

行政院原子能委員會
委託研究計畫期末研究報告

接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力
(1/4)

**Linking up international radiation protection technical
specifications and improving radiation detection capabilities**

計畫編號：110-2001-02-17-07

受委託機關(構)：原子能委員會核能研究所

計畫主持人：袁○程

聯絡電話：(03)4711400 ext 7673

子項計畫主持人：邱○綺、林○君、歐陽○鈺

承辦人：廖○蘭

報告日期：110 年 12 月 29 日

目 錄

| | |
|-----------------------------|-----|
| 目 錄..... | i |
| 中文摘要..... | ii |
| 英文摘要..... | iii |
| 壹、前言(計畫緣起)..... | 1 |
| 貳、研究目的..... | 5 |
| 參、研究方法與過程..... | 10 |
| 肆、主要發現與討論..... | 19 |
| 伍、結論與建議..... | 84 |
| 陸、參考文獻..... | 88 |
| 附件 期末訪查技術性查核問題與回復(Q&A)..... | 91 |

中文摘要

為接軌國際最新輻射防護建議，國際原子能總署、歐盟等國際組織陸續更新輻防管制建議與技術規範。因此，本計畫考量輻射防護管制系統的全面性，亦滾動式地精進管制實務面之技術能力，同時為符合國內外趨勢，進行輻射防護之度量技術研究與提升人員生物劑量評估相關技術，以強化輻射量測與劑量評估之準確度及公信力，提升游離輻射防護管制技術，確保民眾健康及安全。

本年度含三個主要工作項目：1. 建立國際同步之輻射防護規範研究；2. 強化國內輻射檢校量測技術能力研究；3. 精進染色體變異分析技術與評估研究。以國際最新輻防趨勢為依歸，針對技術規範、胎兒劑量、眼球水晶體劑量等輻防架構、管制影響及評估技術進行研析，以落實最適化的輻射防護管制作為，並對人員劑量和輻射偵檢儀器校正能力試驗認證技術進行研究，強化輻射防護相關量測實驗室之技術能力，以及擴增國人染色體背景值資料庫和劑量反應曲線，持續提升游離輻射安全管制層次及水準。

關鍵字：游離輻射、輻射防護、輻射安全標準、輻射度量、生物劑量

英文摘要

The project adopted a roll-on approach to improve the technical ability in control practice and radiation protection measurement technology according to the updated regulations of the radiation management structure and technical specifications suggested from the International Atomic Energy Agency and the European Union.

To improve the research and the technology on the evaluation of radiation detectors for testing and calibration, and to enhance the personnel and biological doses assessment considering the domestic and international trends is the priority of our national laboratory to strengthen the accuracy and credibility of radiation measurement and dosimetry.

There are three subprojects in our four-year project: (1) Researches on the establishment for the updated regulations of the radiation protection management system: the radiation protection technical specifications referring to the latest international trend and the impact of new regulations, and the radiation doses to the lens of the eye and to the fetus are investigated in this project; (2) Researches on the improvement of radiation detection and measurement system, and the dose verification methodology: the performances of the certification technology for personnel dose evaluation and radiation detector calibration are assessed in this project; and (3) Researches on the improvement of the evaluation and technology for human chromosome abnormality analysis: a continuous research on the domestic database for background value and dose response curve of the chromosome. All efforts of this project aims to pursue and to provide a higher level of the regulation of radiation safety.

Keywords: Ionizing Radiation, Radiation Protection, Radiation Safety Standards, Radiation Measurement, Biological Dose.

壹、前言(計畫緣起)

原子能委員會(以下簡稱為原能會)為全國輻射安全的主管機關，核心業務是以專業及合理的管制措施，確保人員、場所及環境之輻射安全。受輻射防護管制之物件包括核子設施、醫療、學術、工業、農業及軍事等單位，所使用之放射性物質及可發生游離輻射設備，保護之對象則包括從業人員、接受放射性診斷及治療之病患、一般民眾及週遭之環境等。由上而下，輻防體系從國際同步之輻防規範、輻防檢校實驗室、第一線從業人員，至一般民眾及週遭之環境，原能會有責任強化游離輻射管制措施、提升國家整體游離輻射劑量與核種活度量測水準、推動原子能科技應用與民生安全議題之研究發展。

核能研究所(以下簡稱為核研所)透過『接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力』計畫之執行，能有效強化與支援原能會的輻防把關工作、精進輻射安全管制技術、推動原子能科技在醫學診療、工業輻安與民生應用之研究發展，並提升國家游離輻射量測與劑量評估技術，使相關技術與國際接軌。而國外先進核能應用國家，建置有國家級生物劑量實驗室，並研究建立人員生物劑量評估與相關技術，國內則透過此計畫，建置與精進輻射生物劑量實驗室，可有效協助意外曝露應變作業與作為法規之科學依據，提升游離輻射安全管制層次及水準，落實原子能科技於社會民生福祉與永續發展之目標。

近年國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)、歐盟等國際組織陸續出版新的管制建議與規範，其輻防管制架構(如曝露情境)已有整體上之變革，鑑於輻防管制措施必須與時俱進，故亟待進行游離輻射防護法及相關技術規範法制精進之研究，另亦需持續提升管制業務所需之輻射量測、儀器檢校及劑量評估驗證技術能力，因應國內外趨勢建立基礎量能和量測系統、制定相關管制作業程序及法規、強化輻射災害應變能量，以完善整體輻射防護管制體系，確保民生及環境輻射安全。

本計畫之執行內容，係考量目前因科技之進步、民眾生活品質之提高，游離輻射於民生應用之發展較過去更為快速增長。主

管機關本於管制之立場，亟需針對未來游離輻射於民生應用之發展潮流，及參考國際趨勢，預先進行研究、調查，以為日後建立合宜之管制規範、審查及評估技術之基礎。計畫內容所參考之目前環境需求與未來方向預測如下：

- 一、我國現行游離輻射防護安全標準，係參照國際放射防護委員會（International Commission on Radiological Protection，簡稱ICRP）於1990年發表之建議書而定。而近十數年，隨著國際輻防體系演進、生物學數據更新等因素。ICRP於2007年後，提出了新的輻防觀念，包含：以三類曝露情境取代原有之輻射作業與干預，加強輻防最適化精神，修訂了危害係數、輻射加權因數、組織加權因數、眼球水晶體劑量限值、確定效應與關鍵群體名詞等部分。而後，IAEA亦針對ICRP的修訂而出版新的安全要求標準（IAEA General Safety Requirements Part 3，簡稱IAEA GSR Part3），本項作業將參照IAEA發表的GSR Part3，並考量我國輻防實務經驗，提出游離輻射防護安全標準差異對照與修訂技術需求等，並彙整國內專家意見，提出修訂方向建議。
- 二、依據原子能委員會於108年的統計資料，就可發生游離輻射設備與放射性物質證照數，非醫用類約為1萬2千餘張，醫用類約有2萬張，輻射從業人員申請徽章之人數近5萬3千人，涵蓋核能設施、工業、醫院、研究機構、國防等領域，其環境輻射監測、人員輻射劑量評估與輻射偵檢為重要的輻防管制工作，相關實驗室具備良好的技術能力與完備的品保作業亦為落實輻射防護作業、保障輻射工作人員之關鍵，因此，透過實驗室認證可以確認全國各相關實驗室是否具備足夠技術能力與品質來執行校正、測試業務。能力試驗是實驗室能力驗證與認證重要的一環，亟需研究國際之技術發展趨勢，及配合主管機關對於國內輻射度量實驗室之管制需求，建立技術規範與執行能力試驗之設備及技術，加強實驗室人員訓練與技術

交流，以提昇國內輻射防護與管制技術。本計畫將由管制需求面出發，建立執行實驗室認證與能力試驗之設備、技術、作業程序，透過能力試驗認證相關研究，瞭解全國相關實驗室之技術能力與品質，運用全國認證基金會（Taiwan accreditation foundation, TAF）舉辦游離輻射領域能力試驗時機，加強實驗室人員訓練與技術交流，以提昇國內輻射防護與管制技術。

三、隨著高齡化與生活型態的改變，以及社會經濟發展影響，如民眾越來越注意健康保健，了解「預防勝於治療」的觀念，而對於放射醫療品質越趨重視，依據衛生福利部110年公布之資料顯示，於108年國人女性接受乳房X光攝影篩檢人數約22萬人，於109年國人接受電腦斷層掃描檢查人次約270萬人次、放射治療約139萬人次、醫用粒子治療約1.7萬人次、核子醫學檢查約47萬人次等使用狀況，配合輻射應用施政與民生需求，以國際新穎性與科技急迫性為立意，針對眼球水晶體劑量高風險族群—透視攝影放射醫療，建置評估眼球水晶體劑量所需的校正光子射質；與精進動態擬人假體在輻射劑量的評估技術。考量社會期待以規劃科研議題，特別是建立國家級的活度或劑量追溯源、量測評估技術，且透過輻射檢測系統與追溯鏈、儀器檢校、放射診療品保稽核與劑量驗證和學術合作研究，精進整體大眾之輻射安全。

四、面對日本福島核事件及複合式災害影響議題，若發生輻射意外曝露，人員生物劑量重建是必要程序。對輻射曝露意外事件，生物劑量評估是針對人體經游離輻射曝露後，淋巴球染色體變異的程度，再利用劑量與輻射效應的關係，對應出人體在輻射曝露時所接受的劑量，人員生物劑量評估技術仰賴長期研究，而國人生物樣本，有助於制定相關意外曝露應變作業程序及法規。建立人員生物劑量評估技術，除有助於制定相關意外曝露應變作業程序及法規，更藉由國際專家合作模式，擴展國際化

分析能力，將可提供國內外服務。

綜上所述，需持續提升管制業務所需之輻射量測、儀器檢校及劑量評估驗證技術能力，因應國內外趨勢建立基礎量能和量測系統、研究劑量稽核與驗證方法、及制定相關管制技術規範，強化輻射災害應變能量，以完善整體輻射防護管制體系，確保民生及環境輻射安全。

貳、研究目的

本計畫之目的，在於因應國際最新技術規範與管理實務趨勢，提供先進輻防管理科學準則建議，強化國內輻射量測技術，打造接軌國際之輻防技術基礎環境與科研量能，提升輻射檢校實驗室量測能力，確保第一線工作品質，研究輻射應用上具新穎或急迫性的劑量評估、活度度量、稽核驗證方法，維持輻射生物評估技術與降低意外曝露偵測低限，增進與維護輻射安全。

本計畫之執行是以核研所技術為中心，透過學術合作達到技術精進與擴散，依據資源分配包括下列三個子項計畫，其中子項計畫一、二由核能研究所保健物理組（簡稱：保物組）執行；子項計畫三由核研所同位素組負責執行，其計畫架構如圖 2-1 所示。子項計畫項目係依據原能會函文之指示與需求而訂定，報陳原能會審查同意後執行。具體內涵如下：

一、 建立國際同步之輻射防護規範研究

因應國內外輻防概念之調整，針對技術規範、胎兒劑量及眼球水晶體劑量等技術層面之輻防架構、管制影響及評估方法進行研析，結合各界共同評估研修方向，以鞏固管制實務立基。

二、 強化國內輻射檢校量測技術能力研究

精進游離輻射領域能力試驗執行之設備、技術、程序等，含括人員/肢端/眼球水晶體劑量計、輻射儀器校正、核種分析等研究，以提升第一線實驗室量測品質。並規劃與建置全球關切之透視攝影劑量品保、眼球水晶體劑量監測等檢校傳遞鏈。

三、 精進染色體變異分析技術與評估研究

持續國家級輻射生物劑量實驗室之國人背景值與反應曲線資料擴增，以助重建輻射意外事故劑量，並逐步發展 γ -H2AX 方法，期突破 0.1 Gy 低限劑量。當細胞遭受游離輻射照射後，細胞中 γ -H2AX 的絲胺酸會被磷酸化產生 γ -H2AX， γ -H2AX 產生量會與照射劑量成正相關，評估作為快速篩檢分析方法之可行性。

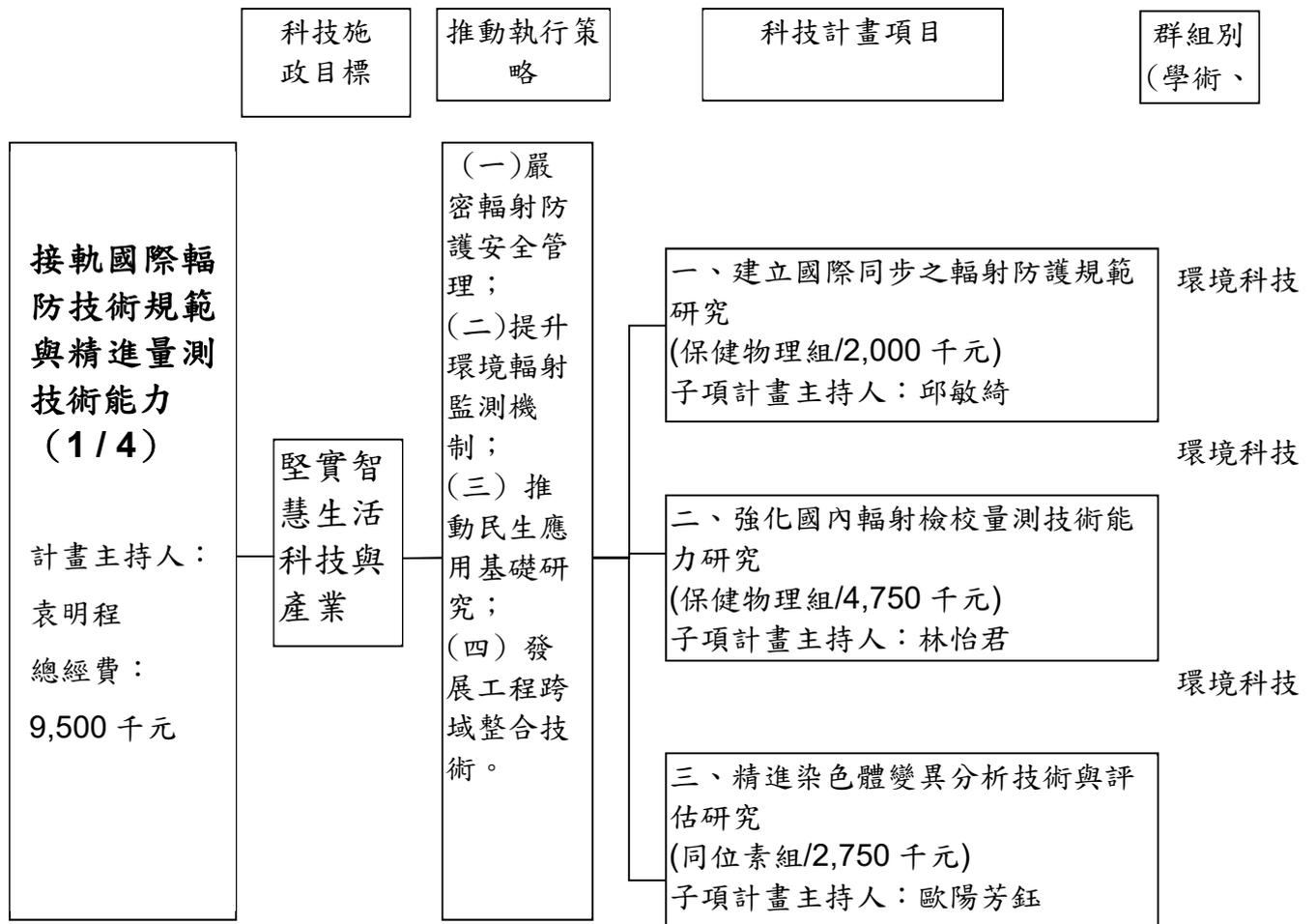
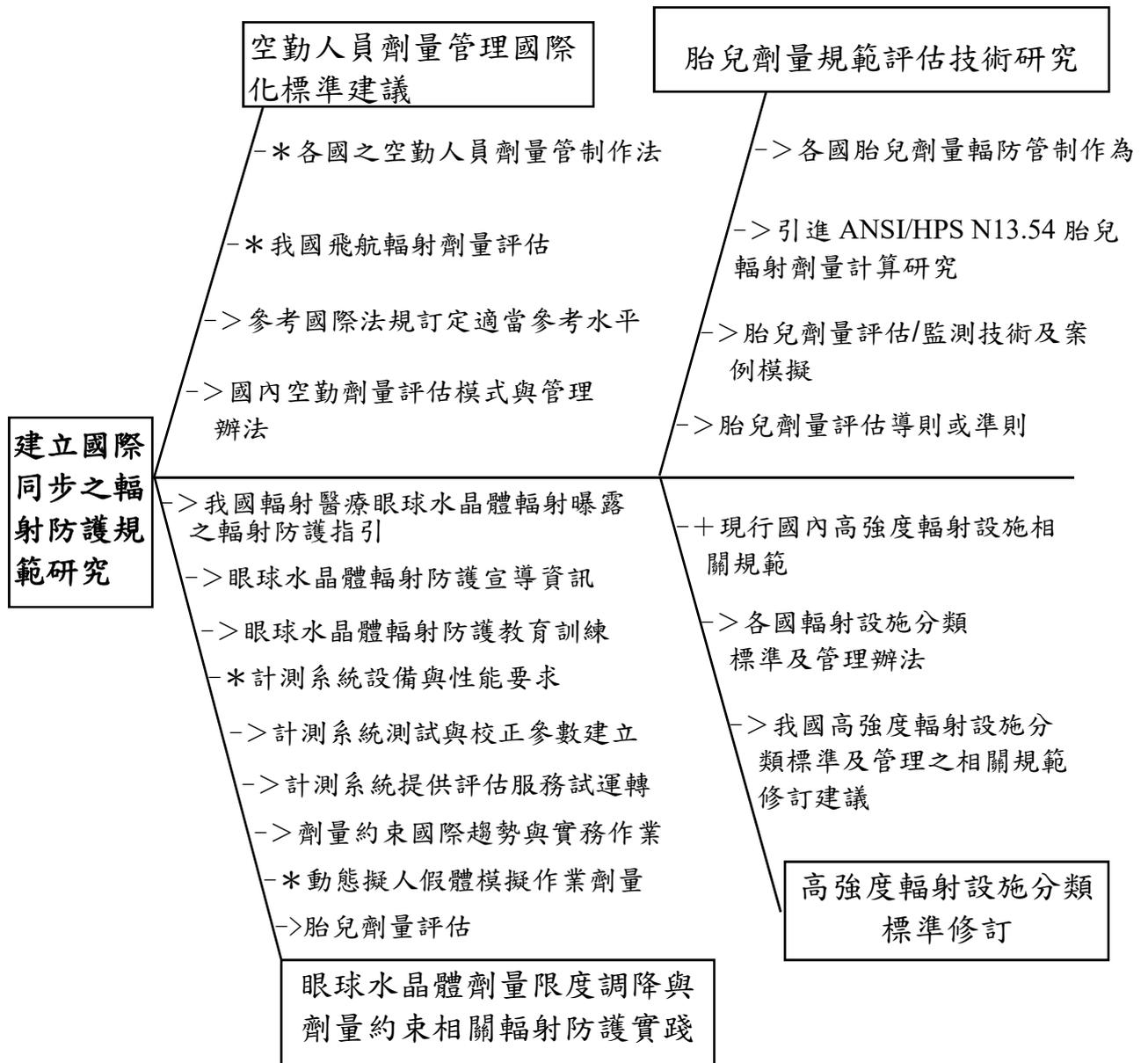


圖 2-1：「接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力」科技計畫架構圖

重要科技關聯圖



(註) 科技成熟度之標註：

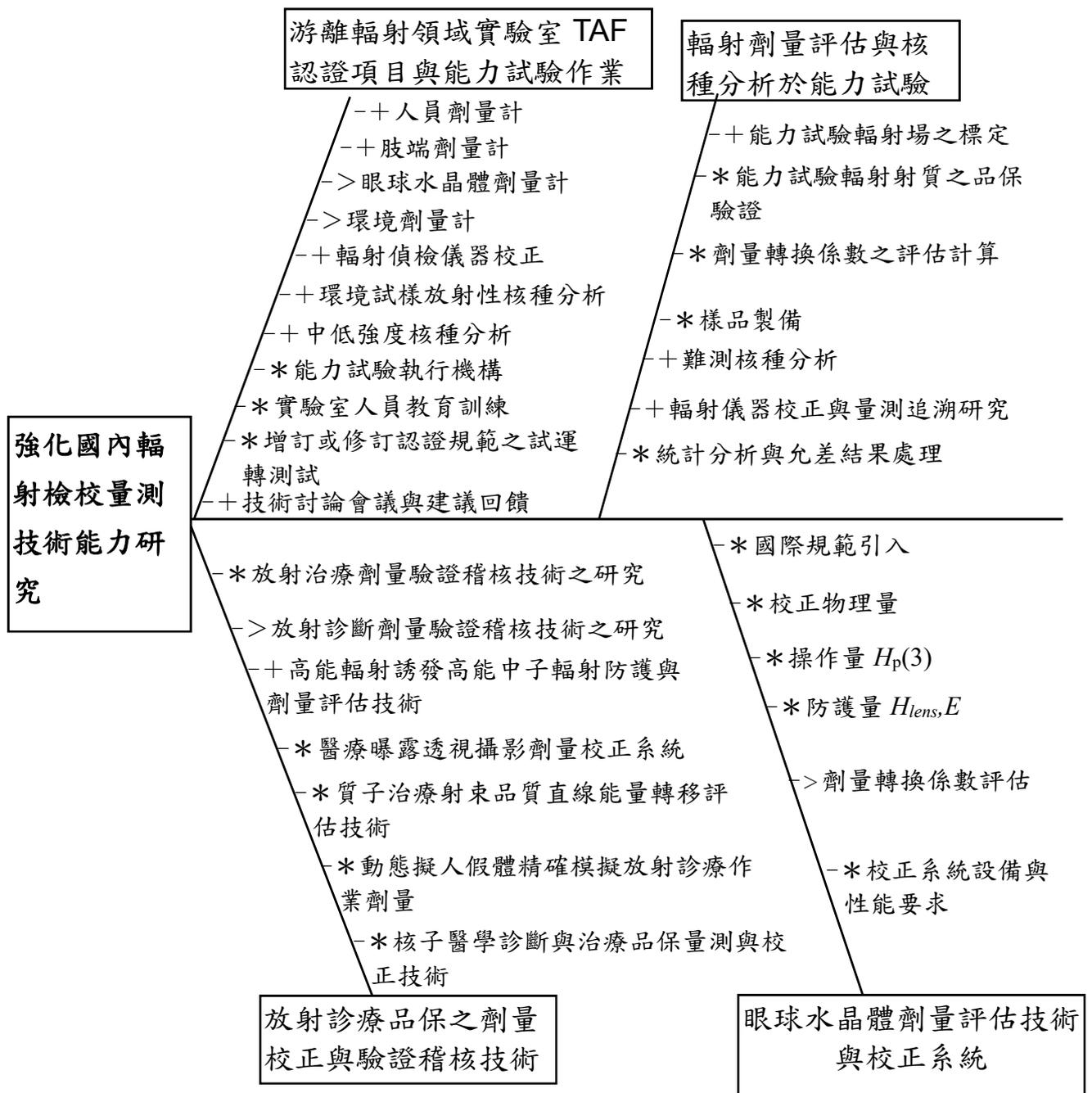
+：我國已有之產品或技術

*：我國正發展中之產品或技術

>：我國尚未發展中產品或技術

產品或技術若與「智慧財產權」有關亦請加註說明

圖 2-2 「建立國際同步之輻射防護規範研究」重要科技關聯圖



(註) 科技成熟度之標註：

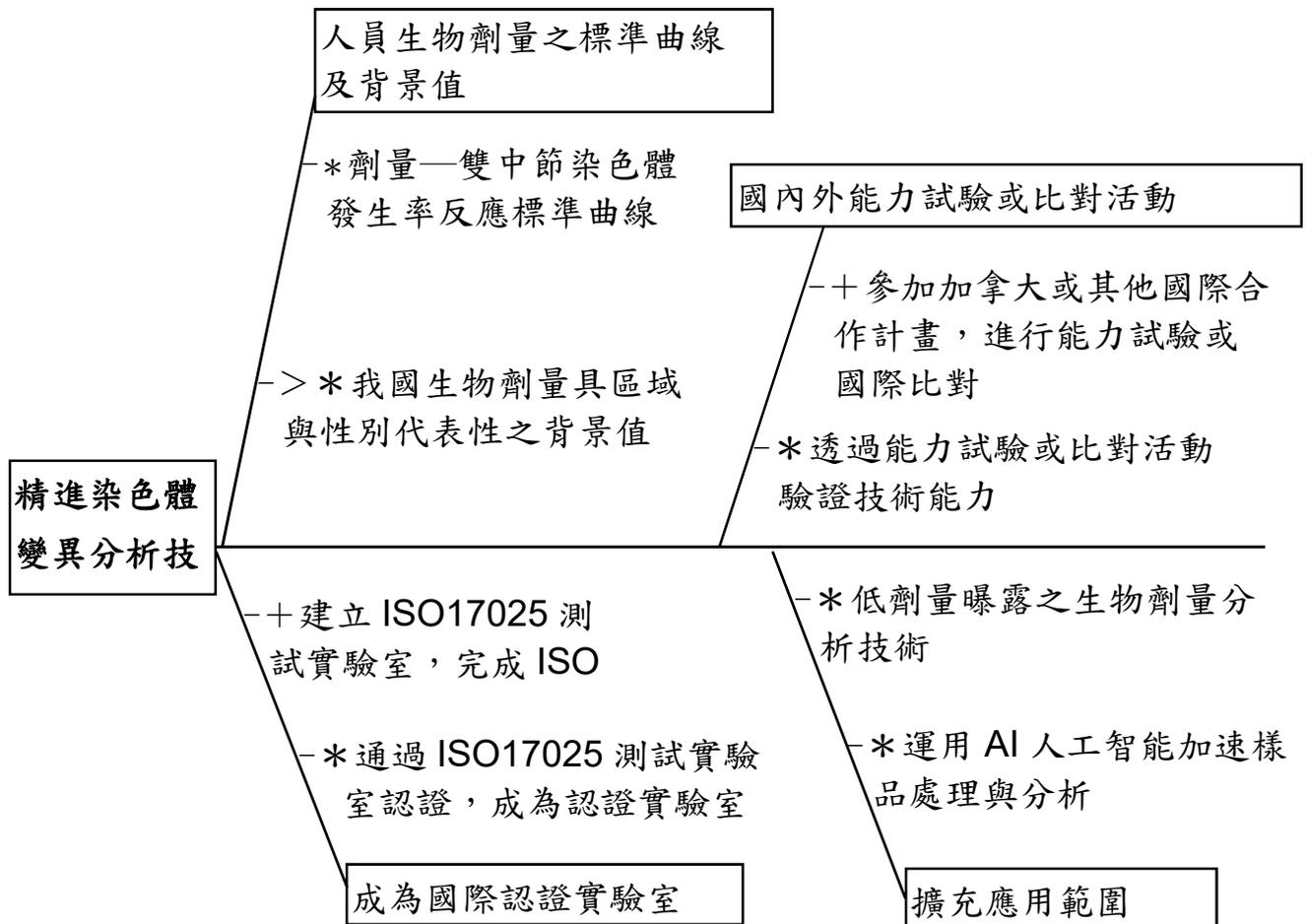
+：我國已有之產品或技術

*：我國正發展中之產品或技術

>：我國尚未發展中產品或技術

產品或技術若與「智慧財產權」有關亦請加註說明

圖 2-3 「強化國內輻射檢校量測技術能力研究」重要科技關聯圖



(註) 科技成熟度之標註：

+：我國已有之產品或技術

*：我國正發展中之產品或技術

>：我國尚未發展中產品或技術

產品或技術若與「智慧財產權」有關亦請加註說明

圖 2-4 「精進染色體變異分析技術與評估研究」重要科技關聯圖

參、研究方法與過程

(一) 內容

110 年度研究計畫共有三個子項計畫包含十個工作項目，以下分三個子項計畫說明研究方法與過程說明如下：

一、 建立國際同步之輻射防護規範研究

1. 胎兒劑量國際輻防體系研析（含學術合作的建立國內懷孕婦女之胎兒輻射劑量評估技術之技術服務）

我國現行游離輻射防護安全標準，對於懷孕女性輻射工作人員之輻射防護，為其賸餘妊娠期間下腹部表面之等價劑量，不得超過二毫西弗，且攝入體內放射性核種造成之約定有效劑量不得超過一毫西弗。國際放射防護委員會 103 號報告建議其賸餘妊娠期間胚胎/胎兒劑量不得超過一毫西弗。

為確保我國輻射防護體系符合國際趨勢，施行胎兒劑量管制作為，達合理抑低之需求，對於懷孕女性輻射工作人員之胎兒輻射防護，仍需進行國際文獻蒐集，探討不同國家懷孕婦女體型、胎兒大小及胎兒深度對劑量評估與不確定度影響，以建立適合我國懷孕女性輻射工作人員之胎兒劑量監測技術，探討制定不同輻射防護策略之差異與影響。

本年度計畫引進美國國家標準學會/保健物理學會 N13.54 文件(ANSI/HPS N13.54)為依據，同時研析各國胎兒劑量量測方法，並以學術合作方式，使用擬人假體建立國內懷孕婦女胎兒劑量評估技術。

2. 執行眼球水晶體劑量監測系統於低能量光子輻射場之校正技術研究(含學術合作的核醫藥物與透視攝影作業操作人員的劑量評估：手掌/眼球水晶體等價劑量與全身有效劑量的關係

之技術服務)

因應國際放射防護委員會修訂眼球劑量職業曝露限值，從 150 mSv/y 降至五年平均 20 mSv/y，並單一年內不超過 50 mSv 之建議，本計畫將進行眼球水晶體劑量監測技術研析與測試，以符合國際規範。本年度針對商用眼球水晶體劑量計於低能量光子輻射場之系統評估進行研究，並於核研所內部及國內透視攝影相關診療醫事人員，提供眼球水晶體劑量監測先期訪查，先期訪查結果可供後續推動眼球劑量職業曝露監測實務之參考。

另一部分將以學術合作方式，驗證與精進核醫藥物與透視攝影作業操作人員的劑量評估：研析手掌/眼球水晶體等價劑量與全身有效劑量的關係；為更精確評估輻射工作人員劑量，特別探討二個重要實務應用：(a)操作人員以手動態處理核醫藥物的劑量評估、及(b)操作螢光透視攝影工作人員的劑量評估。第一部份的精進方向為：參考臨床實務操作條件，考量不同藥物使用不同針套筒的差異，以及詳細針套筒的屏蔽設計影響，以使肢端劑量評估能更貼近實際情形。第二部份的精進方向為：以操作心導管與血管攝影透視人員為關注的關鍵群體，參考臨床操作情節考量不同條件如：有無使用鉛帷幕、有無配戴鉛眼鏡、有無著鉛衣、曝露操作條件等，深入進行劑量評估。針對核醫藥物與透視攝影作業操作人員的劑量評估與輻射安全，本研究相關產出將有助於國內未來輻射管制政策精進之參考。

二、強化國內輻射檢校量測技術能力研究

1. 肢端劑量計能力試驗規劃研究(110-111)，並舉辦技術研討會

近年社會越趨講究生活與醫療品質，在放射醫療的透視攝影檢查、介入性手術和核醫診療藥物製備等領域，肢端劑量評估是相對重要的輻防要項，主管機關(原能會)也不斷強化肢端劑量的輻射防護作為，是故第一線實驗室評估肢端劑量的準確與否，就是把關輻射安全的關鍵。

肢端劑量評估實驗室能力試驗，是主管機關運用全國認證基金會（TAF）的能力試驗週期，所進行的相關研究。110 年度，是正式啟動執行的第一次肢端劑量計能力試驗。上期計畫已順利引入國際最新的 ANSI/HPS N13.32-2018 規範，並參考國內產業現況，與 TAF 合作推出我國「測試領域肢端劑量計能力試驗技術規範(TAF-CNLA-T23(1):2020)」並公告業界。本項目將依據上述規範跨 110 和 111 年度執行此項測試研究。於 110 年的前期研究為建構技術規範所需輻射場與相關設施、規劃運轉之執行、參與實驗室之校正與第一批次照射、以及研究能力評估程序和方法。111 年的後期研究則為運轉之能力試驗程序、劑量計管理、第二與第三批次照射、數據處理、舉辦技術交流會議、評估參與實驗室技術能力、舉辦總結會議、完成參與實驗室評估報告與總結報告。

其中，會涉及執行能力試驗所需照射系統之建立、維持、品保與確證，照射系統包括：加馬光子、X 光和貝他，皆須根據 ANSI/HPS N13.32-2018 版本進行建立、維持或確證。其中牽涉機械、電子、量測與控制設備，輻射劑量量測設備，輻射照射系統及附屬設備（校正台車、軌道等位移裝置、儀控設施、屏蔽裝置等），輻射訊號處理系統，電腦及其週邊擷取設備等軟硬體，以及人力配置、認證執行和教育訓練等搭配，以提供參與實驗室適當射質標準，進行劑量評估或系統校正。

肢端劑量計能力試驗試運轉研究其判斷基準為能力商數，即 $P_i \equiv [H'_i - H_i] / H_i$ (H' 和 H 分別代表受測實驗室量測值和參考值)，並透過 ANSI/HPS N13.32-2008 規定之能力評定公式： $B^2 + S^2 \leq L^2$ (B 為 P_i 平均值； S 為 P_i 標準差； L 為允差)處理，依據第 I 類別 L 為 0.24，第 II、III、IV 類別 L 為 0.35 來進行判定。

2. 輻射偵檢儀器校正能力試驗之研究(109-110)，並舉辦研討會

依據財團法人全國認證基金會實驗室認證處規定，實驗

室申請認證或延展認證前，應通過能力試驗，且有效期為3年，本工作項目為運用109-110年舉辦之第8次輻射儀器校正能力試驗，進行我國相關實驗室技術與品質之研究。本工作依據「校正領域輻射偵測儀器校正技術規範(TAF-CNLA-T06(2))」，進行能力試驗所需的不同類別輻射偵檢儀器及標準輻射場之性能測試，執行國內實驗室對輻射劑量偵測儀器、 α/β 污染偵測儀器及人員劑量計等能力試驗傳遞儀器之品保測試。此研究跨109和110年度執行，109年研究為建構與維持技術規範所需輻射場、規劃運轉之執行、系統測試、研究能力評估程序和方法等。109年為運轉之能力試驗程序、傳遞件管理、數據處理、舉辦技術交流會議、評估參與實驗室技術能力、舉辦總結會議、完成參與實驗室評估報告與總結報告。

本次輻射偵檢儀器校正能力試驗研究的參與實驗室及項目為歷年之最。執行時程為109年9月至110年10月，由國家游離輻射標準實驗室負責執行，內容除「第8次輻射偵檢儀器校正能力試驗」外，尚包括三個實驗室比對活動：「第4次陸軍核生化研究中心儀器校正比對」、「第2次克馬校正實驗室校正比對」和「第1次台電放射試驗室中子輻射偵檢儀器比對」，其中最後一項是因應主管機關強化中子校正技術的品質而執行。

新增之中子輻射偵檢儀器校正實驗室比對研究說明如下：由於國內二級的中子輻射偵檢儀器校正實驗室，僅為台灣電力公司的放射實驗室1家，無法辦理多家實驗室的能力試驗，改採1對1的實驗室比對方式，來確證其技術能力。該實驗室過去持續透過國家游離輻射標準實驗室的校正服務，達成可追溯國際計量標準的校正結果。本實驗室比對是藉由比較兩實驗室對相同儀器校正因子的差異，檢驗其校正系統的表現，用以監控實驗室的技術能力水準及品質能力水平。

本年度除持續之系統品保，並評估參與實驗室技術能力，包括評估校正因子和儀器效率。能力評估根據國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)定義

之 E_n 值 $E_n = \frac{|V_{lab} - V_{ref}|}{(U_{lab}^2 + U_{ref}^2)^{1/2}}$ ， V 及 U 分別代表值及其擴充不確定度($k=2$)，下標 lab 和 ref 分別代表受測實驗室量測值和參考值)。判斷準則如下： $E_n \leq 1$ ，通過能力試驗； $E_n > 1$ ，不通過能力試驗。最後為完成參與實驗室評估報告及舉辦總結會議研討會，達成我國可提供輻射偵檢儀器校正之國內現況分析研究，與技術品質之交流提升。

3. 環境試樣放射性核種分析能力試驗運轉研究，並舉辦能力試驗研討會

本工作項目依據「測試領域環境試樣放射性核種技術規範(TAF-CNLA-T09(2))」，針對環境級核種活度，於不同類別樣品所含放射性核種及其活度之分析進行能力試驗，適用對象主要為天然放射性的環境樣品。本年度採用加馬核種 ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 等；貝他核種 ^{90}Sr 、 ^3H 等；同時，依據 ISO GUIDE 34、35 對於生產參考物質(Reference Material, RM)之技術要求，針對能力試驗使用的參考物質特性值及均勻性進行不確定度評估。

關於環境試樣放射性核種分析能力試驗，今年度是將試驗週期調整為三年的第三次能力試驗。能力判定上，追溯性根據 ANSI N42.22 相對差異小於 3 倍標準差為基準，以兩個方法判定，第一為活度相對偏差值(即 $Br_i = (A_i - Aa_i) / Aa_i$ ， A_i 為測試實驗室量測活度值； Aa_i 為參考活度值)，進行 $-0.25 < Br \leq +0.50$ 之判定；第二為相對精密度(即

$$S_A = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i}{A} - 1 \right)^2 / (N-1) \right]^{1/2} \quad \text{和} \quad S_B = \left[\sum_{i=1}^N (Br_i - Br)^2 / (N-1) \right]^{1/2}$$

，判定基準為 $|S_B| \text{ and } |S_A| \leq 0.4$

。計畫工作內容包括製作參考物質、系統品保、評估參與實驗室技術能力、完成參與實驗室評估報告，並舉辦總結會議，達成我國可提供環境試樣放射性核種分析實驗室之國內現況分析研究，與技術品質之交流提

升。

4. 中低強度核種分析能力試驗運轉研究，並舉辦能力試驗研討會

本工作項目依據「測試領域中低活度核種分析技術規範(TAF-CNLA-T10(3))」執行，針對中低強度級核種活度，進行不同類別樣品所含放射性核種分析能力之測試，主要以核設施排放監測或分析實驗室之技術能量為考量，適用對象主要為核能電廠或學研單位的樣品。研究程序如下：

- (1) 辦理能力試驗簡章與報名表之製作、寄發、報名表回收與參加測試項目彙整；
- (2) 標準射源採購、配製與定量盲樣射源與標準參考射源，編製計測報告格式；
- (3) 寄發射源、開立單據、回收計測報告與數據處理；
- (4) 撰寫總結報告、辦理總結報告會議。

關於中低強度核種分析能力試驗研究，今年度是將試驗週期調整為三年的第三次能力試驗，判定標準為先設定不同核種對應之活度解析度(A_s/u_s ， u 為量測標準不確定度；下標 S 為參考活度值)和比值(A_t/A_s ，下標 t 為受測實驗室活度量測

值)，並根據 ζ 商數(即
$$\zeta = \frac{|A_t - A_s|}{\sqrt{u_t^2 + u_s^2}}$$
)判定，當 $\zeta < 3$ 且總量測不確定度 $\leq 10\%$ ，則符合測試要求。並將依據上述程序執行系統品保、評估參與實驗室技術能力、撰寫參與實驗室評估報告、並舉辦總結會議，達成我國可提供中低強度核種分析實驗室之國內現況分析研究，與技術品質之交流提升。

5. 建置X射線光子之眼球水晶體劑量校正系統

為因應國際放射防護委員會(ICRP)修訂眼球水晶體劑量職業曝露限值從150 mSv/y降至5年平均20 mSv/y，近年來國際上出現大量眼球水晶體劑量量測技術研發資料，無論是

使用直讀式或被動式劑量計來評估眼球水晶體劑量，都需要建立國家級劑量追溯體系，提供眼球水晶體劑量計的校正及能力試驗，作為第一線劑量評估實驗室技術能力水準及品質能力水平的監控。

本工作項目於 109 年度開始，依據 ISO 4037-1 國際標準，建置可用於提供眼球水晶體劑量校正的 ISO 窄能譜(ISO narrow spectrum 又簡稱 IN)系列放射診斷能域射質(IN40、IN60、IN80、IN100、IN120、IN150)。建置方法需先量測 X 光機本身的固有過濾，將規範內所規定的總過濾厚度，扣除固有過濾厚度後，即為所需的附加過濾片厚度，附加過濾片所使用的材料為鋁、銅、錫等，量測結果顯示半值層與規範之差異小於 5%，符合國際規範要求。110 年度規劃完成 X 射線光子之眼球水晶體劑量校正系統建置，建置方法需先標定出可涵蓋 ISO 4037-3 規範假體的 X 射線空氣克馬(K_{air})標準劑量，使用規範之轉換因子，將 K_{air} 轉換為 3 毫米深度處軟組織個人等效劑量($H_p(3)$)，接著設計頭型假體監測裝置與建立監測游離腔參考值，將相關參數編寫進自動擷取程式，爾透過與其他國家校正實驗室的雙邊比對，驗證劑量準確性，即可提供 X 射線光子之眼球水晶體劑量校正服務。

三、精進染色體變異分析技術與評估研究

1. 參與實驗室間能力比對工作，驗證人員生物劑量實驗室分析能力

人員生物劑量實驗室為國內前瞻創新實驗室，有關實驗室品保系統建立與認證，已於 105 年初次取得全國認證基金會 (TAF) ISO17025 認證。108 年度再次通過 ISO17025:2017 新版要求的延展認證審查，持續精進實驗室之品質。

人員生物劑量實驗室於 103-105 年度及 107-108 年度參與由加拿大衛生部所舉辦的國際比對，並順利完成；今年度原規劃參與加拿大衛生部舉辦之國際比對，因疫情影響，國際比對舉辦時間具不確定性，因此本計畫同步規劃國內衛星實驗室間

比對，可驗證實驗室分析人員之能力。藉由參加能力試驗相關活動之良好結果，作為展現實驗室校正技術能力之證明。

2. 分析 110 年度國人本土染色體雙中節背景值

在國際標準組織 (ISO) ISO 19238:2014 國際輻射研究指出，在正常背景值中，每位正常人的每 1,000 顆淋巴球細胞中，平均存在 1 個 (0-2 個) 染色體雙中節變異。至 109 年度為止，人員生物劑量實驗室已完成 28 例正常國人背景染色體雙中節分析，一共分析 28,411 顆細胞，發現 22 個雙中節 (dicentric) 於 21 顆細胞中，目前資料庫國人背景雙中節發生率為 0.77‰，即是 1000 顆細胞中有 0.77 個雙中節發生率，分析結果顯示目前蒐集到的國人血液樣本背景值略低於國際之平均值。

今年度實驗室持續針對國人背景值進行研究分析工作，生物劑量實驗室將與南部醫學中心合作 (高雄醫學大學附設醫院)，並增加 3 例正常人背景染色體雙中節分析，持續收集更多案例來代表國人之生物劑量背景值。

3. 建立 γ -H2AX 之分析方法，研製方法檢量線

依據 EU RENE (Realizing the European Network of Biodosimetry) 目前使用六種生物劑量測定法進行染色體損傷檢測，分別是：(1) 雙中節染色體測定 (dicentric chromosome assay, DCA); (2) FISH 易位測定 (FISH-translocation assay); (3) 微核試驗 (micronucleus assay); (4) 成熟前染色體濃縮法 (the premature chromosome condensation assay, PCC); (5) γ -H2AX 測定 (the gamma-paramagnetic resonance/optically stimulated luminescence)。其中雙中節染色體測定術為實驗室近年來已穩定發展之技術，多次參與國際比對得到具有分析盲樣檢體能力之肯定。

然而，雙中節染色體測定需要投入大量的人力進行分析判讀，染色體樣品需要固定培養四十八小時後才能進行細胞收取及噴片動作，若考量大型輻射意外事故發生時，實際應用上

可能面臨待分析數目眾多而出現人力不足的問題。此外，FISH 檢測結果準確高，但是試劑成本太高，也需要具備分析經驗人員進行判讀。微核試驗與雙中節染色體測定一樣需要由人員進行微核的計數。當細胞遭受游離輻射照射後，細胞中的絲胺酸會被磷酸化產生 γ -H2AX， γ -H2AX 產生量會與照射劑量成正相關，因此藉由分析 γ -H2AX 產生量進而回推輻射照射劑量為目前常見的方式，若使用 ELISA 酵素免疫分析或是 Flow cytometry 流式細胞儀分析方法測定 γ -H2AX，則不需要細胞培養時間也不需要由人工進行判讀，可大幅縮短分析數據所需時間，提升分析效率。

109 年度已藉由預試驗結果確認以靈敏度較佳的 Flow cytometry 流式細胞儀分析方法進行後續試驗，本年度完成 Flow cytometry 之 γ -H2AX 分析方法程序書及分析檢量線一條。

肆、主要發現與討論

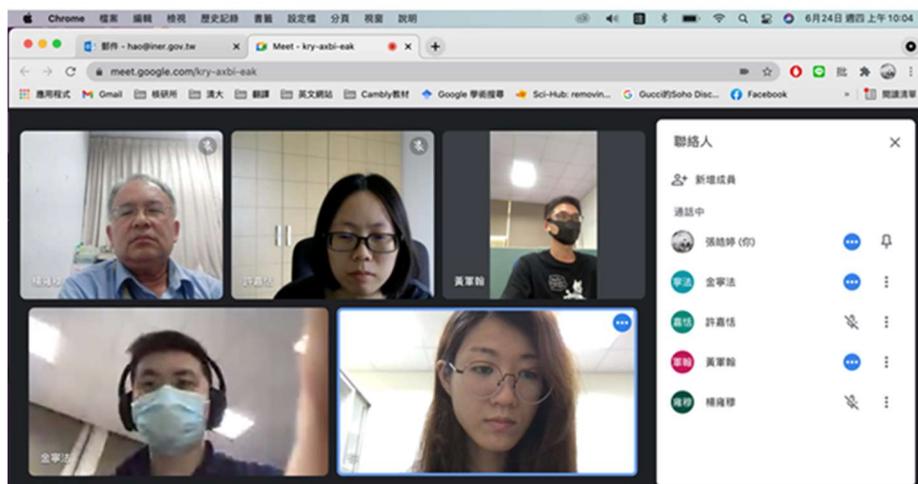
本計畫已達成的績效量化指標為：國際期刊論文 1 篇、會議期刊 1 篇，研究/技術報告 8 篇、舉辦研討會 2 場、形成大會手冊 1 份。績效質化說明依各子項計畫分述如下：

(一) 內容

一、 建立國際同步之輻射防護規範研究

1. 胎兒劑量國際輻防體系研析（含學術合作的建立國內懷孕婦女之胎兒輻射劑量評估技術之技術服務）

為建立國內懷孕婦女胎兒劑量評估技術，於第一季完成國際文獻分析與彙整，以美國國家標準學會/保健物理學會 N13.54 文件(ANSI/HPS N13.54)為主軸，於第一季與第二季辦理兩場「美國國家胎兒輻射劑量計算標準(ANSI/HPS N13.54)」內部討論會議(參見圖 4-1)，針對懷孕婦女之胎兒輻射劑量研究報告進行討論，同時以 ANSI/HPS N13.54 胎兒游離輻射計算標準為主軸，撰寫國內懷孕婦女之胎兒輻射劑量評估技術報告。第二季與清華大學完成 110 年度技服勞務案，以學術合作方式，利用擬人假體建立懷孕婦女胎兒劑量評估技術。



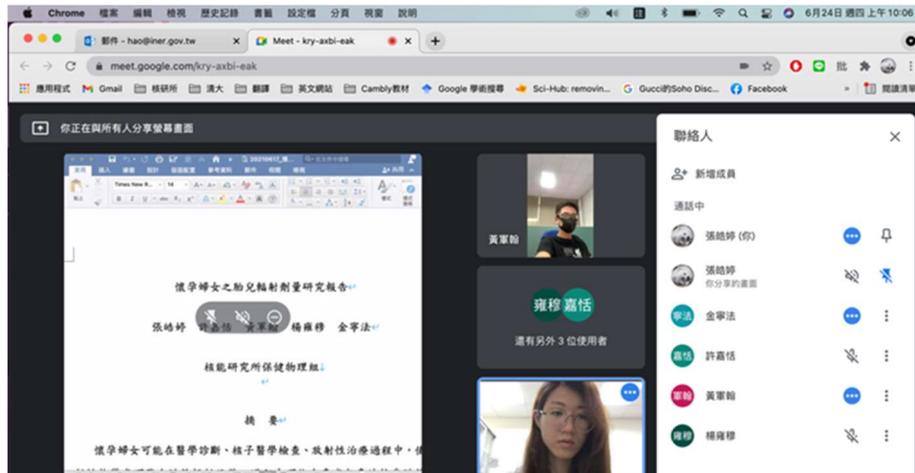


圖 4-1、「美國國家胎兒輻射劑量計算標準(ANSI/HPS N13.54)」
內部討論會議

ANSI/HPS N13.54 胎兒游離輻射計算標準於 2006 年 9 月 15 日，通過美國國家標準協會(American National Standards Institute, ANSI)與美洲保健物理學會(Health Physics Society, HPS)認可，其中包含放射治療、核子醫學診療及放射診斷影像檢查對胎兒的輻射劑量影響，並提出對懷孕婦女之胎兒劑量評估方法與建議，一般常以懷孕婦女子宮劑量來代表胎兒的劑量風險評估，各項摘要分述如下：

- (1) 針對一般性放射治療程序，需透過放射腫瘤科醫師、內科腫瘤科醫師、婦產科醫師和醫學物理師共同討論，制定適合懷孕病患之治療計畫，同時對胎兒劑量做進一步評估，通常只有大型醫療機構才能使用保護胎兒的特殊設備(如：屏蔽橋、移動屏蔽)，孕婦應轉介到有管理能力的治療機構，才能提供懷孕病患完善且安全的治療程序，同時保護胎兒的安全。
- (2) 核子醫學檢查部門會盡可能地避免對懷孕婦女施打放射性藥物，但無法完全避免之情況下，施打核醫藥物進行檢查，其放射性藥物可能滯留體內一段時間，可以透過 ICRP 88 號報告胚胎和胎兒因母體攝入放射性核種所致之劑量及相關研究統計資料，進行胎兒劑量評估。
- (3) 一般放射診斷科可以透過量測結果(Kereiakes, J. G., &

Rosenstein, M. (2019))與相關研究(Jacobson, A., & Conley, J. G. (1976), Osei, E. K., & Faulkner, K. (1999))，進行胎兒劑量初步評估，臨床上，在懷孕婦女告知雇主後，除常規全身劑量計外，會另外配給額外劑量計進行量測追蹤，懷孕初期尚未配給額外劑量計期間將以常規全身劑量計保守評估。

為了更精準地了解胎兒在懷孕婦女體內的劑量，各國開發出不同類型的擬人假體，這些模型被輻射劑量學界廣泛採用，其中以美國橡樹嶺國家實驗室 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL) 利用程式化方法創建懷孕婦女模型 (Stabin et al (1995))最具代表性，假體依據懷孕階段，分為 3 個月、6 個月和 9 個月，該假體之相關研究成果也是目前輻射劑量學中，懷孕婦女相關文獻所參考的依據。此外，美國紐約壬色列理工學院(Rensselaer Polytechnic Institute, RPI)以電腦斷層(Computed Tomography, CT)影像開發懷孕婦女體素假體(Shi, C, 2004)，近年來，也有團隊(Xu, X. George, et al., 2007)利用器官表面幾何來精進懷孕婦女假體，將 RPI 開發的懷孕婦女假體(RPI-P3、RPI-P6、RPI-P9)，混合使用 CT 影像及多邊形網格法，能夠記錄必要的細節，並依照不同孕期各器官大小之幾何變化做更精細的調整。

胎兒劑量評估會受到懷孕婦女體型、胎兒大小與胎兒位置影響，造成評估結果不確定性增加；實際上無法真實量測胎兒與懷孕婦女之劑量，因此常以擬人假體來模擬人體組織與器官，置入輻射劑量計以達成輻射度量之目的，或藉由粒子遷移計算方法，模擬不同情境的劑量分布情形。

擬人假體可分為數學假體(mathematical phantom)與實體假體(physical phantom)，數學假體為簡單幾何組成的電腦數據資料，例如常用來評估淺部等效劑量時所使用的 ICRU 人體組織之等校球，為符合人體組成的化學元素比例之簡單球體。

由於實際人體內之器官以及組織所接受的輻射劑量無法實際將輻射劑量計置入體內度量，因此使用實體假體或電腦程式模擬計算方法評估子宮所接受之劑量，國際常使用之懷

孕婦女假體模型多為數學假體，本研究將以數學假體模擬懷孕女性輻射工作人員，計算體內子宮之輻射劑量分佈情形。

本年度計畫與清華大學共同完成胎兒劑量評估技術初步分析，評估不同孕期女性輻射工作人員體型、胎兒大小、胎兒深度等，考量不同輻射作業條件時，其下腹部表面之皮膚劑量與其子宮位置劑量(胎兒劑量)之相關性關係，建立胎兒劑量轉換係數，提供快速正確的胎兒劑量評估方法。

本研究藉由蒙地卡羅計算程式模擬出兩種體型人種（歐美與台灣人）於不同孕期下之孕婦假體，第一種為 ORNL 實驗室開發之懷孕婦女數學假體(圖 4-1)，包含 0 週(未懷孕)、懷孕第 13 週(3 個月)、第 26 週(6 個月)、及第 38 週(9 個月)之假體，第二種假體根據 Damilakis 研究團隊建議的方法 (Damilakis, J,2002)，同時參考台灣人體型及台灣醫療資料庫數據建立懷孕婦女腹部尺寸，設計出懷孕第 3 個月、第 6 個月、第 9 個月孕期之假體(圖 4-2)，作為代表台灣懷孕女性參考體型，以建立腹部表面劑量與子宮劑量間的劑量轉換係數。

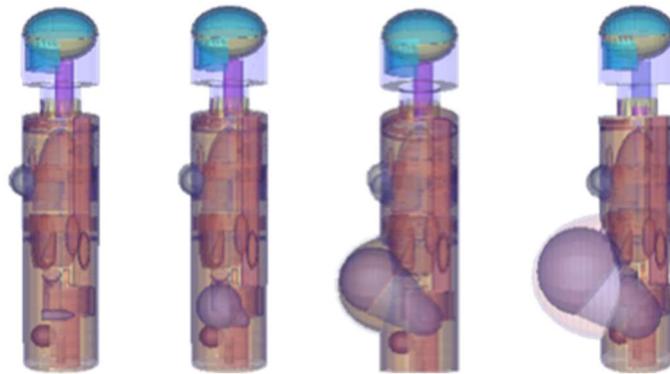


圖 4-1、ORNL 為基礎共同開發之懷孕婦女數學假體，由左至右分別為 0 週、13 週、26 週、38 週之孕期



圖 4-2、本研究自製台灣懷孕婦女腹部壓克力假體：3個月(右)、6個月(中)、9個月(左)

為探討台灣孕婦體型與 ORNL 孕婦假體的劑量評估分布差異，於孕婦實體假體之數學假體的外觀基礎上，參考台灣現有產科護理學資料(周汎濤, 民 103)計算出符合實際子宮的體積大小，再轉換為壓克力密度為材質之子宮假體，作為台灣孕婦子宮模型。建立台灣孕婦子宮模型流程如圖 4-3 所示。

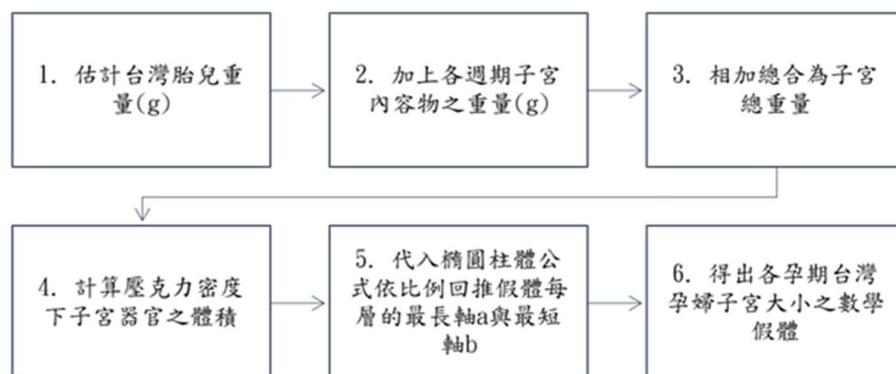


圖 4-3、建立台灣孕婦子宮模型之步驟

根據產科護理學的胎兒重量，第 13 週的胎兒重量定為 34 克、第 26 週定為 980 克、第 38 週定為 2800 克，再加上胎盤、羊水及子宮肌肉三種組織比例 (周汎濤, 民 103)，推算子宮質量，列於表 4-1，假設人體為橢圓柱體型，依據橢圓柱體公式回推各孕期之子宮模型，如圖 4-4，各週期之子宮體積與質量資料如表 4-2。

表 4-1 台灣懷孕婦女子宮內容物重量、子宮總重量以及模擬假體轉換體積資料

| 妊娠期 | 推測的 胎兒重量 (g) | 胎盤 重量 (g) | 羊水 重量 (g) | 子宮肌 肉重量 (g) | 子宮 總重 量(g) | 子宮於壓克力假體 中的體積(cm ³) |
|------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------------------------|
| 3 個月 | 34 | 346.7 | 800 | 480 | 1660.7 | 1396 |
| 6 個月 | 980 | 520 | 1200 | 720 | 3420 | 2874 |
| 9 個月 | 2800 | 650 | 1500 | 900 | 5850 | 4916 |

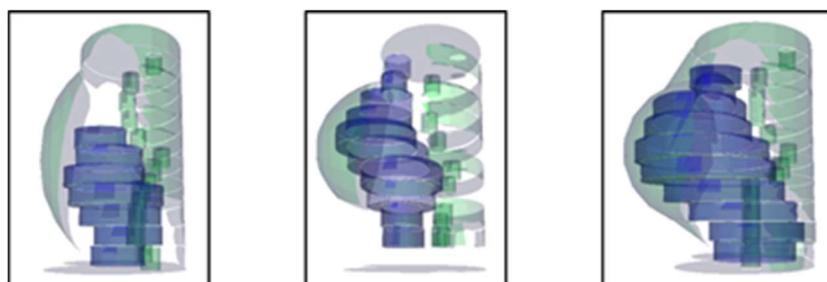


圖 4-4、台灣孕婦子宮大小之數學假體側面圖，由左至右分別為三個月、六個月、九個月之孕期

表 4-2 本研究使用之數學假體子宮體積與重量之比較

| | | 三個月 | 六個月 | 九個月 |
|-------------------|------------------------|------|------|------|
| ORNL 懷孕婦女數 學假體 | 子宮體積(cm ³) | 851 | 3655 | 8854 |
| | 子宮質量(g) | 885 | 3801 | 9208 |
| 台灣懷孕婦女腹部 假體 | 子宮體積(cm ³) | 1396 | 2874 | 4916 |
| | 子宮質量(g) | 1661 | 3420 | 5850 |

本研究以 ORNL 懷孕婦女數學假體，參考 ICRP 74 號與 ICRP 116 號報告之五種照射角度(AP、PA、LLAT、RLAT 及 ISO)，以蒙地卡羅 MCNP5 程式，評估各種射源曝露幾何條件之子宮劑量轉換因數，並與 ICRP 74 號報告之數據進行比較。

第二部分，探討不同體型對胎兒劑量轉換數的影響，本節分別使用 ORNL 懷孕婦女數學假體及台灣懷孕婦女腹部假體進行 MCNP 模擬，使用 Co-60 做為模擬射源，射源距離腹部表面為定值(SSD=20 公分)，為了模擬均勻射源及實際照射情況，本節將射源型態分為兩種面射源，大面射源為模擬均勻射源之情形，其射源面積覆蓋假體全身範圍，另考量實際照射情形，使用小面射源照射，其射源面積覆蓋假體腹部範圍，觀察在兩種面射源照射下，子宮劑量與腹部表面劑量之比例差異，孕婦體內胎兒劑量轉換係數之定義如下式：

$$\text{懷孕婦女體內胎兒劑量轉換係數} = \frac{\text{孕婦體內子宮之劑量}}{\text{孕婦下腹部表面劑量}}$$

第一部分驗證 ORNL 懷孕婦女數學假體之子宮劑量轉換因數結果如圖 4-5 至圖 4-9，在五種照射角度下，未懷孕(0 個月)假體之模擬結果趨勢與 ICRP 74 號報告研究結果一致，隨孕期增加，AP、PA 照射角度之子宮器官劑量轉換因數隨之下降，在 LLAT、RLAT 及 ISO 照射角度下，隨孕期增加，腹部凸出軀幹表面之比例增加，因此子宮器官劑量轉換因數逐漸上升。

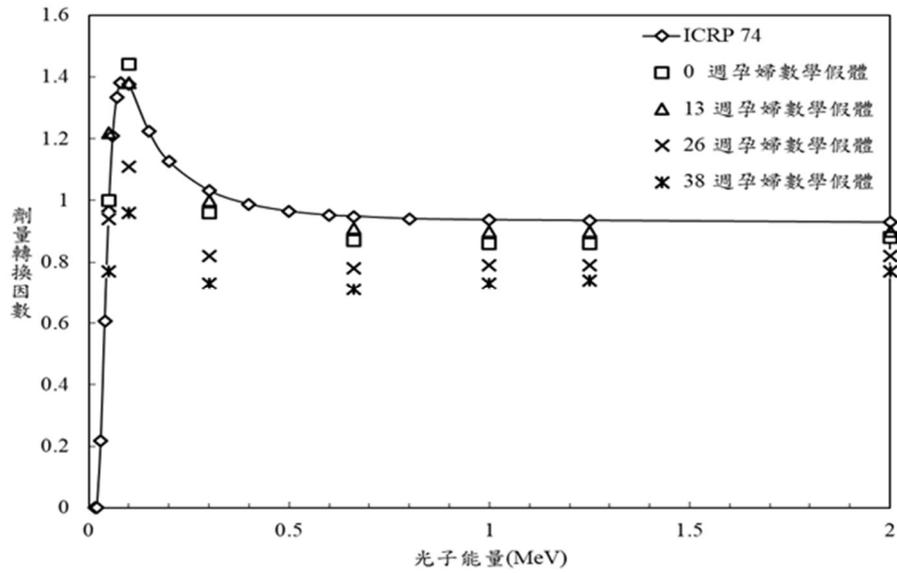


圖 4-5、模擬結果與 ICRP74 報告轉換係數比值比較(AP)

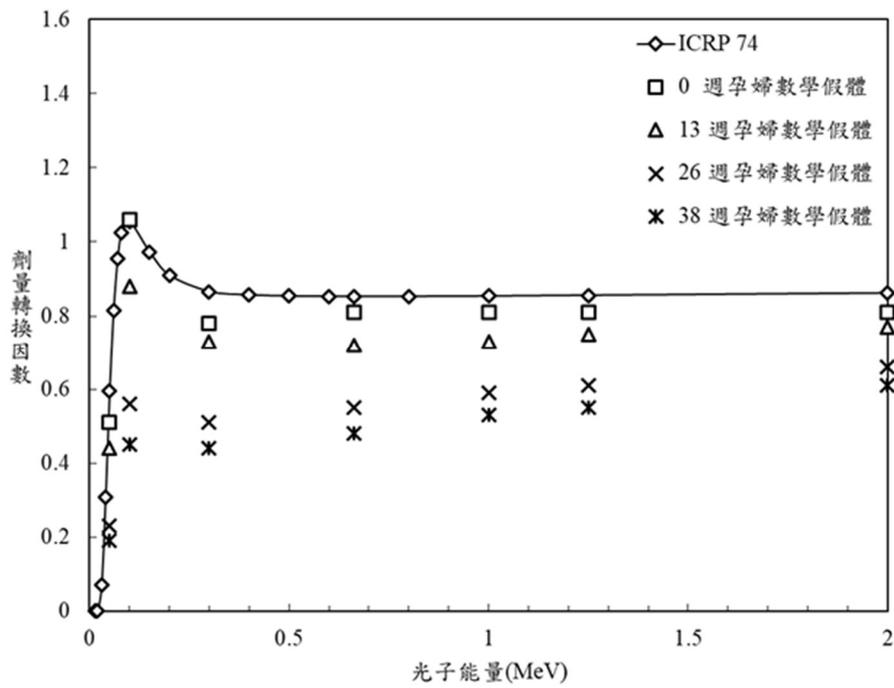


圖 4-6、模擬結果與 ICRP74 報告轉換係數比值比較(PA)

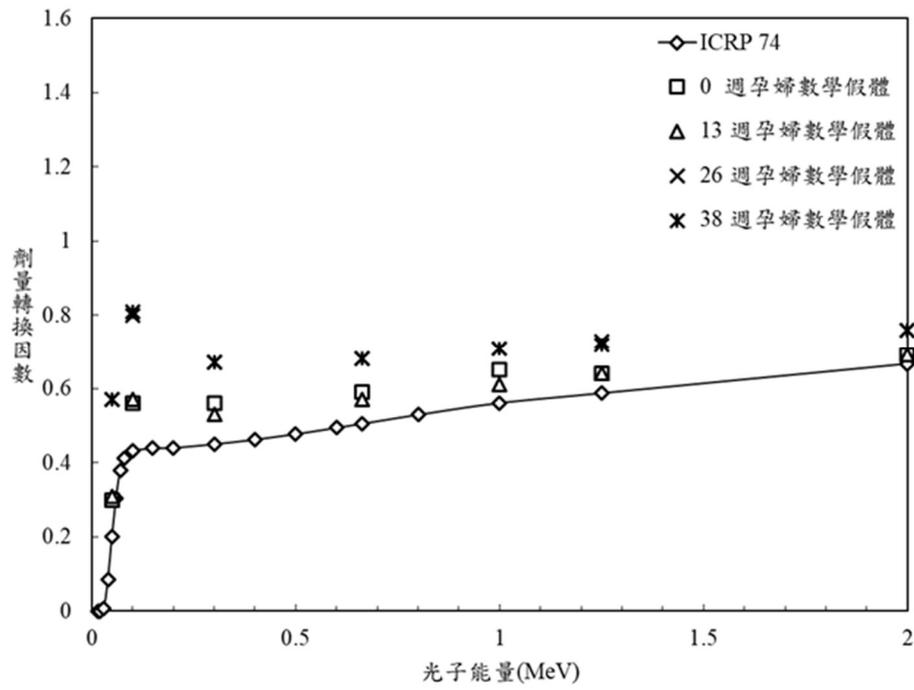


圖 4-7、模擬結果與 ICRP74 報告轉換係數比值比較(LLAT)

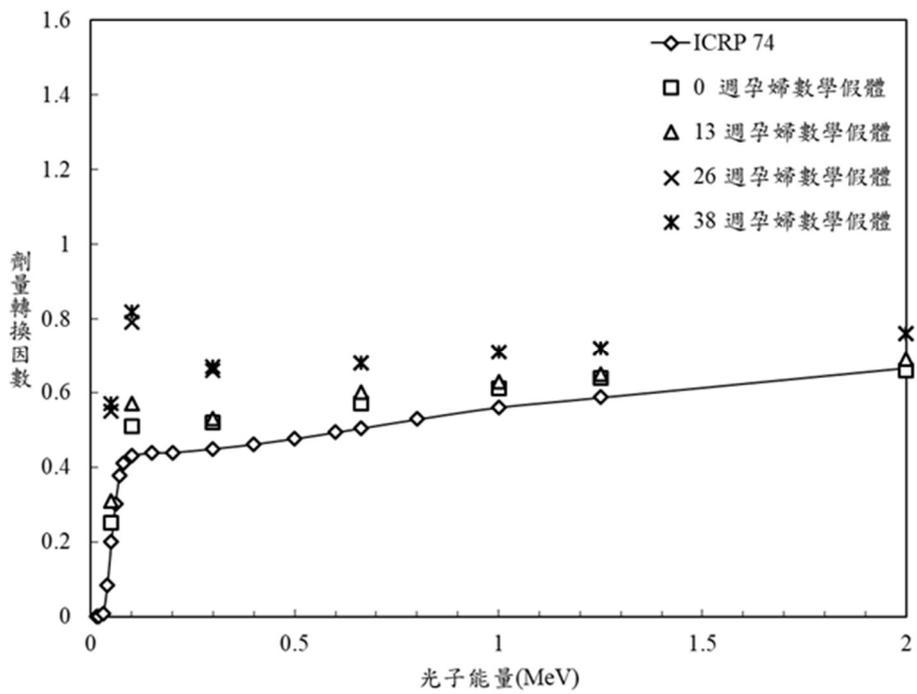


圖 4-8、模擬結果與 ICRP74 報告轉換係數比值比較(RLAT)

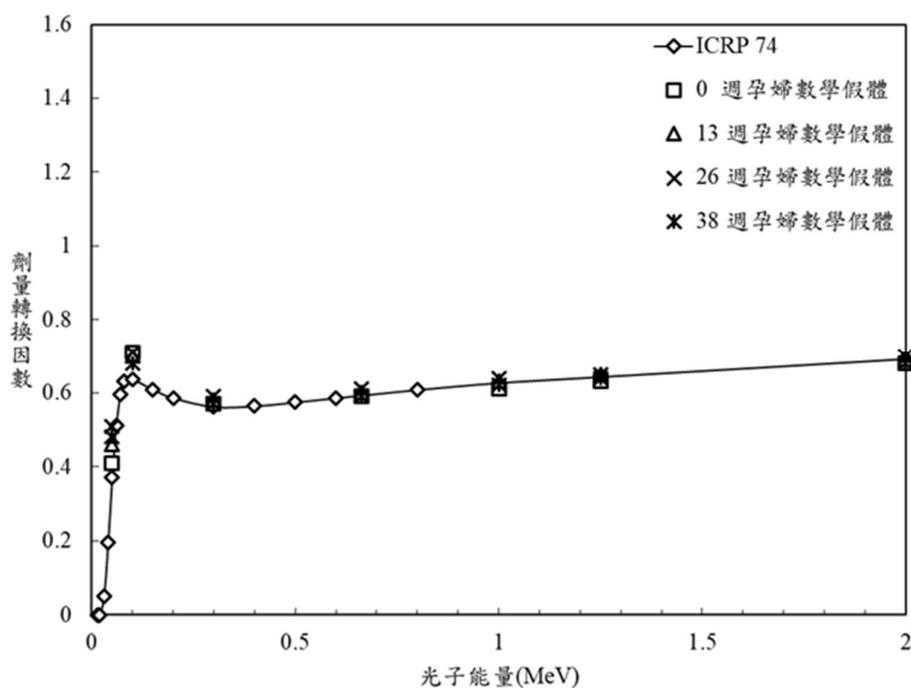


圖 4-9、模擬結果與 ICRP74 報告轉換係數比值比較(ISO)

表 4-3 懷孕婦女體內胎兒劑量轉換係數比較

| 體型 | 射源形狀 | 妊娠期(週) | | | |
|-------------------|------|--------|------|------|------|
| | | 0 個月 | 3 個月 | 6 個月 | 9 個月 |
| ORNL 懷孕婦女 數學假體 | 大面射源 | 0.52 | 0.62 | 0.47 | 0.38 |
| | 小面射源 | 0.47 | 0.58 | 0.37 | 0.28 |
| 台灣懷孕婦女腹 部假體 | 大面射源 | - | 0.43 | 0.44 | 0.43 |
| | 小面射源 | - | 0.36 | 0.34 | 0.33 |

第二部分使用 ORNL 懷孕婦女數學假體及台灣懷孕婦女腹部假體進行 MCNP 模擬，表 4-3 結果顯示，在兩種面射源照射下，ORNL 孕婦假體及台灣懷孕婦女腹部假體之劑量轉換係數大面射源皆高於小面射源，主要因為小面射源集中照射腹部區域對於腹部表面劑量值較高，因此小面積射源的劑量轉換係數較小，另外，ORNL 孕婦假體之劑量轉換係數普

遍高於台灣懷孕婦女腹部假體之劑量轉換係數，是受到子宮分布的位置影響，由於 ORNL 孕婦假體的子宮位置較貼近腹部表面，因此子宮平均接受劑量較高，但隨著孕期的增加，子宮體積位於深處的比例上升，兩者的劑量差異逐漸縮小。

本研究已完成孕婦皮膚表面劑量轉換子宮劑量的劑量轉換係數，探討台灣懷孕婦女子宮大小之數學假體及 ORNL 孕婦數學假體在三種孕期(第 3 個月、第 6 個月、及第 9 個月)之胎兒(子宮)劑量評估。由上述研究結果顯示，劑量轉換係數主要受到人種體型影響，以及懷孕婦女子宮分布的位置，其次則會受到射源大小與能量以及妊娠週期影響，因為低能量光子將會衰減於淺部區域組織中，隨著孕期增加，深部組織比例上升，轉換係數將會逐漸縮小。本研究所使用的台灣懷孕婦女腹部假體，為實體壓克力假體轉為數學假體，未來建議以體素假體方式精進台灣懷孕婦女假體之劑量評估技術，以供輻射工作人員輻射風險之參考依據。

2. 執行眼球水晶體劑量監測系統於低能量光子輻射場之校正技術研究(含學術合作的核醫藥物與透視攝影作業操作人員的劑量評估：手掌/眼球水晶體等價劑量與全身有效劑量的關係之技術服務)

核研所人員體外劑量評估實驗室利用 Thermo Fisher 8800 PLUS 計讀系統，搭配符合計讀儀之規格之型號 DOSIRIS 劑量計執行特性研究。DOSIRIS 是法國國家實驗室發展的髮箍式劑量計，晶片是使用 Harshaw DXT-RAD 系列，符合選用 DXT-100 系列。劑量計可調整位置於鉛眼鏡後方配合使用。目前國內 8 家人員劑量評估實驗室，有 4 家劑量計廠牌同為 Harshaw 系統，推論 DOSIRIS 可能為台灣未來最常見的劑量計系統。

| | |
|---|--|
| <p>眼球水晶體劑量計系統操作程序書</p> <p>邱敏琦</p> <p>插 畫</p> <p>本程序書依據 ISO 17025 實驗室品質管理標準及游離輻射防護法之要求，利用 Harshaw 8800 PLUS 計讀系統評估劑量模式之作業程序，執行眼球水晶體劑量評估時之各項作業程序。本程序書共包含四項作業程序，分別是計讀儀系統校正、環形 TLD 晶片回火、計讀、及眼球水晶體劑量計算的作業程序。</p> <p>關鍵字：熱發光劑量計、眼球水晶體劑量計。</p> <p>核能研究所保健物理組</p> <p>ii</p> | <p>目 錄</p> <p>1. 前言 1</p> <p>2. 眼球水晶體劑量計與計讀系統之介紹 1</p> <p> 2.1 眼球水晶體劑量計 1</p> <p> 2.2 計讀系統 4</p> <p>3. 名詞解釋 1</p> <p>4. 操作步驟 3</p> <p> 4.1 HARSHAW 8800 PLUS TLD 計讀儀系統校正 3</p> <p> 4.2 環型 TLD 晶片回火 11</p> <p> 4.3 環型 TLD 晶片計讀程序 14</p> <p> 4.4 眼球水晶體劑量計算 19</p> <p>5. 操作注意事項 24</p> <p>參考文獻 25</p> <p>附件 1、佩章照射資料紀錄表 26</p> <p>附件 2、眼球水晶體等效劑量參數試算表 27</p> <p>iii</p> |
|---|--|

圖 4-11、眼球水晶體劑量計系統操作程序書摘要及目錄

本計畫已完成眼球水晶體劑量評估作業程序之研究，包含：計讀儀系統校正、環形熱發光劑量計(thermoluminescent dosimeters, TLD)晶片回火、計讀、及眼球水晶體劑量計算的標準作業程序(圖 4-11)。

DOSIRIS 眼球水晶體劑量計之性能測試包含：眼球水晶體劑量計相互干擾分析、劑量線性度評估、及 ISO NS 射質之能量依存性及角度依存性評估。

- 劑量計相互干擾分析：為評估眼球水晶體劑量計照射時，劑量計位置彼此干擾程度，將劑量計置於圓柱形假體表面進行照射(圖 4-12)，測試結果如表 4-4 所示，同時照射 5 個劑量計可忽略劑量計相互間之干擾；
- 劑量線性度評估：以 ISO N-40 射質照射劑量計之結果顯示眼球水晶體劑量計呈現線性正相關(圖 4-13)，劑量在 1 mSv 至 10 mSv 時，評估值與照射劑量之間有良好的線性關係($R^2=0.9995$)；
- ISO NS 射質之能量依存性評估：而劑量計在不同能量之

照射結果顯示其計讀結果具能量依存性(圖 4-14 及表 4-5)，以 N-80 光子能量(65.2 keV)作為歸一化基準，其劑量計量測平均光子能量在 33 keV 至 662keV 之間時，能量依存性修正因子為 0.784 至 1.197 之間；

- 角度依存性評估：劑量計在不同射源入射角度之計量結果顯示，劑量計在 $\pm 60^\circ$ 時的角度依存性差異性很小($\pm 2.0\%$)，當射束與計量計平行($\pm 90^\circ$)時，角度依存性須納入考慮(圖 4-15)。

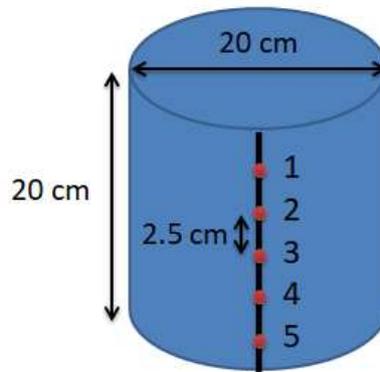


圖 1-12、眼球水晶體劑量計照射位置示意圖

表 4-4、眼球水晶體劑量計相互干擾分析測試結果

| Positon | Card ID | TL 讀值 | |
|---------|---------|-------|-------|
| 3 | 12-1 | 30769 | 3.239 |
| 2 | 13-2 | 30726 | 3.129 |
| 4 | 13-3 | 30803 | 3.227 |
| 2 | 13-4 | 30714 | 3.266 |
| 3 | 13-5 | 30904 | 3.218 |
| 4 | 13-6 | 30789 | 3.188 |
| 2 | 13-7 | 30868 | 3.277 |
| 3 | 13-8 | 30794 | 3.349 |
| 4 | 13-9 | 30912 | 3.256 |
| 5 | 13-10 | 30874 | 3.223 |
| 1 | 2-1 | 30826 | 3.271 |
| 2 | 2-2 | 30790 | 3.226 |
| 3 | 2-3 | 30807 | 3.194 |
| 4 | 2-4 | 30892 | 3.115 |
| 5 | 2-5 | 30917 | 3.296 |
| 平均值 | | | 3.232 |
| 百分誤差 | | | 1.87% |

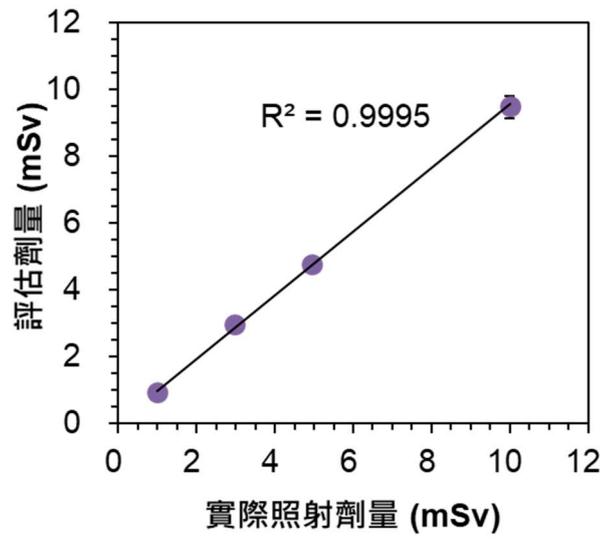


圖 4-13、眼球水晶體劑量計劑量線性測試結果

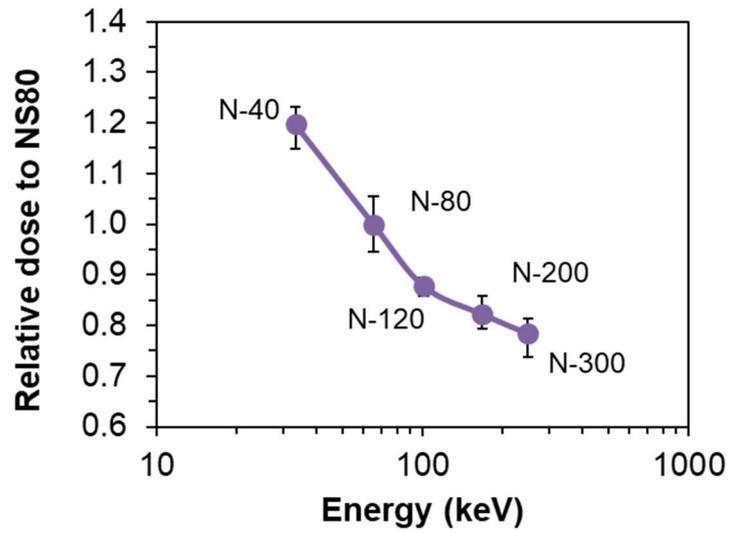


圖 4-14、眼球水晶體劑量計能量依存性測試結果

表 4-5、眼球水晶體劑量計在不同 ISO N-射質之能量轉換因子

| ISO 射質 | 平均能量(keV) | 能量依存性 修正因子 |
|--------|-----------|---------------|
| N-40 | 33.20 | 1.197 |
| N-80 | 65.20 | 1.000 |
| N-120 | 101.00 | 0.877 |
| N-200 | 167.80 | 0.822 |
| N-300 | 249.00 | 0.784 |
| Cs-137 | 662.00 | 0.848 |

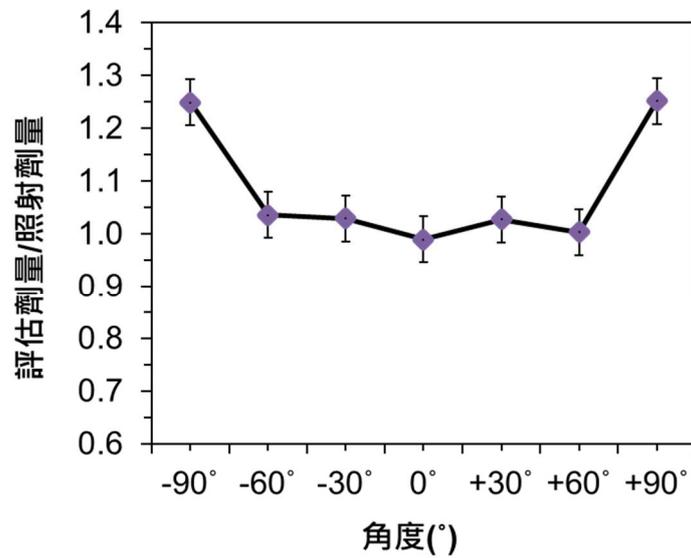


圖 4-15、眼球水晶體劑量計角度依存性測試結果

主管機關為了解國內介入性放射診療醫師及其協助醫事人員、核子醫學科打針、配藥醫事人員及相關輻射工作人員，職業曝露眼球水晶體劑量現況，預計進行眼球水晶體劑量監測的兩年期訪查計畫。今年度的先期訪查為主管機關為了盡速推行眼球水晶體劑量計配戴實政策，臨時交辦計畫。期程為 110 年 10 月，監測 1 個月，參與單位：國立台○大學醫學院附設醫院 (30 位，3 類科別)、臺北榮○總醫院(27 位，3 類科別)、長○醫療財團法人林○長○紀念醫院(28 位，4 類科別)、長○醫療財團法人高○長○紀念醫院(37 位，3 類科別)、衛生福利部桃○醫院(5 位，5 類科別)、核研所同○素組(13 位，2 類別)，圖 4-16 為參與工作族群之人數分佈，其中介入性放射診療醫師：心臟內科 61 人、放射診斷科 25 人、外科 1 人及骨科 1 人；介入性放射診療醫事人員皆為心臟內科護理師及放射師。

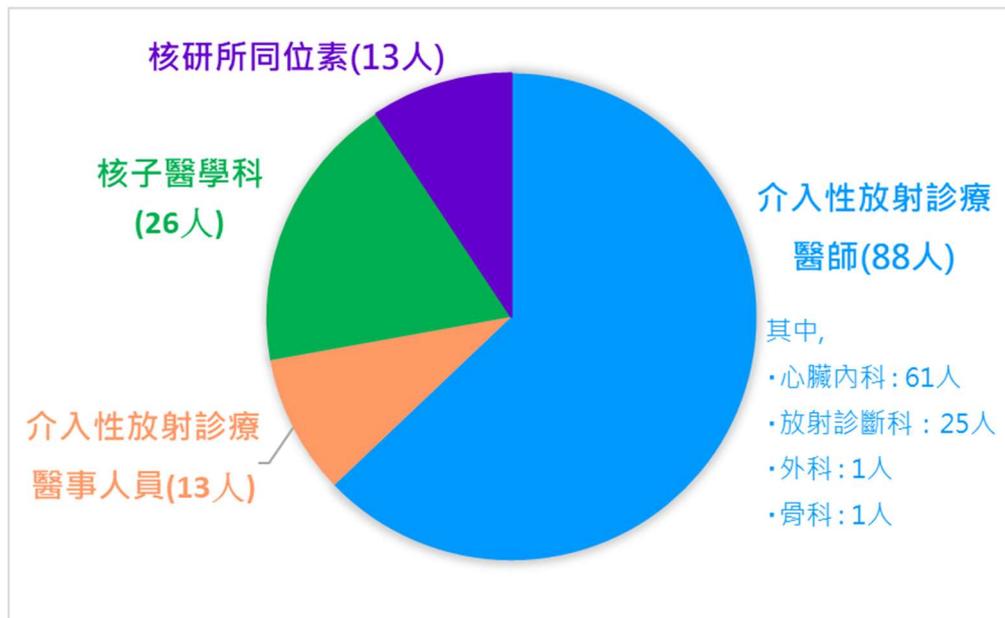


圖 4-16、參與工作族群之人數分佈圖

另針對醫療院所設計眼球水晶體監測先期訪查紀錄表(圖4-17)，以了解介入性放射診療醫師及其協助醫事人員與核子醫學科打針、配藥醫事人員，執行輻射作業時相關曝露時數與使用防護設備等情形，本次共發放 127 份，回收 115 份(92%)，使用防護設備調查結果顯示，核子醫學科主要使用防護設備為鉛玻璃及鉛磚，而介入性放射診療之醫師及醫事人員使用防護設備有：~96%執行介入性放射診療時穿著鉛衣及鉛脖圍；~89%使用鉛玻璃；~81%使用診療床鉛帷幕；~65%配戴鉛眼鏡。

附件三

職業工作人員眼球水晶體劑量監測試運轉紀錄表(4/4)

1. 姓名：_____
2. 本周填表時間：110 年 10 月 25 日至 110 年 10 月 31 日
3. 職業類別：醫師 放射師 護理師 其他_____
4. 科別：放射診斷科 心臟內/外科 核子醫學科
其他_____
5. 本周執行診療項目及案例次數為：
頭部_____次 心血管_____次 胸腹部_____次
四肢_____次 泌尿攝影_____次
其他_____
6. 每周受曝露時數：
5 小時以內 6-10 小時 11-15 小時 16-20 小時
21-25 小時 26-30 小時 其他_____
7. 施作時是否使用防護設備
有 否 鉛衣
有 否 鉛脖圍
有 否 鉛玻璃
有 否 診療床鉛帷幕
有 否 鉛眼鏡
其他_____
8. 其他建議與回饋事項：

圖 4-17、眼球水晶體監測先期訪查紀錄表

為評估核醫藥物與透視攝影作業操作人員的劑量評估，本計畫與清華大學進行學術合作，以臨床核醫與透視攝影操作人員的劑量評估與輻射安全為主要內容，於4月15日提出「110年度核醫藥物與透視攝影作業操作人員的劑量評估」之購案，並於5月12日完成決標，決標金額582千元整，訂約日期為5月21日。

本研究以MCNP與PIMAL程式建立符合臨床曝露情形之模型，如圖4-18所示，模擬射源幾何與假體幾何進行應用案例之輻射劑量評估。

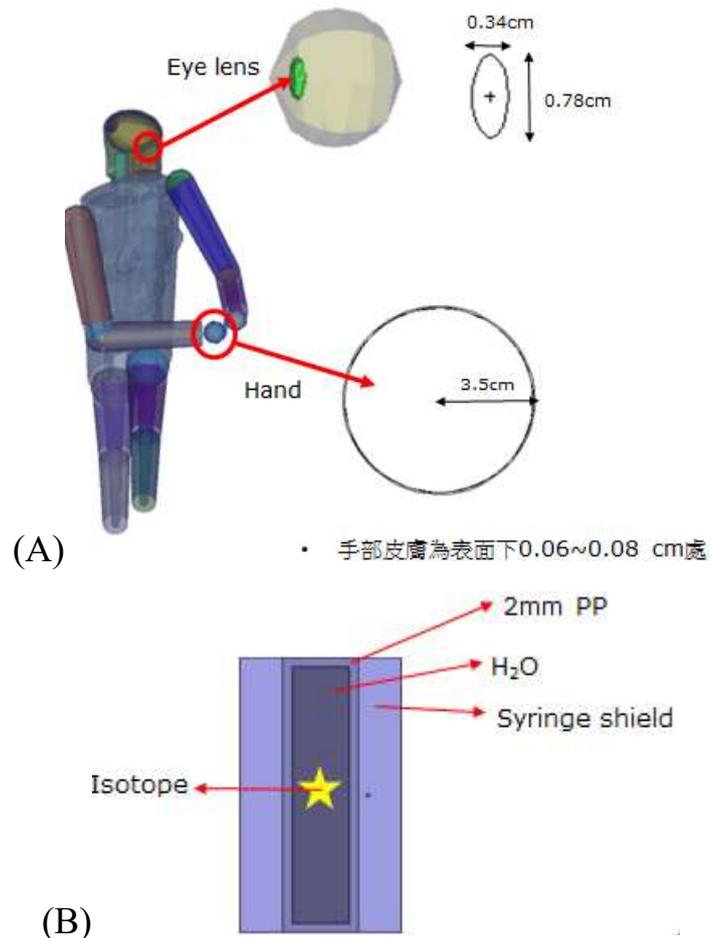


圖 4-18、(A)射源幾何模擬、(B)PIMAL 模型參數設定

本研究分別探討兩個常見的應用案例：(1)工作人員以手近距離處理核醫藥物的情節；(2)醫療人員執行螢光透視攝影的情節。分別探討在不同曝露條件下工作人員所接受的手部、眼球水晶體等價劑量與全身有效劑量，我們也能從劑量間的比值關係，從有效劑量回推水晶體劑量，以便在相關劑量規範調整後進行劑量回溯研究，從已知的有效劑量資料評估手部或眼球水晶體所接受到的輻射風險。應用案例(1)為探討工作人員以手近距離處理核子醫學科常見放射性同位素射源，如 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{123}I 、 ^{131}I 、 ^{18}F 時，工作人員所接受到的手部、眼球水晶體以及全身有效劑量。考量臨床所使用的屏蔽情形，模擬了四種不同的照射情境，如圖 4-19 至圖 4-21 所示，分別在無屏蔽直接以手接觸射源、僅考慮射源針筒屏蔽、僅考慮 L 型鉛屏蔽與兩種屏蔽皆使用的情形，並將劑量率結果整理如表 4-6 與圖 4-22 所示，建立了類似 Γ 常數之劑量轉換因子，將之乘上核種的活度與接觸時間，即可獲得工作人員的手部與眼球水晶體等價劑量與全身有效劑量。

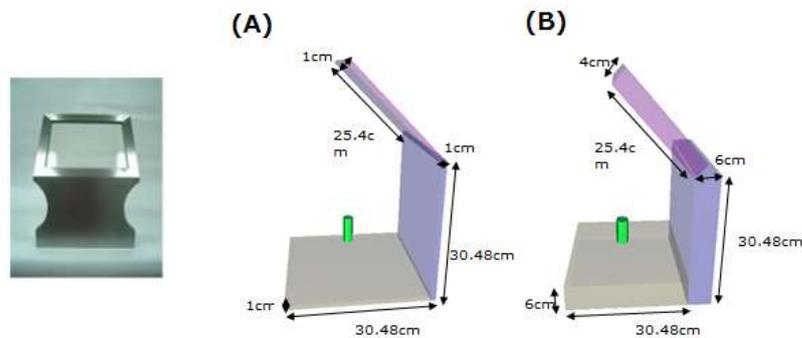


圖 4-19、核子醫學科常用 L 型屏蔽。(A)鉛屏蔽厚 1cm：
 ^{201}Tl / $^{99\text{m}}\text{Tc}$ / ^{123}I / ^{67}Ga 、(B)鉛屏蔽厚 6 cm 外加 4 cm 鉛窗：
 ^{131}I / ^{18}F

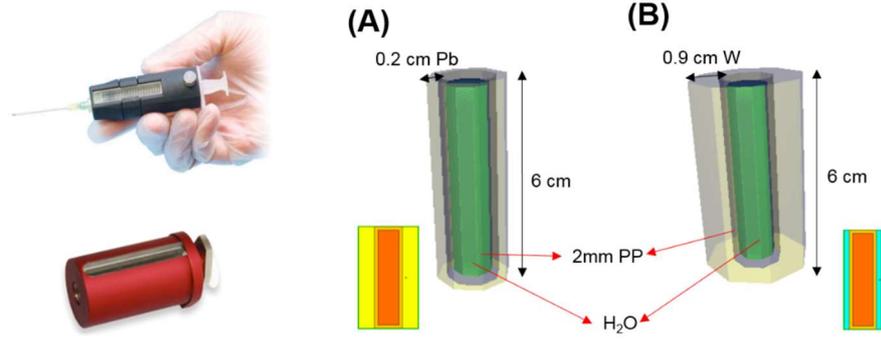


圖 4-20、核子醫學科常用針筒屏蔽。(A)鉛屏蔽厚 2 mm：
 ^{201}Tl / $^{99\text{m}}\text{Tc}$ / ^{123}I / ^{67}Ga 、(B)鎢屏蔽厚 9 mm： ^{131}I / ^{18}F

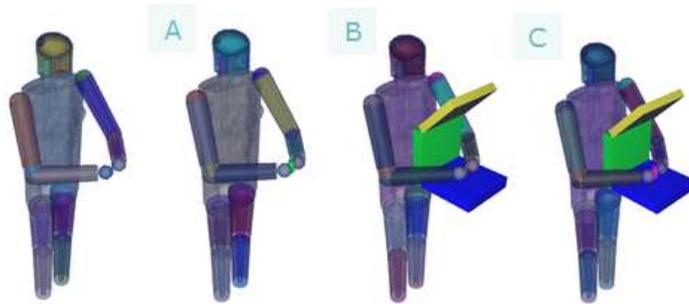


圖 4-21、屏蔽情境。(A)針筒屏蔽、(B)L 型屏蔽、(C)針筒加 L 型
 屏蔽

表 4-6、同位素在不同屏蔽條件下之劑量率(D_{hand} , $D_{hand\ skin}$, D_{lens} , E)

| Dose rate | | None | | Syringe shield(A) | | Lead shield(B) | | Both(C) | |
|-------------------|------------|----------|-------|-------------------|-------|----------------|--------|----------|--------|
| | | pSv/Bq s | re | pSv/Bq s | re | pSv/Bq s | re | pSv/Bq s | re |
| ^{201}Tl | D_{hand} | 1.56E-03 | 0.04% | 1.56E-06 | 0.37% | 1.57E-03 | 0.01% | 1.89E-06 | 0.07% |
| | D_{lens} | 1.27E-05 | 2.85% | 8.04E-08 | 0.51% | 8.33E-08 | 10.69% | 1.39E-09 | 15.81% |
| | E | 2.27E-05 | 0.26% | 5.55E-08 | 1.99% | 1.04E-07 | 1.08% | 5.72E-10 | 2.98% |
| ^{99m}Tc | D_{hand} | 1.83E-03 | 0.03% | 8.34E-07 | 0.36% | 1.85E-03 | 0.01% | 2.17E-06 | 0.04% |
| | D_{lens} | 1.63E-05 | 2.32% | 1.66E-07 | 6.43% | 1.01E-07 | 8.67% | 1.55E-09 | 10.20% |
| | E | 2.68E-05 | 0.21% | 8.04E-08 | 1.45% | 1.46E-07 | 0.73% | 1.15E-09 | 1.36% |
| ^{123}I | D_{hand} | 1.97E-03 | 0.03% | 7.75E-07 | 0.36% | 1.99E-03 | 0.01% | 6.38E-06 | 0.03% |
| | D_{lens} | 1.77E-05 | 2.32% | 1.54E-07 | 6.43% | 9.17E-08 | 8.58% | 1.65E-09 | 14.39% |
| | E | 2.78E-05 | 0.21% | 7.46E-08 | 1.45% | 1.43E-07 | 0.72% | 1.32E-09 | 1.81% |
| ^{67}Ga | D_{hand} | 2.08E-03 | 0.03% | 2.33E-04 | 0.03% | 2.10E-03 | 0.01% | 2.35E-04 | 0.02% |
| | D_{lens} | 1.82E-05 | 2.69% | 1.17E-06 | 3.91% | 1.83E-07 | 8.99% | 2.06E-08 | 12.80% |
| | E | 2.88E-05 | 0.24% | 2.76E-06 | 0.26% | 2.32E-07 | 0.72% | 3.67E-08 | 0.87% |
| ^{131}I | D_{hand} | 6.08E-03 | 0.03% | 3.10E-04 | 0.04% | 6.10E-03 | 0.01% | 3.04E-04 | 0.01% |
| | D_{lens} | 4.93E-05 | 2.52% | 1.34E-06 | 4.93% | 1.50E-07 | 12.95% | 1.14E-08 | 12.74% |
| | E | 7.17E-05 | 0.23% | 3.39E-06 | 0.32% | 2.16E-07 | 0.82% | 1.26E-08 | 0.92% |
| ^{18}F | D_{hand} | 1.69E-02 | 0.08% | 2.24E-03 | 0.02% | 1.70E-02 | 0.01% | 2.25E-03 | 0.01% |
| | D_{lens} | 1.44E-04 | 7.72% | 8.01E-06 | 2.98% | 6.01E-07 | 10.25% | 5.97E-08 | 13.33% |
| | E | 1.92E-04 | 0.72% | 2.38E-05 | 0.17% | 5.57E-07 | 0.80% | 7.84E-08 | 0.91% |

註：re 為相對誤差(relative error)

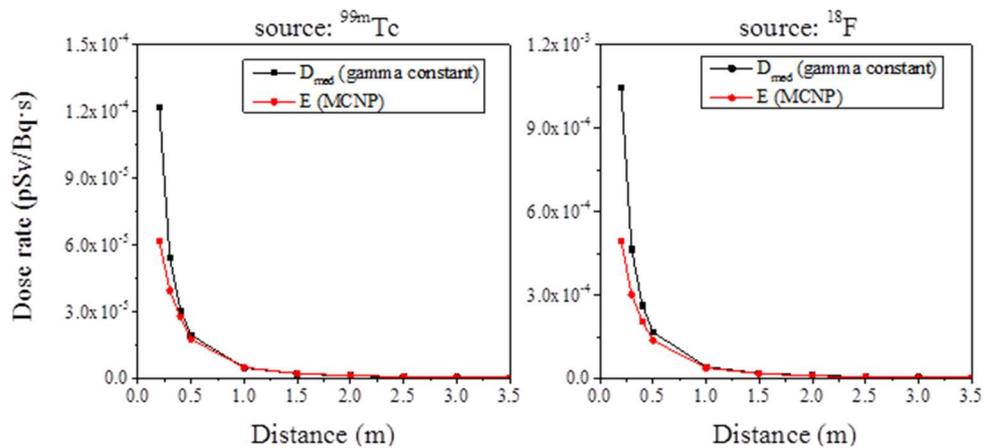


圖 4-22、^{99m}Tc 和 ¹⁸F 不同距離下模擬結果與簡化法之劑量率比較

觀察不同屏蔽用具所影響的劑量衰減程度，將 6 種同位素區分為低能量(²⁰¹Tl、⁶⁷Ga、^{99m}Tc、¹²³I)與高能量(¹³¹I、¹⁸F)類別，分別在低能時使用 0.2 cm 鉛針筒屏蔽與 1 cm 的 L 型鉛屏蔽，高能時使用 0.9 cm 鎢針筒屏蔽與 4~6 cm 的 L 型鉛屏蔽，鉛針筒屏蔽約可將低能射源所造成之手部、眼球水晶體與有效劑量降至 3% 以下，而鎢針筒屏蔽約可將高能射源所造成之手部與有效劑量降至 10% 以下，眼球水晶體劑量降至 5% 以下。而 L 型鉛屏蔽則可以使眼球水晶體與全身有效劑量降為 1% 以下，除了對手部沒有防護的作用外，模型中針筒屏蔽與 L 型鉛玻璃屏蔽的使用，皆能有效降低所接受到的劑量。

本研究也建立了工作人員的手部與眼球水晶體等價劑量與全身有效劑量的量化關係，如表 4-7 與 4-8，將其量化趨勢以圖 4-23 表示。 D_{lens}/E 在無屏蔽情況下平均為 0.65，在僅考慮有 L 型屏蔽下為 0.78，而兩種屏蔽皆考慮的情形下 D_{lens}/E 約為 1.21。 D_{hand}/E 在無屏蔽時平均為 68.12，在有針筒屏蔽使用的情境下約在 10~100 之間，使用 L 型鉛屏蔽後 D_{hand}/E 範圍

為 8000~270000 之間。由於核種所放出光子數量與能量不同，外層屏蔽所造成的劑量衰減與平均能量之關聯性較無特定規律，但仍可以在特定情節下由 D_{lens}/E , D_{hand}/E 數值，將有效劑量合理回推水晶體劑量及手部劑量。

表 4-7：核子醫學科常見射源於不同屏蔽條件下
眼球水晶體與全身有效劑量間比值

| D_{lens}/E | None | Syringe Shield(A) | L-block(B) | Both(C) |
|--------------------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|
| ^{201}Tl | 0.56 ±2.86% | 1.45 ±2.05% | 0.80 ±10.74% | 2.43 ±16.09% |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 0.61 ±2.33% | 2.07 ±6.59% | 0.69 ±8.70% | 1.35 ±10.29% |
| ^{123}I | 0.64 ±2.33% | 2.07 ±6.59% | 0.64 ±8.61% | 1.25 ±14.50% |
| ^{67}Ga | 0.63 ±2.70% | 0.42 ±3.92% | 0.79 ±9.02% | 0.56 ±12.83% |
| ^{131}I | 0.69 ±2.53% | 0.40 ±4.94% | 0.70 ±12.98% | 0.91 ±12.77% |
| ^{18}F | 0.75 ±7.75% | 0.34 ±2.99% | 1.08 ±10.28% | 0.76 ±13.36% |
| Average | 0.65 ±10.54% | 1.12 ±17.53% | 0.78 ±25.41% | 1.21 ±39.94% |

表 4-8：核子醫學科常見射源於不同屏蔽條件下
手部與全身有效劑量間比值

| D_{hand}/E | None | Syringe Shield(A) | L-block(B) | Both(C) |
|--------------------------|--------------|-------------------|--------------|---------------|
| ^{201}Tl | 58.43 ±0.26% | 29.11 ±2.01% | 12683 ±1.08% | 3300 ±2.98% |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 62.52 ±0.21% | 10.70 ±1.48% | 11641 ±0.73% | 1809 ±1.36% |
| ^{123}I | 64.79 ±0.21% | 10.70 ±1.48% | 12720 ±0.72% | 4901 ±1.81% |
| ^{67}Ga | 66.04 ±0.24% | 80.27 ±0.26% | 8275 ±0.82% | 6076 ±0.87% |
| ^{131}I | 76.94 ±0.23% | 89.25 ±0.32% | 25602 ±0.82% | 24787 ±0.92% |
| ^{18}F | 79.98 ±0.72% | 91.14 ±0.17% | 27657 ±0.80 | 27704 ± 0.91% |
| Average | 68.12 ±0.98% | 51.86 ±1.42% | 16430 ±2.20% | 11430 ±3.22% |

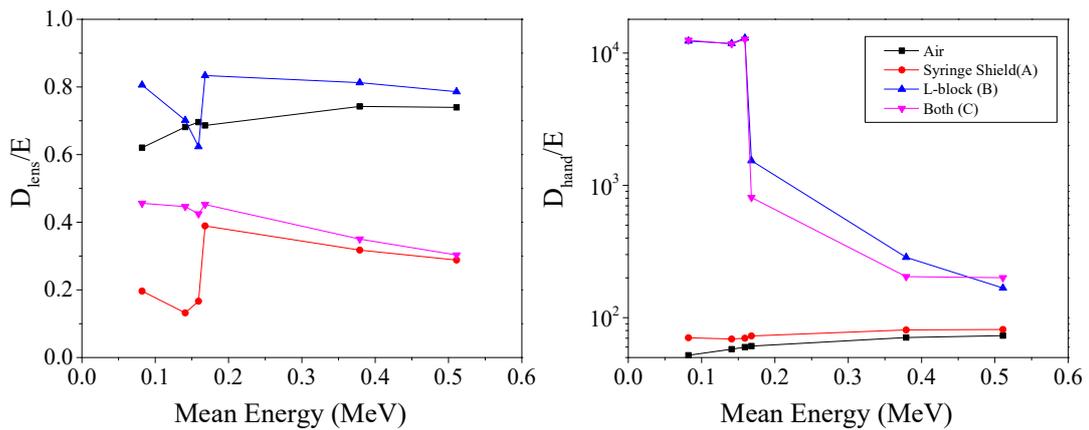


圖 4-23：核子醫學科常見射源於不同屏蔽條件下的手部、眼球水晶體與

全身有效劑量之間比值與能量的關係

應用案例(2)為工作人員操作螢光透視攝影的劑量評估：本案例探討工作人員執行頭部、心臟與腹部透視攝影，管電壓為 80、100、120 kVp 的照射條件時，所接受到的手部、眼球水晶體以及全身有效劑量。對應臨床實際進行造影時所使用的輻射防護設備，模擬四種不同照射情境，分別為無防護、僅使用個人防護(鉛衣與鉛眼鏡)、僅使用固定式防護(懸掛式鉛玻璃與鉛簾)，以及兩種類型防護皆使用之情形。將手部、眼球水晶體以及全身有效劑量結果，除以穿透式游離腔之劑量面積乘積 (dose area product, DAP) 進行標準化，建立劑量轉換因子 E/DAP 、 D_{lens}/DAP 、 D_{hand}/DAP ，如表 4-9 至表 4-11 所示。將以上數值在臨床應用時乘上機器顯示之 DAP 值，即可獲得工作人員的手部與眼球水晶體等價劑量與全身有效劑量。

表 4-9：頭部攝影所造成醫療人員劑量結果彙整 (單位:μSv/Gy/cm²)

| | Tube voltage | None | Mounted | Personal | Both |
|----------------------------|---------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| E / DAP | 80kVp | 3.23E-01 ±2.20% | 1.69E-01 ±3.49% | 2.80E-02 ±3.02% | 9.03E-03 ±4.83% |
| | 100kVp | 4.60E-01 ±1.86% | 2.41E-01 ±2.97% | 4.57E-02 ±3.06% | 1.59E-02 ±4.14% |
| | 120kVp | 5.74E-01 ±1.62% | 2.98E-01 ±2.58% | 6.25E-02 ±2.74% | 2.31E-02 ±3.61% |
| D _{hand} / DAP | 80kVp | 3.32E-01 ±1.29% | 1.82E-01 ±1.67% | 3.16E-01 ±1.32% | 1.75E-01 ±1.20% |
| | 100kVp | 4.32E-01 ±1.15% | 2.57E-01 ±1.42% | 4.06E-01 ±1.18% | 2.47E-01 ±1.02% |
| | 120kVp | 5.18E-01 ±1.04% | 3.28E-01 ±1.25% | 4.82E-01 ±1.09% | 3.14E-01 ±0.91% |
| D _{lens} / DAP | 80kVp | 6.49E-01 ±9.29% | 1.23E-01 ±22.86% | 3.88E-01 ±11.90% | 5.20E-02 ±20.34% |
| | 100kVp | 8.22E-01 ±8.18% | 1.61E-01 ±14.98% | 5.15E-01 ±10.04% | 9.69E-02 ±15.71% |
| | 120kVp | 1.00E+00 ±7.23% | 2.26E-01 ±14.21% | 6.49E-01 ±8.97% | 1.39E-01 ±12.30% |

表 4-10：心臟攝影所造成醫療人員劑量結果彙整(單位:μSv/Gy/cm²)

| | Tube voltage | None | Mounted | Personal | Both |
|----------------------------|---------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| E / DAP | 80kVp | 7.23E-01 ±1.69% | 5.85E-01 ±2.01% | 1.64E-02 ±6.58% | 5.49E-03 ±10.22% |
| | 100kVp | 1.00E+00 ±1.42% | 7.82E-01 ±1.72% | 3.12E-02 ±4.40% | 1.30E-02 ±6.27% |
| | 120kVp | 1.26E+00 ±1.23% | 9.59E-01 ±1.52% | 5.23E-02 ±4.02% | 2.39E-02 ±4.87% |
| D _{hand} / DAP | 80kVp | 2.20E-01 ±1.53% | 1.57E-01 ±1.75% | 1.95E-01 ±1.62% | 1.41E-01 ±1.30% |
| | 100kVp | 3.46E-01 ±1.24% | 2.61E-01 ±1.38% | 3.07E-01 ±1.31% | 2.34E-01 ±1.04% |
| | 120kVp | 4.64E-01 ±1.06% | 3.60E-01 ±1.19% | 4.07E-01 ±1.14% | 3.19E-01 ±0.89% |
| D _{lens} / DAP | 80kVp | 6.60E-01 ±8.14% | 9.17E-02 ±21.68% | 4.06E-01 ±10.55% | 4.71E-02 ±21.32% |
| | 100kVp | 9.19E-01 ±6.95% | 2.28E-01 ±14.03% | 4.97E-01 ±9.72% | 9.77E-02 ±15.39% |
| | 120kVp | 1.24E+00 ±5.94% | 2.32E-01 ±13.41% | 6.96E-01 ±7.92% | 1.13E-01 ±13.53% |

表 111：腹部攝影所造成醫療人員劑量結果彙整(單位: $\mu\text{Sv}/\text{Gy}/\text{cm}^2$)

| | Tube voltage | None | Mounted | Personal | Both |
|----------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| E / DAP | 80kVp | 1.29E+00 \pm 1.28% | 8.08E-01 \pm 1.60% | 1.73E-02 \pm 6.89% | 8.45E-03 \pm 7.39% |
| | 100kVp | 1.77E+00 \pm 1.06% | 1.11E+00 \pm 1.33% | 3.81E-02 \pm 4.97% | 2.14E-02 \pm 4.79% |
| | 120kVp | 2.20E+00 \pm 0.94% | 1.38E+00 \pm 1.15% | 6.69E-02 \pm 3.85% | 3.89E-02 \pm 3.70% |
| $D_{\text{hand}} /$ DAP | 80kVp | 4.71E-01 \pm 1.02% | 3.64E-01 \pm 1.13% | 4.19E-01 \pm 1.08% | 3.31E-01 \pm 0.84% |
| | 100kVp | 7.44E-01 \pm 0.83% | 6.02E-01 \pm 0.90% | 6.58E-01 \pm 0.88% | 5.44E-01 \pm 0.66% |
| | 120kVp | 9.96E-01 \pm 0.72% | 8.24E-01 \pm 0.77% | 8.82E-01 \pm 0.76% | 7.49E-01 \pm 0.57% |
| $D_{\text{lens}} /$ DAP | 80kVp | 6.38E-01 \pm 7.73% | 3.06E-01 \pm 11.11% | 3.97E-01 \pm 9.67% | 1.93E-01 \pm 9.71% |
| | 100kVp | 1.18E+00 \pm 6.27% | 4.67E-01 \pm 9.39% | 6.89E-01 \pm 8.31% | 2.59E-01 \pm 8.95% |
| | 120kVp | 1.70E+00 \pm 5.32% | 6.97E-01 \pm 7.84% | 1.05E+00 \pm 6.83% | 4.09E-01 \pm 7.26% |

為了瞭解診斷用 X 光能譜射源經模型中物件散射後，造成工作人員體內不同器官所接受到的劑量差異，本研究之 E/DAP、 D_{lens}/DAP 、 D_{hand}/DAP 結果顯示在管電壓增加時，得到的值有上升的趨勢，在無防護情況下每增加 20kVp 約能夠增加有效劑量為原先的 1.2~1.4 倍。當管電壓 80kVp 時，射束位置由頭部改變為心臟使 E/DAP 增加至 2.24 倍，由心臟改變為腹部使 E/DAP 增加至 1.78 倍， D_{lens}/DAP 與 D_{hand}/DAP 也有相同劑量變化趨勢，但在射源位置心臟改變為腹部則較不明顯。

探討防護用具對於劑量的影響程度時，分別計算在使用個人與固定式防護時劑量之衰減比例，如表 4-12，相比於無防護情境，個人防護能使 E/DAP 下降 89~99%，而固定式防護能使 D_{lens}/DAP 下降 50~80%。

表 4-12：頭部、心臟、腹部攝影使用個人與固定式防護

所造成劑量衰減比例

| Head | None | Mounted | Personal | Both |
|-------------------------|------|---------|----------|------|
| E/DAP (80kVp) | 0% | 48% | 91% | 97% |
| E/DAP (100kVp) | 0% | 48% | 90% | 97% |
| E/DAP (120kVp) | 0% | 48% | 89% | 96% |
| D_{hand}/DAP (80kVp) | 0% | 45% | 5% | 47% |
| D_{hand}/DAP (100kVp) | 0% | 41% | 6% | 43% |
| D_{hand}/DAP (120kVp) | 0% | 37% | 7% | 39% |
| D_{lens}/DAP (80kVp) | 0% | 81% | 40% | 92% |
| D_{lens}/DAP (100kVp) | 0% | 80% | 37% | 88% |
| D_{lens}/DAP (120kVp) | 0% | 77% | 35% | 86% |
| Heart | None | Mounted | Personal | Both |
| E/DAP (80kVp) | 0% | 19% | 98% | 99% |
| E/DAP (100kVp) | 0% | 22% | 97% | 99% |
| E/DAP (120kVp) | 0% | 24% | 96% | 98% |
| D_{hand}/DAP (80kVp) | 0% | 29% | 11% | 36% |
| D_{hand}/DAP (100kVp) | 0% | 25% | 11% | 33% |
| D_{hand}/DAP (120kVp) | 0% | 22% | 12% | 31% |
| D_{lens}/DAP (80kVp) | 0% | 86% | 38% | 93% |
| D_{lens}/DAP (100kVp) | 0% | 75% | 46% | 89% |
| D_{lens}/DAP (120kVp) | 0% | 81% | 44% | 91% |

表 4-12：頭部、心臟、腹部攝影使用個人與固定式防護所造

成劑量衰減比例(續)

| Abdomen | None | Mounted | Personal | Both |
|-------------------------|------|---------|----------|------|
| E/DAP (80kVp) | 0% | 37% | 99% | 99% |
| E/DAP (100kVp) | 0% | 37% | 98% | 99% |
| E/DAP (120kVp) | 0% | 37% | 97% | 98% |
| D_{hand}/DAP (80kVp) | 0% | 23% | 11% | 30% |
| D_{hand}/DAP (100kVp) | 0% | 19% | 12% | 27% |
| D_{hand}/DAP (120kVp) | 0% | 17% | 11% | 25% |
| D_{lens}/DAP (80kVp) | 0% | 52% | 38% | 70% |
| D_{lens}/DAP (100kVp) | 0% | 61% | 42% | 78% |
| D_{lens}/DAP (120kVp) | 0% | 59% | 38% | 76% |

本研究也建立了工作人員的手部、眼球水晶體與全身有效劑量的量化關係，如表 4-13 至表 4-15， D_{lens}/E 與 D_{hand}/E 在無防護以及僅有固定式防護的情節下比值較固定， D_{lens}/E 在無防護時平均為 1.15，僅有固定式防護時平均為 0.46； D_{hand}/E 在無防護時平均為 0.57，僅有固定式防護時平均為 0.65。在僅使用個人防護的情況有最大 D_{lens}/E 的數值，平均約為 11.83，在同時使用兩種防護的情況時有最大 D_{hand}/E 的數值，平均約為 16.15。由以上的 D_{lens}/E , D_{hand}/E 表格能夠方便臨床工作人員以不同的照射條件與防護情節，從已知的有效劑量對應到可能接受到的眼球水晶體以及手部劑量。在手術過程中，如果沒有配戴鉛眼鏡或是指環劑量劑，便可以透過 D_{lens}/E 、 D_{hand}/E 之關係，從有效劑量合理回推水晶體劑量及手部劑量，適合劑量回溯研究螢光透視攝影對現場工作人員的劑量評估。

表 23：頭部攝影時，眼球水晶體劑量、手部劑量與有效劑量比值

| D_{hand} / E | None | Mounted | Personal | Both |
|----------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 80kVp | 1.03 ±2.55% | 1.08 ±3.87% | 11.29 ±3.29% | 19.38 ±4.97% |
| 100kVp | 0.94 ±2.19% | 1.06 ±3.29% | 8.89 ±3.28% | 15.48 ±4.26% |
| 120kVp | 0.90 ±1.93% | 1.10 ±2.87% | 7.71 ±2.95% | 13.60 ±3.72% |
| D_{lens} / E | None | Mounted | Personal | Both |
| 80kVp | 2.01 ±9.55% | 0.73 ±23.13% | 13.83 ±12.28% | 5.76 ±20.90% |
| 100kVp | 1.79 ±8.39% | 0.67 ±15.27% | 11.28 ±10.50% | 6.08 ±16.25% |
| 120kVp | 1.75 ±7.41% | 0.76 ±14.44% | 10.39 ±9.38% | 6.03 ±12.82% |

表 4-14：心臟攝影時，眼球水晶體劑量、手部劑量與有效劑量比值

| D_{hand} / E | None | Mounted | Personal | Both |
|----------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| 80kVp | 0.30 ±2.28% | 0.27 ±2.67% | 11.86 ±6.77% | 25.69 ±10.30% |
| 100kVp | 0.35 ±1.88% | 0.33 ±2.20% | 9.84 ±4.59% | 17.93 ±6.36% |
| 120kVp | 0.37 ±1.63% | 0.38 ±1.93% | 7.78 ±4.18% | 13.36 ±4.95% |
| D_{lens} / E | None | Mounted | Personal | Both |
| 80kVp | 0.91 ±8.31% | 0.16 ±21.77% | 24.73 ±12.43% | 8.58 ±23.64% |
| 100kVp | 0.92 ±7.09% | 0.29 ±14.13% | 15.95 ±10.67% | 7.50 ±16.62% |
| 120kVp | 0.99 ±6.07% | 0.24 ±13.50% | 13.32 ±8.88% | 4.72 ±14.38% |

表 4-15：腹部攝影時，眼球水晶體劑量、手部劑量與有效劑量比值

| D_{hand} / E | None | Mounted | Personal | Both |
|-----------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| 80kVp | 0.37 ±1.63% | 0.45 ±1.96% | 24.20 ±6.67% | 39.15 ±7.44% |
| 100kVp | 0.42 ±1.35% | 0.54 ±1.60% | 17.26 ±5.05% | 25.40 ±4.83% |
| 120kVp | 0.45 ±1.18% | 0.60 ±1.39% | 13.17 ±3.93% | 19.25 ±3.74% |
| D_{lens} / E | None | Mounted | Personal | Both |
| 80kVp | 0.50 ±7.83% | 0.38 ±11.22% | 22.98 ±11.87% | 22.79 ±12.20% |
| 100kVp | 0.67 ±6.36% | 0.42 ±9.48% | 18.06 ±9.68% | 12.09 ±10.15% |
| 120kVp | 0.78 ±5.40% | 0.51 ±7.92% | 15.66 ±7.84% | 10.51 ±8.15% |

二、 強化國內輻射檢校量測技術能力研究

1. 肢端劑量計能力試驗規劃研究(110-111)，並舉辦技術研討會

本次研究根據 109 年 3 月公告之最新版 TAF 標準規範—TAF (2020 年)第一版的「測試領域人員肢端劑量評估技術技術規範」，文件編號為 TAF-CNLA-T23(1)，與 ANSI/HPS N13.32-2018 國際最新版規範，執行肢端劑量計能力試驗運轉研究。此為兩年期的第一年工作項目，今年度已於 6 月 11 日舉辦全國性線上會議(圖 4-24 與 4-25)，進行執行前規劃說明，時程安排如圖 4-26，於 9 月至 10 月執行測試前校正，於 11 月至 12 月完成第一批次照射。預計明年 1 月至 4 月執行三批次測試，4 月至 5 月執行劑量回報與數據處理，5 月底至 6 月辦理總結技術討論會議，7 月提供參與實驗室測試報告，8 月至 9 月進行總結報告撰寫，以提供主管單位關於評估我國實驗室技術能力的參考資料。

分析測試類別如表 4-16，本次肢端劑量計能力試驗共有四個測試類別(劑量範圍)：(I)高劑量光子(0.1 至 5 Gy)、(II)光子(1 至 100 mSv)、(III)貝他(2.5 至 100 mSv)、和(IV)貝它與光子混合場(3.5 至 100 mSv)，參考表 4-17。依據規範，照射測試分三批次進行，各測試類別每批測試提供 5 個劑量計，共 15 個劑量計；每個類別測試另附 1 個背景劑量計，2 個備用之劑量計。本次使用射質 X 射線為 ISO 的 IN 80 與美國國家標準暨技術研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)的 M100、M150、WS200 和 M250，加馬光子為 ^{137}Cs ，貝他射源為 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 。規範中所使用的假體分為兩種，(1)柱狀假體 (pillar phantom)：代表下手臂或小腿，以測試手腕或腳踝劑量計，壓克力(PMMA)製成之固體正圓柱體，直徑至少為 73 mm，長度至少為 300 mm；(2)棒狀假體 (rod phantom)：代表手指，以測試指環或手部劑量計。壓克力(PMMA)製成之固體正圓柱體，直徑至少為 19 mm，長度至少為 300 mm，本次能力試驗僅針對代表手指的棒狀假體進行照射，故僅測試實驗室的指環劑量計劑量評估能力。



「2021年第1次肢端劑量計能力試驗執行前說明會」

視訊會議議程

日期：110年06月11日
 主持單位所在地點：核能研究所 保健物理組 035 館國家游離輻射標準實驗室

| 時間 | 講題 | 講員/單位 |
|-------------|------------------------|---------------------------------|
| 09:30—10:00 | 註冊進入視訊會議 | |
| 10:00—10:10 | 開幕致詞 | 朱健豪 博士 核能研究所保健物理組 |
| 10:10—11:30 | 第11次人員劑量計能力試驗總結報告及綜合討論 | 施名原 先生/ 朱健豪 博士 核能研究所保健物理組 |

備註：採用 Microsoft Teams meeting 程式，請以姓名註冊進入視訊會議。

(a)



「第八次輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會」

會議議程

日期：110年06月11日
 主持單位地點：核能研究所 保健物理組 035 館國家游離輻射標準實驗室

| 時間 | 講題 | 講員/單位 |
|-------------|--|---------------------------------|
| 13:00—13:30 | 註冊進入視訊會議 | |
| 13:30—13:40 | 開幕致詞 | 朱健豪 博士/ 表明程 博士 核能研究所保健物理組 |
| 10:40—15:00 | (1)第八次輻射偵檢儀器校正能力試驗總結說明 (2)陸軍化生放核訓練中心儀器校正比對、 克馬校正實驗室校正比對、 台電放射實驗室比對(中子) (3)綜合討論 | |

備註：採用 Microsoft Teams meeting 程式，請以姓名註冊進入視訊會議。

(b)

圖 4-24、「2021年輻射儀器校正與肢端劑量計能力試驗技術討論會」技術討論會(視訊會議) (a) 2021年第1次肢端劑量計能力試驗執行前說明會；(b) 第八次輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會。



2021年第1次肢端劑量計能力試驗

報告人：施名原
國家游離輻射標準實驗室
核能研究所 保健物理組
110年6月11日

測試領域人員肢端劑量評估技術規範 (TAF-CNLA-T23(1))

- ANSI/HPS, N13.32-2018 Performance testing of extremity dosimeters
- 肢端劑量計能力試驗測試類別
- 輻射劑量照射範圍
- 允差標準

系統 照射者 負責者

| | | |
|---------|-----|-----|
| X | 鄒○泓 | 苗○德 |
| β | 施○原 | 朱○豪 |
| γ | 葉○宇 | 鄒○泓 |
| 資料處理與分析 | | 陳○奇 |

通用範圍 (光子、其他粒子或以上之混合輻射等體外射源)

- 測試時程及測試所需劑量計數量
- 輻射類別及等效劑量(或吸收劑量)範圍
- 射源型態及照射幾何條件
- 測試結果之評定標準

HARSHOW extremity dosimeter

Thermo DXT-RAD Caps, Rings

103年肢端劑量計測試結果(X機構)

| 代碼 | 測試類別 | 測試劑量計數量 | 測試者 | 測試日期 | 測試結果 | 評定標準 | 備註 | |
|----|-----------|---------|------|------|------|------|------|----|
| 1 | 標準類輻射, 光子 | 400 | 0.19 | 0.19 | 0.02 | 0.15 | 0.24 | 通過 |
| 2 | 標準類輻射, 光子 | 400 | 0.29 | 0.29 | 0.03 | 0.17 | 0.26 | 通過 |
| 3 | 標準類輻射, 光子 | 600 | 0.21 | 0.21 | 0.03 | 0.21 | 0.26 | 通過 |
| 4 | 標準類輻射, 光子 | 400 | 0.34 | 0.34 | 0.01 | 0.17 | 0.18 | 通過 |

Panasonic extremity dosimeter

Panasonic 原廠指環劑量計
放射實驗室自製指環劑量計

肢端劑量計能力試驗選擇結果分析 (代碼 A)

第八次輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會

110年06月11日

報告內容

- 前言
- 參加機構及類別
- 傳遞儀器流程
- 測試方法
- 傳遞儀器規格
- 能力試驗結果
- 陸軍化生放核訓練中心比對結果
- 克馬校正實驗室比對結果
- 台電放射實驗室中子校正比對結果
- 結論

前言

- 財團法人全國認證基金會-校正領域輻射偵測規範(TAF-CNLA-T05), 規定校正實驗室應至少能力試驗。
- 國家的輻射偵測標準實驗室為本次能力試驗的執行者。
- 參加實驗室：台電放射實驗室、台電核三所測中心、道華大學、克馬校正實驗室、核能研究所。
- 執行時程：
 - 109年06月12日：召開第8次輻射偵檢儀器校正研討會議。
 - 109年11月至110年2月：標準件傳遞。
 - 110年6月11日：召開第8次輻射偵檢儀器校正總結會議。

劑量率偵檢器量測結果與總不確定度

比對結果

人員劑量計量測結果與總不確定度

| 代碼 | 低劑量率 | 高劑量率 | <1 mSv | >1 mSv |
|----|------|------|--------|--------|
| A | √ | √ | √ | √ |
| B | √ | √ | √ | √ |
| C | √ | √ | √ | √ |
| D | √ | √ | √ | √ |
| E | √ | √ | √ | √ |
| F | √ | √ | √ | √ |

中子儀器校正方法

中子儀器量測結果

| 儀器型號 | 標準差 | 偏誤 | 修正係數 | 修正係數標準差 |
|-------------|-------|-------|-------|---------|
| WestonV222A | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| ... | ... | ... | ... | ... |

圖 4-25、「2021 年輻射儀器校正與肢端劑量計能力試驗技術討論會」大會手冊封面及內容摘錄

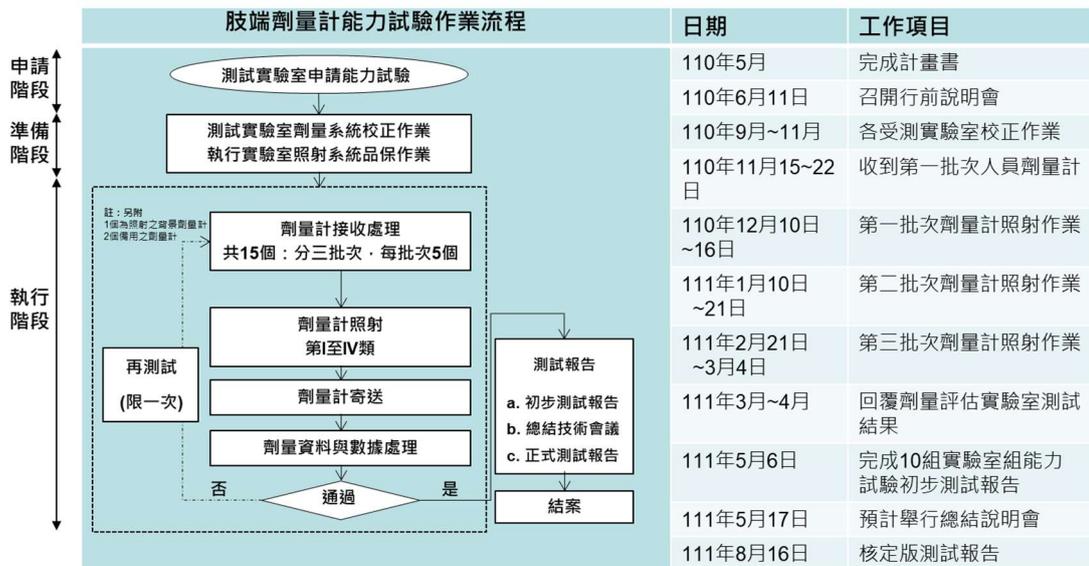


圖 4-26、肢端劑量計能力試驗測試時程

表 4-16、肢端劑量計能力試驗測試類別

| 測試類別 | 測試輻射劑量範圍 | 允差值(L) (for $B^2 + S^2 = L^2$) |
|----------------------------------|----------------|------------------------------------|
| I. 高劑量, 光子 | | |
| A. 一般 (B及C隨機選擇) | 0.1 to 5 Gy | 0.24 |
| B. ^{137}Cs (E=662 keV) | | |
| C. M150 (E=73.0 keV) | | |
| II. 光子 | | |
| A. 一般 (E ≥ 20 keV) | 1.0 to 100 mSv | 0.35 |
| B. 高能量 (E ≥ 500 keV) | | |
| C. 中能量 (E ≥ 70 keV) | | |
| D. 窄能譜 | | |
| III. 貝他 | | |
| A. 一般 (B及C隨機選擇) | 2.5 to 100 mSv | 0.35 |
| B. 高能量點射源 (E ≥ 500 keV) | | |
| C. 低能量點射源 (E < 500 keV) | | |
| D. 片型鈾 (E ≥ 500 keV) | | |
| IV. 貝他與光子混合場 | | |
| A. 一般光子+貝他 | 3.5 to 100 mSv | 0.35 |
| B. 加馬+貝他 | | |

肢端劑量計能力試驗僅以允差值評定公式標準評定其結果，評定的允差值高劑量光子 I 測試類別為 0.24，光子和貝他 II~IV 測試類別為 0.35，較 ANSI N13.11(2009)新版人員劑量計能力試驗之光子和貝他 II~IV 測試類別為 0.30 稍高。

全國性技術討論會之「第一次肢端劑量計能力試驗說明會」因應防疫政策，由原預訂5月20日當週的實體會議，延遲至6月11日由保物組國家游離輻射標準實驗室舉辦線上會議，參加人數為22人，參加單位共6個(依開頭筆劃排列): 為台灣電○公司放射試驗室、行○院原○能委員會核○研究所、貝克○弗股份有限公司、財團法人中華民國輻射○護協會、財團法人全○認證基金會、國立清○大學。

本研究目前已順利完成申請階段、準備階段還有第一批次照射的實務作業，並更新與精簡多份人員劑量能力試驗使用之舊有表單資料，以提升執行效率。我國肢端計量能力試驗為第一次執行，為從無至有的里程碑，這次計有7個實驗室(10個實驗室組)參加型式測試(type testing)，透過彼此的技術交流，期能讓我國技術能力接軌國際。

2. 輻射偵檢儀器校正能力試驗之研究(109-110)，並舉辦研討會

依據財團法人全國認證基金會實驗室認證處規定，實驗室申請認證或延展認證前，應通過能力試驗，且有效期為3年，本計畫配合109年舉辦之第8次輻射儀器校正能力試驗，進行我國相關實驗室技術與品質之研究。

輻射偵檢儀器校正能力試驗研究，依據「校正領域輻射偵測儀器校正技術規範(TAF-CNLA-T06(2))」執行，執行時程為109年9月至110年8月，由國家游離輻射標準實驗室負責執行，組織架構分為：放射活度偵測儀器校正小組、輻射劑量偵測儀器校正小組和品保小組。整體執行內容除「第8次輻射偵檢儀器校正能力試驗」外，尚包括三項實驗室間比對活動：「第4次陸軍核生化研究中心儀器校正比對」、「第2次克馬校正實驗室校正比對」和「第1次台電放射試驗室中子校正」。

輻射偵檢儀器校正能力試驗，是以傳遞儀器標準件的方式執行，個別機構測試結束後，需送回至主辦機構確認儀器功能在正常範圍。針對中低劑量率($\dot{\gamma}$)、累積劑量(γ)、和污染偵測器(α/β)，分別選定傳遞儀器為：NuHP / CoMo 170、

Thermo / EPD-G、和與第一項相同的 NuHP / CoMo 170，另納入美軍野戰輻射偵測器 AN/VDR-2 以測試劑量率類別；中子校正選定儀器為 Wedholm/2222A。參與本次能力試驗的機構有(依開頭筆劃排列)：台灣電○公司放射試驗室、台灣電○公司放射試驗室核三工作隊、行○院原○能委員會輻○射偵測中心、行○院原○能委員會核○研究所輻○偵測儀器校正實驗室、和克○校正實驗室，共 6 家實驗室。參加實驗室比對的機構有：台灣電○公司放射試驗室、克○校正實驗室和陸軍化生放○防護研究中心，共 3 家實驗室。試驗結果判定上，能力試驗是依據 ISO 17043，以 En 值進行判斷， $En = (V_{lab} - V_{ref}) / \sqrt{(U_{lab}^2 + U_{ref}^2)^{1/2}}$ ，其中 V 為量測值，U 為擴充不確定度，下標 lab 代表受測實驗室，下標 ref 代表中心實驗室，當 $En \leq 1$ ，代表通過， $En > 1$ 代表不通過；而實驗室間雙邊比對，則

$$z = \frac{|V_1 - V_2|}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2}}$$

依據 z score 判定準則，其中 V 為量測值，u 為擴充不確定度，下標 1 代表受測實驗室，下標 2 代表中心實驗室，當 $z \leq 2$ ，表示雙邊比對結果一致。

全國性技術討論會之「第八次輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會」因應防疫政策，由原預訂 5 月 20 日當週延遲至 6 月 11 日，由保物組國家游離輻射標準實驗室舉辦線上會議，參加人數為 17 人，參加單位共 6 個(依開頭筆劃排列)：為台灣電○公司放射試驗室、行○院原○能委員會核○研究所、克○企業有限公司、陸軍化○放核防護研究中心、國立清○大學原科中心輕便型輻射偵檢儀校實驗室。會中進行專家學者技術交流，以精進雙方技術能力。

參加能力試驗的 6 家認證實驗室皆符合規範要求，合格率 100%，測試結果顯示如下：

- a. 劑量率偵檢器與人員劑量計量之校正因子的 En 值皆 < 1 ，均通過 TAF 技術規範要求；
- b. α/β 污染偵檢器表面效率之 En 值皆 < 1 ，均通過 TAF 技術規範要求；

c. 三項儀器之總不確定度評估在 3.4%~11%。

同期三個雙邊比對：陸軍化生放核訓練中心、克馬校正實驗室、台電中子校正，能力判定結果之 Z 參數皆小於 2，顯示結果無差異。(參考圖 4-27 至圖 4-28)。

本次研究已完成所有校正件傳遞、多邊校正作業與數據處理、實驗室測試報告、與總結報告，結果顯示，7 家參與實驗室皆符合能力要求，合格率 100%。值得提及的有：(1)特別引入無感時間雙射源測定法完成數據修正(參考圖 4-29)。(2)於本次正規能力試驗時期中，首度納入門框、車輛、區域、手足偵檢器、核醫活度校正儀、CI-36 的污染偵檢器等比對項目；(3)配合主管機關要求，從無至有地完成第 1 次中子校正比對的技術能力測試。

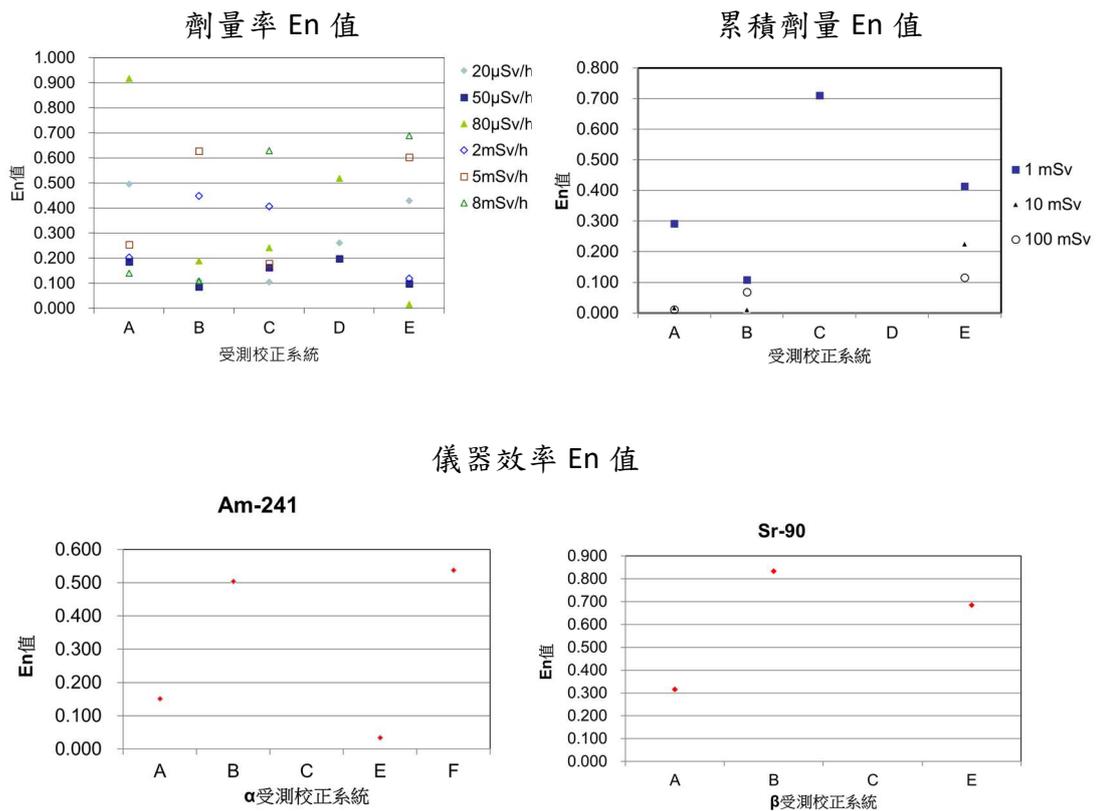


圖 4-27、第八次輻射儀器校正能力試驗結果

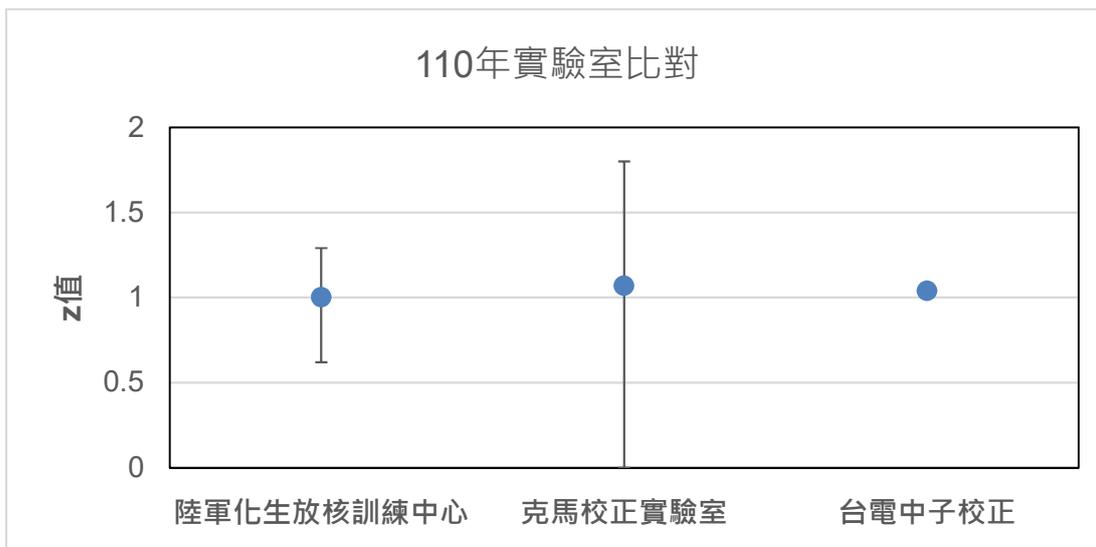


圖 4-28、110 年輻射儀器校正實驗室比對結果

| | | | | | | | |
|----------------------|----------------|----------------|------------------|----------------------|----------------|-----------------|------------------|
| A實驗室 校正結果 | 射源發射率 量測值 | 2595 1015 | alpha/sec cps | B實驗室 校正結果 | 射源發射率 量測值 | 2457.5 989.8 | alpha/sec cps |
| | 無感時間修 正後量測值 | 1101.129 | cps | | 無感時間修 正後量測值 | 1071.533 | cps |
| | 效率 | 0.42433 | 42.43% | | 效率 | 0.43603 | 43.60% |
| | U(k=2)% | 5.06% | | | U(k=2)% | 6.21% | |
| | U(k=2) | 0.02147 | | | U(k=2) | 0.02708 | |
| E實驗室 校正結果 | 射源發射率 量測值 | 7208 2456.7 | alpha/sec cps | F實驗室 校正結果 | 射源發射率 量測值 | 1710 698 | alpha/sec cps |
| | 無感時間修 正後量測值 | 3030.423 | cps | | 無感時間修 正後量測值 | 737.6799 | cps |
| | 效率 | 0.42043 | 42.04% | | 效率 | 0.43139 | 43.14% |
| | U(k=2)% | 3.40% | | | U(k=2)% | 3.60% | |
| | U(k=2) | 0.01429 | | | U(k=2) | 0.01553 | |

圖 4-29、NUVIA/CoMo-170 DL 無感時間評估結果

3. 環境試樣放射性核種分析能力試驗運轉研究，並舉辦能力試驗研討會

環境試樣放射性核種分析能力試驗是屬於全國性實驗室技術與品質能力分析，是依據測試領域環境試樣放射性核種

技術規範(TAF-CNLA-T09(2))，進行能力試驗不同類別所含放射性核種之測試，並依照規範判定結果，進行差異性評估，研究國內實驗室技術現況。

如表表 4-17 所示環境試樣放射性核種分析能力試驗採用加馬核種 ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs ；貝他核種 ^{90}Sr 、 ^3H 研製；同時，依據 ISO GUIDE 34、35 對於生產參考物質(RM)之技術要求，針對生產過程中之參考物質特性值及均勻性進行不確定度評估(如表 4-18 至 4-19)，完成水樣、濾紙、土壤、植物、牛乳、畜產肉類、菇類、米樣、人工尿樣與人工糞樣試驗樣品配製與配送作業，設定測試參考日期為 6 月 1 日，各家實驗室於 8 月 15 日前完成數據回報，並由執行實驗室進行數據結果處理，於 10 月 14 日完並舉辦技術會議，11 月 26 日提供實驗室測試報告，12 月 16 日完成總結報告。

表 4-17、環境試樣放射性核種分析能力試驗測試類別

| 測試樣品 | 測試項目 | | | |
|------|------|------|-----|---|
| | 加馬 | 鋇-90 | 總貝他 | 氬 |
| 水樣 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 濾紙 | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 土壤 | ✓ | ✓ | | |
| 植物 | ✓ | ✓ | | |
| 牛乳 | ✓ | ✓ | | |
| 畜產肉類 | ✓ | ✓ | | |
| 菇類 | ✓ | ✓ | | |
| 米樣 | ✓ | ✓ | | |
| 人工尿樣 | ✓ | ✓ | | ✓ |
| 人工糞樣 | ✓ | ✓ | | |

表 4-18 環境試樣放射性核種分析能力試驗標準射源評估

| 核種 | 配製量 | | 比活度 | | Reference Date | 半化期 | |
|-------------------|---------|---------|--------|-------------------|---------------------|------------------|--------------|
| | 溶液總重(g) | $u_c\%$ | Bq/g | u_c (%, k=1) | y/m/d/h:m | $T_{1/2}$ (days) | u_c (days) |
| ¹³⁷ Cs | 25.0303 | 0.0026 | 256.00 | 0.58 | 2021/06/01 13:00 | 10976 | 29 |
| ¹³⁴ Cs | 25.0122 | 0.0026 | 255.60 | 0.39 | 2021/06/01 13:00 | 754.01 | 0.51 |
| ⁶⁰ Co | 35.9613 | 0.0026 | 256.00 | 0.27 | 2021/06/01 13:00 | 1925.23 | 0.29 |
| ⁹⁰ Sr | 25.0172 | 0.0026 | 252.62 | 0.25 | 2021/06/01 13:00 | 10519 | 26 |
| ³ H | 25.0306 | 0.0030 | 265.00 | 0.49 | 2021/06/01 13:00 | 4496.9 | 9.1 |

表 4-19 環境試樣放射性核種分析能力試驗環境試樣評估(參考值)

| 核種 | 水樣 (Bq/L) | 空浮 (Bq/m ³) | 土壤 (Bq/kg) | 植物 (Bq/kg) | 牛乳 (Bq/kg) |
|-------------------|--------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| ¹³⁷ Cs | 33.4±1.3 | 0.051±0.002 | 255±3 | 35.7±1.4 | 34.0±0.3 |
| ⁶⁰ Co | 35.8±1.5 | 0.041±0.002 | 203±1 | 35.8±1.3 | 38.5±1.8 |
| ¹³⁴ Cs | 30.8±1.3 | 0.052±0.002 | 285±3 | 39.9±1.8 | 31.5±0.7 |
| ⁹⁰ Sr | 12.6±0.4 | 0.075±0.0003 | 352±10 | 86.3±3.4 | 300±7 |
| Gβ | 1796±79 | 0.180±0.001 | * | * | * |
| ³ H | 868±24 | * | * | * | * |

| 核種 | 水樣 (Bq/L) | 空浮 (Bq/m ³) | 土壤 (Bq/kg) | 植物 (Bq/kg) | 牛乳 (Bq/kg) |
|-------------------|--------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| ¹³⁷ Cs | 33.4±1.3 | 0.051±0.002 | 255±3 | 35.7±1.4 | 34.0±0.3 |
| ⁶⁰ Co | 35.8±1.5 | 0.041±0.002 | 203±1 | 35.8±1.3 | 38.5±1.8 |
| ¹³⁴ Cs | 30.8±1.3 | 0.052±0.002 | 285±3 | 39.9±1.8 | 31.5±0.7 |
| ⁹⁰ Sr | 12.6±0.4 | 0.075±0.0003 | 352±10 | 86.3±3.4 | 300±7 |
| Gβ | 1796±79 | 0.180±0.001 | * | * | * |
| ³ H | 868±24 | * | * | * | * |

備註：

- 原始射源活度可追溯至國家游離輻射標準實驗室，參考日期為 110 年 6 月 1 日。
- 樣品活度之不確定度 $k=1$ 。
- 不確定度評估包含：添加值、均勻度及穩定度。
- 人工尿樣與人工糞樣僅一家實驗室報名，樣品配置量少免分樣，故無均勻度評估因子，同時，不確定度較小。

110 年度環境試樣放射性核種分析能力試驗運轉研究計有 12 家測試領域實驗室參加，包括：核○研究所保○物理組、輻○偵測中心、國立清○大學原科中心、台電放○試驗室、台電放○試驗室核三○作隊、台電核二保○物理課、國立屏○科技大學災○防救科技研究中心放○性分析備援實驗室、國立陽○大學生○醫學影像暨放射科學系食○檢驗分析實驗室、衛生福利部食品藥物管理署中區管○中心食○輻射偵檢室、義○食品股份有限公司、新北市政府衛○局、高雄市政府衛○局，參與實驗室數量為歷年之最。

測試結果之評析以土樣和水樣為例，請參考圖 4-30 和圖

4-31，並顯示各核種在 10 種環境試樣的整體表現(請參考圖 4-32)，結果於 10 月 14 日舉行總結會議研討會內宣布：

- 110 年度環境試樣放射性核種分析能力試驗，所有 12 個參與測試實驗室的分析結果，其平均相對偏差(Br)及相對精密度(SA,SB)均通過 TAF 能力試驗的要求。
- 各實驗室分析結果與添加活度的平均相對偏差值(Br)，5 個值介於 $\pm(20\sim30)\%$ ，17 個值介於 $\pm(15\sim20)\%$ ，其餘值均在 $\pm 15\%$ 以內。
- 總體實驗室分析結果平均值表現與參考活度的偏差值，範圍在 1.10~0.81 倍。

此能力試驗自 93 年度起至今已執行 17 年，參加比對實驗室結果良好，足以證明各實驗室之分析能力；下次舉辦能力試驗的時間為民國 113 年。今年的參與實驗室為 12 個，為歷年之最，應是反映民眾關心日本食品輻射檢測議題之故。

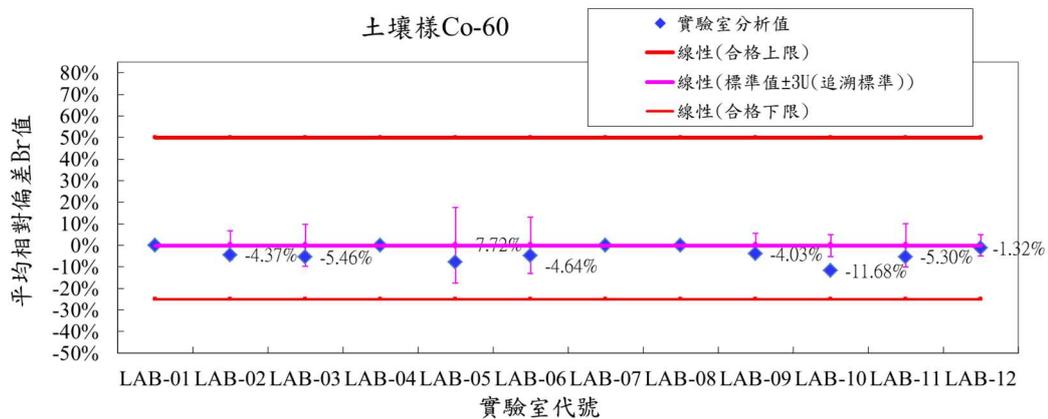


圖 4-30、能力試驗結果統計圖－土壤樣 Co-60

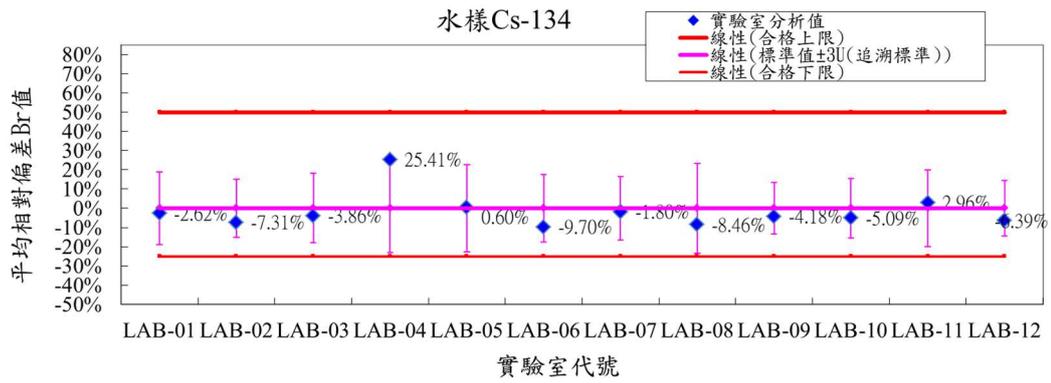


圖 4-31、能力試驗結果統計圖－水樣 Cs-134

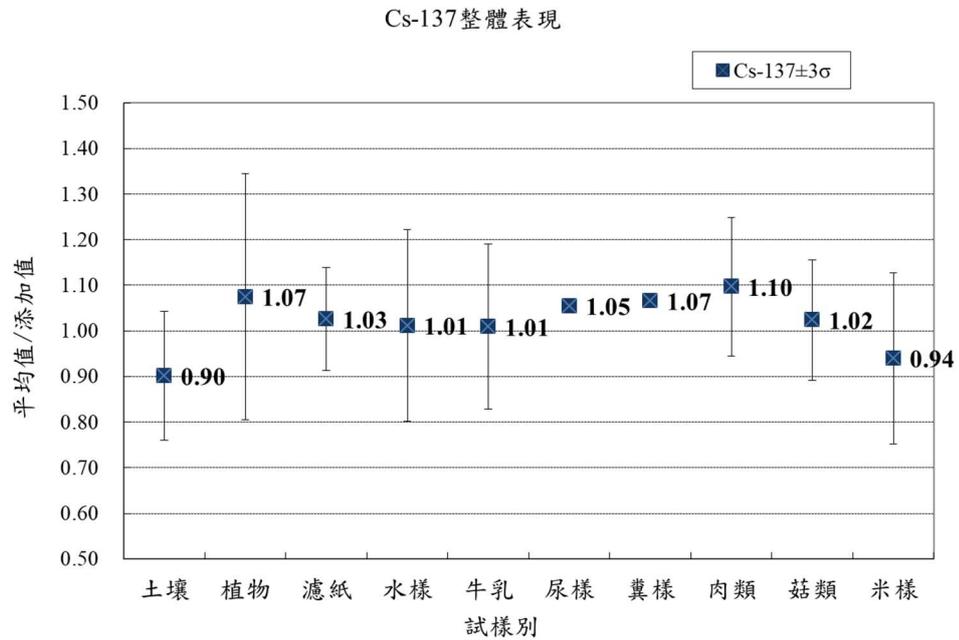


圖 4-32、環境試樣核種分析能力試驗結果

4. 中低強度核種分析能力試驗運轉研究，並舉辦能力試驗研討會

依據 TAF-CNLA-T10(3), 2018/03/23 測試領域中低活度核種技術規範之實驗室認證規範執行研究，並依照規範判定結果，進行差異性評估。

110 年度中低強度核種分析能力試驗運轉研究之文件主要以 e-mail 方式聯絡。主辦單位於 110 年 1 月寄出報名表後，共有 6 家測試領域實驗室參加，分別為台灣電力公司之第一核能發電廠放射化學實驗室、第二核能發電廠放射化學實驗室、第三核能發電廠放射化學實驗室、台灣電力股份有限公司放射試驗室、核能研究所化學組放射化學分析實驗室以及清華大學原子科學技術發展中心放射性核種分析實驗室。不按前述先後次序，分別給以 A~F 之英文字母代碼。今年度提供測試之類別核種項目為：氫核種分析、混合鋇 89/90 核種分析、混合鐵 55/59 核種分析、混合加馬核種分析、和混合難測核種分等 5 個測試類別，其中，混合難測核種分析為本次試驗新增之項目(圖 4-33)。配製含 H-3、Sr-90、Fe-59、Cs-137、Co-60、Ni-63 等 12 種核種試樣(圖 4-34)，核種數量為歷年之最。



| 參與實驗室代號 | 試驗種類 | 核種 |
|---------|--------------|--------|
| ABCDEF | 氚核種分析 | H-3 |
| ABCEF | 混合銻89/90核種分析 | Sr-89 |
| | | Sr-90 |
| ABCEF | 混合鐵55/59核種分析 | Fe-55 |
| | | Fe-59 |
| | | Cs-134 |
| ABCDEF | 混合加馬核種分析 | Cs-137 |
| | | Co-60 |
| | | Na-22 |
| | | Ni-63 |
| ADE | 混合難測核種分析 | Tc-99 |
| | | Am-241 |

圖 4-33、各參與實驗室、代號、參與試驗種類與核種



(1)H-3



(2)混合加馬



(3)混合 Fe-55/59



(4)混合 Sr-89/90



(5)混合難測核種與標準源



(6)表面劑量率評估

圖 4-34、5 項測試類別樣品(1~5)與表面劑量率評估(6)

6 家測試領域實驗室於 110 年 2 月底前回擲報名表。能力試驗採盲樣測試，盲樣射源依據標準配置流程完成(圖 4-35)，射源於 7 月陸續寄出，分送至參與單位，度量包封表面與 1 米處之輻射劑量率，皆符合放射性物質安全運送相關規定；能力試驗回報量測結果以比活度(Bq/g)為單位，量測不確定度以%(k=1)表示，射源標定參考時間為 2021 年台北時間 8 月 1 日下午 1:00。不同核種之評析結果請參考圖 4-36。

110 年度環境試樣放射性核種分析能力試驗，所有六個參加測試實驗室的分析結果：

- A_t/A_s 比值皆合格。
- 能力判定結果之 ζ 參數皆小於 2，顯示結果無差異。均通過 TAF 能力試驗的要求。
- 各受測實驗室量測標準不確定度 $\leq 10\%$ 。均通過 TAF 能力試驗的要求。

於 10 月 14 日舉行「2021 年游離輻射量測能力試驗總結研討會」公布測試結果：受測實驗室在其所參加之類別項目核種的活度分析測試能力均通過測試，合格率 100%。(圖 4-37)

此能力試驗自 93 年度起至今已執行 17 年，下次舉辦能力試驗的時間為民國 113 年。因應核設施除役或處置、核醫製藥或科學研究，對了驗證各實驗室的技術能力，中低強度核種分析能力試驗有其必要性與重要性的地位。



圖 4-35、盲樣射源配置過程

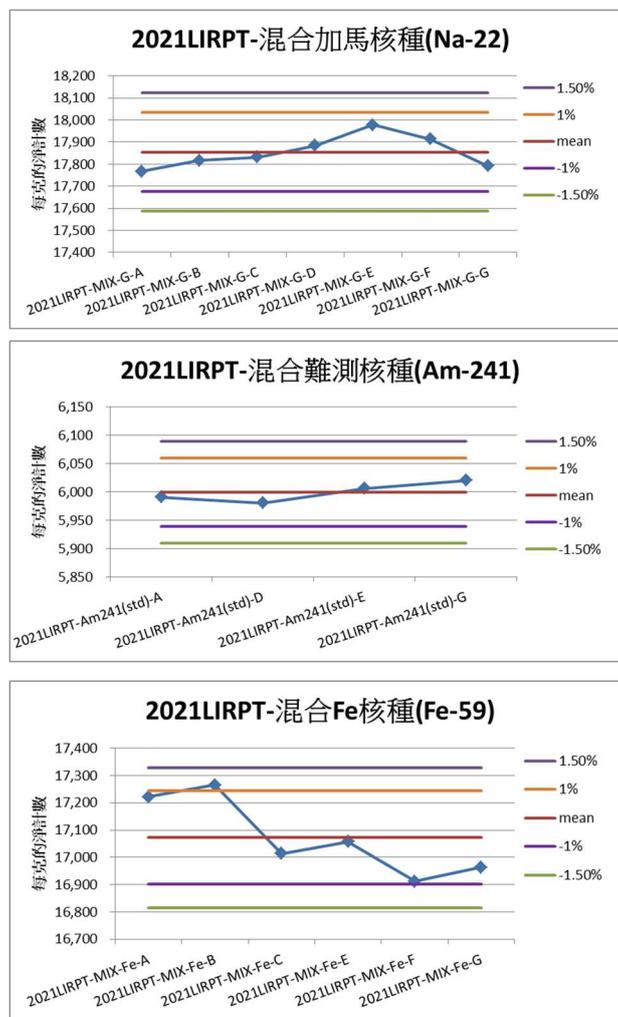


圖 4-36、樣品均勻度測試

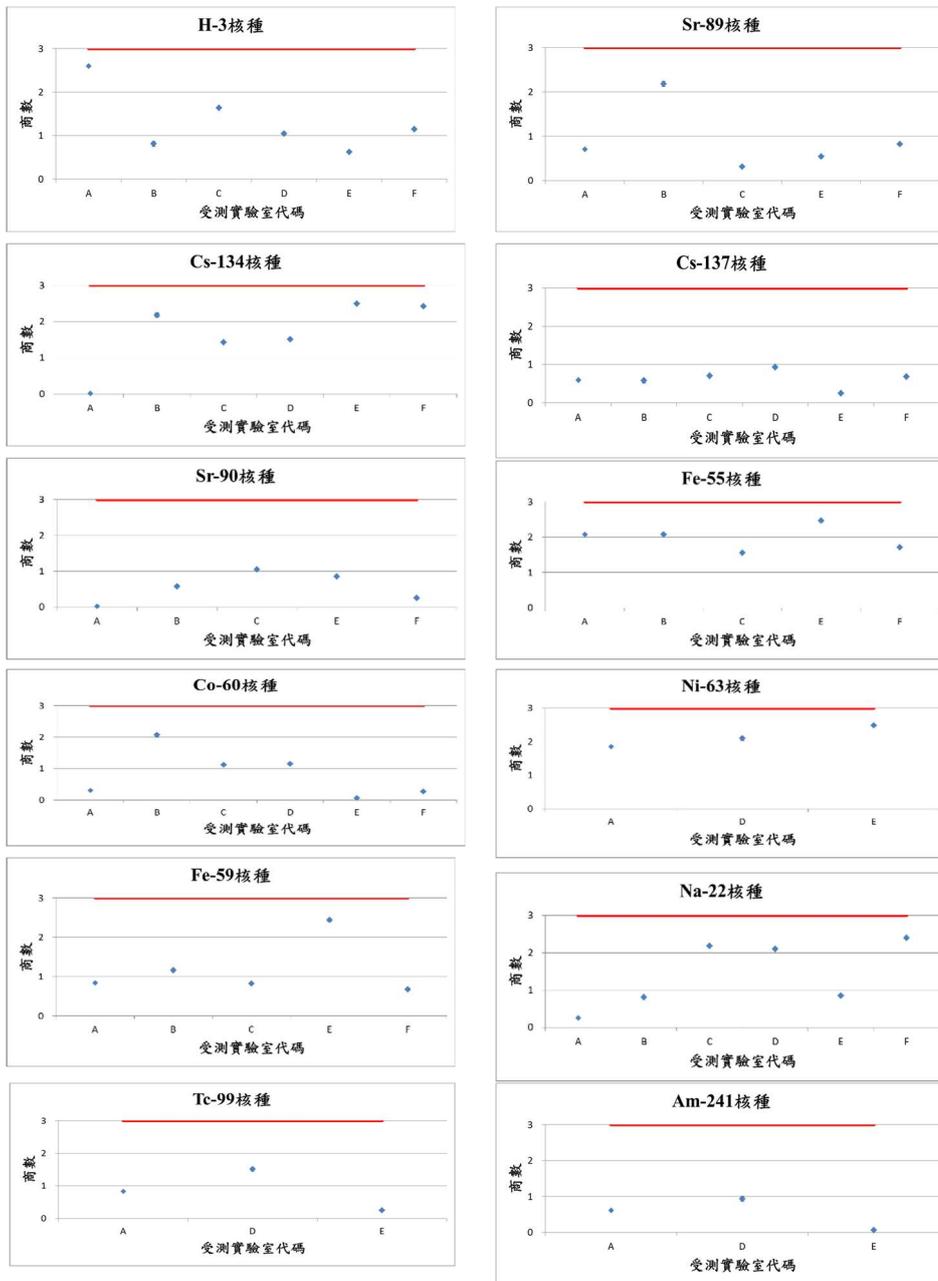


圖 4-37、中低強度核種分析能力試驗結果

5. 建置 X 射線光子之眼球水晶體劑量校正系統

為建置 X 射線眼球水晶體劑量校正系統，先後完成了校正射質選定、校正射質過濾片組配、校正射質半值層量測(與規範差異小於 5%)、從原級標準 1.5 m 傳遞至 3 m 處的標準劑量場建立、頭型假體監測裝置設計建置、監測游離腔校正與監測參考值建立等工作，並提供核研所人員劑量評估實驗室進行眼球水晶體劑量計性能測試。

為了將標定之空氣克馬量測值，轉換為眼球體外輻射監測使用之個人等效劑量 $H_p(3)$ ，須使用 ISO 4037-3 規範之眼球水晶體劑量轉換因子(表 4-20)轉換，該轉換因子應與規範之適當假體搭配使用。規範假體為一個充滿水之圓柱形假體(圖 4-38)，腔壁由 5 mm 厚度之壓克力(PMMA)組成，圓柱直徑為 200 mm，圓柱高為 200 mm。為了使圓柱假體涵蓋在射束照野內，必須把假體放置在距離 X 光機 3 m 處照射，藉由將 1.5 m 處原級標準傳遞至 3 m 處以建立標準劑量場，方法是先標定 1.5 m 處之標準劑量率，再量測 1.5 米處工作標準件(Exradin A5 游離腔)之游離電流，兩者相除，求得工作標準件校正因子，再量測 3 米處工作標準件之游離電流，將之乘上校正因子，即完成 3 米處標準劑量率之標定(表 4-21)。

表 4-20、ISO 4037-3 規範之眼球水晶體劑量轉換因子

| Radiation Quality | $h_{PK}(3; N, \alpha)_{cyl}$ in Sv/Gy for a distance of 2.5m and the angle of incidence, α of 0° |
|-------------------|--|
| N-40 | 1.28 |
| N-60 | 1.54 |
| N-80 | 1.66 |
| N-100 | 1.63 |
| N-120 | 1.58 |
| N-150 | 1.52 |

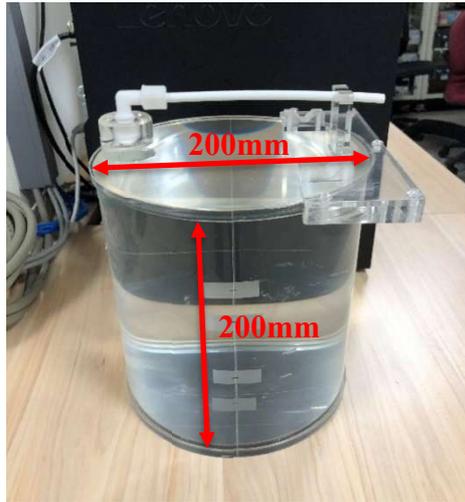


圖 4-38、INER 使用之圓柱假體

表 4-21、3 米處標準劑量率量測結果

| 射質 | 1.5 m 標準劑量率 | A5 工作標準件 校正因子 | 3 m 工作標準件 游離電流 | 3 m 標準劑量率 |
|-------|----------------|------------------|-------------------|--------------|
| | (Gy/s) | (Gy/C) | (C/s) | (Gy/s) |
| N-40 | 8.0737E-06 | 3.0857E+05 | 5.9554E-12 | 1.8377E-06 |
| N-60 | 6.9548E-06 | 3.0165E+05 | 5.3464E-12 | 1.6128E-06 |
| N-80 | 4.1600E-06 | 3.0454E+05 | 3.1697E-12 | 9.6531E-07 |
| N-100 | 1.9048E-06 | 3.0623E+05 | 1.4449E-12 | 4.4248E-07 |
| N-120 | 2.1030E-06 | 3.0805E+05 | 1.5862E-12 | 4.8862E-07 |
| N-150 | 1.6843E-05 | 3.0812E+05 | 1.2745E-11 | 3.9269E-06 |

為確保照射眼球水晶體劑量計之劑量是否正確，在圓柱假體上端加裝監測游離腔(Exradin A5 游離腔) (圖 4-39)，量測監測游離腔照射結果，並與 3 米處標準劑量率相除得到監測因子(表 4-22)，以做照射之劑量驗證。



圖 4-39、監測使用之 Exradin A5 游離腔

表 4-22、監測游離腔監測因子

| 射質 | 監測因子 (Sv/C) |
|-------|----------------|
| IN40 | 3.5264E+05 |
| IN60 | 3.9900E+05 |
| IN80 | 4.3512E+05 |
| IN100 | 4.4236E+05 |
| IN120 | 4.4050E+05 |
| IN150 | 4.2664E+05 |

將以上量測之標準劑量率及監測因子，經過轉換因子轉換為 $H_p(3)$ ，將結果寫進校正系統擷取程式(圖 4-40)，並評估校正系統照射劑量之量測不確定度(表 4-23)，完成系統評估報告，接著即可進行校正作業。擷取程式會根據輸入之射質條件及總劑量，計算眼球水晶體劑量計的照射時間並進行照射。

眼球水晶體劑量計之實際照射劑量，可透過監測游離腔的照射結果，經監測因子修正來計算，將實際照射劑量提供核研所人員劑量評估實驗室，以進行眼球水晶體劑量計性能評估。

圖 4-40、校正系統擷取程式

表 4-23、眼球水晶體劑量校正系統照射劑量之量測不確定度

| 不確定度來源 x_i | 值 ± | 機率分布 | 除數 | 靈敏係數 c_i | 不確定度分量 $u(x_i) \times c_i $ | 自由度 $v(i)$ |
|---------------------------|---------|------|------------|--------------------------|---------------------------------|---------------|
| 收集電荷重複性 | 0.17% | 常態 | 1 | 1 | 0.17% | 19 |
| 電量計校正因子 | 0.0080% | 常態 | 1 | 1 | 0.0080% | 50 |
| 電容校正因子 | 0.0090% | 常態 | 1 | 1 | 0.0090% | 50 |
| 游離腔校正因子 | 0.50% | 常態 | 1 | 1 | 0.50% | 148 |
| 轉換因子 | 2.0% | 常態 | 1 | 1 | 2.0% | 50 |
| 溫度修正 | 0.033% | 矩形 | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.019% | 50 |
| 氣壓修正 | 0.073% | 矩形 | $\sqrt{3}$ | 1 | 0.042% | 50 |
| 量測位置 | 0.067% | 矩形 | $\sqrt{3}$ | 2 | 0.077% | 50 |
| 組合標準不確定度 (u_c) = 2.1% | | | | 有效自由度 (V_{eff}) = 57 | | |
| 擴充標準不確定度 (U) = 4.2% | | | | 涵蓋因子 k = 2 | | |

三、精進染色體變異分析技術與評估研究

本子項計畫研究成果，分別投稿於「中華民國核醫學學會 2021 年會暨學術研討會」(110 年 11 月 20 日)，投稿題目為「Intercomparison of conventional and QuickScan dicentric scoring for the validation of individual biodosimetry analysis in Taiwan」(圖 4-41)，以及投稿「International Journal of Radiation Biology」SCI 期刊，投稿題目為「Intercomparison of Conventional and QuickScan Dicentric Scoring for the Validation of Individual Biodosimetry Analysis in Taiwan」文獻(圖 4-42)，已於 110 年 6 月 1 日刊登，內容主要描述人員生物劑量實驗室於 103、104 及 107 年度參與由加拿大衛生部 Wilkins 教授所舉辦的國際比對結果比較，三次國際比對結果分析 50 顆細胞之偏差皆小於 0.5 Gy，符合主辦方驗收標準，顯示發生大型輻射意外曝露時，本實驗室可提供可靠的人員生物劑量評估。另參加 110 年 11 月 20 日「中華民國放射線醫學會學術研討會」，展示人員生物劑量互動裝置(圖 4-43)，展現歷年研究成果，以推廣與彰顯計畫成果。查核點成果條列如下：



The Society of Nuclear Medicine, R.O.C.

No. 7, Zhongshan S. Rd, Taipei City 100, Taiwan
TEL: 886-2-23562481 FAX: 886-2-23957855 Email: tsnm.tw@gmail.com

Oct. 15, 2021

Dear Mr./Ms. 廖澤蓉 :

We are pleased to inform you that your submission for the 2021 Annual Symposium on Society of Nuclear Medicine, Taiwan (R.O.C.), entitled “**Evaluation of Human Biodosimetry**”, has been accepted as an ePoster presentation (acceptance number: **PB30**). For more information, please see the attached pdf file.

Please let us know if you have any further question.

Best regards,

Ruoh-Fang Yen, M.D.,Ph.D
President,
The Society of Nuclear Medicine,
Taiwan (R.O.C.)

Shih-Chuan Tsai, M.D
President, 2021 Annual Conference
The Society of Nuclear Medicine,
Taiwan (R.O.C.)

Yuh-Feng Wang, M.D.,Ph.D
Chair, Scientific Committee, 2021
Annual Conference The Society of
Nuclear Medicine, Taiwan (R.O.C.)

Ching-Chu Lu, M.Sc
Secretary General,
The Society of Nuclear Medicine,
Taiwan (R.O.C.)

圖 4-41、人員生物劑量成果於中華民國核醫學學會 2021 年會暨學術研討會壁報投稿接受函

Intercomparison of conventional and QuickScan dicentric scoring for the validation of individual biodosimetry analysis in Taiwan

Wan-Chi Lin^{a,*}, Kang-Wei Chang^{b,c,*}, Tse-Zung Liao^a, Fang-Yu Ou Yang^a, Tsui-Jung Chang^d, Ming-Chen Yuan^d, Ruth C. Wilkins^e, and Chih-Hsien Chang^{a,f}

^aIsotope Application Division, Institute of Nuclear Energy Research, Taoyuan, Taiwan; ^bLaboratory Animal Center, Taipei Medical University, Taipei, Taiwan; ^cNeuroscience Research Center, Taipei Medical University, Taipei, Taiwan; ^dHealth Physics Division, Institute of Nuclear Energy Research, Taoyuan, Taiwan; ^eConsumer and Clinical Radiation Protection Bureau, Health Canada, Ottawa, Canada; ^fDepartment of Biomedical Imaging and Radiological Sciences, National Yang Ming Chiao Tung University, Taipei, Taiwan

ABSTRACT

Purpose: The dicentric chromosome assay (DCA), the gold standard for radiation biodosimetry, evaluates an individual absorbed radiation dose by the analysis of DNA damage in human lymphocytes. The conventional (C-DCA) and QuickScan (QS-DCA) scoring methods are sensitive for estimating radiation dose. The Biodosimetry Laboratory at Institute of Nuclear Energy Research (INER), Taiwan, participated in intercomparison exercises conducted by Health Canada (HC) in 2014, 2015 and 2018 to validate the laboratory's accuracy and performance.

Material and methods: Blood samples for the conventional dose response curve for Taiwan were irradiated with 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4 and 5 Gy. Ten blind blood samples were provided by HC. Either or both of two methods of conventional (C) or QuickScan (QS) scoring could be chosen for the HC's intercomparison. For C-DCA triage scoring, only cells with 46 centromeres were counted and each scorer recorded the number of dicentrics in the first 50 metaphases or stopped scoring when 30 dicentrics were reached. Scorers also recorded how much time it took to analyze 10, 20, and 50 cells. Subsequently, the data were entered into the Dose Estimate software (DoseEstimate_v5.1) and dose estimates were calculated. With QS-DCA scoring, a minimum of 50 metaphase cells (or 30 dicentrics) were scored in apparently complete metaphases without verification of exactly 46 centromeres.

Results: For the blinded blood samples irradiated at HC and shipped to INER, the mean absolute deviation (MAD) derived after scoring 50 cells for C-DCA and QS-DCA was <0.5 Gy for all three intercomparisons, meeting the criteria for acceptance.

Conclusion: The results indicated that the Biodosimetry Laboratory at INER can provide reliable dose estimates in the case of a large-scale radiation accident.

ARTICLE HISTORY

Received 4 March 2021
Revised 12 April 2021
Accepted 20 April 2021

KEYWORDS

Biodosimetry; dicentric chromosome assay; intercomparison exercises; radiation accident

圖 4-42、國際期刊論文「Intercomparison of Conventional and QuickScan Dicentric Scoring for the Validation of Individual Biodosimetry Analysis in Taiwan」刊登於 International Journal of Radiation Biology

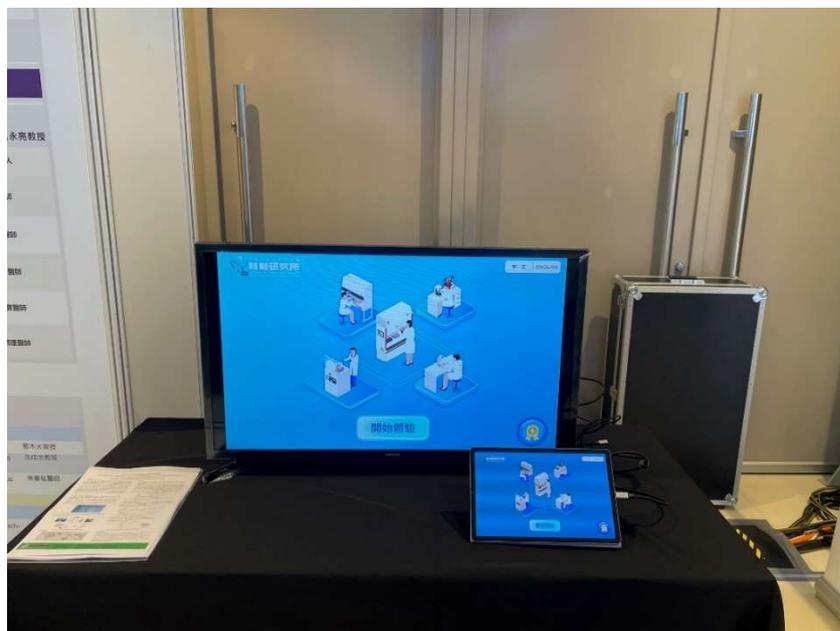


圖 4-43、人員生物劑量互動裝置於中華民國放射線醫學學術研討會展示

1. 參與實驗室間能力比對工作，驗證人員生物劑量實驗室分析能力

人員生物劑量實驗室已於 103、104 及 107 年度參與由加拿大衛生部所舉辦的國際比對，並順利完成；110 年度持續與加拿大衛生部取得聯繫，由於 COVID-19 疫情影響，國外主辦單位將今年度國際比對時程延至年底，為能順利完成計畫預定查核點，本計畫改採國內實驗室間比對，藉此建立國內實驗室比對機制，驗證中心實驗室和衛星實驗室之染色體雙中節分析能力。

今年度共有 3 間實驗室參與比對，包含中心實驗室的‘核研所及計畫輔導已建立與預定建立之衛星實驗室[私立高雄醫○大學（簡稱‘高○’）、與私立台北醫○大學實驗室（簡稱‘北○’）]。比對機制設計上，由本計畫與高○合作取得正常人血液，分裝後請核研所保物組國家標準實驗室以 Co-60 照射 7 個盲樣劑量(照射人員不透露劑量數值)。劑量照射後，將血液樣品進行細胞培養、細胞收穫、固定化、噴片、染色、封片、顯微鏡掃描，製成染色體影像，再將影像分別提供予參與實驗室，各實驗室分析結束後，回傳分析結果於本實驗室。參照國際比對方式，所有實驗室採用傳統染色體雙中節分析法 (conventional-DCA, C-DCA)和快速染色體雙中節分析法 (QuickScan-DCA)，7 個盲樣樣本分析，每個盲樣分析 50 顆細胞。

分析結果利用 Dose Estimate 專業軟體計算實驗室分析人員評估劑量值，比對結果判定係以評估劑量是否位於實際劑量之 ± 0.5 Gy 範圍衡量其正確率，以及以 z-test 評估受測實驗室能力， $z = \frac{|x-\mu|}{\sigma}$ ，其中 x 為評估劑量之平均值， μ 為評估劑量， σ 為不確定度，當 $z \leq 2$ ，表示分析結果滿意。

參加國內實驗室間比對的 3 間實驗室的測試結果為：(1) C-DCA 分析方法正確率最高者為核研所，其次是北○，最後是高○，正確率分別為 100%、85.7%及 57.1%。3 家實驗室

平均正確率為 80.9% (圖 4-44、表 4-24)。(2) QS-DCA 分析方法正確率最高者為核研所，其次是北○，最後是高○，正確率分別為 85.7%、71.4%及 57.1%。3 家實驗室平均正確率為 71.4% (圖 4-45、表 4-25)。(3) C-DCA 與 QS-DCA 分析方法之 z 參數皆小於 2，判定結果顯示各實驗室分析能力均為滿意 (圖 4-46)。

中心實驗室於傳統分析與快速分析均獲得最高正確率，肯定核研所實驗室人員分析能力。衛星實驗室則是在照射劑量大於 2 Gy 之正確度偏低，且有低估的現象。染色體雙中節之分析需仰賴經驗之累積，後續本計畫將藉由經驗分享與教育訓練，積極強化衛星實驗室於較高劑量的分析輔導作業。整體而言，國內各實驗室均具備一定水準之人員生物劑量分析技術。

表 4-24、3 間實驗室採用 C-DCA 方法分析 50 顆細胞的評估劑量值

| 實際劑量 (Gy) | 實際劑量(±0.5 Gy) | | 評估劑量 (Gy) | | |
|--------------|---------------|---------------------|-----------|--------|--------|
| | 上限 | 下限 | 核研所 | 北○ | 高○ |
| 2.3 | 2.80 | 1.80 | 1.976 | 1.851 | 1.495* |
| 0.9 | 1.40 | 0.40 | 0.898 | 1.057 | 0.720 |
| 0 | 0.50 | (0.50) [#] | 0.119 | 0.000 | 0.000 |
| 2.9 | 3.40 | 2.40 | 2.477 | 1.979* | 2.329* |
| 0.5 | 1.00 | 0.00 | 0.479 | 0.237 | 0.237 |
| 3.8 | 4.30 | 3.30 | 3.608 | 3.345 | 2.876* |
| 1.3 | 1.80 | 0.80 | 1.775 | 1.495 | 1.245 |
| 正確率 | | | 100% | 85.7% | 57.1% |
| 平均正確率 | | | 80.9% | | |

*該數值超過上下限

[#]該數值為負值，以括弧呈現其絕對值

2021年國內實驗室比對採用C-DCA分析結果

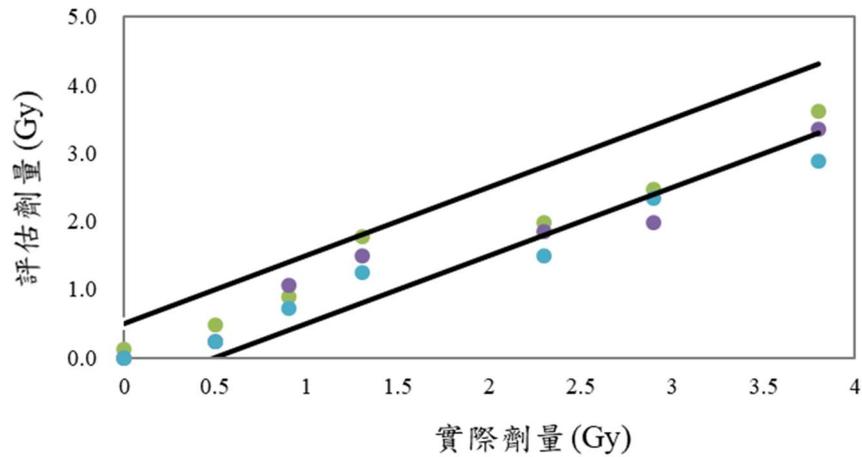


圖 4-44、國內實驗室比對採用 C-DCA 方法的評估劑量結果。綠色點為核研所，紫色點為北○，藍色點為高○。黑色實線為實際劑量上下限範圍 (± 0.5 Gy)。

表 4-25、3 間實驗室採用 QS-DCA 方法分析 50 顆細胞的評估劑量值

| 實際劑量 (Gy) | 實際劑量 (± 0.5 Gy) | | 評估劑量 (Gy) | | |
|-----------|----------------------|--------|-----------|--------|--------|
| | 上限 | 下限 | 核研所 | 北○ | 高○ |
| 2.3 | 2.80 | 1.80 | 2.328 | 2.736 | 1.715* |
| 0.9 | 1.40 | 0.40 | 1.100 | 1.784* | 0.584 |
| 0 | 0.50 | (0.50) | 0.214 | 0.000 | 0.000 |
| 2.9 | 3.40 | 2.40 | 2.652 | 2.736 | 1.979* |
| 0.5 | 1.00 | 0.00 | 0.540 | 0.427 | 0.237 |
| 3.8 | 4.30 | 3.30 | 3.185* | 2.966* | 2.539* |
| 1.3 | 1.80 | 0.80 | 1.600 | 1.784 | 0.954 |
| 正確率 | | | 85.7% | 71.4% | 57.1% |
| 平均正確率 | | | 71.4% | | |

*該數值超過上下限

#該數值為負值，以括弧呈現其絕對值

2021年國內實驗室比對採用QS-DCA分析結果

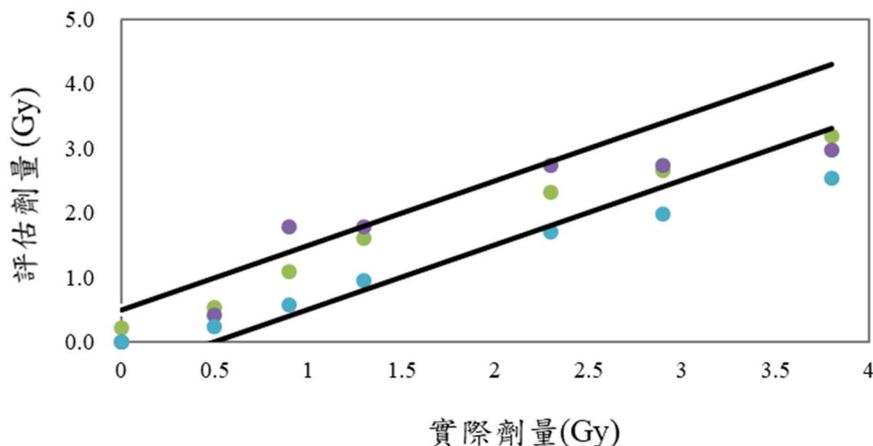


圖 4-45、國內實驗室比對採用 QS-DCA 方法的評估劑量結果。綠色點為核研所，紫色點為北〇，藍色點為高〇。黑色實線為實際劑量上下限範圍 (± 0.5 Gy)。

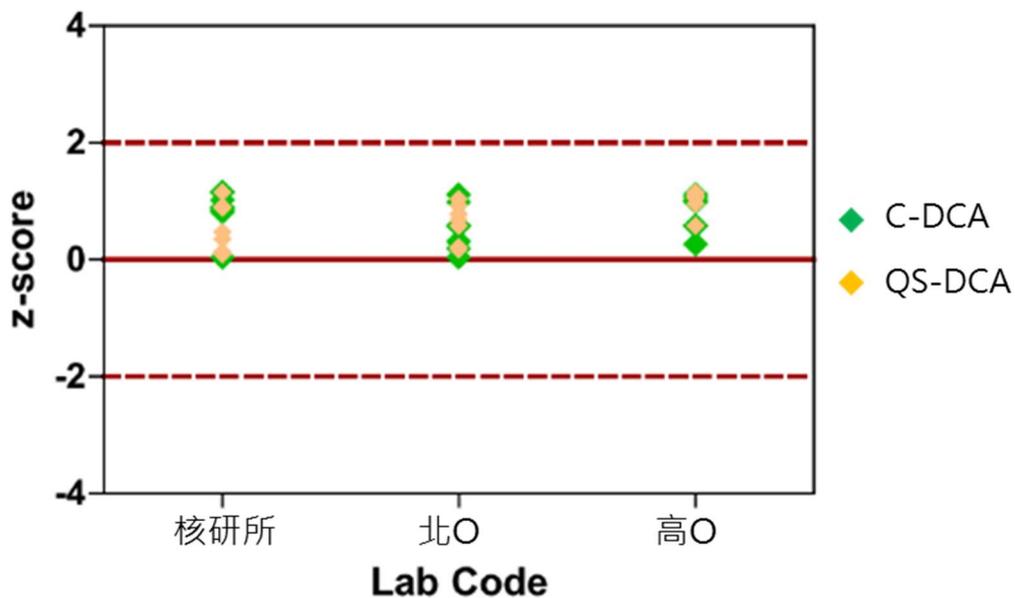


圖4-46、各實驗室的z參數統計分析結果，對50顆細胞採用C-DCA（綠色菱形）和QS-DCA（橘色菱形）兩種分析方法進行評分。X軸為學術單位實驗室。Y軸為z參數， $z \leq 2$ 為滿意（satisfactory）， z 為2~3之間則有問題（Questionable）， $z \geq 3$ 為不滿意（unsatisfactory）。每個數據點代表各實驗室的劑量評估值。

分析 110 年度國人本土染色體雙中節背景值

國際標準組織 (ISO) ISO 19238:2014 國際輻射研究報告指出，正常背景值下，每位正常人的 1,000 顆淋巴球細胞中，平均存在 1 個 (0-2 個) 染色體雙中節變異。生物劑量實驗室於 110 年度完成 3 例正常國人背景值染色體雙中節分析，共計分析 3,049 顆細胞，僅發現 1 顆細胞中含 1 個雙中節 (dicentric) (表 4-26)。統計 101 至 110 年度共完成 31 例正常國人背景染色體分析，一共分析 31,460 顆細胞，發現 23 個雙中節 (dicentric) 於 22 顆細胞中。目前資料庫國人背景雙中節發生率為 0.73 %，代表 1000 顆細胞中有 0.73 個雙中節發生率。

表 4-26、110 年度國人本土染色體雙中節三例背景值分析結果

| 編號 | 第一例 | 第二例 | 第三例 |
|---------|-------|-------|-------|
| 分析影像 | 1009 | 1034 | 1006 |
| 雙中節數 | 1 | 0 | 0 |
| 千分比 (‰) | 0.991 | 0.000 | 0.000 |

此外，本計畫持續進行國人標準曲線研究分析工作，目前生物劑量實驗室與南部醫學中心合作 (高○附設醫院)，增加 3 例正常人背景染色體雙中節分析，未來將進一步與北○進行合作，期許收集更多案例來完善國人之生物劑量背景值。

2. 建立 gamma-H2AX 之分析方法，研製方法檢量線

γ -H2AX 測定法較雙中節染色體測定法，是一種快速、靈敏的生物劑量評估技術，兩者測定法之差異比較請見表 4-27。

表 4-27 雙中節染色體測定法與 gamma-H2AX 測定法比較

| 項目 | 雙中節染色體測定法 | gamma-H2AX 測定法 |
|--------|-----------------|--|
| 測定目標 | 雙中節染色體 | gamma-H2AX 蛋白 |
| 標的成因 | 游離輻射使染色體發生不穩定變異 | 游離輻射、氧化損傷、DNA 損傷化學物質使 H2AX 蛋白磷酸化產生 gamma-H2AX 蛋白 |
| 細胞培養時間 | 48 或 72 小時 | 無須培養 |
| 劑量偵測範圍 | 0.1~5 Gy | 0.02~5 Gy |
| 分析所需時間 | 慢 (1~2 週) | 快 (12~24 小時)* |
| 劑量精確度 | 高 | 普通** |
| 成本 | 低 | 高 |

*如以 0.1 Gy 為分界，高於 0.1 Gy 偵測標的為 gamma-H2AX 螢光強度，數據分析所需時間約 12~24 小時；低於 0.1 Gy 偵測標的為 gamma-H2AX 螢光焦點，數據分析所需時間則須依影像儀器及數據處理軟體而定，初估約需 1~2 週不等。

**gamma-H2AX 蛋白於細胞遭受輻射照射後 5 分鐘內開始形成，約於 45~60 分鐘達到最大值，之後隨細胞啟動修復機制而逐漸消失。這會因個體 DNA 修復能力而有所差異，進而影響劑量評估之準確度。

本計畫於 109 年度研究證實流式細胞儀 (Flow cytometry) 較酵素結合免疫吸附分析法 (ELISA) 分析 gamma-H2AX 蛋白時，具有較佳靈敏度。因此本年度採用 Flow cytometry 建立 gamma-H2AX 分析方法與檢量線，並將試驗程序撰寫成血樣分析方法程序書(圖 4-47)。由本計畫與高○合作取得正常人血液，分裝後請核研所保物組國家標準實驗室以鈷-60 照射 6 個指定劑量，為 0、0.1、0.5、1、3 及 5 Gy。劑量照射後，將血液樣品進行細胞培養、淋巴球細胞分離、固定化、抗體染色、過濾，再將樣品上機至 Flow cytometry 分析。最後將計算試驗結果進行線性迴歸計算。

Gamma-H2AX 蛋白分析方法

1. 目的：以 Flow cytometry 進行樣品分析，回推樣品之輻射曝露

劑量值 -

2. 制定依據：J. Radiat. Res., Vol. 47, No. 3-4 (2006)

3. 材料與方法：

3.1 實驗試劑與耗材

- (1) 健康人類全血檢體
- (2) 15ml 離心管
- (3) 50ml 離心管
- (4) 1.5ml 離心管
- (5) Phosphate buffer (PBS) (Elabscience)
- (6) RBC Lysis buffer (abcam)
- (7) 梯度液 (Lymphoprep)
- (8) 1 抗:Phospho-Histone H2A.X (Ser139)Antibody
- (9) 2 抗:Anti-rabbit IgG(H+L),F(ab')₂ Fragment(Alexa Fluor®488 Conjugate)
- (10) Paraformaldehyde
- (11) Triton X-100
- (12) Bovine Serum Albumin(BSA)

3.2 實驗儀器

- (1) 二氧化碳培養箱 (NuAire)
- (2) 標準溫度計 (不限廠牌)
- (3) 懸臂式離心機 B (ECO TOMY AX-311)
- (4) 懸臂式離心機 A (eppendorf, 5810R)
- (5) Vortex (CORNING, LSE6775)
- (6) 微量吸液器與吸液管 (eppendorf/pipetman)
- (7) Flow cytometry(BD)
- (8) 4℃ 冰箱 (phcbi)
- (9) 冰塊
- (10) 針筒

圖 4-47、gamma-H2AX 之血樣分析方法程序書

不同照射劑量之 Flow cytometry 結果 (圖 4-48) 顯示，隨著照射劑量愈高，gamma-H2AX 產生量愈多，螢光強度愈強，如同預期的，曲線會往右位移 (right shift)。進行螢光強度中位數計算，並與 0 Gy (對照組) 對照計算相對螢光強度比率 (圖 4-49)，相對於對照組，每次試驗皆顯示 gamma-H2AX 生成量螢光強度，即 gamma-H2AX 隨照射劑量提高而升高。將試驗數據平均後，進行線性回歸，可得出一條檢量線 (圖 4-50)，gamma-H2AX 相對產生量與照射劑量之間有良好的線性關係 (判定係數 R^2 為 0.9915)。

依據本試驗結果，初步顯示 gamma-H2AX 產生量與照射劑量有正相關。然而實驗方法仍需進一步優化，如 Flow cytometry 雷射強度參數設定，以及對照組的選定，並有擴增數據點之必要，始能建立較完善的劑量評估檢量線。可因應未來進行大量分析之需求時，可快速完成人員所接受之輻射劑量評估分析。

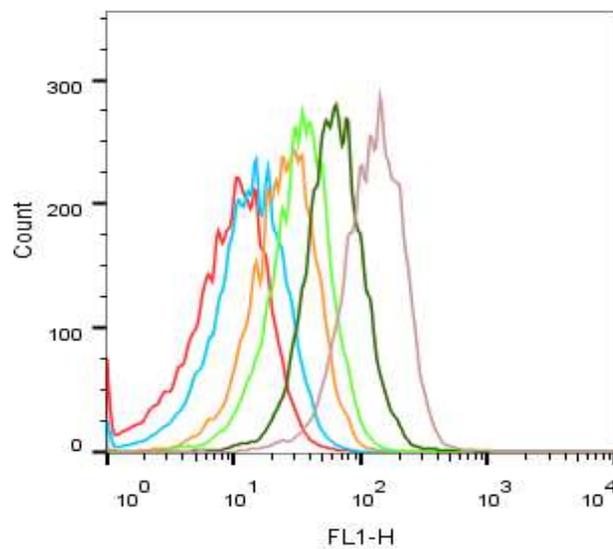


圖 4-48、不同照射劑量之 Flow cytometry 圖。X 軸為螢光強度，Y 軸為細胞數量。紅色曲線為 0 Gy、藍色曲線為 0.1 Gy、橘色曲線為 0.5 Gy、淺綠色曲線為 1 Gy、深綠色曲線為 3 Gy、紫色曲線為 5 Gy。

不同劑量照射下相對 γ -H2AX產生量之中位數

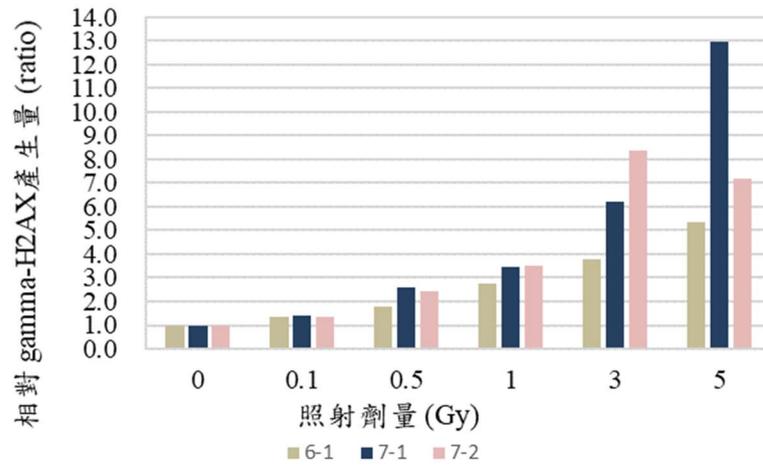


圖 4-49、不同照射劑量之 Flow cytometry 結果。不同顏色代表不同次試驗結果。

γ -H2AX 對照射劑量關係圖

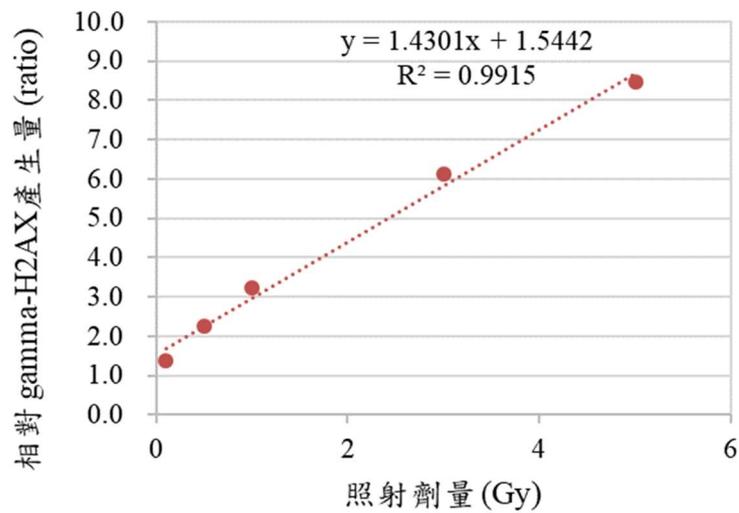


圖 4-50、 γ -H2AX 相對產生量對照射劑量關係圖

伍、結論與建議

一、 110 年度規劃之工作項目及查核點，皆已如期達成。

二、 各子項計畫結論與建議分述如下：

(一)建立國際同步之輻射防護規範研究

完成兩場「美國國家胎兒輻射劑量計算標準(ANSI/HPS N13.54)」讀書會議，確認懷孕婦女胎兒輻射劑量研究方向，並完成胎兒劑量評估技術報告。以學研合作方式，完成胎兒劑量初步評估技術研究，完成「孕婦皮膚表面劑量轉換成子宮劑量」的劑量轉換係數，研究台灣懷孕婦女子宮大小之數學假體及 ORNL 孕婦數學假體進行不同孕期(3 個月、6 個月、9 個月)之胎兒(子宮)劑量評估。未來將進一步以體素假體方式精進台灣懷孕婦女假體，以提升胎兒劑量評估精準度，並以保守條件產出懷孕婦女體內胎兒劑量轉換係數，以供輻射工作人員進行簡易參考依據。

完成眼球水晶體劑量之監測系統研究，完成劑量評估系統與劑量計讀與計算作業程序研究，並完成商用眼球水晶體劑量計特性測試，。同時，完成臨時交辦任務，與 5 家醫院和 1 家核醫製藥中心合作，執行眼球水晶體劑量監測先期訪查計畫，相關經驗將回饋明後年的第 1、2 期訪查計畫。提供「我國游離輻射安全標準修正方向及眼球水晶體劑量計雛型介紹」等專業演講於新興 111 年輻防法規宣導會和放射線醫學會研討會，積極與各界代表溝通，展現政府對於輻射安全之推動與重視。

建立醫療工作人員操作核子醫學科藥物與執行透視攝影診療檢查的劑量評估，以蒙地卡羅 MCNP 程式評估不同條件下工作人員所接受之有效劑量與重要器官等價劑量的關係，研究成果提供政府制定法規參考之依據，保障相關輻射工作人員輻射安全。

(二)強化國內輻射檢校量測技術能力研究

年度規劃之工作項目及查核點，皆已如期達成。研究成

果包含：

- (1) 完成「輻射偵檢儀器校正能力試驗與雙邊比對」，參與測試之實驗室合格率高達 100%。
- (2) 於 6 月 11 日舉辦「2021 年輻射儀器校正與肢端劑量計能力試驗技術討論會」&「第八次輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會」全國性線上技術會議。
- (3) 完成「110 年度環境試樣放射性核種能力試驗」，參與測試之實驗室合格率高達 100%。
- (4) 完成「110 年度中低活度核種分析能力試驗」，參與測試之實驗室合格率高達 100%。
- (5) 於 10/14 舉辦「110 年游離輻射量測能力試驗總結會議暨氫量測技術研討會」全國性線上技術會議。
- (6) 完成眼球水晶體劑量校正系統之校正射質、3m 處標準計量標定、假體設計、監測裝置及擷取程式等相關量測工作。

本期能力試驗研究重要意義如下：

- (1) 肢端劑量計能力試驗為第一次正式舉辦，具有接軌國際趨勢，可促使國內第一線實驗室提供具品質服務，為從無至有的里程碑。
- (2) 本次正規能力試驗時期，首度納入門框、車輛、區域、手足偵檢器、核醫活度校正儀、CI-36 的污染偵檢器，以及中子校正等比對項目。並引入雙射源法進行儀器之無感時間修訂。
- (3) 環境試樣放射性核種能力試驗研究上，本次參與實驗室達到 12 家，包括新增的新北衛○局和高市衛○局，家數為歷年之最。
- (4) 中低活度核種分析能力試驗研究上，本次使用 12 種核種試樣，數量為歷年之最，並新增混合難測核種測試項目。

於國內技術環境接軌國際研究上，國內已於前期引進了 ANSI/HPS N13.11:2009(R2015)人員劑量計能力試驗技術規範，與 ANSI/HPS N13.32:2018 肢端劑量計能力試驗技術規

範，並參考 IAEA 提供 IAEA/WHO 所屬二級輻射偵檢儀器校正實驗室之實驗室間比對服務，建立國內實驗室劑量校正追溯與比對機制。本期更進一步地規劃眼球水晶體劑量計規範之建立，並持續國內技術現況分析研究，運用 TAF 校正領域與測試領域能力試驗進行研究，以評估全國實驗室校正與測試品質，並透過交流提升技術能力，維持良好追溯性，保障民眾與工作人員之輻射安全。

(三)精進染色體變異分析技術與評估研究

研究成果已完成，並投稿通過審查發表於國際期刊，並參加中華民國核醫學學會年會暨國際學術研討會與放射線醫學學會年會，分別發表研究成果及展示人員生物劑量互動裝置，展現歷年研究成果。

雖因 COVID-19 疫情影響今年度改以國內實驗室比對方式，藉此機會建立國內實驗室比對機制，驗證衛星實驗室之染色體雙中節分析能力。國內實驗室比對結果之平均正確率達 70% 以上。整體而言，國內具一定水準之人員生物劑量分析技術。而衛星實驗室在照射劑量大於 2 Gy 之正確度偏低情形，後續將藉由經驗分享與教育訓練，積極輔導衛星實驗室之分析技術，強化實驗室分析品質。

Gamma-H2AX 分析方法優於傳統染色體雙中節變異分析技術在於能夠減少細胞培養時間並能快速得到分析數據，目前實驗結果證實 gamma-H2AX 蛋白的產生量與照射劑量具有正相關。然而實驗方法仍需進一步優化，並有擴增數據點之必要，始能建立較完善的劑量評估檢量線，因應未來進行大量分析情境時，更快速完成劑量評估分析工作。

整體而言，本計畫規劃與執行的工作，應屬國家輻射防護基礎建設的一環，無論在輻射防護法規的更新或執行，本計畫成果能確保我國輻防法規的國際追隨性，及確保國內各專業實驗室可提供足夠的技術能量，支持輻防法規的執行或更新。基礎建設非一朝一夕之功，建請主管機關須持續投入穩定的資源，方能維持各項基礎設

施與技術能力，確保輻射防護法規可持續獲得可靠的技術支撐，保障全民的輻射安全。

陸、参考文献

1. CEA, F. A. R. (2001). ICRP Publication 84 of the ICRP. Pregnancy and medical irradiation.
2. Zaidi, H., & Xu, X. G. (2007). Computational anthropomorphic models of the human anatomy: the path to realistic Monte Carlo modeling in radiological sciences. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 9, 471-500.
3. Stabin, M. G., Watson, E. E., Cristy, M., Ryman, J. C., Eckerman, K. F., Davis, J. L., ... & Gehlen, M. K. (1995). *Mathematical models and specific absorbed fractions of photon energy in the nonpregnant adult female and at the end of each trimester of pregnancy* (No. ORNL/TM-12907). Oak Ridge National Lab., TN (United States).
4. Shi, C. and Xu, X.G. Development of a 30-week-pregnant female tomographic model from computed tomography (CT) images for Monte Carlo organ dose calculations, *Medical Physics*, 31, 2491, 2004.
5. Chen, J. Mathematical models of the embryo and fetus for use in radiological protection, *Health Physics*, 86, 285, 2004.
6. Xu, X.G. et al. A boundary-representation method for designing whole-body radiation dosimetry models: Pregnant females at the ends of three gestational periods—RPI-P3,-P6 and -P9,*Physics in Medicine and Biology*, 52, 7023, 2007.
7. Stewart, F. A., Akleyev, A. V., Hauer-Jensen, M., Hendry, J. H., Kleiman, N. J., Macvittie, T. J., ... & Wallace, W. H. (2012). ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Annals of the ICRP*, 41(1-2), 1-322.
8. Model 8800 PLUS Automatic TLD Card Reader with WinREMStm, Operator's Manual, 2006.
9. 10.9. WinAlgorithms: Dose Calculation AlgorithmFfor Types DXTRAD Dosimeters User's Manual, 2005

10. Halm, B. M., Franke, A. A., Lai, J. F., Turner, H. C., Brenner, D. J., Zohrabian, V. M., & DiMauro, R. (2014). γ -H2AX foci are increased in lymphocytes in vivo in young children 1 h after very low-dose X-irradiation: a pilot study. *Pediatric radiology*, 44(10), 1310-1317.
11. Johnston, M. L., Young, E. F., & Shepard, K. L. (2015). Whole-blood immunoassay for γ H2AX as a radiation biodosimetry assay with minimal sample preparation. *Radiation and environmental biophysics*, 54(3), 365-372.
12. Lin, W. C., Chang, K. W., Liao, T. Z., Ou Yang, F. Y., Chang, T. J., Yuan, M. C., ... & Chang, C. H. (2021). Intercomparison of conventional and QuickScan dicentric scoring for the validation of individual biodosimetry analysis in Taiwan. *International Journal of Radiation Biology*, 97(7), 916-925.
13. Wilkins, R. C., Romm, H., Kao, T. C., Awa, A. A., Yoshida, M. A., Livingston, G. K., ... & Prasanna, P. G. (2008). Interlaboratory comparison of the dicentric chromosome assay for radiation biodosimetry in mass casualty events. *Radiation Research*, 169(5), 551-560.
14. Lee, Y., Jin, Y. W., Wilkins, R. C., & Jang, S. (2019). Validation of the dicentric chromosome assay for radiation biological dosimetry in South Korea. *Journal of Radiation Research*, 60(5), 555-563.
15. Kulka, U., Ainsbury, L., Atkinson, M., Barquinero, J. F., Barrios, L., Beinke, C., ... & Wojcik, A. (2012). Realising the European network of biodosimetry (RENEB). *Radiation protection dosimetry*, 151(4), 621-625.
16. Kataoka, Y., et al., Flow cytometric analysis of phosphorylated histone H2AX following exposure to ionizing radiation in human microvascular endothelial cells. *J Radiat Res*, 2006. 47(3-4): p. 245-57.
17. Damilakis, J., Perisinakis, K., Vrahoriti, H., Kontakis, G., Varveris, H., & Gourtsoyiannis, N. (2002). Embryo/fetus radiation dose and risk from dual X-ray absorptiometry examinations. *Osteoporosis International*,

13(9), 716-722.

18. 周汎濤、洪麗專、林麗華等(民 103)。產科護理學。台灣: 永大書局有限公司。
19. Jacobson, A., & Conley, J. G. (1976). Estimation of fetal dose to patients undergoing diagnostic X-ray procedures. *Radiology*, 120(3), 683-685.
20. Osei, E. K., & Faulkner, K. (1999). Fetal doses from radiological examinations. *The British journal of radiology*, 72(860), 773-780.
21. Kereiakes, J. G., & Rosenstein, M. (2019). *Handbook of radiation doses in nuclear medicine and diagnostic x-ray*. CRC Press.
22. Xu, X. George, et al. "A boundary-representation method for designing whole-body radiation dosimetry models: pregnant females at the ends of three gestational periods—RPI-P3,-P6 and-P9." *Physics in Medicine & Biology* 52.23 (2007): 7023.

附件 期末訪查技術性查核問題與回復(Q&A)

行政院原子能委員會 110 年度科技計畫 期末訪查問題與回復(Q&A)

| (一) 建立國際同步之輻射防護規範研究 | | |
|-----------------------------|--|---|
| | 問題 | 回復 |
| 1. | 表 4-3 懷孕婦女體內胎兒劑量轉換係數比較，其中大/小面射源如何定義，或對應到何種行業之輻射源？另如何利用該轉換係數，推算妊娠期間之「累積」子宮劑量？ | <p>1.由於 ICRP 定義有效劑量是在全身均勻照射下，因此選擇大面積射源，其射源幾何涵蓋全身範圍，小面積射源則是定義在涵蓋腹部大小的面射源。</p> <p>2.射源種類會影響單位時間平均器官之劑量，藉由照射時間即可求得腹部表面累積劑量，再以轉換係數即可回推累積子宮劑量。</p> |
| 2 | 有參與 110 年小規模訪查計畫者，建議於 111-112 年大規模訪查計畫中，亦邀請參與。 | 謝謝建議，未來將邀本年度參與單位持續參與眼球水晶體劑量監測。 |
| (二) 強化國內輻射檢校量測技術能力研究 | | |
| | 問題 | 回復 |
| 1. | 能力試驗之執行，各項目間是否可以考量整併。 | 游離輻射領域各類能力試驗項目的執行方法皆具特殊性，以同屬人員劑量評估用途的人員劑 |

| | | |
|--|--|--|
| | | <p>量計(全身式)、指環劑量計，甚至是正在研發推行的眼球水晶體劑量計能力試驗為例，其照射假體、照射系統、照射劑量範圍、時程規定等依國際規範而有所不同，恐難於同一時期內執行照射。其它如輻射偵檢儀器校正、環境試樣核種分析等能力試驗屬性差異更大外，更受限於執行人力、量測系統、照射系統等資源調配緣故，需要額外所費不貲的經費投入才有可能整併於同期執行。</p> <p>惟，關於技術規範之整併是有可能的，配合 TAF 正研議制式模板全面重整各技術規範內容，將規劃人員劑量計(全身式)、指環劑量計、眼球水晶體劑量計能力試驗整併於同一份技術規範，特定執行細節則列於該技術規範之附件，或以執行單位提供額外的技術指引作為</p> |
|--|--|--|

| | | |
|-----------------------------|----------------------------------|--|
| | | 輔助文件。 |
| (三)、精進染色體變異分析技術與評估研究 | | |
| | 問題 | 回復 |
| 1. | 建議新增染色體雙中節與 gamma-H2AX 技術之優缺點比較表 | 感謝建議，已於第肆章第 79 頁表 4-27 補述。 |
| 2. | 衛星實驗室之分析能力，建議加強輔導。 | 染色體雙中節分析仰賴經驗的累積，本計畫將藉由經驗分享與教育訓練，積極強化於衛星實驗室於將加強較高劑量的分析輔導作業。 |

註：本處委託核研所之計畫名稱及本處承辦人如下：

- | | |
|---------------------|-----------------|
| 1. 建立國際同步之輻射防護規範研究 | (王雅玲技正，分機 2191) |
| | (黃茹絹技士，分機 2194) |
| 2. 強化國內輻射檢校量測技術能力研究 | (林駿丞技士，分機 2206) |
| 3. 精進染色體變異分析技術與評估研究 | (林駿丞技士，分機 2206) |