

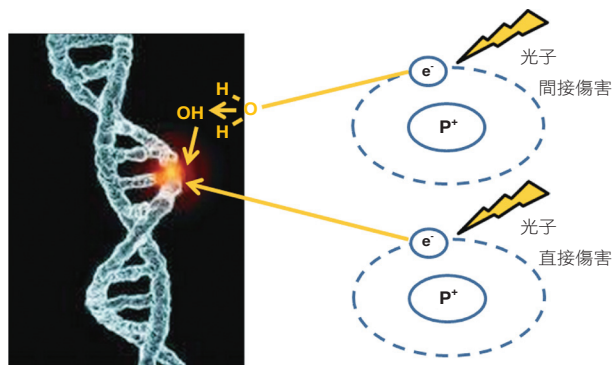
X 光對 DNA 的傷害及其後續修補

輻射種類很多，對於大多數輻射而言，我們看不到也摸不著，人體無法直接感應，但卻可能因暴露過量而致命，使得大家對於輻射有莫名的恐懼感。

■ 楊界雄、曾干容

前陣子日本核子反應爐所發生的輻射外洩及汙染事件，使國人普遍對核意外所引起的輻射傷害加倍關注。平心而論，對於地小人稠又即將有第四座核能發電廠運行的台灣而言，大眾對於核電安全與事故應具備一定的知識，但也不必談核色變，因為在我們生存的大自然裡，輻射就和陽光、空氣、水同時存在。

輻射種類很多，對於大多數輻射而言，我們看不到也摸不著，無法直接感應，但卻可能因暴露過量而致命，使得大家對於輻射有莫名的恐懼感。本文的目的是讓讀者了解輻射劑量對生物體所造成的危害，以及輻射誘導的生物效應，避免因無知而引起恐慌。



游離輻射對細胞 DNA 的直接與間接傷害

什麼是輻射

這裡的輻射指的是「游離輻射」，是一種強度足以使原子游離為電子及正離子的能量。相反的，能量不足以使原子游離的輻射，則是「非游離輻射」。在電磁波中，波長較短的 X 射線及 γ 射線是游離輻射，其餘都是非游離輻射，以超高速前進的高能粒子也是游離輻射。

在輻射的作用下，人體內的生物大分子，如核酸、蛋白質等會被電離或激發，這些生物大分子的性質會因此而改變，細胞的功能及代謝也遭到破壞。也有文獻指出輻射可令 DNA 斷裂或阻礙分子複製，這些都是輻射的直接傷害。此外，人體內的生物大分子存在於大量水分子中，當輻射作用於水分子時，水分子也會被電離或激發，產生有害的自由基（如 $\text{OH}\cdot$ 、 $\text{H}\cdot$ 自由基

對於地小人稠又即將有第四座核能發電廠運行的台灣而言，大眾對於核電安全與事故應具備一定的知識，但也不必談核色變。

等)，繼而使在水分子環境中的生物大分子受到損傷，這些都是輻射的間接傷害。

輻射傷害

輻射對生物體造成的健康效應，可分為機率效應與確定效應兩類。

機率效應—人體只要接受輻射，不管輻射量多少，都可能引發癌症和不良遺傳的機率。而且致癌或不良遺傳的機率與人體所接受的輻射量成正比（直線關係），輻射量越高，罹患的機率越大。也就是說，並非人人一定會致癌，而由機率效應引起的生物效應有致癌、遺傳基因突變等。

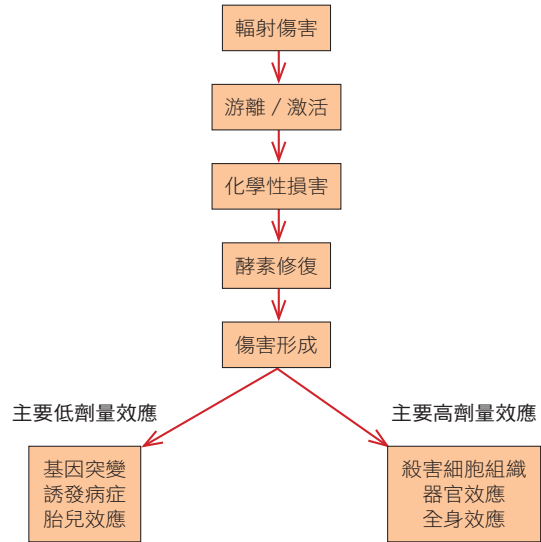
確定效應—當人體在短期內接受輻射超過某一程度以上時，因許多細胞死亡或已無法修復，而產生疲倦、噁心、嘔吐、皮膚紅斑、脫髮、血液中白血球及淋巴球減少等狀況。當接受輻射量更高時，症狀的嚴重度加大，甚至死亡，這種情況稱為確定效應。通常確定效應必須在接受輻射量超過一定程度以上時才會發生。

對各器官系統的傷害

根據暴露的輻射劑量多寡以及身體的暴露範圍大小，輻射對各個器官系統也有不同程度的傷害。以下介紹4種輻射對人體器官造成的急性傷害。

生殖系統—輻射對生殖系統的傷害可依據性別和輻射劑量的不同分為好幾種程度，主要表現是男子精子品質降低、孕婦發生自然流產、胎兒畸形等。

輻射傷害形成的步驟

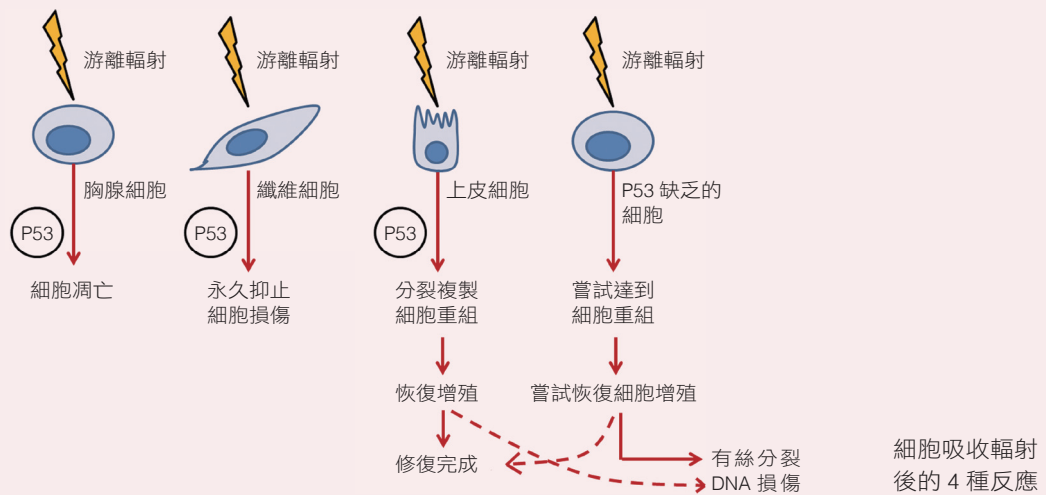


輻射傷害形成的步驟：從吸收輻射到傷害的形成之後，產生高、低劑量的兩種效應。

造血系統—吸收輻射劑量若達 150 ~ 200 rads 就會對造血系統形成傷害，導致紅血球缺乏並引起如免疫功能不全、傷口癒合不良、增加感染併發症、出血、貧血等症狀。

胃腸系統—暴露在輻射劑量超過 600 ~ 700 rads 時，會造成腸黏膜上皮細胞受損、腸壁潰瘍、壞死、穿孔、腹瀉、便血、脫水、電解質不平衡、營養不良、腸炎、細菌感染、腹膜炎、敗血症等嚴重的胃腸系統損傷。

神經、血管系統—若輻射劑量高達 2,000 ~ 3,000 rads 時，會對人體神經、血管系統造成嚴重的傷害，可能出現以下症狀：嘔吐、嗜睡、意識不清、步態不穩、抽搐、淋巴球數目接近零等，有低血壓的患者則



有治療效果不佳的情形。大劑量（100,000 rads）可直接造成神經元傷害，嚴重者甚至會在 24 ~ 72 小時內休克死亡。

誘導的生物效應及修補

既然輻射會對人體造成這麼多的傷害，了解在輻射照射下人體結構中最基礎的細胞會有什麼行為，或如何進行個體的修復，是非常重要的課題。

細胞核內含有遺傳物質去氧核糖核酸（deoxyribonucleic acid，簡稱 DNA）及染色體結構物，在細胞的繁衍生殖上扮演重要的角色。以 DNA 分子為例，當游離輻射與它作用時可產生單鏈斷裂、雙鏈斷裂，或與其他蛋白質交錯結合等結構上的變化。

上述 DNA 結構變化後，輕者如單鏈斷裂，經修補酵素的適當作用仍可使 DNA 或細胞回復正常，因此受過傷害的 DNA 最後不一定會引起細胞變化。重者如雙鏈斷裂

則可造成細胞死亡，但更值得注意的是，部分細胞的 DNA 在受到傷害後，可能會因為錯誤的修補與結合而產生突變基因。突變的細胞重者仍會引起細胞死亡，輕者可能引發癌細胞出現，最後造成癌症。對生殖細胞而言，則可造成遺傳病變，繼續遺傳至下一代，產生遺傳效應。

DNA 吸收輻射線後遭受傷害，會對 DNA 的調控機制產生很大的影響，像是影響抑制細胞的分裂與存活周期的信號，以及影響細胞發出的激活修復、誘導凋亡等反應的信號。

細胞吸收輻射後的反應，包括：當胸腺細胞吸收游離輻射後，導致 Protein 53（簡稱 P53）的激活，使細胞自行死亡，即所謂的細胞凋零；當上皮細胞因吸收輻射線而破壞，在細胞分裂複製時，P53 會先把基因體巡視一遍，發覺基因體破壞時，會請基因修補分子修補基因體。如果基因體破壞程度過大或該細胞已夠老化，則 P53 會啟動另一程序使細胞自行死亡。

人體從吸收輻射能量開始，到產生生物效應，乃至細胞機體的損傷和死亡為止，涉及許多不同性質與路徑的變化。

P53 是什麼？簡單來說，它是一種蛋白質分子，稱為基因體的守護神，也稱為天使基因，因為它守護著基因體，使其保持穩定不被破壞。因此 P53 就是腫瘤抑制蛋白，是抑制腫瘤產生的主要物質。

如果身體的 P53 都沒有被抑制或破壞時，即使細胞變成癌細胞，癌細胞也不能抗拒死亡，癌症也就不會產生。問題是，細胞裡也存在著 Nuclear Factor-Kappa B（簡稱 NF-KB）的蛋白質複合體。NF-KB 即細胞核轉錄因子，平常都很安靜地躲在細胞質裡，當被激發喚醒後，會立刻跑到細胞核及粒腺體裡面。細胞核及粒腺體裡面存在著生物的整個基因體，NF-KB 便會使個別基因體產生免疫效果的基因，保護細胞不至於死亡的基因表現出來，甚至使細胞增殖的基因也表現出來。

這原本是件好事，是我們身體為了對抗受傷，或對抗外界入侵的一種自我保護措施。但如果 NF-KB 這些動作一直被激發著，則細胞都會呈現快速增殖及抗拒死亡的特質，造成慢性發炎現象，也就會形成了癌症。

因此 NF-KB 是調節身體發炎的主要物質，P53 則是抑制腫瘤產生的主要物質。如何平衡這兩種物質的相互影響，也就是抑止癌症形成的重要因素。而 NF-KB 和 P53 的活化都需要同一種叫做 P300 / CBP 的伙伴，它是一種酵素。這個 P300 / CBP 伙伴若被 NF-KB 搶走，則 NF-KB 就被活化，P53 便因沒有 P300 / CBP 伙伴而會被抑制。反過來如果 P53 搶走了 P300 / CBP 伙伴，則 P53 會被活化，而 NF-KB 被抑制。

究竟 NF-KB 或 P53 是如何搶到 P300 / CBP 伙伴而使其各自活化？這就要靠身體的自律神經系統來決定，如果交感神經活躍，就會幫助 NF-KB 取得 P300 / CBP。反過來，若副



P53 蛋白質如何被活化及其功能

交感神經活躍，則 P53 會取得 P300 / CBP。可以說，交感神經的活躍會使發炎加劇，健全的副交感神經則會抑制炎症的發生與進展。

輻射對人體的作用是一個很複雜的過程，臨床上如果能提升副交感神經活性，並降低交感神經活性，對癌症的治療就會有正面的意義。很可惜目前尚未發明出能長時間提升副交感神經活性，降低交感神經活性，又沒有副作用的藥物。

人體從吸收輻射能量開始，到產生生物效應，乃至細胞機體的損傷和死亡為止，涉及許多不同性質與路徑的變化。隨著放射科醫療的進步，X 光照射儀是現代醫療用來判斷身體器官和組織異常變化的重要工具，了解 X 光輻射劑量多寡對人體各器官的傷害以及對身體的影響，是醫療人員和研究人員，甚至一般的普通人，應當具備的基本知識。

楊界雄

交通大學光電學院影像與生醫光電研究所

曾千容

交通大學光電學院照明與能源光電研究所