

行政院原子能委員會
委託研究計畫期末研究報告

輻射防護管制規範與度量技術研究(3/4)

**Research on Radiation Protection Management Specification
and Measurement Technology**

計畫編號：108-2001-02-17-08

受委託機關(構)：原子能委員會核能研究所

計畫主持人：袁○程

聯絡電話：(03)4711400 ext 7673

共同計畫主持人：朱○豪、林○君、王○文、林○琪

聯絡人：鄧○梅

報告日期：109年1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	5
參、研究方法與過程.....	13
肆、主要發現與討論.....	21
伍、結論與建議.....	73
陸、參考文獻	76
附件 期末訪查技術性查核問題與回復(Q&A).....	79

中文摘要

為了接軌如原子能總署 (IAEA)、歐盟等國際上陸續更新的輻防管制建議與技術規範，本計畫配合法規研議政策，立於輻防管制系統全面性考量，採雙主軸方向滾動式進行，以精進管制實務面之技術能力與輻射防護之度量技術研究。探討國內外趨勢，強化輻射量測劑量評估之準確度與公信力，增進輻射偵測儀器檢校及技術評估，與提升人員生物劑量評估相關技術。整體目標為研發建立符合全球趨勢的輻射劑量評估與輻射量測系統，研究劑量稽核與驗證方法，研擬相關管制作業程序及法規參考資料，以及因應輻射災變和緊急曝露之輻射生物劑量技術精進，以提升游離輻射防護管制技術，確保民眾健康及安全。

本年度含四個主題：1. 輻射防護技術規範與劑量評估精進研究；2. 輻射防護能力試驗技術研究；3. 輻射應用劑量評估與檢校技術研究，以及 4. 人員生物劑量染色體變異評估技術研究。工作項目參考國際最新輻防趨勢與作為，針對技術規範、眼球劑量等輻防架構、管制影響及評估技術進行研析；人員劑量和肢端劑量能力試驗認證技術研究；醫療曝露透視攝影之劑量品保及校正進行評估；建立動態擬人假體輻射劑量和質子治療射束品質的評估技術；以及國人染色體雙中節背景值和劑量反應曲線，以持續提升游離輻射安全管制層次及水準。

關鍵字：游離輻射、輻射防護、輻射安全標準、輻射度量、生物劑量

英文摘要

In order to respond to the radiation management structure and technical specifications of international organizations (such as the International Atomic Energy Agency, the European Union, etc.), this plan adopted a roll-on approach to cooperate with the updated regulations on the improvement of technical ability in control practice and radiation protection measurement technology, in two main directions. Considering the domestic and international trends, it aimed to strengthen the accuracy and credibility of radiation measurement and dosimetry, to improve the evaluation technology research of radiation detectors for testing and calibration, and to enhance the personnel and biological doses assessment technology. This plan also considered the full-scale radiation protection system, including radiation dose measurement system, dose verification method, radiation protection management procedure and regulations, radiation biological dose responses and radiation accident prevention strategies. It can improve the techniques for radiation protection management to ensure the public's health and safety.

The main research categories included in this year are: 1. Improvement on radiation protection technical specifications and dose assessment; 2. Radiation protection proficiency testing techniques; 3. Radiation application research of radiation dose evaluation and detection equipment calibration; 4. Evaluation of human biodosimetry/chromosome abnormality. The work items are to develop the radiation protection technical specifications referring to the latest international trend, to research the eye lens

dose, evaluate the impact of new regulations, research the personnel and extremity doses performances certification technology, establish the beam quality of dose calibration for medical exposure fluoroscopy, construct dynamic anthropomorphic prosthesis for radiation protection, extend the linear energy transfer system for particle therapy, and continue to establish the domestic background value and dose response curve of the dicentric chromosome. The final purpose is to pursue and provide a higher level of radiation protection management based on the improvement of the relative technical ability and quality.

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

壹、前言(計畫緣起)

本計畫之執行內容，係考量目前科技進步、民眾生活品質提高，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、審查及評估之技術，建立基礎。計畫內容所參考之目前環境需求與未來方向預測如下：

- 一、我國現行游離輻射防護安全標準，係參照國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, 簡稱ICRP)於1990年發表之建議書而定。而近十數年，隨著國際輻防體系演進、生物學數據更新等因素。ICRP於2007年後，提出了新的輻防觀念，包含以三類曝露情境取代原有之輻射作業與干預、加強輻防最適化精神、危害係數與輻射、組織加權因數修訂、修正眼球水晶體劑量限值、確定效應與關鍵群體名詞等部分皆有所修正。而後，國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)亦針對ICRP的修訂而出版新的安全要求標準 (IAEA General Safety Requirements Part 3, 簡稱IAEA GSR Part3)，本項作業將參照IAEA發表的GSR Part3，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，並彙整國內專家建議，提出建議修訂方向。
- 二、依據原子能委員會於107年12月的統計，非醫用可發生游離輻射設備約為7千餘台，國內醫用可發生游離輻射設備約有1萬8千餘台，輻射從業人員申請佩章之人數5萬2千餘人，

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、輻射劑量評估與輻射偵檢為重要的輻防管制工作，而相關實驗室具備良好的技術能力與完備的品保作業亦是落實輻射防護作業、保障輻射工作人員之關鍵，因此必須透過認證來確認全國各相關實驗室是否具備足夠技術能力與品質來保證執行校正、測試與量測評估等業務。能力試驗是實驗室認證重要的一環，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理與管制需求，建立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，利用全國認證基金會（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，全球罹癌人數逐年升高，國內癌症發生之人數均不斷增加，民眾越來越注意健康保健，了解「預防勝於治療」的觀念，而對於放射診療品質越趨重視，依據衛生福利部106年之統計資料顯示，國人每年接受乳房X光攝影篩檢約163萬人次、電腦斷層掃描檢查人次約238萬人次、放射治療約122萬人次、核子醫學檢查約50.6萬人次，而國內質子治療與重粒子治療技術亦蓬勃發展；爰此，本計畫以輻射應用領域國

際新穎性與科技急迫性為基準，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之量測評估技術，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，人員生物劑量技術，是劑量重建的必要工具，較高的輻射曝露意外事件，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，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，而使用國人生物樣本，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，更可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。

貳、研究目的

本計畫執行四年期科技發展計畫，目標為支援輻射防護管制業務需求，提供管制執行與規範制定之參考依據，增進民眾於原子能應用與輻射防護之信心。

為因應國際最新法規與管制實務趨勢，強化國內輻防科技發展，以輻射防護管制規範與度量技術研究為中心規劃，進行輻射防護管制規範與技術、輻射偵測與儀器檢校、輻防劑量評估與驗證方法、人員與生物劑量評估等面向的研究。考量原子能科技應用的全面性，因應國內外趨勢建立基礎量能和量測系統，含可能遭遇的輻射曝露意外事件，以提升游離輻射防護管制技術，確保民眾健康及輻射安全。本計畫以核研所技術為中心，透過學術合作達到技術精進與擴散，具體內涵包括下列四個主題(分項或主要工作項目)，計畫架構圖如圖一。分項工作一至三由核能研究所保健物理組(簡稱：保物組)執行；分項工作四由核研所同位素組負責執行。工作項目係依據原能會函文之指示與需求而訂定，報陳原能會審查同意後執行。

一、輻射防護技術規範與劑量評估精進研究

為落實最適化的輻射防護管制作為，本計畫參考國際最新輻防趨勢，針對技術規範、眼球劑量等輻防架構，及其管制影響及評估技術進行研析，並結合學研單位之研發能量，共同評估游離輻射防護法研修方向及對現行輻防管制體系之影響，並提供相關系統與實務建議。

二、輻射防護能力試驗技術研究

為提升輻射偵測與防護能力，本計畫參考國際規範、輻防法規與主管機關對於國內輻射劑量評估、環境試樣放射性核種分析、輻射偵檢儀器校正等面向之管制需求，建置能力試驗之執行設備、劑量追溯系統、量測技術、作業程序與技術規範，並透過實驗室認證同步分析及辦理技術研討會，強化教育訓練與技術交流。

三、輻射應用劑量評估與檢校技術研究

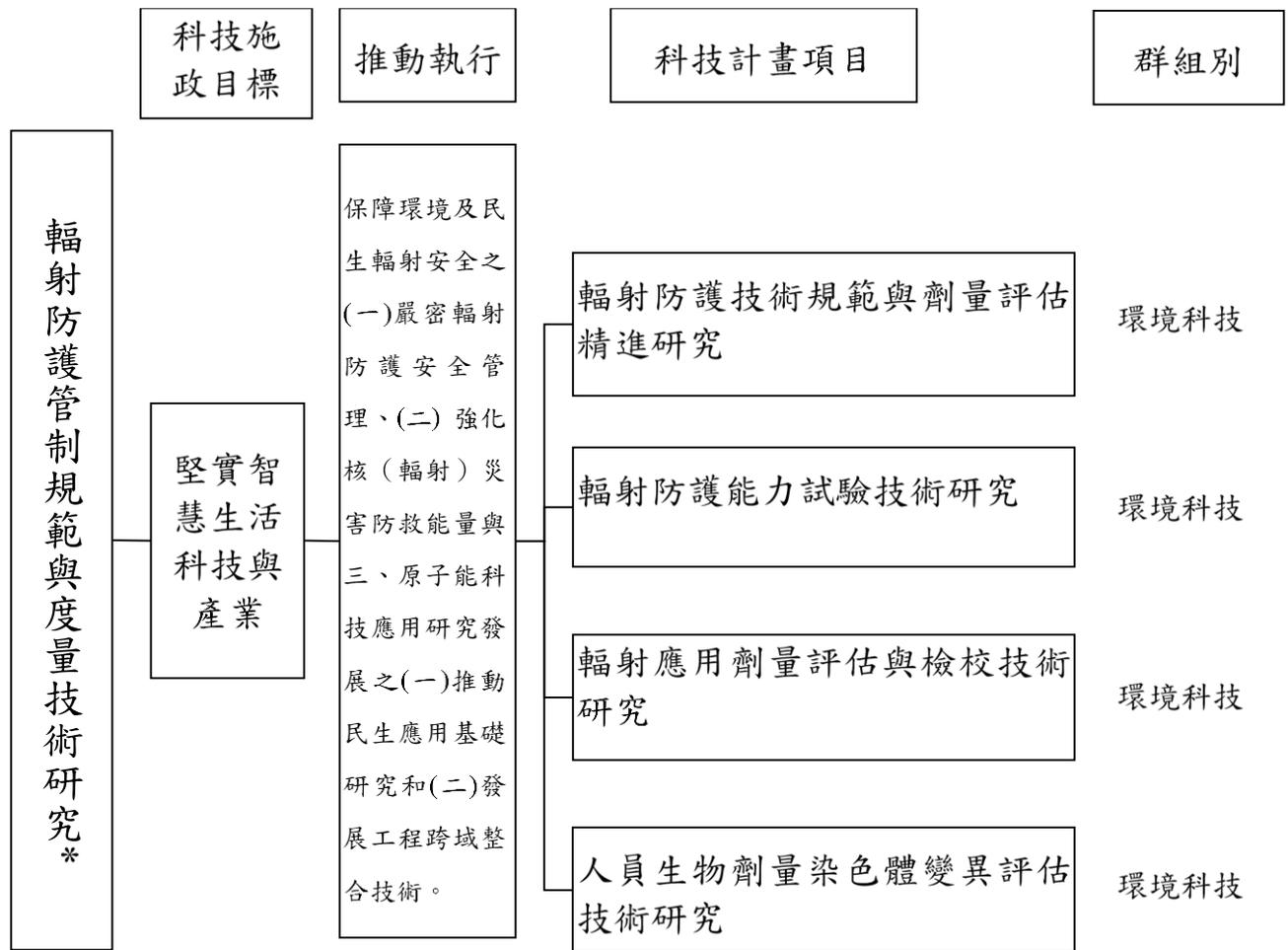
本計畫針對新穎及迫切輻射應用科技研究，以提升輻射曝露管制作業之效能，參考國際醫療品保項目等資料，進行醫療曝露透視攝影之劑量品保及校正評估、建立動態擬人假體在輻射劑量的評估技術，以及粒子治療射束品質評估等研究，結合技術研發與實務，解決國內輻射應用輻防管制與醫療曝露品保之實際與未來潛在需求。

四、人員生物劑量染色體變異評估技術研究

本計畫積極進行人員生物劑量染色體變異評估技術研究，並建立與精進相關技術，有助於協助主管機關執行相關意外曝露應變作業程序及法規，並發展出具有國際水準的輻射生物劑量實驗室系統，服務我國工作人員及民眾。此研究成果可應用於核設施之緊急應變或除役等輻射防護相關的劑量再評估，有效提升主管機關在輻射管制與風險評估的作為。本計畫積極建立與維持 ISO 17025 認證之輻射生物劑量實驗室，持續與國際生物劑量支援網路合作，以核能研究所為參考實

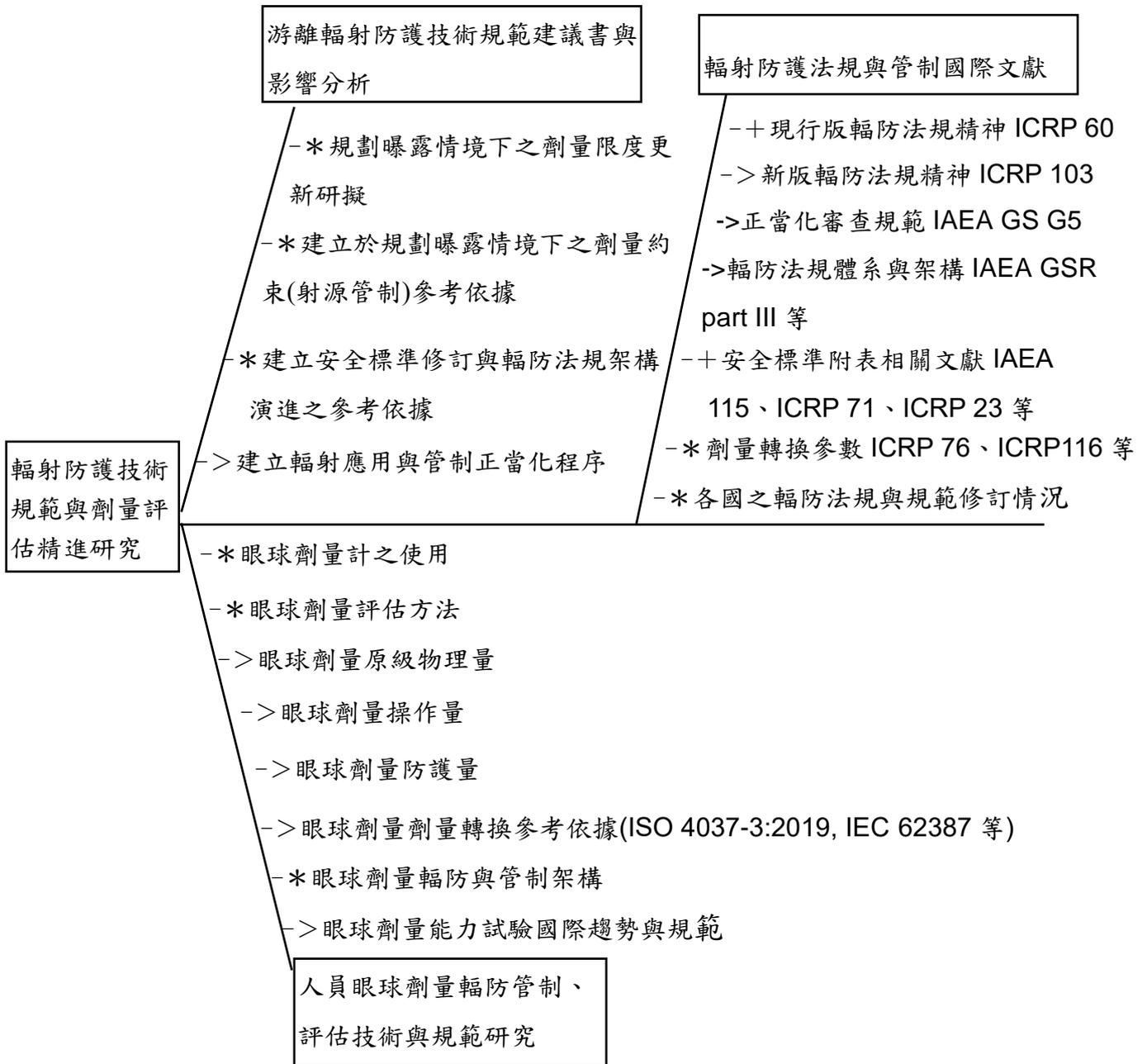
驗室，建立本土染色體雙中節背景值，輔導東部和南部衛星實驗室建立生物劑量評估能力，提升游離輻射安全管制層次及水準。

圖 2-1.至 2-5.說明 108 年度計畫架構與各分項工作之重要科技關聯圖。



*106-107 年度計畫名稱為「核設施除役與輻射防護劑量評估驗證技術研究」

圖 2-1. 108 年度計畫架構圖



(註) 科技成熟度之標註：

+：我國已有之產品或技術

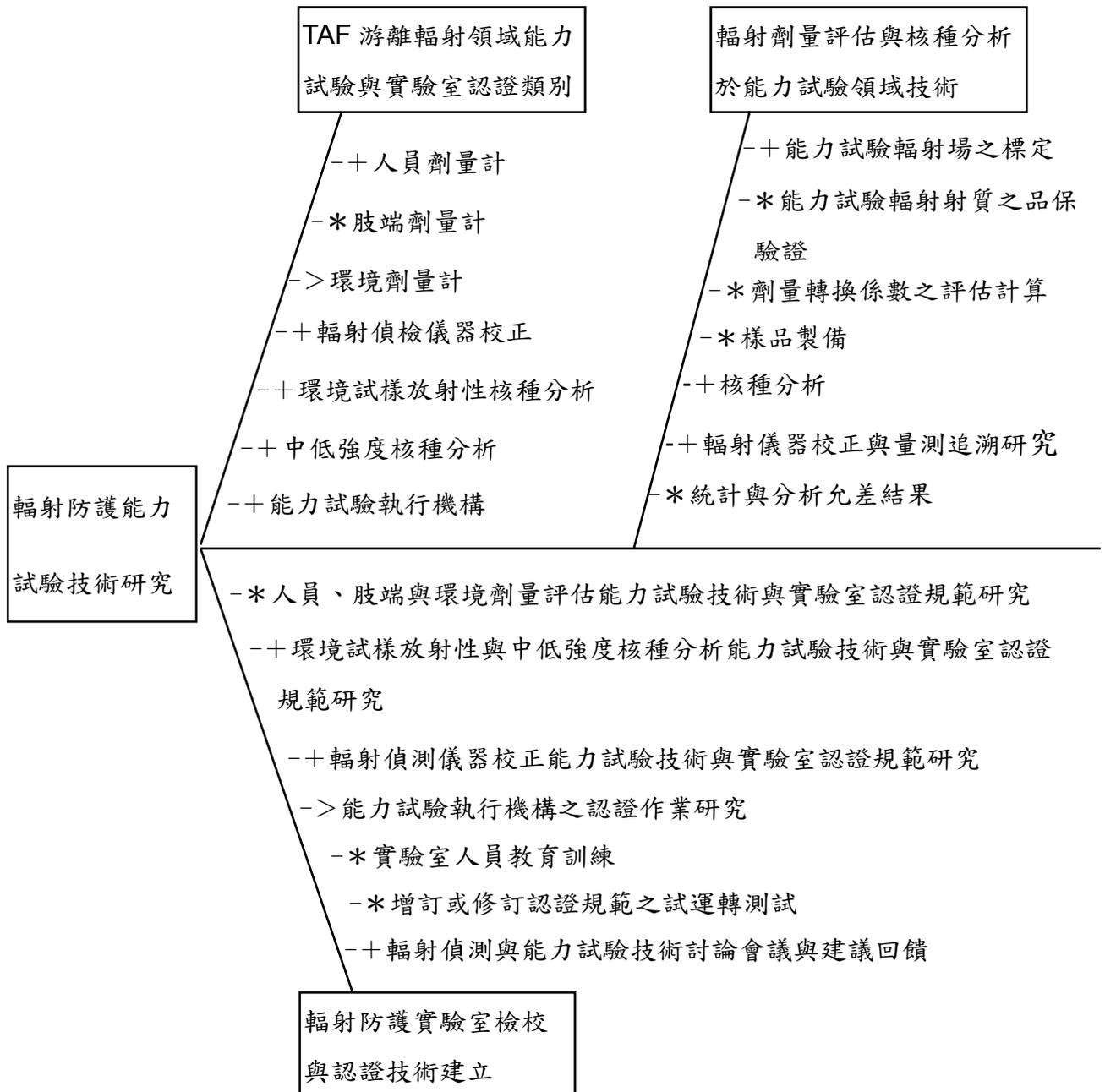
*：我國正發展中之產品或技術

>：我國尚未發展中產品或技術

產品或技術若與「智慧財產權」有關亦請加註說明

圖 2-2. 「輻射防護技術規範與劑量評估精進研究」工作重要科技關

聯圖



(註) 科技成熟度之標註：

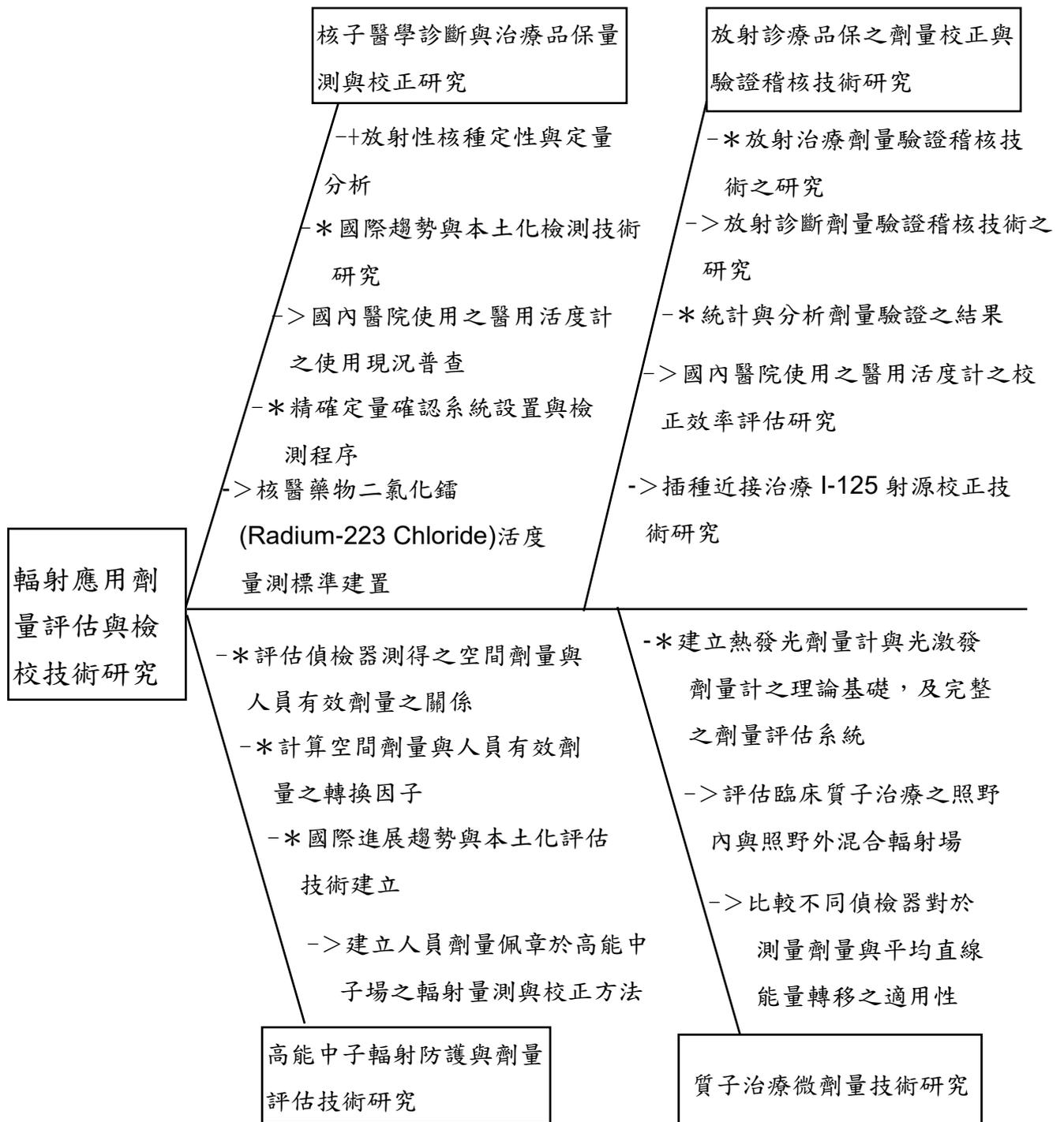
+：我國已有之產品或技術

*：我國正發展中之產品或技術

>：我國尚未發展中產品或技術

產品或技術若與「智慧財產權」有關亦請加註說明

圖 2-3. 「輻射防護能力試驗技術研究」工作重要科技關聯圖



(註) 科技成熟度之標註：

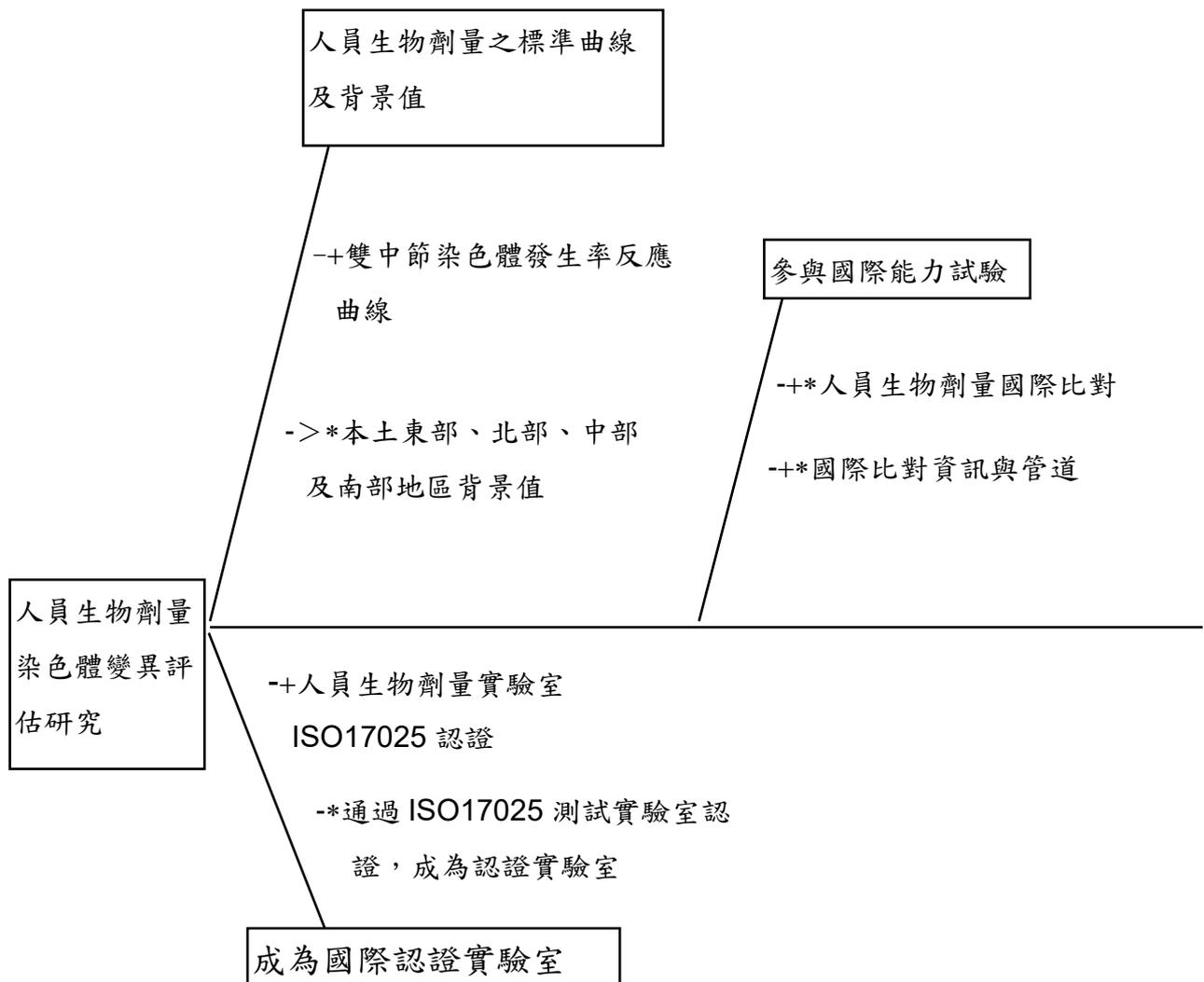
+：我國已有之產品或技術

*：我國正發展中之產品或技術

>：我國尚未發展中產品或技術

產品或技術若與「智慧財產權」有關亦請加註說明

圖 2-4. 「輻射應用劑量評估與檢校技術研究」工作重要科技關聯圖



(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 2-5. 「人員生物劑量染色體變異評估技術研究」工作重要科技關聯圖

參、研究方法與過程

(一) 內容

108 年度研究計畫分項工作之工作項目、研究方法與過程說明如下：

一、 輻射防護技術規範與劑量評估精進研究

1. 研析 IAEA 相關技術規範，完成國外作法與國內現況之差異比較

我國現行之游離輻射防護安全標準，係參考 IAEA 於 1996 年依據 ICRP 60 等報告發布之 IAEA 115 號報告。隨著流行病學調查數據更新與較新的輻射生物效應研究成果；ICRP 於近來更新部分輻防建議與參數。因此，IAEA 於 2007 年啟動 IAEA 115 號報告之更新規劃，於 2014 年公布之 IAEA GSR PART 3 即為 IAEA 115 號報告之更新報告。其主要納入 ICRP 103 號報告對於輻防建議的更新，以及 ICRP 118 號報告對於眼球劑量的劑量限值下修建議。

我國輻射防護法第五條規範游離輻射防護安全標準，應遵循國際輻射防護委員會最新建議，並考量國內實務情形納法，本項作業即為研析 IAEA 相關技術規範，完成國外作法與國內現況之差異比較。

2. 游離輻射防護技術規範修訂(草案)建議之研擬，並舉辦法規或技術規範精進學術會議

依據 ICRP、IAEA 之建議，以及我國實務作業經驗，根

據國外作法與國內現況之差異比較結果，提出差異項目之游離輻射防護技術規範(草案)之修訂建議。並於 108 年度第三季完成法規或技術規範精進學術會議，討論研擬之草案之可行性、對相關利害關係人之衝擊與聽取專家建議。

3. 眼球劑量輻防架構與評估技術研析

ICRP 於 2012 年發布之 118 號報告，將眼球白內障之低限值降至 0.5 Gy，並且將計畫曝露下的職業曝露眼球水晶體劑量建議限值，由原先之每年不超過 150 mSv，修改為連續五年週期間，年均等價劑量不超過 20 mSv，任何一年等價劑量不超過 50 mSv。依據國際文獻研析，部分作業如介入性治療醫護人員等，其眼球劑量可能抵觸此最新之建議限值。因此，本項作業透過收集國際眼球劑量校正與監測/評估技術，以及國際眼球劑量限值修訂進度與實施情形，研析與建置我國對應之眼球劑量輻防架構與劑量評估技術。

二、輻射防護能力試驗技術研究

1. 人員劑量計能力試驗規劃研究，並舉辦技術研討會

人員體外劑量評估實驗室能力試驗是主管機關(原子能委員會)配合全國認證基金會(TAF)的能力試驗時程，進行的相關研究。108 年度開始第十一次人員劑量計能力試驗，今年度依據 ANSI N13.11-2009 (R2015) 版本，修訂完成之測試領域人員劑量計能力試驗技術規範(TAF-CNLA-T08(4)) 執行。此研究跨 108 和 109 年度執行，前期研究為建構技術規範所需輻射場、規劃運轉之執行、參與實驗室之校正、與

研究實驗室能力評估程序和方法。後期研究則為運轉之能力試驗程序、劑量計管理、數據處理、照射系統品保、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。

2. 年度劑量測試輻射場射質品保驗證與評估系統校驗

108 年度展開之第十一次人員劑量計能力試驗，將應用新版測試領域人員劑量計能力試驗技術規範 (TAF-CNLA-T08(4))，照射系統包括：高能光子(加馬)、中低能光子(X 光)、貝他粒子和中子，皆須根據 ANSI N13.11-2009 (R2015) 版本進行建立與確認，牽涉機械、電子、量測與控制設備，輻射劑量量測設備，輻射照射系統及附屬設備 (校正台車、軌道等位移裝置、儀控設施、屏蔽裝置等)，輻射訊號處理系統，電腦及其週邊擷取設備等軟硬體，以及人力配置、認證執行和教育訓練等搭配。透過年度劑量測試輻射場射質品保驗證工作項目，提供各參與實驗室校正射質，以進行劑量評估系統的校驗。

3. 依據 ANSI N13.32 標準，進行肢端劑量評估實驗室認證規範之修訂研究

106 至 107 年度已依據 ANSI/HPS N13.32 (2008) 國際規範推行國內實驗室之肢端劑量計能力試驗試運轉，於 108 年度參考全國性能力試驗試運轉執行結果，草擬我國「測試領域人員肢端劑量評估技術規範(草案)」。ANSI/HPS N13.32 規範內容包括：能力試驗程序、劑量計管理、劑量計照射、

照射資料處理、能力評定與附錄等，本年將研擬的中文規範（草案）初稿，送 TAF 執行技術審查，並公開徵詢專家意見。

4. ICRU90 游離輻射量測的關鍵數據:量測標準和應用之研析

國際輻射單位與度量委員會於 2016 年發布之 ICRU 90 號報告—游離輻射劑量關鍵數據: 量測標準和應用，修訂了產生單位電荷所需能量值 (\bar{W} 值) 的評估結果、阻擋本領的數值，以及光電效應衰減係數的數值，對象為空氣、石墨和水三種輻射量測常用材質，輻射種類包括光子、電子、質子、阿伐離子、碳離子等等。修訂主要原因是物質的平均激發能更新，導致阻擋本領和相關 \bar{W} 值變動，對於以游離腔和卡計為量測方法的劑量量測系統特別重要，此外，蒙地卡羅計算也會受到影響。

國際劑量標準值的重新評估，將牽涉輻射防護、放射診斷、放射治療、重粒子治療、能力試驗等領域。原級標準若依據 ICRU 90 報告修訂量測與校正系統，在 X 光不同射質需引入 \bar{W} 值新的修正因子 k_{ikw} ，Co-60 空氣克馬標準則降低約 0.7%，其他像是 Cs-137、Ir-192、LINAC 光電子都需要重新評估。有鑑於國際度量衡局 (BIPM) 於 2019 年 1 月 1 日啟用 ICRU 90 報告相關參數，108 年度隨即開始針對此份報告或可能之影響進行相關研析工作。

三、輻射應用劑量評估與檢校技術研究

1. 建置醫療曝露透視攝影劑量校正射質

本工作項目為進行建置醫療曝露透視攝影劑量校正射質，

組裝醫療曝露透視攝影劑量校正射質濾片與半值層量測，並分析比較量測數據。

根據國際電工組織 (International Electrotechnical Commission, IEC) 之 IEC 61267 標準規範，調整 X 光機系統的管電壓，配置 RQR 3、RQR 5 及 RQR 8 (radiation qualities in radiation beams emerging from the X-ray tube assembly, RQR) 校正射質並透過 0.5、1.5 及 2.0mm 的銅過濾片組配 RQC 3、RQC 5 及 RQC 8 (radiation qualities based on copper added filter, RQC) 透視攝影之校正射質，經由射線半值層之量測與驗證，完成醫療曝露透視攝影劑量校正射質建立，而後透過相關輻射安全管制體系，提昇輻防管制技術能力，以保障輻射工作人員及民眾之輻射安全。

2. 與學研單位、醫療機構或相關學會合作，建立動態擬人假體在輻射劑量的評估技術

與清華大學合作，針對引進美國核管會 Radiation Protection Computer Code Analysis and Maintenance Program (RAMP) 計畫中的 Phantom with Moving Arms and Legs (PIMAL) 程式，利用 PIMAL 建立一系列動態擬人的假體模型，以趨近輻射工作人員的實際姿態，並以 Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP) 程式進行完整的輻射遷移計算，評估特殊情節下的劑量，深入談討 PIMAL 在精確劑量評估的應用潛力。

本研究工作內容：(1) 安裝與測試 PIMAL 程式，了解其使用範圍與限制、(2) 透過 PIMAL 輔助所建立的模型，計算各種

射源能量照射條件下的有效劑量轉換係數，確認其在有效劑量評估的正確性、(3)利用 PIMAL 建立輻射工作人員走路的姿態，考量逐步走近與遠離射源時的輻射劑量評估、(4)一個劑量精確評估的實務應用：人員在低階放射廢料桶周遭的工作情節、(5)彙整使用經驗，探討如何克服 PIMAL 程式的先天限制，以利未來延伸實務應用範圍。

3. 與學研單位、醫療機構或相關學會合作，建置以粒子徑跡評估質子射束的直線能量轉移系統(含設備設置、理論發展和劑量計校正)

與清華大學合作，本計畫規劃用固態核徑跡偵檢器 CR-39(solid state nuclear track detector, SSNTD)來評估質子射束所產生二次粒子之直線能量轉移能譜，使用質子治療射束照射 CR-39，將二次粒子產生之徑跡分析後轉換為 LET，評估不同質子能量與劑量之直線能量轉移(linear energy transfer, LET)能譜，並將結果與使用蒙地卡羅模擬程式之結果比較，即可驗證所套用系統之適用性，達到建立 CR-39 於質子治療的直線能量轉移量測系統的目標，期望研究結合熱發光劑量計與 CR39 發展雙偵測器之 LET 量測系統以評估廣度更寬的 LET 範圍。

主要透過完成以下三個工作項目來達成本期計畫的目的：
(1)建構固態徑跡偵檢計量測之理論模型和實驗架構設計規劃；
(2)以質子照射固態徑跡偵檢計 30 個，提供量測評估之直線能量轉移能譜，包括 4 個質子能量與 10 個劑量點；(3)完成研析結案報告。

四、人員生物劑量染色體變異評估技術研究

1. 建立 108 年度國人本土染色體雙中節背景曲線

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 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。107 年度本計畫資料統計合計本實驗室共分析國人背景值 22,323 個細胞，於 16 顆細胞中發現 17 個雙中節(dicentric)變異性，目前資料庫顯示國人背景雙中節發生率為 0.76‰，即是 1000 顆細胞中有 0.76 個雙中節發生率，近似國際文獻，在正常背景下，每個人淋巴細胞通常會存在 1/1000 比例的雙中節變異狀況。

2. 建立生物劑量反應曲線

藉由分析人員染色體變異情形，評估人員於輻射意外事件中所接受之劑量，萬一發生大規模輻射緊急狀況，便有需要於短時間內取得大量血液樣本檢體，以利後續依細胞遺傳學檢傷分類法進行評估，並利用生物劑量染色體變異實驗室建立之輻射劑量與染色體雙中節評估反應曲線 (生物劑量標準曲線)，做為執行人員生物劑計讀分析之依據。

本實驗室於 101 至 107 年度陸續完成了六條人員生物劑量反應曲線，並經由於各年度反應曲線劑量之統計差異性分析後合併成一條國人之生物劑量標準曲線，利用增加數據資料數，增進生物劑量評估準確性、可信度及精確度。

108 年度，本實驗室持續針對國人標準曲線進行研究分析工作，血液樣品取得分裝後，將請國家游離輻射標準實驗室進行鈷-60 照射，照射劑量分別為 0.1、0.25、0.5、1、2、

3、4 與 5 Gy，劑量照射後，將血液樣品進行細胞培養、細胞收穫、固定化、噴片、染色、封片、顯微鏡掃描，以及細胞影像分析。經過整理統計後，利用 Dose Estimate 專業分析軟體，分析計算出實驗之反應曲線。

3. ISO17025:2017 改版，並完成兩件案例

人員生物劑量實驗室為國內前瞻創新唯一之實驗室，有關實驗室品保，人員生物劑量實驗室目前已建置一、二、三階文件及四階表單共 43 份文件，並已於 105 年取得全國認證基金會（TAF）ISO 17025 相關認證。且於 106 年度維持該 ISO 現場查核認證工作，並藉由 TAF 派員查訪的機會，精進實驗室之品質，確保分析作業與結果產出之品質標準。

ISO 17025 測試實驗室的能力一般要求，包括使用標準方法、非標準方法與實驗室自行開發的方法所執行之測試。用於發展品質、行政及技術系統以支配其作業，實驗室顧客、法規主管機關及認證機構可應用 ISO 17025 來確定或承認實驗室之能力，以促進國際間認證體系相互認可，並依 TAF 對各領域之共同要求，希望藉由對校正或測試實驗室的評鑑認證，達到實驗室符合國際標準與品質及技術提升之目的。

本計畫因應 ISO 17025 法規文件改版事項，實驗室人員藉由自我閱讀或參加內部/外部的訓練方式，獲得對於 ISO/IEC 17025: 2017 新版規範的認知與瞭解，以使實驗室人員於接受現場評鑑時，可展現符合認證規範要求與能力。本計畫已於 107 年度完成三位工作人員之新版『實驗室認證規範 ISO/IEC 17025 訓練』，並開始重新審視文件資料以符合

ISO 17025 改版作業需求，本計畫已於 108 年初立即執行兩例新版 ISO 17025 規範下血液分析工作，並於 108 年初再次申請 TAF 新版 ISO 17025 認證工作。

4. 輔導衛星實驗室建立劑量分析技術

本實驗室在策略上，是朝向建立參考實驗室 (Reference Lab) 的中程目標努力，逐步培植及訓練專業人力，建立劑量一雙中節染色體發生率之標準曲線(人員生物劑量標準曲線，簡稱標準曲線)、品質保證計畫及程序書，維持符合參考實驗室所需之分析頻率樣品數量、設備，以及細部與劑量分析所需之臨床管理能力，並與其他國家的實驗室互相比對，發表成果。透過計畫之推動，使臺灣發展出具有國際水準的輻射生物劑量實驗室，服務國內民眾。

本計畫針對建立衛星實驗室的目的是：(1)提高樣本處理量能以應對大規模輻射事故；(2)建立細胞遺傳學劑量估算標準方法和劑量反應曲線；(3) 基於染色體雙中節變異性方法，培訓生物劑量估算的後備人員。輔導衛星實驗室建立，除了可以將技術進行傳承與擴散外，若未來發生大型輻射洩露意外事故時，衛星實驗室亦可協助進行分析。

肆、主要發現與討論

本計畫今年度達成國際期刊(SCI)論文投稿 2 篇、會議論文發表 3 篇、舉辦 3 場研討會、教材 1 份、技術規範 1 份等量化指標，如圖 4-1 至圖 4-9。

(一) 內容

一、輻射防護技術規範與劑量評估精進研究

1. 研析 IAEA 相關技術規範，完成國外作法與國內現況之差異比較

本計畫研析 IAEA GSR Part 3、ICRP 103(如圖 4-10)、ICRP 118、歐盟輻防建議等報告以及各國輻防法規修訂進程。盤點與我國游離輻射防護安全標準之主要差異共計十項如下：

- 1). 將輻射作業與干預改為曝露情境導向；
- 2). 懷孕女性輻射作業人員之標準修訂；
- 3). 關鍵群體與確定效應修訂；
- 4). 計畫曝露的防護最適化；
- 5). 眼球水晶體劑量限值修正；
- 6). 緊急曝露的防護最適化；
- 7). 氬氣管理(住宅、工作場所、商品)；
- 8). 空勤人員劑量管制建議；
- 9). 加權因數、風險係數與劑量係數修訂；
- 10). 參考動植物生物劑量管理。

對於上述盤點 10 點差異，併同原能會建議之項目，研析

國際作法與建議、並考量國內實務情形與技術需求，建議優先研議者為：

- 1). 懷孕女性輻射作業人員之標準修訂；
- 2). 關鍵群體與確定效應修訂；
- 3). 計畫曝露的防護最適化；
- 4). 眼球水晶體劑量限值修正；
- 5). 緊急曝露的防護最適化；
- 6). 加權因數、風險係數與劑量係數修訂；
- 7). 緊急曝露的防護最適化。

對於國際文獻研析、國際修法情形、建議修訂草案等內容，完成「研析 IAEA-GSR Part 3 建議及輻防標準技術規範修正建議報告」一份。

2. 游離輻射防護技術規範修訂(草案)建議之研擬，並舉辦法規或技術規範精進學術會議

依據 ICRP、IAEA 之建議，以及我國實務作業經驗與技術需求，提出差異項目之游離輻射防護技術規範(草案)之修訂研擬建議。並於 108 年度第三季、第四季辦理三場次輻防標準修法專家討論會議(含一場次內部專家討論會與兩場次外部專家討論會，如圖 4-6)，探討：

- 1). 修訂策略與時程：探討國際輻防趨勢演進與我國輻射防護安全標準之修訂策略與時程。
- 2). 執行技術需求與衝擊：探討因應輻射防護安全標準修訂，對執行單位所產生新的技術需求，以及對於其他厲害關係人可能的影響與應變。

3). 管制技術需求與方法：探討輻射防護安全標準修訂，對管制機關的管制技術需求與因應作為。

匯集專家討論會議之建議，完成“游離輻射防護安全標準修訂技術規範獨立審查暨修訂策略研討計畫報告”一份。

3. 眼球劑量輻防架構與評估技術研析

ICRP 118 於 2012 年下修眼球劑量限度、IAEA GSR Part 3 亦將其納入，建議將眼球劑量限度由現行之每年不超過 150 mSv，修改為連續五年週期間，年均等價劑量不超過 20 mSv，任何一年等價劑量不超過 50 mSv(如圖 4-11)。以下就眼球監測與評估技術、國際修法經驗分別討論。

1). 眼球監測與評估技術

眼球劑量的管理，在未修法前之職業曝露劑量限度為 150 mSv/y，此數值在一般輻射作業中，可透過劑量佩章 $H_p(10)$ 來管理，確保眼球劑量不超過法規限值。但在限值下修後，單僅以 $H_p(10)$ 的管理來證明眼球劑量的適法性，就不具有保守性及代表性。因此，ICRP 118 發布後，國際上就對於眼球劑量監測或評估技術進行開發。其中較著名的有「ORAMED：Optimization of Radiation Protection of Medical Staff」，在此由歐盟資助的計畫中，發展了一套可直接量測眼球水晶體劑量之個人體外劑量計(EYE-D™)。而在各個儀器商亦在近年開發出不同形式的眼球劑量監測技術如 PHE(英國)、CNEA(阿根廷)、ENEA(義大利)、APD(西班牙)、EDD30(保加利亞)等。

而日本亦發展於現行人員劑量計的使用下，以 $H_p(10)$ 、 $H_p(0.07)$ 的監測結果推估眼球劑量的評估方式，進行眼球劑量

管理。

2). 各國採行情形

上述 ORAMED 發展 EYE-D™ 後。在同一計畫中，建立適當校正方式，於 6 個國家，進行介入性醫療人員劑量監測。結果顯示，現行的作業程序會造成醫護人員眼球劑量超過新的建議值。因此，歐盟規範其會員國應於 2018 年 2 月 6 日前完成修法。因此，英國、法國等國皆於期限前完成修法。另外，法國根據「ASN Report on the state of nuclear safety and radiation protection in France in 2017」提到對於職業性輻射防護，需監測眼球水晶體的曝露，使其符合該組織的新限值（2022 年設定為 20 mSv/年）是未來幾年的主要目標。過渡期為 2018 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日，如何讓臨床醫師或輻射工作人員配戴，相關滅菌、校正及計讀方法，都是需在過渡期解決之課題。荷蘭等國的相關報告亦有相關論述。因此，眼球劑量限值的修訂，除監測/校正技術需建立外，亦須提升輻射作業人員的防護觀念與防護裝具的發展及使用。

此外，根據 IAEA 1731 眼球水晶體職業輻射防護的新劑量限度含義技術文件，眼球劑量計例行監測施行前應對工作場所進行眼球劑量評估，以了解年度的等價劑量是否會超過 5 mSv(此標準未定，依不同國際資料而異，如圖 4-12)。劑量評估方法可以採用以下的 1 種或多種方法：

- 1).工作場所監測 (Workplace monitoring);
- 2).文獻資料的使用(Use of literature data);
- 3).模擬的使用(Use of simulations);

4). 驗證測量的使用，如一段時間的個人監測(Use of confirmatory measurements, i.e. individual monitoring for a limited time)。

IAEA 技術文件同時提供實際執行 $H_p(10)$ 、 $H_p(0.07)$ 和 $H_p(3)$ 例行監測時的劑量計使用指引，統整表如圖 4-13。表中可以看到高於 0.7 MeV 的貝他粒子和其混合場，需要 $H_p(3)$ 劑量計偵測。

3). 本國執行情形

在眼球水晶體劑量執行實務面上，於劑量校正追溯研究方面，已取得 2019 年 1 月公告的最新版 ISO 4037 系列國際規範，其中，可根據 ISO 4037-1 和 ISO 4037-2，研究光子空氣克馬量測與校正系統之規格與性能要求；ISO 4037-3 則提供新的劑量轉換因子，具有單能光子、ISO 射質與眼球劑量假體空氣克馬和 $H_p(3)$ 轉換因子以資研究。規劃將以此國際標準為系統基準，並考慮透視攝影等眼球水晶體劑量較大之職業曝露，參考國際建議之 IEC 61267 射質應用，期將兩者規範引入國內眼球劑量用途，使二級實驗室後續可提供與國際等同之操作量劑量標準。此外，也研製眼球劑量假體，為直徑 20 公分、高 20 公分壓克力外殼的水假體，規劃將用於後續操作量研究的相關實驗(如圖 4-14)。

二、 輻射防護能力試驗技術研究

1. 人員劑量計能力試驗規劃研究，並舉辦技術研討會

依據 ANSI/HPS N13.11-2009(R2015)國際規範，借助國內認證體系(TAF)的資源，完成國內測試標準規範—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」之定訂，並於 108 年 3 月公告，文件編號為 TAF-CNLA-T08(4) (如圖 4-15)。據此於 3 月 20 日召開內部工作協調會議，規劃 5 月舉辦說明會，9 月至 11 月開放測試前系統校正，11 月至次年 3 月進行三批次的 TLD 能力試驗照射，4 月完成再測試，5 月舉辦總結會議，7 月提供正式版報告。

依據上述 TAF-CNLA-T08(4)規範執行跨年度的人員劑量計能力試驗研究，已於 5 月 23 日舉辦「2019 年第 11 次人員劑量計能力試驗執行前說明會」研討會(如圖 4-7)，參與單位(共 9 個): 原能會、清華大學原科中心、輻防協會、貝克西弗、全國認證基金會、同步輻射、台電放射試驗室、核研所人員體外劑量評定實驗室、核研所國家游離輻射標準實驗室；總計人數為 40 人。

簡報中說明本次研究配合第十一次能力試驗執行，預計有 8 家實驗室參與。提供規劃之測試程序(如圖 4-16)、ANSI/HPS N13.11-2009(R2015)版本重要變更：

- (1) 測試類別由六大簡併為五大類；
- (2) 改變通過能力試驗之判斷標準；
- (3) 改變照射劑量範圍；

(4) 縮短測試時程、改變劑量計數等。

以及第 II 測試類別使用非垂直角度照射，角度分別為 0° 、 $\pm 40^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ ，需額外注意新版規範之規定(如圖 4-17)。

2. 年度劑量測試輻射場射質品保驗證與評估系統校驗

依據 TAF-CNLA-T08(4)所示，能力試驗執行機構進行人員劑量計能力試驗照射系統之品保驗證時，所給定每次照射之個人等效劑量或深部吸收劑量值的擴充不確定度(涵蓋因子， $k=2$)不得超過 5%為合格的照射輻射場。

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。其中，光子照射系統依據 ISO 4037 建立與維持，高能光子部分選用 ^{137}Cs 射質，擴充不確定度($k=2$)評估為 2%，X 光光子部分選用 ISO-WS200、ISO-M100 和 ISO-M150 射質，擴充不確定度評估為 2%；貝他粒子照射系統依據 ISO 6980 建立與維持，選用 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 射質，擴充不確定度評估為 3.4%；中子照射系統依據 ISO 8529 建立與維持，選用 ^{252}Cf 射質，擴充不確定度評估為 3.4%。

3. 依據 ANSI N13.32 標準，進行肢端劑量評估實驗室認證規範之研究

肢端劑量計能力試研規範(草案)依據 ANSI/HPS N13.32 國際規範完成內部審查初稿，並於六月交付 TAF 進行後續專家審查程序。8 月 1 日於全國認證基金會(TAF)召開[測試領域人員肢端劑量評估技術規範]第一次專家工作小組會議。

國際最新版為 ANSI/HPS N13.32-2018，已於核研所圖

書館薦購完成，將配合 TAF 新增規範作業以引進國內。最新版標準的吸收劑量和個人等效劑量依據國際輻射單位與度量委員會(ICRU)規定的 0.07 mm，具體實施部位為手、肘、手臂下方的肘部、腳、膝蓋、膝蓋以下的腿部，適用於佩戴在手指和手腕或腳踝上的劑量計能力測試，不適用於評估眼球水晶體劑量或相當於全身的个人劑量的劑量計。新版本同樣沒有考慮劑量評估程序的管理，例如：適當的劑量計識別、報告的詳細格式、現場校正、肢端劑量計的位置，或多位置的肢體劑量計來評估劑量。其轉換因子來自 ISO 4037-3:1999，依據圓桿或圓柱假體，由空氣克馬轉換為個人等效劑量。同時，與之前的 N13.32-1995 和 N13.32-2008 相同，中子劑量轉換因子來自 30 cm 圓柱軀幹模型，並不適用於肢端，因此仍未包括中子測試類別。

國際 ANSI HPS N13.32 舊版為 2008 版，最新版為 2018 版，新舊版本主要差異為：

1). 名詞定義增加「盲樣測試」，從 2008 版的不告知測試類別，改為 2018 版的不告知照射射源，並可由實驗室自由選擇。內容補充：

非盲樣測試：實驗室可採用特定修正因子，得到更準確結果，符合肢端劑量計實際應用狀況；

盲樣測試：實驗室可選擇盲樣測試以證實本身更高的技術能力，通常是劑量計有多個感測元件可區分射源能量，或是使用接近組織等效材質，沒有必要區分射源能量。

- 2). 照射和回報作業時程從 45 天減為 15 天；
- 3). NIST 射質參數依據 2017 年網頁資料變更，劑量轉換因子微調；
- 4). ISO 射質仍依據 ISO 4037-3:1999 版，但修訂原文誤植之劑量轉換因子(註：僅建議使用 NS 80 射質)。

專家工作小組會議審查後，決議將本次訂定的”測試領域人員肢端劑量評估技術規範”，參考最新版的 ANSI HPS N13.32(2018)來撰寫，同時考量能力試驗執行機構之作業量能、各肢端劑量評估實驗室之作業現況，其能力測試一律採盲樣測試，並放寬照射和回報作業時程為 45 天，其他通過測試與否的條件則與 ANSI HPS N13.32(2018)相同。

4. ICRU 90 游離輻射量測的關鍵數據:量測標準和應用之研析

ICRU 第 90 號報告—游離輻射劑量關鍵數據:量測標準和應用，修訂了產生單位電荷所需能量值(\bar{W} 值)、阻擋本領(S/ρ)的數值，以及光電效應衰減係數的數值，即此報告更新了之前的 ICRU 31 的 \bar{W} 值、ICRU 37(1984)的光子電子 S/ρ 值、ICRU 49(1993)的質子與阿伐粒子 S/ρ 值、以及 ICRU 73(2005)的氦粒子 S/ρ 值。因應關鍵參數變更的劑量標準重新評估，將牽涉輻射防護、放射診斷、放射治療、重粒子治療、能力試驗等應用領域。

本計畫針對最大衝擊產業(放射治療市場)，透過三場 2019 年醫學物理春季班教育課程和一場醫學物理學會年會專題演講，共四場次，包括：2 月 24 日於高雄長庚紀念醫院、3 月 16 日於臺北榮民總醫院、3 月 30 日於臺中中山醫學大學

附設醫院、以及 8 月 24 日於高雄長庚紀念醫院旁樺舍商旅高雄館國際會議廳，宣導 ICRU 90 報告「游離輻射量測的關鍵數據：量測標準和應用」之系統再評估與業界可能衝擊影響。

並依據 ICRU 90 報告，研讀與蒐集包含國際度量衡局 (BIPM) 等發表之國際文獻，執行本計畫鈷-60 空氣克馬系統初步再評估，包括：輻射場穩定性實驗、物理參數與修正因子評估、新增監測修正項量測、以及使用自製原級標準件重新標定輻射場強度。結果顯示鈷-60 空氣克馬原級劑量標準絕對值將下修 0.82%，校正因子不確定度維持 $\pm 0.5\%$ ($k=1$)。

三、輻射應用劑量評估與檢校技術研究

1. 建置醫療曝露透視攝影劑量校正射質

依據 IEC 61276 規範，建置醫療曝露透視攝影劑量校正射質。IEC 61267 規範為針對放射診斷使用 X 射線所設計的系列射質，分別對應於不同的照射情況和診斷方法，如下所列：

- (1). RQR 系列射質(Radiation Qualities in Radiation Beams Emerging from the X-ray Source Assembly)：此射質用以評估從 X 射源裝置發射之射束品質。
- (2). RQA 系列射質 (Radiation Qualities based on a Phantom made up of an Aluminium Added Filter)：此射質用以評估經過附加鋁濾片之 X 射線射束品質，用於模擬 X 射線穿透病人後的情形。
- (3). RQC 系列射質(Radiation Qualities based on Copper Added Filter)：此系列射質是經過附加銅濾片之 X 射線，用於模擬透視攝影(fluoroscopy)的射束品質。
- (4). RQT 系列射質：和 RQC 一樣也是使用銅濾片，但管電壓較高，用於模擬電腦斷層掃描的射束品質。
- (5). RQN 與 RQB 系列射質分別代表窄射束與寬射束的情況。
- (6). RQR-M、RQA-M、RQN-M 和 RQB-M 為上述之系列射質用於乳房攝影的情形，其管電壓較低。

(7). 下列圖 4-18 分別列出 IEC 61267 規範所定義之標準 RQR 系列射質所使用之管電壓和半值層，X 射線標準系統適用之電壓範圍為 50 kV 至 300 kV。

本實驗室採購一系列純度 99.9% 之純鋁片及銅片來製作附加過濾片，如圖 4-19。接收照射數據則使用原級標準自由空氣游離腔，此游離腔為本實驗室自行研製之 Attix 改良型自由空氣游離腔如圖 4-20 所示。所建立的標準射質與 ISO 規範射質相似的程度，是以射束的半質層去確認。

半值層實驗之環境架設規劃示意圖及實際照射環境架設圖如圖 4-21 及 4-22，本實驗室透過調整 X 光機系統的管電壓，首先配置出 RQR 校正射質，之後再透過 0.5、1.5 及 2.0mm 的銅過濾片組配出 RQC 3、RQC 5 及 RQC 8 透視攝影之校正射質，經半值層量測，其結果與 IEC 61267 規範差異小於 5% (如圖 4-23 及 4-24)，符合規範要求。

2. 與學研單位、醫療機構或相關學會合作，建立動態擬人假體在輻射劑量的評估技術

擬人化的假體計算模型自 1960 年代初期發展以來經歷了漸進式的演化，大致可以分為三個主要方向：(1) 以二次方程式為基礎建立的數學模型 (1960-2000 年)、(2) 以斷層掃描圖像為基礎建立的立體像素模型 (1980 年迄今)、以及 (3) 以可變形的進階單元為基礎的 Boundary representation (BREP) 模型 (2000 年迄今)。絕大部分的擬人假體都是建立在直立站姿的型態，然而觀察工作環境的輻射曝露，特別是近距離接觸射源的工作人員姿勢並非都是直立的標準動作，人體造成

的自屏蔽效應或是複雜體射源的曝露組態都可能導致直立站姿評估結果的誤差。

PIMAL 程式的早期假體模型都是剛性結構，手臂與腳部幾何為軀幹的一部分而無法彎曲，然而由於其剛性的物理結構與限制，使其不能用於模擬標準照射條件以外的動態或是特殊照射條件。美國橡樹嶺國家實驗室(ORNL)為了彌補這個缺點而進行了 PIMAL (Phantom with Moving Arms and Legs)專案，開發了一個具有自由移動手臂與腿部能力的假體模型，PIMAL 程式內的假體是詳細的數學雌雄同體模型，但可以選擇性別以篩選不同的性徵，是一個有效且精確模擬輻射曝露的輔助工具，特別適用於工作人員輻射曝露與民眾劑量評估的計算分析。此一特性可以產生不同姿態的動態數學假體模型。PIMAL 是一個圖形界面的程式，具有輔助 MCNP 運行之前處理和後處理的功能，可以為用戶在開發複雜 MCNP 模型輸入檔時提供協助並代為執行 MCNP 程式運轉。目前最大的限制在於假體軀幹必須保持直立，此一限制明顯可能影響 PIMAL 的實務應用，我們將在計畫執行期間嘗試克服此一限制，擴大其可能應用範圍。另外，PIMAL 提供一組預先定義的射源配置與放射性同位素射源表單，最後生成的 MCNP 輸入檔亦允許用戶手動修改，可以更彈性地定義使用者所需之射源與偵檢器配置。

今年度動態擬人假體在輻射劑量評估的技術建立研究方面，先對使用 PIMAL 建立擬人假體進行驗證，規劃評估四種模型組合，再將其結果與 ICRP 74 做比較，分別是：(1)光子

+前向入射(AP)、(2)中子+前向入射(AP)、(3)光子+等向入射(ISO)、(4)中子+等向入射(ISO)，如圖 4-25 與 4-26。

光子的計算結果，發現前後(AP)的射源幾何比較結果，如圖 4-27，在能量 0.01~0.15 MeV 區間裡以 PIMAL 所建模型的轉換係數高於 ICRP74 號報告，在 0.03 MeV 為最大值約 30%，而後~0.15 MeV 兩者差別逐漸收斂至 5%，在 0.15~10 MeV 區間兩者的差別皆在 5%以內。等向(ISO)的射源幾何比較結果，如圖 4-28，在能量 0.01~0.15 MeV 區間裡以 PIMAL 所建模型的轉換係數高於 ICRP74 號報告的結果，在 0.02 與 0.03 MeV 時到最大值約 60%，而後~0.15 MeV 兩者差別逐漸收斂至 5%，在 0.15~10 MeV 區間兩者的差別皆在 3%以內。中子的計算結果，可以發現前後(AP)的射源幾何比較結果，如圖 4-29，在能量 10^{-9} MeV 時兩者轉換係數的差別約為 10%，而在能量更高後差別皆在 3%以內；等向(ISO)的射源幾何比較結果，如圖 4-30，在能量 10^{-9} MeV 時差別約為 13%，而在能量超過 3×10^{-8} MeV 後收斂至 3%以內。

前後(AP)與等向(ISO)射源模型比較中，皆是在低能量 (<0.15 MeV)才發生明顯的差別，合理推測應為假體本身的幾何差異，而低能量光子對於屏蔽效應較為敏感所導致，在能量較高的部分則可以看到屏蔽效應造成的影響變小，因此差別也大幅度的變小，兩者趨勢雖在低能量區間有較大差別，但大致相符具有參考性。在中子的表現上，PIMAL 所建模型與 ICRP 74 號報告的趨勢大致相符，先前推測光子可能因為屏蔽效應而對模型幾何較為敏感而有較大差別，而在這部分

中子遷移所伴隨的光子表現對於劑量的貢獻並非佔大比例，所以也可以看到結果是較光子的結果更為吻合的。

本研究進一步模擬工作人員面對走向射源與背對走離射源，探討以 PIMAL 輔助建立之實際動作模型，將其計算結果與 Γ 值(Gamma factor)做比較，如圖 4-31 所示。

模擬結果如圖 4-32，發現面對射源的模型所受劑量略高於背對射源的模型約 20%，而兩者皆小於 Γ 值(Gamma factor)。假體在以不同方向面對於射源確實有所差異，其原因為器官的分布並不對稱，若在一个簡單的面對射源模型都有差異了，則當射源非點射源，而是更複雜的體射源或是射源的強度更高時，差異會顯得更大。

本研究最後建立模型模擬輻射工作人員對射源桶進行擦拭測試或量測時，探討不同姿勢及射源對有效劑量之影響。設定分為(A)站立面對與側向(B)上方彎曲(C)前方彎曲，共八種評估模型，如圖 4-33。

模擬結果數據以圖 4-34 呈現，可知模型(1)與模型(2)最為相近，兩者的差別只在於單隻手臂的延伸，胸腔臟器等等組織加權因素較大的器官在幾何上並沒有任何變動，而單隻手臂的延伸與否造成的影響也只差在手臂上皮膚的劑量沉積，且皮膚的加權因素只有 0.1，因此總體的劑量沒有太大的變化。在模型(3)與模型(4)中，其劑量遠遠低於面對輻射桶幾何，主要的差異貢獻來自於胃、膀胱、睪丸，合理推測為骨骼、骨盆造成的屏蔽效應所造成的影響，及側身時身體增加的深度使得到達器官的輻射減少。模型(6)對於模型(5)而言，沉積

的有效劑量更大，這樣的結果以軀幹內器官對於射源的相對距離來的更近來解釋為合理，而若以個別器官來討論，模型(6)的個別器官沉積的劑量平均都高於模型(5)，並且沒有個別極端值的差距發生。而在不同能量的影響下可以看到在能量越大時其比值越接近 1，原因為不同幾何造成的屏蔽效應之影響會在能量較大時下降。模型(8)對於模型(7)而言，沉積的有效劑量並沒有太大的差異，模型(8)的軀幹看似離輻射源較遠，卻有著較大的有效劑量，而不同能量下的比例則是沒有太大的變化，若以個別器官來看，貢獻劑量較大的部分是睪丸、紅骨髓、肺、胃等，模型(8)的睪丸吸收劑量約為模型(7)的 50%，而紅骨髓、肺、胃等器官吸收劑量卻高於模型(7)約 40%。因此雖然兩者在總體的有效劑量差別不大，但以個別器官的角度來看卻有截然不同的結果。

3. 與學研單位、醫療機構或相關學會合作，建置以粒子徑跡評估質子射束的直線能量轉移系統，含設備設置、理論發展和劑量計校正

與清華大學進行學術合作，CR-39 偵檢器是由烯丙基二甘醇酸酯 (Diallyl Glycol Carbonates)， $C_{12}H_{18}O_7$ 所組成，其成分與人體組織相近，因此適合用於評估人體接受輻射曝露後所呈現的反應，並可藉由分析其徑跡資訊來評估吸收劑量與等效劑量。CR-39 可用於量測 LET 能譜是因為當具有高游離密度之輻射(其 LET 需大於 $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$) 進入 CR-39 後，將沿著輻射之行經路徑與 CR-39 發生庫倫力作用而產生 δ 射線，破壞 CR-39 原先的化學鍵結，於該游離輻射的路徑上形成潛

在徑跡(latent track)，透過使用適當的化學溶液(例如氫氧化鈉)蝕刻(etching)後，由於鍵結破壞前後對於化學溶液的反應程度不相同，形成潛在徑跡的區域將會比其他未受到破壞鍵結的區域受蝕刻速率較快，經過一段時間後就會形成錐狀(cone)徑跡，而此徑跡可以使用光學顯微鏡或是高階的原子力顯微鏡來分析並取得表面徑跡資訊。也就是透過輻射照射後的徑跡對化學溶液的蝕刻速率(track etch rate, V_t)會比周圍未經照射區之蝕刻速率(bulk etch rate, V_b)來得更快，藉由紀錄蝕刻前後 CR-39 的變化即可得到表面移除厚度(amount of bulk etch, B)，再經由光學顯微鏡或高階原子力顯微鏡來觀察 CR-39 表面形成之圓形或橢圓形徑跡，便可取得其表面徑跡資訊，包含有表面徑跡長軸(D_A)、短軸(D_B)與徑跡入射角(θ)，此二軸與表面移除厚度可套入公式計算來得到徑跡速率比(etch rate ratio, V)，分析其徑跡速率比並與其 LET 數值作相關性連結，即可建立出一條 LET 校正曲線，未來只要藉由照射 CR-39 分析其徑跡速率比，套入此校正曲線即可取得入射輻射或其二次粒子之 LET 資訊，完整之理論模型架構如圖 4-35 所示。

表面移除厚度之量測方法共有四種較為常見，主要分為直接量測與間接量測，直接量測即使用測微器(micrometer method)直接量測蝕刻前後 CR-39 之厚度差異，取平均值作為表面移除厚度，準確度約可達 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。而間接量測則有測重法(weight method)、分裂徑跡法(fission track method)與光學法(optical method)三種。

但由於每片 CR-39 厚度僅 0.15 cm，且 CR-39 經蝕刻後會造成些微的厚度不均勻性，若使用直接量測法可能造成較大的誤差。因此，為降低後續計算 LET 之誤差值，並確保表面移除厚度之準確性，本報告決定採用準確度較高且誤差較小之第二種測重法如下公式，藉由量測蝕刻前後之重量(m_1 、 m_2)、表面積(A)、周長(P)與蝕刻後厚度(T_2)來決定表面移除厚度。

$$B = \frac{(m_1 - m_2) \cdot T_2}{2m_2} \cdot \left(1 - \frac{PT_2}{2A}\right)$$

為了評估 CR-39 固態核徑跡偵檢器應用於質子治療之平均直線能量轉移能譜，先評估 CR-39 藉由表面徑跡所得之 LET 能譜與質子劑量之關係，即 LET 能譜之劑量依存性，選取 10 個劑量點，範圍從 7 至 115 cGy (7, 14, 28, 35, 43, 57, 71, 85, 100, 115 cGy)，每個劑量點使用 2 片 CR39，使用林口長庚醫院質子暨放射治療中心之筆尖式掃描質子治療機，產生質子能量為 230 MeV 之射束照射，另外再選取 3 片 CR-39 作為背景值評估。於照射時將 CR-39 放置於 1 公分厚之保麗龍板上方，且每次照射時皆使用完成校正之游離腔 (PTW Advanced Marckus) 來確認機器的輸出劑量，實驗擺設方式如圖 4-36(a)所示。由於在臺灣要取得已知輻射品質射源並不容易，本計畫經分析後，最終採用引用次數最多且應用範圍最廣之 Dörschel 等人於 2002 發表的 LET 校正曲線得到徑跡速率比與直線能量轉移之間的關係(如圖 4-36(b))，觀察 CR-39 受不同質子劑量照射之直線能量轉移能譜的變化，

如圖 4-37。CR-39 接受不同質子劑量之 LET 能譜，由顏色淺深分別為 7 cGy, 14 cGy, ..., 110 cGy, 115 cGy，在結果圖中，可大致將能譜區分為 L 區(LET < 100 keV/μm)以及 H 區(LET > 100 keV/μm)，對 L 區而言，在質子劑量為本實驗之照射範圍時並沒有顯著差異；對 H 區而言，當質子劑量增加時，由於表面徑跡重疊率的增加，重疊徑跡會因為不正常的長軸與短軸，被轉換成較大的徑跡速率比，再經由校正曲線轉換後被計數為錯誤事件(misleading)，因此於分析的結果中，隨著質子劑量的增加，H 區的事件數會有高估的可能性，最大約為 1 個數量級(order)。而質子能量依存性評估，以初始質子能量為 110, 150, 190, 230 MeV，照射劑量 100 cGy，並觀察 CR-39 受不同質子能量照射之直線能量轉移能譜的變化，並與 FLUKA(FLUktuierende KAskade)模擬結果之 LET 能譜比較。

圖 4-38 為 CR-39 偵檢器對於不同初始質子能量(110 MeV、150 MeV、190 MeV、230 MeV)之反應，研究結果可分為 L 區(LET < 100 keV/μm)以及 H 區(LET > 100 keV/μm)討論。對 L 區而言，從 CR-39 分析得到的 LET 能譜與質子初始能量之間為獨立關係；而在 H 區事件數將隨著質子之初始能量越低而有增加的趨勢。圖 4-39 為 FLUKA 模擬 CR-39 於空氣中接受 110、150、190、230 MeV 之質子照射的 LET 能譜分佈結果圖，在結果圖中的趨勢會隨著初始能量越高事件數減少，這是因為當質子能量較高時，與紀錄體積的作用機率下降。若考慮實驗數據分析的不確定性如統計誤差以及

LET 校正曲線的誤差，則可以得知 CR-39 量測數據與 FLUKA 模擬數據大致吻合，特別是在較高初始能量的質子射束條件，而若是進一步討論低 LET 區域中模擬與實驗的差異，推測主要原因是在 FLUKA 的模擬結果記錄是針對所有帶電粒子，所紀錄的 LET 範圍從 $1 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 至 $1000 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ，因此會記錄來自高能初始質子以及其他低 LET 值之帶電粒子(如電子)；然而，CR-39 對 LET 值小於 $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 的粒子之輻射偵測效率低，特別是在 LET 小於 $5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 區域計數值趨近於零。

四、人員生物劑量染色體變異評估技術研究

本分項歷年研究成果，分別透過以下研討會發表：參與 5 月 28 日於台北中油大樓舉辦的行政院災害防救應用科技方案(第二期)104-107 年度總成果研討會，本計畫代表輻射防護處進行現場展示與解說工作；另研究成果於 6 月 22 日核醫學會舉行之『2019 輻射醫療處置國際研討會』，該會議由核醫學會正式發函邀請本計畫參與會議，會議中簡介體內輻射吸收劑量評估之應用；另外於 11 月 16 日前往奇美醫院參與核醫年會進行海報發表，以上成果發表有助於計畫成果之推廣與彰顯。請參照圖 4-3 至圖 4-5。其他工作成果條列如下：

1. 建立 108 年度國人本土染色體雙中節背景曲線：

生物劑量實驗室於 108 年度已完成 25 例正常國人背景染色體雙中節分析，一共分析 25,369 顆細胞，發現 20 個雙中節(dicentric)於 19 顆細胞中。目前資料庫國人背景雙中節發生率為 0.79‰，即是 1000 顆細胞中有 0.79 個雙中節發生率。近幾年來利用人員生物劑量染色體變異性的統計發現，與國際文獻相比，在正常背景下，每個人淋巴細胞通常會存在 1/1000 比例的雙中節變異狀況，目前蒐集到的國人血液樣本背景值是低於國際之平均值。今年度，生物劑量實驗室持續與南部醫學中心合作(高雄醫學大學)，並增加 3 例正常人背景染色體雙中節分析，未來仍將收集更多案例來厚實國人之生物劑量背景值。(參考圖 4-40)

2. 建立生物劑量反應曲線

本實驗室於 108 年度持續針對國人標準曲線進行研究分析工作。於 4 月 8 日與高雄醫學大學合作取得正常人血液進行年度反應曲線分析工作，血液樣品取得分裝後，請國家標準實驗室進行鈷-60 照射，照射劑量分別為 0.1、0.25、0.5、1、2、3、4、5 Gy，於 108 年度之年度劑量反應曲線，與去年度相同增加 0.1 Gy 之劑量作為最低輻射照射之劑量選擇。劑量照射後，將血液樣品進行細胞培養、細胞收穫、固定化、噴片、染色、封片、顯微鏡掃描，以及細胞影像分析。經過整理統計後，利用 Dose Estimate 專業分析軟體，分析計算出實驗之反應曲線。(圖 4-41 至圖 4-42)。

本實驗室於 101 至 108 年度陸續完成了七條人員生物劑量反應曲線，並經由統計方式計算出合併成一條年度人員生物劑量標準曲線。增加樣本數所得到的生物劑量評估可提高其準確性、可信度及精確度，利用輻射劑量與染色體雙中節評估建立反應曲線，並經由統計分析計算於各年度反應曲線劑量之統計差異性分析結果，若各年度數值皆落於管制範圍內無差異後即可合併成一條國人之生物劑量標準曲線(圖 4-43 至圖 4-44)。

3. ISO17025:2017 改版，並完成兩件案例

因應 ISO17025:2017 改版作業(由 2005 年版轉換為 2017 年版)與 ISO17025 重新再評鑑審查(三年)需求，本計畫完成一階品質手冊(1 份)、二階品管系統(10 份)技術系統(14 份)、三階作業程序(10 份)與四階表單(46 份)文件撰寫/修改作

業，於 108 年 1 月即執行兩例符合 ISO 17025 (2017) 規範下的血液分析工作，並於 2 月 20 日進行接受 TAF 查訪工作，查訪開立 8 個 B 類缺失、1 個 C 類缺失，於限期(4 月 20 日)全數完成改善，並將改善結果上傳 TAF 審查委員，給予委員改正後審查；6 月 9 日接獲審查委員再次諮詢(三項問題)，已於 6 月 17 日再次回覆；於 6 月 27 日公告於 TAF 網頁中確認已完成 ISO17025:2017 改版再評鑑之認證工作，9 月 2 日正式取得新版認證證書。(圖 4-45 至圖 4-46)。

4. 建立衛星實驗室劑量分析技術方法：

本實驗室於今年度針對衛星實驗室進行教育訓練，利用過往建立完整之影像數據(含輻射照射劑量樣本)，作為給予高雄醫學大學醫學影像暨放射科學系教育訓練教材，並於 4 月 2 日及 10 月 24 日針對衛星實驗室舉行教育訓練，執行與高雄醫學大學醫學影像暨放射科學系謝○茹副教授、柯○志助理教授之實驗室教育訓練工作，未來希望不只單純可提供人體血樣進行分析，若有緊急曝露事件發生時也可協助進行分析 (圖 4-47 至圖 4-48)。

(二) 附圖與附表

1 Proficiency Testing and Dose Comparison for External Personnel Dosimeters
2 Evaluation in Taiwan .
3
4 Yi-Chun Lin¹, Min-Chi Chiu^{1*}, Chin-Chi Chen¹, Chun-Liang Chen¹, Ming-Chen
5 Yuan¹, Chien-Hsu Chu¹, Teng-Hung Tsou¹, Tseng-Ja Huang^{1,†}
6
7 ¹Health Physics Division, Institute of Nuclear Energy Research, Taoyuan City,
8 Taichuan R.O.C.).
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31 *Corresponding author. Tel.: +886-3-4711400 ext. 7742.
32 Email address: mica@iner.gov.tw.
33 Postal address:
34 Health Physics Division,
35 Institute of Nuclear Energy Research,
36 No. 1000, Wenhua Rd., Longtan Township, Taoyuan County 32546, Taiwan (R.O.C.).
37

1 Abstract .
2 This study investigated the proficiency testing based on the latest American
3 National Standard Institute Health Physics Society (ANSI/HPS) N13.11-2009(R2015)
4 performance testing standard and the benchmark of dose evaluation system for
5 personnel dosimeters in Taiwan. The personnel dose equivalent $H_p(d)$ data of the
6 proficiency testing programs held by the Institute of Nuclear Energy Research (INER)
7 from 2010 to 2017 were reanalyzed to research the dose assessment ability and the
8 criteria update feasibility. The results showed that the tolerance level (L), absolute of
9 bias (B) and standard deviation (S) for all categories of all the eight laboratories met
10 the latest ANSI/HPS N13.11 criteria. In addition, the measurements of the $H_p(d)$ with
11 TLD-700 typed personnel dosimeters were also demonstrated by comparing with the
12 MCNP6 Monte Carlo code. For radiation protection application, the responses of
13 Harshaw 8814 TLD system were also satisfactory in ¹³⁷Cs including the angle tests,
14 M100 and M150 X-ray beams produced by INER. .
15
16 **Keywords:** Personal dose equivalent $H_p(d)$, Performance testing, Personnel
17 dosimeters, Monte Carlo method, Radiation safety. .
18

圖 4-1. 國際期刊論文「Proficiency Testing and Dose Comparison for External Personnel Dosimeters Evaluation in Taiwan」投稿於 Radiation Measurement

Radiation Measurements	
Thermoluminescent Detectors to Measure LET Variations in Proton Therapy of Prostate Cancer: Comparison of Bilateral and Anterior-oblique Beams	
—Manuscript Draft—	
Manuscript Number:	SI-55019 Proceedings
Article Type:	Thermoluminescent dosimeter, linear energy transfer, LET detector, prostate cancer, anterior oblique (AO) proton beams
Keywords:	Thermoluminescent dosimeter, linear energy transfer, LET detector, prostate cancer, anterior oblique (AO) proton beams
Corresponding Author:	Hui-Yu Tsai National Tsing Hua University Hsinchu, Taiwan, TAIWAN
First Author:	Hsien-Hsin Chen
Order of Authors:	Hsien-Hsin Chen Chia-Yu Chien Chih-Hsun Sung Yung-Chieh Lin Ing-Tsung Hsiao Hui-Yu Tsai
Abstract:	Prostate cancer cases develop around the world and can be treated effectively using proton therapy. Two proposed proton therapy treatments for prostate cancer are using bilateral (BL) proton beams in order to mitigate the range uncertainties and anterior-oblique (AO) proton beams in order to reduce the dose of a critical organ. However, relative biological effectiveness varied with the linear energy (LET), which has significant variation for critical organs between BL and AO fields. Thermoluminescent detectors are dedicated LET detectors for in-vivo dose and LET measurements. Phantom studies with bone heterogeneities were designed to mimic the BL and AO proton beam irradiation. The dose-averaged LET (LET _d) in the distal edge of AO beams is 5.87 keV/cm and about three times of the LET _d (1.87 keV/cm) in the lateral penumbra of BL beams. Thus LET _d at a specific depth of distal edge does not vary with proton beam energy and proton modulation width for the proton beam delivery of passive scattering and modulated scanning. For proton beam scanning, LET _d at a specific depth of distal edge increases with the proton energy. Thermoluminescent detectors such as TLD-500 are suitable to measure dose and LET simultaneously for proton therapy of prostate cancer. They can also provide in vivo dose and LET measurements for critical organs located around the treatment targets.
Suggested Reviewers:	Fawad Khan fawad.khan@nu.edu.pk Dai Chuanjie dai@nrc.gov.cn Tomas Kron tomas.kron@steris.com

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58

Thermoluminescent Detectors to Measure LET Variations in Proton Therapy of Prostate Cancer: Comparison of Bilateral and Anterior-oblique beams

Hsien-Hsin Chen^a, Chia-Yu Chien^a, Chi-Hsun Sung^b, Yung-Chieh Lin^a, Ing-Tsung Hsiao^c, Hui-Yu Tsai^{d,*}

^a Graduate Institute of Clinical Medical Sciences, Chang Gung University, Taoyuan, Taiwan

^b Department of Radiation Oncology, Chang Gung Memorial Hospital, Linkou, Taoyuan, Taiwan

^c Institute of Nuclear Engineering and Science, National Tsing Hua University, Hsinchu 30013, Taiwan

^d CEA, DRF, IRFU, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

^e Department of Medical Imaging and Radiological Sciences, Chang Gung University, Taoyuan, Taiwan

^f Department of Engineering and System Science, National Tsing Hua University, Hsinchu 300, Taiwan

*Corresponding author: Hui-Yu Tsai, PhD
Associate Professor of Institute of Nuclear Engineering and Science, National Tsing Hua University, No. 101, Section 2, Kuang-Fu Road, Hsinchu, Taiwan 30013, R.O.C.
TEL: +886 3 2712131 ext 34236
E-mail: huiyutsai@mx.nthu.edu.tw

圖 4-2. 國際期刊論文「Thermoluminescent Detectors to Measure LET Variations in Proton Therapy of Prostate Cancer: Comparison of Bilateral and Anterior-oblique Beams」投稿於 Radiation Measurement

2019 輻射醫療處置國際研討會
Internal Symposium of Radiation Emergency Management
 時間：6月22日(星期六) 08:30~12:30
 地點：台北國際會議中心 201E 會議室

人體染色體變異於生物劑量評估
 Evaluation of Biodosimetry by Human Chromosome Variation
 張明建
 Chang, Kang-Wei
 核能研究所同位素組
 Division of Isotope Application, Institute of Nuclear Energy Research (INER)

Abstract

Personal Biological Laboratories should plan the staff to receive dose as a later dose assessment and management to ensure that the individual dose of radiation-related operations. Accordance with Occupational Radiation Exposure in Taiwan, R. O. C., 2017, there are 52,248 radiation workers in Taiwan, including in nuclear power plants, industrial and hospital areas. In order to cope the accidental exposure of radiation, it is necessary build a biological dosimetry laboratory. When exposed with radiation accident, the biological analysis could as exposure dose assessment, and as a follow-up medical care.

International studies on the current bio-dose-related effects of individuals; biological dosimetry by chromosome analysis is a quick, simple and effective method. In INER (institute of nuclear energy research) had established chromosome variation analysis of the relevant discrimination method, from 2012 to 2016, we were completed four dose-effect curve, and combined into a standard curve for the standard curve. We also participated in the International Competency Test with Canadian Ministry of Health, as well as received ISO17025 Laboratory certification. Expect to become a credible and internationalized national laboratory in biological dosimetry.

In the object, we want to assist establishment the radiation exposure procedures and regulations, and continue to promote the research of biodosimetry techniques. Through the establishment of biological samples and dose-response curve, we establishing and maintaining national level radiation biodosimetry laboratory. Wish the biodosimetry laboratory could reconstruct the radiation exposure level of people which in radiation accidents.

Keywords :
 Biodosimetry; Dicentric chromosome assay.

時間	講題	主講人
08:30-08:50	報到	
08:50-09:00	Opening Remarks 長官致詞 劉文忠 副主委 Deputy Minister Wen-Zhong Liu 林金福 所長 Director Kin-Fu Lin 顏鴻章 部主任 Director Hung-Tsang Yen	
09:00-09:20	座長：/ 報到智主任 (Moderators: / Shiao-Chi Cherng)	
09:20-09:40	體內輻射吸收劑量評估之應用 Applications of Internal Radiation Dosimetry 台灣輻射應急管理在 EOC 中的作用 Radiation Emergency Management in Taiwan Role of EOC	張志賢 組長 Dr. Chih-Hsien Chang 郭益森 醫師 Dr. Ming-Tai Cheng
09:40-10:00	座長：張裕明主任 / 邱創新主任 (Moderators: Dr. Yu-Ming Fan / Chuang-Hsin Chiu)	
10:00-10:20	台灣輻射醫療處置-台北張總經驗 Radiation Emergency Management in Taiwan -Role of VGHTPE 台灣輻射醫療處置-高雄醫學大學附設中和紀念醫院經驗 Radiation Emergency Management in Taiwan -Role of KMHU	姚錫汎 醫師 Dr. Shan-Fan Yao 陳敏俊 醫師 Dr. Yu-Wen Chen
10:20-10:30	Coffee Break	
10:30-11:15	座長：謝啟傑 教授 / 張承培 主任 (Moderators: Prof. Mu-Chang Shieh / Dr. Cheng-Pei Chang)	
11:15-12:00	核災的恢復效應 Recovery Effects from the Nuclear Disaster 輻射醫療處置-KIRAMS 經驗 Radiation Emergency Management Experience in KIRAMS	Dr. Noberu TAKAMURA Dr. Young Woo Jin
12:00-12:30	綜合討論及閉幕報告 Panel discussion and closing remarks	

圖 4-3. 會議論文「體內輻射吸收劑量評估之應用」發表於 2019 年輻射醫療處置國際研討會

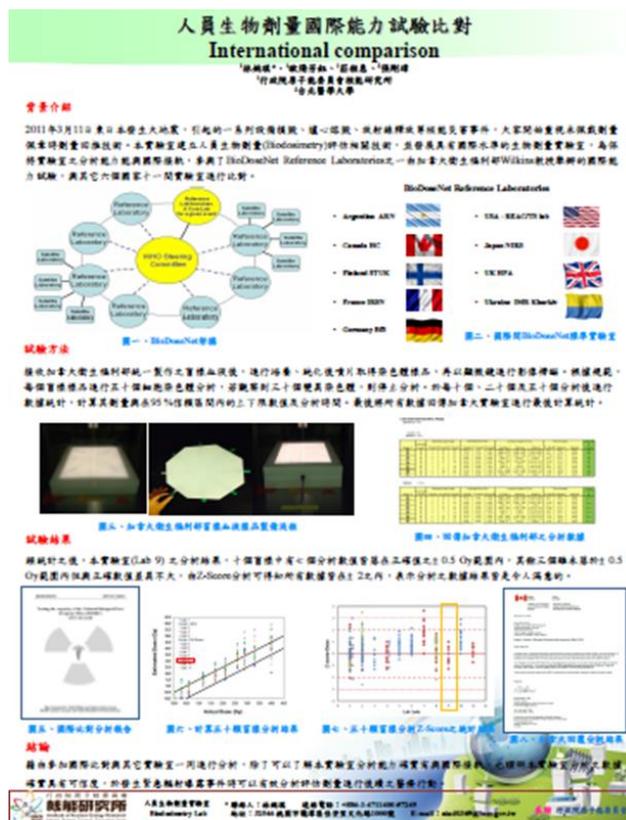


圖 4-4. 會議論文「人員生物劑量國際能力試驗比對」發表於 2019 年核醫年會



圖 4-5. 會議論文「人員生物劑量染色體變異評估技術研究」發表於行政院災害防救應用科技方案(第二期)104-107 年度總成果研討會

9月11日
INER專家
計畫簡報&
討論建議

11月13日 第一次外部專家
計畫簡報&討論建議

12月02日 第二次外部專家計畫
簡報&凝聚共識

圖 4-6. 游離輻射防護安全標準修訂技術範圍獨立審查暨修訂策略專家會議



「2019年第11次人員劑量計能力試驗執行前說明會」研討會

會議議程

日期：108年05月23日
地點：核能研究所 保健物理組 055 館國家游離輻射標準實驗室二樓

時間	講題	講員/單位
10:00-10:30	報到	
10:30-10:40	開幕致詞	張淑君組長 核能研究所保健物理組
10:40-12:30	第11次人員劑量計能力試驗執行前說明會	陳晉奇先生 核能研究所保健物理組
12:30-14:30	綜合討論	朱健豪 分組長 核能研究所保健物理組

圖 4-7. 「2019年第11次人員劑量計能力試驗執行前說明會」研討會

一、人員劑量計能力試驗

- 本所國家游離輻射標準實驗室(NRSL)目前為游離輻射測試領域之能力試驗執行機構，自1991年開始至2016年間已完成十次人員劑量計評估實驗室之能力試驗。
- 本次為第十一次能力試驗，預計有8家實驗室8批劑量計，規劃自2019年9月開始接受校正，10月開始接收人員劑量計，11月開始進行照射。
- 測試標準：人員體外劑量計 CNLA-T08
- 收費標準：

能力商數(performance quotient), P_i :

- 吸收劑量或個人等效劑量與能力試驗執行機構給予值的相對差異，第*i*個劑量計的能力商數定義為

$$P_i = |H'_i - H_i| / H_i$$

式中 H_i : 能力試驗執行機構照射劑量計的個人等效劑量

H'_i : 劑量評估實驗室所報告的個人等效劑量

ANSI N13.11-2009新版與ANSI N13.11-2001之比較

(2016年數據) (2013年數據)

偏差

- 此*n*個 P_i 的試類別(或)之測試。
- 指一組劑量計數 P_i 的平均

內容

- 一、前言
- 二、測試時程
- 三、系統介紹
- 四、新版規範說明
- 五、評定標準

歡迎蒞臨 敬請指教

圖 4-8. 「2019年第11次人員劑量計能力試驗執行前說明會」研討會大會手冊

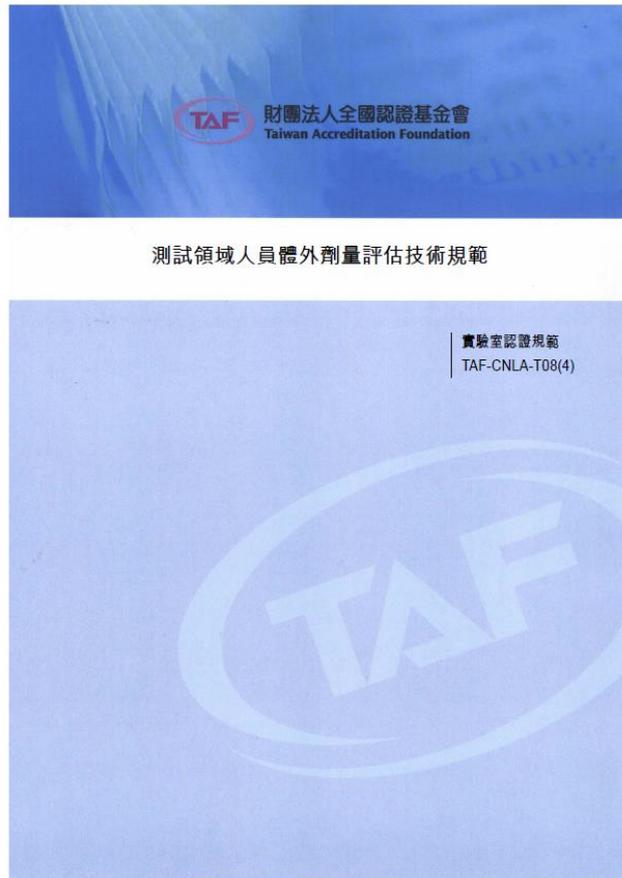


圖 4-9. 「測試領域人員體外劑量評估規範(TAF-CNLA-T08(4))」技術規範

曝露情境與劑量限制

曝露情境	職業曝露	公眾曝露	醫療曝露
計畫曝露	劑量限度 劑量約束	劑量限度 劑量約束	診斷參考水平 ^(a) 劑量約束 ^(b)
緊急曝露	參考水平	參考水平	不適用
既存曝露	不適用	參考水平	不適用

^(a)病人

^(b)醫療照護者、自願參與醫學研究者

現行輻射防護安全標準

建議修入輻射防護安全標準

劑量限度: 5年內平均年有效劑量20 mSv (5年100 mSv)，單一年不超過50 mSv (ICRP 103 5.10)

劑量約束: 在防護最適化下之劑量上限值，通常低於劑量限度(ICRP-103 5.9.1)

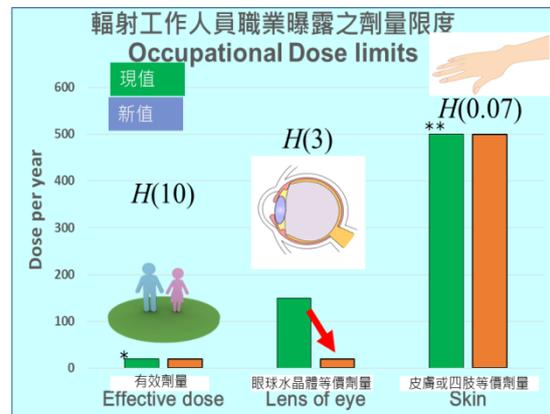
參考水平: ICRP建議為100 mSv/年或100 mSv/緊急曝露(ICRP-103 5.9.3)

診斷參考水平: 病人檢查所受之劑量是否適當，若異常需進行調查(ICRP-103 5.9)

圖 4-10. ICRP 103 報告之表 4 之 ICRP 建議中不同情境的劑量限制

職業曝露			
單位 mSv	>18歲 工作 人員	16-18歲 學生或 實習生	公眾 曝露
現行法	每年 ≤150	每年 ≤50	每年 ≤15
國際輻射防 護委員會 ICRP 118	每年 ≤50*	每年 ≤20	每年 ≤15
國際原子能 總署 IAEA GSR PART3	每年 ≤50*	每年 ≤20	每年 ≤15
歐盟EU BSS	每年 ≤20 或 ≤50*	每年 ≤15	每年 ≤15

*需同時符合每5年平均≤100



輻射工作人員職業曝露之劑量限度，依下列規定：
 *每連續五年週期之有效劑量不得超過100毫西弗(mSv)，且任何單一年內之有效劑量不得超過50 mSv。
 **皮膚或四肢之等價劑量於一年內不得超過500 mSv。

圖 4-11. 根據 ICRP 2012 年建議資料，眼球水晶體劑量限值
下修之國際趨勢

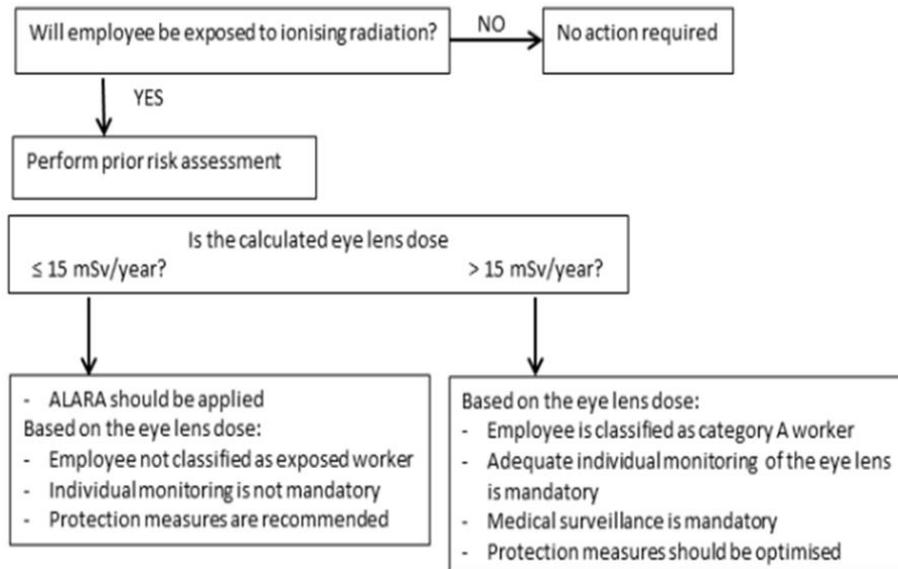
(右圖參考自 2018 年亞太劑量組織(APMP)年會游離輻射領域技術研討會(TCRI)中日本國家實驗室(NMIJ)之簡報資料)

Table 3-1 Recommended action levels per year for monitoring of the eye lens

Recommendation by	Survey	Routine monitoring
IAEA TECDOC 1731 [18]	-	> 5 mSv
ISO-15382 [19]	Not specified	> 15 mSv (single year) or > 6 mSv (consecutive years)
IRPA guidance [20]	1-6 mSv	> 6 mSv
This report	10-15 mSv	> 15 mSv

(a)

The following flow chart¹ can be used:



- 不屬眼球水晶體曝露工作人員
- 不強制眼球水晶體個別監測
- 最佳化輻射量測

- 「類別A」輻射工作人員
- 強制眼球水晶體個別監測
- 強制醫學訪查
- 最佳化輻射量測

(b)

圖 4-12. 荷蘭輻射劑量委員會(NCS)荷蘭眼球水晶體輻防和劑量指引第 31 號報告(NCS 31, 2018 年 5 月)之(a)眼球劑量監測之建議年度採用水平；與(b)眼球水晶體輻防和劑量指引摘要。

Radiation in the field			Necessary types of dosimeters
Neutron	Photon	Beta above 0.7 MeV	
x ¹			One $H_p(10)$ -dosimeter for neutrons
	x		One $H_p(0.07)$ - and/or one $H_p(10)$ -dosimeter for photons
		x	One $H_p(3)$ -dosimeter for beta radiation
x	x		One $H_p(10)$ -dosimeter for neutrons and one $H_p(0.07)$ - and/or one $H_p(10)$ -dosimeter for photons
x ¹		x	One $H_p(10)$ -dosimeter for neutrons and one $H_p(3)$ -dosimeter for beta radiation
	x	x	One $H_p(3)$ -dosimeter for photons and beta radiation
x	x	x	One $H_p(10)$ -dosimeter for neutrons and one $H_p(3)$ -dosimeter for photons and beta radiation

¹ It is noted that neutron radiation is almost always accompanied by photon radiation but the possibility of neutron radiation alone is listed here for the sake of completeness.

圖 4-13. IAEA 1731 技術文件之選擇必須劑量計以監測混合輻射場眼球劑量指引統整表

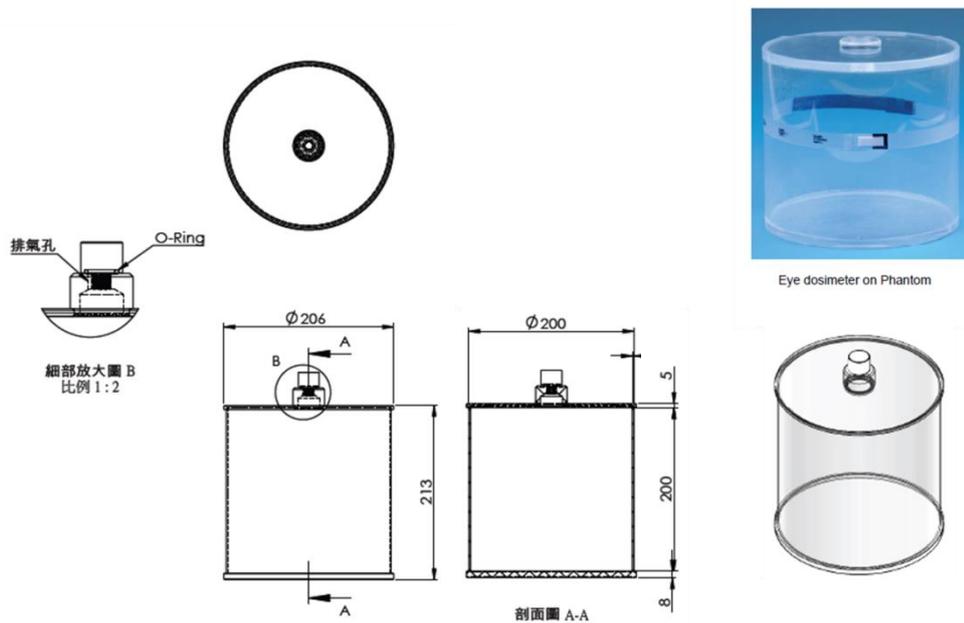


圖 4-14. 眼球劑量假體製作設計圖

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 ($\bar{E} \geq 20 \text{ keV}$, 當 $\bar{E} \leq 70 \text{ keV}$ 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 ($\bar{E} > 70 \text{ keV}$, 照射角度 $\alpha \leq 60$ 度)			
D. 鈾專用			
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 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$)			
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. $^{252}\text{Cf} + \text{II}$			
C. $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O}) + \text{II}$			

圖 4-15. TAF-CNLA-T08(4)新版測試類別表

Table 1b. Limits on number of dosimeters irradiated in particular conditions in category II

	Subcategory IIA		Subcategory IIB		Subcategory IIC		Subcategory IID	
	At least	No more than						
Non- \perp angles	3	5	3	7	3	5	3	5
$\bar{E} < 70 \text{ keV}$	3	5	—	—	—	—	5	10
Mixtures with ^{137}Cs , ^{60}Co	5	10	—	—	5	10	5	10
^{137}Cs , ^{60}Co \perp only	5	10	—	—	5	10	5	10

圖 4-16. ANSI N13.11-2009(R2015) 第 II 類角度照射規定

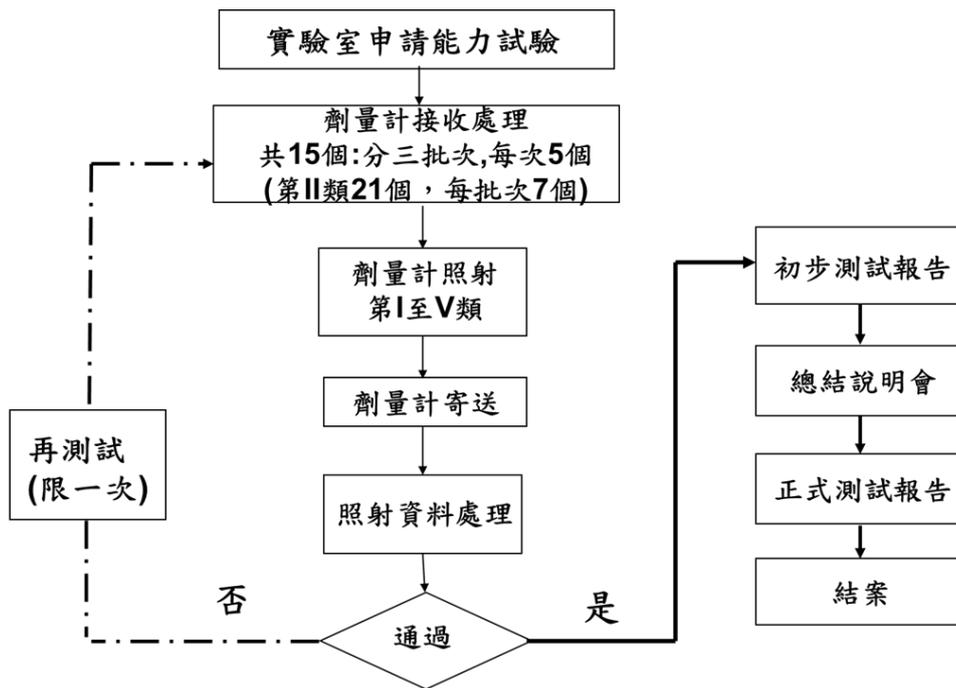


圖 4-17. 第 11 次人員劑量計能力試驗規劃之測試程序

標準射質	管電壓 kV	第一半值層 mm Al	均勻係數
RQR 3	50	1.78	0.76
RQR 4	60	2.19	0.74
RQR 5	70	2.58	0.71
RQR 6	80	3.01	0.69
RQR 7	90	3.48	0.68
RQR 8	100	3.97	0.68
RQR 9	120	5.00	0.68
RQR 10	150	6.57	0.72

圖 4-18. IEC 61267 規範所訂之 RQR 系列射質表

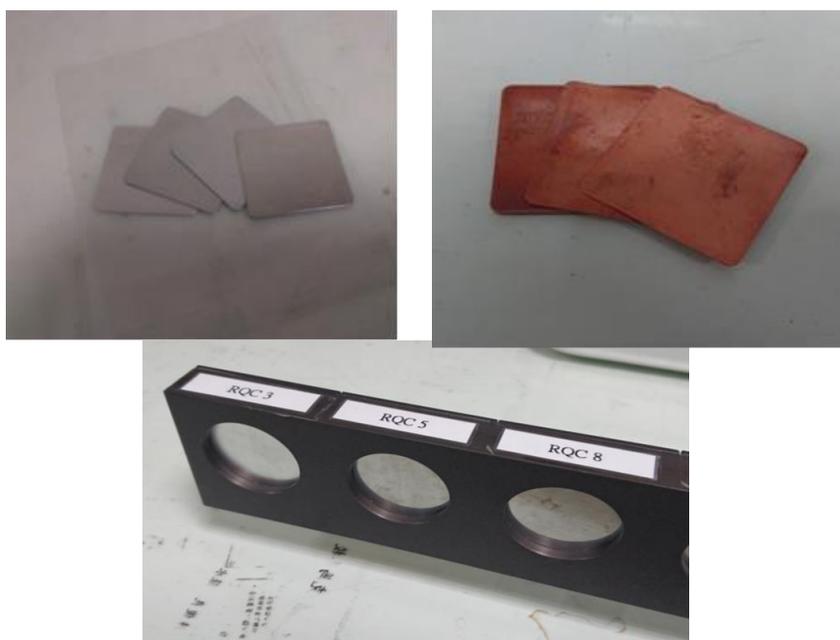


圖 4-19. 純鋁過濾片及純銅過濾片材料

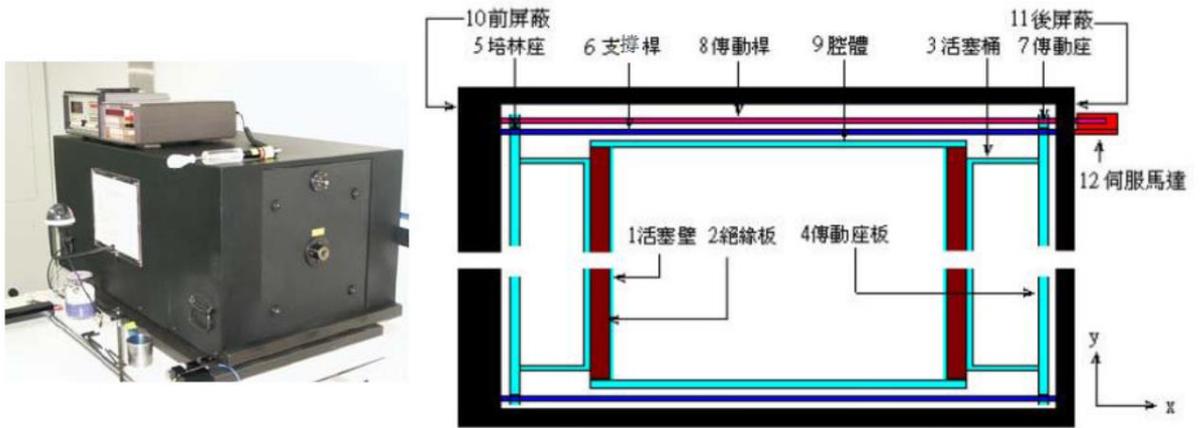


圖 4-20. 自由空氣游離腔結構示意圖

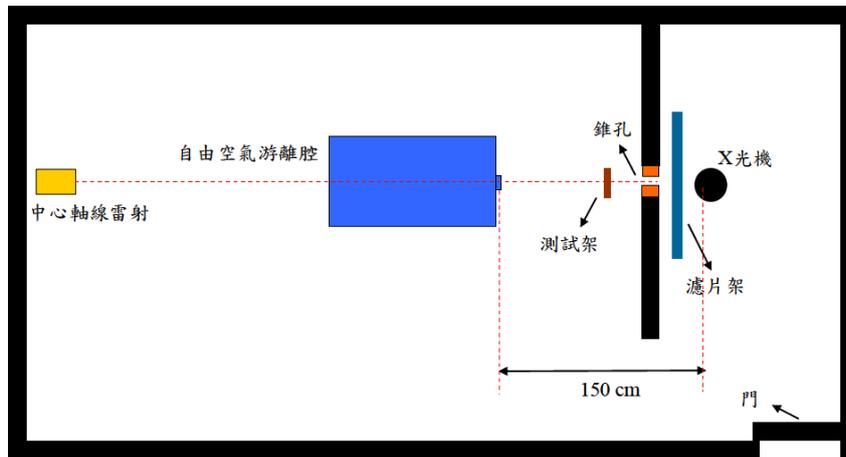


圖 4-21. 半值層量測環境架設規劃示意圖

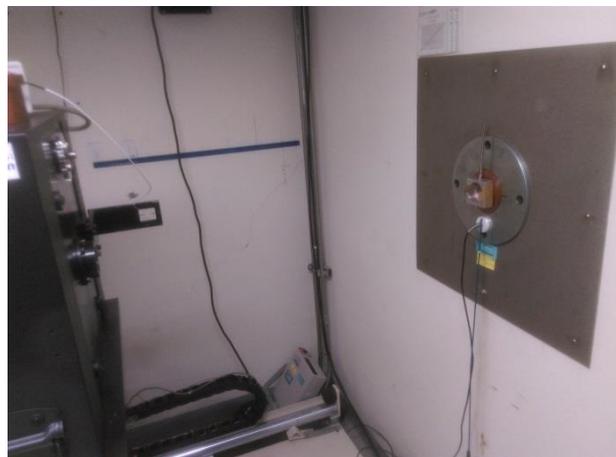


圖 4-22. 實際照射環境架設圖

射質	使用管電壓 kV	附加濾片 mm Al	第一半值層(HVL ₁) mm Al			均勻係數(H)		
			INER	規範	差異(%)	INER	規範	差異(%)
RQR 3	50	2.3	1.79	1.78	-0.55	0.77	0.76	-0.69
RQR 4	60	2.4	2.17	2.19	0.70	0.75	0.74	-1.67
RQR 5	70	2.6	2.57	2.58	0.57	0.73	0.71	-2.44
RQR 6	80	3.1	3.08	3.01	-2.36	0.69	0.69	-0.41
RQR 7	90	3.1	3.56	3.48	-2.39	0.68	0.68	0.52
RQR 8	100	3.2	3.96	3.97	0.27	0.67	0.68	1.73
RQR 9	120	3.7	5.05	5.00	-1.09	0.67	0.68	1.66
RQR 10	150	4.5	6.59	6.57	-0.24	0.70	0.72	2.67

圖 4-23. RQR 半值層量測結果

射質	使用管電壓 kV	附加濾片		第一半值層(HVL ₁) mm Al		
		mm Al	mm Cu	INER	規範	差異(%)
RQC 3	50	2.3	0.5	4.60	4.5	2.2
RQC 5	70	2.6	1.5	8.62	8.4	2.7
RQC 8	100	3.2	2.0	11.55	11.5	0.4

圖 4-24. RQC 半值層量測結果

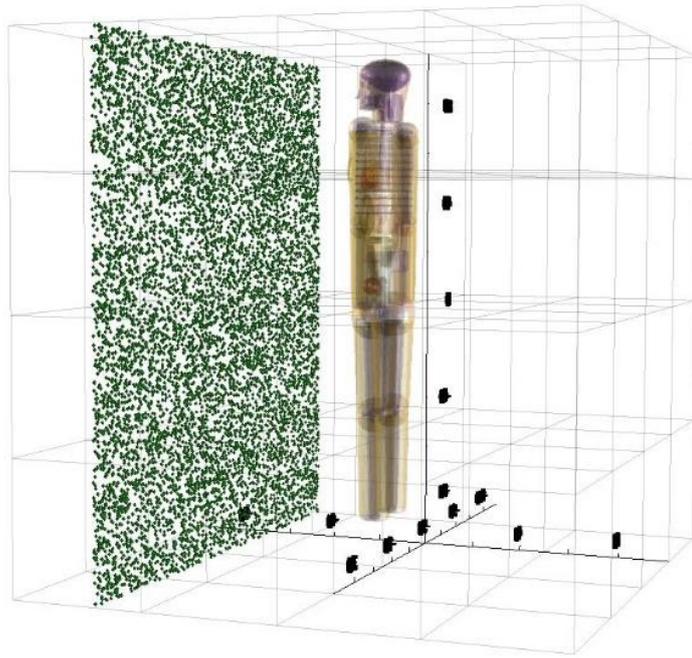


圖 4-25. 前向入射(AP)射源與 PIMAL 人體數學模型

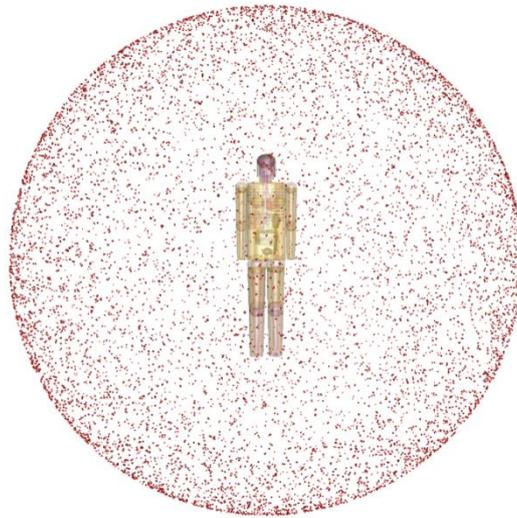


圖 4-26. 等均向入射(ISO)射源與 PIMAL 人體數學模型

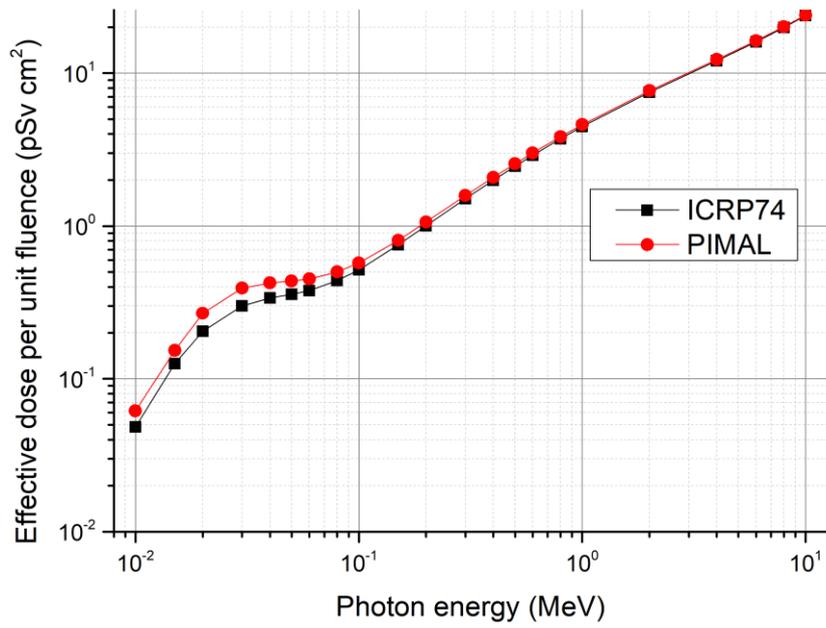


圖 4-27. 前後(AP)幾何下光子轉換因子

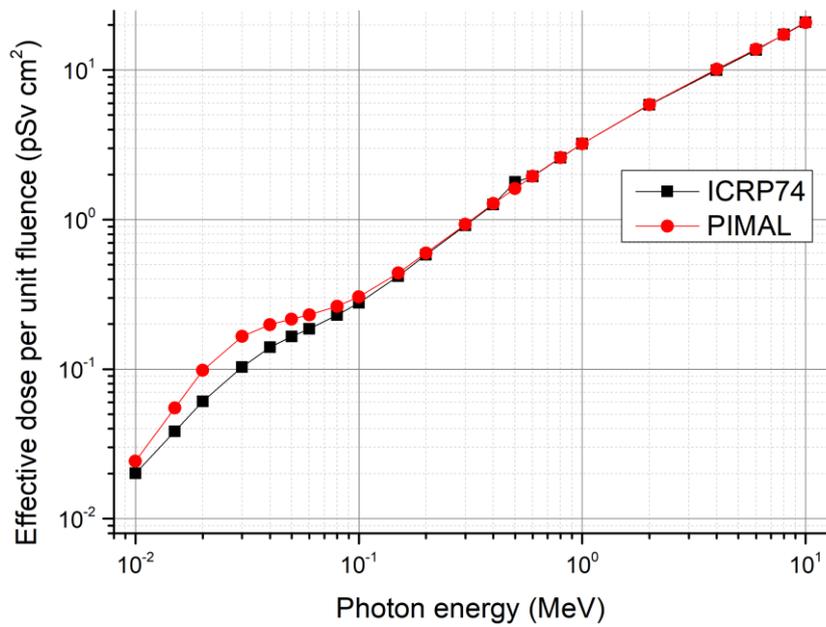


圖 4-28. 等向(ISO)幾何下光子轉換因子

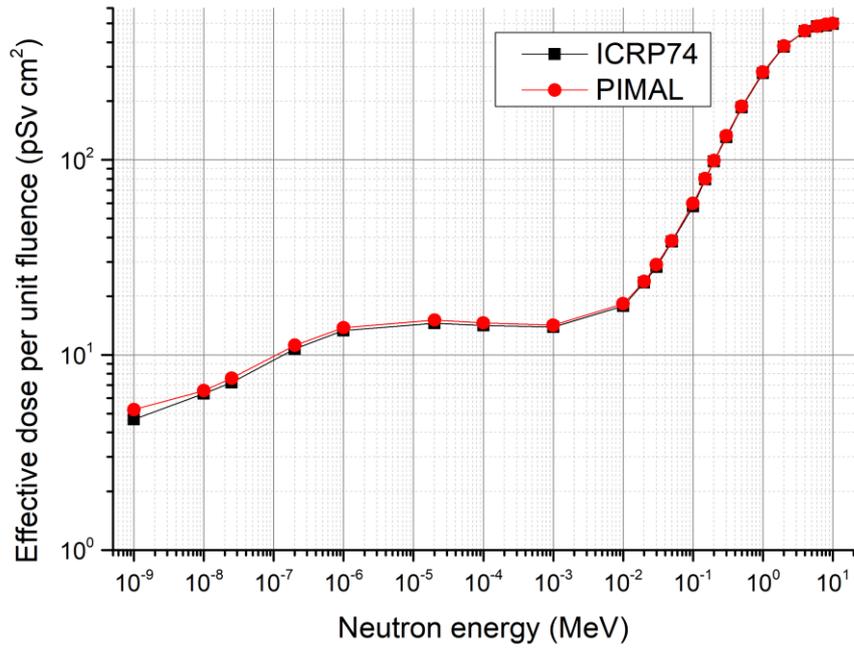


圖 4-29. 前後(AP)幾何下中子轉換因子

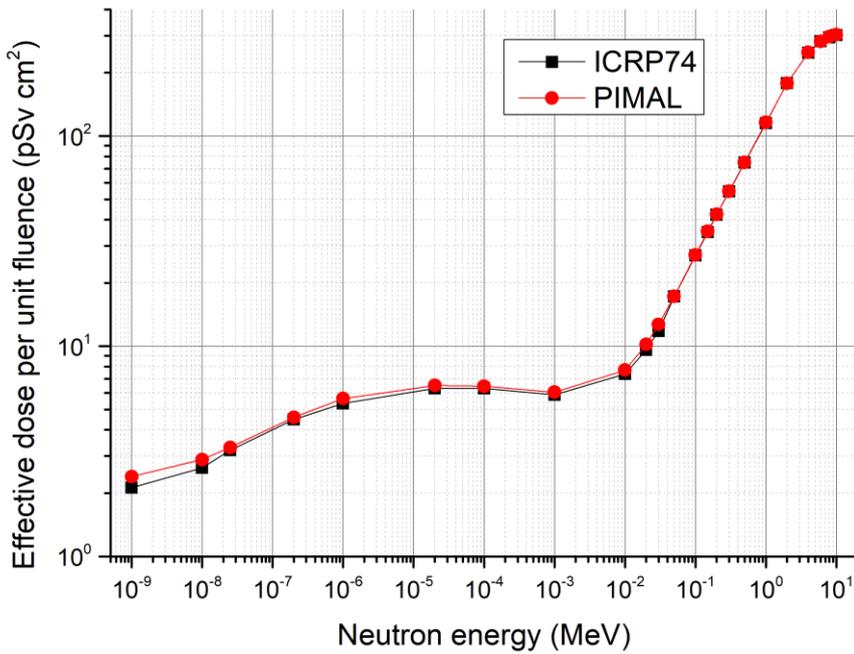


圖 4-30. 等向(ISO)幾何下中子轉換因子

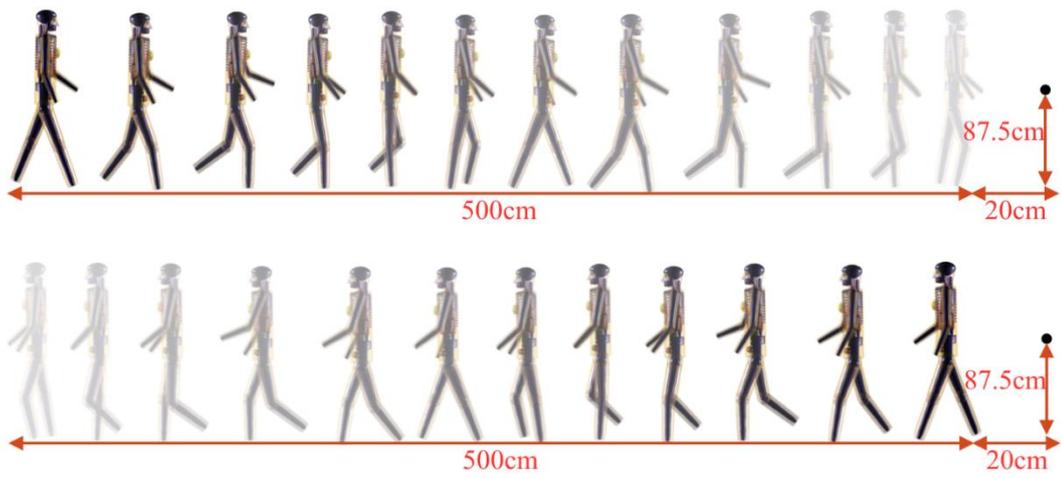


圖 4-31. 利用 PIMAL 建立工作人員對射源的模型示意圖

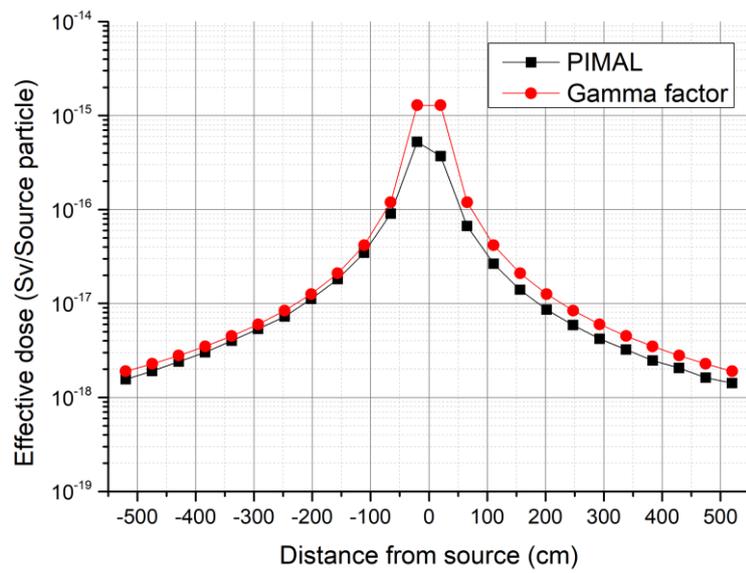
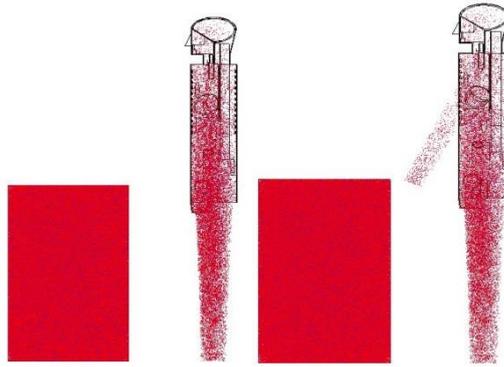
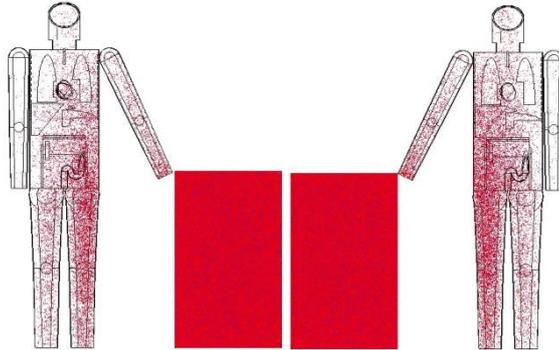


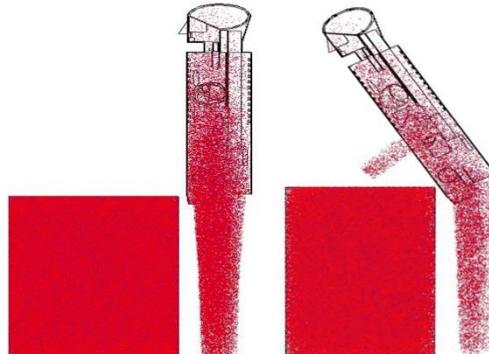
圖 4-32 走向/走離射源，不同距離下造成之有效劑量



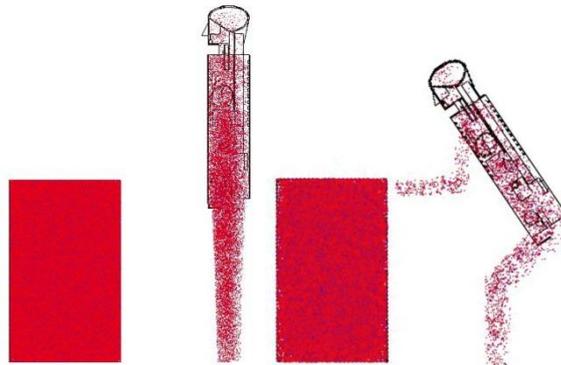
左為模型(1)站立面對示意圖，右為模型(2)單手面對示意圖



左為模型(3)單手左側示意圖，右為模型(4)單手右側示意圖



左為模型(5)直立面對示意圖，右為模型(6)上方彎曲示意圖



左為模型(7)直立面對示意圖，右為模型(8)前方蹲曲

圖 4-33. 假體模型與幾何的設定

銻-137	模型(1) 直立面對	模型(2) 單手面對	模型(3) 單手左側	模型(4) 單手右側
有效劑量 (皮西弗/粒子)	1.07E-5±0.9%	1.09 E-5±0.2%	4.37 E-6±0.5%	3.61 E-6±0.5%
比例	1.00	1.02	0.40	0.33

鈷-60	模型(1) 直立面對	模型(2) 單手面對	模型(3) 單手左側	模型(4) 單手右側
有效劑量 (皮西弗/粒子)	2.16E-5±0.8%	2.19 E-5±0.2%	1.02 E-5±0.4%	8.42 E-6±0.5%
比例	1.00	1.01	0.46	0.38

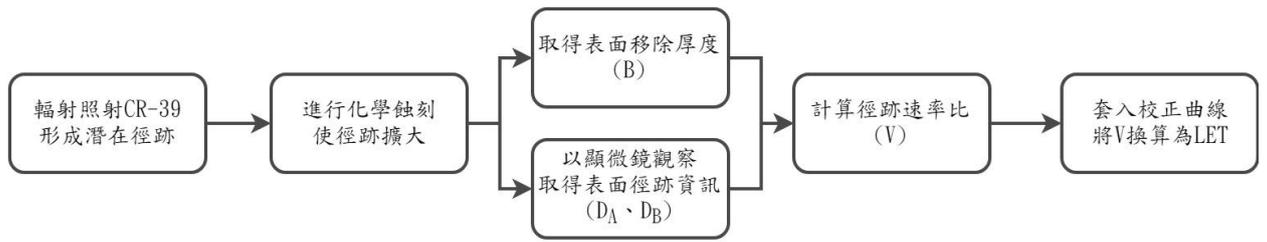
銻-137	模型(5) 直立面對	模型(6) 上方彎曲
有效劑量 (皮西弗/粒子)	1.63E-5±0.3%	2.31 E-5±0.2%
比例	1	1.41

鈷-60	模型(5) 直立面對	模型(6) 上方彎曲
有效劑量 (皮西弗/粒子)	3.33E-5±0.2%	4.56 E-5±0.2%
比例	1	1.36

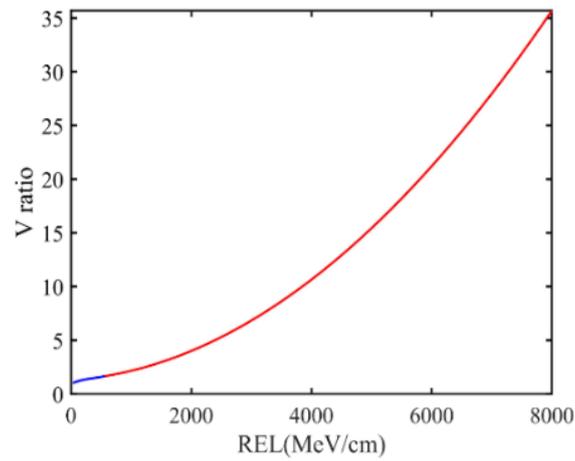
銻-137	模型(7) 直立面對	模型(8) 前方蹲曲
有效劑量 (皮西弗/粒子)	8.5E-6±0.3%	9.23 E-6±0.3%
比例	1	1.08

鈷-60	模型(7) 直立面對	模型(8) 前方蹲曲
有效劑量 (皮西弗/粒子)	1.7E-5±0.3%	1.81 E-5±0.3%
比例	1	1.06

圖 4-34. 假體模型與幾何的設定結果



(a)



(b)

圖 4-35. 本計畫(a)理論模型架構圖與所引用的(b) Dörschel 等人於 2002 發表的 LET 與徑跡速率校正曲線



圖 4-36. CR-39 實驗擺設圖

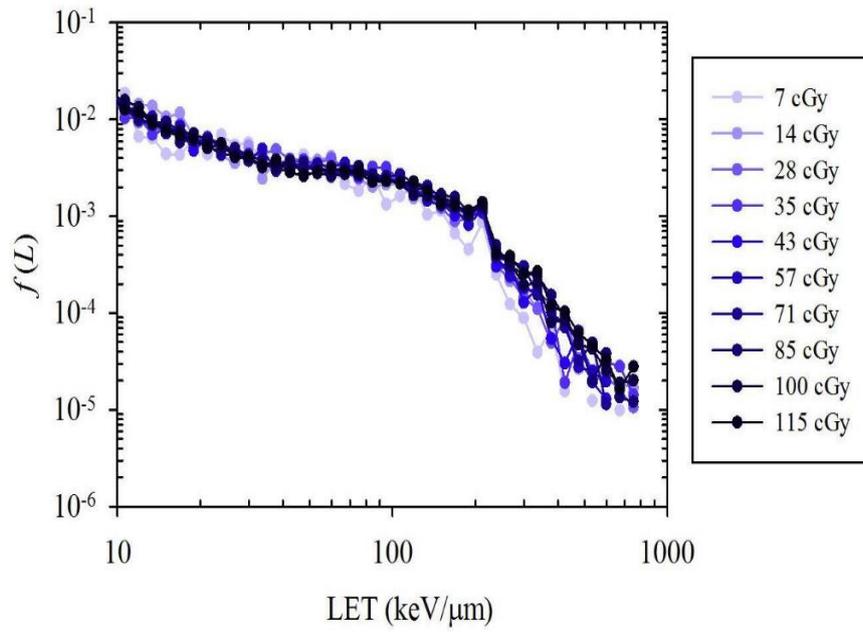


圖 4-37. 照射 CR-39 所得之不同劑量的 LET 能譜圖

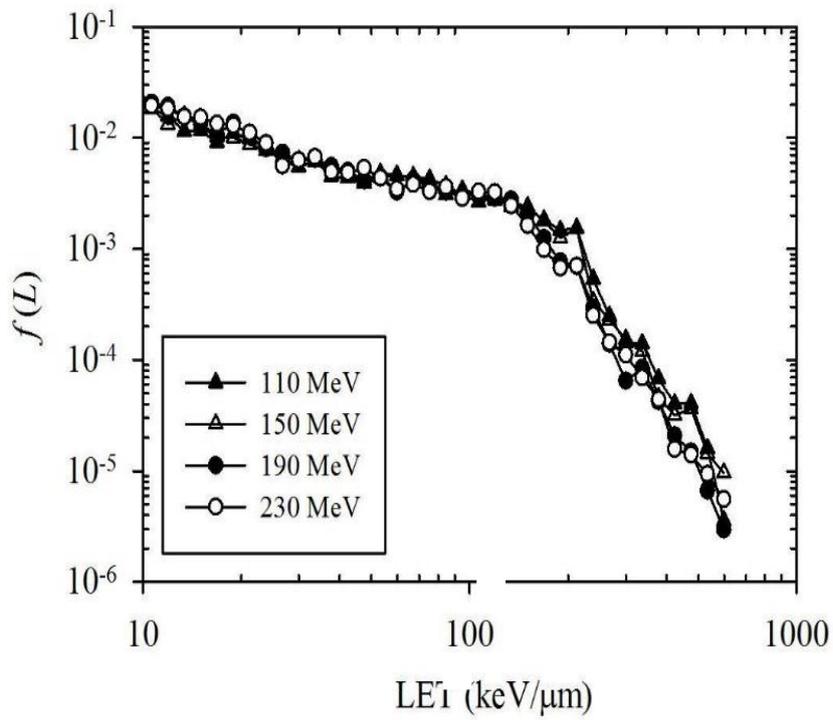


圖 4-38. 照射 CR-39 所得之不同質子能量的 LET 能譜

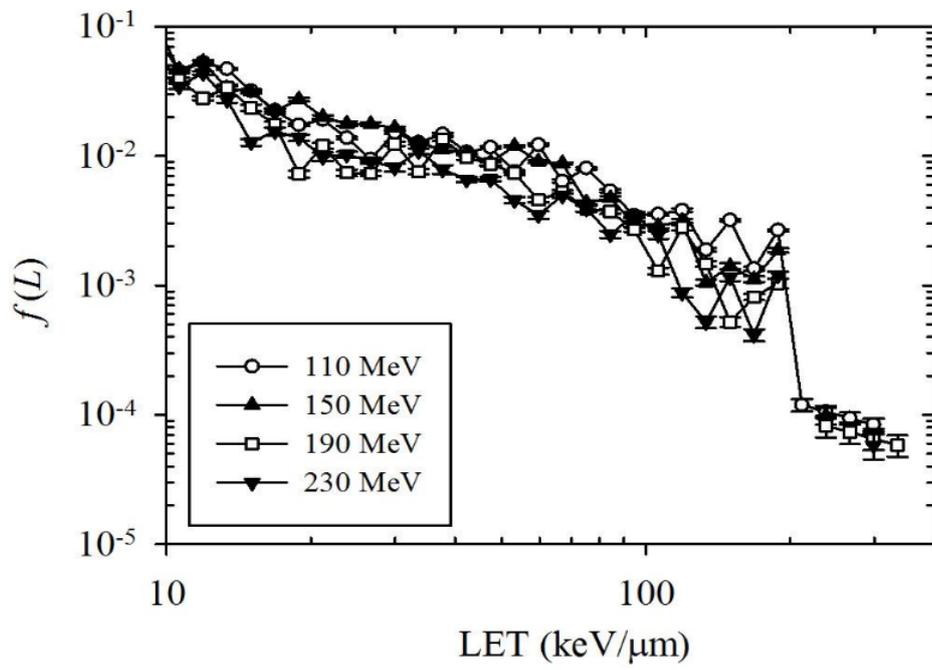


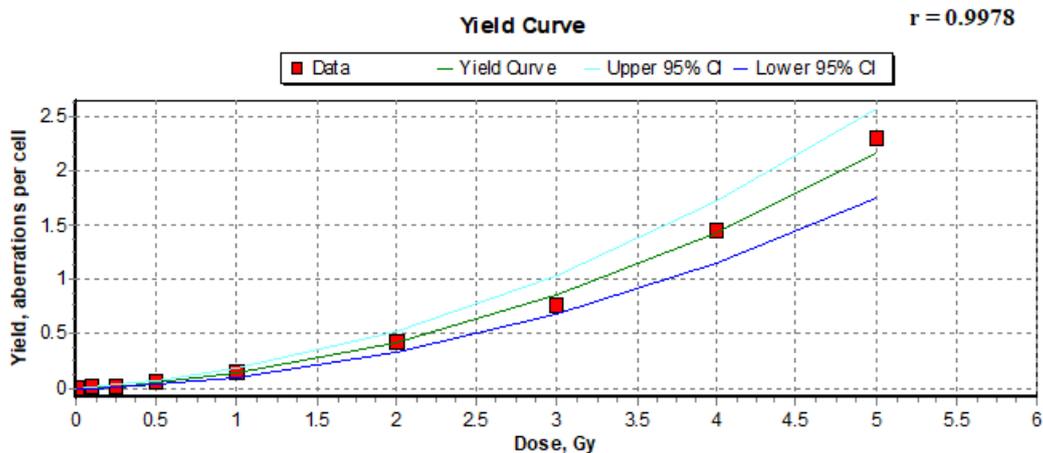
圖 4-39. 以 FLUKA 模擬所得之不同質子能量的 LET 能譜

	2019 年 背景曲線		
編號	1	2	3
分析影像	1016	1021	1009
雙中節數	1	1	1
雙中節發生率 (‰)	0.98	0.98	0.99

圖 4-40. 108 年度國人背景值數據分析

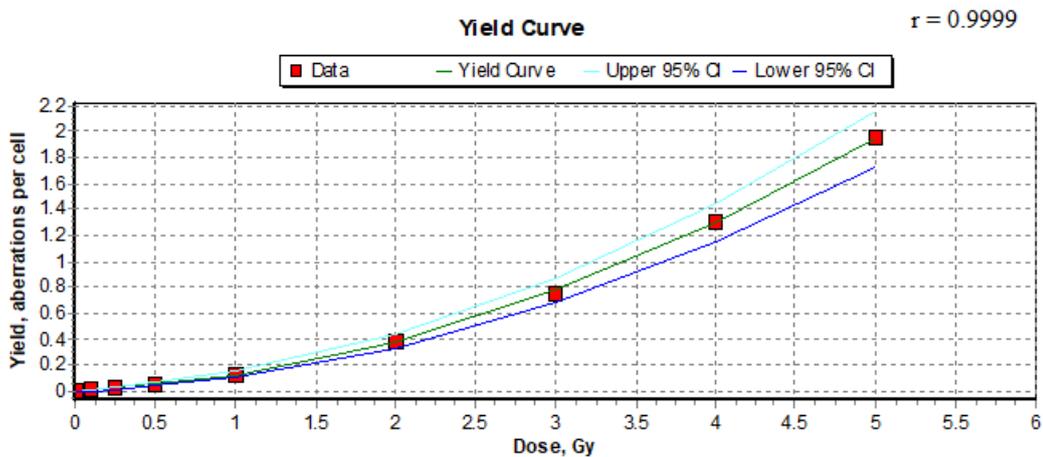
Dose (Gy)	No. of Cells Scored	No. of Dicentric Chromosomes	Dicentric Distribution								
			0	1	2	3	4	5	6	7	
0	1013	2	1011	2	0	0	0	0	0	0	0
0.1	509	4	505	4	0	0	0	0	0	0	0
0.25	534	9	525	9	0	0	0	0	0	0	0
0.5	511	33	478	33	0	0	0	0	0	0	0
1	503	75	428	75	0	0	0	0	0	0	0
2	285	119	187	78	19	1	0	0	0	0	0
3	164	125	67	74	18	5	0	0	0	0	0
4	89	128	21	33	16	14	4	1	0	0	0
5	71	164	4	18	17	19	10	3	0	0	0

圖 4-41. 108 年度反應曲線數據分析



$$Y = 0.0018 (\pm 0.0013) + 0.0667 (\pm 0.0131) * D + 0.0728 (\pm 0.0057) * D^2$$

圖 4-42. 108 年度反應曲線圖形與反應方程式



$$Y = 0.0017 (\pm 0.0012) + 0.0617 (\pm 0.0085) * D + 0.0654 (\pm 0.0025) * D^2$$

圖 4-43. 合併 101-108 年度反應曲線結果與反應方程式

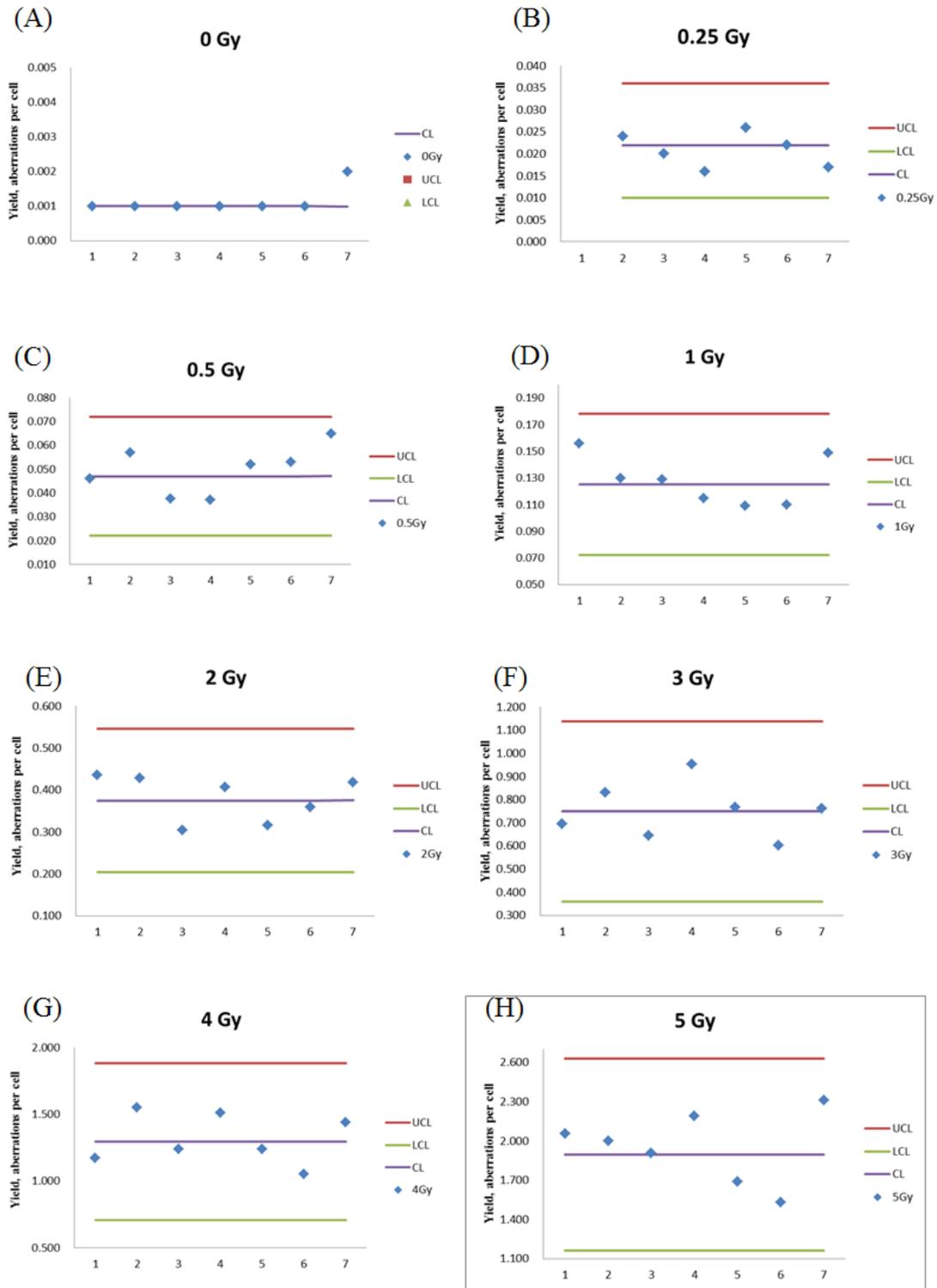


圖 4-44. 整合 101-108 年度反應曲線統計分析(1~7 分別代表 101、102(a)、102(b)、105、106、107、108 年)(A~H 分別代表輻射照射劑量為 0、0.25、0.5、1、2、3、4、5 Gy)



圖 4-45. 實驗室接受 TAF 委員新版及延展審查



圖 4-46. 新版 ISO 17025 通過認證證明

雙中節判斷技巧

- 發現明顯斷片
- 發現明顯雙中節
- 數量總和不足46
- 節點處有內凹變淡(如果是變深可能為交叉)
- 是否有異常長的單一染色體出現

圖 4-47. 衛星實驗室教育訓練教材

核能研究所 人員生物劑量實驗室
雙中節分析人員能力考核表

分析人員姓名：謝雅茹

項次	考核內容	考核日期	考核人員	結果
1	Metaphase Aa 胞雙中節分析 口試	2019/10/29	柯建志	合格
2	Metaphase Aa 胞雙中節分析 實做	2019/10/29	柯建志	合格

考核結果：
分析人員 謝雅茹，經人員生物劑量實驗室考核，其專業及分析能力符合本實驗室試驗要求，可列入本實驗室合格雙中節分析人員。
人員生物劑量實驗室負責人：柯建志

核能研究所 人員生物劑量實驗室
雙中節分析人員能力考核表

分析人員姓名：柯建志

項次	考核內容	考核日期	考核人員	結果
1	Metaphase Aa 胞雙中節分析 口試	2019/10/29	柯建志	合格
2	Metaphase Aa 胞雙中節分析 實做	2019/10/29	柯建志	合格

考核結果：
分析人員 柯建志，經人員生物劑量實驗室考核，其專業及分析能力符合本實驗室試驗要求，可列入本實驗室合格雙中節分析人員。
人員生物劑量實驗室負責人：柯建志

圖 4-48. 衛星實驗室教育訓練考核表

伍、結論與建議

本計畫以支援輻射防護管制業務需求為目標，並因應輻防法規研議政策、能力試驗技術與輻射偵檢儀器驗證、新興放射醫學診療劑量檢校、國內災防應變生物劑量等議題，研究管制業務所需之審查及評估方法與引入國際新規範，精進國內輻射量測實驗室品質與技術，提供作為輻射防護管理業務執行與法規制定之參考依據。其輻射安全管制技術之提升，助於增進民眾於原子能應用輻射防護之信心。相關結論與建議依分項具體說明如下：

一、輻射防護技術規範與劑量評估精進研究

本計畫今年度規劃之工作項目及查核點，皆已如期達成：

- (1) 完成研析 ICRP、IAEA GSR Part 3、歐盟 2013/59/EURATOM 等國際輻防報告，辦理 8 場次讀書會。
- (2) 依據國際輻防趨勢演進，考量國內輻防實務作業，完成「研析 IAEA-GSR Part3 建議及輻防標準技術規範修正建議報告」一份，並於 9 月 25 日提交原能會審閱。
- (3) 完成規劃修法項目之技術細節(包含懷孕婦女劑量評估方法、劑量約束適用方法等)及修訂策略。
- (4) 辦理 3 場次之專家討論審查會(1 場內部及 2 場外部)，匯集國內輻防專家建議，並進行修法草案之修訂。

於本案提出之修訂建議草案，主要係參照國內外學者對於 ICRP 103 之解析與結論、IAEA GSR Part 3 的建議、歐盟標準建議、各國實際納法情形，與我國實務經驗考量。然輻射應用的廣泛，相關建議無法兼容各方需求。因此，仍需與相關利害關係人進行討論，修訂符合我國實務情形的法規。

二、輻射防護能力試驗技術研究

本計畫年度規劃之工作項目及查核點，皆已如期達成。今年度研究有人員劑量計和肢端劑量計能力試驗兩大部分，一方面為全國放射性相關能力試驗技術之國際規範引入，另一方面為強化國內放射性相關實驗室之技術交流與國內現況分析。然而，整體輻射防護能力試驗技術研究存在照射系統設備老化，研究環境人力與經費調度不易問題，今年度已暫時獲得解決，未來仍將盡力於人力協調及資源因應，並進行系統調校及與受測實驗室間之溝通。

而在國內技術環境接軌國際研究上，也持續配合國際輻射應用關鍵參數變更，參考世界趨勢，更新現有檢校系統關鍵參數，並研究相關衝擊影響。

三、輻射應用劑量評估與檢校技術研究

針對新穎或迫切輻射應用科技，例如因應粒子治療和高能中子所衍生之新的輻防需求，以核研所實驗室技術擴展為發展中心，考量國內外趨勢，與國內學術機構合作，精進研發量能。本年度進行建置醫療曝露透視攝影劑量校正射質、動態擬人假體在輻射劑量評估的技術建立、以及固態徑跡偵檢計之直線能量轉移評估。

關於建置醫療曝露透視攝影劑量校正射質，國家游離輻射標準實驗室建立 IEC 61267 系列之 X 射線射質，並經由實驗評估驗證，均能符合 IEC 61267 標準規範，建立 RQR 及 RQC 射質時，RQR 3 至 10 之所有射質資料，而 RQC 建立 3、5 及 8 之編號射質，並確認其數值均符合 IEC 61267 標準規範之要求，

於下一年度將持續進行「BEAMnrc」模擬 RQC 之射質能譜數據，也利用模擬數據計算平均能量及各項修正因子之資料，包括空氣衰減、窗膜衰減、電子損失、光子散射、離子再結合修正因子等，建立完善透視攝影劑量校正系統。

動態擬人假體在輻射劑量評估的技術建立，模擬光子之結果與 ICRP 74 號報告相比在低能量區間有較大的誤差，原因為低能量的光子對於幾何的差異以及組成較為敏感，像是低能量的光子可能因為不同的皮膚厚度或是組織成分便沉積在體外，而在能量較大的區間時趨勢則大致相符。透過建立走向/走離射源的假體模型確定了 PIMAL 在建立細微動態模型的可行性，代表用於建立實際輻射工作人員之工作姿勢具有可行性，而透過動態連續的模型建立，可以得知在每個時間之不同姿勢的切分點劑量，以此便可以完整的模擬一整個工作流程對輻射工作人員的總劑量評估。未來工作中在相關實際案例模型可以加入女性假體的部份，對於研究來說將更為完整，並且可以探討劑量對性別之差異。

質子治療射束之定量與定性具有相當之重要性，本計畫固態徑跡偵檢計之直線能量轉移評估，成功以臨床質子治療射束照射 10 個劑量點與 4 個質子能量，包含背景片共計 31 個 CR-39，藉由分析質子與環境物質作用後產生的二次質子、 α 粒子等二次粒子在 CR-39 上產生的表面徑跡來取得 LET 能譜，成功建立徑跡與粒子 LET 間的關係，並且進一步評估 LET 能譜對不同質子劑量以及對質子的初始能量之反應，由實驗結果可知 CR-39 適用於評估空氣中質子射束之 LET 能譜，且在 1 Gy 劑量範圍

下 CR-39 的讀值不受劑量影響。固態核徑跡偵檢器 CR-39 建立量測高 LET 區域 (LET 大於 10 keV/μm 者) 之直線能量轉移評估方式, 配合前期使用熱發光劑量計建立量測低 LET 區域 (LET 小於 10 keV/μm 者) 之直線能量轉移評估系統結合, 成功發展雙偵測系統來評估廣度更寬的 LET 範圍, 未來可應用於質子治療人體器官等價劑量與輻射防護評估, 以提升劑量評估準確性與作為輻射防護之重要參考。

本分項計畫相關成果除了可作為原能會未來輻防管制之參考、提升核能研究所校正技術服務範圍與準確度、應用於人員之相對輻射生物效應與風險評估等, 對於醫療輻射品質、病患家屬及從業人員輻射安全與環境輻射安全均有相當大的助益。

四、人員生物劑量染色體變異評估技術研究

在臺灣約有五萬多名從事輻射相關的工作人員, 本計畫之推動, 是為了當有意外曝露事件發生時, 能夠即時針對未攜帶輻射劑量徽章之人員, 進行人員輻射曝露劑量之評估, 避免一般民眾或輻射相關從業人員, 對於輻射引發的健康效應產生不必要疑慮, 亦或是能適時給予正確的醫療照護。在意外事故發生時, 國家有具國際水準之檢測單位可提供相關訊息供醫療照護行動參考, 保障工作人員及民眾的健康與安全, 故進行此國際通用之生物劑量研究計畫。

染色體雙中節分析方法為目前國際間所認可之標準方法 (Gold standard), 但在實驗過程中, 培養細胞再加上後續影像分析較花費人力及時間, 於下年度將嘗試使用 H2AX 分析方法觀察是否也可得到劑量與吸收值的相關曲線。

另外本計畫於今年順利取得新版 ISO 17025 認證，未來將繼續通過實驗室之年度查核取得認證以維持實驗室分析之公信力。於國際比對部分，雖然於今年未有執行之查核點，但仍會持續與加拿大保持聯繫，且不排除未來也可能參與其它國家實驗室舉辦之國際能力試驗比對，以保證實驗室的分析能力能與各國實驗室達到同樣水平。

陸、參考文獻

1. 107 年度核設施除役與輻射防護劑量評估驗證技術研究(2/4)研究報告。
2. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, 2014.
3. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, 1990.
4. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, 2007.
5. International Commission on Radiological Protection. ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, ICRP Publication 118, 2012.
6. International Commission on Radiological Protection. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication, ICRP Publication 119, 2012.
7. 原子能委員會.赴法國參加第四屆國際輻射防護體系研討會, 2017。
8. American National Standards Institute, “American National Standard for Performance testing of extremity dosimeters,” ANSI N13.32, 2008.
9. American National Standards Institute, “American National Standard for Performance testing of extremity dosimeters,” ANSI N13.32, 2018.
10. American National Standards Institute, “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,「能力試驗活動要求 TAF-CNLA-R05(7)」, 2018/05/30。
12. 財團法人全國認證基金會, ISO/IEC 17025:2017 測試與校正實驗室能力一般要求, 2018/02/15。
13. 財團法人全國認證基金會,「校正領域量測不確定度評估指引(TAF-CNLA-G16(1))」, 2008/04/15。
14. 財團法人全國認證基金會, TAF-CNLA-T06(2) 校正領域輻射偵測儀器校正技術規範, 2009/01/13。
15. 財團法人全國認證基金會, TAF-CNLA-T08(4)測試領域人員體外劑量評估技術規範, 2019/03。
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Nuclear Energy – Reference Beta Particle Radiations – Part 1: Methods of Production, ISO 6980-1, Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2006.
20. 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.
21. Reference neutron radiations –Part 1: Characteristics and methods of production, ISO 8529-12001/Cor 1:2008, Geneva Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2008.
22. Key Data for Ionizing Radiation Dosimetry Measurement Standards and Applications, ICRU Report 90, Journal of the International Commission on Radiation Units and

- Measurements, Volume 14, Issue 1, April 2016, Page NP, <https://doi.org/10.1093/jicru/ndw043>.
23. 許榮鈞, 林彥全、陳立軒, 朱葦翰, 2019。行政院原子能委員會核能研究所技術服務期末報告：動態擬人假體在輻射劑量評估的技術建立。
 24. X.G. Xu, An exponential growth of computational phantom research in radiation protection, imaging, and radiotherapy: a review of the fifty-year history. *Physics in medicine and biology* 59, R233-302 (2014).
 25. X.G. Xu and K.F. Eckerman, *Handbook of Anatomical Models for Radiation Dosimetry*. Taylor & Francis (2010).
 26. H. Zaidi and X.G. Xu, Computational anthropomorphic models of the human anatomy: the path to realistic Monte Carlo modeling in radiological sciences. *Annu Rev Biomed Eng.* 9, 471-500 (2007).
 27. https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_human_phantom
 28. ICRP, Report of the Task Group on Reference Man, International Commission on Radiological Protection, Publication 23, *Annals of the ICRP* (1975).
 29. <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/research/ramp.html>
 30. H. Akkurt and K.F. Eckerman, Development of PIMAL: Mathematical phantom with moving arms and legs, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2007/14 (2007).
 31. C.J. Werner (Ed), *MCNP User's Manual - Code Version 6.2*, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-17-29981 (2017).
 32. H.L.J. Fisher and W.S. Snyder, Distribution of dose delivered in the body size from a source of gamma rays distributed uniformly in an organ, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-4168 (1967).
 33. ICRP, Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, International Commission on Radiological Protection, Publication 74 (1996).
 34. 林彥全, 動態假體 PIMAL 程式的應用探討暨輔助程式的開發, 國立清華大學碩士論文 (2019)。
 35. 蔡惠予, 陳顯鑫, 宋其勳, 林雍傑, 簡佳玉, 林怡君, 2019。行政院原子能委員會核能研究所技術服務期末報告：固態徑跡偵檢器之直線能量轉移評估技術服務勞務案
 36. 蔡惠予, 宋其勳, 林雍傑, 簡佳玉, 林怡君, 2018。行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告：直線能量轉移評估系統之建立(2/4)。
 37. 林明緯, 蔡惠予, 宋其勳, 黃柏翰, 林雍傑, 林怡君, 2017。行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告：直線能量轉移評估系統之建立(1/4)。
 38. 黃柏翰, 2017。長庚大學醫學影像暨放射科學系碩士論文：CR39 固態核徑跡偵檢器應用於質子治療之平均直線能量轉移能譜評估。
 39. Ashry, A.H., Abdalla, A.M., Rammah, Y.S., Eisa, M., Ashraf, O., 2014. The use of CH₃OH additive to NaOH for etching alpha particle tracks in a CR-39 plastic nuclear track detector. *Radiat. Phys. Chem.* 101, 41–45. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.03.037>
 40. Bassler, N., Jäkel, O., Søndergaard, C.S., Petersen, J.B., 2010. Dose-and LET-painting with particle therapy. *Acta Oncol. (Madr).* 49, 1170–1176. <https://doi.org/10.3109/0284186X.2010.510640>
 41. Benton, E.V., Ogura, K., Frank, A.L., Atallah, T.M., Rowe, V., 1986. Response of different types of CR-39 to energetic ions. *Int. J. Radiat. Appl. Instrumentation. Part 12*, 79–82. [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(86\)90542-X](https://doi.org/10.1016/1359-0189(86)90542-X)
 42. Benton, E.V., Oswald, R.A., Frank, A.L., Wheeler, R.V., 1981. Proton-recoil neutron dosimeter for personnel monitoring. *Health Phys.* 40, 801–809. <https://doi.org/10.1097/00004032-198106000-00002>
 43. Caresana, M., Ferrarini, M., Garlati, L., Parravicini, A., 2010. Further studies on ageing and fading of CR39 PADC track detectors used as air radon concentration measurement devices. *Radiat. Meas.* 46, 1160–1167. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.07.040>
 44. Charvát, J., Spurný, F., 1991. On the SSTD calibration simulation by sparsely ionizing radiation. *Int. J. Radiat. Appl. Instrumentation. Part 18*, 411–414. [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(91\)90008-6](https://doi.org/10.1016/1359-0189(91)90008-6)
 45. Clasie, B., Wroe, A., Kooy, H., Depauw, N., Flanz, J., Paganetti, H., Rosenfeld, A., 2010. A new Talmudic source on the history of diabetes (late onset). *Med. Phys.* 37, 311–321.

- <https://doi.org/10.1118/1.3271390>
46. Doke, T., Hayashi, T., Kobayashi, M., Watanabe, A., 1997. Dip angle dependence of track formation sensitivity in antioxidant doped CR-39 plates. 28, 445–450.
 47. Doke, T., Hayashi, T., Nagaoka, S., Ogura, K., Takeuchi, R., 1995. Estimation of dose equivalent in STS-47 by a combination of TLDS and CR-39. *Radiat. Meas.* 24, 75–82. [https://doi.org/10.1016/1350-4487\(94\)00084-E](https://doi.org/10.1016/1350-4487(94)00084-E)
 48. Dörschel, B., Fulle, D., Hartmann, H., Hermsdorf, D., Kadner, K., Radlach, C., 1997. Dependence of the Etch Rate Ratio on the Energy Loss in Proton Irradiated CR-39 Detectors and Recalculation of Etch Pit Parameters. *Radiat. Prot. Dosimetry* 71, 99–106. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032046>
 49. Dörschel, B., Hermsdorf, D., Kadner, K., Starke, S., 2002. Dependence of the etch rate ratio on the energy loss of light ions in CR-39. *Radiat. Meas.* 35, 287–292. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(02\)00056-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(02)00056-2)
 50. Fager, M., Toma-Dasu, I., Kirk, M., Dolney, D., Diffenderfer, E.S., Vapiwala, N., Carabe, A., 2015. Linear energy transfer painting with proton therapy: A means of reducing radiation doses with equivalent clinical effectiveness. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 91, 1057–1064. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2014.12.049>
 51. Frank, A.L., Benton, E.V., 1977. Radon dosimetry using plastic nuclear track detectors. *Nucl. Track Detect.* 1, 149–179. [https://doi.org/10.1016/0145-224X\(77\)90011-4](https://doi.org/10.1016/0145-224X(77)90011-4)
 52. Giantsoudi, D., Sethi, R.V., Yeap, B.Y., Eaton, B.R., Ebb, D.H., Caruso, P.A., Rapalino, O., Chen, Y.L.E., Adams, J.A., Yock, T.I., Tarbell, N.J., Paganetti, H., MacDonald, S.M., 2016. Incidence of CNS Injury for a Cohort of 111 Patients Treated with Proton Therapy for Medulloblastoma: LET and RBE Associations for Areas of Injury. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 95, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2015.09.015>
 53. Granville, D.A., Sahoo, N., Sawakuchi, G.O., 2014. Calibration of the Al₂O₃:C optically stimulated luminescence (OSL) signal for linear energy transfer (LET) measurements in therapeutic proton beams. *Phys. Med. Biol.* 59, 4295–4310. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/15/4295>
 54. Granville, D.A., Sawakuchi, G.O., 2015. Comparison of linear energy transfer scoring techniques in Monte Carlo simulations of proton beams, *Physics in Medicine and Biology*. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/14/N283>
 55. Grassberger, C., Paganetti, H., 2011. Elevated LET components in clinical proton beams. *Phys. Med. Biol.* 56, 6677–6691. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/20/011>
 56. Grassberger, C., Tang, Z., Li, Y., Xu, L., Ao, Y., 2016. Operating lever design on driving console of convertible crawler combine harvester. *Int. Agric. Eng. J.* 25, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.10.027>
 57. Hirano, Y., Kodaira, S., Souda, H., Matsumura, A., Torikoshi, M., 2018. Linear energy transfer (LET) spectra and survival fraction distribution based on the CR-39 plastic charged-particle detector in a spread-out Bragg peak irradiation by a¹²C beam. *Phys. Med. Biol.* 63. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aadaa6>
 58. Jadrníčková, I., Spurný, F., Molokanov, A.G., 2008. Spectrometry of linear energy transfer and its use in high-energy particle beams. *Phys. Part. Nucl. Lett.* 5, 531–537. <https://doi.org/10.1134/S1547477108060071>
 59. Johnson, C.E., DeWitt, J.M., Benton, E.R., Yasuda, N., Benton, E.V., 2011. LET spectrum measurements in CR-39 PNTD with AFM. *AIP Conf. Proc.* 1336, 637–642. <https://doi.org/10.1063/1.3586180>
 60. Kodaira, S., Konishi, T., Kitamura, H., Kurano, M., Kawashima, H., Uchihori, Y., Nishio, T., Yasuda, N., Ogura, K., Sihver, L., Benton, E.R., 2015. On the use of CR-39 PNTD with AFM analysis in measuring proton-induced target fragmentation particles. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* 349, 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.02.052>
 61. Kodaira, S., Morishige, K., Kawashima, H., Kitamura, H., Kurano, M., Hasebe, N., Koguchi, Y., Shinozaki, W., Ogura, K., 2016. A performance test of a new high-surface-quality and high-sensitivity CR-39 plastic nuclear track detector – TechnoTrak. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* 383, 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.07.002>
 62. Kodaira, S., Naka, S., Yasuda, N., Kawashima, H., Kurano, M., Ota, S., Ideguchi, Y., Hasebe, N., Ogura, K., 2012. Improvement of charge resolution for high Z/β particles in

- CR-39 nuclear track detectors by means of two-step etching technique. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* 274, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.11.040>
63. Kodaira, S., Ota, S., Yasuda, N., Ogura, K., Doke, T., Hasebe, N., 2007. New method of the precise measurement for the thickness and bulk etch rate of the solid-state track detector. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 574, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.01.086>
 64. Kodaira, S., Yasuda, N., Kawashima, H., Kurano, M., Naka, S., Ota, S., Ideguchi, Y., Hasebe, N., Ogura, K., 2011. Detection threshold control of CR-39 plastic nuclear track detectors for the selective measurement of high LET secondary charged particles. *Radiat. Meas.* 46, 1782–1785. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.08.015>
 65. Kodaira, S., Yasuda, N., Konishi, T., Kitamura, H., Kurano, M., Kawashima, H., Uchihori, Y., Ogura, K., Benton, E.R., 2013. Calibration of CR-39 with atomic force microscope for the measurement of short range tracks from proton-induced target fragmentation reactions. *Radiat. Meas.* 50, 232–236. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.10.001>
 66. Lühr, A., vonNeubeck, C., Krause, M., Troost, E.G.C., 2018. Relative biological effectiveness in proton beam therapy – current knowledge and future challenges. *Clin. Transl. Radiat. Oncol.* <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2018.01.006>
 67. McNamara, A.L., Schuemann, J., Paganetti, H., 2015. A phenomenological relative biological effectiveness (RBE) model for proton therapy based on all published in vitro cell survival data. *Phys. Med. Biol.* 60, 8399–8416. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/21/8399>
 68. Nikezic, D., Yu, K.N., 2004. Formation and growth of tracks in nuclear track materials. *Mater. Sci. Eng. R-Reports* 46, 51–123. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.07.003>
 69. Ödén, J., DeLuca, P. M. and Orton, C.G., 2018. The use of a constant RBE=1.1 for proton radiotherapy is no longer appropriate. *Med. Phys.* 12, 3218–3221. <https://doi.org/10.1111/ijlh.12426>
 70. Paganetti, H., 2014. Relative biological effectiveness (RBE) values for proton beam therapy. Variations as a function of biological endpoint, dose, and linear energy transfer. *Phys. Med. Biol.* 59, R419–R472. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/22/R419>
 71. Paganetti, H., Niemierko, A., Ancukiewicz, M., Gerweck, L.E., Goitein, M., Loeffler, J.S., Suit, H.D., 2002. Relative biological effectiveness (RBE) values for proton beam therapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 53, 407–421. [https://doi.org/10.1016/S0360-3016\(02\)02754-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3016(02)02754-2)
 72. Pálfalvi, J.K., 2009. Fluence and dose of mixed space radiation by SSNTDs achievements and constraints. *Radiat. Meas.* 44, 724–728. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.045>
 73. R. Henke, K.O. and E.V.B., Department, 1986. Standard method for measurement of bulk etch in CR-39. *Nucl. Tracks* 12, 307–310.
 74. Romano, F., Cirrone, G.A.P., Cuttone, G., Rosa, F.Di, Mazzaglia, S.E., Petrovic, I., Fira, A.R., Varisano, A., 2014. A Monte Carlo study for the calculation of the average linear energy transfer (LET) distributions for a clinical proton beam line and a radiobiological carbon ion beam line. *Phys. Med. Biol.* 59, 2863–2882. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/12/2863>
 75. Sahoo, G.S., Tripathy, S.P., Molokanov, A.G., Aleynikov, V.E., Sharma, S.D., Bandyopadhyay, T., 2016. Measurement of LET (linear energy transfer) spectra using CR-39 at different depths of water irradiated by 171 MeV protons: A comparison with Monte Carlo simulation. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 818, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.02.038>
 76. Sahoo, G.S., Tripathy, S.P., Sunil, C., Sarkar, P.K., 2013. LET spectrometry of 14 MeV (D-T) neutrons using CR-39 track detectors. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 708, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.01.007>
 77. Spurný, F., Bednář, J., Johansson, L., Säterberg, A., 1996. Linear energy transfer spectra of secondary particles in CR-39 track etch detectors. *Radiat. Meas.* 26, 645–649. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(97\)82877-6](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(97)82877-6)
 78. Spurný, F., Molokanov, A.G., Bamblevski, V.P., 2004. Passive spectrometry of linear

- energy transfer: Development and use. *Radiat. Prot. Dosimetry* 110, 675–679. <https://doi.org/10.1093/rpd/nch148>
79. Tripathy, S.P., Sahoo, G.S., Paul, S., Kumar, P., Sharma, S.D., Santra, S., Pal, A., Kundu, A., Bandyopadhyay, T., Avasthi, D.K., 2017. Generation and application of LET calibration curve for neutron dosimetry using CR-39 detector and microwave induced chemical etching. *Rev. Sci. Instrum.* 88. <https://doi.org/10.1063/1.4984621>
 80. Yasuda, N., Zhang, D.H., Kodaira, S., Koguchi, Y., Takebayashi, S., Shinozaki, W., 2008. Verification of angular dependence for track sensitivity on several types of CR-39. *Radiat. Meas.* 43, 269–273. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.03.027>
 81. Zhou, D., Semones, E., Guetersloh, S., Zapp, N., Weyland, M., Benton, E.R., 2010. The experimental and simulated LET spectrum and charge spectrum from CR-39 detectors exposed to ions near CRaTER at BNL. *Radiat. Meas.* 45, 916–922. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.02.014>.
 82. 方菊雄、劉怡均、李桂芳，細胞遺傳技術與應用。2011。
 83. 趙晟富、張翠容、葉冠毅、張志賢，生物劑量統計方法之應用分析。2014。
 84. 張翠容、趙晟富、葉冠毅、張志賢，103 年度人員生物劑量背景值研究。2014。
 85. 張翠容、蔡青彥、余秉弘、林彬、張志賢，人員生物劑量實驗室之建立。2012。
 86. 馬張明霞，核能研究所生物劑量實驗室意外曝露之生物劑量評估作業說明與回顧。2006。
 87. Khvostunov, I.K., et al., Cytogenetic biodosimetry and dose-rate effect after radioiodine therapy for thyroid cancer. *Radiat Environ Biophys*, 2017. 56(3): p. 213-226.
 88. Zedginidze, A., et al., Biodosimetry of Persons Chronically Exposed to Low and Therapeutic Doses of Ionizing Radiation. *Genome Integr*, 2016. 7: p. 12.
 89. Moquet, J., et al., The second gamma-H2AX assay inter-comparison exercise carried out in the framework of the European biodosimetry network (RENEB). *Int J Radiat Biol*, 2017. 93(1): p. 58-64.
 90. Pan, Y., et al., Study on gammaH2AX Expression of Lymphocytes as a Biomarker In Radiation Biodosimetry. *Genome Integr*, 2016. 7: p. 10.
 91. Park, J.G., et al., Developing Human Radiation Biodosimetry Models: Testing Cross-Species Conversion Approaches Using an Ex Vivo Model System. *Radiat Res*, 2017. 187(6): p. 708-721.

附件 期末訪查技術性查核問題與回復(Q&A)

行政院原子能委員會 108 年度科技計畫 期末訪查問題與回復(Q&A)

(一) 輻射防護技術規範與劑量評估精進研究		
	問題	回復
1.	請依據專家會議決議，全盤檢視「游離輻射防護安全標準」，將計畫曝露、既存曝露及緊急曝露三種情境精神融入條文內容。	遵照委員意見辦理，將於修訂草案中納入三種曝露情節及相對應之管制標準等內容，後續將規劃專案再與貴會報告修訂方式與內容。
(二) 輻射防護能力試驗技術研究		
	問題	回復
1.	本會刻進行下修眼球劑量限值之修法作業，請加速眼球劑量計之研發及校正體系之建置作業，並建立 TAF 認證規範，以利接軌國際管制趨勢。	<p>謝謝委員建議。</p> <p>為配合眼球劑量限值下修之修法作業，國內眼球劑量監測體系之推動時程，將分為「劑量校正」與「計測服務」兩部分來進行。劑量校正方面，首先將透過 ISO 4037(光子)和 ISO 8529(貝他粒子)規範，把國家空氣克馬標準轉換為眼球劑量所需 $H_p(3)$ 操作量，並傳遞至 X 射線校正服務系統，預計光子先行，目標 111 年建置完成，並於 112 年擴展至貝他系統；計測服務方面，將於 109 年執行系統測試研究，目標 110 年完成眼球劑量評估系統，並規劃輻防宣導和防護資訊，111 年完成計測服務行政流程並提供眼球劑量指引。</p> <p>至於 TAF 認證部分，因目前尚無</p>

		ANSI/HPS 或其他國際規範可供依循，因此將於上述兩部分系統建置完成後，先進行實驗室比對驗證測試，並透過測試結果之回饋與國際趨勢，滾動式修訂國內技術規範，以符合管制實務需求。
--	--	---

(三) 輻射應用劑量評估與檢校技術研究

	問題	回復
1.	<p>本期進行新穎技術之動態擬人假體與固態偵檢計直線能量轉移系統之研發，請簡述其應用範圍及相關限制，以利後續發展規劃。</p>	<p>謝謝委員建議，依兩研究答復分述如下：</p> <p><u>動態擬人假體</u></p> <p>應用範圍包含輻射防護、醫學物理方面(如發生核子緊急曝露或意外事故，需評估人員接收之劑量)，絕大部分的擬人假體都是建立在直立站姿的型態，然而仔細觀察工作環境的輻射曝露，特別是近距離接觸射源的工作人員姿勢並非都是直立的標準動作，人體造成的自屏蔽效應或是複雜體射源的曝露組態都可能導致直立站姿評估結果的誤差。軟體相關限制如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 主要為程式當前版本的缺陷，如選單的錯位以及程式碼中缺式可能導致 MCNP 運行錯誤。 2. 假體的上半身座標為固定而無法固定下半身對上半身做位移或自定義座標軸，導致在建立模型時需要通過大量以及繁複的計算才能避免幾何上的堆疊以及不正確位置擺放。 <p><u>固態偵檢計直線能量轉移</u></p> <p>本系統主要是針對臨床質子治療射</p>

		<p>束來進行設計，由固態偵檢計的特性可知，它可用於評估高直線能量轉移之射束，包含質子射束、重粒子射束，應用在質子治療與重粒子治療之照野內與照野外的 LET 評估，此外亦可應用於輻射防護上，即由 LET 測量去評估輻射品質(Q factor)，進而評估輻射工作環境中的等效劑量。目前已有多篇文獻使用固態偵檢計來量測重粒子治療射束之直線能量轉移能譜，若往後欲朝向此領域進行發展，其限制在於需要有設有重粒子治療設施之醫療院所共同合作，俾利進行照射實驗。</p>
--	--	--

(四) 人員生物劑量染色體變異評估技術研究

	問題	回復
1.	<p>「人員生物劑量實驗室」之建立，有助發生輻射意外事故時，迅速重建人員曝露劑量，以採取必要的醫療照護行動，請強化衛星實驗室的教育訓練，並評估拓展到其他實驗室的可能性，以確保我國應變能量。</p>	<p>感謝委員的意見。</p> <p>目前已建立東部花蓮慈濟醫院及南部高雄醫學大學做為衛星實驗室並陸續進行相關教育訓練，109 年度將著重於有劑量之染色體計數訓練，並評估北部有意願參與且適宜之醫學大學，來協助其建立衛星實驗室，拓展應變能量。</p>

註：輻防處計畫聯絡人為王○儒技士(分機 2189)，各分項名稱及輻防處承辦人如下：

- | | |
|----------------------|-----------------|
| 1. 輻射防護技術規範與劑量評估精進研究 | (王○玲技正，分機 2191) |
| 2. 輻射防護能力試驗技術研究 | (鄧○平技士，分機 2203) |
| 3. 輻射應用劑量評估與檢校技術研究 | (黃○絹技士，分機 2194) |
| 4. 人員生物劑量染色體變異評估技術研究 | (鄧○平技士，分機 2203) |