

核能安全委員會
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
(3/4)**

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

計畫編號：

受委託機關(構)：國家原子能科技研究院

計畫主持人：袁○程

聯絡電話：(03)4711400 ext 7699

子項計畫主持人：蔡○恬、林○君、陳○因

承辦人：廖○蘭

報告日期：112 年 12 月 15 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.....	6
參、研究方法與過程.....	12
肆、主要發現與討論.....	21
伍、結論與建議.....	63
陸、參考文獻.....	67

中文摘要

為接軌國際最新輻射防護建議，國際原子能總署（IAEA）、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 the technology of radiation protection measurement 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 Measurement, Biological Dose.

壹、前言(計畫緣起)

核能安全委員會(以下簡稱為核安會)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，核安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。

國家原子能科技研究院(以下簡稱為國研院)透過『接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力』四年期計畫之執行⁽¹⁾，能有效強化與支援核安會的輻防把關工作、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)、歐盟陸續出版新的管制建議與規範⁽²⁾⁻⁽¹⁰⁾，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與法制精進之研究，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、研究劑量稽核與驗證方法、及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⁽³⁾。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⁽⁵⁾，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）⁽²⁾，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、依據核能安全委員會於109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，輻射從業人員申請佩章之人數近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、保障輻射從業人員之關鍵，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109

年之統計資料顯示，國人每年接受乳房X光攝影篩檢約168萬人次、電腦斷層掃描檢查人次約270萬人次、遠隔放射治療約138萬人次、近接放射治療約6.3萬人次、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最大宗族群——透視攝影放射醫療，建置評估眼球水晶體劑量之校正光子射質；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力，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。

本計畫之執行是以國研院技術為中心，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、二由國研院輻射防護研究所（簡稱：輻防所）執行；子項計畫三由國研院同位素所負責執行，其計畫架構如圖 1 所示。子項計畫項目係依據核安會函文之指示與需求而訂定，報陳核安會審查同意後執行。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限度等技術層面之輻防架構、管制影響及評估方法進行研析，針對關鍵群體進行劑量訪查，結合各界共同評估研修方向，以鞏固管制實務立基。本子項計畫之重要科技關聯圖如圖 2。

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，透過比對試驗的監測作為，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。本子項計畫之重要科技關聯圖如圖 3。

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，期突破傳統雙中節法 0.1 Gy 低限劑量。當細胞遭受游離輻射照射後，細胞中 H2AX 的絲胺酸會被磷酸化產生 γ -H2AX 蛋白， 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。本子項計畫之重要科技關聯圖如圖 4。

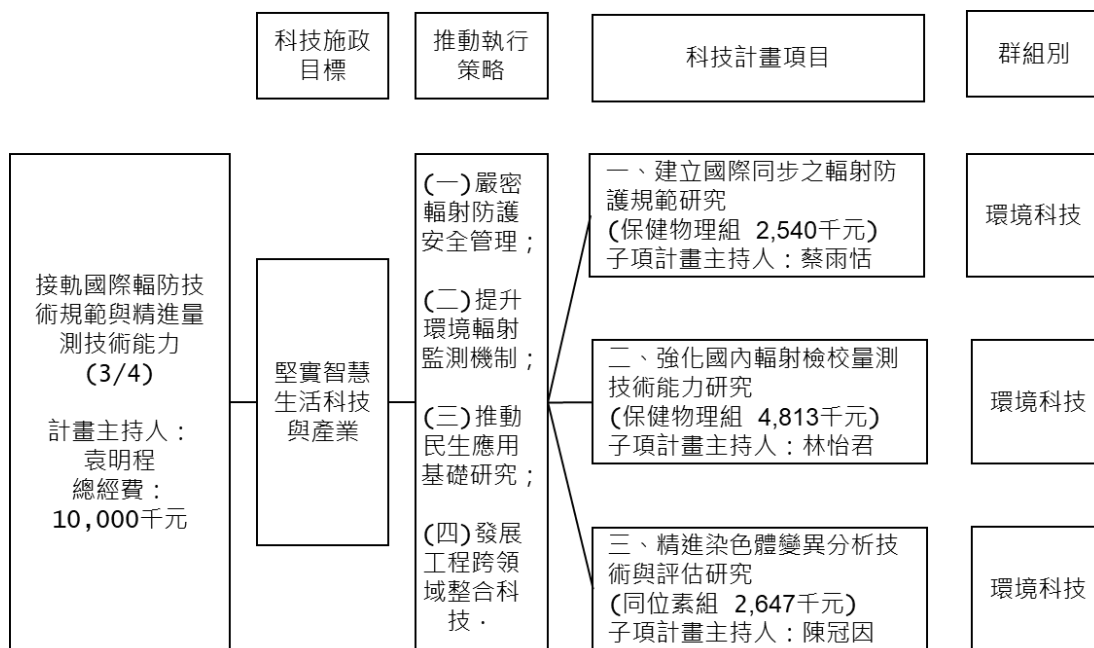
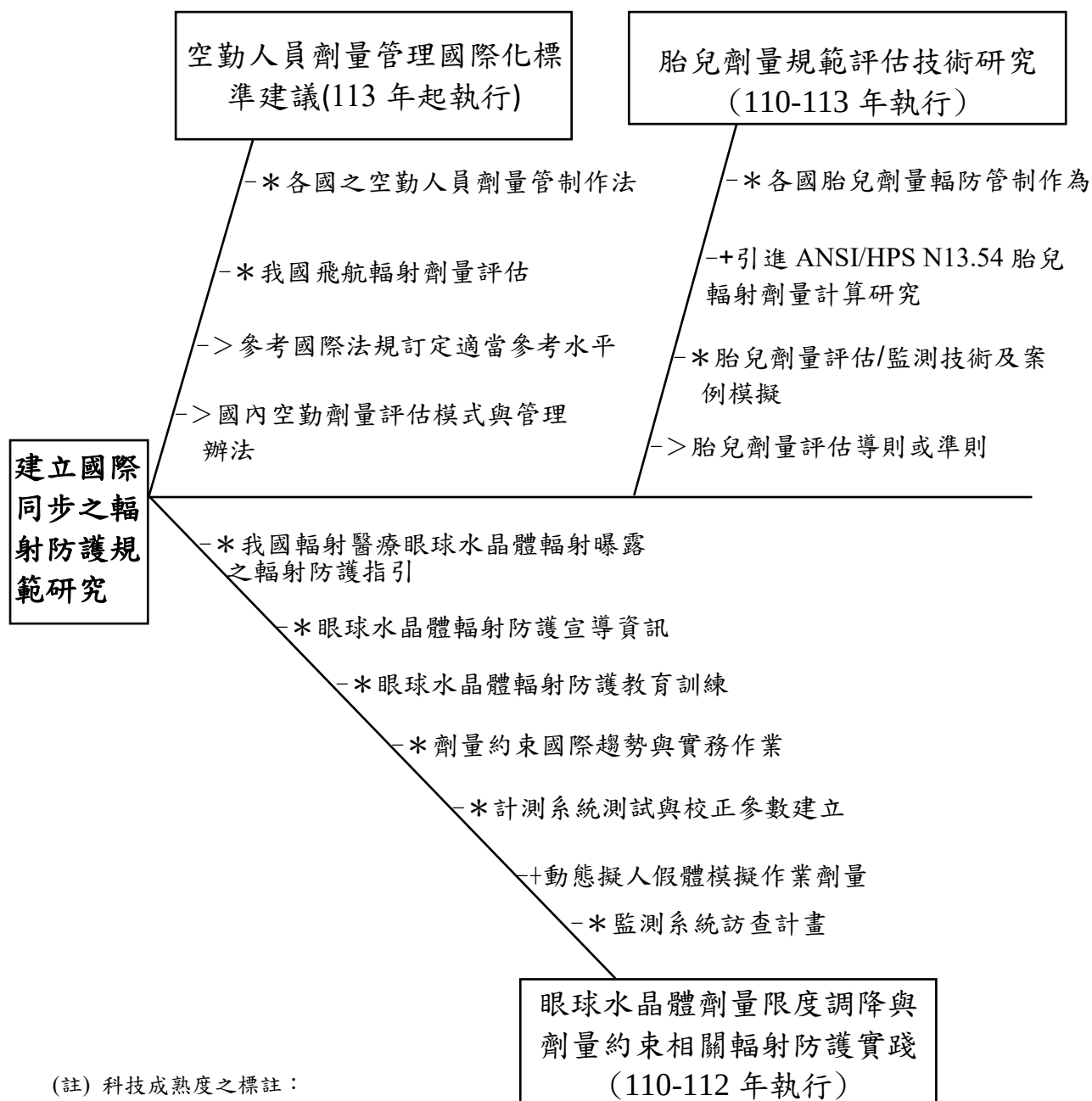


圖 1：：「接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力」科技計畫架構圖

重要科技關聯圖



(註) 科技成熟度之標註：

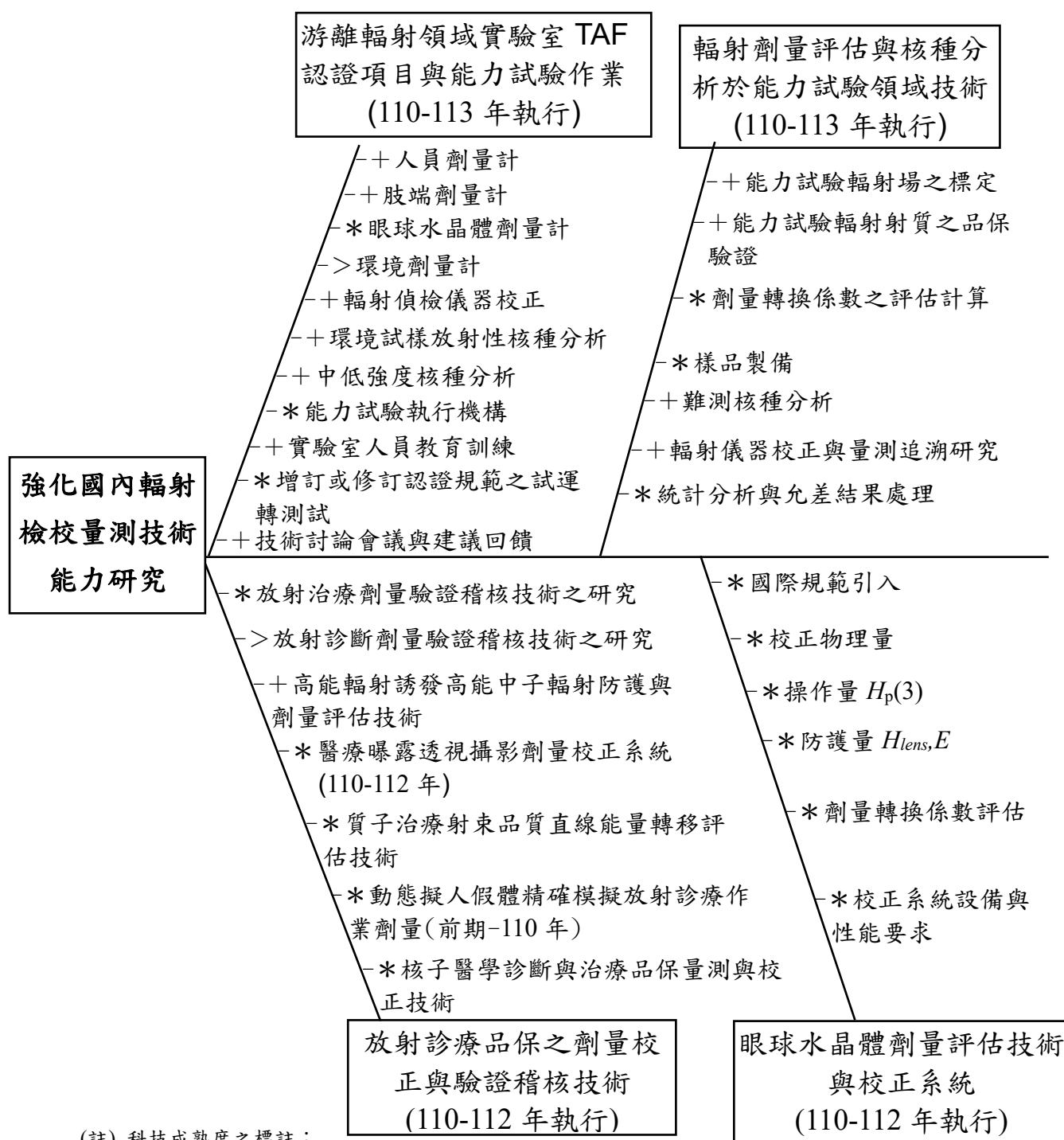
＋：我國已有之產品或技術

*：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：「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 3：「強化國內輻射檢校量測技術能力研究」重要科技關聯圖

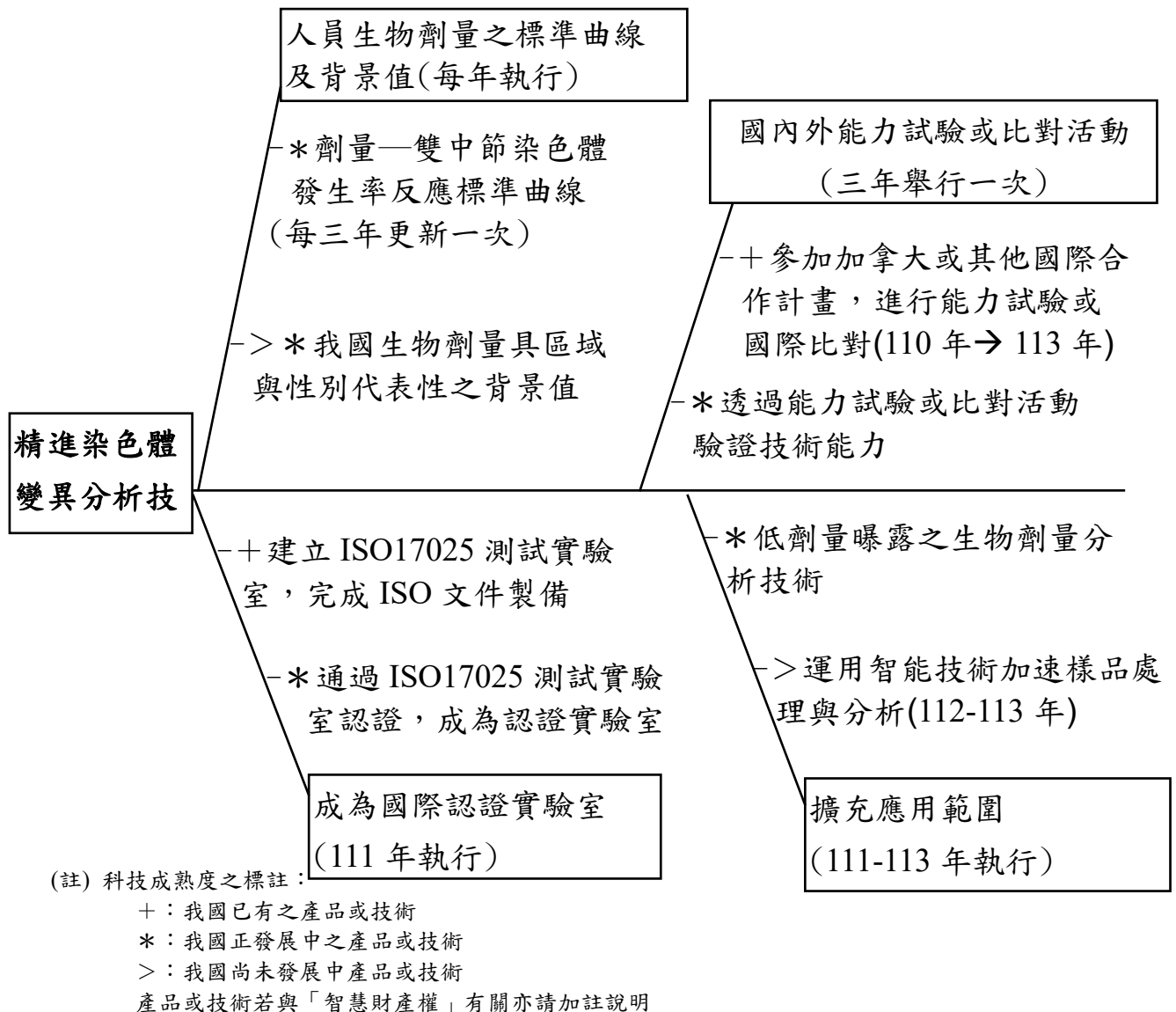


圖 4：「精進染色體變異分析技術與評估研究」重要科技關聯圖

參、研究方法與過程

(一) 內容

112 年度研究計畫工作項目的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. 研擬胎兒劑量評估導則或準則(草案) (含學術合作的 112 年度懷孕婦女假體實際照射及模擬驗證之技術服務)

我國現行游離輻射防護安全標準，對於懷孕女性輻射從業人員之輻射防護，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，對於懷孕女性輻射從業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從業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。

本工作項目以於 110 年度初步完成台灣懷孕婦女壓克力假體製作及數學假體技術建置，並於 111 年度完成台灣懷孕婦女體素假體建立，利用 MCNP 進行劑量轉換係數驗證，為了進一步規劃實際臨床量測以精進實務作法，本年度將以學術合作方式，完成懷孕婦女假體實際照射、電腦模擬驗證及肚皮表面及胎兒劑量保守值估算，並選定一項醫療曝露案例

進行臨床實際量測，評估後續實務執行之可行性，以提供國內懷孕婦女之胎兒輻射劑量管制規範及評估建議。

2. 進行國內眼球水晶體劑量評估之訪查研究 II (含學術合作的國內眼球水晶體劑量評估之訪查研究之技術服務)

因應國際放射防護委員會（ICRP）修訂眼球劑量職業曝露限值從 150 mSv/y 降至 5 年週期 100 mSv，並單一年內不超過 50 mSv 之建議，為符合國際輻射防護趨勢與國情考量，進行 2 年期眼球水晶體劑量監測查訪計畫，本年度延續前一年度持續擴大監測對象為眼球水晶體輻射曝露之高危險群，如：介入性放射診療醫師及其協助醫事人員、核子醫學科放射藥物針劑配製、配藥醫事人員及核電廠之工作人員...等。以累積超過 1500 人月之劑量訪查結果，提供後續技術規範、管制影響及實務曝露監測之參考。

二、 強化國內輻射檢校量測技術能力研究

1. 111-112 年度人員劑量計能力試驗研究與技術研討會舉辦(2/2)

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，人員體外劑量評估實驗室能力試驗是主管機關（核能安全委員會）運用全國認證基金會（TAF）的能力試驗時程，進行的相關研究。本工作依據 ANSI N13.11-2009（R2015）版本標準，即我國測試領域人員劑量計能力試驗技術規範

(TAF-CNLA-T08(5):2019)執行。此研究跨 111 和 112 年度執行，111 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、參與實驗室之校正、研究能力評估程序和方法等。112 年則為運轉之能力試驗程序、劑量計管理、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。

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、貝他和中子，皆須根據 ISO 或 ANSI/HPS 等國際規範進行建立、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、假體訊號線轉接頭組件等)，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。

最後，為分析全國實驗室於人員劑量評估之技術能力，其判斷基準為能力商數(P_i)，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 N13.11-2009 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、V 類別 L 為 0.3 來進行判定。

2. 112-113 年度輻射偵檢儀器校正能力試驗研究與技術研討會舉辦(1/2)

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 112-113 年舉辦之第 9 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 112 和 113 年度執行，112 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。113 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。目前規劃執行時程為 112 年 9 月至 113 年 7 月，由國家游離輻射標準實驗室負責執行，內容主要透過「第 9 次輻射偵檢儀器校正能力試驗」分析國內相關產業的技術和品質能力，用以監控實驗室的技術能力水準及品質能力水平。

3. 建置醫療曝露透視攝影劑量校正系統

為因應主管機關(核能安全委員會)之透視攝影醫療曝露品質保證政策之推行，臨床射束劑量應使用適當劑量計，如：游離腔、克馬面積乘積儀(Kerma area product meter, KAP

meter)等，進行適當的射束品保作業。這些劑量計需要透過國家級劑量追溯體系進行定期校正，以使用於臨床射束，進行準確的劑量評估工作。

本工作項目依據 IEC 61267: 2005 國際標準，建置可用於提供透視攝影劑量校正的 IEC RQC 系列銅附加濾片射質(RQC3、RQC5、RQC8)，此輻射射質可以應用於無散射條件下，具有自動曝露控制系統的透視攝影(automatic brightness control system for fluoroscopy)。建置方法需基於 IEC RQR 系列之管電壓(相當於 50、70 和 100 kV)和固有過濾，再附加銅過濾片，厚度為 0.5、1.5 和 2.0 mm。為符合國際規範要求，其半值層量測結果應與規範之差異小於 5%。112 年度則接續建置醫療曝露透視攝影劑量校正系統，建置方法需先標定出 IEC RQC X 射線空氣克馬(K_{air})標準劑量，以自由空氣游離腔進行輻射場量測，以實驗或蒙地卡羅計算，考量入適當的再結合、光子衰減、電子損失、電極遮蔽、參考溫壓等修正因子，並建置適當的 X 光輸出監測參考因子與自動擷取程式，即可提供 X 射線醫療曝露透視攝影劑量校正服務。

4. 建置 X 射線 ISO 寬能譜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 年週期 100 mSv，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，以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技術能力水準

及品質能力水平的監控。

本工作項目依據 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 W 系列放射診斷能域射質(60 至 150 kV)，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。明年度 112 年度則接續建置 X 射線光子之眼球水晶體劑量校正系統，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 mm 深度處軟組織個人等效劑量($H_p(3)$)，並建置適當的 X 光輸出監測系統與自動擷取程式，即可提供 X 射線光子之眼球水晶體劑量校正服務。而此射質將主要用於能力試驗事故級劑量的測試類別。

三、精進染色體變異分析技術與評估研究

1. 進行 112 年度劑量照射與反應曲線分析工作

以往每四年作一次之劑量照射與反應曲線分析，因應 TAF 查核提出建議，搭配 TAF 實驗室認證證書效期三年，現改以每三年進行分析一次。今年為認證延展後第一年，即進行照射劑量與反應曲線分析，由於實驗室人員異動大，合併進行新進人員染色體分析訓練 2 名。

2. 分析 112 年度國人本土染色體雙中節背景值(含學術合作的之技術服務)

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 111 年度為止，人員生物劑量實驗室已完成 31 例正常國人背景染色體雙中節分析，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‰，即是 1000 顆細胞中有 0.73 個雙中節發生率，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。112 年度，本實驗室持續針對國人背景值進行研究分析工作，生物劑量實驗室將以委託研究技術服務與北部醫學中心合作 (台北醫學大學)，增加 3 例正常人背景染色體雙中節分析，期許收集更多案例來代表國人之生物劑量背景值。

3. 輔導北部備援實驗室建立劑量分析技術

世界衛生組織 (WHO) 有鑑於車諾比核電廠所發生核災變後，由於受影響之國家輻射醫療科技落後及欠缺協調支援能力，因此 WHO 於 2007 年 12 月在瑞士日內瓦舉辦一諮詢會議商討建立全球的生物劑量支援網路 (framework for a global biodosimetry network–BioDoseNet)，此支援網路聚焦在細胞學的生物劑量技術 (cytogenetic)，相關的合作活動以及如何運作此支援網路。於日本在 2001 年 Tokai-mura 臨界核事故後建立了染色體生物劑量計實驗室網絡日本國立放射醫學研究所 (NIRS) 在核應變中起核心作用，染色體生物

劑量計實驗室網絡是該研究所用於核應急的三個網絡之一，該網絡包括了以放射醫學研究所為中心，分別位於日本不同地區的八個實驗室。

本實驗室在策略上，朝向建立參考實驗室（Reference Lab）的中程目標努力，逐步培植與訓練專業人力，同時於台灣各地輔導建立生物劑量評估備援實驗室，使其亦具備染色體雙中節變異分析能力，於大型輻射意外事故發生時，能提高樣本處理量，培訓生物劑量估算的後備人力。本計畫已於 106 年至 110 年起建立南部備援實驗室，輔導高雄醫學大學建立染色體雙中節變異分析技術。今年度將以委託研究技術服務建立北部備援實驗室，輔導台北醫學大學，進行實驗室建立程序，同時須通過人體試驗倫理審查委員會（Institutional Review Board, IRB）審查，取得人體試驗計畫同意，以獲得合法使用人體血樣進行研究，並培訓染色體雙中節背景值分析技術，擴增分析量能。

4. 建立 γ -H2AX 之低劑量檢量線

EU RENEB（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，其中雙中節染色體測定為近年來實驗室已穩定發展之技術，多次參與國際比對並得到具有分析盲樣檢體能力之肯定，但因為雙中節染色體測定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，後續亦需投入大量人力進行分析判讀，且當照射劑量小於 0.1 Gy 存在低分析靈敏度之限制。因此需開發新型生物劑量計具有可以克服劑量敏感性的局限

性，以及避免 DCA 固定的細胞培養步驟。H2AX 為對輻射造成 DNA 損傷敏感的蛋白質之一，當細胞遭受游離輻射照射後，細胞中 H2AX 的絲胺酸會被磷酸化產生 γ -H2AX 蛋白，於 γ -H2AX 標記特異性螢光抗體於顯微鏡下觀測螢光焦點，進而回推評估輻射照射劑量為近年來發展方向，研究顯示受輻射照射產生之 DNA 雙股螺旋斷裂的數量，與 γ -H2AX 螢光數量相關。且低劑量的體內輻射曝露劑量，也可以使用計算人類淋巴球細胞中 γ -H2AX 螢光焦點進行評估。

量測 γ -H2AX 螢光焦點需要一套可靠的螢光顯微鏡設備，今年度將開發低劑量 γ -H2AX 生物劑量評估技術，並於現有顯微鏡系統上增設螢光及影像擷取設備，建立低劑量 γ -H2AX 實驗方法，而後進一步研製低劑量 γ -H2AX 檢量線。

5. 建立染色體電腦智慧型輔助分析程序書

隨著智慧型技術發展逐漸成熟，將導入電腦人工智慧來進行研究分析，目前肉眼分析影像的準確率雖高，但分析時間卻比電腦人工智慧技術長，若能有效訓練電腦人工智慧型系統進行輔助分析，再加上肉眼進行校驗，期望減低分析所需人力及時間進而提升效率。本年度將導入電腦人工智慧型系統進行輔助分析，且相關程序會製作成分析程序書。

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(SCI)論文刊登 1 篇(圖 4-1)，會議論文發表 2 篇(圖 4-2)、舉辦研討會 2 場，形成大會手冊 2 份(圖 4-3 及圖 4-4)、研究報告 3 篇、技術報告 2 篇、人才培育 2 人(薛○彤和黃○瑄碩士生)等量化指標。績效質化說明依各子項計畫分述如下：

Establishment of $H_p(3)$ calibration system for eye dose monitoring in Taiwan

Chiao-An Wu*, Min-Chi Chiu, Tseng-Te Huang, Yi-Chun Lin and Chien-Hau Chu

Health Physics Division, Institute of Nuclear Energy Research, Taoyuan 325207, Taiwan

*Corresponding author: gregor4918@iner.gov.tw

Abstract

In response to the ICRP's amending the occupational exposure limit for the eye lens, the Institute of Nuclear Energy Research (INER) established the $H_p(3)$ calibration system for eye dose monitoring in Taiwan to accurately assess the dose received in the eye lens. INER employed the narrow-spectrum series radiation according to the ISO 4037 as the X-ray radiation qualities, and the measured half-value layer consistent with a 5% difference. The air kerma rate standard was determined by the self-made free air chamber, and through dose conversion coefficient referring to ISO 4037 to obtain the $H_p(3)$ on an ISO cylinder phantom. Furthermore, the calibration system was provided as the characteristics tests for DOSIRIS headset dosimeters. Finally, the $H_p(3)$ calibration system has been established in Taiwan, and it can be used to provide calibration services for eye lens dosimeters and be applied to the proficiency testing that will be held in 2023.

Introduction

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) reviewed the epidemiological surveys in recent years and revised the occupational exposure limit of eye lens dose from the dose equivalent of 150 mSv per year to 20 mSv per year averaged over five consecutive years, and no single year exceeding 50 mSv⁽¹⁾. Research on the monitoring of the eye lens dose expands globally^(2–5). The current ionising radiation protection regulations in Taiwan still refer to the lens dose limit of 150 mSv per year recommended by ICRP Publication 60⁽⁶⁾. The regulator is actively revising relevant regulations to comply with international trends. To assist with the implementation of new regulations, the evaluation equipment for the eye lens dose must be developed as a technical support to ensure the accuracy of dose monitoring. If the lens dosimeter is used to evaluate the dose of staff with high potential risk, the evaluation system of the dosimeter must be traceable to the primary standard to achieve accurate dose monitoring.

Therefore, the National Radiation Standard Laboratory of Institute of Nuclear Energy Research (NRSL/INER) has established an $H_p(3)$ dose calibration system based on the original primary standard. This calibration system will be used to provide calibration services for eye lens dosimeters. The purpose of this article is to introduce the dose

calibration system for the assess of dose to lens of the eye, including the establishment of X-ray radiation qualities according to the ISO 4037, the determining of standard air kerma rates, the evaluation of $H_p(3)$ dose exposure with the monitoring chamber, and then the application for characteristics study of commercial eye lens dosimeters.

Material and methods

The source of $H_p(3)$ calibration system was the PANTAK-SEIFERT ISOVOLT 320 HS medium energy X-ray machine⁽⁷⁾, which can produce X-rays with a tube voltage range of 40–300 kV for irradiation. Irradiation data were collected by using the self-made cylindrical free air chamber (FAC)^(8, 9). It is equipped with a single cavity, and the volume of the cylindrical chamber is adjusted through the movement of the piston to improve the traditional cylindrical FAC and solve the problem of inconsistent inner diameter of chamber.

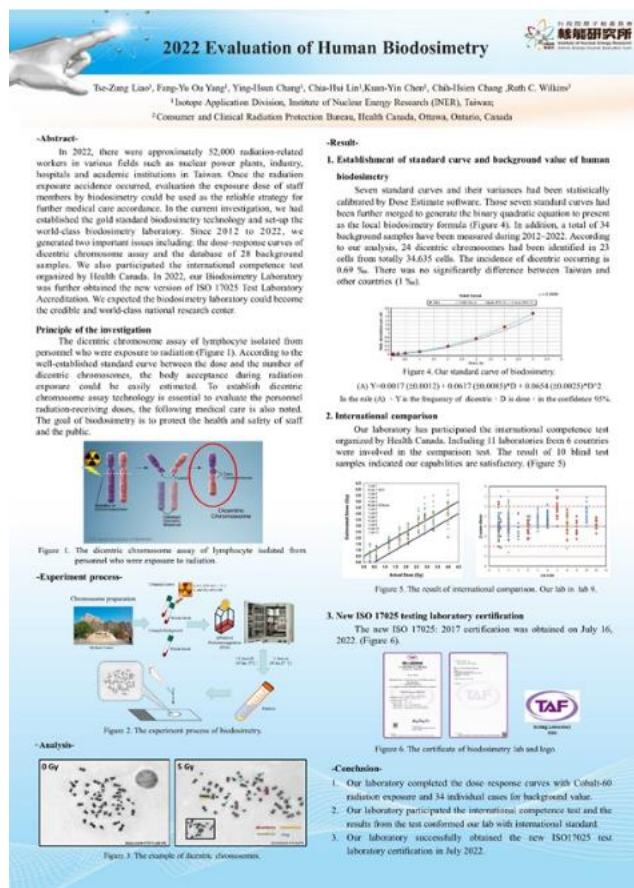
Establishment of radiation qualities

INER selected the radiation quality of the narrow-spectrum series (N-series) beam code defined by ISO 4037-1⁽¹⁰⁾: N-40, N-60, N-80, N-100, N-120 and N-150 for dose calibration of the lens of the eye according to the common energy range of medical exposure.

Received: July 14, 2022. Revised: December 30, 2022. Editorial decision: December 30, 2022. Accepted: December 30, 2022

© The Author(s) 2023. Published by Oxford University Press. All rights reserved. For Permissions, please email: journals.permissions@oup.com

圖 4-1 : Establishment of $H_p(3)$ calibration system for eye dose monitoring in Taiwan 研究成果發表於國際期刊 Radiation Protection Dosimetry，已通過審查獲得期刊接受。



(a)



(b)

圖 4-2：(a)生醫年會會議論文「2022 Evaluation of Human Biodosimetry」；(b) 行政院災防科技創新服務方案成果發表會「精進染色體變異分析技術與評估研究」

人員眼球水晶體劑量計比對試驗暨112年劑量訪查研討會

「人員眼球水晶體劑量計比對試驗暨112年劑量訪查研討會」議程

日期：112年6月8日星期三
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
主辦：核能研究所
協辦：經濟部標準檢驗局

時間	議題	講者/單位
10:00 - 10:30	報到	
10:30 - 10:45	開幕致詞	鄧騰泓 副所長 核能研究所保健物理組
10:45 - 11:30	人員眼球水晶體劑量計比對試驗(24件)標準會議及聯合討論	廖宗賢 博士 核能研究所保健物理組
11:30 - 12:30	112年第一期人員眼球水晶體劑量計聯合研討性成果及聯合討論	廖宗賢 博士 核能研究所保健物理組
12:30 - 13:45	人員劑量TAP規範修訂	黃昭輝 副所長 核能研究所保健物理組
13:45 - 14:00	閉幕致詞	李健豪 博士 核能研究所保健物理組

人員眼球水晶體劑量計比對試驗暨112年劑量訪查研討會

行政院原子能委員會核能研究所

保健物理組

國家游離輻射標準實驗室

112年6月8日

主辦單位：行政院原子能委員會、經濟部標準檢驗局
執行單位：行政院原子能委員會核能研究所



圖 4-3：人員眼球水晶體劑量計比對試驗暨 112 年劑量訪查研討會與大會手冊，共計 8 家實驗室 32 位專家代表參與。

「第九次輻射偵檢儀器校正能力試驗說明會」

日期：112年08月24日
地點：核能研究所 國家游離輻射標準實驗室 (035館) 二樓小會議室

時間	議題	講者/單位
10:00 - 10:30	報到	
10:30 - 10:40	開幕致詞	朱健豪 博士 核能研究所保健物理組
10:40 - 11:30	第九次輻射偵檢儀器校正說明	鄧騰泓 研究助理 核能研究所保健物理組
11:30 - 12:30	陸軍核生化研究中心儀器校正比對 完備校正實驗室校正比對	鄧騰泓 研究助理 核能研究所保健物理組
12:30 - 13:45	綜合討論	鄧騰泓 研究助理 核能研究所保健物理組
13:45 - 14:30	閉幕致詞	朱健豪 博士 核能研究所保健物理組

第九次輻射偵檢儀器校正能力試驗說明會

國家原子能科技研究院
輻射防護研究所
國家游離輻射標準實驗室

112年8月24日

主辦單位：核能安全委員會、經濟部標準檢驗局
執行單位：國家原子能科技研究院



圖 4-4：第九次輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會與大會手冊，共計 8 個單位 23 位專家代表參與。

一、 內容

(一) 建立國際同步之輻射防護規範研究

子項計畫一共有二個工作項目。本年度的最重要成果為完成兩年期的關鍵群體眼球水晶體劑量訪查工作，其輻射工作人員來自放射醫療、非破壞檢測與核能電廠領域，參與人數共 XX 位，共累積 XX 人月筆劑量評估值。

1. 研擬胎兒劑量評估導則或準則(草案) (含學術合作的 112 年度懷孕婦女假體實際照射及模擬驗證之技術服務)

本年度研究目的為驗證台灣懷孕婦女假體模擬數值與實際量測值是否一致，並討論使用蒙地卡羅程式運算的劑量轉換係數是否可應用於實際情況。本研究使用 111 年度完成的台灣懷孕婦女假體以及 MCNP 模擬使用的台灣懷孕婦女體素假體，以學術合作方式，完成懷孕婦女假體量測實驗及模擬驗證，共選定兩組光子射源進行驗證實驗，第一組是非醫用常見的 ^{137}Cs 射源，用來評估單能光子實際量測及模擬之間的差異，另一組則針對醫用診斷 X 光設備的國際標準 RQR 射質 (IEC 61267)，並選定腹部常用的照射條件 RQR 8 來進行光子連續能譜驗證。

「 ^{137}Cs 量測及模擬驗證」於國立清華大學 ^{137}Cs 標準射源校正實驗室進行照射，將 4 個孕期的台灣懷孕婦女假體放置於照射台上 (圖 4-)，射源與腹部表面之間的距離為 80 公分，射源中心對準腹部表面最凸處 (第 28 層與第 29 層中心)，

同時將 TLD 劑量計放置於腹部表面，如圖 4-6 所示，假體內依據不同孕期的子宮體積大小，置入不同數量的 TLD 劑量計，照射條件為腹部表面累積劑量達 15 mSv，照射時間約為 71 分鐘，照射後將 TLD 靜置一天後再進行計讀，該讀值為實驗測量值。為了驗證蒙地卡羅模擬數值是否與實驗測量值有差異，本研究使用 MCNP 建立與真實量測空間相當的模擬情景(圖 4-7)，並放入台灣懷孕婦女體素假體，計算腹部表面劑量以及假體內子宮區域的平均劑量，以驗證實際測量與模擬計算結果是否一致。

「醫用診斷 X 光量測及模擬驗證」於國家原子能科技研究院國家游離標準實驗室進行照射，將 4 個孕期的台灣懷孕婦女假體放置於照射台上 (圖 4-8)，射源與腹部表面之間的距離為 300 公分，射源中心對準腹部表面最凸處 (第 28 層與第 29 層中心)，同時將 TLD 劑量計放置於腹部表面 (圖 4-9-9(a))，假體內依據不同孕期的子宮體積大小，置入不同數量的 TLD 劑量計，照射條件為腹部表面累積劑量達 20 mSv，照射時間約為 266 秒，於相同照射條件下，另外置換徽章於腹部表面 (圖 4-9-9(b))，以了解未來使用腹部徽章之使用情境。在模擬方面，同步使用 MCNP 建立與真實量測空間相當的模擬情景(圖 4-10)，計算腹部表面劑量以及假體內子宮區域的平均劑量，以驗證實際測量與模擬計算結果是否一致。

結果顯示，在「 ^{137}Cs 量測及模擬驗證」實驗中，除未懷孕子宮劑量 MCNP 模擬高估 23.55% (圖 4-11(a))，其餘孕期的子宮劑量、肚皮表面 TLD 劑量讀值與模擬值誤差皆小於 10%，

若使用子宮劑量轉換係數來評估胎兒劑量，除未懷孕假體，其餘孕期的量測值與模擬值的誤差皆小於 10% (圖 4-11(c))，未懷孕的子宮劑量誤差可能來自實際照射 TLD 佈點的誤差所造成，在單能光子情況下，誤差皆小於 10%，不需另外使用相關係數來校正模擬與量測之間的差異，整體來說，使模擬的子宮劑量轉換係數來評估實際腹中胎兒劑量是可行的。在「醫用診斷 X 光量測及模擬驗證」實驗中，所有孕期不論是子宮劑量還是肚皮表面 TLD 劑量，實驗量測值與模擬值誤差皆小於 10% (圖 4-11(b))，若使用子宮劑量轉換係數來評估胎兒劑量，所有孕期的子宮轉換係數量測值與模擬值的誤差也都小於 15% (圖 4-11(d))，相較於單能光子的結果，連續能譜因為有較多散射光子，因此模擬與量測的誤差些微增加，且子宮劑量轉換係數的模擬值高於實驗量測值，基於保守評估原則，在診斷 X 光連續能譜情況中，使模擬的子宮劑量轉換係數來評估實際腹中胎兒劑量是可行的，如

表 4-1 所示，從腹部表面 TLD 劑量及腹部佩章的劑量讀值結果中，可以觀察因光子回散射的原因，導致腹部佩章的讀值皆高於 TLD 劑量值，使用腹部佩章平均高估 14.72%，因此未來若要使用腹部佩章讀值來估算腹中胎兒劑量，需要注意可能會有高估的情況發生。

根據上述研究結果，本研究擬定了一套胎兒劑量評估程序，流程圖如圖 4-12 所示，可用於懷孕輻射工作人員的胎兒劑量評估。

首先，女性輻射工作人員一旦確認懷孕，應在確認懷孕後告知雇主，雇主得知員工懷孕後，第一種方法建議給予額外的腹部劑量配章，在剩餘妊娠期間，配戴於懷孕輻射工作人員腹部表面，將腹部劑量配章的淺部劑量讀值 ($H_p(0.07)$) 作為腹部表面劑量。第二種方法，如果雇主沒有額外給予腹部劑量配章，則可以使用常規個人劑量配章（一般佩戴在胸部表面區域）的淺部劑量讀值 ($H_p(0.07)$) 也可以被視為腹部表面劑量。一般人員劑量，是使用深部劑量讀值 $H_p(10)$ 10 mm 處的深部劑量為有效劑量，但本研究採用 $H_p(0.07)$ 0.07 mm 處的淺部劑量作為腹部表面劑量。第三種方法，在懷孕輻射工作人員忘記配戴個人劑量計的情況下，可以使用文獻⁽¹⁵⁾中估計的最大劑量率來估計腹部表面劑量。

下一步是根據懷孕周期和工作區域的平均光子能量選擇合適的子宮劑量轉換係數 (UDCC)，用來計算一個月的子宮劑量。最後，在隨後的妊娠期中，將每月的子宮劑量加起來作為胎兒在懷孕期間所接受的總劑量。根據 ICRP 103 建議⁽⁶⁾，

女性輻射工作人員在告知雇主懷孕後，雇主應實施相關保護措施，並確保在懷孕的剩餘時間內對胎兒的額外劑量不超過約 1 mSv，本研究提出了幾種評估剩餘妊娠期間的胎兒劑量評估方法，以確保胎兒劑量不超過 1 mSv。

透過 ^{137}Cs 和醫用診斷 X 光量測實驗結果，可以證明模擬和測量數據相近（誤差小於 15%），因此本研究使用 MCNP 模擬建置不同光子能量的子宮劑量轉換係數 (UDCC)，供後續胎兒劑量評估使用。本研究使用的劑量徽章讀值平均比 TLD 劑量讀值高約 14.72%，也符合台灣財團法人全國認證基金會的規範，人員劑量計的測量誤差在 30% 以內是可以接受的。

本研究提供的子宮劑量轉換係數 (UDCC) 可應用於胎兒劑量評估，也提供胎兒劑量評估流程圖，其中包含 3 種評估剩餘妊娠期間胎兒劑量的方法，對於核子醫學科懷孕輻射工作人員未配戴劑量證的情況，仍可根據文獻或工作場所最大劑量率評估腹部表面劑量，以確保胎兒劑量符合 ICRP 103 號報告劑量建議值，不超過 1 mSv。

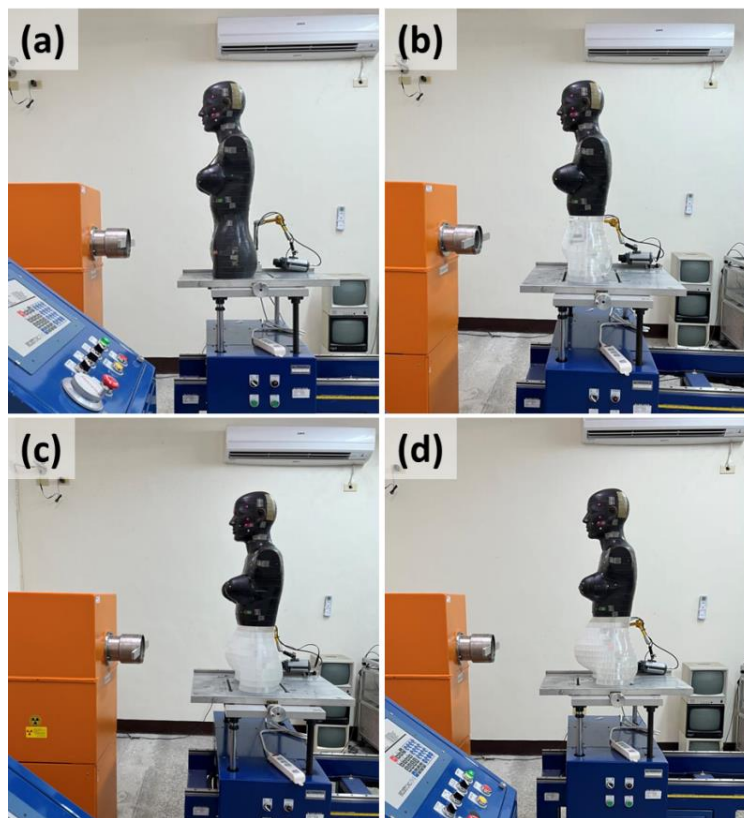


圖 4-5： ^{137}Cs 單能光子量測實驗 (a) 未懷孕 (b) 3 個月 (c) 6 個月 (d) 9 個月孕期

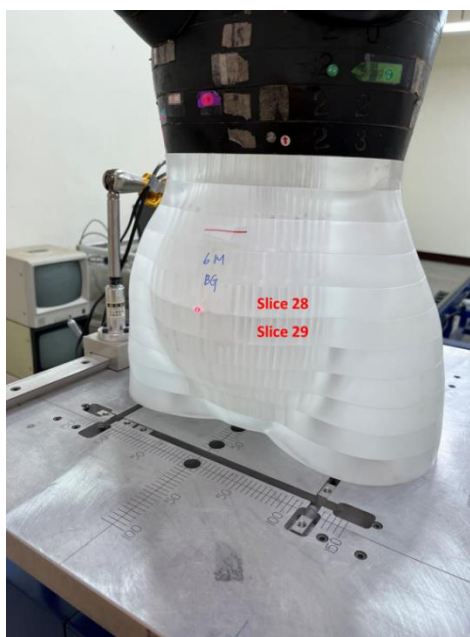


圖 4-6：射源中心及 TLD 置於腹部表面第 28 及第 29 層之間

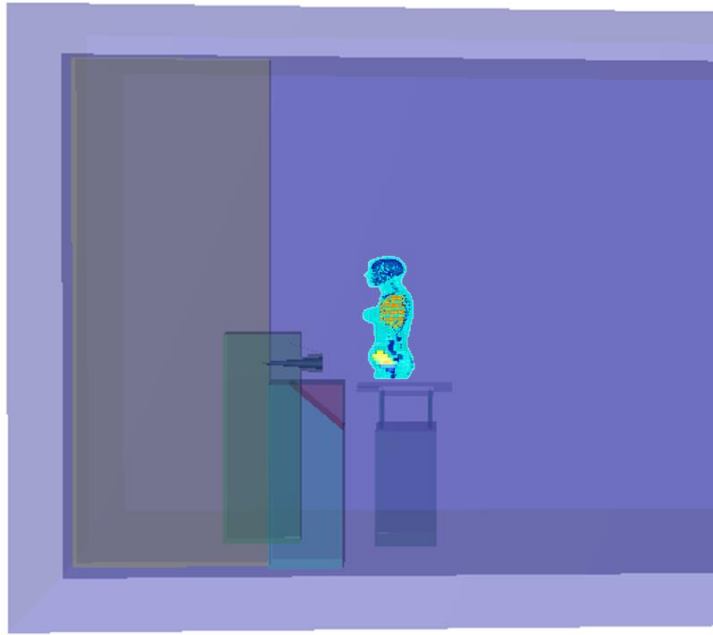


圖 4-7： ^{137}Cs 單能光子量測實驗 - MCNP 模擬情境

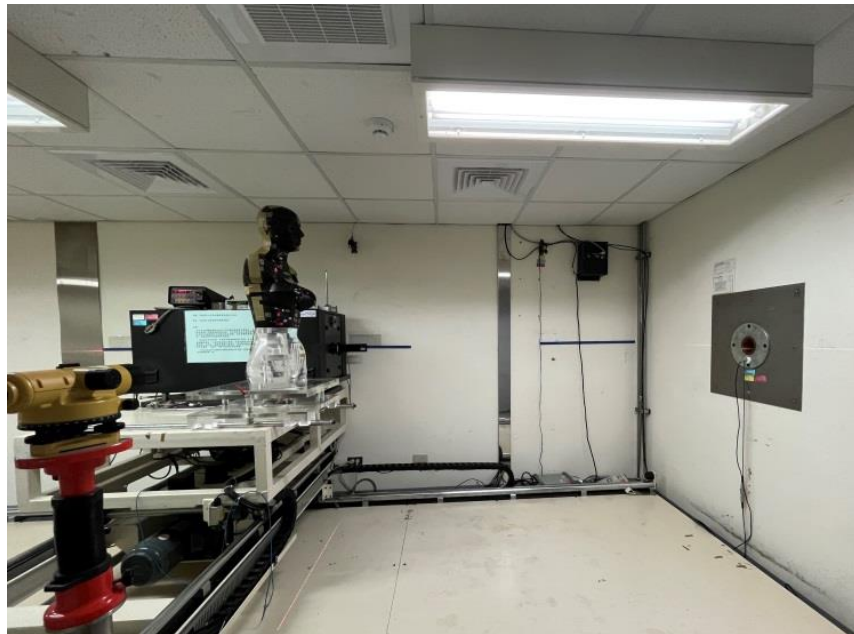


圖 4-8：醫用診斷 X 光連續能譜量測實驗

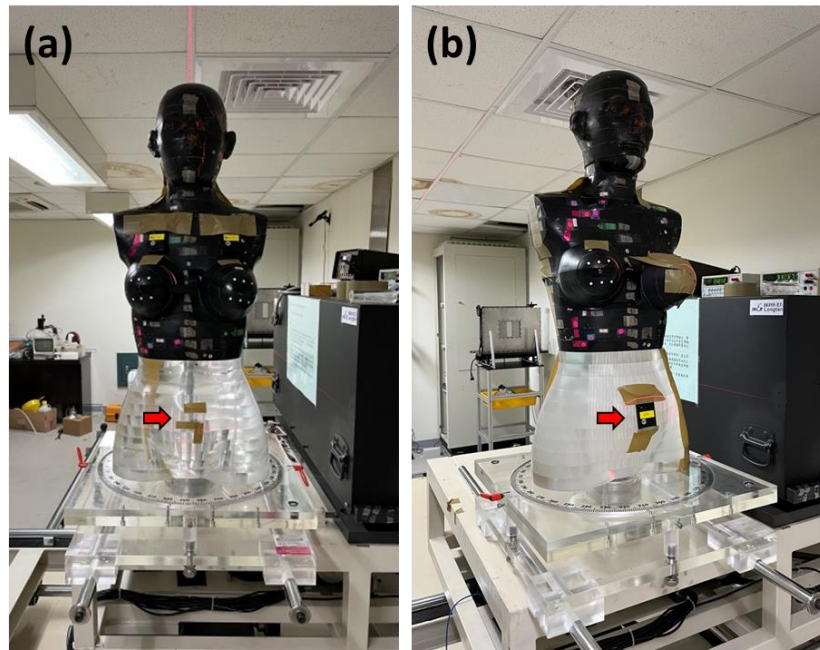


圖 4-9：醫用診斷 X 光連續能譜量測實驗-腹部表面 (a) TLD 劑量計及 (b) 佩章位置



圖 4-10：醫用診斷 X 光連續能譜量測實驗 - MCNP 模擬情境

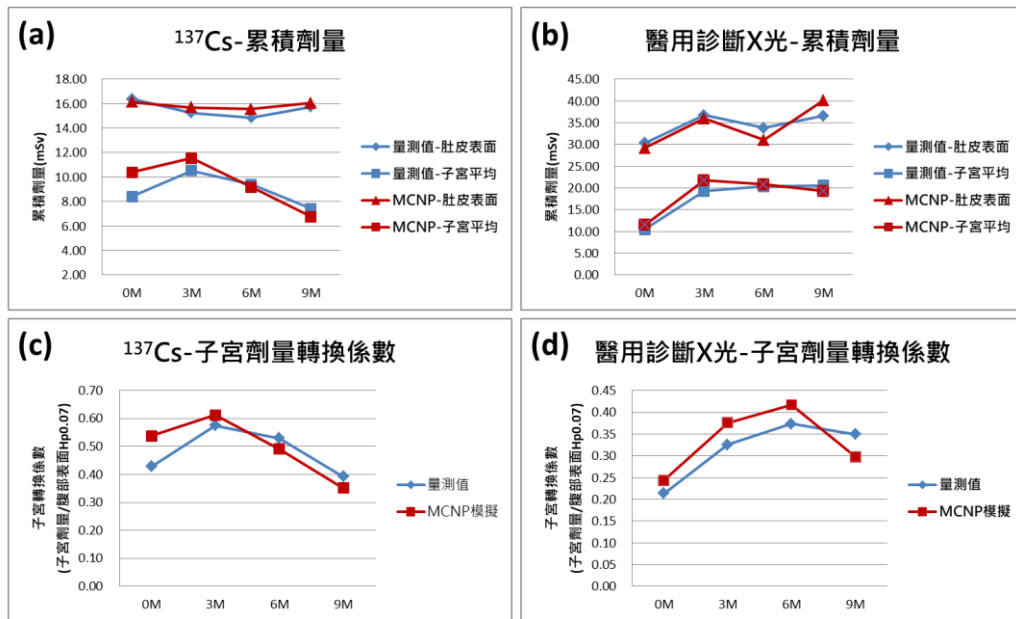


圖 4-11： ^{137}Cs 及醫用診斷 X 光量測及模擬驗證結果

表 4-1： ^{137}Cs 單能光子量測實驗-累積劑量

累積劑量(mSv)	0M	3M	6M	9M
實際量測-肚皮表面	16.38	15.26	14.83	15.75
實際量測-子宮平均	8.41	10.53	9.41	7.42
MCNP 模擬-肚皮表面	16.12	15.70	15.55	16.04
MCNP 模擬-子宮平均	10.39	11.53	9.16	6.76

表 4-2：醫用診斷 X 光連續能譜量測實驗-累積劑量

累積劑量(mSv)	0M	3M	6M	9M
實際量測-肚皮表面	30.27	36.76	33.77	36.60
實際量測-子宮平均	10.41	19.28	20.31	20.60
MCNP 模擬-肚皮表面	36.27	33.08	33.27	37.79
MCNP 模擬-子宮平均	14.23	20.03	22.33	18.12

表 4-3：腹部表面劑量比較表

腹部表面劑量 (mSv)	0M	3M	6M	9M
腹部佩章	39.10	40.37	38.21	39.09
TLD	30.27	36.76	33.77	36.60
誤差百分比 (腹部佩章-TLD) / TLD	29.16%	9.81%	13.14%	6.78%

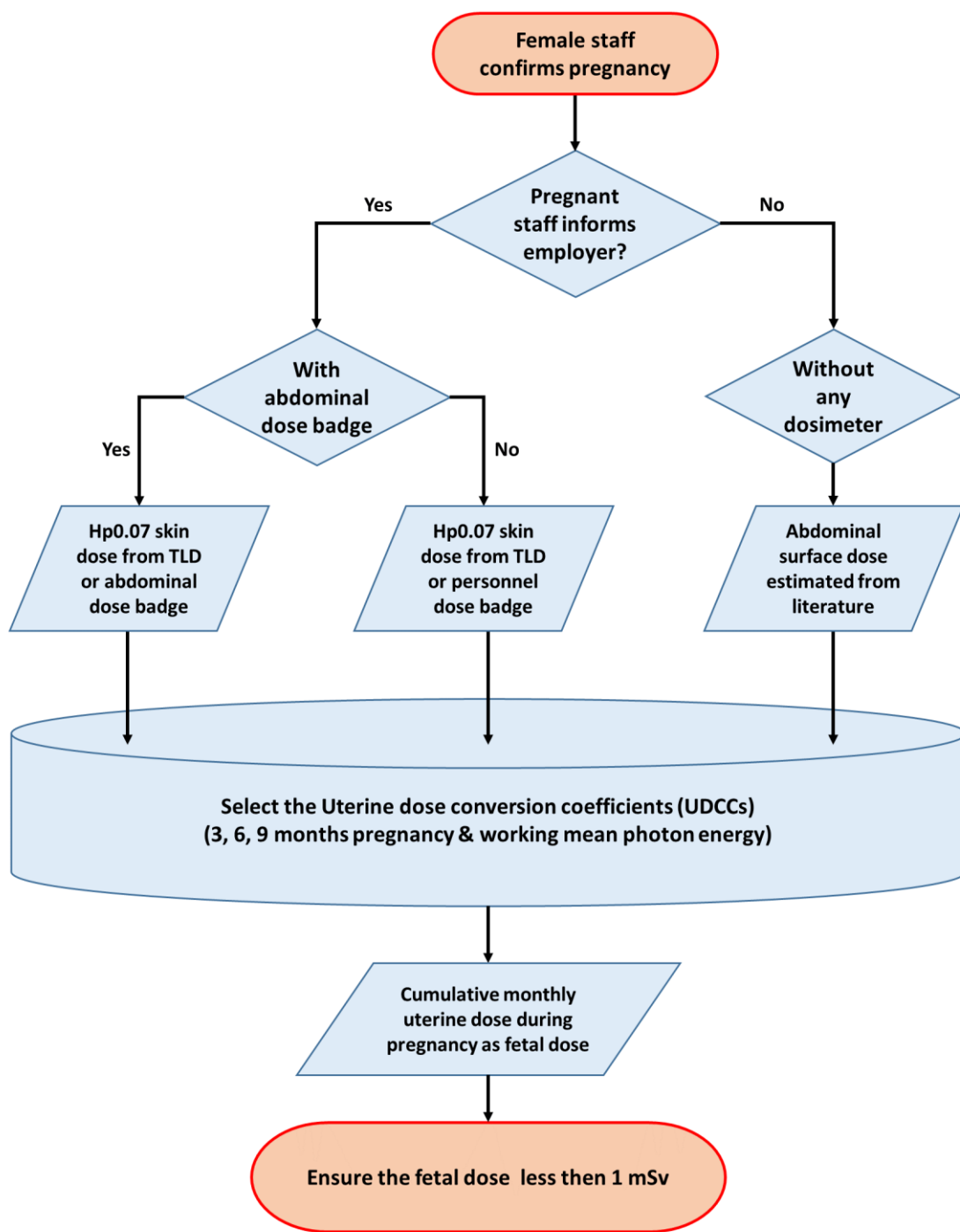


圖 4-12 胎兒劑量評估流程圖

2. 進行國內眼球水晶體劑量評估之訪查研究 II (含學術合作的國內眼球水晶體劑量評估之訪查研究之技術服務)

與國內 1 家學術單位及 7 家人員體外輻射劑量評定機構進行合作方案完成「國內眼球水晶體劑量評估之第 II 期訪查研究」，本年度訪查監測對象，主要針對醫療院所介入性放射診療醫師及其協助醫事人員、核子醫學科放射藥物針劑配製、配藥醫事人員、核能電廠與非破壞檢測之輻射工作人員，並逐月提供眼球水晶體劑量計予參加者進行眼球水體劑量監測評估，以了解國內眼球水晶體輻射曝露之高危險群於現行輻射作業下之眼球水晶體的職業曝露劑量。

本年度參與眼球水晶體劑量監測訪查計畫有 22 家醫療院所 (38 科室)、2 家非破壞性檢測公司及核能電廠，共 204 位參加者，圖 4-13 為工作族群參與人數之分布圖，其中醫療院所監測對象為介入性放射性診療醫師或其協助者 114 人與核子醫學科輻射工作人員 32 人；2 家非破壞檢測公司共 20 位參與者；核能電廠監測對象為一般例行工作輻射人員 26 人及歲修期間輻射工作人員 12 人。本年度訪查計畫自 2 月起陸續針對參與者進行眼球水晶體劑量監測，共完成 1110 人次眼球水晶體劑量評估。

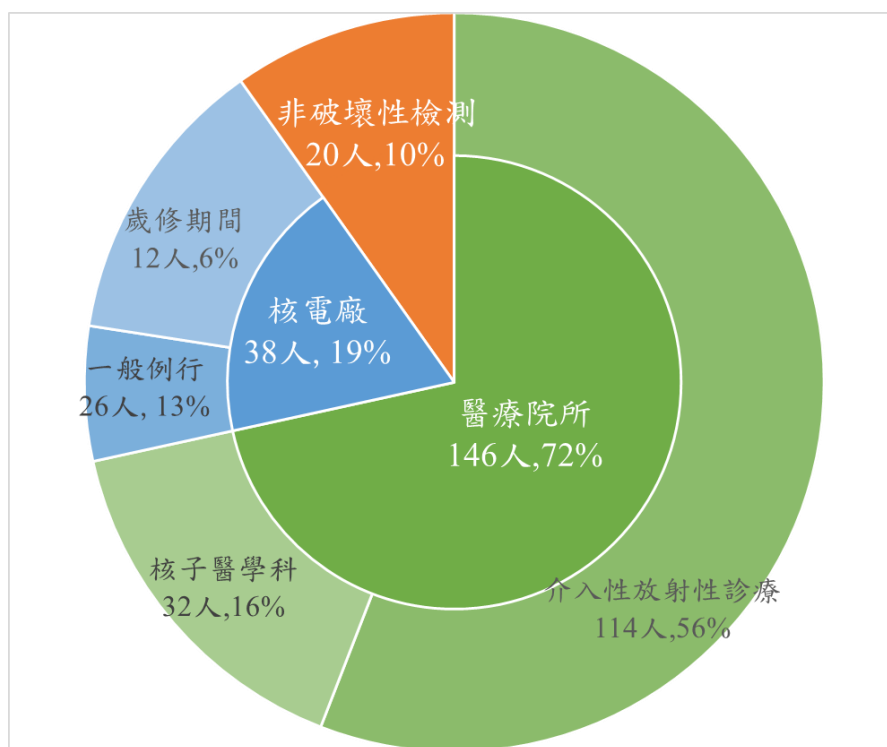


圖 4-13：工作族群參與人數之分布圖

圖 4-14 為本年度參與對象每月眼球水晶體劑量 $H_p(3)$ 監測結果，核能電廠監測 147 人次之月 $H_p(3)$ 值介於 0 至 5.38 mSv 之間；非破壞檢測監測 140 人次之月 $H_p(3)$ 值介於 0 至 3.01 mSv 之間；核子醫學科監測 175 人次之月 $H_p(3)$ 值介於 0 至 0.65 mSv 之間；介入性放射性診療監測 588 人次之月 $H_p(3)$ 值介於 0 至 7.75 mSv 之間。

為了解每位參與者具代表性輻射作業期間眼球水晶體曝露情形，將連續監測達 3 月以上之眼球水晶體劑量 $H_p(3)$ 結果，假以月平均劑量值乘以 12 倍推估個人年累積 $H_p(3)$ 值(圖 4-15)。核能電廠 21 位輻射工作人員之年累積 $H_p(3)$ 值介於 0 至 23.08 mSv 之間；非破壞檢測 20 位輻射工作人員之年累積 $H_p(3)$ 值介於 0 至 17.61 mSv 之間；核子醫學科 30 位輻射工作人員之年累積 $H_p(3)$ 值介於 0 至 3.72 mSv 之間；介入性放射性診療 106 位輻射工作人員之年累積 $H_p(3)$ 值介於 0 至 59.02 mSv 之間；另外，關於有超過新眼球水晶體劑量限值每年平均 20 mSv 風險之評估上，有 1 位(4.8%)核電廠輻射工作人員及 7 位(6.6%)介入性放射性診療輻射工作人員，並其中有 1 人超過 50 mSv，而非破壞檢測及核子醫學科則無超過新劑量限值之風險。

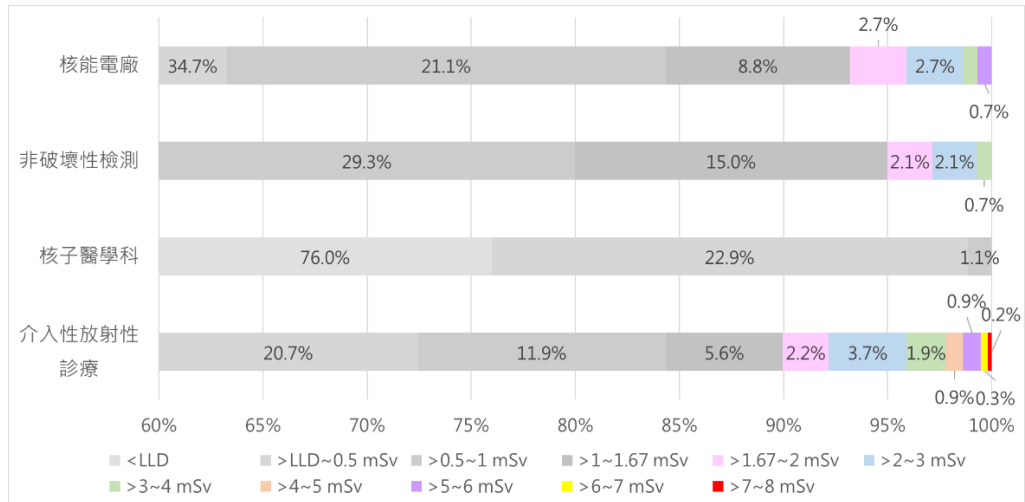


圖 4-14：每月眼球水晶體劑量 $H_p(3)$ 監測之結果

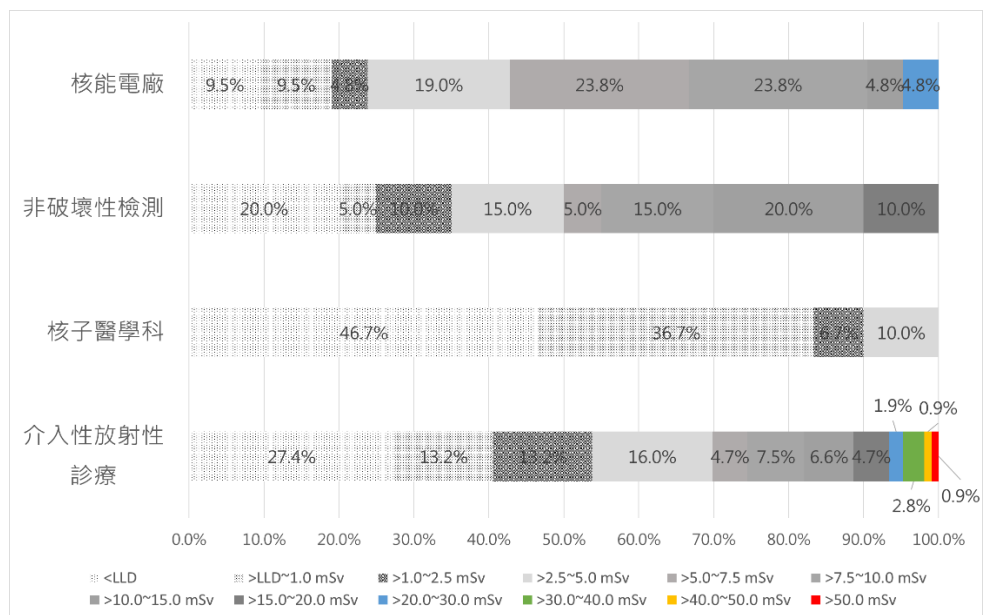


圖 4-15：推估個人年累積眼球水晶體劑量 $H_p(3)$ 之結果

(二) 強化國內輻射檢校量測技術能力研究

子項計畫二共有四個工作項目。本年度的重要成果為刊登於 Radiation Protection Dosimetry SCI 期刊之「Establishment of $H_p(3)$ calibration system for eye dose monitoring in Taiwan」文獻，已於 112 年 10 月公開發表(圖 4-1)，內容主要描述國家原子能科技研究院輻射防護所的國家游離輻射標準實驗室建立之眼球水晶體劑量 $H_p(3)$ 校正系統。

1. 111-112 年度人員劑量計能力試驗研究與技術研討會舉辦(2/2)

本次研究根據最新版 TAF 標準規範—TAF (2019 年)第四版的「測試領域人員體外劑量評估實驗室認證技術規範」，文件編號為 TAF-CNLA-T08(4)，執行人員劑量計能力試驗運轉研究。該文件乃參考 ANSI/HPS N13.11-2009(R2015)國際最新版規範，與國內產官學專家建議而定。人員劑量計能力試驗運轉研究為兩年期的第二年工作項目，並配合第十二次能力試驗執行週期展開。去年已於完成輻射場照射系統測試、能力評估程序和方法規劃、內部工作協調會議、全國性線上會議、測試前劑量評估系統校正規畫等。今年則因應疫情應變措施與配合眼球水晶體劑量計比對試驗(試運作)迫切性，於 1 月至 3 月完成測試前劑量評估系統校正，4 月至 8 月完成三批次照射試驗，10 月至 12 月執行劑量回報與數據處理，12 月辦理總結技術討論會議，12 月完成實驗室測試報告與總結報告(初稿)，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(圖 4-16)。

人員劑量計能力試驗照射系統包括四大系統：高能光子、X

光光子、貝他粒子和中子(參見圖 4-17)。本次訂使用射質 X 射線為 ISO 的 W200，與美國國家標準暨技術研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)的 M100 和 M150，加馬光子為 ^{137}Cs ，貝他射源為 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ，中子射源為 ^{252}Cf 。光子照射系統依據 ISO 4037 建立與維持，分為 ^{137}Cs 系統擴充不確定度($k=2$)評估為 1.4%(測試報告擴充為 2%)，以及 X 光系統擴充不確定度評估為 2%； $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 系統依據 ISO 6980 建立與維持，擴充不確定度評估為 3.4%； ^{252}Cf 系統依據 ISO 8529 建立與維持擴充不確定度評估為 3.4%。規範中所使用代表軀幹的壓克力 (PMMA)長方體假體分為三種尺寸：(1) $30\times30\times15\text{ cm}^3$ ：用於 X 射線和加馬光子輻射場；(2) $30\times30\times5\text{ cm}^3$ ：用於貝他輻射場；(3) $40\times40\times15\text{ cm}^3$ ：用於中子輻射場。

分析測試類別、程序及照射條件上，表 4-6 為測試類別，人員劑量計能力試驗共有五個測試類別[劑量範圍]：I.事故級光子[0.05 至 5 Gy]、II.光子/光子混合場[0.5 至 50 mSv]、III.貝他粒子[2.5 至 250 mSv]、IV.光子與貝他混合場[淺部：3.0 至 300 mSv、深部：0.5 至 50 mSv]、和 V.中子與光子混合場[1.5 至 50 mSv]。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；除了第 II 類每批次提供 7 個劑量計，共 21 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。本次不同射質(對應規範之測試類別，劑量範圍)之照射輻射劑量最低值：光子(第 II 類，0.5~50 mSv)為 10.71 mSv；貝他粒子(第 III 類，2.5~250 mSv)為 2.58 mSv；中子(第 V 類，1.5~50 mSv)為 1.5 mSv，以評估各實驗室能力。

分析國內市場現況上，本次人員劑量計能力試驗共有 10 組實驗室組(若受測佩章廠牌不同，則視為不同組)參加，包括國內八家實驗室，實驗室名稱分別為：：放射試驗室、放射試驗室核二分隊、放射試驗室核三工作隊、國原院、貝克西弗公司、輻射防護協會、同步輻射研究中心、清華大學。受測佩章分為熱發光劑量計(TLD)及光刺激發光劑量計(OSLD)兩種類型，前者提供廠商為 Panasonic、HARSHAW 和 RADOS，後者提供廠商為 LANDAUER。參與能力試驗的受測佩章廠牌分布(實驗室組數量、市占百分比率)為：LANDAUER (1 組、~11%)、Panasonic (3 組、~33%)、HARSHAW (4 組、~44%)、RADOS (1 組、~11%)。以 111 年全國佩章使用數量約 53 萬個劑量計來說，推估廠牌服務量占比(佩章數市占百分比率)約為：LANDAUER (~20%)、Panasonic (~35%)、HARSHAW (~45%)、RADOS (~1%)。10 組人員劑量計實驗室組皆通過第十二次人員劑量計能力測試，合格率 100%。第一至第三批次於今年 8 月底完成初次照射，執行實驗室召回部分劑量計並於 12 月底完成重新照射作業，所有資料經數據處理與技術討論會議，於 113 年完成核定版測試報告發行。

截至目前為止，本工作項目遭遇歷年最多困難項，並提出相對應解決方式：

- (1) 配合政策優先度，實驗室同時執行眼球水晶體劑量比對試驗(試運作)產生之問題與因應方式。對內，因照射設備與人力高度重疊，需適時調查系統備置進度，調配內部照射校正系統運作時程，並於各照射系統人員與數據處理人員

間滾動式溝通協調，除延後人員劑量計能力試驗整體批次照射時程，更彈性結合第二、三批次之照射作業，以爭取時效；對外，受測實驗室反映活動緊迫，聯繫窗口滾動個別化提供適當系統校正資源，提升參與實驗室意願，期以實驗室數量最大化之研究數據，供更新版技術規範之擬訂。

- (2) 照射系統因設備老舊，於去年陸續出現量測雜訊過高、射源無法打出、輻防安全門故障等問題，今年則發生貝他系統和中子系統異常狀況等問題。是故，彈性調配異常系統的劑量計照射時程，待異常排除後，立即與獨立完成批次照射。
- (3) 因應國際上對於眼球水晶體劑量計之重視，並考量實驗室執行現況，預計更新版技術規範將規劃整合全身、肢端與眼球水晶體劑量計能力試驗，並適度精簡降低此龐大負擔。

人員劑量計能力試驗作業流程

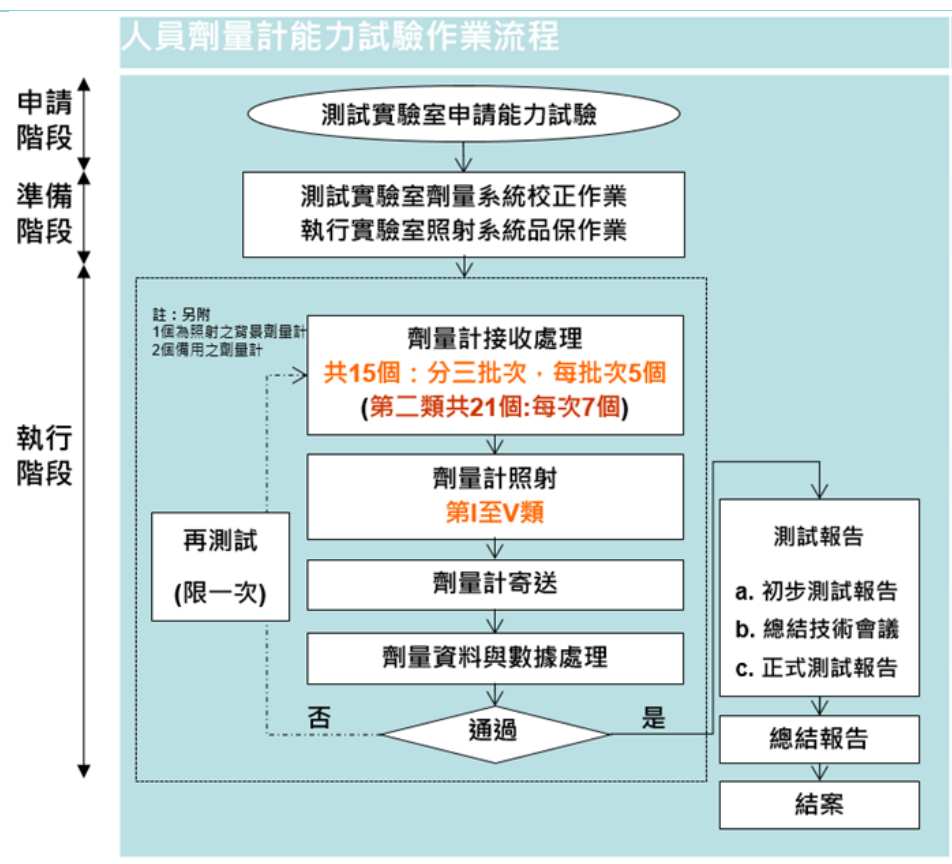


圖 4-16. 人員劑量計能力試驗作業流程

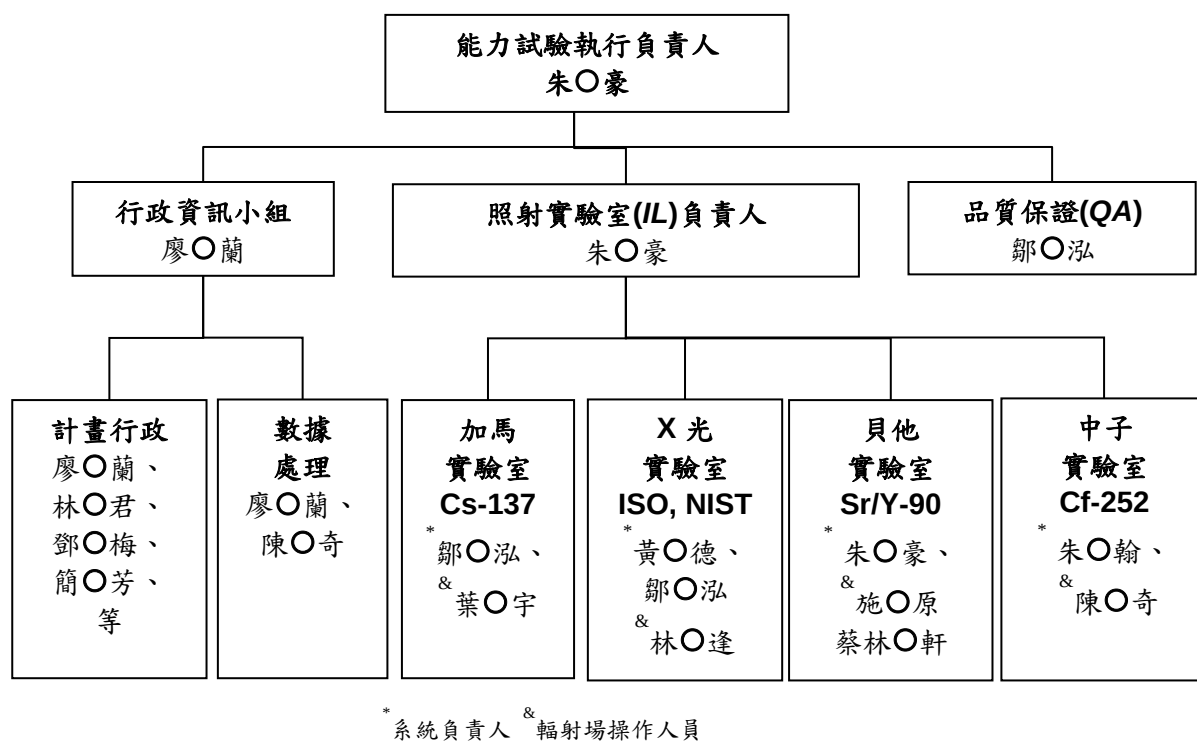


圖 4-17. 人員劑量計能力試驗執行機構組織架構

表 4-6：人員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 (L)	
		深部	淺部
I. 事故級, 光子			
A. 一般 (B 及 C 隨機選擇)	0.05 to 5 Gy	0.24	不測試
B. ¹³⁷ Cs			
C. M150			
II. 光子/光子混合場			
A. 一般 ($\bar{E} \geq 20$ keV, 當 $\bar{E} \leq 70$ keV 時垂直照射)	0.5 to 50 mSv	0.3	0.3
B. 高能量 (¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co; 照射角度 $\alpha \leq 60$ 度)			
C. 中能量 ($\bar{E} > 70$ keV, 照射角度 $\alpha \leq 60$ 度)			
D. 銻專用			
III. 貝他粒子			
A. 一般 (B 及 C 隨機選擇)	2.5 to 250 mSv	不測試	0.3
B. 高能量 (⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y)			
C. 低能量 (⁸⁵ Kr)			
D. 鈾片			
IV. 光子與貝他混合場			
	淺部: 3.0 to 300 mSv	N/A	0.3
	深部: 0.5 to 50 mSv	0.3	N/A
V. 中子與光子混合場			
A. 一般 (B 及 C 隨機選擇)	1.5 to 50 mSv	0.3	不測試
B. ²⁵² Cf + II			
C. ²⁵² Cf(D ₂ O) + II			

註：

1. 不同類別使用的輻射源定義在文件中。
2. 只有第II類使用非垂直角度照射，角度分別為水平及垂直的 0° 、 $\pm 40^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 。
3. 第II類光子混合場中IIA、IIC及IID應與IIB混合，混合比例為3:1至1:3。
4. 第IV類中，淺部劑量的光子劑量與貝他劑量之比例限制在1:1至1:6之間，且不使用 ^{60}Co 。
5. 第IV類中不使用低能量貝他($\bar{E} < 500$)與低能量光子($\bar{E} < 500$)混合。
6. 第V類中，深部劑量的中子與光子劑量之比例限制在1:3至3:1之間，比值包含中子射源所產生的光子。
7. 第II類及第III類類別應被使用在第IV類混合場中，第II類子類別應被使用在第V類混合場中。
8. 第V類中，僅評估光子(包含中子射源所產生的光子)及中子的 $H_p(10)$ 的總和。
9. 照射的中子個人等效劑量不可小於 1 mSv。
10. 第II類別中，其任一深度、任一光子源的個人等效劑量不可小於 0.25 mSv。
11. 僅能有二個(含)以下劑量計照射之個人等效劑量低於 2 倍測試輻射劑量範圍的最小劑量。
12. 僅能有二個(含)以下劑量計照射之個人等效劑量高於一半測試輻射劑量範圍的最大劑量。

112-113 年度輻射偵檢儀器校正能力試驗研究與技術研討會舉辦 (1/2)

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112-113年舉辦之第9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。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。此為兩年期的第一年工作項目，並配合第九次能力試驗執行週期展開。今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。

規劃執行時程為112年8月至113年5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。內容除「第9次輻射偵檢儀器校正能力試驗」外，尚包括兩個實驗室比對活動：「第5次陸軍核生化研究中心儀器校正比對」和「第2次台電放射試驗室比對(中子)」。輻射偵檢儀器校正能力試驗是以傳遞儀器標準件的方式至各個參與機構的輻射場照射，依據美國國家標準局 ANSI N323A (1997)規範，將測試劑量率為傳遞儀器的可量測範圍內的20%及80%的劑量率；能力試驗測試期間中的傳遞件，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(γ 光

子)、累積劑量(γ 光子)、和污染偵測器(α/β 粒子)，分別選定傳遞儀器為：國原院 MERM-PE-HDB 機動環境輻射監錄器、POLIMASTER PM1610、和 SAPHYMO MINITRACE β (圖 4-19)。

全國性技術討論會之「第九次輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會」於 8 月 24 日舉辦(圖 4-3)，參與單位共 8 個：行政院核能安全委員會、台電放射試驗室劑量計測組、台電放射試驗室核三工作隊、輻射偵測中心、清大原科中心、國家原子能科技研究院、克馬校正實驗室、陸軍化生放射防護研究中心，總計 23 位專家代表參與。本會議除說明能力試驗規劃情況，並實地與會專家學者進行了技術討論與學術交流，以增進實驗室技術與品質之提升。

參與本次能力試驗的機構有：台電放射試驗室(劑量計測組)、台電放射試驗室核三工作隊、輻射偵測中心、清大原科中心、國家原子能科技研究院、克馬校正實驗室，共 6 家實驗室。能力試驗部分於 112 年 10 月規劃至 113 年 1 月進行傳遞件傳送(各受測實驗室有 8 至 12 天時間執行各測試類別的儀器校正)，能力試驗於 112 年 10 月將傳遞件從中心實驗室傳出去，傳遞順序為：1. 台電放射試驗室(劑量計測組)、2. 台電放射試驗室核三工作隊、3. 輻射偵測中心、4. 清大原科中心、5. 克馬校正實驗室、6. 國研院輻射度量儀器校正實驗室。預計 112 年 12 月 27 日傳遞件會傳回至中心實驗室，113 年 3 月前收到全部測試結果回報(回報表單如圖 4-20)，中心實驗室將開始計算能力試驗結果，並於 113 年 4 月底完成能力試

驗報告，以及 113 年 5 月至 6 月召開總結會議。



(a)



(b)



(c)

圖 4-19：112-113 年度輻射偵檢儀器校正能力試驗研究傳遞件之(a) MERM-PE-HDB；(b) POLIMASTER PM1610；(c) SAPHYMO MINITRACE β

受測實驗室: _____ 日期: _____ 計測者: _____

表 1、劑量率測試結果

測試值	器示值	校正因子	不確定度(>5 次,k=2)
20 $\mu\text{Sv/h}$			
50 $\mu\text{Sv/h}$			
80 $\mu\text{Sv/h}$			
200 $\mu\text{Sv/h}$			
500 $\mu\text{Sv/h}$			
800 $\mu\text{Sv/h}$			

表 2、劑量測試結果

測試值(Hp)	器示值(Hp)	校正因子	不確定度(>5 次,k=2)
500 μSv			
2000 μSv			
8000 μSv			

註：500 μSv 為清大儀校實驗室與輻射度量儀器校正實驗室比對用

表 3、 α/β 表面效率測試結果

α 計數率	射源發射率	表面效率(%)	不確定度(>5 次,k=2)
β 計數率	射源發射率	表面效率(%)	不確定度(>5 次,k=2)

圖 4-20：112-113 年度輻射偵檢儀器校正能力試驗研究回報表單

2. 建置醫療曝露透視攝影劑量校正系統

本工作項目依據 IEC 61267: 2005 國際標準，接續前一年校正射質建立後，今年建置可用於提供透視攝影的 IEC RQC 系列劑量校正系統。

對於 X 射線空氣克馬(K_{air})標準劑量建立上，已透過實驗量測或蒙地卡羅計算，完成 IEC RQC 系列射質之窗膜衰減(k_{wall})、離子再結合(k_s)、空氣衰減(k_a)、光子散射(k_{sc})、電子損失(k_{el})、初始游離(k_{ij})及平均游離能的能量依存性(k_w)等修正因子評估，並以自由空氣游離腔(Free Air Chamber, FAC)進行輻射場量測，透過修正因子進行劑量修正，同時，根據國際輻射單位與度量委員會(ICRU) 90 號報告建議最新物理參數和新引用修正因子進行評估，完成 IEC RQC-3、RQC-5 及 RQC-8 X 射線之 K_{air} 標準劑量標定，如**錯誤! 找不到參照來源。**和**錯誤! 找不到參照來源。**。即完成醫療曝露透視攝影劑量校正系統建置。

各修正因子定義與量測或模擬方法：

(1) 窗膜衰減(k_{wall})：

由於 FAC 腔體前端設有 X 射線進入的窗口，為達電子平衡之目的，該窗口之材質為一片石墨與塑膠混合薄片，並對入射 X 射線有衰減作用，故必須在量測時加以修正。

腔壁衰減修正因子可由實驗得知，首先取得與入射窗口混合薄片一樣材質及厚度之混合薄片數片，依序量測在自由空氣游離腔入射窗口處增加混合薄片的數量，如此可量到不同單位厚度薄片下的 X 射線穿透強度。

窗膜衰減量測與半值層量測一樣，於相同的負載因子量測條件下，建議在一次的 X 光開關機內完成所有混合薄片之照射，並將監測游離腔及自由空氣游離腔之值做修正與歸一化計算，以歸一化數值為 y 軸對薄片數量為 x 軸作圖，做一次多項式回歸趨勢線，即可得歸一化數值對薄片數量之一次方程式，接著將 x 值帶入-1 即為入射窗衰減修正因子。

(2) 離子再結合(k_s)：

在 FAC 腔內產生之離子對必須加電場予以收集，在收集的過程中，正負離子可能會因為再結合的作用而造成量測信號的損失，因此必須加以修正。

離子再結合的途徑可分為體積再結合(Volume Recombination)、初期再結合(Initial Recombination)和擴散損失(Diffusion Loss)。對於連續輻射而言，高電場強度下體積再結合的因素遠大於初期再結合與擴散損失。依據 Boag 的理論，對於平行板、圓柱和球形結構之游離腔，若忽略初期再結合與擴散損失之影響，體積收集率 f 為：

$$f = 1 - \frac{\alpha}{6k_1k_2e} \times \frac{qd^4}{V^2} = \frac{I}{I_s}$$

其中：

α 為再結合係數(cm^4/s)；

e 為離子所帶電荷(C)；

k_1 及 k_2 為正負離子移動速度(cm^2/Vs)；

q 為單位體積的電荷產率(C/c⁴s)；

V 為電壓(V)；

d 為有效距離(cm)；

I 為量測所得電流(C/s)；

I_s 為飽和電流(C/s)。

對於平行板型游離腔而言，電流 $I=qd$ ，故上式可化簡為：

$$f = 1 - \frac{\alpha}{6k_1k_2e} \times \frac{d^3}{V^2} \times I = \frac{I}{I_s}$$

$$\therefore \frac{1}{I} = \frac{1}{I_s} + \frac{\alpha d^3}{6k_1k_2e} \times \frac{1}{V^2}$$

式中， $\frac{1}{I_s}$ 及 $\frac{\alpha d^3}{6k_1k_2e}$ 皆為常數，故可知 $\frac{1}{I}$ 與 $\frac{1}{V^2}$ 為直線關係，因此，離子再結合修正因子可由實驗方法求得：將輻射場強度固定(相同的負載因子條件)，改變游離腔之工作電壓(本實驗使用 -800V、-1000V、-1300V、-1600V、-2000V、-2500V、-3000V、-3500V、-4000V、-5000V 等十組電壓)以量得相對應之電流(I)，繪出 $1/I$ 與 $1/V^2$ 之關係圖，利用線性關係將 $1/V^2$ 外推至 0 即可得工作電壓無限大時之飽和電流，視為無離子再結合效應，再除以一般工作電壓下之訊號值(本評估所使用的自由空氣游離腔之工作電壓為-3500V)，即為離子再結合修正因子，各射質實驗為求 X 光機輸出穩定，也是建議在一次的 X 光開關機內完成其十組的電壓照射，每組電壓需先穩壓至少

10 分鐘才開始量測。

(3) 空氣衰減(k_a):

FAC 所標定輻射場強度的定義位置(孔口)和實際信號產生的位置(游離腔收集筒幾何中心)不同，因此量測結果必須進行空氣衰減的修正。

空氣衰減修正可由下式計算得知：

$$k_a = e^{\frac{\mu}{\rho} \times L \times \rho_t}$$

式中，

μ/ρ 為空氣之質量吸收係數，可利用 X 射線能譜加權計算而得；

L 為 FAC 定義面至信號產生位置中心面之垂直距離，國家原子能科技研究院設計製作 FAC 之 L 值為 53.95 cm；

ρ_t 為 FAC 量測時之環境空氣密度。

(4) 光子散射(k_{sc})及電子損失(k_{el}):

光子散射修正因子是由於空氣克馬的定義不包含散射輻射造成的能量沉積，因此須將其扣除。電子損失是為了彌補在電荷收集過程中，電子尚未將所有能量沉積於空氣中時，便撞上鋁筒電極，造成量測結果的低估，因此將沉積於鋁筒電極上的能量補償回來。電極遮蔽效應與電子損失相似，是為了彌補在電荷收集過程中，電子尚未將所有能量沉積於空氣中時，便撞上鋁電極棒，造成量測結果的低估，因此將沉積於鋁電極棒上的能量補償回來。

參考 INER-11162 報告「以蒙地卡羅方法計算自由空

氣游離腔之光子散射、電子損失及電極遮蔽效應修正因子」，光子散射、電子能量損失及電極遮蔽效應修正因子可藉由將光子能譜代入下式而得：

$$\overline{k_{sc}} = \frac{\sum_i (\phi_i \times \sum E_{ap,i})}{\sum_i [\phi_i \times (\sum E_{ap,i} + E_{as,i})]}$$

$$\overline{k_{el}} = \frac{\sum_i [\phi_i \times (\sum E_{ap,i} + E_{bp,i})]}{\sum_i (\phi_i \times \sum E_{ap,i})}$$

式中，

ϕ_i 為 i 能量的光子能譜；

$E_{ap,i}$ 、 $E_{bp,i}$ 、 $E_{cp,i}$ 分別代表 i 能量的光子主射束在電荷收集體積內的空氣部分、鋁筒及鋁棒電極區域內之能量沉積； $E_{as,i}$ 則為 i 能量的光子散射輻射在 A 區域內的能量沉積。

$E_{ap,i}$ 、 $E_{bp,i}$ 、 $E_{cp,i}$ 、 $E_{as,i}$ 之值可於 INER-11162 報告附件五查表而得。

(5) 初始游離(k_{ii})及平均游離能的能量依存性(k_w)：

由於平均游離能 W_{air} 是針對荷電粒子入射所定義的，僅考慮其在減速至靜止期間所產生的電荷量，並未包含初始荷電粒子本身的電荷，但實際上此初始電荷仍會被量測系統所收集並造成高估的情況，因此 $k_{ii} < 1$ 。此外，由於目前使用的平均游離能是採用固定值 $W_{air} = 33.97$ ，但實際上此值在低於 10 keV 時會顯著提高(因為非游離過程的重要性提高)。在 ICRU 90 號報告中提供了單能量的 k_{ii} k_w 修正因子。採用能譜加權平均後可得各射質的 k_{ii} k_w 修正因子。

表 4-6、IEC RQC 系列射質之修正因子

射質	k_a	k_{wall}	k_{el}	k_{sc}	k_s	$k_{ji} k_w$	總修正量
RQC-3	1.0157	1.0039	1.0000	0.9924	1.0003	0.9981	1.0104
RQC-5	1.0123	1.0059	1.0000	0.9932	1.0002	0.9978	1.0094
RQC-8	1.0110	1.0035	1.0000	0.9942	1.0005	0.9978	1.0070

表 4-7、IEC RQC 系列射質 1.5 米處之空氣克馬標準劑量率

射質	標準劑量率(Gy/s)
RQC3	4.3928E-06
RQC5	3.3698E-06
RQC8	1.9213E-05

3. 建置 X 射線 ISO 寬能譜眼球水晶體劑量校正系統

本工作項目依據 ISO 4037: 2019 國際標準，接續前一年校正射質建立後，今年建置可用於提供眼球水晶體劑量計能力試驗的 ISO 寬能譜系列劑量校正系統。

截至目前為止，以 FAC 進行輻射場量測，完成標定距離 X 光機 1.5 米處之 ISO 4037-3 寬能譜射質 W-60、W-80、W-110、W-150 及 W-200 空氣克馬(K_{air})標準劑量。如同上述透視攝影 X 射線空氣克馬(K_{air})標準劑量建立，已透過實驗量測或蒙地卡羅計算，完成窗膜衰減(k_{wall})、離子再結合(k_s)、空氣衰減(k_a)、光子衰減(k_{sc})、電子損失(k_{el})、初始游離(k_{ji})及平均游離能的能量依存性(k_w)等修正因子評估，並以自由空氣游離腔(FAC)進行輻射場量測，同時，根據 ICRU 90 報告建議最新物理參數和新引用修正因子進行評估。(如錯誤! 找不到參照來

源。與錯誤! 找不到參照來源。)

今年度完成 ISO 4037 寬能譜射質 W-60、W-80、W-110、W-150 及 W-200 距離 X 光機 1.5 米、3 米處之空氣克馬(K_{air})標準劑量標定，以及 3 米處之 3 mm 深度處軟組織個人等效劑量($H_p(3)$)標準劑量標定(表 4-10)。距離 X 光機 3 米處主要考量為涵蓋 ISO 4037-3 規範頭部假體進行照射，藉由 ISO 4037 規範之轉換因子，將 FAC 標定之 K_{air} ，轉換為 $H_p(3)$ 標準劑量。另一方面，考慮 X 光機輸出穩定度，需架設 A5 游離腔於頭部假體，量測其監測因子(表 4-11)，建置 X 光輸出劑量之監測系統。最後將所有量測結果寫入自行開發的數據自動擷取程式(圖 4-21)，即完成 X 射線 ISO 寬能譜眼球水晶體劑量校正系統之建置，可提供 X 射線光子之眼球水晶體劑量校正服務。

表 4-8、ISO 4037 寬能譜射質之修正因子

射質	k_a	k_{wall}	k_{el}	k_{sc}	k_s	$k_{\text{ii}} k_w$	總修正量
W-60	1.0140	1.0064	1.0000	0.9925	1.0000	0.9980	1.0110
W-80	1.0123	1.0060	1.0000	0.9931	1.0000	0.9979	1.0093
W-110	1.0106	1.0055	1.0001	0.9945	1.0000	0.9979	1.0084
W-150	1.0095	1.0051	1.0005	0.9954	1.0000	0.9981	1.0087
W-200	1.0087	1.0048	1.0021	0.9963	1.0000	0.9986	1.0105

表 4-9、ISO 4037 寬能譜射質 1.5 米處之標準劑量率

射質	K_{air} 標準劑量率(Gy/s)
W-60	2.3221E-05
W-80	4.1793E-05
W-110	2.8337E-05
W-150	6.9584E-05

W-200	1.1993E-04
-------	------------

表 4-10、ISO 4037 寬能譜射質 3 米處之標準劑量率

射質	K_{air} 標準劑量率(Gy/s)
W-60	5.3414E-06
W-80	9.6949E-06
W-110	6.5830E-06
W-150	1.6261E-05
W-200	2.8044E-05

表 4-11、ISO 4037 寬能譜射質之監測因子及 $H_p(3)$

射質	監測因子(Sv/C)	$H_p(3)$ (Sv/s)
W-60	3.8542E+05	7.9052E-06
W-80	4.1235E+05	1.5512E-05
W-110	4.3116E+05	1.0730E-05
W-150	4.2721E+05	2.5205E-05
W-200	4.1845E+05	4.1225E-05

圖 4-21、自行開發 ISO 寬能譜眼球水晶體劑量校正系統數據
自動擷取程式

(三) 精進染色體變異分析技術與評估研究

子項計畫三共有五個工作項目。本年度的重要成果為投稿於 2023 年 3 月 18 日至 19 日舉辦之『第 37 屆生物醫學聯合學術年會』，投稿題目為「2022 Evaluation of Human Biodosimetry」，以推廣與彰顯計畫成果，研究成果並獲邀於 2023 年 6 月 27 日舉辦至行政院災防科技創新服務方案成果發表會進行專題演講(圖 4-2)。查核點成果述明如下。

1. 進行 112 年度劑量照射與反應曲線分析工作

以往每四年作一次之劑量照射與反應曲線分析，因應 TAF 查核提出建議，搭配 TAF 實驗室認證證書效期三年，現改以每三年進行分析一次。今年為認證延展後第一年，即進行照射劑量與反應曲線分析。另外，由於實驗室人員異動大，合併進行新進人員染色體分析訓練 3 名。並由新訓練合格人員參與反應曲線之分析工作，增強實務經驗。

2. 分析 112 年度國人本土染色體雙中節背景值(含學術合作的之技術服務)

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 112 年度為止，人員生物劑量實驗室已完成 37 例正常國人背景染色體雙中節分析，一共分析 37,728 顆細胞，發現 26 個雙中節 (dicentric) 於 25 顆細胞中，目前資料庫國人背景雙中節發

生率為 0.69‰，即是 1000 顆細胞中有 0.69 個雙中節發生率，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。(如表 4-12)112 年度，本實驗室持續針對國人背景值進行研究分析工作，生物劑量實驗室將以委託研究技術服務與北部醫學中心合作（台北醫學大學），增加 3 例正常人背景染色體雙中節分析，期許收集更多案例來代表國人之生物劑量背景值。

表 4-12：112 年度國人本土染色體雙中節背景值分析結果

	第一例	第二例	第三例
分析數量 (顆)	1007	1072	1014
雙中節數 (個)	1	0	1

3. 輔導北部備援實驗室建立劑量分析技術

本計畫已於 106 年至 110 年起建立南部備援實驗室，輔導高雄醫學大學建立染色體雙中節變異分析技術。今年度以委託研究技術服務建立北部備援實驗室，輔導台北醫學大學，進行實驗室建立程序，同時須通過人體試驗倫理審查委員會（Institutional. Review Board, IRB）審查，取得人體試驗計畫同意，圖 21 為獲得通過 112 年度 IRB 審核(效期至 112 年 12 月 31 日)，以獲得合法使用人體血樣進行研究，製作影像圖檔請備援實驗室進行分析，待分析且 double check 整理完之檔案送回所內，再進行校對，以確認分析技術無誤。藉持續分析與校正檔案方式，以建立備援實驗室之分析技術，培訓

染色體雙中節背景值分析技術，擴增分析量能。

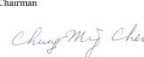
TMU-JIRB Form074/20200317	TMU-JIRB Form074/20200317
臺北醫學大學 臺北醫學大學暨附屬醫院聯合人體研究倫理委員會 TMU-Joint Institutional Review Board 通過聲明書 - 執行效期展延(簡易審查) 開立日期：民國111年12月20日 本會編號：N202112022 計畫名稱：人員生物測量計畫 計畫主持人：張剛輝 共同主持人：黃文盛 試驗/研究機構：臺北醫學大學、臺北醫學大學附設醫院 計畫書版本/日期：Version 1.0/202110211 受試者同意書版本/日期：Version 1.1/20211208/2021/12/08 個案報告表版本/日期：Version 1.0/202110211 上述計畫案經本會，將於第111-12-4次會議(會議日期：111年12月22日)通過，特此聲明。有效期間自 民國111年12月20日 至 民國112年12月19日。試驗/研究期間應接受本會之監督。 依據衛生福利部相關規定，連續追蹤程序及要求如下： 1. 期中報告：本計畫期中報告須於每12個月應於有效期間到期前二個月(民國112年10月19日)提交中期報告，有效期間屆滿時若未通過期中報告與效期展延審查者，試驗研究不得繼續執行。 2. 結案報告：試驗研究完成後，應將執行情形及結果依結案報告表要求送交本會審查。效期屆滿到期前三個月仍未提交者，本會得撤銷本通過聲明書，並即撤銷本試驗/研究之核准，並將撤銷本會作業程序暫停主持人(含任何參與形式)中體試驗/研究之審查三個月。 3. 嚴重不良事件(SAE)報告：執行人體試驗或臨床試驗之主持人應根據衛生署「藥品優良臨床試驗準則」和「嚴重藥物不良反應通報辦法」規定，辦理相關事宜。 主任委員：  臺北醫學大學暨附屬醫院 聯合人體研究倫理委員會 Taipei Medical University Joint Institutional Review Board The TMU-Joint Institutional Review Board performs its functions according to written operating procedures and complies with GCP and with the applicable regulatory requirements. b12b600b0e9214608913881d2813a086 TMU-JIRB Form074/20200317	Taipei Medical University Certificate of TMU-JIRB Approval Issue Date: 2022/12/20 TMU-JIRB No.: N202112022 Protocol Title: Evaluation of human biodosimetry Principal Investigator: Chang, Kang-Wei CO-Investigator: Wen-Sheng Huang Study Site: Taipei Medical University, Taipei Medical University Hospital Protocol Version/Date: Version 1.0/202110211 Informed Consent Form: Version 1.1/20211208/2021/12/08 Case Report Form: Version 1.0/202110211 The above study's continuing report will be approved by TMU-Joint Institutional Review Board in meeting #111-12-4(date:2022/12/22), duration of validity is from 2022/12/20 to 2023/12/19, and must be monitored by TMU-JIRB. According to Ministry of Health and Welfare and the relevant regulations, follow-up procedures and requirements are as below: 1. Continuing Report: Frequency of the report of this trial/study is every 12 month, and should be submitted to TMU-JIRB for review 2 months prior to expiry date (2023-10-19) or the trial/study must be pending. 2. Final Report: The report should be submitted to TMU-JIRB for review once completed. TMU-JIRB may withdraw the approval of the trial/study if the report didn't submitted within 3 months from the date of validity and will suspend PI from new application for 3 months per TMU-JIRB SOPs. 3. SAE: Serious Adverse Event(s) (SAE) Report: SAE report(s) should be submitted to related authorities according to "Regulations for Good Clinical Practice" as well as "Procedures for Reporting Serious Adverse Drug Reaction" by MOHW. Chairman:  臺北醫學大學暨附屬醫院 聯合人體研究倫理委員會 Taipei Medical University Joint Institutional Review Board The TMU-Joint Institutional Review Board performs its functions according to written operating procedures and complies with GCP and with the applicable regulatory requirements. b12b600b0e9214608913881d2813a086 TMU-JIRB Form074/20200317

圖 4-22：112 年度人體研究倫理委員會核可

4. 建立 γ -H2AX 之低劑量檢量線

量測 γ -H2AX 螢光焦點需要一套可靠的螢光顯微鏡設備，今年度將開發低劑量 γ -H2AX 生物劑量評估技術，並於現有顯微鏡系統上增設螢光及影像擷取設備，建立低劑量 γ -H2AX 實驗方法，而後進一步研製低劑量 γ -H2AX 檢量線。

112 年 3 月 21 日採血，回所將血液分裝完畢，至國家游離輻射標準實驗室進行 Co-60 照射，含 0 Gy~0.1 Gy 共六個劑量，經玻片製作及影像掃描，和計數影像螢光計數 foci 數量和照射劑量呈現正相關(圖 右)，與 111 年底趨勢一致(圖 左)。唯之前螢光影像掃描模組為手動對焦模式(圖 3 左)，整體掃

描時間較長，擷取之螢光消退，會影響判讀，本年度採購自動對焦掃描軟體(圖 右)，協助節省影像擷取時間以獲得更貼近實際之螢光數值，且相關係數由去年 $R^2=0.11$ ，提升至本年度 $R^2=0.91$ 。

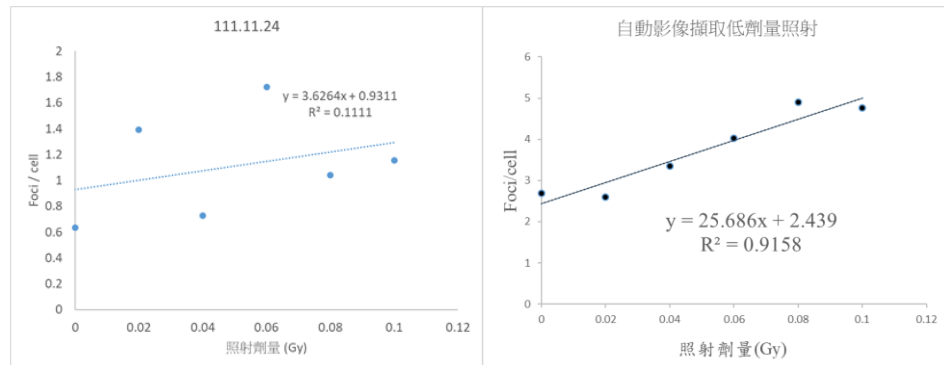


圖 4-23：螢光計數 foci 數量與照射劑量關係圖，左為 111 年底數據，右為本年度 112 年數據

5. 建立染色體電腦智慧型輔助分析程序書

隨著智慧型技術發展逐漸成熟，將導入電腦人工智慧來進行研究分析，目前肉眼分析影像的準確率雖高，但分析時間卻比電腦人工智慧技術長，若能有效訓練電腦人工智慧型系統進行輔助分析，再加上肉眼進行校驗，期望減低分析所需人力及時間進而提升效率。本年度已導入電腦人工智慧型系統進行輔助分析，且相關程序會製作成分析程序書，自動掃描程序書(圖)。

國家原子能科技研究院同位素所/ 藥物製程應用研究工作項目 文件名稱：血液淋巴球中 γ -H2AX foci 免疫螢光顯微鏡影像自動掃描程序書	SCPG1.PA001 版本：0	發行日期： 工作任務：
編製人員： 蔡宜樞		日期：112.10.15
審查人員： 廖澤銘		日期：112.10.16
核准人員： 陳冠國		日期：112.10.16

1.0 目的

- 1.1. 本程序書是應用於 γ -H2AX foci 免疫螢光顯微鏡自動掃描方法。

2.0 原理

- 2.1. 將 1 抗與淋巴細胞核中 γ -H2AX 蛋白結合，再將帶有螢光的 2 抗與 1 抗連結；並利用自動掃描軟體將其於螢光顯微鏡下觀察並掃描計數。

3.0 使用時機

- 3.1. 進行 γ -H2AX foci 觀察及計數時。

4.0 制定依據：

- 4.1. 實際操作

5.0 設備和材料

- 5.1 電子顯微鏡(ZeissAxio Imager Z2 OEM)
- 5.2 自動螢光掃描模組 Metafer MetaCyte (MetaSystems)
- 5.3 高倍鏡油 (Zeiss, Immersol 518F)
- 5.4 拭拭紙 (不限廠牌)

圖 4-24：建立染色體電腦智慧型輔助分析程序書摘錄

伍、結論與建議

一、 年度規劃之工作項目及查核點，皆已如期達成。

二、 各子項計畫詳細的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

1. 完成胎兒劑量評估導則 1 份與懷孕婦女胎兒輻射劑量評估研究報告 1 份，並搭配學術合作，完成 Cs-137 單能光子照射實驗、醫用 X 光連續能譜照射實驗及核醫科懷孕工作人員劑量量測實驗，及產出不同孕期的子宮劑量轉換係數及擬定實務量測作法，以供國內懷孕女性工作人員實務管制參考。
2. 完成國內眼球水晶體劑量評估第 II 期訪查研究與研究報告 1 份，透過 1 家學術單位及 7 家國內人員體外輻射劑量評定機構合作方案，完成 22 家醫療院所、3 家核能電廠及 3 家非破壞性檢測公司，其關鍵群體共 198 位輻射工作人員(累計 960 人月)的眼球水晶體劑量監測評估，藉以了解國內關鍵群體於實際輻射作業下，眼球水晶體的輻射曝露情形，及新的劑量限值對關鍵群體的衝擊。

(二)強化國內輻射檢校量測技術能力研究

1. 完成 111-112 年度人員全身劑量計能力試驗研究：整合國原院國家游離輻射標準實驗室之加馬、X 光、貝他、中子劑量照射系統，達成高劑量、單一輻射場、混合輻射場等五項測試類別之試驗，參與實驗室合格率達 100%，確證我國全身劑量評估實驗室之技術能力，可

符合 ANSI N13.11 國際規範之要求，此對人員劑量監測結果之正確性提供了保障，監測結果可作為管制機關執法之依據。

2. 啟動 112-113 年度輻射偵檢儀器校正能力試驗研究：依據 ISO 17043 與 TAF-CNLA-T06 規範，完成全國性的能力試驗規劃，預計國內 7 個實驗室皆會參與，促使我國輻射偵檢儀器校正技術能力，可符合國際規範要求，確保作業場所輻射監測結果之品質。
3. 於 8 月 24 日舉辦技術研討會 1 場與完成大會手冊 1 份，與會專家代表為 23 人，共 8 個單位(依開頭筆劃排列):台○公司放射試驗室○計測組、○三工作隊、核○委員會、輻○偵測中心、克○公司校正實驗室、清○大學人員劑量實驗室、國家原○能研究院、化○放核訓練中心。透過專家學者間技術討論與學術交流，達成實驗室間技術強化與品質提升之效益。
4. 完成 SCI 期刊 1 篇與「X 射線 ISO 寬能譜眼球水晶體劑量與透視攝影劑量校正系統評估報告」技術報告 1 份，作為 ISO 寬能譜眼球水晶體與醫療曝露透視攝影劑量校正之依據，確保輻防應用端劑量追溯之準確性。

為了接軌國際最新趨勢與因應國內情資，目前正在執行引進與整併最新版 ANSI/HPS N13.11:2022 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，預期可創立新的劑量評估能力試驗機制。

然而，能力試驗四大類照射校正系統存在強度不足、達使

用年限、量測裝置陸續損壞等顯現或潛在問題，建請規畫資源，盡早處理，並強化資源投入，如新的全自動化照射與自動劑量計傳輸系統等建置，從而提升整體計畫工作之效率與強化重要性。

本期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。更進一步地規劃醫療曝露透視攝影、眼球水晶體劑量 X 射線 ISO 寬能譜之兩項劑量校正系統之建立。預期工作項目之完成，可強化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

1. 完成 112 年度三名(比預定多一名)新進人員染色體分析技術訓練合格，並加入反應曲線分析行列完成本年度劑量照射與反應曲線分析工作，並將本年度反應曲線資料納入劑量-雙中節染色體標準曲線中。
2. 完成 112 年度國人本土染色體雙中節背景值分析共三例，雙中節比例為 0.65‰，並納入年度分析值中。
3. 完成輔導北部備援實驗室建立劑量分析技術，經本所抽樣檢查分析數據，修正與調整後確認北部備援實驗室已具備染色體分析技術，完成輔導北部備援實驗室建立劑量分析技術之預期目標。
4. 完成建立 Gamma-H2AX 之低劑量檢量線，導入電腦智慧型影像自動擷取技術，照射劑量與螢光訊號相關係數

R^2 從 0.11 提升至 0.91，低劑量輻射照射劑量與細胞螢光數值呈現正相關。

5. 完成染色體電腦智慧型輔助分析程序書一份，可做為日後實驗影像數據分析參考。

整體而言，本計畫規劃與執行工作，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、參考文獻

1. 行政院核能安全委員會。「接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力」計畫 111 年度期末報告。2022。
2. IAEA, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, 2014.
3. ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, 1990.
4. ICRP, 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4).
5. ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, 2007.
6. ICRP, 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, in Annals of the ICRP. 2012. p. 11, 116-139, 293-302.
7. ICRP, Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication, ICRP Publication 119, 2012.
8. Brent R, Mettler F, Wagner L, Streffer BM, He S, Kusama T. ICRP publication 84: pregnancy and medical radiation. ICRP. 2001;30:1.
9. ANSI & HPS, “American National Standard for Performance testing of extremity dosimeters,” ANSI/HPS N13.32, 2018.
10. ANSI & HPS, “American National Standard for Personnel Dosimetry Performance - Criteria for Testing,” ANSI N13.11, 2009(R2015). Includes all amendments and changes through Reaffirmation Notice , March 12, 2015.

11. 財團法人全國認證基金會(TAF), 「能力試驗活動要求 TAF-CNLA-R05(7)」, 2018。
12. 財團法人全國認證基金會(TAF), 「ISO/IEC 17025:2017 測試與校正實驗室能力一般要求」, 2018。
13. 財團法人全國認證基金會(TAF), 「校正領域量測不確定度評估指引 TAF-CNLA-G16(1)」, 2008。
14. 財團法人全國認證基金會(TAF), 「校正領域輻射偵測儀器校正技術規範 TAF-CNLA-T06(2)」, 2009。
15. 財團法人全國認證基金會(TAF), 「測試領域人員體外劑量評估技術規範 TAF-CNLA-T08(4)」, 2019。
16. 財團法人全國認證基金會(TAF), 「測試領域肢端劑量計能力試驗技術規範 (TAF-CNLA-T23(1))」, 2020。
17. ISO, X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosimeters and Doserate Meters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods, ISO 4037-1, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2019.
18. ISO, X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosimeters and Doserate Meters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy - Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV, ISO 4037-2, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2019.
19. ISO, X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosimeters and Doserate meters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence, ISO 4037-3. Geneva, Switzerland: International Organization for

- Standardization (ISO), 2019.
20. ISO, Nuclear Energy — Reference Beta Particle Radiations — Part 1: Methods of Production, ISO 6980-1, Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2006.
 21. ISO, Reference beta particle radiation —Part 3: Calibration of area and personal response as a function of energy and angle of incidence. ISO 6980-3, Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2006.
 22. ISO, Reference neutron radiations —Part 1: Characteristics and methods of production, ISO 8529-12001/Cor 1:2008, Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2008.
 23. IEC I. ISO/IEC 17025: 2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission. 2017.
 24. Blakely WF, Carr Z, Chu MC-M, Dayal-Drager R, Fujimoto K, Hopmeir M, et al. WHO 1st consultation on the development of a global biodosimetry laboratories network for radiation emergencies (BioDoseNet). Radiation research. 2009;171(1):127-39.
 25. Tanaka S-I. Summary of the JCO criticality accident in Tokai-mura and a dose assessment. Journal of Radiation Research. 2001;42(Suppl):S1-S9.
 26. Standardization ISO. Radiation protection—Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetics. Geneva: ISO. 2004;19238:2014.
 27. Kulka U, Ainsbury L, Atkinson M, Barquinero J-F, Barrios L,

- Beinke C, et al. Realising the European network of biodosimetry (RENEB). *Radiation protection dosimetry*. 2012;151(4):621-5.
28. Kataoka Y, Bindokas VP, Duggan RC, Murley JS, Grdina DJ. Flow cytometric analysis of phosphorylated histone H2AX following exposure to ionizing radiation in human microvascular endothelial cells. *Journal of radiation research*. 2006;0609010004.
 29. Redon CE, Dickey JS, Bonner WM, Sedelnikova OA. γ -H2AX as a biomarker of DNA damage induced by ionizing radiation in human peripheral blood lymphocytes and artificial skin. *Advances in Space Research*. 2009;43(8):1171-8.
 30. Zhou, F. H., Hong, L. Z., Lin, L.H. *Obstetric Nursing*. Yeong Dah Book Company LTD (2014).
 31. Kuok C-H, Huang C-H, Tsai P-S, Ko Y-P, Lee W-S, Hsu Y-W, et al. Preoperative measurement of maternal abdominal circumference relates the initial sensory block level of spinal anesthesia for cesarean section: an observational study. *Taiwanese Journal of Obstetrics and Gynecology*. 2016;55(6):810-4.
 32. Osei E, Faulkner K. Fetal position and size data for dose estimation. *The British journal of radiology*. 1999;72(856):363-70.
 33. Hsieh W-S, Wu H-C, Jeng S-F, Liao H-F, Su Y-N, Lin S-J, et al. Nationwide singleton birth weight percentiles by gestational age in Taiwan, 1998-2002. *Acta Paediatrica Taiwanica*. 2006;47(1):25-33.
 34. Magann, Everett F., et al. "Amniotic Fluid Volume Assessment: Eight Lessons Learned." *International Journal of Women's Health* 13 (2021): 773.