

Health Implications of Ionising Radiation
游離輻射對健康的影響

提爾曼·魯夫 著

周振元 譯

徐光蓉 審訂



摘要

游離輻射的生物效應，是分析包括核電在內的核能技術中，最具爭議性與最被政治化的議題之一。本文第一部分說明游離輻射的本質、來源，以及游離輻射對生物與人體健康的效應，包括許多重要的新事證，指出這些效應比先前估計的影響還要大得多。由於在輻射與健康的領域長久以來被政治化，充滿了爭議與龐大利益的糾葛，本文第二部份簡單介紹歷史過程中輻射與健康領域中的重要人物，目的是為了協助讀者探索與考量在有關歷史、動機與利益時，哪些人說了什麼，以及那樣說的原因。第三個部份討論大規模輻射曝露的可能人為來源。

編者按：

本文出自2017年澳洲國立大學出版社出版的「福島的教訓：東亞地區的核電」一書之第8章。

作者簡介

提爾曼·魯夫是公共衛生和傳染病學醫師、墨爾本大學諾薩爾全球衛生研究所副教授和澳大利亞紅十字國際計畫的醫學顧問。

從2012年起至今，他持續擔任，曾獲1985年諾貝爾和平獎之「國際醫師防止核戰聯盟」的首位澳洲籍共同主席。

他也是獲得2017年諾貝爾和平獎之「國際廢除核武倡議組織」以及澳洲分會之創會主席。

他在墨爾本大學的研究所醫學課程教授核能技術的公眾健康相關問題，包含五門碩士課程與兩門大學部課程；並曾擔任澳洲「醫界防止戰爭協會」的全國主席。

2008年，他擔任國際「防止核武擴散公約」澳洲政府代表團內的首位民間代表，這是國際防止核武擴散與裁軍委員會中兩名民間顧問之一。

2012年，提爾曼因為「積極倡議廢除核武以促進和平，以及在東南亞-太平洋地區宣導預防接種等提升公共衛生服務」，獲得澳洲政府勳章。

什麼是游離輻射？

游離輻射包括各種傳送的能量。有些類型，如X光和伽馬（gamma）射線，都屬於電磁波的一部分，從波長長、能量低的無線電、微波與紅外線波，可見光和紫外線輻射能，到波長短、能量高的X光和伽馬（gamma）射線。其他種類的游離輻射包括次原子粒子和原子碎片。兩者的電磁與高能量的微粒輻射都叫「游離」（ionizing），因為其中有若干種（請見表1）具有足夠的能量將一個或多個電子從原子內打出（即游離ionization）而打破其化學緊附力。本章中所指的輻射，除非特別指出，都是指游離輻射。

表1 常見的游離輻射

游離輻射種類		輻射加權指數 (與光子比較的生物效應)*	可阻擋物
電磁波輻射 (光子)	伽馬射線 (類似X光)	1	穿透力(使用X光攝影的基本原理)，可被高密度材料阻擋(如鉛或水泥)，但是布沒法阻擋
次原子粒子	阿爾發(氦核) 與其他重的分裂 碎片如原子核	20	外層皮膚、一張紙(如果被吸入或吃進人體，體內器官受曝，造成傷害)
	貝塔(電子)	1	一層布；有些能穿透人體皮膚的基底層
	中子(Neutron)	5 - 20 視中子能量而決定	具有穿透力；水泥或土最具保護效果

* 加權指數為1代表這類輻射一單位的能量會造成與X光或伽馬射線等量的生物傷害；加權指數為2表示此輻射會造成與X光或伽馬射線所造成的生物傷害的兩倍，依此類推。

資料來源：疾病預防與控制中心（Centers for Disease Control and Prevention，2015）；歐洲核能學會（European Nuclear Society n. d.）

游離輻射可經由放射性元素自發性的衰變而產生，分裂成為較小的原子，過程常常不斷重複進行，每一次衰變放出的能量以游離輻射形式釋出。這種衰變反應鏈的中間產物通常都具有放射性，直到最終產生穩定原子才停止。衰變反應鏈，每個衰變反應速度和所釋出的輻射類型，是每個放射性元素固定的物理特性。放射物質衰變的速度用半衰期表示——也就是放射性元素分裂到原有量一半所需要的時間。半衰期長的元素能長時間存在，但他們的輻射強度不如衰變快速的放射性元素強。許多化學元素以多種不同原子形式存在（即同位素，原子具有相同質子數，但原子核內中子數不同），部份或所有同位素可能具放射性，這時他們被稱為放射性同位素（radioisotopes）。

游離輻射也可以，像X光機器般，經由快速的帶電粒子撞擊物體產生。核子爆炸釋出的中子輻射可以使得正常狀態下不具放射性的物質轉變成為具放射性，例如將空氣中的氮轉換成半衰期5,730年的碳-14。

不同類型的輻射，穿透組織的能力相差很多。阿爾發（Alpha）粒子只要一張薄紙或布就會被阻擋，不會穿透正常人體皮膚表層的死皮。但是如果進入體內，如肺與腸胃，阿爾發粒子的能量高，傷害將非常嚴重。有些貝塔（Beta）粒子（電子）能穿透到製造新細胞的皮膚基底層。伽馬（gamma）和X光射線具高度穿透力，是X光應用在醫學影像的價值基礎，用厚的水泥板或鉛板才能阻擋。

輻射源與曝露途徑

人們接受輻射曝露的管道不同——基本上分體內與體外。具穿透力的輻射有來自宇宙穿過大氣進來，有源於地裡或地表的放射性物質，來自建材或空氣在人的體外照射。直接接觸具穿透力的放射性物質，在接觸部位造成最嚴重的曝露。吸入、攝取（經由食物、飲水或環境的土壤、灰塵，特別是兒童），或是傷口污染或皮膚破損，使放射性物質可能進入人體，導致體內受輻射曝露。

即使放射性物質只能穿透很短的距離，體內輻射曝露是有害的，尤其當放射性粒子會長時間停留在體內（更嚴重）。體內輻射污染有時是很難

測量，特別是當放射性物質不會釋放高穿透力輻射（如鈾plutonium、銻strontium和氚tritium），可能在評估輻射曝露時被忽略。

許多生物體系裡重要的放射性同位素在化學表現上，和人體所需其他元素類似，因此被我們的身體接受（見表2）。部份放射性同位素會在生物體中濃縮，從食物鏈底層上升，可能在生物圈中再循環。例如，淡水湖的魚類含銻-137（caesium-137）濃度可能比該魚類生存的淡水湖湖水的銻-137濃度高10,000倍。

表2 核能電廠會產生的幾項嚴重影響人體健康的放射性同位素

放射性同位素	主要釋出的輻射類型	半衰期	健康衝擊與主要曝露途徑
碘-131	貝塔、伽馬	8天	攝取，在食物鏈中濃縮（特別是牛奶）；集中在人體的甲狀腺；引發甲狀腺疾病，包括甲狀腺癌 — 兒童最易受害
銻-137	貝塔、伽馬	30天	體外與攝取，人體把銻-137當成鉀，後者是細胞裡主要正離子；能在生物體內濃縮；與許多癌症有關；大氣中核子試爆對全球人口與核能電廠災害的主要輻射曝露來源
銻-90	貝塔	28年	攝取，人體把銻-90當成鈣，集中在骨骼與牙齒；能在生物體內濃縮；長時間存在體內；引發白血病與骨癌
鈾-239	阿爾發	24,400年	吸入，長時間存在體內；體內傷害；特別是吸入，導致肺癌。核反應爐內鈾原子吸收了中子就一定產生鈾同位素
氚 (氫-3)	貝塔	12.3年	攝取，體內傷害；與水分子結合；不會生物累積

資料來源：聯合國原子輻射影響科學委員會 UNSCEAR (1993:Annex B 128-9)

放射性物質可能是固體、液體或氣體。具有放射性的物質，或表面被這些放射性物質污染的材料、物體或生物體，都會釋放出輻射；遭受輻射曝露的物體和生物體，但不含放射性物質，就不會是輻射污染源，也不會傷害其他物體。例如，人因為醫療目的而注射放射性化學物質會短時間內變成具放射性；而透過X光診斷或接受體外放射線治療癌症的人，不具放射性。

人體受到天然背景輻射曝露最大的來源是氡氣（radon gas），是最重的惰性氣體，也是原本就存在於地殼中的鈾-235、鈾-238和釷-232衰變過程中產生的致癌物質。氡的衰變過程中有若干中間產物（鈾plutonium、鉍bismuth 和碲tellurium），他們性質比較活潑，會附著在空氣中的懸浮粒子與灰塵上，吸入體內會停在肺部。這些氡的衰變中間產物所釋出的輻射劑量占氡相關的輻射絕大部分。氡是全球肺癌的次要成因，僅次於抽菸。

最近幾十年，醫療輻射曝露在世界許多地方急速增加，甚至有些國家民眾受醫療輻射曝露的劑量與受天然輻射曝露的劑量相當（如：澳洲美國）或更高（如：日本）。原因是電腦斷層儀器（CT檢查，一種複雜的X光檢查）的使用增加。

多數的現代核武都同時含高度濃縮鈾與鈾。鈾或鈾可有40種不同的分裂方式，產生300多種不同的放射性核種，其半衰期從涵蓋幾分之一秒到幾百萬年。在核反應爐內，鈾和鈾也被分裂，但是在核反應爐內被控制的連鎖反應的中子，其速度遠比核武爆炸時的「快速」中子慢。此外，分裂初期產生的碎片，多半生命期很短，沒來得及在反應爐內擴散，但長生命期的分裂產物會累積。所以，核能反應爐比核彈累積高比例的長生命期放射性同位素。

除了創製出上數百種自然不存在的放射性元素（見表3）外，與沒有經過核反應的原料相比，核武試爆與核能反應爐運轉都將輻射強度增強百萬倍以上。

表3 正常運轉的核能電廠共同會釋放的放射性同位素

在空氣中的	
種類	共同會釋出的同位素（原子數）
分裂與活化的氣體	氙Krypton (85, 85m, 87, 88) 氙Xenon(131, 131m, 133, 133m, 135, 135m, 138) 氬Argon (41)
鹵族元素	碘Iodine (131, 132, 133, 134, 135) 溴Bromine (82)
粒狀物	鈷Cobalt (58, 60) 銫Cesium (134, 137) 鉻Chromium (51) 錳Manganese (54) 鈮Niobium (95)
氫	氫Hydrogen (3)
液體	
種類	共同會釋出的同位素（原子數）
混合分裂與活化的氣體產物	鐵Iron (55) 鈷Cobalt (58, 60) 銫Cesium (134, 137) 鉻Chromium (51) 錳Manganese (54) 鈳Zirconium (95) 鈮Niobium (95) 碘Iodine (131, 133, 135)
氫	氫Hydrogen(3)
溶解與傳輸的惰性氣體	氙Krypton(85, 85m, 87, 88) 氙Xenon(131, 131m, 133, 133m, 135, 135m)

資料來源：國家研究委員會National Research Council (2012: 37-8)

為什麼游離輻射具有生物重要性？

游離輻射會對生物體造成嚴重傷害，不是因為它有極多的能量，而是因為這些能量是集中地、一次包裹形式地傳送至細胞。以平常體檢用的X光為例，能量是普通化學鍵結強度的15,000倍。全身暴露4戈雷（Gy）劑量的游離輻射，人體會產生急速致命的放射病。但是這劑量輻射傳給一位70公斤成年人的能量，僅280焦耳（joules）— 相當於喝攝氏60度熱茶或咖啡3毫升所攝取的熱量。

大而複雜的鏈狀分子，特別是DNA，定義了我們是哪類物種，調節（體內）許多生物過程，是我們接收最珍貴的遺產，也是我們傳給子孫不可或缺的資產。我們體內細胞DNA的雙螺旋體，其中一股是來自於母親，另一股是來自於父親。這些大型分子特別容易受游離輻射干擾。輻射可能造成DNA的直接傷害，或是經由輻射產生的高度活潑的化學物質，如自由基（或）離子，與DNA反應而間接傷害DNA。所產生的傷害有許多不同形式—DNA的單股或雙股斷裂，改變組成DNA基礎的核苷酸鹼基的氧化狀態，DNA部分區段被刪除，導致基因與染色體受損。血液中淋巴細胞的染色體變異的頻率，特別是造成雙染色體形式，被用在全身受輻射曝露的幾週內，估計身體所接受到的輻射劑量。穩定而持續的染色體變化，不殺死受曝露的細胞，會產生染色體易位（translocations，即部份染色體重新排列），發生頻率即使受輻射曝露50年後還在增加，如日本的被爆者（hibakusha，即核爆生還者）與紐西蘭參與核武試爆的退伍軍人（Wahab et al. 2008）得到證實。

受輻射傷害的DNA可能有多種後果，包括有效修復、細胞死亡（特別是高劑量輻射曝露）、功能受損、誘發癌症，或者是DNA的變化被傳給下一代。細胞本身有修復DNA的功能，但修復未必完整，也不是不會出錯。DNA在分裂時最容易受輻射傷害，因此快速分裂與成長的組織最容易受傷，例如骨髓裡的造血細胞、卵巢與睪丸裡的生殖細胞、胃腸道內細胞襯裡與毛囊。子宮內的胚胎受輻射曝露會導致胎兒受損（如智能障礙）與畸型。幼兒與胚胎對輻射效應最敏感，胎兒期發生易罹癌症的突變，很可能傳給以後繁衍產生的子細胞（daughter cells）；相較之下，胎兒出生以後發生突變，繁衍產生的子細胞較少，影響較弱。

輻射與健康的科學瞭解仍在演進中。過去認為，同劑量輻射在短時間內曝露所造成的傷害，比長時間曝露傷害強一倍半到兩倍。

但是後面會討論到，最新的證據顯示並非如此。多種輻射有「旁觀者效應」（Bystander effect），即輻射傷害某一細胞的同時其周圍的細胞也受損，即便開始DNA並未受損。發炎反應就被認為是有關。「基因組不穩定」（Genomic instability）描述輻射相關的基因傷害，導致未來更容易受損，而且不穩定現象會從母細胞（parent）傳給子細胞（daughter cells）。「旁觀者效應」與「基因組不穩定」都有可能延遲出現。

輻射強度與影響

輻射有許多不同測量方式。最基本的放射性強度單位是量度原子解體的頻率—1貝克（becquerel, Bq）是每秒鐘一個放射性衰變。被吸收的放射性劑量用戈雷（gray, Gy）為單位—1戈雷是一焦耳能量進入一公斤物質（通常指組織）。

「當量劑量」（Equivalent dose）指特定器官或組織在吸收能量所產生的生物效應—吸收的劑量乘上相關組織的權重指數，後者反映該組織對輻射效應的敏感程度。目前組織權重指數共分五組，輻射敏感程度相差40倍。最敏感的一組是性腺（卵巢和睪丸）；次敏感的一組包括血紅骨髓（製造血液細胞）、胃部、大腸和肺部。**「有效劑量」（Effective dose）**是所有受曝組織與器官所受的當量劑量的總和，並針對不同組織對輻射敏感度做調整。「有效劑量」是整體風險的指標。如此計算的總和不是精準的科學，而且當劑量分散在不同組織時比較缺乏實質意義。例如，腦部電腦斷層掃描（CT scan）時，腦部接受40-50毫戈雷（mGy）輻射劑量，會增加腦部癌症風險；這劑量如果轉換成有效全身劑量（Effective whole-body dose）為4.5毫西弗（mSv）（Mathew's et al. 2013）。當量劑量與有效劑量兩者都是用西弗（severe, Sv）為單位。對穿透力強的X光與伽馬射線，劑量用戈雷（Gy）與西弗（Sv）表示是相同的。

我們所有人都受到全球平均背景放射性物質影響，有源自於地殼中鈾衰變所產生的氡氣、宇宙輻射源、土壤與岩石、還有攝取低劑量的天然放射性物質，平均曝露劑量約每年2.4毫西弗（mSv）。一次胸腔前後X光檢查通常劑量約0.01毫西弗（mSv）；電腦斷層掃描（CT scan）劑量約3-12毫西

弗 (mSv) 或更多。急性輻射受曝超過100毫西弗 (mSv) 造成的染色體改變，在實驗室裡可以測出。低於100毫西弗 (mSv) 的輻射劑量通常被認為屬於「低劑量」。

游離輻射劑量超過100-250毫西弗產生的急性效應，透過一般驗血可以測出，接受更高輻射劑量將會出現急性輻射病症狀。接受劑量超過100毫西弗會對不同器官同時產生可逆與持續性影響。接受幾百毫西弗輻射劑量急性曝露下，急性輻射病症狀發生率極可能增加；如果沒有緊急醫療救護，接受4西弗左右劑量(即4,000毫西弗)，多數人會致命。更高劑量的輻射會用在針對身體特殊部位，以治療各種癌症（通常細胞分裂增生速度比正常細胞快）目的是要殺死癌細胞。當輻射劑量超過某個門檻時，輻射曝露的急性效應會出現，如皮膚發燙、落髮、不孕等與急性病徵，如頭痛、噁心和嘔吐等。許多急性輻射病徵會消失，特別是當有良好的醫療照護。

相對的，任何各種強度的游離輻射曝露，包括劑量低到無法短期測出暴露影響或症狀者，都和長期基因受損與慢性病的風險上升，以及幾乎所有癌症的增加率有關¹，而且與受暴露輻射劑量呈正比。放射性物質不只增加癌症發生率，也讓癌症提早發生。受曝者往後的一生都受這些額外風險威脅。沒有輻射最低健康安全劑量已是公認的結論 — 所有輻射曝露都會增加長期健康風險。此定論也包含天然背景的輻射曝露。某些地理區域的高背景輻射已被證實和突變率增加、免疫力改變、身體的變化與多種不同動、植物物種，包括人類，的癌症增加率等負面影響有關 (Moller and Mousseau 2013)。最近資料分析意外發現孩童進行電腦斷層與高且早發癌症機率有關，在此之前，估計骨髓每年接受2.5毫西弗的天然背景輻射曝露，可能導致兒童白血病罹患率增加30% (Wakefield, Kendall, and Little 2009)。

按理說，美國國家科學院所出版定期嚴謹評估的游離輻射之生物影響報告(BEIR)應該是最具權威性的報告。但是最近一期是2006年出版之BEIR VII (低劑量游離輻射曝露健康風險評估委員會，Committee to Assess Health Risk from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation 2006) 報告，許多新事證是在該報告出版後出現。BEIR VII估計每增加一毫西弗的輻射曝露劑量，民眾罹患實體癌症風險就增加萬分之一；增加白血病風

1 癌症通常被分為兩大類—造血器官癌症（白血病）與實體器官癌症。

險是前者的十分之一；半數的癌症會致死，所以推估每增加一毫西弗輻射曝露，癌症死亡風險約增加兩萬分之一。

國際輻射防護委員會（ICRP）與多數國家輻射防護機構，建議民眾之非醫療曝露，可容許的最大輻射曝露劑量限制為每年一毫西弗（相當於每小時0.11微西弗；每小時多少微西弗是慣用的衡量輻射曝露單位，ICRP 2009）。有些政府採取較高的防護標準，例如，美國環境保護署規範清理輻射污染地區必須達到每年0.12毫西弗的水準（US EPA 2014）。

長久以來一個持續的趨勢，當我們對輻射影響所知越多，就有更多證據顯示已知的影響確實存在。可容許的最大輻射曝露劑量限制從來不曾被放寬，只有不斷被降低。例如從1950至1991年間，輻射相關產業工作人員一年全身可容許最大輻射曝露劑量建議值，從250降至20毫西弗。低於上述建議劑量值上限，並不代表沒有健康風險這些，只代表在安全上確保從業人員健康，與商業上龐大利益及成本考量，兩方面最新妥協的結果。

游離輻射也會增加非癌症疾病的發生與死亡風險，包括心臟血管與呼吸道疾病。過去已在中、高輻射曝露劑量的病例獲得證實，而最新的證據顯示循環系統疾病的死亡率在低總劑量與低劑量率情況下都有增加，這狀況在許多核能產業工作人員身上發生。估計的心臟與循環系統疾病的死亡風險增加，與輻射曝露造成的癌症風險不相上下，意味著輻射曝露所造成的額外死亡風險可能單算癌症死亡增加風險的兩倍左右（Little et al. 2012）。

即使眾多的人接受總劑量低微的輻射曝露也可能導致嚴重後果，這是瞭解輻射對健康影響的一個重要觀念。例如，英國一項研究顯示，絕大多數（超過85%）因氫氣相關的肺癌死亡者，所居環境的氫濃度低於每立方公尺100貝克，遠比建議需要立刻進行補救措施的每立方公尺200貝克的標準低（Gray et al. 2009）。用上述傳統風險估計，針對一億人口接受的平均輻射曝露劑量一毫西弗，預期會增加一萬個癌症病例。

輻射對健康傷害增加民眾的脆弱性

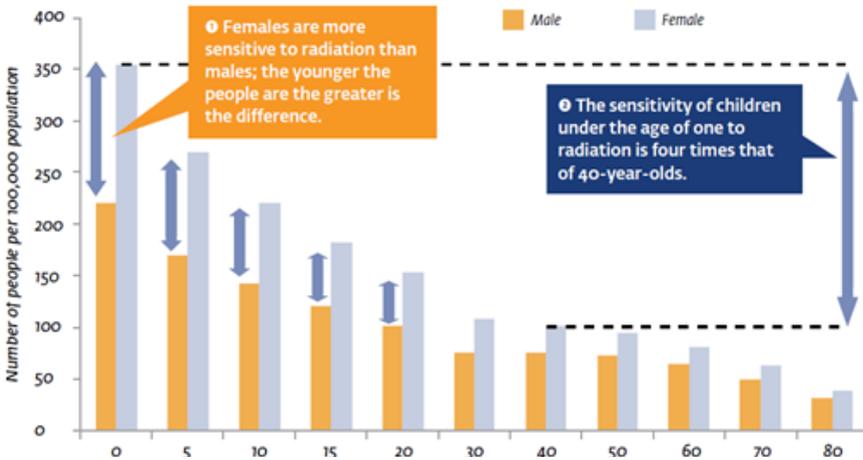
輻射風險並不是眾人平均分配，幼兒風險最高，隨年齡增加而遞減。嬰兒對引發癌症的輻射影響比中年人敏感四倍（評估低劑量游離輻射曝露之健康風險委員會 Committee to Assess Health Risk from Exposure to Low

Levels of Ionizing Radiation 2006)。孕婦腹部一次X光曝露，其胎兒接受到的輻射劑量相當於10毫西弗，1950年代英國愛麗絲·史都華（Alice Stewart）所做的開創性研究結果顯示，這使得該孕婦兒女在孩童時期的罹患癌症風險增加40%（DoII and Wakeford 1997）。

根據低劑量游離輻射曝露健康風險評估委員會出版的BEIR VII 評估，等量的全身輻射曝露，婦女與女童罹患癌症機率比男士與男童高52%，癌症死亡率比男士或男童高38%；暴露的年紀越輕，不同性別罹患癌症風險的差異越大，0至5歲間，接受等量輻射劑量，女童罹患癌症的機率比男童高86%（Makhijani, Smith, and Thorne 2006: 35-50）。

孩童遠較成年人容易受到輻射傷害是很重要的一相同的輻射劑量，一歲以下男嬰罹患癌症機率是30歲的男士的3.7倍；相似的比較，一歲以下的女嬰罹患癌症的機率是30歲的女性的4.5倍（低劑量游離輻射曝露健康風險評估委員會Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation 2006:470-99）。這差異一方面是幼兒的敏感度高，以及幼兒平均活的比成年人久，使得輻射影響更有機會發展。圖1顯示整體罹癌風險與年齡的關係。

圖1 增加10毫西弗輻射劑量造成一生罹癌風險增加與年齡、性別的相關



資料來源：NAIIC（2012），數據來自於低劑量游離輻射曝露健康風險評估委員會Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation（2006）。

因為輻射曝露，影響非癌症的健康風險，增加年輕人的脆弱性。例如，最新針對英國民眾做的研究，發現年幼時的輻射曝露與年輕人患心血管疾病風險增加有關連。據估計，在10歲之前孩童受輻射曝露與70歲以後受輻射曝露，前者罹患心血管疾病死亡的風險是後者的10倍。同樣的，受輻射曝露而罹患實體癌症（solid cancers）致死的風險，孩童曝露是70歲以後曝露者高出20倍，約是30-39歲年齡層接受等劑量輻射影響的兩倍（Little et al. 2012）。

合併考量幼童與女性較易受輻射曝露影響，結果是很驚人的。例如，同樣喝含放射性同位素鋇-90的飲料，女嬰罹患乳癌的風險比30歲的女性高20.6倍。如果攝取同樣輻射劑量的放射性同位素碘-131，女嬰的風險比30歲的女性高32.8倍。這表示在等量的放射性污染下，五歲以下女童累積的乳癌或甲狀腺癌風險比成年女性一生累積的風險還大（Makhijani, Smith, and Thorne 2006: 40）。這些脆弱性的差異現象在全人口平均風險裡被模糊掉了。

輻射的健康傷害證據不斷更新

廣島與長崎被曝者（hibakusha）的長期追蹤調查提供了大量的歷史資料，是估計輻射對健康的風險依據—核能工業、其他輻射曝露工作人員，以及一般民眾的建議輻射劑量限制也是根據這些數據設定。最近發表，取材於持續進行研究廣島與長崎核爆生還者的研究資料，**證實了輻射劑量多寡與整體癌症風險，劑量—反應的線性關係，沒有最低安全劑量（Ozasa et al. 2012）**。研究同時顯示**每單位輻射劑量造成的風險（risk per unit dose）在低輻射劑量時會比較（高劑量）強**。數據並沒有顯示，相同的輻射劑量在長時間曝露的罹癌風險比短時間曝露的風險低；這和一些國際組織，如國際輻射防護組織（ICRP）目前仍用的假設不同。這些資料更沒有顯示，日本官方及現有供學生與教師的教材內容所宣稱：缺乏證據顯示低於100毫西弗輻射曝露，會增加罹癌率的風險（Cabinet Office et al. 2016）（意思是：有證據顯示低於100毫西弗輻射曝露，會增加罹癌率的風險）。即使在日本這種極端、官方不斷複誦缺乏事證說辭的環境下，也有相互矛盾的現象發生。一位在損壞的福島核一廠清理現場的男性員工，工作14個月後罹患白血病，日本政府同意提供工傷補償金（Soble 2015）。日本規定要求工傷補償必須輻射曝露劑量達到每年5毫西弗。

日本核爆生還者研究有許多研究方法上的瑕疵，會低估輻射風險（見表4）（Richardson, Wing, and Cole 2013; Mathews et al. 2013）。最顯著的缺陷是核爆生還者研究其實反映的是強壯的倖存人口、某些受曝個案被錯誤分類，包括相當少數人受到低劑量輻射曝露，缺乏核爆發生五年內癌症死亡病例記錄的與13年內的癌症病例。

表4 日本核爆生還者壽命研究，輻射健康風險傾向被低估的緣由

<p>所選擇是相對強壯的人口</p>	<p>這些核爆生還者已歷經各種艱困、營養不足與戰爭的剝奪。核爆增加的壓力讓比較強壯者，平時養分較佳者，不容易受傷者或沒有健康問題者比較容易存活，因此在核彈負面影響下部會太脆弱。</p>
<p>沒有早期癌症死亡紀錄</p>	<p>癌症死亡病例在1950年才開始紀錄－1945～1950年間的癌症死亡病例沒有計入。</p>
<p>沒有早期白血病與癌症病例記錄</p>	<p>1950年才開始紀錄白血病病例，其他癌症病例記錄從1958年開始，也就是核爆發生後13年；而癌症罹患率預期應在1947～1948年間開始增加。</p>
<p>有些被列為未受曝的人口實際是受曝的</p>	<p>距離原爆中心點2.5到10公里範圍內的人口被列為「未受曝」；其中許多人實際是受曝者。在原爆一週之後進入原爆城市的人受中子誘發的放射性曝露（廣島原爆第二天平均內臟受曝劑量估計是82毫西弗）。1950-62年間，廣島附近因淋到輻射落塵的黑雨（Black rain）受曝露的人，死亡率非常高；但是卻被列在控制組。所有類似這種輻射曝露都被忽略，因此減低了輻射暴露對受曝生還者的影響。此外，在各種分析中，輻射暴露劑量低於10毫戈雷（mGy）的都被算做未受曝。</p>
<p>劑量估計不確定</p>	<p>雖然持續地對核爆生還者受曝輻射劑量謹慎估算，但個人接受曝劑量仍然有相當大的不確定。</p>
<p>比較少的核爆生還者受到低劑量輻射曝露</p>	<p>據估計約有7萬名生還者受到低劑量輻射曝露（<100毫西弗）。樣本數量比最近對核能工業工作人員以及接受電腦斷層掃描民眾的輻射健康影響等研究少，後兩項研究有較強的統計威力，能更準確的測得（關聯）效果。</p>

<p>消失的輻射劑量不成比例地集中在高度受曝者</p>	<p>廣島和長崎各有約3,500名生還者「沒有劑量」，這些人離原爆點很近，應該是高度受曝，事發時年紀多半很輕，事後多半離開被炸的城市，這些人不成比例地被排除在研究之外。</p>
<p>永存的個人生命 (immortal person time)</p>	<p>1950年起生還者加入壽命研究，但是直到1965年才完成參與研究者的輻射曝露劑量估計與罹癌病例數量計算。因此，有些被研究的生還者，在這15年間若罹患癌症是不會被列入病例裡。</p>
<p>輻射引起的相關癌症持續發生</p>	<p>特別輻射暴露發生在風險最高的年輕族群，只要他們還存活，超過(平均數量)的癌症病例就會持續出現。</p>
<p>恥辱和歧視</p>	<p>許多核爆生還者遭受排斥、歧視與社會孤立，結婚的機會下降，都成為核爆生還者隱匿身分的誘因。</p>

資料來源：作者的原始資料；Richardson, Wing and Cole (2013); Mathew's et al. (2013)。

近十年，新而有力的流行病學調查，提供比早先研究更正確的估計，並證實比以往所知高的輻射相關的健康風險 (Kitahara et al. 2015)。這些研究靠著電腦將各種資訊連結，才可能進行；特別是有關低劑量輻射暴露資料，大批民眾受輻射暴露的健康影響資料，國家健康保險所資助的孩童電腦斷層掃描資料，隨後罹患癌症並向當地衛生單位通報並登錄癌症。新研究中最重要幾篇重點如下。

鄰近核電廠的兒童白血病

住在核電廠附近的孩童有明顯過高的白血病，在過去幾十年來一直受到關注並引發爭議。最著名的可能是1980年代英國的塞拉菲爾德 (Sellafield) 核電廠附近高出尋常的白血病 (leukaemia) 與淋巴瘤 (lymphoma) 病例，塞拉菲爾德 (Sellafield) 就是1957年發生核子事故與大火的溫斯克爾 (Windscale)，這是1986年車諾比 (Chernobyl) 核災發生前，歐洲輻射污染最嚴重的核能設施。一個政府組成的委員會建議做的調查，意外地發現在距離塞拉菲爾德 (Sellafield) 核電廠5公里範圍內的出生的兒童，罹患白血病與淋巴瘤的風險較高；如果孩童的父親在核電廠任職，

特別是胚胎受孕前父親受到高輻射劑量曝露，所生子女風險更高（Gardner et al. 1990）。2007年美國能源部支持的一項整合分析（meta-analysis）檢視全球有的可靠數據，確認住在核電廠附近的孩童罹患白血病風險，統計上有意義的顯著上升（Baker and Hoel 2007）。

德國一個全國性大規模研究提供了最確切的發現，這是個長達25年，針對所有德國16座運轉中核電廠附近孩童，罹患白血病情況的研究。研究顯示，在核電廠5公里內孩童罹患白血病的風險，是距核電廠50公里外孩童風險的一倍，即便後者也風險仍比常態高（Kaatsch et al. 2008）；結果在統計上是高度有意義。隨後法國的研究，雖不如德國研究扎實，也發現類似的白血病風險增加。雖然這些結果都被挑戰，質疑研究沒有詳細地依風向估算實際輻射曝露以及它們的預期效應。無論怎樣，沒辦法改變存在的強烈相關；除了輻射外，找不到其他可能的成因。在現實世界，實際數據永遠勝過理論模型。

孩童電腦斷層掃描後罹患癌症

全球醫療輻射曝露不停增加，主要是因為做電腦斷層掃描，利用X光進行螺旋式、緊密分佈的人體截面攝影，過程中全身接受的有效輻射劑量在1到10或更多（最高超高過20）毫西弗。不少研究顯示兒童接受電腦斷層掃描後，罹癌風險比早先估計高很多。目前樣本最大的研究是澳洲針對68萬不到20歲的年輕人，接受電腦斷層掃描後的罹癌風險，和1030萬沒做過電腦斷層掃描的澳洲年輕人比較，資料涵蓋20年（Mathews et al. 2013）。研究樣本人數比日本原爆生還者研究多10倍，而總輻射劑量是日本原爆生還者研究中低輻射曝露劑量的四倍。

這電腦斷層掃描研究證實，在接受一次平均有效劑量4.5毫西弗的電腦斷層掃描後10年內，罹癌率增加24 %，之後每多做一次電腦斷層掃描罹癌率再增16%（Mathews et al. 2013）。癌症最早可能在輻射受曝之後兩年內發生。第一次做電腦斷層掃描之後平均接近10年才進行追蹤，因此受曝者生命中會有新的癌症繼續發生。以受曝者相似的年齡及追蹤期長短來說，電腦斷層掃描的罹患白血病相關風險和日本原爆生還者相似；但權威性的電腦斷層掃描研究實體癌症罹患的風險發現，與日本原爆生還者研究相比，前者腦癌機率高12.5倍（Smoll et al. 2016），其他實體癌症總計高9倍（Mathews et al. 2013）。澳洲的白血病與腦癌的研究結果，與英

國一個較小型的研究結果相類似，後者沒有包含其他實體癌症（Pearce et al. 2012）。

澳洲研究是目前針對低劑量輻射（健康影響）研究中，樣本數最大以民眾為基礎的研究，對象是對輻射最易受傷的孩童群體，因此研究結果具高度重要性。以上所提的研究在低輻射劑量影響、早發的癌症與孩童受曝，填補許多日本原爆生還者研究的重要資訊空缺。目前已開始進行對這些孩童的長期追蹤，檢視輻射醫療過程的相關風險，未來可以預見會有重要的新發現。現有的這些研究結果應該足以促使估計的輻射風險向上調，並降低建議的輻射劑量限制，如此才能有效保護最脆弱族群。與輻射有關癌症風險的劑量與反應（dose-response）關係曲線，多數人都認為非線性；尤其是對孩童，很可能在低輻射劑量區域反應較陡—每毫西弗影響在低劑量較高劑量區域強（Smoll et al. 2016）。在最容易受影響的族群中，與輻射有關癌症中，在接受輻射暴露後較早發生的類型，很可能是病例增加最多的。

核能工作者的癌症風險

在國際癌症研究署(International Agency for Research on Cancer)協調下，數十萬在核能設施的工作者最新的長期白血病（Leuraud et al. 2015）與癌症（Richardson et al. 2015）風險研究報告於2015年公布。研究對象包括自於法國、英國與美國的308,000名核能工作者，有些從1944年起開始追蹤，樣本平均追蹤期為26年，平均年齡58歲，總直腸輻射劑量（一種內臟受曝的度量），是日本原爆生還者中低劑量受曝者劑量的五倍。這些核能工作者接受的平均輻射劑量僅每年1.1毫戈雷，比許多數地區的背景輻射劑量還低，而累積的輻射曝露劑量也遠低於，每年20毫西弗，現有核能工作者可接受之建議輻射劑量上限（這研究的核能工作者在平均工作12年所接受的總輻射劑量平均約是20毫西弗）。

實體癌症的風險在統計學上和日本核爆生還者相當，但比20到60歲男性日本原爆生還者風險高50%，而且風險隨工作者年齡增加而持續攀升。白血病風險和20至60歲男性日本原爆生還者相似。要注意的是該研究中核能工作者平均年齡58歲，是罹患癌症與慢性病正開始加速的情況。

這些大規模且權威的研究顯示即使非常低的輻射劑量和遠低於該職業所建

議的輻射劑量限制內，依然有風險。這些研究都**不支持**，相同總輻射劑量在較長的時間內曝露，風險會比較低的論點（單位時間低劑量與高劑量的比較－劑量率高低）。世界衛生組織（WHO）2013年針對福島核災的健康影響報告（WHO 2013），與2013年聯合國原子能輻射效應科學委員會（UNSCEAR 2014）同時都捨棄過去BEIR VII假設在低輻射劑量時低劑量率影響的衰減倍數（reduction factors）為1.5，以及其他若干輻射防護組織，如ICRP使用衰減倍數2。對接受電腦斷層掃描者研究與對核能工作者研究，無庸置疑地證明游離輻射相關的癌症風險是沒有最低安全劑量。

車諾比與福島核一廠核災受曝者的癌症與其他健康影響

最近關於1986年車諾比核災影響的獨立回顧審視（Fairlie 2016），主要發現包括：

- 2065年前，歐洲估計會因此增加40,000個致死的癌症；
- 目前已經增加6,000起甲狀腺癌病例，2065年前估計還會再增10,000個病例。過去這些病例幾乎都是發生在孩童，但最近也發現年紀較長的病例。其他國家，如奧地利、斯洛伐克、捷克和波蘭也都發現甲狀腺癌病例增加。至少部份的增加可能歸因於車諾比核災；
- 在總數估計60萬至80萬清理車諾比核災的工人，白血病與甲狀腺癌病例都增加，甚至比過去輻射安全劑量（100-250 mGy）還低的劑量下白內障風險依然增加；
- 雖然多個國際組織都假設，在車諾比污染區內不會有可察覺的先天性肢體缺陷案例增加，但在烏克蘭高度輻射污染的Rivne-Polissia區域，發現神經系統天生缺陷增加；包括神經管缺陷，如脊柱裂、無腦畸形、小頭畸形和小眼或沒有眼睛（Dancause et al. 2010）；
- 白俄羅斯與烏克蘭污染最嚴重的地區乳癌病例增加；
- 因為輻射污染與長期擔心輻射風險而遷離導致生命流離失所，也對健康產成負面影響－核災清潔工人的憂鬱症、創傷症後障礙比率都偏高，即便數十年後仍然如此；有幼兒受輻射暴露的母親，容易罹

患憂鬱症、焦慮和其他精神障礙。

雖然若干日本與國際組織宣稱，福島核災沒有造成對健康有可測得的負面影響，這令人難以置信的評估已經被證明錯誤。日本官方重建署估計，至2016年初為止，福島縣有3,407個與核災有關的死亡（包括因不當的疏散引起、留在輻射污染區內持續需要照顧的慢性病患，以及自殺）。對於輻射受曝者缺乏完整的健康檢查與後續追蹤，加上日本許多相鄰地區癌症登錄不完整，代表對健康問題的偵測與因應能力受到限制。

福島縣是健康檢查做得比較完整的地區，（但其他輻射落塵影響地區並非如此），會針對核災發生時年紀不到18歲的孩童進行定期的甲狀腺超音波檢查。到2016年9月，仍有24至29 %符合檢查資格的人沒有參與；這樣積極地檢查甲狀腺異常，應該比一般缺乏積極篩選過程的檢查，發現比較多的腫囊和結節病例。雖然福島核災的甲狀腺輻射劑量估計應該遠比車諾比核災低，但初步資料已顯示明顯的甲狀腺癌增加開始發生。這些是根據到2015年底，福島縣113名兒童被診斷出罹患甲狀腺癌，其中51個病例是在第二次超音波檢查診斷發現（Tsuda et al. 2016a, 2016b）：

- 福島縣開始偵測到的甲狀腺癌罹患率比日本全國平均高20至50倍；
- 第一次超音波檢查後兩年做第二次超音波檢查，診斷發現的罹癌率仍比全國平均高20到38倍；這樣大的差距不會僅僅是積極檢測發現較多病例造成；
- 福島縣內，輻射污染最嚴重地區的甲狀腺癌罹患率是輻射污染最低地區的2.6倍；
- 被診斷出的甲狀腺癌症不成比例的非良性－92%動過手術的個案，癌細胞擴散到甲狀腺之外到淋巴結或是其他的內臟。

截至2016年9月，福島縣接受健康檢查的兒童罹患甲狀腺癌的病例已增加到145件。

輻射對污染地區非人類物種的影響

Timothy Mousseau 與 Anders Moller 針對車諾比與福島輻射污染地區生存的非人類物種輻射效應的研究提供了非凡的證據—這些證據大多數是他們親自蒐集的。從土壤中的細菌與霉菌到樹木、各類昆蟲、蜘蛛、各種鳥類、與大小型哺乳動物，幾乎所有研究的每一重物種與生態社區都發現負面的生物效應，這些負面效應都與輻射屋然的程度直接成正比，沒有很明顯的門檻，而絕大多數的負面效應都明顯發生在每年1到10毫戈雷（mGy）的輻射劑量範圍內。

要說人類不會受到類似的負面效應影響，在生物學上是令人難以置信的。輻射對非人類物種的生物影響較先前所了解的還大，而最近從人體取得的數據，也發現類似的趨勢。Mousseau 與Moller 的研究證明取得有機體在真實的生態環境下，包含最脆弱的發展階段、組織和器官，包括生殖細胞和胚胎，以評估輻射效應是非常重要的。

輻射與健康簡史

延緩將證據轉換為政策與實際行動，龐大利益團體的不當影響，與科學及醫學界的腐敗

歷史的經驗，從公共衛生風險的證據轉化為政策與實際行動，常常需要經過一二十年，或有些案例需要幾十年時間，尤其當這風險的暴露與產生影響間隔很長的時間，以及有強而龐大的利益團體感受到威脅時。例子包括香煙、石棉、酒精飲料、不健康的垃圾食品、化石燃料、以及低劑量輻射。特別是輻射與化石燃料，一個趁隙而入的額外因素，激化否定、無法專注和惰性使得絕大多數的受害者無法被明確指認。通常我們無法區分癌症或心臟病發生是因為輻射暴露、抽煙、化學品暴露或其他因素所造成，何況大多數癌症是許多因素相互影響所致。

太多的輻射受害者沒辦法一一被確認，他們混在群眾裡。我們看不見、感覺不到、聞不出、也嚐不出輻射。除非在接受到高劑量曝露後發生的急性輻射症狀，人完全無法感覺到輻射的傷害。長期基因損傷與癌症通常在數年後，甚至幾十年後才顯現。這些因素使得輻射的影響不是沒有被充分瞭解，就是被低估。但這並不表示不存在著受影響的個人與家庭，他們受

苦與早逝應該受到重視並應努力避免發生。例如：大氣中的核武試爆產生的全球輻射落塵，讓每個人都受污染，多年累積將導致2百萬人因癌症死亡，以及相同數量的非致命性癌症（Ruff 2015）。但是除了一些曾參與核武試爆的退伍軍人與試爆區下風處社區民眾外，絕大多數輻射受害者與死於額外因素造成癌症者都不會被一一確認。

輻射健康影響的證據外，要理解輻射的健康影響規範演進，必須瞭解各個機構與衝突的廣泛歷史背景。核武是殺傷力最強的武器，威脅所有地球上生命的基本存在；但卻是政治議題與部份國家與美國實際運作核心。半世紀前，擁有核武的國家制定具約束力的核武非擴散公約，並承諾將廢除核子武器；至今仍然有14,930個核武（Kristensen and Norris 2017），沒有任何武器減量談判進行中，所有九個核武國家正在大規模的投資核子武器現代化（僅美國在未來30年內將投資1兆美元），計畫未來無限期地部署核武器（Kristensen and McKinzie 2015）。禁止與廢除化學與生物武器、地雷與子母炸彈公約大多數都已經被執行。2017年7月7日，聯合國首度通過由122個會員國支持完全禁止核子武器的歷史性公約。此公約本於非常清楚的事證，就是核子武器是所有武器中最不具區分性與最不人道的，沒有任何正當理由使用，也會是全球有效的自殺炸彈。可是，所有依賴核能與核武國家都反對此公約，依舊拒絕廢止核子武器。

過去70年來，觀念上核子武器的威力不僅被國家做為推動核武擴張的工具，也創造鈾礦濃縮工廠、核子反應爐與用過核燃料棒再處理工廠等，用來提供核子武器製造能力與材料。

1953年美國總統艾森豪於在聯合國「原子能的和平用途」（Atoms for Peace）演說後，全球開始積極地鼓勵核能研究、生產同位素反應爐和核能發電廠。美國國防部顧問Stefan Possony在1953年心理戰略委員會（Psychology Strategy Board）鼓吹：「如果原子能同時被建設性的利用，原子彈會更容易被接受」（摘自於Kuznick 2011）。美國原子能委員會委員Thomas Murray特別在日本推銷核能：

「人們現在對廣島與長崎的記憶依舊十分清晰，如果日本這樣的國家興建一座核電廠，是非常戲劇性與基督教精神表現，可將我們提升超越這些城市的殘酷回憶（摘自Kuznick 2011）。」

自曼哈頓計劃開始，冷戰期間大規模地投資在新興的核子武器，美國與蘇聯捐助全球100個以上國家興建研究用核反應爐，鼓勵並補貼核電廠興建；努力操控、扭曲、淡化與擱置和輻射相關的健康風險證據，一直是同步、進行中。許多大型官方與民間機構，具備雄厚的財力、優渥的工作、組織化、政治化與龐大商業利益等，都涉及核子武器與核能反應爐發展。不受歡迎的研究常常遭受打壓與停止；收集不受歡迎的證據的獨立研究者也被打擊、經費被刪、被駁斥以及與學術上被貶為不可信。雖然本篇無法詳述輻射健康效應的歷史細節，表揚這些獨立的科學家與醫生們的勇氣，對他們的科學貢獻致意是很重要的，如Alice Stewart, George Kneale, Thomas Mancuso, Edward Martell 與 Carl Johnson等許多人，因為在輻射健康效應風險的開創性科學工作，不受龐大核能產業利益者歡迎而飽受傷害（Quigley, Lowman, and Wing 2012）。

1969年一位菸草產業的管理者解釋：「懷疑是我們的產品，因為它存在大眾心中，是與「大量事實」競爭最好的對策，也可用來營造爭議。」（Brown and William, Minnesota Lawsuit 1969）。類似的否認、風險極小化，與鼓吹爭議至今仍持續在輻射的健康風險領域廣泛存在。以下簡短的討論說明有關主要機構的一些顧慮。



世界衛生組織

身為全球領銜的健康技術機構，世界衛生組織成員包括所有國家，擁有很強的權威性與號召力。WHO的報告、建議、技術標準與指導原則都受到注意與尊敬。但世界衛生組織的能力因為預算長期短缺而所限，在輻射與健康領域，長久以來缺乏適當領導與能力；廣為人知其與國際原子能總署（IAEA）的關係，WHO的過分聽信與缺乏適當的獨立性使得問題惡化。這兩個機構1959年簽的協議規定：「當任何一方提出啟動計畫或活動，而另一方對此或有相當高的興趣時，提案方必須(shall)徵詢另一方意見，雙方協議進行調整。」（IAEA 1959: Article 1.3）。

國際原子能總署在組織上是矛盾的，既是全球核能產業標準與核能核武安全保護的規範者，同時鼓吹使用核能科技，包括核電—相當於倡議核子武

器擴散，但主要任務是阻止核子武器擴散（IAEA 1957）。在有些重要場合，如2006年多所聯合國機構有關車諾比核災的影響研究報告，國際原子能總署領銜撰寫報告結論、資訊分享與公開評論，非常不恰當的壓低核災造成的健康影響（IAEA 2006）。該報告宣稱僅有4000額外死亡案例是歸因於車諾比核災；而國際癌症研究署（International Agency for Research on Cancer）也是世界衛生組織的相關機構，但是研究更活躍，也較具獨立性，同年估計，至2065年將會有41,000個癌症病例，以及16,000（6,700 - 38,000）個死亡病例（Cardis et al. 2006）。

世界衛生組織針對潛在最大的輻射暴露與污染來源，核子武器戰所產生的健康影響發表兩份劃時代的報告（WHO 1983, 1987）。世界衛生組織大會承認「核子武器對人類的健康與福祉造成最大與立即性的威脅」（WHO 1983）。1987年，世界衛生組織大會決定核子武器戰的健康影響調查應該持續，並要求世界衛生組織秘書長定期向大會報告進度。但是，沒有對這項決議進行追蹤。

在福島核災相關方面，世界衛生組織的角色基本上被限制在整理輻射劑量，以及評估在這些劑量下曝露之健康風險的報告（WHO 2012, 2013）。核災之後的公共衛生管理與保護受影響民眾健康部份，世界衛生組織沒有積極提供國際協助。報導指出，日本副部長Shinji Asonuma 直接向世界衛生組織秘書長施壓，希望降低福島核災後日本兒童甲狀腺的輻射估計劑量，令人質疑日本政府與世界衛生組織的獨立性。世界衛生組織最原始估計，在污染嚴重的地區約為300至1,000毫西弗，東京與大阪地區為10至100毫西弗；世界衛生組織最終報告分別降低為100至200毫西弗與1至10毫西弗；據報導日本政府在正式報告發佈前仍要求繼續下修輻射劑量估計值（Asahi Shimbun GLOBE 2014）。

世界衛生組織長期以來的預算危機削弱了它的能力，也因為絕大部份經費仰賴各國政府捐獻，因此破壞了它的獨立性。世界衛生組織的預算從1990-91年的14億美元，增加到2016-17年預計的44億美元，而這段期間來自各國政府的經常性捐助還停留在每年約10億美元，因此世界衛生組織79%的預算，依賴一些政府與慈善團體捐助—其中許多捐贈是指定用途（WHO 2015）。



INTERNATIONAL COMMISSION ON
RADIOLOGICAL PROTECTION

國際輻射防護委員會

國際輻射防護組織於1928年成立，是建議輻射防護各類標準的要角。自認為是獨立的組織、致力於公眾利益、超越黨派、公開透明與願意負責。根據其2014年年度報告，232位成員來自於全球30多個國家，經過公開的程序提名，在自願基礎上邀請以獨立的專家身分參與。國際輻射防護委員會最早是在英國獨立登記的慈善團體，並在加拿大設有一個小秘書處，是以會社（club）的形式運作。即便在2016年7月簡略地瀏覽其網站，就令人高度懷疑其獨立性。助理科學秘書，Haruyuki Ogino博士，是由日本商用核反應爐營運者－日本的電力事業中央研究所（Central Research Institute of Electric Power Industry）免費提供。國際輻射防護委員會許多會員有的是積極發展核電或核武政府的雇員，或是在擁有明顯龐大核能利益的公司的員工，包括大型開採鈾礦的Cameco，Areva Resources Canada Inc.，以及美國、歐洲與日本的核能經營者，和他們的協力廠商。不少的核能公司也會提供ICRP資金。一個科學組織與利益團體這樣多層次緊密地互動，以平常的標準來看都是明顯地不恰當。

ICRP的腐敗以及受利益團體不當影響的惡劣事蹟，被日本國會成立的「福島核子災害獨立調查委員會」揭露（NAIIC 2012）。調查委員會發現的內部文件顯示，日本電氣事業連合會（Federation of Electric Power Companies, FEPC）遊說包括國際輻射防護委員會成員在內的許多輻射專家，成功地放寬輻射防護標準，使日本政府採用最低的輻射防護標準。調查也發現日本的ICRP成員的國際差旅費用，是由日本電氣事業連合會支付，但假借是付給其他團體。日本電氣事業連合會的文件敘述「政府規範不應該涵蓋職業輻射曝露劑量的限制...女性設特殊輻射劑量限制，特殊的員工健康檢查...以及緊急事故時的法定輻射曝露劑量限制等都應該廢止」。結果是「核能業者對ICRP 2007年建議的所有關心事項都有了回應」（NAIIC 2012: 第5章, 第5.2.3節）。至今，國際輻射防護委員會仍沒有對這樣的腐敗與不當做為有任何反應。

日本國會的委員會也說明核能發電業者也試圖「引導輻射健康效應的相關研究，朝向發現較少傷害的方向，引導日本與其他地區輻射防護的專家們

的意見，朝向放寬輻射防護與控制的方向發展」。日本電氣事業聯合會的文件顯示「如果能科學地證明輻射劑量的影響不會累積，未來可預期在包括輻射劑量限制等評估將會大幅放寬」。東京電力公司（福島核電廠的擁有與經營者）的前任副總裁Sakae Muto 先生曾建議「要密切留意研究趨勢，確保不會被很差的研究者劫持，導往錯誤的方向」（NAIIC 2012: 第5章，第232節）。



聯合國原子能輻射影響科學委員會

大氣中核武試爆，所產生的全球輻射落塵，以及全世界嬰兒牙齒含銫-90量不斷增加等問題的國際的關注與抗議日益升高，聯合國於1955年會員大會成立聯合國原子能輻射影響科學委員會。根據官網，「為了刻意轉移立即終止所有核子武器試爆的提案，因此在聯合國會員大會提案成立一個委員會，收集與評估不同游離輻射強度與影響」（UNSCEAR 2016）。聯合國原子能輻射影響科學委員會(UNSCEAR)的創立，也和核武國家懷疑國際許多科學家透過聯合國教科文組織（United Nations Education, Scientific and Culture Organisation）與國際科學聯盟理事會（International Council of Scientific Unions），資助進行與各國政府無關，研究核子武器試爆輻射落塵影響的科學活動有關。（Herron 2014）。Nestor Herran描述UNSCEAR成立初期，美國與英國如何在科學上強勢主導，並將淡化輻射落塵的危險建置成為範本—例如1958年UNSCEAR第一份主要報告；人類在核武試爆後接受到的長期輻射曝露的大部份來自碳-14，但UNSCEAR報告根本沒有討論碳-14 (Ruff 2015)。

設立時僅15個被指派的會員國；1973至2011年間一些國家陸續加入，總數增為27。除了2016年與中國簽綱要協議，要建核能核反應爐的蘇丹（Sudan）之外，所有會員國都有核子武器、核能電廠或研究用核子反應爐。這些國家在UNSCEAR的代表都是各國政府任命，而且通常是該國核能電廠或核能管制機構的員工。他們並不是因為在科學與醫學的優異表現被指派，不能視為獨立的專家。其中一些人與核能工業關係密切，有些同時是ICRP會員。一個著名的例子是2012年加拿大UNSCEAR代表，也擔任

其他幾年代表的Douglas R. Boreham博士，目前受雇於安大略省核電公司Bruce Power。Boreham博士對輻射風險認知，與已知的證據或國家及國際輻射防護機構的瞭解都不同，他不斷重複辯稱低劑量輻射曝露利大於弊，例如：「低劑量輻射的曝露，如果影響健康，也是有利而不是風險」（Higson et al. 2007: 259），並且電腦斷層掃描可降低而不是增加罹癌風險（Scott et al. 2008）。Boreham博士至少曾經三次代表鈾礦公司Toro Energy，Uranium One和Heathgate Resources 去澳洲，進行「員工輻射訓練」與「社區的輻射與健康諮詢」－對於目的在淡化輻射風險與引發混淆的活動，很委婉的說辭（Toro Energy Limited 2008; MAPW 2012）。

很多人希望並假設這些國際機構，如UNSCEAR與ICRP是具備獨立的嚴謹和科學的誠信正直做為保護全球健康的棟樑，如政府間氣候變遷小組（Intergovernmental Panel on Climate Change）廣泛的同儕審查過程；相反的，這些國際機構被強大的政府與商業利益所主導把持，欠缺透明度，缺乏適當倫理規範會員的利益衝突，並且不斷重覆發生對證據做選擇性解釋與故意淡化輻射風險。例如，對Mousseau和Moller累積越來越多的資料，顯示車諾比與福島輻射污染對動、植物造成顯著影響，但UNSCEAR多年來報告，以實際資料與所喜好的模型表現不符而排除不採用，並且忽視大部分車諾比核災的健康影響證據。

未來大規模民眾輻射受曝的可能

雖然地球上的生物在長期的演化壓力與背景輻射相關的生物風險之下演進，核能反應爐與核子武器的出現，在放射性物質釋出的量、時間與空間尺度上，創造了前所未有的可能。

核子武器

廣島與長崎原子彈爆炸、核武工廠的洩漏與廢棄物，以及2,056次核武試爆，三者共計產生人類製造的最大環境輻射污染，而且還會持續影響人類健康千萬年（Ruff 2015）。但，前述的影響和核子武器戰爭後民眾可能接受的輻射曝露相比將黯然失色（WHO 1987; IOM 1986），即使只用了全球現有14,930件核子武器的一小部份（Kristensen and Norris 2017）。核戰之後，任何輻射劑量的影響只會更加嚴重，因為無可避免地還有其他多重傷害、壓力與健康風險同時存在 — 也不能期待有有效且運作正常的

醫療服務。

只要有核子武器，核戰的風險是永遠存在；最瞭解的人推估危險升高成，核子武器減量並沒有落實；所有核武國家都計畫進行大規模的核武現代化；1,800件核武仍在高度警戒狀態，幾分鐘內就可以被啟動；網路攻擊核能或核武的指揮控制系統的風險日益升高；美國-北約組織（NATO）和俄羅斯間，印度與巴基斯坦、南中國海以及朝鮮半島國家間關係持續惡化，還不停挑釁式地展示核武能力；以及很多核武國家的政策是用核武先發制人，很可能在軍事衝突開始升高時使用（Helmand et al. 2016）。2015年原子科學家公報（Bulletin of the Atomic Scientists）將世界末日時鐘從距離末日午夜5分鐘移前至3分鐘，2016年沒調整，2017年移前至距末日午夜2分半鐘。美國前國防部長William Perry與俄羅斯前外交部長Igor Ivanov 兩位都列名為評估者，評估目前核戰的風險遠比冷戰時期高，而且在增加中（Helfand et al. 2016）。

任何一個城市即便只引爆一枚核武，都不可能進行有效可行的醫療因應，只有急迫地裁撤核武，不然無法持續地避免核武被使用，因此這是為了全球健康絕對必要採取的措施。2017年聯合國大會（2016: 4）決定召開協商「禁止，並進一步徹底消除核武，具備法律約束力的辦法」，是打破核武裁減僵局的歷史性機會。除了禁止與裁除核子武器，希望未來世界能達到並持續沒有核子武器，就必須控制並去除所有可分裂物質—高濃縮鈾與分離出來的鈾—核子武器的原料。必須停止這些物質生產，現有庫存應盡量以不可逆方式處置。鈾濃縮工廠是用來生產高濃縮鈾，鈾無可避免地在從核反應爐產生，從用過核燃料提煉出來，兩物種自然存在的能力是這星球最大的健康危害，都與核能發電有關。

停止製造高濃縮鈾（von Hippel and IPFM 2016），將所有的鈾濃縮工廠交給國際控管（Diesendorf 2014），停止所有用過燃料棒的再處理與提煉鈾的活動（IPFM 2015b）是促進全球安全的重要步驟。

核能設施釋出的輻射

核能設施日常運轉時會釋放出放射性物質，輕微事故也經常發生。在核能電廠，大量的輻射強度很高與半衰其很長的物質，累積在核反應爐內的核燃料與放在冷卻池中冷卻的用過燃料棒裡；後者因為輻射強度與熱度很

高，必須持續以流動的水冷卻三到五年，才可能移入乾式貯存筒儲存。用過燃料棒儲存池不像反應爐具備多層防護工程的圍阻體，只有簡單的建築覆蓋。當2011年當福島核一廠核災發生時，全廠70%的輻射物質在用過燃料棒池裡（Stohl et al. 2011）。與核反應爐類似，如果不停循環的冷卻水突然中斷，即使是非常短暫，用過燃料棒很容易起火燃燒或爆炸。

日本官方與核電設備商認為福島核一廠反應爐爐心熔毀是因為海嘯而非地震。但證據顯示，輻射外洩在地震發生後，海嘯尚未襲擊前就已發生（Stohl et al. 2011; NAIIC 2012）。這過程對全球每一座核電廠都深具意義。反應爐與用過燃料棒儲存池所需的冷卻系統，可能因為許多因素中斷，不當設計、施工錯誤與地震海嘯等天災，像2011年3月11日發生的情況；或刻意地實質切斷電源或冷卻水供應或冷卻水循環；也很可能透過網路攻擊。在2010年曝光，由美國與以色列聯合開發的震網（Stuxnet）電腦蠕蟲(computer worm)，可能是自1992年來許多網路攻擊核能設施中最著名的例子。震網蠕蟲攻擊目標是伊朗的核能設施中，所採用西門子(Siemens)公司的Step 7 SCADA系統，被攻擊後鈾濃縮的離心機的轉速變過快，造成其中約1,000個局部損毀（Baylon, with Brunt and Livingstone 2015）。平常裝置1吉瓦的核電廠擁有的放射性物質比一個百萬噸級核彈所能釋放的更多，而且半衰期長；一個百萬噸級核彈爆炸力約是摧毀廣島的原子彈的67倍。也就是說，截至2016年7月1日仍在運轉中的402座核反應爐（Schneider et al. 2016），每一座實際上就是個大型、在既定位置上，可能的輻射恐攻武器（「髒彈」）。

從1950年代初以來，全球已知有約20次核能意外，造成反應爐爐心熔毀（Burns, Ewing, and Navrotsky 2012）。事故發生在不同國家、不同設計的軍用與民用核反應爐，雖然所有事故都可能發生輻射外洩，但不是所有事故都有輻射釋放到環境中。在國際核災事件分級表（International Nuclear and Radiological Event Scale, INES）上列為4級或更嚴重的核災，全球共計發生20次。4級以上核災會對所在地區性產生嚴重影響，包括「在核能設施範圍內釋出大量放射性物質，民眾嚴重的輻射曝露的可能性非常高」（IAEA n. d.）。這類嚴重事故過去曾發生在阿根廷、加拿大、法國、日本、斯拉夫、瑞士、英國、美國和蘇聯/俄羅斯（Lelieveld, Kunkel, and Lawrence 2012）。真正歷史上發生爐心熔毀意外的頻率約是每800爐年發生一次。沸水式反應爐搭配早年設計的馬克一型或二型圍阻體，如在福島核一廠的反應爐以及許多美國的核反應爐，歷史上發生爐心熔 意外

的頻率約為每630爐年一次（Cochran 2011）。因此，以目前運轉中400多個反應爐來看，可以預期每隔幾年就發生一次爐心熔毀的意外。

Lelieveld與同仁分析全球主要核電廠災害發生的頻率以及所產生輻射落塵（Lelieveld, Kunkel, and Lawrence 2012），發現所釋出的銫-137有超過90%會擴散到50公里外，約有50%擴散超過1,000公里。根據定義，銫-137的量超過每平方公尺37,000貝克，就算是嚴重的污染，相當於在重大核災後的第一年內人體接受約1毫西弗（mSv）的輻射曝露劑量。以車諾比核災作為基準估計最嚴重意外事故的影響，與歷史上發生最嚴重核災的頻率（車諾比與福島核災都被列為INES第7級），他們估計大部分的北美洲、東亞、和歐洲地區受主要核災污染的風險，每年高於1%；在毀滅性的爐心融化後，銫-137污染在每平方公尺40,000貝克以上區域面積將達138,000平方公里；如果災害在西歐發生，平均將影響2,800萬人；如果發生在南亞，將有3,400萬人受影響。

放射性物質的散佈

從技術層面看，在水、食物供應鏈或由傳統爆破散佈放射性物質相當的簡單，取得放射性物質的可能性也很高。能大量取得，最危險的放射性物質就是高階核廢料（包括用過燃料棒以及用過燃料棒再處理取走鈾之後剩餘的核廢料），以及從用過燃料棒分離出來的鈾。全球已分離出來的鈾總計約505公噸，其中約半數放在民用核能設施（IPFM 2015a）。高階核廢料在數千萬年內都具極端危險的輻射強度，必須嚴格地與地下水、生物圈達隔絕一百萬年。平均的核能反應爐每年製造30公噸高階核廢料，一全球每年產生約12,000公噸；2015年全球高階核廢料的總庫存量約390,000公噸。至今仍沒有一個國家有運轉中的高階核廢永久貯存場，這些放射性物質很可能被竊取或被挪用他用，特別是在用過燃料棒再處理工廠，故意在一個或多個都市散佈也可能真的發生，而且這些物質的存在是用地質時間尺度衡量。這樣的事件都可能造成當地嚴重的輻射污染。

出版資訊

發行 /



社團法人台灣媽媽監督核電廠聯盟協會

台灣媽媽監督核電廠聯盟協會用關懷孩子的未來、疼惜土地的心，參與監督台灣核電廠的安全問題與核廢料處理方式，研究全球氣候變遷與台灣環境問題，協助凝聚社會共識攜手探討台灣新世代的能源政策及環境永續發展議題。

發行人 /

徐光蓉

作者 /

提爾曼·魯夫(Tilman A. Ruff)

譯者 /

周振元

出版日期 /

2018年9月

電話 /

(02) 2709-6101

網站 /

www.momlovestaiwan.tw

電子信箱 /

momlovestaiwan@gmail.com



媽媽監督核電廠聯盟