

RMC-110-310Rev4

民用航空宇宙輻射之國民劑量評估  
(112年9月修正版)



核能安全委員會輻射偵測中心

112年9月

# 民用航空宇宙輻射之國民劑量評估

## 摘要

國民輻射劑量由多面向所組成，美國輻射防護與度量委員會(NCRP)的作法是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( $E_{\text{Taiwan}}$ )結果分別為 3.1 微西弗/年及 0.057 微西弗/年；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，於民國 108-111 年國民輻射劑量調查重新評估國人的飛航劑量。

為能夠客觀評估民用航空之飛航劑量，本研究利用交通部民航局所提供國人飛航行為調查結果，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 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，本研究採用民國 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，選定國際線 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，另以 SIEVERT 飛航劑量評估軟體針對國際線飛航劑量評估以驗證比較。

評估結果，以 NTHU FDC 計算之國際線各航線往返總個人年有效劑量( $E_{\text{EXP}}$ )範圍為 1.8 至 157.9 微西弗，SIEVERT 計算之各航線往返總個人年有效劑量( $E_{\text{EXP}}$ )範圍為 2 至 189.2 微西弗；兩岸線往返之總個人年有效劑量( $E_{\text{EXP}}$ )範圍為 1.7 至 20.5 微西弗；國內線往返之總個人年有效劑量( $E_{\text{EXP}}$ )範圍為 0.11 至 0.25 微西弗。顯示歐美航線因飛行距離較其他航線遠，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評估結果比其他航線高；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，所以劑量評估結果之曝露劑量相對較低。綜上，本研究計算所得之民用航空宇宙輻射所造成之國民輻射劑量( $E_{\text{Taiwan}}$ )為 0.010 毫西弗/年。

# Assessment of Radiation Dose from Civil Aviation in Taiwan

## Abstract

The population radiation dose is composed of multiple factors, and the National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) in the U.S. categorizes cosmic radiation exposure from civil aviation as a subcategory of consumer products. In 1998, the first population radiation dose assessment was conducted, evaluating flight doses for 25 international and 28 domestic routes. The results showed that the effective dose per individual per year in Taiwan ( $E_{\text{Taiwan}}$ ) was 3.1  $\mu\text{Sv}/\text{year}$  for international routes and 0.057  $\mu\text{Sv}/\text{year}$  for domestic routes.

This study utilizes survey results on the flying behavior of Taiwanese citizens provided by the Civil Aeronautics Administration, Ministry of Transportation and Communications. It focuses on popular routes for international, cross-strait, and domestic travel. The NTHU FDC aviation dose assessment software specific to Taiwan is used to perform aviation dose calculations, evaluating the radiation dose incurred by Taiwanese citizens due to air travel. Taking into consideration the impact of the COVID-19 pandemic on the global aviation industry from the year 2020 to 2022, the study used survey data on Taiwanese citizens' flying behavior from the years 2015 to 2019. It selected 65 popular international flights, 75 cross-strait flights, and 23 domestic flights for assessment.

The evaluation results show that, based on NTHU FDC calculations,

the total annual effective dose for round-trip international flights ranges from 1.8 to 157.9  $\mu\text{Sv}$ . The total individual annual effective dose ( $E_{\text{EXP}}$ ) calculated by SIEVERT for each route round trip ranges from 2 to 189.2  $\mu\text{Sv}$ . For round-trip cross-strait flights, the total annual effective dose ranges from 1.7 to 20.5 $\mu\text{Sv}$ . For round-trip domestic flights, the total annual effective dose ranges from 0.11 to 0.25  $\mu\text{Sv}$ . This indicates that European and American routes have higher radiation exposure assessments due to their longer flight distances compared to other routes. Most Asian countries are located near the equator or at low latitudes and are closer to Taiwan. Consequently, their flight durations are shorter, resulting in relatively lower exposure doses. In conclusion, the study calculates that the population radiation dose from civil aviation was estimated to be 0.010 mSv of annual dose for Taiwan nationals.

## 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<sub>EXP</sub>: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<sub>Taiwan</sub>:台灣全體國民之平均年有效劑量**(Effective dose per individual per year in Taiwan)。

計算方式為台灣之集體有效劑量除以台灣人口數，以毫西弗(mSv)或微西弗( $\mu$ Sv)表示。

# 目錄

一、	前言 .....	1
二、	文獻回顧 .....	3
	(一) 宇宙輻射 .....	3
	(二) 美國 .....	4
	(三) 輻射偵測中心(民國 87 年) .....	5
三、	民用航空劑量評估方法 .....	6
	(一) 宇宙輻射對飛航劑量影響 .....	6
	(二) 劑量評估軟體 .....	8
	1. SIEVERT .....	8
	2. NTHU FDC .....	10
	(三) 國人飛航行為調查 .....	12
	1. 國際線 .....	15
	2. 國內線 .....	17
	3. 兩岸線 .....	17
四、	飛航劑量分析結果與劑量評估 .....	19
	(一) 飛航劑量分析結果 .....	19
	1. 國際線 .....	19
	2. 兩岸線 .....	28
	3. 國內線 .....	28

(二) NTHU FDC 與 SIEVERT 結果差異分析.....	34
五、 民用航空曝露之國民輻射劑量評估 .....	40
(一) 國民輻射劑量評估結果.....	40
(二) 與其他國家之比較.....	46
六、 結論.....	48
七、 參考資料.....	49
附表 1 近五年國際航班旅客年平均人數排序 .....	53
附表 2 近五年國內航線旅客年平均人數排序 .....	61
附表 3 近五年兩岸航線旅客年平均人數排序 .....	63
附錄、審查意見對照表 .....	71

## 圖目錄

圖 1 在航空高度上受到銀河宇宙射線和太陽宇宙射線的複雜輻射環境示意圖【9】 .....	4
圖 2 NCRP 160 報告中各消費性產品及其活動分類項目占比 .....	5
圖 3 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 .....	7
圖 4 SIEVERT 劑量評估軟體之劑量率模擬示意圖 .....	9
圖 5 SIEVERT 線上版之飛航評估軟體之官網頁面 .....	10
圖 6 NTHU FDC 飛航評估軟體之頁面 .....	11
圖 7 台灣各機場進出旅客趨勢(民國 100 年「民航統計年報」) .....	13
圖 8 台灣各機場進出旅客趨勢(民國 108 年「民航統計年報」) .....	13
圖 9 民國 104-108 年台灣各機場出入旅客人次比例統計圖 .....	14
圖 10 民國 104-108 年國際線旅客年平均人數排序 .....	16
圖 11 民國 108 年民航局統計年報針對國內線載客人數市占率結果 .....	18
圖 12 以 NTHU FDC 之台灣熱門航線劑量比較圖 .....	25
圖 13 以 SIEVERT 之台灣熱門航線劑量比較圖 .....	26
圖 14 以 NTHU FDC 與 SIEVERT 計算平均值之台灣熱門航線劑量比較圖 .....	27



## 表目錄

表 1 民國 104-108 年國際線經 NTHU FDC 飛航劑量評估軟體計算之結果 .....	21
表 2 民國 104-108 年國際線經 SIEVERT 飛航劑量評估軟體計算之結果 .....	23
表 3 民國 104-108 年兩岸線經 NTHU FDC 飛航劑量評估軟體計算之結果 .....	29
表 4 民國 104-108 年國內線經 NTHU FDC 飛航劑量評估軟體計算之結果 .....	32
表 5 國際線、兩岸線與國內線等飛航劑量分析結果 .....	33
表 6 NTHU FDC 與 SIEVERT 劑量評估軟體對台灣國際航線之單趟平均劑量計算結果比較 .....	37
表 7 NTHU FDC 軟體進行原機場與替代機場個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )計算結果比較 .....	39
表 8 NTHU FDC 軟體進行實際航班與大圓航線劑量計算結果比較 .....	39
表 9 國際線經 NTHU FDC 計算所得之集體有效劑量結果 .....	41
表 10 兩岸線經 NTHU FDC 計算所得之集體有效劑量結果 .....	43
表 11 國內線經 NTHU FDC 計算所得之集體有效劑量結果 .....	45
表 12 民用航空宇宙輻射劑量評估結果之比較 .....	47

## 一、 前言

受全球疫情影響前，全世界的航班數量每日超過十萬航次。飛行期間，乘客和機組人員會受到來自宇宙之輻射曝露，且會因為飛機高度的增加、飛航時間增多與滯留高緯度地區等因素，而接受較高的輻射曝露【1】。Matthiä 等人之研究(2017)指出【2】，在天氣晴朗狀況下，飛機從芝加哥到北京，且經由北極上空掠過的乘客所得到的輻射劑量相當於一張胸部 X 射線(約 0.1 毫西弗)，約為一般民眾年劑量限度(1 毫西弗)之十分之一。

輻射偵測中心(以下簡稱本中心)已於民國 110 年度完成民用航空宇宙輻射之國民劑量評估報告【3】，先針對民國 104-108 年間國人飛航行為進行調查，並使用法國 SIEVERT 劑量評估軟體(<http://sievert-system.org>)進行國際線(65 條)及兩岸線(14 條)之劑量計算，評估民用航空宇宙輻射之國民輻射劑量，台灣因民用航空宇宙輻射所造成之國民輻射劑量( $E_{\text{Taiwan}}$ )約為每年 0.012 毫西弗。然而，只以單一軟體進行評估，恐有以偏概全的疑慮，若能有其他軟體驗證或實測值做佐證，將使本研究更完整且具代表性，但因高空中宇宙射線輻射場的特性非常複雜，於現階段執行飛航宇宙輻射實際量測是困難的，所以大多會以劑量評估程式的方式模擬飛機於空中造成的輻射劑量。近年現行評估飛航行為的宇宙輻射劑量程式包括：美國 CARI、德國 EPCARD、法國 SEIVERT、加拿大 PCAire 等【4】，皆為高緯度國家，而台灣地處低緯度，其地磁緯度與這些國家差異甚大，再加上這些國家對於飛航劑量之研究通常只著重在各自有興趣的航線，因此並無針對台灣航線進行飛航劑量的分析研究，若直接套用其飛航評估軟體進行計算，仍有飛航宇宙輻射評估不夠全面之疑慮【5】，加上我國清華大學已於民國 107 年陸續自行開發 NTHU Flight Dose Calculator(以下簡稱 NTHU FDC)軟體做國內民用航空之劑量評估，NTHU FDC 為我

國第一套技術自主的飛航劑量評估程式【6】，該程式係針對台灣之地理位置、經緯度與受宇宙射線影響等因素所設計之劑量評估軟體，其計算結果具有一定之參考價值；且 NTHU FDC 飛航劑量評估程式已於民國 110 年完成與國際現有的飛航劑量程式完成相關的比對驗證，包含 Code-to-Code (以 EURODOS-2012-03 報告比較 11 個來自不同國家與實驗室的飛航劑量程式)與 Code-to-Experiment (以模擬值估算各量測實驗條件下的周圍等效劑量率，再與測量值做比對)，其結果於民國 111 年發表，顯示 NTHU FDC 飛航評估軟體對於飛航劑量之計算具有合理的預測能力【7】，是值得被信賴的。

另外，本中心於民國 110 年度民用航空宇宙輻射之國民劑量評估報告【3】中，因 SIEVERT 劑量評估軟體本身提供航點之限制，只針對國際線較熱門且規模較大的機場提供航點計算，如台灣地區僅開放桃園機場、高雄機場等兩個機場，因此，於原報告中兩岸航線只能以鄰近地點做部分地區航班的評估，國內線航班也無法提供劑量計算；而 NTHU FDC 軟體採國際民用航空組織(ICAO)機場代碼方式，只要有機場代碼，即可進行航線運算，能更完整提供各國國際線及國內線之機場定位，故使用 NTHU FDC 軟體計算其航點的結果除能符合在地化，更符合台灣地區飛航行為之國民輻射劑量評估。

綜合上述原因，本研究將沿用民國 110 年度民用航空宇宙輻射國民劑量評估之作法，利用交通部民航局之民航統計年報所提供之國人飛航行為調查結果，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，再使用 NTHU FDC 飛航劑量評估軟體重新執行劑量計算與分析；同時，也會與民國 110 年評估報告中 SIEVERT 軟體完成之國際線飛航劑量評估結果進行劑量比較，最後，彙整相關數據並評估國人因搭乘飛機所造成之國民輻射劑量，以精進及修正民用航空因宇宙輻射造成輻射劑量評估結果。

## 二、 文獻回顧

### (一) 宇宙輻射

宇宙射線來自外太空，又稱為初級宇宙射線，可分為銀河宇宙射線與太陽宇宙射線。由太陽產生的太陽宇宙射線能量較低，其主要成分是質子和電子；而來自太陽系之外的銀河宇宙射線，由 89% 高能質子、10% 氦原子核及 1% 重元素(高能荷電粒子、中子、電子、超高能微中子、光子)等組成。這些帶電高能粒子會與大氣層產生宇宙射線散裂反應，產成二次宇宙射線，包含中子、質子、光子、電子、介子等【8】。飛機在高空時，其乘客和機組人員會曝露在這種複雜的二次粒子和光子輻射場中，如圖 1 所示。

地球的大氣層基本上可以保護地球，減少地球受到宇宙射線的影響，然而隨著高度的增加，接受到宇宙輻射的劑量也就越來越大。由美國聯邦航空總署(Federal Aviation Administration, FAA)【10】的資料顯示，在地表跟飛行高度達 35,000 呎(約 10,668 公尺)的飛機相比，每小時的輻射曝露劑量可差到 100 倍。除了飛行高度會影響宇宙輻射曝露的劑量之外，曝露劑量還與飛行時間、地磁緯度與太陽活動週期有關。因宇宙輻射中的帶電粒子受到地球磁場偏轉，使得宇宙輻射在接近地球時會順著磁力線而聚集到高緯度地區，造成宇宙射線強度明顯高於赤道附近的區域。

美國輻射防護與度量委員會(NCRP)在 2009 年出版的 NCRP 160 報告【11】中 Friedberge 等人之研究(2000)提到，民用航空的典型飛行高度在 6,100 至 12,200 公尺之間；而私人客機的飛行高度通常為 15,000 至 17,000 公尺。針對飛行高度在 6,100 至 18,300 公尺，於赤道附近之劑量主要來自銀河宇宙射線，所造成之平均有效劑量因高度不同而為 0.54 至 3.89 微西弗/小時；而在高緯度地區(南、北極處)，於相同高度所造成之劑量為 1.05 至 14.5 微西弗/小時。

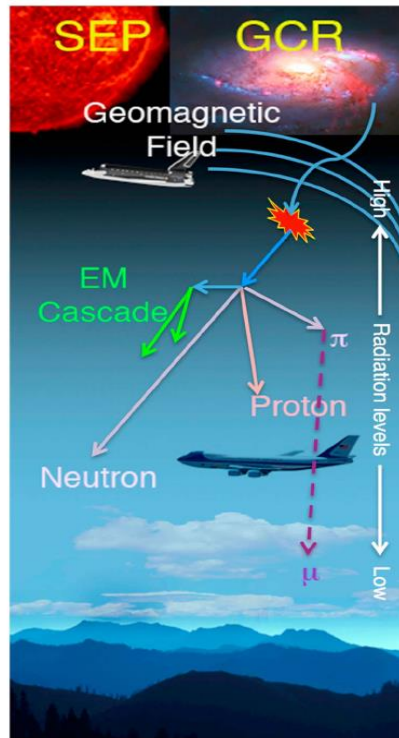


圖 1 在航空高度上受到銀河宇宙射線和太陽宇宙射線的複雜輻射環境示意圖(圖片來源：參考文獻【9】)

## (二) 美國

美國 NCRP 第 160 號報告，其中的第五章分類為消費性產品及其活動，民用航空宇宙輻射曝露屬於消費性產品及其活動分類的子項，如圖 2 所示。其評估方式係採用美國運輸統計局 (BTS, 2008) 報告，針對 2006 年的統計數據進行飛航行為調查及分析，分類方式分為國內航班與國際航班，在美國搭乘國內航空公司的旅客約有 6.6 億人次，占總體 89 %；搭乘國際航空公司的旅客約有 8,480 萬人次，占總體 11 %。劑量評估部分則利用 CARI-6 飛航劑量軟體計算各航班在飛行中受到銀河宇宙輻射曝露所造成的有效劑量，其中，國內航班的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )為每小時 3.30 微西弗，平均飛行時間為 2.84 小時，集體有效劑量(S)為 6,192 人-西弗；國際航班的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )為每小時 5.21 微西弗，平均飛行時間為 9.35 小時，集體有效劑量(S)為 4,131 人-西弗，總集體有效劑量(S)(國內與國際值的總和)為 10,323

人-西弗，約占消費性產品及其活動分類項目之 26%。

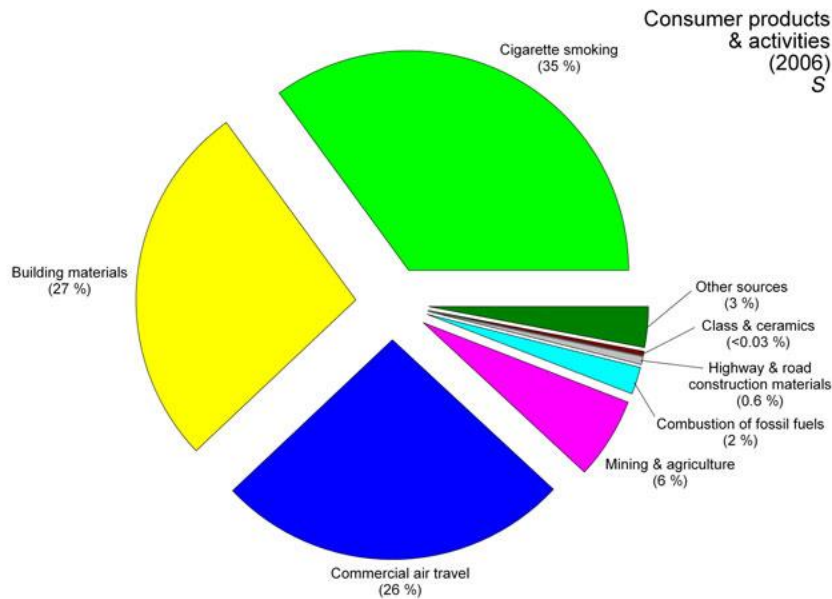


圖 2 NCRP 160 報告中各消費性產品及其活動分類項目占比

### (三) 輻射偵測中心(民國 87 年)

國民輻射劑量評估中，民用航空宇宙輻射曝露依循 NCRP 160 報告之作法，將其分類列為消費性產品及其活動分類的子項。本中心於民國 87 年執行第一次國民輻射劑量評估【12】，其中已包含飛航劑量評估，當時分成國際線(25 條)及國內線(28 條)做評估，引用美國聯邦航空總署 CARI-2 程式，計算國民輻射劑量( $E_{\text{Taiwan}}$ )結果分別為 3.1 微西弗/年及 0.057 微西弗/年；惟因 CARI-2 程式相當老舊(現今已更新至 CARI-6)，該程式使用的輻射遷移程式(Radiation transport codes)較簡易，缺乏考慮許多重要影響宇宙射線的因素【13】，隨科技技術進步與國際對宇宙射線的了解，已不符現況，且因全球化影響促進國際運輸，飛航行為之現況與 20 年前當時的狀況相比，國人飛航活動已有相當大的變化，綜上，故有重新評估飛航劑量之必要性。

### 三、 民用航空劑量評估方法

本研究沿用本中心民國 110 年民用航空宇宙輻射之國民輻射劑量評估報告之作法，針對民國 104 年至 108 年間台灣地區的熱門航線進行國人飛航行為之評估，再搭配劑量評估軟體進行劑量計算，以獲得民用航空宇宙輻射之國民輻射劑量評估。而飛航所造成的劑量值，會因所採用的劑量評估模式或評估的基準點的不同而有差異；因此，在執行劑量評估前，需先針對宇宙輻射對飛航劑量之影響以及劑量評估軟體之適用性進行評估與探討。

#### (一) 宇宙輻射對飛航劑量影響

NCRP 101 號報告【14】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【15】，近 60 年太陽風強度的變動資料如圖 3，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，本研究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，作為後續劑量評估軟體的參數基準以進一步計算與分析。

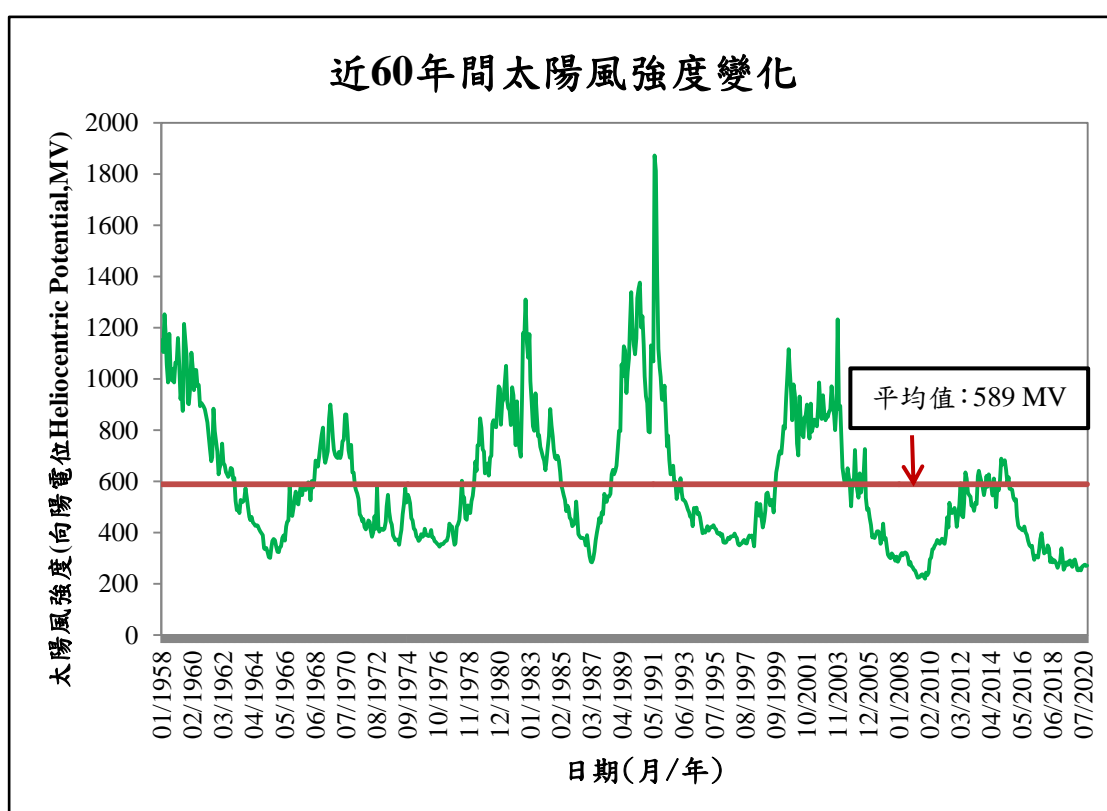


圖 3 近 60 年太陽風強度資料並換算為阻隔銀河宇宙輻射之電位



## (二) 劑量評估軟體

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【16】；NTHU FDC 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。本研究將採用 NTHU FDC 之飛航評估軟體進行民用航空宇宙輻射之國民輻射劑量評估。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，故本研究採用 NTHU FDC 軟體之大圓模式，並搭配 SIEVERT 軟體作為劑量評估之驗證。針對 SIEVERT 與 NTHU FDC 之飛航評估軟體簡介如下：

### 1. SIEVERT

SIEVERT 之飛航評估軟體是由法國民航總局 (French General Directorate of Civil Aviation, DGAC)、輻射防護研究所 (Institut de Radioprotection et de SûretéNucléaire, IRSN)、巴黎天文台和法國極地研究與技術研究所 (French Institute for Polar Research and Technology, IFRTP) 等單位共同合作開發的劑量評估軟體。SIEVERT 為公開及定期更新之免費軟體，該軟體之劑量計算納入了各個飛機之飛行航線，經過數十次飛行模式的驗證與計算，以降低不同航空業者因制訂飛行計畫差異所造成的不確定度。另外，因太陽活動是動態性的進行緩慢的變化，故 IRSN 每個月會結合太陽活動進行重新計算並驗證空間中之網格預測模式，以進行軟體之更新【17】。

SIEVERT 之劑量評估方式為依飛機可到達之經度、緯度與高度，

將空域進行劃分，以經度 10°、緯度 2°與高度 304.8 公尺為一單元格，製成一 265,000 的網格，每個網格參考宇宙射線與太陽活動所造成之輻射予以一劑量率，如圖 4。因此，在天空各點之宇宙射線強度均可經由模擬計算獲得，透過飛機飛行位置與停留至單元格的時間所得到的劑量進行累積，即可估算人員於單趟飛航中可能接受之輻射劑量。

於 SIEVERT 線上版之飛航劑量評估軟體，其官網頁面依照順序需填選之飛行參數包括：起飛國家(Country)、起飛城市(City)、當地出發日期(Date)與當地出發時間(Time)、降落國家、降落城市、當地抵達日期與當地抵達時間等基本資料，如圖 5，經運算後即可獲得單趟航次所接受之宇宙輻射曝露劑量。

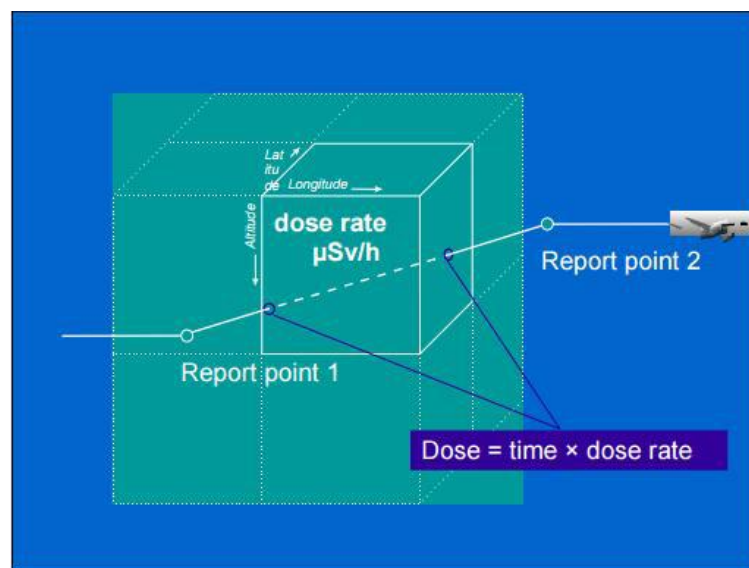


圖 4 SIEVERT 劑量評估軟體之劑量率模擬示意圖【17】

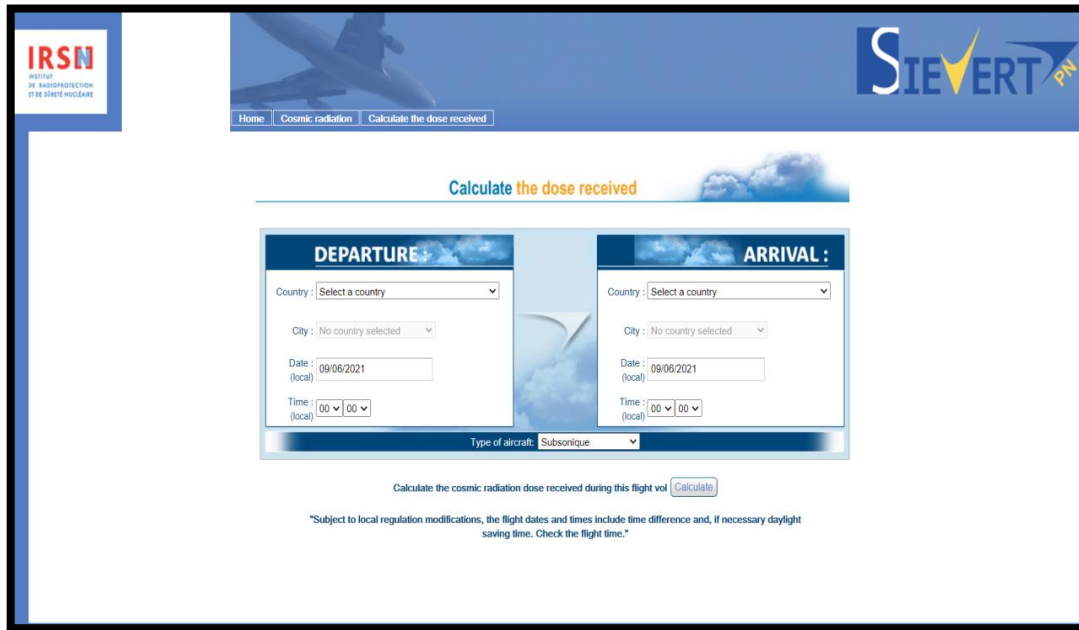


圖 5 SIEVERT 線上版之飛航評估軟體之官網頁面  
(<http://sievert-system.org>)

## 2. NTHU FDC

NTHU Flight Dose Calculator (python version)是一套方便使用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，與大氣層做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，且計算的結果已與其它飛航劑量評估程式驗證過，以確保程式的正確性。【18】

因國內能取得之飛航相關資料有限，無法獲得實際航班資料，而 NTHU FDC 亦針對此限制提供相對應之劑量運算模式，即大圓模式 (Great-circle)，以地表兩點間的最短飛行路徑假設條件下來計算航程之有效劑量及累積能譜。有關 NTHU FDC 之操作方式簡述如下，先選擇軟體 Orthodrome 頁面並依順序填選相關參數，包括：(1) 輸入出發 (Departure) 及降落 (Destination) 機場的 ICAO 機場代碼，並確認相對機場之經度、緯度及高度；(2) 點選 ICRU-84，此為針對垂直截止剛度依存性 (宇宙線地磁效應) 進行修正；(3) Year/Month 列表：選擇飛機起飛的年份與月份；(4) Speed/Altitude 列表：依 NTHU FDC 使用手冊建議【18】，對於國際線、兩岸線可使用 10500 公尺搭配 900 km/h；國內線為 4000 公尺搭配 500 km/h；(5) Radiation Components 列表：點選 Total，如圖 6，經運算後即可完成單趟航次所接受之宇宙輻射曝露劑量。

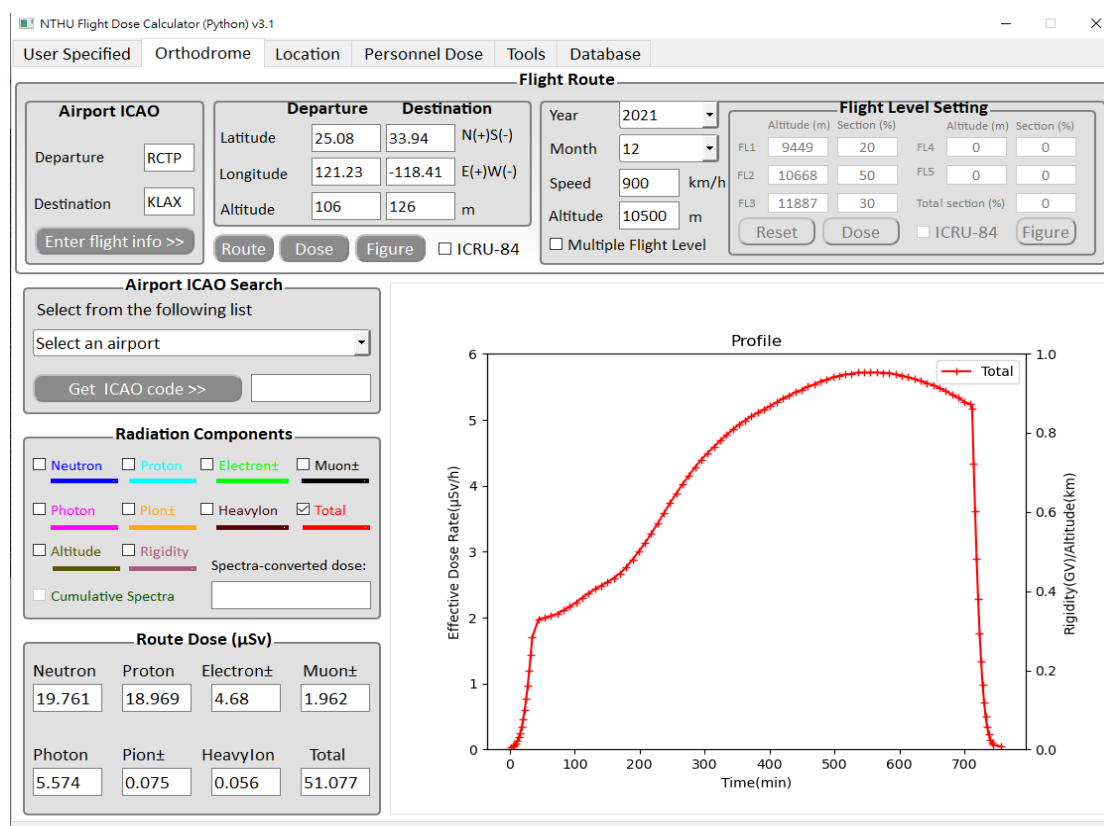


圖 6 NTHU FDC 飛航評估軟體之頁面【18】

### (三) 國人飛航行為調查

本中心民國 87 年度完成之國民輻射劑量評估報告，已針對飛航行為之宇宙輻射曝露劑量進行評估，當時之評估結果，飛航之國民輻射劑量( $E_{\text{Taiwan}}$ )為每年 3.16 微西弗，包含國內線 0.057 微西弗/年及國外線 3.1 微西弗/年。由交通部民航局的民航統計年報資料【19】可發現，近 20 年歷經社會、經濟、政治條件改變，國人對於飛航行為之目的與喜好產生改變，導致國際航線與國內航線於人數相較以往呈現不同之趨勢。過去僅針對國內線及國外線進行探討，現今，考量航次及重要性，擬依旅客飛航目的分為國內線、兩岸線與國際線三大類進行探討，下列將針對近十五年間國內線、兩岸線與國際線三個部分的旅客人次變化進行簡單的探究與分析。

國內線部分，由旅客人次的變化來看，自從民國 96 年高鐵通車後，國內航線旅客人次大幅下降，由最高接近每年 3,500 萬人次降為 1,100 萬人次左右，如圖 7 所示。國內的民航狀況有相當大的改變，最主要的改變在於過去旅客最多的台北高雄、台北台中、台北嘉義等航線，因旅客大幅減少已全面停飛，現在最主要的旅客人次來自於台北金門、台北馬公與高雄馬公等離島航線。

台灣開放兩岸探親是在民國 76 年，但一直到民國 92 年開始兩岸航線周末包機，航班人次才有較明顯的成長，民國 97 年開放陸客來台觀光，平日包機後搭機旅客持續成長，於民國 101 年以後定期航班旅客人次逐漸穩定，民國 103 年至 108 年，兩岸線與國內航線旅客人數差異不大，每年大約 1,100 萬人次，如圖 8 所示。

國際線部分，近幾年因國際運輸需求增加，國外旅遊風氣盛行等因素，國內外航空業者不斷加開航線，國人出國旅遊人數呈現直線攀升，促使國際航線的旅客人數明顯較 20 年前增加。與民國 85 年時

相比，當時國際航線人次約為 1,200 萬人次，而民國 108 年國際航線人次已達到 4,800 萬人次，如圖 8，約為四倍；國際航線部分也由過去不到 80 條發展到現在已有 119 條定期航線。綜合以上敘述，可發現台灣各機場進出旅客之趨勢變化主要是由國際線所影響。

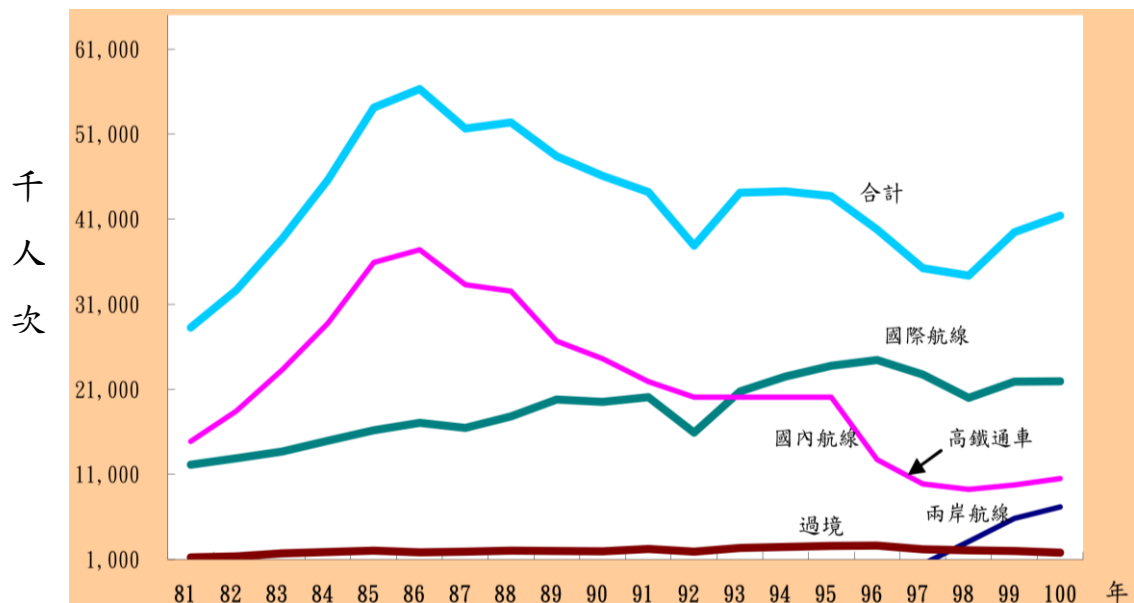


圖 7 台灣各機場進出旅客趨勢(民國 100 年「民航統計年報」)【19】

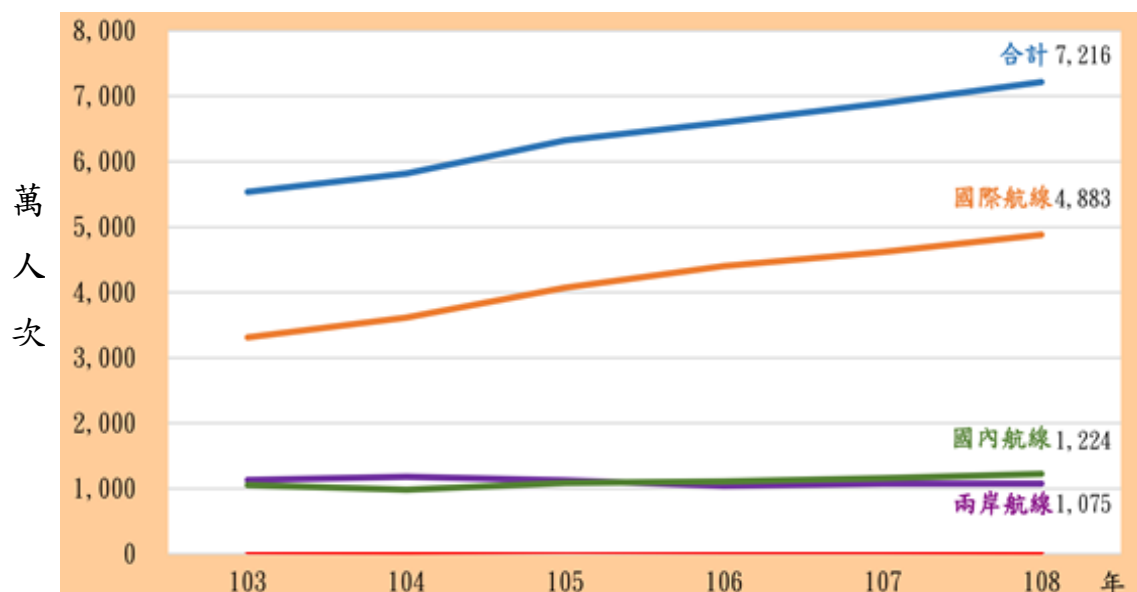


圖 8 台灣各機場進出旅客趨勢(民國 108 年「民航統計年報」)【19】

為進行民國 104 年至 108 年之民用航空宇宙輻射之國民劑量評估，本研究參考民航局的年報統計資料，針對民國 104 年至 108 年台灣各機場出入旅客人次進行了統計分析，以瞭解國人飛航行為之現況及近五年變化趨勢，如圖 9 所示。整體而言，民國 104 年至 108 年台灣各機場出入之總旅客人次是逐年增加的；分析結果可發現，國際線近五年人次不斷攀升，由 3,616 萬人次(民國 104 年)上升至 4,883 萬人次(民國 108 年)，平均約占每年台灣各機場出入旅客人次之 66%；國內線也有人次上的提升，由 980 萬人次(民國 104 年)上升至 1224 萬人次(民國 108 年)，約占每年台灣各機場出入旅客平均人次之 17%，應與近期離島旅遊興盛與推廣有關；兩岸線自推動的包機直航後旅客人次穩定，維持在 1,100 萬上下，整體而言人次變化不大，約占每年台灣各機場出入旅客平均人次之 17%。

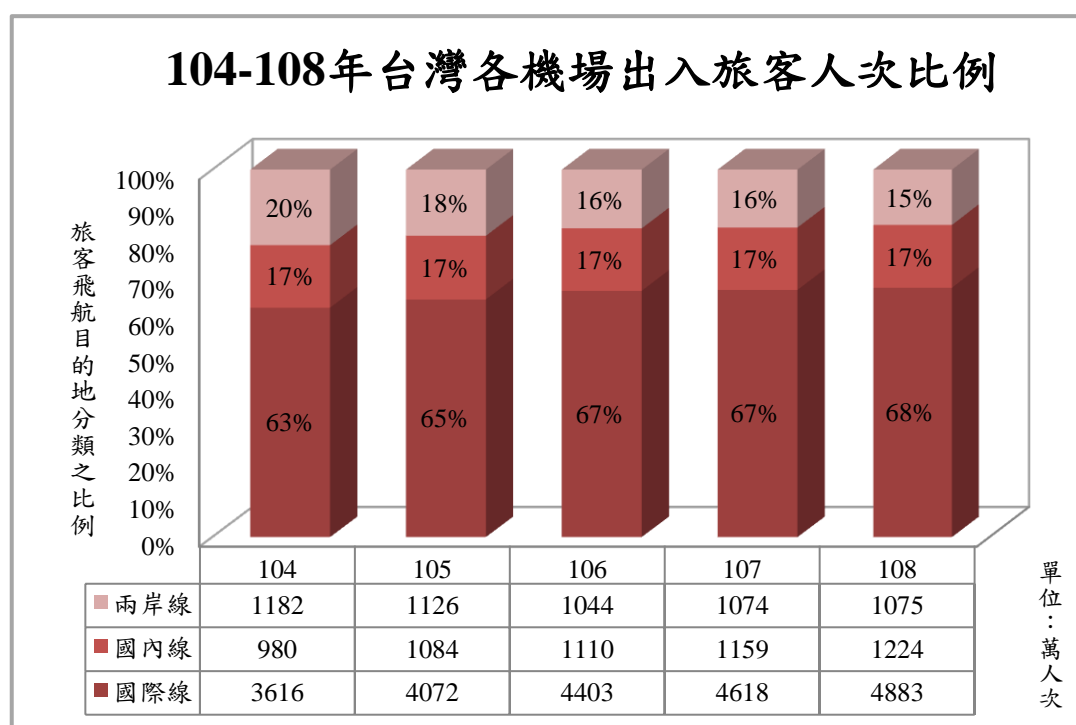


圖 9 民國 104-108 年台灣各機場出入旅客人次比例統計圖【19】

## 1. 國際線

將所有國際航線以民國 104 年到 108 年之所有定期航線(119 條)搭機年平均人數加以排序，結果如附表 1。由民國 87 年版之國民輻射劑量評估結果之旅客人次分布來看，20 年前旅客最多的 10 條航線為香港、澳門、東京、曼谷、洛杉磯、新加坡、大阪、胡志明市、舊金山與漢城，現在則以香港、東京、大阪、首爾(即漢城)、新加坡、曼谷、馬尼拉、澳門、胡志明市、琉球、吉隆坡等東南亞與東北亞航線為主。洛杉磯與舊金山雖仍是歐美航線最多旅客人數的航線，但其旅客人數現在僅排名 14 與 15，被馬尼拉、吉隆坡等航線取代。

於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；承上，依序統計由台灣往返香港為最多人次之航線，其年平均出入境人數約為 6,546,053 人次，依序累計總人次達 95 % 航線為由台灣往返英國倫敦，其年平均出入境人數約為 84,503 人次，以每年 41,680,451 之出入境人次進行評估，如圖 10 所示，本報告會以 NTHU FDC 軟體重新計算國際線之劑量，再與民國 110 年評估報告【3】中，以 SIEVERT 軟體計算國際線之劑量結果做比較。



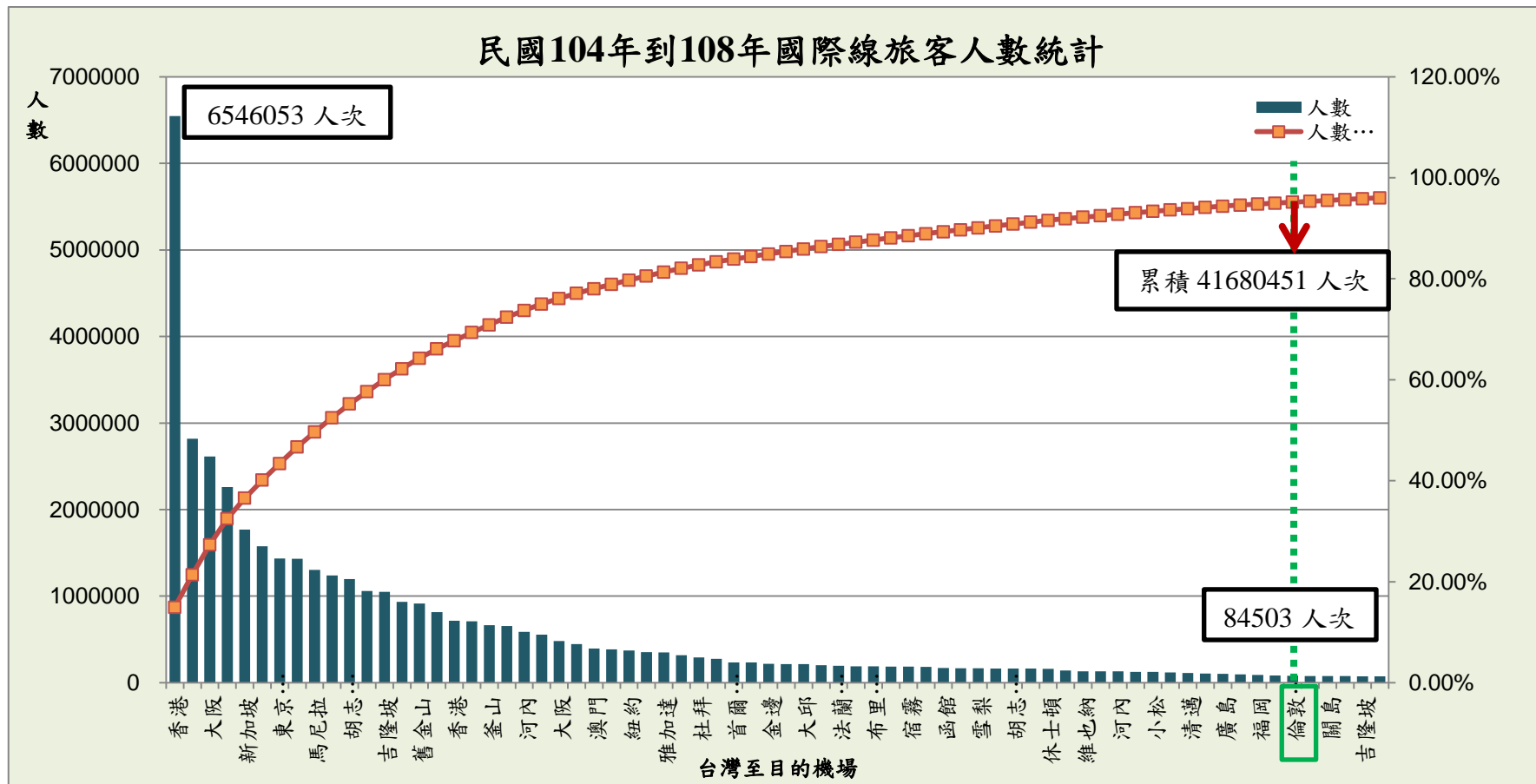


圖 10 民國 104-108 年國際線旅客年平均人數排序【19】

\*註：台灣機場包含桃園、高雄、台中、松山機場。

## 2. 兩岸線

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，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。將兩岸航線以民國 104 年到 108 年之搭機年平均人數加以排序，結果如附表 3。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；承上，依序統計由台灣往返上海浦東為最多人次之航線，其年平均出入境人數約為 1,758,917 人次，依序累計總人次達 95 % 航線為由台灣往返山西太原，其年平均出入境人數約為 24,821 人次，以每年平均 10,705,913 之出入境人次進行評估。另外，因 SIEVERT 軟體於大陸地區只提供上海、北京、廈門、深圳等部分航點，因此，將採用 NTHU FDC 軟體進行劑量評估，評估結果一併納入表 3 呈現。

### 3. 國內線

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。而國內航線依類別可分為西部航線、花東航線及離島航線，依民航局統計資料結果顯示如圖 11，搭乘人數以離島航線為主，其次為花東航線，西部航線因高鐵啟用及普及已於民國 108 年起全面停飛。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。將國內航線以民國 104 年到 108 年之搭機年平均人數加以排序，結果如附表 4。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；承上，依序統計由松山機場往返金門機場為最多人次之航線，其年平均出入境人數約為 2,501,558 人次，依序累計總人次達 100 % 航線為由高雄機場往返望安機場，其年平均出入境人數約為 3,071 人次，以每年平均 11,092,337 之出入境人次進行評估。另外，因 SIEVERT 軟體於台灣地區只提供桃園國際機場與高雄國際機場兩個航點，無法提供國內航班計算，因此，使用 NTHU FDC 軟體進行劑量評估，評估結果一併納入表 4 呈現。

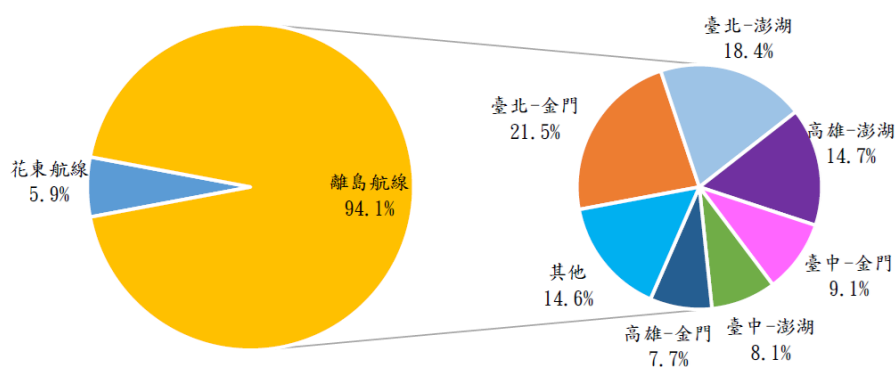


圖 11 民國 108 年民航局統計年報針對國內線載客人數市占率結果【19】

## 四、飛航劑量分析結果與劑量評估

### (一) 飛航劑量分析結果

依國人飛航行為調查結果，本研究以國際線 65 條航班、兩岸線 75 條航班與國內線 23 條航班(共計 163 條航班)為基礎，國際線部分利用 NTHU FDC 與 SIEVERT 之飛航劑量評估軟體進行劑量計算；兩岸線與國內線部分只採用 NTHU FDC 軟體計算之結果，因 NTHU FDC 軟體使用 ICAO 機場代碼搭配相對機場之經度、緯度方式進行機場定位，無特定地區航點不支援之限制，故可更全面且準確地針對國人飛航調查結果提供不同航班進行評估，其計算結果如下：

#### 1. 國際線

分別利用 NTHU FDC 及 SIEVERT 軟體計算 65 條國際線飛航劑量，計算結果如表 1 與表 2，排序方式為將所有國際航線以民國 104 年到 108 年定期航線搭機之年平均人數多寡由多到少進行排列，計算涵蓋人數達總人次 95 % 以上之主要航線。經 NTHU FDC 軟體計算後所得之有效劑量，去程的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )範圍為 0.9 微西弗(桃園至澳門、高雄至琉球)至 78.7 微西弗(桃園至美國紐約)；回程的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )範圍為 0.9 微西弗(澳門至桃園、琉球至高雄)至 79.2 微西弗(美國紐約至桃園)；總個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )為去程劑量加上回程劑量之結果，劑量範圍為 1.8 微西弗(桃園往返澳門、高雄往返琉球)至 157.9 微西弗(桃園往返美國紐約)。另經 SIEVERT 軟體計算後所得之有效劑量，去程的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )範圍為 1 微西弗(高雄至澳門)至 93.4 微西弗(桃園至美國休士頓)；回程的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )範圍為 1 微西弗(澳門至高雄)至 97.1 微西弗(美國紐約至桃園)；總個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )為去程劑量加上回程劑量之結果，劑量範圍為 2 微西弗(高雄往返澳門)至 189.2 微西弗(桃園至美國紐約)。

分別利用 NTHU FDC 與 SIEVERT 劑量評估軟體結合國人出國至各大洲之人次比例，計算之台灣熱門航線之空間劑量率比較圖，如圖 12 及圖 13，取 NTHU FDC 及 SIEVERT 兩個軟體計算結果之平均值如圖 14，以圖 14 之平均值來看，亞洲地區採用之往返地包含：香港、日本東京、韓國首爾、大陸北京、大陸上海、泰國曼谷、新加坡、印尼雅加達與杜拜等，共 9 個地點；其總個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )評估結果分別為 3.4 微西弗、10.5 微西弗、6.5 微西弗、8.8 微西弗、3.1 微西弗、10.6 微西弗、14.0 微西弗、16.9 微西弗與 31.9 微西弗。美洲地區採用之台灣往返地包含：美國紐約、洛杉磯、舊金山、休士頓與加拿大溫哥華等，共 5 個地點；其總個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )評估結果分別為 173.6 微西弗、107.7 微西弗、105.0 微西弗、164.1 微西弗與 112.7 微西弗。歐洲地區採用之往返地為德國法蘭克福與荷蘭阿姆斯特丹，共 2 個地點；其總個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )評估結果為 115.7 微西弗與 120.6 微西弗。大洋洲地區採用之往返地為澳洲雪梨，其總個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )評估結果為 38.4 微西弗。

比較不同區域航線之結果，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。

表 1 民國 104-108 年國際線經 NTHU FDC 飛航劑量評估軟體計算之結果

排序	台灣機場(ICAO)←→目的地機場(ICAO)				E <sub>EXP</sub> (微西弗)		E <sub>EXP</sub> (微西弗) (去程與回程)
					去程	回程	
1	桃園機場	RCTP	香港	VHHH	1.8	1.8	3.7
2	桃園機場	RCTP	東京成田	RJAA	4.5	4.5	8.9
3	桃園機場	RCTP	大阪	RJOO	3.3	3.3	6.5
4	桃園機場	RCTP	首爾仁川	RKSI	2.6	2.6	5.2
5	桃園機場	RCTP	新加坡	WSSS	6.9	6.9	13.8
6	桃園機場	RCTP	曼谷	VTBS	5.0	5.0	10.1
7	松山機場	RCSS	東京羽田	RJTT	4.2	4.2	8.4
8	高雄機場	RCKH	香港	VHHH	1.5	1.5	3.0
9	桃園機場	RCTP	馬尼拉	RPLL	1.8	1.8	3.5
10	桃園機場	RCTP	澳門	VMMC	0.9	0.9	1.8
11	桃園機場	RCTP	胡志明市	VVTS	4.3	4.3	8.7
12	桃園機場	RCTP	琉球	ROAH	1.5	1.5	2.9
13	桃園機場	RCTP	吉隆坡	WMKK	7.0	7.0	13.9
14	桃園機場	RCTP	洛杉磯	KLAX	50.3	50.6	100.9
15	桃園機場	RCTP	舊金山	KSFO	48.2	48.5	96.8
16	桃園機場	RCTP	福岡	RJFF	2.1	2.1	4.2
17	臺中機場	RCMQ	香港	VHHH	1.7	1.6	3.3
18	桃園機場	RCTP	名古屋	RJNA	3.7	3.7	7.3
19	桃園機場	RCTP	釜山	RKPK	2.3	2.2	4.5
20	桃園機場	RCTP	札幌	RJCC	6.4	6.4	12.7
21	桃園機場	RCTP	河內	VVNB	2.9	2.9	5.8
22	高雄機場	RCKH	東京成田	RJAA	5.1	5.1	10.1
23	高雄機場	RCKH	大阪	RJOO	3.9	3.9	7.8
24	桃園機場	RCTP	溫哥華	CYVR	49.5	49.8	99.3
25	高雄機場	RCKH	澳門	VMMC	1.6	1.6	3.1
26	桃園機場	RCTP	曼谷廊曼	VTBD	5.0	5.0	10.1
27	桃園機場	RCTP	紐約	KJFK	78.7	79.2	157.9
28	桃園機場	RCTP	峇里島	WADD	8.4	8.4	16.8
29	桃園機場	RCTP	雅加達	WIII	8.4	8.4	16.7
30	桃園機場	RCTP	阿姆斯特丹	EHAM	50.7	51.0	101.7
31	桃園機場	RCTP	杜拜	OMDB	15.5	15.5	31.0
32	高雄機場	RCKH	首爾仁川	RKSI	3.4	3.4	6.7

排序	台灣機場(ICAO)←→目的地機場(ICAO)				E <sub>EXP</sub> (微西弗)		E <sub>EXP</sub> (微西弗)
					去程	回程	(去程與回程)
33	松山機場	RCSS	首爾金浦	RKSS	2.7	2.6	5.3
34	桃園機場	RCTP	西雅圖	KSEA	50.1	50.5	100.7
35	桃園機場	RCTP	金邊	VDPP	4.5	4.5	9.1
36	高雄機場	RCKH	胡志明市	VVTS	3.7	3.7	7.4
37	桃園機場	RCTP	大邱	RKTN	2.4	2.4	4.8
38	桃園機場	RCTP	亞庇	WBKK	4.3	4.3	8.6
39	桃園機場	RCTP	法蘭克福	EDDF	48.6	49.0	97.6
40	桃園機場	RCTP	伊斯坦堡	LTBA	32.3	32.5	64.8
41	桃園機場	RCTP	布里斯本	YBBN	16.3	16.3	32.6
42	桃園機場	RCTP	巴黎	LFPG	52.2	52.6	104.8
43	桃園機場	RCTP	宿霧	RPVM	3.0	3.0	6.0
44	桃園機場	RCTP	東京羽田	RJTT	4.3	4.3	8.6
45	桃園機場	RCTP	函館	RJCH	5.9	5.9	11.8
46	桃園機場	RCTP	多倫多	CYYZ	74.8	75.4	150.2
47	桃園機場	RCTP	雪梨	YSSY	18.8	18.9	37.8
48	臺中機場	RCMQ	澳門	VMMC	1.7	1.7	3.5
49	臺中機場	RCMQ	胡志明市	VVTS	4.1	4.1	8.3
50	桃園機場	RCTP	安大略	KONT	51.3	51.7	102.9
51	桃園機場	RCTP	休士頓	KIAH	72.6	73.1	145.7
52	桃園機場	RCTP	仙台	RJSS	5.0	5.0	10.1
53	桃園機場	RCTP	維也納	LOWW	43.4	43.8	87.2
54	高雄機場	RCKH	琉球	ROAH	0.9	0.9	1.8
55	高雄機場	RCKH	河內	VVNB	2.6	2.6	5.2
56	高雄機場	RCKH	札幌	RJCC	7.0	7.0	14.1
57	桃園機場	RCTP	小松	RJNK	3.8	3.8	7.6
58	高雄機場	RCKH	曼谷	VTBS	4.5	4.5	9.1
59	桃園機場	RCTP	清邁	VTCC	4.9	4.9	9.8
60	高雄機場	RCKH	新加坡	WSSS	6.2	6.2	12.4
61	桃園機場	RCTP	廣島	RJOA	2.8	2.8	5.7
62	桃園機場	RCTP	芝加哥	KORD	72.7	73.3	146.1
63	高雄機場	RCKH	福岡	RJFF	2.8	2.8	5.6
64	高雄機場	RCKH	釜山	RKPK	3.0	3.0	5.9
65	桃園機場	RCTP	倫敦	EGKK	53.6	54.0	107.5

表 2 民國 104-108 年國際線經 SIEVERT 飛航劑量評估軟體計算之結果

排序	台灣機場←→目的地機場		航程時間 (平均飛行時間)		E <sub>EXP</sub> (微西弗)		E <sub>EXP</sub> (微西弗) (去程與回程)
			去程(hr)	回程(hr)	去程	回程	
1	桃園機場	香港	1.67	1.83	1.4	1.6	3.0
2	桃園機場	東京成田	3.42	3.75	5.6	6.4	12.0
3	桃園機場	大阪	2.67	2.92	3.9	4.5	8.4
4	桃園機場	首爾仁川	2.50	2.67	3.7	4.1	7.8
5	桃園機場	新加坡	4.50	4.75	6.9	7.3	14.2
6	桃園機場	曼谷	3.58	3.75	5.4	5.7	11.1
7	松山機場	東京羽田	2.67	3.42	4.0	5.7	9.7
8	高雄機場	香港	1.58	1.58	1.2	1.2	2.4
9	桃園機場	馬尼拉	2.0	2.25	2.7	2.7	5.4
10	桃園機場	澳門	1.83	1.83	1.6	1.6	3.2
11	桃園機場	胡志明市	4.67	3.25	7.1	4.6	11.7
12	桃園機場	琉球	1.42	1.58	1.3	1.7	3.0
13	桃園機場	吉隆坡	4.75	4.92	7.4	7.6	15.0
14	桃園機場	洛杉磯	13.83	13.25	58.2	56.3	114.5
15	桃園機場	舊金山	13.5	12.75	57.9	55.2	113.1
16	桃園機場	福岡	2.17	2.67	2.9	3.9	6.8
17	臺中機場	香港	1.67	1.75	1.4	1.5	2.9
18	桃園機場	名古屋	2.92	3.17	4.5	5.1	9.6
19	桃園機場	釜山	2.0	2.33	2.6	3.3	5.9
20	桃園機場	札幌	3.42	4.17	5.6	7.2	12.8
21	桃園機場	河內	2.92	2.5	4.0	3.2	7.2
22	高雄機場	東京成田	3.42	3.92	5.9	7.0	12.9
23	高雄機場	大阪	2.67	2.92	3.9	4.4	8.3
24	桃園機場	溫哥華	13.08	11.67	66.9	59.2	126.1
25	高雄機場	澳門	1.42	1.42	1.0	1.0	2.0
26	桃園機場	曼谷廊曼	3.58	3.92	5.4	6.0	11.4
27	桃園機場	紐約	14.67	15.83	92.1	97.1	189.2
28	桃園機場	峇里島	5.25	5.25	8.4	8.4	16.8
29	桃園機場	雅加達	5.33	5.42	8.4	8.6	17.0
30	桃園機場	阿姆斯特丹	13.0	12.0	75.1	64.3	139.4
31	桃園機場	杜拜	8.67	7.92	17.2	15.6	32.8
32	高雄機場	首爾仁川	2.5	2.67	3.6	4.0	7.6



排序	台灣機場←→目的地機場		航程時間 (平均飛行時間)		E <sub>EXP</sub> (微西弗)		E <sub>EXP</sub> (微西弗) (去程與回程)
			去程(hr)	回程(hr)	去程	回程	
33	松山機場	首爾金浦	2.33	2.42	3.3	3.6	6.9
34	桃園機場	西雅圖	12.5	12.0	62.5	60.2	122.7
35	桃園機場	金邊	3.25	3.0	4.7	4.2	8.9
36	高雄機場	胡志明市	3.17	2.33	4.4	2.9	7.3
37	桃園機場	大邱	2.08	2.42	2.7	3.5	6.2
38	桃園機場	亞庇	3.5	3.5	4.8	4.8	9.6
39	桃園機場	法蘭克福	13.67	12.5	69.7	64	133.7
40	桃園機場	伊斯坦堡	12.25	10.58	42.1	36.9	79.0
41	桃園機場	布里斯本	8.83	8.67	17.0	16.7	33.7
42	桃園機場	巴黎	13.83	13.17	72.8	69.7	142.5
43	桃園機場	宿霧	2.92	2.67	3.9	3.4	7.3
44	桃園機場	東京羽田	2.83	3.5	4.4	5.8	10.2
45	桃園機場	函館	3.42	4.17	5.6	7.2	12.8
46	桃園機場	多倫多	13.83	13.83	85.6	83.5	169.1
47	桃園機場	雪梨	9.25	9.17	19.5	19.4	38.9
48	臺中機場	澳門	1.67	1.5	1.4	1.1	2.5
49	臺中機場	胡志明市	3.5	3.33	5.0	4.7	9.7
50	桃園機場	安大略	14.37	15.17	60.5	64.2	124.7
51	桃園機場	休士頓	16.5	15.83	93.4	89	182.4
52	桃園機場	仙台	3.17	3.83	5.1	6.6	11.7
53	桃園機場	維也納	13.0	11.58	59.9	53.6	113.5
54	高雄機場	琉球	1.58	1.58	2.1	1.6	3.7
55	高雄機場	河內	2.58	2.28	3.3	2.8	6.1
56	高雄機場	札幌	4.0	4.58	6.6	7.9	14.5
57	桃園機場	小松	2.75	3.25	4.1	5.2	9.3
58	高雄機場	曼谷	3.5	3.42	5.1	5.0	10.1
59	桃園機場	清邁	4.0	3.75	6.3	5.8	12.1
60	高雄機場	新加坡	4.08	4.75	6.1	7.3	13.4
61	桃園機場	廣島	2.33	2.67	3.2	3.9	7.1
62	桃園機場	芝加哥	13.68	14.83	83.3	88.7	172.0
63	高雄機場	福岡	2.5	2.5	3.5	3.5	7.0
64	高雄機場	釜山	2.42	2.42	3.3	3.4	6.7
65	桃園機場	倫敦	14.0	13.08	74.3	72.0	146.3

### 台灣熱門航線之劑量比較圖

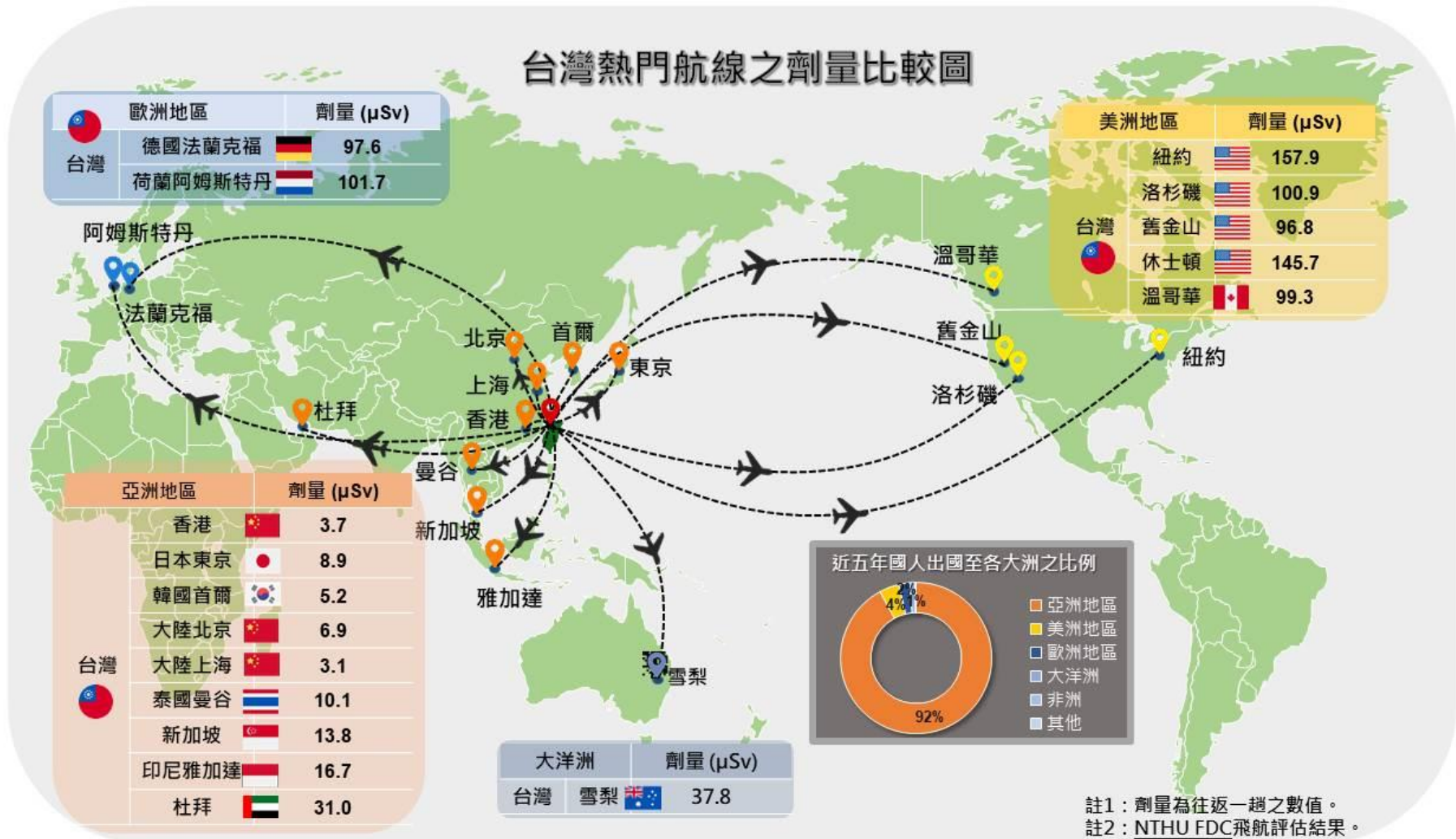


圖 12 以 NTHU FDC 之台灣熱門航線劑量比較圖(本研究整理)

### 台灣熱門航線之劑量比較圖

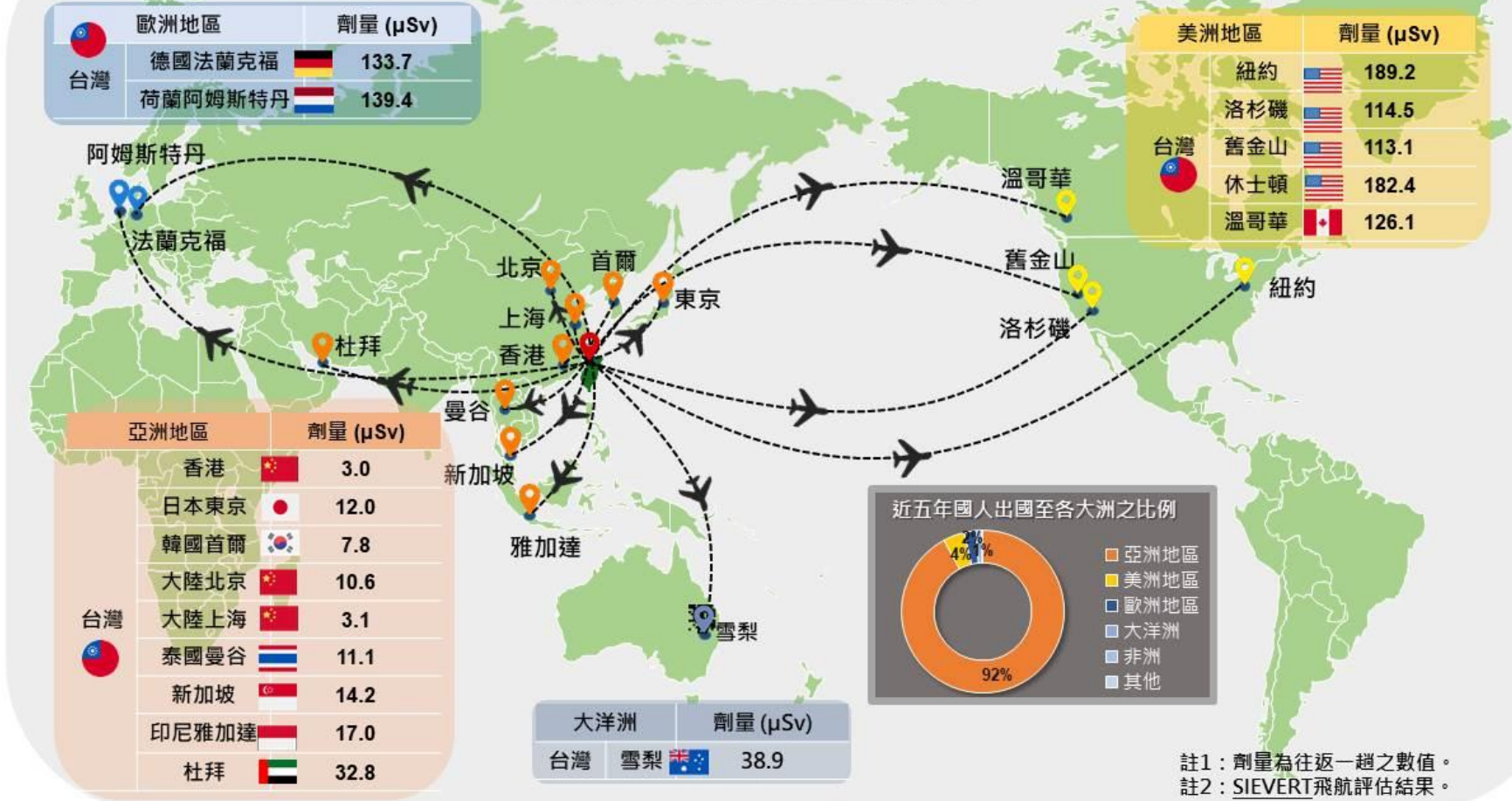


圖 13 以 SIEVERT 之台灣熱門航線劑量比較圖(本研究整理)



### 台灣熱門航線之劑量比較圖

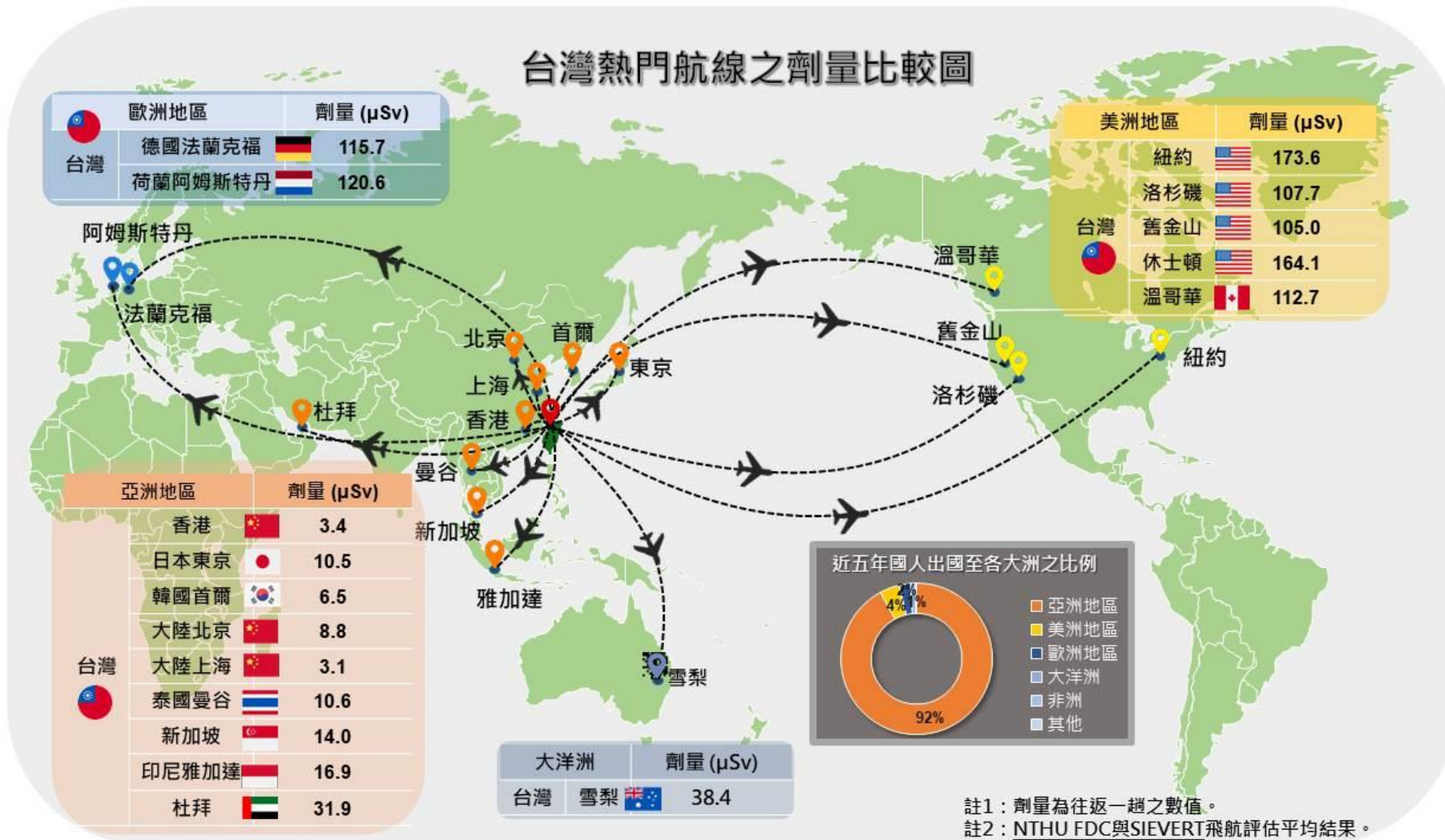


圖 14 以 NTHU FDC 與 SIEVERT 計算平均值之台灣熱門航線劑量比較圖(本研究整理)

## 2. 兩岸線

兩岸線飛航劑量分析結果如表 3，排序方式與國際線方法相同，採民國 104 年到 108 年之定期航線搭機年平均人數最多的前 75 條(涵蓋人數達總人次 95 % 以上之主要航線)進行劑量計算。個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )之結果，去程的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )範圍為 0.8 微西弗(桃園至福州、高雄至寧波)至 10.2 微西弗(桃園至烏魯木齊)；回程的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )範圍為 0.8 微西弗(福州至桃園、寧波至高雄)至 10.3 微西弗(烏魯木齊至桃園)；總個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )為去程劑量加上回程劑量之結果，劑量範圍為 1.7 微西弗(桃園或松山往返福州、高雄往返寧波)至 20.5 微西弗(桃園往返烏魯木齊)。

## 3. 國內線

國內線飛航劑量分析結果如表 4，排序方式如同國際線與兩岸線，採 104 年到 108 年之定期航線搭機年平均人次涵蓋 100 % 的航線，共計 23 條進行劑量計算。有效劑量之結果，去程的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )範圍為 0.05 微西弗(台東至綠島、馬公至七美)至 0.13 微西弗(高雄至金門)；回程的個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )範圍為 0.05 微西弗(綠島至台東、七美至馬公)至 0.13 微西弗(金門至高雄)；總個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )為去程劑量加上回程劑量之結果，劑量範圍為 0.11 微西弗(嘉義往返馬公、台東往返綠島、馬公往返七美)至 0.25 微西弗(高雄往返金門)。

綜上，為比較國人飛航種類，以不同軟體(NTHU FDC、SIEVERT)計算之差異，彙整假設條件及模式在國際線、兩岸線與國內線等飛航劑量分析結果如表 5。

表 3 民國 104-108 年兩岸線經 NTHU FDC 飛航劑量評估軟體計算之結果

排序	台灣機場(ICAO)←→目的地機場(ICAO)			E <sub>EXP</sub> (微西弗)		E <sub>EXP</sub> (微西弗) (去程與回程)	
				去程	回程		
1	桃園機場	RCTP	上海浦東	ZSPD	1.5	1.5	3.1
2	桃園機場	RCTP	北京	ZBAA	3.4	3.4	6.9
3	松山機場	RCSS	上海虹橋	ZSSS	1.5	1.5	3.1
4	桃園機場	RCTP	深圳	ZGSZ	1.8	1.8	3.7
5	桃園機場	RCTP	廣州	ZGGG	0.9	0.9	1.8
6	高雄機場	RCKH	上海浦東	ZSPD	1.2	1.2	2.4
7	桃園機場	RCTP	杭州	ZSHC	1.3	1.3	2.6
8	桃園機場	RCTP	廈門	ZSAM	1.1	1.1	2.3
9	桃園機場	RCTP	南京	ZSNJ	1.8	1.8	3.6
10	松山機場	RCSS	上海浦東	ZSPD	1.5	1.5	3.1
11	桃園機場	RCTP	無錫	ZSWX	1.6	1.6	3.3
12	桃園機場	RCTP	鄭州	ZHCC	2.1	2.1	4.2
13	桃園機場	RCTP	寧波	ZSNB	1.2	1.2	2.3
14	桃園機場	RCTP	成都	ZUUU	3.5	3.5	7.0
15	松山機場	RCSS	福州	ZSFZ	0.9	0.9	1.7
16	桃園機場	RCTP	瀋陽	ZYTX	3.8	3.8	7.6
17	桃園機場	RCTP	長沙	ZGHA	1.0	1.0	2.0
18	松山機場	RCSS	廈門	ZSAM	1.2	1.2	2.4
19	臺南機場	RCNN	武漢	ZHHH	1.5	1.5	2.9
20	桃園機場	RCTP	福州	ZSFZ	0.8	0.8	1.7
21	桃園機場	RCTP	青島	ZSQD	2.0	2.0	4.1
22	桃園機場	RCTP	西安	ZLXY	3.0	3.1	6.1
23	桃園機場	RCTP	哈爾濱	ZYHB	5.7	5.7	11.4
24	桃園機場	RCTP	濟南	ZSJN	2.4	2.3	4.7
25	桃園機場	RCTP	合肥	ZSOF	0.9	0.9	1.9
26	桃園機場	RCTP	重慶	ZUCK	2.8	2.8	5.6
27	桃園機場	RCTP	桂林	ZGKL	1.7	1.7	3.4
28	桃園機場	RCTP	海口	ZJHK	1.9	1.9	3.9
29	桃園機場	RCTP	南昌	ZSCN	1.5	1.5	3.1
30	桃園機場	RCTP	武漢	ZHHH	1.2	1.2	2.3
31	桃園機場	RCTP	石家莊	ZBSJ	3.0	3.0	6.0
32	桃園機場	RCTP	南寧	ZGNN	2.2	2.2	4.5

排序	台灣機場(ICAO)←→目的地機場(ICAO)				E <sub>EXP</sub> (微西弗)		E <sub>EXP</sub> (微西弗)
					去程	回程	(去程與回程)
33	松山機場	RCSS	天津	ZBTJ	3.1	3.1	6.1
34	桃園機場	RCTP	大連	ZYTL	2.9	2.9	5.8
35	桃園機場	RCTP	長春	ZYCC	4.7	4.7	9.4
36	桃園機場	RCTP	昆明	ZPPP	3.9	4.1	8.0
37	桃園機場	RCTP	煙臺	ZSYT	2.4	2.4	4.8
38	桃園機場	RCTP	貴陽	ZUGY	2.7	2.9	5.6
39	高雄機場	RCKH	杭州	ZSHC	0.9	0.9	1.9
40	桃園機場	RCTP	太原	ZBYN	3.3	3.4	6.6
41	松山機場	RCSS	重慶	ZUCK	2.8	2.9	5.7
42	桃園機場	RCTP	溫州	ZSWZ	1.1	1.1	2.3
43	松山機場	RCSS	成都	ZUUU	3.6	3.6	7.2
44	高雄機場	RCKH	廈門	ZSAM	1.1	1.1	2.2
45	高雄機場	RCKH	武漢	ZHHH	1.6	1.6	3.1
46	高雄機場	RCKH	福州	ZSFZ	1.3	1.3	2.6
47	桃園機場	RCTP	張家界	ZGDY	1.8	1.8	3.6
48	桃園機場	RCTP	呼和浩特	ZBHH	4.4	4.6	9.0
49	桃園機場	RCTP	泉州	ZSQZ	1.0	1.0	2.0
50	桃園機場	RCTP	烏魯木齊	ZWWW	10.2	10.3	20.5
51	桃園機場	RCTP	蘭州	ZLLL	4.8	5.0	9.7
52	桃園機場	RCTP	徐州	ZSXZ	1.6	1.6	3.2
53	桃園機場	RCTP	黃山	ZSTX	1.3	1.3	2.6
54	高雄機場	RCKH	深圳	ZGSZ	1.5	1.5	3.0
55	高雄機場	RCKH	鄭州	ZHCC	2.6	2.6	5.2
56	松山機場	RCSS	杭州	ZSHC	1.3	1.3	2.6
57	桃園機場	RCTP	天津	ZBTJ	3.1	3.0	6.1
58	臺中機場	RCMQ	上海浦東	ZSPD	1.8	1.8	3.6
59	高雄機場	RCKH	南京	ZSNJ	1.4	1.4	2.8
60	高雄機場	RCKH	南昌	ZSCN	0.9	0.9	1.8
61	高雄機場	RCKH	長沙	ZGHA	1.2	1.2	2.4
62	桃園機場	RCTP	鹽城	ZSYN	1.2	1.2	2.3
63	臺中機場	RCMQ	深圳	ZGSZ	1.7	1.6	3.3
64	桃園機場	RCTP	麗江	ZPLJ	4.6	4.8	9.5
65	臺中機場	RCMQ	廣州	ZGGG	1.7	1.7	3.5

排序	台灣機場(ICAO)←→目的地機場(ICAO)				E <sub>EXP</sub> (微西弗)		E <sub>EXP</sub> (微西弗)
					去程	回程	(去程與回程)
66	高雄機場	RCKH	寧波	ZSNB	0.8	0.8	1.7
67	高雄機場	RCKH	廣州	ZGGG	1.6	1.6	3.3
68	桃園機場	RCTP	銀川	ZLIC	4.6	4.7	9.3
69	松山機場	RCSS	武漢	ZHHH	1.2	1.2	2.5
70	桃園機場	RCTP	常州	ZSCG	1.8	1.8	3.6
71	臺中機場	RCMQ	太原	ZBYN	3.5	3.5	7.0
72	桃園機場	RCTP	三亞	ZJSY	2.4	2.4	4.8
73	高雄機場	RCKH	昆明	ZPPP	3.8	4.0	7.7
74	桃園機場	RCTP	南通	ZSNT	1.8	1.8	3.6
75	松山機場	RCSS	太原	ZBYN	3.3	3.4	6.7



表 4 民國 104-108 年國內線經 NTHU FDC 飛航劑量評估軟體計算之結果

排序	台灣機場(ICAO)←→目的地機場(ICAO)			E <sub>EXP</sub> (微西弗)		E <sub>EXP</sub> (微西弗) (去程與回程)	
				去程	回程		
1	松山機場	RCSS	金門機場	RCBS	0.07	0.07	0.13
2	松山機場	RCSS	馬公機場	RCQC	0.11	0.11	0.22
3	高雄機場	RCKH	馬公機場	RCQC	0.08	0.08	0.17
4	台中機場	RCMQ	金門機場	RCBS	0.10	0.10	0.20
5	高雄機場	RCKH	金門機場	RCBS	0.13	0.13	0.25
6	台中機場	RCMQ	馬公機場	RCQC	0.08	0.08	0.17
7	松山機場	RCSS	台東機場	RCFN	0.11	0.11	0.23
8	松山機場	RCSS	南竿機場	RCFG	0.08	0.08	0.16
9	台南機場	RCNN	馬公機場	RCQC	0.06	0.06	0.12
10	台南機場	RCNN	金門機場	RCBS	0.11	0.11	0.21
11	松山機場	RCSS	北竿機場	RCMT	0.08	0.08	0.16
12	松山機場	RCSS	花蓮機場	RCYU	0.08	0.08	0.15
13	台東機場	RCFN	蘭嶼機場	RCLY	0.06	0.06	0.13
14	台中機場	RCMQ	南竿機場	RCFG	0.10	0.10	0.19
15	高雄機場	RCKH	花蓮機場	RCYU	0.08	0.08	0.16
16	嘉義機場	RCKU	金門機場	RCBS	0.10	0.10	0.19
17	嘉義機場	RCKU	馬公機場	RCQC	0.06	0.06	0.11
18	台東機場	RCFN	綠島機場	RCGI	0.05	0.05	0.11
19	金門機場	RCBS	馬公機場	RCQC	0.06	0.06	0.12
20	高雄機場	RCKH	七美機場	RCCM	0.07	0.07	0.14
21	台中機場	RCMQ	花蓮機場	RCYU	0.07	0.07	0.14
22	馬公機場	RCQC	七美機場	RCCM	0.05	0.05	0.11
23	高雄機場	RCKH	望安機場	RCWA	0.08	0.08	0.16

表 5 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	SIEVERT	
國際線	$E_{EXP}$ (微西弗) (去程)	0.9~78.7	1~93.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>2015 年 5 月 20 日為出發日。</li> <li>NTHU FDC 之 Altitude / Speed 採用 10500 公尺搭配 900 km/h；SIEVERT 採內建預設高度，不需要飛行速度，但要求使用者輸入出發與抵達時間。</li> </ul>
	$E_{EXP}$ (微西弗) (回程)	0.9~79.2	1~97.1	
	$E_{EXP}$ (微西弗) (去程與回程)	1.8~157.9	2~189.2	
兩岸線	$E_{EXP}$ (微西弗) (去程)	0.8~10.2	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>2015 年 5 月 20 日為出發日。</li> <li>NTHU FDC 之 Altitude / Speed 採用 10500 公尺搭配 900 km/h。</li> </ul>
	$E_{EXP}$ (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	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>2015 年 5 月 20 日為出發日。</li> <li>NTHU FDC 之 Altitude / Speed 採用 4000 公尺搭配 500 km/h。</li> </ul>
	$E_{EXP}$ (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。

## (二) NTHU FDC 與 SIEVERT 結果差異分析

因 NTHU FDC 之飛航評估軟體能提供台灣地區較完整之航點，也能更在地化提供完整的飛航資訊，故本研究於兩岸線與國內線採用 NTHU FDC 飛航評估軟體進行民用航空宇宙輻射之國民劑量評估，於國際線部分則以 NTHU FDC 軟體為主，SIEVERT 軟體驗證的方式作為劑量評估之結果。經 NTHU FDC 與 SIEVERT 軟體分析比較國際線 65 條(涵蓋人數達總人次 95 % 以上之主要航線)單趟之平均有效劑量(單位：微西弗)結果，如表 6 所示，兩者之劑量評估差異值結果介於-43 % 到 56 %；其中，以高雄飛琉球(-43 %)與高雄飛澳門(56 %)之差異最大。而造成劑量差異來源可由以下四點說明之：

1. **飛航劑量評估軟體本身差異**：因高空之宇宙射線成分複雜，較難以實際量測方式取得，一般會以模擬方式計算飛機在宇宙輻射產生的輻射場，常見之輻射遷移程式如：LUIN、FLUKA、GEANT、LAHET、MCNPX 與 MARS 等【20-22】。由法國開發之 SIEVERT 飛航評估軟體採用的是 LUIN 的輻射遷移程式；而我國開發之 NTHU FDC 飛航評估軟體則採用 FLUKA，以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。兩者飛航評估軟體使用不同的輻射遷移程式且內建設定參數也存在差異，故造成評估結果之誤差的來源之一；另外，台灣的地理位置接近赤道，受到宇宙射線以及地磁緯度等影響，與歐美等國主要城市差異甚大，若使用他國資訊直接延伸外插到低地磁緯度區域亦造成差異。在輻射防護簡訊第 151 期【23】，主題為台灣熱門航線的飛航劑量文章中提及，使用 NTHU FDC 開發之飛航評估軟體進行飛航劑量評估會更切合台灣之狀況。
2. **劑量評估軟體提供航點之限制**：SIVERT 是法國開發之軟體，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，如台灣地區僅有桃園機場、高雄機場等兩個機場；經評估，台灣因所處緯度低且以鄰近機場套入計算結果可能差異不大，故採以鄰近機場之評估結果替代，因此，民國 110 年評估報告【3】以 SIEVERT 評估之假設條件：台灣之松山機場以桃園機場替代，共 2 條航線(松山往返東京及往返首爾)、台中機場以桃園機場替代，共 3 條航線(台中往返香港、往返澳門及往返胡志明市)；而 NTHU FDC 軟體採機場 ICAO 機場代碼，並確認相對機場之經度、緯度及高度等方式進行航點定位，能完整提供各國國際線及國內線之機場。本研究另以 NTHU FDC 軟體於相同條件下，將上述替代機場方式進行計算，結果如表 7；松山飛往東京及首爾，改為桃園飛往東京及首爾，其差異值分別為-2 %及-1 %，誤差尚可接受；然而，台中飛往香港、澳門及胡志明市，出發地改為桃園，其差異值為-10 %、89 %及-5 %，就明顯差異很多，因此，以替代機場的方式進行飛航劑量之評估，仍需考量誤差過大的問題。

3. **飛機飛航時間差異**：SIEVERT 劑量評估軟體需自行輸入飛機飛航時間，因評估對象為一般民眾，以旅遊人次之航班為主，不限國籍航空，所以，飛航時間採同航線之平均飛行時間進行計算。然而，不同航空公司會有不同的飛行時間與飛行路線，以台灣飛香港為例：台灣飛至香港時間約介於 1.5-1.92 小時之間，若以 1.5 小時代入計算，其個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )為 1.1 微西弗；另以 1.92 小時代入計算之，其個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )為 1.8 微西弗，兩者差異達 64 %，其中，又以短程航班時間造成之差異較大，故以 SIEVERT 評估時，飛航時間會採用平均時間作為代表；而 NTHU FDC 軟體之大圓模式已設定為兩點間之最短行程，則以內建方式進行飛航時間之計算，無需輸入航段之飛航時間，因此，較無航線選擇差異造成之時間誤差。

4. **實際航線或最短飛行路徑之選擇**：因國內能取得之飛航相關資料有限，無法獲得實際航班資料，NTHU FDC 已針對此限制提供相對應之劑量運算模式，以大圓模式(Great-circle)，即地表兩點間的最短飛行路徑假設條件下，計算有效劑量及累積能譜。依我國國立清華大學對 NTHU FDC 飛航劑量評估軟體研究成果【24】，使用 NTHU FDC 軟體針對實際航班與大圓航線劑量計算之結果進行比較，該研究航線涵蓋兩岸線及國際線之歐美線、東南亞線、東北亞線，航線包含：阿姆斯特丹、紐約、法蘭克福、洛杉磯、雪梨、杜拜、新加坡、東京、北京與香港等，詳如表 8，其實際航線劑量評估結果最低為 1.2 微西弗 (香港)，最高為 93.4 微西弗 (阿姆斯特丹)；大圓航線劑量評估結果最低為 0.7 微西弗 (香港)，最高為 67.9 微西弗 (阿姆斯特丹)，兩者之劑量評估差異值結果介於-42.3 %到 4.5 %，可以發現使用大圓模式所計算之劑量大多小於實際航班所計算之劑量，因大圓模式為兩點間最短飛行距離路徑，雖有劑量低估之情形與限制，但於文獻中表明，在無法取得實際航班之情況下，使用大圓航線是最好的結果，大致情境是合理的，且 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，因此，針對國際線部分，將採 NTHU FDC 軟體劑量評估結果作為國際線之劑量代表。

綜上，無論是飛航劑量評估軟體本身差異、軟體本身內建之選擇、飛航時間選取造成之差異、實際航線與大圓航線差異等都可能造成劑量計算結果之誤差，綜合軟體之適用性，故於國際線、兩岸線、國內線皆採用 NTHU FDC 飛航劑量軟體評估所得之劑量進行國民輻射劑量之評估。

表 6 NTHU FDC 與 SIEVERT 劑量評估軟體對台灣國際航線之單趟平均劑量計算結果比較

排序	台灣機場←→目的地機場		SIEVERT	NTHU FDC	差異值
			單趟之平均個人有效劑量(微西弗)	單趟之平均個人有效劑量(微西弗)	
1	桃園機場	香港	1.5	1.8	23%
2	桃園機場	東京(成田)	6.0	4.5	-26%
3	桃園機場	大阪	4.2	3.3	-22%
4	桃園機場	首爾(仁川)	3.9	2.6	-33%
5	桃園機場	新加坡	7.1	6.9	-3%
6	桃園機場	曼谷	5.6	5.0	-9%
7	松山機場	東京(羽田)	4.9	4.2	-13%
8	高雄機場	香港	1.2	1.5	23%
9	桃園機場	馬尼拉	2.7	1.8	-35%
10	桃園機場	澳門	1.6	0.9	-42%
11	桃園機場	胡志明市	5.9	4.3	-26%
12	桃園機場	琉球	1.5	1.5	-2%
13	桃園機場	吉隆坡	7.5	7.0	-7%
14	桃園機場	洛杉磯	57.3	50.4	-12%
15	桃園機場	舊金山	56.6	48.4	-14%
16	桃園機場	福岡	3.4	2.1	-36%
17	台中機場	香港	1.5	1.6	14%
18	桃園機場	名古屋	4.8	3.7	-24%
19	桃園機場	釜山	3.0	2.3	-24%
20	桃園機場	札幌	6.4	6.4	0%
21	桃園機場	河內	3.6	2.9	-19%
22	高雄機場	東京(成田)	6.5	5.1	-22%
23	高雄機場	大阪	4.2	3.9	-6%
24	桃園機場	溫哥華	63.1	49.7	-21%
25	高雄機場	澳門	1.0	1.6	56%
26	桃園機場	曼谷	5.7	5.0	-12%
27	桃園機場	紐約	94.6	78.9	-17%
28	桃園機場	峇里島	8.4	8.4	0%
29	桃園機場	雅加達	8.5	8.4	-2%
30	桃園機場	阿姆斯特丹	69.7	50.8	-27%
31	桃園機場	杜拜	16.4	15.5	-6%
32	高雄機場	首爾(仁川)	3.8	3.4	-12%

33	松山機場	首爾(金浦)	3.5	2.6	-23%
34	桃園機場	西雅圖	61.4	50.3	-18%
35	桃園機場	金邊	4.5	4.5	2%
36	高雄機場	胡志明市	3.7	3.7	2%
37	桃園機場	大邱	3.1	2.4	-22%
38	桃園機場	亞庇	4.8	4.3	-10%
39	桃園機場	法蘭克福	66.9	48.8	-27%
40	桃園機場	伊斯坦堡	39.5	32.4	-18%
41	桃園機場	布里斯本	16.9	16.3	-3%
42	桃園機場	巴黎	71.3	52.4	-26%
43	桃園機場	宿霧	3.7	3.0	-18%
44	桃園機場	東京(羽田)	5.1	4.3	-16%
45	桃園機場	函館	6.4	5.9	-8%
46	桃園機場	多倫多	84.6	75.1	-11%
47	桃園機場	雪梨	19.5	18.9	-3%
48	台中機場	澳門	1.3	1.7	39%
49	台中機場	胡志明市	4.9	4.1	-15%
50	桃園機場	安大略	62.4	51.5	-17%
51	桃園機場	休士頓	91.2	72.8	-20%
52	桃園機場	仙台	5.9	5.0	-14%
53	桃園機場	維也納	56.8	43.6	-23%
54	高雄機場	琉球	1.9	0.9	-43%
55	高雄機場	河內	3.1	2.6	-16%
56	高雄機場	札幌	7.3	7.0	-3%
57	桃園機場	小松	4.7	3.8	-19%
58	高雄機場	曼谷	5.1	4.5	-10%
59	桃園機場	清邁	6.1	4.9	-19%
60	高雄機場	新加坡	6.7	6.2	-7%
61	桃園機場	廣島	3.6	2.8	-20%
62	桃園機場	芝加哥	86.0	73.0	-15%
63	高雄機場	福岡	3.5	2.8	-20%
64	高雄機場	釜山	3.4	3.0	-12%
65	桃園機場	倫敦	73.2	53.8	-27%

註 1：單趟之平均個人有效劑量為有效劑量之去程與回程的平均

註 2：差異值為(NTHU FDC 劑量值-SIEVERT 劑量值)/ SIEVERT 劑量值。

表 7 NTHU FDC 軟體進行原機場與替代機場個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )計算結果比較

目的地機場	台灣機場	$E_{EXP}$ (微西弗)	替代機場	$E_{EXP}$ (微西弗)	差異值
東京	松山機場	4.2	桃園機場	4.3	-2%
首爾		2.7		2.7	-1%
香港	台中機場	1.7	桃園機場	1.8	-10%
澳門		1.7		0.9	89%
胡志明市		4.1		4.3	-5%

註：差異值為(台灣機場個人年有效劑量值-替代機場個人年有效劑量值)/替代機場個人年有效劑量值。

表 8 NTHU FDC 軟體進行實際航班與大圓航線劑量計算結果比較

台灣機場	目的地機場	實際航班 (微西弗)	大圓航線 (微西弗)	差異值
桃園機場	阿姆斯特丹	93.4	67.9	-27.4%
桃園機場	紐約	69.6	66.2	-5.0%
桃園機場	法蘭克福	65.9	45.9	-30.3%
桃園機場	洛杉磯	42.7	44.7	4.5%
桃園機場	雪梨	19.9	18.1	-9.2%
桃園機場	杜拜	16.5	14.9	-9.5%
桃園機場	新加坡	7.0	6.2	-11.3%
桃園機場	東京	5.1	4.5	-11.8%
桃園機場	北京	3.8	2.7	-31.0%
桃園機場	香港	1.2	0.7	-42.3%

註：差異值為(大圓航線個人年有效劑量值-實際航班個人年有效劑量值)/實際航班個人年有效劑量值。



## 五、 民用航空曝露之國民輻射劑量評估

### (一) 國民輻射劑量評估結果

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，國際線 65 條經 NTHU FDC 軟體計算結果如表 9，合計為 380 人-西弗/年。但依國人飛航行為調查結果，國際線每年之往返出入境人次之計算涵蓋本國人與外國之統計結果，為針對本國人進行飛航宇宙所造成之國民劑量評估，參考內政部移民署【25】的統計資料，本國人民國 104 年至 108 年之出入境比率約占整體之 0.58。因此，採用 NTHU FDC 軟體計算之集體有效劑量(S)為 380 人-西弗/年  $\times$  0.58  $\div$  0.9517 (涵蓋 95.17 % 人次回推) = 231.59 (人-西弗/年)；兩岸線劑量推估方式與國際線相同，兩岸線 75 條計算結果如表 10，合計為 21.5 人-西弗/年，故集體有效劑量(S)為 21.5 人-西弗/年  $\times$  0.58  $\div$  0.9509 (涵蓋 95.09 % 人次回推) = 13.12 (人-西弗/年)。國內線劑量推估方式亦與前兩者相同，但涵蓋 100 % 人次進行評估，故無需進行人次回推，國內線 23 條計算結果如表 11，集體有效劑量(S)為 1.0 人-西弗/年。

最後，彙整內政部戶政司【26】民國 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 245.7 人-西弗/年，再除以總人口數，即可獲得民用航空宇宙造成國人之平均國民輻射年劑量為 0.010 毫西弗/年。

表 9 國際線經 NTHU FDC 計算所得之集體有效劑量結果

排序	台灣機場←→目的地機場		年平均 出入境 人次	單趟之平均個 人有效劑量 (微西弗)	集體有效劑量 (人-西弗/年)
1	桃園機場	香港	6546053	1.8	12.1
2	桃園機場	東京(成田)	2817463	4.5	12.6
3	桃園機場	大阪	2612581	3.3	8.6
4	桃園機場	首爾(仁川)	2260484	2.6	5.9
5	桃園機場	新加坡	1767961	6.9	12.2
6	桃園機場	曼谷	1574728	5.0	7.9
7	松山機場	東京(羽田)	1436323	4.2	6.1
8	高雄機場	香港	1433327	1.5	2.1
9	桃園機場	馬尼拉	1302589	1.8	2.3
10	桃園機場	澳門	1238236	0.9	1.1
11	桃園機場	胡志明市	1196670	4.3	5.2
12	桃園機場	琉球	1058803	1.5	1.6
13	桃園機場	吉隆坡	1048965	7.0	7.3
14	桃園機場	洛杉磯	933784	50.4	47.1
15	桃園機場	舊金山	914193	48.4	44.2
16	桃園機場	福岡	815942	2.1	1.7
17	台中機場	香港	714444	1.6	1.2
18	桃園機場	名古屋	709144	3.7	2.6
19	桃園機場	釜山	665084	2.3	1.5
20	桃園機場	札幌	655555	6.4	4.2
21	桃園機場	河內	587080	2.9	1.7
22	高雄機場	東京(成田)	555102	5.1	2.8
23	高雄機場	大阪	482522	3.9	1.9
24	桃園機場	溫哥華	446122	49.7	22.2
25	高雄機場	澳門	395863	1.6	0.6
26	桃園機場	曼谷	384792	5.0	1.9
27	桃園機場	紐約	370924	78.9	29.3
28	桃園機場	峇里島	352619	8.4	3.0
29	桃園機場	雅加達	348332	8.4	2.9
30	桃園機場	阿姆斯特丹	316468	50.8	16.1
31	桃園機場	杜拜	292227	15.5	4.5

32	高雄機場	首爾(仁川)	275640	3.4	0.9
33	松山機場	首爾(金浦)	232988	2.6	0.6
34	桃園機場	西雅圖	232675	50.3	11.7
35	桃園機場	金邊	216904	4.5	1.0
36	高雄機場	胡志明市	214309	3.7	0.8
37	桃園機場	大邱	213601	2.4	0.5
38	桃園機場	亞庇	202921	4.3	0.9
39	桃園機場	法蘭克福	194002	48.8	9.5
40	桃園機場	伊斯坦堡	189084	32.4	6.1
41	桃園機場	布里斯本	188888	16.3	3.1
42	桃園機場	巴黎	187062	52.4	9.8
43	桃園機場	宿霧	185797	3.0	0.6
44	桃園機場	東京(羽田)	183183	4.3	0.8
45	桃園機場	函館	169436	5.9	1.0
46	桃園機場	多倫多	167065	75.1	12.5
47	桃園機場	雪梨	166593	18.9	3.1
48	台中機場	澳門	164965	1.7	0.3
49	台中機場	胡志明市	163002	4.1	0.7
50	桃園機場	安大略	162623	51.5	8.4
51	桃園機場	休士頓	159128	72.8	11.6
52	桃園機場	仙台	140320	5.0	0.7
53	桃園機場	維也納	132215	43.6	5.8
54	高雄機場	琉球	130574	0.9	0.1
55	高雄機場	河內	129847	2.6	0.3
56	高雄機場	札幌	125842	7.0	0.9
57	桃園機場	小松	125262	3.8	0.5
58	高雄機場	曼谷	120068	4.5	0.5
59	桃園機場	清邁	112857	4.9	0.6
60	高雄機場	新加坡	106526	6.2	0.7
61	桃園機場	廣島	101202	2.8	0.3
62	桃園機場	芝加哥	97145	73.0	7.1
63	高雄機場	福岡	90867	2.8	0.3
64	高雄機場	釜山	84503	3.0	0.3
65	桃園機場	倫敦	78974	53.8	4.2
	合計				380

表 10 兩岸線經 NTHU FDC 計算所得之集體有效劑量結果

排序	台灣機場←→目的地機場		年平均 出入境 人次	單趟之平均個 人有效劑量 (微西弗)	集體有效劑量 (人-西弗/年)
1	桃園機場	上海浦東	1758917	1.5	2.7
2	桃園機場	北京	752933	3.4	2.6
3	松山機場	上海虹橋	730066	1.5	1.1
4	桃園機場	深圳	560716	1.8	1.0
5	桃園機場	廣州	473076	0.9	0.4
6	高雄機場	上海浦東	292850	1.2	0.4
7	桃園機場	杭州	281978	1.3	0.4
8	桃園機場	廈門	275384	1.1	0.3
9	桃園機場	南京	258492	1.8	0.5
10	松山機場	上海浦東	212402	1.5	0.3
11	桃園機場	無錫	198024	1.6	0.3
12	桃園機場	鄭州	191171	2.1	0.4
13	桃園機場	寧波	179792	1.2	0.2
14	桃園機場	成都	167472	3.5	0.6
15	松山機場	福州	157848	0.9	0.1
16	桃園機場	瀋陽	155539	3.8	0.6
17	桃園機場	長沙	154941	1.0	0.2
18	松山機場	廈門	148382	1.2	0.2
19	台南機場	武漢	147689	1.5	0.2
20	桃園機場	福州	140671	0.8	0.1
21	桃園機場	青島	139858	2.0	0.3
22	桃園機場	西安	134306	3.0	0.4
23	桃園機場	哈爾濱	125794	5.7	0.7
24	桃園機場	濟南	119645	2.4	0.3
25	桃園機場	合肥	118126	0.9	0.1
26	桃園機場	重慶	116759	2.8	0.3
27	桃園機場	桂林	109513	1.7	0.2
28	桃園機場	海口	105862	1.9	0.2
29	桃園機場	南昌	100236	1.5	0.2
30	桃園機場	武漢	99434	1.2	0.1
31	桃園機場	石家莊	88404	3.0	0.3

排序	台灣機場←→目的地機場		年平均 出入境 人次	單趟之平均個 人有效劑量 (微西弗)	集體有效劑量 (人-西弗/年)
32	桃園機場	南寧	85673	2.2	0.2
33	松山機場	天津	84872	3.1	0.3
34	桃園機場	大連	83235	2.9	0.2
35	桃園機場	長春	82681	4.7	0.4
36	桃園機場	昆明	81927	4.0	0.3
37	桃園機場	煙臺	76261	2.4	0.2
38	桃園機場	貴陽	75725	2.8	0.2
39	高雄機場	杭州	74369	0.9	0.1
40	桃園機場	太原	73107	3.3	0.2
41	松山機場	重慶	70053	2.9	0.2
42	桃園機場	溫州	69259	1.1	0.1
43	松山機場	成都	65909	3.6	0.2
44	高雄機場	廈門	65184	1.1	0.1
45	高雄機場	武漢	63768	1.6	0.1
46	高雄機場	福州	62328	1.3	0.1
47	桃園機場	張家界	60633	1.8	0.1
48	桃園機場	呼和浩特	59785	4.5	0.3
49	桃園機場	泉州	59618	1.0	0.1
50	桃園機場	烏魯木齊	57083	10.2	0.6
51	桃園機場	蘭州	55445	4.9	0.3
52	桃園機場	徐州	46661	1.6	0.1
53	桃園機場	黃山	44201	1.3	0.1
54	高雄機場	深圳	44110	1.5	0.1
55	桃園機場	鄭州	41174	2.6	0.1
56	松山機場	杭州	40778	1.3	0.1
57	桃園機場	天津	39267	3.0	0.1
58	台中機場	上海浦東	39152	1.8	0.1
59	高雄機場	南京	36875	1.4	0.1
60	高雄機場	南昌	35167	0.9	0.0
61	高雄機場	長沙	34698	1.2	0.0
62	桃園機場	鹽城	32649	1.2	0.0
63	台中機場	深圳	32491	1.6	0.1

排序	台灣機場←→目的地機場		年平均 出入境 人次	單趟之平均個 人有效劑量 (微西弗)	集體有效劑量 (人-西弗/年)
64	桃園機場	麗江	31500	4.7	0.1
65	台中機場	廣州	31206	1.7	0.1
66	高雄機場	寧波	29787	0.8	0.0
67	高雄機場	廣州	28990	1.6	0.0
68	桃園機場	銀川	28332	4.6	0.1
69	松山機場	武漢	27567	1.2	0.0
70	桃園機場	常州	27271	1.8	0.0
71	台中機場	太原	26747	3.5	0.1
72	桃園機場	三亞	26598	2.4	0.1
73	高雄機場	昆明	26521	3.9	0.1
74	桃園機場	南通	26158	1.8	0.0
75	松山機場	太原	24821	3.4	0.1
合計					21.5

表 11 國內線經 NTHU FDC 計算所得之集體有效劑量結果

排序	台灣機場←→目的地機場		年平均 出入境 人次	單趟之平均個 人有效劑量 (微西弗)	集體有效劑量 (人-西弗/年)
1	松山機場	金門機場	2501558	0.07	0.17
2	松山機場	馬公機場	1927014	0.11	0.21
3	高雄機場	馬公機場	1614693	0.08	0.14
4	台中機場	金門機場	980875	0.10	0.10
5	高雄機場	金門機場	857335	0.13	0.11
6	台中機場	馬公機場	837909	0.08	0.07
7	松山機場	台東機場	476270	0.11	0.05
8	松山機場	南竿機場	463734	0.08	0.04
9	台南機場	馬公機場	287415	0.06	0.02
10	台南機場	金門機場	254448	0.11	0.03
11	松山機場	北竿機場	168159	0.08	0.01
12	松山機場	花蓮機場	120192	0.08	0.01
13	台東機場	蘭嶼機場	98487	0.06	0.01
14	台中機場	南竿機場	93352	0.11	0.01
15	高雄機場	花蓮機場	91193	0.08	0.01
16	嘉義機場	金門機場	87512	0.10	0.01
17	嘉義機場	馬公機場	75326	0.06	0.00
18	台東機場	綠島機場	52282	0.05	0.00
19	金門機場	馬公機場	39478	0.06	0.00
20	高雄機場	七美機場	29699	0.07	0.00
21	台中機場	花蓮機場	25165	0.10	0.00
22	馬公機場	七美機場	7168	0.05	0.00
23	高雄機場	望安機場	3071	0.08	0.00
合計					1.0

## (二) 與其他國家之比較

彙整本研究的評估結果，與 NCRP 第 160 號報告【11】、日本之民用航空宇宙輻射劑量評估結果【27】進行比較，如表 13。台灣經飛航劑量軟體評估之個人年有效劑量( $E_{EXP}$ )為 0.011 毫西弗/年，與日本的 0.008 毫西弗/年較為相近，但遠小於美國的 74.5 毫西弗/年，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 245.7 人-西弗/年，皆遠小於美國的 10,323 人-西弗/年、日本的 1,013 人-西弗/年，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。

表 12 民用航空宇宙輻射劑量評估結果之比較

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

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 <sup>b</sup> 0.011 <sup>c</sup>	245.7
NCRP 160	74.5	10,323
日本	0.008	1013 <sup>d</sup>

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= $(231.59 \text{ 人-西弗/年}) \times 1000 / (43796025 \text{ 人次/年} \times 0.58 \text{ 本國出入境比率}) = 0.0091$  毫西弗；兩岸線= $(13.12 \text{ 人-西弗/年}) \times 1000 / (11259114 \text{ 人次/年} \times 0.58) = 0.0020$  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  $0.0091 + 0.0020 + 9.02 \times 10^{-5} = 0.0111$  毫西弗/年，以 0.011 毫西弗/年表示之；總人次如附表一、附表二、附表三。

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



## 六、 結論

本中心自民國 110 年起針對國內一般民眾飛航行為進行調查，本研究延續民國 110 年之執行成果，進一步以國立清華大學開發 NTHU FDC 飛航劑量軟體進行劑量計算，另搭配 SIEVERT 軟體對國際線做驗證比對，同樣以 2015 年 5 月 20 日上午 8 時 0 分作為基準日進行飛航劑量之計算，該日期的太陽活度為近 60 年的平均值，頗具代表性，結果顯示二個軟體計算所得之劑量差異不大。

另外，分析台灣熱門航線可發現，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，因而造成輻射曝露劑量評估結果比其他航線高；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，所以劑量評估結果之曝露劑量相對較低，二個模擬軟體呈現一致性的結果。

綜合軟體之適用性，國際線、兩岸線、國內線皆採 NTHU FDC 飛航劑量評估軟體之模擬結果，本報告更新民用航空宇宙輻射所造成之國民輻射劑量( $E_{\text{Taiwan}}$ )為每年 0.010 毫西弗。

## 七、參考資料

- 【1】 Delores J. Knipp, Essential science for understanding risks from radiation for airline passengers and crews, *Space Weather*, 2017, 15, 549-552.
- 【2】 Matthiä D., Heber B., Reitz G., Meier M., Sihver L., Berger, T. and Herbst K., Temporal and spatial evolution of the solar energetic particle event on 20 January 2005 and resulting radiation doses in aviation, *J. Geophys. Res.*, 2009, doi:10.1029/2009JA014125
- 【3】 行政院原子能委員會輻射偵測中心，RMC-110-310 民用航空宇宙輻射之國民劑量評估報告(內部報告)，行政院原子能委員會輻射偵測中心，110 年 12 月。
- 【4】 Bottollier-Depois J.F., Beck P., Bennett B., Bennett L., Bütikofer R., Clairand I., Desorgher L., Dyer C., Felsberger E., Flückiger E., Hands A., Kindl P., Latocha M., Lewis B., Leuthold G., Maczka T., Mares V., McCall M. J., O'Brien K., Rollet S., Rühm W., Wissmann F., Comparison of codes assessing galactic cosmic radiation exposure of aircraft crew, *Radiat. Prot. Dosim.*, 2009, 136, 317–323.
- 【5】 楊子毅，台灣熱門航線的飛航劑量，輻射防護簡訊第 151 期，出刊日期 108 年 6 月 15 日。
- 【6】 Li A. L., Pan W. F. and Sheu R. J. Development, validation and demonstration of the NTHU flight dose calculator., *Radiat. Prot. Dosim.*, 2018, 180, 134-137.
- 【7】 許榮鈞、黃昱翔、賴柏辰、楊子毅，飛航劑量評估程式的認

證與飛航劑量量測實驗設計，110 年度原子能科技學術合作研究計畫成果發表會論文集，111 年 9 月 26 日。

- 【8】 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，碩士論文，國立清華大學核子工程與科學研究所，104 年。
- 【9】 Tobiska W. K., Global real time dose measurements using the automated radiation measurements for Aerospace safety(ARMAS) system, Space Weather, 2016. 14, 1053–1080, doi:10.1002/2016SW001419.
- 【10】 U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, In-Flight Radiation Exposure, 2014.
- 【11】 “Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP REPORT No.160.”
- 【12】 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，行政院原子能委員會輻射偵測中心，87 年 6 月。
- 【13】 許榮鈞、楊子毅、黃昱翔、賴柏辰，系統化與客製化的飛航輻射劑量研究，108 年度原子能科技學術合作研究計畫成果發表會論文集，109 年 9 月 29 日。
- 【14】 NCRP (1989b). National Council on Radiation Protection and Measurements. Exposure of the U.S. Population from Occupational Radiation, NCRP Report No. 101 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- 【15】 [https://www.faa.gov/data\\_research/research/med\\_humanfacs/aeromedical/media/MV-DATES.zip](https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/media/MV-DATES.zip)

- 【16】 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。
- 【17】 EUROPEAN COMMISSION, Radiation Protection 140 Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew Compilation of Measured and Calculated Data), 2004, 110, 417-422.
- 【18】 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。
- 【19】 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>
- 【20】 Bottollier-Depois J.F., A. Biau, P. Blanchard, I. Clairand, P. Dessarps, P. Lantos, D. Saint-Lô, M. Valero, Assessing exposure to cosmic radiation: the SIEVERT system, Radioprotection, 2003, vol, 357-366.
- 【21】 Lantos P., Fuller N., History of the solar flare radiation doses on-board aeroplanes using semi-empirical model and Concorde measurements, Radiat. Prot. Dos., 2003. 104,199-210.
- 【22】 Lantos P., Fuller N., Bottollier-Depois J.F., Methods for Estimating Radiation Doses Received by Commercial Aircrew, Aviation Space and Environmental Medicine, 2003, 74, 746-752.
- 【23】 楊子毅，台灣熱門航線的飛航劑量，輻射防護簡訊第151期，出刊日期108年6月15日。

- 【24】 Zi-Yi Y., Rong-Jiun S., Effects of flight route variation and great-circle approximation on aviation dose assessment for popular flights from taiwan, Radiation Protection Dosimetry, 2019, 184, 79-89.
- 【25】 內政部移民署全球資訊網。 <https://immigration.gov.tw/>
- 【26】 內政部移民署全球資訊網。 <https://ris.gov.tw/app/portal/346>
- 【27】 生活環境放射線編集委員会，生活環境放射線(国民線量の算定) 第3版，令和2年(2020年)11月。

附表 1

近五年國際航班旅客年平均人數排序

航線 排序	台灣機場名稱	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
1	桃園國際機場	香港	6546053	6546053	14.95%
2	桃園國際機場	東京(成田)	2817463	9363516	21.38%
3	桃園國際機場	大阪	2612581	11976098	27.35%
4	桃園國際機場	首爾(仁川)	2260484	14236582	32.51%
5	桃園國際機場	新加坡	1767961	16004543	36.54%
6	桃園國際機場	曼谷(蘇凡 納布)	1574728	17579271	40.14%
7	臺北松山機場	東京(羽田)	1436323	19015594	43.42%
8	高雄國際機場	香港	1433327	20448921	46.69%
9	桃園國際機場	馬尼拉	1302589	21751510	49.67%
10	桃園國際機場	澳門	1238236	22989746	52.49%
11	桃園國際機場	胡志明市	1196670	24186416	55.23%
12	桃園國際機場	琉球	1058803	25245219	57.64%
13	桃園國際機場	吉隆坡	1048965	26294184	60.04%
14	桃園國際機場	洛杉磯	933784	27227968	62.17%
15	桃園國際機場	舊金山	914193	28142161	64.26%

航線 排序	台灣機場名稱	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
16	桃園國際機場	福岡	815942	28958103	66.12%
17	臺中國際機場	香港	714444	29672547	67.75%
18	桃園國際機場	名古屋	709144	30381691	69.37%
19	桃園國際機場	釜山	665084	31046775	70.89%
20	桃園國際機場	札幌	655555	31702330	72.39%
21	桃園國際機場	河內	587080	32289410	73.73%
22	高雄國際機場	東京(成田)	555102	32844512	74.99%
23	高雄國際機場	大阪	482522	33327035	76.10%
24	桃園國際機場	溫哥華	446122	33773157	77.11%
25	高雄國際機場	澳門	395863	34169020	78.02%
26	桃園國際機場	曼谷(廊曼)	384792	34553812	78.90%
27	桃園國際機場	紐約	370924	34924737	79.74%
28	桃園國際機場	峇里島	352619	35277356	80.55%
29	桃園國際機場	雅加達	348332	35625688	81.34%
30	桃園國際機場	阿姆斯特丹	316468	35942157	82.07%
31	桃園國際機場	杜拜	292227	36234384	82.73%
32	高雄國際機場	首爾(仁川)	275640	36510024	83.36%

航線 排序	台灣機場名稱	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
33	臺北松山機場	首爾(金浦)	232988	36743012	83.90%
34	桃園國際機場	西雅圖	232675	36975687	84.43%
35	桃園國際機場	金邊	216904	37192591	84.92%
36	高雄國際機場	胡志明市	214309	37406901	85.41%
37	桃園國際機場	大邱	213601	37620502	85.90%
38	桃園國際機場	亞庇	202921	37823422	86.36%
39	桃園國際機場	法蘭克福	194002	38017425	86.81%
40	桃園國際機場	伊斯坦堡	189084	38206508	87.24%
41	桃園國際機場	布里斯本	188888	38395396	87.67%
42	桃園國際機場	巴黎	187062	38582458	88.10%
43	桃園國際機場	宿霧	185797	38768255	88.52%
44	桃園國際機場	東京(羽田)	183183	38951438	88.94%
45	桃園國際機場	函館	169436	39120874	89.33%
46	桃園國際機場	多倫多	167065	39287938	89.71%
47	桃園國際機場	雪梨	166593	39454531	90.09%
48	臺中國際機場	澳門	164965	39619496	90.46%
49	臺中國際機場	胡志明市	163002	39782497	90.84%



航線 排序	台灣機場名稱	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
50	桃園國際機場	安大略	162623	39945120	91.21%
51	桃園國際機場	休士頓	159128	40104248	91.57%
52	桃園國際機場	仙台	140320	40244568	91.89%
53	桃園國際機場	維也納	132215	40376783	92.19%
54	高雄國際機場	琉球	130574	40507357	92.49%
55	高雄國際機場	河內	129847	40637204	92.79%
56	高雄國際機場	札幌	125842	40763046	93.07%
57	桃園國際機場	小松	125262	40888308	93.36%
58	高雄國際機場	曼谷(蘇凡 納布)	120068	41008376	93.63%
59	桃園國際機場	清邁	112857	41121233	93.89%
60	高雄國際機場	新加坡	106526	41227759	94.14%
61	桃園國際機場	廣島	101202	41328961	94.37%
62	桃園國際機場	芝加哥	97145	41426106	94.59%
63	高雄國際機場	福岡	90867	41516973	94.80%
64	臺灣高雄國際 機場	釜山	84503.4	41601476	0.949891602
65	桃園國際機場	倫敦	78974	41680451	95.17%

航線 排序	台灣機場名稱	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
66	臺南國際機場	胡志明市	77579	41758029	95.35%
67	桃園國際機場	關島	76273	41834302	95.52%
68	桃園國際機場	羅馬	75974	41910276	95.69%
69	高雄國際機場	吉隆坡	74535	41984811	95.86%
70	桃園國際機場	檳城	73778	42058589	96.03%
71	桃園國際機場	峴港	72939	42131528	96.20%
72	桃園國際機場	高松	69782	42201311	96.36%
73	桃園國際機場	長灘島	68016	42269327	96.51%
74	桃園國際機場	務安	65499	42334825	96.66%
75	桃園國際機場	濟州	65379	42400204	96.81%
76	臺南機場國際	香港	63111	42463315	96.96%
77	高雄國際機場	馬尼拉	60437	42523752	97.10%
78	桃園國際機場	岡山	59871	42583623	97.23%
79	桃園國際機場	墨爾本	59786	42643409	97.37%
80	花蓮國際機場	香港	56272	42699681	97.50%
81	桃園國際機場	清州	55492	42755173	97.62%
82	桃園國際機場	鹿兒島	54841	42810013	97.75%

航線 排序	台灣機場名稱	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
83	桃園國際機場	德里	54434	42864448	97.87%
84	桃園國際機場	檀香山	53677	42918125	98.00%
85	桃園國際機場	富山	49755	42967880	98.11%
86	桃園國際機場	奧克蘭	48050	43015930	98.22%
87	臺中國際機場	河內	47009	43062939	98.33%
88	臺中國際機場	東京(成田)	46404	43109342	98.43%
89	桃園國際機場	北九州	44895	43154237	98.53%
90	桃園國際機場	旭川	44688	43198925	98.64%
91	桃園國際機場	靜岡	43480	43242405	98.74%
92	桃園國際機場	克拉克	42147	43284552	98.83%
93	桃園國際機場	羅馬(達文 西)	38988	43323541	98.92%
94	桃園國際機場	帛琉	36534	43360075	99.00%
95	桃園國際機場	泗水	35820	43395895	99.09%
96	臺中國際機場	琉球	31567	43427462	99.16%
97	桃園國際機場	宮崎	29399	43456861	99.23%
98	高雄國際機場	熊本	27718	43484579	99.29%
99	桃園國際機場	茨城	25704	43510283	99.35%

航線 排序	台灣機場名稱	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
100	桃園國際機場	花卷	24811	43535094	99.40%
101	桃園國際機場	青森	23163	43558257	99.46%
102	桃園國際機場	佐賀	22655	43580911	99.51%
103	桃園國際機場	公主港	20156	43601067	99.55%
104	高雄國際機場	名古屋	19249	43620316	99.60%
105	桃園國際機場	新潟	18780	43639096	99.64%
106	臺南機場國際	大阪	17535	43656631	99.68%
107	高雄國際機場	峴港	17097	43673728	99.72%
108	桃園國際機場	松山	16395	43690123	99.76%
109	桃園國際機場	汶萊	15661	43705784	99.79%
110	桃園國際機場	石垣島	15641	43721424	99.83%
111	桃園國際機場	芽莊(金蘭)	15052	43736476	99.86%
112	桃園國際機場	莫斯科(謝 列梅捷沃)	13892	43750368	99.90%
113	高雄國際機場	克拉克	13111	43763479	99.93%
114	高雄國際機場	宿霧	11633	43775112	99.95%
115	桃園國際機場	莫斯科(多 莫傑多沃)	7824	43782936	99.97%

航線 排序	台灣機場名稱	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
116	高雄國際機場	濟州	5519	43788455	99.98%
117	臺中國際機場	大阪	4928	43793383	99.99%
118	桃園國際機場	海參威	2601	43795984	100.00%
119	桃園國際機場	伊爾庫 茨克	41	43796025	100.00%

附表 2

近五年國內航線旅客年平均人數排序

航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
1	松山機場	金門機場	2501558	2501558	23%
2	松山機場	馬公機場	1927014	4428572	40%
3	高雄機場	馬公機場	1614693	6043266	54%
4	台中機場	金門機場	980875	7024141	63%
5	高雄機場	金門機場	857335	7881476	71%
6	台中機場	馬公機場	837909	8719385	79%
7	松山機場	台東機場	476270	9195655	83%
8	松山機場	南竿機場	463734	9659390	87%
9	台南機場	馬公機場	287415	9946805	90%
10	台南機場	金門機場	254448	10201253	92%
11	松山機場	北竿機場	168159	10369412	93%
12	松山機場	花蓮機場	120192	10489604	95%
13	台東機場	蘭嶼機場	98487	10588091	95%
14	台中機場	南竿機場	93352	10681444	96%
15	高雄機場	花蓮機場	91193	10772636	97%

航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
16	嘉義機場	金門機場	87512	10860148	98%
17	嘉義機場	馬公機場	75326	10935474	99%
18	台東機場	綠島機場	52282	10987756	99%
19	金門機場	馬公機場	39478	11027234	99%
20	高雄機場	七美機場	29699	11056933	100%
21	台中機場	花蓮機場	25165	11082098	100%
22	馬公機場	七美機場	7168	11089266	100%
23	高雄機場	望安機場	3071	11092337	100%

附表 3

近五年兩岸航線旅客年平均人數排序

航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
1	桃園國際機場	上海浦東	1758917	1758917	15.62%
2	桃園國際機場	北京	752933	2511850	22.31%
3	臺北松山機場	上海虹橋	730066	3241917	28.79%
4	桃園國際機場	深圳	560716	3802633	33.77%
5	桃園國際機場	廣州	473076	4275709	37.98%
6	高雄國際機場	上海浦東	292850	4568558	40.58%
7	桃園國際機場	杭州	281978	4850536	43.08%
8	桃園國際機場	廈門	275384	5125920	45.53%
9	桃園國際機場	南京	258492	5384412	47.82%
10	臺北松山機場	上海浦東	212402	5596814	49.71%
11	桃園國際機場	無錫	198024	5794838	51.47%
12	桃園國際機場	鄭州	191171	5986009	53.17%
13	桃園國際機場	寧波	179792	6165801	54.76%
14	桃園國際機場	成都	167472	6333273	56.25%
15	臺北松山機場	福州	157848	6491121	57.65%



航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
16	桃園國際機場	瀋陽	155539	6646660	59.03%
17	桃園國際機場	長沙	154941	6801601	60.41%
18	臺北松山機場	廈門	148382	6949983	61.73%
19	臺南國際機場	武漢	147689	7097671	63.04%
20	桃園國際機場	福州	140671	7238342	64.29%
21	桃園國際機場	青島	139858	7378200	65.53%
22	桃園國際機場	西安	134306	7512506	66.72%
23	桃園國際機場	哈爾濱	125794	7638300	67.84%
24	桃園國際機場	濟南	119645	7757945	68.90%
25	桃園國際機場	合肥	118126	7876071	69.95%
26	桃園國際機場	重慶	116759	7992830	70.99%
27	桃園國際機場	桂林	109513	8102343	71.96%
28	桃園國際機場	海口	105862	8208206	72.90%
29	桃園國際機場	南昌	100236	8308442	73.79%
30	桃園國際機場	武漢	99434	8407876	74.68%
31	桃園國際機場	石家莊	88404	8496280	75.46%
32	桃園國際機場	南寧	85673	8581953	76.22%

航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
33	臺北松山機場	天津	84872	8666826	76.98%
34	桃園國際機場	大連	83235	8750061	77.72%
35	桃園國際機場	長春	82681	8832741	78.45%
36	桃園國際機場	昆明	81927	8914668	79.18%
37	桃園國際機場	煙臺	76261	8990929	79.85%
38	桃園國際機場	貴陽	75725	9066654	80.53%
39	高雄國際機場	杭州	74369	9141023	81.19%
40	桃園國際機場	太原	73107	9214130	81.84%
41	臺北松山機場	重慶	70053	9284183	82.46%
42	桃園國際機場	溫州	69259	9353442	83.07%
43	臺北松山機場	成都	65909	9419351	83.66%
44	高雄國際機場	廈門	65184	9484535	84.24%
45	高雄國際機場	武漢	63768	9548303	84.81%
46	高雄國際機場	福州	62328	9610630	85.36%
47	桃園國際機場	張家界	60633	9671263	85.90%
48	桃園國際機場	呼和浩特	59785	9731048	86.43%
49	桃園國際機場	泉州	59618	9790666	86.96%

航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
50	桃園國際機場	烏魯木齊	57083	9847749	87.46%
51	桃園國際機場	蘭州	55445	9903194	87.96%
52	桃園國際機場	徐州	46661	9949855	88.37%
53	桃園國際機場	黃山	44201	9994055	88.76%
54	高雄國際機場	深圳	44110	10038165	89.16%
55	高雄國際機場	鄭州	41174	10079339	89.52%
56	臺北松山機場	杭州	40778	10120118	89.88%
57	桃園國際機場	天津	39267	10159384	90.23%
58	臺中國際機場	上海浦東	39152	10198536	90.58%
59	高雄國際機場	南京	36875	10235410	90.91%
60	高雄國際機場	南昌	35167	10270577	91.22%
61	高雄國際機場	長沙	34698	10305274	91.53%
62	桃園國際機場	鹽城	32649	10337924	91.82%
63	臺中國際機場	深圳	32491	10370415	92.11%
64	桃園國際機場	麗江	31500	10401915	92.39%
65	臺中國際機場	廣州	31206	10433121	92.66%
66	高雄國際機場	寧波	29787	10462909	92.93%

航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
67	高雄國際機場	廣州	28990	10491899	93.19%
68	桃園國際機場	銀川	28332	10520230	93.44%
69	臺北松山機場	武漢	27567	10547797	93.68%
70	桃園國際機場	常州	27271	10575068	93.92%
71	臺中國際機場	太原	26747	10601815	94.16%
72	桃園國際機場	三亞	26598	10628413	94.40%
73	高雄國際機場	昆明	26521	10654933	94.63%
74	桃園國際機場	南通	26158	10681091	94.87%
75	臺北松山機場	太原	24821	10705913	95.09%
76	臺北松山機場	溫州	23130	10729042	95.29%
77	高雄國際機場	重慶	22870	10751912	95.50%
78	桃園國際機場	揚州	21354	10773266	95.68%
79	臺中國際機場	三亞	19530	10792796	95.86%
80	桃園國際機場	淮安	19148	10811944	96.03%
81	臺中機場國際	杭州	19080	10831024	96.20%
82	高雄國際機場	海口	17607	10848631	96.35%
83	高雄國際機場	成都	17175	10865806	96.51%

航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
84	高雄國際機場	徐州	15722	10881527	96.65%
85	臺中國際機場	寧波	15696	10897223	96.79%
86	臺中國際機場	呼和浩特	15329	10912552	96.92%
87	臺中國際機場	廈門	15177	10927729	97.06%
88	桃園國際機場	汕頭	14816	10942545	97.19%
89	桃園國際機場	義烏	14729	10957274	97.32%
90	臺中國際機場	南京	14415	10971688	97.45%
91	高雄國際機場	南寧	14372	10986060	97.57%
92	高雄國際機場	天津	13772	10999833	97.70%
93	臺中國際機場	福州	13513	11013346	97.82%
94	臺中國際機場	昆明	13484	11026830	97.94%
95	高雄國際機場	北京	12783	11039613	98.05%
96	高雄國際機場	太原	12107	11051720	98.16%
97	桃園國際機場	西寧	11418	11063138	98.26%
98	臺中國際機場	合肥	11365	11074502	98.36%
99	臺中國際機場	海口	11285	11085787	98.46%
100	臺中國際機場	天津	11031	11096818	98.56%

航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
101	桃園國際機場	威海	10685	11107503	98.65%
102	臺中國際機場	濟南	10543	11118046	98.75%
103	臺中國際機場	南寧	10034	11128079	98.84%
104	臺北松山機場	合肥	9817	11137896	98.92%
105	高雄國際機場	濟南	8936	11146832	99.00%
106	桃園國際機場	海拉爾	8758	11155590	99.08%
107	高雄國際機場	合肥	8603	11164193	99.16%
108	臺中國際機場	長沙	8513	11172706	99.23%
109	花蓮國際機場	天津	8439	11181145	99.31%
110	臺中國際機場	石家莊	8321	11189466	99.38%
111	花蓮國際機場	濟南	8230	11197696	99.45%
112	高雄國際機場	青島	8128	11205824	99.53%
113	高雄國際機場	三亞	7998	11213822	99.60%
114	臺中國際機場	鄭州	7583	11221405	99.67%
115	高雄國際機場	桂林	7079	11228483	99.73%
116	臺中國際機場	青島	6523	11235006	99.79%
117	高雄國際機場	常州	5137	11240143	99.83%

航線 排序	機場名稱 (台灣)	機場名稱	年平均出 入境人次	累積人次	累積人次 百分比
118	臺中國際機場	成都	4997	11245140	99.88%
119	臺中國際機場	武漢	4518	11249657	99.92%
120	花蓮國際機場	武漢	2815	11252472	99.94%
121	高雄國際機場	黃山	1819	11254291	99.96%
122	桃園國際機場	延吉	1433	11255724	99.97%
123	臺中國際機場	哈爾濱	1360	11257084	99.98%
124	高雄國際機場	瀋陽	1048	11258132	99.99%
125	高雄國際機場	蘭州	982	11259114	100.00%

## 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	<p><b>綜合意見</b></p> <p>本報告使用 SIEVERT 及 NTHU FDC 兩種軟體，利用交通部民航局提供之國人飛航行為調查結果，評估國人搭乘國際線、兩岸線與國內線之宇宙射線國民輻射劑量。本報告評估之方法合理可行，評估結果高度可信，應作為國人商用飛航宇宙輻射之國民劑量數據的重要文件。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>
2	<p><b>綜合意見</b></p> <p>「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」、「集體有效劑量」，美國 NCRP-160 報告中分別以 <math>E_{Exp}</math>、<math>E_{US}</math>、<math>S</math> 代表之，單位分別為毫西弗、毫西弗、人-西弗，以避免不必要之混淆。本報告則混用劑量、輻射劑量、曝露劑量、平均劑量、有效劑量、國民劑量、國民輻射劑量等，不但增加了閱讀困難度，而且也不夠嚴謹。</p>	<p>感謝委員意見；已全面檢視報告數據並完成修正。(名詞定義、其餘如內文)</p>



## 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><b>P.19 四.(一).1</b></p> <p>L#16,17, 報告中說明桃園至紐約之劑量為 78.7 <math>\mu\text{Sv}</math>, 回程為 79.2 <math>\mu\text{Sv}</math>, 請問這是否係回程飛行時間較長所致?</p>	有關去程與回程劑量計算結果可能因各種因素而不同, 如宇宙射線輻射場狀況、飛行計畫規劃、飛行緯度、高度等。
2	<p><b>P.19 四.(一).1</b></p> <p>L#22, 報告中說明...97.1 <math>\mu\text{Sv}</math> (美國紐約往返桃園, )...; 是否應為...97.1 <math>\mu\text{Sv}</math> (美國休斯頓至桃園, )...;</p>	感謝委員建議; 已修正(p.19)。
3	<p><b>P.40 四.(三)</b></p> <p>L#19, 報告中說明...涵蓋 95.08 %...; 惟依 p.68 至太原累積人次比為 95.09, 是否為誤植?</p>	感謝委員建議; 經確認為涵蓋 95.087%, 已修正(p.40)。
4	<p><b>P.21-24 四.(一).1</b></p> <p>請問表 1 與表 2 所有班次之起飛時間是否均為第 7 頁說明之 2015 年 5 月 20 日上午 8:00, 再以兩個軟體程式分別評估計算劑量。</p> <p>報告之研究方法中說明是採用長期太陽風之平均值 589 MV, 目的是要取得客觀的一致性, 因為此平均值在此太陽黑子約 11 年週期中應屬高峰階段, 所以造成宇宙射線的偏移會使飛航人員受到相對較低之劑量。所以若有機會將此計畫之實驗值與國外在此 11 年週期其他時段之計算數值作比較時, 可能此計畫之評估值會顯得偏低, 敬請參考。</p>	<p>感謝委員建議;</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本報告劑量計算時間皆採用 2015 年 5 月 20 日上午 8:00。</li> <li>2. 納入未來規劃之參考。</li> </ol>
5	<p><b>文字修正</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 目錄三、(二)中, ...軟體之選擇...建議修正為...軟體..., 以與內文一致。</li> <li>2. 圖目錄中, ...圖 10 近五年...建議修正為...圖 10 104-108 年..., 以與內文一致。</li> <li>3. 表目錄中, ...表 1 國際線...建議修正為...表 1 104-108 年國際線..., 以與內文一致。表 2 亦同。</li> <li>4. 表目錄中, ...表 3 兩岸線...建議修正為...表 3 104-108 年兩岸線..., 以與相關表格</li> </ol>	<p>感謝委員建議; 已修正。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 目錄</li> <li>2. 圖目錄</li> <li>3. 表目錄</li> <li>4. 表目錄</li> <li>5. p.1</li> <li>6. p.1</li> </ol>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	<p>一致。表 4 亦同。</p> <p>5. P.1, L#7, ...一般民眾之劑量限度...建議修正為...一般民眾年劑量限度...。</p> <p>6. P.1, L#13, ...國民輻射年劑量...建議修正為...國民輻射劑量...。</p> <p>7. P.4, L#3, ...的子項，其評估...建議修正為...的子項，如圖 2 所示。其評估...。</p> <p>8. P.35, L#20, ...小時帶入計算...建議修正為...小時代入計算...。另 L#21 亦同。</p>	<p>7. p.4</p> <p>8. p.35</p>

### 三、魯經邦委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p><b>綜合意見</b></p> <p>1.118-111 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；</p> <p>(1) 章節有以壹、貳...，亦有以一、二...方式編碼者。</p> <p>(2) 表格有以表一、表二 ...，亦有以表 1、表 2...方式編碼者。</p> <p>2. 國內學術界配合國際日漸重視商用飛航宇宙輻射曝露的輻安議題趨勢自行發展出相關劑量評估程式，且經與先進國家發展之程式比對驗證結果，證實程式之品質足以執行精確評估，而評估單位亦以此一程式評估商用飛航宇宙輻射之國民劑量，值得肯定。</p> <p>3. 國民劑量評估之目的主要在驗證國家在輻射防護管理及管制執行與技術發展之成效，並藉以探討是否仍有精進餘地。茲依據 ICRP 132 號報告建議之精神，對未來執行商用飛航宇宙輻射之國民劑量評估提出建議如下：</p> <p>(1) 依據 ICRP 132 號報告建議，商用飛航之乘客，區分為：</p> <p>a. 偶爾飛行者 (Occasional flyer)：指不常搭乘飛機旅行的人，年飛行時間明顯低於典型的機組人員。</p> <p>b. 飛行常客 (Frequent flyer)：指基於個人原因或專業職責定期乘坐飛機旅行，並且可以在飛行常客獎勵計畫中註冊的人員。一些飛行常客的年飛行時間可能達到典型機組人員的數量級（例如，每年 500 小時）。</p> <p>(2) ICRP 認為商用飛航宇宙輻射曝露的輻射防護行動，應採分級方式處理：</p> <p>a. 偶爾飛行者所受宇宙輻射的劑量很低，沒有必要採取防護措施。然而，基於透明及「知情權」原則，ICRP 建議向所有乘客提供有關宇宙輻射的一般資訊，並鼓勵國家主管機關、航空公司、消費者聯盟及旅行社傳播有關與航空</p>	<p>感謝委員意見；</p> <p>1. 相關報告均已修改，會採統一格式辦理。</p> <p>2. 感謝委員肯定。</p> <p>3. 本中心納入未來業務規劃之參考。</p>

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
	<p>有關的宇宙輻射的一般資訊。</p> <p>b. 對於飛行常客，ICRP 的建議如下：</p> <p>(a) 大多數飛行常客與機組人員曝露於宇宙輻射的情況並不會相同（例如，在曝露，飛行頻率和選擇程度方面），因此，建議將飛行常客的曝露視為公眾曝露，並以相同的方式對待此類飛行常客與偶爾飛行者。</p> <p>(b) 鼓勵可能擔心自己受到宇宙輻射的飛行常客使用免費提供的劑量電腦程式評估其個人曝露，以便瞭解其曝露情況，並在必要時調整其飛行頻率。</p> <p>(c) 在執行專業職責的飛行常客中，有極少數人曝露與機組人員風險相當。對這類飛行常客的曝露進行管理，應採取類似於對機組人員的要求。因此，應根據當時的情況逐案認定哪些飛行常客視為職業曝露。這可能會致使個人評估其曝露，並在適當的情況下使用這些資訊與僱主進行對話。一項決定應產生於一個涉及所有利害關係人的過程。</p> <p>(3) 基於上述理由，建議未來在評估國民劑量時，能夠與入出境主關機關合作，將本國人民搭乘飛機的人數，按搭乘頻率將偶爾飛行者及飛行常客的人數加以統計分類，再據以評估不同頻率飛行乘客的劑量。這樣評估的數據可能對未來飛航宇宙輻射曝露防護體系及指引的建立將更有幫助。</p>	

#### 四、 許榮鈞委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p><b>綜合意見</b></p> <p>報告內容充實且描述清楚易懂，有利於提升國內民眾對於宇宙輻射飛航劑量的了解。以下幾點小建議提供參考。</p>	感謝委員意見。
2	<p><b>P.3</b></p> <p>“二、文獻回顧&gt;...銀河宇宙射線，由高能質子、氦原子核及其他...組成。”建議引用文獻簡單補充一句說明各成分的比例，以利讀者理解判斷，例如：大約 89%是質子，10%是氦原子核，還有 1%是重元素。</p>	感謝委員建議；已補充說明(p.3)。
3	<p><b>P.4</b></p> <p>文中多處出現”人-Sv”的單位，中英夾雜不好，建議改為”人-西弗”，也與另一份報告對此單位的描述一致。</p>	感謝委員建議；已修正。(p.41 表 9-12)
4	<p><b>P.5</b></p> <p>“...該程式使用的輻射遷移程式(radiation transport codes)較簡易...”英文第一個字建議大寫，與文中其他地方格式一致。</p>	感謝委員建議；已修正(p.5)。
5	<p><b>P.6</b></p> <p>“...近 60 年太陽風強度的變動資料如圖 3，平均值為 589 MV；近期太陽風偏高，...”是否筆誤？審查者看圖三整體趨勢，近期太陽風強度應該是偏低吧？</p>	感謝委員建議；已修正(p.6)。
6	<p><b>P.11</b></p> <p>圖 6 顯示 NTHU FDC 飛航評估軟體之頁面[18]，圖中字型太大有互相遮蔽問題，有礙閱讀，建議可引用文獻的圖或是找 NTHU FDC 國內作者協助解決顯示問題。</p>	感謝委員建議；已更新圖示(p.11)。
7	<p><b>P.13</b></p> <p>圖 8 顯示台灣各機場進出旅客趨勢(108 年「民航統計報」)[19]，圖中線條有”過境”這項但是內文未提及，建議刪除過境線條或是文中補充簡述。</p>	感謝委員建議；參採建議刪除過境線條。(p.13)

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
8	<p><b><u>P.33</u></b></p> <p>表 5 國際線、兩岸線與國內線等飛航劑量分析結果</p> <p>(1) 其中假設條件一欄有三處呈現：NTHU FDC 之 Speed/Altitude 採用 10500 公尺搭配 900 km/h；其中速度高度文字與數字相反，應該是 Altitude/Speed 採用 10500 公尺搭配 900 km/h</p> <p>(2) SIEVERT 採內建預設：建議改為”SIEVERT 採內建預設高度，不需要飛行速度，但要求使用者輸入出發與抵達時間”</p>	<p>感謝委員建議；已修正。(p.33)</p>
9	<p><b><u>P.39</u></b></p> <p>表 7 使用 NTHU FDC 軟體進行原機場與替代有效劑量計算結果比較：其中第 4 列台中機場→澳門 與 桃園機場→澳門差異頗大，值得懷疑，建議二者再計算檢查一次。</p>	<p>感謝委員建議；經再次重新計算與確認，仍為原數值。(p.39)</p>
10	<p><b><u>P.49</u></b></p> <p>...以 2015 年 5 月 20 日上午 8 時 0 分作為基準日進行飛航劑量之計算，以降低太陽週期造成之影響...</p> <p>“降低太陽週期造成之影響”之敘述不太洽當或容易誤解，建議直接說明該日期的太陽活度為近 60 年的平均值，頗具代表性。</p>	<p>感謝委員建議；已修正。(p.50)</p>

## 五、張泰誠委員

項次	建議修正內容	意見回復與修正說明
1	<p><u>簡報第 6 頁</u></p> <p>聯合國原子輻射影響科學委員會(UNSCEAR) 聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR) 影響與效應，翻譯名詞希能統一</p>	<p>感謝委員建議，已在簡報中修正。</p>
2	<p><u>簡報第 24 頁</u></p> <p>飛航劑量評估軟體 NTHU FDC 操作頁面 (軟體改善建議)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建議輸入起降機場 ICAO 碼即可自動帶入經度、緯度及高度。</li> <li>2. 飛機行駛高度設定建議可加入英尺選項</li> </ol>	<p>感謝委員建議。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 有關輸入起降機場 ICAO 碼即可自動帶入經度、緯度及高度，該軟體中已含此功能。</li> <li>2. 該建議後續轉知軟體開發單位參閱。</li> </ol>
3	<p><u>簡報第 27 頁</u></p> <p>國人飛航行為調查-國際線近五年旅客人數統計(已排序)，建議增加附註說明係由國內不同機場飛航至目的地機場，故有機場名(城市)重複出現...(範例)。</p>	<p>感謝委員建議，已在簡報中加上備註。</p>
4	<p><u>簡報第 28 頁</u></p> <p>國人飛航行為調查-兩岸線近五年旅客人數統計(已排序)，建議增加附註說明係由國內不同機場飛航至目的地機場，故有機場名(城市)重複出現...(範例)。</p>	<p>感謝委員建議，已在簡報中加上備註。</p>