

RMC-112-305Rev2

**108-111 年國民輻射劑量評估
總結報告(112 年 10 月修正版)**



計畫全程：自 108 年 1 月 1 日至 111 年 12 月 31 日

執行單位：核能安全委員會輻射偵測中心

112 年 10 月

108-111 年國民輻射劑量評估總結報告

摘要

本計畫為民國 108 年至 111 年，為期 4 年的海陸域環境輻射調查與國民輻射劑量評估科技計畫之分項計畫。本中心為了瞭解台灣民眾在生活環境中所接受到天然與人造游離輻射曝露的輻射劑量，參考美國輻射防護與度量委員會(NCRP)的分類方式，將國民輻射劑量之來源及應用層面分成五類進行調查研究，包含(1)背景輻射、(2)醫療輻射、(3)消費性產品、(4)產業活動、(5)職業輻射曝露等五大類。本計畫蒐集國內外相關文獻及評估方式，結合實測作業、曝露情境進行劑量的評估，評估作業包含國人的生活習慣調查，以獲得符合現況之國民輻射劑量評估結果。其調查結果包括各輻射來源分項所造成的曝露族群之「個人平均有效劑量(E_{EXP})」、「集體有效劑量(S)」及「國民輻射劑量(E_{Taiwan})」等三項。

綜上，民國 108 至 111 年辦理國民輻射劑量評估調查結果，背景輻射包含宇宙射線、地表輻射、氬氣及體內放射性核種等 4 類，造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 2.37 毫西弗，占整體國民輻射劑量之 60.15%；醫療輻射造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 1.51 毫西弗，占整體國民輻射劑量之 38.32%；消費性產品主要係針對吸菸行為、飛航活動、農業(如肥料)及燃煤電廠等，合計 0.057 毫西弗，占整體 1.45%；職業曝露包含天然射源(如民航空勤人員)及人工射源(含核燃料循環、醫學應用、工業應用、其他應用類之輻射工作人員)等，合計 0.00118 毫西弗，占整體 0.03%；產業活動主要來源為核設施，合計 3.9×10^{-7} 毫西弗，不到整體之 0.001%；綜上，本計畫國民輻射劑量(E_{Taiwan})評估調查結果為 3.94 毫西弗。

Summary Report for Evaluation of Exposure Dose to Ionizing Radiation in Taiwan from 2019 to 2022

Abstract

This project is a sub-project of the 4-year land and sea environmental radiation survey and population radiation dose assessment science and technology plan from 2019 to 2022 in Taiwan. In order to understand the radiation dose that Taiwanese people are exposed to from natural and artificial ionizing radiation in their living environment, the Radiation Monitoring Center(RMC, Taiwan) refers to the classification method of the United States Commission on Radiation Protection and Measurement (NCRP) and divides the sources and application levels of population radiation doses into five categories including five major categories: (1) background radiation, (2) medical radiation, (3) consumer products, (4) industrial activities, and (5) occupational radiation exposure.

This project collects relevant domestic and global literature and assessment methods, and conducts dose assessments based on actual measurement operations and exposure scenarios. The assessment operations include surveys of Taiwanese people's living habits to obtain population radiation dose assessment results that are consistent with the current situation. The survey results include three items: "Individual average effective dose (E_{EXP})", "Collective effective dose (S)" and "Population radiation dose (E_{Taiwan})" for exposed groups caused by each radiation source sub-category.

In summary, according to the results of the population radiation dose

assessment survey from 2019 to 2022, the average annual effective dose by background radiation is 2.37 millisieverts (mSv) per person includes four sub-categories: cosmic rays, surface radiation, radon gas, and internal radionuclides. It is 60.15% of the overall population radiation dose. The annual effective dose by medical radiation is 1.51 mSv per person. It is 38.32% of the overall population radiation dose. The annual effective dose by consumer products is 0.057 mSv per person includes sub-categories: smoking, aviation, agriculture (such as fertilizers) and coal-fired power plants. It is 1.45% of the overall population radiation dose.

The annual effective dose by occupational exposure is 0.00118 mSv per person includes two sub-categories: natural radioactive sources (such as civil aviation personnel) and artificial radioactive sources (including radiation workers in nuclear fuel cycle, medical applications, industrial applications, and other applications), etc. It is 0.03% of the overall population radiation dose. The annual effective dose by industrial activities is 3.9×10^{-7} mSv per person and its main source is from nuclear facilities. It is less than 0.001% of the overall population radiation dose. To summarize the population radiation dose (E_{Taiwan}) assessment survey result for this project is 3.94 mSv per year.

名詞定義

1. S:集體有效劑量(Annual collective effective dose)

指特定群體曝露於某輻射源，所受有效劑量之總和，亦即為該特定輻射源曝露之人數與該受曝露群組平均有效劑量之乘積，其單位為人-西弗(man-Sv)。

2. E_{EXP} :個人年有效劑量(Average annual Effective dose)

意指曝露族群之平均年有效劑量，又稱個人平均年有效劑量。此劑量為法規上所稱之約定有效劑量，指各組織或器官之約定等價劑量與組織加權因數乘積之和，其單位為西弗(Sv)或毫西弗(mSv)。

3. $E_{EXP-AVE}$:有劑量人員之個人年有效劑量

係指經監測有劑量值人員之平均劑量，意即年集體有效劑量/有劑量值工作人員數，文中會以「有劑量人員平均有效劑量」稱之。

4. $E_{population}$:總族群之平均有效劑量(Effective dose per individual in the population)

意指總族群之平均年有效劑量，計算方式為集體有效劑量除以總群體數，其單位為毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)。

5. E_{global} :全球民眾之個人平均年有效劑量(Effective dose per individual per year in global population)

計算方式為全球每年之集體有效劑量除以全球人口數，以毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)表示。

6. E_{US} :美國全體國民之平均年有效劑量(Effective dose per individual per year in United State)

計算方式為美國每年之集體有效劑量除以美國人口數，以毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)表示。

7. E_{JP} : 日本全體國民之平均年有效劑量(Effective dose per individual per year in Japan)

計算方式為日本每年之集體有效劑量除以日本人口數，以毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)表示。

8. E_{Taiwan} : 台灣全體國民之平均年有效劑量(Effective dose per individual per year in Taiwan)

計算方式為台灣每年之集體有效劑量除以台灣人口數，以毫西弗(mSv)或微西弗(μ Sv)表示；亦即國民輻射劑量。

目錄

壹、前言	1
貳、執行方法	2
參、研究成果	5
一、背景輻射	5
(一) 地表輻射	5
(二) 宇宙射線	18
(三) 攝食曝露	26
(四) 氬氣吸入	44
二、醫療輻射	51
三、消費性產品	70
(一) 吸菸行為	70
(二) 飛航活動	73
(三) 農業肥料	81
(四) 燃煤電廠	90
四、產業活動	98
(一) 核設施	98
五、職業曝露	106
肆、結論	118
伍、參考文獻	124
陸、附件	138

圖目錄

圖 1 國民輻射劑量調查研究計畫評估範圍.....	2
圖 2 戶外地表輻射量測情形.....	7
圖 3 室內地表輻射量測情形.....	8
圖 4 宇宙輻射量測情形(地點：武嶺停車場).....	18
圖 5 宇宙輻射量測情形(地點：樂信瓦旦紀念公園).....	19
圖 6 宇宙輻射游離輻射成分劑量率與海拔高度關係.....	21
圖 7 中子宇宙輻射劑量率與海拔高度關係.....	21
圖 8 氡氣量測儀器擺放建議.....	47
圖 9 國內住宅室內氡氣活度濃度分布圖.....	48
圖 10 醫療輻射劑量評估流程.....	53
圖 11 劑量評估模型建構流程.....	57
圖 12 近 60 年太陽風強度資料並換算為阻隔銀河宇宙輻射之電位	74
圖 13 104-108 年台灣各機場出入旅客人次比例統計圖	76
圖 14 以 NTHU FDC 之台灣熱門航線劑量比較圖(本研究整理).....	79
圖 15 雲林麥寮、高雄市興達與台中市火力發電廠現場度量結果	97
圖 16 台灣地區 111 年各職業曝露之從業人口比例.....	114
圖 17 台灣地區 111 年各職業曝露之集體有效劑量比例.....	115
圖 18 國民輻射劑量組成與比較.....	123

表目錄

表 1、108-111 年國民輻射劑量評估規畫期程表	3
表 2 各縣市地表輻射之劑量率與年有效劑量	10
表 3 各縣市不同構造房屋住宅數量及室內地表輻射	11
表 4 室內與戶外之占用因子.....	12
表 5 各縣市不同年齡群之地表輻射年有效劑量	13
表 6 地表輻射之集體有效劑量	15
表 7 地表輻射國民輻射劑量差異比較	17
表 8 中子宇宙射線(戶外)與游離輻射成分宇宙射線(戶外)所造成各縣市國民之集體劑量	23
表 9 室內與戶外之宇宙射線集體劑量	24
表 10 宇宙射線國民輻射劑量	24
表 11 宇宙射線國民輻射劑量與國外及國內往年比較	25
表 12 國人不同性別、年齡別之身體質量指數 (BMI).....	28
表 13 攝食之劑量轉換因子.....	29
表 14 台灣地區食品檢測結果	31
表 15 食品鈾-210 之檢測結果	32
表 16 國人各年齡群之年攝食量	33
表 17 攝食法估算之國民輻射劑量	40
表 18 我國因攝食導致之體內輻射劑量	41

表 19 攝食曝露年有效劑量之比較	43
表 20 各國國際組織的室內氡氣標準	45
表 21 ICRP 氡氣劑量評估之比較.....	46
表 22 台灣住宅氡氣量測結果	49
表 23 各國之氡氣吸入背景輻射劑量	50
表 24 醫療委託研究之計畫分年進度表	54
表 25 劑量計算符號公式.....	59
表 26 劑量評估方式.....	60
表 27 電腦斷層有效劑量.....	61
表 28 核子醫學有效劑量.....	62
表 29 心臟類介入性透視攝影有效劑量	62
表 30 非心臟類介入性透視攝影有效劑量	62
表 31 傳統透視攝影有效劑量	63
表 32 一般傳統 X 光有效劑量.....	63
表 33 乳房攝影有效劑量.....	63
表 34 牙科攝影有效劑量.....	64
表 35 電腦斷層集體有效劑量	64
表 36 核子醫學集體有效劑量	65

表 37 心臟類介入性透視攝影集體有效劑量	65
表 38 非心臟類介入性透視攝影集體有效劑量	65
表 39 傳統透視攝影集體有效劑量	66
表 40 一般傳統 X 光集體有效劑量.....	66
表 41 乳房攝影集體有效劑量	66
表 42 牙科攝影集體有效劑量	67
表 43 集體有效劑量總和 (S)	67
表 44 國民每人年平均劑量 (E_{Taiwan})	68
表 45 集體有效劑量百分比 (S60) 比較	69
表 46 個人平均年有效劑量比較	69
表 47 國人吸菸行為之集體有效劑量	72
表 48 國際線、兩岸線與國內線等飛航劑量分析結果	78
表 49 民用航空宇宙輻射劑量評估結果之比較	80
表 50 13 件肥料樣品中所含鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度	82
表 51 肥料樣品施用於農地後的鐳當量濃度、體外風險指數	86
表 52 本文肥料樣品(施用於農地前)的鐳當量濃度、加馬射線係數與其他國家之比較.....	89
表 53 雲林麥寮、高雄興達與台中火力發電廠現場度量量測點	93
表 54 經現場度量分析之活度濃度與加馬劑量率結果	94

表 55 天然放射性核種鈾系、鈾系與鉀-40 於不同樣品之活度比較.....	95
表 56 各國煤炭中含放射性核種活度濃度量測差異比較	96
表 57 核能一廠、核能二廠、核能三廠之集體有效劑量(S)評估結果	99
表 58 本中心針對核設施周圍民眾個人劑量評估結果	100
表 59 清華大學針對核設施周圍民眾個人劑量評估結果	101
表 60 核研所針對核設施周圍民眾個人劑量評估結果	102
表 61 蘭嶼低放貯存場周圍民眾個人劑量評估結果	103
表 62 台灣核設施造成集體有效劑量與國民輻射劑量評估結果	104
表 63 國際文獻之核設施集體有效劑量(S)	105
表 64 民國 111 年版職業曝露劑量(僅劑量監測).....	108
表 65 台灣地區民國 104-109 年職業輻射曝露劑量統計總表	109
表 66 台灣地區之職業曝露劑量評估結果(民國 87 年及民國 111 年).....	113
表 67 職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})之比較.....	115
表 68 台灣職業曝露之國民輻射劑量(E_{Taiwan}).....	117
表 69 國民輻射劑量的組成(五大類).....	118
表 70 人為輻射各評估項目之曝露人數、集體有效劑量、曝露人口之個人有效劑量比較	122

壹、前言

國民輻射劑量係以臺灣民眾生活的國內環境為基礎，並考量國人的生活習慣及職業型態差異，針對不同的輻射來源進行調查、量測、統計與分析，計算出每位國民每年生活在國內的環境中，接受到來自天然與人造的游離輻射曝露劑量平均值之總和。

輻射偵測中心(以下簡稱本中心)於民國 81 年至 87 年期間執行第一次國民輻射劑量評估【1】，評估項目主要分為天然輻射、放射性落塵、職業曝露、醫療輻射、核設施和雜項射源六大類，評估結果臺灣每年每人國民輻射劑量總計為 2.44 毫西弗，其中天然輻射導致每年每人年劑量約 1.62 毫西弗，占 66.3%，以地表輻射為最主要天然輻射，其次是氡氣與體內放射性核種；人造輻射導致每年每人劑量約 0.82 毫西弗，以醫療輻射為最主要劑量來源，占總劑量來源的 33.3%；其他輻射源項的貢獻只有 0.4%。考量國內上一次評估國民輻射劑量迄今超過 20 年，國人經濟條件及生活習慣已有相當大的改變，環境輻射量測技術亦不斷精進，以及近年來國際上對劑量評估方式的調整，因此，本中心對國民輻射劑量進行重新調查及再評估。

本中心於民國 108 至 111 年執行之國民輻射劑量評估，除醫療輻射之調查評估委由專業學術單位執行外，其餘項目皆由本中心自行研究，已於 111 年底完成國民輻射劑量整體評估作業，並於民國 111 年 6 月 16 日、11 月 14 日、11 月 16 日、11 月 21 日及 12 月 8 日召開 5 場審查會辦理報告審查作業，歷次開會通知單及會議記錄如附件一，並於民國 112 年初陸續完成各分項報告之修正，共計完成 11 本評估報告，本報告係綜合摘要紀錄各評估報告之重要結果。

貳、執行方法

為瞭解台灣民眾在生活環境中所接受到天然與人造游離輻射曝露的輻射劑量，本中心從民國 108 年至 111 年，共計花費四年完成國民輻射劑量重新調查與評估。參考美國輻射防護與度量委員會(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)2009 年出版 160 號報告【2】的分類方式，將國民輻射劑量之來源及應用層面分成五類進行調查研究，包含(1)背景輻射、(2)醫療輻射、(3)消費性產品、(4)產業活動、(5)職業輻射曝露等五大類，如圖 1。本計畫蒐集國內外相關文獻及評估方式，結合實測作業、曝露情境進行劑量的評估，評估作業包含國人的生活習慣調查，以獲得符合現況之國民輻射劑量評估結果，評估結果包括各輻射來源分項所造成的曝露族群之「個人平均有效劑量(E_{EXP})」、「集體有效劑量(S)」及「國民輻射劑量(E_{Taiwan})」等三項。

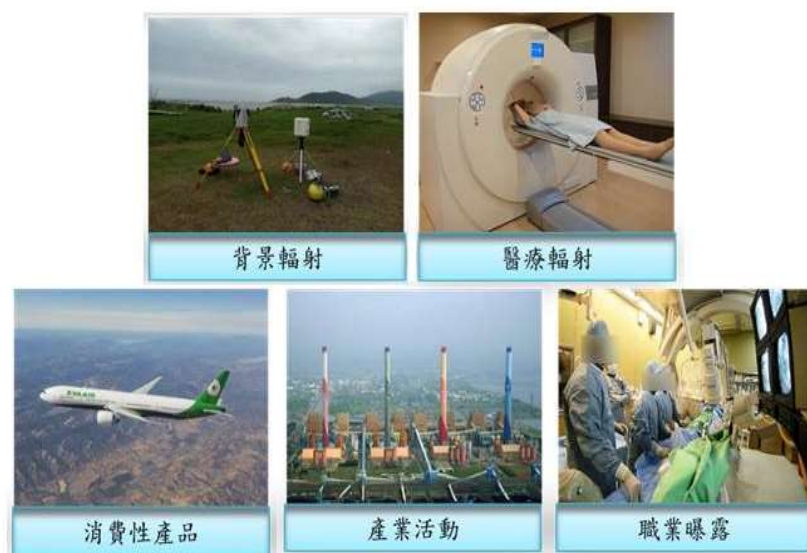


圖 1 國民輻射劑量調查研究計畫評估範圍

本中心自民國 108 年起開始重新進行國民輻射劑量的調查作業，規劃之期程如表 1。背景輻射的部分，氬氣因應國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)2017 年 ICRP 第 137 號報告【3】中發布新的劑量轉換因子而重新加以評估；體外劑量如宇宙輻射與地表輻射彙整過去資料後，並新增外島與山區之體外輻射劑量之調查，以強化數據之完整性；攝食曝露部分則針對鉀-40、鈾-210 等放射性核種完成計測分析與劑量評估。

表 1、108-111 年國民輻射劑量評估規畫期程表

	108	109	110	111
背景輻射	√	√	√	√
醫療輻射曝露	√	√	√	√
消費性產品	√	√	√	√
職業曝露		√	√	√
產業活動		√	√	√

醫療輻射自民國 108 年起歷時 3.5 年，以委託研究方式由財團法人中華民國輻射防護協會執行，透過醫療院所訪談與調查作業，針對 8 種醫療輻射診斷類別(電腦斷層、核子醫學、心臟類介入性透視攝影、非心臟類介入透視攝影、傳統透視攝影、一般傳統 X 光、乳房攝影和牙科攝影)及其相應的 51 個檢查項目，依各檢查項目的醫療曝露模式分別開發劑量評估模型；評估每個檢查項目的單次有效劑量，並配合調查醫療曝露人口資訊，以得到集體有效劑量；最後搭配台灣總人口數，推算 8 種醫療輻射診斷類別的國民醫療輻射劑量。

消費性產品的輻射劑量，評估項目包含：吸菸行為、飛航活動、農業肥料與燃煤電廠等。民國 108 年已執行吸菸行為劑量先期評估作業，後續亦取得衛福部最新之吸菸習慣調查結果，納入成人與青少年等族群等統計資料，以符合國人吸菸群體統計數據之概況。在飛航活動部分，國際線的搭乘人次於 20 年間增加 4 倍，因此於民國 109 年開始蒐集統計民航局各機場出入境人數資料，配合劑量評估軟體（法國 SIEVERT）進行先期評估；國內航線與兩岸線，搭配國內新開發之劑量評估軟體（台灣 NTHU FDC），亦進行進一步評估；農業肥料針對市售 13 件肥料進行放射性活度濃度分析，以評估肥料樣品施作於農地後，造成農民的平均年有效劑量及國民輻射劑量；燃煤電廠為針對國內燃煤電廠周圍之空浮與土壤進行採樣調查與量測，並參考燃煤電廠周圍人口分布之情形，評估當地居民因燃煤電廠產生之煤灰所造成的輻射劑量。

產業活動部分係針對從事某經濟活動而造成特殊群體(關鍵群體)之輻射曝露，評估項目主要為核設施。核設施以針對國內現有核設施進行探討，包含核能一廠、核能二廠、核能三廠、清華大學研究用反應器、核能研究所、台電公司蘭嶼低放貯存場等，共計 6 座核設施，參採各項核設施監測季報與年報方式，進行國民輻射劑量之評估。

職業曝露的評估自民國 109 年開始執行，依據國內「全國輻射工作人員劑量資料庫」之職業曝露監測資料，我國目前存在輻射從業人口的行業可分成：核燃料循環類、醫學應用類、工業應用類、其他類以及天然射源類等 5 類；每類別下又會再依職業種類分有細項，共計 23 項。本報告以上述統計資料為基礎，並收集其他未納入劑量監測之職業(如:民用航空機組人員)之職業曝露研究，計算國人從事輻射相關職業所造成之國民輻射劑量。

參、研究成果

本次國民輻射劑量評估主要由背景輻射、消費性產品、職業曝露、產業活動及醫療輻射五類來源組成，各分項研究成果如下：

一、背景輻射

(一) 地表輻射

地表輻射為背景輻射的來源之一，源於地殼岩石圈中鈾系、釷系及鉀-40 等天然放射性核種所產生的輻射，其中鈾-232 之半化期約為 141 億年、釷-238 之半化期約為 45 億年、鉀-40 之半化期為約 12.48 億年，這類核種自地殼誕生以來就存在，目前全球的土壤及岩石當然都含有這些天然放射性物質，也就是造成地表輻射的來源。

依聯合國原子輻射效應科學委員會(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation ,UNSCEAR) 2000 年出版之 SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION to the General Assembly : Annex B - Exposures from natural radiation sources(以下簡稱 UNSCEAR 2000 年報告)【4】所述，地殼中釷系元素，鈾系元素和鉀-40 的全球平均活度濃度分別為 33、45 和 420 貝克/公斤；UNSCEAR 2008 年出版之 SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION to the General Assembly : Annex B - Exposures of the public and workers from various sources of radiation (以下簡稱 UNSCEAR 2008 年報告)【5】所述，全球土壤天然放射性物質釷-226、釷-238、鈾-232 和鉀-40 的平均活度濃度分別為 32、33、45 和 412 貝克/公斤，然而在全球某些國家，例如巴西、法國、印度、尼日利亞、伊朗，有一些天然背景輻射較平均值高的區域，導致這些地區每年因天然放射性核種導致的輻射劑量有幾個毫西弗的增加。人民受到的天然地表輻射，除了戶外地表輻射，亦有室內地表輻射，其主要來源是建材，依 UNSCEAR

2008 報告所述，室內地表輻射造成國民年有效劑量之全球平均值為 0.41 毫西弗，戶外地表輻射造成國民年有效劑量之全球平均值為 0.07 毫西弗。

美國最新的國民輻射劑量評估報告是美國輻射防護與度量委員會於 2009 年出版的 NCRP 160 號報告，其中地表輻射造成美國國民每人年平均有效劑量(E_{US})為 0.21 毫西弗，在部分州的特殊區域，地表輻射造成每人年平均有效劑量(E_{US})可達 1.61 至 2.09 毫西弗。本中心曾於民國 81 年至 87 年期間進行過國民輻射劑量評估，民國 87 年 6 月完成「國民輻射劑量之評估研究報告」，評估結果臺灣每年每人國民輻射劑量總計(E_{Taiwan})為 2.44 毫西弗(mSv)，其中天然輻射導致每年每人年劑量約 1.62 毫西弗，占 66.3%，戶外地表輻射每年每人劑量約 0.07 毫西弗，室內地表輻射每年每人劑量約 0.57 毫西弗，合計地表(加馬)輻射每年每人劑量約 0.64 毫西弗。

為量測地表輻射，本計畫共使用兩項儀器，包含：(1)純鍺偵檢器(廠牌：ORTEC，型號：Micro-detective)；(2)碘化鈉型偵檢器(廠牌：FLIR，型號：identiFINDER2)。戶外地表輻射部分係引用美國能源部現場度量方法(HASL-258)【6】；現場度量方法原則上須盡量選擇適合地點，適合地點為量測區域內，以偵檢器為中心，在半徑 10 公尺範圍內無建築物，且地表下方 10 公尺深為均質乾燥土壤(無雜質)，如圖 2；於戶外將純鍺偵檢器以三腳架架高，偵檢器朝下，偵檢頭中心置於距離地面 1 公尺高處，量測 1 小時加馬能譜，可測得地表天然放射性物質活度濃度，再引用 UNSCEAR 2000 報告所述地表放射性核種活度濃度轉換地表加馬輻射劑量率之計算方法，可計算出各處地表輻射之加馬輻射劑量率，此計算式為：

$$D=(0.462*A_{Ra}+0.621*A_{Th}+0.042*A_K)*C，$$

A_{Ra} 、 A_{Th} 和 A_K :地表中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度(單位:Bq/kg)；

C:空間吸收劑量與輻射劑量率轉換因子 0.7 (單位：Sv/Gy)；

D:乾燥空氣環境下離地表面 1 公尺處的加馬輻射劑量率(單位：μSv/h)。



圖 2 戶外地表輻射量測情形

(地點：花蓮縣新城鄉新城公園)

民眾在建築物內活動時也會接受到加馬游離輻射，這類輻射來源有兩項，分別為二次宇宙射線的加馬游離成分及建築物建材。對宇宙射線的加馬游離成分而言，影響住宅輻射劑量的因素為上方樓層建物水泥的總厚度，及受測住宅所在的樓層；對源自建築物建材的天然加馬輻射而言，影響因素則是受測住宅天花板及四周牆壁建材中所含天然放射性核種的活度濃度差異。為呈現室內地表輻射數據的客觀性，本計畫僅評估一般的民眾住宅，不包含輻射作業場所、經特殊輻射防護設計的住宅、曾受過輻射污染的住宅及輻射鋼筋屋等。以二吋碘化鈉閃爍型偵檢器測量住宅客廳之加馬輻射劑量率，偵檢器可直接測得加馬輻射劑量率($\mu\text{Sv/h}$)，量測位置為距離地板 1 公尺高，離牆面至少 50 公分處，並計算 1 小時內之平均加馬輻射劑量率，如圖 3。該儀器內建轉換因子為一戈雷等於一西弗，將所測之空間吸收劑量率(Absorbed dose rate)換成周圍等效劑量(Ambient equivalent dose)，但因天然輻射場之能量分布較一般以銫-137 為校正射源之手持式偵檢器校正場為低，若量測結果用於國民輻射劑量評估時，此數值將過於保守【7】；本中心民國 87 年執行之國民輻射劑量評估，吸收劑量轉換加馬輻射劑量因子

採用 0.8，經參考日本地表輻射偵測相關之文獻【8】，本研究以 0.748 作為室內吸收劑量轉換加馬輻射劑量因子(單位：Sv/Gy)。

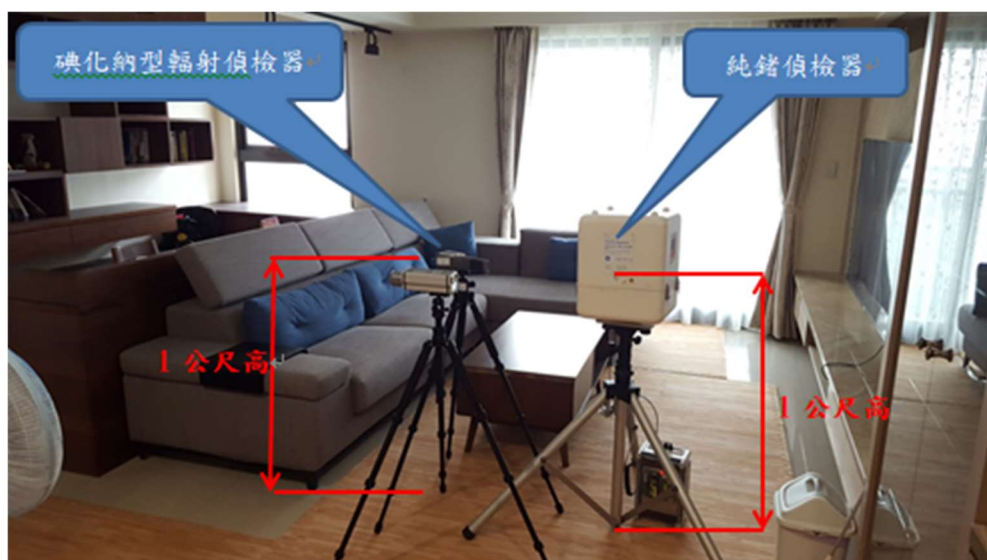


圖 3 室內地表輻射量測情形

(地點：高雄市小港區鋼筋混凝土住宅大樓)

戶外地表輻射部分，自民國 102 年至 110 年，依國內行政區分布，至全國各鄉鎮縣市區執行戶外地表輻射的實測調查，共量測 497 處(含特殊地質區域 8 處)。整體而言，臺灣本島地質以沉積岩為主，各地的戶外地表輻射劑量率差異不大，少數特殊地質區域，例如台南市將軍區及北門區海灘區域，因富含重砂，內含的獨居石其鈾-232 含量較高，其地表輻射劑量偏高(每小時 0.3 至 1.31 微西弗)，屬於特殊地質區，但因無民眾居住於特殊地質區域內，僅少數遊憩觀光民眾短暫停留該區域且缺少實際停留時間數據，相對於一整年的國民輻射劑量評估時間範圍，因時間相對短暫，粗估年有效劑量(E_{EXP})僅增加每年 0.0105 毫西弗(假設某民眾 1 年內觀光 8 小時，年有效劑量僅增加 1.31 微西弗/時*8 時)；金門縣為花岡岩地質，但本報告引用方法所選擇量測位置，輻射劑量率量測結果並無特殊；澎湖縣為玄武岩

地質，現有數據顯示，其地表輻射劑量最低。依據目前的偵測結果，經各縣市人口數及平均戶外輻射劑量率加權計算後，本研究測得之戶外平均輻射劑量率為每小時 0.051 微西弗，如表 2，若民眾完全於戶外活動，計算出戶外地表輻射造成之個人年有效劑量 (E_{EXP}) 為 0.45 毫西弗 ($0.051 \times 365 \times 24 \times 10^{-3}$)。

室內地表輻射部分，自民國 106 年至民國 110 年赴民眾住宅進行量測，建築形式包含大樓、公寓及透天型式的住宅，共偵測 50 戶，其中 48 戶為鋼筋混凝土，2 戶為加強磚造。實測結果顯示鋼筋混凝土高於加強磚造之建築，鋼筋混凝土建築的室內輻射劑量率平均值為每小時 0.107 微西弗，加強磚造建築的室內輻射劑量率平均值則為每小時 0.086 微西弗；加強磚造建物其室內隔間牆及主結構牆面較薄，室內平均加馬輻射劑量率較低，實測結果與理論推測趨勢相符。因臺灣地震發生頻率高，磚造建築已非建築主流，依據內政部民國 111 年底之房屋稅籍住宅類數量統計，我國目前房屋稅籍住宅構造主要以鋼筋混凝土者約占七成，加強磚造者約占 2 成，其餘的構造分類包含：磚、木、石造、鋼骨混凝土、鋼骨鋼筋混凝土及其他；表 3 為本報告參考內政部民國 111 年第四季之各類構造房屋住宅數量統計表【9】，表中的 RC(鋼筋混凝土)類包含鋼筋混凝土、鋼骨鋼筋混凝土及鋼骨混凝土等三類建築，與加強磚造類之建築依數量占比估算室內地表輻射劑量，兩者已涵蓋所有建築之 9 成以上，因其他構造之建築種類繁多且無量測資料，故暫不予估算。承上，本研究評估全國之室內平均輻射劑量率為每小時 0.092 微西弗，各縣市因建築構造比例不同，室內輻射劑量率介於每小時 0.062 微西弗(台東縣)至 0.102 微西弗(新北市、台北市)，加強磚造建築比例較高的縣市室內地表輻射劑量率會較低。綜上，若民眾完全於室內活動，計算出室內地表輻射造成之個人年有效劑量(E_{EXP})平均值為 0.603 毫西弗($0.092 \times 365 \times 24 \times 0.748 \times 10^{-3}$)。

表 2 各縣市地表輻射之劑量率與年有效劑量

縣市	偵測點數	地表輻射劑量率 ^b (uSv/hr)	地表輻射年有效劑量 (mSv)
新北市	32	0.057	0.499
台北市	16	0.057	0.499
桃園市	18	0.054	0.473
台中市	36	0.055	0.482
台南市	46 ^a	0.060	0.526
高雄市	45	0.059	0.517
宜蘭縣	12	0.055	0.482
新竹縣	13	0.051	0.447
苗栗縣	26	0.050	0.438
彰化縣	31	0.062	0.543
南投縣	18	0.064	0.561
雲林縣	20	0.056	0.491
嘉義縣	19	0.053	0.464
屏東縣	60	0.062	0.543
台東縣	30	0.041	0.359
花蓮縣	20	0.045	0.394
澎湖縣	4	0.043	0.377
基隆市	7	0.059	0.517
新竹市	3	0.046	0.403
嘉義市	3	0.057	0.499
金門縣	16	0.058	0.508
連江縣	14	0.066	0.578
全國	489 ^a	0.051	0.45

備註：a.劑量率與年有效劑量計算不含臺南市特殊地質區 8 處。

b.已乘上吸收劑量轉換加馬輻射劑量因子 0.7(天然核種且射源幾何形狀為偵檢器下方圓柱體型)，此欄地表輻射劑量率為加馬輻射劑量率(屬周圍等效劑量率)，此轉換因子在一般輻防用途且採用銨 137 標準射源校正時為 1。

表 3 各縣市不同構造房屋住宅數量及室內地表輻射

縣市	房屋住宅數量(戶數)				百分比(%)			地表輻射 劑量率 (uSv/hr)	*地表輻射 有效劑量 (mSv/yr)
	總數	RC 類	加強 磚造	其他	RC 類	加強 磚造	其他		
新北市	1680583	1514526	113605	52452	90.12%	6.76%	3.12%	0.102	0.671
台北市	902767	796614	81423	24730	88.24%	9.02%	2.74%	0.102	0.671
台中市	1094267	811274	200739	82254	74.14%	18.34%	7.52%	0.095	0.642
台南市	723085	455360	156492	111233	62.97%	21.64%	15.38%	0.086	0.625
高雄市	1106585	803499	217146	85940	72.61%	19.62%	7.77%	0.095	0.566
宜蘭縣	196988	101304	67522	28162	51.43%	34.28%	14.30%	0.085	0.622
桃園市	893840	668865	181009	43966	74.83%	20.25%	4.92%	0.098	0.558
新竹縣	224486	155043	45186	24257	69.07%	20.13%	10.81%	0.092	0.601
苗栗縣	208067	104893	59730	43444	50.41%	28.71%	20.88%	0.079	0.519
彰化縣	413678	198495	124528	90655	47.98%	30.10%	21.91%	0.078	0.510
南投縣	170560	77066	47197	46297	45.18%	27.67%	27.14%	0.073	0.476
雲林縣	242006	87799	74725	79482	36.28%	30.88%	32.84%	0.066	0.432
嘉義縣	176447	57052	57018	62377	32.33%	32.31%	35.35%	0.063	0.413
屏東縣	296559	121285	104019	71255	40.90%	35.08%	24.03%	0.075	0.489
台東縣	87443	27212	28909	31322	31.12%	33.06%	35.82%	0.062	0.409
花蓮縣	132689	62159	36390	34140	46.85%	27.43%	25.73%	0.074	0.487
澎湖縣	33668	11705	13107	8856	34.77%	38.93%	26.30%	0.071	0.468
基隆市	168184	137830	17878	12476	81.95%	10.63%	7.42%	0.097	0.636
新竹市	181727	140088	33426	8213	77.09%	18.39%	4.52%	0.099	0.646
嘉義市	109401	67687	23207	18507	61.87%	21.21%	16.92%	0.085	0.556
金門縣	23893	12363	9175	2355	51.74%	38.40%	9.86%	0.089	0.584
連江縣	3066	1899	117	1050	61.94%	3.82%	34.25%	0.070	0.456
全國	9069989	6414018	1692548	963423	70.72%	18.66%	10.62%	0.092	0.603

*備註:已考慮室內吸收劑量轉換加馬輻射劑量因子 0.748。

民眾在住宅室內或戶外皆會接受到地表加馬輻射，因此參考行政院主計總處自民國 87 年起辦理之「社會發展趨勢調查」，依家庭生活、社會參與、時間運用及健康安全等 4 項主題按年輪辦，其中「時間運用」報告，可作為每日生活所占時間比率分析，惟因該調查自 96 年起停辦，因此，能引用的最近期資料為其民國 93 年公布之「社會發展趨勢調查報告」【10】。該報告所提供之室內與戶外之占用因子如表 4 所示，共區分成 4 個年齡群。

表 4 室內與戶外之占用因子

年齡群	人口數 (107 年底)	每日生活所占時間比率		
		戶外	室內	
			家	工作或學校
未滿 15 歲	3,048,227	0.1	0.65	0.25
15~24 歲	2,871,374	0.23	0.44	0.33
25~64 歲	14,235,814	0.19	0.40	0.41
65 歲以上	3,433,517	0.15	0.85	
總人口數	23,588,932			

本研究以內政部民國 110 年底所公布的人口統計資料 (合計 23,264,640 人)，分縣市將上述 4 個年齡群之人口占比分別納入，考量不同年齡群之室內與戶外占用因子，先計算不同年齡群因活動時間差異造成的室內與戶外地表輻射，再考量各年齡群的總人數，即可算出集體有效劑量(S)，如表 5 所示。表 5 中的地表輻射之個人年有效劑量(E_{Exp})包含戶外地表輻射及室內地表輻射；其中，戶外地表輻射係由表 2 之各縣市之戶外地表環境輻射年有效劑量平均值與表 4 各年齡群戶外占用因子之乘積；室內地表輻射部分，

則是由表 3 之各縣市之室內地表環境輻射之年有效劑量平均值與表 4 各年齡群室內占用因子之乘積；兩者加總即可獲得不同年齡群之地表輻射之個人年有效劑量(E_{Exp})。

表 5 各縣市不同年齡群之地表輻射年有效劑量

縣市	總人口數* (人)	年齡群							
		未滿 15 歲		15~25 歲		25~65 歲		66 歲以上	
		E_{Exp} (毫西弗)	人口 占比 (%)	E_{Exp} (毫西弗)	人口 占比 (%)	E_{Exp} (毫西弗)	人口 占比 (%)	E_{Exp} (毫西弗)	人口 占比 (%)
新北市	3,995,551	0.857	11.53	0.805	9.93	0.821	61.49	0.837	17.05
台北市	2,480,681	0.857	12.59	0.805	8.78	0.821	57.73	0.837	20.91
桃園市	2,281,464	0.820	14.01	0.771	11.12	0.786	60.59	0.801	14.28
台中市	2,814,459	0.800	13.49	0.753	10.98	0.767	60.46	0.782	15.08
台南市	1,852,997	0.730	11.52	0.694	9.79	0.705	60.66	0.716	18.03
高雄市	2,728,137	0.801	11.33	0.761	9.96	0.774	60.39	0.786	18.33
宜蘭縣	449,062	0.723	11.39	0.693	10.50	0.703	59.51	0.712	18.60
新竹縣	580,503	0.767	15.73	0.721	11.31	0.735	59.32	0.749	13.64
苗栗縣	535,132	0.668	11.63	0.635	10.85	0.645	59.23	0.655	18.30
彰化縣	1,245,239	0.668	12.15	0.650	11.14	0.655	58.74	0.661	17.97
南投縣	479,595	0.629	10.29	0.619	10.64	0.622	58.93	0.625	20.13
雲林縣	664,092	0.569	10.58	0.558	11.04	0.561	58.25	0.565	20.12
嘉義縣	488,158	0.543	8.59	0.532	10.62	0.535	59.09	0.539	21.69
屏東縣	798,703	0.643	10.09	0.628	10.35	0.633	60.08	0.637	19.48
台東縣	212,551	0.528	11.11	0.503	10.80	0.511	59.35	0.518	18.74
花蓮縣	318,892	0.625	11.37	0.592	10.48	0.602	59.11	0.612	19.05
澎湖縣	107,223	0.601	9.92	0.569	11.81	0.579	60.01	0.589	18.26
基隆市	361,526	0.817	9.84	0.773	9.88	0.787	60.98	0.800	19.30
新竹市	452,473	0.818	16.27	0.758	10.95	0.777	58.63	0.795	14.16
嘉義市	262,924	0.719	12.66	0.687	11.49	0.697	58.16	0.707	17.69
金門縣	141,295	0.754	8.38	0.718	11.04	0.729	64.14	0.740	16.43
連江縣	13,983	0.607	10.21	0.603	10.83	0.604	64.96	0.605	14.00
全國	23,264,640	0.776	12.12	0.736	10.32	0.748	60.00	0.761	17.56

*資料來源:內政部 110 年人口統計年報；本報告整理。

各縣市地表輻射之集體有效劑量(S)及平均年有效劑量(E_{EXP})如表 6；將各年齡群之地表輻射之個人年有效劑量(E_{Exp})再乘上該年齡群之人口數即可獲得該年齡群之集體有效劑量(S)，不同縣市各年齡群之人口數為表 5 之總人口數乘上人口占比；四個年齡群集體有效劑量之加總即可得表 6 之集體有效劑量(S)。各縣市之集體有效劑量(S)介於每年 6.69 人-西弗(連江縣最低)至 2,559.16 人-西弗(新北市最高)，人口數較多及鋼筋混凝土建築占比較高的縣市會有較高的地表輻射劑量，全國之集體有效劑量(S)合計為 13,542.55 人-西弗。其中，室內地表輻射之集體有效劑量(S)為 11,521.28 人-西弗，占整體地表輻射的 85.1%；戶外地表輻射之集體有效劑量(S)為 2,021.27 人-西弗，占整體地表輻射的 14.9%。將全國之地表輻射造成之集體有效劑量總和除以總人口數，即可獲得地表輻射對國人造成個人平均年有效劑量，亦即國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.58 毫西弗。

本次調查評估之地表輻射所造成國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 0.58 西弗(包含戶外 0.09 毫西弗、室內 0.49 毫西弗)，與上次(民國 82 至 87 年)評估結果每年 0.64 毫西弗(包含戶外 0.07 毫西弗、室內 0.57 毫西弗)比較，本次調查結果，戶外地表輻射較上次高 0.02 毫西弗/年，室內地表輻射較上次低 0.08 毫西弗/年，地表輻射(含戶外及室內)之國民輻射劑量較上次低 0.06 毫西弗/年，推測造成差異之因素包含：(1)測量方法與設備不同、(2)量測位置不同、(3)空間吸收劑量轉換加馬輻射劑量因子改變。

表 6 地表輻射之集體有效劑量

縣市	集體有效劑量(人-西弗)			個人 年有效劑量 (毫西弗)
	室內地表輻射	戶外地表輻射	合計	
新北市	2206.491	352.666	2,559.16	0.641
台北市	1374.548	215.306	1,589.85	0.641
桃園市	1205.637	193.597	1,399.23	0.613
台中市	1450.390	234.613	1,685.00	0.599
台南市	864.344	157.426	1,021.77	0.551
高雄市	1397.999	253.024	1,651.02	0.605
宜蘭縣	206.424	40.967	247.39	0.551
新竹縣	287.521	45.363	332.88	0.573
苗栗縣	228.691	41.383	270.07	0.505
彰化縣	523.079	119.259	642.34	0.516
南投縣	188.032	47.577	235.61	0.491
雲林縣	236.375	57.612	293.99	0.443
嘉義縣	165.767	40.306	206.07	0.422
屏東縣	321.323	76.898	398.22	0.499
台東縣	71.529	13.499	85.03	0.400
花蓮縣	127.804	22.168	149.97	0.470
澎湖縣	41.243	7.209	48.45	0.452
基隆市	189.109	33.142	222.25	0.615
新竹市	241.613	31.740	273.35	0.604
嘉義市	120.461	23.122	143.58	0.546
金門縣	67.662	12.944	80.61	0.570
連江縣	5.235	1.452	6.69	0.478
全國	11521.276	2021.27	13,542.55	0.58

本報告之國內天然游離輻射中地表輻射所造成國民輻射劑量調查之執行結果，與 2009 年之美國 NCRP 第 160 號報告及 UNSCEAR 2008 年報告的全球民眾之個人平均有效劑量(E_{global})比較如表 7，本次評估的結果與其他報告差異之因素，主要在於室內之地表輻射劑量，可能造成差異的來源包含：(1)室內地表輻射量測方法不同，其他文獻所採用方法或量測設備均有差異(有些非實際量測而僅用粗估計算)，而導致無法直接逕行比較，因此「室內地表輻射量測方法不同」為造成差異因素之一。(2)量測位置地質特性不同(民國 87 年量測地點為台灣環島鐵路沿線)，地表輻射的來源為鈾系、釷系及鉀-40 等天然放射性核種所產生的伽馬輻射，所以各量測地點下方土壤岩石所含鈾系、釷系及鉀-40 之活度濃度不同會產生輻射劑量率不同的自然現象，因此「量測位置地質特性不同」為造成差異因素之一。(3)主要建築物構造不同。其中，因建物所導致地表輻射差異主要原因為「國內鋼筋混凝土型式之建築物所占比例較高」所造成，混凝土及紅磚皆含相對高活度濃度的鈾系、釷系及鉀-40 等天然放射性核種，木頭、鋼筋、強化玻璃等天然放射性核種含量極低，加上國內鋼筋混凝土型式建築物所占比例較高，因此「主要建築物構造不同」為造成差異因素之一。

表 7 地表輻射國民輻射劑量差異比較

單位：毫西弗/年

項目 範圍 /來源	戶外 地表輻 射	室內 地表 輻射	地表 輻射	方法或量測設備
本次評估	0.09	0.49	0.58 (E _{Taiwan})	純鍺偵檢器及二吋碘化鈉型 閃爍偵檢器
本中心民國 87 年版國民輻射 劑量評估報告	0.07	0.57	0.64	一吋碘化鈉型閃爍偵檢器及 熱發光劑量計
美國 NCRP 第 160 號報告 2009 年版	--	--	0.21 (E _{US})	純鍺偵檢器，The NURE Program，僅量測戶外(每 25kmx25km 區隔為一區域， 室內採 8nGy/h+0.59x「戶外 之空氣吸收劑量率」，單位 nGy/h)，木造與磚造屋比例較 高，資料為 1992 年
全球平均 UNSCEAR 2008 年版	0.07	0.41	0.48 (E _{global})	收集全球相關文獻， 進行數據分析，常見的範圍 在 0.3 至 1.0 毫西弗/年之間

詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-110-318Rev3 地表輻射國民輻射劑量評估-112 年修正版(附件二)。

(二) 宇宙射線

影響宇宙射線的主要因素為海拔高度，其次為地磁緯度變化及太陽週期等；國內緯度差異不大，因地磁緯度變化來造成宇宙射線的差異可忽略；太陽宇宙射線在高空大氣層就被吸收掉，對居住在地表附近的民眾亦可忽略【11】。

為獲得垂直高度的宇宙射線變化，本計畫共使用三項儀器，包含：(1) 高壓游離腔(廠牌：GE Reuter Stokes，型號：RSS-131ER)量測包括宇宙射線與地殼中天然放射性物質所造成的加馬輻射劑量；(2) 純鍺偵檢器(廠牌：ORTEC，型號：Micro-detective)量測來自地表放射性物質所造成之加馬輻射劑量【12】；(3) 球型中子偵檢器(廠牌：Berthold，型號：LB-6411 Pb)量測來自宇宙射線所造成之中子輻射劑量。高壓游離腔與純鍺偵檢器距離地面 1 公尺高量測，球型中子偵檢器設置於地面，各處均量測 1 小時，如圖 4 及圖 5。

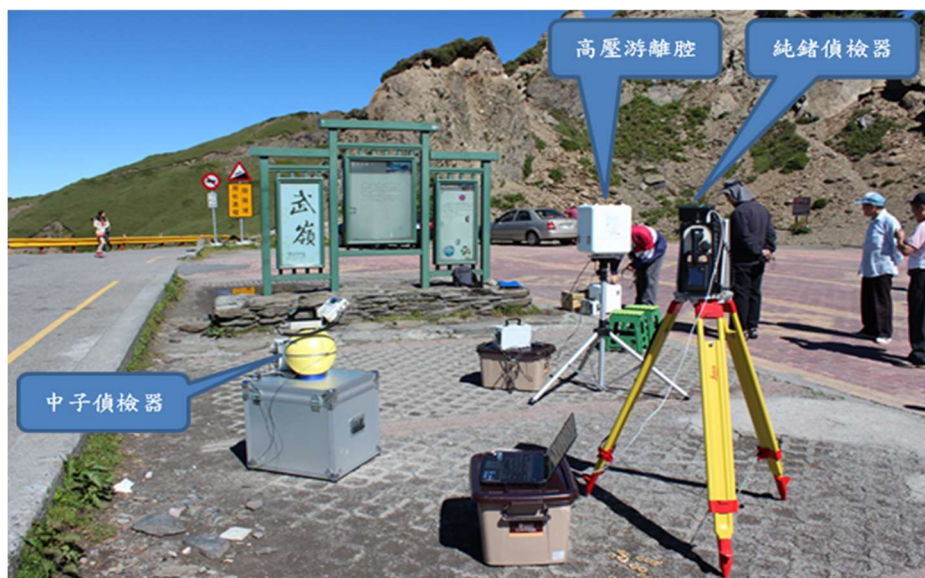


圖 4 宇宙輻射量測情形-武嶺停車場
(海拔高度 3263 公尺，非特殊地點僅挑選為示意圖)

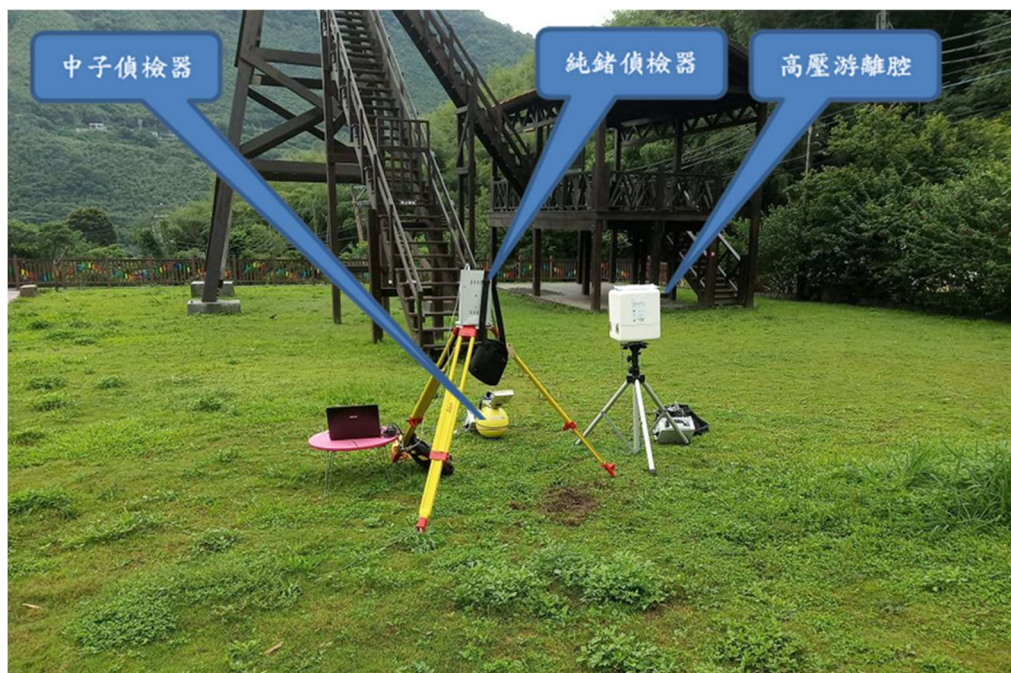


圖 5 宇宙輻射量測情形-樂信瓦旦紀念公園
(海拔高度 356 公尺，非特殊地點僅挑選為示意圖)

在每處量測點，純鉀偵檢器可測得地表天然放射性物質活度濃度，引用 UNSCEAR 2000 年報告所述地表放射性核種活度濃度轉換地表加馬輻射劑量率之計算方法，可計算出各處地表輻射之加馬輻射劑量率，此計算式為 $D = (0.462 \cdot A_{Ra} + 0.621 \cdot A_{Th} + 0.042 \cdot A_K) \cdot C$ ，其中 A_{Ra} 、 A_{Th} 和 A_K 為地表中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度(Bq/kg)； C 為空間吸收劑量與輻射劑量率轉換因子 0.7 (Sv/Gy)； D 為乾燥空氣環境下，離地表面 1 公尺處的加馬輻射劑量率($\mu\text{Sv/h}$)。若量測點之天然放射性物質鐳-226、釷-232 和鉀-40 有一項不存在，則該量測點視為非一般土壤地質(例如澎湖縣珊瑚礁地形上)，不列入本計畫範圍。

高壓游離腔可測得空氣曝露率，單位為毫侖琴/時(mR/h)；再乘上儀器劑量轉換因子 8.696，單位為微格雷/時/毫侖琴/時($\mu\text{Gy/h/mR/h}$)，可算出空

氣吸收劑量率，單位為微格雷/時($\mu\text{Gy/h}$)；再乘上吸收劑量率與輻射劑量率轉換因子 0.7(單位為 Sv/Gy)，可算出各處總加馬輻射劑量率，包含宇宙射線加馬輻射劑量率與地表加馬輻射劑量率，將總加馬輻射劑量率扣除地表加馬輻射劑量率，可算出宇宙射線加馬輻射所造成之輻射劑量率。球型中子偵檢器測得各處中子計數率，單位為計數/秒(CPS)；再乘上儀器劑量轉換因子 1.27 單位為微西弗/小時/計數率 ($\mu\text{Sv/h/CPS}$)，可算出各處中子輻射劑量率。最後，將各處宇宙射線加馬輻射所造成之輻射劑量率加上中子輻射劑量率，得到各處宇宙射線所造成之輻射劑量率。

自民國 102 至 110 年，在國內不同海拔高度量測游離輻射成分與中子宇宙射線，共測量 86 處，量測點的海拔高度從 2 至 3263 公尺，量測垂直高度的宇宙射線差異，分別計算各處宇宙射線加馬輻射所造成之輻射劑量率與中子輻射劑量率，得到海拔高度與宇宙射線游離輻射成分之回應曲線，以及海拔高度與中子宇宙射線之回應曲線，這兩組多項式如下。

海拔高度與宇宙射線游離輻射成分之關係：

$$\text{DRGIN} = 0.0384e^{0.0003H}$$

其中 DRGIN 為宇宙射線游離輻射之劑量率(單位：微西弗/時)；

H 為海拔高度(單位：公尺)；

海拔高度與中子宇宙射線之關係：

$$\text{DRNE} = 0.0065e^{0.0006H}$$

其中 DRNE 為中子宇宙射線劑量率(單位：微西弗/時)；

H 為海拔高度(單位：公尺)；

量測結果顯示，在海平面位置，宇宙射線游離輻射成分與中子宇宙射

線之劑量率分別為 0.0384 微西弗/時($\mu\text{Sv/h}$)與 0.0065 微西弗/時，海拔高度每上升 1500 公尺，宇宙射線劑量率增加 69%，其中包括宇宙射線游離輻射成分劑量率增加 57%，中子宇宙射線之劑量率增加 146%，如圖 6 及圖 7。

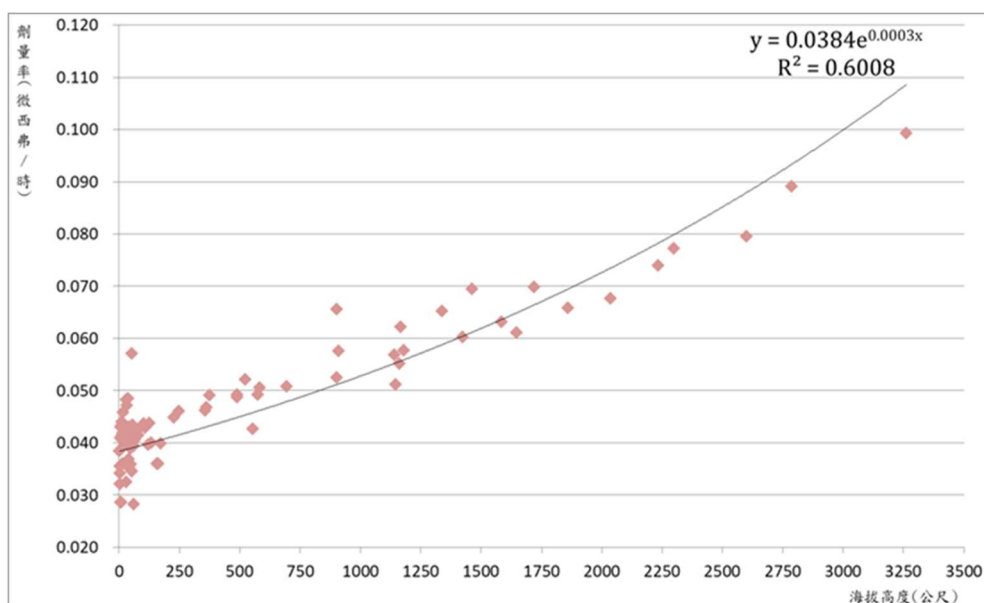


圖 6 宇宙輻射游離輻射成分劑量率與海拔高度關係
(本中心自民國 102 至 110 年期間量測結果)

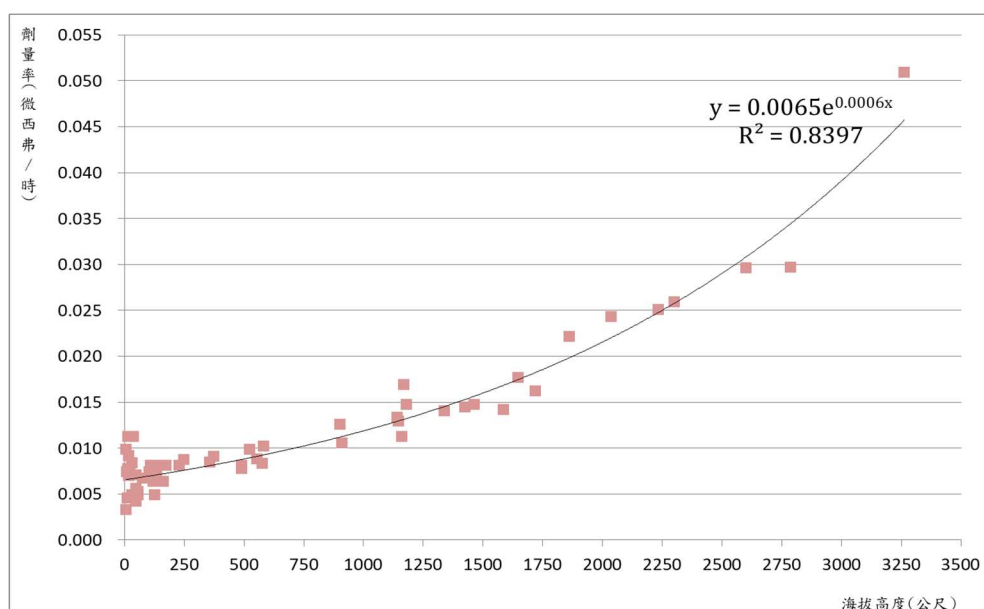


圖 7 中子宇宙輻射劑量率與海拔高度關係
(本中心自民國 102 至 110 年期間量測結果)

利用以上海拔高度與宇宙射線劑量率的關係、各縣市人口數、及各縣市人口居住密集區的平均海拔高度，先算出各縣市的集體有效劑量，加總後除上總人口數，即可計算出宇宙射線所造成國民輻射劑量，算式如下：
宇宙射線之國民輻射劑量=各縣市宇宙射線所造成集體有效劑量之總和/總人口數，人口密集居住區平均海拔高度為各縣市政府官網上所述平均海拔高度加上 3 層樓(10 公尺)計算，若無法找到平均海拔高度的縣市，改以縣市中心火車站海拔高度加上 3 層樓(10 公尺)計算。

宇宙射線所造成之每人年平均有效劑量(E_{EXP})如表 8，包含戶外中子宇宙射線及游離輻射成分宇宙射線，兩者所造成之個人年有效劑量(E_{EXP})分別為 0.059 毫西弗及 0.342 毫西弗如表 8；以上加總後，戶外宇宙射線造成每人平均年有效劑量為 0.401 毫西弗，此劑量僅為民眾於戶外近地面活動時所接受宇宙射線之國民輻射劑量，未包含民眾因出國旅遊搭乘航空器所接受的高空宇宙射線之輻射劑量。

民眾在室內也會接受到宇宙射線，考慮建築物對宇宙射線之屏蔽，引用美國 NCRP 第 160 號報告，宇宙射線在室內的輻射劑量率為戶外的 80%；另外，行政院主計總處自民國 87 年起辦理「社會發展趨勢調查」，依家庭生活、社會參與、時間運用及健康安全等 4 項主題按年輪辦，其中「時間運用」報告，可作為每日生活所占時間比率分析，惟因該調查自民國 96 年起停辦，因此，能引用的最近期資料為民國 93 年社會發展趨勢調查報告【13】，本報告所提供之室內與戶外之占用因子如表 4 所示，區分成 4 個年齡層。再收集內政部所公佈民國 107 年底 4 個年齡層之人口數(合計 23,588,932 人)，分別納入不同年齡層之室內與戶外占用因子，計算在室內中子宇宙射線及游離輻射成分宇宙射線所造成國民每人年平均有效劑量。

表 8 中子宇宙射線(戶外)與游離輻射成分宇宙射線(戶外)所造成各縣市國民之集體劑量

縣市別	人 口 數 (108 年 1 月 底)	人口密集居住區 平均海拔高度 (公尺)	中子宇宙射線		游離成分宇宙射線	
			平均劑量率 (微西弗/時)	集體劑量 (人-西弗/年)	平均劑量率 (微西弗/時)	集體劑量 (人-西弗/年)
新北市	3,997,189	66	0.006763	236.7937	0.0392	1371.4786
臺北市	2,666,908	34	0.006634	154.9834	0.0388	906.3025
桃園市	2,223,733	94	0.006877	133.9659	0.0395	769.4228
臺中市	2,806,406	69	0.006775	166.5512	0.0392	963.7752
臺南市	1,883,723	37	0.006646	109.6670	0.0388	640.7270
高雄市	2,773,607	23	0.006590	160.1237	0.0387	939.4570
宜蘭縣	455,035	37	0.006646	26.4913	0.0388	154.7750
新竹縣	557,349	40	0.006658	32.5063	0.0389	189.7466
苗栗縣	548,403	24	0.006594	31.6790	0.0387	185.8070
彰化縣	1,277,176	18	0.006571	73.5121	0.0386	431.9478
南投縣	496,606	261	0.007602	33.0704	0.0415	180.6561
雲林縣	685,354	51	0.006702	40.2367	0.0390	234.0965
嘉義縣	506,559	46	0.006682	29.6506	0.0389	172.7661
屏東縣	824,587	21	0.006582	47.5473	0.0386	279.1309
臺東縣	218,691	26	0.006602	12.6480	0.0387	74.1402
花蓮縣	327,788	23	0.006590	18.9236	0.0387	111.0261
澎湖縣	104,511	17	0.006567	6.0119	0.0386	35.3356
基隆市	369,987	110	0.006943	22.5044	0.0397	128.6333
新竹市	445,990	36	0.006642	25.9492	0.0388	151.6529
嘉義市	268,579	61	0.006742	15.8630	0.0391	92.0142
金門縣	139,484	10	0.006539	7.9900	0.0385	47.0612
連江縣	13,079	40	0.006658	0.7628	0.0389	4.4527
總 計	23,590,744			1,387.4315		8064.4053

表 9 中戶外游離成分宇宙射線集體劑量係由表 9 各年齡層人口數乘上戶外占用因子，再乘上戶外游離輻射成分宇宙射線造成國民每人年平均有效劑量計算，計算式說明如下： $3,048,227 \text{ (人)} \times 0.1 \times 0.366 \text{ (毫西弗)} = 111,565 \text{ (人-毫西弗)}$ 。表 10 中戶外游離成分宇宙射線國民輻射劑量係由表 10 各年齡層之戶外游離成分宇宙射線集體劑量總和除以表 9 各年齡層總人口數，計算式說明如下： $1,531,736 \text{ (人-毫西弗)} / 23,588,932 \text{ (人)} = 0.065 \text{ (毫西弗/年)}$ 。室內中子宇宙射線所造成國民每人平均有效劑量為 0.041 毫西弗/年，室內游離輻射成分所造成國民每人平均有效劑量為 0.241 毫西弗/年。

表 9 室內與戶外之宇宙射線集體劑量

單位：人-毫西弗

年齡層	戶外		室內	
	游離成分宇宙射線集體劑量	中子宇宙射線集體劑量	游離成分宇宙射線集體劑量	中子宇宙射線集體劑量
未滿 15 歲	104,249	17,985	803,269	138,268
15~24 歲	225,862	38,965	647,368	111,432
25~64 歲	925,043	159,583	3,376,280	581,163
65 歲以上	176,139	30,387	854,534	147,092
總計	1,431,294	246,919	5,681,454	977,955

表 10 宇宙射線國民輻射劑量

單位：毫西弗/年

戶外宇宙射線		室內宇宙射線	
游離成分宇宙射線國民輻射劑量	中子宇宙射線國民輻射劑量	游離成分宇宙射線國民輻射劑量	中子宇宙射線國民輻射劑量
0.061	0.010	0.241	0.041
0.071		0.282	
0.353			

中子宇宙射線造成國民每人年平均有效劑量為 0.051 毫西弗，游離輻射成分宇宙射線造成國民每人年平均有效劑量為 0.302 毫西弗；室內宇宙射線造成國民每人年平均有效劑量為 0.282 毫西弗，戶外宇宙射線造成國民每人年平均有效劑量為 0.071 毫西弗；總計，宇宙射線共造成國民每人年平均有效劑量為 0.35 毫西弗。

本次調查評估國內天然游離輻射中宇宙射線所造成國民輻射劑量調查之執行結果，與上次(民國 82 至 87 年)及美國 NCRP 第 160 號報告及 UNSCEAR 2000 報告之比較如表 11。本次調查結果與前次差異之因素包含：(1)測量方法與設備不同、(2)量測位置海拔高度不同。

本次調查與美國 NCRP 第 160 號報告及 UNSCEAR 2000 報告相比亦有差異，推測造成差異之因素包含：(1)量測方法不同、(2)量測位置之緯度不同、(3)量測位置之海拔高度不同。詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-112-301Rev2 宇宙輻射國民輻射劑量評估(附件三)。

表 11 宇宙射線國民輻射劑量與國外及國內往年比較

單位：毫西弗/年

項目 範圍/來源	中子 宇宙射線	游離成分 宇宙射線	宇宙射線 國民輻射劑量	方法或量測設備
本次評估	0.051	0.303	0.35 (E _{Taiwan})	高壓游離腔及純鍺偵檢器
本中心民國 87 年版國民輻射 劑量評估報告	0.015	0.235	0.25 (E _{Taiwan})	21 公升標準型常壓游離腔及 3 吋球型點化鈉偵檢器
美國 NCRP 第 160 號報告 2006 年版	--	--	0.33 (E _{US})	電腦程式 PLOTINUS(O'Brien 開發 2005 年版)模擬計算 (太陽活動十一年週期時間內 之宇宙射線平均值)
全球平均 UNSCEAR 2008 年版	0.1	0.28	0.38 (E _{global})	收集全球相關文獻，進行數據 分析

(三) 攝食曝露

食品中放射性核種造成的體內曝露劑量之評估，必須知道食品中的放射性物質活度，再由食品攝食量推算經由食品嚥入的活度，以及不同核種的體內劑量轉換因子，進而推算食品所造成的體內劑量。

本計畫彙整本中心民國 106-110 年間「台灣地區放射性落塵與食品調查半年報」報告中之檢測數據為統計母數；劑量轉換因子採用現行之游離輻射防護安全標準公告之劑量轉換因子，且依不同年齡群評估；曝露情境的假設引用衛福部的資料，包括國健署之「國民營養健康狀況變遷調查」，及攝食情境採用衛生福利部食藥署所建置之「國家攝食資料庫」所提供的國人飲食習慣的調查結果，以更貼近國人的飲食習性，完成鉀-40、鈾-210、鈾-232、鈾-238、銻-137 及銻-90 等 6 個核種之體內劑量評估。

1. 體內曝露劑量評估方法

(1) 全身計測法

人體因攝食累積鉀-40，且因生理代謝功能，人體會自我調節保持一定比例之鉀濃度，以維持身體正常運作；因此，UNSCEAR 2000 報告、NCRP 第 160 號報告及日本環境省的「放射線による健康影響等に関する統一のな基礎資料」【14】及國際原子能總署(IAEA)在 2016 年出版的「Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water」報告【15】，都是以全身計測的方式推算食入鉀-40 的體內曝露劑量。依據 UNSCEAR 2000 報告及 IAEA 報告評估結果，因鉀-40 體內曝露造成全球成人之個人年有效劑量(E_{global})為 0.165 毫西弗。日本在評估核種之體內劑量評估已自 2011 年起改採攝食法做推算，但評估鉀-40 時，鉀-40 之每日攝取的含量係採定值，以鉀的每日必須攝取量(2.64 克/天)推算出之鉀-40 含量(81.5 貝克/天)，仍近似於全身計測的做法，評估結果算出日本

因鉀-40 造成體內曝露之國民輻射劑量(E_{JP})為 0.18 毫西弗。

美國 2009 年出版之 NCRP 160 號報告經由全身計測法推算出，整體族群之鉀-40 體內曝露之平均有效劑量(E_{US})為每年 0.136 毫西弗，並進一步分析不同性別、年紀、身體質量指數(BMI)與鉀-40 體內劑量關係，獲得經驗公式如下：

男性的鉀-40 體內曝露之年有效劑量 E_{K-40} (單位:毫西弗/年)

$$E_{K-40} = 0.0885(2.946 - 0.0062 \times \text{年齡} - 0.0311 \times BMI)$$

女性的鉀-40 體內曝露之年有效劑量 E_{K-40} (單位:毫西弗/年)

$$E_{K-40} = 0.0876(2.5 - 0.00512 \times \text{年齡} - 0.0292 \times BMI)$$

上述經驗公式適用於 14 歲以上身體組成和成年人相當的族群，且歐洲白人與亞洲人間無族群差異【16】。因此，鉀-40 之體內曝露劑量評估會引用美國 NCRP 160 號報告公式做法進行評估。身體質量指數 (BMI) 部分，本計畫引用衛生福利部國民健康署委託中央研究院生物醫學科學研究所潘文涵教授執行之「國民營養健康狀況變遷調查(民國 102-105 年)」研究計畫成果報告【17】，有關國人不同性別、年齡之身體質量指數 (BMI) 平均值之調查結果(如表 12)，推斷我國 16 歲以上不同年齡國人之鉀-40 體內曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})。

表 12 國人不同性別、年齡別之身體質量指數 (BMI)

年紀	男性	女性	全體
2 個月-3 歲	16.5	15.7	16.1
4-6 歲	15.6	15.4	15.5
7-12 歲	18.9	18.1	18.5
13-15 歲	20.5	20.4	20.5
16-18 歲	21.2	22.1	21.7
19-44 歲	24.6	23	23.8
45-64 歲	25	24	24.5
65-74 歲	25.1	24.6	24.9
>75 歲	24.3	24.8	24.6

資料來源：國民營養健康狀況變遷調查(民國 102-105 年)；本報告整理

(2) 攝食法

攝食法是 ICPR 基於輻射防護目的所發展的個人劑量評估方法，與國民輻射劑量評估之目的不同；輻防劑量則以嚥入活度為基礎，利用 ICRP 的劑量轉換因子等數據，計算分齡參考人之約定有效劑量。國民輻射劑量的需求是估算國人攝食所導致之約定有效劑量年平均値，應以核種在組織中之活度(可由全身計測器度量)為基礎，計算不同年齡群之個人約定有效劑量的年平均値。若採用 ICRP 之攝食法評估體內曝露劑量方法評估國民輻射劑量，針對長半化期天然放射性核種(鉀-40、鈾系及鈾系之核種等)之攝食體內曝露，可能會有高估的情形。

嚥入放射性核種所造成之體內曝露劑量，計算公式如下

$$\sum A_i \times M_i \times F_i = E$$

A_i ：各類消費食品所含該核種之活度濃度(Bq/kg)

M_i ：各類消費食品之國人平均年攝食量(kg)

F_i ：攝食造成全身有效體內器官劑量轉換有效劑量之劑量轉換因子
(Sv/Bq)

E：國人每人因攝食各類消費性食品中所含放射性物質造成之國民輻射年劑量(mSv/y)

本報告所用之劑量轉換因子係使用游離輻射防護安全標準【18】附表三之三，在計算不同年齡群的吸入劑量時，可依其年紀選用不同之劑量轉換因子進行體內曝露劑量之估算，如表 13。

表 13 攝食之劑量轉換因子

單位:Sv/Bq

年紀 核種	<1	1-2	2-7	7-12	12-17	>17
鈾-232	4.60E-06	4.50E-07	3.50E-07	2.90E-07	2.50E-06	2.30E-07
鈾-238	3.40E-07	1.20E-07	8.00E-08	6.80E-08	6.70E-08	4.50E-08
銩-137	2.10E-08	1.20E-08	9.60E-09	1.00E-08	1.30E-08	1.30E-08
銩-90	2.30E-07	7.80E-08	4.70E-08	6.80E-08	8.00E-08	2.80E-08
鈾-210	2.60E-05	8.80E-06	4.40E-06	2.60E-06	1.60E-06	1.20E-06

本報告用以評估各核種吸入劑量之各類消費食品檢測數據，主要是原能會輻射偵測中心在民國 106-110 年間執行台灣環境輻射監測計畫之食品檢測數據。為評估國民輻射劑量，因此，納入評估之食品數據亦以國人主要消費之國產農特產品為主，數據來源包括「台灣地區食品放射性含量偵測計畫」及「台灣海陸域環境輻射調查計畫」；另為探討國人吸入鈾-210 部份的劑量，民國 110、111 年進一步針對國人主要消費食品中的魚、豬、牛、雞、羊肉及其內臟進行鈾-210 放射性核種含量分析之專案計畫；相關數據均已收錄在民國 106-110 年之「台灣地區放射性落塵與食品調查半年報」之歷年成果報告【19-28】中並於原能會網站(<https://www.aec.gov.tw>)上公開。

「台灣地區食品放射性含量偵測計畫」主要是監測台灣地區國人主要民生消費食品中的放射性核種含量，包含稻米、麵粉、黃豆、高麗菜、地

瓜、馬鈴薯、花椰菜、鳳梨、香蕉、柑橘、魚、豬肉、牛肉、雞肉、蛋、及鮮奶等 16 項，依區域選定北、中、南、東共 5 個代表城鄉地區(宜蘭、台北、台中、高雄、台東)，偵測中心每年分上、下半年赴消費市場購買新鮮食品進行抽樣，再以標準方法進行放射性含量分析；除了 16 大類之主要消費食品外，偵測中心也會不定期購買具代表性的其他農特產品進行檢測。綜整民國 106 年至民國 110 年之「台灣地區食品放射性含量偵測計畫」，21 類農產品之歷年食品檢測數量共計有 808 個樣本，統計結果如表 15。「台灣海陸域環境輻射調查計畫」中有關海域部分，係依據台灣周邊海域輻射背景數據，並參考鄰近國家之海洋輻射監測方式及考量台灣周邊海域洋流狀況，訂定長期監測計畫內容，該計畫完成之海產品檢測共計 529 件(海水魚 415 件、藻類 18 件、甲殼類 46 件、貝類 35 件、頭足類 15 件)；陸域部分則包含台灣地區之土壤及稻米放射性核種含量背景調查，偵測中心與農委會農試所合作，由農試所提供台灣西部桃園至台南所種植之稻米樣本，分析稻穀、稻殼及糙米之放射性物質含量，本報告主要納入糙米部分的樣本，共計 47 件。鈷-210 進行專案採樣，共計 97 樣品。綜整上述食品檢測結果，共計有 1,384 個食品樣本，另針對上述食物樣品之檢測結果如表 14、表 15。

表 14 台灣地區食品檢測結果

單位：貝克/公斤(Bq/kg)

食品種類		鉀-40	銫-137	釷系列	鈾系列	鐳-90
稻米		49.86	0	0	0.031	0.019
麵粉		49.12	0	0	0.005	0.031
雜糧		94.50	0	0	0	-
豆類		536.85	0.036	0	0	0.173
雞肉		119.96	0.002	0	0	0.014
豬肉		115.48	0.011	0	0.007	0.002
牛肉		115.90	0.026	0.006	0.036	0.010
蛋類		49.57	0	0.004	0.053	0.014
牛奶		57.43	0	0	0.022	0.017
蔬菜	其他蔬菜	109.45	0.002	0	0.005	0.017
	根菜類	153.46	0.003	0	0.056	0.010
	菇類	106.22	0	0	0	-
	海菜類	93.01	0.003	0.130	0.191	-
水果	漿果類	88.24	0	0	0.032	0.012
	柑橘類	61.03	0.005	0	0.022	0.020
	其他水果	94.65	0	0	0	0.019
水產品	淡水魚類	124.01	0.012	0.001	0.012	0.008
	海水魚類	147.53	0.166	0.0004	0.036	0
	貝類	60.44	0.002	0.020	0.046	-
	甲殼類	79.97	0.004	0.004	0.051	-
	頭足類	78.37	0	0.005	0	-

表 15 食品鈷-210 之檢測結果

食物種類	放射性核種活度濃度(Bq/kg)			樣本數 (件)
	範圍	平均值 (all)	平均值 (去極值)	
雞肉	ND-0.26	0.12	0.1	4
雞內臟	ND-3.51	0.68	0.148	6
牛肉	ND-0.2	0.1	0.1	2
牛內臟	0.28-0.58	0.43	0.43	3
豬肉	ND-0.97	0.43	0.33	3
豬內臟	ND	ND	ND	4
羊肉	ND-0.04	0.04	0.04	2
羊內臟	ND-0.04	0.04	0.04	2
淡水魚肉	0.51-1.58	1.05	1.05	2
淡水魚內臟	2.78-242.81	84.2	7	3
鹹水魚肉	ND-112.46	9.77	8.02	46
鹹水魚內臟	15.72-755.85	190.83	147.5	11
頭足類	1.26-11.08	6.17	6.17	2
貝類	18.92-75.95	32.4	18.92	3
甲殼類	8.29-184.3	75.28	54.26	4

另為建置符合國人飲食習慣的攝食情境，本計畫以衛福部食藥署「國家攝食資料庫」之 2022 年公告之 108 年調查報告【29】為基礎，該攝食調查共分成 0-3 歲、3-6 歲、6-12 歲、12-16 歲、16-18 歲、16-65 歲及 65 以上歲等 7 個年齡群，攝食調查是依據該資料庫之「106 年國家攝食資料庫食物分類表」及「國民營養調查食物分類原則」進行。本計畫先盤整民國 106-110 年檢測之農產品種類品項，在進行國家攝食資料庫之食物分類品項的比對和歸類，最後以 21 個食品種類（表 16 第一欄）做為為嚥入評估之攝食情境，本報告採用 108 年調查報告中「食物品項攝食量計算結果」之平均值，並以每日攝食量之平均值乘上 365 日方式，直接將每日攝食量換算成年攝食量，所得之國人各年齡群攝食情境如表 16。本報告採用的攝食情境能反映出各個年齡群的攝食特性，評估結果應更能呈現全國各年齡群在嚥入途徑之國民輻射劑量。

表 16 國人各年齡群之年攝食量

單位:公斤/年

食品種類		攝食量 (資料庫分類)	0-3 歲	3-6 歲	6-12 歲	12-16 歲	16-18 歲	19-65 歲	>65 歲
	稻米	米類及製品	17.01	29.32	35.57	38.03	35.3	39.92	49
	麵粉	麥類及製品	7.11	13.48	20.31	24.48	27.39	22.56	20.91
	雜糧	雜糧類及製品	1.12	2.77	2.75	2.28	2.57	2.46	1.09
	豆類	豆類及製品、植物油	10.67	20.89	24.43	29.69	29.5	40.31	30.46
	雞肉	禽類及製品	3.34	6.34	11.23	12.34	13.36	11	3.85
	豬肉	豬及製品	7.46	21.24	28.32	32.38	31.96	30.94	21.67
	牛肉	牛及製品	0.3	1.34	3.17	5.45	6.22	3.91	1.45
	蛋類	蛋及製品	7.39	15.85	21.08	23.55	22.59	17.55	10.38
	奶類	鮮奶及製品	27.86	43.13	35.62	30.57	27.23	19.49	10.15
蔬菜	其他蔬菜	包菜、小菜及其他	15.34	34.55	48.63	50.66	47.71	82.43	103.71
	根菜類	根菜及製品	6.1	14.3	17.69	17.61	18.59	22.8	25.92
	菇類	菇類及製品	0.79	2.22	2.11	1.86	1.81	3.43	2.64
	海菜類	藻類、海菜及製品	0.32	0.83	1.08	1.04	0.84	1.12	0.66
水果	漿果類	大小漿果及製品	12.13	13.82	14.63	12.49	13.48	28.65	30.51
	柑橘類	柑橘及製品	1.15	2.47	2.28	3.37	2.81	4.97	4.49
	其他水果	其他水果	8.4	10.66	10.38	9.81	12	17.2	16.22
水產品	淡水魚類	淡水魚	0.44	0.56	0.81	0.81	1.11	1.51	2.45
	海水魚類	海水魚及魚類製品	5.16	6.69	7.71	8.01	8.37	12.28	14.61
	貝類	貝類及製品	0.51	0.71	0.97	0.8	1.22	1.23	0.61
	甲殼類	甲殼類及製品	1.06	1.99	2.66	3.18	3.14	3.16	1.76
	頭足類	頭足類及製品	0.11	0.22	1.01	1.23	2	1.89	0.77
總攝食量			133.77	243.38	292.44	309.64	309.20	368.81	353.31

資料來源: 「國家攝食資料庫」民國 108 年調查結果; 本報告整理。

2. 體內曝露之個人平均有效劑量

(1) 鉀-40

鉀-40 在不考量各年齡及性別之組成比重，以國人 BMI 值推算出 16 歲以上成人之鉀-40 之體內劑量，男性和女性的鉀-40 體內曝露之年有效劑量(E_{EXP})平均分別為 0.161 及 0.132 毫西弗/年。

(2) 鈷系及鈾系元素

加馬計測的結果，大部分食品都測不到的鈷系及鈾系核種。1,384 個食品樣本僅有 8 個樣本測得鈷系核種，是在牛肉、雞蛋及海產品中的少數樣本測得，且含量都偏低。大部分食品中的鈾系元素之含量都非常低且不易測得，1,384 個食品樣本僅有 56 個樣本測得，包括根菜類、蛋類、甲殼類、貝類是較易測得鈾系列活度濃度的食品種類；其中，根菜類及海菜類的鈾-238 含量較高，這個結果與國外文獻類似。

日本的國民輻射劑量研究【30】發現，日本民眾因食品嚥入鈷-210 的個人年有效劑量(E_{JP})為 0.73 毫西弗，是貢獻最多有效劑量的核種，占了總攝食劑量的 91%，主要原因是日本人比歐美人消費了更多魚類和貝類，而魚貝類因鈷-210 含量高，也因此，日本人經由食品嚥入的體內暴露劑量會較歐美人高。日本因海產類的攝食量大而有較高的鈷-210 攝食劑量，考量台灣民眾的攝食特性與日本相近，海鮮的食用量高且亦有食用內臟的習慣，為使國民輻射劑量評估結果更完整，本中心自民國 110 年起針對國人主要消費食品中的魚類、頭足類(如:花枝)、貝類、甲殼類(如:蝦蟹)等水產食品及豬、牛、雞、羊等禽畜類肉品及其內臟進行專案採樣，進一步探討國人嚥入-210 部份的嚥入劑量；民國 110、111 年分別完成 63 件及 34 件食品之鈷-210 放射性核種含量分析，共計完成 97 件。

97 個樣品中有 14 件小於儀器最低可測活度濃度(MDA 為 0.04 貝克/公斤)，以禽畜類動物肉品及其內臟類的樣本為主，4 個豬內臟(豬肝)樣本的鈾-210 活度濃度都小於儀器最低可測活度濃度；活度濃度超過 100 貝克/公斤的樣本有 11 件(110 年 8 件及 111 年 3 件)，都是屬水產品類的樣本，以魚類的內臟為主，涵蓋海水魚及淡水魚，而海水魚的內臟又高於淡水魚；另外，還有丁香魚及秋刀魚各 1 個樣本和 2 個甲殼類樣本測得活度濃度超過 100 貝克/公斤。整體而言，海鮮類之肉品及其內臟之鈾-210 放射性核種含量高於禽畜類動物之肉品及其內臟；水產品的部分，海水類水產品的鈾-210 放射性核種含量高於淡水類水產品，魚內臟會高於魚肉；陸域動物部分，國人常食用的禽畜類肉品包含豬、牛、羊、雞，又以羊肉及其內臟之鈾-210 放射性核種含量較其他品項的禽畜類肉類為高，除了豬內臟以外，禽畜類動物內臟的鈾-210 活度濃度也都會高於肉品本身。

為估算因攝食造成之鈾-210 之個人年有效劑量(E_{EXP})，本報告將 97 個樣本區分為雞肉、雞內臟、豬肉、豬內臟、牛肉、牛內臟、羊肉、羊內臟、淡水魚、淡水魚內臟、海水魚、海水魚內臟、頭足類、貝類及甲殼類等 15 類，以分別評估因攝食造成之個人年有效劑量(E_{EXP})；另考量整體之檢測數量較少，部分食品種類之鈾-210 放射性核種含量差異大，為求慎重，樣本數大於 2 個的品項，鈾-210 活度濃度會採去極值(最大值、最小)再取平均的方式處理後，再進行攝食劑量的計算。另考量動物內臟之攝取因人而異，故以食用與否兩個情境分別評估再取其平均；衛福部「國家攝食資料庫」之調查結果可個別提供各項禽畜類動物(豬、牛、雞、羊)等肉類及內臟之攝食量，因此，豬、牛、雞、羊等禽畜類動物產品可直接分別計算食用肉類及內臟的個別劑量；但該攝食資料庫並無法分別提供魚肉及魚內臟部分的每日攝食量，因此，魚肉及魚內臟水產品類的估算以攝食情境區分，分別假設只吃肉(只吃魚肉、不吃魚內臟)及含吃內臟(會吃魚肉及魚內臟都

吃)等兩個情境進行攝食劑量之估算，並假設有食用魚內臟習慣的人之食用頻次為每周 1 天；魚肉及魚內臟比例參考相關文獻【31、32】，食用魚以魚內臟比例為 6-10%(以 6%計)、魚肉比例 40-60%(以 60%計)之重量比例加權後再做評估。

劑量轉換因子分成小於 1 歲、1-2 歲、2-7 歲、7-12 歲、12-17 歲及大於 17 歲等 6 個不同年齡群，「國家攝食資料庫」之攝食情境可區分為 0-3 歲、3-6 歲、6-12 歲、12-16 歲、16-18 歲、16-65 歲及 65 以上歲等 7 個年齡群；經交叉配對劑量轉換因子及所適用的攝食情境後，可分成小於 1 歲、2-3 歲、3-6 歲、6-7 歲、7-12 歲、12-16 歲、16-17 歲、17-18 歲及 19-65 歲、大於 65 歲等 11 個年齡群分別推算吸入劑量。評估結果，各年齡群因吸入鈾-232 所造成之體內曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})介於每年 7.06×10^{-6} 到 3.0×10^{-5} 毫西弗；鈾-238 部分，各年齡群因吸入所造成體內曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})介於 2.22×10^{-4} 到 9.43×10^{-4} 毫西弗/年。

國人將豬、牛、羊、雞等禽畜類動物之內臟作為日常食材是相當普遍的，但動物內臟之食用習慣因人而異，為估算吸入途徑之個人年有效劑量(E_{Taiwan})，以食用與否兩個情境分別評估再取其平均；本報告以只吃肉類(只吃肉、不吃內臟)及有吃內臟習慣(肉及內臟都會吃)等兩個情境來區分不同年齡群之年攝食劑量，計算結果分別為 0.009 到 0.072 毫西弗/年及 0.009 到 0.073 毫西弗/年。水產品部分，國人雖有食用魚類內臟的習慣，但並非所有魚種的內臟都會被食用，且可食用的魚類內臟也不像豬牛羊雞這類陸域動物之內臟容易取得，故另假設有食用魚內臟習慣的人之食用頻次為每周 1 天。另考量國人魚類內臟之攝取因人而異，本報告以只吃動物肉類(只吃肉、不吃內臟)及有吃內臟習慣(肉及內臟都會吃)等兩個情境來區分不同年齡群之年攝食劑量，計算結果分別為 0.278 到 2.856 毫西弗/年及 0.310 到 3.100 毫西弗/年。為評估國民輻射劑量，本報告另取兩個攝食情境之平均值

計算出，國人各族群吸入鈾-210 之個人年有效劑量(E_{EXP})為 0.303 到 3.050 毫西弗/年。

(3) 人造核種

大部分食品樣本都測不到銫-137，即便測到銫-137 含量也都非常低；經統計，1,384 個食品樣本中，有 371 個樣本測到銫-137，大多是在海水魚類的樣本中檢出，約占了 91%。因銥-90 是屬於純β核種，其分析需要複雜的化學萃取程序，故分析的食品種類及樣品數都較少，如：玉米、菇類、海菜類、貝類、甲殼類及頭足類的相關樣本都沒有進行過銥-90 分析；民國 106 至民國 110 年累計之銥-90 食品檢測樣本共計 319 個，計有 116 個樣本測到銥-90。

劑量轉換因子分成小於 1 歲、1-2 歲、2-7 歲、7-12 歲、12-17 歲及大於 17 歲等 6 個不同年齡之年齡群，「國家攝食資料庫」之攝食情境可區分為 0-3 歲、3-6 歲、6-12 歲、12-16 歲、16-18 歲、16-65 歲及 65 以上歲等 7 個族群；經交叉配對劑量轉換因子及所適用的攝食情境後，可分成小於 1 歲、2-3 歲、3-6 歲、6-7 歲、7-12 歲、12-16 歲、16-17 歲、17-18 歲及 19-65 歲、大於 65 歲等 11 個年齡群分別推算吸入劑量。

評估結果，各年齡群經由日常飲食吸入銫-137 所造成之年攝食劑量(E_{EXP})介於 1.34×10^{-5} 到 5.50×10^{-5} 毫西弗/年；銥-90 部分，不同年齡群之因吸入銥-90 所造成之體內曝露個人年攝食劑量(E_{EXP})介於 1.72×10^{-4} 到 8.42×10^{-4} 毫西弗/年。

3. 國民輻射劑量評估

本中心前版(民國 87 年版)之國民輻射劑量評估，體內曝露的評估係參考聯合國原子輻射影響科學委員會 (UNSCEAR) 及日本 1992 年版的「日本生活環境放射線 (国民線量の算定)」的作法，主要以人體內各器官之天然放射性物質活度，推算放射性物質含量在體內的有效劑量，因國內數據缺乏，相關數據是直接引用日本在全身計測的研究資料或參考 UNSCEAR 1993 號報告。

本中心民國 87 年版之國民輻射劑量評估報告，天然核種的部分共計評估氡-3、碳-14、鉀-40、銣-87 及鉛 210+鉍-210 等 5 類，個別核種體內曝露造成之個人年有效劑量(E_{EXP})分別為 1.0×10^{-5} 毫西弗、 1.2×10^{-2} 毫西弗、0.154 毫西弗、 6×10^{-3} 毫西弗及 0.12 毫西弗，總計為 0.3 毫西弗/年。其中，僅鉀-40 之評估結果是引用台灣本身的數據(清華大學的全身計測調查以及本中心自行辦理之全身計測調查)，其餘核種的評估結果都是引用國外文獻。另該報告也透過消費食品的採樣，評估了國人透過食品吸入銥-90、銩-137 兩個核種的體內曝露個人年有效劑量(E_{EXP})分別為 0.37 及 0.78 微西弗/年，國民輻射劑量(E_{Taiwan})合計約 0.0012 毫西弗/年。

本報告綜整 UNSCEAR 2000 報告、NCRP 第 160 號報告及日本環境省的「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料」等國外最新文獻，參考日本之作法，以攝食法評估吸入放射性核種所造成體內曝露之國民輻射劑量，計算公式如下

$$\sum \frac{E_j \times P_j}{P_{total}} = E_{Taiwan}$$

E_j ：j 族群吸入該核種之年有效劑量(毫西弗/年)

P_i ：j 族群的人數 (人)

P_{total} ：總人口數 (人)

E_{Taiwan} ：國人每人因攝食各類消費性食品中所含放射性物質造成之國民輻射年劑量(mSv/y)

因為 UNSCEAR 2000 報告之全球民眾之個人平均年有效劑量(E_{global})、NCRP 第 160 號報告之美國全體國民平均年有效劑量(E_{US})及日本全體國民之平均年有效劑量(E_{JP})都是以成年人曝露劑量作為代表，為了能和上述報告相比，本報告也會以成年人之體內曝露劑量作為國民輻射劑量(E_{Taiwan})。成年人的定義則參考國際放射防護委員會(ICRP)的做法【33】，ICRP 建議將代表性個人之年劑量分為嬰兒、孩童及成年人三個年齡群，三個年齡群的年齡分別為 0 至 6 歲、6 至 16 歲及 16 至 70 歲，本報告會將 16 至 70 歲年齡群之體內曝露劑量納入國民輻射劑量(E_{Taiwan})做計算評估。

(1) 人口統計數據

人口的數據則來自內政部人口調查統計【34】，將小於 1 歲、2-3 歲、3-6 歲、6-7 歲、7-12 歲、12-16 歲、16-17 歲、17-18 歲及 19-65 歲、大於 65 歲等 11 個年齡群的年攝食劑量乘上該群之人口數占比(即 P_j/P_{total})，加總後即為食品攝入體內曝露之國民輻射劑量評估結果，本報告所用的人口數是 110 年 12 月年之統計數據；男性共計 1,157 萬 8,696 人、女性共計 1,179 萬 6,618 人，合計 2,337 萬 5,314 人；因攝食導致的體內曝露之國民輻射劑量(E_{Taiwan})會以 16 至 70 歲之年齡群之進行評估，依攝食情境再細分成四個年齡群，並以此四個年齡群之人口加權占比推算國民輻射劑量。

(2) 體內曝露之國民輻射劑量

本報告利用 NCRP 公式推算國人鉀-40 體內劑量，在考量各年齡及性別之人口組成，依人口比例加權計算國人 BMI 值推算出 16 歲以上成人之鉀-40 之體內劑量，男性和女性的鉀-40 體內曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})平均值分別為 0.167 及 0.136 毫西弗/年，整體成人(不含 16 歲以下人口)之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.152 毫西弗/年。

考量各年齡層的攝食差異及人口比例(表 17)，以攝食法計算出因

攝食鈾-232、鈾-238、銻-137、鋨-90 及鈾-210 等 5 個核種之體內劑量如表 17，評估所造成之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 0.00001 毫西弗、0.0003 毫西弗、0.00005 毫西弗、0.00032 毫西弗、0.377 毫西弗，嚥入這 5 個核種導致體類內曝露的國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 0.378 毫西弗，以鈾-210 最高。

表 17 攝食法估算之國民輻射劑量

年齡群分類		16-17 歲	17-18 歲	19-65 歲	>65 歲	國民輻射劑量 E_{Taiwan} (毫西弗)
16 歲以上 人口占比		1.08%	1.12%	78.18%	19.62%	
個人 年有效 劑量 E_{EXP} (毫西弗)	鈾-232	1.87E-05	1.26E-05	1.29E-05	7.41E-06	1.18E-05
	鈾-238	3.96E-04	2.66E-04	2.99E-04	2.88E-04	2.97E-04
	鈾-210	0.470	0.352	0.395	0.303	0.377
	銻-137	4.13E-05	4.13E-05	5.50E-05	5.37E-05	5.44E-05
	鋨-90	7.29E-04	2.55E-04	3.25E-04	2.80E-04	3.20E-04

因攝食導致體內曝露之國民輻射劑量加總結果如表 18。其中，天然核種碳-14 因與年份差異不大，且目前國際上仍建議以全身計測或器官劑量推估的方式進行評估，故沿用本中心前版(民國 87 年版)之國民輻射劑量評估之評估數據；其餘核種因攝食造成之體內曝露劑量均已更新為本報告的重新評估數據。

表 18 我國因攝食導致之體內輻射劑量

核種種類		國民輻射劑量 E_{Taiwan} (毫西弗)	占比(%)
天然核種	鉀-40	0.152	28.06%
	釷-232	1.18E-05	0.00%
	鈾-238	2.91E-04	0.05%
	鈾-210	0.377	69.60%
	碳-14	0.012*	2.22%
人造核種	銫-137	5.44E-05	0.01%
	銥-90	3.20E-04	0.06%
合計		0.542	100.00%

*備註：國民輻射劑量之評估研究報告(1998)，輻射偵測中心。

我國在攝食曝露的國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 0.54 毫西弗。以鈾-210 之 0.377 毫西弗/年最高，在整體攝食曝露劑量之占比為 69.6%；其次是鉀-40 之 0.152 毫西弗/年，占比為 28.1%；碳-14 之體內曝露劑量 0.012 毫西弗/年，占比約為 2.2%；其餘核種所貢獻之年有效劑量總和約為 0.68 微西弗，不到 0.001 毫西弗，其攝食曝露劑量占比約只有整體攝食劑量的 0.1%。

在攝食劑量貢獻比例較高的鈾-210 和鉀-40 都是天然核種，是攝食劑量最主要的來源，占比超過 97%；釷系及鈾系元素中的天然核種，除了鈾-210，本報告還有評估釷-232、鈾-238 等 2 個核種，因鈾-210 的攝食劑量高，3 個核種約占整體攝食曝露的 70%；依據國際上的相關研究，鐳-226、鉛-210 也都是釷系及鈾系核種可能貢獻較高劑量來源的核種，但受限於現有數據，本報告並未納入評估，若有相關數據，

未來或可進一步探討。人造核種銫-137 及銥-90 部分，兩者攝食導致之國民輻射劑量(E_{Taiwan})合計為 0.37 微西弗/年，約占整體攝食曝露劑量的 0.05%；與本中心前版(民國 87 年版)之國民輻射劑量評估之評估結果(兩者合計 1.2 微西弗/年)相比，已有明顯下降。

4. 與其他國家之比較

彙整本報告的評估結果，與日本、UNSCEAR 2000 報告及 NCRP 第 160 號報告之體內曝露輻射劑量評估結果，透過攝食途徑造成之體內曝露劑量比較如表 19。

台灣地區經由攝食途徑導致體內曝露之個人平均年有效劑量(E_{Taiwan})，亦即國民輻射劑量 (E_{Taiwan})，為 0.73 毫西弗/年，雖低於日本的 0.99 毫西弗/年，但高於全球平均值 0.29 毫西弗/年，主要的差異來源在鈾-210 的攝取劑量，台灣和日本都是喜食海鮮和有食用動物內臟習慣的國家，故以攝食法評估，以這樣的評估結果反應台灣的飲食特性；鈾系列及鈾系列核種的攝取主要是與地質有關，透過食物鏈累積在各類食品中，我國的評估結果較日本及全球都低；至於在人工核種的部分，也是遠低於日本的攝食劑量。UNSCEAR 和美國並未在背景輻射體內曝露部分討論人造核種的劑量，該部分主要是併在產業活動中的核設施做討論。上述評估結果將作為後續更新國民輻射劑量中背景輻射體內曝露劑量的參考。詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-111-312Rev3 國人攝食導致的體內輻射曝露劑量評估-112 年修正版(附件四)。

表 19 攝食曝露年有效劑量之比較

單位:毫西弗/年

核種分類		台灣	日本 ^{*2、*3}	全世界 ^{*4}	美國 ^{*5}
天然核種	鉀-40	0.152	0.18 ^{*2}	0.17	0.15
	鈾-232	1.28E-05	3.90E-04 ^{*3}	3.80E-04	0.13
	鈾-238	3.07E-04	6.70E-04 ^{*3}	2.50E-04	
	鈾-210	0.377	0.73 ^{*3}	0.070	-
	鉛-210	-	0.058 ^{*3}	0.021	
	鐳-226	-	0.012 ^{*3}	0.006	
	鐳-228	-	-	0.011	
	碳-14	0.012 ^{*1}	0.014 ^{*2}	-	0.01
人造核種	銫-137	5.62E-05	7.80E-04 ^{*3}	-	-
	銥-90	3.32E-04	1.70E-03 ^{*3}	-	-
合計		0.542	0.99 ^{*2}	0.29	0.29

- *備註：1.國民輻射劑量之評估研究報告(1998),表 1.20 (P.42)；本報告整理。
 2.放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料(令和3年度版)上卷, P.66；本報告整理。
 3. Evaluation for Committed Effective Dose Due to Dietary Foods by the Intake for Japanese Adults (2009),表 4；本報告整理。
 4. UNSCEAR 2000 報告(2000) AnnexB,表 18 (P.127)；本報告整理。
 5.NCRP160 號報告(2009),表 3-14(P.75)；本報告整理。

(四) 氡氣吸入

氡氣(radon)是一種無色無味的惰性氣體，具放射性，主要是從土壤及岩石中的鈾系及釷系元素衰變後形成，因是氣態所以會逸散釋放在空氣中。氡氣衰變伴隨阿伐(α)粒子，吸入肺部後對其組織造成不小輻射劑量。因阿伐粒子穿透力不強，皮膚即可阻擋，造成之體外輻射劑量通常可以忽略。但若藉由呼吸吸入體內，阿伐粒子會在短距離內具有大量能量沉積，對於肺部組織細胞造成嚴重傷害。放射性氡氣主要分為氡-222(Rn-222)及氡-220(Rn-220)，氡-222 的半化期約 3.8 天，從鈾系元素衰變鏈中可知氡-222 是鈾-238、釷-232 的衰變產物；其中因氡-222 半化期較長，較氡-220 更易在室內累積，故主要造成氡氣劑量的來源為氡-222。

國際放射防護委員會(ICRP)在 2007 年發佈之第 103 號報告【35】中，以年有效劑量 10 毫西弗(mSv)作為參考基準，由有效劑量推導出住宅室內氡氣之參考基準為每立方公尺 600 貝克(Bq/m³)、工作場所室內氡氣之參考基準為每立方公尺 1500 貝克(Bq/m³)。ICRP 在 2010 年發佈之第 115 號報告【36】，主要是針對氡及其子核對肺癌的風險(Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon)，報告中針對氡氣依流行病學調查結果，提升氡氣風險係數(risk coefficient)為原本 2 倍，因此在氡氣聲明(Statement on Radon)【37】中，將住宅室內氡氣之參考基準降為每立方公尺 300 貝克(Bq/m³)、工作場所室內氡氣之參考基準降為每立方公尺 1000 貝克(Bq/m³)。ICRP 在 2014 年所發佈之第 126 號報告【38】，主要是針對氡氣曝露之輻射防護(Radiological Protection against Radon Exposure)，報告中建議室內氡氣之參考基準為每立方公尺 100 貝克(Bq/m³)，最高不大於每立方公尺 300 貝克(Bq/m³)。各國國際組織室內氡氣標準彙整如表 20。

表 20 各國國際組織的室內氡氣標準

國際組織	年份	名稱	數值
美國環境保護署 (U.S. EPA)	2003	建議行動基準 (recommended action level)	4 pCi/L (150 Bq/m ³)
世界衛生組織 (WHO)	2009	參考基準 (reference level)	100 Bq/m ³
ICRP 第 103 號報告	2007	參考基準 (reference level)	住宅：600 Bq/m ³ 工作場所：1500 Bq/m ³
ICRP 第 115 號報告	2010	參考基準 (reference level)	住宅：300 Bq/m ³ 工作場所：1000 Bq/m ³
ICRP 第 126 號報告	2014	參考基準 (reference level)	100~300 Bq/m ³

各國國際組織對於氡氣曝露的劑量轉換因子有不同的建議值，對於評估體內劑量而言，不同劑量轉換因子會換算出不同的年輻射劑量。國際放射防護委員會(ICRP)於 2010 年公告之第 115 號報告「Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon」，報告中依氡氣依流行病學調查結果，提升氡氣風險係數(risk coefficient)，由 2.8×10^{-4} 升至 5×10^{-4} per WLM，約為原本 2 倍。ICRP 另於 2014 年公告之第 126 號報告「Radiological Protection against Radon Exposure」，是根據第 115 號報告中所提出之氡氣風險，重新評估氡氣劑量。ICRP 於 2017 年公告之第 137 號報告「Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3」，報告中更新氡氣對工作人員的體內劑量轉換因子，假設氡-222 與子核之間的平衡因子為 0.4，標稱劑量轉換因子(nominal dose conversion coefficient)為 6.7×10^{-6} (mSv/h)/(Bq/m³)，如果是在洞穴工作或是室內進行體力活動的工作人員，則劑量轉換因子會提高至 1.3×10^{-5} (mSv/h)/(Bq/m³)。

承上，ICRP 第 65 號報告及 ICRP 第 126 號報告 ICRP 第 137 號報告之評估結果比較如表 21，評估參數均以住宅活動時間為每年 7000 小時、平衡因子為 0.4 進行估算；因風險係數之提高，，ICRP 第 65 號報告及 ICRP 第 126 號報告之差異，同樣是個人年有效劑量 (E_{EXP})10 毫西弗(mSv)，氬氣活度濃度由每立方公尺 600 貝克(Bq/m³) 降至每立方公尺 300 貝克 (Bq/m³)。ICRP 第 137 號報告進一步調高了劑量轉換因子，以工作場所氬氣活度濃度每立方公尺 300 貝克 (Bq/m³)之空間，所受的個人年有效劑量(E_{EXP})相當於 4 毫西弗(mSv)。住宅之氬氣活度濃度每立方公尺 300 貝克 (Bq/m³)，個人年有效劑量 (E_{EXP})會由 10 毫西弗提高到 14 毫西弗(mSv)；ICRP 第 137 號報告主要是針對工作人員職業曝露提供攝入/吸入劑量轉換因子的建議值，並不是針對一般民眾；但比照之前 ICRP 第 126 號報告所建議的職業防護，都是將工作場所設定與住宅相同的合理干預水平，故初步推斷後續發表有關一般民眾的體內劑量轉換因子也會參採同樣的風險值，故本計畫採用 ICRP 第 137 號報告之劑量轉換因子。

表 21 ICRP 氬氣劑量評估之比較

參考文獻	類型	氬氣活度濃度 貝克/立方公尺 (Bq/m ³)	個人年有效劑量 (E_{EXP}) 毫西弗(mSv)
ICRP 第 65 號報告	住宅 (home)	600	10
ICRP 第 126 號報告		300	10
ICRP 第 137 號報告		300	14
	工作場所 (work)	300	4

為了瞭解臺灣室內氡氣情形，本中心針對國內室內氡氣進行調查，量測方法主要參考美國國家標準(ANSI)發布之量測室內氡氣及其衰變產物之建議【39、40】。執行量測氡氣時之儀器擺放建議如圖8，儀器擺放需距離門 90 公分以上、距離地板 50 公分以上、距離牆壁 30 公分以上，並距離其他儀器 10 公分以上，以避免互相干擾。儀器不宜擺放設置在浴室、廚房、櫥櫃、水槽旁、陽光直曬、高氣流、熱源、輻射源旁...等，避免儀器偵測失效。此外，若室內空間超過 189 平方公尺、不同通風系統之房間及獨立區域，則建議添加偵測儀器分別量測。

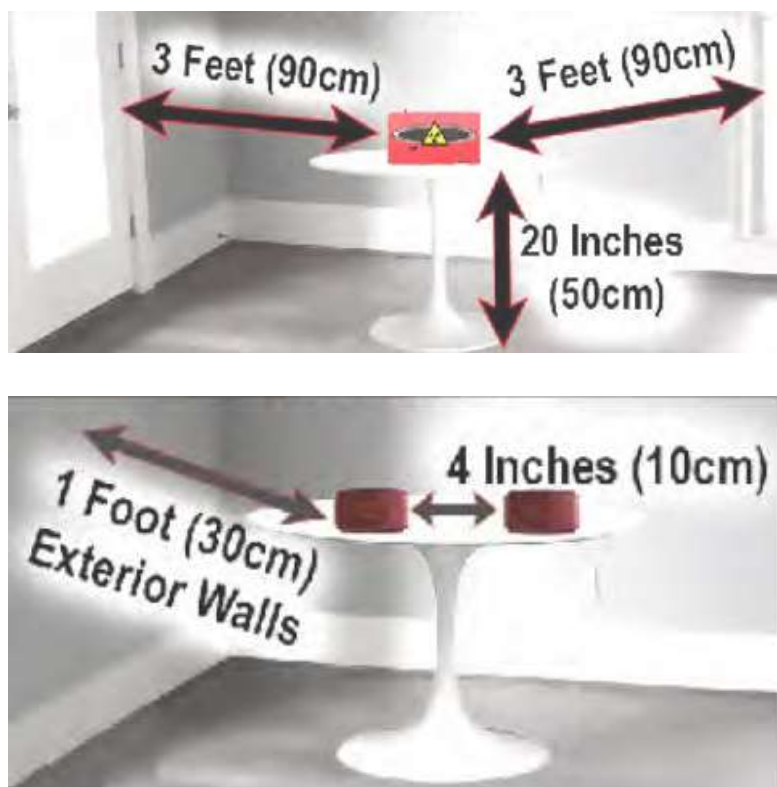
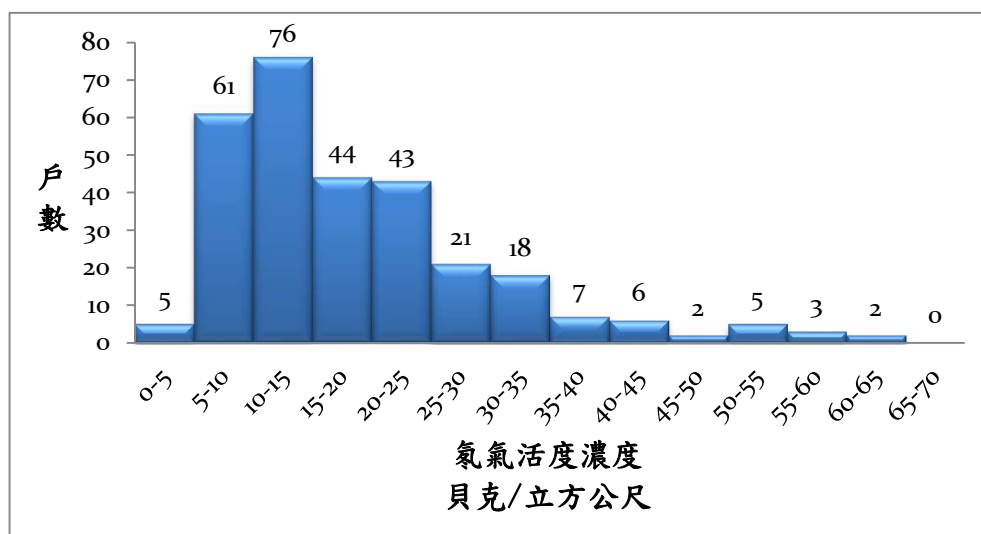


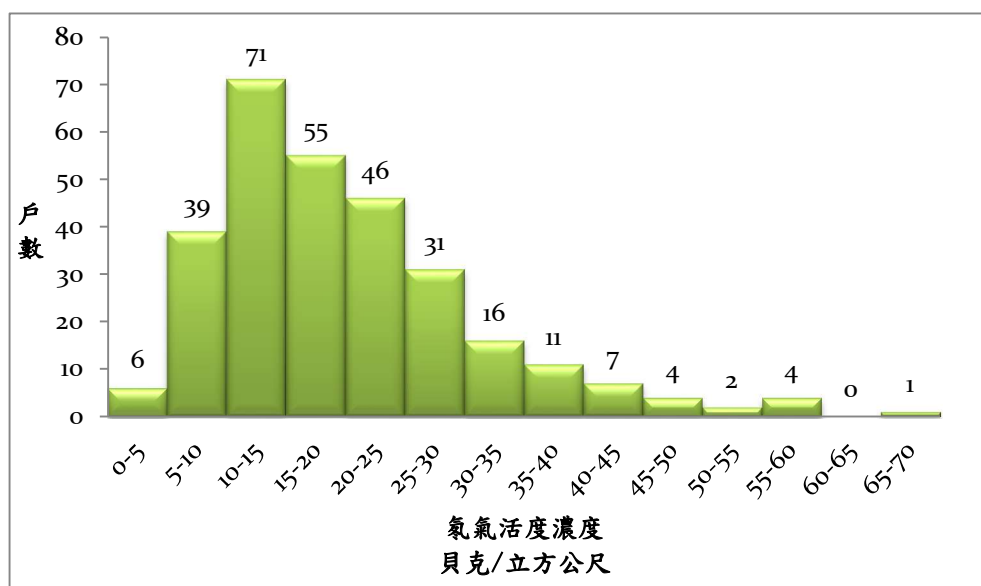
圖 8 氡氣量測儀器擺放建議

民國 104 至 106 年本中心委託義守大學執行「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫之調查結果【41】，加上本中心民國 108 至 110 年陸續赴陳情民眾住宅執行氡氣量測服務之偵

測數據，共計累積 293 戶住宅氡氣活度濃度量測結果。此 293 戶之住宅氡氣活度濃度分布如圖 9，多數住宅不論是客廳還是臥房，氡氣活度濃度分布都在每立方公尺 35 貝克(Bq/m³)以下，約占整體之 9 成；以活度濃度每立方公尺 10~15 貝克(Bq/m³)最多，客廳部分其次是每立方公尺 5~10 貝克(Bq/m³)，臥房部分則是以每立方公尺 15~20 貝克(Bq/m³)次之。



(a) 客廳之氡氣活度濃度分布圖



(b) 臥房之氡氣活度濃度分布圖

圖 9 國內住宅室內氡氣活度濃度分布圖

表 22 為本中心彙整民國 104 至 106 年執行「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」計畫量測數據及本中心民國 108-110 年赴民眾住家執行氡氣量測服務之量測結果，顯示臥房之氡氣平均活度濃度(每立方公尺 20.09 貝克)略高於客廳(每立方公尺 18.90 貝克)，推測原因為臥房通風狀況通常較客廳差。本報告沿用「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫之評估方法，考量國民室內活動時間占 9 成以上，依此估計臥房之占用因子以每天 8 小時、其他房間(含辦公室)以每天 14 小時計、戶外活動以每天 2 小時計；依據本中心民國 104-110 年之氡氣量測調查數據，臺灣地區一般住宅的室內氡氣平均活度濃度為每立方公尺 19.33 克；計算過程如下：

$$(18.90 \times 14 + 20.09 \times 8) / 22 = 19.33 \text{ (單位: Bq/m}^3\text{)}$$

參採 2017 年 ICRP 第 137 號報告的劑量轉換因子，推估氡氣吸入造成個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.90($19.33/300 \times 14 = 0.902$)毫西弗(mSv)，亦即國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 0.9 毫西弗。

表 22 台灣住宅氡氣量測結果

	104-106 年 量測數據*		108-110 年 量測數據		合計	
	量測數 (點次)	平均 濃度 (Bq/m ³)	量測數 (點次)	平均 濃度 (Bq/m ³)	量測數 (點次)	平均 濃度 (Bq/m ³)
客廳	289	18.83	4	23.90	293	18.90
臥室	289	19.99	4	27.36	293	20.09

*資料來源：「臺灣地區住宅氡氣活度擴大量測與劑量再評估」研究計畫期末報告，2017；本中心整理。

本中心民國 87 年版之國民輻射劑量評估報告，測得台灣室內氡氣活度濃度為 10 ± 4 貝克/立方公尺(Bq/m^3)，估算出因氡氣曝露造成之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.44 毫西弗。與本計畫評估結果的差異最主要是氡氣劑量轉換因子的調整；此外，量測儀器的差異也會影響量測的結果。

台灣氡氣吸入造成個人年有效劑量，亦即國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 0.90 毫西弗，與國際現況相比如表 23。我國氡氣活度濃度量測結果較國際上數值低，主要原因為臺灣位處亞熱帶潮濕、高溫，地質條件在鈷、鈾系元素含量上並無特殊性，且臺灣建築物主要為鋼筋混凝土造成，住宅室內重視通風所致。國內目前並未針對室內氡氣之活度濃度訂定相關之管制規定，而國際組織針對氡氣活度濃度標準僅作為建議值，本報告之完成，可做為相關主管機關是否將氡氣活度濃度納入法令管制之主要參考依據。詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-111-313Rev2 國人住宅氡氣輻射劑量評估-112 年修正版(附件五)。

表 23 各國之氡氣吸入背景輻射劑量

單位：毫西弗(mSv)

種類	台灣 (E_{Taiwan})	日本 ^{*1} (E_{JP})	美國 ^{*2} (E_{US})	全球 ^{*3} (E_{global})
氡氣吸入	0.90	0.46	2.28	1.26

*資料來源：1.放射線による健康影響等に関する統一のな基礎資料（令和 3 年度版）上卷(2021), P.66。

2.NCRP160 號報告(2009), 表 1-1, (P.12)。

3. UNSCEAR 2008 報告(2000) VolumnI,表 1 (P.4)。

二、醫療輻射

在人造游離輻射劑量中，對民眾貢獻來源最大的是來自醫療曝露。自 20 世紀初發現放射核種和 X 光，游離輻射很快地被用於醫學上，現在已被確立為醫學診斷和治療的重要工具。過去幾十年間，因醫療影像設備與成像技術快速發展，輻射在醫學上的使用率顯著增長，無論在歐洲、美國還是台灣都有類似的成長趨勢，透過分析健保資料庫的醫療輻射檢查的人次，發現台灣的年平均成長率約 8.2%。

本計畫醫療輻射部分係委託財團法人中華民國輻射防護協會，執行醫療輻射造成台灣整體國民輻射劑量評估研究，透過全民健康保險研究資料庫取得各種類別的檢查項目的人次，若有檢查項目未涵蓋於全民健康保險研究資料庫的部分，則需配合其他相關資料庫以補足。另需赴醫療院所進行實地調查，取得各種類別醫療作業中的檢查項目與檢查序列其技術條件設定、臨床實際掃描方法等資訊，再以實地量測方式，包含：劑量輸出測量，以確定劑量評估的準確性等，並計算出各種醫療輻射類別的檢查項目有效劑量。藉由本計畫調查研究方法，了解醫療輻射造成台灣整體國民輻射劑量之情形，建立完整的國民醫療輻射劑量資料，未來亦可利用此資料評估國民醫療輻射運用的變化趨勢。

執行國民醫療輻射劑量評估，經過醫療院所與健保資料庫調查後，確認執行下列 8 種放射診斷之醫療輻射類別，共 51 個檢查項目劑量評估，分項說明如下：

- (一) 電腦斷層：頭部、頸部、胸部、上腹部、腹部（含骨盆腔）、胸部與上腹部、胸部與腹部（含骨盆腔）、骨盆、下肢、脊椎、心血管，共 11 項。

- (二) 核子醫學：壓力與重分佈心肌斷層灌注掃描、全身骨骼掃描、全身炎症掃描、心室搏出分率及心室壁活動測定、正子造影-全身、其他項，共 6 項。
- (三) 心臟類介入性透視攝影：心室及動脈攝影、冠狀動脈擴張術(含血管內／心臟內異物移除術)、主動脈氣球裝置術、心律不整經導管燒灼術、電氣生理檢查、其他項，共 6 項。
- (四) 非心臟類介入性透視攝影：經皮血管內血管成形術、血管阻塞術、經皮穿肝膽管引流術(含修正術)、皮下穿刺腎造瘻術、逆行性膽道及胰管造影、其他項，共 6 項。
- (五) 傳統透視攝影：靜脈注射泌尿系統造影術、下消化道攝影、上消化道攝影、食道攝影、小腸系統、子宮輸卵管造影、其他項，共 7 項。
- (六) 一般傳統 X 光：頭頸部、胸肩部、腹部(含骨盆腔)、腎臟-輸尿管-膀胱、脊椎、上肢、下肢，共 7 項。
- (七) 乳房攝影：一般乳房攝影、放大乳房攝影，共 2 項。
- (八) 牙科攝影：根尖周、咬翼式、咬合片、齒顎全景、測顱、顱顎關節(單側)，共 6 項。

本報告的執行流程如圖 10，包含三大部分：(一)前期準備、(二)模型建立、(三)劑量評估，涵蓋八類國民醫療輻射劑量評估流程，其中表 24 為執行計畫後滾動修正的全程計畫分年進度表。

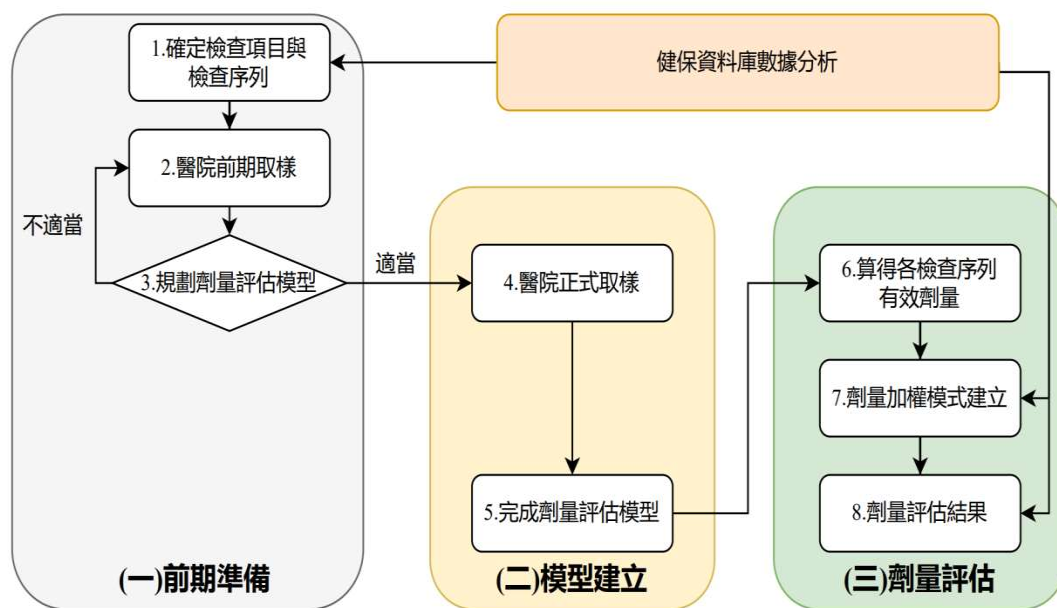


圖 10 醫療輻射劑量評估流程

表 24 醫療委託研究之計畫分年進度表

項次	項目	108 年	109 年	110 年
I	健保資料庫資料分析：1.了解健保資料庫的代碼及取得與 8 種類別對應的人次，2.健保資料庫的人次趨勢評估，3.精進健保資料庫的人次評估。	I.1	I.2	I.3
II	取樣醫院檢查序列調查：12 家醫院、96 個診療部門，包含：1.電腦斷層，2.核子醫學，3.心臟類介入性透視攝影，4.非心臟類介入性透視攝影，5.傳統透視攝影，6.一般傳統 X 光，7.乳房攝影，8.牙科攝影。	2 家醫院、16 個診療部門 (II.1~II.8)	6 家醫院、48 個診療部門 (II.1~II.8)	4 家醫院、32 個診療部門 (II.1~II.8)
III	建構劑量評估模型，包含：1.電腦斷層，2.核子醫學，3.心臟類介入性透視攝影，4.非心臟類介入性透視攝影，5.傳統透視攝影，6.一般傳統 X 光，7.乳房攝影，8.牙科攝影。	III.3~III.5，III.8	III.1~III.2，III.6~III.7	精進與微調
IV	推算集體有效劑量，包含：1.電腦斷層，2.核子醫學，3.心臟類介入性透視攝影，4.非心臟類介入性透視攝影，5.傳統透視攝影，6.一般傳統 X 光，7.乳房攝影，8.牙科攝影。	-	IV.1，IV.7	IV.2~IV.6，IV.8
V	彙整劑量資料：1.國民醫療輻射劑量總彙整，2.建立台灣醫療輻射檢查項目劑量資料庫。	-	-	V.1，V.2
VI	建置醫療劑量網站：1.設計構想台灣醫療輻射類別劑量網站，2.建立台灣醫療輻射類別劑量網站。	-	VI.1	VI.2

取得醫院的實地調查數據，因涉及醫院第一線醫療作業，取樣流程繁瑣，包含：(1) 決定目標醫院，需時 1 週、(2) 聯繫拜訪並說明計畫內容，需時 2 至 3 週、(3) 完成醫院同意取樣的行政流程，需時 4 至 8 週、(4) 到院實地取樣，需時 3 至 4 週，一家醫院總體時間約需達 3 至 4 個月。除了取樣醫院序列調查外，再加上後續有效劑量計算與劑量評估，需時 4 至 8 週，一家醫院從聯繫到計算完成總體時間約需達 5 至 6 個月。

八種類別皆會取得底下 3 種資訊：

- (一) 醫院基本資料：記錄資料包括醫院名稱、醫院分級、設備台數。
- (二) 設備相關資訊：記錄資料包括設備廠牌、設備型號、設備序號、登記字號、裝機年份、新機或移機、設置部門。
- (三) 取樣人次統計：記錄資料包括檢查項目的取樣人次。

再依據各種類別檢查取樣相關參數資料：

- (一) 電腦斷層：記錄資料包括檢查日期、檢查項目、性別、年齡、身高、體重、設備名稱、掃描範圍、旋轉時間、重組厚度、Scan mode、AEC、kV、Beam width、Beam collimation、Table feed、Slice thickness、Pitch、CTDIvol、mAs、Scan time、DLP。
- (二) 核子醫學：記錄資料包括檢查日期、檢查項目、性別、年齡、身高、體重、放射性藥物種類、放射性藥物活度、SPECT、PET/CT、設備名稱、掃描範圍、旋轉時間、重組厚度、Scan mode、AEC、kV、Beam width、Beam collimation、Table feed、Slice thickness、Pitch、CTDIvol、mAs、Scan time、DLP。
- (三) 心臟類介入性透視攝影：記錄資料包括檢查日期、檢查項目、性別、年齡、身高、體重、設備名稱、總透視時間、DAP、

Air Kerma、FOV、SID、kV、mA、Tube 角度、filter、Single/bi plane。

(四) 非心臟類介入性透視攝影：記錄資料包括檢查日期、檢查項目、性別、年齡、身高、體重、設備名稱、總透視時間、DAP、Air Kerma、FOV、SID、kV、mA、Tube 角度、filter、Single/bi plane。

(五) 傳統透視攝影：記錄資料包括檢查日期、檢查項目、性別、年齡、身高、體重、設備名稱、總透視時間、DAP、Air Kerma、FOV、SID、kV、mA、mAs、Tube 角度、filter。

(六) 一般傳統 X 光：記錄資料包括檢查日期、檢查項目、性別、年齡、身高、體重、設備名稱、DAP、FOV、SID、kV、Tube 角度、filter。

(七) 乳房攝影：記錄資料包括檢查日期、檢查項目、性別、年齡、身高、體重、設備名稱、照射張數、左/右乳房、乳房厚度、平均乳腺劑量。

(八) 牙科攝影：記錄資料包括檢查日期、檢查項目、性別、年齡、身高、體重（體型）、設備名稱、FSD、SID、DAP、Tube 角度、filter、Cone 大小、Cone 形狀、kV、mA、time。

劑量評估模型建構流程如圖 11，前置流程包含：蒐集、閱讀、整理國際相關文獻資料，購置、交貨、驗收劑量模擬軟體，本報告使用劑量模擬軟體包含 CT-expo 軟體、PCXMC 軟體。

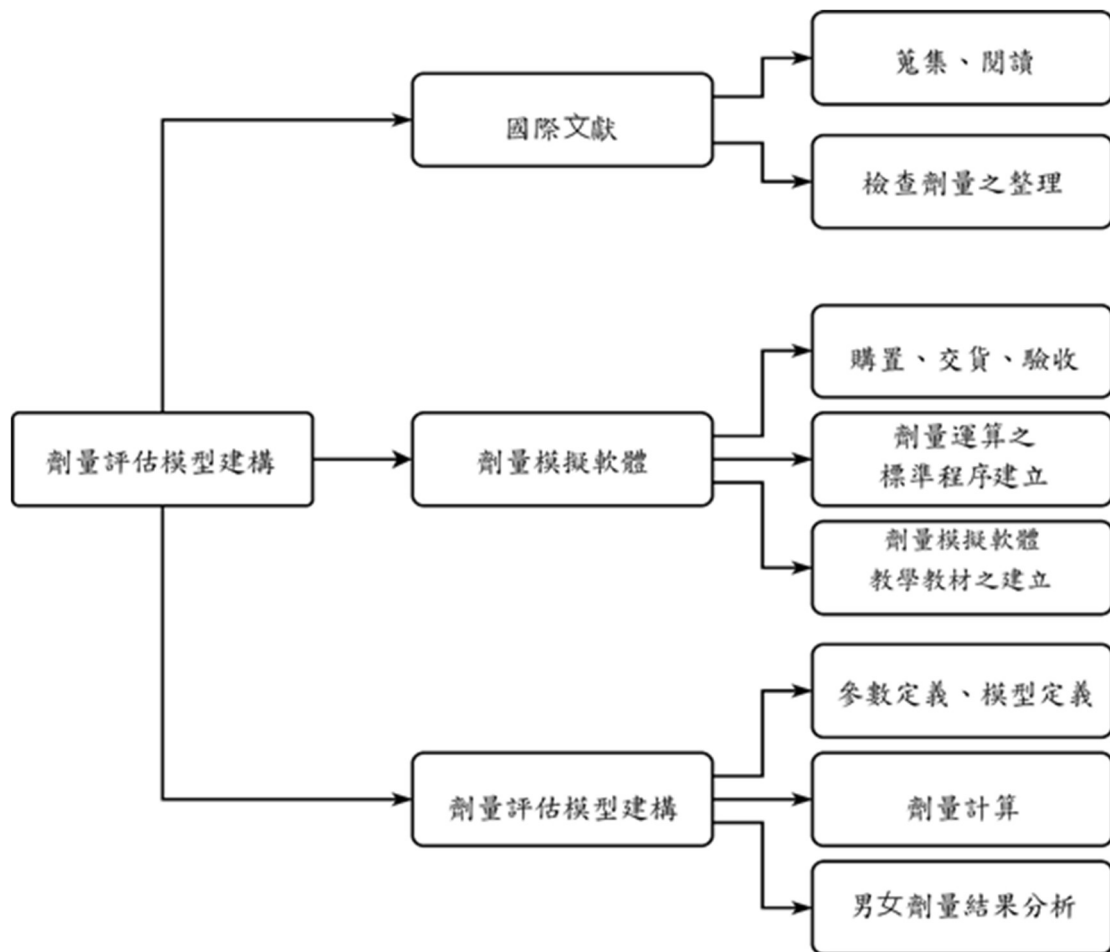


圖 11 劑量評估模型建構流程

劑量評估包含依序從檢查序列、檢查項目、集體有效劑量、每人年平均劑量的推算過程。

依據醫院 (i)、類別檢查項目 (j)、檢查序列 (k) 等三個取樣層級，分層取樣後，計算並得到其有效劑量的分佈，因劑量分佈並非呈現常態分佈，故將選用其中位數代表此檢查序列的有效劑量(E_{ijk})，以執行後續人次加權和集體有效劑量計算，步驟說明如公式 (a) 至 (d)，符號公式如表 25。

首先於指定 i 醫院，針對指定的 j 類別檢查項目，得到不同檢查序列 (k) 的取樣人次 (n_{ijk})，以加權其檢查序列的有效劑量 (E_{ijk})，並加總後得到對應指定 i 醫院、指定的 j 類別檢查項目的有效劑量

(E_{ij})，則：

$$E_{ij} = \frac{\sum_k n_{ijk} E_{ijk}}{\sum_k n_{ijk}}$$

其後，依據上述有效劑量 (E_{ij})，以各醫院 (i) 指定類別檢查項目 (j) 的取樣人次 (n_{ij})，進行有效劑量 (E_{ij}) 的加權計算，而得到指定 j 類別檢查項目下訪查的有效劑量 (E_j)，則：

$$E_j = \frac{\sum_i n_{ij} E_{ij}}{\sum_i n_{ij}}$$

將上述各類別檢查項目的有效劑量 (E_j)，分別乘上 106 年健保資料庫其檢查項目人次 (N_j)，以得到該類別檢查項目的集體有效劑量 ($S_j = N_j E_j$)，將集體有效劑量進行加總，以得到對應之集體有效劑量總和 ($\sum_j N_j E_j$)。

為選取最具代表性的檢查序列 (k) 來作為調查項目，選定原則為該檢查序列劑量貢獻較高、人次較多、或集體劑量顯著，遂依據 NCRP 報告與相關文獻之類別檢查項目的有效劑量，其分別乘上 106 年健保資料庫其檢查項目人次 (醫療輻射檢查項目人次)，試算其集體有效劑量總和，並選取其集體有效劑量總和 90% 以上所包含的 k 個檢查序列，作為檢查序列的選定標準。不同類別試算其集體有效劑量總和占 106 年集體有效劑量總和 $R\%$ 的 k 個檢查序列皆不盡相同，因此集體有效劑量總和需除以 $R\%$ 以修正之 (S)，則：

$$S = \frac{\sum_j N_j E_j}{R\%}$$

最後再除以民國 106 年之台灣總人口數 (P) 以得之台灣每人年平均劑量 (E_{Taiwan})，則：

$$E_{\text{Taiwan}} = \frac{S}{P}$$

表 25 劑量計算符號公式

變數 k ：檢查序列 變數 j ：檢查項目 變數 i ：取樣醫院	$n_{ij} = \sum_k n_{ijk}$	$N_j = \sum_k N_{jk}$
參數 n ：醫院取樣人次 參數 N ：健保資料庫檢查人次 參數 E ：有效劑量 參數 R ：集體有效劑量總和占比 參數 P ：台灣總人口數 參數 E_{TW} ：台灣每人年平均劑量	<u>取樣醫院的人次計算</u> i 醫院的 j 檢查項目之取樣人次，為加總 k 檢查序列的取樣人次和	<u>健保資料庫的人次計算</u> j 檢查項目之總人次，為加總 k 檢查序列的人次和

利用 JMP 統計軟體，分析調查 51 個檢查項目對應檢查序列的取樣醫院數、取樣人次、同家醫院不同檢查序列有效劑量之中位數的最小值、最大值，以及加權結果。

劑量評估模型包含了檢查項目的選擇、計算參數選擇與假設，並搭配劑量模擬軟體，再計算各檢查序列的有效劑量。

其中臨床受檢者於相同檢查下，器官所接受的劑量可能因受檢者的性別與體重而有所不同，為能模擬出與臨床受檢者相近的情況，故將性別與體重列為重要參數之一，機器設定參數亦參考與臨床情況相近的條件，使劑量模擬得到的數據與臨床相近，才具參考價值。本計畫將 8 種醫療輻射類別之劑量評估方式分成 3 個：（一）取樣調查劑量數據、（二）國際報告劑量轉換因數、（三）評估劑量模擬軟體，如表 26，並建立各對應之劑量評估模型。

表 26 劑量評估方式

類別	檢查項目	檢查序列	劑量評估模型	劑量評估方式	
1.電腦斷層	11	23	23	劑量模擬軟體	CT-Expo 軟體
2.核子醫學	6	12	12	國際報告劑量轉換因數	ICRP 106 號報告
3.心臟類介入性透視攝影	6	26	6	劑量模擬軟體	PCXMC 軟體
4.非心臟類介入性透視攝影	6	13	11	劑量模擬軟體	PCXMC 軟體
5.傳統透視攝影	7	10	8	劑量模擬軟體	PCXMC 軟體
6.一般傳統 X 光	7	35	69	劑量模擬軟體	PCXMC 軟體
7.乳房攝影	2	4	4	取樣調查劑量數據	取樣調查劑量數據
8.牙科攝影	6	17	22	劑量模擬軟體	PCXMC 軟體
小計	51	140	155		

基於 NCRP 報告與相關文獻關於 6 種（電腦斷層、心臟類介入性透視攝影、非心臟類介入性透視攝影、傳統透視攝影、一般傳統 X 光、牙科攝影），以劑量模擬軟體的方式進行劑量評估，因此本計畫亦參考其方式評估劑量。其中劑量模擬軟體又可以細分成 2 類：CT-Expo 軟體、PCXMC 軟體。

CT-Expo 軟體為德國團隊所開發的劑量計算軟體，透過蒙地卡羅模擬與訪查資料庫建構而成，用於電腦斷層的劑量評估，根據部位決定檢查項目的掃描範圍，不同檢查序列的實際掃描參數去建立相關的劑量評估模型。

PCXMC 軟體為芬蘭的輻射與核能安全署於 2008 年所開發出的軟體，本計畫用於心臟類介入性透視攝影、非心臟類介入性透視攝影、傳統透視攝影、一般傳統 X 光、牙科攝影的劑量評估。

基於 ICRP 106 號報告與相關文獻關於核子醫學劑量，以 ICRP 60 號報告的組織加權因數推算藥物活度與全身有效劑量的轉換因數（mSv/MBq），透過取樣醫院的藥物種類及活度（mCi）與轉換因數之間的單位換算，得到其檢查項目的有效劑量。

基於 NCRP 報告與相關文獻關於乳房攝影劑量，利用平均乳腺劑量，再搭配乳房在 ICRP 60 號報告的組織加權因數為 0.05、ICRP 103 號報告的組織加權因數為 0.12，進行計算檢查項目的有效劑量。

根據取樣醫院檢查序列調查結果，計算出檢查項目之有效劑量，並彙整成表 27 至表 34。

表 27 電腦斷層有效劑量

檢查項目	取樣醫院數	取樣人次	有效劑量(毫西弗)	
			ICRP 60	ICRP 103
1.頭部	13	4,510	2.07	1.63
2.頸部	11	717	7.43	8.18
3.胸部	12	2,971	7.40	8.01
4.上腹部	11	3,761	15.96	15.92
5.腹部（含骨盆腔）	8	1,408	22.01	19.43
6.胸部與上腹部	2	260	13.40	15.37
7.胸部與腹部（含骨盆腔）	4	183	24.54	22.89
8.骨盆	6	344	18.30	16.38
9.下肢	4	72	7.20	8.10
10.脊椎	9	224	4.48	5.13
11.心血管	5	246	7.88	10.27

表 28 核子醫學有效劑量

檢查項目	取樣 醫院數	取樣 人次	有效劑量(毫西弗)
			ICRP 60
1.壓力與重分佈心肌斷層灌注掃描	6	2,781	11.75
2.全身骨骼掃描	7	2,607	3.68
3.全身炎症掃描	4	162	11.44
4.心室搏出分率及心室壁活動測定	1	9	11.93
5.正子造影 - 全身	6	3,183	18.08
6.其他項	7	591	6.34

表 29 心臟類介入性透視攝影有效劑量

檢查項目	取樣 醫院數	取樣 人次	有效劑量(毫西弗)	
			ICRP 60	ICRP 103
1.心室及動脈攝影	7	421	14.65	15.43
2.冠狀動脈擴張術(含血管內/ 心臟內異物移除術)	7	234	33.85	35.96
3.主動脈氣球裝置術	2	21	6.03	6.64
4.心律不整經導管燒灼術	3	6	9.27	9.82
5.電氣生理檢查	2	17	12.00	12.64
6.其他項	1	9	0.96	1.02

表 30 非心臟類介入性透視攝影有效劑量

檢查項目	取樣 醫院數	取樣 人次	有效劑量(毫西弗)	
			ICRP 60	ICRP 103
1.經皮血管內血管成形術	6	337	0.75	0.64
2.血管阻塞術	10	187	28.83	26.93
3.經皮穿肝膽管引流術(含修正 術)	8	109	3.04	2.82
4.皮下穿刺腎造瘻術	6	103	0.49	0.47
5.逆行性膽道及胰管造影	1	14	0.12	0.14
6.其他項	9	224	5.89	6.89

表 31 傳統透視攝影有效劑量

檢查項目	取樣 醫院數	取樣 人次	有效劑量(毫西弗)	
			ICRP 60	ICRP 103
1.靜脈注射泌尿系統造影術	5	414	0.90	0.82
2.下消化道攝影	11	51	4.40	3.52
3.上消化道攝影	9	35	4.50	4.73
4.食道攝影	11	77	0.89	1.05
5.小腸系統	7	29	2.91	2.67
6.子宮輸卵管造影	13	380	1.50	1.11
7.其他項	9	99	1.19	1.18

表 32 一般傳統 X 光有效劑量

檢查項目	取樣 醫院數	取樣 人次	有效劑量(毫西弗)	
			ICRP 60	ICRP 103
1.頭頸部	11	1,615	0.01	0.01
2.胸肩部	13	45,272	0.05	0.05
3.腹部（含骨盆腔）	12	2,880	0.22	0.16
4.腎臟-輸尿管-膀胱	13	10,739	0.24	0.22
5.脊椎	13	11,303	0.12	0.11
6.上肢	13	4,820	0.0003	0.0002
7.下肢	13	13,419	0.001	0.001

表 33 乳房攝影有效劑量

檢查項目	取樣 醫院數	取樣 人次	有效劑量(毫西弗)	
			ICRP 60	ICRP 103
1.一般乳房攝影	21	8,312	0.14	0.34
2.放大乳房攝影	11	343	0.16	0.38

表 34 牙科攝影有效劑量

檢查項目	取樣 醫院數	取樣 張數	有效劑量(毫西弗)	
			ICRP 60	ICRP 103
1.根尖周	8	10,326	0.001	0.005
2.咬翼式	6	1,453	0.002	0.01
3.咬合片	5	82	0.002	0.004
4.齒顎全景	7	2,804	0.003	0.01
5.測顱	6	336	0.01	0.01
6.顳顎關節（單側）	6	36	0.004	0.005

根據檢查項目有效劑量，再乘上由民國 106 年健保資料庫檢查項目人次去推算醫療輻射檢查項目人次結果，推算集體有效劑量結果，並彙整成底下表 35 至表 42。

表 35 電腦斷層集體有效劑量

檢查項目	健保 人次 (人)	醫療輻射 人次 (人) *	集體有效劑量 (人西弗)	
			ICRP 60	ICRP 103
1.頭部	708,885	814,810	1,687	1,328
2.頸部	121,198	139,308	1,035	1,140
3.胸部	308,296	354,363	2,622	2,838
4.上腹部	202,036	232,225	3,706	3,697
5.腹部（含骨盆腔）	428,730	492,793	10,846	9,575
6.胸部與上腹部	108,983	125,268	1,679	1,925
7.胸部與腹部（含骨盆腔）	19,303	22,187	544	508
8.骨盆	26,922	30,945	566	507
9.下肢	31,310	35,989	259	292
10.脊椎	40,909	47,022	211	241
11.心血管	23,032	26,474	209	272
加總結果			23,364	22,323

*醫療輻射人次=健保人次/健保占比，民國 106 年健保占比約為 0.87

表 36 核子醫學集體有效劑量

檢查項目	醫療輻射 檢查人次 (人)	集體有效劑量 (人西弗)
		ICRP 60
1.壓力與重分佈心肌斷層灌注掃描	161,813	1,901
2.全身骨骼掃描	138,871	511
3.全身炎症掃描	11,889	136
4.心室搏出分率及心室壁活動測定	12,488	149
5.正子造影 - 全身	40,348	729
6.其他項	38,456	244
加總結果		3,670

表 37 心臟類介入性透視攝影集體有效劑量

檢查項目	醫療輻射 檢查人次 (人)	集體有效劑量 (人西弗)	
		ICRP 60	ICRP 103
1.心室及動脈攝影	174,259	2,553	2,689
2.冠狀動脈擴張術(含血管內/心臟內異物移除術)	55,318	1,873	1,989
3.主動脈氣球裝置術	2,792	17	19
4.心律不整經導管燒灼術	5,038	47	49
5.電氣生理檢查	4,400	53	56
6.其他項	1,052	1	1
加總結果		4,544	4,803

表 38 非心臟類介入性透視攝影集體有效劑量

檢查項目	醫療輻射 檢查人次 (人)	集體有效劑量 (人西弗)	
		ICRP 60	ICRP 103
1.經皮血管內血管成形術	70,002	53	45
2.血管阻塞術	22,188	640	598
3.經皮穿肝膽管引流術(含修正術)	16,614	51	47
4.皮下穿刺腎造瘻術	10,173	5	5
5.逆行性膽道及胰管造影	9,681	1	1
6.其他項	42,452	250	292
加總結果		1,000	988

表 39 傳統透視攝影集體有效劑量

檢查項目	醫療輻射 檢查人次 (人)	集體有效劑量 (人西弗)	
		ICRP 60	ICRP 103
1.靜脈注射泌尿系統造影術	98,443	89	81
2.下消化道攝影	15,751	69	55
3.上消化道攝影	11,815	53	56
4.食道攝影	6,669	6	7
5.小腸系統	4,752	14	13
6.子宮輸卵管造影	21,567	32	24
7.其他項	7,324	9	9
加總結果		272	245

表 40 一般傳統 X 光集體有效劑量

檢查項目	醫療輻射檢查人次 (人)	集體有效劑量 (人西弗)	
		ICRP 60	ICRP 103
1.頭頸部	613,315	6	6
2.胸肩部	9,817,705	491	491
3.腹部(含骨盆腔)	1,304,911	287	209
4.腎臟-輸尿管-膀胱	2,303,997	553	507
5.脊椎	5,101,648	612	561
6.上肢	2,710,854	1	1
7.下肢	5,629,974	6	6
加總結果		1,956	1,781

表 41 乳房攝影集體有效劑量

檢查項目	醫療輻射檢查人次 (人)	集體有效劑量 (人西弗)	
		ICRP 60	ICRP 103
1.一般乳房攝影	232,602	33	79
2.放大乳房攝影	6,497	1	2
加總結果		34	81

表 42 牙科攝影集體有效劑量

檢查項目	醫療輻射檢查張數（張）	集體有效劑量（人西弗）	
		ICRP 60	ICRP 103
1.根尖周	14,162,700	14	71
2.咬翼式	567,455	1	6
3.咬合片	9,022	0.02	0.04
4.齒顎全景	3,680,755	11	37
5.測顱	2,755	0.03	0.03
6.顳顎關節（單側）	8,295	0.03	0.04
加總結果		26	114

最後將各個檢查項目的集體有效劑量進行加總，並以試算其集體有效劑量總和占民國 106 年集體有效劑量總和 $R\%$ 以修正，去推估未納入計算之檢查項目集體有效劑量，最後再除以 106 年之台灣總人口數（2,357 萬 1,227 人）以得之台灣每人年平均劑量，如表 43 至表 44。

表 43 集體有效劑量總和（S）

類別	R %	集體有效劑量總和（人西弗）	集體有效劑量總和（人西弗）
		ICRP 60	ICRP 103
1.電腦斷層	97%	24,087	23,013
2.核子醫學	96%	3,823	—
3.心臟類介入性透視攝影	100%	4,544	4,803
4.非心臟類介入性透視攝影	93%	1,075	1,062
5.傳統透視攝影	97%	280	253
6.一般傳統 X 光	100%	1,956	1,781
7.乳房攝影	100%	34	81
8.牙科攝影	100%	26	114

表 44 國民每人年平均劑量 (E_{Taiwan})

類別	台灣每人年平均劑量 (mSv)	百分比 (%)	台灣每人年平均劑量 (mSv)
	ICRP 60		ICRP 103
1.電腦斷層	1.02	67.5%	0.98
2.核子醫學	0.16	10.6%	—
3.心臟類介入性透視攝影	0.19	12.6%	0.20
4.非心臟類介入性透視攝影	0.05	3.3%	0.05
5.傳統透視攝影	0.01	0.7%	0.01
6.一般傳統 X 光	0.08	5.3%	0.08
7.乳房攝影	0.001	0.1%	0.003
8.牙科攝影	0.001	0.1%	0.005

本報告完成國內醫療輻射之集體有效劑量 (S) 以及國人個人平均年有效劑量 (E_{Taiwan}) 的估算，並將評估結果與美國比較如表 45、表 46。在集體有效劑量與個人平均年有效劑量之分佈，國內與美國是相似的；國內劑量最高的前三個類別分別為電腦斷層，次之為心臟類介入性透視攝影與核子醫學。其中，介入性透視攝影程序與透視攝影，因在檢查項目的臨床操作方式有極大的變異，無論在醫院之間、醫師執行程序之間、還有病人疾病複雜程度等都存在很高的差異，而這些的差異會帶來劑量的變異極大，且美國於 2016 年的 NCRP 184 號報告中也調整了類別內的檢查分類方法【42】，故而導致美國前後兩份報告的劑量排序略有不同。整體而言，國內的醫療輻射曝露造成之個人平均年有效劑量，亦即國民輻射劑量(E_{Taiwan})約為每年 1.51 毫西弗，低於美國的個人平均年有效劑量(E_{US})每年 2.33 毫西弗。詳細評估過程請參閱國民醫療輻射劑量調查研究計畫民國 111 年度委託研究計畫期末報告(如附件六)。

表 45 集體有效劑量百分比 (S_{60}) 比較

國家	台灣		美國	
報告文獻	本計畫		NCRP 184 號報告	
人口年份	2017		2016	2006
類別	百分比		百分比	
1.電腦斷層	67.5%	67%	62%	49%
2.核子醫學	10.6%	11%	18%	26%
3.心臟類介入性透視攝影	12.6%	13%	6%	8%
4.非心臟類介入性透視攝影	3.3%	3%	5%	7%
5.傳統透視攝影	0.7%	6%	9%	10%
6.一般傳統 X 光	5.3%			
7.乳房攝影	0.1%			
8.牙科攝影	0.1%			

表 46 個人平均年有效劑量比較

單位：毫西弗

國家	台灣	美國	
報告文獻	本計畫	NCRP 報告	
人口年份	2017	2016 (NCRP 184)	2006 (NCRP 160)
類別	$E_{TW\ 60}$	$E_{US\ 60}$	$E_{US\ 60}$
1.電腦斷層	1.02	1.45	1.46
2.核子醫學	0.16	0.41	0.73
3.心臟類介入性透視攝影	0.19	0.13	0.23
4.非心臟類介入性透視攝影	0.05	0.12	0.2
5.傳統透視攝影	0.01	0.2	0.3
6.一般傳統 X 光	0.08		
7.乳房攝影	0.001		
8.牙科攝影	0.001		
總計	1.51	2.33	2.92

三、消費性產品

(一) 吸菸行為

因菸草的葉片表面因其特殊絨毛結構，具有濃集氬氣衰變產物的特性，因此在菸草中可測得較高濃度的鉛-210 及鉍-210。本報告之主要目的在於探討菸草中放射性物質含量，其中的鉍-210 為阿伐核種，其所釋出的阿伐粒子穿透力不強，吸入體內後會在極短距離內有大量能量沉積，而對於人體組織細胞造成傷害。由解剖學發現其吸入體內後，會集中在支氣管分叉處形成輻射「熱點」，導致肺部受到偏高的輻射劑量【43】。

美國 2009 年通過之「預防家庭吸菸與菸草管制法案(Family smoking prevention and tobacco control ACT)」中，已納入強制菸商須降低菸草中放射性鉍-210，加上世界衛生組織(WHO)統計罹患致死率最高的癌症為肺癌【44】，使相關議題在近十年來又受到關心。

本中心針對國內常見 9 種品牌、22 類香菸樣品進行鉍-210 之分析檢測，本中心之分析方法主要參考美國能源部標準分析方法 HASL-300【45】中，Po-02-RC 係針對水、蔬菜、土壤、空氣濾紙樣品中鉍之分析方法(Polonium in Water, Vegetation, Soil, and Air Filters)。分析方法是將一包香菸菸草取出後以攝氏 60 度烘乾隔夜，再以粉粹機打碎均勻混合(可分樣後使用加馬能譜以鉀-40 為指標，確認是否已均勻混合)。取 5 克菸草樣品，加入 100 ml 硝酸及鉍-209 示蹤劑(約 30-80 毫貝克)，加熱盤加熱(約攝氏 80 度)進行消化直到快乾，期間使用磁攪拌子(鐵氟龍包覆)攪拌。若消化不夠完全，可再加 20 ml 硝酸與 3 ml 過氧化氫再加熱至快乾。由於硝酸會破壞硝化之後必須使用的銀片，改加入 6N 鹽酸 100 ml 後以 Whatman 41 號濾紙過濾，過濾後加熱濾紙至快乾，加入 0.5N 鹽酸溶解沉積物後棄置濾紙。溶液中

加入 1 ml 飽和抗壞血酸(ascorbic acid)及銀片，置於攝氏 60~80 度加熱盤上靜置 4 至 5 小時，讓鈾離子自然沉積於銀片表面上，期間適量補充 0.5N 鹽酸。取出銀片用去離子水稍加沖洗後，置於室溫乾燥，並進行阿伐能譜分析計測 8 萬秒，利用示蹤劑的計測結果推算化學回收率，進而換算鈾-210 活度濃度。

各香菸樣品的鈾-210 活度濃度範圍在每公斤 16.44 到 24.17 貝克。以每根香菸中的菸草重量 0.7 克換算，每根香菸鈾-210 含量範圍在 11.51 到 16.92 毫貝克之間，平均為 13.93 毫貝克。

此數值與美國 NCRP 第 160 號報告中採用之香菸鈾-210 活度(14 毫貝克)相近，參考國際文獻顯示其他國家菸草鈾-210 活度與本次國內常見香菸產品之鈾-210 活度差異不大，本報告以每根香菸鈾-210 活度濃度 0.014 貝克進行吸菸輻射劑量之評估。

吸菸習慣的部分，本報告以內政部公布之民國 107 年人口數，並參考衛生福利部國民健康署之國人吸菸行為調查、青少年吸菸行為調查等報告中之吸菸比例，另參考國健署之健康促進統計年報中之每天平均吸菸根數，評估吸菸造成的個人年有效劑量(E_{EXP})及集體有效劑量(S)分別為 0.45 毫西弗(每天吸一包菸)及 1,110,452 人-毫西弗，因此推算香菸中鈾-210 造成國人平均國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.047 毫西弗，如表 47。

表 47 國人吸菸行為之集體有效劑量

年齡	人口數 (人)		吸菸比例 (%)		集體有效劑量(S) (人-毫西弗)	
	男性	女性	男性	女性	男性	女性
<12 歲	1,253,538	1,161,174				
國中學生 (12-14 歲)	331,183	302,332	4.0%	1.4%	5,961	952
高中職學生 (15-17 歲)	381,252	349,041	11.3%	4.4%	19,387	3,456
成年人 (>18 歲)	9,746,940	10,063,472	23.40%	2.40%	1,026,353	54,343
合計	11,712,913	11,876,019			1,051,701	58,751
	23,588,932				1,110,452	

與國外文獻之數據相比，美國 NCRP 第 160 號報告採用之香菸針-210 活度為 14 毫貝克，報告中美國吸菸造成的國民輻射劑量(E_{US})為 0.0455 毫西弗(mSv)。另日本原子力安全研究協會於 2020 年發表之報告「生活環境輻射-國民輻射劑量的計算（第 3 版）」，報告中吸菸造成的國民輻射劑量(E_{JP})為 0.040 毫西弗(mSv)，顯示我國與其他國家吸菸造成的國民輻射劑量差異不大。詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-109-319Rev3 國人吸菸造成的輻射劑量評估-112 年修正版(附件七)。

(二) 飛航活動

本中心參考美國輻射防護與度量委員會(NCRP)的作法，將民用航空宇宙輻射列為消費性產品的子項目。本中心於民國 87 年進行第一次國民輻射劑量評估，當時以 25 條國際線及 28 條國內線進行飛航劑量之評估，計算我國國民輻射劑量(E_{Taiwan})結果分別為每年 3.1 微西弗及每年 0.057 微西弗；惟歷經 20 年社會經濟變化，國人在飛航行為上與當時的狀況相比有相當大的變化，因此，於本次國民輻射劑量調查重新評估國人的飛航劑量。

NCRP 101 號報告【46】指出，宇宙輻射與太陽粒子是飛機飛航期間對航空公司機組人員與乘客受到輻射曝露的主要來源。由於宇宙輻射並非定值，而是受太陽活動影響，呈現約 11~12 年的周期變動，在太陽輸出最大的時候，隨著太陽黑子數量的增加，嵌入太陽輻射中的磁場有助於將更多的銀河宇宙輻射分量偏轉遠離地球。出於這個原因，在最大太陽活動期間，劑量比平均值低約 20%，在太陽活動最小時期間高約 20%。在太陽活動極小期期間，太陽耀斑極有可能會產生異常多的高能粒子，從而導致飛航過程中的宇宙輻射增加。

太陽的活動狀況可採用太陽表面釋出的離子強度(也稱為太陽風)作為指標，當太陽風強度高時會形成高電位差，阻隔來自銀河系的高能帶電粒子，進而降低宇宙輻射劑量。由太陽風換算的向陽電位(Heliocentric potential)可在美國民航局取得資料【47】，近 60 年太陽風強度的變動資料如圖 12，平均值為 589 MV；2015 年(民國 104 年)5 月之後，太陽風均偏弱，低於平均值，也就是近幾年宇宙輻射皆為偏高的狀態。若以近年(民國 104 年至今)之宇宙射線進行劑量計算，會高估整體之飛航劑量。

航班會因飛航路線會受到飛行日期或天氣影響，不同航空業者的飛行計畫也多有差異。由於無法得到民國 104 年至 108 年近五年每條航線的確實飛航路線，為了能夠使劑量評估結果更客觀且具一致性，並涵蓋近五年的評估日期，本報告將採用平均太陽風強度(589 MV)作為飛航劑量評估的基礎，訂定 2015 年 5 月 20 日上午 8 點 0 分為固定出發日，以作為後續劑量評估軟體的參數基準以進一步計算與分析。

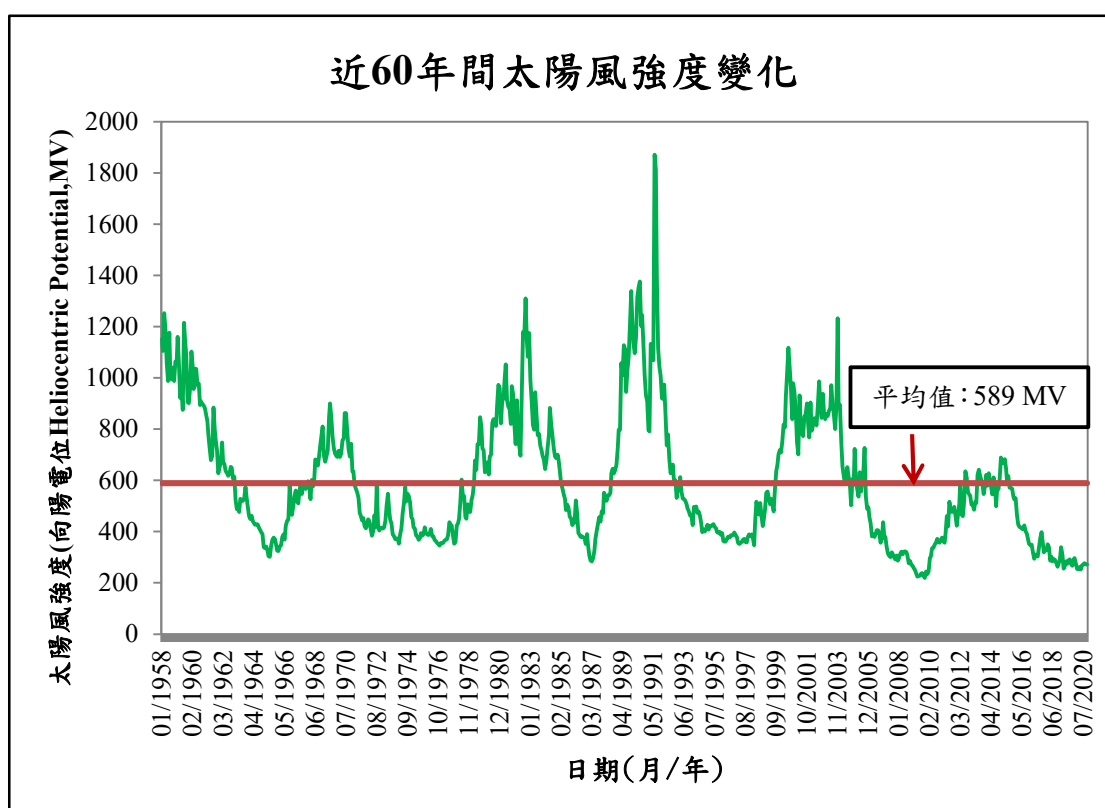


圖 12 近 60 年太陽風強度資料並換算為阻隔銀河宇宙輻射之電位

現行評估飛航行為的宇宙輻射個人年有效劑量(E_{EXP})包括 CARI、EPCARD、SIEVERT、NTHU FDC 等軟體；其中，CARI 與 EPCARD 分別為美國聯邦航空總署(FAA)與德國環境衛生研究中心(Helmholtz ZentrumMünchen)所發展，量測銀河與太陽射線等宇宙輻射之軟體；SIEVERT 則為法國商用軟體，利用 EPCARD 模式輸出資料進行飛

航相關人員曝露劑量評估【48】；NTHU FDC【49】為我國國立清華大學自行研發之飛航劑量評估軟體，可提供大圓模式(模擬地表兩點間的最短飛行路徑)及實際飛航路線等兩種模式，可依需求選用合適之劑量模擬評估方法。

因國內能取得之飛航相關資料有限，且為降低過多人為假設所造成之評估誤差，客觀評估民用航空之飛航劑量，本報告利用交通部民航局所提供國人飛航行為調查結果【50】，針對國際線、兩岸線與國內線三個部分的旅遊人次進行熱門航線探討，再分別以台灣之 NTHU FDC 軟體之大圓模式飛航劑量評估軟體執行飛航劑量計算，評估國人因搭乘飛機所造成之國民輻射劑量。考量民國 109 年至 111 年因 COVID-19 疫情關係影響全球航空業，本報告僅彙整民國 104 年至 108 年間台灣地區的熱門航線進行國人飛航行為之調查結果。

在國民輻射劑量計算中，相較於國內線與兩岸線，國際航班人數占比高、飛航時間長且有部分航線會經過高緯度區域，因此，初步研判國際線為民用飛航宇宙輻射劑量主要之來源。為涵蓋大部分的劑量來源，累加人數達總人次 95 %以上之主要航線，預計採用前 65 大條航線進行評估；兩岸航線自開航以來雖逐年上升，但近年已趨穩定，變化不大，且與國內航線旅客人數相近，每年約一千一百萬人次，約為國際航線人數的五分之一(如圖 13)，因航程較遠時間較長，且部分航線飛往高緯度區域的城市，因此有可能會有較高輻射劑量，故納入評估項目。為涵蓋大部分的劑量來源，累加人數達總人次 95 %以上之主要航線，預計採用前 75 大條航線進行評估；國內線近 5 年內趨勢變化不大，每年約一千一百萬人次，約為國際航線人數的五分之一。因國內航線航程較短，飛機通常不會飛太高且航程時間不長，加上航線所在都處於低緯度區域，故可預期國內線之宇宙輻射劑量不高。因

國內航線數目較少，預計涵蓋 100 %航線，採用 23 條航線進行評估。本報告依選定之國際線 65 條航班、兩岸線 75 條與國內線 23 條航班之熱門航線進行評估；軟體部分，先期評估使用之 SIEVERT 軟體因取得為公開的簡易試算軟體，只開放部分功能，對部分地區之航點設定較簡化，多數機場不在其內建選項中；NTHU FDC 飛航劑量評估軟體為我國自主研發之本土飛航劑量評估程式，係針對台灣地理條件及經、緯度所設計之劑量評估軟體，再加上為與兩岸線、國內線使用一致飛航劑量評估軟體，故國際線、兩岸線、國內線皆採用 NTHU FDC 評估所得之劑量。

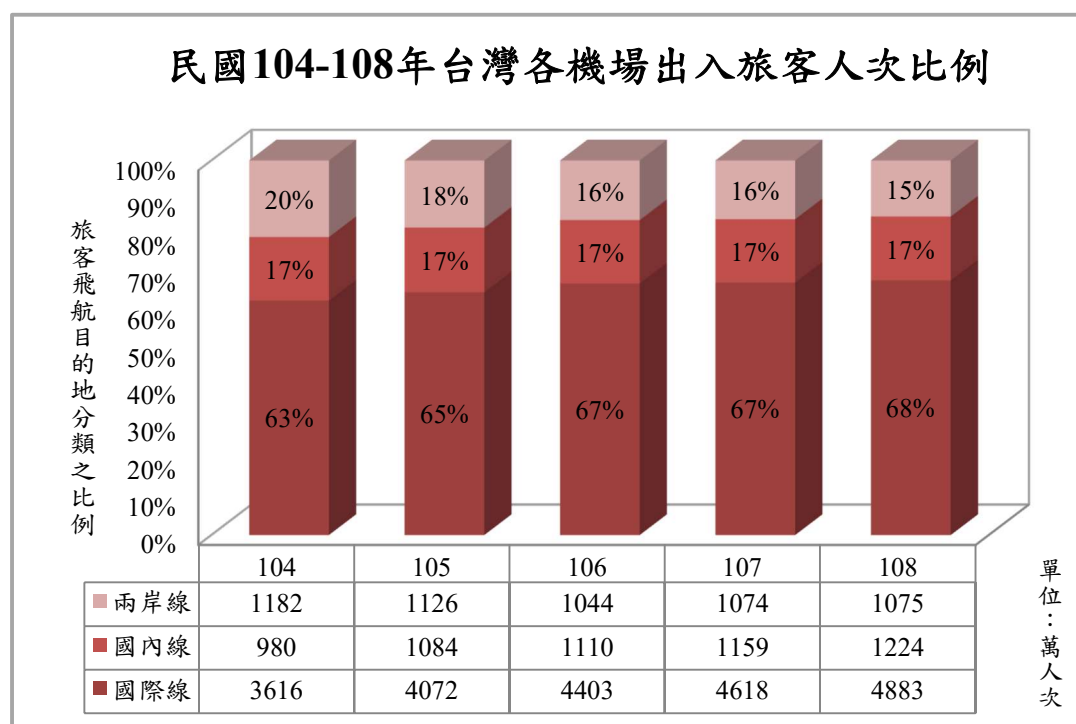


圖 13 民國 104-108 年台灣各機場出入旅客人次比例統計圖

評估結果國際線 NTHU FDC 計算之各航次總個人有效劑量範圍為 1.8 至 157.9 微西弗；兩岸線之各航次總個人年有效劑量(E_{EXP}) (去

程與回程)範圍為 1.7 至 20.5 微西弗；國內線之各航次總個人年有效劑量(E_{EXP})(去程與回程)範圍為 0.11 至 0.25 微西弗，分析結果如表 48。另比較不同區域航線之結果如圖 14，歐美航線因飛行距離較其他航線長遠，導致其受宇宙輻射曝露的時間相對較長，因而其輻射曝露劑量較其他航線高，評估結果顯示，歐美航線中的桃園飛往紐約曝露劑量最高；而亞洲地區之國家大多分布於赤道附近或位於低緯度，再加上距離台灣較近，飛航時間較短，所以曝露劑量相對較低。劑量曝露多寡主要與飛行高度、飛行時間、地磁緯度與太陽活動週期等因素有關，因使用相同之日期與時間點進行飛航劑量之計算，且飛行高度由劑量評估軟體之內建程式所訂定，所以降低了太陽活動週期與飛行高度造成之不確定性，故於此次評估中飛行時間與國家緯度分布為主要影響劑量評估結果之因素。

利用飛航劑量評估軟體計算所得之輻射劑量，並結合國人飛航行為調查結果，可推算集體有效劑量(S)。集體有效劑量(S)為各航次單趟之平均有效劑量(取往返之平均)與年平均出入境人次相乘後之總合，計算國際線 65 條經 NTHU FDC 之集體有效劑量(S)之平均值為每年 231.6 人-西弗；兩岸線 65 條經 NTHU FDC 計算之集體有效劑量(S)為每年 13.1 人-西弗；國內線 23 條經 NTHU FDC 計算之集體有效劑量(S)為每年 1.0 人-西弗。最後，彙整內政部戶政司【51】104 年至 108 年之全台人口數，其平均人口數為 23,559,034 人。將國際線、兩岸線與國內線加總之集體有效劑量(S)為每年 245.7 人-西弗，再除以總人口數，即可獲得民用航空宇宙射線造成國人之國民輻射年劑量(E_{Taiwan})為每年 0.010 毫西弗。

表 48 國際線、兩岸線與國內線等飛航劑量分析結果

飛航行為 分類	劑量計算結果	飛航劑量計算軟體	假設條件
		NTHU FDC	
國際線	E _{EXP} (微西弗) (去程)	0.9~78.7	2015 年 5 月 20 日為出發日。 - NTHU FDC 之 Altitude / Speed 採用 10500 公尺搭配 900 km/h。
	E _{EXP} (微西弗) (回程)	0.9~79.2	
	E _{EXP} (微西弗) (去程與回程)	1.8~157.9	
兩岸線	E _{EXP} (微西弗) (去程)	0.8~10.2	2015 年 5 月 20 日為出發日。 - NTHU FDC 之 Altitude / Speed 採用 10500 公尺搭配 900 km/h。
	E _{EXP} (微西弗) (回程)	0.8~10.3	
	E _{EXP} (微西弗) (去程與回程)	1.7~20.5	
國內線	E _{EXP} (微西弗) (去程)	0.05~0.13	2015 年 5 月 20 日為出發日。 - NTHU FDC 之 Altitude / Speed 採用 4000 公尺搭配 500 km/h。
	E _{EXP} (微西弗) (回程)	0.05~0.13	
	E _{EXP} (微西弗) (去程與回程)	0.11~0.25	

註：總有效劑量為去程劑量值加上回程劑量值。

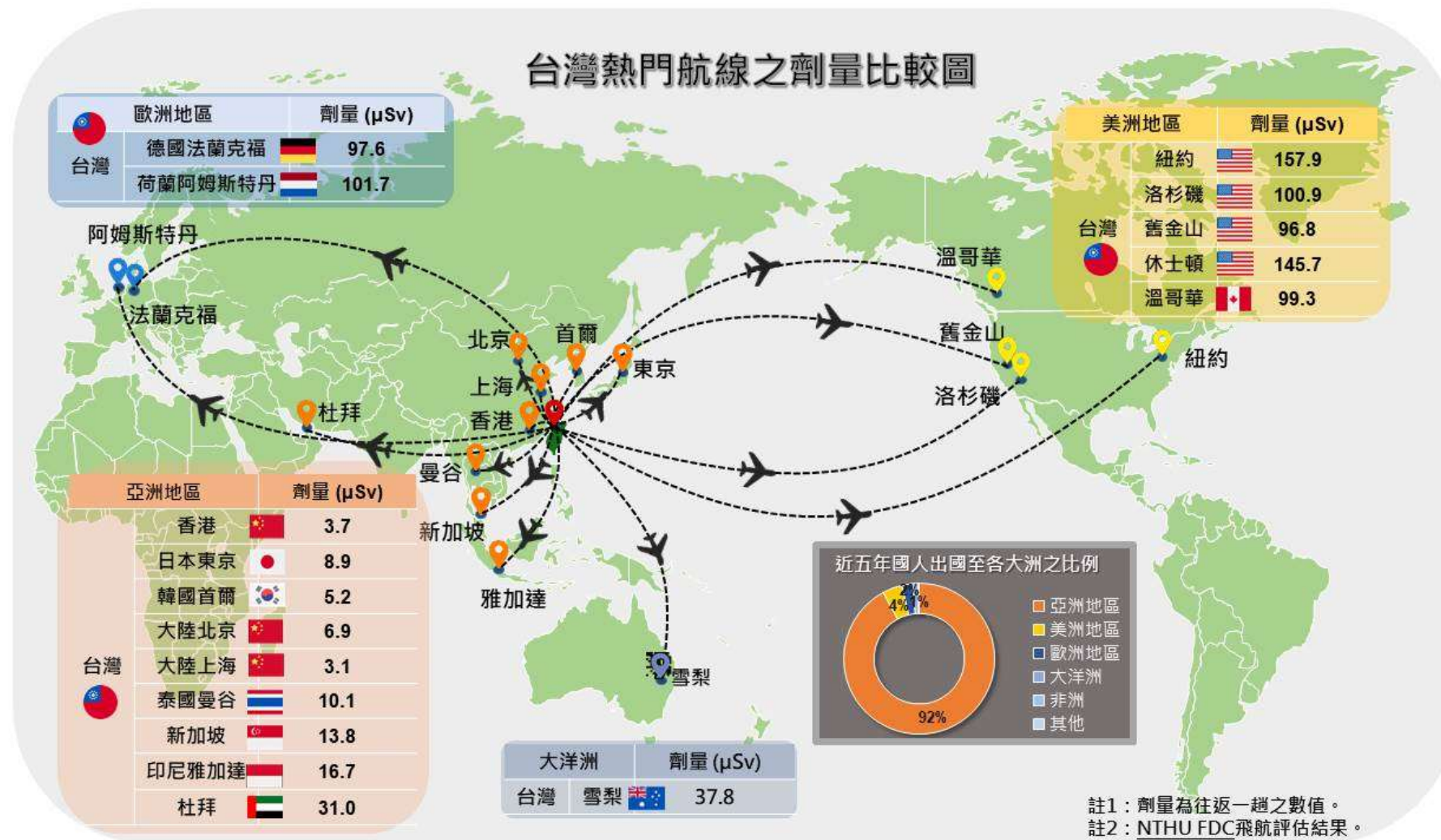


圖 14 以 NTHU FDC 之台灣熱門航線劑量比較圖(本研究整理)

本報告的評估結果與 NCRP 第 160 號報告、日本之民用航空宇宙輻射劑量評估結果比較如表 49。台灣經飛航劑量軟體評估結果回推之個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.007 毫西弗，與日本的每年 0.008 毫西弗較為相近，但遠小於美國的每年 74.5 毫西弗；主要係因我國與日本皆為海島型國家，且生活型態較為相近，所以評估全體國民之個人平均有效劑量結果差異不大。集體有效劑量(S)部分，台灣的評估結果為每年 245.7 人-西弗，皆遠小於美國的每年 10323 人-西弗、日本的每年 1013 人-西弗；其差異來源主要與民眾搭乘飛機之人次與總人口數有關，因台灣人口數遠低於美國及日本，故台灣評估之集體有效劑量(S)為最低。詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-110-310Rev4 民用航空宇宙輻射之國民劑量評估-112 年修正版(附件八)。

表 49 民用航空宇宙輻射劑量評估結果之比較

分類	個人年有效劑量 E_{EXP}^a (毫西弗/年)	集體有效劑量 S (人-西弗/年)
台灣(111 年版)	0.017 ^b 0.007 ^c	245.7
NCRP 160	74.5	10323
日本	0.008	1013 ^d

註 1：a 為曝露族群之平均年有效劑量，分母為曝露族群人數；非國民輻射劑量(E_{Taiwan})，分母為全台總人數。

註 2：b 為曝露人口以國人護照持有率 6 成推算之； $0.010/0.6=0.017$ 毫西弗/年。

註 3：c 為集體有效劑量回推取得(國際線+兩岸線+國內線)個人有效劑量；國際線= $(231.59 \text{ 人-西弗/年}) \times 1000 / (43796025 \text{ 人次/年}) = 0.0053$ 毫西弗；兩岸線= $(13.12 \text{ 人-西弗/年}) \times 1000 / (11259114 \text{ 人次/年}) = 0.0012$ 毫西弗；國內線= $(1.0 \text{ 人-西弗/年}) \times 1000 / (11092337 \text{ 人次/年}) = 9.02 \times 10^{-5}$ 毫西弗，計 $0.0053+0.0012+9.02 \times 10^{-5}=0.0065$ 毫西弗/年，以 0.007 毫西弗/年表示之。

註 4：d 為 $(0.008 \text{ 毫西弗/年} \times 126706000) / 1000 = 1013$ 人-西弗/年。

(三) 農業肥料

化學肥料可提高作物產量，在現代農業管理有其重要性，因此化肥工業遍布世界各地；台灣常使用的肥料主要分為複合肥料、磷肥料與鉀肥料，複合肥料是含有氮、磷與鉀三種元素的肥料，氮肥中的氮由氮產生，磷肥中的磷由磷酸鹽礦石獲得，鉀肥中的鉀則來自氫氧化鉀或全氧化鉀(化學式： K_2O)，磷酸鹽礦石含有鈾系、釷系及其衰變系列核種，氮則不含鈾系與釷系天然核種，氫氧化鉀或全氧化鉀含有少量的鉀-40，天然存在的鉀-40 占整體鉀元素的比率約為 0.0117%【52】；肥料中含有多種天然放射性核種，其生產過程中作為原料的礦物以鈾-238 及其衰變系列(如鐳-226)和鉀-40 為主，還有少量釷-232 及其衰變系列【53、54】。

土壤中的天然放射性因地而異，肥料是農地土壤中除天然來源之外的主要放射性來源【55、56】。化肥的大量使用會增加土壤和地下水中放射性核種的含量，進而增加人類經飲用水和食物鏈等曝露途徑吸入的放射性核種，肥料中的鐳-226 一旦沉積在骨骼中，將可能造成生物損傷【57】。

農業活動中的肥料使用，會有鈾系、釷系和鉀-40 等放射性核種，會造成使用者的體外曝露(加馬輻射)，與吸入氬氣及其衰變產生阿伐粒子的體內輻射曝露，從輻射防護的角度來看，監測肥料中的天然放射性具有其意義【58】。

為瞭解民眾進行農業耕種時施作肥料行為所造成的輻射劑量，本報告調查國內常用 13 件市售肥料，採用加馬能譜分析方法，計算肥料樣品的鐳當量濃度、體外風險指數、體內風險指數、加馬射線係數，並評估平均每位農民與國民因肥料樣品施作於農地後所造成的吸收

劑量及年有效劑量。

本中心從農會購買國內製造、使用頻率高的 13 件市售化學肥料，品項涵蓋：複合肥料、磷肥及鉀肥等類型，如表 50 所示，將這些樣品放置於 110°C 的烘烤箱中烘乾 24 小時，以確保完全去除水分，然後將樣品在乾燥器中冷卻至室溫，再以研磨機粉碎。將乾燥均質樣品裝入密封的聚乙烯計測容器（直徑 5.7cm，高 4.5cm）中，容器用黏性環氧樹脂膠帶密封以防止氡-222 和氡-220 逸出，製備後靜置 30 天，再送入高純鍺輻射偵檢器量測。

表 50 13 件肥料樣品中所含鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度

Code	Fertilizer Type	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
M1	Compound	85.7±0.9	1.3±0.4	2616.7±47.1
M2	Compound	151.6±8.3	3.8±1.4	3786.8±83.3
M3	Compound	184.2±9.8	9.2±3.3	3101.0±62
M4	Compound	114.7±5.3	1.6±0.5	2951.0±56.1
M5	Compound	89.8±5.8	1.5±0.4	4932.6±113.4
M6	Compound	148.7±9.4	1.1±0.4	2773.4±47.1
M7	Compound	106.2±8.7	6.7±2.3	3722.7±70.7
M8	Compound	120.5±9.0	1.8±0.6	2762.0±44.2
M9	Compound	140.5±12.5	8.0±2.9	3408.3±64.8
P1	Phosphate	537.0±4.8	4.6±1.2	258.3±8.5
P2	Phosphate	567.6±4.5	3.5±0.8	360.0±11.4
K1	Potash	150.4±19.6	2.9±1.0	3871.8±77.4
K2	Potash	132.9±13.3	9.2±1.0	2687.3±51.1

鐳-226、釷-232 和鉀-40 的放射性核種活度濃度分析使用 CANBERRA 公司（現為 MIRION 公司）製造的 P 型同軸高純鍺輻射偵檢器測量，偵檢器之相對偵測效率為 40%，偵檢器在 1332.5 keV 處之能量解析度小於 2 keV，偵檢器連接到三合一數位核儀模組，再

連接到個人電腦，透過多頻道分析軟體系統進行數據分析，該系統具有 4096 個頻道；偵檢器進行效率校正的射源是使用與待測樣品相同幾何形狀且裝填於馬林氏計測容器之標準射源。

為降低計測時之背景輻射干擾，高純鍺輻射偵檢器置於圓柱型屏蔽體內，主屏蔽之等效鉛當量大於 10 cm，內襯以原子序由外而內逐漸遞減的多層材料金屬屏蔽，屏蔽內計測能量範圍在 50 keV 至 2000 keV，背景值可小於 2.5 計數/秒(CPS)。

在平衡狀態下鈾-238 的衰變系列中，鐳-226 及其子核系列涵蓋 99.27%母核種鈾-238 的加馬輻射，因此，國際間的研究文獻中，通常以鐳-226 代表鈾-238 系列的放射性核種活度濃度【59】。鐳-226 活度濃度是從鉍-214 的 609.31 keV 能峰測量出的，沒有使用鐳-226 的 186 keV 光子峰，從鉈-208 的 583.19 keV 能峰估計釷-232 的活度濃度；使用鉀-40 本身的 1460 keV 能峰估計鉀-40 活度濃度。肥料中放射性核種 i 由下列公式計算：

$$A_i = \frac{C_j}{p_{ji} \cdot w \cdot t \cdot e}$$

A_i = 肥料中放射性核種 i 的活度濃度(Bq/kg)，包含鐳-226 活度濃度(A_{Ra})、釷-232 活度濃度(A_{Th})、鉀-40 活度濃度(A_K)；

C_j = 計測核種 j 能峰的淨計數，計測核種 j 分別有鉍-214(C_{Bi})、鉈-208(C_{Ti})及鉀-40(C_K) (Counts)；

p_{ji} = 計測核種 j 能峰對核種 i 的加馬射線發射機率(%)；

w = 乾燥樣品淨重量(kg)；

t = 測量時間(sec)；

e = 偵測器的絕對效率(%)。

本報告所分析 13 件肥料樣品之鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的活度濃度如表 1。編號 M1 至 M9 的樣品屬於複合肥料，鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的平均活度濃度分別為 126.9 ± 2.8 、 3.9 ± 0.6 、 3339.4 ± 22.9 貝克/公斤(Bq/kg)；編號 P1 與 P2 的樣品屬於磷肥，鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的平均活度濃度分別為 552.3 ± 3.3 、 4.0 ± 0.7 、 309.1 ± 7.1 Bq/kg；編號 K1 與 K2 的樣品屬於鉀肥，鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的平均活度濃度分別為 141.7 ± 11.8 、 6.0 ± 0.7 、 3279.6 ± 46.4 Bq/kg。13 件肥料樣品所含核種活度濃度均小於天然放射性物質管理辦法基準值(鐳-226：1000 貝克/公斤、鈾-232：1000 貝克/公斤和鉀-40：10000 貝克/公斤【60】)。

國際文獻說明很難採用上述不同放射性核種的活度濃度直接進行比較，因此，聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR) 2008 年報告中提出鐳當量濃度 (Radium equivalent concentration, R_{aeq})作為比較的指標。

鐳當量濃度是比較樣品中所含放射性核種相當於鐳活度濃度之比較指標，可由下列公式計算【55】：

$$R_{aeq} = (A_{Ra} + 1.43 * A_{Th} + 0.077 * A_K) * Cf$$

Cf = 肥料占農地土壤的比率(%)；

其中， A_{Ra} 、 A_{Th} 和 A_K 分別是各樣品中鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的活度濃度(Bq/kg)，假設肥料與 0.5 公尺厚的土壤混合，乾燥土壤的平均密度為 1300 公斤／立方公尺；依據行政院農業委員會之農業統計資料，於臺灣地區肥料產銷量值統計年報，民國 109 年之複合肥料、氯化鉀、硫酸鉀、過磷酸鈣等化學肥料之施用總量為 737015.7 公噸，以及農耕土地面積統計年報中，109 年短期農耕土地面積為 479185.72 公頃數據，不列入長期農耕土地(為休耕或荒廢農地)，計算出肥料占

農地土壤的比率 $Cf=737016 \times 10^3 / (479185.72 \times 10000 \times 0.5 \times 1300)$ 為 0.0236%。因為施肥用量因人而異，本報告採保守估算，假設 Cf 為 0.236%，即施用 10 倍濃度肥料進行估算，本報告分析 13 件肥料樣品施作於農地後的鐳當量濃度如表 51，經稀釋後之肥料均未超過經濟合作暨發展組織(OECD)1979 年報告中提出鐳當量濃度的建議值(370 貝克/公斤)，磷礦石或肥料中的 R_{aeq} 值若達 370 貝克/公斤，對應之加馬射線造成的有效劑量為 1.5 毫西弗/年(mSv/y) 【61】。農民在進行農耕活動時，會受到已經施作於農地肥料的體外曝露，體外風險指數(The external hazard index，簡稱 H_{ex})可由下列公式計算：

$$H_{ex} = \left(\frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) * Cf$$

其中 A_{Ra} 、 A_{Th} 和 A_K 分別是各肥料樣品中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度(Bq/Kg)，UNSCEAR 2000 年報告指出，若 H_{ex} 值小於 1，則加馬射線所造成之體外劑量可低於每年 1.5 毫西弗，本報告分析 13 件肥料樣品施作於農地後的體外風險指數計算如表 51。

表 51 肥料樣品施用於農地後的鐳當量濃度、體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效劑量(對農民)及加馬射線係數

Code	Fertilizer Type	Cf (%)	Raeq (Bq/kg)	Hex	Hin	D (nGy/h)	E (μSv/y)	I _γ
M1	Compound	0.236	0.682	0.0018	0.0024	0.3547	0.4350	0.0027
M2	Compound	0.236	1.059	0.0029	0.0038	0.5462	0.6699	0.0042
M3	Compound	0.236	1.029	0.0028	0.0040	0.5217	0.6398	0.0040
M4	Compound	0.236	0.812	0.0022	0.0029	0.4199	0.5150	0.0032
M5	Compound	0.236	1.113	0.0030	0.0036	0.5890	0.7223	0.0046
M6	Compound	0.236	0.859	0.0023	0.0033	0.4387	0.5380	0.0034
M7	Compound	0.236	0.950	0.0026	0.0032	0.4945	0.6065	0.0038
M8	Compound	0.236	0.792	0.0021	0.0029	0.4078	0.5001	0.0031
M9	Compound	0.236	0.978	0.0026	0.0035	0.5028	0.6166	0.0039
P1	Phosphate	0.236	1.330	0.0036	0.0070	0.6178	0.7577	0.0045
P2	Phosphate	0.236	1.417	0.0038	0.0074	0.6596	0.8090	0.0048
K1	Potash	0.236	1.068	0.0029	0.0038	0.5520	0.6770	0.0043
K2	Potash	0.236	0.833	0.0022	0.0031	0.4247	0.5208	0.0033
Average						0.502	0.616	

除了體外曝露外，氡及其短壽命子核種對呼吸器官也有危害，常用於評估因地表天然放射性核種及後續曝露途徑造成的體內曝露風險，例如評估農作物、井水等，體內風險指數(The internal hazard index，簡稱 H_{in})可由下列公式計算：

$$H_{in} = \left(\frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) * Cf$$

其中 A_{Ra}、A_{Th} 和 A_K 分別是各樣品中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度；UNSCEAR 2000 年報告指出，若 H_{in} 值小於 1，則加馬射線所造成之體內劑量可低於每年 1.5 毫西弗，本報告分析 13 件肥料樣品施作於農地後的體內風險指數結果計算如表 52。

從這些已經施作於農地的肥料中所含的放射性核種所發出的加

馬射線，經過乾燥空氣離地表面 1 公尺處所造成的空間吸收劑量 (Absorbed dose，簡稱 D) 可由下列公式計算：

$$D \left(\frac{\text{nGy}}{\text{h}} \right) = (0.462 \times A_{\text{Ra}} + 0.621 \times A_{\text{Th}} + 0.042 \times A_{\text{K}}) \times C_f$$

其中 A_{Ra} 、 A_{Th} 和 A_{K} 分別是各樣品中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度；UNSCEAR 2000 年報告提到全球肥料樣品施作前的吸收劑量平均值為 59 奈格雷/時；本報告計算 13 件肥料樣品施作於農地後以 C_f 為 0.236% 計算，離地表面 1 公尺處所造成的吸收劑量平均值為 0.502 奈格雷/時如表 58，遠低於全球肥料樣品施作前之空間吸收劑量平均值，結果與國外同類型研究文獻接近【62】。

施作於農地的肥料中所含鐳-226、釷-232 和鉀-40 放射性核種所發射的加馬射線造成的年有效劑量 (The annual effective dose，簡稱 E) 可由下列公式計算：

$$E \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{y}} \right) = D \left(\frac{\text{nGy}}{\text{h}} \right) \times 8760 \left(\frac{\text{h}}{\text{y}} \right) \times O \times C \left(\frac{\text{mSv}}{\text{nGy}} \right) \times 10^3 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{mSv}} \right)$$

其中 O 是佔用因子，考量農民受肥料所含天然放射性物質的每日平均曝露時間，定義 O 值為 0.2； C 是空間吸收劑量與有效劑量的轉換因子 (0.7×10^{-6} 毫西弗/奈格雷)，考量農業活動在通風良好的戶外，正常施用肥料狀況下，肥料所含鐳-226 的子核種氦氣所造成的體內曝露忽略不計，13 件肥料樣品施作於農地後造成的年有效劑量計算如表 2，年有效劑量僅包括體外曝露，「農民」之平均年有效劑量 (E_{Exp}) 為每年 0.616 微西弗 (μSv)；參考行政院農業委員會公布民國 111 年 10 月農民健康保險投保人數 966,281 人，參考內政部戶政司民國 111 年 12 月戶口統計資料表中全國人口數 23,264,640 人，計算「國民」之平均年有效劑量 (E_{Taiwan}) 為每年 0.026 微西弗 ($=0.616 \times 966281/23264640$)。肥料樣品施作於農地後造成農民或國民的年有效

劑量皆遠低於我國及全球典型的背景輻射，且低於自然背景的變動範圍，對人體健康的風險微乎其微【63】。

本報告分析 13 件肥料樣品施作於農地後造成的體外射線輻射危害，可以透過加馬射線係數進行評估，加馬射線係數(Gamma Index，簡稱 I_γ)可由下列公式計算【64】：

$$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{3000}$$

其中 A_{Ra} 、 A_{Th} 和 A_K 分別是各樣品中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度；UNSCEAR 2000 年報告中敘述，若 I_γ 值小於 6，則加馬射線所造成之有效劑量會低於每年 1 毫西弗；本報告分析之 13 件肥料樣品施作於農地後的加馬射線係數結果計算如表 2， I_γ 均低於 6。

本報告分析 13 件肥料樣品中有 9 件複合肥料、2 件磷肥、2 件鉀肥，為與其他國家肥料進行比較，將分析所得之鐳當量濃度、加馬射線係數並依類別進行平均，並不考量肥料占農地土壤之比例。9 件複合肥料之平均鐳當量濃度為 0.919(貝克/公斤)，不考量肥料占農地土壤之比例回推鐳當量濃度為 $0.919/0.236\%=390$ (貝克/公斤)。

另 9 件複合肥料之平均加馬射線係數為 0.0037，不考量肥料占農地土壤之比例回推加馬射線係數為 $0.0037/0.236\%=1.56$ 。參考其他研究文獻並與其他國家肥料之比較結果詳如表 52，國內市售肥料之鐳當量濃度與加馬射線係數與日本較相近。

本報告分析 13 件市售肥料中鐳-226、釷-232 和鉀-40 的活度濃度，結果均低於天然放射性物質管理辦法的基準值。考量農業活動在通風良好的戶外，在正常施用肥料狀況下，肥料占土壤的比率，計算在正常情況下施用這些肥料所造成的鐳當量濃度、體外風險指數、體內風險指數、吸收劑量、年有效劑量及加馬射線係數，計算結果均遠低於

歐盟委員會指導方針【63】或 UNSCEAR 2000 年報告所提出建議值。這些建議值分別為 370 貝克/公斤、小於 1、小於 1、59 奈格雷/時、480 微西弗/年、小於 1。

綜上，肥料樣品施作於農地後，造成「農民」的個人年平均有效劑量(E_{Exp})為每年 0.616 微西弗，遠低於一般民眾每年 1 毫西弗之劑量限值，結果顯示國內正常施作肥料時不需進行輻射防護措施；此結果再除以全國總人口數，評估出農業肥料所造成「國民」之平均年有效劑量，亦即國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 0.026 微西弗。詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-111-306Rev2 消費性產品(農業肥料)之國民輻射劑量評估-112 年修正版(附件九)。

表 52 本文肥料樣品(施用於農地前)的鐳當量濃度、加馬射線係數與其他國家之比較

Country	Fertilizer Type	Raeq* (Bq/kg)	$I\gamma$	Literature source
Taiwan(M1-M9)	Compound	390	1.56	This study
Taiwan(P1-P2)	Phosphate	582	1.96	This study
Taiwan(K1-K2)	Potash	403	1.6	This study
Japan	Compound	454	1.63	【64】
Egypt	Compound	613	2.06	【66】
Brazil	Compound	1772	12.3	【67】
Saudi Arabia	Compound	275	Not calculated	【68】
Algeria	Compound	1168	9.6	【69】
Bengal	Phosphate	374	Not calculated	【70】

*註：未乘上肥料占農地土壤的比率(f)結果。

(四) 燃煤電廠

依聯合國原子輻射效應科學委員會在 1993 年出版的 UNSCEAR 1993 報告【71】，指出燃煤電廠例行作業會產生飛灰與爐底灰等煤渣，因煤炭本身即含鈾與鈾系等天然放射性物質，煤炭燃燒過程會釋放出這些天然放射性物質，經大氣擴散及乾濕沉降後濃縮儲存在土壤等環境介質當中。另有國外研究內容指出【72】，燃煤於燃燒的過程將煤中的有機物去除，進而產生濃縮的情況，經過大氣擴散及乾濕沉降後，部分燃煤電廠周圍土壤測得含有較高濃度之天然放射性物質，較其他地點天然背景輻射為高。本中心於民國 87 年進行第一次國民輻射劑量評估，與當時的狀況相比，現今已無電視映像管產品之流通與使用，為補充國民輻射劑量消費性產品及其活動之調查研究，本中心針對國內燃煤電廠周圍之空浮與土壤進行採樣調查與量測，並參考燃煤電廠周圍人口分布之情形，評估當地居民因燃煤電廠產生之煤灰所造成的輻射劑量。

1. 燃煤設施周圍之空浮採樣調查及居民輻射劑量評估

火力發電廠之燃煤鍋爐屬高溫燃燒，煤炭高溫燃燒後排放大量細微粒可能對自然環境、人類身體健康造成影響。煤炭燃燒過程將有機成分轉換成氣態物質排放至大氣，而放射性物質則在燃燒過程濃縮至底灰及飛灰，提高飛灰及底灰之天然放射性核種活度。燃煤鍋爐燃燒過程排放粒狀物 (PM)、二氧化硫 (SO₂)、氮氧化物 (NO_x)、一氧化碳 (CO)、揮發性有機化合物 (VOCs) 及各種微量元素，而這些物質還包括微粒上所含之天然放射性核種，此物質經煙囪排放至大氣，再藉由擴散作用間接污染我們的生活環境。

煤炭含有來自地殼之天然放射性核種(如 U-238、K-40、Th-232)

及其衰變產物。煤炭上天然核種之活度與一般土壤之活度大致相同，許多人類活動與煤炭運用有關，尤其是製造業及電力業大量使用煤炭作為燃料，燃燒過程產生放射性核種之濃縮現象，而導致大氣微粒上天然放射性核種活度增加。

為探討燃煤設施周圍懸浮微粒之輻射活度濃度調查及居民輻射劑量之評估，本中心於民國 110 年委託國立屏東科技大學，規劃於民國 110 年 4 月 13~15 日及民國 110 年 10 月 23~25 日進行南部興達電廠廠區內之大氣懸浮微粒採樣，並於 110 年 9 月 7~9 日進行中部台中火力發電廠廠區內採樣，以高雄興達電廠與台中火力發電廠兩座台電之燃煤電廠為研究對象，在燃煤設施主設備之東、西、南及北四個方向各架設一部 General Metal Work Co.製造之 PS-1 高流量採樣器(型號 GPS-1 PUF Sampler)，採樣期間另架設一台氣象儀蒐集採樣期間氣象資料，每次皆為連續三天的微粒採樣，以探討大氣總懸浮微粒濃度及微粒上天然放射性核種活度濃度。高流量採樣器進行大氣中總懸浮微粒採樣，其採氣體積範圍 $3922\sim10238\text{ m}^3$ ，平均值為 $7585\pm2233\text{ m}^3$ ，該平均採氣體積大於一個人一年呼吸量 4380 m^3 。將採集之微粒全部置於馬林杯中，並以純鍺偵檢器量測天然放射性核種活度濃度，偵測時間為 10 萬秒，分析結果顯示：三次採樣 9 個樣品均低於偵測極限，從結果可以說明大氣中總懸浮微粒上之放射性活度極低。

一般民眾較容易接觸到的是經由排放管道排放至大氣之懸浮微粒，該研究進行大氣微粒上天然放射性核種活度之分析，其量測之結果微粒上所含之輻射物質皆小於偵測極限，並不會對人體造成健康危害。詳細評估過程請參閱科技部補助專題研究計畫報告-燃煤設施周圍之空浮採樣調查及居民輻射劑量評估。

2. 燃煤設施周圍環境土壤輻射強度調查與居民劑量評估

全台共 6 座燃煤電廠，其中，台電運營之燃煤電廠為 4 座 19 部機組；民間運營之燃煤電廠為 2 座 5 部機組【73】，本報告將針對台電運營之燃煤電廠選擇 2 座，以機組較多之燃煤電廠優先；民營運營之燃煤電廠選擇 1 座，亦以機組較多之燃煤電廠優先，共篩選 3 座台灣大型燃煤火力電廠，分別為雲林麥寮發電廠(民營)、高雄市興達發電廠(台電)與台中市火力發電廠(台電)。選擇民眾常使用之公共空間進行現場度量，於雲林麥寮發電廠周邊之量測點為阿媽公園、橋頭國小許厝分校與長庚雲林分院，共 3 處；高雄市興達發電廠周邊量測點為五福宮附近空地、高雄市興達國民小學與興達港河堤邊，共 3 處；台中市火力發電廠周邊量測點為梧棲運動公園、台中港旅客服務中心旁草地、河濱公園槌球場與臺中市龍井國民小學，共 4 處。上述量測地點詳如表 53。

本計畫針對國內燃煤電廠周邊土壤進行量測，採用美國能源部 HASL-300 現場度量技術進行燃煤電廠周圍之土壤輻射強度調查，並參考燃煤電廠周圍人口分布之情形，評估當地居民因燃煤電廠產生之煤灰所造成的國民輻射劑量。雲林麥寮發電廠、高雄興達發電廠與台中火力發電廠周邊(共 10 處)土壤現場量測結果列於表 54，鉀-40 量測活度濃度範圍在每公斤 496 到 635 貝克；鈾系核種量測活度濃度範圍在每公斤 18 到 39 貝克；鈾系核種量測活度濃度範圍在每公斤 31 到 59 貝克。為作輻射劑量評估參考使用，本報告參考國際輻射單位與度量委員會(ICRU)第 53 號報告將現場度量之活度濃度(貝克/公斤)轉換成加馬劑量率(微西弗/時)，鉀-40、鈾系、鈾系轉換因子分別為 0.039、0.528、0.389 毫西弗-公斤/貝克-小時；經轉換之土壤量測結果，鉀-40

之加馬劑量率範圍為每小時 0.019 至 0.025 微西弗；鈾系之加馬劑量率範圍為每小時 0.001 至 0.021 微西弗；鈾系之加馬劑量率範圍為每小時 0.012 至 0.023 微西弗。將計算轉換的鈾系、鈾系與鉀-40 劑量率加總後即可獲得總加馬劑量率，總加馬劑量率之範圍落於每小時 0.043 至 0.066 微西弗；以個別電廠的量測結果來看，雲林麥寮電廠、高雄興達電廠與台中火力發電廠之加馬劑量率平均值分別為每小時 0.057、0.054 與 0.052 微西弗 (如表 54)。

表 53 雲林麥寮、高雄興達與台中火力發電廠現場度量量測點

量測地點	與電廠間距離	地址
雲林麥寮發電廠(3 處)		
阿媽公園	2.52 km	雲林縣麥寮鄉中山高速公路
橋頭國小許厝分校	2.76 km	雲林縣麥寮鄉中興村 5 鄰仁德西路二段 589 號
長庚雲林分院	2.24 km	雲林縣麥寮鄉中興村工業路 1500 號
高雄市興達發電廠(3 處)		
五福宮附近空地	2.71 km	高雄市路竹區海安路 165 號
高雄興達國民小學	1.98 km	高雄市茄萣區崎漏里民治路 2 號
興達港河堤邊	1.25 km	高雄市茄萣區大發路 30 號
台中市火力發電廠(4 處)		
梧棲運動公園	2.42 km	臺中市梧棲區草湳里文化路一段
台中港旅客服務中心 旁草地	3.20 km	台中市梧棲區中二路一段 9 號
河濱公園槌球場	2.98 km	台中市龍井區西部濱海公路 345 號
臺中龍井國民小學	4.97 km	臺中市龍井區龍西里龍門路 51 號

表 54 經現場度量分析之活度濃度與加馬劑量率結果

現場度量		活度濃度 (貝克/公斤)				加馬劑量率 (微西弗/小時)			
電廠	編碼	測定場所	鉀-40	鈾系	鈾系	鉀-40	鈾系	鈾系	總加馬劑量率 (微西弗/小時)
雲林麥寮 發電廠	A	長庚雲林分院	572±17	27±4	44±5	0.022 ±0.001	0.014 ±0.002	0.017 ±0.002	0.053 ±0.003
	B	橋頭國小許厝分校	603±17	38±4	57±6	0.024 ±0.001	0.020 ±0.002	0.022 ±0.002	0.066 ±0.003
	C	阿媽公園	496±15	27±4	44±5	0.019 ±0.001	0.014 ±0.002	0.017 ±0.002	0.051 ±0.003
高雄市興 達發電廠	D	五福宮附近空地	634±17	20±6	34±3	0.025 ±0.001	0.011 ±0.003	0.013 ±0.001	0.049 ±0.003
	E	高雄市興達國民小學	525±15	32±3	43±3	0.020 ±0.001	0.017 ±0.002	0.017 ±0.001	0.054 ±0.002
	F	興達港河堤邊	560±17	29±2	59±6	0.022 ±0.001	0.015 ±0.001	0.023 ±0.002	0.060 ±0.003
台中市火 力發電廠	G	梧棲運動公園	510±15	18±3	35±6	0.020 ±0.001	0.010 ±0.002	0.012 ±0.002	0.043 ±0.003
	H	台中港旅客服務中心 旁草地	539±16	19±3	31±5	0.021 ±0.001	0.010 ±0.002	0.012 ±0.002	0.043 ±0.003
	I	河濱公園槌球場	524±15	32±4	45±4	0.020 ±0.001	0.017 ±0.002	0.018 ±0.002	0.055 ±0.003
	J	臺中市龍井國民小學	635±17	39±3	53±6	0.025 ±0.001	0.021 ±0.002	0.021 ±0.002	0.066 ±0.003

燃煤電廠主要透過煤炭的燃燒來產生電力，煤炭本身即含鈾與釷系等天然放射性物質，煤炭燃燒過程會產生飛灰而釋放出這些天然放射性物質，再隨著大氣擴散沉降於附近土壤中。為確認土壤中是否含飛灰成分，參考國外相關文獻【74】，發現可透過天然放射性核種釷系、鈾系與鉀-40 三者之活度濃度比例粗略確認是否為純土壤或是含有飛灰沉降之土壤，該研究結果發現一般土壤的鉀-40 活度濃度會遠大於釷系(^{232}Th)與鈾系(^{238}U)，而釷系會略大於鈾系；而在有煤炭(coal)、飛灰(fly ash)或是底灰(bottom ash)的情況下，鉀-40 之活度濃度依然遠大於釷系與鈾系，但鈾系則會略大於釷系，差異如表 55 所示。另外，國際原子能總署(IAEA)2003 年出版報告之 IAEA 419 號報告中【75】彙整了各國對煤炭的量測分析結果，如表 56，各國針對其電廠所使用的煤炭進行了檢測分析，提供了一個鈾和釷系列與鉀-40 活度濃度範圍的代表性數據，煤炭中天然存在的放射性物質的濃度雖然取決於其起源煤層的地質構造特徵，但各國的檢測結果仍呈現一致性，大多數國家的煤炭中，所測得的鈾系活度濃度是大於釷系的。

表 55 天然放射性核種釷系、鈾系與鉀-40 於不同樣品之活度比較

Sample type	Activity concentrations (Bq kg^{-1})		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Coal	32.02	29.17	314.11
Fly ash	59.07	52.04	338.58
Bottom ash	50.63	42.05	311.01
Soil	45	51	423.21

(資料來源: Spatial distribution of radionuclides in agricultural soil in the vicinity of a coal-fired brick kiln)

表 56 各國煤炭中含放射性核種活度濃度量測差異比較

單位：貝克/公斤

國家	鈾-238	鐳-226	釷-232	鉀-40
澳洲	8.5-4.7	19-24	11-69	23-140
巴西	72	72	62	-
埃及	59	26	8	-
德國	-	10-145	10-63	10-700
希臘	117-390	44-206	-	-
匈牙利	20-480	-	12-97	30-384
義大利	23 ± 3	-	18 ± 4	218 ± 15
波蘭	18*	-	11*	-
羅馬	80*	126*	62*	-
英國	7-19	7.8-21.8	7-19	55-314
美國	6.3-73	8.9-59.2	3.7-21.1	-

*平均值

本報告進一步將雲林麥寮發電廠(編碼：A、B、C)、高雄市興達發電廠(編碼：D、E、F)與台中火力發電廠(編碼：G、H、I、J)之現場度量結果做綜合比較評估，如圖 15；由圖中可看到，三座電廠周圍公共空間之土壤中的釷系、鈾系與鉀-40 之活度濃度，皆為鉀-40 遠大於釷系與鈾系，釷系則略為大於鈾系，表示三個區域之土壤可能皆沒有受飛灰沉降的影響，故居住於該地區的居民並不會因此獲得較高的輻射劑量。詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-110-306 Rev2 燃煤電廠周圍環境土壤輻射強度調查與居民劑量評估報告-112 年修正版(如附件十一)。

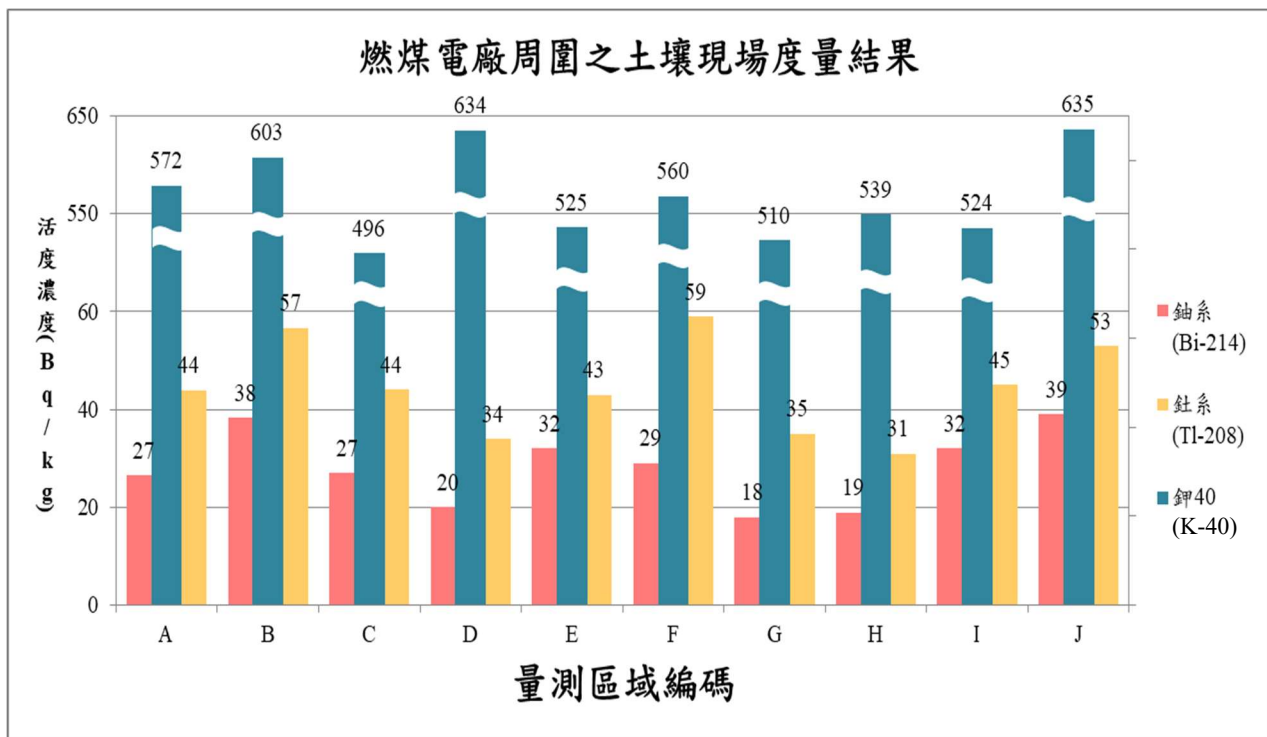


圖 15 雲林麥寮、高雄市興達與台中市火力發電廠現場度量結果

四、產業活動

(一) 核設施

在核設施周圍輻射強度調查中，核設施因運轉而使周圍居民接受到輻射曝露之情形將其為分類產業活動。本中心於民國 87 年進行第一次國民輻射劑量評估，與當時的狀況相比，雖然核能一廠目前已無發電進入除役過渡階段，但考量核燃料仍置於反應器壓力槽內，仍適用運轉中核能電廠之管制規定，故本報告評估之核設施包括：核能一廠、核能二廠、核能三廠、清華大學研究用反應器、核能研究所、台電公司蘭嶼低放貯存場等，共計 6 座核設施，為確認現行核設施周圍環境變化對民眾之影響，本中心更新並評估關鍵群體因核設施所造成的國民輻射劑量。

1. 核能電廠

綜整核能一廠、核能二廠、核能三廠民國 106 年至 110 年之放射性排放廢氣、廢水評估集體有效劑量(S)之結果【76-90】，彙整如表 57。各年度 3 個核能電廠之氣體排放集體有效劑量(S)加總結果分別為每年 7.63×10^{-3} 、 1.29×10^{-2} 、 6.50×10^{-3} 、 6.70×10^{-3} 、 4.55×10^{-3} 人-西弗，平均值為每年 7.65×10^{-3} 人-西弗；液體排放集體有效劑量(S)加總結果分別為每年 2.22×10^{-3} 、 1.25×10^{-3} 、 6.86×10^{-4} 、 1.33×10^{-3} 、 2.10×10^{-3} 人-西弗，平均值為每年 1.52×10^{-3} 人-西弗，將氣體、液體排放集體有效劑量(S)結果相加，即可獲得核能電廠近 5 年之集體有效劑量(S)，平均值為每年 0.00917 人-西弗。

表 57 核能一廠、核能二廠、核能三廠之集體有效劑量(S)評估結果

型 式		沸水式		壓水式	小 計	歷 年 平 均	總集體有效 劑量(S)* (人-西弗/年)
廠 別		核能一廠	核能二廠	核能三廠			
氣體 集體 有效 劑量 (人-西 弗/年)	106	8.27×10 ⁻⁴	6.58×10 ⁻³	2.22×10 ⁻⁴	7.63×10 ⁻³	7.65×10 ⁻³	9.17×10 ⁻³
	107	2.35×10 ⁻⁴	1.24×10 ⁻²	2.36×10 ⁻⁴	1.29×10 ⁻²		
	108	3.27×10 ⁻⁴	5.89×10 ⁻³	2.90×10 ⁻⁴	6.50×10 ⁻³		
	109	4.53×10 ⁻⁴	6.05×10 ⁻³	1.94×10 ⁻⁴	6.70×10 ⁻³		
	110	3.28×10 ⁻⁴	3.84×10 ⁻³	3.84×10 ⁻⁴	4.55×10 ⁻³		
液體 集體 有效 劑量 (人-西 弗/年)	106	8.66×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻³	5.68×10 ⁻⁶	2.22×10 ⁻³	1.52×10 ⁻³	
	107	2.04×10 ⁻⁴	1.03×10 ⁻³	1.21×10 ⁻⁵	1.25×10 ⁻³		
	108	1.54×10 ⁻⁴	5.25×10 ⁻⁴	6.67×10 ⁻⁶	6.86×10 ⁻⁴		
	109	1.45×10 ⁻⁴	1.18×10 ⁻³	6.16×10 ⁻⁶	1.33×10 ⁻³		
	110	1.17×10 ⁻³	9.23×10 ⁻⁴	7.20×10 ⁻⁶	2.10×10 ⁻³		

*註：

1. 總集體有效劑量=氣體集體有效劑量(106-110 年平均)+液體集體有效劑量(民國 106-110 年平均)。
2. 本報告整理。

2. 清華大學研究用反應器

本報告採用本中心「臺灣地區核設施 110 年環境輻射監測年報」【91】與「110 年國立清華大學環境輻射監測季報」(第一季~第四季)【92-95】之核設施周圍民眾個人劑量評估結果，劑量評估方法依據行政院原子能委員會民國 98 年 11 月 11 日修正公布「環境輻射監測規範」，由熱發光劑量計監測累積劑量及環境試樣放射性含量分析結果，評估體外及體內劑量。本中心「臺灣地區核設施 110 年環境輻射監測年報」之核設施周圍民眾個人劑量評估結果如表 58，清華大學對關鍵群體之年有效劑量與約定有效劑量結果小於每年 0.001 毫西弗，

其造成周圍民眾劑量應極低微，其劑量可忽略；清華大學「110 年國立清華大學環境輻射監測季報」(第一季~第四季)之核設施周圍民眾個人劑量評估結果如表 59，清華大學對關鍵群體之年有效劑量與約定有效劑量結果皆小於每年 0.001 毫西弗，造成周圍民眾劑量應極低微，其劑量可忽略。集體有效劑量為有效劑量與約定有效劑量乘上關鍵群體人數合計結果，因評估有效劑量與約定有效劑量結果極低，可忽略，故集體有效劑量不予計算。

表 58 本中心針對核設施周圍民眾個人劑量評估結果

單位：毫西弗

曝路途徑	有效劑量			約定有效劑量				合計
	TLD	地表	岸沙	空浮微粒	飲水	農畜產物	海產物	
清華大學	*	-	/	-	/	-	/	-
核能研究所	*	-	-	-	/	-	-	-
台電公司蘭嶼低放貯存場	*	-	-	-	/	-	-	-

註：

1. “*”表示低於 TLD 偵測低限 0.05 毫西弗／年。
2. “-”表示小於 0.001 毫西弗。
3. “/”表示未分析（評估）。
4. 約定有效劑量評估係考慮 50 年的劑量積存。
5. 有效劑量的推算與評估，係參考「環境輻射監測規範」之附件四「體外及體內劑量評估方法」。
6. 原報告有列出核爆影響，因核爆影響屬既存曝露，不在本報告考量範圍，故不予列出。
7. 資料來源：臺灣地區核設施 110 年環境輻射監測年報。

表 59 清華大學針對核設施周圍民眾個人劑量評估結果

單位：毫西弗／年

曝露途徑	體外曝露			體內曝露			
	TLD	地表	岸沙	空浮微粒	飲水	農畜產物	海產物
清華大學	<MDA	-	*	-	*	-	*

註：

1. TLD 評估 0.05 毫西弗/年或 0.025 毫西弗/季，則註記小於 MDA。
2. 各曝露途徑的有效劑量低於 0.001 毫西弗(<0.001 毫西弗)者，僅註記「-」，並加註「未達評估標準」。
3. 凡經評估所得最大個人劑量之設站地點，在計畫書中未規劃執行該項試樣(表示無此曝露途徑)者，即於表格中直接標示「*」，並註明「最大個人劑量的地點無此曝露途徑」。
4. 原報告有列出核爆影響，因核爆影響屬既存曝露，不在本報告考量範圍，故不予列出。
5. 資料來源：110 年國立清華大學環境輻射監測季報」(第一季~第四季)

3. 核能研究所

本報告採用本中心「臺灣地區核設施 110 年環境輻射監測年報」與「110 年核能研究所場所外環境輻射監測報告書」【96-99】之核設施周圍民眾個人劑量評估結果，劑量評估方法依據行政院原子能委員會民國 98 年 11 月 11 日修正公布「環境輻射監測規範」，由熱發光劑量計監測累積劑量及環境試樣放射性含量分析結果，評估體外及體內劑量。本中心「臺灣地區核設施 110 年環境輻射監測年報」之核設施周圍民眾個人劑量評估結果如表 58，核研所對關鍵群體之有效劑量與約定有效劑量結果小於 0.001 毫西弗，其造成周圍民眾劑量應極低微，其劑量可忽略；核研所「110 年核能研究所場所外環境輻射監測報告書」之核設施周圍民眾個人劑量評估結果如表 60，核研所對關鍵群體之年有效劑量與約定有效劑量結果小於每年 0.001 毫西弗，其

造成周圍民眾劑量應極低微，其劑量可忽略。集體有效劑量為有效劑量與約定有效劑量乘上關鍵群體人數合計結果，因評估有效劑量與約定有效劑量結果極低，可忽略，故集體有效劑量不予計算。

表 60 核研所針對核設施周圍民眾個人劑量評估結果

單位：毫西弗

曝路途徑	有效劑量			約定有效劑量				合計
	TLD	地表	岸沙	空浮微粒	飲水	農畜產物	海產物	
核能研究所	*	-	/	-	-	-	/	-

註：

1. “*”表示小於 TLD 偵測低限（0.025 毫西弗/季）。
2. “-”表示小於 0.001 毫西弗。
3. “/”表示未分析（評估）。
4. 體內約定有效劑量評估係考慮 50 年的劑量積存。
5. 有效劑量的推算與評估請參考「環境輻射監測規範」中附件四「體外及體內劑量評估方法」與「核能研究所 110 年環境輻射監測計畫」。
6. 原報告有列出核爆影響，因核爆影響屬既存曝露，不在本報告考量範圍，故不予列出。
7. 資料來源：核能研究所場所外環境輻射監測報告書(110 年 1 月至 12 月)

4. 台電公司蘭嶼低放貯存場

低放貯存場亦採用本中心「臺灣地區核設施 110 年環境輻射監測年報」與「低放貯存場 110 年環境輻射監測報告」【100】之核設施周圍民眾個人劑量評估結果。劑量評估方法依據行政院原子能委員會民國 98 年 11 月 11 日修正公布「環境輻射監測規範」，由熱發光劑量計監測累積劑量及環境試樣放射性含量分析結果，評估體外及體內劑量。本中心「臺灣地區核設施 110 年環境輻射監測年報」之核設施周圍民眾個人劑量評估結果如表 58，低放貯存場對關鍵群體之年有效劑量與約定有效劑量結果小於每年 0.001 毫西弗，其造成周圍民眾劑量應

極低微，其劑量可忽略；台電公司「低放貯存場 110 年環境輻射監測報告」之核設施周圍民眾個人劑量評估結果如表 61，台電公司蘭嶼低放貯存場對關鍵群體之年有效劑量與約定有效劑量結果小於每年 0.001 毫西弗，其造成周圍民眾劑量極低微，其劑量可忽略。集體有效劑量(S)為有效劑量與約定有效劑量乘上關鍵群體人數之總和，因評估有效劑量與約定有效劑量結果極低，可忽略，故台電公司蘭嶼低放貯存場之集體有效劑量不予計算。

表 61 蘭嶼低放貯存場周圍民眾個人劑量評估結果

單位：毫西弗

曝露途徑	體外曝露			體內曝露				合計
	TLD	地表	岸沙	空浮微粒	飲水	農畜產物	海產物	
低放貯存場	-	-	-	-	-	-	-	-

註：

1. “-” 表示小於 0.001 毫西弗。
2. “/” 表示未分析（評估）。
3. 原報告有列出核爆影響，因核爆影響屬既存曝露，不在本報告考量範圍，故不予列出。
4. 資料來源：低放貯存場 110 年環境輻射監測報告(110 年 1 月至 12 月)，台灣電力公司。

為計算核設施之國民輻射劑量，總人數係採用內政部戶政司【101】民國 104 年至民國 110 年之全台人口數統計，資料取其平均作為總人口數，為 23,533,103 人。核設施整體之集體有效劑量(S)部分，將國內 6 座核設施之集體有效劑量(S)加總而來，數據彙整如表 62；核能電廠為每年 0.00917 人-西弗，其餘核設施(清華大學研究用反應器、核能研究所、低放貯存場)之集體有效劑量(S)因劑量極低，故不予評

估，故核設施合計之集體有效劑量(S)為每年 0.00917 人-西弗。將集體有效劑量(S)之合計結果除以總人口數，即可獲得核設施周圍環境輻射造成國人之平均年有效劑量(E_{Taiwan})，亦即國民輻射劑量；核能電廠之國民輻射劑量(E_{Taiwan})分別為每年 3.9×10^{-7} 毫西弗，其餘核設施之國民輻射劑量因劑量極低，故不予評估，核設施之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 3.9×10^{-7} 毫西弗。

表 62 台灣核設施造成集體有效劑量與國民輻射劑量評估結果

分類	111 年版	
	集體有效劑量(S) (人-西弗)	國民輻射劑量(E_{Taiwan}) (毫西弗)
核能電廠*	0.00917	3.9×10^{-7}
清華大學研究用反應器	-	-
核能研究所	-	-
低放貯存場	-	-
合計	0.00917	3.9×10^{-7}

註：*表示其核能電廠包含核能一廠、核能二廠、核能三廠

與國際現況相比，彙整美國 NCRP 第 160 號報告、日本生活環境放射線(国民線量の算定)第 3 版、UNSCEAR 2008 報告等國際文獻之核設施周圍民眾集體有效劑量(S)評估結果如表 63，於各文獻中皆提及核能電廠運營所造成周圍民眾曝露劑量結果占整體核設施評估之大宗，由表 63 可發現於核能電廠製造與生產中，採礦為劑量貢獻相對大的部分，因台灣本身無鈾礦等天然資源，故我國核能發電所使用之核燃料來源仰賴國外進口，因此並無鈾礦開採、濃縮、轉化等前處理流程，加上台灣核能電廠設置數量相較於其他國家較少，且政府落實對核設施之管理，有效降低關鍵群體之輻射曝露，故集體有效劑

量(S)評估結果為各國最低(每年 0.00917 人-西弗)。詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-111-315Rev2 核設施周圍環境輻射調查與民眾劑量評估-112 年修正版(附件十)。

表 63 國際文獻之核設施集體有效劑量(S)

單位：人-西弗

分類	台灣 (111 年版)	NCRP 160	日本	UNSCEAR (2008)
核能電廠製造與生產				
採礦	-	105.75	-	52.82
提煉	-	28.13	-	2.224
鈾轉化	-	0.034	-	11.12
鈾濃縮	-	0.011	-	
製造	-	0.005	-	0.834
核能電廠	0.00917	5.40	/	75.06
再處理	-	-	-	30.3
低放貯存廠	-	-	/	-
運輸	-	14.06	/	<27.8
合計	0.00917	153	10	200
研究用反應器				
研究用反應器	-	1.6	/	/
其他	-		12*	/
總計	0.00917	154.6	22	/

註：

1. /表示未取得原報告數據。
2. -表示未評估該項目。
3. *為氬-85 監測，主要來自核燃料再處理廠排放。
4. 本報告整理；資料來源：美國 NCRP 第 160 號報告(2009)、日本生活環境放射線(国民線量の算定)-第三版(2020)、UNSCEAR 2008 年報告(2008)。

五、職業曝露

國民輻射劑量評估中，職業曝露劑量的貢獻相對較小，但他反映了各國對工作場所及工作人員之控制與管理；趨勢顯示，在合理控制下，輻射工作群體的總劑量是逐年下降的。

依據「游離輻射防護法」第 2 條第 9 款之定義，「職業曝露」係指從事輻射作業所受之曝露；另依據「游離輻射防護法」第 15 條第 1 項之規定：「為確保輻射工作人員所受職業曝露不超過劑量限度並合理抑低，雇主應對輻射工作人員實施個別劑量監測。」而依據國際放射防護委員會(ICRP)第 60 號報告對職業曝露之詮釋，在現行的輻射防護體系下，「只有在工作中所接受的曝露，可以被合理地認定係有營運管理責任時，才視為職業曝露」。

為能掌控國內輻射工作人員與劑量資料，達到輻射防護安全管制之目標，行政院原子能委員會依「游離輻射防護法」第 15 條第 5 項之授權，建立「全國輻射工作人員劑量資料庫」，進行我國輻射工作人員與劑量等資料之彙整與統計分析，並出版「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」並公開予各界知悉。該資料庫包含全國輻射工作人員之熱發光劑量計(TLD)及光刺激發光劑量計(OSLD)評定之歷年體外劑量，劑量值已包含使用中子人員劑量計之劑量資料。本計畫職業曝露劑量之評估主要依據「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」，另也參考聯合國原子輻射效應科學委員會（UNSCEAR）最新發表的「Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2020/2021 Report Volume IV comprises scientific annex D: Evaluation of occupational exposure to ionizing radiation」（以下簡稱 UNSCEAR 2020/2021 報告）【102】、美國 NCRP 第 160 號報告以及日本環境省

在 2020 年出版的「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和 3 年度版）」等國際文獻做法及國內相關研究評估飛航劑量，以將我國民用航空類別納入職業曝露評估。

（一）台灣地區職業曝露現況

行政院原子能委員會為輻射安全管制的主管機關，為有效管理職業輻射曝露，在職業曝露劑量之統計分類，以自民國 89 年起改依聯合國原子輻射效應科學委員會 (UNSCEAR) 最新之輻射工作類別進行分類統計。本中心民國 87 年出版的國民輻射劑量評估報告，在職業曝露評估的部分係針對民國 79-84 年期間台灣各項職業曝露劑量進行評估，當時的職業曝露類別僅核反應器運轉、放射性照相、發光應用、放射性同位素產銷、加速器運轉、教育研究、醫用放射診斷、放射牙科、核子醫學、放射治療、地下採礦及航空員等，分成研究用、醫學應用、工業應用、核能電廠及天然射源等五大類來進行評估。

自民國 89 年以後，我國在職業曝露分類開始改依聯合國原子輻射效應科學委員會 (UNSCEAR) 最新之輻射工作類別進行分類統計，分成核燃料循環、醫學應用、工業應用、天然射源與其他等五大項，五大項工作類別下另有細部工作類別；依據 UNSCEAR 的分類，我國目前存在的行業包括有：核燃料循環類之反應器運轉、核燃料循環研究類(核廢料管理)等 2 類；醫學應用類之放射診斷、放射牙科、核子醫學、放射治療、所有其他應用等 5 類；工業應用類之工業照射、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、所有其他工業應用等 7 類；天然射源類之商用航空、採煤業、其他採礦業、石油與天然氣工業、礦物與礦石處理等 5 類；以及其他類之教育機構、獸醫、其他及嚴重效應之意外等 4 類，共計 23 項。

依據原能會「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」所提供之民國 104 年至 109 年之劑量監測數據【103-108】，各個職業細項分類的總從業人數、年集體有效劑量及個人年有效劑量(包含個人年有效劑量、有劑量人員之個人年有效劑量)彙整如表 64，最大、最小值及平均值都是以年為單位進行統計分析。職業輻射曝露劑量評估統計結果如表 65；近六年的職業輻射之總人數 53,082 人，職業輻射曝露之集體有效劑量(S)為每年 6.667 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.126 毫西弗。以射源種類區分，我國目前在人工射源部分的輻射工作人員約為 53,050 人，集體有效劑量(S)為每年 6.67 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.13 毫西弗；天然輻射部分平均人數 32 人，集體有效劑量(S)為每年 1.20×10^{-5} 人-西弗(0.012 人-毫西弗)，個人年有效劑量(E_{EXP})量為每年 3.66×10^{-4} 毫西弗；綜上，絕大部分的職業曝露都是由人工射源相關之職業種類所貢獻的。

表 64 民國 111 年版職業曝露劑量(僅劑量監測)

	人數 (人)	集體有效劑量 S (人-西弗)	個人年有效劑量* E_{EXP} (毫西弗)
核燃料循環	5605	4.87	0.87
醫學應用	19023	1.10	0.06
工業應用	22124	0.55	0.03
其他應用	6298	0.15	0.02
小計 (人工射源)	53050	6.67	0.13
天然射源	32	$1.20E-05$	$3.66E-04$
總計	53082	6.67	0.13

*備註：個人年有效劑量(E_{EXP})係指該類別總人數之整體平均有效劑量；意即集體有效劑量 S/總工作人員數=個人年有效劑量 E_{EXP}

表 65 台灣地區民國 104-109 年職業輻射曝露劑量統計總表

類別	人數 (人)			集體有效劑量 S (人-毫西弗)			個人年有效劑量 E _{EXP} (毫西弗)			有劑量人員平均有效劑量 E _{EXP-AVE} (毫西弗)		
	min	Max	Ave	min	Max	Ave	min	Max	Ave	min	Max	Ave
反應器運轉	5010	6257	5483	3670.88	6700.16	4840.03	0.73	1.07	0.88	1.59	2.08	1.75
核燃料循環研究	147	308	198	0.19	120.67	25.69	0.001	0.39	0.13	0.10	2.57	0.70
放射診斷	12695	15384	13,948	364.84	510.89	424.27	0.03	0.04	0.03	0.44	0.71	0.55
放射牙科	682	770	722	5.21	15.47	9.48	0.01	0.02	0.01	0.15	1.11	0.60
核子醫學	1062	1123	1,100	475.94	641.80	561.82	0.45	0.57	0.51	1.06	1.16	1.13
放射治療	1509	1752	1,614	29.08	62.19	39.01	0.02	0.04	0.02	0.35	0.93	0.62
其他醫學應用	1515	2192	1,889	39.95	101.67	67.93	0.03	0.06	0.04	0.51	0.80	0.67
工業照射	128	179	161	0.12	4.28	1.62	0	0.03	0.01	0.12	2.89	0.88
工業放射障項	848	1,293	1,082	242.07	555.03	341.94	0.22	0.44	0.32	1.30	2.37	1.64
發光應用	6	9	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
放射性同位素製造	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
測井	38	48	42	0	0.87	0.25	0	0.02	0.006	0	0.12	0.07
加速器運轉	9	12	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
其他工業應用	19,926	20,965	20,701	90.44	388.9	202.95	0	0.02	0.01	0.26	0.60	0.46
民用飛行	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
石油與天然氣工業	25	33	30	0	0.07	0.01	0	2.26E-03	3.87E-04	0	0.07	0.01
礦物與礦石處理	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
教育機構	1,900	2,286	2,064	18.18	30.03	25.73	0.009	0.02	0.01	0.11	0.19	0.13
獸醫	78	152	112	0.77	7.33	3.55	0.009	0.06	0.03	0.13	0.92	0.46
其他相關應用	3,787	4,360	4,145	67.49	215.18	119.30	0.02	0.05	0.03	0.15	0.29	0.21

*統計資料:民國 104-109 年「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」

以「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」為基礎之評估結果，劑量來源以人工射源部分為主；近六年之天然射源相關職業從業人數僅餘約 32 人，除了天然射源相關產業(如:採煤業、其他採礦業、石油與天然氣工業、礦物與礦石處理)在國內已逐漸式微沒落外，現行法規並未要求針對航空業從業人員進行劑量監測是主因。考量全球化的趨勢使得空中運輸較 20 年前活絡許多，因此，會在下章節以適當方法推估。

(二) 民用航空之職業曝露評估

航空作業的輻射劑量來自宇宙射線的背景輻射，宇宙射線的輻射曝露視為既存曝露，考量飛航行為的增加會提高宇宙射線貢獻的輻射曝露量，國際放射防護委員會(ICRP)於 2016 年出版了第 132 號報告探討航空作業的宇宙射線輻射防護【109】，該報告對飛航人員職業曝露訂有啟動措施標準為 5-10 毫西弗/年，一旦超過該劑量，雇主應對員工採取適當因應措施。

國際上對職業飛航劑量的估算方法也分成模式推估及劑量監測兩種，美國 NCRP 第 160 號報告針對民用航空部分的劑量評估，係採模式計算方式求得，從業人員之個人年有效劑量(E_{EXP})為 3.07 毫西弗；UNSCEAR 2021/2022 報告對民用航空職業曝露評估，包含利用劑量計監測 250,000 名航空業工作人員的曝露劑量及模式評估，所得之航空人員個人年有效劑量(E_{EXP})為 2.7 毫西弗；Kubančák *et al.* 之研究【110】，針對捷克之民用航空的職業曝露評估，是採劑量監測的方式，該國航空業從業人員歷年之個人年有效劑量(E_{EXP})為 1.3 - 2.1 毫西弗；Yasuda *et al.*之研究【111】，利用 JISCARD EX 模式推

估日本飛航從業人員 2007 年之職業曝露劑量，機長和空服員的個人平均有效劑量(E_{EXP})分別為 1.7-3.8 毫西弗及 2.2-4.2 毫西弗。

原能會與中國醫藥大學合作進行有關「臺灣重要航線宇宙輻射劑量之評估與量測方法評析及其資料庫建立」之飛航輻射劑量研究，該研究使用 CARI-6、CARI-7A 與 EPCARD.Net 5.4.3 等三種國際最新飛航輻射劑量評估程式，並根據我國籍飛航人員每月工時、飛行時間、飛行高度、地磁緯度等資訊，評估臺灣國籍航空(中華航空與長榮航空)主要頻繁航線之宇宙輻射劑量。在不考慮高曝露劑量之極端情境，研究結果顯示我國飛航人員之平均個人年有效劑量約為 2-3 毫西弗。

國內的清華大學自行開發了飛航劑量計算軟體 NTHU Flight Dose Calculator(以下簡稱 NTHU FDC)，做為評估飛航行為的宇宙輻射有效劑量【112】。這個清華大學自行開發的模式，已於民國 110 年完成與其它國際飛航劑量評估程式之驗證，該程式對飛航劑量的模擬結果跟其他國際上的飛航評估軟體如：CARI、EPCARD、SIEVERT 相比，評估結果與其它軟體差異不大【113】。Yang and Hsu 在 2021 年所發表研究【114】，即是利用 NTHU FDC 軟體評估台灣國籍航空機師之職業曝露劑量，該研究利用 2006 年至 2018 年這兩家航空公司所有運營航班的實際航線，包括：客運、貨運和包機航班的，計算 2,513 名飛行駕駛的年度職業曝露劑量，台灣民用航空駕駛的個人年有效劑量(E_{EXP})評估果落在 1.70 毫西弗到 2.97 毫西弗之間，個人平均有效劑量的平均值是 1.97 毫西弗/年。因具有本土化的優勢，故優先採用以 NTHU FDC 軟體評估台灣地區之飛航劑量數據，本報告以 Yang and Hsu 的研究評估所得之 1.97 毫西弗/年，作

為民用航空飛航工作人員之個人年有效劑量(E_{EXP})的評估基礎。

從業人口的部分，依據行政院性平會之國籍航空公司受僱員工統計資料【115】，我國國籍航空公司之受僱員工實際從事飛行工作包括：機長、副機長及空服員，從業人口在過去 10 年呈現逐年增加趨勢，民國 106 年後突破萬人；民國 104 年-109 年之機長、副機長及空服員之平均從業人數分別為 1,364 人、1,561 人、7,855 人，合計為 10,780 人。承上，算出台灣民用航空之職業曝露集體有效劑量(S)為每年 21.24 人-西弗，將納入天然射源類的職業曝露。

(三) 台灣地區職業曝露評估

在納入民用航空之職業曝露劑量評估結果後，民國 111 年版之天然射源相關職業曝露之從業人數調整為 10,822 人，集體有效劑量(S)為每年 21.236 人-西弗；與人工射源之職業曝露劑量加總後，民國 111 年的職業輻射之總人數 63,872 人，職業輻射曝露之集體有效劑量(S)為每年 27.903 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.436 毫西弗。表 66 分別列出民國 87 年版及民國 111 年版之台灣地區職業曝露劑量比評估結果。民國 87 年的職業輻射總人數約 24,917 人，以人工射源類為主；集體有效劑量(S)為每年 24.15 人-西弗，主要由人工射源類所貢獻；個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.97 毫西弗。

表 66 台灣地區之職業曝露劑量評估結果(民國 87 年及民國 111 年)

版本 職業類別	民國 87 年版 (民國 79-84 年)			民國 111 年版 (民國 104-109 年)		
	人數 (人)	集體 有效劑量 S (人-西弗)	個人 年有效劑 量 E_{EXP} (毫西弗)	人數 (人)	集體 有效劑量 S (人-西弗)	個人 年有效劑 量 E_{EXP} (毫西弗)
核燃料循環	7919	15.50	1.96	5605	4.866	0.868
醫學應用	6188	0.85	0.14	19023	1.102	0.058
工業應用	4944	1.52	0.31	22124	0.55	0.025
其他應用	3266	1.16	0.36	6298	0.149	0.024
小計 (人工射源)	22317	19.03	0.85	53050	6.667	0.126
NORM 相關	1000* ²	0.16* ³	1.6E-04* ³	32	1.20E-05	3.66E-04
民用航空	2195	4.96* ³	2.23* ³	10,780	21.236* ³	1.97* ⁴
小計 (天然射源)	2600* ²	5.12 * ³	1.97	10822	21.236* ³	1.96
總計	24917	24.15	0.97	63872	27.903	0.436

- *備註:1. 個人年有效劑量(E_{EXP})係指該類別總人數之整體平均有效劑量；意即集體有效劑量 S/
總工作人員數=個人年有效劑量 E_{EXP}
2. 參考當時社會現況估算所得，非實際統計數據。
3. 非以劑量監測數據計算，係另以國際認可的評估方法估計所得。
4. 資料來源: A Comprehensive Approach for Estimating Collective and Average Effective
Doses of Galactic Cosmic Radiation Received by Pilots.(2021), Yang and
Hsu. °

整體而言，職業曝露的總從業人口較 20 年前大幅提升，集體有效劑量(S)也是增加的，但個人年有效劑量(E_{EXP})則是降低的。比較前後評估結果，年集體有效劑量增加的類別僅有天然射源類及醫學應用類，造成差異的主要因素均是從業人口在近 20 年有大幅度的增加。天然射源類的從業人數變化，主要是來自航空業的發展所增加的飛航人員，約為 20 年前的 5 倍；人工射源類的從業人數變化，僅

核燃料循環類的人數是下降的，其餘四類都呈現明顯增加，醫療應用類及工業應用類分別增加了 3 倍及 4.6 倍。

台灣目前的輻射從業人口比例如圖 16，工業應用類取代核燃料循環類成為最大宗，占整體的 34.6%，醫學應用類 29.8%次之，天然射源的總人數占比為 16.9%，其他應用類 9.9%，核燃料循環類之人數僅占 8.8%，是所有職業類別中人數最少的。

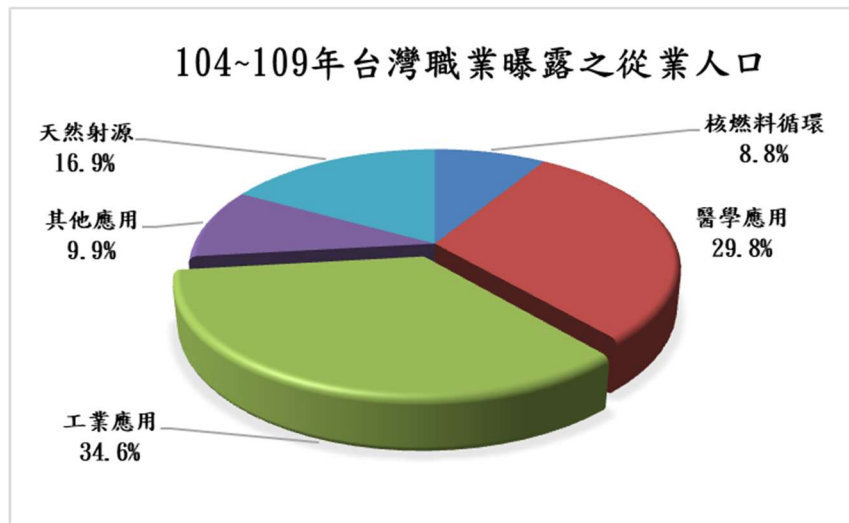


圖 16 台灣地區 111 年各職業曝露之從業人口比例

圖 17 是各職業輻射類別之集體有效劑量(S)之比例關係圖。在納入職業飛航劑量之評估數據後，評估台灣目前之職業曝露的集體有效劑量(S)為每年 20.358 人-西弗，天然射源的集體有效劑量(S)占比為 82.9%，核燃料循環占比 12.5%居次，為人工射源類職業曝露最主要的劑量貢獻來源，其次是醫學應用類，占比為 2.8%，工業應用類及其他應用類之貢獻比分別占 1.4%及 0.4%。

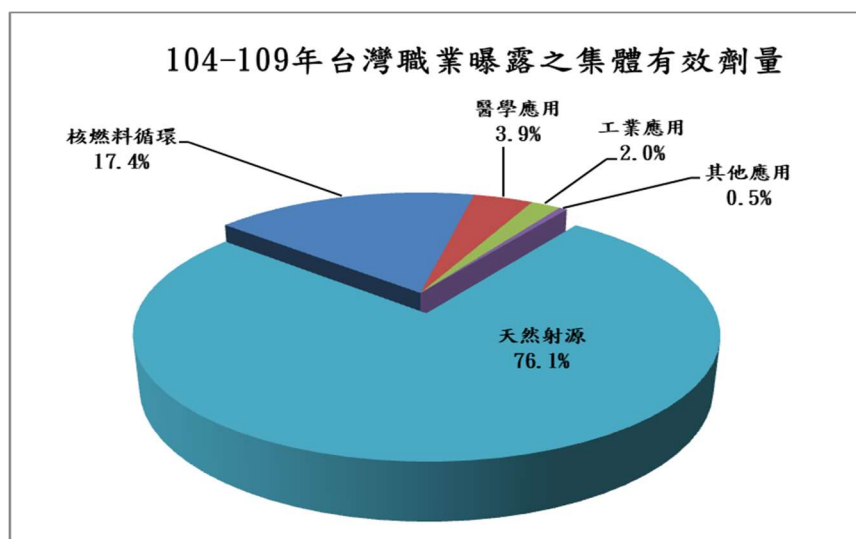


圖 17 台灣地區民國 111 年各職業曝露之集體有效劑量比例

(四) 與其他國家之比較

彙整國外相關文獻各類職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})，比較如下表 67。

表 67 職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})之比較

單位：毫西弗

職業種類		台灣	全球* ¹	美國* ²	日本* ³
人工 射源	核燃料循環	0.87	0.6	1.87	1.16
	醫學應用	0.06	0.5	0.75	0.08
	工業應用	0.03	0.4	0.81	0.34
	其他應用	0.02	0.1	0.72	0.02
	軍事應用	-	0.15	0.59	
天然 射源	NORM 作業	0.0004	1.9	-	0.02
	民用航空	1.97	2.7	3.07	2

*備註：1. UNSCEAR 2020/2021 報告(2022)。

2. NCRP160 號報告(2009)。

3. 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料-令和 3 年度版(2022)。

職業曝露的個人年有效劑量(E_{EXP})部份，我國在人工射源及天然射源職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})之平均值分別為每年 0.13 毫西弗及 1.96 毫西弗，整體職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.44 毫西弗；與 UNSCEAR 2020/2021 報告的評估結果相比，全球之人工射源及天然射源職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})分別為每年 0.5 毫西弗及 1.9 毫西弗(民用航空之職業曝露劑量為每年 2.7 毫西弗)，整體職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 1.2 毫西弗，我國的職業曝露劑量都是低於全世界平均的。

(五) 職業曝露之國民輻射劑量

本中心前版(民國 87 年版)之國民輻射劑量評估，職業輻射曝露之集體有效劑量(S)為每年 24.15 人-西弗，以當時台灣地區人口數 2,100 萬人計，台灣地區職業曝露對台灣全體國民造成之平均年有效劑量，亦即國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 1.14 微西弗；其中，人工射源及天然輻射分別貢獻每年 0.9 微西弗及 0.24 微西弗。

本報告所完成之民國 111 年年職業曝露評估包含兩個部分，第一部分是依據 104 年至 109「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」之劑量監測數據，所得之職業曝露歷年集體有效劑量如表 68；人口的數據則來自內政部人口統計年報【116】，將集體有效劑量除以當年度的人數，即為當年度職業曝露對台灣民眾造成之平均年有效劑量，意即國民輻射劑量(E_{Taiwan})。在不考慮民用航空職業曝露的情況下，近六年台灣職業曝露造成之國民輻射劑量(E_{Taiwan})在每年 0.234~0.366 微西弗之間，近六年之平均值為每年 0.281 微西弗。第二部分是以模式推估結果計算民用航空之職業曝露，以國際認可方式結合本土數據進行劑量推估，民國 104~109 年民用航空之集體有效劑量(S)平均值

為 21.236 人-西弗，換算成國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.901 微西弗/人-年，與劑量監測所得之國民輻射年劑量 E_{Taiwan} (0.281 微西弗/人-年)加總，結果為 1.182 微西弗/人-年，約為每年 0.00118 毫西弗。

表 68 台灣職業曝露之國民輻射劑量(E_{Taiwan})

年分	104	105	106	107	108	109
男(人)	11,712,047	11,719,270	11,719,580	11,712,913	11,705,186	11,673,765
女(人)	11,780,027	11,820,546	11,851,647	11,876,019	11,897,935	11,887,471
總人口數(人)	23,492,074	23,539,816	23,571,227	23,588,932	23,603,121	23,561,236
集體有效劑量 S (毫西弗)	8589.69	7326.65	5803.61	5775.33	5516.98	6725.03
國民輻射劑量 E_{Taiwan} (微西弗/年)	0.366	0.311	0.246	0.245	0.234	0.285

依據 UNSCEAR 2020/2021 報告，更新後之全球職業曝露集體有效劑量(S)為每年 29,770 人-西弗，人工射源及天然射源職業曝露之集體有效劑量分別為每年 5,470 人-西弗及 24,300 人-西弗。至於在全球之職業曝露所造成之群體輻射劑量部份，因 2021 年全世界的人口約有 78.37 億人，全球職業曝露對全球民眾造成之平均年有效劑量 E_{global} 估計為每年 3.799 微西弗。

我國職業曝露集體有效劑量(S)為每年 27.903 人-西弗，在人工射源及天然射源職業曝露之集體有效劑量(S)分別為每年 6.667 人-西弗及 21.236 人-西弗，與 UNSCEAR 2020/2021 報告的全球職業曝露評估結果相比，我國的職業曝露劑量占全球的 0.094%，人工射源及天然射源職業曝露則各占全世界該類別之 0.122%及 0.087%。詳細評估過程請參閱本中心技術文件 RMC-111-301 Rev3 職業曝露國民輻射劑量評估-112 年修正版(如附件十二)。

肆、結論

一、本中心於民國 108 年至 111 年執行國民輻射劑量評估計畫，調查結果所得之國民輻射劑量五大來源之年有效劑量及百分比如表 69。背景輻射造成之每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})總計為每年 2.37 毫西弗，占比為 60.15%；醫療輻射之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 1.51 毫西弗，占比為 38.32%；消費性產品主要針對吸菸行為及飛航活動，造成國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 0.057 毫西弗，占比為 1.45%；職業曝露造成之國民輻射劑量(E_{Taiwan})約為每年 0.00118 毫西弗，占比約為 0.03%；產業活動造成之國民輻射劑量(E_{Taiwan})小於每年 3.9×10^{-7} 毫西弗，占比小於 0.001%。

表 69 國民輻射劑量的組成(五大類)

項目	年有效劑量 (毫西弗)	百分比(%)
背景輻射	2.37	60.15
醫療輻射	1.51	38.32
消費性產品	0.057	1.45
職業曝露	0.00118	0.03
產業活動	3.9×10^{-7}	<0.001
總計	3.94	100

二、國民輻射劑量仍以背景輻射為主，約占整體國民輻射劑量之 60.15%，背景輻射各來源之評估結果摘錄如下：

(一) 地表輻射：地表輻射包含戶外地表輻射及室內地表輻射，戶外及室內地表輻射分別為 0.09 毫西弗及 0.49 毫西弗；總計，地表輻射造成國人之平均年有效劑量(E_{Taiwan})為 0.58 毫西弗，占整體背景輻射劑量之 24.47%。

(二) 宇宙射線：宇宙射線劑量包含中子宇宙射線及游離輻射成分，

中子宇宙射線造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 0.05 毫西弗，游離輻射成分宇宙射線造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 0.30 毫西弗；總計，宇宙射線造成國人之平均年有效劑量(E_{Taiwan})為 0.35 毫西弗，占整體背景輻射劑量之 14.77%。

(三) 攝食曝露：主要評估消費性食品吸入鉀-40、鈾-210 等放射性核種之全身有效劑量等，計算出體內放射性核種所造成之平均年有效劑量(E_{Taiwan})為 0.54 毫西弗，占整體背景輻射劑量之 22.78%。

(四) 氬氣：國內住宅氬氣濃度平均每立方公尺 19.33 貝克，換算氬氣吸入造成國人之平均年有效劑量(E_{Taiwan})為 0.90 毫西弗，占整體背景輻射劑量之 37.97%。

三、人為輻射部份以醫療輻射為主，其次是消費性產品，各評估項目之曝露人數、集體有效劑量(S)、曝露人口之個人年有效劑量(E_{EXP})及國民輻射劑量(E_{Taiwan})比較如表 70，評估結果摘錄如下：

(一) 醫療輻射：醫療輻射包含 8 種醫療輻射類別，電腦斷層造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 1.02 毫西弗；核子醫學造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 0.16 毫西弗；心臟類介入性透視攝影造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 0.19 毫西弗；非心臟類介入透視攝影造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 0.05 毫西弗；傳統透視攝影造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 0.01 毫西弗；一般傳統 X 光造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 0.08 毫西弗；乳房攝影造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 0.001 毫西弗；牙科攝影造成國

民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 0.001 毫西弗；總計，醫療輻射造成國民每人年平均有效劑量(E_{Taiwan})為 1.51 毫西弗，占整體之 38.32%。

- (二) 吸菸行為：以每根香菸鈾-210 活度濃度 0.014 貝克進行吸菸輻射劑量之評估，換算吸菸導致之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.047 毫西弗，占整體國民輻射劑量之 1.19%。
- (三) 飛航活動：針對國際線、兩岸線與國內線等台灣地區的熱門航線進行國人飛航行為之調查與劑量評估，計算民用飛航所造成國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.010 毫西弗，占整體國民輻射劑量之 0.25%。
- (四) 農業肥料：農業活動中的肥料使用，會有鈾系、釷系和鉀-40 等放射性核種，因農業耕種時施作肥料行為所造成的國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 2.6×10^{-5} 毫西弗(0.026 微西弗)，占整體國民輻射劑量之 0.001%。
- (五) 燃煤電廠：針對國內燃煤電廠周圍之空浮與土壤進行採樣調查與量測，空浮部分大氣微粒之天然放射性核種活度之分析，其量測之結果微粒上所含之輻射物質皆小於偵測極限；土壤量測結果未受到飛灰放射性影響而造成輻射曝露增加，其評估劑量應極低，趨近於 0，故不再繼續推算可能造成之最大劑量值或年集體有效劑量。
- (六) 核設施：針對國內現有核設施進行探討，包含核能一廠、核能二廠、核能三廠、清華大學研究用反應器、核能研究所、台電公司蘭嶼低放貯存場等，共計 6 座核設施；核能電廠以外之核設施之國民輻射劑量因劑量極低，故不予評估；核設施所造成國民輻射劑量皆由三座核能電廠所貢獻，為每年

3.9×10^{-7} 毫西弗。

(七) 職業曝露：以我國目前存在輻射從業人口的行業，包括：核燃料循環類，醫學應用類、工業應用類、天然射源類及其他類 5 類。綜整劑量監測及劑量評估之結果，職業曝露造成國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.00118 毫西弗(1.18 微西弗)，占整體國民輻射劑量之 0.03%。

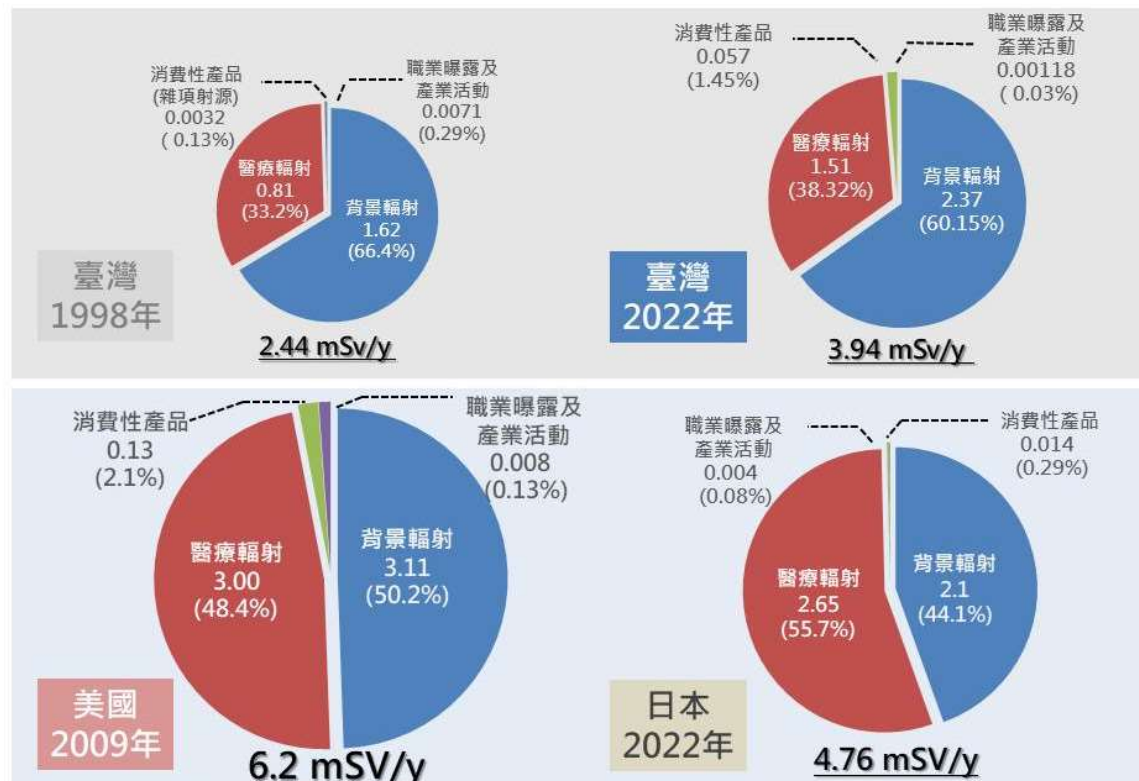
四、依本中心民國 108 至 111 年重新辦理國民輻射劑量評估調查結果，國民輻射劑量組成與比較如圖 18。國民輻射劑量(E_{Taiwan})評估調查結果為 3.94 毫西弗，其評估結果較 20 年前之 2.44 毫西弗為高，除凸顯民眾生活條件、習慣之差異外，也和評估方法及使用參數改變有關，但整體變化與各國趨勢相同，均以背景輻射及醫療輻射為主，占 98%以上。

表 70 人為輻射各評估項目之曝露人數、集體有效劑量、曝露人口之個人有效劑量比較

種類	細項	曝露人數 (人)	S (人-西弗)	E _{EXP} (毫西弗)	E _{Taiwan} (毫西弗)
職業 曝露	核燃料循環	5605	4.866	0.868	2.81x10 ⁻⁴
	醫學應用	19023	1.102	0.058	
	工業應用	22124	0.55	0.025	
	其他應用	6298	0.149	0.024	
	NORM 相關	32	1.2x10 ⁻⁵	3.66x10 ⁻⁴	
	民用航空	10780	21.236	1.97	9.01x10 ⁻⁴
消費 性產 品	吸菸行為	259.8 萬	1.11	0.225~0.45	0.047
	飛航活動	7000 萬	267.95	0.00005~0.189	0.011
	農業(肥料)	96.6 萬	0.595	6.16E-03	2.6x10 ⁻⁵
產業 活動	核設施	*	0.00917	10 ⁻⁴ ~<10 ⁻⁶	3.9x10 ⁻¹⁰
醫療 輻露	電腦斷層	232.1 萬	23364	2.07~24.54	1.02
	核子醫學	40.4 萬	3670	3.68~18.08	0.16
	心臟類介入性 透視攝影	24.3 萬	4544	0.96~33.85	0.19
	非心臟類介入 性透視攝影	21.4 萬	1000	0.12~28.83	0.05
	傳統透視攝影	16.6 萬	272	0.89~4.5	0.01
	一般傳統 X 光	2448.2 萬	1956	0.0003~0.24	0.08
	乳房攝影	23.9 萬	34	0.14~0.16	0.001
	牙科攝影	1843.1 萬	26	0.001~0.014	0.001

*核設施之曝露人口以其鄰近 50 公里內之關鍵群體估算之。

圖 18 國民輻射劑量組成與比較



伍、參考文獻

- 【1】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，國民輻射劑量之評估研究報告，87 年 6 月。
- 【2】 National Council on Radiation Protection and Measurements., Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States (NCRP Report No. 160) , 2009
- 【3】 International Commission on Radiological Protection., Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3 (ICRP Publication 137). ICRP Publishing., 2017
- 【4】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation (UNSCEAR 2000 Report) , UNSCEAR Publishing., 2000
- 【5】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation (UNSCEAR 2008 Report) , UNSCEAR Publishing., 2008
- 【6】 H. L. Beck, J. DeCampo, C. Gogolak, In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometry, U.S.Atomic Energy Commission Report HASL-258, New York, NY., 1972
- 【7】 陳清江，一戈雷等於多少西弗？輻射防護簡訊 21: P.8 ,1996
- 【8】 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, 2013
- 【9】 內政部，不動產資訊平台-房屋稅籍住宅類數量， 111 年。
<https://pip.moi.gov.tw/V3/e/scre0402.aspx>
- 【10】 行政院主計總處，社會發展趨勢調查報告，103 年。
- 【11】 潘洧樊，大氣層次級宇宙射線蒙地卡羅模擬及飛航劑量評估，國立清華大學核子工程與科學研究所碩士論文，2015

- 【12】 H. L. Beck, J. DeCampo, C. Gogolak, In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometry, U.S. Atomic Energy Commission Report HASL-258, New York, NY., 1972
- 【13】 行政院主計總處，民國 93 年社會發展趨勢調查報告，93 年。
- 【14】 日本環境省，「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和 3 年度版）」，2022
- 【15】 International Atomic Energy Agency (IAEA), Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water. IAEA-TECDOC- 788. IAEA Publishing., 2016
- 【16】 Brindha J.T, Rajaram S, Kannan V.A., Comparative study of body potassium content in males and females at Kalpakkam (India). Radiat Prot Dosimetry, 123(1) : 36-40, 2007.
- 【17】 衛生福利部國民健康署，國民營養健康狀況變遷調查 (102-105 年) 成果報告，衛福部食品藥物管理署，106 年。
- 【18】 行政院原子能委員會，游離輻射防護安全標準，94 年 12 月 30 日修正。
- 【19】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 106 年上半年台灣地區放射性落塵與食品調查報告，106 年。
- 【20】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 106 年下半年台灣地區放射性落塵與食品調查報告，107 年。
- 【21】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 107 年上半年台灣地區放射性落塵與食品調查報告，107 年。
- 【22】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 107 年下半年台灣

地區放射性落塵與食品調查報告，108 年。

- 【23】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 108 年上半年台灣地區放射性落塵與食品調查報告，108 年。
- 【24】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 108 年下半年台灣地區放射性落塵與食品調查報告，109 年。
- 【25】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 109 年上半年台灣地區放射性落塵與食品調查報告，109 年。
- 【26】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 109 年下半年台灣地區放射性落塵與食品調查報告，110 年。
- 【27】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 110 年上半年台灣地區放射性落塵與食品調查報告，110 年。
- 【28】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，民國 110 年下半年台灣地區放射性落塵與食品調查報告，111 年。
- 【29】 衛福部食品藥物管理署、國家衛生安全研究院，國家攝食資料庫-108 年攝食量調查報告，111 年。
- 【30】 T. Ota, T. Sanada, Y. Kashiwara, T. Morimoto & K. Sato, Evaluation for committed effective dose due to dietary foods by the intake for Japanese adults. Japanese Journal of Health Physics, 44(1), 80-88., 2009
- 【31】 高淑雲、蔡慧君，農政視野--提升漁產加值行動方案、農政與農情，行政院農業委員會出版品，106 年 10 月(第 304 期)。
- 【32】 郭俊德，水產品廢棄物之處理與應用，行政院農業委員會臺南區農業改良場，農情半月刊第 189 期，90 年(第二期)。

- 【33】 International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 72: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, Ann. ICRP 26. ICRP Publishing., 1996
- 【34】 內政部，戶籍人口統計，110 年。
- 【35】 International Commission on Radiological Protection (ICRP), Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 103). ICRP Publishing, 2007
- 【36】 International Commission on Radiological Protection., Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon (ICRP Publication 115). ICRP Publishing, 2007
- 【37】 International Commission on Radiological Protection (ICRP), Statement on Radon. ICRP Publishing, 2009
- 【38】 International Commission on Radiological Protection (ICRP), Radiological Protection against Radon Exposure (ICRP Publication 126). ICRP Publishing, 2014
- 【39】 American Association of Radon Scientists and Technologists, Protocol for conducting measurements of radon and radon decay products in homes (ANSI/AARST MAH-2019) AARST Publishing., 2019
- 【40】 American Association of Radon Scientists and Technologists, Protocol for conducting measurements of radon and radon decay

products in homes (ANSI/AARST MAH-2014) AARST Publishing, 2014

- 【41】 陳清江，「台灣地區住宅氬氣活度擴大量測與劑量再評估」計畫成果，行政院原子能委員會輻射偵測中心，106 年。
- 【42】 National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), Medical Radiation Exposure of Patients in the United States (Report No. 184). NCRP Publishing, 2019
- 【43】 F. T. CROSS, Radioactivity in Cigarette Smoke Issue, Health Phys. 1984; 46(1), 205–208.
- 【44】 <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer>
- 【45】 EML, DOE (EML is currently part of the DHS). HASL-300 Method Po-02-RC: Polonium in Water, Vegetation, Soil, and Air Filters. EML Procedures Manual, HASL-300, 28th Edition, 1997.
- 【46】 National Council on Radiation Protection and Measurements.(NCRP), Exposure of the U.S. Population from Occupational Radiation, NCRP Report No. 101, 1989
- 【47】 https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/media/MV-DATES.zip
- 【48】 袁明豪、吳昀庭、胡家瑜、吳怡靚、林欣儀，臺灣重要航線宇宙輻射劑量之評估與量測方法評析及其資料庫建立，原子能科技學術合作研究計畫期末報告，106 年 12 月 31 日。
- 【49】 楊子毅，NTHU Flight Dose Calculator (Python version) 使用手

冊(版本 3.1c),國立清華大學核子工程與科學研究所輻射安全與屏蔽實驗室,111 年 6 月。

- 【50】交通部民用航空局民航統計年報
<https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=1092&lang=1>
- 【51】內政部移民署全球資訊網。 <https://ris.gov.tw/app/portal/346>
- 【52】S.Y.F. Chu, L.P. Ekström and R.B, The Lund/LBNL Nuclear Data Search Version 2.0, Firestone LBNL, Berkeley,USA , 1999.
- 【53】N. N. Jibiri and K. P. Fasae, Activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in brands of fertilizers used in Nigeria, Radiation Protection Dosimetry, vol. 148, no. 1, pp. 132–137, 2012
- 【54】N. M. Hassan, N. A. Mansour, M. Fayez-Hassan, and E. Sedqy, Assessment of natural radioactivity in fertilizers and phosphate ores in Egypt, Journal of Taibah University for Science, vol. 10, no.2, pp.296–306, 2016.
- 【55】W. Boukhenfouf and A. Boucenna, The radioactivity measurements in soils and fertilizers using gamma spectrometry technique, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 102, no. 4, pp. 336–339, 2011.
- 【56】S. Righi, P. Lucialli, and L. Bruzzi, Health and environmental impacts of a fertilizer plant—Part I:assessment of radioactive pollution, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 82, no. 2, pp. 167–182, 2005.
- 【57】G. Marovic and J. Sencar, ^{226}Ra and possible water contamination due to phosphate fertilizer production, Journal of

Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters, vol. 200, no. 1, pp. 9–18, 1995.

- 【58】 N. M. Hassan, M. Hosoda, T. Ishikawa et al., Radon migration process and its influence factors; review, Japanese Journal of Health Physics, vol. 44, no. 2, pp. 218–231, 2009.
- 【59】 M. S. Yasir, A. Ab Majid, and R. Yahaya, Study of natural radionuclides and its radiation hazard index in Malaysian building materials, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 273, no. 3, pp. 539–41, 2007.
- 【60】 行政院原子能委員會，天然放射性物質管理辦法，106 年 9 月 15 日修正。
- 【61】 NEA-OECD Nuclear Energy Agency, Exposure to Radiation from Natural Radioactivity in Building Materials. Nuclear Energy Agency(NEA), Report by NEA Group of Experts, Organization for Economic Co-Operation and Development, OECD, Paris, France, 1979.
- 【62】 R. Ugolini, E. Caldognetto and F. Trotti,” Use of Fertilizers in Agriculture: Individual EffectiveDose Estimate”, Environments, vol.7, no. 7, pp. 1–8, 2020.
- 【63】 行政院原子能委員會，游離輻射防護標準，94 年 12 月 30 日修正。
- 【64】 N. M. Hassan, Byung-Uck Chang, and Shinji Tokonami, Comparison of Natural Radioactivity of Commonly Used Fertilizer Materials in Egypt and Japan, Journal of Chemistry,

vol. 2017, pp.1–8, 2017.

- 【65】 COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation, and repealing ,Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom.
- 【66】 N. M. Hassan, N. A. Mansour, M. Fayez-Hassan, E. Sedqy, Assessment of natural radioactivity in fertilizers and phosphate ores in Egypt, Journal of Taibah University for Science, vol.10, pp.296–306, 2016.
- 【67】 V. A. Becegato, F. J. F. Ferreira, and W. C. P. Machado, Concentration of radioactive elements (U, Th and K) derived from phosphatic fertilizers in cultivated soils, Brazilian Archives of Biology and Technology, vol. 51, no. 6, pp. 1255–1266, 2008.
- 【68】 W. R. Alharbi, Natural radioactivity and dose assessment for brands of chemical and organic fertilizers used in Saudi Arabia, Journal of Modern Physics, vol. 4, no. 3, pp. 344–348, 2013.
- 【69】 A. Bramki., M. Ramdhane., F. Benrachi, Natural radioelement concentrations in fertilizers and the soil of the Mila region of Algeria, Journal of Radiation Research and Applied Sciences ,vol. 11, Issue 1,pp. 49-55, 2018
- 【70】 M. N. Alam, M. I. Chowdhury, M. Kamal, S. Ghose, H. Banu, and D. Chakraborty, Radioactivity in chemical fertilizers used in Bangladesh, Applied Radiation and Isotopes, vol. 48, no. 8, pp. 1165–1168, 1997.

- 【71】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Publications, New York, 1993.
- 【72】 U.S. Geological Survey (USGS), Radioactive Elements in Coal and Fly Ash: Abundance, Forms, and Environmental Significance, Fact Sheet FS-163-97, <http://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs163-97/FS-163-97.html>., 1997.
- 【73】 台灣電力公司火力發電簡介。
<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=202&cid=129&cchk=675cea43-9c45-4ae1-80c6-4f18b3b38d8e>
- 【74】 M.d. Jainal Abedin, M.d. Rezaul Karim, Spatial distribution of radionuclides in agricultural soil in the vicinity of a coal-fired brick kiln. Arabian Journal of Geosciences, Article number : 236, 2019.
- 【75】 International Atomic Energy Agency (IAEA), Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation. Technical Reports Series No. 419. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003.
- 【76】 台灣電力公司核能發電處，核一廠 106 年放射性物質排放年報，107 年。
- 【77】 台灣電力公司核能發電處，核二廠 106 年放射性物質排放年報，107 年。
- 【78】 台灣電力公司核能發電處，核三廠 106 年放射性物質排放年

報，107 年。

【79】 台灣電力公司核能發電處，核一廠 107 年放射性物質排放年報，108 年。

【80】 台灣電力公司核能發電處，核二廠 107 年放射性物質排放年報，108 年。

【81】 台灣電力公司核能發電處，核三廠 107 年放射性物質排放年報，108 年。

【82】 台灣電力公司核能發電處，核一廠 108 年放射性物質排放年報，109 年。

【83】 台灣電力公司核能發電處，核二廠 108 年放射性物質排放年報，109 年。

【84】 台灣電力公司核能發電處，核三廠 108 年放射性物質排放年報，109 年。

【85】 台灣電力公司核能發電處，核一廠 109 年放射性物質排放年報，110 年。

【86】 台灣電力公司核能發電處，核二廠 109 年放射性物質排放年報，110 年。

【87】 台灣電力公司核能發電處，核三廠 109 年放射性物質排放年報，110 年。

【88】 台灣電力公司核能發電處，核一廠 110 年放射性物質排放年報，111 年。

- 【89】 台灣電力公司核能發電處，核二廠 110 年放射性物質排放年報，111 年。
- 【90】 台灣電力公司核能發電處，核三廠 110 年放射性物質排放年報，111 年。
- 【91】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，臺灣地區核設施 110 年環境輻射監測年報，111 年 3 月。
- 【92】 原子科學技術發展中心，國立清華大學環境輻射監測季報 (110 年第 1 季)，110 年 5 月。
- 【93】 原子科學技術發展中心，國立清華大學環境輻射監測季報 (110 年第 2 季)，110 年 8 月。
- 【94】 原子科學技術發展中心，國立清華大學環境輻射監測季報 (110 年第 3 季)，110 年 11 月。
- 【95】 原子科學技術發展中心，國立清華大學環境輻射監測季報 (110 年第 4 季)，111 年 2 月。
- 【96】 行政院原子能委員會核能研究所，核能研究所場所外環境輻射監測報告書(期間 110 年 1 月至 110 年 3 月)，110 年 5 月。
- 【97】 行政院原子能委員會核能研究所，核能研究所場所外環境輻射監測報告書(期間 110 年 4 月至 110 年 6 月)，110 年 8 月。
- 【98】 行政院原子能委員會核能研究所，核能研究所場所外環境輻射監測報告書(期間 110 年 7 月至 110 年 9 月)，110 年 11 月。
- 【99】 行政院原子能委員會核能研究所，核能研究所場所外環境輻

射監測報告書(期間 110 年 10 月至 110 年 12 月),111 年 2 月。

- 【100】 台灣電力股份有限公司，低放貯存場 110 年環境輻射監測報告，111 年 2 月。
- 【101】 內政部移民署全球資訊網。<https://ris.gov.tw/app/portal/346>
- 【102】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2022) , Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2020/2021 Report Volume IV comprises scientific annex D: Evaluation of occupational exposure to ionizing radiation (UNSCEAR 2020/2021 Report) . UNSCEAR Publishing.
- 【103】 行政院原子能委員會，全國輻射工作人員劑量資料統計年報 (民國 104 年版)，105 年。
- 【104】 行政院原子能委員會，全國輻射工作人員劑量資料統計年報 (民國 105 年版)，106 年。
- 【105】 行政院原子能委員會，全國輻射工作人員劑量資料統計年報 (民國 106 年版)，107 年。
- 【106】 行政院原子能委員會，全國輻射工作人員劑量資料統計年報 (民國 107 年版)，108 年。
- 【107】 行政院原子能委員會，全國輻射工作人員劑量資料統計年報 (民國 108 年版) ，109 年。
- 【108】 行政院原子能委員會，全國輻射工作人員劑量資料統計年報 (民國 109 年版)，110 年。

- 【109】 J. Lochard, D. Bartlett, W. Rühm, H. Yasuda & J. F. Bottollier-Depois ICRP Publication 132: Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation. *Annals of the ICRP*, 45(1), 5–48., 2016
- 【110】 J. Kubančák, D.Kyselová, I. Kovář, M.Hlaváčová, R.Langer, I. Strhársky, K. Kudela, M. Davidková & O. Ploc, OVERVIEW OF AIRCREW EXPOSURE TO COSMIC RADIATION IN THE CZECH REPUBLIC. *Radiation Protection Dosimetry*, 186(2–3), 211–214., 2019
- 【111】 H. Yasuda, T. Sato, H. Yonehara, T. Kosako, K. Fujitaka & Y. Sasaki, Management of cosmic radiation exposure for aircraft crew in Japan. *Radiation Protection Dosimetry*, 146(1–3), 123-125., 2011
- 【112】 李安倫，台灣飛航輻射劑量的研究與評估程式的開發，碩士論文，國立清華大學，臺灣博碩士論文知識加值系統，106年。
- 【113】 許榮鈞，飛航劑量評估程式的認證與飛航劑量測量實驗設計，科技部補助專題研究計畫成果報告，106年。
- 【114】 Z. Y. Yang & R. J. Sheu, A Comprehensive Approach for Estimating Collective and Average Effective Doses of Galactic Cosmic Radiation Received by Pilots. *Health Physics*, 120(1), 72–79., 2020
- 【115】 行政院性別平等委員會，重要性別平等資料庫-國籍航空公司受雇員工，109年。

【116】內政部，戶籍人口統計(109 年)，110 年。

陸、附件

附件一、國民輻射劑量審查會議歷次開會通知單及會議記錄

附件二、RMC-110-318Rev3 地表輻射國民輻射劑量評估-112
年修正版

附件三、RMC-112-301Rev2 宇宙輻射國民輻射劑量評估

附件四、RMC-111-312Rev3 國人攝食導致的體內輻射曝露劑
量評估-112 年修正版

附件五、RMC-111-313Rev2 國人住宅氡氣輻射劑量評估-112
年修正版

附件六、國民醫療輻射劑量調查研究計畫 111 年度委託研究
計畫期末報告

附件七、RMC-109-319Rev3 國人吸菸造成的輻射劑量評估
-112 年修正版

附件八、RMC-110-310Rev4 民用航空宇宙輻射之國民劑量評
估-112 年修正版

附件九、RMC-111-306Rev2 消費性產品(農業肥料)之國民輻
射劑量評估-112 年修正版

附件十、RMC-111-315Rev2 核設施周圍環境輻射調查與民眾
劑量評估-112 年修正版

附件十一、RMC-110-306Rev2 燃煤電廠周圍環境土壤輻射強
度調查與居民劑量評估報告-112 年修正版

附件十二、RMC-111-301Rev3 職業曝露國民輻射劑量評估
-112 年修正版