



場次 1—核能安全與輻射應用科技領域

核醫藥物產業與趨勢分析.....	1
核醫醫療資料庫及市場分析研究.....	6
建立輕度認知功能障礙診斷與評估的核醫影像人工智慧模型.....	10
衛星定位系統之可靠度測試研究.....	15
111 年核電廠熱水流安全分析暨管制法規技術精進研究.....	22
除役廢棄物離廠偵測國際規範研析.....	29
日本發電用反應器高活度設備拆除技術實例研究.....	35
111 年核電廠結構/設備受潛在地震之安全影響及因應管制技術研究.....	41
111 年核電廠水災與海嘯危害再評估精進技術研究與管制技術諮詢.....	47



核醫藥物產業與趨勢分析

Trend and status analysis of nuclear medicine industry

(計畫編號：111A004)

洪茂欽¹ 顏若芳² 黃奕琿²¹ 慈濟科技大學醫學影像暨放射科學系 ² 國立台灣大學醫學院附設醫院核子醫學部

本研究旨在瞭解台灣核子醫學診療使用分佈情形及發展趨勢，利用全民健康保險研究資料庫 2014 年至 2020 年間的核醫就醫紀錄，分析核醫診療使用趨勢及醫療資源分布情形。結果顯示，2014 至 2020 年間平均每年核醫診療量為 452,280 次，核醫總量隨時間顯著增加，年增量為 18,422 次。壓力與重分布心肌灌注斷層掃描是最常進行且增加最為快速的檢查項目，平均每年執行 155,724 次，占有核醫診療的 34.4%，並以每年平均 6,594 次逐年增加。反之，放射免疫分析使用量每年平均為 2,658,927 次，從 2014 年 2,681,647 次減少至 2020 年 2,587,650 次，每年平均減少 27,311 次，甲狀腺刺激素放射免疫分析是最常進行的檢查項目，占全部放射免疫分析量的 16.0%。估計 2014 至 2020 年間，台灣核醫藥物使用量每年平均為 5,657 Ci，從 2014 年 4,568 Ci 增加至 2020 年 5,567 Ci，每年平均增加 193 Ci，使用量最多的核醫藥物依序為 Tc-99m MDP、Tc-99m RBC 及 F-18 FDG，分別占總量的 53.6%、12.1%及 8.7%。2022 年全台核醫部門的醫事人力配置，以放射師人數為最多(328 人)，其次為醫師(196 人)、護理師(144 人)、醫檢師(73 人)、藥師(39 人)及加速器人員(25 人)。核醫設備則以雙頭 SPECT 居多(83 台)，其次為 SPECT/CT(55 台)及傳統



PET/CT(36 台)。本研究深入分析國內核醫領域（體內造影與體外放射免疫分析）的應用與發展趨勢，以及核醫人力及設備分布情形，期能做為核醫部門規劃人力設備與研發製造核醫藥物的重要參考依據。

The purpose of this study is to investigate the utilization and trend of nuclear medicine practice in Taiwan according to the National Health Insurance Research Database from 2014 to 2020. It was found that the average annual nuclear medicine utilization during 2014-2020 were 452,280, and the total number of nuclear medicine practice increased significantly over time, with an annual increment of 18,422. Stress and redistribution myocardial perfusion imaging was the most frequently performed and fastest-increasing examination, with an average of 155,724 per year, accounting for 34.4% of all nuclear medicine practice, and an average increasing of 6,594 per year. In addition, the average use of radioimmunoassay was 2,658,927 per year, which decreased from 2,681,647 in 2014 to 2,587,650 in 2020, with an average reduction of 27,311 per year. Thyroid-stimulating hormone radioimmunoassay was performed most frequently, accounting for 16.0% of the total. It is estimated that from 2014 to 2020, the average annual radioactivity of radiopharmaceuticals in Taiwan is 5,657 Ci, increasing from 4,568 Ci in 2014 to 5,567 Ci in 2020, with an average annual increase of 193 Ci. The most used radiopharmaceuticals were Tc-99m MDP, Tc-99m RBC and F-18 FDG, accounted for 53.6%, 12.1% and 8.7% of the total, respectively. In 2022, the number of radiological technologist (328 people) is the largest number of medical staff in nuclear medicine departments in Taiwan, followed by physician (196 people), nurses (144 people), medical examiners (73 people), pharmacists (39 people) and accelerator personnel (25 people). The majority of



nuclear medicine equipment is double-head SPECT (83 sets), followed by SPECT/CT (55 sets) and traditional PET/CT (36 sets). This study deeply analyzes the application and development trend of the domestic nuclear medicine field (in vivo imaging and in vitro radioimmunoassay), as well as the distribution of nuclear medicine manpower and equipment, and could predict the market trend of nuclear medicine in Taiwan in the future. It is an important reference for nuclear medicine departments to plan manpower and equipment, as well as to develop and manufacture radiopharmaceuticals.

壹、計畫目標

吾人先前分別就 1997 至 2010 年間，以及 2000 年至 2013 年間的台灣的核醫診療健保使用情形進行統計分析，發現核醫使用總量與健保費用總支出隨時間顯著增加，但各種診療項目則有不同的增減趨勢，這些變化趨勢與疾病發生率變化及人口老化有關。由於全民健保於 2019 年新增鐳-223 治療，加以人口持續老化，因此有必要持續更新核醫診療最新利用情形與發展趨勢，於是本研究利用全民健康保險研究資料庫，深入分析 2014 年至 2020 年間的核醫診療使用情形。

貳、重要成果

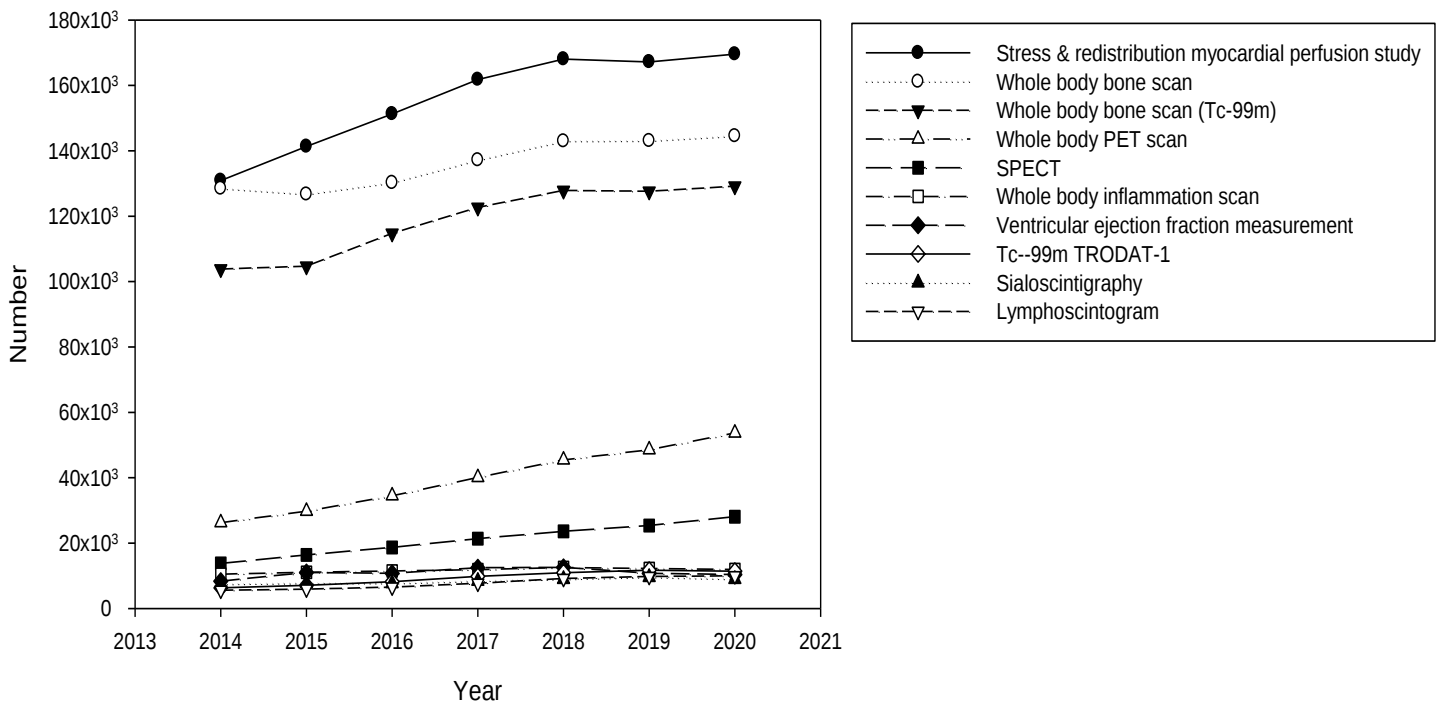
- 一、本研究結合了產(醫院)、官(衛生福利資料科學中心)、學(中華民國核醫學學會與慈濟科技大學)，對於台灣核醫診療應用發展趨勢，包括體內造影與體外放射免疫分析，以及核醫人力設備分布有一全面性的瞭解，研究成果對於核醫藥物開發製備與規劃核醫人力設備具有重要的參考價值。



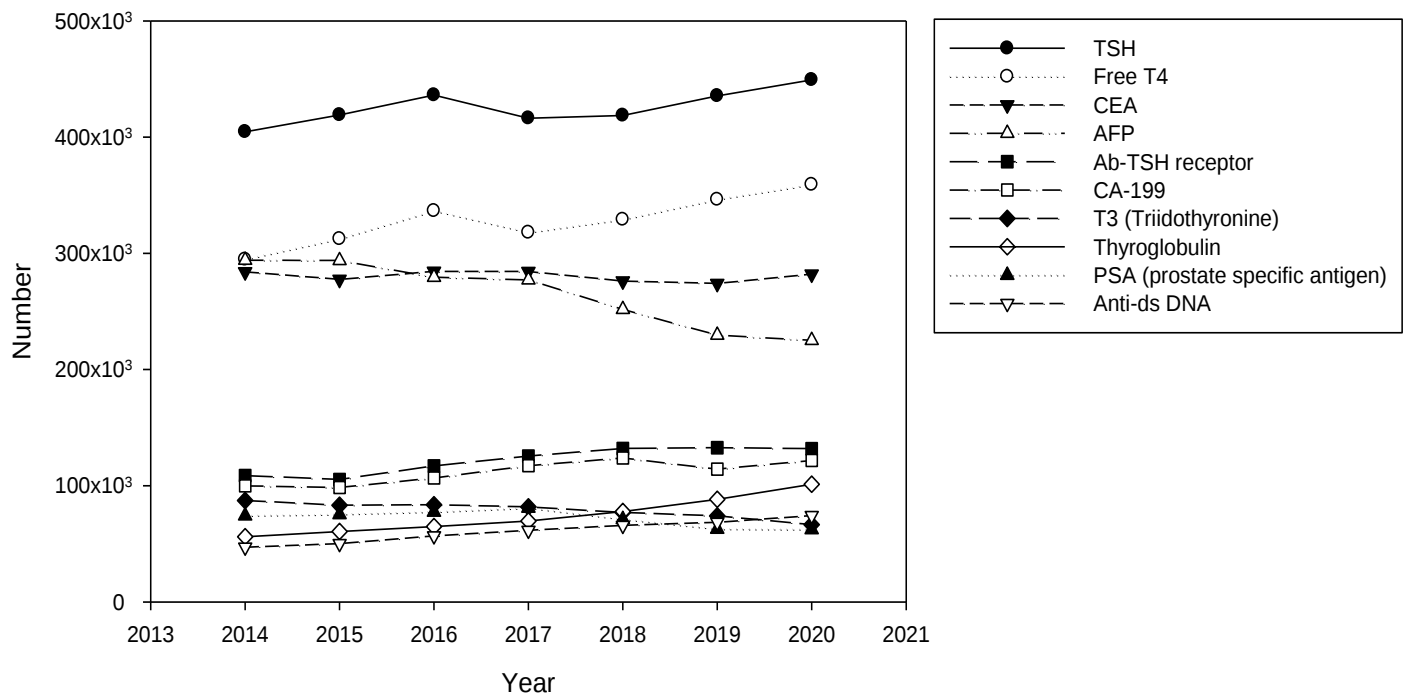
二、本研究成果已被核子醫學暨分子影像雜誌接受刊登(待出版)。

參、展望

建議將來持續針對國內核醫診療應用定期調查分析，使核醫人才培訓、核醫藥物製備開發及核醫設備購置都能達到最佳的狀態，以提供國人高品質的核醫服務。



圖一、2014-2020 年主要核醫診療次數變化趨勢



圖二、2014-2020 年主要 RIA 檢查次數變化趨勢



核醫醫療資料庫及市場分析研究

The utilization pattern and market analysis of nuclear medicine using claim database

(計畫編號：111A001)

楊水河¹ 盧晞卉² 廖姿淇¹ 賴嘉鎮¹

¹ 國立成功大學臨床藥學與藥物科技研究所 ² 國立成功大學附設醫院核子醫學科

台灣核子醫學診療相關領域的發展隨著越來越多的藥物及診療技術加入而有顯著成長，各大醫療院所亦投入更多的影像硬體設備如 PET/CT 等以造福更多的病患。因此，要了解民眾對於核醫的需求及目前國內的核醫市場狀況，進行大規模且具代表性的調查研究是必須的。舉例而言，日本從 1982 年起每 5 年就會進行全國性的核醫調查報告以了解市場變化；然而，台灣的核醫市場調查以文獻搜尋結果僅至 2013 年就未進行更新，無法得知近年(2014~)來的核醫市場情況。所以，進行台灣核醫市場分析研究是緊迫且必要的。

本計畫使用全民健保資料庫進行大規模且具代表性的調查研究以了解民眾對於核醫的需求及目前國內的核醫市場狀況。本研究亦透過共同資料模型之方式(common data model)取得韓國的承保資料庫抽樣檔進行分析，並透過比較兩邊藥物使用狀況與市場概況，以提供本國與亞太區國家使用狀況之比較。

There has been a significant improvement in the field of nuclear medicine therapy as more new drugs and diagnostic technologies have been invented and



more nuclear equipment has been implemented in hospitals. To better understand the unmet need for nuclear medicine and the current state of the market, large-scale and representative research is essential. For example, the Japanese government has conducted a national survey report on the current nuclear medicine market every five years since 1982. Meanwhile, there is no updated report on the nuclear medicine market in Taiwan since 2013, thus the state of art research regarding current Taiwan nuclear medicine market is imperative.

This study was a national scale and representative market research of nuclear medicine via the National Health Insurance Database (NHID). We also applied the common data model approach to obtain nuclear medicine reimbursement information from Korea's claims database, which could provide information on nuclear market utilization patterns between Taiwan and Asia-Pacific countries.

壹、計畫目標

本計畫旨在透過健保資料庫取得全國核能藥物使用之狀況與相關檢查用途分析，並透過計算花費與使用人次了解相關核能藥物之成長狀況與民眾需求。此外，本研究亦與國外學者合作取得韓國抽樣之承保紀錄，並透過比較兩國使用狀況了解台灣與國際使用狀況之差異，並提供未來政策與產業相關考量。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

(一)本研究發現台灣健保體系下之核醫藥物使用量呈現明顯之上升



趨勢，尤其於中樞神經系統、以及正子斷層掃描成長速度最快，且於費用方面則以 65 歲以上之患者佔據最多使用量，且年成長率亦最高，可見台灣高齡化社會對於核醫檢查之需求量亦有顯著提升；根據醫療層級進行分析亦可發現，雖然醫學中心以及區域醫院使用量佔據最大，但一般診所則具有最高的年成長率，可見核醫醫療設備之逐漸普及化。

二、學術成就方面，本研究後續將根據研究內容統整後進行投稿至指標性期刊，並可將相關研究結果統整為海報投稿至相關國際研討會。

參、展望

本研究透過健保資料庫開啟核醫大數據分析之可能性，並可透過後續串連患者診斷以及用藥提供後續研究之材料與相關研究題目；未來研究可以著重於研究特定核醫檢查之使用狀況以及與臨床之連結性，協助改善醫療花費以及提供臨床建議。

表 1、健保資料庫:核醫檢查使用年花費以及年使用人次

Calendar year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Mean	AAGR * (%)
Annual cost per million NTD														
Outpatient	1226.89	1389.09	1484.56	1642.14	1803.01	1923.25	2111.71	2334.70	2598.48	2721.77	2855.69	2869.82	2080.09	8.09
Inpatient	543.53	631.11	619.44	637.49	674.38	695.29	733.99	777.79	861.64	936.63	946.58	1008.36	755.52	5.88
Annual visits per thousand														
Outpatient	221.22	281.68	309.50	331.30	354.44	371.01	389.35	415.84	446.83	454.09	459.18	439.41	372.82	6.69
Inpatient	83.46	105.56	106.47	105.68	109.31	110.17	111.10	114.90	125.22	129.94	128.24	129.04	113.26	4.29

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表

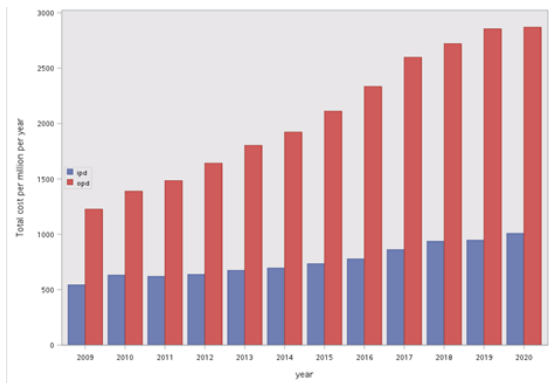


圖 1.門診與住院核醫使用花費

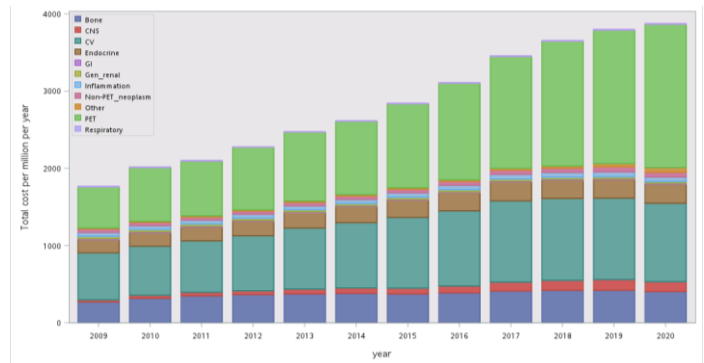


圖 2.核醫檢查各器官用量

**建立輕度認知功能障礙診斷與評估的核醫影像人工智慧模型****Developing an Artificial Intelligence Model for Diagnosis and Evaluation of
Mild Cognitive Dysfunction in Nuclear Medicine Imaging****(計畫編號：112A005)****楊智傑****國立陽明交通大學數位醫學暨智慧醫療推動中心**

隨著失智症人口快速增加，如何有效區辨健康人與輕度認知障礙患者成為重要的議題。本計畫目標為利用 ECD 腦血流 SPECT 影像及結構性 T1 加權腦影像之數據發展具可解釋深度學習模型來建立輕度認知功能障礙影像人工智慧模型。研究結果顯示結合兩種影像所建立的模型預測準確率可達 95%。該成果可為棘手之神經性疾患診斷乃至治療預後，提出客觀且高準確率之輔助診斷工具，為台灣精準醫療實力再提升。

It has become increasingly important to combine medical images and data to distinguish healthy people from those with mild cognitive impairment and dementia. We propose to develop an interpretable deep learning model of mild cognitive impairment from ECD cerebral blood flow SPECT images and structural brain images. The results show that the prediction accuracy of the model established by combining T1-weighted images and ECD SPECT images can reach 95%. Achieving this can be a valuable auxiliary diagnostic tool for diagnosing and monitoring difficult neurological diseases and further strengthen Taiwan's precision medicine.



壹、計畫目標

本研究計畫將應用台灣本土的輕度認知功能障礙個案的 T1 加權磁共振造影腦影像與 ECD 腦血流 SPECT 影像，結合可解釋性的深度學習技術，建立輕度認知功能障礙診斷與評估的核醫影像人工智慧模型，藉由找出輕度認知功能障礙患者之大腦功能與結構性在特定腦區的差異，期望能在疾病早期找出可能罹患該症之個案，從上游著手提高預防醫療的比重，趁早給予更多的醫療支持。

貳、重要成果

本研究結果顯示在以體素為基礎的型態計量學分析中，輕度認知障礙受試者的大腦體積有萎縮之趨勢，主要集中在小腦後葉、左側前後扣帶皮層以及右側顳葉區域。而在建立輕度認知功能障礙的分類模型中，單純使用 T1 加權影像之分類準確率比單純使用 ECD SPECT 影像來的高，但兩種模型的準確率皆以高達 90% 以上，代表本研究中所使用的特徵值擷取方法能夠有效選出能分辨輕度認知障礙與健康受試者之關鍵腦區。

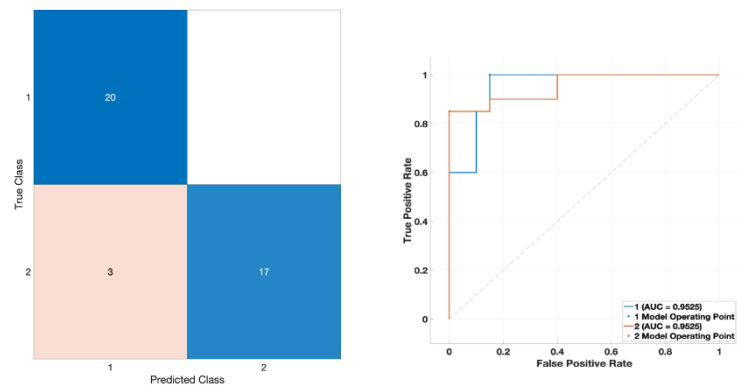
此外，我們發現使用 T1 加權影像能夠有效預測輕度認知障礙患者（敏感性：100.0%）；而 ECD SPECT 影像所建立的模型則是能夠更準確的分類健康受試者（特異性：95.0%），代表兩種不同之腦影像各具其分類優勢，若能結合此兩種腦影像儀器來建構輕度認知功能障礙診斷之人工智慧模型，其準確率相較於單一腦影像儀器應能往上提升，而結果也如我們所預期，在結合了 T1 加權磁共振造影影像與 ECD SPECT 核醫影像後，其預測準確率也高達 95%（表一），顯示兩種影像之結合能夠互補並提升自身影像之優勢。



表一、總結三種輕度認知功能障礙分類模型之比較。

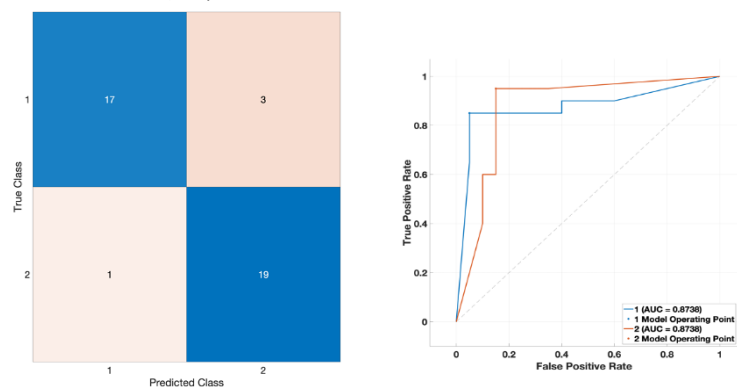
腦影像儀器	T1 加權影像	ECD SPECT 影像	結合 T1 加權影像與 ECD SPECT 影像
特徵值數量	1,735	188	1,923
表現最佳之 演算法	Linear SVM、		
	Quadratic SVM、		Cosine KNN、
	Cubic SVM、	Wide Neural	Cubic KNN、
	Medium Gaussian SVM、	Network	Ensemble (Subspace
	Coarse Gaussian SVM、		Discriminant)
	Coarse Gaussian SVM、		
	Cubic KNN		
F1-score	0.93	0.89	0.95
準確率	92.5%	90.0%	95.0%

T1加權影像



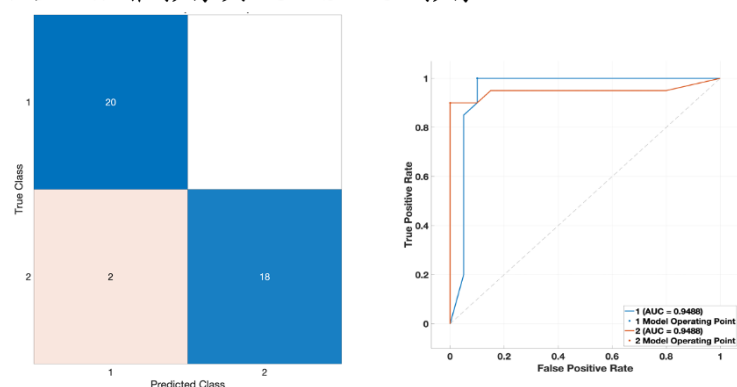
圖一 T1 加權影像建立之輕度認知功能障礙分類模型結果

ECD SPECT影像



圖二 ECD SPECT 影像建立之輕度認知功能障礙分類模型結果

結合T1加權影像與ECD SPECT影像



圖三 結合 T1 加權影像與 ECD SPECT 影像建立之輕度認知功能障礙分類模型結果



參、展望

本研究之結果發現該模型作為精準輔助診斷工具的巨大潛力，相信未來若能更加精進定將能夠實際應用於神經性疾患診斷乃至治療預後，提出客觀、明確，且高準確率之精準輔助診斷工具，透過建立 T1 加權磁共振造影影像與 ECD SPECT 核醫影像所建立之分類模型，期望能在疾病早期找出可能罹患該症之個案，從上游著手提高預防醫療的比重，趁早給予更多的醫療支持。



衛星定位系統之可靠度測試研究

The study on the reliability tests of GPS

(計畫編號：111B016)

卓奕均¹ 林智琪¹ 朱健豪² 陳始明¹ 趙自強¹

¹長庚大學 ²核能研究所

此計畫旨在評估科技執法中使用的 GPS 是否具有足夠的輻射抗性，以協助台灣主管機關管理可移動的高強度密封射源，並在丟失或遭盜時偵測其位置。計畫的主要任務包括：1.制定衛星定位系統的輻射抗性測試標準；2.建立輻射抗性測試標準所需的參考劑量系統；3.完成衛星定位系統的可靠性分析和比較。本計畫的成果可為主管機關提供有用的參考，以實施對可移動的高強度密封射源的科技執法。

This study looks at whether the GPS used for technology enforcement has strong enough radiation hardness and whether regulatory bodies in Taiwan are able to manage mobile high activity sealed radiation isotopes. The GPS can offer early alert of isotope lost or stolen. Prompt replacement of the GPS when it is getting close to the end of its useful lifetime will be effective preventing large disaster. The tasks of this projects completing the reliability analysis and comparison of various GPS including, Task 1, constructing a radiation hardness testing scheme, Task 2, establishing a reference dose system for the radiation hardness testing scheme, and Task 3, conducting reliability analysis and comparison of different GPSs.



壹、計畫目標

根據「放射性物質與可發生游離輻射設備及其輻射作業管理辦法」第四十七條“...射源運送車輛或容器應有即時追蹤系統...”，本計畫的目標是協助主管機關實現可移動高強度密封射源的科技執法，並使用衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)作為該科技執法的基礎。然而，在實施 GPS 科技執法之前，必須確定此 GPS 是否具有足夠的輻射抗性，以滿足足夠長的生命週期，並在服務年限內能夠偵測射源是否遺失或失竊，並在生命週期將盡時能夠提前預警更換設備。這是一個重要的問題，必須在實施 GPS 科技執法之前解決。

高強度密封射源的管理非常重要，因為如果發生事故，對社會的影響也非常嚴重。在過去，台灣曾經經歷過這樣的事故，造成了慘重的代價。根據國衛院環境衛生與職業醫學研究組劉紹興主持的「輻射屋居民流行病學調查及研究」，1982 年至 1984 年期間，台灣共有 1,659 棟房屋成為鈷 60 鋼筋輻射污染的建築物。此外，根據「放射性污染建築物事件防範及處理辦法」，年劑量超過 5 毫西弗的居民必須接受健康檢查。截至 2011 年，輻射屋居民已經進行了超過 9,000 次健康檢查。

一個高強度密封射源的遺失可能會產生大量放射性廢棄物，因此使用 GPS 進行科技執法，必須考慮 GPS 是否足夠耐輻射，並具有足夠長的使用壽命。因此，本計畫的目標是針對台灣科技執法所需的衛星定位系統，進行輻射抗性研究和可靠度分析。

在台灣，銥 192 被大量用於非破壞檢測(Non-Destructive Testing, NDT)，以提供物體的瑕疵、老化或強度不足等資訊，而不會損壞物體。然而，若射源管理不當，可能會對社會造成重大影響。銥 192 射源比起鈷 60 和鈾



137 更容易被攜帶，因此也成為高強度科技執法的首要對象。主管機關也開始評估 GPS 是否可以使用在高強度密封射源的科技執法上。市場上的 GPS 接收器中，精密太空級 GPS 接收器的價格高昂，但其環境耐受性也較高，可以承受更高的溫差及輻射環境，但是由於其較難取得、易受各國技術輸出管制之限制且經濟效益不高，因此本計畫打算在瞭解高輻射場對其特性之影響的前提下，使用商用 GPS 接收器建立放射線照相檢驗作業之 GPS 輻射源監控管制系統。

貳、重要成果

一、測試標準

許多機構擁有豐富的半導體測試經驗。本研究參考了德州儀器 UC-1825B-SP TID 的測試報告，該報告可分為以下幾個部分：

1. 設備資訊(Device-Information)：包含詳細的晶片規格和介紹。
2. 晶片測試(Total-Dose Test Setup)：包括輻射源的定義、測試操作流程和晶片測試內容的說明。
3. 測試特性結果(Test Characterization Results)：描述裝置的功能測試結果。
4. 劑量系統及參考(Applicable and Reference)：提供針對不同輻射環境的矽等效劑量的參考專業報告程序書，例如美國材料和試驗協會規格-ASTM、歐洲太空部件協調-European Space Components Coordination (ESCC)和軍規-Military test standard (MIL)。
5. 劑量率依存性測試。

● 輻射品質

在進行電子元件可靠度測試時，相同的輻射劑量可能會造成不同



的游離輻射損傷，因為需要考慮不同輻射品質的影響。雖然輻射劑量相對容易測量，但卻必須進一步定義不同輻射品質所造成的影響。德州儀器指出，不同種類的輻射在相同劑量的情況下，會對元件產生顯著不同的影響。例如，在銥 192 射源的應用場合中，光子能量約為 200-600 kV，不同於國際標準中使用的鈷 60，因此必須進行兩種射源等效性的研究。

在相同的劑量下，不同類型的輻射會對元件產生顯著不同的影響。因此，常使用線性能量轉移(Linear Energy Transfer, LET)來描述射束品質，對於瞭解 TID 效應有一定幫助。此外，劑量率也對 TID 效應產生很大的影響。當劑量率越高，輻射對元件的總游離劑量就越低，但這種影響因不同元件而異。例如，對於 p 型二極體而言，劑量率的影響比 n 型二極體更大。因此，在進行 DUT (Device Under Test)測試時，不僅最好在使用場域下進行，測試所選的元件也應該是應用時的候選元件。即使是相同輻射，不同劑量率對元件的影響也會有十倍以上的差異。這表明，光子的能量不同，TID 效應也不一定相同。因此，為了獲得可靠的結果，最好在與使用場域相同的情況下進行 DUT 的測試。在本計畫中，我們也評估使用鈷 60 和銥 192 射源可能產生的差異。

- 低劑量率敏感性增強

在低劑量率下，輻射品質敏感的劑量計會表現出敏感性增強的效應。這是因為半導體壓力測試(Stress Testing)和其正常使用環境下的劑量率存在著相當大的差別。在壓力測試中，需要在極短時間內進行，從而在短時間內沉積大量的劑量，形成大量的電子-電洞對，進而產生



較高的再結合率和較低的總劑量效應。相反，在低劑量率下進行測試時，由於所累積的游離損傷比在高劑量率條件下大得多，因此容易出現低劑量率敏感性增強 (ELDRS)，特別是在二極體元件(BJN)中。在進行可靠度評估時，必須注意劑量率的影響，因為在實際的太空環境中，輻射的劑量率非常低，其 TID 發生點未必與實驗室中相同。輻射品質敏感的劑量計可以幫助使用者檢測其照射環境中是否存在 ELDRS。

二、結果與討論

● 完成衛星定位系統之可靠度分析比較

本計畫完成三種受測機型(CAREU-U1；CAREU-U3；某廉價機台-U2，每種機型各五台)之鈷 60 高劑量率輻射損傷加速實驗、鈷 60 低劑量率測試(U3)、以及銥 192 高劑量率測試。其結果見下表之原始測試紀錄。所測試機型皆為商用元件(COTs)。U1/U3 為較高貴機台，U2 為廉價機台。在這些測試中發現失效都不是發生在 GPS 晶片，而是電源晶片，所以利用 GPS 晶片壽命來推估 GPS 系統壽命將會高估系統的可靠度，日後研究應針對不同的電源晶片進行測試，為獨立出 GPS 晶片之壽命，本研究額外做了四個 GPS 晶片的鈷 60 高劑量率功能測試。



No	Model	Radiation field	Start time date/time	System failure date/time	System failure dose (krad-Si)
T3	U3	HDR, ^{60}Co	2022/10/5 10:20	2022/10/5 12:26	12.193
T4	U3	HDR, ^{60}Co	2022/10/5 14:00	2022/10/5 15:15	15.297
T4	U3	HDR, ^{60}Co	2022/10/27 14:22	2022/10/27 15:23	15.297
T5	U1	HDR, ^{60}Co	2022/9/30 11:11	2022/9/30 12:11	33.015
T6	U1	HDR, ^{60}Co	2022/10/6 08:45	2022/10/6 10:21	21.282
T7	U2	HDR, ^{60}Co	2023/1/5 15:02	2023/1/5 18:36	21.339
T8	U2	HDR, ^{60}Co	2023/1/5 13:26	2023/1/5 14:33	12.765
T9	U3	HDR, ^{60}Co	2023/1/5 10:36	2023/1/5 11:50	14.099
T11	U1	LDR, ^{60}Co	2022/10/18 12:00	2022/12/7 20:38	28.113
T1	U2	Ir-192	2023/1/17 13:45	2023/1/31 11:11	5.512
T2	U2	Ir-192	2023/1/17 13:45	2023/1/31 13:52	5.751
T12	U1	Ir-192	2023/1/17 13:45	2023/2/8 18:45	16.617
T25	U2	Ir-192	2023/1/17 13:45	2023/2/8 18:09	12.724
T26	U1	Ir-192	2023/1/17 13:45	2023/2/4 18:24	13.846
T27	U3	Ir-192	2023/1/17 13:45	2023/2/8 01:35	15.528



● 本研究之結論為：

1. 系統測試故障通常發生在可靠度最弱的部分，目前的測試結果不是發生在 GPS 晶片，而是電源晶片。今後可以對不同的電源晶片進行測試，選擇抗輻射能力更強的電源晶片，這樣可以提高 GPS 系統的整體抗輻射能力。
2. 電源晶片為主要故障點是合理的，因為 1.電源晶片應該承受更高的電流，需要更好的絕緣。柵極氧化層較厚，而 TID 主要發生在絕緣層(氧化層)；2.電源晶片中的線性元件較多。BJT 和線性元件的 TID 影響比較嚴重。因此電源晶片的失效劑量較低是有道理的。
3. 儘管商用 GPS 的輻射抗性不能通過選擇特定的電源晶片而得到顯著改善，但我們可以努力實現自製系統。未來也可考慮合併電子圍籬或 WIFI 定位等技術。

參、展望

除了輻射損傷造成 GPS 失效之外，本研究也發現兩個可能導致 GPS 失效的結果。

1. 高空氣象異常可導致 GPS 定位出現誤差，未來執法時應考量天候不佳時可切換到第二種(如 WIFI)或第三種技術(Air-tag?)確保定位。
2. GPS 干擾器，雖然此設備不合法，坊間常有人使用此設備干擾 GPS 定位，可造成數個街區 GPS 定位失效，遇到這種情形主管機關也該事先設想因應方式。

**111 年核電廠熱水流安全分析暨管制法規技術精進研究****2022 Thermal-Hydraulic Safety Analysis and Regulation Technical
Improvement for Nuclear Power Plant**

(計畫編號：111B008)

曾永信 王美雅 陳得誠

清華大學原子科學技術發展中心

為能進一步探討機組於除役過渡階段之安全管制技術，本研究整合材料科學、熱水流分析與風險評估團隊，針對處於停機過渡階段之機組組件是否在具輻射環境下仍因為微生物活動而導致敏化材料潛在腐蝕之疑慮、機組於除役期間臨時火源之風險以及機組在假想喪失冷卻水事故中以低壓爐心注水系統(LPCI, Low Pressure Core Injection)作為救援措施的有效性進行評估。在各分項之努力下，本研究明確的提出以下結論：1．明確的臨時火源之風險與管制建議；2．敏化後之材料仍不致因微生物生長而腐蝕，以及3．現有之 LPCI 援救措施於除役過渡期間仍能有效避免爐心燃料裸露。

In order to further improve the safety regulation technology of NPP during the transitional period of decommissioning, this study integrates materials science, thermal-hydraulic analysis and risk assessment experts to determine the microbial corrosion risk of sensitized components under radiation environment, the temporary ignition source risk and the effectiveness of LPCI in a LOCA accident. The research clearly draws the following conclusions: 1.



Purposed risk and control suggestions for temporary fire sources; 2. The sensitized material will not corrode due to microbial growth, and 3. Existing LPCI rescue measures still can effectively prevent the core fuel un-coved result during the decommissioning transition period.

壹、計畫目標

我國主管機關為能透過與美國核管會之合作以增進對國內運轉中、除役過渡階段等機組之管制品質，自 2004 年與 U.S. NRC 簽訂 CAMP 國際合作協議，並藉由與國內學術單位的合作案持續就國內各界關注之管制議題進行管制技術精進與資訊研析。令主管機關具有充足的技術支援與佐參資訊，對國內處於各種不同階段之機組，皆能有適切之管制動。對此本研究除藉由「CAMP 合作計畫下核電廠除役過渡階段系統安全分析與評估」建立與美國 NRC 之合作關係之外，對內亦針對除役中機組進「微生物腐蝕對於除役過渡階段的核電廠系統與組件安全維護的影響」與「核能電廠除役期間臨時火源之火災危害分析與安全管制要項研究」，以瞭解機組進入除役過渡階段後，因為機組狀態與作業情境之改變，是否造成潛在風險。

貳、重要成果

本計畫各項重要成果可依所執行之分項工作分別描述如下：

一、CAMP 合作計畫下核電廠除役過渡階段系統安全分析與評估

(一)以 TRACE 之建模程式 SNAP 完成核二開蓋模式，模式考慮再循環管路及 LPCI 等設定，並經電廠數據校驗(圖 1 左上)。

(二)利用停機 7 天、30 天、60 天至 1 年等不同熱源條件進行分析，



顯示隨停機時間的拉長有助於延緩事故情境，惟燃料裸露長度過長時，將導致鋇水反應產生，此時燃料升溫趨勢將與蒸汽供應量直接相關，與衰變熱之關聯性將減低(圖 1 右上)

(三)由圖 1 右下可知，隨著事故發展並使燃料裸露長度增加時將伴隨護套升溫，直至 1073K 時將導致氫氣產生；分析顯示 LPCI 可將水位維持於(2/3)爐心高度，可避免燃料破損(圖 1 右下)。

二、微生物腐蝕對於除役過渡階段對核電廠系統與組件安全維護的影響

(一)本研究建立如圖 2 所示之試片製備流程，並以國際間常見之加熱方式製備敏化試片後，投入植菌與否之培養液中進行實驗；其結果顯示，敏化不銹鋼與未經敏化的試片相比，並未有明顯的差異。

(二)進一步分析顯示，硫酸鹽還原菌(Sulfate-Reducing Bacteria, SRB)可藉由代謝產生硫化氫離子(HS^-)對不銹鋼與敏化不銹鋼造成代謝物腐蝕。且不銹鋼鈍化層對 HS^- 較為敏感，少量 HS^- 即可誘發鈍化層改性。而敏化 304 不銹鋼因鉻乏區遭 HS^- 的破壞隨時間增加而加劇，將使鉻乏區經長時間 HS^- 破壞後失去保護作用。

(三)SRB 菌經加馬照射後，確實可以觀察到生物膜皆較無照射組更稀疏(圖 3)，顯示 SRB 在加馬照射下可能受到傷害而使其代謝活動變緩，亦即除役過渡階段過程中機組採用不銹鋼製作的組件，暫無需顧慮微生物腐蝕之影響。

三、核電廠除役期間臨時火源之火災危害分析與安全管制要項研究

(一)火災危害大多以 NUREG/CR-6850 提供之方法與數據進行風險評估，唯針對臨時可燃物其評估結果如若過於保守以致影響除役作業之進行，可以參考 NUREG-2233 之最新方法與參數，則可獲得



較為實際之結果，兼顧火災風險管理與除役作業之進行。

(二)檢視核三廠防火計畫相關程序書(如 105、586.5)並與 RG 1.191 監管指引內容進行比對，研析結果某些監管項目，例如可燃物管制、防火區邊界或屏蔽之控制等，可能因建置用過核子燃料池島區、低放射性廢棄物處理區設備建置等作業而導致火災危害特性與功率運轉期間不同，因此程序書(如 105、105.1、586.5 等)應進行適當修訂。

(三)根據本研究之分析結果，核三廠燃料廠房一樓防火區(含 105、105A、及 105B)除役期間應嚴格管控可燃物進出，且不應存放臨時可燃物(圖 4)。若因除役作業所需，應在現場人員管控下，作業完成立即移出。二樓防火區 133 與三樓防火區 134 等區域要放置臨時可燃物，應有進一步的評估，佐證其適切性以及行政管制的因應措施。

參、展望

本計畫藉由實驗與階方式探討機組是否因為系統狀態之改變與設備可用性不同抑或除役作業期間之臨時火源等與正常運轉不同之情境而造成機組之潛在危險。各項技術不僅源自於過往機組運轉期間所積累之能量；透過機組狀態改變之情境，更可擴展對於事故與風險之分析視野。預期本計畫之執行將可為國內未來所需的核能管制提供必要之人才與技術。

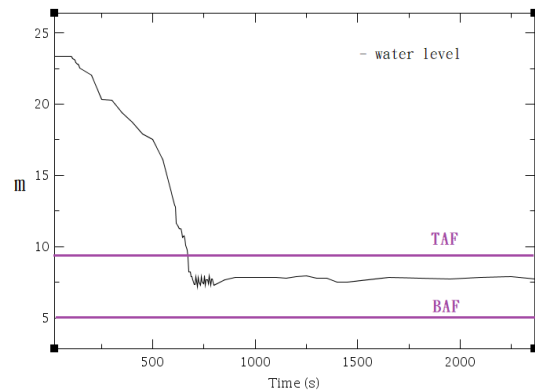
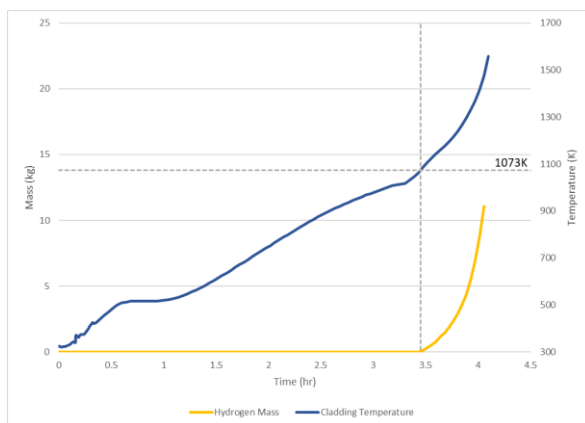
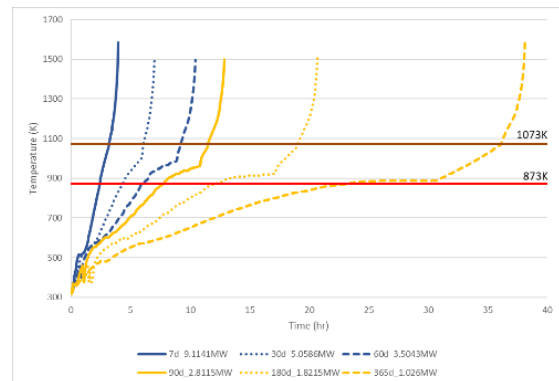
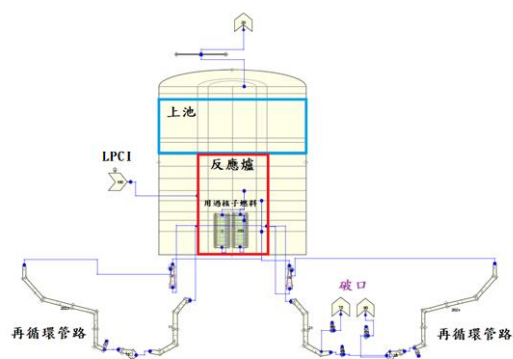


圖 1、TRACE 之 LOCA 分析模式(左上)、不同停機時間下燃料溫度升溫趨勢(右上)、爐心溫度趨勢與氫產生量(左下)以及 LPCI 注水對水位之維持效果(右下)

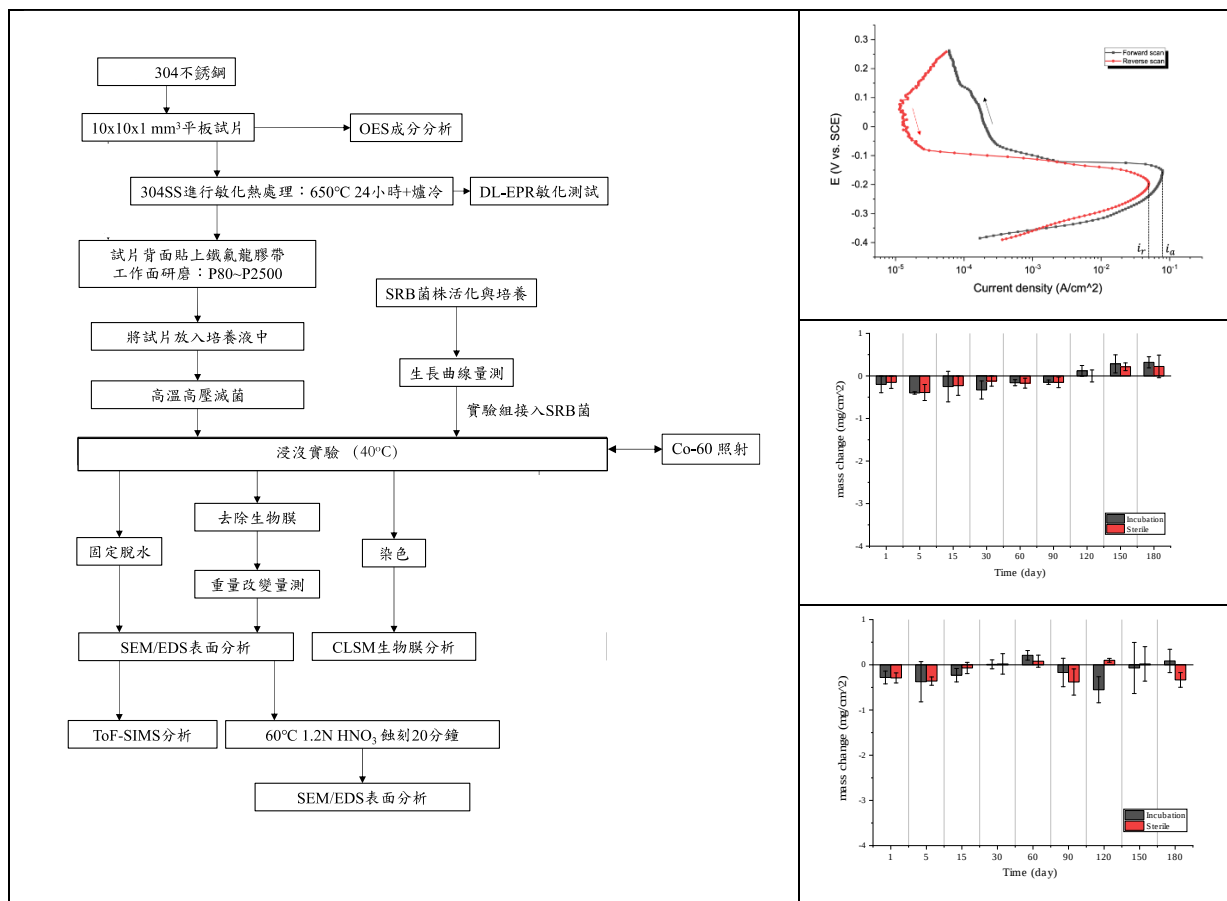


圖 2、整體微生物實驗流程(左)、敏化後 DL-EPR 結果(右上)、不銹鋼質量改變(右中)、敏化不銹鋼質量改變(右下)

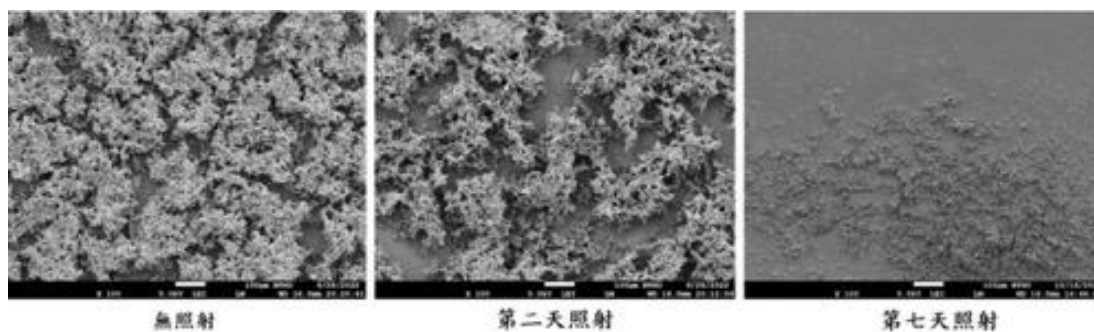


圖 3、不同照射條件下敏化 304 不銹鋼在第 30 天時於低倍率下的表面生物膜形貌

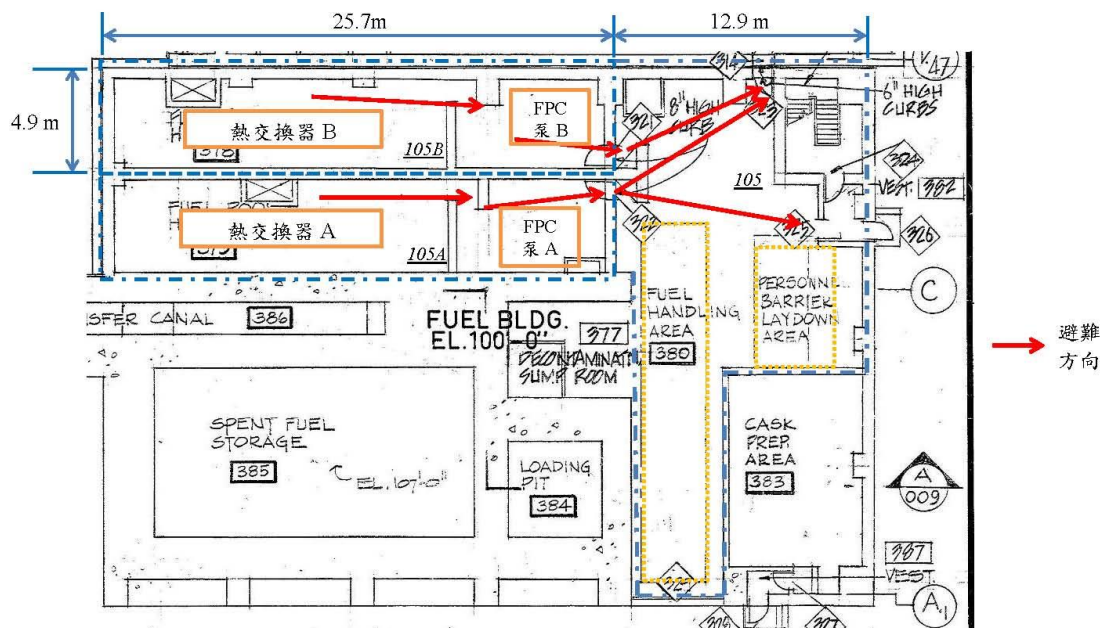


圖 4、燃料廠房一樓防火區(考量重要設備與消防功能，不應存放臨時可燃物)



除役廢棄物離廠偵測國際規範研析

Study of International Regulations on Radiological Characterization of Waste
Cleared from Decommissioning Nuclear Power Plants

(計畫編號：111B012)

趙得勝 蔣安忠 劉鴻鳴

國立清華大學原子科學技術發展中心

核設施除役與拆除將產生大量的廢棄料，其中大部分的材料並不具放射性或僅具有非常低的放射性污染，經過適當地處理及解除管制之後，可以以有條件或無條件的方式進行回收及再利用。回收/再利用的做法為極具價值的解決方案，可以最大限度地減少除役產生的放射性廢棄物，同時也可最大限度地回收或重新使用仍具有價值的材料。囿於除役廢棄物種類相當歧異，且解除管制離廠後的回收與再利用產物也可能牽涉十分複雜的應用範疇與放射性曝露情節，目前國際上仍缺乏一致性的廢棄物離廠輻射偵檢管制標準，此將可能造成未來廢棄物離廠後進行回收與再利用的限制與挑戰。為因應未來核設施廢棄物解除管制可能面臨的劑量評估與特性偵檢需求，本研究計畫已完整地收集與分析目前國際上針對除役廢棄物解除管制的相關規範及執行實務，並完成廢棄物解除管制的放射性評估方法及偵檢標準研析，藉此預先獲知核設施廢棄物離廠偵測在管制上可能面臨的挑戰，相關的成果可提供國內的設施經營者與管制機關在擬定廢棄物解除管制之做法與管制策略時的參考。



The decommissioning and demolition of nuclear facilities is expected to generate a large amount of scrap materials. Most of them are non-radioactive or are of very low-level radioactivity and can be removed from the facilities by means of conditional or unconditional clearance for further recycling and reuse if they have been properly treated. Recycling and reuse option is a valuable solution to minimize radioactive waste from decommissioning and simultaneously maximize recovery and reuse of valuable materials. Due to the fact that the types of decommissioned waste are quite different, the recycling and reuse products after clearance may involve very complex applications and radioactive exposure scenarios. Currently there is still a lack of consistent international regulatory standards of radiological characterization for waste clearance, which may result in restrictions and challenges for recycling and reuse of scrap materials cleared from nuclear facilities in the future. In order to meet the possible needs of radiological dose assessment and characterization survey for clearance of materials from nuclear facilities, we have thoroughly collected and analyzed the current international regulations and implementation practices on clearance of decommissioning waste by this project. We have also completed the exploration and analysis of radiological dose assessment methods as well as characterization survey standards for waste clearance, so as to understand the possible regulatory challenges on clearance of waste from decommissioning nuclear facility in the future. The relevant fruitful results of this project can be useful reference for domestic facility licensees and regulatory authorities when formulating the practices and regulatory strategies of waste clearance.



壹、計畫目標

國際上有許多核設施已屆或正瀕臨運轉期限而須面臨除役的命運，國內的核能電廠未來也將除役而需採取立即拆除的處置措施。在可預見的未來，經由核設施之除役與拆除將會產生相當巨量的廢棄物，包括：廢鋼鐵、銅、鋁及混凝土碎石等。由於核設施除役產生的大部分廢棄材料或物件對公眾健康的危害通常極低或可忽略不計，藉由解除管制的過程可以回收及重複使用，然廢棄物的解除管制目前在國際上並無一致性的離廠偵檢標準，致使解除管制的做法雖有相當多的優勢，但迄今並未被廣泛地施行。探究其欠缺一致性離廠偵檢標準的原因，主要係由於廢棄物解除管制離廠之後可能牽涉相當複雜的回收及再利用情節，且過往的放射評估常採用過於保守的假設，致使各國紛紛採行較為嚴謹的標準，進而可能衍生解除管制離廠限值過度保守，並造成特性偵檢的困難。為使解除管制的原則更易於落實，發展可行的廢棄物解除管制放射性評估方法及適合國內採行的離廠偵檢標準將有其必要性。本研究計畫之目標將針對上述面向進行深入研析，主要的工作項目說明包括：(1) 廢棄物解除管制國際管制規範研析；(2) 材料解除管制之放射性評估方法研析；(3) 材料解除管制離廠偵測限值之來源與依據研析。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

本研究主要針對除役廢棄物解除管制之國際規範、回收/再利用案例、放射性評估方法、離廠偵測限值等面向進行研析，執行成果列述如下：

1. 針對除役廢棄物解除管制之回收/再利用方案進行研析，除概述目



前可供遵循的國際管制規範及各國所採取的做法之外，也藉由案例分析汲取各國際機構在回收/再利用方案的實務經驗。

2. 分析比較回收/再利用與處置/替代兩種方案對於健康、環境、以及社會經濟面向的影響，藉此可獲知回收/再利用方案在健康風險與環境衝擊方面具有極大的優勢。
3. 探討國際對於除役廢棄物解除管制之管制現況、實務做法、以及風險評估等，相關的內容與經驗可提供國內的設施經營者與管制機關在擬定廢棄物解除管制之做法與管制策略時的參考。
4. 針對 NUREG-1640 廢棄物解除管制回收與再利用之放射性評估方法進行研析，完成各類解除管制廢棄物（包含廢鋼鐵/銅/鋁及混凝土）之回收與處置的放射評估方法及參數分析，並整理各類廢棄物的劑量評估結果及其最重要的關鍵曝露情節與均一化劑量，同時也表列核電廠常見核種對應的劑量評估結果。
5. 針對國際上各機構在廢棄物解除管制離廠偵測限值之管制規範進行研析，除完成 NRC、IAEA、ANSI 等國際機構之篩查水平及指引發展歷程的分析比較之外，也完整探討 NRC IE Circular No. 81-07 及 ANSI-HPS N13.12-2013 兩份文件中相關標準的制訂依據與使用原則，據此彙整國際各機構對於殘留放射性污染物質解除管制的標準及相關依據，並且與國內現行標準進行比較。

二、學術成果

1. 完成“除役廢棄物離廠偵測國際規範研析”委託計畫期中報告與期末報告。
2. 發表國內期刊論文一篇：



趙得勝, "核設施除役廢棄物解除管制之國際發展現況及其影響評估", 台電工程月刊第 895 期, 112 年 3 月號。

3. 培育及延攬人才：完成博士培育/訓人數 1 名、碩士培育/訓人數 4 名。
4. 投稿論文"核設施除役廢棄物解除管制之國際發展現況及其影響評估"獲評選為『優等稿件』(獎勵機構：台灣電力公司台電工程月刊編輯部)。

參、展望

- 一、針對除役廢棄物之解除管制與離廠偵檢，過去各國之間的法規標準並不一致且未有進一步地協調發展，此可能會對未來除役廢棄物的回收/再利用發展構成挑戰。建議國內應開始研議相關管制方案，以因應未來核電廠除役之可能需求。
- 二、經由風險評估與環境影響比較，廢棄物解除管制之回收/再利用方案相較於處置/替代方案具有更大的優勢，可大大地減少土地使用、水、空氣、礦物資源、能源資源等環境衝擊。建議國內有關單位應積極考慮採取回收/再利用方案，並確保可提出安全且有效的除役廢棄物解除管制實施方案。
- 三、NUREG-1640 分析係考量美國當前的工業實務及民生應用等條件選擇可能的曝露情節，用以確認各類解除管制材料的關鍵群體，可做為支援管制考量的技術基礎。
- 四、由除役廢棄物解除管制之劑量評估結果顯示，工人相關曝露情節為各類廢棄物進行回收與處置時的關鍵群體，且混凝土瓦礫的回收與處置會貢獻最高劑量。國內雖不像美國有完整的廢棄物回收與處置



的設施與網絡，然未來如有執行相關作業的需要時，務須針對上述情節或材料的關鍵群體加強管制上的措施。

五、針對廢棄物解除管制離廠之偵測標準，目前國內外已有相關法規或指引經由評估個人或公眾的輻射劑量與風險、量測儀器的最低可測能力、以及現場作業的可執行性，制訂由解除管制標準所延伸的篩查水平。此似已漸成為國際上逐漸認可的做法與共識，國內未來或許也可適度參酌。



日本發電用反應器高活度設備拆除技術實例研究

Study of Dismantling Technology for Highly Radioactive Equipment at
Power Reactors in Japan

(計畫編號：111B011)

許文勝 楊雋之

國立清華大學

日本原子力研究所（現為原子力研究開發機構）的「動力試驗爐」JPDR(Japan Power Demonstration Reactor)是日本最初的發電用反應器也是目前唯一完成除役的電廠。該電廠於 1963 年開始運轉，1976 年結束運轉，1982 年開始第一階段除役準備作業，1986 年開始第二階段拆除實驗至 1996 年完成拆除。其拆除過程中所獲得的經驗對後續日本核電廠的除役作業提供了非常重要的參考價值。為確保國內核電廠安全除役，藉由本計畫蒐集 JPDR 高活度設備拆解之實際案例，彙整並掌握相關拆除技術與應用範例，以瞭解日本除役實務經驗與作法，提供管制單位參考。

The JPDR (Japan Power Demonstration Reactor) is the first Japanese nuclear power reactor, which was constructed for the purpose of obtaining an experience of operation and decommissioning. The JPDR started to operate in 1963 and was shut down in 1976. Its decommissioning program consists of two phases. Phase 1 and Phase 2 began in 1982 and 1986, respectively, and were completed successfully in 1996. The dismantling technology and lessons learned from JPDR are very useful for other plants to implement



decommissioning project. The purpose of this research is to have insight into the operational experience of JPDR decommissioning by means of collecting and analyzing its documents, especially those of dismantling technology for highly radioactive equipment. The results gained could be provided for regulatory application.

壹、計畫目標

為邁向 2025 年「非核家園」目標，於台灣 4 座核電廠中，核一廠 1、2 號機及核二廠 1 號機已進入除役階段，核二廠 2 號機及核三廠也將於運轉執照屆滿後陸續停止運轉。在核四不重啟之前提下，2025 年台灣將迎接「零核時代」。然而，在告別核電之後開啟的是另一條漫長且充滿挑戰的除役之路。核電廠除役是一項極為龐大、複雜的工程，一般需耗費 25 至 30 年之久。根據核一廠除役時程的規劃，主要分成四個階段，包括：停機過渡階段、除役拆廠階段、廠址最終狀態偵測階段及廠址復原階段。而其中最具挑戰性的，就是除役拆廠階段所進行反應器本體與其他受中子活化之結構、系統及組件的拆除作業。針對這些輻射管制區域內高活度設備的拆除作業，除了需要高度的專業技術外，還需採取適宜的工法並輔以必要的專用設備，以確保除役拆除期間的輻射安全。

日本原子力研究所的 JPDR 是日本最初的發電用反應器也是目前唯一完成除役的電廠，於 1963 年開始運轉，1976 年結束運轉，1982 年開始第一階段除役準備作業，1986 年開始第二階段拆除實驗至 1996 年完成拆除。其拆除過程中所獲得的經驗對後續日本核電廠的除役作業提供了非常重要的參考價值。

由於國內無先前拆廠經驗可循，為確保核電廠安全除役，藉由本計畫



蒐集 JPDR 高活度設備拆解之實際案例，彙整並掌握相關拆除技術與應用範例，以瞭解日本除役實務經驗與作法，提供管制單位參考。

貳、重要成果

完成 JPDR 除役相關研究報告之資料蒐集，深入分析有關高活度設備拆除各項內容，並彙整相關拆除技術與應用範例。

藉由本計畫之執行，深入瞭解 JPDR 高活度設備拆除實務經驗與作法，並進行細部探討與綜整分析進而提出管制建議，以作為管制單位進行除役審查與相關執行作業之決策參考。

參、展望

核電廠除役不只是電廠的責任，也是政府（管制單位）需共同面對的課題。為使民眾安心並保障民眾健康安全，除役時需做到「有效果且有效率」，即最佳化。電廠方面應制定確實的管理計畫，並配合管制單位根據除役風險等級變化所實施的安全管制，對放射性廢棄物以有效果且有效率的方法進行處理及處置。



表 1 JPDR 拆除實績

所在地	茨城縣，日本原子力研究所
許可區分	反應器設施
反應器型式	沸水式(BWR)
設施概要	日本首座實現核能發電的反應器
熱功率	90,000 kW
建設費	約 45 億日圓
初次臨界	1963 年 8 月
永久停止運轉	1976 年 3 月
研發拆除技術	始於 1981 年，歷經 5 年時間研發
實際拆除作業	1986 年 12 月開始至 1996 年 3 月完成拆除
除役技術研發費	約 90 億日圓
設備拆除費	約 140 億日圓
產生放射性廢棄物	3,770 噸
工作人員集體劑量	306 人・mSv

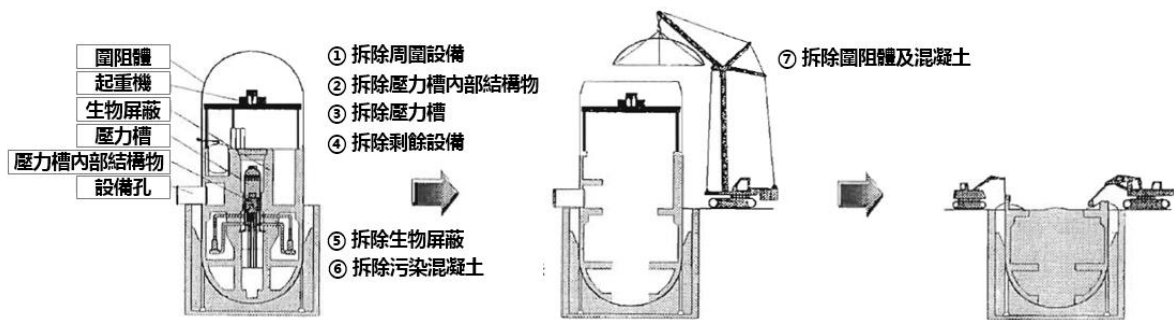


圖 1 JPDR 反應器圍阻體拆除程序



圖 2 反應器拆除技術研發項目

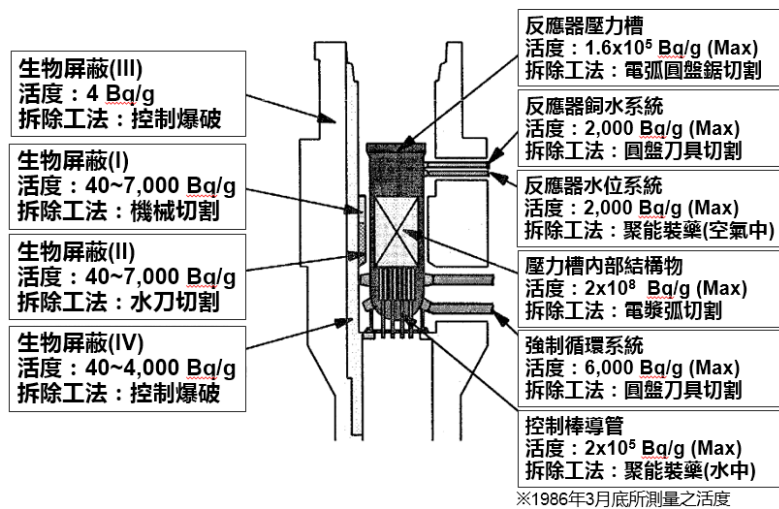


圖 3 JPDR 的組件、結構及其拆除工法

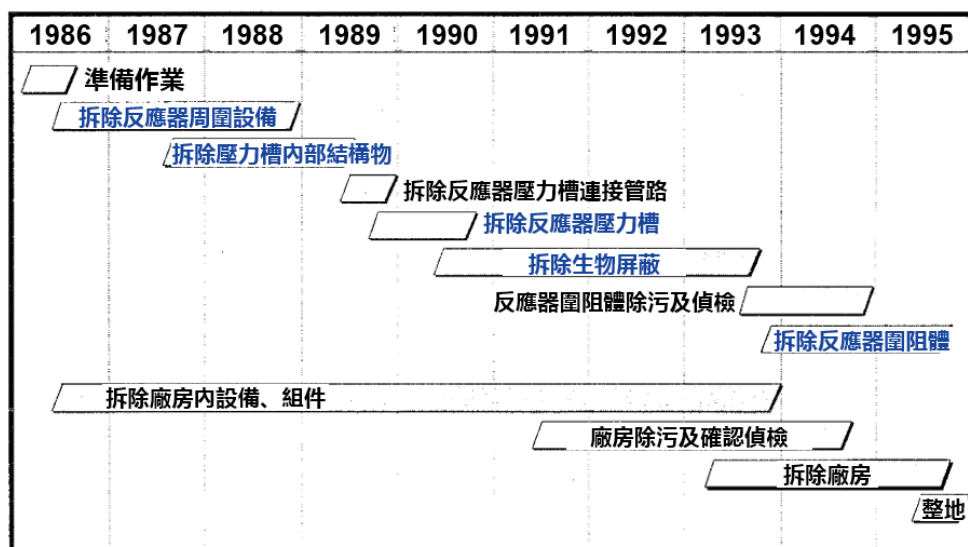


圖 4 JPDR 拆除時程

**111 年核電廠結構/設備受潛在地震之安全影響及因應管制技術研究**

Safety Impact and Regulatory Technology Research for NPP

Structures/Components under Potential Earthquakes (2022)

(計畫編號：111B006)

洪李陵 朱世禹 侯琮欽 王雲哲 鍾興陽

成功大學土木工程學系

為因應台電核電廠執行 PSHA SSHAC-3 計畫之後續相關管制需求，本計畫首先利用台灣的地動資料庫進行垂直向對水平向譜加速度比值的中值和對數標準差之相關分析，提出中值和對數標準差隨振動週期變化的線性包絡線。其次基於波傳理論，以水平向大震度人造地震輸入分析軟體 STRATA，探討 PWR 電廠之地盤反應。同時採用 PWR 電廠井下實際量測資料，比較 V/H 反應譜比值的峰值週期與垂直向頻率響應函數顯著週期的關聯性。接著在 ABAQUS 分析時，輸入 OBE、SSE 或 RLE 之反摺積，探討核能結構於不同高程或土壤性質的土壤結構互制效應之結果，並比較 SSI 時域分析與往年 SASSI 之頻域分析結果的區別及準確性。核電廠依據美國核能研究所(NEI)的多樣式應變策略(FLEX)，進行不同超越設計基礎外部事件(BDBEE)災害侵襲下的減災策略評估分析，本計畫最後詳細推導 C1%與 C10%的計算流程，並與 CDFM 方法及易損性分析的 HCLPF 值對比評估，提供核能管制單位有效檢視核電廠關鍵結構與設備的 FLEX 耐震評估。



On account of potential seismic threats, the TPC has executed the PSHA SSHAC-3 on its NPPs. At first, this project uses Taiwan ground-motion database to evaluate the median and the logarithmic standard deviation of V/H response spectral ratios, and provides linear envelopes for period-dependent median and logarithmic standard deviation of V/H response spectral ratios. Based on the wave propagation theory, the horizontal artificial earthquakes with different magnitudes are applied to the software STRATA in order to investigate the linear/non-linear site responses of the PWR power plant. Furthermore, the on-site measurements from earthquake events of the PWR power plant are used to investigate the correlation between the peaks and the predominant periods of the vertical frequency response function. Then, the old and new soil data for deconvolution processing are used and OBE, SSE or RLE are input in ABAQUS to implement time-domain analysis at different elevations of structure. The results of SSI analysis in time domain would be compared with the results of SASSI analysis in frequency domain for distinction and accuracy. FLEX published by NEI contains coping strategies for beyond-design-basis-external-event (BDBEE) hazards on NPPs. Finally, the $C_{1\%}$ and $C_{10\%}$ calculation methods are derived in this project. Its results are compared with CDFM and fragility analysis for HCLPF values. This study provides nuclear energy control agencies to effectively review the FLEX procedures of nuclear power plants for evaluating their seismic capacities.

壹、計畫目標

為因應台電核電廠執行 PSHA SSHAC-3 計畫後之相關管制需求，例如核電廠地震危害與篩選報告、核電廠耐震度評估技術報告、場址地動放大效應分析、和土壤-結構互制的樓板反應譜分析等等，需建立 SPRA 管



制能力，釐清與研析新一代的管制技術。本計畫目標為：(1)進行 V/H Ratio 中值和對數標準差之比較，與重要影響因子之探討，以及隨週期包絡函數之分析。(2)進行不同輸入地震動強度與場址土層非線性行為探討，以及垂直向地盤反應與地震事件井下量測之評估。(3)進行既有核電廠之時間域與頻率域 SSI 分析之比較。(4)進行多樣式應變策略(FLEX)中 NEI 12-06 Appendix H Path 5 耐震評估程序的分析方法及技術內涵檢視。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

利用台灣的地動資料庫中，各週期可用的測站紀錄計算 V/H Ratio，並假設其為對數常態分佈，估計中值和對數標準差，再以簡單的線形包絡之，發現 V/H Ratio 隨振動週期有上升、下降、再上升的趨勢。

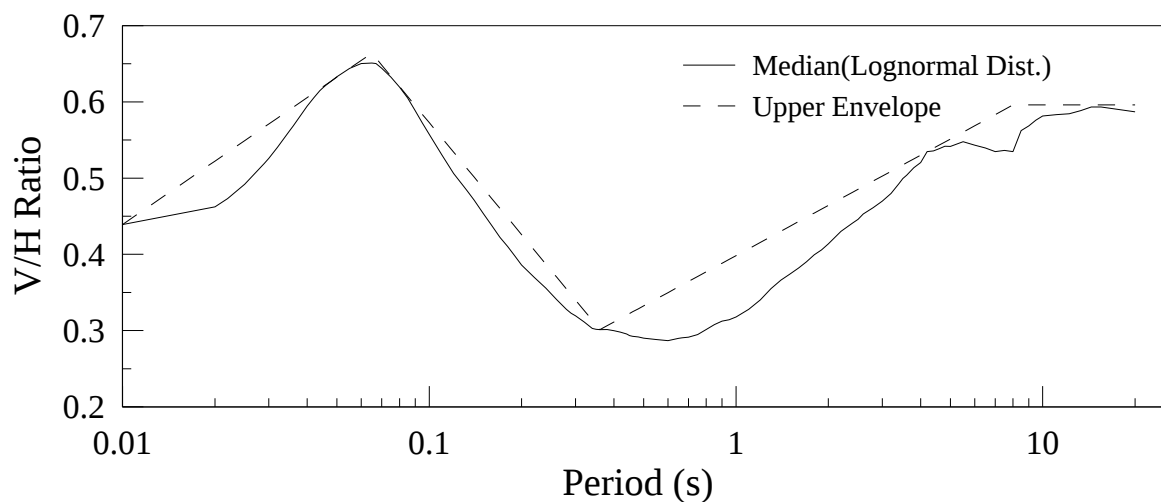


圖 1 V/H Ratio 中值的曲線和包絡線



利用實際建物基礎或自由場的實測加速度紀錄計算 V/H Ratio，亦發現 V/H Ratio 隨振動週期有上升、下降、再上升的趨勢。

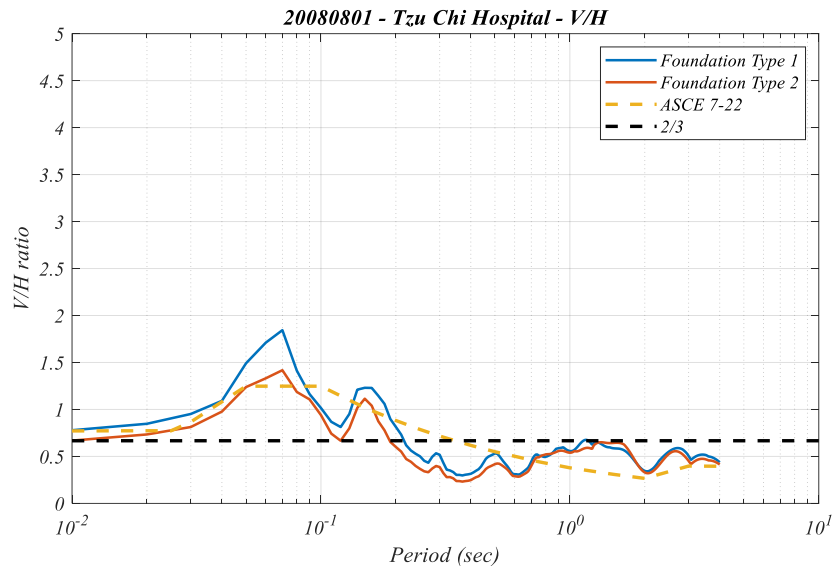


圖 2 慈濟醫院基礎加速度之 V/H Ratio

(地震事件：2008 年 8 月 1 日)

本計畫的各設備案例以相關公式計算對應於不同地表加速度需求的預期破壞機率，可知：(1)剪力牆的耐震承受能力最強，而儲存槽的耐震承受能力最弱。(2)廠用水泵與熱交換器的耐震承受能力互有高低，乃因熱交換器的中值比較高，但複合對數標準差比較低之故。

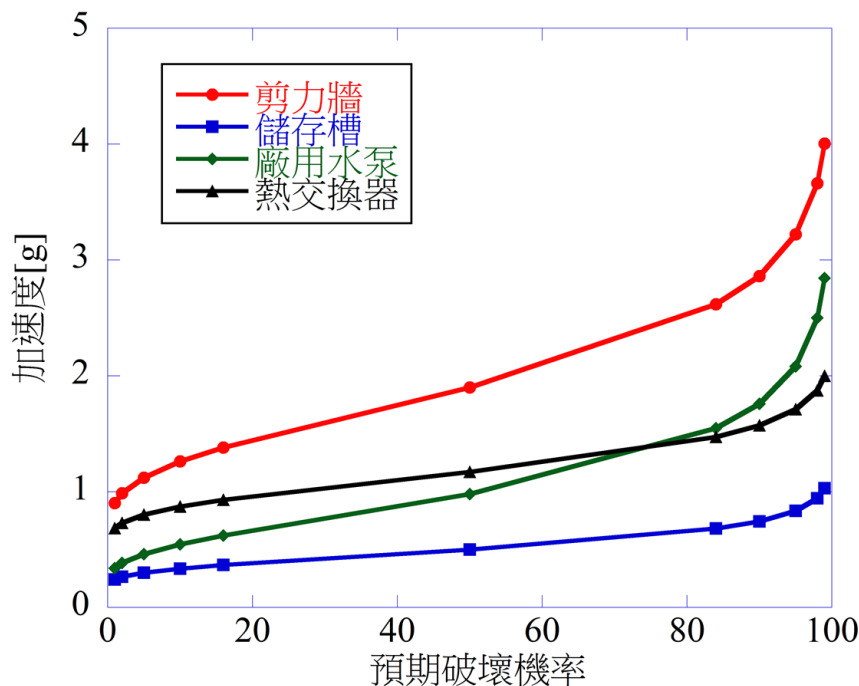


圖 3 各案例之預期破壞機率與可承受之地表加速度

參、展望

一、SSHAC 計畫應用當下的可用資訊，一旦發現新資訊，例如新的顯著影響風險資料、新的技術模型、或分析和演繹資料的新方法等，已完成的風險計畫面臨更新需求，故有必要研析 NUREG-2213 的 SSHAC 計畫危害更新程序。

二、台電公司依照 EPRI 1025287 報告導則，提出核一、二、三廠「地震危害與篩選(SPID)報告」，交付核管審查，透過計畫之執行，強化管制審查平行驗證技術。SPID 涉及地盤反應分析(SRA)，獲取基礎輸入反應譜(FIRS)，用於接續的地震安全度評估和用過燃料池評估，故有必要蒐集場址井下與圍阻體之實際地震資料，基於廠址基礎設計反應譜，進行圍阻體振動反應預估和時間域地盤反應分析與



kappa2 調修之研究。

三、基礎輸入反應譜作用於核電廠廠房和圍阻體後，需進行其內 SSC 的耐震餘裕度檢核，故有必要建立核電廠結構之土壤-結構互制分析模型，利用時間域分析方法進行土壤-結構互制影響研究。

四、台電公司依照 EPRI 3002000704 和 EPRI-NP-6041-SL 執行導則提出核一、二、三廠「加速耐震評估程序(ESEP)報告」，交付核管審查，其中使用多樣式應變策略(FLEX)的核能管制方式，以及 NEI 12-06 Appendix H Path 5 的指引，改善高地震風險的設備，增加核電廠的深度防禦能力，提升核電廠整體的耐震餘裕，故有必要進行「NEI 12-06 Appendix H Path 5」耐震評估案例實作之研究。



111 年核電廠水災與海嘯危害再評估精進技術研究與管制技術諮詢
Regulatory technology and advanced assessment methodology onflooding and
tsunami hazard reassessment for NPP (2022)
(計畫編號：111B007)

蕭士俊¹ 洪李陵² 吳昀達¹ 陳彥龍¹

¹ 成功大學水利及海洋工程學系 ² 成功大學土木工程學系

本研究分為三個部分進行海嘯方面之研究。首先，以建立「近岸廠區」的美國地震型的機率式海嘯危害度分析程序為目的進行評估技術之建置。接著，蒐集並彙整既有文獻針對機率式海底崩塌型海嘯(LPTHA)之建置方法及認知不確定性分析，並以蒙地卡羅模擬法建立初步的機率式海底山崩型海嘯分析方法及流程。最後，進行水密門易損性曲線組成分析技術之研析，包含水密門易損性之資訊收集、水密門易損性之試驗數據解析和水密門易損性曲線之分析程序探討。

There are three tasks in this project. Firstly, a tsunami source reconstruction method was established for the nearshore region based on the probabilistic earthquake-tsunami hazard assessment method which uses the unit tsunami method to assess scenarios. Secondly, the review studies available in the literature for LPTHA were studied with the inclusion of a procedure tree involving slide variability and uncertainty. Based on existing information, we aim to establish an LPTHA with using Monte Carlo simulation to make slide variability and uncertainty included. Finally, the analysis techniques for



constituting the fragility curves of watertight doors subject to tsunami demand were studied, including the collection of information on the fragility of watertight doors, the resolution of test data on the fragility of watertight doors, and the discussion of analysis procedure on the fragility curves of watertight doors.

壹、計畫目標

日本福島核災事故發生後，USNRC 組成之 NTTF 建議事項 2.1 要求核電廠進行水災再評估。故本研究目標分為三個部分：1. 建立美國地震型「近岸廠區」的機率式海嘯危害度分析程序，釐清核電廠進行地震型機率式海嘯危害度分析所需之評估管制技術內涵，提供國內進行相關審查所需之參酌。2. 建立機率式海底山崩型海嘯的評估流程，研析相關方法。3. 研析水密門易損性曲線組成分析技術。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

(一)研究進一步將所需之門檻條件明確化(Condition-1: 所有測站的最大海嘯波高的相對誤差絕對值之平均值 $\leq 20\%$ ； Condition-2: 每個測站之最大波高皆須 $\geq 80\%$ 的最大海嘯波高值)，並成功逆推海嘯源。研究以 8 個不同的海嘯源初始權重猜測值進行，逆推成果如圖 1。圖 2 顯示通過逆推門檻條件的結果共有 6 組，惟結果非唯一解，其對於近岸之影響性有待研析。

(二)建立包含認知不確定性分析之 LPTHA 執行架構及分析流程。

研析海底山崩剛體模型和流變模型之評估技術程序研析，據此



釐清不同水動力模式及山崩模式之耦合方法及優劣勢。

(三)根據相關回顧性文章，以山崩型海嘯而言，具頻散特性的數值模式為必要條件，而使用剛體假設以模擬海底山崩海嘯可提供較保守之模擬結果。此外，本研究實際進行兩種不同運動型態之剛體模型造成的溢淹範圍，結果顯示 Translation 型態之結果較為保守(如圖 3)，與前人研究所述相符。

(四)依據日本 Taoka 等人(2020)的水密門實驗和模擬分析，在水密門抗地震與海嘯的易損性評估中，水密門的水密性能可以水壓為指標來定義，例如可選擇水理實驗中水密門達到允許漏水量的對應水壓。

(五)水密門密封部的不同設計導致水密性能有異，例如填料性質、填料道數和填料壓蓋放置方式等。未發現水密門的水密性能與水密門的面內剪應變有明顯關係，但研判水密性能與水密門因地震造成的面外剪應變有關，可惜 Taoka 等人(2020)的水理實驗未將面外剪應變列入實驗條件。

(六)由於水理實驗的結果只得到三種類型水密門各 9 個需求水壓數據，再無其它同類型水密門的水理實驗數據，不足以估算知識不確定性的對數標準差。因此，無法推估單一類型水密門的平均易損性曲線，也無法推估單一類型水密門不同信心水準的易損性曲線。

二、學術成就方面，共發表國內研討會論文一篇

發表研究論文「地震型機率式海嘯於近岸危害度之研究」於國內海洋工程研討會，進行機率式海嘯源逆推方法之建置研究。



參、展望

因海嘯源逆推之結果非唯一解，此對於機率式海嘯危害度於近岸廠區之影響需要進一步的研析。此外，以蒙地卡羅模擬進行之機率式海底山崩型海嘯分析結果顯示可能因模擬組數不足或其他因素，造成於陸域之適用性不佳，需要持續進行研究確認。最後，透過研析日本的水密門易損性曲線組成分析實驗和模擬成果，以此為基礎持續研究，藉此建立水密門易損性曲線建構方法。

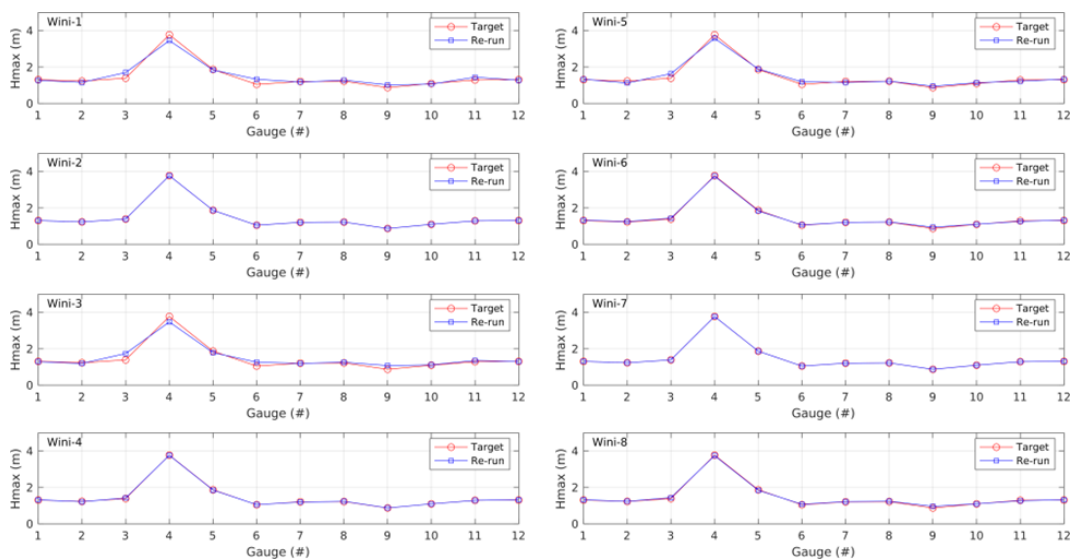


圖 1.8 種初始權重猜測值以 FUWAVE-TVD 重新模擬(Re-run)與目標值(Target)的最大海嘯波高(Hmax)於不同測站之比對結果

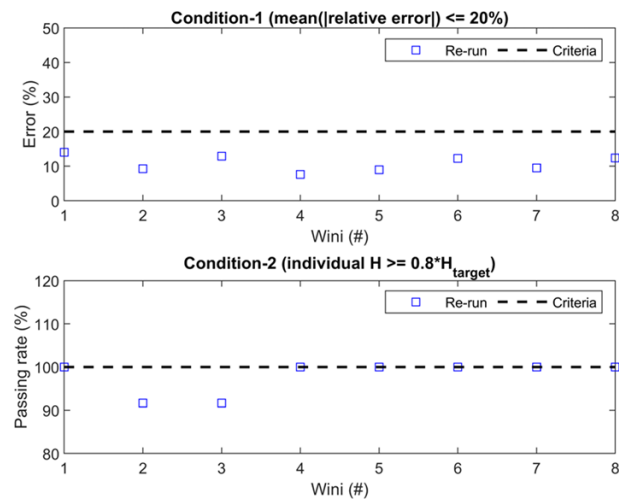


圖 2. 8 種初始權重猜測值於逆推門檻條件之分析 (Passing rate = 滿足 Condition-2 的測站數/總測站數)

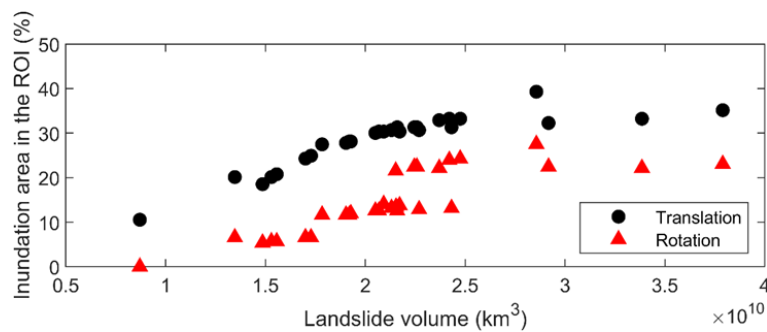


圖 3. 以 Translation 和 Rotation 進行不同崩移參數之海嘯模擬所造成的廠區溢淹面積

**場次 2—環境能源科技領域 I**

複合料源固液分離設計及產氣機制評估.....	1
國內燃氣發電應用情境與商業模式評估研究.....	6
複合化框體製造開發技術.....	15
有機液流電池電解液開發研究.....	19
SOFC 硬銲接合件熱機疲勞－潛變交互作用研究.....	23
先進合金系統的中子暨影像技術研究.....	28
量子電容薄膜材料及儲電特性分析.....	36
節能除濕轉輪系統健康危害風險有效性評估.....	41
多孔吸附關鍵陶瓷結構元件氣流、熱流及運轉負載特性模擬分析研究	46



複合料源固液分離設計及產氣機制評估

Design of solid-liquid separation of composite source and evaluation of gas
production mechanism

(計畫編號：111B013)

林志榮 柯力維 吳容銘

明志科技大學環境與安全衛生工程系

近年來科技發展使廢棄物產生量大增，連帶的處理費和運輸費用也增高，因此廢棄物減量化相形重要，常用的減量化方法包括濃縮脫水、厭氧消化等。厭氧消化可降解有機質大約 30-50%，並產生沼氣能源。而若有有機質偏低，則厭氧消化的應用受到了一些限制。因此將廢棄物轉化為生質燃料的循環生物經濟是現代社會的永續發展願景，本計畫擬針對稻桿、稻殼、廢菇包以及廚餘等 4 種本土料源進行水熱前處理，建立固液分離技術，分析固體、液體產物經厭氧消化反應後之沼氣產量，藉以作為後續厭氧消化參數之規畫依據，並評估固液分離對整體厭氧消化產氣之影響。

The technology advancement in recent years not only significantly increased the waste generation but also elevated the cost of associated treatment and transportation, making waste reduction an important issue. Concentration, dehydration, and anaerobic digestion were viewed as common waste reduction technologies. Anaerobic digestion (AD) could degrade approximately 30–50% organics content and generate biogas, a promising bioenergy. Low concentration of organics in substrate could limit the application of AD process,



therefore the concept of circular bio-economy which converts waste into biofuel is the goal for sustainable development of modern society. The project plans perform hydrothermal pretreatment for four types of indigenous feedstocks including rice straw, rice husk, spent mushroom waste, and kitchen waste. The suitable solid-liquid separation (S/L) technology for pretreated biomass was investigated, and the AD batch test for solid/liquid fraction of pretreated biomass was conducted to evaluate the biomethane potential, which was used for optimizing AD parameters and evaluating the S/L effect on biogas production.

壹、計畫目標

本計畫擬先行對稻桿、稻殼、廢菇包以及廚餘等 4 種本土料源進行前處理，再進行固液分離並各自厭氧產氣，以評估整體之產氣結果。試驗進行的步驟如圖 1 所示，料源經基本之粉碎以及水熱前處理之後，經固液分離將水解液體以及料源固體分離出來，然後再各自進行厭氧消化產氣試驗以及產氣分析，圖 2 為程序步驟的示意圖。本計畫擬處理的料源預計有稻桿、稻殼、廢菇包以及廚餘等。基於料源之特性有所變異，故此隨著處理料源之不同，固液分離方法也須配合前處理產物之特性進行設計。本研究預計以過濾方法建立固液分離技術。

貳、重要成果

一、增加質傳攪拌的酸處理測試

本批次實驗以酸處理產物進行測試，輔以磁石攪拌期能優化產氣結果。圖 3 為總產氣量，本批次產氣結果以稻桿之液相為最佳，達到



133 L/kg VS；其次以稻殼為佳。除了稻稈之液相產物之產氣率由 102 L/kg VS 提升至 133 L/kg VS，其餘各實驗組產氣率提升有限。相對於鹼處理，酸處理產物之產氣潛能欠佳，顯示鹼處理為較理想之前處理方式。

二、各料源固液產物產氣貢獻比例與最適化產氣方案

可知鹼處理稻稈與酸處理米飯之產氣主要來源為液體，基於產氣貢獻主要來自於液相產物，固液分離程序之必要性降低，產物直接進行厭氧消化為較佳之產氣方案。

相對而言，其餘料源經酸、鹼前處理後，主要以固相產物為主要產氣來源。故此整合固液分離單元至前處理、厭氧發酵程序，藉由固液分離技術先行獲取固體產物，再行厭氧消化生產沼氣，應為各料源最適之產氣方案，液體產物可往重複利用或加值應用的方向進行處理。

三、4 kg 級之固液分離測試

由上所述，固液分離有其有利性，故本研究試行 4 公斤級之測試，以稻殼為渣料，固液分離後之結果顯示渣料 320 g 經處理後再經固液分離，幾乎 99% 以上都可回收，並沒有太大的質量損失。

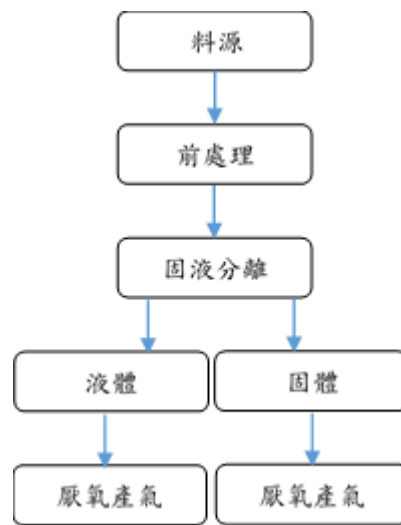


圖 1、計畫預計試驗步驟

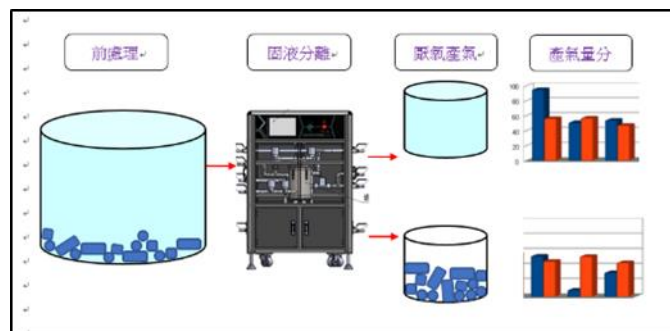


圖 2、試驗步驟示意圖

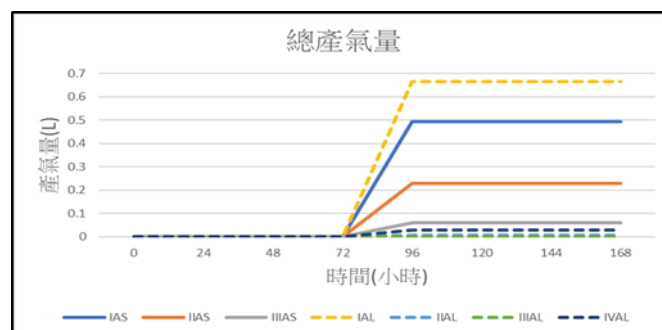


圖 3、增加質傳之總產氣量



參、展望

本研究完成各料源固液產物產氣貢獻比例分析，基於實驗測試結果，各料源經酸、鹼前處理後，主要以固相產物為主要產氣來源，於此考量下，固液分離程序值得加入；藉由固液分離技術先行獲取固體產物，再行厭氧消化生產沼氣，藉以提升厭氧槽單位體積之產氣量，應為各類料源最適之產氣方案。未來可以上述產氣方案為基礎，配合混和禽糞、畜牧廢水，最佳化厭氧反應參數，進而最大化產氣潛能。基於固液分離程序之必要性，本研究另完成公斤及固液分離測試，可作為後續放大測試的基礎。



國內燃氣發電應用情境與商業模式評估研究

Research on Gas Power Generation Application Scenario and Business Model

(計畫編號：111B014)

陳中舜

財團法人中華經濟研究院

生質燃氣工程是指採用厭氧消化技術處理各類有機廢棄物(水)並制取沼氣的系統工程，是能源化、減量化、無害化處理農村有機廢棄物、生活垃圾、畜禽糞汙的主要途徑。

本計畫在提出 3 種可應用於低碳燃氣生產之農、林、漁或牧等領域的廢棄物選項建議及論述後，並透過地理資訊系統與內外部成本效益分析，找出適合台灣營運之兩種以上創新商業模式，以利後續的落實與推廣。

Biomass gas project refers to a systematic project that uses anaerobic digestion technology to process various organic wastes and produce biogas. main source of pollution.

This project proposes and discusses three waste options that can be applied to low-carbon gas production in the fields of agriculture, forestry, fishing or animal husbandry. And through geographic information system and internal and external cost-benefit analysis, find out two or more innovative business models suitable for Taiwan's operation, to facilitate the subsequent implementation and promotion.



壹、計畫目標

生質燃氣工程是指採用厭氧消化技術處理各類有機廢棄物(水)並制取生質燃氣的系統工程,是能源化、減量化、無害化處理農村有機廢棄物、生活垃圾、畜禽糞汙的主要途徑。生質燃氣是一種優質、廉價、衛生的氣體燃料,是可再生的生物質能源。生質燃氣的主要成分是 CH_4 (含量 40%~70%) 和 CO_2 (含量 15%~60%), 生質燃氣的高位熱值一般為 22~25MJ/m³。經提純淨化後可提高 CH_4 的相對含量,熱值可達 39.8MJ/m³。由於生質燃氣是處理各類有機廢棄物的產物,使用 CH_4 作為能源不會增加 CO_2 排放。因此,在實現「減碳」目標進程中,各國對於生質燃氣能源皆多有關注。

歐美國家生質燃氣產業已經形成多種成熟的商業模式,¹主要包括以德國、英國、丹麥和美國為主的汽電共生模式(CHP)、瑞典和瑞士等國的車用燃氣模式以及管道天然氣模式等。就發展農村經濟角度,一般可分為 4 種模式:

- 一、種養結合畜沼果(菜、茶)模式
- 二、生質燃氣集中供氣模式
- 三、氣熱電肥聯產模式
- 四、生物天然氣模式

貳、重要成果

一、關鍵技術

生質燃氣工程的核心技術是厭氧發酵技術,此外,隨著生物天然氣

¹ <https://www.re.org.tw/knowledge/more.aspx?cid=201&id=5095>



的發展，生質燃氣提純技術也日益受到重視，並不斷取得進步和發展。根據發酵原料的不同分為畜禽糞便、工業有機廢棄物、秸稈和多種混合原料，我國目前生質燃氣工程主要以處理畜禽養殖場糞汙為主。²

生質燃氣經淨化提純後可達到天然氣的標準，生物天然氣可直接併入現有的天然氣管網或經壓縮後用於車用燃氣。目前，生質燃氣提純技術主要有水洗法、物理或化學吸收法、變壓吸附法（PSA）和膜分離法等。在這些技術中，加壓水洗法和變壓吸附法由於具有技術成熟、設備穩定、運行成本低等優點，是國內外應用最廣泛的技術；膜分離法目前被廣泛用於工業上的氣體分離，具有操作簡單、低污染、低能耗、易放大等優點，隨著技術水準的不斷提高和成本的進一步下降，在生質燃氣提純領域具有很大的應用前景。

歐盟國家生質燃氣產業的迅速發展離不開法律和政策的大力支持，主要分為終端產品補貼和建設補貼 2 種。終端產品補貼包括上網電價補貼、生物天然氣補貼等。

二、產品高值化與新商業模式

以下一~三項為較常見之提高相關產物附加價值的方式，四~五項則是新興應用模式：

- (一)沼氣（生質燃氣）高值化：車用生物燃氣、管道生物燃氣、罐裝生物燃氣、汽電共生
- (二)沼渣高值化：沼肥產品、商品肥料、沼渣養蚯蚓、牛場墊料
- (三)沼液高值化：液態有機肥、生物農藥、土壤改良

² https://www.aec.gov.tw/share/file/information/aGiiNUNY3N2yJAqF9FTrhv__.pdf



(四)生質燃氣制氫：³將生質燃氣首先提純為生物甲烷，再以生物甲烷蒸汽轉化制氫兩步過程均有成熟的商業化技術，但是製程工序較長。將甲烷蒸汽轉化技術加以調整，直接以生質燃氣為原料蒸汽轉化制氫，可以簡化工藝路線，同時該路線技術和經濟上都是可行的。

(五)靈活性生質燃氣生產⁴：Hahn 等學者對靈活性生質燃氣生產（以下均稱「靈活產氣」）的概念歸納如下：靈活產氣是一種通過調節厭氧發酵反應過程，在有能源需求時即時定量產生質燃氣的技術。相對於調節生質燃氣儲氣容量，靈活產氣技術可以將發酵罐產氣集中在高需求時段，從而不再需要很高的生質燃氣儲存容量，降低生質燃氣廠的投資、運行和管理成本。因此靈活產氣被視為一種具有前景的按需供氣方法。

三、三種可應用於我國之生質燃氣之料源評估

從初步料源盤查、產量等相關資料評估後，建議稻草、廢菇包及狼尾草可為國內用於生質燃氣生產的建議料源。經文獻分析後發現上述三種料源經適當的處理後，產氣量皆可達 400 L/Vs kg 以上，如表 1，應能符合貴所計畫要求，後續可視實際需求，擇一進行驗證之。

³ 周偉偉（2021），沼氣制氫工藝技術研究，化工管理，P.184~190。

⁴ 劉軼整，黃濤，彭道平（2020），德國靈活性沼氣生產技術及其對中國生物質能利用的啟示，四川環境，P.186~192。

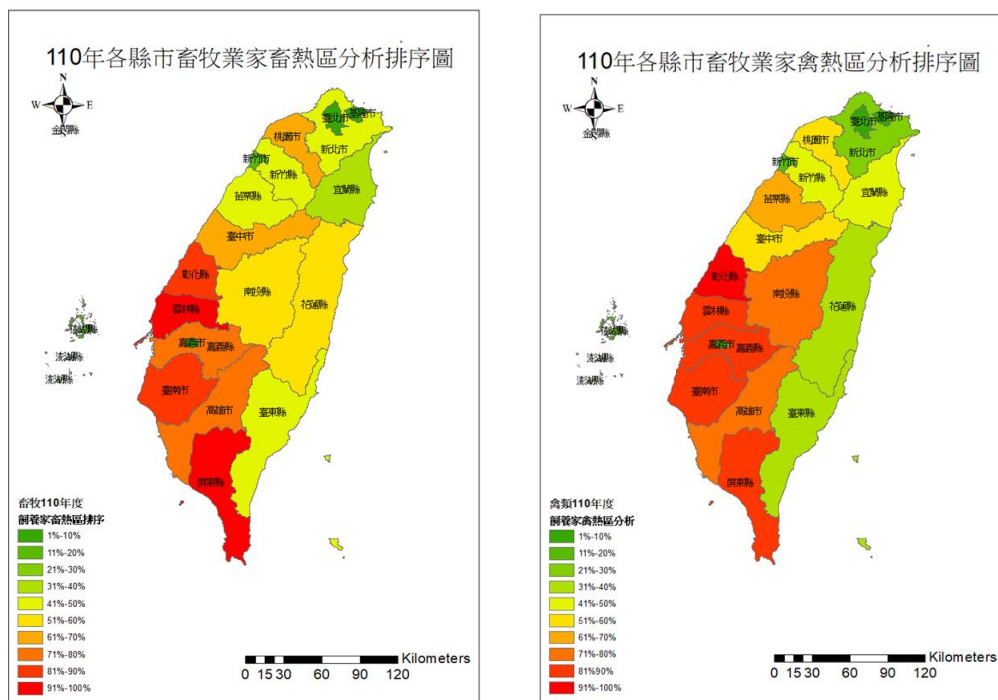


表 1、建議料源

建議料源	產氣量(L/VS kg)	引用文獻
稻草	574.5	Effect of Ca(OH) ₂ pretreatment on extruded rice straw anaerobic digestion, Bioresource Technology, 196, p.116–122 (2015).
廢菇包	492 (以VS 89%，甲烷濃度50%換算)	Evaluation of Pretreatment Effect for Spent Mushroom Substrate on Methane Production, Journal of Water and Environment Technology, 17, p.174–179 (2019).
狼尾草	410-500	- A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 1: Upstream strategies., Renewable Energy, 146, p.1204-1220 (2020). - Biogas and its opportunities—A review., Front. Environ. Sci. Eng., 12, (2018).

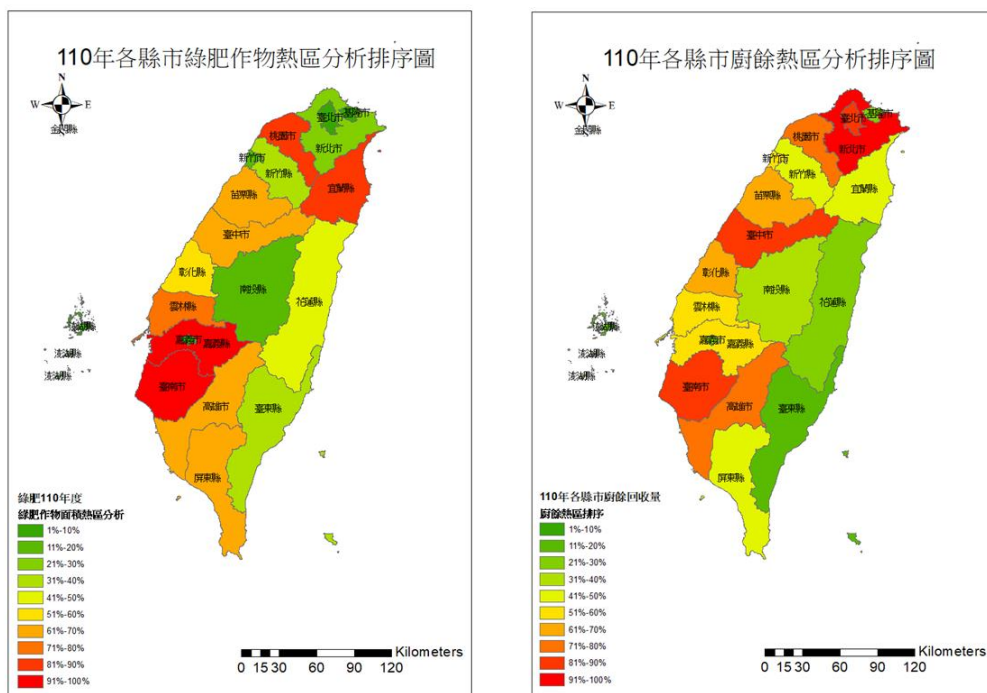
資料來源：核研所

本研究於盤點各縣市農業生產情形後，將運用地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）將潛力生質料源依產出區位及各料源產地、農業作物類別、禽畜類別、產量進行分類，以地理資訊系統進行空間分析，評估可供發展生質技術作為低碳燃氣料源的農業資源主要熱點地區，如圖 1~2。由於農業廢棄物所與其他化石能源衍生產品特性相異，其中最大的差別為供應穩定性，即是各項農業廢棄物所能供應之季節時序不盡相同，如表 2，並非隨時皆能滿足需求端之需要，為使本研究所規劃之國內生質能低碳燃氣情境具可實現性，故針對上述農業資源物外，另擴及各項潛力料源進行供應地區熱區分析，以規劃各種生質技術所需料源之最具經濟可行性設置區位。



資料來源：本研究分析繪製

圖 1、110 各縣市畜牧業家畜熱區與家禽熱區分析圖



資料來源：本研究分析繪製

圖 2、110 各縣市綠肥作物熱區與廚餘熱區分析圖



表 2、可供作生質能基載料源之作物產出時序

月份 料源項目		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
穀物 作物	稻作												
	食用玉米												
	飼料玉米												
高纖 維作 物	製糖甘蔗												
	盤固拉草												
	狼尾草												
	竹子												
綠肥 作物	豆科等												

註：綠色填滿月份為可供應時令

資料來源：本研究調查及整理

四、建議新興商業模式

本研究考慮到生質燃氣可調節與可轉氫的特性，提出了以下三種商業概念：

- (一) 基於產業鏈需要或是減排承諾，國內越來越多企業需要達成 100%綠電的目標，這時生質燃氣搭配中小型燃氣輪機操作，可用以彌補太陽光電與風電的間歇性之缺口，擔任綠電扶助服務之角色。由於其特有的可調度性，所以具備更高的時間價值，可爭取比台電躉購更高的價格。
- (二) 依照大用戶條款，被規範之用電戶除在自有廠區或建築裝設綠電設備外，亦可在場區外進行相關投資。利用此規定並結合多種再生能源，建立一區域再生能源中心，以生質燃氣+儲能設備做為儲備核心（鋰電池為短期、生質燃氣為中期、氫為長期）擴大綠電可調度能力，創造規模經濟並將綠電分配給最需要的人。在此園



區內，各類綠電價格是公開的，設備建造費用以募資的方式獲得，產生的電能以標售的方式，利潤則依投資比例分潤，徹底實現綠電交易自由化的形式。

- (三) 目前多數工業用氫皆來自天然氣。生質燃氣基本成分與天然氣十分類似，同樣可作為生產氫的原料，且其可被視為低碳氫或綠氫。若是可結合上述再生能源合作園區的概念，不僅可將多餘之再生能源用來產氫，也可搭配生質燃氣產生的氫作為銷售，大大增加產品的彈性與獲益。由於氫的跨國長途運輸有其困難度，故未來本土綠氫仍有相當的需求與發展空間。

參、展望

在我國生質燃氣使用方面，一般最保守之方式可採躉購電價方式，目前獲利仍高於碳權買賣。但若未來國內再生能源市場變化與氫經濟發展後，24 小時綠電或是綠氫需求將更具市場價值。故在今日生產方面可考慮引進多聯產的方式，以增加生質燃氣靈活性，來因應市場變化做最有效之搭配。

基於提升臺灣電網韌性及改善能源結構，除發展分散式電力係迫切議題外，在電力能源開發及電網建設亦須考量是否得滿足未來用電需求，考量風險趨避及如何以農業資源作為循環經濟之實踐，發展生質低碳燃氣應用模式除重點關注以農、林、漁領域為主料源之生質燃氣進行料源集運之經濟可行性為首要評估外，多元化物料來源有助於單一物料如面臨之價格波動時，得對於潛在成本風險加以控管並降低供給面的不確定性。

本次研究針對不同用戶需求，為生質燃氣提出了 3 種新興商業模式，從綠色備用電力、區域再生能源中心、生質燃氣綠氫園區。除了規模差異



外，也涵蓋配合國家短中長期之能源發展政策，若可盡早佈局，將有助於企業持續之獲利並促進產業升級。



複合化框體製造開發技術

Integrated composite frame manufacturing and development technology

(計畫編號：111B004)

王耀明¹ 莊上慶¹ 古鴻賢² 許寧逸²

¹財團法人金屬工業研究發展中心 ²核能研究所

傳統液流電池多以螺栓進行鎖固組裝，並透過大量密封件導入結構中來達成電池堆防漏之工程。本計畫將通過材料接合之技術導入電池框體製程中，透過雷射接合技術將雙極板與框板接合為一體製成複合化框體，使框板與雙極板之間透過加熱熔融達到接合之目的，以省去密封元件之使用；最後並通過膠封後綁束之手法對電池堆進行封裝，以此達複合化框體製造及電池堆之組裝目的。

The classical flow batteries are mostly locked and assembled with bolts. and a large number of seals are introduced into the structure to achieve the leak-proof project of the battery stack. In this project, the technology of material bonding is introduced into the battery frame process, and the bipolar plate and the frame plate are joined into an integrated frame body through the laser bonding technology, so that the frame plate and the bipolar plate can be joined by heating and melting. The purpose is to save the use of sealing elements; Finally, the battery stack is encapsulated by the method of bundling after glue sealing, so as to achieve the purpose of manufacturing the composite frame and assembling the battery stack.



壹、計畫目標

液流電池之電堆開發之技術應朝向輕、薄、小為開發方向，因此本計畫複合化框體製造開發技術主要由兩部分所組成，先利用雷射黏合技術來開發出薄型一體化之框體架構；再利用膠封技術，以機械性交互鎖扣的方式，改良傳統鎖固法帶來之尺寸、重量、鎖合力不均之影響，並透過錨固黏合技術來達到複合化框體開發技術。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

(一) 研發成果之性能改善

1. 液流電池結構設計與改善

本計畫透過液流電池結構設計，將傳統鎖固型之液流電池模組進行修正，移除舊有之密封件及鎖固件，大幅降低電池模組之結構尺寸。該模組面積下降約 22%，單片框板厚度下降 50%，電池組以五串聯模組總體積相對於傳統鎖固電池組為例，則減少約 40%，於相同功率比較下，體積功率密度提升約 1.6 倍，該電池於 9.6A 之充電電流下(電極面積 96cm²、電流密度 100mA/cm²)，最大電壓可充電至 8.0V，故該電池模組之最大功率為 76.8W。

2. 一體化熔接技術開發

本計畫製作一體化電池框板，分別針對 ABS 塑膠框板同質接合、ABS 塑膠框板與石墨板進行熔接實驗，於 ABS 塑膠框板同質接合之接合強度可達 38.3MPa、ABS 塑膠框板與石墨板之接合強度



可達 15.2MPa。

3. 電池性能改善

本計畫所開發之液流電池模組經 0.6bar 之操作壓力下超過 1hr 無發生洩漏及壓力變化，並可進行多循環之電池性能測試，且無漏液狀況。其電池效率皆為穩定且具重現性，其中於 100 mA/cm² 下，仍可進行充放電操作，並可持續提升；於 40 mA/cm² 下能量效率可達 70%，後續並可通過電解液之選用與改質使其效果提升。

二、學術成就方面

已投稿國內會議論文 1 篇，於台灣銲接協會 111 年度會員大會暨論文發表會投稿，論文題目：超音波接合應用於塑膠質膜壓板接合。

參、展望

本計畫之成果，已開發出複合化液流電池框體，並可實際進行充、放電行為，且於長時間運行中皆無問題發生，故該技術之開發具可行性。而為使本計畫所開發之液流電池模組於未來可實際進入儲能案場運作，仍有可持續研究之議題。最為主要之項目為電池反應面積之增加，因面積增加從而影響熔接技術於框板製作上的困難度，這也是該技術最迫切需解決問題。而透過本案開發出薄型框體後，亦能針對各部關鍵組件進行材料製成、改質之相關研究，使材料能更有效應用於薄型液流電池結構中。

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表

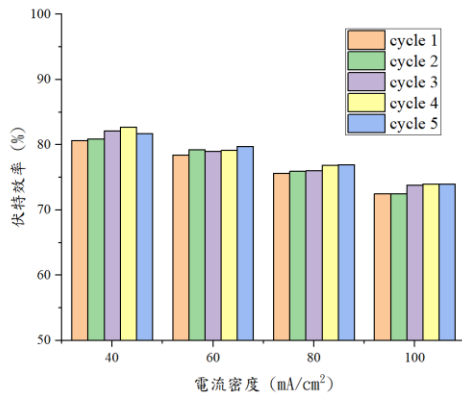


圖 1、複合化框體電池之伏特效率

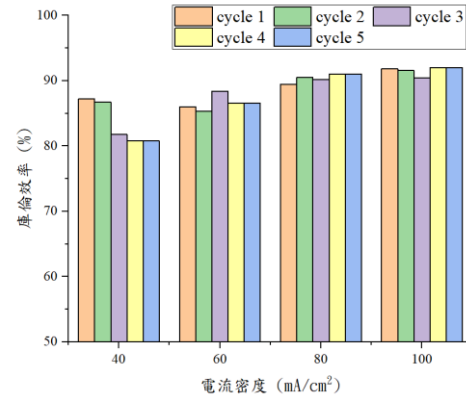


圖 2、複合化框體電池之庫倫效率

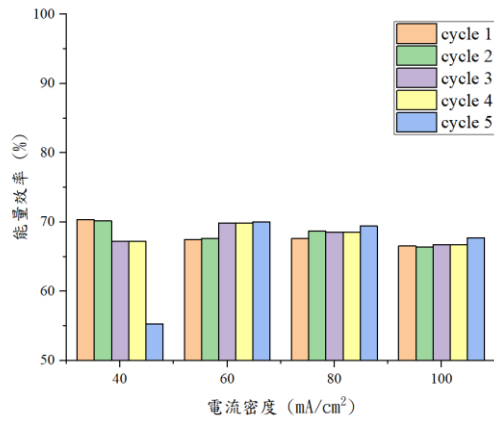


圖 3、複合化框體電池之能量效率

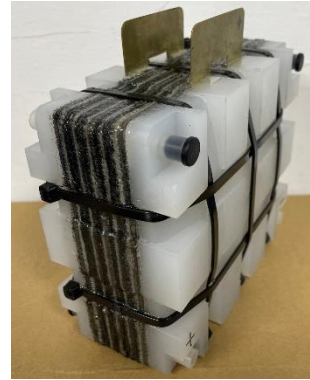


圖 4、複合化框體電池模組成品



有機液流電池電解液開發研究

The electrolyte development of organic redox flow battery

(計畫編號：111B005)

王丞浩¹ Belay Getahun Tegegne¹ 歐昀庭¹ Daniel Manaye Kabtamu^{1,2}

王耀明³ 黎羽真¹ 黃子中¹ 蕭訓宏¹ 林昕德¹ 林意珉¹

Aknachew Mebreku Demeku¹

¹國立臺灣科技大學材料科學與工程系 ²Debre Berhan 大學化學系

³金屬工業研究發展中心產業升級服務處

本計畫首先進行正極與負極有機電解液之開發，選擇易取得、寬電化學視窗、高溶解度、高電化學活性的有機電解質來作為有機液流電池系統之氧化還原活性有機材料。經過一系列電化學測試後，發現 2,1,3-benzothiadiazole (BTD)/10-methylphenothiazine (MPT) 的正負極分子組合擁有達到 2.23 V 的電池電壓且具備較為優異的電化學活性與穩定性。此外，在單電池充放電試驗中，BTD/MPT 電解液系統於電流密度 10 mA cm^{-2} 的情況下能量效率達到 44.4%；於 5 mA cm^{-2} 的循環充放電穩定度測試中，能量效率維持率可達到 92.4%。經由 UV-Vis 吸收光譜及 FTIR 吸收光譜之結果推測，電解液之 MPT 活性分子在穩定度測試後應部份呈現二聚體或寡聚體的型態。

The first stage of this project is to develop positive and negative organic electrolytes of organic redox flow battery (ORFB). To reach the target of high application value and operational stability, suitable redox-active organic



materials (ROMs) are chosen based on availability, potential window, solubility, electrochemical activity, etc. After electrochemical tests, the ideal cell voltages of 2,1,3-benzothiadiazole (BTD)/10-methylphenothiazine (MPT) can approach to 2.23 V, and they also performed better reversibility and stability. In the single cell tests, the energy efficiency (EE) of BTD/MPT can reach to 44.4% at the current density of 10 mA cm^{-2} . Moreover, BTD/MPT possessed an outstanding EE retention rate of 92.4% at 5 mA cm^{-2} . Based on the change of the absorption peaks in UV-Vis spectra and the disappearance of the absorption peaks on 661 cm^{-1} and 760 cm^{-1} in FTIR spectra, some MPT molecules might become dimers or oligomers after stability tests.

壹、計畫目標

為配合國內再生能源占比日益提高，儲能系統的開發刻不容緩，其中，液流電池的應用潛力備受各界矚目。本計畫欲改善水相液流電池因電解水而受限的工作電壓與能量密度，將目標放在新型有機液流電池電解液之開發上，除了以電化學測試及單電池充放電來檢驗氧化還原活性分子之電化學活性與穩定性外，亦藉由光譜分析技術來提高對電解液特質之了解。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

本計畫在第一階段研究選擇了具開發潛力之有機氧化還原活性分子進行電化學活性測試，在合適的輔助電解質與溶劑之搭配下，9-fluorenone (FL)/phenothiazine (PT)與 BTD/MPT 的組合分別擁有 2.33 V



與 2.23 V 的理想電池電壓，且具備較為優異的電化學活性。在第二階段則針對良好電化學活性的 FL/PT 與 BTD/MPT 電解液進行電化學穩定度測試，其中 FL/PT 電解液的氧化還原峰隨著循環伏安法掃描圈數增加而明顯衰退，而 BTD/MPT 電解液之氧化還原峰間距幾乎無增加，顯示其高度的電化學穩定性；在單電池充放電測試方面，於 10 mA cm^{-2} 的情況下，BTB/MPT 之能量效率表現為較優異的 44.4%，此結果與電化學活性測試結果吻合。在第三階段的 BTB/MPT 電解液單電池穩定度測試中，於 5 mA cm^{-2} 電流密度下進行充放電 100 圈，能量效率維持率可達到 92.4%；且藉由 UV-Vis 吸收光譜在 250-350 nm 吸收峰形略偏向長波長且更加平坦，以及 FTIR 吸收光譜在 661 cm^{-1} 與 760 cm^{-1} 吸收峰之消失推測，電解液之 MPT 活性分子在單電池充放電 100 圈後應部份呈現二聚體或寡聚體的型態。上述結果皆顯示了此電解液的高電化學活性與穩定度，以及本研究對其特性之更加了解。

二、學術成就

(一)國際期刊論文

Belay Getahun Tegegne, Daniel Manaye Kabtamu*, Yu-Zhen Li, Yun-Ting Ou, Zih-Jhong Huang, Ning-Yih Hsu, Hung-Hsien Ku, Yao-Ming Wang, Chen-Hao Wang*, *N-methylphenothiazine as stable and low-cost catholyte for nonaqueous organic redox flow battery*, Journal of Energy Storage, 61 (2023) 106753.

(二)國內研討會論文

Belay Getahun Tegegne, Daniel Manaye Kabtamu*, Ning-Yih Hsu, Hung-Hsien Ku, Chen-Hao Wang*, *N-Methylphenothiazine Catholyte for Nonaqueous Organic Redox Flow Battery*, MRS-Taiwan 2022



Annual Meeting, Miaoli, Taiwan, Nov. 18 – 19 (2022).

參、展望

藉由本計畫成功開發出有機液流電池電解液後，象徵未來我們的液流電池單電池工作電壓可望不再受限於水電解而難以提升，能量密度的突破亦指日可待。有機液流電池在操作與設計上有諸多相異於水相液流電池的地方，本團隊藉此次經驗成功掌握若干操作關鍵，對於未來國內在發展有機液流電池儲能系統能提供建設性的幫助，事實上，有機分子種類繁多，能應用於液流電池的活性分子開發仍屬一片藍海，相信在此領域的耕耘能創造出更多電池系統選擇方案。

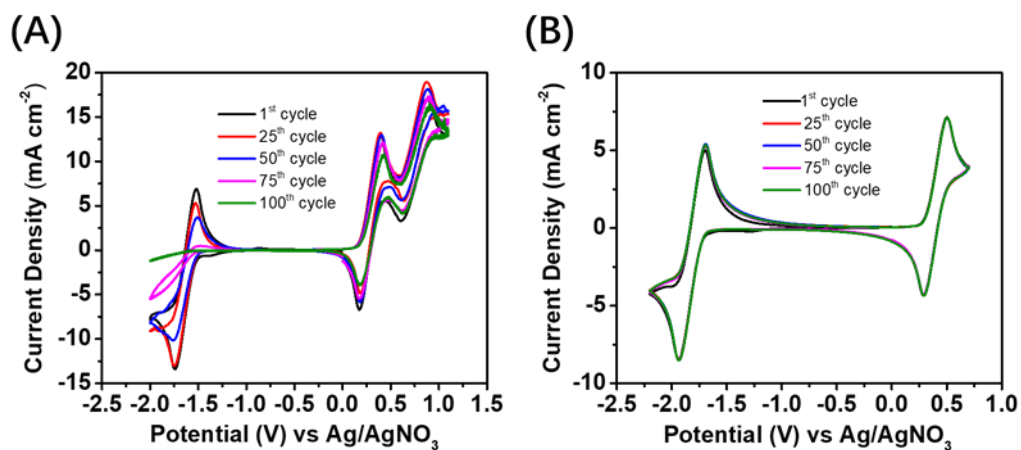


圖 1、半電池循環伏安法穩定度測試（100 圈）。（A）FL 與 PT（60 mV s^{-1} ）；（B）BTM 與 MPT（60 mV s^{-1} ）。

**SOFC 硬銲接合件熱機疲勞—潛變交互作用研究****Interactions of Thermo-Mechanical Fatigue and Creep of Braze Sealing Joint
for SOFC**

(計畫編號：111A007)

黃柏憲¹ 林志光¹ 黃亮維² 劉建國²¹立中央大學機械工程學系 ²核能研究所

本研究以核研所開發的平板式 SOFC 系統電池堆為研究對象，目的在探討 MS-SOFC 接合件之熱循環—潛變性質與破壞模式，所使用的高溫硬銲材料為核能研究所開發適用 MS-SOFC 之高溫硬銲銀鍍合金材料，金屬連接板則是使用代號為 Crofer 22 H 的商用肥粒鐵系不銹鋼。在室溫與高溫 750 °C 的溫度循環下，於空氣中對接合件施予相對應的張力及剪力負載來進行熱循環—潛變實驗，同時評估氧化環境熱時效處理對接合件熱循環—潛變性質的影響，並透過破斷面觀察以及元素分析，來了解接合件之破裂模式。熱循環—潛變試驗的結果顯示，接合件未時效及 1000 小時時熱效處理後，接合件於室溫與高溫(750 °C)環境下的張力及剪力試片，所能負荷的熱循環數皆隨著負載減少而增加。未時效張力與剪力接合件在累積高溫負載 1000 小時壽命之 100 次熱循環的對應負載強度分別為 5.04 MPa 與 3.5 MPa，相較於具 1000 小時斷裂壽命之純潛變強度，分別下降了 8%與 2.4%；時效處理張力與剪力接合件具 100 次熱循環壽命的對應負載強度分別為 4 MPa 與 3.04 MPa，相較於具 1000 小時斷裂壽命之純潛變強度，分別下降了 25%與 13.2%。由此可知熱循環—潛變交互作



用，相較於純潛變機制，對未時效及時效接合件都會造成額外的損傷，降低累積的高溫斷裂壽命。接合件破斷面分析結果顯示，未時效張力及剪力接合件，在較短循環數下，破斷面發生於氧化鉻層及銀鋅料層之間，而中、長循環數下，破斷面介於鉻酸銀層及銀鋅料層之間。時效處理張力及剪力接合件在所有循環數下，破斷面皆會發生於鉻酸銀層及銀鋅料層之介面或氧化鉻層及鉻酸銀層之介面。

The purpose of this study was to characterize thermal cycling-creep properties and fracture pattern of the braze seal/metallic interconnect joint in MS-SOFC, which is being developed at the Institute of Nuclear Energy Research (INER). The materials used were a Ag-Ge sealant developed at the Institute of Nuclear Energy Research and a commercial Crofer 22 H ferritic steel. The thermal cycling-creep test was conducted by applying a constant load (shear or tensile mode) on the joint under thermal cycling between room temperature and 750 °C. Effects of thermal aging were also considered. Fracture surfaces were analyzed using scanning electron microscopy to investigate the fracture patterns.

Experimental results showed that the number of cycles to rupture of both unaged and aged joints was increased with a decrease in the applied constant shear and tensile loading. The tensile and shear strength of unaged joint at 100 thermal cycles, equivalent to accumulated time of 1000 h at 750 °C, was 5.04 MPa and 3.5 MPa, respectively. In comparison with creep strength of unaged joint at 1000 h, it was reduced by 8% and 2.4%, respectively. The tensile and shear strength of aged joint at 100 thermal cycles was 4 MPa and 3.04 MPa, respectively. In comparison with creep strength of aged joint at 1000 h, it was reduced by 25% and 13.2%, respectively. Apparently, the combination of



thermal cycling and creep would generate more damage than pure creep, leading to a shorter rupture time.

For unaged tensile and shear joints, fracture mainly occurred at the interface between Cr_2O_3 and braze with a short thermal cycling life. For a longer accumulated time at high temperature, more and more AgCrO_2 formed at the joints with a medium or long thermal cycling life. Fracture sites gradually transformed to the interface between AgCrO_2 and braze. For aged tensile and shear joints, fracture mainly occurred at the interface between AgCrO_2 and braze. In addition, the longer thermal cycling life the aged joints sustained, the more remarkable this phenomenon was. On the other hand, for the aged joints with a shorter thermal cycling life, more fracture occurred at the interface between Cr_2O_3 and AgCrO_2 .

壹、計畫目標

為配合核研所執行高效率固態氧化物燃料電池技術開發及應用計畫之目標，本研究計畫針對核研所已開發適用於新一代平板式 MS-SOFC 系統硬鋁封裝技術所用之硬鋁填料，進行與金屬連接板接合之鋁接件的熱循環-潛變交互作用性質分析，探討硬鋁填料/金屬連接板接合件在熱循環工作條件下，承受不同程度應力的耐久壽命，尤其是硬鋁填料與金屬連接板鍵結之界面的劣化行為與破裂模式，做深入的分析，以探討硬鋁耐久接合性對 MS-SOFC 電池堆結構可靠度之影響。

貳、重要成果

- 一、對於未時效接合件在室溫及 750 °C 間進行之熱循環-潛變交互作用實驗，相較於 1000 小時所需之純潛變高溫機械性質負載，張



力及剪力分別下降 8% 及 2.4% (圖 1)，而對於時效接合件，施加張應力及剪應力分別下降 25% 及 13.2% (圖 2)。

二、對於未時效張力及剪力接合件，在較短斷裂時間下，破斷面發生於氧化鉻層及銀鋅料層之間，而中、長斷裂時間下，觀察到破斷介於鉻酸銀層及銀鋅料層之間(表 1)。

三、對於時效張力及剪力接合件，在所有斷裂時間下，破斷面主要會發生於鉻酸銀層及銀鋅料層之間(表 1)。

參、展望

持續透過學界與核研所互補性的合作，相輔相成，建立金屬支撐固態氧化物燃料電池堆封裝接合件熱循環-潛變耐久機械強度量測能量及壽命評估模式，將可作為國內在開發金屬支撐固態氧化物燃料電池系統，設計電池堆結構尺寸與材料選擇的參考，提升國內發展 SOFC 技術所需之研發能量、技術水平與人才培育。

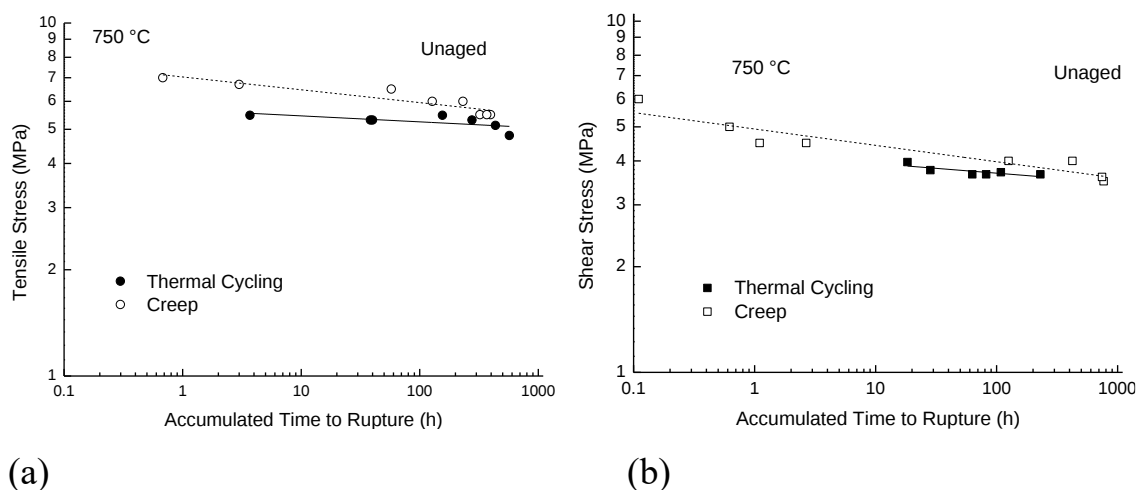


圖 1、未時效接合件之應力-熱循環斷裂時間曲線與純潛變比較圖：
(a) 張應力模式；(b) 剪應力模式

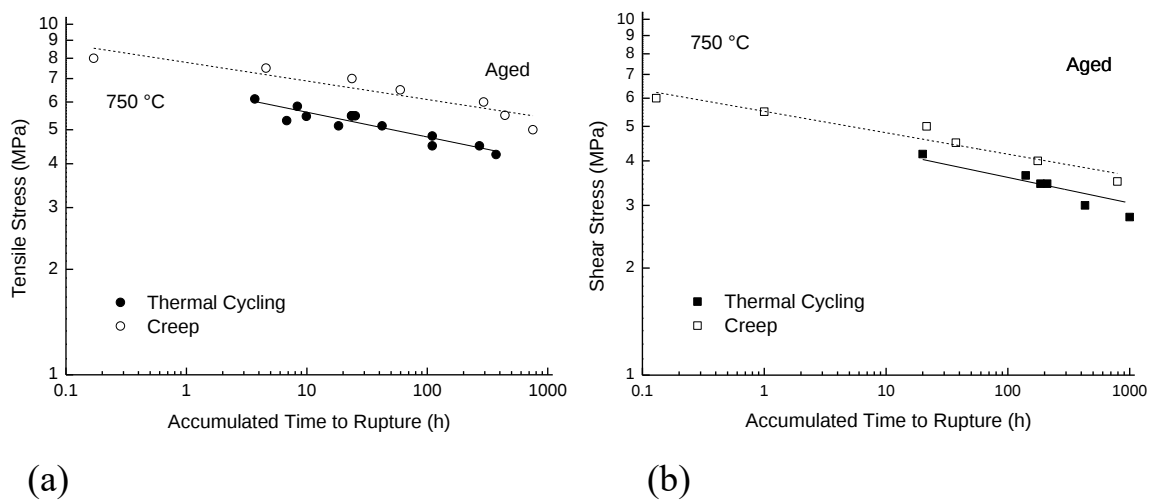


圖2、時效接合件之應力-熱循環斷裂時間曲線與純潛變比較圖

(a) 張應力模式；(b) 剪應力模式

表1、未時效及時效處理之張力及剪力試片破斷面位置比較

熱循環數	負重模式	時效條件	破斷面位置*
低	張力	未時效	A
中	張力	未時效	A+B+C
高	張力	未時效	A+B+C
低	剪力	未時效	A
中	剪力	未時效	A+C
高	剪力	未時效	B+D+E
低	張力	時效	A+B
中	張力	時效	B+C
高	張力	時效	A+B+C
低	剪力	時效	A+B+F
中	剪力	時效	B+C+F
高	剪力	時效	B+C+F

*A：氧化鉻層及銀鋅料層之介面；B：鉻酸銀層及銀鋅料之介面；

C：鉻酸銀層及氧化鉻層之介面；D：銀鋅料層；E：鉻酸銀層；F：氧化鉻層



先進合金系統的中子暨影像技術研究

Using Neutron Diffraction & Complimentary Images for Metal Research

(計畫編號：111A002)

黃爾文 翁慧慈

國立陽明交通大學材料研究所

本計畫報告應用中子繞射研究鋁矽十鎂合金(AlSi10Mg)機械性能。鋁矽十鎂合金是近共晶鋁矽合金的一種，除了低比重、高比強度和良好的電與熱傳導性特性之外，由於其矽含量高在高溫下流動性好，且能避免快速冷卻引發的破裂，因此適合用選擇性雷射熔化(Selective Laser Melting, SLM)來製備。利用 SLM 製備的鋁矽十鎂合金具有特殊共晶矽網絡狀微觀結構，期中報告的重點為 T6 熱處理的效應。藉由本計畫的執行，觀察到共晶矽網狀結構消失並伴隨矽顆粒的析出，在機械性質上經固溶處理發現維氏硬度大幅降低，經時效處理後維氏硬度上升到一定峰值後開始下降，也就是發生過時效。本結案報告報導應用 T5 熱處理所做的優化。發現透過 T5 直接時效保留原先細小結構的強度共顯，並加上時效強化的加強進行比較，在硬度方面可明顯看出 T5 在較短的時間內得到最高硬度，在任何時間段中都具比 T6 更高的維氏硬度。本結論達成計畫甘特圖最後的期末目標「優化鋁合金熱處理改質」。而本計畫研究成果也於去年發表在 Materials Science and Engineering: A, 856。



AlSi10Mg is a near-eutectic aluminum-silicon alloy. AlSi10Mg has good properties, such as its low density, high specific strength, and good electrical and thermal conductivity. AlSi10Mg can also be manufactured by selective laser melting (SLM). Because of its high silicon content, good flowability at high temperatures, and AlSi10Mg can be additively manufactured without rapid cooling-induced rupture. With this project, we published neutron results on Materials Science and Engineering: A, 856 in 2020. We trained undergraduate and graduate students to obtain knowledge on neutron diffraction for mechanical behavior study.

After the midterm report, we further applied different treatments to find better heat treatments to enhance the hardness. In this final report, our results show that the T5 heat treatment is better than T6. The samples after T5 heat treatment have higher hardness than those after the T6 heat treatments.

壹、計畫目標

近年來，積層製造開始運用在各大領域，其中，又以汽車及航太領域為主。同時，各國對環境議題的逐漸地重視，開始對碳排放有所管制，以及商用太空旅行載具發展蓬勃，因此產業開始意識到高強度輕金屬的重要性。鋁合金具備上述所需之性質，其中，又以鋁矽十鎂合金(AlSi10Mg)最廣為人知。然而，鋁矽合金系統，製造方式上，選擇性雷射融化後樣品因為快速冷卻而出現擬共晶的析出現象，且孔隙率會高於傳統鑄造型的樣品，常帶來探討不同積層方向對機械性質的差異。本次研究希望利用後熱處理方式，改善選擇性雷射融化之鋁矽十鎂合金樣品特性。



貳、重要成果

一、材料性質分析

本次研究的選擇性雷射熔化製備-鋁矽十鎂合金，其(as-built)樣品微結構為細長細胞狀(elongate cellular)晶的鋁基材，伴隨著共晶矽的網絡邊界結構¹，如圖 1 所示。經過 T6 處理後，原先的共晶矽網絡結構將消失，轉變成矽顆粒析出並隨著熱處理過程粗化矽顆粒。圖 2 為 X 光繞射的實驗結果，利用 GSAS II 分析軟體來對繞射峰進行擬合，計算出樣品的晶格常數。結果顯示，在熱處理前的樣品，其繞射峰訊號主要為 FCC 的 Al 相；熱處理過後，明顯可見 FCC 的 Si 相的繞射峰出現，因此推斷在經過 T6 熱處理的固溶處理後，有明顯的 Si 相析出。除了 Al 和 Si 相，並沒有觀察到 Mg₂Si 相的訊號出現，經過熱處理後無 Mg₂Si 相的產生。

二、鋁合金中子繞射數據分析

此中子實驗數據為在日本 J-PARC 的 TAKUMI 中子繞射儀進行拉伸『積層製造鋁矽十鎂合金』實驗的即時(in-situ)中子繞射。圖 3 為中子繞射圖。分析後訊號為 FCC 鋁及矽，晶面間距從低至高分別為 Al(222)、Al(311)、Al(220)、Si(311)、Si(220)、Al(200)、及 Al(111)。從各應變量下繞射訊號的變化顯示，樣品在拉伸時並沒有產生可觀察到的相變化。如下圖 4(a)所示，此圖 4(a)為 { 311 } 系鋁基及矽相之晶格應變演變，作為兩種鋁矽十鎂合金中沿荷重方向 (Loading Direction, LD) 和橫向 (Transverse Direction, TD) 的巨觀應力的函數。{ 311 } 系為 fcc 多晶體在

¹ Li, D., et al., *Effect of heat treatment on AlSi10Mg lattice structure manufactured by selective laser melting: Microstructure evolution and compression properties*. Materials Characterization, 2022. 187.



晶體學中最為典型的變形區，承圖上所示，總計呈現三區斜率變化，依序為：I 區之彈性形變區、II 區之塑性形變起始區、III 區之強化項矽材之塑性形變區。I 區彈性形變區中，矽相與鋁基之晶格應變都呈線性成長，II 區之所以為塑性形變起始區，相較於鋁基之晶格應變近乎不改變外，矽相則呈現非線性的成長，這同時表示鋁基開始塑性形變，矽相則經歷相同時間中的塑性形變以及彈性形變，並且，矽相對於晶格應變的影響在兩種方向中都比起鋁基更加重要。因鋁基與矽相之晶格應變呈現類似的演變，因此矽相可以作為較弱相之鋁基之強化物。此 I 區、II 區、III 區斜率之變化，可以從圖 4 (b) 繞射半峰寬(Full Width at Half Maximum, FWHM) 沿 LD 的微觀應力演變作為上述機制之佐證。實驗以拉伸時的即時(in-situ)中子繞射數據，如圖 5 所示，取得材料的機械性質及晶格尺度的資訊、搭配顯微鏡學的微結構觀察估算各微結構區域的降伏強度、以及顯微鏡下的空隙及裂紋觀察得出其破壞行為。將以上三種結果比較及互補，最後得出形變機制的結論。

三、鋁合金熱處理實驗

本次機械性質量測選用維氏硬度做量測，在 T6 熱處理前，Hz.樣品的維氏硬度值為 145.9Hv，Vt.樣品的維氏硬度值則是 144.86Hv，兩者相差甚小。在進行 540°C 一小時的固溶處理後，硬度皆有明顯的降低，Hz.樣品和 Vt.樣品的維氏硬度分別是 77.69Hv 與 79.28Hv。而進一步開始 180°C 的人工時效處理後，開始有硬度上的回升，在 0.5 小時至 4 小時的時效時間兩批樣品，平均維氏硬度皆有大於 100Hv 的強度；再過 6 小時之後硬度皆開始下降。結果如圖 6 所示。本次機械性質量測選用維氏硬度做量測，T5 熱處理選擇使用 Hz.樣品，在進行 170°C 時效處理



後，硬度降低接著回升的情況出現，在 1.5hr 時有最大硬度值出現。對於 T5 與 T6 量測硬度之差異性，如圖 7 所示。對於兩者硬度比較，可發現 T5 處理之樣品在 1.5hr 達到 141.6 最高硬度；T6 在 2hr 達到 117.08Hv(最高硬度)，並且 T5 試片硬度在任何時段都比 T6 處理之樣品高，因此經由 T5 處理可以得到較好的性質，如圖 8 所示。

四、學術成就方面

『Lam, T.-N., et al., Estimating fine melt pool, coarse melt pool, and heat affected zone effects on the strengths of additive manufactured AlSi10Mg alloys. Materials Science and Engineering: A, 2022. 856.』為本補助計畫產出結果，經整理投稿至 Materials Science & Engineering A 並已於近期發表。詳情可至參考文獻²。

參、展望

未來的研究可以在 T5 熱處理的基礎上進一步深入研究，探索最佳參數對鋁矽十鎂合金性能的影響，並進行微觀結構和相變的研究。同時，可以擴展研究範圍，探索其他熱處理方式，例如 T4 等對合金性能的影響，並應用其他材料表徵技術如 X 光繞射等，對微觀結構進行深入研究，並應用力學測試、疲勞性能等，更全面評估鋁矽十鎂合金的機械性能，以全面了解結構與性能之間的關係。

² Lam, T.-N., et al., *Estimating fine melt pool, coarse melt pool, and heat affected zone effects on the strengths of additive manufactured AlSi10Mg alloys*. Materials Science and Engineering: A, 2022. 856.

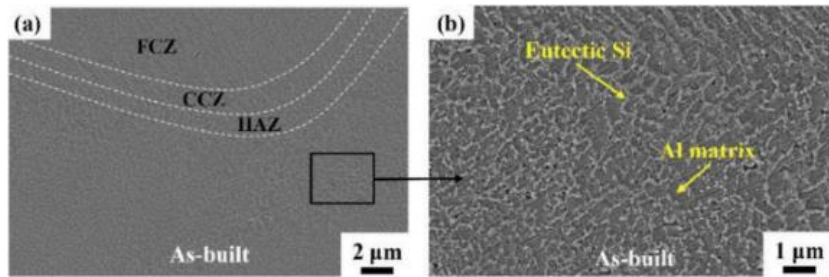


圖 1、本圖為 Li, D., *et al* ^[1]圖 5 的熱處理前 AlSi10Mg 樣品 SEM 圖

(a) 融池邊界結構，(b) 共晶矽的網絡狀

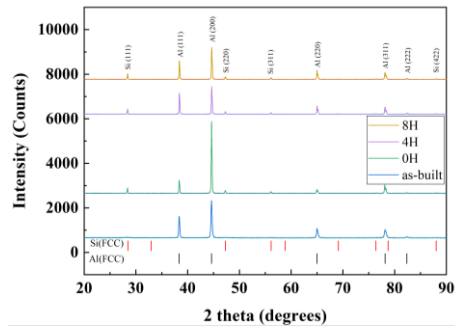


圖 2、T6 熱處理前後的 X 光繞射結果與分析結果

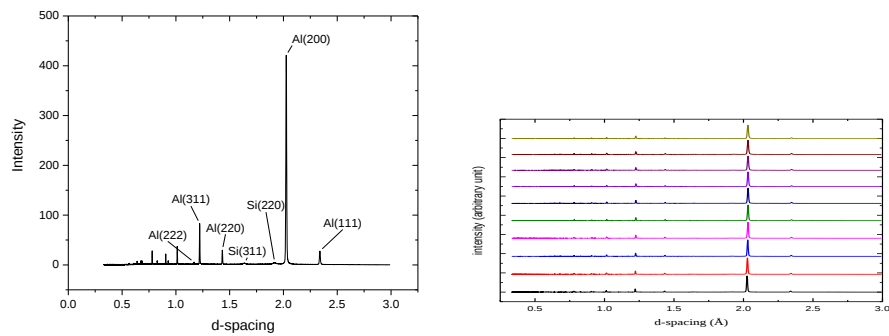


圖 3、(a)形變前的中子繞射；(b)即時(in-situ)中子繞射圖譜，拉伸中的垂

直樣品，由下到上為應變程度的增加

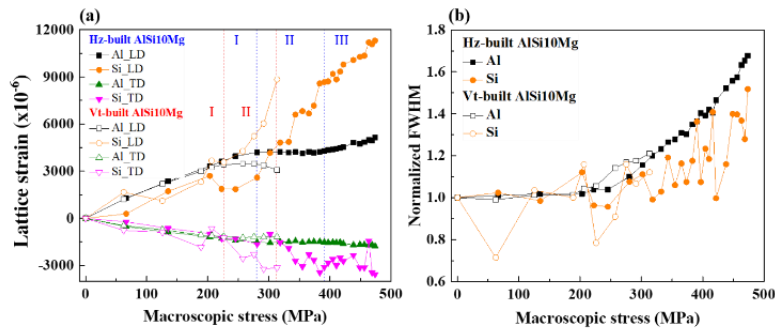


圖 4、本圖為 Lam, T.-N., *et al*^[2] 晶格應變演變作為兩種 AlSi10Mg 合金中沿荷重方向和橫向的巨觀應力的函數；(b)FWHM 演變作為兩種合金中沿 LD 的巨觀應力的函數

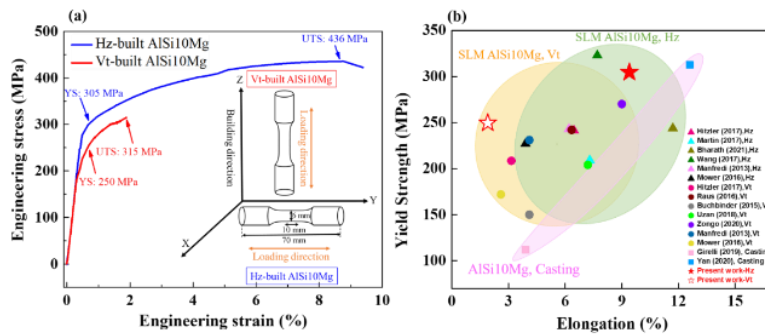


圖 5、本圖為 Lam, T.-N., *et al*^[2] 圖 4 的(a) 兩個方向相關的 AlSi10Mg 的工程應力-應變曲線。(b) 鑄造合金和 SLM 製造的 AlSi10Mg 合金的降伏強度與伸長率

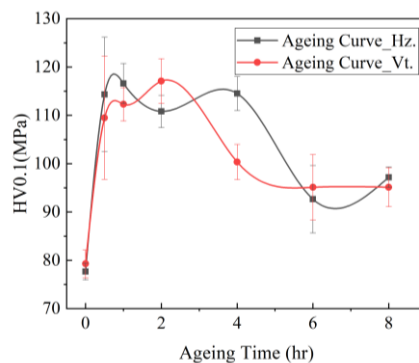


圖 6、AlSi10Mg 合金 (水平向 Hz.與垂直向 Vt.) 時效強化曲線圖

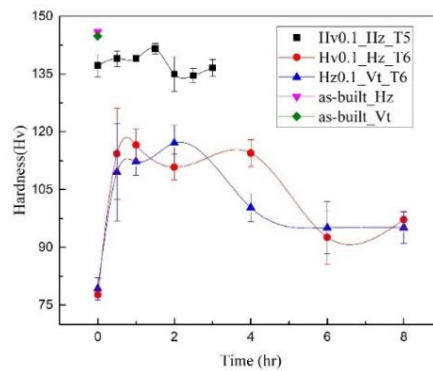


圖 7、為 as-built 試片與進行 T5、T6 熱處理硬度量測數據曲線圖

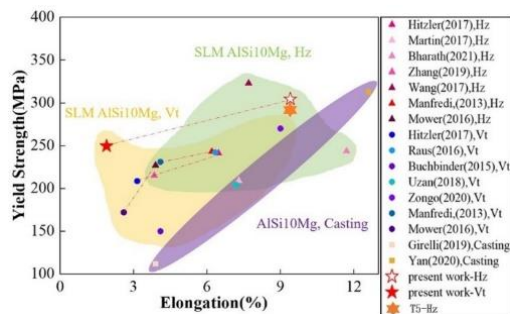


圖 8、為 T5 熱處理其機械性質進行比較



量子電容薄膜材料及儲電特性分析

Investigating performance of energy storage and material properties of
quantum capacitance thin film

(計畫編號：111A003)

蔡宗鳴

國立中山大學材料與光電科學學系

現代社會透過電子化的訊息傳輸，使人們能在短時間內巨量轉移資訊內容，讓通訊更為便利，然而，高速通訊會受記憶體容量大小限制，因此，開發記憶體技術變得重要，其中，與矽半導體製程匹配的浮動閘極記憶體，在利用量子點作為浮動閘極材料後，能讓記憶體儲存更多電荷，且提升可靠度。本計畫基於此，專注於新型量子點記憶體研究，對元件進行電性與材料分析，再搭配文獻的材料參數進行比較，最後提出元件的物理模型與操作原理。本計畫所開發之技術未來可提供物理儲能電池之應用。

In modern society, with electronic means of information transmission, people can transfer a large amount of information content immediately, which makes communication more convenient. However, high-speed communication is limited by the size of memory. Therefore, the development of memory technologies becomes important. Among them, the floating gate memory with inserting quantum dots in floating gate, whose fabrication process is compatible with conventional silicon semiconductor process, have better storage capability



of charges and reliability. According to that, this project focuses on new quantum dots memory. In this project, based on device electric/material analyses and previous researches, the physical model is proposed for explanation of device characteristics. The technology developed in this project can provide the application of physical energy storage batteries in the future.

壹、計畫目標

本計畫利用精準半導體電性量測系統的定電流/電壓量測，分析元件儲電性能，並透過材料分析，如穿透式電子顯微鏡、拉曼光譜、傅里葉轉換紅外光譜和光致發光分析等儀器，進一步分析元件內部結構、光學特性、材料組成與能帶特性，最後比對文獻的材料參數，分析元件的物理模型與操作原理，也設計高性能的記憶體元件。

貳、重要成果

近年開發高性能的浮動閘極記憶體遇到瓶頸，雖然穿隧氧化層厚度變薄時，能提升寫入抹除能力，但會導致氧化層漏電變大，導致元件更容易崩潰，且可靠度變差，而量子點記憶體能有效降低電荷流失，而有小的操作電壓，與較快的寫入速度，因此，本計畫研究具可反覆寫入抹除記憶體訊號的 Fe_2O_3 量子點記憶體，透過電性與材料分析，分析記憶體操作原理與物理機制，也設計高性能的記憶體元件。

一、記憶體元件材料分析與操作物理機制

本計畫所使用的記憶體元件結構為 $\text{n-Si/Fe}_2\text{O}_3$ 奈米點/穿隧氧化層/ p-Si ，元件結構示意圖、量子點掃描電子顯微鏡(scanning electron microscope, SEM)與穿透式電子顯微鏡(transmission electron microscope,

TEM)材料分析如圖 1，並搭配 TEM 中的能譜儀(energy dispersive spectroscopy, EDS)的點分析分析材料組成，分析鐵、矽和氧的原子比例。

除了分析材料的尺寸結構與材料組成外，也分析材料的晶相與能帶如圖 2 所示，首先，對 Fe_2O_3 量子點材料片做拉曼光譜與傅立葉轉換紅外光譜分析，得知 Fe_2O_3 組成包含赤鐵礦(hematite, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)和磁赤鐵礦(maghemite, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)，此外，也量測光致發光分析，得知缺陷能階為峰值 649 nm (1.91 eV)的 Fe^{3+} $6\text{A}_1 \rightarrow 4\text{T}_1$ 能階轉換，且有部分量子點尺寸較大(>70nm)，當量子點尺寸較大時，則元件無量子侷限效應，近似於塊材效應，導致峰值紅移，波長變長，能量變弱。完成元件製備後，量測元件儲放電特性與分析能帶特性，如圖 3 所示。另外，也分析相同結構，但量子點改為金屬 Pt 的記憶體特性，如圖 4 所示。

二、學術成果發表國內外研討會論文 1 篇

相關學術成果發表於 2023 台灣物理年會(The Physical Society of Taiwan 2023 Annual Meeting)，題目為 A Novel Forming-Free Technology by X-ray Irradiation for HfO_2 -based Resistive Random Access Memory。

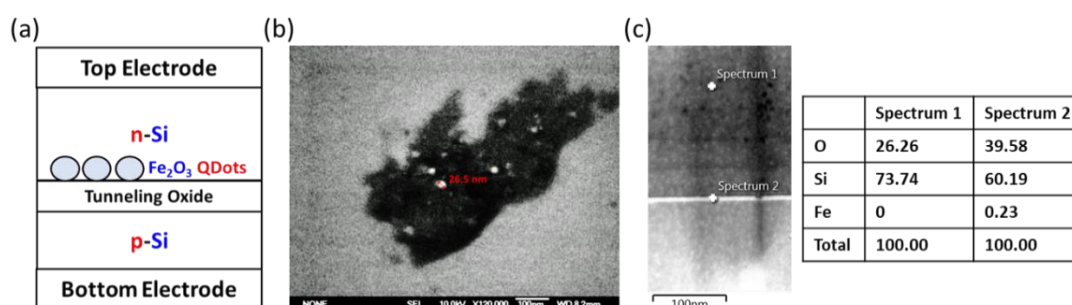


圖 1、(a)元件結構示意圖與量子點的(b)SEM 與(c)TEM 材料分析

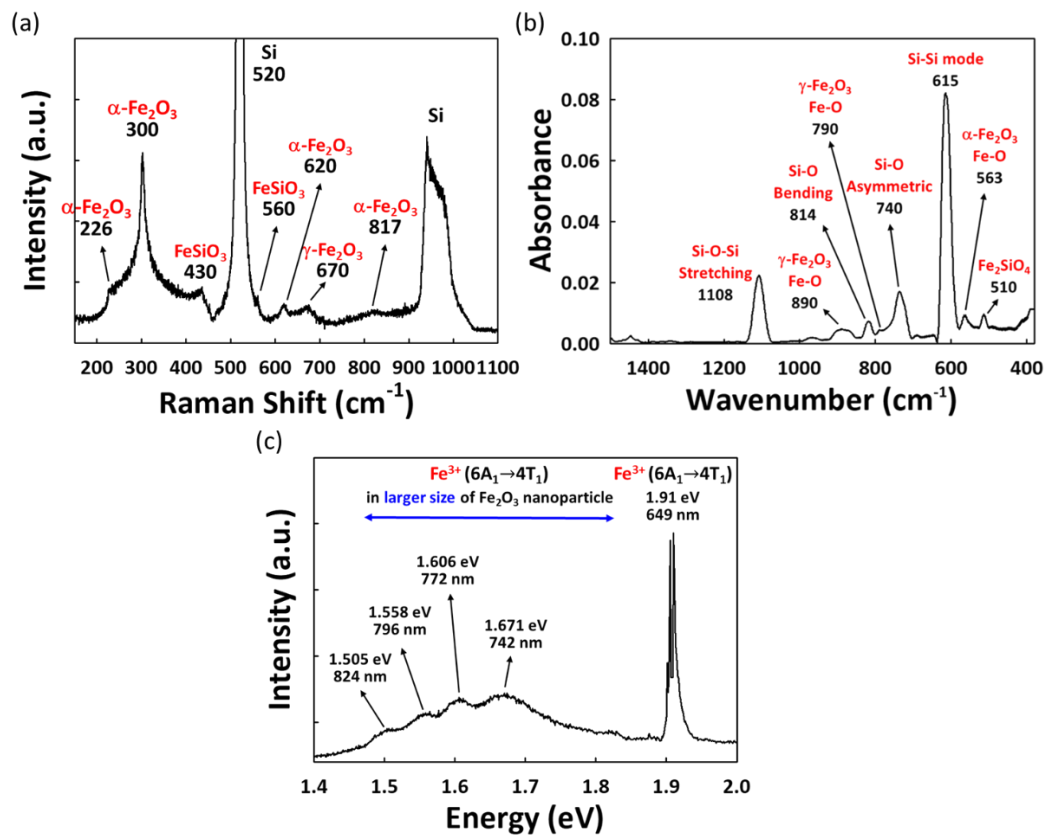


圖 2、 Fe_2O_3 量子點材料片的(a)拉曼光譜與(b)傅立葉轉換紅外光譜
與(c) 光致發光光譜

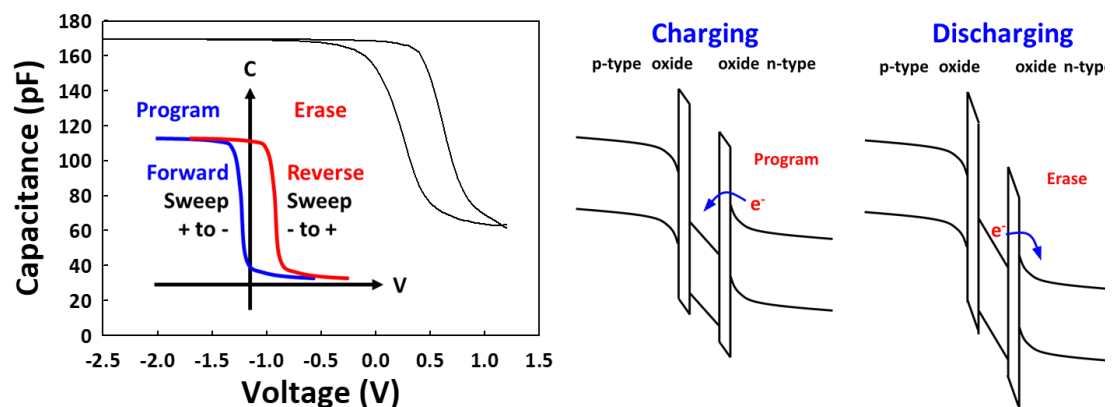


圖 3、(a) Fe_2O_3 量子點記憶體元件的儲放電特性與(b)能帶示意圖

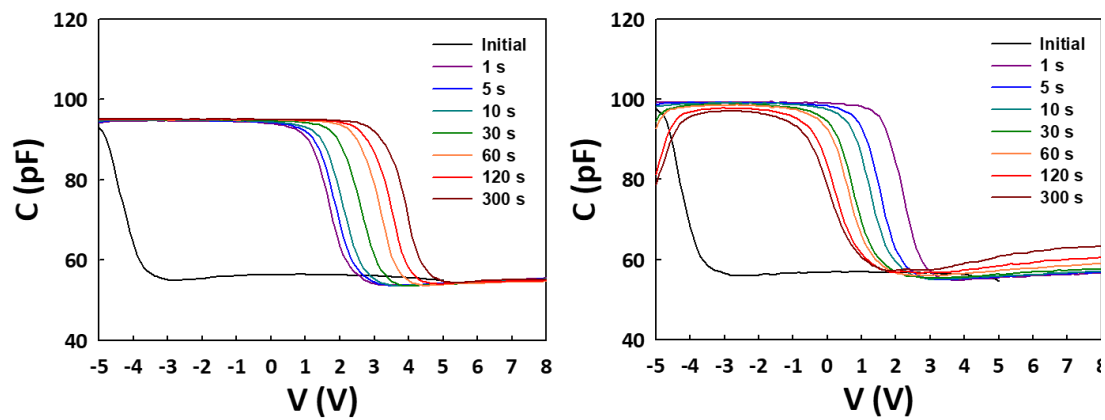


圖 4、Pt 量子點記憶體元件的定電壓儲放電特性

參、展望

本計畫開發了一種具可反覆寫入抹除記憶體訊號的 Fe_2O_3 量子點之固態半導體記憶體，通過 TEM、SEM、Raman、FTIR 與 PL 分析元件結構、材料組成與特性，也量測電容電壓曲線，分析電容記憶窗口約 0.5 V，並提出記憶體內電子寫入抹除機制。本計畫所開發的記憶體，相比浮動閘極記憶體，製造簡單且成本低，且此技術未來可提供物理儲能電池之應用。



節能除濕轉輪系統健康危害風險有效性評估

Assessment of the pulmonary health risk of energy-saving dehumidification
rotor system

(計畫編號：111A008)

林家驊¹ 林坤儀² 江欣諭^{1,2}

¹ 國立虎尾科技大學生物科技系 ² 國立中興大學環境工程學系

為了未來節能除濕轉輪系統之應用及推廣，進行節能除濕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)人類肺細胞平台來進行節能除濕轉輪系統排放氣體之人體肺毒性檢測，並釐清其生物作用機制。由監測數據看來，除濕輪乾燥系統運轉時排放至採樣空間之 VOCs、SO₂、NO₂、O₃+NO₂、PM₁、PM_{2.5}和 PM₁₀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影響操作空間之空氣品質。除濕輪乾燥系統運轉產生之 PM_{2.5} 懸浮顆粒物對正常 BEAS-2B 細胞亦無顯著之細胞毒性、氧化壓力、發炎效應、肺屏障損害及慢性阻塞性肺病罹患風險。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肺部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 order to apply and popularize the energy-saving dehumidification rotor system, assessing the toxicity risk of the exhaust gas from the energy-saving dehumidification rotor system will be an urgent task for the future development



of the system. This study uses the in vitro human lung cell platform to conduct the human lung toxicity test of the exhaust gas from the energy-saving dehumidification rotor system (DRS) and clarify its mechanism of biological actions. According to the monitoring data, VOCs, SO₂, NO₂, O₃+NO₂, PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ discharged into the sampling space during the operation of DRS are not significantly different from the blank conditions. The PM_{2.5} suspended particles produced by the DRS have no significant cytotoxicity, oxidative stress, inflammatory effect, lung barrier damage and risk of chronic obstructive pulmonary disease on normal BEAS-2B cells. Based on the experimental results obtained in this study, the operation of DRS will not have a significant risk of harm to human lung health. It is hoped that the results of this study can be used as a reference for developing the energy-saving dehumidification rotor system in the future so it can continue to grow under safe conditions.

壹、計畫目標

為了完整揭示除濕輪乾燥系統操作可能對人體健康造成之影響，本研究將利用人類正常肺上皮細胞(BEAS-2B)來進行除濕輪乾燥系統排放尾氣(可吸入性微粒)可能誘發的肺部危害效應和機制。本研究計畫目的係釐清除濕輪乾燥系統排放尾氣(可吸入性微粒)是否可能導致人體肺部危害及其危害之關鍵因素，並有效地評價除濕輪乾燥系統操作之潛在風險。

貳、重要成果

本研究於除濕輪乾燥系統運轉同時利用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 VOCs、SO₂、NO₂、O₃+NO₂、PM₁、PM_{2.5}和 PM₁₀。由監測數據看來，除濕輪乾燥系統(Dehumidification rotor system,



DRS)運轉並不會影響操作空間之空氣品質(圖 1 及 2)。DRS 運轉前後收集之 $PM_{2.5}$ 懸浮顆粒物對正常 BEAS-2B 細胞所產生之細胞存活率與控制組並無差異(圖 3)。此顯示 DRS 工作人員在短期操作期間其肺部所暴露之 $PM_{2.5}$ 並不會對肺細胞產生明顯之細胞毒性效應。DRS 運轉前後收集之 $PM_{2.5}$ 懸浮顆粒物對正常 BEAS-2B 細胞所產生之活性氧分子(reactive oxygen species, ROS)量與控制組並無差異(圖 4)。此顯示 DRS 工作人員在短期操作期間其肺部所暴露之 $PM_{2.5}$ 並不會對肺細胞產生明顯之氧化壓力累積效應。DRS 運轉前後收集之 $PM_{2.5}$ 懸浮顆粒物對正常 BEAS-2B 細胞所產生之 IL-6、IL-8 和 NF- κ B 發炎因子蛋白表現量與控制組並無差異(圖 5)。此顯示 DRS 工作人員在短期操作期間其肺部所暴露之 $PM_{2.5}$ 並不會對肺細胞產生明顯之發炎效應。由實驗之結果看來，DRS 運轉前後收集之 $PM_{2.5}$ 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並無差異(圖 6)。此顯示 DRS 工作人員在短期操作期間其肺部所暴露之 $PM_{2.5}$ 並不會對肺部緊密連接蛋白產生影響。此外，DRS 工作人員在短期操作期間其肺部所暴露之 $PM_{2.5}$ 亦不會對肺部 AAT 蛋白產生影響，因此其對慢性阻塞性肺病之誘發風險並不高。

一、說明研發成果之重要貢獻

一般認為相較於柴油燃燒機系統，以除濕輪乾燥系統進行乾燥是一個兼具低污染及高經濟效應之處理方法。本研究針對除濕輪乾燥系統之排放尾氣(可吸入性微粒)進行安全評估後，初步確認除濕輪乾燥系統具備環保及低環境危害之特性。

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

本研究結果顯示除濕輪乾燥系統運作並不會對人體肺部產生危害風險。除濕輪乾燥系統運作所產生之尾氣排放顆粒物亦可能對人體眼睛及皮膚產生影響。因此，未來將繼續針對上述兩部位進行毒性檢測，藉以完整確認除濕輪乾燥系統運作之安全性。

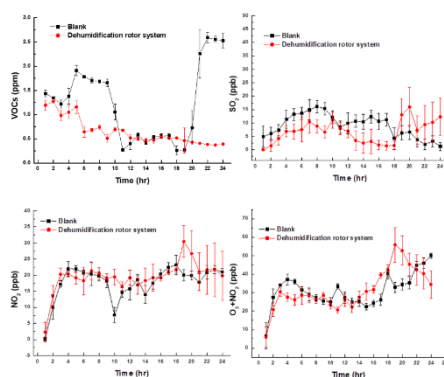


圖 1、排放尾氣之成分

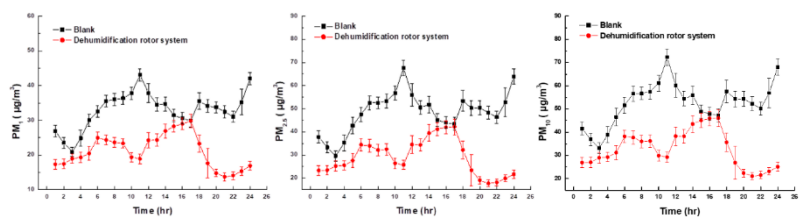


圖 2、排放尾氣之粒狀物濃度

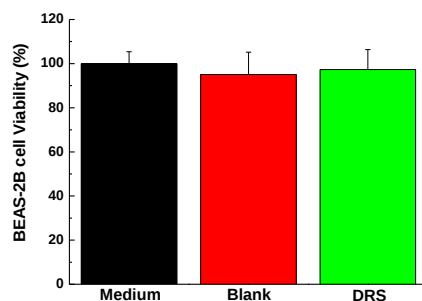


圖 3、PM_{2.5} 懸浮顆粒之細胞毒性效應

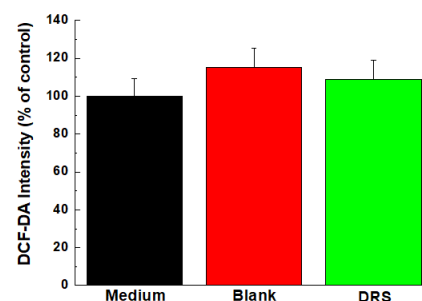


圖 4、PM_{2.5} 懸浮顆粒之細胞氧化壓力

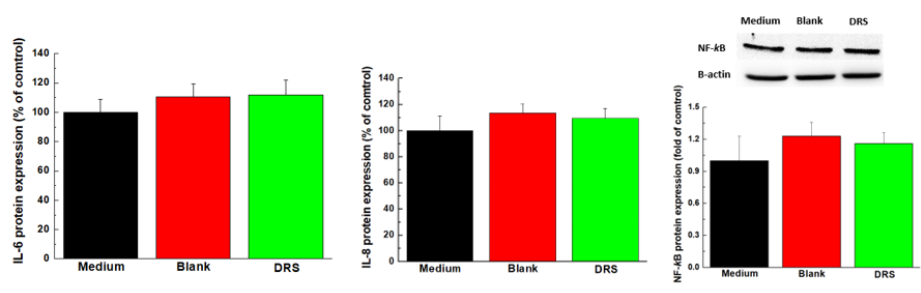


圖 5、PM_{2.5} 懸浮顆粒之細胞發炎因子表現量

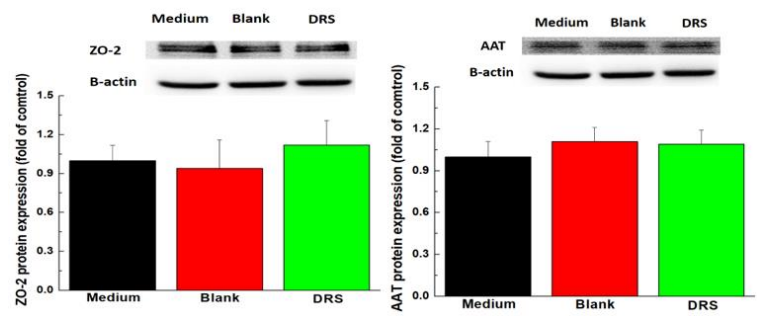


圖 6、PM_{2.5} 懸浮顆粒之細胞 ZO-2 與 AAT 表現量



多孔吸附關鍵陶瓷結構元件氣流、熱流及運轉負載特性模擬分析研究

Simulation and analysis of air flow, heat flow and operating load characteristics of porous adsorption ceramic structural components

(計畫編號：111B001)

張哲維 陳伽達 李旺龍

國立成功大學材料科學及工程學系

本期計畫採用有限元素法建立吸附脫附濃縮槽及燃燒室的數值分析模型。利用修正傳輸過程中的質量、動量(Navier-Stokes 方程式)、及能量守恆方程式；分析在六種不同流速條件下，吸附脫附濃縮槽內氣流與熱流交互作用時的溫度、流速及壓力分佈。燃燒室則是在分析將不同濃縮物在不同濃度條件下溫度、流速及濃度分佈，並根據燃燒室的數值模擬分析找出最佳的雙層孔洞設計。

This project uses the finite element method to establish the numerical analysis model of the adsorption-desorption concentration tank and combustion chamber. The modified mass, momentum (Navier-Stokes equation), and energy conservation equation are used to analyze the temperature and flow rate when the gas flow and heat flow in the adsorption-desorption concentration tank interact with each other under six different flow rates. The combustion chamber is analyzing the temperature, concentration, and flow velocity under different concentration conditions, and based on the numerical simulation analysis wish to find the best duel-layer pore design.



壹、計畫目標

揮發性有機氣體 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 是主要的環境污染物，不當的排放將造成環境汙染，而吸附濃縮焚燒法是目前常用來處理廠房排放的 VOCs 汙染物技術，此方法去除不同濃度的 VOCs 廢氣效率可高達 95% 以上，並且熱量還可進行回收。為了更清楚瞭解去除廠房工作中所排放的 VOCs 的機制，本計畫著重於評估吸附脫附濃縮槽與燃燒室模擬的可行性。

貳、重要成果

本計畫將藉由有限元素法分別建立吸附脫附濃縮槽及燃燒室數值分析模型，其邊界條件與氣體路徑如圖 1 所示，吸附濃縮槽模型中氣流與熱流會通過 30 PPI 以及 60 PPI 兩種規格的多孔吸附關鍵陶瓷結構元件並針對在六種不同流速條件下，去分析氣流與熱流交互作用時的溫度、流速及壓力分佈等變化。燃燒室模型將評估三種 VOCs (丙酮、異丙醇、甲苯) 在三種不同濃度條件對於燃燒室燃燒點最低溫度變化，研究時間相依的流速、濃度分佈及溫度分佈變化並評估最佳的雙層孔洞組合設計。

一、說明研發成果之重要貢獻

(一) 吸附試驗成果

為了證明多孔吸附關鍵陶瓷結構元件具有吸附 VOCs 分子的能力，因此設計了一套吸附試驗的流程來進行證明。表 1 為吸附試驗得到的實驗數據經轉換後與 Yoon-Nelson 模型比較後得到的參數結果。

(二) 方程式的修正

當流體流過多孔吸附關鍵陶瓷結構元件時需要進行修正才可以



更加精準的描述模型的運作。

1. 動量守恆方程式

在均質的連續流體中，可以使用納維爾-斯托克斯方程式（Navier-Stokes equations）表示動量守恆，並用來描述流體動量變化、壓力變化、黏滯耗散與重力之間的關係。根據達西定律(Darcy's law)與 Dupuit-Forchheimer 關係式對 Navier-Stokes equation 做一些修正可得：

$$\frac{1}{\epsilon_p} \rho_f \frac{\partial \mathbf{v}_p}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon_p^2} \rho_f (\mathbf{v}_p \cdot \nabla) \mathbf{v}_p = -\nabla p - \frac{\mu}{\kappa} \mathbf{v}_p + \rho_f \mathbf{g} \quad (1)$$

2. 能量守恆方程式

流體在多孔介質中流動時，熱能藉由熱傳導與熱對流擴散至整個多孔吸附關鍵陶瓷結構元件。該過程由式(11)的能量守恆方程式來描述，左側第一項為與時間變化有關的熱源，左側第二項與移動熱源有關，左側第三項為熱傳導所產生的熱源，且須同時考慮固體與流體造成的影響。

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (2)$$

（三） 研究成果

1. 添加岩棉的影響

有岩棉作為保溫材不僅對於數值模型中流體的流動路徑與熱的傳遞等皆有更好的表現，也可以大幅提升多孔吸附關鍵陶瓷結構元件在數值模型蓄熱的能力。



2. 不同孔隙度的對比

從圖 2 可以分別看出脫附與吸附時從管道連線中各位置的溫度，可以發現當流體流進多孔吸附關鍵陶瓷結構元件的時候會產生一個溫差，代表多孔吸附關鍵陶瓷結構元件對於流體的流動有極大的影響。此外我們討論了不同孔徑大小的多孔吸附關鍵陶瓷結構元件對於模型的影響。

3. 燃燒室的蓄熱能力

我們在本研究中探討了燃燒室的蓄熱能力，圖 3 為燃燒室燃燒氣體 20 min 後再開置等待 60 min 後的位置隨溫度圖，由此圖可以看出不同模式後的溫度分佈變化，且透過找出溫度最低點，找出高於自燃溫度的時間點，進而獲得最佳的孔洞組合。

參、 展望

本研究建立吸附脫附濃縮槽及燃燒室的數值模型，並針對不同流率下進數值行分析，著重於溫度、流速及壓力等分佈造成影響的討論。藉由透過建立的數值模型，探討流體貫穿多孔介質與燃燒時劇烈氧化反應的機制，未來透過此數值模型可以直接對實驗的結果進行預測。



表 1、吸附動力模型所得之參數

VOCs	濃度 [ppm]	陶瓷元件試驗 前後重量差 [g]	反應速率 k_B [1/min]	實驗貫穿 時間 $\tau_{50,exp}$ [min]	理論貫穿 時間 $\tau_{50,theory}$ [min]	R^2	最大吸附 量 [$\mu\text{g/g}$]
丙酮	500	0.54	1.741	4.9	3.9	0.95	0.52332
	350	1.68	0.336	12.2	15.2	0.94	2.10899
	200	0.6	0.269	15.3	16.4	0.93	2.40973
	50	1.36	0.359	21.7	17.5	0.94	0.09310
甲苯	500	1.06	2.105	3.1	2.0	0.92	6.83029
	350	0.62	2.818	3.3	2.6	0.95	0.20446
	200	0.37	2.358	3.7	3.1	0.95	0.14194
	50	0.88	0.798	4.6	6.7	0.88	0.23064
異丙醇	500	0.45	0.488	11.0	13.4	0.98	0.71012
	350	0.54	0.305	17.3	19.8	0.97	0.83315
	200	0.76	0.188	24.6	25.3	0.94	1.72282
	50	1.41	0.153	29.7	34.8	0.95	0.24230

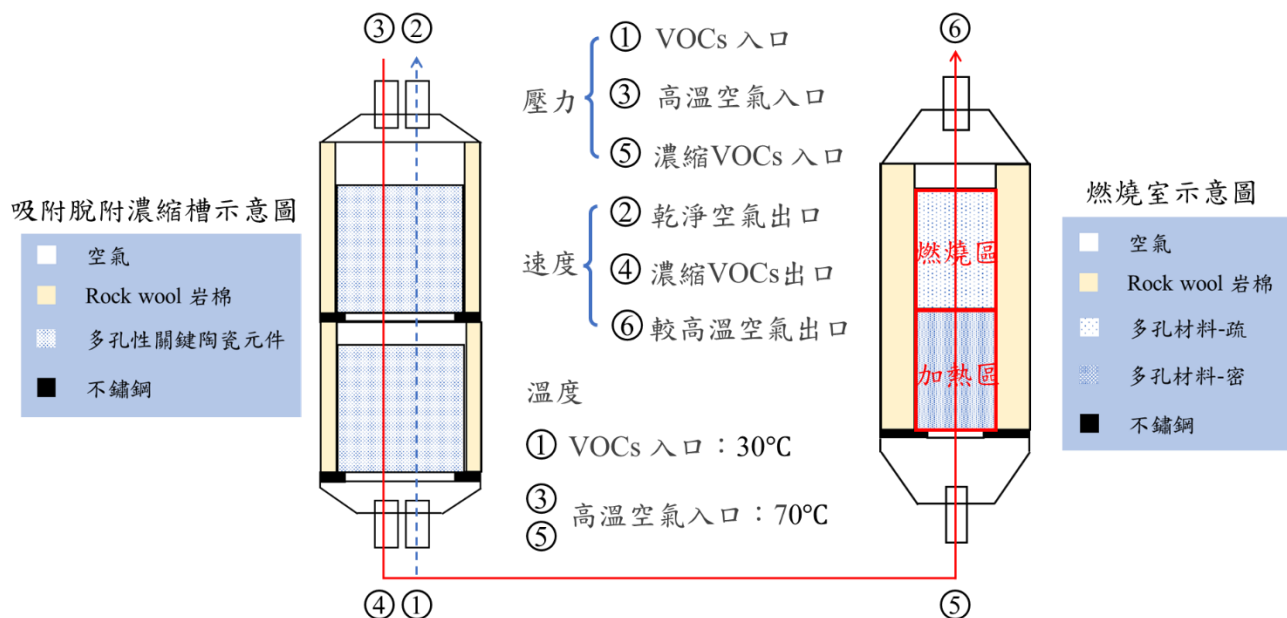


圖 1、吸附脫附濃縮槽及燃燒室數值模型的邊界條件與氣體路徑圖

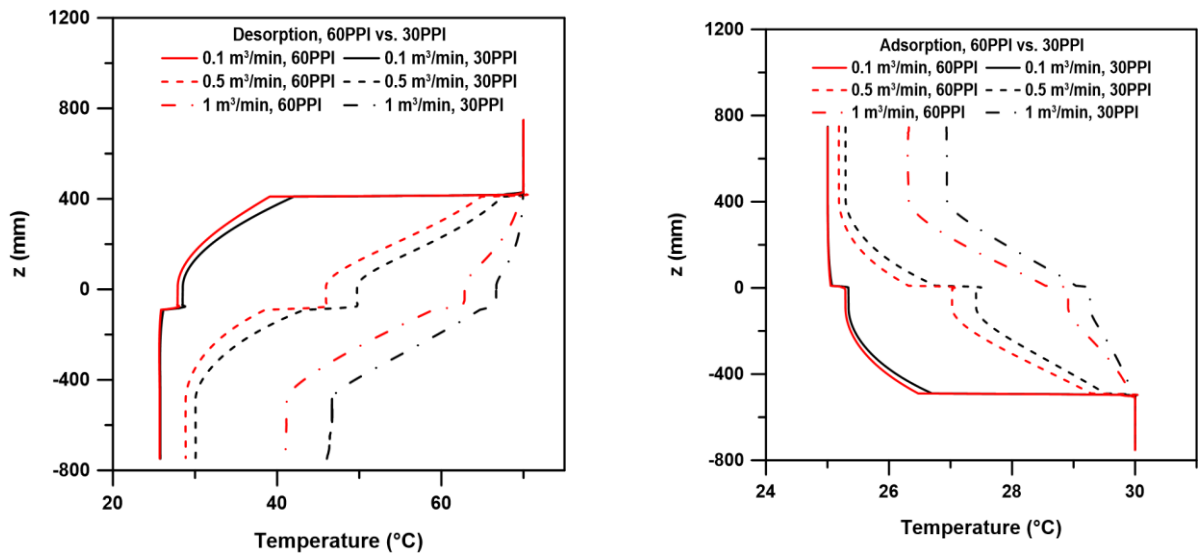


圖 2、30 PPI 與 60 PPI 數值模型位置隨時間的變化比較圖

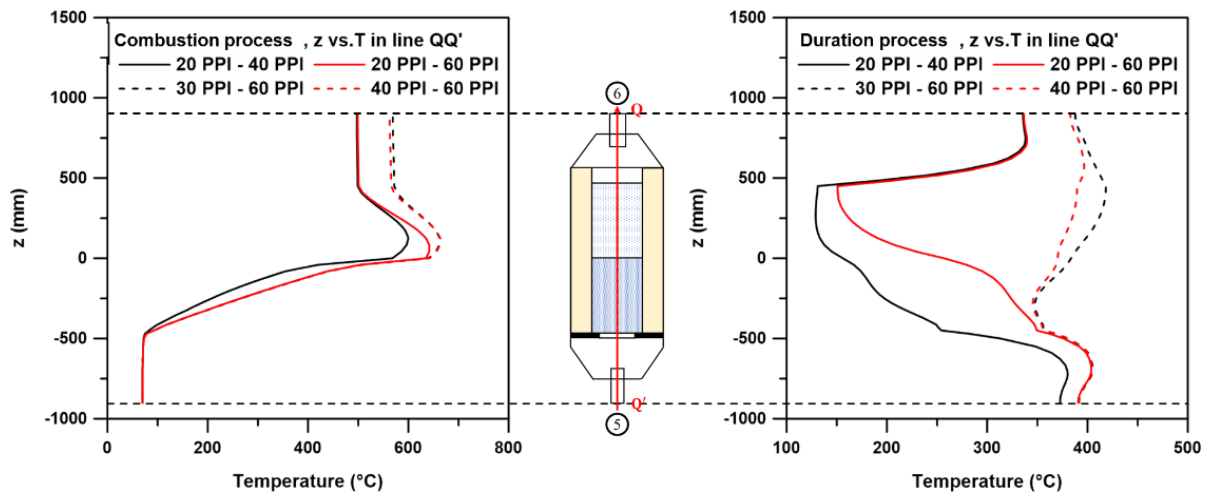


圖 3、30 PPI 與 60 PPI 數值模型位置隨時間的變化比較圖

**場次 3—環境能源科技領域 II**

配電級分散式電源運轉模式之短路電流研究.....	1
優化饋線開關長期操作序列之研究.....	6
饋線設備關聯性資訊模型之研究.....	13
配電系統漸進式輔助調控技術研究.....	22
變壓器智慧診斷之專家系統技術研究.....	29
智慧型儲能充電站運轉管理組件技術之研究.....	35
三相功率調節系統協調柴油機之基載輸出策略研究.....	40
混合能源協調分配及補償策略研究.....	45



配電級分散式電源運轉模式之短路電流研究

Studies on Fault Current from Distributed Generations Considering Operation
Modes in Distribution Level

(計畫編號：111A010)

洪穎怡 洪凡希

中原大學電機工程系

本計畫針對短路故障條件下，配電系統中基於變流器的分散式電源(Inverter-based Distributed Generation, IBDG)的各種控制模式進行研究。分散式電源測試系統分別採用光伏(Photovoltaics, PV)系統與電池儲能系統(Battery Energy Storage System, BESS)。本計畫建構正序、負序與零序等效電路以尋求穩態條件下的三相平衡、單相接地、相間與雙相接地及單相高阻抗接地故障。

本計畫首先利用戴維寧等效電路，考慮具逆變器之分散式電源以電壓源或電流源為模型，推導於平衡故障及各種不平衡故障的短路電流關係式。其次提出具 IBDG 的配電系統之平衡與不平衡故障的分析公式(靜態模型)。考慮的控制模式方面，在基於逆變器的 PV 系統採用的控制方案為 最大功率追蹤(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 模式、P-Q 控制與 V-Q 下垂模式。在基於逆變器的 BESS 系統採用的控制方案為 P-Q 模式、V-Q 與 P-f 下垂模式。除了推導穩態故障電流之外，本計畫也推導出初始暫態高峰故障電流之數學關係式。

本計畫用三種模擬方式來驗證上述解析公式的正確性，包括



MATLAB Simulink 模擬與解析解的比較、Opal-RT eMegasim 的分核即時模擬及功率硬體迴圈模擬實驗。

In this project, various modes of Inverter-based Distributed Generation (IBDG) in distribution systems are studied under fault conditions. This project adopts the photovoltaic (Photovoltaics, PV) system and battery energy storage system (Battery Energy Storage, BESS). This project implements positive sequence, negative sequence and zero sequence equivalent circuits to study three-phase balanced, single-phase-to-ground, phase-to-phase and two-phase-to-ground, and single-phase high-impedance grounding faults under steady-state conditions.

First, through the Thevenin equivalent circuit, by considering the distributed generation with inverters as a voltage source or current source model, the short-circuit current relationship associated with balanced faults and various unbalanced faults is derived. Secondly, the analytical formula (static model) of balanced and unbalanced faults of distribution system with IBDG are proposed. In terms of control modes considered, the control schemes used in inverter-based PV systems are Maximum Power Point Tracking (MPPT), P-Q and V-Q droop mode. The control schemes adopted in the inverter-based BESS system are P-Q mode, V-Q and P-f droop modes. In addition to deriving the steady-state fault current, this project also deduces a mathematical expression for the initial transient peak fault current.

This project uses three kinds of simulations to validate the accuracy of the proposed analytical formula: Matlab Simulink time-domain simulation, Opal-RT eMegasim real-time digital simulation and power hardware-in-the-loop simulation.



壹、計畫目標

本研究的目的為分析具 IBDG 的配電系統於故障狀態時的模式，研究目標如下：

- 以配電系統的戴維寧等效電路研究 IBDG (PV 系統與 BESS 系統)的平衡與不平衡(單相接地、相對相、雙線接地、單相高阻抗)故障。
- 提出具 IBDG 的配電系統之平衡與不平衡故障的分析公式(靜態模型)。基於逆變器的 PV 系統採用的控制方案為 MPPT 模式與 V-Q 下垂模式。基於逆變器的 BESS 系統採用的控制方案為 P-Q 模式、V-Q 與 P-f 下垂模式。
- 使用計算機模擬基於 IBDG 配電系統的平衡與不平衡故障的數值研究。
- 使用 MATLAB Simulink 與 OPAL-RT 模擬比較穩態靜態模型與動態模型的結果。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要數據

本文利用三個母線系統做模擬，如圖 1 所示。並以其正序、負序及零序戴維寧等效電路研究，其中正序電路如圖 2 所示。基於模擬結果，可總結如下：

- 對於所有類型的故障，所提出靜態分析方法的結果都接近 MATLAB Simulink 模擬的結果。
- 在穩態條件下，基於逆變器的光伏系統從各種控制模式獲得的結果非常相似。然而，在初始瞬態條件下，VQ 控制模式的響應不同於 MPPT、PQ 和 Pf 模式。



- 在初始瞬態和穩態條件下，基於逆變器的 BESS 系統從不同的基於電流源的控制模式獲得的結果與建模為電壓源的模式的结果相當。

二、學術成就方面

(一)期刊論文

1. Y.Y. Hong; Y.H. Chan; Y.H. Cheng; Y.D. Lee; J.L. Jiang; S.S. Wang , “Week-ahead Daily Peak Load Forecasting Using Genetic Algorithm–based Hybrid Convolutional Neural Network” , IET Generation, Transmission and Distribution, vol.16 , p.2416-2424, 2022.
2. Y.Y. Hong, G.F.DG. Apolinario, Y.D. Lee, J.L. Jiang and J.N. Yeh, “Short Circuit Analysis of Inverter-based Distributed Generation and Energy Storage System with Different Control Modes,” submitted to IEEE Trans. on Power Delivery (TPWRD-00503-2023).

(二)研討會論文

1. Y.Y. Hong; S.S. Lin; J.H. Wang; Christian L.P.P. Riofloridio; J.B.D. Santos; Y.D. Lee; J.L. Jinag; J.N. Yeh , “A Short-Term Spatiotemporal Wind Speed Forecasting Using CNN Optimized by PSO” , 2022 , 2022 IET ICETA , 2022 /10 /14 ~ 2022 /10 /16 , 中華民國台灣。

參、展望

未來的工作包括探索 IBDG 的額外控制模式並分析它們在各種故障類型下的性能。此外，所提出的方法可以應用於其他類型的分佈式發電，例如燃料電池和風力渦輪發電機。有故障電流的估計值後，可進一步研究保護協調設計及配電系統饋線重組，以增強電力系統韌性。

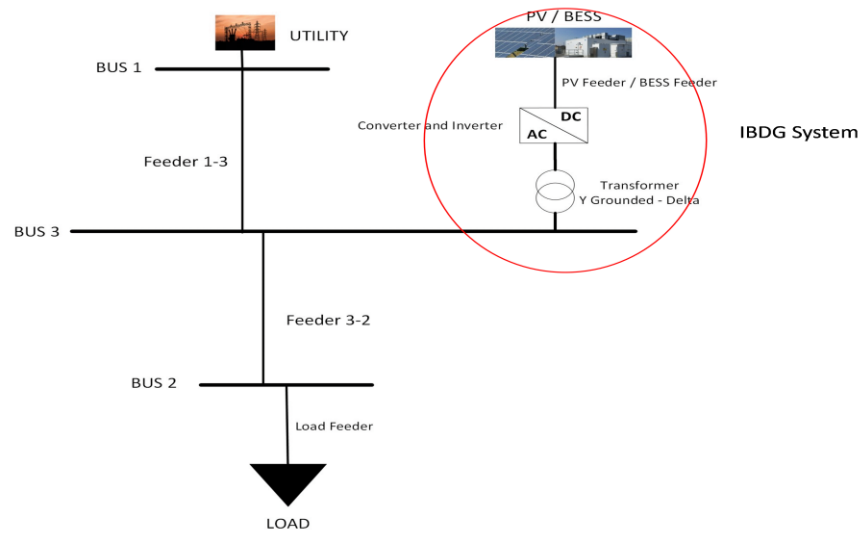


圖 1 三個母線電力系統

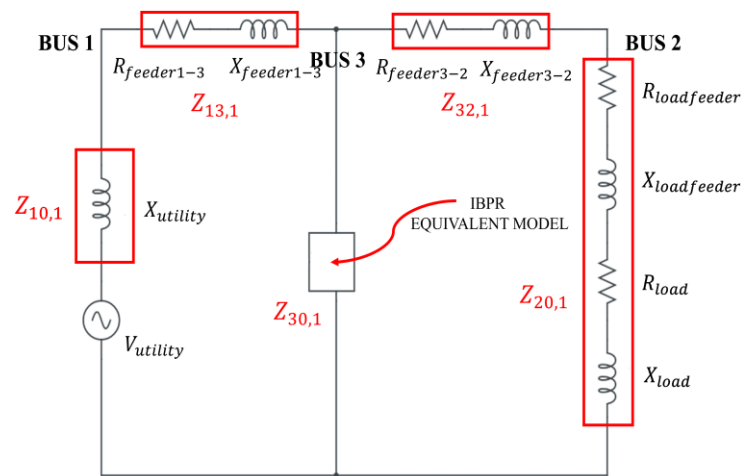


圖 2 三個母線戴維寧等效電路



優化饋線開關長期操作序列之研究

Study on Optimizing the Long-term Operation Sequence of Feeder Switch

(計畫編號：111A007)

黃維澤¹ 林韋辰¹ 蕭耀賢¹ 李立淳¹

李奕德² 姜政綸² 蔡佳豪² 張博荃² 何元祥²

¹國立彰化師範大學 ²核能研究所

本計畫建立一套擴大區域範圍之配電網長期開關操作及其序列與三相淨負載平衡最佳化模擬平台，目的為利用操作開關調整饋線拓樸架構以提升區域最大再生能源併網容量，以及利用調整分歧線與主幹線變壓器抽接點相別以達三相淨負載平衡之效果。開關操作與三相淨負載平衡分別為配電網規劃與運轉上常見的技術，本計畫亦整合二項技術並探討其對於電網運轉性能改善成效，包括最大再生能源併網容量、線路損失、負載平衡與中性電流等。另外，在最佳開關操作技術中，其操作序列亦為一重要的議題。在多個開關操作的排列組合下，找出其優先順序，除了可避免開關兩側過大的電流或相位角差距造成的衝擊，對於配電網運轉操作提供系統性的作業安排。故本研究在進行最佳化長期開關操作演算後，隨即推導最佳開關操作序列，以提供完善的規劃運轉建議。最後，本計畫透過台電區域電網資料以及歷史負載資料經 Python 語言自動轉檔為配電系統模擬軟體 OpenDSS 腳本，以及應用高性能群體智能演算法發展最佳開關操作序列與三相淨負載平衡之策略，並且開發具使用者介面之模擬平台整合上述功能，依據不同需求提供各情境下之規劃運轉建議，所開發之平台有助於提供大範圍區域配電網最佳運轉模擬分析與實用參考。



This project aims to establish a wide range regional distribution networks (DNs) optimal simulation platform for long-term operation sequence of feeder switch and three-phase net-load balancing. The objective is to increase the maximum hosting capacity (HC) by switching line switches; and to improve three-phase unbalance by rephasing the laterals and the distribution transformers on feeder main. Due to the switch operation and three-phase load balance are the useful techniques on DN's planning and operation. Therefore, in this project, both of the techniques are integrated and study to improve the maximum HC, conductor loss, load balance, neutral current, etc. Moreover, on the switch operation planning, the operation sequence of them is also an important issue. Under the arrangement and combination of multiple switch operations, figuring out the priority order can not only avoid the impact caused by the high difference of currents or phase angle between both terminals of the switch, but can provide a more systematic strategy for the DN system operators. Therefore, after conducting the switch operation optimization algorithm in this study, the optimal operation sequence of switches is also be calculated in order to provide a complete suggestion for the system planning. This project intends to utilize Python language to convert the DN data of topology and parameter and the historical load data of Taipower to the OpenDSS (a DN simulator) scripts automatically, and use the high-performance swarm intelligence algorithm to search the best strategy on sequence of switch operation and net-load three phases balance. The simulation platform with a user interface will be developed to integrated above functionality, providing the operation suggestion in different scenarios based on user needs, and it is helpful for optimal operation simulation in large scale area distribution networks.



壹、計畫目標

為了增強配電自動化系統附加價值以及達到配電網最佳運轉策略，本計畫提出一套區域配電網最佳化長期開關操作序列與三相淨負載平衡模擬平台。目的為提升配電網之再生能源最大併網容量、減輕開關切換對系統之衝擊、降低中性線電流與線路損耗等。本計畫著重於理論面與實務面的整合，經與台電區處相關單位研議目前配電網最迫切需被改善的運轉工作項目後，取得標的配電網全尺度資料以利饋線模型建置。目前已知可取得資料為台電配電圖資管理系統轉檔後之區域電網資料，以及台電 SCADA 中由 FTU 所回傳之電壓、電流等歷史資料。得益於資料的完整性，本計畫已 Python 語言撰寫程式擷取系統分析所需參數，轉換為配電系統模擬軟體之電網模型，再搭配相關軟體套件與演算法，調整開關操作與三相負載接線方式獲得最佳策略，以達提升再生能源併網容量、降低系統衝擊與損失等效果。

除了配電網開關操作策略，模擬平台亦將進行開關操作序列與負載相位平衡作之最佳化策略求解，為了達到全面性的最佳化效果以及可彈性輸入模擬時間、模擬標的、最佳化需求，故本計畫開發一套具使用者介面之模擬平台，將電網資料與 FTU 歷史資料轉檔後，可讓電網規劃人員依據其需求輸入標的系統參數，以及最佳化目標如最大再生能源併網容量與線路損失等，如圖 1 之平台架構所示，使得本計畫之技術更有亮點與實用性。

貳、重要成果

本研究將台電配電網建模、饋線開關操作演算法、開關操作序列演



算法、三相淨負載平衡演算法、群體智能演算法、以及使用者介面整合為一個模擬平台，在資料轉檔過程中，以台電 FTU 之 .sql 檔與饋線拓樸架構之 set 檔進行轉檔並建立 OpenDSS 饋線模型，再依據使用者需求執行標的系統開關操作演算以求解最佳饋線拓樸，目標為提升配電網裕度等。以橋村 S/S (XE) 於 2021 年 7 月白天平均負載為例，圖 2 為開關操作前後各饋線三相電流與損失輸出結果，部分饋線在變電所內轉供達到饋線電流平衡，進而降低 12 小時總線路損失 210.8 kWh，由於饋線負載趨於平均，也使得負載與再生能源併網欲度提升。此外，圖 3 所示為 XE S/S 在該開關作策略下之投切順序，開關投切之最大電流變化為 55.3A。三相淨負載平衡策略方面，以大美 S/S (XK) 於 2021 年 7 月白天平均負載為例，圖 4、圖 5、圖 6 分別呈現變壓器相別調整前後饋線口最大三相電流、最大中性電流、線路總損失，可看出饋線三相電流趨於平衡，最大中性線電流下降 27.6 A，進而降低 12 小時總線路損失 11.2 kWh。

圖 7 為本計畫開發之模擬平台介面，其標的系統為台電雲林區處之 P/S、D/S，與 S/S 所轄之 11.4 kV 與 22.8 kV 高壓放射狀饋線，提供電網運轉人員輸入最佳化目標、模擬時間、標的系統、演算法、目標函數等相關需求參數後，透過 Python 對 OpenDSS 下指令執行最佳化饋線開關操作策略、開關序列策略、淨負載平衡策略模擬分析。

參、展望

本計畫依據所擬定目標與工作項目，以台電雲林區處實際運轉資料，開發配電網最佳開關操作、開關序列，與三相淨負載平衡模擬平台，提供饋線運轉者一套較具系統性之模擬工具，除了可改善饋線裕度、損失、中



性電流、不平衡率等運轉指標外，亦提供清晰之報表、拓樸繪製等，供配電工程師依據欲達成之運轉目的進行預先模擬分析，判斷在各種情境與運轉策略下之合理性與可行性等，進而作為實務運轉之參考，故所開發之平台具實務應用之價值。

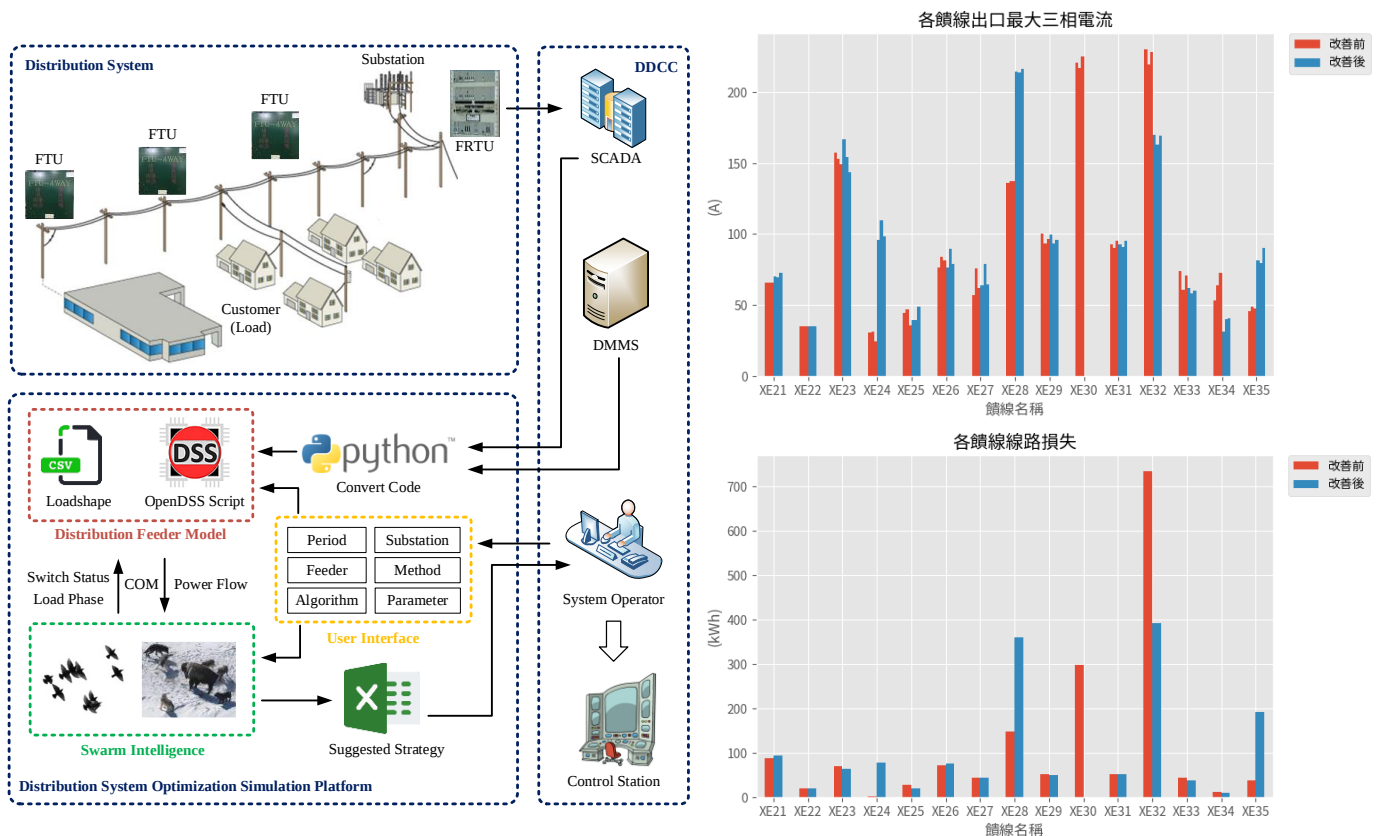


圖 1 本計畫平台架構

圖 2 開關操作之饋線電流與損失模擬結果



操作 順序	切開開關 ⁽¹⁾	投入開關 ⁽²⁾	切開開關 所屬饋線 ⁽³⁾	投入開關 所屬饋線 ⁽⁴⁾	最大饋線出口電 流變動率 ⁽⁵⁾
1 ⁽¹⁾	K0455BA17-S06_NO ⁽²⁾	K0355HB4748-J01 ⁽³⁾	XE21,XE33 ⁽⁴⁾	XE21 ⁽⁵⁾	XE33: 29.1% ⁽⁶⁾ (64.9 A→77.0 A) ⁽⁷⁾
2 ⁽¹⁾	K0354EC49-S06_NO ⁽²⁾	K0354EC49-J05 ⁽³⁾	XE21,XE27 ⁽⁴⁾	XE21 ⁽⁵⁾	XE24: 0.0% ⁽⁶⁾ (19.6 A→19.6 A) ⁽⁷⁾
3 ⁽¹⁾	K0256BC06-S01_NO ⁽²⁾	K0255HD8050-S04 ⁽³⁾	XE26,XE27 ⁽⁴⁾	XE27 ⁽⁵⁾	XE27: 12.1% ⁽⁶⁾ (56.7 A→56.0 A) ⁽⁷⁾
4 ⁽¹⁾	K0565FE46-S01_NO ⁽²⁾	K0465BE08-S01 ⁽³⁾	XE24,XE30 ⁽⁴⁾	XE30 ⁽⁵⁾	XE24: 407.2% ⁽⁶⁾ (19.6 A→74.9 A) ⁽⁷⁾
5 ⁽¹⁾	K0164FE72-S01_NO ⁽²⁾	K0263BD40-S01 ⁽³⁾	XE23,XE30 ⁽⁴⁾	XE23 ⁽⁵⁾	XE23: 12.5% ⁽⁶⁾ (151.5 A→170.5 A) ⁽⁷⁾
6 ⁽¹⁾	K0167FE09-S01_NO ⁽²⁾	K0268DB56-F01 ⁽³⁾	XE25,XE35 ⁽⁴⁾	XE25 ⁽⁵⁾	XE21: 0.0% ⁽⁶⁾ (52.3 A→52.3 A) ⁽⁷⁾
7 ⁽¹⁾	K0860EB03-S01_NO ⁽²⁾	K1060HB50-S01 ⁽³⁾	XE32,XE28 ⁽⁴⁾	XE32 ⁽⁵⁾	XE21: 0.0% ⁽⁶⁾ (52.3 A→52.3 A) ⁽⁷⁾
8 ⁽¹⁾	K0860EC72-S01_NO ⁽²⁾	K0859EB18-S01 ⁽³⁾	XE32,XE28 ⁽⁴⁾	XE32 ⁽⁵⁾	XE21: 0.0% ⁽⁶⁾ (52.3 A→52.3 A) ⁽⁷⁾
9 ⁽¹⁾	K0765DE84-S01_NO ⁽²⁾	K0867HB32-S01 ⁽³⁾	XE34,XE28 ⁽⁴⁾	XE28 ⁽⁵⁾	XE21: 0.0% ⁽⁶⁾ (52.3 A→52.3 A) ⁽⁷⁾
10 ⁽¹⁾	K0468FC22-S01_NO ⁽²⁾	K0665EE32-S01 ⁽³⁾	XE25,XE34 ⁽⁴⁾	XE34 ⁽⁵⁾	XE21: 0.0% ⁽⁶⁾ (52.3 A→52.3 A) ⁽⁷⁾
11 ⁽¹⁾	K0355FD44-S08_NO ⁽²⁾	K0355GD87-J01 ⁽³⁾	XE33,XE27 ⁽⁴⁾	XE33 ⁽⁵⁾	XE21: 0.0% ⁽⁶⁾ (52.3 A→52.3 A) ⁽⁷⁾
12 ⁽¹⁾	K0265DC33-S01_NO ⁽²⁾	K0565EE36-S01 ⁽³⁾	XE35,XE30 ⁽⁴⁾	XE30 ⁽⁵⁾	XE21: 0.0% ⁽⁶⁾ (52.3 A→52.3 A) ⁽⁷⁾
13 ⁽¹⁾	K0267BE72-F01_NO ⁽²⁾	K0266EC83-S01 ⁽³⁾	XE25,XE35 ⁽⁴⁾	XE25 ⁽⁵⁾	XE30: 100.0% ⁽⁶⁾ (37.8 A→0.0 A) ⁽⁷⁾

圖 3 橋村變電所重構前後三相饋線電流

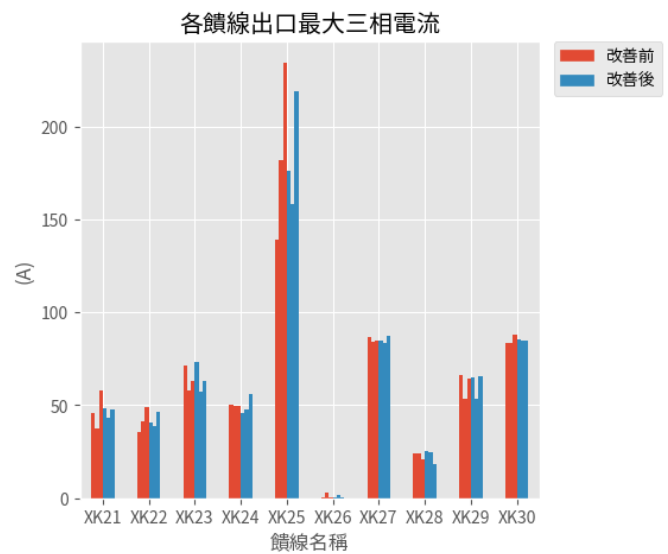


圖 4 淨負載平衡之饋線電流模擬結果

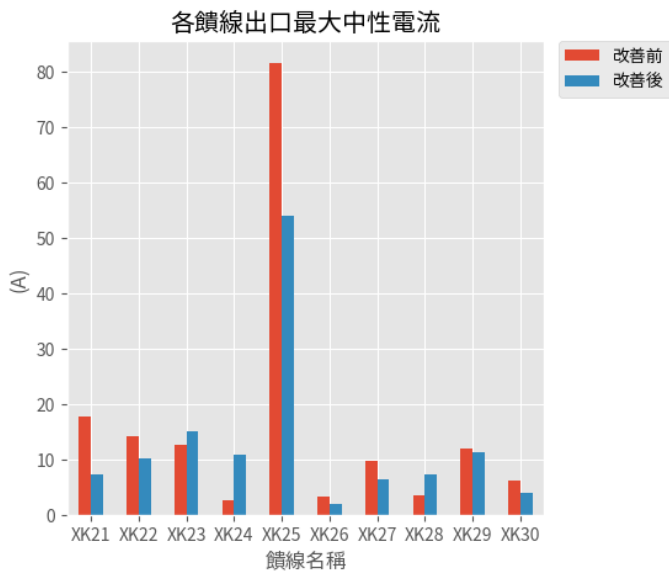


圖 5 淨負載平衡之饋線中性電流模擬結果

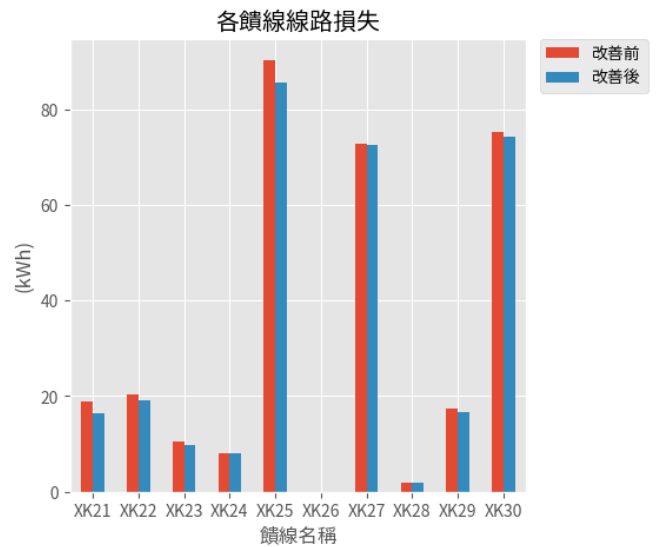


圖 6 淨負載平衡之饋線線損模擬結果

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表

區域配電網最佳化運轉模擬平台

匯入

開關切換目標
☒ 考慮分枝線開關
☐ 不考慮分枝線開關

演算法
 代理人數
 迭代次數
☒ 粒子群演算法(PSO)
☐ 灰狼演算法(GWO)
☐ 蝙蝠演算法(BA)
☐ 人工蜂群演算法(ABA)
☐ 布穀鳥搜尋法(CSO)
☐ 貓群演算法(CA)
☐ 螢火蟲演算法(FA)
☐ 鯨群演算法(WSA)
☐ 重力搜尋演算法(GSA)
☐ 煙火演算法(FWA)
☐ 和弦演算法(HS)
☐ 社交蜘蛛演算法(SSA)
☐ 細菌覓食演算法(BFO)

模擬年份
 2019年
 2020年
 2021年

模擬月份
 1月
 2月
 3月
 4月
 5月
 6月
 7月
 8月
 9月
 10月
 11月
 12月

模擬時段
☒ 白天
☐ 夜晚
☐ 平日
☐ 假日

目標變電所 (代號)
☒ 口湖S/S (XX)
☒ 土庫S/S (XD)
☒ 大美S/S (XK)
☒ 元長S/S (XF)
☒ 斗工D/S (XU)
☒ 斗六D/S (XN)
☒ 斗南D/S (XW)
☒ 水林S/S (XR)
☒ 北勢D/S (XL)
☒ 古坑S/S (XA)
☒ 台西D/S (XP)
☒ 四湖D/S (XQ)
☒ 西螺S/S (XC)
☒ 東北S/S (XH)
☒ 虎科D/S (XO)
☒ 虎茅D/S (XJ)
☒ 崙背S/S (XI)
☒ 雲林P/S (XZ)
☒ 雲港S/S (XG)
☒ 檳中D/S (XB)
☒ 楊村S/S (XE)
☒ 濁水S/S (XM)
☒ 豐田S/S (XT)

電網地圖

Window Snip

目標函數權重 (總和須為1)
 降低總線路損失
 降低饋線口中性電流
 各饋線口電流均化
 再生能源併網裕度
 降低開關切換次數

圖 7 模擬平台介面



饋線設備關聯性資訊模型之研究

Study of Common Information Model for Feeder Facilities

(計畫編號：111A011)

辜德典¹ 林嘉宏¹ 陳朝順² 陳政佑³

¹國立高雄科技大學電機工程系 ²義守大學電機工程系 ³核能研究所

近年來隨著全球興起淨零碳排趨勢，傳統燃料性發電逐漸被取代，綠色再生能源併網量提升，能源供應端逐漸由單一轉為分散式，使得電力輸配方向也不再是單一固定方向，而是經各分歧線或饋線於不同方向注入電網，加上再生能源設施之發電具有易受季節氣候影響之間歇特性，此現象均可能引發饋線電壓變動，增加了能源併網時維持供電電壓變動率的困難，以及若發生故障時有電力潮流逆送之風險，針對此情形台電認為有對其監測之必要，同時為了未來將此資訊與台電所發展之饋線自動化與再生能源管理系統(DREAMS)與先進配電管理系統(ADMS)進行相互通訊，需建立一套標準且統一之資料交換模型。

本計畫針對配電系統之資訊交換，參考國內外共同資訊模型(Common Information Model, CIM)於配電圖資之應用方式，用以協助配電系統運轉、規劃、設計與改善等。本計畫所使用之 CIM 以物件導向(Object-oriented)為概念，轉換配電圖資元件為類別(Class)型式，同時該類別具備繼承(Inheritance)、關聯(Association)與聚合(Aggregation)之關係，藉以簡化資訊系統之互通性。另為了解該 CIM 之性能與可靠度，本計畫以簡式物件存取通訊協定(Simple Object Access Protocol, SOAP)為基礎，提出



SOAP 訊息之可靠性架構，除提升該訊息於超文本傳輸協定(HyperText Transfer Protocol, HTTP)之傳輸安全性外，亦提高其資料可靠度。此外，本計畫亦依據所提出之 CIM 應用於變壓器端末單元(Transformer Terminal Unit, TTU)之結構定義，同時提出商用資訊模型轉換器之應用方式，結合該 TTU 執行饋線末端電壓監測，有效達到配網端設備之資訊收集、交換與應用之目的。

In recent years, the goal of net-zero carbon emissions has led to countries replacing conventional fuel with alternative energy sources. The increased capacity of renewable energy in the distribution systems converse power flow direction from a single fixed direction to multidirectional. Renewable energy facilities have intermittent power generation due to being easily influenced by seasonal changes and climate change. This may result in voltage variation on distribution feeders increasing the difficulty to maintain power quality when faults occur. Accordingly, the Taipower is necessary to monitor voltage of the feeder to maintain power quality of distribution systems.

This project is to apply the data exchange technologies with common information model (CIM) to distribution mapping management system (DMMS) for the distribution transformer management. The object-oriented CIM is used to transfer the real-time information of distribution transformers to the class of the CIM model which is represented by the relationship of association, aggregation, inheritance. The project proposes the simple object access protocol (SOAP) based architecture to improve the reliability and security of the data transfer. The proposed CIM is applied to the data transfer of the transformer terminal units (TTU) to monitor the voltages of distribution transformers on high PV penetration feeders and to achieve the SCADA of the facilities in distribution systems.



壹、計畫目標

台電公司針對配電系統已建構數個資訊系統進行資料收集與分工處理，其系統可執行對應之工作流程，而為使配電系統達到智慧電網(Smart Grid)之應用功能，台電公司已開始推展先進配電管理系統(Advanced Distribution Management System, ADMS)之建置工程，以整合不同資訊系統對配電系統進行管理與監控。本計畫針對配電系統之資訊交換，參考國內外共同資訊模型(Common Information Model, CIM)於配電圖資之應用方式，藉以降低整體 ADMS 之複雜度外，亦透過標準資料轉換模型降低整體系統之轉換程式數量與其開發成本。近期國內針對 ADMS 已開始規劃用於各系統之 CIM 結構，然而對於未來即將導入至 ADMS 之 TTU 或故障電流指示器(Fault Current Indicator, FCI)等資料交換模型，仍尚未定義出，對此本計畫配合 IEC 61970 之套件、類別、屬性、連結性等相關物件導向參數，定義出應用於 TTU 之資訊結構模型，並在傳輸過程應用簡單物件存取協定(SOAP)，於結構中加入用於識別之附加訊息，增加可靠性同時，亦降低自外部攻擊及竊取之風險。本計畫針對台電未來建構之 ADMS 系統，研析其配電圖資種類建構其配電資訊模型方法，同時亦針對未來 TTU 佈建與其 ADMS 系統之整合，規劃其 TTU 之資訊模型，並安裝 TTU 執行饋線電壓監測，同時提出具可靠性之 SOAP 訊息架構，以確保 CIM 於資訊交換時之可靠性，進一步降低 ADMS 之資料交換複雜度外，亦可達到配電系統之智慧電網應用功能。



貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

(一) 應用配電變壓器資訊端末單元(TTU)於饋線電壓監測

本計畫提出之資訊模型轉換器開發架構如下圖 1 所示，資料接收方面，現場端之變壓器端末單元(TTU)會將所量測之資料數據透過 LoRa 無線通訊技術傳送至該區域範圍內之資料收集器(DCU)，而 DCU 會再透過第 4 代行動通訊技術(4G)傳送至後台主站，主站會將所有測得資訊紀錄於實時與歷史資料庫，並將透過結構化查詢語言(Structured Query Language, SQL)把資料庫中欲傳遞之實時資訊取出，以 CIM 專用之 XML 格式進行資料轉換，最後使用 SOAP 作為與客戶端對接之窗口，同時於 SOAP 訊息中加入安全標頭(Security Header)作為認證依據，在提供網路服務同時，亦保證資料傳遞之安全性，使達到使設備資訊能以 CIM 之統一形式，與客戶端達到設備間資料實時交換之目的。

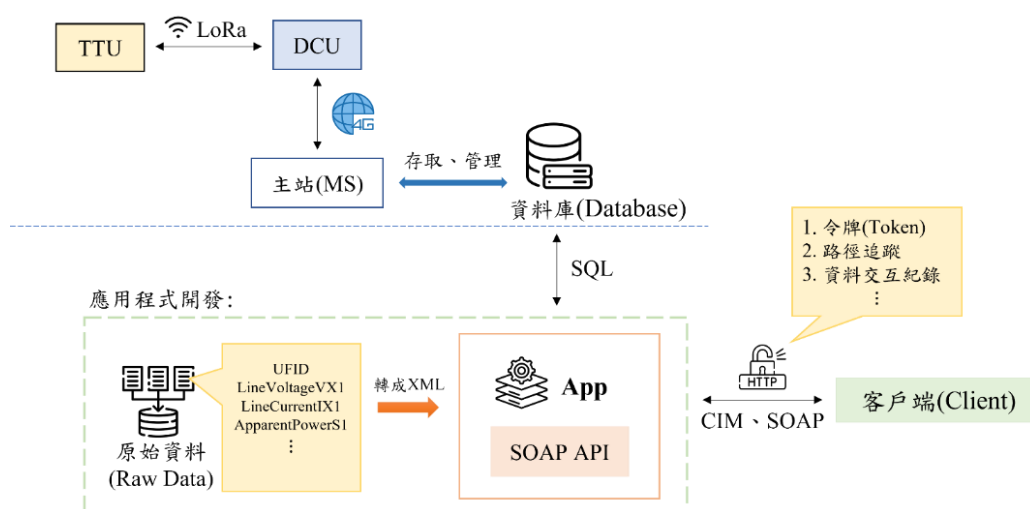


圖 1 資訊模型轉換器開發架構



(二) 變壓器末端單元(TTU)之通用資訊模型(CIM)建立

因應電網中高佔比再生能源而導致的饋線電壓變動之問題，本計畫選擇變壓器末端單元(TTU)安裝至配電變壓器二次側，執行對其饋線電壓與運轉狀況之監測，針對 TTU 硬體之實際操作設定與量測參數運用 UML，為 TTU 訂立一套 CIM 之商用配電資訊模型。為讓所設計模型符合 CIM 國際規範，本計畫以 IEC 61970-301 中量測(Meas)套件內現有之量測與控制模型為基礎，並配合台電所定義之 TTU 資料傳輸格式，其中模型內部屬性包含於末端饋線所測得之電壓、電流及功率等狀態實時(real-time)數據與其累積值等相關測量值，並導入位於 Core 套件中之「IdentifiedObject」根類別為所有所需類別提供通用之命名屬性，以利實務上結合相關設備識別序號對整體配電系統進行更完善地建置，TTU 之 UML 結構圖如圖 2 所示。

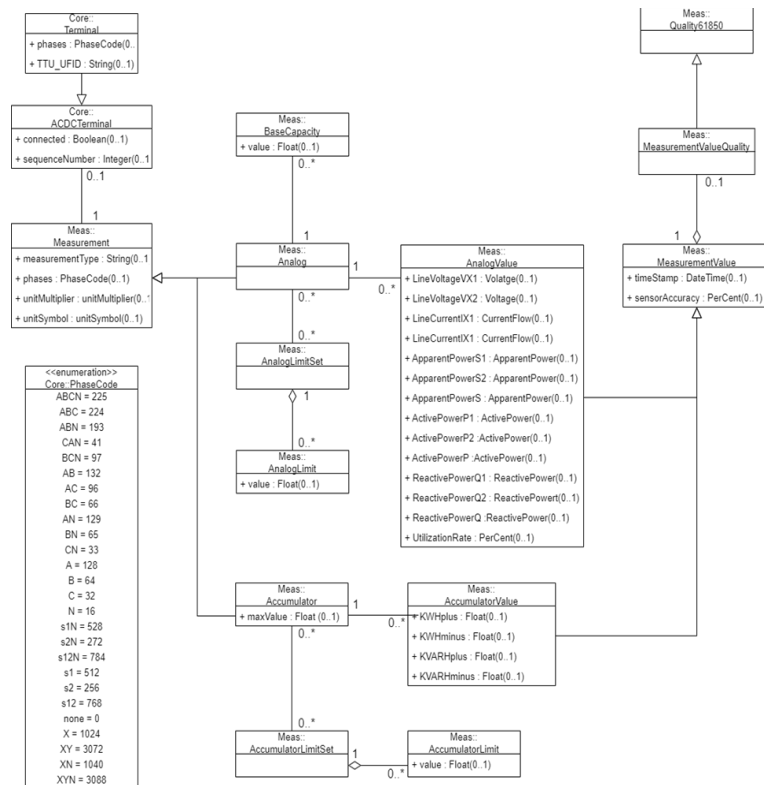


圖 2 TTU 資訊模型之 UML 結構圖



(三) 結合 SOAP 及 XML 之商用資訊模型轉換應用

本計畫目前規劃使用微軟(Microsoft)在.NET Framework 框架中所提供之 ASP.NET web 服務(.asmx)來建立 Web 服務功能，該服務會使用簡單物件存取通訊協定 (SOAP)，以 XML 作為基礎語言，過程中綁定超文本傳輸協(HyperText Transfer Protocol, HTTP)作為傳輸層以達到跨平台通訊，.asmx 服務的使用者不必考慮用來執行此服務底層架構，僅需了解該服務如何傳送和接收 SOAP 訊息，當 Web 服務收到 SOAP 請求時，會經過程式的邏輯處理後，將其傳回值序列化成 SOAP 響應並透過 HTTP 協定將其回傳給客戶端，透過 ASP.NET，能使程式在撰寫 Web 服務過程中把專注力放在資訊模型轉換程式的邏輯處理上，而非 SOAP 溝通細節，讓開發及資訊系統界接上更具效率。

(四) 配電變壓器資訊端末單元(TTU)規劃及建置

為執行應用 TTU 之通用資訊模型(CIM)對饋線電壓變動之監測，本計畫目前規劃位於台電雲林區處管轄內一對擁有高佔比再生能源之饋線進行監測點建置，安裝饋線如下表 1 所示，監測點設立於主配電變壓器二次側之饋線頭端與末端區域，作為饋線電壓變動之對照依據，三具 TTU 會分別裝設於該區域鄰近資料收集器(DCU)可接收範圍內之 R、S、T 各相別的配電變壓器上，各相之實時電壓、電流、實功與虛功等測量及累計值進行監測。



表 1 TTU 安裝饋線表

安裝饋線	類型	桿位	相別	裝置
XD35	饋線	大有 157 北 5 東 11	R	TTU
XD35	饋線	大有 157 北 5 東 11	S	TTU
XD35	饋線	大有 157 北 5 東 11	T	TTU
XD35	饋線	大有 157 北 5 東 10	N/A	DCU
XH29	分歧線	中廣 83 分 1	R	TTU
XH29	分歧線	中廣 83 分 1	S	TTU
XH29	分歧線	中廣 83 分 1	T	TTU
XH29	分歧線	中廣 83 分	N/A	DCU

(五) 應用 CIM 於饋線電壓之監測

為驗證本文提出 TTU 對饋線電壓監測所測得之有效性，本計畫選擇將其安裝至市中心與郊區作為對照，在量測配電變壓器二次側同時，標記出該地區每小時之 LoRa 無線通訊信號強度(RSSI)以確保訊號可靠度，如圖 3 郊區單日每小時測得電壓與 RSSI 所示，該區所量測之電壓變化主要受饋線上工業用戶負載端與再生能源本身之間歇性所影響，最大電壓值發生在早上 7 點，數值為 12.23 kV，而最小電壓值發生下午 3 時，數值為 11.68 kV。圖 4 為市中心單日每小時測得電壓與 RSSI，該區電壓變化主要源自於饋線上商業用戶負載端影響，最大電壓值發生在早上 11 點，數值為 12.25 kV，而最小電壓值發生晚上 8 時，數值為 11.75 kV，距相應之 DCU 約 1.55 公里，雖通訊距離相對較短，但因市區障礙物較多阻撓信號傳遞，該 RSSI 十分靠近極限值-120dBm 左右。而 TTU 對測試之配電變壓器所量測之實時電壓、實功與虛功等測量值會透過無線傳輸技術傳輸至後台主站，主站會將所有測得資訊紀錄於實時與歷史資料庫，並將欲傳輸之實時訊息以 CIM 專用之 XML 格式轉出，用來作為後續基於 CIM 所發展之相關配電管理系統的傳輸基礎，通訊過程中 CIM 所使用之 XML 格式如圖 5 所示。

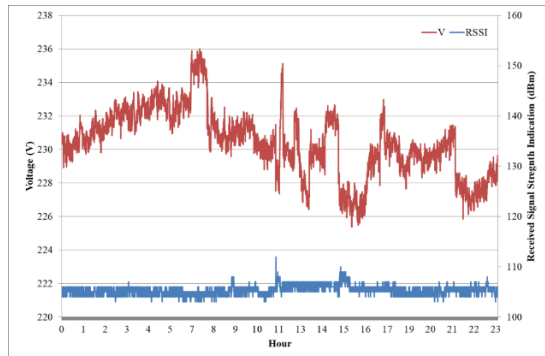


圖 3 郊區單日所量測之電壓與 RSSI

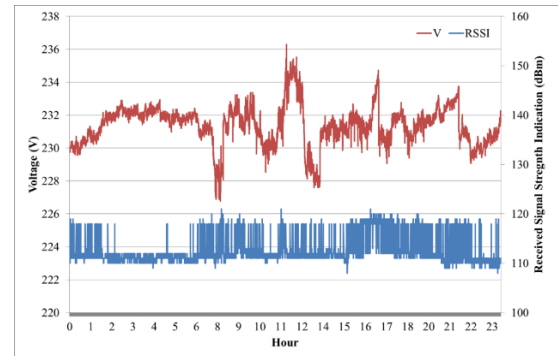


圖 4 市中心單日所量測之電壓與 RSSI

```

<cim:AnalogValue rdf:ID="#_AnalogValueID">
  <cim: Analog Value.LineVoltageVX1>118</cim: Analog Value.LineVoltageVX1>
  <cim: Analog Value.LineVoltageVX2>118</cim: Analog Value.LineVoltageVX2>
  <cim: Analog Value.LineCurrentIX1>63</cim: Analog Value.LineCurrentIX1>
  <cim: Analog Value.LineCurrentIX2>62</cim: Analog Value.LineCurrentIX2>
  <cim: Analog Value.ApparentPowerS>16</cim: Analog Value.ApparentPowerS>
  <cim: Analog Value.ActivePowerP>16</cim: Analog Value.ActivePowerP>
  <cim: Analog Value.ReactivePowerQ >16</cim: Analog Value.ReactivePowerQ >
  <cim: Analog Value.UtilizationRate>xxx</cim: Analog Value.UtilizationRate>
  <cim:IdentifiedObject.name>TTU1</cim:IdentifiedObject.name>
  <cim:IdentifiedObject.aliasname>Q1212 FA6128</cim:IdentifiedObject.aliasname>
  <cim:IdentifiedObject.description>
    voltage monitoring of feeders connected the secondary side of the Transformer A
  </cim:IdentifiedObject.description>
  <cim:Measurement.Terminal rdf:resource="#_TransformerAID"/>
</cim:AnalogValue >
<cim:Analog rdf:ID="#_ AnalogID">
  <cim:Analog.normalValue>110</cim:Analog.normalValue>
  <cim:Analog.positiveFlowIn>true</cim:Analog.positiveFlowIn>
  <cim:Measurement.phases>2</cim:Measurement.phases >
  <cim:IdentifiedObject.name>TTU1</cim:IdentifiedObject.name>
  <cim:IdentifiedObject.aliasname>Q1212 FA6128</cim:IdentifiedObject.aliasname>
  <cim:Measurement.Terminal rdf:resource="#_TransformerAID"/>
</cim:Analog>
<cim:AccumulatorValue rdf:ID="#_ AccumulatorValueID">
  <cim: AccumulatorValue.KWHplus>76014406</cim: AccumulatorValue.KWHplus>
  <cim: AccumulatorValue.KWHminus>0</cim: AccumulatorValue.KWHminus>
  <cim: AccumulatorValue.KVARplus>754432</cim: AccumulatorValue.KVARplus>
  <cim: AccumulatorValue.KVARminus>0</cim: AccumulatorValue.KVARminus>
  <cim:IdentifiedObject.name>TTU1</cim:IdentifiedObject.name>
  <cim:IdentifiedObject.aliasname>Q1212 FA6128</cim:IdentifiedObject.aliasname>
  <cim:IdentifiedObject.description> kilowatt-hour meter </cim:IdentifiedObject.description>
  <cim:Measurement.Terminal rdf:resource="#_TransformerAID"/>
</cim:AccumulatorValue>
<cim:Accumulator rdf:ID="#_ AccumulatorID">
  <cim: Accumulator.maxValue>99999999</cim: Accumulator.maxValue>
  <cim:Measurement.phases>2</cim:Measurement.phases >
  <cim:IdentifiedObject.name>TTU1</cim:IdentifiedObject.name>
  <cim:IdentifiedObject.aliasname>Q1212 FA6128</cim:IdentifiedObject.aliasname>
  <cim:Measurement.Terminal rdf:resource="#_TransformerAID"/>
</cim:Accumulator>
<cim:BaseCapacity rdf:ID="#_ BaseCapacityID">
  <cim:BaseCapacity.value>25</cim:BaseCapacity.value>
  <cim:IdentifiedObject.name>TTU1</cim:IdentifiedObject.name>
  <cim:IdentifiedObject.aliasname>Q1212 FA6128</cim:IdentifiedObject.aliasname>
  <cim:IdentifiedObject.description>The capacity of Transformer A</cim:IdentifiedObject.description>
</cim:BaseCapacity>
<cim:Terminal rdf:ID="#_ TransformerAID">
  <cim:Terminal.phases>xxx</cim:Terminal.phases>
  <cim:Terminal.TTU_UFID> Q1212 FA6128 </cim:Terminal.TTU_UFID>
  <cim:Terminal.Measurement rdf:resource="#_ TTU1ID">
  <cim:Terminal.ConnectivityNode rdf:resource="#_ Node1ID">
  <cim:IdentifiedObject.name> TransformerA </cim:IdentifiedObject.name>
</cim:Terminal>

```

圖 5 TTU 之 XML 傳輸格式



二、學術成就方面，共發表國際期刊 1 篇與國內研討會 1 篇。

1. Te-Tien Ku, Chia-Hung Lin, Chao-Shun Chen, Yih-Der Lee, Jheng-Lun Jiang, Cheng-Yu Chen and Chen-Min Chan, “Applications of Common Information Model and Feeder Voltage Sensor with High-Penetration Photovoltaic Systems,” Sensors and Materials, vol. 34, pp. 3671-3683, 2022.
2. 辜德典，林嘉宏，陳朝順，楊傑勛，李奕德，姜政綸，陳政佑，詹振旻，"應用通用資訊模型之饋線電壓監測"，第四十三屆中華民國電力工程研討會暨第十九屆台灣電力電子研討會，台灣 臺中市 2022 年 12 月 1-2 日。

參、展望

本文為達到相關配電管理系統之資料相互交換的目的，應用通用資訊模型(CIM)，選擇變壓器端末單元(TTU)安裝至配電變壓器二次側，執行對其饋線電壓與運轉狀況之監測，參考國際電工委員會(IEC)訂立之 IEC 61970 等規範標準，以及國際組織 CIM Users Group (CIMUG)所提供之模型與應用實例，針對國內 ADMS 系統架構運用 UML 及台電所定義之 TTU 資料傳輸格式，為 TTU 訂立一套 CIM 之商用配電資訊模型，而為驗證其有效性，選擇將兩組 TTU 分別安裝至郊區與市中心做對照，並將所量測之端末電壓等資訊，從 UML 轉換為 XML 格式進行傳輸，而在傳輸方面，本文結合簡單物件存取協定(SOAP)來進行資料的相互傳遞與轉換，使設備資訊能在保證安全性及可靠度的環境下，以 CIM 之統一形式，提供給其他配電設備相關管理系統，除了降低資料交換複雜度，亦可達到設備資料共享與透明化之目的，為未來銜接或執行其他智慧電網相關應用程序時提供更大的彈性與便利性。

**配電系統漸進式輔助調控技術研究****Research on Progressive Auxiliary Regulation Technique of Distribution System**

(計畫編號：111A012)

陳正一¹ 談光雄² 翁祥瑤¹ 戴于竣¹¹ 中央大學電機工程學系 ² 國防大學理工學院電機電子系

隨著全球能源危機和環境問題日益嚴重，分散式發電和微電網技術越來越受關注，發展再生能源，邁向低碳社會，已是無可避免的趨勢，因此未來的電力系統，勢必要降低石化能源比例，擴大再生能源利用。但由於大部分分散式電源通過逆變器等電力電子設備接入大電網，幾乎不具有慣量，當分散式電源的容量增長到占大電網一定比例之後，分散式電源的無慣量特性會給大電網的穩定性造成威脅。因此若能有效整合微電網電力控制策略與相關電力品質穩定機制，必將大大的提高微電網的安全穩定性。本計畫主要目標為(1)分析國內外配電系統擾動與故障案例；(2)提出配電網發送至微電網之調度命令與通訊格式規劃；(3)探討配電系統受再生能源等不同擾動與系統故障時，提出微電網分散式電源之漸進式輔助調控策略邏輯；(4)建構微電網模型，並以即時模擬驗證所提之漸進式輔助調控策略邏輯；(5)應用在核能所即時模擬系統 OPAL-RT 進行前述模型實測。此外，本計畫將依據核能所微電網系統為基礎，建立相關配電網模型，並透過即時模擬系統探討分散式電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。



With the global energy crisis and serious environmental problems, distributed generation and microgrid technology have drawn much attention. Development of renewable energy towards a low carbon society is an inevitable trend. Therefore, the future power system is bound to reduce the proportion of petrochemical energy and expand the utilization of renewable energy. However, since most of the distributed generations are connected to the power system through power electronic equipment such as inverters, these systems almost have no inertia. When the capacity of the distributed generations increases to a certain proportion of the power system, the inertia-free characteristics of the distributed generations would introduce the threat to the stability of power system. Therefore, if the power control strategy and related power-quality stabilization mechanisms can be effectively integrated, the security and stability of the microgrid can be greatly improved. The main objective of this project is to (1) analyze the international case studies for disturbances and faults of distribution system, (2) propose the dispatch commands and communication formats for the distribution system and microgrid, (3) propose the progressive auxiliary regulation technique for multiple distributed generations in the distribution system under different disturbances and faults of renewable energy, (4) build up the real-time simulation model for the performance verification of proposed progressive auxiliary regulation technique, (5) apply the OPAL-RT real-time simulator in the institute of Nuclear Energy Research (INER) to examine the developed models. Besides, the microgrid system of the INER is adopted to establish the simulation models. Based on this system and real-time simulator, the regulation strategy of the distributed generators in different operating modes would be discussed to maintain the stability of the microgrid system.



壹、計畫目標

本計畫主要目標為(1)分析國內外配電系統擾動與故障案例；(2)提出配電網發送至微電網之調度命令與通訊格式規劃；(3)探討配電系統受再生能源等不同擾動與系統故障時，提出微電網分散式電源之漸進式輔助調控策略邏輯；(4)建構微電網模型，並以即時模擬驗證所提之漸進式輔助調控策略邏輯；(5)應用在核能所即時模擬系統 OPAL-RT 進行前述模型實測。此外，本計畫將依據核能所微電網系統為基礎，建立相關配電網模型，並透過即時模擬系統探討分散式電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。

貳、重要成果

本計畫已完成多模式漸進式輔助電力調節策略開發與即時模擬驗證，從實驗結果可以得知本研究提出之模糊派翠類神經網路應用於三種功能控制上的響應結果皆優於傳統比例積分控制器，可使負載端之電力品質保持在更佳的水平。最後，本研究也透過即時模擬系統驗證的方式證實本計畫之多模式漸進式輔助電力調節系統架構與控制法能正確發揮其多功能的特性。以微電網發展為主的智慧電網技術正逐漸趨於成熟，而功率調節系統因可改善再生能源發電的不穩定性，現今已普遍搭配儲能系統控制運用於微電網當中。本研究提出之多模式漸進式輔助電力調節系統架構除了具有原本的功率調節功能外，額外設計了電壓補償功能與不斷電系統功能，使得負載在面臨不同的電力品質事件時也能維持穩定運作。本研究所提出之多模式漸進式輔助電力調節系統與配電線路之連接方式如下圖 1 所示，與一般功率調節系統的主要差異為本文提出之多模式功率



調節系統可根據電源端當前的電力品質狀況改變與輸配電線路的連接方式，藉由雙向開關 SW_i、SW_v 的切換實現系統與線路的並聯或串聯，同時依照控制判斷流程切換系統演算法使其工作在不同的模式。

一、說明研發成果之重要貢獻

(一) 所提出之系統可根據電源端供電狀態切換至適當的模式進行控制，其模式切換流程如圖 2 所示。首先系統由電壓感測器偵測輸配電線路以檢測電源端是否出現電力事件，若電源端處於正常供電則系統工作於之功率調節模式，並檢測直流端儲能元件當前電量決定充放電，若檢測到電力事件出現，則首先判斷是否為電力中斷事件，若電源端依然維持供電則系統工作在電壓補償模式，若為電力中斷事件則系統啟動斷路器將負載切離電網並工作在不斷電系統模式。

(二) 透過即時模擬系統 OPAL-RT 進行本計畫所提多模式漸進式輔助電力調節策略之性能驗證可以發現，由圖 3 可看出當發生三相電壓驟降時，負載端電壓能夠有效地獲得補償，並且由圖 3(d)可看出本文系統能有效執行模式切換並分別輸出命令功率值與補償功率值，再由圖 4 驗證了本文提出之模糊派翠類神經(FNPN)其響應較佳，能使負載端更快速地恢復至額定功率。

(三) 主持人於 2023 年 1 月榮獲 111 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內研討會論文各一篇。

(一) Jun-Hao Chen, Kuang-Hsiung Tan, and Yih-Der Lee, “Intelligent Controlled DSTATCOM for Power Quality Enhancement,” *Energies*, 15, 4017, pp. 1-19, May 2022.



(二) 陳正一、戴于竣、李奕德，基於多微電網之協調及保護控制策略，
第四十三屆中華民國電力工程研討會，2022 年 12 月 1-2 日，台灣台中市。

參、展望

本計畫之研究重點著重在系統架構與其控制法搭配的可行性，以及比較智慧型控制法與傳統比例積分控制器應用的響應差異。在模擬架構方面，目前模擬環境僅一台逆變器，未來可與其他再生能源發電系統併網以形成較大的模擬環境，測試本文系統在與微電網併網的環境下其運行結果與效能是否能保持相同水準，另外本研究系統架構的開關元件選擇是否會影響實驗結果，也可再做進一步的驗證。

而在系統控制法方面，功率調節模式下之控制法可採用較複雜的功率平滑化控制，電壓補償模式下之控制法也可嘗試反饋或多環控制以測試其是否具有更佳的效果，智慧型控制法也能測試多種不同的模糊類神經之優缺點。最後，本研究採用即時模擬系統進行控制策略驗證，希望未來能夠在實際硬體上測試本研究系統架構與控制法，使功率調節系統能確實達成多功能特性，並有更多研究與發展的方向。

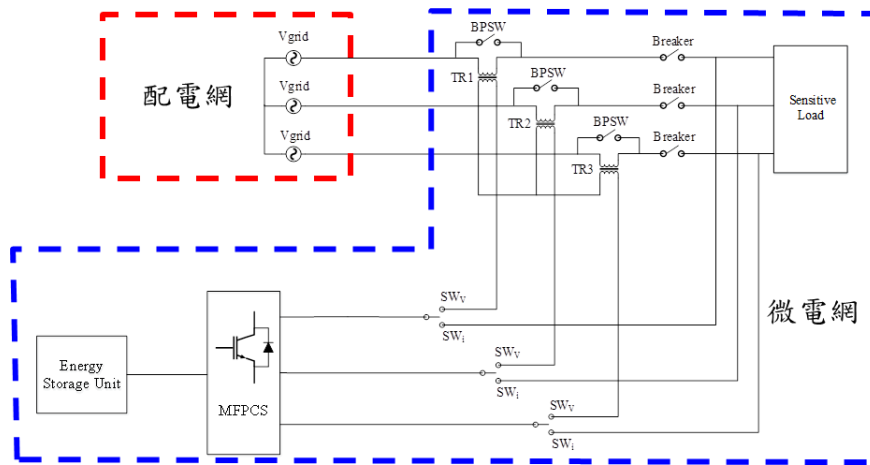


圖 1、本計畫所提之多模式漸進式輔助電力調節系統線路連接圖

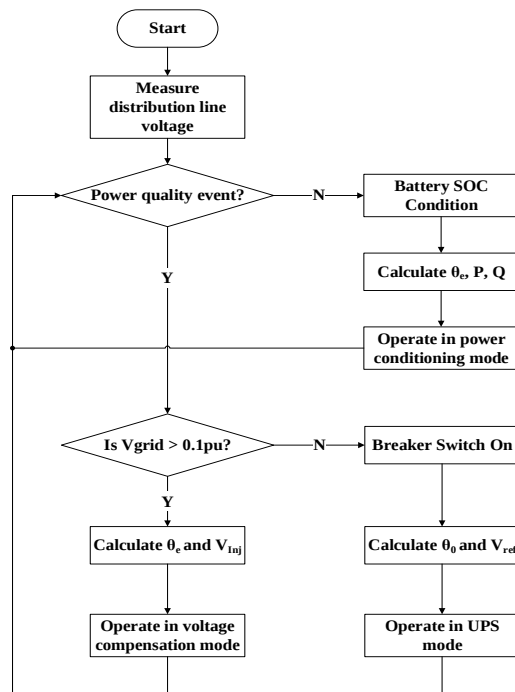


圖 2、本研究漸進式調控模式切換流程圖

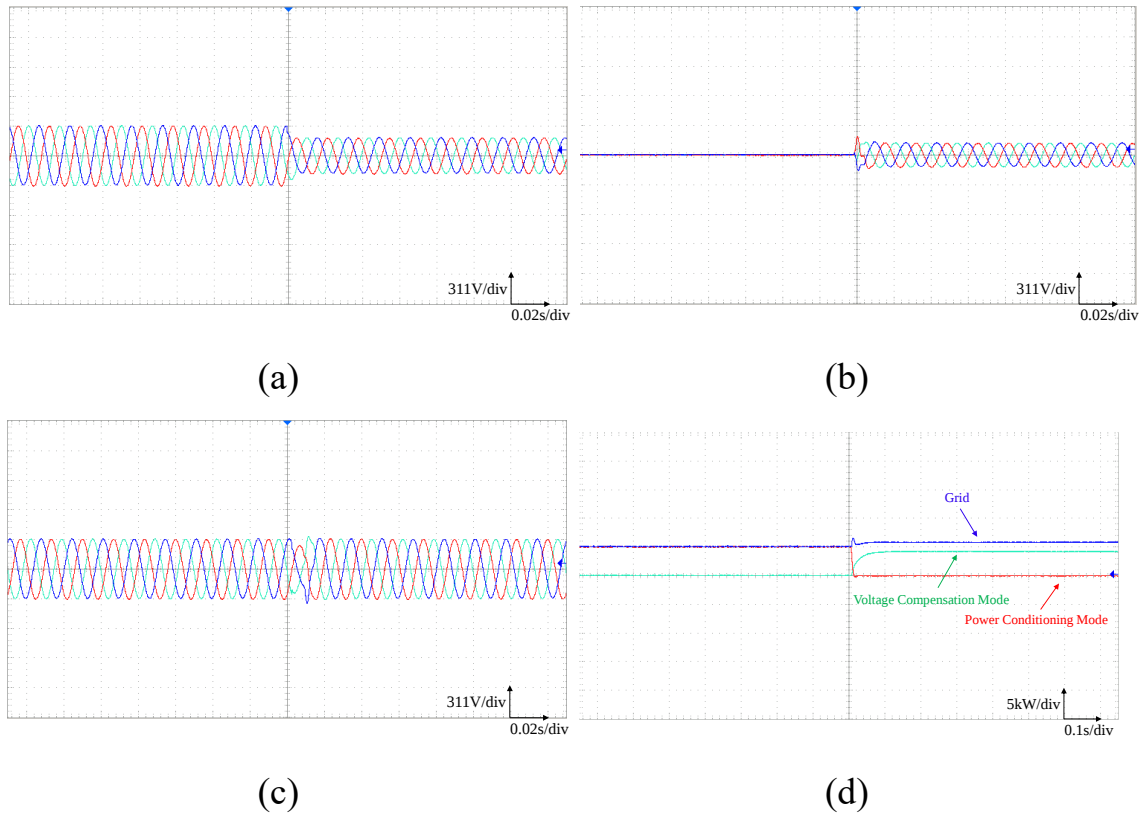


圖 3、(a)三相電壓驟降電源端電壓波形、(b)三相電壓驟降系統注入補償電壓波形、(c)三相電壓驟降負載端電壓波形、(d)三相電壓驟降電源端與系統模式輸出功率波形

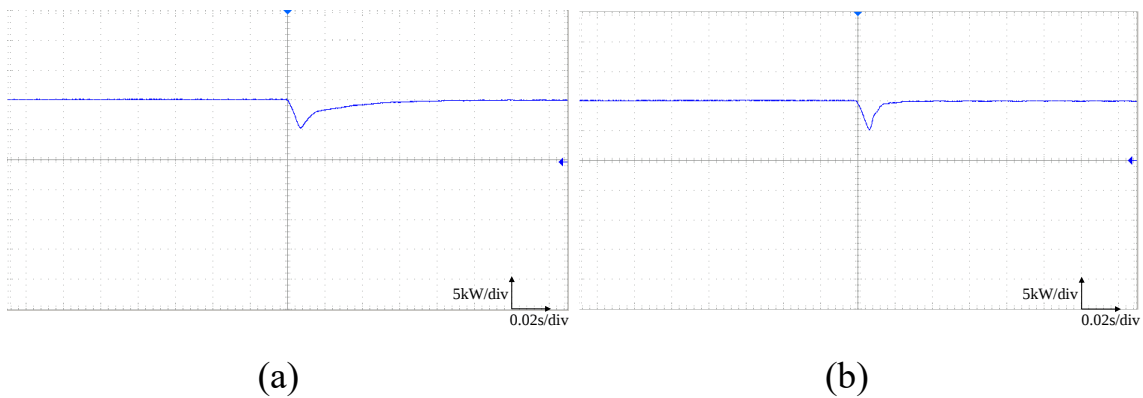


圖 4、(a)三相電壓驟降比例積分控制器負載端功率響應、(b)三相電壓驟降 FNP 控制負載端功率響應



變壓器智慧診斷之專家系統技術研究

Research of an Expert System of Transformer for Diagnosis Using Artificial Intelligence

(計畫編號：111A016)

郭政謙¹ 劉鏡明¹ 麥昊生¹ 孫士文²

¹國立臺灣科技大學電機工程系 ²核能研究所

高壓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。

本計畫運用局部放電量測後所產生的 PRPD 圖及其數據進行人工智慧深度學習辨識。為了能使診斷系統提升診斷效率與準確性，本計畫於實際變電站案場架設局部放電監控系統，利用高頻感測器(HFCT、UHF)進行局部放電之數據量測及儲存。透過實際數據學習真實環境之雜訊干擾，使得對於故障數據提高的模型雜訊辨識能力。本計畫採用生成對抗網路(Generative Adversarial Network, GAN)與卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)來對油浸式變壓器進行故障分析與識別。GAN 被廣泛運用於訓練資料數據生成。與傳統增強數據不同在於 GAN 是近年仍持續發展的深度學習方法，使用少數類樣本進行數據擴充。訓練完後的生成模型可無限生成與真實樣本相似的樣本，且將此樣本輸入至分類模型 CNN 進行訓練。透過此方法可以將系統實際運行數據進行辨識分類，將此深度學習模型與局部放電監控系統結合應用，可確保電



力設備可靠的運行，降低維護費用，並提高安全性與穩定供電，避免未知的故障所引起的用電中斷現象。

If high-voltage equipment fails, great economic benefits will be lost. So prevention is better than cure. One of the effective methods of high-voltage insulation degradation detection is to monitor partial discharge of the equipment, that is initial characteristic. Early detection of equipment problems can prevent them in advance, and trend observation is better than periodic inspection. Long-term monitoring effectively reduces the probability of misjudgment.

This project uses the PRPD diagram and its data generated after the partial discharge measurement to carry out artificial intelligence deep learning identification. In order to improve the diagnostic efficiency and accuracy of the diagnostic system, this plan sets up a partial discharge monitoring system in the actual substation site, and uses high-frequency sensors (HFCT, UHF) to measure and store partial discharge data. Learn the noise interference of the real environment through actual data, so as to improve the noise identification ability of the model for fault data. This project uses Generative Adversarial Network (GAN) and Convolutional Neural Network (CNN) to analyze and identify oil-immersed transformer faults. GAN is widely used in training data generation. The difference from traditional enhanced data is that GAN is a deep learning method that has continued to develop in recent years, using minority samples for data augmentation. After training, the generated model can infinitely generate samples similar to real samples, and input the samples to the classification model CNN for training. Through this method, the actual operating data of the system can be identified and classified. Combining this



deep learning model with the partial discharge monitoring system can ensure reliable operation of power equipment, reduce maintenance costs, improve safety and stable power supply, and avoid unknown failures The resulting power outage.

壹、計畫目標

高壓設備發生短路事故大多是絕緣劣化的原因，而絕緣劣化通常是經由電應力、熱應力或機械應力造成的老化現象，這些老化現象會再因為局部放電的關係加速劣化導致嚴重的事故發生，為避免造成重大事故，結合深度學習辨識達到即時偵測告警異常。

本計畫透過高頻電磁波間接量測法檢測到的局部放電信號，利用 PRPD 圖的分析診斷出瑕疵放電，達到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

計畫建立一套變壓器局部放電人工智慧故障診斷系統，針對油浸式變壓器進行線上之局部放電量測，並將之轉為可用來評估變壓器故障類型的 PRPD 圖，輔以人工智慧深度學習的技術進行辨識及訓練，透過生成對抗網路及捲積神經網路進行資料生成及辨識，加速對於判斷設備異常的準確性，確保電力設備可靠的運行，降低維護費用，並提高安全性與穩定供電，避免未知的故障所引起的用電中斷現象，以掌握變壓器運轉狀態，進而後續可針對變壓器之健康狀態進行智慧診斷技術之開發研究。

此外，本計畫培育出具有變壓器故障診斷及運轉狀態監測評估的專業技術人才，這些學生畢業後，對國內電機產業界有相當大的貢獻，對於檢測設備



自製國產化，提升國內檢測技術之發展，亦可有長足之推升。

一、開發一套電力變壓器之智慧診斷專家系統

提供智慧型電力變壓器狀態立即顯示及故障預先警示系統，有效防止絕緣劣化或重要設備元件無預警故障的發生，架構主要分為兩大部分。

(一) 長期放置於電力變壓器之運轉監測單元

透過資料擷取器收集電場感測器、高頻電流感測器、超高頻局部放電感測器，即時線上擷取電力變壓器內各元件局部放電訊號並利用 TCP/IP 網路傳輸方式，傳回位元於中央伺服器進行訊號處理與分析，其主要架構示意圖如圖 1 所示：



圖 1 整體系統架構圖

(二) 電力變壓器狀態檢測及預警主系統

使用一台伺服器級電腦，搭配綜合局部放電法對電力變壓器內之高壓元件進行訊號量測，評估各高壓元件是否有異常局放現象，藉由圖控式人機介面的資料擷取與故障型態分析。同時透過捲積神經網路演算法分析目前與歷史數據，結合設備絕緣老化過程之特徵萃取，作為老化或絕緣劣化的輔助參考指標其功能方塊示意圖如圖 2 所示：

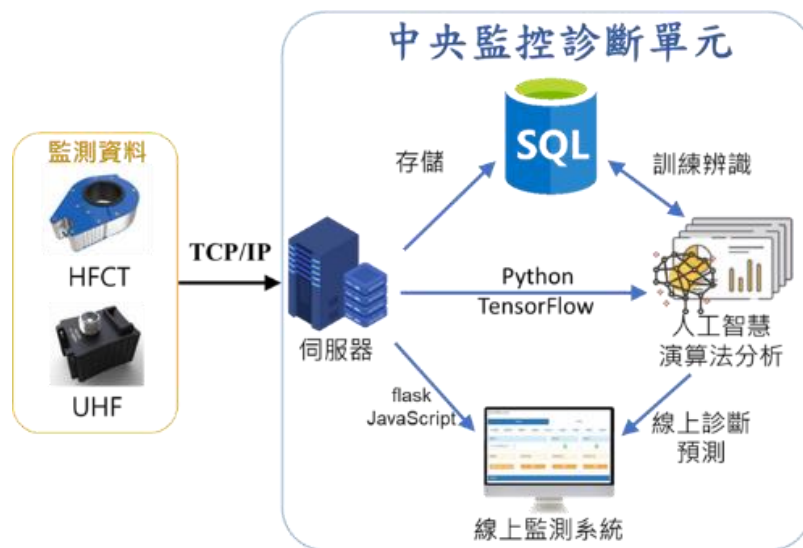


圖 2 中央監控診斷單元架構圖

二、學術成就方面，發表一篇國內外研討會及投出一篇期刊論文

(一) 第四十三屆中華民國電力工程研討會暨第十九屆台灣電力電子研討會

應用生成對抗網路於卷積神經網路之局部放電圖譜辨識

Application of Generative Adversarial Network to Convolutional Neural Network for Phase Resolved Partial Discharge Pattern Recognition

(二) MDPI electronics (投出)

Application of Fault Overlay Method and CNN in Infrared Im-2 age of Detecting Inter-Turn Short-Circuit in Dry-type Trans-3 former

參、展望

本計畫已研發出透過深度學習神經網路建立之智慧診斷局部放電信號技術。後續可進一步對此技術提出進行延伸應用開發，在局放監測系統中可擴展使用情境及方式。如：結合滾動式即時檢測告警功能，與使用者



提高相對應輔助，提高辨識頻率並結合既有告警系統規則。其目的為能夠完善發揮人工智慧的協助應用，帶來提高電力的系統穩定及可靠度。



智慧型儲能充電站運轉管理組件技術之研究

Component technology research of intelligent energy storage and charging
station operation and management

(計畫編號：111A015)

施汶妮¹ 盧芊彤² 薛康琳²

¹聯合大學化學工程學系 ²聯合大學能源工程學系

本研究以多膜多室法進行建立電解液去除低電位活性雜質之程序。透過探討鈮、氫離子電解液和與鐵、氫離子電解液的遷移速度，並分析鈮、氫離子電解液和鐵、氫離子電解液的在多膜多室系統下的各室鐵、鈮濃度、和 pH 值。透過上述實驗結果評估在 2 膜 3 室系統和 3 膜 4 室的鐵雜質去除程序評估。由於 3 膜 4 室的內阻較高較耗能因此不建議使用 3 膜 4 室系統。透過 2 膜 3 室系統處理實驗配製含鐵離子之鈮電解液，經處理後之電解液經過充放電測試，結果顯示皆優於處理前之電解液，因此本研究已驗證多膜多室法去除低電位之雜質是可行的，並建立一個連續式處理程序。未來可再找尋本研究以外之離子膜或處理機構等以提升與鈮同屬第一過渡元素系的鐵離子的處理效率。

The multi-membrane and multi-chamber method was used to establish a procedure for the removal of low-potential active impurities in the electrolyte. The experiment was observed the change of volume, vanadium ion concentration, and hydrogen ion concentration in the double-membrane and triple-chamber (DMTC) and triple-membrane and quadruple-chamber



(TMQC). Data in each room was collected and detection of the concentration of hydrogen / vanadium ions and hydrogen / iron ions at zero and 20 mA cm^{-2} . The iron impurity removal process by DMTC and TMQC was evaluated based on above the results of experiment. Since the internal resistance of TMQC is relatively large and energy consuming, it is not recommended. Vanadium electrolyte containing iron ions was treated by DMTC, and the iron concentration was reduced after treatment. The performance of regenerative electrolyte was better than the untreated electrolyte. Therefore, this study verified the feasibility of the multi-membrane multi-chamber method to remove low-potential impurities and a continuous treatment process was established. In the future, we could study other suitable ion membranes or treatment mechanism to improve the efficiency for iron ions belonging to the first transition element system same as vanadium

壹、計畫目標

石油廢棄物中含有鐵、銅、錳、鎳…等多種金屬。其中以鐵與銅其氧化還原電位比鈳還低，會大幅影響鈳電池的電壓效率與輸出功率，因此必須降低電解液中的低電位活性物質濃度。常見的去水中物質的雜質方法有活性碳法、離子樹脂交換法、沉澱法、電沉澱法和萃取法等。但由於鈳電解液中的硫酸濃度為 $4\text{M H}_2\text{SO}_4$ ，因此上述去除方式皆有其瓶頸。不是受到水溶液的 pH 值太低導無法進行離子交換、或是受到 pH 值太低導致電沉澱的速度比腐蝕速度快，又或是化學沉澱法或萃取法需再透過有機溶劑或是化學物質反應造成二次污染等問題，因此本計畫擬採用新型多膜室法去除電解液中的雜質，並透過電沉澱法或隔離法降低電解液中的活性物質。最後再經電解液濃度、電位、pH 等調整，使電解液回復並



以全鈳液流電池單電池驗證之。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

(一)研究成果

1. 本研究計畫透過多膜多室分離鈳電解液中的低活性物質，結果如圖 1~圖 4 所示。由於 3 膜 4 室的內阻較高較耗能且離子的分離效果與 2 膜 3 室差異不大，因此不建議使用 3 膜 4 室系統。
2. 透過 2 膜 3 室系統處理含 986 ppm 鐵離子之鈳電解液，處理後之電解液經 25 mAcm^{-2} 、 50 mAcm^{-2} 、 75 mAcm^{-2} 12 圈充放電後顯示皆優於處理前之電解液(如表 1 所示)。
3. 本研究已驗證多膜多室法去除低電位之雜質是可行的，也可降低廢液產生，並將實驗結果建立一個連續式處理程序。
4. 未來可再找尋本研究以外之離子膜或處理機構等導入此系統中以提升與鈳同屬第一過渡元素系的鐵離子的處理效率。

二、學術成就方面發表

於「中國機械工程學會 111 年度年會暨第 39 屆全國學術研討會 (CSME 2022)」中國機械工程學會年會 2022 年研討會發表論文乙篇，論文名稱：以多膜多室法探討鈳、鐵、氫離子之遷移現象。

參、展望

本研究計畫透過多膜多室分離鈳電解液中的低活性物質。全期計畫已完成鈳/氫離子和鐵/氫離子的在 2 膜 3 室系統和 3 膜 4 室系統的處理前

後之電解液分析，經由實驗結果驗證方法是可行的，未來若要再提升分離效果，可再尋找本研究以外的離子膜或處理機構等導入此系統中以提升與鈳同屬第一過渡元素系的鐵離子的處理效率。

表 1、電解液處理前後之效率

Current Density mAcm^{-2}	commercial			Untreated			Treated			增加值
	CE(%)	VE(%)	EE(%)	EE	VE(%)	EE(%)	CE(%)	VE(%)	EE(%)	EE
25	95.03	94.43	89.57	+0.7	93.0	88.2	95.1	93.6	88.9	+0.7
50	96.34	89.23	85.87	+0.6	87.8	84.4	96.4	88.7	85.2	+0.6
75	95.98	84.63	80.76	+0.2	84.1	80.5	96.1	84.1	80.7	+0.2

註：增加值計= treated EE(%) - untreated EE(%)

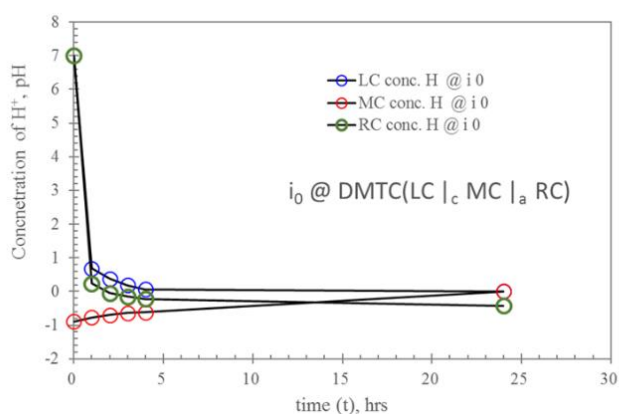


圖 1、氫離子濃隨時間的變化@ 0 mAcm^{-2}

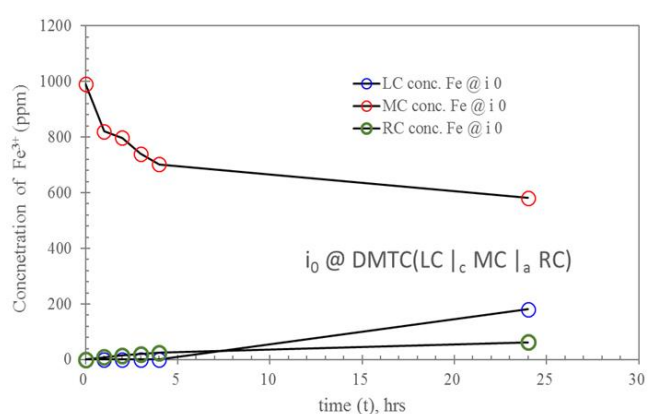


圖 2、鐵離子濃隨時間的變化@ 0 mAcm^{-2}

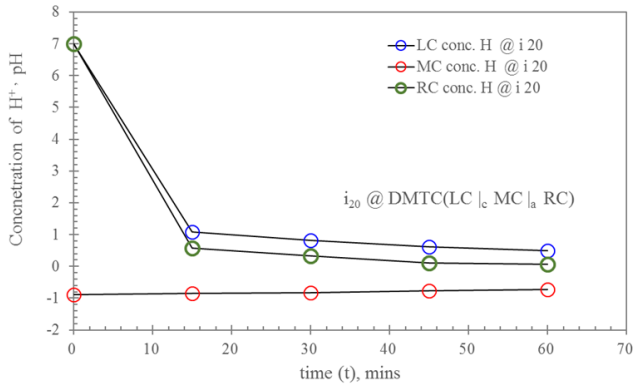


圖 3、氫離子濃隨時間的變化@20 mAc^{m-2}

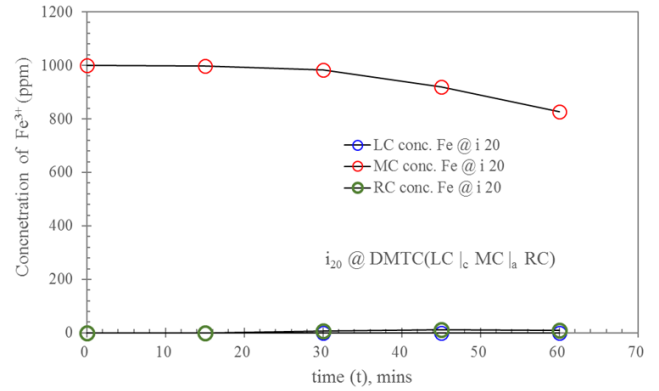


圖 4、鐵離子濃隨時間的變化@20 mAc^{m-2}



三相功率調節系統協調柴油機之基載輸出策略研究

Study on Power Coordinated Strategies for Base-Load Diesel Generators with
Three-Phase Power Conditioning System

(計畫編號：111A014)

羅國原¹ 劉國祥¹ 陳敬宇²

¹高雄科技大學電機工程系 ²核能研究所

近年來我國政府已全力投入發展再生能源，希望能提高能源自主比例，帶動新興綠能產業，隨之而來的高占比再生能源將帶來更多的挑戰，因此本計畫擬發展應用於離島微電網之三相功率調節系統協調柴油機之基載輸出策略。功率調節系統採用三組單相全橋換流器設計，可進行離島微電網電網四象限功率傳輸，實現柴油機輸出平滑控制模式、三相不平衡補償與微電網電壓補償模式，當發生交流電超過正常範圍時低，將進行實虛功控制，並以波德圖驗證系統穩定度。最後將以實際硬體電路進行測試驗證，本計畫提出三種模式之切換，包含三相獨立功率控制、三相三臂控制以及 Totem-Pole 實功控制，可獨立調節各相功率與平衡電網電壓的穩定，平衡時三相三臂控制可將其中三臂停止切換，並且通過 DQ 轉換來簡化控制參數。

In recent years, Taiwan government concentrated on developing the technologies of renewable energy to increase the proportion of energy independency and motivate the development of renewable energy industry. However, the high penetration of renewable energy will become the huge



challenge and impacts to the electricity grid in Taiwan. The objective of this project is to develop power coordinated strategies for base-load diesel generators with three-phase power conditioning system. The power conditioning system included three bidirectional dc-ac full-bridge inverters for microgrid applications. The proposed control strategies can operate the BESS with active and reactive power conditions and realize power smoothing, islanding detection, mode-transfer, and three-phase unbalance compensation. This project proposed three control modes including three-phase independent power control, three-phase three-legs control, and totem-pole real power control.

壹、計畫目標

Since renewable energy has been the fastest-growing energy source in recent years, fluctuations of the high-penetration renewable energy will cause a negative impact on the power grid system for stability and reliability. The demand for information storage, calculation, and transmission is also increasing. To strengthen grid resilience and minimize the consequences of extreme climatic conditions, a battery energy storage system (BESS) is one feasible solution to smooth the power output of renewable energies resource and provide ancillary services that support the transmission and stabilize the grid.

The topology proposed in this paper uses H-bridge inverters to achieve the bidirectional grid-connected converter system with multi-control strategies. To meet the relevant standards of high power factor and low total harmonic distortion (THD) with high conversion efficiency, there are two operating modes developed in this paper: (1) unipolar control mode (UCM) and (2)



totem-pole control mode (TPCM). The proposed TPCM is able to eliminate the diode losses and achieve higher conversion efficiency for real power control. Under three-phase balanced ac grid conditions, the DQ method is often used to simplify the design procedure and circuit analysis. In this project, an isolated DAB converter is implemented to provide the step-up function and meet the regulations for the inverters. Therefore, the proposed converter is also suitable for a three-phase converter system under unbalanced ac grid conditions.

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

A prototype of the proposed bidirectional converter, which is composed of two sets of DAB modules and an H-bridge inverter, was built and tested with the multi-mode control strategies. Figure 1 shows the schematic of the prototype converter with the proposed control strategies by using a DSP TMS320F28335. The key experimental waveforms of the inverter are shown in Figures 2. The experimental waveforms are consistent with the theoretical ones.

二、學術成就方面，共發表國際期刊及國內研討會論文各一篇

(一) K.-Y. Lo, K.-H. Liu, L.-X. Chen, C.-Y. Chen, C.-H. Shih, and J.-T.

Lin, “Multi-Mode Control of a Bidirectional Converter for Battery Energy Storage Systems,” *energies*, 15, 8114, 2022.

(二) 施建亨、劉國祥、陳敬宇、羅國原，“應用於儲能系統之三相多模式功率轉換器,”第十九屆台灣電力電子研討會暨第四十三屆中華民國電力工程研討會台中市。

參、展望

In recent years, the government has investments in various energy storage system for renewable system. This project can play an important role to achieve the power smoothening and voltage regulation with the high penetration rate of renewable energies in the future. This project proposed three control modes including three-phase independent power control, three-phase three-legs control, and totem-pole real power control. The research outcome obtained from the project will assist industry developers and utility in analysis and management of BESS, which will greatly allow renewable energy development and achieve government policies.

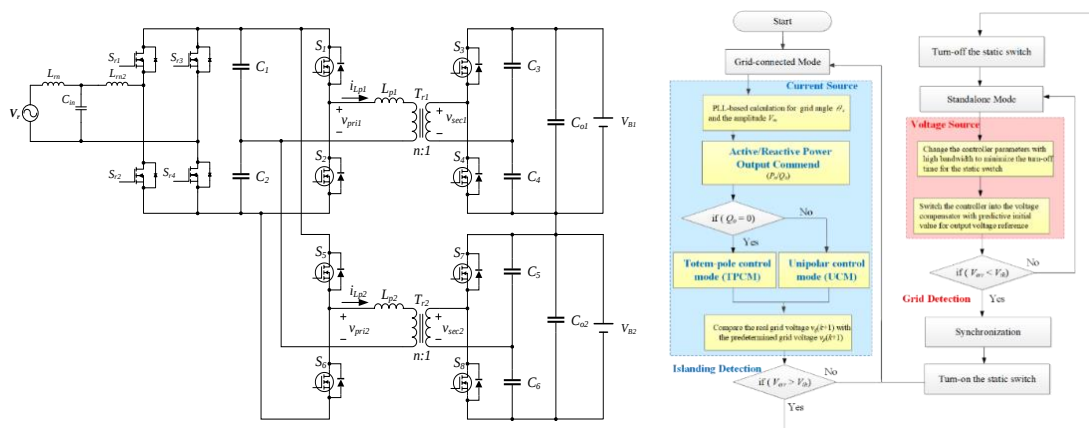
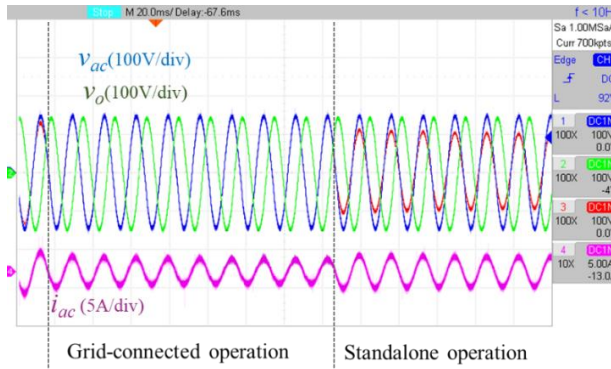
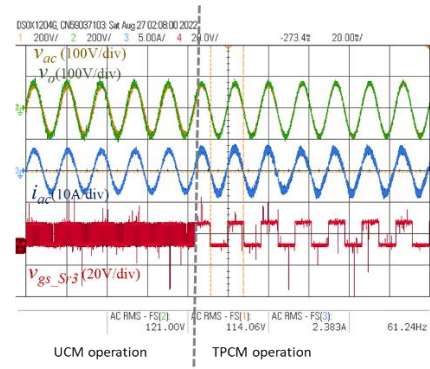


圖 1、Configuration of the battery energy storage system.

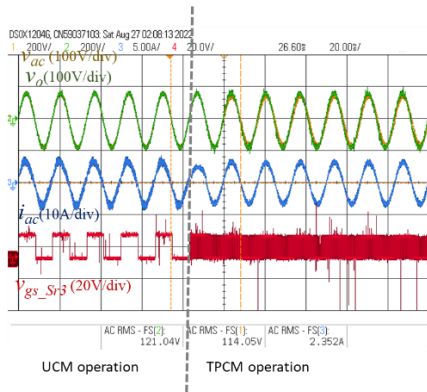
111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表



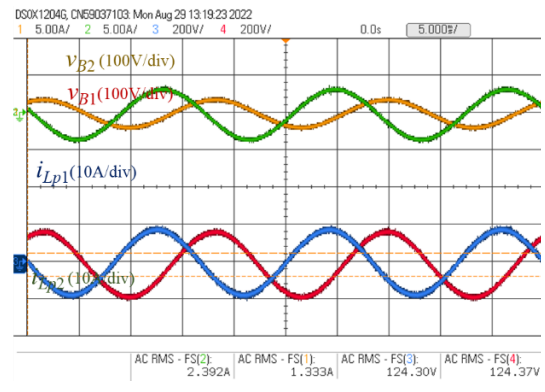
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 2、Experimental waveforms for the proposed system (a) Grid-connected to Standalone operation (b) UCM to TPCM operation (c) TPCM to UCM operation (d) Unbalance operation.



混合能源協調分配及補償策略研究

Study on Coordinated Energy Distribution and Compensation Strategy

(計畫編號：111A013)

裴晉哲¹ 武傳仁¹ 王雅亭¹ 鄭勝隆²

¹清華大學原科中心 ²核能研究所

面對大量再生能源併入電網，再生能源其間歇性嚴重影響電力即時之供需平衡穩定性，故為了確保電力系統之穩定與安全，電網需要仰賴微電網與儲能系統等新能源設施技術之發展，從而提供電網輔助服務功能。目前可以透過台電的電力交易平台使各界人士做為提供者參與輔助服務，而參與者如何透過該市場交易機制確保自身利益最大益也是一門重大學問。本計畫以核研所微電網系統及其相關能源設備作為研究對象，將參考台電智慧調度與發電，建置 MW 級微電網能源協調分配模擬系統，用於與即時及補充備轉輔助服務運行相關模擬分析研究。該計畫主要研究內容包含(i)分析微電網執行即時備轉期間分散式電源可能發生之故障情境，並設計緊急支援策略協助輔助服務運行；(ii)分析核研所於即時備轉執行期間，發生功率因數變動之問題並提出改善分析；(iii)依據台電電力交易平台之即時備轉相關歷史資料，提出以微電網參與輔助服務之競標價格評估；(iv)分析微電網執行補充備轉期間分散式電源可能發生之故障情境，並在所設計之緊急支援策略執行下評估可提升之分散式能源容量。

The penetration of the renewable energy has been increased around the



world. It may cause various system impacts, and then further affects the system stability and safety. This is due to the intermittent characteristics of natural energies which cause the output power variation on the renewable energy facilities and unbalanced installations of green/ renewable power generations. For example, the frequency instability which is caused by unbalanced power supply and demand. The severity also varies by the renewable energy installation capacity and load demand of the parallel feeder of the energy facility. Therefore, functions such as energy storage equipment and demand response can assist to stabilize the power supply. This project focused on the investigation of using INER microgrid system and its new added energy resources to participate in reserve-type ancillary services. The main tasks of this work include: (i) to establish the modelling and control technology of the INER microgrid system and its critical energy resources; and then to establish a simulation environment for INER microgrid system model to provide auxiliary services simulations with the implementations of various emergency strategies; (ii) to investigate the power factor compensation problem when performing spinning reserve in INER microgrid; (iii) based on the historical data from Taipower Power Energy Trading Platform, to present the bidding price estimation for INER microgrid to participate in spinning reserve; (iv) to design the emergency support strategy for INER microgrid participate in supplementary reserve, and to give an estimation on the enhancement of existed energy resources under supplementary reserve.

壹、計畫目標

台電於 2021 年起設立電力交易平台來開放輔助服務市場，使民間電力設備資源可以參與提供電網服務，以應對未來電力系統備轉能量來源

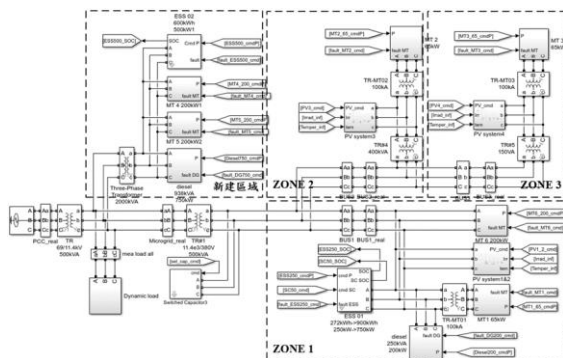


不足之窘境。因應台電目前所開放之輔助服務市場機制，本計畫以核研所之微電網系統及其相關發電資源為研究對象，探討透過微電網系統參與輔助服務之應用，並將針對執行即時與補充輔助服務而遭遇相關故障問題時，設計有效之緊急支援策略使微電網系統能在故障期間不受故障問題影響，維持應有之輔助服務運行表現；同時，亦對輔助服務執行過程中，造成微電網系統運行功因變動之問題進行探討。

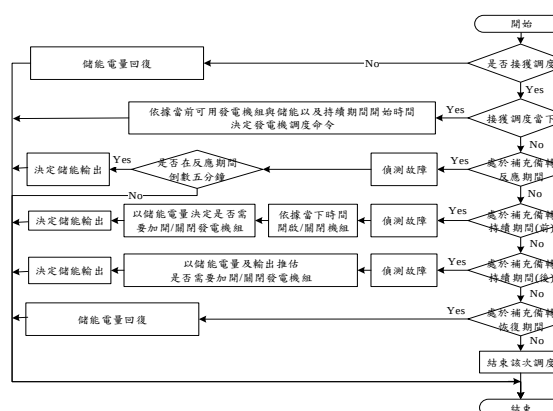
貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

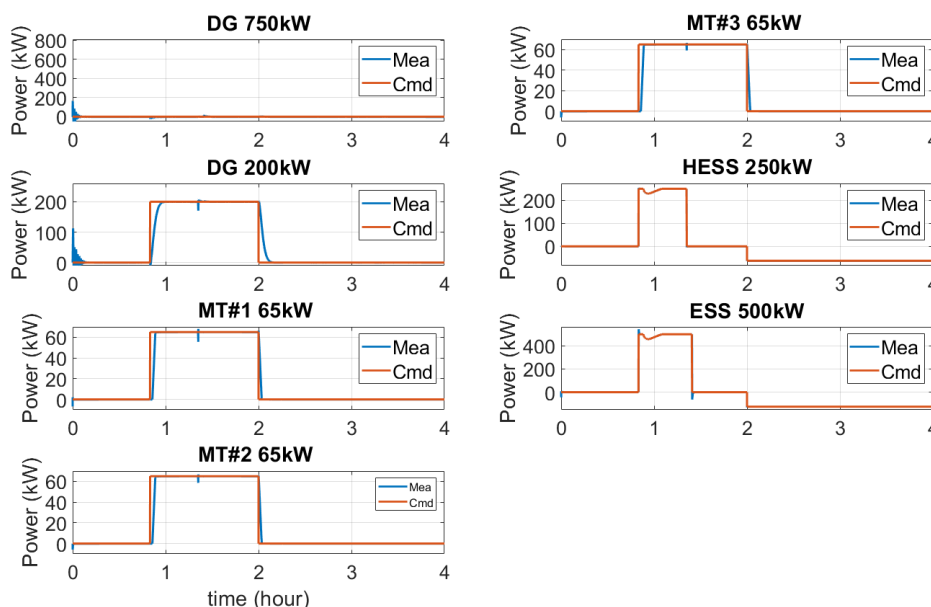
台電公司積極倡導以電力交易平台來吸引各界透過儲能設施與其他非傳統發電資源等方式來參與輔助服務，以為國內電力系統孕育及創造更多可利用之備轉資源。當前，在需要具備發電調度與資源管理技術下，微電網系統乃是相當適合參與輔助服務之資源型態，透過對系統內各項資源之運行掌握，可彈性達成輔助服務之執行。然而，輔助服務執行中，最重要的即在接獲電力公司調度命令後，可在滿足規定之執行率下，成功提供日前競標容量之備轉供電。期間，無論在調度前、響應期間或執行期間發生事故，都將對微電網系統來參與輔助服務之能力造成影響。有鑒於此，本計畫最重要之成果貢獻即在 Model-based 環境下完成核研所微電網模型建構與相關支援輔助服務進行之緊急控制策略開發。透過各式情境之模擬分析，提供實體系統操作者進行輔助服務運轉資源規劃之參考，以找尋出最適切之系統與發電資源運行調配。



(a) 微電網系統模型



(b) 緊急資源策略



(c) 調度前故障各發電資源響應

圖 1 具緊急支援之輔助服務模擬分析成果範例

二、學術成就方面

本研究計畫完成以下論文發表

- [1] Yu-Jen Liu, Cheng-I Chen, Wei-Chung Fu, Yih-Der Lee, Chin-Chan Cheng, and Yen-Fu Chen, “A Hybrid Approach for Low-Voltage AC Series Arc Fault Detection,” *Energies*, 16(3), Jan. 2023.
- [2] Yu-Jen Liu, Cheng-Yu Lee, Wei-Ming Liu, Yih-Der Lee, and Chin-



Chan Cheng, “Optimization-Based Stochastic Analysis Method for the Assessment of PV Hosting Capacity,” in *Proc. of IEEE International Conference on Applied System Innovation (ICASI)*, Nantou, Taiwan, April 2022.

- [3] Yu-Jen Liu, Cheng-Yu Lee, Po-Yu Hou, Yih-Der Lee, and Chin-Chan Cheng, “A Comparative Analysis of LSTM and BILSTM Network-Based Methods in PV Power Prediction,” in *Proc. of IET International Conference on Engineering Technologies and Applications (IET ICETA)*, Changhua, Taiwan, Oct. 2022.

- [4] 劉偉名、劉祐任、李奕德、鄭金展、陳彥輔、施湘芸，以微電網資源參與台電即時備轉服務之模擬分析，第四十三屆中華民國電力工程研討會，台中，111年12月。

參、展望

輔助服務市場自 2021 年起成為國內電業創造與開發備轉能量之重要一環，期透過市場競標參與機制，為電力事件發生前能儲備充裕之可利用能量，以幫助電網之運行與恢復。目前有關輔助服務市場之技術要求，主要來自電業規章或技術規範且多參考國外經驗所擬制，尚未建立完善之國家規範；期待於不久之將來，能加速標準化建立，讓輔助服務市場參與者有合宜之法規可供依循。目前，參與輔助服務市場之實務案場，多數乃是採單一資源架構設計且多以單獨設立之併網型儲能系統為大宗。惟於未來，相信會有更多元之參與方式，如再生能源發電之加入或以需量反應方式進行等；此時，具備整合多項發電資源與調度管理技術之微電網系統勢必可從中扮演要角，成為參與電業輔助服務市場之利器。而核研所微電



網系統在國內新進電網技術發展上一直是重中之重，經常作為技術領前之代表；因此，期待該系統日後能持續升級擴充與茁壯開發，成為國內必要之電網技術開發與驗證場域。



場次 4—輻射與應用科技領域

衛星元件太空輻射效應評估及先期技術建立.....	1
抗輻射電子元件開發與輻射效應評估.....	5
抗輻射晶片技術開發與輻射驗證平台.....	13
建立南部備援實驗室之環境試樣分析備援技術.....	17
海水鋮 90 方法開發及海陸域樣品鋮 90 初步調查.....	24
輻射事件應變技術開發研究.....	28
輻射災害應變資源建置與實務管理之研究.....	34
109 年至 111 年北部地區輻射災害檢驗分析實驗室之能力精進計畫.....	39
111 年核設施核子保安作業精進研究.....	44



衛星元件太空輻射效應評估及先期技術建立

Evaluation of Anti-Radiation Effect and Establishment of Advanced Technology for Satellite Components

(計畫編號：AEC111004)

葉彥顯

核能研究所

太空技術成功的關鍵因素在於開發可設計用於太空應用的電子元件和晶片，因為它們暴露在各種高能粒子和光子的空間輻射下，可能導致長期特性退化或暫態故障等。因此，了解輻射對太陽電池、電子元件和晶片等衛星元件的影響對於太空科技應用的發展尤為重要。本計畫完成衛星元件太空輻射效應評估及先期技術之建立。本論文說明工作項目 1「抗輻射太空太陽電池技術開發」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。在太空太陽電池效率提升上，本研究在磊晶參數調整中，主要於上部子電池的 PN 接面之磷化銦鎵 InGaP 磊晶層裡加入銻-Sb 元素當作表面活化劑使用，可有效提高 InGaP 磊晶層能隙，由 1.82 eV 增加到 1.88~1.89 eV，提高之材料能隙相當於提高電池之輸出電壓值，最終將可提升電池之輸出功率。在元件製程上則分析不同金屬厚度與熱退火條件，以達到最佳之歐姆接觸效果。在太空太陽電池輻射測試上以 1 MeV 之質子照射，並與其他團隊之結果做比較。此成果可作為後續實驗設計與太空太陽電池可靠度計算的參考，並在抗輻射太空太陽電池技術之開發上有一初步的成果展示。



The significant topics of space technology are solar cells, electronic components and chips that can be used in space. Since these devices are exposed to radiation of various high-energy particles and photons in a long period of time during space programs, it may cause gradual degradation or failure, etc. Hence, understanding the effects of radiation on satellite devices is one of the most important tasks in the development of space technology. Via the project, the evaluation of anti-radiation effect and establishment of advanced technology for satellite devices were completed. This paper demonstrate work item 1, “Development of anti-radiation space 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 conversion efficiency, the main adjustment was to add antimony (Sb) as surfactant into indium gallium phosphide (InGaP) which is the main material of top cell. It was shown that the presence of Sb increased the energy band gap from 1.82 eV to 1.89 eV. The open-circuit voltage (VOC) also increased accordingly, which elevated the output power. In the electrode process, different metal thicknesses and thermal annealing conditions were analyzed to obtain the optimal ohmic-contact. On the radiation test, space solar cells were irradiated with 1 MeV protons, and the result was compared with that of other teams. The analysis and the result could be a reference for the sequential experiments and give a demonstration for the establishment of anti-radiation space solar cell technology.



壹、計畫目標

太空科技成功與否的重要關鍵因素為發展可設計用於太空等級應用的電子元件與晶片，因其曝露於各種高能粒子與光子的太空輻射之中，可能造成長期的特性劣化或暫態失效等影響，故瞭解輻射對於衛星元件如太陽電池、電子元件與晶片的影響對發展太空科技應用尤為重要。本計畫工作項目 1 之目標即開發高效率太空太陽電池，並評估太空輻射對太陽電池之影響以建立抗輻射太空太陽電池先期技術。

貳、重要成果

在各種太陽電池材料中，III-V 族多接面太陽電池可完美匹配太空用太陽電池的核心技術發展需求，透過多接面子電池連續堆疊串聯，轉換效率理論極限可達到 86.8%，另外 III-V 族材料本身比起傳統矽基太陽電池具備更高的抗輻射能力，因此若要適應各種環繞地球軌道之太空輻射環境，其 III-V 族多接面太陽電池乃是最佳的選擇。本所長期致力於創新技術之研發，已具備超過十年之三五族(III-V)族高效率太陽電池研發經驗。近年亦配合政府「國家太空科技發展長程計畫」政策，投入太空太陽電池技術之開發並取得初步成果。經過一連串的實驗與數據分析，並透過電極製程的優化，其效率已逐漸提高。本次研究聚焦於透過提升材料能隙去增加電池元件的開路電壓，進而提升整體電池的轉換效率，讓電池的平均效率可達到 28%以上。藉由調整太陽電池磊晶層結構、成長條件並優化電極製程後，太空太陽電池於實驗型樣品(受光面積 $0.8 \times 1.0 \text{ cm}^2$)之最高效率可達 30.77%，量產型樣品(受光面積 $4 \times 8 \text{ cm}^2$)最高效率亦達到 29.1%(平均 28%)，已具國際商售太空電池水準。初步的太空太陽電池輻射測試結



果方面，本測試以 1 MeV 之質子做測試，在累積通量 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 照射後，太陽電池之剩餘轉換效率可大於 60%，顯示本所自製之電池其抗輻射能力與其他團隊之電池相當，已具備基本的抗輻射能力。

一、研發成果之重要貢獻

藉由本計畫之執行並整合國內跨領域研究機構資源及技術，完成高效率太空太陽電池開發及評估抗輻射能力。研究成果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，對半導體工業、核能電廠、太空飛行器等都有重要貢獻，可提昇我國科技競爭力。

二、論著產出

工作項目「抗輻射太空太陽電池技術開發」共發表 6 篇研究與技術報告。

- (一) 楊凱翔，NR9-6000PY 負光阻之製程參數建立
- (二) 陳孟忻，研磨機與上蠟機操作手冊
- (三) 方正豪，太空太陽能電池之 JMP 數據分析
- (四) 林秉閔，磊晶再成長技術開發磷化銦鎵太陽電池之研究
- (五) 施圳豪，高效率太空用太陽電池磊晶技術開發
- (六) 葉彥顯，太空太陽電池輻射測試

參、展望

太空科技已是先進國家競逐國力的指標，本研究的成果有助於國內在太空科技之研究發展。目前國內的產業與學術界對於太空科技領域並未投注足夠資源，本研究可做為國內未來在推展航太科學、軍事、太空科技等研究領域的重要基礎。本團隊於計畫完成後，並已規劃四年之接續計



畫，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、質子照射實驗之結果

Sample #	Eff.(Before)	Eff.(After)	Remaining Eff.
1	26.9%	17.8%	66.2%
2	26.5%	18.2%	68.7%
3	27.7%	17.8%	64.3%



圖 1、切割前之 4 吋太陽電池(2 片)

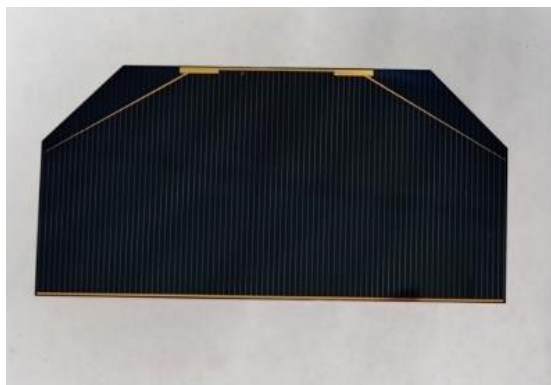


圖 2、太陽電池成品(面積 8 cm X 4 cm)

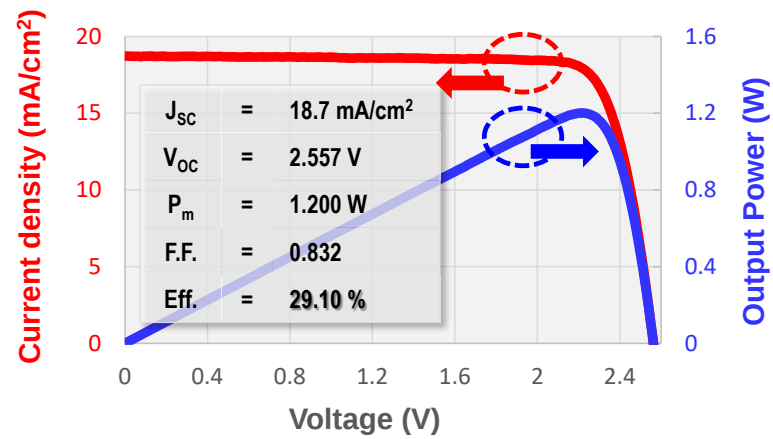


圖 3、轉換效率達 29.1%電池之電流-電壓特性曲線

**抗輻射電子元件開發與輻射效應評估****Development of Radiation-Resistant Electronic Devices and Evaluation of its
Radiation Effects**

(計畫編號：111B002)

巫勇賢¹ 張廖貴術¹ 趙得勝²¹ 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

電子元件曝露於各種高能粒子與光子的太空輻射之中，可能造成長期的特性劣化或暫態失效等影響，瞭解輻射對於電子元件與電路的影響對發展太空科技應用尤為重要，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。本研究將針對可抗輻射之新材料、製程技術與新型元件結構進行先期研究，藉此釐清各類材料與元件的輻射耐受性及各種輻射效應的作用機制與驗證測試方法，並以此做為拓展未來研究的重要基礎。本年度執行的研究項目包括：(1)抗輻射之新興記憶體元件開發；(2)抗輻射之金氧半場效電晶體與快閃記憶體元件之製程研究；(3)下世代半導體材料與元件之輻射效應評估。在此報告之中，我們提供上述各研究項目的緣起與目的、實驗方法與過程，並完整地說明所獲致的成果與發現，相關成果預期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。

When electronic components are exposed to various high-energy particles and photons in space radiation, they may suffer the issues such as long-term



property degradation or transient failures. Understanding the effects of radiation on electronic devices and circuits is particularly important for space applications. The development of advanced radiation-hardened electronic devices to withstand extreme radiation environment in space is also a key factor and challenge to the success of space exploration missions. In this project, we will conduct preliminary study on new techniques, fabrication process, and materials and devices that can mitigate the degradation subject to radiation. We can expect to clarify the radiation tolerance of various materials and devices as well as acquire the mechanisms and the verification test methods of various radiation effects, which would be the important basis to expand future research. The topics to be implemented this year include: (1) the development of radiation-resistant emerging memory devices; (2) the study of fabrication process for radiation-resistant metal-oxide-semiconductor field effect transistors and flash memory devices; (3) the assessment of radiation effects on next-generation semiconductor materials and devices. In this report, we provide the motivation and purpose and the experimental methods and procedures of the above topics in this project. We also thoroughly explain the results and findings obtained in this year, which are expected to be useful to serve as an important basis for the promotion of aerospace science, military, space electronics and other research fields in our country in the future.

壹、計畫目標

本研究計畫係針對抗輻射之半導體材料、製程、以及元件開發等進行先期研究及評估，主要聚焦的研究主題涵蓋三個面向：

一、抗輻射之新興記憶體元件開發

低軌衛星中通訊酬載電腦(Payload Computer)是通訊酬載的控制指



揮中心，而半導體記憶體則是酬載電腦中數據儲存系統的關鍵電子元件。由於低軌衛星所承受的輻射主要以質子為主，本研究在過去輻射研究的基礎上，以基於 HfO_2 之 FeFET 鐵電記憶體為對象，導入新的介面層與元件結構，進一步探討質子造成的 TID 效應，期盼以更接近於太空輻射的環境進行測試，對於未來提出改善抗輻射的方案將更有具體的參考方向。

二、抗輻射之金氧半場效電晶體與快閃記憶體元件之製程研究

關於新元件新材料是否能應用在太空相關領域仍然有待探討，而通常可行的做法是以目前主流的 CMOS 邏輯元件及快閃記憶體元件 (Flash) 經輻射環境的可靠度測試後，建構成衛星電子系統。為了避免半導體元件在太空輻射環境下失效造成衛星故障，確定元件在輻射傷害下造成的劣化程度及抗輻射能力是非常重要的工作。本研究以金氧半場效電晶體 (MOSFET)、鰭式電晶體 (FinFET) 及快閃記憶體 (Flash) 元件經輻射傷害之可靠度為研究重點。初步將以 Co-60 進行 TID 效應測試，探討元件中絕緣層與高介電層之輻射效應。

三、下世代半導體材料與元件之輻射效應評估

寬能隙半導體具有優異的本質特性，已成為製作下世代高效能功率半導體元件的重要材料。再者，基於寬能隙半導體在本質上可具有較高的位移能量 (displacement energy)，也被預測可較矽具備更為優異的輻射耐受性，尤以碳化矽 (SiC) 及氮化鎵 (GaN) 兩種寬能隙半導體材料的發展最受矚目。本研究係針對 SiC 與 GaN 等寬能隙材料與元件的輻射效應研究現況進行先期評估，以瞭解其輻射響應及劣化機制。因應未來建構電子元件測試平台之需求，本研究也進行 SiC 金氧半電容元件的輻射



效應初始評估，並針對國際上廣泛採用的測試標準進行研析，以先行建立重要輻射特性的測試流程及可行性評估。

貳、重要成果

一、抗輻射之新興記憶體元件開發

本計畫以 HfZrO_x (HZO) 鐵電層為基礎，透過五個研究方向提升抗輻射性並掌握太空環境中其他輻射源的損傷機制：(1) 導入不同介面層製作鐵電記憶體；(2) 以 p 型通道完成鐵電記憶體製作；(3) 開發金屬電極材料製作鐵電記憶體；(4) 以施加脈衝電壓方式進行輻射損傷後之修復；(5) 以質子束作為輻射源探討鐵電記憶體之輻射損傷機制。圖 1 與圖 2 是質子束照射平台與 FeFET 鐵電記憶體元件之結構圖。重要成果說明如下：

- (一) 建立質子束照射下之鐵電記憶體 FeFET TID 測試平台。
- (二) 進行鐵電記憶體 FeFET 製作及製程開發，包含 FeFET 介面層品質改善、以 p 型通道完成 FeFET 製作、開發金屬電極材料製作 FeFET 等。
- (三) 以 NH_3 電漿直接氮化矽晶基板形成 SiN_x 提高記憶視窗，並可提升記憶體的可靠度與電偶極的切換速度。
- (四) 以質子束作為輻射源完成 FeFET 鐵電記憶體之抗輻射測試，研究結果顯示在質子照射通量達到 $2.5 \times 10^{14} \text{ ions/cm}^2$ 時，FeFET 鐵電記憶體仍具有極佳的耐久度與資料保存能力，可證實其具有相當優異的抗質子輻射能力。

二、抗輻射之金氧半場效電晶體與快閃記憶體元件之製程研究



本研究針對 MOSFET、FinFET、Flash 元件進行設計與製作，圖 3 為元件結構與製作流程示意圖，圖 4 為奈米線式元件結構示意圖。為了探討上述元件的總劑量效應，輻射照射使用清大原科中心的 Co-60 照射設施，如圖 5 所示。重要成果說明如下：

- (一) 完成金氧半場效電晶體與快閃記憶體元件製作，包含 MOSFET、FinFET、Tri-Gate 無接面式通道 Flash。
- (二) 完成 MOSFET/FinFET 元件輻射效應測試分析，在 100 krad 輻射照射後，FinFET 元件的電性幾乎沒有變化，相較 Planar MOSFET 具有更為優異的抗輻射性。
- (三) 完成三面閘極無接面通道 Flash 元件抗輻射測試，採用 Si₃N₄/ZrON 堆疊式電荷儲存層之元件在經過 10 krad、100 krad、1000 krad 三種輻射劑量照射後，皆具有相近的導通電流及開關電流比，且 ZrON 樣品的寫入及抹除的速度也不因輻射效應而改變，同時具有相當的記憶窗。

三、下世代半導體材料與元件之輻射效應評估

本研究的工作項目包含：(1)寬能隙材料與元件之輻射效應研析；(2)SiC 金氧半電容製作與 TID 輻射效應分析；(3)輻射效應標準驗證流程與測試平台評估。圖 6 所示為本研究所使用的 SiC 基板的材料參數及 MOS 電容結構。重要成果說明如下：

- (一) TID 效應測試主要採用 Co-60 γ -ray 射源，少數研究則採用 X-ray，劑量範圍介於 0~1000 Mrad 之間。相較於接面型元件，MOSFET 元件對於 TID 輻射效應較為敏感。適當的製程條件控制可提升 SiC MOSFET 的輻射耐受性。



- (二) 為使輻射照射更貼近元件實際的操作環境，TID 輻射效應的照射條件必須適當地考量溫度、濕度、偏壓、劑量率等參數的影響。
- (三) DDD 輻射效應可藉由中子或其它高能粒子進行評估，DDD 效應造成元件劣化的主要原因為位移損傷造成元件通道區及飄移區的載子移除現象。採用較高摻雜濃度的元件可有效抑制 DDD 效應的發生。
- (四) SiC 功率元件的 SEE 效應主要的失效模式為單一事件燒毀(SEB)，SEB 效應實驗的高能粒子涵蓋中子、質子以及其它重粒子，甚至地面中子也可作為觸發源。SiC 功率元件的 SEB 失效機率或發生截面隨外加偏壓而增加，且與元件製造商和元件結構有關。
- (五) 藉由 SiC MOS 電容的 Co-60 gamma rays 之 TID 效應的初步分析可知，gamma rays 照射會產生游離電荷並造成 C-V 特性曲線往左飄移，此係介電層捕獲電洞而形成帶正電的氧化層陷阱電荷所致。

四、績效指標達成情形

(一) 論文發表：完成國外期刊論文投稿 2 篇

1. “Electrical deterioration of 4H-SiC MOS capacitors due to bulk and interface traps induced by proton irradiation”, Microelectronics Reliability 142 (2023) 114927.
2. “Radiation hardness of InWZnO thin film as resistive switching layer”, Appl. Phys. Lett. 120 (2022) 191605.

(二) 培育及延攬人才：完成博士培育/訓人數 2 名、碩士培育/訓人數 5 名。



參、展望

- 一、電子元件輻射效應之實驗參數與影響因子眾多，首要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。
- 二、國內目前較欠缺高能粒子照射設施，建議相關單位應構思籌建適用的加速器設施，或整合目前國內可用資源發展開放式使用平台，以因應未來可能的需求。
- 三、輻射效應測試平台之建立應力求可符合國際認可之測試標準，目前相關的測試環境仍未臻完備，建議建議本計畫未來應支援建立相關效應測試平台所需的資源。

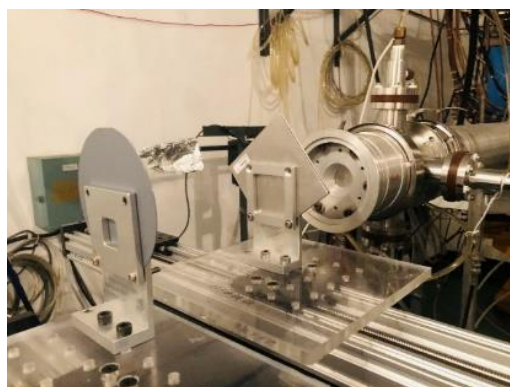


圖 1、質子照射平台

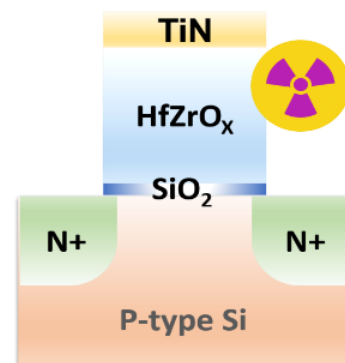


圖 2、FeFET 元件結構

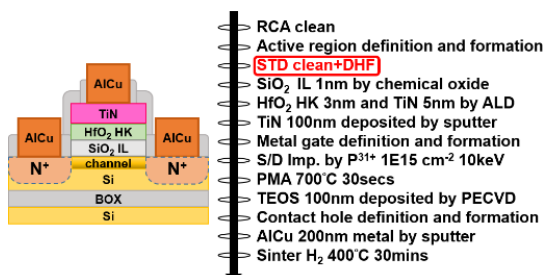


圖 3、元件結構與製作流程

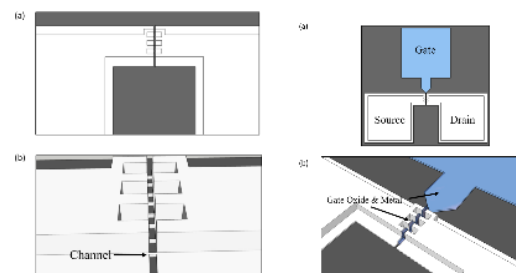


圖 4、奈米線式元件結構

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表



二根射源管

距離(cm)*	kGy/h	Gy/h
6.75	0.809	29.77
8	0.666	24.84
20	0.142	4.993
30	0.111	2.466
40	0.033	1.249
50	0.021	0.817
60	0.015	0.542
校正時間	2021/5/20	2021/5/21

* 由產品名稱標上距離源中心點距離

† 校正公式： $R = R_0 e^{-\mu x}$

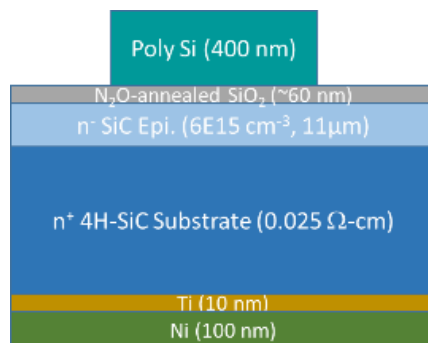


圖 5、Co-60 照射場與劑量率

圖 6、SiC MOS 元件結構與材料參數



抗輻射晶片技術開發與輻射驗證平台

Radiation-hardened IC technology development and radiation verification platform

(計畫編號：111B003)

陳昱霖¹ 廖培凱² 蔡佳勳³ 洪建平² 李建霖³ 梁淳皓¹ 蔡孟智¹

余世博² 陳信樹¹ 蔡坤諭³ 李佳翰²

¹ 台灣大學電子所 ² 台灣大學工程科學及海洋工程學系 ³ 台灣大學電機工程學系

本研究計畫「抗輻射晶片技術開發與輻射驗證平台」之研究項目包含「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」，以脈衝雷射光代替質子或高能粒子進行晶片之輻射驗證，大幅縮短驗證時間，有助於快速開發耐輻射的晶片。以晶片設計流程搭配輻射粒子照射實驗開發具有耐輻射功能的類比數位混和訊號、低功耗及硬體資訊安全晶片同時也針對小晶片異質整合技術、評估相關抗輻射特性進行研發。

This research proposal, which title is radiation-hardened IC technology development and radiation verification platform, includes three topics, design and development of radiation-hardened IC for space commercial applications, radiation verification platform based on short pulse laser, and radiation-hardened wafer grade small chip heterogeneous integration technology. The pulsed laser light instead of protons or high-energy particles is used for radiation verification of chips, which greatly shortens the verification time and



helps to quickly develop radiation-hardness chips. The analog-digital mixed-signal, low-power consumption and hardware information security chips with radiation-hardness functions are developed through the chip design process combined with radiation experiments. At the same time, development for small-chip heterogeneous integration technology and evaluation of related radiation resistance characteristics is evaluated.

壹、計畫目標

「抗輻射晶片技術開發與輻射驗證平台」研究項目包含「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」三個子主題，以脈衝雷射光代替質子或高能粒子進行晶片之輻射驗證，大幅縮短驗證時間，有助於快速開發耐輻射的晶片。

貳、重要成果

本計畫之重要研究成果包含了抗輻射晶片設計、短脈衝雷射光點控制、抗輻射晶片設計輻照實驗、及小晶片製程探討，說明如下。另外，本研究成果投稿一篇國際學術期刊，審查中。

一、抗輻射晶片設計

探討抗輻射類比數位混訊號晶片之設計，配合輻射射線觀察晶片輸出訊號的 SEE 現象。目前已完成台積電 180 nm 製程的比較器及抗輻射比較器的晶片下線，而台積電 180 nm 製程的抗輻射類比數位轉換器與 90 nm 比較器也已完成設計與下線。



二、短脈衝雷射光點控制

雷射光點之尺寸是雷射 SEE 測試的關鍵參數之一，由於同樣強度的雷射光束在聚焦成不同大小的光點時，其通量也會不同，使得單位面積上受到的照射量也會不同，進而影響到 SEE 測試時所量測到的實驗結果。本團隊目前已進行了相關實驗的文獻調查，並且將取得的資訊用於評估現有的實驗架設之改進方向，以實現光點大小控制。

三、抗輻射晶片設計輻照實驗

本團隊使用自行架構之雷射照射實驗設備，DUT 將會由電源供應器供電，並且由 Multimeter 監測其電壓及電流，訊號產生器會提供穩定的訊號給 DUT，其頻率可調整。脈衝雷射將會經過聚焦鏡聚焦並且照射在 DUT 上，整體結果將會在示波器上呈現。而目前的實驗流程規劃為首先確認儀器開啟後皆正常運作，然後將 DUT 移動至雷射光位置照射，示波器將會顯示晶片上的訊號是否有因為雷射光的照射而出現 SEU 現象，如果有的話將會把示波器顯示之 SEU 次數的數據紀錄下來，而沒 SEU 現象發生的話則將會針對電壓或是雷射之強度進行調整，當調整至晶片產生現象時則才會記錄數據。在抗輻射晶片照射的實驗中，我們針對設計好的 180 奈米製程的抗輻射電路做照射實驗，照射期間雷射可調整的最大平均功率約為 150 毫瓦，而晶片的訊號由訊號產生器提供，其設定為頻率一百萬赫茲的方波輸入給晶片，並且由電源供應器偽晶片提供電壓，然後輸出將會由示波器截取。

四、小晶片製程探討

近幾年來，異質整合及先進封裝已經是半導體業界熱門的技術議題。透過異質整合及先進封裝的技術，可將不同製程的小晶片模組整合在一



起，確保設計擁有最大的彈性。目前計畫與 TSRI 異質整合晶片組已有初步討論異質整合晶片的可能性，TSRI 針對 2.5D/3D 的異質整合技術已經有初步成果，後續規劃先從雙方有共識的方向進行，與 TSRI 學習晶片級的封裝整合技術。

參、展望

關於抗輻射晶片設計的部份已完成抗輻射類比數位混訊號晶片之設計，共設計三種抗輻射晶片，分別用於探討不同電路設計對於抗 SEE 能力的比較，以及不同製程對於抗 SEE 能力的差別探討。而短脈衝雷射光點大小控制的部份目前則是進行了文獻資料的蒐集，且分析了文獻上的實驗方式，並針對現有的架設找出可以對於控制雷射光點大小的部份進行了雷射架設的優化及改良，並且利用現有以及改良後的實驗架設針對已經下線完回來的抗輻射晶片做脈衝雷射之照射研究，在雷射照射的部分完成抗輻射晶片之照射實驗之架構也進行了利用脈衝雷射之照射，有觀測到 SEU 效應，實驗結果也顯示了有使用抗輻射技巧的晶片可以成功抵抗 SEU 的發生，也驗證了雷射輻射架設平台在對於抗輻射電路設計的幫助上有不錯的效果。在小晶片製程探討的部分已經蒐集多個半導體業界異質整合與先進封裝技術的相關文獻，並分析異質整合製程可能出現的輻射效應，後續將與 TSRI 合作進行抗輻射小晶片異質整合技術開發，異質整合載板的部分，規劃採用成熟製程(如 180nm 或 90nm 製程)製作。



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：AEC111001)

葉一隆¹ 陳庭堅² 徐文信¹ 林志忠² 黃韋翔² 陳婉玲³

¹ 國立屏東科技大學土木工程系 ² 國立屏東科技大學環境工程與科學系

³ 行政院原子能委員會輻射偵測中心

2011 年日本福島事故發生後，國內核能總體檢辦理成果報告敘述緊急應變機制有關輻射檢測人力及設備備援能量檢討報告之結果顯示，若在境內或鄰近之境外發生類似福島電廠核子事故，將會湧入大量需要檢測的各類農、漁、畜牧等產品，以及環境中水樣、空氣、土壤、生物樣品等樣本。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能量至環境中水樣、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。

本計畫執行成果包括 1.完成核能三廠環境試樣計測比較實驗，藉此比對本實驗室樣本前處理及檢測的能力；2.完成「IAEA 國際原子能總署」環境試樣放射性分析能力試驗，驗證實驗室技術人員檢測穩定性與熟練度等項目；3.開設輻射安全及災害防救環境教育訓練課程，讓學生瞭解輻射的基本原理，並引入輻射與日常生活的關聯性及應用，進而對輻射建立正確的觀念；4.結合恆春鎮農會提供在地農產品放射性含量檢驗分析及說



明，積極扮演民眾溝通、促進公民參與環境輻射監測作業，及提升南部備援實驗室曝光度；5.完成氫及銻 90 分析前處理方式作業程序書，以擴展放射性核種分析能力。

After the Fukushima accident in Japan in 2011, the Atomic Energy Council (AEC), thoroughly reviewed the lessons learned from Fukushima accident and proposed the “Post Fukushima Safety Assessment Summary”, make a proposal of the program and then publish the report. According to the report, it implies various radiation-contaminated food must be analyzed in case of the nuclear disaster. As a result, there is a great demand for analysis of those environmental samples, including crops, fishery, livestock products, water, air, soil, and biological environmental samples. In conclusion, for the sake of ensuring the environmental radiation safety, it has to promote the capacity of radioactive analysis of the southern backup laboratory. Therefore, the aim of this project is to enhance the capacity of radioactive analysis for environmental samples, and finally acquired the accreditation about the items of environmental samples from the Taiwan Accreditation Foundation (TAF).

Our laboratory has achieved the preset goals of this project this year. Those achievements include : (1) Collaborating with the Radiation Monitoring Center (RMC) for the task of monitoring the Maanshan Nuclear Power Plant, taking and analyzing the samples around the nuclear power plant, and carries out the comparison experiment between two offices, (2) The laboratory passes the proficiency test held by "International Atomic Energy Agency (IAEA), to verify the laboratory technicians' proficiency, (3) Conduct the on-site foodstuff radioactive analysis and face-to-face dialogs among local resident the Maanshan nuclear power plant to promote citizens' participation in



environmental monitoring work, (4) Providing real-time radioactive analysis service of indigenous agricultural products and expounding the analytical result, (5) Complete the operating procedures for tritium and strontium-90 analysis pre-processing methods to expand the analysis capabilities.

壹、計畫目標

本計畫的目的希冀在國立屏東科技大學輻射災害備援實驗室，建立環境試樣分析備援技術，強化備援實驗室之分析檢測量能，本年度依計畫目標已完成核能三廠環境試樣計測比較實驗、於校內開辦輻射安全及災害防救環境教育訓練、結合恆春鎮農會提供在地農產品放射性含量檢驗分析及說明、建立氫及銦 90 核種前處理方式作業程序書及培訓技術人員。另本實驗室於平時可訓練相關人員與學生的參與，協助各級政府進行市售商品調查或環境輻射採樣檢測作業，接受民眾或廠商委託進行進出口食品、消費性商品、環境試樣放射性含量檢測等技術服務；當發生核子事故或輻射相關意外事件時，可支援應變單位執行各類樣品的放射性檢測作業，提升輻災應變能量，確保國人的安全。

貳、重要成果

本計畫工作項目依行政院原子能委員會輻射偵測中心要求查核日期與項目進行控管，截至 111 年 12 月已完成核三廠第一~四季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、建立氫及銦 90 核種前處理方式作業程序書籍培訓技術人員及結合在地農會提供農特產品放射性檢測分析及說明等工作項目。



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

本實驗室於 111 年 1、4、7、10 月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能力是否有一致性，藉此達到比較實驗的目的。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 82 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，修課人數共計 213 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) 建立氫及銨 90 核種前處理方式作業程序書及培訓技術人員

輻射偵測中心於 111 年 1 月移轉氫及銨 90 相關程序書共 4 份，本實驗室接續修訂為實驗室特有之作業程序書並歸類為品質文件，以符合品質管理與品質保證之要求。相關程序書包括 RAL-O14 植物試樣氫活度分析之前處理作業程序書、RAL-O15 水樣氫活度分析之前處理作業程序書、RAL-O16 試樣銨-90 分析作業程序書及 RAL-O17 銨-90 分析效率校正作業程序書。並派員至輻射偵測中心參加氫及銨 90 核種前處理及計測程序培訓訓練。



(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

本實驗室透過恆春鎮農會及社區理事長的協助，至恆春地區採集農作物及農田土壤進行放射性核種分析，分析結果將產出檢測報告，後續再提供給農民並向農民解說檢測結果。因本實驗室已通過 TAF 及 TFDA 游離輻射測試領域實驗室認證，故檢測報告具有公信力。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，一方面也能消除核電廠是否有對當地造成污染的疑慮。

(五) 參加國際環境試樣放射性分析能力比較實驗

本實驗室一方面為了 TAF 與 TFDA 實驗室認證規定須參加國內外能力試驗比對外，另一方面可驗證確認本實驗室的分析能力與儀器的準確度，於 111 年報名 IAEA 國際原子能總署試樣比對試驗，藉此檢視本實驗室的分析能力與數據的可靠性。本實驗今年參加的環境試樣放射性分析能力比較實驗皆為”通過”。

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。本實驗室將 108 年及 109 年執行的原子能學術合作研究計畫整理成論文並發表在國際期刊共計 4 篇，如表 1 所示。



表 1、學術發表

期刊封面	論文
	Activity concentrations and bioconcentration factors (BCF) of natural radionuclides (^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th) from cultivated substrates to mushrooms. 2022 (期刊: <i>Environment Science and Pollution Research</i> , SCI, IF: 5.190)
	Soil to tobacco component transfer factors for natural radionuclides ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th and the risk assessment of tobacco leaf in smoking. 2022 (期刊: <i>Journal of Environmental Science and Health, Part A</i> , SCI, IF: 2.582)
	Assessment of doses from ingestion of radionuclides ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra and ^{232}Th in edible commercial mushrooms from Taiwan. 2022 (期刊: <i>Radiation Protection Dosimetry</i> , SCI, IF:0.954)
	Assessment of doses from ingestion of naturally occurring radionuclides K-40 and Ra-226 in rice consumed in Taiwan. 2022 (期刊: <i>Radiation Protection Dosimetry</i> , SCI, IF:0.954)

參、展望

關於抗輻射晶片設計的部份已完成抗輻射類比數位混訊號晶片之設計，共設計三種抗輻射晶片，分別用於探討不同電路設計對於抗 SEE 能力的比較，以及不同製程對於抗 SEE 能力的差別探討。而短脈衝雷射光點大小控制的部份目前則是進行了文獻資料的蒐集，且分析了文獻上的實驗方式，並針對現有的架設找出可以對於控制雷射光點大小的部份進行了雷射架設的優化及改良，並且利用現有以及改良後的實驗架設針對



已經下線完回來的抗輻射晶片做脈衝雷射之照射研究，在雷射照射的部分完成抗輻射晶片之照射實驗之架構也進行了利用脈衝雷射之照射，有觀測到 SEU 效應，實驗結果也顯示了有使用抗輻射技巧的晶片可以成功抵抗 SEU 的發生，也驗證了雷射輻射組設平台在對於抗輻射電路設計的幫助上有不錯的效果。在小晶片製程探討的部分已經蒐集多個半導體業界異質整合與先進封裝技術的相關文獻，並分析異質整合製程可能出現的輻射效應，後續將與 TSRI 合作進行抗輻射小晶片異質整合技術開發，異質整合載板的部分，規劃採用成熟製程(如 180nm 或 90nm 製程)製作。

**海水銨 90 方法開發及海陸域樣品銨 90 初步調查****Method Development of Sr-90 in Seawater and Preliminary Investigation of Sr-90 in Sea and Land Samples**

(計畫編號：AEC111002)

龔得安¹ 葉宣琦² 連芸秀² 潘嘉吟³ 陳和賢²¹屏東科技大學食品安全管理研究所 ²屏東科技大學食品科學系³行政院原子能委員會輻射偵測中心

長半衰期放射性核種對生態環境的影響，目前受到環境科學工作者的極大關注，因為隨著時間的推移，這些長半衰期放射性核種將成為環境放射性危害的主要貢獻核種。難測核種銨-90 檢測費工費時又耗費化學藥劑，目前國內相關調查資料較少，且尚未建立海水銨-90 微量分析方法，本計畫將嘗試建立相關技術，以進行海陸域樣品銨-90 含量初步調查，協助完備海陸域相關放射性分析資訊，確保國人輻射安全。

As time goes by, these long half-life radioactive nuclei will become the main contributors to environmental radioactive hazards. Detecting the difficult-to-detect nuclear species strontium-90 is labor-intensive, time-consuming, and requires the use of chemicals. Currently, there are a lack of relevant investigation data on strontium-90 available in Taiwan, and an analytical method for detecting strontium-90 in seawater has not yet been developed. Preliminary investigation of the strontium-90 content can assist in the completion of relevant radioactive analysis information in both land and sea areas, thereby ensuring the radiation safety of the people of Taiwan.



壹、計畫目標

海洋放射性污染議題日益受到重視，本計畫目的為建立海水樣品銥-90 分析方法，並進行海陸域樣品之銥-90 含量初步調查，完備海陸域相關放射性分析資訊。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

- (一) 本研究建立海水中銥 90 之濃縮純化與分析方法：本研究建置海水中銥 90 之測定方法為利用草酸鹽沉澱海水中之二價鹼金屬後以發煙硝酸法及鉻酸鈉法除去樣品中大部分的鈣及鋇元素再經由銥釷分離後生成之碳酸銥計算回收率靜置 14 天後再次銥釷分離生成氫氧化釷後以低背景比例計數器計測。
- (二) 完成 5 件海水銥 90 分析以及 15 件海陸域生物樣品與淡水樣品：5 件海水選擇金門、東引、小琉球、龍洞及蘭嶼等海水試樣，詳細樣品資訊如表 1 所示，5 件海水活度分析結果為正常狀態或小於最小可測量值(Minimum Detectable Amount, MDA)。15 件海陸域生物樣品與淡水樣品共之銥 90 活性均小於 MDA。
- (三) 輻射專業人才養成：計畫團隊協同主持人龔得安老師、連芸秀、吳宇陽及戴琮旻完成輻射防護 18 小時教育訓練並順利取得合格證書；連芸秀亦於下半年度完成輻射防護 36 小時教育訓練後，並順利取得合格證書(圖 1)。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文

計畫成果分別參加 2022 年環境分析化學研討會以及食品科技學會



研討會，成果海報分別圖 2 與 3 所示。其中「海水中鋇 90 之濃縮純化與分析方法建立」為題獲得環境分析化學研討會優良論文獎(圖 4)。

參、展望

本計畫期間完成執行海陸域樣品(海水 5 件、海生物 5 件、土壤 3 件、農魚特產 2 件及淡水試樣 5 件)共計 20 件，並完整建立海水鋇 90 分析方法及執行分析方法確效。研究成果也同時發表於相關領域之研討會，獲得相關領域專家之認可與肯定。此計畫也培育相關放射化學專業操作人員，提升台灣相關放射化學專業操作之人才。本研究數據用於監測台灣地區海陸域樣品及周圍海域之鋇 90 含量分布，以協助台灣海陸域完備輻射背景數據與環境輻射安全。

表 1、111 年執行海水鋇取樣地點資料

海水取樣地點	深度(公尺)	取樣日期	取樣座標
金門	0-5	111.3.18	24.40,118.50
貢寮龍洞外海	0-5	111.2.11	25.30,122.30
蘭嶼	200	111.4.25	22.15,122.30
小琉球	200	111.2.26	22.00,120.00
東引	0-5	111.8.2	26.25,120.31

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表



圖 1、連芸秀輻射防護 36 小時輻射安全證書

圖 2、參加環境分析化學年會海報



圖 3、參加食品科學年會海報



圖 4、環境分析化學年會優良論文獎



輻射事件應變技術開發研究

Research on The Emergency-Response Technology for The Radioactive Events

(計畫編號：AEC111006)

鄧仁星¹ 袁明程² 林聰得²

¹ 中央氣象局 ² 核能研究所

本計畫執行工作包括：

1. 強化輻射應變技術。
2. 完備應變設備整備相關作業及其作業程序。
3. 放射性物質擴散分析能力建立。
4. 開發遠端遙控行動式輻射偵測平台、應變資訊平台。

The implementation of this project includes:

1. Enhance the radiation disaster response technology.
2. Complete operating procedures for the emergency equipment and preparation.
3. Establishment of radioactive material diffusion analysis capability.
4. Develop remote control mobile radiation detection platform and response information platform.



壹、計畫目標

今年計畫目標計有建置訓練研發中心展示室(下稱展示室)，提出輻射應變技術隊(下稱輻應隊)相關程序書精進建議；持續發展放射性物質擴散模擬分析能力，與輻射事件應變資訊平台（下稱資訊平台）功能；建置遠端遙控行動式輻射偵測平台（下稱偵測平台）夾取非破壞性檢測導管夾具；完成輻射偵測團隊課程與資訊平台及偵測平台使用教學。

貳、重要成果

一、強化輻射應變技術

111 年 10 月 6 日辦理輻應隊輻射隊訓練課程，對象為原能會各局處及所屬單位任務編組之輻應隊成員共 31 人，照片如圖 1。展示室併同訓練開始試運轉如圖 2。

二、完備應變設備整備相關作業及其作業程序

完成輻射彈事件出勤裝備中個人防護裝具及各式偵檢儀器、熱區初始範圍(未進行輻射或污染量測前)、熱區擴大劃分標準、初始室內掩蔽區域之修訂建議。

三、放射性物質擴散分析能力建立

今年以事先轉換完成之建物資料庫來取代內政部授予之建物原始檔，大幅度縮短模擬擴散分析所需時間，花費時間由數十分鐘縮短至 7 秒鐘到 6 分 45 秒不等，更符合緊急應變需求。另外新增國內 5 個重要人流匯集處之運跑模擬，做為平時準備參考。其中以台南市永樂市場附近的模擬輻射彈事件為例，附近建物多為 2 至 3 層矮建物，密集度很高。風向為東風時柱狀空間劑量結果，往風向下游方向累積濃度，由於



輻射彈位置西南側之永樂市場建物影響較大，且其建物為北東北-西南西走向，其擴散分布結果會有些偏折現象(如圖 3)。

四、建置遠端遙控行動式輻射偵測平台

利用夾爪上搭載之深度相機，完成箱體物件之圖像式夾取機能開發，使用圖像式物件辨識與定位架構，如圖 4 所示，可輔助人員遠端操控機械手臂，提升夾取成功率。完成管式夾爪功能，並增加電磁裝置做為輔助吸附功能，夾爪採快拆機構，可直接人力免工具進行調整。完成影像擷取功能，可將影像手動上傳雲端空間，以連結方式提供資訊平台進行影像回放功能，如圖 5 所示，也可利用載具區域網路進行影像串流功能。

五、發展輻射災害應變資訊平台

完成增訂之主要功能如圖 6，主要提供輻應隊於電子地圖上審視輻射彈爆炸事件優先偵測區域，與偵測結果資訊儲存與展現，以及出勤之簡訊通知等，提高應變效能。

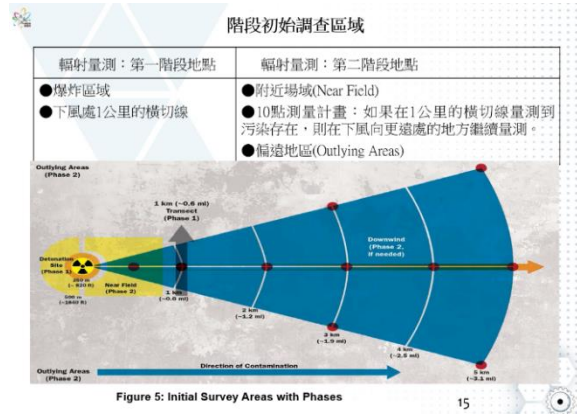
參、展望

輻應隊程序書關於輻射彈爆炸事件現場處置相關程序更新後，可融入訓練，持續進行細部討論。放射性物質擴散分析在運跑時，可在針對建物轉換的運算時進行平行化運算方法，壓縮時間。偵測平台建議未來建立網狀網路通訊傳輸配置，擴充操作範圍，適度增加操作訓練。資訊平台經輻應隊訓練實地操作後所得之建議，將納入未來修訂內容。

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表



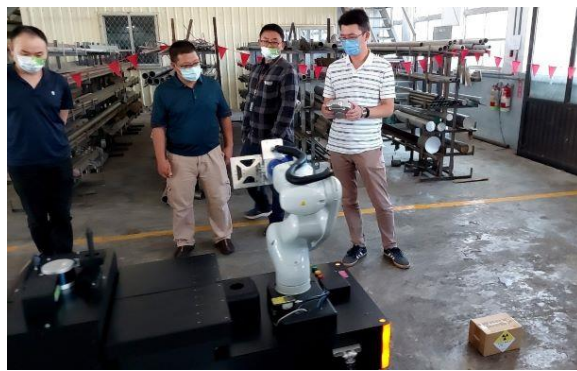
輻射彈爆炸事件情境模擬影片



輻射彈事件輻射量測區域示意圖



輻射偵測團隊作業模擬演練



偵測平台操作練習

圖 1、輻應隊訓練剪影



輻應隊 A 組學員合照



輻應隊 B 組學員合照

圖 2、展示室試運轉當日圖片

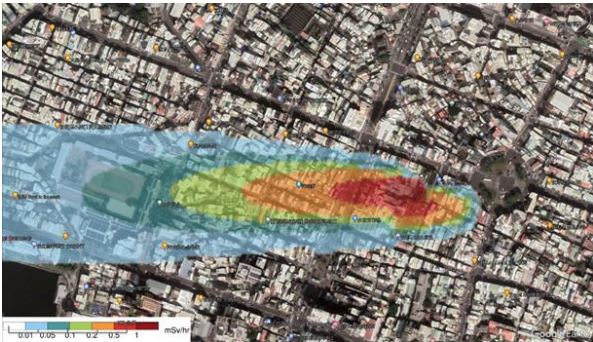


圖 3、模擬台南永樂市場輻射彈事件，風向為東風，核種為 Cs-137，15 分鐘累積空間劑量率分布(填色部分為單位為 mSv/hr)。

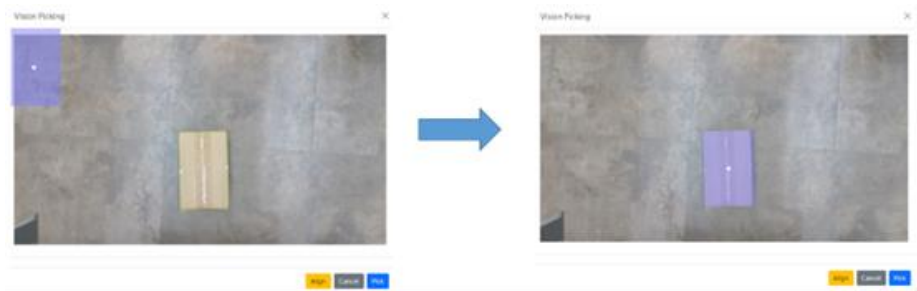


圖 4、偵測平台圖像視覺夾取-物件框選

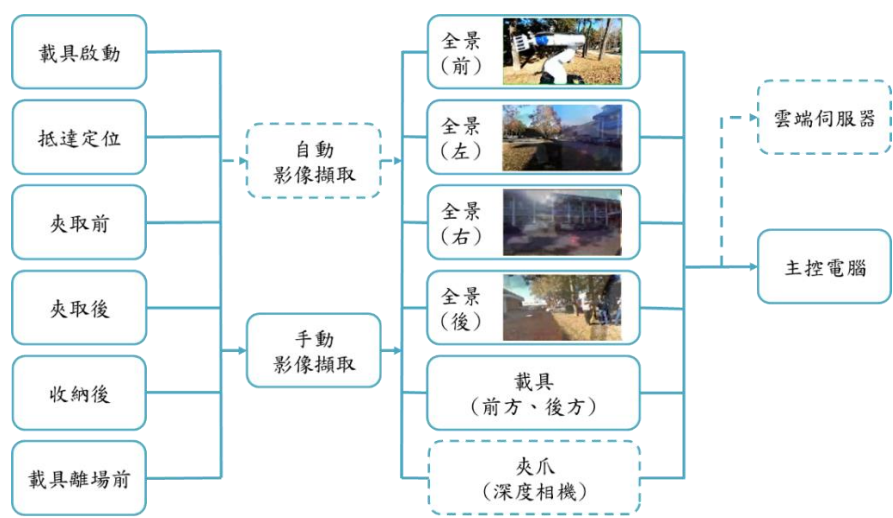


圖 5、偵測平台影像擷取流程圖



輻射彈事件 1 公里橫切線區



輻射彈事件鄰近區域偵測點



輻射彈事件 10 點測量計畫



「輻射劑量率」圖層以不同顏色標示輻射劑量率，點選標示後顯示數值、時間、記錄人員、儀器

簡訊通知

Step 1: 簡訊種類
☒ 出勤 ☐ 準備

Step 2: 組別

Step 3 發送名單:

組別	姓名	職稱	門號	簡訊內容	發送
新聞組	杜若婷	組長	0988000000	「A隊應變訓練」於「2022-10-06」於「25.0135650,121.457180」發生，您為「新聞組組長」，請點選「http://t.host.tw/m/」登入成功後，前往「」集結，您的直屬長官為「李錫恩」，手機號碼為「0988000000」。	☒
新聞組	新聞測試1	組長		「A隊應變訓練」於「2022-10-06」於「25.0135650,121.457180」發生，您為「新聞組組長」，請點選「http://t.host.tw/m/」登入成功後，前往「」集結，您的直屬長官為「李錫恩」，手機號碼為「0988000000」。	☒
新聞組	何瑾	組員	0988000000	「A隊應變訓練」於「2022-10-06」於「25.0135650,121.457180」發生，您為「新聞組組長」，請點選「http://t.host.tw/m/」登入成功後，前往「」集結，您的直屬長官為「李錫恩」，手機號碼為「0988000000」。	☒
新聞組	蔡念純	組員	0988000000	「A隊應變訓練」於「2022-10-06」於「25.0135650,121.457180」發生，您為「新聞組組長」，請點選「http://t.host.tw/m/」登入成功後，前往「」集結，您的直屬長官為「李錫恩」，手機號碼為「0988000000」。	☒
新聞組	鄭凱文	組員	0988000000	「A隊應變訓練」於「2022-10-06」於「25.0135650,121.457180」發生，您為「新聞組組長」，請點選「http://t.host.tw/m/」登入成功後，前往「」集結，您的直屬長官為「李錫恩」，手機號碼為「0988000000」。	☒

提供具權限之使用者，勾選成員通知、編輯簡訊發送功能；簡訊內容自動帶入：事件名稱、發生時間、地點、收簡訊者輻應隊職稱、平台現場端連結、集結地點、直屬長官與手機

圖 6、資訊平台主要增訂功能

**輻射災害應變資源建置與實務管理之研究****Resources Establishment and Practical Management of Radiation Emergency
Response**

(計畫編號：AEC111007)

馬士元¹ 盧彥佑²¹ 銘傳大學都市規劃與防災學系 ² 瑞鉅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，將於民國 112 年辦理模擬演練 1 場次，以驗證中央與地方政府境外核災應變能力。

本計畫針對放射性物質意外情境研擬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。設計以「放射性物質運送意外」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 collects the planning management and the latest situation of recovery and rehabilitation after the Fukushima incident in Japan, and develop overseas nuclear accident scenarios and drill script which will be used as simulation drill in 2023, to verify the ability of central and local governments to respond to the overseas nuclear accident.



This project develops suggestions for first responders' emergency procedures and video scripts about radioactive material accident scenarios and holds radiation disaster prevention and rescue workshops for local governments. Moreover, establish first responders' radiation emergency response exercise training systems.

This project designed a short vision of "radiation material transportation accident," 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，本研究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，以及針對地方縣市政府第一線應變人員辦理相關訓練、建置訓練系統等，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氚廢水之處置

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，後續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，並透過各分析機構與 IAEA 間數據比對及當地相關人士之參與，進一步提升其客觀性及透明度。

(二) 日本福島返鄉現況

根據 2022 年 7 月 26 日公布的「避難指示區域的現狀與展望」，目前已解除 3 個市町村之所有特定復興再生據點區域，包含葛尾村、大熊町及雙葉町等；預計於 2023 年春季解除浪江町、富岡町及飯館村的所有特定復興再生據點區域。

(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 2022 年 4 月 8 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 58 處。污染狀況重點調查地區之市町村，規劃 1,040 處臨時儲存場，其中目前仍使用中的臨時儲存場共有 24 處。

(四) 賠償金統計

東電於 2022 年 10 月 28 日公布之統計，個人之賠償申請件數約為 1,147,000 件、公司或自營商等之賠償申請件數約為 546,000 件。

目前支付總金額約為 10 兆 4,922 億日圓，該金額尚有可能持續上升。

二、放射性物質運送意外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



以「核醫藥物（非密封放射性物質）或非破壞性照相檢驗業者使用之密封放射性物質於運送過程中發生車禍事故」為想定，解析地方政府第一線應變人員進行災害辨識、通報原能會核安監管中心及應變處置流程。

三、輻災防救主題圖文懶人包

以「在路上跑的放射性物質」為標題，針對放射性物質運送之基礎知識、放射性物質運送意外應留意事項等進行說明，大致以「問與答」之方式呈現文案，製作圖文懶人包，使圖文資訊呈現更為精準。

四、境外核災情境與演練腳本研擬

境外核災兵棋推演主要演練對象設定為各中央部會及離島三縣（金門縣、連江縣、澎湖縣），將於 112 年辦理模擬演練，驗證災情查報與掌握、國際請求支援、掌握當地國人情況、邊境管制作為、記錄與蒐集因境外核災致輻射污染而遭受之損失等處置重點。

五、地方政府輻災防救講習

藉由相關課程，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，課末並藉由情境模擬推演分組討論，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」等 4 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，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，提升臨災韌性。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。



109 年至 111 年北部地區輻射災害檢驗分析實驗室之能力精進計畫
Advancement of radiation measurement and analysis laboratory for radiation
disaster in northern region of Taiwan from year 109 to 111
(計畫編號：AEC111008)

吳杰 賴韻婕

國立陽明交通大學

輻射災害發生時，會使得周遭環境受到放射性物質污染，為提升核子事故引致災害之應變能力與保護民眾生活環境安全，行政院原子能委員會委託國立陽明交通大學持續精進北部地區輻射災害檢驗分析實驗室，以整備核子事故引致輻射災害的應變能力。本年度完成建立環境水樣難測核種銥-90 之定量分析技術，並完成標準前處理作業及其定量流程。此外，本實驗室亦參加 111 年度國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)之放射性核種能力試驗，並以高分 A 級通過，驗證實驗室在加馬能譜分析以及銥核種活度分析之檢測能力。接應本年度社會面臨福島食品相關議題，實驗室也接獲衛生局之委託，朝向自給自足之目標邁進。

When a radiation disaster occurs, it can result in contamination of the surrounding environment with radioactive substances. In order to enhance the emergency response capability and protect the living environment of the public from the hazards caused by nuclear accidents, the Atomic Energy Council of the Executive Yuan has commissioned the Radiation Measurement And



Analysis Center at National Yang Ming Chiao Tung University to continuously improve the response capability to radiation disasters in the northern Taiwan. In the current year, the laboratory has successfully established quantitative analysis techniques for the challenging radionuclide strontium-90 in environmental water samples, and completed standard pre-processing operations and quantitative procedures. In addition, the laboratory also participated in the International Atomic Energy Agency (IAEA) Radiological Exercise for 2022, and achieved a high score of A grade, verifying the laboratory's detection capabilities in gamma spectrometry and strontium nuclide activity analysis. In response to the food safety concerns related to Fukushima in the current year, the laboratory has also been entrusted by the Department of Health to work towards self-sufficiency in analysis capabilities.

壹、計畫目標

目前國內針對核子事故後的民生消費食品主要藉由加馬能譜分析系統計測是否含有碘-131、銫-134 與銫-137，而核子事故後亦會外釋其他放射性核種，其中銓-90 最值得關注，因銓-90 半衰期長達 28.8 年，且在人體內累積的生物半衰期平均約 18 年。故應建立適切的銓-90 前處理與檢驗分析系統，使國內於核子災害事故後的應變與檢測之能力能更為精進且完善，以提供更全面性的環境輻射監測分析能力服務。

貳、重要成果

本實驗室以化學沉澱法與離子交換法有效達成銓離子的純化，並優化前處理標準作業程序。在執行試樣前處理離心步驟時發現，將樣品再次離心有助於提高銓-90 之回收率，因此以進行二次離心作為試樣前處理之



標準流程。實驗室利用鋇-90 衰變成釷-90 之特性，偵測謝倫可夫(Cerenkov)輻射，再由公式轉換而得鋇-90 之活度，由實驗結果得知，如圖 1，樣品在第 13、14 天後計測數據趨於穩定，達成鋇-釷平衡的狀態，因此將此訂為樣品配製標準作業程序。同時為消除鋇載體溶液因時間造成溶質變化之誤差進行鋇載體之標定，確保其再現性與有效性。

在鋇核種量測方面，實驗室使用 Tri-Carb 4810 液態閃爍計數器進行檢測，並利用鋇-90 射源建立偵測效率以作為換算基礎，同時驗證此量測方法之準確度，記錄如表 1。在量測時間最佳化分析方面，實驗室利用比對不同量測時間紀錄計測值進行觀察，由實驗結果表 2 可知，測量時間 250 分鐘時，MDA 已遠小於環境基準之規範，故以此參數作為樣品的量測時間。此外，實驗室透過調整儀器能窗大小，以背景與樣品的計數值之比值作為判斷值，此比值越大表示計測到的背景值越低，而樣品活度計數值越高，為期望達成之最佳狀態，實驗結果如圖 2，由實驗結果可知能窗範圍在 0~15 keV 時比值最大，因此決定以此參數作為液態閃爍計數器之參數設定。綜述以上，實驗室完成建立一套完善且具系統性之鋇-90 量測程序。

在國內外能力試驗方面，本年度參加一場國際原子能總署之放射性核種能力試驗，所有試驗結果皆符合標準合格通過，藉此驗證實驗室在加馬能譜分析以及鋇核種活度分析之檢測能力。在對外服務方面，為因應政府開放福島食品相關議題，實驗室接受各大媒體之訪問與專訪，增加實驗室的曝光度，達成實驗室之業務推廣，因此接獲食品放射性檢測之委託案件，逐步邁向自給自足之目標。而在教育宣導活動方面，實驗室參與兩場園遊會擺攤活動，如圖 3、圖 4，強化國人對於輻射防護的觀念，並且配



合本校本系舉辦之「2022 生物醫學影像與科技探索營」營隊課程，活動照片如圖 5，啟發學生對放射領域的興趣，推廣輻射安全的基礎教育與實驗室業務。本年度亦持續參與核安第 28 號演習，以觀摩學習的方式，使北部備援實驗室更加完備。

參、展望

本實驗室將持續維持輻射度量的能力，透過參與能力試驗精進量測技術水平，同時驗證實驗室建立檢測流程具備相當的水準，進而完善國內核子事故的應變能力。除此之外，為厚實國內放射性分析技術所需之應變儲備量能，定期採集北部電廠周圍之環境試樣、食品以及飲用水源等樣品，執行環境試樣分析技術之定期測試與演練，共同保護國民之輻射安全。

表 1、樣品計測值與理論值比對紀錄表

理論活度 (Bq/L)	空瓶重 (mg)	蒸乾後總重 (mg)	回收率(%)	偵測效率(%)	測量cpm	測量dpm	測量活度 (Bq/L)
9407 ± 282	12064.3	12077.3	52.4%	64.8%	18551	54571.5	9095 ± 1121
4736 ± 142	12183.5	12199	62.5%	64.8%	12017	29648.7	4941 ± 572
942 ± 28	12051.3	12066.6	61.7%	64.8%	2482	6203.72	1034 ± 127
90 ± 3	12193.1	12208.6	62.5%	64.8%	283	698.227	116 ± 14

表 2、不同測量時間與 MDA 紀錄表

測量時間 (min)	30	60	100	250	500	1000
MDA (Bq/L)	0.22	0.11	0.063	0.026	0.013	0.0064

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表

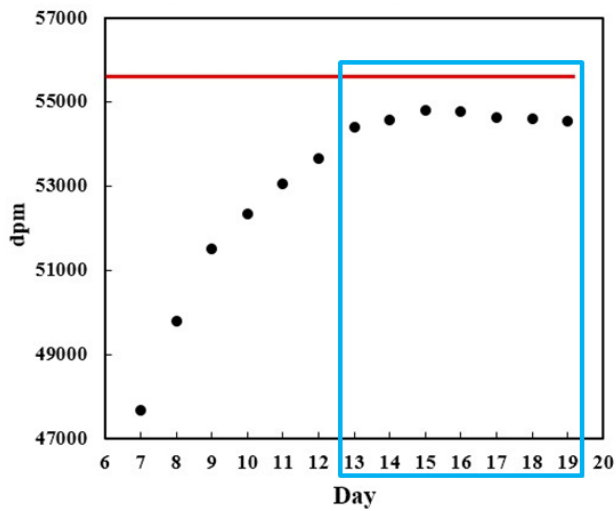


圖 1、銻-鈇平衡實驗記錄圖

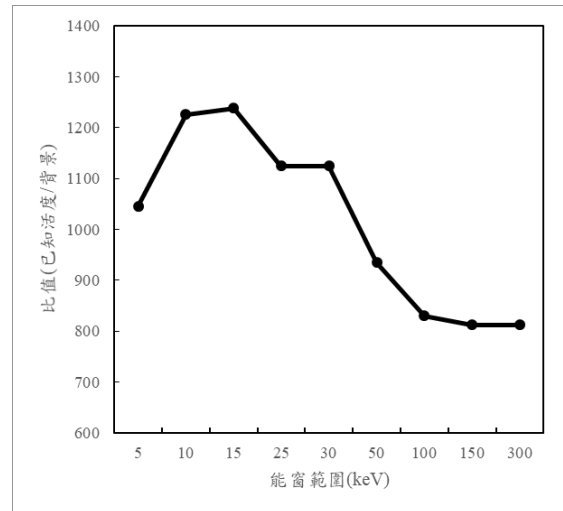


圖 2、不同能窗範圍與樣品計數值/背景值之比值關係圖



圖 3、111 年 1 月 15 日台北市 119 防災宣導活動側拍照



圖 4、111 年 9 月 17 日新北市所舉辦之 111 年國家防災日防災教育宣導園遊會



圖 5、「2022 生物醫學影像與科技探索營」活動側拍照



111 年核設施核子保安作業精進研究

The Improvement Study of Security Implementation of Nuclear Facilities in 2022

(計畫編號：AEC111009)

蔡智明 馬紹仕

核能研究所

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，本文為 111 年研究成果。

The objective of this two-years project is to continuously improve the national capability of protecting the nuclear facilities and materials against the threat of unauthorized removal or sabotage. The study is focus on the regulation and implementation activities with regard to the security and cybersecurity of nuclear facilities in Taiwan. Through the researches in 2022, some opinions on improving the protection performance are 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)(文後簡稱 ITC 國際核子保安訓練)，提出精進防護成效之看法。

貳、重要成果

本研究包含 5 個工作項目，111 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。本計畫研析該文件，輔助完成我國 NSCOE 建置藍圖規劃草案，並完成中譯版草案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

本計畫於 111 年實地參加核能一廠、核能二廠與核能三廠核子保安暨緊急應變整備業務視察作業、清華大學 THOR 核子保安暨緊急應變整備業務視察及核一廠與核二廠核子保安及反恐應變桌上兵推演練共 6 場活動，針對核子保安與資通安全作業精進提出 7 點看法，供原能會參考。



(三) 舉辦「2022 核設施核子保安作業精進研討會」

為精進我國核子保安從業人員相關專業知能，原能會透過本計畫，於 111 年 9 月 27 日在公務人力發展學院福華國際文教會館舉辦「2022 核設施核子保安作業精進研討會」，共有內政部警政署保二總隊、清華大學、台電公司(含各核能電廠)、原能會等人員約 40 位參加，研討議題涵蓋：IAEA 對於成立國家核子保安支援中心的建議、亞洲區 NSCOE 介紹、全球核子保安績效評量指標、核設施資通安全訓練用測試設備使用經驗分享，及核設施儀控系統之電腦安全等，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，以及學界、業者與管制機關相互溝通、交流之目的，圖 1、圖 2 為活動照片。

(四) 參加「核子保安應變武力個案研究」視訊訓練

美國能源部(Department of Energy, DOE)國家核子保安局(National Nuclear Security Administration, NNSA)於 111 年 11 月 16 日至 18 日舉辦「核子保安應變武力個案研究」視訊訓練，本計畫透過美方核子保安領域專家講述歷史上 4 個重要的保安事件案例(96 年及 97 年哈瑞溫斯頓巴黎珠寶搶劫案、104 年 11 月比利時核能科學家監視案、101 年 7 月美國能源部 Y-12 核設施入侵案、96 年 11 月南非佩林達巴核電廠保安事件)，結合其他工作項目的成果提出 8 點看法。

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 IAEA-NSS-33，本計畫於 111 年完成中譯版草案，預期於 112 年完成



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「核子保安(資安)文化」視訊訓練

美國 DOE/NNSA 於 111 年 6 月 7 日至 9 日舉辦「核子保安(資安)文化」視訊訓練，本計畫結合其他工作項目的成果提出 1 點看法。

三、核子保安卓越中心建置藍圖規劃

(一) 收集亞洲 NSCOE 相關資料

本計畫針對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, ISCIN)、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)的相關資料，蒐集這些中心的沿革、宗旨與任務、組織架構、活動與營運成效等資訊，用以規劃我國 NSCOE 藍圖。

(二) 我國 NSCOE 建置藍圖初步規劃

本計畫根據日本 ISCIN 與南韓 KINAC/INSA 資料蒐集成果，以及國內短、中、長期需求，初步規劃 NSCOE 三階段建置與營運工作：

- 1.第一階段是發展教育與人員培訓、政策研究及國際交流與合作等功能；
- 2.建立研究發展(R&D)、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；
- 3.將前兩階段發展之保安技術與經驗推廣至其他關鍵基礎設施。再考量國內政策與可用資源，本計畫初步建議採用虛擬模式(virtual model)較合適，由核研所代為推動及長期營運



NSCOE 功能。

四、協助辦理 NTI 核子保安評比相關事宜

本計畫針對 109 年全球保安績效評量指標全球評比報告新增之放射性射源保安評估(Radioactive Source Security Assessment)方法進行研析，經彙整後提供管制單位參考，建議提早自行評核國內放射性射源保安管制與作業成效。

五、整理 ITC 國際核子保安訓練教材

(一) 整理 ITC-28 國際核子保安訓練教材

本計畫針對 108 年第 28 屆 ITC 國際核子保安訓練，整理課堂講授 32 堂之教材，課程設計是依循設計評核程序概念(Design Evaluation Process Outline)(如圖 3)，進行核設施/核物料實體防護系統(Physical Protection System, PPS)之需求定義、設計、評核三個基本階段的介紹與演練，並在實務上透過重複檢視與評核 PSS 的設計與性能，確保核子保安成效可以與時俱進。

(二) 舉辦「ITC 國際核子保安訓練經驗分享與討論座談會」

為深入了解 ITC 國際核子保安訓練，原能會透過本計畫，於 111 年 11 月 28 日在台北舉辦「ITC 國際核子保安訓練經驗分享與討論座談會」，邀請國內相關核子保安從業人員共同參與，由曾接受訓練的人員分享受訓經驗與在職實務經驗，透過討論與問卷方式共同研議建立本土化訓練課程之方案及可行方式。圖 4、圖 5 為活動照片。

參、展望

本所擬依據計畫書 112 年規劃，延續 111 年工作與成果，完成 IAEA-

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表

TDL-010 中譯版與 IAEA-NSS-33 中譯版等工作，並達成各工作項目預期目標，例如完成我國 NSCOE 建置規劃。



圖 1、研討會活動照片(合影)



圖 2、研討會活動照片(綜合座談)

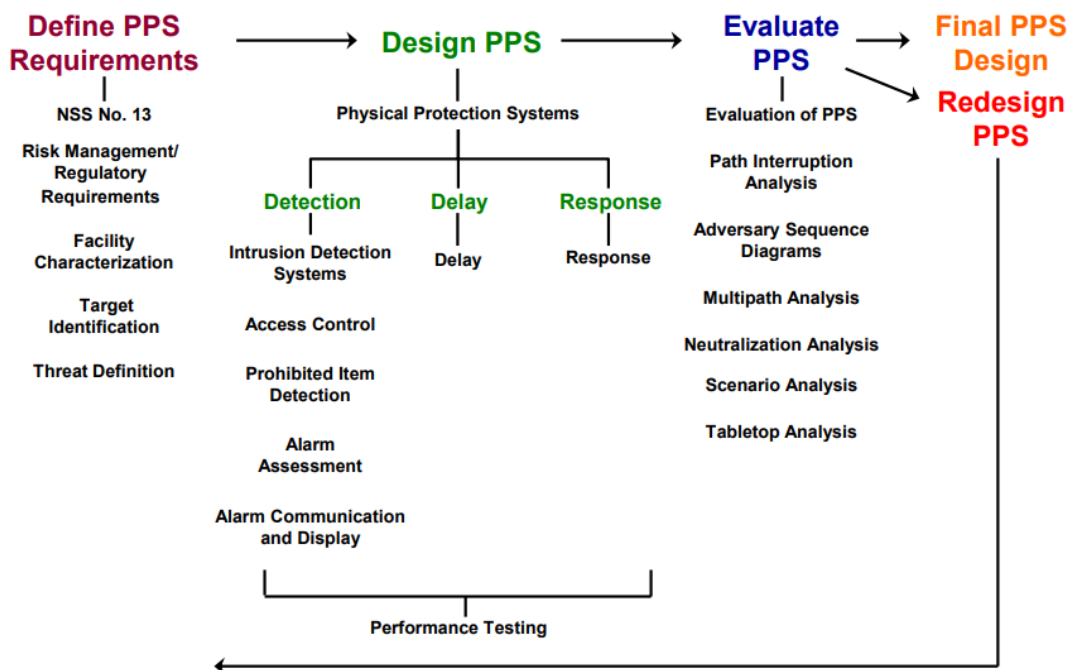


圖 3、設計評核程序概念

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表



圖 4、座談會活動照片(演講)



圖 5、座談會活動照片(討論)

場 5—核能與除役安全科技領域

111 年用過核子燃料乾貯護箱內輻射場分布及殘餘水對燃料護套影響研析	1
111 年用過核子燃料最終處置設施安全評估及設計之審驗與管制技術研究	8
111 年低放射性廢棄物坑道處置源項與工程審驗技術研析	15
111 年度核電廠除役期間除污策略技術彙整與安全評估及相關特性分析	22
111 年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析	30
核子反應器設施安全與除役前期作業管制實務研究	35



111 年用過核子燃料乾貯護箱內輻射場分布及殘餘水對燃料護套影響研析

A combined study of radiation, thermal hydraulic, and residual water chemistry
on the fuel cladding behavior of spent nuclear fuels in dry storage casks

(計畫編號：111FCMA001)

許榮鈞¹ 王美雅² 曾永信² 賴柏辰¹

¹清華大學核子工程研究所 ²清華大學原子科學技術發展中心

本研究結合蒙地卡羅模擬軟體 SCALE/MAVRIC、計算流體力學工具 FLUENT 以及自行開發之輔助分析工具，建立具有評估輻射遷移、熱水流模擬、輻射分解及再結合分析能力之整合方法，可用於探討殘餘水對燃料護套的影響研析，提升對於用過核子燃料護套在中期乾式貯存可能腐蝕風險的了解。本研究選擇以 NAC-UMS 為乾貯護箱標的，有系統地進行各種分析模式的建立與案例的計算，深入討論相關議題與影響。研究結果指出即使考慮各項保守之射源強度、含水量與貯存溫度等條件，用過核子燃料於乾貯期間之潛在氧化因子皆遠小於運轉與溼式貯存時期，並無破壞燃料護套完整性之疑慮。

In order to evaluate the potential corrosion of fuel cladding during interim dry storage period, this study combined the Monte Carlo software SCALE/MAVRIC, Computational Fluid Dynamics (CFD) toolkit FLUENT, and some self-developed codes to establish a methodology with the capability to evaluate radiation transport, thermal-hydraulic, and radiolysis and recombination mechanisms. The NAC-UMS cask model was selected for



demonstration in this project. The results confirmed that, even in conservative conditions of radiation sources, residual water quantities, and storage temperatures, the potential oxidation on the cladding of spent nuclear fuels during dry storage is considerably less than that in routine operation or wet storage period, ensuring the integrity of spent nuclear fuels during long-term storage.

壹、計畫目標

本研究結合「輻射遷移」、「熱流」與「輻射分解及再結合」分析技術，用以評估乾貯護箱於標準乾燥作業後仍殘留有假設性水分時，因中子與加馬輻射作用之下，是否因為輻射分解與再結合效應而使護箱內部產生氧化還原反應並對於燃料護套完整造成影響，整體研究流程與使用之工具如圖一所示。為達成此一目的，本研究依技術關聯性，將此研究工作劃分為兩個子計畫來執行。其中子計畫一係利用 SCALE/MAVRIC 分析程式針對護箱進行不同幾何細節的建模，再搭配平均與真實裝填燃料分區之源項以探討不同模型假設對於護箱內外輻射場之影響，並提供可靠之中子及加馬射線劑量分布作為子項計畫二輻射分解與再結合分析之輸入參數。子項計畫二則是計算流體力學進行護箱熱流場分析、殘餘水評估以及相對溼度計算外，亦將結果進一步轉換對應之流路模型，並匯入子項計畫一所提供之輻射場分布，再行以自建輻射分解及再結合技術進行氧化、還原劑之評估，並作業護套氧化腐蝕之潛在可能評估。

貳、重要成果

1. 本研究建立乾貯護箱詳細內部構造模擬與分析能力，以



SCALE/MAVRIC 程式建構二種乾貯護箱的幾何模型(均質化與詳細的密封鋼筒)，以及二種裝載燃料的射源模型(平均射源與 56 束個別射源)，藉以探討護箱模型差異對於後續輻射場分布的影響。乾貯護箱內外詳細的中子與加馬射線劑量分布並非安全分析報告所必須，但相關資訊與研究經驗可以強化對於安全分析所使用假設的認識，提升分析與審查品質。

2. 如圖 3 與 4 所示，本研究完成詳細密封鋼筒建模，以及考量 56 束用過燃料的排列造成非均勻射源的效應。若考慮均質化密封鋼筒且裝載平均源項(Model 1)最為保守；使用具燃料束結構的詳細密封鋼筒模型，若假設裝載平均源項(Model 2)其結果亦傾向保守，相對於最貼近真實的模型(Model 3)而言；詳細密封鋼筒模型加上考慮實際裝載之個別燃料束源項的案例建模困難且計算費時，但其評估結果可用於量化相關假設引發的差異，並與未來現場實測進行有意義的比較。
3. 經計算流體力學就乾燥作業產生之燃料溫度分布本研究評估所得之護箱內保守殘餘水量如表 1 所示，其結果顯示只有同時考慮低熱負載與高燃耗之非實質裝載條件，方有可能出現相對溼度大於氧化閾值(20%)之狀況。且利用 NRC 報告中所載之評估模式求得之貯存期間(20 年)氧化層厚度亦僅有 $0.04\mu\text{m}$ 。
4. 進一步將子項計畫一所獲得之加馬、中子輻射場，以及子項計畫二以計算流體力學求得之溫度場及流速分布(如圖 6(a)所示)匯入自建之水化學分析模式後，即可獲得各處之氧化劑與還原劑分佈，其中作用相對較強之氧化劑(過氧化氫)之分佈顯示，乾貯護箱內即使殘餘有若干水汽，但所造成之氧化劑濃度仍較溼式貯存遠低近 3 個數量級。結果



可證採用乾式貯存之用過核子燃料暫無需顧慮貯存期間護套潛在之劣化議題。

參、展望

透過結合輻射遷移、熱流分析及輻射分解與再結合分析技術，本研究建立可對燃料護套在乾貯期間受殘餘水影響進行量化評估之技術。研究成果可為國內未來乾式貯存設施於管制、審查乃至民眾溝通，提出具體學理與佐證資料。未來研究方向建議對於少數特殊性議題(例如破損燃料相關處置與分析)加強研究，本團隊亦擬著手進行其分析模式靈敏度、源項合適性、以及安全分析常見簡化合理性與保守度等進行深入探討，以利提升國內用過核子燃料乾貯安全分析技術與審查品質。

表 1、分析所得護箱內部殘餘水及其對內部環境之溼度表現

	含水量	含水量(mole)		絕對溼度(mg/L) (相對溼度 RH)			
		14kW	7kW	14kW	7kW	14kW	7kW
燃耗	35	10.38	66.67	32.7	201.1	0.46	11.5
	45	19.44	121.22	58.6	365.7	0.84	20.8

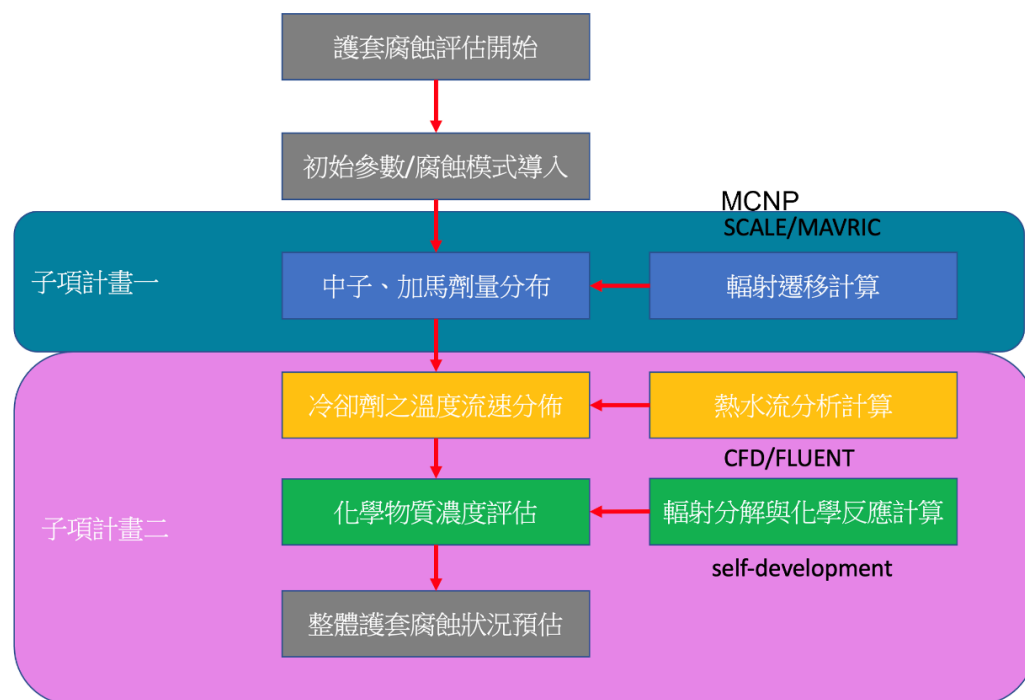


圖 1、本研究各項分析的整體流程與關聯性

(a)

(b)

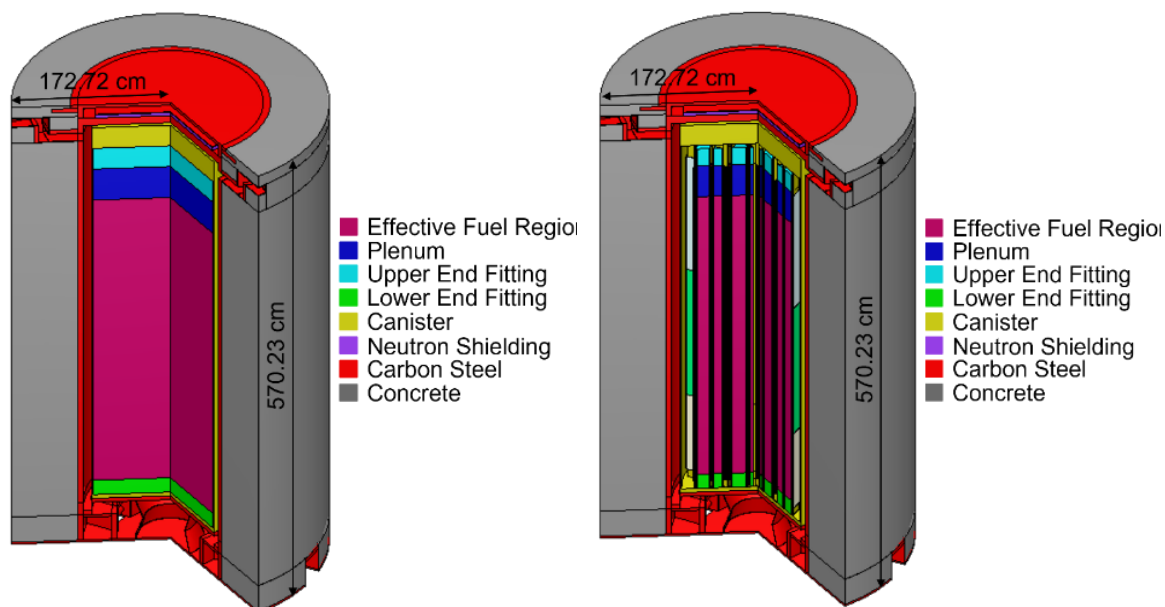


圖 2、NAC-UMS 乾貯護箱輻射遷移分析模式：(a)均質化燃料、(b)詳細燃料束結構

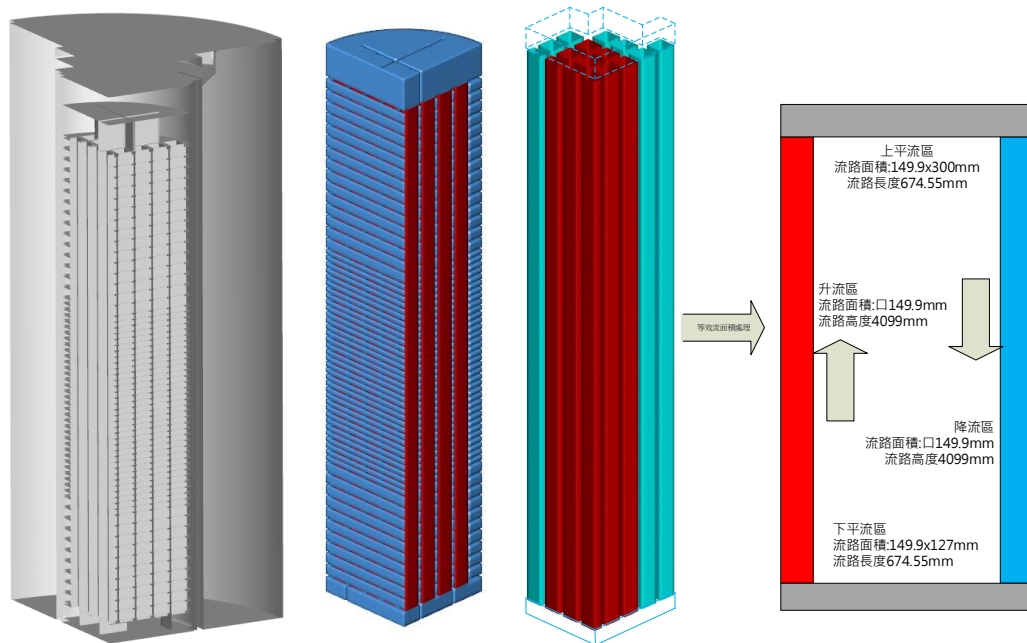


圖 3、整合計算流體力學與自建分析技術之熱流場與氧化、還原劑分布
計算技術

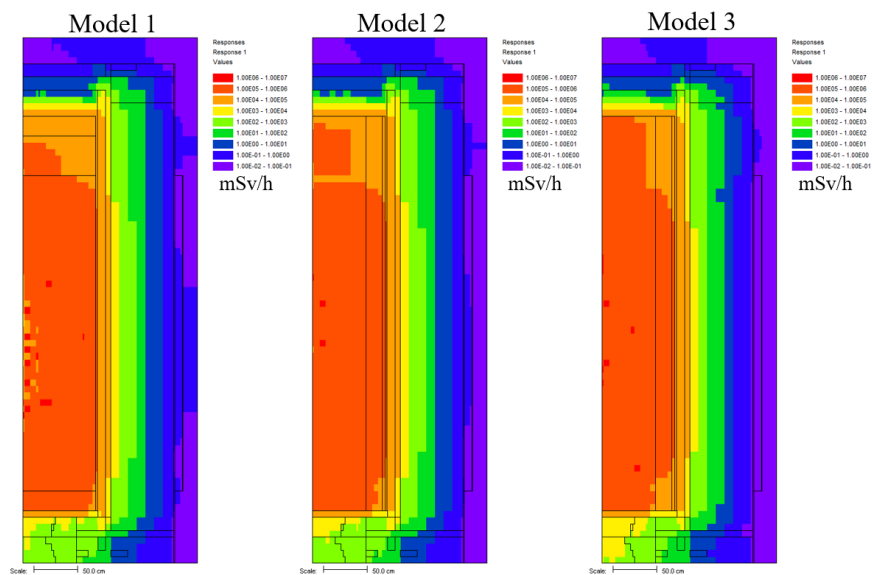


圖 4、三種模型計算所的護箱內外輻射劑量率的分布

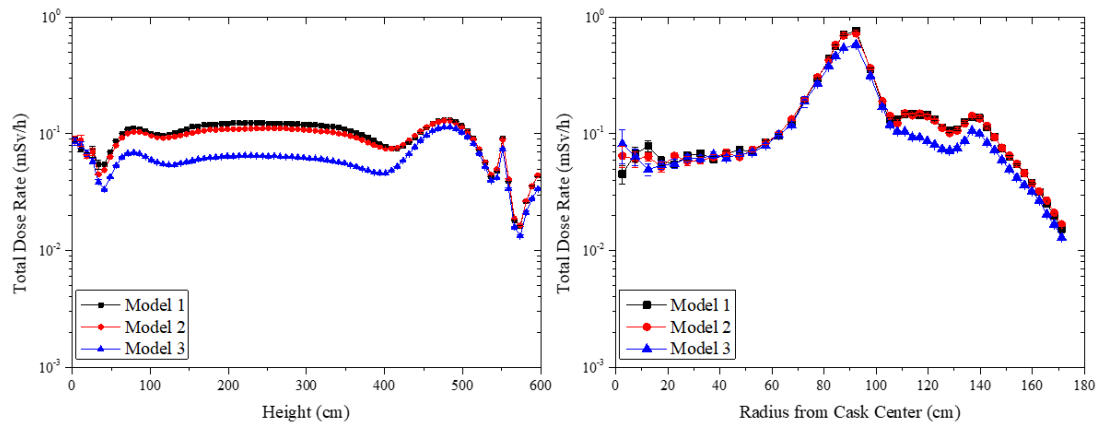


圖 5、三種模型對於護箱表面輻射劑量率分布的比較

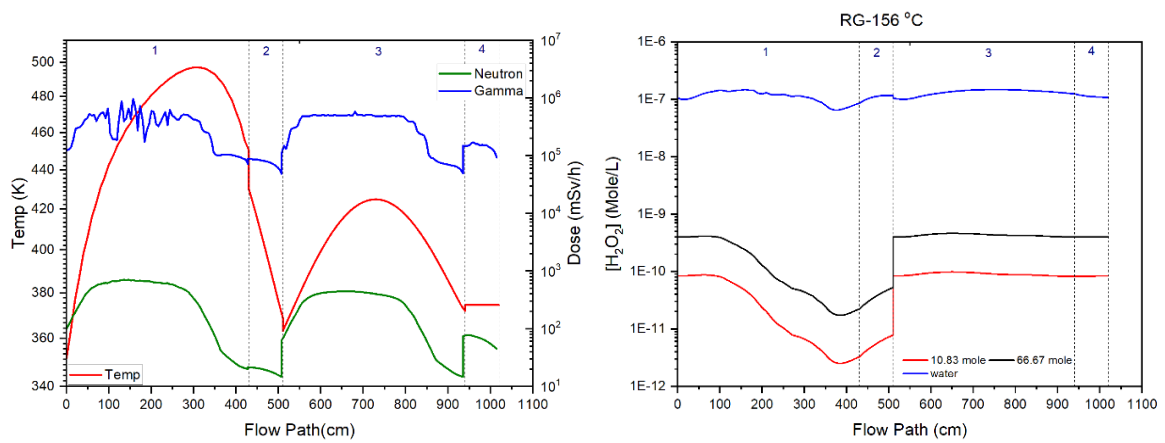


圖 6、(a)輻射分解與再結合分析條件；(b)所得過氧化氫分布



111 年用過核子燃料最終處置設施安全評估及設計之審驗與管制技術研究

Study on the Regulation, Review, and Verification of the Safety Assessment
and Design of the Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel (2022)

(計畫編號：111FCMA003)

張瑞宏¹ 黃偉慶¹ 楊樹榮²

¹國立中央大學土木工程學系 ²國立屏東科技大學土木工程學系

本計畫目的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，發展我國用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則之內容，分年完成我國高放最終處置安全分析報告導則之研擬工作。

本計畫針對 109 年研究計畫所規劃之用過核子燃料最終處置安全分析報告導則章節內容，彙整國際組織提出之高放最終處置有關安全證案之指引或導則，以及主要核能國家高放廢棄物地質處置設施之安全策略、安全要求與技術要項、及高放地質處置安全分析報告審查案例等資訊，研擬我國用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則之「安全評估」與「品質保證計畫」兩專章，同時提出未來審查要項之建議。另外，針對用過核子燃料地質處置設施安全評估所需的重要技術項目，進行實驗與模擬成果之平行驗證，包括高放處置設施遠場熱傳導分析與國際合作計畫母岩裂縫水力影響案例之平行驗證、鹼性環境下沖蝕對緩衝材料流失量與回脹性能折損評估等重點工作，以掌握處置設施安全評估工作之審查



重點，支援審查驗證技術，並提升國內相關管制技術與審查能力。

The geological disposal program for spent nuclear fuel in Taiwan has entered into the second phase of identifying potential areas for a repository site, started from year 2018. Also, the government of Taiwan has placed “the promotion of legalization process for final disposal facility for high-level radioactive wastes” as one of the specific goals in the “Taiwan Sustainable Development Goals” declared in 2019. Therefore, the development of the guide for the safety analysis report for the disposal facility becomes essential.

This project is to 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 relevant information, a draft guide of the safety analysis report for geological disposal facility can be devised for Taiwan.

In addition to the preparation of the guide for geological disposal facility, a couple of verification tasks on important safety features of the geological disposal facility are included. 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

原能會放射性物料管理局為強化管制技術以執行安全論證報告及各項研究成果審查工作，需對高放最終處置之管制要項及技術發展重點持續進行相關研發工作。依台電公司「高放處置計畫書(2018年修訂版)」之



規劃，目前我國高放處置計畫已進入第二階段「候選場址評選與核定(2018 - 2028 年)」工作。

為完備我國用過核子燃料最終處置相關法規，109 - 110 年物管局已進行「設施之設計基準」、「設施之建造」、「場址之特性描述」及「設施之運轉」等章節之研析，111 年度計畫重點將持續上述導則(草案)研究工作，針對安全分析報告導則「設施之安全評估」(含預期之意外事故評估)與「品質保證計畫」等章節，研擬專章條文並提出審查要項建議，以逐步完備安全分析報告導則(草案)內容；同時針對最終處置重要議題，發展自主試驗與數值模擬之能力，以提升國內相關審驗技術為目標。

貳、重要成果

子計畫一：用過核子燃料最終處置設施安全評估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，包括國際經濟合作暨發展組織(OECD)所屬核能總署(NEA)所發表的 6923 號「放射性廢棄物地質處置設施安全評估方法」報告研析及審查要項建議撰擬，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專責機構或管制機關所公開的法規、安全要求、安全證案報告、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，並作為研擬我國安全分析報告導則內容之參考依據，同時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「設施之安全評估」及「品質保證計畫」兩專章章節架構與審查要項建議，及專章條文



與說明內容之研擬，以延續 109、110 年計畫之成果。

子計畫一研究團隊透過內部分組討論與定期之工作會議，同時藉由舉行線上座談會，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，並彙整專家意見及建議內容，進行高放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則專章內容之研擬。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；所提出的設施之安全評估及品質保證計畫專章條文草案，足以作為持續發展安全分析報告導則各專章的範本，有助於逐步完成安全分析報告導則完整內容，完備我國放射性廢棄物相關管制法規。

子計畫二：高放最終處置遠場熱傳導分析與國際合作計畫母岩裂縫水力影響分析案例之平行驗證

子計畫二係針對高放最終處置遠場熱傳導分析之平行驗證計算、國際合作計畫母岩裂縫水力影響分析案例之平行驗證計算、多孔處置設施間距及通風效應影響分析。首先，鑑於用過核子燃料所產生大量熱能係藉由天然母岩障壁進行隔絕，為觀察熱載重對於整個母岩區的影響，在規劃階段，必須針對處置場遠場進行大尺度且長時間進程的熱傳導行為分析。因此，參考瑞典或其他國際評估報告所提供遠場設置的設計概念，針對熱傳導效應分析，進行熱傳導效應之數值模擬驗證，探討處置場遠場溫度分佈狀況。其次，依據 DECOVALEX 計畫中針對裂縫影響效應分析所提供的指定工作任務，在特定幾何條件下建立同樣配置之數值模型，使用主要案例進行耦合運算之平行驗證，並且進一步針對處置相關之影響參數對於工程障壁的溫度及水力特性進行影響分析。此外，處置罐的



埋設方式主要採多排多孔的方式進行作業，為了解平行處置隧道的相互影響，進行處置場間距對溫度及飽和度場影響的數值模擬分析、及各參數效應的比較運算，並對處置場通風情形進行分析以探討其影響。

- (1) 參考國際評估報告所提供之處置場設施的設計概念，針對規劃階段所需，進行大尺度且長時間進程的熱傳導效應數值模擬驗證，探討遠場的溫度分佈狀況，了解熱載重對於整個母岩區的影響，本文之 Scanline A、B 及 C 溫度變化趨勢與文獻皆一致(圖 1)。
- (2) 依據國際合作計畫中針對裂縫影響效應分析的指定工作任務，在特定幾何條件下建立同樣配置之數值模型，使用主要案例進行耦合運算平行驗證，所得溫度結果與 SKI、CNSC 及 JNC 相當接近(圖 2)。
- (3) 考量處置罐多排多孔埋設作業方式，以所建構之「熱-水-力學耦合數值分析模型」加上通風冷卻效應，所得結果多排與單排結果相近。

子計畫三：鹼性環境下沖蝕對緩衝材料流失量與回脹性能折損評估

深地層處置場處置孔內的緩衝材料受裂隙地下水流影響可能會因沖蝕作用導致質量的損失，而使緩衝材料的密度下降，影響處置場長期安全。深地層處置常使用混凝土作為封塞材料，當地下水與混凝土接觸後會形成鹼性地下水環境，文獻表示當緩衝材料與高鹼性溶液接觸時，會造成緩衝材料膨潤土內部的二氧化矽礦物溶解，進而造成密度下降而影響緩衝材料的回脹性能。本計畫模擬緩衝材料於深地層中接觸不同 pH 值、陽離子強度與種類的地下水環境下，針對沖蝕所引致緩衝材料的流失量與回脹性能折損的影響進行探討，主要研究成果如下：



- (1) 在 0.1 mM NaOH(pH=10)環境下，實驗進行期間可觀察到沖蝕質量損失，而於地下水環境中較高的離子強度 (4 mM NaOH (pH=11.6) 與 400 mM NaOH (pH=13.6))會對沖蝕行為發生束制，如圖 3。
- (2) 在 pH 值在 13 以下時，離子強度對沖蝕行為具有顯著的影響，離子强度高會使膨潤土形成較為絮凝而不易被沖蝕的結構。
- (3) 在不同陽離子的沖蝕實驗中，於相同離子強度下，溶液中陽離子以鈣為主時，沖蝕行為發展上較為緩慢，沖蝕量也略低於以鈉離子為主的溶液，但整體行為發展趨勢兩者是相近的。
- (4) 於低離子強度($\text{pH} \leq 10$)之地下水溶液試驗中，緩衝材料回脹壓力皆因發生沖蝕行為而出現下降趨勢；於 $\text{pH}=11.6$ 及 $\text{pH}=13.6$ 溶液試驗中，皆無沖蝕現象發生，但回脹壓力仍明顯下降，其中於 $\text{pH}=11.6$ 溶液中試體徑向膨脹的發展可能造成回脹壓力下降，而 $\text{pH}=13.6$ 溶液中，回脹壓力下降主要原因來自於試體中礦物被溶解，如圖 4。

參、展望

為完備我國用過核子燃料最終處置相關法規，物管局已於 110 及 111 年委託研究計畫中，先後完成用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則(草案)之「場址特性描述」、「設施運轉」、「設施之安全評估」與「品質保證計畫」等章節內容之研擬。112 年持續透過參酌國際組織高放最終處置安全規定或導則，研析法國、加拿大、英國、日本等國的階段性安全證案報告案例，並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，研提我國用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則「設施之安全評估」及「品質保證計畫」章節架構及內容，並期能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及對國內階段成果報告平行驗證技術，以及緩衝材料於鹼性環境下流失量與回脹性能折損評估研究，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實驗技術，將可提升管制機關審查與驗證之技術能力。

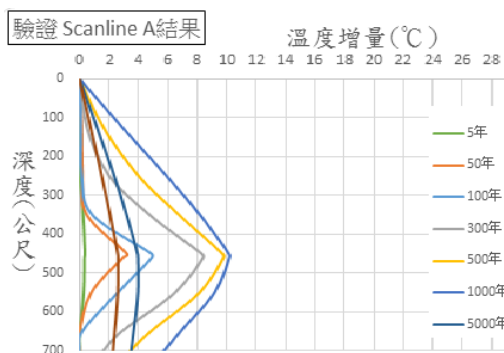


圖 1、ScanlineA 隨深度變化之溫度增量驗證結果

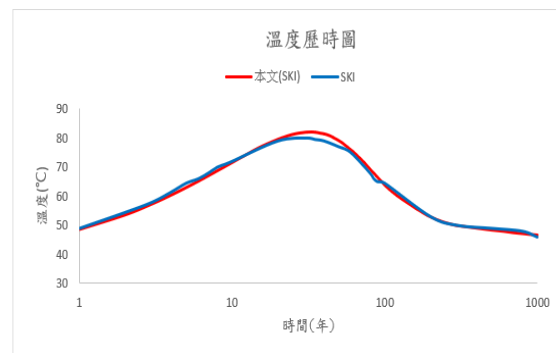


圖 2、SKI 案例參考點之溫度歷時

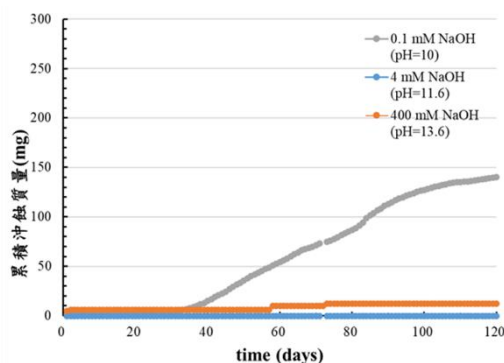


圖 3、不同 pH 值之累計流失量

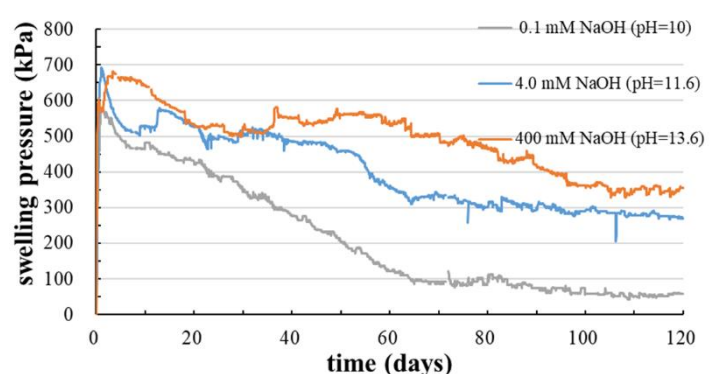


圖 4、不同 pH 值之回脹壓力變化



111 年低放射性廢棄物坑道處置源項與工程審驗技術研析

Research on source term and engineering verification technology of low-level waste tunnel disposal

(計畫編號：111FCMA005)

王士榮¹ 楊長義² 李宏輝³ 林文勝⁴ 董家鈞¹

¹ 國立中央大學應用地質研究所 ² 淡江大學土木工程學系

³ 國防大學理工學院環境資訊及工程學系 ⁴ 臺灣大學水工試驗所

台電公司根據經濟部公告兩處低放處置設施建議候選場址，持續推動低放處置計畫。原能會放射性物料管理局除要求台電公司精進各項處置技術外，亦需精進我國低放處置審驗技術與管制法規。爰此，本計畫針對「處置設施工程材料特性之審驗要項研究」、「坑道處置不同化學環境之力學及水力耦合特性研析」，以及「超 C 類放射性廢棄物處置安全管制研究」等議題進行研究，習得國際低放廢棄物處置技術與法規發展趨勢，並探討我國環境地質條件與處置設計概念，提出適合於我國之低放處置安全管制要項建議，並協助主管機關精進我國低放處置審驗技術與管制法規。

The Ministry of Economic Affairs has announced two proposed candidate sites for low-level disposal. Taiwan Power Company has continued to promote low-level disposal plans. In addition to requiring Taiwan Power Company to continuously improve various disposal technologies, the Fuel Cycle and Materials Administration also needs to complete the low-level disposal



verification technology and regulations. Therefore, this project includes "Research on the key items for verification of material properties of disposal facilities", "Research of mechanical - hydraulic coupling characteristics of tunnel disposal in different chemical environments", and "Greater-than-Class C disposal safety control research", etc. Through the project, we will understand the development trend of international low-level waste disposal technology and regulations, and discuss domestic environmental geological conditions and disposal design concepts. Put forward important suggestions for domestic low-level disposal safety control.

壹、計畫目標

本計畫「111 年低放射性廢棄物坑道處置源項與工程審驗技術研析」共分為三個子計畫進行研究。子計畫一蒐集國內、外岩石力學特性及其對現地應力量測結果之影響的文獻，綜整處置技術先進國家有關處置母岩現地與室內岩石力學試驗項目與分析結果，並就我國本土處置母岩之材料特性進行比較與研析，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。子計畫二蒐集國際間有關不同化學環境下岩體裂隙之水力-力學耦合之室內試驗文獻，進一步針對化學環境之水力-力學耦合室內試驗之方法進行研析，比較這些研究方法之差異，並且透過實際的研究案例，對於化學環境之水力-力學耦合之室內試驗之研究成果有更進一步的掌握，最後提出相關建議。子計畫三研析超 C 類放射性廢棄物之來源及特性，蒐集研析國際上對於超 C 類放射性廢棄物管制法規與處置案例，探討超 C 類放射性廢棄物處置之關鍵技術議題，最後並提出我國低放處置設施處置超 C 類放射性廢棄物安全評估審查建議。



透過研析國際低放廢棄物處置技術與法規發展趨勢，並探討我國環境地質條件與處置設計概念，提出適合於我國之低放處置安全管制要項建議，期為民眾做好低放射性廢棄物處置安全把關工作。

貳、重要成果

本計畫將重要成果依各子計畫，並以重點是列舉成果，如下：

(一) 111 年處置設施場址岩石力學特性及其對現地應力量測結果之影響研析

1. 蒐整瑞典 SFR 等國外有關地下實驗室與場址調查之岩石力學試驗項目及完整岩石力學參數資料，並彙整成表(表 1)。就鑽孔數量、試驗項目與試驗組數而言，以瑞典 SFR 最為完整；此外，亦蒐整 SFR 在裂隙相關力學特性研究、加拿大 URL 有關岩石損傷應力量測研析，及韓國(KURT 有關鑽炸引致岩體損傷之現地試驗等。
2. 根據 SKB 有關岩石力學參數及對應之用途，將本年度及前期相關研究，依完整岩石力學參數與裂隙力學參數進行綜整並表格化。此外，根據「101 安塑至草埔地質調查」之岩石力學試驗結果，推估硬頁岩在單壓強度與楊氏模數具有一定程度之異向性。
3. 利用數值分析軟體 FLAC3D 建立套鑽法數值模型，並定量探討材料異向性、應力異向性及人為誤差對現地應力量測之影響。發現當材料異向性較高時($E_t/E_n = 2.6$)，套鑽法分析之主應力值推估誤差最高可達 100%。
4. 綜整國際間處置技術先進國家發展放射性廢棄物處置技術之經驗，提出我國未來有關場址調查之鑽探取樣與室內試驗、地下實驗室



工作項目及現地應力量測等建議。

(二) 111 年坑道處置不同化學環境之力學及水力耦合特性研析

1. 蒐整日本、美國和中國對於岩體破裂面於化學環境下水力-力學耦合特性之室內試驗相關文獻。研究之岩體包含石灰岩、花崗岩以及頁岩等，研究中分別以不同化學條件下的溶液進行室內試驗與分析，本研究彙整其試驗流程及成果概述。
2. 岩體破裂面於化學環境下水力-力學耦合特性之室內試驗研究方法主要包含兩個部分，其一為流體流動試驗裝置，其一為破裂面表面觀測裝置，本研究將其差異彙整成表(表 2)。
3. 國際案例分析發現，不同岩體之破裂面受不同化學流體之影響：
 - (1) 石灰岩之破裂面受流經溶液的 pH 值影響顯著，快速的水力通道產生可能使滲透率快速上升。
 - (2) 花崗岩之破裂面受到壓溶作用的影響，溶解反應優先發生於破裂面之不平整接觸面，使水力內寬減小。
 - (3) 頁岩質破裂面中則需視碳酸鹽類礦物含量多寡，碳酸鹽類礦物容易溶解使破裂面之開口寬增加。
4. 綜整我國低放建議候選場址之特徵化資訊，並與國際間有關化學環境下，力學-水力耦合之室內試驗成果進行比較。提出低放射性廢棄物坑道處置之要項建議。

(三) 111 年超 C 類放射性廢棄物處置安全管制研究

1. 蒐整美國超 C 類放射性廢棄物之定義、來源及特性，以及特別參考 IAEA 對於中放射性廢棄物(其定義接近美國超 C 類之分類)的來源與特性等(分類示意圖如圖 1)，並就我國核能電廠除役計畫提



出之超 C 類放射性廢棄物主要來源及其特性進行說明。

2. 針對美國 10 CFR 61 管制法規(我國低放射性廢棄物分類標準參考來源)及美國提出之處置設施處置超 C 類放射性廢棄物案例進行探討。其中，美國對於超 C 類放射性廢棄物處置之最優選規劃係於目前既有的超鈾廢棄物(Transuranic Waste)的深層地質處置場(WIPP)進行處置。另外，IAEA 指出大多數半化期小於 30 年之短半化期中放射性廢棄物(ILW-SL)，可在近地表設施中處置；長半化期中放射性廢棄物(ILW-LL)需在地質處置設施中進行處置。
3. 研析美國能源部提出「超 C 類放射性廢棄物處置之環境影響報告書」、美國核管會提出「超 C 類放射性廢棄物處置的關鍵技術問題」，以及 IAEA 定義的中放射性廢棄物處置關鍵技術，防止或限制放射性核種外釋並確保衰變到無害的程度，避免影響生物圈環境安全之關鍵技術議題等。
4. 我國核能電廠除役後的廢棄物 Ni-59、Ni-63 及 Nb-94 之濃度超出 C 類之限值而被歸類為超 C 類，並規劃採用 SNF 同規格乾式護箱貯存。而我國目前超 C 類放射性廢棄物類等於 IAEA 分類之 ILW-LL。國際多數國家提出將 ILW-LL 和用過核子燃料(SNF)(或高放射性廢棄物(HLW))聯合處置(例如法、日、英)，建議未來應採取地質處置方式，並可併入用過核子燃料(SNF)進行聯合處置。

參、展望

本計畫透過國內公共工程建設之鑽探試驗報告，蒐整我國二處低放射性廢棄物建議候選場址所處母岩之岩石力學特性，可提供未來有關處



置場址設計與安全評估之參考。惟達仁鄉建議候選場址尚欠缺完整岩石張力強度、裂隙形成應力，及二處建議候選場址之裂隙變形特性等仍屬欠缺，有待持續蒐整或透過試驗獲得。此外，本研究建構之 USBM 套鑽法數值模型，初步僅針對主應力值之推估誤差進行參數分析，未來可在相同的參數條件下，持續研析主應力方向之推估誤差。再者，蒐整美國、中國、日本等國家，有關化學環境下之水力-力學耦合室內試驗方法與研究成果。未來可進一步針對數值模擬與相關參數需求等議題進行研析，以了解國際上在此研究領域進行數值模擬之現況與成果。最後，針對超 C 類放射性廢棄物處置之關鍵技術議題，建議未來國內應考慮超 C 類放射性廢棄物類型特徵、人類無意闖入、意外事件造成放射性外釋評估，以及處置方案對資源區域及人類健康影響等關鍵技術議題。

表 1、國際處置技術先進國家相關岩石力學試驗項目與完整岩石力學參數

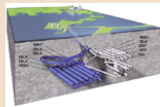
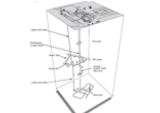
國家/實驗室或場址	岩石力學 相關試驗項目	單壓強度 (MPa)	張力強度 (MPa)	楊氏模數 (GPa)	泊松比	三軸試驗 強度參數	參考文獻
瑞典 SFR 	• 單軸壓縮強度試驗 • 間接張力強度試驗 • 三軸壓縮強度試驗 • 裂隙直接剪力試驗 • 裂隙正向閉合試驗	150 ~ 310	12 ~ 18	72 ~ 83	0.22 ~ 0.30	凝聚力： 27.6 ~ 29.4 MPa 摩擦角： 47° ~ 60° m_i : 9.4 ~ 27.2	• SKB R-07-31(2007)
加拿大 AECL 	• 單軸壓縮強度試驗 • 間接張力強度試驗 • 三軸壓縮強度試驗 • 破裂韌度試驗	乾：200 ± 22 濕：198 ± 18	9.30	69	0.26	m_i : 28.9	• Everit & Laitai(2004) • Martine(1993)
日本瑞浪 地下實驗室 	• 單軸壓縮強度試驗 • 間接張力強度試驗 • 三軸壓縮強度試驗	166	6.24	51.8	-	凝聚力：38.2 MPa 摩擦角：50.8°	• JAEA-Research-2009-31(JAEA, 2009)
韓國 KURT 	• 單軸壓縮強度試驗	乾：177.7±13.3 濕：148.3±15.4	-	乾： 55.9±1.1 濕： 64.6 ± 4.6	乾：0.25 濕：0.27	-	• Kwon et al.(2009) • Park1 et al.(2019) 5



表 2、破裂面於化學環境下水力-力學耦合特性之室內試驗方法比較

參考文獻	流體流動試驗裝置	破裂面表面觀測裝置	試驗流體分析
Polak 等人 (2004)	- 使用環氧樹脂包覆樣本並置入三軸加壓裝置 - 樣本上下兩側封蓋開孔並穿入輸液管線	X-ray CT 掃描儀：觀察破裂面礦物重新分布狀況	ROSS 複合式 pH 電極(Thermo Orion)：量測溶液 pH 值
Watanabe 等人(2011)	- 使用氟橡膠 Viton® 包覆樣本 - 將樣本置入由鋁製內襯和碳纖維外包之裝岩心架，可提供 50 MPa 的最大圍壓	Aquilion™ 第三代醫用掃描儀(東芝醫療系統公司)：透過 CT 值轉換為破裂面之開口寬，破裂面之開口寬變化	-
Ishibashi 等人(2013)	- 使用乳膠套筒包覆樣本並置入三軸加壓裝置 - 樣本上下兩側封蓋開孔並穿入輸液管線	-	-
申林方 等人(2010)	- 使用橡膠包覆樣本並置入三軸加壓裝置 - 樣本上下兩側封蓋開孔並穿入輸液管線	掃描電子顯微鏡(SEM)：觀察破裂面礦物重新分布狀況	溶液濃度變化
Feng & Ding(2007)	- 伺服控制加載子系統 - 流體力學和化學測試子系統	觀測記錄分析子系統：觀測破裂面受應力、化學作用下之變化	-
Khan 等人 (2022)	- 將樣本包裹在環氧樹脂(J-B Weld MarineWeld Epoxy) - 兩端裝有 4 mm 玻璃珠以分散流量，並使用 PEEK 封蓋蓋住，以製成密封的岩心-流體試驗單元	- X-ray CT 掃描儀：觀察破裂面之開口寬變化 - SEM 成像：判別礦物密度、破裂面表面地形成像 - EDS 掃描：地球化學變化	-

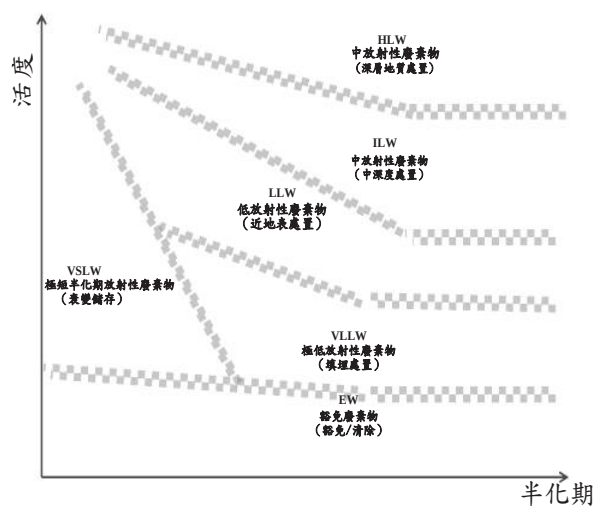


圖1、廢棄物分類方案的概念性說明(修改IAEA(2009)報告圖一)

**111 年度核電廠除役期間除污策略技術彙整與安全評估及相關特性分析**

Technologies and Strategy of Decontamination, and Safety Assessment and Characterization Analysis for Nuclear Power Plants during Decommissioning 2022

(計畫編號：AEC11102005L)

許文勝¹ 歐陽汎怡² 林明緯² 葉宗洸² 王本誠² 李進得¹

楊融華³ 陳韶萱²

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

³國立清華大學能源與環境研究中心

由於核電廠需要除污的系統及組件，大部份屬於金屬材質，故除污技術著重於移除這些受污染金屬的氧化層，從較不具侵蝕性的表面薄膜溶解，到針對重度污染而必須將基底金屬溶解或刨除。本計畫於 108~110 年度已針對金屬組件適用之除污技術進行全面之研析與探討，本年度則針對可應用於混凝土表面的除污技術及選取相應技術所考量之因子，進行相關資料的研析與彙整，並持續蒐集國外核電廠除役及除污的最新案例與進度，提供管制單位全面掌握各類型除污標的所適用的除污技術，以及相關建議與決策參考，並強化管制能量；為因應雷射於物理除污技術的新興發展趨勢、本計劃執行雷射除污實驗以研析金屬表面之除污特性與對材料結構之影響，並探討雷射參數差異對鋼材除污操作的影響，以深化管制單位對此新興技術之評估基礎。再者，本計畫進行電化學除污方法應用於沸水式反應器環境下不銹鋼表面的除污特性精進研究，提昇國內的除役技術研究能量，並培養未來電廠除役作業相關的專業技術與管制人才。



另為延續先期蒐集與彙整國際用過燃料棒衰變熱計算之相關文獻，持續研析與應用於我國除役電廠之用過燃料棒衰變熱評估，透過蒐集國外電廠用過燃料池衰變熱評估與經驗，並針對國內沸水式反應器電廠(BWR)與壓水式反應器電廠(PWR)用過燃料池組態，進行深入分析與探討，並研析不同衰變熱模式計算之差異與適切性，彙整研究結果以提供管制單位安全性管制建議與作為。

而核能電廠完成除役前，須透過輻射偵檢調查來證明廠址的殘餘量符合外釋法規之規範，因此本計畫亦聚焦管制單位對於電廠除役輻射偵檢相關作業與產出之規範審查標準，透過蒐集、研析及彙整美國核電廠輻射偵檢報告之實際審查案例，提出針對除役作業與數據品質目標(DQO)及數據品質評估(DQA)相關之審查管制建議。

The available decontamination technologies employed for metal components in decommissioning of nuclear power plants have been collected and integrated extensively during this project from 2019-2021. In this year, the decontamination process applied to the surfaces of concrete was discussed further. The related experiences of decontamination process of foreign nuclear power plants were also collected continuously. The results evaluated by the whole project were integrated to provide regulatory recommendations for AEC regarding the decontamination technology. In addition, considering the rapid growth of laser decontamination for nuclear facilities, one major task of this project was to conduct experiments for using laser pulses to ablate stainless steel and carbon steel samples. The results of laser pulse characterization and analyses for irradiated material surface consequently contribute to the associated regulations in Taiwan. Furthermore, this project carried out the



advanced research on the decontamination characteristics of stainless steel surfaces by applying the electrochemical methods in the environment of boiling water reactors. Through the project conducted, it is also helpful to cultivate the talents for the decommissioning of nuclear power plants in the future.

Continuing to assess the decay heat of spent fuel pool in decommissioning nuclear power plants, this project collected international literatures on the decay heat calculation of spent fuel rods that was applied to decay heat assessment of spent fuel pool in domestic decommissioned nuclear power plants. From international experience, this study focused on the difference of spent fuel pool configuration between Boiling Water Reactor (BWR) and Pressurized Water Reactor (PWR), and estimated the application of decay heat formulas in-depth.

Before a nuclear power plant completes its decommissioning, it is required to conduct radiation survey and site investigation to ensure compliancy with regulations. The documents prepared by the nuclear power plants and the comments by NRC are worthy of reference. Some insight was gained by collecting and analyzing the above documents. Recommendations related to the data quality objectives (DQO) and data quality assessment (DQA) for radiation surveys for nuclear power plant decommissioning were also provided to the regulation agencies.

壹、計畫目標

子項計畫一：核電廠除役期間除污策略和技術彙整

本年度為進一步了解雷射技術應用於金屬表面除污的操作特性，本計畫執行實驗以解析雷射參數差異對不鏽鋼與碳鋼剝蝕結果的影響，並建構量測雷射脈衝參數與分析照射後試片表面之方法，以深化管制單位



對雷射除污技術的評估基礎。另外，針對可應用於混凝土表面的除污技術及選取相應技術所考量之因子，進行相關資料的研析與彙整，並蒐集國外核電廠除役及除污的最新案例與進度，提供管制單位全面掌握各類型除污標的所適用的除污技術，以及相關建議與決策參考。再者，本計畫進行電化學除污方法應用於沸水式反應器環境下不銹鋼表面的除污特性精進研究，透過改變材料面積及形狀等參數，找出效率最高的除污方法，以降低除污後放射性廢棄物的產生量。本計畫除可提昇國內的除役技術研究能量外，亦能培養未來電廠除役作業相關的專業技術與管制人才。

子項計畫二-分項 1：核電廠除役期間安全評估技術強化

核電廠除役期程一般超過 25 年，用過燃料不同時期之衰變熱對於安全分析實為重要，尤其是用過燃料從濕式貯存進入到乾式貯存時，就必須採用適宜之衰變熱計算式以及詳細的將用過燃料棒束相關條件，如燃耗、運轉歷史功率、燃料濃度等資料代入計算。因此，基於管制單位之職責，本計畫研析衰變熱計算式之關鍵因子與應用範圍，以確保業主送審之安全評估報告結果為合理且正確，透過此計畫蒐集與彙整國外用過燃料棒衰變熱評估之相關文獻與經驗，應用於國內除役核電廠之用過燃料棒衰變熱評估，並提出相關管制建議，有助於提昇國內的除役技術研究能量，亦能培養未來電廠除役作業相關的專業安全評估技術與管制人才。

子項計畫二-分項 2：核電廠除役期間廠址取樣方法品質研析

核能電廠完成除役前，必須透過最終狀態偵檢調查來證明廠址的殘餘輻射量符合法規之外釋規範，以確保核電廠除役後廠址作為其他用途



之安全。由於台灣的除役作業相關作業及管制規範主要參考美國針對核電廠除役之相關文獻，本計畫的目的為蒐集及研析彙整美國核管會(NRC)針對除役輻射偵檢調查數據品質之相關指引及規範，以及美國核電廠實務上進行除役偵檢作業相關的產出和 NRC 的審查報告，並提供和除役輻射偵檢調查數據品質相關之管制建議給相關管制單位參考。

貳、重要成果

子項計畫一：核電廠除役期間除污策略和技術彙整

執行雷射剝蝕實驗以研析雷射照射量對不鏽鋼與碳鋼試片的剝蝕深度與重量損失之關係。研究也發展量測雷射脈衝參數之方法與估算雷射照射參數之原則，並彙整使用封閉式集塵腔的經驗和利用高溫爐於不鏽鋼與碳鋼試片成長表面氧化層的操作程序，以及建立對試片表面形貌和氧化層成份的分析步驟。成果有助於管制機關了解雷射對金屬材料之剝蝕特性，並作為應用雷射除污技術於核電廠除役與除污作業的評估基礎。

其次，針對混凝土除污技術之性能及優、缺點進行彙整及綜合研析，並列舉各項技術之照片輔助說明，相關技術於應用上的一般危害、通風與過濾、輻射防護及工業危險等考量因子亦做重點說明，亦俾利管制機關能迅速掌握各項技術之適用材質與相應之考量，作為後續進行除污管制作業之參考依據並強化管制能量。

而為使用電化學除污的電解拋光技術尋求最適合我國沸水式反應器除役時使用的除污參數，組件因除污的需求而切割成不同大小與形狀的除污件，在定電流的情況下，隨著材料電解表面積增加，單位時間內



基材、高溫氧化層、電鍍氧化層的重量損失會隨之增加，改變對電極的設計，可改善平板試片大面積的影響，除污面積與形狀的差異確實影響了除污的效果。

子項計畫二-分項 1：核電廠除役期間安全評估技術強化

本計畫主要成果為研析國際間對於用過核子燃料衰變熱計算模式以及探討其適用範圍與特性，並且針對國內核電廠進行除役階段技術安全評估。針對國際四種衰變熱計算模式: ASB 9-2、ANSI/ANS 5.1、RG 3.54、以及 ISO 10645 進行比較與評估，其衰變熱計算模式之適用性與差異比較結果彙整於表，供管制單位審查參考依據。本計畫並開發不同情境事故下關鍵時序與燃料護套溫升率之變化公式(分別為全黑事故與喪失冷卻水事故兩種情境下之溫升率變化公式)，藉此公式可用於推估後續核電廠停機冷卻時間下，燃料護套溫升率的值。綜合以上之研究成果，以及美國、韓國除役電廠之經驗，有助於協助管制單位對於用過燃料不同貯存階段之特性與衰變熱採用之依據有明確的界定，衰變熱公式適用性與限制也有明確的說明，能作為核安管制案之審查參考依據，發揮本計畫之最大研究價值與效益。

子項計畫二-分項 2：核電廠除役期間廠址取樣方法品質研析

蒐集研析與彙整了以下五類文獻，並根據研析成果提出與數據品質相關之管制建議予管制單位參考。

1. NRC 所著與除役輻射偵檢相關指引與導則。
2. Zion 核電廠最終狀態程序規範。
3. Zion 核電廠最終狀態偵檢報告。
4. NRC 對 Zion 核電廠之執照終止計畫以及最終狀態偵檢報告之審



查評估。

5. 原能會與除役輻射偵檢相關委託案成果報告。

參、展望

子項計畫一：核電廠除役期間除污策略和技術彙整

在對雷射除污技術的評估上，則可依所建立的實驗基礎繼續執行對銅、鋁與鎳基合金等電廠常用金屬材料的雷射剝蝕研究，以進一步了解雷射除污應用於不同材料時的特性差異。核電廠除役作業的進行涉及到大型系統、組件及廠房的拆除，因此，在除污作業完成後，必須針對可能涉及到的相關問題及解決方案進行瞭解，以便後續的研擬規劃。本計畫的目的即在於針對國際核電廠除役時，大型組件與結構物之拆除及切割技術進行研析與彙整，並持續關注蒐集國外核電廠除役及拆除之最新案例與進度，以提出供管制機關審查及視察要項之參考。為使用電化學除污技術尋求我國沸水式反應器除役時使用的除污參數，因應不同的除污件面積與形狀，透過找出效率最高的除污方法，以降低除污後放射性廢棄物的產生量。

子項計畫二-分項 1：核電廠除役期間安全評估技術強化

本研究採用 TRACE 進行用過燃料棒溫升計算，且 TRACE 程式中針對鉛-水反應模型估算燃料護套局部氧化多寡，以等效護套反應（Equivalent Clad Reacted, ECR）的百分比來表示，未來能應用於用過燃料棒事故安全分析評估，分析結果提供給管制單位作為審查參考之依據，發揮最大價值。

子項計畫二-分項 2：核電廠除役期間廠址取樣方法品質研析



111 年度的計畫中，蒐集與研析了美國 NRC 有關核電廠除役輻射偵檢作業與數據品質相關之指引與審查標準、美國核電廠實務上進行除役輻射偵檢作業之產出，以及 NRC 針對除役核電廠進行除役輻射偵檢作業產出之相關文件之審查報告。所蒐集研析之資訊及建議可提供國內管制單位作為審查或視察核電廠除役輻射偵檢作業之參考，後續並可持續蒐集研析美國其他核電廠提交至美國核管會有關關執照終止之計畫或報告，以及核管會的審查與核電廠的回覆等文獻，提供國內管制單位參考。



111 年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析

Study on the characteristics of site-specific groundwater protection and control during the decommissioning of nuclear power plants

(計畫編號：AEC111011)

陳瑞昇¹ 梁菁萍² 何佑婕¹

¹ 中央大學高等模式研發應用中心 ² 輔英科技大學護理系

核電廠運轉和除役期間須建立廠址地下水防護計畫，以監測地下水相關特性參數，掌握廠址若在發生放射性核種之外釋情境，進入土壤、甚至地下水系統之狀況。本計畫目的為研析核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性，計畫完成四項重要工作項目，工作項目一依我國核電廠除役期間廠址特性，探討水文地質參數試驗或評估方法之可行性，並提出調查技術與方法建議。工作項目二檢視目前國內進入除役期間之核二廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容，並提出管制建議。工作項目三持續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，並據以精進我國核電廠除役期間個廠地下水特性評估的輸入參數。工作項目四彙整本會前三年相關委託研究之分析成果，以提出管制相關之關鍵建議。

Development of a site-specific groundwater protection program is imperative for monitoring groundwater characteristic parameter and controlling the possible scenarios of the inadvertent release of hazardous material into the soil and subsequent groundwater system during the operation and decommissioning of a nuclear power plant. This project targets to study the



groundwater protection and regulation for decommissioning of nuclear power plants. Four major tasks are completed in this project. Task 1 explores the tests or methods for determining the hydrogeological parameters. Task 2 evaluates the groundwater transport model and the groundwater protection program; a regulatory strategy is thus created. Task 3 advances the input parameters for characterizing groundwater properties during decommissioning of a nuclear power plants via collecting international practical experience of groundwater protection during operation and decommissioning of nuclear power plants. Task 4 integrate the results of three projects financially supported by Atomic Energy Commission to deliver suggestions for critical regulatory strategy.

壹、計畫目標

研析美國核電廠廠址地下水防護管制相關資訊，並參考原能會「110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」及相關委託研究報告，適時對我國核電廠除役廠址地下水防護管制提出相關建議，以供原能會參考。

貳、重要成果

一、探討水文地質參數試驗或評估方法之可行性，並提出調查技術與方法建議

分別探討並說明受壓含水層抽水試驗、非受壓含水層抽水試驗與微水試驗執行方法與分析方法。

二、檢視國內除役期間之核二廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容，並提出管制建議

(一)地下水傳輸模擬的信賴度取決於選用貼近真實場址污染傳輸的模



式與給予合理的參數兩個重要因素，核二廠地下水傳輸模式選用 GROUND 模式，太過老舊且將地下水流方向(x 方向)的兩個邊界設定在兩個無窮遠處($\pm\infty$)，以水平線源釋放點在 $x = 0$ ，當地下流往正 x 方向移動，注入的污染源將可能因水力延散作用而造成跟地下水水流方向相反的方向(負 x 方向)遷移(逆水流延散)，並不符合真實地下水污染物的遷移現況，且逆水流延散過程而會造成污染物濃度的低估。

(二)近年來有許多前瞻解析模式與數值解模式，台灣環保署地下環境模式平台也提供前瞻的解析模式與數值模式，建議核二廠地下水傳輸模式可以參卓採用公版工具。

(三)核二廠地下水傳輸模式只考慮氙進行地下水傳輸模擬，氙被認為不具吸附性，除役電廠可能的關切核種可能有 Sr-90 或 Cs-137，這些核種本身除具吸附性外，其劑量貢獻度也不會與氙相同，建議應可以考慮其它關切核種進行模擬。

三、蒐集國際核電廠運轉與除役期廠址地下水防護實務經驗，據以精進核電廠除役期間個廠地下水特性評估的輸入參數

(一)研析美國 Zion 電廠利用 DUST-MS 軟體進行模擬多個關切核種，了解不同核種的遷移特性。

(二)研析南韓 Kori 電廠利用 RESRAD-ONSITE 軟體進行導出濃度指引水平計算的關切核種、模擬情境與定率式與機率式輸入參數。

(三)核二廠地下水傳輸模式只考慮氙進行地下水傳輸模擬，氙被認為不具吸附性，除役電廠可能的關切核種可能有 Sr-90 或 Cs-137，這些核種本身除具吸附性外，其劑量貢獻度也不會與氙相同，建



議應可以考慮其它關切核種進行模擬。

四、彙整原能會前三年相關委託研究之分析成果，以提出管制相關之關鍵建議

- (一)建議管制單位要求台電公司加強地下水專業人才培育，正確解讀並詳實掌握 NEI07-07 指引與 EPRI 核電廠地下水防護指引精神、目的與相關地下水保護工作的執行方法與細節，持續精進地下水防護相關工作。
- (二)建議管制單位要求台電公司詳實進行資料盤點、整合與保存，以做為後續持續精進的參考依據。
- (三)建議管制單位應要求台電公司依過去的資料，擬定需要逐步加強監測井的建置與岩心採樣，並利用所有可用的監測井進地下水水位與地下水水質監測，以更準確掌握地下水流動的方向與地下水質的時空變化。
- (四)建議管制單位要求台電公司充實水文地質資料，應視需要精進場址概念模式與地下水傳輸模式作為地下水污染遷移預測工具，以進行後續的可能決策。
- (五)建議管制單位要求台電公司適切納入水資源或環境領域在地下水監測井設置與以及地下水水質採樣的標準流程。

參、展望

- 一、建議管制單位要求台電公司建立公版 EPRI 導則中文文件，協助個廠依文件落實地下水防護工作。
- 二、依美國 Zion 電廠與南韓 Kori 電廠的經驗，建議管制單位要求台電



公司確實掌握關切核種，納入地下水傳輸模式建立。

三、環保署地下環境模式平台建置免費場址管理軟體與領先全球地下水傳輸解析與數值工具，建議管制單位要求台電公司參卓使用。

**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：AEC111012)

林家德

核能研究所

為配合原能會核能管制處因應核能電廠運轉及除役可能面臨之技術議題，本計畫擬定相關研究項目，期能滿足現階段運轉管制實務上之需求，並兼顧目前核電廠除役管制業務。本計畫 111 年度之研究重點仍延續既定方向，精進地震、海嘯防護、材料腐蝕與維護、熱水流分析、風險評估等相關核安評估能力。基於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，本計畫持續參考各國核能電廠除役經驗以及法規要求，強化除役管制作業品質及管制要求，在確保安全之前提下，協助國內核電運轉及除役管制任務均能順利達成目標。

To cope with the possible technical issues facing the nuclear regulatory body in overseeing the operation and decommissioning of nuclear power plants, this project fulfills the needs in dealing with the regulatory process. In 2022, it emphasized on keeping the regulatory technical competences in seismic and tsunami protection capabilities, 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 remains in



the reactor in early stage, this project keeps up with the advances in decommissioning activities in other nuclear countries, strengthening the regulation quality and depth, to ensure safe operation and decommissioning progresses in domestic nuclear power plants.

壹、計畫目標

本計畫為四年期，總目標在強化核安及除役管制技術能量，除維持核能電廠安全運轉所需管制技術能力，保持與核能先進國家技術交流及經驗分享。111 年度著重在精進地震與海嘯防護、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，同時提供管制單位作業所需之技術支援能量。本計畫針對我國機組進入除役階段而爐心仍留有用過核子燃料之特殊組態，提供除役管制技術與管制因應作為建議，也參考各國除役核能電廠除役經驗以及法規要求，建立適當之技術評估與分析能力，強化除役管制作業品質及管制要求，以保障國內核電廠除役符合安全規範。

貳、重要成果

本計畫係依據 111 年 2 月 16 日原能會『會核字第 1110002394 號』函，委請本所執行『核子反應器設施安全與除役前期作業管制實務研究』，計畫全程 4 年，本年度為第 3 年。

一、研發成果之重要貢獻

111 年度計畫之各項重要研究成果可大致區分為「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。

(一)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



參與 CAMP 國際合作計畫，取得最新熱水流分析程式版本，並針對核二廠除役過渡階段發生喪失冷卻水事故之情境與低壓注水系統(LPCI)救援措施進行有效性評估。根據厭氧菌等微生物腐蝕實驗的觀察，發現敏化 304 不銹鋼雖因鉻乏區存在，使得氧化層易遭硫化物的破壞，但對於微生物腐蝕仍具有一定程度之抵抗能力。綜整過去年度研究成果，除役過渡階段水溫趨勢漸減，輻射劑量仍有抑菌效果。目前核能機組皆有適當的程序書管理水質，除役過渡階段之水溫、水質與輻射場環境皆不利於厭氧菌活動，其代謝活動逐步變慢甚而暫時停止活動，因此除役過渡階段環境下微生物腐蝕活動應偏趨緩方向。

2. 核電廠後福島管制審查技術精進研究

本計畫完成美國核管會報告 NUREG-2233 之評估方法及 RG 1.191 除役期間防火計畫監管內涵研析，並與核三廠消防相關程序比對後，提出建議或注意事項。完成機率式地震型海嘯源逆推方法之建置及測試，並研擬逆推門檻條件。另針對水密門的耐水壓性能，完成水密門水理試驗數據研析，並推導易損性相關參數。

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

針對地震垂直與水平加速度比值(V/H Ratio)，提出重要影響因子之 V/H Ratio 中值和對數標準差之包絡線經驗公式，並以寬頻大震度人造地震探討水平方向土壤之非線性反應，與其他場址之地震事件進行交互驗證。完成以不同土壤性質差異，分別輸入各種地震地表反摺積，進行壓水式核電廠圍阻體結構土壤結構互制效應之分析。



(二)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，完成用過核子燃料定性風險分析架構初步建立，可做為除役過渡階段管制所需之燃料風險評估基礎。針對核能電廠除役階段前期風險顯著性確立程序評估工具，就評估程序及功能持續進行維護及更新，完成核能電廠視察風險顯著性評估工具之使用者操作手冊，納入新完成之評估程序及功能，有助於視察人員進行風險評估。

2. 核電廠運轉及除役期間事故分析及緩和策略研究

蒐集彙整核三廠爐心、一次側迴路、二次側蒸汽產生器與相關重要設備系統資料，進行嚴重事故分析程式 MELCOR 模式組件參數計算，完成我國核三廠 MELCOR 模式建立，並模擬電廠全黑案例取得初步分析結果。

3. 除役期間核電廠重要設備維護管理安全管制技術研究

本計畫研析國際間運用現象識別與評比方法(Phenomena Identification and Ranking Table, PIRT)研究資料，針對 SFP 冷卻水快速流失以及因池水蒸發緩慢導致用過燃料曝露事件，就熱水力、熱傳與燃料升溫等現象進行分類及評比。研析美國核管會報告(NUREG-2191)，就維護管理方案(第 XI.E7 節：高壓礙子)與國內核電廠維護方式進行比對。針對核一廠用過燃料池安全維護管理及廠房吊車安全議題，蒐集國際最新核安資訊，盤點目前用過燃料池安全維護管理議題之關鍵要項。

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，射線照相、渦電流及超音波等非破壞檢測項目之人員訓練，共計完成 8 人次之初/中級訓練，並有 3 項檢測取得中級檢測人員資格；運用相關非破壞檢測人力協助國內核電廠大修視察(核二廠二號機第 27 次大修及核三廠一號機第 27 次大修)。

5. 核電廠運轉及除役階段材料維護與防治策略研析

針對碳鋼管銲件，以機械加工方式製造間隙，並於靜滯水環境中進行間隙腐蝕試驗。結果顯示：不論在氣-水介面或水中環境條件下，碳鋼管銲件均未發生間隙腐蝕。於溶氧水化學環境中，針對高程度塑性變形之 304L 不銹鋼進行應力腐蝕試驗，結果指出因塑性變形使材料晶粒拉長，應力腐蝕裂紋易沿晶界成長，形同裂紋擴展所需驅動力降低，故使應力腐蝕裂縫成長速率提升。

6. 核電廠除役視察管制實務研究

研析加拿大之第三方除役作業標準，與 Pickering 商用核電廠之初步除役計畫書，再與 110 年研究報告彙整，提出除役拆除作業管制建議。完成「日本發電用反應器高活度設備拆除技術實例研究」報告，針對日本原子力研究所的 JPDR (Japan Power Demonstration Reactor)，研析其拆除過程中所獲得的經驗。完成切割作業廠房之通風安全評估小尺度實驗模型建置，並進行實際量測，取得微粒粒徑及濃度變化等特性數據。

二、學術成就

(一)學術成就量化績效

本計畫 111 年度發表國內外研討會及期刊論文共 10 篇。養成合作團隊(計畫)共 4 團隊。培育人才計 12 名，完成研究報告共計 27 篇，



技術報告及檢驗方法報告計 5 篇。以下摘要列舉三篇研究論文說明。

(二)摘述說明

1. 論文「地震型機率式海嘯於近岸危害度之研究」研究參考美國進行機率式海嘯源逆推方法之建置，並將所需之門檻條件明確化(條件 1: 所有測站的最大海嘯波高的相對誤差絕對值之平均值 $\leq 20\%$ ；條件 2: 每個測站之最大波高皆須 $\geq 80\%$ 的最大海嘯波高值)，成功完成海嘯源逆推。採用屏東周圍海域 50 m 水深處 12 個數值觀測站進行逆推分析，以 8 個不同的海嘯源初始權重猜測值進行，逆推結果如下圖 1 所示。
2. 論文「Effects of thermal aging on the stress corrosion cracking behavior of cast stainless steel with different δ -ferrite levels in high temperature water environment」，刊登於國際期刊「Journal of Nuclear Materials」。此篇論文主要模擬探討在沸水式反應器高溫水化學環境中， δ -肥粒鐵含量及熱時效對於 CF8A 鑄造不銹鋼應力腐蝕裂縫成長行為的影響。研究結果顯示，高 δ -肥粒鐵含量及熱時效均會提升 CF8A 鑄造不銹鋼的應力腐蝕龜裂敏感性，詳如圖 2。

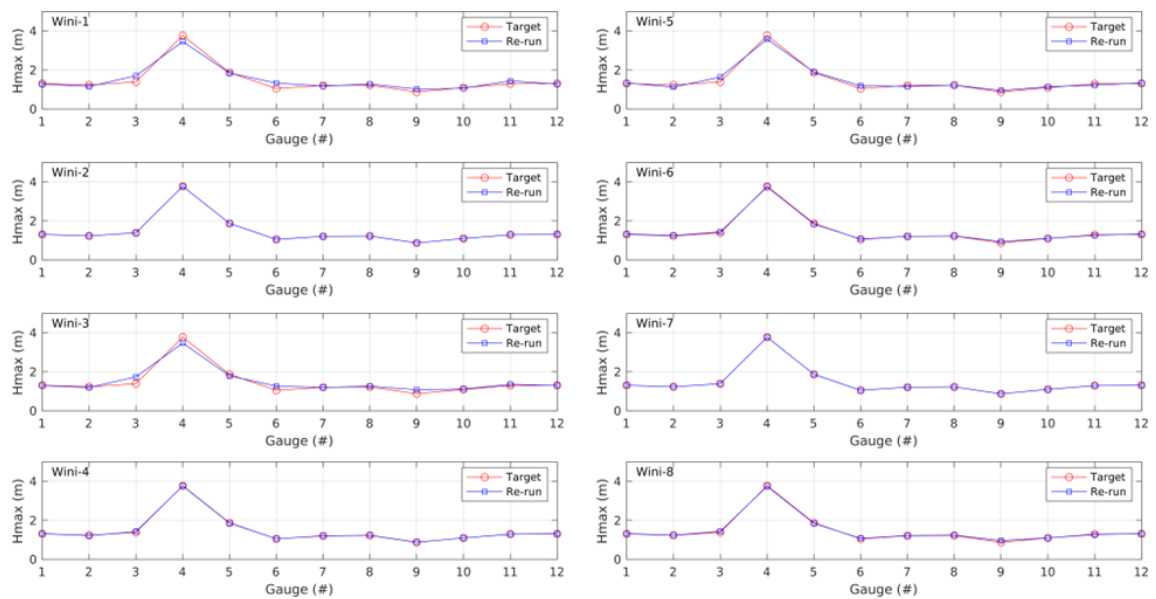


圖 1. 八種初始權重猜測值以 FUWAVE-TVD 重新模擬(Re-run)值與目標值(Target)的最大海嘯波高(Hmax)於不同測站之比對結果

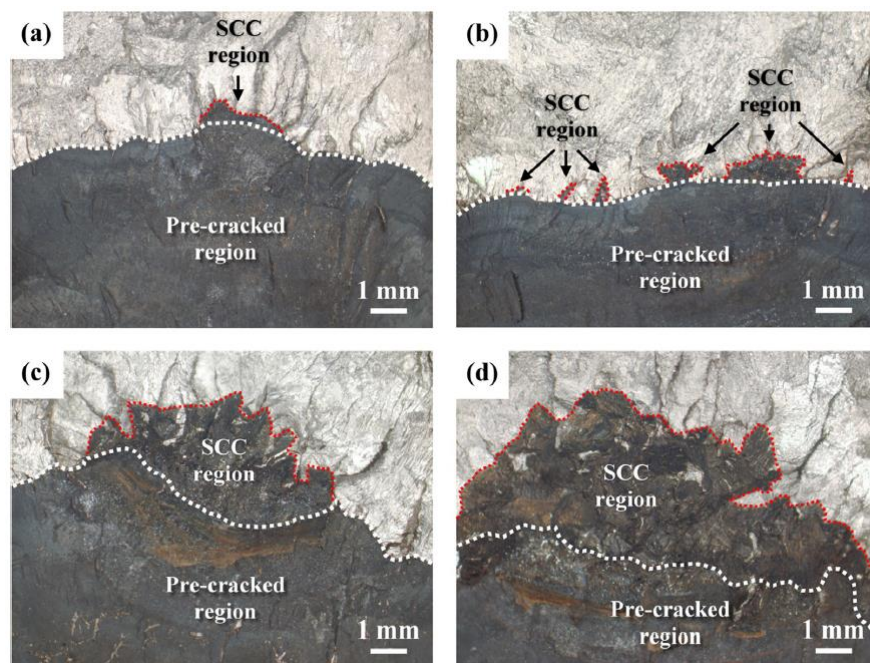


圖 2. CF8A 鑄造不銹鋼經應力腐蝕試驗後破斷表面形貌:

- (a)低肥粒鐵含量，未時效條件；(b)低肥粒鐵含量，時效條件；
(c)高肥粒鐵含量，未時效條件；(d)高肥粒鐵含量，時效條件。



3. 研討會論文「核電廠圍阻體結構健康診斷研究」，以 PWR 電廠一號機圍阻體為例，分析訊號篩選與圍阻體搖擺行為，探討土壤-結構互制效應對健康診斷之影響。根據歷次地震建立圍阻體健康履歷，作為未來震後重啟之參考標準。同時根據 PWR 廠井下觀測資料，利用頻率響應函數進行地層轉換函數運算，與傳統之經驗地層轉換函數比較，根據現有地層參數，建立 PWR 電廠預估理論地層模型，詳如圖 3。

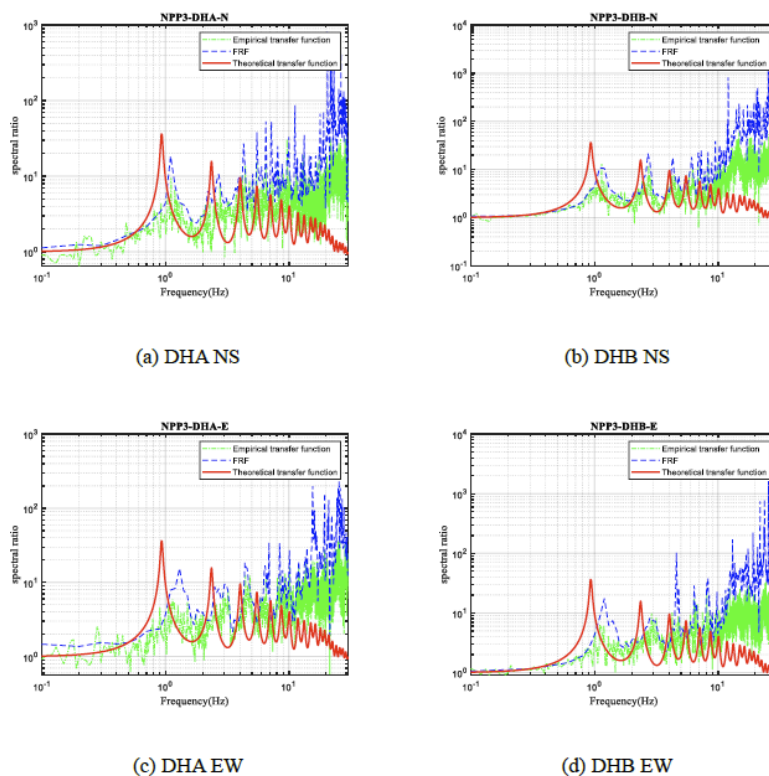


圖 3.場址理論土層轉換函數與實測資料之經驗地層轉換函數與 FRF 之比較

參、展望

本計畫研究項目主要依據管制單位在執行管制業務上之實際需求而擬定，研究成果可作為管制單位執行決策時之技術參考依據。未來將持續



透過自行研究、跨機構合作與學術交流等方式，，並配合管制單位需求強化技術，確保除役安全並支援各項可能面臨的管制議題。

**場 6—輻防與放射醫學科技領域**

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	12
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	19
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	25
計畫曝露輻射安全與劑量約束評估研究	29
既存性曝露管理規範研析	35
核電廠除役階段之輻射安全管理與規劃技術研究	41



接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力

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

(計畫編號：MM11003-0292)

袁明程 朱葦翰 林怡君 陳冠因

核能研究所

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

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



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

1. 111 年度規劃之工作項目及查核點，皆已如期達成。
2. 子項計畫一【建立國際同步之輻射防護規範研究】：完成第一期眼球水晶體劑量評估訪查研究，完成共 926 人次眼球水晶體劑量監測評估，包含 14 家醫療院所(33 科室)、核三電廠及 3 家非破壞性檢測公司，以了解國內關鍵群體於實際輻射作業下，眼球水晶體輻射曝露情形及新劑量限值之衝擊。針對眼球水晶體劑量監測訪查計畫之參與者，已辦理 10 場實體及 5 場線上教育訓練，其內容說明 ICRP 新的眼球水晶體劑量限值，另針對眼球水晶體年等價劑量可能超過新的劑量限值之虞者，提供適當輻射防護措施之建議，提升關鍵群體對眼球水晶體輻射曝露的重視，進而改善其工作現況，以利於未來保障約 2 萬輻射工作人員；「美國國家胎兒輻射劑量計算標準 (ANSI/HPS N13.54)」引進與研究報告 1 篇；並初研台灣懷孕婦女假體及胎兒劑量評估技術，可作為胎兒輻射防護之參考論據。(圖 1)
3. 子項計畫二【強化國內輻射檢校量測技術能力研究】：完成建置貝



他眼球水晶體劑量校正系統(量測不確定度 $<5\%$)，可提供國內眼球水晶體劑量國際等同之校正追溯服務；全國性游離輻射技術領域實驗室能力試驗研究的指標性突破為：「肢端劑量評估」能力試驗活動為第 1 次正式舉辦(圖 2)，是從無至有的里程碑，具有接軌國際趨勢，促使第一線實驗室提供具品質服務，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 千餘輻射從業人員測值準確度之效益。

4. 子項計畫三【精進染色體變異分析技術與評估研究】：首度執行國內實驗室間比對試驗，以核研所為中心實驗室，驗證與監測備援實驗室之染色體雙中節變異分析能力。另建立更快速有效率之生物劑量評估 (γ -H2AX 分析)方法(圖 3)與 SCI 期刊刊登 1 篇，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。

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。

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表

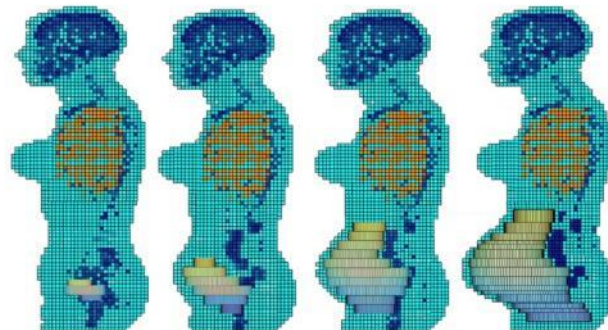
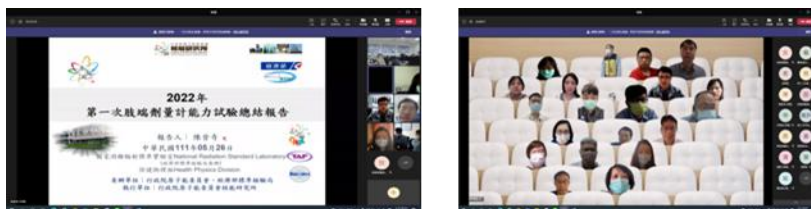


圖1：台灣懷孕婦女體素假體



「2022年第一次肢端劑量計能力試驗總結說明討論會議」

視訊會議議程

日期：111年05月26日

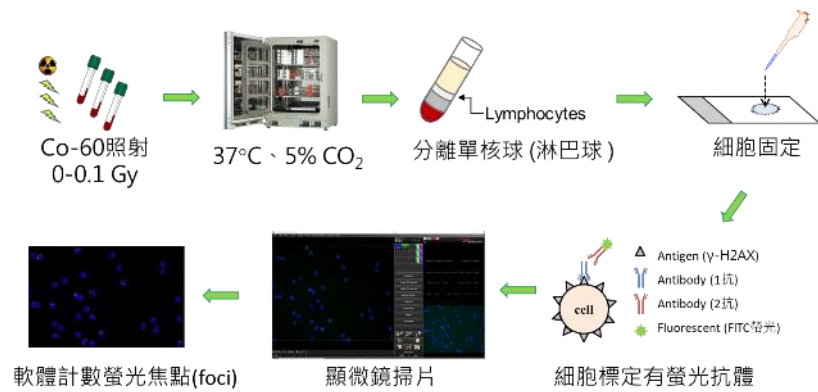
主持單位所在地點：核能研究所 保健物理組 035 館國家游離輻射標準實驗室

時間	議題	講員/單位
09:00—09:30	註冊進入視訊會議	
09:30—09:40	開幕致詞	袁明程 副組長 核能研究所保健物理組
09:40—10:30	「第一次肢端劑量計能力試驗」結果及綜合討論	陳晉奇 先生 核能研究所保健物理組
10:30—10:45	閉幕致詞	朱健豪 博士/ 袁明程 副組長 核能研究所保健物理組

備註：採用 Microsoft Teams meeting 模式，請以姓名註冊進入視訊會議。



圖2：第一次肢端劑量計能力試驗總結說明會議

圖3：低劑量 γ -H2AX試驗流程



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：MM11003-0286)

楊子毅 盧苡欣

核能研究所

含天然放射性物質之商品應用日漸廣泛且深入民生，本計畫考量不同商品使用情境，建立含天然放射性物質商品之量測及人員劑量評估技術，彙整相關文件以推動實驗室認證；利用相關係數進行歷史檢測數據分析以建立商品快篩機制；參考國外經驗作法來研擬我國管制建議；並持續配合主管機關執行後市場調查，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. The goal of this plan is to consider different scenarios for using products containing NORMs to establish measurement and personnel dose assessment technologies, and prepares relevant documents for promoting certification of laboratory. At the same time, it establishes a rapid screening mechanism through statistic method and analysis of historical data. In addition, provide recommended standard for products containing NORMs in our country based on the foreign experiences. Finally, it continues to cooperate with the competent authority to carry out market surveys of products to ensure the radiation safety.



壹、計畫目標

2018 年南韓負離子床墊輻射超標事件後，造成民眾在使用含天然放射性物質商品之輻安疑慮，據此主管機關原子能委員會便成立本計畫，希望能建立國內對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，並透過跨部會合作方式對市售產品進行檢測分析，確保商品輻射安全。

貳、重要成果

一、建立氦氣量測標準程序

為建立氦氣量測標準程序，並積極推動實驗室認證，遂彙整檢測流程所需之量測技術程序書及各項劑量評估模式，完成「含天然放射性物質商品檢測標準作業程序書」之編撰作業。此外，也建立及更新各類實驗室品保文件及表格、並與國內持有類似氦氣檢測儀器之實驗室進行氦氣量測比對試驗，以驗證本實驗室量測結果之準確性。

二、建立商品快篩機制

氦氣檢測的過程需模擬使用者實際使用商品的情況，根據商品類型的不同，完整的劑量評估流程可能需耗費數小時，在異常事件處理之时效性與因應方面，有必要建立商品篩選機制，以快速挑選出可能超標之商品。據此，本年度的工作內容亦針對該項議題，希望利用歷史檢測資料及數據，透過統計分析方法找出各項檢測數值間的關聯性，以建立商品快篩機制。

(一)分析方法

相關係數是統計學上常見的數值分析方法，可用來表示各變量之間的相關程度，本研究探討變數包含 CoMo-170 計數率、RAD7 量測



之 Rn-220 和 Rn-222 氡氣活度濃度、體內及體外劑量等，其中由於 CoMo-170 方便使用且可快速得出結果的特性，被挑選作為劑量快篩指標，將針對上述變量之歷史檢測數據，進行相關係數分析。

(二)分析結果

從圖 1 相關係數對稱矩陣分析結果可看出，CoMo-170 計數值與體外劑量的關係有相當高的相關性，但幾乎無法有效的反應出體內劑量的關係，相關性非常低，這是因為 CoMo-170 計數值與高穿透力的光子所造成的劑量相關，會直接回饋到體外劑量的部分；反觀體內劑量主要與氡氣活度濃度較為相關，尤其是與 Rn-220 的相關係數可達 0.7 左右，而 Rn-222 的關係度稍低，相關係數約 0.37，難以直接透過 CoMo-170 計數值反映。最後也彙整統計歷史大數據分析結果，對於所有體內劑量超過法規標準 1 mSv/y 的案例，其 CoMo-170 計數值分佈在 20 cps 以上範圍(20.1~187.9 cps)，雖然也有 CoMo-170 數值超過 20 cps 但體內劑量低於 1 mSv/y 的案例存在，不可直接以偏概全，但應可利用此經驗數值，於需要快速進行篩選的情境下，作為是否要进一步進行 Rn-220 及 Rn-222 氡氣活度濃度檢測的指標。

三、研擬含天然放射性物質商品之管理建議

為有效管制含天然放射性物質商品，保障國人使用商品之健康安全，本研究遂蒐集日本、南韓等國對於含天然放射性物質商品之國際相關文獻資料進行彙整，研擬含天然放射性物質商品之管理建議予主管機關參考。根據日本 2009 年之管理辦法，其參考 ICRP 82 報告之產品干預豁免標準、IAEA 的法規豁免報告建議數值，以及 IAEA 2007 年專題演討會上之結論，採用 1 mSv/y 作為含天然放射性物質商品之年劑量標準



值，並建議這類含有天然鈾、鈾核種之商品以活度濃度 1 Bq/g 作為是否超標的判斷依據；2018 年南韓爆發負離子床墊超標事件之後，南韓於 2021 年修訂相關管理辦法，參考 IAEA RS-G-1.7、IAEA SRS-49 等文獻，針對含有天然放射性核種的原物料、副產品、廢棄物及商品，訂定了註冊登記限值，其中鈾、鈾系活度濃度設為 1 Bq/g、K-40 活度濃度 10 Bq/g，並以 1 mSv/y 作為輻射劑量衡量標準。我國現行「天然放射性物質管理辦法」提到的天然放射性物質核種活度濃度基準值，分別為 K-40 活度濃度 1 Bq/g，其他天然放射性核種 0.1 Bq/g，以及一般人年有效劑量標準 1 mSv/y，該基準值與國際現行趨勢一致，建議維持在該基準。

四、執行含天然放射性物質商品後市場調查

針對 111 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：醫療器材、面膜等；經濟部標準局：眼罩、口罩或寢具等)之輻射檢測與劑量評估，共完成了 24 件商品檢測，結果列如表 1。其中經檢測評估結果顯示，有 1 件枕頭商品之評估年有效劑量超過「天然放射性物質管理辦法」所規定之年劑量限值(1 mSv)，且所含 K-40、鈾系或鈾系核種活度濃度，亦超過規定之核種活度濃度限值，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。

參、展望

本計畫將持續參考國際趨勢進行研究調查，為日後發展合宜之管制規範及劑量評估技術建立基礎，也考量更多種類型商品的使用情境來發



展適合之劑量評估模式，以更加貼近民生使用情況，並持續透過跨部會合作進行市場調查作業，為民眾使用商品的安全把關。

表 1、111 年抽驗商品種類統計結果

送樣單位	樣品種類	送樣件數	超標(>1 mSv/y)件數
衛福部食藥署	面具/面膜	4	0
	小計	4	0
經濟部標準局	枕頭	4	1
	棉被	3	0
	手環	3	0
	口罩	4	0
	襪子	4	0
	眼罩	2	0
	小計	20	1

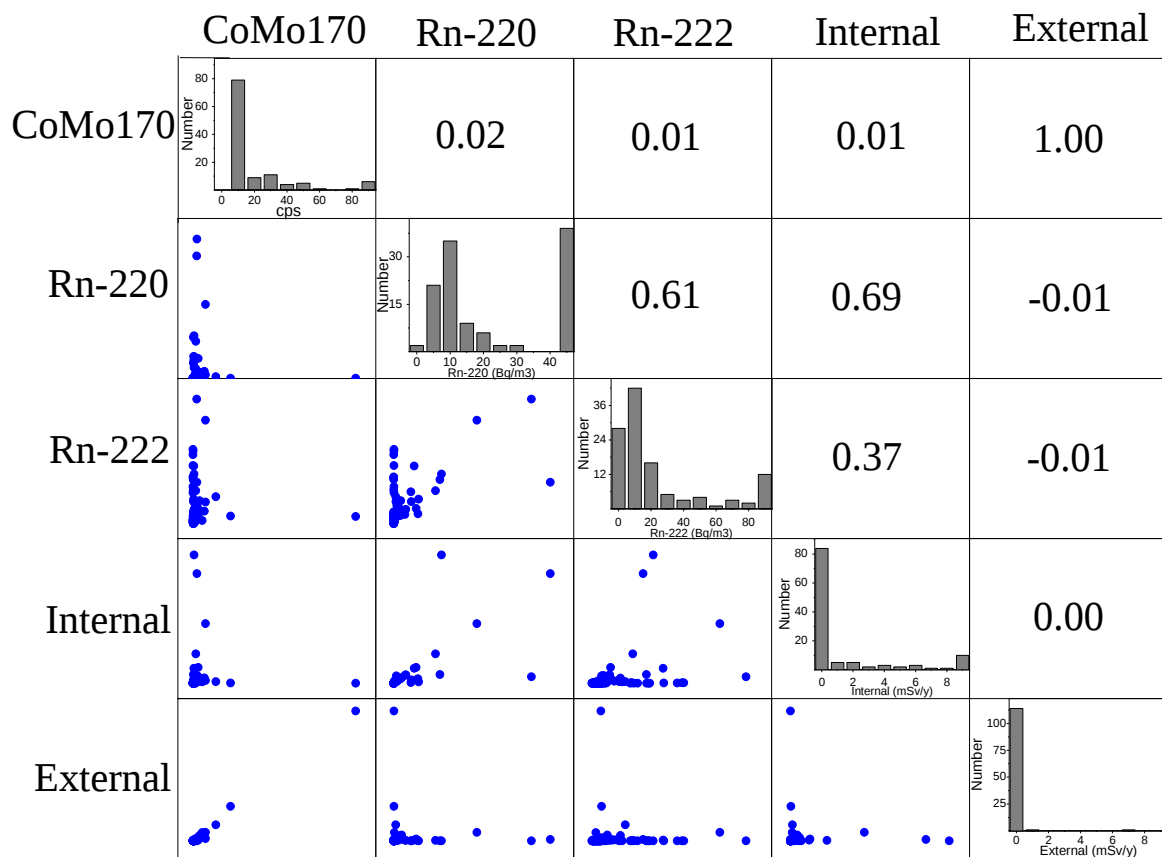


圖 1、相關係數矩陣



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

(計畫編號：MM11003-0287)

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。上述加速器在運轉過程不可避免會有射束損失引發之二次中子，二次中子會造成加速器本體、屏蔽或建築物結構體等不同程度的活化。不論是設施逐漸接近使用規劃週期或是因其他原因等需求，未來終將面臨拆除或除役問題，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。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除役輻射安全評估建議。本計畫目標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與審查。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，本計畫依加速器類型區分為(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，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。

There will be several high-intensity accelerator facilities in Taiwan, at least 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 developed suitable models and methodologies to quantify the magnitudes and general trends of material activation in the above-mentioned facilities. Accordingly, practical guidelines or recommendations will be 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 this year. In the next year, the main focus will be shifted to the material activation induced in 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能夠順利進行輻射安全評估作業。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，以利未來設施永久停用之執行。

貳、重要成果

本年度針對國內高強度輻射設施除污及除役規劃暨安全審查技術研究進行完整的文獻研讀、資料收集及案例分析，關注重點包含除役相關建議、二次中子產生機制、綜合性技術報告，以及 3 種高強度輻射設施及 AB-BNCT 質子加速器設施運轉的二次中子特性、劑量率分布、殘存活化等議題，文獻回顧與彙整詳見期末報告 3.1 節。本團隊也在完成蒙地卡羅程式對於二次中子產率的相關驗證後，透過模擬 250 MeV 質子、400 MeV/A 碳離子、3 GeV 電子及 AB-BNCT 30 MeV 質子撞擊相同靶材二次



中子產率的比較，結果發現每一個碳離子入射所生成的二次中子數量最多，但在考慮各個加速器的操作電流及工作負載後，AB-BNCT 30 MeV 質子加速器所生成的二次中子數量將比其他高強度輻射設施所誘發的二次中子數量高 2 個數量級以上，完整比較資訊詳見期末報告 3.2 節。除了文獻收集與工具驗證，本年度也順利邀請國內 7 間設置有質子/重離子癌症治療高強度輻射設施的醫療院所相關人員參與本計畫，針對加速器的設施廠牌型號、加速粒子種類/能量、運轉起始日、射束損失位置、射束損失點的材料組成等資訊進行資料匯整，並重點分析影響活化潛勢的關鍵參數，以利後續蒙地卡羅技術的建立及活化評估，根據資料匯整結果，本團隊決定以 250 MeV 質子與 400 MeV/A 碳離子進行分析，射束損失點為加速器室及射束線室中的加速器本體(鐵)及治療室中的水假體，並整合設施 20 年的假設工作負載進行活化潛勢的評估，評估結果呈現於期末報告 3.3 節。針對高強度設施的活化分析，本團隊利用蒙地卡羅軟體 FLUKA 進行模擬計算，為了確立 FLUKA 對於分析活化的適用性，除了二次中子產率驗證，更進一步針對殘存核種產率以及殘存劑量率進行驗證，驗證顯示 FLUKA 可以適當的重現文獻中的實驗結果。為了更精確的分析設施中的二次輻射特性及誘發的活化潛勢，本團隊參考中國醫藥大學附設醫院新建之加速器設施為參考模型(圖 1)，並據以進行後續的放射活化分析，圖 2 呈現部分結果，顯示不同方向混凝土的活化潛勢隨冷卻時間的變化及混凝土中的殘存核種組成，完整結果彙整於期末報告 3.4 節。結合前述的設施運轉調查結果及 FLUKA 的使用，期末報告 3.5 節呈現兩種加速粒子在兩個不同射束損失點所造成的劑量率貢獻及活化潛勢，針對幾項二次中子的重要性質及誘發的物質活化潛勢，整理相關結果如表 1。依據



假設之射束損失情節，碳離子治療設施治療室的前向混凝土活化最嚴重，質子治療設施加速器室的前向混凝土活化嚴重程度次之。最後，為了降低混凝土建物可能的活化，本團隊也嘗試考慮以鐵+聚乙烯+碳化硼的複合式屏蔽材料進行中子通量抑低的可能性與效益分析，結果顯示複合式材料的使用確實可以達到中子減量的目的，且效果優於任一單一材料的使用，但整體而言，對於混凝土活化抑低的效果不明顯(相較於以小型迴旋加速器為主的放射性物質生產設施)，主要原因在於粒子治療設施環境的高能中子數量多，中子的減速與吸收的效果較差，如何有效達到活化抑低的手段值得進一步探討。

參、展望

放射活化分析的結果與射束損失情節的假設息息相關，針對本研究中的活化分析結果，均基於國內各設施的輻射安全分析報告所彙整的假設，然而輻射安全分析報告中的假設可能過於保守，對於活化分析的結果即存在高估的可能性。除此之外，蒙地卡羅放射活化分析技術可做為除役規劃的重要工具，其結果有利於預測或比對設施活化潛勢，但是不建議取代現場取樣與實驗量測，因為模型中有許多重要參數存在相當大的不確定性。建議如 IAEA-SSG-49 號報告所述，隨著設施實際運轉資料的收集與完備，逐步更新活化分析的預測，以利日後設施除役的規劃與準備。



表 1、高強度輻射設施的二次中子特性及設施活化潛勢匯整比較

		靶體	加速器室與射束線室	治療室
		鐵	鐵	水
250 MeV 質 子設施	前向	中子通量	$4.6 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{s} \pm 0.1\%$	$4.8 \times 10^2 \text{ n/cm}^2/\text{s} \pm 0.2\%$
		$\phi_{he}, \phi_f, \phi_{epi}, \phi_{th}$ ϕ, ϕ, ϕ, ϕ	2.9%, 51.3%, 28.1%, 17.6%	50.6%, 22.3%, 8.2%, 18.8%
		混凝土厚度 CL>1	70 公分	0
		放射活性混凝土厚度	20 公分	0
	側向	中子通量	$8.4 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s} \pm 0.2\%$	$7.1 \times 10^1 \text{ n/cm}^2/\text{s} \pm 0.8\%$
		$\phi_{he}, \phi_f, \phi_{epi}, \phi_{th}$ ϕ, ϕ, ϕ, ϕ	0.0%, 24.0%, 35.7%, 40.3%	0.8%, 21.1%, 17.3%, 60.8%
		*殘存活度@EOB	加速器(鐵): $217 \text{ Bq/g} \pm 0.02\%$	混凝土內屏蔽(鐵): $0.16 \text{ Bq/g} \pm 0.8\%$
400 MeV/A 碳離子設施	前向	中子通量	$1.1 \times 10^3 \text{ n/cm}^2/\text{s} \pm 0.1\%$	$1.8 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s} \pm 0.1\%$
		$\phi_{he}, \phi_f, \phi_{epi}, \phi_{th}$ ϕ, ϕ, ϕ, ϕ	6.5%, 52.7%, 25.0%, 15.8%	41.2%, 34.5%, 9.6%, 14.8%
		混凝土厚度 CL>1	0	85 公分
		放射活性混凝土厚度	20 公分	0
	側向	中子通量	$1.5 \times 10^2 \text{ n/cm}^2/\text{s} \pm 0.2\%$	$5.5 \times 10^2 \text{ n/cm}^2/\text{s} \pm 0.5\%$
		$\phi_{he}, \phi_f, \phi_{epi}, \phi_{th}$ ϕ, ϕ, ϕ, ϕ	0.1%, 23.4%, 34.8%, 41.8%	1.4%, 22.6%, 17.5%, 58.6%
		*殘存活度@EOB	加速器(鐵): $0.32 \text{ Bq/g} \pm 0.05\%$	混凝土內屏蔽(鐵): $12.8 \text{ Bq/g} \pm 0.2\%$

*加速器室中針對加速器進行計算，治療室中針對混凝土內鐵屏蔽進行計算

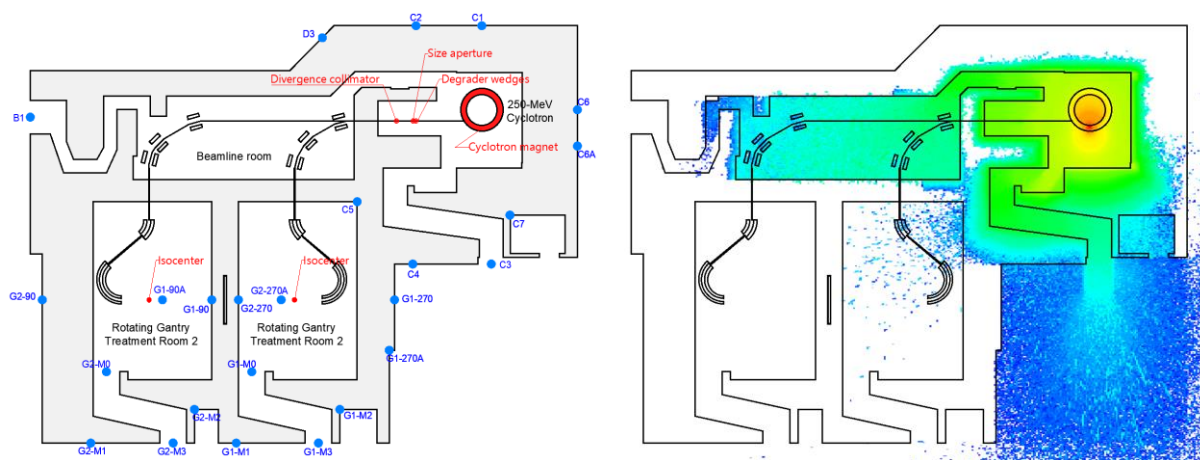


圖 1、質子治療設施模型與射束損失引發之輻射劑量率分布圖

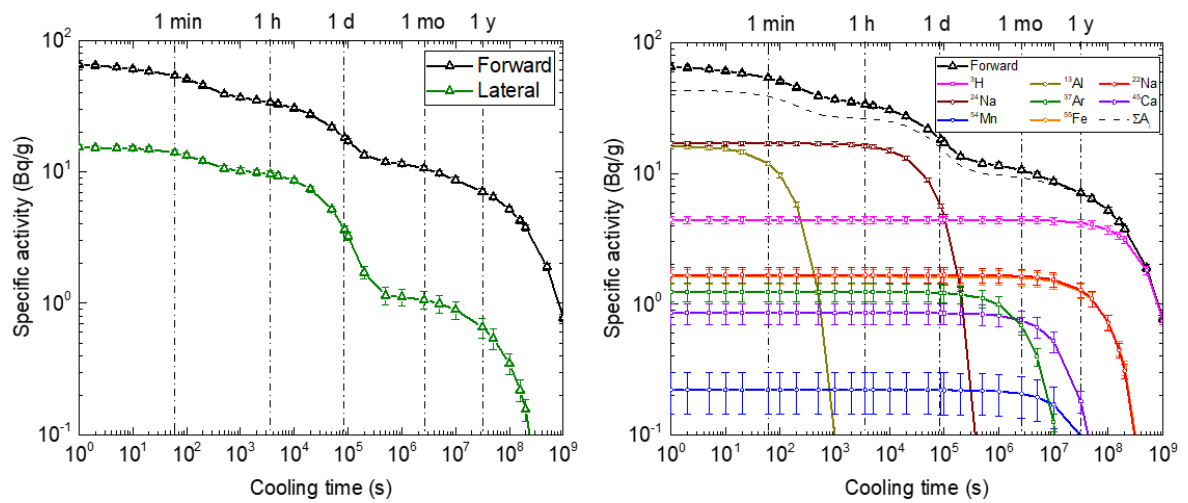


圖 2、質子設施加速器室的(左)前向混凝土表面與側向混凝土表面的活化潛勢隨冷卻時間的變化及(右)前向混凝土中的殘存核種組成



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

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：MM11003-0288)

田能全¹ 許芳裕¹ 張似璫²

¹清華大學原子科學技術發展中心 ²輻射防護協會

本計畫模擬輻射異常物回收作業過程中人員接觸不同強度輻射異常物情境，包括人工輻射異常物被誤熔等情境，並對國內鋼鐵業者進行現場訪查，以評估分析與確認相關從業人員可能接受之輻射劑量與健康風險。於 111 年本計畫研擬了發現人工輻射異常物之從業人員的注意事項建議，並蒐集研析國際組織對鋼鐵業者發現輻射異常物之應對作為，並辦理研究成果座談宣導會與業者進行意見交流，相關成果提供主管機關作為對鋼鐵輻射異常物管制與處置作法之參考。

This project simulated the exposure of workers involved in the recovery of iron and steel radiation anomalies during the recovery processes of different intensities of radiation anomalies, including artificial radiation anomalies being mistaken smelting. Besides, on-site visits and investigations of radiation safety to domestic steel companies to confirm the radiation doses and health risks of relevant practitioners may receive were also conducted. In 2022, precautions and suggestions for practitioners who discovered artificial radiation anomalies have been developed, response measures of international organizations to the



discovery of radiation anomalies in iron and steel industry were collected and analyzed, and a research results symposiums to exchange opinions with the industry was held. The relevant research results would be provided to the competent authority of ionizing radiation (AEC) as a reference for the control and disposal of abnormal iron and steel radiation in Taiwan. °

壹、計畫目標

本計畫針對業者通報發現鋼鐵輻射異常物後，進行通報案件輻射異常物之現場調查，並模擬輻射異常物回收作業過程中人員接觸不同強度人工輻射異常物情境，評估分析關鍵群體因作業所受之輻射曝露劑量及健康風險，並進行現場訪查，以確認相關從業人員之輻射劑量與健康風險。

貳、重要成果

一、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)對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查

1. 總計完成 31 起鋼鐵業輻射異常物通報案件之現場檢/訪查；
2. 建立 31 起通報案件之不同平面輻射劑量分布曲線；
3. 完成 17 家鋼鐵熔爐業者之鋼鐵業年度輻射偵檢作業檢查。

(二)對國內鋼鐵業者從業人員接觸不同強度人工輻射異常物情境模擬分析

1. 參考彙整鋼鐵異常物處理流程之國際相關文獻並結合我國實際



訪查情形，建立鋼鐵異常物處理的三種曝露情節：一般曝露情節、回收曝露情節與誤熔曝露情節。

2. 一般曝露情節又劃分為三個部分，分別是廢金屬運送、鋼鐵異常物搜尋與暫存、退運處理。本計畫依據 109-110 年通報發現之人工核種，建立其一般曝露情節的體外劑量資料庫。資料庫係以單位貝克(1 Bq)之人工來源核種、以及單位時間(1 h)進行計算。
3. 回收曝露情節可分為五個部分，分別是廢金屬運送、廢金屬冶煉、爐渣運送、集塵灰運送、鋼運送。廢金屬回收曝露情節之體內/外劑量資料庫係以單位活度(1 Bq)核種、以及單位時間(1 h)進行計算。此一資料庫係按照假設之廢金屬回收曝露情節進行模型建立、計算，除了體外曝露途徑計算外，部分從業活動需考慮體內曝露途徑，包含吸入與嚥入兩種不同曝露途徑計算。

(三)人工輻射異常物誤熔情境模擬評估

1. 本計畫依據 109-110 年通報發現之人工核種將其分為幾個群體，分別涵蓋鑄錠與集塵灰的 Co-60、Ir-192，以及涵蓋集塵灰與爐渣但非銑同位素的 C-137，分別建立其人工輻射異常物誤熔情境。人工鋼鐵輻射異常物處理之誤熔曝露情節分為五大個部分及其相關影響流程，包括廢金屬運送、廢金屬冶煉、爐渣運送、集塵灰運送與鋼運送等。
2. 以單位活度(1 Bq) 109-110 年通報發現之人工核種(Co-60、Cs-137 與 Ir-192)、以及單位時間(1 h)進行計算，建立典型核種在廢金屬誤熔曝露情節之體內/外劑量資料庫。此一資料庫係按照假設之廢金屬誤熔曝露情節進行模型建立、計算，除了體外曝露途徑計



算外，部分從業活動需考慮體內曝露途徑，包含吸入與嚥入兩種不同曝露途徑計算。

(四)探討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評估

1. 完成通報人工輻射異常物 (109-110 年通報，111 年無通報發現人工鋼鐵輻射異常物)之一般曝露情節相關人員可能接受之劑量與風險評估：工作人員最大個人有效劑量發生在輻射異常物搜尋的搬運人員，約為 1.25×10^{-3} mSv。以此最大劑量進行保守評估所得之風險，仍小於相當於接受 1 次醫療胸腔 X 光檢查的劑量(約 2.0×10^{-2} mSv)與風險，故此風險可予以忽略。
2. 完成誤熔情節之相關人員劑量評估：在誤熔曝露情節中，異常物對一般民眾造成的最大個人有效劑量為公共產品的鋼構建築情節，主要因素乃是其受到四面射源的曝露且作業時間又是所有情節中較長(2000 h)。全部案例中最大個人有效劑量範圍為 $3.05 \times 10^{-3} \sim 1.25 \times 10^{-2}$ mSv，最大集體劑量範圍為 $2.50 \times 10^{-2} \sim 1.02 \times 10^{-1}$ man-Sv。即使全部受影響者為一人，其所受之劑量亦小於我國規定的一般人年劑量限值 1 mSv。
3. 完成回收情節之相關人員劑量評估：因回收所得之一般民眾集體有效劑量落在 $1.21 \times 10^{-10} \sim 1.16 \times 10^{-2}$ man-Sv，其中，最大個人有效劑量發生在公共產品的鋼構建築情節，此乃係因為該情節之曝露時間最長(2000 小時/年)且來自四面牆的曝露所造成之有效劑量結果。一般民眾最大個人有效劑量發生在 Ir-192，其值為 1.95 μ Sv。從結果可得，回收含有放射性的廢金屬，且該廢金屬的活



度濃度值低於國際原子能總署出版的安全標準叢書編號 RS-G-1.7 的表 2 所提及之豁免值，其因回收所造成的曝露之從業人員最大個人有效劑量遠小於我國規定的一般人年劑量限值 1 mSv，且造成之癌症風險皆很低。

(五)研擬人工輻射異常物從業人員注意事項建議

本計畫提出對於接觸輻射異常物相關工作人員(如廢金屬運送司機、監視人員、輻射異常物搜尋人員、搬運人員、輻射異常物暫存管理人員、退運處理裝載人員、退運處理司機、卸載人員等)之個別之輻射安全注意事項建議。

(六)蒐集與研析國際組織對鋼鐵業者發現輻射異常物之應對作為

本計畫彙整 IAEA SSG-17 提出金屬回收和生產設施的每個經營者應制定發現輻射異常物之應對計畫建議，以及廢金屬中含放射性廢棄物(輻射異常物)的管理建議。

(七)辦理研究成果之國內鋼鐵業者座談宣導會：

本計畫於 111 年 11 月 30 日辦理一場「111 年國內設有熔煉爐鋼鐵業者輻射安全宣導」座談會，與業者進行意見交流，作為發現鋼鐵輻射異常物作業流程精進與人員劑量合理抑低措施之參考。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文

國際會議論文發表 1 篇：

- Fang-Yuh Hsu, Hao-Siang Hsu, Yong-Tai Chen, Li-Yen Chen. Radiation Dose Survey of Workers Related to Iron and Steel Radiation Anomalies, 2022 IRPA North American Regional Congress, St. Louis, MO, 20-23 February, 2022.



參、展望

本計畫規劃於 112 年持續針對鋼鐵業者通報發現之輻射異常物案例評估相關工作人員可能接受之輻射劑量與風險外，亦持續研析國際組織對之應對作為、檢視我國相關偵檢標準、程序與管理作法，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，並評估國內鋼鐵從業人員接受關鍵劑量時機及提出輻射防護措施建議。此外，亦將規劃辦理 112 年研究成果之國內鋼鐵業者座談宣導會，持續與業者進行意見交流。

**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：MM11003-0289)

李紳豪^{1,2} 蕭安成^{1,3} 許世明^{1,4} 劉明祥^{1,5} 陳合興^{1,6} 林妙蓉^{1,2}

曾珉珉^{4,7} 陳昱璉^{1,4}

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國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系

⁵阮綜合醫療社團法人阮綜合醫院 ⁶臺中榮民總醫院 ⁷臺北醫學大學附設醫院

放射治療劑量給予的準確性，將影響治療成效；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。本研究計畫，其目標如下：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。本計畫將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。111 年共完成 111 臺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，並實地訪查放射治療設備檢視影像導引系統其品質保證作業精進與臨床可行性評估。本計畫收集國內外醫學物理師甄審及考核之相關規範，亦完成拍攝醫用直線加速器及含放射性物質之遙控後荷式近接治療設備之品質保證作業示範教學影片。



The accuracy of radiation therapy dose administration will affect the treatment outcome. The implementation of radiation quality assurance operations needs to combine with clinical actual inspection and dose verification. Through continuous and complete review, the quality of radiation therapy will be improved. The objectives of this research project are as follows:

1. Inspection of radiation safety and medical exposure quality assurance of domestic radiotherapy equipments;
2. Review the implementation methods and results of quality assurance operations for new radiation therapy technologies;
3. Improve the professional ability of domestic radiation therapy exposure quality assurance personnel.

This project will conduct a series of inspections on radiotherapy equipments across the country to ensure radiation safety and quality of treatment for patients. In 2022, 111 radiotherapy equipment were measured and all of them were within the acceptance criteria. radiotherapy equipment with image-guided radiotherapy systems were audited, the results were analyzed in statistical graphs. The information of examination and assessment of medical physicists in different organizations were collected, and the videos of quality assurance procedures for linear accelerator and brachytherapy were made.

壹、計畫目標

本計畫將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，可收集數據並進行綜合分析，俾利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、111 年執行訪查結果

(一)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

共完成了 77 臺醫用直線加速器、18 臺遙控式後荷近接治療機、11 臺電腦斷層治療機、3 臺加馬刀及 2 臺電腦刀，總共 111 臺放射治療設備之現場查核工作，受檢項目皆符合輻射醫療曝露品質保證標準的規定且已達到 111 年之訪查目標。

(二)新型放射治療技術品質保證作業執行狀況與可行性

本年度收取共計 41 台低能量影像導引系統品質保證作業結果，包含 36 台直線加速器及 5 台電腦斷層治療儀，完成國內臨床放射治療用低能量影像導引系統品質保證作業執行狀況與可行性評估並達到 111 年實地訪查工作目標。

二、完成依現行《輻射醫療曝露品質保證標準》規範製作醫用直線加速

器、含放射性物質之遙控後荷式近接治療設備之品質保證精進作業示範教學影片，以供國內臨床參考使用。

三、完成收集國內外醫學物理師之甄審、考核之相關規範，以作為國內

醫學物理師甄審制度法制化之參考。

四、完成論文投稿共二篇：

(一) Study the quality assurance control operation on medical exposure of radiotherapy equipment ; 22nd Asia-Oceania Congress on Medical Physics , e-poster 發表

(二) The quality assurance of image-guided radiotherapy survey in Taiwan ; 22nd Asia-Oceania Congress on Medical Physics , e-poster 發表



參、展望

計畫第二年（112 年）持續進行國內所有使用中放射治療設備，輻射安全與醫療曝露品保作業檢查。針對新型的臨床治療設備及技術，對國內具備無整平濾片技術之設備，進行抽樣實地訪查，以確認現行對該技術之品質保證項目是否有精進空間，同時對少分次大劑量治療計畫之劑量驗證方式進行分析、比較，故將進行現況訪查，收集相關數據，以提出臨床通用之劑量驗證程序。依現行輻射醫療曝露品質保證標準規範，製作可供國內臨床參考使用之電腦斷層治療機、電腦刀與加馬刀之品質保證作業示範教學影片。



計畫曝露輻射安全與劑量約束評估研究

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

(計畫編號：MM11003-0290)

許芳裕

清華大學原子科學技術發展中心

本計畫分二年期進行，內容包括蒐集國際間計畫曝露輻射作業之劑量約束實務作法，提出適用國內不同類型輻射作業管制之劑量約束值建議。輻射源現況調查部分，於每年度內須完成至少 350 件非醫用輻射源輻射安全訪查，111 年以登記類可發生游離輻射設備、非密封放射性物質為主要訪查標的。依據年度訪查結果，統計其類型、用途及評估輻射劑量與風險，建立不同類型、用途之輻射源應用之輻射防護安全規範，使業者有所依循，以提升輻射安全之管制效能。

This project is carried out in two years. The content includes the collection of international planned radiation exposure practices and dose restraint practices, and proposals for dose restraint values applicable to different types of radiation operations in domestic. In the part of the investigation of the current status of radiation sources in domestic, at least 350 radiation safety inspections of non-medical radiation sources must be completed every year. In 2022, the main inspection targets were registered ionizing radiation equipment and unsealed radioactive materials. Based on the results of the annual survey in



each year, statistics of types, uses, and radiation doses and risks of ionizing radiation sources are evaluated, and radiation protection safety guides for the application of different radiation source types and uses of radiation sources are established to enable the industry to follow and to improve the effectiveness of radiation safety control.

壹、計畫目標

本計畫參考我國輻射源分級及分類，於每年度內完成一定數量輻射源之抽樣訪查作業，執行實際現場作業調查，依據年度訪查結果，統計其類型、用途及評估輻射劑量與風險，建立不同類型、用途之輻射源應用之輻射防護安全規範，使業者有所依循，以提升輻射安全之管制效能。

貳、重要成果

一、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) 執行放射性物質或可發生游離輻射設備輻射安全訪查

現場訪查及檢測結果已完成 472 件游離輻射源之抽樣現場訪查，包括登記類可發生游離輻射設備 299 件(移動型/手持式 X 光機 76 件，複查 3 件；櫃型 X 光機 105 件；X 光管式靜電消除器 5 件；離子佈植機 85 件；動物用(獸醫)X 光機 28 件，複查 3 件)；密封放射性物質 32 件；以及非密封放射性物質作業場所 141 件(包括登記類 6 件、許可類 135 件)。



(二) 蒐集、研析國際間對非密封放射性物質輻射作業劑量約束實務作法、建立非密封放射性物質之輻射防護安全規範草案建議

1. 蒐集美國相關參考資料及文獻，研析彙整其要點如下：

美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC) 於 1999 年針對放射性物質的使用執照申請，提出了綜合導則 NUREG-1556 Vol.7 報告，此報告主要針對關於學術研究發展和有限定範圍使用放射性物質之具體許可申請與審查程序及導則。延續 NUREG-1556 Vol.7 報告之內容與精神，NRC 又於 2007 年提出了另二份報告 NUREG-1556 Vol.13 及 NUREG-1556 Vol.21，分別又針對商業放射性藥物許可及利用加速器生產放射性物質的許可，提出相關申請與審查程序及導則。此三份報告之主要內容相仿，但針對不同使用目的提出了部分的特定要求。

美國佛羅里達州衛生署輻射控制局(Florida DOH Bureau of Radiation Control)提出 DH-1054 表格，作為申請或更新使用放射性物質之申請書檢查清單，此檢查清單依據美國 NRC 的 NUREG-1556 系列技術報告的要求，供申請者及審查者做為參考與指導。

彙整上述參考文獻、NUREG-1556 系列技術報告及 DH-1054 檢查清單之輻射安全評估資訊，較值得討論的議題在人員劑量監測(Personnel Monitoring)要求上須進行工作人員體外及體內劑量監測，即須要求工作人員配戴劑量佩章與進行體內曝露偵測(如全身計數或生化分析)；除非經評估輻射工作人員不可能超過美國法規年約束值(深部劑量-有效劑量：5 毫西弗/年、淺部-皮膚劑量：50 毫西弗/年、淺部-肢端劑量：50 毫西弗/年、眼球劑量：15 毫西弗/年)，即



可不用實施配戴劑量佩章措施；或經評估對於使用非密封放射性物質的工作人員，能夠證明其年攝入放射性物質之活度不可能會超過年攝入限度(ALI)的 10%。

2. 非密封放射性物質輻射防護安全規範草案建議書

一般非密封放射性物質作業場所或實驗室輻防安全規定之內容包括(1)作業場所或實驗室設計與配置、(2) 個人防護措施、(3) 放射性污染去除與廢料處理等。本計畫提出之非密封放射性物質輻射防護安全規範草案建議書，全文列於計畫期末成果報告之附錄三。

(三) 評估各類別輻射源或輻射作業之劑量約束建議值，提出劑量約束建議值

本計畫依國際間輻射作業劑量約束實務作法並結合訪查數據，評估 111 年度訪查之各類別輻射源或輻射作業之劑量約束建議值，並提出劑量約束建議值如以下說明，提供主管機關作為管制參考。

依據劑量約束的定義，劑量約束為在最適化該輻射源防護時作為劑量的上限，因此本建議書對不同類別之輻射作業劑量約束值評估方法如下：

1. 在前述 2.2 節之正常作業可能造成年劑量的上限(以正常作業造成輻射工作人員劑量的平均值 ± 3 倍標準差，作為工作人員職業曝露的劑量約束值範圍。
2. 對一般民眾的劑量約束值範圍則建議取職業曝露的劑量約束值的 30%。
3. 參考(須符合)ICRP 之建議：
(A) 對緊急曝露之劑量約束值範圍為 > 20 至 100 mSv 間；



(B) 對職業曝露之劑量約束值範圍為 $1 \leq$ 至 20 mSv 間；

(C) 對公眾曝露之劑量約束值範圍為 $< 1 \text{ mSv}$ 。

依據上述方法並參考與結合本年度(111 年)及「109 至 110 年度計畫曝露輻射安全與劑量約束評估研究」計畫之訪查數據結果，提出之不同類別非醫用輻射作業之劑量約束值(範圍)建議。任一類別職業曝露之劑量約束值係以 109 年至 111 年現場調查所評估之全部件數之工作人員年劑量平均值至平均值+3 倍標準差之值為其建議劑量約束值範圍，如其小於 1 mSv 則取 1 mSv 為劑量約束值；若其大於 20 mSv ，則取 20 mSv 為劑量約束值。公眾曝露則以職業曝露的 30% 為原則，若其大於 1 mSv ，則取 1 mSv 為劑量約束值。

(四) 提出輻防管制及風險控管之具體建議

111 年已完成 472 件游離輻射源之抽樣現場訪查，在可發生游離輻射設備部分，移動型/手持式 X 光機現場訪查與檢測 76 件，其中有 3 件無安全連鎖裝置，動物用(獸醫)X 光機現場訪查與檢測 28 件，另有 3 件安全連鎖裝置故障，總計有 6 件異常係安全連鎖裝置故障的問題，亦為近年發現的主要異常問題之一。

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，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，以及對密封放射性物質輻射源的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。

二、學術成就(發表國內外研討會及期刊論文)

發表 1 篇國際會議論文：

- Fang-Yuh Hsu and Li-Yen Chen, Radiation safety investigation of non-medical planned exposure radiation practices in Taiwan, 67th Annual



Meeting of Health Physics Society, Spokane Convention Center,
Spokane, WA, USA. 17-21 July 2022.

參、展望

規劃下年度(112 年)以許可類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)為主要訪查標的，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。結合歷年(109-112)訪查數據，評估訪查輻射源或輻射作業類別之劑量約束建議值，作為管制參考。



既存性曝露管理規範研析

Research and Analysis on Regulations for Existing Exposure Management

(計畫編號：MM11003-0291)

許芳裕¹ 尹學禮²

¹清華大學原子科學技術發展中心 ²美洲保健物理學會台灣總會

本計畫分二年期進行，工作內容包括蒐集研析其他國家就既存性曝露管理規範與具體作為，並研析我國既存性曝露管理行業(利害關係人)範疇，包含接受宇宙射線曝露之飛航空勤人員、職業曝露氡氣、建材或 NORM 工作場域等。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。本計畫於 111 年蒐集與研析國際輻防組織或其他國家就既存性曝露管理之具體做法或規範、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。

This project is carried out in a two-year period. The work includes collecting and analyzing the existing exposure management regulations and specific actions of other countries, and analyzing the existing exposure management industry (stakeholders) in Taiwan, including aircraft crews exposed to cosmic rays, occupational exposures radon gas, building materials or NORM workplaces. Before formulates or revises the promotion regulations in domestic, it is necessary to implement the public participation system, fully



communicate with the industry, understand the difficulties, solve the problems, or improve the supporting measures, to reduce the impact of domestic first promotion of regulations for existing exposure management in the future. Thereby, expert research conferences and explanatory meetings with industry players are planned to hold. This year (2022) project collected and analyzed the specific practices or guideline provided by the International Radiation Protection Organization or other countries on the management of existing exposures, examined the scope of existing exposure management industry in Taiwan, and proposed a draft for the management of existing exposures, evaluated the feasibility and impact, and complete the handling of two expert seminars and one industry symposium.

壹、計畫目標

目前各國對於 ICRP-103 報告所提之既存性曝露，均規劃依據 ICRP 建議並結合其國情，訂定相關管制/管理準則，惟大多數國家仍處研議階段。本研究蒐集研析各國對既存性曝露之天然輻射源的輻防管理作法或執行情形、評估我國可行性並分析推動既存性曝露管理之影響衝擊，以期未來有助於我國推行既存性曝露管理規範。

貳、重要成果

本計畫於 111 年蒐集與研析國際輻防組織或其他國家就既存性曝露管理之具體做法或規範、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，以及辦理二場次專家研商會議與一場次業者座談說明會，重要成果分別說明如下。

一、蒐集與研析國際輻防組織或其他國家就既存性曝露管理之具體做法



或規範

1. 在宇宙射線的影響上，ICRP 於 2016 年針對飛行中會受到宇宙射線曝露之機組人員與乘客，提出輻防相關建議(ICRP 132)，國際各國亦陸續參考 ICRP 之建議，制定相關管理規範或指引，以確保其國籍航班之機組人員的輻射安全與防護管理；國內涉及宇宙射線之相關行業為有國際線航班之航空公司。
2. 在氡氣的影響上，ICRP 建議國家權責單位應依其國情訂定氡氣措施計畫，評估其氡氣之推導參考基準，並建議要能合理在 $100\sim 300\text{ Bq/m}^3$ 之間，世界各國大致採取類似管理參考基準，包括美國採用 150 Bq/m^3 ，澳洲與以色列採用 200 Bq/m^3 ，加拿大採用 800 Bq/m^3 ；而國內原能會曾委託國內學者進行居家室內氡氣調查，結果發現均在數十 Bq/m^3 範疇，因此國內氡氣情況相較於其他國家而言，對民眾影響較為輕微。
3. 在 NORM 的影響上，大多數情況下，加工材料中所含之 NORM 是天然存在的，並沒有故意添加其放射性，因此涉及 NORM 的行業中工作人員的曝露通常不被認為是職業曝露；但仍應該注意及了解他們可能接受的曝露，ICRP 認為工業上應用天然放射性物質的範圍十分廣泛，因此對工作人員的防護，建議須依個別工作場所及其工作條件作分級方式的管理。
4. 在建材的輻射影響及管理上，IAEA SSG-32 報告對室內建材輻射安全防護及管制作法提出建議，國際上有中國大陸、波蘭、奧地利、以色列、捷克、俄羅斯、芬蘭等國已將建築材料天然放射性相關標準要求，我國亦已與國際同步，於 106 年 9 月應因國際發



展趨勢修訂天然放射性物質管理辦法，採用建材活度濃度指數作為建材分類管理基準，確保建材對公眾之輻射安全。

二、檢視我國符合既存性曝露管理行業之範疇

本計畫檢視與調查國內符合既存性曝露管理行業之初步概況，分類彙整說明如下。

(一)受宇宙射線影響之行業

經調查國籍民用航空運輸業有經營長程國際航線者包括中華航空、長榮航空及星宇航空三家航空公司。

(二)涉及 NORM 工業行業

依據 ICRP 142 及 EURATOM 所列出之涉及 NORM 工業行業進行網路搜尋與電話諮詢等初步調查，國內可能涉及 NORM 之工業行業包括：(1)礦石的開採與加工(包括石油/天然氣開採)、(2)金屬生產、(3)化石燃料(煤炭)的燃燒、(4)水泥熟料生產、(5)磷酸鹽加工業、(6)二氧化鈦(titanium dioxide)顏料的製造、(7)稀土元素提取、(8)鋯石(zircon)和氧化鋯(zirconia)工業、(9)地熱能生產、(10)水處理。

(三)涉及天然放射性既存性曝露之建材業者

建築材料(包含用殘渣或副產品製造的建築材料)：國內預拌混凝土或生產混凝土業者約有 404 家，磚瓦業者約有 26 家，建築用陶瓷業者約 63 家，天然石材加工與銷售業者約 2 百多家。(原能會目前每年對天然石材加工與銷售業者進行現場訪查，近年訪查結果均符合天然放射性物質管理辦法第 9 條之規定)。

(四)受氡氣曝露影響之行業

國內受職業曝露氡氣影響之行業調查結果，可詳前述涉及 NORM



工業行業之礦石的開採與加工的國內礦場狀況，但可能之曝露情況與其實際影響程度，尚須進一步調查。

三、研擬既存性曝露管理規範(草案)建議書並評估可行性及衝擊

本計畫已提出適用於我國之既存性曝露管理規範(草案)，草案內容包括第一章：總則(立法目的、法源依據與用詞定義)，第二章：空勤人員之管理，第三章：氬氣之管理，第四章：天然放射性物質產業之管理，第五章：建材放射性物質之管理。草擬之既存性曝露管理規範(草案)全文列於期末成果報告之附件一。

四、辦理專家研商會議

本計畫假台大集思會議中心於 111 年 7 月 12 日舉行「國際飛航宇宙射線之安全管理趨勢及國內因應對策」專家會議(圖 1)；於 111 年 11 月 17 日舉行「含天然放射性物質商品國際管理趨勢與國內因應對策」專家會議(圖 2)。

五、辦理業者座談說明會

本計畫於 111 年 11 月 23 日台大集思會議中心舉行「國際飛航宇宙射線之安全管理趨勢及國內因應對策」業者座談說明會(圖 3)。

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表



圖 1 專家研商會議(111/7/12)



圖 2 專家研商會議(111/11/17)



圖 3 業者座談說明會(111 /11/23)

參、展望

本計畫規畫於 112 年將針對國內 NORM 工業可能影響較重要者進行深入研析，並探討後續可能之分級管理；此外，規劃於 112 年將執行之工作包括：撰擬業者實施劑量合理抑低之自主管理措施或指引(草案)、撰擬主管機關審查標準或程序(草案)建議，以及邀集既存性曝露管理受影響之利害關係團體，辦理至少 3 場業者溝通/說明會。



核電廠除役階段之輻射安全管理與規劃技術研究

Research on the radiation safety management and planning technology for
decommissioning of nuclear power plants

(計畫編號：AEC111003)

黃珏吉 林士軒

核能研究所

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，是保障輻射工作人員之關鍵與重要的課題，故有必要精進輻射安全管理技術，包括除役期間輻射劑量合理抑低之輻射防護措施開發、輻射管制應用對策研擬及報告審查技術建立，俾利精進國內輻射防護與管制技術，完善管制核設施除役之輻射安全。針對此需求，本計畫執行工作包括：研析除役作業場所輻射分析之審查技術、精進核電廠除役期間輻防管制技術以及建立除役期間與除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術等。

Since a large number of radiation operations are carried out at various stages during the decommissioning period, the implementation of radiation regulations, radiation protection operations, complete protective measures and technical capabilities are key and important issues for the protection of radiation workers, so it is necessary to strengthen the technique for radiation safety regulation. It includes the the development of radiation protection methods for the radiation dose as low as reasonably achievable, the



development of radiation control application policies, and the establishment of report review methods to improve the technologies of domestic radiation protection and regulation.

In response to this demand, the proposed implementation of this project includes: research of radiation analysis techniques for decommissioning workplaces, refinement of radiation control technology at all stages of decommissioning, and review technology for the environmental radiation monitoring report for the decommissioned nuclear power plant.

壹、計畫目標

因應未來核電廠陸續除役，需發展核電廠除役相關安全管制技術，並吸收核電廠除役國際經驗，發展完整之大型核設施除役規劃及管理技術，其中尤以建立支援核電廠除役安全管制之研究團隊並培養實務人才，是為當下應優先執行的要務。故本計畫之執行內容包含(一)除役作業場所輻射分析之審查技術研究；(二)精進除役期間輻射管制技術之研究；及(三)除役期間與除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術建立及訓練。

貳、重要成果

本研究計畫之重要成果與學術成就如下：

一、研發成果重要貢獻

於「除役作業場所輻射分析之審查技術研究」完成除役廢棄物離廠偵測國際規範研析，由於核設施的除役與拆除，預期未來將會產生相當大量的除役廢棄物，這些廢棄物大部分都未遭受或僅具有微量的放射性污染，並且仍具有價值。過去國際上處理這些廢棄物大多採用低放廢棄



物處置設施之處置/替代做法，但目前已有許多個案開始採用回收/再利用方案。本研究針對除役廢棄物解除管制之回收/再利用方案及輻射評估方法，從管制規範、實務經驗、以及健康、環境與社會經濟影響等面向進行剖析。此外，針對離廠標準，本研究完成 NUREG-1640 中的放射評估方法，及 NRC IE Circular No. 81-07 文件中相關標準的制訂依據與使用原則之研析，探討材料解除管制的放射性評估方法及偵檢標準。國內目前正面臨核電廠除役的階段，有關單位也應檢視及因應上述材料回收/再利用的各項挑戰及建議，以確保可提出安全且有效的除役廢棄物解除管制的實施方案。

於「精進除役期間輻射管制技術之研究」完成核電廠除役獨立驗證機構管理機制研究，藉由研析美國橡樹嶺科學與教育學院(Oak Ridge Institute for Science and Education, ORISE)，探討國際獨立驗證機構之資格條件、經費來源與設備需求等。結果顯示，ORISE 可直接與美國能源部(DOE)簽約，或透過工作訂單方式，與其他 DOE 承包商或外地辦事處簽約而獲得經費(如圖 1)。而 ORISE 與美國核管會(NRC)之合作關係基於 NRC 與 DOE 間之機構間協議(interagency agreement)進行簽約，且指出 ORISE 實驗室執行 NRC 工作必須依據 DOE 合約進行，協助 NRC 進行除役相關文件技術審查、過程中偵檢(in-process inspections)及確認偵檢(confirmatory surveys)，並提供輻射偵檢及實驗室分析技術。我國獨立驗證機制仍於發展階段，參考國際作法，及國內目前人員劑量計實驗室與輻射防護偵測業者之認可、管理與運作執行經驗，建議可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 2)，確保除役廢棄物殘餘放射性符合各階段輻射量測之預定標準。

於「除役期間與除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術建立及訓練」完成除役廢棄物表面污染容許量標準研究，本研究研析 ANSIN13.12 及 IAEA DS-500 兩份報告關於表面污染容許量標準之訂定原則，其中 ANSIN13.12 針對由管制區解除管制之物件，對一般大眾關鍵群體劑量總有效劑量(total effective dose, TED)限制在 $10 \mu\text{Sv/y}$ (1.0 mrem/y) 以解除管制監管控制的材料。而表面活度篩選水平，是以表面質量轉換因子(即 $\text{cm}^2/\text{g}=1$)所推導出來的，對於表面質量比率顯著不同之材料，則應對應其質量面積比調整表面活度篩選水平。IAEA DS-500 延續 IAEA GSR Part 3 報告之精神，將解除管制的劑量基準訂為 $10 \mu\text{Sv/y}$ ，並使用此基準推導通用解除管制標準，輻射作業之固體物質解除管制之選項，如圖 3 所示。其中，限值推導可使用實際情節，採每年 $10 \mu\text{Sv}$ 之有效劑量標準；或使用低機率情節推導，採每年 1 mSv 的有效劑量標準與每年 50 mSv 的皮膚等效劑量限值，由上述二者採較低者作為標準。針對表面污染解除管制之限值，亦建議可由密度與厚度方式計算，並與比活度限值比較，以判定是否能解除管制。藉由研析上述兩份報告，以精進除役期間與除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術。此外，本研究辦理除役廠址輻射偵檢審查技術教育訓練，派員擔任「111 年度輻射防護視察員訓練課程」講師，合計 10 小時，以提升我國核設施除役之輻防管制能力。

二、學術成就

本計畫產出論文 1 篇、研究報告 2 篇及形成教材 1 份，論文投稿於



台電工程月刊之「核設施除役廢棄物解除管制之國際發展現況及其影響評估」，研究報告包含「除役廢棄物離廠偵測國際規範研析」及「除役廢棄物表面污染容許量標準研究」，並派員擔任「111 年度輻射防護視察員訓練課程」講師及完成教材製作。

上述成果可應用於主管機關未來進行回收/再利用方案之管制及決策、建立獨立驗證機制，及制定離廠相關標準之參考，以確保核電廠除役過程之輻射安全。

參、展望

本四年期計畫配合核電廠除役作業之進行，發展核電廠除役相關安全管制技術，並吸收核電廠除役國際經驗，發展核設施除役規劃及管理技術。未來將持續精進研究成果，「除役作業場所輻射分析之審查技術研究」本年度已完整解析 NUREG-1640 分析中的放射評估方法，及 NRC IE Circular No. 81-07 文件中相關標準的制訂依據與使用原則。後續將持續蒐集及研析國際核設施除役廢棄物回收再利用案例及管制標準，以作為主管機關未來管制除役廢棄物之參考；「除役作業場所輻射分析之審查技術研究」完成研析美國核電廠除役廢棄物獨立驗證作法，探討國際獨立驗證機構之資格條件、經費來源與設備需求，並參考國內目前人員劑量計實驗室與輻射防護偵測業者之認可、管理與運作執行經驗。未來將蒐集國內核電廠除役管制之相關法規及資料，研擬獨立驗證可行性評估建議方案；「除役期間與除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術建立及訓練」研析 ANSI N13.12 及 IAEA DS-500 兩份報告關於表面污染容許量標準之訂定原則，及辦理 10 小時技術訓練。未來將持續蒐集及更新國際有關離廠管

111 行政院原子能委員會 委託研究計畫成果發表

制限值之資訊，並定期提供管制人員審查技術教育訓練，以提升我國核設施除役之輻防管制能力。

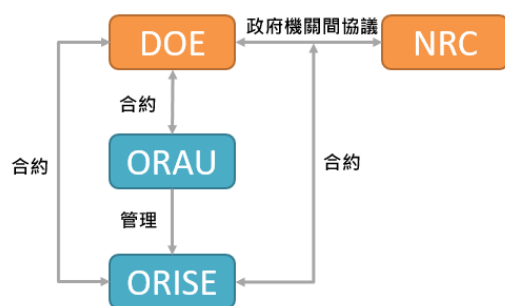


圖 1. ORISE 與管制機關間之關係

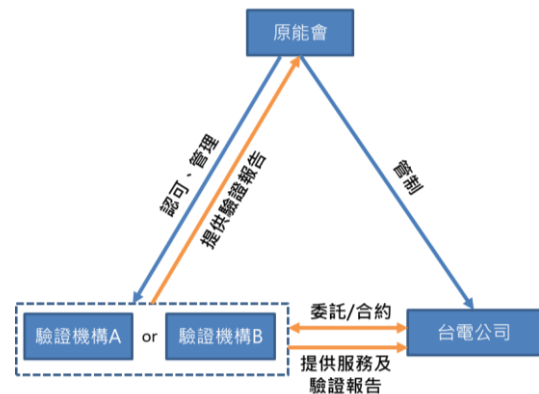


圖 2. 我國獨立驗證架構建立規劃

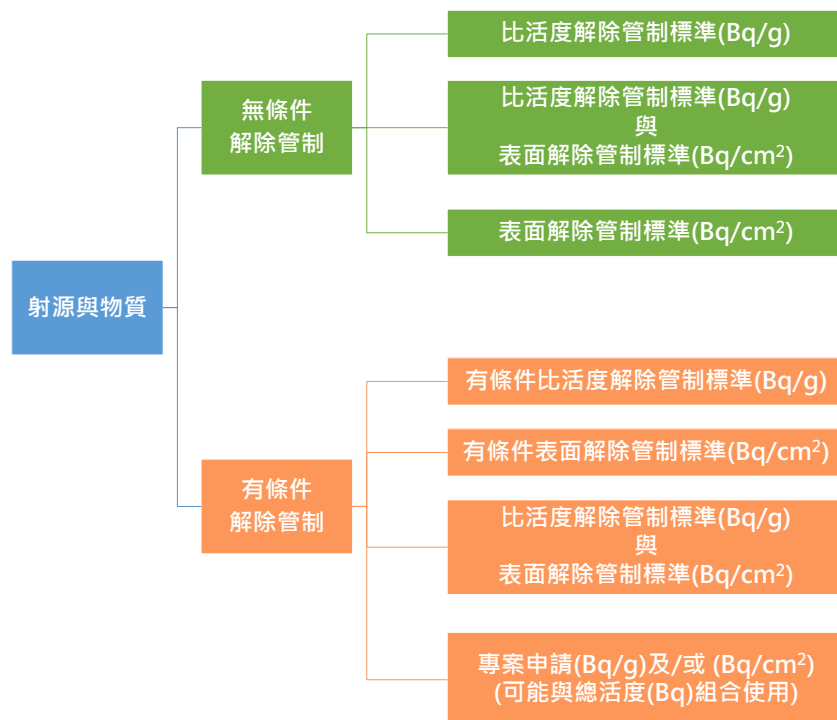


圖 3. 輻射作業之固體物質解除管制選項