

核能安全委員會

委託研究計畫

# 113-114 年推動既存曝露管理之劑量評估 及量測技術研究(1/2)

**Research on Dose Assessment and Measurement Techniques for Existing  
Exposure Management from 2024 to 2025**

113 年度期末報告

受委託機關(構)：國家原子能科技研究院

計畫主持人：楊子毅

主要工作項目負責人：袁明程、盧苡欣、郭又勤、黃煥景

聯絡人：盧苡欣

聯絡電話：(03)4711400 ext 7980

報告日期：113 年 12 月 13 日

## 目 錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	ii
壹、計畫目的.....	3
貳、113 年度計畫工項及作法.....	3
參、113 年度預定進度及具體成果.....	10
肆、113 年度成果.....	14
伍、交付文件一覽表.....	60
陸、結論.....	61
參考資料.....	62
附件一、飛航劑量量測可行性評估相關研究報告.....	65
附件二、飛航劑量評估工具相關技術報告.....	66
附件三、氬氣量測或標定技術精進相關研究報告.....	67
附件四、含天然放射性物質商品後市場調查技術報告.....	68

## 中文摘要

本計畫將針對既存曝露進行研析，包含空勤人員接受之宇宙射線劑量評估及含天然放射性物質等相關議題。在空勤人員劑量評估部分，將透過開發飛航劑量評估工具，搭配空勤人員出勤班表資料，來進行人員劑量評估及預測，同時也參考國外經驗積極發展飛航劑量量測技術，可因應未來評估結果的驗證所需，相關之人員劑量評估結果也可作為未來國內空勤人員輻射劑量管理方案之參考。此外，也協助核安會評估國籍航空公司主要航線之輻射劑量，並宣達相關科普知識；而含天然放射性物質之應用方面，將基於實驗室過往之氦氣量測及劑量評估經驗，延伸應用到其他含天然放射性物質之民生用途，除建立相關量測分析程序及技術外，也致力於宣達相關科普知識予民眾，並持續精進實驗室氦氣量測技術，並協助核安會進行含天然放射性物質商品後市場調查，以保障民眾使用相關商品之輻射安全。

關鍵字：飛航劑量、天然放射性物質、人員劑量評估。

## **Abstract**

This project will analyze issues related to existing exposures, such as the assessment of cosmic radiation doses received by aircrew and the presence of naturally occurring radioactive materials. In the aircrew dose assessment section, personnel dose assessments and predictions will be conducted by developing aviation dose assessment tools, along with aircrew duty roster data. Additionally, development of aviation dose measurement technology based on foreign experiences will be pursued to meet the verification needs of future assessment results. The relevant personnel dose assessment results can serve as references for future domestic radiation dose management programs for aircrew. Furthermore, assistance will be provided to the Nuclear Safety Commission in evaluating the radiation doses on major routes of national airlines and disseminating related public knowledge. In the application aspect of naturally occurring radioactive materials, based on laboratory experience in radon measurement and dose assessment, efforts will be extended to other applications involving naturally occurring radioactive materials. Besides establishing relevant measurement and analysis procedures and technologies, public knowledge on these radioactive materials will be disseminated, and laboratory radon measurement technology will be continuously improved. Additionally, assistance will be provided to the Nuclear Safety Commission in conducting post-market surveys of products containing naturally occurring radioactive materials to ensure the radiation safety of the public using such products.

**Keywords:** flight dose, naturally occurring radioactive material(NORM), personnel dose assessment.

## 壹、計畫目的

為發展飛航劑量及含天然放射性物質商品之量測技術，以精進及強化國內既存曝露相關管理技術，為未來國內推動天然輻射管理預作準備，並與國際輻防趨勢接軌，本研究擬針對空勤人員飛航劑量及天然放射性物質民生應用等議題進行研析。

## 貳、113 年度計畫工項及作法

本計畫子計畫一：飛航劑量量測技術開發與空勤人員安全管理研析，今年規劃執行工作包括：飛航劑量量測技術及劑量管理模式之國際文獻研析及量測系統之可行性評估與建置規劃、空勤人員出勤資料解析及劑量評估工具開發、評估國籍航空公司主要航線之輻射劑量及宣達宇宙射線相關科普知識、提出空勤人員輻射劑量管理導則草案及相關建議。具體實施方法如下述：

### 一、 飛航劑量量測技術及劑量管理模式之國際文獻研析及量測系統之可行性評估與建置規劃

飛航高度所在之高空輻射場包含中子、質子、渺子等多種粒子，比國內現有的任何照射場都複雜，故輻射度量難度也較高，國內也尚未有應用於高空複雜混合輻射場之輻射度量經驗。故本計畫擬參考國際作法，考量各輻射偵檢器之特性與應用範圍，進行飛航劑量量測技術發展之可行性評估，綜整實際於高空操作儀器的便利性及安全性等條件，建置適用於本國的飛航劑量量測系統，以建立安全又有效的高空輻射量測技術。國際上針對高空輻射場量測，因涵蓋輻射種類複雜，一般會以線性能量轉移(Lineal energy transfer, LET) 10 keV/μm

為界，將輻射區分成高線性能量轉移及低線性能量轉移兩類分別進行量測，如利用可同時量測高/低線性能量轉移的組織等效比例計數器 (Tissue equivalent proportional counter, TEPC)，或者利用多種偵檢器分別對高/低線性能量轉移分別進行量測後再加總的作法。本研究將蒐集國際經驗進行各項偵檢技術之系統性可行性評估，目前初步考量實際飛機上之執行性及安全性，如高空量測時造成之高電壓、高氣壓、電磁波干擾等因素，以及彙整與航空業者討論之建議，擬挑選體積小、方便攜帶、無操作疑慮、需帶回實驗室進行後處理計讀的被動式量測技術為主要開發對象，文獻常見作法如軌跡偵檢器 CR39 (solid state nuclear track detector, SSNTD) 或熱發光劑量計 (Thermoluminescent dosimeter, TLD) 等，透過二者分別量測低/高線性能量轉移貢獻後，再加總推算出總劑量。

## 二、 空勤人員出勤資料解析及劑量評估工具開發

為進行空勤人員劑量評估，擬就國際上現有的飛航劑量評估軟體中，考量功能性、適配性及操作便利性後，擇一做為劑量評估工具航線劑量之評估源頭，然而該類劑量評估工具多為學研用途，程式介面的設計及操作較為不直觀友善，故希望透過預先彙整各民航業者航線資料，先計算好所有航線的飛航劑量值，再整理以建構大數據航線劑量資料庫，並開發可解析空勤人員班表航線資料格式、自動化比對劑量資料庫之工具，以

避免民航業者直接操作原版飛航劑量評估程式的困難，該工具除了評估空勤人員劑量值外，也將設計資料處理功能，依照不同劑量程度進行分類呈現，並搭配詳細操作說明書輔助說明，達到有效控管人員劑量之目的，相關劑量報表產出也可做為未來主管機關制定相關人員劑量管理規則之參考。目前先規劃以統一班表輸入規格為主要設計方向，並參考 TLD 人員資料輸出格式處理，因應未來銜接相關系統之用。

### 三、 評估國籍航空公司主要航線之輻射劑量及宣達宇宙射線相關科普知識

台灣處在東南亞重要的商貿地點，於航空業中扮演重要角色，國際上對於航線劑量的資訊有很多，但關於台灣的航線劑量資訊卻很少，需進行相關資訊的補足，故本計畫擬參考民航局每年發布的統計年報，挑選出該年度所有國籍航空公司之航線中，頻率最高的 10 條台灣直飛航線作為本工作項目探討的主要航線，透過至少 2 種飛航劑量評估程式，分別計算各主要航線的飛航劑量並進行參考比對，並提供相關資料給主管機關參考。此外國內對於宇宙射線之既存曝露背景知識較為缺乏，在現今受到科技產品影響甚深的世代，網路是最有效的資訊傳遞方式，故本計畫擬透過在本單位現有的天然放射性物質資訊網網站上發布親民之簡單科普圖文或短影片等方式，進行宇宙射線及飛航劑量相關背景知識宣達，本項目將綜整子計畫二工項三之內

容，於網站上提供 5 張與既存曝露相關之科普圖文讓民眾知悉。

#### **四、 提出空勤人員輻射劑量管理導則草案及相關建議**

根據 ICRP 132 號報告建議，對於空勤人員的劑量管理，除了應告知當事人宇宙射線可能造成之飛航劑量相關資訊外，也須對其所受之輻射劑量進行評估，對於空勤人員的劑量管理已然成為國際趨勢，如英國、德國、澳洲、日本皆陸續採取人員劑量管理措施，並訂定建議的劑量管制規範值，故本計畫擬參考國際上對於空勤人員之管理做法，考量我國國情及實際執行面後，研擬空勤人員輻射劑量管理導則草案與建議，供主管機關參考。

**本計畫子計畫二：民生商品含天然放射性物質之量測技術精進研析**，今年規劃執行工作包括：天然放射性物質於民生應用之量測技術相關國際文獻研析、精進氫氣氣體量測或標定技術研析及天然放射性物質於民生應用之檢測方法及評估模式開發、構思及宣達天然放射性物質於民生應用之科普知識、含天然放射性物質商品之後市場調查。具體實施方法如下述：

##### **一、 天然放射性物質於民生應用之量測技術相關國際文獻研析**

本單位實驗室已具備含天然放射性物質商品直接曝露所造成之體外劑量、鈾系及鈾系加馬核種分析，以及氫氣活度濃度所造成之體內劑量評估等技術。本年度擬擴展此套量測方法之應用領域，先就民生常用之建材

為對象，蒐集並彙整國際文獻之評估及量測方法，以利後續與實驗室現有技術整合。

## 二、 精進氦氣氣體量測或標定技術研析及天然放射性物質於民生應用之檢測方法及評估模式開發

根據本子計畫工項一所蒐集之資訊，考慮民眾於不同建材環境之使用情節及假設，以建立適切之劑量評估模式，可做為未來人員既存曝露劑量估算之參考，然而建材之評估模式的建立不如商品使用般單純，較難定義出代表性使用情節，目前規劃先以最保守之情況進行假設，以密閉環境不開窗之情況進行評估，並假定人員全天候皆待在室內，以量化最大可能劑量值，再進行調整。並預計協助主管機關執行建材輻射檢測 40 件，作為初步劑量評估方法建立之參考。由於氦氣屬於氣體且半衰期短，故在實驗室難以取得穩定之氦氣參考物質，校正使用之射源一般為其母核的放射性鐳核種，透過阿法衰變產生放射性氦，然而因鐳核種的半衰期較氦核種的半衰期來得長許多，故在每次使用後須靜置一段時間，待氦核種活度累積達平衡後才能再次使用，有其使用上的限制。本計畫擬利用加馬核種分析、理論數值推算或其他方式，嘗試透過母核與子核間的比活度隨時間變化之關係，藉此來間接標定氦氣的活度濃度，並研析標定技術應用於校正之可行性，盼可對未來氦氣量測儀器校正程序建立之目標提供助益。此外，針對現有之含天然放射性物質商品之氦氣量測技

術，也將透過如置於小腔體內實驗比對，以提高活度濃度累積來增強偵檢器響應訊號，或延長量測時間以降低背景干擾等作法，精進現有的氬氣量測技術。

### **三、 構思及宣達天然放射性物質於民生應用之科普知識**

為了向民眾傳達正確之天然放射性物質於民生應用相關科普資訊，本計畫擬彙整天然放射性物質相關資訊，結合管制規定、檢測流程及方法等內容於本單位天然放射性物質資訊網，並加強說明除含天然放射性物質商品外之民生應用，如居家建材及世界衛生組織 WHO 及 ICRP 對於一般住家及工作場所室內氬氣濃度參考基準等資訊，本項目將綜整子計畫一工項三之內容，於網站上提供 5 張與既存曝露相關之科普圖文讓民眾知悉。

### **四、 含天然放射性物質商品之後市場調查**

市面上常見到標榜負離子、能量或紅外線等功效之產品，其部分原因為添加了天然放射性物質，若不當或長時間使用恐造成額外之劑量曝露，為了確保民眾在使用此類商品時之輻射安全，對於該類商品的檢測是不可或缺的。本計畫擬透過與核能安全委員會、經濟部標準檢驗局、衛生福利部食品藥物管理署、各地方衛生局等主管機關配合之方式，對市售商品進行後市場調查抽樣，再利用實驗室已建立之含天然放射性物質商品評估模式進行人員劑量評估，確保民眾使用商品時所接受到的年均有效劑量不超過一般民眾之劑量限值 1

mSv，並提供相關檢測結果給主管機關參考。

本案經投標並於 113 年 2 月 27 日進行議約採固定價格決標方式辦理，議約結果本院同意下列議約事項(計畫全程)：

- (一)空勤人員劑量評估工具，提供詳細操作說明書 1 份。
- (二)國籍航空公司主要航線劑量評估，至少 2 種程式的評估結果。
- (三)每年提供 5 張與既存曝露相關之科普圖文資訊。
- (四)每年執行建材輻射檢測 40 件。

## 參、113 年度預定進度及具體成果

### 一、預定進度與查核點

#### 子計畫一：飛航劑量量測技術開發與空勤人員安全管理研析

工作項目	年月												備註	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
(1) 飛航劑量量測技術及劑量管理模式之國際文獻研析及量測系統之可行性評估與建置規劃			※										※	
(2) 空勤人員出勤資料解析及劑量評估工具開發			※										※	
(3) 評估國籍航空公司主要航線之輻射劑量及宣達宇宙射線相關科普知識						※			※					
(4) 提出空勤人員輻射劑量管理導則草案及相關建議													※	
工作進度估計百分比（累積數）	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	88%	95%	100%		
預定查核點	第 1 季：完成飛航劑量量測技術文獻蒐集，及劑量評估工具開發之演算法架構建立。 第 2 季：完成宇宙射線相關科普知識宣達。 第 3 季：完成國籍航空公司主要航線輻射劑量評估。 第 4 季：完成飛航劑量量測可行性評估相關研究報告、飛航劑量評估工具開發以及相關技術報告，並提出管理導則草案。													
說明：1.工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2.「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。 3.每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。														

## 子計畫二：民生商品含天然放射性物質之量測技術精進研析

年月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註	
工作項目														
(1) 天然放射性物質於民生應用之量測技術相關國際文獻研析			※								※			
(2) 精進氫氣氣體量測或標定技術研析及天然放射性物質於民生應用之檢測方法及評估模式開發													※	
(3) 構思及宣達天然放射性物質於民生應用之科普知識						※								
(4) 含天然放射性物質商品之後市場調查													※	
工作進度估計百分比（累積數）	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	88%	95%	100%		
預定查核點	<p>第 1 季：完成天然放射性物質於民生應用國際文獻蒐集。</p> <p>第 2 季：完成天然放射性物質於民生應用相關科普知識宣達。</p> <p>第 3 季：完成天然放射性物質於民生應用國際文獻研析。</p> <p>第 4 季：完成氫氣量測或標定技術精進相關研究報告，以及含天然放射性物質商品後市場調查技術報告。</p>													
<p>說明：1.工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。</p> <p>2.「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。</p> <p>3.每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。</p>														

## 二、具體成果

### 子計畫一：飛航劑量量測技術開發與空勤人員安全管理研析

1. 本子計畫 113 年度預期完成工作項目如下：
  - (1) 完成飛航劑量量測技術之文獻研析、可行性評估及建置規劃。
  - (2) 完成空勤人員劑量評估工具開發。
  - (3) 完成國籍航空主要航線之輻射劑量評估並宣達科普知識。
  - (4) 提出空勤人員輻射劑量管理導則草案。
2. 本子計畫 113 年度具體成果規劃包括：
  - (1) 研究團隊養成 1 個
  - (2) 飛航劑量評估工具開發 1 式
  - (3) 飛航劑量量測可行性評估相關研究報告 1 篇(如附件一)
  - (4) 飛航劑量評估工具相關技術報告 1 篇(如附件二)
  - (5) 空勤人員輻射劑量管理導則草案 1 份

### 子計畫二：民生商品含天然放射性物質之量測技術精進研析

1. 本子計畫 113 年度預期完成工作項目如下：
  - (1) 完成天然放射性物質民生應用國際文獻研析。
  - (2) 完成天然放射性物質於居家常用建材之評估模式開發及氡氣標定技術研析先期研究。
  - (3) 完成天然放射性物質於民生應用之科普知識宣達。
  - (4) 協助含天然放射性物質商品之後市場調查。
2. 本子計畫 113 年度具體成果規劃包括：

- (1) 研究團隊養成 1 個
- (2) 氦氣量測或標定技術精進相關研究報告 1 篇(如附件三)
- (3) 含天然放射性物質商品後市場調查技術報告 1 篇(如附件四)

## 肆、113 年度成果

本年度各研究計畫工作項目依研究計畫申請書執行，各項目成果及查核點達成情形說明如下：

### 子計畫一：飛航劑量量測技術開發與空勤人員安全管理研析

#### 一、飛航劑量量測技術及劑量管理模式之國際文獻研析及量測系統之可行性評估與建置規劃

國際文獻研析蒐集了包含歐盟發布的 Radiation Protection 140 報告[1]、Radiation Protection 156 報告[2]、國際輻射單位與度量委員會 ICRU 84 號報告[3]、國際放射防護委員會 ICRP 132 號報告[4]及期刊文獻數篇等，將彙整各量測技術之優劣，進行後續國內發展飛航劑量量測技術之可行性評估與系統設備建置規劃，以下為部分重點內容摘錄。

飛航劑量量測技術可行性評估部分，有關飛航劑量量測，國外使用之輻射偵檢器包含組織等效比例計數器 (Tissue Equivalent Proportional Counter, TEPC)、Liulin 型式偵檢器、RaySure 偵測器、TID (Transient Induced Detector) 以及 CR39 固態核徑跡偵檢器(或稱為軌跡偵檢器 track detector)。Hawk TEPC 作為一款專門用於機載輻射劑量測量的 TEPC，使用微劑量能譜來確定周圍等效劑量率  $H^*(10)$ 。TEPC 測量的微劑量能譜可依照能量沉積的概念，進一步計算出總吸收劑量  $D$ ，接著再透過與射質因數  $Q$  (Quality factor) 的乘積來得到等效劑量率[5]。Hawk TEPC 由電池供電，裝在一個手提箱中，方便放置在機艙內。其輻射敏感體積是一個內徑為 4.95 吋的球形空腔，由組織等效塑膠 A-150 製成，內部填充 7 Torr 的丙烷氣體，用於模擬直徑為

2 米的組織體積。該空腔安裝在真空密封的不銹鋼容器中，而能譜分析的電子設備則安裝在鋁製圓柱體中，該圓柱體直接連接到不銹鋼偵測器底座上。Hawk TEPC 裝置上設有一個顯示屏，用於監控數據採集過程的重要資訊，例如時間、日期、總累積劑量、劑量率等。

2015 年 9 月 25 日，美國 NASA 支持下，Mertens 等人發射了 RaD-X 氣球，進行了一次平流層氣球飛行實驗。這次實驗提供了大量的測量數據，包括在一般商業飛行高度的宇宙射線輻射以及海拔更高的大氣層環境的游離輻射場。此外，實驗還攜帶了幾種不同的輻射偵測器，以評估它們在長期連續監測飛航輻射方面的潛在應用。在海拔 20 公里以上的高度，RaD-X 計劃從四種不同的偵測器中獲得了超過 18 小時的飛行數據，這四種偵測器分別是 TEPC、Liulin、TID 和 RaySure 偵測器[6]，如圖 1 所示。初步評估顯示，RaySure 偵測器在飛航高度上的測量結果與 TEPC 相當一致，尤其在富含中子的大氣輻射環境中。RaySure 是一種對高 LET 事件敏感的能譜儀，並且可以將矽中的測量能譜轉換為等效劑量。然而，RaySure 目前尚未商業化，偵檢器較難取得。這些結果表明，TID 和 RaySure 偵測器可能成為飛機上即時連續輻射監測的候選技術。

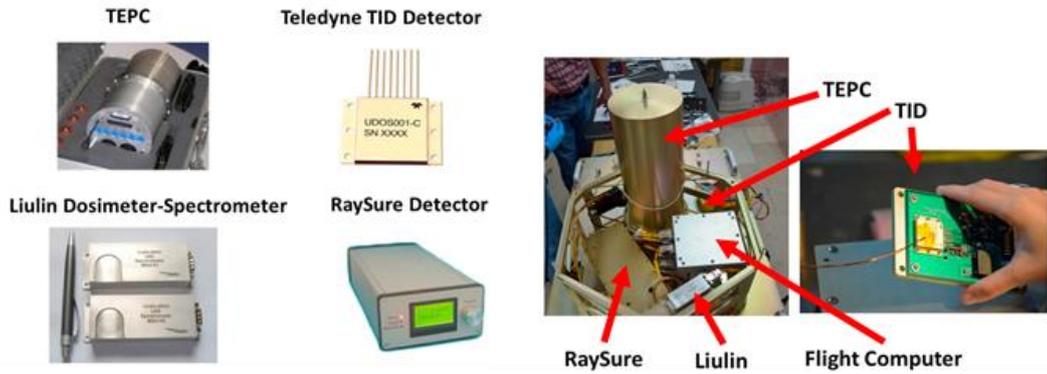


圖 1、RaD-X 計劃的氣球上所裝載的四種輻射偵測器，以及各偵檢器的擺設方式[6]

INGO 計劃中，Kubancak 等人於捷克客機上利用 Liulin 測量宇宙輻射的劑量及其分佈情況[7]，不同航線的量測結果如圖 2 所示。Liulin 偵檢器是一種主動式、平面式的矽半導體輻射偵測器，其有效檢測區域為 2x1 平方公分，可以檢測單個能量沉積事件並記錄所產生的能譜。該團隊首先在 CERN 的高能輻射參考場進行量測以取得校正參考值，並識別了影響 Liulin 偵檢器系統不確定度的主要因素。研究發現 Liulin 偵檢器測量結果的組合不確定度估計約為 $\pm 16\%$ 。此外，他們在窄體飛機內進行了多次飛行測量實驗，觀察到了客艙內不同位置的  $H^*(10)$  測量結果。窄體飛機是指機身較窄、通常只有一條座椅通道的飛機，如 Airbus A319、Airbus A320 和 Boeing 737。相對地，寬體飛機則是機身較寬、通常有兩條座椅通道的飛機，用於長途航班。然而，作者指出 Liulin 偵檢器對於熱中子和中等能量中子的敏感度不高，建議未來在寬體飛機上進行類似的測量實驗，以更全面地觀察飛機客艙內的輻射場分佈情況。

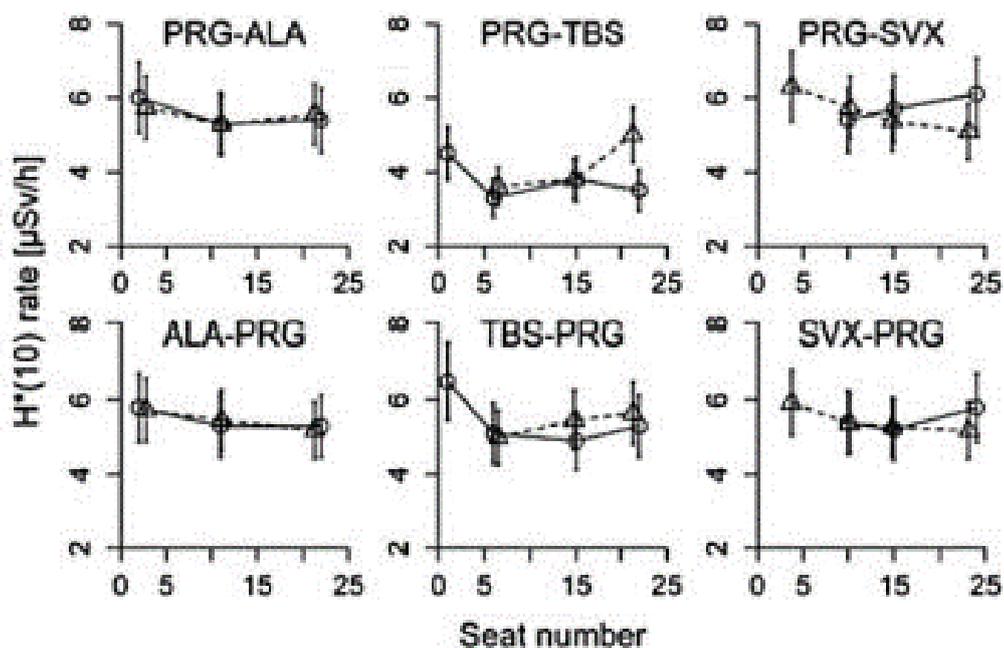


圖 2、Liulin 型式偵測器於不同航線所測量之周圍等效劑量率分佈  
(圓圈: 機艙右側測量值, 三角形: 機艙左側測量值)[7]

早在 1999 年, O'Sullivan 等人以 CR39 進行了飛機上的輻射測量, 獲得了一般飛行高度的輻射特性 LET 曲線, 因其無需供電的被動檢測特性使其可在輻射測量同時避免飛行時的各種信號干擾, 非常適合飛行輻射相關的監測[8]。此外, Zhou 等人[9]的文獻也報告了 CR39 在飛行輻射相關量測和分析方面的應用。為了測試該技術的有效性, 該團隊首先在類似飛行高度輻射場的 CERN-CEC 校正場進行了測量, 發現使用重離子校正獲得的劑量值具有最好的一致性。在 1993 至 2003 年期間, Zhou 等人將 CR39 以堆疊排列放置在飛機機艙內, 每堆由多達 20 片 CR39 組成, 每片厚度為 0.55 毫米。飛行輻射曝露結束後, 所有 CR39 一起送回到都柏林高級研究所(DIAS)實驗室進行讀數。先在 60°C 的 6.25 N 的 NaOH 中蝕刻 20 小時或 60 小時, 短時間

蝕刻用於輻射粒子射程較短的事件，而長時間蝕刻則用於射程相對較長的事件。該團隊的研究涵蓋了 1993 年至 2003 年間所有調查的航線，包括 Aer Lingus、Alitalia、Air France、Finnair、捷克航空的一些國際亞音速航班和英國航空的部分超音速航班，超音速航班僅包括倫敦-紐約航線(London-New York)，而其他航班均為亞音速。總表呈現了該團隊機載 CR39 於不同時期和飛行路線所受到的曝露總時間以及使用 CR39 量測到的等效劑量率結果。根據飛航劑量評估程式 EPCARD v3.2 和 CARI-6 計算的等效劑量率結果也列在表 1 中進行比較。整體而言，實驗結果和程式模擬結果之間整體符合程度良好，根據 EPCARD v3.2 計算大部分亞音速航班的實驗值和理論值之間的差異在 1% 到 15%之間，而對於超音速航班差異則是在 13%到 22%之間。

韓國天文和空間科學研究所的 Hwang 等人在 2020 年的文獻中提到[10]，該團隊使用 Liulin-6K 設備在商業航班上進行了 25 次輻射劑量測量。這些測量覆蓋了包括北美、東南亞、澳洲、俄羅斯和歐洲在內的多個大陸航線。Liulin-6K 設備使用矽傳感器來檢測帶電粒子的線性能量傳遞，並將其轉換為劑量。研究人員將測量結果與韓國輻射曝露評估模型 KREAM 進行了比較，發現 KREAM 的結果與 Liulin 觀測結果非常一致，百分比誤差約為 10.95%。

表 1、CR39 測量結果與程式計算之比較[8]

Flight route	Date of exposure	Expo. time (≥9 km) (h)	Dose equi. rate CR-39 (≥5 keV/μm water) (ICRP 60) (μSv/h)	Dose equi. rate EPCARDv3.2 (≥5 KeV/μm water) (H <sup>+</sup> (10)) (μSv/h)	Dose equi. rate CARI-6 (E) Total LET (ICRP 60) (μSv/h)
<i>Concorde</i>					
London–New York	December 1994–July 1995	450	8.52 ± 0.29	6.67	10.53
London–New York	December 1996–June 1997	482	8.34 ± 0.56	6.92	10.64
London–New York	July 1997–February 1998	538	8.22 ± 0.64	7.15	10.64
London–New York	July 2000	45	6.00 ± 0.42	4.73	8.41
London–New York	May 2002	45	6.30 ± 0.65	5.38	8.92
London–New York	July 2002	45	6.06 ± 0.65	5.25	8.70
<i>Aer Lingus</i>					
Dublin–Boston, NY	1993	1729	3.56 ± 0.13	4.09	5.64
Dublin–Boston, NY	April–May 1997	180	4.48 ± 0.42	4.93	5.98
Dublin–Boston, LA	June 2000	185	3.60 ± 0.32	3.44	5.07
Dublin–Boston, LA	September–October 2000	610	3.26 ± 0.23	3.12	5.13
Dublin–Boston, LA	March–April 2001	436	3.39 ± 0.39	3.44	5.40
Dublin–LA	August–October 2001	796	3.35 ± 0.29	3.40	5.58
Dublin–Boston, LA	August–October 2001	694	3.29 ± 0.31	3.30	5.35
<i>Alitalia</i>					
Milan–LA	December 1995–February 1996	205	3.52 ± 0.29	4.70	6.27
Milan–Tokyo	May–July 1997	172	3.68 ± 0.52	4.52	5.91
Rome–Rio de Jan	October–December 1996	313	1.40 ± 0.12	1.11	2.52
<i>Air France</i>					
Paris–Tokyo	May 2001	210	2.72 ± 0.24	3.10	4.91
Paris–Fairbanks–Tokyo	April 2002	26	3.24 ± 0.29	3.05	4.49
<i>Czech Airlines</i>					
Prague–NY	March–May 2001	NA <sup>a</sup>	Total (mSv) 1.33 ± 0.10	Total (mSv) <sup>b</sup> 1.63	Total (mSv) <sup>b</sup> 2.68
Prague–NY	May–July 2001		1.52 ± 0.13	2.16	3.78
Prague–NY	August–October 2001		1.26 ± 0.10	1.46	2.60
/Montreal/Toronto	October–December 2002		1.39 ± 0.11	1.30	2.45
<i>Finnair</i>					
Hel.–PEK,BKK,HK, NY	November 2002–February 2003	764	Average 1.96 ± 0.14	Average 2.00	Average 3.38

<sup>a</sup> NA, not available.

<sup>b</sup> Provided by Prof F. Spurny, Nuclear Physics Institute, Prague.

綜整上述文獻回顧內容，多種偵檢器都可達成量測目的，考量飛航劑量偵檢器的要求(如以下幾點)，整理比較如表 2：

- ✓ 靈敏度和準確性：偵檢器需具備高靈敏度和準確性，以便能夠捕捉和測量不同種類的輻射，如高 LET 和低 LET 輻射。
- ✓ 便攜性和易用性：由於需在飛機狹窄的空間內使用，偵檢器需具有便攜性和易於操作的特點。
- ✓ 電源要求：偵檢器應該具有低能耗或被動式設計，以減少對電源的依賴，確保在長時間飛行中的連續運作。
- ✓ 耐用性和穩定性：偵檢器需在飛行環境中的各種條件下保持穩定性和耐用性，包括高海拔、溫度變化和振動等因素。

表 2、各偵檢器的優點、缺點、使用條件、使用限制比較

偵檢器	優點	缺點	適用條件	使用限制
TEPC	高靈敏度、能區分高低LET輻射	需要電源、體積較大	飛機機艙內，需固定放置	不適合小型飛機或空間有限環境
CR-39	無需電源、便攜、可長時間曝露	前置處理繁複(需化學蝕刻等)	適合長時間輻射曝露測量	需實驗室後處理和分析
Liulin	實時測量，對中子輻射敏感	僅對帶電粒子敏感，體積較大	適合在固定位置的實時監測	不適合於所有類型的輻射場
RaySure	高靈敏度、實時能譜分析	價格較高，需要校準	適合高海拔和輻射強度高的環境	需定期校準和維護
TID	對短時間輻射事件敏感	需要電源，數據處理較複雜	適合瞬時輻射劑量測量	不適合長時間曝露

系統設備建置規劃部分，考慮到台灣的環境因素，認為目前最適合的輻射偵測器是 TEPC 和 CR39。TEPC 對微劑量能譜有高度敏感性，能夠區分高低 LET 輻射成分，並且具有電池和插電式兩種供電方式。相比之下，常見的電子個人劑量計雖然體積小，但對中子的反應差，無法準確反映飛行高度的宇宙射線輻射場特性。雖然一些團隊正在開發新的飛航輻射偵測器，但矽製固態偵測器對中子的測量準確性較低。

綜上所述，在目前的研究資源和飛行環境下，CR39 被認為是更好的選擇，可作為未來飛航劑量輻射偵測的重要工具。因此，目前將重點聚焦在軌跡偵檢器 CR39，考慮到其輕便易攜帶的特性，適合長時間放置於高空量測，且不須過多人為照料，也無電磁波、高電壓、高氣壓等飛安疑慮產生，在初步與民航業者的溝通中，為最有可能發展之飛航劑量量測技術，詳細評估內容待後續報告中彙整呈現，並建立其用於飛航劑量量測的標準操作程序(SOP)，包括化學蝕刻、光學掃描等步驟。

## 二、空勤人員出勤資料解析及劑量評估工具開發

在空勤人員飛航劑量評估工具開發方面，劑量計算演算法架構如下圖 3，其中藍色方塊為我方須事先完成的事項。

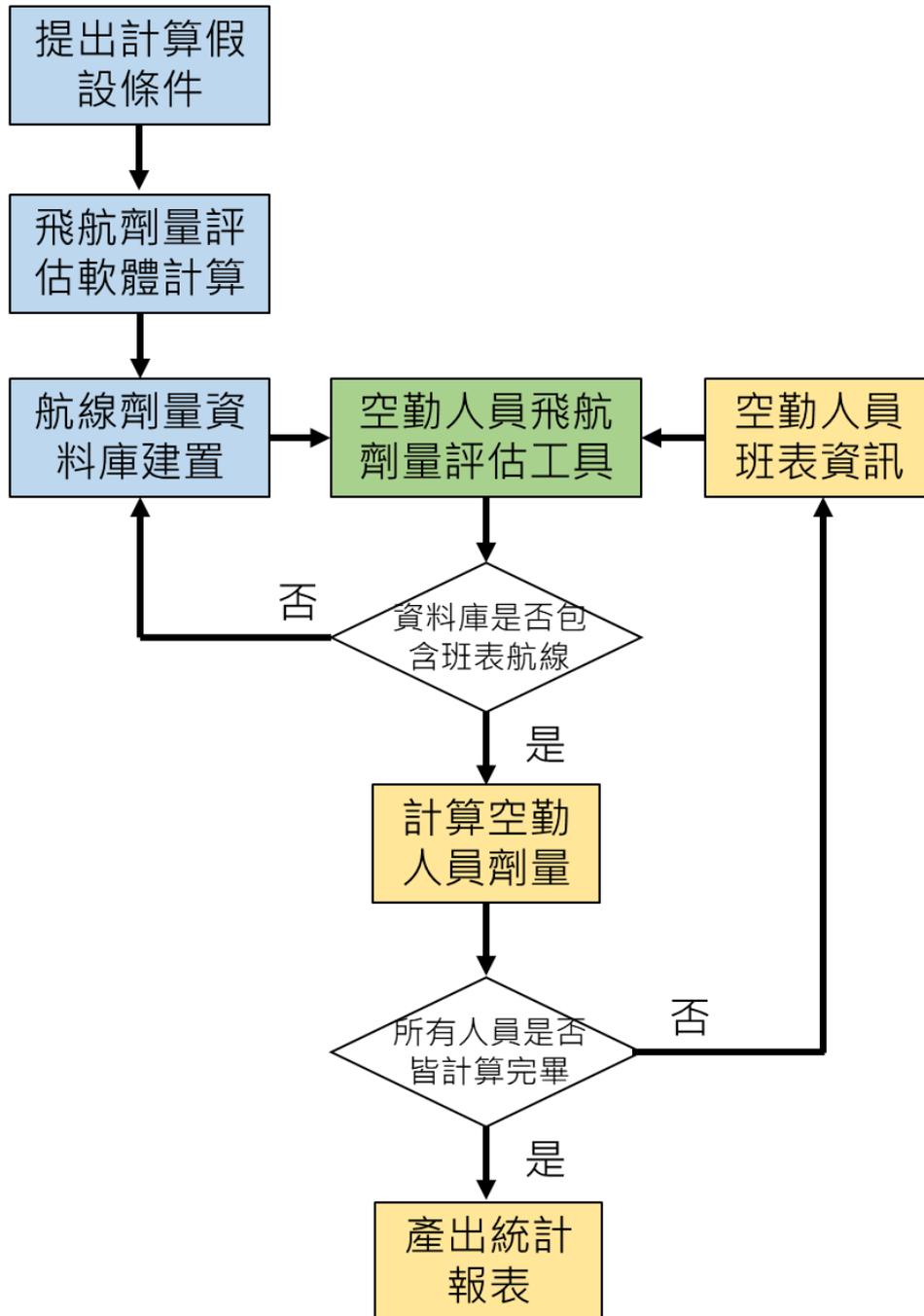


圖 3、空勤人員飛航劑量評估工具演算法架構圖

而航線劑量資料庫建置部分，目前係以國內第一套技術自主的評估程式 NTHU Flight Dose Calculator (FDC) [11]作為劑量計算媒介，國際間對於飛航評估軟體常見的驗證方式包含與量測數據的比對，以及與其他飛航評估軟體的比對兩部分。ICRU-84 號報告[3]針對第一部分提供了大量量測數據，如圖 4 為 ICRU-84 號報告之量測值[3]及 FDC 之計算值，在不同高度、緯度、太陽週期等條件時對於中子能譜的結果比較[12]，其中可看到在  $10^{-10}$ ~ $10^{-9}$  GeV 差異較大，此點在 ICRU-84 報告中並未多做說明，判斷可能原因為實驗量測使用的儀器有低限值 (threshold)，導致低能量中子無法有效響應，而 FDC 是透過理論模型計算，故不管在高能或低能都可計算出結果，得出的中子能譜較為連續平滑。除了能譜比較外，在與 ICRU-84 號報告的其他劑量值參考數據比較項目中，FDC 與參考數據的差異皆符合報告建議的 30% 以內[12]；而第二部分則可透過歐盟出版的 EURADOS 報告[1]進行，如圖 5 為 FDC 與 EURADOS 報告中不同的飛航劑量評估軟體，對於 23 條不同航線之劑量計算結果的比較，其中 FDC 在圖中的劑量結果標示為 “dose rate database” 和 “spectra conversion”，前者代表直接使用 FDC 劑量率資料庫擬合函數進行計算之結果；而後者則是透過 FDC 獨有的能譜轉換方法，將能譜直接乘上劑量轉換因子後得出的劑量，兩者會略有差異。雖然與 EURODOS 報告中其餘 11 個程式的中間值 (圖 5 中紅色)相比，FDC 的劑量預測略為保守，參考 FDC 之文獻[11]，其考量到各程式使用之模型與假設不同，認為與程式中間值差異在 20% 屬合理範圍內，顯示其計算結果的可靠性。

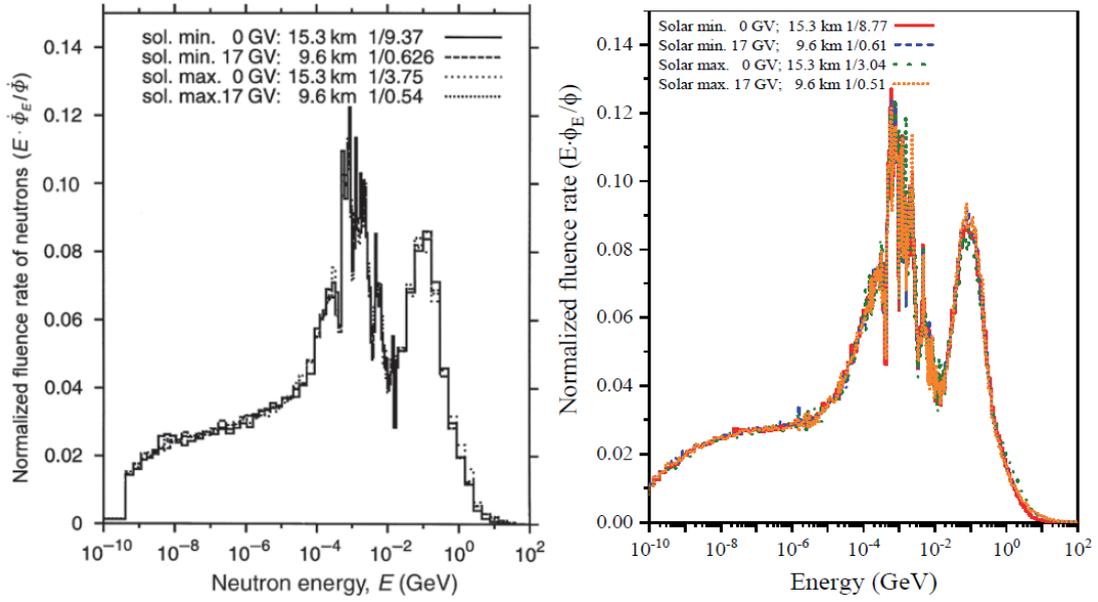


圖 4、ICRU-84 號報告(左)量測值及 NTHU Flight Dose Calculator(右)計算值之中子能譜比較[12]

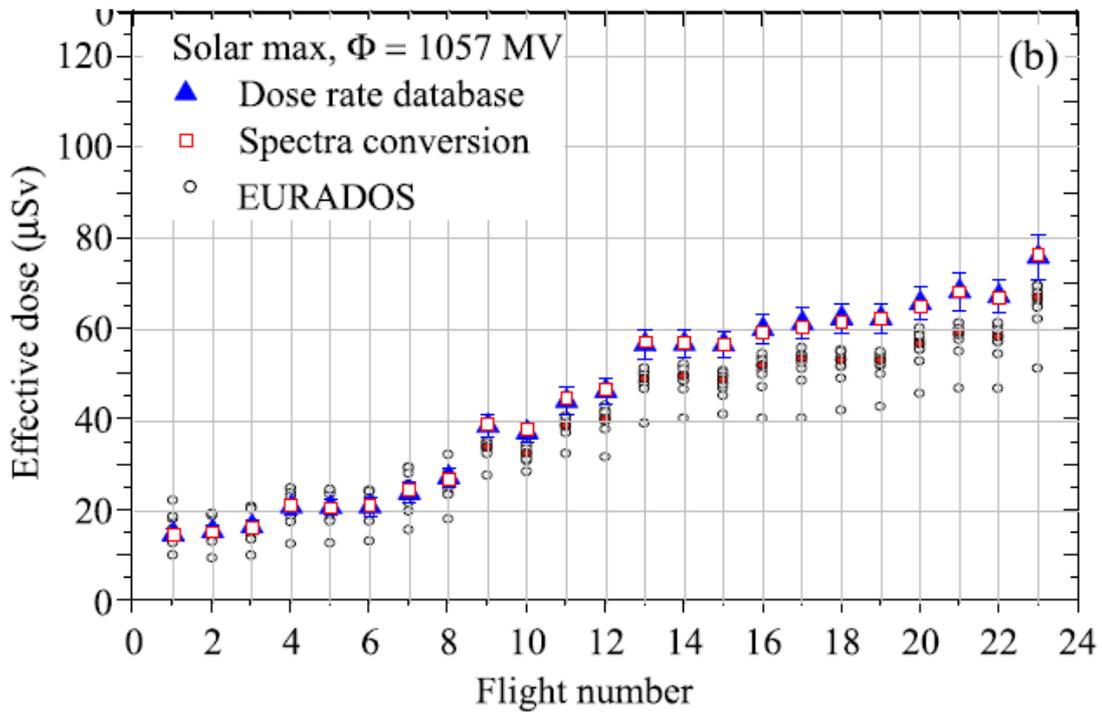


圖 5、NTHU Flight Dose Calculator 與 EURADOS 報告之驗證[11]

對於本資料庫建置需求，目前假定計算條件參考常見之民航客機平均值，設定為飛航高度 10500 公尺，飛航速度為每小時 900 公里，並以兩目標機場間最短距離的路線(稱之為大圓航線)來模擬飛行路線軌跡；飛行年份部分，由於宇宙射線強度也會受到太陽磁場強弱的影響，而太陽磁場的強弱可藉由觀測太陽黑子的數目來辨別，一般遵循著約 11 年的變化週期(稱之為太陽週期)，為了將此因素也納入考慮，我們以歷史太陽週期的高低點分別進行劑量評估，再透過線性內插方式進行後續處理，建立線性擬合計算公式，並將參數儲存以建立航線劑量資料庫，再依計算需求以年份作為內插計算之指標。綠底部分為本計畫預發展之劑量評估工具，將比對民航業者之空勤人員班表與資料庫數值，計算出人員劑量後以報表方式呈現。黃底部分則為需要民航業者配合的部分，包含空勤人員班表的提供、評估工具的實際操作及報表回傳等步驟準備。

圖 6 為空勤人員飛航劑量評估工具(Aircrew Radiation Dose Assessment Software, AiRDAS)之安裝介面，採用常見的 windows 作業系統開發，此工具之執行將以綁定 MAC IP 之方式授予憑證 License 後才能使用，目的為有效控管工具之使用對象。圖 7 至圖 11 則為初步的介面設計，包含了填入單位資料頁面，可輸入使用單位之公司資料(圖 7)；選取航線劑量資料庫頁面，可輸入預採用的航線劑量資料庫(圖 8)；匯入班表資料頁面，可輸入空勤人員班表並進行劑量計算(圖 9)；劑量評估結果頁面(圖 10)，可輸出飛航劑量評估結果會總表及飛航劑量評估紀錄表，如圖 11 及 12，可作為後續人員劑量追蹤或資料回報之用。該程式之

執行須填寫申請單(圖 13)並以綁定 MAC IP 之方式授予憑證 License，以有效控管工具之使用對象。本評估軟體也將配合核安會，於本年度推動之「空勤人員宇宙射線劑量管理試辦計畫」中提供給民航業者使用，進行人員劑量評估與控管。關於此工具的相關功能請參考附件二之測試報告，或者參考於 8 月程式發布時一併提供給核安會之操作手冊(圖 14)。

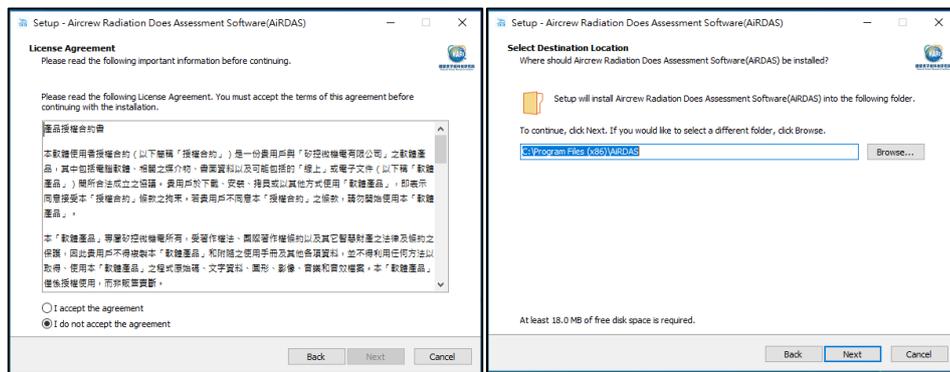


圖 6、空勤人員飛航劑量評估工具-程式安裝



圖 7、空勤人員飛航劑量評估工具-填寫單位資料頁面



圖 8、空勤人員飛航劑量評估工具-選取航線劑量資料庫頁面

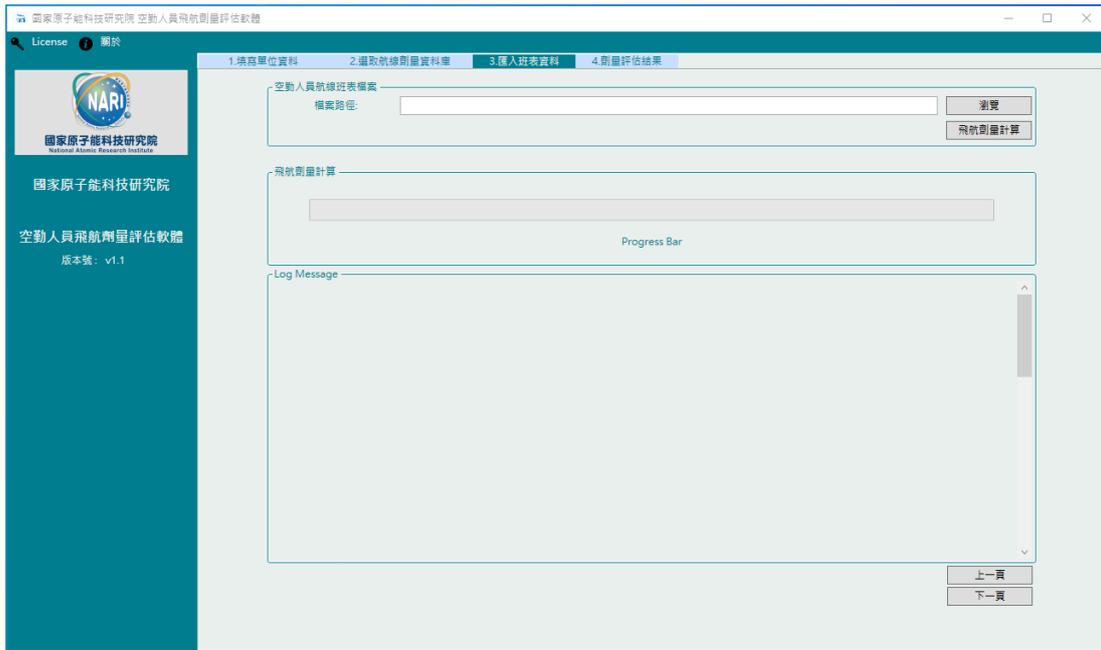


圖 9、空勤人員飛航劑量評估工具-匯入班表資料-計算前(上)後(下)



圖 10、空勤人員飛航劑量評估工具-劑量評估結果頁面

### 空勤人員飛航劑量評估結果彙總表

1. 航空公司: CAL  
 2. 軟體版本: v1.1  
 3. 評估日期: 2024/9/16  
 4. 評估週期: 2024/01-2024/02  
 5. 評估結果:  
 累積受評人數: 5 人  
 年均劑量: 0.2312 毫西弗  
 最高劑量: 0.309 毫西弗

空勤人員年度飛航劑量統計

劑量區間(毫西弗)	空勤人員類別	
	駕艙(人)	客艙(人)
小於1	2	3
1以上至未滿2	0	0
2以上至未滿3	0	0
3以上至未滿4	0	0
4以上至未滿5	0	0
5以上至未滿6	0	0
大於6	0	0
航線數	12	12
航班數	19	24
總人數(人)	2	3
年均劑量(毫西弗)	0.242	0.224
集體劑量(人*毫西弗)	0.485	0.672
最高劑量(毫西弗)	0.309	0.282

管理人簽章:  
 負責人或代理人簽章:

圖 11、空勤人員飛航劑量評估工具-飛航劑量評估結果彙總表

### 飛航劑量評估紀錄表

航空公司: CAL      軟體版本: v1.1      評估日期:

序號	人員姓名	身分證字號/護照號	人員類別	輻射劑量(毫西弗)													
				1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
	劉xx	A10XXXXX05	CC	0.090	0.086	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Justin-Muda	XXXXXXXXXX	PC	0.100	0.145	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	田中律	AA1234567	CC	0.309	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Lisa J Thib	31195855	PC	0.183	0.099	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	王XX	TI23154531	PC	0.000	0.145	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

代理人簽章: \_\_\_\_\_      負責人或代理人簽章: \_\_\_\_\_

圖 12、空勤人員飛航劑量評估工具-飛航劑量評估紀錄表

#### 國家原子能科技研究院-空勤人員飛航劑量評估軟體憑證申請書

113.08.06

\*每個欄位均為必填，請填寫完成且用印後，E-mail 至 [zyvang@nari.org.tw](mailto:zyvang@nari.org.tw)

公司/機構名稱	
負責人	
管理人/聯絡人(單位與職稱)	
聯絡電話或手機號碼	
聯絡 E-mail	
申請原因(如新申請、管理人異動等)	
管理人/聯絡人簽名	單位印信

備註：

- 為安裝及使用空勤人員飛航劑量評估軟體，請提供電腦「系統資訊」檔案(\*.txt 文字檔)，併同本申請單寄至 [zyvang@nari.org.tw](mailto:zyvang@nari.org.tw)
- 上述檔案可透過滑鼠右鍵點擊開始功能表>執行，輸入 Msinfo32後開啟系統資訊頁面，再選擇檔案>匯出。
- 使用本軟體需安裝 .NET 6.0.x Desktop Runtime 桌面執行階段套件(x64)，請於微軟官方網站下載：<https://dotnet.microsoft.com/zh-tw/download/dotnet/6.0>。

以 下 請 勿 填 寫

承辦人	核定時間	核定編號

圖 13、空勤人員飛航劑量評估工具-軟體憑證申請書



圖 14、空勤人員飛航劑量評估工具-操作手冊

### 三、評估國籍航空公司主要航線之輻射劑量及宣達宇宙射線相關科普知識

本研究選擇 FDC 及 CARI 作為台灣主要航線劑量評估的程式，FDC 為本國自主開發的飛航劑量評估軟體[11]，可較自由的針對需求進行客製化功能改進，此外，它以蒙地卡羅程式 FLUKA [13]計算結果為基礎，能夠精準地計算出不同輻射粒子在高空中的劑量貢獻，關於程式驗證等內容已於章節二中說明；而 CARI 是由美國聯邦航空管理局開發並廣泛應用於國際飛航劑量評估的標準工具[14]。兩者均採用 ICRP 74 報告中的有效劑量轉換因數，這使得它們在基礎計算方法上具有一致性，便於直接比較。

國籍航空公司主要航線之代表航線的挑選部分，我們從最新的民航局 112 年民航統計報[15]中的表 50「臺灣各國際機場國際及兩岸定期航線班機載客率—按航線分」，根據載客量挑選出了 10 條最頻繁的國際及兩岸定期航線做為討論對象。然而，考慮到載客人數最多的國際航線多集中於亞洲，這些航線的飛行時間和距離相對較短，飛行高度較低，飛航輻射劑量大多較為一致，且過度集中於單一地區較不具代表性。為了涵蓋更多具代表性的航線，本研究根據載客率多寡，選擇了飛往亞洲、美洲、歐洲的前三條頻繁航線，以及一條飛往大洋洲的航線，盡可能地來涵蓋全球範圍，這些航線及其機場資訊記錄於表 3 中，圖 15 則展示了在地圖上標示的台灣以及各個目的地機場的位置，以便直觀地理解這些航線在地圖上的分佈。

我們選擇了載客人數最多的亞洲航線，分別是載客人數為

5,175,798 的香港航線，3,218,166 的東京航線，以及 2,507,222 的首爾航線。此外，美洲的代表航線有載客人數為 1,134,776 的舊金山航線，426,117 的溫哥華航線，及 325,222 的紐約航線。歐洲航線方面，我們選擇了巴黎（257,743 人）、法蘭克福（259,908 人）以及伊斯坦堡（227,820 人）。最後，選擇了飛往大洋洲的布里斯本航線，其載客人數為 284,594 人。在這次的模擬中，時間選擇為與年報一致的 2023 年，並將模擬日期設定為 7 月。7 月作為模擬日期是因為它處於年中的中間值，能夠較好地反映全年飛行條件的平均情況。

表 3、民航局 112 年年報中所挑選之 10 條代表航線

Continent	Destination	Airport	ICAO code	Latitude	Longitude
Asia	Hong Kong	Chek Lap Kok International Airport	VHHH	22°18' 32"N	113°54'53"E
Asia	Tokyo	Narita International Airport	RJAA	35°46'37"N	140°23'34"E
Asia	Seoul	Incheon International Airport	RKSI	37°34'18"N	126°58'41"E
Americas	San Francisco	San Francisco International Airport	KSFO	37°46'41"N	122°25'27"W
Americas	Vancouver	Vancouver International Airport	CYVR	49°17'13"N	123°7'15"W
Americas	New York	John F. Kennedy International Airport	KJFK	40°38'24"N	73°46'48"W
Europe	Paris	Charles de Gaulle Airport	LFPG	49°0'36"N	2°33'0"E
Europe	Frankfurt	Frankfurt Airport	EDDF	50°6'39"N	8°40'5"E
Europe	Istanbul	Istanbul Atatürk Airport	LTBA	40°58'47"N	28°49'13"E
Oceania	Brisbane	Brisbane Airport	YBBN	27°28'12"S	153°1'48"E



圖 15、10 條航線目的地機場位置分佈

計算結果彙整於表 4，可觀察到在亞洲航線中，香港、東京和首爾於 2023 年 7 月的模擬結果，這三條航線的總劑量相對較低，與其飛行距離和飛行高度密切相關。香港航線的總劑量為  $1.461 \mu\text{Sv}$ ，這是所有航線中劑量最低的。這反映了該航線的短途性質以及較低的飛行高度，使得乘客和機組人員曝露於較少的宇宙射線。東京和首爾航線的總劑量則分別為  $3.689 \mu\text{Sv}$  和  $2.188 \mu\text{Sv}$ ，這兩條航線的輻射曝露水平略高於香港，主要是因為它們的飛行距離較長，且飛行高度稍高。儘管如此，這些數值仍顯示出短途航線的輻射劑量普遍較低，宇宙射線的曝露相對有限。

美洲航線，主要都聚集在北美洲中的舊金山、溫哥華和紐約的輻射劑量明顯高於亞洲航線。這些長途跨洋航線因其飛行時間長、飛行高度高以及穿越高緯度區域而導致較高的輻射曝露。舊金山航線的總劑量為  $45.635 \mu\text{Sv}$ ，溫哥華為  $47.856 \mu\text{Sv}$ ，而紐約航線的總劑量則達到  $78.852 \mu\text{Sv}$ ，是所有航線中劑量最高的。

這些數據表明，跨太平洋和跨大西洋的長途航線，由於更長時間曝露於宇宙射線以及途經高緯度地區的特性，輻射劑量顯著增加。在這些航線上，中子和質子是主要的輻射來源，特別是在紐約航線上，中子和質子的總劑量分別為 33.259  $\mu\text{Sv}$  和 30.303  $\mu\text{Sv}$ ，占據了總劑量的絕大部分。

歐洲的航線包括巴黎、法蘭克福和伊斯坦堡，這些航線的輻射劑量雖然不及北美航線高，但仍屬於較高範圍。巴黎和法蘭克福航線的總劑量分別為 50.690  $\mu\text{Sv}$  和 47.011  $\mu\text{Sv}$ ，顯示出長途跨大西洋航線的劑量水平相對接近。這些航線同樣途經高緯度區域，且飛行時間長，導致乘客和機組人員曝露於較高水平的宇宙射線。中子和質子依然是主要的劑量貢獻者，特別是在巴黎航線上，這兩種粒子分別貢獻了 20.442  $\mu\text{Sv}$  和 19.130  $\mu\text{Sv}$ 。相較之下，伊斯坦堡航線的總劑量為 29.681  $\mu\text{Sv}$ ，這是一條相對較短的歐洲航線。儘管如此，伊斯坦堡航線的輻射劑量依然高於大部分亞洲航線，顯示出長途飛行的宇宙射線曝露影響。

在大洋洲的布里斯本航線上，總劑量為 13.074  $\mu\text{Sv}$ ，儘管這是一條較長的航線，但其輻射劑量仍低於北美和歐洲的長途航線。這主要是因為從台灣出發到大洋洲的距離通常比飛往北美和歐洲的距離稍短，特別是使用大圓估計法時，航線距離相對較短，飛行時間也較少，從而減少了宇宙射線的曝露。此外，該航線沒有經過高緯度區域，因此輻射劑量的累積相對較低。中子和質子仍然是主要的輻射來源，這兩種粒子的貢獻分別為 4.017  $\mu\text{Sv}$  和 3.991  $\mu\text{Sv}$ 。

總體來說，2023 年的模擬結果顯示出航線輻射劑量與飛行

距離、飛行高度以及航線經過的地理區域密切相關。長途跨洋航線如紐約、巴黎和溫哥華，由於更長時間的宇宙射線曝露以及途經高緯度區域，劑量明顯較高。而短途航線如香港和東京，因飛行距離短且高度較低，劑量顯著較低。這些結果進一步確認了飛航輻射劑量的區域性差異，並強調了飛行參數對輻射曝露的影響。

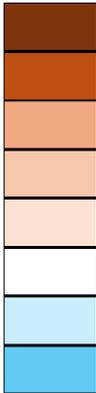
在 FDC 及 CARI 比較部分，我們主要關注飛航劑量最主要之劑量貢獻(中子、質子)的兩者差異。由表 5 可看出在所有航線中，中子的相對誤差相對較小，誤差範圍在-0.135(香港)至-0.006(溫哥華)之間。這表明 CARI 與 FDC 在中子的劑量計算上相對一致。由於中子是飛行輻射中最主要的輻射源之一，兩個程式在此項輻射成分上的一致性顯示了它們的可靠性。質子的相對誤差也較為一致，誤差範圍從-0.230(紐約)到-0.119(東京)。在所有航線中，CARI 計算出的質子劑量略低於 FDC，可能原因為兩者所適用之計算模型與假設不同所造成。

表 4、國籍航空公司 10 條主要航線之各輻射劑量成份 FDC 及 CARI 程式計算結果。

Destination	Simulation Program	Radiation Dose ( $\mu\text{Sv}$ )							Total
		Neutron	Proton	Electron	Muon	Photon	Pion	Heavy ion	
Hong Kong	FDC	0.457	0.423	0.216	0.108	0.252	0.003	0.001	1.461
	CARI	0.395	0.331	0.287	0.093	0.307	0.004	0.009	1.420
Tokyo	FDC	1.152	1.115	0.546	0.234	0.630	0.008	0.004	3.689
	CARI	1.141	0.983	0.767	0.222	0.814	0.011	0.028	3.960
Seoul	FDC	0.698	0.656	0.313	0.149	0.365	0.005	0.002	2.188
	CARI	0.650	0.547	0.411	0.130	0.440	0.006	0.015	2.196
San Francisco	FDC	17.570	16.829	4.265	1.777	5.067	0.068	0.059	45.635
	CARI	16.907	13.854	5.657	1.665	6.175	0.077	0.496	44.812
Vancouver	FDC	19.182	17.959	4.041	1.703	4.839	0.065	0.067	47.856
	CARI	19.065	14.905	5.342	1.586	5.884	0.073	0.545	47.495
New York	FDC	33.259	30.303	5.710	2.441	6.932	0.091	0.116	78.852
	CARI	30.665	23.330	7.366	2.206	8.191	0.100	0.858	73.036
Paris	FDC	20.442	19.130	4.185	1.769	5.023	0.067	0.074	50.690
	CARI	19.801	15.499	5.476	1.631	6.040	0.075	0.578	49.180
Frankfurt	FDC	18.828	17.673	3.961	1.672	4.746	0.063	0.068	47.011
	CARI	18.558	14.604	5.270	1.568	5.804	0.072	0.546	46.491
Istanbul	FDC	10.763	10.517	3.216	1.322	3.780	0.051	0.032	29.681
	CARI	10.405	8.820	4.287	1.242	4.629	0.059	0.289	29.699
Brisbane	FDC	4.017	3.991	1.987	0.764	2.270	0.031	0.015	13.074
	CARI	3.964	3.465	2.829	0.753	2.979	0.039	0.102	14.116

表 5、國籍航空公司 10 條主要航線之各輻射劑量成份 FDC 及 CARI 程式計算結果相對差異。

Destination	Relative Difference between the simulation results of the two programs							
	Neutron	Proton	Electron	Muon	Photon	Pion	Heavy Ions	Total
Hong Kong	-0.135	-0.218	0.329	-0.139	0.218	0.312	7.762	-0.028
Tokyo	-0.010	-0.119	0.405	-0.052	0.292	0.319	5.952	0.073
Seoul	-0.069	-0.166	0.315	-0.130	0.206	0.131	6.427	0.004
San Francisco	-0.038	-0.177	0.326	-0.063	0.219	0.138	7.406	-0.018
Vancouver	-0.006	-0.170	0.322	-0.069	0.216	0.122	7.129	-0.008
New York	-0.078	-0.230	0.290	-0.096	0.182	0.102	6.394	-0.074
Paris	-0.031	-0.190	0.308	-0.078	0.202	0.115	6.817	-0.030
Frankfurt	-0.014	-0.174	0.330	-0.062	0.223	0.142	7.028	-0.011
Istanbul	-0.033	-0.161	0.333	-0.060	0.225	0.153	8.025	0.001
Brisbane	-0.013	-0.132	0.424	-0.015	0.312	0.257	5.825	0.080



- value > 1.0
- 0.8 < value ≤ 1.0
- 0.5 < value ≤ 0.8
- 0.3 < value ≤ 0.5
- 0.1 < value ≤ 0.3
- 0.1 < value ≤ 0.1
- 0.3 < value ≤ -0.1
- value ≤ -0.3

在科普資訊宣達部分，已調整原有國原院「天然放射性物質資訊網」名稱為「天然輻射資訊網」，並調整原先網站架構及內容，新增宇宙射線專區，該專區之資訊為提供宇宙射線及飛航劑量相關資訊予民眾知悉，包含宇宙輻射及飛航劑量之背景說明、空勤人員劑量管理、飛航劑量評估等，也透過常見問題專區將相關的輻射知識將提供給讀者，並搭配科普圖文方式讓民眾更易於理解。此網站內容與架構已提供給核安會審核，並於 113 年 8 月 7 日正式發布上線，網站外觀與架構分別如圖 16 及 17 所示。



圖 16、天然輻射資訊網外觀

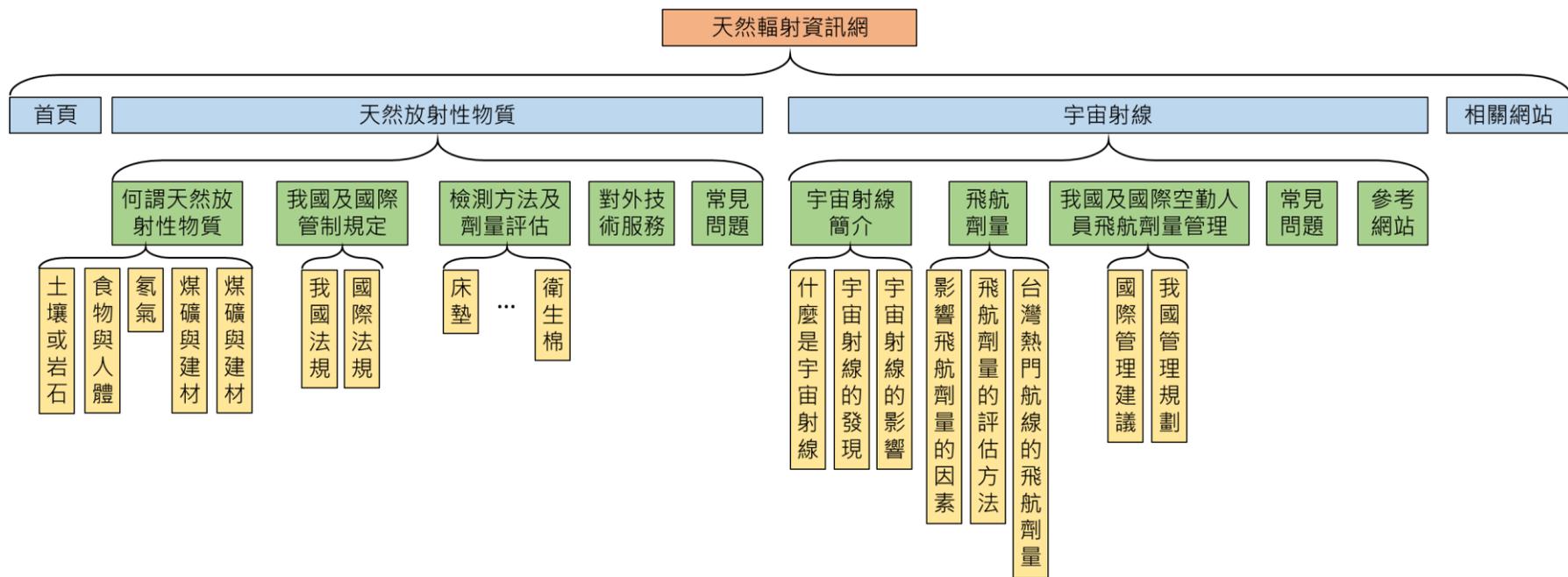


圖 17、天然輻射資訊網架構

#### 四、提出空勤人員輻射劑量管理導則草案及相關建議

空勤人員的劑量管理部分，需對其所受之輻射劑量進行評估，並提供相關輻射背景知識[4]，而國際上也陸續採取人員劑量管理措施，並訂定建議的劑量管制值。ICRP 132 號報告建議每年最高輻射曝露為 5-10 毫西弗[4]，目前多數國家採用 6 毫西弗作為管制建議，而我國透過 FDC 評估自 2006 至 2019 年之年曝露約為 1.65 到 2.71 毫西弗[16]，低於 ICRP 的建議值。以此為基礎，並考量本國目前正規畫推動之試辦計畫之作法，研擬空勤人員輻射劑量管理導則草案，供主管機關參考。後續建議可配合試辦計畫之執行成果，以及各民航業者之意見反饋，召開專家與利害關係人檢討會議，來適時檢討及修正內容，並配合相關管制法令的制定，讓空勤人員劑量管理的推動與執行更加順遂。管理導則(草案)之內容暫擬如下：

##### 空勤人員輻射劑量管理導則(草案)

000 年 00 月 00 日 發布

- 一、本導則依 000000 法第 00 條及 000000 辦法訂定。
- 二、本導則係供空勤人員之雇主、設施經營者及主管機關進行空勤人員劑量管理時之作業依據。
- 三、本導則所稱劑量管理，係指雇主或設施經營以主管機關所認可之劑量評估工具，進行空勤人員劑量評估，並依規定保存及提報相關資料給主管機關。
- 四、雇主或設施經營者進行劑量管理之資料保存及提報，需遵守下列規定：
  - (一) 每月月底前需提報該年度 1 月份至前一月份為止之

劑量評估累積結果，內容包含公司名稱、使用之評估工具及版本、評估週期、客艙及駕艙各別空勤人員總數、評估之平均劑量及劑量累積區間統計等資訊。

(二) 每月需將各別空勤人員該月之劑量評估結果及累積劑量，透過如人事管理系統、電子郵件、書面等形式告知受評之當事人，並留存紀錄備查至少十年。

(三) 若受評估之空勤人員劑量有超過主管機關所訂定的管制值每年 6 毫西弗之情事，應進行結果確認。

(四) 對於妊娠之空勤人員，自告知妊娠之日起至妊娠終止日止，胎兒接受之劑量有超過 1 毫西弗之情事，應進行結果確認。

五、 雇主或設施經營者發現劑量評定結果有第四點第三及第四款情形時，應再執行下列查驗事項：

(一) 查證空勤人員班表。

(二) 查證劑量評估工具之評估條件。

(三) 驗證劑量評估結果。

六、 雇主或設施經營者經依前點規定查驗完畢後，確認有第四點第三及第四款情形者，應填具附件「空勤人員飛航劑量評估結果超過劑量管理值管理措施」，並採取合理抑低其輻射之措施，並於提報第四點第一款劑量評估結果之日起一個月內函報管理措施予主管機關審核。

七、 主管機關得視需要要求雇主或設施經營者，向主管機關報告調查結果與檢討改善及防範措施。

八、 雇主或設施經營者需對在職之空勤人員提供宇宙射線可能

造成之輻射曝露、風險及管理措施等相關資訊，並留存紀錄，及協助支援主管機關辦理之相關宣導活動。

本子計畫 113 年工作項目及查核點皆已順利完成。

## 子計畫二：民生商品含天然放射性物質之量測技術精進研析

### 一、天然放射性物質於民生應用之量測技術相關國際文獻研析

國際文獻研析部分，以關鍵字進行網站檢索，並盡量含蓋到多個國家的資訊，已蒐集包含英國公共衛生部之 HPA-RPD-036 報告 [17]、澳洲昆士蘭科技大學 (Queensland University of Technology, QUT) 研究報告 [18]、書籍 Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction [19] 及期刊文獻 [20-22] 等，重點將聚焦在各類民生常用建材之含天然放射性物質量測技術上，相關重點內容說明如下說明。

HPA-RPD-036 報告 [17] 中整理了天然放射性物質於礦業、金屬冶煉、磷肥及建材等領域應用之活度濃度相關資料，其中包含了磚頭建材數據，其分析方法為透過取樣和研磨後密封 5 週，以確保  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$  與氡氣及其短半衰期子核間的濃度可與母核達平衡，再進行加馬能譜分析。

QUT 研究報告 [18] 彙整了對固體材質中的放射性物質檢測方法，包含了阿法、貝他、加馬能譜分析和質譜儀法 (Mass spectrometry) 等皆可對材料內的放射性物質進行量測，但除了加馬能譜分析法之外，其餘方法都牽涉到化學分離或需破壞等特性，使用上較為不便，而加馬能譜分析能夠以非破壞性方式同時檢測大量的天然放射性核種，是分析法中的最佳選擇，其中又以鍺型偵檢器的加馬核種分析最為常見。本報告也包含可作為建材的石膏材質數據，以純鍺偵檢器量測  $^{238}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  等核種的活度濃度。

Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction [19] 一書中作者 Schroeyer 針對天然放射性物質的特性、副產物到

建材的輻射特性、甚至法規管制面等都有著墨。建材量測方面本書提到了加馬能譜分析法，此法會利用半導體偵檢器如高錳鋅偵檢器搭配多頻道分析儀，於預偵測的位置進行 $^{238}\text{U}$ 系、 $^{232}\text{Th}$ 系及 $^{40}\text{K}$ 的活度濃度就地量測(圖 18)，或是取樣後帶回實驗室利用高純鋅偵檢器分析(圖 19)，本書章節七亦收錄了諸多的實驗數據供讀者參考。



圖 18、加馬能譜分析就地量測



圖 19、加馬能譜分析實驗室分析

另外，本書也提及可利用閃爍偵檢器 (Scintillation spectrometry) 如碘化鈉 (NaI) 進行能譜分析 (如圖 20)，此偵檢器雖然能量解析度較差但具有成本低、高靈敏度且不需要液態氮冷卻系統，使用上較純鍺偵檢器便利。



圖 20、閃爍偵檢器於實驗室(左)及就地(右)測量

期刊文獻相關研究部分，Imani 等人[20]分析了磚、水泥、花崗岩及大理石等伊朗當地建材，透過取樣、磨碎、過篩、高溫烘乾等流程處理後密封 28 天，以確保  $^{222}\text{Rn}$  及其短半衰期子核與  $^{226}\text{Ra}$  平衡，再利用高鋅鍺偵檢器量測  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$  和  $^{40}\text{K}$  的活度濃度，並透過計算危害因子來評估體外劑量風險，分析結果以花崗岩的風險數值最高但皆未超過建議基準值；Amatullah 等人[21]分析了水泥、磚、油漆和磁磚等孟加拉當地常見建材，透過取樣、磨碎後密封 4 至 6 週以確保  $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  及其子核與  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{224}\text{Ra}$  之間的長期平衡，再利用高鋅鍺偵檢器量測  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$  和  $^{40}\text{K}$  的活度濃度，分析結果顯示需特別注意水泥和油漆的輻射曝露情況；Jang 等人[22]分析了磁磚、磚、水

泥、油漆等韓國常見建材，透過取樣、研磨、過篩、高溫烘乾後密封 4 週以確保  $^{226}\text{Ra}$  及相關子核的平衡狀況，再利用高鋇鍺偵檢器量測  $^{226}\text{Ra}$  和  $^{40}\text{K}$  的活度濃度，較特別的是本研究針對  $^{232}\text{Th}$  特別利用了電感耦合電漿體質譜法(Inductively coupled plasma mass spectrometry)進行分析，搭配房間模型及 MCNPX 計算進行體外劑量評估，並用  $^{226}\text{Ra}$  活度濃度評估了  $^{222}\text{Rn}$  造成之體內劑量。表 6 彙整了文獻中提及的建材量測結果，多數文獻採用純鍺偵檢器進行分析，可作為未來發展相關技術之參考，其中 QUT 研究報告使用的樣品為特殊實驗室量測用途，非屬市售建材，故量測數據不列本表。

表 6、文獻中對建材輻射之活度濃度彙整

文獻	活度濃度(Bq/kg)			建材種類	Ref.
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$		
HPA-RPD-036	50-696	14.8-170	-	磚	[17]
Schroeyer's book	11-93	6-92	70-852	磚、水泥、石膏等	[19]
Imani et al.	6.7-43.6	5.9-60	28.5-1085	磚、水泥、花崗岩及大理石等	[20]
Amatullah et al.	7.33-157	4.08-131	128-1234.5	磚、水泥、油漆及磁磚等	[21]
Jang et al.	<0.99-385	0.73-109	7.7-858	磚、水泥、油漆及磁磚等	[22]

## 二、精進氡氣氣體量測或標定技術研析及天然放射性物質於民生應用之檢測方法及評估模式開發

本團隊實驗室已於 112 年 9 月取得全國認證基金會(TAF)民生用品類「含天然放射性物質商品」的加馬核種分析及阿法核種分析(氡氣量測)項目之認證，是國內唯一取得該項認證之實驗室。但在評估對象及模式的種類上仍有提升空間，需持續精進實驗室之量測技術以與國際技術看齊，為此本計畫針對氡氣量測進行了研析，並產出相關研究報告(如附件三)，摘錄部分重點如下所述。本研究將應用純鍺偵檢器進行樣品中氡氣活度評估方法之可行性，以拓展樣品中所含氡氣濃度之量測方式。

針對氡氣量測所開發之檢測儀器大多以阿法粒子作為探測標的，圖 21 為  $^{222}\text{Rn}$  的核種衰變鏈[23]，由圖中可觀察到能夠衰變生成阿法粒子之氡氣子核種包含  $^{218}\text{Po}$ 、 $^{214}\text{Po}$  與  $^{210}\text{Po}$  三種，其中個別核種對應之半衰期依序為 3.05 分鐘、164 微秒與 138 天，而阿法粒子衰變能量則為 6.00 MeV、7.69 MeV 與 5.31 MeV。理論上，上述核種均可用於氡氣量測之用，然而考量到快速檢測之需求性，半衰期時間將影響當次量測可測得次數，故市售儀器多以短半衰期子核種  $^{218}\text{Po}$  與  $^{214}\text{Po}$  所放出之阿法粒子含量作為  $^{222}\text{Rn}$  活度之判斷依據。

然而氡氣射源在使用上仍有其風險存在，射源罐一經開啟便會逐步擴散至環境中，一旦操作不慎使用者有可能於實驗過程中吸入氡氣，進而產生體內曝露劑量，為了避免此情況發生，便衍生出其它的氡氣評估方法。重回衰變鏈圖，可發現在衰變過程中，由  $^{226}\text{Ra}$  衰變生成之  $^{222}\text{Rn}$  氣體，在通過聚乙烯材質擴

散至膠囊外部後，會形成  $^{218}\text{Po}$  並附著於物體表面，之後會再進一步衰變而形成  $^{214}\text{Pb}$  核種， $^{214}\text{Pb}$  核種之半衰期為 26.8 分鐘，其具有能量為 351.93 keV 之加馬能峰，故可透過純鍺偵檢器分析加馬能譜來間接判定氡氣活度[24]，過往便有學者通過分析  $^{214}\text{Pb}$  核種含量來推算射氣分率(emanation fraction)數值之研究。

以下將通過實驗室購置由美國國家標準暨技術研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)所製作之氡氣射源進行試驗，此氡氣標準參考物質(Standard reference material, SRM)原理係將  $^{226}\text{Ra}$  液態射源密封於聚乙烯材質的膠囊內部，再將此膠囊存放於兩端具有受螺旋閥控制通氣口之容積為 22 ml 玻璃瓶中，使用時僅需將通氣口之螺旋閥開啟，瓶內所累積的氡氣便可藉由幫浦輔助或自然擴散的方式排出，並應用於氡氣量測儀器之校驗作業。通常在容器密封良好的條件下，容器內  $^{226}\text{Ra}$  會不斷衰變生成  $^{222}\text{Rn}$ ，由於  $^{226}\text{Ra}$  (1600 年)與  $^{222}\text{Rn}$  (3.82 天)之半衰期差異非常大，故可參照以下推導公式來計算瓶內氡氣與鐳達長期平衡狀態(secular equilibrium)所需時間，其中， $A_{\text{Rn}}$  為氡氣活度； $A_{\text{Ra}}$  為鐳活度； $\lambda_{\text{Rn}}$  為氡氣衰變係數， $t$  為累積時間(天)：

$$\frac{A_{\text{Rn}}}{A_{\text{Ra}}} = (1 - e^{-\lambda_{\text{Rn}}t})$$

經計算在累積 67 天後氡氣與鐳兩者活度會達到長期平衡狀態(如圖 22)[25]，即  $A_{\text{Rn}}$  會等於  $A_{\text{Ra}}$ ，但在實務上累積約四周時間後，兩者活度比值已近似於 1，即可投入實驗使用。

在實際情況下，藉由氡氣量測儀器分析結果回推活度時，往往會發現這兩個核種的活度並非等值，這是源自於發射源其

表面覆蓋材質的特性，導致生成的  $^{222}\text{Rn}$  無法全數通過覆蓋材質而外釋於環境中，並得以被儀器所檢測，此氡氣外釋比例即稱為射氣分率。表 7 係將 NIST 兩組不同活度氡氣射源 SRM 4973 與 SRM 4974 累積 30 天後(達長期平衡狀態)，應用純鍺偵檢器量測  $^{226}\text{Ra}$  與  $^{214}\text{Pb}$  之活度分析結果(圖 23)，量測時間設定為 4000 秒，量測效率是以 SRM 4974 ( $^{226}\text{Ra}$  活度為 5679 Bq，參考日期：2024/9/16)為基準，透過效率公式可計算出量測效率 7.2%，若以此回推 SRM 4973 所含有之  $^{226}\text{Ra}$  活度值，可得到分析結果為 481.8 Bq，此數值與理論值 497 Bq 之差異約為 3.0%；若改以  $^{214}\text{Pb}$  活度為評估目標，則藉由 SRM 4974 所導出之效率值為 3.1%，回推 SRM 4973 含有之  $^{214}\text{Pb}$  活度值為 567.8 Bq，與達長期平衡時理論值 497 Bq 之間誤差約 14%。

後續透過管路連接幫浦對 SRM 4974 射源做強制排氣(如圖 24)，排氣條件為 2 L/min，總排氣時間為 5 小時，推算排氣體積為 600 L，由於  $^{226}\text{Ra}$  射源係封存於膠囊內部，故活度值於排氣前後無明顯變化，但  $^{214}\text{Pb}$  便有著相當顯著的改變，可觀察到於強制排氣後，隨著  $^{222}\text{Rn}$  被幫浦強制排出瓶外，其衰變子核種  $^{214}\text{Pb}$  便不再生成，導致瓶內  $^{214}\text{Pb}$  活度大幅度下滑。然而如同前面所述，受到聚乙烯材質影響，並非所有氡氣分子均能釋出至膠囊外部，故部分仍留存於膠囊內部之氡氣所衰變生成之  $^{214}\text{Pb}$  活度便可被純鍺偵檢器測得，經檢測殘留於瓶內  $^{214}\text{Pb}$  活度為 120 Bq，即膠囊釋出的氡氣活度約 448 Bq，對應之射氣分率即為 0.789，對照射源證書所附之射氣分率值 0.844，兩者誤差僅約 6.6%。

通過上述實驗成果，可初步確認應用純鍺偵檢器量測衰變子核種  $^{214}\text{Pb}$  對於  $^{222}\text{Rn}$  活度檢出方法是可行的，但本次測試樣本為標準射源，須經過四週氡氣累積時間，此方法在實際應用面上，以及對於市售負離子商品之氡氣檢測之量測條件與效率之制定、方法之適用性等，仍待後續實驗以進一步釐清。

表 7、氡氣濃度於強制排氣前後核種活度差異

核種	排氣時間(hr)	活度(Bq)
$^{226}\text{Ra}$	0	481
$^{214}\text{Pb}$	0	568
$^{226}\text{Ra}$	5	484
$^{214}\text{Pb}$	5	120

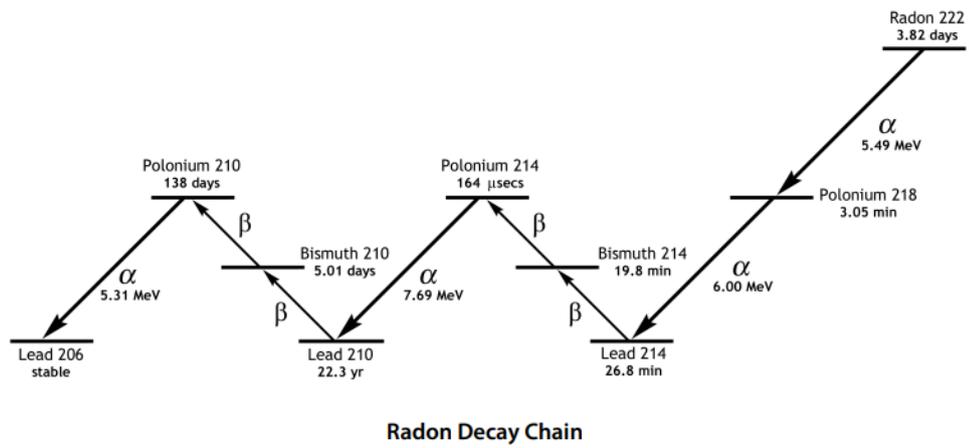


圖 21、<sup>222</sup>Rn 衰變鏈[23]

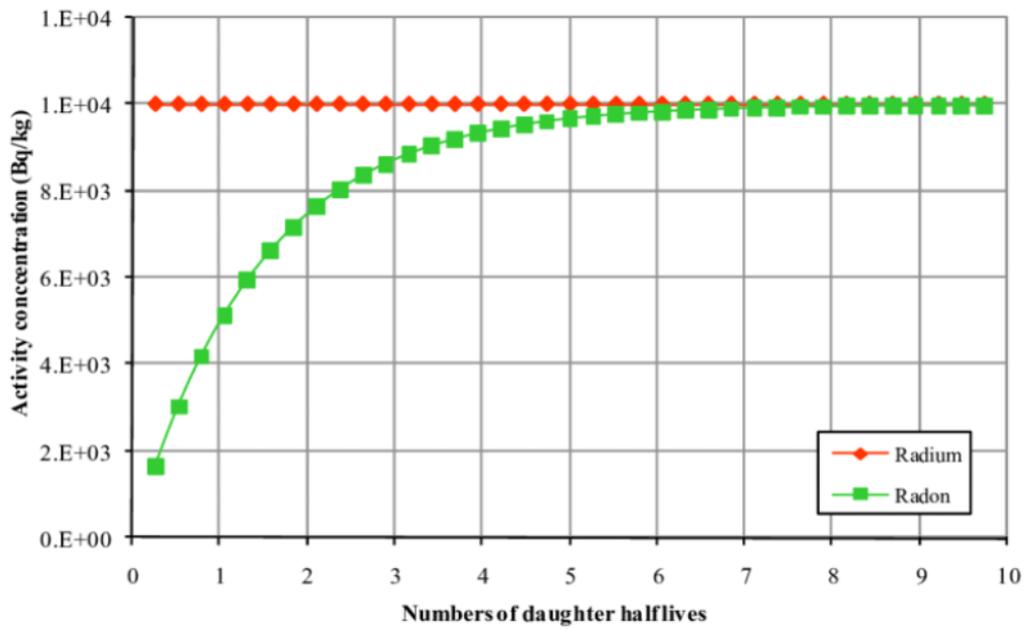


圖 22、鐳氣長期平衡趨勢[25]

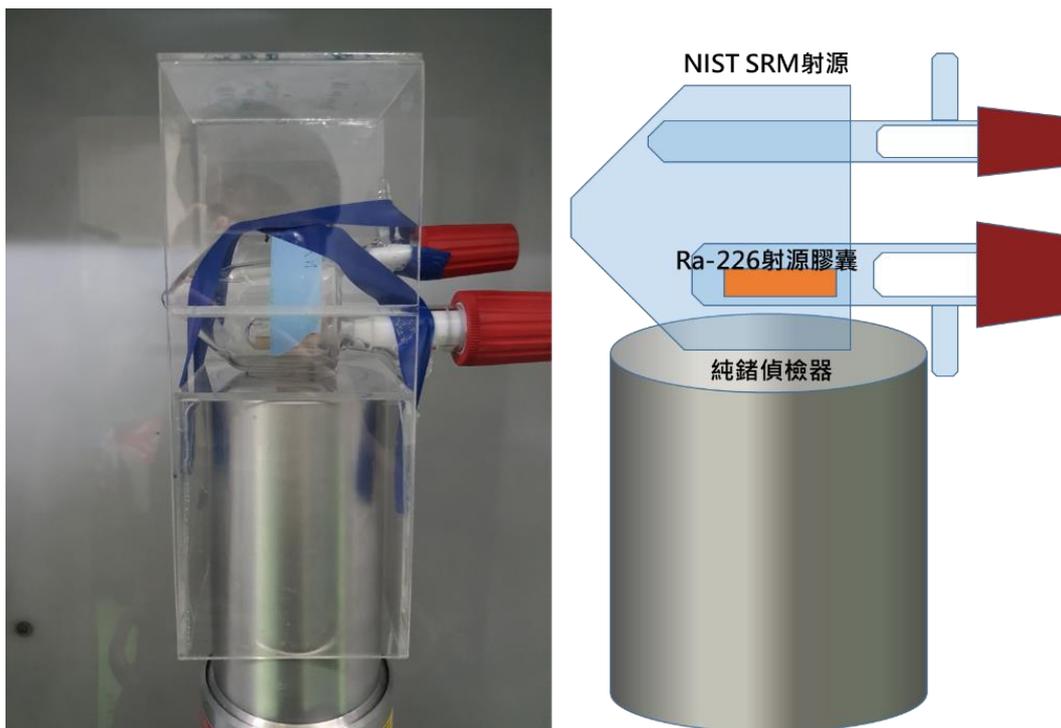


圖 23、長期平衡態氡氣射源量測情形與示意圖

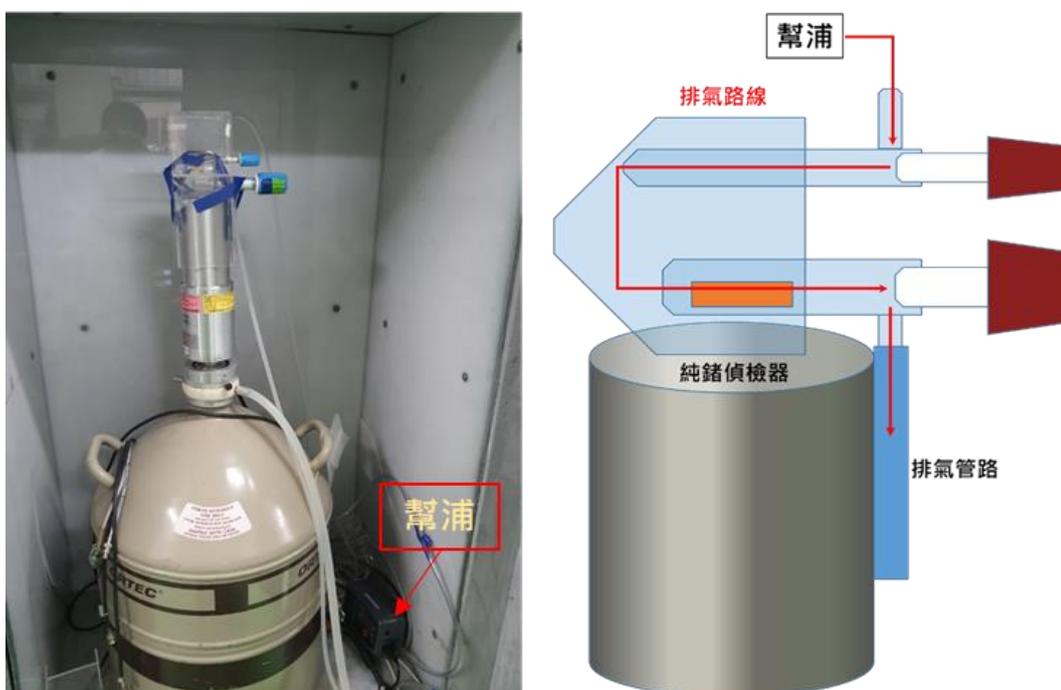


圖 24、氡氣射源強制排氣架設情形與管路示意圖

此外，本年度也協助核安會執行了 40 件石材檢測作業，希望相關檢測結果可作為後續模式開發之參考。透過「台北市石材商業同業公會」協助提供業者名單，本院配合核安會與公會人員於 10 月 7 日赴新北八里的四家石材業者，至現場執行建材輻射檢測 40 件，為未來建立劑量評估模式進行準備。檢測方法參考核安會 108 年發布之法規「建材輻射劑量率量測與取樣及放射性核種分析基準」（會輻字 10800002341 號令）項次(二)執行，並以天然放射性物質管理辦法第 9 條第 1 款「*建材所含天然放射性物質達主管機關公告納管範圍，其建材表面 0.1 公尺處之輻射劑量率每小時超過 0.2 微西弗者(不含背景值)，應實施活度濃度分析；其活度濃度指數及使用範圍，依附表一規定。*」為管制基準，量測結果整理於表 8。

本次檢測共檢測 4 家石材業者，每家業者抽測 10 件樣品，樣品類型包含花崗岩及大理石，利用 AT-1121 手持式偵檢器掃描有無熱點並量測劑量率。量測結果大多落在背景變動範圍內，皆未超過管理辦法中需進行進一步檢測分析之劑量基準 0.2  $\mu\text{Sv/h}$ ，其中最高劑量率(扣除背景)約為 0.123  $\mu\text{Sv/h}$ ，檢測照片如圖 25 所示。



圖 25、石材劑量率量測



圖 25、石材劑量率量測(續)

表 8、113 年石材抽驗結果清單

地區	廠商	石材種類	尺寸(長/寬/高)		距石材表面10cm處劑量率(微西弗/小時)			備註
			(cm/cm/cm)	含背景	扣除背景	背景值		
北部	1. 業者A (檢測日期 113年10月7 日)	義大利綠	290x200x2	0.088	0.000	0.113	花崗岩	
		千江月	331x184x2	0.133	0.020	0.113	花崗岩	
		嘉柏麗	303x201x2	0.142	0.029	0.113	大理石	
		星字灰	297x190x2	0.076	0.000	0.113	大理石	
		水晶	300x160x2	0.070	0.000	0.113	大理石	
		曠野之心	290x171x2	0.082	0.000	0.113	花崗岩	
		Diamond	239x130x2	0.083	0.000	0.113	大理石	
		卡地亞	291x195x2	0.088	0.000	0.113	大理石	
		雕刻紫	284x185x2	0.085	0.000	0.113	大理石	
		玻璃星	309x177x2	0.135	0.022	0.113	花崗岩	
	2. 業者B (檢測日期 113年10月7 日)	黃金雕刻白	320x183x2	0.077	0.000	0.106	大理石	
		EXTEA	292x186x2	0.077	0.000	0.106	大理石	
		天使之星-紅花綠葉	320x186x2	0.103	0.000	0.106	花崗岩	
		Tiffany-永恆	335x200x2	0.195	0.089	0.106	花崗岩	
		天使之星-珍珠	313x188x2	0.134	0.028	0.106	花崗岩	
		米開朗基羅	318x191x2	0.127	0.021	0.106	花崗岩	
		Vatican	337x174x2	0.092	0.000	0.106	大理石	
		雪山藍	335x178x2	0.177	0.071	0.106	花崗岩	
		聖彼得	308x195x2	0.090	0.000	0.106	大理石	
		行雲流水	308x200x2	0.065	0.000	0.106	大理石	
	3. 業者C (檢測日期 113年10月7 日)	皇家寶鑽	278x178x2	0.134	0.019	0.115	花崗岩	
		新安格拉珍珠	232x163x2	0.080	0.000	0.115	大理石	
		紫點金麻	300x196x2	0.157	0.042	0.115	花崗岩	
		綠蒙卡	334x202x2	0.110	0.000	0.115	花崗岩	
		卡拉拉百C	316x152x2	0.073	0.000	0.115	大理石	
		阿法雅深灰	262x168x2	0.080	0.000	0.115	大理石	
		古馳黑	314x187x2	0.110	0.000	0.115	花崗岩	
		羅馬洞石	304x174x2	0.069	0.000	0.115	大理石	
	4. 業者D (檢測日期 113年10月7 日)	雲多拉灰	183x162x2	0.079	0.000	0.115	大理石	
		雕刻黑	322x192x2	0.188	0.073	0.115	花崗岩	
		綠光	301x187x2	0.238	0.123	0.115	花崗岩	
		義大利黑	274x168x2	0.065	0.000	0.115	大理石	
		雕刻黑	314x181x2	0.143	0.028	0.115	花崗岩	
		A+滿天星	280x188x2	0.073	0.000	0.115	花崗岩	
		觀音山石	244x176x2	0.073	0.000	0.115	花崗岩	
		雲山水	277x181x2	0.055	0.000	0.115	大理石	
極光灰		308x175x2	0.112	0.000	0.115	大理石		
銀河灰(仿古)		315x197x2	0.074	0.000	0.115	大理石		
紫檀	294x199x2	0.105	0.000	0.115	花崗岩			
黃金木化(仿古)	223x197x2	0.074	0.000	0.115	大理石			

### 三、構思及宣達天然放射性物質於民生應用之科普知識

既存曝露相關之科普圖文資料準備及宣達部分，圖 26 為本季新設計之 10 張與既存曝露相關之科普圖卡，內容包含負離子、氡氣、天然放射性物質、建材輻射等主題，並搭配 QA 文字陸續公布於本院「天然輻射資訊網」網站的「天然放射性物質專區」項目下的「常見問題」中，如圖 27 所示，讓民眾可簡單快速的了解艱深的科學概念。



圖 26、既存曝露科普圖卡

### 天然放射性物質之輻射檢測及劑量評估

人體所接受之年輻射劑量值(mSv/yr)可透過儀器測量搭配計算公式進行評估。

表面輻射劑量率偵測儀 (體外劑量)

氡222/220監測儀 (體內劑量)

人體所接受之年輻射劑量值為體外劑量及體內劑量兩種來源的加總。

核能安全委員會 製圖

### 負離子商品後市場查核機制及流程

行政院消保處已整合核委會、經濟部標準局以及衛福部食藥署等單位，共同進行負離子商品後市場管理查核。

國家原子能科技研究院已建置【負離子商品檢測實驗室】，提供輻射檢測服務。

若是檢測出輻射劑量超過民眾年劑量限值(1毫西弗)將會通知商品目的事業主管機關聯繫廠商回收下架處理

作業流程：抽樣 → 檢測 → 通知 → 查處 → 處理

抽樣：核委會、標準局、食藥署  
 檢測：核委會、標準局、食藥署  
 通知：核委會、標準局、食藥署  
 查處：核委會、標準局、食藥署  
 處理：核委會、標準局、食藥署

民眾可至核委會網站，查詢超過民眾年劑量限值的負離子商品。

核能安全委員會 製圖

### 已經買到輻射超標負離子商品，如何處理消費爭議？

- 政府將依消保法要求販售超標負離子商品之廠商採取下架、回收等必要處置；核委會網站公布後市場查核，超過民眾年劑量限值的負離子商品。
- 已購買民眾如有消費爭議得向企業經營者、消費者保護團體或消費者服務中心提出申訴；如未獲妥適處理時，得向直轄市、縣(市)政府消費者保護官申訴。
- 前期申訴如仍未獲得妥適處理，得向直轄市或縣(市)消費者調解委員會申請調解。(消費者保護法44條)

民眾可至核委會網站，查詢超過民眾年劑量限值的負離子商品。

核能安全委員會 製圖

### 負離子是什麼？

離子 (ion) 是帶有電荷的原子、原子團或分子，是極小的微粒。帶正電的稱為正離子，帶負電的稱為負離子。

正離子：原子失去電子  
 負離子：原子獲得電子

### 添加負離子之商品是否具有促進健康效果？

負離子之商品指的是於商品中添加天然放射性物質之負離子粉，藉以產生負離子，宣稱可淨化空氣、提高睡眠品質，甚至具有促進健康效果，惟目前尚未經客觀實際之科學驗證其功效。

核能安全委員會 製圖

### 國際組織對空勤人員之劑量標準及建議

國際放射防護委員會(ICRP)認為宇宙射線為既存曝露的一種，對於長時間曝露之空勤人員確實會接受到比一般民眾更高的輻射劑量，故制定和執行管制策略非常重要。

組織	空勤人員	一般民眾
國際原子能總署(IAEA)	20mSv/5年平均 50mSv/1年上限	1mSv
國際放射防護委員會(ICRP)		
美國聯邦航空總署(FAA)		
歐盟(EU)	6mSv	1mSv
全國輻射防護與測量委員會(NCRP)	6mSv 5mSv(孕婦)	1mSv

ICRP建議採用5-10mSv/年作為空勤人員劑量參考基準，目前各國大部分均遵循此建議與趨勢，進行空勤人員的劑量安全管理。

核能安全委員會 製圖

### 氡氣如何進入到家中？

氡是一種無色、無味、無臭的氣體，來自於土壤中天然放射性物質的衰變，透過地基、牆壁的裂縫孔洞等途徑，或者透過地下水進入建築物內。氡氣進入建築物後，通常會積聚在室內，特別是在密閉性高、通風差的環境中，若長時間吸入可能會增加罹患肺癌的風險。

### 氡氣進入途徑

- 牆壁裂縫
- 施工縫
- 地板裂縫
- 地下水
- 供水管周圍縫隙
- 牆內空調

記得保持室內通風，避免氡氣在密閉環境積聚囉！

核能安全委員會 製圖

圖 26、既存曝露科普圖卡(續)

### 常見問題

**Q** 負離子是什麼?

**Q** 負離子如何產生?哪種會有輻射?

**Q** 可謂負離子商品?是否具有促進健康效果?

**Q** 負離子商品如何產生輻射?對健康有何影響?

**Q** 負離子商品後市場查核機制及超標超標商品?

**Q** 於安會有提供檢測服務嗎?

**Q** 如何辨別由天然放射核物質之負離子商品?

**Q** 我已經買到輻射超標負離子商品, 如何處理消費爭議?

**Q** 我在哪裡可以得到更多負離子商品的相關訊息?

**Q** 建材有輻射嗎?國內現有些單位可以提供檢測服務?

**Q** 空氣如何檢測?國內有那些單位可以提供檢測服務?

**Q** 市面上有賣用藥粉和陶土燒成的陶製球及各種商品, 說可釋放紅外線或負離子可增進健康, 請問這種商品如拿來接觸人體(如加熱來加熱)是否會對人體造成不好的影響?

**Q** 目前那些負離子商品輻射超標?

**Q** 生活中的氡氣來自於?人體吸入氡氣的影響?

**Q** 如何降低室內氡氣的濃度?

**Q** 如何進行天然放射核物質之輻射檢測及劑量評估?

**Q** 氡氣如何進入到家中?

### 負離子如何產生?哪種會有輻射?

**A** 目前與4種主要的負離子產生方式:

- 摩擦: 當水分子從表面或落下時, 因與空氣摩擦而帶電荷分離, 進而產生負離子, 例如瀑布、淋浴間。
- 放電: 雷雨天大氣分子發生電離, 進而產生負離子, 而天上閃電的負離子以速度極快, 負離子湧向地面即應用這種原理, 利用放電或空氣電離產生負離子。
- 轉磁品: 利用轉磁在一定溫度下即可釋出外層電子的特性來產生負離子。
- 添加鈣、鈣、鎂等天然放射核物質, 使空氣中的分子游離而產生負離子, 上述4種負離子產生方式中, 只有利用天然放射核物質所產生負離子時, 才會產生輻射問題。

### 建材有輻射嗎?國內現有些單位可以提供檢測服務?

**A** 磁磚、花崗岩、大理石等天然放射核物質含量較高, 故可量測到輻射劑量, 應符合NORM之管理建議採核種活度(指氡系列每1貝克/克、銣-40每10貝克/克)及劑量(自釀西曆/年)作基準, 另依核委會輻射檢測中心核子調查室內加劑量(指建材)平均值每年約為0.59毫西弗, 有關建築物之輻射檢測需求, 請至核委會網站「輻射防護」項下之「臺灣版」, 再選擇「輻射檢測服務業務名單」查詢。

### 生活中的氡氣來自於?人體吸入氡氣的影響?

**A** 標示含有負離子的商品中, 如果添加天然放射核物質, 除了會造成體外輻射外, 同時會產生具放射性的氡氣, 吸入後進而造成體內輻射曝露。當人體吸入氡氣時, 其衰變時產生的α粒子會造成體內輻射曝露, 進而造成呼吸系統疾病、肺部組織損害、或細胞突變, 並增加罹患風險(請參閱)。

圖 27、天然輻射資訊網-天然放射性物質專區-常見問題

#### 四、含天然放射性物質商品之後市場調查

本年度共完成標準局抽測商品 20 件及食藥署抽測商品 10 件，檢測結果彙整於表 9 及表 10，在本年度檢測之商品中並無商品超過「天然放射性物質管理辦法」所規定之劑量限值，商品之檢測結果也已提供給核安會及抽測單位，作為後續含天然放射性物質商品後市場調查規劃之參考。

表 9、113 年抽驗商品統計結果(依送樣單位)

送樣單位	送樣件數	劑量超標(1 mSv/y)件數
衛福部食藥署	10	0
經濟部標準局	20	0
<b>總計</b>	<b>30</b>	<b>0</b>

表 10、113 年抽驗商品種類統計結果(依樣品種類)

送樣單位	樣品種類	送樣件數	劑量超標(1 mSv/y)件數
衛福部食藥署	面具/面膜	4	0
	護腕	2	0
	水杯	3	0
	水壺	1	0
	<b>小計</b>	<b>10</b>	<b>0</b>
經濟部標準局	枕頭	6	0
	口罩	2	0
	護膝	1	0
	護腰	1	0
	手環*	2	0
	項鍊*	1	0
	襪子	3	0
	眼罩	1	0
	衣服	1	0
	棉被	2	0
	<b>小計</b>	<b>20</b>	<b>0</b>

\*手環以護腕模式評估；項鍊以圍巾/披肩模式評估。

此外，本院於 5 月 15 日參加由核安會邀集經濟部標準局、衛福部食藥署等主管機關所召開之「市售負離子商品後市場查核作業之精進與討論」會議，會議結論為將持續透過跨機關合作方式執行國內後市場調查，適時檢討及滾動調整抽樣量能，以保障消費者輻射安全。並修正原有之「宣稱負離子或可能具輻射安全之虞商品之查核標準程序」，俾利各機關共同辦理後市場查核作業更為完善。本子計畫 113 年工作項目及查核點皆已順利完成。

## 伍、交付文件一覽表

本年度計畫應交付文件及期限如下表：

年度	項目	交付期限	數量		備註
			紙本	電子檔	
113 年度	期初報告	決標次日起 30 工作 天內	2	1	
	期中報告	113 年 7 月 15 日 前(含當日)	2	1	
	研究設備相 關採購及驗 收文件	113 年 8 月 20 日 前(含當日)	1		
	期末報告	113 年 12 月 6 日 前(含當日)	2	1	機關認有修改之 必要者，廠商應 於 15 日內修正 完成
	期末成果報 告	期末報告審查通過 後 15 日內	8	1	期末報告應提出 原創性舉證之相 關措施作為結案 參據

註：期末報告應包含當年度需求說明書所列之工作項目執行情形及量化值。

## 陸、結論

本計畫之執行內容，係考量既存曝露與人民生活之密切關連性，尤其是飛航劑量及天然放射性物質的應用，會隨科技進步及人民素質提升，而有更多相關應用發展和傳達知識的必要。主管機關本於管制之立場，亟需針對相關輻射情節進行評估，並參考國際經驗及作法，預先進行關鍵技術研析，為日後制定合宜之管制規範、審查及評估技術等建立基礎。

本計畫子計畫一部分，已完成國際文獻蒐集及飛航劑量量測技術可行性初步評估，綜整考量後預計以CR39為重點技術發展項目。我國常見航線劑量評估及空勤人員飛航劑量評估工具的開發皆順利完成，並將配合核安會於本年度推動之「空勤人員宇宙射線劑量管理試辦計畫」中提供給民航業者使用，搭配於本院對外網站上新增宇宙射線專區之方式進行科普資訊宣達，並綜整國際上對於空勤人員的管制作法，提出空勤人員輻射劑量管理導則草案及相關建議給核安會參考。

本計畫子計畫二部分，已蒐集國際文獻中對於天然放射性物質於各類民生常用建材之應用及劑量評估方法，並彙整了文獻中提及的建材量測結果，有助於未來相關檢測技術的建立。此外，針對實驗室現有之氬氣量測技術，利用純鍺偵檢器量測衰變子核進行氬氣活度推估之可行性測試；除此之外，也利用把既存曝露相關科普圖卡發布在網路上之方式來進行資訊宣達，並持續協助核安會、標準局和食藥署進行含天然放射性物質商品後市場調查，為民眾使用商品之輻射安全把關。

## 參考資料

- [1] European Commission, "Cosmic radiation exposure of aircraft crew,"  
Compilation of measured and calculated data. Final report of  
EURADOS WG5 to the Group of Experts established under Article  
31 of the Euratom Treaty. Radiation Protection 140. Luxembourg,  
European Commission, 2004.
- [2] Europäische Kommission, "RADIATION PROTECTION 156:  
Evaluation of the Implementation of Radiation Protection Measures  
for Aaircrew," Dictus Publishing, 2011.
- [3] ICRU, "Reference Data for the Validation of Doses from Cosmic-  
Radiation Exposure of Aircraft Crew, ICRU Report 84," Journal of  
the ICRU, vol. 10, 2010.
- [4] ICRP, "Radiological protection from cosmic radiation in aviation.  
ICRP Publication 132," Ann. ICRP, vol. 45, 2016.
- [5] L. Lindborg et al., "The use of TEPC for reference dosimetry," Radiat.  
Prot. Dosim., vol. 86, pp. 285, 1999.
- [6] C. J. Mertens, G. P. Gronoff, R. B. Norman, B. M. Hayes, T. C. Lusby,  
T. Straume et al., "Cosmic radiation dose measurements from the  
RaD-X flight campaign," Space Weather, vol. 14, pp. 874-898, 2016.
- [7] J. Kubancak et al., "Measurement of dose equivalent distribution on-  
board commercial jet aircraft," Radiat. Prot. Dosim., vol. 162, pp. 215,  
2014.
- [8] D. O'Sullivan et al. "Cosmic rays and dosimetry at aviation altitudes,"  
Radiation measurements, vol. 31, pp. 579-584, 1999.
- [9] D. Zhou, D. O'Sullivan, E. Flood, "Radiation field of cosmic rays  
measured at aviation altitudes by CR-39 detectors," Advances in

- Space Research, vol. 37, pp.1218-22, 2006.
- [10] J. Hwang, J. Kwak, G. Jo and U. Nam, "Validation of KREAM Based on In-Situ Measurements of Aviation Radiation in Commercial Flights," Journal of Astronomy and Space Sciences, vol. 37, pp. 229-236, 2020.
- [11] Z. Y. Yang, P. C. Lai, and R. J. Sheu, "Update and New Features of NTHU Flight Dose Calculator: A Tool for Estimating Aviation Route Doses and Cumulative Spectra of Cosmic Rays in Atmosphere," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 66, pp. 1931-1941, 2019.
- [12] Z. Y. Yang and R. J. Sheu, "Validation of the New NTHU Flight Dose Calculator with the ICRU-84 Reference Data" Trans. Am. Nucl. Soc., vol. 123, pp. 1202, 2020.
- [13] G. Battistoni, S. Muraro, P. R. Sala, F. Cerutti, A. Ferrari, S. Roesler, et al., "The FLUKA code: Description and benchmarking," AIP Conf.Proc., vol. 896, pp. 31-49, 2007.
- [14] K. Copeland, "CARI-7A: Development and Validation" Radiation Protection Dosimetry, vol. 175, pp. 419-431, 2017.
- [15] 台灣民航局 112 年台灣民航統計年報，2023。
- [16] Y. S. Huang, Z. Y. Yang and R. J. Sheu, "Automated Workflow for Calculating the Collective and Average Effective Doses of Galactic Cosmic Radiation Received by Pilots in Taiwan from 2006 to 2021," Health Phys, vol. 125, pp. 455-464, 2023.
- [17] J. S. Hughes and M. P. Harvey, "A Study on the transport of naturally-occurring radioactive material," HPA-RPD-036, 2008.
- [18] S. H. Alharbi, "Measurement and Monitoring of Naturally Occurring Radioactive Materials for Regulation," Science and Engineering

- Faculty, Queensland University of Technology, 2016.
- [19] W. Schroeyer, "Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction," 1st Edition, Woodhead Publishing, 2017.
- [20] M. Imani et al., "Natural radioactivity and radiological risks of common building materials used in Semnan Province dwellings, Iran," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 41492-41503, 2021.
- [21] S. Amatullah et al., "Assessment of radiometric standard and potential health risks from building materials used in Bangladeshi dwellings," *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, vol. 103, pp. 3376-3388, 2021.
- [22] M. Jang et al., "Indoor external and internal exposure due to building materials containing NORM in Korea" *J Radioanal Nucl Chem*, vol. 307, pp. 1661-1666, 2016.
- [23] DURRIDGE Company, "RAD7 Electronic Radon Detector User Manual," DURRIDGE. 2023.
- [24] Chang, B. U., Kim, Y. J., Song, M. H., Kim, G. H., Jeong, S. Y., & Cho, K. W, "A new primary emanation standard for Radon-222," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 156, pp. 108928, 2020.
- [25] Li Yu, Dirk Mallants and Geert Olyslaegers, "Assessment of radon release from concrete components in the Dessel low-level waste near surface disposal facility," SCK•CEN, 2011.

## 附件一、飛航劑量量測可行性評估相關研究報告

### 飛航劑量量測可行性研析

楊子毅

#### 摘 要

根據 NCRP 160 號報告和 UNSCEAR 2000 年報告書第 1 冊，空勤人員每年受到的宇宙輻射劑量約為 3 mSv，超出了一般民眾 1 mSv 的劑量限值。為此，本研究將參考國際標準，構建劑量管理機制，並依據 ICRU 84 號報告，透過適當程式計算劑量並進行定期驗證，以確保評估的可靠性。此外，為了應對未來飛航環境量測需求，本研究將開發適用於飛航高度的劑量量測技術，並評估不同方法的優劣及操作便利性，提出國內技術建議。

關鍵字：飛航劑量、輻射度量。

國家原子能科技研究院

## 附件二、飛航劑量評估工具相關技術報告

空勤人員飛航劑量評估軟體 AiRDAS 功能開發及測試技術報告

楊子毅

摘要

本報告為針對核安會委託計畫「113-114 年推動既存曝露管理之劑量評估及量測技術研究」所開發的空勤人員飛航劑量評估軟體 AiRDAS 之建構過程、操作介面和功能性等方面進行說明，提供細部的軟體資料庫建構與劑量評估邏輯，並以假想案例進行軟體功能的可行性測試。

關鍵字：飛航劑量、劑量評估、軟體開發。

國家原子能科技研究院

## 附件三、氡氣量測或標定技術精進相關研究報告

### 純鍺偵檢器對氡氣量測標定技術研究

黃煥景、楊子毅

#### 摘要

本報告嘗試透過氡氣標準射源探討應用純鍺偵檢器量測氡氣之可行性，利用美國國家標準暨技術研究所製作之氡氣射源進行試驗，由核種衰變鏈母子核間活度濃度關係的角度嘗試回推。實驗結果顯示利用 Pb-214 推算之射氣分率與射源證明書誤差僅 6.6%，初步確認應用純鍺偵檢器量測衰變子核種 Pb-214 對於 Rn-222 活度檢出方法是可行的，但在實際應用面上仍須透過進一步實驗釐清。

關鍵字：氡氣、純鍺偵檢器。

國家原子能科技研究院

## 附件四、含天然放射性物質商品後市場調查技術報告

含天然放射性物質商品之後市場調查(112年-113年)

盧苡欣

摘要

自 107 年 8 月國內得知韓國 Daijin 公司輻射床墊事件，我國建立跨部會專案小組，由核能安全委員會、經濟部標準檢驗局及衛生福利部食品藥物管理署等單位合作分工，進行含天然放射性物質商品聯合稽查抽驗及相關機制建立。本報告彙整 112 年 7 月至 113 年 6 月抽驗商品檢驗結果，以作為含天然放射性物質商品後市場調查結果之依存。

關鍵字：天然放射性物質、氡氣、劑量評估。

國家原子能科技研究院