業曝露

類 別	人 數 (人)	年集體劑量〔平均值〕 (人·西弗)	個人年劑量〔平均值〕 (毫西弗)
核電廠	7917	14.1~18.1 [15.5]	1.85~2.22 [1.95]
沸水式	6005	10.2~14.8 [13.3]	1.96~2.40 [2.22]
壓水式	1912	1.36~3.35 [2.2]	1.85~1.95 [1.12]
工業應用	4844	0.62~2.22 [1.5]	0.16~0.48 [0.31]
放射照相	2445	0.33~1.62 [1.02]	0.22~0.48 [0.42]
其 他	2262	0.16~1.0 [0.48]	0.05~0.50 [0.21]
消費性產品	137	0.016~0.016 [0.02]	0.012~0.012 [0.12]
醫學應用	6188	0.47~1.51 [0.85]	0.07~0.24 [0.13]
診斷	5249	0.32~1.2 [0.68]	0.06~0.22 [0.13]
治療	427	0.02~0.08 [0.05]	0.05~0.19 [0.11]
核醫學	512	0.005~0.24 [0.12]	0.01~0.47 [0.25]
研究應用	3266	0.33~2.09 [1.16]	0.12~0.74 [0.36]
教育	1146	0.12~0.20 [0.13]	0.01~0.18 [0.11]
其他	2120	0.32~1.89 [1.03]	0.28~1.09 [0.48]
總 計	22215	12.5~22 [19.0]	0.5~1.0 [0.85]

統計資料：自民國79年~84年

天然輻射源的職業曝露劑量主要來自地下採礦及航空兩項職業，總工作人數約為2600人，評估其年集體劑量約為5.1人·西弗，約占全世界天然輻射源職業曝露年集體劑量的0.06%，個人年平均劑量約為2.15毫西弗。

自民國59~77年期間台灣煤礦年產量自460萬公噸至今已減至130萬公噸，煤礦工人由32000人減到數百人，已成爲台灣夕陽產業之一。爲瞭解台灣礦坑中氫活度水平，本中心於民國81年進行台灣北部新平溪、文山、利豐及南邦等

四個礦場坑道氡及其子核活度調查，偵測結果其活度在78~320貝克/立方公尺，平均濃度為147貝克/立方公尺(24mWL)。在民國79年後礦工人數約為1000人，氡子核平均濃度為24mWL，根據聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)1993年報告建議職業工作人員氡的劑量轉換因子為5.6mSv·WLM⁻¹，推算台灣煤礦工人受氡及其子核造成之職業曝露年集體劑量約為0.16人·西弗。

航空業的職業曝露劑量主要來自國內航線及國際航線的飛行員及空服員服勤時受宇宙射線產生之額外劑量，估計民國80年航空業空服人員總人數約2195人，造成之年集體劑量約為4.92人·西弗，平均年劑量約為2.23毫西弗。

目前UNSCEAR由職業曝露劑量評估全世界人口劑量，僅由人造輻射源各類別工作人員實際監測結果的年集體劑量評估全世界人口劑量約為0.84微西弗/人·年，其評估結果信賴度較高。而天

然輻射源部份因採礦及航空的職業曝露劑量係估計值，而非實測值，天然輻射源評估全世界人口劑量為1.68微西弗/人·年，兩者合計世界人口劑量約為2.52微西弗/人·年，如表2所示。顯示UNSCEAR天然輻射源評估集體劑量約為人造輻射源的2倍。但一般民眾關心來自採礦的天然輻射源的照射還不如來自人造輻射源在工業和醫學中應用所產生的照射那樣受到重視，而台灣天然輻射源的集體劑量約為人造輻射源的26%，其主要原因係台灣煤礦開採人數較少，又無花崗岩地質及鈾礦區，故天然背景輻射水平較低所致。由此評估台灣人造輻射源的國民輻射劑量約為0.9微西弗/人·年，與UNSCEAR評估結果相當。但天然輻射源的國民輻射劑量僅0.27微西弗/人·年，兩者合計台灣職業曝露造成的國民輻射劑量約為1.17微西弗/人·年，約為全世界職業曝露劑量的40%。

表2台灣地區職業曝露劑量與全世界之比較

職業類別		受監測工作人員的年平均人數 (千人)	年平均集體有效劑量 (人·西弗)	受監測工作人員的年平均有效劑量 (毫西弗)	人口數 (人)	國民輻射劑量 (微西弗/人·年)
全世界	人造輻射源	4000	4300	1.1	5.1×10 ⁹	0.84
	天然輻射源	5200	8600	1.7	5.1×10 ⁹	1.68
	總計	9200	12900	2.8	5.1×10 ⁹	2.52
台灣	人造輻射源	22.2	19	0.85	2.1×10 ⁷	0.90
	天然輻射源	2.6	5.1	2.15	2.1×10 ⁷	0.27
	總計	24.8	24.1	3.0	2.1×10 ⁷	1.17

註：全世界資料係引用UNSCEAR 1993年報告。

一、緒言

在核工領域裏偶而有機會看到如下的波茲曼粒子遷移方程式：

$$\Omega \cdot \nabla \Phi_g(r, \Omega) + \Sigma_t^g(r) \Phi_g(r, \Omega) = S_g(r, \Omega) + \sum_{g'=g}^1 \int_{4\pi} d\Omega' \Sigma_s^{g' \rightarrow g}(r, \Omega' \rightarrow \Omega) \Phi_{g'}(r, \Omega')$$

此式非常複雜，要獲得方程式解確實不易，如果引用蒙地卡羅方法雖不能獲得真解但卻不難取得其解的估計值。以上僅是將蒙地卡羅法應用到數學方程式求解的一個範例，其實蒙地卡羅法應用的範圍非常廣泛例如：在輻防及核工領域中，輻射偵檢儀器效率的估算、體內劑量計算、醫用輻射劑量評估、複雜輻射屏蔽計算、落塵分布估計、核反應器臨界估算等等，皆可獲得符合實用價值的解答，至於在其他領域的應用上，例如企業競爭激烈的今日，若根據收集到的商業情報使用本法加以分析該可研判出最佳的經營策略，又生物研究需時頗長、耗費人力也多、而且得到的結果精準度又不易達要求水準，若能使用本法

將可克服部分困難，另外研討某一地區或民族的特性，可根據所蒐集到的相關社會資料藉由本法獲得結果，其他例如：電子工業晶片產品之改進、軍事上兵棋推演模擬甚至環境評估如廢水排放之模擬追蹤等工作皆適用。

二、蒙地卡羅方法

蒙地卡羅方法是一種統計學上的方法，該法利用隨機取樣 (random sampling) 的步驟並引用統計學上的中央極限定理 (central limit theorem)，求得問題解答的估計值及其統計偏差。茲舉兩個實例更詳細說明本法依不同題形所採的執行步驟。

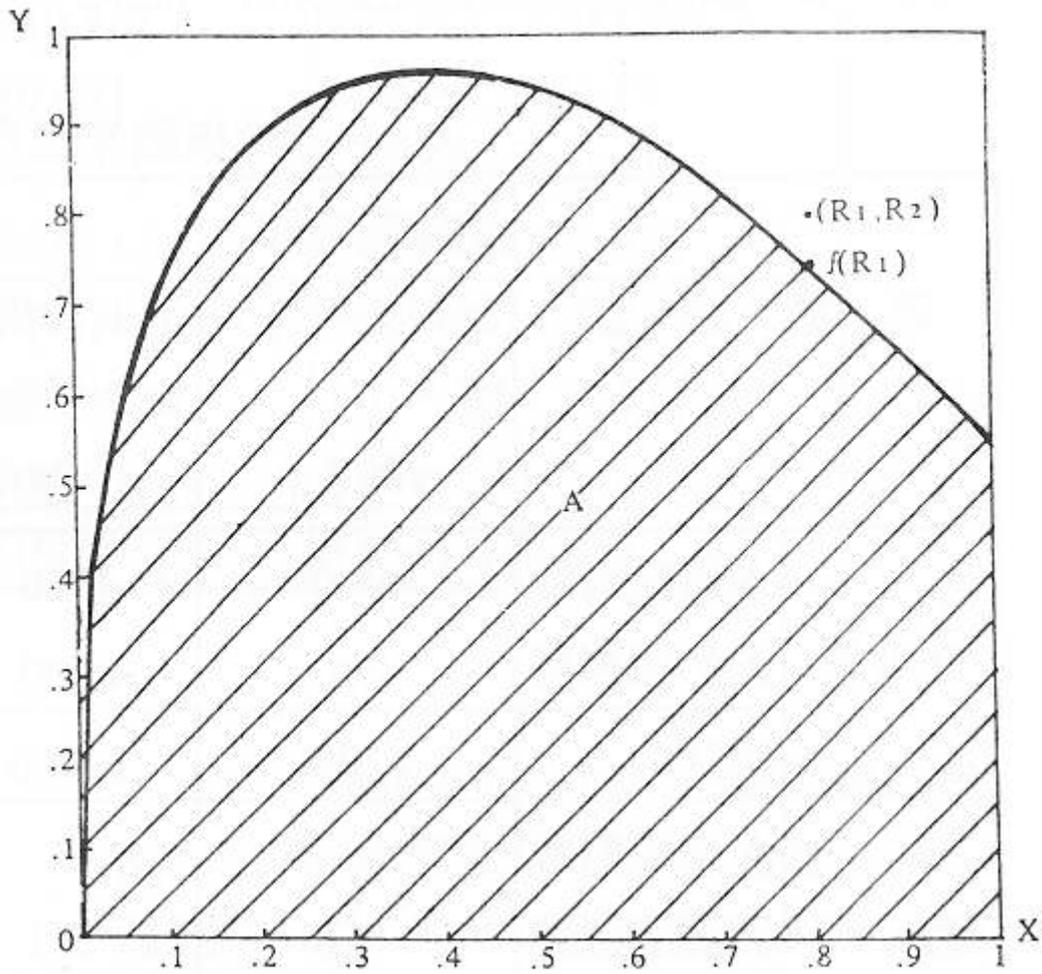


圖 1、之曲線圖

例 1 求 $A = \int_0^1 e^{-x^2} \ln(x+14) \sin \sqrt[3]{x} dx$,

即圖 1 曲線下斜影之面積。

(已知 $0 \leq x \leq 1$ 且

$$0 \leq e^{-x^2} \ln(x+14) \sin \sqrt[3]{x} < 1)$$

本例之求解步驟如下：

- 1.由均質隨機數產生器取一隨機數 R_1 ，代表上式 x 的值，
- 2.再取一隨機數 R_2 形成在 x - y 平面上的一個點 (R_1, R_2)
- 3.計算 $f(R_1) = e^{-R_1^2} \ln(R_1 + 14) \sin \sqrt[3]{R_1}$ ，而得 $x = R_1$ 時曲線上 y 的值 $f(R_1)$
- 4.比較 R_2 與 $f(R_1)$ 如果：
 - (1) $R_2 > f(R_1)$ 則表示點 (R_1, R_2) 不在曲線下斜影內，此時令 $M = M$ ， $N = N + 1$ ，
 - (2) $R_2 \leq f(R_1)$ 則表示點 (R_1, R_2) 在曲線下斜影內，此時令 $M = M + 1$ ， $N = N + 1$ ，
- 5.由 1.到 4.重覆 n 次($N=n$)，落在斜影內的有 m 個($M=m$)，則得曲線下斜影面積 "A" 之估計值為 m/n ，且估計誤差(一個標準差)為 $\frac{1}{n} \sqrt{\frac{m(n-m)}{n-1}}$ 。

上例所談到的隨機數係指一系列被產生時並無法預知且不會重現的數，通常這些數被侷限在 0 與 1 之間。由於無法預知且不會重現的數在實用欠缺被驗證的可行性，故使用本法時均以數學方法配合計算機產生可預知且可重現的「假隨機數」取代真正的隨機數。均質隨機數係指產生的隨機數均勻地分布在 0 與 1 之間。

例 2 有一已知能量 E_0 之點加馬射源，如圖 2 所示置於屏蔽牆之一側，求牆之另一側之加馬射線穿透率？

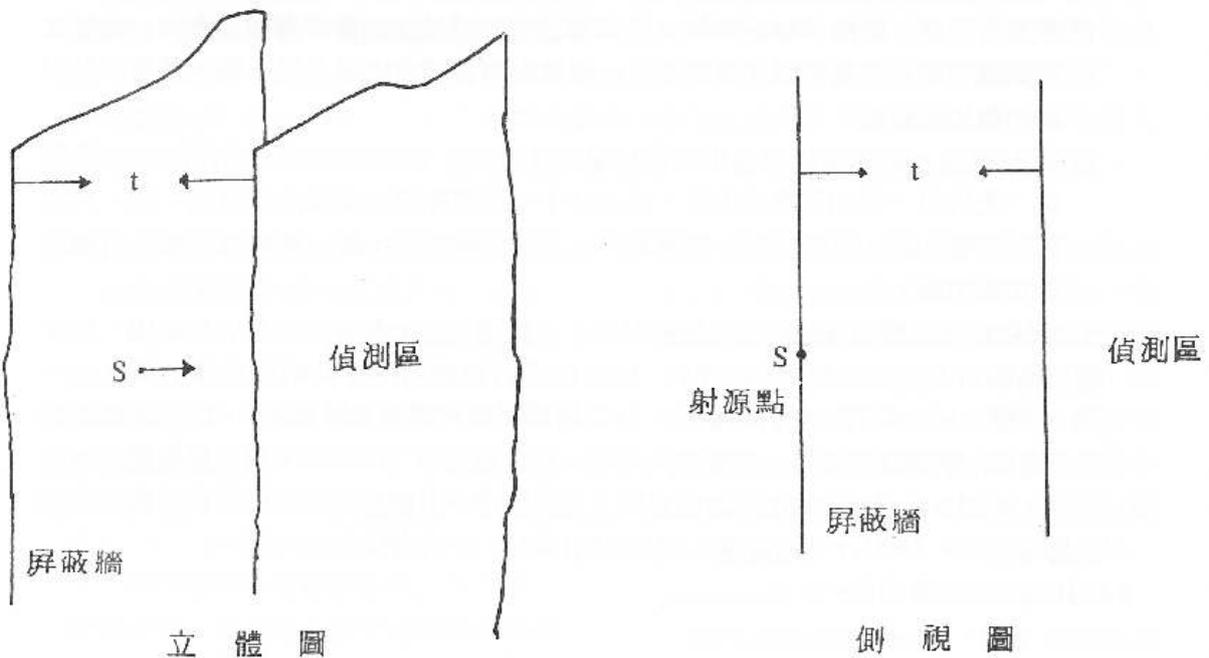


圖 2、點射源加馬射線穿透屏蔽牆示意圖

加馬射線離開射源後就不斷飛行直到與物質發生碰撞，碰撞後可能就停止前進，也可能折向繼續前進，這些行為在數學上可藉由前述的波茲曼方程式加以描述。此式再加以推導分解還可以獲得碰撞、飛行兩個更具物理意義的方程式，此二式並可套用蒙地卡羅方法加以模擬求解。針對簡單的問題，如本例則可直接依加馬射線之物理現象加以追蹤模擬，其求解步驟如下：

1. 加馬射線離開射源後，往各個方向飛行的機會相同或稱各向同性，若射出方向以立體球座標各軸的方向餘弦(α 、 β 、 γ)表示，則可藉用隨機數 R_1 、 R_2 而得：

$$\theta = \pi R_1, \phi = 2\pi R_2, \alpha = \sin\theta \cos\phi, \beta = \sin\theta \sin\phi, \gamma = \cos\theta。$$

2. 由下式利用隨機數 R_3 以及能量為 E 之加馬射線的直線衰減係數 $\mu_t(E)$ 決定加馬射線與屏蔽物質作用前所飛行的長度 l ：

$$l = \frac{-1}{\mu_t} \ln R_3。$$

3. 利用隨機數 R_4 以及加馬能量為 E 時之光電效應係數 $\mu_{pe}(E)$ 、康普吞效應係數 $\mu_{ce}(E)$ 、成對效應係數 $\mu_{pp}(E)$ ，並由下列各式決定加馬射線與屏蔽物質作用後所發生的是光電、康普吞或成對效應：

$$0 < R_4 \leq \mu_{pe}(E) / \mu_t(E), \text{ 發生光電效應，}$$

$$\mu_{pe}(E) / \mu_t(E) < R_4 \leq [\mu_{pe}(E) + \mu_{ce}(E)] / \mu_t(E), \text{ 發生康普吞效應，}$$

$$[\mu_{pe}(E) + \mu_{ce}(E)] / \mu_t(E) < R_4 < 1, \text{ 發生成對效應。}$$

4. 作用後所發生的若是：

(1) 光電效應，則令加馬射線在碰撞點停止，重新於點射源再取加馬射線。

(2) 康普吞效應，則依 Klein-Nishina 公式算出碰撞後放出的康普吞加馬方向、能量並再繼續追蹤此加馬射線，直到在下一碰撞點停止或穿出牆之另一側，重新於點射源再取加馬射線。

(3) 成對效應，則碰撞後將放出二個能量 0.511MeV 各向同性但方向相反的加馬射線，先取第一個加馬繼續追蹤，直到在下一碰撞點停止或穿出牆之另一側，再追蹤第二個加馬，直到在下一碰撞點停止或穿出牆之另一側，後再重新於點射源再取加馬射線。

5. 若加馬射線被追蹤後其結局是在碰撞點停止，則牆之另一側並無加馬射線穿出，故穿牆加馬數目不增加，維持 $M = M$ ，但若加馬射線被追蹤後其結局是穿出牆之另一側，則牆之另一側有加馬射線穿出，計數增加一個，要令 $M = M + 1$ 。以上兩種結局皆由追蹤一射源加馬而得，射源加馬多取一個，故要令 $N = N + 1$ ，但成對效應的情況不同，兩個 0.511MeV 的加馬射線實際上是由追蹤一射源加馬而得的，故追蹤第一個加馬時仍令 $N = N$ ，到追蹤第二個加馬時再令 $N = N + 1$ 。

6. 統計誤差的估算同例一。

三、蒙地卡羅運算技巧

蒙地卡羅方法適合用來解決其他方法不易克服的複雜問題，依大數法則(law of

larger number), 取樣數越大所得的估計結果越精準, 相對地所花費的計算機時間也越長, 像例 2, 如果加馬射線極不易穿出牆外時, 計算機時間的使用將會長到不切實際的地步。為縮短計算機時間專家於是想出一些扭曲加馬射線行進路徑, 逼之加速往偵檢區前進的方法, 特稱之為偏導技巧(biasing technique), 又因為使用這些技巧可降低估計結果的誤差, 提升結果精確度故又稱為變異數降低技巧(variance reduction technique)。引用偏導技巧雖可提升結果精確度, 但若技巧引用不當反而會得到更不準確的估計值而不自知, 宜須注意。

四、結語

蒙地卡羅方法基本原理十分簡單、易學, 但需要選取大量的樣品, 逐一追蹤模擬, 才能獲得較有意義的結果, 也因此需要花費的計算機時間相當可觀, 所以以往本法的應用並不普及, 今日電腦硬、軟體皆非昔日可比, 尤其三度空間繪圖功能的高強, 追蹤模擬過程的細節均可一清二楚, 使得結果的可信度大為提高, 本法的應用該不再是一種奢侈的行為, 值得極力推廣。

五、後記

二十多年前筆者蒙長官提拔赴美研習蒙地卡羅數學方法, 之後又蒙清華翁教授器重得在該校與多位原科所同學共同探討該法之理論及應用近十載, 復受該校江祥輝教授、薛燕婉教授之肯定得於民國七十六年利用暑期蒙地卡羅法推廣班參與解說工作之際了解各領域之需要。當年使用該法解決問題的最大困難就是電腦速度太慢, 而致無法解決一些較複雜、實際的問題, 所以當年為文時結論經常提到的是“日後電腦發展到一定水準時, 蒙地卡羅方法將可以具體地克服不少其他方法所不易解決的難題”。拜電腦發展的神速, 今日已有不少專攻蒙地卡羅方法應用之專家學者, 相信本法的大眾化指日可待, 特為文再談本法以達拋磚引玉之效, 最後並感謝周冬寶博士之斧正。

▲ 接受體內核醫檢查病人所受的輻射劑量與其排泄物的處理方法? (續) (國泰醫院 杜慶燾)

4. 如何和接受過核醫學檢查的病人接觸

接受過放射性藥品投予在體內的病患本身已成為輻射源, 因此和這些病患接觸時, 易受到輻射的照射。表3顯示, 接受體內放射線診斷病人所釋放出的劑量率。嬰幼兒和接受過核醫學檢查的病人應儘量保持距離, 並縮短接觸的時間。餵乳中的母親若接受過放射性物

質的投予, 則放射性物質會隨著母乳而排出, 雖然依核種的種類有所不同, 但餵乳中的母親在接受過核醫檢查後, 其餵乳時間至少須停止四小時以上。依 ICRP 52 的報告, 餵乳中的女性在接受過核醫檢查後, 其餵乳時間必須按照下列四項限制來實行: ① 須停止 3 個星期的藥品: ^{131}I 與 ^{125}I 的化合物 (^{131}I - hippuran 除外)、 ^{22}Na 、 ^{69}Ca 、 ^{201}Tl 、 ^{175}Se (Seleno-methionine), ② 至少須停止 12 個小時的藥品: ^{131}I 、 ^{125}I 、 ^{123}I - hippuran、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 化合物 (除標準紅血球、

Su-Mop、DTPA)，③至少須停止4個小時的藥品：^{99m}Tc 紅血球、Su-Mop、

DTPA，④無須停止的藥品：⁵¹Cr-EDTA。

表3 接受核醫檢查病人（成人）的劑量率

檢查的種類	放射性醫藥品	代表的投予量 (MBq)	劑量率(nSv/h per MBq)					
			投予後			2小時後		
			0	0.3m	1m	0	0.3m	1m
骨骼影像	^{99m} Tc MDP	150~600	27	13	4	13	7	2
肝影像	^{99m} Tc colloid	10~250	27	13	4	20	10	3
血液儲存量	^{99m} Tc RBC	550~740	27	13	4	20	10	3
心肌影像	²⁰¹ Tl	50~110	36	18	6	36	18	6

註：表中m為公尺

(ICRP Publ.52)

5. 體內核子醫學檢查對病人的放射性影響

由表2(詳見28期p9)中可看出，在核醫診斷中病人的照射劑量，不必擔心會對人體有任何影響。但是減少每個病人的檢查劑量，相對地可以減少病人一生及全國民眾的照射劑量，所以國際原

子能總署在1994年報告（IAEA BSS 1994/9）中，特別公布體內核醫檢查時，放射性藥品投予量的最高限制，如表4所示。故做體內核醫檢查時，應小心其使用量，以不超過此最大量為準。最後特此感謝清華大學翁寶山教授之指正。

表4、典型的體內核醫學診斷時放射性藥品的最大投予量

檢查的種類	核種	化合物	檢查之最大投予量 (MBq)
骨骼影像	^{99m} Tc	MDP	600
骨骼影像(SPECT)	^{99m} Tc	MDP	800
腦血流	^{99m} Tc	HMDAP	500
腦血流	¹³³ Xe	GAS	400
甲狀腺影像	^{99m} Tc	TcO ₄ ⁻	200
甲狀腺影像	¹²³ I	I ⁻	20
心臟影像	²⁰¹ Tl	Tl ⁺	100
心臟影像(SPECT)	^{99m} Tc	MDP	800
循環器影像	^{99m} Tc	MAA	800
肺灌流影像	^{99m} Tc	MAA	100
肺影像	^{87m} Kr	GAS	6000
肺換氣量測定	¹³³ Xe	GAS	400
膽肝影像	^{99m} Tc	HIDA	150
唾液腺影像	^{99m} Tc	TcO ₄ ⁻	40
腫瘤影像	⁶⁷ Ga	Citrate	300
淋巴結影像	^{99m} Tc	Colloidal Sn hydroxide	80

資料來源：IAEA BSS 1994/9)

附錄一：成人器官、組織的放射性藥品照射劑量(pGy/Bq)〔丸山隆司氏等：日本醫學放射線雜誌 48, 1540(1988) 〕

放射藥品	卵巢	精巢	紅骨髓	乳房	甲狀腺	肺	骨表面	肝	腎	脾	副腎	大腸上部
^{99m} Tc-Pertechnetate	2.19	2.07	2.32	0.888	12.2	2.66	4.16	3.55	3.15	3.75	2.90	2.15
^{99m} Tc-MDP	2.29	1.90	7.65	1.87	2.17	2.54	13.8	2.90	2.61	2.54	3.01	2.1
^{99m} Tc-Coloidal Snhydroxide	1.29	3.06	3.80	4.51	0.529	6.33	5.84	105.6	10.8	74.1	11.8	6.13
^{99m} Tc-Phytic acid	1.29	3.06	3.80	4.51	0.529	6.33	5.84	105.6	10.8	74.1	11.8	6.13
^{99m} Tc-Albumin	1.24	0.487	4.56	5.07	1.74	68.1	5.69	7.20	45.3	9.54	1422.	2.21
^{99m} Tc-DTPA	0.983	0.669	1.12	0.390	0.710	0.934	1.80	1.70	25.2	2.16	2.38	1.06
^{99m} Tc-HIDA	17.6	2.39	19.4	5.56	2.61	4.81	3.42	33.5	8.68	4.27	7.39	205.
^{99m} Tc-PYP	6.75	3.68	8.95	2.08	1.46	1.76	16.0	1.56	10.5	1.63	2.51	1.43
^{99m} Tc-MAA	0.889	0.569	2.85	4.27	1.73	63.0	4.18	11.2	2.44	3.85	4.76	1.24
¹³¹ I-Adosterol	224.	180.	93.3	27.0	7253.	210.	251.	262.	229.	265.	13860.	144.
¹³¹ I-Hippurate	0.649	0.332	0.510	0.272	0.343	0.554	1.35	1.33	123.	2.38	3.09	0.900
¹³¹ I-HSA	438.	350.	161.	43.6	338.	359.	449.	448.	376.	450.	443.	266.
¹³¹ I-NaI	39.4	30.9	62.5	62.8	6.17×10 ⁵	123.	356.	56.3	40.7	54.9	59.1	25.4
¹³¹ I-NaI	2.76	2.24	8.30	1.86	5850.	4.50	16.3	4.31	3.16	3.83	3.51	2.27
⁶⁷ Ga-Citrate	46.0	36.2	38.9	12.7	39.5	46.3	79.9	117.	89.8	151.	60.0	36.1
²⁰¹ Tl-Chloride	38.6	91.7	38.9	7.83	123.	9.47	70.2	127.	228.	45.3	48.5	37.0
⁷⁵ Se-Selenomethionine	1105.	876.	1360.	694.	1480.	620.	2280.	5790.	4290.	3180.	2000.	1170.
¹³³ Xe-IV	0.443	0.362	0.256	0.100	0.406	32.2	1.19	0.562	0.417	0.580	0.571	0.253
¹³³ Xe-Gas	0.443	0.362	0.256	0.100	0.406	32.2	1.19	0.562	0.417	0.580	1.571	0.253
^{133m} In-DTPA	48.0	13.8	85.0	35.0	13.2	38.2	107.	135.	4760.	283.	344.	95.5
¹¹¹ In-Chloride	23.8	19.0	56.9	8.74	20.5	24.5	103.	38.9	28.9	32.6	29.8	21.8
^{81m} Kr-Generatooe	4.98	4.02	1.63	0.593	4.31	4.62	3.92	5.73	4.79	5.71	5.58	3.22
^{81m} Kr-Gas	0.0291	0.0115	0.0472	0.0800	0.0203	0.677	0.162	3.78	0.153	0.0552	0.204	0.0970
⁵⁹ Fe-Ferric citrate	1.69×10 ³	3.64×10 ⁴	2.32×10 ³	1.98×10 ³	8.69×10 ²	5.76×10 ³	5.36×10 ³	3.55×10 ⁴	2.20×10 ⁴	4.77×10 ⁴	7.20×10 ³	2.98×10 ³
荷重係數Wr	0.25	0.25	0.12	0.15	0.03	0.12	0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

附錄二：放射性藥品中英文名稱對照

符號	號	放射性藥品名
^{99m} Tc	Pertechnetate	過銻酸鈉(^{99m} Tc)注射液
^{99m} Tc	MDP(Methylene Diphosphonate)	甲烯基二磷酸銻注射液
^{99m} Tc	Coloidal Snhydroxide	膠體氧化錫銻注射液
^{99m} Tc	Phytic acid	植酸銻(^{99m} Tc)注射液
^{99m} Tc	Albumin	銻人血清白蛋白注射液
^{99m} Tc	DTPA(Diethylene triamine penta acetate)	二丁烯三胺五醋酸
^{99m} Tc	HIDA=N(2,6dimethyl phenyl carbamoyl methyl)imino-diacetate- ^{99m} Tc	
^{99m} Tc	PYP(Pyrraline)	吡咯酸銻注射液
^{99m} Tc	MAA(Macroaggregated albumin)	巨凝集巨蛋白
¹³¹ I	Adosterol	
¹³¹ I	Hippurate	碘化馬尿酸鈉注射液
¹³¹ I	HSA (Human Serum Albumin)	碘化人血清白蛋白注射液
¹³¹ I	NaI(Iodine 碘)	碘化鈉(I-131)膠囊
¹³¹ I	NaI	碘化鈉(I-123)膠囊
⁶⁷ Ga	Citrate(Ga: Gallium 鎵)	鎵-67枸橼酸鹽注射液
²⁰¹ Tl	Chloride(Tl: Thallium 鉍)	鉍-201氯化鉍注射液
⁷⁵ Se	Selenomethionine(Se: Selenium 硒)	二胺四甲基硒丁酸
¹³³ Xe	IV(Xe: Xenon)	氙-133注射液
¹³³ Xe	Gas	氙-133吸入用氣體
^{133m} In	GTPA(In: Indium 銻)	二乙稀三胺五醋酸銻注射液
¹¹¹ In	Chloride	氯化銻(¹¹¹ In)注射液
^{81m} Kr	Generator(Kr: Krypton 氙)	氙發生器
^{81m} Kr	Gas	氙(^{81m} Kr)吸入用氣體
⁵⁹ Fe	Ferric citrate	檸檬酸鐵注射液

▲什麼是“放射性”和“輻射”(續)
(清華大學 朱鐵吉)

問 4、輻射的能量究竟是怎麼回事？

答 4、輻射的能量依輻射的種類有不同的含意。x 射線和 γ 射線這類電磁輻射，如前所述，其能量隨頻率的增高(即隨波長之減短)而增大。而 α 射線、 β 射線、電子、和中子這一類粒子輻射，其速度大則能量也大。

由輻射產生裝置得到的人造輻射(電子輻射、x 射線等)能量決定於施加在裝置上的電壓。例如施加在電子輻射產生裝置上的電壓為 1MV，就可得到能量為 1MeV 的電子輻射。電子伏(eV)是用於原子或分子世界的能量單位。

與此相反，由放射物質放出的輻射(α 射線、 β 射線、 γ 射線)的能量決定於放射性物質的種類。例如，鈷 60 放射的 γ 射線有 1.17MeV 和 1.33MeV 兩種能量；碳 14 會放射出 0.15MeV 的 β 射線。

問 5、輻射具有什麼性質？它對物質產生什麼樣的作用？

答 5、輻射的性質與作用，可分為穿透作用、游離作用、熱作用、膠片感光作用、螢光作用等 5 項，有代表性的是以下兩項：

- (1)具有貫穿物質的性質(穿透作用)
- (2)當輻射通過物質時，能使物質中的原子、分子產生游離。換言之，在物質中產生帶正電荷及負電荷的離子(游離作用)。

游離就是圍繞原子核旋轉的電子被擊出，離開原子核束縛的現象，猶如圍繞太陽旋轉的行星離開太陽系一樣。因為電子離開了，故稱為游離。因輻射而

產生游離的原子、分子成為正離子；而捕獲了電子的原子、分子成為負離子。

穿透作用和游離作用的大小隨輻射的種類(α 射線、 β 射線、 γ 射線或 x 射線)而有顯著差別。即使是同種輻射，依其能量也有差別。表 3 是 α 射線、 β 射線和 γ 射線穿透力和游離本領的比較。 α 射線的游離本領大，能使較多的原子、分子游離，因此消耗了較多的能量，其穿透力也就小了。與此相反， γ 射線的游離本領小，因此穿透就大。 β 射線的穿透力和游離本領則在 α 射線和 γ 射線之間。

表 3 輻射的穿透力和游離本領

	穿透力	游離本領
α 射線	1	10^4
β 射線	10^2	10^2
γ 射線	10^4	1

α 射線在空氣中的穿透力只有幾公分，一張紙就很容易把它擋住。 β 射線在空氣中的穿透力為幾拾公分到幾公尺，但數毫米的鉛板或 1cm 厚的塑膠板就能把它擋住。與此相反， γ 射線的穿透能力很強，要用相當厚的鉛板或混凝土來防護(要使 γ 射線的強度降到原來的 1/10，需要約 4 公分厚的鉛板或約 20 公分厚的混凝土)。

利用輻射穿透作用的例子有 x 射線胸部透視檢查， γ 射線檢查船舶的焊縫或飛機發動機的缺陷等。穿透到物體內部的輻射強度隨穿透的厚度而減弱；物體的密度越大，減弱得越多。因此，如果測定透過後的輻射強度，就可以瞭解物體內部的缺陷或有無異物，以及異物的分布。

此外，輻射照射物質時，由於上述的游離作用，組成物質的原子、分子的電子被擊出到外側，原子、分子就被游離了，或者分子間的化學鍵被切斷。利用輻射的照射來促進化學反應，防止馬鈴薯發芽，對醫療器具(注射器、手術線等)進行滅菌，或破壞癌細胞等等，這些基本上都是靠游離作用。

除穿透作用和游離作用外，輻射的性質和作用還有升高溫度的作用(熱作用)，使膠片感光的作用，使夜光塗料發光的作用(螢光作用)等。微波、紅外線、紫外線也有一部分這些作用。微波的熱作用見於微波爐；紅外線的熱作用見於電熱器和電爐；光或紫外線的感光作用見於照相機的膠片感光；還可以見到其它各種應用實例。

問6、輻射的強度和輻射的量指的是什麼？

答6、如前所述，由於輻射與光同屬一類，輻射的強度與量可以與光的情況相同的方法來考慮。

首先，輻射的強度與光的照度相當，某點處的照度(表面的亮度)為一秒鐘內入射到一平方公分的表面上的光的量，以勒克司(Lux)為單位。與此對應，某點處的輻射強度，用一定時間內每一克物質中因游離作用而產生的離子對總數表示。其單位通常採用戈雷/時

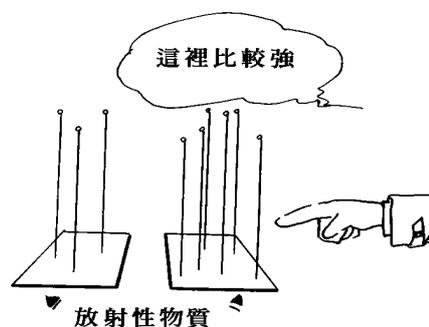
(Gy/h)。以人體為特定對象時，採用西弗/時(Sv/h)。

在某點處，每一平方公分表面上，在一定時間內入射的輻射的數目越多，且輻射的能量越高，則該點處的輻射強度就越強。這裡所說的輻射數目，對粒子輻射係指其粒子的個數；對電磁輻射係指其光子的這種粒子的個數。

其次，輻射的量與光的光量相當。輻射的量稱為劑量。輻射強度越強，且照射的時間越長，當然受到的劑量就越多。

這個關係與日光浴時曝光量由紫外線的強度和照射時間的乘積來確定正好相似。

測量劑量的尺度採用戈雷(Gy)或西弗(Sv)單位



(關於“放射性”部分，請待下回分解。)

1. 歡迎賜稿，稿件請寄新竹郵政2-33號信箱或電傳(03)5722521 輻防協會編輯組收。來稿一經刊登，略致薄酬(政令宣導文章，恕不給稿酬)。
2. 本刊因篇幅限制，新聞類每則請控制在500字以內，專題類每篇以2000字以內為佳。
3. 歡迎訂閱(每年六期180元)。請洽：李孝華小姐 TEL：(03)5722224。

