

RMC-108301

107 年
國民輻射劑量評估先期作業研究
年度執行報告



計畫全程：自 107 年 1 月 1 日至 107 年 12 月 31 日

執行單位：行政院原子能委員會輻射偵測中心

108 年 1 月

摘 要

本中心於民國 85 至 87 年完成「台灣地區國民輻射劑量評估」，該評估結果為國內各界評估輻射風險的重要參考，然而已二十年未再做評估。這段期間環境輻射量測技術之躍進，生活水平習慣改變快速。本計畫蒐集國際間探討各項輻射曝露來源之評估結果，排定評估優先次序，以利後續推動台灣地區國民輻射劑量調查作業。

目錄

壹、前言	2
一、計畫背景	2
二、計畫目標	3
貳、執行策略及方法	4
參、期程與資源需求	5
一、計畫期程	5
二、經費需求	6
肆、結果與討論	7
一、國際間國民輻射劑量評估比較	7
二、室內天然輻射劑量初步量測與評估探討	9
三、飛航人員與民眾搭機接受天然輻射之初步評估	10
四、體內劑量評估模式初步評估	17
五、醫療輻射劑量評估作業初步規劃	23
伍、國民輻射劑量調查作業規劃	48
陸、結論	50
柒、參考文獻	50
捌、附件	56

壹、前言

一、計畫背景

國人的輻射曝露來源很多，包括醫學診斷和治療程序、自然背景輻射、核爆落塵殘留、嚴重核子事故如烏克蘭車諾比爾及日本福島等以及從事人造或增強天然存在輻射源的相關職業曝露等等。國際組織定期對於民眾輻射曝露劑量進行評估，例如聯合國輻射影響科學委員會(UNSCEAR)自 1958 年起每隔 5 至 10 年，會依蒐集資料的統計結果，評估全球民眾輻射劑量[1]。美國輻射防護委員會(NCRP)於 2006 年的再評估報告(NCRP 160 號報告)顯示美國民眾接受輻射曝露與 1980 年代同樣對全美民眾進行大規模的輻射曝露情況調查的 NCRP 93 號報告相比，輻射曝露的來源有大幅差異[2]。

民國 85 至 87 年輻射偵測中心進行過國民輻射劑量評估，評估項目主要分為天然輻射、核爆落塵、職業曝露、醫療輻射、核設施和雜項五大類。天然輻射導致每年每人年劑量約 1.62 毫西弗。人造輻射曝露源導致每年每人劑量約 0.82 毫西弗[3]。臺灣國民輻射劑量總和是 2.44 毫西弗。天然輻射占整體劑量比例為 66.3%，以地表輻射為最主要劑量來源，其次是氡氣與體內劑量。醫療輻射占總劑量來源 33.3%，為人造輻射最主要的來源，其他輻射源項的貢獻只有 0.4%。對照聯合國輻射影響科學委員會(UNSCEAR) 1993 年報告的世界平均值評估結果，台灣天然輻射劑量是世界天然輻射平均值的 67%，醫療輻射劑量是第一級醫療水準國家平均值的 80%[4]。20 多年來，醫療科技發展迅速，民眾生活習慣改變，國民輻射劑量的變化情況有必要進行系統性地探討整理。

二、計畫目標

原能會為我國輻射及核能安全的管制監督機關，負責核電廠、輻射作業場所及放射性廢棄物等之安全管制，保障民眾、環境及輻射工作人員之輻射安全。為強化環境輻射監測作業效能及安全防護，讓民眾瞭解我國環境輻射狀況，有必要建立更為完整之環境輻射背景資料。

(一) 目標說明

1. 蒐集國內外相關文獻，確定國民輻射劑量的評估項次。

國民輻射劑量的來源包羅萬象，粗分為天然與人造兩大類。天然輻射包括氡氣、宇宙輻射、建材輻射、食品飲水中天然放射物質等等，人造則包括醫療、工業、核能發電、核爆、核子事故等。各國因國情不同，評估的項目會有些許差異，因此進行先期探討，並建立未來四年完整調查的作業規劃。

2. 進行室內天然輻射劑量初步量測與評估。

為精進劑量評估方法，室內天然輻射採實際量測結果不同的房舍與建材進行修正，此先期評估結果也可納入未來四年國民輻射劑量調查之規劃內容。

3. 飛航人員與民眾搭機接受天然輻射之初步評估。

宇宙射線是天然輻射的來源之一，但只有當高度超過 1500 公尺以上且在高緯度地區影響才會較為明顯。台灣位於低緯度地區，推估只有往高緯度區域飛航較會增加民眾輻射劑量。107 年度蒐集國內外有關民用飛航人員宇宙輻射劑量管制相關法規，另以國際通用的評估程式粗略估計國內民眾搭機可能的航線劑量，以評估後續進一步做法。

4. 體內劑量評估模式初步評估。

為精進劑量評估方法，先期作業以確認近年來國際組織公布體內劑量轉換因子的修正為主。並探討劑量轉換因子改變可能的影響，以能應用在食品及飲用水之輻射劑量評估。

5. 醫療輻射劑量評估作業初步規劃。

隨著科技的進步，醫療輻射的使用在近二十年來大幅成長，雖然醫療放射設備的設計及輻射醫療品保制度的推行，已經讓單次暴露的劑量大幅下降，但是因為使用量的增加而導致美國評估醫療劑量必須加以約束。因為涉及醫療專業，107 年委託相關專業學術機構進行先期探討，以確定調查評估的作業方式。

(二) 預期效益

1. 檢討國民輻射劑量評估結果，可作為與民眾進行風險溝通的基本參考資料。
2. 藉由背景輻射資料庫的建立，提升國內輻射度量的能力。
3. 利用 107 年度計畫執行的結果，作為國民輻射劑量調查計畫之參考依據。

貳、 執行策略及方法

本計畫主要進行國民輻射劑量評估的先期探討分為四個分項。執行作法主要蒐集國內外相關參考文獻，分析各國所完成的國民輻射劑量評估中主要的輻射劑量來源。據此探討台灣地區民眾生活特性與其他地區之差異，推估可能的重要輻射劑量來源，並進行初步評估，以利後續評估作業的推動。其中醫療輻射劑量的評估方法，因為涉及醫

療專業，因此委請清華大學協助進行規劃評估方法與作業方式。

參、期程與資源需求

一、計畫期程

本計畫期程為 107 年 1 月 1 日起至 107 年 12 月 31 日止，如下表 3.1。

表 3.1 計畫進度表

工作項目	107 年 1 月	107 年 2 月	107 年 3 月	107 年 4 月	107 年 5 月	107 年 6 月	107 年 7 月	107 年 8 月	107 年 9 月	107 年 10 月	107 年 11 月	107 年 12 月
資料蒐集、委外發包與設備建置			*1									
室內建材初步分析與結果彙整												
宇宙輻射法規蒐集與模擬結果彙整												
完成體內劑量評估確認												
委外作業醫療輻射先期結果彙整												
工作檢討與半年報						*2						
各項評估作業方法修改確認									*3			
分析結果彙整與補強												
規劃長程計畫細部作業											*4	
總結報告												
*查核點說明	1. 完成委外發包作業。 2. 室內劑量建材評估分項作業結果。 3. 體內劑量評估分項作業結果。 4. 宇宙輻射模式評估方法確認與提出長程計畫規劃。											

二、 經費執行情形

本計畫 107 年度總經費為 2,600 仟元，結餘 73,365 元，執行率為 97.18%，執行情形如表 3.2 所示。

表 3.2 經費運用情形

單位：新臺幣 元

經費科目	全年度預算數		已執行數		備註
	金額 (B)	占總額(%) $C=(B/A)$	金額 (H)	占總額(%) $I=(H/A)$	
業務費	1,600,000	61.54	1,532,535	58.94	
設備費	1,000,000	38.46	994,100	38.24	
總計(A)	2,600,000	100	2,526,635	97.18	

肆、結果與討論

一、國際間國民輻射劑量評估比較

國際間國民輻射劑量評估結果，整理如表 4.1。劑量比重占前三位的項目以粗體字標示。不管是哪一個國家評估結果，氡氣與醫療輻射為國民輻射劑量評估最重要的兩個項目。至於接下來的排序，則各國因生活環境特性不同，導致劑量來源項目占比有所差異。

台灣的體外曝露較高的原因，推估主要來自於建築結構大多為鋼筋混凝土，與國外以木造房為主的建築結構不同。木造房的輻射劑量通常與戶外地表輻射差異不大，鋼筋混凝土中含有天然放射性物質鈾系列與釷系列，雖然對於戶外地表輻射會有屏蔽效果，但是由國際間量測結果，平均室內會比室外高約 1.2 倍到 2 倍[1]。

日本的飲食評估高於其他國家，主要原因是日本海產中的鈾 210 所造成。因為鈾 210 為阿伐射源所以造成的輻射加權因子高於加馬與貝他射源，且主要會存在於無脊椎的漁產如蛤蜊、蚵蜆等以及動物內臟。由於相較於其他主食，攝取量不高，所以其他國家評估結果並不顯著，主要還是來自於天然放射物質鉀 40。

美國由於地質條件以及住屋節能考量室內通風較差，氡氣評估結果最高，此外由於將吸菸以及建材所造成的劑量評估於雜項射源項目中，所以該項目也較其他國家高。由於吸菸的人口與使用量難以評估，所以許多國家僅將吸一包菸的輻射劑量評估結果當作參考，而不納入國民輻射劑量評估。

英國氡氣與宇宙輻射劑量高於台灣，主要是國土範圍緯度較高且受其境內花岡岩地質的影響，但是體外輻射與醫療輻射劑量相對偏低，所以最後評估的總劑量與台灣差異不大。

表 4.1 各國評估國民輻射劑量項目與結果

單位:毫西弗/年

項目	台灣[3]	日本[5]	美國[2]	英國[6]	愛爾蘭[7]	聯合國[1]
氡氣	0.44	0.48	2.28	1.30	2.05	1.26
飲食	0.28	0.99	0.29	0.27	0.235	0.29
地表(含建材)	0.64	0.33	0.21**	0.35	0.300	0.48
宇宙輻射	0.26	0.36	0.33	0.33	0.345	0.39
醫療	0.81	3.87	3.00	0.44	0.540	0.60
核爆、事故落塵	0.006	0.005	--*	0.005	0.015	0.007
雜項	0.001	0.004	0.13**	0.0008	--	--
職業	0.003	0.0015	0.05	0.0004	0.185	0.005
核設施	8.5E-7	0.0001	--	--	5E-9	0.0002
合計	2.44	5.98	6.2	2.70	3.39	3.0

* “—”表示可忽略不評估。

**建材劑量評估於雜項。

愛爾蘭的氡氣問題較為嚴重，其他評估項目結果與英國差不多。與其他國家不同之處，在於愛爾蘭職業曝露的評估中包含了工作場所氡氣所造成的劑量，所以該項目劑量較其他國家高。一般評估職業曝露時，除了少數職業須進入地下密閉空間如礦工外，僅針對輻射作業場所的輻射源應用所造成的工作人員劑量進行評估，不對天然輻射進行評估。

綜合以上結果，考量氡氣、醫療、地表(含住宅建材)體外輻射、飲食以及宇宙輻射共計五個項目的輻射來源，評估所得輻射劑量可涵蓋總劑量 90%以上，務必審慎評估，其餘項目則視民眾生活習慣，選擇重點項目評估即可。必須強調的是，目前引用的各國評估結果，都沒有包含日本福島事件所造成的劑量。

二、 室內天然輻射劑量初步量測與評估探討

在我們的生活環境中，天然放射性物質廣泛地存在於各種地質構造中，例如土壤及岩石和建築材料當中[8]，所以民眾是一直持續受到天然放射性物質所產生的游離輻射所影響，地殼中鐳 226，鈾 232 和鉀 40 的平均活度濃度分別為每公斤 35、30 和 400 貝克，然而在全球某些國家，例如巴西、法國、印度、尼日利亞、伊朗，每年都會發現一些天然背景輻射較平均值高的區域，導致這些國家的天然放射性劑量增加[1]。

因為大多數民眾在室內度過 80% 的時間[9]，所以測量建築材料中的放射性物質活度濃度對於國民劑量的評估非常重要。建築材料中天然存在的放射性核種鈾系列、鈾系列和鉀 40 的加馬輻射，是住宅中體外輻射曝露的主要來源，依 UNSCEAR 2008 年報告所述，建築材料加馬射線造成的全球平均室內有效劑量估計約為每年 0.48 毫西弗[1]。

為瞭解台灣地區室內加馬輻射劑量，本中心於民國 76 年以熱發光劑量計度量 43 戶住宅室內加馬輻射劑量，平均為每小時 0.080 ± 0.017 微西弗，在 79 年也針對 42 戶民宅進行度量，結果與第一次調查結果相近[3]。推算年劑量 $0.08(\text{微西弗/小時}) \times 8760(\text{小時/年}) \times 0.8(\text{室內占用因子}) = 560$ 微西弗，也就是 0.56 毫西弗，比聯合國統計平均劑量高。台灣現代建築多為鋼筋混凝土建築，其室內外劑量率比值約為 1.9[3]，國外多木屋建築，室內外劑量率比值差異較小，可能是造成劑量率偏高的原因。

107 年於高雄市區針對 48 戶住宅進行室內劑量率偵測，平均劑量約為每時 0.08 微西弗，與過去的結果差異不大。同時也在屏東科技大學，對於木屋結構的房舍進行量測，結果發現木屋結構的房舍室內劑量率比室外低，主要原因在於建材的輻射劑量不高，反而屏蔽來自室

外的地表輻射。

表 4.2 木屋及木屋外草地輻射劑量率

單位：微西弗/時

偵測點 項目	木屋室內中央	木屋外草地
偵檢器	碘化鈉型	碘化鈉型
平均	0.065	0.083
範圍	0.012~0.159	0.007~0.182

由建材的統計來看，民國 88 年曾與商檢局合作進行市面磁磚 60 件與石材 74 件，結果鈾系列濃度低於每公斤 176 貝克，釷系列濃度低於每公斤 274 貝克，鉀 40 濃度低於每公斤 1681 貝克。102 年至 106 年市場取樣共計 402 件樣品，量測結果鈾系列濃度低於每公斤 389 貝克，釷系列濃度低於每公斤 242 貝克，鉀 40 濃度低於每公斤 1588 貝克。除了有兩件馬來西亞進口的防滑地磚鈾系列較過去高，其餘都在過去量測結果的變動範圍內。

由今年的初步評估結果來看，一般住宅室內輻射劑量率與過去量測結果相當。而造成室內劑量的差異，主要來自於建築結構材料的使用。建議未來應該對於不同的建築形式，如高樓、地下室住家等，以及進口石材的使用需再補充更多的調查數據，以確認室內輻射劑量是否維持過去的水平。

三、 飛航人員與民眾搭機接受天然輻射之初步評估

飛航工作人員與乘客曝露的宇宙輻射主要是來自太陽系外的高能粒子(通常被稱為銀河宇宙射線, galactic cosmic rays 簡稱 GCR)。銀河宇宙射線主要是質子(~85%)和阿伐(~12%)以及其他基本粒子。GCR 與大氣相互作用，所產生的二次粒子與主要入射粒子一起造成人員輻射曝露，強度隨著高度降到海平面而減小。來自 GCR 的劑量不僅隨

高度而變化，且隨著地磁緯度朝向極點較大而在赤道附近較小；此外也取決於大約 11 年周期的太陽活動變化，太陽活動劇烈會釋出較高的離子通量(通常稱為太陽風)，阻擋銀河宇宙射線進入太陽系內，降低宇宙輻射劑量。

過去已有一些調查發現機師與空服人員罹癌率高於一般民眾，因此懷疑是由於宇宙輻射的影響[10-20]，歐盟 1996 年於 Council Directive 96/29/Euratom 要求會員國對於飛航工作人員所受輻射劑量加以重視，希望能在 2000 年基於 ICRP 60 號報告的輻射防護原則，提出適當的干預架構。2004 年 EURADOS 發表輻射防護建議 140 號報告建議對於飛航高度低於 8 公里的航線，可以不做任何的措施，高於 8 公里以上 15 公里以下的航線，可以使用歐盟認可的評估程式評估工作人員年劑量，高度高於 15 公里以上的航線建議在機上加裝監測設備，以保障工作人員的輻射安全。

民國 85 年輻射偵測中心曾經使用美國民航局所發展的程式 CARI-2 與 LUIN，針對國內與國際各航線評估每航次的輻射劑量，並評估國人因搭乘飛機所造成的輻射劑量，迄今已逾 20 年，該評估程式已改版，且現在民眾搭機較過去更為便利，因此需要重新評估。

美國聯邦航空管制局(Federal Aviation Administration, FAA)所發展的 CARI 軟體目前已更新到第 7A 版。CARI 計劃源自 1991 年，該計劃最初被稱為 CARRIER，但後來縮短為 CARI。CARI-2 和後期版本使用由美國亞歷桑納大學發展之 LUIN 程式進行輻射傳輸劑量率計算的數據庫[21,22]。LUIN 的主要作法是使用波茲曼輻射傳輸方程式，進行各種輻射粒子作用與傳輸計算，並使用「疊加近似」法來進行重離子的大氣傳輸。之後版本之改版中最明顯的變動在於 CARI-5 時，它依據國際放射防護委員會第 60 號報告建議的有效劑量轉換因子[23,24]，進行全身有效劑量的計算。到 CARI-6W、CARI-7 更將周圍

等效劑量 $H^*(10)$ 列為輸出選項之一。另外，CARI-7 不再使用 LUN 進行傳輸計算，而是改採美國洛斯阿拉莫斯國家實驗室(Los Alamos National Laboratory)開發的通用蒙地卡羅輻射傳輸程式 MCNPX 2.7.0 來計算不同位置的輻射劑量率。

CARI-6 計算需要使用者輸入起點和目的地機場，以推估兩者之間飛行路線所接受的銀河宇宙輻射的有效劑量。飛行路線是由美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)的程式 INVERSE 和 FORWARD 10 計算所得的最短路線(通常被稱為大圓路線)，其考慮到地球形狀與完美球體之間的差異。使用者還須輸入飛行廓線資料，其中包括從起飛到達首個途中高度的起飛所需時間，以及每條途中所需的不同高度和各高度花費的時間，以及從最後高度下降到目的地機場的分鐘數。在計算劑量時，程式考慮到高度、地理座標、太陽活動和地磁變化的影響。最新版本的 CARI-7 將計算的高度限制從 27 公里延長到了 100 公里。在 CARI-7 中可以從多個銀河宇宙射線(GCR)模型中進行選擇能譜曲線，且包含了太陽風離子與銀河宇宙輻射交互作用的 Forbush 降低效應。此外粒子通量、ICRP 60 或 103 號報告有效劑量和周圍等效劑量 $H^*(10)$ 的劑量輸出皆是選項，以符合不同國家或組織使用者不同的需求[25,26]。

SIEVERT 由法國民航總局 (French General Directorate of Civil Aviation, DGAC) 和輻射防護研究所 (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, IRSN) 與巴黎天文台和法國極地研究和技術研究所 (French Institute for Polar Research and Technology, IFRTPT) 合作開發，主要是基於歐盟與德國 Siegen 大學資助，由德國環境衛生研究中心成功研發的 EPCARD (European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses) 程式組。EPCARD 先藉由蒙地卡羅程式 FLUKA 模擬二次宇宙射線的組成與在大氣中的傳輸，包括中子、質子、光子、

電子等粒子，再透過太陽活動及地球磁場之相關物理參數，計算出二次宇宙射線在地球不同時間、經緯度、高度所產生的輻射劑量率。SIEVERT 系統將空域以高度、經度和緯度為軸，生成一個 265,000 網格。每個網格被分配一個劑量率值。SIEVERT 程式評估飛機在每個網格中花費的時間，累積計算所接受的劑量。每個月 IRSN 皆會結合太陽活動狀態，計算繪製並驗證空間之網格預測模式，例如太陽閃耀期會制定特別的劑量率分布圖，遇到太陽風暴時調查項目較一般狀況繁複，因此計算結果可能須等待幾個星期。SIEVERT 的使用，航空公司可透過法國民航總局申請各航線空勤人員於飛行期間所累積的有效輻射劑量，以保障空勤人員之輻射安全。

過去也曾對於不同的評估模式以及實地量測結果進行比對測試 [27-39]，因為使用的模式複雜，因此有些航線不同模式的預估值或是與實際量測差異可達兩倍之多。但是對於定點的評估與設定相同的飛航高度、時間與航線緯度條件、輻射粒子能量分布以及地磁效應均相同下，模式評估差異可減小到 50% 以內。量測的限制則因為不同粒子的劑量量測方法不同，加上宇宙輻射粒子能量分布廣，量測系統校正不易，量測不確定度就偏大，因此大多建議量測僅做為參考，規劃空服人員與機師輻射防護之劑量評估以模式評估為主。

在計算飛航所接受的劑量時，必須考慮 11 年變動周期的太陽風強度，在美國聯邦航空管制局的網站上，可下載歷年資料如圖 4.1[40]，以向陽電位來表示。如果向陽電位高，銀河宇宙輻射所造成的輻射劑量就會下降。20 年前是以 30 年平均值作為計算的依據，大約是 600MV。由圖中可看出，最近這次太陽周期，太陽風強度都偏低，造成近十年飛航宇宙輻射平均輻射劑量可能會比之前高。

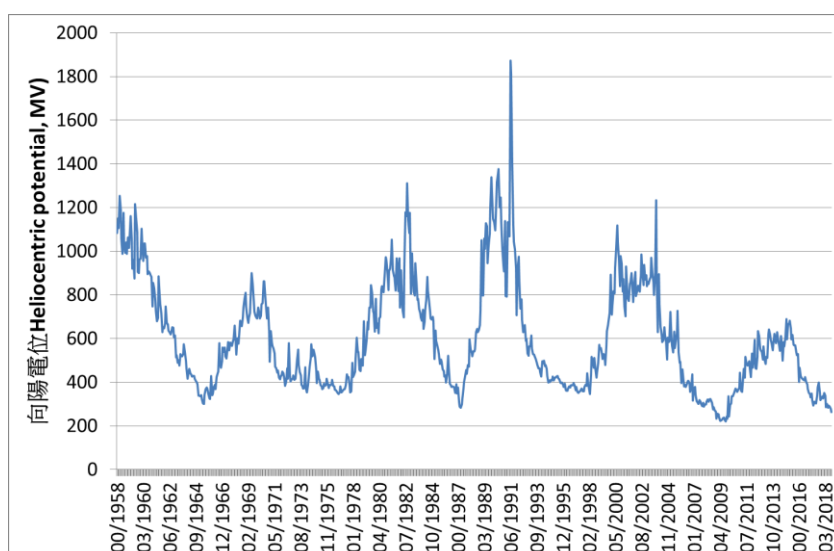


圖 4.1 評估劑量需要的主要參數太陽風強度，以向陽電位表示。

由民航局統計資料可發現，在民國 85 年進行飛航宇宙輻射評估以後，國內的飛航狀況有相當大的改變。由旅客人次的變化來看，自從民國 96 年高鐵通車後，國內航線旅客人次大幅下降，由最高接近三千五百萬人次降為一千一百萬人次左右，最主要的改變在於過去旅客最多的台北高雄、台北台中、台北嘉義等航線，因旅客大幅減少已全面停飛，現在最主要的旅客人次來自於台北金門、台北馬公與高雄馬公等離島航線。兩岸航線自民國 92 年開始周末包機，民國 97 年平日包機後搭機旅客持續成長，於 101 年以後定期航班旅客人次逐漸穩定，與國內航線旅客人數差異不大。

國際航線的旅客人數則明顯大幅增加，與民國 85 年時相比，106 年國際航線人次為四千四百萬人次，為之前評估時的四倍，國際航線由過去不到 80 條，現在已有定期航線 120 條。由旅客人次來看，過去旅客較多的航線為香港、澳門、東京、曼谷、洛杉磯、新加坡、大阪、胡志明市、舊金山與漢城，現在則以香港、東京、大阪、首爾(即漢城)、新加坡、曼谷、澳門、胡志明市、馬尼拉、吉隆坡東南亞與東北亞為主，主要的差異在於洛杉磯與舊金山雖仍是歐美航線最多旅客人數的航線，但現在僅排名 12 與 13，被馬尼拉、吉隆坡與沖繩等航線取代。

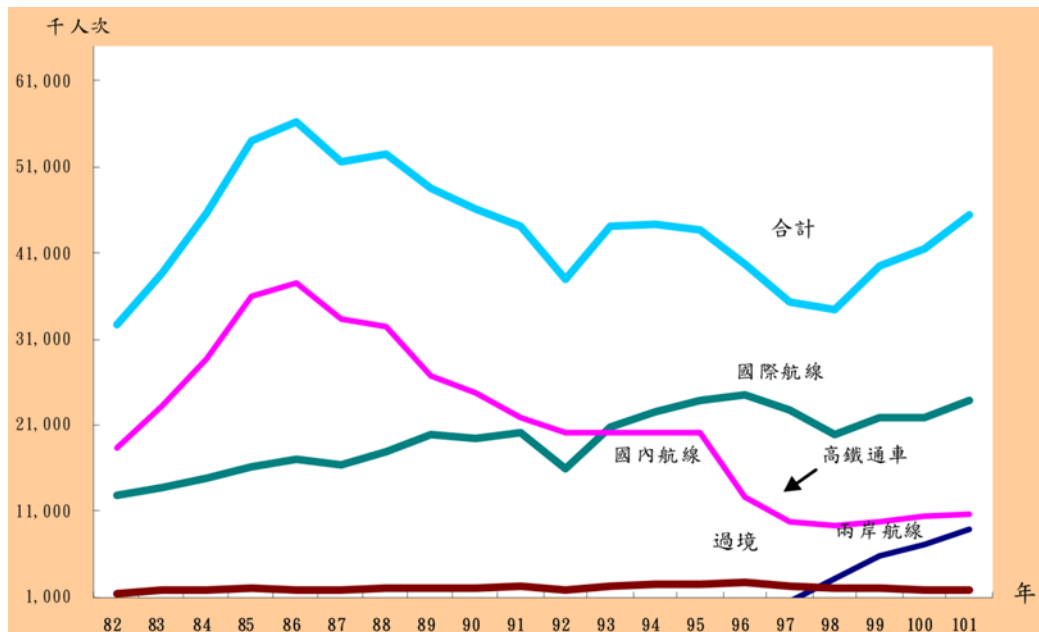


圖 4.2 民國 100 年前國內航空人次變化趨勢
(引用自 101 年民航局統計年報[41])

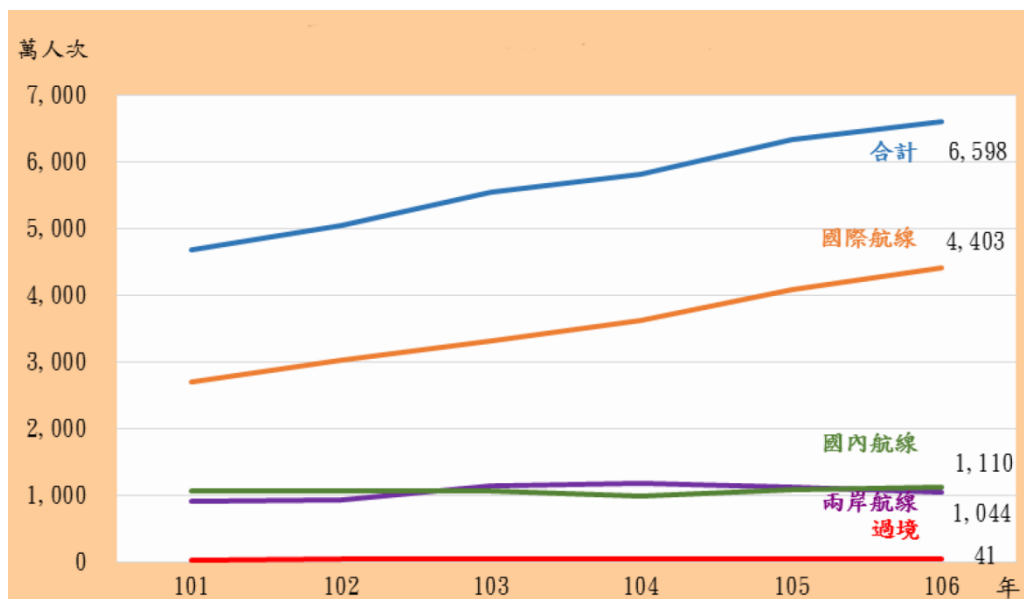


圖 4.3 民國 100 年以後國內航空人次變化趨勢
(引用自 106 年民航局統計年報[41])

選擇十條國內不同機場劑量較高或旅客較多的航線，對於不同的評估方法進行演算比對，設定時太陽風強度選擇一致的情況，飛航的參數如飛航高度、航程時間等，在程式的限制內盡量取相近值。計算結果如表 4.3。

表 4.3 不同評估方法計算各航線往返劑量比較

航線	往返劑量(微西弗)		
	CARI-2	CARI-7	SEIVERT
台北=紐約	155	187	186
台北=阿姆斯特丹	98	173	160
台北=溫哥華	95	130	112
台北=舊金山	93	117	105
台北=洛杉磯	92	115	103
台北=法蘭克福	92	156	148
台北=約翰尼斯堡	72	76	57
台北=奧克蘭	60	63	47
台北=東京	14	16	11
高雄=新加坡	14	17	13

CARI-2 為之前評估所使用的劑量模式，高緯度且飛航時間長的歐美航線明顯都偏低，但其他區域則差異較小。CARI-7 為最新的版本，因為使用的輻射粒子傳輸模式與過去完全不同，計算結果都比過去高 5%~76%，至於歐盟使用的 SIEVERT 的粒子傳輸模式比較接近 CARI-7 評估結果與過去 CARI-2 差異也達 -23%~65%，但與 CARI-7 差異為 0.4%~33%較為接近。由於宇宙輻射粒子種類多且能量分布廣，加上實際飛航的高度、飛行路線與所需航程時間等也會因應當時的氣象條件而改變，因此劑量量測驗證不易，很難研判那一個評估方式較為正確。此外，飛航劑量評估程式的設計原則，為了確保輻射防護的安全邊際效應，通常對於參數不確定度的處理，會採取較為保守的評估方式。由評估結果來看，高緯度航線的劑量，在較新的程式評估中明顯較過去評估結果高。

由以上討論可得知，由太陽風離子強度推算的向陽電位來看，太陽風近十年的強度沒有以往強，表示宇宙輻射是朝增加的趨勢。加上這 20 年來國內航空器利用環境大幅改變，國際航線較過去多且民眾搭機人次也大幅增加。而國際航線旅客人次，主要是低緯度的東南亞航

線，與距離不算遠的東北亞航線，推算飛航宇宙輻射劑量相較於高緯度與遠距離的歐美航線，並不算太高，與之前評估結果差異也不大。但因班次與旅客人次大幅增加，統計上也會導致平均國民輻射劑量的變動，因此建議須重新加以評估。至於國內航線的宇宙輻射劑量之前評估結果就不高，主要是緯度低、飛航高度不高且距離短。加上現在旅客人次大幅減少，建議可不再評估忽略其劑量影響。兩岸航線在上次評估時尚未開始營運，因此雖然旅客人次與國內航線差不多，但有部分航線距離較長緯度也較高如哈爾濱、瀋陽、蘭洲等，因此建議須加以評估對國民輻射劑量的影響。

因為使用不同的軟體評估結果，有些航線差異可能達 76%，其中美國開發的 CARI-7 為較保守的評估模式，建議使用此軟體作為重新評估的主要參考依據。

四、 體內劑量評估模式初步評估

體內劑量評估比較重要的問題在於呼吸道與腸胃道模式的精進、不同器官加權因子的變化等等因素，導致不同核種有所不同的變動狀況。過去對於一般民眾的劑量轉換因子常採用美國環保署發布的 FGR 11，隨著 ICRP 60 號報告的發行，相對應的劑量轉換因子發布於 ICRP 72 號報告[59]，FGR 13 也基於該報告修正劑量轉換因子。近年隨著 ICRP 113 號報告發行，劑量轉換因子也隨之檢討，目前新的工作人員的劑量轉換因子已陸續發布，但對於一般民眾的劑量轉換因子尚未完成。目前最新的 IAEA BSS 也是依據 ICRP 72 號報告所訂定。以國民輻射劑量來說，體內劑量最大的來源是食品中的鉀 40，其次是食品與飲水中的鈾系列與釷系列核種。以鉀 40 的劑量轉換因子來看，FGR 11 的劑量轉換因子為 5.09×10^{-9} (西弗/貝克)，ICRP 72 號報告修正為 6.16×10^{-9} (西弗/貝克)增加約 20%。鐳 226 由 FGR 11 的 2.24×10^{-7} 修正

為 2.80×10^{-7} ，也增加約 20%。預期使用新的劑量轉換因子，會有較過去評估值增加的趨勢。

以體內劑量占比最高的鉀 40 為例來作初期探討。在自然界中，鉀 40 在穩定鉀元素中同位素占比為 0.0117%。1 克鉀元素含有 1.17×10^{-4} 克鉀 40，含原子個數為 $1.17 \times 10^{-4} / 40 (\text{莫耳}) \times 6.02 \times 10^{23} (\text{亞弗加厥常設}) = 1.76 \times 10^{18}$ ，乘上鉀 40 的衰變常數(一個鉀 40 原子每秒衰變一次的機率) $1.76 \times 10^{-17} (\text{s}^{-1})$ 可得到每秒衰變 30.9 次，也就是含有 30.9 貝克鉀 40。在土壤與岩石中因不同的化學組成成分，鉀 40 含量差異很大，大約每公斤 30 至 1100 貝克，人為活動例如施用鉀肥也會造成土壤與地下水鉀含量產生變化[42]。海水中含有大約每公升 10 貝克鉀 40[43]。由於鉀離子為動植物生長必須的礦物質，因此透過食物與飲水攝取，鉀離子成為生物鏈循環不可避免的一環，鉀 40 除了加馬輻射外還有高能量的貝它輻射，因此在鉀離子中固定占比的鉀 40，便成為生物體內最主要的天然核種體內劑量來源。

由過去的文獻可了解，人體中鉀離子主要存在於肌肉組織，骨骼與脂肪中含量相對相當的少[44,45]。為維持人體生理機能的正常運作，鉀離子在肌肉中的濃度必須維持在幾乎穩態(homeostatic)範圍內，太低或太高均可能危及生命。因此早期有文獻建議採用 ICRP 參考人參數[46]，假設體重 70 公斤成年人，全身鉀離子約 140 克相當於含有 4000 貝克鉀 40，推估年劑量為 0.18 毫西弗[43]。

由於人體中肌肉組織多寡與年紀、性別、身高及體重等參數都有關係，如圖 4.4 所示，為了能夠更為精準的評估劑量，大部分文獻採用全身加馬能譜計測法，實際調查量測民眾體內鉀 40 含量[47-51]。以美國 NCRP 第 160 號報告為例，共計量測了男性 2037 人；女性 248 人。量測結果顯示人體內鉀 40 平均濃度以年齡來區分，20 歲以後隨

年齡增加而減少，以健康參數來看則是隨著身體質量指數(體重除以身高的平方，簡稱 BMI)增加而減少。由於鉀 40 主要存在肌肉中，20 歲以後肌肉逐漸流失，且體脂肪越多相對肌肉比率越少，但體脂肪量測不易，利用 BMI 與體脂肪有正相關性，便可以使用容易量測的 BMI 作為肥胖指標，來解釋鉀 40 的濃度變化趨勢[52]。此外以性別區分是男性高於女性，主要原因在於受到基因、荷爾蒙與脂肪轉換生理機轉影響，女性皮下脂肪層比男性厚，導致肌肉比率較男性低[53]。

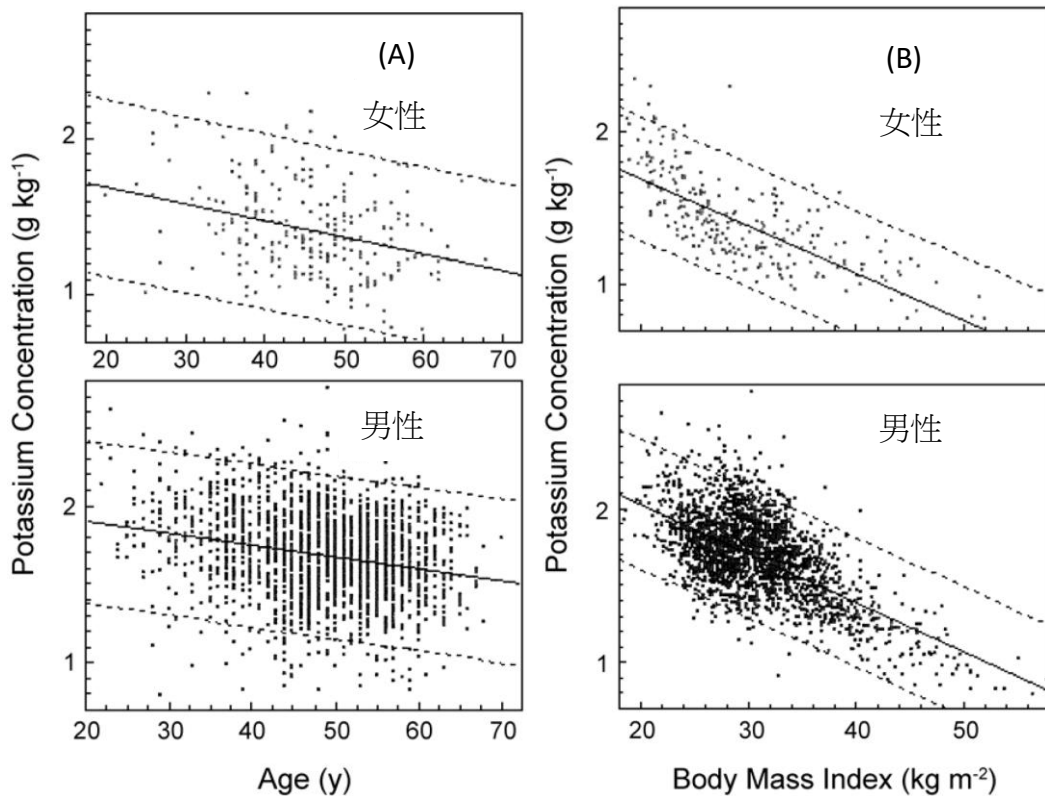


圖 4.4 鉀離子在人體中的濃度隨年齡(A)與身體質量指數 BMI(B)的變化趨勢，上方為女性，下方為男性[2]。

由於早期 ICRP 參考人假體的 BMI 為固定值，且推算劑量時假設不同軟組織成分無差異，如果要探討不同人個別差異，就必須使用不同高矮胖瘦的假體群來推估個別的劑量轉換因子。雖然後來 ICRP 參考人有提出補充資料，增加不同年齡的大小假體[54]，但 NCRP 採用的是美國橡樹嶺國家實驗室所建議的 6 種假體[55]，並將量測數據透

過不同假體的劑量轉換因子換算與擬合的結果，建議鉀 40 造成個人的年劑量計算可以簡化成為以下公式[2]:

男性年有效劑量 $E_{(\text{毫西弗})} = 0.0885 \times (2.946 - 0.0062 \times \text{年齡} - 0.0311 \times \text{BMI})$

女性年有效劑量 $E_{(\text{毫西弗})} = 0.0876 \times (2.5 - 0.00512 \times \text{年齡} - 0.0292 \times \text{BMI})$

但是在推算國民輻射劑量時，NCRP 則建議可不考慮年齡、BMI 等因素，直接用平均值推算鉀 40 所造成年體內劑量。NCRP 得到美國男性為每年 0.149 毫西弗、女性為每年 0.123 毫西弗，全體民眾平均為每年 0.136 毫西弗[2]。

由於 NCRP 的調查對象為美國 20 歲以上的成年人，在俄羅斯的調查報告中除了增加 14 歲到 20 歲的群組外，也對烏拉爾山區(Ulars mountain)不同族群進行分析。結果顯示鉀 40 造成年劑量最高年齡落在 20 歲到 40 歲群組，且歐洲白人與亞洲人間無族群差異[49]，劑量評估結果與美國差異不大。

此外，對於個別食品種類的鉀 40 含量所造成的劑量評估，則採用攝食體內劑量模式來加以評估[56-58]。例如日本直接採用每日鉀必須攝取量 2.64 克(其中鉀 40 含量約 81.5 貝克)，劑量轉換因子採用最新 ICRP 72 號報告模式[59]，攝入每貝克鉀 40 造成劑量為 6.16×10^{-9} 西弗來推算鉀 40 所造成的年劑量： $81.5(\text{Bq/d}) \times 365.25(\text{d}) \times 6.16 \times 10^{-9}(\text{Sv/Bq}) \times 10^3 = 0.18(\text{mSv})$ [56]。透過主要食品的鉀 40 量測與攝食調查資料，也可作為無法得到實際進行全身計測數據時的一種劑量評估方法。

民國 87 年輻射偵測中心統計國內對民眾進行全身計測結果，其中清華大學原子科學技術發展中心以 8 吋碘化鈉閃爍偵檢器度量 300 位男性和 80 位女性的體內鉀 40 含量平均值分別為 54 ± 12 及 43 ± 3 貝克/公斤。另外輻射偵測中心以純鍍偵檢器測量 83 位男性和 96 位女性的體內鉀 40 含量分別為 54 ± 8 及 46 ± 5 貝克/公斤，將上述兩項調查合併，總共 559 位民眾的鉀 40 平均含量為 51.2 貝克/公斤，以聯合國

UNSCEAR 報告建議劑量轉換因子每公斤 1 貝克活度的鉀 40 造成年劑量為 0.003 毫西弗[1]，則台灣地區成人每年因體內鉀 40 造成劑量為 $51.2(\text{貝克/公斤}) \times 0.003(\text{毫西弗}/(\text{貝克/公斤})) = 0.154$ 毫西弗[3]。比美國統計結果 0.136 毫西弗高，但比聯合國 UNSCEAR 2008 統計全球平均值 0.170 毫西弗低[1]。

表 4.4 台灣地區消費市場主要食品鉀 40 含量與年劑量評估

類別	鉀 40 濃度 (鮮奶: 貝克/升, 其餘貝克/公斤)			年食用量 (鮮奶: 升/年, 其餘: 公斤/年)	年劑量 (毫西弗)
	最大值	最小值	中位值		
米	50	20	34	44.5	0.009
葉菜	276	36	81	41.8	0.021
鮮奶	121	40	56	18.0	0.006
水果	207	29	68	115.1	0.048
豬肉	159	94	123	35.7	0.027
雞蛋	83	39	49	18.1	0.005
雞肉	164	50	137	34.6	0.029
根(莖)類	318	42	104	38.8	0.025
魚肉	224	12	125	13.9	0.011
麵粉	129	45	51	37.9	0.012
合計					0.193

若採用攝食模式來評估統計，輻射偵測中心民國 102 年至 106 年，五年期間針對市場上 10 大類主要消費食品取樣偵測結果[60]，整理如表 4.4。劑量轉換因子採用 ICRP 72 號報告模式，推算國人經由攝食鉀 40 造成的年劑量為 0.193 毫西弗，主要劑量來源為水果，其次是雞豬肉與蔬菜。攝食模式評估的劑量比直接量測評估結果高，主要原因在於攝食模式假設放射性同位素與穩定同位素非達成平衡的固定比率，因此當攝食越多造成的劑量也越大，並未考慮因攝食量大造成排出率也增高的影響。然而，就輻射防護的觀點來看，這樣的假設是合理的。

不論是採用直接量測或是攝食模式來評估劑量，都具有較高的內

涵誤差。全身計測系統的誤差來源主要來自效率校正作法。全身計測大多使用簡易型假體來推算效率，因此量測結果因為人體與假體的幾何效率差異，有偏高的誤差，加上統計民眾量測結果的鉀 40 平均濃度所對應的民眾身體參數例如身高體重等，與劑量轉換因子推算時所使用的假體也不相同，因此推估評估結果可能誤差達 30%以上。

而攝食模式的誤差來源在於食品採樣時，有些類別例如魚肉中鉀 40 含量最高與最低就有超過 10 倍以上的差異，蔬菜類則大約 8 倍，顯示相同類別不同的品種的食品中鉀離子的含量差異很大。由於數據分布不是常態分佈，因此統計方法採用中位值(median)而非平均值(average)來進行評估，以減少來自取樣分布所造成的誤差。比較攝食模式與量測評估結果差異約 25%，考量誤差的評估尚在可接受的範圍。此外攝食模式評估，可能因為部分食物未納入評估而有低估的現象。然而由國內的狀況來看，主要攝食類項均已納入所以不會有這疑慮，反而使用攝食模式評估鉀 40 劑量會有高估的現象，主要來自於食品調查採樣品種的誤差，以及模式假設過於保守的因素。

另外，利用內政部人口資料查詢網[61]與衛福部統計處[62]可查詢國人年紀與身高體重狀況。衛福部民國 82 年 85 年營養健康狀況統計男性平均身高 167.3 公分，體重 65.5 公斤，BMI 23.43；女性平均身高 156.1 公分；體重 56.9 公斤，BMI 23.38。人口年齡中位數最早只提供至民國 90 年，採用該年資料男性 32.3 歲，女性 32.83 歲，男女性別人口比 1.058。將這些資料帶入 NCRP 的公式中計算可得鉀 40 年劑量評估男性 0.177 毫西弗，女性 0.144 毫西弗，平均 0.159 毫西弗，與之前量測評估結果比較，略有高估但差異約在 6%以內。所以使用 NCRP 建議的公式計算也具相當的可信度。

由於衛福部營養健康狀況調查只提供至民國 97 年，由網路搜尋的資料顯示[63]，目前台灣男性平均身高 173 公分，體重 74.8 公斤，BMI

25，女性平均身高 160 公分，體重 60.7 公斤，BMI 23.7。而人口年齡中位數 106 年已到男性 40.04 歲，女性 41.83 歲，男女性別比 0.9889。以 NCRP 公式計算 106 年可能的男性年劑量 0.164 毫西弗，女性 0.140 毫西弗，平均 0.152 毫西弗，較內文中推算的低，推測未來隨著老年化社會的來臨，鉀 40 所造成的劑量會呈現下降的趨勢，但下降幅度不會太大。

雖然鉀 40 是體內劑量最主要的來源，但其所造成的國民平均年輻射劑量值變化不會太大，因此建議不需重新評估。若要查驗可參考飲食習慣，做保守的攝食模式評估，或直接參考營養健康參數以 NCRP 的公式估算即可。

另外食品中鈾系列含量參考國外的分析結果大約大約在每公斤 3 到 7 毫貝克，鈾系列為每公斤 2 到 4 毫貝克[64]，低於目前輻射偵測中心加馬能譜系統之偵測極限，因此統計過去五年食品中的鈾與鈾系列核種都是未檢出，建議可直接引用聯合國統計結果。

五、醫療輻射劑量評估作業初步規劃

醫療放射檢查或放射治療的統計數據是衡量該國放射學與醫療水準的全球指標，因為其反應出醫療體系、放射學設備和人力配置的差異，開發程度不同的國家，其各自的醫療曝露劑量差異也很大。在 2000 年時，全球統計醫療水準較高和較低的國家醫療曝露的年人均有效劑量分別為 1.1 和 0.05 毫西弗[65]。於民國 87 年台灣所做的調查顯示，醫療曝露年人均有效劑量為 0.81 毫西弗[3]，接近醫療水準較高的平均值。然而當時的放射醫學影像技術仍未全面數位化，電腦斷層掃描檢查普及率也不高，一些先進技術如正子造影也尚未引入國內，加上健保制度尚未施行，醫學影像品保制度尚未推動等，目前放射醫學對國人輻射劑量的影響勢必與過去大不相同，因此需要有系統的規劃重新

評估的做法。

做法上蒐集彙整國外醫療輻射調查評估相關文獻，參考國際主流調查做法，考量放射醫學於不同應用(一般診斷、特殊診斷、核子醫學藥物)項目的分布特性，輔以醫療分級、條件設定、劑量度量方法等資訊，以分析各項醫療輻射應用，執执行程序因為環境差異造成劑量變化之可能影響情形。

美國輻射防護委員會的 160 號報告[2]，發表了 2006 年的美國人口游離輻射曝露的劑量結果，2006 年美國人口中每人總有效劑量約 6.2 毫西弗，醫療輻射曝露就約有 3.0 毫西弗，約佔 50% 的集體有效劑量，醫療輻射曝露是顯著的曝露源。醫療輻射曝露依據醫療設備分為五類：電腦斷層掃描、一般 X 光攝影和透視攝影（包括牙科、脊椎照相術和骨密度測定法）、介入性透視攝影、核子醫學、體外放射治療。

五種設備分類在 2006 年的所執行的檢查程序數量(或可說照射人次)，有兩種層次的資料來源。第一種是來自美國市場調查公司 IMV 的醫學資訊部所製作的商業市場基準報告，此報告可明確指出醫療設備提供哪些醫療服務，這種資料是 NCRP 主要採用的數據。第二種是當 IMV 資訊不足時，所用的補充數據，其來源包括醫療保險(Medicare, 醫療投保者)的理賠紀錄，美國退伍軍人事務部的健康計畫投保者的理賠紀錄，美國大型國家雇主計劃(LNEP)的理賠紀錄，與牙科底片包膜的銷售紀錄。

各檢查程序的有效劑量則引用已發表的文獻。電腦斷層掃描：基於文獻所提供的數據，包括劑量長度乘積、年齡和身體區域下的特定轉換因子。一般 X 光攝影和透視攝影：基於文獻所提供的有效劑量的數據。介入性透視攝影：基於文獻所提供的數據，包括空氣克馬面積乘積、特定檢查程序的劑量轉換因子。核子醫學：基於文獻所提供的劑量轉換係數，進而可轉換成有效劑量。體外放射治療：只對治療區

域外的器官和組織，所評估的吸收劑量。這樣的有效劑量推論方式，並不足得到醫療曝露的實際測量結果，也不足以進行統計變異的分析。

NCRP 第 160 號報告指出，美國在 25 年間(1980 至 2006)的劑量增加主要的貢獻來自電腦斷層掃描、介入性透視攝影、與核子醫學。在評估醫療輻射曝露時，雖有評估體外放射治療的劑量貢獻，但未將之納入國民劑量的評估。NCRP 第 160 號報告評估醫療輻射曝露的幾點限制：(1)醫療設備的新舊所造成的劑量差異亦未包含於內，通常較新的設備可能會有較低的醫療劑量，但評估時是採用文獻發表的有效劑量；(2)核子醫學檢查的劑量評估可能低估，因為核子醫學設備由單純的核醫設備，轉而趨向結合電腦斷層的設備，而電腦斷層掃描設備在這部分的劑量貢獻是未納入評估的。

英國國民健康局發表了 2008 年的英國人口游離輻射曝露的劑量結果[66]。2008 年英國人口中每人總有效劑量約 2.65 毫西弗，醫療輻射曝露僅約有 0.4 毫西弗，約佔 15%的集體有效劑量。

英國所採用的劑量評估方法，是取樣 29 家醫院，蒐集這些醫院中的放射信息系統(radiology information systems, RIS)中的病人檢查資訊，在外插推算至整個英國群體。至於有效劑量的資訊，大部分來自於英國國民健康局的英國病人劑量數據庫(National Patient Dose Database of HPA)，少部分來自於發表文獻。英國在 10 年間(1998 至 2008)的總檢查頻次增加了 10%，集體有效劑量增加了 23%，劑量增加的主要貢獻來自電腦斷層掃描。相較於其他同樣醫療等級的國家，英國的醫療檢查頻次較低，每次檢查所造成的有效劑量也較低。

英美的醫療輻射曝露差異頗大，兩國劑量差異的主因可能是英國的人口數較低，英國受檢查人次較少，且針對相同檢查程序，英國報告所引用文獻的輻射劑量較低。此外一個檢查程序因檢查目的有可能

會作一次以上的掃描，美國的資料有處理這一部分，但英國的資料並沒有處理這一部分，因此同一檢查程序，英國評估出來的劑量會較低。

歐盟、加拿大、聯合國等的醫療輻射曝露調查多數偏向於檢查程序的技術條件調查，進而推算該檢查的有效劑量，並無加入檢查的人口資訊或掃描次數的資訊，因而無法計算集體有效劑量，進而推算出醫療程序的平均每人有效劑量。

台灣除了之前的調查外，陳拓榮等學者[67]所進行的調查最為完整，其採用類似英國的調查方法。其後亦有針對特定檢查項目進行評估，蔡惠予等[68]是調查電腦斷層掃描的檢查劑量，葉大銘等[69]則是調查電腦斷層掃描的檢查之集體劑量。近期亦有許弼勝[70]以健保資料庫推算醫療曝露的集體劑量，所採用的方法類似美國的調查方法。綜合以上文獻並考量現在的醫療環境，初步規劃出台灣醫療輻射曝露的調查方法架構，如圖 4.5 所示。

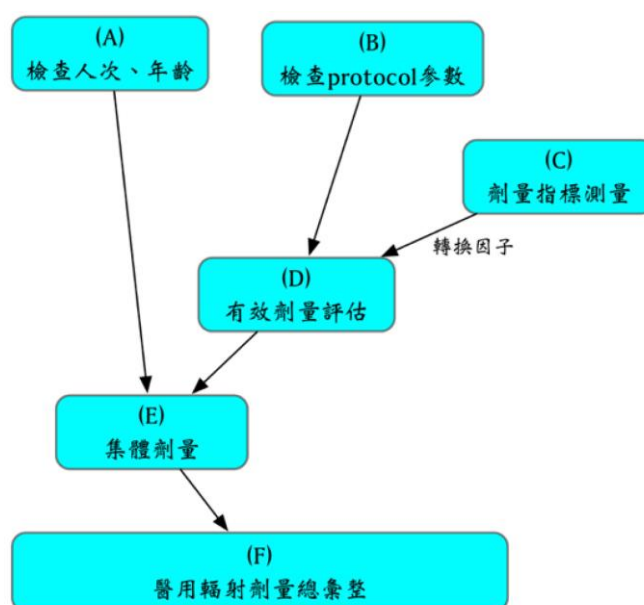


圖 4.5 醫療輻射劑量量測與評估方法

項目(A)的檢查人次與年齡分布，可以採用衛生福利部健康加值中心的國民健保資料庫之數據，惟須仔細分析健保資料庫的登記代碼，是否與臨床檢查項目可以對應起來。項目(D)有效劑量的評估，可以有

兩種方式取得，第一種方法是定義出各項檢查，該檢查的有效劑量則引用已發表的文獻，最好是台灣的文獻，若無則可找國際文獻。此方法雖然有某程度的誤差，但因目的是估算集體劑量，這樣的方法也是可以接受的，目前美國的調查就是採取這種方式，英國部分檢查的調查也是採取此法。第二種方法也是需先定義出各項檢查，然後如圖 4.5 中，抽樣部分醫療院所，進行項目(B)檢查程序的參數調查，與項目(C)劑量指標的測量，依據這些抽樣的測量、調查、與評估結果，再等比放大至整體。英國大部分檢查的調查是採取此法。項目(E)的集體劑量評估，則需要彙整項目(A)的檢查人次與年齡分布與項目(D)有效劑量的評估的結果。

醫療輻射造成的國民劑量評估方法，依照放射醫學在醫療院所的不同運用分為三大類：放射診斷、核子醫學檢查與放射治療。其中，放射診斷類別中再依照儀器設備的不同細分為六類，此六類的輻射劑量評估方式亦各有不同，分別為一般 X 光攝影、傳統透視攝影、介入性透視攝影、電腦斷層、乳房攝影與牙科攝影。整體而言，醫療輻射造成的國民劑量共分為八大項進行評估，如圖 4.6 所示。

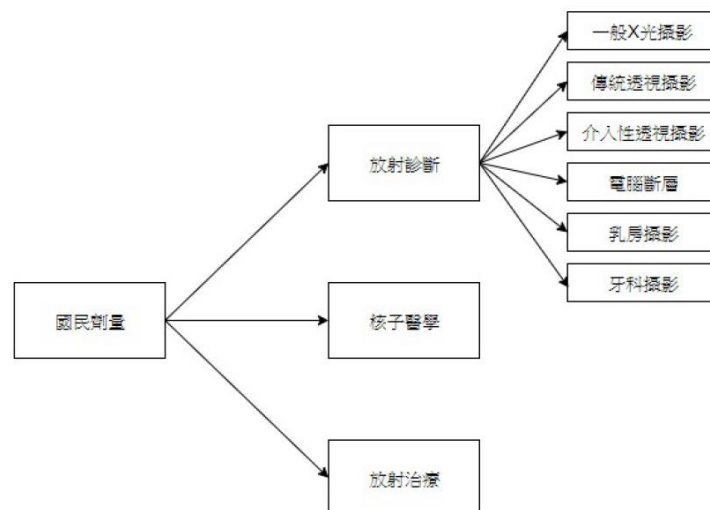


圖 4.6 醫療輻射曝露之分類

國民醫療輻射劑量八大項中的每一大項，皆須在評估流程中取得

之資料數據分別為：國人醫療輻射序列的年度照射頻次、單次序列的有效劑量、集體有效劑量與國人年平均醫療輻射劑量。

國人醫療輻射序列的年度照射頻次從全民健康研究資料庫中取得，然而全民健康研究資料庫中的資料並未含有健康檢查(例如：民眾自費檢查)所造成的輻射劑量來源，因此在某些特殊情況下，利用中華民國行政院衛生福利部公布的年度資料輔助參考，以降低評估的誤差。單次序列的有效劑量則需透過醫療院所的實際數據蒐集進行評估，然而針對不同種類的檢查或治療儀器所造成的輻射劑量，其評估劑量的方式各有不同，針對不同項目的評估方法將在下段落中詳述。集體劑量的計算方式利用國人醫療輻射序列的年度照射頻次乘上單次序列的有效劑量取得，而平均有效劑量則須利用中華民國行政院內政部所公布的台灣年度人口總數，計算平均值取得。以下就八大項討論劑量評估的作業方式：

(1) 一般 X 光攝影輻射劑量調查方法

一般 X 光攝影的序列年度數量從全民健康保險資料庫中取得，然而健保資料庫中關於一般 X 光攝影的分類代碼繁多，因此需先將資料庫中的代碼數據進行分類，將一般 X 光攝影依照人體的部位分為九大類，分別為胸部 X 光、腎臟-輸尿管-膀胱 X 光、腹部 X 光、頭部 X 光、脊椎 X 光、肩部 X 光、上肢 X 光、下肢 X 光與骨盆 X 光，如圖 4.7 所示。

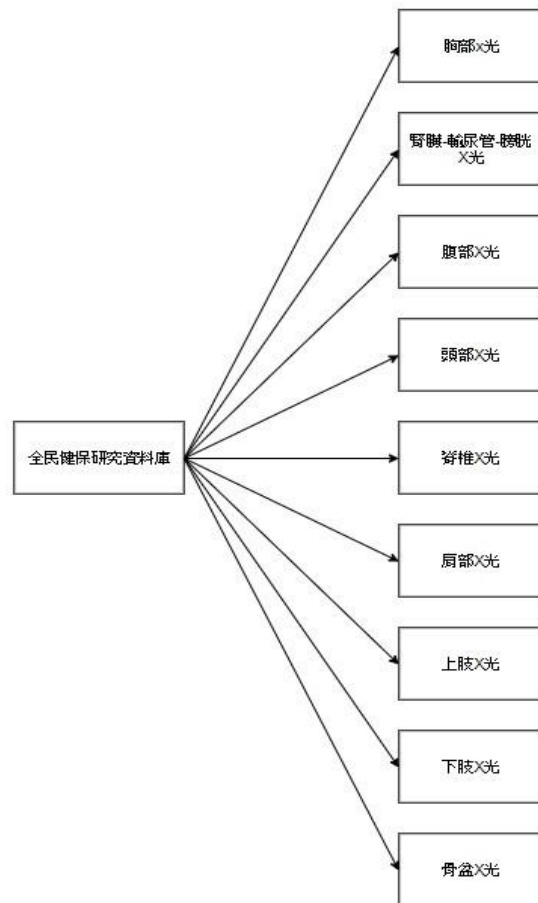


圖 4.7 納入國民劑量評估的一般 X 光攝影之主要分類

一般 X 光攝影的個別序列劑量評估需透過取樣醫院的實際劑量參數資料進行評估，資料的數據須達年度資料的百分之十以確保取樣資料具有代表性，然而醫療院所所取得的劑量參數並不代表實際的有效劑量，需透過有效劑量評估軟體(PCXMC)進行劑量轉換，取得單次序列的有效劑量。除此之外，一般 X 光攝影的序列在實際運用上相當複雜，以胸部 X 光為例，分為胸腔 X 光攝影、肋骨 X 光攝影等，甚至胸腔 X 光攝影又可再細分為後前位、側位或特殊角度等，因此在劑量評估上，需將有效劑量評估軟體(PCXMC)轉換出的單次序列有效劑量依照樣本數的權重進行平均，取得胸部 X 光攝影單次序列有效劑量，如圖 4.8 所示。

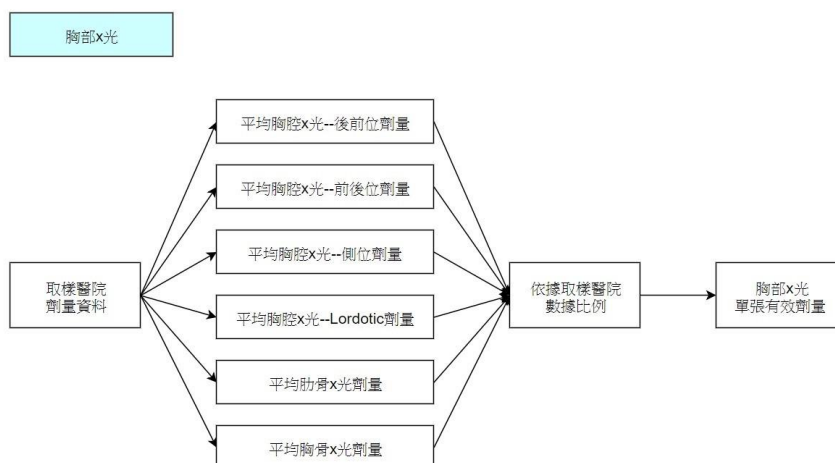


圖 4.8 胸部 X 光攝影單次序列有效劑量之評估流程

除了胸部 X 光攝影之外，其他的八大部位也依照相同的方式進行權重平均，取得個別分類的序列有效劑量。再分別將各序列的年度數量乘上各序列的單次有效劑量取得一般 X 光攝影的集體劑量，利用行政院內政部的台灣總人口數，計算台灣年度一般 X 光攝影平均個人有效劑量。評估方法流程如圖 4.9 所示。

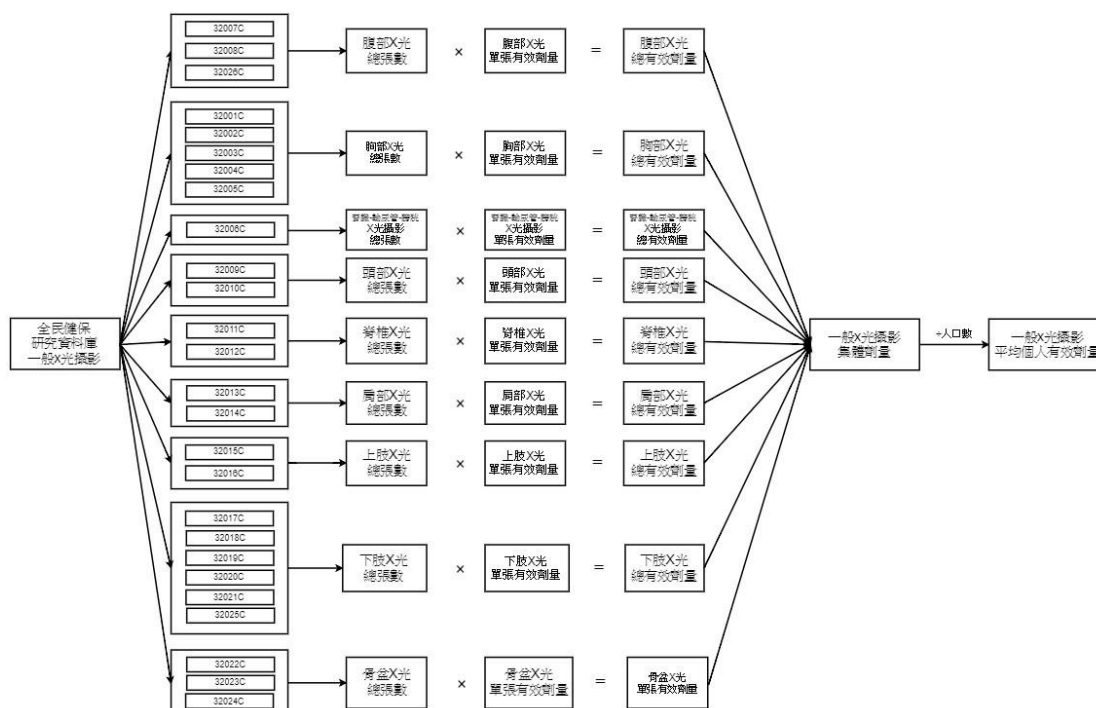


圖 4.9 一般 X 光攝影平均個人有效劑量評估之設計結構

(2)傳統透視攝影輻射劑量調查方法

傳統透視攝影的國民劑量評估須先取得年度的序列數量，從全民健保研究資料庫中的代碼序列中，總共分成三十七種不同序列的檢查項目，如圖 4.10 所示。其中年度序列頻次大於一千次以上者(前十二項序列)約占序列總數的百分之八十左右。

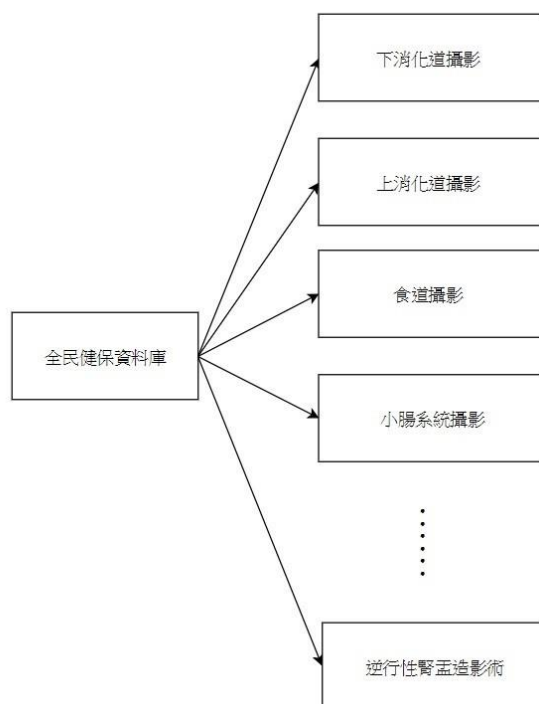


圖 4.10 納入國民劑量評估的傳統透視攝影之主要分類

傳統透視攝影的個別序列劑量評估需蒐集取樣醫院的實際劑量參數資料，包括曝露時間、克馬面積乘積、照野大小等，資料的蒐集數據須達年度資料的百分之十以確保取樣資料具有代表性，然而醫療院所取得的劑量參數並不代表實際的有效劑量，需透過有效劑量評估軟體(PCXMC)進行劑量轉換，取得單次序列的有效劑量。除此之外，為了確保有效劑量評估軟體模擬出來的數值是準確的，將抽樣至取樣醫院進行劑量測量，驗證劑量計算的準確性。由全民健保研究資料庫取得的年度個別序列總數乘上個別序列驗證後的序列有效劑量，取得傳統透視攝影的集體劑量，再利用行政院內政部的台灣總人口數，計算台灣年度傳統透視攝影的平均個人有效劑量，流程如圖 4.11 所示。

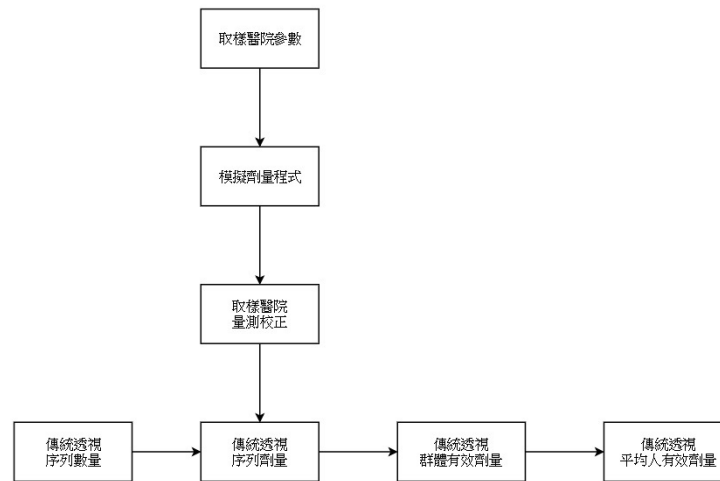


圖 4.11 傳統透視攝影有效劑量之評估流程

(3) 介入性透視攝影輻射劑量調查方法

介入性透視攝影的國民劑量評估從全民健保研究資料庫中取得個別的年度序列數量，資料庫中將序列分為心臟與非心臟兩大類，如圖 4.12 所示。心臟類別的序列檢查分布於醫療院所的心導管部門，年度序列頻次大於二千次以上者(前九項序列)約占序列總數的百分之九十五以上；非心臟類別的序列檢查分布於醫療院所的放射診斷部門，年度序列頻次大於一千次以上者(前二十三項序列)約占序列總數的百分之九十五左右。

介入性透視攝影的個別序列劑量評估需蒐集取樣醫院的劑量參數資料，包括克馬面積乘積、照野大小、曝露時間等，資料的蒐集數據須達年度資料的百分之十以確保取樣資料具有代表性，然而醫療院所取得的劑量參數並不代表實際的有效劑量，需透過有效劑量評估軟體(PCXMC)進行劑量轉換，取得單次序列的有效劑量。除此之外，為了確保有效劑量評估軟體模擬出來的數值是準確的，將抽樣至取樣醫院進行劑量測量，驗證劑量計算的準確性。由全民健保研究資料庫取得的年度個別序列總數乘上個別序列驗證後的序列有效劑量，取得介入性透視攝影的集體劑量，再利用行政院內政部的台灣總人口數，計算

台灣年度介入性透視攝影的平均個人有效劑量。評估流程與傳統透視攝影作業圖 4.11 相同。

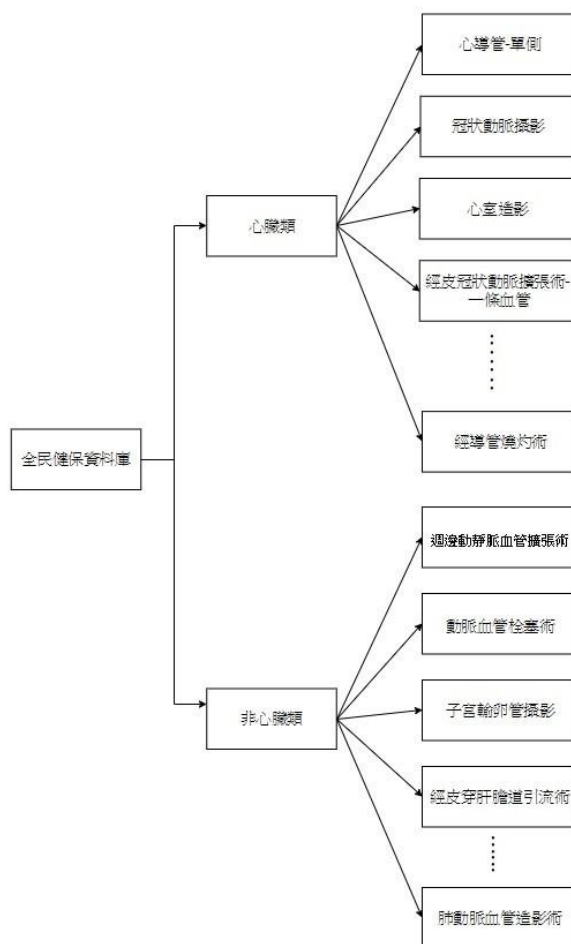


圖 4.12 納入國民劑量評估的介入性透視攝影之主要分類

(4) 電腦斷層輻射劑量調查方法

電腦斷層序列檢查相對於一般 X 光攝影單次輻射劑量較高，而近年來，利用電腦斷層儀器進行健康檢查(非健保之自費檢查)的比例也逐年增長，因此電腦斷層序列年度數量利用衛生福利部公布的年度資料：「歷年特定醫療技術檢查檢驗醫療儀器使用人次」，此人次中包含著健康保險與健康檢查資訊，然而衛生福利部公布的資料只有人次沒有針對特定部位的年度數量進行分類，因此需利用取樣醫院所得到的數據比例進行分類，將電腦斷層檢查分為六大類，分別為頭部、頸部、胸部、腹部、骨盆與其他類。流程如圖 4.13 所示。

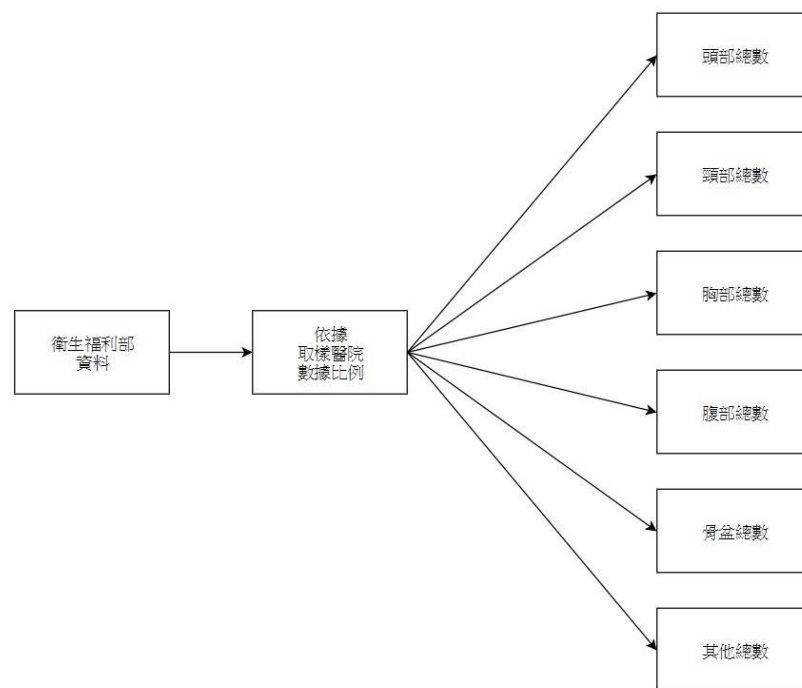


圖 4.13 納入國民劑量評估的電腦斷層之主要分類

電腦斷層的個別序列劑量評估需透過取樣醫院的實際劑量數據進行評估，資料的數據須達年度資料的百分之十以確保取樣資料具有代表性，然而電腦斷層在實際運用上相當複雜，以頭部為例，有分為腦部、鼻竇、顏面骨電腦斷層等，甚至對於外傷或癌症病患會有頭頸部、全身型電腦斷層等較長範圍的掃描，因此在評估頭部單次掃描劑量時，需依照取樣醫院數據的比例進行權重取得平均值，除此之外，不同種類的檢查掃描次數也不盡相同，甚至依照病情的需要，不同病患進行相同檢查所需掃描的次數也略有差別，因而在評估頭部單一病患掃描次數時，需依照取樣醫院所得的數據，根據不同比例進行權重取得平均。評估流程如圖 4.14 所示。

根據流程圖中所示，依據不同檢查的權重所得到單一病患頭部劑量長度乘積(Dose Length Product, DLP)，再乘上劑量轉換因子，取得單一病患頭部有效劑量。針對大範圍的電腦斷層掃描，則根據掃描實際長度給予每部位劑量權重，如圖 4.15 所示。

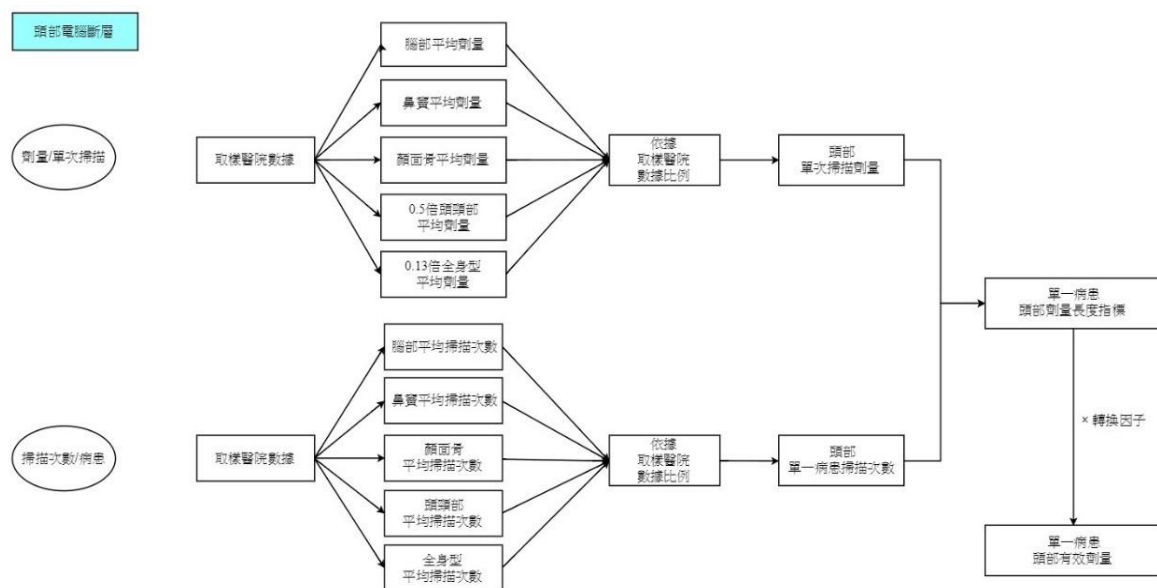


圖 4.14 電腦斷層單一病人單一程序的有效劑量之評估流程

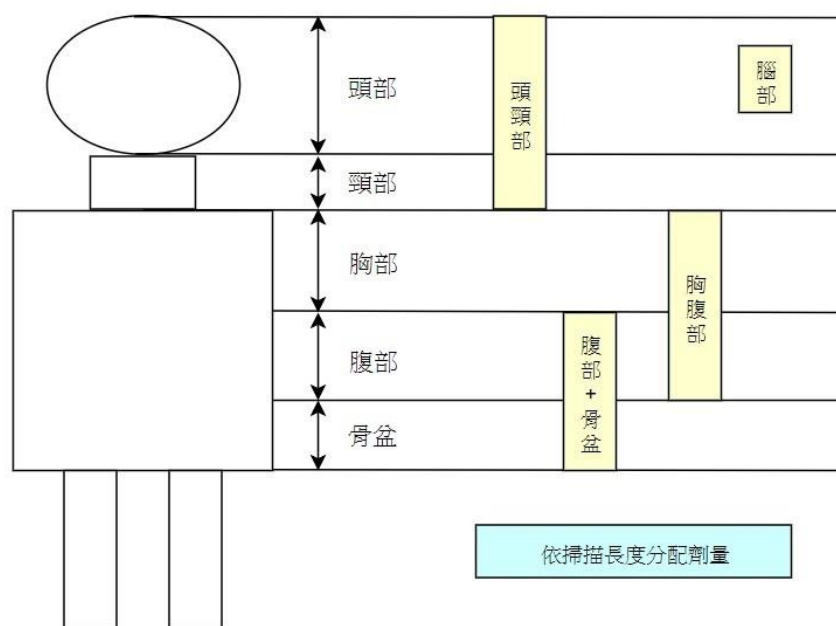


圖 4.15 電腦斷層掃描軀幹分區

除了頭部電腦斷層之外，其他的五大類也依照相同的方式進行權重平均，取得個別分類的序列有效劑量。再分別將各序列的年度數量乘上各序列的單次有效劑量取得電腦斷層的集體劑量，利用行政院內政部的台灣總人口數，計算台灣年度電腦斷層平均個人有效劑量。評估方法如圖 4.16 所示。

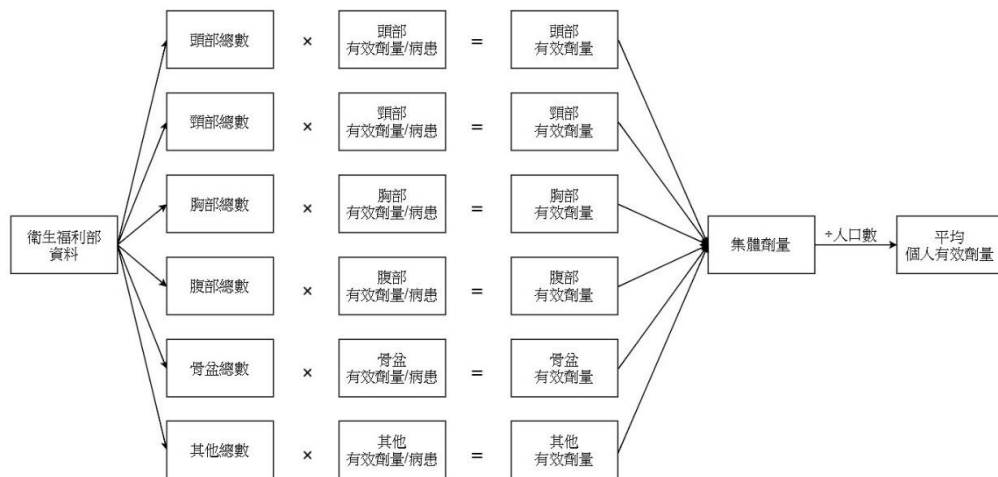


圖 4.16 電腦斷層有效劑量之評估流程

(5) 乳房攝影輻射劑量調查方法

乳房攝影的國民劑量評估須從全民健保研究資料庫中取得年度序列數量，因為不同醫院或不同症狀每序列所取像的張數也不相同，因此需透過取樣醫院的實際數據得到平均每序列的取像張數，單張影像劑量也依照同樣的方式取得，而取樣資料的數據須達年度資料的百分之十以確保取樣資料具有代表性。除此之外，為了確保劑量的數值是準確的，將抽樣至取樣醫院進行劑量測量，驗證劑量計算的準確性。年度乳房攝影序列數量乘上乳房攝影序列劑量取得乳房攝影的集體劑量，利用行政院內政部的台灣總人口數，計算台灣年度乳房攝影平均個人有效劑量。評估方法流程如圖 4.17 所示。

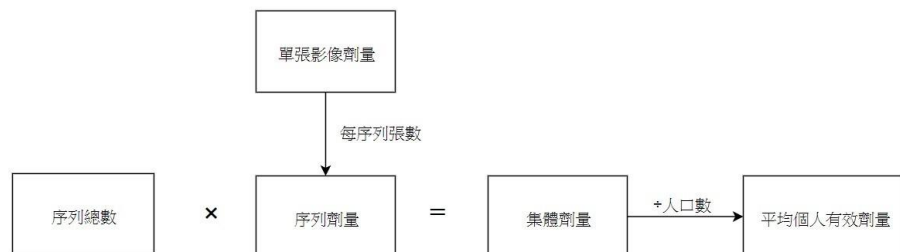


圖 4.17 乳房攝影有效劑量之評估流程

(6) 牙科攝影輻射劑量調查方法

牙科攝影的國民劑量評估須先取得年度序列數量，從全民健保研

究資料庫中的代碼序列中，總共分成九種不同序列的檢查項目，如圖 4.18 所示。

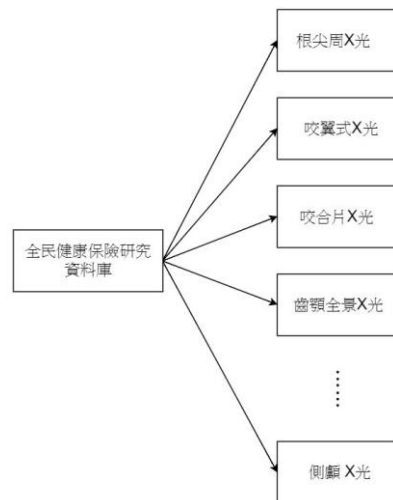


圖 4.18 納入國民劑量評估的牙科攝影之主要分類

牙科攝影的序列劑量將參考國內已發表的文獻進行劑量評估，而不同醫院或診所針對不同症狀每序列的取像張數也不太相同，因此需透過取樣醫院的實際數據得到平均每序列的取像張數，除此之外，為了確保劑量數值是準確的，將抽樣至取樣醫院或診所進行劑量測量，驗證劑量計算的準確性。牙科攝影的年度個別序列總數乘上個別序列有效劑量，取得牙科攝影的集體劑量，再利用行政院內政部的台灣總人口數，計算台灣年度牙科攝影的平均個人有效劑量，流程表如下所示：



(7) 核子醫學檢查輻射劑量調查方法

核子醫學檢查國民劑量評估中的年度序列數量資料來源分為兩類，包括全民健康保險研究資料庫與衛生福利部年度資料，因考量近年來醫療健康檢查(非健保之自費檢查)的比例逐年增長，在核子醫學領域中，正子電腦斷層檢查為健康檢查之冠，因此正子電腦斷層年度序列

數量，是利用衛生福利部公布的年度資料：「歷年特定醫療技術檢查檢驗醫療儀器使用人次」，此人次中包含著健康保險與健康檢查資訊，而其他序列的核子醫學檢查，則根據全民健保研究資料庫中所取得的年度序列數量，如圖 4.19 所示。

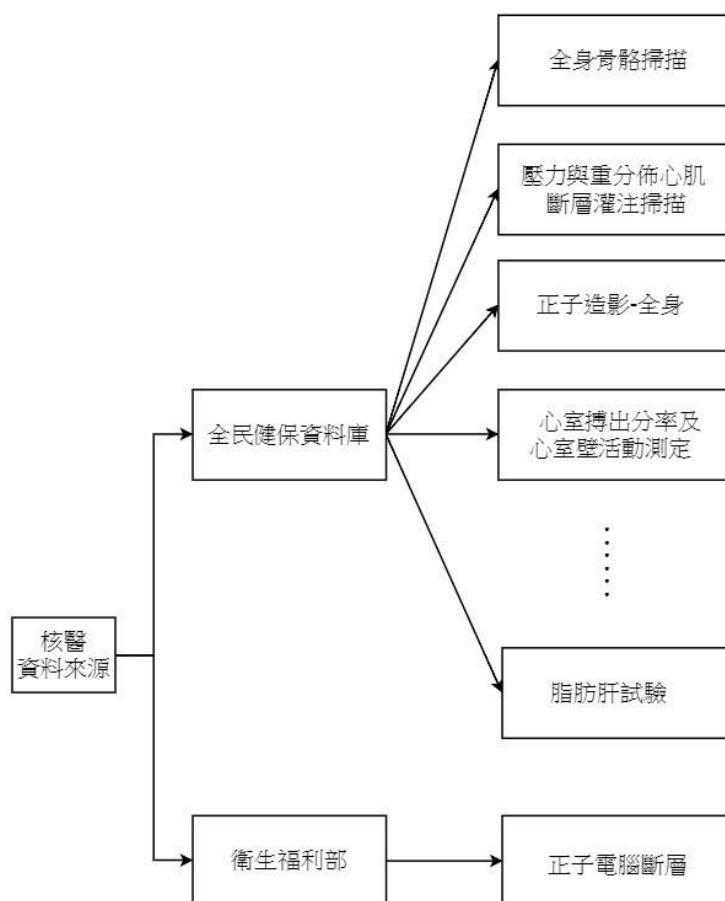


圖 4.19 納入國民劑量評估的核子醫學檢查之主要分類

核子醫學檢查的個別序列劑量評估與使用的放射性核種種類、活度有關，需透過取樣醫院的實際訪查、蒐集數據等進行評估，資料的數據須達年度資料的百分之十以確保取樣資料具有代表性，根據國際放射防護委員會(ICRP)所發表的文獻，取得使用不同的放射性藥物的劑量轉換因子，倘若相同的核子醫學檢查序列使用不同的放射性核種時，則根據取樣醫院數據的權重進行平均，以取得單次核子醫學序列的有效劑量，如圖 4.20 所示。

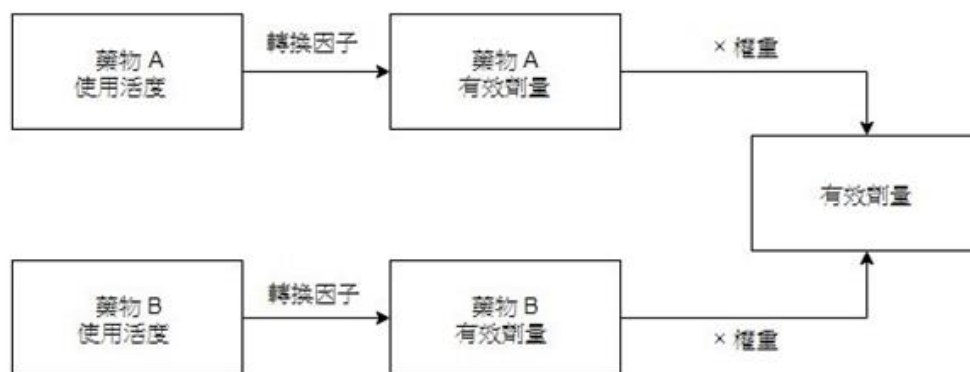


圖 4.20 核子醫學單項檢查有效劑量之評估流程

正子電腦斷層掃描的劑量分為正子劑量與電腦斷層劑量兩者之總和，正子劑量的評估方式與單項檢查相同，而電腦斷層的劑量則須至取樣醫院進行量測，取得平均值。最後，將各序列的年度數量乘上各序列的單次有效劑量取得核子醫學的集體劑量，利用行政院內政部的台灣總人口數，計算台灣年度核子醫學平均個人有效劑量。評估方法流程如圖 4.21 所示。

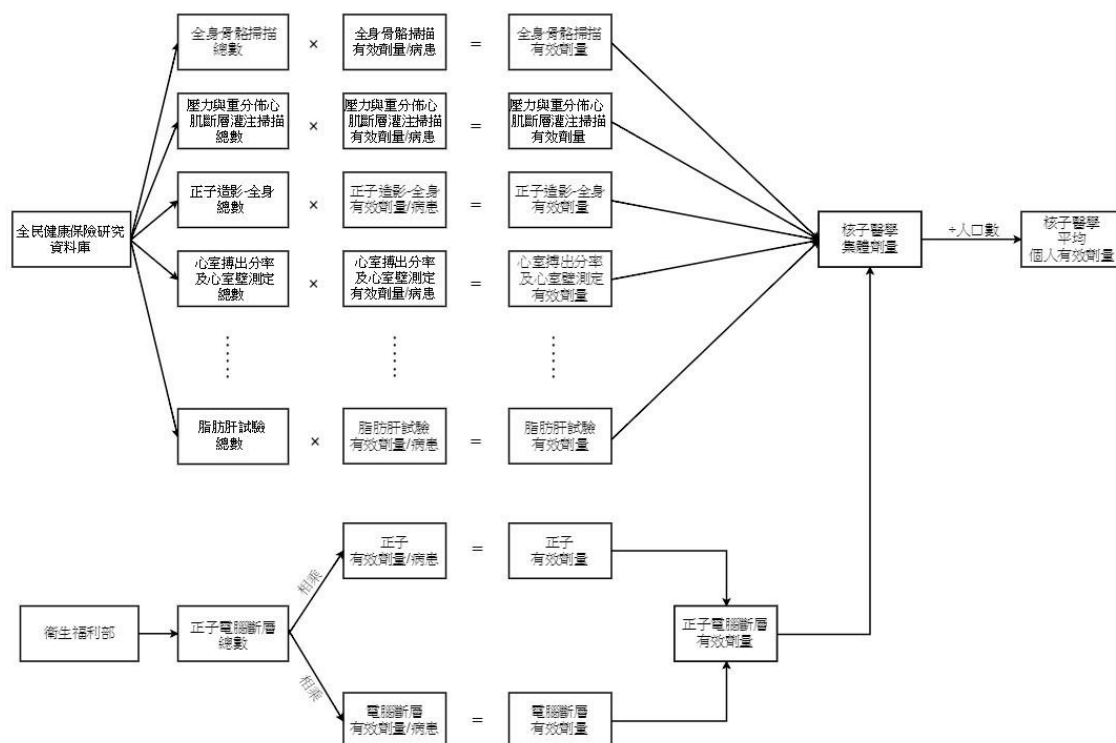


圖 4.21 核子醫學總有效劑量之評估流程

(8) 放射治療輻射劑量調查方法

放射治療的國民劑量評估須先取得年度序列數量，選取癌症治療中以放射治療為主的十大癌症進行評估，從全民健保研究資料庫中取得各種癌症的放射治療數量如圖 4.22 所示。

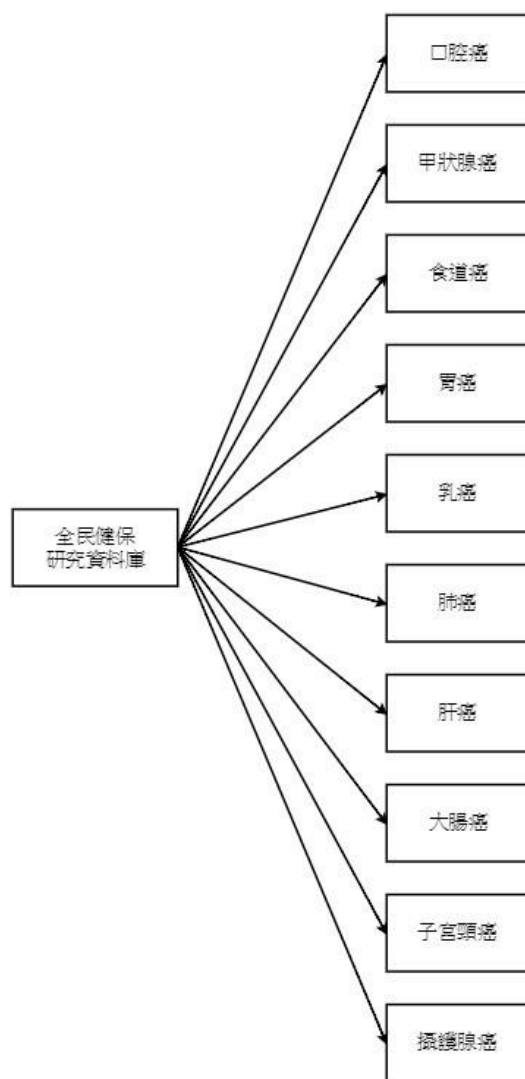


圖 4.22 納入國民劑量評估的放射治療之主要分類

放射治療的單次序列劑量為評估非治療器官(正常組織器官)所接受的輻射劑量，將正常器官因為放射治療所接受的輻射劑量乘以該器官的組織加權因數得到該器官等效劑量，再將所有正常器官所接受的等效劑量相加取得非治療器官的有效劑量如圖 4.23 所示。

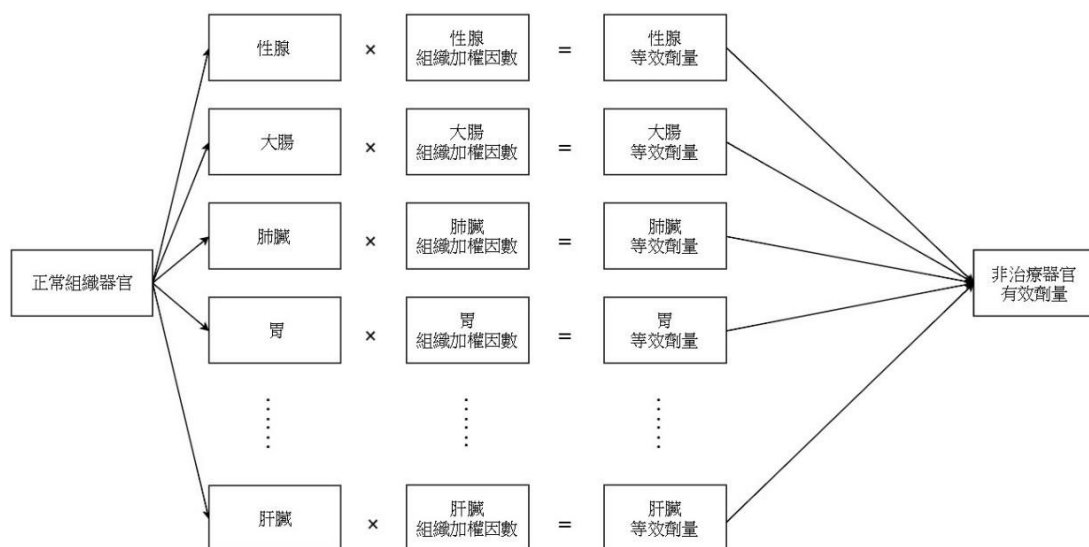


圖 4.23 放射治療單項治療項目的有效劑量之評估流程

放射治療的年度癌症總數乘上非治療器官有效劑量，取得放射治療的非治療器官集體劑量，再利用行政院內政部的台灣總人口數，計算台灣年度放射治療的平均國人有效劑量，除此之外，也可利用台灣年度放射治療的總人口數，計算台灣放射治療人口年平均個人有效劑量，流程如圖 4.24 所示。

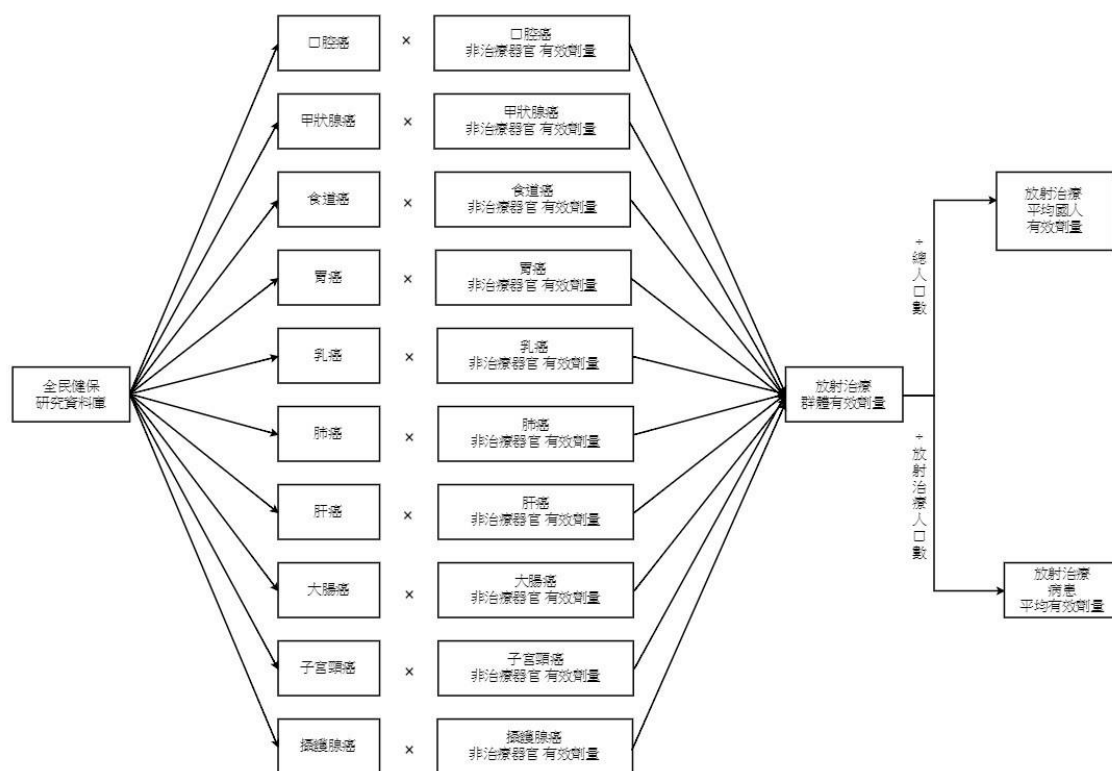


圖 4.24 放射治療總有效劑量之評估流程

綜合上述八大項的作業方式，要每一小項都加以評估有其困難度，因此應該以劑量較高或是照射人次較多的項次進行排序，以能在資源的分配上做最佳化的運用。參考國內外的單次照射劑量資料與目前健保資料庫的件次統計，各分項排序如表 4.5 至表 4.12。

表4.5 美國、英國、台灣電腦斷層序列劑量比較表

電腦斷層序列	美國(mSv)	英國(mSv)	台灣(mSv)
頭部電腦斷層	2 (0.9-4)	1.4	2
頸部電腦斷層		3	5.7
胸部電腦斷層	7 (4-18)	6.6	10.6
腹部電腦斷層	10 (3-25)	5.6	20.1
骨盆電腦斷層	10 (3-25)	6	15.9
其他	5 (1-10)		4.3

表4.6 美國、英國、台灣核子醫學劑量比較表（依據台灣頻次排序）

核子醫學序列	美國(mSv)	英國(mSv)	台灣(mSv)
全身骨骼掃描	6.3	3	4.44
壓力與重分佈心肌斷層灌注掃描	17.7	12.9	10.7448
正子造影-全身	14.1	7	6.66
心室搏出分率及心室壁活動測定	7.8		3.7
全身炎症掃描	8.5	8.1	11.322
動態腎/泌尿功能測定	2.2	0.6	0.888
鎔-99m 甲狀腺掃描	4.8	0.9	2.22
唾液腺閃爍攝影			4.44
碘-131 癌症追蹤檢查	11.5	10.1	4.588
全身腫瘤掃描	25	13.8	18.87
腎臟掃描	2.2	1.4	0.888
靜態核醫心臟功能檢查	17.7	12.9	10.7448
腦質斷層灌注掃描	6.9	4.8	6.66
三相骨骼掃描	6.3		4.44
肺灌注檢查	2	0.9	3.256
淋巴閃爍攝影	3.5		0.74

表4.7 美國、英國、台灣介入性透視攝影非心臟類序列劑量比較表（依據台灣頻次排序）

介入性透視攝影(非心臟類) 序列	美國(mSv)	英國(mSv)	台灣(mSv)
血管整形術			23
血管阻塞術	70	21.2	32.3
子宮輸卵管造影	1.2	0.42	0.6
經皮穿肝膽管引流術	4.6	4.58	1.2
皮下穿刺腎造瘻術	1.6	2.09	
尿道排泄造影術	2	1.86	
逆行性膽道及胰管造影	3.9	2.46	5
電腦斷層導引下組織切片	1.6	2.6	
四肢動靜脈造影	7.1	2.3	
經皮椎體成形術	15.6	2.57	
內臟血管造影	6	8.51	
主動脈造影	5	5.1	
頸動脈造影— 雙側	15	8.45	
椎動靜脈造影	0.8	2.57	
關節造影術	0.2	0.1	
順行性靜脈 X 光攝影	0.37	0.56	
脊髓造影 — 腰椎	4	2.38	
主動脈氣球裝置術	6.8	5.1	
數位減像血管攝影(靜脈)	7.1	1.3	
經皮穿刺膽囊引流術	4	6.85	
鎖骨下動脈造影	4.1	3.6	
乳房攝影立體定位組織切片術	1.6	2.6	
肺動脈造影	6	8.2	

表4.8美國、英國、台灣介入性透視攝影心臟類序列劑量比較（依據台灣頻次排序）

介入性透視攝影(心臟類) 序列	美國(mSv)	英國(mSv)	台灣(mSv)
心導管－單側	7.1	3.9	
冠狀動脈攝影	7.1	3.9	
心室造影	7.1	3.9	
經皮冠狀動脈擴張術－一條血管	15.1	7.8	7.2
心導管(包含冠狀動脈攝影)	14.2	7.8	
經皮冠狀動脈擴張術－二條血管	30.2	15.6	18.2
經皮冠狀血管成形術	15.1	7.8	7.2
心導管－二側	14.2	7.8	
不整脈經導管燒灼術	17.3	6.9	

表4.9 美國、英國、台灣傳統透視攝影序列劑量比較表（依據台灣頻次排序）

傳統透視攝影 序列	美國(mSv)	英國(mSv)	台灣(mSv)
靜脈注射泌尿系統造影術	3	2.1	
下消化道攝影	8	2.2	3.5
上消化道攝影	6	2	4.5
食道攝影	6	1.5	1.2
小腸系統	6	1.3	
T型管子膽囊造影術		1.1	
逆行性腎盂造影術－單側	2.3	1.55	
順行性腎盂造影術	0.6	1.55	
螢光透視吞嚥錄影攝影檢查	6	0.52	
膀胱造影術	1.8	0.53	
膽管造影術		2.65	
逆行性腎盂造影術－雙側	4.6	3.1	

表4.10 美國、英國、台灣一般X光序列劑量比較表

一般 X 光序列	美國(mSv)	英國(mSv)	台灣(mSv)
胸部 X 光	0.1 (0.05-0.24)	0.014	0.06
腎臟-輸尿管-膀胱 X 光	0.7 (0.04-1.1)	0.43	0.38
腹部 X 光	0.7 (0.04-1.1)	0.43	0.48
頭部 X 光	0.1 (0.03-0.22)	0.07	0.04
脊椎 X 光	1.5 (0.5-1.8)	0.6	1.15
肩部 X 光	0.008	0.011	0.07
上肢 X 光	0	0.0009	0.001
下肢 X 光	0.005	0.0002	0.002
骨盆 X 光	0.6 (0.2-1.2)	0.28	0.44

表4.11 美國、英國、台灣乳房攝影劑量比較表

乳房攝影序列	美國(mSv)	英國(mSv)	台灣(mSv)
平均乳腺劑量/張	1.8	2.1	1.42
序列張數	2	2	1.88
劑量	0.42	0.5	0.32

表4.12 美國、英國、台灣牙科攝影序列劑量比較表（依據台灣頻次排序）

牙科攝影序列	美國(mSv)	英國(mSv)	台灣(mSv)
根尖周 X 光攝影	0.005	0.005	0.007
咬翼式 X 光攝影	0.005	0.005	0.011
咬合片 X 光攝影			0.015
齒顎全景 X 光片攝影	0.01	0.019	0.018
測顱 X 光攝影	0.012		0.009
顙顎關節 X 光攝影（單側）			0.013
齦蓋切除術			0.018
矯正檢查			0.027

彙整上面討論的結果，八大類的調查項目內容建議如表 4.13。此外，醫療輻射國民劑量的抽樣實地調查建議篩選至少 12 家醫院，涵蓋

北中南東等四區地理區域，且包括醫學中心、區域醫院、地區醫院等三個醫院層級分類，且抽樣調查數目至少能包含 10% 的檢查數，使得抽樣的結果具有代表性。

表4.13 醫療輻射國民劑量評估分類與建議納入調查的項目

類別	備註
1. 電腦斷層	根據表 4.5 的比較結果，建議調查國內 22 種電腦斷層檢查，再依據掃描部位分成五類。根據 NCRP 160 號報告，電腦斷層的集體有效劑量佔所有醫療輻射劑量的 49%。
1.1. 頭部電腦斷層	
1.2. 頸部電腦斷層	
1.3. 胸部電腦斷層	
1.4. 腹部電腦斷層	
1.5. 骨盆電腦斷層	
1.6. 其他	
2. 核子醫學檢查	根據表 4.6 的比較結果，建議調查國內 16 種核子醫學檢查的序列，即可包含 94% 的檢查量，歸納成類別 2.1~2.6。根據 NCRP 160 號報告，核子醫學檢查的集體有效劑量佔總醫療輻射劑量的 26%。
2.1. 全身骨骼掃描	
2.2. 壓力與重分佈心肌斷層灌注掃描	
2.3. 正子造影-全身	
2.4. 心室搏出分率及心室壁活動測定	
2.5. 全身炎症掃描	
2.6. 其他	
3. 介入性透視攝影	根據表 4.8 的比較結果，建議調查國內 9 種心臟介入性透視攝影的序列，即可包含 98% 的檢查量，歸納成類別 3.1.1~3.1.6。
3.1. 介入性透視攝影(心臟類)	
3.1.1. 心導管—單側	
3.1.2. 冠狀動脈攝影	
3.1.3. 心室造影	
3.1.4. 經皮冠狀動脈擴張術	
3.1.5. 心導管(包含冠狀動脈攝影)	
3.1.6. 其他	
3.2. 介入性透視攝影(非心臟類)	根據表 4.7 的比較結果，建議調查 23 種國內非心臟介入性透視攝影的序列，即可包含 94% 的檢查量，歸納成類別 3.2.1~3.2.6。根據 NCRP 160 號報告，介入性透視攝影的集體有效劑量佔總醫療輻射劑量的 14%。
3.2.1. 血管整形術	
3.2.2. 血管阻塞術	
3.2.3. 子宮輸卵管造影	
3.2.4. 經皮穿肝膽管引流術	
3.2.5. 皮下穿刺腎造瘻術	
3.2.6. 其他	

表4.13 醫療輻射國民劑量評估分類與建議納入調查的項目(續)

類別	備註
4. 傳統透視攝影	根據表 4.9 的比較結果，建議調查 12 種國內傳統透視攝影的序列，即可包含 81%的檢查量，歸納成類別 4.1~4.6。根據 NCRP 160 號報告，傳統透視攝影的集體有效劑量佔總醫療輻射劑量的 3.6%。
4.1. 靜脈注射泌尿系統造影術	
4.2. 下消化道攝影	
4.3. 上消化道攝影	
4.4. 食道攝影	
4.5. 小腸系統	
4.6. 其他	
5. 一般傳統 X 光	根據表 4.10 的比較結果，建議調查國內 26 種一般傳統 X 光檢查，再依據照射部位分成六類。根據 NCRP 160 號報告，一般傳統 X 光的集體有效劑量佔所有醫療輻射劑量的 6.4%。
5.1. 頭部 X 光	
5.2. 胸部 X 光	
5.3. 腹部骨盆腔 X 光	
5.4. 腎臟-輸尿管-膀胱 X 光	
5.5. 脊椎 X 光	
5.6. 四肢 X 光	
6. 乳房攝影	根據表 4.11 的比較結果，建議調查國內乳房攝影檢查的序列張數與每張影像的照射平均乳腺劑量。根據 NCRP 160 號報告，乳房攝影的集體有效劑量佔所有醫療輻射劑量的 0.7%。
7. 牙科攝影	根據表 4.12 的比較結果，建議調查 8 種國內牙科攝影的序列，歸納成類別 7.1~7.6。根據 NCRP 160 號報告，牙科攝影的集體有效劑量佔總醫療輻射劑量的 0.3%。
7.1. 根尖周 X 光攝影	
7.2. 咬翼式 X 光攝影	
7.3. 咬合片 X 光攝影	
7.4. 齒顎全景 X 光片攝影	
7.5. 測顱 X 光攝影	
7.6. 其他	
8. 放射治療	NCRP 160 號報告提及應調查放射治療區域外的正常器官所接受到的醫療輻射劑量，美國結果為平均每人 1.18 mSv。建議選擇國內 10 大癌症進行調查。

伍、 國民輻射劑量調查作業規劃

參考美國 NCRP 的分類方式以及過去所做的調查項次，分天然背景輻射、醫療輻射、消費性產品輻射、輻射源應用民眾劑量以及職業輻射曝露五大類，重新進行國民輻射劑量調查的作業規劃。

天然背景輻射包含有室內外氡氣、溫泉區氡氣、地表宇宙輻射及室內外體外輻射、食品飲水體內劑量等。過去三年已經對國內住宅內氡氣進行調查，建議增加地下空間居住與營業使用場所之量測以及溫泉地區量測。地表體外輻射劑量與食品飲水的體內劑量，初步發現與過去差異不大，可直接彙整近年量測，但建議持續進行進口石材調查已確認其影響程度。

醫療輻射由於目前的作業內容與過去差異頗大，加上國內外統計結果都發現，近年使用頻次也大幅增加，因此建議全面性地進行重新評估作業。

消費性產品的輻射劑量中過去常見的評估項目如電視陰極射線管、煙霧偵檢警報器、鐘錶螢光劑、含氧化鈾玻璃以及含鈾焊條及燈絲等，目前均已不在生產，市場流通也漸漸減少甚至不復見，建議不再重新評估。抽菸人口雖然已因推動菸害防制而減少，但對於抽菸人口資訊的調查近年更為明確，故建議重新加以評估。民眾商業飛航在國際線的部分搭乘人次於 20 年間增加 4 倍，建議重新加以評估，但國內線原本評估劑量就不高，加上高鐵通車後搭乘人次大幅減少故建議不再評估，兩岸航線之前未評估，建議選擇人次較多與航線較長的航線加以評估。礦業應用方面自民國 89 年台灣最後四個煤礦場：台北縣三峽的利豐煤礦、裕峰煤礦、新店市山區的安順煤礦以及石碇鄉的台誠煤礦，宣告停工，台灣煤業正式畫下句點。目前的礦產以地上開採土石為主，建議不再評估。農業以肥料的使用所造成民眾的輻射劑量為主，雖然

預期劑量不高，但為民眾所關心的議題，建議須重新加以評估。此外，包括石化燃燒如燃煤電廠對附近居民造成的輻射劑量、負離子民生消費產品等也是民眾生活常見的輻射源，都建議加以評估。

輻射源應用造成民眾劑量，核設施如核能電廠、研究用反應器及蘭嶼貯存場等周圍民眾劑量目前持續監測與評估中。照顧或接近近期進行核子醫學檢查或治療病患的民眾劑量建議進行評估。安全檢查設備如行李、貨櫃或旅客安全檢查之 X 光機所造成民眾劑量，經評估都在可忽略的範圍，建議不需評估。

職業曝露美國區分為醫療、航空、工業與商業、教育與研究及政府與軍方等從業類別。國內依全國輻射工作人員劑量資料統計年報[71]的統計分類，1995 年～1999 年的工作類別分為研究用、醫用、非醫用及核能電廠等四大類，之後依 UNSCEAR 分類[1]為核燃料循環、醫用、工業用、天然射源與其他等五大類別，同時統計分析細部工作類別——核燃料循環類之反應器運轉、核燃料循環研究類(主要為核廢料管理)；醫用類之放射診斷、放射牙科、核子醫學、放射治療、所有其他應用；工業用類之工業照射、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；天然射源類之石油與天然氣工業、礦物與礦石處理；其他類之教育機構、獸醫、其他等 19 項。除了飛航工作人員國內未納入外，其餘大概都已涵蓋。職業曝露建議依新的分類重新評估，並與輻射防護處合作，以取得最新的劑量統計資料。

除了上述分類外，境外核子事故對於國民輻射所造成的影響也是國人關心的議題，包括過去 1986 年發生前蘇聯車諾比核電廠以及 2011 年日本福島第一核電廠放射性物質外釋所造成的體內或體外劑量，也建議加以評估。

上述討論關於各類別的執行建議，整理表列於附件 1。

陸、 結論

本計畫已完成對台灣地區國民劑量調查計畫的前期研究評估，參酌國際間的做法，並彙整台灣過去的研究經驗，建議各類別調查與評估方式。考慮台灣現在的狀況，針對各類別細項對於總劑量可能占比，提出評估的優先次序，對於目前少見的輻射來源則建議不再評估，以將資源做最有效的應用，提供作為未來執行國民輻射劑量重新評估的參考。

國民輻射劑量評估雖然以平均劑量為主要的結果，但對於部分項目如醫療、民生消費產品等，民眾常接觸的項目，例如吸菸、泡溫泉、體內鉀 40 等，有些細項劑量雖然在總劑量占比不高，卻可以提供民眾自行評估個別化差異的參考，例如吸一根香菸所增加的輻射劑量，或是用身高體重與年紀推算鉀 40 體內劑量等。因此也建議加以評估，並將提供民眾自行評估的方式，納入未來工作內容。

柒、 參考文獻

- [1] UNSCEAR, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation", UNSCEAR, United Nations, New York (2008).
- [2] National Council on Radiation Protection and Measurements, Ionizing Radiation Exposure of the Population in the United States, NCRP Report No.160 (2006).
- [3] 林培火，陳清江，林友明，國民輻射劑量之評估研究報告，原子能委員會輻射偵測中心，民國 87 年 6 月。
- [4] UNSCEAR, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation", UNSCEAR, United Nations, New York (1993).
- [5] 原子力安全研究協會，「新生活環境放射線（平成 23 年（2011 年））」
- [6] Public Health England, "Ionising Radiation Exposure of the UK Population:2010 Review",2016
- [7] EPA RPII, "Radiation Doses Received by the Irish Population",

- Radiation Protection Institute of Ireland, 2014
- [8] V. Rati, A. Mahur, R. Sonkawade, M. Suhail, A. Azam, R. Prasad, Evaluation and analysis of ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K and radon exhalation rate in various grey cements, *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 48 (2010), p. 473.
 - [9] Lust Merle, Realo Enn, Assessment of natural radiation exposure from building materials in Estonia, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 61(2) (2012), p.107.
 - [10] O'Sullivan, D., et al. (2000), Evaluation of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. FIGM-CT-2000-00068 (DOSMAX), Community Research and Development Information Service, EU.
 - [11] Bartlett, D.T., Hager, L.G., Irvine, D. and Bagshaw, M. (2000). Measurements on concorde of the cosmic radiation field at aviation altitudes. *Radiat. Prot. Dosim.* 91, 365–376.
 - [12] Bartlett, D.T. (2004). Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. *Radiat. Prot. Dosimetry* 109(4), 349–355.
 - [13] EURADOS (2004). Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew Compilation of Measured and Calculated Data, A Report of EURADOS WG 5 to Group of Experts established under Article 31 of the EURATOM Treaty.
 - [14] Tokumaru, O., Haruki, K., Bacal, K., Katagiri, T., Yamamoto, T. and Sakurai, Y. (2006). Incidence of cancer among female flight attendants: A meta-analysis. *J. Travel Med.* 13(3), 127–132.
 - [15] Waters, M., Grajewski, B., Pinkerton, L. E., Hein, M. J. and Zivkovich, Z. (2009). Development of historical exposure estimates of cosmic radiation and circadian rhythm disruption for cohort studies of Pan- Am flight attendants. *Am. J. Ind. Med.* 52, 751–761.
 - [16] Bennett, L.G.I.; Lewis, BJ; Bennett, BH ; McCall, MJ. (2013) A survey of the cosmic radiation exposure of Air Canada pilots during maximum galactic radiation conditions in 2009. *RADIATION MEASUREMENTS* Volume 49, Pages 103-108.
 - [17] Dos Santos Silva, I., De Stavola, B., Pizzi, C., Evans, A.D. and Evans, S.A. (2013). Cancer incidence in professional flight crew and air traffic control officers: disentangling the effect of occupational versus lifestyle exposures. *Int. J. Cancer* 132, 374 – 384.
 - [18] Pukkala, E., Helminen, M., Haldorsen, T., Hammar, N., Kojo, K., Linnersjö, A., et al. (2012). Cancer incidence among Nordic airline cabin crew. *Int. J. Cancer* 131, 2886–2897.
 - [19] Drouet, F. and Michelet, M., (2012). Results of the EAN request on radiation protection of aircraft crew, European ALARA Network.
 - [20] ICRP, (2016). Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation. ICRP Publication 132. *Ann. ICRP* 45(1), 1–48.

- [21]Felsberger, E., K. O'Brien, and P. Kindl (2009), IASON-FREE: Theory and experimental comparison, *Radiat. Prot. Dosim.*, 136(4), 267–273, doi:10.1093/rpd/ncp128
- [22]Copeland, K. (2013) Recent and Planned Developments in the CARI Program. Federal Aviation Administration.
- [23]International Commission on Radiation Units & Measurements (ICRU), Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations. Report 47, ICRU, 1992.
- [24]ICRP, Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60, ICRP(2012)
- [25]Copeland, K. Mertens, C. (2014) Federal Aviation Administration. CARI-NAIRAS: Calculating Flight Doses From NAIRAS Data Using CARI, Federal Aviation Administration. 49
- [26]Copeland, K. (2017) CARI-7A: Development and Validation. *Radiat Prot Dosimetry*. 175(4), 419-431.
- [27]Al Anid H, Lewis BJ, Bennett LG, Takada M. (2009), Modelling of radiation exposure at high altitudes during solar storms. *Radiat Prot Dosimetry*. 136(4), 311-316.
- [28]Beck, P., Aircraft crew radiation exposure in aviation altitudes during quiet and solar storm periods. In J. Liliensten (ed.), *Space Weather*, Volume 344 of the series *Astrophysics and Space Science Library*, p. 241–267, 2007.
- [29]Bottollier-Depois, J. F., P. Beck, M. Latocha, V. Mares, D. Matthiä, W. Rühm, and F. Wissmann (2012), Comparison of Codes Assessing Radiation Exposure of Aircraft Crew due to Galactic
- [30]Cosmic Radiation, EURADOS Rep. 2012-03, EURADOS, Braunschweig Bottollier-Depois, J.F., Beck, P., Bennett, B., Bennett, L., Bütikofer, R., Clairand, I., et al. (2009). Comparison of codes assessing galactic cosmic radiation exposure of aircraft crew. *Radiat. Prot. Dosim.* 136, 317–323.
- [31]Green, A.R., L.G.I. Bennett, B.J. Lewis, F. Kitching, M.J. McCall, M. Desormeaux, A. Butler (2005). An empirical approach to the measurement of the cosmic radiation field at jet aircraft altitudes. *Advances in Space Research* Volume 36, Issue 9, 1618–1626.
- [32]Lee, J., Nam, U.-W., Pyo, J., Kim, S., Kwon, Y.-J., Lee, J., et al. (2015). Short-term variation of cosmic radiation measured by aircraft under constant flight conditions. *Space Weather* 13, 797–806.
- [33]Lewis BJ, Bennett LG, Green AR, Butler A, Desormeaux M, Kitching F, McCall MJ, Ellaschuk B, Pierre M. (2005), Aircrew dosimetry using the Predictive Code for Aircrew Radiation Exposure (PCAIRE). *Radiat Prot Dosimetry*, 116(1-4 Pt 2), 320-326.
- [34]McCall MJ, Lemay F, Bean MR, Lewis BJ, Bennett LG. (2009), Development of a predictive code for aircrew radiation exposure. *Radiat*

- Prot Dosimetry. 136(4), 274-281
- [35]Rafnsson, V., Sulem, P., Tulinius, H. and Hrafnkelsson, J. (2003). Breast cancer risk in airline cabin attendants: A nested case-control study in Iceland. *Occup. Environ. Med.* 60, 807–809. Spurny, F. and Dachev, T. (2003). Long-term monitoring of the onboard aircraft exposure level with Si-diode based spectrometer. *Adv. Space Res.* 32, 53–58.
- [36]Takada, M., Nunomiya, T., Ishikura, T., Nakamura, T., Lewis, B.J., Bennett, L.G.I., et al. (2011). Measuring cosmic-ray exposure in aircraft using real-time personal dosimeters. *Radiat. Prot. Dosim.* doi: 10.1093/rpd/ncr221.
- [37]Tobiska, W.K., Atwell, W., Beck, P., Benton, E., Copeland, K., Dyer, C., Gersey, B. & et al. (2015). Advances in atmospheric radiation measurements and modeling needed to improve air safety. *Space Weather*, 13, doi:10.1002/2015SW001169.
- [38]Wissmann F, Burmeister S, Dönsdorf E, Heber B, Hubiak M, Klages T, Langner F, Möller T, Meier M. (2010), Field calibration of dosimeters used for routine measurements at flight altitudes. *Radiat Prot Dosimetry*. 140(4), 319-325.
- [39]潘洸樊，大氣層次級宇宙射線蒙地卡羅模擬及飛航劑量評估，碩士論文，國立清華大學核子工程與科學研究所。(2015)
- [40]https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7/
- [41]<http://www.caa.gov.tw/Big5/content/index.asp?sno=870>
- [42]Guimond, R.J. (1978). The radiological aspects of fertilizer utilization. "Radioactivity in Consumer Products" (A. A. Moghissi, P. Paras, M. W. Carter, and R. F. Barker, eds.), U.S. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/ CPOOO3, pp. 31-393. NTIS, Springfield, Virginia.
- [43]Merril E, Thomas G,(1997) Environmental Radioactivity from Natural, Industrial, and Military Sources. Academic Press, USA.
- [44]Gallagher D, Visser M, De Meersman RE, Sepúlveda D, Baumgartner RN, Pierson RN, et al.(1997) Appendicular skeletal muscle mass: effects of age, gender, and ethnicity. *J Appl Physiol.* 83(1):229–239.
- [45]Silva AM, Shen W, Heo M, Gallagher D, Wang Z, Sardinha LB, et al. (2010) Ethnicity-related skeletal muscle differences across the lifespan. *Am J Hum Biol.* 22(1):76–82.
- [46]ICRP, (1975) Report of the Task Group on Reference Man. ICRP Publication 23. Pergamon Press, Oxford.
- [47]Lahham A, Fülöp M, Vladár M, Ragan P.(1998) Body potassium content and radiation dose from 40K to the Slovak population. *Health Phys.* 74(3):346-9
- [48]Zerquera JT, Alonso MP, Bejerano GL, López JO, Rodríguez NA. (2003) Assessment of the doses received by the Cuban population from 40K contained in the body: modelling based on a neural network. *Radiat Prot*

- Dosimetry. 104(3):237-43.
- [49]Brindha JT, Rajaram S, Kannan V.A, (2007) Comparative study of body potassium content in males and females at Kalpakkam (India). Radiat Prot Dosimetry. 123(1):36-40
 - [50]Tolstykh EI, Degteva MO, Bougrov NG, Napier BA (2016) Body Potassium Content and Radiation Dose from 40K for the Urals Population(Russia). PLoS ONE 11(4)
 - [51]Yoo J, Jin YW, Kim KP, Assessment of Body Potassium Level By Gender And Age In Korean Adult Group. Radiat Prot Dosimetry. 2018 Jan 1;178(1):57-62.
 - [52]Jackson AS, Stanforth PR, Gagnon J, Rankinen T, Leon AS, Rao DC, Skinner JS, Bouchard C, Wilmore JH. (2002) The effect of sex, age and race on estimating percentage body fat from body mass index: The Heritage Family Study. Int J Obes Relat Metab Disord. 26(6):789-96.
 - [53]Sylvia T, (2016) The Secret Life of Fat: The Science Behind the Body's Least Under stood Organ and What It Means for You. W. W. Norton & Company.LA USA
 - [54]ICRP, (2002) Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32 (3-4).
 - [55]Cristy M and KF Eckerman. (1987) Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photons sources. ORNL/TM-8381 V1-V7, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
 - [56]下道國，真田哲也，藤高和信，湊進，日本の自然放射線による線量 Isotope News 2013 2 月 No.706:23-32
 - [57]Venturini L, Sordi GA. Radioactivity in and committed effective dose from some Brazilian foodstuffs. Health Phys. 1999 Mar;76(3):311-3.
 - [58]Piotr G, Agnieszka DŚ, Zbigniew Z, Ewa M, Estimation of the committed radiation dose resulting from gamma radionuclides ingested with food. J Radioanal Nucl Chem. 2014; 299(3): 1359–1364.
 - [59]ICRP, (1995) Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26 (1).
 - [60]<https://www.aec.gov.tw/trmc/monitoring/fallout.html>
 - [61]<http://statis.moi.gov.tw/micst/stmain.jsp?sys=100>
 - [62]<https://dep.mohw.gov.tw/DOS/lp-1720-113-5-20.html>
 - [63]<https://www.worlddata.info/average-bodyheight.php#by-population>
 - [64]M.A. MISDAQ, H. ELAMYN, H. ERRAMLI,(2008) 238U and 232Th concentrations in various foodstuffs in Morocco and resulting radiation doses to the members of the public, Radioprotection Vol. 43(2)
 - [65]HPS. (2009, March 10). People Exposed to More Radiation from Medical, pp. 1–10
 - [66]HPA. (2010). Frequency and Collective Dose for Medical and Dental

- X-ray Examinations in the UK, 2008 (No. HPA-CRCE-012) (pp. 1–58). Health Protection Agency.
- [67]Chen, T. R., & Tung, C.-J. (2011). Trend and risk of diagnostic medical exposure to Taiwan population. Presented at the Proceedings 2011 International Conference on Human Health and Biomedical Engineering. [http : //doi.org/10.1109/hhbe.2011.6029057](http://doi.org/10.1109/hhbe.2011.6029057)
- [68]Tsai, H.-Y., Tung, C.-J., Yu, C. C., Yu, C.-C., & Tyan, Y. S. (2007). Survey of computed tomography scanners in Taiwan: dose descriptors, dose guidance levels, and effective doses. *Medical Physics*, 34(4), 1234 – 1243. [http : //doi.org/10.1118/1.2712412](http://doi.org/10.1118/1.2712412)
- [69]Yeh, D.-M., Tsai, H.-Y., Tyan, Y.-S., Chang, Y.-C., Pan, L.-K., & Chen, T.-R. (2016). The Population Effective Dose of Medical Computed Tomography Examinations in Taiwan for 2013. *PLoS ONE*, 11(10), e0165526. [http : //doi.org/10.1371/journal.pone.0165526](http://doi.org/10.1371/journal.pone.0165526)
- [70]許弼勝. (2017). 利用全民健保資料庫推估國民醫療診斷用輻射劑量. 高雄醫學大學.。
- [71]原子能委員會，2008，全國輻射工作人員劑量資料統計年報。

捌、 附件

附件 1 規劃進行國民輻射劑量重新調查項目

項目	現況	規劃執行方法
1. 天然背景輻射		
1.1 氬氣及鈾氣		
1.1.1 室內及室外的氬活度	已開始調查	1. 蘭嶼地下室氬氣輻射劑量評估 2. 地下室住家與工作場所氬氣劑量評估
1.1.2 溫泉水中的氬活度	需重新評估	選擇國內溫泉景點進行量測，依國外經驗以磺酸泉優先，碳酸泉氬氣問題較小。
1.2 宇宙輻射	已開始調查	彙整數據評估
1.3 地表輻射		
1.3.1 台灣環島鐵路沿線天然背景		建議不做評估
1.3.2 住宅室內體外輻射	已開始調查	彙整數據評估
1.3.3 戶外體外輻射	已開始調查	彙整數據評估
1.3.4 放射性落塵(體外輻射)	已開始調查	彙整數據評估
1.4 體內放射性核種		
1.4.1 飲用水中的放射性	例行環測監測	彙整數據評估
1.4.1.1 飲用水中鐳 226	例行環測監測	當總阿伐超過每公升 0.2 貝克進行分析
1.4.1.2 水域中氡	例行環測監測	彙整數據評估
1.4.2 食品中的放射性	例行環測監測	彙整數據評估 購買市售食品分析
1.4.2.1 酒類中碳 14 及氚之含量	87 年曾經調查活度，但未納入劑量評估	建議不再評估
1.4.3 人體中的天然放射性核種	NCRP 160 建議採食品攝食評估	建議合併食品調查
1.4.4 放射性落塵(體內輻射)	例行環測監測	彙整數據評估
2. 醫療輻射曝露	需重新評估	1. NCRP160 號報告分成 4 類：電腦斷層、核子醫學、介入性透視、一般放射造影

項目	現況	規劃執行方法
		與透視。 2. 87 年本中心之研究分成 3 類：醫用 X 光、牙科 X 光、核子醫學檢查。 3. 本次規劃分成 8 類，建議委託學術機構執行
3. 消費性產品		
3.1 抽菸	需重新評估	1. NCRP160 號報告中占消費性產品 35 % 2. 向衛福部國民健康署菸害防制組取得國人抽菸習慣資訊。 3. 市場取樣至少 20 種品牌香菸，分析輻射濃度並換算劑量。
3.2 建築材料	例行環測監測	彙整數據評估
3.3 商業飛航旅程	需重新評估	1. 與輻射防護處合作確認工作人員職業曝露。 2. 向民航局標準組取得民眾搭機飛航資訊，統計飛航宇宙輻射劑量。
3.4 礦業及農業		
3.4.1 煤礦坑氬氣的度量	建議不重做	目前已無煤礦開採
3.4.2 肥料中的放射性對農民的輻射劑量評估	需重新評估	評估常用肥料造成農民劑量。
3.5 其他雜項射源		
3.5.1 負離子民生用品輻射劑量評估	需重新評估	調查市面常用健康負離子產品，進行放射分析與劑量評估
3.6 因石化燃料燃燒		
3.6.1 燃煤電廠周圍民眾輻射曝露	需重新評估	
3.7 高速道路與一般道路之建築材料	不重新評估	參考 NCRP160 號報告結果，劑量非常低
3.8 玻璃及陶瓷		
3.8.1 陶瓷假牙及長期配戴陶瓷飾品	不重新評估	參考 NCRP160 號報告結果，劑量非常低
4. 工業、安全檢查、醫療、教學、研究等活動		
4.1 照顧或接觸近期接受核子醫學檢查或治療的病患	建議評估	NCRP160 號報告中占工業、安全檢查、醫療、教學、研究等活動 72 %。國內未曾評估。

項目	現況	規劃執行方法
4.2 核能發電相關產業設施之周圍(80 公里內)民眾	例行環測監測	目前核能電廠與蘭嶼貯存場環境，均有例行監測數據可彙整評估。
4.3 因工業、醫療、教育、研究等應用設施之周圍(80 公里內)民眾	例行環測監測	目前清華大學與核能研究所等研究用反應器周圍環境，均有例行監測數據可彙整評估。
4.4 政府部門(例如美國能源部)相關設施之周圍(80 公里內)民眾	建議不做評估	國內無相關設施
4.5 安全檢查目的設備之周圍民眾	建議不做評估	參考 NCRP160 號報告結果，行李檢查 X 光機、貨櫃檢查 X 光機、旅客安全檢查 X 光機等劑量很低
5. 職業曝露	需重新評估	由輻射防護處取得執業人員劑量統計資料，並探討飛航工作人員劑量。