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

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：袁〇程
聯絡電話：(03)4711400 ext 7673
共同主持人：林〇君、廖〇蘭
承辦人：廖〇蘭

報告日期：113 年 12 月 10 日

目錄

壹、計畫摘要.....3
(一) 中文摘要.....3
(二) 英文摘要.....4
貳、計畫目的.....5
參、執行方法及進行步驟.....10
（一）採用之方法與原因.....10
子項計畫（一）建立國際同步之輻射防護規範研究.....10
子項計畫（二）強化國內輻射檢校量測技術能力研究.....16
子項計畫（三）精進染色體變異分析技術與評估研究：.....18
肆、研究成果.....22
(一) 建立國際同步之輻射防護規範研究.....22
(二) 強化國內輻射檢校量測技術能力研究.....39
(三) 精進染色體變異分析技術與評估研究.....54
伍、結論與建議.....60
陸、參考文獻.....63

壹、計畫摘要

(一) 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）及歐盟等國際組織相繼更新輻射防護的管制建議與技術規範，本計畫因應國內外趨勢，著眼於輻射防護管制系統的全面性，採滾動式方式提升管制實務技術，並聚焦於輻射防護度量技術研究及生物劑量評估技術的精進，藉此強化輻射量測與劑量評估的準確性及公信力，確保民眾輻射安全。本年度計畫包含三大核心工作項目：一是研析國際同步的輻射防護規範，二是強化國內輻射檢校與量測技術，三是精進染色體變異分析與評估技術。計畫針對技術規範、胎兒劑量、眼球水晶體劑量等輻防架構與管制影響進行研究，並針對眼球水晶體劑量計及輻射偵測儀器的校正能力試驗認證技術進行深化探討，以提升輻射防護量測實驗室的技術能力，同時擴充國人染色體背景值資料庫及劑量反應曲線，全面提升游離輻射安全技術的層次與水準。

(二) 英文摘要

To align with the latest international recommendations on radiation protection, organizations such as the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the European Union have successively updated their regulatory guidelines and technical standards. This project, in response to domestic and international trends, focuses on the comprehensiveness of the radiation protection regulatory system. It adopts a rolling approach to enhance practical regulatory techniques, emphasizing research in radiation protection measurement technologies and advancements in biological dosimetry. The goal is to strengthen the accuracy and credibility of radiation measurement and dose evaluation, thereby ensuring public radiation safety. This year's project includes three core objectives: (1) analyzing internationally aligned radiation protection standards, (2) enhancing domestic calibration and measurement technologies, and (3) advancing techniques for chromosomal aberration analysis and evaluation. The project investigates technical standards and regulatory impacts related to fetal dose, ocular lens dose, and broader radiation protection frameworks. It also delves into the calibration testing and certification techniques for ocular lens dosimeters and radiation detection instruments to bolster the technical capabilities of radiation protection laboratories. Additionally, it aims to expand the national database of chromosomal baseline values and dose-response curves, further improving the level and quality of ionizing radiation safety technologies.

貳、計畫目的

國家原子能科技研究院（以下簡稱為國原院）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。同時，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執行之科學依據，提升游離輻射安全技術層次及水準，落實原子能科技於社會民生福祉與永續發展。

近年國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）、歐盟陸續出版新的管制技術建議與規範，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技術體系，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。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技術規範、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：

依據核能安全委員會於 112 年的統計資料[44]，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 5 千餘張，醫用類約有 2 萬 3 千張，輻射從業人員申請佩章之人數近 5 萬 7 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技術，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、測試業務之虞，比對試驗亦或能力試驗可監測實驗室的技術現況，是實驗室能力驗證與認證重要的一環，引入國際之技術發展趨勢，並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，建立執行全國性比對試驗之設備、技術、作業程序，運用全國認證基金會（Taiwan accreditation fundation, TAF）實驗室認證的架構，舉辦游離輻射領域能力試驗，瞭解國內相關實驗室之技術能力與品質，透過能力試驗認證相關研究，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。

隨著高齡化與生活型態的改變，以及社會經濟發展影響，民眾越來越注意「預防勝於治療」的健康保健觀念，國內外皆對於放射醫療品質越趨重視。依據衛生福利部 112 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 345 萬人次、遠隔放射治療約 144 萬人次、近接放射

治療約 6.3 萬人次、醫用粒子治療約 7.9 萬人次、核子醫學檢查約 52.8 萬人次等使用狀況，亦配合 IAEA 提出胎兒劑量評估與眼球水晶體劑量監測之重要性，以及國內輻射應用施政與民生需求，一方面亟需針對眼球水晶體劑量最大宗族群—透視攝影放射醫療之輻射工作人員，進行教育訓練與宣導工作，並關注眼球水晶體劑量評估技術，建置評估眼球水晶體劑量之校正光子射質；另一方面，持續女性輻射工作人員與胎兒劑量評估工作，利用臺灣懷孕婦女假體模擬與量測評估技術之建立，立基社會期待之科研議題，透過輻射檢測系統與追溯鏈、儀器檢校、和學術合作研究，精進整體輻射工作人員與大眾之輻射安全。

面對日本福島核事件及複合式災害應變議題，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，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，國內透過本計畫持續建立與維持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。

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。

本計畫包括下列三個子項計畫，執行策略是以國原院技術為中心，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、二由國原院輻射防護所（簡稱：輻防所）執行；子項計畫三由國原院同位素所負責執行。依據資源分配，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，包含眼球水晶體劑量計、輻射儀器校正等研究，以提升第一線實驗室量測品質。並規劃與建置全球關切之眼球水晶體劑量監測檢校追溯鏈。

(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 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。

參、執行方法及進行步驟

（一）採用之方法與原因

子項計畫（一）建立國際同步之輻射防護規範研究

本子計畫已初步建立適用於臺灣的孕婦假體及胎兒劑量評估技術，並完成相關案例模擬。後續將進一步分析和比較孕婦與胎兒的劑量實驗數據，藉此編制適用於我國不同輻射場域的胎兒劑量轉換數值表。在眼球水晶體劑量監測方面，計畫已完成國內輻射工作領域的眼球水晶體劑量調查，掌握各領域的曝露情況。根據調查結果，將針對相關工作群體實施教育訓練，並製作專業教材，以降低眼球水晶體劑量標準下修可能帶來的影響。以下將分為兩大工作項目詳細說明。

(A1) 利用臺灣懷孕婦女假體，分析其懷孕婦女與胎兒劑量數據關係，以建立不同輻射場之胎兒劑量轉換數值表

本研究可以分為兩個部分。第一部分，以不同光子能量進行模擬照射實驗，使用 111 年建置的台灣懷孕婦女混和式假體（3 個月、6 個月及 9 個月）[13-14, 34-37]，進行子宮劑量轉換係數估算，提供完整的子宮劑量轉換係數表，涵蓋能量範圍為 0.01 至 2000 MeV，供後續查表使用。第二部分，本研究蒐集常用的游離輻射設備及常見放射性物質所產生的平均光子能量，以此條件進行子宮劑量轉換係數的評估。透過提供適用於不同輻射工作場所的參

數，此方法可為輻射工作人員進行胎兒劑量評估時，提供更準確且更簡便的工具。

研究的主要目的是驗證使用子宮劑量轉換係數（UDCC）進行胎兒劑量評估的可行性。在此之前，必須通過台灣懷孕婦女假體模擬建立一系列子宮劑量轉換係數(UDCC)。由於目前國際上尚未有子宮劑量轉換係數(UDCC)可以參考，本研究主要參考 ICRP 74 和 ICRP 116 報告中子宮器官的轉換係數（Uterine Conversion Coefficient, UCC），該轉換係數代表每單位自由空氣克馬劑量（K_a）所對應的子宮劑量（D_{uterus}），其單位為 Gy/Gy [41-42]。子宮劑量轉換係數（Uterine Dose Conversion Coefficient, UDCC）將操作量改為腹部表面等價劑量（$H_{abd\text{-}skin}$），其目的在於希望能通過腹部劑量計實際量測的腹部表面等價劑量($H_{abd\text{-}skin}$)，推算出不同孕期的子宮等價劑量(H_{uterus})（在此視為胎兒有效劑量（E)），UDCC 的單位為 mSv/mSv，本報告中簡稱為「子宮劑量轉換係數（UDCC)」。

UDCC 的蒙地卡羅模擬條件是將台灣懷孕婦女假體放置在空氣環境中進行全身照射，假體的位置位於模擬區域的中心，並在其腹部表面放置 TLD 劑量計。輻射照射的幾何採用相對保守的前後（AP）照射，寬射束光子的照野大小為 $200 \times 200\ cm^2$，覆蓋整個假體，射源至假體腹部表面之間的距離為 1 公尺（SSD = 100 cm)，實驗設置如圖 1。子宮吸收劑量指的是懷孕婦女假體子宮中 TLD 劑量計測得的平均吸收劑量（mGy)，腹部表面的吸收劑量與子宮的平均吸收劑量，單位都是 mGy，並通過乘以光子的輻射加權

因子（W_R =1）來轉換為等價劑量，其單位為 mSv。本研究的子宮劑量轉換係數（UDCC）是將子宮等價劑量（H_{uterus}）除以腹部表面等價劑量（$H_{abd-skin}$），其單位為 mSv/mSv，如公式（1）所示。

$$\text{子宮劑量轉換係數（UDCC）} = \frac{\text{子宮等價劑量 } H_{uterus}\ (\text{mSv})}{\text{腹部表面等價劑量 } H_{abd-skin}\ (\text{mSv})} \quad \text{（公式 1）}$$

在實務上，懷孕輻射工作人員可將人員劑量計放在腹部表面，並採用 $H_p(0.07)$的淺部劑量讀值，作為腹部表面等價劑量 $H_{abd\text{-}skin}$ (單位: mSv)，並與子宮劑量換算係數 (UDCC) 相乘，即可用來估算當月的子宮等價劑量(H_{uterus}) (單位: mSv)，隨後的妊娠期中，將每個月的子宮等價劑量(H_{uterus})累加起來作為胎兒有效劑量(E_{fetus})。

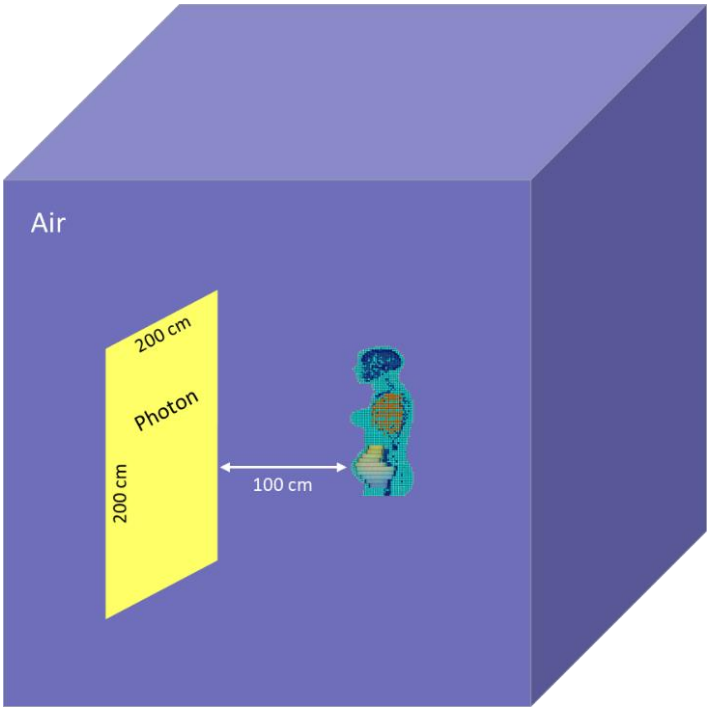


圖 1：子宮劑量轉換係數模擬設置

為了提供不同輻射工作場所工作人員更簡便的胎兒劑量估算方式，本研究參考核安會 112 年度「游離輻射應用與管理統計」年報的分類方式，將常見的輻射工作場所依用途別，分別為「醫用類」及「非醫用類」兩大類，再依輻射源的類別分為「可發生游離輻射設備」及「放射性物質」，分類的方式如**錯誤! 找不到參照來源。**所示 [43]。

本研究根據表 1 所列的輻射工作場所射源類別進行資料蒐集，整理出不同射源類別的平均光子能量。接著，依據所述方法，模擬子宮劑量轉換係數（UDCC），最終產出各射源類別對應的 UDCC。輻射工作人員可根據工作場所類別，選擇適合孕期的 UDCC，進行胎兒劑量評估。

表 1：台灣常見的輻射工作場所射源類別

用途別	輻射源類別
醫用 可發生游離輻射設備	1. X 光模擬定位儀
	2.電腦刀(CyberKnife)
	3.電腦斷層治療機(Tomotherapy)
	4.醫用直線加速器(LINAC)
	5.電腦斷層掃描儀 (診斷用、核醫用、電腦斷層模擬定位掃描儀)
	6.乳房攝影用 X 光機
	7.研究用 X 光機
	8.高強度輻射設施(質子治療、重離子治療)
	9.牙科型 X 光機
	10.巡迴車用 X 光機
	11.骨質密度儀
	12.移動型 X 光機
	13.診斷型 X 光機
	14.震波碎石定位用 X 光機
	15.心導管或血管攝影用 X 光機
醫用 放射性物質	1.一般近接治療射源(I-125)
	2.加馬刀(Gamma Knife)(Co-60)
	3.遙控後荷治療射源(Ir-192)
	4.遠隔治療射源(Co-60)
	5.放射免疫分析(I-125)
	6.血液照射(Cs-137)
	7.放射性物質生產設施 (反應爐、迴旋加速器、孳生器)
	8.核子醫學藥物
	9.校正用射源
非醫用 可發生游離輻射設備	1.分析鑑定
	2.照相檢驗
	3.獸醫用 X 光機
	4.學術研究
	5.查緝任務
	6.測量控制
	7.離子植入
	8.靜電消除
	9.校正用
	10.櫃型 X 光機
	11.移動型
非醫用 放射性物質	1.密封
	2.非密封

(A2) 執行眼球水晶體相關輻射防護訓練至少 2 場次，並製作相關教材

國際放射防護委員會 (ICRP) 103 報告發布後，國際原子能總署 (IAEA) 更新了輻射防護標準 (GSR Part III)，並依據 ICRP 118 號報告，將眼球水晶體劑量限度從每年 150 mSv 降至 5 年內 100 mSv，單一年不得超過 50 mSv。IAEA 1731 技術文件指出需關注的高風險群體包括醫療介入性手術、核子醫學製藥、近接治療、工業非破壞檢測等領域的輻射工作人員。依據核能安全委員會 112 年統計資料，輻射從業人員申請佩章之人數約 5 萬 5 千人，涵蓋核燃料循環類(4,497 人)、醫用類(22,439 人)、工業用類(22,695 人)、天然射源類(32 人)、其他類(5,870 人)，散布於核能設施、醫院、工業、研究機構、國防等領域，推估潛在眼球水晶體劑量關鍵族群人數約 2 萬人，藉於國內並無有效之詳細分類，故潛在關鍵族群人數乃為國內最大可能人數，實際人數應較此推估人數小很多。

為此，本年度計畫將針對眼球水晶體劑量關鍵族群辦理教育訓練與宣導會議，由核安會邀請相關單位參與。期能藉由教育訓練課程強化輻射工作人員之眼球水晶體劑量評估重要性、輻射防護觀念與實務做法，並且透過宣導會議，了解輻射工作人員在未來眼球水晶體劑量限度下修之際，實際影響實務工作所遭遇問題，編列相關教育訓練教材(包含簡報、推廣文宣品)，以作為輻射防護宣導與推廣使用。

子項計畫（二）強化國內輻射檢校量測技術能力研究

配合全國認證基金會（TAF）實驗室認證要求(「能力試驗活動要求 TAF-CNLA-R05」、TAF「ISO/IEC 17025:2017 測試與校正實驗室能力一般要求」、「校正領域量測不確定度評估指引 TAF-CNLA-G16(1)」，2008。)[2-7]，辦理輻射儀器偵檢儀器能力試驗之數據處理、舉辦技術交流會議、舉辦總結會議及完成參與實驗室評估報告等作業；同時辦理眼球水晶體劑量能力試驗之前期規劃研究(「測試領域人員體外劑量評估技術規範 TAF-CNLA-T08(4)」、「測試領域肢端劑量計能力試驗技術規範（TAF-CNLA-T23(1)」)，確保眼球水晶體劑量量測之一致性[2-7]。

(B1) 執行眼球水晶體劑量計能力試驗之前期作業，包含：建構與維護技術規範所需輻射場、規劃執行程序、建立參與實驗室名冊及辦理說明會等

眼球水晶體劑量計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）於實驗室認證的比對試驗時程，進行的全國性研究。此研究為首次正式執行，參考 ANSI/HPS N13.32-2018、ISO14146 國際標準、以及 TAF 測試領域人員劑量計能力試驗技術規範（TAF-CNLA-T08）[9-11]，執行光子、X 光、貝他和中子輻射場維持或確證、規劃運轉、參與實驗室之校正，以及研究能力評估程序和方法。

為了具備事故級高劑量的技術能力評測條件，首先須依據 ISO 4037-1 國際標準[24]，建置可用於眼球水晶體劑量校正之 ISO 高空氣克馬率系列(High

air kerma rate series, H-series) IH 150 射質(150 kV)，以提供高劑量條件之全國性能力試驗射質類別。射質建置方法：首先量測 X 光機本身的固有過濾厚度，將規範內提及的總過濾厚度，扣除固有過濾厚度後，即得到所需的附加過濾片厚度，附加過濾片所之材質為銅，接著量測第一半值層厚度，量測結果需顯示與規範之差異小於 5%，符合國際規範之要求，即完成射質建立。接著使用自由空氣游離腔作為一級標準件，利用實驗或蒙地卡羅方法評估修正因子，量測參考點位置之 IH 150 射質 X 射線空氣克馬(K_{air})。為了建置該 IH 150 射質眼球水晶體劑量校正系統，使用球型游離腔二級標準件，於射束照野足夠將 ISO 4037-3 規範之假體完全涵蓋在內之距離，標定該處的 K_{air}，再使用 ISO 4037 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($H_p(3)$)[26]，接著建置 X 光輸出監測系統與修訂數據自動擷取程式參數，即可建立國家級的 IH 150 射質 X 射線光子之眼球水晶體劑量照射與校正系統。

(B2) 辦理輻射偵檢儀器校正能力試驗，包含：數據處理、傳遞件管理、辦理技術交流會議及完成參與實驗室評估報告等

根據 TAF 實驗室認證處的規定，實驗室在申請認證或擴展認證範疇之前，需通過能力試驗，且該試驗的有效期為三年。本項工作將利用 112 至 113 年舉辦的第 9 次輻射儀器校正能力試驗，對國內相關實驗室的技術與品質進行研究分析。試驗過程將依據 TAF 校正領域輻射偵測儀器校正技術

規範 (TAF-CNLA-T06)，對不同類型的傳遞儀器及校正系統進行性能測試，涵蓋輻射劑量偵測儀器、放射性活度 α/β 污染偵測儀器及人員劑量計等設備的射質與品質控制試驗。113 年度的研究內容包括能力試驗的程序運行、傳遞件管理、數據處理，以及舉辦技術交流會議、評估參與實驗室的技術能力、召開總結會議，並完成相關的實驗室評估報告與最終總結報告。

子項計畫（三）精進染色體變異分析技術與評估研究：

本計畫持續進行年度國人染色體雙中節背景值的分析工作，不斷擴充我國染色體背景值資料庫，以提升劑量重建的精確性。此外，本計畫依據前一年導入智慧型電腦影像輔助分析技術，並完成相關分析程序的制定。接下來，將進一步對比人工分析與電腦分析的差異，確保電腦分析結果的可靠性與準確性。

(C1) 執行年度國人染色體背景值分析至少 3 例，擴增我國染色體背景值資料庫

根據國際標準組織（ISO）ISO 19238:2014 的研究[30]，在正常背景條件下，每位健康個體的每 1,000 顆淋巴球中平均會出現 1 個（範圍 0 至 2 個）染色體雙中節變異。 112 年度共完成 37 名正常國人的染色體雙中節背景值分析，共計檢測 37,728 顆細胞，發現 26 個雙中節變異，分布於 26 顆細胞中。目前國人的背景雙中節發生率為每 1,000 顆細胞約 0.69 個，略低於國際平均值。本年度計畫完成國人的背景值研究，與北部備援實驗室合

作，通過臨床試驗許可，取得 3 例國人樣本數據，完成染色體雙中節背景值分析，持續擴充國人的生物劑量背景資料庫，提升資料庫的代表性與完整性。

(C2) 參與人員生物劑量實驗室分析能力之國際比對試驗或國內實驗室比對

世界衛生組織（WHO）因應車諾比核災後所揭露的輻射醫療技術落後與國際協調支援不足的問題，於 2007 年 12 月在瑞士日內瓦召開會議，討論建立全球生物劑量支援網絡（BioDoseNet）的計畫[12]。該網絡重點聚焦於細胞學生物劑量技術（cytogenetics）的應用，並制定相關合作模式與運作機制。同時，在 2001 年日本 Tokai-mura 臨界核事故後，國立放射醫學研究所（NIRS）成立了染色體生物劑量計實驗室網絡，作為核應急的核心系統之一，涵蓋日本各地的八個實驗室，形成一個強有力的應變資源。本實驗室的發展策略是致力於成為國際級參考實驗室（Reference Lab），透過積極參與國際能力比對，持續提升生物劑量分析能力。自 103 年度以來，實驗室多次參加由加拿大衛生部(Health Canada, HC) Dr. Ruth Wilkins 主導的國際比對活動，並順利完成相關測試。本年度計畫繼續與 Wilkins 教授合作，參與國際比對分析，進一步確認實驗室人員的專業水平，助力我國生物劑量分析實驗室邁向國際化。

在國內，我們專注於培養專業人才，並推動建立備援生物劑量評估實驗室，使其具備染色體雙中節變異分析能力。這項舉措能在大型輻射事件中有效提升樣本處理量，並為未來的生物劑量估算提供後備人力支持。實驗室已

建置完整的品質管理體系，包括 43 份涵蓋不同層級的文件與表單，並於 105 年首次取得台灣認證基金會（TAF）ISO 17025 認證，且持續維持認證資格。在 113 年因組織調整，我們重新申請 TAF ISO/IEC 17025:2017 認證並成功取得，進一步優化實驗室品質管理，確保分析作業與結果的高度可靠性與準確性。

(C3) 電腦智慧型及人工分析染色體之準確度比對研究

EU RENEB（Realizing the European Network of Biodosimetry）目前採用六種生物劑量測定方法進行染色體損傷檢測[33]，其中染色體雙中節分析 (DCA, Dicentric Chromosome Analysis) 已成為實驗室穩定發展的技術。透過多次參與國際比對，該技術展現了分析盲樣檢體的能力。然而，DCA 需要 48 小時的細胞培養時間，並且分析過程耗費大量人力。此外，當輻射劑量低於 0.1 Gy 時，分析靈敏度有限，導致結果準確性受限。因此，有必要開發新型生物劑量計，以克服 DCA 的時間及敏感度限制。H2AX 蛋白質被視為對輻射引起 DNA 損傷的敏感指標[38-39]。在細胞受到游離輻射後，其絲胺酸會被磷酸化產生 γ-H2AX，進一步使用標記 γ-H2AX 的特異性螢光抗體觀察螢光焦點，藉此推算輻射劑量。研究顯示，γ-H2AX 螢光焦點的數量與輻射引起的 DNA 雙股斷裂數量呈現正相關，且在低劑量輻射下，也能透過計算淋巴球細胞中的 γ-H2AX 焦點進行劑量評估。

本實驗室已於 112 年度開發了低劑量 γ-H2AX 生物劑量評估技術，並在現有顯微鏡系統中增設螢光及影像擷取設備，成功建立低劑量 γ-H2AX 的檢

測方法。後續導入電腦智慧型分析技術，與人工分析進行比較，建立更精確的低劑量 γ-H2AX 檢量線。113 年度將進一步針對中劑量 γ-H2AX，進行電腦智慧型分析與人工分析的檢量線比對，以驗證電腦分析的準確性，降低人力需求，並全面提升分析效率及結果可靠性。

肆、研究成果

(一) 建立國際同步之輻射防護規範研究

A1. 利用臺灣懷孕婦女假體，分析其懷孕婦女與胎兒劑量數據關係，以建立不同輻射場之胎兒劑量轉換數值表

本研究建立了完整的台灣懷孕婦女的子宮劑量轉換係數（Uterine Dose Conversion Coefficient, UDCC），如表 2，涵蓋能量範圍從 0.01 MeV 至 2000 MeV，並針對孕期的三個階段（3 個月、6 個月、9 個月）進行了模擬分析。結果顯示，UDCC 相較於傳統的子宮轉換係數（Uterine Conversion Coefficient, UCC）具更高的實用性，因其使用腹部表面等價劑量（$H_{abd-skin}$）作為操作量，使輻射劑量評估更加貼近實際量測情境。由模擬結果推算，UDCC 可有效地從腹部表面劑量推估出不同孕期的子宮等價劑量（H_{uterus}），即胎兒有效劑量（E），提供更精準的胎兒劑量評估工具。

在實務上，懷孕輻射工作人員可將人員劑量計放在腹部表面，並採用 $Hp(0.07)$的淺部劑量讀值當作腹部表面等價劑量（$H_{abd-skin}$），並將其乘以本研究所建立的 UDCC ，輻射工作人員應考慮該工作人員工作環境的平均光子能量，並依照懷孕孕期選用 UDCC，在未懷孕至懷孕 0 至 3 個月內，建議使用 3 個月的 UDCC，懷孕懷孕 3 至 6 個月內，建議使用 6 個月的 UDCC，懷孕滿 6 個月以上，建議使用 9 個月的 UDCC，本

研究所計算的子宮劑量轉換係數(UDCC)，為孕期輻射防護提供了重要依據，並為輻射工作人員進行胎兒劑量評估提供實用且可靠的工具。

從表 2 所有孕期 UDCC 的數值結果，可以觀察到 3 個月孕期在 2 MeV 的光子能量環境中，UDCC 有最大值。為確保妊娠期間胎兒的等價劑量不超過 1 mSv，本研究假設胎兒在腹中接受最大劑量限值 1 mSv，並根據子宮劑量轉換係數（UDCC）的最大值 0.855 回推，計算出腹部表面等價劑量為 1.13 mSv。這表示在懷孕 10 個月期間，胎兒的最大劑量限值為 1 mSv，對應的腹部表面等價劑量不得超過 1.12 mSv。若以每月劑量進行管制，懷孕期間腹部表面佩章的淺部劑量 $Hp(0.07)$ 每月應小於限值 0.12 mSv，以確保胎兒安全。

表 2：子宮劑量轉換係數(UDCC)

平均光子能量 (MeV)	子宮劑量轉換係數 Uterine Dose Conversion Coefficient (UDCC)		
	3 個月	6 個月	9 個月
0.010	0.0000002	0.0012728	0.0011840
0.015	0.0007036	0.0126297	0.0117456
0.020	0.0168289	0.0596642	0.0542847
0.030	0.195	0.277	0.234
0.040	0.384	0.433	0.369
0.050	0.508	0.509	0.461
0.060	0.564	0.555	0.466
0.070	0.497	0.569	0.484
0.080	0.501	0.551	0.469
0.100	0.503	0.545	0.489
0.150	0.513	0.524	0.483
0.200	0.542	0.544	0.484
0.220	0.618	0.559	0.488
0.300	0.556	0.590	0.523

0.400	0.582	0.612	0.532
0.500	0.621	0.637	0.575
0.511	0.622	0.637	0.576
0.600	0.635	0.646	0.598
0.662	0.734	0.660	0.611
0.800	0.663	0.677	0.636
1.000	0.694	0.694	0.654
1.117	0.706	0.709	0.662
1.330	0.703	0.719	0.664
1.500	0.712	0.732	0.681
2.000	0.855	0.743	0.697
3.000	0.780	0.782	0.739
4.000	0.789	0.800	0.758
5.000	0.805	0.807	0.771
6.000	0.821	0.822	0.787
6.129	0.819	0.818	0.784
8.000	0.837	0.833	0.799
10.000	0.843	0.841	0.810
15.000	0.851	0.848	0.813
20.000	0.853	0.849	0.819
30.000	0.853	0.852	0.820
40.000	0.853	0.852	0.820
50.000	0.851	0.850	0.819
60.000	0.850	0.849	0.817
80.000	0.847	0.846	0.814
100.000	0.844	0.844	0.811
150.000	0.838	0.838	0.805
200.000	0.834	0.834	0.800
300.000	0.828	0.829	0.795
400.000	0.825	0.826	0.791
500.000	0.822	0.823	0.789
600.000	0.821	0.822	0.787
800.000	0.818	0.820	0.785
1000.000	0.816	0.818	0.783
1500.000	0.814	0.816	0.780
2000.000	0.812	0.814	0.779

為了計算輻射工作場所之子宮劑量轉換係數表，首先需要依照表 1

所列的輻射工作場所射源類別進行資料蒐集，第一部分為「醫用可發生游離輻射設備」,其中 X 光模擬定位儀如同診斷 CT 能量範圍約為 80~140 keV，常用的醫用直線加速器光子能量為 6 和 10 MeV，電腦斷層掃描儀低能量約為 80keV、高能量約為 140 keV、血管造影約為 45-55 keV、高對比約為 60-75KeV，平均光子能量計算結果如表 3。第二部分「醫用放射性物質」，一般近接治療射源主要為 I-125、加馬刀主要為 Co-60、遙控後荷治療射源主要為 Ir-192、遠隔治療射源主要為 Co-60、放射免疫分析主要為 I-125、血液照射主要為 Cs-137，其平均光子能量如表 3 所示，其中放射性物質生產設施又可細分為反應爐、迴旋加速器以及孳生器。第三部分「非醫用可發生游離輻射設備」和第四部分「非醫用放射性物質」調查結果如表 3 所示。

表 3：台灣常見的輻射工作場所之平均光子能量

用途別	輻射源類別	光子平均能量 (MeV)
醫用可發生游離輻射設備	1. X 光模擬定位儀	0.05
	2.電腦刀(CyberKnife)	2.52
	3.電腦斷層治療機(Tomotherapy)	2.52
	4.醫用直線加速器(LINAC)	3.36
	5.電腦斷層掃描儀(診斷用、核醫用、電腦斷層模擬定位掃描儀)	0.04
	6.乳房攝影用 X 光機	0.01
	7.研究用 X 光機	0.04
	8.高強度輻射設施(質子治療、重離子治療)	140.70
	9.牙科型 X 光機	0.03
	10.巡迴車用 X 光機	0.07
	11.骨質密度儀	0.04
	12.移動型 X 光機	0.03
	13.診斷型 X 光機	0.03
	14.震波碎石定位用 X 光機	0.03
	15.心導管或血管攝影用 X 光機	0.04
醫用放射性物質	1.一般近接治療射源(I-125)	0.03
	2.加馬刀(Gamma Knife)(Co-60)	1.25
	3.遙控後荷治療射源(Ir-192)	0.38
	4.遠隔治療射源(Co-60)	1.25
	5.放射免疫分析(I-125)	0.66
	6.血液照射(Cs-137)	0.04
	7.放射性物質生產設施 (反應爐、迴旋加速器、孳生器)	0.18
	8.核子醫學藥物	0.75
	9.校正用射源	0.70
非醫用可發生游離輻射設備	1.分析鑑定	0.07
	2.照相檢驗	0.07
	3.獸醫用 X 光機	0.03
	4.學術研究	0.01
	5.查緝任務	0.04
	6.測量控制	0.05
	7.離子植入	0.02
	8.靜電消除	0.00
	9.校正用	0.06
	10.櫃型 X 光機	0.02
	11.移動型	0.02
非醫用放射性物質	1.密封	0.06
	2.非密封	0.86

根據上述平均光子能量，本研究使用 MCNP5 軟體對懷孕 3、6、9 個月的子宮劑量轉換係數（UDCC）進行模擬，最終提出了完整的輻射工作場所之子宮劑量轉換係數表，如表 4，輻射工作人員可以依據自己的工作場所及懷孕周期選擇適合的子宮劑量轉換係數（UDCC），再乘上腹部表面佩章的淺部劑量讀值 $H_p(0.07)$，便可快速得到當月的子宮等價劑量，並將其視為當月的胎兒有效劑量（E）。

表 4 ：輻射工作場所之子宮劑量轉換係數表(UDCC)

台灣常見的輻射工作場所		子宮劑量轉換係數 Uterine Dose Conversion Coefficient (UDCC)		
		3 個月	6 個月	9 個月
醫用可發生游離輻射設備	1. X 光模擬定位儀	0.461	0.480	0.426
	2.電腦刀(CyberKnife)	0.816	0.763	0.719
	3.電腦斷層治療機(Tomotherapy)	0.816	0.763	0.719
	4.醫用直線加速器(LINAC)	0.783	0.788	0.746
	5.電腦斷層掃描儀(診斷用、核醫用、電腦斷層模擬定位掃描儀)	0.384	0.433	0.369
	6.乳房攝影用 X 光機	0.0003660	0.0071784	0.0066760
	7.研究用 X 光機	0.303	0.366	0.311
	8.高強度輻射設施(質子治療、重離子治療)	0.839	0.839	0.806
	9.牙科型 X 光機	0.147	0.218	0.185
	10.巡迴車用 X 光機	0.516	0.565	0.479
	11.骨質密度儀	0.343	0.399	0.339
	12.移動型 X 光機	0.185	0.264	0.223
	13.診斷型 X 光機	0.263	0.333	0.282
	14.震波碎石定位用 X 光機	0.263	0.333	0.282
	15.心導管或血管攝影用 X 光機	0.396	0.441	0.378
醫用放射性物質	1.一般近接治療射源(I-125)	0.185	0.264	0.223
	2.加馬刀(Gamma Knife)(Co-60)	0.704	0.715	0.663
	3.遙控後荷治療射源(Ir-192)	0.577	0.608	0.531
	4.遠隔治療射源(Co-60)	0.704	0.715	0.663
	5.放射免疫分析(I-125)	0.734	0.660	0.611
	6.血液照射(Cs-137)	0.290	0.355	0.301
	7.放射性物質生產設施(反應爐、迴旋加速器、孳生器)	0.533	0.538	0.484
	8.核子醫學藥物	0.687	0.671	0.627
	9.校正用射源	0.715	0.665	0.618
非醫用可發生游離輻射設備	1.分析鑑定	0.516	0.565	0.479
	2.照相檢驗	0.516	0.565	0.479
	3.獸醫用 X 光機	0.125	0.191	0.163
	4.學術研究	0.0003660	0.0071784	0.0066760
	5.查緝任務	0.425	0.458	0.399
	6.測量控制	0.534	0.530	0.463
	7.離子植入	0.007	0.030	0.027
	8.靜電消除	0.0000002	0.0012728	0.0011840
	9.校正用	0.557	0.550	0.466
	10.櫃型 X 光機	0.035	0.081	0.072

	11.移動型	0.013	0.049	0.045
非醫用放射性物質	1.密封	0.564	0.555	0.466
	2.非密封	0.673	0.682	0.641

本研究的目的是評估懷孕輻射工作人員的胎兒劑量，根據上述研究結果，本研究擬定了一套胎兒劑量評估程序，如圖 2 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，應主動告知雇主。雇主在得知員工懷孕後，應指示該名懷孕輻射工作人員將常規佩戴於胸口處的個人劑量配章移至腹部表面最高處，並每月監測其腹部劑量配章的淺部劑量讀值（$H_p(0.07)$）。若讀值低於每月劑量限值 0.12 mSv，則無需進一步評估胎兒劑量；若某月份的讀值超過每月劑量限值 0.12 mSv，則需進行詳細評估，並追溯至告知懷孕當月的劑量記錄。如有劑量超標疑慮，則進一步追溯至受孕日月份的劑量記錄。若在受孕當月尚未將配章放置於腹部表面，則應以胸口佩章的淺部劑量讀值代替進行計算與評估。

下一步是根據「工作環境(表 2)」或「輻射工作場所(表 4)」的平均光子能量，選擇適當的子宮劑量轉換係數 (UDCC)，並依照懷孕周期（3、6、9 個月）進行劑量評估。在隨後的妊娠期間，需將每月計算出的子宮劑量累加，作為胎兒在整個妊娠期間所接受的總劑量。根據 ICRP 103 建議，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。

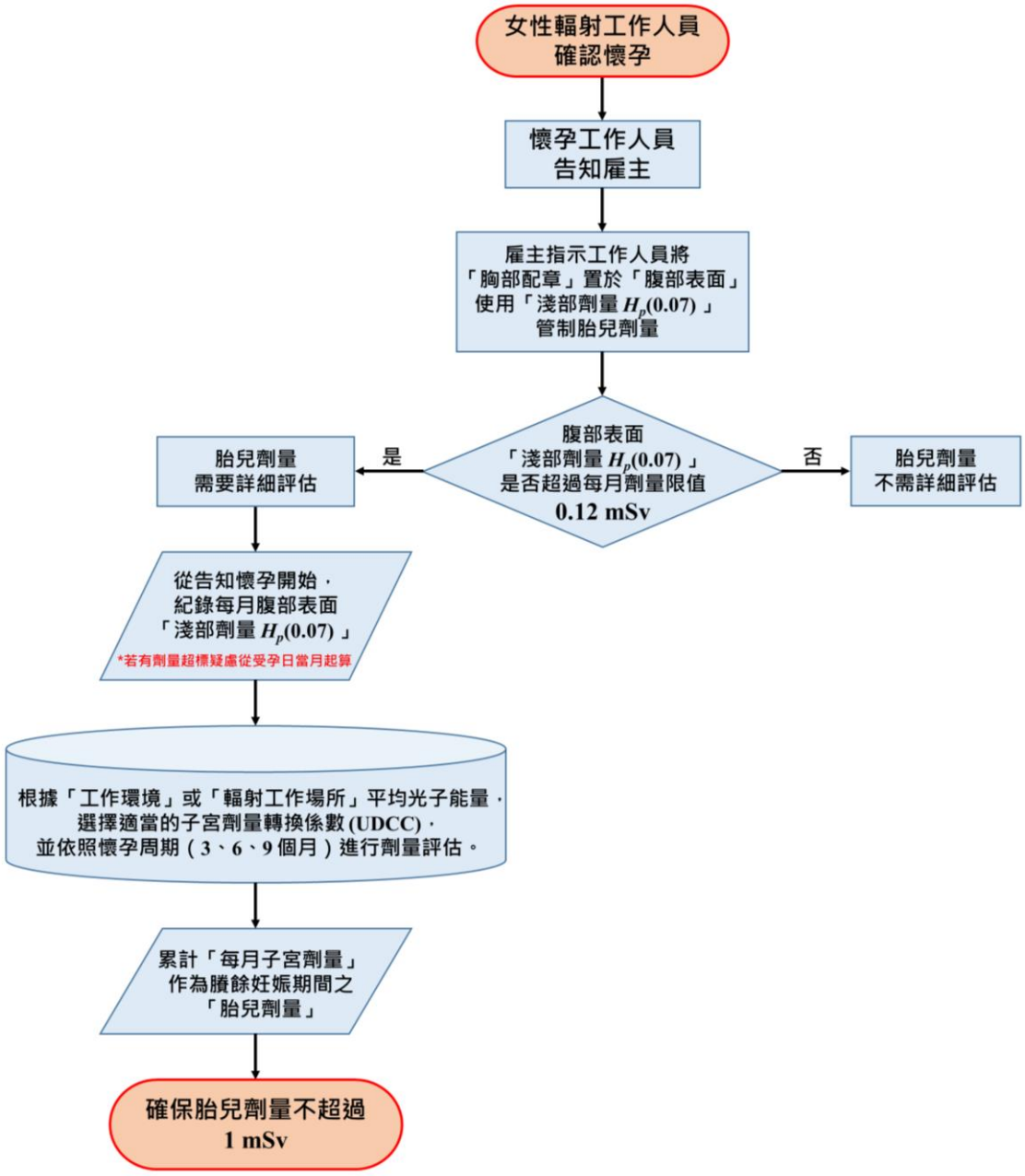


圖 2：胎兒劑量評估流程圖

假設女性輻射工作人員於 4 月 1 日告知雇主已懷孕，並估算其受孕日期為 3 月 1 日。雇主在得知此消息後，於 4 月 1 日指示該員工將原佩戴於胸部的劑量配章移至腹部表面最高處，並開始每月監測腹部劑量配章的淺部劑量讀值（$H_p(0.07)$）。該名員工的工作地點及配章讀值如表 5 所示。7 月份的劑量監測結果顯示，該名懷孕員工的腹部表面劑量超過

每月限值 0.12 mSv。因此，雇主決定調整其工作性質，將其調派至輻射劑量及子宮劑量轉換係數（UDCC）較低的工作地點—乳房 X 光機操作區，並開始進行詳細的胎兒劑量評估。此外，雇主也追溯至該員工自告知懷孕以來的劑量記錄。以下是該名員工的計算結果：

表 5：女性輻射工作人員劑量計量測結果

時間	胸部配章 淺部劑量 $H_p(0.07)$ mSv	腹部配章 淺部劑量 $H_p(0.07)$ mSv	是否超過 每月限值 0.11 mSv	工作 地點	懷孕 狀況	UDCC 選用週期
1 月	0.05	NA		移動型 X 光機	未懷孕	
2 月	0.08	NA		移動型 X 光機	未懷孕	
3 月	0.06	NA		骨質密度儀	受孕日 (未告知)	3 個月
4 月	NA	0.05	X	骨質密度儀	妊娠期間 (已告知)	3 個月
5 月	NA	0.03	X	骨質密度儀		3 個月
6 月	NA	0.08	X	電腦刀		6 個月
7 月	NA	0.12	V	電腦刀		6 個月
8 月	NA	0.02	X	乳房 X 光機		6 個月
9 月	NA	0.01	X	乳房 X 光機		9 個月
10 月	NA	0.02	X	乳房 X 光機		9 個月
11 月	NA	0.05	X	乳房 X 光機		9 個月
12 月	0.01	NA			未懷孕	

首先，雖然 3 月為受孕期間，但由於女性輻射工作人員尚未告知雇主其懷孕狀況，因此 3 月不納入胎兒劑量評估範圍。唯有在該員工出現劑量超標疑慮時，才需追溯至受孕當月（3 月）進行劑量評估與計算。女性輻射工作人員於 4 月 1 日告知雇主已經懷孕，因此 4 月需計入胎兒劑量評估期間，該名員工於 4-5 月在「骨質密度儀」工作，工作人員懷孕 3 個

月，經查工作場所之子宮劑量轉換係數表(表 4)，可知 UDCC 為 0.343，因此 4-5 月的子宮累積等價劑量如下式：

4-5 月：(0.05+0.03)　mSv×0.343=0.027 mSv

6-7 月該名員工在「電腦刀」工作，工作人員懷孕 6 個月，經查表 6 可知 UDCC 為 0.807，因此 6-7 月的子宮累積等價劑量如下式：

6-7 月：(0.08+0.14)　mSv×0.763=0.168 mSv

8 月該名員工在「乳房 X 光機」工作，工作人員懷孕 6 個月，經查表 6 可知 UDCC 為 0.0071784，因此 8 月的子宮累積等價劑量如下式：

8 月：0.02 mSv×0.0071784=1.44×10^{-4} mSv

9-11 月該名員工在「乳房 X 光機」工作，工作人員懷孕 9 個月，經查表 6 可知 UDCC 為 0.0066760，因此 9-11 月的子宮累積等價劑量如下式：

9-11 月：(0.01+0.02+0.05)　mSv×0.0066760=6.68×10^{-3} mSv

將每個月的子宮等價劑量累加起來作為胎兒有效劑量：

$0.27+0.168+1.44\times10^{-4}+6.68\times10^{-3}$ =0.2 mSv

根據上述計算，可得到妊娠期間的胎兒有效劑量為 0.2 mSv，並未超過 ICRP 103 建議之胎兒劑量限值 1 mSv。

A2. 執行眼球水晶體相關輻射防護訓練至少 2 場次，並製作相關教材

本年度為推廣眼球水晶體的輻射防護觀念，針對關鍵輻射工作群體進行

宣導，強調輻射防護建議及劑量監測的重要性。本項工作委託輻射防護協會執行，針對從事介入性診療的專業人員（如心導管醫師、神經放射科醫師、放射診斷科醫師及相關工作人員），設計眼球水晶體劑量監測與輻射防護教材(圖 3)，內容分為四個部分：1. 眼球水晶體輻射防護之國際法規發展現況；2. 介入性放射診療的輻射場特性；3. 台灣臨床研究調查的結果分享；4. 優化介入性放射診療中的輻射防護措施之具體建議。於北中南完成三場教育訓練宣導會(圖 4)，，三場宣導講座場次資訊為表 1，含時間地點與講師安排。三場講座規劃參與人數以 150 人/場為上限，台中場參與人數為 66 人(出席率 93%)；台北場參與人數為 109 人(出席率 96%)；高雄場次參與人數為 86 人(出席率 75%)，其中，台中場次因報名時間較短，故參與人數最少；高雄場原訂於 10/5 辦理，因受颱風侵擾改期至 10/19 舉行，醫療從業人員因輪班排休制度無法順利調班，導致當天最後出席率比預期(85%)降低許多。將宣導會內容錄製成一小時的影片(圖 5)，其目的為後續推廣教育的輔助說明之用。表 2 為與會人員問答集彙整。此外，針對眼球水晶體劑量監測及輻射防護的關鍵概念與常見問題，編寫十題常見問與答(圖 6)，供工作人員參考。為配合計畫需求，已撰寫並投稿一篇宣導文章(Physical and Engineering Sciences in Medicine)，投稿文章標題為「Influences of radiation-protective devices on eye lens radiation doses for staff involved in fluoroscopy-guided interventional procedures: Interpretation of clinical observations through Monte Carlo simulations」)以利推廣與宣導眼球水晶體劑量之重要性。

圖 3：眼球水晶體劑量教育訓練宣導講義(節錄)

圖 4：眼球水晶體劑量教育訓練宣導講座

表 6：講座場次資訊

	台中場	台北場	高雄場
日期	9/21(六)	9/28(六)	10/19(六)
時間	09:00~12:00	13:30~16:30	13:30~16:30
場地	集思新烏日會議中心	集思台大會議中心	國立科學工藝博物館
講師	蔡惠予 教授	蔡惠予 教授	葉美妤 醫學物理師

表 7：與會人員問答集彙整

問題	現場回復
新眼球水晶體劑量限值與監測規範何時實施?	本年度進行教育宣導以減少新法上限衝擊，並逐步進行前期的調查及技術研發，未來會視相關技術發展及全面性調查研究，評估相關法規之內容。
國內各評定實驗室是否可提供眼球水晶體劑量評估及能力試驗情形?	111 年國內各評定實驗室有參與眼球水晶體劑量比對試驗並皆通測試，113~114 年度辦理第一次眼球水晶體劑量計能力試驗，國內各評定實驗室皆有參與。
介入性放射性診療所使用無重力鉛衣靈活嗎？	使用便利且靈活，可提升 9 倍處置頻次，但該設備費用不便宜。

那些關鍵群體需要進行眼球水晶體劑量管制？	逐步建置導則及輔導，後續視相關技術及研究發展辦理試辦計畫，眼球水晶體劑量管制非手段，其目的是使關鍵群體重視輻射安全之觀念，進而善用輻射防護原理及設備，使輻射劑量合理抑低。

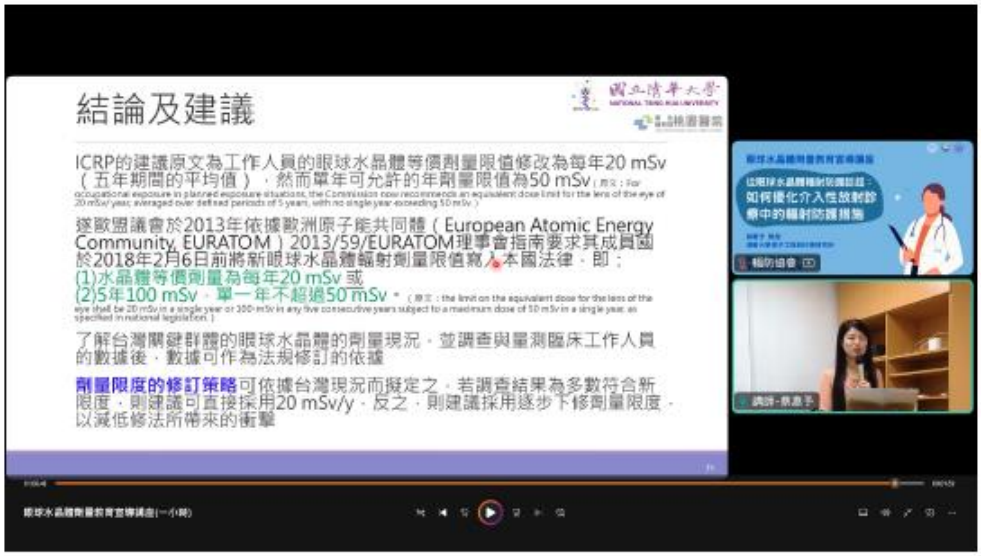
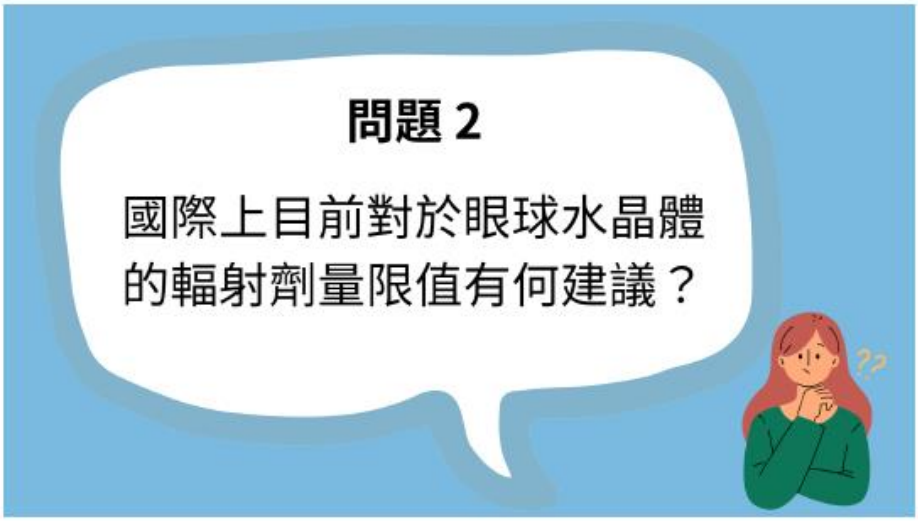


圖 5：眼球水晶體劑量教育訓練宣導影片(節錄)



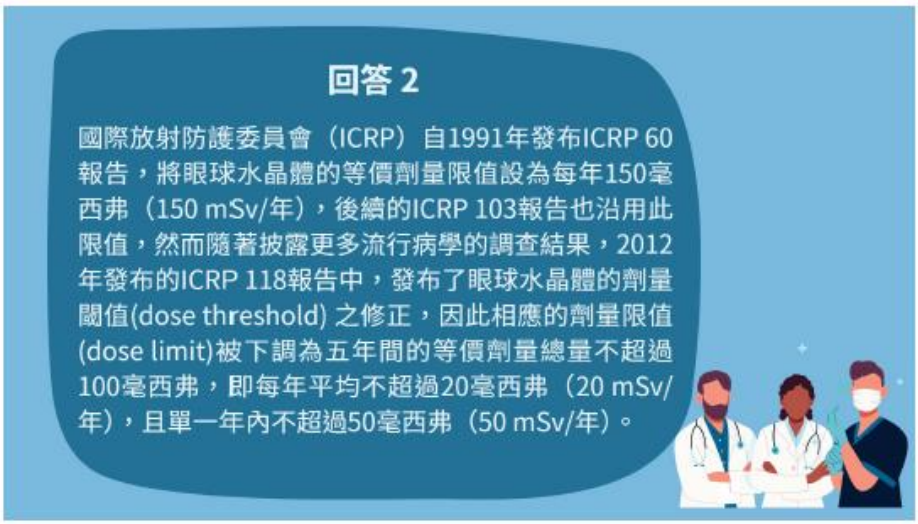


圖 6：眼球水晶體劑量教育訓練宣導重要觀念問與答(節錄)

(二) 強化國內輻射檢校量測技術能力研究

B1. 執行眼球水晶體劑量計能力試驗之前期作業，包含建構與維護技術規範所需輻射場、規劃執行程序。

為了眼球水晶體監測新興法規的上線，需先透過全國性的眼球水晶體劑量計能力試驗的執行，監測各個第一線技術服務實驗室是否具備良好的技術能力。而眼球水晶體劑量計能力試驗執行重要前置工作就是建立國家級的X射線ISO 高空氣克馬率(IH或HK)眼球水晶體劑量校正系統，以提供能力試驗高劑量級照射使用。

首先需建置眼球水晶體劑量校正系統的校正射質IH150。建置校正射質須進行附加過濾片組配及半值層量測，並且半值層量測結果需與規範差異小於5%。射質過濾片組配需先量測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，經量測本台X光機系統的固有過濾片鋁當量厚度為0.15 mmAl，依據固有過濾片厚度組配完成之附加過濾片如圖7。附加過濾片在IH150射質中使用的材料為銅，純度最低要求為99.9 %，密度為8.94 g/cm^3。接著量測半值層，並與ISO 4037規範定義之第一半值層厚度進行比較，結果差異皆在5%以內，如表8，代表本院建立之IH150射質與ISO 4037規範之射質有相近的能譜特性。

圖 7：NARI 035 館組配之高空氣克馬率射質 IH150 附加過濾片

表 8：NARI 035 館之高空氣克馬率射質 IH150 半值層量測結果

g 射質	管電壓	附加過濾片	NARI 第一半值層 1st HVL	ISO 第一半值層	第一半值層差異(%)
	kV	mm Cu	mm Cu	mm Cu	(NARI - ISO) /ISO
IH150	150	0.5	0.811	0.808	0.40%

接著使用自由空氣游離腔作為一級標準件進行 IH 150 射質 X 射線空氣克馬(K_{air})率標定，標定前須先進行 1.5 m 參考點處劑量修正因子的量測與模擬評估，項目包含：空氣衰減(k_a)、窗膜衰減(k_{wall})、電子損失(k_{el})、光子散射(k_{sc}) [8]、離子再結合(k_s)、初始游離(k_{ii})及平均游離能的能量依存性(k_w)評估[19]，結果如表 9。眼球水晶體劑量評估使用之假體為一個充滿水的圓柱形頭部假體，圓柱直徑為 200 mm、高為 200 mm，腔壁由 5 mm 厚度之壓克力(PMMA)組成，為了將其完整涵蓋於射束照野內，標準劑量率標定位置選擇於距離 X 光機 3 m 處進行照射。方法採用為使用球型游離腔二級標準傳遞的方式來進行 3 m 處標準劑量率的標定。首先將二級標準件(此游離腔

同時為量測系統之工作標準件)於 1.5 m 處進行校正，得到工作標準件校正因子；再將 3 m 處工作標準件之游離電流量測結果，乘上校正因子，即可標定出 3 m 處 K_{air} 標準劑量率。後續將 ISO 4037-3 規範之轉換因子應用於所測得的空氣克馬率，將其轉換為為眼球體外輻射監測使用之個人等效劑量率 $\dot{H}_p(3)$，其結果如表 10。

表 9：NARI 035 館之 IH150 射質劑量修正因子量測與模擬評估結果

射質	k_a	k_{wall}	k_{el}	k_{sc}	k_s	$k_{ii}k_w$	總修正量
IH150	1.0111	1.0041	1.0002	0.9943	1.0008	0.9979	1.0084

表 10：NARI 035 館標定之 IH150 射質空氣克馬率與個人等效劑量率 $\dot{H}_p(3)$

射質	3m 處空氣克馬率 (Gy/s)	轉換因子 (Sv/Gy)	個人等效劑量率 $\dot{H}_p(3)$ (Sv/s)
IH150	7.874E-05	1.6	1.260E-04

為了準確評估眼球水晶體劑量計受照射的劑量，設計於圓柱假體的上方會再架設一支監測用的游離腔，用以監測每次照射的結果。將型號 Exradin A5 的游離腔當作監測游離腔架設在圓柱假體上，如圖 8，於 3 m 處進行照射，即可測得監測游離腔之監測因子，並乘上眼球水晶體劑量轉換因子 $h_{pK}(3;H,\alpha)_{cyl}$，即得到為最後使用之監測因子，結果如表 11。最後將個人等效劑量率 $\dot{H}_p(3)$ 及監測因子等資料輸入進數據擷取程式，即完成數據擷取程式建置，圖 9。

本系統依據 ISO GUM 量測不確定度指引所建議之方法評估量測不確定

度，其中原級標準輻射場的擴充不確定度為 0.87% (k=2)，游離腔校正的擴充不確定度為 0.92% (k=2)，將其引用至所建置的眼球水晶體劑量計校正系統，得到擴充不確定度為 4.2%(k =2)。

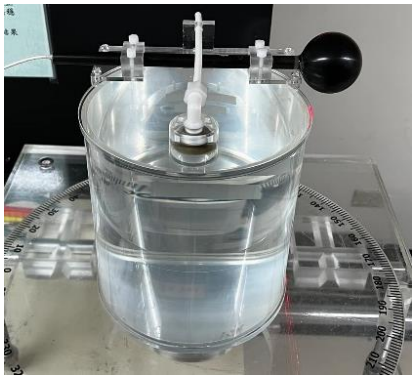


圖 8：Exradin A5 監測游離腔架設於 ISO 圓柱假體上

表 11：Exradin A5 監測游離腔之監測因子

射質	Exradin A5 監測因子 (Sv/C)
IH150	4.2021E+05

圖 9：完成數據擷取程式建置

眼球水晶體劑量計能力試驗研究為首次正式執行，參考 ANSI/HPS

N13.32-2018、ISO14146 國際標準、以及 TAF 測試領域人員劑量計能力試驗技術規範（TAF-CNLA-T08）等，執行光子、X 光和貝他輻射場維持或確證、規劃運轉、參與實驗室之校正，以及研究能力評估程序和方法。7 月 26 日辦理第一次眼球水晶體劑量計能力試驗執行前說明會議，預計共有七家實驗室參與(表 12)。在輻射源的選擇上，依據 ISO 4037 與 ISO 6980 國際規範，提供符合規範的加馬、X 射線和貝他粒子的適當輻射場。此外，配合 TAF 技術規範的更新，全面重整人員劑量計(全身式)、肢端(指環式)劑量計、眼球水晶體劑量計能力試驗週期。待 TAF 公告新版技術規範(草案)後，將採行最新規範要求執行本次試驗。規劃本次測試類別範圍與允差列於表 14。

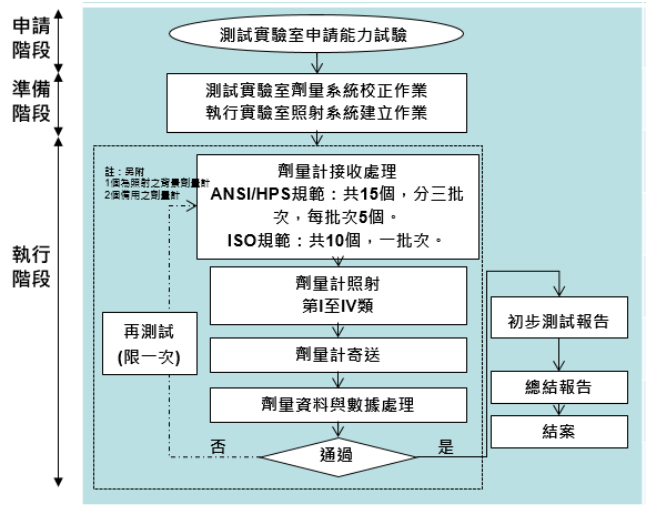
表 12：參與能力試驗實驗室列表

參與實驗室名稱
台電放射試驗室劑量計測組
台電核二工作隊放射試驗室
台電核三工作隊放射試驗室
貝克西弗實驗室
國立清華大學人員劑量實驗室
國家原子能科技研究院
輻射防護協會

照射測試因應技術國際化，除了 ANSI/HPS 方法：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。也同步納入 ISO 14146 方法：一批次進行，共 10 個劑量計。是故，分析全國實驗室於眼球水晶體劑量評估之技術能力，除了原有 ANSI/HPS 之判斷基準為能力

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能力試驗參考值)，並透過能力評定公式：$B^2+S^2 \leqq L^2$ (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。也納入 ISO 能力判定公式，即判斷基準為 $\boldsymbol{R = \frac{H'_i}{H_i}}$，與 $H_P(3)$偵測低限訂為 0.3 mSv，評定標準 1：$\left(0.71 - \frac{0.32}{0.23+H_i}\right) \leq R \leq \left(1.67 + \frac{0.5}{1.2+H_i}\right)$，適用光子平均能量> 10 keV 和貝他平均能量> 0.2 MeV(較易量測)及其混合場；以及評定標準 2：$0.5 - \frac{0.2}{0.2+H_i} \leq R \leq 2$，適用中子、光子平均能量≤ 10 keV 光子與貝他平均能量≤ 0.2 MeV (較難量測)及其混合場。能力試驗規劃時程如表 13。

表 13：眼球水晶體劑量計能力試驗時程規劃



執行規劃日期	工作項目
113 年 7 月 26 日	完成計畫書 召開執行前說明會
114 年 8-10 月 114 年 10-12 月	受測實驗室劑量計篩選作業 照射系統維修與測試
114 年 1-2 月	受測實驗室校正作業
114 年 3-4 月	批次照射作業
114 年 4-5 月	劑量回報、再測試
114 年 7 月	發布初步測試報告 辦理總結說明會議
114 年 9 月	發布正式報告

表 14：肢端與眼球水晶體劑量評估之測試類別、測試範圍及允差

測試類別	測試輻射劑量範圍	允差(*L*)
I. 高劑量級光子		
A. 一般 (B 及 C 隨機選擇) B. ^{137}Cs ($\bar{E}$ = 662 keV) C. M150 ($\bar{E}$ = 73.0 keV，用於 $D(0.07)$) IH150 ($\bar{E}$ = 78.0 keV，用於 $D(3)$)	0.1 to 5 Gy	0.24
II. 光子		
A. 一般 ($\bar{E}$ ≥ 20 keV) B. 高能量 ($\bar{E}$ ≥ 500 keV) C. 中能量 ($\bar{E}$ ≥ 70 keV) D. 窄能譜 (Am-241 或 NS80)	1.0 to 100 mSv	0.35
III. 貝他		
A. 一般 (B 及 C 隨機選擇) B. 高能量點射源 ($\bar{E}$ ≥ 500 keV) C. 低能量點射源 ($\bar{E}$ < 500 keV) D. 片型鈾($\bar{E}$ ≥ 500 keV)	2.5 to 100 mSv	0.35
IV. 貝他與光子混合場		
A. 一般光子＋貝他 B. 加馬＋貝他	3.5 to 100 mSv	0.35

註：

1. 第 II 類別中，僅能允許一個劑量計的給定劑量低於 2.5 mSv。
2. 每一類別使用的輻射源定義在文件中。
3. 使用在第 IV 類混合場中的第 II 類及第 III 類子類別，不可有特定的選擇。
4. 第 IV 類混合場之貝他與光子個人等效劑量之比例(貝他:光子)，範圍由 1 : 1 至 5 : 1 之間。
5. 在第 IV 類混合場中，低能量($\bar{E}$ < 500 keV)貝他粒子只可混合高能量($\bar{E}$ ≥ 500 keV)光子。

B2. 辦理輻射偵檢儀器校正能力試驗，包含數據處理、傳遞件管理、辦理技術交流會議及完成參與實驗室評估報告等；

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，本計畫舉辦第 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。

能力試驗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，訂定測試劑量率為傳遞儀器可量測範圍的 20%及 80%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)、累積劑量(γ)、和污染偵測器(α/β)，分別選定傳遞儀器為：國原院 /MERM-PE-HDB (圖 10a)、POLIMASTER / PM1610 (圖 10b)、和 SAPHYMO / miniTRACEβ (圖 10c)，另納入美軍野戰輻射偵測器 AN/VDR-2 測定劑量率類別。輻射場資料如表 15。

(a)

(b)

(c)

圖 10：射偵檢儀器校正能力試驗傳遞件之(a) MERM-PE-HDB；(b) POLIMASTER PM1610；(c) SAPHYMO MINITRACE β。

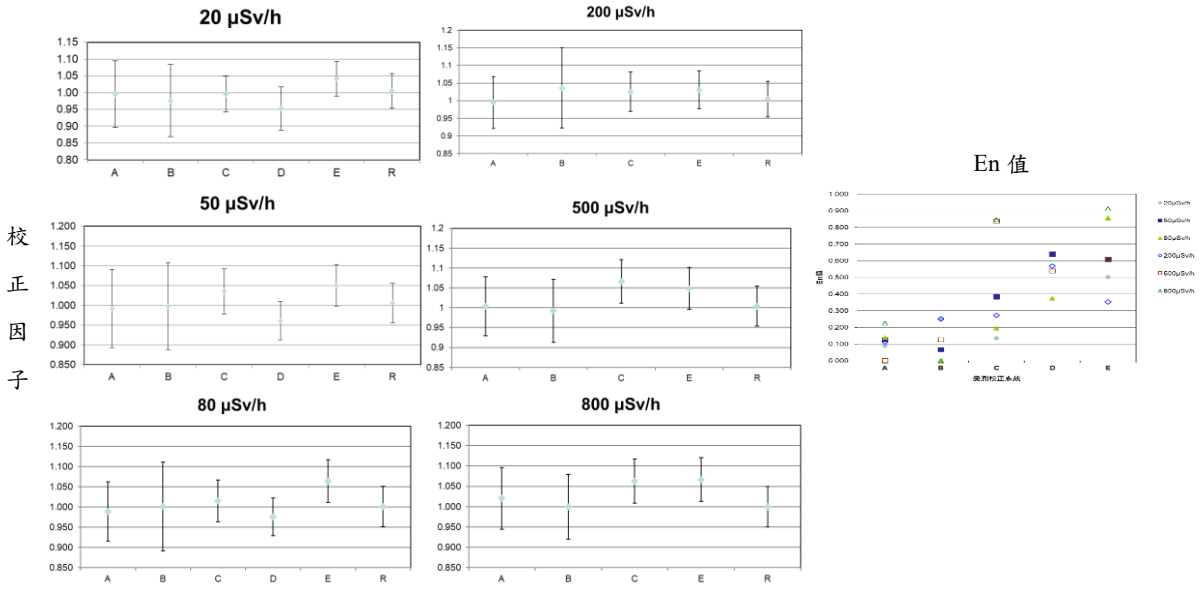
能力試驗的能力判定因應技術國際化，分析全國實驗室於輻射偵檢儀器校正之技術能力，依據 ISO 17043 規範之 E_n 值進行判定，即 $E_n = |(V_{lab}-V_{ref})| / (U_{lab}^2 + U_{ref}^2)^{1/2}$，其中，$V_{lab}$ 或 V_{ref} 為受測實驗室或中心實驗室量測值(校正因子或效率)；U_{lab} 或 U_{ref} 為受測實驗室或中心實驗室擴充不確定度。當 E_n 值小於等於 1 時，代表通過能力試驗；當 E_n 值大於 1 時，代表不通過能力試驗。雙邊比對則採用 z 分數(z score)判定準則，即 $z = |(V_1-V_2)| / (u_1^2 + u_2^2)^{1/2}$，其中，$V$ 為校正因子；u 為不確定度。當 z 值小於等於 2 時，代表雙邊比對結果一致；當 z 值大於 2 小於等於 3 時，代表雙邊比對結果有疑慮；當 z 值大於 3 時，代表雙邊比對結果有顯著差異。

試驗部分於 112 年 10 月-113 年 1 月進行傳遞件傳送(各受測實驗室有 8 天時間執行各測試類別的儀器校正)、113 年 3 月中收到全部測試結果回報、113 年 4 月底完成能力試驗報告初稿，及 113 年 5 月 21 日召開「第 9 次輻射偵檢儀器校正能力試驗暨第 5 次陸軍化生放核防護研究中心校正比對總結說明會」，總計參與比對試驗之 6 家實驗室與主管機關核安會、主辦單位國原院等 16 位專家學者參與，單位包含：(1)核能安全委員會輻射防護組、(2)台灣電力股份有限公司放射試驗室劑量計測組、(3)台灣電力股份有限公司放射試驗室核三工作隊、(4)輻射偵測中心、(5)國立清華大學原科中心、(6)克馬校正實驗室、(7)陸軍化生放核訓練中心、與(8)國原院。本會議說明能力試驗 6 家實驗室參與能力試驗的 E_n 值皆小於 1，通過率 100%，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。

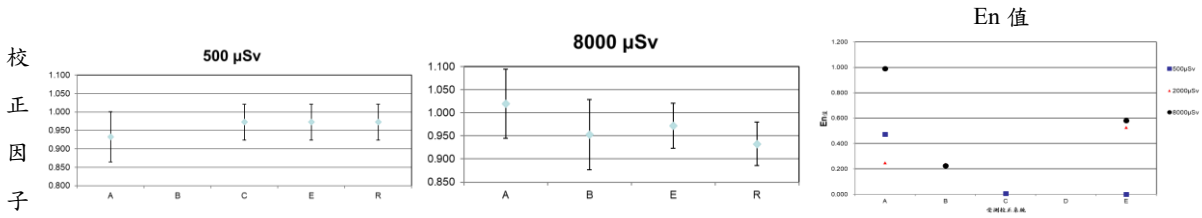
實驗室比對的機構有：陸軍化生放射防護研究中心和台灣電力公司放射試驗室，共 2 家實驗室。陸軍化生放射防護研究中心傳遞件為野戰輻射偵檢器 AN/VDR-2，主機序號 0560、偵檢管序號 40719CC 儀器，參與低、高劑量率的測試項目，與國原院輻射度量儀器校正實驗室比對之結果 z 參數最大值為 1.26，小於 2，依據 ISO/IEC 17043 規範之 z score 判定準則，雙邊比對結果一致。台灣電力公司放射試驗室之中子校正比對結果 z 參數為 0.5，小於 2，依據 ISO/IEC 17043 規範之 z score 判定準則，雙邊比對結果一致。

表 15：國內參與第 9 次輻射偵檢儀器校正能力試驗之機構與其輻射場

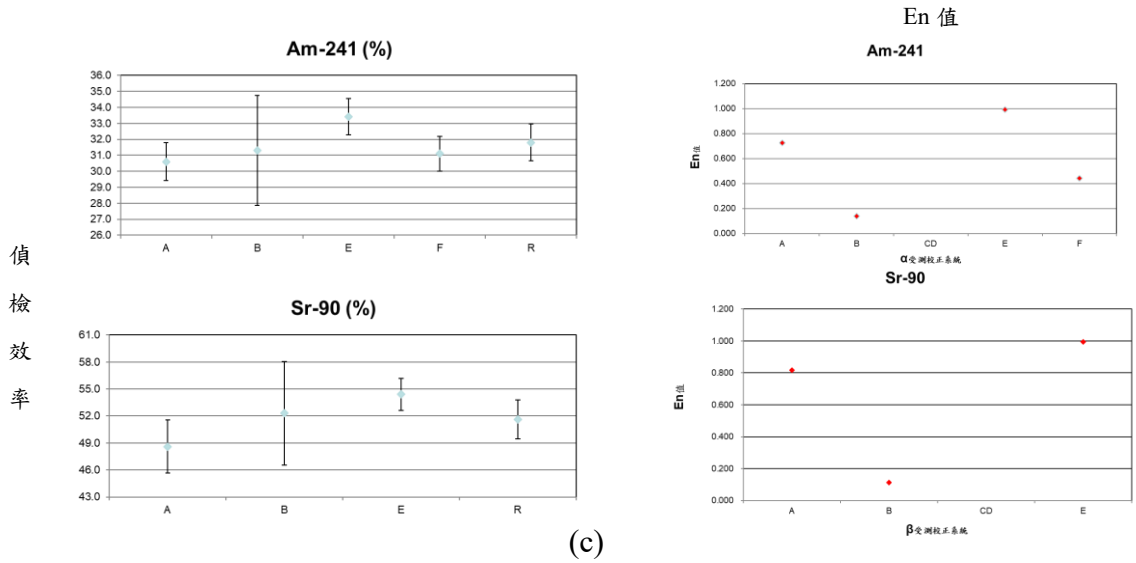
參加機構	應參加類別	核種或設備	輻射場強度範圍
輻射偵測中心	KK1002 中劑量率 低劑量率	Cs-137	0.1 mSv/h ～ 25 mSv/h 5 μSv/h ～ 0.1 mSv/h
清華大學人員劑量實驗室	KK1002 中劑量率 低劑量率 累積劑量	Cs-137	1 mSv/h ～ 10 mSv/h 5 μSv/h ～ 900 μSv/h 100 μSv ～
台電放射試驗室	KK1002 中劑量率 低劑量率 累積劑量	Cs137	1 mSv/h ～ 999 mSv/h 5 μSv/h ～ 999 μSv/h 0.1 mSv～
	KK1005	Sr-90	933 β/s to 3582 β/s
	KK1006	Am-241	1320 α/s to 2638 α/s
台電放射試驗室 核三工作隊	KK1002 中劑量率 低劑量率 累積劑量	Cs-137	400 μSv /h ～ 8 Sv/h 14 μSv/h ～ 400 μSv/h 0.1 mSv～
	KK1005	Sr-90	1124 β/s to 3114 β/s
	KK1006	Am-241	2279 α/s to 2780 α/s
國原院輻射度量儀器校正實驗室	KK1002 中劑量率 低劑量率 累積劑量	Cs-137	1 mSv/h ～ 1 Sv/h 4 μSv/h ～ 999 μSv/h 1μSv～2 Sv
	KK1005	Sr-90	545 β/s to 6489 β/s
	KK1006	Am-241	47 α/s to 7376 α/s
克馬校正實驗室	KK1005	Cl-36	539 β/s to 1860 β/s
	KK1006	Am-241	388 α/s to 1710 α/s
	KK1004	Co-57 Ba-133 Cs137	5.47 mCi 255 μCi 205 μCi
	KK1004	Am-241 Eu-152 Cs137	0.11 μCi 0.11 μCi 0.47 μCi
	KK1004	Cs137	19.7 μCi



(a)



(b)



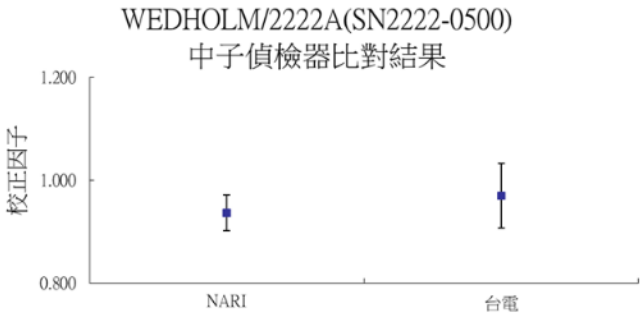
(c)

圖 11：國內參與第 9 次輻射偵檢儀器校正能力試驗之試驗結果。(a)劑量率偵檢器量測結果與 E_n 值；(b)人員劑量計量測結果與 E_n 值；(c)α/β 污染偵檢器效率量測結果與 E_n 值。

陸軍化生放核訓練中心校正結果								
照射器	偵檢器	時間	量測值		標準值		校正因子	Z
			μGy/h	Uc(%)	μGy/h	Uc(%)		
NRC-8μCi-002	VDR-2	累積	7.08	2.9	7.13	2.8	1.01±5.8 %	0.27
	DT-616	累積	117.85	4.6	124.85	4.0	1.06±9.2 %	0.57
NRC-8μCi-003	VDR-2	累積	7.67	2.8	7.81	2.7	1.02±5.6 %	0.57
	DT-616	累積	130.93	5.4	150.77	4.7	1.15±10.8 %	1.26
NRC-8μCi-004	VDR-2	累積	9.16	3.2	9.42	3.0	1.03±6.4 %	0.78
	DT-616	累積	147.61	4.5	163.73	4.2	1.11±9.0 %	0.76
輻射度量儀器校正實驗室結果								
GHS-5Ci	VDR-2	劑量率	8.29	2.6	8.26	2.5	1.00±5.2 %	-
	DT-616	劑量率	15.50 cGy/hr	2.6	16.53 cGy/hr	2.5	1.07±5.2 %	-

(a)

	校正因子	不確定度(%, k=1)	不確定度(k=1)	Z
NARI	0.936	3.7	0.035	0.5
台電	0.97	6.5	0.063	



(b)

圖 12：112-113 年度國內輻射偵檢儀器校正雙邊比對之結果。(a) 陸軍化生放核訓練中心結果與 *z* 值；(b) 台電放射實驗室中子校正結果與 *z* 值。

(三) 精進染色體變異分析技術與評估研究

C1. 完成年度國人染色體背景值分析 3 例，擴增我國染色體背景值資料庫

本年度已於 3 月 11 日完成收案 3 例(Case A、B 及 C)，進行染色體雙中節實驗及分析，將血樣處理後進行實驗、染色和玻片製作。3 月 25 日起檔案製作與分析，4-6 月完成分析與確認，9 月底確認染色體雙中節：Case A 為 0.995 ‰，Case B 為 0.989 ‰，Case C 為 0.938‰(表 15)，納入年度分析值中本年度背景值平均為 0.973‰。背景雙中節分析國際標約為為 1.0‰，目前今年度的平均數值趨近國際標準。至 113 年度為止，人員生物劑量實驗室已完成 40 例正常國人背景染色體雙中節分析，一共分析 40,810 顆細胞，發現 29 個雙中節（dicentric）於 29 顆細胞中，收案男女比為 17:23，雙中節發生率分別為 0.695‰和 0.721‰(表 16)。

表 15：本年度背景值染色體雙中節比例

	2024年背景值雙中節比例		
編號	Case A	Case B	Case C
分析影像數	1005	1011	1066
雙中節數	1	1	1
千分比(‰)	0.995	0.989	0.938

表 16：背景值資料庫男女染色體雙中節比例

	男	女	總數
數量	17	23	40
分析數	17254	23556	40810
雙中節數	12	17	29
雙中節發生率(‰)	0.695491	0.721684	0.71061

團隊完成研討會投稿至 2024 年生醫年會，論文通過審查接受，於 2024 年 1 月 7 日完成投稿，3 月 5 日通知接受，3 月 23 至 24 日於國防醫學大學舉辦之生物影像研討會完成壁報論文發表(圖 13)。

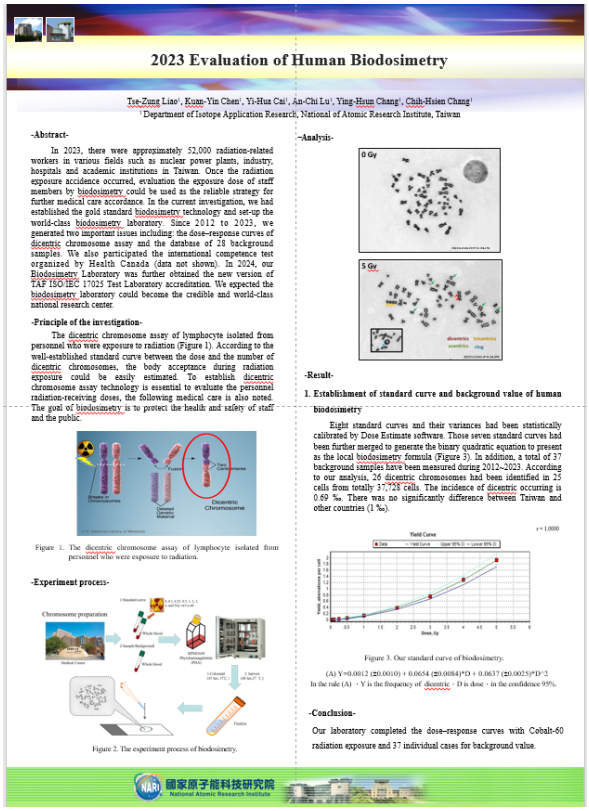


圖 13：生醫影像研討會會議論文「2024 Evaluation of Human Biodosimetry」論文

C2. 完成人員生物劑量實驗室分析能力之國際比對試驗

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，人員生物劑量實驗室目前已建置 TAF 一、二、三階文件及四階表單共 40 份文件，TAF ISO/IEC 17025 測試實驗室認證證書有效期為三年，因核能研究所改制為國家原子能科技研究院終止原實驗室編號(3201)，需重新申請認證(編號

4224)，3 月 20 日已完成 TAF ISO/IEC 17025 新認證實驗室訪查與補充更新文件，通過認證，取得 TAF 實驗室編號 4224 之證書(圖 14)，確保分析作業與結果產出之品質標準。

財團法人全國認證基金會
Taiwan Accreditation Foundation

認 證 證 書

(證書編號：L4224-240227)

茲證明

國家原子能科技研究院

人員生物劑量實驗室

桃園市龍潭區文化路 1000 號

為本會認證之實驗室

認證依據：ISO/IEC 17025：2017；CNS 17025：2018
認證編號：4224
初次認證日期：一百一十三年二月二十七日
認證有效期間：一百一十三年二月二十七日至一百一十四年七月十六日止
認證範圍：測試領域，如續頁

董事長

陳怡鈴

中華民國一一三年二月二十七日

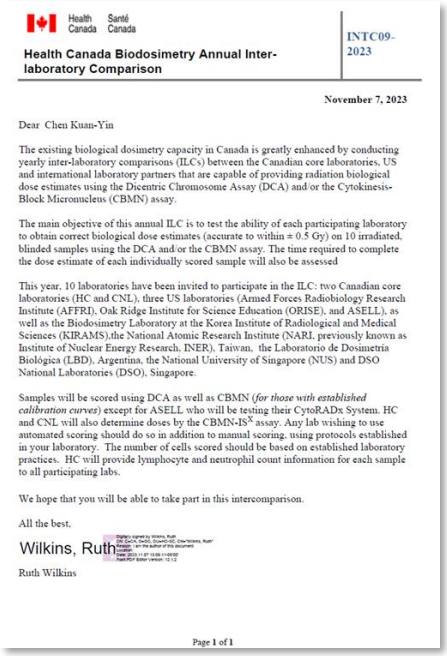
本認證證書為續頁合併使用無效　第 1 頁，共 2 頁

圖 14：TAF 認證實驗室(編號 4224)證書

國際比對自 112 年 9 月 14 日接獲本所張志賢副執秘轉寄 Health Canada(HC, 加拿大衛生部)詢問今年是否參加國際能力試驗比對，考量以下幾點：1.實驗室同仁從未參與國際能力比對以及對於技術熟悉度如何？2. 本所改為國源院後 TAF 實驗室若需要重新認證或現場監評是否需要國際認證資料?3.本實驗室目前人力負荷程度? 經過內部評估與討論並回覆 Health Canada Dr. Ruth Wilkins 國原院願意接受挑戰，並規劃執行方式。

本次國際比對包含 10 個實驗室受邀參加 ILC (Inter-laboratory

Comparison)(圖 15)：兩個加拿大核心實驗室（HC 和 CNL）、三個美國實驗室[武裝部隊放射生物學研究所（AFFRI）、橡樹嶺科學教育研究所（ORISE）和 ASELL 生技公司] ，以及韓國放射醫學科學研究所 (KIRAMS) 的生物劑量測定實驗室、台灣國家原子能科技研究院 (NARI，以前稱為核能研究所 (INER))、阿根廷生物劑量實驗室 (LBD)、新加坡國立大學(NUS) 和新加坡 DSO 國家實驗室。



Health Canada Santé Canada

Health Canada Biodosimetry Annual Inter-laboratory Comparison

INTC09-2023

November 7, 2023

Dear Chen Kuan-Yin

The existing biological dosimetry capacity in Canada is greatly enhanced by conducting yearly inter-laboratory comparisons (ILCs) between the Canadian core laboratories, US and international laboratory partners that are capable of providing radiation biological dose estimates using the Dicentric Chromosome Assay (DCA) and/or the Cytokinesis-Block Micronucleus (CBMN) assay.

The main objective of this annual ILC is to test the ability of each participating laboratory to obtain correct biological dose estimates (accurate to within ± 0.5 Gy) on 10 irradiated, blinded samples using the DCA and/or the CBMN assay. The time required to complete the dose estimate of each individually scored sample will also be assessed

This year, 10 laboratories have been invited to participate in the ILC: two Canadian core laboratories (HC and CNL), three US laboratories (Armed Forces Radiobiology Research Institute (AFFRI), Oak Ridge Institute for Science Education (ORISE), and ASELL), as well as the Biodosimetry Laboratory at the Korea Institute of Radiological and Medical Sciences (KIRAMS),the National Atomic Research Institute (NARI, previously known as Institute of Nuclear Energy Research, INER), Taiwan, the Laboratorio de Dosimetría Biológica (LBD), Argentina, the National University of Singapore (NUS) and DSO National Laboratories (DSO), Singapore.

Samples will be scored using DCA as well as CBMN (*for those with established calibration curves*) except for ASELL who will be testing their CytoRADx System. HC and CNL will also determine doses by the CBMN-IS^{X} assay. Any lab wishing to use automated scoring should do so in addition to manual scoring, using protocols established in your laboratory. The number of cells scored should be based on established laboratory practices. HC will provide lymphocyte and neutrophil count information for each sample to all participating labs.

We hope that you will be able to take part in this intercomparison.

All the best,

Wilkins, Ruth

Ruth Wilkins

Page 1 of 1

圖 15：加拿大衛生部舉辦國際比對邀請函

Health Canada 於當地時間 11 月 27 日週一透過國際快遞 FedEx 將 10 個血樣寄出，通關後運送至實驗室為 12 月 1 日，開始實驗並製作玻片和檔案，接著分析和處理數據，經過確認後將數據回傳 Health Canada。血樣進口的配件包含溫度計和輻射偵測計復運回 Health Canada。113 年 1 月 31 日完成數據分析與確認後回傳 Health Canada，相關數據由 Health Canada

處理比對。我們於 113 年十月收到比對結果結論：這些結果證明 NARI 能夠熟練準確地使用染色體雙中節分析提供劑量評估(圖 16)。

Unclassified / Non classifié

Health Canada / Santé Canada

Healthy Environments and Consumer Safety Branch / Direction générale, Santé environnementale et sécurité des consommateurs

Department of Isotope Application Research
National Atomic Research Institute (NARI)

Subject: Results of Biological Dosimetry Inter-laboratory comparison, November 2023

Dear Tse-Zung Liao

October 22, 2024

In November 2023, a biological dosimetry inter-laboratory comparison exercise organized by Health Canada. For this exercise, 10 irradiated and blinded blood samples were sent to 10 international laboratories. Each laboratory processed the samples and analysed them for dose using the dicentric assay. Results were returned to Health Canada.

The National Atomic Research Institute (NARI) participated in this exercise and provided dose estimates after scoring 50 cells or 30 dicentrics for two scorers using both conventional and QuickScan scoring techniques. The results are attached. Overall, from the 40 scoring results submitted, NARI identified the correct dose (wit 0.5 Gy of the delivered dose) in 34 of the 40 dose estimates (88% success). It was noted that scorer ACLu performed better (93%) than YHCai (75%) and suggest that a review of the scoring is done between the two scorers. Once all data is received from other participating laboratories, a more in depth analysis will be conducted to compare between laboratories.

These results provide evidence that NARI is proficient at providing dose estimates using the dicentric assay for radiation biodosimetry.

Regards,

Ruth Wilkins, PhD
Division Manager
Ionizing Radiation Health Sciences Division
Ruth.Wilkins@hc-sc.gc.ca

Tel: (613) 355-6028

Consumer and Clinical Radiation Protection Bureau
Environmental and Radiation Health Sciences Directorate
775 Brookfield Road
Ottawa, Ontario K1A 1C1
Canada

* Outside ± 0.5Gy

圖 16：加拿大衛生部舉辦國際比對報告

C3. 電腦智慧型及人工分析染色體之準確度比對研究

目前 γ-H2AX 由於取得市售螢光影像擷取、分析軟體，自去年起進行手動與人工智慧作業流程做對比，進度較快。去年度之 γ-H2AX 已完成之低劑量檢量線 0~0.1 Gy 手動影像分析(圖 17A) 及智慧型影像擷取分析(圖 17 B)，今年完成中劑量智慧型影像擷取分析(0~1 Gy)檢量線(圖 12 C)。智慧型影像分析線性關係(圖 17 B, C)皆優於手動分析(圖 17 A)。

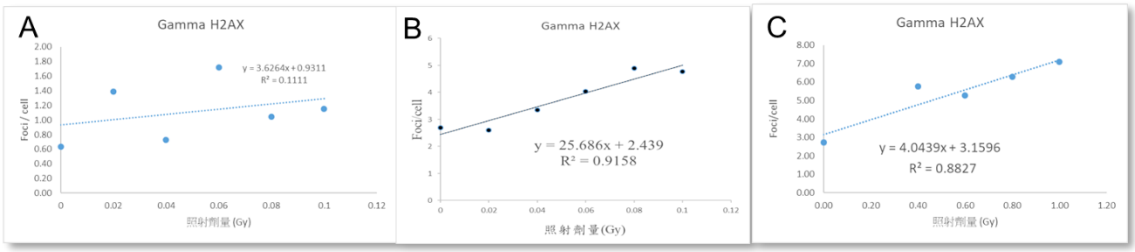


圖 17：螢光計數 foci 數量與照射劑量關係圖，A.手動擷取低劑量照射影像分析，B.人工智慧擷取低劑量照射影像分析，C.人工智慧擷取中劑量照射影像分析。

染色體雙中節分析部分尚未有市售軟體，雖洽談軟體廠商，但市場太小，廠商無意願開發。完成本年度染色體影像自動化分析前處理之研究規劃，本團隊與長庚大學合作，初步從 200 張原始圖檔進行影像處理與分析，針對影像自動化分析染色體變異數前，需針對原始影像進行前處理，包含影像自動化分割方法之可行性分析。

伍、結論與建議

本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：完成國際期刊投稿 1 篇、研討會論文 1 篇、研究/技術報告 7 篇、辦理學術活動共 5 場、形成手冊/教材 3 份，與規範標準草案 1 份。

子項計畫一：建立國際同步之輻射防護規範研究

A1. 以本計畫團隊建立之臺灣懷孕婦女假體，研析台灣常見的輻射工作場所、可發生游離輻射設備及常用放射性物質之工作光子能量範圍，建立不同輻射場之胎兒劑量轉換數值表，現階段針對女性輻射工作人員之胎兒輻射防護，國內可依據現行「游離輻射防護安全標準」制定相關規範。為響應國際放射防護委員會 (ICRP) 於 2007 年第 103 號報告中的建議，胎兒劑量不得超過 1 毫西弗。本研究提出一套完整的胎兒劑量評估方法，包括「子宮劑量轉換係數表」及「常見輻射工作場所之子宮劑量轉換係數表」。當腹部表面淺部劑量 Hp(0.07) 超過每月劑量限值 0.12 mSv 時，雇主可根據懷孕婦女的「工作環境」或「輻射工作場所」的平均光子能量，選擇適當的子宮劑量轉換係數 (UDCC)，並依據懷孕周期（3、6、9 個月）進行劑量評估，確保胎兒劑量不超過 1 mSv。此外，本研究提供具體的胎兒劑量計算案例，供雇主在計算時參考，為未來臨床應用及相關監管機構提供指引，進一步保障輻射工作環境中懷孕人員及其胎兒的健康與安全。

A2. 完成眼球水晶體輻射防護宣導講座北中南共 3 場次，共計 124 個單位、298 位介入性放射診療等單位代表、專家與利害關係人參與，並形成宣導教材、影片、重要觀念 Q&A，與廣宣品，達到國際輻防趨勢引入與推廣之效益。

子項計畫二：強化國內輻射檢校量測技術能力研究

B1. 完成眼球水晶體劑量計能力試驗研究之前期規劃研究，建構與維護技術規範所需輻射場與參與實驗室名冊，辦理全國性說明會；同步達成 X 射線 ISO 高空氣克馬率(IH) 150 之眼球水晶體劑量校正系統建立，國家實驗室可提供全國的人員劑量評估實驗室進行眼球水晶體劑量計 IH150 劑量照射與性能測試，以利執行全國性能力試驗高劑量測試類別，厚實輻防管制技術能力。

B2. 完成第九次輻射偵檢儀器校正能力試驗研究，分析與監測我國產業能力，能力試驗研究之 6 家參與實驗為 100%合格率，比對研究之判定結果顯示能力無差異，達成國內輔導與能力分析。並辦理全國性技術交流會議，共計 8 個單位共 16 位專家學者參與。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。

子項計畫三：精進染色體變異分析技術與評估研究

C1. 完成 113 年度國人染色體背景值分析 3 例，本年度背景值平均為 0.973‰，並納入年度分析資料庫。

C2. 完成人員生物劑量實驗室分析能力之國際比對試驗比對，參加 Health

Canada 舉辦國際能力試驗比對，證實本實驗室染色體雙中節分析提供劑量評估的能力；完成國內 TAF ISO/IEC 17025 新認證實驗室，通過認證取得 TAF 實驗室 4224 之證書。

C3. 完成電腦智慧型及人工分析 Gamma H2AX 之準確度比對技術開發研究，以電腦智慧型影像分析技術完成中劑量智慧型影像擷取分析(0~1 Gy)檢量線，結果顯示智慧型影像分析線性關係皆優於人工手動分析。

總體而言，本計畫的規劃與執行屬於國家輻射防護基礎建設的重要環節，不僅對輻射防護法規的更新與執行提供關鍵支援，也確保我國輻防法規能與國際標準接軌，同時保障國內各專業實驗室具備足夠的技術能力，以支援輻防法規的實施與改進。輻射防護基礎建設的完善需要長期的努力與投入，建議主管機關持續提供穩定的資源支持，以維持相關基礎設施與技術能力，確保輻防法規始終具備可靠的技術後盾，進一步保障全民的輻射安全。

陸、參考文獻

1. 行政院原子能委員會。「接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力」計畫 112 年度期末報告。2023。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 核能研究所 INER-11162 報告，黃增德、朱健豪、林怡君，「以蒙地卡羅方法計算自由空氣游離腔之光子散射及電子損失及電極遮蔽效應修正因子」，2014。
9. ANSI, “Radiation Protection Instrumentation Test and Calibration,” N323A-1997. 1997.
10. ANSI & HPS, “American National Standard for Personnel Dosimetry Performance - Criteria for Testing,” ANSI N13.11, 2022.
11. ANSI & HPS, “American National Standard for Performance Testing of Extremity Dosimeters,” ANSI/HPS N13.32, 2018.
12. 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.
13. Gualdrini G, Ferrari P. Handbook of anatomical models for radiation dosimetry. Oxford University Press; 2011.
14. 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.
15. IAEA, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, 2014.
16. IAEA, Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, IAEA TECDOC No.1731, 2014.
17. ICRP, ICRP Publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1990.
18. ICRP, ICRP publication 84, Brent R, Mettler F, Wagner L, Streffer BM, He S, Kusama T. Pregnancy and Medical Radiation.. 2001;30:1.

19. ICRP, ICRP Publication 90, Key Data For Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards And Applications, 2016.
20. ICRP Publication 103, ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 2007.
21. 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.
22. ICRP, ICRP Publication 119, Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication, 2012.
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. ISO, X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosemeters 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.
25. ISO, X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosemeters 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.
26. ISO, X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosemeters and Doserate meters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy - Part 3: Calibration of area and personal dosemeters 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.
27. ISO, Nuclear Energy ─ Reference Beta Particle Radiations ─ Part 1: Methods of Production, ISO 6980-1, Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2006.
28. ISO, Radiological protection — Criteria and performance limits for the periodic evaluation of dosimetry services for external radiation, ISO 14146:2024, Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2024.
29. ISO/IEC, Conformity assessment — General requirements for the competence of proficiency testing providers, ISO/IEC 17043:2023, Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2023.
30. ISO/IEC, Radiological protection-Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetic- Dicentric assay, ISO/IEC 19238:2023(E), Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2023.

31. ISO/IEC, Radiological protection-Performance criteria for service laboratories performing initial cytogenetic dose assessment of mass casualties in radiological or nuclear emergencies — General principles and application to dicentric assay, ISO/IEC 21243:2022(E)Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2022.
32. 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-.
33. 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.
34. 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.
35. Osei E, Faulkner K. Fetal position and size data for dose estimation. The British journal of radiology. 1999;72(856):363-70.
36. Osei EK, Kotre CJ. Equivalent dose to the fetus from occupational exposure of pregnant staff in diagnostic radiology. Br J Radiol. 2001;74(883):629-37.
37. Paulbeck C, Griffin K, Lee C, Cullings H, Egbert SD, Funamoto S, et al. Dosimetric impact of a new computational voxel phantom series for the Japanese atomic bomb survivors: pregnant females. Radiation Research. 2019;192(5):538-61.
38. 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.
39. Roch-Lefèvre S, Mandina T, Voisin P, Gaëtan G, Mesa JEG, Valente M, et al. Quantification of γ-H2AX foci in human lymphocytes: A method for biological dosimetry after ionizing radiation exposure. Radiation research. 2010;174(2):185-94.
40. Standardization ISO. Radiation protection–Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetics. Geneva: ISO. 2004;19238:2014.
41. Stewart F, Akleyev A, Hauer-Jensen M, Hendry J, Kleiman N, Macvittie T, et al. 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. 2012;41(1-2):1-322.
42. ICRP, 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4).
43. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External

Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).

44. 112 年游離輻射應用與管理統計，原子能委員會 Atomic Energy Council，112 年 9 月出版