

106 年度政府科技發展計畫 績效報告書 (D006)

計畫名稱：核設施除役與輻射防護劑量評估驗證
技術研究 (1/4)

執行期間：

全程：自 106 年 1 月 1 日 至 109 年 12 月 31 日止

本期：自 106 年 1 月 1 日 至 106 年 12 月 31 日止

主管機關：行政院原子能委員會

執行單位：行政院原子能委員會核能研究所

中華民國 107 年 4 月 12 日

目 錄

【106 年度政府科技發展計畫績效報告基本資料表(D003)】	1
【分年階段性目標達成情形與重要成果摘要表】	5
【106 年度績效自評意見暨回復說明(D007)】	9
第一部分	11
壹、 目標與架構	12
一、 目標與效益	12
(一) 目標	12
(二) 效益	16
二、 架構	20
三、 實際達成與原預期目標之差異說明	24
貳、 主要內容	25
一、 執行內容	25
二、 遭遇困難與因應對策	40
三、 實際執行與原規劃差異說明	42
參、 經費與人力執行情形	49
一、 經費執行情形	49
(一) 經資門經費表 (E005)	49
(二) 經費支用說明	50
(三) 經費實際支用與原規劃差異說明	50
二、 計畫人力運用情形	51
(一) 計畫人力結構 (E004)	51
(二) 人力實際進用與原規劃差異說明	51
肆、 已獲得之主要成果與重大突破(含量化 output) (E003)	52
第二部分	55
壹、 主要成就及成果之價值與貢獻度(outcome)	56
一、 學術成就(科技基礎研究)	56
二、 技術創新(科技技術創新)	59
三、 經濟效益(經濟產業促進)	60
四、 社會影響(社會福祉提升、環境保護安全)	60
五、 其他效益(科技政策管理、人才培育、法規制度、國際合作、推動輔導等)	62
貳、 跨部會協調或與相關計畫之配合	63
參、 檢討與展望	64
附錄一、KPI 佐證資料表	69
附錄二、佐證圖表	72

【106 年度政府科技發展計畫績效報告基本資料表(D003)】

審議編號	106-2001-02-04-01					
計畫名稱	核設施除役與輻射防護劑量評估驗證技術研究(1/4)					
主管機關	行政院原子能委員會					
執行單位	行政院原子能委員會核能研究所					
計畫主持人	姓名	劉文熙	職稱	處長		
	服務機關	行政院原子能委員會輻射防護處				
計畫類別	新興一般計畫					
計畫群組及比重	環境科技 100 %					
執行期間	106 年 1 月 1 日至 106 年 12 月 31 日					
全程期間	106 年 1 月 1 日至 109 年 12 月 31 日					
資源投入 (以前年度 請填決算數)	年度	經費(千元)		人力(人/年)		
	106	11,514		8.00		
	107	12,177		8.50		
	108	15,000		9.50		
	109	15,000		9.50		
	合計	53,691		35.50		
	106 年度	經費項目		預算數(千元)	決算數(千元)	執行率(%)
		經常 門	人事費	0	0	0
			材料費	1,365	1,776	130.14
			其他經常支出	5,883	5,451	92.66
			小計	7,248	7,227	99.72
		資本 門	土地建築	0	0	0
			儀器設備	4,300	4,287	99.69
			其他資本支出	0	0	0
小計			4,300	4,287	99.69	
經費合計		11,548	11,514	99.71		
本計畫在機關施政項目之定位及功能	<p>一、原子能委員會是全國輻射安全的主管機關，輻射防護管制的核心業務是以專業及合理的管制措施，確保人員及環境之輻射安全。輻射防護管制之物件包括核子設施、醫療、學術、工業、農業及軍事等單位所使用之放射性物質及可發生游離輻射設備，對象則包括從業人員、接受放射性診斷及治療之民眾、一</p>					

	<p>般民眾及週遭之環境。</p> <p>二、為防制輻射危害，強化游離輻射管制措施，原能會有責任推動原子能科技在放射診療及工業應用等民生安全議題之研究發展，提升國家游離輻射標準，並使相關技術與國際接軌。考量科技專業性，本計畫係以職權交辦方式委由核能研究所執行，以落實原子能科技於社會民生福祉與永續發展之目標，堅實智慧生活科技與產業。</p> <p>三、本計畫進行核設施除役之輻射偵測儀器檢校及技術評估研究，以及建立人員生物劑量評估相關技術，以助因應未來核能電廠陸續除役所需與國內可能遭遇的輻射曝露意外事件；在原子能科技應用上，考量輻射防護管制系統的全面性，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，以提升游離輻射防護管制技術，確保民眾健康及安全。</p>
<p>計畫重點描述</p>	<p>本計畫分為下列四個主要項目執行：</p> <p>一、核設施除役輻射防護管制技術研究</p> <p>為增進核設施除役輻射量測之準確度與公信力，完善管制核設施除役之輻射安全，本計畫針對核設施例行運轉預警機制設定進行探討、研製環境試樣參考物質及建立檢校追溯體系與量測程序，且為落實輻防管制措施，修訂除役後廠址環境輻射偵測報告導則，並配合除役廠址特性參數分析，建立生物體輻射劑量評估技術。</p> <p>二、輻射防護能力試驗技術研究</p> <p>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、量測技術與作業程序，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。</p> <p>三、輻射應用劑量評估與檢校技術研究</p> <p>針對新穎及迫切輻射應用科技研究，為提升輻射曝露管制作業之效能，研究可追溯國際之量測技術與品保；參考放射醫療品保國際劑量稽核運作模式，以實測方式研擬放射診療劑量校驗技術與品保作業程序；粒子治療射束品質評估。因應粒子治療與高能中子所衍生之新的輻防需求，研究中子偵檢器(區域監測</p>

	<p>器、劑量計等)校正技術。</p> <p>四、人員生物劑量染色體變異評估技術研究</p> <p>為協助建立輻射意外曝露應變作業程序及法規，本計畫將持續推動人員生物劑量評估技術之研發，藉由維持國家級輻射生物劑量實驗室，並透過建立國人生物樣本，將有助於重建輻射意外事故中受影響人員之輻射曝露。</p>
<p>計畫效益與 重大突破</p>	<p>一、核設施除役輻射防護管制技術研究</p> <p>(一) 參考國際相關文獻或規範，修訂除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則，以確保除役後廠址環境輻射對民眾之劑量能符合法規限值要求。</p> <p>(二) 針對『核電廠 PRM 警報值設定』及『核設施例行運轉環境試樣調查基準』進行研究，檢視目前設定值之設定依據、評估模式所使用劑量標準、曝露情節及參數之合適性，確保核設施例行運轉預警機制能發揮正常功能，保障民眾及環境之輻射安全。</p> <p>(三) 完成菇類及濾紙環境核種分析儀器校正用參考物質製備，並依據 ISO Guide34、35 之技術需求，完成樣品均勻度測試及添加核種之不確定度評估，確保量測環境試樣加馬核種活度之準確性及可追溯性。</p> <p>(四) 舉辦除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練，藉由課程說明及實際程式操作訓練，以了解程式運作原理及建立除役廠址核種外釋活度推導審查技術，進而完備主管機關於核設施除役輻射防護之管制能力。</p> <p>二、輻射防護能力試驗技術研究</p> <p>依據原子能委員會 106 年 12 月的統計數據，國內醫用可發生游離輻射設備約有 1 萬 8 千餘台，非醫用可發生游離輻射設備約為 7 千餘台，輻射從業人員（申請佩章人數）已達 5 萬 2 千餘人，涵蓋核設施、工業、醫院、研究機構等領域，本計畫精進執行實驗室認證與能力試驗之設備、技術、作業程序，106 年透過人員劑量計、輻射儀器校證與肢端劑量計能力試驗相關研究，提升全國相關實驗室之技術能力與品質，以強化國內輻射防護與管制技術。</p> <p>三、輻射應用劑量評估與檢校技術研究</p> <p>依據衛生福利部 105 年統計資料顯示，國人每年放射治療</p>

	<p>約 119 萬人次，而國內質子治療與重粒子治療技術亦蓬勃發展，加以同步輻射台灣光子源和宇宙射線之高能輻射，爰此，本計畫醫療曝露設備(遠端)劑量驗證品保稽核系統，帶電粒子射質評估系統，以及高能中子輻防評估系統之研究，透過學術合作進行技術拓展，精進高能輻射射束內外劑量驗證技術，提升原子能民生應用品質，強化社會大眾之輻射安全。</p> <p>四、人員生物劑量染色體變異評估技術研究</p> <p>計畫曝露與事故曝露可能涵蓋核能設施、工業、醫院、研究機構等領域，若發生輻射意外曝露，人員生物劑量重建是必要程序，人員生物劑量評估技術仰賴長期研究，維持人員生物劑量實驗室之運作，有助於制定相關意外曝露應變作業程序及法規，提升游離輻射安全管理層次及水準。</p>			
<p>遭遇困難與因應對策</p>	<p>無遭遇困難或落後。</p>			
<p>後續精進措施</p>	<p>一、隨著我國核能一廠與二廠兩座核設施已陸續接近預定停止運轉日期，本計畫應持續參考國際規範與管制作法，配合我國國情，對於核設施預警機制設定、除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則、環境試樣放射性活度量測校正技術、人員與環境劑量評估技術，進行研究探討，以提升核設施除役之輻射監測能力與輻防管制品質。</p> <p>二、本年度已依據國際規範 ANSI 13.11(2009)最新版本，完成近三次人員劑量計能力試驗結果之規範符合性分析，初步判定各實驗室具備新版規範之技術與品質，後續將與 TAF 合作，以精進國內規範技術與國際接軌；另外，有關輻射偵檢儀器校正與全國性肢端劑量(試運轉)能力試驗研究，亦預計於 107 年完成。</p> <p>三、國內引入高能質子或粒子等的原子能應用或放射醫療設施之趨勢正蓬勃發展，特別是所誘發的高能中子與先前國內執行的中子輻射防護經驗有所不同，106 年度已建立高能中子指標之量測基礎技術，下一階段將持續精進，並據以規劃建立國內工作場所的高能中子量測技術服務。</p> <p>四、對於輻射意外事故之災防應變，持續發展人員生物劑量評估技術之應用範圍，可探討不同輻射類型與能量之生物反應，提升計畫效益。</p>			
<p>計畫連絡人</p>	<p>姓名</p>	<p>王濬儒</p>	<p>職稱</p>	<p>技士</p>
	<p>服務機關</p>	<p>行政院原子能委員會</p>		
	<p>電話</p>	<p>(02) 2232-2189</p>	<p>電子郵件</p>	<p>cjwang@aec.gov.tw</p>

【分年階段性目標達成情形與重要成果摘要表】

年度	階段性目標達成情形	重要成果摘要說明
106	<p>一、核設施除役輻射防護管制技術研究</p>	
	<p>1. 完成除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則修訂；</p> <p>2. 完成核電廠 PRM 設定點及評估模式與核設施例行運轉環境調查基準研究；</p> <p>3. 完成環境核種分析儀器校正用參考物質(菇類、濾紙)研製。</p>	<p>1. 學術成就與技術創新： 完成「核電廠預警機制設定」與「環境核種分析儀器校正用參考物質(菇類、濾紙)」報告 2 篇，對於現行預警機制設定之合理性及輻射偵檢器量測結果準確性與可追溯性，提供重要參考資訊。</p> <p>2. 合作團隊養成： 因應我國核設施除役工作之推動，建立除役輻射安全防護與劑量評估技術團隊，以確保環境與人員之輻射安全。</p> <p>3. 技術服務： 研製環境核種分析儀器校正用參考物質，供應第一線實際偵測實驗室，有可信賴校正參考源，以確保量測結果之準確性與可追溯性。</p> <p>4. 決策依據： 完成除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則修訂，可供主管機關制定相關輻防管制規定之參考，確保除役後廠址殘餘輻射對周圍環境及人員之安全。</p>
	<p>二、輻射防護能力試驗技術研究</p>	
	<p>1. 能力試驗輻射場射質品保險證技術研發，以舉辦人員劑量計能力試驗技術討論會議，進行技術交流；</p>	<p>1. 學術成就與合作團隊養成： 舉辦研討會 1 場，配合第十次人員劑量能力試驗，持續與 TAF 認可實驗室(游離輻射測試領域人員劑量計有 8 家)進行技術交流，提升</p>

<p>2. 肢端劑量計能力試驗試運轉前期研究；</p> <p>3. 輻射偵檢儀器校正能力試驗規劃研究，並舉辦技術研討會。</p>	<p>實驗室之技術與品質，強化國內整體劑量評估能力。</p> <p>2. 技術創新： 依據近三次人員劑量能力試驗數據，評估 ANSI N13.11 新國際規範的適用性，其研究與推動有助強化我國人員輻射劑量計評定單位之整體品質，提供相關工作人員劑量更加準確、高品質的計測結果。</p> <p>3. 技術服務： 研發之輻射偵檢儀器校正、人員劑量計和肢端劑量計能力試驗照射系統，可提供全國性能力試驗使用，確保第一線工作人員之輻射安全、民眾及環境之輻射安全。</p> <p>4. 決策依據： 輻防處為游離輻射領域能力試驗管制單位，最近一次人員劑量能力試驗總結報告與各實驗室偵測低限(LLD)，為關鍵性劑量評估能力指標，可供輻防管制作為與規定要求之參考。</p>
<p>三、輻射應用劑量評估與檢校技術研究</p>	
<p>1. 20 台直線加速器之放射治療劑量實地測量；</p> <p>2. 高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析研究；</p> <p>3. 建置質子射束劑量 TLD 系統。</p>	<p>1. 學術成就與合作團隊養成： 結合管制單位、研究單位(核研所)和學術單位(清華大學、陽明大學等)，完成國際期刊刊登 3 篇、會議論文 2 篇，立基於社會期待與新穎科研，進行原子能應用之研發與技術擴展。</p> <p>2. 技術創新：</p> <p>(1) 完成醫用加速器之放射治療電子劑量驗證稽核作業、臨床量測數據分析比較及統整歷年結果，精進國家級遠端郵校系統。(備註：累計電子 20 台、6 MV 光子 20 台、</p>

		<p>10 MV 光子 18 台)</p> <p>(2) 完成高能中子指標量測程序與長庚醫院 235 MeV 質子治療加速器輻防劑量修正的實際案例分析，建立傳統緩速型偵檢器校正因子之能譜修正評估，降低高能中子劑量低估的疑慮，可望減少過往必須送到國外校正的不便。</p> <p>(3) 完成質子射束劑量 TLD 系統設置，建構理論模型，藉由理論計算與實驗測量結果進行比較分析，確認執行新興質子治療器官等價劑量與輻射防護評估之系統可行性，提升劑量評估準確性與作為輻防管制之參考。</p>
<p>四、人員生物劑量染色體變異評估技術研究</p>		
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 與國內東部醫學中心合作，取得人血樣本進行分析研究； 2. 輔導建立南部衛星實驗室； 3. 通過 ISO 17025 認證年度查訪，精進實驗室品質； 4. 參與國際合作與分析，提升量測公信力。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 學術成就與合作團隊養成： 完成會議論文 2 篇、舉辦研討會 1 場、完成 ISO17025 東部醫學中心(花蓮慈濟)國人血樣背景分析及輔導南部衛星實驗室(高醫)建立。 2. 品質精進： 維持全國認證基金會 (TAF) 之專業實驗室認證。透過參與國際比對，亦可提高我國能見度。 3. 技術服務： 完成國內首例臨時性急性曝露分析任務。可確保發生輻射意外事故時人員曝露劑量之重建能力，防患於未然。 4. 資料庫擴充： 增加年度生物劑量反應曲線，藉此擴充國人生物劑量反應資料

		庫。
--	--	----

註：106 年度具體成果請參閱第一部分之肆的量化指標說明，佐證資料請參閱附錄 A。

【106 年度績效自評意見暨回復說明(D007)】

計畫名稱：

績效自評審查委員：

序號	審查意見	回復說明
壹、計畫實際執行與原計畫目標符合程度(自評評分：___) 9-10 分：超越計畫原訂目標，且已就所遭遇困難提出有效之因應對策。 8 分：達成計畫原訂目標，且已就遭遇困難提出可行之因應對策。 7 分：大致達成原訂目標，且就遭遇困難所提因應對策尚屬可行。 1-6 分：執行內容與原規劃未符，或未達成原訂目標，或仍須對所遭遇困難提出更有效可行之因應對策。		
1-1		
1-2		
1-3		
貳、計畫經費及人力運用之妥適度(自評評分：___) 9-10 分：與原規劃一致。 7-8 分：與原規劃大致相符，差異處經機關說明後可以接受。 1-6 分：與原規劃不盡相符，且計畫經費、人力與工作無法匹配。		
2-1		
2-2		
2-3		
參、計畫主要成就及成果(重大突破)之價值、貢獻度及滿意度(自評評分：___) 9-10 分：所達成量化指標或質化效益超越原計畫預期效益。 8 分：所達成量化指標及質化效益與原計畫預期效益相符 7 分：大致達成原計畫預期效益。 1-6 分：未達成計畫原計畫預期效益。		
3-1		
3-2		
3-3		
肆、跨部會協調或與相關計畫之配合程度(自評評分：___) 10 分：認同機關所提計畫執行無須跨部會協調，且不須與其他計畫配合。 9-10 分：跨部會協調或與相關計畫之配合情形良好。 7-8 分：跨部會協調或與相關計畫之配合情形尚屬良好。		

1-6 分：跨部會協調或與相關計畫之配合情形仍待加強。		
4-1		
4-2		
4-3		
伍、後續工作構想及重點之妥適度(自評評分：) 9-10 分：後續工作構想良好；屆期計畫成果之後續推廣措施良好。 7-8 分：後續工作構想尚屬良好；屆期計畫之後續推廣措施尚屬良好。 1-6 分：後續工作構想有待加強；未規劃適當之屆期計畫後續推廣措施。		
5-1		
5-2		
5-3		
陸、總體績效評量暨綜合意見 (自評評分：) 10:極優 9:優 8:良 7:可 6:尚可 5:普通 4:略差 3:差 2:極差 1:劣		
6-1		
6-2		
6-3		

第一部分

註：第一部分及第二部分（不含佐證資料）合計頁數建議以不超過 200 頁為原則，相關有助審查之詳細資料宜以附件方式呈現。

壹、目標與架構

一、目標與效益

(一) 目標

原子能委員會(簡稱本會)是全國輻射安全的主管機關，輻射防護管制的核心業務是以專業及合理的管制措施，確保人員及環境之輻射安全。本計畫整體考量目前政府政策與社會期待，雙主軸定位於「核設施除役」及「輻射防護」劑量評估驗證技術研究，目的為：1. 核能電廠除役啟動之際，建立輻安審查及管制作業所需之評估程式及實際參數，與研擬相關管制作業參考導則或規範建議；2. 持續精進游離輻射能力試驗、輻射應用檢校技術，研究國內外劑量評估、稽核與驗證方法，研擬相關規範，並透過人員生物劑量評估專業實驗室技術和維運，精進國內災防應變能力，以提升輻射防護管制作業之品質及效能，進而增進民眾對原子能應用輻射防護之信心。

本計畫共有 4 個主要項目，其執行目標分述如下：

1. 核設施除役輻射防護管制技術研究

為增進核設施除役輻射量測之準確度與公信力，完善管制核設施除役之輻射安全，本計畫致力於研究核設施除役預警機制、建置輻射偵測儀器校正系統與研發環境試樣參考物質、研究發展檢校追溯體系與量測程序，且為落實輻防管制措施，研訂輻防視察作業程序，並配合除役廠址特性參數分析，建立生物體輻射劑量評估技術。

2. 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，研究並建置能力試驗所需之執行設備、劑量追溯系統、量測技術與作業程序，並透過實驗室認證

同步舉辦分析能力試驗及辦理技術研討會，強化教育訓練與技術交流。

3. 輻射應用劑量評估與檢校技術研究

本項目致力於輻射應用新穎與急迫性議題研究。與學研醫療單位及國內放射物理專家合作，參考國際醫療曝露品保稽核運作模式，如：美國放射物理中心(Radiological Physics Center, RPC)，此新興國際發展趨勢為利用游離腔、被動式輻射劑量計與設計適合之郵寄假體裝置，實測於國內現有放射診療設施，建立國內放射診療劑量遠端之量測、驗證與評估技術，探討放射物理中心之建立與相關品保校驗技術與程序，亦能協助主管機關提升管制作業之效能。

針對高能加速器周圍之輻射場量測而言，其設施屏蔽外之滲漏輻射可能包含能量廣泛之中子、帶電強子、光子、電子與 μ 介子，因此其滲漏輻射的偵測作業乃是一項複雜且困難的任務。以質子加速器類型而言，通常加速器誘發中子為造成設施屏蔽外滲漏輻射的最大來源成分，因此，針對質子加速器工作場所與屏蔽設施外之環境輻射偵測，主要著重於利用主動、被動式偵檢器進行中子劑量監測。無論採用何種量測方法，均須於事前進行相關偵檢設備的性能測試與校正，以期該偵檢器之量測結果具有一定程度之可信度，提供具有可追溯性且具公信力之準確中子劑量量測結果。然而，國內目前所提供之中子校正服務，僅可採用平均能量為 2 MeV 之 Cf-252 自發分裂中子源；以及在 Cf-252 射源外以直徑 30 公分重水球(D_2O) 包覆，藉此軟化其能譜至平均能量 510 keV 之 Cf-252+ D_2O 能譜。經由前述射源校正後之中子偵檢器，應用於國內目前發展的高能粒子加速器所誘發之中子輻射場時，其準確程度則有待更進一步的確認與驗證。本計畫藉由與學研醫療單位合作，精進高能粒子加速器誘發中子之量測與模擬技術，並因應利用 Cf-252 放射性核種校正之儀器於高能中子場可能造成的劑量低估情形，提出適當的解決方案，

以滿足國內醫療院所、主管機關對於高能中子場之輻射防護與管制需求。

對於國內蓬勃發展之粒子治療，以質子放射治療而言，質子照野內因質子與物質作用，會產生二次輻射，包含中子、阿伐粒子、光子、電子等，這些粒子所造成的生物效應不盡相同，然而目前臨床上就照野範圍內的相對生物效應（relative biological effect, RBE）均設固定值 1.1，隨著微劑量學（microdosimetry）與輻射生物學的發展，臨床所使用平均 RBE 已不足夠，實際上 RBE 會隨著深度、組織組成等因素而改變，故了解混合輻射場下的直線衰減係數（linear energy transfer, LET）之實際分布將變得日益重要。對於重粒子治療而言，需要積極了解治療區域內的 LET 分布，以推估至相對應的 RBE 範圍，並適合於更精緻的治療計畫與劑量計算，此外，也可應用到治療區域以外的 LET 分佈，以精進輻射防護，進而更清楚輻射的真正效益。目前評估微劑量學的方法是採用充填組織等效氣體的比例計數器（tissue equivalent proportional counter, TEPC）來測量線能分佈，然而該劑量計不適用於評估輻射照野內之人體內的線能變化。本工作項目目標於發展射束品質評估的固態偵檢系統，包括熱發光劑量計（Thermoluminescent Dosimeters, TLD）系統等系統，用以評估質子放射治療下混合輻射場的劑量與射束品質，射束品質的評估包括平均線能或平均直線能量轉移。透過學術合作建立輻射場平均線能量測系統，除可得知特定輻射場之相對輻射生物效應，有助於提升整體放射治療品質外，可進而評估照野外的射質因數（Q），據此計算輻射防護等效劑量，精進質子治療與輻射防護劑量評估技術。

相關研究以提升國家及國內游離輻射量測標準，落實原子能科技於社會民生福祉與環境永續發展，堅實智慧生活科技與產業為目標。

4. 人員生物劑量染色體變異評估技術研究

生物劑量是最趨近於受曝露者真實接受到的劑量。目前生物體內作為生物劑量計最常使用的方法為染色體變異分析，即藉由分析染色體變異的程度及數量來反應所接受的劑量。細胞染色體對於輻射非常的敏感，目前應用最廣泛的，即是抽取人體周邊循環血液中的淋巴球來作分析。淋巴球分析有幾個優點：(1)人體組織中以淋巴球對於輻射最為敏感，淋巴球隨血液做全身循環，血液中的淋巴球，有 99.9%是處於細胞週期中的 G₀ 期，對輻射敏感度是一致的；(2)淋巴細胞較其他細胞易於取得，只需簡單的抽血、分離及培養技術，就可得到足夠的細胞以供分析檢查。染色體變異頻率與劑量的關係有二次線性的關係，人體淋巴球細胞經過 Co-60 照射後分析其雙中節及環形變異頻率，關係呈現線性平方的關係。在劑量低於 1 Gy 時，通常以單一次碰撞事件為主；至於劑量高於 1 Gy 時，隨著價電子數目增多，將使得變異事件快速增加，其速率通常以二次方上升，因此染色體雙中節評估技術為本計畫最基本需建立之技術。

世界衛生組織(WHO)建立的全球的生物劑量支援網路 (framework for a global biodosimetry network–BioDoseNet) ，即是以細胞學的生物劑量技術 (cytogenetic)之雙中節不穩定變異分析作為主體發展。以雙中節、環形等不穩定變異推算劑量時，通常使用於急性曝露的情況，且最好是曝露後越早分析愈好，以免受到細胞死亡更新或其它因素的干擾。根據國際原子能總署(IAEA)及美國衛生與人類服務部(The United States Department of Health and Human Services)更指出雙中節染色體分析適用於急性、短期數個月內發生之事件評估。ISO 19238 更依據 IAEA 及國際目前研發狀況訂定了相關作業程序供標準實驗室遵行。

計畫執行單位(核研所)自 100 年起重建生物劑量研發能力後，更於 102-105 年接續之前的研發能力，短期目標以提升生物劑量實驗室能力為主，中期目標為建立專業生物劑量實驗室硬體，長期目

標為提升實驗室品質，申請實驗室認證，建立具公信力之專業實驗室。策略上，透過與國內醫學中心合作，提供人體合法血液樣本，並透過合作關係共同分析數據，以比對國內不同實驗室分析能力。另外，於核研所建置符合國際人員生物劑量實驗室硬體與國內衛福部規範之第二級生物安全實驗室，以進行臨床檢體操作，來達成國際 ISO 人員生物劑量實驗室之安全標準。今年並配合政府政策，成立生物安全相關委員會，建立相關作業程序與應變計畫書。此外，本計畫持續與加拿大衛生部 Dr. Ruth Wilkins 及日本的 BioDoseNet 委員 Dr. Mitsuaki Yoshida 密切聯繫，就相關技術進行國際實驗室分析能力比對及專業討論，藉此提升我國研發人員之技術能力。藉由生物劑量實驗室軟硬體不斷提升，並累積國人分析數據，進而朝亞洲參考實驗室努力。

- a. 在人員生物劑量評估技術方面，目前世界上公認的黃金標準是以染色體雙中節分析法來評估人員所接收到的輻射劑量，本計畫執行單位核能研究所已重建生物劑量實驗室以及人員生物劑量評估基本技術，本計畫將延續先前的基礎，繼續朝國家級生物劑量實驗室目標推展。
- b. 本計畫將完善已取得之 ISO 認證之精進試驗，並加入國際生物劑量支援網路，藉此服務同區域的國家，使相關技術能力與國際接軌。

(二) 效益

本計畫依四個主要工作，分述執行成效如下：

1. 核設施除役輻射防護管制技術研究

我國核能一廠與二廠分別於 1978 年和 1981 年開始商轉，兩核設施已陸續接近預定停止運轉日期。本計畫參考國際規範，並對於核設施除役預警機制、場址最終狀態輻射偵檢審查技術、環境試樣放射性活度分析技術、人員與環境劑量評估技術，進行深入之研究

探討，為提供核設施除役輻防管制作業之參考依據，並建立輻射偵測儀器校正系統與環境試樣參考物質，建構完整的儀器檢校追溯體系與量測技術程序，且為落實輻防管制措施，於除役計畫規劃階段將針對輻防視察與除污作業和意外事件案例進行研究，確保核設施除役作業之工作人員個人劑量符合法規限值、集體劑量符合劑量合理抑低之目標，並配合除役之廠址特性環境物質及相關參數分析，建立除役廠址關聯之人員與生物體輻射劑量評估技術，以提升核設施除役之輻射監測能力與輻防管制品質。

2. 輻射防護能力試驗技術研究

為提升輻射偵測與防護能力，本計畫將參考國際規範、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，研究並建置能力試驗所需之執行設備、劑量追溯系統、量測技術與作業程序，並透過實驗室認證同步舉辦分析能力試驗及辦理技術研討會，強化教育訓練與技術交流。

建立認證實驗室能力試驗執行之設備、系統、技術、作業程序，持續之能力試驗研究可提升全國實驗室之技術與品質，保障服務對象，含：可發生游離輻射設備醫用類約 1 萬 8 千餘台、非醫用類約 7 千餘台；輻射從業人員申請佩章 5 萬 2 千餘人（原能會 106 年 12 月統計資料）等。

3. 輻射應用劑量評估與檢校技術研究

由於放射醫學之進步，接受放射線診療之民眾與日俱增，依衛生福利部之統計資料顯示，國人接受放射診療之人次統計如下：105 年接受乳房 X 光攝影篩檢約 79.4 萬人次，進行電腦斷層掃描檢查人次約 219 萬、接受放射治療約 119 萬人次。整體而言，本計畫之放

射診療設備進行(遠端)醫療曝露品保稽核與劑量驗證研究，為國際新穎之遠端劑量稽核技術，可比較醫院間劑量輸出，以有效人力確保接受放射診療民眾之醫療曝露品質。目前藉由學術合作執行放射治療郵校系統實測分析，透過累計電子 20 台、6 MV 光子 20 台、10 MV 光子 18 台驗證系統可行性，亦可提供作為未來精進稽核作業之重要參考，與透過本計畫協助國內建立放射物理中心之相關校驗技術。

高能中子場進行中子偵檢儀器、人員劑量徽章等量測時，如僅利用國家標準實驗室 Cf-252 標準射源之校正結果，可能會有量測結果低估的情形，因此需要建立一快速且具準確度高之評估方式。本計畫建立之評估方法可應用於能量分布由 keV 等級的核反應器圍阻體外部中子能譜延伸至接近 10 GeV 之高能中子場，目前透過學術合作與實測精進方法之可行性，完成中子偵檢器能譜修正因子與校正射源以及偵檢器類型的關聯性評估，並建立質子治療設施中子區域監測器校正自動化程式，可快速且正確地輸出能譜修正因子，以建立技術服務能量。

因應國內質子治療與重粒子治療等新放射治療設施之發展，需要進行審慎的品保措施及射束劑量驗證。本計畫發展可同時量測吸收劑量與直線能量轉移射質的熱發光劑量計等系統，以應用於臨床質子治療評估輻射照野內之相對輻射生物效應與輻射照野外之射質因子，透過學術合作進行實測研究，以提升質子治療之醫療曝露品質與精進輻射防護管制於劑量評估之技術。

4. 人員生物劑量染色體變異評估技術研究

國內約有輻射工作人員 5 萬 2 千餘人，涵蓋核能設施、工業、醫院、研究機構等各類領域，如發生輻射意外曝露事件，劑量重建是必要程序。人員劑量評估除採用物理劑量計外，建立生物劑量評估為事故發生後必須採取的措施，藉此可確認人員接受之劑量，採取必要的醫療照護行動。國外先進核能應用國家均已建立人員生物劑量評

估技術與建置國家級生物劑量實驗室，我國亦有必要建立相關之技術與設備。

本計畫係建立我國生物劑量研發能力後，短期目標以提升人員生物劑量實驗室能力，中期目標為建立專業人員生物劑量實驗室硬體，長期目標則為提升人員生物劑量實驗室品質，並申請人員生物劑量實驗室認證，建立具公信力之專業實驗室。預期成效上，可透過與國內醫學中心合作，獲得人類血液檢體合法提供，並利用獲得的血液檢體，經由不同劑量之鈷-60 照射，培養全血細胞、製作染色體玻片、分析雙中節染色體，以建立人員生物劑量標準曲線；並將收集正常人染色體雙中節分析，作為本土國人背景值資料庫，以了解在一般環境下，正常國人的染色體雙中節發生率。另外將持續參與國際能力比對，確定實驗室分析人員之能力，對於我國朝向國際化之生物劑量分析實驗室將有加倍加分之效應。最後，人員生物劑量實驗室目前已為國內前瞻創新實驗室，並已取得 ISO17025 測試實驗室認證，預期未來可提供更可信數據給國人參考。

二、架構

細部計畫		子項計畫		主持人	共同主持人	執行機關	計畫原訂目標	計畫效益與目標達成情形
名稱	預算數/ (決算數) (千元)	名稱	預算數/ (決算數) (千元)					
核設施除役與輻射防護劑量評估驗證技術研究	11,548/ (11,514)	1.核設施除役輻射防護管制技術研究 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 4.人員生物劑量染色體變異評估技術研究	11,548/ (11,514)	林怡君	張剛璋	核能研究所	1.建立完整的儀器檢校追溯體系與環境試樣參考物質製備能力序，並針對輻防視察準則進行研究，以增進核設施除役輻射量測之準確度與公信力。	1.1 參考國際相關文獻或規範，修訂除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則，以確保除役後廠址環境輻射對民眾之劑量能符合法規限值要求。 1.2 針對『核電廠 PRM 警報值設定』及『核設施例行運轉環境試樣調查基準』進行研究，檢視目前設定值之設定依據、評估模式所使用劑量標準、曝露情節及參數之合適性，提供主管機關於民眾及環境之輻射安全專業建議。 1.3. 完成菇類及濾紙環境核種分析儀器校正用參考物質製備，並依據 ISO Guide34、35 之技術需求，完成樣品均勻度測試及添加核種之不確定度評估，確保量測環境試樣加馬核種活度之準確性及可追溯性。 1.4. 舉辦除役廠址輻射安全及殘餘

							輻射劑量評估教育訓練，藉由課程說明及實際程式操作訓練，以了解程式運作原理及建立除役廠址核種外釋活度推導審查技術，進而完備核設施除役輻射防護之管制能力。
						2.透過持續的能力試驗研究，建置評估系統與能力，以了解與精進國內實驗室於人員劑量、肢端劑量和輻射儀器校正技術水平，由上而下確保輻射防護體系之完整。	<p>2.1. 精進人員劑量計測能力試驗，舉辦研討會，並依據 ANSI N13.11 完成國內 8 家實驗室之總結評估研究，及評估新國際規範的適用性，作為人員劑量評估實驗室劑量校正追溯之管制應用，保障國內約 5 萬名輻射從業人員輻射防護安全。</p> <p>2.2. 提升輻射偵檢儀器校正能力試驗技術，完成輻射偵檢儀器校正能力試驗規劃及各項表單研擬，舉辦研討會，作為國內 5 家實驗室劑量校正追溯之管制應用，確保國內約 7 千餘台非醫用可發生游離輻射設備、1 萬 8 千餘台醫用可發生游離輻射設備及各輻射作業場所之輻射作業品質和環境輻射安全。</p> <p>2.3. 參考肢端劑量計能力試驗 ANSI N13.32 國際最新標準及 105 年完成之認證規範草案初稿，執行肢</p>

							端劑量計能力試驗前期研究，完成肢端劑量能力試驗全國性試運轉計畫書，精進人員劑量評估實驗室劑量校正追溯之管制應用。
						3.完成醫療曝露之(遠端)品保稽核研究、高能中子儀器校驗與劑量驗證，質子/重粒子治療射質評估技術，以保障病患放射診療品質、輻射從業人員和一般民眾之輻射安全。	<p>3.1. 完成醫用加速器之放射治療電子劑量驗證稽核作業、臨床量測數據分析比較及統整歷年結果，精進國家遠端郵校系統。</p> <p>3.2. 完成高能中子指標量測程序與長庚醫院 235 MeV 質子治療加速器劑量低估修正的實際案例分析，建立用於校正傳統緩速型偵檢器的偵檢器能譜修正因子，降低以往高能中子劑量低估的疑慮，減少必須送到國外校正的不便。</p> <p>3.3. 完成質子射束劑量 TLD 系統設置，建構理論模型，藉由理論計算與實驗測量結果進行比較分析，確認直線能量轉移評估可行性，可用以新興質子治療等價劑量與輻射防護之評估，提升劑量評估準確性與作為輻射防護之重要參考。</p>

						<p>4.建立染色體雙中節評估技術及重建劑量反應曲線，成立國家級中心及地區衛星實驗室，提供輻射意外和民眾需求的人員生物劑量服務。</p>	<p>4.1. 三例國人背景值分析與反應曲線分析工作：完成 106 年度國人背景值與反應曲線分析，以擴充我國生物劑量背景值與劑量反應資料，俾利精進歷年研究成果之代表性。</p> <p>4.2. ISO17025 年度查訪工作：通過 ISO17025 實驗室年度查訪與認證審查並取得證書，達成本年度實驗室認證目標，並藉此確保人員生物劑量實驗室之品質及技術水準。</p> <p>4.3. 完成臨時性急性曝露分析任務：針對醫院人員意外接受輻射曝露現象，啟動急性曝露處理流程，並於 15 日內完成檢體製備、影像分析與報告撰寫等程序，順利回覆該人員劑量。</p> <p>4.4. 南部衛星實驗室分析技術與 IRB 申請：完成國內醫院研究倫理審查委員會(IRB)申請，建立南部醫療院所採集血液樣本標準作業流程，以提供本計畫合法的血液來源，藉此維持人員生物劑量實驗室正常運作。</p>
--	--	--	--	--	--	--	---

三、實際達成與原預期目標之差異說明

本計畫之執行成果均符合或提前原規劃之進度達成，且量化產出超越原目標。

貳、主要內容

一、執行內容

本研究計畫按專業領域分成 4 項主要工作，依主要工作分述工作項目和執行內容如下(研究成果之圖表請參閱 B. 主要工作研究內容佐證資料)：

(一) 核設施除役輻射防護管制技術研究

1. 除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則修訂

依據「核子反應器設施管制法」第 28 條規定，核子反應器設施除役計畫執行完成後六個月內，經營者應檢附除役後之廠址環境輻射偵測報告；此外，「核子反應器設施管制法施行細則」第 20 條中亦規定除役後之廠址環境輻射偵測報告應具備之內容。因此，為利審查該報告，本會前已擬訂除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則草案，惟因應「除役後廠址環境輻射偵測報告」之架構調整，故特依據國際相關文獻或規範(美國 MARSSIM 手冊及美國核管會 NUREG-1757 報告等)，據以修訂除役後廠址環境輻射偵測報告導則草案(如附錄二、圖 B.1.1 所示)，以確保除役後廠址環境輻射造成民眾之劑量符合法規限值要求，有效確保環境、民眾與工作人員之輻射安全。

2. 除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練

有關核子反應器設施除役後廠址之輻射影響，依據核子反應器設施管制法施行細則第十七條規定，針對非限制性使用的場址，其對一般人之年有效等效劑量不得超過 0.25 毫西弗，對於限制性使用的場址，對一般人之年有效等效劑量則不得超過 1 毫西弗，但在輻射偵測實務上，常以核種活度作為操作量，並經由考量關鍵群體之曝露情節與曝露途徑，推導關鍵群體所接受之輻射劑量，藉此判定其輻射影響是否符合法規標準，綜言之，除役場址核種外釋活度推導(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)為判定

核子反應器設施除役後廠址之輻射影響是否符合法規限值的關鍵技術。

本計畫已於 106 年 5 月完成除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練，課程中主要介紹 2 個由美國阿岡國家實驗室 (Argonne National Laboratory, ANL) 所開發除役廠址殘餘輻射劑量評估程式 (RESRAD-ONSITE 及 RESRAD-OFFSITE)，內容包含程式輸出、輸入介面介紹、劑量評估方法論、Mass Balance 與 Non-Dispersive Model 及估算 Kd 替代方法等，藉由課程說明及實際程式操作訓練，以了解程式運作原理及建立除役場址核種外釋活度推導審查技術 (如附錄二、圖 A.8 所示)。

其中關於除役場址核種外釋活度推導審查技術，則包含我國 (核子反應器設施管制法) 及美國 (10 CFR 20 Subpart E) 除役場址釋出再利用劑量限值規定、及美國核管會 NUREG-1757 第二卷報告中，所介紹關鍵核種及曝露情節選定方法、並參考 NUREG/CR-5512、NUREG/CR-6755 與 NUREG/CR-6697 等報告，了解輸入參數之類型與特性，以及美國阿岡國家實驗室 ANL/EVS/TM-14/4 報告 (Data Collection Handbook) 所介紹輸入參數蒐集方法等內容進行介紹，進而精進核設施除役輻射防護管制能力。

3. 核電廠 PRM 設定點及評估模式研究

為了評估排放物的放射性含量，核能電廠會在排放口以取樣分析與即時線上監測等方式進行監控，其中針對氣體排放之即時線上監測，電廠均設有流程輻射監測器 (process radiation monitor, PRM)，期能即時掌握排放情形，此外，為了對異常排放情形適時採取調查措施，避免民眾受到重大輻射影響，PRM 設有警報值，藉此供設施經營者及主管機關適時採取預警措施。綜言之，PRM 警報值適當與否，對於預警措施的執行時機與成效具有關鍵性的影響。為瞭解現行核電廠 PRM 警報值之設定是否適當，本計畫研究其設定依據，即藉由瞭解其參考技術文件相關內容 (參見附錄二、

圖 B.1.2 為佐證資料之一)，並檢視其評估模式所使用的劑量目標、曝露情節、曝露途徑及相關參數，評估現行 PRM 警報值之設定之適切性。

4. 核設施例行運轉環境調查基準之研究

我國現行「環境輻射監測規範」（民國 98 年修正版）的調查基準係綜合考量一般人年劑量限值、曝露情節、曝露途徑等因素，並參考國外相關法規而訂定。由於時空變遷，核設施排放對一般人造成影響的輻射曝露情節與途徑漸有異動，因此有必要通盤考量，針對現行核設施例行運轉環境之調查基準進行檢討。

經蒐集相關文獻後發現，我國所制定的調查基準主要是參考美國核能管制委員會 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) NUREG-0473 報告內容所訂定，其中牛奶試樣因兩國人民飲食習慣不同，而略有修改。然而我國現行環境試樣放射性分析調查基準分析項目，比美國 NUREG-0473 報告所列項目要多出許多，主要為早期國內輻射防護領域專家學者開會討論之決議(如附錄二、表 B.1.1 所示)，關於我國現行調查基準之訂定依據，如所引用劑量限值、曝露情節與曝露途徑等因素、及與美國制定數值之差異，將持續進行資料蒐集及研析，以通盤了解現行核設施例行運轉環境試樣分析調查基準設定之依據。

5. 研製環境核種分析儀器校正用參考物質(菇類、濾紙)

財團法人全國認證基金會(TAF)，目前開放環境試樣放射性核種分析測試實驗室申請認證的測試項目，共計有：土壤、水樣、植物樣、肉樣、空浮濾紙樣、牛乳樣、米樣、菇類、人工尿樣及人工糞樣等十種環境試樣，本年度則針對菇類與濾紙樣環境試樣參考物質製備進行研發，並依據 ISO GUIDE 34、35 之技術需求，完成參考物質均勻度測試與添加核種不確定度評估(如附錄二、表

B.1.3 至 B.1.5 所示)。

評估本次菇類參考物質配製結果，各配製核種之不確定度(k=1)分別為⁶⁰Co：3.91%、¹³⁴Cs：3.76%、¹³⁷Cs：3.80%、⁸⁵Sr：3.42%、⁹⁰Sr：2.51%；濾紙樣參考物質配製結果，各配製核種之不確定度(k=1)分別為⁶⁰Co：1.62%、¹³⁴Cs：2.29%、¹³⁷Cs：1.84%、⁸⁵Sr：3.04%、⁹⁰Sr：3.08%，表示核研所在配製台灣地區菇類、濾紙樣參考物質能力與國際上販售之參考物質一致，足以提供作為國內各實驗室之標準參考試樣。

(二) 輻射防護能力試驗技術研究

1. 能力試驗輻射場射質品保驗證，並舉辦人員劑量計能力試驗技術討論會議，進行技術交流。

配合人員劑量計能力試驗之執行(執行實驗室組織架構如附錄二、圖 B.2.1)，依據測試領域人員劑量計能力試驗技術規範(TAF-CNLA-T08)，進行能力試驗之照射系統性能測試與品保驗證技術研究，延續上年度工作項目，完成三批次照射作業研究，並分析數據，評估各實驗室能力表現，完成總結評估研究報告，舉辦人員劑量計能力試驗總結研討會，進行技術與品質交流和經驗回饋。本年度將近三次人員劑量計能力試驗結果，分別以 ANSI N13.11 之 2001 年和 2009 版國際規範進行分析，以評估最新規範於我國執行之可行性。

國內市場現況本次通過八組實驗室-徽章，受測徽章廠牌不同視為不同組，其名稱分別為(依開頭筆劃排列)：台灣電力公司放射試驗室(劑量計測組)- RADOS、台灣電力公司放射試驗室(劑量計計測組及核二工作隊)- Panasonic、台灣電力公司放射試驗室核三工作隊- HARSHAW、行政院原子能委員會核能研究所人員體外劑量評估實驗室、貝克西弗股份有限公司、財團法人中華民國

輻射防護協會、財團法人國家同步輻射研究中心、和國立清華大學原科中心人員劑量實驗室。受測佩章廠牌/型號(數量、市占百分比率)分布為：OSLD (1 組、12.5%)、Panasonic/UD802A & UD809 (2 組、25%)、HARSHAW/8814 & 8806 (4 組、50%)、RADOS (1 組、12.5%)。本次照射輻射劑量低限值：光子為 0.55 mSv；貝他粒子為 4.59 mSv；中子為 1.51 mSv，其低限值皆符合規範範圍。關於實驗室之偵測低限(lower limit of detection, LLD)值(如附錄二、圖 B.2.2.所示)，也配合主管機關管制需求，新增於能力試驗測試報告，以供查驗。

實驗室對規範的符合度分析上，目的為與國際同步之可行性評估，著眼於國內現況分析與量能精進。將 2016 年八組、2013 年九組與 2010 年八組人員劑量計實驗室數據，以國際發展之新(ANSI N13.11-2009)與現行(ANSI N13.11-2001)版本進行分析(請參閱附錄二、圖 B.2.6.至圖 B.2.7.)。發現均可通過 ANSI N13.11-2009 版本人員劑量計能力試驗，可供國內規範進行更新之參考。

於今年 5 月 25 日舉辦之 2017 人員劑量能力試驗研討會暨 2017 輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會(包含肢端劑量計與輻射偵檢儀器校正能力試驗)，共計有 18 個單位 67 人參與。於「第十次人員劑量計能力試驗總結評估」議程中公告結果(請參閱附錄二、圖 B.2.3.至圖 B.2.5.)，實地與會專家學者進行了技術討論與學術交流，增進實驗室技術與品質之提升。

2. 肢端劑量計能力試驗試運轉前期研究

依據 ANSI 國際規範推行國內實驗室之肢端劑量計能力試驗試運轉，前期研究為建構技術規範所需輻射場，規劃試運轉之執行，分析參與實驗室與研究能力評估程序和方法(請參閱附錄二、表 B.2.1.的佐證資料)，並開始批次照射。

肢端劑量計能力試驗試運轉前期研究是依據 ANSI/HPS. N13.32-2008 Performance testing of extremity dosimeters 國際規範

進行，共有四種照射類別(劑量範圍/規範允差值)分別為：(I)高劑量光子(0.1~5 Gy / 0.24)、(II)光子(1.0~100mSv / 0.35)、(III)貝他(2.5~100mSv / 0.35)與(IV)貝他與光子混和場(3.5~100mSv / 0.35)。規範中所使用的假體分為兩種，(1)柱狀假體 (pillar phantom)：代表下手臂或小腿，以測試手腕或腳踝劑量計，壓克力(PMMA)製成之固體正圓柱體，直徑至少為 73 mm，長度至少為 300 mm；(2)棒狀假體 (rod phantom)：代表手指，以測試指環或手部劑量計。壓克力(PMMA)製成之固體正圓柱體，直徑至少為 19 mm，長度至少為 300 mm。

肢端劑量計能力試驗僅以允差值評定公式標準評定其結果，評定的允差值高劑量光子 I 測試類別為 0.24，光子和貝他 II~IV 測試類別為 0.35，較 ANSI N13.11(2009)新版人員劑量計能力試驗之光子和貝他 II~IV 測試類別為 0.30 稍高。除人員劑量計與指環劑量計能力試驗規範的比較外，本次特別採盲樣/非盲樣兩階段測試架構，即以兩階段數據回報方式，可以實測結果進行國際規範於本國之可行性評估。

3. 輻射偵檢儀器校正能力試驗規劃研究，並舉辦技術研討會。

依據校正領域輻射偵測儀器校正技術規範(TAF-CNLA-T06(2))，進行能力試驗不同類別的傳遞儀器及校正系統之性能測試，進行國內實驗室之輻射劑量偵測儀器、放射活度 α/β 污染偵測儀器及人員劑量計等傳遞儀器之能力試驗射質品保測試。藉以提升我國輻射偵檢器校正的能力水平(請參閱附錄二、表 B.2.2.統整歷年國內輻射儀器校正實驗室與其提供輻射場強度的佐證資料)。

於 5 月 25 日舉辦 2017 人員劑量能力試驗研討會暨 2017 輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會(包含人員劑量計與肢端劑量計能力試驗)，於「第七次輻射偵檢儀器校正能力試驗」與「第三次陸軍核生化訓練中心儀器校正比對說明」議程中說明依據

TAF-CNLA-R05(5)- 2014/08/26 規範辦理，參與測試的機構有：輻射偵測中心、清華大學、台電放射試驗室、台電放射試驗室核三工作隊、核能研究所，共 5 家實驗室。

輻射偵檢儀器校正能力試驗是以傳遞儀器標準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 N42.17A (2003)輻射防護級輕便型儀器之性能規範，設定儀器讀值的準確度需於 $\pm 15\%$ 以內，長期穩定度需於 10%以內。規劃整個輻射偵檢儀器校正能力試驗的工作項目包含：(1) 傳遞儀器檢查；(2) 量測輻射偵檢儀器校正因子；(3) 量測污染偵檢儀器儀器效率；(4) 量測人員劑量計校正因子；(5) 量測游離腔校正因子(試運作)；(6) 量測擴充不確定度 (U)。最後會依據 ISO 43-1 規範以商數 E_n 值判斷輻射偵檢儀器校正能力試驗的測試結果。

(三) 輻射應用劑量評估與校正檢校技術研究

1. 與學術單位、醫療機構或相關學會合作，進行加速器之放射治療電子劑量驗證稽核作業，並完成量測數據之分析比較

本研究團隊為陽明大學、中華民國醫學物理學會、行政院原子能委員會、核能研究所等共同進行研發，利用自行研發自製多功能性輻射測量郵校假體，搭配選用之偵檢器(熱發光劑量計、玻璃劑量計及輻射變色軟片等)，進行醫用直線加速器電子射束輸出劑量的測量，建立修正劑量轉換系統，並藉由此計畫，分析探討國內醫院使用電子射束放射治療之(遠端)劑量驗證稽核作業；協助建立國內放射治療在電子輻射劑量輸出有不同醫院間相互比對及討論的機制，同時進行劑量稽核驗證郵校系統測試，一方面透過實測確認可行性，一方面藉此提升放射治療電子劑量輸出的準確性，本年度統整近年研究成果，提供主管機關作為推動國內放射治療設備醫療曝露品保作業之參考。

成效說明：

- a. 自製多功能性輻射測量郵校假體，精進國家級遠端郵校系統，完成稽核假體臨床測試；
- b. 進行臨床放射治療電子射束劑量驗證，完成臨床量測數據之分析比較及統整歷年光子與電子射束結果；
- c. 完成國際期刊 1 篇 (Dosimetric comparison of different treatment modalities for stereotactic radiotherapy, Radiation Oncology (2017) 12:155)；
- d. 舉辦一場教育訓練課程，討論近年研究成果與臨床輻射量測技術；
- e. 完成累計 20 台放射治療直線加速器之電子射束劑量實地測量及臨床測試研究報告。(請參閱附錄二、圖 B.3.1.至圖 B.3.2.的佐證資料)

本研究延續自製多功能性輻射測量郵校假體系統之研發，為一系列郵校劑量驗證系統的基礎，透過自製假體的設計搭配多種劑量計，建立國內醫院放射治療劑量驗證稽核系統雛型。由歷年光子與電子劑量輸出驗證之臨床量測結果，測試自行設計之自製多功能性輻射測量郵校假體系統，可有效應用於國內放射治療設備，作為輻射測量郵校稽核使用。放射治療中的劑量稽核驗證是評估醫院間醫療曝露品質之有利方法。國際間透過放射治療郵校驗證系統，以解決地幅廣大、人力資源分配不均之問題，國內則可透過自製假體進行統一的量測方式與劑量驗證程序，做為臨床醫療單位間劑量輸出之可比性，節省繁複的品質保證程序。國內則應綜合考量輻防管制應用效能以進行下一步規劃。無論如何，其臨床量測數據之分析比較，可提供輻防管制參考。

2. 與學術單位、醫療機構或相關學會合作，高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析

為了彌補傳統緩速型中子偵檢器量測高能中子輻射場之劑量低估的問題，針對國內高能粒子加速器，包含：新竹同步輻射臺灣光子源之 3 GeV 電子加速器、林口長庚醫院質子治療中心之 230 MeV 質子加速器，以及未來台大癌醫、高雄長庚醫院、中國醫藥大學附設醫院、彰化基督教醫院、台北醫學大學附設醫院、高雄醫學大學附設醫院等質子治療機(104 年 11 月衛福部公告核准設立之醫療機構)，臺北榮總和中國附醫重粒子(可能為高達~400 MeV 之碳離子)癌症治療加速器等設備，所產生之污染中子攸關國人之健康與輻射安全，本計畫需具備前瞻性創新技術，進行輻射劑量相關研究評估與驗證。

與清華大學合作，並參考 IAEA-TRS-403 報告中超過 200 種的工作場所中子能譜，開發自動化程式，建立用來表示能譜特性的高能中子指標，並比較利用 Cf-252 射源校正之偵檢器響應函數所計算出來的劑量，以及直接利用通率劑量轉換係數得到的劑量，建立用於校正傳統緩速型偵檢器的偵檢器能譜修正因子。建立高能中子能譜指標與劑量低估修正之研究，藉由林口長庚醫院質子治療機實際案例分析，驗證該量測系統之有效性，以利未來核能研究所推廣高能中子技術服務，提升中子校正技術水準。(請參閱附錄二、圖 B.3.3.至圖 B.3.6.的佐證資料)

成效說明：

- a. 精進自動化分析程式：持續改進自動化分析程式的功能與可靠性，快速有系統地探討可能影響修正的因素；
- b. 彙整能譜修正因子的影響分析：進行各種不同型式中子偵檢器對應的能譜修正因子的比較研究；
- c. 高能中子劑量低估的修正指引：針對 INER Cf-252 中子校正場的設備，探討傳統型式中子偵檢器在高能輻射場的劑量低估問題，建立高能中子劑量低估修正的參考規範；
- d. 實際案例能譜計算與修正分析：以長庚質子治療加速器為例，實際計算有興趣位置的中子能譜，以高能中子指標決定劑量

修正因子，測試檢驗這套修正辦法的有效性，以利未來本所推廣技術服務；

- e. 完成高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析研究報告；
- f. 完成國際會議論文(含口頭論文)共計 2 篇(Dose Underestimation and Correction Factors for Conventional Neutron Dose Meters Used in High-Energy Neutron Environments, 9th International Workshop on Radiation Safety of Synchrotron Radiation Sources, 和 Shielding Analysis of a Carbon-ion Therapy Accelerator: A Comparison between Simplified and Monte Carlo Calculations, 13th International Topical Meeting on the Nuclear Applications of Accelerators)。

經由本研究靈敏度分析發現，能譜修正因子屬於中子輻射場的特性參數，與所用的中子偵檢器之廠牌或性質、不同尺寸的緩速型中子劑量計和不同的中子校正射源沒有明顯關係。針對傳統緩速型中子劑量計在高能中子輻射場下，容易有劑量低估問題，雖然國外已提出些許改善方案，但多針對特定的中子偵檢器或是特定的設施環境，並無完整有系統地分析，本研究提供一種簡單且有效的中子能譜修正因子的概念，用來修正劑量低估問題，其成果驗證了延伸能量型的中子劑量計可以改善傳統緩速型中子劑量計的問題，正確反應高能中子的劑量貢獻。當延伸能量型的中子劑量計時，於高能中子輻射場之劑量修正非常重要，研究成果顯示修正前後數值高達數倍之多。於林口長庚醫院質子治療機實際案例分析中，能譜修正因子與理論計算相符，唯 FLUKA 計算程式仍有精進空間，如模型建立與射源描述均是未來可以改善與值得深入探討部分。

建立用於校正傳統緩速型偵檢器的偵檢器能譜修正因子，降低以往高能中子劑量低估的疑慮，減少必須送到國外校正的不便，並將本研究成果提供國內醫療院所、加速器設施及校正

實驗室參考，可精進國內中子校正技術服務，為高能中子劑量評估之技術帶來實務進展。

3. 與學術單位、醫療機構或相關學會合作，建置質子射束劑量 TLD 系統，含設備設置、理論發展和劑量計校正

質子治療與傳統放射治療的光子電子射束相較，射束射質具有特殊性，需要評估直線能量轉移(linear energy transfer, LET)，才能更準確地決定照野內的生物劑量與照野外器官的等價劑量。目前規劃的研究包括使用蒙地卡羅計算與實際測量系統的建立。

建立直線能量轉移評估系統，首先需要建置控溫程度良好的 TLD 加溫/控溫系統，當讀出輝光曲線時需有輝光曲線分析程式，利用理論模型分析各能峰的分量，計算特定能峰下的分量比值，以評估平均直線能量轉移。在 LET 評估部分，使用長庚質子中心第二治療室擾動式射束，能量為 190MeV：分別使用單個布拉格峰和擴展的布拉格峰(SOBP)所形成的射束，TLD-100 放置在 100%百分深度劑量(PDD)深度中，隨後所得到的輝光曲線與鈷六十照射所得到的輝光曲線，計算出高溫比值(225-300°C)，再對應出 LET，達到測量射束 LET 之目的。其次，需用合適的粒子遷移計算程式進行理論計算，以評估質子射束在不同物質深度下之初始質子的能量、與被誘發生成二次粒子的產率與能量，進而計算平均直線能量轉移。最後，將理論計算與實驗測量結果進行比較分析，建立可同時量測吸收劑量與平均直線能量轉移的劑量計系統，可評估質子治療之劑量與平均直線能量轉移，進而了解人員之相對輻射生物效應與風險，未來可推廣應用至病人安全與環境輻射安全評估之相關應用。(請參閱附錄二、圖 B.3.7.至圖 B.3.9.的佐證資料)

成效說明：

- a. 完成質子治療劑量 TLD 系統設置；
- b. 建構理論模型、粒子遷移的直線能量轉移計算；
- c. 藉由理論計算與實驗測量結果進行比較分析，確認直線能量轉移評估系統的可行性，以執行新興質子治療人體器官等價劑量與輻射防護之評估，提升劑量評估準確性與作為輻射防護之重要參考。
- d. 完成國際期刊 2 篇 (Secondary neutron ambient dose equivalent measurement of the wobbling system of a proton beam radiotherapy facility, Radiation Physics and Chemistry 137(2017) 116-120，和 Monte Carlo simulations for angular and spatial distributions in therapeutic energy proton beams, Radiation Physics and Chemistry 140(2017) 217-224)，內容分別為：質子治療二次中子周圍等效劑量量測，和治療級質子射束角度與能量依存劑量分布模擬。
- e. 完成建置質子射束劑量 TLD 系統研究報告。

直線能量轉移系統研究，對應國內新興質子/重粒子等高能設施之射質評估。惟質子射束照射上，受限於醫用質子射束時間，造成質子照射相關驗證實驗較為有限，期間雖積極溝通與爭取，仍受限醫用質子射束時間，在有限的時間中，目前已完成初步量測評估，並將理論計算與實驗測量結果進行比較分析，確認了本套 TLD 直線 能量轉移評估系統的可行性。

(四) 人員生物劑量染色體變異評估技術研究

1. 與國內東部醫學中心合作，取得人血樣本進行國人背景分析研究

在國際標準組織(ISO) ISO19238:2014 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。

106 年度生物劑量染色體變異實驗室持續增加 3 例正常國人背景染色體雙中節分析，一共分析 3,144 個細胞，發現僅有一個雙中節變異性。合計本實驗室共分析國人背景值 19,412 個細胞，發現 16 個雙中節(dicentric)變異性於 15 顆細胞中，目前資料庫國人背景雙中節發生率為 0.82‰，即是 1000 顆細胞中有 0.82 個雙中節發生率，近似國際文獻。

106 年度，本實驗室持續針對國人標準曲線進行研究分析工作。於 5 月 8 日與花蓮慈濟醫院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 0.25、0.5、1、2、3、4、5Gy。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，分析計算出當年度之反應曲線($Yield = 0.0011 (+/- 0.0011) + 0.0616 (+/- 0.0130) * D + 0.0569 (+/- 0.0054) * D^2$)。

本實驗室於 101 至 106 年度陸續完成了五條人員生物劑量反應曲線，並經由統計方式合併成一條人員生物劑量標準曲線($Yield = 0.0011 (+/- 0.0010) + 0.0583 (+/- 0.0084) * D + 0.0676 (+/- 0.0025) * D^2$)，利用增加樣本數所得到的生物劑量評估準確性、可信度及精確度，計畫於 107 年度將持續執行人員生物劑量反應曲線工作，並依照參考文獻將雙中節變異性之最低劑量添增至 0.1Gy，使未來在使用雙中節分析時可精準至 0.1Gy。

本年度完成國內首例緊急曝露分析工作，證明本技術於實務上具有可用性。

2. 輔導建立南部衛星實驗室

人員生物劑量評估技術係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。有鑒於此，本計畫預計以核研所為中心實驗室，於國內數個區域建立衛星實驗室，藉由訓練該醫療院所同仁具備整體血樣採集過程標準文件化，提升國內血樣採集量能。

本計畫於3月29日分別向義大癌治療醫院院長張肇松醫師(核子醫學科主任陳○墉醫師、林○佳藥師)和高雄醫學大學醫學影像暨放射科學系謝○茹副教授討論南部衛星實驗室，將擇一成為本計畫之南部衛星實驗室。因高雄醫學大學附設醫院為臺灣三級輻傷處置與輻傷責任醫院，且謝○茹副教授曾參與輻射鋼筋屋染色體變異性分析研究工作，考量過往經驗，故選擇高醫為南部衛星實驗室合作對象；於5月19日由本計畫技術組負責人林○琪小姐辦理高雄醫學大學教育訓練，並協助判別雙中節變異性方法建立，謝副教授將協助申請其院內人體試驗委員會(IRB)之送審，以利後續南部血樣採集標準化流程；於12月15日通過IRB審查，俾於107年取得染色體樣品以執行相關分析作業。

3. 完成人員生物劑量實驗室 ISO17025 認證年度查訪工作，精進實驗室品質

103年度起實驗室人員接受ISO17025法規相關訓練，於104年度依據TAF規定提出ISO17025認證申請，並於105年TAF實地評鑑後獲得實驗室能力認證，完成實驗室認證目標。今年度實驗室由於試驗主管變更與年度查核機制緣故，計畫於5月初即委請輔導廠商給予ISO17025相關教育訓練(異動申請及監督評鑑輔導、監督評鑑輔導、ISO17025規範介紹、ISO17025內部稽核實務、量測不確定度與ISO17025外部稽核)，並藉由5月初緊急協助主管機關處理急性曝露事件，(請參閱附錄二、圖B.4.的佐證資料)作為本年度TAF稽核文件資料，並申請TAF派員查

訪。

TAF 於 7 月 6 日完成年度稽核工作(認證編號:3201),稽核結果一個 b 類缺失(冰箱溫度與二氧化碳校正期間內中間查核機制),已於 8 月 16 日完成並回覆,並於 8 月 23 日接獲認證核決通過。於 12 月 26 日執行 ISO17025 內部管理審查會議,除針對本年度 ISO17025 審查過程檢討改進外,也由內部技術組和品管組持續修正相關 SOP,並確立 107 年度品質政策和實驗室目標。

針對品保部分,本年度另也通過 ISO9001 金屬中心稽查作業與 ISO9001 核能研究所所內稽查工作,並獲得客戶滿意度調查表 100 分的肯定。

4. 參與國際合作與分析,完成人員生物劑量實驗室資料比對

人員生物劑量實驗室已於 103-104、104-105 年度參與由加拿大衛生部 Dr. Wilkins 教授所舉辦的國際比對,並順利完成,106-107 年度除了持續參與加拿大衛生部之國際比對研究外,並已與法國核輻射防護研究所(IRSN)洽談國際比對實驗合作,對於我國朝向國際化之生物劑量分析實驗室將有加倍加分之效應。

人員生物劑量實驗室已於 103-104、104-105 年度參與由加拿大衛生部 Dr. Wilkins 教授所舉辦的國際比對,並順利完成,106 年度由於加拿大主辦方延後國際比對,並訂於 107 年初執行,並仍同意我國參與,106 年度已完成計畫內系統前置準備和驗證工作,將於明年年初實際進行國際比對工作。明年度計畫執行上,除了持續參與加拿大衛生部之國際比對研究外,並已與法國核輻射防護研究所(IRSN)洽談國際比對實驗合作,對於我國朝向國際化之生物劑量分析實驗室將有加倍加分之效應。

二、 遭遇困難與因應對策

類別	說明	因應措施與建議
執行困難	<p>本年度第一分項之「核設施例行運轉環境調查基準之研究」，係為探究我國現行「環境輻射監測規範」之環境試樣放射性分析預警措施之制定依據，經蒐集相關文獻後發現，我國所制定的調查基準主要是參考 1979 年美國核能管制委員會 NUREG-0473 報告內容所訂定，然而我國現行環境試樣放射性分析調查基準分析項目，比美國 NUREG-0473 報告所列項目要多出許多，數值上也略有差異，其中多為早期國內專家討論會議之決議，然相關會議紀錄已不可考就，因此在了解早期制定該預警措施之設定依據及方法上，有一定程度之困難。</p>	<p>本計畫以美國阿岡國家實驗室所開發 RESRAD-ONSITE 劑量評估程式，評估當嚥入或吸入與紀錄基準或調查基準相當活度之物質時，所相對應接受之輻射劑量，以了解現行設定基準之適切性。</p>
執行困難	<p>第二分項「輻射防護能力試驗技術研究」之人員劑量計能力試驗工作，於新國際規範引進上之困境為：以主管機關立場，施政目標為接軌國際，爰引最新的國際規範【ANSI N13.11 (2009)人員劑量計能力試驗技術規範】據以推動，但對於各個人員劑量評估實驗室而言，考量規範變更之不便，且新規範允差限值較為嚴苛，當然希望沿用舊有規範。</p>	<p>積極透過辦理人員劑量計測能力試驗精進研討會進行雙向溝通，除瞭解目前各實驗室的技術能力，並依據新規範進行國內 8 家實驗室之新規範適用性評估研究。結果顯示，各人員劑量評估實驗室技術能力均能符合新規範，有助推動後續相關作業，接軌國際管制趨勢。</p>

<p>執行困難</p>	<p>第三分項關注急迫性與新穎性輻射應用議題，同時也是社會大眾最為關注之焦點，有關質子/粒子治療等高能中子輻防量測或治療級質子射質評估，需於實際放射醫學中心的大型尖端設施進行測定，牽涉醫院管理問題，不易實行。</p>	<p>持續與醫院方積極溝通，並透過第一線的醫學物理師協助，了解醫院管理模式；輔以蒙地卡羅計算技術，以協助設計實驗流程與建置量測系統，利用假日或非病患治療空檔，有效率完成現場量測工作。</p> <p>建議未來透過管制審查作業，了解設施實際階段，如能於臨床治療前階段等進行量測，時間充裕更能精進整體研究品質。</p>
<p>執行落後</p>	<p>無</p>	<p>-</p>

三、實際執行與原規劃差異說明

本計畫之執行均符合原規劃之進度與目標。

1. 核設施除役輻射防護管制技術研究

工作項目	計畫書查核點	執行成果	差異分析
1. 除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則修訂	完成核設施除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則草案修訂。	依據修訂後核設施除役後廠址環境輻射偵測報告導則，完成核設施除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則草案修訂。	符合進度
2. 除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練	完成除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練及產生訓練教材 1 份。	舉行除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練，並完成訓練教材 1 份。	提前或符合進度
3. 核電廠 PRM 設定點及評估模式研究	完成核電廠預警機制設定研究報告。	完成國際文獻研析及核電廠預警機制設定研究報告。	符合進度
4. 核設施例行運轉環境調查基準之研究			
5. 研製環境核種分析儀器校正用參考物質(菇類、濾紙)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 完成配製樣品之標準活度量測追溯。 2. 完成環境核種分析儀器校正用參考物質(菇類、濾紙)技術報告。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 完成可追溯至國家游離輻射標準實驗室之加馬射源(^{60}Co、^{134}Cs、^{137}Cs、^{85}Sr)與貝他射源(^{90}Sr)配製及不確定度評估。 2. 完成菇類與濾紙樣環境試樣參考物質之製備，並依據 ISO GUIDE 34、35 之技術需求，完 	提前或符合進度

		成參考物質均勻度測試與添加核種不確定度評估。完成環境核種分析儀器校正用參考物質(菇類、濾紙)技術報告。	
--	--	---	--

2. 核設施除役輻射防護管制技術研究

工作項目	計畫書查核點	執行成果	差異分析
1. 能力試驗 輻射場射 質品保驗 證技術研 發,以舉辦 人員劑量 計能力試 驗技術討 論會議,進 行技術交 流	1. 完成三批次人員劑量計能力試驗之照射作業並進行評估。 2. 舉辦能力試驗技術研討會。 3. 完成輻射偵測、劑量評估或能力試驗認證技術報告 1 篇。	1. 持續射質品保、數據收集與經驗回饋,以完成三批次人員劑量計能力試驗之照射作業並開始相關評估研究。(於 3/20 完成) 2. 完成數據處理與評估報告,舉辦 2017 人員劑量能力試驗研討會暨 2017 輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會,共計有 18 個單位 67 人參與。會中分析人員劑量計能力試驗實驗室現況、近年數據於 ANSI N13.11 新規範適用度與討論相關技術,進行技術交流。(於 5/25 完成) 3. 完成第十次人員體外劑量評估實驗室能力試驗之總結報告。(於 9/30 完成)	提前 或符 合進 度
2. 肢端劑量 計能力試 驗試運轉 前期研究	執行肢端劑量計能力試驗照射系統之品保驗證。	於 5/25 舉辦 2017 人員劑量能力試驗研討會暨 2017 輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會中,討論肢端劑量計能力試驗試運轉研究。 本次能力試驗試運轉有 5 家實驗室 8 組劑量計參與,已完成於 7 月開始之品保驗證程序之執	符合 進度

		行，同時，於 9/6 完成 2017 肢端劑量計能力試驗試運轉執行計畫書。(於 9/30 完成) 完成 2017 肢端劑量計能力試驗試運轉執行計畫書。	
3. 輻射偵檢儀器校正能力試驗規劃研究，並舉辦技術研討會	執行輻射偵檢儀器校正能力試驗相關性能測試與品保驗證。	於 5/25 舉辦 2017 人員劑量能力試驗研討會暨 2017 輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會中，討論輻射偵檢儀器校正能力試驗規劃研究。 本次能力試驗預計有 5 家實驗室參與，並特別將陸軍核生化訓練中心的軍規輻射偵測儀器列為能力試驗比對儀器。已於例行校正作業間隔，進行輻射偵檢儀器校正能力試驗相關性能測試與品保驗證。(於 9/30 完成)	符合進度

3. 輻射應用劑量評估與檢校技術研究

工作項目	計畫書查核點	執行成果	差異分析
1. 與學研單位、醫療機構或相關學會合作，進行加速器之放射治療電子劑量驗證稽核作業，並完成量測數據之分析比較	1. 與國內學研機構或學會洽談，討論合作機制與預期成果。 2. 完成 10 組臨床直線加速器放射治療電子射束劑量驗證之分析比較。 3. 完成 20 台直線加速器之放射治療劑量實地測量及臨床測試研究	1. 與國內學研單位或醫療機構進行放射治療電子劑量驗證研究工作之討論。(於 3/31 完成) 2. 利用自製假體與 TLD 等偵檢器之郵校系統，完成 10 組臨床直線加速器放射治療電子射束劑量驗證之分析比較，差異小於 5%。(於 9/30 完成) 3. 完成國內醫院使用電子射束之放射治療劑量驗證稽核作業研究報告 1 篇，為醫用加速器之放射治療電子劑量驗證稽核作業、臨床量測數據分析比較及	提前或符合進度

	<p>報告。</p> <p>4. 完成研究成果投稿(國際/國內)會議論文與期刊。</p>	<p>統整歷年結果，精進國家遠端郵校系統。(備註：累計電子 20 台、6 MV 光子 20 台、10 MV 光子 18 台) (於 12/15 完成)</p> <p>4. 完成國際期刊刊登 1 篇，內容為：TLD 等劑量評估於立體放射治療法的差異比較。</p>	
<p>2. 與學研單位、醫療機構或相關學會合作，發展高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析技術</p>	<p>1. 與國內學研機構或學會洽談，討論合作機制與預期成果。</p> <p>2. 完成建立高能中子劑量低估的修正指引。</p> <p>3. 完成高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析研究報</p> <p>4. 完成研究成果投稿(國際/國內)會議論文與期刊。</p>	<p>1. 與國內學研單位或醫療機構進行高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析研究工作之討論。(於 3/31 完成)</p> <p>2. 針對 INER Cf-252 中子校正場的設備，針對傳統型式中子偵檢器在高能輻射場的劑量低估問題，彙整研究經驗與建議，建立高能中子劑量低估修正的參考規範。(於 9/30 完成)</p> <p>3. 完成高能中子指標量測程序劑量低估修正的實際案例分報告 1 篇，為高能中子指標量測程序與長庚醫院 235 MeV 質子治療加速器劑量低估修正的實際案例分析，建立用於校正傳統緩速型偵檢器的偵檢器能譜修正因子，降低以往高能中子劑量低估的疑慮，減少必須送到國外校正的不便。(於 12/12 完成)</p> <p>4. 完成國際會議論文 2 篇，內容為：高能中子環境之傳統中子劑量計修正、和粒子治療加速器屏蔽蒙地卡羅計算。</p>	<p>提前或符合進度</p>

<p>3. 與學研單位、醫療機構或相關學會合作，研發建置質子射束劑量 TLD 系統，含設備設置、理論發展和劑量計校正</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 與國內學研機構或學會洽談，討論合作機制與預期成果。 2. 完成建立直線能量轉移評估系統的理論模型。 3. 完成建置質子射束劑量 TLD 系統研究報告 4. 完成研究成果投稿(國際/國內)會議論文與期刊。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 與國內學研單位或醫療機構進行建置質子射束品質測系統研究工作之討論。(於 3/31 完成) 2. 針對直線能量轉移評估系統之建立進行相關資料收集探討，並完成熱發光劑量計的計讀系統設置，進行初步測量與數據分析，以及建構直線能量轉移評估系統的理論模型、開始著手進行粒子遷移的直線能量轉移計算。(於 9/30 完成) 3. 完成直線能量轉移評估系統之建立報告 1 篇，為質子射束劑量 TLD 系統設置，建構理論模型，藉由理論計算與實驗測量結果進行比較分析，確認直線能量轉移評估系統的可行性，以執行新興質子治療人體器官等價劑量與輻射防護之評估，提升劑量評估準確性與作為輻射防護之重要參考。(於 12/15 完成) 4. 完成國際期刊刊登 2 篇，內容為：質子治療二次中子周圍等效劑量量測、和治療級質子射束角度與能量依存劑量分布模擬。 	<p>提前或符合進度</p>
--	---	---	----------------

4. 人員生物劑量染色體變異評估技術研究

工作項目	計畫書查核點	執行成果	差異分析
1. 國內東部醫學中心	確實取得國內東部醫學中心採取	完成取得血液樣本之規畫和準備程序，與國內東部醫學中心(花	提前進度

合作,取得人血樣本進行背景值分析研究	血樣。 執行國人背景值染色體變異性分析工作。	蓮慈濟醫院)合作,取得人血樣本進行背景值分析研究。(於 2/7 完成)	
2.輔導建立南部衛星實驗室	輔導南部衛星實驗室。	以核能研究所為中心實驗室,本年度輔導建立高雄醫學大學附設醫院為南部衛星實驗室。	符合目標
3.完成 ISO17025 認證年度查訪工作,精進實驗室品質	遵循 ISO17025 規範,完成一例相關文件建立工作,以應 TAF 年度稽核標準。 完成 ISO17025 年度查訪工作。	於 7/6 完成 TAF 年度稽核工作(認證編號:3201),稽核結果僅有一個 b 類缺失(冰箱溫度與二氧化碳校正期間內中間查核機制),並於 8/16 完成並回覆,8/23 接獲完成認證核決通過,書面通知並於 10/15 寄送至核研所。(於 8/23 完成) 另執行系統測試、品保流程等前置準備工作。包括國內首例緊急曝露分析,以及針對品保部分,完成 ISO17025 年度查訪、ISO9001 金屬中心稽查作業與 ISO9001 核研所內稽工作,並獲得客戶滿意度調查表 100 分的肯定。 完成人員生物劑量實驗室 ISO17025 及 ISO19238 整合評估報告 1 篇。	提前或符合進度

<p>4. 完成 106 年度反應曲線分析工作，並納入標準曲線中</p>	<p>完成 106 年度三例國人背景值分析工作。</p>	<p>於 5/9 執行鈷六十輻射照射，5/17 完成樣品製備(共計有 0、0.25、0.5、1、2、3、4 與 5Gy)。</p> <p>完成 106 年度國人反應曲線分析，並納入標準曲線中，以擴充我國國人染色體變異性與輻射劑量反應資料，俾利精進歷年研究成果之代表性。(於 12/4 完成)</p>	<p>提前進度</p>
<p>5. 參與加拿大衛生部 Wilkins 教授舉辦的國際比對工作</p>	<p>參與加拿大衛生部 Wilkins 教授舉辦的國際比對工作。</p>	<p>因應加拿大衛生部延期舉辦，將配合主辦單位作業時程，於 107 年執行相關前置準備與分析工作。</p> <p>完成人員生物劑量緊急曝露事件報告 1 篇。</p>	<p>符合進度</p>

參、經費與人力執行情形

一、經費執行情形

(一) 經資門經費表 (E005)

單位：千元

	106 年度					107 年度 預算數	108 年度 申請數	備註
	預算數 (a)	初編決算數			執行率 (d/a)			
		實支數 (b)	保留數 (c)	合計 (d=b+c)				
總計	11,548	11,514	0	11,514	99.71%	12,177	15,000	自 108 年度起，配合本會除役相關計畫整併，本計畫「核設施除役輻射防護管制技術研究」主要工作項目移列其他計畫項下，並因應管制需求新增「輻射防護技術規範與劑量評估精進研究」主要工作項目，並同步配合調整本中程計畫名稱為「輻射防護管制規範與度量技術研究」。
一、經常門小計	7,248	7,227	0	7,227	99.72%	8,177	10,000	
(1)人事費	0	0	0	0	N/A	0	0	
(2)材料費	1,365	1,776	0	1,776	130.41%	1,650	2,250	
(3)其他經常支出	5,883	5,451	0	5,451	92.66%	6,527	7,750	
二、資本門小計	4,300	4,287	0	4,287	99.69%	4,000	5,000	
(1)土地建築	0	0	0	0	N/A	0	0	
(2)儀器設備	4,300	4,287	0	4,287	99.69%	4,000	5,000	
(3)其他資本支出	0	0	0	0	N/A	0	0	

(二) 經費支用說明

人事費：原子能委員會核能研究所屬公務機構，因此人事費用由核能研究所公務預算自行編列，本計畫無須編列人事費用；

業務費：依實際計畫執行需求用於實驗用試樣與耗材(放射性分析、生物檢體處理等)、檢體採集與分析等勞務案、專支人力、學術合作、實驗室認證與教育訓練費用、維修費、管理費等；

設備費：依實際計畫執行需求新增或汰換之設備，本年度用於自動染色體掃描顯微鏡進出玻片設備(2,400千元)、細胞組織染色機(250千元)，為人員生物劑量研究所需，輻射劑量量測設備—可攜式石墨卡熱里計(1,636.6千元)，為高能輻射場劑量量測所需。

(三) 經費實際支用與原規劃差異說明

經費實際支用情形符合原訂規劃，皆為實際計畫執行所需，經常門支用狀況為 99.71%，資本門支用狀況為 99.69%，總經費支用狀況高達 99.71%。

二、計畫人力運用情形

(一) 計畫人力結構 (E004)

計畫名稱	執行情形	106 年度							107 年度 總人力 (預算數)	108 年度 總人力 (申請數)
		研究員 級	副研究員 級	助理研究員 級	助理級	技術 人員	其他	總人力 (人年)		
核設施除役與 輻射防護劑量 評估驗證技術 研究	原訂	0	2.3	2.3	1.3	1.1	1.0	8.0	8.5	9.5
	實際	0	2.3	2.3	1.3	1.1	1.0	8.0	N/A	N/A
	差異	0	0	0	0	0	0	0	N/A	N/A

備註 1：中程計畫原名稱為「核設施除役與輻射防護劑量評估驗證技術研究」，自 108 年度起調整為「輻射防護管制規範與度量技術研究」。

備註 2：中程計畫有 4 個主要項目，其中「核設施除役輻射防護管制技術研究」自 108 年度起調整為「精進輻射防護技術規範與劑量評估研究」。

(二) 人力實際進用與原規劃差異說明

本計畫人力進用實際與規畫無差異。

肆、已獲得之主要成果與重大突破(含量化 output) (E003)

屬性	績效指標類別	績效指標項目		106 年度		效益說明 (每項以 500 字為限)	重大突破
				原訂目標值	實際達成值		
學術成就 (科技基礎研究)	A.論文	期刊論文	國內(篇)	3	0	本計畫於 106 年共產出 7 篇論文，其中共計刊登 3 篇 SCI 國際期刊。 將計畫執行成果撰寫成論文發表，可提升計畫執行者之學術地位，並貢獻研發社群有關我國輻射安全與品質管制成效、輻射量測技術、劑量評估管制能力等經驗之累積，為相關技術發展重要參考與引用之依據。	
			國外(篇)		3		
		研討會論文	國內(篇)		1		
			國外(篇)		3		
		專書論文	國內(篇)		0		
			國外(篇)		0		
	B.合作團隊(計畫)養成	機構內跨領域合作團隊(計畫)數	4	1	作之推行，強化輻射安全與輻射醫療品質。於建立除役之輻射安全防護與劑量評估，提升輻射安全和醫療品質研究中建立本土化之研究團隊，並輔導國內南部完成衛星實驗室之建立工作。以確保環境、人員與國內民眾之輻射安全。於計畫建立 4 個專業合作團隊： 1.核設施除役輻射防護管制技術研究團隊； 2.輻射防護能力試驗技術研究團隊； 3.輻射應用劑量評估與檢校技術研究團隊； 4.人員生物劑量染色體變異評估研究團隊。		
		跨機構合作團隊(計畫)數		3			
		跨國合作團隊(計畫)數		0			
		形成實驗室數	0	1			

學術成就 (科技基礎研究)	C. 培育及延攬人才	博士培育/訓人數	1	1	本計畫培訓之碩士生之輻射防護相關基礎與應用科學之專業知能，可增加未來之投入相關輻防產業、醫療輻射與檢校技術領域之專業競爭力。
		碩士培育/訓人數		2	
		學士培育/訓人數		0	
	D1. 研究報告	研究報告篇數	4	6	1. 將研究成果撰寫成專題研究報告，以利後續政策、法規、制度的推動； 2. 技術經驗傳承，建構研發之基礎，支援主管機關從事安全管制工作。
	E. 辦理學術活動	國內學術會議、研討會、論壇次數	1	1	辦理 1 場「2017 年輻射醫療處置國際研討會」及 1 場「2017 人員劑量能力試驗研討會暨 2017 輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會」將研究成果與建議透過學術活動推廣於國內。
		國際學術會議、研討會、論壇次數	1	1	
		雙邊學術會議、研討會、論壇次數	0	0	
	F. 形成課程/教材/手冊/軟體	形成課程件數	0	0	製作訓練課程教材或手冊，可供學習者或與會人士更直接與深入了解相關領域專業知識。106 年共完成下列訓練教材或手冊： 1. 完成除役廠址殘餘輻射劑量評估訓練教材 1 份； 2. 2017 人員劑量能力試驗研討會暨 2017 輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會手冊 1 份。
		製作教材件數	1	1	
		製作手冊件數	1	1	
自由軟體授權釋出教材件數		0	0		

技術創新	H. 技術報告及檢驗方法	新技術開發或技術升級開發之技術報告篇數	2	3	建立相關專業技能能量，傳承技術關鍵資訊，提升核安輻安管制水準，建立相關專業技能並提供相關單位參考。
		新檢驗方法數	0	0	

科技技術創新)	J1.技轉與智財授權	技轉或授權件數	技術(含先期技術)移轉 <u>國內</u> 廠商或機構件數	0	1	透過本計劃與執行單位既有輻射檢校專業技術，支援 X 光機輻射劑量監測儀，為開發放射造影和透視攝影用「劑量面積乘積游離腔計讀儀」核心技術。完成 X 光機輻射劑量監測儀-克馬/劑量面積乘積儀製作技術之國內 1 家廠商技轉。
			技術(含先期技術)移轉 <u>國外</u> 廠商或機構件數		0	
			專利授權 <u>國內</u> 廠商或機構件數		0	
			專利授權 <u>國外</u> 廠商或機構件數		0	
			自由軟體授權件數		0	
			其他授權件數		0	

106 年度計畫績效指標實際達成與原訂目標差異說明：

本計畫績效指標總量化產出超越原目標。

第二部分

註：第一部分及第二部分（不含佐證資料）合計頁數建議以不超過 200 頁為原則，相關有助審查之詳細資料宜以附件方式呈現。

壹、主要成就及成果之價值與貢獻度(outcome)

(請說明計畫所達成之主要成就與成果，以及其價值與貢獻度；若綱要計畫為多年期計畫，請填寫起始年累積至今之主要成就及成果之價值與貢獻度。)

一、學術成就(科技基礎研究)

1. 本計畫於 106 年共產出 7 篇論文，其中 3 篇刊登於 SCI 國際期刊，3 篇發表於國際會議，1 篇發表於國內會議：
 - 研究論文一「Secondary neutron ambient dose equivalent measurement of the wobbling system of a proton beam radiotherapy facility」刊登 Radiation Physics and Chemistry 137(2017) 116-120 SCI 期刊(參閱附錄二、圖 A.1.)，目的是評估臺灣第一座質子設施擾動(wobbling)系統，每單位處方質子劑量(prescribed proton dose)的中子周圍等效劑量(neutron ambient dose equivalent)，即 $H^*(10)/D$ 。使用寬能域中子偵檢器(WENDI-II)於距中軸 50-225 cm 處量測 $H^*(10)$ 。較高的質子能量與較寬的擴展布拉格峰(SOBP)，導致較高的二次中子輻射貢獻； $H^*(10)/D$ 的分布長庚與其他設施(HIBMC, NCCHE, SCC, PMRC)的結果類似；
 - 研究論文二「Monte Carlo simulations for angular and spatial distributions in therapeutic energy proton beams」刊登 Radiation Physics and Chemistry 140(2017) 217-224 SCI 期刊(參閱附錄二、圖 A.2.)，利用 FLUKA、GEANT4、MCNP6 三種蒙地卡羅程式，比較臨床治療級 80、160 和 230 MeV 質子射束，於通過水靶、鋁靶以及在水假體中之散射角、深度通量分布和深度劑量分布，採用理想點射源及實際半高全寬 1.1 cm 射源進行模擬。各個蒙地卡羅程式模擬有著一致性的趨勢；角度與能量依存的劑量分布結果，可應用於小視野劑量、質子放射手術、動物質子照射等新興的臨床領域；
 - 研究論文三「Dosimetric comparison of different treatment modalities for stereotactic radiotherapy」刊登 Radiation Oncology (2017) 12:155 SCI 期刊(參閱附錄二、圖 A.3.)，使用熱發光劑量計(TLD)及劑量膠片(EBT3)進行放射治療劑量準確性的量測評估，

比較傳統直線加速器立體放射治療 (cone-based linear)，高強度模式弧形調控放射治療 (flattening filter-free volumetric modulated arc therapy)，以及螺旋刀(tomotherapy)模式之立體放射治療法(SRT) 量的差異性。TLD 及 EBT3 劑量量測結果與放射治療計畫計算值差異小於 4%。

- 研究論文四「Dose Underestimation and Correction Factors for Conventional Neutron Dose Meters Used in High-Energy Neutron Environments」和研究論文五「Shielding Analysis of a Carbon-ion Therapy Accelerator: A Comparison between Simplified and Monte Carlo Calculations」，分別發表於 9th International Workshop on Radiation Safety of Synchrotron Radiation Sources (RadSynch2017)和 13th International Topical Meeting on the Nuclear Applications of Accelerators (AccApp'17)國際會議(參閱附錄二、圖 A.4.和圖 A.5.)，內容分別為高能中子環境之傳統中子劑量計修正，和粒子治療加速器屏蔽蒙地卡羅計算；
 - 研究論文六「Current Status of Human Biological Dosimetry」和研究論文七「人員生物劑量染色體變異評估技術研究」，分別發表於 2017 年輻射醫療處置國際研討會和 2017 年第 32 屆生物醫學聯合學術年會(參閱附錄二、圖 A.6.和圖 A.7.)，內容分享人員生物劑量分析之學術研究，有助於推廣相關研究單位對於輻射與雙中節變異性的研究成果，可尋求以建立相關學術研究機制，增益於輻射相關議題的研發。
2. 本計畫於 106 年共產出 6 篇報告(參閱附錄一 KPI 佐證資料)，含括核設施除役輻射防護管制技術、劑量量測與能力試驗認證、相關的研究分析，可供國內外相關領域專業人員參考使用，並有助於後續輻射安全管制規劃。關於「核電廠預警機制設定」研究報告，內容著重於核電廠 PRM 設定與評估模式，及核設施例行運轉環境調查基準設定之研究，可供未來修訂相關管制法規之參考。
 3. 透過計畫的執行，與國家游離輻射標準實驗室、全國輻射劑量評估和輻射偵測實驗室、清華大學、陽明大學、長庚大學、花蓮慈濟醫院、高雄醫學大學附設醫院、長庚醫院、中華民國醫學物理學會等合作(參閱附錄一 KPI 佐證資料)，共建立 4 個專業合作團隊，有助於國內基礎科學的學術交流，亦能建立國內輻射安全防護相互支援的網絡。在前瞻性科學研究上：

- 與陽明大學和醫學物理學會合作，本研究延續自製多功能性輻射測量郵校假體系統之研發，為一系列郵校劑量驗證系統的基礎，透過自製假體的設計搭配多種劑量計，建立國內醫院放射治療劑量驗證稽核系統雛型，現為備援系統考量。由歷年光子與電子劑量輸出驗證之臨床量測結果，測試自行設計之自製多功能性輻射測量郵校假體系統，可有效應用於國內放射治療設備，作為輻射測量郵校稽核使用。放射治療中的劑量稽核驗證是評估醫院間醫療曝露品質之有利方法。國際間透過放射治療郵校驗證系統，以解決地幅廣大、人力資源分配不均之問題，國內則可透過自製假體進行統一的量測方式與劑量驗證程序，建立作為臨床醫療單位間劑量輸出之可比較性結果，於劑量驗證稽核重點，節省人力物力之支出。(參閱附錄二、圖 B.3.1. 和圖 B.3.2.)
- 與清華大學和長庚醫院合作，於高能中子輻防議題上，研究能譜修正因子屬於中子輻射場的特性參數，與所用的中子偵檢器之廠牌或性質、不同尺寸的緩速型中子劑量計和不同的中子校正射源沒有明顯關係。傳統緩速型中子劑量計於高能中子輻射場之劑量修正非常重要，研究成果顯示修正前後數值高達數倍之多。於林口長庚醫院質子治療機實際案例分析中，能譜修正因子與理論計算相符。(參閱附錄二、圖 B.3.3.至圖 B.3.6.)
- 與清華大學、長庚大學和長庚醫院合作，於直線能量轉移系統研究上，對應國內新興質子/重粒子等高能設施之射質評估。目前已完成初步量測評估，並將理論計算與實驗測量結果進行比較分析，確認了本套 TLD 直線能量轉移評估系統的可行性，進而了解人員之相對輻射生物效應與風險，未來可推廣應用至病人安全與環境輻射安全評估之相關應用。(參閱附錄二、圖 B.3.7.至圖 B.3.9.)
- 人員生物劑量評估技術係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。有鑒於此，本計畫預計以核研所為中心實驗室，於國內數個區域建立衛星實驗室，藉由訓練該醫療院所同仁具備整體血樣採集過程標準文件化，提升國內血樣採集量能(參閱附錄二、圖 B.4.急性曝露案例實際作為資料)。藉由執行人員生物劑量研究計畫，建立與慈濟大學分子生物暨人類遺傳學系之學術研究團隊，除有助於雙方學術交流外，亦能建立國內生物劑量相互支援網路。106 年度更積極建立南部衛星實驗室，選擇高雄醫學大學附設醫院謝○茹副教授具備輻射鋼筋屋染色體變異性分析研究之經驗，教育高醫具備初步判別雙中節變異性方法與技術的建立，並由謝副教授協助申請院內人體試驗委員會 (IRB) 之送審，以利後續南部血樣採集標準化流程。

二、技術創新(科技技術創新)

1. 針對傳統緩速型中子劑量計在高能中子輻射場下，容易有劑量低估問題以及延伸能量波那球(Extended-range Bonner Spheres)中子能譜計測系統費用昂貴、重以及不便攜帶特點，雖然國外已提出些許改善方案，但多針對特定的中子偵檢器或是特定的設施環境，並無完整有系統地分析，本研究提供一種簡單且有效的中子能譜修正因子的概念，用來修正劑量低估問題，其成果驗證了延伸能量型的中子劑量計可以改善傳統緩速型中子劑量計的問題，正確反應高能中子的劑量貢獻，有效提高量測劑量之準確度。
2. 本計畫透過既有輻射檢校專業技術，支援 X 光機輻射劑量監測儀-克馬/劑量面積乘積儀製作技術研發，為開發放射造影和透視攝影用「劑量面積乘積游離腔計讀儀」的核心技術，游離輻射計讀儀與微小電流量測裝置之數據擷取，可有效修正與還原超過上下限之訊號，而能夠更準確地判斷出雜訊分佈型態，並精確估測出實際電流，且原型機產品性有內建溫度及國家劑量面積乘積標準支持，可進而獲得更準確的游離輻射劑量，有效提升空氣游離腔量測準確度，增加產品等級，具有市場競爭力。目前已與科發基金等計畫合作，完成 1 家國內廠商(千才生醫股份有限公司)之技轉。

3. 人員生物劑量分析實驗室於 105 年獲得 TAF ISO17025 實驗室能力認證。今年度實驗室持續 ISO17025 相關教育訓練(如：異動申請及監督評鑑輔導、監督評鑑輔導、ISO17025 規範介紹、ISO17025 內部稽核實務、量測不確定度與 ISO17025 外部稽核)，並藉由 5 月初緊急急性曝露事件作為 TAF 年度稽核資料，完成查訪改善事項並獲 TAF 認證核決通過。未來將持續精進技術創新與品質保證，以成為國家級實驗室為標的。

三、經濟效益(經濟產業促進)

1. 環境核種分析儀器校正用參考物質(菇類、濾紙)之研發，可用於環境輻射防護之核種分析技術，減少購入國外參考物質所耗費之時間與費用。
2. 以高能中子指標決定劑量修正因子提供傳統波那球測量高能中子的方法能為現有設施設備之中子量測帶來方便性，更重要的是改善以往高能中子劑量低估的疑慮，減少國內業者必須送到國外校正的不便，如校正時程不易掌控、國外校正衍生相關費用，並將本研究結果提供國內醫療院所及加速器設施參考，有利於未來中子校正技術推廣服務，為高能中子劑量評估之技術帶來實務進展。
3. 使用熱發光劑量計作為郵校劑量計之郵校假體系統，證實有效應用於放射治療劑量之稽核驗證，可進行大範圍醫療曝露品質保證之稽查活動，降低人力、時間成本。
4. 經由維持人員生物劑量實驗室之運作，一旦國內發生輻射意外曝露時，將利用此公信力的專業實驗室針對人員接受劑量做為評估，除可提升國人對相關產業之瞭解，並避免不必要恐懼，更可使相關產業得以及早恢復運作，進而提升經濟效益；除此之外，可及早推估出受曝露者所接受的劑量，以便於醫生能夠作最正確的治療，將減少不必要的醫療浪費。

四、社會影響(社會福祉提升、環境保護安全)

1. 舉辦除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練，藉由透過課程說明及實際程式操作訓練，以了解相關劑量評估程式運作原理及

建立除役場址核種外釋活度推導審查技術，進而完備核設施除役輻射防護管制能力，確保核電廠除役人員及環境之輻射安全。

2. 環境試樣中加馬核種活度含量，最常使用加馬能譜分析技術來進行量測，而量測結果準確性與可追溯性，則需仰賴環境試樣參考物質來進行校正。本計畫依據 ISO GUIDE 34、35 之技術需求，完成菇類及濾紙樣參考物質均勻度測試與添加核種不確定度評估，藉以提升環境試樣加馬核種活度量測之準確性及可追溯性。
3. 本計畫執行單位核能研究所作為 TAF 指定游離輻射相關領域能力試驗的主辦機構，主辦許多類型的能力試驗，中強度放射性核種分析、環境試樣放射性核種分析、人員劑量計、肢端劑量計、污染偵檢器及輻射偵檢器等能力試驗活動，依 ISO 17043 規範要求，規劃成立能力試驗執行機構，並通過 TAF 認證，期能輔導業界提升其品保能力。
4. 本年度輻射防護能力試驗與輻射應用劑量評估與檢校技術研究，可提升國家及國內游離輻射劑量量測，應用於可發生游離輻射設備醫用類約 1 萬 8 千餘台、非醫用類約 7 千餘台；輻射從業人員申請佩章 5 萬 2 千餘人(原能會 106 年 12 月統計資料)；放射治療病患(每年接受治療人次約 119 萬)輻射安全與曝露品質之精進，落實原子能科技於社會民生福祉與永續發展，堅實智慧生活科技與產業。
5. 成立並維持符合 ISO17025 國際認證規範之測試實驗室「人員生物劑量實驗室」，從社會層面來看，其提供了社會責任，藉由此研究的進行，讓人民瞭解相關單位對於輻射防護的全面性考量，增加人民對輻射相關產業之接受度。也可使人民瞭解到政府保護民眾健康權益的決心，增加彼此的互信。

本年度完成國內首例臨時性急性曝露分析任務，可於 15 日內完成檢體製備、影像分析與報告撰寫等程序；確立國人若遭遇急性曝露之流程，可提供於國內輻射相關工作人員與其周遭人員工作環境的

保護與後續醫療照顧之依據。

五、其他效益(科技政策管理、人才培育、法規制度、國際合作、推動輔導等)

1. 研析除役後廠址環境輻射偵測相關文獻，並完成除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則草案修訂，有助於確保除役後廠址對周圍民眾與環境之輻射安全。
2. 將國際規範與輻防法規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、量測技術與作業程序，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，相關研究成果可做為提升國內實驗室量測水平之管制參考，有效保障民眾與輻射工作人員之安全。
3. 本計畫除本身技術研究發展外，亦透過各方學術合作進行技術擴展，藉以培育輻射檢校、劑量評估、醫療曝露品保、以及核設施輻防管制與輻射屏蔽及防護安全分析評估等相關人才，包括聘請研究助理、行政助理、培育人員，一方面可提供就業機會；另一方面在計畫執行過程中，達到專業知能培訓之目的，可增加未來之投入相關領域之專業競爭力。
4. 人員生物劑量於國際能力交叉比對部分，本計畫除參加加拿大衛生部 Dr. Wilkins 教授辦理之國際比對外，也與法國核輻射防護研究所 (IRSN) 洽談合作事宜 (交流議題：Join the BioDoseNet system to provide high quality evidence about INER's biodosimetry laboratory)。

貳、跨部會協調或與相關計畫之配合

本計畫關係環境試樣參考物質研製、輻射作業場所之輻射評估、輻射防護品保與偵測儀器驗證技術建立、與粒子治療設施誘發中子輻射等之量測評估技術建立、與生物劑量評估技術建立，其輻射量測與能力試驗所使用的標準射源與偵檢器，必須送至國家游離輻射標準實驗室進行校正追溯，因此需與經濟部標準檢驗局之「建立及維持國家游離輻射標準」計畫相互合作，利用標檢局計畫所建立的各項量測標準，作為參考物質、能力試驗輻射應用及生物劑量等檢測校正之源頭，依其標準值作為評定依據；此外，配合本會政策推行，新開發之輻射防護與醫療品保所需之劑量及活度校正技術，可回饋標檢局計畫，提升研發能量，達成最大的執行效益。

本計畫與科發基金計畫合作，配合透視攝影品保政策之推行，透過既有輻射檢校專業技術，支援X光機輻射劑量監測儀-克馬/劑量面積乘積儀製作技術研發，為開發放射造影和血管攝影用「劑量面積乘積游離腔計讀儀」的核心技術，優勢為內建溫度與國家劑量面積乘積標準支援，可提升空氣游離腔量測準確度，本會則可回饋醫療曝露品保研究與臨床第一線人員經驗，增加產品等級，達成具市場競爭力的目的。

人員生物劑量的評定可提供本會進行輻射劑量評估與事故分析，目前已和慈濟醫學大學與高雄醫學大學合作，項目包括協助申請人體試驗委員會(IRB)許可，也委請單位協助執行部分染色體之雙中節分析。人員生物劑量針對曝露人員之輻射劑量亦可協助提供相關資訊予衛福部，以對事故人員做出妥適的醫護照顧與後續追蹤看護。

參、檢討與展望

本計畫以支援輻射防護管制業務需求為目標，並因應核設施除役輻射劑量評估與管制研究、能力試驗技術與輻射偵檢儀器驗證、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。相關結論與建議依主要工作具體說明如下：

1. 核設施除役輻射防護管制技術研究

本計畫已依據修訂後除役後廠址環境輻射偵測報告導則，完成除役後廠址環境輻射偵測報告審查導則草案，力求除役後廠址環境輻射造成民眾之劑量符合法規限值要求，有效確保環境、民眾與工作人員之輻射安全。(請參閱附錄二、圖 B.1.1.的佐證資料)

於除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練中，已於 5 月 25 日完成除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練並產出 1 份訓練教材，藉由課程說明及實際程式操作訓練，以了解程式運作原理及建立除役場址核種外釋活度推導審查技術，進而完備核設施除役輻射防護管制能力。(請參閱附錄二、圖 A.8.的佐證資料)

於核電廠 PRM 設定點及評估模式研究中，本計畫已進行 PRM 國際趨勢之研析，參考韓國電力研究院 2004 發表之 SCI 論文，該論文提出兩種評估模式，其一係以最大劑量率限值反推；另一種係以排放濃度限值反推，新舊 PRM 評估值之數值有差到超過 2 個數量級，但由於此期刊主要為探討 PRM 評估值之方法論，故對於新舊 PRM 評估值之設定值有差到超過 2 個數量級之差異，該期刊並無說明後續核電廠之因應措施。(請參閱附錄二、圖 B.1.2.的佐證資料)

對於研析國際期刊之經驗回饋意見，本計畫提出兩點建議：

- 1.由於各外釋點的特性不一，建議採多樣化的模式來評估 PRM。
- 2.若涉及實際設定 PRM，設施經營者需要更進一步地與監管單位的溝

通協調，以確保符合適用性。

此外，經蒐集相關文獻後發現，我國所制定的環測調查基準主要是參考美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC) NUREG-0473 報告內容所訂定，然而我國現行環境試樣放射性分析調查基準，仍與美國 NUREG-0473 報告所列數值及分析項目數目有一定程度差異存在。下半年度經由蒐集相關文獻，初步完成嚥入或吸入與紀錄基準或調查基準相當活度之物質時，所相對應接受之輻射劑量，可做為未來修訂現行預警基準之參考。(請參閱附錄二、表 B.1.1.至表 B.1.2.的佐證資料)

於環境參考試樣研發方面，完成菇類及濾紙樣環境核種分析儀器校正用參考物質製備，並依據 ISO Guide34、35 之技術需求，完成樣品均勻度測試及添加核種不確定度評估。(請參閱附錄二、表 B.1.3.至表 B.1.5.的佐證資料)

2. 輻射防護能力試驗技術研究

實驗室認證與能力試驗技術建立方面，國際上已建立 ANSI N13.11 (2009)人員劑量計能力試驗技術規範與 ANSI N13.32 (2008)肢端劑量計能力試驗技術規範(請參閱附錄二、表 B.2.1 的能力試驗比較資料)，並執行肢端劑量計能力試驗之運轉測試，IAEA 亦提供 IAEA/WHO 所屬二級輻射偵檢儀器校正實驗室之實驗室間比對服務，以確認實驗室劑量校正追溯之現況。後續應依據國際最新之技術發展趨勢，更新相關之認證技術規範，持續研究國際之技術發展趨勢與引入國內市場。

人員劑量計能力試驗第十次執行時雖採用現行 TAF 規範，但數據與方法將整合新版內容進行全面分析。關於實驗室之偵測低限(LLD)值，也配合本會管制需求，新增於能力試驗測試報告，以供查驗。

本次執行第十次人員劑量計能力試驗總結會議特別提出 ANSI/HPS N13.11-2009 與 N13.11-2001 差異，包括具有不同照射類別、測試劑量計數量、輻射源，以及更嚴格的合格標準等，第十次人員劑量計能力試驗總結評估之重點摘要如下：(請參閱附錄二、圖 B.2.2.至圖 B.2.7.的佐證資料)

- 輻射場(規範範圍)照測低限值：光子 (0.55 mSv)、貝他粒子 (4.59 mSv)、中子 (1.51 mSv)，其低限值皆符合規範範圍。
- 9 間人員劑量評估實驗室，有一家需進行再測試，其餘 8 組人員劑量計實驗室都通過第十次人員劑量計能力測試；
- 將 2016 年 8 組與 2013 年 9 組人員劑量計能力試驗數據進行 ANSI N13.11-2001 與 2009 新舊版本分析，發現近兩次能力試驗資料均符合新舊版本人員劑量計能力試驗之要求。
- 實驗室之偵測低限(LLD)值，也配合本會管制需求，新增於能力試驗測試報告，以供查驗。

關於實驗室於規範符合性分析，國內測試實驗室前三次人員劑量計能力試驗數據，可全數符合 ANSI N13.11 (2009)版本，相關資料可提供進行 TAF 人員體外劑量評估實驗室能力試驗規範修訂，以作為下一次執行人員劑量計能力試驗之基礎。

肢端劑量計能力試驗研究執行上，於工作協調會臨時動議中，參考 TAF 技術委員建議，確定肢端劑量計能力試驗將採單獨執行方式，並於 106 下半年進行肢端劑量計能力試驗試運轉前期研究，107 年上半年接續後期研究。經照射系統評估、計讀測試系統校正、三批次照射、二階段數據回報、數據處理及分析，預計於 107 年 5 月舉行總結會議，7 月發布試運轉測試報告正式版。而試運轉之結果將回饋規範修訂(需時約 1 年)，規範審核核定(需時約 1 年)，而後公告與開放國內二級實驗室申請 TAF 認證。關於該試運轉研究，已於 5 月 25 日研討會中說明，現場就國際規範進行技術討論，特別是盲樣與非盲樣兩測試模式細節，預計採兩階段數據處理執行更進一步之研究。

輻射偵測儀器之偵檢準確度為民眾關注議題，尤其是輻射劑量偵測儀器、放射活度 α/β 污染偵測儀器及人員劑量計等儀器。配合 TAF 校正領域輻射偵測儀器能力試驗進行之研究，可評估國內五家實驗室校正品質，並透過交流提升技術能力，維持良好追溯性，保障民眾與工作人員之輻射安全。

3. 輻射應用劑量評估與檢校技術研究

放射治療郵校劑量驗證稽核系統已建立，採自製假體，並完成臨床光子、電子射束劑量驗證稽核作業程序研究(請參閱附錄二、圖 B.3.1.至圖 B.3.2.的佐證資料)。研究結果呈現本系統可有效快速進行輻射劑量輸出之比對；後續可進行多醫院遠端郵校實測試驗，評估放射治療技術與品質，比對國內不同醫院設備間，輻射劑量輸出之正確性與穩定性。國際上採用遠端劑量稽核由校系統，以解決地幅廣大、人力資源分配不均之問題，國內現綜合考量輻防管制應用效能，為備援系統，以因應資源短缺時的手段。

高能中子輻射場劑量修正指引已建立(請參閱附錄二、圖 B.3.3.至圖 B.3.6.的佐證資料)，實際案例分析為長庚 230 MeV 質子治療加速器，雖然模擬與實際測量結果有些許落差，但考量能譜修正因子的因素後，尚與理論計算相符。其能譜計算中，已將不同質子射束損失比例組合加以考量，未來可在模型建立與射源特性描述上加以精進，使模擬與量測更趨於一致，作為國內中子校正技術服務之精進，為高能中子劑量之輻防管制帶來實務面的進展。

直線能量轉移系統研究(請參閱附錄二、圖 B.3.7.至圖 B.3.9.的佐證資料)，對應國內新興質子/重粒子等高能設施之射質評估。惟質子射束照射上，受限於醫用質子射束時間，造成質子照射相關驗證實驗較為有限，期間雖積極溝通與爭取，仍受限醫用質子射束時間。應綜合考量實際臨床質子射束充分驗證之重要性，以於未來研究應用於質子治療人體器官等價劑量與輻射防護評估，可確實提升劑量評估準確性與作為輻射防護之重要參考。

4. 人員生物劑量染色體變異評估技術研究

此計畫源自於臺灣 3 座核能電廠運轉，且工業、醫院及研究機構等各類領域亦有許多從事輻射相關工作人員，為避免一般民眾及輻射相關從業人員對於輻射引發健康之不必要疑慮。俾備意外事故發生時，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。(請參閱附錄二、圖 B.4.的佐證資料)

人員生物劑量實驗室除已建置 ISO17025 分析實驗室資格外，更添增大量檢體(80 片)自動送樣擷取影像機組，以面對國內之任何輻射緊急曝露事件，未來仍有多項工作需要執行，如：國人各區域背景值與反應曲線、染色體雙中節分析自動化建立、低劑量輻射效應的分析能力與面臨現今醫療環境變化之質子射源反應曲線建立，均為本計畫之未來推動展望。

附錄一、KPI 佐證資料表

【A 論文表】

題 名	第一作者	發表年(西元年)	文獻類別
Secondary neutron ambient dose equivalent measurement of the wobbling system of a proton beam radiotherapy facility, Radiation Physics and Chemistry 137(2017) 116-120	Y.L. Liao	2017	D
Monte Carlo simulations for angular and spatial distributions in therapeutic energy proton beams, Radiation Physics and Chemistry 140(2017) 217-224	Y.C. Lin	2017	D
Dosimetric comparison of different treatment modalities for stereotactic radiotherapy, Radiation Oncology (2017) 12:155	S.M. Hsu	2017	D
Shielding Analysis of a Carbon-ion Therapy Accelerator: A Comparison between Simplified and Monte Carlo Calculations, 13th International Topical Meeting on the Nuclear Applications of Accelerators	B.L. Lai	2017	F
Dose Underestimation and Correction Factors for Conventional Neutron Dose Meters Used in High-Energy Neutron Environments, 9 th International Workshop on Radiation Safety of Synchrotron Radiation Sources	Y.C. Liu	2017	F
Current Status of Human Biological Dosimetry, 2017 年輻射醫療處置國際研討會	K.W. Chang	2017	F
人員生物劑量染色體變異評估技術研究, 2017 年第 32 屆生物醫學聯合學術年會	張剛璋	2017	E

註：文獻類別分成 A 國內一般期刊、B 國內重要期刊、C 國外一般期刊、D 國外重要期刊、E 國內研討會、F 國際研討會、G 國內專書論文、H 國際專書論文

【B 合作團隊(計畫)養成表】

團隊(計畫)名稱	合作對象	合作模式	團隊(計畫)性質	成立時間(西元年)
核設施除役輻射防護管制技術研究團隊	核能研究所(保健物理組)、國家游離輻射標準實驗室	A	A	2017
輻射防護能力試驗技術研究團隊	核能研究所(保健物理組)、國家游離輻射標準實驗室、清華大學、輻射偵測中心、台電公司、同步輻射、輻防協會、貝克西弗	B	A	2017
輻射應用劑量評估與檢校技術研究團隊	核能研究所(保健物理組)、清華大學、陽明大學、長庚大學、醫學物理學會	B	A	2017

生物劑量染色體變異評估研究團隊	核能研究所(同位素組、保健物理組)、花蓮慈濟醫院、高雄醫學大學附設醫院	B	A、C	2017
-----------------	-------------------------------------	---	-----	------

註：合作模式分成 A 機構內跨領域合作、B 跨機構合作、C 跨國合作；團隊(計畫)性質分成 A 形成合作團隊或合作計畫、B 形成研究中心、C 形成實驗室、D 簽訂協議

【C 培育及延攬人才表】

姓名	機構名稱	學歷	性質
賴○倫	清華大學	A	N/A
陳○麟	陽明大學	B	N/A
宋○勳	長庚大學	B	N/A

註：學歷分成 A 博士(含博士生)、B 碩士(含碩士生)、C 學士(含大學生)；性質分成 B 學程通過、C 培訓課程通過、D 國際學生/學者交換、E 延攬人才

【D1 研究報告表】

報告名稱	作者姓名	出版年(西元年)	是否被採納
核電廠預警機制設定研究報告	黃○治	2017	D
2017 歧端劑量計能力試驗試運轉執行計畫書	陳○奇 林○君	2017	C
高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析	許○鈞	2017	D
直線能量轉移評估系統之建立	林○緯 蔡○予	2017	D
人員生物劑量緊急曝露事件報告	林○琪 張○瑋等	2017	C
人員生物劑量實驗室 ISO17025 及 ISO19238 整合評估報告	莊○惠 張○瑋等	2017	C

註：是否被採納分成 A 院級採納、B 部會署級採納、C 單位內採納、D 存參

【E 學術活動表】

研討會名稱	性質	舉辦日期 (YYYYMMDD)	主/協辦單位
2017 人員劑量能力試驗研討會暨 2017 輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會	A	20170525	核能研究所

2017年輻射醫療處置國際研討會	B	20170415	主辦：臺北榮民總醫院、核能研究所、中華民國核醫學學會 協辦：財團法人核能資訊中心、中華民國核能學會、臺灣電力公司
------------------	---	----------	---

註：性質分成 A 國內研討會、B 國際研討會、C 兩岸研討會

【F 形成課程教材手冊軟體表】

名稱	性質	類別	發表年度(西元年)	出版單位	是否為自由軟體
除役廠址殘餘輻射劑量評估教育訓練教材	B	A	2017	核能研究所	否
人員劑量計、肢端劑量計及輻射偵測儀器校正能力試驗手冊	C	A	2017	核能研究所	否

註：性質分成 A 課程、B 教材、C 手冊；類別分成 A 文件式、B 多媒體、C 軟體(含 APP)、D 其他(請序明)

【H 技術報告檢驗方法表】

技術或檢驗方法名稱	性質	作者姓名	出版年(西元年)	出版單位
環境核種分析儀器校正用參考物質(菇類、濾紙)	A	林憶薰	2017	核能研究所
第十次人員體外劑量評估實驗室能力試驗之總結報告	A	陳晉奇 林怡君	2017	核能研究所
國內醫院使用電子射束之放射治療劑量驗證稽核作業研究	A	許世明	2017	核能研究所

註：性質分成 A 技術報告、B 檢驗方法

【J1 技術移轉及智財授權表】

技術或智財名稱	類別	授權單位	被授權廠商或機構	授權金(千元)
X 射線輻射劑量監測儀-克馬/劑量面積乘積儀製作技術	C	核能研究所	千〇生醫股份有限公司	N/A

註：類別分成 A 先期技術移轉、B 軟體/自由軟體授權、C 技術移轉、D 專利授權、E 商標授權、F 品種權授權、G 著作/出版品授權、H 其他項目授權(請述明)

附錄二、佐證圖表

A. KPI 佐證資料



圖 A.1. 國際期刊論文「Secondary neutron ambient dose equivalent measurement of the wobbling system of a proton beam radiotherapy facility」於 Radiation Physics and Chemistry 刊登



Monte Carlo simulations for angular and spatial distributions in therapeutic-energy proton beams



Yi-Chun Lin^{a,*}, C.Y. Pan^a, K.J. Chiang^b, M.C. Yuan^a, C.H. Chu^a, Y.W. Tsai^b, P.K. Teng^c, C.H. Lin^c, T.C. Chao^d, C.C. Lee^d, C.J. Tung^d, A.E. Chen^b

^a *Health Physics Division, Institute of Nuclear Energy Research, Taiwan, ROC*

^b *Department of Physics, National Central University, Taiwan, ROC*

^c *Institute of Physics, Academia Sinica, Taiwan, ROC*

^d *Department of Medical Imaging & Radiological Sciences Chang Gung University, Taiwan, ROC*

ARTICLE INFO

Keywords:

Proton beam
Lateral scattering
Monte Carlo simulation
MCNP
FLUKA
GEANT4

ABSTRACT

The purpose of this study is to compare the angular and spatial distributions of therapeutic-energy proton beams obtained from the FLUKA, GEANT4 and MCNP6 Monte Carlo codes. The Monte Carlo simulations of proton beams passing through two thin targets and a water phantom were investigated to compare the primary and secondary proton fluence distributions and dosimetric differences among these codes. The angular fluence distributions, central axis depth-dose profiles, and lateral distributions of the Bragg peak cross-field were calculated to compare the proton angular and spatial distributions and energy deposition. Benchmark verifications from three different Monte Carlo simulations could be used to evaluate the residual proton fluence for the mean range and to estimate the depth and lateral dose distributions and the characteristic depths and lengths along the central axis as the physical indices corresponding to the evaluation of treatment effectiveness.

The results showed a general agreement among codes, except that some deviations were found in the penumbra region. These calculated results are also particularly helpful for understanding primary and secondary proton components for stray radiation calculation and reference proton standard determination, as well as for determining lateral dose distribution performance in proton small-field dosimetry. By demonstrating these calculations, this work could serve as a guide to the recent field of Monte Carlo methods for therapeutic-energy protons.

1. Introduction

Proton therapy has clear theoretical dosimetric advantages with Bragg peak (BP) dose distribution compared to conventional radiotherapy using photons. Its superior spatial dose distribution can deliver a high conformal dose to the tumor and spare normal tissue owing to sharper distal dose falloff ($L_{D80-D20}$, defined as the length from 80% to 20% dose level) followed by BP. Currently, proton therapy delivery techniques trend toward making the proton beam smaller and using intensity-modulated and spot-by-spot approaches to improve treatment quality and efficiency and create new treatment capabilities for clinical therapy (Newhauser and Zhang, 2015; Pedroni et al., 2005). On the smaller lateral profile, better accuracy in simulation is desirable for lateral penumbra influencing dose distribution and conformity (Gelover et al., 2015). Furthermore, absolute proton dose determination in providing a reference beam usually demands perturbation corrections

based on the Monte Carlo technique to determine the contributions from primary and secondary components, as to the photon primary standard (Lin et al., 2009). Moreover, Monte Carlo based treatment planning systems can be used to determine the configuration, and testing data for patient dose prediction relies on accurate simulations (Newhauser et al., 2007a). In addition, one of the clinical requirements is to use an independent tool to verify the correctness of the treatment plan. Therefore, a validated Monte Carlo system for the simulation of radiation transport could be a useful tool for pre-clinical and clinical research studies (Paganetti et al., 2004; Titt et al., 2008).

Before going into the clinical design of beamlines and treatment heads in proton facilities, it is important to understand the physics of a proton traveling through matter. In the traveling direction of the proton beam, the lateral variation in the transverse direction is affected by multiple Coulomb scattering (MCS) and the width of the proton beam spreads out with increasing depth. In addition to these elastic

* Corresponding author.

E-mail address: yajmna@nser.gov.tw (Y.-C. Lin).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.03.018>

Received 30 September 2016; Received in revised form 6 March 2017; Accepted 7 March 2017

Available online 08 March 2017

0969-806X/© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

圖 A.2. 國際期刊論文「Monte Carlo simulations for angular and spatial distributions in therapeutic-energy proton beams」於 Radiation Physics and Chemistry 刊登

RESEARCH

Open Access



Dosimetric comparison of different treatment modalities for stereotactic radiotherapy

Shih-Ming Hsu^{1,2*}, Yuan-Chun Li^{1,4,5}, Chien-Chung Jeng⁴ and Chia-Ying Tsieng^{1,2}

Abstract

Background: The modalities for performing stereotactic radiotherapy (SRT) on the brain include the cone-based linear accelerator (linac), the flattening filter-free (FFF) volumetric modulated arc therapy (VMAT) linac, and tomotherapy. In this study, the cone-based linac, FFF-VMAT linac, and tomotherapy modalities were evaluated by measuring the differences in doses delivered during brain SRT and experimentally assessing the accuracy of the output radiation doses through clinical measurements.

Methods: We employed a homemade acrylic dosimetry phantom representing the head, within which a thermoluminescent dosimeter (TLD) and radiochromic EBT3 film were installed. Using the conformity/gradient index (CGI) and Paddick methods, the quality of the doses delivered by the various SRT modalities was evaluated. The quality indicators included the uniformity, conformity, and gradient indices. TLDs and EBT3 films were used to experimentally assess the accuracy of the SRT dose output.

Results: The dose homogeneity indices of all the treatment modalities were lower than 1.25. The cone-based linac had the best conformity for all tumors, regardless of the tumor location and size, followed by the FFF-VMAT linac; tomography was the worst-performing treatment modality in this regard. The cone-based linac had the best gradient, regardless of the tumor location and size, whereas the FFF-VMAT linac had a better gradient than tomotherapy for a large tumor diameter (28 mm). The TLD and EBT3 measurements of the dose at the center of tumors indicated that the average difference between the measurements and the calculated dose was generally less than 4%. When the 3% 3-mm gamma passing rate metric was used, the average passing rates of all three treatment modalities exceeded 98%.

Conclusions: Regarding the dose, the cone-based linac had the best conformity and steepest dose gradient for tumors of different sizes and distances from the brainstem. The results of this study suggest that SRT should be performed using the cone-based linac on tumors that require treatment plans with a steep dose gradient, even as the tumor is slightly irregular; we should also consider using a high dose gradient of the cone base to treat and protect the normal tissue. If normal tissues require special protection exist at positions that are superior or inferior to the tumor, we can consider using tomotherapy or Cone base with couch at 0° for treatment.

Keywords: Linac, Stereotactic radiotherapy, Tomotherapy, Treatment planning systems, VMAT

* Correspondence: smhsu@ym.edu.tw

¹Medical Physics and Radiation Measurement Laboratory, National Yang-Ming University, Taipei, Taiwan, ROC

²Department of Biomedical Imaging and Radiological Sciences, National Yang-Ming University, No. 155, Sec. 2, Linong St, Beitou District, Taipei 112, Taiwan, ROC

Full list of author information is available at the end of the article

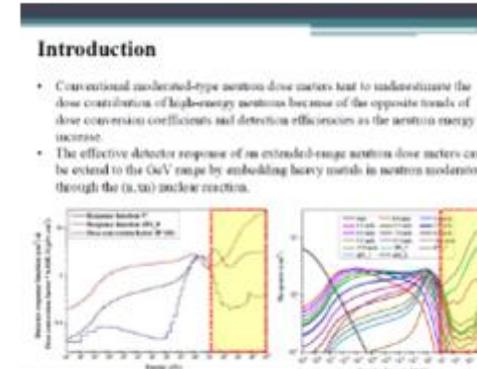
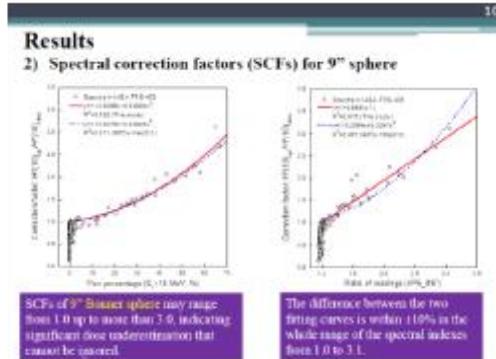
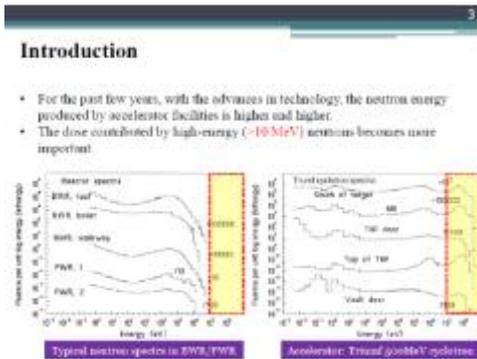
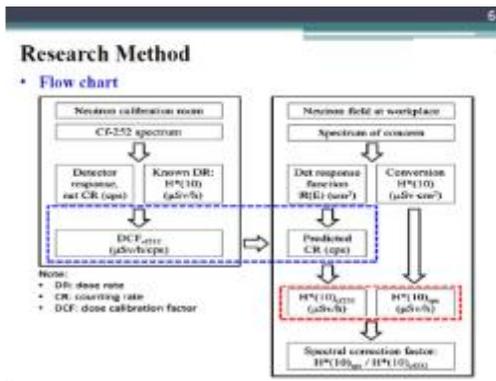


© The Author(s). 2017 **Open Access** This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The Creative Commons Public Domain Dedication waiver (<http://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>) applies to the data made available in this article, unless otherwise stated in a credit line to the data.

圖 A.3. 國際期刊論文「Dosimetric comparison of different treatment modalities for stereotactic radiotherapy」於 Radiation Oncology 刊登

Dose Underestimation and Correction Factors for Conventional Neutron Dose Meters Used in High-Energy Neutron Environments

Yen-Chiang, Liu
 Advisor: Rong-Jinn, Shiu
 Institute of Nuclear Engineering and Science, National Tsing Hua University
 2017/4/20



Conclusions

- The dose underestimation regarding conventional moderated-type detector in the presence of high-energy neutrons, resulting from the intrinsic inconsistency between the low detection efficiency and high dose contribution of high-energy neutrons.
- This observation presents a practical scheme for correcting the dose underestimation of conventional neutron detectors and confirms a satisfactory performance of extended-range neutron dose meters.
- This observation also addressed two important questions associated with the applications of this correction scheme in practical situations where different calibration sources or dose meters are used.
- These observations practically facilitate the implementation and application of the suggested spectrum-dependent dose correction factors in workplaces.

圖 A.4. 會議論文「Dose Underestimation and Correction Factors for Conventional Neutron Dose Meters Used in High-Energy Neutron Environments」口頭發表於 9th International Workshop on Radiation Safety of Synchrotron Radiation Sources (RadSynch2017)

SHIELDING ANALYSIS OF A CARBON-ION THERAPY ACCELERATOR: A COMPARISON BETWEEN SIMPLIFIED AND MONTE CARLO METHODS[†]

B.L. Lai and R.J. Sheu^{*†}

Institute of Nuclear Engineering and Science, National Tsing-Hua University[†]
101, Sec. 2, Kuang-Fu Road, Hsinchu, Taiwan[†]
ss00014ty20@hotmail.com; rjsheu@mx.nthu.edu.tw[†]

ABSTRACT

Taipei Veterans General Hospital plans to build the first heavy-ion (carbon) radiotherapy treatment center in Taiwan, specializing in difficult-to-treat cancer cases. Shielding analysis for such an accelerator involves many computational difficulties: source term estimation, complicated geometry modeling, deep-penetration calculation and streaming evaluation. Monte Carlo simulations are generally considered the most accurate method for complex accelerator shielding analysis, but they are time-consuming and error-prone for less-experienced users. Analytical models based on point-source line-of-sight approximation are intuitive and popular in practice because they are easy to use. However, the accuracies and limitations of simplified models need to be evaluated. In this study, a set of shielding data, including source terms and attenuation lengths for several common targets (copper, iron, graphite and tissue) and shielding materials (concrete, iron, and lead), were generated by performing Monte Carlo simulations for carbon ions of energies with 400 and 800 MeV. Possible applications and a proper use of the data set were demonstrated in evaluating dose distribution outside a typical carbon-ion treatment room. The comparison of model predictions and Monte Carlo calculated results showed the effectiveness and advantage of applying the data set to a quick shielding design and dose analysis for heavy-ion therapy accelerators.

KEYWORDS

Accelerator shielding analysis; Monte Carlo; source term; attenuation length

1. INTRODUCTION

Large accelerator applications in Taiwan have gained more and more interests in recent years. Currently, the largest accelerator in Taiwan is the TPS, which is a 3-GeV electron synchrotron with a circumference of 518m. The facility has been open in 2016 to users from around the world. In addition, particle cancer therapy has been receiving much attention in many countries due to its physical and biological advantages. In Taiwan, the first proton therapy center equipped with a 235 MeV proton cyclotron was installed in Linkou Chang Gung Memorial Hospital. It has been open for routine patient treatment in 2015. Several similar facilities are also under construction or planning. Another new facility with a 400 MeV/u carbon-ion machine is under planning in Taipei Veterans General Hospital. It is the target of this study.

Accelerator operation can potentially produce significant amount of radiation that must be carefully evaluated, in particular for an accelerator situated in a densely populated hospital. For the above

[†] Corresponding author: Rong-Jun Sheu (rjsheu@mx.nthu.edu.tw)

圖 A.5. 會議論文「Shielding Analysis of a Carbon-ion Therapy Accelerator: A Comparison between Simplified and Monte Carlo Calculations」發表於 13th International Topical Meeting on the Nuclear Applications of Accelerators (AccApp'17)

Current Status of Human Biological Dosimetry

Abstract

Background: There are about 44,000 radiation workers in Taiwan, including in nuclear power plants, industrial and hospital areas. In order to cope with the accidental exposure of radiation, it is necessary to build a biological dosimetry laboratory. When the exposed with radiation accident, the biological chromosome analysis could as exposure dose assessment, and as a follow-up medical care reference.

METHODS: International studies on the current bio-dose-related effects of individuals; biological dosimetry by chromosome analysis is a quick, simple and effective gold standard method. In our laboratory, blood samples of normal subjects were irradiated with 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 and 5Gy of Cobalt-60 gamma rays, and further cultured the blood lymphocytes. The cultured lymphocyte chromosomes were photographed by a microscope and then calculated the chromosome variation.

Results and conclusion: In our laboratory 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.

圖 A.6. 會議論文「人員生物劑量研究成果」口頭發表於 2017 年輻射醫療處置國際研討會



人員生物劑量染色體變異評估技術研究

Evaluation Biodosimetry of Human Chromosome Variation

林婉琪、莊程惠、歐陽芳鈺、陳貴竹、張剛瑾

-摘要-

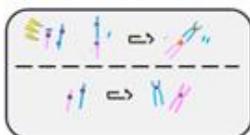
國內目前有輻射工作人員 50,000 餘人，涵蓋核能電廠、工業、醫院、研究機構等各類領域，曾發生輻射意外曝露事件，人員生物劑量評估為事故發生後可採取的措施，並用以評估人員接受之劑量，做為醫療防護的參考。

本研究建立人員生物劑量(Biodosimetry)評估相關技術，並發展出具有國際水準的生物劑量實驗室。由 101 年至今，本研究已建立一人員生物劑量標準曲線資料庫，並參與加拿大衛生部 Wilkins 教授舉辦的國際能力試驗，並於 105 年取得 ISO17025 測試實驗室認證，將成為具公信力的國家實驗室。

-實驗原理-

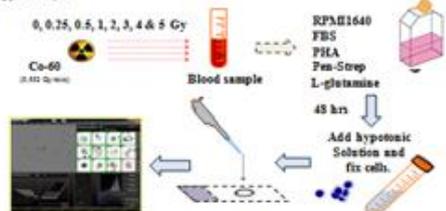
生物劑量是針對人體經過輻射曝露後，人體淋巴球發生染色體變異造成染色體雙中節(圖一)，再利用劑量與雙中節發生率的關係，對應出人體在輻射曝露時所接受的劑量。

建立生物劑量評估為事故發生後必須採取的措施，以確認人員接受之劑量，採取必要的醫療防護行動，保障工作人員及民眾的健康與安全。



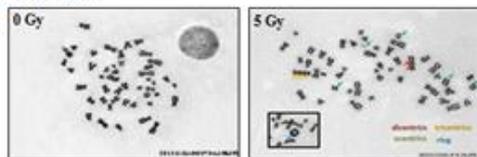
圖一、雙中節染色體分析(DCA)是藉由觀察經過輻射曝露後的淋巴球血液淋巴球發生兩個中節的染色體。

-實驗流程-



圖二、人員生物劑量試驗流程。

-染色體分析-

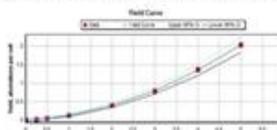


圖三、染色體雙中節分析圖例。

-研究成果-

1. 人員生物劑量標準曲線及背景值建立

人員生物劑量實驗室完成了四條反應曲線，並利用統計方法計算五條反應曲線的差異性，並合併成一條可代表本土國人的人員生物劑量標準曲線及二元二次方程式(圖四、式(A))。另外，101-105 年共完成 16 例背景值(圖五)。



圖四、可代表本土國人的人員生物劑量標準曲線圖。

$$Yield = 0.0010 (+/- 0.0010) + 0.0554 (+/- 0.0083) \times D - 0.0705 (+/- 0.0025) \times D^2$$

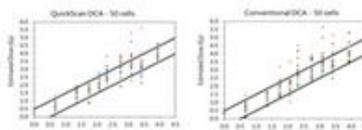
(A) 式中，Y 為雙中節發生頻率，D 為劑量，此式包含 95% 信賴區間。

背景值	101	102	103	104	105
背景值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
背景值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
背景值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

圖五、101-105 年所完成的 16 例背景值。

2. 國際比對典、ISO17025 測試實驗室認證

人員生物劑量實驗室參加加拿大衛生部 Wilkins 教授所舉辦的國際比對，共有 5 個國家 5 個實驗室參與，10 個實驗測試的結果顯示本實驗室分析能力符合國際標準(圖六)；於 105 年 7 月 14 日獲得 ISO17025 測試實驗室認證(圖七)。



圖六、國際能力比對結果，本實驗室是合格，數據符合國際標準。



圖七、人員生物劑量實驗室之 ISO17025 測試實驗室 LOGO 與編號。

-結論-

目前實驗室已完成 16 例正常國人背景染色體雙中節分析，一共分析 16,268 顆細胞，發現 15 個雙中節(dicentric)，背景雙中節發生率為 0.92‰，即是 1000 顆細胞中有 0.92 個雙中節發生率，近似國際文獻(正常背景下，淋巴細胞通常會存在 1/1000 比例的雙中節變異狀況)。

計畫積極推動及建立人員生物劑量評估研究相關技術，以有助於制定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，服務核能工作人員及民眾，並藉由通過 ISO 認證，協助建立國內核能劑量評估能力，提升核能輻射安全管理層次及水準。



人員生物劑量實驗室 Biodosimetry Lab

* 聯絡人：林婉琪 連絡電話：+886-3-4711400 #7349

地址：32546 桃園市龍潭區後寮里文化路 1000 號 E-mail: stud0369@nuc.nyu.edu.tw

核能行政府專家諮詢委員會

圖 A.7. 會議論文「人員生物劑量染色體變異評估技術研究」海報發表於 2017 年第 32 屆生物醫學聯合學術年會



課程表

日期：106 年 5 月 25 日星期四
 地點：原子能委員會輻防處 5 樓會議室

時間	課程內容
09:00-12:00	RESRAD-ONSITE 程式介紹及實作 <ul style="list-style-type: none"> ● 程式輸入、輸出介面介紹 ● 方法論 ● DCGL ● 估算 Kd 替代方法 ● Mass Balance 與 Non-Dispersive Model
13:30-16:30	RESRAD-OFFSITE 程式介紹及實作 <ul style="list-style-type: none"> ● 程式輸入、輸出介面介紹 ● 方法論 ● New Source Term Model ● Probabilistic/Sensitivity Analysis

圖 A.8. 除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練照片及課程表

除役廠址輻射安全及殘餘輻射劑量評估教育訓練，主要介紹 2 個由美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)所開發除役廠址殘餘輻射劑量評估程式(RESRAD-ONSITE 及 RESRAD-OFFSITE)，內容包含程式輸出、輸入介面介紹、劑量評估方法論、Mass Balance 與 Non-Dispersive Model 及估算 Kd 替代方法等，藉由課程說明及實際程式操作訓練，以了解程式運作原理及建立除役場址核種外釋活度推導審查技術。



會議議程

日期：106年05月25日
地點：核能研究所 國家游離輻射標準實驗室(035館)二樓

時間	講題	講員/單位
08:30—09:00	報到	
09:00—09:10	開幕致詞	胡中興組長 核能研究所保健物理組
09:10—11:30	人員劑量計能力試驗總結評估	陳晉奇先生 核能研究所保健物理組
	輻射偵檢儀器校正能力試驗說明	葉俊賢先生 核能研究所保健物理組
	第三次 陸軍核生化研究中心儀器校正比對	葉俊賢先生 核能研究所保健物理組
11:30—13:00	肢端劑量計能力試驗試運轉	葉俊賢先生 核能研究所保健物理組
13:00—15:30	綜合討論	朱健豪分組長 核能研究所保健物理組

備註：開會當日請攜帶開會通知單，以便進出本所。

「第十次人員劑量計能力試驗總結會議」

會議議程

日期：106年05月25日
地點：核能研究所 國家游離輻射標準實驗室(035館)二樓

時間	講題	講員/單位
08:30—09:00	報到	
09:00—09:10	開幕致詞	胡中興組長 核能研究所保健物理組
09:10—11:00	人員劑量計能力試驗總結評估	陳晉奇先生 核能研究所保健物理組
11:00—11:30	休息	
11:30—13:00	肢端劑量計能力試驗試運轉	葉俊賢先生 核能研究所保健物理組
13:00—15:30	綜合討論	朱健豪分組長 核能研究所保健物理組

「第七次輻射偵檢儀器校正能力試驗說明會」

日期：106年05月25日
地點：核能研究所 國家游離輻射標準實驗室(035館)二樓

時間	講題	講員/單位
09:00—09:30	報到	
09:30—09:40	開幕致詞	胡中興組長 核能研究所保健物理組
09:40—10:40	第七次 輻射偵檢儀器校正能力試驗	葉俊賢 核能研究所保健物理組
10:40—11:00	休息	
11:00—13:30	第三次 陸軍核生化訓練中心儀器校正比對	葉俊賢 核能研究所保健物理組
13:30—15:00	綜合討論	朱建豪分組長 核能研究所保健物理組

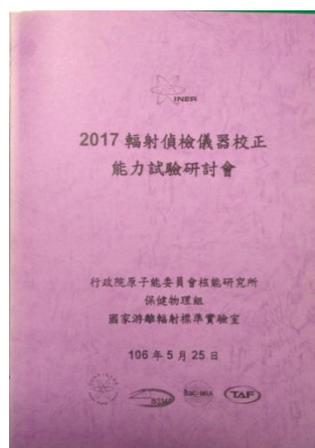
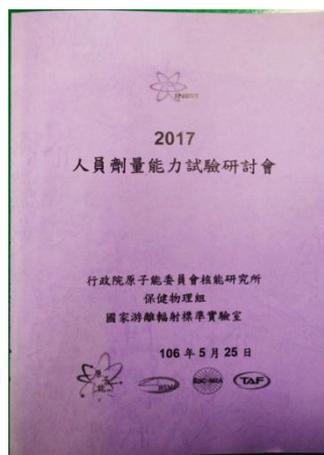


圖 A.9. 2017 人員劑量能力試驗研討會暨 2017 輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會照片、議程及研討會手冊

20 International Symposium of 17 Radiation Emergency Management 輻射醫療處置國際研討會

Time: 2017/04/15(Saturday) 08:00~17:00
Venue: Hall 1, Chi-Der Building, Taipei Veterans General Hospital (TVGH), Taipei



Jay Wu	Naoki Matsuda	Noboru Takamura	Kang-Wei Chang	Makiko Orita	Keiji Suzuki	Fuh-Yuan Shih
--------	---------------	-----------------	----------------	--------------	--------------	---------------

Jay Wu
Associate Professor, Department of Biomedical Imaging and Radiological Sciences, National Yang-Ming University
Topic: Radiation health effects (Continuous education)

Naoki Matsuda
Professor, Department of Radiation Biology and Protection, Atomic Bomb Disease Institute, Nagasaki University(NU)
Topic: Radiation Protection in Japan

Noboru Takamura
Professor, Department of Global Health, Medicine and Welfare, Atomic Bomb Disease Institute, NU
Topic: Lessons from Chernobyl and Fukushima

Kang-Wei Chang
Deputy Engineer, Institute of Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council
Topic: Current Status of Human Biological Dosimetry

Makiko Orita
Associate Professor, Department of Global Health, Medicine and Welfare, Atomic Bomb Disease Institute, NU
Topic: Risk communication in Fukushima

Keiji Suzuki
Associate Professor, Department of Radiation Medical Sciences, Atomic Bomb Disease Institute, NU
Topic: Biological mechanisms of low-dose radiation effects

Fuh-Yuan Shih
Director, Occupational Safety & Health Office, Attending physician, Department of Emergency Medicine, National Taiwan University Hospital(NTUH)
Assistant Professor, School of Medicine, NTU
Topic: Emergency Medical Preparedness for radiation incidents in Taiwan





圖 A.10. 2017 年輻射醫療處置國際研討會

B. 主要工作研究內容佐證資料

B.1. 核設施除役輻射防護管制技術研究

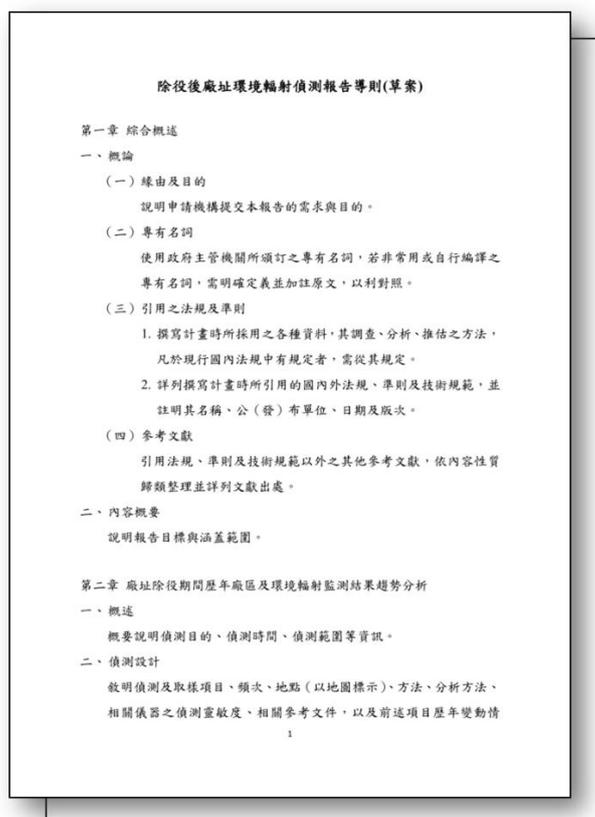


圖 B.1.1 修訂後除役後廠址環境輻射偵測報告導則(草案)

依據「核子反應器設施管制法」第 28 條規定，核子反應器設施除役計畫執行完成後六個月內，經營者應檢附除役後之廠址環境輻射偵測報告；此外，「核子反應器設施管制法施行細則」第 20 條中亦規定除役後之廠址環境輻射偵測報告應具備之內容。因此，為利審查該報告，故特依據國際相關文獻或規範，據以修訂除役後廠址環境輻射偵測報告導則草案，以確保除役後廠址環境輻射造成民眾之劑量符合法規限值要求，有效確保環境、民眾與工作人員之輻射安全。

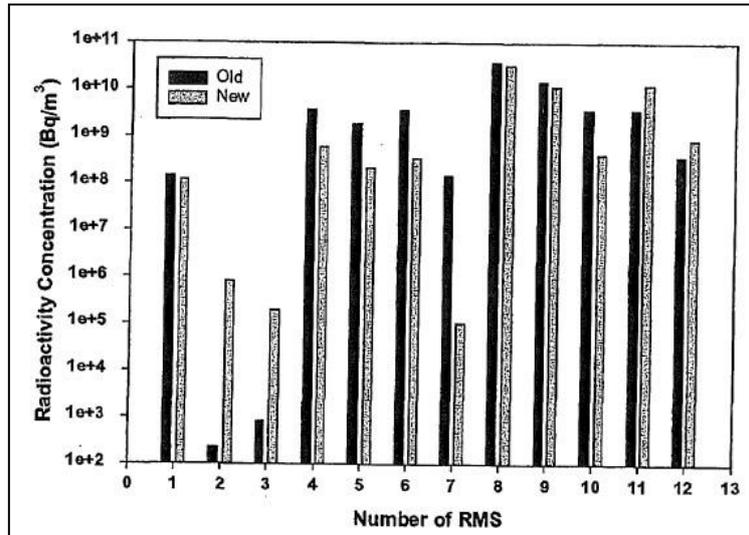


圖 B.1.2. 韓國 SCI 期刊新舊 PRM 評估值比較

於核電廠 PRM 設定點及評估模式研究中，本計畫參考韓國電力研究院 2004 年發表之 SCI 論文，其中提出兩種評估模式(最大劑量率限值反推，以及以排放濃度限值反推)，以了解國際 PRM 設定之趨勢。

表 B.1.1. NUREG-0473 與我國調查基準之初步分析

核種	水(貝克/公升)				空氣(毫貝克/立方公尺)				農漁產品(貝克/仟克·濕重)				蔬菜、草樣(貝克/仟克·濕重)				牛奶(貝克/升)				
	紀	劑量(mSv/y)	調	劑量(mSv/y)	紀	劑量(mSv/y)	調	劑量(mSv/y)	紀	劑量(mSv/y)	調	劑量(mSv/y)	紀	劑量(mSv/y)	調	劑量(mSv/y)	紀	劑量(mSv/y)	調	劑量(mSv/y)	
氫(H)-3	10	2.45E-04	1100	2.69E-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
錳(Mn)-54	0.4	7.13E-04	40	7.13E-02	0.6	9.10E-06	-	-	0.3	1.28E-08	110	4.68E-06	0.5	1.32E-05	-	-	0.4	7.13E-04	-	-	
鐵(Fe)-59	0.7	9.01E-03	15	1.93E-01	1.2	5.77E-05	-	-	0.5	5.40E-08	40	4.32E-06	0.9	6.04E-05	-	-	0.7	9.01E-03	-	-	
鈷(Co)-58	0.4	9.64E-04	40	9.64E-02	0.6	6.66E-06	-	-	0.3	1.33E-08	110	4.88E-06	0.5	1.38E-05	-	-	0.4	9.64E-04	-	-	
鈷(Co)-60	0.4	7.13E-03	10	1.78E-01	0.6	5.11E-05	-	-	0.3	6.12E-08	40	8.15E-06	0.5	6.34E-05	-	-	0.4	7.13E-03	-	-	
鋅(Zn)-65	0.9	1.07E-02	10	1.19E-01	1.5	5.55E-05	-	-	0.5	1.17E-07	74	1.73E-05	1	1.45E-04	-	-	0.9	1.07E-02	-	-	
銦(Sr)-89	0.1	1.19E-03	-	-	1	2.70E-05	-	-	1	1.56E-07	-	-	1	9.69E-05	-	-	-	-	-	-	
銦(Sr)-90	0.1	7.59E-03	-	-	1	4.24E-04	-	-	1	1.68E-06	-	-	1	1.04E-03	-	-	10	7.59E-01	-	-	
鋅(Zr)-95	0.7	2.00E-03	15	4.28E-02	1	4.07E-05	-	-	0.5	2.85E-08	-	-	0.9	3.19E-05	-	-	0.7	1.96E-03	-	-	
鈮(Nb)-95	0.7	1.14E-03	15	2.45E-02	1	1.15E-05	-	-	0.5	1.74E-08	-	-	0.9	1.95E-05	-	-	0.7	1.06E-03	-	-	
碘(I)-131	0.1	9.18E-03	1	9.18E-02	0.5	1.33E-04	30	7.99E-03	-	-	-	-	0.4	3.28E-04	4	3.28E-03	0.1	5.94E-03	0.4	2.38E-02	
鈉(Cs)-134	0.4	5.55E-03	2	2.77E-02	0.6	3.17E-05	370	1.95E-02	0.3	3.42E-07	8	9.11E-06	0.5	3.54E-04	37	2.62E-02	0.4	3.43E-03	3	2.57E-02	
鈉(Cs)-137	0.4	3.80E-03	2	1.90E-02	0.6	2.21E-05	740	2.72E-02	0.3	2.34E-07	74	5.77E-05	0.5	2.42E-04	74	3.59E-02	0.4	2.77E-03	3	2.08E-02	
鋇(Ba)-140	0.4	4.22E-03	10	1.06E-01	2	5.77E-05	-	-	1	1.56E-07	-	-	1	9.69E-05	-	-	1	1.06E-02	10	1.06E-01	
鐳(La)-140	0.4	2.65E-03	10	6.63E-02	2	3.11E-05	-	-	1	1.20E-07	-	-	1	7.46E-05	-	-	1	6.60E-03	10	6.60E-02	

表 B.1.2. 我國及韓國之惰性氣體排放濃度限值比較

單位：Bq/m³

核種\國家	我國 (舊標準) ¹	我國 (現行標準) ²	韓國 ³
Kr-83m	4.00E+06	1.30E+07	1.00E+07
Kr-85	2.00E+04	1.25E+05	1.00E+05
Kr-85m	4.00E+03	4.64E+03	5.00E+03
Kr-87	9.00E+02	8.06E+02	8.00E+02
Kr-88	3.00E+02	3.26E+02	3.00E+02
Xe-131m	5.00E+04	8.56E+04	9.00E+04
Xe-133	2.00E+04	2.28E+04	2.00E+04
Xe-135	2.00E+03	2.85E+03	3.00E+03
Xe-135m	1.00E+03	1.17E+03	1.00E+03
Xe-138	5.00E+02	5.83E+02	6.00E+02

備註：

(1)游離輻射防護安全標準-第四表/放射性核種管制限度(民國 80 年 7 月 10 日修正發布)-採用 ICRP-26 號報告建議。

(2)游離輻射防護安全標準-附表四之二/一般人放射性核種管制限度(民國 94 年 12 年 30 日修正發布) -採用 ICRP-60 號報告建議。

(3) Korean Ministry Of Science and Technology (MOST) Notice 2002-23.

表 B.1.3. 標準射源配置活度與不確定度評估

核種	射源活度 (Bq/g)	不確定度(%) (k=1)	射源量 (g)	配製量 (g)	樣品比活度 (Bq/g)	不確定度(%) (k=1)
¹³⁷ Cs	4332.07 ±	0.90%	8.95655	250.32	155.00 ±	0.90%
⁶⁰ Co	3498.67 ±	0.60%	9.05428	250.29	126.57 ±	0.60%
¹³⁴ Cs	21088.88 ±	0.90%	0.98052	250.29	82.62 ±	0.90%
⁸⁵ Sr	3809.14 ±	0.90%	0.85277	49.83	65.19 ±	0.90%
⁹⁰ Sr	3872582.28 ±	0.90%	0.10362	249.73	1606.81 ±	0.90%

表 B.1.4. 菇類均勻度測試結果

核種	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁸⁵ Sr	⁹⁰ Sr
$\delta_{\text{the repeatability}}$	0.85%	0.59%	0.52%	0.28%	0.28%
$\delta_{\text{the between-bottle}}$	3.86%	3.65%	3.69%	3.30%	3.30%
均勻度 測試	3.86%	3.65%	3.69%	3.30%	3.30%

表 B.1.5. 濾紙樣均勻度測試結果

核種	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁸⁵ Sr	⁹⁰ Sr
$\delta_{\text{the repeatability}}$	0.33%	0.58%	0.66%	0.62%	0.62%
$\delta_{\text{the between-bottle}}$	1.50%	2.10%	1.60%	2.90%	2.90%
均勻度 測試	1.50%	2.10%	1.60%	2.90%	2.90%

B.2. 輻射防護能力試驗技術研究

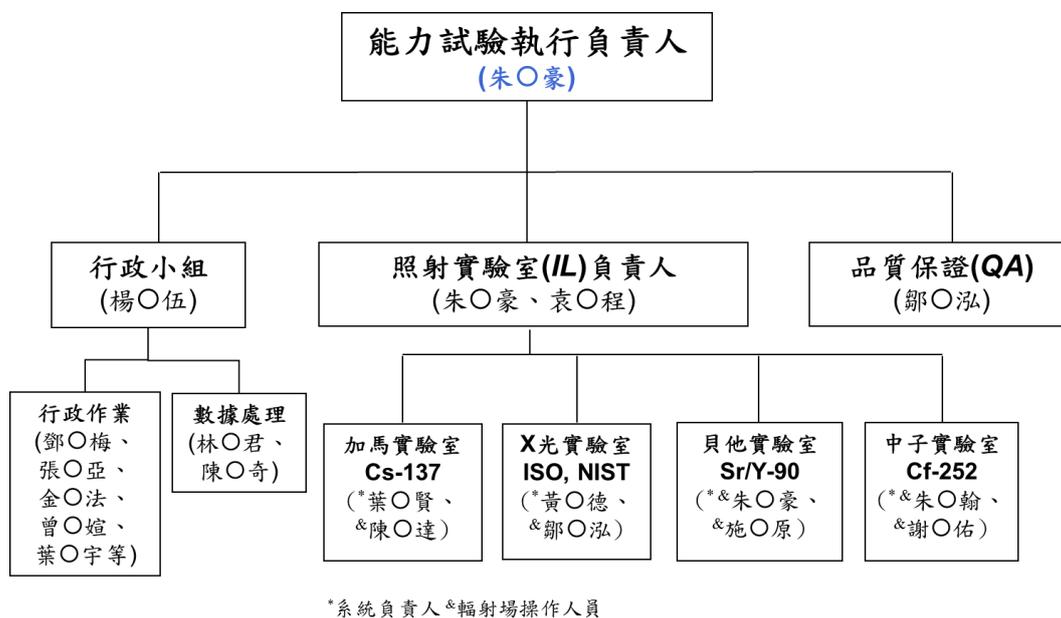
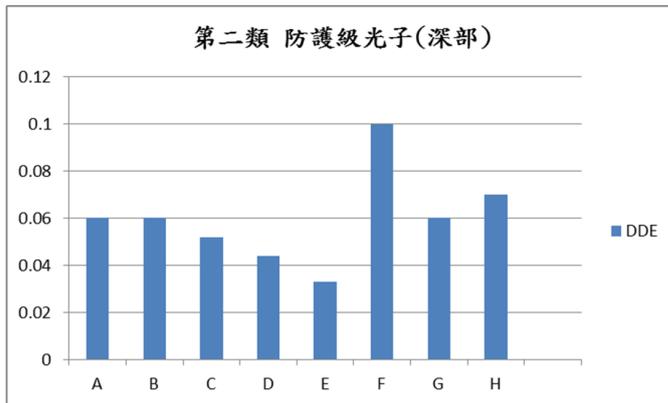
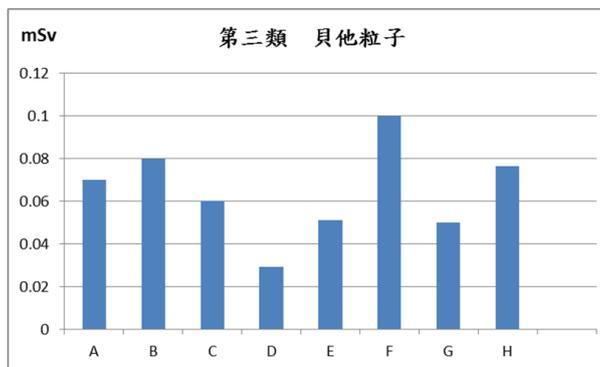


圖 B.2.1. 人員劑量計能力試驗執行機構組織架構

單位	LLD計算(mSv)
A	0.06
B	0.06
C	0.052
D	0.044
E	0.033
F	0.1
G	0.06
H	0.07



單位	LLD計算(mSv)
A	0.07
B	0.08
C	0.06
D	0.029
E	0.051
F	0.1
G	0.05
H	0.0766



單位	LLD計算(mSv)
A	0 (保守估計為0.01)
B	0.09
C	0.051
D	0.074
E	0.025
F	0.09
G	0.01
H	0.07

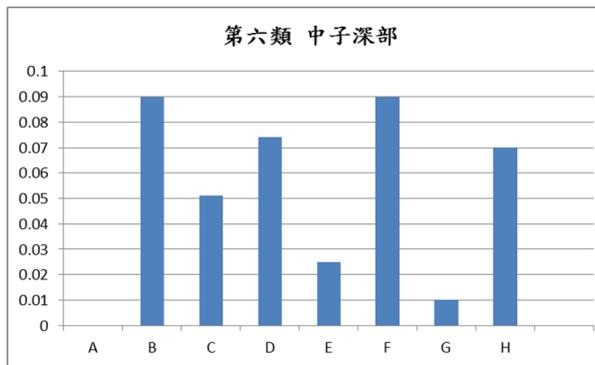
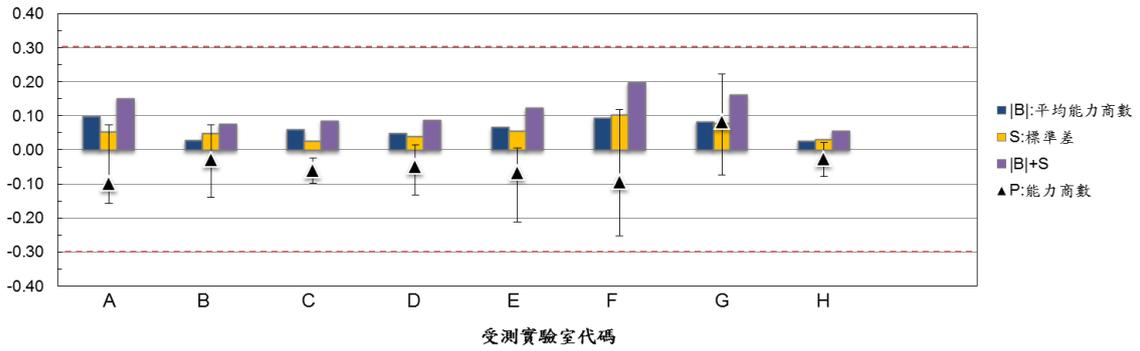
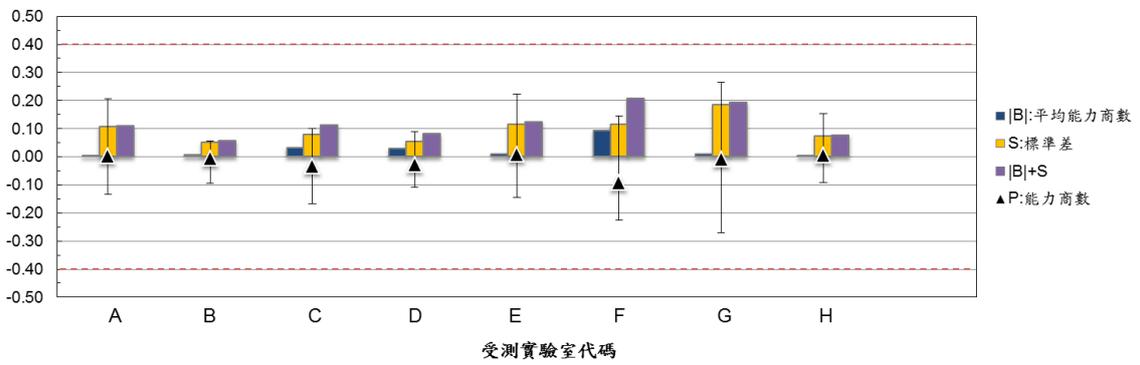


圖 B.2.2. 第十次人員劑量計能力試驗實驗室 LLD 估計結果

測試類別 I 事故級光子 深部吸收劑量



測試類別 II 防護級光子 深部等效劑量



測試類別 II 防護級光子 淺部等效劑量

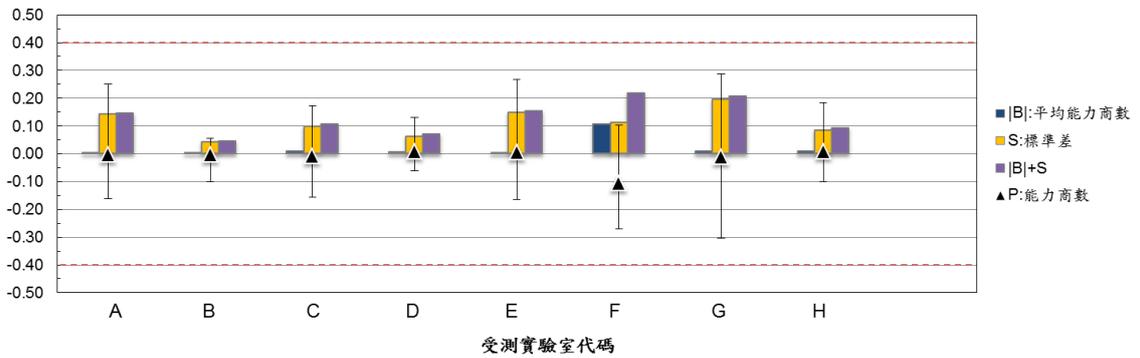
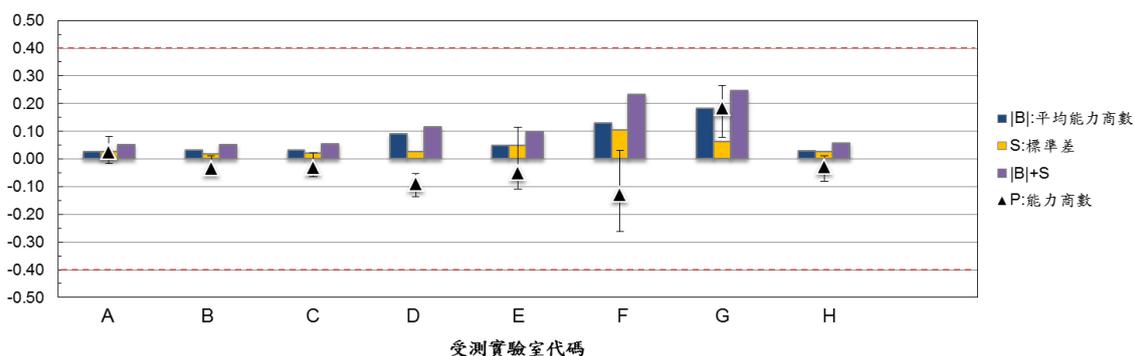
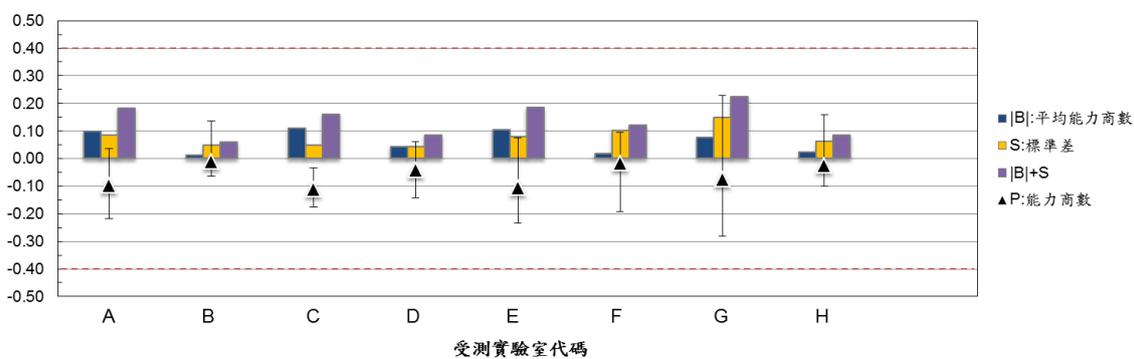


圖 B.2.3. 第十次人員劑量計能力試驗測第 I 與 II 類測試結果

測試類別 III 貝他射源 淺部等效劑量



測試類別 IV 混合光子場 深部等效劑量



測試類別 IV 混合光子場 淺部等效劑量

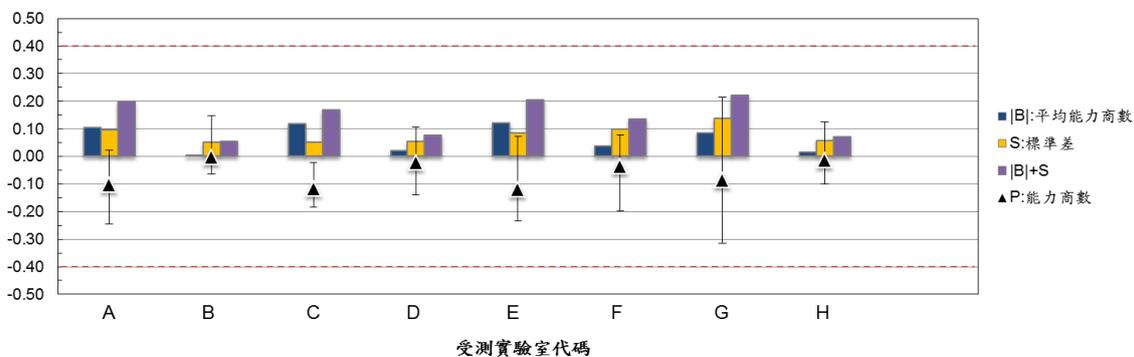


圖 B.2.4. 第十次人員劑量計能力試驗測第 III 與 IV 類測試結果

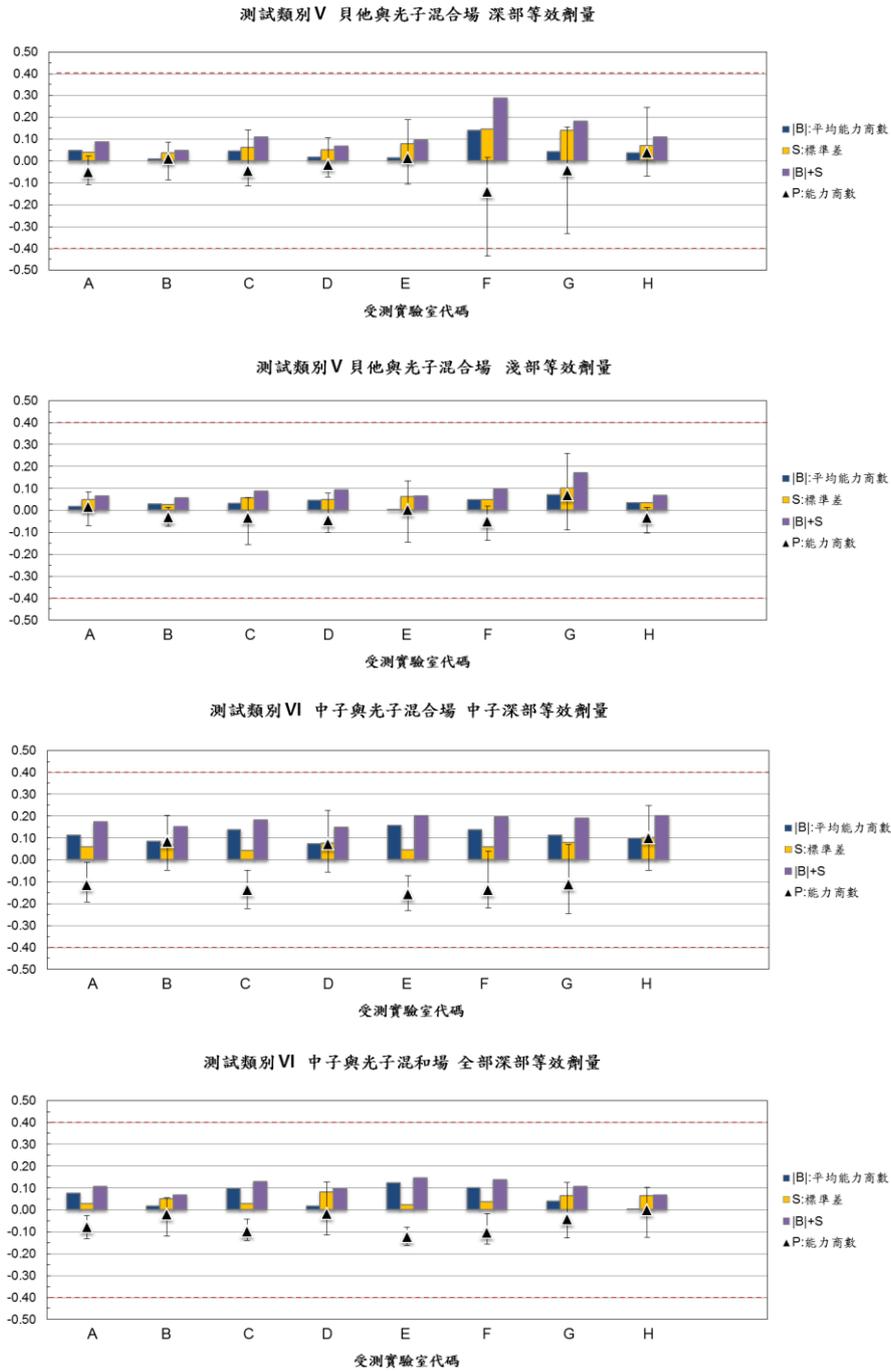


圖 B.2.5. 第十次人員劑量計能力試驗測第 V 與 VI 類測試結果

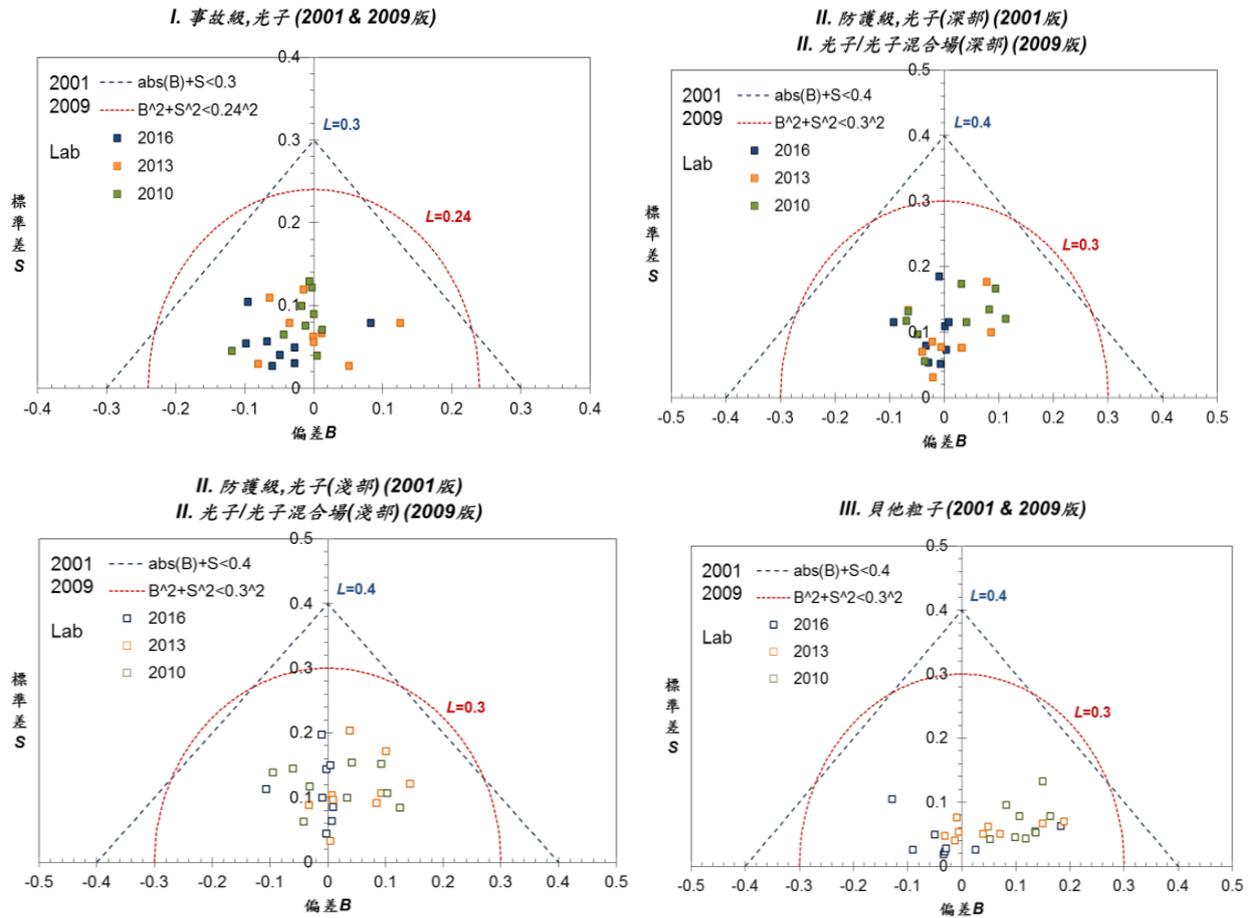


圖 B.2.6. 近三次人員劑量計能力試驗測 ANSI N13.11 2001 年版和 2009 年版分析結果(事故級光子、防護級光子和貝他粒子測試類別)

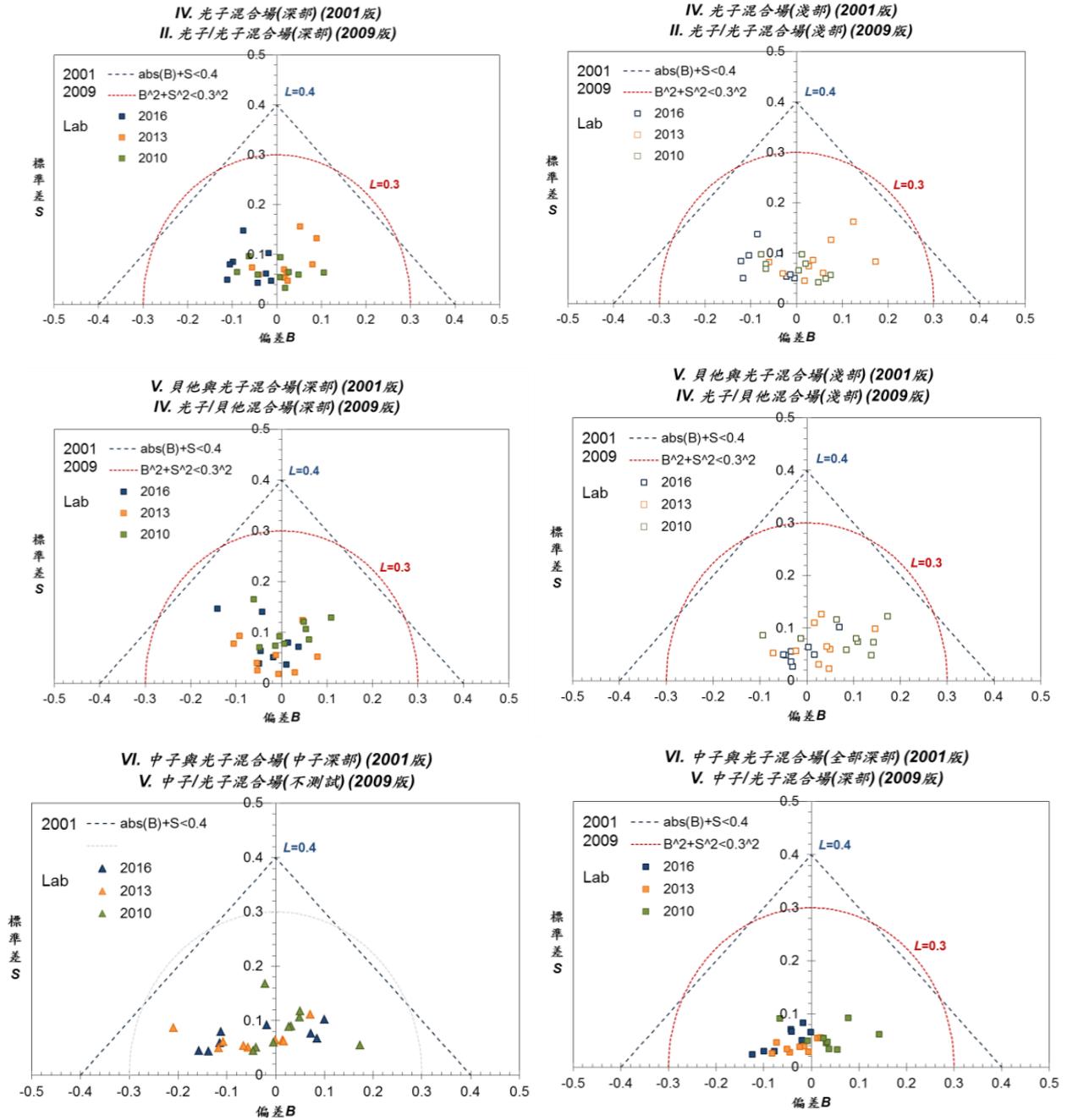


圖 B.2.7. 近三次人員劑量計能力試驗測 ANSI N13.11 2001 年版和 2009 年版分析結果(防護級光子混合場、貝他與光子混合場和中子與光子混合場測試類別)

表 B.2.1. 人員劑量計(2009 版)與肢端劑量計能力試驗比較

能力試驗種類	人員劑量計	指環劑量計
國際規範	ANSI/HPS. N13.11 2009	ANSI/HPS. N13.32 2008
散射比	<3%	<1%
距射源中心(max.)	10 cm	6 cm
轉換係數	深部、淺部	淺部
測試類別	X, γ, β, n	X, γ, β
能力評定 (允差值)	$B^2+S^2 \leq L^2$	$B^2+S^2 \leq L^2$

表 B.2.2. 國內輻射偵檢儀器校正機構與輻射場

參加機構	參加類別	核種或設備	輻射場強度範圍
輻射偵測中心	光子 - 中劑量率 - 低劑量率	Cs-137	- 0.1 mSv/h ~ 25 mSv/h - 5 μ Sv/h ~ 0.1 mSv/h
清華大學	光子 - 中劑量率 - 低劑量率 - 累積劑量	Cs-137	- 1 mSv/h ~ 10 mSv/h - 5 μ Sv/h ~ 900 μ Sv/h - 100 μ Sv ~
台電放射實驗室	光子 - 中劑量率 - 低劑量率 - 累積劑量	Cs-137	- 1 mSv/h ~ 999 mSv/h - 5 μ Sv/h ~ 999 μ Sv/h - 0.1 mSv ~
	貝他	Sr-90	933 β /s to 3582 β /s
	阿伐	Am-241	1320 α /s to 2638 α /s
台電放射實驗室 核三工作隊	光子 - 中劑量率 - 低劑量率 - 累積劑量	Cs-137	- 400 μ Sv/h ~ 8 Sv/h - 14 μ Sv/h ~ 400 μ Sv/h - 0.1 mSv ~
	貝他	Sr-90	1124 β /s to 3114 β /s
	阿伐	Am-241	2279 α /s to 2780 α /s
台電放射實驗室 龍門工作隊	光子 - 中劑量率 - 低劑量率 - 累積劑量	Cs-137	- 1 mSv/h ~ 4 Sv/h - 5 μ Sv/h ~ 999 μ Sv/h - 0.1 mSv ~
	貝他	Sr-90	2300 β /s to 11900 β /s
	阿伐	Am-241	2780 α /s to 4510 α /s
核能研究所	光子 - 中劑量率 - 低劑量率 - 累積劑量	Cs-137	- 1 mSv/h ~ 20 mSv/h - 10 μ Sv/h ~ 900 μ Sv/h - 1 μ Sv ~ 16 Sv
	貝他	Sr-90	0~99999cps
	阿伐	Am-241	0~99999cps

B.3. 輻射應用劑量評估與檢校技術研究

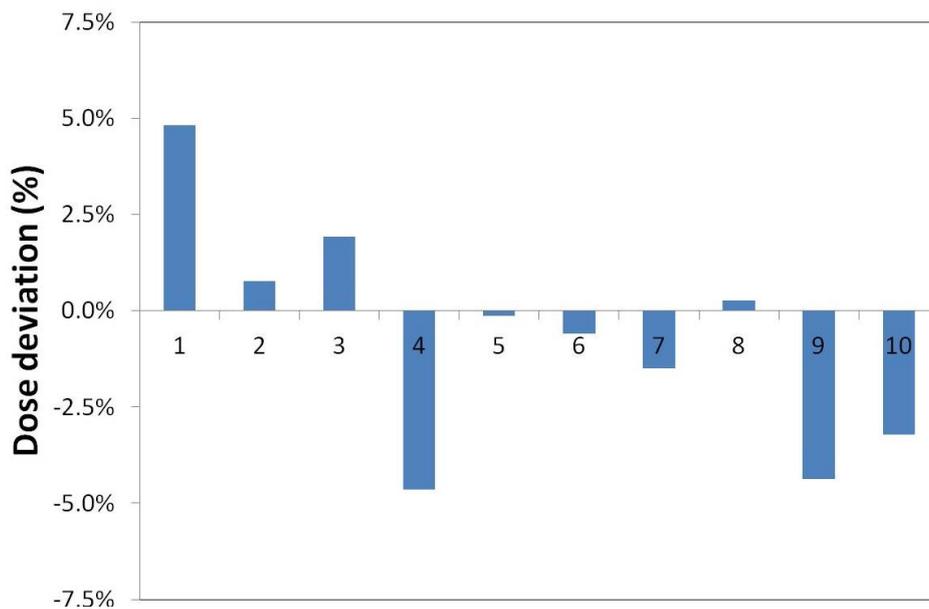
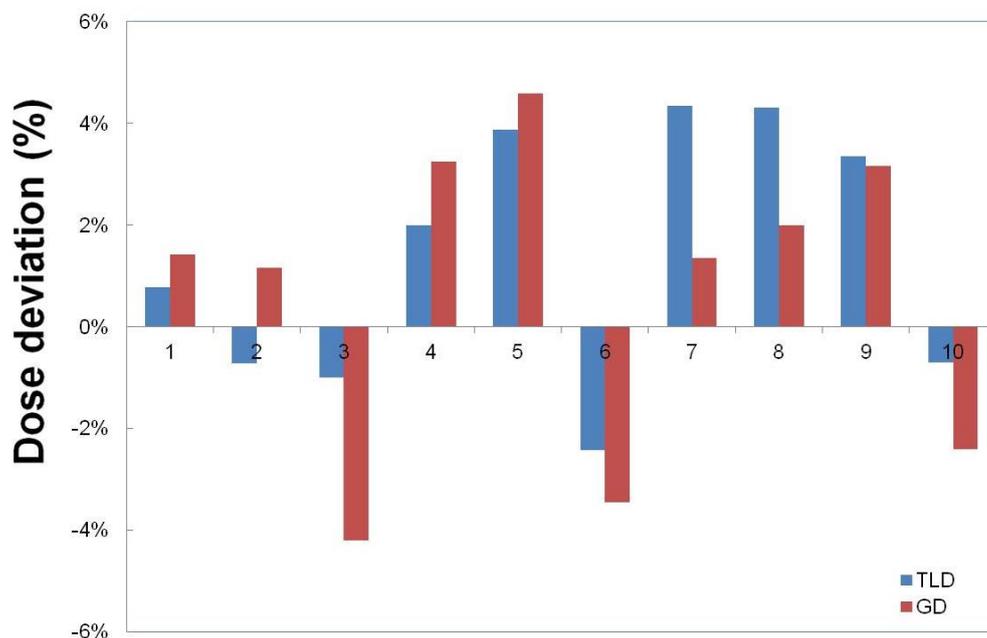


圖 B.3.1. 電子劑量輸出驗證之 20 組臨床量測結果

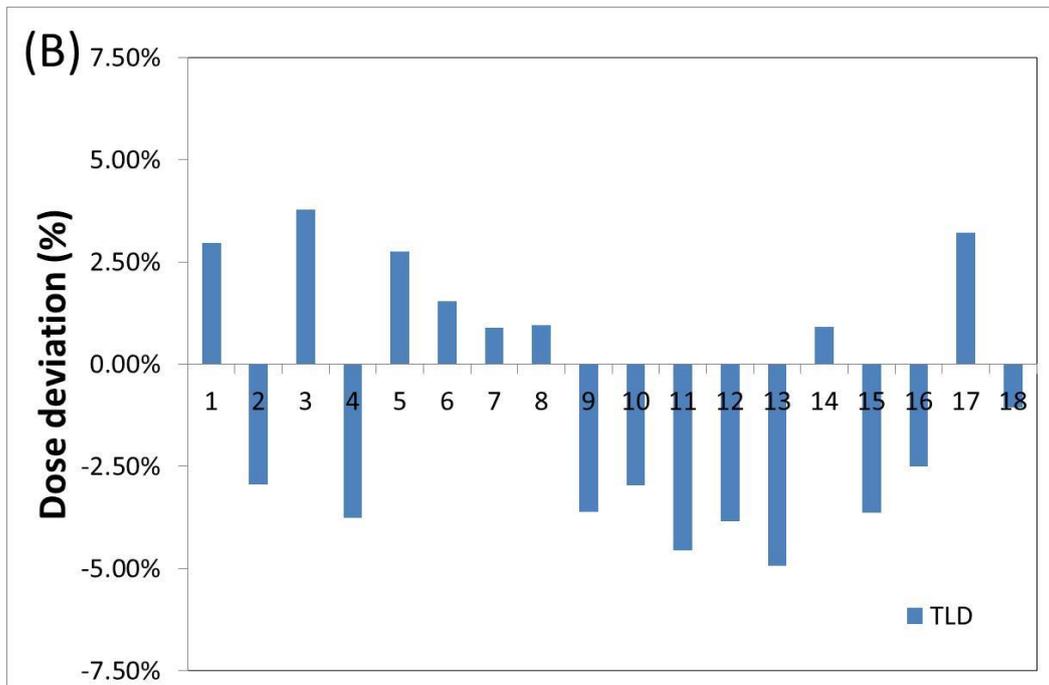
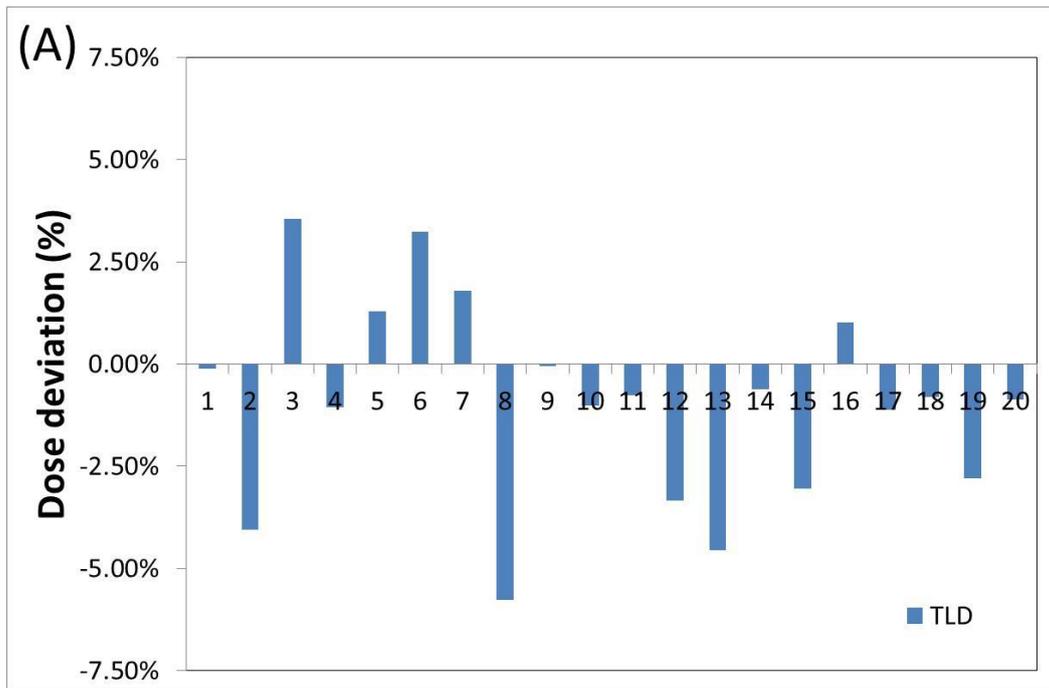


圖 B.3.2. 光子劑量輸出驗證之臨床量測結果：(A)6 MV 共有 20 台直線加速器參與測量，(B)10 MV 共有 18 台參與測量。

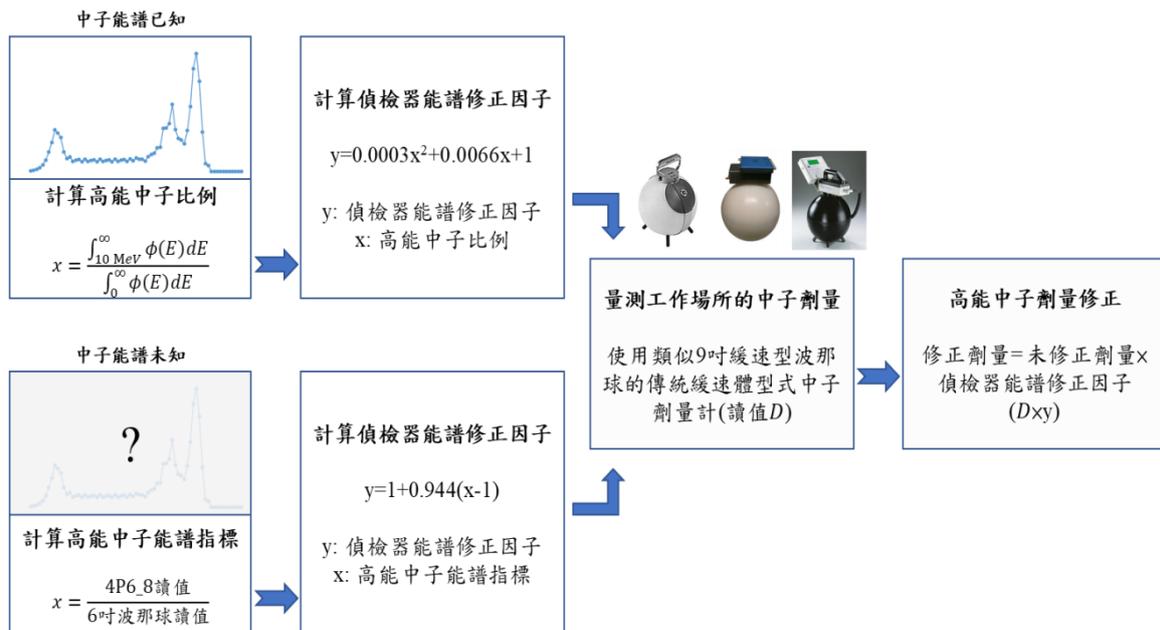


圖 B.3.3. 高能中子輻射場劑量修正步驟流程圖

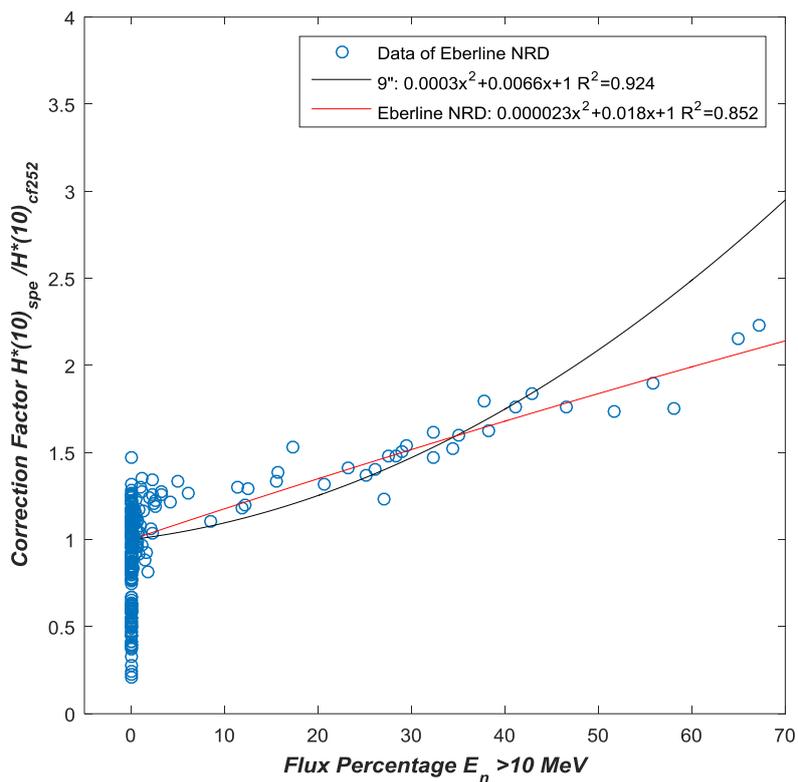


圖 B.3.4. 不同的中子偵檢器對能譜修正因子影響

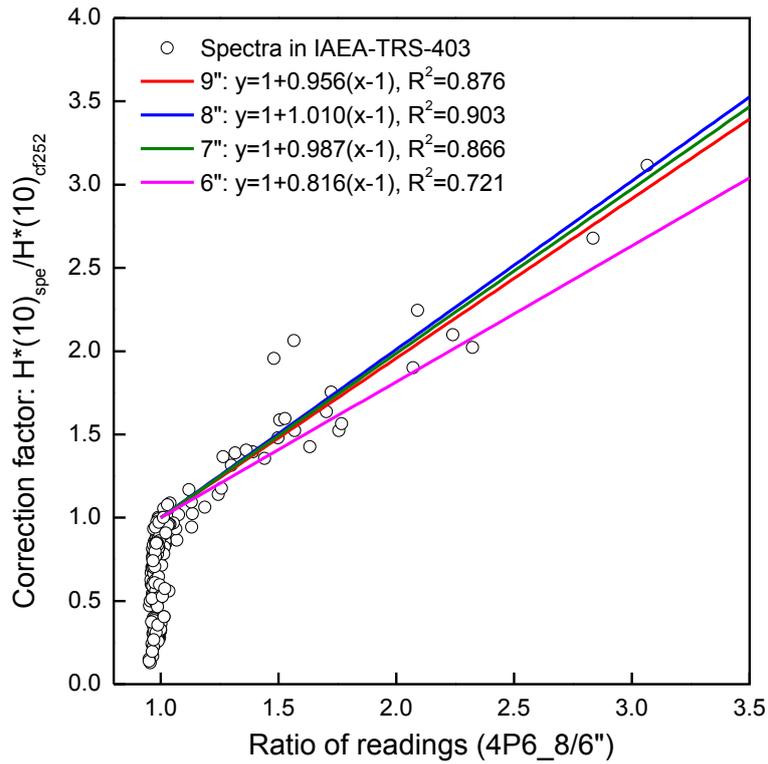


圖 B.3.5. 不同尺寸的波那球體對能譜修正因子影響

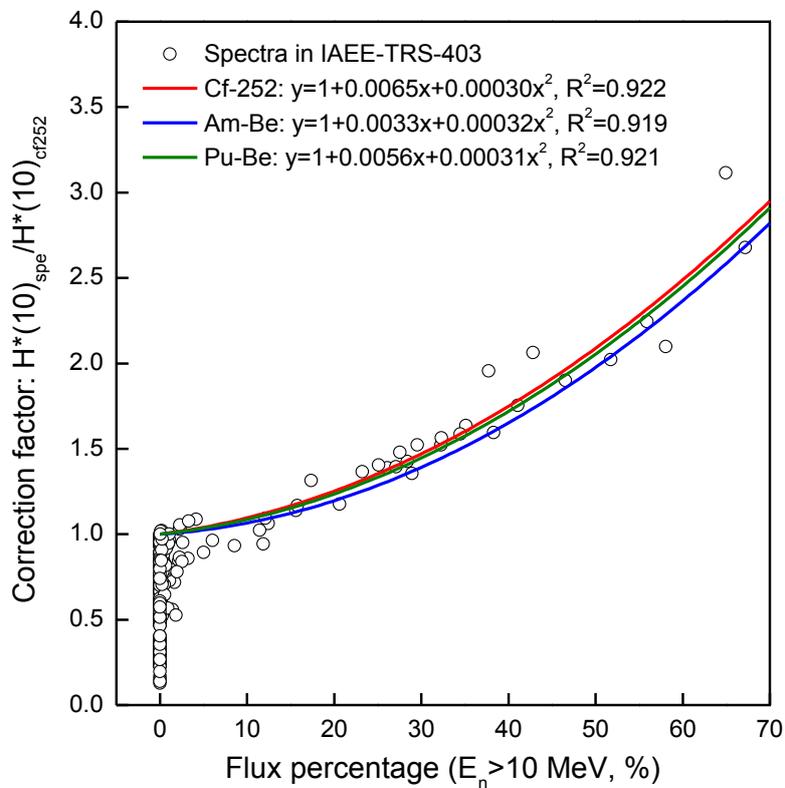
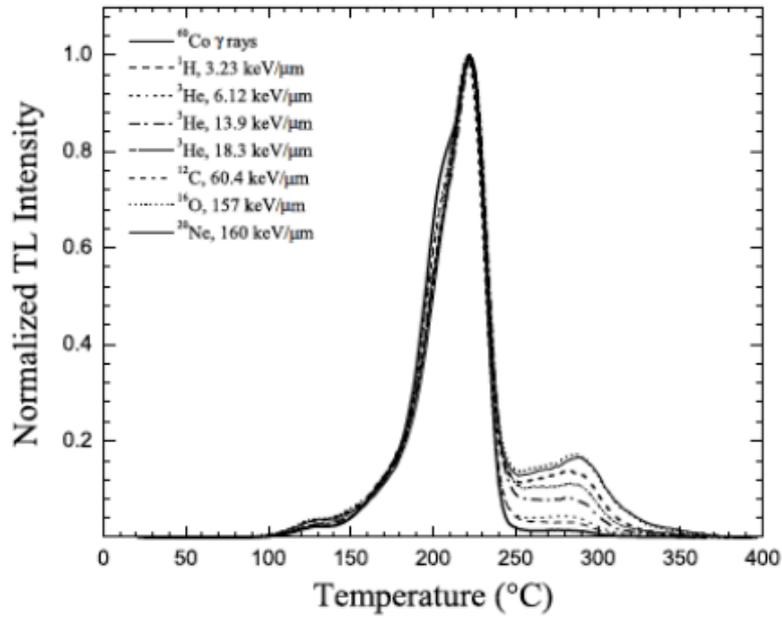
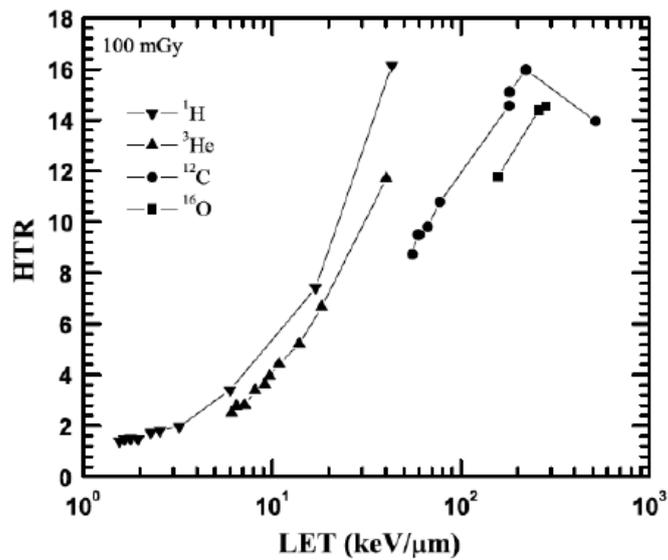


圖 B.3.6. 不同校正射源對能譜修正因子影響

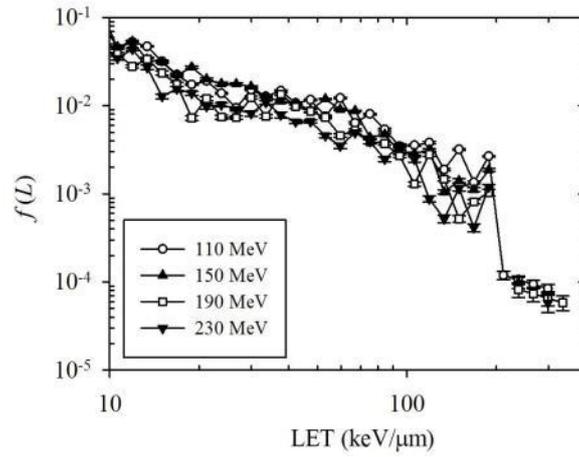


(a)

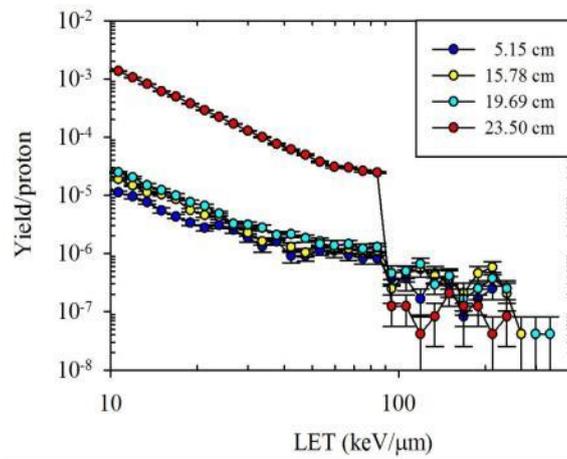


(b)

圖 B.3.7. 直線能量轉移評估系統之建立研究之(a) 高溫區的反應曲線隨 LET 而變化；(b)高溫比值是 LET 的函數。



(a)



(b)

圖 B.3.8. 粒子遷移計算及熱發光劑量計建立直線能量轉移評估系統:(a) LET 能譜與不同初始質子能量之結果；(b) 水假體不同深度下之 LET 能譜。

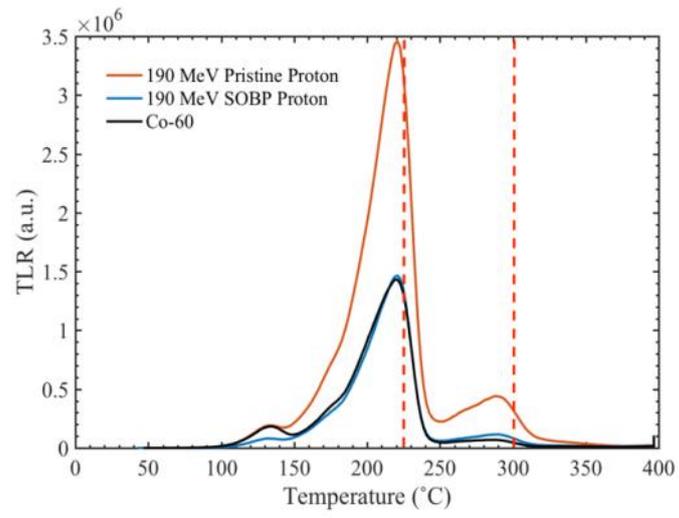
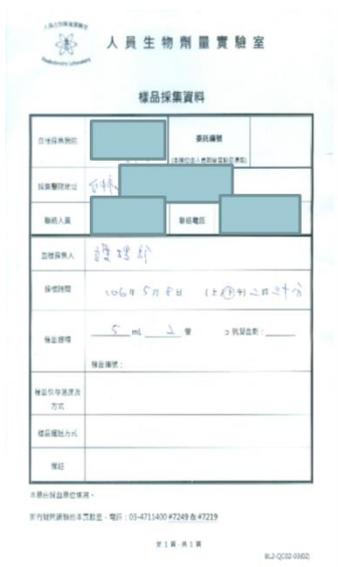


圖 B.3.9. TLD 直線能量轉移系統之質子與鈷六十伽馬射線輝光曲線

B.4.人員生物劑量染色體變異技術研究



人員生物劑量實驗室
樣品採集資料

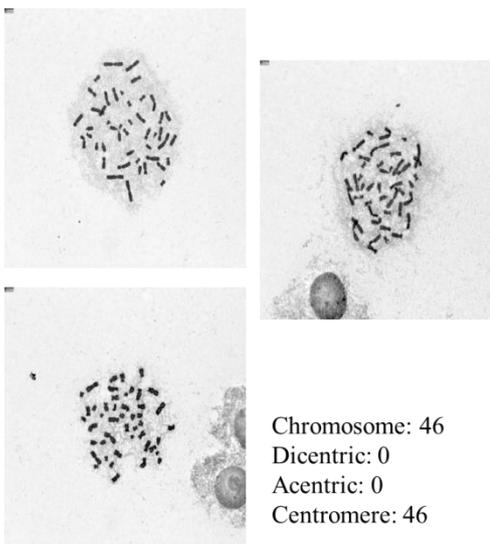


人員生物劑量實驗室
分析委託單

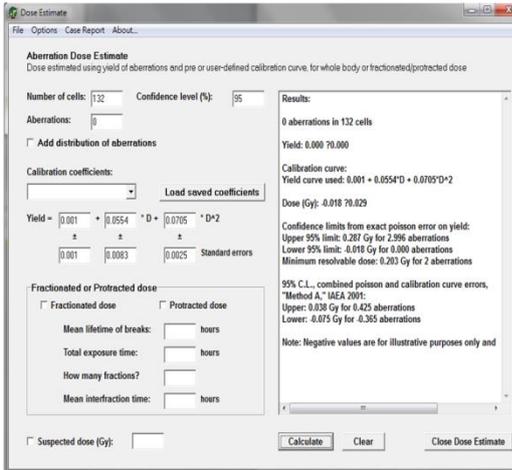


人員生物劑量實驗室
染色體雙中斷分析之輻射曝露問卷

(a)



Chromosome: 46
Dicentric: 0
Acentric: 0
Centromere: 46



Dose Estimate
Aberration Dose Estimate
Number of cells: 132
Confidence level (%): 95
Yield: 0.001 + 0.0554 * D + 0.0705 * D^2
Standard errors: 0.001, 0.0083, 0.0025
Results:
0 aberrations in 132 cells
Yield: 0.000 70.000
Calibration curve:
Yield curve used: 0.001 + 0.0554 * D + 0.0705 * D^2
Dose (Gy): 0.018 70.025
Confidence limits from exact poisson error on yield:
Upper 95% limit: 0.287 Gy for 2.996 aberrations
Lower 95% limit: 0.018 Gy for 0.000 aberrations
Minimum resolvable dose: 0.203 Gy for 2 aberrations
95% C.I., combined poisson and calibration curve errors, "Method A", IAEA 2007:
Upper: 0.036 Gy for 0.425 aberrations
Lower: 0.073 Gy for 0.353 aberrations
Note: Negative values are for illustrative purposes only and

(b)

圖 B.4. 人員生物劑量實驗室本年度 TAF 稽核利用急性曝露案例作為實例資料。(a) TAF 稽核文件；(b) 樣本分析。