

112

核能安全委員會委託研究計畫 成果發表會 摘要彙編





議程

辦理時間：113 年 6 月 4 日

辦理地點：國立政治大學公共行政及企業管理教育中心（台北市大安區金華街 187 號）

場次 1：場地 1-1 科技政策與輻射應用領域（上午 09:30~12:00）				
發表方式：Oral 簡報及 QA				會場地點：9 樓 A938 會議室
場序	時間	執行機關	計畫主持人	計畫名稱
1	09:30~10:00	國立臺灣大學	李佳翰	晶片系統抗輻射技術發展
2	10:00~10:30	國家原子能科技研究院	葉彥顯	衛星元件開發及輻射驗證環境建構
3	10:30~11:00	國立清華大學	趙得勝	元件製程抗輻射技術發展
	11:00~11:10	中場休息		
4	11:10~11:40	財團法人核能資訊中心	郭瓊文	我國原子能科技決策支援體系先期評估
5	11:40~12:10	長庚大學	陳始明	半導體元件耐輻射可靠度之關聯性研究
	12:10~13:00	綜合討論（逾時供應午餐）		



議程

場次 2：場地 1-2 輻射保安應變領域 (下午 13:30~16:00)				
發表方式：Oral 簡報及 QA				會場地點：9 樓 A938 會議室
場序	時間	執行機關	計畫主持人	計畫名稱
1	13:30~14:00	國原院核能安全研究中心	蔡智明	112 年核設施核子保安精進作業研究
2	14:00~14:30	輻射偵測中心	陳婉玲	精進輻射災害環境輻射偵測能量與技術-建立南部備援實驗室之環境試樣分析備援技術
	14:30~14:40	中場休息		
3	14:40~15:10	瑞鉅災害管理及安全事務顧問股份有限公司	馬國宸	輻射災害應變資源建置與實務管理之研究
4	15:10~15:40	國家原子能科技研究院	袁明程	輻射事件應變技術開發研究
	15:40~16:00	綜合討論		



議程

場次 3：場地 2-1 核能安全領域 (上午 09:30~12:00)				
發表方式：Oral 簡報及 QA				會場地點：9 樓 A901 會議室
場序	時間	執行機關	計畫主持人	計畫名稱
1	09:30~10:00	社團法人台灣防火材料協會	施國銓	核電廠除役作業所需之必要設施脆弱度評估與風險管理技術之先期研析
2	10:00~10:30	中華民國地球物理學會	陳瑞昇	精進核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性、參數及技術要項
3	10:30~11:00	國立清華大學	許文勝	核電廠特殊結構除役管制技術之先期研究
	11:00~11:10	中場休息		
4	11:10~11:40	國立清華大學	許文勝	美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之先期研析
5	11:40~12:10	國原院核能安全研究中心	林家德	核子反應器設施安全與除役前期作業管制實務研究
	12:10~13:00	綜合討論 (逾時供應午餐)		



議程

場次 4：場地 2-2 放射性物料安全領域 (下午 13:30~16:00)				
發表方式：Oral 簡報及 QA				會場地點：9 樓 A901 會議室
場序	時間	執行機關	計畫主持人	計畫名稱
1	13:30~14:00	國立清華大學	許榮鈞	112 年受損燃料裝罐後對乾貯護箱之熱流與屏蔽分析技術建立與特性研析
2	14:00~14:30	台灣地下水資源暨水文地質學會	王士榮	112 年低放射性廢棄物坑道處置環境與異向性審驗技術研析
	14:30~14:40	中場休息		
3	14:40~15:10	國立屏東科技大學	楊樹榮	112 年用過核子燃料最終處置設施安全分析之審驗與管制技術研究
4	15:10~15:40	工業技術研究院	李昭仁	112 年用過核子燃料乾貯設施再取出單元及運送作業安全管制技術精進研析
	15:40~16:00	綜合討論		



議程

場次 5 & 6 ：場地3 輻射防護領域 (09:30~16:00)				
發表方式：Oral 簡報及 QA				會場地點：9樓 A939 會議室
場序	時間	執行機關	計畫主持人	計畫名稱
1	09:30~10:00	國家原子能科技研究院	袁明程	接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力
2	10:00~10:30	國家原子能科技研究院	楊子毅	含天然放射性物質商品之調查及管理研究
3	10:30~11:00	國立清華大學	許榮鈞	高強度輻射設施除污及除役規劃暨安全審查技術研究
	11:00~11:10	中場休息		
4	11:10~11:40	國立清華大學	田能全	112 年度鋼鐵輻射異常物相關回收與熔煉作業人員之輻射劑量及風險評估研究
5	11:40~12:10	中華民國醫學物理學會	李紳豪	放射治療設備之醫療曝露品質保證管制作業及項目精進研究
	12:10~13:00	綜合討論 (逾時供應午餐)		
6	13:30~14:00	國立清華大學	許芳裕	計畫曝露輻射安全與劑量約束評估研究
7	14:00~14:30	國立清華大學	許芳裕	既存性曝露管理規範研析
	14:30~14:40	中場休息		
8	14:40~15:10	國家原子能科技研究院	黃珮吉	核電廠除役獨立驗證偵檢量測技術先期研究
	15:10~16:00	綜合討論		



議程

場次 7 & 8 ：場地4 核醫科技領域 (10:00~16:00)				
發表方式：Oral 簡報及 QA			會場地點：9樓 A902 會議室	
場序	時間	執行機關	計畫主持人	計畫名稱
1	10:00~10:30	長庚大學	翁啓昌	放射性碘-131 標幟 PARP 抑制劑於三陰性乳癌治療效益評估
2	10:30~11:00	國立清華大學	裴晉哲	中子斷層影像技術開發
	11:00~11:10	中場休息		
3	11:10~11:40	臺北醫學大學	張剛璋	TSP0 3rd generation 放射性藥品(I-123-ER176) 於腦部創傷動物模式 (Traumatic brain injury, TBI) 影像分析
4	11:40~12:10	國立陽明交通大學	陳傳霖	MIBG 類似物及 ER-176 類似物之氟或碘-標誌比對研究案
	12:10~13:00	綜合討論 (逾時供應午餐)		
5	13:30~14:00	和信治癌中心醫院	黃玉儀	轉移性肝病灶切除前的肝功能評估-開放性學術臨床試驗，與電腦斷層掃描體積測量或核磁共振術比較，評估術前殘餘肝功能評估方法：鎩 68-多蕾克鎩正子造影之準確度
6	14:00~14:30	國立陽明交通大學	簡千栩	運用人工智慧探討及預測動脈粥狀硬化之形成
	14:30~14:40	中場休息		
7	14:40~15:10	國立虎尾科技大學	林家驊	乾燥潔淨轉輪系統運作對皮膚及眼睛危害風險評估
8	15:10~15:40	致理科技大學	鄭來宇	固體靶站設備操作虛擬實境之使用者互動介面優使性評估
	15:40~16:00	綜合討論		



議程

場次 9 & 10 : 場地 5 環境能源科技領域-1 (10:00~16:00)				
發表方式：Oral 簡報及 QA				會場地點：9 樓 A903 會議室
場序	時間	執行機關	計畫主持人	計畫名稱
1	10:00~10:30	中原大學	洪穎怡	分散式區域電網之電壓穩定策略研究
2	10:30~11:00	國立彰化師範大學	黃維澤	配電饋線三相負載變動與不平衡改善之策略研究
	11:00~11:10	中場休息		
3	11:10~11:40	國立高雄科技大學	蘇俊連	含分散式電源之饋線電驛最佳化協調策略研究
4	11:40~12:10	國立高雄科技大學	辜德典	配電資訊模型系統傳輸最佳化之研究
	12:10~13:00	綜合討論 (逾時供應午餐)		
5	13:30~14:00	國立中正大學	劉祐任	微電網支援配電饋線運轉之研究
6	14:00~14:30	台灣氫能與燃料電池學會	陳正一	微電網三相多電源併聯與調頻之研究
	14:30~14:50	中場休息		
	14:50~16:00	綜合討論		



議程

場次 11 & 12 : 場地 6 環境能源科技領域-2 (10:00~16:00)				
發表方式：Oral 簡報及 QA				會場地點：9 樓 A904 會議室
場序	時間	執行機關	計畫主持人	計畫名稱
1	10:00~10:30	國立臺灣科技大學	郭政謙	變電所輸變電設備損傷診斷專家系統研究
2	10:30~11:00	東南科技大學	汪以仁	輸電線路保護與電驛設定
	11:00~11:10	中場休息		
3	11:10~11:40	國立臺灣大學	劉志文	具綠能發電設備併網之電網韌性強化
4	11:40~12:10	國立陽明交通大學	曾院介	低功耗磁阻式感測器元件研究
	12:10~13:00	綜合討論 (逾時供應午餐)		
5	13:30~14:00	國立清華大學	沈若樸	生質物創新運用之轉換技術及其效益研究
6	14:00~14:30	中原大學	院繼祖	低維度碳材合成技術研究
	14:30~14:50	中場休息		
	14:50~16:00	綜合討論		



目 錄

場次 1：科技政策與輻射應用領域

※晶片系統抗輻射技術發展.....	1
※衛星元件開發及輻射驗證環境建構.....	8
※元件製程抗輻射技術發展.....	16
※我國原子能科技決策支援體系先期評估.....	22
※半導體元件耐輻射可靠度之關聯性研究- 開發關鍵電子元件的輻射可靠 性測試平臺.....	26



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





晶片系統抗輻射技術發展

Radiation-hardened technology development of integrated circuits and systems

(計畫編號：112B007)

蔡孟智¹、梁淳皓¹、洪建平²、余世博²、李建霖¹、蔡佳勳¹、李佳翰²、陳信樹¹、蔡坤諭¹

¹台灣大學電機工程學系 ²台灣大學工程科學及海洋工程學系

本研究計畫「晶片系統抗輻射技術發展」之研究項目將分為「太空商業應用之抗輻射晶片設計開發」、「短脈衝雷射輻射驗證技術」及「抗輻射晶圓等級小晶片異質整合技術」三個子主題，本計畫完成開發具有耐輻射功能的電源轉換器(DC-DC Converter)，本計畫也把已建立之短脈衝雷射之輻射驗證平台加以改善，使平台具備可程式控制化的能力，以利於整合各項儀器，本計畫也將研發小晶片之異質整合的技術、評估其抗輻射之特性、探討異質整合載板之矽橋(Silicon Bridge)的多層連線(Interconnect)，並進一步討論比一般晶片面積大的晶圓等級整合，使之能減少使用到傳統印刷電路板，以利太空電子系統的體積與重量之有效降低。

This research proposal "Radiation-hardened technology development of integrated circuits and systems" has three topics, including "Design and Development of Radiation Hardened Chips for Space Commercial Applications", "Verification techniques for Short-pulse Laser induced Radiation" and "Heterogeneous Integration of Radiation Anti-radiation



Wafer-level Small Chips Technology". In this project, we complete the development of a power converter (DC-DC Converter) with radiation-resistant functions. It also integrates the built short-pulse laser radiation verification platform to be programmable and controllable to facilitate the integration of various instruments. Meanwhile, the heterogeneous integration technology of small chips will be studied. The relevant radiation resistance characteristics will be evaluated, investigate the multilayer interconnect of the silicon bridge of the heterogenous integration substrate and integrate the wafer level which has the larger area than the general chip size, which can be used to reduce the traditional printed circuit boards, and effectively reduce the whole volume and size for the space electronic systems.

壹、計畫目標

為執行原能會計畫的「晶片系統抗輻射技術發展」研究項目，本項目分為「太空商業應用之抗輻射晶片設計開發」、「短脈衝雷射輻射驗證平台」及「抗輻射晶圓等級小晶片異質整合技術」三個工作項目。

貳、重要成果

本計畫之重要成果分成三個工作項目「太空商業應用之抗輻射晶片設計開發」、「短脈衝雷射輻射驗證技術」及「抗輻射晶圓等級小晶片異質整合技術」，說明如下。在本計畫之支持下，投稿被接受刊登如下之 SIC 期刊文章 Chi-Wei Chen, Weining Zeng Pranoto, Hsin-Shu Chen, and Wen-Jong Wu, " A 0.25- μ m HV-CMOS Synchronous Inversion and Charge Extraction Interface Circuit With a Single Inductor for Piezoelectric Energy Harvesting," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 38, No. 12, pp. 15707-15718, Dec. 2023.



一、 太空商業應用之抗輻射晶片設計開發

抗輻射晶片量測部份目前已經完成了傳統 SWR 與抗輻射 SWR PCB 之設計，並且已完成傳統與抗輻射 SWR PCB 下線，另外進行 LDO 輻射影響分析與抗輻射方法分析，比較不同抗輻射方法之簡之優劣，未來將據此進行抗輻射 LDO 之改善設計。

在抗輻射 SWR 與傳統 SWR PCB 方面，晶片量測時可使用麵包版與離散被動元件進行量測，此量測方法由於不需進行焊接並且可自由更動佈線，相較於設計 PCB 搭配 SMD 容易進行量測所需之電路環境，然而使用麵包版與離散被動元件實現之電路環境具有以下缺點，佈線線阻較大、雜訊較多、離散被動元件數值較不精確等，因此多使用 PCB 搭配 SMD 進行量測電路環境設置，確保量測數值精確並符合所需之電路環境，目前已經由 TSRI 進行抗輻射 SWR 與傳統 SWR PCB 下線。

在 LDO 輻射影響分析與抗輻射布局前分析方面，當傳統 LDO 受到輻射干擾時，由於 SEE 現象導致內部節點電壓跳動，導致輸出電壓擾動，由於當參考電壓擾動時可能導致使用此參考電壓之電路產生非預期之行為表現，抑制此現象對於提供電路穩定參考電壓之應用尤為重要。類比電路抑制 SEE 現象主要使用兩種方式進行：類比冗餘與時間偏移冗餘類比冗餘 (Analogue Redundancy)。類比冗餘利用將電路複製多份，並利用電阻將



輸出進行平均，來達到減緩輸出擾動的效果，可用於運算放大器輸出節點減緩因輻射引起之擾動，進而減緩 LDO 輸出擾動。

二、 短脈衝雷射輻射驗證技術

在移動平台系統整合方面，本團隊目前短脈衝雷射輻射驗證平台系統如下圖所示。從整體架構配置中可再細分為光學系統、成像系統及移動平台系統。其中移動平台系統承載 DUT，先透過垂直平台使光源及影像能對焦至 DUT，再透過整合的兩個一維移動平台達到在二維移動的效果。平面掃描過程中設定每步移動單位長度、移動速度及定義座標零點，而達到讓光源掃描 DUT 的目的。

在自動化控制能量衰減及照射時間方面，DUT 發生 SEE 現象後，會針對敏感區域照射並逐步調降能量，且同時監測 DUT 的反應是否發生 SEE 現象，以找到對於雷射的臨界能量。而雷射能量的調控是透過光路中的中性密度濾波片來控制，先前中性密度濾波片需手動旋轉使雷射通過濾波片中不同穿透率的部分，進而達到調控能量的效果。但中性濾波片不同位置對於能量衰減的變化為非線性的關係，且手動調整較難以固定比例調整能量變化。

三、 抗輻射晶圓等級小晶片異質整合技術

在異質整合晶片之多層連線建模探討方面，異質整合製程上方的小晶片，透過主動中介層(Active Interposer)的多層連線進行訊號的連結，PAD、微凸塊(microbump)與導線彼此之間的寄生電阻電容(RC)

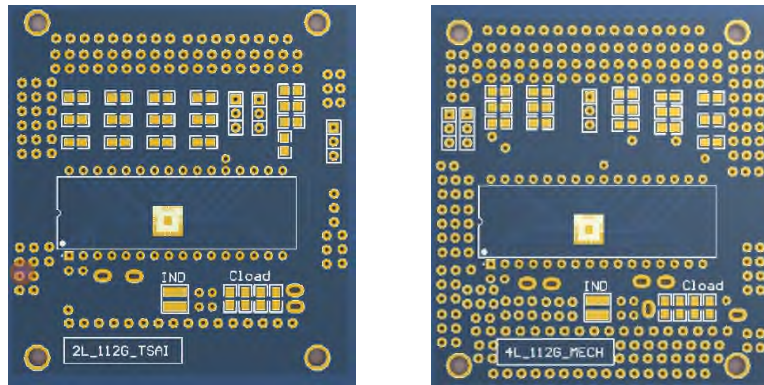


效應，會影響晶片間訊號傳輸的延遲時間、穩定性及完整性。由於不同長度、粗細與間距的導線，對於電路特性所造成的影響程度不同，因此在異質整合晶片電路設計的過程中，於電路模擬時必須將 PAD、微凸塊與導線間的寄生效應納入考量，以確認晶片的功能與規格是否仍符合原先的設計，在主動中介層上的主動電路通常會加入緩衝器(Buffer)來增強訊號。

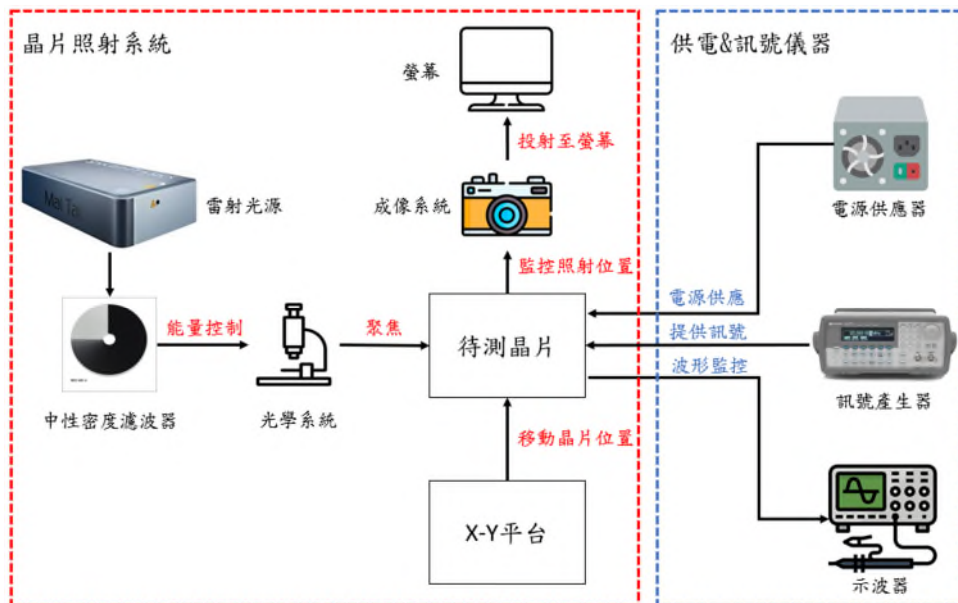
在異質整合製程之小晶片電路設計方面，為了進行抗輻射小晶片異質整合技術開發與探討，設計了一個含有 2 對 4 解碼器與 32 bit ROM 矩陣的電路佈局，如圖三所示。ROM 電路佈局設計的過程中，同時諮詢 TSRI 工程師的建議，將異質整合實作可能面臨的問題納入考量。

參、展望

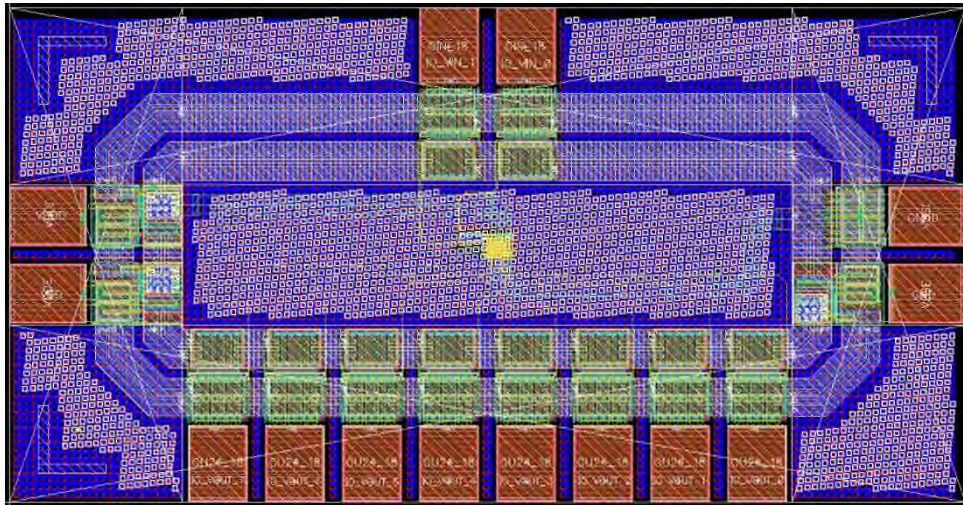
將持續針對已完成之傳統 SWR 與抗輻射 SWR PCB 之設計，並且已完成傳統與抗輻射 SWR PCB 下線，另外進行 LDO 輻射影響分析與抗輻射方法分析，比較不同抗輻射方法之簡之優劣，未來將據此進行抗輻射 LDO 之改善設計。精進客製化自動化短脈衝雷射輻射驗證技術，相較於以往能更準確地調整照射能量的比例，也能更有效率地找到敏感區域的臨界能量。後續也規劃使用類似 T18 製程進行主動中介層晶片實作，並透過與 TSRI 合作進行的異質整合技術，將工作項目一設計的 SRAM 晶片和工作項目三設計的 ROM 晶片與主動中介層晶片進行封裝整合，預計 113 年使用核研所提供的質子束射線對異質整合封裝後的晶片進行照射實驗。



圖一、左圖為傳統 SWR PCB 圖，右圖為抗輻射 SWR PCB 圖。



圖二、短脈衝雷射輻射驗證平台架構配置。



圖三、32 bit ROM 電路佈局。



衛星元件開發及輻射驗證環境建構

Development of satellite components and establishment of radiation test environment

(計畫編號：112B008)

葉彥顯

國家原子能科技研究院

國際上各國均將太空科技發展視為競逐國力的象徵，而決定太空科技成功與否的重要關鍵因素之一便是發展可用於太空之太陽電池、電子元件與晶片。這些元件必須克服的第一個障礙即是太空輻射環境對元件的損害，其影響範圍可能從元件操作性能劣化到完全的功能失效，而這些影響甚至可能會導致主要衛星系統故障及太空任務提前終止。故瞭解輻射對於太陽電池、電子元件與晶片的影響以及因應措施對發展太空科技應用尤為重要。本計畫進行衛星元件之開發及輻射驗證環境之建構。本論文說明工作項目 1「太陽電池抗輻射技術發展」之執行成果，研究項目包括「抗輻射太陽能電池磊晶研究」、「抗輻射太陽能電池元件製程」、「抗輻射太陽能電池元件特性量測」三個子主題。為提升太空太陽電池效率，本研究改變中層子電池摻雜濃度，將摻雜濃度之差異加大，提升載子收集效率。接著根據外部量子效率量測，調整上層子電池光譜，使電流達到更合適之匹配。製程方面透過金屬與半導體之接觸電阻的研究，以改變退火溫度方式降低電阻值，另外也研究在玻璃蓋片上增加抗反射膜，以進一步提升效率。在太空太陽電池輻射測試上以 1 MeV 之質子照射，電池轉換效率維持率平均為 65.65%，已達預期目標；並量測照



射前後之外部量子效率，以了解可能之輻射損害機制。

The maturity of space technology development has been regarded as a symbol of national strength, and the key topics of space technology are the space solar cells, electronic components and chips. The first obstacle these components have to overcome is the damage caused by radiation in space environment. Radiation damage may degrade the performance of components or even cause functional failure, which may further lead to failure of major satellite systems and termination of space programs. Therefore, understanding the impact of radiation on solar cells, electronic components and chips is particularly important for the development of space technology applications. This project includes the development of satellite components and the construction of a radiation verification environment. This paper demonstrate work item 1, “Development of Anti-Radiation Solar Cell Technology”, the topics include “Study of the epitaxy of anti-radiation space solar cell”, “Device process of anti-radiation space solar cell” and “Measurements of anti-radiation space solar cell”. To improve the efficiency, doping concentration of the middle cell was changed to improve the carrier collection efficiency. Then, based on the external quantum efficiency measurement, the spectrum of the top cell was adjusted to achieve a proper current match. In metal process, the contact resistance between metal and semiconductor was reduced by changing the annealing temperature; an anti-reflective film was coated on the cover glass to improve efficiency. In radiation test, after 1 MeV protons radiation, the average normalized remaining power was 65.65%. The external quantum efficiency before and after the radiation test was measured to study the radiation damage mechanism.



壹、計畫目標

太陽電池是衛星主要的電力來源。為確保正常運作，太陽電池必須能夠承受太空中高能粒子的轟擊；因為輻射所造成之損害可能使太陽電池性能衰退或功能失效，進而導致衛星系統故障及太空任務提前終止。因此在太空太陽電池之開發上除著重轉換效率外，其抗輻射能力亦為重要之參數。本研究接續過去之開發經驗持續提升太陽電池之轉換效率，並對電池之抗輻射能力及損害機制加以研究。

貳、重要成果

III-V 族太陽電池具有最高的轉換效率，但國內太陽電池產業仍以矽晶太陽電池最被廣泛使用，主要為發電成本與製造成本相對較低，且 III-V 族太陽電池需搭配聚光模組使用，使得成本居高不下造成市場萎縮。然而，近年來國內太空科技產業化，自主技術開發被視為重點發展項目，儼然成為 III-V 族多接面太陽能新契機。藉由本計畫「太陽電池抗輻射技術發展」之執行，以 III-V 族材料製作出具抗輻射與高轉換效率之電池，有利於搭載在衛星作為電力來源，可促使國內產業升級快速跨入太空科技領域，帶動台灣太空產業供應鏈，逐步邁向關鍵元件自主化目標。本研究開發先以提升轉換效率為出發點，搭配輻射之測試以評估太陽電池之抗輻射能力，並研究可能之損害機制，作為後續改善之參考。本計畫以國原院現有 MOCVD 太陽電池磊晶設備，自主研發設計太空用太陽電池片，並藉由元件輻射效應的探討，強化前瞻性太空科技的應用與實務。



經由本計畫之執行，已展現初步之開發成果。首先研究改變中層子電池摻雜濃度，將摻雜濃度之差異加大，以提升載子收集效率(表 1)。接著根據外部量子效率之量測結果，調整上層子電池光譜，使電流達到更合適之匹配(圖 1)。製程方面則透過金屬與半導體之接觸電阻的研究，以改變退火溫度的方式降低電阻值(表 2)，另外也研究在玻璃蓋片上增加抗反射膜，以進一步提升效率(表 3)。

在太空太陽電池輻射測試上以 1 MeV 之質子照射，電池轉換效率維持率平均為 65.65%(表 4)，已達預期目標；並量測照射前後之外部量子效率，探討可能之輻射損害機制(圖 2)。

藉由本研究之執行、實驗分析及初步的研究成果，本院在抗輻射太空太陽電池技術方面已逐漸建立基礎，可作為後續研究設計與太空太陽電池可靠度計算之依據。

一、說明研發成果之重要貢獻

航太科技為先進國家競逐國力的指標，本研究有效利用現有資源與研發人才，在初期大幅降低從無到有的高額預算投資與場域建設時效性問題，完成高效率太空太陽電池製作，大面積(8 cm × 4 cm)太陽電池之最佳轉換效率可達 29.1%，已達商售產品之基本規格要求。抗輻射方面在 1 MeV 質子照射環境下，電池轉換效率維持率平均為 65.65%，與文獻之水平相當，展現國內初步開發成果，並向衛星元件關鍵元件自主化目標更邁進一步。

藉由計畫之執行培訓數名專業研究人員，使其熟悉 III-V 族半導體磊晶、製程、封裝、材料分析、元件設計、輻射對物質作用的基本原理與應用、輻射損傷機制、輻射效應測試方法等，強化人員在半導體元件、材料、輻射物理等方面的專業知識。參與之工作人員獲得完



整訓練，對於國內太空科技人才之培育有實質的貢獻。經由與相關學術單位進行技術合作交流，加快太空元件技術開發計畫時程，並提升學術理論與實務能力。經由全方位交流合作，逐步降低國際採購風險衝擊，帶動台灣太空產業供應鏈，達到關鍵元件自主化目標。

二、論著產出

工作項目「太陽電池抗輻射技術發展」共發表 5 篇研究與技術報告。

1. 李岳穆，光電元件金屬-半導體接觸特性之研究
2. 施圳豪，太空用太陽電池之磊晶架構優化研究
3. 蔡世貞，Al/Si 合金共熔點和 InGaP 化合物半導體能隙與 MOCVD 製程溫度之關係
4. 林家偉，退火條件對半導體電極影響
5. 葉彥顯，太空太陽電池之位移損害劑量測試法

參、展望

目前國內的產業與學術界對於太空元件領域並未投注足夠資源，本研究將可做為國內未來在推展航太科學、軍事、太空電子等研究領域的重要基礎。本計畫促進國內太空科技發展，真正落實國家之國防、太空科技技術自主政策目標。本團隊於計畫完成後，仍繼續規劃三年之接續發展，以本計畫之成果為基礎，延續衛星元件之開發並建構輻射驗證環境，以補足目前國內輻射驗證技術之不足。



表 1、改變中層子電池摻雜濃度之實驗結果

	Jsc(mA/cm ²)	Voc(V)	Jm(mA/cm ²)	Vm(V)	Pm(W)	FF	Eff.	Avg. Eff.
Before	17.75	2.60	17.08	2.18	1.12	0.81	27.27%	27.41%
	17.89	2.60	17.35	2.16	1.13	0.81	27.42%	
	17.81	2.61	17.01	2.21	1.14	0.81	27.53%	
	17.90	2.59	17.27	2.17	1.13	0.81	27.39%	
	17.80	2.60	17.01	2.21	1.13	0.81	27.43%	
After	17.10	2.63	16.64	2.27	1.14	0.84	27.57%	27.62%
	18.00	2.61	17.37	2.18	1.14	0.80	27.63%	
	17.59	2.62	16.85	2.24	1.14	0.82	27.65%	
	17.59	2.58	17.00	2.21	1.13	0.83	27.51%	
	17.34	2.63	16.79	2.26	1.14	0.83	27.72%	

電池面積：30.18 cm²

表 2、不同退火溫度所得到的特徵接觸電阻

退火溫度(°C)	轉移長度L _T (μm)	片電阻R _{sh} (Ω/□)	特徵接觸電阻ρ _c (10 ⁻⁴ Ω-cm ²)
345	10.8	480.36	5.59
365	9.7	503.47	4.72
385	8.5	492.01	3.51
405	6.1	506.98	1.90
425	10.5	483.31	5.38

表 3、有無 ARC 之效率比較

玻璃有無AR之比較 (AM0)		Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	Jm (mA/cm ²)	Vm (V)	Pm (W)	F.F.	EFF.	效率變化 (%)
Sample 1	無 AR	12.88	2.54	12.22	2.28	0.84	0.85	20.45%	+2.80%
	有 AR	13.22	2.54	12.37	2.32	0.86	0.85	21.02%	
Sample 2	無 AR	13.85	2.60	13.25	2.32	0.93	0.85	22.56%	+2.71%
	有 AR	14.19	2.60	13.76	2.30	0.95	0.86	23.17%	
Sample 3	無 AR	13.79	2.56	12.37	2.30	0.86	0.81	20.87%	+3.21%
	有 AR	14.12	2.58	12.91	2.28	0.89	0.81	21.54%	

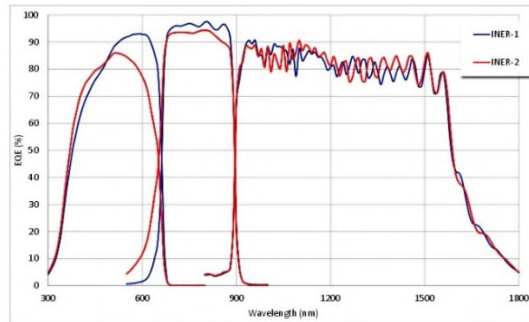
電池面積：30.18 cm²



表 4、質子輻射照射實驗結果

Sample	Condition	Isc (mA)	Voc (V)	Im (mA)	Vm (V)	Pm (mW)	FF	Eff.	Ratio
1	Before	14.41	2.56	0.01	2.26	31.54	0.86	28.84%	65.22%
	After	11.61	2.26	0.01	1.99	20.51	0.78	18.81%	
2	Before	14.34	2.56	0.01	2.28	31.62	0.86	28.91%	66.72%
	After	11.69	2.30	0.01	2.01	21.03	0.78	19.29%	
3	Before	0.01	2.56	0.01	2.26	0.03	0.86	28.91%	65.02%
	After	11.73	2.28	0.01	2.01	20.50	0.77	18.80%	

Simulator	AM0 (Space)			
	Top	Mid	Bot	J _{TopMid}
INER 1	18.24	16.98	28.54	1.07
INER 2	16.54	17.83	28.73	0.93



Sample	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	Jm (mA/cm ²)	Vm (V)	Pm (W)	FF	Eff.
INER 1	16.06	2.62	15.68	2.36	0.03	0.88	27.1%
INER 2	17.76	2.60	17.41	2.30	0.03	0.87	29.3%

電池面積 : 0.8 cm²

圖 1、調整上層子電池光譜之實驗結果

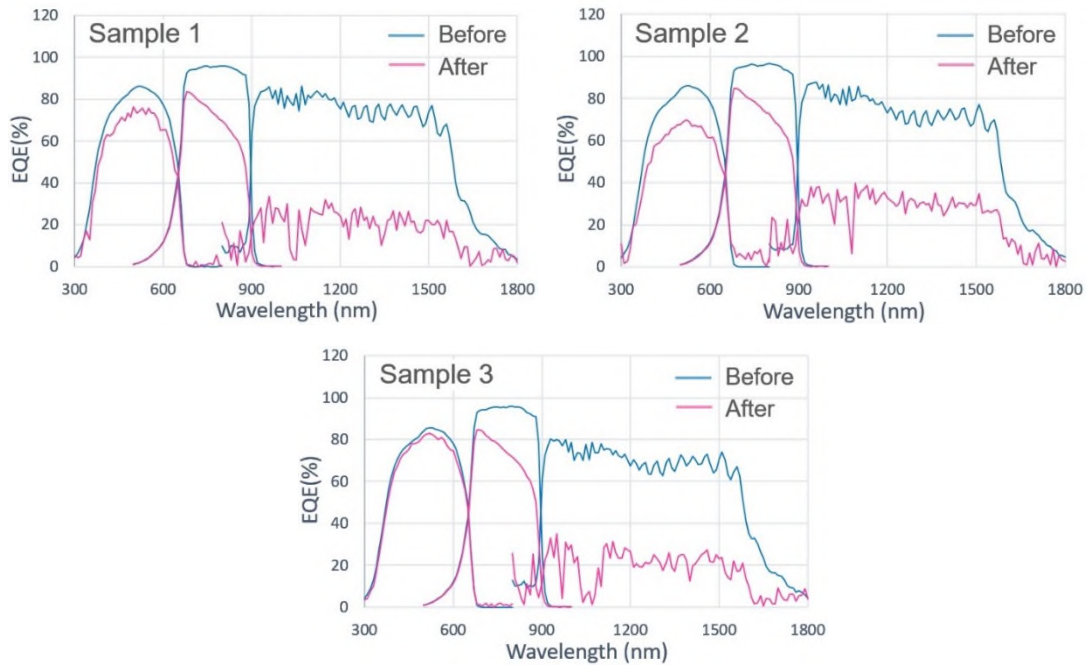


圖 2、電池於質子照射前後之 EQE 量測的結果



元件製程抗輻射技術發展

Development of Radiation-Hardened Electronic Devices and Process Technology

(計畫編號：112B006)

巫勇賢¹ 張廖貴術¹ 趙得勝²

¹ 國立清華大學工程與系統科學系 ² 國立清華大學原子科學技術發展中心

太空任務與低軌衛星應用的高度需求已驅使許多國家競相投入太空科技領域的發展，而太空應用商業化的潮流也可望開創下一波產業的新藍海。然目前太空科技仍存在諸多的技術挑戰，其中太空環境中的高能輻射對於電子元件或系統所誘發的輻射效應，可能造成電子元件操作性能劣化或暫態失效，已成為未來太空科技發展亟待解決的問題之一。為實現太空科技的創新構想與關鍵應用，瞭解輻射對於電子元件與材料的影響與作用機制為厚植太空電子領域的技術基礎，而開發可用以承受太空極端輻射環境的先進抗輻射電子元件亦是太空探索任務成功與否的關鍵要務與挑戰。有鑑於此，本研究係針對可抗輻射之新材料、製程技術與新型元件結構進行探索，藉此釐清新型材料與元件的輻射耐受性及各種輻射效應的劣化機制與測試評估方法。本年度所執行的研究項目包括：(1)抗輻射之新興記憶體元件開發：建構質子束照射下之總游離劑量效應測試技術；(2)抗輻射之積體電路製程與先進電晶體研究：應用於衛星軌道之抗輻射測試評估與繡式場效電晶體製作分析；(3)寬能隙半導體材料與元件之輻射效應評估：SiC 或 GaN 寬能隙材料評估與輻射損傷特性分析。



A high demand for space missions and low-orbit satellite applications has driven many countries to invest in the development of space technology. The trend of commercialization of space applications is also expected to create a new blue ocean for the next wave of industrial revolution. However, there are still many technical challenges in space technology. Among them, the radiation effects induced by high-energy radiation in space environment may lead to performance degradation or transient failure of electronic devices or systems. This has become one of the urgent problems to be solved in the development of space technology in near future. In order to realize the innovative concepts and key applications of space technology, understanding the radiation effects and the damage mechanisms on electronic devices and materials is particularly important to enhance the technical basis in the field of space electronics. Development of advanced radiation-hardened electronic devices to withstand extreme radiation environment in space is also a key imperative and challenge to the success of space exploration missions. For this reason, in this project we explored new semiconductor materials, process technologies and novel device structures that can mitigate the degradation subject to radiation. By this research project, we can clarify the radiation resistance and the degradation mechanisms of new materials and devices as well as establish the test evaluation methods of various radiation effects. The research topics to be implemented this year include: (1) Development of novel radiation-hardened memory devices: establishment of test technology of total ionizing dose effects using proton beam irradiation; (2) Study of radiation-hardened IC manufacturing technology and advanced transistors: fabrication, analysis, and radiation test evaluation of FinFET transistors applied to satellite orbit; (3) Assessment of radiation effects on wide bandgap semiconductor materials and devices: evaluation and analysis of radiation damage characteristics of SiC or



GaN wide bandgap materials.

壹、計畫目標

發展太空科技需要面對眾多的挑戰，除須多學科的知識支持與技術整合之外，在太空環境之下，許多技術都需要重新開發和驗證。當航天器或衛星在太空中運行時，其電子系統首當其衝會遭受到來自太陽粒子和宇宙射線的影響，這些輻射包含各式高能粒子(如中子、質子、電子及重離子等)，它們可能與系統中的電子元件相互作用，從而導致故障、記憶體錯誤、資料損失、系統崩潰等問題，甚至可能會導致太空任務提前終止。因此，發展具備太空等級的電子元件或設備將是刻不容緩之事，也是橋接國內半導體供應鏈並促進國內電子元件產業加值的絕佳策略。為能及早厚植太空電子領域的技術基礎，首要之務即是開發可有效抑制太空輻射效應的電子元件，並針對相關元件建立適用的輻射效應驗證測試平台。有鑑於此，本研究計畫主要針對具備抗輻射優勢之半導體材料、製程、以及新型元件進行開發及輻射效應評估，主要聚焦的研究主題涵蓋三個面向：

- (1)抗輻射之新興記憶體元件開發：建構質子束照射下之總游離劑量效應測試技術；
- (2)抗輻射之積體電路製程與先進電晶體研究：應用於衛星軌道之抗輻射測試評估與鰭式場效電晶體製作分析；
- (3)寬能隙半導體材料與元件之輻射效應評估：SiC 或 GaN 寬能隙材料評估與輻射損傷特性分析。

貳、重要成果

一、抗輻射之新興記憶體元件開發

本研究針對 HfZrO_x (HZO) 鐵電層 FeFET 鐵電記憶體在質子輻照後的



性能進行詳細分析，總結重要成果如下：(1)Zr 比例為 50%的 FeFET 鐵電記憶體在質子輻照下表現出卓越的質子輻射韌性；(2)在高流量質子輻照下，FeFET 鐵電記憶體的閘極切換電流表現受到影響，出現高臨界電壓和切換電流的變化；(3)質子輻照對鐵電層中氧空缺的生成和重新分佈產生影響，導致切換特性的變化和鐵電層衰退；(4)Zr 比例為 67%的 FeFET 鐵電記憶體在高質子流量下氧空缺數量增加，比例為 50%的 FeFET 表現則較為穩定。

二、抗輻射之積體電路製程與先進電晶體研究

本研究針對平面電晶體(MOSFET)與鰭式電晶體(FinFET)進行設計與製作，並探討 Co-60 輻射照射對 MOSFET 和 FinFET 電晶體特性的影響，總結重要成果如下：(1)MOSFET 和 FinFET 的 I_{on} 隨輻射劑量率增加而退化，且 MOSFET 的退化程度更為明顯；(2) MOSFET 的次臨界擺幅(subthreshold swing, S.S.)變化量較 FinFET 高，可能由於鰭界面氧化層的元件受損更嚴重；(3) I_{on}/I_{off} 隨輻射劑量率增加而退化，且 MOSFET 的退化量較 FinFET 高；(4)劑量率越高，特性劣化越明顯，但在極高劑量率下，可能因升溫和退火效應而產生飽和。

三、寬能隙半導體材料與元件之輻射效應評估

本研究深入地探討 Ar^+ 與 He^+ 輻照對於 GaN 磊晶層及中子輻照對於 4H-SiC 基材的輻射損傷效應，總結重要成果如下：(1) Ar^+ 與 He^+ 輻照會移除 GaN 晶體中的自由電子載子，當損傷程度 dpa 為 11 時，載子移除率約為 32.5%；(2)GaN 晶體中受損的晶格在室溫動態退火時可引起缺陷的相互作用；(3)離子輻照所產生的非輻射復合缺陷嚴重抑制 GaN 晶體的近帶隙(NBE)發光；(4)中子輻照造成 SiC 晶體的晶格損傷，其能隙及 Urbach energy (E_U)等數值與損傷程度呈現一致的趨勢，且中子輻照也會降低 SiC



晶體的載子濃度與載子遷移率。

績效指標達成情形：

1. 論文發表：完成重要期刊與國際會議論文投稿共計 3 篇。
2. 培育及延攬人才：完成博士培育/訓人數 3 名、碩士培育/訓人數 4 名。

參、展望

本計畫依原規劃目標逐漸推展，各工作項目均符合或超前原訂目標。電子元件種類相當多元，且其輻射效應之實驗參數與影響因子眾多，關鍵之務應先釐清各輻射源可能的作用機制，並依元件結構及輻照實驗條件等進行深入地分析。此外，國內目前可使用的高能粒子輻照設施相對較為不足，未來應構思籌建適用的加速器設施或整合目前國內可用的資源，以因應太空科技持續推展的需求。本計畫後續的工作構想重點包括：(1) 以材料、元件結構與電壓脈衝改善 FeFET 鐵電記憶體之抗輻射能力；(2) 鱈式與閘環繞式場效電晶體之抗輻射氧化層製程開發及分析；(3) SiC MOS 電容元件及其輻射效應分析。

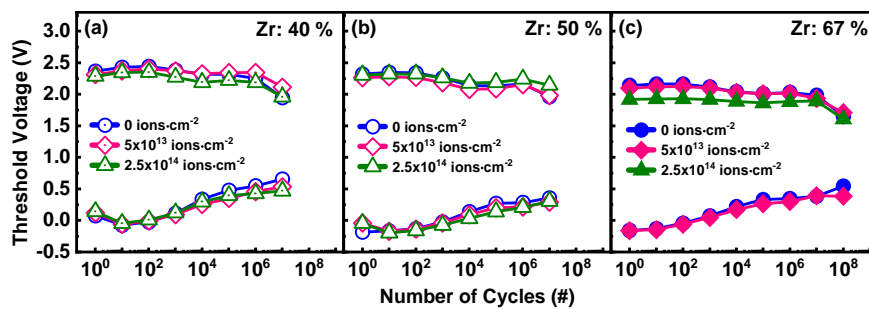


圖 1 不同 Zr 比例 FeFET 性能隨質子流量的變化

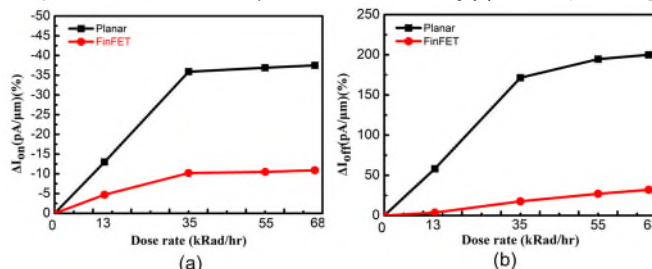


圖 2 MOSFET 與 FinFET 之 I_{on} 與 I_{off} 退化比例隨劑量率之變化

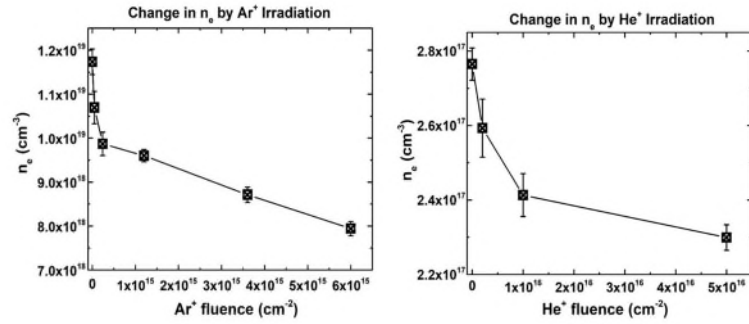


圖 3 GaN 晶體電子濃度隨 Ar⁺與 He⁺輻照通量之變化



我國原子能科技決策支援體系先期評估

Preliminary Evaluation on Decision Support System for Nuclear Energy Science and Technology

(計畫編號：112B009)

郭瓊文¹ 尹學禮² 鍾玉娟³

核能資訊中心

原子能科技已廣泛應用於醫、農、工業及環境永續相關民生領域，所以在各個國家均會列為持續科技發展的重點領域。我國在以往原子能科技民生應用的發展過程中，亦針對輻射在醫、農、工等領域相關的技術發展與應用，有相當良好的基礎與成果。核安會已訂有「民國 111 至 114 年原子能科技民生應用發展的策略藍圖」，本計畫於執行期間，參酌此策略藍圖，規劃蒐集世界各關鍵單位與國家有關研析原子能科研體系、重要政策及可能之合作管道。經探討研析並依國內相關產業現況及發展潛力、人才培訓情況、國家發展導向等因素，提出我國原子能科技施政決策支援體系之政策建議。

關鍵詞：原子能科技、核安會、決策支援系統

Atomic energy technology has been widely used in fields related to medicine, agriculture, industry, and environmental sustainability, making it as a key area of sustainable technological development in various countries. In the past, our country has also made significant achievements in the development and application of radiation-related technologies in the fields of medicine, agriculture, and industry. Nuclear Safety Commission (NUSC) has established



a strategic blueprint for the development of atomic energy technology to improve people's livelihood from 2022 to 2025. During the implementation of this program, it refers to this strategic blueprint to collect and analyze the nuclear energy scientific research systems, important policies and possible channels of cooperation with various key organizations and countries worldwide. After conducting research and analysis, considering the current situation and development potential of related domestic industries, personnel training situation, national development orientation and other factors, policy recommendations will be proposed to support the country's decision-making process in atomic energy science and technology, specifically in the context of the decision support system (DSS).

Keywords: atomic energy technology, Nuclear Safety Commission, decision support system

壹、計畫目標

鑒於原子能科技已廣泛應用於醫、農、工業及環境永續，核安會已訂有「民國 111 至 114 年原子能科技民生應用發展策略藍圖」，作為近年布局原子能科技研發之政策基礎。因應國際局勢變化快速，科技日新月異，國家淨零轉型等需求，核安會為強化與國內法人及學研機構之政策及業務合作，廣泛研析國際原子能科技資訊，先期歸納國際原子能重要科研體系、發展策略及合作管道，作為未來建立我國原子能科技施政決策支援體系之基礎。

貳、重要成果

探討國際原子能總署、歐盟、美國、日本、中國等國之原子能科研體



系，重要政策及合作管道，並提出對於建立我國原子能科技施政決策支援體系之施政方案建議。重要成果如下：

- 一、此研究屬先期研究計畫，其執行時程較短僅有半年的時間，主要是建立相關資料蒐集的領域與管道，作為日後廣泛蒐集整理的模式。計畫並對未來原子能和平應用決策平台之架構提出建議，使其能在資料蒐集彙總與活化運用上，為未來的原子能應用科技決策，建立良好的運作基礎。
- 二、計畫蒐集資料的來源包括國際原子能總署、歐盟、美國、日本與中國大陸等單位與國家，涵蓋原子能應用發展於醫、農、工、及各前瞻研究領域的資料，相關成果已具有雛形。未來除可持續追蹤更新，並建議應透過與產業之座談，並與各部會相關的施政方針密切配合，達到最佳化發展的模式。計畫建議之決策平台(圖1)，可扮演資料蒐集彙整，以及座談討論互動資訊歸納的良好作業平台。
- 三、未來可加強前瞻科技研究，並透過與業界溝通，做好產業轉型與發展的重要橋樑，核安會可藉由掌握原子能應用核心技術的發展，達到更有效整合與拓展國家原子能應用領域的目標。

參、展望

- 一、藉由與國內產業界之座談，並與各部會相關的施政方針密切配合，達到最佳化發展的模式。
- 二、透過與業界溝通，做好產業轉型與發展。
- 三、本計畫建議之決策平台，可扮演資料蒐集彙整，以及座談討論互動資訊歸納的良好作業平台。

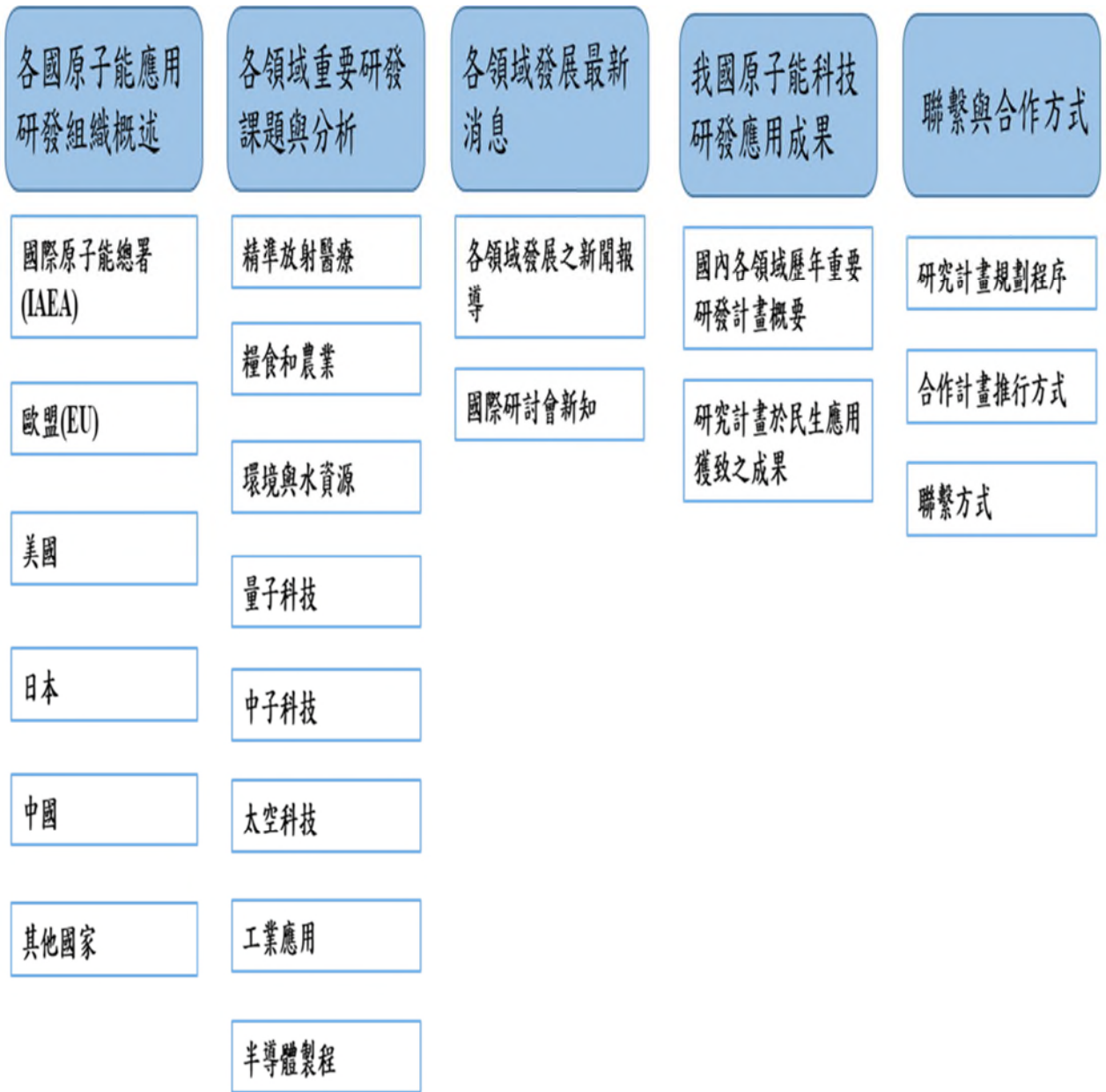


圖 1、原子能科技決策支援體系平台架構及各研究領域資訊



半導體元件耐輻射可靠度之關聯性研究-開發關鍵電子元件的輻射可靠性
測試平臺

**Development of Radiation Reliability Test Platform for Key
Electronics Components**

(計畫編號：112A009)

陳始明

長庚大學可靠度科學技術研究中心

全球金融、電信、交通、氣象、國防、航空和許多其他應用都越來越依賴衛星服務。隨著這些應用的不斷擴展，衛星的數量正迅速增加，其成本必須降低。因此，為數眾多的小型衛星正在使用更多的商業級現有電子元件。商業現成的（COTS）電子元件通常對輻射影響更敏感。隨著IC製程演進和更薄的氧化層，元件對總游離劑量效應(TID)輻射效應的敏感性會降低。另一方面，單事件效應(SEEs)發生機率隨著IC製程的縮小而增加，產生SET和SEU所需的閾值能量更少。

本計畫的主要目的為對商業級現有電子元件的輻射可靠性評估。今天的航太業者要在體積小、功率低和成本低的小型衛星中使用商業級現有電子元件來滿足高水準的性能。關鍵問題是確定可靠度和成本之間的適當平衡。要求的測試越多，單位成本就越高。衛星工業和電子設備製造商目前面臨的挑戰是為太空應用中使用的商業級現有電子元件確定最佳測



試水準與成本。

The utilization of satellite services has become increasingly integral across various sectors such as global finance, telecommunications, transportation, meteorology, defense, and aviation. With the continuous expansion of these applications, there has been a significant rise in the number of satellites, necessitating cost reduction measures. Consequently, there is a growing trend towards the integration of commercial-grade electronic components, including Commercial off-the-shelf (COTS) components, within small satellites.

However, it is essential to note that COTS electronic components typically exhibit heightened sensitivity to radiation effects. Moreover, as Integrated Circuit (IC) processes advance and thinner oxide layers are employed, the sensitivity of components to Total Ionization Dose (TID) radiation effects tends to decrease. Conversely, the probability of encountering single event effects (SEEs) rises with the miniaturization of integrated circuits.

The primary objective of this project is to assess the radiation reliability of COTS components, particularly in the context of the space industry's demand for high-performance, small, low-power, and cost-effective satellites. A critical consideration in this endeavor is striking the appropriate balance between reliability and cost. The more extensive the testing required, the higher the unit cost, thereby posing challenges for both the space industry and electronic equipment manufacturers.

Addressing these challenges entails determining the feasibility of utilizing COTS components in space applications and identifying the optimal testing levels and associated costs. This project aims to provide insights into the suitability of COTS components for space missions and to establish guidelines



for effectively managing the trade-off between reliability and cost in satellite design and construction.

壹、計畫目標

所有電子系統都需要電源，這項工作的重點是探討 TID 對電源電路中常用的 COTS 分立關鍵元件的效應，以便決定電子系統在輻射環境中的可靠度。這專案的目標是獲得這些元件的初步實驗結果並建立元件的測試協議，以平衡測試項目和成本。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

(一)研發成果

從我們的輻射(伽馬和質子)測試中，我們發現電阻器對輻射具有很強的抵抗力；輻射可能導致電容變化或耗散變化，或者兩者兼具，如表 1 所示(質子對陶瓷電容器的影響與伽馬輻射的影響不同)；對於分離 MOSFET，輻射後閾值電壓變得更加負，因此 I_{DSS} 顯著增加， g_m also 增加。大面積、高反向擊穿電壓的二極體，金屬與半導體之間的接觸電阻略有變化。如果擊穿電壓降低，則可以觀察到接觸電阻和 pn 結缺陷。由於晶片尺寸較小，小訊號二極體更容易受到伽馬輻射的影響，但相反地，質子輻射對其的影響較小。軸向引線二極管由於晶片表面上的輻射要少得多，受到的伽馬輻射影響較小，伽馬輻射主要是在結界保護層上，但由於質子輻射可以損壞保護層，所以在質子輻射下，其漏電流增加。

簡而言之，二極體封裝類型和結構會影響其輻射衰減的嚴重度，而



且伽馬和質子輻射對其影響是不同的。

表 1 輻射對電容器的影響

電容器類型	電容變化	耗散變化
鉭	小	大
陶瓷	大	小*
電解質	小	小

*在質子輻射下，陶瓷電容器的耗散變化變得很大

這些發現回答了 COTS 元件能否用於太空應用的問題。國際上正在探討這個問題。美國宇航局其實也做了很大規模的輻射對電子零件的測試，並建立了一個龐大的資料庫，但其中並沒有分析為什麼有一些零件可以承受比較高的輻射。而我們的這項研究，除了對 COTS 的元件進行輻射測試外，也分析了各種不同的元件對輻射承受度的不同的原因，幫助電子零件廠商改善他們的元件設計及封裝材料的選擇，並更能找出適當的測試條件，達到測試和成本的平衡。不管是美國宇航局或者是我們的測試，我們知道有些 COTS 的元件確實可以使用在輻射的環境下，這將使低軌衛星的成本能夠更加下降，進而增進民眾福祉。我們的研究結果也可以幫助台灣的電子工業看到進入太空工業的可能性。

二、學術成就



(一)國外研討會發表

Cher Ming Tan, “Investigation of Radiation effect on COTS Power Semiconductor Devices”, Invited talk in IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (IEEE EDTM), 2024

(二)期刊論文

Cher Ming Tan, I-Chun Cho, Nilim Akash Baruah, Debraj Banerjee, Hawibam Thoithoi Singh, Vishal Srivaths,, Tsi-chian Chao,, Lin Tsung Te, Hou Fu Chung, “Investigation of gamma radiation on discrete electronic devices.”, submitted to Electronics, MDPI.

參、展望

根據我們的實驗結果，未來的研究方向有以下：

1. 預估 COTS 元件在 space 環境中的 TID 壽命。
2. COTS 元件的選擇標準及其評估平台。
3. COTS 元件的設計（晶片級和封裝級）：透過 COTS 元件的輻射研究的失效分析來增強其輻射硬度。



圖 1、IEEE EDTM 2024 研討會發表



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





目 錄

場次 2：輻射保安應變領域

※112 年核設施核子保安作業精進研究.....	1
※精進輻射災害環境輻射偵測能量與技術-- 建立南部備援實驗室之環境 試樣分析備援技術	7
※輻射災害應變資源建置與實務管理之研究.....	12
※輻射事件應變技術開發研究.....	18



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





強化輻射災害應變與管制技術之研究(4/4)

112 年核設施核子保安作業精進研究

The Improvement Study of Security Implementation of Nuclear Facilities in 2023

(計畫編號：AEC111009)

蔡智明 馬紹仕

國家原子能科技研究院

為了提升我國核子反應器設施防護人為惡意破壞與防止核子物料遭竊的能力，此兩年計畫(111 至 112 年)針對設施的核子保安與資通安全之管制與作業，研析國際原子能總署出版之相關指引、參加實地視察工作、蒐集亞洲區核子保安卓越中心資料、研析核子威脅倡議組織新提出的保安指標評核方式及整理國際核子保安訓練教材，提出精進防護成效之看法。

The objective of this two-years project was to continuously improve the national capability of protecting the nuclear facilities and materials against the threat of unauthorized removal or sabotage. The study was focus on the regulation and implementation activities with regard to the security and cybersecurity of nuclear facilities in Taiwan. Through the researches in 2023, some opinions on improving the protection performance were proposed for reference.

壹、計畫目標



本研究(111 至 112 年)針對核子反應器設施(簡稱核設施)的核子保安與資通安全之管制與作業，研析國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)出版之相關指引、參加實地視察工作、蒐集亞洲區核子保安卓越中心(Nuclear Security Center of Excellence, NSCOE)資料、研析核子威脅倡議組織(Nuclear Threat Initiative, NTI)新提出的保安指標評核方式及整理核設施與核物料實體防護國際訓練課程(International Training Course on the Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities, ITC)(簡稱 ITC 國際核子保安訓練)，提出精進核子保安防護成效之看法。

貳、重要成果

本研究包含 5 個工作項目，今年度(112 年)各項目之重要成果分述如後。

一、我國核設施核子保安作業精進相關研究

(一)研析 IAEA-TDL-010 文件

IAEA 彙整各國經驗並發展一套成立及永續營運國家核子保安支援中心(Establishing and Operating a National Nuclear Security Support Centre)的方法，於 109 年發布 IAEA-TDL-010 文件。本計畫研析此文件，輔助完成我國 NSCOE 建置藍圖規劃草案，並完成文件主文中譯版以利該中心永續營運參考。

(二)參加核子反應器設施實體防護系統視察工作

本計畫實地參加(1)核能一廠、核能二廠與核能三廠核子保安(共 3 場)年度視察；(2)清華大學 THOR 核子保安視察；(3)各核能電廠核子保安暨反恐應變無腳本兵棋推演等共 6 場活動，針對核子保



安作業精進提出看法，供核安會參考。

(三)日本核子反應器設施除役期間核子保安管制與作業研究

本項目委託清華大學進行研究，參考日本方面核子反應器設施用過核子燃料全部移出設施之前(含除役期間)的核子保安規範指引，以及核子反應器設施業者於上述期間核子保安相關作業經驗，針對所蒐集到的資料進行研析與重點歸納整理，提供管制單位強化核子保安之參考。同時，此研究參考國際間核子反應器設施之管制機關對於核能安全與核子保安介面之管制方式及實務經驗，針對國內核能設施運轉及除役狀況，進行適用性評估並因應我國實務狀況調整，提出可應用在國內核能安全與核子保安介面管制的作法。

二、我國核設施保安及資通安全管制效能之精進建議研究

(一)研析 IAEA-NSS-33 文件

IAEA 考量儀控系統是核設施確保核能安全的關鍵系統之一，該系統的電腦安全是資通安全與核子保安的關鍵，遂於 107 年發布「國際原子能總署核設施儀控系統之電腦安全 IAEA-NSS-33」，於今年本計畫完成翻譯定稿，可做為國內管制單位與核設施營運者重要參考工具，以及我國 NSCOE 製作培訓教材之基礎。

(二)參加核子反應器設施關鍵數位資產資通安全視察工作

本計畫實地參加核能一廠、核能二廠與核能三廠核子保安、關鍵數位資產資通安全年度視察，針對關鍵數位資產資通安全視察作業精進提出看法，供核安會參考。

(三)舉辦核設施保安及資通安全管制效能研討會或座談會

本計畫於 9 月 21 日(三)舉辦「2023 年核設施保安及資通安全管制效能精進研討會」，地點為公務人力發展學院福華國際文教會



館。此次研討會共有內政部警政署保二總隊與保六總隊、清華大學、台電公司(含各核能電廠)、核安會等人員約 50 位參加，研討議題涵蓋：2023 年世界核子保安協會核能資通安全訓練課程介紹、核設施與 IT 資安法規與實務差異、風險評估技術與核設施實體防護應用介紹、核子保安作業精進研究成果綜合報告及我國核子保安卓越中心推動計畫說明等。最後並由學員與講師、專家進行綜合討論，充分達到專業知能的傳授，以及相互溝通、交流之目的。圖 1、圖 2 為活動照片。

(四)建立核子反應器設施關鍵數位資產資通安全專業視察訓練計畫草案

延續 111 年研究工作，計畫團隊派員參加美國能源部國家核子保安局於 5 月 9 日至 12 日舉辦之「核設施資通安全技術交流」訓練，並於訓練活動分享箱式網路設備(Cyber in a Case)使用經驗與建議回饋，且針對資通安全議題進行討論，全程參與且取得結訓證書。計畫團隊亦派員參加 ISO 27001 (2022 版)資訊安全管理系統核心概念與條文要點解析訓練課程，以及 ISO 27001 (2022 年版)資訊安全管理系統主導稽核員訓練課程，通過測驗取得合格證書。

最後，計畫團隊依據兩年研究成果的累積，經由參加核安會舉辦之視察員訓練課程、參與實地視察、參加國內外訓練課程等活動的經驗與發現，將參與核子反應器設施關鍵數位資產資通安全專業視察訓練的人員分為 4 類，擬定訓練計畫草案。

三、核子保安卓越中心建置藍圖規劃

本計畫收集且整理亞洲區日本核不擴散暨核子保安總合支援中心(Integrated Support Center for Nuclear Nonproliferation and



Nuclear Security, ISCN)、南韓核不擴散與管制研究所(Korea Institute of Nuclear Nonproliferation And Control, KINAC)與國際核不擴散與保安學院(International Nuclear Nonproliferation and Security Academy, INSA)及中國國家核安保技術中心(State Nuclear Security Technology Center, SNSTC)的資料，配合國內短、中、長期需求，進行我國 NSCOE 建置藍圖初步規劃。第一階段是開發人力資源能量，奠定該中心執行核子保安相關人員平時教育與訓練的功能，並推動國際交流與合作及核子保安政策研究；第二階段是開始發展核子保安技術服務、核子保安技術開發、核應用技術開發等功能，並持續經營第一階段之業務；第三階段是將前兩階段發展之保安技術與經驗，從核子反應器設施推廣至其他重要設施。業務推動方面則是考量國內政策與可用資源，採用虛擬模式，由合適機關(如國原院)代為推動 NSOCE 建置與永續營運之工作方式。

四、協助辦理 NTI 核子保安評比相關事宜

本計畫針對核安會於 112 年 2 月提供 NTI(核子威脅倡議組織)對台灣保安績效初步評量結果與核安會答覆內容，以及本期我國 NTI 核子保安評比結果進行研析，從公眾教育與政策推動方面提出改善看法。

五、整理 ITC 國際核子保安訓練教材

本計畫今年度針對第 29 屆 ITC 國際核子保安訓練課程內容進行整理與研析，並與第 28 屆 ITC 比較。另配合我國 NSCOE 藍圖規劃，研究團隊第一階段轉換 ITC 課程為適合我國需求的內容，於第二階段期間嘗試與其他國家關鍵基礎設施接洽，了解其特性與需求，再於第三階段期間，將前兩階段核設施實體防護訓練經驗與成效轉換為其他國家關鍵基礎設施防護課程。研究成果包含提出訓練



教材的設計範本(標準化)與補充教材內容的設計。

參、展望

研究團隊依原定計畫，延續 111 年工作成果，完成我國 NSCOE 藍圖規劃等工作，符合工作項目預期目標，未來將依循此規劃發展並推動我國 NSCOE 業務。



圖 1、研討會活動照片(合影)



圖 2、研討會活動照片(演講)



強化輻射災害應變與管制技術之研究(4/4)

精進輻射災害環境輻射偵測能量與技術--

建立南部備援實驗室之環境試樣分析備援技術

**Establishment the backup technology of environmental sample analysis
in the southern backup laboratory**

(計畫編號：PG11204-0006)

葉一隆¹ 陳庭堅² 林志忠³ 黃韋翔² 陳婉玲⁴

¹國立屏東科技大學土木工程系 ²國立屏東科技大學研究總中心

³國立屏東科技大學環境工程與科學系 ⁴核能安全委員會輻射偵測中心

核子事故的預防是世界各國相當重視的議題，而事故後的應變處理更是至關重要。國立屏東科技大學災害防救科技研究中心放射性分析備援實驗室已完成軟硬體設施之購置，並訓練加馬能譜分析技術能力之操作人員，同時亦取得財團法人國際認證基金會(Taiwan Accreditation Foundation, TAF)和衛福部食品藥物管理署(Taiwan Food and Drug Administration, TFDA)之游離輻射測試領域「食品加馬能譜分析項目」認證等。然而於輻射災害發生時，為確保環境之輻射安全，在環境樣品檢測上，亦將面臨大量檢測量能之需求。因此本計畫主要目的是擴展檢測量能至環境中水樣、空氣、土壤、植物樣品與生物樣本之檢測分析技術領域，並取得相關領域檢測技術認證。

The prevention of nuclear accidents is an issue that countries around the world attach great importance to, and the emergency response following



such accident is even more crucial. The Radioactive Analysis Backup Laboratory at the Disaster Prevention and Mitigation Technology Research Center of national Pingtung University of Science and Technology (NPUST) has completed the procurement of software and hardware facilities. Moreover, it has trained operators with capabilities in Gamma spectrum analysis technology and obtained certifications from Taiwan Accreditation Foundation (TAF) and Taiwan Food and Drug Administration (TFDA) certification for "Food Gamma Spectrum Analysis" in the field of ionizing radiation detection. However, in the event of a radiation disaster, ensuring the radiation safety of the environment will require a significant demand for detection capacity in the environmental samples analysis. Therefore, the main objective of this project is to expand the detection capabilities to include the analysis of environmental samples such as water, air, soil, plant and biological specimens, and to obtain the relevant certifications in the field of detection technology for these samples..

壹、計畫目標

本計畫希冀強化國立屏東科技大學的輻射災害備援實驗室之分析檢測量能，使實驗室能具備各領域放射性分析技術。除可因應未來若發生境內外核子事故所致的放射性檢測需求外，日本福島核廢水排放入海後，勢必會有更多環境樣品檢測之民生需求，故加速建立及強化輻射災害備援實驗室有其迫切性及重要性。

貳、重要成果

本計畫 112 年度工作項目依核能安全委員會輻射偵測中心要求查核日期與項目進行控管，已完成核三廠環境試樣計測比較實驗報告、開設「災害防救環境教育」與「輻射與安全」通識課程、完成參加國內外



環境試樣放射性分析能力比較實驗檢討報告、建立銻 90-分析前處理技術並參與國際試樣比對試驗、結合在地農會提供農特產品放射性檢測分析及說明、支援核能三廠周遭鄉鎮里及學校核安講習辦理現場輻射偵檢器檢測展示及申請 TAF 銻 90 增項分析認證等工作項目。

一、研發成果之重要貢獻

(一)完成核能三廠各季環境試樣計測比較實驗報告

本實驗室前往屏東恆春核能三廠進行環境試樣的採集及分析，並將本實驗室前處理好的樣本交給輻射偵測中心分析，以比對雙方的樣本計測分析結果是否有一致性，藉此達到檢測分析能力比較的目的。本實驗室統計核能三廠共四季的採樣種類及數量，包括岸沙、海水、淡水、土壤、牧草、羊奶、相思樹、葉菜類、海藻、海魚、家禽等共計 84 個樣本。

(二)開設輻射安全與災害防救環境教育通識課程

本計畫主持人葉一隆教授偕同 3 位本實驗室團隊(徐文信教授、陳庭堅教授及林志忠助理教授)於本校開設『天然災害防救概論』與『輻射與安全』通識課程，本學年度修課人數共計 190 人。本通識課程安排學生參觀放射性分析備援實驗室，講解核子事故發生時樣本後送備援實驗室分析之流程、一般民眾委託樣本之分析流程，讓學生了解食品及環境樣本的前處理及樣本放射性檢測的原理及操作流程。

(三)建立銻 90-分析技術並參與國際環境試樣放射性分析能力比較試驗

本實驗室在輻射偵測中心輔導下已建立銻-90 核種檢測分析技術，並參加國內環境試樣比對試驗並於本年度參與之國際原子能總



署(IAEA)能力試驗，包含銻-90 核種檢測項目，比對結果均為「合格」。

(四)結合恆春鎮農會提供在地農特產品放射性含量檢驗分析及說明

本實驗室至恆春地區採集農作物及農田土壤進行放射性核種分析，共計 52 件，並產出檢測報告提供給農民並向農民解說檢測結果。此工作項目獲得恆春鎮農會及社區農民的肯定，不僅能幫在地農田土壤及農作物把關，農民一方面能對自己生產的農作物有信心，一方面也能消除核能電廠是否有對當地造成污染的疑慮。

(六)完成牡丹水庫水樣總貝他及總貝他監測

本實驗室已完成 112 年度第一~四季牡丹水庫水樣總貝他及總阿伐分析，取樣樣品量共 100 件，藉此檢視本實驗室之技術水準並累積實務經驗。

(七)辦理核能三廠周遭鄉鎮里及學校核安講習進行現場輻射偵檢器輻射檢測展示

本實驗室至恆春鎮社區辦理核安講習教育訓練，並進行現場輻射偵檢器輻射檢測展示共計 4 場，參與人數共 257 人，藉此達到民眾實際參與監督及監測資訊透明機制之政策目標。

(八)申請 TAF 游離輻射領域銻-90 分析認證

本實驗室已向 TAF 申請游離輻射領域銻-90 分析增項認證，認證項目包括土壤、水樣及生物試樣。

二、學術成就方面

本實驗室除了持續建立放射性相關檢測技術外，亦積極爭取研究計畫，並將計畫執行成果整理成期刊或論文並發表。

本實驗室投稿中華民國環境工程學會第 35 屆(2023)年會暨各



專門學術研討會，並於 112 年 11 月 17-18 日前往宜蘭大學口頭報告，發表論文共計 3 篇：

1. 環境安全與衛生研討會：「水中放射性核種鐳元素含量分析與風險評估之探討」。(口頭發表)
2. 土壤與地下水研討會：「核三廠周遭土壤及底泥之放射性核種活度與分佈之特性」。(口頭發表)
3. 土壤與地下水研討會：「泥火山天然放射性核種特性」。(口頭發表)

參、展望

未來將持續進行核能三廠環境試樣比較實驗以及參與國內、外能力試驗，藉此穩固本實驗室之檢測技術，希冀於核能三廠發生核子事故時，能立即投入支援進行放射性分析作業，肩負起緊急應變時環境樣品及食品放射性計測之功效。本實驗室亦積極參與及配合核安會或偵測中心所規劃民眾科普宣導之工作，拉近民眾與政府間對於輻射安全認知的距離。



強化輻射災害應變與管制技術之研究(4/4)

輻射災害應變資源建置與實務管理之研究

Research on the Resources Establishment and Practical Management of Radiation Emergency Response

(計畫編號：AEC11011039L)

馬士元¹ 鄭銘泰² 黃偉凱³ 胡育銘⁴

¹銘傳大學都市規劃與防災學系 ²國立臺灣大學醫學院附設醫院 ³瑞鈺災害管理及安全事務顧問股份有限公司

本計畫蒐集日本福島事故後，復原作業規劃管理與執行相關資料之彙整分析；研擬境外核災情境與演練腳本，並辦理模擬演練 1 場次，以驗證中央與地方政府境外核災應變能力。

此外，本計畫針對放射性物質意外情境研擬放射線照相檢驗場所火災之地方政府第一線應變人員應變程序建議與示範影片腳本，及辦理地方政府輻射災害防救講習（以下簡稱輻災講習），並建置輻射災害第一線應變人員推演教育訓練系統。本計畫另設計以「境外核災」及「輻射彈事件」為主題的圖文懶人包，提供各級政府單位宣傳。藉由上述項目的準備與訓練，精進中央與地方政府境外核災應變機制，提升應變人員的輻災應變能力，拓展民眾輻災應變視野，強化我國輻射災害應變能量。

This project collected and analyzed the planning management of recovery after the Fukushima incident in Japan. Additionally, it developed overseas nuclear accident scenarios and conducted one simulation drill to verify the ability of central and local governments to respond to the overseas nuclear



accident.

Furthermore, this project developed suggestions for first responders' emergency procedures and video scripts about radiographic testing workplace with fire, and held radiation disaster prevention and rescue workshops for local governments. Moreover, it established first responders' radiation emergency response exercise training systems.

This project also designed short versions of “overseas nuclear accident” and “dirty bomb accident” with infographics, providing government at all levels to disseminate. By providing the preparation and training above, the overseas nuclear accident emergency response mechanism of central and local governments can be improved, the radiation disaster responding ability of respondents can be escalated, broaden public's vision of radiation emergency response, and strengthen the resilience of our country.

壹、計畫目標

為了提升我國政府的輻射災害應變能力，本計畫蒐集並翻譯國外文獻、研擬地方政府第一線應變人員應變程序建議、設計宣導用輻災防救圖資，撰擬境外核災腳本並進行模擬演練，並針對地方縣市政府第一線應變人員辦理相關訓練及建置訓練系統，強化一般民眾及公部門人員對於輻射的知識與應變能力，有效提升我國的輻災防救能量。

貳、重要成果

一、資料蒐集、翻譯、研析與彙整

(一)日本福島第一核電廠含氫廢水排放海洋後之行動重點

日本政府於 2021 年 4 月 13 日宣布預計於 2023 年將存放於福



島第一核電廠廠區內的「多核種去除設備」處理水（簡稱「ALPS 處理水」）排放至海洋，日本政府為確保符合國際間排放標準，除與國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）於 2021 年 7 月簽署協議，針對 ALPS 處理水排放之安全性進行審查外，日本環境省亦於 2022 年 5 月 12 日公布其與原子力規制委員會共同實施之「ALPS 處理水相關海域環境監測草案」，規劃於排放前開始進行 ALPS 處理水周邊海域監測，截至 2024 年 4 月 19 日止，已分五批次排放，排放日期分別為 2023 年 8 月 24 日、10 月 5 日、11 月 2 日、2024 年 2 月 28 日、4 月 19 日。在 ALPS 處理水排放前，日本經濟產業省於 2023 年 8 月 22 日發布「ALPS 處理水基本方針的實施及今後的行動」，其重點包括「安全確保／說明與傳遞資訊」、「應對謠言影響／支援生計延續」，以及「未來科技」等三大方針。

(二) 日本福島返鄉現況

根據日本經濟產業省 2023 年 4 月 25 日公布的「避難指示區域概念圖」，目前已解除 6 個市町村之所有特定復興再生據點區域，包含葛尾村、大熊町、雙葉町、浪江町、富岡町及飯館村等。

(三) 日本福島除污地區之臨時儲存場狀況

根據日本環境省於 2023 年 3 月 7 日公布的統計結果，除污特別地區之市町村內共有 331 處臨時儲存場，其中目前仍使用中的臨時儲存場共有 28 處。污染狀況重點調查地區之市町村，規劃 1,041 處臨時儲存場，其中目前仍使用中的臨時儲存場共有 3 處。

(四) 賠償金統計

根據東電於 2023 年 9 月 30 日公布之統計，個人之賠償申請件數約為 2,782,000 件、公司或自營商等之賠償申請件數約為 561,000



件，目前支付總金額約為 10 兆 8,997 億日圓。

二、放射線照相檢驗作業場所火災之地方政府第一線應變人員應變程序建議書及示範影片腳本訂定

以「放射線照相檢驗作業場所火災事件」進行狀況想定，並依應變時序說明人員於災害發生初期數小時、輻防人員到場前，應如何進行危害辨識、管制區劃分、自我防護及事件應變處置，提供作業相關原則，期能降低災害帶來的損失。

三、輻災防救主題圖文懶人包製作

以「境外核災」及「輻射彈事件」2 項主題製作圖文懶人包。「境外核災」其內容包括境外核災之定義，政府平時的監測工作與整備事項、災時應變作為等資訊等進行說明。「輻射彈事件」則介紹輻射彈的定義、輻射彈與原子彈之差異、輻射防護的原則，民眾應如何進行應變與防護。內容大致以「問與答」之方式呈現文案，使圖文資訊呈現更為精準。文案摘錄如圖 1 及圖 2。

四、境外核災腳本撰擬與辦理模擬演練

本研究團隊於 112 年 9 月 23 日假中央災害應變中心辦理「境外核災應變模擬演練」。演練形式為桌上模擬演練 (Tabletop Exercise, TTX)，主要演練對象為各中央部會及離島三縣 (金門縣、連江縣、澎湖縣)，參與演練機關單位依災情想定及狀況，擬定因應對策及處置作為。未來精進方向包括境外核災處理作業要點之修訂、增列更多相關單位參與、境外核災須納入地區災害防救計畫、強化地區災害防救計畫之輻災具體行動研擬、利害關係人對輻射災害之認知、輻災之資訊整合、發布及落實境外核災模擬之平時演練。

五、地方政府輻災防救講習



藉由講習相關課程，有效提升地方政府與相關單位輻災業務承辦人員、應變人員對應變機制及防救措施之了解，熟稔相關作業程序以維護自身安全，課末學員以「輻射災害第一線應變人員推演教育訓練系統」（以下簡稱訓練系統）就想定之輻射災害情境與時序進行電腦兵棋推演，透過各分組討論研擬各階段狀況之應變作為，實際驗證所學應變要領，加乘學習成效。

六、輻射災害第一線應變人員推演教育訓練系統建置

輻射災害第一線應變人員推演教育訓練系統以「導入空間思維」、「符合實際現況之模擬災害情境」、「擴充劇本模組化」、「保存演練數據成果」及「防災體制應用」等 5 項設計原則建置。透過輻射災害情境設定及人員決策應變作為，強化應變人員輻射災害應變處理及決策能力。

參、展望

我國位處環太平洋地震帶，近年受氣候變遷影響，旱澇頻仍，都市環境日趨複雜，且人口密集，容易形成更為複合型態的災害狀況，必須透過整備作業精進應變機制，提升防災韌性。本研究將持續研析國際經驗、研擬應變程序建議、製作宣導用輻災防救圖資、辦理境外核災模擬演練及地方政府輻災講習，運用推演教育訓練系統，提升我國各級政府、第一線應變人員及民眾的應變能力及基礎知識。



萬一真的發生境外核災.....

請大家不用過度恐慌



核安會將於第一時間啟動緊急應變機制，透過環境輻射即時監測、大氣擴散模擬及研析各國測站數據變化趨勢，進行多重確認。

圖 1、境外核災圖文懶人包

如果真的發生輻射彈事件？



- 1 遠離爆炸鄰近地區
- 2 待在室內緊閉門窗
- 3 空調轉成室(車)內循環
- 4 聽從政府相關指示

圖 2、輻射彈事件圖文懶人包



強化輻射災害應變與管制技術之研究(4/4)

輻射事件應變技術開發研究

Research on The Emergency-Response Technology for The Radioactive Events(4/4)

(計畫編號：PG11204-0056)

袁明程¹ 鐘正邦¹ 陳建蒲²

¹國家原子能科技研究院 ²中央氣象署

112 年完成擴充輻射災害防救訓練研發中心(下稱訓練研發中心)軟體設施、提出「輻射應變技術隊輻射彈事件(已爆彈)偵測區域量測作業導則(建議草案)」、修訂與測試輻射災害應變資訊平台(下稱資訊平台)應變任務規劃功能、建置遠端遙控鉛罐車以協助遠端遙控輻射偵測平台(下稱偵測平台)回收射源。另選定國內六個人口稠密或交通要衝區域，進行特性風場與放射性物質擴散模擬，彙整前述模擬結果，分析污染物擴散累積的熱點區域，評估劑量分布狀況；及完成輻射應變技術隊(下稱輻應隊)年度訓練課程。

This year we have expanded the software and hardware facilities at the training and R&D center. Additionally, we proposed "The Guidelines for Initial Response Detection of Radiation Bomb Explosion Incidents (Draft Proposal)", and revised and tested the Radiation Disaster Response Information Platform task planning function. We also created a remote controlled lead tank truck to assist in retrieving radioactive sources for the detection platform. Furthermore, we selected 6 densely populated or traffic-



critical areas to conduct characteristic wind fields and radioactive material diffusion simulations. We then integrate the simulation results to analyze hot spots where pollutants spread and accumulate, and evaluated dose distribution. Additionally, we completed the Radiation Disaster Response Team's annual training sessions.

壹、計畫目標

我國核能安全委員會(下稱核安會)為促進輻災防救技術發展，改善訓練場所與教材不足之問題，自 109 年至 112 年委託本院進行訓練研發中心各項工作：強化輻射應變技術、完備應變設備整備相關作業及其作業程序、放射性物質擴散分析能力建立、建置偵測平台與資訊平台。

貳、重要成果

一、強化輻射應變技術

完成輻應隊年度訓練 1 場次，課程內容包括非破壞檢驗輻射傷害事件，及放射性物質運送意外事件，以車輛、車載式偵檢儀器、手提式輻射偵檢儀器、非破壞檢驗放射器(假體)作為訓練教材，結合理論與實務，提升輻應隊對於輻射事件或災害之應變能力，如圖 1、2 所示。

二、完備應變設備整備相關作業及其作業程序

為因應國內萬一發生輻射彈爆炸事件，快速掌握優先應偵測區域與偵測點，參考美國國土安全部(Department of Homeland Security, U.S.A.)、美國國家都市安全技術實驗室 (National Urban Security



Technology Laboratory)相關輻射彈應變之文獻與影片，完成輻射應變技術隊輻射彈事件(已爆彈)偵測區域作業導則建議草案，提供核安會修訂相關程序書之參考。

三、放射性物質擴散分析能力建立

輻射彈很可能發生在人口密集的都市，並隨建築物周圍之大氣擴散污染物，因此要評估其污染的程度及影響範圍，需要使用區域性即時數值預報氣象資料，搭配大氣污染物擴散模式，整合成一套評估系統。112 年度精進系統模擬結果之地理顯示模組，讓使用者在電子地圖操作時，不會因為放大縮小的動作影響圖像的解析度，提高參考性。同時增加放射性物質擴散之乾沉降模組，有加入乾沉降模組距離爆炸中心點的劑量分佈範圍最遠點，較沒有加入乾沉降模組短，在兩者之空氣濃度的分布可以看見定量上的差異，從劑量分布結果可以看到分布範圍的顯著差異，提高擴散評估結果真實性如圖 3、4 所示。今年完成 6 個縣市各 1 個人潮集中處之模擬，以嘉義市與台北市為例如圖 5、6 所示。

四、建置遠端遙控行動式輻射偵測平台

使用遠端遙控行動式輻射偵測平台進行未知輻射源的輻射偵測及回收，可以降低應變人員遭受之輻射劑量。112 年完成遙控履帶式鉛罐車(下稱鉛罐車)設計與製作，可搭配原有之偵測平台，進行非破壞檢驗之掉落射源或其他輻射物之夾取與運送，如圖 7 所示，鉛罐車並具有遙控開閉之鉛屏蔽艙蓋如圖 8 所示，可減少應變人員遭受輻射劑量或輻射污染的機率。



五、建置輻射災害應變資訊平台

輻射災害應變資訊平台作為輻災時的應變輔助工具，主要功能已在 109-111 年間建置完成，112 年主要進行資安與各功能維運測試，針對網站及主機進行資安弱點掃描及滲透攻擊測試，沒有發現需修補之弱點，並修訂小部分功能操作流程，提升操作便利性如圖 9、10。

參、展望

在放射性物質擴散分析能力建立的部分，需精進系統模擬街廓尺度風場受到建物影響，使模擬結果更貼近實際變化，並將數據調整成接近地面的累積數值，以提供給第一線應變人員參考。同時模組目前只有氣體型擴散模式，尚缺固態型的爆裂物分散的結果，尚待持續精進，將更適合應用於輻射彈事件。



圖 1、輻應隊訓練-車載輻射偵測



圖 2、輻應隊訓練-偵測平台操作

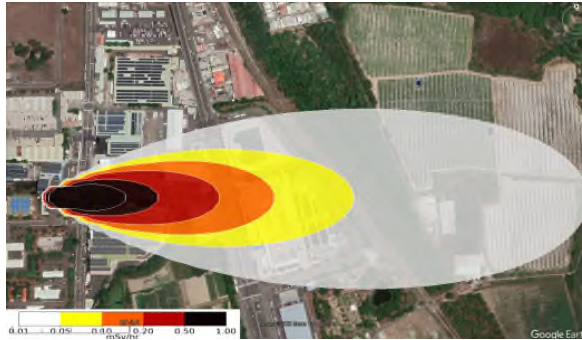


圖 3、模擬 A 地輻射彈事件無乾沉降模組，15 分鐘累積空間劑量分布(mSv/hr)

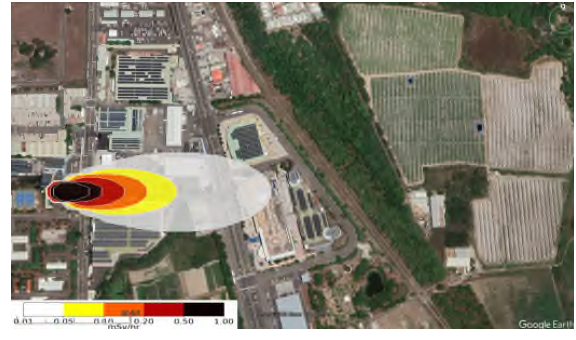


圖 4、模擬 A 地輻射彈事件含乾沉降模組，15 分鐘累積空間劑量分布(mSv/hr)

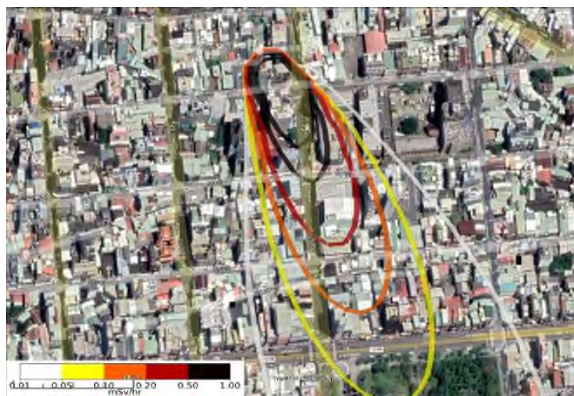


圖 5、模擬 B 地輻射彈事件 15 分鐘累積空間劑量分布(mSv/hr)

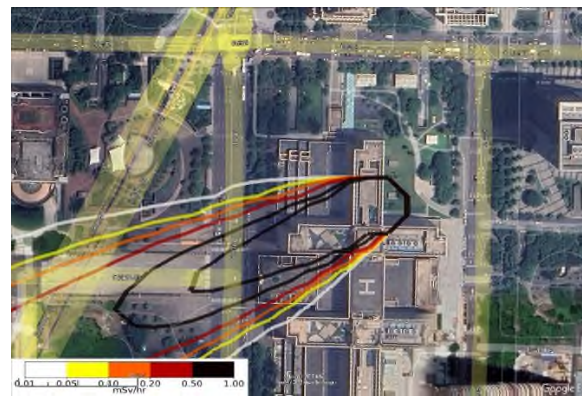


圖 6、模擬 C 地輻射彈事件 15 分鐘累積空間劑量分布(mSv/hr)



圖 7、偵測平台與鉛罐車協作

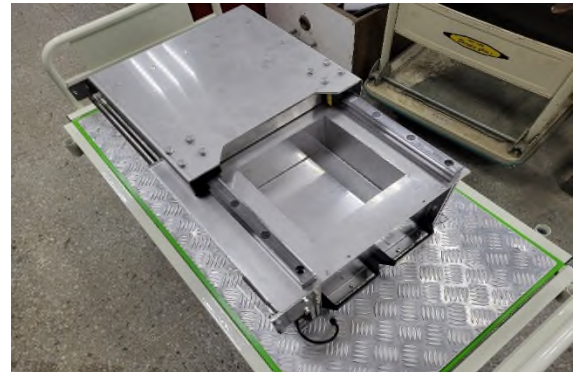


圖 8、遙控開閉之鉛屏蔽艙蓋



圖 9、下拉式選單名單精進



圖 10、簡訊發送分組瀏覽精進



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





目 錄

場次 3：核能安全領域

※核電廠除役作業所需之重要設施脆弱度評估與風險管理技術之先期研 析	1
※精進核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性、參數及技術要項	7
※核電廠特殊結構除役管制技術之先期研究	11
※美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之先期研析	18
※核子反應器設施安全與除役前期作業管制實務研究	22



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





核電廠除役作業所需之重要設施脆弱度評估與風險管理技術之先期研析
**Applying Critical Infrastructure Protection and Risk Management Techniques
on Nuclear Power Plant during Decommissioning**

(計畫編號：AEC11203011L)

施國銓¹ 黃俊能² 沈子勝³ 黃育祥⁴

¹社團法人台灣防火材料協會 ²³⁴中央警察大學消防系

我國核電廠近年逐一邁入除役階段並著手執行除役計畫，為落實除役核子設施之防護及風險管理，本計畫借鑑國際文獻、IAEA 最新風險管理等方法，參考現行台電除役計畫以核子管制之角度結合專家群意見，依據除役計畫內之作業情境、主要風險來源等可能情境具體分析核電廠除役各階段作業之潛在風險，釐清主要風險，以強化除役執行期間之風險管理與管制作為。

Drawing upon the latest practices outlined by the International Atomic Energy Agency (IAEA), this research utilizes the Decommissioning Risk Management Project, DRiMa, framework to analyze potential risks associated with the approved decommissioning plan for the Chin-shan Nuclear Power Plant. Additionally, theories of Critical Infrastructure Protection are employed to study risks based on activities' scenarios and hazards. A quantitative questionnaire was developed and filled by experts in nuclear regulation to assess key risks that need to be managed and mitigated during the implementation of decommissioning plans.



壹、計畫目標

本計畫參考 ISO 31000 風險管理國際標準、關鍵基礎設施安全防護、IAEA Decommissioning Risk Management Project (DRiMa 專案) 等一脈相承的風險管理體系，建構結構化且量化之研究方法，以國內專家群發放問卷的方式取得相對客觀之風險評估成果，提升核電廠除役計畫風險管理的透明程度與議題可深入討論的可行性，以利確認核電廠除役期間主要風險並強化管制作為。

貳、重要成果

結合國際最新做法與台電除役計畫之管制實務

- (一) 以經過核定台電公司除役計畫的作業規劃為基礎。
- (二) 引用 IAEA DRiMa 專案之實務做法。(詳圖 1)
- (三) 參考國際(Ex.韓國)核電廠除役階段風險因子架構及評估成果。
- (四) 對應關鍵基礎設施安全防護的必要資產與關鍵資源之架構，釐清發生風險的情境與媒介物，決定主要危害因子。
- (五) 除役期間發生火災之風險納入評估。
- (六) 建立實務專家可理解且具操作性的問卷架構。(詳表 1)

以專家群意見強化風險矩陣決策品質

採用風險矩陣架構，即以機率(Probability, P)與衝擊(Impact, I)之評估值($P \times I$)決定個別風險之重要性。(詳表 2)

專家群考量各作業在相應危害因子情境下，以量化方式分別評估風險之 P 值及 I 值。

藉由統計分析方法提取專家群的風險評估結果(詳圖 2-4)。

個別專家評估為極端風險存在的情形納入參考。



提升風險矩陣分析的客觀程度及決策分析之可信度。

專家群總體評估結果得到的主要風險及排序

(一)拆除作業

1. 「3.1.1.1 反應器圍阻體」發生「結構物倒塌」
2. 「2.5.7.2 汽機廠房各樓層設備拆解與拆除」發生「結構物倒塌」
3. 「2.5.8 其他輻射作業」發生「工具操作不當」

(二)輻射防護主要風險之危害來源為「包封/HEPA」

1. 「1.2.6 拆除前除污」。
2. 「2.4.1 用過核子燃料池內用過核子燃料移置乾式貯存設施」。
3. 「2.5.4.1 反應器內部組件」。

(三)放射性廢棄物

1. 「2.4.1 用過核子燃料池內用過核子燃料移置乾式貯存設施」發生「容器破損傾倒」。
2. 「2.5.4.3 爐水淨化系統之水與樹脂移除」發生「使用工具發生意外」。
3. 「1.2.3 用過核子燃料移出」發生「使用工具發生意外」。

火災防護建議

- (一)主要火災風險因子可分為三類：電纜、易燃液體、易燃物。
- (二)根據日本災例，電氣設備為除役期間發生火災的要素之一。
- (三)塑料包材需注重管理。

表 1、除役管制目標及風險類型一覽表

除役管制目標	風險類型 I	風險類型 II	風險類型 III
拆除作業	工具操作不當	結構物倒塌	火災
輻射防護	包封/ HEPA	偵檢器	火災
放射性廢棄物	使用工具發生意外	容器破損傾倒	火災

表 2、風險矩陣及專家問卷

第一部份 拆除作業

項次	任務/作業	實體及情境	核心功能業務衝擊評估 Impact					發生機率評估 Probability				
			拆除作業 職災/工期延誤 (值越大表示衝擊越嚴重)					(值越大表示發生機率越高)				
			極高	高	中	低	極低	極高	高	中	低	極低
2.5 拆解與拆除												
2.5.2	放射性廢棄物管理區域準備	工具操作不當										
		結構物倒塌										
		火災										
2.5 拆解與拆除 / 2.5.3 汽機廠房設備拆解第一期												

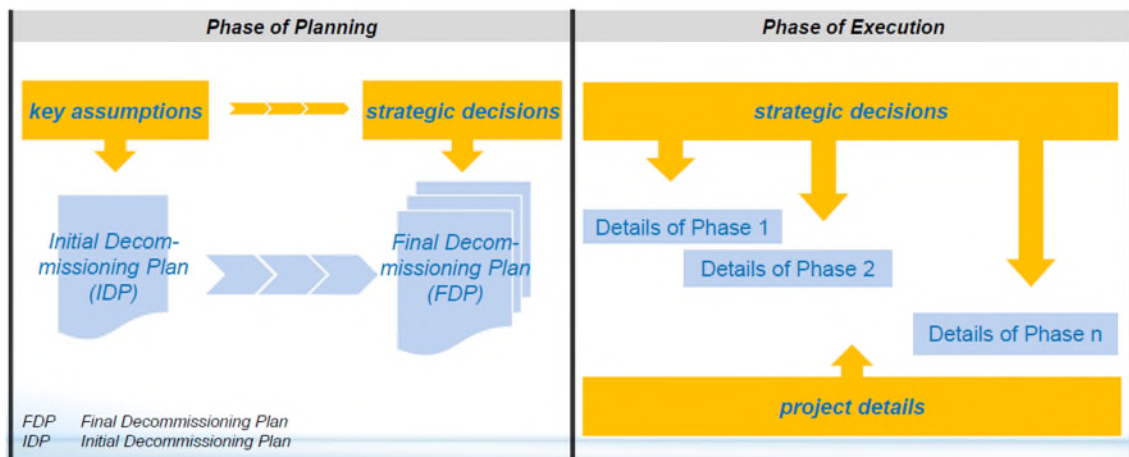


圖 1、IAEA DRiMa 風險管理示意圖

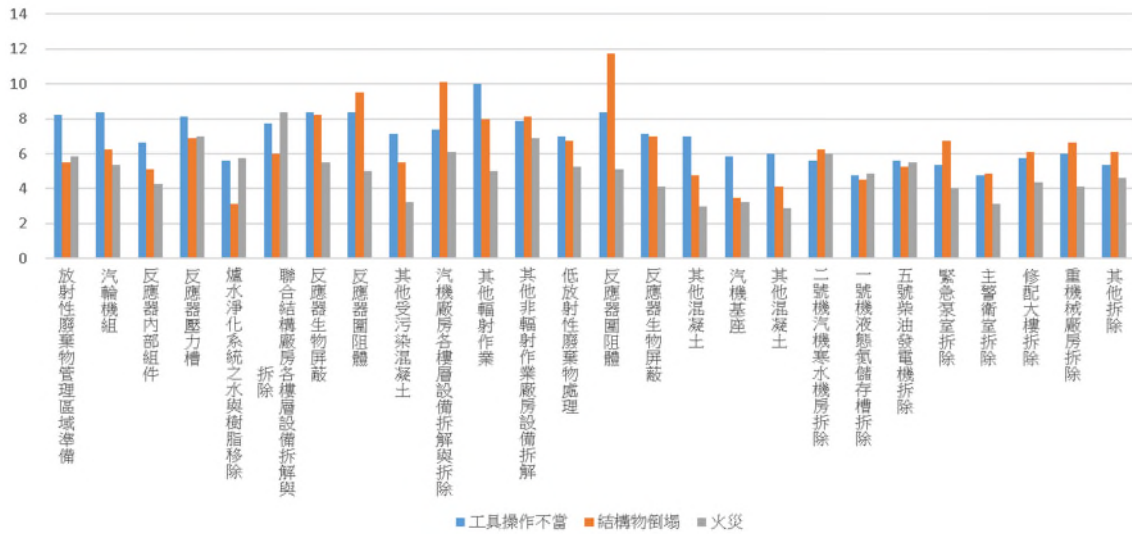


圖 2、「拆除作業」風險評估結果一覽

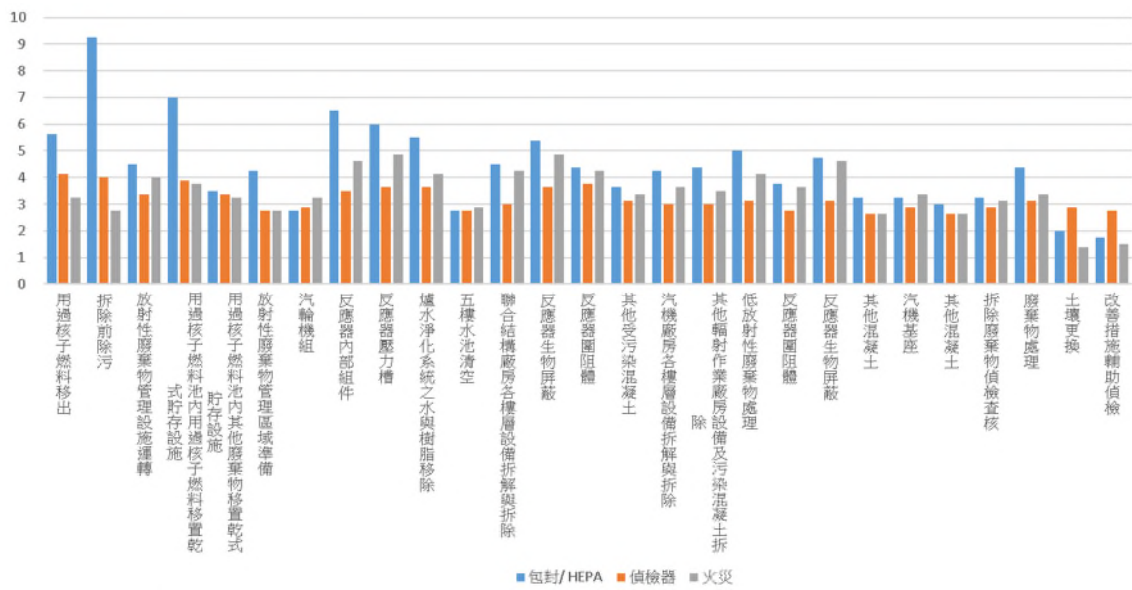


圖 3、「輻射防護」風險評估結果一覽

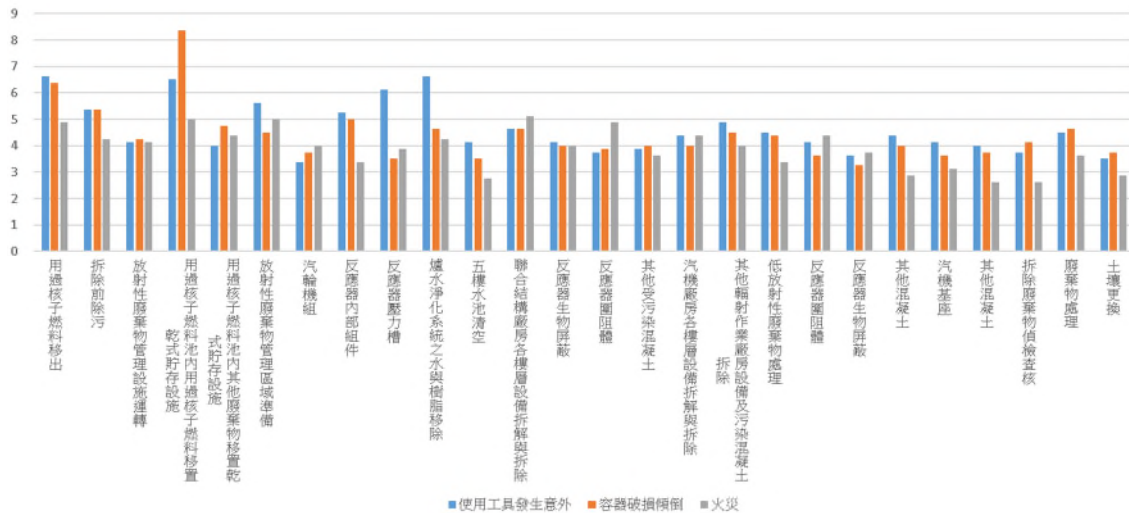


圖 4、「放射性廢棄物」風險評估結果一覽

參、展望

我國核電廠正式展開除役工作，根據 IAEA DRiMa 架構即由 Initial Decommissioning Plan 逐步落實至 Final Decommissioning Plan，應由規劃階段的想定管理落實至執行階段的技術決策，相關風險管理目標及必要作為將日漸明確，本計畫值此關鍵時刻亦首度建立除役作業風險評估機制，以期能儘早確立除役專案風險管理重點，未來能銜接並掌握除役現場真實的作業風險並預先管制，杜絕輻射污染的可能性。



精進核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性、參數及技術要項
Enhancing the features, parameters, and technological prerequisites for
site-specific groundwater protection and regulation during the
decommissioning phase of nuclear power plants

(計畫編號：AEC11204013L)

陳瑞昇¹ 梁菁萍² 郭映彤¹ 何佑婕¹

¹ 中華民國地球物理學會 ² 輔英科技大學護理系

為研析我國核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性，核安會(改制前為原能會)108 年至 111 年委託研究計畫已探討廠址水文地質參數之評析準則、核一/二廠地下水傳輸模式與防護監測方案之精進評析，本計畫目的為精進核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性、參數及技術要項，計畫完成三項重要工作。工作項目一為依我國核電廠除役期間廠址特性，探討採用試驗或評估方式取得地工特性參數之評析準則，並提出相關調查技術與方法之審查要項與建議性作法。工作項目二為蒐集國際核電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務經驗，並提出對我國核電廠除役期間個廠地下水特性評估相關輸入參數審查要項與作法之建議事項。工作項目三檢視目前國內即將進入除役期間之核三廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容，並提出專業建議。

To investigate the groundwater protection and regulation features pertinent to nuclear power plant decommissioning, this study builds upon previous projects funded by the Nuclear Safety Commission (NSC), formerly



known as the Atomic Energy Commission (AEC). These projects, conducted between 2019 and 2022, scrutinized the guidelines governing hydrogeological parameters and critically evaluated groundwater transport modeling and protection programs at the Chin-Shan and Kuosheng Nuclear Power Plants. Our study aims to advance site-specific groundwater protection and regulation features, parameters, and technological requirements during nuclear power plant decommissioning. Three primary tasks comprise this project: Task 1 entails exploring test methods for determining geotechnical parameters and devising strategies for reviewing relevant investigation technologies and methods. Task 2 involves delivering suggestions for reviewing input parameters for groundwater characteristics during decommissioning, informed by ongoing experiences in groundwater protection during both operational and decommissioning phases. Task 3 focuses on scrutinizing groundwater transport modeling and protection programs at the Maanshan Nuclear Power Plant, poised for decommissioning, to offer a professional strategy for the NSC (formerly AEC).

壹、計畫目標

探討廠址地工特性參數之評析準則、核三廠地下水傳輸模式與防護監測方案之精進評析，以持續強化我國核電廠地下防護管制監督之技術能力。持續蒐集及彙整美國業界相關核電廠地下水防護計畫之管制資訊，以精進我國除役期間核電廠地下水防護方案審查及管制之技術能力。

貳、重要成果

本計畫執行有三個主要成果：

1. 本計畫針對除役期間廠址重要地工參數試驗與評估方式建立評析準則，



- 相關重要地工參數試驗包括孔隙率試驗、土壤密度試驗、土壤含水量試驗以及與吸附分配係數試驗與評估方法(實驗室/現地)。
2. 本計畫研析美國 Humboldt Bay 核電廠說明關切核種的選取過程，本計畫也研析南韓 Kori 核電廠除役相關文獻，了解應用 RESRAD-OFFSITE 進行 Kori 核電廠的初步 DGCLs 計算，也詳實探討理解 RESRAD-OFFSITE 與 RESRAD-ONSITE 進行 Kori 核電廠初步 DGCLs 計算相似性與差異性，並詳細說明 RESRAD-OFFSITE 進行 Kori 核電廠初步 DGCLs 的詳細流程，藉由國際的相關經驗以精進我國核電廠除役期間核電廠地下水特性。
 3. 檢視國內即將進入除役期間之核三廠地下水傳輸模式，本計畫就目前核三廠無地下水傳輸模式提出專業評析。在核三廠地下水防護監測方案，本計畫以 EPRI「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」作為基礎分析核三廠地下水防護監測方案，並提供 EPRI 導則的精神與相關重要項目，建議核三廠地下水防護方案可再就 EPRI 導則第三章至第七章內容檢視精進，相關計畫成果可供管制單位作為未來管制上之參考。

參、展望

1. 本計畫參考 ASTM 相關規範及地下水教科書說明重要地工參數試驗方法，提供管制單位參考納入要求台電公司以之基礎資訊，後續可應用於擴增相關場址特性參數調查。
2. 從美國 Humboldt Bay 核電廠與南韓 Kori 電廠計算初步 DGCLs 的經驗，兩者有非常相似的關切核種，相關結果可供我國核電廠比對及確實掌握關切核種，並納入發展核電廠地下水傳輸模式或計算 DCGLs 的



基礎。

3. 針對核電廠地下水防護方案，建議台電公司建立公司層級文件，詳實依據 EPRI 導則發展內容，再由各電廠依據個廠特性完成各廠之地下水防護方案，以強化地下水防護作業。



核電廠特殊結構除役管制技術之先期研究

Preliminary Study on Regulatory Technologies for the Decommissioning of Special Structures in Nuclear Power Plants

(計畫編號：AEC11206021L)

許文勝¹ 歐陽汎怡² 藍貫哲² 王本誠² 李進得¹ 葉宗洸² 王美雅¹

¹ 國立清華大學原子科學技術發展中心 ² 國立清華大學工程與系統科學系

我國核一廠一號機除役即將進入拆除重要組件階段，除役過程中最具困難與挑戰的工作項目之一就是反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel, RPV)與 RPV 內部組件。為了能針對 RPV 與內部組件切割技術方法進行更深入的了解，此計畫目的希望透過國際間拆除技術與切割相關的案例進行蒐集與分析。此外，考量到大型特殊結構物於除役期間之拆除技術與工法研究，減少放射性物質對於現場施作人員的輻射劑量，針對非接觸式遠距加工的雷射技術應用於除役期間大型構件拆除分割的可行性進行評估，並著重於國際文獻蒐集彙整，雖然雷射切割技術在一般工業用途切割金屬薄板已相當普遍，但目前國際間未有除役核電廠用雷射切割進行拆解壓力容器與內部組件的應用實例。

隨著國內核電廠除役階段的來臨，核電廠煙囪拆除成為不可或缺的研究課題，然而，過去的文獻資料缺乏對煙囪除役的系統性彙整，故本研究以 IAEA 的煙囪拆除報告為基礎，該報告廣泛涵蓋煙囪類型、非核及核能用途煙囪的拆除經驗，以及廢棄物管理等相關議題，另蒐集研析近年來國際較新的煙囪拆除案例與輻射防護規定，以因應國內核一廠及核三廠鋼製煙囪材質，提出具體而可行的拆除管制建議。



另外，目前 RPV 與內部組件的拆除是以機械式拆除方法為主，選擇適合的機械技術方法來進行 RPV 與內部組件的切割，並且基於國際間拆除技術與切割相關的案例來彙整出相關的研究成果與管制建議。

The decommissioning of Unit 1 at Chin-shan Nuclear Power Plant in Taiwan is about to enter the second stage of dismantling important components. The segmentation of reactor pressure vessel (RPV) and the RPV internals is one of the most difficult and challenging tasks in decommissioning. Considering the research on dismantling technologies and construction methods of large special structures during decommissioning, reducing the radiation dose to on-site operators in a reasonable low level, and aiming at the convenience of non-contact are both critical. Based on the feasibility assessment of using laser technology for remote processing of large-scale components during decommissioning, the collection of international literature and compilation were initially carried out in this pilot technology research and analysis case. Although laser cutting technology is quite common for cutting thin metal sheets in general industrial applications, there are currently no international examples of decommissioning nuclear power plants using laser cutting to dismantle pressure vessels and internal components

As the decommissioning stage of nuclear power plants is approaching in Taiwan, the dismantling of stack structures has become an essential research issue. However, the systematic collection of stack decommissioning was lacked in the past literature. Therefore, this study is based on the IAEA technical Report, i.e. "Dismantling of Contaminated Stacks at Nuclear Facilities", which extensively covers various stack types and the dismantling



experience of both nuclear and non-nuclear stacks. The report also addresses waste management and relevant issues. Recent cases of international stack dismantling and radiation protection regulations are collected in this research. Recommendations focused on the dismantling of steel stacks, as those in Chin-shan NPP and Maanshan NPP, are provided for better regulations done by NSC.

In addition, the main segmentation technique for reactor vessel internals has used mechanical cutting as the primary cutting method. It would be helpful to choose the appropriate mechanical techniques and methods used to cut the RPV internals through gathering and analyzing the literature and engineering reports. Several regulatory recommendations were summarized based on findings from the collecting information on the international dismantling technologies and the segmentation-related practices.

壹、計畫目標

子項計畫一：

核電廠除役階段進入到拆解大型組件例如壓力容器，由於可能具有高度放射性，必須仔細安排拆解前後物料活度，以及拆解計畫，如何兼顧員工放射暴露安全，以及滿足拆解作業的成本與時間限制，是一大挑戰。雷射切割屬於精密且高效的切割技術，可實現非接觸且可遠距加工之優勢，極有潛力作為核電廠除役期間，用以拆除大型複雜組件的重要技術之一。因此本研究旨在彙整雷射切割技術在核電廠除役過程中的相關文獻，研析目標包含雷射切割原理與工法介紹，針對不同材料之雷射切割特色，雷射切割應用除役電廠與技術展示相關文獻，最後對於管制機關提出管制建議。



子項計畫二：

煙囪是核電廠內的重要結構之一，隨著核電廠運轉年限增加，內部會積累大量的放射性微粒與氣體，這些污染物可能會對環境及人體健康造成影響，而電廠的除役計畫中，預期只有混凝土或金屬拆除技術及輻射防護方面的資料，其可能適用於煙囪拆除。由於此議題目前缺乏系統性的報告，故本子項主要蒐集彙整除役核電廠受污染煙囪之拆除技術報告及國際案例，研析核電廠受污染煙囪之拆除技術，並彙整相應技術所考量之重要因子，提供國內管制機關掌握核電廠受污染煙囪之拆除技術資訊，並提出先期研析成果及初步管制建議，可作為後續管制方向參考。

子項計畫三：

核電廠除役在拆除與處置反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel, RPV)與 RPV 內部組件時，因為考慮高放射性容量、複雜的設計與高硬度材料的需求，透過評估採各式機械式切割的優缺點來選擇最合適的切割方法。

貳、重要成果

子項計畫一：

(一) 對於金屬材料一般目的之雷射切割主要參數

一般雷射切割，多針對三公分厚度以內、成份均勻且表面平整的金屬薄板，以光纖雷射與 CO₂ 雷射進行切割。對於較厚碳鋼與不鏽鋼切割所需雷射功率，可採用每公分/kW 來概估所需總功率。

(二) 國際間關於雷射切割於除役應用相關資訊

對具有一定活度的壓力容器與內部組件材料的除役拆解需求，尚未有雷射切割技術的應用除役中或是已除役電廠的文獻報導，在英、德、韓等國相關研發中技術會搭配水下作業進行雷射切割。



(三) 管制建議

主管機關針對雷射切割可要求業主對於雷射切割系統與工作環境，需符合勞動及職業安全衛生研究所的作業規範「SDSE051T0094—雷射產品的安全—設備分類、需求及使用指引」滿足雷射作業安全需求，且雷射切割可能造成污染物的氣化，切割 RPV 與內部組件因帶有放射性物質前，需要求業主評估產生放射性及粉塵散逸、污染擴散，以及工作人員輻射暴露時間的影響及後續廢棄物處置的規範。

子項計畫二：

本子項總結年度研究重點如下：

- (1) 目前成熟的拆除技術中，最適用鋼製煙囪(核一廠及核三廠煙囪材質)的拆除方式，可能是由上而下的切割(Top-down segmenting)或是完整移除(例如：核三廠較小型的焚化爐煙囪)，這二類拆除方式，亦特別適用於拆除後需在地面除污的煙囪；其中，鋼製煙囪適用之切割技術則包括：機械鋸、機械剪、切割機(nibblers)、火焰或電漿切割。
- (2) 準確的物理、化學及放射性特性調查，是選擇煙囪拆除策略與技術的一項關鍵因素，可據此確認能否以較經濟的方式來進行煙囪除污。
- (3) 利用預先除污，可將煙囪拆除產生的空浮排放可能性降至最低；若無法預先除污，可採取水霧噴霧、霧化、帳篷或局部通風系統等措施，來控制空浮排放，並確保其維持在可接受標準內，或利用污染固定劑(如可剝塗層)進行強化。煙囪在進行拆除時，可在場址週邊安裝空氣採樣器，進行空氣污染物的偵測。
- (4) 應明確找出並管理煙囪拆除計畫的邊界與界面，以確保在拆除工作之前與之後，能適當地隔離輔助系統。
- (5) 在空曠處所或高處作業時，應在作業台車上裝置活動式避雷設施，以



防止雷擊感電，根據國內勞工安全衛生法之相關規定，當 10 分鐘的平均風速達 10 m/sec 以上(強風)，或一次降雨量達 50 mm 以上(大雨)，應即停止作業。

- (6) 福島核一廠煙囪(因發生嚴重事故，使輻射特性調查及拆除難度較高)前提條件雖與國內煙囪情況不同，但其在較嚴峻情境下所採用的無人機調查、遠端控制機器人檢查水位，以及遠端操作切割設備等新技術，均可作為借鏡；其對於強風考量、防止機具墜落及切割前先在本體噴灑防塵劑等措施，亦可列入後續管制考量項目。

子項計畫三：

透過分析機械切割用於 RPV 與 RPV 內部組件，因每一種反應器都具有獨特的特性，拆除之前應適當考慮可能產生的活化\污染的放射性廢棄物，透過評估容器的搬運、廢棄物處置的要求、不同處置選項的容器類型與尺寸後再來選擇切割方法，採用人員屏蔽與遠端操作的切割工具，依照需要的幾何形狀進行切割，可大幅度降低切割量與大限度增加切割物件的尺寸。而機械式切割的設備通常價格較低廉，切屑顆粒較大好收集，也不容易產生氣溶膠，二次廢棄物的數量相對來說較少。在進行現場切割之前能夠進行部署前的規劃、模擬或測試，也建議可以採用 3 維模擬軟體建立反應器壓力槽與內部組件的模型，可模擬切割過程及切割物件的裝卸與包裝，當所有壓力槽內部組件在不同階段切割取出時，壓力槽的內部環境會變得非常擁擠，阻礙工作人員的工作動線，此模型便能夠提供資訊，幫助如何有效地移動這些切割下來的組件，以此提高工作效率與安全性。

另外，透過此計畫的執行，培育四位碩士班學生，多方涉略相關領域的技術文獻，培育相關人才。



參、展望

子項計畫一：

雖然目前未有雷射切割技術的應用於除役電廠的文獻報導，但雷射切割具非接觸、可遠距加工以及可程式控制三大特性，對於減少作業員工的輻射暴露有明顯優勢，並且可見各國也積極研發相關技術，建議我國持續投入資源研析，掌握管制與應用技術關鍵。

子項計畫二：

國內核一廠的煙囪排氣是經由廢氣廠房的地下通道連接至主煙囪，該地下通道在除役階段勢必面臨拆除問題。這些地下結構、系統與組件雖常見於核電廠的設計中，但在早期建廠時，卻顯少考慮要如何將其除役，且過往的技術文獻中，亦缺乏關於核電廠地下或嵌入式組件除役的系統性報告，故本子項規劃於後續將針對這類地下設施的拆除進行相關技術報告及國際案例的彙整研析，以提供管制機關掌握這類特殊構造的拆除技術資訊。

子項計畫三：

針對未來的規劃，對於反應器壓力槽內部組件會以鋸切割(Sawing)與研磨水噴射切割(AWJC)分段切割為主，針對相關的技術文獻與案例進行分析與探討其切割規劃與策略，作為管制方向之參考。



美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之先期研析
**Preliminary analysis of Requirements for Deregulation after
Decommissioning of US Nuclear Power Plants**

(計畫編號：AEC11203010L)

許文勝¹ 陳韶萱¹

¹ 清華大學原子科學技術發展中心

為瞭解美國核電廠執照終止計畫及提交報告之內容及實務經驗，本計畫蒐集並研析了 1) 美國 La Crosse 核電廠執照終止計畫(LTP)相關的報告、2) NRC 對 LTP 的審查結果，以及 3) 業者對審查結果之回覆等文獻。此外，為更多取得有關未受輻射影響區域分類之資訊參考，蒐集並研析 Zion 核電廠未受輻射影響區域的特性偵檢結果與 NRC 對其審查報告。

期末報告內容包含 La Crosse 核電廠 LTP 各章內容摘譯、NRC 對 La Crosse 核電廠 LTP 之審查結果與業者對審查結果的回覆之彙整摘譯、Zion 核電廠未受輻射影響區域特性偵檢結果與 NRC 對其之審查結果摘譯，以及對我國核電廠解除除役管制要項的建議。提出的建議包含針對我國核電廠申請解除除役管制之文件內容應包含的項目與對各項目的審查要項建議，以及對未受輻射影響區域輻射偵檢報告之審查建議。



To get the knowledge of the content and practical experiences related to the termination of licenses for nuclear power plants in the United States, this project collected documents related to the License Termination Plan (LTP) for the La Crosse nuclear power plant, Nuclear Regulatory Commission (NRC) review results of the LTP, and responses from the licensee. Additionally, to obtain more information regarding the classification of non-impacted area, also collected characterization results of the non-impacted areas of the Zion nuclear power plant as well as NRC review reports. After consolidating, summarizing, and analyzing the collected literature, recommendations for the review and regulatory requirements pertaining for the decommissioning and deregulation of domestic nuclear power plants were proposed.

The final report includes translated excerpts from various chapters of the La Crosse Nuclear Power Plant LTP, a summary translation of the NRC's review results of the La Crosse Nuclear Power Plant LTP and the licensee's responses to these results, the characterization survey results of non-impacted areas at the Zion Nuclear Power Plant, the NRC's review results, and recommendations for the key points of license termination for nuclear power plants in Taiwan. The recommendations include suggested items to be included in the documents for applying for the license termination of nuclear power



plants in Taiwan, review criteria for each item, and review suggestions for survey reports in non-impacted areas.

壹、計畫目標

研析彙整美國除役核電廠除役期間與解除除役相關的文獻，以協助國內管制機關掌握解除除役管制之技術審查與管制技術。

配合我國核電廠除役作業現廠實務與國內管制單位之管制需求，針對我國核電廠申請解除除役管制之文件內容及相關報告審查要項之管制重點，進行研析並提出具體建議事項，以供國內管制單位有關強化解除核電廠除役管制之技術審查管制作業之參考。

貳、重要成果

完成 La Crosse 核電廠和執照終止計畫相關文獻之蒐集、研析、摘譯及彙整，包含 1)La Crosse 執照終止計畫(LTP)、2)NRC 對 La Crosse 核電廠 LTP 之審查結果，以及 3)La Crosse 核電廠對 LTP 審查結果之回覆等三大類。

完成 Zion 和 La Crosse 電廠未受輻射影響區之輻射偵檢報告及管制單位審查結果之蒐集、研析、摘譯及彙整。

經彙整 112 年度的研究成果，針對我國核電廠解除除役管制要項以下建議，提出了以下項目之相關建議：



1. 解除除役管制文件中應包含的項目。
2. 解除除役管制文件有關「特性描述」審查要項。
3. 解除除役管制文件有關「剩餘拆除作業」審查要項。
4. 解除除役管制文件有關「除污計畫」審查要項。
5. 解除除役管制文件有關「最終狀態偵檢」審查要項。
6. 解除除役管制文件有關「證明符合解除除役管制之輻射標準方法」審查要項。
7. 未受輻射影響區域特性偵檢之審查要項。

參、展望

本計畫之目標重點為研析美國核電廠的執照終止計畫(LTP)與 NRC 對 LTP 審查之相關文件內容，以作為我國解除除役管制之參考。

美國核電廠在提交 LTP 並通過 NRC 審查後，須依據 LTP 之規畫進行最終狀態偵檢(FSS)，並將最終狀態偵檢報告(FSSR)提交 NRC 審查，FSSR 通過審查後才能將申請執照終止。我國核電廠要解除除役管制，同樣應進行核電廠廠區之最終狀態偵檢，以確認廠址符合外釋之輻射標準。未來建議繼續研析有關最終狀態偵檢報告與審查之文獻，以精進解除除役管制技術。



核子反應器設施安全與除役前期作業管制實務研究

Research on Regulatory Practices for Nuclear Reactor Facility Safety and Early-Stage Decommissioning Activities

(計畫編號：AEC112012)

林家德

國家原子能科技研究院

我國核能電廠陸續進入除役階段前期，管制單位需能兼顧運轉及除役過渡時期的安全議題。本計畫配合核安會核安管制組現階段之業務，擬定除役過渡階段之安全研究項目，以滿足核電廠運轉與除役管制實務的技術需求。本計畫 112 年度之研究重點仍沿著四年期計畫既定主軸，針對福島後核電廠安全強化議題與除役過渡階段安全顧慮，精進地震、海嘯防護、材料腐蝕與維護、熱水流分析、風險評估等核安管制知能。我國核能電廠運轉在除役階段爐心仍有核燃料之特殊組態，本計畫亦從國際核能電廠除役事例，彙整管制作法以強化我國除役管制要求及品質，確保除役過渡階段的核電安全。

The domestic nuclear power fleet had sequentially entered the transient period of the decommissioning phase. The nuclear regulatory body needs a coherent approach to the safety of both operational and decommissioning plants. This project adheres to its 4-year framework to support the current activities of the nuclear safety regulatory division of the Nuclear Safety Commission by setting up the research issues on safety in the transient phase to decommissioning, aiming at fulfilling the technical needs in dealing with



the related regulatory practice. In 2023, it kept on building the regulatory competitiveness in seismic and tsunami safety evaluation, thermo-hydraulic safety analysis, material corrosion, preventive maintenance and risk assessment. In light of Taiwan's unique decommissioning configuration in which the spent fuels still remain in the reactor in early stage, this project consolidates the international regulatory experiences into decommissioning regulatory basis. It enhances the regulation quality and depth to ensure nuclear safety in the transient period to decommissioning process.

壹、計畫目標

本計畫總目標在維持核能電廠運轉與除役安全所需管制專業，並持續汲取核能先進國家除役管制作法與經驗，強化核安及除役管制技術能量。112 年度為本四年期計畫之最後一年，計畫重點在於建立核能電廠地震與海嘯防護管制所需之評估技術，以及除役過渡階段用過核子燃料之熱水流安全分析、材料劣化與維護、風險評估等核安管制技術。我國機組進入除役但爐心仍留有用過核子燃料之特殊組態國際少見，本計畫除提供此階段管制因應之技術基礎外，也參考各國類似案例，尋求適當的科學佐證，提供管制參考，以強化除役管制品質，保障國內核電廠除役安全。

貳、重要成果

本計畫全程 4 年，112 年係依據 112 年 3 月 27 日原能會『會核字第 1120004405 號』函，委請本院執行『核子反應器設施安全與除役前期作業管制實務研究』，本年度為第 4 年。

研發成果之重要貢獻

112 年度計畫之研究成果大致可區分為「精進運轉中核電廠核安管制



技術」與「建立除役管制實務工具與技術」兩類簡述如下。

精進運轉中核電廠核安管制技術類

1. 核電廠熱水流安全分析程式應用與驗證

持續參與 CAMP 國際合作計畫，更新 TRACE 熱水流分析程式與國際 CAMP 會議資訊，並完成核三廠用過燃料池冷卻系統失效及喪失冷卻水事故之案例分析。本項工作也根據四年來對於厭氧菌等微生物腐蝕實驗的觀察，得出除役過渡階段環境條件，機組在持續管理冷卻水水質之前提下，微生物腐蝕活動應偏趨緩方向，對於除役過渡電廠組件之影響輕微。

2. 核電廠後福島管制審查技術精進研究

本項工作完成美國核管會視察程序書 64704 研析報告，核一、二廠除役過渡與除役拆廠階段臨時可燃物之火災危害分析，提出防火管制注意事項建議。本項工作亦引入單位海嘯計算法，進行大量情境模擬，並參考地震型機率海嘯分析法，完成因海底山崩導致核一、二廠近岸廠區年超越率 1/10,000 海嘯高度分析，結果顯示影響並不顯著。另研析三類型水密門水理試驗數據，完成對應之易損參數分析。

3. 核電廠結構/設備受潛在天然災害之安全影響及因應管制技術研究

本項工作完成美國核管會文件 NUREG-2213 地震危害分析更新程序之研析報告，並以新一代地動反應分析技術，完成國內核電廠圍阻體於地震事件下的行為分析，提出管制建議。完成美國核能協會報告 NEI 12-06 App. H Path 5 及加速耐震評估程序(Expedited Seismic Evaluation Process, ESEP)之耐震評估案例實作研究，並彙整前期研究成果，提出最新關鍵管制建議。完成核三廠圍阻體時域與頻域結構土壤互制分析結果之統整研析，提出管制建議參考。



建立除役管制實務工具與技術類

1. 風險告知視察工具應用於運轉及除役作業管制之研究

參考核二廠除役過渡階段前期之系統組態特性及技術規範，完成核二廠除役作業管制用過核子燃料風險告知視察工具開發。完成核能電廠視察風險顯著性評估程序檢視，納入美國核管會新完成之評估程序及功能。完成現有視察評估工具之年度維護與更新。

2. 核電廠運轉及除役期間事故分析及緩和策略研究

本年度以美國核管會嚴重事故分析程式 MELCOR 模式，參照 NUREG-7110 報告之規畫，完成我國核三廠電廠全黑案例運算，建立事故現象分析技術。完成小型模組化反應爐之相關資訊與管制法規彙整報告。

3. 除役期間核電廠重要設備維護管理安全管制技術研究

本項工作本年度完成國際間除役過渡階段重要留用設備維護管理方案之研析，針對用過核子燃料池安全議題完成分類及評比，可做為未來研究優先度之參考。完成核一廠聯合廠房吊車安全議題研析報告與核電廠留用儀電類設備電纜管理議題研析報告，提供管制參考。

4. 核電廠運轉及除役期間非破壞檢測評估研究

執行目視檢測，磁粒檢測及高階超音波等非破壞檢測項目之人員訓練，共計完成 3 人次之初/中級訓練，並有 2 項檢測取得資格；運用相關非破壞檢測人力協助國內核電廠大修視察(核三廠二號機第 27 次大修)共 19 人天，技術支援核二廠組建超音波檢測視察作業 10 人天。

5. 核電廠運轉及除役階段材料維護與防治策略研析

完成不同表面加工(車銷、粗磨與細磨)之 304L 不銹鋼進行應力腐蝕龜裂敏感性試驗，結果顯示車銷樣品的應力腐蝕龜裂敏感性最高，但在經粗磨加工後可有效降低敏感性。完成碳鋼管銲件於靜滯水環境之間隙腐



蝕試驗，顯示於碳鋼易發生局部腐蝕之區域，犧牲陽極法可降低腐蝕速率。

6. 核電廠除役視察管制實務研究

完成瑞典除役管制文件與案例研析報告，並借鏡日本除役核設施用過核子燃料池管制作為經驗，完成「日本長期停機(含除役)核設施用過燃料池運轉維護及安全管制技術實例研究」報告，供管制參考。完成國際除役管制知識管理資訊系統年度更新，強化作業程序與學習地圖知識管理。

學術成就

(一) 學術成就量化績效

本計畫 112 年度發表國內外研討會及期刊論文共 7 篇。養成合作團隊(計畫)共 4 團隊。培育人才計 7 名，完成研究報告共計 25 篇，技術報告及檢驗方法報告計 5 篇，軟體授權釋出教材達 3 件。以下摘要列舉兩篇研究論文說明。

(二) 摘述說明

1. 論文「The Impact of Low-dose Gamma Radiation on the Microbiologically Influenced Corrosion in the Coolant System Components During the Decommissioning Transition Phase of Nuclear Power Plants」研究碳鋼與不銹鋼於冷卻水環境下之微生物腐蝕行為，藉由實驗模擬硫酸還原菌在厭氧環境下生長與代謝現象，經掃描式電子顯微鏡與電化學阻抗譜、電位極化曲線分析試片腐蝕狀況，結果指出生物膜的老化與加馬射線的照射都會抑制微生物的生長與代謝，進而抑制微生物腐蝕之現象，如圖 1。
2. 研究論文「Effects of micro-shot peening on the stress corrosion cracking of austenitic stainless steel welds」，探討微珠擊對 304 及 316 不銹鋼雷射銲接銲道應力腐蝕行為的影響。研究結果發現，



微珠擊可使不銹鋼表面形成奈米晶粒結構以及殘留壓縮應力，進而使銲道熔融邊界的應力腐蝕龜裂敏感性降低，詳見圖 2。

參、展望

本計畫依據管制單位在執行管制業務上之實際需求擬定研究規畫，並完成四年期階段性任務。成果已陸續提供管制決策之技術參考。政府組織轉型後本院仍將持續透過委託研究、跨機構合作與學術交流等方式，持續強化管制技術，支持各項安全管制作為，確保除役安全。

編註：本報告內容係整理自本計畫各子項報告，各子項負責人為蔡智明、黃智麟、徐康耀、吳泰宏、蕭伯彬、林書睿、鄭勝隆、陳泰丞、廖安清。

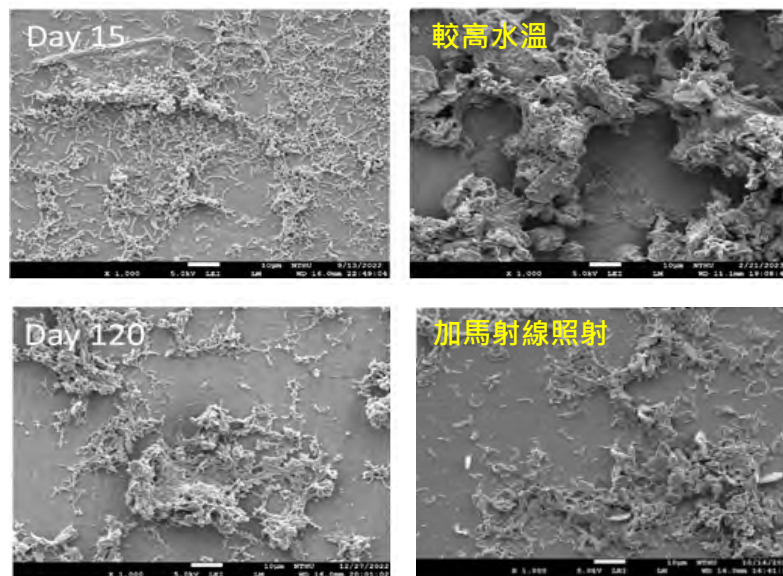


圖 1. 評估微生物腐蝕效應，觀察硫酸還原菌於各種培養條件下的生長與代謝狀況

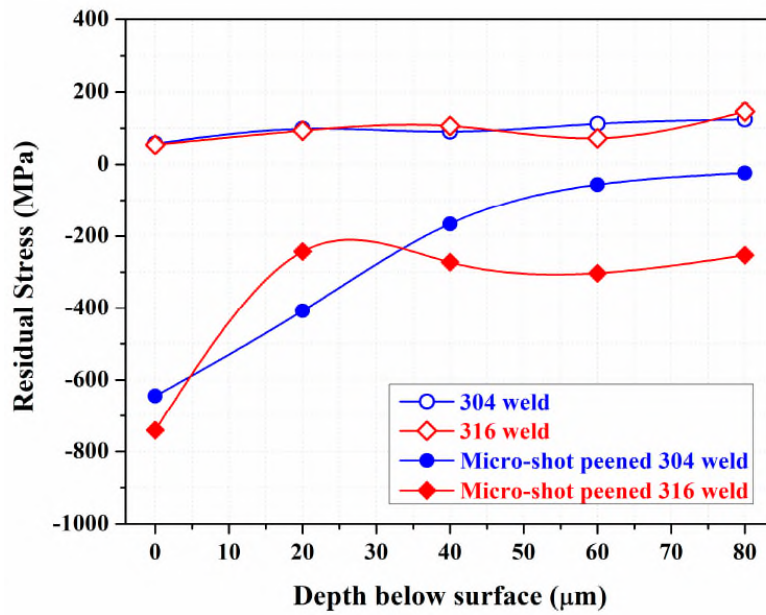


圖 2. 研析腐蝕防治作法，觀察未經過微珠擊及經過微珠擊(micro-shot peening)的 304 及 316 不銹鋼雷射鐳道在厚度方向上的殘留應力分布



目 錄

場次 4：放射性物料安全領域

※112 年受損燃料裝罐後對乾貯護箱之熱流與屏蔽分析技術建立與特性 研析	1
※112 年低放射性廢棄物坑道處置環境與異向性審驗技術研析.....	7
※112 年用過核子燃料最終處置設施安全分析之審驗與管制技術研究..	12
※112 年用過核子燃料乾貯設施再取出單元及運送作業安全管理技術精 進研析	21



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





112 年受損燃料裝罐後對乾貯護箱之熱流與屏蔽分析技術建立與特性研 析

Thermal and radiation analyses of a spent nuclear fuel dry storage cask filled with damaged fuel cans

(計畫編號：112FCMA001)

許榮鈞 曾永信 賴柏辰

國立清華大學

本研究完整研析國際間對於受損燃料乾貯之可行技術與施行實例，藉以建立一套可評估護箱裝載受損燃料時影響輻射與熱流特性之分析模式，藉以探討各類型受損燃料裝載於乾貯護箱後之影響，以期提出技術分析要點與管制建議。研究結果指出選用任何有先例之燃料罐裝載各類受損燃料時，對於輻射屏蔽與熱流沒有不良影響，反而將略為增加屏蔽與熱流分析餘裕，結果證實經妥當規劃的乾貯設施確能有效且安全的貯存受損燃料。研究中藉由國際資訊蒐集研析、假想案例探討與實務分析所獲得的重要發現，皆已彙整為管制要點供參，有助於協助主管機關提升國內乾貯管制量能。

This study completely analyzes the feasible technologies and implementation examples of dry storage loaded with damaged fuel in the world. In order to provide technical analysis findings and regulation suggestions related to the Dry Storage Systems (DSSs) with damaged fuel can (DFC) a set analysis methodology for DSS has been developed to evaluate the impact of radiation shielding and thermal hydraulic



characteristics. The research results indicate that no any obviously adverse effects on radiation shielding and thermal hydraulic can be found for a cask loaded with DFC. On the contrary, the shielding and thermal hydraulic margin will be slightly increased on both analysis results. The results prove that properly planned dry storage facilities can indeed be effective and safely store damaged fuel. The important findings obtained through international information collection, technology analysis and hypothetical case studies have been summarized into regulation suggestions, which will help the authorities improve the capacity of domestic dry storage supervision.

壹、計畫目標

為符合除役需求，我國核電廠之所有用過核子燃料皆需採乾式貯存設施進行中期貯存。在 1 萬 8 仟束燃料中約有 0.3% 的少數燃料被定義為受損燃料。為能確保受損燃料於乾貯期間之安全性，本研究藉由研析國際間貯存受損燃料之實例，並比對各廠家所提供之受損燃料罐(Damaged Fuel Can, DFC)設計，再藉由輻射屏蔽與熱流分析技術的輔助，針對乾貯護箱裝載 DFC 之各項可能假想情境進行深入探討。最後，研究團隊業已將各項技術發現以及國際案例研究之結論匯整為管制建議，以供主管機關參考。

貳、重要成果

國際實例與 DFC 資訊研析

(一) 完整研析美國 NRC 對阿肯色州護箱裝載案、NAC UMS 申請裝載高燃耗與受損燃料之審查與核准經過，並提供其法源依據與技術審查要點供主管機關參考。



(二) 詳細蒐集並比對國際間乾貯技術領先廠家，如 AREVA、HOLTEC、GNS、NAC、Westinghouse 之 DFC 設計，並探討其設計特性與作業限制。

(三) 蒐集並研析立陶宛 Ignalina 電廠以 GNS 之 CONSTOR 護箱裝載完整及受損燃料之資訊供參。

●子項一「乾貯系統裝載受損燃料罐之輻射屏蔽特性與案例研析」研究重要成果

(一) 建立如圖 1 所示之五種常見燃料束(GE8x8-1、GE8x8-2、SPC8x8、GE9B 和 ATRIUM-10)的分析模型，並以 SCALE/TRITON 分析技術進行低燃耗情節用過核子燃料射源項評估分析。在 235U 初始濃縮度為 1.9 wt%條件下，評估 7 種假想裝載受損燃料 DFC 之低燃耗情節。結果顯示當正規化到同樣 1 MTU 的情況下，五種燃料束在各燃耗情節下所呈現的燃料中子與燃料光子射源項近乎一致，不因燃料設計組態不同而有明顯差異，此一觀察有利於簡化相關安全分析所需考量之情節數目。

(二) 如圖 3 所示，考慮裝載受損燃料 DFC 放置數目(0-4 束)的差異，結果顯示並未對護箱表面側邊與頂部劑量率分布造成顯著影響。此一現象主要係因相較於護箱內擺置完整的 52 束用過核子燃料，4 束 DFC 所造成的劑量率影響很小；某特定角度有無放置 DFC 帶來的幾何自屏蔽效益也使劑量率受影響程度減小。

●子項二「乾貯系統裝載受損燃料罐之熱流特性與案例研析」研究重要成果

(一) 本研究利用如表 1 所示之核子燃料設計參數完成國內各式用過核燃料之設計極限案例篩選，進一步藉此證實均質化模式於各種燃料



之適用性。

(二) 藉由國際間 DFC 之設計類型，擬定如圖 4 所示之假想 DFC 設計，並經比對後證實裝載 DFC 之提籃，將具有較高之等效熱導率與較低之熱負載。此外，研究結果亦證實可將擬裝載之 DFC 視為乙種擬裝載之燃料類型，且可從中選定一具保守性之設計基準燃料進行分析。

(三) 建立代碼化源項模式，可搭配各式護箱模型後，模擬任何數量與位置之 DFC 裝載條件，且可視需求設定假想性燃料重排事件(如圖 5 所示)，提供各種情境之熱流分析結果供參。

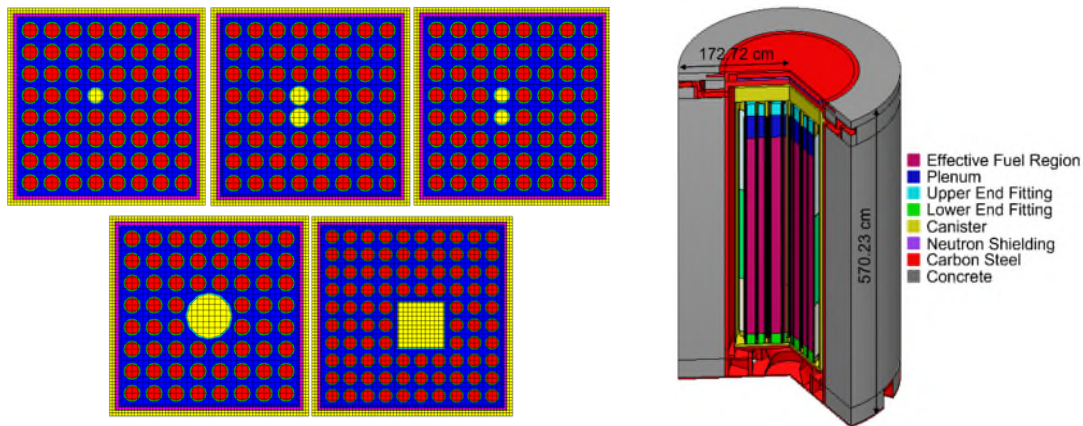


圖 1、建立核一廠之各式常見燃料束射源模型

圖 2、建立 NAC-UMS 展蔽分析模式，可評估不同 DFC 配置對表面劑量之影響

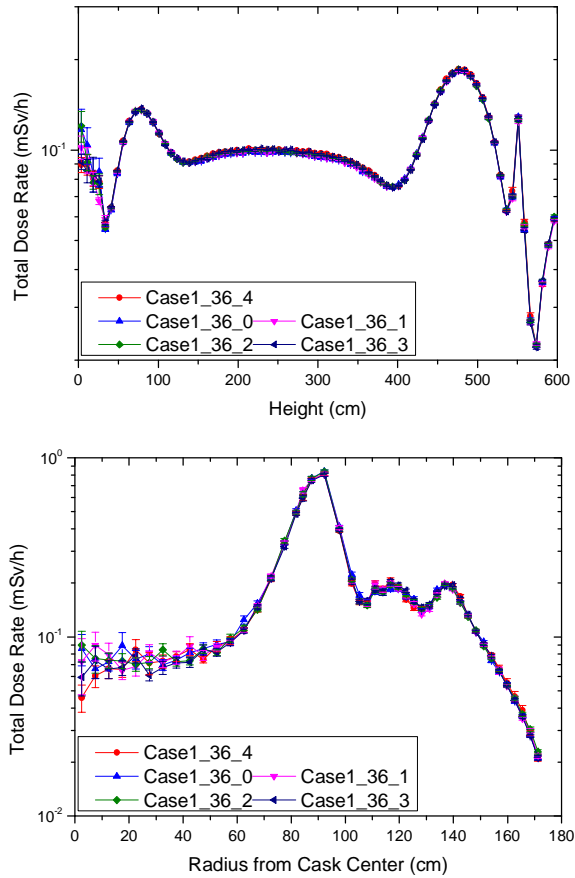


圖 3、不同 DFC 放置數量對護箱表面劑量之影響：側面劑量(左)和頂部劑量(右)

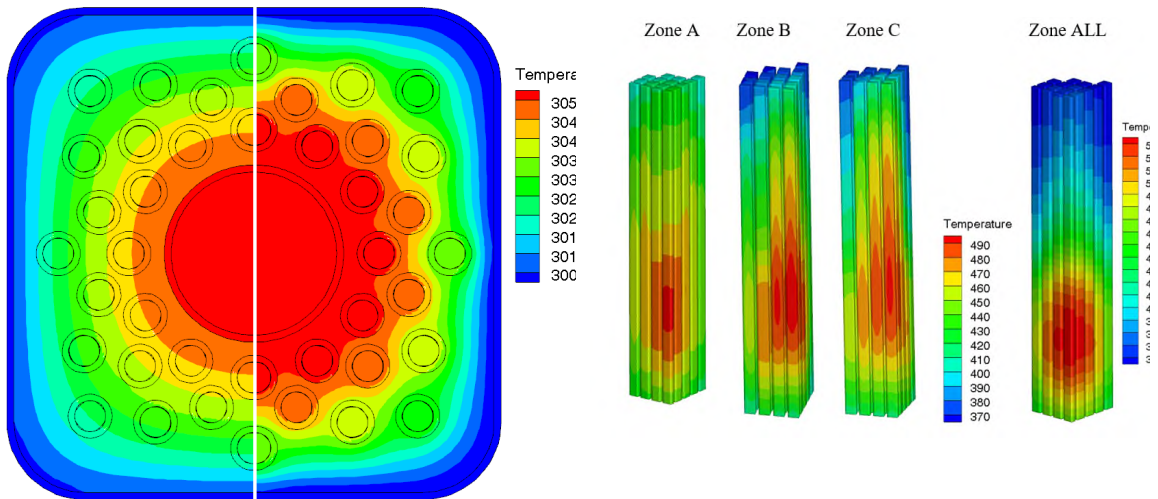


圖 4、假想性 DFC 之均質化(左)與實際模式之溫度分佈(右)

圖 5、不同提籃區域生重排現象之溫度表現



表 1、國內常見沸水式用過核子燃料重要設計參數

燃料類型	燃料丸	燃料護套	列置數
	直徑(cm)	厚度(cm)	
GE 8x8-1	1.057	0.086	8x8
GE 8x8-2	1.041	0.0815	8x8
GE 9B	1.044	0.0815	8x8
SPC 8x8	1.027	0.0885	8x8
GE12	0.8763	0.06604	10x10
ATRIUM-10	0.867	0.0605	10x10

參、展望

本研究基於蒐集文獻所得之受損燃料特性與乾貯實務，在考慮可行的簡化技巧及必要的額外作業流程後，進行完整的輻射屏蔽與熱流特性研析，並將獲得的分析結果回饋以供主管機關參考。所建立之分析技術，亦可應用於壓水式機組燃料乾式貯存之安全分析，以滿足國內對乾貯設施安全管制之需求。



112 年低放射性廢棄物坑道處置環境與異向性審驗技術研析

Environment and Anisotropy Verification Technology for Tunnel Disposal of Low-level Radioactive Waste

(計畫編號：112FCMA002)

王士榮 楊長義

台灣地下水資源暨水文地質學會

我國目前朝向非核家園的目標前進，但低放射性廢棄物處置仍然為必須處理的課題。前期委託研究已針對集中貯存應變方案，以及封閉後安全管制等議題進行研究，另一部分也針對低放坑道處置技術持續精進，本年度接續上個年度之低放坑道處置議題，提出「112 年低放射性廢棄物坑道處置環境與異向性審驗技術研析」，主要內容包括：岩體裂隙化學環境下水力-力學耦合模擬技術研析，以及異向性岩體材料強度試驗與破壞準則建構技術與應用，持續精進並更新國際低放廢棄物處置技術，進一步提升管制量能。

The current direction of our country is towards a non-nuclear home, but the disposal of low-level radioactive waste remains a necessary issue to address. Early commissioned research has focused on centralized storage contingency plans and issues related to secure control after closure. Another part of the research continues to improve the technology for low-level waste disposal in tunnels. In the current year, following the previous year's low-level waste disposal issues, this study presents an analysis of "Environmental and Anisotropy Examination Technology for the 112th Year Low-Level



Radioactive Waste Tunnel Disposal." The main content includes the analysis of hydraulic-mechanical coupling simulation technology in the chemical environment of fractured rock masses. Additionally, it involves the construction and application of testing and destruction criteria for the strength of anisotropic rock mass materials. The goal is to continuously improve and update international low-level waste disposal technology in Taiwan, further enhancing regulatory capacity.

壹、計畫目標

為響應全球趨勢，我國積極以推動無核家園為目標。我國法規中，將放射性廢棄物分類為高、低放射性廢棄物並分別依不同標準進行處置。其中，低放除了核電場受核污染之廢棄物外，還有包含醫療、工業、農業以及研究單位所持續產生的低放射性廢棄物，因此低放射性廢棄物處置為國內重要的課題。本計畫以前期研究成果為基礎，持續針對低放射性廢棄物坑道處置技術之議題，提出「112 年低放射性廢棄物坑道處置環境與異向性審驗技術研析」，包含兩個子計畫。子計畫一針對岩體裂隙於不同化學環境下，水力-力學耦合模擬相關之文獻進行蒐整與研析，透過研析岩體裂隙於不同化學環境下，水力-力學耦合模擬方法及模擬結果之案例，並與室內試驗之結果相互驗證其合理性。子計畫二綜整國際間有關異向性岩體之場址調查與坑道開挖案例，針對異向性岩體破壞準則及破壞模式進行研析，並彙整我國本土異向性岩體力學特性與破壞準則研究成果，以提供未來有關處置母岩之場址特性調查、試驗規劃及發展相關審驗技術之參考。另外，本計畫亦舉辦國內專家技術討論會，針對本研究提出之議題進行討論。透過此研究，期能協助管制單位持續精進審查技術，並提供相關建議。



貳、重要成果

(一) 子計畫一：112 年低放射性廢棄物坑道處置之岩體裂隙於不同環境下之水力-力學耦合模擬技術研析

- 1、化學環境下之水力-力學耦合模擬，Yasuhara 等人(2003)首先提出多孔介質的壓實現象模型，並於後續的研究進行改良(圖 1)，應用於裂隙受不同化學環境(包含溫度)下之裂隙水力-力學耦合。此模型包含幾個機制，分別為裂隙粗糙接觸處的壓溶作用、溶解後之物質的擴散、溶質於裂隙表面的沉澱，以及自由面的溶解等機制。
- 2、不同模型所考量之關鍵參數不盡相同。Yasuhara 等人(2006)之研究中反應速率常數、孔隙面積等影響模擬結果顯著，其原因源自於待測樣本岩性的不確定性；Liu 等人(2006)之研究中 α 、 β (粗糙接觸處寬度)和 γ (溶解速率常數)是主要控制之三個常數；McGuire 等人(2013)之研究中，受壓溶解機制的不同也可能導致模擬結果與試驗結果的差異。
- 3、由 Yasuhara 等人(2006)、Liu 等人(2006)和 McGuire 等人(2013)之研究中發現，在粗糙接觸處的受壓溶解機制也有所不同。Karcz 等人(2008)研究中展示了應力作用下，裂隙粗糙接觸處之三種不同機制(圖 2)。包含壓溶作用(滲透率減小)、應力腐蝕破裂(滲透率減小)，以及快速流動通道(滲透率增加)。
- 2、綜整有關裂隙岩體於不同化學環境下水力-力學耦合之室內試驗與數值模擬相關文獻，並將重要資訊彙集成表。(1) 室內試驗的部分包含室內試驗裝置、所使用之觀測儀器、試驗項目、樣本之岩性、流體化學特性以及滲透率變化等。(2) 數值模擬的部分包含了幾何參數的假設、模擬機制以及關鍵的參數等。

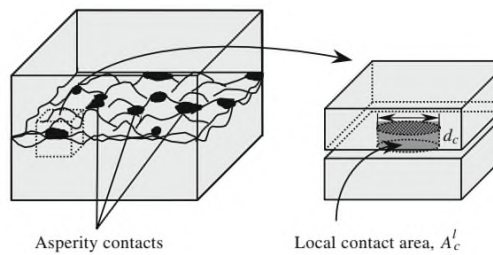


圖 1 裂隙粗糙接觸處之理想化模型

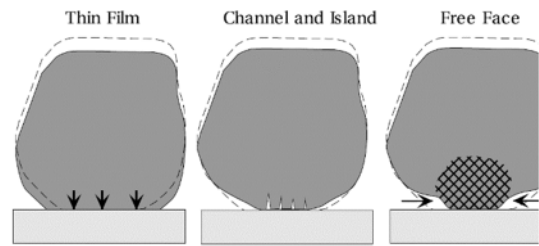


圖 2 三種受壓溶解模型示意圖

(二) 子計畫二：112 年低放射性廢棄物坑道處置之異向性岩體破壞準則建構技術與應用

- 1、完整岩石的勁度、強度、熱傳導率、電阻率等特性，端視試體取樣方向不同，其試驗結果亦有所差異，對於處置場的設計與建造、熱傳建模與坑道穩定性分析等，必須將處置母岩的葉理特徵及其影響納入考量。
- 2、處置母岩若具葉理特徵，不僅對坑道式處置之數值模型建模、工程規劃與設計具有重要意義，對場址調查工作階段，尤其是現地應力量測亦屬重要。目前的現地應力量測技術，無論是水力破裂法或是應變釋放法，處置母岩既存弱面對現地應力量測結果存在直接或間接的影響，應特別注意。
- 3、Posiva(2006)提出的岩石力學葉理參數(rock mechanics foliation number, RMF)與葉理分類矩陣(圖 3)可提供工程師了解處置母岩葉理分布特徵，及評估數值分析採離散裂隙模型(Discrete Fracture Model, DFM)建模之必要性。
- 4、異向性岩體破壞準則之建構，必須考慮參數數量、參數是否具備物理及力學意義、參數如何獲得、破壞準則與試驗數據之驗證與峰後行為之適用性，另外，其應用於數值分析之可行性亦須一併考量。
- 5、基於葉理面破壞準則(Foliation failure criterion, FFC)所開發

的 FFC Jmodel 與 Ubi-FFC Cmodel，經驗證已可模擬異向性岩體力學特性(圖 4)。

rock mechanics significance of foliation increasing from left to right			
rock mechanics significance of foliation increasing from top to bottom	G1 gneissic low App. 1A(b)	G2 gneissic intermediate App. 1A(c)	G3 gneissic high App. 1A(d)
	B1 banded low App. 1B(b)	B2 banded intermediate App. 1B(c)	B3 banded high App. 1B(d)
	S1 schistose low App. 1C(b)	S2 schistose intermediate App. 1C(c)	S3 schistose high App. 1C(d)

Legend	
 	foliation of low rock mechanics significance (RMF 1)
 	foliation of intermediate rock mechanics significance (RMF 2)
 	foliation of high rock mechanics significance (RMF 3)

圖 3 根據葉理發育狀態與型態建立之葉理矩陣

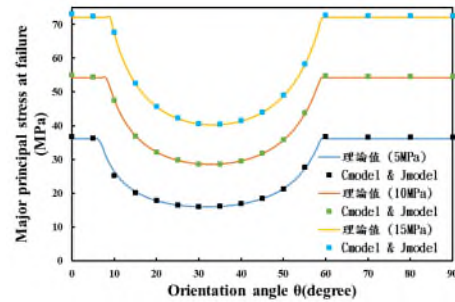


圖 4 岩體滑動破壞強度理論值與模擬比較(以 Cmodel 與 Jmodel 複合模型為例)

參、展望

本研究中，針對岩體裂隙於不同化學環境下水力-力學耦合之議題，蒐整許多國際間的室內試驗及數值模擬相關文獻。室內試驗部分研究耗費資源龐大(例如：CT 電腦斷層掃描)，如未來我國需發展相關技術，可從投入資源較少的項目開始著手。數值模擬結果可能會受到反應速率常數、孔隙面積等參數影響，模型中所考慮的機制也會影響模擬結果。因此，未來我國之研究方向可朝向建立一個水力-力學-化學矩陣列表，盤點研究現況；或是先給定一個化學條件，聚焦在特定議題下進行相關研究。異向性岩體破壞準則建構技術與應用之議題，Posiva(2006)針對岩石是否為均質或異向性岩體，及葉理結構及對岩石異向性特徵的描述與分類經驗，值得我國參考。另外，岩體異向性對開挖引致岩體損傷與支撐設計之影響，以及本土具葉理面與劈理面之變質岩類，其異向性對岩石強度、變形特性與水力特性之影響，及不同岩石類別在上述異向性之差異，可做為未來之研究課題。



112 年用過核子燃料最終處置設施安全分析之審驗與管制技術研究
Study on the Regulation, Review, and Verification of the Safety Analysis
of the Geological Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel

(計畫編號：112FCMA003)

楊樹榮 楊長義

國立屏東科技大學

核能安全委員會基於主管機關之責任，一方面嚴格督促台電公司切實執行高放處置計畫，同時持續推動用過核子燃料最終處置安全管制相關法規制定作業，以期妥善解決我國放射性廢棄物問題，並保障民眾安全及維護環境品質。本計畫目的即在參酌國際核能組織對高放地質處置安全證案相關指引、準則，以及核能先進國家處置相關法規、安全要求或高放最終處置設施階段性安全證案案例等資訊，據以發展我國用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則內容，完成我國高放最終處置安全分析報告導則之研擬工作。

本計畫擬針對「109 年用過核子燃料最終處置設施設計之審驗與管制技術研究」所規劃之高放最終處置安全分析報告導則章節架構，延續 109-111 年已進行「設施之設計基準」、「設施之建造」、「場址之特性描述」、「設施之運轉」、「設施之安全評估」及「品質保證計畫」等 6 個章節之研擬，擬針對安全分析報告「綜合概述」、「設施之組織規劃、行政管理及人員訓練計畫」、「輻射防護作業及環境輻射監測計畫」、「消防防護計畫」、「封閉及監管規劃」、「保安計畫及料帳管理計畫」及「保防計畫」等七個章節，研提各專章條文並提出審查要項建議，以完備安全分



析報告導則(草案)內容。另外，為掌握高放處置技術最新發展，針對關鍵技術要項，規劃進行傾斜裂隙環境下沉積(sedimentation)及沖蝕(erosion)對緩衝材料流失量之影響評估研究，以掌握高放處置設施安全評估工作之審查重點，支援審查驗證技術，以提升國內相關管制技術與審查能力。

With the ultimate goal of solving the difficulties in the safe disposal of spent nuclear fuel, the mission of the Nuclear Safety Commission includes supervising Taipower in implementing the geological disposal program for spent nuclear fuel in Taiwan and promoting the formulation of regulations for safe disposal of spent nuclear fuels. This is expected to be beneficial to the regulating control of the final disposal program conducted by Taipower. The objective of the project is to develop the specific guide for the safety analysis report for the geological disposal facility by referring to the main issues discussed in international geological disposal programs and reviewing comments provided to various countries on their disposal project's safety analysis report by regulating agencies.

This project will assimilate the safety guides published by international organizations and the safety requirements and design criteria established by regulating agency of various major nuclear-power-generating countries for the geological disposal facility for radioactive wastes. Based on extensive study on related information, a draft guide for the safety analysis report for geological disposal facility will be devised for Taiwan. This year's task is focused on the remaining 7 chapters in the proposed guide, in order to complete the draft.

In addition to the development of the review guide for geological



disposal facility, a sub-project on investigating the sedimentation and erosion of buffer material with sloped fractures across the deposition hole will be conducted in this study. The tasks include experimental investigations on the sedimentation and erosion behavior of buffer materials in sloped fractures, and the evaluation of mass loss due to sedimentation and erosion of buffer materials. These tasks are intended to be conducted independently such that major findings from Taipower's safety analysis reports at different stages and/or international collaborated researches can be compared and verified.

壹、計畫目標

目前我國高放處置計畫進入第二階段「候選場址評選與核定(2018-2028年)」工作，因應選址工作展開，核能安全委員會(以下簡稱核安會)要求台電公司按照計畫目標，依國際原子能總署(IAEA)發布之安全證案導則，就我國處置計畫階段及地質處置母岩特性，針對處置技術持續採滾動式檢討精進，於114年底前提出「我國用過核子燃料最終處置安全論證報告」(SNFD2025)，以確保台電公司最終處置計畫達到最佳現有技術且符合國際水平。

核安會為聚焦我國用過核子燃料最終處置管制重點及強化管制作業，參酌核能國際組織高放地質處置相關導則、安全規範，以及各國最終處置法規、安全要求或審查案例等資訊，據以研擬我國用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則(草案)。至目前為止，109-111年核安會已委託計畫先後完成「設施之設計基準」、「設施之建造」、「場址之特性描述」、「設施之運轉」、「設施之安全評估」及「品質保證計畫」等六個專章之內容研擬；112年度計畫重點則持續上述導則(草案)研究工作，針對安全分析報告導則之「綜合概述」、「設施之組



織規劃、行政管理及人員訓練計畫」、「輻射防護作業及環境輻射監測計畫」、「消防防護計畫」、「封閉及監管規劃」、「保安計畫及料帳管理計畫」及「保防計畫」等七個章節，研擬各專章條文內容並提出審查要項建議，期於本(112)年度完成我國高放安全分析報告導則(草案)全部共十三章之完整內容。

本計畫針對用過核子燃料地質處置設施安全分析報告導則所需之「綜合概述」、「設施之組織規劃、行政管理及人員訓練計畫」、「輻射防護作業及環境輻射監測計畫」、「消防防護計畫」、「封閉及監管規劃」、「保安計畫及料帳管理計畫」及「保防計畫」等資訊與技術，進行國際高放地質處置設施安全證案相關資訊蒐集與研析，並彙整各國處置計畫階段性安全分析報告審查要項，以研提我國高放處置設施安全分析報告導則之七個專章內容，同時提升對於安全證案報告相關審驗技術能力為目標，提出二項子計畫，分別為：

子計畫一：用過核子燃料最終處置設施安全分析報告之審驗與管制技術研究

子計畫二：傾斜裂隙環境下沉積及沖蝕對高放處置設施緩衝材料流失量之影響評估

子計畫一主要內容分為二個部分，一為國際高放射性廢棄物最終處置計畫相關文獻資訊蒐集，並對主要核能國家地質處置階段性安全證案報告進行擇要研析與審查要項建議；二為針對我國高放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則(草案)，研提「綜合概述」、「設施之組織規劃、行政管理及人員訓練計畫」、「輻射防護作業及環境輻射監測計畫」、「消防防護計畫」、「封閉及監管規劃」、「保安計畫及料帳管理計畫」及「保防計畫」等專章條文內容。



子計畫二將深地層中的傾斜裂隙納入研究考慮，設計出可考慮流量、裂隙傾斜角度及水化學環境條件下的實驗裝置，在上述不同試驗因子組合下，進行一系列沉積及傾角沖蝕實驗，藉以瞭解緩衝材料在傾斜裂隙環境下受沉積與沖蝕作用對流失量之影響。

貳、重要成果

子計畫一：用過核子燃料最終處置設施安全分析報告之審驗與管制技術研究

子計畫一主要內容分為二個部分，一為國際高放射性廢棄物最終處置計畫相關文獻資訊進行蒐集與研析，包括國際組織與各國高放最終處置計畫安全分析案例、技術及研發報告等進行擇要研析並提出審查要項建議；二為研提我國高放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則(草案)「綜合概述」、「設施之組織規劃、行政管理及人員訓練計畫」、「輻射防護作業及環境輻射監測計畫」、「消防防護計畫」、「封閉及監管規劃」、「保安計畫及料帳管理計畫」及「保防計畫」等專章章節架構與審查要項建議，以及專章條文內容之研擬。

子計畫一主要內容分為二個部分，一為國際高放射性廢棄物最終處置計畫相關文獻資訊進行蒐集與研析，包括國際經濟合作暨發展組織(OECD)所屬核能總署(NEA)於2013年所發表的「地質處置場封閉後安全證案之性質和目的」報告研析及要項建議撰擬，以及由法國ANDRA、加拿大NWMO、英國NDA及日本NUMO等高放最終處置計畫之管制機關或專責機構所公開的法規、安全要求、安全分析報告案例、技術及研發報告等內容，進行擇要研析與審查要項建議之撰擬，以掌握國際高放最終處置計畫安全分析之發展，並作為安全分析



報告導則內容研擬之參考依據，藉以提升國內相關管制技術與審查能力；二為研擬我國高放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則「綜合概述」、「設施之組織規劃、行政管理及人員訓練計畫」、「輻射防護作業及環境輻射監測計畫」、「消防防護計畫」、「封閉及監管規劃」、「保安計畫及料帳管理計畫」及「保防計畫」等專章章節架構與審查要項建議，以及專章條文與說明內容之研擬，以延續 109 年至 111 年計畫之成果。

為確認高放最終處置設施安全分析報告導則草案全文之完整性及一致性，研究團隊於本年度專章內容初步完成，即回顧過去三年(109-111)所陸續完成之六個專章條文內容，並進行重新檢視，詳細審視其技術內容的連貫性與合理性，透過反覆討論與修訂，以及兩次專家座談會議中專家之建議，完成全部專章內容草案。

本計畫之執行，集結了國際組織高放最終處置相關指導原則、各國最終處置相關法規及案例，建立我國高放射性廢棄物最終處置安全分析導則內容發展的基礎；所提出的高放最終處置設施安全分析報告導則條文草案，將有助於我國放射性廢棄物相關管制法規更趨完備。

子計畫二：傾斜裂隙環境下沉積及沖蝕對高放處置設施緩衝材料流失量之影響評估

在深地層下，當高放處置設施緩衝材料接觸到地下水流後，因膨脹擠入岩石裂隙中，並在地下水與重力的影響下發生沖蝕與沉積作用，進而引起緩衝材料的質量損失。相對於在平行裂隙下，具有傾斜角度的裂隙在質量損失的影響上是較為嚴重的。因此，子計畫二將傾斜角度納入本年度計畫中，並評估 MX-80 與 K-V1 膨潤土做為緩衝材料



在不同水化學之離子強度、離子種類、與傾斜角度影響下對緩衝材料質量損失的影響，主要研究成果如下：

1. 在有水流動與無水流動情況下，當裂隙傾角大於 45° 時，實驗結果表明 MX-80 及 K-V1 兩種膨潤土皆有沉積行為的發生，當傾斜角度由 60° 增加至 90° 時，因沉積造成的質量損失的幅度有減緩的趨勢。因此，處置場環境須避開母岩裂隙傾角過大的環境。
2. K-V1 膨潤土相較於 MX-80 膨潤土沉積量較大，這是由於膨潤土與水接觸的飽和過程中，K-V1 膨潤土發展出的顆粒間距較大，因此使 K-V1 形成較為分散的結構，導致在質量損失上較為顯著。
3. 傾角沖蝕實驗結果表明，MX-80 和 K-V1 膨潤土在相同陽離子種類下，皆隨著陽離子強度的上升，其擴散雙層壓縮，顆粒間的擴散排斥力大幅減少，成為絮凝的結構，使得沖蝕明顯受到抑制，因而有較大的徑向擴張量，尤其於 6 mM NaCl 水溶液高陽離子強度下，因陽離子強度之因素，使試體無明顯沖蝕行為發生，如圖 1 所示。
4. 在相同陽離子強度但不同陽離子種類下，含 CaCl_2 的水溶液相較於含 NaCl 的水溶液，造成的沖蝕質量總損失率較低，主要由於鈣離子相比於鈉離子其親和力較高，因此膨潤土中的鈉離子將被取代，使鈉型膨潤土逐漸轉為鈣型膨潤土，而鈣型膨潤土結構較為絮凝，因而不易受沖蝕影響。因此，處置場地下水含鈣離子的環境下將能抑制緩衝材料的沖蝕發生，如圖 2 所示。
5. K-V1 膨潤土於傾角 45° 時，膨潤土僅受重力作用產生的沉積損失率為 19.32 %，而在 1.00 mL/min 流量的沖蝕與沉積共同作用下，質量總損失率高達 98.93 %，由此可知在同時受水流剪切力及重力耦合作



用下，其質量損失將產生更為嚴重的影響。

6. MX-80 及 K-V1 兩種膨潤土在低陽離子強度下較易發生沖蝕，因此徑向擴張在發展過程中不斷受到沖蝕影響，進而擠入裂隙的膨潤土無法持續向外擴張發展。

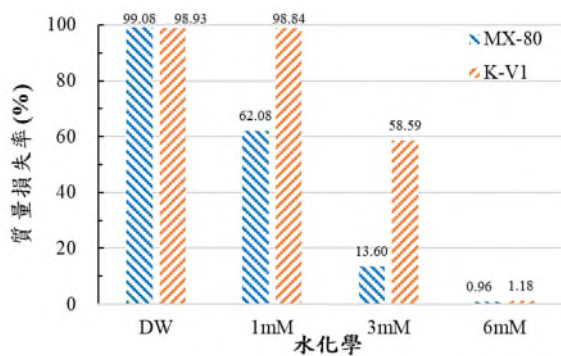


圖 1 MX-80 及 K-V1 膨潤土於不同陽離子強度下之沉積沖蝕總損失率

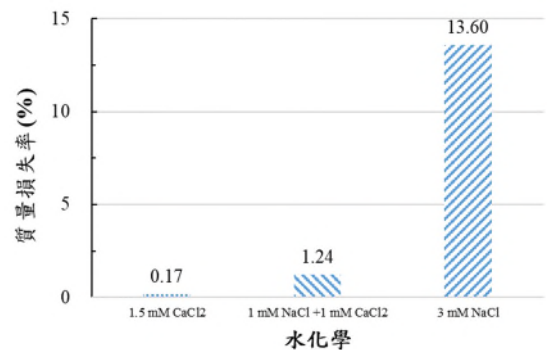


圖 2 MX-80 膨潤土於不同陽離子種類之沖蝕質量總損失率

參、展望

為完備我國用過核子燃料最終處置相關法規，核安會先後於 109 年至 111 年委託之研究計畫中，針對用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則(草案)場址之設施設計、設施建造、場址特性描述、設施運轉、安全評估及品質保證計畫章節進行研擬；112 年度則聚焦於最終處置設施「綜合概述」、「設施之組織規劃、行政管理及人員訓練計畫」、「輻射防護作業及環境輻射監測計畫」、「消防防護計畫」、「封閉及監管規劃」、「保安計畫及料帳管理計畫」及「保防計畫」等章節內容之研擬。

透過參酌國際組織高放最終處置安全規定或導則、核能先進國家相關法規、安全要求或導則及國際間高放最終處置設施安全分析報告審查案例，研提我國用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則年度專章



章節架構及條文內容。此外，計畫團隊參酌法國、加拿大、英國、日本等國的階段性安全分析報告，及對台電公司 SNFD2017 報告的審查經驗納入考量，並透過徵詢主管機關的專業意見指導，以及舉辦專家諮詢座談會議之方式邀請各界專家及台電公司高放計畫執行團隊成員共同諮詢討論，協助專章架構及條文草案內容之修訂，以整合多方看法與意見，逐步發展完整的安全分析報告導則，供國內主管機關及相關單位參考應用。

同時，為提升我國高放最終處置計畫之驗證能力，針對高放最終處置設施緩衝材料於傾斜裂隙環境下沉積及沖蝕流失量評估相關研究，研提國內最終處置之審查重點及建議事項，藉以持續發展國內平行驗證技術，精進我國用過核子燃料最終處置計畫之研發內容，提升管制機關審查與驗證之技術能力。



112 年用過核子燃料乾貯設施再取出單元及運送作業安全管制技術精進
研析

**Refinement of safety control technology for dry storage facility reuse
units and safety standards regulations for spent nuclear fuel
transportation**

(計畫編號：112FCMA004)

李昭仁 洪振育 張皓評

工業技術研究院

我國核能一廠與核能二廠已進入整體除役工作，而用過核子燃料之移除也成為重點之關鍵。本計畫主要重點：(1) 用過核子燃料乾式貯存設施再取出單元安全管制技術精進研析，(2) 用過核子燃料運送作業之安全管制技術研析。國際運轉中之濕式貯存運轉經驗可參考如美國的 GE Morris 或瑞典 SKB 的 Central Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel, CLAB。本年度將藉由搜尋此類運轉資料與審查資訊，提供我國再取出系統審查要項之精進之材料。且於 111 年提出之審查要點主要作為核一廠與核二廠之 BWR 沸水式電廠之用過燃料池為主要審查內容，而對於我國核三廠所採用之壓水式 PWR 電廠，也需要確保水質控制上是否有額外之工作議題需要討論，因此本年度計畫中，也會依據壓水式電廠之用過燃料池，進行資料蒐集與研析，完善此審查要點之內容。透過對 IAEA 於 2018 年發布之 SSR-6 (Rev.1) 放射性物質運輸安全規則之研析，並針對現有法規與 IAEA 中關於放射性物質運輸的安全要求進行協調，協助管制單位對相關運輸管理審查及安全管制要求進行檢討與精進，



以逐步完善放射性物質運送法規要求。此外，乾式貯存設施係核能電廠除役之必要設施，於 111 年之物管局相關計畫中已經提出乾式貯存設施之再取出系統安全審查要點，此要點依據美國核管會之濕貯相關標準，由於濕貯之作法於國際間並不常見，此類法規也需要更多相關於國際之運轉經驗進行研析，並於本年度計畫中進行更進一步之精進。

Chin-Shan and Kuosheng nuclear power plants have entered the decommissioning stage in Taiwan, and removing the spent nuclear fuel from the reactor has become the key point. This project will be divided into two parts including: (I) refinement of safety control technology for dry storage facility reuse units, and (II) safety standards regulations for spent nuclear fuel transportation.

In the sub-project I, the indoor dry storage facility will be necessary for the current decommissioning plan. In 2022, the safety review items of the retrieval system of the dry storage facility have been proposed. Such regulation required more research related to international operating experience. For the wet storage operation experience in international operation, refer to GE Morris in the United States for wet-type spent nuclear fuel storage and SKB CLAB in Sweden. This year, searching for operating data and reviewing related regulations or information, will provide more suggestions. In addition, 2022 is mainly focused on the BWR plants. This year will also focus on PWR systems such as Maanshan Nuclear power plant, in this research we will refer to the Maanshan Power Plant spent fuel pool design standard and regulations. Improve the review point content on the retrieval system.

Meanwhile, in the sub-project II, through the study of IAEA's SSR-6



(Rev.1) Safety Standards Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material published in 2018, and the harmonization of existing regulations with IAEA's safety requirements for the transport of radioactive material, it will assist the nuclear regulatory authority in reviewing/refining the relevant transport management reviews and safety control requirements. Not only that, it will gradually improve the regulatory requirements for the transport of radioactive substances.

壹、計畫目標

本計畫可以達成目標如下：

- (1) 用過核子燃料乾式貯存設施再取出單元安全管制技術精進研析
研析歐美相關再取出系統之運轉經驗，參酌國內核三廠最終安全分析報告(FSAR)與相關法規標準與設計準則，精進我國再取出池安全標準與審查作業導則的審查要點；
- (2) 用過核子燃料運送作業之安全管制技術研析 彙整研析國際間放射性物質安全運送規定中，對於放射性物質運送作業之安全標準及安全要求等資料，根據研析結果，提出放射性物質安全運送作業審查之精進建議，作為未來放射性物質安全運送審查作業之參酌依據。

貳、重要成果

- (一) 主要聚焦於國際間對用過燃料進行再取出行為的設施進行深入研析。由於再取出的動作涉及解除密封性和用過燃料的吊掛工作，其整體過程與目前使用的濕式貯存系統或再處理系統的前置作業相似。因此，本年度的研究收集了三個國際案例(法國 La Hague、瑞典 CLAB 以及美國 GE Morris)，這些案例作為濕貯與再處理廠的



代表，用來進行詳盡的研析。已針對三個國際仍在運營的貯存設施進行了資料蒐集與研析，並加入了美國與法國在相關營運過程中所考慮的監管資料。這些資料將作為我國未來監管的參考基礎。由於各國在吊掛取出等細節方法上存在差異，因此本報告將以原則性描述為主要說明內容，同時提出可用來精進修改審查要項與建議的方針。

- (二) 藉由彙整 IAEA SSR-6 (Rev.1) 及國際間用過核子燃料運送作業之安全要求研析，彙整國內現行放射性物質運送安全管制法規，並審視已有之放射性物質運輸經驗，根據研析成果對放射性物質運送作業安全管制技術，以及審查作業提出精進建議。已完成項目包含(1)對 IAEA 放射性物質運輸規則進行研析、(2)彙整現行放射性物質運送安全管制法規的工作、(3)參考美國 DOE 對於運輸放射性廢棄物的實際操作規劃與規範要求，包含裝運計畫、檢查、緊急應變計畫、承運人要求以及運輸安全管制計畫等、(4)蒐集美國商用用過核子燃料現況，以及集中式中期貯存設施許可證法院審理進展、(5)針對美國聯辦法規，根據 IAEA SSR-6 (Rev.1) 與利益相關團體的訴求所做出的修訂內容進行研析、(6)彙整美國 NRC 為因應大規模用過核子燃料活動所做的準備，以及運輸活動中各單位的角色與責任，並研析調查小組提出之建議改善措施。面對未來的用過核子燃料廠外運輸需求，已將所蒐集之用過核子燃料安全管制技術及相關法規以及研析成果，對比已有之放射性物質運輸規劃，針對過核子燃料運送作業之安全管制技術與安全審查，提出具體精進建議事項；相關彙整資料與研析成果，亦可用於未來放射性物質安全運輸審查工作的參考依據。



- (三) 再取出系統為我國未來用於乾貯設施中必要的一環，此系統可以在密封鋼筒，因事故產生破裂洩漏等無法維持密封時，作為換筒的重要手段。在必要時可利用此設施進行用過核子燃料再取出，執行檢查或再包裝以滿足安全要求。再取出單元類似小型燃料池，可進行燃料之再取出作業，需具備燃料池所有功能，並滿足燃料池之設計基準。滿足放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則第 13 條要求。因此藉由研析國際間之相關審查與現場之運轉經驗，並用以精進再取出系統審查要項亦能夠有效提升我國核管法規的完善性。
- (四) 放射性物質的運輸作業規劃是一項備受注目的活動，在運輸期間確保包件安全與保防要求都是重大任務之一，目前現行法規是依照 IAEA TS-R-1 而制定，其適用於放射性物質經由陸地、水上及空中等運輸方式，以及運輸過程中使用之輔助設備，並規範運輸作業之安全標準，包括包裝設計、製造、維護、維修，以及放射性物質包件的準備、托運、裝載、卸載和接收等。

參、展望

對於三座國際設施及其相關的安全分析審查等資料，專注於用過核燃料的再取出，強調減少相關風險、實施檢查與監測程序。透過硬體設備上的限制，降低護箱吊掛或轉換的風險，同時透過檢查或監測程序，減少人員可能暴露於放射性風險的情況。Morris 設施的意外事故分析和 La Hague 面臨監管單位的要求等情況，顯示用過燃料池設施本身的意外事故可區分為廠址相關和設施相關的內容。廠址相關主要考慮現地探勘與氣象資料，而設施相關主要考慮其設計與安全性能。然而，針對台灣本身之考量，由於意外事故條件下，多元式的再取出



方案可能不是主要目標。在這種情況下，建議應該傾向於採用沉浸式等較為單純之方法，以確保在意外事故發生時，整體再取出系統的操作安全性。該建議將更有利於應對意外狀況，維護再取出系統的穩定運作。

面對未來的用過核子燃料廠外運輸需求，已將所蒐集之用過核子燃料安全管制技術及相關法規以及研析成果，對比已有之放射性物質運輸規劃，針對用過核子燃料運送作業之安全管制技術與安全審查，提出具體精進建議事項；相關彙整資料與研析成果，亦可用於未來放射性物質安全運輸審查工作的參考依據。

後續可針對以下二項工作進行研究：

1. 用過燃料池維護經驗與再取出單元管制技術精進研析
2. 用過核子燃料運輸管制技術與運輸計畫案例研析



目 錄

場次 5&6：輻射防護領域

※接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力.....	1
※含天然放射性物質商品之調查及管理研究.....	7
※高強度輻射設施除污及除役規劃暨安全審查技術研究.....	11
※112 年度鋼鐵輻射異常物相關回收與熔煉作業人員之輻射劑量及風險 評估研究.....	17
※放射治療設備之醫療曝露品質保證管制作業及項目精進研究.....	21
※計畫曝露輻射安全與劑量約束評估研究.....	25
※既存性曝露管理規範研析.....	29
※核電廠除役獨立驗證偵檢量測技術先期研究.....	33



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力

Linking up international radiation protection technical specifications and improving radiation detection capabilities (3/4)

袁明程

國家原子能科技研究院

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

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

The project adopted a roll-on approach to improve the technical ability in control practice and the technology of radiation protection measurement according to the updated regulations of the radiation management structure



and technical specifications suggested from the International Atomic Energy Agency and the European Union.

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

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

壹、計畫目標

本計畫之目的，在於因應國際最新技術規範與管理實務趨勢，提供先進輻防管理科學準則建議，強化國內輻射量測技術，打造接軌國際之輻防技術基礎環境與科研量能，提升輻射檢校實驗室量測能力，確保第一線工



作品質，研究輻射應用上具新穎或急迫性的劑量評估、活度度量、稽核驗證方法，維持輻射生物評估技術與降低意外曝露偵測低限，增進與維護輻射安全。

貳、重要成果

一、112 年度規劃之工作項目及查核點，皆已如期達成，已達成的績效量化指標為：國際期刊(SCI)論文刊登 1 篇，會議論文發表 2 篇、舉辦研討會 2 場，形成大會手冊 2 份、研究報告 3 篇、技術報告 2 篇、人才培育 2 人等量化指標。

二、子項計畫一【建立國際同步之輻射防護規範研究】：

(一) 完成懷孕婦女之胎兒輻射評估導則 1 份，建立不同孕期的子宮劑量轉換係數及擬定實務量測作法，以供國內懷孕女性工作人員實務管制參考。(圖 1)

(二) 完成第 II 期眼球水晶體劑量監測訪查研究，與 22 家醫療院所(38 科室)、3 家核能電廠及 3 家非破壞性檢測公司合作，共完成 1,159 人次眼球水晶體劑量監測評估，以了解國內關鍵群體實際輻射作業下，眼球水晶體輻射曝露情形及新劑量限值衝擊，以利於未來保障約 2 萬名輻射工作人員。(圖 2)

三、子項計畫二【強化國內輻射檢校量測技術能力研究】：

(一) 完成第 12 次人員全身劑量計能力試驗研究：整合國原院國家游離輻射標準實驗室之加馬、X 光、貝他、中子劑量照射系統，達成高劑量、單一輻射場、混合輻射場等五項測試類別之試驗，參與實驗室合格率达 100%，確證我國全身劑量評估實驗室之技術能力，可符合 TAF-CNLA-T08(4):2019(參考國際 ANSI/HPS N13.11-



2009R2015)規範之要求，此對人員劑量監測結果之正確性提供了保障，監測結果可作為管制機關執法之依據，促使第一線實驗室提供具品質之服務，涵蓋核設施、工業、醫院、研究機構等領域，強化服務端之民眾與 5 萬 3 千餘名輻射從業人員測值準確度之效益。

(二) 啟動 112-113 年度輻射偵檢儀器校正能力試驗研究：依據 ISO 17043 與 TAF-CNLA-T06 規範，完成全國性的能力試驗規劃，促使我國輻射偵檢儀器校正技術能力，可符合國際規範要求，確保作業場所輻射監測結果之品質。

(三) 完成建置透視攝影與眼球水晶體劑量校正用 ISO 寬能譜系列射質之劑量校正系統，半值層與規範差異小於 5%、劑量的量測不確定度 $<5\%$ ，達成 ISO 規範要求，成功建立此射質。研究成果發表 SCI 期刊 1 篇與「X 射線 ISO 寬能譜眼球水晶體劑量與透視攝影劑量校正系統評估報告」技術報告 1 份，作為 ISO 寬能譜眼球水晶體與醫療曝露透視攝影劑量校正之依據，確保輻防應用端劑量追溯之準確性。

四、子項計畫三【精進染色體變異分析技術與評估研究】：

(一) 完成三名新進人員染色體分析技術訓練合格，並完成本年度國人本土染色體雙中節背景值分析共三例，雙中節比例為 0.65% ，納入年度分析值中，並將本年度反應曲線資料納入劑量-雙中節染色體標準曲線中，完成本年度劑量照射與反應曲線分析工作，以因應大型輻射意外曝露事件，縮短分析時程，提供受曝者劑量分析數據做為醫療處置的參考依據。(圖 3)

(二) 完成輔導北部備援實驗室建立劑量分析技術，經本所抽樣檢查分析數據，修正與調整後確認北部備援實驗室已具備染色體分析技

術，完成輔導北部備援實驗室建立劑量分析技術之預期目標。

(三) 完成建立 Gamma-H2AX 之低劑量檢量線，導入電腦智慧型影像自動擷取技術，照射劑量與螢光訊號相關係數 R^2 從 0.11 提升至 0.91，低劑量輻射照射劑量與細胞螢光數值呈現正相關，並完成染色體電腦智慧型輔助分析程序書一份。

參、展望

本年度計畫規劃與執行進度已如期達成目標，持續強化國家輻射防護基礎建設與輻射防護法規的更新或執行，以確保我國輻防法規的國際追隨性，及確保國內各專業實驗室可提供足夠的技術能量，支持輻防法規的執行或更新。

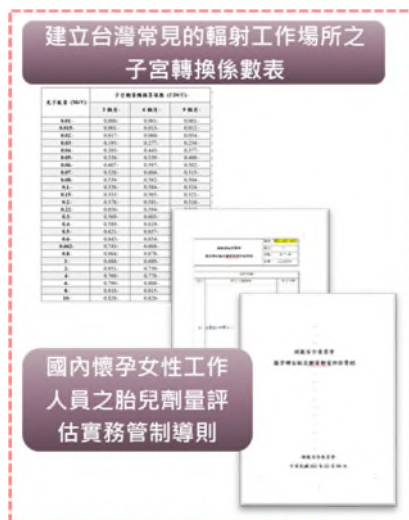


圖 1、懷孕女性工作人員之子宮劑量轉換係數表與劑量評估實務管制導則

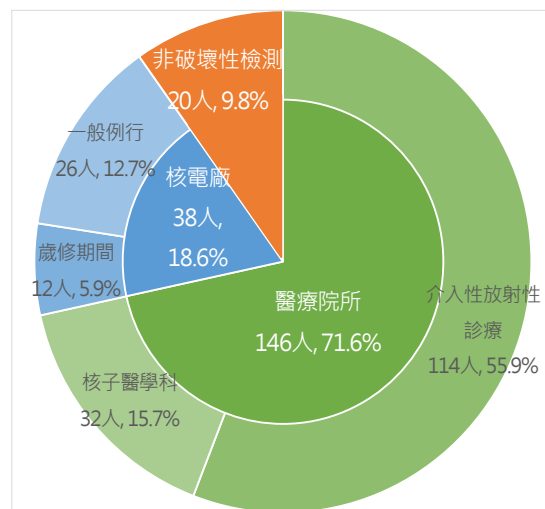


圖 2、眼球水晶體劑量訪查參與職業類別分布

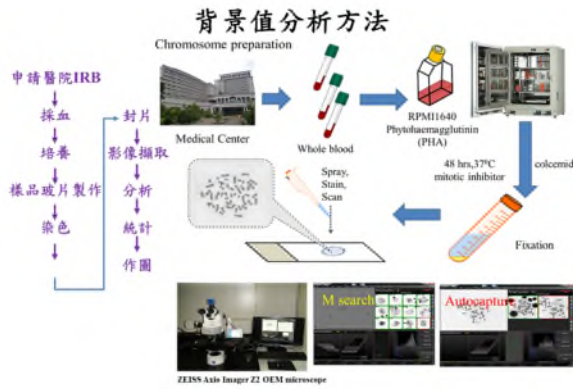


圖 3、國人本土染色體雙中節背景值分析流程



含天然放射性物質商品之調查及管理研究

Research on the radiation survey and safety management for NORM (naturally occurring radioactive material) contained products

(計畫編號：PG11301-0332)

楊子毅¹ 盧苡欣¹ 黃煥景¹

¹ 國家原子能科技研究院

含天然放射性物質之商品應用日漸廣泛且深入民生，本計畫分析不同商品之天然放射性物質添加型式及含量，建立含天然放射性物質商品之氡氣量測及校正、人員劑量評估等技術，及研擬輻射異常之含天然放射性物質商品之處理方案，以保障民眾使用相關商品之輻射安全。

The applications of products containing naturally occurring radioactive materials (NORMs) are becoming increasingly widespread and deeply involved in people's livelihood. This plan was analyzed the types and content of NORMs added in different commodities, establish techniques for radon measurement and calibration, personnel dose assessment of products containing NORMs, and develop a treatment plan for products containing NORMs with abnormal radiation to protect the radiation safety of people using related products.

壹、計畫目標

自 2018 年起，南韓負離子床墊輻射超標事件引起國際對於使用含天然放射性物質商品的輻安疑慮，核安會本於主管機關職責，遂委託本院協



助執行本計畫。除了參考國際經驗及作法，持續強化對於含天然放射性物質商品之輻射量測及人員劑量評估之技術外，也逐步建立對於超標商品的處理機制，並透過跨部會合作方式對市售產品進行抽樣檢測分析，以確保民眾使用商品之輻射安全。

貳、重要成果

一、參考 ICRP 報告，建立含天然放射性物質商品之體內劑量評估技術

本計畫蒐集 ICRP 115 號報告、UNSCEAR 報告等國際文獻或報告，利用氬氣活度濃度之量測值搭配計算參數，搭配不同商品使用情節，共建立 17 種含天然放射性物質商品之體內劑量評估方法，並送核安會核備。此外，本實驗室於 112 年 3 月向全國認證基金會(TAF)提出增列申請，於本院原有之認證實驗室「環境試樣放射性核種分析實驗室」下，增列「民生用品-含天然放射性物質商品」的加馬核種分析及阿伐核種分析(氬氣量測)項目，並於 112 年 9 月取得證書，如圖 1 及圖 2 所示，為國內第一家取得含天然放射性物質商品氬氣檢測認證項目之實驗室。

二、含天然放射性物質商品之處理方案研擬

參考韓國對於 Daijin 床墊事件之處理作法、我國過往對於超標之市售負離子床墊處理經驗，以及現行我國和韓國之管制程序，提出含天然放射性物質商品之處理方案建議，以分階段方式說明含天然放射性物質商品之後市場調查、檢測過程及超標商品處理。除了將實驗室檢測及人員劑量評估結果提報核安會外，對於超標商品，核安會將會同相關負責單位訪查販售業者，對商品之庫存、流向及來源進行追蹤，



採取後續回收銷毀、處份、資訊公開等作業。

三、執行含天然放射性物質商品後市場調查

針對 112 年 1 月至 12 月期間協助市售商品主責主管機關年度定期抽驗(如衛福部食藥署：面具/面膜、護腰及水壺等；經濟部標準局：襪子、枕頭及口罩等)之輻射檢測與劑量評估，共完成了 29 件商品檢測，結果列如表 1。其中經檢測評估結果顯示，並無商品之評估年有效劑量超過「天然放射性物質管理辦法」所規定之一般人年劑量限值 1 mSv，已提交相關檢測數據給主管單位進行後續處理作業，本調查評估結果可供後續含天然放射性物質商品後市場調查規劃之參考。

四、學術成就方面，彙整了近幾年之研究數據與成果，共發表國外期刊論文 1 篇：Zi-Yi Yang, “A study on the relationship between the radiation detection quantity of NORM-containing products in Taiwan.” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 333, 1195-1202, 2024. 內容主要探討含天然放射性物質商品之各種輻射量測值與劑量間的關係。

參、展望

本實驗室已取得全國認證基金會 TAF 增項認證申請，為國內首間取得含天然放射性物質商品氬氣檢測項目認證之實驗室，是實驗室量測技術能力及品質具公信力之展現，未來將持續精進氬氣量測技術，並擴展至更多樣的含天然放射性物質民生應用領域，如民生常見建材之劑量評估等。此外，也將持續配合主管機關核安會，進行含天然放射性物質商品後市場調查及科普知識宣達，以保障民眾使用此類商品的輻射安全。

表 1、112 年抽驗商品種類統計結果

送樣單位	樣品種類	送樣件數	劑量超標(1 mSv/y)件數
衛福部食藥署	面具/面膜	4	0
	護腰	1	0
	水壺	2	0
	水杯	2	0
	小計	9	0
經濟部標準局	襪子	3	0
	枕頭	6*	0
	棉被	4*	0
	眼罩	2	0
	護腕	2	0
	口罩	2	0
	圍巾/披肩	2	0
	小計	21*	0

*註：其中一件送檢樣品包含枕頭及棉被，於本表中分 2 件統計



圖 1、TAF 認證證書

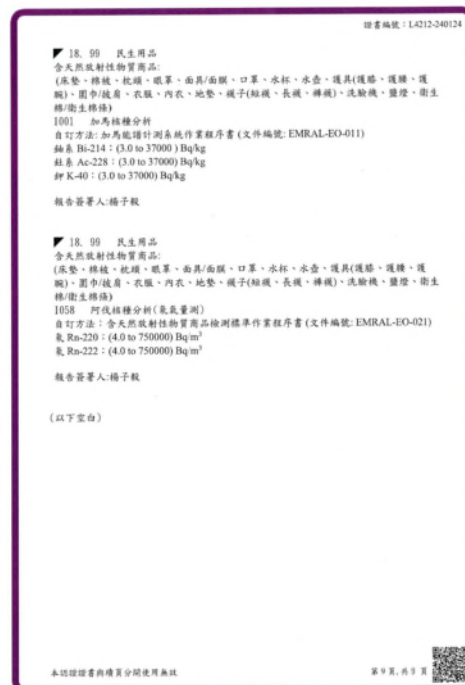


圖 2、含天然放射性物質商品
TAF 認證項目



高強度輻射設施除污及除役規劃暨安全審查技術研究

Studies on radiation protection aspects in decontamination and decommissioning of high-intensity accelerator facilities (2/2)

(計畫編號：AEC11012047L)

許榮鈞^{1,2} 房博文¹ 謝澄憶¹

¹國立清華大學核子工程與科學研究所 ²國立清華大學工程與系統科學系

國內將有數座高強度輻射設施，包括多座質子(~250 MeV)癌症治療機、1座重離子(~400 MeV/A)癌症治療機、以及二座高能電子(1500與3000 MeV)同步輻射加速器。由於上述加速器在運轉過程中有機會因核反應誘發二次中子生成，二次中子輻射再造成加速器本體、屏蔽或建築物結構體等不同程度的活化。關於放射活化殘存量評估技術及設施除役技術，已在國際逐漸形成討論焦點。因此在未來幾年，國內有必要逐步建置高強度輻射設施活化產物管理與輻射安全評估的建議。本計畫針對上述國內高強度輻射設施進行放射活化特性研究，建立其運轉產生之活化產物活度與殘存評估技術、放射性廢棄物的抑低與管理相關規範的精進，提出高強度輻射設施進行除污及除役規劃建議，以利未來設施除役的規劃執行與安全審查。考量各種加速器的特性及其二次中子產生機制與引發物質活化的差異，本計畫以加速器類型區分為(1)質子/重離子癌症治療加速器與(2)高能電子加速器二大類來分別探討，111年進行二類設施各式加速器的大致輻射等級的比較分析，並深入探討質子/重離子治療機運轉引發之物質活化議題；本年度(112年)則以探討GeV等級高能電子加速器的物質活化問題為主軸。計畫成果與經驗將有利於國內對於加速器運轉引發物質活



化相關議題的管理與管制。

There will be several high-intensity accelerator facilities in Taiwan, including a few proton (~250 MeV) cancer therapy machines, one heavy-ion (~400 MeV/A) cancer therapy machine, and two high-energy electrons (1500 and 3000 MeV) synchrotron facilities. Significant secondary neutrons may be generated through hadronic cascades in proton/heavy-ion induced nuclear reactions or photonuclear reactions after electromagnetic cascades in high-energy electron accelerators. Those neutrons potentially induce material activation in accelerator components and surrounding environment to varying degrees depending on the characteristics of neutrons and material properties. Therefore, studies on radiation protection aspects in decontamination and decommissioning of these facilities are deemed to be important and necessary for both the facility owners and regulatory agencies. Based on collected operation histories and advanced Monte Carlo techniques, the project aimed to develop suitable models and methodologies to quantify the magnitudes and general trends of material activation in the above-mentioned facilities. Accordingly, practical guidelines or recommendations are provided to support future decommissioning activities. Considering the mechanisms and characteristics of the secondary neutron production in these facilities, this project was divided into parts. A comparative study of the two categories was performed and an in-depth investigation of the material activation caused by the operation of proton/heavy-ion therapy accelerators was conducted in 2022. In this year, the focus was shifted to the material activation of GeV-grade high-energy electron accelerators. The results and experience obtained from this project will facilitate the management and regulation of material activation in these facilities.



壹、計畫目標

國內高強度輻射設施建物或加速器本身逐漸接近使用生命規劃週期，終將面臨永久停用問題，或因應設施場所利用目的變更而有拆遷變更場址的需求問題。關於放射活化殘存量評估技術及設施除役技術，已在國際逐漸形成討論焦點，國內有必要逐步建置高強度輻射設施活化產物管理與輻射安全評估的建議，包括：放射活化殘存量的評估、量測與活化產物管理策略等；另一方面亦應建立質子/重離子/高能電子加速器等設施活化產物管理及輻射安全評估規範，俾利未來國內相關設施參考使用。有鑑於此，本計畫目標對國內高強度輻射設施(質子/重離子癌症治療與高能電子加速器)進行有系統的放射活化特性研究，建立其運轉產生之活化產物活度特性與殘存劑量評估、抑低與管理相關規範的精進，提出高強度輻射設施進行除污及除役規劃建議，以利未來設施相關業務的執行。

貳、重要成果

本年度高強度輻射設施除污及除役規劃暨安全審查技術研究主要標的物是高能電子加速器進行活化分析，實際參考對象為國內兩座現有設施 1.5 GeV 的 TLS 及 3.0 GeV 的 TPS，研究起點主要參考相關設施的安全度分析報告內容與文獻研析的結果。承襲 IAEA-SSG49 號報告的除役精神，加速器設施的除役規劃應根據實際運轉狀況進行週期的評估及調整，本報告透過蒐集 TPS 的實際運狀況，發現每年的射束損失約為安全分析報告預估的 65%。本研究持續專研蒙地卡羅活化分析技術，參考 TPS 安全度分析報告的評估架構重新以最新版本 FLUKA 進行活化評估，並基於原有的分析情節再合理增加混凝土中(不可避免)雜質所造成之活化的影響，殘存活度分析結果顯示，在極端的照射情節下(所有的射束損失均



集中在單一位置)，前向及側向混凝土可能有程度不同的活化風險。此外，本研究也進一步討論電子能量、照射情節、靶材差異對活化的影響，並將實際運轉情節對活化結果進行修正。

值得注意，基於照射情節差異對於活化評估的可觀影響，本團隊參考文獻與團隊近年參與的活化分析經驗，發現加速器常用的照射情節大致可區分為三種(圖 1)：原則上，週期性照射情節最貼近加速器真實運轉情節，其活化預測結果最貼近實際的活化情形，但是受限於蒙地卡羅程式輸入的限制，實務上常見以下列二種簡化連續照射情節來取代，第一種簡化是直接忽略二次照射之間的停機，直接串成連續照射，此一假設總是保守，但須注意是否過度高估；第二種簡化也是連續照射但降低射束輸出，也就是將總工作負載平均分配在設施生命期，此一假設則總是低估，針對長半衰期核種的活化預測尚可，但不適用於針對短半衰期核種的活化預測。本研究有系統地分析三種照射情節在不同應用環境下的預測(圖 2)，據以導出對應的修正因子(圖 3)，主要與加速器運轉的工作因數與核種半衰期有關，研究成果將有利於未來國內各式加速器的活化分析與安全審查。

參、展望

本計畫總體目標是針對高強度輻射設施進行國外放射性活化分析相關文獻回顧、國內設施運轉歷程調查、放射性活化情形評估及參數靈敏度分析，俾利輔導設施經營者順利完成設施除役作業。除了透過蒙地卡羅分析程式量化評估高強度設施潛在的活化風險問題，本團隊也重點整理 IAEA-NW-T-2.9 : Decommissioning of Particle Accelerators 報告，該報告根據國外加速器除役經驗建立相關除役建議，報告內容有助於國內未來的除役相關管理及管制的精進。結合兩年研究結果，本團隊於 112 年邀請



國內產、學、研與管制機關共同針對活化分析結果及 IAEA-NW-T-2.9 內容進行分享討論，並從各界獲得反饋，預期可提升國內相關設施未來推動除役作業與放射性廢棄物管理的水準。

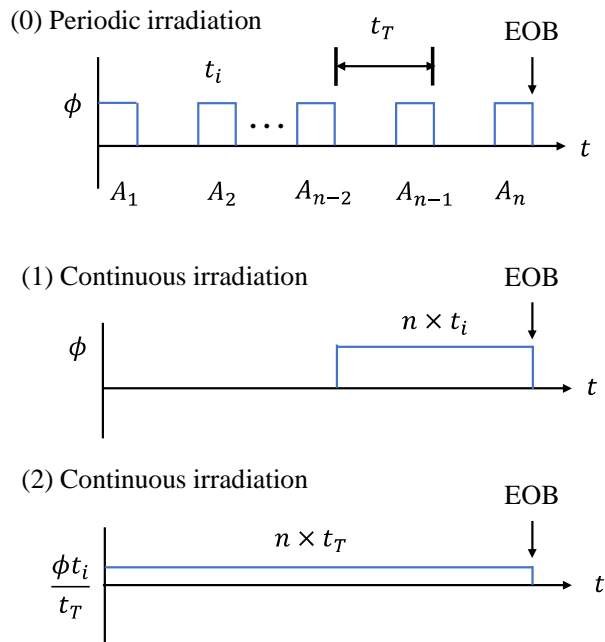


圖 1、常用於活化分析的三種射束照射情節

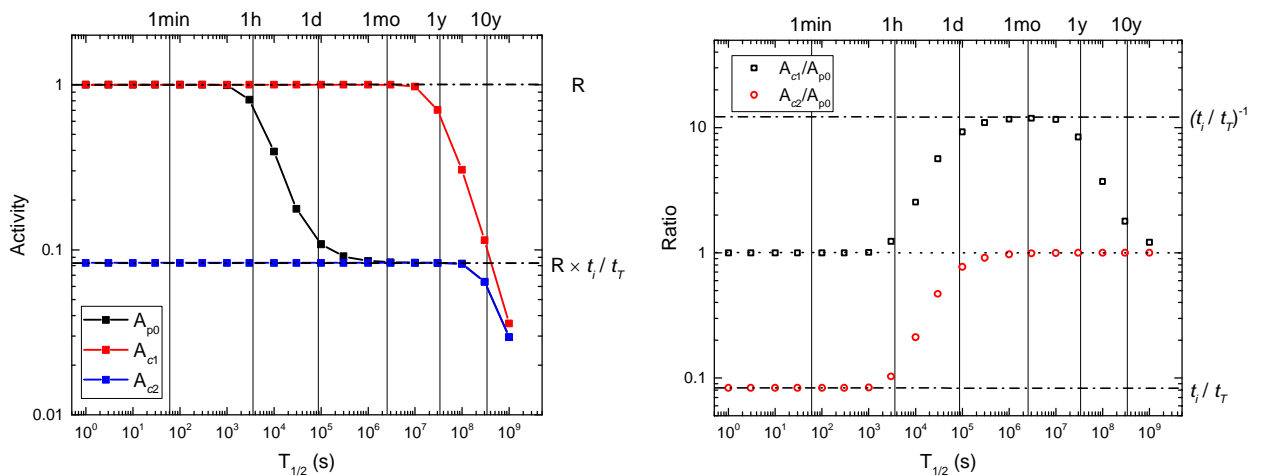


圖 2、(左)三種照射情節評估不同半衰期核種的殘存活度；(右)以 A_{p0} 為基礎比較 2 種簡化連續照射情節所得之殘存活度預測的差異

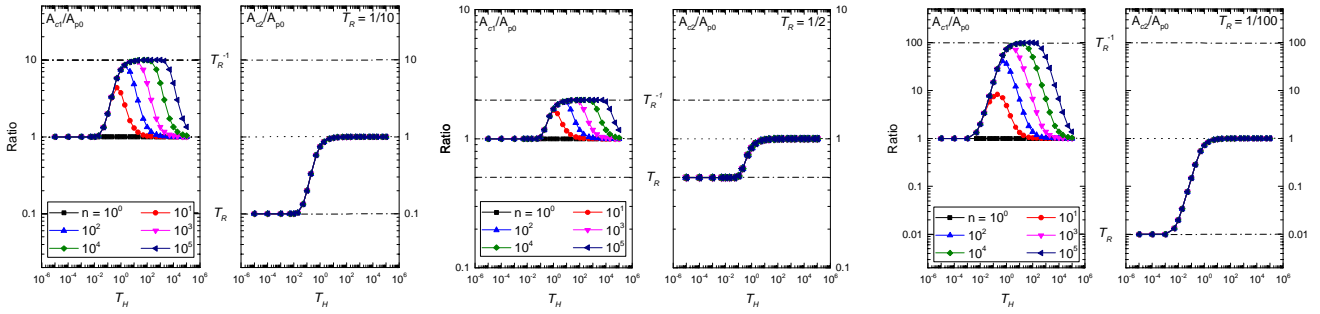


圖 3、使用因數 T_R 為 1/10、1/2、1/100 時，修正因子(A_{c1}/A_{p0} 及 A_{c2}/A_{p0})在不同照射週期次數及衰變因數下的變化



112 年度鋼鐵輻射異常物相關回收與熔煉作業人員之輻射劑量及風險評估研究

2023 Research on radiation dose and risk assessment of workers involved in the recovery and smelting of iron and steel radiation anomalies

(計畫編號：AEC11011042L)

田能全 許芳裕

國立清華大學原子科學技術發展中心

本計畫為二年期計畫(111 年至 112 年)之第二年，規劃透過輻射防護評估程式與對國內鋼鐵業者進行現場訪查之實測數據，模擬評估鋼鐵輻射異常物回收作業過程中，相關從業人員可能接受之輻射曝露劑量及健康風險。此外，亦規劃蒐集與研析國際鋼鐵輻射異常物之管制與處置現況，適度檢視我國相關偵檢標準、程序與管理作法。本計畫於 111 年已探討評估各種情境下接觸不同強度人工輻射異常物從業人員之輻射劑量與風險、研擬人工輻射異常物從業人員注意事項建議；112 年則提出國內鋼鐵業者發現輻射異常物之標準作業流程草案建議及輻射防護措施建議，供主管機關作為進一步鋼鐵輻射異常物之管制與處置作法參考。

This project, a 2-year project from 2022 to 2023, uses the internationally developed commercial personnel radiation dose assessment codes and the actual measurement data of on-site inspections of domestic iron and steel industry, to simulate the exposure dose and health risks of workers involved in the recovery of iron and steel radiation anomalies during the recovery



processes of different intensities of radiation anomalies. In addition, it is also planned to collect and analyze the current status of the control and disposal of international steel radiation anomalies, and appropriately reviewing domestic relevant inspection standards, procedures and management practices. In 2022, this project has discussed and evaluated the radiation dose and risk of employees exposed to different levels of artificial radiation abnormalities in various situations, and developed recommendations for precautions for practitioners of artificial radiation abnormalities; This year (2023), the draft recommendations of standard handling procedures and radiation protection measures for discovery of radiation anomalies in domestic are proposed. The proposed protective measures by this project are intended to provide to the competent authority to use as a reference for further control and disposal of steel radiation anomalous.

壹、計畫目標

本計畫之研究目標如下：

- 一、針對各項工作單元、場所之從業人員作業環境進行分析探討。
- 二、模擬評估國內鋼鐵從業人員於不同輻射異常物接觸情境之輻射劑量與風險。
- 三、標準作業流程規劃與輻射防護措施擬訂，及對業者進行輻射安全宣導。

貳、重要成果

- 一、研發成果之重要貢獻

本計畫對國內鋼鐵業者進行檢/訪查並實測輻射劑量率，以及利用



實測輻射劑量率結果評估所通報輻射異常物案件之鋼鐵業從業人員接觸輻射異常物之可能劑量。此外，本計畫完成深入研析 IAEA SSG-17 及美國與歐盟等國際組織對鋼鐵輻射異常物之最新管制與處置作法建議，進行相關文獻之重點彙整，並提出國內鋼鐵業者發現輻射異常物之標準作業流程草案。並且對接觸含人工核種輻射異常物相關工作人員，依據其因需偵檢或處理含人工核種之輻射異常物之人員類別與劑量評估結果，判斷出可能接受較高劑量之工作族群作為關鍵群體：可能接受最大劑量之關鍵群體為輻射異常物搜尋程序中之搬運人員，主因為其接受關鍵劑量時機為在搬運時接觸輻射異常物之距離較近(本計畫以 30 公分距離之最大可能劑量進行劑量評估)，並提出相應之輻射防護措施建議。

除上述執行成果，並針對研究成果，包括國內鋼鐵業者發現輻射異常物之標準作業流程草案建議、國內鋼鐵從業人員接受關鍵劑量時機與輻射防護措施建議等，完成辦理一場鋼鐵業者座談宣導會，對鋼鐵業者進行輻射安全宣導與意見交流。

二、學術成就(發表於國內外研討會及期刊論文)

本研究計畫之成果發表於國內期刊如下：

- 1.許芳裕，鋼鐵廠的輻射安全守門員-門框式輻射偵檢儀，核後端，2024 Feb. No.19, p18-21.

參、展望

目前國內具熔煉爐之鋼鐵業者已建立輻射偵檢制度，於廠房門口裝置門框式輻射偵檢儀，若發現輻射異常物情形即依規定進行通報。惟目前



各鋼鐵廠因使用之門框式輻射偵檢儀廠牌與型號的差異，造成其偵測效率與靈敏度不一；建議後續規劃調查與彙整國內鋼鐵業者使用之門框式輻射偵檢儀種類與特性，建立統一之品保要求與測試標準。



放射治療設備之醫療曝露品質保證管制作業及項目精進研究

Study the quality assurance control operation and project improvement on medical exposure of radiotherapy equipments

(計畫編號：AEC11012048L)

李紳豪^{1,2} 蕭安成^{1,3} 劉明祥^{1,4} 曾珉珉^{5,6} 連可宇^{1,5} 陳昱璉^{1,5} 陳合興^{1,7}
林妙蓉^{1,2} 許世明⁵

¹ 中華民國醫學物理學會 ² 長庚醫療財團法人林口長庚紀念醫院 ³ 中國醫藥大學附設醫院 ⁴ 阮綜合醫療社團法人阮綜合醫院 ⁵ 國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系 ⁶ 臺北醫學大學附設醫院 ⁷ 臺中榮民總醫院

放射治療的目的在於增加腫瘤組織劑量，達到減少腫瘤組織或抑制其增生；並降低正常組織劑量，避免產生副作用，抑或降低其發生的機率。因此，放射治療劑量給予的準確性，將影響治療成效。為確保放射治療劑量所給予劑量的準確性，應進行放射治療設備之醫療曝露品質保證，而輻射品保作業的執行，需要結合臨床實際查核與劑量驗證。透過持續且完整的檢視，將可提昇放射治療的品質與維護安全性。本研究計畫目標如下：1、國內放射治療設備，輻射安全與醫療曝露品保作業檢查；2、檢視新型放射治療技術品質保證作業執行方式與成效；3、提升國內醫療院所放射治療輻射醫療曝露品保人員專業能力。本計畫針對全國放射治療的設備進行檢查，以確保治療病患的輻射安全與治療品質。112年共完成105台放射治療設備品保作業之現場查核工作，所有檢測結果皆符合法規規範，並實地訪查20台低分次高劑量技術劑量驗證及品質保證作業現況訪查和20台無整平濾片技術品質保證作業精進與臨



床可行性評估研究。本年度亦完成拍攝電腦斷層治療機、電腦刀與加馬刀之品質保證作業示範教學影片。

關鍵詞：輻射品保、輻射安全、放射治療劑量

The purpose of radiation therapy is to increase the dose to the tumor tissue to reduce tumor growth or inhibit it while reducing the dose to normal tissue to avoid side effects or reduce their probability. Therefore, the accuracy of the radiation therapy dose delivery affects its effectiveness. To ensure the accuracy of the radiation therapy dose, medical exposure quality assurance of radiation therapy equipment should be conducted, and radiation protection operations require clinical verification and dose verification. Continuous and comprehensive review can improve the quality of radiation therapy. The goal of this research project is as follows: 1. Inspection of radiation therapy equipment nationwide to ensure radiation safety and medical exposure quality assurance. 2. Examination of the quality assurance procedures and effectiveness of new radiation therapy techniques (such as low-energy image-guided system for radiotherapy, hypofractionation and flattening filter-free techniques). 3. Enhancement of the professional capabilities of radiation therapy medical exposure quality assurance personnel in medical institutions throughout the country. In 2023, a total of 105 radiation therapy equipment quality assurance operations were conducted. All test results complied with legal regulations. Additionally, 20 low fractionation high dose technique dose verification and quality assurance operation status checks were performed, as well as 20 quality improvement and clinical feasibility evaluation studies for techniques of flattening filters free. In the current year, instructional videos for quality assurance operations were also completed for



computed tomography therapy machines, CyberKnife, and Gamma Knife.

Key word: radiation quality assurance, radiation safety, radiation therapy dose

壹、計畫目標

本計畫旨在針對全國放射治療的設備進行檢查，以確保治療病患的輻射安全與治療品質。透過檢查作業，得知數據並進行綜合分析，以檢視現有品保標準之品質保證作業成果、確保國內放射治療之輻射安全及治療品質；並收集國外有關醫學物理師甄審及考核之相關規範，以作為未來將醫學物理師資格認定辦法予以法制化之參考。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

1. 放射治療設備輻射安全及醫療曝露品保作業檢查與品質提升

全台總計共 150 台醫用直線加速器、33 台遙控式後荷近接治療機、20 台電腦斷層治療機、9 台加馬刀及 5 台電腦刀，總共 217 台放射治療設備，本計畫將分兩年完成臨床品保作業，111 年已完成 112 台。112 年完成放射治療設備現場查核工作共 105 台，包含 73 台醫用直線加速器、16 台遙控式後荷近接治療機、8 台電腦斷層治療機、5 台加馬刀及 3 台電腦刀，已完成所有放射治療設備現場查核工作。

2. 新型放射治療技術品質保證作業執行狀況與可行性

在各臨床單位配合下，本年度已收取共計 40 台新型放射治療



技術劑量驗證及其品質保證作業結果納入數據，包含低分次高劑量治療方式之放射治療設備 20 台及 20 台無整平濾片技術之直線加速器。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文

- (一) 完成論文投稿共二篇：
- (二) 博士生培育一人；碩士生培育一人。
- (三) 完成教育訓練課程。
- (四) 品保作業示範教學影片共 3 支：

- 1. 電腦斷層治療機。2. 電腦刀。3. 加馬刀。

參、展望

112 年完成 105 台使用中放射治療設備，包含醫用直線加速器、含放射性物質之遙控後荷式近接治療設備、電腦斷層治療機、電腦刀與加馬刀之輻射安全與醫療曝露品保作業檢查。兩年完成執行國內所有使用中放射治療設備，受檢項目皆符合輻射醫療曝露品質保證標準的規定。依目前現場訪查結果，臨床單位所使用之放射治療設備，皆可符合現行輻射醫療曝露品質保證標準規範，因此現行標準規範較可貼近臨床單位進行和達到輻射醫療曝露。



計畫曝露輻射安全與劑量約束評估研究

2023 Study on Evaluation of Radiation Safety and Dose Constraint of Planned Exposure Situation

(計畫編號：AEC11012046L)

許芳裕

國立清華大學原子科學技術發展中心

本期計畫延續 111 年計畫曝露輻射安全與劑量約束評估研究之作法，112 年以可發生游離輻射設備、密封放射性物質及高強度輻射設施(照射場)等輻射源與設施為主要輻射作業現場訪查標的，完成 360 件輻射源之現場輻射安全訪查。亦蒐集、研析國際間對高強度輻射(照射場)輻射作業劑量約束實務作法，並結合訪查數據，評估與提出所訪查輻射作業類別之劑量約束建議值。此外，並提出高強度輻射設施(照射場)之輻射防護安全規範草案建議，作為主管機關管制之參考。

This project continues the 2022 works and methods of the study on evaluation of radiation safety and dose constraint of planned exposure situation. In 2023, this project focuses on radiation sources and facilities such as equipment possible of producing ionizing radiation, sealed radioactive materials, and high-intensity radiation facilities (such as irradiation facilities), in nonmedical applications. The on-site radiation safety inspections of 360 radiation sources or facilities have been completed in 2023. This work has collected and analyzed the international practices or measures on dose constraints for high-intensity radiation facilities, and combined with the



survey data, evaluated and proposed recommended dose constraint values for the types of radiation practices surveyed. In addition, a draft recommendation on radiation protection safety regulations for high-intensity radiation facilities (irradiation facilities) is proposed as a reference for the control and management of the competent authority.

壹、計畫目標

本計畫為二年期計畫之第二年期，將延續前一年期(111年)計畫之作法與目的，研究計畫目標說明如下：

- 一、持續對不同類別與使用目的之非醫用輻射源進行輻射作業現場訪查，分析彙整國內之輻射作業現況，及掌握國內不同輻射作業職業曝露情形與輻射安全風險分析。
- 二、藉由輻射作業現場輻射安全訪查與業者直接接觸機會，宣導計畫曝露之最適化及合理抑低的輻射安全防護觀念。
- 三、依據現場訪查結果，提出所訪查輻射源與其使用類別之劑量約束建議值與具體輻射防護管制建議，建立不同類別與使用目的之輻射源的輻射防護安全規範。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

本計畫 112 年對非醫用游離輻射源之抽樣現場訪查與輻射安全檢測，總計完成 360 件，包括可發生游離輻射設備 330 件(移動型 X 光機：72 件、櫃型 X 光機：150 件、動物用 X 光機：28 件、X 光管式靜電消除器 9 件；離子佈植機 71 件)、放射性物質 26 件(密封放射性物質 24 件；非密封放射性物質作業場所 2 件)以及高強度輻



射設施 4 件。

在現場訪查檢測結果統計上，主要的輻射安全疑慮應為安全連鎖裝置的問題較多，在可能發生之異常狀況，主要考量移動型/手持式 X 光機，不排除其可能發生朝向人員身體照射的情況、動物醫院協助動物照 X 光之協助者等，可能有較高接受劑量的風險；其他可能發生異常之情況如 X 光管式靜電消除器屏蔽門使用時間久後，可能造成偏斜或屏蔽不佳而造成作業區輻射劑量增加的異常狀況。112 年發現疑似有異常狀況者，均已通報主管機關、請廠商限期改善並經複查確認完成改善。

此外，本計畫亦完成研析、彙整國際間對高強度輻射(照射場)輻射作業劑量約束實務作法，並逐步依國際間輻射作業劑量約束實務作法並結合國內現場訪查進行人員劑量與風險評估數據統計分析結果，評估各類別輻射源或輻射作業之劑量約束建議值，並且依規劃提出高強度輻射(照射場)之輻射防護安全規範(草案)建議書，供核安會作為強化輻防管制之參考。

二、學術成就(發表於國內外研討會及期刊論文)

本研究計畫之成果發表於國際會議，說明如下：

1. Fang-Yuh Hsu, Investigation of radiation doses and dose constraint values of non-medical planned exposure radiation practices in Taiwan, 4th International Conference on Dosimetry and its Applications (ICDA4), 16-20 October 2023, Valencia, Spain.

參、展望



鑒於現場訪查檢測結果統計，目前輻射源作業主要的輻射安全疑慮應為安全連鎖裝置的問題較多；建議逐年持續對不同種類用途之 X 光機進行抽樣現場訪查，並持續關注相關 X 光機設備安全連鎖裝置功能是否正常之檢測，以及對輻射源輻射安全測試及擦拭報告之抽樣查核檢測，將有助於提升輻射防護安全效能、降低輻射作業造成之風險。

此外，建議持續對訪查輻射源標的進行劑量約束值評估，增加統計之可靠性，持續更新提出適用之劑量約束值及精進管理措施建議，並建立劑量約束管理措施通用範本，提升管制單位及使用單位之管制及自主管理效能。



既存性曝露管理規範研析

2023 Research and Analysis on Regulations for Existing Exposure Management

(計畫編號：AEC11012049L)

許芳裕 尹學禮 林宥蓉

國立清華大學原子科學技術發展中心

ICRP-103 報告書提出了既存性曝露情境的概念，既存性曝露之輻射源可分為天然輻射源與人造輻射源，其中之天然輻射源包含宇宙射線及天然放射性物質(naturally occurring radioactive material, NORM)，包括氫氣、NORM 工業、建材等，而人造輻射源則為核子或輻射事故殘留之曝露等。ICRP 建議各國對既存性曝露之天然輻射源進行調查，並依據各國狀況適度建立輻防管理作法。本計畫分二年期進行，於第一年(111 年)已蒐集與研析部分國際輻防組織與國家就既存性曝露管理之具體做法或規範、初步檢視我國符合既存性曝露管理行業之範疇，提出既存性曝露管理規範(草案)建議書並評估可行性及衝擊，以及完成辦理二場次專家研商會議與一場次業者座談說明會。本年(112 年)為第二年，已完成提出既存性曝露業者自主管理指引(草案)建議書與主管機關審查標準或程序(草案)建議書，完成辦理三場次業者座談說明會，以及提出 111-112 年全程研究成果報告。

The ICRP-103 report puts forward the concept of the existing exposure situation. The radiation sources of the existing exposure can be divided into



natural radiation sources and artificial radiation sources. The natural radiation sources include cosmic rays and naturally occurring radiative material (NORM), including radon gas, NORM industry, building materials, etc., while the artificial radiation source is the exposure of nuclear or radiation accident residues. ICRP recommends that countries conduct investigations on existing natural radiation sources of exposure, and appropriately establish radiation protection management practices based on the conditions of each country. This project is carried out in two years. In the first year (2022), the specific practices or guidelines of international radiation protection organizations and countries on the management of existing exposures have been collected and analyzed, and the industry scope that meets the existing exposure management in Taiwan has been preliminary reviewed, in addition, the existing exposure management specification (draft) proposal has been proposed and the feasibility and impact have been evaluated, and two expert discussion meetings and one industry discussion and explanation session have been completed. This year (2023) is the second year of the project, and have proposed the self-management guidelines (draft) proposal for the existing exposure industry and the review standard or procedure (draft) proposal for the competent authority, and complete three explanatory seminars for industry practitioners, and proposed a full report on the 2-year research results from 2022 to 2023.

壹、計畫目標

為配合我國游離輻射防護法修訂作業，積極辦理既存性曝露管理規範研析，草擬管制準則、自主管理規範或審查導則等，有其必要



性。本計畫之研究目標即為研提適用於我國之天然輻射源既存性曝露管理規範與審查導則建議書。

貳、重要成果

本研究延續 111 年成果，持續蒐集與研析國際組織及各國對含天然放射性既存性曝露情境之管理具體做法或規範，新增日本文部科學省提出之「含鈾、鈷原材料及產品安全保障指引」(Guideline for Ensuring Safety of Raw Materials and Products Containing Uranium or Thorium) (2009)、IAEA SRS 117 建築材料和建築材料中放射性核種曝露的監管控制 (Regulatory Control of Exposure due to Radionuclides in Building Materials and Construction Materials) (2023)及 ICRP 132 飛行中宇宙射線之輻射防護(Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation) (2016)研析重點彙整，並草擬完成包括國內航空業、含氬氣作業場所、NORM 工業、建材業之既存性曝露業者自主管理措施指引(草案)建議書與提出自主管理措施時主管機關審之查標準或程序(草案)建議。

此外，亦進一步檢視與調查分析我國符合既存性曝露管理行業之範疇；除了航空業者外，國內較可能涉及 NORM 相關行業類別為：礦石的開採與加工業者、石油生產/加工業者、金屬生產業者。

本計畫於 112 年第三季至第四季間完成辦理三場次「既存性曝露之輻防護管理趨勢及國內因應策略」業者座談說明會，對象涵括國內可能涉及 NORM 工業、建材業以及含氬氣作業場所之業者。於座談會中與業者進行交流說明與溝通，聽取與會相關業者對於相關管理作法之意見；並彙整文獻研析結果與座談會相關業者意見，提出推動既存性曝露管理所需技術盤點建議，作為後續國內主管機關推動管理對策之參考。



參、展望

本計畫蒐集研析其他國家就既存性曝露管理規範與具體作為，研析我國天然輻射源既存性曝露管理行業範疇，包含接受宇宙射線曝露之空勤人員、職業曝露氬氣、建材或 NORM 工作場域等。此外，辦理專家研商會議與業者溝通或說明會，於我國訂定、修訂或推動法規前，落實公眾參與制度，與業者充分溝通。本計畫提出之既存性曝露管理規範(草案)建議書、既存性曝露業者自主管理指引(草案)建議書與主管機關審查標準或程序(草案)建議書，將提供業者與主管機關有所依循，以提升輻射安全之管制/管理效能。



核電廠除役獨立驗證偵檢量測技術先期研究

Preliminary study of independent confirmatory survey technology for nuclear power plants decommissioning

黃珮吉 梁鑫京 高大宇

國家原子能科技研究院

我國三座核電廠已陸續達運轉年限而需進行除役，由於除役期間各階段有大量的輻射作業進行，落實輻防管制工作、輻射防護作業、完備的防護措施與技術能力，是除役之關鍵與重要的課題。由國際上核電廠除役經驗可知，藉由獨立驗證，可及早發現業者有問題之輻射偵檢結果，並檢視輻射偵檢程序，使業者及早進行改善作業，並增進民眾對除役計畫落實程度之信心，故有必要精進核電廠除役獨立驗證偵檢技術。針對此需求，本計畫執行工作包括：建立核電廠除役獨立驗證執行程序、強化除役期間殘餘污染輻射量測驗證技術，與精進核電廠除役放射性核種分析技術等。

The three nuclear power plants in Taiwan have been reached the end of their operation and need to be decommissioned one after another. Since there is a lot of radiation work to be done during the decommissioning period, implementing radiation control work, radiation protection operations, complete protection measures and technical capabilities are the key and important issues for decommissioning. International experience with decommissioning nuclear power plants shows that independent confirmation can detect problematic radiation detection results early and allow for a review



of radiation detection procedures. This enables the operator to make early improvements and increase public confidence in the decommissioning plan's implementation. The proposed project aims to address the need for improved independent confirmation and detection technology for decommissioning nuclear power plants. To achieve this goal, the project is to establish independent confirmation procedures for decommissioning nuclear power plants, enhance the technology for measuring and verifying residual contamination during decommissioning, and refine the technology for analyzing radionuclides for decommissioning nuclear power plants.

壹、計畫目標

因應我國核電廠陸續除役，期間將面臨大量除役廢棄物管理及外釋議題，屆時如何取得公眾及利害關係團體之信任為一重要課題，故建立除役獨立驗證制度及技術有其必要性，以確保設施經營者之偵檢品質，並保障核設施除役公眾與環境之輻射安全。針對此需求，本計畫執行工作包括：建立核電廠除役獨立驗證執行程序、強化除役期間殘餘污染輻射量測驗技術研究、以及精進核電廠除役放射性核種分析技術驗證研究。

貳、重要成果

本研究計畫之重要成果與學術成就如下：

一、研發成果

於「建立核電廠除役獨立驗證執行程序」完成我國獨立驗證架構建立規劃研究。本案參考國際上作法，以及國內目前人員劑量計實驗室、輻射防護偵測業者，及核子反應器設施監查機構之認可、管理與運作執行經驗，建議由主管機關訂定獨立驗證機構認可管理辦法，業



者自行委託符合主管機關認可資格之驗證機構執行輻射偵檢，再由驗證機構提交驗證結果予主管機關及業者以供備查(如圖 1)。本計畫依據我國針對核電廠除役現有的法規規定或管制措施度，研擬四種獨立驗證法源推動建議方案，考量我國核電廠除役獨立驗證作業是否可順利推行之關鍵要素為法規授權及經費支持，本計畫另參考我國輻射防護服務相關業務管理辦法、商品檢驗指定試驗室認可管理辦法及其相關管理辦法，研擬核子反應器設施除役設備離廠抽樣複檢單位技術能力規範(草案)，提供主管機關未來推行國內核電廠除役獨立驗證作業之參考。

於「強化除役期間殘餘污染輻射量測驗證技術研究」成功設計一套核污染顯像用加馬相機硬體工程與規格參數，並經由完成零組件採買、感測頭製作、週邊支援組件組裝、基礎成像軟體工具開發、硬體系統整合等工程階段之研發工作，完成了一套加馬相機系統實體的開發(如圖 2)。儀器開發之初設定的四項安管輔助用途，包含拆除物分類輔助、拆除現場評估、豁免/外釋監管輔助、以及牆/地面熱點偵蒐而言。雖仍未能夠全數滿足設定用途，但後續可透過本儀器易於改裝之設計基礎，透過開發不同的準直器零組件，來逐步滿足上述用途的需求。除上述不同適用性準直器零組件的開發外，仍有數項系統層面的開發工作尚待進行，包括先前提及的影像後處理、光學影像精進、以及溫控模式改良等影像系統性能的穩定、精進與微調相關技術，都是預定後續將進行的的工作，改良後預計可提升活度估算的精準度以及低活度影像的品質，並提升儀器應用的寬廣度(彈性)與實用性。

於「精進核電廠除役放射性核種分析技術驗證研究」完成中低強度核種能力試驗參考物質製備工作，根據核一廠除役計畫書內容說明，



活化金屬為核一廠除役金屬廢棄物活度的主要來源，其活度約占除役金屬廢棄物的 95.6%，但重量僅佔 4.3%。為取得活化金屬樣品以做為比對之用，本計畫通過使用本院 TRR 之爐心組件金屬真實放射性試樣，取出後並將金屬鑽孔試樣裁剪成較小片段，以利均勻及適當進行活度分配，並完成金屬基質樣品製作(如圖 3)。樹脂基質樣品則以添加標準射源為主，透過將樹脂均勻浸泡於放射性射源溶液中，並以振盪器振盪反應 2 天，最後去除多餘放射性溶液，將樹脂倒出置於陶瓷盤內以燈照進行自然乾燥並分裝於樣本瓶中(如圖 3)，完成樹脂基質樣品製作。上述樣品均應用高純鍺偵檢器量測分裝樣品活度，並以 one-way ANOVA 統計檢定(F/P values)決定測試件分裝過程之均勻度。

二、學術成就

本計畫產出論文 1 篇、研究報告 2 篇，論文投稿於台電工程月刊之「開發核污染顯像用加馬相機之工程參數探討」，研究報告包含「核電廠除役獨立驗證執行程序研究」及「中低強度核種能力試驗金屬及樹脂固態參考物質製備」。

上述成果係因應我國核電廠陸續除役後，所面臨大量除役廢棄物管理及外釋議題，主管機關應如何建立除役獨立驗證制度及技術，以確保設施經營者之偵檢品質，並取得公眾及利害關係團體之信任，保障核設施除役公眾與環境之輻射安全。

參、展望

本計畫係考量主管機關本於管制立場，針對未來核電廠除役獨立驗證制度，預先進行研究，以建立合宜之管制規範、審查及評估之技術。「建立核電廠除役獨立驗證執行程序」已參考國內外有關執行經驗，研擬核電

廠除役獨立驗證法源推動方案，並擬定核子反應器設施除役設備離廠抽樣複檢單位技術能力規範(草案)，提供主管機關建立我國核電廠除役獨立驗證機構管理機制之參考；而「強化除役期間殘餘污染輻射量測驗證技術研究」中則以自主技術能力與經驗為基礎，完成加馬相機系統實體的開發，並針對儀器進行初步性能評測，確認相機顯像性能優良，功能性亦符合預期；「精進核電廠除役放射性核種分析技術驗證研究」中以國原院現有核種活度分析技術，完成中低強度核種不同型態之參考物質製備工作，以藉此驗證各實驗室是否符合國內外相關規定和具備一定之技術水平，所製備基質樣品皆利用純鍍偵檢器量測活度，並經統計檢定計算確認分裝樣品符合均勻性。

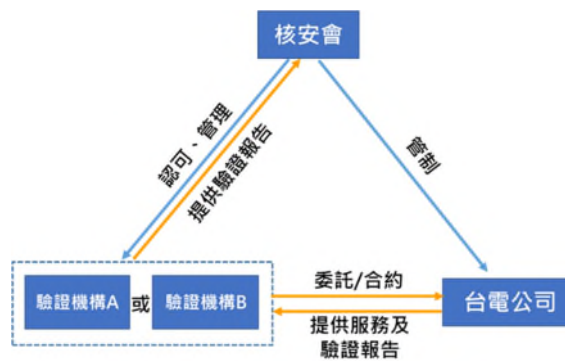


圖 1、我國獨立驗證架構建立規劃

1.完成加馬相機系統預期性能評估

分析預測性能：

- 理論分析基於準直器設計，呈現系統將在
- 1.在10倍焦距(0.5 m)距離攝影時，提供了1 m×1 m的視野範圍，以及範圍內6 cm的有效分辨率
 - 2.在20倍焦距(1 m)距離攝影時，則提供了2 m×2 m的視野範圍以及範圍內12 cm的有效分辨率
 - 3.透過建模與模擬演算，系統靈敏性(以探測的偵測效率表示)：於662 keV加馬射線的探測方面，本系統將提供0.145%的(絕對)偵測效率。



圖 2、加馬相機架構與預期性能規格

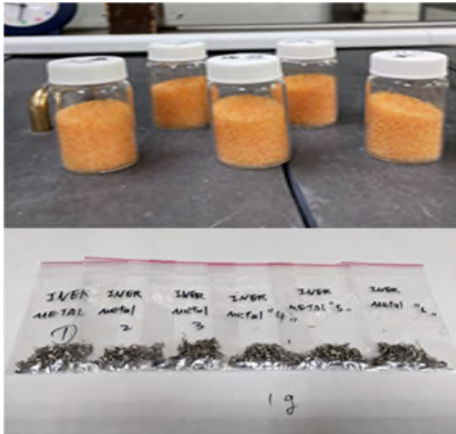


圖 3、金屬與樹脂基質樣品製備



目 錄

場次 7&8：核醫科技領域

- ※放射性碘-131 標幟 PARP 抑制劑於三陰性乳癌治療效益評估 1
- ※中子斷層影像技術開發 8
- ※TSPO 3RD GENERATION 放射性藥品(碘-123-ER-176)作為早期腦神經退化發炎誘發診斷藥物 14
- ※MIBG 類似物及 ER-176 類似物之氟或碘-標誌比對研究案 19
- ※轉移性肝病灶切除前的肝功能評估-開放性學術臨床試驗，與電腦斷層掃描體積測量或核磁共振術比較，評估術前殘餘肝功能評估方法：鎂 68-多蓄克鎂正子造影之準確度 24
- ※運用人工智慧探討及預測動脈粥狀硬化之形成 31
- ※乾燥潔淨轉輪系統運作對皮膚及眼睛危害風險評估 37
- ※固體靶站設備操作虛擬實境之使用者互動介面優使性評估報告 43



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





放射性碘-131 標幟 PARP 抑制劑於三陰性乳癌治療效益評估
Characterize the therapeutic efficacy of an iodine-131 labeled PARP inhibitor for triple negative breast cancer

(計畫編號：112A001)

翁啓昌^{1,2,3}

¹長庚大學醫學影像暨放射科學系 ²林口長庚醫院醫研部 ³長庚大學健康老化中心

十幾年來癌症皆為造成國人死亡之首位，其中乳癌更是我國婦女最為好發之頭號殺手。根據乳癌細胞表面受體之表現，可分別選擇不同之治療方式並取得一定之治療成果，然而，其中一無表現任何受體之三陰性乳癌腫瘤細胞，由於其受體表現與其他種類之乳癌細胞皆不相同，也因此以常見之治療方式效果皆不盡理想。根據研究發現，該細胞除具備 BRCA1/2 抑癌基因突變外，同時細胞內亦大量表現一可修復細胞 DNA 單股螺旋損傷之多聚 ADP-核糖聚合酶 (PARP)。然而，根據臨床文獻報導，該抑制劑之治療療效差異性十分大，主要原因可能是因為無法針對受測病患癌細胞內之 PARP 表現量進行評估。藉由使用放射性標幟之 PARP 抑制劑，如本實驗室透過 I-123-KX-1 可有效評估腫瘤細胞內 PARP 之表現量。本研究計畫已完成放射性碘-131-PARP 抑制劑之標幟工作，並確認放射化學純度及其標幟後對 PARP 酵素仍維持一定之親和力，最後透過於 MDA-MB-231 之乳癌腫瘤細胞動物模型確認經口服放射性碘-131 標幟之 KX-1 後，可有效抑制該腫瘤之治療效果，代表該藥物極有潛力作為三陰性乳癌細胞治療之能力。



In the past decade, cancer has been the leading cause of death for Taiwanese people, and breast cancer is the most diagnosed cancer among women in our country. For the treatment of breast cancer, usually different targeted drugs or compounds are prescribed depending on the expression of receptors on the surface of breast cancer cells, and usually this method may provide a suitable therapeutic efficacy. However, the triple-negative breast cancer cells, which do not express any receptors, making the common treatment methods for breast cancer ineffective. According to research findings, these cells not only have BRCA1/2 gene mutations but also express a large amount of poly (ADP-ribose) polymerase (PARP), which plays a major role on the repairment of the single-stranded DNA damage in cells. As such reason, couples of PARP inhibitors have been approved by FDA for breast cancer treatment. However, based on some published literature reports, there is a great difference in the therapeutic effect of PARP inhibitors, mainly because the expression of PARP is different individually. To provide a quick and efficient monitoring method for the PARP expression in different patients, several radiolabeled PARP inhibitors, for instance, I-123-KX-1. This research project has completed the labeling of radioactive iodine-131-PARP inhibitor, and confirmed its radiochemical purity and maintained a certain affinity for PARP enzymes after labeling. Finally, through an oral administration of radioactive iodine-131-labeled KX-1 in a MDA-MB-231 breast cancer tumor cell animal model, the effective inhibition of tumor growth was confirmed, indicating the significant potential of this drug for the treatment of triple-negative breast cancer cells.

壹、計畫目標



經研究發現，三陰性乳癌採用傳統腫瘤治療方式效果不佳可能與其癌細胞內一具 DNA 修復之 PARP 酵素高度表現有關。因此許多藉由抑制該酵素進行癌症治療的藥物陸續被開發出並投入療程中。為提升該藥品之療效，本計劃擬透過開發一可信賴之碘-131 標幟之 PARP 抑制劑，除評估其放化及生物結合特性外，最後於腫瘤動物模型中評估其口服投藥之療效。

貳、重要成果

2.1. 碘-131 標幟 PARP 抑制劑放化分析

因無先前使用臨床碘-131 口服液進行 KX-1 標幟之放化製備流程可供參考，故於本計畫中針對該藥物之標幟條件進行測試。反應最終產物以 QC 型 HPLC 進行分析，分析圖譜如下方圖一所示。從該圖中可以觀察到，標幟反應最終產物其滯留時間 ($7.4\pm 0.1\text{min}$) 與 KX-1 標準品相仿，確認該產物為本實驗所需要之放射性碘標幟 KX-1。表 1 所列出的數據為截至目前為止，使用不同條件進行測試之代表性結果。

2.2. 碘-131 標幟 PARP 抑制劑生物分佈測試

為確定經口服後放射性碘-131-KX-1 於實驗動物體內之正常分布，計畫中分別於三個不同時間點於動物口服該放射性藥物後將其進行生物分布實驗。從圖二可以清楚發現，實驗動物經口服餵食 1 小時後雖然在胃部有高達 50%ID/g 之放射性活度累積，但是隨著時間到了 6 個小時後，僅剩下約 1/5 左右的活度累積，與此同時，在其他器官的活度訊號亦相當低，代表該藥物於實驗動物體內被 wash out 的速率相當不錯，未來可進一步透過增加實驗動物隻數藉此進行該過程所造成放射劑量的推算。



2.3. 碘-123 標幟 PARP 抑制劑小動物活體 SPECT 造影

為進一步評估 KX-1 結合至動物體內腫瘤 PARP-1 之情況，本計畫使用實驗室所建立之碘-123-KX-1 對該實驗動物進行活體造影。圖三為代表性活體造影影像，該影像中採用紅色箭頭標示之處為腫瘤植入之處，從該結果中可明顯觀察到放射性 KX-1 可以清楚的呈現出腫瘤所在之處。經確認，該結果亦與文獻上所報導之氟-18-FTT (KX-1 衍生物) 結果類似[1]。

2.4. 碘-131 標幟 PARP 抑制劑腫瘤動物模型療效測試

測試結果如圖四所示，於該數據中可以清楚看到，該實驗動物在未經碘-131-KX-1 治療組別中，其腫瘤體積在開始觀察後兩週體積約增加了將近一倍，然而，在使用該放射性藥物進行治療的組別中，於治療完成後一周內可以明顯觀察到腫瘤體積略有縮小(約 10-20%)，可惜的是在治療後兩周腫瘤體積仍緩慢增加，或許意味著後續研究中可能需提高治療劑量或修改治療流程之設計。

一、研發成果之重要貢獻

本計畫之主要貢獻包含建立一簡便之放射性碘-131-KX-1 標幟方式，且於小動物的治療測試結果得知，該藥品能有效地減緩甚至停止腫瘤細胞的生長。其中關於所使用的碘-131 來源可選用一般臨床上之碘-131 口服液即可，相對於購自特定廠商之途徑，亦可有效地節約成本及省去等待進口時間之困擾。國原院為國內專職於放射性藥品供應之單位，且亦身負開發新藥供應國人需求之任務。相信該藥品若有機會獲得該院持續挹注經費開發，未來應有機會投入臨床服務用。

二、學術成就方面，目前已完成投稿國外期刊論文一篇。

(一) Validation of a simplified I-125-KX1 radiolabeling method for



PARP-1 detection of breast cancer cells. Molecules (投稿中)

參、展望

綜合本計畫之結果可以得知，透過結合可釋出貝他粒子之碘-131 之 PARP 抑制劑，可經由兩種不同之方式消滅腫瘤細胞，進而提升治療之效果。雖然成果頗為豐碩，但考量到治療方式之最佳化以及於不同動物模型可能之差異性。本計畫建議後續之研究可採用原發性腫瘤動物模型結合不同之給藥方式（如提高劑量或增加給藥頻率）進一步確認該藥品之療效。

表 1、放射性碘-131 標幟 KX-1 之放射藥物標幟暨分析結果

反應條件	放射化學產率 (Radiochemical yield; RY)	放射化學純度 (Radiochemical purity; RP)	標幟批數 (n)
RT, 60min, 10 μ g	14.4%	>99%	1
100 ° C, 30 min, 10 μ g	80.4 \pm 12.8%	>99%	5
100 ° C, 10 min, 5 μ g	73.0 \pm 1.3%	>99%	4

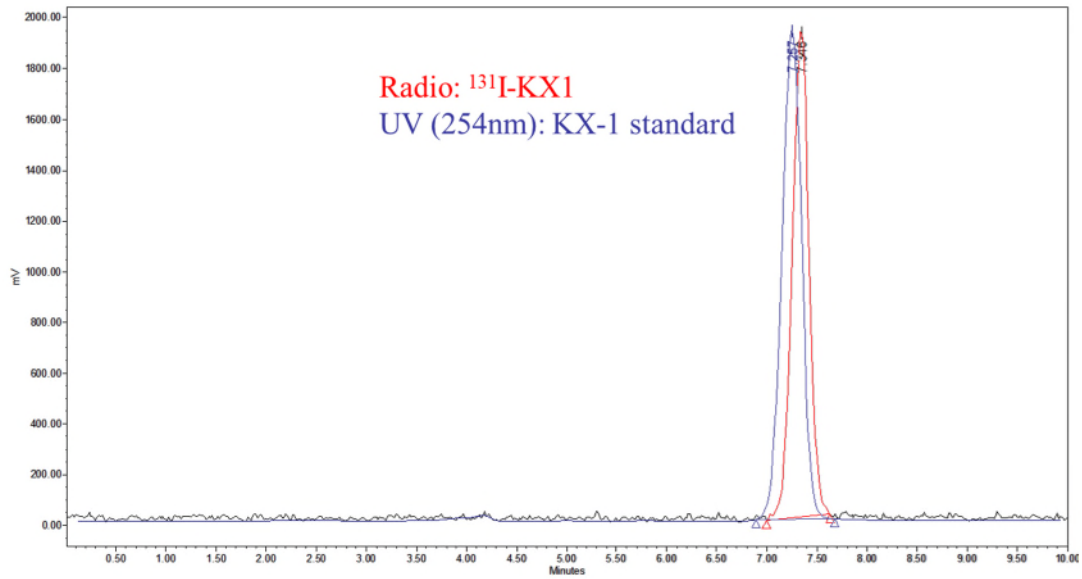


圖 1、放射性碘-131 標幟 KX-1 之代表性 HPLC 分析圖譜。

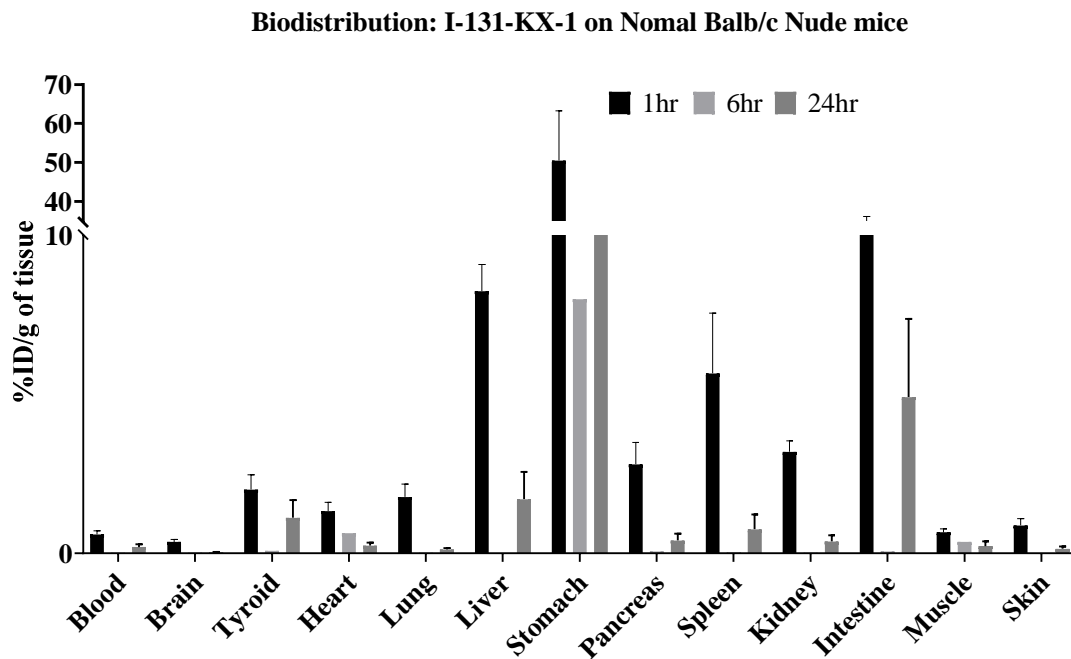


圖 2、實驗動物經口服給予放射性碘-131-KX-1 後之生物分布資料。

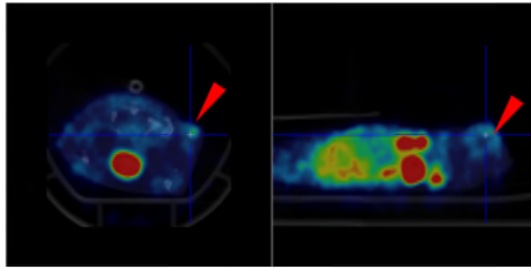


圖 3、碘-123-KX-1 於 MDA-MB-231 動物之活體影像。

圖 4、動物經藥物治療(n=3)與未治療組別(n=5)之腫瘤體積變化。

參考文獻

1. Makvandi, M., Xu, K., Lieberman, B. P., Anderson, R. C., Effron, S. S., Winters, H. D., ... & Mach, R. H. (2016). A radiotracer strategy to quantify PARP-1 expression in vivo provides a biomarker that can enable patient selection for PARP inhibitor therapy. *Cancer research*, 76(15), 4516-4524.
2. Lee, Hsiaoju S., et al. "The development of 18F fluorthanatracer: A PET radiotracer for imaging poly (ADP-Ribose) polymerase-1." *Radiology: Imaging Cancer* 4.1 (2022): e210070.



中子斷層影像技術開發

Neutron computed tomography technology development in Taiwan

(計畫編號：112A004)

裴晉哲¹ 武傳仁¹ 王雅亭¹ 許幼新² 鄭勝隆²

¹清華大學原科中心 ²國家原子能科技研究院

本研究的目的是為建立台灣中子斷層影像技術之能力。藉清華大學水池式反應器(THOR) W1 中子束的中子照相，依照 2D 中子影像的擷取方式進行物體掃描，開發或利用中子斷層應用軟體，以發展中子斷層影像分析研究能力。經本計畫的執行，已首度建立台灣中子斷層影像的研究技術。

The goal of this study is to establish the neutron computed tomography (NCT) image technology of neutron radiography in Taiwan. This work preliminarily starts the capture procedure of the neutron radiography images at W1 Neutron Beam of Tsing Hua Open-pool Reactor, and then develop or apply the NCT software to develop the NCT technology ability in Taiwan. After the execution of the project, the NCT research technology has been firstly established in Taiwan.

壹、計畫目標

計畫總體描述、計畫目標。(約 150 字)

本開發中子影像斷層掃描(neutron computed tomography, NCT)技術計畫，主要係依據國家發展目標「創新原子能科技跨域研發產業關鍵技術」



而規劃，希望藉開發獨特中子影像斷層掃描，以建立國內在非破壞檢測技術上的新檢測利器。

研究係使用位於清華大學的 THOR 中子源，藉之前發展完成的 2D 影像擷取方法步驟與程序，開發或利用應用軟體，以首度建立台灣中子斷層影像的分析研究能力。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

經研發，已開發中子斷層掃描方法，藉由 THOR 中子照相系統(圖 1)，建立中子斷層影像擷取分析程序。

1. 架設完成 NCT 的成像系統，項目依序主要是：連接儀器、相機對焦測試、之後擷取照像的影像(如圖 2.)。
2. 建立 NCT 影像擷取程序：(1) 安裝鏡頭於 CCD 的轉接環、(2) 連接 CCD 導線及電源線、(3) 啟動控制程式，確認 CCD 與電腦連接完成、(4) 進行 CCD 的對焦測試、(5) 於中子照相箱上安裝 CCD 設備、(6) 設定曝光時間、照相次數、角度等參數、(7) 安裝並固定樣品於旋轉平台上，而後執行擷取影像。
3. 完成中子斷層影像的擷取與處理斷層影像的分析，利用自我開發自動控制軟體，控制旋轉平台旋轉角度，自動截取系列影像，再利用 PSI 所開發的 MuhRec 中子斷層分析軟體，以取得中子斷層影像組。

依照以上程序，進一步的進行 WD-40 油罐影像擷取，以每 1 度擷取 WD-40 影像一次，共需要擷取 360 張中子影像，CCD 曝光時間為 3 sec，由於已建立自動的影像擷取系統，整個取像時程順利於 54 分鐘內



完成。經利用 PSI 所開發的 MuhRec 中子斷層分析軟體進行影像分析處理，系列上、中、下斷層影像結果顯示如圖 3。

此外，亦附帶以每次 20 度的旋轉方式，擷取 Ladder 金屬梯子的中子影像，分析處理後，系列上、中、下斷層影像結果顯示如圖 4，其中的空隙結構清晰可見。

本研究經執行後，有以下摘要結論：

1. 已藉 THOR-W1，建立台灣首度的中子電腦斷層影像(NCT)分析的程式，影像處理程序也已建立完成。
2. 以 WD-40 油罐較簡易物件的斷層初步分析，再進一步開發自動擷取影像系統，並應用其分析程序與方法，進行物件的中子電腦斷層影像分析與探討，可提供國內非破壞結構研究團隊一項特殊的檢測利器。
3. 中子影像掃描牽涉龐大的資料處理，中子斷層影像的後分析處理，需要做高技術性(中子物理)的影像修正，方能提升其清晰度，經本計畫的執行，已順利引進 PSI 開發的 MuhRec 中子斷層分析軟體，未來可供國內非破壞結構研究團隊，於中子斷層影像上進行深入之研究。

二、解決的問題

本研究所建立的中子斷層影像分析能力，為國內之首次，可應用於 X 光所不能檢測的物件，補足非破壞檢測技術的缺漏之處。

參、展望

已藉 THOR 中子照相系統開發 NCT 的處理技術程序，並首次建立國內 NCT 影像的分析能力，未來進一步可應用於國內產業及民生的用途上。

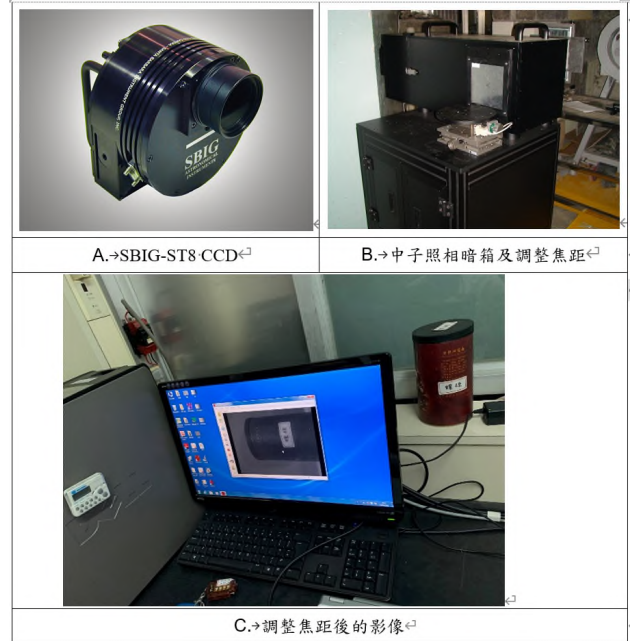
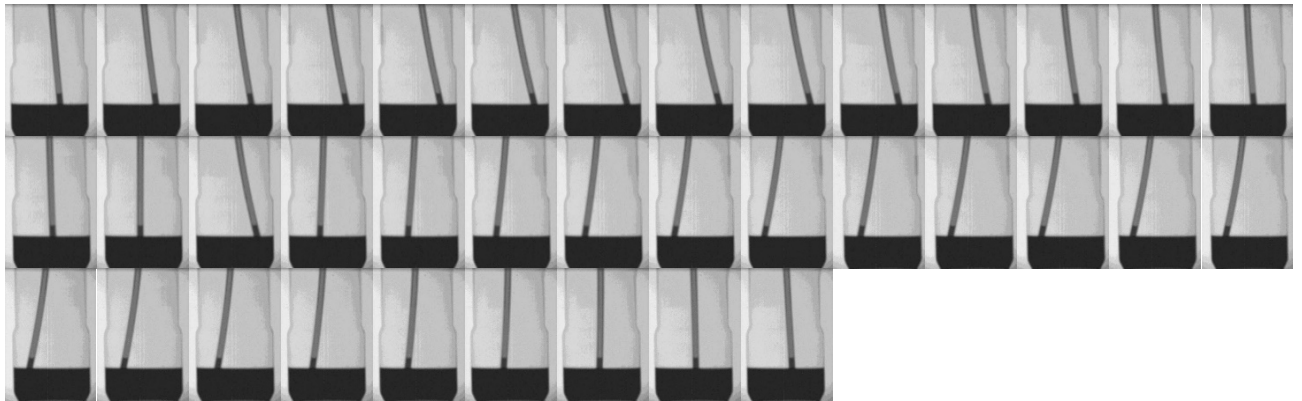


圖 1、THOR 中子照相系統

圖 2. 中子斷層掃描 NCT 的設置

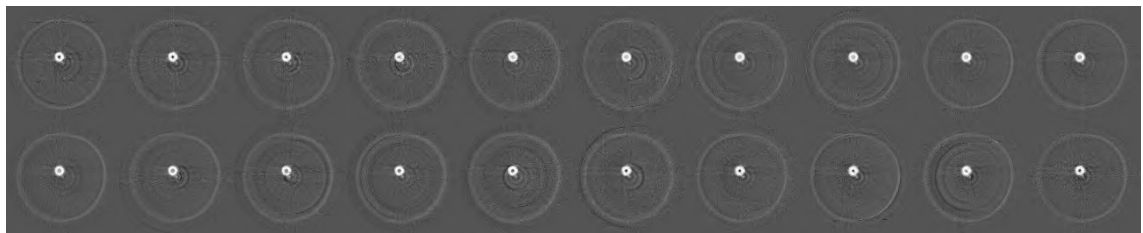


WD-40 油罐實體影像

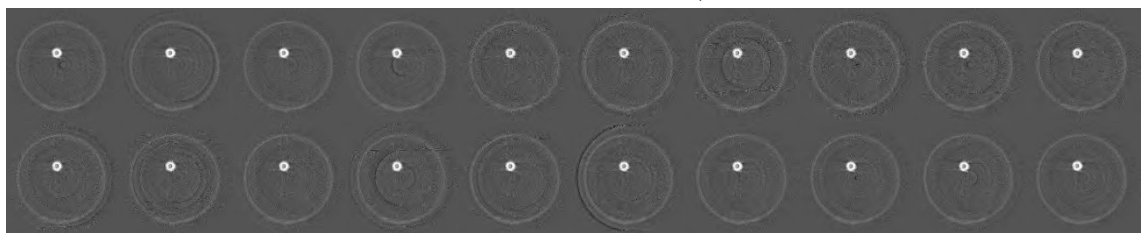


NCT 影像，角度：0→10→20→... 350→360

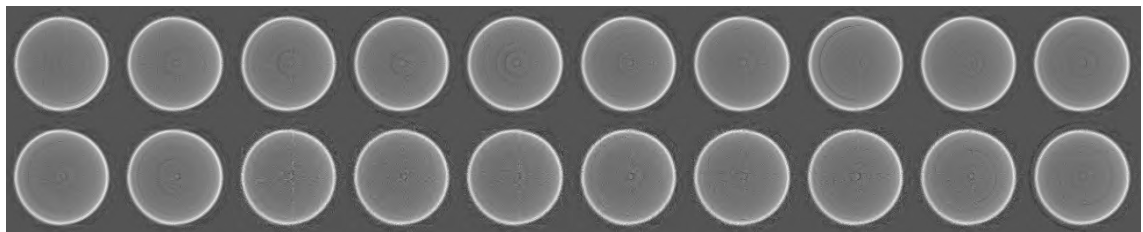
NCT 分段影像



WD-40 上段結構



WD-40 中段結構



WD-40 底段結構

圖 3. WD-40 油罐之中子電腦斷層分析

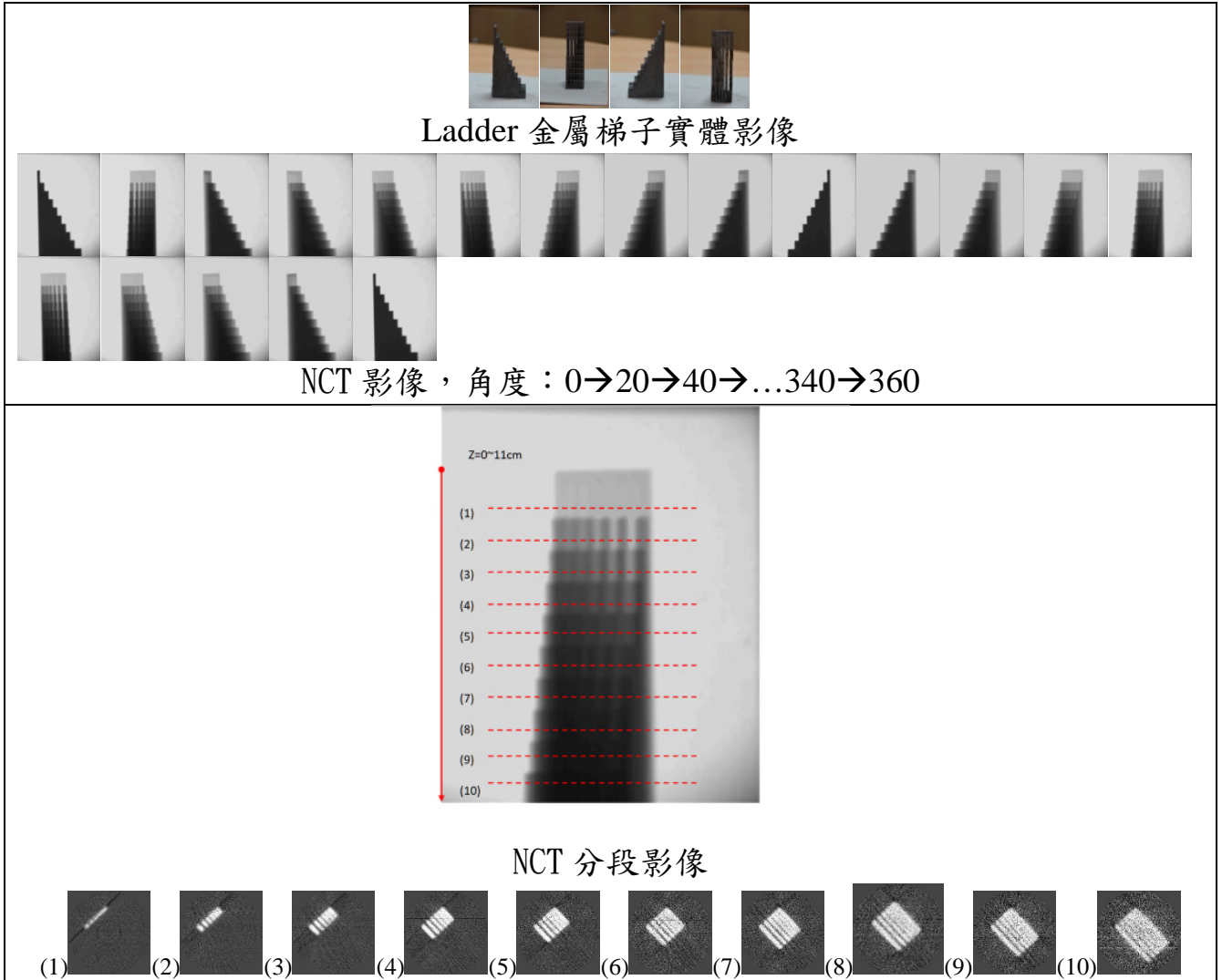


圖 4. Ladder 金屬梯子之中子電腦斷層分析



**TSPO 3rd generation 放射性藥品(碘-123-ER-176)作為早期腦神經退化
發炎誘發診斷藥物**

**Evaluation of Iodine-123-ER-176 as an Inflammation Diagnostic
Radiopharmaceutical by Nuclear Medicine Imaging Analysis for Early
Neurodegeneration**

(計畫編號：112B015)

張剛璋

臺北醫學大學神經醫學研究中心/實驗動物中心

創傷性腦損傷(Traumatic brain injury, TBI)藉由 PET 與 SPECT 反映出體內功能性影像分佈，使用放射性示踪劑提供各組織/器官的功能性影像定量分析，通過動態(dynamic)掃描和藉由數學模型方式呈現注射放射性藥物的藥效分析和其藥物動力學分析研究。

腦部發炎是由於神經免疫細胞激活的神經發炎，神經膠質瘤細胞在腦部損傷時被激活，被激活膠質細胞/巨噬細胞與易位蛋白(Translocator Protein, TSPO)的表達顯著增加有關，放射性標記的 TSPO 放射性示踪劑將可提供早期診斷和療效評估工作。藉由此計劃的實施，已完成建立腦部創傷動物模式(TBI animal model)做為此次試驗的動物模式；並進行放射性藥物(F-18-FEPPA 與 I-123-ER176)於腦部發炎檢測結果，藉此評估藥物專一性與結合能力的分析。結果可顯示 TBI 動物模式於 F-18-FEPPA 累積於創傷後第七天腦部結合放射性 TSPO 核醫藥物量與對側比較約 1.556 倍(紋狀體)與 1.212 倍(皮層)位置，且此影像可經由 MRI T2 影像觀測到其對於腦部創傷的結構性影像。針對國原院研發之 I-123-



ER176/SPECT 影像分析，藉由影像分析其腦部進腦量約為 4.3~5.3%ID (0.5~2 小時)，於 TBI 動物模式第七天約 2.61 倍(紋狀體)與 0.97 倍(皮層)位置，其結果與 F-18-FEPPA 相似，未來可持續精進於其他發炎反應之研究，做為新穎核醫藥物的開端。

關鍵詞：正電子發射斷層掃描(PET)、創傷性腦損傷(TBI)、單光子發射斷層掃描(SPECT)

Traumatic brain injury (TBI) based on positron emission tomography (PET) and single photo emission computed tomography (SPECT) reflects the molecular imaging technique in vivo spatial distribution of functional images in the body, uses radioactive tracers to provide functional /quantitative information of each tissue/organ, and uses dynamic scanning and The pharmacodynamics/pharmacokinetic analysis of injected radiotracers are presented in the form of mathematical models.

Experiencing brain inflammation after a traumatic brain injury (TBI) is virtually inevitable. Neuroinflammation by activated by neuroimmune cells and implicated in the pathogenesis of several neurodegenerative diseases. Glial cells are activated in response to brain injury, and activated microglial/macrophages are associated with dramatically increased expression of translocator protein (TSPO), radiolabeled-TSPO could improve early diagnosis and therapeutic follow-up.

Across this plan will gradually research in the field for nuclear medicine preparation, analysis and application for Translation Medicine. TBI animal model has been established as the animal model for this trial; and radiotracers



(F-18-FEPPA and I-123-ER176) have been used to treat brain inflammation. Analysis of PET/SPECT image results to evaluate drug specificity and binding ability.

The results can show that in the TBI animal model, the amount of F-18-FEPPA accumulated in the brain on the Day 7 after trauma was approximately 1.56 times (striatum) and 1.21 times (cortex) compared with the contralateral side, and the structural image of brain trauma can be seen through MRI T2 imaging. In I-123-ER176/SPECT image analysis the amount of brain penetration through image analysis is approximately 4.3~5.3%ID (0.5~2 hours), which is approximately 2.61 times on the Day 7 of TBI animal model (Striatum) and 0.97 times (Cortex) location, the results are similar to F-18-FEPPA. In the future, we can continue to improve the research on other inflammatory reactions as the beginning of new nuclear medicine drugs.

Key words : Positron emission tomography (PET), Traumatic brain injury (TBI), Single Photon Emission Tomography (SPECT)

壹、計畫目標

在本研究中，我們嘗試使用 F-18-FEPPA 和 I-123-ER176 偵測大鼠腦部經由 TBI 撞擊後 TSPO 神經元發炎反應。F-18-FEPPA 目前已利用於臨床使用上，期待國原院自製的 I-123-ER176 未來可取代 F-18-FEPPA 於臨床使用。

貳、重要成果

經實驗證明，I-123-ER176 於 TBI 動物模式中，TBI 撞擊後第七天



腦部累積量為最多(此結果與 F-18-FEPPA 一致，且可於免疫螢光染色結果確認)。在藥品專一性部分，腦部結合量與 F-18-FEPPA 相仿，且在紋狀體(striatum)與對側區域相比較，結合專一性結果優於 F-18-FEPPA(TBI 第七天)。

一、說明研發成果之重要貢獻

本計畫欲解決現今核子醫學於發炎反應的偵測方式，現今核醫發展多利用 PET 做為影像分析的工具；相對的，SPECT 相關藥物的開發則較為欠缺，於同時國際間也針對核醫使用問題，期許有更多的 SPECT 相關藥物的開法，未來除可供應國人外，也可提供低收入國家之核醫分析(SPECT 造價較為便宜)。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文....

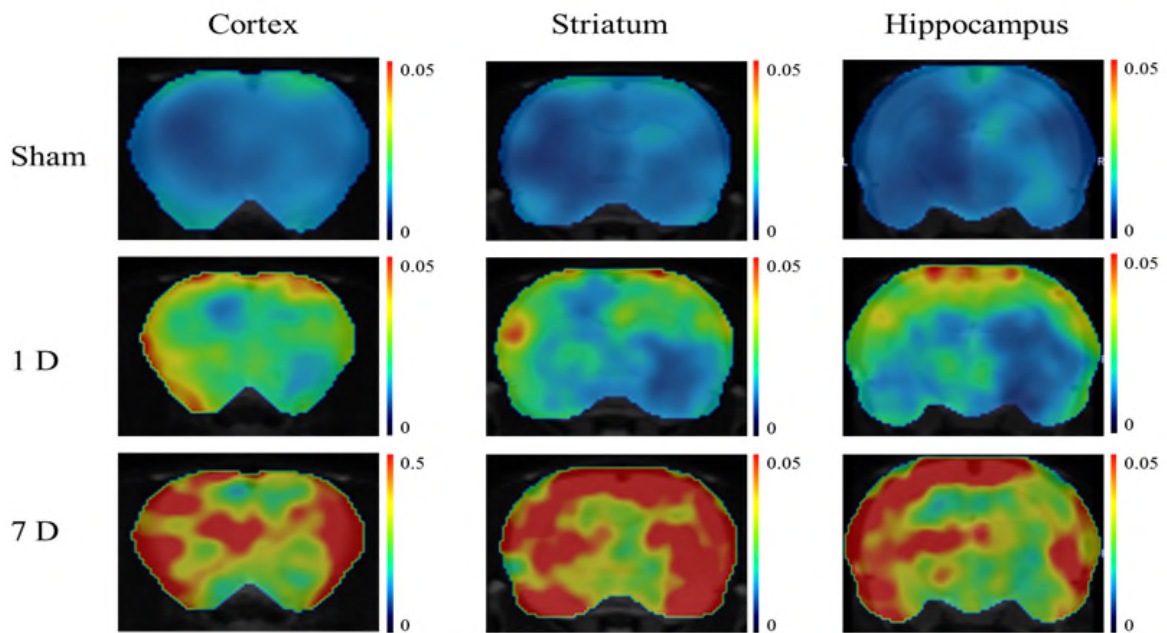
於計劃執行期間已發表一篇國際期刊(審稿中)：Pharmaceuticals: Evaluation of neurotransmitter receptor radiopharmaceuticals in TBI rat brain imaging of awake/anesthetized animal by PET image.

參、展望

本計劃藉由腦部發炎作為神經免疫細胞激活的神經發炎，藉由放射性標記的 TSPO 放射性示蹤劑(I-123-ER176)已證明可提供早期診斷和療效評估工作。未來可持續精進於其他體內發炎反應之研究，做為新穎核醫藥物的開端。



圖一、實驗動物 TBI 流程圖



圖二、sham control、24hr、7D 之 F-18-FEPPA/PET 影像結果



MIBG 類似物及 ER-176 類似物之氟或碘-標誌比對研究案

The Study for Radio-halogenation of MIBG and ER-176 Analogues

(計畫編號：NL1120631)

劉守軒¹ 張瑋岷¹ 陳傳霖¹

¹陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系

隨人口老化的比例增加，其中相關的退化性疾病亦顯著增加中，近期發現心臟疾病與認知功能的下降可能存在密切之關聯性，發展相關功能性檢查之核醫藥物將有助於此類相關疾病之早期診斷運用，因此開發正子神經退化性疾病及心臟疾病診斷之核醫藥物有其之重要性。¹²³I-間碘苄基胍 (¹²³I-mIBG)即是一重要的核醫診斷藥物，可應用於心臟及神經母細胞瘤單光子斷層造影檢查上，同時 ¹³¹I-間碘苄基胍 (¹³¹I-mIBG)亦可作為神經母細胞瘤高風險患者的治療藥物。因此本研究案先進行此類藥物 MIBG 類似物之放射性碘-標誌。在不同的氧化條件下，從 N,N'-雙(叔丁氧基羰基)-3-(三丁基甲錫烷基)苄基胍(TBSMBG)前體放射合成 [^{123/131}I]-mIBG，並進行了評估。使用三種不同的氧化劑方法製備放射性 [¹³¹I]mIBG。N-氯琥珀醯亞胺(NCS)、氯胺 T 和過氧化氫標記的放射化學產率分別約為 85.3±1.0%、79.5±3.1%和 74.4±2.0%，而 NCS 氧化條件下 [¹²³I]mIBG 的放射化學產率略低約為 71.3±1.1%。本研究獲得的結果表明應有機會進一步量化不添加載體的[*I]mIBG 之製備。

The proportion of the aging population increases, the related degenerative



diseases are also increasing significantly. There is increasing evidence that heart disease and cognitive decline are linked. The development of radiopharmaceuticals for relevant functional evaluation will have benefit in the early diagnosis and application of such related diseases. Therefore, it is important to develop radiopharmaceuticals for the diagnosis of neurodegenerative diseases and heart diseases. ^{123}I -Metaiodobenzylguanidine (^{123}I -mIBG) is an important diagnostic drug. It can be used in single photon tomography examination of heart and neuroblastomas. At the same time, ^{131}I -metaiodobenzylguanidine (^{131}I -mIBG) can also be used as a therapeutic drug for patients with high risk of neuroblastomas. Therefore, the synthesis of radioactive [^{131}I]mIBG was explored using three distinct oxidant methods, yielding radiochemical yields of approximately $85.3\pm 1.0\%$, $79.5\pm 3.1\%$, and $74.4\pm 2.0\%$ with N-chlorosuccinimide (NCS), Chloramine T, and hydrogen peroxide, respectively. However, the radiochemical yields of [^{123}I]mIBG from the NCS oxidation condition were slightly lower at approximately $71.3\pm 1.1\%$. The study suggests promising prospects for scaling up the production of no-carrier-added [$^*\text{I}$]mIBG in the future.

壹、計畫目標

放射性碘標誌之間碘苄基胍(MIBG)由於其能與腎上腺受體結合且



具高度特異性因此可作為富含腎上腺受體組織，器官何種留之診斷及治療，因此在臨床上可做為腎上腺髓質掃描檢查，心肌造影及噬鉻細胞瘤病灶轉移診斷等應用。而 ER176 為第三代的 translocator protein (TSPO) 轉位子蛋白的放射性診斷藥物，主要神經發炎相關，有機會可作為早期神經退化性疾病診斷之造影藥物。因此本研究案主要進行兩藥物 MIBG 類似物及 ER-176 類似物之放射性氟或碘-標誌的委託研究，主要為尋找合適之標誌前驅物，提升放射性標誌產率，建立放射藥物純化分離分析之條件等。

貳、重要成果

在本研究中，探討了用於製備無載體的 [* I]mIBG 的各種氧化條件下之標誌效率。最初，我們利用 bisBoc-TBSmIBG 前體和常用的 N-氯代琥珀醯亞胺 (NCS) 作為氧化劑進行標記，並使用 RadioTLC 進行分析。為了建立分析條件，使用非放射性 bisBoc-mIBG 和 mIBG。考慮到反應需要酸性條件，在反應過程中可觀察到放射性碘標記的 bisBoc-mIBG 和 mIBG 分別在對應於 $R_f = 0.6$ 和 $R_f = 0.8$ 的位置形成。隨後，使用三氟乙酸 (TFA) 進一步去保護，得到 [131 I]mIBG 產物。有趣的是，即使沒有 TFA 去保護，大多數反應也能獲得 [131 I]mIBG。此外，使用 TFA 進一步脫保護的結果顯示兩者之間沒有顯著差異。進一步的固相純化和分離使我們能夠實現 $85.3 \pm 1.0\%$ 的中等到高放射化學產率。

在改變反應條件以使用氯胺-T 時。脫保護後轉化為 [131 I]mIBG。經過進一步的固相純化和分離，放化收率達到了 $79.5 \pm 3.1\%$ 。另一方面，若以較高比例的過氧化氫相比，用 30% 過氧化氫氧化主要產生 [131 I]mIBG，而不需要 TFA 去保護 TFA 去保護後，兩個結果之間幾乎沒有差異。固相純化和分離也獲得了良好的放射化學產率 $74.4 \pm 2.0\%$ 。



總結上述三種不同的製備 $[^{131}\text{I}]\text{mIBG}$ 的氧化條件下，獲得了令人滿意的放射化學產率，其中大多數利用 NCS 的反應產率超過 80%。因此，我們在這些條件下繼續製備 $[^{123}\text{I}]\text{mIBG}$ 。放射性標記過程中的去保護較不明顯。然而，經過 TFA 脫保護後，可以獲得 $[^{123}\text{I}]\text{mIBG}$ ，隨後透過 HPLC 進行驗證。將非放射性 bisBoc-mIBG 與未去保護的反應溶液共注射後，結果顯示非放射性 bisBoc-mIBG 的保留時間約為 17.3 分鐘，可觀察到的放射性 bisBoc-mIBG 約為 18.6 分鐘，還有少量在約 12.6 分鐘時觀察到的 $[^{123}\text{I}]\text{mIBG}$ 量。隨後的去保護顯示在 13.5 分鐘時存在非放射性 mIBG，並且在 14 分鐘時觀察到 $[^{123}\text{I}]\text{mIBG}$ 的一致到達時間。雖然固相萃取純化後的放射化學產率不如 $[^{131}\text{I}]\text{mIBG}$ ，但仍達 $71.3\pm 1.1\%$ 。

本研究成功建立 $[^{131}\text{I}]\text{mIBG}$ 和 $[^{123}\text{I}]\text{mIBG}$ 的放射化學標誌，實現了高放射化學產率和純度。優化的方法已證明是可靠的，並且結果似乎是可重複的。我們的方法包括用於特徵追蹤的放射性薄層分析、用於評估化學純度的高效液相層析 (HPLC) 以及同時應用固相萃取程序。這種全面的純化和分離過程可以進行分析，未來應有機會改善的大規模合成工作。

在 ER176 放射性藥物開發中，由於使用先前獲得的標記前體期間出現了一些意想不到的發現。在重新評估前體的結構後，很明顯地它可能不適合此一新藥之有效標記方式。因此建議其化學合成路徑進需重新設計，以改善標誌前驅物之製備。目前，新的合成方法已重新建立及探索中，這為該此研究指明了另一的方向。

一、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文：

(一)在放射性無載體的 $[*\text{I}]\text{mIBG}$ 之放射化學標誌



1. 38th 生物醫學聯合學術年會發表題目: Radiolabelling of [^{131}I]-MIBG with various oxidizing agent
2. 已投稿 Annals of Nuclear Medicine and Molecular Imaging; 題目: Radiosynthesis of $^{131/123}\text{I}$ -metaiodobenzylguanidine (mIBG) for theranostic applications

參、展望

目前初步以小放射劑量之方式進行標誌條件之建立、合適之放射藥物分析條件及純化分離條件之製程，在此一基礎上將有助於未來建立較大活度之放射藥物製備純化分離分析條件，將有助於提供協助臨床使用。



轉移性肝病灶切除前的肝功能評估- 開放性學術臨床試驗，與電腦斷層掃描體積測量或核磁共振術比較，評估術前殘餘肝功能評估方法：鎩

68-多蕾克鎩正子造影之準確度

AN OPEN-LABEL, COMPARATIVE PHASE II CLINICAL TRIAL TO ASSESS THE ACCURACY AND RELIABILITY OF THE GA68-DOLACGA POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY COMPARED TO COMPUTER TOMOGRAPHY VOLUMETRY OR MAGNETIC RESONANCE IMAGE FOR MEASUREMENT OF LIVER RESERVE AMONG LIVER METASTASES PATIENTS

(計畫編號：111A006)

黃玉儀¹ 蔡紫蓉²

¹和信治癌中心醫院 核子醫學科 ²和信治癌中心醫院 一般外科

一、研究背景

Asialoglycoprotein Receptor (ASGPR) 是一種僅存在於功能性肝細胞膜上的受體，核研所開發的 INER038 能夠與 ASGPR 特異性結合，當 INER038 以放射性核素鎩-68 標記時，可根據其影像在肝臟中的吸收程度來預測肝臟的功能儲備。

二、研究目的

主要目的為比較鎩 68-多蕾克鎩正子造影與電腦斷層掃描體積測量或磁振造影的測定結果。次要目的為評估鎩 68-多蕾克鎩正子造影與傳統



肝功能檢驗及肝纖維化指數之相關性、評估鎩 68-多蕾克鎩在肝癌病患中的安全性。

三、研究設計

這是一項 open-label comparative study，目標是招募 2 名經組織學或細胞學證實診斷為肝轉移的患者，並且將受益於轉移切除術。對於原發癌症已接受根治治療的肝轉移患者，可接受的剩餘功能容積，大約大於標準肝容積的三分之一，或根據臨床判斷相當於至少兩個肝段。

四、研究方法

受試者將受 2.0 ± 1.0 mCi Ga-68-Dolacga 注射劑的 iv 推注，注射後 60 分鐘後進行 Ga-68-Dolacga PET 連續造影。其後將進行兩次隨訪訪問以確認受試者的健康狀況，並收集任何新的不良事件。肝 CTV 或 MRI 將由放射科專家手動追蹤肝臟輪廓並對每個軸向切面的面積進行總和。對於功能定量分析，將以注射劑劑量的百分比 (%ID) 和標準攝取值 (SUV) 表示示踪劑的吸收量，以及定性評估。

五、研究結果

以鎩 68-多蕾克鎩正子造影評估病患術前肝儲存量，本研究發現以客觀之閾值(threshold)選定法，採取 20%~30%之閾值最為接近肝臟正常體積範圍；而客觀之閾值選定於 25%~30%之結果，最接近電腦斷層掃描體積測量前肝儲存量。研究中兩個案並未發現顯著之安全性問題。



六、結論

本研究發現，鎩 68-多蕾克鎩正子掃描具有評估肝臟體積之潛在應用性，可以客觀之閾值(threshold)選定法作為正常功能之肝臟圈選工具，但未來仍需進行更大型的臨床試驗來確認檢查效能以及藥物安全性。

The Asialoglycoprotein Receptor (ASGPR) is a receptor present exclusively on the membrane of functional liver cells. The INER038 carries six sugars at the terminal endpoint of the glycopeptide and can bind specifically to ASGPR. When labeled with the radioactive isotope Ga-68, INER038 can predict liver functional reserve based on its absorption in the liver.

Objectives:

The primary objective is to compare the results of Ga-68-Dolacga PET imaging with computed tomography volumetry or magnetic resonance imaging. The secondary objectives include evaluating the correlation of Ga-68-Dolacga PET imaging with traditional liver function tests and liver fibrosis indices, as well as assessing the safety of Ga-68-Dolacga in patients with liver cancer.

Study Design:

This is an open-label comparative study aimed at evaluating the performance of Ga-68-Dolacga PET relative to CTV or MRI in measuring liver reserve. The goal is to recruit 2patients diagnosed with liver metastases confirmed by histology or cytology and who would benefit from metastasectomy. Acceptable residual functional volumes are approximately greater than one-third of the standard liver volume or equivalent to at least two liver segments based on clinical judgment, among other inclusion criteria, and no exclusion criteria.



Methods:

During imaging, subjects received IV injection of 2.0 ± 1.0 mCi Ga-68-Dolacga, followed by PET imaging acquisition 60 minutes post-injection. Subsequently, two follow-up visits will be conducted to confirm the subjects' health status and collect any new adverse events. Liver CTV or MRI will be manually traced by radiology experts to outline the liver contours and sum the areas for each axial slice. For functional quantitative analysis, tracer uptake will be expressed as a percentage of injected dose (%ID) and standard uptake value (SUV), along with qualitative assessment.

Results:

In evaluating preoperative liver storage using Ga-68-Dolacga PET imaging, this study found that adopting an objective threshold selection method, selecting a threshold of 20% to 30% is closest to the normal liver volume range, while an objective threshold selection of 25% to 30% yields results closest to computed tomography volumetry of liver storage before measurement. No significant safety issues were observed in the two cases in the study.

Conclusion:

This study suggests that Ga-68-Dolacga PET scanning has the potential application in evaluating liver volume and can serve as a tool for objectively selecting the liver with normal function using a threshold selection method. However, larger clinical trials are needed in the future to confirm the performance of the examination and the safety of the drug.

壹、計畫目標

ASGPR 是一種僅存在於功能性肝細胞膜上的受體，可用作測量功能性肝臟儲備的方法，核研所開發了肽化合物 INER038，該化合物



能夠與 ASGPR 特异性結合，當 INER038 以放射性核素鎵-68 標記時，可根據其在肝臟中的吸收程度來預測肝臟的功能儲備。此計畫主要目標為比較鎵 68-多蕾克鎵正子造影與電腦斷層掃瞄體積測量或磁振造影的測定結果。次要目標為評估其與傳統肝功能檢驗及肝纖維化指數之相關性以及使用後的病患安全性。

貳、重要成果

1. 主要評估指標：

- (1) 鎵 68-多蕾克鎵正子造影評估病患術前肝儲存量，發現以客觀之閾值 (threshold) 選定法 20%~30% 之閾值最為接近肝臟正常體積範圍。(個案 S001 結果資料如表一；個案 S002 結果資料如表二)
- (2) 電腦斷層掃瞄體積測量評估病患術前肝儲存量。兩個案之肝總體積、肝腫瘤體積以及肝儲存量如表三。
- (3) 鎵 68-多蕾克鎵正子造影術前肝儲存量與電腦斷層掃瞄體積測量前肝儲存量之相關性，發現鎵 68-多蕾克鎵正子造影使用客觀之閾值選定 25%~30% 之結果最接近電腦斷層掃瞄體積測量前肝儲存量結果。(個案 S001 結果資料如表四；個案 S002 結果資料如表五)。

參、展望

- 一、 本研究發現，鎵 68-多蕾克鎵正子掃描用來評估肝臟體積時，可以客觀之閾值(threshold)選定法作為正常功能之肝臟圈選工具，本試驗兩個案之測試發現 20%~30% 之閾值最為接近肝臟正常體積範



圍，測得之肝臟儲存量體積差異可小於 10%。

二、 在安全性監測的部分，研究中兩個案並未發現顯著之安全性問題，但仍需要未來進行更大型的臨床試驗來確認藥物安全性。

題，但仍需要未來進行更大型的臨床試驗來確認藥物安全性。

表一、S001 鎷 68-多蕾克鎷正子造影不同閾值計算得到之肝臟體積

S001	WPH	SUV threshold/ value	20.00%	25.00%	30.00%
SUVmax (g/ml)			9.34	11.67	14.00
46.68		PET_RLV (cc)	1428	1375	1264

表二、S002 鎷 68-多蕾克鎷正子造影不同閾值計算得到之肝臟體積

S002	PYH	SUV threshold/ value	20.00%	25.00%	30.00%
SUVmax (g/ml)			7.80	9.75	11.70
38.99		PET_RLV (cc)	1428	1322	1285

表三、電腦斷層掃描體積測量得到之術前肝儲存量

		CT_TLV (cc)	CT_TuV (cc)	CT_RLV (cc)	CT_Remnant rate (%)
S001	WPH	1308	2.18	1305.8	99.8
S002	PYH	1313	2.8	1310.2	99.8

表四、S001 鎷 68-多蕾克鎷正子造影術前肝儲存量與電腦斷層掃描體積測量前肝儲存量之相關性

		CT_RLV (cc)	SUV threshold/ value	20.00%	25.00%	30.00%
				9.34	11.67	14.00
S001	WPH	1305.8		1428	1375	1264
		difference (%)		9.36	5.30	-3.20



表五、S002 鎊 68-多蕾克鎊正子造影術前肝儲存量與電腦斷層掃瞄體積
測量前肝儲存量之相關性

		CT_RLV	SUV threshold/	20.00%	25.00%	30.00%
		(cc)	value	7.80	9.75	11.70
S002	PYH	1310.2		1428	1322	1285
			difference (%)	8.99	0.90	-1.92



運用人工智慧探討及預測動脈粥狀硬化之形成

Using artificial intelligence to investigate and predict the formation of atherosclerosis

(計畫編號：112A002)

簡千栩¹ 夏建忠²

¹ 國立陽明交通大學生理學研究所 ² 國家原子能研究院

心血管疾病已經長年高居國人十大死因前三名，其臨床所面臨到的課題為無法早期預測疾病之高危險群，而其發病又極其快速且嚴重，因而被稱為人類的隱形殺手。而粥狀動脈硬化容易引發心肌缺氧進而造成心衰竭。其形成原因與巨噬細胞吞噬脂質，形成斑塊，造成局部發炎反應有關。臨床與動物模型發現斑塊好發於動脈的彎曲或分岔處。詳細形成機制不清楚。因此，本計劃將利用動物模型建立主動脈中，巨噬細胞在空間上與時間上細胞分佈與發炎相關分子之影像。其中，可利用同位素標定之相關之抗體和 APD 藥物，分辨細胞在不同病程中的分佈、形態變化與發炎分子(如：NFkB、NLRP3...等)之表現。合併使用人工智慧運算其相關性，期待能運用人工智慧開發預測動脈粥狀硬化病程與嚴重程度之平台。初步研究成果已建立分析血管斑塊比例的影像分析程式，運用此程式，可有



效分析斑塊在血管中所佔有之面積、比例。可用於分析不同病程中，斑塊所佔有之比例。並可用作後續實驗中所需之輕度、中度與重度動脈粥狀硬化之驗證。未來，將根據實驗規劃建立動脈粥狀硬化小鼠的血管運用人工智慧建立影像辨識系統，並且結合血管斑塊比例的影像分析程式之結果發展分析動脈粥狀硬化之人工智慧影像系統。

Cardiovascular disease has been among Taiwan's top three leading causes of death. The challenge in the clinical setting is the inability to predict high-risk groups for the disease early. Atherosclerosis is prone to causing myocardial ischemia, leading to heart failure, and the formation is related to macrophages engulfing lipids and forming plaques, causing local inflammatory reactions. Clinical and animal models have discovered that plaques are more likely to occur at bends or bifurcations in arteries. The detailed mechanism of formation needs to be clarified. Therefore, this project aims to use animal models to establish the spatial and temporal distribution of macrophages and inflammation-related molecules in the aorta. Isotope-labeled antibodies and APD drugs can be employed to distinguish the distribution and morphological changes of cells and the expression of inflammatory molecules in different stages of the disease. Ultimately, we will combine artificial intelligence and animal model to develop a platform for predicting the progression and severity of atherosclerosis. Our preliminary results have been made in developing an image analysis program for assessing the proportion of vascular plaques. Utilizing this program enables effective analysis of the area and proportion occupied by plaques within blood vessels. It can be employed to analyze the



proportional presence of plaques in various stages of disease progression. Furthermore, it can validate mild, moderate, and severe atherosclerosis in subsequent experiments. A vascular imaging recognition system using artificial intelligence will be established in the future based on experimental designs for atherosclerotic mice. This system will be integrated with the results from the image analysis program for vascular plaque proportion, facilitating the development of an artificial intelligence-driven image analysis system for atherosclerosis assessment.

壹、計畫目標

一、動脈粥狀硬化

動脈粥狀硬化由於病兆初期並無明顯徵狀，而後續會造成血栓與血管堵塞¹，嚴重將造成致死之心臟衰竭。而台灣將在 2025 年進入超高齡社會，因此，對於心血管健康的瞭解將是我們刻不容緩得面臨的挑戰。本計畫將利用人工智慧結合疾病小鼠的建立，對動脈粥狀硬化病程的變化加以判斷。期待能夠解決動脈粥狀硬化無法早期判斷之挑戰。

二、人工智慧 (AI) 與同位素標定血管造影

人工智慧 (AI) 在醫學影像分析領域的廣泛運用中，其中之一是於血管攝影影像解析上的應用。血管攝影在診斷和治療心血管疾病方面扮演著重要角色，其影像呈現能夠展現血管的幾何特性，如形狀與尺寸，以及是否存在阻塞或狹窄。AI 技術的介入使得自動血管攝影影像分析成為可能，並有能力辨識異常情況，如血管狹窄、血栓或動脈瘤。展望未來，AI 在血管攝影影像分析領域的應用潛力廣闊。它有助於醫生更早地進行心血管疾病的準確診斷，同時提供更為精密的治療方案。藉此，有望進一步



改善心血管疾病患者的預後，並降低相關疾病的致死率²。

三、主要發現與結論

本研究使用傳統影像處理方法，透過 Python 程式語言中的 OpenCV 電腦視覺庫來進行影像處理。最後成功計算斑塊(Plaque)與血管(Vessel)之面積比，並成功建立分析血管斑塊影像分析軟體。

貳、重要成果

基於實驗目的，我們設計了輕度、中度與重度動脈粥狀硬化的動物模型，用以建構不同病兆之血管造影（圖 1）。針對研究結果階段得知：

1. 比對技術的評估結果：

基於血管病變面積比方面的相關性和一致性，本研究能夠評估 Autoradiography 和 Oil Red Stain 兩種技術是否能夠相互對照。

本研究使用傳統影像處理方法，透過影像處理、特徵提取等流程，計算出基於兩種技術所計算出的血管病變面積比，並畫出莖葉折線圖，方便觀察差距及變化。

2. 分析並增進 Autoradiography 的特徵提取效果

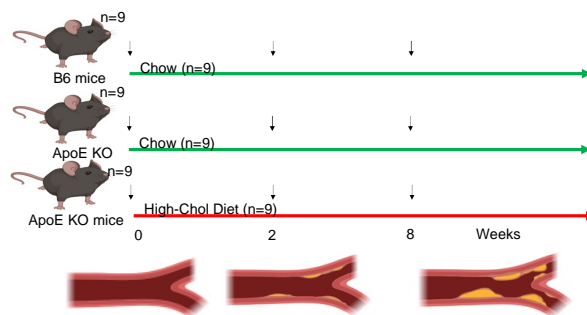
可以由下圖 2 得知，Autoradiography 和 Oil Red O Staining 兩種技術在 4 周時，面積比率較為相近；在 8 周時，面積比率有明顯差距，但在編號 14 及 18 的樣本可以觀察到幾乎一致的面積比率。因此，可以得出 4 周時面積比率之相關性較高，8 周時則較低，後續能夠透過



增加樣本數來進一步計算整體相關性。經特徵提取後可拉近 Autoradiography 和 Oil Red Stain 兩種技術之分析結果。

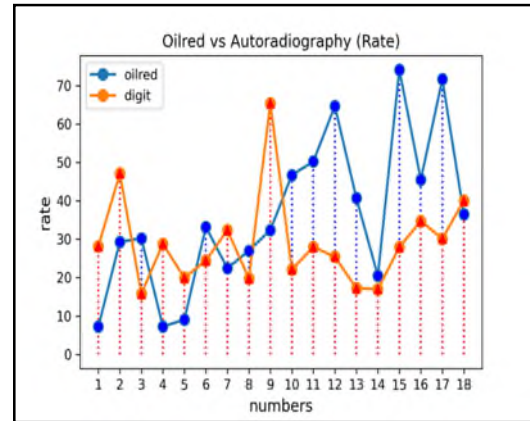
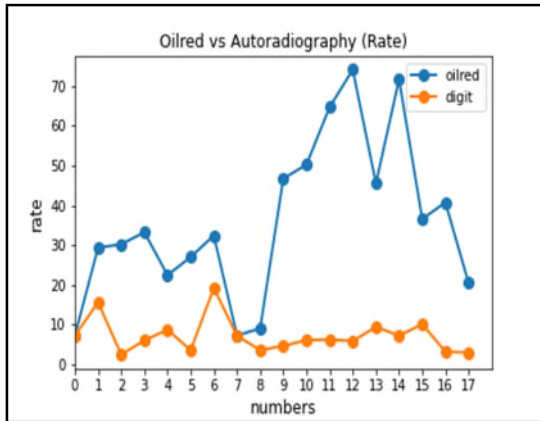
參、展望

本研究經由傳統影像處理技術，開發血管病變程度判斷工具，並顯示出高度的準確性及可靠性。藉由理論判斷，立定 Oil Red O Staining 為標準答案，透過專家標註不同病變程度區間結合數據、圖表及敘述性統計結果，成功顯示 Oil Red O Staining 對於不同階段的病變識別能力非常穩定，Autoradiography 則是於早期預測較為優秀，若後續加入更多樣本數，將能夠進一步的佐證兩者的差異及優劣勢。



Created with BioRender

【圖 1】利用正常與動脈粥狀硬疾病小鼠，結合正常飲食與高膽固醇飲食，建立 a)正常，b)高危險群(中等)，c)發病(嚴重)，三種狀態。



【圖 2】 Oil Red Stain 與 Autoradiography 面積 （右）特徵提取前，
（左）特徵提取後



乾燥潔淨轉輪系統運作對皮膚及眼睛危害風險評估

Assessment of the skin and eye health risk of dehumidification rotor system

(計畫編號：112A007)

林家驊¹ 林坤儀² 江欣諭^{1,2}

¹ 虎尾科技大學生物科技系 ² 中興大學環境工程學系

為了未來乾燥潔淨轉輪系統之應用及推廣，進行乾燥潔淨轉輪系統排放氣體之毒性風險評估將為該系統發展所必須迫切執行之任務。本研究利用體外(in vitro) 細胞毒性檢測方法來進行節能除濕轉輪系統排放氣體之人體皮膚及眼睛危害性之檢測，並釐清其生物作用機制。具體研究成果包括：1)完成節能除濕轉輪系統排放氣體之成分分析；2)完成節能除濕轉輪系統排放 PM_{2.5} 之細胞毒性檢測；3)完成節能除濕轉輪系統排放 PM_{2.5} 之氧化壓力檢測；4)完成節能除濕轉輪系統排放 PM_{2.5} 之發炎效應檢測；5)完成節能除濕轉輪系統排放 PM_{2.5} 之皮膚及眼睛疾病罹患風險。由監測數據看來，乾燥潔淨轉輪系統運轉時排放至採樣空間之 PMs 均略低於平時，此顯示乾燥潔淨轉輪系統可能具備降低環境中 PMs 之能力。此外，除濕輪乾燥系統運轉時排放之 VOCs、SO₂、NO₂ 和 O₃+NO₂ 與空白條件沒有顯著差異，初步研判除濕輪乾燥系統運轉並不會顯著造成操作空間空氣品質之惡化。除濕輪乾燥系統運轉產生之 PM_{2.5} 懸浮顆粒物對正常人類視網膜色素上皮 (ARPE-19) 細胞及皮膚成纖維 (CG1629) 細胞亦無顯著之細胞毒性、氧化壓力、發炎效應、屏障損害及皮膚及眼睛疾病罹患風險。綜合本研究所得之實驗結果顯示，除濕輪乾燥系統運作並不會對人體眼睛及皮膚健康產生顯著之危害風險。本研究之成果可供未來節能除濕轉輪系統發展之參考，藉以協助該節能除濕轉輪系統在考量安全的條件下持續成長。



In anticipation of the future application and promotion of the dehumidification rotor system, conducting a toxicity risk assessment of the system's emitted gases is an imperative task for the development of this system. This study utilized in vitro cytotoxicity testing methods to assess the hazards posed by the emitted gases of the energy-saving dehumidification rotor system to human skin and eyes, clarifying its biological mechanisms. The concrete findings include: 1) Completion of the compositional analysis of gases emitted by the energy-saving dehumidification rotor system; 2) Completion of cytotoxicity testing of PM_{2.5} emitted by the energy-saving DWS; 3) Completion of oxidative stress testing of PM_{2.5} emitted by the system; 4) Completion of inflammatory effect testing of PM_{2.5} emitted by the system; 5) Assessment of the risk of skin and eye diseases due to PM_{2.5} emissions from the system. Monitoring data indicates that the PMs emitted into the sampling space during the operation of the drying and cleaning wheel system are slightly lower than usual, suggesting the system's potential ability to reduce PMs in the environment. Additionally, the VOCs, SO₂, NO₂, and O₃+NO₂ emitted during the operation of the dehumidification rotor system showed no significant difference compared to the control conditions, preliminarily indicating that the operation does not significantly deteriorate the air quality of the operating space. The PM_{2.5} particulate matter produced by the operation of the dehumidification rotor system also showed no significant cytotoxicity, oxidative stress, inflammatory effects, barrier damage, or increased risk of skin and eye diseases in ARPE-19 (human retinal pigment epithelial cells) and CG1629 (human skin fibroblasts) cells. The experimental results of this study suggest that the operation of the dehumidification rotor system does not pose a significant health risk to human eyes and skin. The findings of this study can serve as a reference for the future development of the energy-saving dehumidification rotor system, aiding its continued growth under safe conditions.



壹、計畫目標

為了進一步評估本套乾燥潔淨轉輪系統未來之應用潛力，本研究計畫將進一步針對該系統操作過程所排放之 PMs 是否可能對皮膚及眼睛產生健康危害進行研究。實驗主要將運用環境汙染及生物毒性效應檢測，來釐清乾燥潔淨轉輪系統排放尾氣 PMs 之人體皮膚及眼睛健康危害風險及相關生物作用機制。為了更完整揭示乾燥潔淨轉輪系統操作可能對人體健康造成之影響，本研究將利用人角膜細胞和人表皮細胞來進行乾燥潔淨轉輪系統排放尾氣可能誘發的皮膚及眼睛危害效應和機制。

貳、重要成果

本研究於乾燥潔淨轉輪系統運轉同時利用多功能即時空氣檢測系統與即時空氣檢測系統進行操作環境，相關之空氣檢測數據包括 PM₁、PM_{2.5}、PM₄、PM₁₀、VOCs、SO₂、NO₂ 和 O₃+NO₂。由 PMs 監測數據看來，乾燥潔淨轉輪系統運轉時排放至採樣空間之 PM₁、PM_{2.5}、PM₄ 和 PM₁₀ 均略低於空白條件之 PMs 數值(圖 1)。此是否顯示乾燥潔淨轉輪系統有降低環境中 PMs 之能力，仍有待更進一步實驗來證明。由環境氣體汙染物監測數據看來，乾燥潔淨轉輪系統運轉時排放至 VOCs、SO₂、NO₂ 和 O₃+NO₂ 與空白條件沒有顯著差異(圖 2)，研判乾燥潔淨轉輪系統運轉並不會影響操作空間之空氣品質。乾燥潔淨轉輪系統運轉前後收集之 PM_{2.5} 懸浮顆粒物對人類 ARPE-19 細胞及 CG1629 細胞所產生之細胞存活率與控制組並無差異(圖 3)。初步看來乾燥潔淨轉輪系統運轉對人類眼睛及皮膚細胞的細胞毒性效應並不顯著，後續將進一步針對其他生物毒性指標進行檢測。乾燥潔淨轉輪系統運轉前後收集之 PM_{2.5} 懸浮顆粒物對人類 ARPE-19 細胞



及 CG1629 細胞(圖 4)所產生之活性氧分子(reactive oxygen species, ROS)量與控制組並無差異。此顯示乾燥潔淨轉輪系統操作工作人員在短期操作期間其所暴露之 PM2.5 並不會對眼睛及皮膚產生明顯之氧化壓力累積效應。乾燥潔淨轉輪系統運轉前後收集之 PM2.5 懸浮顆粒物對人類 ARPE-19 細胞及 CG1629 細胞所產生之 IL-6、IL-8 和 NF-kB 發炎因子蛋白表現量與控制組雖略有上升或下降之現象,但均統計之顯著差異(圖 5)。此顯示乾燥潔淨轉輪系統工作人員在短期操作期間其所暴露之 PM2.5 並不會對眼睛及皮膚細胞產生明顯之發炎效應。乾燥潔淨轉輪系統運轉前後收集之 PM2.5 懸浮顆粒物對正常 BEAS-2B 細胞所產生之 ZO-2 和 AAT 發炎因子蛋白表現量與控制組雖略有上升或下降之現象,但均統計之顯著差異(圖 6)。此顯示乾燥潔淨轉輪系統工作人員在短期操作期間其所暴露之 PM2.5 並不會對眼睛及皮膚緊密連接蛋白產生影響,因此其對屏障之破壞風險並不高。此外,乾燥潔淨轉輪系統工作人員在短期操作期間其所暴露之 PM2.5 亦不會對眼睛及皮膚 AAT 蛋白產生影響,因此其對眼睛及皮膚疾病之誘發風險並不高。

一、研發成果之重要貢獻

本研究工作內容為進行乾燥潔淨轉輪系統操作之氣體排放監測及排放懸浮顆粒物之生物體外(in vitro)毒性檢測。研究結果顯示除濕輪乾燥系統運作並不會對人體眼睛及皮膚健康產生顯著之危害風險。

二、學術成就方面

本研究成果目前正規畫投稿至國內及國外研討會共發表國內外研討會。

參、展望



本研究結果顯示乾燥潔淨轉輪系統運作並不會對人體眼睛及皮膚產生危害風險。綜合本團隊近兩年之研究成果顯示乾燥潔淨轉輪系統運作所產生之尾氣排放顆粒物對人體之健康危害風險極小，此顯示其在乾燥應用上應可降低傳統設備可能對人體健康之危害。未來將可繼續結合實廠運作進行生物危害風險評估，藉以加強乾燥潔淨轉輪系統取代傳統設備之說服力。

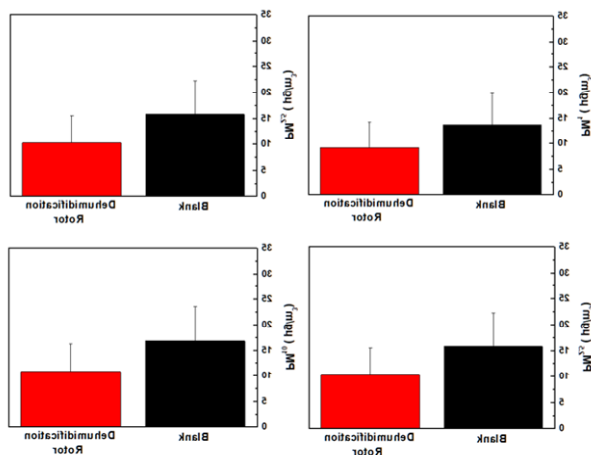


圖 1. 排放尾氣之成分

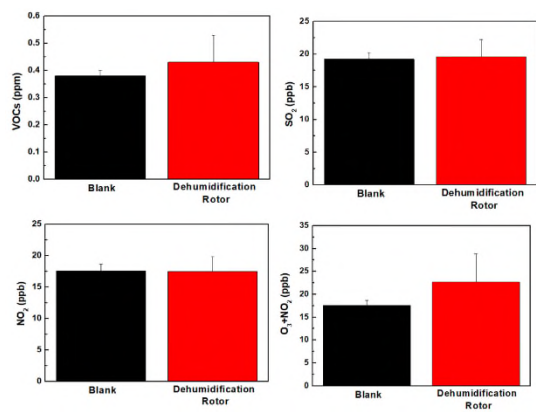


圖 2. 排放尾氣之粒狀物濃度

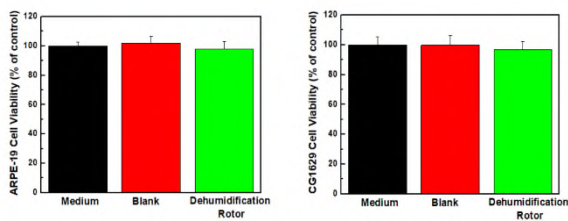


圖 3. PM_{2.5} 懸浮顆粒之細胞毒性效應

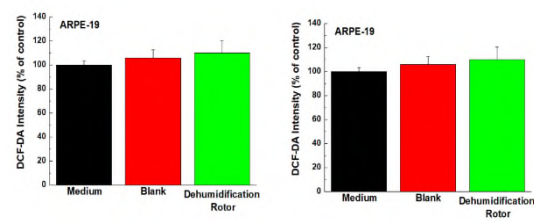


圖 4. PM_{2.5} 懸浮顆粒之細胞氧化壓力

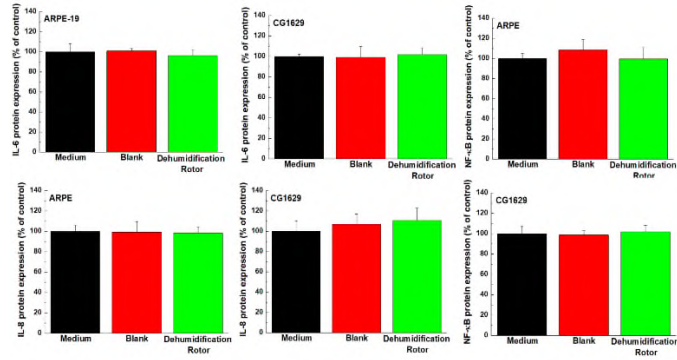


圖 5. PM2.5 懸浮顆粒之細胞發炎因子表現量

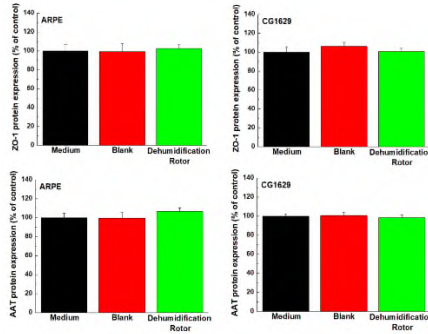


圖 6. PM2.5 懸浮顆粒之細胞 ZO-2 與 AAT 表現量



固體靶站設備操作虛擬實境之使用者互動介面優使性評估報告

User Interaction Interface Usability Evaluation Report for the Operation of Solid Target Station System Using Virtual Reality

(計畫編號：NL1110722)

鄭來宇¹ 楊智偉² 黃仲毅³

^{1,2}致理學校財團法人致理科技大學 ³核能研究所

迴旋加速器固體靶站的運作及維護存在高輻射、高電壓、高溫等危險因素，上述多種風險在現場訓練過程皆難以避免，因而建置虛擬實境訓練平台，使工作人員得以在無風險之虛擬實境環境中，進行固體靶站設備操作之教育訓練。本文說明固體靶站虛擬實境訓練平台建置過程需考量之要素，並提供腳本、分鏡表等虛擬實境建置過程不可或缺材料之範本，最後提供訓練平台之成效評估要點及方法。期許本平台之建置能作為未來虛擬實境技術拓展之墊腳石，本文提供技術傳承之範例及後續平台精進之參考。

It is challenging to prevent dangerous factors like high radiation, high voltage, and high temperature during on-site training when operating or maintaining the cyclotron solid target station. Therefore, there is a need to build a virtual reality training platform, providing a risk-free virtual reality environment for workers to conduct education and training on operating solid target station equipment. This article explains several factors considered along the process of building a solid target station virtual reality training



platform, and provides several material templates such as scripts and storyboards indispensable for virtual reality designing. Lastly, the crucial points and methods for evaluating the effectiveness of training platform are presented. Hopefully, this platform can serve as a stepping stone for the promotion of virtual reality technology and this article becomes a good example of technological inheritance and reference for future platform enhancement.

壹、計畫目標

原子能委員會核能研究所(以下簡稱本所)TR30/15 迴旋加速器自民國 82 年開始運轉，可以說是國內發展核醫領域的重大投資設備，其中用於照射生產醫用放射性同位素使用固體靶站照射，所生產醫用同位素由本所核醫藥物產銷中心製成核醫藥物提供國內各醫院使用。

而固體靶系統生產的過程中，常會遇到故障情形導致製程中斷，面臨數小時、數天的停機維護。當狀況產生導致藥物無法照射生產，作業人員必須儘快復原，若因製程延誤無法及時出貨給醫院，將延誤病患就醫時機，威脅人民的生命安全。現場人員在製程面臨狀況時能第一時間作出正確的處理對於固體靶系統來說極為重要，也因此人員訓練上需下足功夫。

接續前節，迴旋加速器固體靶站的運作和搶修存在各種潛在危險，如高輻射、高電壓、高溫等，目前固體靶操作人員的訓練仍是以傳統方式，在實際訓練過程難免有人員劑量及暴露於危險環境之風險，且控制平台介面無法令學習者確實了解並連接平台顯示訊號與實際動作，只能依照厚重操作手冊內之繁瑣訊息判斷當前運作狀況。

因此，訓練平台建置之主要目的是開發一套固體靶站設備操作虛



擬實境訓練系統，以期未來能協助操作人員在減少暴露於危害的虛擬實境環境中進行固體靶站設備操作之教育訓練。同時，導入 3D 模型、剖面圖及爆炸圖等也能提供人員設備構造相關知識，協助靶梭傳送組件製作維護，有效降低卡靶的機率。新進人員得以早日熟習關鍵零組件性能，熟練操作人員亦可透過平台更精熟，達成合理抑低輻射劑量、技術傳承與永續經營之目標。

貳、重要成果

本計畫工作可分為兩大項，分別為 3D 模型製作及虛擬實境訓練程式開發，本計劃對院內之貢獻可列舉如下。

(一)精實人員訓練

院內現有訓練方式主要以口頭教學，學習者需憑想像來還原現場實際運作情形，無從得知實際運作情形，其中也包括許多長年經驗者。利用虛擬實境方式訓練可令新進人員快速理解照射作業運作流程，而資深研究人員亦可利用拆解各步驟，針對問題排除、情境模擬等研究方向改良現有流程或設備。

(二)強化運維技術

院內於固體靶系統之維護、替換長年依靠院外技術人員支援，近年同位素所大力培養技術人員以期達到院內自行運轉維護之目標，並以此為基礎規劃未來 70MeV 之技術人員。本研究製作之 3D 組件模型配合虛擬實境訓練動作展示可協助研究人員分析零件功能並改善，強化人員對機構運作熟悉度，配合另案開發之測試站，虛實整合作為技術展示、精進之墊腳石。

(三)培養自製開發能力



除訓練及運維外，虛擬實境展示之成果也可作為自製實體零組件之參考，透過虛擬實境瞭解組件模型設計動作後，可以此開發製作功能一致之備品、甚至更好之零組件取代品亦或各獨立運作系統。同樣想法可套用於未來擴充之其他系統，最終可培養自製零件技術，推廣為院內外服務項目之一。

參、展望

虛擬實境技術的自由、主觀、擬真及互動性可為使用者帶來身臨其境的感受，將其融入並活用虛擬實境訓練平台有優異的教育訓練效果，且為未來發展的一大趨勢。其中虛擬實境訓練方式應用於高風險工作訓練的成效更是無可匹敵，因其可以輕易模擬各種現實難以體驗的情境，且能夠讓學習者在安全、可控制及可測量的環境中重複進行探索、學習，為最適合本研究主題之訓練方式。

本研究以迴旋加速器固體靶站虛擬實境訓練平台為例說明虛擬實境訓練平台之建置過程，包括初期考量構想、文字腳本流程建立、分鏡表建立、訓練程式成效評估手段要點等。基於建置的虛擬實境系統，往後可以考慮於系統中結合導覽功能、統整更多廠房系統或結合測試站系統開發擴充實境(AR)、混合實境(MR)等多個研究發展方向。

虛擬實境訓練程式經不斷的改進、擴充後能有無限的發展空間，以本文中所提的建置過程為鏡，可使未來的虛擬實境開發者站在巨人的肩膀上，替團隊發掘虛擬實境的更多可能性。



圖 1、固體靶系統 3D 模型

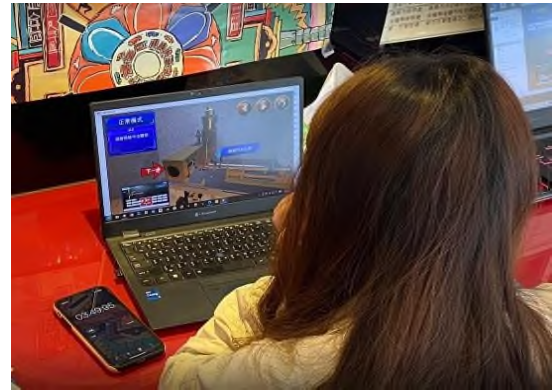


圖 2、虛擬實境程式實際使用情形



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





目 錄

場次 9&10：環境能源科技領域- 1

※分散式區域電網之電壓穩定策略研究.....	1
※配電饋線三相負載變動與不平衡改善之策略研究.....	7
※分散式電源之饋線電驛最佳化協調策略研究.....	15
※配電資訊模型系統傳輸最佳化之研究.....	21
※微電網支援配電饋線運轉之研究.....	27
※微電網三相多電源併聯與調頻之研究.....	33



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





分散式區域電網之電壓穩定策略研究

Studies on Strategies for Voltage Regulation in Area Power Grid with Distributed Generation

(計畫編號：112A013)

洪穎怡¹ 凡希凱¹ 葉進男²

¹ 中原大學電機系 ² 國原院

太陽能 and 風能等再生能源在電網的運用已經愈來愈普及，這些再生能源可以來自大型發電案場或家庭中的小型發電設施，因此導致了電網的分散化。以往傳統電網依賴於單一的大型電力發電業者，而再生能源發電則存在於電網中的多個較小的能源系統。目前透過微型電網，一個小型區域電網可以自行發電，也可連接到主要大電網以買賣多餘的電力。然而，具分散式電源的區域微型電網之間的交易是一項極具有挑戰性的任務，由於沒有單一的電力供應商來管理交易，一天之內可能會發生多筆交易，同時多個賣家的存在使交易流程更加複雜化。區域微型電網可以相互聯接形成互聯微型電網，其穩定性比單個微型電網更高，這也意味著系統內有更多的賣家和買家需要管理。本研究提出一個基於區塊鏈的能源管理系統來處理互聯微型電網內的交易行為。使用 IEEE 33-bus 配電系統的測試案例，並將其分成三個區域微型電網，使得這些微型電網既可以獨立運轉，也可以以網路化的方式互聯，相互提供能源支持。本計畫使用數位孿生來建立系統中的分散式電源模型，用於驗證區塊鏈網路的交易。區塊鏈網路的記錄包含系統內每小時讀數以及故障等系統干擾數據。本計畫使用 OPAL-RT 即時數位模擬器的 Simulink 模型建立



24 小時的模擬系統。本計畫使用長短期記憶 (LSTM) 設計電池控制器的硬體迴圈模擬，可減輕系統故障影響並回傳給區塊鏈網路。區塊鏈網路為使用 Python 與 Solidity 在以太坊虛擬機 (Ethereum Virtual Machine, EVM) 上開發且部署在私有 Ganache 區塊鏈平台上。

Renewable energy sources such as solar and wind energy are becoming more common in the power grid. These sources can be produced from large- scale farms or smaller generators found in households. This has led to the decentralization of the power grid. While the traditional power grid relied on a single large power producer, this new approach to energy production relies on multiple smaller sources across the grid. Microgrids now became possible, where a small community (area) can produce power on its own or even connect to the main grid for buying or selling excess power. Trading between multiple areas (microgrid) with distributed generators (DGs) however is a challenging task, since there is not single supplier of electricity that manages the transactions. Multiple transactions can happen throughout the day and the presence of multiple sellers makes the process even more complex. Microgrids can also connect to one another to form a networked microgrid, which provides even more stability than a single microgrid. However, this also means that there are more sellers and buyers within the system that have to be managed. This study presents a blockchain-based energy management system to process transaction within the system. A test case using the IEEE 33-bus system is modified and separated into three microgrids is considered. These microgrids can operate independently or can interconnect in a networked mode that can provide energy support to each



other. Digital twin models are created for the DGs in the system and are used for verifying transaction in the blockchain network. Records in the blockchain network include hourly readings within the system as well as system disturbances such as faults. A 24-hour simulation is created using a Simulink model running on an OPAL-RT digital simulator that runs in real-time. A hardware-in-the-loop simulation using a long short-term memory (LSTM) controller for a battery is designed to mitigate system faults and notify the blockchain network of the event. The blockchain network is developed on an Ethereum Virtual Machine (EVM) using Python and Solidity, deployed on a private Ganache blockchain platform.

壹、計畫目標

微型電網具有對電力中斷的恢復能力，為區域電網提供出售多餘電力的機會，以及與其他微型電網互聯的優勢，從而建立一個與大型集中式電網具有相同穩定性水平的系統。與集中式電力系統相比，維持區域微型電網的穩定性更加困難，因為較小的發電機在系統內更易產生突發狀況，造成在能源市場上的賣家增加使電力交易更形困難。

此研究使用數位孿生(Digital Twins)與區塊鏈(Blockchain)網路來解決上述問題。數位孿生用於即時監控微型電網，而區塊鏈則記錄所有交易。研究的具體目標如下：

1. 開發在電力系統中使用數位孿生的階層系統
2. 以區塊鏈網路處理數位孿生
3. 使用 Simulink 建立電力系統的即時模擬



4. 透過硬體迴圈模擬實現數位孿生系統

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

(一) 雙向 DC-DC 轉換器結果

將所提出的控制器與 PI 和 FLC 等其他傳統控制器進行了測試比較。假設微型電網發生 3 週期短路故障，交流電網電壓下降至公稱值的 10%。本計畫用均方根誤差(RMSE)值於比較每個控制器性能的指標。RMSE 值越低表示效能越好，R2 值越接近 1 越好。在這兩種情況下，線上調整的 LSTM 控制器都顯示出最佳的效能，比較結果如表 1 所示。

(二) 數位孿生區塊鏈模擬結果

區塊鏈界面與數位孿生模擬同步進行，這部分的結果取決於 Simulink 和此處記錄的數位孿生輸出。區塊鏈的作用是初始化系統並啟用微型電網之間的交易，然後記錄系統內的所有事件，例如每小時測量和故障發生。

Ganache 中僅顯示交易雜湊(Hash)函數、發送者地址、接收者地址以及建立和驗證合約的成本(以 Gas 表示)。這可以防止任何未經授權的使用者存取記錄。只有 DSO 允許的參與者才能檢查記錄，即 DSO 和網路中的微型電網。

這些數位孿生在 Python 與 Simulink 程式同時運作，即時運行 24 小時模擬來測試數位孿生。數位孿生輸入的測量數據每隔 1 小時採集一次並發送到區塊鏈網路。使用 Python 程式建立的神經網路模



型，將 Simulink 的實際功率讀數與數位孿生估計輸出進行比較，微型渦輪發電機結果如圖 1 所示。

二、學術成就方面

已投稿國際期刊: Y.Y. Hong, F.I. Alano, Y.D. Lee, J.L. Jiang and J.N. Yeh, “Digital Twin-Based Blockchain for Power Support in Networked Microgrids,” submitted to IEEE Access.

參、展望

本計畫提出了一種基於數位孿生和區塊鏈的系統，用於促進互聯微電網之間的電力交易。該研究探討了各種情景，包括 24 小時、15 分鐘和 10 秒的模擬，以驗證所提方法的不同功能。在 24 小時模擬中，區塊鏈成功記錄了每小時的交易，採用了與數位孿生相結合的修改後的 PoS 共識演算法。15 分鐘的模擬測試了故障檢測和競價功能，展示了區塊鏈通過競標過程促進微電網之間的電力支援並記錄故障詳情的能力。

此外，硬體驗證證實，線上調整的 LSTM 控制器能夠在微電網中保持穩定的電壓，優於其他現有的控制器。未來的研究將集中於利用邊緣計算設備和 AIoT 技術開發其他先進的基於深度學習的控制器，以增強微電網在嚴重突發情況下的穩定性；此外，還將探索靈活的深度學習控制器設計，以解決不平衡故障問題。



表1 每個控制器的 RMSE 和R2 值

控制器種類	RMSE	R2
PI	0.59314	0.77523
FLC	0.39599	0.90028
LSTM 無在線調整	0.38083	0.91210
具在線調整 LSTM	0.05509	0.99816

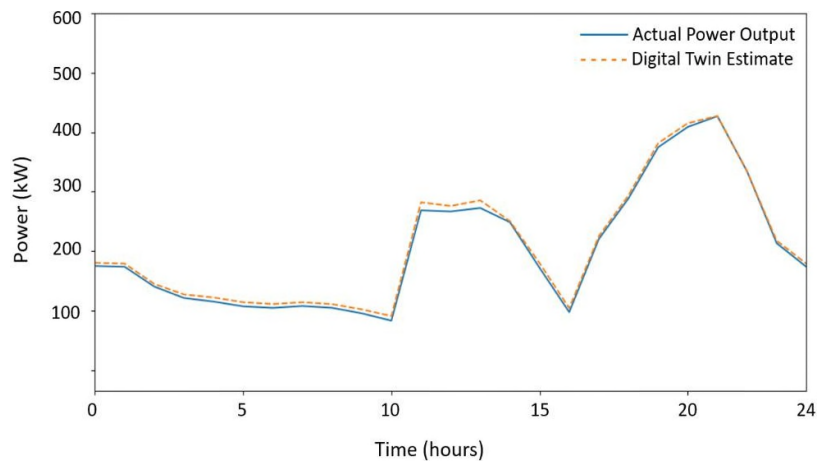


圖1 微型電網 A 的微型渦輪機數位孿生和實際功率輸出比較



配電饋線三相負載變動與不平衡改善之策略研究

Study on Three-Phase Unbalance Improving Strategies Considering Load Variations of Distribution Feeders

(計畫編號：112A010)

¹黃維澤、¹林韋辰、¹蕭耀賢、

²李奕德、²姜政綸、²張博荃、²何元祥

¹國立彰化師範大學 ²國家原子能科技研究院

為因應現代配電網負載變動與不平衡問題，本計畫建立區域配電網三相負載平衡最佳化模擬平台。在配電自動化架構下可從配電調度中心(DDCC)與饋線調度中心(FDCC)獲得匯流排電壓、線路電流、實功、虛功，與饋線元件等資料，使電網資訊掌握度愈趨完整。故本計畫以實際配電網資訊建立饋線模型，再調整饋線之負載抽接點相別以改善三相不平衡問題，進而降低電壓與電流不平衡率、零序與正序電壓不平衡率、中性線電流、線路損失，提高饋線電力品質。本計畫將台電區域電網資料以及歷史負載資料以程式語言轉換為配電系統模擬開源工具 OpenDSS 檔案，透過 API 進行饋線拓樸調整並獲得正常運轉與非正常運轉之三相電力潮流，搭配最佳化演算法求解最佳三相負載最適配置，研究成果有助於改善目前配電網併入分散式資源後之三相不平衡程度。

To address the issues of load variations and imbalance in modern



distribution systems, this project aims to establish a simulation platform for optimizing three-phase load balancing in regional distribution networks. Based on distribution automation, comprehensive data such as bus voltages, line currents, active power, reactive power, and feeder elements can be obtained from the Distribution Dispatch and Control Center (DDCC) and the Feeder Dispatch and Control Center (FDCC), resulting in a more complete understanding of the power grid. Therefore, this project utilizes practical distribution network information to create a feeder model. The load tapped-off points are then adjusted to improve three-phase imbalance issues, consequently reducing voltage and current imbalances, zero-sequence and negative-sequence voltage imbalances, neutral line currents, line losses, and enhancing feeder power quality. This project involves converting the Taiwan Power Company's regional grid data and historical load data into OpenDSS files, a distribution system simulator, using the Python programming language. The circuit topology adjustments are performed through an API, obtaining three-phase power flow under normal and abnormal operating conditions, and employing optimal algorithms to solve for the optimal three-phase load arrangement. The outcomes are helpful for improving the unbalanced conditions of distribution networks after the interconnection of distribution energy resources.



壹、計畫目標

本計畫研究在分散式電源與負載組合之配電饋線下，如何改善三相不平衡。首先，蒐集國內外之相關文獻，並探討傳統、現代，以及先進之相位調整方法。為了應用在實際電網中，本研究蒐集由配電調度中心(DDCC)與饋線調度中心(FDCC)之饋線實際量測負載、饋線拓樸、變壓器相別與接線等資料進行饋線建模，並建立配電饋線之分散式能源與負載統計模型，以利分析三相不平衡改善前後之淨負載特性，亦可簡化潮流解析時間。接著，在不同拓樸架構下進行電力潮流解析，並分析不同架構下三相不平衡率。最後，研擬配電饋線三相不平衡改善之目標式，以高性能且快速求解之群體智能演算法進行負載抽接點之相位重新配置，以改善三相不平衡改善，所提出之方法預期可改善配電饋線之三相電壓不平衡率、零序電壓不平衡率、負序電壓不平衡率、降低中性線電流、線路損失等。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

過去電力公司往往依循報表人工調整負載抽接點之相位配置。現今配電系統資料愈趨完整，故本計畫透過 DDCC 取得之負載與相位資料，結合演算法改善台電三相不平衡問題。台電常見之配電變壓器模型，分別為單相兩線式、單相三線式、三相三線式 U-V 接、三相四線式 U-V 接、三相三線式 Y 接，以及三相三線式 Δ 接。其中單相與 U-V 接變壓器為三



相不平衡之主因。三相電壓不平衡率是指電力系統之三相電壓大小值不相等或者相位差非 120 度，以前者而前，可計算三相電壓不平衡率(Three-phase voltage unbalance ratio, TPVUR)，後者考慮到大小值和相位差，使用對稱成分計算不平衡率，包含零序電壓不平衡率(Zero-sequence voltage unbalance ratio, ZSVUR)與負序電壓不平衡率(Negative-sequence voltage unbalance ratio, NSVUR)。為了改善配電系統三相不平衡率，本研究將調整負載抽接點相別配置，單相共有 3 種接法；兩相變壓器通常為 V-V 或 U-V 接或者兩台單相變壓器，共有 3 種接法；三相變壓器則共有 6 種接法。此外，除了將兩相負載抽接點相別對調外，也可能將兩相都接到較輕載之相別。本研究採用群體智能演算法，每個個體代表著每個負載抽接點的組合型式，如圖 1 所示，目標函式為最小化三相不平衡指標，經迭代收斂後求得較佳解或次佳解，如圖 2 所示。以饋線 XC31 為例，模擬時段為 111 年夏月白天平均負載。採用灰狼演算法(GWO)進行最佳化演算，目標函數為最小化三相電壓不平衡率。圖 3 至圖 7 分別呈現相別調整前後饋線最大三相電壓不平衡率、最大零序電壓不平衡率、最大負序電壓不平衡率、出口最大中性電流、最大三相電流、線路總損失。

表 1 彙整針對 4 種改善三相不平衡指標之最佳化結果，對於電網運轉者而言，可依據饋線所面臨的問題，從本研究所開發之模擬平台(圖 9)



選擇饋線、時段、最佳化目標等執行模擬，而不需以人工方式調整變壓器相別。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文各一篇

(一) 蕭權賢、黃維澤、林韋辰、李奕德、姜政綸，”應用 SAC 於微電網日前排程之研究”，第四十四屆中華民國電力工程研討會暨第二十屆台灣電力電子研討會，台北市，2023 年 12 月。

(二) Lin, W.-C.; Hsiao, C.-H.; Huang, W.-T.; Yao, K.-C.; Lee, Y.-D.; Jian, J.-L.; Hsieh, Y. “Network Reconfiguration Framework for CO2 Emission Reduction and Line Loss Minimization in Distribution Networks Using Swarm Optimization Algorithms.” in *Sustainability* 2024, 16, 1493. <https://doi.org/10.3390/su16041493>

參、展望

本計畫依據所擬定目標與工作項目，以實際運轉資料，開發配電網最佳相位配置模擬平台，提供饋線運轉者一套較具系統性之模擬分析工具，改善饋線三相不平衡率等，亦提供清晰之報表、拓樸負載曲線等，具實務應用之價值。

表 1、模擬結果彙整

	原始 數值	最佳化數值			
		目標最小 TPVUR	目標最小 ZSVUR	目標最小 NSVUR	目標最小 中性電流
TPVUR	0.26 %	0.06 %	0.10 %	0.14 %	0.12 %
ZSVUR	0.29 %	0.11 %	0.06 %	0.16 %	0.11 %
NSVUR	0.24 %	0.07 %	0.06 %	0.03 %	0.09 %
中性電流	27 A	5 A	7 A	7 A	3 A
線路損失	15.2 kWh	13.4 kWh	13.2 kWh	13.5 kWh	13.7 kWh

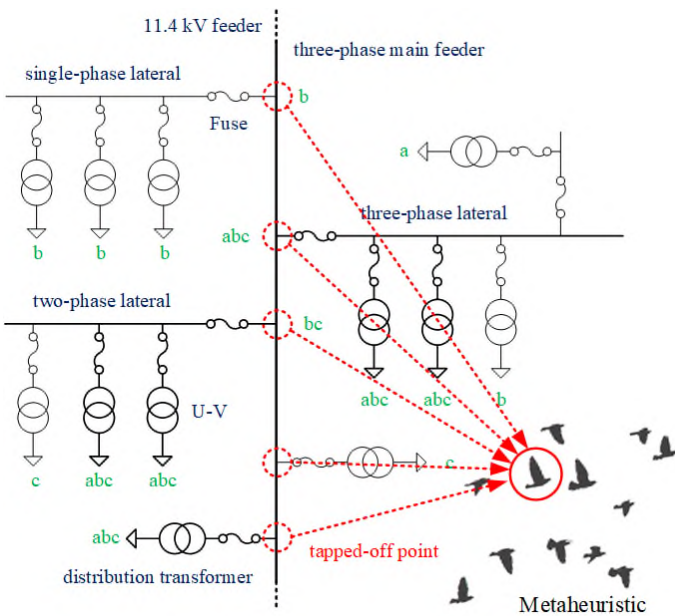


圖 1、群體智能演算法應用於相位配置

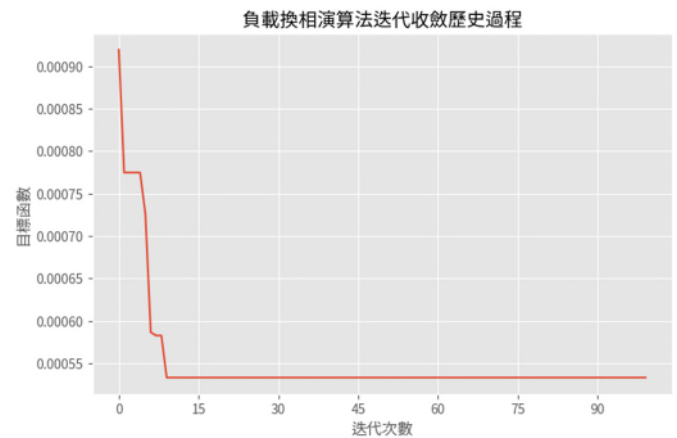


圖 2、灰狼演算法迭代過程

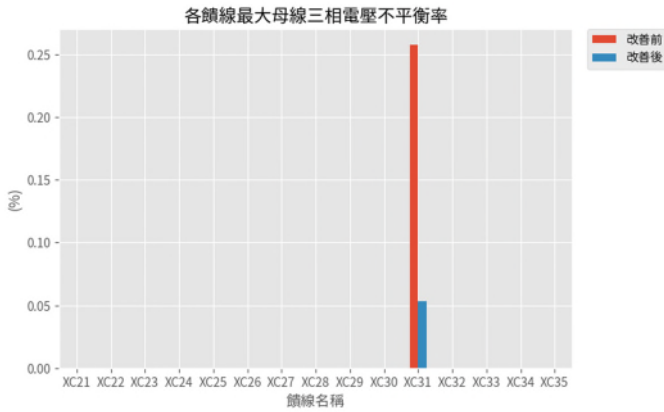


圖 3、最大三相電壓不平衡率

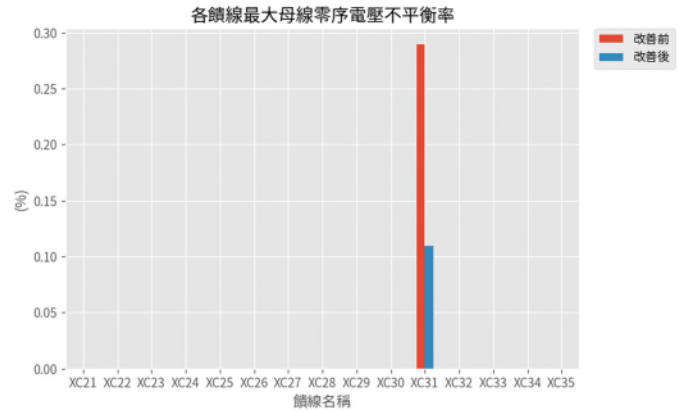


圖 4、最大零序電壓不平衡率

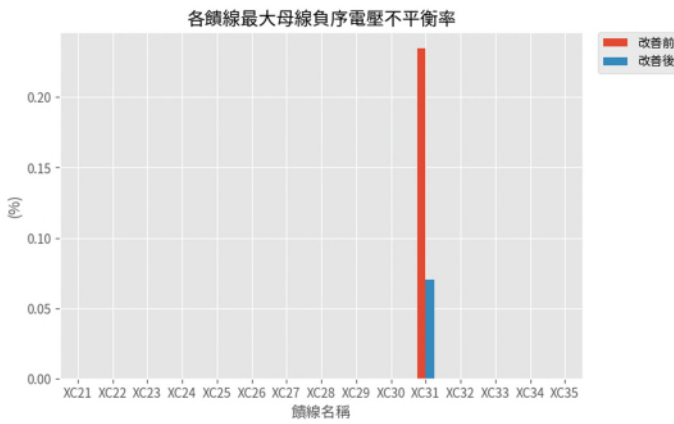


圖 5、最大負序電壓不平衡率

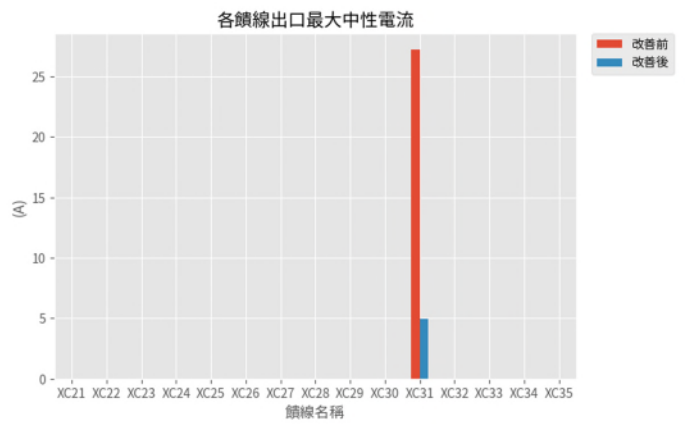


圖 6、最大中性電流

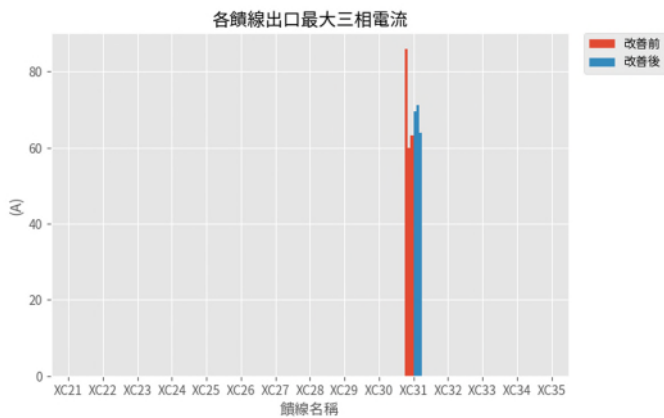


圖 7、最大三相電流

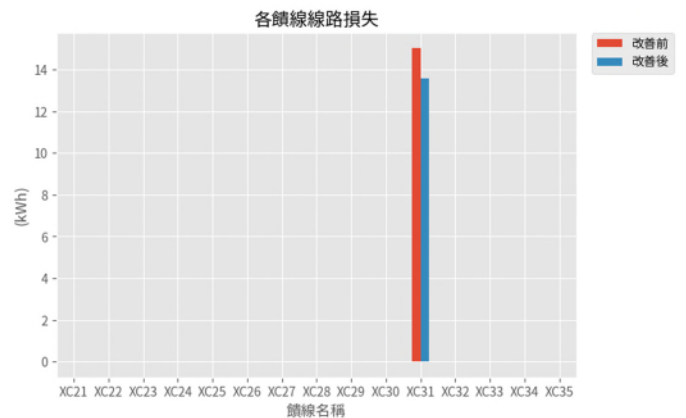


圖 8、總線路損失

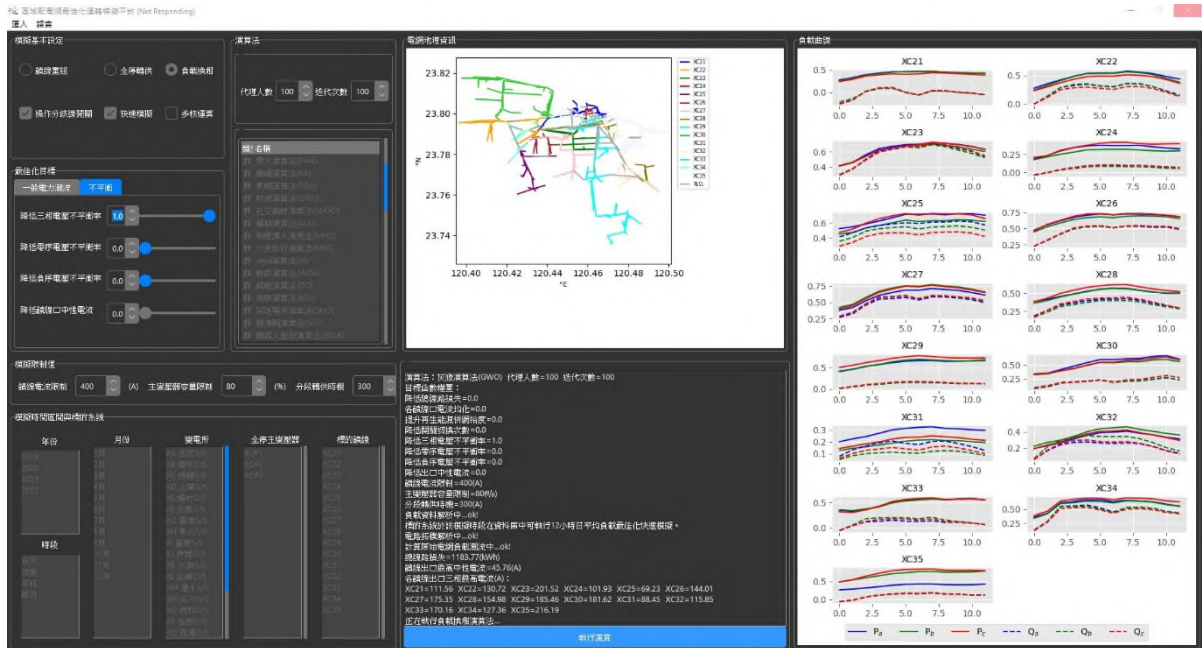


圖 9、模擬平台介面



分散式電源之饋線電驛最佳化協調策略研究

Study of Optimal Feeder Protection Relay Coordination Strategy with Distributed Power Generation

(計畫編號：112A0011)

蘇俊連 詹東昇

國立高雄科技大學電機工程系

本計畫提出以改良式粒子群優化 (Modified Particle Swarm Optimization, MPSO) 演算法應用於求解考慮分散式能源併網之過電流保護電驛 (Over Current Relay, OCR) 協調策略，透過追蹤系統結構的連接性形成追蹤路徑集合，將電驛保護協調問題以建模為最小化所有保護電驛動作時間 (Operation Time, OT) 之總和，並將受到協調時間間隔 (Coordination time interval, CTI) 的限制。不同的保護電驛動作時間總和將代表不同的保護電驛的時間乘數設定值 (Time Multiplier Setting, TMS) 與始動電流設定值 (Pickup Current setting, PCS) 的適應度，並應用 MPSO 求解此一最佳化保護協調問題。計畫中將以含有多個分散式電源之配電系統為測試案例，顯示所提出的 MPSO 算法成功求解出最佳的 TMS 與 PCS 設置組合，降低整體 OT，並減輕了 DG 加入系統後對保護協調設置的影響，測試案例中針對本計畫所提出的 MPSO 與其他元啟發式人工智慧的隨機搜尋算法進行測試與比較，凸顯所提出之演算法具有更好的效率和性能。



This project introduces the application of Modified Particle Swarm Optimization (MPSO) algorithm to solve the coordination strategy of Over Current Relay (OCR) considering distributed energy integration. By forming a set of tracking paths through the connectivity of the system structure, the OCR coordination problem is modeled as minimizing the summation of all protection relay operation times (OT), while considering the constraint of coordination time interval (CTI). The total sum of different protection relay operation times will represent the fitness of various Time Multiplier Setting (TMS) and Pickup Current Setting (PCS) values. The Modified Particle Swarm Optimization (MPSO) algorithm is then applied to solve this optimization problem for protection coordination. The project will use a distribution system with multiple distributed energy resources as a test case to demonstrate the successful solution of the optimal TMS and PCS settings by the proposed MPSO algorithm. This will reduce the overall OT and mitigate the impact on protection coordination settings caused by the addition of distributed generation (DG) to the system. In the test case, the MPSO proposed in this project will be tested and compared with other metaheuristic artificial intelligence random search algorithms, highlighting the superior efficiency and performance of the proposed algorithm.

壹、計畫目標

本計畫針對中低壓配電系統併接分散式電源後之電驛保護協調議題進行整合性的研究：

(一)研析針對饋線架構改變與分散式電源併網後電力系統保護協調策略



相關文獻。

- (二)蒐集與檢討測試饋線所使用之保護電驛相關參數與設定值的適用性，有助於確保現有保護設置的有效性，並根據需要進行調整。
- (三)研析分散式電源併網對電驛設定策略的影響，以及研究當系統故障時實施饋線轉供後的電驛保護協調設定衝突情況，並歸納相關的調整法則。這將有助於解決饋線轉供時可能出現的保護設置衝突，確保系統的可靠運行。
- (四)研提出一套考慮分散式電源併網之最佳化電驛設定策略，建立其最佳化演算法模型、並進行模擬、驗證策略之可行性，這將有助於確定最佳化策略的有效性，並提供未來系統設計和優化的參考依據。
- (五)完成國際會議論文、SCI 期刊論文之發表。

貳、重要成果

本計畫針對考慮分散式電源(DG)併網對於中壓 (MV) 配電系統電驛保護協調之影響議題進行研究，透過各種模擬分析後，將保護協調視為一最佳化問題模型，並應用啟發式人工智慧隨機搜尋法求解最佳保護電驛協調參數設定值。

一、本研究之成果簡述如下：



- (一)本計畫利用 ETAP 電力分析軟體建構配電系統網路，分析、驗證並歸納出分散式電源(DG)併網以及饋線轉供後，導致電驛保護協調失序的原因。
- (二)本計畫提出適應性電驛設定(調整)最佳化策略，將電驛保護協調視為一最佳化問題模型，以最小化系統總電驛動作時間 OT 為目標，並在同時考量電驛 TMS 與 PCS 參數設定之實際上/下限制值、主/後衛保護電驛之 CTI 限制，應用啟發式人工智慧隨機搜尋法 PSO 求解最佳化問題。
- (三)本計畫將配電系統劃分為主饋線路徑和支線路徑，提出以追蹤路徑的概念，每個追蹤路徑集合中包含安裝在傳輸線上之電驛編號，在利用每個電驛不同的 TMS 與 PCS 參數組合，計算該電驛動作時間與各路徑之電驛操作時間之和。最後以最小化總電驛動作時間為目標函數，用以評估每個電驛在各個不同的 TMS 與 PCS 參數組合時之適合度，作為挑選之依據。
- (四)本計畫中進一步改良了 PSO 演算法易於提早收斂至區域最佳解的缺點，提出改良式 PSO 演算法，該演算法其具有可自動調整之區域自我認知和群體運作機制(Adaptive Self-cognition and Society Operation Scheme, ASSOS)，稱之為 MPSO-ASSOS 演算法，並用於求解追蹤路



徑上每個電驛的 TMS 與 PCS，並確保 TMS 與 PCS 能符合不等式限制的約束，以及主/後衛保護電驛之 CTI 要求。

- (五)本計畫將所提出之最佳化模型與演算法應用於實際的饋線系統中，完整測試所提出方法的可行性。模擬結果表明，所提出的 MPSO-ASSOS 降低了總體 OT，並克服了不同 DG 併網條件下對於系統電驛保護協調設置的影響。

二、論文投稿

本計畫之研究成果共計投稿 SCI 論文 1 篇與國際研討會 1 篇，如下：

(一)期刊論文

Tung-Sheng Zhan, Chun-Lien Su, Yih-Der Lee, Jheng-Lun Jiang and Jin-Ting Yu (2023, Nov.). Adaptive OCRs Coordination in Distribution System with Distributed Energy Resources Contribution. AIMS Energy, 11(6). (DOI: 10.3934/energy.2023058) (IF. 1.8, SCI).

(二)研討會論文

Tung-Sheng Zhan, Chun-Lien Su, Yih-Der Lee and Jheng-Lun Jiang (2023, Oct.). An Adaptive OCR Coordination in Distribution System with DGs Contribution. Proceeding of 2023 International Conference on Artificial Intelligence and Power Engineering (AIPE 2023), Tokyo, Japan.



參、展望

網際網路與通信科技蓬勃興起，帶動資訊與通信科技（Information and Communication Technology，簡稱 ICT）發展，台灣目前 ICT 技術成熟，舊有的機械式 OCR 皆已替換為數位型 OCR。這些 OCR 可以通過電信或無線技術連接，使中央控制中心能夠透過即時通訊的方式，調整 OCR 的最佳 TMS 與 PCS 之設置，這樣的技術升級和系統優化將有助於提高系統對電驛協調的靈活性和效率。因此，為因應中低壓配電系統未來將有高佔比之分散式電源併入，將可嘗試提出保護電驛即時調整決策系統，在各種不同的網路結構與分散式電源供電佔比下，透過即時運算或人工智慧即時決策系統，動態調整 OCR 之 TMS 與 PCS 之設置，以避免電驛保護協調失序，造成不必要的停電狀況發生，提高系統可靠度。



配電資訊模型系統傳輸最佳化之研究

Study of Data Exchange Optimization for Common Information Model

(計畫編號：112A012)

辜德典¹ 林嘉宏¹ 陳朝順² 蔡坤霖¹

¹國立高雄科技大學電機系 ²義守大學電機系

本計畫針對共同資訊模型(Common Information Model, CIM)之資料傳輸，分析簡式物件存取通訊協定(Simple Object Access Protocol, SOAP)與表現層狀態轉換(Representational State Transfer, RESTful)傳輸差異，建立其 CIM 之傳輸系統架構，並以 SOAP 與 RESTful 所提供之應用程式介面(Application Programming Interface, API)完成不同系統之資料介接，並針對其資料存取分析關聯性(Structured Query Language, SQL)與非關聯性(Not Only SQL, NoSQL)資料庫(Database)之架構及差異性，以提出提升 CIM 之資料交換及存取效能之方法。另一方面，針對配電變壓器之運轉維護，本計畫亦應用 CIM 進行設備管理，同時根據提供之即時數據資料，分析大量再生能源對配電變壓器之影響，並以視覺化方式進行呈現，有效達到配網端設備之資訊收集與交換，進一步達到配電設備資產管理之應用功能。

The aim of this project is to analyze the differences between simple object access protocol (SOAP) and the representational state transfer (RESTful) for the common information model (CIM). The SOAP and RESTful are used to exchange data and verify their performance in the



proposed data exchange architecture. The application programming interface (API) of SOAP or RESTful is used to exchange data for different systems and record data sets in the database. The structured query language (SQL) and not only SQL (NoSQL) databases are selected for the comparisons of the access performance. Besides, the CIM is also used for the operation and maintenance of the distribution transformers. The real-time information of CIM is used to analyze the impact of distribution transformers and display the status of the distribution transformers on the graphic user interface (GUI) when high-penetration renewable energy is installed in the distribution system. Finally, the proposed data exchange architecture with database method collects and exchanges data between facilities to achieve the asset management of the distribution systems. ◦

壹、計畫目標

本計畫針對台電在雲林區處已佈建之變壓器末端單元(Transformer Terminal Unit, TTU)，以 CIM 規劃其資訊模型並執行饋線電壓監測，同時提出具可靠性之 SOAP 與 RESTful 訊息架構，確保 CIM 於資訊交換時之即時性與安全性。亦評估 SQL 與 NoSQL 資料庫在資料存取之性能，建構合適於 ADMS 使用之資料庫。最後以圖形化方式呈現配電變壓器運轉狀態，支援配電系統之智慧電網應用功能及配電設備資產管理。

貳、重要成果

一、CIM 之資傳輸與效能佳化分析

本計畫針對 CIM 之資料交換及存取方式提出最佳化測試，分為資料存取測試與傳輸測試。



(一)資料存取測試

資料存取測試之目的為評估不同資料庫在 CIM XML 格式存取方面的性能，依照比較兩種資料庫的平均獲取時間，選擇性能較佳之資料庫做後續測試之測試資料庫，其結果如圖 1 所示，由於 NoSQL 資料庫提供專門處理 XML 之資料庫，故在處理 CIM XML 格式上比起 SQL 資料庫顯得有更高的相容與速率。

(二)資料傳輸測試

資料傳輸測試為基於資料存取測試選定之資料庫，使用 RESTful 和 SOAP 兩種網路服務進行資料獲取和資料查詢測試。其流程為透過測試平台分別使用兩種網路服務發送獲取完整 CIM XML 格式與特定資料之請求，存取模組處理請求並從回傳所需之資料，最後記錄測試流程之耗時。其結果如圖 2、3 所示，因 SOAP 需要定義及解讀其服務並使用較為複雜的消息格式，而 RESTful 使用較為簡單的消息格式並支援較高的效能和可擴展性，因此 RESTful 相較更為高效。

根據上述之結果，得出 RESTful 網路服務搭配 NoSQL 資料庫進行資料傳輸與存取為最佳選擇方案，此結果相信將有助於提升配電系統資料交換的效能與降低其存取複雜度。

二、配電變壓器運維狀態與圖形化介面

(一)視覺化之關鍵參數

絕緣材料是配電變壓器正常運轉的關鍵。絕多數變壓器的故障原因是來自絕緣材料的劣化所引起，大約占 85% 以上。IEEE Std C57.91 針對油浸式變壓器進行了規範和壽命評估，說明絕緣老化是由溫度、溼度和氧含量組成的時間函數，其著重於考慮運行在繞組最熱點溫度



所產生的老化影響，本計劃將使用其作為變壓器健康之參考值。如公式(1)所示，該指南將繞組最熱點溫度 θ_H 對於絕緣壽命的影響以絕緣老化加速因子 F_{AA} 進行計算，而繞組最熱點溫度的變化則與負載量有關。

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\theta_H+273} \right]} \quad (1)$$

以再生能源替代傳統化石能源與核能發電，已成為我國政府明確的發展目標。再生能源所發出之電能多為直流電，必須透過逆變器轉為交流電才可以併入輸配電網路或轉為家庭用電。因為是透過逆變器進行交直流轉換，其所產生的諧波(Harmonic)可能會導致負載與設備產生多餘損耗及發熱，進而影響設備之安全性與系統運行效率。文獻(10)以公式(1)為基礎，針對諧波對負載與繞組最熱點溫度之影響進行推導與評估，結果如公式(2)所示。

$$\frac{\sum \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \cdot K_\theta + \sum h^2 \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \frac{P_{EC-R}}{K_\theta}}{1 + P_{EC-R}} \times [\Delta\theta_{H-R}]^{\frac{1}{m}} = \tau_H \frac{d\theta_H}{dt} + [\theta_H - \theta_{Oil}]^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

(二) 運維狀態圖形化介面

本計畫以 CIM 為基礎，以 Python 語言架設一圖形化介面，針對配電系統設備之運轉與維護狀態進行即時監控，達到便於維護人員監控與管理配電系統備之功能。此介面分為前後端兩個部分，前端部分負責即時運維狀態呈現與用戶操作響應，而後端部分則負責前端操作功能定義與連結 RESTful 網路服務端口進行需求處理。該圖形化介面含有負載資料與曲線、變壓器健康度示警等功能，如圖 4 所展示。

三、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文共 2 篇。

1. 辜德典、蔡坤霖、李勇賜、周哲宇、李奕德、姜政綸、曾興嘉、



詹振旻，「配電資訊模型系統傳輸最佳化之研究」，第四十四屆中華民國電力工程研討會暨第二十屆台灣電力電子研討會，2023年12月。

2. Te-Tien Ku, Chia-Hung Lin, Chao-Shun Chen, Yih-Der Lee, Jheng-Lun Jiang, Sing-Jia Tzeng, “A Distribution Static Synchronous Compensator Application to Mitigate Voltage Variation for Distribution Feeders,” MDPI Sustainability, 2023.

參、展望

為加速配電系統之智慧電網功能發展，未來之研究方向為：首先，增設更多量測設備，並使用 CIM 進行資料介接與交換，以降低交換複雜度且詳盡地監控配電系統設備。其次，對智慧電網中不同新穎設備的 CIM 模型進行建模與儲存，同時優化資料庫儲存結構與搜索方法。進一步地，建構配電系統設備管理系統，透過智慧電網與 CIM，實現更多設備監控與策略控制。最後，利用人工智慧(AI)優化配電系統設備管理方法與策略，以實現更輕鬆快速的設備運維狀態監控。

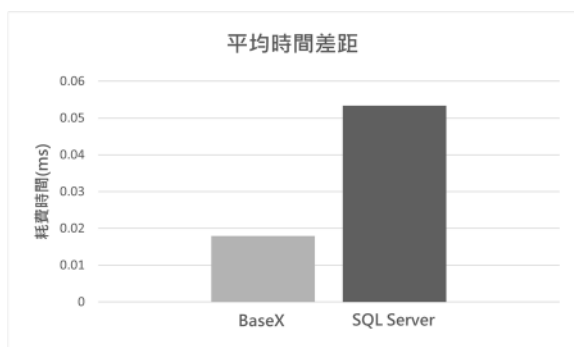


圖 1、資料庫存取測試時間差距圖

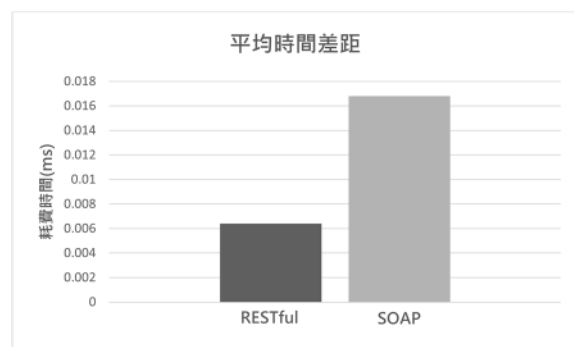


圖 2、資料獲取測試時間差距圖

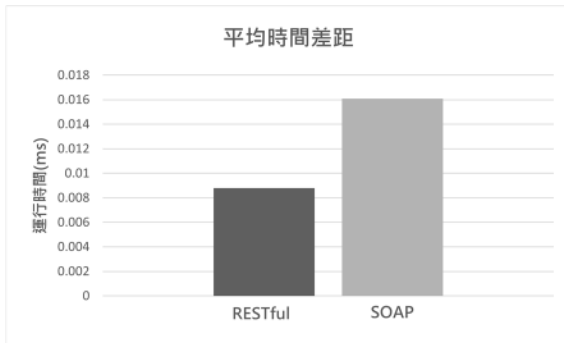


圖 3、資料查詢測試時間差距圖

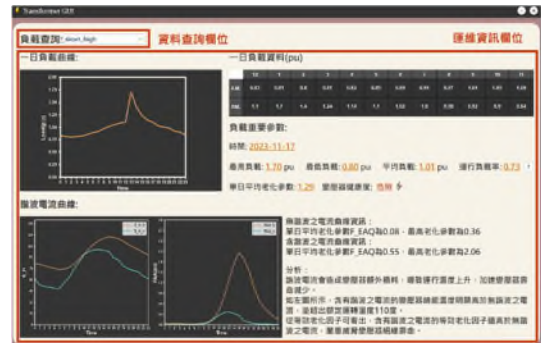


圖 4、運維狀態圖形化介面



微電網支援配電饋線運轉之研究

Study on Supporting Operation of Distribution Feeders by Microgrid

(計畫編號：112A014)

劉祐任¹ 郭宗翰¹ 郭育瑋¹ 鄭金展²

¹ 中正大學電機工程學系 ² 國家原子能科技研究院

面對大量再生能源整合至電網的挑戰，再生能源的間歇性影響了電力供需平衡的穩定性。為確保電力系統的穩定和安全，電網需要依賴新興能源設施技術，如微電網和儲能系統，以提供電網輔助服務功能。目前，透過台電的電力交易平台，各界人士可以作為提供者參與輔助服務，而參與者如何透過市場交易機制確保自身的最大利益也成為一個重要的研究課題。本計畫以國原院微電網系統及其相關能源設備作為研究對象，將參考台電輔助服務規定，建置 MW 級微電網之輔助服務模擬系統。該系統將用於進行補充備轉與調頻輔助服務之相關的模擬研究。本年度計畫主要研究內容包含(i)負載預測方法開發與建立具負載預測機制之補充備轉控制策略，並進行模擬分析；(ii)進行太陽能發電參與補充備轉之控制策略設計與模擬分析(iii)執行各種調頻備轉輔助服務(dReg0.25、E-dReg 及 sReg 等)之模擬與效益評估。

Facing the challenge of integrating a large amount of renewable energy into the power grid, the intermittency of renewable energy sources has impacted the stability of the grid electricity supply. To ensure the stability and



safety of the power grid, seeking advanced grid technologies, such as microgrids and energy storage systems, to provide more grid supporting services are paid more attentions. Currently, various stakeholders can participate as suppliers of ancillary services via Taipower's energy trading platform; meanwhile, how these participants can ensure their maximum benefits on energy market trading mechanisms has become an important research topic. This project focuses on the study of using NARI microgrid system to participate ancillary services. A megawatt-scale microgrid simulation system is developed and can applied to implement the simulation analysis of supplementary reserve and spring reserve. The main research goal of the project in this year include (i) to develop load forecasting method, and applied to implement supplementary reserve simulation with this load forecasting strategy. (ii) to design a control strategy that considers the participation of PV power in supplementary reserve simulation under night peak load period. (iii) to do simulation analysis of the operation of various spring reserves (sReg, dReg, and e-dReg) under NARI microgrid system and then makes the assessments on their performance.

壹、計畫目標

為了解決電力輔助容量來源不足的問題，台電透過設立電力交易平台來開放輔助服務市場，使得民間的電力設備資源可以參與提供輔助服務。本計畫以國原院微電網系統及其相關能源設備為研究對象，旨在探討微電網系統如何參與輔助服務並進行負載預測，以提供更有效的電力系統運營和管理。透過對微電網系統的研究，希望找到解決再生能源發電變動性帶來的挑戰的方法，同時提供穩定的輔助服務以支援整體電力系統的運作。透過對負載預測的研究，可以更準確地預測未來電力需求，並根



據預測結果調整微電網系統的運作，以確保系統在負載高峰期和低谷期都能夠穩定運行，這將有助於提高微電網系統參與輔助服務的效能，確保整體電力系統的穩定性。

貳、重要成果

本年度計畫旨在進行國原院微電網系統參與電力輔助服務之模擬研究，主要工作係在(1)開發負載預測方法，使幫助提升過往開發之補充備轉控制策略操作能力，讓負載預測機制加入執行補充備轉之模擬中；(2)研究太陽能發電參與補充備轉之議題，並完成具有太陽能發電之補充備轉控制策略；(3)執行三種調頻備轉(sReg、dReg 與 e-dReg)之模擬分析，透過價金計算評估其執行調頻服務之效益；同時，亦進行儲能容量升級之模擬，使看出容量提升後三種調頻備轉服務執行之效。

一、說明研發成果之重要貢獻

(一)負載預測模型開發

本計劃使用兩種深度模型架構作為訓練並進行預測，分別為長短期記憶(Long Short Term Memory)及門控循環單元(Gated Recurrent Unit)。前者，使用架構為 2 個 LSTM 層，1 個丟棄層(Drop Out)機率設置為 0.25 及 1 個全連接層(Fully Connect Layer)。Drop Out 層為在訓練過程中隨機丟棄一部份的神經元，其目的在於防止過擬合之情況發生，通過丟棄部分神經元的輸出，使神經網路不依賴單一特定神經元，以此減少過擬合的風險，及幫助神經網路學習到更多特徵或模式，以提高



泛化能力，而因隨機丟棄一些神經元輸出，導致數量變少，計算時也能夠減少訓練時間，提高效率。全連接層在時間序列任務中通常在整個模型的架構中最後一層，用於將序列資料轉換為具有固定維度之特徵進行表示，而若是通過增加多層全連接層，對於複雜模型架構來說，能夠增加模型非線性能力，更好進行模型擬合及收斂。GRU 模型部分，使用 3 個 GRU 層、2 個丟棄層機率設置為 0.25 與 1 個全連接層。搭配相關資料處理技術，兩種模型於本計畫中均有效實現負載預測功能，如圖 1~4 所示。

(二)加入負載預測與太陽能發電之補充備轉控制策略開發

依據圖 5 所建立之完整微電網系統與發電資源模型，將前述負載預測機制以及太陽能電力加入控制策略開發，用於實現以需量反應方式參與補充備轉服務。由研究成果圖 6 至 9 得知，在使用各種不同初始儲能電量與不同負載消耗電量之情境模擬下，含有預測機制之補充備轉操作無論在抑抵或執行率表現上均優於無預測機制之執行。

二、學術成就方面

本研究計畫完成以下論文發表

- [1] Yu-Jen Liu, Po-Yu Hou, Tsung-Han Kuo, Yih-Der Lee, Chin-Chan Cheng, and Yen-Fu Chen “Study on harmonic suppressions by optimization-based three-phase three-wire PV-APF,” in *Proc. of IEEE International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, Taichung, Taiwan, pp.95-98, June 2023.

參、展望

本年度計畫在有效的微電網模擬模型開發以及相關運轉控制策略之設計下，已成功測試與驗證利用多能源設施在需量反應樣態下實現補充備轉操作之可行性，並比較了在控制上有無使用負載預測之差異。未來可持續嘗試各式最佳化方法概念之利用，讓利用微電網執行電力輔助服務之運行可更達經濟優化。

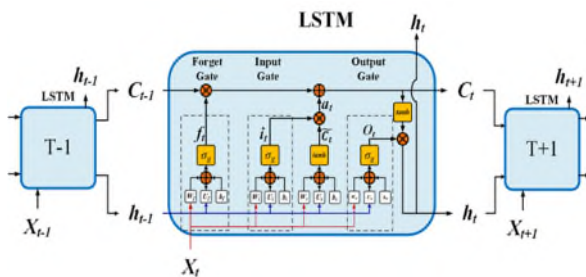


圖 1、LSTM 模型結構

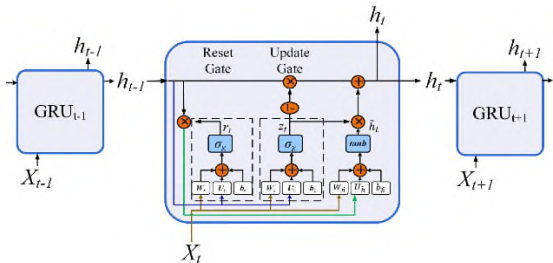


圖 2、GRU 模型結構

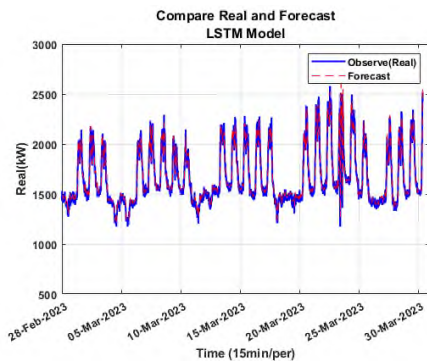


圖 3、LSTM 預測結果

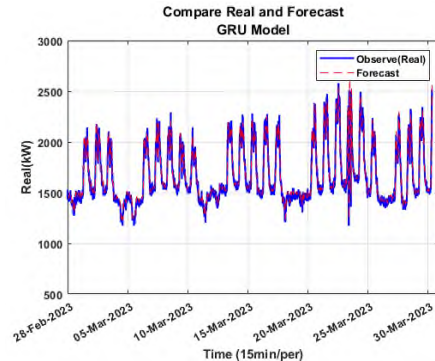


圖 4、GRU 預測結果

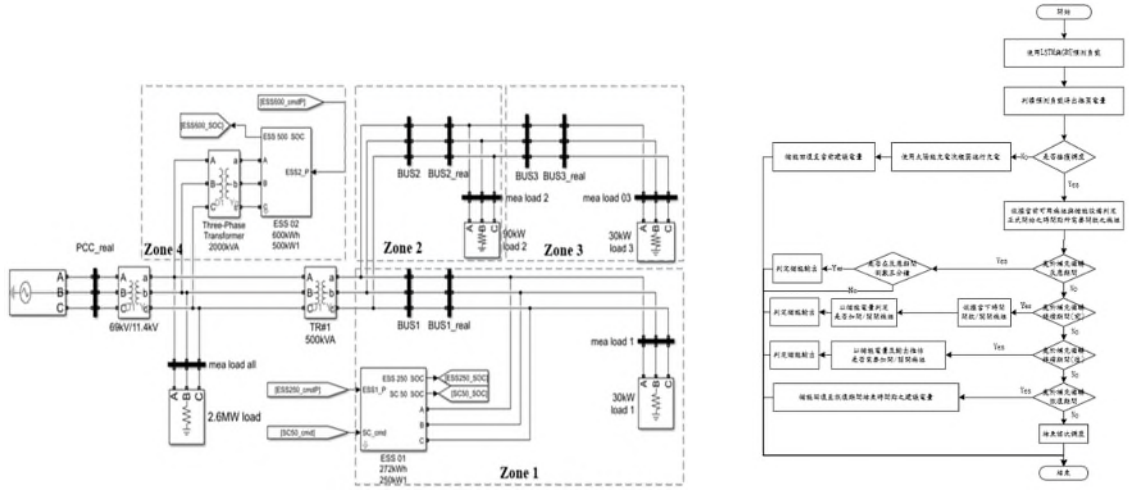


圖 5、NARI 微電網系統與發資源建模與補充備轉控制

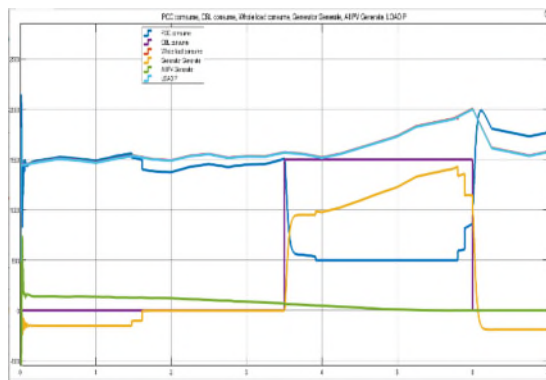


圖 6、無加入預測機制之抑抵表現

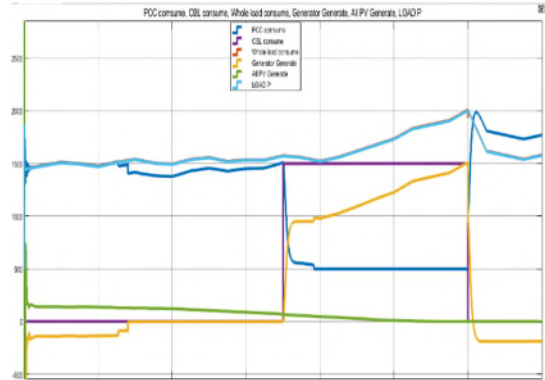


圖 7、加入預測機制之抑抵表現

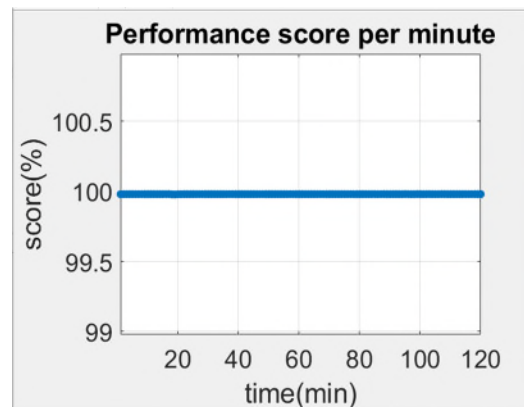
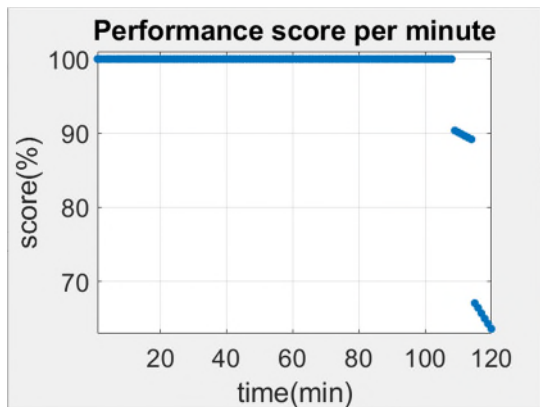


圖 8、無加入預測機制之執行率表現 圖 9、加入預測機制之執行率表現



微電網三相多電源併聯與調頻之研究

Research on Grid-Connection of Multiple Three-Phase Power Sources and Frequency Regulation in Microgrid

(計畫編號：112A015)

陳正一¹ 談光雄² 李俊緯¹ 楊家滢³

¹ 中央大學電機工程學系 ² 國防大學電機電子工程學系 ³ 東華大學物理學系

全球的能源危機和環境問題越來越嚴重，因此人們越來越關注分散式發電和微電網技術，這些技術有助於發展再生能源，推動社會邁向低碳化。未來的電力系統需要減少對化石燃料的依賴，並加大再生能源的使用比例。然而，當分散式電源容量增長到一定比例時，它們通過變流器等電力電子設備接入主電網，幾乎沒有慣性，這可能會對主電網的穩定性造成威脅。為了保證微電網的運轉安全和穩定性，需要有效地整合微電網電力控制策略和相關能源調度機制。如果成功實現這樣的整合，將大大提高微電網的運轉安全性和穩定性，並促進再生能源的發展。本計畫主要目標為(1)建立微電網孤島運轉架構模型；(2)開發三相功率調節系統、柴油機、與再生能源等 3 種電源之併聯技術，使再生能源併接點電壓變動率在 5% 以內；(3)開發三相功率調節系統主動及被動孤島偵測、及模式切換技術，當柴油機關閉後，三相功率調節系統維持負載電壓變動率在 5% 以內；(4)開發微電網孤島運轉模式下，三相功率調節系統之快速偵測電網頻率技術、及調頻演算法，並維持電池 SOC 在合理範圍。此外，本計畫將依據國家原子能科技研究院提供之微電網系統為基礎，建立相關電網模型，並透過模擬軟體探討儲能系統、柴油機、



與再生能源在不同運作模式與情境之調控策略以維護微電網系統之穩定性。

Since the global energy crisis and environmental issues are becoming increasingly severe, the decentralized power generation and microgrid technologies have drawn much attention in recent years. These technologies are helpful for developing renewable energy and promoting society's transition to low-carbon environment. The future power system needs to reduce its reliance on fossil fuels and increase the proportion of renewable energy usage. However, when the capacity of distributed power sources grows to a certain proportion and connected to the main grid through power electronic equipment such as inverters, little inertia characteristics of these devices may lead to a threat to the stability of the main grid. To ensure the safe and stable operation of microgrids, it is necessary to effectively integrate microgrid power control strategies and related energy scheduling mechanisms. If this integration can be achieved successfully, it will greatly improve the operational safety and stability of microgrids and promote the development of renewable energy.

The main objectives of this project are to: (1) establish a microgrid islanding operation framework model; (2) develop parallel-connection control strategy for three-phase power conditioning systems, diesel generators, and renewable energy, to ensure that the voltage fluctuation rate at the connection point of renewable energy is within 5%; (3) develop active and passive islanding detection and mode switching technologies for the three-phase power conditioning system. When the diesel generator is turned off, the three-phase power conditioning system can maintain the load voltage



fluctuation rate within 5%; (4) develop fast detection technology of grid frequency and frequency regulation algorithm for the three-phase power conditioning system in microgrid islanding operation mode, and maintain the SOC of battery within a reasonable range.

In addition, this project would establish relevant grid models based on the microgrid system provided by National Atomic Research Institute and perform the simulation to explore the control strategies of energy storage systems, diesel generators, and renewable energy under different operating modes and scenarios to maintain the stability of the microgrid system.

壹、計畫目標

本計畫主要目標為(1)開發三相功率調節系統、柴油機、與再生能源之併聯技術，使再生能源併接點電壓變動率在 5% 以內；(2)開發三相功率調節系統主動及被動孤島偵測、及模式切換技術，當柴油機關閉後，維持負載電壓變動率在 5% 以內；(3)開發三相功率調節系統之快速偵測電網頻率技術、及調頻演算法，並維持電池電量在一合理範圍。

貳、重要成果

微電網系統的核心之一是對多種電源的整合與管理，特別是在偏遠地區，柴油發電機作為主要電源，在確保穩定供電方面扮演著關鍵角色。為了應對設備故障、運轉過熱停機等問題，微電網場域中常會裝設多台柴油發電機。在這種情況下，當一台發電機出現故障或需要維修時，系統會自動切換到另一台發電機，以確保供電不中斷。這種切換過程中，為了減少對負載端供電穩定度的影響，需要一個良好的功率輸出平滑化機制。本報告透過三相功率調節系統的儲能電池額外提供功率來消弭因設備切換



所產生的擾動，從而維持負載端的功率穩定。

而為了驗證功率平滑化控制的效果，本報告進行了一系列的模擬測試。這些測試模擬了太陽能系統、柴油發電機組以及儲能系統之間的交互作用，特別是在發電機之間的切換過程中。模擬結果顯示，當儲能系統採用功率平滑化控制，即使在發電機切換過程中，負載的消耗功率也能保持在一個穩定的水平，從而避免了負載跳脫或設備損壞的風險。

本研究還特別強調了在微電網運行於孤島模式時的控制策略。孤島模式是指微電網因某些原因與主電網分離，獨立運行的狀態。在這種情況下，由於失去了電網電壓作為參考信號，微電網的電壓和頻率可能會變得不穩定。因此，維持微電網輸出的電壓及頻率成為了一個重要的課題。本報告中介紹了常見的孤島偵測方法，包括被動式和主動式兩種方式。被動式偵測方法依賴於監測電網的自然電氣參數，如電壓、頻率、相位等，而主動式偵測則是通過對電網施加外部干擾並監測其響應來識別孤島情況。

除此之外，本報告還重點介紹了三相功率調節系統的頻率偵測技術，特別是普羅尼法的應用。普羅尼法是一種用於估計指數或正弦項的數學方法，最初用於信號處理和數學物理學領域。在微電網技術中，普羅尼法被應用於解析複雜信號中的基頻成分，這對於分析電網中的電力成分和擾動具有關鍵意義。由本報告中的模擬結果顯示，普羅尼法可以有效完成系統頻率偵測，並使儲能系統依據需求進行電網調頻功能。

綜上所述，本報告的研究成果對於微電網系統的可靠性和效率有著重要的意義。特別是在偏遠地區或緊急情況下，這些技術和策略可以有效地確保電力供應的穩定性和安全性。未來的發展方向應著重於進一步提高這些系統的自適應能力和對環境變化的靈敏度，從而更好地應對複雜



和多變的運轉條件。

一、說明研發成果之重要貢獻

(一) 功率平滑化機制需要一設計良好之低通濾波器，否則容易造成最終平滑功率的時間延遲。圖 1 之穩定平滑輸出結果，有賴於選用低通濾器之時間常數低於兩台柴油發電機切換時間即可達成。關於拼接點之電壓部分，由分析結果可以發現其電壓變動率 $<5\%$ 以內，控制結果十分穩定。

(二) 由圖 2 系統頻率偵測結果與圖 3 儲能系統調頻輔助服務控制結果可以發現，普羅尼法可以有效完成系統頻率偵測，在此基礎儲能系統功率控制則依據台電之調度曲線進行系統頻率調節。

(三) 主持人於 2024 年 3 月獲 112 學年度中央大學學術研究傑出獎。

二、學術成就方面，共發表國際期刊論文及國際研討會論文各一篇。

(一) Kuang-Hsiung Tan, Jun-Hao Chen, and Yih-Der Lee, “Intelligent Controlled Dynamic Voltage Restorer for Improving Transient Voltage Quality,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 74686-74701, 2023.

(二) Cheng-I Chen, Chung-Hsien Chen, and Yih-Der Lee, “Optimal Energy Management System Based on Particle Swarm Optimization for Microgrid,” *The 6th International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, June 30 – July 3, 2023, Taichung, Taiwan.

參、展望

本計畫之研究重點著重在三相功率調節系統、柴油機、與再生能源之併聯協調與控制技術，僅確保系統之穩定運轉，並無考量系統之運轉成本



(如柴油機燃料)，因此未來能夠在考量系統成本之情況下，進行系統穩定控制時並符合最佳化能源調度，則更有助於微電網系統運轉效益之提升。

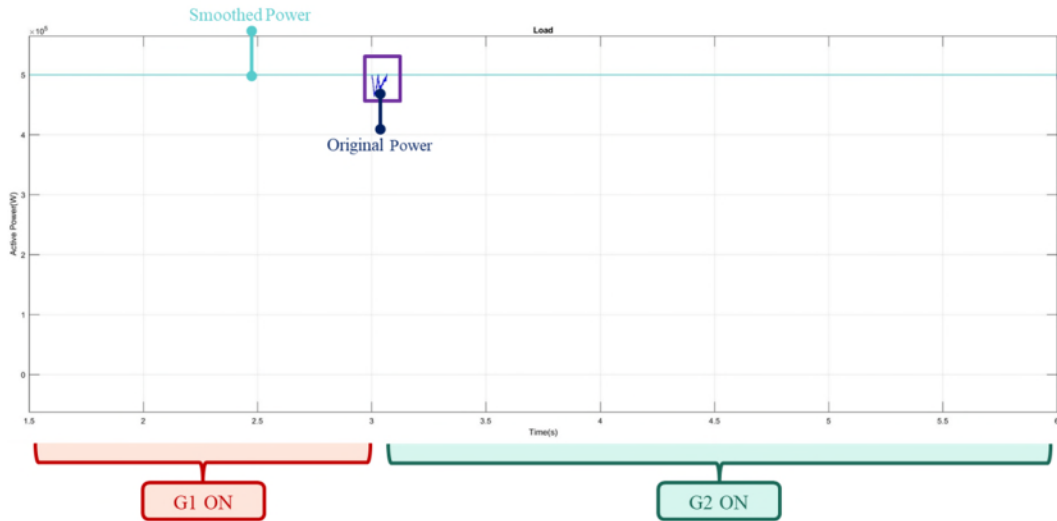


圖 1、負載之消耗功率

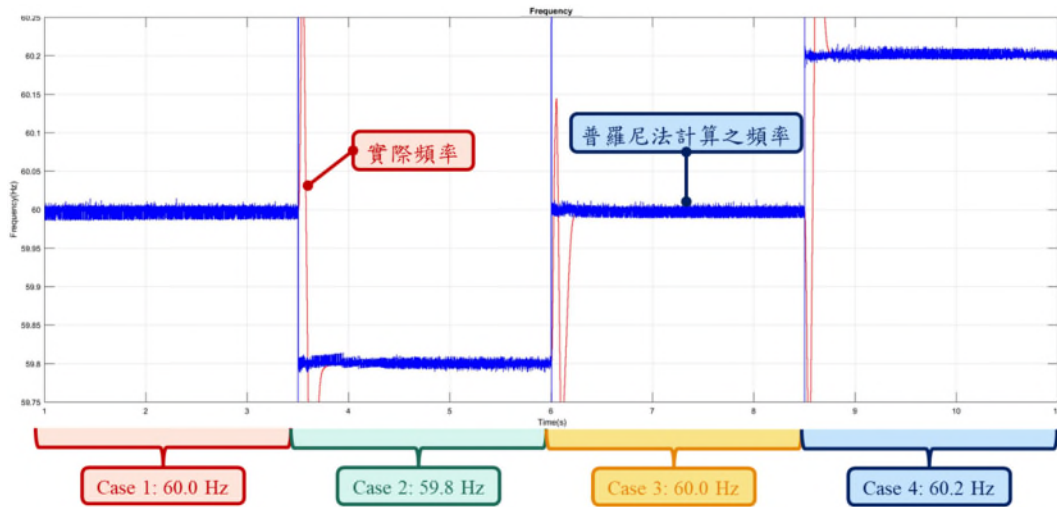


圖 2、以普羅尼法偵測系統頻率之結果

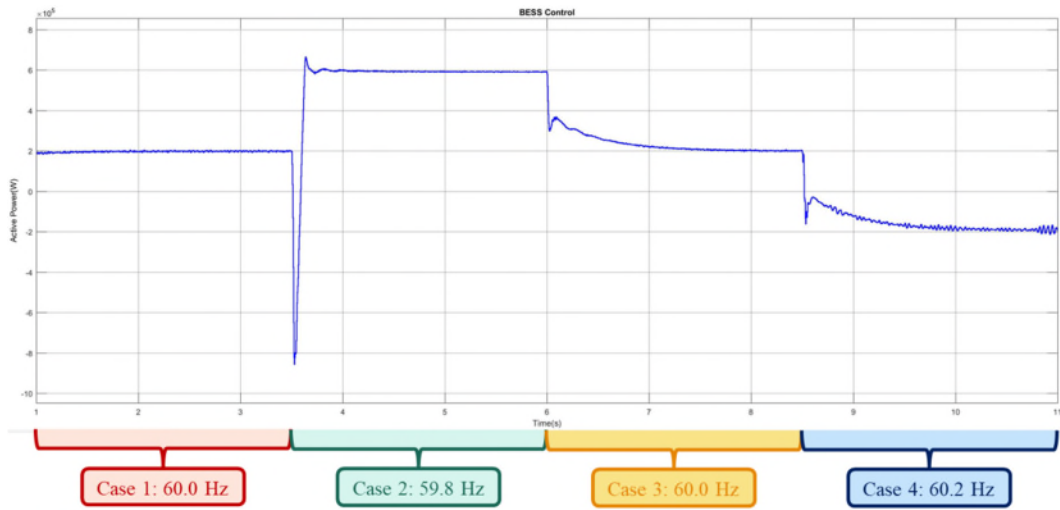


圖 3、儲能系統調頻輔助服務控制結果



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





目 錄

場次 11&12：環境能源科技領域- 2

※變電所輸變電設備損傷診斷專家系統研究.....	1
※輸電線路保護與電驛設定.....	5
※具綠能發電設備併網之電網韌性強化.....	9
※低功耗磁阻式感測器元件研究.....	14
※生質物創新運用之轉換技術及其效益研究.....	19
※低維度碳材合成技術研究.....	26



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission

112

委託研究計畫成果發表會





變電所輸變電設備損傷診斷專家系統研究

Research on Expert System for Diagnosis of Damaged Transmission and Transformation Equipment in Substations

(計畫編號：112A016)

郭政謙¹ 陳昌國²

¹ 國立臺灣科技大學電機工程系 ² 國家原子能科技研究院

輸變電設備一旦故障即損失極大的經濟效益，所以預防更勝於治療，高壓絕緣劣化檢測的有效方法之一就是觀察設備局部放電的現象，且為最初期的特徵，即早發現設備問題就可以提前做預防，而趨勢性觀察更優於週期性的檢查，長時間的觀察有效降低誤判的機率。

本計畫擬自行開發高速資料擷取裝置擷取局部放電原始放電波形數據進行雜訊抑制。為了能使診斷系統提升診斷效率與準確性，需對量測數據進行雜訊抑制，使得對於放電類型進行故障辨識，本計畫擬採用原始放電波形與雜訊抑制技術來快速對輸變電設備進行放電類型鑑別與識別。透過此方法可以讓系統實際運行數據紀錄原始放電波形，了解此輸變電設備於多次的局部放電量測中之原始放電波形狀況有哪幾種，再進行雜訊抑制後，作為局部放電類型鑑別。

If the power transmission and transformation equipment fails, it will lose great economic benefits, so prevention is better than treatment. One of the effective methods for high-voltage insulation degradation detection is to observe the phenomenon of partial discharge of equipment, and it is the



earliest characteristic. Prevention can be done in advance, and trend observation is better than periodic inspection. Long-term observation can effectively reduce the probability of misjudgment.

This project intends to develop a high-speed data acquisition device to acquire the original discharge waveform data of partial discharge for noise suppression. In order to improve the diagnostic efficiency and accuracy of the diagnostic system, it is necessary to suppress the noise of the measurement data, so that the fault identification of the discharge type is carried out. Carry out discharge type identification and identification. Through this method, the actual operating data of the system can be recorded as the original discharge waveform, so as to understand the original discharge waveform conditions of the power transmission and transformation equipment in multiple partial discharge measurements, and then after noise suppression, it can be regarded as the type of partial discharge identification.

壹、計畫目標

本系統的檢測改善了過去許多檢測方式的缺點，像是過去高壓設備局部放電診斷使用 PRPD 分析圖譜，此方法測試都只能測出高壓設備整體的絕緣劣化情形，但本系統透過檢測到的局部放電信號，利用原始放電波形的分析診斷出高壓設備的瑕疵放電，而且舊有的檢查方法需要透過斷電才能進行檢查，設備停電的時間將會帶來經濟成本損失，因此本計畫運用高頻電磁波間接量測法，不需要再擔心靠近高壓設備的風險，高壓設備也不需要停電就能做即時傳輸資訊的監控。



貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

原能會研發成果之性能、數據、改善、與外界研發成果之比較；本計畫所解決之問題，如何增進民眾福祉；所獲得之獎項、國際合作、專利授權、技術移轉、國際/國內之重要性。

(一) 完成之工作項目

1. 變電所輸變電設備損傷診斷專家系統開發，並於核研所指定場域進行輸變電設備之局部放電原始放電波形紀錄。
2. 高速資料擷取裝置系統功能規劃及其人機介面設計。
3. 運用雜訊抑制技術提升局部放電類型鑑別之辨識率。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文

(一) 國內外研討會

1. IEEE ECEI 2024 7th Eurasian Conference on Educational Innovation
Operation Strategy for Charging Station Considering Solar and Storage System

(二) 期刊論文

1. Applied Science
Research on Partial Discharge Expert System for Diagnosis of Damaged Transformation Equipment

參、展望

本研究計畫的未來規劃、發展和期望是建立一個能夠評估變電所輸



變電設備健康狀態的專家診斷系統。這個系統將整合高速資料擷取裝置和人工智慧技術，以提高診斷的效率和準確性。研究通過提升識別率來分類局部放電的原始波形，從而提前預防和修復潛在的設備故障，減少停電的發生並保證電力供應的穩定性和安全性。雜訊抑制技術的效果對於提高局部放電檢測的結果具有相當的重要性，能有效提升系統辨別訊號中的干擾雜訊，以確保診斷結果的可精確度。未來發展趨勢將可進行提升系統的自動化和智慧診斷，進一步結合大數據分析，以實現更全面和深入的電力設備健康狀態評估。



輸電線路保護與電驛設定

Transmission Line Protection and Relay Configuration

(計畫編號：112A018)

汪以仁¹ 周一婷²

¹ 東南科大電機系 ² 中原大學電機系

在 69kV 電力系統中，多端子輸電線路由於存在多個端點和支線，其測距電站保護協調的標置設置需要考慮的因素比一般的兩端子輸電線路更多，需綜合考慮線路拓撲結構、實際情況下變電所與饋線的相對位置、饋線與支線的連接方式及連接位置等因素。本研究目標針對三端以上線路的第一保護區間、第二保護區間、第三保護區間阻抗計算方法以及故障電流分佈進行研究，並基於現有測距電站標置程式，規劃多端子線路的程式流程架構，以應對未來電網結構日趨複雜和再生能源併網的需求，確保系統保護協調的適用性。

In a 69kV power system, multi-terminal transmission lines have more factors to consider in the setting of distance relay coordination compared to conventional two-terminal transmission lines, due to the presence of multiple endpoints and branch lines. Factors such as the topology of the line, the relative positions of substations and feeders in practical situations, and the connection methods and locations of feeders and branches need to be comprehensively considered. This study aims to research the impedance calculation methods for Zone 1, Zone 2, and Zone 3, as well as the distribution of fault currents in transmission lines with more than three terminals. Additionally, based on the



existing distance relay setting programs, a program flow structure for multi-terminal lines will be developed to meet the requirements of increasingly complex power grid structures and the integration of renewable energy sources, ensuring the applicability of system protection coordination.

壹、計畫目標

台灣輸電線保護電驛以差流電驛(87L)為主保護、測距電驛(21)為後衛保護，測距電驛標置數值之正確性將影響隔離故障速度與停電範圍，攸關輸電網路系統供電安全與品質，對電網韌性之強化扮演至關重要的角色。因此，本研究計畫目標係基於現行電驛標置系統，研究三端子(含)以上之保護設定原理，針對 69kV 電力系統多端子輸電線路保護電驛之設置方式與其限制進行研析；此外，本研究擬針對現有輸電線路測距電驛標置程式規劃多端子線路程式流程架構擴充方法，並規劃與核研所開發程式介接之 API 功能與架構。

貳、重要成果

- (1)本研究透過蒐研國內外的案例與相關研究文獻，掌握目前多端子測距電驛設置方法，評估適合台電 69kV 輸電系統之方法。
- (2)針對三端或多端線路案例，本研究根據其拓撲結構與故障電流分佈之影響，評估三端子(含)以上的線路保護設定方案，包含 Zone 1、Zone 2、Zone 3 阻抗計算方法以及相關限制條件。
- (3)本研究參考國研院提供之標置程式變數定義、函式區塊與運算流程等，針對多端子案例提出進程式擴充與佈署之規劃。規劃擴充方式係透過 GET API 介接多端子線路電驛標置運算模組，輸入參數包含



系統參數與 PMU 量測數據，輸出結果包含視在阻抗向量與修正係數向量，如表一所示。

參、展望

隨著電力系統的發展，未來電網結構將趨於更加複雜，再生能源的大規模併網增加了新的變數，因此針對多端子線路保護電驛設置方式與標置系統程式之優化係相當重要的議題。

透過本計畫的研究，針對三端子或多端子的電驛保護，可採用適應性方法，運用同步相量測量單元(Phasor Measurement Unit, PMU)獲取電流相量數據，以進一步調校電驛設置。此外，透過設計電驛標置程式模組化之擴充架構，並導入 Docker 容器，以確保程式獨立性與可移植性以利未來維護。未來研究方向將針對系統新型接線方式與再生能源併網影響，研析保護電驛設置之精進方式，以及優化模擬驗證之自動化流程。



表一、API 之參數說明

I/O 屬性	參數名稱	型態	說明
INPUT	system_matrix	Matrix	系統參數矩陣
INPUT	pmu_data	Vector	PMU 資料向量
OUTPUT	app_imp	Vector	視在阻抗向量
OUTPUT	correction	Vector	修正係數向量



具綠能發電設備併網之電網韌性強化

Resilience Enhancement of the Power System with Interconnection of Renewable Energy Source

(計畫編號：112A019)

劉志文¹ 李孟芸¹ 黃鈺善¹ 張家瑞¹ 林子喬²

¹國立臺灣大學電機工程系 ²國立臺北科技大學電機工程系

台灣力拚 2050 淨零轉型，大量分散式再生能源(風電/光電)將併於配電網，而穩定供電是首要目標。為提升電網韌性、減少輸電線故障造成的經濟和電力品質問題與加快修復和恢復供電的速度，本計畫開發使用數位電驛(Intelligent Electronic Device, IED)數據，實現多端輸電線適應保護、故障分類和定位的技術。為實踐故障診斷，也需仰賴精準的時間同步，及精準的輸電線參數估測。因此，本計畫包含四個子項目：(1) 設計事件位置定位及事件類型判定演算法。2. 設計故障電流分析之智慧型識別方法。3. 發展時間同步校正與事件順序分析方法。4. 建立電力線路參數自動化估測與校正方法。

The goal of this project is to enhance the resilience of the power grid through the development of a technology that utilizes Intelligent Electronic Device (IED) data to achieve multi-end transmission line adaptive protection, fault classification, and localization. This will not only improve the resilience of the power grid, but also reduce the economic and power quality problems caused by transmission line faults, and speed up the repair and restoration of power supply. To achieve fault diagnosis, precise time synchronization and



transmission line parameter estimation are required. Therefore, this project is divided into four sub-projects, including the design of a fault localization, fault classification, and an intelligent identification method for fault current, the development of a time synchronization and correlation for sequence of event (SOE) analysis method, and the establishment of an automated transmission line parameter estimation and correction method.

壹、計畫目標

本計畫致力於提出一套以數位電驛資料為基礎的多端輸電線適應保護電驛技術，並且兼具故障類型判別及位置定位之功能。為實踐故障診斷，需仰賴精準的時間同步，及精準的輸電線參數估測。本計畫之三大子項目分別為：設計供電系統(1)事件位置定位(2)事件類型判定(3)故障電流分析之智慧型識別方法、發展時間同步校正與事件順序分析方法及建立電力線路參數自動化估測與校正方法，並使用歷史事故資料與真實線路參數進行建模、計算與驗證。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

基於經濟和電力品質觀點，輸電線故障類型分類、故障定位與保護至關重要，當輸電線發生故障，引發的經濟損失將難以估計。一般輸電線長度達數十至數百公里，其間可能經過各式地形，於故障後的修復過程中，即時且精確的輸電線線路故障診斷，以利維修人員迅速排除故障進而恢復供電，是電力系統可靠運轉的關鍵。

(一)事件類型判定

本計畫提出採用機器學習模型 Conformer 進行事件類型判定。



訓練資料由 MATLAB Simulink 產生，為雙端輸電線路如圖 1 所示。採用的特徵為三相電壓與三相電流時序資料，標籤為故障類型共 11 類，涵蓋 9 種非對稱故障與 2 種對稱故障。模擬產生之訓練資料送入機器學習模型進行訓練，訓練完成之模型能夠直接判定真實事故波型的故障類型。由於臺灣電網電驛使用之取樣頻率眾多，本計畫之方法也探討各取樣頻率涵蓋 4 點/週波至 188.5 點/週波之分析。機器學習模型分別採用 4 點/週波與 16 點/週波進行訓練，驗證 (Validation) 準確率均達 100%，歷史事故之測試 (Testing) 準確率為 87.963% 與 87.04%。

(二) 事件位置定位

事故發生時，事件位置定位使維修人員迅速掌握故障地點，縮短復電所需時間。本計畫探討之事件位置定位包含輸電線路單端、雙端與多端故障定位。單端故障定位基於故障的暫態進行分析。雙端與三端故障定位則藉由基頻相量、阻抗矩陣與模型線路參數計算事故位置，三端線路模型如圖 2 所示。本計畫另外探討 CT 飽和是否對故障定位結果產生影響。本計畫之事件位置定位在歷史事故資料計算與實際巡線誤差為 0.9532km。

(三) 發展時間同步校正與事件順序分析

由於成本等因素，電網中之數位電驛等量測裝置未具備全球定位系統 (Global Positioning System) 功能，因而缺乏時間戳記，造成不同設備間非同步量測問題，並造成事件位置定位、輸電線路參數估測等演算法之計算誤差。本計畫比較兩種校正方法角度校正法及時間位移校正法，提出各方法之優勢與限制，並採用二者解決量測數據非同步問題。



(四)電力線路參數自動化估測與校正方法

本計畫採用之輸電線單端、雙端與多端故障定位演算法均以分布式參數模型為基礎，演算法使用到之線路參數如傳播常數 γ 與特性阻抗 Z_c ，不準確的線路參數將影響定位結果。本計畫使用基於分布式線路參數模型之輸電線路參數估測方法，無需進行迭代求解，對比需要迭代求解的方法，除了有較低之計算複雜度，且求得之線路參數為唯一解。此演算法計算於 Simulink 模擬資料，161 kV 系統中正序電組、感抗誤差值為 0%，導納為 0.035%。345kV 系統中，正序電組誤差為 0.56%、感抗 $5.472 \times 10^{-3} \%$ 、導納為 $6.6 \times 10^{-3} \%$ 。

二、投稿國際研討會與國際 SCI(E)期刊論文

(一)投稿國際研討會與 IMETI 論文

1. 本計畫以輸電線路事件類型判定方法，投稿 IMETI 2023 國際研討會。
2. 會議資訊：
會議名稱: International Multi-Conference on engineering and Technology Innovation 2023
會議時間: 10/27~10/31 2023。
會議地點: 台灣 桃園
會議網址: <https://imeti.org/IMETI2023/>。
3. 研討會推薦轉投期刊 Applied Sciences:
題目: Transmission Line Fault Classification Using Conformer Convolution-Augmented Transformer Model

(二)投稿國際 SCI(E)論文

1. 本計畫以時間同步校正方法，投稿國際 SCI(E)論文:



題目: A Simple Formula for Time Synchronization for Improved Transmission Line Fault Location

參、展望

統整本計畫提出之事件類型判定、事件位置定位、時間同步校正與事件順序分析與電力線路參數自動化估測與校正方法，最終智慧事故監測及診斷系統流程圖如圖 3 所示。未來可依據該系統以雲端、自動化方式進行事故診斷，並依新增事故進行系統參數微調，增進準確率。

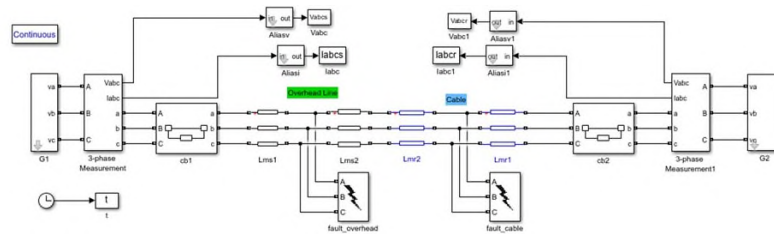


圖 1、雙端輸電線路模型

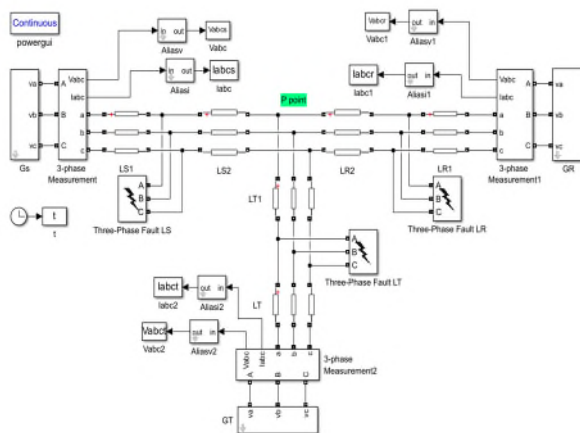


圖 2、三端輸電線路模型

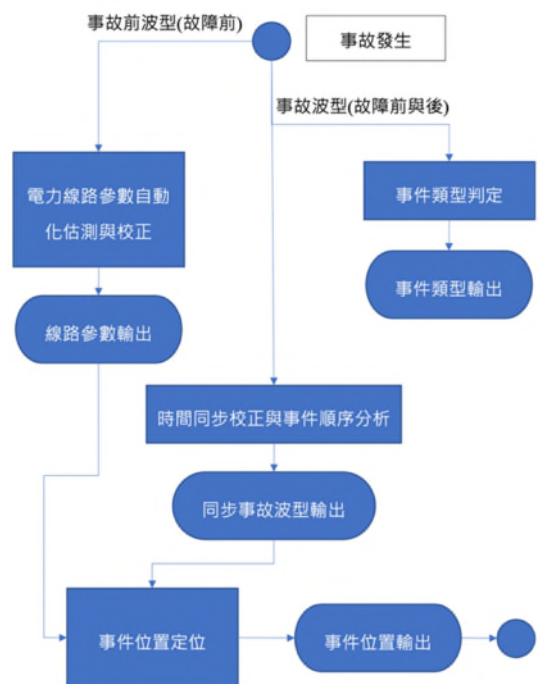


圖 3、智慧事故監測及診斷系統
流程圖



低功耗磁阻式感測器元件研究

Research of low-power magnetoresistance sensor devices

(計畫編號：112A005)

曾院介¹ 陳柏聞²

¹國立陽明交通大學材料科學與工程學系 ²核能研究所

磁場感測器在機械控制、消費性電子元件等應用上為極為重要之感測元件，配合永久磁鐵標記，磁場感測器可以在自動控制領域提供精準的位置與角度資訊。於消費性電子上則可作為電子羅盤等方位與姿態感測之應用工具。磁阻式感測器是由自旋閥：兩層鐵磁層與一非磁性之間隔層隔開之異質結構構成，兩層鐵磁層之間之相對磁矩排列角度決定自旋閥處之電阻態用以進行磁場感測。在此計畫中，我們使用化學濺鍍方式以多層鐵磁層-非磁性層交互堆疊的方式製作出以異常霍爾效應 (Anomalous Hall effect, AHE) 為原理的具超順磁特性的磁阻式感測器、並以穿隧式磁阻效應 (Tunnel Magneto-Resistance, TMR) 製作出磁阻比 >50% 的膜層結構，在未來計畫將其結合為兼具二者特性的磁阻式感測器。

Magnetic field sensors play a crucial role in various applications such as mechanical control and consumer electronic devices. When combined with permanent magnet markers, magnetic field sensors can provide precise position and angle information in the field of automatic control. In consumer electronics, they can serve as tools for applications like electronic compasses, enabling orientation and attitude sensing. Resistive magnetic sensors operate



based on a spin valve structure: a heterogeneous arrangement consisting of two layers of ferromagnetic material separated by a non-magnetic spacer layer. The relative alignment of magnetic moments between the two ferromagnetic layers determines the resistance state of the spin valve, allowing for magnetic field sensing. In this project, we employ a chemical sputtering method to fabricate resistive magnetic sensors with a stacked structure of multiple layers of ferromagnetic and non-magnetic materials. This stacking approach is designed to leverage the anomalous Hall effect(AHE), resulting in sensors with superparamagnetic characteristics. Additionally, we utilize the Tunnel Magneto-Resistance (TMR) effect to create a film structure with a magnetic resistance ratio exceeding 50%. In future projects, we plan to integrate these features to develop a resistive magnetic sensor that combines both anomalous Hall effect and Tunnel Magneto-Resistance characteristics.

壹、計畫目標

在本計畫中，我們將應用 AHE 感測器和 TMR 感測器，因其具有各自的優點。AHE 感測器以其簡單的製造工藝、鐵磁性材料的優異熱穩定性以及良好的線性響應範圍著稱，這些特性對於感測器的製作極為關鍵。另一方面，TMR 感測器以其高磁阻比聞名，我們計畫製造的感測器目標是實現超過 50% 的磁阻比。為了達到這一目標，我們選擇採用容易调控的多層膜結構，這有助於最大化改良感測器。



貳、重要成果

本計畫開發的磁阻式感測器將為未來感測器技術的開發奠定基礎，有助於推動相關研究領域的進步。

參、展望

本計畫的研究流程包括製造高品質的感測器元件和磁阻比膜層結構，並嘗試將這兩者結合。目前所達成的成果是分別製成優良的感測器元件和磁阻比略高於 50% 之結構。未來，我們希望進一步提高磁阻比，並增強感測器元件的線性量測範圍或靈敏度以達成目標。我們計劃持續優化鍍膜技術，包括引入退火過程和創新的表面結構設計，這些改進或可提升感測器的整體性能和可靠性。

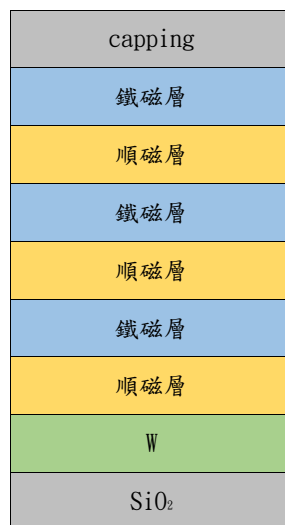


圖 1. 多層鐵磁層感測器結構示意圖。

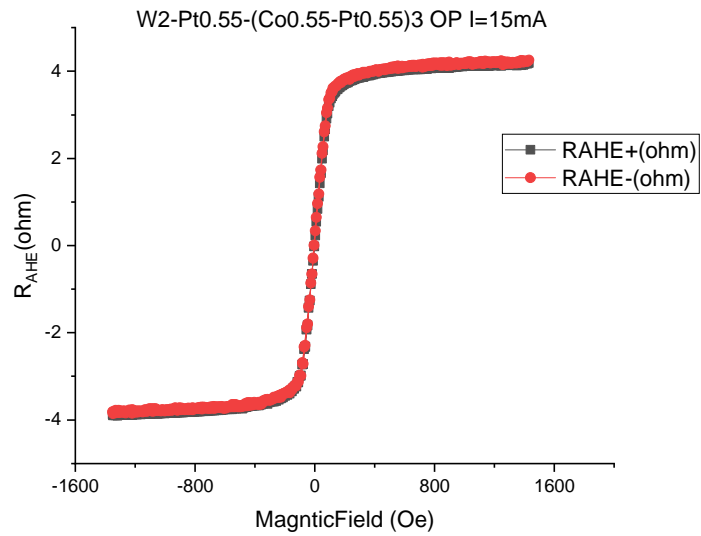


圖 2. 多層鐵磁層結構 AHE 感測器之阻值量測圖

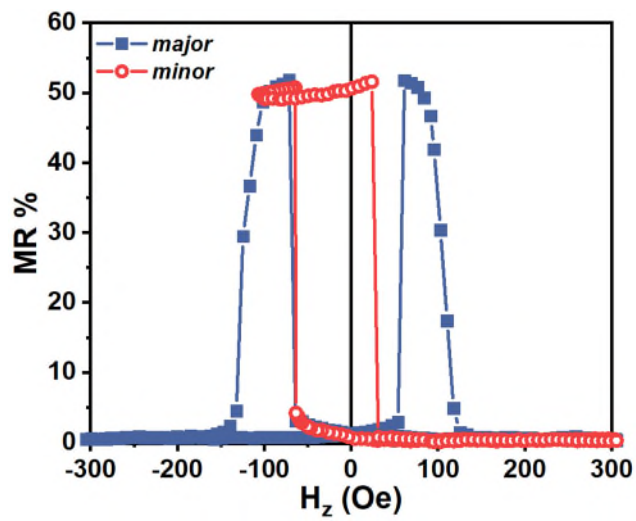


圖 3. 多層鐵磁層結構之阻值量測圖

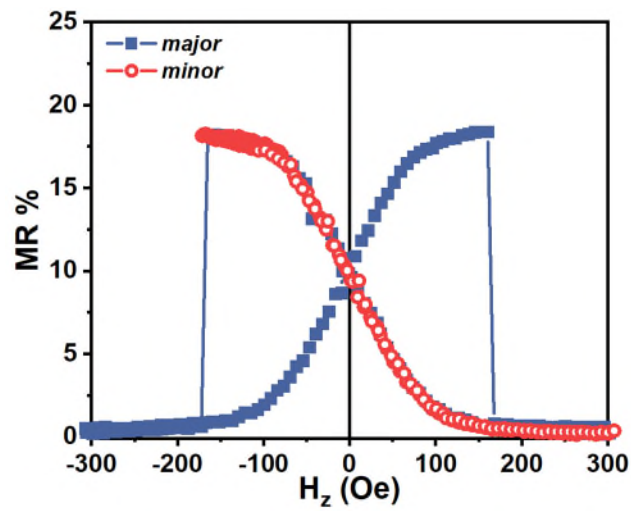


圖 4. 多層鐵磁層結構 TMR 感測器之磁阻率-外加磁場圖



生質物創新運用之轉換技術及其效益研究

Investigating innovative applications of biomass conversion technology and its efficiency

(計畫編號：112A008)

沈若樸¹ 林逸學¹

¹ 國立清華大學化工系

溫室氣體如二氧化碳和甲烷的回收及再利用為近年來全球在淨零排放和極端氣候的共同努力目標，其中已有研究團隊成功透過化學法將二氧化碳有效轉化成乙酸，由於乙酸相較於二氧化碳較容易做為碳源給微生物再利用並進行生物轉化，本計畫希望透過代謝工程建構並優化能有效高值化乙酸的生化合成平台。在之前的研究中，我們團隊已成功利用大腸桿菌轉化基本碳源如葡萄糖與甘油進入紫色桿菌素(Violacein、Deoxyviolacein)等具備抗真菌、抗癌以及染劑潛力的高價值化合物，我們以紫色桿菌素合成菌株作為基礎，建立一個以乙酸做為主要甚至唯一碳源的生產平台，透過邏輯途徑設計(Rational Design)提高了乙酸饋入中心代謝的效率，同時我們也將 RBS Library 結合到目標質體上利用優化後的篩選方法與呈色法，成功篩選出紫色桿菌素的生產優勢株，與控制組相比產量提高了五倍 (達 180 mg/L deoxyviolacein)同時乙酸消耗率提升了 70%。最終利用 RBS calculator 計算基因間表現的強度進行討論。本研究將有助於了解與實現乙酸和二氧化碳再利用及高值化的願景。



In recent years, the world has been striving for net zero emissions and combating extreme climate events by pursuing the common goal of capturing and reusing greenhouse gases such as carbon dioxide and methane. Some research teams have successfully converted carbon dioxide into acetate through chemical methods. Acetate is more readily utilized as a carbon source for microbial bioconversion than carbon dioxide, making it an ideal target for efficient and high-value bioproduction. This project aims to construct and optimize a biochemical synthesis platform that can effectively convert acetate into high-value compounds through metabolic engineering. In previous studies, our team has successfully utilized *Escherichia coli* to convert basic carbon sources such as glucose and glycerol into high-value compounds such as violacein and deoxyviolacein, which have antifungal, anticancer, and dye potential. Employing a rational design approach, we have enhanced the efficiency of acetic acid integration into central metabolism. Additionally, we have integrated an RBS Library into the target plasmid, utilizing optimized screening methodologies and colorimetric assays to select and analyze high-performing strains with improved yield. By comparison with regular RBS strain, deoxyviolacein production increased five-fold (reaching 180 mg/L) while the consumption rate of acetic acid rose by 70%. Lastly, by RBS calculator analyzing we compared each gene's expression level. This study contributes to the comprehension and realization of the vision for acetic acid and carbon dioxide reuse and high-value transformation.

壹、計畫目標

目前大多數生物技術產品都是基於含有糖或澱粉植物的碳水化合物底物的微生物轉化，例如葡萄糖或蔗糖。然而，考慮到全球人口的增長和



糧食短缺，這些傳統材料主要都是透過作物例如澱粉、玉米等提煉而成，在食品和飼料工業中的競爭應用將成為未來生物產業與代謝工程所面臨的難題，因此找尋替代碳源在生物技術中更加重要。近年來許多研究團隊都將目光聚焦在開發微生物，使微生物利用其他替代碳源，其中一個例子就是乙酸，乙酸不僅存在於各式廢水處理過程中，也可藉由不同方式轉化而成(如圖一)，近年有研究團隊成功透過化學法將二氧化碳有效轉化成乙酸更是推動了乙酸再利用的研究契機。本計畫目的在於利用乙酸作為生產紫色桿菌素的主要碳源，首先需要篩選出乙酸利用及適應的優勢大腸桿菌株，透過合理路徑優化，我們也將額外調控關鍵基因以提高乙酸進入中心代謝的通量，如前文所述透過表現 *Acs* (乙醯-CoA 合成酶)、*Pck* (PEP 羧化酶) 以及 *AceA* 並剔除 *IclR* 基因提高 Glyoxylate shunt 的通量等策略，找尋在乙酸環境下擁有最佳生長曲線的大腸桿菌株。先前我們團隊已藉由在大腸桿菌 BW25113 剔除 *trpR* 以及 *tnaA* 基因成功提高了色胺酸在細胞內的含量及紫色桿菌素的合成。我們計畫利用相同策略藉由剔除乙酸生長優勢株上 *trpR* 以及 *tnaA* 基因，進而提高色胺酸的累積量，以將更多碳通量導入下游紫色桿菌素。

貳、重要成果

建立 RBS Library 調控代謝途徑基因表現

我們將選定的 RBS Library No. 6 (RRRRRD) 與色胺酸及紫色桿菌素合成途徑上之基因結合以隨機調控個基因的表現。我們以 high copy number 之質體來表現 *vioA*、*vioB* 與 *vioE*；medium copy number 之質體表現 *vioC* 與 *acs*；low copy number 表現 *trpE* 與 *trpD*。將上述三種質體植入大腸桿菌 BW25113 Δ *trpR* Δ *tnaA* Δ *iclR* 後，將菌液塗在添加乙酸的 M9 培養



盤並進行篩選，同時也嘗試許多篩選的優化如不同 YE 比例與生長環境溫度等。

以呈色法篩選具有生產潛力之菌株

利用已建立好的 RBS Library 篩選方法，我們不斷地挑選出呈色較深的優勢菌株，進行生產測試。我們將這些菌株培養在 2mL LB medium 中，第二天將其轉移到 M9-YE-Ace medium 中（其中包含 5 g/L 的 YE 與乙酸），進行為期兩天的生產實驗。在這兩天的過程中，我們在 24 小時補充一次乙酸(5g/L)，並觀察不同菌株的產物產量以及乙酸消耗量。

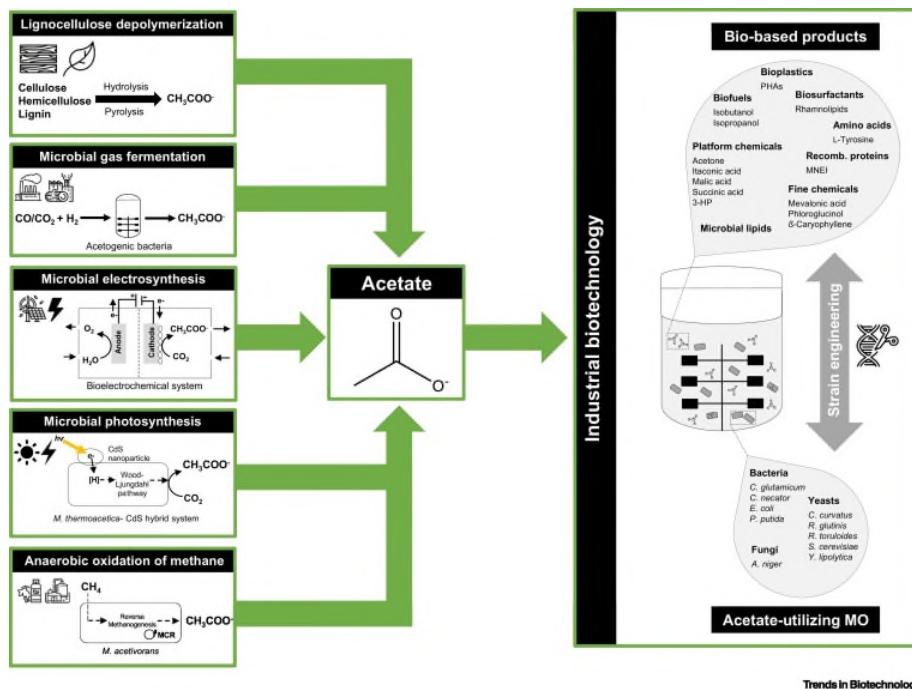
將這些篩選出的菌株與控制組(Ac3)進行必較，發現產量有明顯的浮動，有少部分的菌株產量低於控制組，但大多數都比控制組產出較多的 deoxyviolacein。如#1、#2、#4、#9 等，其中#1、#30 以及 #40 產量提升至控制組的 5 倍。針對產量前十高的菌株，我們將其乙酸消耗量與控制組進行比對，我們發現第一天的乙酸消耗量，實驗組與對照組呈現相似的情況。然而，第二天的一些實驗組（如 #1、#35、#36、#40）的乙酸消耗量明顯多於對照組，兩天的生產中乙酸消耗量提升了約 70%。我們認為這可能與 RBS Library 調整基因轉譯強度的效果有關。一些菌株在 RBS Library 的調控下，表現出較高的乙酸整體使用率亦或是更高的產物轉化率進而影響 deoxyviolacein 的產量。後續我們會使用 RBS calculator 針對 ribosome binding site 進行更深入的討論並獲得專利位置。

參、展望

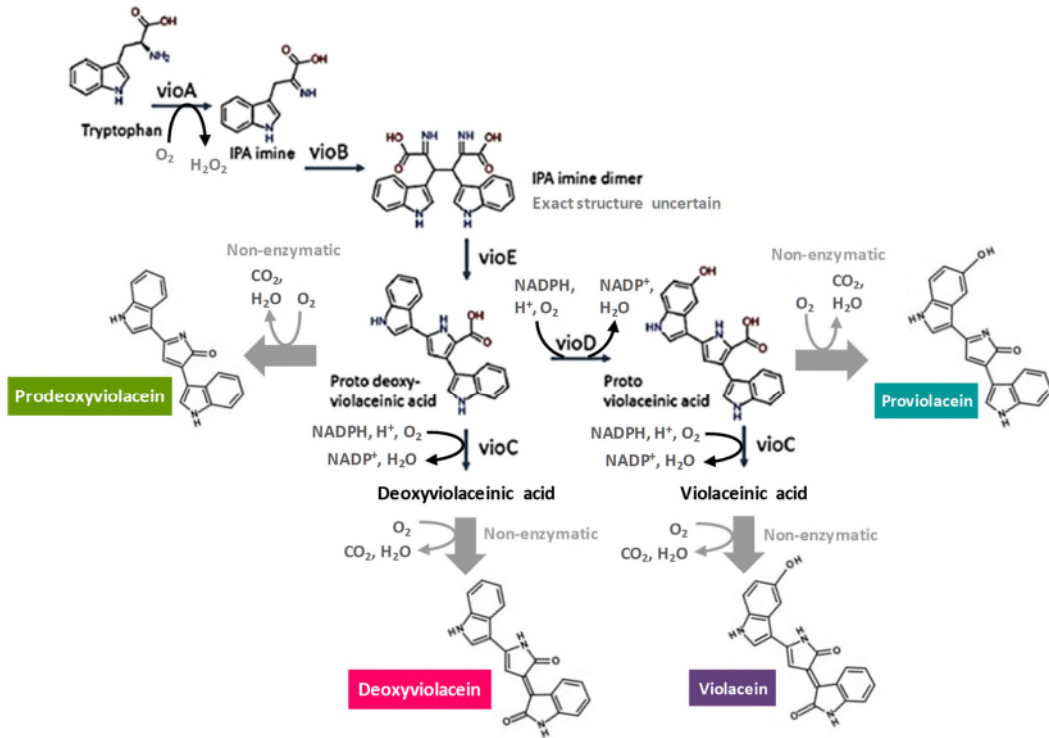
本計畫希望透過代謝工程建構並優化能有效高值化乙酸的生化合成平台。我們以紫色桿菌素合成菌株作為基礎，建立一個以乙酸做為主要甚至唯一碳源的生產平台，透過邏輯途徑設計(Rational Design)提高了乙酸饋



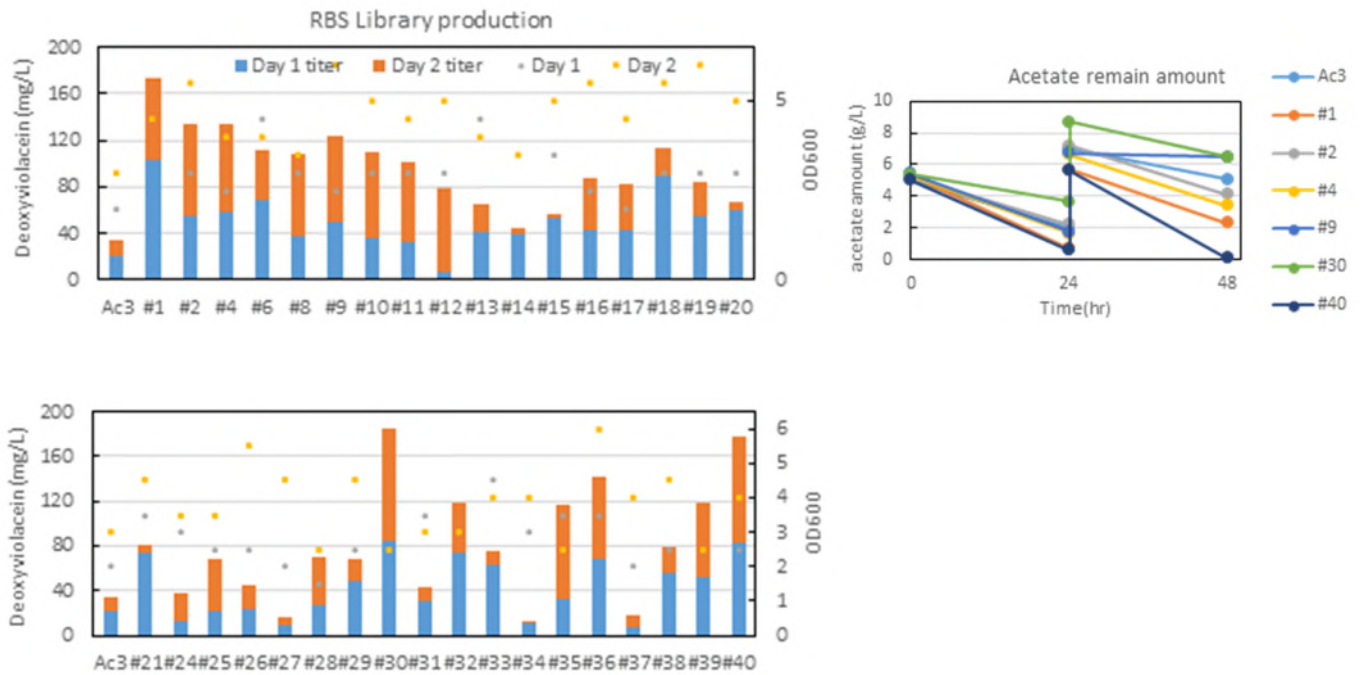
入中心代謝的效率，同時我們也將 RBS Library 結合到目標質體上利用優化後的篩選方法與呈色法，成功篩選出紫色桿菌素的生產優勢株，與控制組相比產量提高了五倍 (達 180 mg/L deoxyviolacein)同時乙酸消耗率提升了 70%，最終利用 RBS calculator 計算基因間表現的強度進行討論並獲得專利位置。本研究有助於了解與實現乙酸和二氧化碳再利用及高值化的願景。



圖一 以乙酸作為碳源生產平台簡圖



圖二 violacein 代謝途徑



圖三 (左) RBS library mutant 生產測試 deoxyviolacein 產量 (長條圖表示產量，主垂直座標軸；點座標圖為 OD₆₀₀ 值，副垂直座標軸)。(右) 生產優勢株乙酸殘留濃度 (Ac3 為 regular RBS)



低維度碳材合成技術研究

Low-dimensional carbon material synthesis and analysis

(計畫編號：112B016)

院繼祖、張嘉哲、張妍嫻

中原大學

低維度碳基奈米材料可利用地表含量豐富且永續之前驅物，藉由低成本及環保之方法簡單合成。此外，這些奈米材料具有多種優越的材料特性，如可調控的電子能態、優異穩定性及可操控的電化學特性。在碳基奈米材料中，碳量子點（或稱為石墨烯量子點）是由奈米尺度 sp^2 鍵結的石墨烯主體及邊緣/表面官能基團所組成。因此，碳量子點能夠兼具二維石墨烯及零維量子點的優點，在光電子和能源相關應用中將是非常有前景的奈米材料。

在這一年計畫中，我們成功地以硝化後的芘(pyrene)，利用下而上分子融合(bottom-up molecular fusion)方法製備了親水性的碳量子點，並且控制其石墨烯結構及邊緣官能基。由於具有多種獨特的材料特性，如大面積、高導電性、高效率電荷傳輸及界面鍵結位點；因此在三氧化鎢(WO_3)為基底的電致變色元件中，預期將是非常有前景之添加劑，可提高電致變色之性能，如上色效率、切換時間和循環穩定性。我們使用不同的光譜技術研究了碳量子點/三氧化鎢複合物的材料、光學及電化學性質。此外，我們也以碳量子點/三氧化鎢複合薄膜製備了無機-有機混合電致變色元



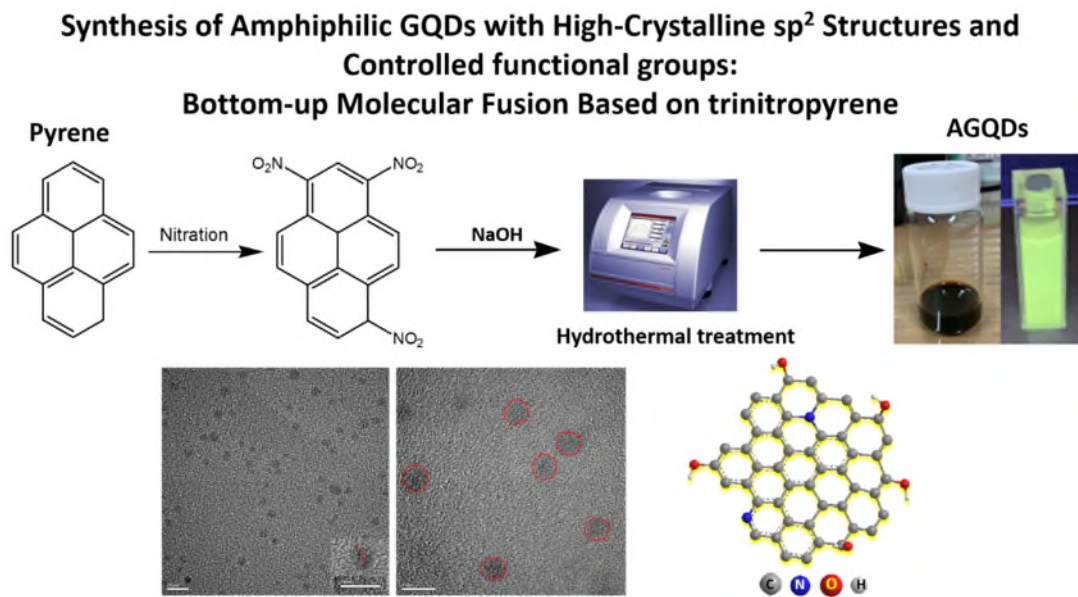
件。透過調節碳量子點之含量，我們成功地增強電致變色之性能。

Low-dimensional carbon-based nanomaterials can be simply synthesized using low-cost and eco-friendly methods based on earth-abundant and sustainable precursors. In addition, such nanomaterials possess several superior materials properties, such as tunable electronic states, excellent stability, and engineerable electrochemical properties. Among carbon-based nanomaterials, carbon quantum dots (CQDs or referred to as graphene QDs) compose of nanoscale sp^2 graphitic framework and edge/surface functionalization. As a result, the CQDs can hold both advantages arising from two-dimensional graphene and zero-dimensional QDs, thus would be promising nanomaterials in optoelectronic and energy-related applications.

In this one-year project, we have successfully prepared hydrophilic CQDs with well-controlled graphitic structures and edge functionalization using bottom-up molecular fusion method based on the nitrated pyrene. Due to several unique materials properties, such as large surface areas, high conductivity, efficient charge transfer, and interfacial bonding sites, they would be promising additives for WO_3 -based electrochromic devices, which could enhance the electrochromic properties, such as coloration efficiency, switching time, and cyclic stability. We have investigated their materials, optical, and electrochemical properties for the CQDs/ WO_3 composites using different spectroscopic techniques. Moreover, hybrid inorganic-organic electrochromic



devices were also fabricated based on the CQDs/ WO_3 composite films. Indeed, the enhanced electrochromic properties were observed by tuning the loading contents of CQDs.





核能安全委員會

Nuclear Safety Commission

新北市永和區成功路1段80號2樓

電話：(02)8231-7919

傳真：(02)8231-7833

<https://www.nusc.gov.tw/>