

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(2/2)

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

114 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、林建功

聯絡人：盧苡欣

聯絡電話：(03)4711400 ext 7980

報告日期：114 年 12 月 12 日

目 錄

| | |
|-----------------------------------|----|
| 中文摘要..... | i |
| Abstract..... | ii |
| 壹、計畫目的..... | 3 |
| 貳、114 年度計畫工項及作法..... | 3 |
| 參、114 年度預定進度及具體成果..... | 8 |
| 肆、114 年度成果..... | 11 |
| 伍、交付文件一覽表..... | 65 |
| 陸、結論..... | 66 |
| 參考資料..... | 67 |
| 附件一、空勤人員輻射劑量評估相關研究報告..... | 70 |
| 附件二、飛航劑量量測技術相關技術報告..... | 71 |
| 附件三、天然放射性物質於居家常用建材體外劑量相關研究報告..... | 72 |
| 附件四、含天然放射性物質商品後市場調查技術報告..... | 73 |

中文摘要

本計畫針對既存曝露進行研析，包含空勤人員接受之宇宙射線飛航劑量及含天然放射性物質兩主題。在空勤人員接受之宇宙射線及造成之飛航劑量部分，建立飛航劑量量測技術，並透過已開發之評估軟體來評估空勤人員劑量，我國代表航線劑量評估及科普資訊宣達，以及提出相關輻射劑量管理建議；而含天然放射性物質之應用方面，基於實驗室過往之氡氣量測及劑量評估經驗，擴展負離子商品評估模式、建立天然放射性物質於建材之體外劑量量測技術和宣達相關科普資訊，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 analyze issues related to existing exposures, including two main topics: cosmic radiation induced flight doses received by aircrews and naturally occurring radioactive materials (NORM). For the cosmic radiation induced flight doses, we establish flight dose measurement techniques and evaluate aircrew doses using developed assessment software. We also provide dose assessments for representative routes departed from Taiwan, disseminate information to publiscs, and propose relevant radiation dose management recommendations. Regarding the application of NORM, based on the laboratory's past experience in radon gas measurement and dose assessment, we expand the evaluation model for products containing naturally occurring radioactive materials. We also establish in-vitro dose measurement techniques for NORM in building materials, disseminate relevant information to publiscs, and assist the Nuclear Safety Commission in conducting post-market surveillance of NORM-containing products to ensure the radiation safety of the public using these 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、114 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：飛航劑量量測技術之量測系統建置與輻射場校正測試、利用劑量評估工具執行空勤人員輻射劑量評估、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、提出國內空勤人員劑量管理方案及相關建議。具體實施方法如下述：

一、 飛航劑量量測技術之量測系統建置與輻射場校正測試

在 113 度的研究成果中，我們挑選 CR-39 底片作為飛航劑量量測技術發展之目標，並完成了相關軟硬體如顯微鏡、恆溫循環水槽、影像分析軟體等設備的添購。目前已進行初步儀器設備功能測試，完成了量測系統建置，並參考國際文獻之作法，初步規劃 CR-39 底片之量測流程，後續依照此流程逐步進行相關測試實驗，參考國際校正作法，並評估我國國內是否有相同條件之照射場，設計對應的實驗條件，把實驗結果與理論基礎做結合。

二、 利用劑量評估工具執行空勤人員輻射劑量評估

本年度利用 113 年開發的空勤人員飛航輻射劑量

的評估工具 AiRDAS (Aircrew Radiation Dose Assessment Software)，評估中華航空、長榮航空、星宇航空、華信航空、立榮航空、台灣虎航等國內六家民航業者的空勤人員劑量，考量到班表及劑量屬機密個資，故操作面上會以輔導民航業者使用為原則，目前是以每月提報之方式進行月份的人員劑量資料收集。此外也持續蒐集使用者經驗及回饋以改良本工具，並定期彙整各民航業者之去識別化劑量報表，進行人員劑量分布分析並評估人均年劑量，綜整歸納出專屬於本國的空勤人員劑量分布、集體劑量及平均值等數據，提供予主管機關作為後續推動空勤人員劑量管理之參考。

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

本研究參考民航局最新年報資料，對國籍航空公司主要航線的輻射劑量進行評估。選擇至少兩種不同的飛航劑量評估程式，對至少 10 條航線進行評估，評估對象包含華航、長榮、星宇、虎航等公司，以深入瞭解航空航班中的輻射劑量分佈情況。此外，也持續充實宇宙射線相關科普資料，為了擴增資訊受眾廣度，本年度將新增英文版相關內容，並設計相關圖卡，希望能提高宣達成效。

四、 提出國內空勤人員劑量管理方案及相關建議

今年度延續 113 年度提出之空勤人員劑量管理導則草案，持續與民航業者進行溝通協調及蒐集相關意

見，並透過彙整本年度工作內容(2)之成果，比對國內空勤人員之個人年劑量分布與國外之差異，以提出建議之劑量管制值，連同意見修訂管理導則草案，提出適用於國內空勤人員劑量管理方案予主管機關參考。

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：研擬天然放射性物質相關量測技術精進方案、建立天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量量測分析技術、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、 研擬天然放射性物質相關量測技術精進方案

天然放射性物質之測量與許多因素有關，尤其是體內劑量(氡氣)的量測易受到環境條件不同的影響，也加深了對含天然放射性物質商品活度濃度精準量測的難度。考量到鈾氣的半化期較短，量測難度及易受環境影響之波動度都較高，因此在量測時要如何設定儀器的空氣泵浦流量對於鈾氣測量的準確性至關重要。故本研究希望探討在不同量測條件設置下對氡氣及鈾氣的活度濃度累積效應差異，建立隨時間變化的活度濃度時序圖，並分別在開放及封閉環境下進行測試，以提供更加準確有效之體內劑量評估結果。此外，也將依循113年度期末報告之委員建議，擴增現有的含天然放射性物質商品檢測模式，提供更多元的商品內容以貼近民眾使用情況，並配合後續專家審查會議進行模式討

論，對未來新增認證模式項目做準備。

二、 建立天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量量測分析技術

天然放射性物質所造成之輻射曝露，可分為體外及體內曝露兩類，本年度將先針對居家常用建材造成之體外曝露方面進行探討，嘗試透過輻射劑量計量測劑量率，搭配上 ICRP-115 號報告之劑量評估公式，進行占用時間及合理距離之假設，藉此評估體外劑量；亦或是利用文獻提及之純鍍偵檢器比活度量測結果，搭配模擬實驗建立的劑量率轉換係數，進行體外劑量評估。此外，也將持續配合主管機關赴坊間石材或建材業者，進行建材輻射檢測，作為後續評估模式發展的參考。

三、 構思及宣達天然放射性物質於民生應用之科普知識

本年度將持續於本院「天然輻射資訊網」網站上提供更加豐富的相關內容，透過簡單圖文資訊傳達艱深科學概念，讓民眾可快速理解，藉此宣達天然放射性物質於民生應用之科普知識，本年度圖文資訊規劃著重於建材輻射的劑量評估、背景輻射水平等相關議題做發想。

四、 含天然放射性物質商品之後市場調查

本院「環境試樣放射性核種分析實驗室」為具備全國認證基金會(TAF)-含天然放射性物質商品阿伐核種分析(氬氣量測)、加馬核種分析兩認證項目之實驗室，

持續配合衛福部食藥署、經濟部標準局等機關，對市售相關含天然放射性物質商品之檢測提供技術支援，搭配不同商品使用情境及模式，評估人員接受之年有效劑量，並提供相關檢驗結果給主管機關參考，作為後續處理該類商品之依據。

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。

本案於 114 年 2 月 21 日收到核安會來函，通知配合立院 114 年中央政府總預算刪減，辦理契約協議變更，原 114 年度子計畫二工作內容(二)「精進氬氣精進氬氣氣體量測或標定技術研析及建立天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量量測分析技術」，變更為「建立天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量量測分析技術」，原契約總金額新台幣 800 萬 7000 元，變更減價為 760 萬 8100 元，原契約 114 年度總金額新台幣 398 萬 9000 元，變更減價為 359 萬 100 元。契約變更事宜核安會已於 114 年 3 月 21 日同意變更，並於 114 年 4 月 14 日完成契變協議書，本計畫內容將以契約變更後之工作內容及成果呈現。

參、114 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)飛航劑量量測技術之量測系統建置與輻射場校正測試 | | | ※ | | | | | | | | | | ※ | |
| (2)利用劑量評估工具執行空勤人員輻射劑量評估 | | | | | | ※ | | | | | | | | |
| (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)提出國內空勤人員劑量管理方案及相關建議 | | | | | | | | | | | | | ※ | |
| 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：完成飛航劑量量測系統建置。 第 2 季：完成空勤人員輻射劑量評估相關研究報告。 第 3 季：完成國籍航空公司主要航線輻射劑量評估及科普知識宣達。 第 4 季：完成飛航劑量量測技術相關技術報告，並提出劑量管理方案與建議。 | | | | | | | | | | | | | |
| 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)研擬天然放射性物質相關量測技術精進方案 | | | ※ | | | ※ | | | | | | | |
| (2)建立天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量量測分析技術 | | | | | | | | | | | | ※ | |
| (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 | 第 1 季：完成負離子商品模式擴增研擬。 第 2 季：完成天然放射性物質量測技術精進方案。 第 3 季：完成天然放射性物質於民生應用相關科普知識宣達。 第 4 季：完成天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量相關研究報告，以及含天然放射性物質商品後市場調查技術報告。 | | | | | | | | | | | | |
| 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。 | | | | | | | | | | | | | |

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 114 年度預期完成工作項目如下：
 - (1) 完成飛航劑量量測技術之量測系統建置與輻射場校正測試。
 - (2) 完成空勤人員輻射劑量評估。
 - (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) 提出空勤人員劑量管理方案。
2. 本子計畫 114 年度具體成果規劃包括：
 - (1) 研究團隊養成 1 個
 - (2) 空勤人員輻射劑量評估相關研究報告 1 篇
 - (3) 飛航劑量量測技術相關技術報告 1 篇
 - (4) 空勤人員劑量管理方案 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 114 年度預期完成工作項目如下：
 - (1) 精進天然放射性物質相關量測技術。
 - (2) 完成天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量分析技術建立。
 - (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 114 年度具體成果規劃包括：
 - (1) 研究團隊養成 1 個
 - (2) 完成天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量相關研究報告 1 篇
 - (3) 含天然放射性物質商品後市場調查技術報告 1 篇

肆、114 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：

一、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(1) 飛航劑量量測技術之量測系統建置與輻射場校正測試

1.1 文獻研析

飛航劑量量測技術方面，目前已進行初步儀器設備功能測試，完成量測系統建置，詳細內容如附件二，並參考國際文獻之作法[1]，初步規劃 CR-39 底片之量測流程如圖 1，包含照射試驗、高溫蝕刻、軌跡拍攝、影像分析等步驟。CR-39 底片的偵測原理是基於粒子的線性能量轉移(Linear Energy Transfer, LET)，它能夠準確地檢測帶電粒子對底片造成的結構性損傷，因此非常適合我們的需求。當這些帶電粒子通過偵檢器時，將引發 CR-39 底片中的游離激發，進而導致其分子結構的鍵斷裂。經過化學蝕刻處理後，這些斷裂形成的軌跡可在顯微鏡下被清晰觀察到，而這些軌跡代表著輻射行經路徑。

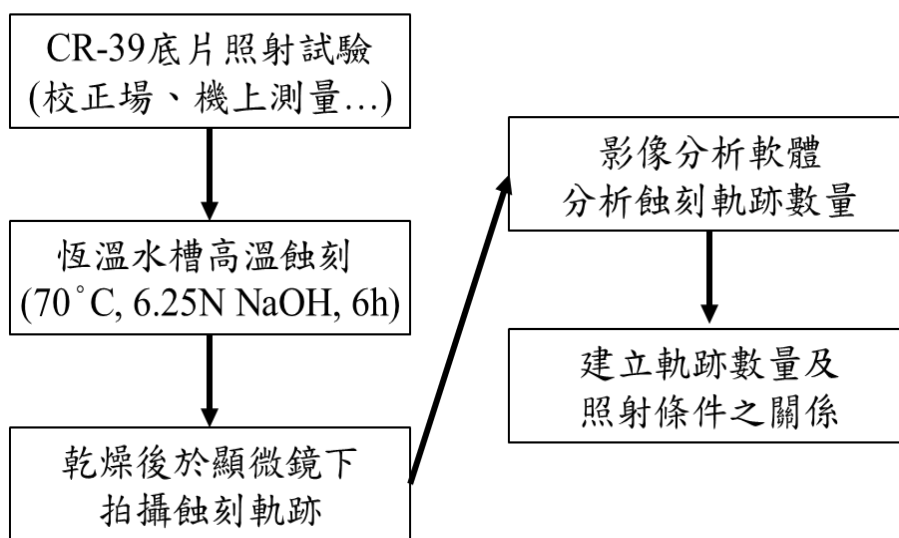


圖 1、CR-39 量測技術流程圖

對於國內的輻射場校正測試實驗，CR-39 底片輻射量測的準確性高度依賴於適當的校正方法，依據蒐集到的國際文獻，Horwacik 等人[2]和 Zhou 等人[3]皆採用了歐洲核子研究組織(European Organization for Nuclear Research Organisation européenne pour la recherche nucléaire，簡稱 CERN)的高能量宇宙輻射參考場(CERF)，來校正 CR-39 底片偵測的核軌跡與輻射劑量關係，以確保測量結果能夠準確反映飛行環境中的輻射場特性。Horwacik 等人[2]主要針對中子輻射劑量校正，透過 CERF 參考場進行快中子(能量高於 1 MeV)的響應標定，並計算 CR-39 底片的中子劑量響應係數。另一方面，Zhou 等人[3]除了在 CERF 參考場進行的中子量測校正之外，亦進行高能重離子校正，並使用 Am-241 阿伐射源來校正 CR-39 底片對高原子序重粒子的響應。這些研究顯示 CERF 參考場因其輻射環境與飛航高空輻射場高度相似，成為 CR-39 底片在航空劑量測量研究中最重要之標定場之一。然而，目前國內尚無類似 CERF 參考場可供使用，因此我們將考慮以其他輻射場來替補，例如本院的 Cf-252 快中子校正場以及國立清華大學的 THOR-BNCT(Tsing Hua Open-pool Reactor–Boron Neutron Capture Therapy)熱中子輻射場。

CERF 參考場的輻射源來自高能質子與 π 介子撞擊鉛靶產生的次級中子，能夠模擬飛航環境中高能快中子與次級輻射，因此較適合飛行環境的中子輻射標定。相較之下，Cf-252 快中子源主要透過自發性裂變產生中子，其中子能譜雖然涵蓋了部分快中子成分，但與飛航環境中的高能宇宙射線中子場仍有較大差異。特別是 Cf-252 主要產生 0.5 到 6 MeV 能量範圍內的中子，而飛航環境中的快中子通常能量更高，且來自高能質子與宇宙射線的次級產生。因此，雖然 Cf-252 快中子源可作為 CERF 校正場的替代方案之一，但其能

譜範圍較低，無法精確模擬航空輻射環境中的高能快中子，可能影響 CR-39 底片的最終劑量評估準確性。因此，在未來的校正工作中，我們將根據不同中子場的特性進行補正與誤差評估，以確保 CR-39 底片在飛航劑量測量中的可靠性。

1.2 操作流程

文獻中對於 CR-39 底片蝕刻，所使用的化學蝕刻溶液 NaOH 濃度通常在 5 至 7.25 M 之間，蝕刻溫度則在 60 至 90°C 範圍內[4]，如表 1 整理。在此我們選擇文獻中最多人使用的 6.25 M 濃度搭配 70°C 進行操作，並對 CR-39 底片進行蝕刻 6 小時[5]。為避免每次操作耗費大量 NaOH，我們製作了可放置 10 片 CR-39 底片的放置匣(如圖 2 左)，只要將 NaOH 裝滿放置匣外殼容器(如圖 2 右)，再放置於裝滿純水的恆溫循環水槽內(如圖 3)，利用隔水加熱方式間接加熱 NaOH，以節省 NaOH 的使用，最後透過紅外線測溫槍確認 NaOH 已達目標溫度後再放入 CR-39 底片進行蝕刻。

表 1、文獻使用之化學蝕刻條件[4]

| Etchant type | Concentration (M) | Temperature (°C) | Reference |
|--------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| NaOH | 5.00 | 70 | (Spurný et al., 2004) |
| | 5.00 | 80 | (Leonardi et al., 2009) |
| | 6.00 | 70 | (Inozemtsev et al., 2021) |
| | 6.25 | 60 | (Zhou et al., 2010) |
| | 6.25 | 70 | (Sahoo et al., 2016) |
| | 6.25 | 90 | (Kading et al., 2020) |

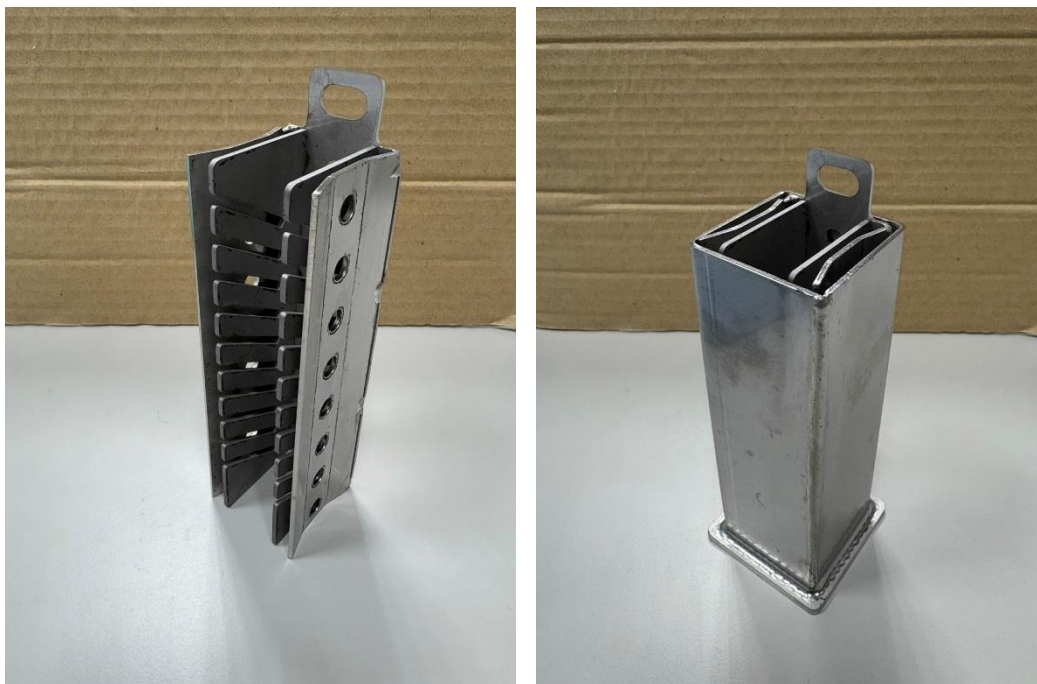


圖 2、(左)底片放置匣及(右)外殼容器



圖 3、恆溫循環水槽

本研究使用的金相顯微鏡配備了多種倍率的物鏡(5x、10x、20x、50x)和10x目鏡，能夠全面檢查樣品的微觀結構與表面特徵，配合4K CCD相機能即時傳輸影像到顯示器，方便觀察與記錄擷取，外觀如圖4所示。在CR-39底片的核軌跡掃描過程中，由於儀器不具備自動掃描功能，需手動調整顯微鏡之照野，因此我們使用了累積平均法，即通過隨機光學掃描底片的不同區域，逐步累積影像張數，分別記錄各張影像下的核軌跡數量並進行平均，作為該CR-39底片之代表核軌跡數量，一般來說若假設CR-39底片受到的輻射照射均勻，則隨著拍攝張數的上升，其核軌跡數量的平均應會趨於穩定，此方法根據輻射強度不同，所需的影像數量有所變化。



圖4、本研究使用之顯微鏡及相機組合

為了分析 CR-39 底片上的核軌跡數量，本研究採用了 Fiji 作為影像後處理的軟體。Fiji 是一款基於 ImageJ 的圖像處理工具，具備強大的粒子分析功能，可高效地計算影像中的核軌跡數量。該功能通過設置閾值將原始灰度圖像轉換為二進位圖像，並根據顆粒的大小和圓度進行自定義分析，從而識別並標記符合條件的核軌跡，進一步計算軌跡數量及孔徑大小。此外，我們也通過 Fiji 中的巨集文本(macros)功能(如圖 5)，可以記錄下所有處理步驟，並應用於批量影像處理，進一步提高效率 and 一致性。

```
import os

def count_lines_in_folder_recursive(folder_path):
    results = {}
    for root, dirs, files in os.walk(folder_path):
        for file_name in files:
            if file_name.endswith('.txt'):
                full_path = os.path.join(root, file_name)
                try:
                    with open(full_path, 'r', encoding='utf-8') as f:
                        lines = f.readlines()
                        relative_path = os.path.relpath(full_path, folder_path)
                        results[relative_path] = len(lines)
                except Exception as e:
                    relative_path = os.path.relpath(full_path, folder_path)
                    results[relative_path] = f'Error: {e}'
    return results

# 設定要掃描的資料夾路徑
folder_path = 'C:\Users\i2469\Desktop\BNCT'

line_counts = count_lines_in_folder_recursive(folder_path)

# 取得資料夾名稱作為檔名
folder_name = os.path.basename(os.path.normpath(folder_path))
output_file = f'{folder_name}.dat'

# 將結果寫入 .dat 檔
with open(output_file, 'w', encoding='utf-8') as f:
    for file_path, count in line_counts.items():
        f.write(f'{file_path}: {count} lines\n')

print(f'結果已輸出到 {output_file}')
```

圖 5、Fiji 巨集文本功能

1.3 測試實驗

本次測試實驗選用國立清華大學的 THOR-BNCT 熱中子輻射場作為中子反應校正環境。該場域原設計為醫學用途，具備穩定的中子束輸出能力，可透過調整反應爐功率與照射時間精確控制條件。

THOR-BNCT 運轉時產生的熱中子能量約為 0.025 eV，屬於高 LET 之低能中子，可與 CR-39 底片材料中的氫(H)、碳(C)、氧(O)原子發生彈性或非彈性散射，產生質子或阿伐粒子，於底片中留下可經化學蝕刻顯現的微觀損傷軌跡。由於熱中子與 CR-39 底片作用效率高、軌跡表現明顯，該場域適合作為驗證中子誘生軌跡能力的實驗平台。

在實驗設計上，我們將 CR-39 底片貼附於 THOR-BNCT 品保用的方型 PMMA 材質假體最遠離射源之平面，並依垂直方向分成上、中、下三排配置，如圖 6 所示。根據國立清華大學提供之 MCNP 模擬分析結果，中子在穿透假體後能量顯著降低，最遠側表面熱中子比例明顯上升，且以中心點的中子通量最高。此配置有助於分析不同高度與位置對底片軌跡密度的實際影響。此外，我們設計五組不同保存模式，分別於蝕刻前或蝕刻後儲存於室溫(25–27°C)或低溫(2°C)環境達 14 天，並搭配三排(上中下)空間分佈設置，希望能進一步分析 CR-39 底片儲存條件的影響，如圖 7 所示，五組實驗條件說明如下：

Group 1 為對照組，底片於照射後 24 小時內立即蝕刻，作為標準參考與重現性驗證依據。

Group 2 為「蝕刻前低溫儲存組(Pre-storage #1)」，底片於照射後先在 2°C 冰箱冷藏 14 天，再進行蝕刻。

Group 3 為「蝕刻前室溫儲存組(Pre-storage #2)」，底片於照射後先在室溫 14 天，再進行蝕刻。

Group 4 為「蝕刻後低溫儲存組(Post-storage #1)」，底片照射後立即蝕刻，蝕刻完成後放入 2°C 冰箱冷藏 14 天。

Group 5 為「蝕刻後室溫儲存組(Post-storage #2)」，底片照射後立即蝕刻，再於室溫儲存 14 天。

本次實驗的照射條件為 THOR-BNCT 平常例行照射治療品保所使用之條件，設定為反應器功率 1.7 MW 條件下照射 6 分鐘，圖 8 為 THOR-BNCT 照射場之功率監控面板，功率自開始照射後逐步上升到目標功率 1.7 MW 後(圖 8 (上))，維持 6 分鐘照射(高原區)，最後再逐漸下降(圖 8 (下))。



圖 6、CR-39 底片於 PMMA 假體之擺放位置

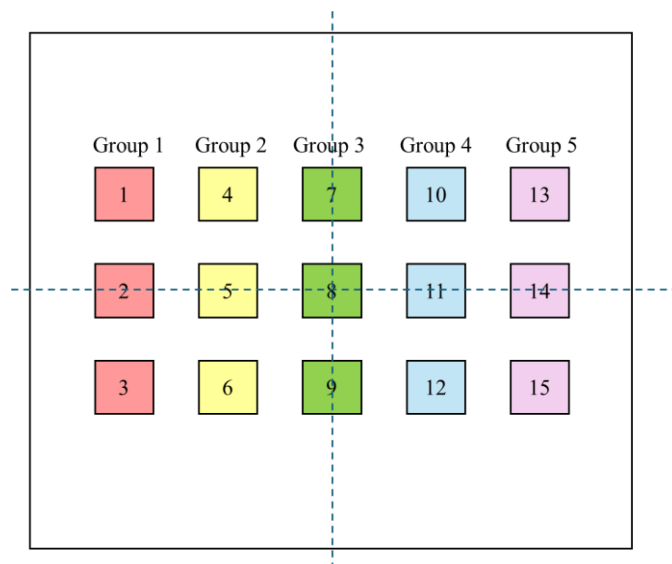


圖 7、CR-39 底片編號分組

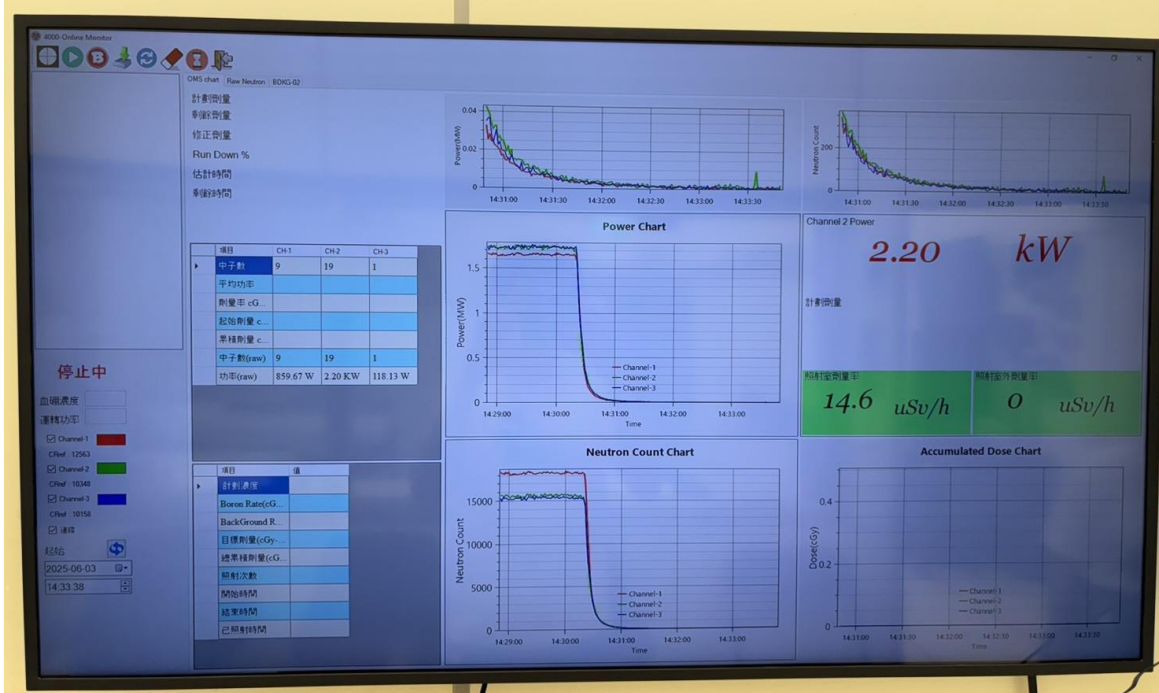
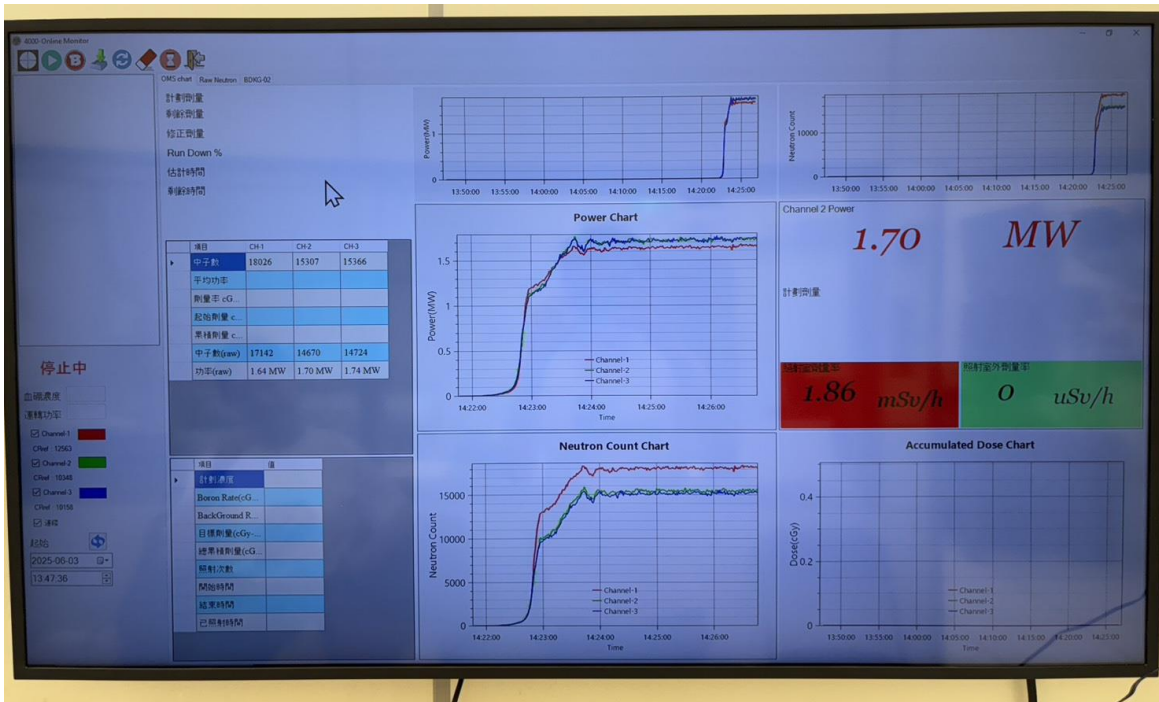


圖 8、THOR-BNCT 照射場功率監控面板(上)照射開始(下)照射結束

1.4 實驗結果

由於 CR-39 底片是以觀察到的影像軌跡數量為依據，在假設照射條件均勻與 CR-39 底片作用的前提下，若能盡可能地提高拍攝之影像張數，則可避免少數影像不清晰情況，平均多張影像之結果以得到較穩定、具代表性的累積平均軌跡數。圖 9 為 Group 1 對照組，即底片於照射後 24 小時內立即蝕刻的 CR-39 底片影像結果範例，途中的黑色小圓點即為照射後的核軌跡，可看出底部背景有一些同向的刮痕及少量水漬(空心小圓點)，但在經過 Fiji 軟體影像分析後，影像如圖 10 所示，刮痕及水漬的影響皆順利消除，有效過濾多餘的雜質資訊。

圖 11 至圖 14 為部分雜質較高的影像範例，圖 11 為底片有遭受到外力破壞，留下連續性的滑痕軌跡，此影響即便透過 Fiji 軟體影像分析仍無法消除(圖 12)；圖 13 為底片水漬及底部刮痕殘留嚴重，此影響透過 Fiji 軟體影像分析仍無法消除(圖 14)。上述影像在巨集執行完畢後須手動剔除，以避免影響最後的平均結果。

圖 15 為 Group 1 對照組 CR-39 底片之累積平均軌跡數變化，橫軸為計算平均軌跡數量所使用的影像張數，所有的影像皆是以隨機但不重複的前提在 CR-39 底片(大小約 25mm x 25mm)上掃描所拍攝出，每張影像的大小約為 1.581 mm x 0.89 mm；縱軸為在該影像張數下的累積平均軌跡數，可看出隨著影像張數的提高，該平均值會逐漸趨於一穩定值，以此案例來看當影像張數達到 40 張以上時開始趨於穩定，最終的累積平均軌跡數為 140 左右。故建議未來在進行影像分析時，建議每個 CR-39 底片拍攝的影像張數應至少達 40 張以上，才可獲得較有參考性的平均值。

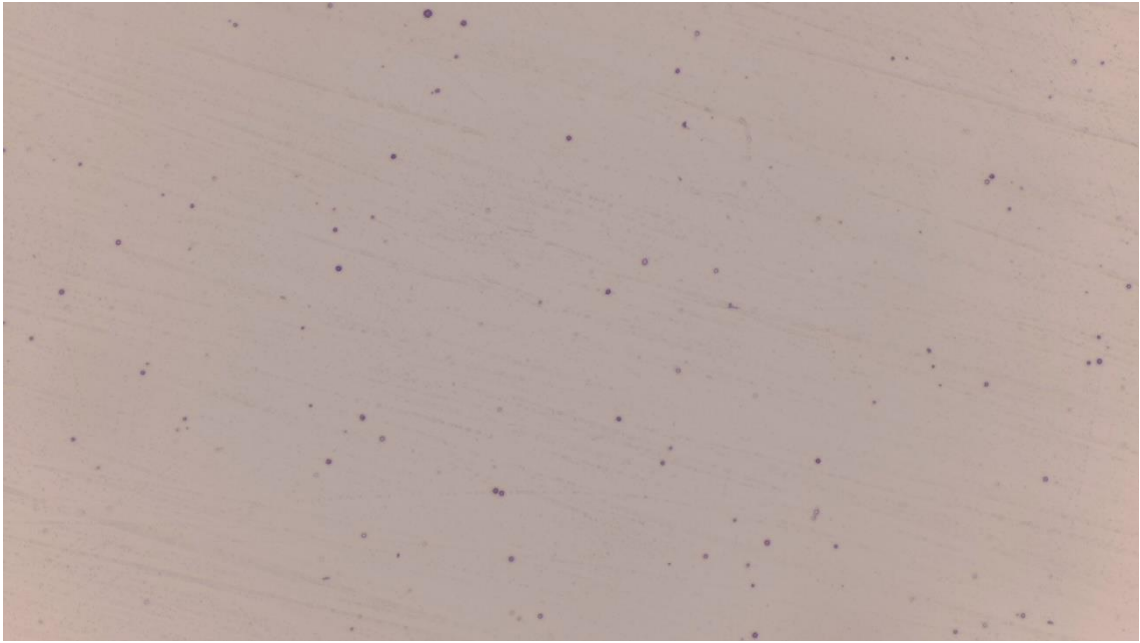


圖 9、CR-39 底片影像範例

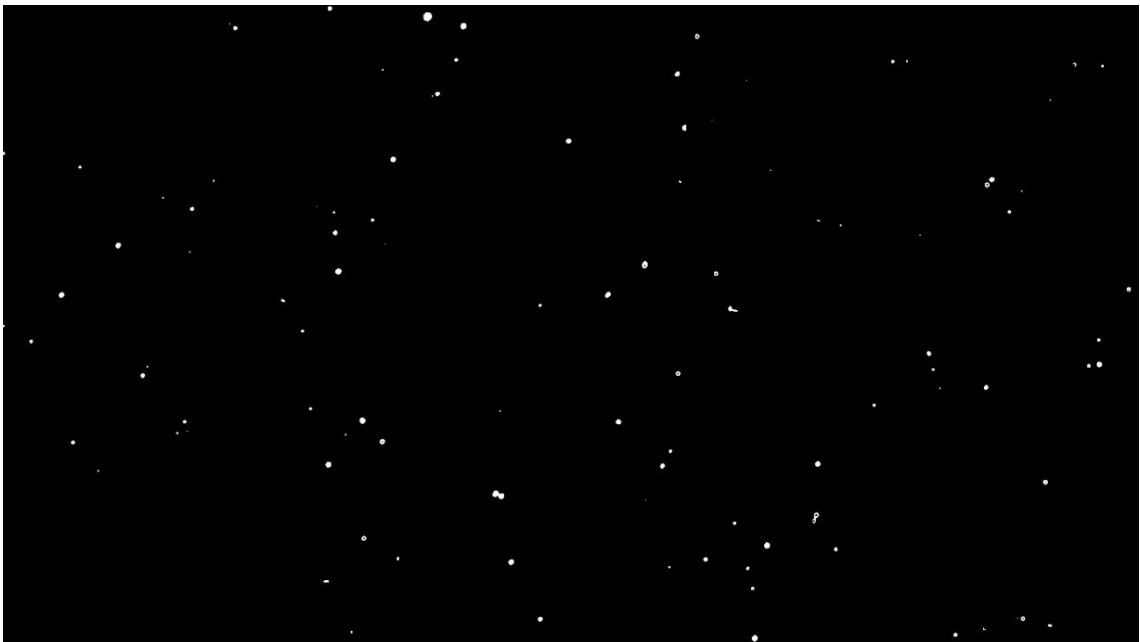


圖 10、CR-39 底片影像(處理後)範例

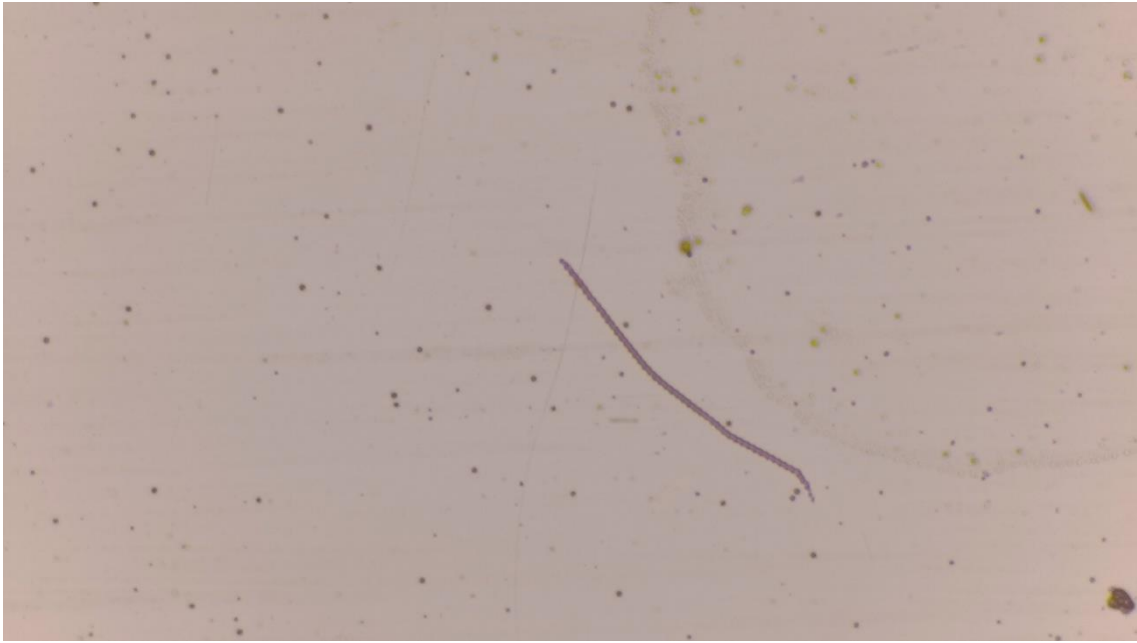


圖 11、CR-39 底片雜質影像範例 1a



圖 12、CR-39 底片雜質影像(處理後)範例 1b

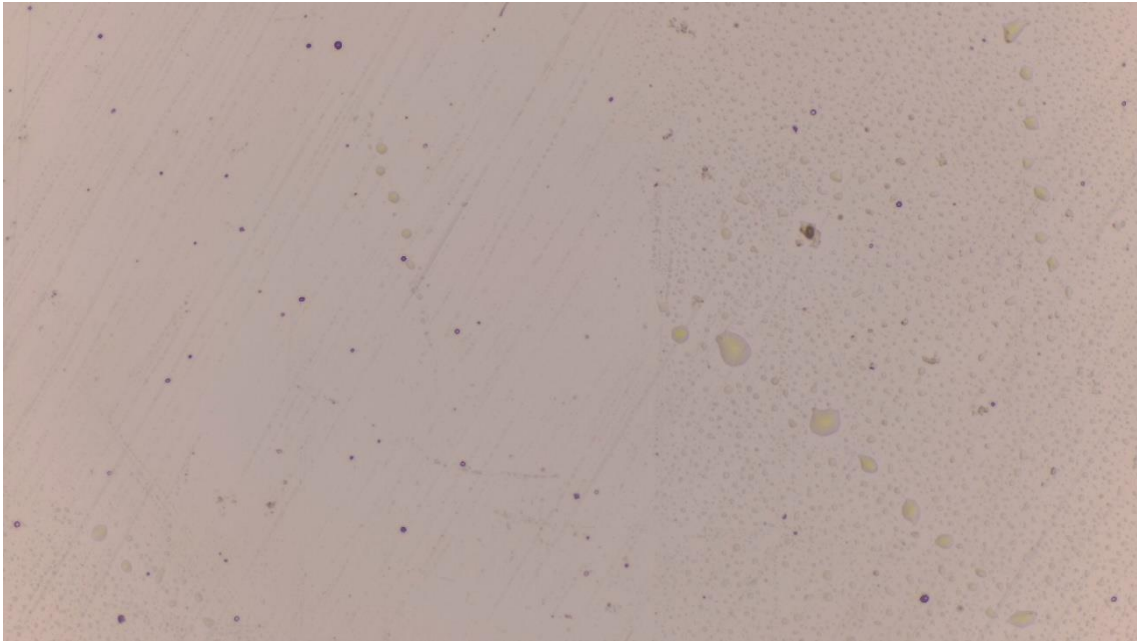


圖 13、CR-39 底片雜質影像範例 2a

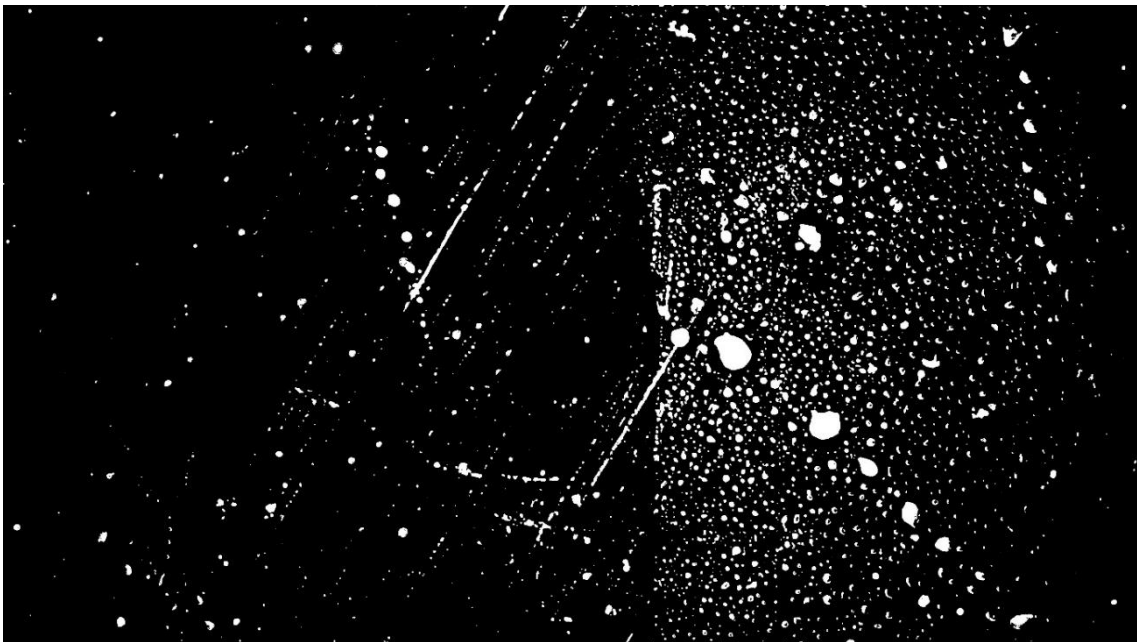


圖 14、CR-39 底片雜質影像(處理後)範例 2b

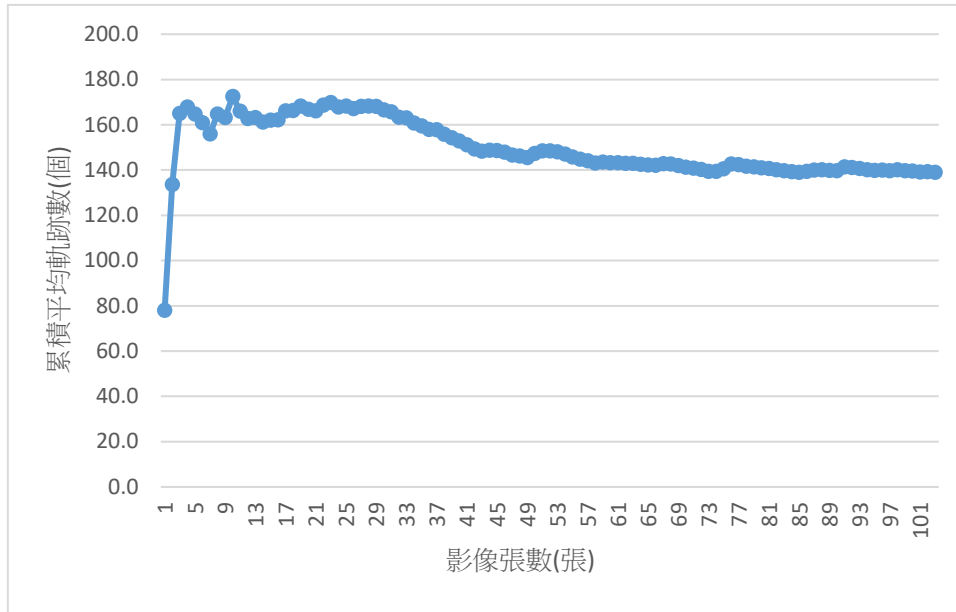


圖 15、CR-39 底片不同影像張數之累積平均軌跡數

表 2 為 CR-39 底片累積軌跡數統計結果，從 CR-39 底片位於假體上的位置來看，位於中子射束正中間的 Group 3 的軌跡數明顯高於兩側的 Group 1 及 Group 5 結果，若比較同一 Group 內的三片 CR-39 底片，也可大致看出以中間的 CR-39 底片軌跡數較高的趨勢。若比較蝕刻的即時性(Group 2 vs Group 4；Group 3 vs Group 5)，就本次試驗的並無看出明顯趨勢；若比較 CR-39 底片的保存條件(Group 2 vs Group 3；Group 4 vs Group 5)，則可看出在 2°C 冰箱冷藏比起室溫保存，其結果的穩定性較佳(標準差較小)，建議未來若無法即時蝕刻拍攝影像，可盡量在冷藏環境下保存。由於從結果上看來中子射源具備空間分布特性，不同照射位置所受的輻射強度皆不相同，難以直接定量出輻射絕對劑量，故本次測試僅探討實驗操作條件及環境等差異，而不就輻射強度及軌跡數量之相對關係做比較，但確實能從 CR-39 底片的軌跡反映出中子輻射照射後的效果。

表 2、CR-39 底片累積軌跡數統計結果

| Group | CR-39 S/N | Tracks / image | Tracks / cm ² | Avg. | Std.(%) |
|-------|--------------|----------------|--------------------------|-------|-----------|
| 1 | 1 | 139.0 | 9879 | 9009 | 995(11%) |
| | 2 | 129.8 | 9225 | | |
| | 3 | 111.5 | 7924 | | |
| 2 | 4 | 146.1 | 10383 | 10293 | 162(2%) |
| | 5 | 146.2 | 10390 | | |
| | 6 | 142.2 | 10106 | | |
| 3 | 7 | 175.9 | 12501 | 14441 | 3515(24%) |
| | 8 | 260.3 | 18499 | | |
| | 9 | 173.4 | 12323 | | |
| 4 | 10 | 113.0 | 8031 | 9829 | 1774(18%) |
| | 11 | 162.9 | 11577 | | |
| | 12 | 139.0 | 9879 | | |
| 5 | 13 | 91.0 | 6467 | 8367 | 1678(20%) |
| | 14 | 126.5 | 8990 | | |
| | 15 | 135.7 | 9644 | | |

工作項目(2) 利用劑量評估工具執行空勤人員輻射劑量評估

空勤人員輻射劑量評估報告彙整部分，詳細內容如附件一，摘錄內容如下：

ICRP-132 號報告[6]建議，應建立宇宙射線飛航劑量對空勤人員之相關劑量管理措施，並以 5 到 10 毫西弗為參考管理基準。針對此目的，本院於 113 年已協助開發空勤人員飛航劑量評估工具，透過分析各航空公司航班資訊，藉此評估國內空勤人員劑量分布情形，做為未來相關劑量管理方案制定之重要參考。

為了概括性的瞭解國內航空公司之現況，我們先參考交通部民航局發布之 113 年民航統計年報[7]，113 年度國籍航空之受雇員工組成部分，包含機長 1698 人、副駕駛員 1802 人、客艙空服員 9262 人，摘錄我國共 6 家國籍航空公司之相關資訊，整理如下：

中華航空 113 年共有適航航空器 82 架，國際航線涵蓋 67 條客運定期航線和 37 條貨運定期航線，其中客運部分共計 55790 架次，前三頻繁之航線分別為飛往香港(6829 架次)、曼谷蘇凡納布(3599 架次)及東京成田 (3452 架次)，另有國際不定期客運包機共計 1909 架次，飛往仰光及靜岡等地。

長榮航空 113 年共有適航航空器 85 架，國際航線涵蓋 56 條客運定期航線和 21 條貨運定期航線，其中客運部分共計 55903 架次，前三頻繁之航線分別為飛往香港(6549 架次)、曼谷蘇凡納布(2920 架次)及東京成田(2918 架次)，另有國際不定期客運包機共計 4 架次，飛往松山。

星宇航空 113 年共有適航航空器 26 架，國際航線涵蓋 33 條客運定期航線和 0 條貨運定期航線，其中客運部分共計 21207 架次，前三頻繁之航線分別為飛往東京成田(2121 架次)、澳門(2037 架次)

及大阪(1464 架次)，另有國際不定期客運包機共計 192 架次，飛往德島及高松。

華信航空 113 年共有適航航空器 12 架，國際航線涵蓋 5 條客運定期航線和 0 條貨運定期航線，其中客運部分共計 2291 架次，前三頻繁之航線分別為飛往廈門(1038 架次)、胡志明市(731 架次)及福州(314 架次)。

台灣虎航 113 年共有適航航空器 14 架，國際航線涵蓋 44 條客運定期航線和 0 條貨運定期航線，其中客運部分共計 18499 架次，前三頻繁之航線分別為飛往東京成田(2535 架次)、大阪(1896 架次)及澳門(1556 架次)，另有國際不定期客運包機共計 210 架次，飛往茨城及福島等地。

立榮航空 113 年共有適航航空器 14 架，國際航線涵蓋 3 條客運定期航線和 0 條貨運定期航線，其中客運部分共計 940 架次，前三頻繁之航線分別為飛往廈門(314 架次)、上海浦東(314 架次)及深圳(312 架次)。

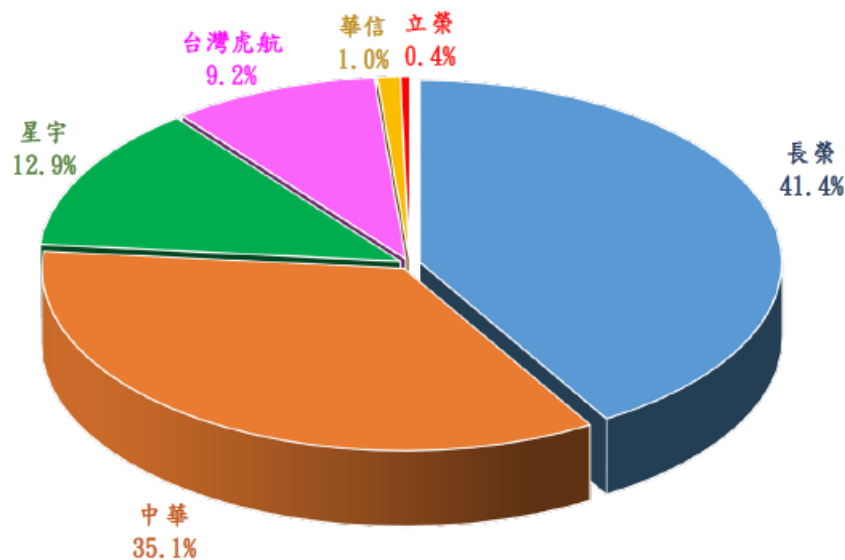


圖 16、國籍航空公司國際航線載客人數佔比[7]

空勤人員劑量統計資料部分，本報告彙整自 114 年 1 月 1 日至 114 年 10 月 31 日止之數據資料，由於本報告撰寫時尚未完成 114 年整年度之劑量評估，後續待資料收齊後將額外更新一份包含 114 年完整劑量評估之報告給核安會。此外值得一提的是，立榮航空之人員係隸屬於長榮航空控管，故本次試驗數據會將立榮航空併於長榮航空處理。

詳細數據內容如附件一，若以平均劑量來看，五家航空公司 114 年 1 到 10 月的整體平均劑量為 1.660 mSv，假設每月各航空公司的出勤及航線狀況無太大差異，將截至 114 年 10 月為止的平均劑量，以月份推算到一整年(12 個月)，則整體年平均劑量約為 1.992 mSv。以最高劑量來看，五家航空公司 114 年 1 到 10 月的整體最高劑量為 3.670 mSv，假設每月各航空公司的出勤及航線狀況無太大差異，將截至 114 年 10 月為止的最高劑量，以月份推算到一整年(12 個月)，則整體年最高劑量約為 4.404 mSv，會落在“4 以上至未滿 5”的區間，此數值只是對最終結果的預測，實際狀況還是要以最終彙整之數據為主。若以劑量區間的人數分布來看，截至 114 年 10 月為止多數(96%)的空勤人員劑量皆落在 3 mSv 以下，如表 3 所示。

表 3、整體空勤人員年劑量區間人數分布(114 年 1 月至 10 月)

| 劑量區間(mSv) | 駕艙(人) | 客艙(人) | 加總(人) | 占比 |
|-----------|-------|-------|-------|-----|
| 小於 1 | 1350 | 2451 | 3801 | 28% |
| 1 以上至未滿 2 | 702 | 3659 | 4361 | 32% |
| 2 以上至未滿 3 | 1150 | 3733 | 4883 | 36% |
| 3 以上至未滿 4 | 298 | 277 | 575 | 4% |
| 4 以上至未滿 5 | 0 | 0 | 0 | 0% |
| 5 以上至未滿 6 | 0 | 0 | 0 | 0% |
| 大於 6 | 0 | 0 | 0 | 0% |

我們彙整了最新的「113 年民航統計年報」以及 114 年度截至 10 月為止之航班數據，相關數據也有助於瞭解我國空勤人員劑量分布之情況，可作為未來管理措施及政策推動之重要參考。

工作項目(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

3.1 評估國籍航空公司主要航線之輻射劑量

在評估國籍航空公司主要航線部分，採用美國開發的 CARI-7A[8]及我國清大開發的 pyFDC[9]兩套軟體進行分析，並參考最新 113 年的民航統計年報，針對華航、長榮等國籍航空挑選共 10 條航線進行評估，相關內容如下所述。

CARI-7A 是美國聯邦航空總署開發的飛航輻射劑量計算程式[8]，用於評估航空飛行中因銀河宇宙射線造成的輻射曝露。該系統結合銀河宇宙射線模型與蒙地卡羅模擬資料，模擬粒子在大氣中的傳輸與次級粒子產生，並考慮太陽活動與地磁條件的影響。CARI-7A 可沿實際航線計算並輸出有效劑量，以及質子、中子、電子、光子與重離子等粒子的劑量成分。其特點包括支援多種銀河宇宙射線模型、可模擬從海平面至次軌道高度的飛行，並能處理大量航班的批次計算。此工具廣泛應用於航空劑量監測與航太輻射風險評估。

pyFDC 為國立清華大學開發的飛航輻射劑量評估程式[9]，其計算結果已與歐盟 EURADOS 報告[10]及其他程式進行 22 條航線比對驗證，涵蓋太陽活動極高與極低情境，結果顯示良好可靠性。其核心採用 FLUKA 蒙地卡羅模擬[11]產生的資料庫，可模擬宇宙輻射與大氣交互作用產生的次級粒子場，進而計算航空劑量與能譜分布。使用者可透過批次計算功能來一次匯入大量航線資訊（包括飛行高度、速度與日期），或在圖形介面中手動新增資料庫中缺少的機場經緯度，系統將計算並輸出有效劑量，以及中子、質子、電子、光子與重離子等成分的劑量能譜。

為確保研究結果具代表性，本研究參考 113 年民航統計年報[7]資料，檢視每週飛航次數前十名、以桃園機場為起點的國籍航空直飛航線，範圍限於華航、長榮、星宇、虎航、立榮及華信六家航空公司。分析顯示，多數為亞洲短程航線，以香港最頻繁，日本占四條，其餘為東南亞國家，僅洛杉磯與舊金山屬長程航線。若僅採用此十條航線，無法充分呈現不同區域與航程的劑量差異。因此，本研究選擇涵蓋亞洲、歐洲、北美及大洋洲的主要國際航線，具體如下：

亞洲：香港、東京、首爾、曼谷。

北美：洛杉磯、溫哥華、紐約。

歐洲：阿姆斯特丹、巴黎。

大洋洲：雪梨。

表 4 彙整上述航線的機場名稱、國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)機場代碼與經緯度，以供 pyFDC 與 CARI-7A 進行航線計算與輻射劑量模擬；圖 17 則示意各航線的大圓分布，便於理解其地理差異。

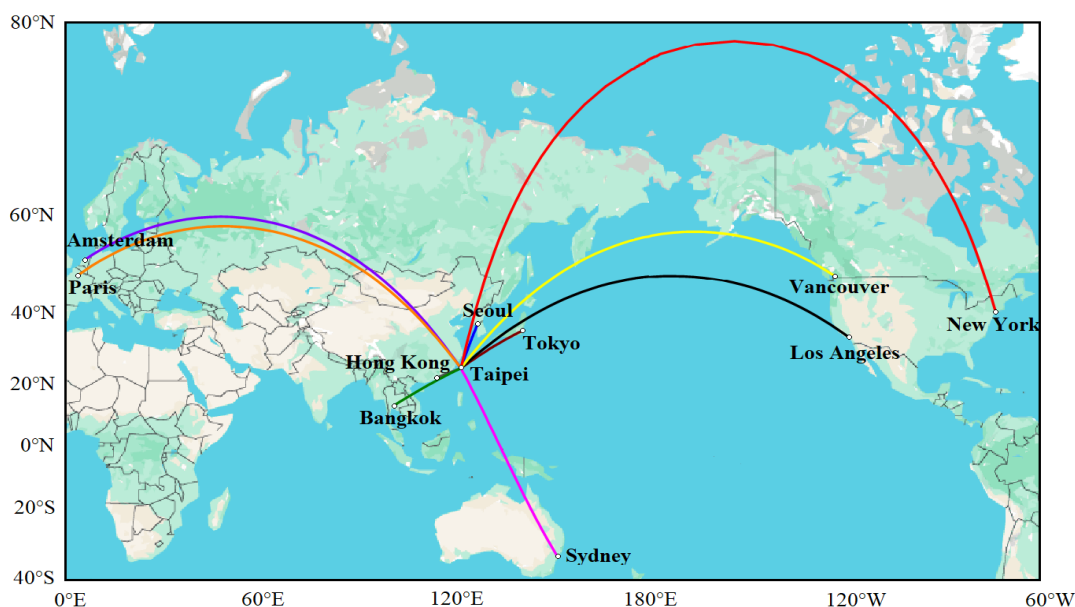


圖 17：10 條台灣主要航線的大圓航線示意圖

表 4、挑選之 10 條台灣出發之主要航線

| 目的地 | 機場 | 機場代碼 | 緯度 | 經度 |
|----------------------|---|------|------------|-------------|
| 香港 / Hong Kong | Hong Kong International Airport | VHHH | 22°18'36"N | 113°54'18"E |
| 東京 / Tokyo | Narita International Airport | RJAA | 35°46'21"N | 140°23'19"E |
| 首爾 / Seoul | Incheon International Airport | RKSI | 37°27'48"N | 126°26'24"E |
| 曼谷 / Bangkok | Suvarnabhumi Airport | VTBS | 13°41'00"N | 100°45'00"E |
| 洛杉磯 / Los Angeles | Los Angeles International Airport | KLAX | 33°56'33"N | 118°24'29"W |
| 溫哥華 / Vancouver | Vancouver International Airport | CYVR | 49°11'12"N | 123°10'05"W |
| 紐約 / New York | John F. Kennedy International Airport | KJFK | 40°38'23"N | 73°46'44"W |
| 阿姆斯特丹 / Amsterdam | Amsterdam Airport Schiphol | EHAM | 52°18'07"N | 4°45'25"E |
| 巴黎 / Paris | Paris – Charles de Gaulle Airport | LFPG | 49°00'23"N | 2°32'54"E |
| 雪梨 / Sydney | Sydney Kingsford Smith Airport | YSSY | 33°56'04"S | 151°10'26"E |

從表 5 的模擬結果可看出飛行距離、緯度與飛行時間對總有效劑量具有顯著影響。亞洲航線如香港、東京、首爾與曼谷屬短航線，其總有效劑量顯著低於長程航線。例如，香港航線的模擬結果約為 1.429 μSv (pyFDC)與 1.392 μSv (CARI-7A)，為所有航線中最低；東京與曼谷則約介於 3.6 至 3.9 μSv ，顯示短程航線因飛行時間短且未進入高緯度區域，輻射曝露相對有限。

北美與歐洲航線的總有效劑量明顯高於其他區域，主要受到飛行時間較長、以及進入高緯度地區導致地磁剛度(geomagnetic rigidity)減弱等因素影響。以紐約航線為例，總有效劑量最高，分別為 73.000 μSv (pyFDC v3.2) 與 72.584 μSv (CARI-7A)，遠高於其他航線。歐洲航線如阿姆斯特丹與巴黎的總劑量亦達 46.121 至 49.340 μSv ，與北美航線相當，顯示其輻射曝露與極區效應密切相關。洛杉磯與溫哥華航線則介於 44.856 至 47.338 μSv ，同屬高曝露等級。

大洋洲的雪梨航線則雖屬中長程，但總劑量明顯低於歐美航線，僅約 15.108 μSv (pyFDC) 與 17.400 μSv (CARI-7A)，約為北美航線的三分之一，反映其航程未經高緯度區域且飛行時間較短。

根據 ICRP-103 號報告[12]與 UNSCEAR 2000 報告[13]，高緯度地區因地磁剛度較低，地磁場屏蔽作用顯著減弱，使高能宇宙射線更易進入大氣層，並在高空與大氣原子核發生散射反應，產生大量次級粒子如中子與渺子，導致輻射劑量顯著上升。因此，穿越極地或高緯度區域的長程航線曝露風險不可忽視，而未經高緯度的航線則相對較低。

綜合而言，模擬結果呈現顯著的區域性差異，並與飛行距離、緯度及飛行時間密切相關，與既有文獻的趨勢一致，證實飛行路徑與地理條件對宇宙輻射曝露的重要性。

表 5、雙程式模擬主要航線的有效劑量結果

| Destinations | Simulation Programs | Simulated Effective Dose (μSv) | | | | | | | Total |
|--------------|---------------------|--------------------------------|--------|----------|-------|--------|-------|-----------|--------|
| | | Neutron | Proton | Electron | Muon | Photon | Pion | Heavy Ion | |
| Hong Kong | pyFDC | 0.445 | 0.412 | 0.213 | 0.107 | 0.248 | 0.003 | 0.001 | 1.429 |
| | CARI | 0.387 | 0.323 | 0.280 | 0.091 | 0.300 | 0.004 | 0.008 | 1.392 |
| Tokyo | pyFDC | 1.121 | 1.085 | 0.537 | 0.230 | 0.620 | 0.008 | 0.004 | 3.605 |
| | CARI | 1.131 | 0.974 | 0.760 | 0.220 | 0.806 | 0.010 | 0.027 | 3.923 |
| Seoul | pyFDC | 0.679 | 0.638 | 0.308 | 0.146 | 0.359 | 0.005 | 0.002 | 2.137 |
| | CARI | 0.660 | 0.556 | 0.419 | 0.132 | 0.448 | 0.006 | 0.015 | 2.233 |
| Bangkok | pyFDC | 1.164 | 1.139 | 0.596 | 0.245 | 0.683 | 0.010 | 0.004 | 3.841 |
| | CARI | 1.051 | 0.914 | 0.850 | 0.233 | 0.895 | 0.012 | 0.026 | 3.977 |
| Los Angeles | pyFDC | 17.081 | 16.437 | 4.359 | 1.802 | 5.160 | 0.069 | 0.048 | 44.956 |
| | CARI | 17.368 | 14.326 | 5.961 | 1.752 | 6.499 | 0.082 | 0.505 | 46.461 |
| Vancouver | pyFDC | 17.790 | 16.716 | 3.915 | 1.639 | 4.673 | 0.062 | 0.061 | 44.856 |
| | CARI | 19.002 | 14.856 | 5.324 | 1.581 | 5.865 | 0.073 | 0.547 | 47.338 |
| New York | pyFDC | 30.414 | 27.876 | 5.512 | 2.338 | 6.664 | 0.088 | 0.108 | 73.000 |
| | CARI | 30.475 | 23.186 | 7.320 | 2.193 | 8.140 | 0.100 | 0.858 | 72.584 |
| Amsterdam | pyFDC | 18.482 | 17.298 | 3.902 | 1.641 | 4.671 | 0.062 | 0.065 | 46.121 |
| | CARI | 19.550 | 15.198 | 5.284 | 1.574 | 5.834 | 0.072 | 0.565 | 48.183 |
| Paris | pyFDC | 18.935 | 17.780 | 4.052 | 1.701 | 4.846 | 0.065 | 0.067 | 47.446 |
| | CARI | 19.865 | 15.549 | 5.494 | 1.636 | 6.060 | 0.075 | 0.584 | 49.340 |
| Sydney | pyFDC | 4.777 | 4.722 | 2.194 | 0.849 | 2.514 | 0.035 | 0.017 | 15.108 |
| | CARI | 5.203 | 4.496 | 3.237 | 0.875 | 3.425 | 0.045 | 0.138 | 17.400 |

pyFDC 與 CARI-7A 因使用之模型假設不同，評估之劑量略有差異，但兩者皆經過可靠的比對驗證，具有實務上的參考價值與可靠性。但若進一步探討特定次級粒子或重離子的能譜與劑量貢獻時，則需檢視程式的粒子輸入數據、能量分辨率、重離子分類標準及劑量換算方式，以確保結果在特定粒子分析上的適用性與準確性。此部分亦需結合未來的實際飛航量測，並使用能分辨不同重離子的輻射偵檢器進行比對，方能更準確地驗證與修正模擬結果。

3.2 宣達宇宙射線相關科普知識

在宣達宇宙射線相關科普知識方面，考量到民航業者有部分職員為非本國人，為了更有效推廣宇宙射線及飛航劑量等相關科普資訊，我們在本院「天然輻射資訊網」網站上，新增了英文版的宇宙射線專區，如圖 18 所示，此專區已於 3 月 5 日上線，透過簡單圖文資訊傳達科普觀念。此網站也配合政府政策需求，於 8 月 27 日取得 AA 級無障礙標章。



圖 18、天然輻射資訊網英文版宇宙射線專區

本年度也持續製作飛航劑量相關科普圖卡共 5 張，幫助使用者釐清相關知識，如圖 19 至圖 21 所示，此外還將其中 2 張圖卡設計成科普互動教具 2 式如圖 22 及圖 23，呈現不同航線飛行時間距離及高度變化所帶來的劑量差異。



圖 19、圖卡-宇宙射線與飛航劑量

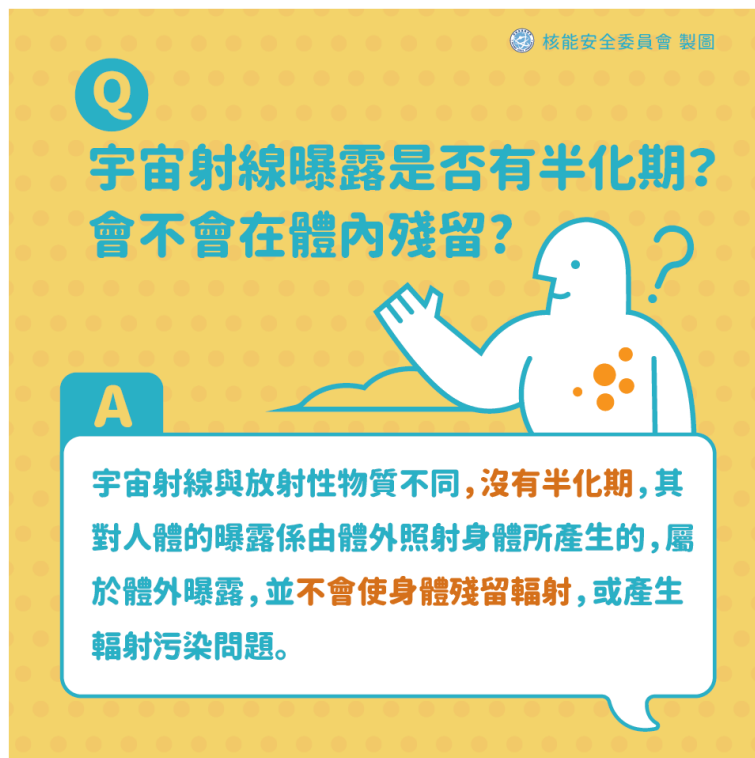


圖 20、圖卡-宇宙射線曝露是否有半化期及會不會殘留體內？




核能安全委員會 製圖

Q

試辦計畫所使用的劑量評估軟體是否有經過驗證？

A

試辦計畫使用國原院開發的飛航劑量評估軟體，並取用清華大學開發之程式的計算結果，經ICRU-84與EURADOS驗證，計算結果可靠。


 +
 
 =
 

空勤人員班表 劑量評估程式 人員劑量評估

VERIFIED
VERIFIED
VERIFIED

圖 21、圖卡-試辦計畫使用的軟體是否經過驗證？



圖 22、教具-航線往返劑量知多少



圖 23、教具-無所不在的宇宙射線

工作項目(4) 提出國內空勤人員劑量管理方案及相關建議

國際輻防組織(International Commission on Radiological Protection, ICRP)建議空勤人員輻射劑量範圍 5-10 mSv/y [6]，我國位屬中低緯度國家，飛行航線受宇宙射線影響相對較低。經評估 114 年 1 月至 10 月各航空公司提報資料並歸納我國空勤人員輻射劑量分布情形，估算我國空勤人員 114 年全年平均劑量約為 1.992 mSv，最高劑量約為 4.404 mSv，低於 ICRP 建議的 5-10 mSv/y 範圍。

114 年統計結果可作為台灣空勤人員劑量分布的重要參考，但考量每年航班安排差異性及太陽活度隨年度變化等因素，各年度平均劑量可能略有不同，尤其最高劑量數值會受特定人員當年度排班影響而變動較大，故建議航空公司視狀況配合持續監測，讓我國空勤人員劑量分布資訊能更為完善。

有關國內空勤人員劑量管理方案，綜合考量國際管理趨勢及國內輻射劑量分布情形，擬定相關管理方案提供主管機關及航空公司自主監測參考，說明如下：

1. 劑量評估：

- (1) 利用劑量評估工具來評估空勤人員的累積輻射劑量，如本計畫開發之 AiRDAS 或其他國際知名、經過驗證的劑量評估工具(如 CARI、EPCARD、pyFDC 等)，以確保可靠的評估結果。
- (2) 建立劑量紀錄保存機制，以利後續自主監測，並延伸至整體職業生涯。
- (3) 定期檢視劑量評估工具的有效性及其可靠性。

2. 自主監測：航空公司自主監測空勤人員輻射劑量參考水平，建議參考 ICRP 之 5-10 mSv/y 範圍或國際多數國家(如英國、澳洲、韓國等)設定之 6 mSv/y。
3. 優化飛行排班：
 - (1) 考慮高緯度飛行時間：高緯度地區的輻射水平較高，應考慮空勤人員在這些區域的飛行時間，輪換勤務以分散高劑量航線之累積曝露。
 - (2) 考慮高海拔飛行時間：較高的飛行高度通常意味著較少的地球大氣層屏障，輻射曝露量也會增加。
 - (3) 考慮太陽風暴等事件影響：在太陽事件活耀或宇宙射線活動高漲時期，宇宙射線造成之飛航劑量會較高，應納入考量。
4. 提供輻射防護宣導：對空勤人員進行輻射防護知識宣導，包括宇宙輻射的來源、影響、個人防護措施以及劑量監測的重要性。
5. 孕期空勤人員的特別考量：
 - (1) 提供替代職務：懷孕的空勤人員應暫時調離飛行職務，改為地勤工作，以保護孕母及胎兒免受輻射影響。
 - (2) 制定明確政策：航空公司應制定明確的政策，規定孕期空勤人員的輻射防護措施和工作安排。

本子計畫 114 年所有查核點皆已順利完成。

二、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 工作項目(1) 研擬天然放射性物質相關量測技術精進方案

1.1 劑量評估模式建立及調整

為精進天然放射性物質商品量測技術，提供更加多元之商品檢測模式，實驗室擬擴增研擬負離子商品模式，並考量商品實際使用面來調整原有模式。

根據 113 年度期末報告委員提出之審查意見，對牙刷、髮梳、按摩用品及蓬蓬頭等四種宣稱含天然放射性物質之商品，提出了新的使用情節及評估模式(草案)如表 6，包含了氡氣造成之體內劑量及體外劑量的評估方法，對應的量測情節如圖 24 至圖 27 所示，並於 114 年 5 月 29 日核安會召開的討論會中，與核安會、食藥署、標準局及學界教授共同就商品使用情境進行討論。

此外，原有面具/面膜模式是依據會輻字第 1070014066 號函辦理，考量面具及面膜類產品使用時間有很大差異，故擬將原有模式內容拆開，如表 7 及圖 28 及圖 29 所示，以更加貼近商品使用情形，相關模式細節已於討論會後綜整意見修訂，後續也會著手為新增模式之認證做準備，預計於明年向 TAF 提出認證申請。

表 6、商品檢測模式擴增列表

| 樣品類型 | 體內劑量(氬氣) | 體外有效劑量 | 備註 |
|------|---|--|--|
| 牙刷 | 以牙刷置於嘴部位置，並於嘴部測得氬氣活度濃度，搭配日常活動(非睡眠)呼吸率及商品標示建議使用時間做評估，若無特別標示則評估每日使用 3 次，每次使用該產品 2 分鐘，共 36.5 小時/年所接受之劑量。 | 以距牙刷中心(或輻射熱點)15 公分處(人體甲狀腺位置)所測得輻射劑量率，搭配商品標示建議使用時間做評估，若無特別標示則評估每日使用 3 次，每次使用該產品 2 分鐘，共 36.5 小時/年所接受之劑量。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 量測方式如附圖。 2. 台灣勞工人體計測資料庫[14]顯示，成人嘴部至甲狀腺之垂直高度約 15 公分。 |
| 髮梳 | 以髮梳置於頭頂中心位置(約距離鼻孔 15 公分處)，並於鼻孔測得氬氣活度濃度，搭配日常活動(非睡眠)呼吸率，評估每日使用 4 次，每次使用該產品 2 分鐘，共 48.7 小時/年所接受之劑量。 | 以距髮梳中心(或輻射熱點)30 公分處(人體甲狀腺位置)所測得輻射劑量率，評估每日使用 4 次，每次使用該產品 2 分鐘，共 48.7 小時/年所接受之劑量。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 量測方式如附圖。 2. 台灣勞工人體計測資料庫[14]顯示，成人頭頂至鼻孔之垂直高度約 15 公分、頭頂至肩膀(甲狀腺)之垂直高度約 30 公分。 |
| 按摩用品 | 以按摩用品置於肩膀位置(約距離鼻孔 25 公分處)，並於鼻孔測得氬氣活度濃度，搭配日常活動(非睡眠)呼吸率及商品標示建議使用時間做評估，若無特別標示則評估每日 | 以按摩用品中心(或輻射熱點)20 公分處(人體甲狀腺位置)所測得輻射劑量率，搭配商品標示建議使用時間做評估，若無特別標示則評估每日使用 2 次，每次 30 分鐘，共 365 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 量測方式如附圖。 2. 台灣勞工人體計測資料庫[14]顯示，以成人鼻孔至肩膀(甲狀腺)之垂直高度 15 公分，和成人肩寬的一半(約 20 公分)，換算按摩用品至鼻孔距離約 25 公分、按摩用品至甲狀腺距離約 20 公 |

| | | | |
|-----|--|---|---|
| | 使用 2 次，每次 30 分鐘，共 365 小時/年所接受之劑量。 | 小時/年所接受之劑量。 | 分。 |
| 蓮蓬頭 | 以蓮蓬頭置於頭頂中心位置(約距離鼻孔 15 公分處)，並於鼻孔測得氬氣活度濃度，搭配日常活動(非睡眠)呼吸率，評估每日 1 次，每次使用 30 分鐘，共 182.5 小時/年所接受之劑量。 | 以距蓮蓬頭中心(或輻射熱點)30 公分處(人體甲狀腺位置)所測得輻射劑量率，評估每日使用 1 次，每次使用 30 分鐘，共 182.5 小時/年所接受之劑量。 | 1. 量測方式如附圖。 2. 台灣勞工人體計測資料庫[14]顯示，以成人頭頂至鼻孔之垂直高度約 15 公分、頭頂至肩膀(甲狀腺)之垂直高度 30 公分。 |

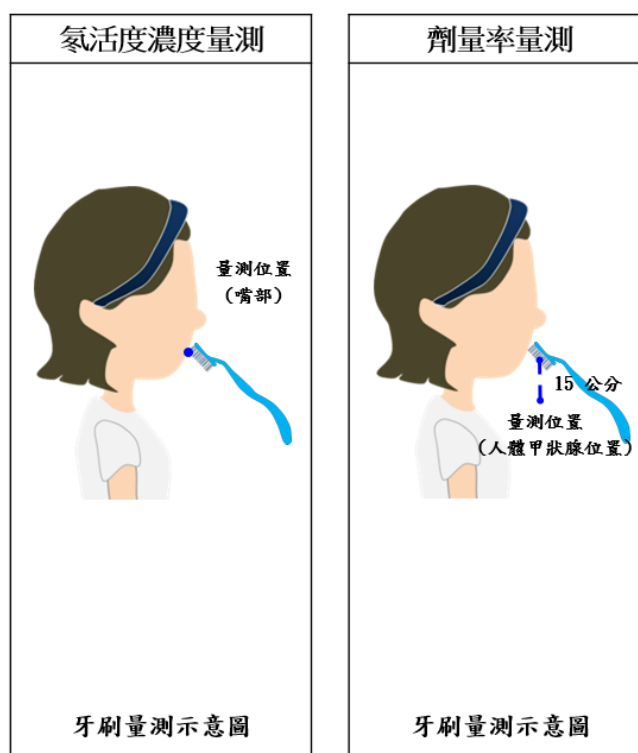


圖 24、牙刷量測模式

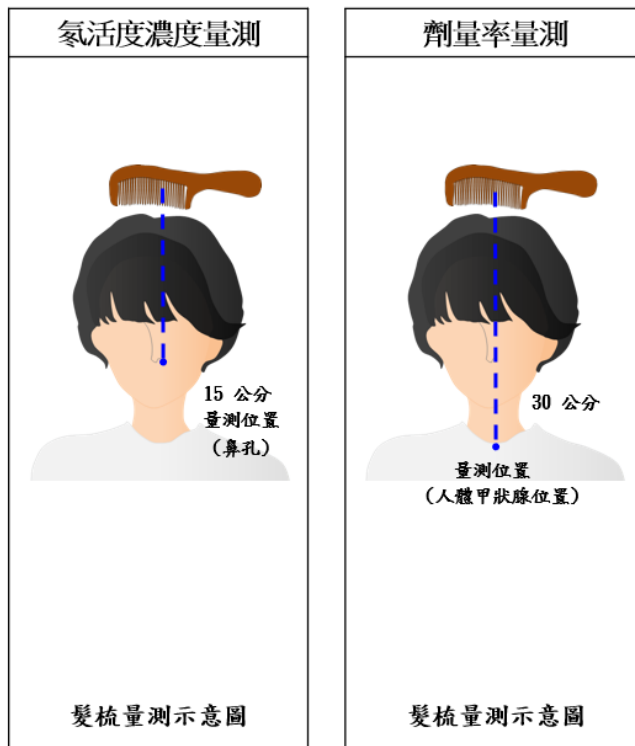


圖 25、髮梳量測模式

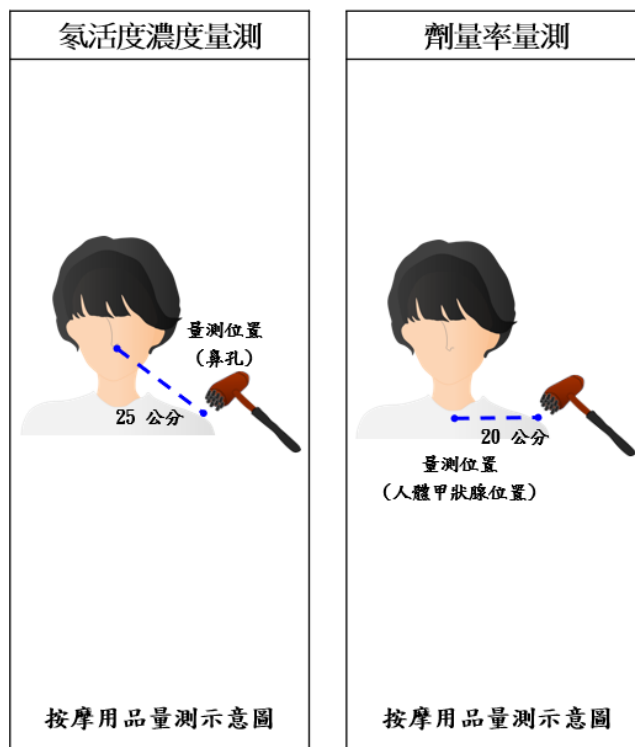


圖 26、按摩用品量測模式

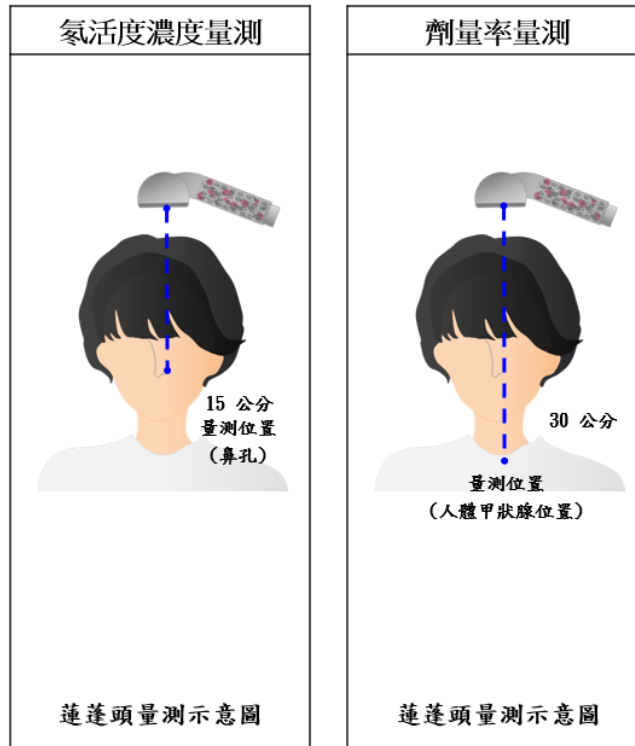


圖 27、蓮蓬頭量測模式

表 7、原有面具/面膜商品檢測模式調整列表

| 原有模式(依據會輻字第 1070014066 號函) | | | |
|----------------------------|--|--|---|
| 樣品 類型 | 體內劑量(氬氣) | 體外有效劑量 | 備註 |
| 面具/ 面膜 | 以緊鄰面膜(或面具)鼻孔位置處所測得氬氣活度濃度，搭配日常活動(非睡眠)呼吸率，評估每日使用該產品包裝建議使用時間所接受之劑量。 | 以距面膜(或面具)中心 20 公分處(人體甲狀腺位置)所測得輻射劑量率，搭配每日使用該產品包裝建議使用時間進行評估。 | <ol style="list-style-type: none"> 若產品無建議使用時間，則以每日使用 2 小時 4 分進行估算。 評估模式，依據會輻字第 1070014066 號函辦理。 |

| 調整後模式 | | | |
|-------|---|---|---|
| 樣品類型 | 體內劑量(氬氣) | 體外有效劑量 | 備註 |
| 面具 | 以緊鄰面具鼻孔位置處所測得氬氣活度濃度，搭配日常活動(非睡眠)呼吸率，評估每日使用該產品包裝建議使用時間所接受之劑量。 | 以距面具中心 20 公分處(人體甲狀腺位置)所測得輻射劑量率，搭配每日使用該產品包裝建議使用時間進行評估。 | <ol style="list-style-type: none"> 量測方式如附圖。 若產品無建議使用時間，則以每日使用 2 小時 4 分進行估算。 |
| 面膜 | 以緊鄰面膜鼻孔位置處所測得氬氣活度濃度，搭配日常活動(非睡眠)呼吸率及商品標示建議使用時間做評估，若無特別標示則評估每日使用 1 次，每次 20 分鐘，共 121.7 小時/年所接受之劑量。 | 以距面膜中心 20 公分處(人體甲狀腺位置)所測得輻射劑量率，搭配商品標示建議使用時間做評估，若無特別標示則評估每日使用 1 次，每次 20 分鐘，共 121.7 小時/年所接受之劑量。 | <ol style="list-style-type: none"> 量測方式如附圖。 |

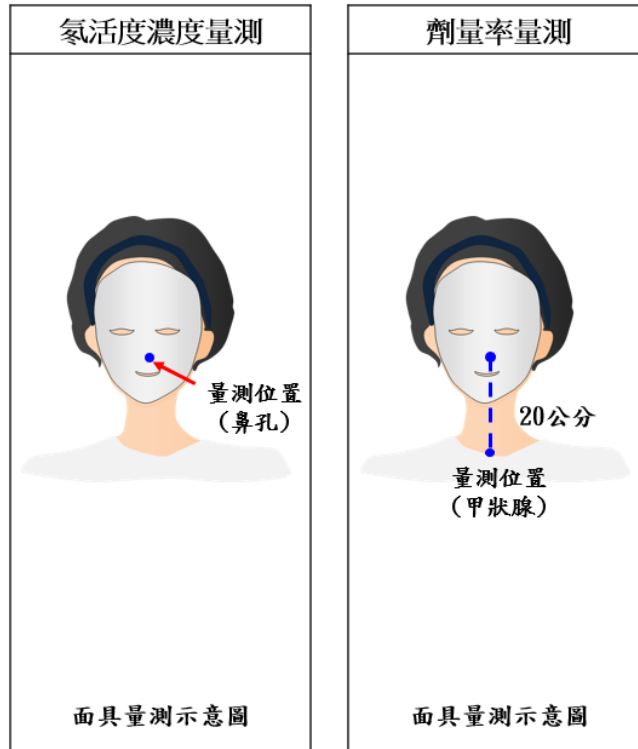


圖 28、面具量測模式

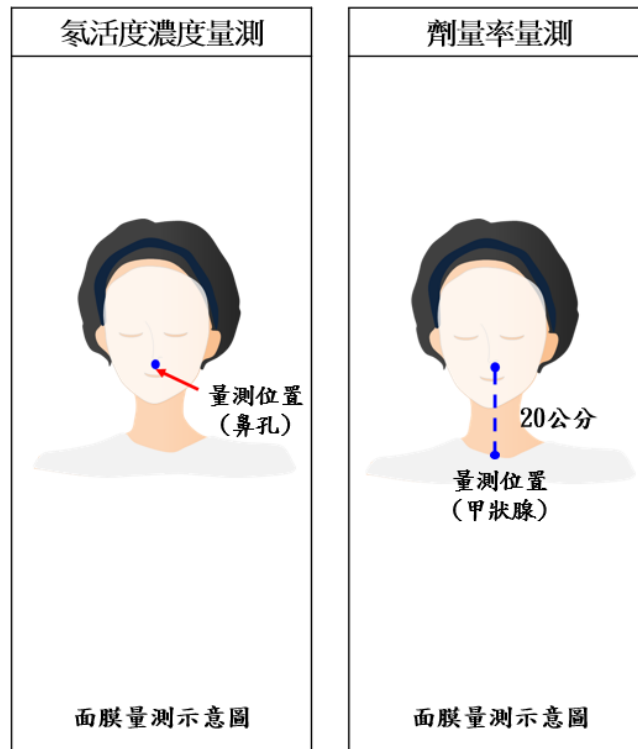


圖 29、面膜量測模式

1.2 天然放射性物質量測技術精進方案

由於 RAD7 是使用密閉迴路技術來量測之氡氣活度濃度，會受到放射性氣體釋出率的影響，考量到釷氣(Thoron, Rn-220)半化期極短僅 55 秒，若流速循環設定不佳，則可能導致釷氣在尚未被偵檢前就已衰變，進而影響準確度[15]。為此目的，我們利用不同的空氣流動速率於密閉式空間及迴路循環系統進行氣體循環，以測試氡氣濃度累積及衰變過程中在不同空氣流動速率下的濃度變化情形。

本案所使用氡氣(Rn-222)源自於 Ra-226 核種衰變，由於兩者之間半化期差異巨大(1600 年與 3.82 天)，故於封閉環境中兩者活度可達到長期平衡狀態。累積模式即利用此一特性，將純 Ra-226 射源置入封閉環境中，通過自然擴散或幫浦打氣推動氡氣，並利用儀器測量氡氣的濃度累積趨勢；衰變模式則是基於氡氣短半化期特性，在封閉環境濃度達平衡時移除 Ra-226 射源供給，缺少母核補充情況下氡氣活度便會自然衰減，再透過儀器測量氡氣的濃度衰減趨勢。累積模式優勢為可取得近乎恆定值之平衡濃度進行評比，但須採用自然擴散方式，達到濃度平衡狀態耗時較久(約 3 至 4 天)；衰變模式優勢為操作時間短，約一天即可獲得足夠數據用於推導原始濃度。

實驗設置與方法為分別使用三種不同的空氣流動速率，包含 0.03 L/min、0.5 L/min 和 1 L/min 之空氣流動速率，在密閉空間及迴路中，循環檢測 Ra-226 標準參考物質所釋放出來的氡氣累積及衰變濃度變化。實驗設置如圖 30，於檢測前以乾燥管連接 Ra-226 標準參考物質、密閉空間與迴路進行空氣吹掃，

將整體空間之氣體溼度降低至 5% 以下，同時吹掃並排出 Ra-226 標準參考物質內部空間所累積的氬氣，並利用密封桶上的連接孔，將 RAD7 外接到桶外電腦進行即時氬氣濃度監測，隨時查看桶內的量測數據，使整體空間氬氣濃度降低至 100 Bq/m^3 左右。而進行氬氣累積及衰變濃度實驗時，會透過連接一個可調整不同流速的外部幫浦，進行整體密閉空間的空氣流動與循環，而 RAD7 的內部幫浦則保持關閉狀態，並以 1 小時為濃度週期紀錄，每次實驗持續 72 小時左右。

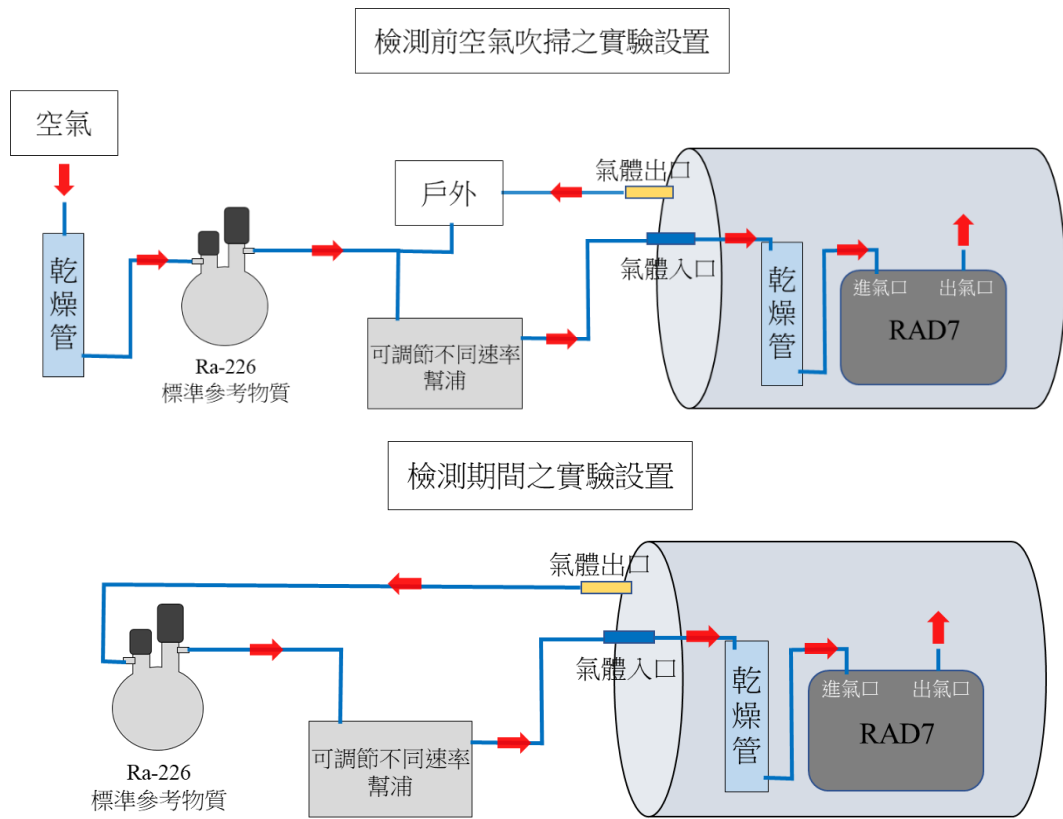


圖 30、(上)檢測前(下)檢測期間密閉空間之氬氣累積及衰變實驗設置示意圖

本研究共測試了 1 L/min、0.5 L/min 和 0.03 L/min 三種不同

的 RAD7 空氣流動速率，皆進行氡氣累積及衰變濃度動態變化實驗測試，如圖 31 至圖 36，可看出在不同設定時皆可看出氡氣隨時間累積及衰減之情形。在累積模式部分，氡氣會隨時間逐步累積後達到穩態，此外在相同的時間設置下，當流速較高時期氡氣的累積濃度較低，可能是因為有較強的流動干擾，需要較長時間才能達到穩定地氡氣濃度，另外因累積時間不長，最高量測到的活度為 $19,400 \text{ Bq/m}^3$ ，也尚未達到標準參考物質理論推算之活度 $24,261 \text{ Bq/m}^3$ ，若拉長量測時間則濃度應該會更接近理論推算值；衰變模式部分則不管流速多寡，其降低的幅度都差不多。值得一提的是，此實驗是在密閉的小體積空腔中執行，而現行之實際商品量測則是在開放的空間，故氡氣更有可能受到外界環境影響，而有逸散稀釋之情況，但此現象較符合實際人們在使用商品的情況，在未來建立或修正模式量測程序時亦會將流速納入修正或不確定度考量中。

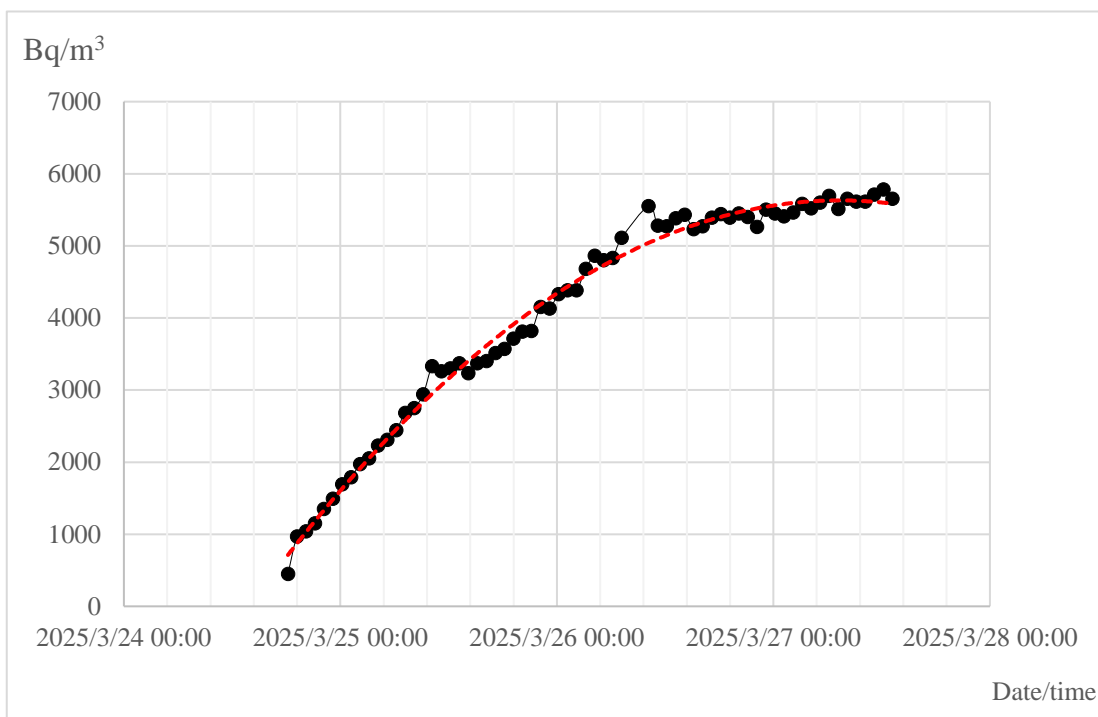


圖 31、1 L/min 氡氣累積模式

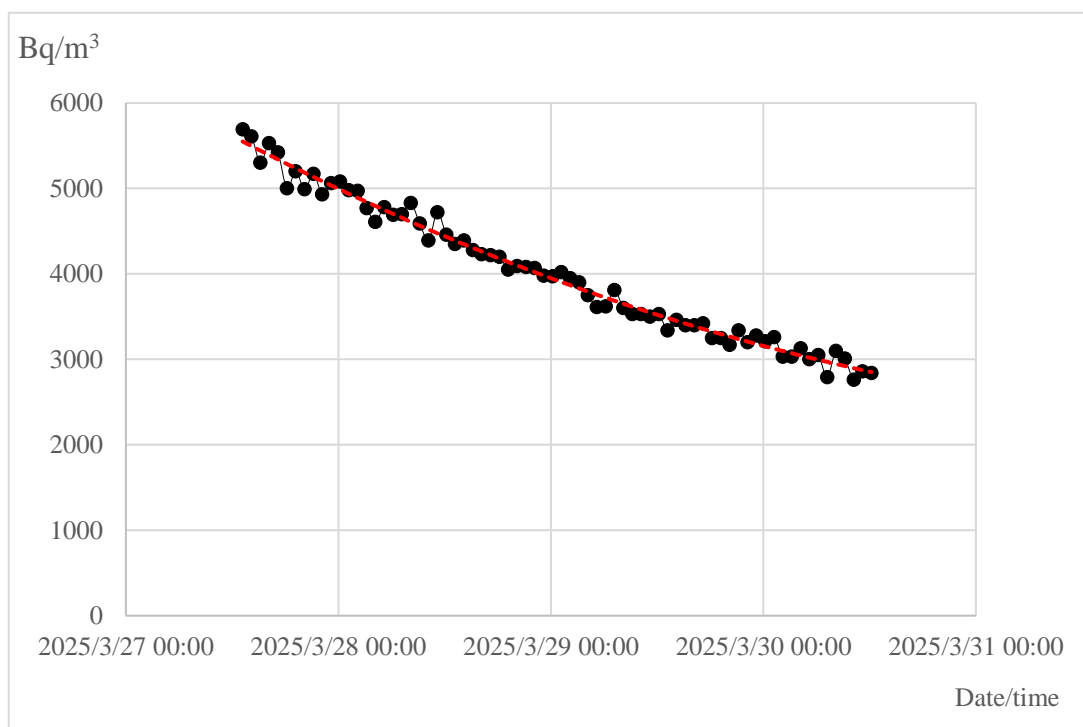


圖 32、1 L/min 氡氣衰變模式

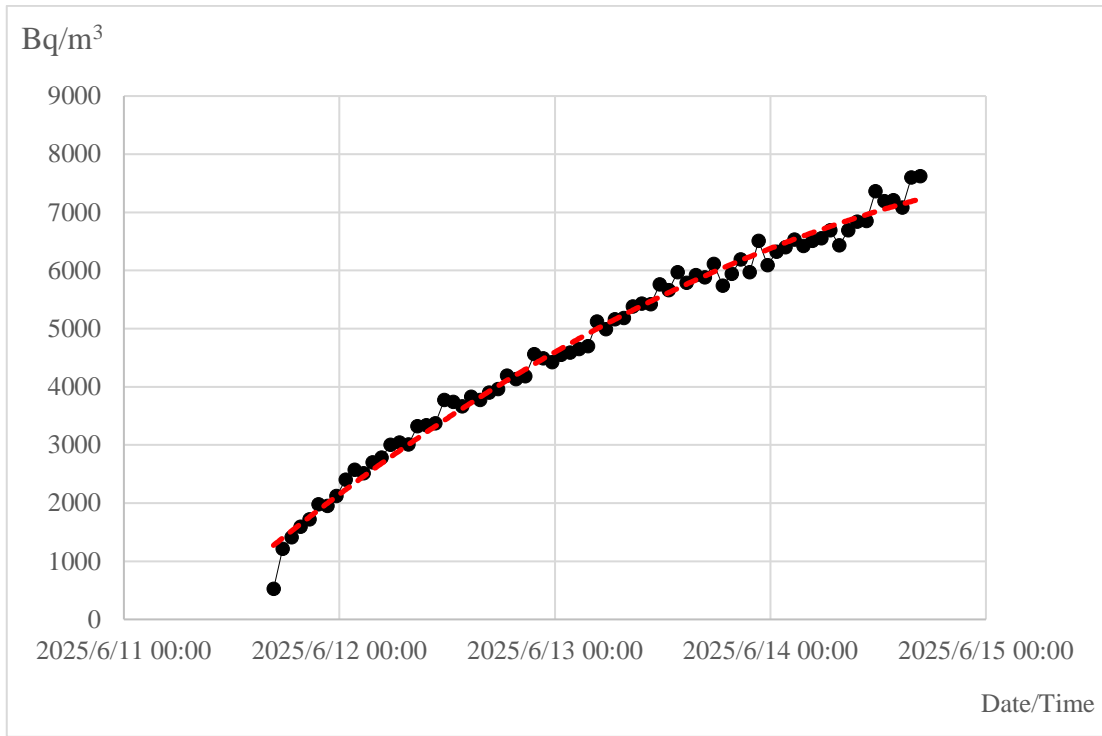


圖 33、0.5 L/min 氡氣累積模式

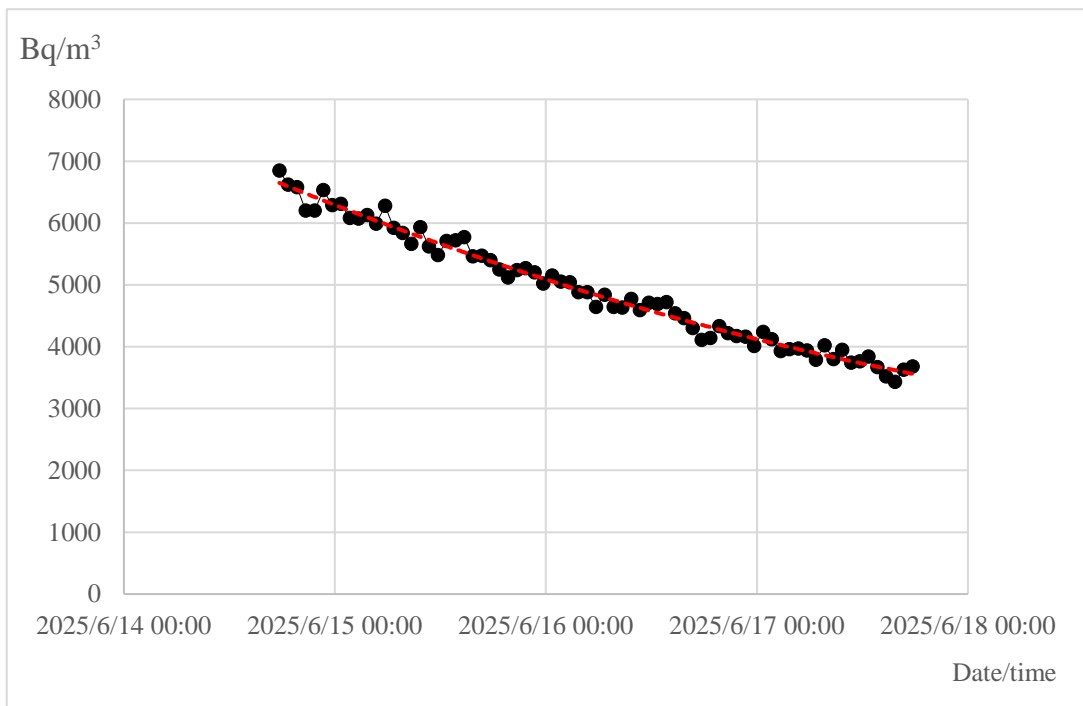


圖 34、0.5 L/min 氡氣衰變模式

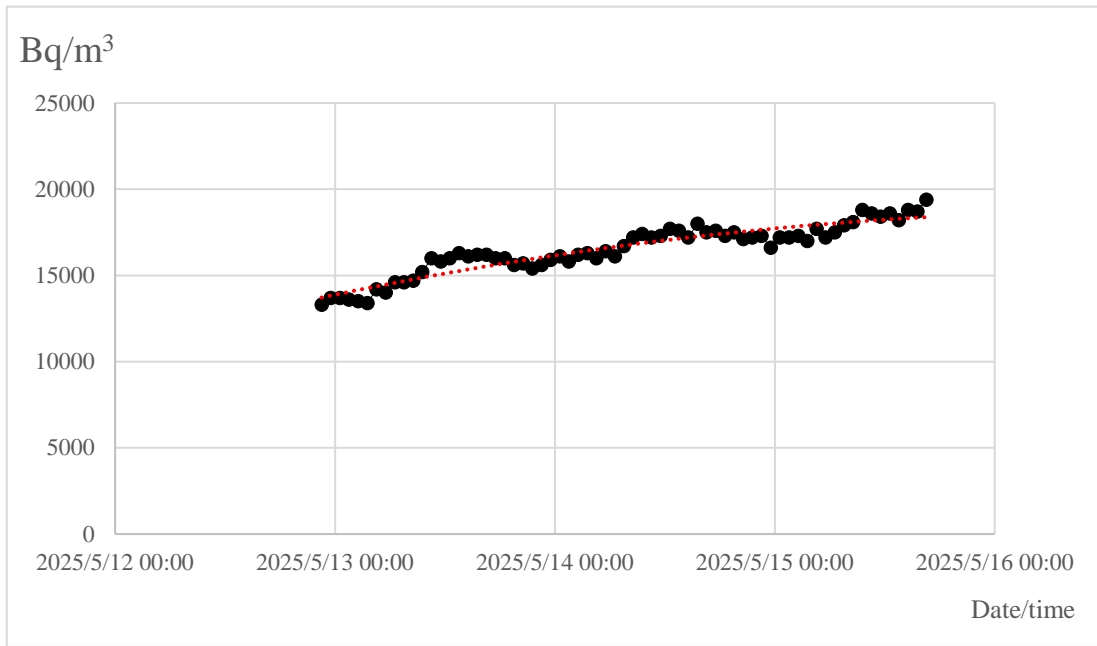


圖 35、0.03 L/min 氡氣累積模式

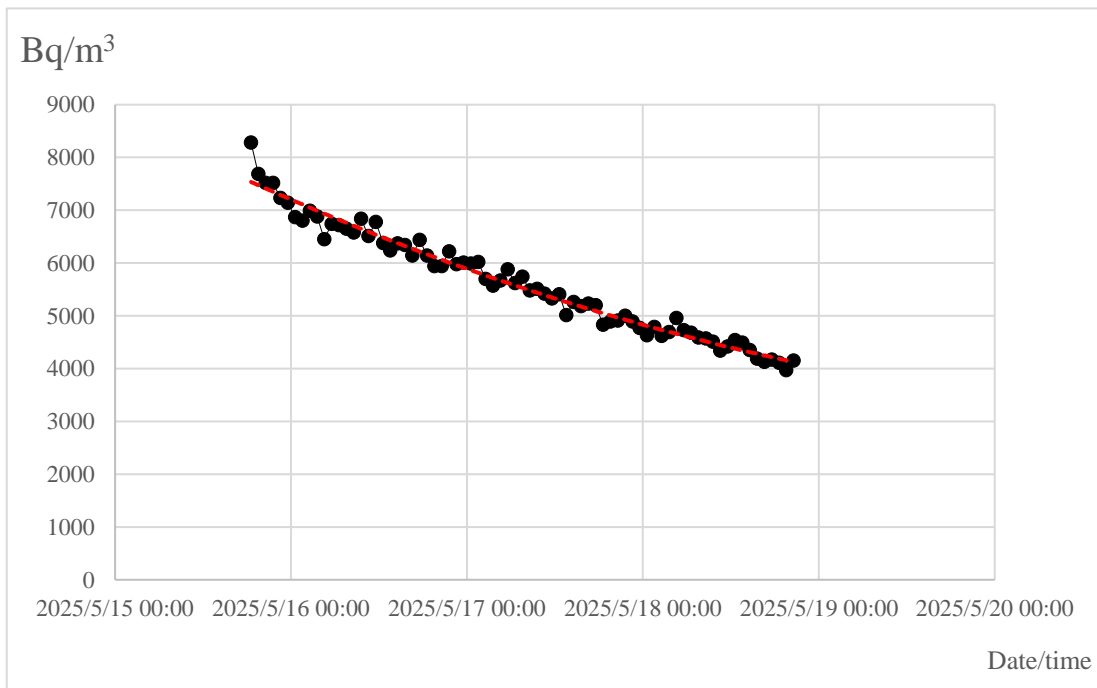


圖 36、0.03 L/min 氡氣衰變模式

工作項目(2) 建立天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量量測分析技術

2.1 建材體外劑量量測分析技術建立

本研究將參考數篇國際文獻，就各國對含天然放射性物質之建材量測方法進行探討，包括使用的量測儀器、對象核種、劑量評估公式及使用到的參數等，並從中歸納適合我國使用的體外劑量評估方法，為未來建立相關量測技術預先做好準備。詳細內容如附件三，摘錄如下：

2.1.1 Abdullahi 等人對馬來西亞建材的研究

奈及利亞貢貝大學(Gombe State University)的 Abdullahi 等人 [16]使用高純鍺偵檢器(High Purity Germanium detector, HPGe)的加馬核種分析量測值，搭配評估公式對馬來西亞的建材進行分析。他們挑選馬來西亞不同供應商來源的市售常見裝潢材料，如瓷磚、石灰石、黏土、滑石等，利用 HPGe 進行量測，據此得出各樣品的 Ra-226、Th-232 和 K-40 活度濃度。接著再利用活度濃度推算室內空氣吸收劑量率(D)及室內年體外有效劑量(E)，公式如下：

$$D(\text{nGy h}^{-1}) = 0.08C_K + 1.1C_{Th} + 0.92C_{Ra}$$

$$E(\mu\text{Sv y}^{-1}) = D(\text{nGy h}^{-1}) \times CF(\text{Sv Gy}^{-1}) \times OF \times t(\text{h})$$

其中 C_K 、 C_{Th} 、 C_{Ra} 分別為 Ra-226、Th-232 和 K-40 的活度濃度 (Bq/kg)，搭配 RP 112 號報告[17]的公式用來計算出距離地面一公尺高的吸收劑量(D)，接著可進一步透過 UNSCEAR 報告 Annex B [18]的轉換因子(conversion factor, CF) 0.7 (Sv/Gy)，以及室內占用因子(occupancy factor, OF) 0.8，搭配在室內的時間 t 來計算

出整年的有效劑量，本文獻採用的 t 為 7008 (h/y)。本文獻評估之年體外劑量分布在 0.2 到 2.5 mSv/y 的範圍。

2.1.2 Jang 等人對韓國建材的研究

韓國原子能研究所(Korea Atomic Energy Research Institute)的 Jang 等人[19]使用 HPGe 量測建材中的天然放射性核種，搭配 MCNPX 程式[20]模擬及 ICRP 參考人假體[21]，評估成人男性及女性的體外劑量。他們挑選韓國市售建材，如瓷磚、磚、水泥等，利用 HPGe 量測 Ra-226、K-40 的活度濃度(Bq/kg)，並使用電感耦合等離子體質譜法 (inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)量測 Th-232 的活度濃度(Bq/kg)。接著，利用文獻提供的 Markkanen 房間模型[22]，設定房間大小為 4 公尺x5 公尺x2.8 公尺，假設牆壁為密度 2.35 g/cm³ 的 20 cm 厚牆以取得較保守的評估結果，並在室內放上基於 CT 影像建構的 ICRP 男性及女性的成人假體[21]，如圖 37 所示，利用 MCNPX[20] 蒙地卡羅程式模擬放出光子的遷移情形，評估出 Ra-226、Th-232 和 K-40 對男性及女性假體的有效劑量率(Sv/h per Bq/kg)，如表 8，最後再與量測之 Ra-226、Th-232 和 K-40 的活度濃度(Bq/kg) 相乘並加總，得出年體外劑量(mSv/y)，本文獻評估之年體外劑量約落在 0 至 1.46 mSv/y 的範圍。

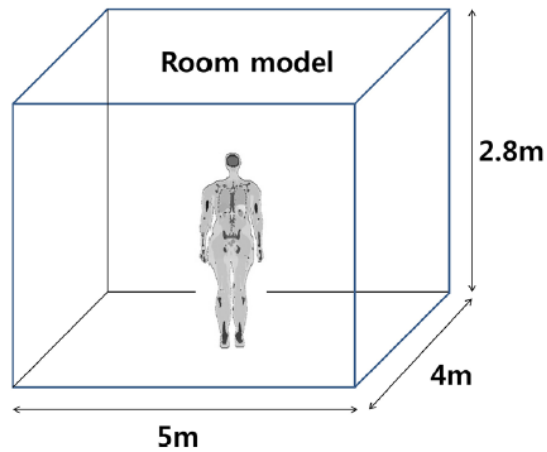


圖 37、ICRP 參考人假體置於房間模型內[21]

表 8、各核種的 ICRP 男/女假體有效劑量率[21]

| Radionuclide | Male (Sv h ⁻¹ per Bq kg ⁻¹) | Female (Sv h ⁻¹ per Bq kg ⁻¹) |
|-------------------|--|--|
| ²²⁶ Ra | 4.99E-10 | 5.21E-10 |
| ²³² Th | 7.09E-10 | 7.26E-10 |
| ⁴⁰ K | 4.89E-11 | 4.94E-11 |

2.1.3 Gehrcke 等人對德國建材的研究

德國聯邦輻射防護局(Federal Office for Radiation Protection, Bfs)的 Gehrcke 等人[21]使用 HPGe 量測德國市售建材如磚、水泥等所含的天然放射性核種，搭配德國的標準量測方法[22]進行分析，各種建材樣品會先磨碎到約 3 mm 大小經 105°C 高溫烘乾 24 小時，並置於密封容器中至少 21 天以達到 Ra-226 及 Rn-222 的平衡，再透過 RP 112 號報告[17]的方法搭配標準室內模型進行體外劑量評估，本文獻評估之結果約落在<0.3 至 1.0 mSv/y 範圍。

根據文獻研析的結果，以 RP 112 號報告[17]的方法為多數文獻所採用，建議可做為我國建材體外劑量評估方法之主體架構，

並參考綜整其他文獻方法的觀點，逐步建立完整建材劑量評估體系，本團隊預建立之分析方法及步驟簡述如下：

- (1) 建材前處理，包含取樣、研磨、過篩等步驟，並裝入計測罐。
- (2) 利用 HPGe 偵檢器進行量測，得出各建材樣品的 Ra-226、Th-232 和 K-40 活度濃度。
- (3) 利用上述核種的活度濃度，推算在特定條件(表 9)的室內空氣吸收劑量率(D)，如下式：

$$D(\text{nGy h}^{-1}) = 0.08C_K + 1.1C_{Th} + 0.92C_{Ra}$$

其中 C_K 、 C_{Th} 、 C_{Ra} 分別為 Ra-226、Th-232 和 K-40 的活度濃度(Bq/kg)，0.08、1.1、0.92 為計算參數，在此以整間房間皆以該建材建構為例，若有其他情節請參考表 9。

- (4) 利用吸收劑量率，推算室內年體外有效劑量(E)，如下式：

$$E(\mu\text{Sv y}^{-1}) = D(\text{nGy h}^{-1}) \times CF(\text{Sv Gy}^{-1}) \times OF \times t(\text{h})$$

其中 CF 為 0.7 (Sv/Gy)，OF 為 0.8，t 為 7000 (h/y)，值得一提的是，在 RP112 號報告 ANNEX II 中並未乘上 OF 參數，但本團隊認為應將此影響納入劑量評估時的考量。

表 9、RP 112 報告劑量率評估參數表[17]

| | | | |
|---|--|-------------------|-----------------|
| Dimensions of the model room | 4 m x 5 m x 2.8 m | | |
| Thickness and density of the structures | 20 cm, 2350 kg m ⁻³ (concrete) | | |
| Annual exposure time | 7000 hours | | |
| Dose conversion | 0.7 Sv Gy ⁻¹ | | |
| Background | 50 nGy h ⁻¹ | | |
| | Specific dose rate, nGy h⁻¹ per Bq kg⁻¹ | | |
| Structures in a building causing the irradiation | ²²⁶ Ra | ²³² Th | ⁴⁰ K |
| Floor, ceiling and walls (all structures) | 0.92 | 1.1 | 0.080 |
| Floor and walls (wooden ceiling) | 0.67 | 0.78 | 0.057 |
| Floor only (wooden house with concrete floor) | 0.24 | 0.28 | 0.020 |
| Superficial material: tile or stone on all walls (thickness 3 cm, density 2600 kg m ⁻³) | 0.12 | 0.14 | 0.0096 |

2.2 建材輻射檢測

本年度也協助核安會執行了至少 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 23 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。

本次檢測共檢測 4 家石材業者，檢測照片如圖 38 所示，結果整理於表 10，共抽測 41 件樣品，樣品類型包含花崗岩及大理石等，利用 AT-1121 手持式偵檢器掃瞄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 $0.129 \mu\text{Sv/h}$ 。



圖 38、石材劑量率量測

表 10、114 年石材抽驗結果清單

| 地區 | 廠商名稱 | 石材種類 | 尺寸(長/寬/高) (cm/cm/cm) | 距石材表面10cm處劑量率(微西弗/小時) | | | 備註 |
|-------|------------------------------------|------------|-------------------------|-----------------------|-------|-------|-----|
| | | | | 含背景 | 扣除背景 | 背景值 | |
| 北部 | 1. 業者A (檢測日期 114年10月 23日) | 雅典娜灰 | 253x163x2 | 0.083 | 0.000 | 0.085 | 大理石 |
| | | 北國之戀 | 314x203x2 | 0.107 | 0.022 | 0.085 | 花崗岩 |
| | | 冰島灰 | 249x171x2 | 0.060 | 0.000 | 0.085 | 大理石 |
| | | 黑冰花 | 293x143x2 | 0.083 | 0.000 | 0.085 | 大理石 |
| | | 藍銀灰 | 310x133x2 | 0.051 | 0.000 | 0.085 | 大理石 |
| | | 金鑲玉 | 294x159x2 | 0.085 | 0.000 | 0.085 | 花崗岩 |
| | | 雕刻黑 | 326x200x2 | 0.160 | 0.075 | 0.085 | 花崗岩 |
| | | 安藤忠雄 | 271x160x2 | 0.058 | 0.000 | 0.085 | 大理石 |
| | | 咖啡絨 | 251x190x2 | 0.060 | 0.000 | 0.085 | 花崗岩 |
| | 2. 業者B (檢測日期 114年10月 23日) | 水墨丹青 | 333x189x2 | 0.085 | 0.000 | 0.09 | 石英石 |
| | | 水墨江南 | 297x191x2 | 0.219 | 0.129 | 0.09 | 石英石 |
| | | 歐易斯特 | 320x182x2 | 0.102 | 0.012 | 0.09 | 石英石 |
| | | 赤壁賦 | 327x197x2 | 0.081 | 0.000 | 0.09 | 花崗岩 |
| | | Blue River | 303x195x2 | 0.081 | 0.000 | 0.09 | 花崗岩 |
| | | 阡陌(皮革) | 293x191x2 | 0.113 | 0.023 | 0.09 | 花崗岩 |
| | | 流雲挹翠 | 327x198x2 | 0.086 | 0.000 | 0.09 | 石英石 |
| | | 隱玥光 | 301x167x2 | 0.079 | 0.000 | 0.09 | 大理石 |
| | | 雲彩晶鑽 | 293x187x2 | 0.054 | 0.000 | 0.09 | 大理石 |
| | | 藍星 | 289x186x2 | 0.069 | 0.000 | 0.09 | 大理石 |
| | | 彩繪白玉 | 292x146x2 | 0.071 | 0.000 | 0.09 | 大理石 |
| | | 特級奧特曼 | 181x158x2 | 0.064 | 0.000 | 0.09 | 大理石 |
| | | 華麗灰 | 242x131x2 | 0.067 | 0.000 | 0.09 | 大理石 |
| | | 青花瓷 | 292x161x2 | 0.066 | 0.000 | 0.09 | 大理石 |
| | | 依貝莎 | 199x153x2 | 0.065 | 0.000 | 0.09 | 萊姆石 |
| | 馬德里灰 | 233x192x2 | 0.067 | 0.000 | 0.09 | 大理石 | |
| | 3. 業者C (檢測日期 114年10月 23日) | 白玫瑰 | 275x190x2 | 0.142 | 0.022 | 0.12 | 花崗岩 |
| | | 魂河白 | 275x179x2 | 0.142 | 0.022 | 0.12 | 花崗岩 |
| | | 雪白蒙卡 | 341x200x2 | 0.197 | 0.077 | 0.12 | 花崗岩 |
| | | 月光米黃 | 248x168x2 | 0.094 | 0.000 | 0.12 | 大理石 |
| | | 雪多拉灰 | 265x126x2 | 0.101 | 0.000 | 0.12 | 大理石 |
| | | 皇家白玉 | 275x186x2 | 0.093 | 0.000 | 0.12 | 大理石 |
| | | 金鋒石 | 235x170x2 | 0.087 | 0.000 | 0.12 | 大理石 |
| | | 櫻桃黑 | 290x142x2 | 0.088 | 0.000 | 0.12 | 大理石 |
| | 4. 業者D (檢測日期 114年10月 23日) | 安哥拉黑 | 313x193x2 | 0.091 | 0.000 | 0.12 | 花崗岩 |
| | | 鳳凰于飛 | 185x297x2 | 0.112 | 0.000 | 0.116 | 花崗岩 |
| | | 翠玉白菜 | 293x201x2 | 0.110 | 0.000 | 0.116 | 花崗岩 |
| 山嵐映月 | | 293x195x2 | 0.112 | 0.000 | 0.116 | 花崗岩 | |
| 黃金雕刻白 | | 316x196x2 | 0.112 | 0.000 | 0.116 | 花崗岩 | |
| 玉桂園林 | | 300x180x2 | 0.119 | 0.003 | 0.116 | 花崗岩 | |
| 君臨天下 | | 165x316x2 | 0.121 | 0.005 | 0.116 | 花崗岩 | |
| 曙光永恆 | 275x152x2 | 0.122 | 0.006 | 0.116 | 花崗岩 | | |

工作項目(3) 構思及宣達天然放射性物質於民生應用之科普知識

科普知識宣達方面，本年度也持續製作天然放射性物質於民生應用相關科普圖卡，藉此傳遞相關知識，包含「煤礦與建材也有天然輻射?」、「天然放射性物質的考古妙用」、「天然放射性物質的民生用途」等共 3 張圖卡，如圖 39 至 41 所示，後續也將持續新增圖卡內容，並陸續於網路上發布。

連同子計畫一工作項目(3)的 5 張飛航劑量圖卡，本年度共完成 8 張既存曝露相關之科普圖文資訊。



圖 39、圖卡-煤礦與建材也有天然輻射?

天然放射性物質的考古妙用



圖 40、天然放射性物質的考古妙用

天然放射性物質的民生用途

| | |
|--|--|
| <h3>建材</h3> <p>一些天然礦石如花崗岩、石板中含有微量天然放射性元素(如鈾、釷)，常用於地板、檯面等建材中。</p>  | <h3>肥料</h3>  <p>肥料包含鉀(K)、磷(P)及氮(N)，其中鉀是天然的放射性元素，而磷是從含高鈾濃度的磷礦中開採而得。</p> |
| <h3>鐘錶</h3> <p>1970年代舊式鐘錶會用鐳226當光源，現在則以氚(H-3)或鉕(Pm-147)取代。</p>  | <h3>考古</h3> <p>透過量測古物內天然放射性物質碳14的濃度，可以鑑定古物所屬的年代。</p>  |

圖 41、圖卡-天然放射性物質的民生用途

工作項目(4) 含天然放射性物質商品之後市場調查

含天然放射性物質商品之後市場調查部分，已收到核安會提供之經濟部標準檢驗局和衛生福利部食品藥物管理署的年度抽樣清單，以及地方政府衛生局等抽樣機關之來函說明，目前已陸續收到抽樣單位之樣品並持續進行檢測中。

本年度共計完成 10 件食藥署送測之負離子醫療器材、化粧品及食品容器具，以及 22 件標準局送測之負離子口罩、棉被、枕頭等商品，合計共 32 件，相關送樣件數、劑量過 1 mSv/y 件數、各單位送樣樣品種類件數等資訊如表 11 及表 12 所示，其中本年度全部 32 件檢測商品中，共有 5 件商品之評估劑量超過 1 mSv/y，已提交檢測數據予主管機關參考，關於詳細的後市場調查內容呈如附件四。

表 11、114 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 | 22 | 5 |
| 總計 | 32 | 5 |

表 12、114 年抽驗商品統計結果(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 | 3 | 0 |
| | 護腰 | 2 | 0 |
| | 護膝 | 1 | 0 |
| | 水杯 | 4 | 0 |
| | 小計 | 10 | 0 |
| 經濟部標準局 | 枕頭 | 5 | 1 |
| | 口罩 | 2 | 0 |
| | 棉被 | 2 | 1 |

| | | | |
|--|-----------|-----------|----------|
| | 衛生棉 | 1 | 0 |
| | 圍巾 | 1 | 1 |
| | 項鍊* | 4 | 2 |
| | 淨化器* | 1 | 0 |
| | 鹽燈 | 1 | 0 |
| | 眼罩 | 2 | 0 |
| | 床墊 | 1 | 0 |
| | 襪子 | 1 | 0 |
| | 衣服 | 1 | 0 |
| | 小計 | 22 | 5 |

*項鍊、淨化器以圍巾/披肩模式評估。

本子計畫 114 年之所有查核點皆順利完成，彙整如表 13：

表 13、計畫目標與完成說明對照表

| 計畫目標 | 完成說明 | 完成度 |
|-----------------------------------|---|-------|
| 子一工項(1)完成飛航劑量量測技術之量測系統建置與輻射場校正測試。 | 已完成量測系統建置，並於清大 BNCT 進行測試實驗，確立了操作流程及後處理條件。 | 100 % |
| 子一工項(2)完成空勤人員輻射劑量評估。 | 已利用 AiRDAS 完成民航業者空勤人員劑量評估，提供平均劑量、最高劑量及劑量區間人數分布等資訊，目前統計資料至 114 年 10 月，待全年度資料收集齊全後會再補上完整報告。 | 100 % |
| 子一工項(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。 | 已利用 pyFDC 及 CARI 評估我國十條主要航線劑量，並建立英文版網站專區，及產出 5 張科普圖卡及 2 式教具，進行科普宣達用途。 | 100 % |

| | | |
|-------------------------------------|---|-------|
| 子一工項(4) 提出空勤人員劑量管理方案。 | 已參考 ICRP 報告及國際劑量限值，擬定相關管理方案建議。 | 100 % |
| 子二工項(1)精進天然放射性物質相關量測技術。 | 已提出四種新增的商品檢測模式，預計於明年提出 TAF 認證申請，並探討了不同流速設定對氬氣量測之影響。 | 100 % |
| 子二工項(2)完成天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量分析技術建立。 | 已參考國際文獻及 RP 報告，建立體外劑量分析技術，並執行建材輻射量測 41 件。 | 100 % |
| 子二工項(3)完成天然放射性物質於民生應用之科普知識宣達。 | 已完成 3 張天然放射性物質相關科普圖卡製作，進行科普宣達用途。 | 100 % |
| 子二工項(4)協助含天然放射性物質商品之後市場調查。 | 已完成標準局、食藥署送測之商品檢測共 32 件，並提交相關檢測報告。 | 100 % |

。

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 | |
| 114 年度 | 期初報告 | 114 年 3 月 15 日 前(含當日) | 2 | 1 | |
| | 期中報告 | 114 年 7 月 15 日 前(含當日) | 2 | 1 | |
| | 研究設備相關採購及驗收文件 | 114 年 8 月 20 日 前(含當日) | 1 | | |
| | 期末報告 | 114 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

本計畫包含的兩個子計畫，子計畫一飛航部份，完成了量測系統建置，並於國內照射場進行測試試驗，確立了操作流程及後處理條件，同時也彙整了114年1月至10月各航空公司回報之報表資料，歸納出我國空勤人員劑量分布現況，是未來推動劑量管理的重要參考。此外，於天然輻射資訊網上增設英文版宇宙射線飛航劑量專區，及提出國內熱門航線劑量資訊、國內空勤人員劑量管理方案與建議等；子計畫二天然放射性物質部分，提出四種新增的商品檢測模式，預計於明年提出TAF認證申請，我們也就文獻提供之建議，探討了不同流速設定對氬氣量測之影響，以達到精進量測結果之目的，最後也完成科普圖文製作、協助執行商品後市場調查及建材輻射量測等任務。本計畫114年所有的查核點及工項均順利達成。

參考資料

1. G. S. Sahoo, S. P. Tripathy, D. S. Joshi, T. Bandyopadhyay. “Effect of etching temperature and time on properties of solid-state nuclear track detector Cr-39” AIP Conf. Proc. 2398, 020051, 2022.
2. T. Horwacik, P. Bilski, P. Olko, F. Spurny and K. Turek, “Investigations of doses on board commercial passenger aircraft using CR-39 and thermoluminescent detectors.” Radiation Protection Dosimetry, 110, 377–381, 2004.
3. D. Zhou, D. O’Sullivan and E. Flood, “Radiation field of cosmic rays measured at aviation altitudes by CR-39 detectors.” Advances in Space Research, 37, 1218–1222, 2006.
4. 褚工德，建立結合微波誘導化學蝕刻與 CR-39 固態核徑跡偵檢器之重粒子直線能量轉移量測系統與實際應用(未出版碩士論文)。國立清華大學，新竹市，111 年 8 月。
5. Z. S. Karima and M. S. Aswood, “Effect of Etching Temperature and Time on Properties of Solid-State Nuclear Track Detector CR-39,” AIP Conf. Proc. 2398, 020051, 2022.
6. International Commission on Radiological Protection (ICRP), “Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation.” ICRP Publication 132. Ann. ICRP 45, 1–48, 2016.
7. 交通部民用航空局，113 年民航統計年報，114 年 6 月。
8. K. Copeland, “CARI-7A: Development and validation. Radiation Protection Dosimetry,” 175, 419–431, 2017.
9. 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 Transactions on Nuclear Science, 66, 1931–1941, 2019.
10. European Radiation Dosimetry Group (EURADOS), EURADOS Report 2012-03, Braunschweig, Germany, 2012.
11. F. Ballarini et al., “The FLUKA code: Overview and new developments,” EPJ Nuclear Sci. Technol., 10, 16, 2024.

12. International Commission on Radiological Protection (ICRP). “The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” ICRP Publication 103, *Annals of the ICRP*, 37, 2007.
13. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), “Sources and effects of ionizing radiation,” New York, NY: United Nations, 2000.
14. 勞動部勞動及職業安全衛生研究所，台灣勞工人體計測資料庫，IOSH84-H121、IOSH85-H121「勞工靜態與動態人體計測資料庫之量測」報告，105年。
15. C. Natarajan, C. Seethapathy, V. S. Challa and V. Balasubramaniam, “Study on the dynamics of radon concentration buildup in the closed-loop measurement system with RAD7 online radon monitor.” *Radiation Protection Dosimetry*, 201, 18-30, 2024.
16. S. Abdullahi, A. F. Ismail and M. S. Yasir, “Radiological hazard analysis of Malaysia’s ceramic materials using generic and RESRAD-BUILD computer code approach”, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 324, pp. 301–315, 2020.
17. European Commission, “Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials”, *Radiation protection* 112, 1999.
18. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR, “Sources and effects of ionizing radiation VOLUME I: SOURCES (Annex B Exposures from natural radiation sources)”, New York, NY: United Nations, 2000.
19. M. Jang, K. H. Chung, Y. Ji, J. M. Lim, C. J. Kim, M. J. Kang and G. S. Choi, “Indoor external and internal exposure due to building materials containing NORM in Korea”, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 307, pp. 1661–1666, 2016.
20. J. S. Hendricks, “MCNPX extension version 2.5.0”, LA-UR-05-2675, 2005.
21. International Commission on Radiological Protection (ICRP), “The ICRP reference computational phantoms for the adult male and female.” ICRP Publication 110, 2009.
22. M. Markkanen, “Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity”, STUK-B-STO 32, 1995.

23. K. Gehrcke, B. Hoffmann, U. Schkade, V. Schmidt and K. Wichterey, “Radiation exposure from the use of norm in building materials in Germany”, Proceedings of an International Symposium Marrakesh, Morocco, 22–26 March 2010.
24. ISO, Measurement of Radioactivity in the Environment — Soil — Part 3: Measurement of Gamma-Emitting Radionuclides, ISO 18589-3: 2007.

附件一、空勤人員輻射劑量評估相關研究報告

114 年國籍航空空勤人員飛航劑量評估報告

楊子毅

摘 要

本報告參考最新民航統計年報，整理國內 6 家民航業者之相關背景資料，並就核安會 114 年推動之「空勤人員宇宙射線劑量監測及統計」試辦計畫中各航空公司提供的數據報表進行分析比較。其中截至 114 年 10 月為止，整體國內空勤人員之平均劑量為 1.66 mSv，最高劑量為 3.67 mSv，若就現有數據推估整年空勤人員平均劑量為 1.992 mSv，最高劑量為 4.40 mSv 與文獻評估的平均劑量 2 到 3 mSv 一致。

關鍵字：飛航劑量、劑量評估。

國家原子能科技研究院

附件二、飛航劑量量測技術相關技術報告

飛航劑量量測技術可行性評估及先期測試研究

楊子毅 林佳盈* 郭又勤 許榮鈞*

摘要

根據 NCRP-160 報告，空勤人員每年受到的宇宙射線輻射劑量約為 3 mSv，較一般民眾的 1 mSv 劑量限值來得高。為因應未來飛航劑量量測的需求，本研究探討適用於飛航環境的劑量量測技術，考量各方法的優缺點及操作便利性，提出國內技術發展建議。同時，本研究透過於國內照射場實驗，測試飛航劑量量測偵檢器之響應程度，希望能藉此歸納出最佳的偵檢器操作條件，以利未來進行高空輻射量測之所需。

關鍵字：宇宙射線、飛航劑量、輻射偵測。

國家原子能科技研究院
*國立清華大學

附件三、天然放射性物質於居家常用建材體外劑量相關研究報告

天然放射性物質於居家常用建材之體外劑量量測先期研究

楊子毅

摘 要

本報告參考數篇國際文獻，就各國對含天然放射性物質之建材量測方法進行探討，包括使用的量測儀器、對象核種、劑量評估公式及使用到的參數等，並從中歸納適合我國使用的體外劑量評估方法，為未來建立相關量測技術預先做好準備。

關鍵字：天然放射性物質、建材、劑量評估。

國家原子能科技研究院

ii

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(113 年-114 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 113 年 7 月至 114 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

ii