

RMC-111-301Rev3

職業曝露國民輻射劑量評估 (112 年 8 月修正版)



核能安全委員會輻射偵測中心

112 年 8 月

職業曝露國民輻射劑量評估

摘要

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。

本研究依據行政院原子能委員會民國 104 年至 109 年之「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」之劑量監測數據，我國目前進行輻射劑量監測之職業曝露人口約有 53,000 人，近六年職業曝露之集體有效劑量(S)為每年 6.67 人-西弗，輻射工作人員之個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.13 毫西弗，換算成國民輻射劑量(E_{Taiwan})為每年 0.281 微西弗/年；整體而言，我國的職業輻射從業人數雖增加，但集體有效劑量則逐年下降，故職業曝露之國民輻射年劑量呈現長期下降趨勢。

民用航空的從業人員會因職業的關係有較高的宇宙射線劑量，惟目前之「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」並無相關監測數據；為能與國際職業曝露現況比較，本研究參採聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)、美國及日本之做法，以國際認可方式結合本土數據進行民用航空職業曝露劑量之推估；國內民國 104~109 年民用航空飛航工作人員約有 10,780 人，國內文獻推算我國飛航人員之個人年有效劑量(E_{EXP})約為 1.97 毫西弗，據以推算出民用航空之集體有效劑量(S)約為每年 21.24 人-西弗，民用航空的職業曝露劑量導致之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 0.901 微西弗/人-年，參考國際做法，納入民用航空業之職業曝露劑量，我國職業曝露所造成之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 1.18 微西弗/人-年。

依據本中心 111 年版之國民輻射劑量評估之總結果，經評估，台灣之國民輻射劑量(E_{Taiwan})合計為每年 3.95 毫西弗；職業曝露部分所貢獻的劑量約佔整體國民輻射劑量之 0.03%，比例遠較其他來源為低。

Evaluation of Occupational Exposure to Ionizing Radiation in Taiwan

Abstract

This study mainly calculates the dose of occupational exposure to ionizing radiation sources in Taiwan. The data sources include dose monitoring and dose assessment. Based on the dose monitoring data of domestic radiation workers from the annual report of “National Database Center of Occupational Radiation Exposures (NDCORE) ” by the Atomic Energy Council (now restructuring as Nuclear Safety Commission, NSC) from 2015 to 2020, there were approximately 53,000 workers in Taiwan monitored for occupational radiation exposure. According to the occupational external radiation exposure data from 2015 to 2020, collective effective dose of occupational exposure was 6.67 man-sieverts(man-Sv), and the average annual effective dose (E_{EXP}) over total radiation workers was 0.13 millisieverts(mSv), which converts to annual effective dose per capita in Taiwan (E_{Taiwan}) is 0.281 microsieverts(μ Sv) per year. Major dose of occupational exposure are from nuclear fuel cycle, medical and industrial categories.

Aircrews are exposed to cosmic radiation, which is composed of primary and secondary radiation. However, the current “National Database Center of Occupational Radiation Exposures (NDCORE) “does not include the monitoring data of civil aviation workers. According to statistics from 2015 to 2020, Taiwanese domestic airlines have approximately 10,780 crew members (including pilots and flight attendants). Average annual effective dose (E_{EXP}) for Taiwanese aircrew members is about 1.97 mSv estimated by local model,

and based on this, collective effective dose (S) for civil aviation is estimated to be 21.24 man-Sv. The occupational exposure dose from civil aviation results in annual effective dose per capita in Taiwan (E_{Taiwan}) of 0.901 μSv .

Referring to the UNSCEAR report, combined with the dose simulation results of the civil aviation industry and radiation worker dose monitoring data, the annual effective dose per capita in Taiwan (E_{Taiwan}) from occupational exposure is estimated to be 1.18 μSv . Total of annual effective dose per capita in Taiwan (E_{Taiwan}) is estimated to be 3.95 mSv in 2022. The contribution from occupational exposure accounts for approximately 0.03% of the total national radiation dose, a significantly lower proportion compared to other sources of ionizing radiation. Overall, although the number of occupational radiation workers in Taiwan has increased, collective effective dose of occupational exposure has been decreasing year by year, resulting in a long-term downward trend in the annual effective dose per capita in Taiwan (E_{Taiwan}).

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；亦即台灣之國民輻射劑量。

目錄

摘要.....	i
名詞定義.....	ii
一、 前言.....	1
二、 文獻回顧.....	3
(一) 聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)	3
(二) 美國.....	20
(三) 日本.....	22
三、 台灣地區職業曝露現況.....	24
(一) 核燃料循環類.....	28
(二) 醫學應用類.....	32
(三) 工業應用類.....	37
(四) 其他應用類.....	42
(五) 天然射源類.....	46
(六) 小結.....	49
四、 職業曝露評估.....	54
(一) 民用飛行之職業曝露評估.....	54
(二) 台灣地區職業輻射曝露評估.....	60
(三) 與其他國家之比較.....	65
五、 職業曝露之國民輻射劑量評估.....	66
六、 結語.....	69
七、 參考文獻.....	70
附錄、審查會意見之辦理情形回復對照表.....	74

表目錄

表 1、UNSCEAR 最新之職業曝露分類.....	5
表 2、UNSCEAR 1993 報告的職業曝露評估結果.....	7
表 3、UNSCEAR 2000 報告的職業曝露評估結果.....	8
表 4、UNSCEAR 2008 報告的職業曝露評估結果.....	10
表 5、UNSCEAR 2020/2021 報告的職業曝露評估結果.....	12
表 6、各類工作場所氬氣曝露劑量.....	14
表 7、全球人工射源相關職業曝露之劑量變化趨勢.....	16
表 8、全球天然射源相關職業曝露之劑量變化趨勢.....	19
表 9、美國職業曝露劑量.....	21
表 10、日本職業曝露劑量.....	23
表 11、台灣職業曝露分類與全世界之比較.....	25
表 12、台灣地區 87 年版之職業曝露評估結果.....	27
表 13、核燃料循環類之職業曝露劑量.....	30
表 14、核燃料循環類職業曝露之劑量比較.....	32
表 15、醫學應用類之職業曝露劑量.....	33
表 16、醫學應用類職業曝露之劑量比較.....	35
表 17、工業應用類之職業曝露劑量.....	38
表 18、工業應用類職業曝露之劑量比較.....	40
表 19、其他應用類之職業曝露劑量.....	44
表 20、其他應用類職業曝露之劑量比較.....	45
表 21、天然射源類之職業曝露劑量.....	48
表 22、天然射源類職業曝露之劑量比較.....	49
表 23、台灣地區民國 104-109 年職業輻射曝露劑量統計總表.....	50
表 24、111 年版職業曝露劑量(僅劑量監測)	51
表 25、國籍航空公司受雇員工數.....	54
表 26、納入民用航空評估結果之天然射源職業劑量.....	59
表 27、台灣地區之職業曝露劑量評估結果(87 年及 111 年)	60
表 28、職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})之比較.....	64
表 29、民國 104-109 年職業輻射曝露之集體有效劑量(S)	65
表 30、台灣職業曝露之國民輻射劑量(E_{Taiwan})	66
表 31、台灣職業曝露與其他國家之比較.....	68

圖目錄

圖 1、民國 104-109 年職業輻射各類別之從業人口比例.....	52
圖 2、民國 104~109 年職業輻射各類別年集體有效劑量之比例.....	52
圖 3、台灣地區各職業曝露之從業人口比例 (87 年版).....	62
圖 4、台灣地區各職業曝露之從業人口比例 (111 年版).....	62
圖 5、台灣地區各職業輻射之集體有效劑量比例 (87 年版).....	63
圖 6、台灣地區各職業輻射之集體有效劑量比例 (111 年版).....	64

職業曝露國民輻射劑量評估報告

一、前言

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，輻射偵測中心自民國 108 年起，展開為期 4 年的國民輻射劑量調查計畫；生活中的游離輻射包含天然輻射及人工輻射，本中心分成背景輻射、消費性產品、醫療輻射、產業活動及職業曝露 5 大類進行評估；需依輻射曝露種類執行劑量計測及曝露族群之調查，以推估曝露人口的個人年有效劑量，據以計算集體有效劑量，再除以台灣總人口數，最後獲得國民輻射劑量。

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。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(International Commission on Radiological Protection, 簡稱 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」，定期公開予各界知悉。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。

我國在職業曝露劑量之統計分類，早期的工作類別是分為研究用、醫學應用、非醫學應用及核能電廠等四大類；自民國 89 年以後，則改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)最新之輻射工作類別進行分類統計，包括核燃料循環、醫學應用、工業應用、天然射源與其他應用等五大項進行工作類別分類，早年的研究用類與非醫學應用類，則依目前分類原則分別併入工業類與其他類做統計。聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)之核燃料循環、醫學應用、工業應用、天然射源與其他等五大項工作類別下，另有細部工作類別進一步區分；依據聯合國的分類，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；工業應用類計有工業照射、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；天然射源類之民用航空、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。

依歷年申報資料來看，其中之民用航空、採煤業、其他採礦業及嚴重效應之意外等 4 類，國內沒有從事該工作類別人員的劑量申報資料，故並無相關數據；依最新的「109 年全國輻射從業人員劑量資料統計年報」，我國目前已無人從事礦物與礦石處理；職業的變化與我國的產業特性及社會變遷息息相關，也會影響整體的職業輻射曝露劑量變化趨勢。

本研究進行職業曝露劑量評估之目的，在於瞭解各輻射相關職業造成劑量之比較，並作為國民輻射劑量評估之依據。歷年劑量資料統計趨勢顯示，在合理控制下，輻射工作群體的總劑量是逐年下降的；本報告參考國際文獻，並依據 104 年至 109 年之「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」的數據進行台灣地區職業曝露之評估，以呈現我國職業曝露的現況。

二、 文獻回顧

(一) 聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)

全球的游離輻射劑量評估由聯合國原子輻射效應科學委員會 (UNSCEAR) 進行長期的調查，且不定期出版相關報告更新評估結果。UNSCEAR 將民眾的輻射來源分為天然輻射源(Natural Source)和人工輻射源(Artificial Source)；天然輻射曝露造成的輻射曝露又稱為背景輻射，來源包含：宇宙射線(Cosmic radiation)、地表輻射(External terrestrial)、氡氣吸入(Inhalation radon gas)及攝入(Ingestion)等 4 個主要途徑；人工輻射係指因人為活動造成輻射曝露，UNSCEAR 依來源將其分為醫療輻射、核試驗、職業曝露、核事故及核設施來探討；本章節主要就 UNSCEAR 歷年報告中有關職業曝露的部分做說明。

UNSCEAR 在 1993 年出版了第一份輻射劑量調查報告「Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes」報告(以下簡稱 UNSCEAR 1993 報告)，職業曝露的專章在該份文件的附錄 D，數據來源是 1985 年至 1989 年的全球輻射職業調查結果【1】。UNSCEAR 於 2000 年又再出版了「Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes」報告(以下簡稱 UNSCEAR 2000 報告)，職業曝露的專章在該份文件的附錄 E，數據來源是 1990 年至 1994 年的全球輻射職業調查結果【2】；2008 年 UNSCEAR 又出版了「Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes A and B」報告(以下簡稱 UNSCEAR 2008 報告)更新公眾曝露及職業曝露部分的調查數據，數據來源是 2000 年至 2002 年的全球輻射職業調查結果，職業曝露的統計數據列在該份文件的附錄 B【3】。全球最新的職業曝露報告，是 UNSCEAR 在 2022 年發表的「Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2020/2021 Report Volume IV comprises scientific annex D: Evaluation of occupational exposure to ionizing radiation」報告 (以下簡稱 UNSCEAR 2020/2021 報告)，

此份 UNSCEAR 2020/2021 報告的數據來源是 2010 年至 2014 年的全球輻射職業調查結果【4】。

聯合國原子輻射效應科學委員會 (UNSCEAR) 自 1975 年開始收集和評估游離輻射的職業曝露的來源、劑量和趨勢；游離輻射的職業曝露除了人工射源在工業、醫學、教育和研究中的應用外，天然射源也可能造成相關從業人員的曝露。聯合國原子輻射效應科學委員會 (UNSCEAR) 報告所評估的職業輻射曝露狀況，主要依輻射源的種類及應用方式做區分，依來源分成天然輻射 (Natural Radiation) 和人工輻射源 (Man-made source) 兩大部門進行評估。天然輻射的職業種類再區分為：採礦業、航空業及其他與或是天然放射性物質 (Naturally Occurring Radioactive Materials, 簡稱 NORM) 之運用或因工作受到天然背景輻射曝露相關的職業；人工輻射的職業種類，主要區分為：核燃料循環、醫學應用、工業應用、軍事活動和其他 (如：研究、獸醫或其他運用) 等運用類別來做探討；UNSCEAR 2020/2021 報告目前之職業曝露分類方式如表 1。

歷年的 UNSCEAR 報告在職業曝露的分類做法略有差異。UNSCEAR 1993 報告並沒有「其他應用 (Miscellaneous)」這個分類，其中之子項目是歸類在其他四類中的其他 (Other)，例如，「其他應用 (Miscellaneous)」中最主要的教育研究類，過去是散佈在核燃料循環、工業應用、醫學應用等分類中做劑量計算；另外，UNSCEAR 1993 報告並沒有評估獸醫 (Veterinary medicine) 這個子項目，UNSCEAR 2000 報告及 UNSCEAR 2008 報告就有這個類別，但是放在「其他應用 (Miscellaneous)」這個類別中統計，但到了 UNSCEAR 2020/2021 報告，則已改被歸類在「醫學應用 (Medical uses)」的分類中。本中心民國 87 年之國民輻射劑量評估報告主要是參考 UNSCEAR 1993 報告的分類，但當時中的職業評估並未納入獸醫之評估；另因台灣目前的做法是參考 UNSCEAR 2000 報告之分類，獸醫已被歸類在「其他應用 (Miscellaneous)」做劑量統計，因此，雖然 UNSCEAR 2020/2021 報告已做調整，本研究的職業曝露評估還是會依照國內目前分類方式，將獸醫歸類在「其他應用 (Miscellaneous)」中做評估。

表 1、UNSCEAR 最新之職業曝露分類

射源類	職業細項分類
核燃料循環 (Nuclear fuel cycle)	鈾礦開採(Uranium Mining) 鈾礦煉製(Uranium Milling) 鈾礦濃縮(Uranium conversion) 鈾礦濃縮(Uranium Enrichment) 核燃料製造(Fuel fabrication) 核反應器運轉(Reactor operation) 除役(Decommissioning) 燃料再處理(Fuel Reprocessing) 核廢料管理(Waste management) 核燃料循環研究 (Research in nuclear fuel cycle) 保安和保全檢查(Safety and safeguards inspections) 核燃料循環中的運輸(Transport within nuclear fuel cycle) 其他(All other activities in nuclear fuel cycle)
醫學應用 (Medical uses)	放射診斷(Diagnostic radiology) 放射牙科(Dental practice) 核子醫學(Nuclear Medicine) 放射治療(Radiotherapy) 獸醫(Veterinary medicine) 所有其他醫療應用(All other medical uses)
工業應用 (Industrial uses)	工業照射(Industrial Irradiation) 工業放射照相(Industrial Radiography) 發光應用(Luminizing) 放射性同位素產銷(Radioisotope production) 測井(Well logging) 加速器運轉(Accelerator operation) 工業儀表(Industrial gauges) 所有其他工業應用(Other)
軍事活動 (Military activities)	核武器生產(Weapon fabrication) 核子動力潛艇裝置(Nuclear ships and support) 其他軍事活動(All other Military activities) 其他特定職業群體(Other specific occupational group)
其他應用 (Miscellaneous)	教育機構(Educational establishments) 用過射源的廢棄(Waste spent sources) 射源的商業運輸(Commercial Transport of radiation sources)
天然輻射 (Natural radiation)	民用飛行(Civilian aviation) 採煤業(Coal mining) 其他採礦業(Mineral mining other than coal and uranium) 石油與天然氣工業(Oil and natural gas industry) 礦物與礦石處理(Processing of mineral and ores) 採礦以外工作場所的氡氣曝露(Radon in workplaces other than mineral extraction industries)

*資料來源: UNSCEAR 2020/2021 報告之表 1；本研究整理。

UNSCEAR 對全球職業曝露劑量和趨勢的評估報告的主要資料來源有兩個：(1) UNSCEAR 全球職業輻射曝露調查報告(UNSCEAR Global Survey of Occupational Radiation Exposure)所收集的數據；和(2)經過同行審查之相關文獻中所發表的評估和分析結果；整體而言，在各類輻射相關職業曝露中，以核燃料循環的數據最為完整及可信，因為該數據比其他輻射用途的曝露數據更為完整。以上資料對職業輻射曝露的評估都是基於對職業工作人員的個人監測紀錄或其工作場所及曝露評估數據。成員國都是基於輻射防護目的收集其國內之職業輻射族群的曝露劑量；因此，職業曝露相關數據都以「曝露群體之個人平均年有效劑 E_{EXP} (Average annual Effective dose)」和「集體有效劑量 S (Annual collective effective dose)」表示。輻射防護管制規定及相關用語的定義都是依據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)及輻射防護相關國際組織之作法辦理。

1. 歷年報告之調查結果

(1) UNSCEAR 1993 報告

UNSCEAR 1993 報告【1】之職業曝露調查結果如表 2，人工射源之職業曝露主要分成核燃料循環(Nuclear fuel cycle)、工業應用(Industrial application)、醫學應用(Medical application)及軍事活動(Defence activity)等四類；天然射源則分為民用飛航(Civilian aviation)、採煤業(Coal mine)、其他採礦業(Other Mine)、礦業以外的產業(Other than mine)等 4 類做探討。

1985 年至 1989 年全世界人工射源相關的職業曝露工作人員約有 422 萬 8 千人，人工射源職業曝露之個人年有效劑量 E_{EXP} (Average annual Effective dose)為及集體有效劑量 S (Annual collective effective dose)為 1.1 毫西弗及 4,300 人-西弗，主要由核燃料循環類所貢獻；天然射源相關的職業曝露人口約有 520 萬人，天然射源職業曝露之個人年有效劑量 E_{EXP} (Average annual Effective dose)為及集體有效劑量 S

(Annual collective effective dose)為 1.7 毫西弗及 8,600 人-西弗。依據 UNSCEAR 1993 報告【1】，1985 年至 1989 年全世界職業曝露的個人年有效劑量 E_{EXP} (Average annual Effective dose)及集體有效劑量 S (Annual collective effective dose)為 1.4 毫西弗及為 12,900 人-西弗。以當時全世界的總人口 53 億人計算，全世界職業曝露之平均年有效劑量 E_{global} (Effective dose per individual per year in the population)為每年 2.43 微西弗/人-年。

表 2、UNSCEAR 1993 報告的職業曝露評估結果

職業分類		集體有效劑量 S (人-西弗)	個人年有效劑量 E_{EXP} (毫西弗)
人工射源	核燃料循環	2500	2.9
	工業應用	510	0.9
	醫學應用	1000	0.5
	軍事活動	250	0.7
	小計(人工射源)	4300	1.1
天然射源	民用飛航	800	3
	採煤業	3400	0.9
	其他礦業	4100	6
	礦業以外產業	<300	<1
	小計(天然射源)	8600	1.7
合計		12900	1.4

*資料來源: UNSCEAR 1993 報告 Annex D 之表 41；本研究整理。

(2) UNSCEAR 2000 報告

UNSCEAR 2000 報告【2】主要是利用 1990 年至 1994 年的職業曝露數據評估全球的職業曝露劑量，其評估結果如下表 3；從 UNSCEAR 2000 報告開始，人工射源的部分除了原有的核燃料循環、工業應用、

表 3、UNSCEAR 2000 報告的職業曝露評估結果

職業分類		集體有效劑量 S (人-西弗)	個人年有效劑量 E_{EXP} (毫西弗)
人工射源	核燃料循環	1400	1.75
	工業應用	360	0.51
	醫學應用	760	0.33
	軍事活動	100	0.24
	其他應用	40	0.11
	小計(人工射源)	2700	0.6
天然射源	民用飛行	800	3.0
	採煤業	2600	0.7
	其他礦業	2000	2.7
	礦業相關製程	300	1.0
	地上工作場所氡氣曝露	6000	4.8
	小計(天然射源)	11700	1.8
合計		14440	1.31

*資料來源: UNSCEAR 2000 報告 Annex E 之表 35、表 43；本研究整理。

醫學應用及軍事活動等四個部門外，增加了其他應用類(Miscellaneous)，其下的職業種類主要包含：教育研究、獸醫類及其他難以歸類在前述四個部門的職業種類；天然射源部分，除了民用飛航、採煤業及其他礦業外，原有的「礦業以外的其他類(Other than mine)」另外拆成「礦業相關製程(Mineral processing)」及「地上工作場所氡氣曝露(Radon Exposure above ground)」做統計。

1990 年至 1994 年全世界人工射源相關的職業曝露工作人員已成長到 460 萬人，人工射源職業曝露之個人年有效劑量 E_{EXP} (Average annual Effective dose)為及集體有效劑量 S (Annual collective effective dose)則呈現下降趨勢，分別為 0.6 毫西弗及 2,700 人-西弗，主要還是

由核燃料循環類所貢獻；天然射源相關的職業曝露人口約有 650 萬人，同樣呈現成長趨勢，天然射源職業曝露之個人年有效劑量 E_{EXP} 為及集體有效劑量 S 為 1.8 毫西弗及 11,700 人-西弗。1990 年至 1994 年全世界職業曝露的個人年有效劑量 E_{EXP} 及集體有效劑量 S 為 1.31 毫西弗及為 14,400 人-西弗。

(3) UNSCEAR 2008 報告

表 4 是 UNSCEAR 2008 報告【3】所更新之職業曝露評估結果，數據來源是 2000 年至 2002 年的全球輻射職業調查。2000 年至 2002 年人工射源的部分，全世界人工射源相關的職業曝露工作人員約有 986 萬 5 千人，持續呈現增長趨勢；人工射源職業曝露之個人年有效劑量 E_{EXP} 為 0.4 毫西弗，則呈現下降趨勢；但集體有效劑量 S 則增長至 4,730 人-西弗，約為 UNSCEAR 2000 報告【2】中估計值(2,700 人-西弗)的 2 倍，主要是因為醫學應用類集體劑量的增加，較前版的報告增加近 5 倍，醫學應用類自此也取代核燃料循環類成為最主要的集體劑量貢獻來源；輻射的醫療用途約佔集體有效劑量的 75%；核燃料循環約佔人為輻射源總用量的 17%，工業用途、軍事活動和所有其他類別的工作人員，所貢獻的總劑量約佔總劑量的 8%。

天然射源部分，曝露於天然射源（超過自然背景的平均水平）相關的職業曝露人口約有 1,305 萬人，亦較 UNSCEAR 2000 報告【2】有明顯的增加；天然射源職業曝露之個人年有效劑量 E_{EXP} 及集體有效劑量 S 為 2.9 毫西弗及 37,260 人-西弗，評估結果顯示，曝露於天然射源導致的年集體有效劑量估計約為 UNSCEAR 2000 報告估計值(11,700 人-西弗)的 3 倍，呈現大幅增加的趨勢。其中，民用飛航的變化較小，工作人員之個人平均年有效劑量(E_{EXP})還是維持在 3 毫西弗的水平；但在採煤業、其他礦業的評估結果則有明顯的差異，不論是個人平均年有效劑量(E_{EXP})及集體有效劑量(S)都大幅增加，主要原因在於數據上掌握了更完整的曝露人口(人數增加約 2 倍)外，更完整的調查也讓 UNSCEAR 推論出該兩類之曝露人口在個人平均年有效劑量(E_{EXP}) 在

過去是明顯低估的，因而在本次的評估結果提高相關數據。

表 4、UNSCEAR 2008 報告的職業曝露評估結果

職業分類		集體有效劑量 S (人-西弗)	個人年有效劑量 E_{EXP} (毫西弗)
人工射源	核燃料循環	800	1.0
	工業應用	289	0.3
	醫學應用	3540	0.5
	軍事活動	45	0.1
	其他應用	56	0.1
	小計(人工射源)	4730	0.4
天然射源	民用飛行	900	3.0
	採煤業	16560	2.4
	其他採礦業	13800	3.0
	礦業以外其他業別	6000	4.8
	小計(天然射源)	37260	2.9
合計		41990	1.8

*資料來源: UNSCEAR 2008 報告 Annex B 之表 92、表 91；；本研究整理。

綜上，依據 UNSCEAR 2008 報告，2000 年至 2002 年全世界職業曝露的個人年有效劑量 E_{EXP} 及集體有效劑量 S 為 1.8 毫西弗及為 41,990 人-西弗。曝露人口的個人平均年有效劑量(E_{EXP})代表工作場所的輻射防護執行效果，整體而言，對存在輻射曝露風險的職業人口來說，人工射源曝露造成的個人平均年有效劑量(E_{EXP})是下降的，顯示全球在輻射防護作業的整體執行是逐漸進步的。天然輻射部份雖然顯示為增加，但並不代表就是輻射防護作業上的問題，因為，天然放射性物質(NORM)所造成的曝露本就不容易評估，該數據本就存在被低估的可能性。

(4) UNSCEAR 2020/2021 報告

聯合國原子輻射效應科學委員會 (UNSCEAR) 對職業曝露最新的調查報告是 UNSCEAR 2020/2021 報告【4】，主要是利用 2010 年至 2014 年的職業曝露數據評估全球的職業曝露劑量，其評估結果整理如下表 5。依據 UNSCEAR 2020/2021 報告的評估結果，2010 年至 2014 年間全世界每年因職業曝露在天然射源和人工射源的人口已達到 2,400 萬人，天然射源及人工射源的從業人數約有 1260 萬人及 1140 萬人，占比分別為 52% 及 48%。曝露劑量的部份，2010 年至 2014 年全世界職業曝露之個人年有效劑量 E_{EXP} 及集體有效劑量 S 為 1.2 毫西弗及 29,770 人-西弗。人工射源職業曝露工作人員之個人平均年有效劑量 (E_{EXP}) 及集體有效劑量 (S) 估計約為 1.9 毫西弗及 5,470 人-西弗；天然射源職業曝露工作人員的個人年有效劑量 E_{EXP} 估計約為 0.5 毫西弗及 24,300 人-西弗。

人工射源的集體有效劑量最主要的貢獻來源為醫學應用類，其集體有效劑量 (4,500 人-西弗) 約佔整體人工射源集體有效劑量 (5,470 人-西弗) 的 83%；核燃料循環和工業應用約佔 16%，各佔約 8%；其他應用類約佔人為輻射源年均集體有效劑量的 1%；軍事活動的之從業人口最少，集體有效劑量 S 佔比極低，小於 1%。個人平均年有效劑量 (E_{EXP}) 之部分，全球之人工射源類別的個人平均年有效劑量 (E_{EXP}) 為 0.5 毫西弗，各國差異所呈現的不確定區間為 0.3 毫西弗至 0.9 毫西弗；不同職業類別之個人平均年有效劑量 (E_{EXP}) 由高至低依序為：核燃料循環 (0.6 毫西弗)、醫學應用 (0.5 毫西弗)、工業應用 (0.4 毫西弗)、軍事活動 (0.15 毫西弗) 及其他應用 (0.1 毫西弗)。

表 5、UNSCEAR 2020/2021 報告的職業曝露評估結果

職業分類		人數 (萬人)	集體有效劑量 S (人-西弗)	個人年有效劑量 E _{EXP} (毫西弗)
人工射源	核燃料循環	76.2	483	0.6
	工業應用	900	440	0.4
	醫學應用	110	4500	0.5
	軍事活動	8	9.7	0.15
	其他應用	54	38	0.1
	小計(人工射源)	1148	5470	0.5
天然射源	民用飛行	75	2000	2.7
	採煤業	800	12800	1.6
	其他採礦業	380	9500	2.5
	小計(天然射源)	1255	24300	1.9
合計		2400	29770	1.2

*資料來源: UNSCEAR 2020/2021 報告之表 12、表 48；本研究整理。

天然射源的部分，2010 至 2014 年間天然射源職業曝露可分為採礦業及民用航空業，全球採礦業的從業人口大約有 1,180 萬人，可分為煤炭和煤、鈾礦以外礦產的提取和相關製程，佔天然射源職業曝露總人數的 94%；其中約有 70%從事煤炭開採，其餘 30%則是煤、鈾礦以外礦產的採礦作業；鈾礦開採的從業人雖然也與天然射源有關，但統計上是被歸類在核燃料循環類。民用航空業全球的從業人數估計約為 75 萬人。整體而言，天然射源職業曝露的集體有效劑量 S 約為 24,300 人-西弗；然而，由於整體數據不足，這個數據並不包含石油和天然氣開採，以及工作場所氬氣曝露所造成的劑量評估結果。在 UNSCEAR 2008 報告中，1995 至 1999 年間天然射源職業曝露的年集體有效劑量估計為 31,260 人-西弗，其中 30,360 人-西弗是由採礦業

(不包含鈾礦開採)所貢獻，民用航空業則約貢獻了約 900 人-西弗。依據最新的評估結果，天然射源職業曝露的集體有效劑量(S)估計已降到 24,300 人-西弗，主要的貢獻仍來自採礦作業。其中，煤炭開採之集體有效劑量(S)約為 12,800 人-西弗，煤、鈾礦以外礦產的採礦作業之集體有效劑量(S)約為 9,500 人-西弗，採礦類之集體有效劑量(S)合計約 22,300 人-西弗。民用航空業之年集體有效劑量(S)約為 2,000 人-西弗。

UNSCEAR 2020/2021 報告【4】中提到，和過去的報告相比，這份最新的評估報告因為在國際組織的合作以及數學模式和統計技術都有所精進，評估結果較之前的結果更加可信。精進重點包括:(a)透過與國際民航組織合作，改由其提供的全球空中交通和民用航空人員的詳細數據來評估民用航空機組人員曝露劑量；(b)核燃料循環類的劑量數據改由國際原子能總署(IAEA)和經濟合作暨發展組織核能署(OECD Nuclear Energy Agency) 共同建置維護之職業曝露資訊系統 (Information System on Occupational Exposure, ISOE) 數據庫的資訊來評估；以及(c)改用數學多變量模型，改進了醫學應用類的劑量評估不確定性。然而，UNSCEAR 2020/2021 報告雖然有以上的改進，但仍有部分不足。核燃料循環類的職業曝露數據相對完整，但仍有部分類別及部分國家的數據是相對缺乏的，包括工作人員人數和集體有效劑量都會是有所低估的；包括工業應用類項下的子項目、軍事用途以及工作場所的氬氣曝露等部門，現有數據仍不允許做出夠可靠的全球性評估。

軍事用途相關的職業曝露，因僅有美國、英國及法國提供較詳細的劑量監測數據，其他國家的資料並不完整，因此，這個部分的數據可信度相對較低；但估計目前此類別之從業人口已從 30-40 萬人的高峰減至約 8 萬人，從業人口和集體有效劑量占比不高且逐年降低。

以工作場所的氬氣曝露為例，依據 UNSCEAR 2000【2】報告，地面工作場所氬氣曝露的工作人員是職業曝露的第二大群體，集體有效劑量(S)約為每年 6000 人-西弗。因為無法有效掌握全球的職業人口，

UNSCEAR 2020/2021 報告【4】雖未提出這個類別的集體有效劑量(S)；儘管如此，UNSCEAR 2020/2021 報告仍從世界各國最新文獻中審查了大量數據，做出有關工作場所之氡氣曝露劑量的評估結果(如表 6 所示)。這些數據表明地下工作場所的個人平均年有效劑量(E_{EXP})從 0.2 到 5.1 毫西弗，地上工作場所的個人平均年有效劑量(E_{EXP})也有 0.4 至 1.4 毫西弗；以往對於職場氡氣曝露的評估以礦業為重點，然而，礦山以外的工作場所，大多數位在地面上的工作地點，包括：工廠和商業建築等也都同樣存在氡氣曝露的問題。工作場所的氡氣曝露在整體職業曝露集體劑量卻有一定占比，這部分的研究將會是 UNSCEAR 未來探討職業曝露的重要工作之一。

整體而言，UNSCEAR 2020/2021 報告調查所得之職業曝露現況，沒有發現任何應用類別的工作人員群體因輻射應用而接受偏高的劑量。

表 6、各類工作場所氡氣曝露劑量

種類	工作地點	氡氣平均濃度 (Bq/m ³)	個人年有效劑量 E_{EXP} (毫西弗)
地下場所	開放礦坑/觀光礦坑	3090	5.1
	SPA/溫泉	250	3.4
	地鐵/隧道/停車場	28	0.2
	實驗室/儲藏室/釀酒室/辦公室	400	2.7
地面場所	學校/醫院	180	1.3
	辦公室/營業場所	74	0.5
	工廠	66	0.43
	倉庫/酒窖	190	1.4
	水廠/魚塢	793	1.4

*資料來源: UNSCEAR 2020/2021 報告之表 11；本研究整理。

2. 各職業部門之劑量變化趨勢

表 7 是 UNSCEAR 自 1975 年起對人工射源職業曝露之歷年調查評估結果。比較 1975 至 1979 年及 1990 至 1994 年的調查結果，全球每年因人工射源的職業曝露受到監測的人口數持續增加，人工射源的職業曝露部分，全球在 1995 至 1999 年間因輻射作業受監測的工作人員約有 1000 萬，到了 2010 至 2014 年已經增加到超過 1140 萬人。UNSCEAR 2020/2021 報告的資料基準期(2010-2014 年)的人工射源職業曝露人口為前期(1995-1999 年)的兩倍，主要是因為醫療應用類的勞動力增加，但其他各類的職業曝露的人數也都有成長；其中，1995 至 1999 年間到 2010 至 2014 年間的醫療應用類的勞動力就增加了約 20%。長期來看，過去 40 年人工射源之職業曝露人口由 280 萬增加到 1,140 萬，增幅最大的就是醫學應用類的從業人口數（從約 130 萬增加到約 900 萬，成長了近 7 倍），約佔整體人工射源職業曝露總勞動力也由原來的 45%成長到 79%。醫學應用類的勞動力中占人工射源的主導地位，從業人數及集體有效劑量約佔整體的 80%和 75%。

2010 至 2014 年間人工射源的個人平均年有效劑量(E_{EXP})之整體平均值約為 0.5 毫西弗/年(mSv/yr)，與 40 年前的個人平均年有效劑量(E_{EXP})平均值(1.7 毫西弗/年)相比，呈現大幅下降的趨勢。

集體有效劑量(S)部分，40 年間的總量都在 4,500-5,500 人-西弗之間波動，人工射源職業曝露在 UNSCEAR 2020/2021 報告【4】的資料基準期(2010-2014 年)之年集體有效劑量約為每年 5,500 人-西弗，比較大的差異在於各部門貢獻的劑量比例；早期人工射源之輻射應用是以核燃料循環為主，但從 1980 年開始，除醫學相關的應用外，所有其他輻射應用類別職業曝露之集體有效劑量(S)都開始是呈現降低趨勢，尤其是以核燃料循環類和工業應用類最為明顯。以個別項目來看，核燃料循環類、醫學應用類和工業應用類之集體有效劑量(S)分別為 480 人-西弗、4,500 人-西弗及 440 人-西弗，其中，醫學應用類在集體有效劑量(S)的占比從 21.5%成長到 82.4%，已取代核燃料循環類變最主要的集體劑量來源。

表 7、全球人工射源相關職業曝露之劑量變化趨勢

資料期間 (西元年)		1975 至 1979	1980 至 1984	1985 至 1989	1990 至 1994	1995 至 1999	2010 至 2014
人數 (萬人)	核燃料循環	56	80	88.8	80	67	76.2
	醫學應用	128	18.9	222	232	744	900
	工業應用	53	69	56	70	79	110
	其他應用	14	18	16	36	47.6	54
	合計	282	391	422.8	460	975.4	1140
集體 有效劑量 S (人-西弗)	核燃料循環	2300	3000	2500	1400	1000	483
	醫學應用	1000	1140	1030	760	3540	4500
	工業應用	870	940	510	360	315	440
	其他應用	70	40	20	40	53	38
	合計	4660	5370	4310	2660	4960	5460
個人 年有效劑量 E _{EXP} (毫西弗/年)	核燃料循環	4.4	3.7	2.6	1.8	1.4	0.6
	醫學應用	0.8	0.6	0.5	0.3	0.5	0.5
	工業應用	1.6	1.4	0.9	0.5	0.4	0.4
	其他應用	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1
	平均	1.7	1.3	1	0.6	0.5	0.5

*資料來源: UNSCEAR 2020/2021 報告之表 48。

(1) 核燃料循環類

核燃料循環類的監測人數在 1975 至 1989 年期間也有顯著地增加，從 60 萬人增加到 90 萬人；但在 1990 至 1994 年間降至約 80 萬人，到了 2010 至 2014 年間更降至約 76 萬人。核燃料循環類的五年集體有效劑量(S)之平均值，在 1975-1989 年間都大約落在 2,500 人-西弗，儘管核能發電的比例在 1985-1989 年已較 1975 至 1979 年增加了 3-4 倍，集體有效劑量(S)變化不大；1990 至 1994 年間，核能發電量繼續增加，集體有效劑量(S)則呈現明顯下降，1990 至 1994 年之集體有效劑量(S)平均值約為 1,400 人-西弗，較 1975 至 1989 年間減少 2 倍；到了 2010

至 2014 年間，核燃料循環類的集體有效劑量(S)已經降至 480 人-西弗；核燃料循環類的劑量降低有相當比例來自於全球反應爐(核電廠)運行的減少。核燃料循環類的集體有效劑量(S)，1985 至 1989 年間的年平均價值約為 1,100 人-西弗，到 2010 至 2014 年降至 328 人-西弗；在個人年有效劑量的部分，雖然各個子項目及不同國家之間存在一些差異，但整體而言，核燃料循環類工作人員的年平均有效劑量監測結果呈現持續降低的情況，從每年 4.4 毫西弗到每年 0.6 毫西弗。核燃料循環類之曝露劑量的主要來源仍是反應器運轉；惟考量核產業之整體發展趨勢，未來陸續會有運轉中反應器陸續進入除役作業，除役子項目的劑量會逐漸增加，UNSCEAR 2021/2022 報告【4】在資料收集期間也儘可能收集相關數據，但這部分的資料仍相對缺乏，全球性的評估結果暫時無法有效進行。

(2) 醫學應用類

醫學應用類的監測人數在過去 40 年增加了近 7 倍，從 130 萬增加到 900 萬；這個數字可能被低估，預估可能高達 1700 萬。根據 UNSCEAR 全球醫療曝露調查(UNSCEAR Global Survey of Medical Exposure)對 1990 至 1999 年間的全球性調查，受監測的醫療應用類工作人員數量從 230 萬增加至 740 萬。醫學應用類的五年平均年集體有效劑量，在 1975 至 1989 年間都大約落在 1,000 人-西弗，平均年集體有效劑量變化不大；1990 至 1994 年間，醫學應用類的五年年均集體有效劑量大幅下降至 760 人-西弗；但 1995-1999 年之五年年集體有效劑量則增加至 3,500 人-西弗，本段期間約以每年增加 25%的比例持續增加。在個人年有效劑量的部分，大致呈現下降趨勢，但這個數據存在不確定性；醫學應用類工作人員的個人年有效劑量，從 1975 至 1979 年的 0.8 毫西弗/年(mSv/yr)，到 1985 至 1989 年下降至 0.5 毫西弗/年(mSv/yr)後，這個值就維持穩定不變。根據 UNSCEAR 全球醫療曝露調查(UNSCEAR Global Survey of Medical Exposure)結果，常規之放射診斷類從業人口約佔整體醫學應用類工作人員的 90%；另外的 10%

則屬於放射介入治療。此外，獸醫這個子項目在過去的 UNSCEAR 報告是歸類在其他應用類中，這會對數據造成影響。

(3) 工業應用類

工業應用類的監測人數在過去 40 年增加了近 2 倍，從 50 萬增加到 110 萬。1975 至 1984 年期間，工業應用類的全球年集體有效劑量相當一致，每年約 900 人-西弗；然而，它在 1980 年代後半期下降了近兩倍，降至 510 人-西弗，並在 1990 至 1994 年持續下降至約 360 人-西弗，1995 至 1999 年降至約 315 人-西弗；但到了最近兩個分析期則顯示為增加，2005 至 2009 年及 2010 至 2014 年分別為 419 人-西弗和 440 人-西弗。由於監測數據和預測變量之間缺乏統計上顯著的相關性，無法用於推斷工業用類下個別子分項的變化，很難確定是那個子分項對工業應用類整體年集體有效劑量增加造成影響。在個人年有效劑量的部分，從 1975 至 1979 年到 1995 至 1999 年減少了近 4 倍，從每年 1.6 毫西弗降到 每年 0.4 毫西弗，然後就沒再有明顯變化了。另外，1990 至 1994 年之前的 UNSCEAR 報告中，工業應用類包括教育相關用途的工作人員，這會對數據造成影響。

(4) 其他應用類

和其他人工射源相比，其他應用類的數據相對有限，另因現有數據和推導趨勢之數學模型的預測參數間缺乏統計上顯著的相關性，無法做出有效推估，因此，該類別在全球職業曝露集體劑量應會被低估。

(5) 天然射源類

聯合國原子輻射效應科學委員會 (UNSCEAR) 對於天然射源的職業曝露劑量的評估是在 1990 至 1994 年期間首次引入的，但當時可用的數據有限，UNSCEAR 無法在之前的評估中得出具代表性的全球範圍內的曝露劑量。到了 2010 至 2014 年期間，在民用航空、採礦作業和礦物加工等類別，已經有較足夠的數據對於該領域之職業曝露劑量

進行整體性的可靠評估；然而，在「礦業以外的其他類(Other than mine)」的「礦業相關製程(Mineral processing)」及「工作場所氡氣曝露(Radon Exposure in workplace)」因為調查資料不多且各國從業人口數結果差異很大，在包括像是石油和天然氣開採等礦業以外的製程，以及工作場所氡氣曝露雖都屬於職業曝露，即使這次 UNSCEAR 2021/2022 報告所納入評估的全球職業工作人員人數已經遠高於之前歷年的 UNSCEAR 評估報告了，但仍可能低估了實際職業曝露人數，故無法推導出全球。表 8 是 UNSCEAR 自 1995 年對天然射源職業曝露歷年調查評估的彙整表，僅呈現民用飛行、採煤業、其他採礦業之歷年變化趨勢。

1995 至 1999 年間，天然射源職業曝露工作人員的個人年有效劑量估計約為 2.7 毫西弗/年（但不包括礦井以外工作場所的氡氣曝露劑量），而來自人工射源職業曝露工作人員的個人年有效劑量估計則維持在 0.5 毫西弗/年。

表 8、全球天然射源相關職業曝露之劑量變化趨勢

資料期間(西元年)		1995 至 1999	2000 至 2004	2005 至 2009	2010 至 2014
人數 (萬人)	民用飛行	30	45	60	75
	採煤業	690	1090	880	800
	其他採礦業	460	-	-	380
	合計	1180	-	-	1260
集體 有效劑量 S (人-西弗)	民用飛行	900	1220	1680	2030
	採煤業	16560	25070	18480	12800
	其他採礦業	13800	-	-	9500
	合計	31260	-	-	24300
個人 年有效劑量 E _{EXP} (毫西弗)	民用飛行	3.0	2.7	2.8	2.7
	採煤業	2.4	2.3	2.1	1.6
	其他採礦業	3.0	-	-	2.5
	平均	2.7	-	-	1.9

*資料來源: UNSCEAR 2020/2021 報告之表 12。

(二)美國

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(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)在2009年出版的「Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States (Report No. 160)」報告(以下簡稱NCRP第160號報告)【5】，上一個版本是1982年出版的NCRP第83號報告。NCRP第160號報告【5】的第七章是有關職業曝露的評估結果，其對職業曝露的統計共分成核電廠、工業應用、醫學應用、民用航空、教育研究及政府部門等六大類；而表9是該報告中所提供最新的輻射從業人員劑量資料統計資料。從該表得知，醫學應用類的人數為美國整體輻射從業人員的最大宗，佔了整體的62%，其次是工業應用和教育研究，分別佔了13%和11%，政府部門、民用航空部門及核電廠分別為7%、4%及3%；在年集體有效劑量部分，美國職業曝露的總集體劑量是1,377人-西弗，其中，醫學應用及民用航空所貢獻的劑量較高，醫學應用類所貢獻的集體有效劑量(S)為549人-西弗，佔了整體的40%，其次是民用航空部門的531人-西弗，佔了整體的39%，核電廠(110人-西弗)及工業應用(109人-西弗)在總集體有效劑量(S)上各別貢獻了8%，教育研究和政府部門的集體有效劑量(S)為60人-西弗及18人-西弗，分別佔職業曝露集體有效劑量(S)的4%及1%。在個人年有效劑量(E_{EXP})的呈現上，NCRP第160號報告是採以集體有效劑量(S)除以紀錄到有劑量之人數所得的數值，而非全體從業人數，以呈現特定類別的曝露人口在個人年有效劑量上的差異。

NCRP第160號報告【5】呈現的職業曝露評估結果如表9所示，個人年有效劑量(E_{EXP})係以民用航空部門之3.07毫西弗為高，依次分別為核電廠(1.87毫西弗)、工業應用(0.81毫西弗)、醫學應用(0.75毫西弗)、教育研究(0.72毫西弗)及政府部門(0.59毫西弗)，曝露群體中，有劑量工作人員之個人年有效劑量(E_{EXP})平均為每年1.13毫西弗，若涵蓋監測到有曝露劑量及沒有曝露劑量的所有工作人員，美國職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})則為0.34毫西弗。美國NCRP第160號報告在職業曝露劑

量的調查上，都是利用法規要求的人員劑量計實際監測數據進行計算，以去評定職業人員在工作過程中的體外劑量，唯獨民用航空部門的職業曝露劑量，是利用模式及曝露情境作整體評估。

表 9、美國職業曝露劑量

職業類別	人數	集體有效劑量 S (人-西弗)	個人年有效劑量 E _{EXP} (毫西弗)
核電廠	116,354	110	1.87
醫學應用	2,519,693	549	0.75
工業應用	505,368	109	0.81
教育研究	437,007	60	0.72
政府部門 ^{*2}	284,192	18	0.59
民用航空	173,000	531	3.07 ^{*1}
總計	4,035,614	1377	1.13(平均值)

*備註: 1、利用評估所得，而非透過劑量佩章監測。

2、包含美國能源部等政府單位及軍方。

3、資料來源:NCRP 第160號報告，本研究整理。

民用航空的評估，因為缺乏人員劑量計的監測數據，美國 NCRP 第 160 號報告在民用航空部分的劑量值，是改採模式計算不同航程規劃及緯度之宇宙射線所得。航空機組人員的輻射曝露劑量來源主要是初級宇宙射線，初級宇宙射線包含銀河宇宙射線與太陽宇宙射線，由於太陽產生的太陽宇宙射線能量較低，在高空大氣層就被吸收掉，對居住在地表附近的民眾可予忽略，對高空航空作業來說，兩者都必須估算在內；其中，太陽宇宙射線計算，已將 11 年太陽週期造成的輻射變異考慮在內。民用航空曝露劑量總計估算主要的 16 條國內線及 12 條國外線，計算 45 年間(1958 年到 2002 年)飛航紀錄的有效劑量，並依飛行時間(air time)及航行時間(block time)估算出各別的有效劑量率。美國 16 條國內線的飛行平均有效劑量及航行平均有效劑量分別為 3.3 微西弗/小時及 2.93 微西弗/小時；12 條國外線的劑量模式評估的飛行平均有效劑量及航行平均有效

劑量分別為 5.21 微西弗/小時及 4.96 微西弗/小時。最後，再以空服員之工作條件(年工作時數 1200 小時、機師之年工作時數 700 小時；飛行時數在國外航線佔 10%、國內航線佔 90%)，以 2006 年統計的空服員人數 97,000 人、機師人數約 76,000 人為計算基礎；計算所得之民用航空職業曝露之集體有效劑量(S)為 531 人-西弗/年，換算成個人平均年有效劑量(E_{EXP})則為 3.07 毫西弗/年。

(三)日本

日本公益財團法人原子力安全研究協會所(Nuclear Safety Research Association, NSRA)接受日本環境省的委託執行日本之國民輻射劑量評估作業，至今共計在 1992 年、2011 年及 2022 年發布三份不同年代評估報告。2011 年的調查報告，職業曝露是與產業活動的對日本全體國民之平均年有效劑量 E_{JP} (Effective dose per individual per year in Japan)為 0.003 毫西弗，占整體日本國民輻射(5.97 毫西弗)之 0.05%；2022 年報告則升高至 0.004 毫西弗，占整體日本國民輻射(4.7 毫西弗)之 0.085%，不論是集體劑量或是占比都有升高的趨勢，應與 2011 年因 311 東日本大地震引發福島第一核電廠事故相關。據統計資料顯示，2002 年日本核燃料循環類以外之接受個人劑量管理的放射線工作人員人數估計約為 46 萬人，到了 2022 年已經有超過 50 萬名輻射工作人員須依法執行個人劑量管理。

日本環境省在 2022 年最新出版的「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）」報告【6】，職業曝露劑量的評估結果如表 10。日本 2011 年發生福島第一核電廠事故，事故後復原階段衍伸出之電廠搶救及環境除污作業，因此，日本在核燃料循環類的職業曝露統計中，另針對福島電廠及福島除污作業的工作人員的數量和劑量另做統計，該兩類的職業曝露的個人年有效劑量(E_{EXP})不只較核燃料循環類一般運轉作業的工作人員高，也較其他人工射源類之各類職業曝露的個人有效劑量高；福島電廠及福島除污作業的工作人員數量合計達 56,776 人，兩者的集體有效劑量(S)合計為 121.08 人-西弗，分別占整體

職業曝露及人工射源集體有效劑量(S)之 39.1%和 45.2%，和 UNSCEAR 全世界及美國 NCRP 之職業曝露劑量貢獻比例呈現相當大的差異。

表 10、日本職業曝露劑量

職業分類		人數	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	一般	55,091	8.26	0.15
	福島電廠	20,730	104.5	5.04
	福島除污作業	36,046	16.58	0.46
醫學應用	一般	352,601	130.5	0.37
	牙醫	23,505	0.705	0.03
	獸醫	15,217	0.457	0.03
工業應用	一般	68,218	4.09	0.06
	NTD 業者	3,662	1.54	0.42
其他應用	研究	66,784	1.34	0.02
天然射源	NORM 作業	268,600	5.91	0.022
	民用航空	18,000	36	2.0
職業曝露合計		928,454	309.8	0.33(平均值)

資料來源: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；本研究整理

三、 台灣地區職業曝露現況

依據聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)於 2017 出版的「聯合國教育科學委員會全球職業曝露調查用戶手冊(A USER MANUAL:UNSCEAR Global Survey of Radiation Occupational Exposure)」【7】，目前之全世界職業曝露分類如表 11 所示。從表 11 也呈現全世界的職業輻射曝露分類現況與台灣的差異。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，自 89 年起已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 87 年出版的國民輻射劑量評估報告【8】，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，當時的職業曝露劑量尚未依據 UNSCEAR 的統計分類方式，爰該份報告評估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、地下採礦及飛航等；表 11 之 87 年欄位即為該報告與全世界的對照。

為與國際管制方式接軌，我國自民國 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，表 11 之 111 年欄位即為我國目前國內職業輻射現況與全世界的對照，該欄位係依據行政院原子能委員會的民國 104 年至 109 年「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」，因部分職業細項在台灣並無從業人員，故無；另，我國在職業曝露上因管制上的考量及管理上的需要與 UNSCEAR 有部分差異，例如:獸醫這個類別在 UNSCEAR 的分類是被歸類在醫用輻射，但在我國則是因管制上的考量被歸類在其他應用類，而本報告的評估結果會以台灣的分類方式為主。

110 年版之職業曝露評估結果，所採用的係我國民國 104 年到 109 年(共計六年)間的職業輻射曝露劑量統計數據，資料來源係行政院原子能委員會 2016 年至 2021 年出版的民國 104 年至 109 年「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」【9-14】。我國目前存在輻射從業人口的行業包括有: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

表 11、台灣職業曝露分類與全世界之比較

UNSCEAR分類		台灣	
射源類	職業細項分類	87年版 ^{*1} (79-84年)	111年版 ^{*1} (104-109年)
核燃料循環 (Nuclear fuel cycle)	鈾礦開採(Uranium Mining)	×	×
	鈾礦煉製(Uranium Milling)	×	×
	鈾礦濃縮(Uranium conversion)	×	×
	鈾礦濃縮(Uranium Enrichment)	×	×
	核燃料製造(Fuel fabrication)	×	×
	核反應器運轉(Reactor operation)	○	○
	除役(Decommissioning)	×	×
	燃料再處理(Fuel Reprocessing)	×	×
	核廢料管理(Waste management)	×	○
	核燃料循環研究 (Research in nuclear fuel cycle)	×	○
	保安和保全檢查 (Safety and safeguards inspections)	×	×
	核燃料循環中的運輸 (Transport within nuclear fuel cycle)	×	×
	其他(All other activities in nuclear fuel cycle)	×	×
醫用(Medical uses of radiation)	放射診斷(Diagnostic radiology)	○	○
	放射牙科(Dental practice)	○	○
	核子醫學(Nuclear Medicine)	○	○
	放射治療(Radiotherapy)	○	○
	獸醫(Veterinary medicine) ^{*2}	×	○
	所有其他醫療應用 (All other medical uses)	×	○
工業應用 (Industrial uses of radiation)	工業照射(Industrial Irradiation)	○	○
	工業放射照相 (Industrial Radiography)	○	○
	發光應用(Luminizing)	○	○
	放射性同位素產銷 (Radioisotope production)	○	○
	測井(Well logging)	○	○
	加速器運轉(Accelerator operation)	○	○
	工業儀表(Industrial gauges)	○	○
	所有其他工業應用(Other)	○	○

表 11、台灣職業曝露分類與全世界之比較(續)

UNSCEAR分類		台灣	
射源類	職業細項分類	87年版 ^{*1} (79-84年)	111年版 ^{*1} (104-109年)
軍事活動 (Military activities)	核武器生產(Weapon fabrication)	×	×
	核子動力潛艇裝置 (Nuclear ships and support)	×	×
	其他軍事活動 (All other Military activities)	×	×
	其他特定職業群體 (Other specific occupational group)	×	×
其他 (Miscellaneous)	教育機構 (Educational establishments)	○	○
	用過射源的廢棄 (Waste spent sources)	×	×
	射源的商業運輸(Commercial Transport of radiation sources)	×	×
天然射源類 (Natural radiation)	民用航空(Civilian aviation)	○	○
	採煤業(Coal mining)	○	×
	其他採礦業(Mineral mining other than coal and uranium)	×	×
	石油與天然氣工業 (Oil and natural gas industry)	×	○
	礦物與礦石處理 (Processing of mineral and ores)	×	○
	採礦以外工作場所的氡氣曝露 (Radon in workplaces other than mineral extraction industries)	×	×

*說明:

1. 指國民輻射量評估報告之版本。87年版指民國87年出版之版本，其職業曝露評估結果係以79-84年間統計資料為基礎；111年版係指民國111年出版之版本(實際公開時間為民國112年)，其職業曝露評估結果係以104-109年間統計資料為基礎。
2. 獸醫這個輻射職業類別在UNSCEAR是被歸類在醫用輻射，台灣則因管制上的考量被歸類在其他；本中心在87年國民輻射評估報告中的職業評估並未納入獸醫之評估，本次111年版報告則依目前分類納入其他類中評估。

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；天然射源類之民用飛行、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。

本中心 87 年出版的國民輻射劑量評估報告【8】，職業曝露包含人工射源及天然輻射，並將兩者以不同的方式分別評估，人工射源部分係利用人員劑量計之監測數據計算所得，天然輻射部分則是以國際認可的推估模式間接評估所得。20 年前，我國在人工射源部分的輻射工作人員平均人數為 22,317 人，集體有效劑量(S)合計為 19.03 人-西弗，工作人員之個人年有效劑量(E_{EXP})為 0.85 毫西弗；天然輻射部分包括地下採礦及航空業，平均人數為 2,600 人，集體有效劑量 (S)合計為 5.12 人-西弗，工作人員之個人年有效劑量(E_{EXP})為 1.97 毫西弗；兩者合計之職業曝露集體有效劑量(S)為 24.15 人-西弗，工作人員之個人年有效劑量(E_{EXP})為 1 毫西弗。以當時台灣地區人口數 2,100 萬人計，推估職業曝露造成之國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 1.14 微西弗/人-年；與當時 UNSCEAR 1993 報告【1】的職業曝露劑量對全球民眾之個人平均年有效劑量 E_{global} (2.43 微西弗/人-年)相比，僅有全世界平均值的 45%。79-84 年間之輻射工作人員職業輻射曝露評估結果詳如表 12。

表 12、台灣地區 87 年版之職業曝露評估結果

職業類別	工作人員數 (人)	集體 有效劑量 S (人-西弗)	個人 年有效劑量 E_{EXP} (毫西弗)	台灣之 國民輻射劑量 E_{Taiwan} (微西弗/人-年)
人工射源	22317	19.03	0.85	0.9
天然輻射	2600	5.12	1.97	0.24
總計	24917	24.15	1	1.14

民國 104-109 年間之輻射工作人員職業輻射曝露評估，係依據行政院原子能委員會之「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」，該年報係依游離輻射防護法需進行劑量監測之工作人員的劑量申報資料。在「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」的職業從業人員劑量資料統計數據中，在個人年有效劑量上有「個人平均年有效劑量」及「有劑量人員之個人年有效劑量」兩種統計數據；其中，個人平均有效劑量係指該類別總人數之「個人年有效劑量」之平均值，意即集體有效劑量(S)除以總工作人員數，所代表的是整體從業族群的平均曝露劑量概況，在之後的報告中，會以「個人年有效劑量」稱之，統一代號為 E_{EXP} ；另在「有劑量人員之個人年有效劑量」之數據，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，會以「有劑量人員平均有效劑量」稱之，統一代號為 $E_{EXP-AVE}$ ，做為區隔；以上兩者代表的意義不同，各職業類別在個人平均年有效劑量(E_{EXP})、有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)的變化也會反映出不同職業類別的發展及輻射曝露防護改變。以 NCRP 第 160 號報告【5】為例，為了能夠比較各行業在職業曝露上的特性，該報告之個人年有效劑量(E_{EXP})部分，就僅針對有紀錄有劑量之人數的平均數值，亦即本研究之後提及之「有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)」。

為了能夠呈現各職業別及其細項對國民輻射劑量貢獻，以及比較過去的狀況和國際上的差異，另依五大職業分類說明如下：

(一) 核燃料循環類

台灣共計三座核能電廠，總計 6 部機組，包含 4 部沸水式機組及 2 部壓水式機組；因應國家能源轉型政策，核一、二、三廠自 108 年起已陸續除役，依據民國 104 年至 109 年之全國輻射從業人員劑量資料統計年報【9-14】，我國目前核燃料循環類的工作人員包含反應器運轉及核燃料循環研究等兩類。本項在前版(87 年版)的分類屬核電廠類，僅以核反應器運轉一類做統計，並未進一步區分其他

核產業相關項目；因除役作業的需求，本類別也新增了包含核廢料管理之核燃料循環研究類之細項類別。

因三座核能電廠將陸續除役，反應器運轉類之從業人口持續下降，核燃料循環研究類包含核廢料管理從業人口，則因除役作業的需求，人數反而是逐年增加的。核燃料循環類民國 104-109 年職業輻射曝露統計如表 13 所示。本研究之職業輻射曝露評估結果，主要是依據民國 104-109 年職業輻射劑量統計資料，核燃料循環類之從業人口在民國 104-109 年間之總人數在 5,127-6,384 人之間，歷年平均人數約 5,605 人，趨勢上呈現逐年減少的趨勢，反應器運轉仍為該類的主要從業族群，核電廠陸續除役後，反應器運轉人力需求將大幅減少，雖然除役作業會新增核廢料管理類之人力需求，但整體而言，仍可預期本類別之總從業人口未來會逐年減少。核燃料循環類整體之集體有效劑量(S)在 3.70-6.70 人-西弗之間，集體有效劑量(S)平均值為 4.87 人-西弗，在 104-108 年呈現持續下降趨勢，但民國 109 年之集體有效劑量 S(5.05 人-西弗)卻較前三年明顯增加，反應器運轉及核燃料循環研究類也都有明顯增加情況。個人年有效劑量(E_{EXP})部分，核燃料循環類整體之個人年有效劑量(E_{EXP})在 0.71-1.05 毫西弗之間，近六年之平均值為 0.87 毫西弗；有劑量人員平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)部分，近六年落在 1.59-2.10 毫西弗之間，平均值為 1.75 毫西弗，兩者皆無明顯下降趨勢。

以個別項目來看，反應器運轉類及核燃料循環研究類，在從業人數、集體有效劑量(S)、個人年有效劑量(E_{EXP})的變化恰巧呈現相反的趨勢；反應器運轉類在上述統計數據均呈現逐年下降，核燃料循環研究類則則是逐年上升，係因行政院自 105 年起推動非核家園政策，核電廠陸續準備除役，而核一廠也已於民國 108 年 7 月 16 日正式進入除役階段，爰影響核燃料循環業之就業市場。目前的人數分布，反應器運轉類之從業人數仍為核燃料循環類的大宗，近六年的平均

表 13、核燃料循環類之職業曝露劑量

年分		104	105	106	107	108	109	歷年平均
人數 (人)	反應器運轉	6,257	5,940	5,389	5,225	5,010	5,076	5,483
	核燃料循環研究	147	159	178	173	221	308	198
	合計 ^{*3}	6,384	6,084	5,557	5,127	5,189	5,286	5,605
集體有效劑量 S (人-毫西弗)	反應器運轉	6700.16	5585.23	4077.75	4081.55	3670.88	4924.62	4840.03
	核燃料循環研究	0.25	0.7	0.19	0.44	31.9	120.67	25.69
	合計	6700.41	5585.93	4077.94	4081.99	3702.78	5045.29	4865.72
個人年有效劑量 ^{*1} E _{EXP} (毫西弗)	反應器運轉	1.07	0.94	0.76	0.78	0.73	0.97	0.88
	核燃料循環研究	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.39	0.13
	平均	1.05	0.92	0.73	0.80	0.71	0.95	0.87
有劑量人員平均有效劑量 ^{*2} E _{EXP-AVE} (毫西弗)	反應器運轉	1.82	1.75	1.62	1.59	1.62	2.08	1.75
	核燃料循環研究	0.25	0.23	0.1	0.22	0.8	2.57	0.70
	平均	1.81	1.75	1.62	1.59	1.61	2.10	1.75

*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.有劑量人員平均有效劑量(E_{EXP-AVE})係指經監測有劑量值人員之平均劑量；意即集體有效劑量 S/有劑量值工作人員數=有劑量人員個人年有效劑量 E_{EXP-AVE}。

3.合計係指該類輻射從業人員之合計值；因有部分工作人從事二種(含)以上之主項輻射工作類別，因此，各類輻射從業人員人數之總和會大於合計值；但因劑量是依據個人身分證字號為統計條件，不會有重複計算劑量的情況。

占比仍有整體的 96%；但隨著我國能源政策的改變，除役作業會帶動核廢料管理相關就業需求，核燃料循環研究類之從業人口因而逐年增加，該類人數已在 109 年超過整體的 5%，可預期在未來會逐漸取代反應器運轉類成為本類最主要從業人口。

集體有效劑量(S)的部分，反應器運轉類及核燃料循環研究類之近六年的平均值分別為 4.84 及 0.03 人-西弗，反應器運轉類幾乎貢獻了所有的集體有效劑量(S)。從總量來看，反應器運轉類之年集體

有效劑量 104 年為 6.70 人-西弗，至 108 年已降至 3.67 人-西弗，降幅達 45%，但在 109 年又增加至 4.93 人-西弗；核燃料循環研究類呈現持續增加趨勢，104 年之集體有效劑量(S)僅有 2.5×10^{-4} 人-西弗，至 109 年已增加至 0.12 人-西弗，增加了 484 倍。個人年有效劑量(E_{EXP})部分，反應器運轉類及核燃料循環研究類之平均值分別為 0.88 及 0.13 毫西弗；有劑量人員平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)部分，二個細項類別近六年之平均值分別為 1.75 及 0.70 毫西弗。整體而言，核燃料循環類在集體有效劑量(S)、個人年有效劑量(E_{EXP})及有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)都呈現長期下降的趨勢，109 年呈現明顯的增加，主要原因在於該年度有二次核電廠大修的排程(歷年都只有一次)以及蘭嶼貯存場有重新裝填放射性廢棄物的工作安排。

87 年版及 111 年版之核燃料循環類職業輻射曝露劑量比較如 14。前版(87 年版)之國民輻射劑量評估【8】，79-84 年從事核燃料循環類工作人員的總平均人數共計 7,919 人，集體有效劑量(S)在 14.1-18.1 人-西弗之間，平均值為 15.5 人-西弗；歷年之個人年有效劑量(E_{EXP})在 1.85-2.22 毫西弗之間，平均值為 1.95 毫西弗。當時，核燃料循環類所造成的集體有效劑量(S)，貢獻了台灣人工射源職業曝露劑量約 82%，是台灣職業曝露最主要的來源。民國 104-109 年從事核燃料循環類工作人員，從業總人口僅剩 20 年前從業人口(7,919 人)的七成，從業人口與 20 年前相比有明顯的減少，集體有效劑量(S)之年平均降至 4.87 人-西弗，僅有 20 年前(15.5 人-西弗)的三分之一，但與其他類別的職業曝露相比，仍是台灣職業曝露的主要來源，貢獻了台灣人工射源職業曝露劑量約 73%。

在個人年有效劑量(E_{EXP})部分，民國 104-109 年之歷年平均值為 0.868 毫西弗，則僅有 20 年前的數值(1.95 毫西弗)的 44.5%，呈現明顯減少；核燃料循環研究類為近年來的新增職業項目，前版(87 年)評估報告並無相關之統計數據，故無法比較。

表 14、核燃料循環類職業曝露之劑量比較

版本 職業類別	87 年版 (79-84 年)			111 年版 (104-109 年)		
	人數 (人)	集體	個人*	人數 (人)	集體	個人*
		有效劑量 S (人-西弗)	年有效劑量 E_{EXP} (毫西弗)		有效劑量 S (人-西弗)	年有效劑量 E_{EXP} (毫西弗)
反應器運轉	7919	15.50	1.95	5483	4.84	0.88
核燃料循環 研究	-	-	-	198	0.03	0.13
總計	7919	15.50	1.96	5605	4.87	0.87

*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} 。

(二) 醫學應用類

依據民國 104 年至 109 年之全國輻射從業人員劑量資料統計年報【9-14】，我國目前醫學應用職業曝露包含放射診斷、放射牙科、核子醫學、放射治療及其他醫學應用等五類；前版(87 年版)之職業輻射劑量評估【8】，醫學應用類的職業曝露僅區分為診斷、治療、核子醫學等三類。和前版(87 年版) 國民輻射劑量評估的分類差異，主要在於前版的診斷類目前已細分為放射診斷及放射牙科，以及新增其他醫學應用類的細項。

我國醫學應用類民國 104-109 年職業輻射曝露統計如表 15 所示。以趨勢來看，醫學應用類之從業人口在民國 104-109 年間之總人數介於 17,199-20,970 人，近六年之年平均總從業人數約為 19,023 人，從業人口呈現持續上升趨勢；集體有效劑量(S)部分，長期來看亦呈現上升趨勢，醫學應用類整體之集體有效劑量(S)在 0.92-1.21 人-西弗之間，集體有效劑量(S)平均值為 1.10 人-西弗，近六年間之集體有效劑量(S)最高值是落在 107 年。表 15 所列之個人有效劑量包含個人年有效劑量(E_{EXP})及有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)。

表 15、醫學應用類之職業曝露劑量

年份		104	105	106	107	108	109	歷年平均
人數 (人)	放射診斷	12,695	13,188	13,521	13,967	14,931	15,384	13,948
	放射牙科	682	711	716	709	745	770	722
	核子醫學	1,062	1,076	1,111	1,123	1,113	1,117	1,100
	放射治療	1,509	1,532	1,582	1,613	1,698	1,752	1,614
	其他醫學應用	1,515	1,680	1,825	2,077	2,047	2,192	1,889
	合計 ^{*3}	17,199	17,958	18,522	19,199	20,291	20,970	19,023
集體 有效劑量 S (人-毫西弗)	放射診斷	364.84	455.91	388.61	436.64	510.89	388.74	424.27
	放射牙科	9.11	7.23	6.83	13	15.47	5.21	9.48
	核子醫學	475.94	522.74	604.77	641.8	573.9	551.74	561.82
	放射治療	30.91	29.08	62.19	42.87	31.67	37.32	39.01
	其他醫學應用	39.95	62.57	101.67	80.35	54.44	68.58	67.93
	合計	920.39	1077.53	1164.07	1214.66	1186.37	1051.59	1102.44
個人 年有效劑量 ^{*1} E _{EXP} (毫西弗)	放射診斷	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	放射牙科	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
	核子醫學	0.45	0.49	0.54	0.57	0.52	0.49	0.51
	放射治療	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02
	其他醫學應用	0.03	0.04	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04
	平均	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06
有劑量人員 平均 有效劑量 ^{*2} E _{EXP-AVE} (毫西弗)	放射診斷	0.44	0.71	0.57	0.55	0.56	0.47	0.55
	放射牙科	0.15	0.66	0.38	0.81	1.11	0.47	0.60
	核子醫學	1.06	1.15	1.16	1.14	1.14	1.10	1.13
	放射治療	0.35	0.79	0.93	0.6	0.54	0.50	0.62
	其他醫學應用	0.51	0.67	0.73	0.8	0.63	0.67	0.67
	平均	0.61	0.87	0.82	0.79	0.76	0.69	0.76

*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.有劑量人員平均有效劑量(E_{EXP-AVE})係指經監測有劑量值人員之平均劑量；意即集體有效劑量 S/有劑量值工作人員數=有劑量人員個人年有效劑量 E_{EXP-AVE}。

3.合計係指該類輻射從業人員之合計值；因有部分工作人從事二種(含)以上之主項輻射工作類別，因此，各類輻射從業人員人數之總和會大於合計值；但因劑量是依據個人身分證字號為統計條件，不會有重複計算劑量的情況。

，個人年有效劑量(E_{EXP})之平均值為 0.06 毫西弗，各年度之個人年有效劑量(E_{EXP})也幾無變動；有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)部分，平均值為 0.76 毫西弗，近六年數值介於 0.61-0.87 毫西弗之間，呈現變動狀態。

111 年版職業輻射曝露評估結果，主要是依據民國 104-109 年職業輻射劑量統計資料，醫學應用類的從業人口目前仍呈現逐年上升趨勢，從業總人口較 20 年前增加超過三倍，此外，各細項類別的人數也同樣呈現上升趨勢，其中又以其他醫學應用類之成長趨勢最明顯；在人數分布上，醫學應用從業人數的部分，以放射診斷為大宗，超過整體的七成(約 72%)，其次是放射治療(8.5%)和核子醫學(5.9%)，放射牙科及其他醫學應用則分別占 3.8%及 9.8%。

以個別項目來看，放射診斷、放射牙科、核子醫學、放射治療及所有其他醫學應用之集體有效劑量(S)平均值分別為 0.42、0.01、0.56、0.04 及 0.07 人-西弗，以核子醫學(0.56 人-西弗)為最高，放射診斷(0.43 人-西弗)次之，放射牙科(0.01 人-西弗)最低。個人年有效劑量(E_{EXP})部分，五個細項類別之平均值分別為 0.03、0.01、0.51、0.02 及 0.04 毫西弗；其中，以核子醫學(0.51 毫西弗)最高，約為平均值的 9 倍，遠高於醫學應用類之個人年有效劑量(E_{EXP})之整體平均值(0.06 毫西弗)，個人年有效劑量(E_{EXP})最低的同樣也是放射牙科(0.01 毫西弗)。有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)部分，五個細項類別之平均值分別為 0.55、0.60、1.16、0.62 及 0.67 毫西弗，同樣以核子醫學類最高，是醫學應用類之整體平均值(0.76 毫西弗)之 1.5 倍，其餘四個細項類別的差異不大且皆低於平均值，有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)最低的則是放射診斷類。

承上，以歷年平均來看，我國目前醫學應用類的從業人口，仍以放射診斷為主，超過整體的七成，其集體有效劑量(S) (0.42 人-西弗)，則占了醫學應用類集體有效劑量(S)總和之 38.5%，但在其有劑量人員之平均有效劑量 $E_{EXP-AVE}$ (0.55 毫西弗)的部分，卻較其他醫學

應用類的項目為低。集體有效劑量(S)占比最高的則是核子醫學類，占了醫學應用類整體劑量總和的 51%，核子醫學類之有劑量人員之平均有效劑量 $E_{EXP-AVE}$ (1.13 毫西弗)，也明顯高於醫學應用類中的其他項目。

87 年版及 111 年版醫療應用類職業輻射曝露劑量比較如表 16。前版(87 年版)之職業輻射劑量評估【8】，醫學應用類的職業曝露僅區分為診斷、治療、核子醫學等三類；79-84 年間從事醫學應用工作人員的總平均人數共計 6,188 人，集體有效劑量(S)之歷年平均值約為 0.85 人-西弗；個人年有效劑量(E_{EXP})在 0.07-0.24 毫西弗之間，平均值為 0.14 毫西弗。111 年版的評估結果，醫學應用類的從事人數較 20 年前大幅增加，成長了三倍且仍呈現上升趨勢，集體有效劑量(S)也是呈現上升趨勢，從每年 0.85 人-西弗提高至每年 1.10 人-西弗。然而，醫學應用類之個人年有效劑量(E_{EXP})卻是從 0.14 毫西弗降至 0.06 毫西弗，這也代表著醫學應用在輻射防護作業的落實與改善。

表 16、醫學應用類職業曝露之劑量比較

版本 職業類別	87 年版 (79-84 年)			111 年版 (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)
放射診斷	5249	0.68	0.13	13948	0.42	0.03
放射牙科				722	0.01	0.01
核子醫學	512	0.12	0.25	1100	0.56	0.51
放射治療	427	0.05	0.11	1614	0.04	0.02
其他醫學應用	-	-	-	1889	0.07	0.04
合計	6188	0.85	0.14	19023	1.10	0.06

*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} 。

以個別項目來看，87 年版之診斷、治療、核子醫學之集體有效劑量(S)分別為 0.68、0.05 及 0.12 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})分別為 0.13、0.11 及 0.25 毫西弗；人數的部分，其中的診斷類包含醫用放射診斷及放射牙科，從業人數約為 5,249 人，占當時醫學應用類總人數的 85%，治療及核子醫學之從業人數分別為 427 人及 512 人，約各占醫學應用人數的 7%及 8%。診斷類的從業人數多，其年集體有效劑量(0.68 人-西弗)也占了醫學應用類之集體有效劑量(S)總和的 77%，但診斷類之個人年有效劑量 E_{EXP} (0.13 毫西弗)係低於醫學應用類整體平均值，也僅有核子醫學類之個人年有效劑量 E_{EXP} (0.25 毫西弗)的二分之一。

隨著輻射在醫學應用上的發展，醫學應用類的從業人口在過去 20 年有了很大的變化，也逐漸成為台灣職業曝露的重要來源，與全球的趨勢一致。111 年版職業輻射曝露評估結果，醫學應用類不只是在整體從業人口呈上升趨勢，各細項類別的人數也是逐年增加；放射診斷及放射牙科在前版(87 年版)之國民輻射劑量評估同屬醫學診斷類，二個細項類別之從業人數目前合計約為 14,670 人，人數較 20 年前增長 2.8 倍，占目前整體醫學應用從業人數的 75.8%，雖然比例較 20 年前(85%)略低，但仍是醫學應用類的主要族群。放射治療、核子醫學及其他醫學應用類之從業平均人數分別為 1,614 人、1,110 人及 1,889 人，分別占了醫學應用類總人數的 8.4%、5.7%及 9.8%；與 20 年前的統計數據相比，放射治療、核子醫學在從業人口分別成長了 3.78 倍及 2.15 倍，均有明顯的成長；20 年前未進行統計之其他醫學應用類，是醫學應用類下新增的細項類別，占了目前醫學應用總從業人口的近十分之一，這個項目的成長也代表著過去 20 年來，輻射在醫學上的應用廣度、多元性及重要性都是增加的。

(三) 工業應用類

依據民國 104 年至 109 年之全國輻射從業人員劑量資料統計年報【9-14】，我國目前工業應用之職業曝露包含工業照射、工業放射照相、發光應用、放射性同位素製造、測井、加速器運轉及其他工業運用等 7 類。前版(87 年版)之國民輻射劑量評估【8】，工業應用部分係分成放射照相、其他、消費性產品等 3 項來評估，其他則包含測量控制、分析鑑定等行業。因前後版本在工業應用的分類方式差異頗大，不易與現今各細項類的變化做比較。

我國在工業應用類之職業輻射曝露統計如表 17 所示，該表列出民國 104-109 年間工業應用類之職業輻射曝露統計數據，工業應用類之從業人口在 104-109 年間之總人數在 21,406-22,479 人之間，總從業人數平均約為 21,996 人，近幾年的人數變化相對平穩，都在 22,000 人上下呈現微幅變動趨勢；集體有效劑量(S)部分，長期來看則呈現下降趨勢，工業應用類整體之集體有效劑量(S)在 0.38-0.77 人-西弗之間，近六年之集體有效劑量(S)平均值在 0.55 人-西弗，最低值是民國 107 年，最高值則落在民國 109 年。表 17 之個人有效劑量包含個人年有效劑量(E_{EXP})及有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)，個人年有效劑量(E_{EXP})部分，104-109 年間落在 0.02-0.04 毫西弗之間，整體之歷年平均值為 0.03 毫西弗，最低值及最高值分別落在 107 年和 109 年；有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)部分，104-109 年間落在 0.67-1.31 毫西弗之間，近六年之平均值為 0.86 毫西弗，最低值是民國 107 年、最高值為民國 109 年，呈現變動趨勢。民國 109 年度之有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)會偏高，且遠高於歷年平均值，係因當年度的工業照相類及工業放射照相類兩個項目有監測到較高的劑量結果。

本研究之職業曝露評估結果，主要是依據民國 104-109 年職業輻射劑量統計資料，工業應用類之職業曝露包括：工業照射、工業放射照相、發光應用、放射性同位素製造、測井、加速器運轉及其他

表 17、工業應用類之職業曝露劑量

年分		104	105	106	107	108	109	歷年平均
人數(人)	工業照射	128	144	168	174	174	179	161
	工業放射照相	918	848	901	1,280	1,293	1,250	1,082
	發光應用	6	7	6	8	9	8	7
	放射性同位素製造	2	1	1	2	2	2	2
	測井	40	48	43	44	38	39	42
	加速器運轉	12	9	11	12	12	10	11
	其他工業應用	20,903	20,906	20,751	20,965	20,754	19,926	20,701
	合計 ^{*3}	21,995	21,951	21,877	22,479	22,269	21,406	21,996
集體有效劑量 S (人-毫西弗)	工業照射	0.9	0.12	1.09	4.28	0.46	2.89	1.623
	工業放射照相	332.69	242.07	246.49	282.93	392.42	555.03	341.938
	發光應用	0	0	0	0	0	0	0
	放射性同位素製造	0	0	0	0	0	0	0
	測井	0.06	0	0.12	0.22	0.24	0.87	0.252
	加速器運轉	0	0	0	0	0	0	0
	其他工業應用	388.9	246.16	153.95	90.44	130.51	207.75	202.952
	合計	722.55	506.35	401.73	377.87	522.36	766.54	549.567
個人年有效劑量 ^{*1} E _{EXP} (毫西弗)	工業照射	0.01	0	0.01	0.02	0	0.02	0.01
	工業放射照相	0.36	0.29	0.27	0.22	0.30	0.44	0.32
	發光應用	0	0	0	0	0	0	0
	放射性同位素製造	0	0	0	0	0	0	0
	測井	0	0	0	5E-03	6E-03	0.02	6E-03
	加速器運轉	0	0	0	0	0	0	0
	其他工業應用	0.02	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01
	平均	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02
有劑量人員平均有效劑量 ^{*2} E _{EXP-AVE} (毫西弗)	工業照射	0.9	0.12	0.12	1.07	0.15	2.89	0.88
	工業放射照相	1.53	1.56	1.3	1.41	1.64	2.37	1.64
	發光應用	0	0	0	0	0	0	0
	放射性同位素製造	0	0	0	0	0	0	0
	測井	0.06	0	0.1	0.07	0.08	0.12	0.07
	加速器運轉	0	0	0	0	0	0	0
	其他工業應用	0.51	0.56	0.49	0.26	0.34	0.60	0.46
	平均	0.74	0.81	0.78	0.67	0.85	1.31	0.86

*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.有劑量人員平均有效劑量(E_{EXP-AVE})係指經監測有劑量值人員之平均劑量；意即集體有效劑量 S/有劑量值工作人員數=有劑量人員個人年有效劑量 E_{EXP-AVE}。

3.合計係指該類輻射從業人員之合計值；因有部分工作人員從事二種(含)以上之主項輻射工作類別，因此，各類輻射從業人員人數之總和會大於合計值；但因劑量是依據個人身分證字號為統計條件，不會有重複計算劑量的情況。

工業應用等 7 類做統計。在人數分布上，工業應用類從業人數的部分，以其他工業應用類為大宗，超過整體的九成(約 94.1%)，遠高於另外六個細項分類，顯示輻射在工業上的應用發展相當多元，已遠超過過去最常見的照相及檢測的運用；居次的分別是工業放射照相(4.9%)和工業照射(0.7%)，其餘的細項類別在國內都只有零星數人的從業人口。

以個別項目來看，有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)部分，在發光應用、放射性同位素製造及加速器運轉等三類並無從業人員有監測到曝露劑量，其餘四個細項類別之有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)平均值分別為 0.88 毫西弗(工業照射)、1.64 毫西弗(工業放射照相)、0.07 毫西弗(測井)及 0.46 毫西弗(其他工業應用)，工業放射照相類之數值明顯偏高，是工業應用類之有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)整體平均值(0.86 毫西弗)之 1.9 倍，顯示工業放射照相類的從業人員，是較易出現偏高之個人曝露劑量的族群，遠高於其他工業應用的細項類別的。個人年有效劑量(E_{EXP})部分，發光應用、放射性同位素製造及加速器運轉等三類因無從業人員有監測到曝露劑量，爰本項為零，其餘四個細項類別之個人年有效劑量(E_{EXP})平均值分別為 0.01 毫西弗(工業照射)、0.32 毫西弗(工業放射照相)、 6×10^{-3} 毫西弗(測井)及 0.01 毫西弗(其他工業應用)，亦是以工業放射照相類之數值較高，工業放射照相類之個人年有效劑量(E_{EXP})是工業應用類整體平均值(0.025 毫西弗)之 12.6 倍，顯示工業放射照相類的從業人員的曝露情形在工業應用類各細項類別中偏高的。

在集體有效劑量(S)的部分，工業照射、工業放射照相、測井及其他工業相關應用在集體有效劑量(S)之六年平均值分別為 2×10^{-3} 、0.34、 2.5×10^{-4} 及 0.20 人-西弗，以工業放射照相類最高，其他工業應用類次之。在工業應用類的七大分類中，以工業放射類之人數較多，約占 5%，但從業人口最大宗的還是其他工業應用類，約占了近 95%；因此，集體有效劑量(S)主要也是由這兩個類別所貢獻的，

工業放射照相類及其他工業應用類分別貢獻了工業應用類集體有效劑量(S)的 61.8%及 36.4%，兩者在人數及集體有效劑量(S)的配比差異，也可看出工業放射照相類因其產業特性，從業人員普遍會有較高的曝露劑量所致。

87 年版及 111 年版工業應用類職業輻射曝露劑量比較如表 18。前版(87 年版)之職業輻射劑量評估【8】，工業應用類的職業曝露僅區分為放射照相、消費性產品及其他等三類；民國 79-84 年間從事工業應用之工作人員總人數約為 4,844 人、集體有效劑量(S)在 0.62~2.22 人-西弗之間，平均值為 1.52 人-西弗；歷年之個人年有效劑量(E_{EXP})在 0.16~0.48 毫西弗之間，平均值為 0.31 毫西弗。

表 18、工業應用類職業曝露之劑量比較

版本 職業類別	87 年版 (79-84 年)			111 年版 (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)
工業照射	2445	1.02	0.42	161	2.0E-03	0.01
工業放射照相				1082	0.34	0.32
發光應用	137	0.016	0.12	7	0	0
放射性同位素 製造	2262	0.48	0.21	2	0	0
測井				42	2.5E-04	6.0E-03
加速器運轉				11	0	0
其他工業應用				20701	0.20	0.01
總計	4844	1.52	0.31	21996	0.55	0.025

*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} 。

以個別項目來看，87 年版之放射照相、消費性產品及其他之集體有效劑量(S)分別為 1.02、0.02 及 0.48 人-西弗，個人年有效劑量

(E_{EXP})分別為 0.42、0.12 及 0.21 毫西弗；人數的部分，放射照相類從業人數約為 2,445 人，占當時工業應用類總人數的 50.5%，消費性產品及其他之從業人數分別為 137 人及 2,262 人，約各占工業應用類人數的 2.8%及 46.7%。放射照相類的從業人數多，其集體有效劑量 $S(1.02 \text{ 人-西弗})$ 也占了工業應用類整體集體有效劑量(S)總和之 67.1%，消費性產品及其他類的則分別貢獻了 1.3%及 31.6%。因輻射在工業上的應用相當多元，聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR)自民國 89 年起調整了工業應用的分類，將工業應用分成工業照射、工業放射照相、發光應用、放射性同位素製造、測井、加速器運轉及其他等 7 類；而 87 年版的國民輻射劑量評估的工業應用，僅有分成放射照相、消費性產品及其他等三類，並未有更細項的分類。前版(87 年版)之國民輻射劑量評估報告【8】第五章，係有關消費性產品的章節，提及當時的消費性產品包含：電視機映像管及顯示器、夜光錶、煙霧警報器、健康用品、電銲熔接棒等品項，其中的發光應用屬台灣常見消費性產品的最大宗，爰作為前後對照；其餘包括放射性同位素製造、測井、加速器運轉等項目，本研究依分類原則將其歸類在 87 年的其他類，據以進一步討論前後的從業人數及職業曝露劑量變化。

本研究之 111 年版職業輻射曝露評估結果，主要是依據民國 104-109 年職業輻射劑量統計資料，工業應用類從業總人口(21,996 人)較 87 年版的統計數據(4,844 人)增加超過四倍，其從業人口已取代過去的核燃料循環類，成為目前五大應用類別最多的，而工業應用類下各細項類別的人數也是明顯增加；87 年版的放射照相類包含現今的工業照射及工業放射照相類，目前二個細項之從業人數合計約為 1,243 人，人數減少到約只剩 20 年前的一半，占目前整體工業應用類從業人數的 5.6%，從業人口占比遠低於 20 年前(50.5%)，但這二個細項之集體有效劑量(S)合計約為 0.34 人-西弗，貢獻了工業應用類整體集體有效劑量(S)總和的 62.4%，仍是工業應用類最主要

的來源。然而，雖然工業應用類從業人口有相當明顯的成長，但集體有效劑量(S)則是降低的，從 1.52 人-西弗降至 0.55 人-西弗，因此，工業應用類之個人年有效劑量(E_{EXP})亦從 0.31 毫西弗降至 0.03 毫西弗，這也代表著工業應用在對從業人員的輻射防護作業上，在過去 20 年已有相當的改善。

承上，消費性產品(發光應用)之從業人口由 137 人減少至 7 人，已有明顯的減少；其他類由 2,262 人增長至 20,701 人，從業人口分別成長了近 10 倍。在年集體劑量的部分，消費性產品(發光應用)在近六年都無監測到人員有劑量，對整體劑量已無貢獻；對應 87 年版的其他類，放射性同位素製造、測井、加速器運轉及其他類之集體有效劑量(S)合計約為 0.20 人-西弗，在其占比由 31.6%提高至 36.4%。

(四) 其他應用類

依據民國 104 年至 109 年之全國輻射從業人員劑量資料統計年報【9-14】，其他應用類的職業曝露包含教育機構、獸醫、其他相關應用及嚴重效應之意外等四個細項分類，與 UNSCEAR 的職業分類略有不同。UNSCEAR 目前的職業分類詳如表 1，其他應用類包含教育機構、用過射源的廢棄、射源的商業運輸等三項；對應我國的從業現況，只有教育機構之分類細項是一致的；另，被我國歸類在其他應用類中的獸醫類，則是被 UNSCEAR 歸類在醫學應用類。前版(87 年版)之國民輻射劑量評估【8】雖然同樣分為五大應用類別，但當時並無其他應用類，而是以研究應用類取代其他應用類。

本研究之職業輻射曝露評估結果，主要是依據民國 104-109 年職業輻射劑量統計資料，我國目前其他應用類之職業曝露區分為教育機構、獸醫、其他相關應用以及嚴重效應之意外等四類做統計。我國在其他應用類之職業輻射曝露統計如表 19 所示，其中的嚴重效應之意外類因近六年從業人數都是 0 人，故在該表並未列出劑量數據欄位。其他應用類之從業人口在民國 104-109 年間之總人數在

5,832~6,659 人之間，總從業人數平均約為 6,298 人，近六年呈現下降趨勢。集體有效劑量(S)部分，其他應用類整體之集體有效劑量(S)為每年 0.10~0.25 人-西弗之間，近六年之集體有效劑量(S)平均值為 0.15 人-西弗，呈現下降趨勢。表 19 所列之個人有效劑量包含個人年有效劑量(E_{EXP})及有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)；其他應用類近六年之個人年有效劑量(E_{EXP})在 0.02~0.04 毫西弗之間，近六年平均值為 0.02 毫西弗，亦呈現下降趨勢；有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)部分，近六年介於 0.15~0.24 毫西弗之間，平均值為 0.19 毫西弗，未呈現特定變化趨勢。在人數分布上，其他應用類中各細項分類的從業人數，以其他相關應用為大宗，近六年的從業人數約在 4,000 人上下，約占整體六成以上(65.6%)，UNSCEAR 在其他應用類的職業細項分類(如:用過射源的廢棄、射源的商業運輸)應該都涵蓋在內；教育機構類及獸醫類的平均人數占比分別為 32.6%及 1.8%，以趨勢來看，教育機構類從業人數逐年下降，獸醫類的從業人數則有逐年上升的趨勢。

以個別項目來看，教育機構、獸醫及其他相關應用之集體有效劑量(S)平均值分別為 0.03、 4×10^{-3} 及 0.12 人-西弗，以其他相關應用類最高，教育機構類次之，獸醫類最低；在集體有效劑量(S)占比上，其他相關應用類及教育機構類分別貢獻了 80.3%及 17.3%，獸醫類僅占 2.4%。個人年有效劑量(E_{EXP})部分，教育機構、獸醫及其他相關應用之平均值分別為 0.01、0.03 及 0.03 毫西弗，同樣是以其他相關應用類最高，個人年有效劑量(E_{EXP})最低的細項類別則是教育機構類。有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)部分，教育機構、獸醫及其他相關應用近六年之有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)平均值分別為 0.13、0.46 及 0.21 毫西弗，最低的是教育機構類，最高的則是獸醫類，明顯高於其他應用類之有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)之整體平均值(0.19 毫西弗)。獸醫類在 UNSCEAR 的分類，從 2008 年起已經從其他應用類被歸類到醫學應用類，但在有劑

量人員之平均有效劑量($E_{\text{EXP-AVE}}$)部分，獸醫類與醫學應用類之有劑量人員之平均有效劑量($E_{\text{EXP-AVE}}$)整體平均值(0.76 毫西弗)相比，卻是偏低的。

表 19、其他應用類之職業曝露劑量

年分(民國)		104	105	106	107	108	109	歷年平均
人數 (人)	教育機構	2,286	2,120	2,056	2,066	1,953	1,900	2,064
	獸醫	78	92	109	109	129	152	112
	其他相關應用	4,338	4,360	4,331	3,976	4,075	3,787	4,145
	嚴重效應之意外	-	-	-	-	-	-	0
	合計 ^{*3}	6,659	6,540	6,479	6,137	6,142	5,832	6,298
集體有效劑量 S (人-毫西弗)	教育機構	30.03	18.18	28.87	21.71	29.31	26.26	25.73
	獸醫	0.77	0.79	2.45	2.93	7.33	7.05	3.55
	其他相關應用	215.18	155.87	128.63	76.17	67.49	72.48	119.30
	合計	245.98	174.84	160.95	100.81	104.13	105.79	148.75
個人年有效劑量 ^{*1} E_{EXP} (毫西弗)	教育機構	0.01	9E-03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
	獸醫	0.01	9E-03	0.02	0.03	0.06	0.05	0.03
	其他相關應用	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
	平均	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
有劑量人員平均有效劑量 ^{*2} $E_{\text{EXP-AVE}}$ (毫西弗)	教育機構	0.19	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.13
	獸醫	0.15	0.13	0.49	0.4	0.92	0.64	0.46
	其他相關應用	0.17	0.2	0.29	0.26	0.16	0.15	0.21
	平均	0.17	0.19	0.24	0.22	0.15	0.15	0.19

*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.有劑量人員平均有效劑量($E_{\text{EXP-AVE}}$)係指經監測有劑量值人員之平均劑量；意即集體有效劑量 S/有劑量值工作人員數=有劑量人員個人年有效劑量 $E_{\text{EXP-AVE}}$ 。

3.合計係指該類輻射從業人員之合計值；因有部分工作人從事二種(含)以上之主項輻射工作類別，因此，各類輻射從業人員人數之總和會大於合計值；但因劑量是依據個人身分證字號為統計條件，不會有重複計算劑量的情況。

87 年版及 111 年版其他應用類職業輻射曝露劑量比較如表 20。前版(87 年版)之職業輻射劑量評估【8】並無其他應用類，而是以研究應用類為分類名稱，下面再細分成教育類及其他類等兩項。79-84 年在研究應用類的輻射工作人員，在管理實務上其實是涵蓋了教育、政府研究單位及加速器等輻射職業項目，其他類包含教育以外的政府研究單位及加速器等其他研究應用，總平均人數共計 3,266 人，集體有效劑量(S)在 0.33-2.09 人-西弗之間，集體有效劑量(S)平均值為每年 1.16 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.36 毫西弗；其中，教育類的人數約 1,146 人，集體有效劑量(S)為每年 0.13 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.11 毫西弗；其他(政府研究單位及加速器等研究應用)類的平均人數約 2,120 人，集體有效劑量(S)為每年 1.03 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為每年 0.48 毫西弗。

表 20、其他應用類職業曝露之劑量比較

版本 職業類別	87 年版 (79-84 年)			111 年版 (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)
教育機構	1146	0.13	0.11	2064	0.03	0.01
獸醫	-	-	-	112	4E-03	0.03
其他相關 應用	2120	1.03	0.48	4145	0.12	0.03
總計	3266	1.16	0.36	6298	0.15	0.02

*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} 。

比較 87 年版及 110 年版其他應用類各細項的職業曝露差異，教育機構類的從業人員較 20 年前增加了近 2 倍，此細項之從業人口 2,709 人在民國 102 年達到最高峰，是 20 年前的 2.4 倍，但自該年起已逐年下降；其他相關應用類的人數同樣呈現類似趨勢，87 年版

僅 2,120 人，至今已增加至 4,145 人，從業人數在民國 103 年達最高峰，當年度約有 4,661 人，之後逐漸下降；獸醫類的從業人數因為 20 年前並未統計，故無法比較。

其他應用類從業人口整體而言是成長的，集體有效劑量(S)卻有明顯的降低，從每年 1.16 人-西弗降至每年 0.15 人-西弗，因此，其他相關應用類之個人年有效劑量(E_{EXP})亦從每年 0.36 毫西弗降至每年 0.02 毫西弗；類似的變化也同樣反應在細項類別之統計數據上，教育機構類及其他應用類的年集體有效劑量及個人年有效劑量也都是大幅降低的，這代表著在其他應用類從業人員的輻射防護作業上，在過去 20 年已有相當的進步。

(五) 天然射源類

依據民國 104 年至 109 年之全國輻射從業人員劑量資料統計年報【9-14】，屬天然射源類之職業曝露包含民用航空、採煤業、其他採礦業、石油及天然氣工業、礦物與礦石處理等 5 類，其中的民用航空、採煤業、其他採礦業等 3 類在近六年的劑量資料中並無從業人口之數據。採煤業及其他採礦業係已因時代變遷產業沒落所致，確實已無相關產業之從業人員；至於民用航空的部分，根據交通部民國 109 年的交通統計年報【15】，我國民國 108 年之每周飛行次數高達 8,647 航次；以及行政院性別平等委員會的重要性別平等資料庫【16】之國籍航空公司受雇員工統計資料，民國 109 年計有機長及副機長(包含我國籍及外國籍)3,027 人、客艙空服員 8,384 人，民用航空之從業人員總計有 11,411 人。因「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」之數據是建立依法規要求的人員劑量計實際監測所得，藉以評定職業人員在工作過程中的體外劑量，因此，民用航空雖有從業人員，但因我國目前並無針對民用航空作人員劑量監測，故該統計年報中之民用航空類之從業人員數量為 0。本章節之評估結果還是依據「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」之劑量監測結果，因民用航空並未有執行實際監測缺乏相關數據，以致民用航空類之

職業曝露人數及劑量均無法反映實況，會參考國外做法另行研議可行的評估方式。

天然射源類民國 104-109 年職業輻射曝露統計如表 21 所示，其中的民用航空、採煤業及其他採礦業近六年從業人數都是 0 人，故在該表並未列出劑量數據相關欄位。依據本報告依據「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」整理之民國 104-109 年職業輻射曝露結果，國內從事天然射源類的總平均人數目前僅約 32 人，集體有效劑量(S)之平均值為 1.2×10^{-5} 人-西弗(近六年只有 1 人有監測到劑量)，個人年有效劑量(E_{EXP})為 3.66×10^{-4} 毫西弗，有劑量人員之平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)也僅有 0.004 毫西弗。石油及天然氣工業和礦物與礦石處理之從業人員，也大多未測得體外劑量，故在天然射源類的集體有效劑量(S)遠低於其他類別。

前版(87 年版)之職業輻射劑量評估【8】，天然射源類的職業曝露主要評估地下採礦(採煤業)及航空業兩個細項，兩者都不是以劑量監測數據計算，而是另以國際認可的方式評估所得。採煤業的職業曝露部分，是透過對台灣礦坑中氡氣及子核活度濃度的調查，測得台灣礦坑中氡氣平均活度為 147 貝克/立方公尺(mWL)，後以礦工的人數約 1,000 人及氡的劑量轉換因子($5.6\text{mSv} \cdot \text{WLM}^{-1}$)進行估算，推算出台灣煤礦工人之集體有效劑量(S)為 0.16 人-西弗。航空業的職業曝露劑量，國內線及國外線的飛航劑量，分別利用美國亞歷桑納大學 O'Brien 教授的宇宙射線劑量評估程式，以及 UNSCEAR 1993 年報告的航空人員之個人年有效劑量(E_{EXP}) (3 毫西弗)為基礎，參考民航局提供的航空業從業人口統計資料，估算出民用航空類之集體有效劑量(S)為 4.96 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為 2.23 毫西弗。綜上，爰 87 年版之天然射源類職業輻射曝露評估結果，總工作人數約為 2,600 人，整體之集體有效劑量(S)為 5.12 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為 1.97 毫西弗。

表 21、天然射源類之職業曝露劑量

年份		104	105	106	107	108	109	歷年 平均
人數 (人)	民用航空	-	-	-	-	-	-	0
	採煤業	-	-	-	-	-	-	0
	其他採礦業	-	-	-	-	-	-	0
	石油與天然氣工業	33	32	29	25	31	31	30
	礦物與礦石處理	4	2	2	2	0	0	2
	合計	37	34	31	27	31	31	32
集體 有效劑量 S (人-毫西弗)	石油與天然氣工業	0	0	0	0	0.07	0	1.2E-02
	礦物與礦石處理	0	0	0	0	0	0	0
	合計	0	0	0	0	0.07	0	1.2E-02
個人平均 年有效劑量 ^{*1} E_{EXP} (毫西弗)	石油與天然氣工業	0	0	0	0	2.26E-03	0	3.87E-04
	礦物與礦石處理	0	0	0	0	0	0	0
	平均	0	0	0	0	7.53E-04	0	3.66E-04
有劑量人員 平均 有效劑量 ^{*2} $E_{EXP-AVE}$ (毫西弗)	石油與天然氣工業	0	0	0	0	0.07	0	0.01
	礦物與礦石處理	0	0	0	0	0	0	0
	平均	0	0	0	0	0.02	0	4.0E-03

*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.有劑量人員平均有效劑量($E_{EXP-AVE}$)係指經監測有劑量值人員之平均劑量；意即集體有效劑量 S/有劑量值工作人員數=有劑量人員個人年有效劑量 $E_{EXP-AVE}$ 。

87年版及111年版天然射源類職業輻射曝露劑量比較如表22，其差異除了呈現20年間產業變遷的結果，同時也因為兩個版本在天然射源類職業曝露在分類方式和評估方式略有差異所造成。其中，採煤業、其他採礦業、石油與天然氣工業、礦物與礦石處理皆是與天然資源開採相關產業，因相關產業在我國已逐漸式微沒落，從業人數從2,600人到僅餘32人。民用航空亦屬天然輻射相關的輻射工作人員，因現行法規並未要求針對航空業從業人員進行劑量監測，而表22中110年版之數據係以劑量監測數據為評估的依據，因此，

民用航空之職業曝露皆為 0，有關民用航空之職業曝露劑量之評估會在下個章節做呈現。

表 22、天然射源類職業曝露之劑量比較

版本 職業類別	87 年版 (79-84 年)			111 年版 (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)
民用航空	2195	4.96 ^{*3}	2.23 ^{*3}	-	-	-
採煤業	1000 ^{*2}	0.16 ^{*3}	1.6E-04 ^{*3}	-	-	-
石油與天然 氣工業	-	-	-	30	1.2E-05	3.87E-04
礦物與礦石 處理	-	-	-	2	0	0
總計	2600 ^{*2}	5.12 ^{*3}	1.97 ^{*3}	32	1.2E-05	3.66E-04

*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.非劑量監測數據，係另以國際認可的方式評估計算所得。

(六)小結

綜上，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【9-14】，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 23，最大、最小值及平均值都是以年為單位進行統計分析。

本研究評估之職業輻射曝露劑量彙整如表 24；相關數據係依據原能會民國 104 年至 109 年「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」，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 6.667 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為 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)6.67 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為 0.13 毫

表 23、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」

西弗；天然輻射部分平均人數 32 人，集體有效劑量(S) 1.20×10^{-5} 人-西弗(0.012 人-毫西弗)，個人年有效劑量(E_{EXP})量為 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 24、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}

圖 1 是 111 年版職業曝露各職業類別之從業人口比例關係圖，人口數是採用民國 104-109 年「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」之人數平均。111 年版的職業曝露評估結果，輻射從業人口以工業應用類為最大宗，佔整體的 41.7%，其次是醫學應用類 35.8%，其他應用類 12.1%次之，核燃料循環類之人數僅佔 11.9%，是目前人工射源類中的 4 個職業類別中從業人數最少的；天然射源的從業人數目前佔比約是 0.1%。

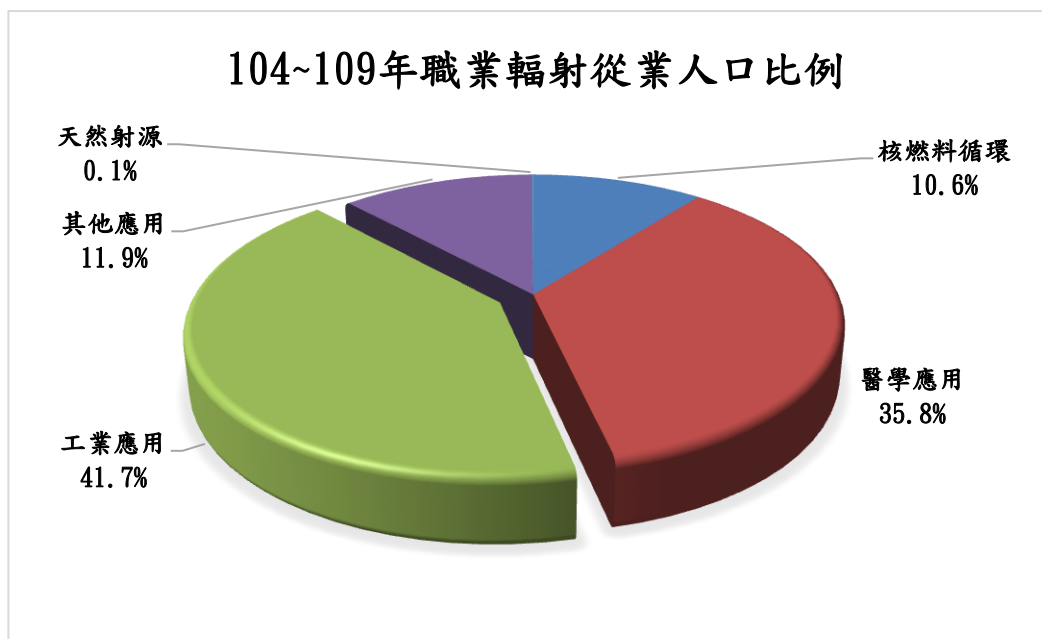


圖 1、民國 104-109 年各職業曝露之從業人口比例

圖 2 是 111 年版職業輻射之各職業類別在集體有效劑量之比例關係圖。111 年版之職業曝露的集體有效劑量(S)合計為 6.67 人-西弗，主要由核燃料循環類所貢獻，佔比約為 73.0%；醫學應用類居次，佔比為 16.5%；工業應用類及其他應用類之貢獻比分別佔 8.2%及 2.2%。這個比例僅針對有劑量監測數據的從業人口，劑量仍以人工射源類的職業曝露為主，天然射源的集體有效劑量占比低於 0.1%。

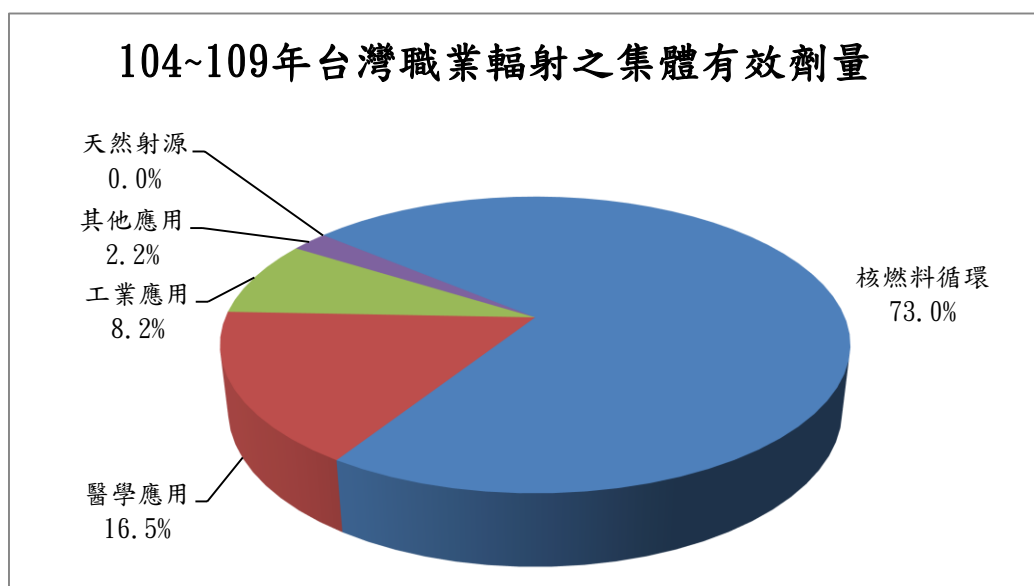


圖 2、民國 104~109 年各職業曝露之集體有效劑量比例

承上，以行政院原子能委員會之民國 104-109 年「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」為基礎，111 年版的職業曝露劑量計算基礎皆建立在該年報提供之劑量監測數據上，因此，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 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)已逐漸式微沒落外，該統計年報並無民用航空之劑量監測數據是主因。現行法規並未要求針對航空業從業人員進行劑量監測，全球化的趨勢使得空中運輸較 20 年前活絡許多，依據行政院的統計資料，我國民用航空從業人員已在民國 106 年超過 10,000 人且持續增加，但受限法令仍無相關劑量監測數據，因此，會在下章節以適當方法推估，以進一步與 20 年前的數據進行比較。

四、職業曝露評估

(一) 民用航空之職業曝露評估

依據行政院性平會之統計資料【16】，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，106 年後突破萬人，民國 104 年-109 年之平均人數為 10,780 人，詳如表 25。

表 25、國籍航空公司受僱員工數

員工職別	機長		副駕駛員		客艙空服員		合計
性別	男	女	男	女	男	女	
100 年	941	8	1,054	65	369	3,811	6,248
101 年	1,053	12	1,080	77	380	4,370	6,972
102 年	1,054	20	1,124	73	398	4,753	7,422
103 年	1,117	22	1,208	76	419	5,379	8,221
104 年	1,246	27	1,321	81	526	6,226	9,427
105 年	1,257	26	1,400	93	492	6,691	9,959
106 年	1,324	33	1,460	104	521	7,422	10,864
107 年	1,358	39	1,527	119	523	7,784	11,350
108 年	1,401	44	1,540	122	525	8,035	11,667
109 年	1,381	49	1,480	117	573	7,811	11,411
104-109 年 平均	1,328	36	1,455	106	527	7,328	10,780

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【17】，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，包括：個人資訊提供、評估與記錄保存個人曝露劑量、調整適當的航班行程等。ICRP 第 132 號報告之第 68 段也提到「航空機組人員因輻射安全以外的原因接受例行體檢。ICRP 認為，曝露於宇宙輻射不需要額外實施體檢。可在常規體檢中使工作人員和醫生之間有機會就宇宙輻射曝露的議題進行對話。」，這意謂著航空機組人員已實施例行的航空醫學的體格及健康檢查，已可涵蓋對輻射健康風險的評估，無須另行施行輻射健檢。

以歐盟為例，歐盟原子能共同體(European Atomic Energy Community, EURATOM)對飛航人員之建議管制標準為 6 毫西弗/年。但依據歐盟有關空服員之輻射職業曝露之基本安全標準要求之規定【18】，當飛航人員每年曝露量可能遭受超過 1 毫西弗時，雇主即需採取包括：評估飛航對人員造成的曝露風險、在安排工作班表時考慮風險以減少高度曝露的機組人員的劑量、向工作人員告知工作風險及評估懷孕女性機組人員等措施；另針對年有效劑量超過 6 毫西弗/年之高曝露機組人員，應進行職業曝露相關管制措施，包括：告知符合高曝露人員、評估與記錄保存個人曝露劑量以及提供職業醫師與健康服務等醫務監護等。宇宙射線有其管制上的困難，因此，各國對於民用航空的劑量管理及劑量監測要求也有相當的差異；台灣目前並未針對民用航空的從業人員訂定相關管制規定，飛航工作人員並無相關劑量管理和劑量監測要求。

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，NCRP 第 160 號報告【5】針對民用航空部分的劑量評估，係採模式計算方式求得，民用航空之集體有效劑量(S)為 531 人-西弗，從業人員之個人年有效劑量(E_{EXP})為 3.07 毫西弗；UNSCEAR 2000 報告【2】對民用航空職業曝露評估，則是利用劑量計監測 250,000 名航空業工作人員的曝露劑量，所得之集體有效劑量(S)為 800 人-西弗，航空人員個人年有效劑量(E_{EXP})為 3 毫西弗；Kubančák *et al.* 之研究【19】，針對捷克之民用航空的職業曝露評估，也是採劑量監

測的方式，從 1998 到 2017 年的監測結果顯示，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，其中測得個人年有效劑量(E_{EXP})之最大值為 5.7 毫西弗，集體有效劑量(S)為 1.3 - 4.1 人-西弗；Yasuda *et al.*之研究【20】，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，估算機長的個人平均有效劑量(E_{EXP})為 1.7-3.8 毫西弗，空服員的個人平均有效劑量(E_{EXP})為 2.2 至 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【21】，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，飛航人員之每月飛行時數則是以臺灣民航局規定之每位飛航人員工時(包括飛行時間、待命、上課受訓)連續 30 天不超過 120 小時之上限進行估算。該研究依據我國國籍航空 2017 年 4 月夏季定期航線航班資料，臺灣重要頻繁航線 16 條航線為：亞洲地區中國的香港、北京、上海航線，日韓地區的東京、大阪、札幌、仁川航線，東南亞地區的曼谷、馬尼拉、吉隆坡、雅加達；北美地區的洛杉磯、紐約、舊金山；歐洲地區的巴黎、法蘭克福等，共計每周 1455 次航班之宇宙輻射曝露有效劑量；上述航線約佔國籍航空每週航班的 67%。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。該研究同時也針對高曝露劑量之航線進行機組人員劑量評估，亞洲航線有效劑量最高者為桃園飛札幌航線，一年中若每個月飛 15 趟札幌來回航班，每月飛行時間將達 120 小時，累計年有效劑量為 3.66 毫西弗；台灣重要頻繁航線中最高輻射曝露劑量則為桃園飛紐約航線，若全年度每個月皆飛三趟紐約來回，每月飛行時間即可累積達 90 小時，CARI-7A、EPCARD.Net 5.4.3 及

CARI-6 三個模式評估所得之個人年有效劑量(E_{EXP})分別為 7.50 毫西弗、5.31 毫西弗及 4.64 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【22】。NTHU FDC 是清大自行開發的飛航劑量計算工具，以多粒子遷移的蒙地卡羅程式 FLUKA(FLUktuierende KAskade) 2011.2c.5 版本的計算結果所開發，FLUKA 能模擬宇宙射線由大氣層外入射，與大氣層作用後所產生之二次輻射的情況，配合上內建之最大($\phi=1440$ MV)及最小($\phi=465$ MV)兩種太陽活度條件的銀河宇宙射線(Galactic Cosmic Rays GCR)初始射源能譜，考慮到地磁與垂直截止剛度(Vertical cutoff rigidity)的影響。射源採用以 Badhwar 與 O'Neil 於 1996 年所發表的報告為基礎發展的全粒子能譜(All-Particle Spectrum)，包含了原子序由 1 到 28 共 28 種不同元素的組成，另外定義了約 100 層的球體來代表地球大氣層加上兩層的泥土材料，最高延伸到 70 公里，其外則為真空材質。此模型考慮了中子、質子、正負渺子、正負介子、光子、電子、正子、和原子序 2 到 28 的重粒子所造成之劑量貢獻【23】。這個清華大學自行開發的模式，已於 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【24】；因具有本土化的優勢，故優先以 NTHU FDC 軟體評估台灣地區的之飛航劑量。

Yang and Hsu 在 2021 年所發表研究【25】，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。該研究提出了一種可行且全面的方法，對台灣國籍民用航空駕駛，在工作過程中因宇宙射線造成的集體劑量和平均有效劑量進行系統性的評估。台灣目前有中華航空公司和長榮航空等兩家國際航空公司，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。由於宇宙輻射組成複雜，不同年份受到太陽活動的影響也有不同，再加上不同航線在航空高度的差異，因此，飛航人員的曝露劑量存在很大的不確定性，2006 年至 2018 年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。

綜上，我國目前並無針對民用航空業下之飛航人員劑量監測，該項之職業曝露劑量改能採模式評估的方式進行；事實上，宇宙射線組成複雜，現有的個人劑量計無法做出有效的監測，而且，使用經過驗證的飛航評估軟體，也能有效的評估出飛航劑量，不論是美國、歐盟、日本或是 UNSCEAR，也都會採行具資料客觀性及代表性的模式評估數據來評估職業飛航劑量。本研究採用 Yang and Hsu 的研究【25】，是 2021 年針對台灣空服員之研究所發表的本土性數據，以 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。承上，我國民用航空之職業曝露劑量評估結果如表 26，集體有效劑量(S)為每年 21.24 人-西弗，作為天然射源類中的民用航空職業曝露劑量評估結果。

表 26、納入民用航空評估結果之天然射源職業劑量

版本 職業類別	111 年版 (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)
民用航空	10,780	21.236 ^{*1}	1.97 ^{*2}
採煤業	-	-	-
石油與天然氣工業	30	1.2E-05 ^{*3}	3.87E-04 ^{*3、*4}
礦物與礦石處理	2	0	0
總計	10,822	21.236	1.96

*備註:1.集體有效劑量 S 為【該類別全年度總人數累積劑量之總和】；意即集體有效劑量 S=個人年有效劑量*總人數。

2.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.。

3.資料來源:原能會「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」。

4.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}

(二) 台灣地區職業曝露評估

表 27 分別列出 87 年版及 111 年版之台灣地區職業曝露劑量比評估結果。

表 27、台灣地區之職業曝露劑量評估結果(87 年及 111 年)

版本 職業類別	87 年版 (79-84 年)			111 年版 (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.。

在納入民用航空之職業曝露劑量評估結果後，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 21.236 人-西弗；與人工射源之職業曝露劑量加總後，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 0.436 毫西弗。87 年間在

人工射源類的工作人員人數約為 22,317 人，集體有效劑量(S)為每年 19.03 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為 0.85 毫西弗；天然輻射部分包括地下採礦及航空業，總人數為 2,600 人，集體有效劑量(S)為每年 5.12 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為 1.97 毫西弗；兩者合計，87 年版的職業曝露總人數約 24,917 人，職業曝露之集體有效劑量(S)為每年 24.15 人-西弗，個人年有效劑量(E_{EXP})為 0.97 毫西弗。

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，因此，集體有效劑量(S)明顯增加。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。

圖 3 及圖 4 分別是 87 年版及 111 年版之職業輻射各類別從業人口之比例關係圖。87 年版(民國 79~84 年)的輻射從業人口，以核燃料循環類佔 31.8%為最大宗，醫學應用類 24.8%次之，工業應用類、其他應用類及天然射源依序各佔總人數的 19.8%、13.1%及 10.4%；111 年版(民國 104~109 年)的輻射從業人口比例如圖四，其比例與 20 年有極大差異，工業應用類取代核燃料循環類成為最大宗，佔整體的 34.6%，醫學應用類 29.8%次之，天然射源的總人數佔比為 16.9%，其他應用類 9.9%，核燃料循環類之人數僅佔 8.8%，是所有職業類別中人數最少的。

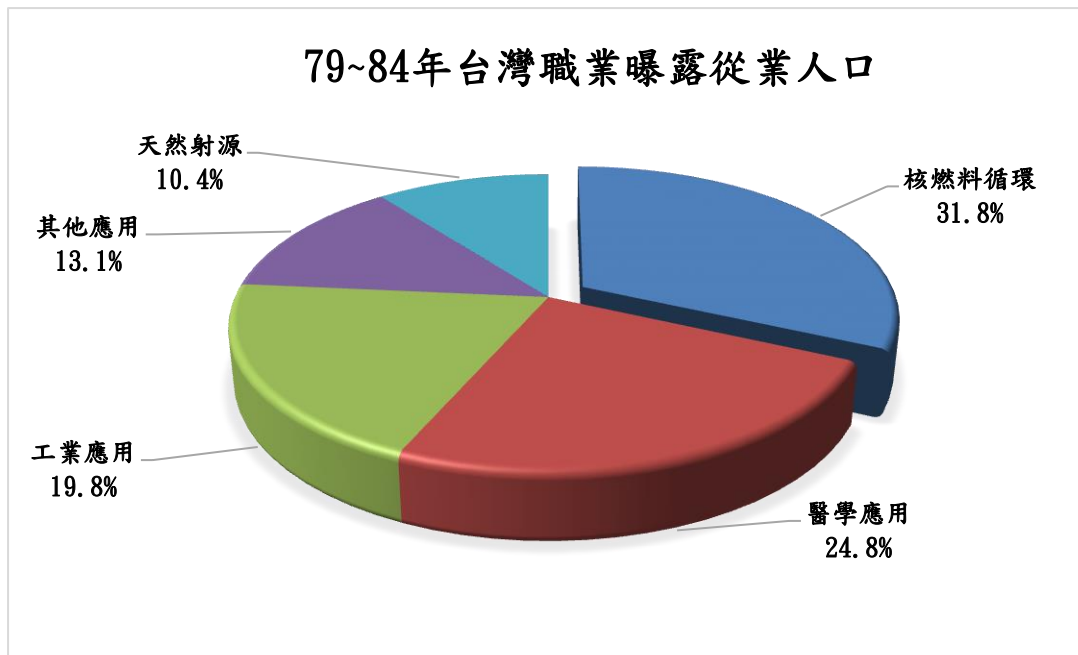


圖 3、台灣地區各職業曝露之從業人口比例(87 年版)

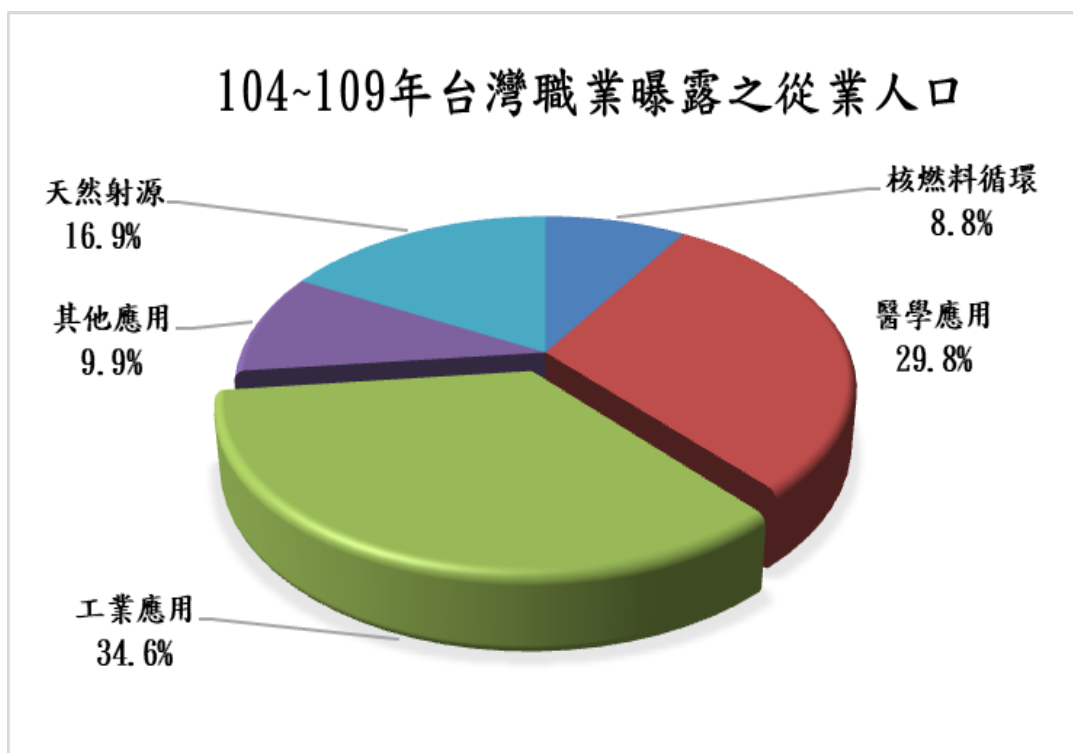


圖 4、台灣地區各職業曝露之從業人口比例(111 年版)

圖 5 及圖 6 分別是 87 年版及 111 年版之職業輻射各類別之集體有效劑量(S)之比例關係圖。87 年版(民國 79~84 年)職業曝露的集體有效劑量(S)為 24.15 人-西弗，核燃料循環類佔 64.2%為最主要的劑量貢獻來源，天然射源類 21.2%次之，工業應用類、其他應用類之貢獻比分別佔 6.3%及 4.8%，集體有效劑量(S)貢獻比最低的是醫學應用類，僅佔 3.5%。在納入職業飛航劑量之評估結果後，111 年版(民國 104~109 年)職業曝露的集體有效劑量(S)為 20.358 人-西弗，天然射源的集體有效劑量(S)佔比為 82.9%，核燃料循環佔比 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，佔比為 2.8%，工業應用類及其他應用類之貢獻比分別佔 1.4%及 0.4%。

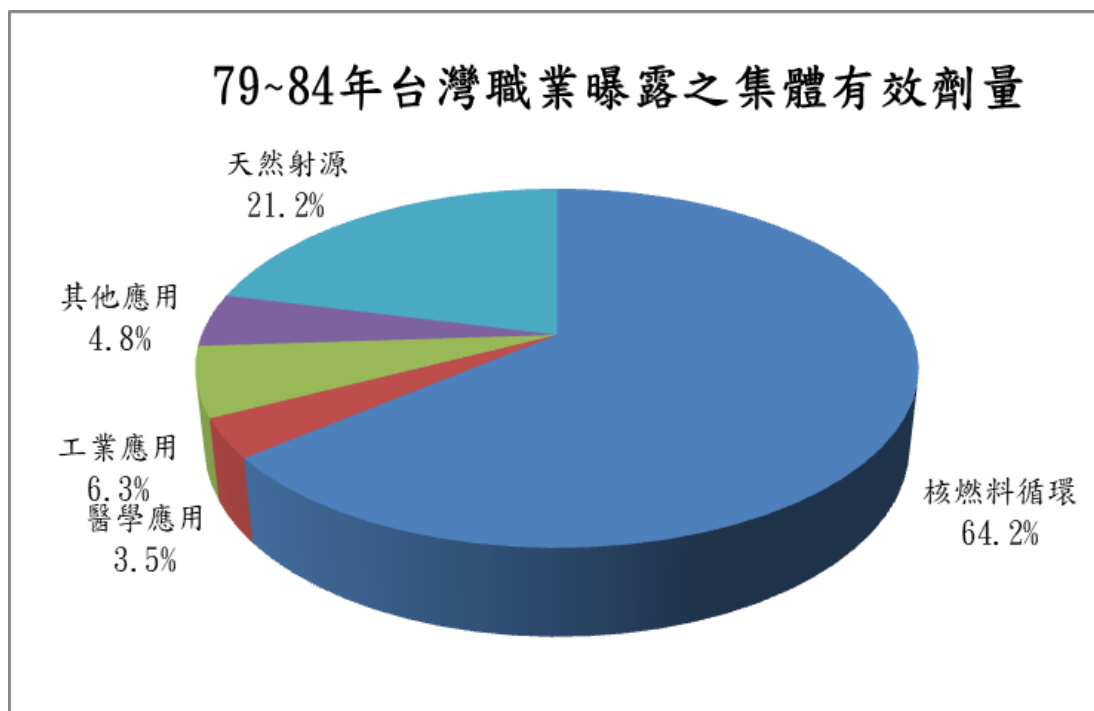


圖 5、台灣地區各職業曝露之集體有效劑量比例(87 年版)

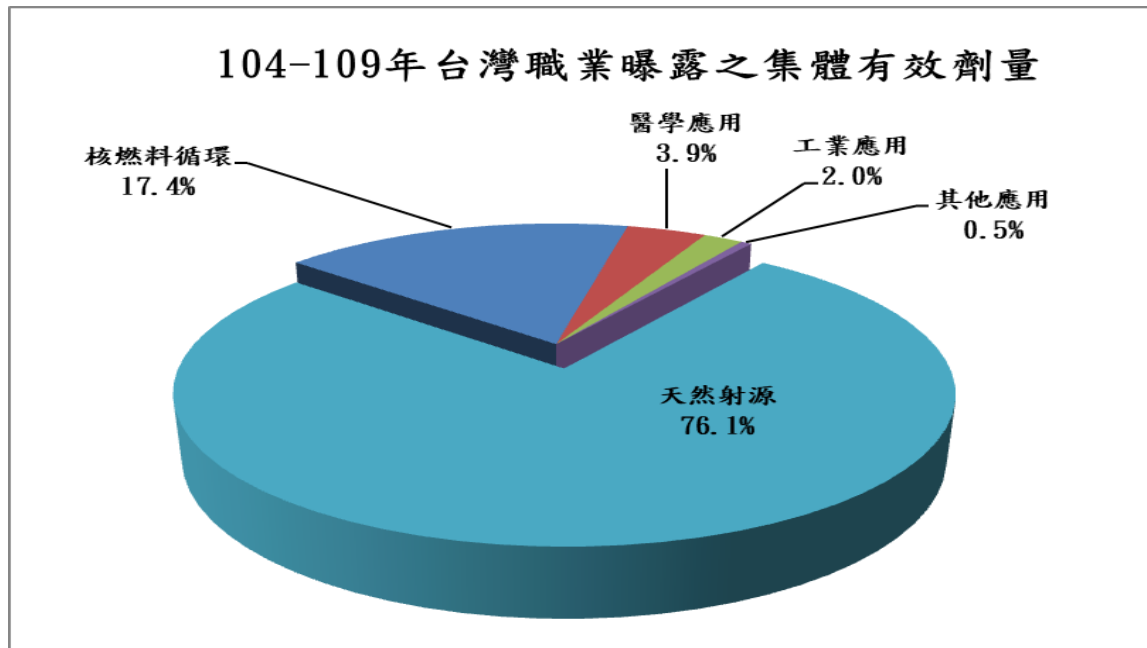


圖 6、台灣地區各職業曝露之集體有效劑量比例(111 年版)

(三) 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 28。

表 28、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	美國	日本
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

五、 職業曝露之國民輻射劑量評估

(一) 台灣之職業曝露國民輻射劑量

本中心前版(87 年版)之國民輻射劑量評估【8】，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(Effective dose per individual per year in Taiwan)，亦即國民輻射劑量(E_{Taiwan})為 1.14 微西弗/人-年；其中，人工射源及天然輻射分別貢獻 0.9 微西弗/人-年及 0.24 微西弗/人-年。

本研究所完成之 111 年版職業曝露評估包含兩個部分，第一部分是依據民國 104 至 109 年「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 29，整體變化呈現下降趨勢。此數據並未估算民用航空背景輻射的職業曝露，因此，天然射源類的職業曝露劑量占比極低，整體之集體有效劑量(S)以人工射源類職業曝露劑量為主。

表 29、民國 104-109 年職業輻射曝露之集體有效劑量(S)

單位:人-毫西弗

	104	105	106	107	108	109
核燃料循環	6700.41	5585.93	4077.94	4081.99	3702.78	5045.29
醫學應用	920.75	1077.53	1164.07	1214.66	1186.37	1051.59
工業應用	722.55	488.35	401.65	377.87	523.63	522.36
其他應用	245.98	174.84	159.95	100.81	104.13	105.79
天然射源	0	0	0	0	0.07	0
合計	8589.69	7326.65	5803.61	5775.33	5516.98	6725.03

人口的數據則來自內政部人口統計年報【26】，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 E_{Taiwan} (Effective dose per individual per year in Taiwan)，意即國民輻射劑量(E_{Taiwan})；承上，依據「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」所得之國民輻射劑量評估結果整理如表 30。

表 30、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

因「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」並無民用航空職業曝露相關監測數據，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，較前版(87 年)評估結果 0.24 微西弗/人-年略高。

本研究所完成之 111 年版職業曝露評估，除了依據「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」之劑量監測數據進行評估外，第二部分是在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；評估結果，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；結果顯示，納入民用航空之職業曝露劑量，會對國民輻射劑量評估結果造成相當大的差異。

(二) 與其他國家之比較

台灣職業曝露與全球及美國、日本之曝露人口、集體有效劑量(S)及國民輻射劑量 $E_{\text{population}}$ (Effective dose per individual in the population)比較如表 31。

依據 UNSCEAR 2022 年提出之 UNSCEAR 2020/2021 報告【4】，更新後之全球職業曝露集體有效劑量(S)為 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 5,470 人-西弗及 24,300 人-西弗；職業曝露的個人年有效劑量(E_{EXP})部份，整體平均為 1.31 毫西弗/人-年，人工射源及天然射源職業曝露之工作人員的個人年有效劑量(E_{EXP})分別為 0.6 毫西弗及 1.8 毫西弗。我國職業曝露集體有效劑量(S)為 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 6.667 人-西弗及 21.236 人-西弗，與 UNSCEAR 2020/2021 報告【4】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%。至於在職業曝露所造成之群體輻射劑量部份，亦即總組群之平均有效劑量 $E_{\text{population}}$ (Effective dose per individual in the population)，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} (Effective dose per individual per year in global population)估計為 3.799 微西弗。

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 0.126 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 0.436 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 0.5 毫西弗及 1.9 毫西弗(民用航空之職業曝露劑量為 2.7 毫西弗)，整體職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})為 1.2 毫西弗，我國的職業曝露劑量都是低於全世界平均的。

表 31、台灣職業曝露與其他國家之比較

	台灣	日本	美國	全球
職業曝露人口 (萬人)	6.4	92.84	403.6	1260
集體有效劑量 S (人-西弗)	27.9	309.8	1377	29770
國民輻射劑量 $E_{\text{population}}$ (毫西弗/年)	0.001	0.002	0.005	0.005

六、 結語

本中心已在民國 109 年度完成職業曝露評估的初步報告，惟該報告並未納入民用航空之職業曝露數據；主要係因受限於現有的法規並未要求民用航空業針對相關工作人員進行劑量監測，以致若僅以「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」作業職業曝露評估，會低估該類之職業曝露劑量。

本報告為修正民國 111 年 1 月所完成之「職業曝露國民輻射劑量評估結果(104-109 年)」，有關職業曝露的國民輻射劑量評估結果，除依據 104 年至 109 年之「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」的數據進行評估外，另在民用航空類的職業部分，雖受限於現有的法規並未有實際監測數據，然已參考國際評估方法及國內相關文獻進行評估，綜整評估的結果將能更客觀呈現我國職業曝露的現況。

依據本中心 111 年版之國民輻射劑量評估之總結果，經評估台灣之國民輻射劑量(E_{Taiwan})合計為每年 3.95 毫西弗；職業曝露部分所貢獻的劑量為每年 1.182 微西弗，約佔整體國民輻射劑量之 0.03%，比例遠較其他來源為低。

七、 文獻

- 【1】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (1993) ,Sources and Effects of Ionizing Radiation (UNSCEAR 1993 Report) . UNSCEAR Publishing.
<https://www.unscear.org/unscear/en/publications/1993.html>
- 【2】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000) ,Sources and Effects of Ionizing Radiation (UNSCEAR 2000 Report) . UNSCEAR Publishing.
https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html
- 【3】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2008) ,Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes A and B, (UNSCEAR 2008 Report) . UNSCEAR Publishing.
https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2008_Report_Vol.I-CORR.pdf
- 【4】 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.
https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2020_2021_4.html
- 【5】 National Council on Radiation Protection and Measurements. (2009) , Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States (Report No. 160) . NCRP Publishing.
<https://ncrponline.org/shop/reports/report-no-160-ionizing-radiation-exposure-of-the-population-of-the-united-states/>
- 【6】 日本環境省(2022)。「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）」。日本環境省

<https://www.env.go.jp/content/900410890.pdf>

- 【7】 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.(2017), UNSCEAR's global survey of radiation exposure: A User Manual.

https://www.survey.unscear.org/lib/exe/fetch.php?media=unscear_occupational_exposure_survey_manual_v1.pdf

- 【8】 行政院原子能委員會輻射偵測中心(1998)。國民輻射劑量之評估研究報告。行政院原子能委員會輻射偵測中心。

- 【9】 行政院原子能委員會(2016)。全國輻射工作人員劑量資料統計年報(民國 104 年版)。行政院原子能委員會。

https://www.aec.gov.tw/share/file/protection/XSg5CQnJg49EXvSJPtM4HA__.pdf

- 【10】 行政院原子能委員會(2017)。全國輻射工作人員劑量資料統計年報(民國 105 年版)。行政院原子能委員會。

https://www.aec.gov.tw/share/file/protection/~Q~dj2GGNSL4c1dSFLFOew__.pdf

- 【11】 行政院原子能委員會(2018)。全國輻射工作人員劑量資料統計年報(民國 106 年版)。行政院原子能委員會。

https://www.aec.gov.tw/share/file/protection/yHRgiaHTHOPhFY0Sl-3XwA__.pdf

- 【12】 行政院原子能委員會(2019)。全國輻射工作人員劑量資料統計年報(民國 107 年版)。行政院原子能委員會。

https://www.aec.gov.tw/share/file/protection/bBYTPExuo~qy3vUjkR7~dQ__.pdf

- 【13】 行政院原子能委員會(2020)。全國輻射工作人員劑量資料統計年報(民國 108 年版)。行政院原子能委員會。

<https://www.aec.gov.tw/share/file/protection/E3IOFvo9g6SFOTq-fH>

B6bg__.pdf

- 【14】 行政院原子能委員會(2021)。全國輻射工作人員劑量資料統計年報(民國 109 年版)。行政院原子能委員會。
https://www.aec.gov.tw/share/file/protection/GsmxIwC79hS7JdRjhpONcw__.pdf
- 【15】 交通部(2019)。交通統計要覽(民國 108 年)。交通部。
<https://www.motc.gov.tw/ch/home.jsp?id=2050&parentpath=0%2C6&mcustomize=statistics501.jsp>
- 【16】 行政院性別平等委員會(2020)。重要性別平等資料庫-國籍航空公司受雇員工(民國 109 年)。行政院性別平等委員會。
https://www.gender.ey.gov.tw/gecdb/Stat_Statistics_Query.aspx?sn=YZ2YZUeRsWtaZcewTIUIlA%40%40&statsn=8250l90sD1JfdPvzGAoicA%40%40&d=m9ww9odNZAz2Rc5Ooj%2FwIQ%3D%3D
- 【17】 Lochard, J., Bartlett, D., Rühm, W., Yasuda, H., & Bottollier-Depois, J. F. (2016). ICRP Publication 132: Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation. *Annals of the ICRP*, 45(1), 5–48. <https://doi.org/10.1177/0146645316645449>
- 【18】 EUROPEAN COMMISSION, Radiation Protection 140 CosmicRadiation Exposure of Aircraft Crew Compilation of Measured andCalculated Data), 2004.
- 【19】 Kubančák, J., Kyselová, D., Kovář, I., Hlaváčová, M., Langer, R., Strhářsky, I., Kudela, K., Davídková, M., & Ploc, O. (2019). OVERVIEW OF AIRCREW EXPOSURE TO COSMIC RADIATION IN THE CZECH REPUBLIC. *Radiation Protection Dosimetry*, 186(2–3), 211–214. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz204>
- 【20】 Yasuda, H., Sato, T., Yonehara, H., Kosako, T., Fujitaka, K., & Sasaki, Y. (2011). Management of cosmic radiation exposure for aircraft crew in Japan. *Radiation Protection Dosimetry*, 146(1–3),

123-125. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr133>

- 【21】 袁明豪 (2017)。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。科技部補助專題研究計畫成果報告。

<https://www.grb.gov.tw/search/planDetail?id=12084717>

- 【22】 李安倫 (2017)。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。

<https://hdl.handle.net/11296/497f32>。

- 【23】 楊子毅 (2022)。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。

- 【24】 許榮鈞 (2017)。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。

<https://grbdef.stpi.narl.org.tw/fte/download4?docId=2785911&responseCode=5167&grb05Id=13690810>

- 【25】 Yang, Z. Y., & Sheu, R. J. (2020). A Comprehensive Approach for Estimating Collective and Average Effective Doses of Galactic Cosmic Radiation Received by Pilots. *Health Physics*, 120(1), 72–79. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001284>

- 【26】 內政部 (2021)。戶籍人口統計 (109 年)。內政部。
https://ws.moi.gov.tw/001/Upload/OldFile/site_stuff/321/2/year/year.html

附錄、審查意見對照表

一、 董傳中委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	綜合意見 本報告評估之職業曝露國民輻射劑量，涵蓋了核燃料循環、醫學應用、工業應用、其他應用、天然射源等幾大類。針對實施輻防管制個別劑量監測的類別，因可引用「全國輻射工作人員劑量資料庫」中之數據，故國民劑量評估已經順利完成。尚未實施輻防管制的天然射源類別，因為缺乏個別劑量監測資料，所以必須採用其他方法加以評估，其中航勤人員職業曝露所佔國民劑量比例最大，是本報告評估的重點。	感謝委員意見；已在報告中修正相關文字內容，強調以評估航勤人員職業曝露之必要性。
2	綜合意見 評估「國民輻射劑量」與監測「職業曝露輻防劑量」之目的不同，前者是為建立全體國人之集體及個人有效劑量(含天然與人工輻射)，後者則為管制職業曝露之器官等價劑量及有效劑量。對於宇宙射線曝露之航勤人員而言，由於同一航班之機組人員與乘客的輻射劑量大略相同，因此沒有必要實施個別劑量監測，只需利用驗證過(經量測比對)之程式計算國民劑量。我國游離輻射防護法因未納入高空宇宙射線之職業曝露管制，以致在「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」中查無此項劑量監測數據，但這不影響利用計算程式評估航勤人員職業曝露之國民劑量。事實上，偵測中心提供之「商用飛航宇宙輻射之國民劑量評估報告」中，已針對國人搭乘之國際線、兩岸線及國內線的國民劑量進行了評估，利用此一方法只需代入機組人員的飛航班次與人數，即可計算航勤人員職業曝露之國民劑量。	(一)「民用航空」職業曝露劑量已改採國內文獻「A Comprehensive Approach for Estimating Collective and Average Effective Doses of Galactic Cosmic Radiation Received by Pilots.」之研究結果，並以該研究評估所得之台灣本國航空駕駛員因職業曝露之個人平均有效劑量平均值 1.97 毫西弗/年作為本研究評估整個民用航空職業曝露集體有效劑量之基礎。 (二)承上，以上述文獻作為民用航空職業曝露之個人年有效劑量(E_{EXP})，曝露人口則參採行政院之國籍航空的從業人員統計資料，即可推算出民用航空職業曝露之集體有效劑量。

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
3	P37-p38、表 17 國民輻射劑量的評估，應盡量採用本土數據，不宜引用他國或國際之評估結果。	感謝委員意見；「民用航空」職業曝露劑量已改採國內文獻「A Comprehensive Approach for Estimating Collective and Average Effective Doses of Galactic Cosmic Radiation Received by Pilots.」之研究結果。
4	全文 「國民輻射劑量」乃一統稱，包括「曝露群體之個人平均有效劑量」、「全體國民之個人平均有效劑量」、及「集體有效劑量」。美國 NCRP-160 報告中分別以 E_{Exp} 、 E_{US} 、S 代表，除了能夠一目了然而且避免混淆。建議本報告採用類似作法(譬如 E_{Exp} 、 E_{Taiwan} 、S)，統一劑量用詞，以避免誤解及增加理解。	感謝委員意見；相關報告均已修改，並在報告中納入名詞定義的部分。
5	表 19 “-“與”0”的意義不同，-代表無資料、未評估、或不適用，0 則代表評估的結果為零。依此，天然射源的 0 應改為-。	感謝委員意見；已全面檢視報告數據並完成修正。
6	會議口頭意見 以模式評估飛航人員之劑量已相當成熟，雖然沒有劑量監測的數據但若能以劑量評估算出其職業曝露劑量，應該還使要納入整體職業曝露評估的結果，也未必要以監測的結果。	感謝委員意見，已參採修正相關內容。
7	會議口頭意見 不要過度引用劑量監測的資料。	感謝委員意見，已參採修正相關內容。
8	會議口頭意見 報告用詞要統一(如：天然射源、人工射源)。	感謝委員意見，已統一修正。

二、 尹學禮委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	P.4 二、(一) 表 1 中，第 4 欄說明有劑量人員個人年有效劑量數值，請問原報告中有無統計此類人員之人數？若有，能否加註於表格中使更明確。	感謝委員意見；經檢視原報告並無提供人數，故無法提供。
2	P.8 三、 L#20 說明獸醫在 UNSCEAR 分類為醫用輻射，與我國列為其他應用類有所不同。為求作業評估結果更能符合世界的需求，建議將此訊息轉知原子能委員會輻射防護處以供未來可能修正分類時一併參考。	感謝委員意見；已在修正報告補充 UNSCEAR 歷年職業曝露報告之內容(詳見修正報告第 6-19 頁)及獸醫在 UNSCEAR 分類的演變歷史(詳見修正報告第 4 頁)。
3	P.17 三、(二) 表 7 是輻射曝露統計，請問個人年有效劑量之歷年平均値一欄，是以 104~109 年之算術平均值計算，抑或以 6 年之總年集體有效劑量除以 6 年之總人數來計算，以核子醫學類而言，這兩種方法的計算結果都是 0.51 毫西弗，唯二者意義稍有不同。	感謝委員提問；該數據是採六年平均。
4	P.29 三、(五) L#13，建議考量刪除「卻並非國內無從業人口。」一句，因後續說明文句已十分清楚。	感謝委員建議；已修正(詳見修正報告第 46 頁)。
5	P.30 三、(五) L#15，報告中說明氬氣平均活度為 147 貝克/立方公尺，(m WL)，因游離輻射防護安全標準之附表三之九中說明，其轉換係數每貝克/立方公尺為 1.07×10^{-4} 或 2.67×10^{-4} WL，請補充說明此 147 貝克/立方公尺(m WL)之參考依據或換算方式。 L#16，報告中說明氬氣的劑量轉換因子為 5.6 mSv/WLM，因游離輻射防護安全標準之附表三之九中說明，其轉換係數每工作基準月為 4 或 5 毫西弗，請補充說明此 5.6 mSv/WLM 之參考依據。	感謝委員意見；該部分內容係引用本中心 87 年版之國民輻射劑量報告，因年代久遠已無法找到個別子項目之相關資料，無法再補充更細節內容，併予陳明。
6	P.32 三、(五) 能否補充說明表 14 中有關民用飛行之集體劑量計算方法。是採用何種電腦程式評估的嗎？	感謝委員建議；該部分內容係引用本中心 87 年版之國民輻射劑量報告，因年代久遠已無法找到個別子項目之相關資料，無法再補充更細節內容，併予陳明。

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
7	P.41 四、(二) 圖 4 之標題為...各類別之從業人口比例...，建議修正為...各類別從業人口之比例...，以與目錄用詞一致。	感謝委員建議；已修正。
8	文字修正 1. 目錄中之附錄...輻射劑量統計表...，建議修正為...輻射劑量統計總表...，以與內文一致。 2. 表目錄中...表 2、...聯合國...委員會輻射工作人員...，建議修正為...表 2、...UNSCEAR 2000 報告輻射工作人員...，以與內文一致。 3. 表目錄表 6、表 8、表 10、表 12、表 14、表 17 中，均有使用職業劑量一詞，建議考量參考輻防法及游離輻射防護安全標準，修正為職業曝露之劑量或職業曝露劑量。內文亦同。 4. 表目錄表 16 中，...受雇員工數表...，建議修正為...受僱員工數表...。內文亦同。 5. 表目錄表 19 及表 20 中，...，錄表同。。。年...，建議修正為...建議修正為.....年...，以與內文一致。	感謝委員建議；相關文字修正意見均已參採。
9	會議口頭意見 文獻中有提到日本福島相關工作人員的劑量，是否這就是所謂嚴重意外事故的職業曝露劑量，請確認。	感謝委員意見，日本最新的報告是把福島相關的職業曝露分開計算，但也沒明確說就是屬於嚴重意外事故的職業曝露劑量；我國的劑量分類是依據原能會發布之全國輻射工作人員劑量資料統計年報，目前尚無法取得適當的說明資料，後續會再與輻防處聯繫，確認後再作補充說明。
10	會議口頭意見 請了解工業照射類職業曝露劑量在 109 年特別高的原因，建議可在內文補充說明。	感謝委員意見，目前尚無法取得適當的說明資料，後續會再補充說明。

三、 魯經邦委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	綜合意見 118-111 年國民輻射劑量調查評估報告按曝露類別分成多本報告，惟個份報告體例（章節及表格編碼）不甚一致，建議加以檢視後予以統一。例如： 1. 章節有以壹、貳...，亦有以一、二...方式編碼者。 2. 表格有以表一、表二 ...，亦有以表 1、表 2...方式編碼者。	感謝委員意見；相關報告均已修改，會採統一格式辦理。
2	P.5 二、(二) 1. 報告中敘述：「...在 UNSCEAR 2000 報告後，雖然仍持續針對職業曝露做調查，但此後就未在針對整體性調查出版相關文件、僅在 2016 年更新職業曝露之整體年集體有效劑量及個人年有效劑量，...」 2. 惟經查 UNSCEAR 2020/2021 Report (2022 年 5 月出版，可自 UNSCEAR 官網下載) 已有針對職業曝露的完整報告，請參閱該報告第 1 冊之《Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly》第 VI 章(pp.30-34.) 及附錄 D。 3. 若時間允許，除上面第 5 頁之敘述修正外，建議將 UNSCEAR2020/2021 報告中職業曝露討論相關的內容與數據納入更新。	感謝委員意見；已在修正報告補充 UNSCEAR 歷年職業曝露報告之內容(詳見修正報告第 6-19 頁)，包括 2022 年最新發布之 UNSCEAR 2020/2021 Report。
3	P.11 三、 1. 報告中敘述：「...以當時台灣地區人口數 2,100 萬人計算，職業曝露之國民輻射劑量為 1.14 微西弗/人-年；與當時 UNSCEAR 1993 報告的全世界職業曝露劑量（2.43 微西弗/人-年）相比...、」。 2. 按 87 年版報告說明「目前 UNSCEAR 由職業曝露劑量評估全世界人口劑量，僅由人造輻射源各類別工作人員實際監測結果的年集體有效劑量評估全世界的人口劑量為 0.81 微西弗/人-年，其評估結果信賴度較高。而天然輻射源部份因採礦及航空的職業曝露劑量，係估計值，而非實測值，天然輻射源評估全世界人口劑量為 1.62 微西弗/人-年，兩者合計世界人口劑量約為 2.43 微西弗/人-年...」 3. 經關鍵字查閱 UNSCEAR 1993 報告本文及附錄 D，所有關於數字 2.43、0.81 及 1.62 似無以微西弗/人-年為單位者。請確認是否係 87 年報告在研究過程依當時全球人口數評估及 UNSCEAR 1993 報告相關數據計算得出之結	感謝委員意見；已在修正報告補充 UNSCEAR 歷年職業曝露報告之內容(詳見修正報告第 6-19 頁)，包括最早出版的 UNSCEAR 1993 報告；並已就文字上會與本中心 87 年版之國民輻射劑量報告引用 UNSCEAR 1993 報告或 UNSCEAR 1993 報告本身內容的部分進行文字修正。

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	果。若確係如此，引用此一數字，則應補充說明而不宜直接稱此一數字引用自 UNSCEAR 報告，請審酌。 4.另 UNSCEAR 報告中與職業曝露相關的平均個人劑量評估，都是以職業曝露人數來計算平均，並未以全人口來平均後登載於報告內。把非職業曝露者納入平均，很容易造成誤解，如果是為了表達方式與 87 年版一致，建議在報告中說明清楚。	
4	P.36 四、(一) 1.報告中陳述 ICRP 132 建議當機組員超過年劑量 5-10 毫西弗的行動參考基準，雇主應採取的防護措施包括「不特定的額外醫療監控」，似對 ICRP 132 有所誤解，建請修正。 2.依據 ICRP 132 第(68)段；「航空機組人員因輻射安全以外的原因接受例行體檢。ICRP 認為，曝露於宇宙輻射不需要額外實施體檢。一般來說，常規體檢就使工作人員和醫生之間有機會就曝露於宇宙輻射的議題進行對話。(原文：Aircraft crew routinely undergo medical examinations for reasons other than radiation safety. The Commission considers that exposure to cosmic radiation does not require specific additional medical examinations. Generally, routine medical examinations represent an opportunity to engage a dialogue between a worker and a physician on the topic of exposure to cosmic radiation.)」，這表示航空機組人員已實施例行的航空醫學的體格及健康檢查，已可涵蓋對輻射健康風險的評估，無須另行施行輻射健檢。 3.另報告中使用「醫療監控」一詞，建議參照我國法規稱「醫務監護」。 4.報告中稱歐盟建議的管制標準為年劑量 6 毫西弗，請明確指出法規或指引的名稱，並納入參考文獻清單。	(一)感謝委員建議，相關內容經確認後已參採修正，詳見修正報告 P.55-P.56。
5	P.44 五、 1.報告中提及 UNSCEAR 2016 更新職業輻射曝露年集體有效劑量為 14,400 人-西弗，個人年有效劑量為 1.31 微西弗/人-年。請澄清這兩個數字是直接引用 UNSCEAR 2016 的數字，還是依據 UNSCEAR 2016 哪些數據計算而得。(因依關鍵字搜尋，UNSCEAR 2016 找不到這兩個數據) 2.如果是本報告依據 UNSCEAR 2016 相關數據計算而得，則不宜陳述這是 UNSCEAR 2016 更新的數據，應詳細說明採用了哪些數據計算	(一)感謝委員意見。個人年有效劑量 1.31mSv 係 UNSCEAR 與於 2016 年針對 UNSCEAR 2000 報告發表勘誤表，修正原數值 0.1 mSv；發布日期為 2016 年 10 月，並非另有 UNSCEAR

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	而得，並說明計算的過程或邏輯。	2016 報告。 (二) 為避免混淆，已在修正報告補充 UNSCEAR 歷年職業曝露報告之內容 (詳見修正報告第 6-19 頁)

四、 許榮鈞委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	綜合意見 報告內容充實且描述清楚易懂，有利於提升國內民眾對於職業暴露國民輻射劑量的整體了解。以下幾點小建議提供參考。	感謝委員意見。
2	p.3 二、文獻回顧>倒數第4行：“...商用航空部門高於其他職業類別的原因，主要在於該劑量數據獲得方式的差異...”此句描述不太正確應該修訂！數據獲得方式確實不同(計算評估 vs 測量)，但不是因為方法不同導致航空部門劑量高於其他職業類別的原因，即使是用測量也是會有同樣的結果與趨勢。例如 p.37 所述：“本研究採用 UNSCEAR 1993 報告公布的個人年有效劑量 3 毫西弗做為評估基礎；UNSCEAR 之數據是建立在 250,000 名航空從業人員的實際劑量監測結果”	原內容之文字說明不清造成混淆，已修正。
3	p.6 表 2、UNSCEAR2000 報告輻射工作人員職業暴露劑量：表右下角的數字(0.1*)是否有誤？平均值 0.1 mSv？不太可能，表上所有數字都比 0.1 來得大？	(一)因 0.1 mSv 計算有誤，故 UNSCEAR 於 2016 年發表勘誤表，修正原報告之 0.1 mSv 將該數據修正為 1.31mSv。 (二)為避免混淆，已在修正報告補充 UNSCEAR 歷年職業暴露報告之內容(詳見修正報告第 6-19 頁)
4	p.8 三、台灣地區職業暴露現況：...本中心 87 年出版的國民輻射劑量評估報告...出版的年版之職業暴露評估結果...版此一報告具有輻射科普與民眾參考的重要價值，評估間隔有點遠，建議未來可考慮適當縮短國民輻射劑量評估的週期。	感謝委員建議，本中心納入未來業務規劃之參考。
5	p.13 表 5、核燃料循環類職業輻射暴露統計表，其中 109 年的反應器運轉(3670 運轉職業輻射與核燃料循環研究(31 料循環研究的年集體有效劑量都大幅增加(相較於 108 年以前趨勢)，原因為何？建議在內文中簡單描述以利讀者理解。	已補充，詳見修正報告第 31 頁。
6	p.17 表 7”註解 3：合計係指該類輻射從業人員之合計值；因有部分工作人從事二種(含)以上之主項輻射工作類別，因此，各類輻	(一)相關數據係直接引用原能會發布之全國輻射工作人員劑量資料統計年報，因為是全國性統計，雖然在分類

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	射從業人員人數之總和會大於合計值。”若一工作人員因執行二類職業屬性，其所受輻射劑量在本表如何分類統計？建議簡單說明以利讀者理解。	上會依其橫跨之類別有個別統計，但因劑量是依據個人身分證字號為統計條件，不會有重複計算劑量的情況。 (二)感謝委員建議，已在相關內容中加註。
7	p.21 表 9、工業應用類職輻射曝露統計表：其中”放射性同位素製造”與”加速器運轉”二類人數極低，109 年從業人數分別只有 2 人與 10 人，好像不符國內實況？國內現在有 13 台放射性生產設施運行中，也有好幾台高強度加速器設施運行中。	相關數據係直接引用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，
8	p.27 表 11、其他應用類職業輻射曝露統計表：請問其中類別”嚴重效應之意外”的定義為何？	感謝委員意見，目前尚無法取得適當的說明資料，後續會再補充說明。
9	p.35 “...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，106 年後突破萬人，104 年-109 年之平均人數為 10,780 萬人，詳如表 16。”應該是 10,780 人而非 10,780 萬人。	已修正，詳見修正報告第 51 頁。
10	p.36 第 5-6 行：“...依據歐盟輻射職業曝露之基本安全標準要求之規定，當飛航人員每年曝露量可能遭受超過 1.1 mSv 時，雇主即需採取包括...。 ””主即需採取包？或是 1 mSv 的筆誤？	1.1 mSv 係筆誤，已修正。
11	p.37 “...本研究採用 UNSCEAR 1993 報告公布的個人年有效劑量 3 毫西弗做為評估基礎...”。審查者認為此一數據(3 mSv/y)過於老舊(1993 年以前的數據)而且過於保守(歐美高緯度國家的數據會高估低緯度的台灣)，不適用於 110 年版台灣職業曝露國民劑量(3 mSv 乘上所有機師人數占了國內所有職業暴露的 82.9%集體劑量!)。建議可參考引用去年國內團隊發表於 Health Physics 期刊的論文“刊的論文“ Physics 發表於露的數據定，當飛航人員每年曝露量可能遭受超過超過超過。。。估的週期。訂射健檢。fety. The Commission considers that exposure to cosmic radiation does no 該團隊依據民航年報的數據，嚴謹考慮每一條航段的貢	已參採，感謝委員提供相關文獻。

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	獻，分析獲得台灣機師的年集體與個人劑量，其中 104、105、106、107 年的機師個人平均劑量分別為 1.70、1.81、1.78、1.97 mSv/y。	
12	<u>會議口頭意見</u> 國民輻射劑量評估資料要好好保存，未來再評估的時候會有比較完整的參考資料。	感謝委員意見，本中心納入未來業務規劃之參考。

五、 張泰誠委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	綜合意見 建議減少名詞種類或統一名詞： p.3 商用航空 (美國 NCRP 用語) p10 民用飛行(Civilian aviation) 表 3、台灣職業曝露分類用語 P.29 民用飛行「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」 P34 商用航空 P35 民用飛行 p36 商用航空 p37 民用航空業 P38 表 17 民用飛行 P39 民用航空之飛航職業 P44 民用航空 <u>*商用飛航宇宙輻射之國民劑量評估報告(111年)(原能會報告)</u> *民用航空運輸業管理規則 AOR 定義 民用航空運輸業：指以航空器直接載運客、貨、郵件，取得報酬之事業。 普通航空業：指以航空器經營民用航空運輸業以外之飛航業務而受報酬之事業，包括空中遊覽、勘察、照測、消防、搜尋、救護、拖吊、噴灑、拖靶勤務、商務專機及其他經核准之飛航業務。 外界較易混淆民用航空、商務專機、商用飛航，建議使用「民用航空」	已修正，將「商用航空」、「民用飛行」統一用語為「民用航空」。
2	<u>p.37-38 表 17；P.42 圖 5、圖 6；P.44</u> 1.P42 圖 6 討論我國職業輻射年集體有效劑量：估算民用航空劑量後，我國天然射源類(含民用飛行)職業，為我國職業輻射年集體有效劑量的大宗(82.9%)，未估算時為核燃料循環(64.2%) 2. P44 討論我國職業暴露全國劑量：估算民用航空之職業曝露劑量，會對國民輻射劑量評估結果造成相當大的差異(我國納入後為聯合國劑量的 1.26 倍，且為我國納入前的 5.89 倍)。本報告採用聯合國原子輻射效應科學委員會 UNSCEAR 1993 年報告公布的民用航空業個人年有效劑量 3 毫西弗 mSv，作為我國(104-109 年間)民用飛行職業類別個人年有效劑量，推估出我國組員年集體有效劑量 32.34 西弗、個人為 1.373 微西弗 uSv，再加上我國不含飛航組員之國民輻射年劑量 0.281 微西弗，推論出我國國民輻射劑量 1.654 微西弗 uSv/人-年(估算民用飛行職業後)，是	(一)「民用航空」職業曝露劑量已改採國內文獻「A Comprehensive Approach for Estimating Collective and Average Effective Doses of Galactic Cosmic Radiation Received by Pilots.」之研究結果，並以該研究評估所得之台灣本國航空駕駛員因職業曝露之個人平均有效劑量平均值 1.97 毫西弗/年作為本研究評估整個民用航空職業曝露集體有效劑量之基礎。

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	UNSCEAR 研究 1.31 微西弗(μSv)/人-年的 1.26 倍。 3.雖然研究時間區間略有出入，建請同時採用原能會與我國學界合作的研究成果，例如我國清大許榮鈞教授團隊(系統化與客製化的飛航輻射劑量研究，109 年原子能科技合作計畫論文集，平均 2.29 毫西弗 mSv)、中國醫藥大學袁明豪教授(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,106 年)，推估出納入民用飛航職業之我國國民輻射劑量，較為符合我國實際情形。 其他國際研究數據:美國輻射防護與度量委員會 NCRP: 所有美國輻射暴露工作者中，以飛航組員接收到最大年均有效劑量(達 3.07 毫西弗 mSv)，其他飛航組員宇宙輻射暴露估算區間為 0.2 至 5 毫西弗 mSv/每年。 資料來源:美國 CDC https://www.cdc.gov/niosh/topics/aircrew/cosmicionizingradiation.html#fn01 The National Council on Radiation Protection and Measurements reported that aircrew have the largest average annual effective dose (3.07 mSv) of all US radiation-exposed workers. Other estimates of annual aircrew cosmic radiation exposure range from 0.2 to 5 mSv per year. 我國並非人口大國，國籍駕駛員+空服(104-109 年平均 10780 人)約占總人口數(104-109 年平均 23559401 人)的 0.046%，以聯合國研究飛航人員輻射量數據*我國總人口數推估我國國民劑量，與全球平均相比是否被高估？另台灣緯度低(0-90 度的 23.5 度)航線分布及機組員接收之輻射劑量亦有不同，倘能採用針對我國飛航人員的研究數據，較為公允。	(二)承上，台灣為低緯度國家，採用上述之個人平均有效劑量平均值 1.97 毫西弗/年，，與日本 2 毫西弗/年(2022 年資料)、美國 3.07 毫西弗/年(2009 年)及全世界 2.7 毫西弗/年(2022 年資料)之民用航空職業暴露工作人員劑量相比，較能反映出地域本土性，教具代表性。 (三)因各國國情及產業特性不同，本就會因為民眾生活習慣、產業特性及經濟條件而與 UNSCEAR 評估之全球狀況有所差異；本中心進行國民輻射劑量在評估的目的，不只了解環境各類輻射來源對一般民眾的劑量比例，更重要的是了解對曝露人口造成的個別劑量及集體劑量，以作為輻射管制的依據。
3	<u>簡報第 16 頁</u> 文獻回顧 UNACEAR 2000 報告應為 UNSCEAR 2000 誤繕。	感謝委員建議，已在簡報中修正。
4	<u>簡報第 35 頁</u> 職業飛航劑量採用 UNSCEAR 2000 報告，建議可採計 UNSCEAR 2020/2021 報告 volume 4 第 109 項次相關台灣數據(2006-2018)報告平均 2.2 毫西弗。	感謝委員建議，已在簡報中修正。
5	<u>會議口頭意見</u> P.30 飛航人員每月工時上限 120 小時，建議修正為連續 30 天工時上限 120 小時。	已修正。
6	<u>會議口頭意見</u> 請再確認 NCRP 最近有沒有再更新評估結果，若無也可在文章中說明已引用最新資料。	經確認 NCRP 最近沒有再更新評估結果，已在相關章節中說明。

六、 原能會(輻射防護處)

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<u>全內容</u> (1)「工人」建議修改為「工作人員」。 (2)「暴露」請修訂為「曝露」。 (3)第 6 頁「自然輻射源」建議改為「天然輻射源」。	已修正。
2	<u>六(p.45)</u> 該節提及「...並 <u>外</u> 納入民用航空之職業...」，請修正文意。	已修正。