

環境與能源

SOFC 硬鋁封裝接合件熱機疲勞性質研究	1
中子動態影像技術開發	5
低溫量子薄膜特性分析	9
量子感測元件特性分析研究	14
多孔性除濕輪體氣流特性分析	21

SOFC 硬鋁封裝接合件熱機疲勞性質研究

Thermo-Mechanical Fatigue Properties of Braze Sealing Joint for SOFC

(計畫編號：110A005)

沈則方¹、林志光¹、黃亮維²、劉建國²、吳思翰²

¹國立中央大學機械工程學系 ²核能研究所燃材組

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 接合件之熱機疲勞性質分析與破壞模式之影響，所使用的高溫硬鋁材料為核能研究所開發適用 MS-SOFC 之高溫硬鋁銀鍍合金材料，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剪力負載來進行熱機疲勞實驗，同時評估氧化環境時效處理對接合件熱機疲勞性質的影響，並透過微結構觀察以及元素分析，來了解接合件之破裂模式。試驗結果顯示未時效及 1000 小時時效處理後之接合件，不論室溫或是高溫區段的應力值增加，皆會造成熱機疲勞循環壽命的下降，說明兩者皆有熱機疲勞效應；兩者相比較之下，在高溫區段低應力條件下的表現結果相近，但當高溫區段的應力值上升，未時效接合件對於室溫區段的應力值相對較為敏感。接合件破斷面分析結果顯示，未時效剪力接合件在較短斷裂時間下，破斷面主要發生於氧化鉻層及銀鋁料層之間，而中、長斷裂時間下，觀察到破斷面有與時效接合件相同成分之鉻酸銀層出現，且破斷面逐漸轉移至鉻酸銀層及銀鋁料層之間；對於時效剪力接合件，在所有熱機疲勞壽命下，破斷面周圍區域皆會發生於鉻酸銀層及銀鋁料層之間，且其比例隨著疲勞壽命增加而增加，反之，破斷面位於氧化鉻層及鉻酸銀層之間的比例隨著疲勞壽命的增加而減少。

The purpose of this study is to characterize thermo-mechanical fatigue (TMF) 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 are a Ag-Ge sealant developed at INER and a commercial Crofer 22 H ferritic steel. The TMF test was conducted by applying temperature-dependent load (shear mode) on the joint with thermal cycling between room temperature (RT) and 750 °C in air. Comparison of the TMF properties between unaged and aged specimens is also made. The TMF life of both unaged and aged joints are decreased with increasing applied shear loading either at RT or at 750 °C. Such results indicate that the TMF effect did exist and impair the durability of the joints. Compared to each other, the results are quite similar while applying a lower load at 750 °C. However, the unaged joints are more sensitive to the load applied at RT than the aged joints, given a larger load applied at 750 °C. For unaged shear joints, fracture mainly occurred at the interface between Cr_2O_3 and braze with a short TMF life. For a longer accumulated time at high temperature, more and more AgCrO_2 forms at the joints with a medium or long TMF life. Fracture sites gradually transformed to the interface between AgCrO_2 and braze. For aged shear joints, fracture mainly occurred at the interface between AgCrO_2 and braze. In addition, the longer TMF life the aged joints sustained, more remarkable this phenomenon was. On the other hand, for the aged joints with a shorter TMF 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 系統硬銲封裝技術所用之硬焊填料，進行與金屬連接板接合之焊接件的熱

機疲勞性質分析，探討硬鋁填料/金屬連接板接合件在室溫與高溫循環工作條件下，承受不同程度應力的耐久性質，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

1. 對於未時效與時效剪力接合件在室溫與 750 °C 循環下進行之熱機疲勞實驗，接合強度比例值(JSR)分別為 0.2、0.4、0.6，結果顯示不論室溫或是高溫區段的應力值增加，皆會造成熱機疲勞循環壽命的下降（如表 1 及表 2），說明兩者皆有熱機疲勞效應存在。
2. 如表 3 所示，對於未時效剪力接合件，在較短疲勞壽命下，破斷面發生於氧化鉻層及銀鋁料層之間，而中、長疲勞壽命下，觀察到破斷面有與時效接合件相同成分之鉻酸銀層出現，並且破斷面多介於鉻酸銀層及銀焊料層之間，少部分區域之破斷面在各層之間游走。
3. 對於時效剪力接合件，在所有疲勞壽命下，破斷面周圍區域皆會發生於鉻酸銀層及銀焊料層之間，並且隨著越長的疲勞壽命比例越多，反之，破斷面位於氧化鉻層及鉻酸銀層之間之比例隨著越長的疲勞壽命越少，而少部分區域之破斷面在各層之間游走。

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高溫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。

表1、未時效處理接合件在剪力模式下的熱機疲勞循環數

Applied shear stress (JSR) at RT	Number of cycles to failure		
	Applied shear stress (JSR) at 750 °C		
	2.01 MPa (0.2)	4.02 MPa (0.4)	3.04 MPa (0.6)
8.00 MPa (0.2)	>60*	>60*	1
16.01 MPa (0.4)	>60*	<1	<1
24.01 MPa (0.6)	4	<1	<1

*Runout test

表 2、時效處理接合件在剪力模式下的熱機疲勞循環數

Applied shear stress (JSR) at RT	Number of cycles to failure		
	Applied shear stress (JSR) at 750 °C		
	1.94 MPa (0.2)	3.88 MPa (0.4)	5.81 MPa (0.6)
6.10 MPa (0.2)	>60*	30	13
12.19 MPa (0.4)	>60*	21	1
18.29 MPa (0.6)	9	4	<1

*Runout test

表3、未時效及時效處理之剪力試片破斷面位置比較

熱機疲勞循環壽命	時效條件	破斷面位置*
短	未時效	A
中	未時效	A+B+C
長	未時效	B+C+D
短	時效	A+B+E
中	時效	A+B
長	時效	B+E

* 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: 氧化鉻層

中子動態影像技術開發

Development of dynamic image technology on neutron radiography

(計畫編號：110A002)

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

本研究目標為先期探討影響動態影像擷取的參數、擷取速率及影像品質，藉此建立中子動態影像擷取程序，最終並以市售 3C 冷卻風扇或時鐘進行測試驗證，經執行，已建立中子動態影像的分析檢測能力。

This project is to develop the dynamic image technology of neutron radiography. To establish the capture procedure of the dynamic images, this work will preliminarily start on the parameter's study on the image resolution, frame rate, and quality improvement of the image system. Furthermore, a commercial 3C cooling fan or alarm clock will be investigated by using the of neutron radiography and thus establishes the dynamic image technology on neutron radiography after the study.

壹、計畫目標

為配合「創新原子能科技跨域研發產業關鍵術」施政目標，執行「原子物理新穎技術開發與應用」計畫，發展中子影像技術以協助國內產業開發新材料元件並提昇競爭力。未來 5G 設備的高效率散熱與輕量化需求下，3C 產品中散熱模組關鍵管件開發為可能應用的領域之一，由中子影像探測實際得知其填充物及制冷劑（含氫流體，如水）分佈以改善效能。

因此本計畫利用清華水池式反應器（以下簡稱 THOR）中子源，藉中

子照相技術(圖 1)來進行動態影像擷取程序的相關研究，以建立中子影像分析研究能力。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

(一)建立 THOR 中子照相系統進行動態中子影像分析能力，為國內之首次。

(二)建立影像擷取程序(圖 2)

- 1.完成中子動態照相成像系統的架設：項目依序主要為儀器連接、對焦測試、對焦後擷取影像。
- 2.完成中子動態影像擷取程序建立：安裝鏡頭、連接導線、開啟控制程式、進行對焦測試、設備裝設於中子照相箱設、設定參數條件(曝光時間、像素大小)開始影像擷取。
- 3.完成中子動態影像擷取參數及影像品質分析探討(圖 3-圖 4)。

本研究經執行後，有以下摘要結論：

- (一) ICCD 影像的空間解析度最高達 0.5mm，靜態影像可用 10ms 擷取(解析度約達 1 mm)。而 CCD 影像的解析度最高達 0.2mm，其影像經影像處理技術分析，可清晰觀察散熱模組管件內的流體分布或組件架構(圖 5)。
- (二) 在短曝光時間下，提高增益可以提升影像清晰度，但過度增益反會增加雜訊。
- (三) 散熱風扇的靜態影像尚可在 50ms 的曝光時間下取得，但相同條件下，無法獲得清晰風扇葉片的動態影像。需增強對比，方能取得較清晰動態影像。
- (四) 鬧鐘的指針較薄/細，無法獲得明顯對比，須強化顯示以利觀測。

經指針後經黏貼Cd片，增加對比度後，並使用sCMOS攝影機，已
可以獲得Frame Rate>2 FPS的動態影像。

二、學術成就方面

以上成果已於 2021 中子年會中發表，論文資料如下：

Jeng S.L., Peir J.J., Chung C.L., Wu C.J., Lee H.M., Chen S.H., Huang J.Y., “The Quality Evaluation of Thermal Neutron Imaging with Various Types of Digital Cameras”, 2021 Taiwan Neutron Science Society Annual Meeting and Neutron Scattering Technology Symposium, Kaohsiung, Taiwan, ROC Nov. 19-20, 2021.

參、展望

已藉 THOR 中子源建立中子照相的鏡頭聚焦、光圈設定、影像擷取、
成像時間等動態處理程序，為國內之首次，並已完成影像分析能力，未來
進一步可發展中子斷層影像(NCT)研究，以建立國內「中子斷層掃描」影
像的分析能力，更加應用於國內產業及民生用途上。

Neutron radiography and tomography

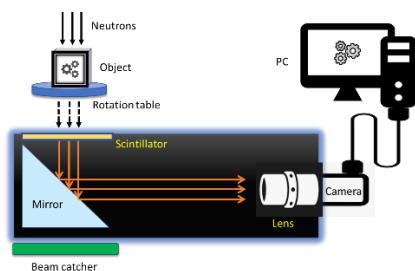


圖 1、中子照相系統示意圖

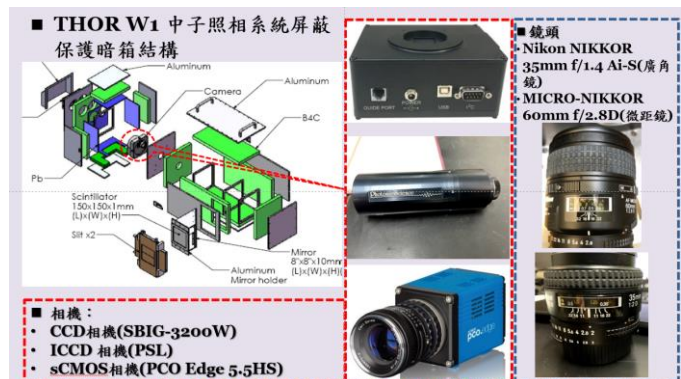


圖 2、THOR 中子照相系統

(a)



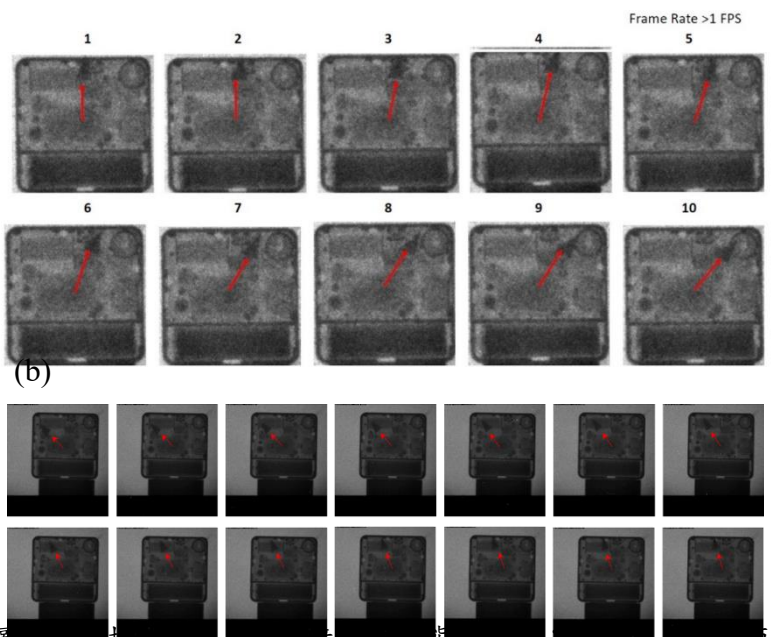
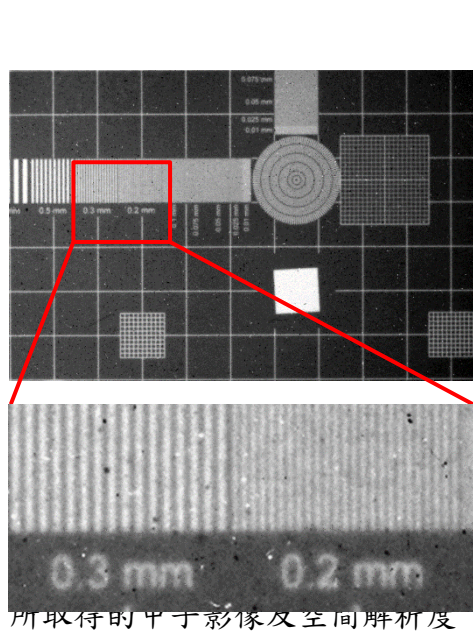


圖 4、擷取轉動開關的動態影像：(a)廣角鏡頭(35mm)+ICCD；(b)廣角鏡頭(35mm)+PCO 相機(sCMOS)，焦距條件:0.7；光圈 1.4。

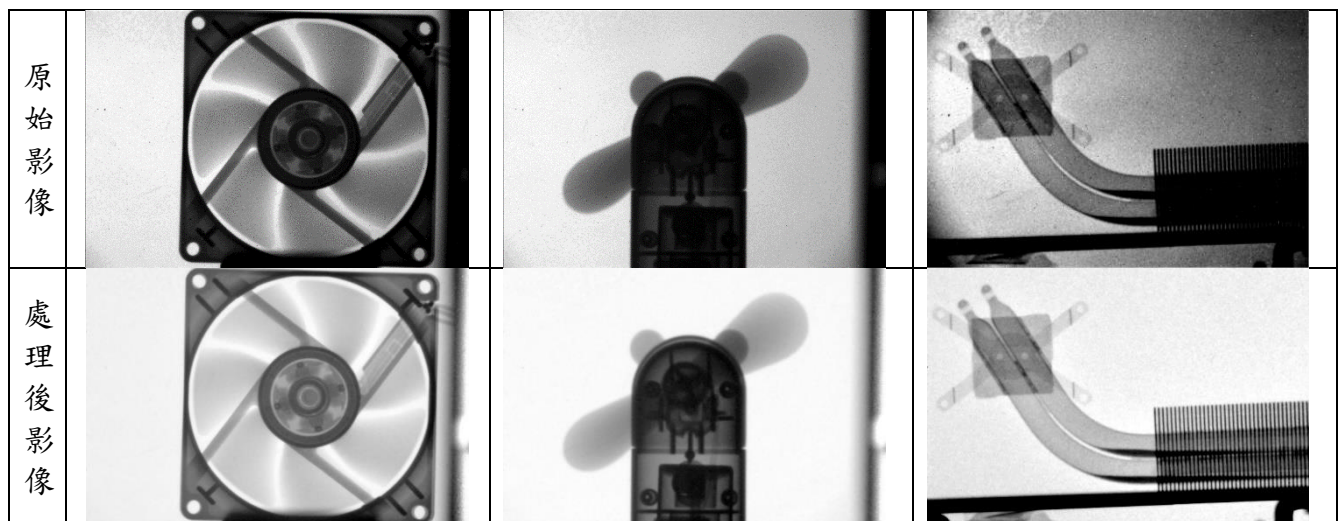


圖 5、散熱風扇、小電扇、CPU 散熱管中子照相的原始影像與處理後影像

低溫量子薄膜特性分析

Investigating low-temperature characteristics of quantum thin film

(計畫編號：110A002)

蔡宗鳴

中山大學材料與光電科學學系

近年來，環境永續發展的意識抬頭，電動交通工具，比如電動車和電動機車受到高度重視，並有來自全球的相關產業積極投入開發，其中，鋰電池是關鍵零組件之一，而為了開發高輸出電力密度的電池技術，鋰電池結合電容的複合型元件逐漸成為主流，而本計畫基於此，專注於新型固態物理電池研究，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，也設計高性能的電池元件。

In recent years, the awareness of sustainable development of the environment has risen. Electric vehicles have been highly valued, and related industries around the world have actively invested in development. Among the components of an electric vehicle, lithium batteries are one of the key components. For development the technology of high power density battery, the technology of combination of lithium batteries and capacitors have gradually become the mainstream. According to that, this project focuses on new solid-state physical batteries. In this project, based on device electric/material analyses and previous researches, the physical model is proposed for explanation of device operating characteristics and develop a high-performance battery.

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和定電壓量測，分析元件充放電性能，並利用材料分析，藉由如穿透式電子顯微鏡、拉曼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，最後搭配文獻的材料參數進行比較，分析元件的物理模型與操作原理，也設計高性能的電池元件。

貳、重要成果

雖然現行的全固態電池技術發展，在學術與業界中已經日趨成熟，但利用量子薄膜儲放電的電池研究卻非常稀少，因此，本計畫研究含量子薄膜的全固態電池，利用電性與材料分析，分析此種電池的操作原理與物理機制，也包括能帶的分析，與高性能電池的開發

一、電池元件操作物理機制分析

本計畫所使用的電池元件結構為 $\text{WO}_3/(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)$ 的奈米點/ NiO ，元件結構示意圖與量子點高解析度穿透式電子顯微鏡(high resolution transmission electron microscope, HR-TEM)材料分析如圖 1，並搭配 HR-TEM 中的能譜儀(energy dispersive spectroscopy, EDS)的點分析分析材料組成，分析鈦、矽和氧的原子比例和重量百分比，其中， WO_3 為 n 型氧化物， NiO 為 p 型氧化物，奈米點為被 SiO_2 包覆 TiO_2 的儲電層。

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 TiO_2 量子點材料片做拉曼光譜分析，得知 TiO_2 組成包含金紅石(Rutile)和銳鈦礦(Anatase)，此外，也量測光致發光分析，得知 TiO_2 主要成分為 Rutile ($E_g = 3\text{eV}$)，且缺陷能階為 2.36 eV 。

統整材料分析結果，比較文獻上的材料參數，發現充放電的缺陷能階(2.36 eV)與 TiO_2 自我參雜所形成的能階高度一致，致此驗證電池生

成儲電特性的機制為 TiO_2 自我參雜，機制示意圖和反應式如圖 3 所示， TiO_2 自我參雜(self-dopping)形成 $\text{Ti}(3+)-\text{O}(1-)$ 的複合物(complex)，而此複合物生成所造成的晶格扭曲，會生成一個缺陷能階，而此能階能對電子充放電。因此，量子點全固態電池可以通過光子生成電池容量，並具有電子充放電特性。完成元件製備後，量測元件充放電特性與分析能帶，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 2021 中國材料科學學會國際會議暨年會，題目為 The improvement in switching behavior of all-solid-state electrochromic device by inducing crystal path in $\text{Li}:\text{Ta}_2\text{O}_5$ electrolyte。

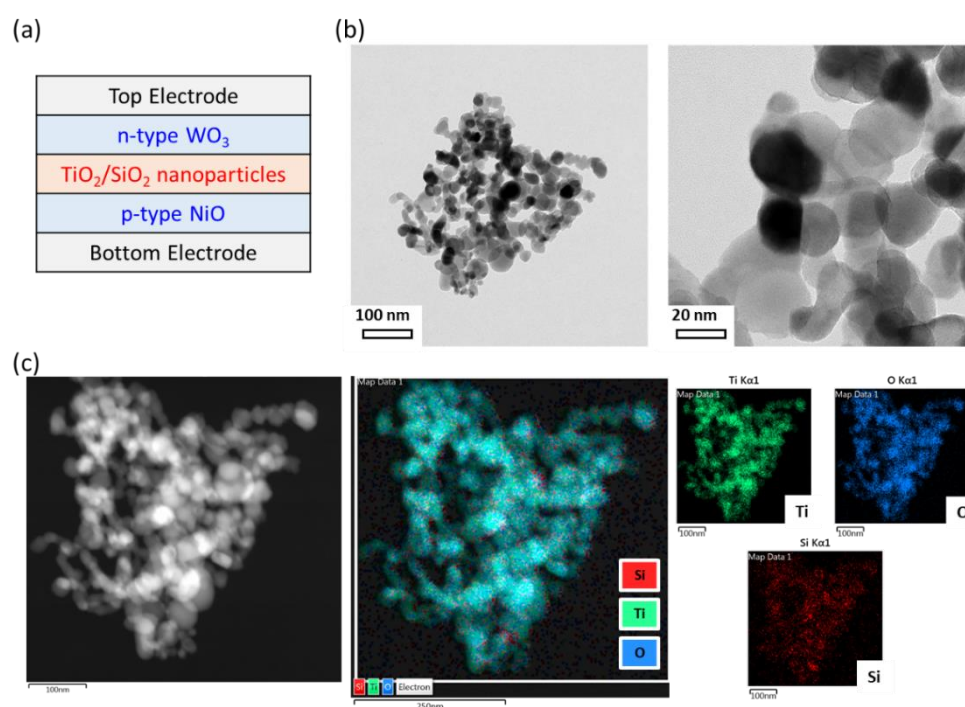


圖 1、(a)元件結構示意圖與量子點的 HR-TEM(b)照片與(c)材料分析

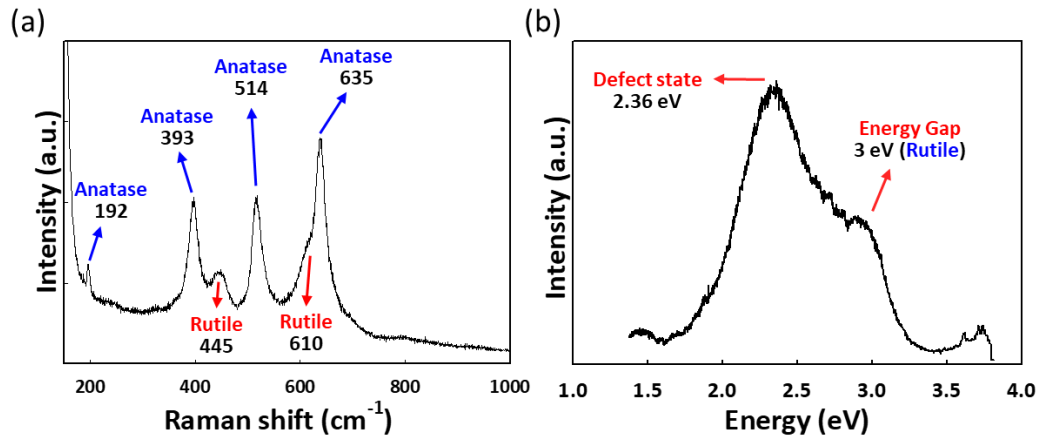
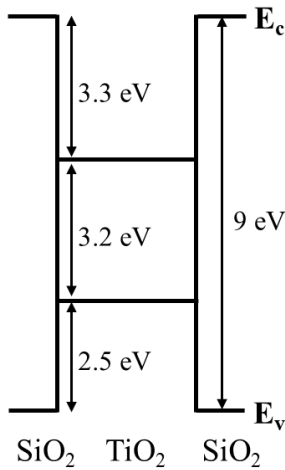
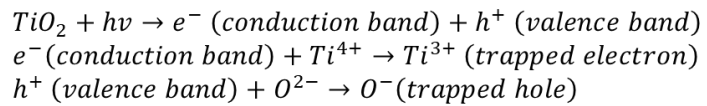


圖 2、TiO₂ 量子點材料片的(a)拉曼光譜分析與(b)光致發光分析

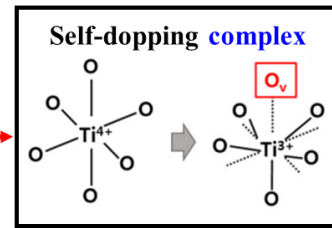
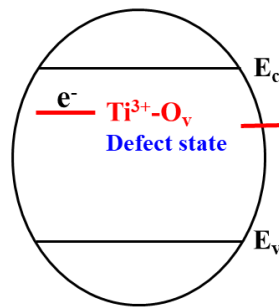
Energy diagram of TiO₂/SiO₂ QD



TiO₂ Self-doping reaction formula:



Energy diagram of TiO₂



Defects are originated from lattice distortion of self-doping complex.

圖 3、TiO₂ 量子點儲放電特性機制圖

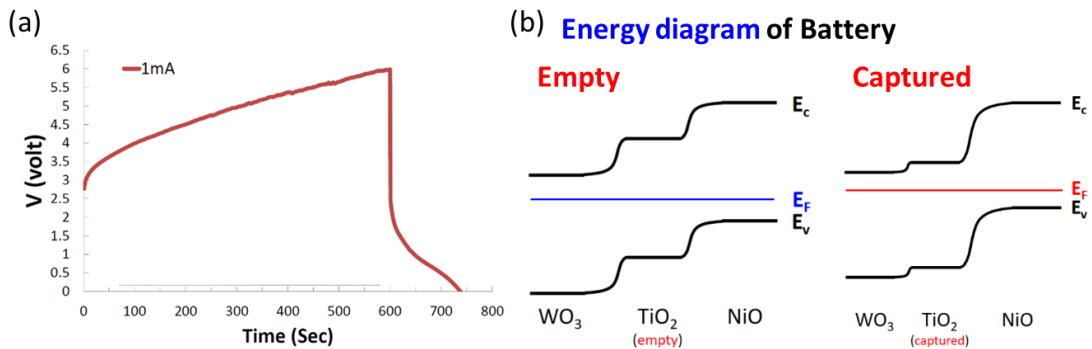


圖 4、(a)電池元件的定電流充放電特性(b)元件充放電能帶圖

參、展望

本計畫開發了一種具儲電特性的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 奈米點固態電池，並通過光致發光分析，驗證電池的儲電特性源自 TiO_2 奈米點自我參雜生成的缺陷能階，且電池具有 0.16mAh 的放電容量，並提出相關物理機制與能帶圖。本計畫所開發的電池均由無機且固態材料所製成，而具有優異的安全性和穩定度，且製造方式簡單，未來可以利用低成本工藝大量製造。

量子感測元件特性分析研究

Investigation and analysis of the characterization of quantum-dot based
sensors

(計畫編號：110A003)

院繼祖¹ 蔡錕斌¹ 陳柏聞²

¹ 中原大學物理學系 ² 核能研究所

石墨烯量子點 (GQD)，具有二維石墨烯與量子點引入的幾種獨特特性，因此是用於溶液處理光電應用的無毒、且地球豐富的奈米材料。然而，通過自上而下切割/剝離得到的傳統 GQD 表現出多種發光狀態、豐富的缺陷和較大的不均勻性，因此存在光致發光量子效率 (PL QY) 低和光學性能控制不佳的問題。在這裡，GQDs 是通過自下而上的分子融合製備的，具有寬帶吸收、高量子產率和單指數衰減曲線，這意味著 GQDs 具有明確的激發發射態，因此將是用於寬帶光電探測的溶液處理納米材料。

Graphene quantum dots (GQDs) can possess several unique properties either inherited from 2D graphene or introduced by the quantum confinement, thus would be nontoxic, earth-abundant photoactive nanomaterials for solution-processed optoelectronic devices. However, conventional GQDs derived by top-down cutting/exfoliation exhibited multiple emissive states, abundant defects, and large inhomogeneities, thus suffering from low photoluminescence quantum yields (PL QYs) and ill-controlled optical properties. Here, GQDs was prepared by bottom-up molecular fusion, which exhibited broadband absorption, high quantum yield and single-exponential decay profile, implying the GQDs with well-defined excited emissive states, thus would be promising

solution-processed nanomaterials for broadband photodetection.

壹、計畫目標

本計畫旨在製備高結晶性的石墨烯量子點，並藉由量子效應或電子耦合來調控其電子能態，以利與氧化鋅或石墨烯等高載子遷移率之材料形成異質結構，應用於高效率感測元件。

貳、重要成果

一、研究成果之貢獻

自上而下氧化切割製備的 GQDs 通常存在大量的結構和表面缺陷，以及不均勻性，導致低 QY 及複雜 PL 行為。為了避免上述問題，這邊採用小芳香族分子(硝化芘)和三聚氰胺以自下而上溶劑熱分子融合製備 GQDs。從圖 1a 所示的 TEM 圖像中，所製備的 GQD 的平均尺寸約為 4 nm。在高解析度 TEM 圖像中發現 0.21 nm 的晶格間距，如圖 1a 的插圖所示，對應於石墨烯的 (100) 平面。FTIR 光譜驗證石墨烯量子點的胺基官能化的結果如圖 1b，在 3200-3500 cm^{-1} 處可以看到 N-H 的伸縮振動，1745 cm^{-1} 為 C=N 振動峰，1602 和 825 cm^{-1} 分別為 C=C、C-N 伸縮峰，2800~3000 cm^{-1} 則是屬於 C-H 振動峰，證明石墨烯量子點表面帶有氨基^[20]。我們也利用 X 射線光電子能譜(XPS)來研究胺基官能化石墨烯量子點在 C1s 的光譜中(圖 1c)，283.6 eV、284.2 eV、286.7 eV 處的擬合峰，可分別歸於 C=C、C-N 和 C=N 等鍵結。而石墨烯量子點的 N 1s 光譜顯示出 398.5 eV 處的 NH₂ 訊號(圖 1d)，綜合 N 1s 和 C 1s 光譜中的結果，證明胺基官能基已成功與石墨烯量子點結合。

圖 2a 顯示了 GQD 溶解在甲苯中的歸一化 UV-vis 吸收和 PL 光譜。與在紫外區域具有窄吸收帶的傳統 CND/GQD 相比，GQD 可

以觀察到寬帶吸收(在 ~ 600 nm 處開始，在 ~ 490 nm 處達到峰值)；同時還發現了在約 590 nm 處具有黃色發光峰值，以及在約 634 nm 處出現的肩峰。其時間解析 PL 衰減曲線(生命期)，如圖 2b 所示。透過時間解析螢光光譜之量測，我們發現其螢光衰減行為可用單一指數衰減來做擬合(fitting by single exponential decay functions)，得到 6 ns 輻射複合生命期(radiative lifetime)；此外，在螢光衰減曲線中我們並沒有發現皮秒等級(picosecond scale)之快速非輻射複合過程，因此適合後續的光感測器之應用。同時，與具有低 QY 的傳統 GQD 不同，我們的 GQD 其 QY 可以達到 $\sim 78\%$ (利用絕對 QY 測量獲得)，如圖 2c 所示。眾所周知，豐富的結構和表面缺陷的存在將有效地捕獲光激發的載流子，從而引入快速的非輻射弛豫，從而導致具有低 QY 的非指數衰減曲線。因此，高 QY 和單指數衰變行為都證明了 GQD 中的有效輻射複合過程。

一般而言，由於石墨稀量子點的平面結構(planar structure)，量子點可經由 $\pi - \pi$ 堆疊產生緊密的聚集(aggregation)，進而引起快速的非輻射複合(fast non-radiative recombination)阻止電荷轉移。由於石墨稀量子點邊緣胺基的存在，在適當的條件下(控制溶劑的極性)，我們的石墨稀量子點會因胺基間的氫鍵(hydrogen bonding)橫向的自組裝(self-assembly)形成平面的二維形貌(two-dimensional morphology)。如圖 2d 為石墨稀量子點在二氧化矽表面之原子粒顯微鏡影像(atomic force microscopy)，我們發現石墨稀量子點可以自組裝形成二維結構，高度約 4.5 奈米；此外胺基的引進及自組裝的作用也有助於擴展吸收光譜及激子的分離，這些效應都有利於我們的石墨稀量子點在光感測器之應用。當入射光能量大於石墨稀量子點能隙時，石墨稀量子點可有效吸收光子能量產生激子，即束縛電子-電洞對(excitons, bonded electron-hole pairs)，光激發之激子

可藉由石墨稀量子點及氧化鋅奈米粒子間之界面電場(interfacial electric fields)分解(dissociation)並產生電荷分離(charge separation)，將電子轉移至氧化鋅通道層，電洞仍留在石墨稀光敏層，此空間電荷可以扮演著 local gate 的角色，產生光閘效應(photogating effect)，進而產生光增益(optical gain)。

將石墨稀量子點之光敏層以塗布方法覆蓋於氧化鋅之電子傳層，由於我們石墨稀量子點的平面結構且官能基主要分布於邊緣(edge)，在上下表面並沒有寄生之官能基，因此我們石墨稀量子點可以和氧化鋅的奈米粒子形成有效的電子轉移界面，不需經過複雜的官能基交換的過程。接著我們量測我們製備的光電導光感測器元件在光照及無光照條件下的電流-電壓曲線(0-2V)如圖 3a，我們發現在這個電壓區間，暗電流的變化不大；但在光照條件下(375 nm)，光電流呈現著指數型增加，代表著石墨稀量子點可以有效吸收光子能量並將電荷轉移至氧化鋅通道層，並且在外加電場的作用下產生光電流；為了更進一步了解光電導過程，我們將光電導光感測器進一步的退火並置於真空中量測其電流與電壓曲線如圖 3b 所示。我們發現暗電流沒有明顯變化，而 I-V 曲線在光照下表現出接近線性的行為。值得注意的是，與環境相比，在真空中測量的光電探測器的光電流顯著增加，在 2 V 時從 5 到 680 μ A。在我們的實驗條件下，如此大的變化應該與 ZnO 傳導通道的變化有關。我們提出了一種機制來合理化我們的觀察。在 GQDs 的光激發下，激子可以在 GQD/ZnO 界面上有效地解離，然後電子可以轉移到 ZnO 通道。由於較少的氧吸附效應，ZnO 通道的遷移率增強，導致傳導通道中的電子傳輸增強，進而導致光電流大大增強。

總之，我們基於自下而上的分子融合方法製備了 GQD。這種 GQD 具有高結晶石墨結構，因此顯示出寬帶吸收、與激發波長無關的發射和

單指數衰減行為，這意味著明確的發光行為。此外，光電導光電探測器是基於 GQDs 光敏劑和 ZnO 通道層製造的。由於 GQD 和 ZnO 異質結構之間的有效電荷轉移，我們的光電探測器在真空中具有高光電流和低暗電流。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文

ACS Nano 16, 3994-4003 (2022)

參、展望

石墨稀量子點是以碳為主體的二維奈米材料，可利用無毒且便宜的前驅物以簡易之水熱法或氧化剝離法製得，理論上可兼具二維石墨稀及零維量子點之材料特性，因此被預期是次世代重要之光電材料。然而以傳統方法所製備之石墨稀量子點，具有大量含氧官能基所形成之表面態及晶體結構之缺陷，因此光激電子會極快的被補獲，對於實際光電元件之應用是一個很大的阻礙。我們在這個計畫中，成功使用分子融合法將四個苯環的小分子合成出高結晶品質並且不含氧官能基之石墨稀量子點，我們發現光激發之激子具有較長的生命以及非常優良的電子輻射複合效率，因此非常適用於發光及光電轉換元件。此外我們所合成之石墨稀量子點可藉由非共價交互作用，形成不同形貌的超分子結構，因此我們可以經由溶劑的極性來誘發不同程度的交互作用，進一步來調控其光學特性，對未來在凡得瓦異質結構之光電元件有極大的發展潛力。

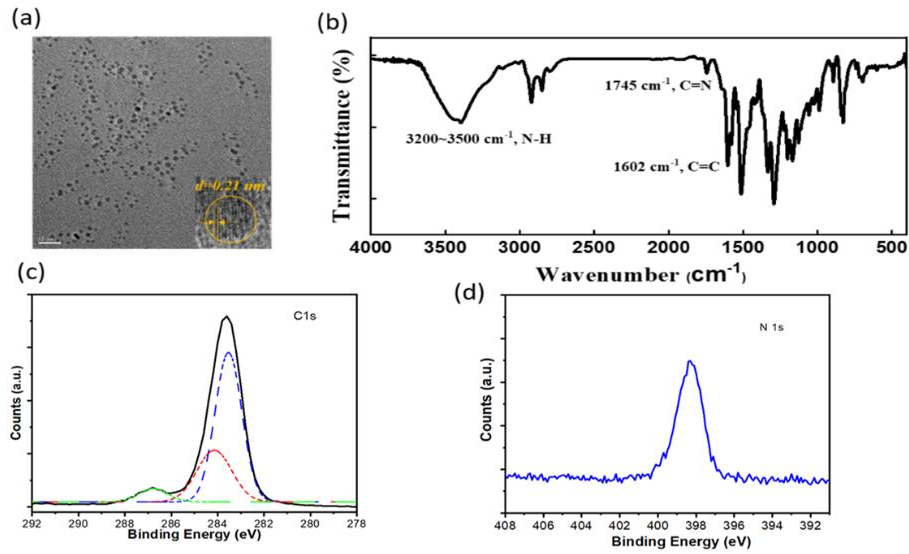


圖 1：(a) GQD 的 TEM 圖像及其尺寸分佈，插圖為高解析度 TEM 圖像；(b) GQD 的 FTIR，以及 GQD 的 C1s (c) 和 N 1s (d) 的 XPS 光譜

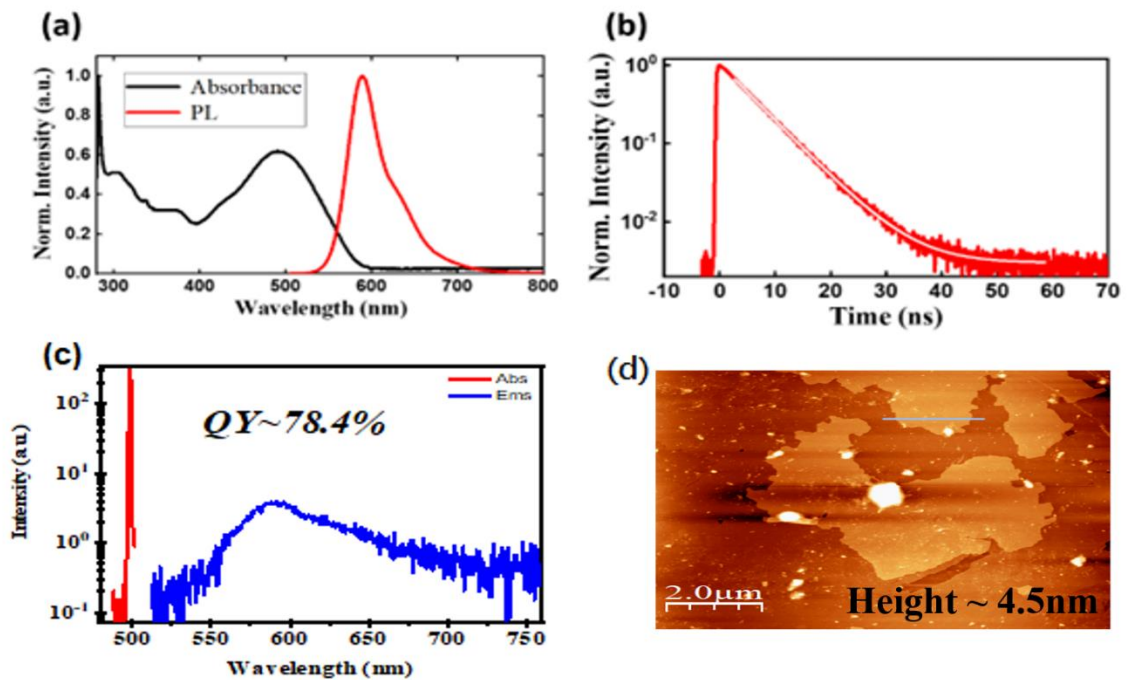


圖 2：(a) GQDs 在 甲苯中的歸一化後吸收和 PL 光譜；(b) 時間解析螢光光譜及擬合曲線；(c) QY 測量結果；(d) 石墨稀量子點在二氧化矽表面之原子粒顯微鏡影像(atomic force microscopy)

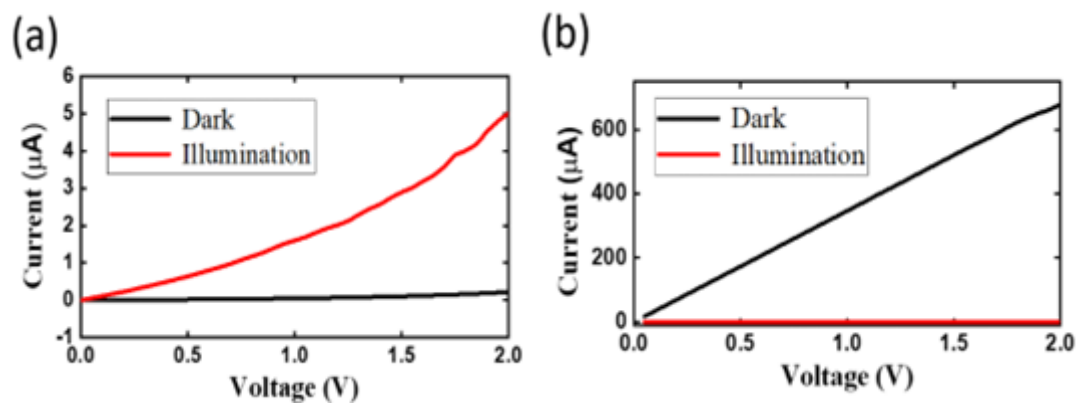


圖 3：(a)光電導光感測器元件在一般環境下照光及未照光條件下電流-電壓曲線；(b)光電導光感測器元件在真空下照光及未照光條件下電流-電壓曲線

多孔性除濕輪體氣流特性分析

Simulation and Analysis of Air Flow Characteristics of Porous Desiccant Wheel

(計畫編號：110B007)

呂世婷 陳伽達 張哲維 李旺龍

國立成功大學材料科學與工程學系

本計畫採用有限元素法建立多孔性除濕輪模型，分析製程與再生氣流通過除濕輪時氣流的交互作用，並針對多孔性除濕輪進行揮發性有機物之吸附特性試驗，使用特定孔徑之除濕輪通過不同濃度的有機物進行吸附測試，以獲得吸附動力及貫穿曲線之操作參數，之後藉由獲得之實驗數據，分析多孔性除濕輪之吸附特性下的 Yoon-Nelson 模型之模擬結果。

This project uses the finite element method to establish a porous desiccant wheel model analyzing the interaction between process and regeneration air flow when they pass through the desiccant wheel. This project also conducts the adsorption tests of the desiccant wheel through different concentrations of volatile organic compounds to obtain the parameters of adsorption kinetics and breakthrough curves. The experimental data is used to analyze the Yoon-Nelson model of the adsorption characteristics of the porous desiccant wheels.

壹、計畫目標

除濕輪為乾燥機內之重要元件，因此對其周圍的氣流及溫度進行分析，本研究將使用有限元素法對乾燥機內之氣流特性變化進行模擬，分析不同操作條件下的溫度變化，並探討不同操作條件對溫度的影響貫穿曲線

常作為分析吸附劑的方法與 Yoon-Nelson 模型擬合，希望能進一步提升有機氣體的吸附能力。

貳、重要成果

一、氣流通過多孔陶瓷除濕輪體後之氣流特性分析：

除濕輪在運轉時，室內低溫空氣的水氣被除濕輪吸附之後，被相對濕度較低的高溫氣流通過除濕輪後，即能達到除濕的目的。若再生氣流與製程氣流產生交互作用時，就無法達到原本的作用。因此乾燥機內的溫度分佈對除濕能力影響甚大，且與氣流速度、孔隙率、孔徑等等因子有關。

1. 氣流速度會影響氣流通過除濕輪所需的時間，而通過的時間將會對溫度傳遞造成影響，因此氣流速度為影響乾燥機中的除濕輪之溫度分佈的重要因素。若再生氣流速度較慢，氣流需要較長的時間才可通過除濕輪，因此高溫的再生氣流有較多的時間可以流動至周圍，使除濕輪溫度上升。
2. 當孔隙率小時，除濕輪表面積將增加，並對氣流產生較大的阻力，使氣流流速下降並難以通過除濕輪，因此孔隙率對流速溫度分佈影響非常大。由圖二結果顯示出當孔隙率為 0.2 時，製程氣流出口溫度最高，說明除濕輪對氣流有很大的阻力，使製程氣流與再生氣流幾乎無法穿過除濕輪，因此製程氣流會流至再生氣流出口；同樣地，再生氣流會流至製程氣流出口。此外，孔隙率為 0.2 和 0.4 時，溫度幾乎沒有改變，說明孔隙率對氣流的影響已達到最大，孔隙率由 0.4 增至 0.6 時，氣流可通過除濕輪，因此製程氣流出口的溫度開始下降。
3. 除濕輪另一重要參數為滲透率，而滲透率亦會受到孔徑的影響，如

圖三所示。當孔徑為 1 mm 時，氣流難以通過除濕輪，因此製程氣流出口的溫度主要受到再生氣流影響，溫度可達到 55°C，而再生氣流出口溫度則為 26°C，與製程氣流入口的溫度非常接近，說明此時氣流幾乎無法通過除濕輪，隨著孔徑增加至 3 mm，製程氣流出口溫度下降至 27 度，再生氣流出口溫度則上升至 70°C，由此可知氣流已可通過除濕輪流向對側出口，因此相同氣流入口與出口的溫差將會下降，然而再繼續增加孔徑後，孔徑對溫度的影響力迅速減少，但仍可看出再生氣流的溫度降低，製程氣流溫度增加，說明此時兩道氣流可能藉由大孔徑之除濕輪產生交互作用。

4. 將 60 PPI 之除濕輪對三種濃度的丙酮進行吸附試驗，並用此數據建立對應的 Yoon-Nelson model 吸附動力模型如圖 4 所示。吸附動力模型所得之參數如表 1 所示，實驗 50% 貫穿時間與計算所得之理論 50% 貫穿時間接近，且 R^2 值皆大於 0.9，此外發現當氣體濃度較低時，除濕輪對丙酮氣體的反應速率常數(k)較大，氣體濃度高時，單位重量的除濕輪則可吸附較多丙酮。

參、展望

本研究利用數值模擬分析乾燥機在不同操作條件下的溫度分佈，若製程氣流出口溫度低，且再生出口溫度高，則表示乾燥機具有較佳的除濕能力。希望此多孔性除濕輪模型未來可以運用在不同的工業領域上，例如：農產品、塑膠與半導體等對熱敏感的領域，或是可以成為我們建立之後研究多孔性材料吸附揮發性有機氣體 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 氣體的基礎。

表 1、吸附動力模型參數

conc. (ppm)	weight (g)	k (1/min)	R^2	$\tau_{50,exp}$	$\tau_{50,theory}$	adsorption capacity ($\mu\text{g/g}$)
7.57	795.9	0.28	0.99	25.5	25.5	0.16308
10.09	757.7	0.16	0.96	27.2	27.8	0.24158
12.62	786.9	0.15	0.90	32.2	31.4	0.35358
15.14	792.1	0.09	0.92	44.6	41.7	0.96402

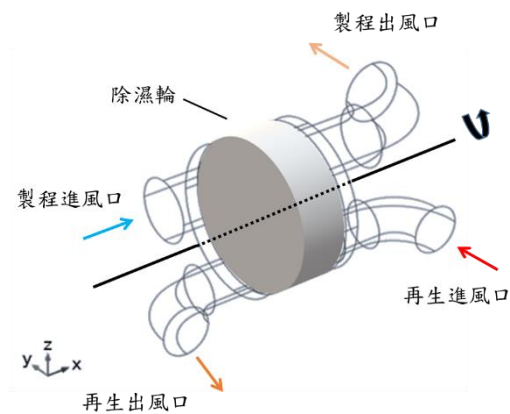


圖 1、多孔性除濕輪模型示意圖

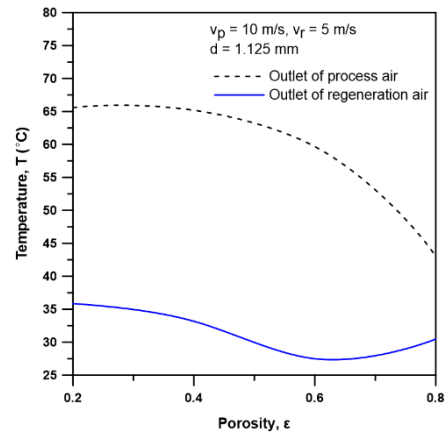


圖 2、孔隙率與氣流出口溫度關係圖

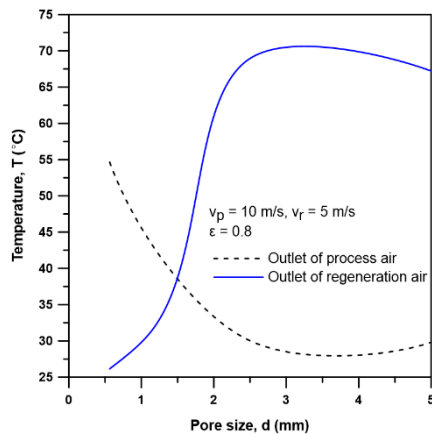


圖 3、孔徑與氣流出口溫度關係圖

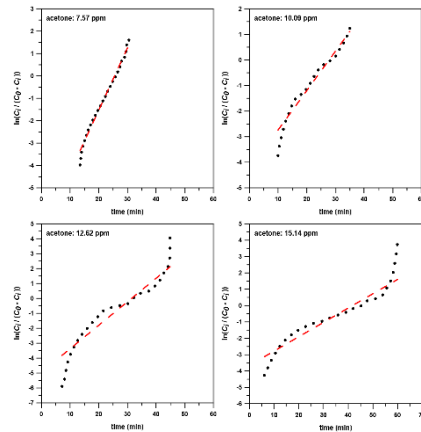


圖 4、不同濃度丙酮之 Yoon-Nelson model 吸附動力模型結果

儲能系統

高電流密度之電極材料研究.....	1
液流電池系統產品化標準測試與驗證研究	5
液流電池活性物質處理程序與產業技術之研究	10
液流電池儲能系統在風力發電系統之電力整合關鍵技術研究	14

高電流密度之電極材料研究

Development of high performance electrodes applied on vanadium redox flow battery

(計畫編號：110B003)

王丞浩¹ 歐昀庭¹ Daniel Manaye Kabtamu^{1,2} Anteneh Wodaje Bayeh

^{1,3} 郭俞麟⁴ 王耀明⁵ 江泰瑾⁶ 黃信智⁶ 黎羽真¹ 黃子中¹

¹國立臺灣科技大學材料科學與工程系 ²Debre Berhan 大學化學系 ³Addis Ababa 大學化學與生醫工程系 ⁴國立臺灣科技大學機械工程系 ⁵金屬工業研究發展中心產業升級服務處 ⁶國立臺灣科技大學全球發展工程學士學位學程

本計畫首先針對全釩液流電池(Vanadium redox flow battery, VRFB)的石墨氈電極進行直接表面處理法之開發，發現石墨氈經過 600°C微波灰化 15 分鐘後，能夠達到最佳之電化學催化活性。第二階段則聚焦於開發金屬有機骨架(Metal-organic framework, MOF)衍生觸媒，Zr-MOF 經過 900°C 在氫氣中高溫燒結 2 小時後(MDC-900)，電化學測試之氧化與還原峰的峰間距僅 222 mV，顯示其優異的電化學催化活性。第三階段整合了電極直接表面處理法與觸媒附著法，藉由將高電化學活性之 MOF 衍生材料 MDC-900 觸媒附著在經 600°C微波灰化的石墨氈電極上，在單電池充放電測試展現了 83%的能量效率且 100 圈後無衰退，這顯示了其傑出的電化學效能與充放電穩定性。

The development of electrode surface modification method in vanadium redox flow battery (VRFB) is conducted in the first stage of this project. From the results, the graphite felt which was heat-treated by microwave at 600°C for 15 minutes can reach to the best electrochemical catalytic activity. The second

stage of this project focuses on the development of metal-organic framework (MOF) derived catalysts. Zr-MOF could have the smallest peak separation (222 mV) after sintering at 900°C for 2 hours in argon (MDC-900). In the third stage of this project, if the MOF-derived catalyst MDC-900 was integrated on the surface of graphite felt which has been modified at 600°C (MDC-900-HGF600), the energy efficiency of the single cell which assembled MDC-900-HGF600 could reach 83% and after 100 cycles almost without decline. It proved that this kind of modified graphite felt possessed superior electrochemical catalytic activity and charge-discharge stability.

壹、計畫目標

因應當前國際趨勢與政府政策，再生能源的使用占比將日益提高，為穩定電網輸出，儲能系統將扮演極為重要的角色，其中 VRFB 備受矚目。本計畫整合表面改質與觸媒附著的技術來提高 VRFB 之電極效能，除了以能量效率與循環充放電結果來檢驗電極電化學活性與運作穩定性外，亦藉由材料分析技術來找出提高效能的關鍵因素。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

本計畫在第一階段的電極直接表面處理法之開發上，利用微波灰化法測試最適合應用於本商用石墨氈的加熱溫度，經由電化學測試與材料分析結果可知，石墨氈在 600°C微波灰化 15 分鐘後，能夠達到最佳的電化學催化活性；在第二階段的觸媒材料開發上，針對近年來備受重視但尚較少應用於 VRFB 的 MOF 之衍生材料進行鈮離子電化學催化活性測試，由效能與材料分析結果可知，Zr-MOF 於 900°C在氬氣中高溫燒結 2 小時後形成的 Tetragonal ZrO_2 晶粒與石墨化碳鑲嵌之結構，具備最

優異的電化學催化活性；在第三階段整合電極直接表面處理法與觸媒附著法的部分，藉由將高電化學活性之 MOF 衍生材料 MDC-900 觸媒附著在經 600°C 微波灰化的石墨氈電極上，經半電池測試的電極反應峰分離可達到小於 450 mV 的目標，另進行電流密度 120 mA cm⁻² 之單電池充放電穩定度測試，可得知其能量效率達到 83%，明顯高於計畫目標所設定的 65%，同時在進行充放電 100 圈後，能量效率完全無衰退，達到原先所設定能量效率保有第一圈的 80% 以上之目標(圖 1)。上述結果皆顯示了本計畫所成功開發的 MDC-900-HGF600 改質石墨氈電極具備優異的電化學效能、穩定性與產業應用潛力。

二、學術成就

(一)國際期刊論文

Yun-Ting Ou, Daniel Manaye Kabtamu*, Anteneh Wodaje Bayeh, Hung-Hsien Ku, Yu-Lin Kuo, Yao-Ming Wang, Ning-Yih Hsu, Tai-Chin Chiang, Hsin-Chih Huang, Chen-Hao Wang*, *Metal-Organic Frameworks Derived Catalyst for High-Performance Vanadium Redox Flow Batteries*, Catalysts, 11 (2021) 1188.

(二)國際研討會論文

Yun-Ting Ou, Daniel Manaye Kabtamu, Anteneh Wodaje Bayeh, Hung-Hsien Ku, Ning-Yih Hsu, Chen-Hao Wang*, *Electrode modification by metal-organic frameworks derived catalyst for improving the performance of vanadium redox flow batteries*, TACT2021 International Thin Films Conference (Virtual Conference), Taipei, Taiwan, Nov. 15 – 18 (2021).

參、展望

藉由本計畫成功整合石墨氈表面處理與觸媒應用技術後，VRFB 之能

量效率與運作穩定性獲得顯著之提升，在這其中我們除了獲知石墨氈高溫灰化處理的重要性外，也發現 MOF 衍生材料為一群極具應用潛力的觸媒，未來可望針對這群結構多樣的材料進行開發，相信對於電極效能提升大有助益。此外，為提高液流電池系統的輸出電壓與能量密度，未來或許能將觸角延伸至非水相電解液系統，使我們在提升液流電池效能方面具備更多選擇方案。

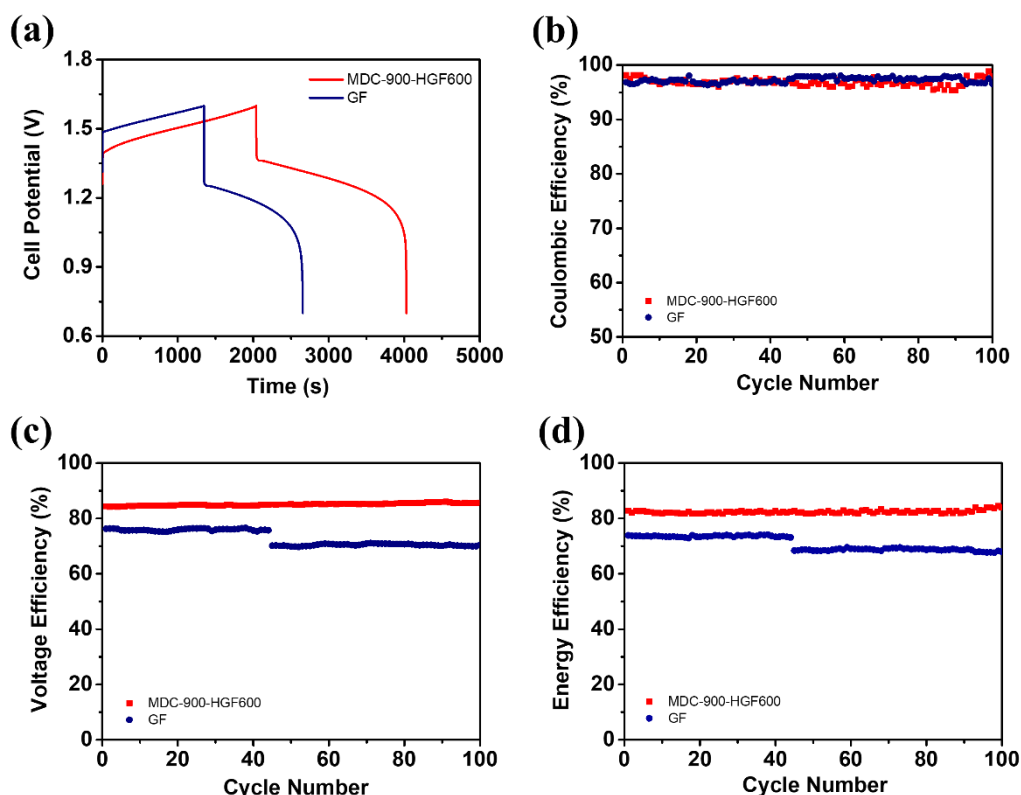


圖 1、MDC-900-HGF600 之單電池充放電穩定性測試之(a)充放電曲線圖；(b)庫倫效率；(c)伏特效率；(d)能量效率。電流密度為 120 mA cm⁻²。

液流電池系統產品化標準測試與驗證研究

The Research of Standardization of Products Test for Flow Battery System

(計畫編號：110B004)

王耀明¹ 徐維懋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

本次計畫已完成液流電池系統性能標準測試與驗證研究以及液流電池系統安全標準測試與驗證研究的部分內容，包含法規對 IEC 62933-2-1，「電能儲能(EES)系統的規範要求：針對單元參數與測試方法的規範」、IEC 62932-2-1，「液流電池於定置型應用：性能通用要求和測試方法」、IEC 62933-5-1，「電能儲能(EES)系統的規範要求：集成電網的電能儲能系統的安全注意事項-通用規範」、IEC 62932-2-2，「液流電池於定置型應用之安全要求」以及 UL 1973，「用於輕軌與定置型系統之電池標準」等法規進行研析。已比對 IEC 62933-2-1 以及 IEC 62932-2-1，規劃液流電池性能檢測之方式，並比對 IEC 62933-5-1 以及 IEC 62932-2-2，規劃液流電池安全檢測之方式及內容。

This project has completed part of the flow battery system performance standard test and study, part of the flow battery system safety standard test and study. Including research and analysis of IEC 62933-2-1, "Electrical energy storage (EES) systems –Part 2-1: Unit parameters and testing methods – General specification", IEC 62932-2-1, "Flow battery energy systems for stationary applications – Part 2-1: Performance general requirements and test methods", IEC 62933-5-1, "Electrical energy storage (EES) systems – Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems – General

specification ", IEC 62932-2-2, "Flow battery energy systems for stationary applications –Part 2-2: Safety requirements " and UL 1973, "Batteries for use in stationary, vehicle auxiliary power and light electric rail (LER) applications". It's been planned several testing program with performance and safety, to finished the final report and the test procedure.

壹、計畫目標

液流電池是一種適合大規模儲能之電化學儲能系統，但因我國液流電池的商業化較晚，對於液流電池未有完善之標準制定，亦缺乏液流電池標準檢測驗證環境。因此本計畫建立液流電池相關驗證規劃，參考國際間儲能電池系統相關法規以及液流電池系統相關法規，並對性能及安全部份進行研究，盤點相關產品化所需之標準測試與驗證，以確保液流電池之安全，同時也將助於國內液流電池產業鏈完整建構，提升台灣於儲能產業之競爭力。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

本計畫參考國際液流電池相關標準規範，建立液流電池系統效能測試管理規範，使液流電池系統效能測試獲得適切控管，以確保測試數值的正確性以及統一性。

(一) 測試程序

液流電池系統效能測試程序應如下圖 1 所示，先參考待測電池的說明書/設計規格，確認測試條件，再進行零組件測試、電性相關測試以及基本安全相關測試。

(二) 測試方法

於測試程序中將測試方法主要分為三部份，其中包含零組件測試、

電性相關測試及基本安全相關測試。

1. 零組件測試包含環境溫度與反應性部分的測試。電解液的周邊零件應能抵抗其環境溫度以及所含酸性流體的變質，周邊零件在測試環境，在 50°C (122°F) 溫度下於全氣流循環烘箱中分別置放 7 天、30 天及 60 天，最終的被測材料的抗拉強度應不低於原樣材料抗拉強度的 80%。且電解液接觸的墊圈和密封件應在浸入電解液 70 小時後進行體積變化和抽出、拉伸強度和伸長率的測試。拉伸強度和伸長率至少應為標準值的 60%，體積變化值應為標準值的-1 到+ 25%，且重量變化不得大於 10%。
2. 其次電性相關測試則包含能量容量測試、輸出功率/輸入功率測試、往返效率測試、使用壽命測試、電池響應測試、自放電測試、過充測試以及過放電保護測試。
3. 最後對電池系統進行基本安全的相關測試，以確認液流電池系統具有設計或製造商所宣稱的效能。其中包含漏電流測試、溫度過高/過低測試以及短路測試。若測試不通過時，則需更改說明書或規格，或是重新設計開發以達到預期之效能。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文

(一)應用國際標準導入液流電池相關技術

名稱：Effect of electrolyte's density and operating temperature on the battery capacity of vanadium redox flow battery- A numerical approach

出處：2021 MRS-T International Conference

(二)儲能系統相關標準分析

名稱：國際電工委員會對於電能儲能系統性能參數與安全之要求

出處：經濟部標準檢驗局 - 標準、檢驗與計量雙月刊 111 年 01 月號

參、展望

本次計畫已完成液流電池系統性能標準測試與驗證研究以及液流電池系統安全標準測試與驗證研究的內容，包含法規對 IEC62933-2-1、IEC 62932-2-1、IEC 62933-5-1、IEC 62932-2-2 以及 UL 1973 等法規進行研析。並比對 IEC 62933-2-1、IEC 62932-2-1 以及 UL 1973，規劃液流電池性能檢測之方式，包含能量容量之測量、輸入輸出功率測試、往返效率測試、系統響應測試、自放電測試以及工作電壓與頻率範圍測試…等各項性能測試。又比對 IEC 62933-5-1 以及 IEC 62932-2-2 之內容，規劃液流電池安全檢測之方式。

研析與整理的過程中發現性能與安全部分法規亦有不足處，如對液流電池循環壽命的檢測方式、因應危害氣體的通風要求…等未提供有足夠且清楚的測試方式。因此找尋國際間相關液流電池法規，或積極發展液流電池的國家中，是否有相關法規對這些部分進行規範。如此方能完善本計畫之檢測驗證內容。

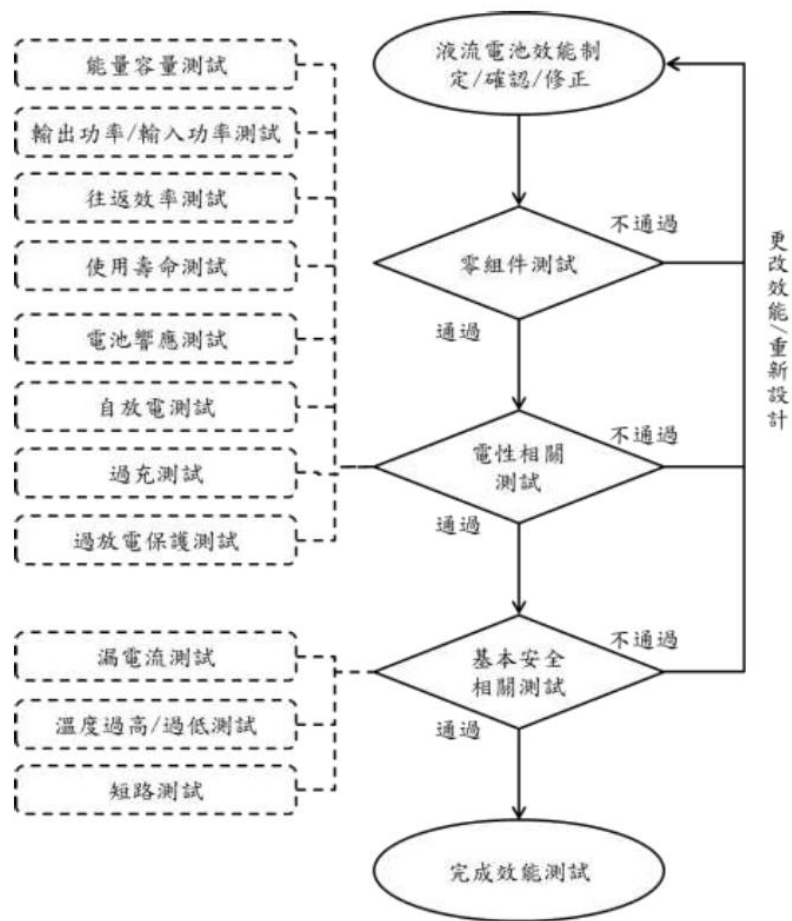


圖 1、液流電池系統效能測試程序

液流電池活性物質處理程序與產業技術之研究

Study of the Active Materials and Industrial Technology of Redox Flow Battery

(計畫編號：110B005)

張志宇¹、田益修²、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

石油廢棄物的雜質中如鐵、鈣、鎂、鎳、鋁、銅、鉀、錳、矽等成分，雖可從石油廢棄物中提煉鈦電解液，降低鈦電解液成本，但可能在煉製成鈦液中含有這些活性物質，因此本計畫擬了解電解液中的活性物質種類與濃度對全鈦液流電池的影響程度。實驗結果顯示矽會在電解液中產生沉澱導致電池內部結構損毀，鐵和銅雜質對電壓效率影響較顯著外導致電池性能下降，其餘雜質皆對電性影響不大。經各類去除法分析比較後，銅最高除率達 95.8%、鐵為 66%。最後將雜質處理程序建立連續處理，處理後之電解液充放電效果優於處理前。

The all-vanadium redox flow battery is an energy storage battery used for large-scale electricity storage, but the electrolyte cost accounts for more than 40 % of the total. If recycling business waste or extracting vanadium from stone coal can effectively reduce the price of vanadium electrolyte, some impurities may remain in the recycling process, and long-term cycling will affect the performance of the battery.

The report analysis/test the performance of the active materials in vanadium flow battery, testing and evaluation of electrode material, analysis of commercial electrolyte, and effects of impurities additive in the electrolyte.

The results show most of the activities affected lightly but Fe, Cu and Si. According to the results, Si, Fe, and Cu were emergent impurities to be treated. The ions of iron and copper were dissolved in electrolyte, except for silicon. The best removal methods were electrochemical deposition method. The remove efficiency of Cu and Fe were 95.8 % and 66%. The continued treatment process was established, and the performance of after treatment electrolyte was better than before treatment electrolyte。

壹、計畫目標

石油廢棄物的雜質中如鐵、鈣、鎂、鎳、鋁、銅、鉀、錳、矽等成分，可能在煉製成鈳液中含有這些活性物質，依據研究得知含非鈳之活性物質電解液對全鈳液流電池並不完全影響，因此本計畫擬了解電解液中的活性物質種類與濃度對全鈳液流電池的影響程度。首先欲評估產業中鈳電液可能有的活性物質並添加於鈳電解液中分析其電性，再針對有礙活性物質以不同濃度進行全鈳液流電池之單電池測試，並分析電性與單電池測試結果之關係，評估電解液與活性物質監測可行性。再根據上述之實驗進行有礙物質去除，去除方法包括活性碳、離子樹脂、沉澱法等方式去除或去除到不影響鈳電池反應之濃度以下，再將處理後之活性物質建立合適的處理程序。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

(一) 電解液之活性物質分析

分析鐵、鈣、鎂、鎳、鋁、銅、鉀、錳、矽等非鈳活性物質，進行全鈳液流電池測試比較。除了矽會沉澱外，其餘可將非鈳活性物質分為氧化還原電位高於鈳與低於鈳 2 類。對於氧化電位高於鈳的活性物質，無論電壓效率、庫倫效率與能量效率則幾乎沒有變化，但仍會受到電池在充放電過程中產生的電場影響，造成交互作用，導致電容

量逐漸衰退。對於低於鈇的反應電位的鐵和銅離子，可明顯看出電壓效率明顯降低，而導致能量效率降低。由此可知矽、鐵與銅雜質影響最具，矽的沉澱如圖 1 與圖 2 所示，鐵與銅的實驗結果如圖 3 與圖 4 所示。

(二) 電解液之活性物質分析

由上述實驗結果可知，鐵、銅和矽為上述雜質中最需立即處理的雜質成分。經沉澱、電沉積、..等處理方法後，最佳的銅去除率可達 95.8%，和鐵的去除率可達和 66%。處理後之電解液充放電效果優於處理前，圖 5 所示。

參、展望

高安全性的全鈇液流電池是大型儲電的明日之星。從事業廢棄物回收製備的鈇電解液的可大幅降低電解液成本，但電解液中殘存的活性物可能會導致電容量的衰退，因此鈇電解液的雜質去除是重要且必須做的研究。雖目前的實驗結果可改善電解液的效能，但耗能。因此，如何以更節能、更有效率且具產業型事上去除方式仍待持續研究開發。

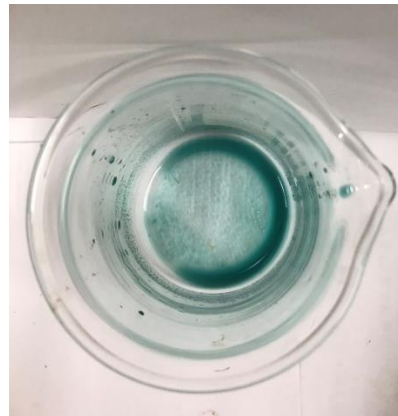
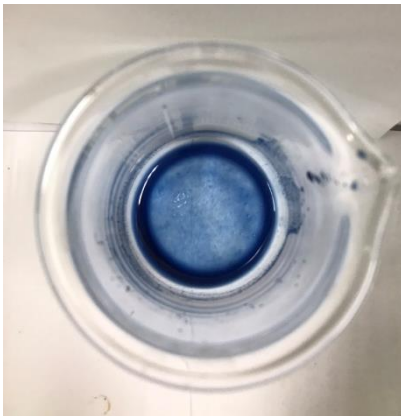


圖1、矽在正極鈇電解液的沉澱照片 圖2、矽在負極鈇電解液的沉澱照片

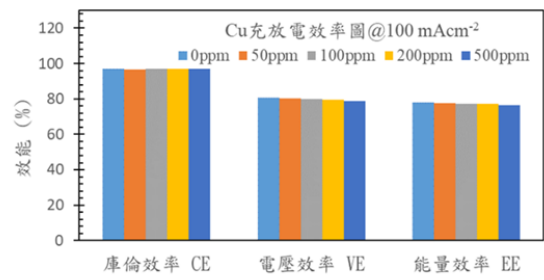
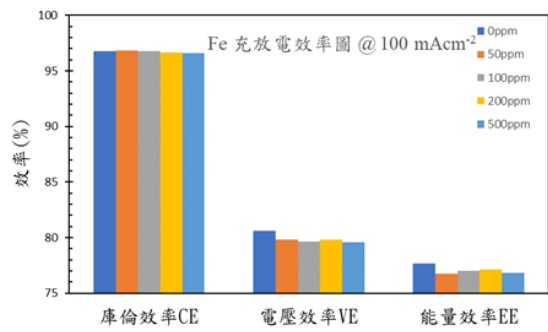


圖 3、不同鐵離子濃度之鈎電解液

圖 4、不同銅離子濃度之鈎電解液

充放電效能分析

充放電效能分析

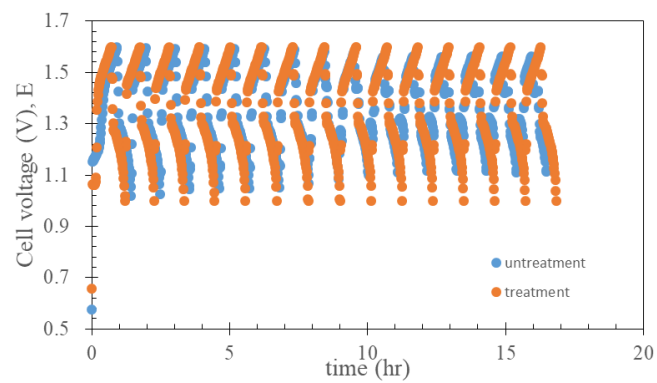


圖 5、處理前後之充放電圖

液流電池儲能系統在風力發電系統之電力整合關鍵技術研究

A Study of Key Technique for Power Integration of a Flow Battery-based Energy-Storage System into a Wind Power-Generation System

(計畫編號：110B006)

王醴^{1*} 黃志宏¹ 古鴻賢² 謝錦隆²

¹國立成功大學電機工程學系研究所 ²核能研究所

本文的研究目標在於探討全釩氧化還原液流電池儲能系統整合風力發電機組之電力機構技術的研發，建置系統與綠能應用最佳整合管理策略技術。在所建立的風力發電機組整合全釩氧化還原液流電池儲能系統之「實驗室級測試系統平台」，於選定運轉條件下，先以實測方式量測該「實驗室級測試系統平台」之相關電氣量，再以該量測結果修正「實驗室級測試系統平台」模擬系統的參數，俾使該「實驗室級測試系統平台」之模擬結果與實測結果的誤差量在 5% 的範圍附近。根據該系統的電壓、電流、頻率之模擬與實測比對結果發現，最大的誤差為 6.6%。本文亦以該「實驗室級測試系統平台」之系統數學模型，完成不同風速下之工作點變動穩態結果進行特徵值與根軌跡等頻域分析，亦完成負載變動、風力發電機轉矩干擾、風速變動之時域非線性模型動態響應分析。

The aim of this paper is to study the mechanism and technique for power integration of a vanadium redox flow battery energy storage system (VRFB) into a wind-turbine generator (WTG), and to establish the optimal integration-management strategy of system and green-energy applications. The system model of the laboratory-scale platform for power integration of a VRFB into a

WTG, the measured steady-state results of the platform under a selected operating condition are used to revise the parameters of the system model of the platform. According to the results of voltage, current and frequency, the maximum error between the measured and the simulated results is 6.6%. The system model of the platform is then used to obtain the results such as steady-state operating points, eigenvalues and root-loci plots based on frequency domain as well as dynamic simulations based on time domain such as load changes, wind-speed changes, and torque disturbances.

壹、計畫目標

本計畫將在所研究的風力發電系統加入一個以全釩氧化還原液流電池(VRFB)為基礎之儲能系統，使得風力發電系統的發電電力在併入電力系統或供電給負載時，能夠被轉變為平滑的電力輸出，進而改善風力發電系統輸出電力變動特性對所連接電力系統或負載造成的負面影響，液流電池其儲存時間與儲存容量皆非常大，即液流電池非常適合於大型儲能系統。

貳、重要成果

本計畫使用 Matlab/Simulink 軟體，模擬圖 1 所示之實驗室平台架構的穩態特性並進行分析，在固定直流負載為 0.5 p.u.(標么)下，圖 2 為模擬風速自 4 m/s 增加至 14m/s 之變動條件下之系統工作點與特徵值變動結果，並將特徵值變動結果繪製為根軌跡圖，如表 8 所列，可得知在所有風速變動條件下，整體系統仍可維持穩定狀態。

當系統在遭受干擾條件下的動態響應模擬結果，其中分為三種系統干擾條件：(a)負載變動(b)風速變動(c)轉矩干擾。本文分別對以上三種動態干擾對實驗室平台系統進行了分析與評估，並且確保該系統之穩定性。

一、負載變動下之動態響應分析

在固定風速 13 m/s、直流負載功率 0.5 p.u.下，當時間 $t = 10$ s 時，將負載功率提升至 1.25 p.u.，並在時間 $t = 40$ s 時，將負載功率下降至 0.75 p.u.，如圖 3 所示為負載變動之系統動態響應模擬結果，結果表明此實驗室平台系統是穩定的，足以應付負載變動之干擾。

二、風速變動下之動態響應分析

在固定直流負載功率 0.5 p.u.下，當時間 $t = 30$ s 時，風速由 13 m/s 逐漸下降至 12.5 m/s，再逐漸回升至 13 m/s，實驗室平台系統發生風速變動時之系統動態響應模擬結果如圖 4 所示，依模擬圖形所示，此實驗室平台系統是穩定的，足以應付負載變動之干擾。

三、轉矩干擾下之動態響應分析

在固定風速 13 m/s、直流負載功率 0.5 p.u.下，當時間 $t = 30$ s 時，永磁式同步發電機發生 0.1 p.u.之轉矩干擾，並在時間 $t = 30.1$ s 時清除，如圖 5 所示，為永磁式同步發電機發生轉矩干擾之系統動態響應模擬結果。由該圖結果可以分析得知此實驗室平台系統是穩定的，足以應付轉矩之干擾。

參、展望

本計畫探討了利用直流微電網整合風能與全釩氧化還原液流電池系統，在未來將對於系統的穩定度進行改善，從電力電子轉換器之阻尼控制器設計研究，以達成前述之目的，並且比較在加入控制器前後，對於其穩態模型和線性化模型，分別進行不同工作點條件功率潮流分析和對系統特徵值之影響。

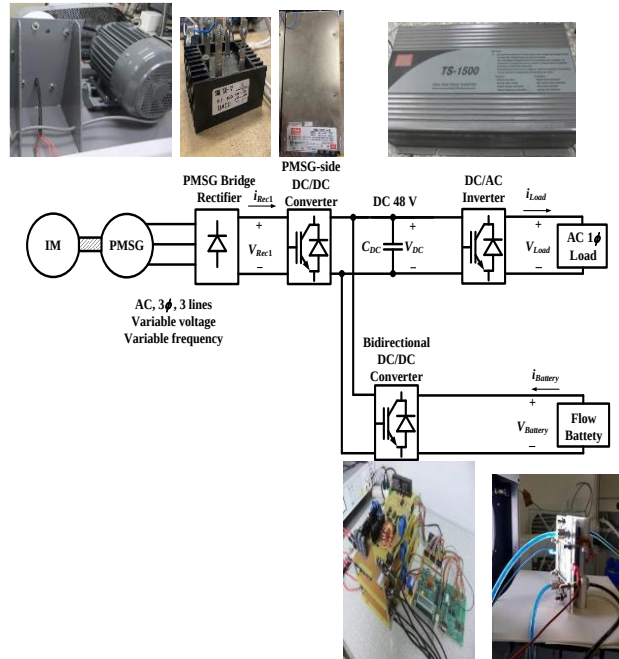
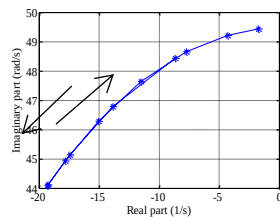
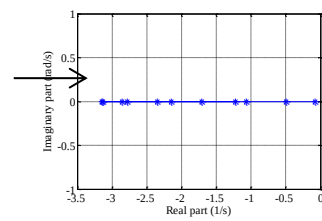


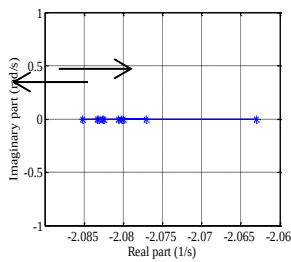
圖 1、本計畫所提出之「實驗室級測試系統平台架構」



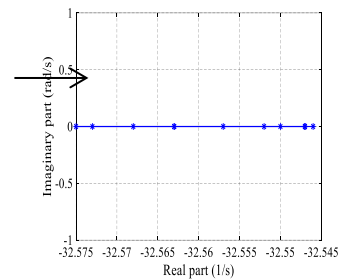
(a)特徵值 Λ_3



(b)特徵值 Λ_7

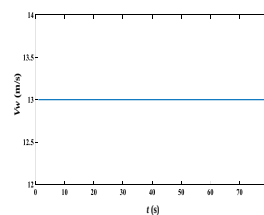
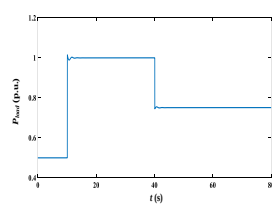


(c)特徵值 Λ_{14}

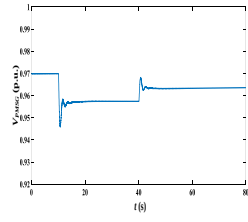


(d)特徵值 Λ_{15}

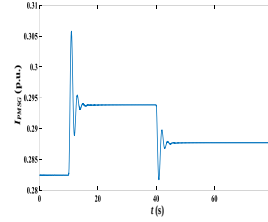
圖 2、風速自 4 m/s 增加至 14 m/s 之實驗室平台系統四個模態的根軌跡圖



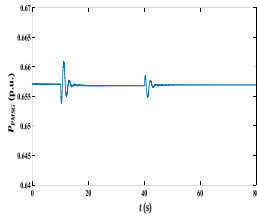
(a) 直流負載功率



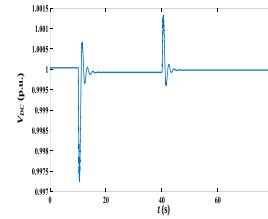
(b) 風速



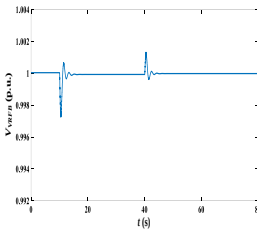
(c) 永磁式同步發電機之輸出電壓



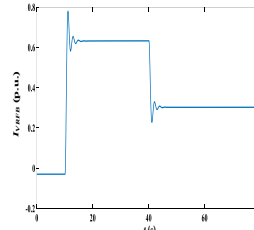
(d) 永磁式同步發電機之輸出電流



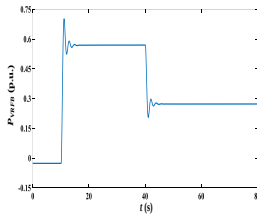
(e) 永磁式同步發電機之輸出實功



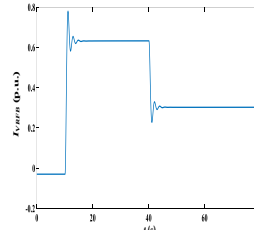
(f) 直流匯流排之電壓



(g) 全釩氧化還原液流電池之輸出電壓



(h) 全釩氧化還原液流電池之輸出電流



(i) 全釩氧化還原液流電池之輸出功率

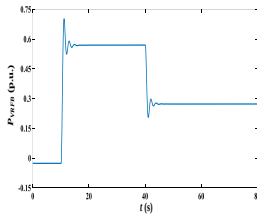
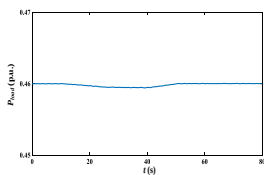
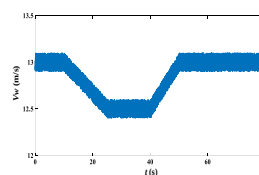


圖 3、整合永磁式同步發電機與全釩氧化還原液流電池之實驗室平台

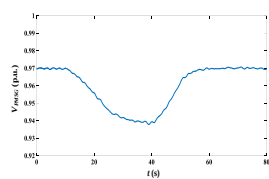
系統發生負載變動之動態響應模擬結果



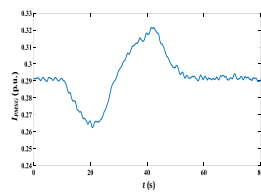
(a) 直流負載功率



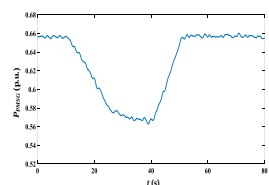
(b) 風速



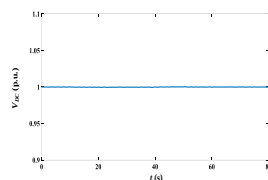
(c) 永磁式同步發電機之輸出電壓



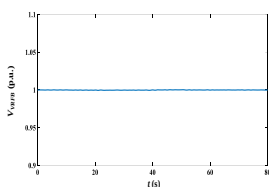
(d) 永磁式同步發電機之輸出電流



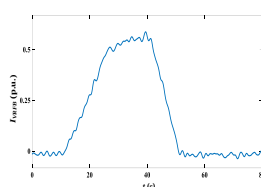
(e) 永磁式同步發電機之輸出實功



(f) 直流匯流排之電壓

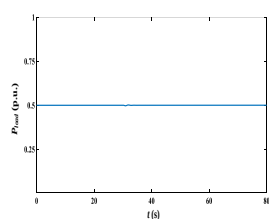


(g) 全釩氧化還原液流電池之輸出電壓

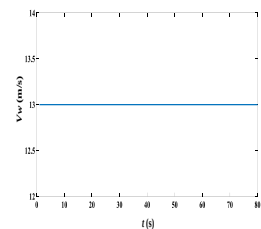


(h) 全釩氧化還原液流電池之輸出電流

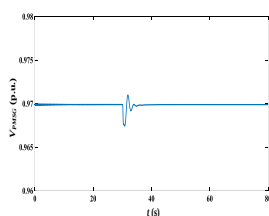
圖 4、整合永磁式同步發電機與全釩氧化還原液流電池之實驗室平台系統發生風速變動之動態響應模擬結果



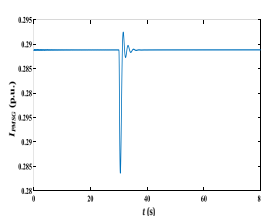
(a) 直流負載功率



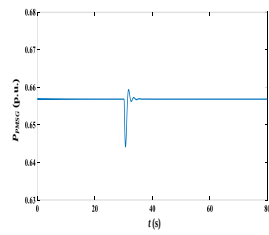
(b) 風速



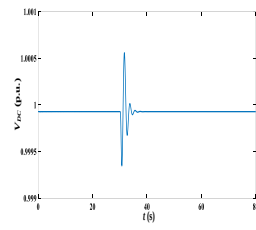
(c) 永磁式同步發電機之輸出電壓



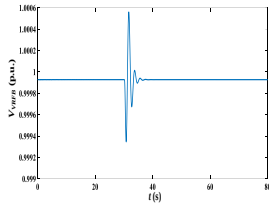
(d) 永磁式同步發電機之輸出電流



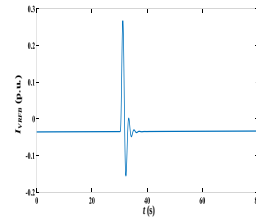
(e) 永磁式同步發電機之輸出
實功



(f) 直流匯流排之電壓



(g) 全釩氧化還原液流電池之
輸出電壓



(h) 全釩氧化還原液流電池之
輸出電流

圖 5、整合永磁式同步發電機與全釩氧化還原液流電池之實驗室平台系統發生轉矩干擾之動態響應模擬結果

生質能源

沼氣甲烷提升策略研究.....	1
PHA 編輯策略應用於菌株基因改良	4
生分解塑膠 PHAs 加工及其性質研究	13
生質單體催化技術及其應用效益評估研究	18

沼氣甲烷提升策略研究

The strategy to elevate the biogas production

(計畫編號：110B010)

郭昆讓¹ 曾慶平¹ 詹明峯² 陳文華²

¹國立陽明交通大學生物科技學系 ²核能研究所

臺灣能源需求依賴進口，因此能源開發成為台灣經濟發展之重要課題。台灣每年約有 220 萬公噸之農業纖維廢棄物產出，農業廢棄物可作為生質能源使用，開發成為循環經濟。農業廢棄物主要由纖維素組成，破壞纖維素結構可使單醣釋放，可提升產沼氣效率。本研究利用養豬場廢水(或沼液)當作調整材，與纖維廢棄物混和以調整碳氮比，並添加不同之小分子有機化合物提升沼氣產量，比對不同條件下的菌相改變結果與微生物代謝路徑變化，以實驗測試及驗證沼氣甲烷提升之不同策略方法。養豬場廢水的化學需氧量為 10550mg/L、總固體含量為 18%、碳氮比為 14。實驗結果顯示，添加不同小分子有機化合物後，沼氣產量皆比不添加的對照組高，提升了 1.5~2.23 倍。

Taiwan's energy demand depends on imports. Therefore, energy development become an important issue for Taiwan's economic development. Taiwan produces approximately 2.2 million metric tons of agricultural fiber waste every year. Agricultural waste is suitable for use as biomass energy and can be developed as part of a circular economy. The main structure of agricultural waste is composed of cellulose. Destruction of the cellulose structure can release monosaccharides to improve the efficiency of biogas production. This study use pig farm wastewater (or biogas slurry) as the

material to mix with fiber waste to adjust the carbon-nitrogen ratio. The different small molecular organic compounds were added into culture, and compared to the results of the bacterial changes under different conditions to obtain the microbial metabolism pathways. The experimental tests can verify different strategies and methods for elevation of biogas production.

The experimental results showed that when organic was added organic acid, the biogas amount increased by 1.5~2.23 fold increasing compared with no addition.

壹、計畫目標

本研究將以養豬場廢水與台灣常見的纖維原料作為主要研究目標，並根據原料性質與厭氧發酵微生物代謝途徑，開發設計調整代謝途徑配方。使用核能所化學組開發之酸催化水熱法前處理稻稈與養豬場廢水及不同之有機酸添加，藉由調整影響厭氧消化產氣的參數，進行實驗室批次測試驗證和配方參數最佳化，完成沼氣甲烷提升策略研究。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

(一)主要發現

本計畫在比較添加不同小分子有機化合物來提升沼氣產量實驗中，添加有機酸 A 和 B 後最佳產氣效果分別較不添加的對照組提升 1.5 倍和 2.23 倍，證實小分子有機化合物可以提升產氣量。而調整 pH 值也會影響到整體產氣效果，添加有機酸 A 實驗中，調整 pH 值沒有較好效益，相較沒有調整時的最佳表現產氣量由 403 毫升略降到 387 毫升。當添加有機酸 B 實驗中，調整值 pH 則沒有較好的效益，其最佳表現產氣量由 601 毫升下降到 413 毫升。

(二)本計畫所解決之問題

根據行政院農委會統計，台灣每年平均約產生 246 萬噸的農業廢棄物，其中最大宗的為稻稈約為 195 萬噸，適合作為生質沼氣原料，此外，大部分養豬場經過三段式放流處理後就直接排放，不但無法回收沼氣能源，也衍生出許多汙染污染的問題。本計畫利用養豬場廢水與解聚纖維稻稈回收後共醱酵方式減少廢水排放量及其處理成本，並藉由添加小分子有機酸再次提高厭氧消化效率，不僅有助於減輕異味、去除對人體或動物有害的病原體，消化後產生的沼液具有用作土壤肥料的潛力，回收產生的沼氣也有助於減少溫室氣體排放。

二、學術成就

本計畫研究成果預計可發表在國內研討會中，後續初步探討結果進行深入研究後預計將撰寫 2 篇期刊論文發表。

參、展望

本計畫先將高含氮沼液與纖維料源的厭氧反應參數調整至最佳化，得到初步生質沼氣最佳產氣量，再經由添加小分子有機酸以及 pH 的調整更進一步提升沼氣生產效率。未來將可以提供實場規模之參照，最終達到提升農業廢棄物與能源作物的經濟價值，此技術將可延伸應用至其他纖維料源之沼氣生產，將對台灣綠色能源、產業升級、循環經濟及永續發展均有其重要性。

PHA 編輯策略應用於菌株基因改良

The gene modification of strain by PHA edited strategy

(計畫編號：109B011)

游勝傑

中原大學環境風險管控研究中心

聚羥基烷酯(polyhydroxyalkanoates, PHAs)是一種生物可分解性塑膠，可以藉由 PHA 合成菌合成，廢水中的磷蓄積菌是一種 PHA 合成菌，磷蓄積菌在除磷過程中於厭氧狀態下釋出體內之聚磷酸鹽，獲得能量後將廢水中溶解性有機物以 PHAs 的形式貯存於體內，隨後於好氧狀態磷蓄積菌將體內的 PHAs 氧化，獲得能量後再將原本釋出的磷酸鹽攝取回體內，因此，自具有除磷之廢水處理程序之污泥中可篩選出 PHA 合成菌。目前國內外應用於廢水處理之除磷技術，多數還是以生物處理程序為主，例如 MBR(Membrane Bioreactor) 薄膜生物法、A₂O(Anaerobic·Anoxic·Aerobic)厭氧、缺氧、好氧廢水生物處理技術、SBR(Sequencing Batch Reactor)批式活性污泥法等方法。因此，本團隊針對國內具備除磷處理單元之廢(污)水處理廠，進行共 21 座廢水處理廠之採樣，位置包含 16 座都市污水及 5 座工業廢水，分析微生物菌相供 PHA 菌株改良編輯用。

PHAs(polyhydroxyalkanoates) is a kind of biodegradable plastic that can be synthesized by “PHA synthesizing bacteria”. “Phosphorus accumulating bacteria” in wastewater is a kind of “PHA synthesizing bacteria”. “Phosphorus accumulating bacteria” release polyphosphates in the body under anaerobic

conditions during the process of phosphorus removal. After the energy is obtained, the dissolved organic matter in the wastewater is stored in the body in the form of PHAs, and then the PHAs in the body is oxidized by the “phosphorus accumulating bacteria” in the aerobic state, and the originally released phosphate is taken back into the body after the energy is obtained. “PHA synthesizing bacteria” can be screened from the sludge of the wastewater treatment process for phosphorus removal. At present, most of the phosphorus removal technologies used in wastewater treatment at home and abroad are mainly based on biological treatment procedures, such as MBR(Membrane Bioreactor) membrane biological method, A2O(Anaerobic·Anoxic·Aerobic) biological treatment of wastewater Technology, SBR(Sequencing Batch Reactor) batch activated sludge method and other methods. Therefore, our team will plan a total of 21 sampling locations for wastewater/sewage treatment plants with phosphorus removal treatment units, including 16 urban sewage treatment plants and 5 industrial wastewater treatment plants, and conduct preliminary microbial phase analysis to provide improved use of “PHA synthesizing bacteria”.

壹、計畫目標

本案之目的為合成 PHA，磷蓄積菌於厭氧狀態下即將體內之聚磷酸鍵斷鍵釋磷獲得能量後攝取溶解性 BOD 並以 PHA 形式合成，因此採集生物除磷反應槽之污泥為第一優先考量，另外薄膜生物反應器之污泥停留時間較長，因此微生物多樣性較高，亦可採集此等反應槽之污泥。擬依上述說明，從中規劃並採樣提供 16 座都市污水及 5 座工業廢水活性污泥之生物樣品(其中需含除磷程序及薄膜生物反應器製程者)，完成進行菌相分析並提供評估結果報告。以供後續 PHA 編輯及改良使用。

貳、重要成果

一、污泥來源

本研究篩選國內具備生物除磷或 MBR 單元之污水處理廠(水資源回收中心)及工業廢水處理廠進行採樣，共採集 16 座都市污水廠及 5 座工業廢水廠之曝氣池污泥。

(一)、菌種培養及分析

1. 總菌落數培養

本研究將採集之污泥進行總菌落數檢測方法培養，以添加 Glucose、Tryptone、Beef extract 等藥劑之 TGEA 培養基培養，另外再添加 Na_2CO_3 提供無機碳之來源。

2. DNA 萃取

本研究所使用菌種的 DNA 萃取方法分為兩種，一為冷凍解凍法(thaw-freezen)，從培養基挑出適量菌株置入已加入 15 μl 滅菌二次水之離心管中，經由 -20°C 冷凍 30 分鐘、 95°C 解凍 10 分鐘的方式，重複進行 3 次以上，主要目的在於打破菌株之細胞壁，得到該菌株之 DNA；另一個方法則是利用 Phenol-Chloroform 法，該萃取步驟主要先破壞細胞壁，去除醣類與殘留之蛋白質，最後以 75% 冰酒精洗滌三次去除多餘之鹽類，之後倒置風乾約 2 小時，再加入滅菌二次水，即可置於 -20°C 下保存。

3. 聚合酵素連鎖反應(PCR)

在 PCR 反應中，偵測不同菌種需要不同的引子，將純菌培養及污泥所萃取之 DNA 進行基因增幅，再利用 11-1512 primer 進行 16S rDNA 放大。而總菌落偵測方面則以 11-1512 進行 PCR 增幅，clone 過後之菌株則利用 M13 引子來進行 PCR 反應，再以 968 fgc-1392 之 primer 夾出片段較短之位置進行 DGGE 分類。

4. 限制酵素法(RFLP)

限制酵素法(RFLP)主要是利用 PCR 產物與酵素間之反應，本研究採用二種酵素分別為 HhaI 及 HaeIII。其方法為將緩衝液依照比例均勻混合：10×buffer，1X；HhaI or HaeIII；PCR products 適量；ddwater 定量至 20μl。並將混合均勻後置於 37°C 下，反應 6 小時或隔夜；待其完全反應後取出反應物與 10×loading dye 混合均勻、迅速注入配置好 1.5%凝膠，並以 100 伏特進行 30 分鐘的電泳反應，之後照相並記錄其切割情形且觀察其 DNA 片段位置。

5. 基因轉殖(Gene cloning)

本研究對於基因轉殖(Gene cloning)部份，主要利用向 Invitrogen 公司購買之 TOPO TA Cloning® Kit Dual Promoter，該產品之大腸桿菌載體為 OneShot Top10F' Chemically Competent E.coli。其方法為將目標 DNA PCR 產物嵌入質體 DNA，再轉殖入大腸桿菌載體中，並加入該 Kit 所附之 SOC medium 於 37°C 下，進行震盪培養 1 小時。之後將載體菌液均勻塗抹於已添加抗生素 Ampicillin、IPTG 及 X-gal 之 LB 培養基上，於 37°C 培養 24 小時。由於質體(vector)具有抗生素耐受性基因，因此經過培養後培養基所長之菌落即表示含有質體，而其質體切點設計在半乳糖苷酶基因上，當載體未接受外來之 DNA 片段時，該基因受到 IPTG 誘導，此時半乳糖苷酶會與 X-gal 作用產生藍色菌落；但當載體接受外來之 DNA 片段時，該基因受到嵌入破壞使得該基因無法表現原有之活性，無法與 X-gal 作用，此時菌落經呈現白色(此步驟為藍白篩選)。

經由 24 小時培養之後，挑出培養基上白色菌落在畫於另外一個 LB 培養基上進行培養，同樣於 37°C 培養 24 小時，待培養完成後進行保存供日後實驗使用。

6. 變性梯度凝膠電泳法 (DGGE)

進行 DGGE 實驗時，首先需製作變性梯度為 40%-60%，濃度為 6% 之聚丙醯胺凝膠。將 PCR 的產物取適量置入 well 中，在電壓為 200V，溫度為 60°C 下電泳 3 小時左右。電泳完成後，進行銀染使其呈色以便觀察菌相。

7. 定序及核苷酸比對

本研究利用特定引子，利用 DGGE 及 RFLP 分類，分別於各類挑選一菌株將其 PCR 產物進行 DNA 定序，再將定序結果於 NCBI (National Center for Biotechnology Information) 網站進行序列比對。除了進行序列比對外，可進一步利用 DDBJ (DNA Data Bank of Japan) 網站上之 clustalW 程式多重排比並依據種屬親緣學的分析，來呈現親緣關係之樹型圖。

二、主要發現

(一) 污泥 16srDNA 純菌培養

本研究採用環檢所公告的總菌落數檢測法進行 16S rDNA 純菌培養。經培養後得到 150 個菌落，經冷凍解凍法萃取 DNA 後利用 11-1512 PCR，共有 112 個菌株 PCR 成功，再以 968fgc-1392r 夾出較小片段之 DNA 以做 DGGE 篩選，經 DGGE 篩選後可將菌株分為 12 類。本研究接著將 DGGE 分類之 PCR 產物送定序，利用 NCBI 的 BLAST 程式各類菌株與基因庫中最相近之菌種。

經由整理發現反應槽污泥經純菌培養後之菌株大多為可將硝酸鹽或亞硝酸鹽還原，可行脫硝作用之菌種，如表 5 所示，本研究採集之水廠於在除磷及脫硝作用上都有明顯之效果，因此檢測出脫硝作用及除磷作用相關之菌種。

將上述純菌培養污泥之 16S rDNA 分類結果與活性污泥所發現之

Proteobacteria 門之 Alpha、Beta、Gamma、Delta、Epsilon 等綱及 CFB、Gram-positive 和 Spirochaetales 等做親源關係演化之樹狀圖，如圖 3 所示。

污泥純菌培養以 DGGE 所分之 12 類菌種，其中七類菌種部分集中於框線所圍之區域，所佔比例甚大，該區域內菌種之數目佔污泥總菌落數之 50.5%，由此可知反應槽中菌相種類集中於該區域內。

表 1、污泥純菌培養之 16S rDNA 分類定序結果整集

菌株行為	代表菌株編號	相似度 (%)	菌株
脫硝作用	CYCU-16S-16S-MBRAS-i309	97.62	<i>Staphylococcus sp</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-i316	91.47	<i>Pedobacter sp</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-i119	98.76	<i>Thauera sp.</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-i108	99.27	<i>Thauera sp.</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-i207	98.97	<i>Thauera sp</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-i414	96.30	<i>Acidovorax sp.</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-i429	97.34	<i>Acidovorax sp.</i>
同時脫硝 除磷	CYCU-16S-16S-MBRAS-i416	96.03	<i>Aquaspirillum metamorphum</i>

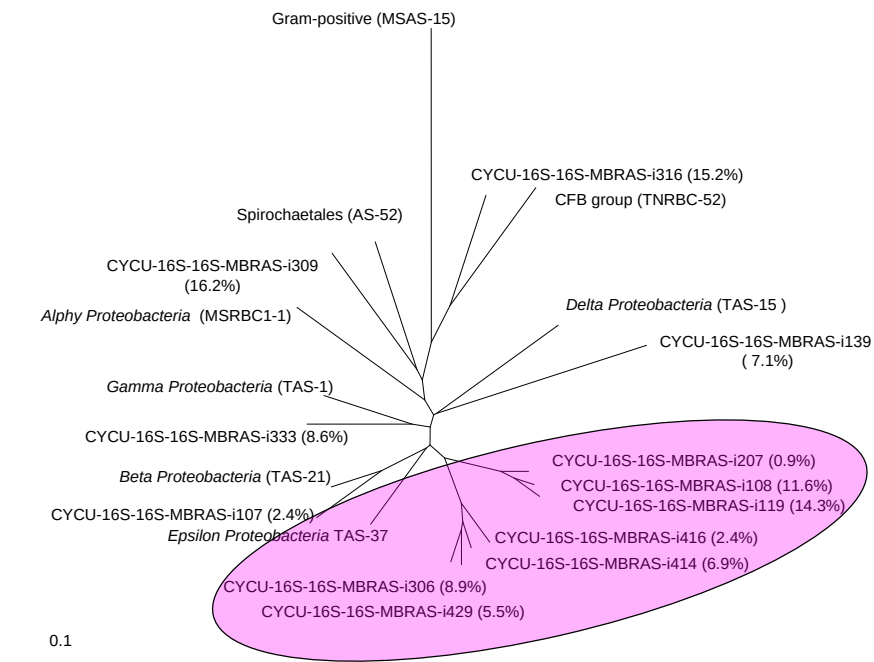


圖 1、污泥純菌培養之 16S rDNA 親源演化距離及樹狀圖

(二) 污泥之 16S rDNA 基因轉殖

本研究以 phneol-chloroform 萃取污泥 DNA 並以 11-1512 primer PCR 後，經 E-coli 轉殖共得到 150 個菌落，獲得之菌落以 M13 primer 確認後，共有 117 個轉殖成功，再以 DGGE 篩選後將這些菌株分為 19 類，其分類示意圖如圖 4 所示。本研究接著將 DGGE 分類之 PCR 產物送定序後，利用 NCBI 之 BLAST 程式找出與基因庫中最相近的菌種。

經由整理發現反應槽之污泥，經 clone 將其 16S rDNA 基因以 DGGE 分類定序，經 NCBI 基因庫比對結果可發現該反應槽中鑑定出具脫硝及除磷能力之菌種居多，如表 7 所示。

將上述以 DGGE 分類之 19 類菌株，與活性污泥所發現之 Proteobacteria 門之 Alpha、Beta、Gamma、Delta、Epsilon、CFB 及 Gram-positive 和 Spirochaetales 做親源關係演化之樹狀圖，如圖 5 所示，由圖 5 可得知，反應槽之污泥經基因轉殖其 16S rDNA 基因，其菌相種類及菌數皆分佈很廣且平均，因此可知其菌相分佈極廣且極具多樣性。且觀察得知，污泥經 clone 分類結果屬 Alphaproteobacteria 綱之菌株為：CYCU-16S-16S-MBRAS- c111、CYCU-16S-16S-MBRAS-c121、CYCU-16S-16S-MBRAS-c226 及 CYCU-16S-16S- MBRAS-c302。為 Betaproteobacteria 綱之菌株為：CYCU -16S-16S-MBRAS-c104、CYCU-16S-16S-MBRAS-c125、CYCU-16S-16S- MBRAS-c133、CYCU-16S-16S-MBRAS-c207 和 CYCU-16S-16S-MBRAS- c208。而屬 Gammaproteobacteria 綱之菌株為：CYCU-16S-16S-MBRAS- c107。而歸類為 Deltaproteobacteria 綱之菌株為：CYCU-16S-16S-MBRAS- c232。另外 CYCU-16S-16S-MBRAS-c230、CYCU-16S-16S-MBRAS-c233 則屬 Shingobacteria 綱，CYCU-16S-16S-MBRAS-c113 及 CYCU-16S-16S-

MBRAS-c218 屬 Actiobacteridae 綱，CYCU-16S-16S-MBRAS-c234 則歸類為 Planctomycetacia 綱。

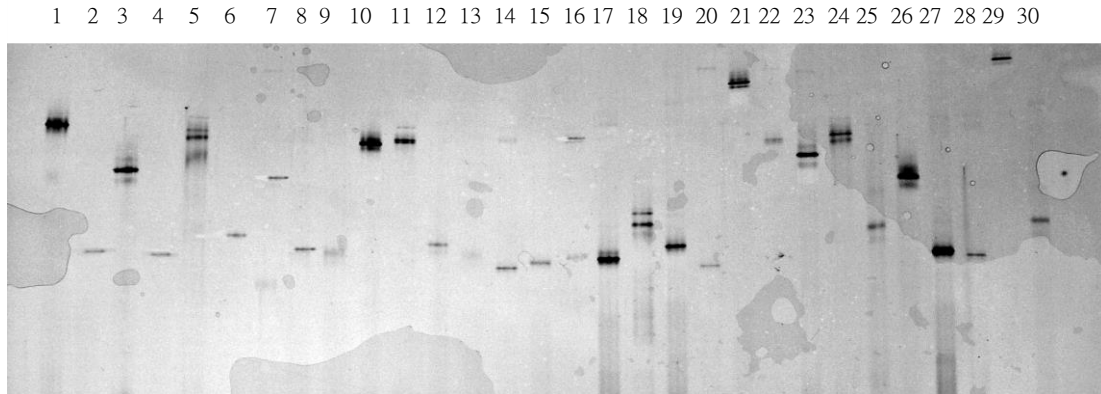


圖 2、污泥經基因轉殖之 16S rDNA DGGE 分類基因示意圖

(lane 1~29 分別表示 sample 301、302、303、304、307、308、311、312、313、314、316、317、318、319、320、323、324、325、326、328、329、330、331、332、334、338、401、402、403 及 405)

表 2、污泥 clone 之 16S rDNA 分類定序結果整集

菌株行為	代表菌株編號	相似度 (%)	菌株
脫硝作用	CYCU-16S-16S-MBRAS-c111	96.20	<i>Rhodobacter sphaeroides</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-c121	95.83	<i>Rhodobacter sphaeroides</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-c226	97.33	<i>Rhodobacter sphaeroides</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-c218	98.60	<i>Notocoida limicola</i>
除磷作用	CYCU-16S-16S-MBRAS-c104	96.20	<i>Aquaspirillum metamorphum</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-c234	97.19	<i>Planctomycete sp.</i>
	CYCU-16S-16S-MBRAS-c133	90.03	<i>Actinomycete sp.</i>
同時脫硝 除磷	CYCU-16S-16S-MBRAS-c233	93.48	<i>Haliscomenobacter hydrossis</i>

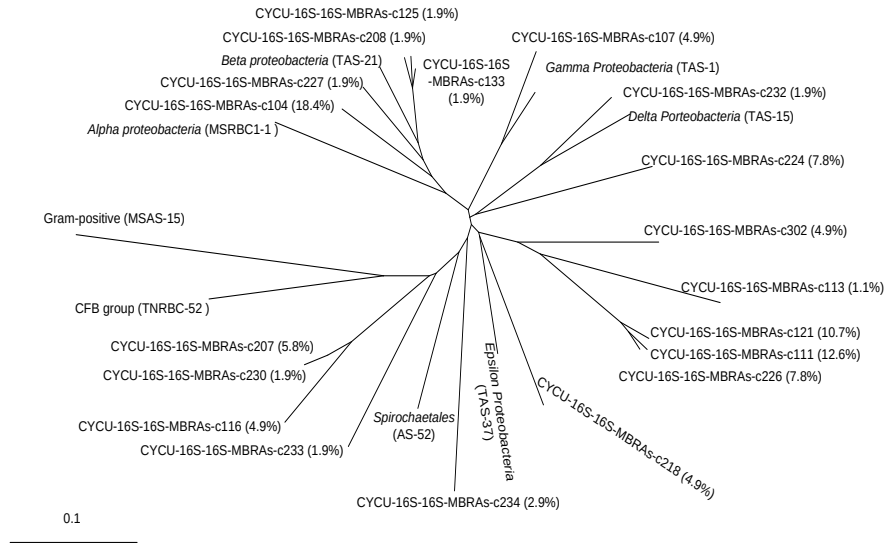


圖 3、污泥基因轉殖之 16S rDNA 親源演化距離及樹狀圖

參、展望

1. 污泥利用總菌落數培養後，以 DGGE 分類為 12 類，其 16S rDNA 基因經定序比對結果大多為具有脫硝功能之菌屬，與反應槽具有脫硝作用相符。
2. 由總菌落數培養之 16S rDNA 基因，其類源演化關係分佈集中於某一區，且比對結果 Betaproteobacteria 綱佔總菌落數比例為 52.9%。
3. 將反應槽污 clone 經 DGGE 分類後，共分為 19 類，將其 16S rDNA 基因比對結果發現，反應槽中鑑定出具脫硝及除磷能力之菌種居多。
4. 污泥經基因轉殖後，其類源演化樹狀圖菌種分散均勻，鑑定出菌種大部屬於 Alphaproteobacteria 及 Betaproteobacteria 綱，分別佔 39% 及 29.9%。
5. 分別採用純菌培養及基因轉殖兩菌種分離之方法，可看出利用純菌培養可分離之菌種類別較少，其可分離出較多種類之菌株，但觀察其類緣圖會發現其彼此間分佈均勻。

生分解塑膠 PHAs 加工及其性質研究

Study on the physical properties of biodegradable plastic PHAs

(計畫編號：109B012)

李晨宇 李宇立

財團法人塑膠工業技術發展中心

本計畫係協助以核研所研發生產之聚羥基脂肪酸酯(Polyhydroxy-alkanoates, PHAs)為原料，進行產品化評估及其成品試作研究，並同時協助進行生物可分解性之測試評估，以有利於計畫成果之展現。再者，以 PHAs 為原料進行混練加工製程技術及物化性質建立，但由於 PHAs 材料製造需要非常注重原料含水率與加工溫度等細節，才能有效發揮其最佳物性，因此將建構 PHAs 材料混練加工之技術平台，發展從原料、添加助劑、乾燥參數、混練相容性與加工參數等關鍵技術，掌握國內 PHAs 材料混練造粒製程控制能力。運用上述之改質後 PHAs 材料，進行產品化試作測試，如：化妝品瓶子、食品包材、杯子或兒童玩具，並產出 1~2 件之 PHAs 載具，並建立押出或射出等加工製程參數，根據產品需求進行產品的各項物性評估及生物可分解試驗評估。

The plan is to use PHAs produced by the Nuclear Research Institute as a raw material for product manufacturing research, and at the same time to evaluate the biodegradable test. Furthermore, the use of PHAs as raw material for modification and establishment of physical properties. However, PHAs modified material to be noted processing temperatures and moisture content. Therefore, build a PHAs material processing technology platform and develop

key technologies from raw materials, additives, drying parameters, mixing compatibility and processing parameters. Use modified PHAs materials for productization experiments and biodegradable evaluation, such as: cosmetic bottles, food packaging materials, cups or children's toys.

壹、計畫目標

以聚羥基脂肪酸酯(PHAs)材料為主，並進行以下相關實驗；建立材料分析技術、混練加工、產品化加工與生物可分解性，於材料分析藉射出成型製作標準試片進行機械性質分析與判定產品化加工之可能性，經檢測分析後材料流動性與強度偏脆性，仍須混練加工調整材料物性，以利於後續材料產品化生產之 3D 列印與射出成型方式進行產品化試做。

貳、重要成果

- 一、材料物性檢測分析：PHAs 材料熱變形溫度為 153.5°C ，機械性質為拉伸強度 365.85 kgf/cm^2 ，彎曲強度 636.24 kgf/cm^2 ，衝擊強度 19.19 J/m ，硬度(shore D) 83 D，比重 1.24。
- 二、PHAs 塑膠粒子藉由單螺桿押出機，進行 3D 列印膠條製作，其加工溫度為 $170\sim 190^{\circ}\text{C}$ ，材料經過押出機模頭擠出及水中牽引至拉條收捲，產出的 PHAs 膠條使用 3D 列印印表機進行產品化試作，其列印加工溫度為 185°C ，材料經過熔融後分別列印小花瓶(長 x 寬 x 高： $7\text{cm} \times 7\text{ cm} \times 11\text{ cm}$)及兩種尺寸的粉底盒(長 x 寬 x 高： $5.5 / 7\text{cm} \times 5.5\text{ cm} / 7\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$)。
- 三、將 PHAs 粒子置於除濕乾燥機內進行乾燥，條件為溫度： 70°C 與時間:4 小時以上，並達到 250 ppm 以下之水份含量，即可進行射出成型加工，完成直徑 5cm 厚度 5mm 的化妝品容器組。

四、生物可分解性試驗遵照 ISO 14855-1 的試驗方法，使用濕式氣體流量計與二氧化碳偵測器，將 PHAs 膠粒製成的薄膜片材放入裝有有機質堆肥接種物的 2000 mL 容器內，容器置於 58 ± 2 °C 的試驗環境，以含飽和水份之空氣通氣。在生物可分解性檢測，從分析結果可知 PHAs 材料也可在 180 天達到 ISO 14855-1 規範的分解率 90 % 以上。

參、展望

根據市調機構估計，PHA 於 2021 年的全球的市場規模為 5,780 萬美元，到 2026 年預計會成長到 9,850 美元，年均複合增長率為 11.8 %，其中歐洲、北美及亞洲會是 PHAs 最主要的市場。而 PHAs 本身具生質、生物可分解及生物相容等特性，讓 PHAs 涉足的產品相當多元，如：膜袋、包材、一次性食品用具或生醫材料等產品，都能落在 PHAs 的應用範圍內，這使得 PHAs 在近年受到了產業界極大的重視，也成為各界重點開發的目標材料之一。

表 1、物性檢測分析結果

硬度		比重		熱變形溫度	
	Shore D		比重		°C
1	83	1	1.242	1	153.8
2	83	2	1.239	2	153.5
3	83	3	1.239	3	153.2
4	83	Average	1.2	Average	153.5
5	83				
Average	83				

彎曲試驗		拉伸試驗		衝擊試驗	
	kgf/cm ²		kgf/cm ²		J/m
1	628.604	1	364.5	1	19.966
2	643.489	2	363.18	2	17.382
3	629.182	3	364.12	3	18.996
4	636.118	4	369.51	4	17.059
5	643.81	5	367.96	5	22.557
Average	636.241	Average	365.85	Average	19.192



圖 1、PHAs 材料 3D 列印膠條

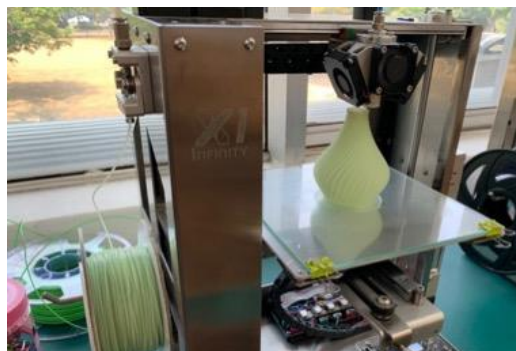


圖 2、PHAs 材料之小花瓶



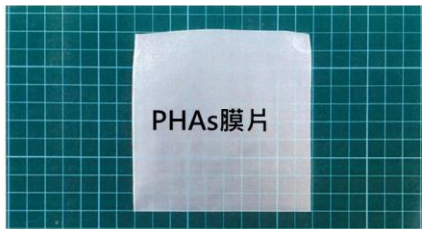
圖 3、PHAs 膠條 3D 列印之粉底盒



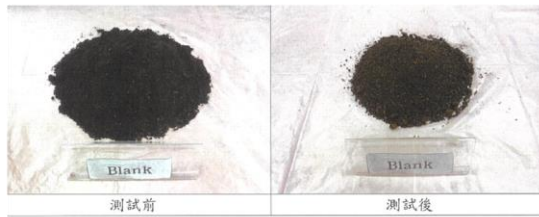
圖 4、PHAs 膠粒射出化妝品容器組

PHAs生物分解性評估試驗

測試樣品(PHAs 膜片本色)



空白組



對照樣品(濾紙)



測試樣品(PHAs膜片)



圖 5、PHAs 生物分解性評估試驗結果

生質單體催化技術及其應用效益評估研究

Assessment of bio-monomer catalytic technology and its application

(計畫編號：110A006)

沈若樸

國立清華大學化工系

在之前的工作中，我們將選定的 RBS library 與 violacein 合成途徑上各基因結合，並透過培養盤菌落呈色法篩選出多種可有效生產紫色桿菌素之 RBS 組合，其中產量最好之組合在 10mL minimal medium (M9+2g/L tryptophan) 搖瓶培養 24 小時，violacein 與 deoxyviolacein 最高產量分別能達 103.8 mg/L 與 351.2 mg/L。而由於上游色胺酸途徑尚未被優化，這一切入點成為了可提高紫色桿菌素類化合物產量之可能性。

在此年度中，我們選定了幾個酵素去過度表現，也剔除了幾種會影響色胺酸產量之基因，並將優化紫色桿菌素途徑之方法套用至色胺酸合成途徑中，以此可達到不須額外添加色胺酸就可合成高產量 violacein 或是 deoxyviolacein，之後利用 RBS Library 以及呈色法搭配上紫色桿菌素途徑之質體篩選出 178 株具有生產潛力的菌株。而在下半期，我們將已篩選菌株進行穩定度的測試，之後將穩定性或產量較高的菌株送往定序以確認其 RBS 序列組合，並使用 RBS calculator 估算各 RBS 之轉譯強度以分析不同酵素間的規律關係。此外，我們也優化了 violacein 最佳生產菌株的生產環境等參數，並於生物反應器中進行初步放大規模的生產。而之後我們更參考了其它文獻中產量較好的培養基溶液並做測試及優化，目前我們的最佳菌株分別能在 72 小時內產生 1.6 g/L violacein 或 4 g/L deoxyviolacein。

In the previous work, we combined the selected RBS library with the genes in the violacein pathway, and screened out a strain based on the colony color on the agar plate that can effectively produce violacein. The best strains can produce 103.8 mg/L violacein or 351.2 mg/L deoxyviolacein in 10 mL minimal medium (M9+2g/L tryptophan) shake flask culture for 24 hours, respectively. Since the upstream tryptophan pathway has not been optimized, this point can be the possibility to increase the production of violacein compounds.

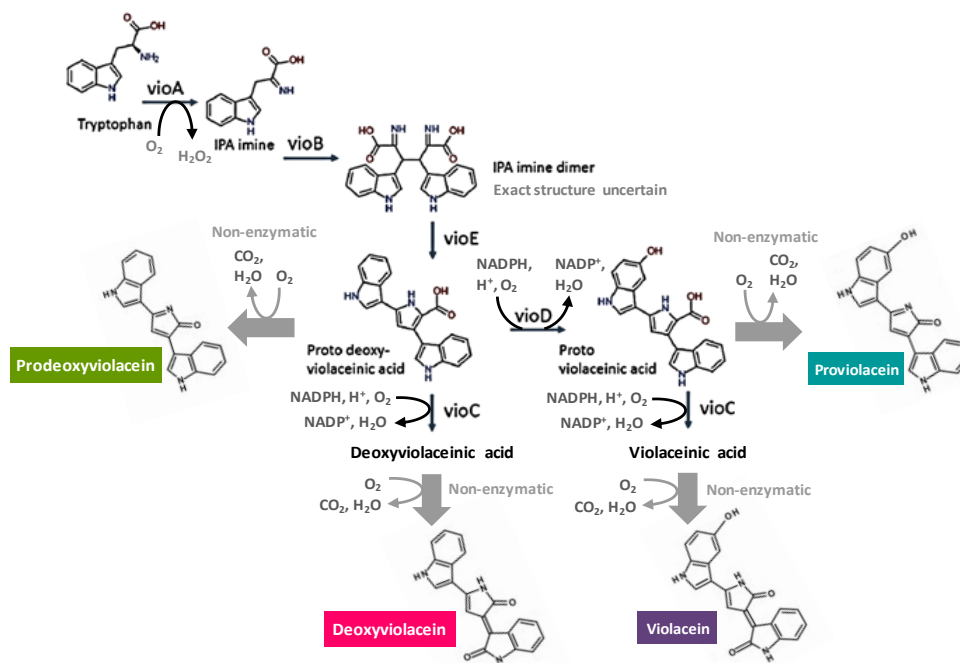
In this year, we selected several enzymes to overexpress and eliminated several genes that affect the production of tryptophan, besides, we also optimized the tryptophan pathway to achieve the high production of violacein while it won't need the addition of tryptophan. Afterwards, 178 strains with potential production of violacein or deoxyviolacein were screened by using RBS Library and coloring method. In the second half, we test the stability of the higher productive strains. After that, we sequenced the stable strains to confirm their RBS sequence combination while also used the RBS calculator to estimate the translation initial rate of each RBS sequence to analysis the regulation or correlation between these enzymes. In addition, we also optimized the production parameters of the best violacein productive strain and carried out preliminary scale-up production in the 1 L bioreactor. Furthermore, we also tested the medium in other literatures and did the optimization. At present, our best strains can produce 1.6 g/L violacein or 4 g/L deoxyviolacein in 72 hours, respectively.

壹、計畫目標

紫色桿菌素(violacein)及脫氧紫色桿菌素(deoxyviolacein)為微生物的二級代謝產物。他們具有抗氧化、抗菌、抗病毒及抗腫瘤等特性，且

violacein 已被成功使用於對抗白血病、肺癌和淋巴瘤細胞等。此外，violacein 作為生物染料具有良好的色調及穩定性同時也具有天然的抗菌效果，這些具有發展性的特點使人們對於生產 violacein 和 deoxyviolacein 越來越感興趣。

紫色桿菌素類化合物為色胺酸(tryptophan)之衍伸物，透過基因操縱組 vioABCDE 可產生四種不同的有色化合物(如圖一)。且已有文獻指出添加色胺酸可提高紫色桿菌素在天然生產者甚至是重組菌株中的產量，而 Rodrigues 等人也曾提及紫色桿菌素的產生會造成微生物體內色胺酸之累積量下降，這些都證實了色胺酸在生產紫色桿菌素的重要地位。而以往透過微生物進行生產時都會額外添加色胺酸以提高紫色桿菌素的產量，不過此方式是比較經濟不實惠的。若微生物能夠自我生產色胺酸使其足以過量生產紫色桿菌素，那麼我們可以透過微生物的生物轉換方式，將相對較便宜的簡單碳源轉化為經濟價值較高的紫色桿菌素。

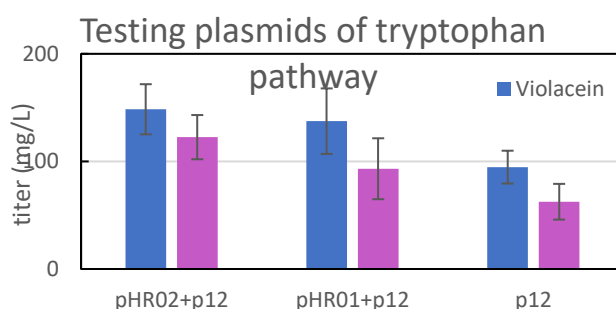


圖一 violacein 代謝途徑

貳、重要成果

一、建構及測試不同質體對於紫色桿菌素產量之影響

色胺酸為紫色桿菌素的前驅物，為了達到無須額外添加色胺酸但又能提高下游紫色桿菌素的產量，我們參考了相關文獻，挑選了 *trpE*、*trpD*、*aroG*、*serA* 這四種基因、建構了兩種質體分別為 pHR01(*trpE*、*trpD*、*aroG* 和 *serA*)和 pHR02(*trpE* 和 *trpD*)。將上述兩種質體分別與紫色桿菌素合成途徑之質體一起植入大腸桿菌中，並帶著控制組(p12，只含紫色桿菌素合成途徑之質體)於 TB medium 中進行生產測試(圖二)。可以發現無論是 pHR01 或是 pHR02 都確實能夠提高最終產物紫色桿菌素的產量，另外雖然 pHR01 比 pHR02 多表現了 *aroG* 及 *serA*，但產量卻沒有所提升，推測可能是所要表現之基因種類過多，加重了大腸桿菌在代謝上的負擔，以致產量無法更進一步上升。鑒於大腸桿菌的代謝負擔及之後 RBS Library 理論大小的設計，我們選擇了 pHR02 去過量表現 *trpE* 和 *trpD*，並進行實驗的下一步驟。



圖二 色胺酸合成途徑之質體測試

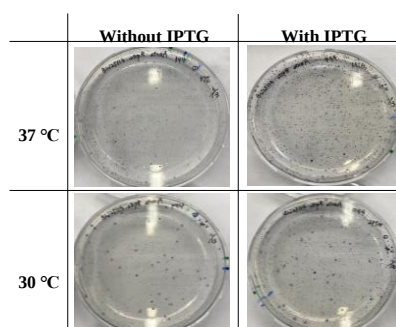
二、大腸桿菌中色胺酸抑制及競爭基因之剔除

在大腸桿菌中，有些基因會與色胺酸合成途徑做競爭如 *sdaA*、*tnaA*、*pheA* 等。當中的 *tnaA* 為將色胺酸降解為吲哚之基因，是最直接影響到色胺酸的競爭基因之一，另外 *trpR* 為色胺酸的調控基因，當大腸桿菌生成色胺酸後，其調控子會與色胺酸結合並抑制色胺酸之生成，因此我

們選擇將上述兩種基因從大腸桿菌中剔除以增加色胺酸在細菌體內之生成累積量。

三、優化培養盤以提高呈色法之辨別度

由於在培養盤上紫色桿菌素超過一定產量後，其顏色就會維持較深的藍紫色而難以透過肉眼進行顏色深淺的判斷，為了提高呈色法在培養盤上的辨別度，我們將培養盤進行了優化的工作，透過不同組成、不同溫度及是否添加誘導劑來使相同菌株在不同培養盤上的顏色有所不同。而由於 LB agar 培養盤上含有較多利於生長及生產的混合物，這會使菌落顏色過深不利於呈色法篩選，因此選擇了 M9 agar 培養盤進行下一步的優化。我們將先前已篩選過最好的紫色桿菌素質體 p44 植入大腸桿菌 BW25113 Δ trpR Δ tnaA 中，之後將菌液分別塗在不同組成的 M9 agar 培養盤上並於不同溫度下進行培養，期望能得到顏色較淺的培養盤組成及溫度。如圖三中可以看到在加了誘導劑(IPTG)之後，菌落顏色會有比較深的現象，然而培養溫度只會影響生長速度而對於顏色深淺並沒有太大的改變。以此，之後呈色法將以 M9 agar 培養盤在不加誘導劑且在 37°C 的條件下進行篩選。



圖三 培養盤組成及溫度之優化

四、建立 RBS Library 調控色胺酸及紫色桿菌素代謝途徑基因表現

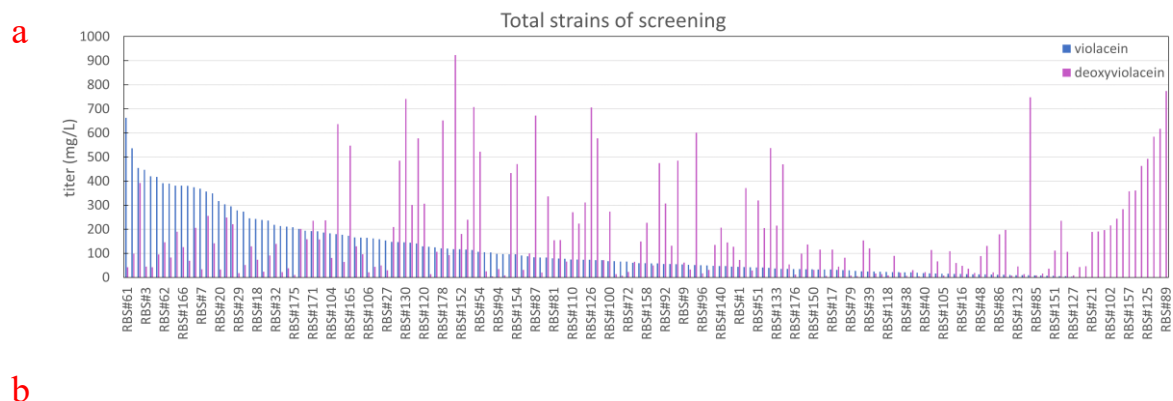
將質體植入大腸桿菌 BW25113 Δ trpR Δ tnaA 後，由於有 7 種可調控

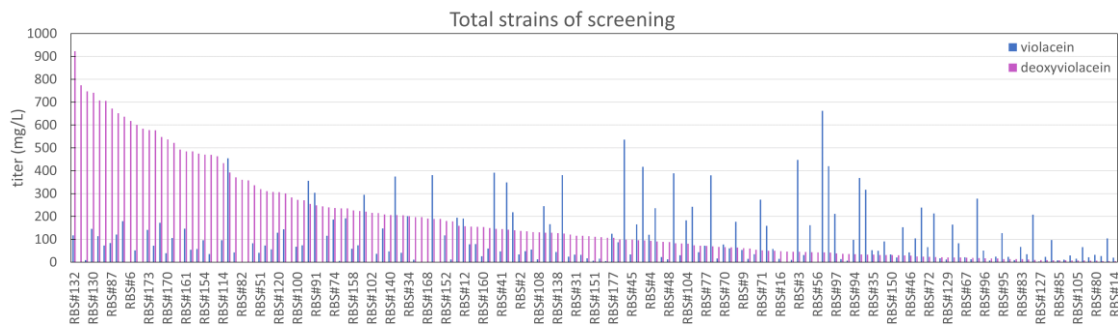
RBS 的基因，我們可以得到一個理論大小為 967 的 Library，之後將菌液塗在已優化過的培養盤上，可以觀察到各菌落的顏色有深淺之分，而每盤培養盤約有 5000 顆菌落。

五、以呈色法篩選具有生產潛力之菌株

為了確認 RBS 組合為造成菌落顏色深淺的主要原因，我們隨機挑選了培養盤上的菌落進行培養並分析產物。經過 24 小時的搖瓶培養並透過 HPLC 分析後，可以得知與對照組相比，擁有 RBS Library 組合的菌株在產物及產量上都發生了變化，作為對照組的 p44 為偏好生產 deoxyviolacein 的菌株，而經過 RBS 組合的調控後，我們得到了編號 3、7、13 和 15 為 violacein 的偏好生產菌株，在 deoxyviolacein 的方面，編號 6 也比對照組多生產了約一倍，這可以證實我們所設計並套用的 RBS Library 能夠藉由調整基因轉譯的速率去影響到最終的產物及產量。

在證實經過結合我們所設計的 RBS Library、質體及菌株，對於改變最終產物及產量為可行的之後，接著透過呈色法挑選在培養盤上顏色較深的菌株，再利用接種到培養液的方式進行二次篩選。而通過二次之菌株將會進一步進行搖瓶生產並分析產物及產量。圖四為所有經過篩選之菌株的產物及產量，當中共包含了 178 顆菌株。

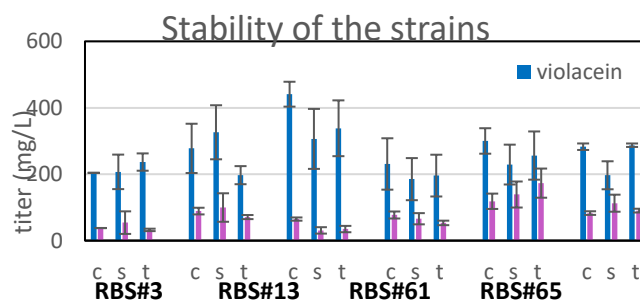




圖四 所有經篩選菌株之產物及產量分布 (a 為依照 violacein 產量多寡為順序作排列，b 為依照 deoxyviolacein 產量多寡為順序作排列)

六、穩定度及再現性測試

文獻中曾指出擁有 Vio 基因操縱組的重組大腸桿菌具有較高的可能性會形成低產量甚至不產生紫色桿菌素的突變體，因此在完成篩選之後，為了確認紫色桿菌素的產量是可再現的，我們將菌株從-80°C 之甘油保存管中重新塗盤並於培養盤上隨機挑選數顆菌落做生產測試，結果發現即使是相同菌株，不同菌落在產量上也會有所差異。之後我們從產量較好的菌落中取出質體，重新植入到大腸桿菌 BW25113 Δ trpR Δ tnaA 中並測試是否能達到相同的產量。測試的結果如圖五，大部分的菌株在重新轉植後皆可達到差不多的產量，我們之後將產量、穩定度及再現性較好的菌株送定序以確認其 RBS 序列組合。

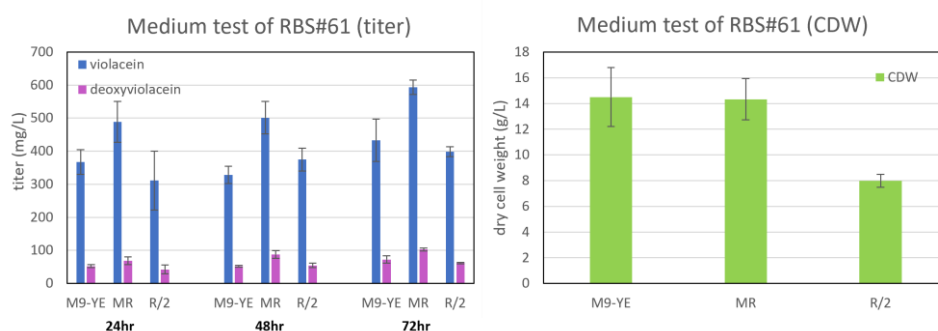


圖五 菌株穩定度及產量再現性

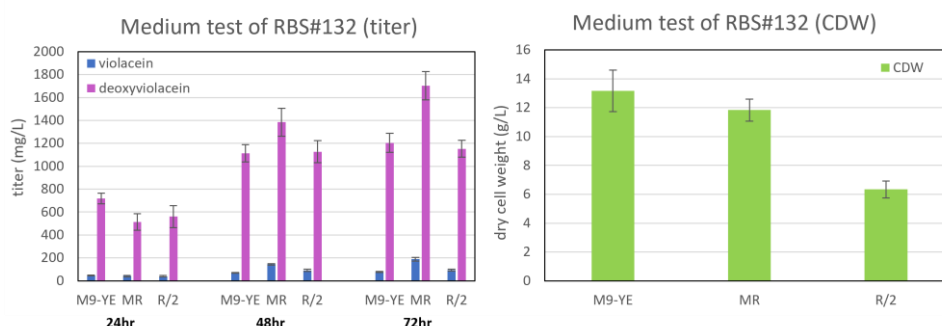
七、生產條件優化

菌株的生產環境包含培養液組成、溫度以及酸鹼值等皆會影響到最終產物紫色桿菌素的產量。我們將 violacein 最佳生產菌株的編號 61 作

為優化的基準並進行了數種不同條件下的測試，我們參考了其他有利於大腸桿菌生長或 violacein 生產的相關培養基文獻[15, 16]，並再額外測試了兩種培養基，分別為 MR 以及 R/2 培養基，如圖六與圖七，以先前產量較好的 M9(1% Y.E.)作為控制組，可以發現在產量方面，使用 MR medium 約能提高 40%，而 R/2 medium 的產量則跟控制組差不多。而在 dry cell weight 方面，M9-YE 及 MR medium 所累積的菌量是差不多的，這說明了 MR medium 中的其他微量金屬及元素比起 M9 培養基中的還更有利於 violacein 的生產，然而使用 R/2 medium 所累積的菌量則是其他兩種培養基的一半，這顯示出了使用 R/2 medium 所達到每單位菌量的產量能較高。



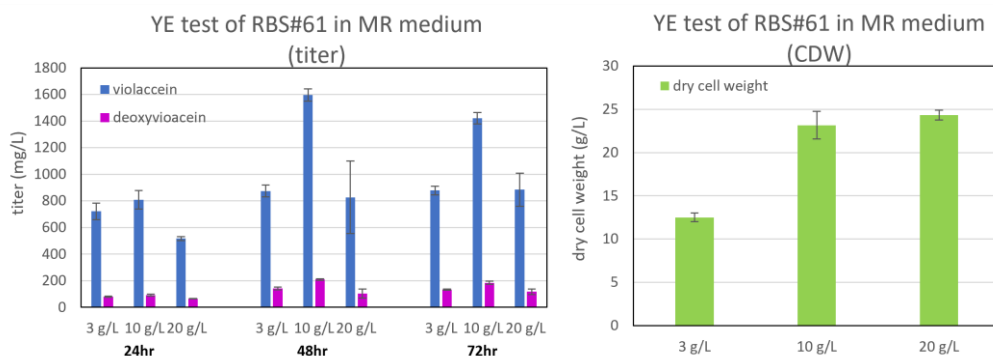
圖六 不同培養基對生產 violacein 的測試



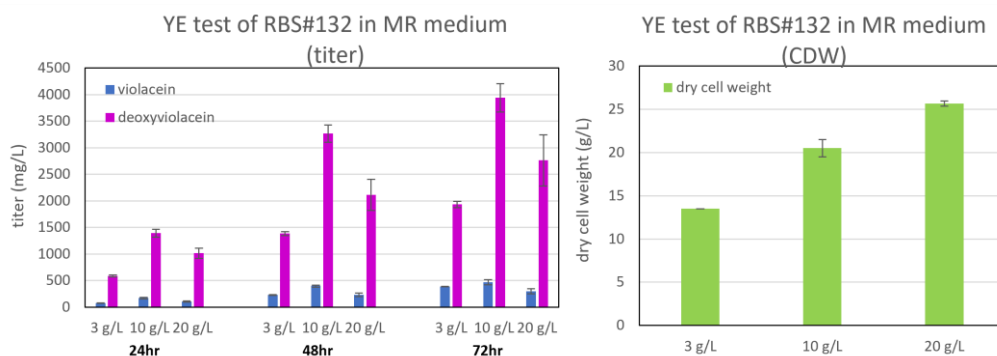
圖七 不同培養基對生產 deoxyviolacein 的測試

而由於 MR medium 有額外添加 yeast extract 以及 ammonium sulfate，我們接著也在 MR medium 中嘗試了不同濃度的 yeast extract 對產量的

影響，如圖八及圖九可以發現在產量方面，額外添加 10 g/L 的酵母菌萃取物所能達到的產量最高，而接著再提高到 20 g/L 並不會繼續增加產量。在菌量累積的方面，10 g/L 的實驗組所達到的菌量大約是 3 g/L 的控制組的兩倍，而他們之間的產量關係也大約是兩倍，因此我們可以藉由增加酵母菌萃取物濃度去提高菌的累積量再進一步的突破產量。目前我們的最佳生產菌株分別能在 72 小時的搖瓶內生產 1.6 g/L 的 violacein 或 4 g/L 的 deoxyviolacein。



圖八 不同濃度之酵母菌萃取物於 MR medium 對生產 violacein 的測試



圖九 不同濃度之酵母菌萃取物於 MR medium 對生產 deoxyviolacein 的測試

八、生產規模放大

我們於 1L 的生物反應器做初步的規模放大測試(圖十)，不過目前仍有些問題尚未釐清及解決，因此還是有使產量提升的空間。如文獻中

曾提到於 48 小時產量達到最高點，但隨著發酵時間的延長，其產量會越來越低，這與我們發現到的問題相似，至於 deoxyviolacein 的最佳生產菌株編號 132，我們發現其在發酵時間約 30 小時後會排出 deoxyviolacein 至培養基溶液中形成團狀物(圖十)，文獻中也曾推測可能是藉此降低菌株的毒性進一步使產量上升的關鍵，然而由於 deoxyviolacein 並不溶於水，這會使產物凝聚而附著在發酵槽的槽壁或器具上(圖十)，且無法單純以物理方式處理，進而可能低估了產物的真正產量。因此增加了我們在取樣上的困難，導致 30 小時之後的產量及乾細胞重量(dry cell weight)跳動幅度過大。



圖十 於生物反應器中生產紫色桿菌素

參、展望

我們成功建構出能夠提升紫色桿菌素產量之上游色胺酸途徑的質體及宿主，並利用 RBS Library 去隨機變異 *trpE*、*trpD*、*vioA*、*vioB*、*vioE*、*vioD*、*vioC* 這七個基因以改變不同基因的轉譯速率，這些菌株無須額外添加色胺酸即可高產量的生產 violacein 和 deoxyviolacein。此外，為了使呈色法能夠更精確且容易判斷，我們透過優化培養盤來改善顏色深度易達飽和之問題。在篩選數量大小的部分，其 RBS Library 之理論大小為 967，而每盤培養盤約有 5000 顆菌株，當中約可篩出 30 顆菌株，而我們總共移植並培養了 6 盤且篩選出共 178 株不同 RBS 組合之菌株。

我們將通過穩定度測試的這些菌株送往定序確認其 RBS 序列組合，之後透過 RBS calculator 分析其轉譯初始速率並與控制組做對比。我們發

現到增強某一種酵素可使整個途徑產生推力及拉力，幫助生成較多的紫色桿菌素，此外大部分菌株的 *vioD* 都較 *vioC* 的 RBS 強度還要強，其中最佳生產菌株的編號 61 甚至擁有約 10 倍的 RBS 強度。

接著，我們透過將已篩選之菌株重新塗盤和轉植來測試其穩定度及再現性，經過此步驟會淘汰掉於篩選階段有生產潛力但卻無法再現的菌株以減少往後無法再現產量等問題。我們以 violacein 最佳生產菌株為基準進行生產環境優化，包含了溫度、培養基、碳源、誘導點以及調整 pH 值的差異，並於此階段找到了較適合的生產參數，我們也有在生物反應器內進行產量的初步測試，但如先前所述，仍然還有很大的優化空間，目前我們能在 72 小時內透過搖瓶生產 1.6 g/L 的 violacein 或 4 g/L 的 deoxyviolacein。

智慧電網 I

配電網最佳化配置與提升饋線裕度之研究	1
微電網多電源協調與智慧控制技術研究	7
儲能系統電站組件與離網應用技術之研究	12
變壓器大數據監測與智慧診斷技術研究	18

配電網最佳化配置與提升饋線裕度之研究

Study on Optimal Allocation of Distribution Networks and Improvement of Feeder Capacity Reserve

(計畫編號：110A007)

¹黃維澤、¹林韋辰、¹蕭耀賢、¹李立淳

²李奕德、²姜政綸、²蔡佳豪、²張博荃、²何元祥

¹國立彰化師範大學 ²核能研究所

本計畫建立區域配電網之饋線重組最佳化模擬平台，其目的為提升饋線上分散式再生能源及負載之總裕度，在再生能源高滲透率對配電網的衝擊下達到最佳運轉之效果。首先，本研究採用饋線終端設備所量測之電壓、電流以及饋線開關拓樸等資料進行配電網的精準建模，再以此模型進行區域配電網饋線重組之最佳化模擬演算；最佳化演算法則使用群體智能演算法以搜尋疊迭代方式對目標函數進行求解；所開發之平台可提供台電區處較具系統性之開關切換策略建議與簡易操作的使用平台。此外，為了完整掌握饋線動態架構，本計畫使用邊緣計算器擷取饋線終端設備即時資料，用以偵測並學習未知開關操作狀態，達到更精準之動態拓樸估測；同時，亦結合天氣與即時負載資料在邊緣計算器中進行即時、時前、日前負載預測，以利進行邊緣端潮流解析進而求得饋線損耗與壓降等狀態，達到精準系統狀態預測，提高配電網運轉者對電網之掌握性。本計畫之成果有助於提升再生能源併網裕度與配電網供電品質。

This project aims to establish a regional distribution network

reconfiguration (DNR) optimal simulation platform for increasing the hosting capacity of distributed renewable energy resource (DRER) and load which achieve optimal operation under the impact of the high penetration of DRER. Firstly, the data set of voltage and current measured by feeder terminal unit (FTU) and the data of feeder switch topologies are used to build the distribution network model. This model is applied in DNR optimization algorithms for solving the best solution by swarm intelligence algorithms. This platform is capable of providing Taipower a more systematic DNR strategy and a user-friendly interface. Furthermore, in order to master the information of feeder dynamic topology, the Tensor Processing Unit (TPU) is utilized as edge computer to capture real-time data of FTU to detect and learn the unknown feeder switch operation status for the more accurate dynamic topology estimation. Moreover, the weather and real-time load data are transmitted to the TPU to carry out the real-time, hour-ahead, day-ahead net load forecast, then solve the power flow of the feeder to obtain the precise real-time system losses and voltage drop of the feeder. The combination of TPU and FTU is expected to achieve the accurate feeder state estimation and enhance the distribution network operators to realize the system state. The outcomes of this project are helpful for increasing DRER interconnected reserve capacity and power quality.

壹、計畫目標

在正常運轉情形下，透過饋線轉供可達到平衡區域配電網饋線間負載的效果，以改善總系統損失或者饋線末端壓降；而在如今大量分散式再生能源如太陽光電等併入配電網的情形下，運用開關切換策略達到區域配電網拓撲重構，可將再生能源逆送量過高的饋線段轉供至鄰近尖峰需求相對較高之饋線，或者轉供至容量裕度(Hosting Capacity)較大之饋線以防止太陽光電電壓變動率超過電網規範。為了在實際配電網進行拓撲重

構，掌握實際配電負載模型為首要之務。然而現今配電網結構愈趨複雜，除了一般用戶負載模型外，大量再生能源如太陽光電、小型風機等，雖其有著清潔與就近供電等多種好處，卻也對讓配電網模型趨於複雜。若要精準掌握配電網實際負載模型，需取得高壓用戶電錶資訊、用戶資訊系統、再生能源業者之發電量資訊等。然而客戶資訊隱私等種種原因，在實作上欲完整掌握所有資訊非常困難，故退而求其次以 FTU 量測之區域範圍電壓、電流等資訊來推導負載模型方為上策。故本研究將以 FTU 量測資訊與饋線拓圖資料為基礎，透過 Python 語言與 OpenDSS 模擬工具，開發一套區域配電網最佳拓樸配置平台，其架構圖如圖 4 所示。此外，邊緣運算可將原本完全由中心節點處理大型服務切割，分散到邊緣節點去處理，而邊緣節點更接近於用戶端裝置，可以加深資料的處理的細膩度，非常適合應用於資訊龐大的配電網，TPU 即為一種專門用於機器學習之邊緣計算器，本研究提出一新穎分散式電力估測架構，透過整合 FTU 與 TPU，在 TPU 邊緣端進行負載預測、電力潮流解析，可減輕饋線調度中心伺服器負擔，其架構圖如圖 5 所示。

貳、重要成果

本研究將台電配電網建模、饋線重構演算法、群體智能演算法、以及使用者介面整合為一個模擬平台，將台電 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，目標為提升配電網欲度等。以橋村變電所為例，圖 6 為重構前後各饋線三相電流輸出結果報表，由其最大值由 206 A 下降至 134 A，最小值由 41 A 上升至 62 A，變異數亦改善了 24 A，各饋線負載相較原本更為平均；重構前後最大饋線線路總損失由 733 kWh 下降至 334 kWh，轄區饋線損失總和由 2753 kWh 下降至

2616 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，本研究開發之平台提供了拓樸架構之地圖，如圖 7 所示，使用者除了利用建議開關切換表，亦可利用兩圖觀察演算前後之差異。

本研究以台電濁水變電所所轄饋線之 FTU 歷史負載與中央氣象局林內測站資料，透過遞迴神經網路之長短期記憶法，進行長期之日前負載預測，圖 8 為其中饋線 XM24 之三相饋線負載預測結果。此外，本研究透過 TPU 向 FTU 以及溫、濕、照度計，通訊，進行 FTU 負載即時預測，其結果如圖 9 所示。最後，所預測之負載再導入 OpenDSS 饋線模型執行三相電力潮流解析，以達邊緣計算之效果，可將重要結果回傳至中央伺服器，以減輕伺服器負擔以及傳輸成本。

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，開發配電網最佳配置模擬平台，提供饋線運轉者一套較具系統性之工具，除了可改善饋線欲度、損失等，亦提供清晰之報表、拓樸繪製等，供饋線運轉者觀察其動作之合理性、可行性等，具實務應用之貢獻。另一方面，本研究提出一新穎之電力邊緣運算架構，將 TPU 安裝置 FTU 中，透過其與 FTU 與環境監測設備通訊，以機器學習等工具達到即時、日前負載預測，並可直接執行電力潮流解析。未來這項技術可期應用於饋線上各具 FTU 中，在邊緣端先行進行預算再回傳至饋線調度中心，使得饋線資訊更為智慧化。

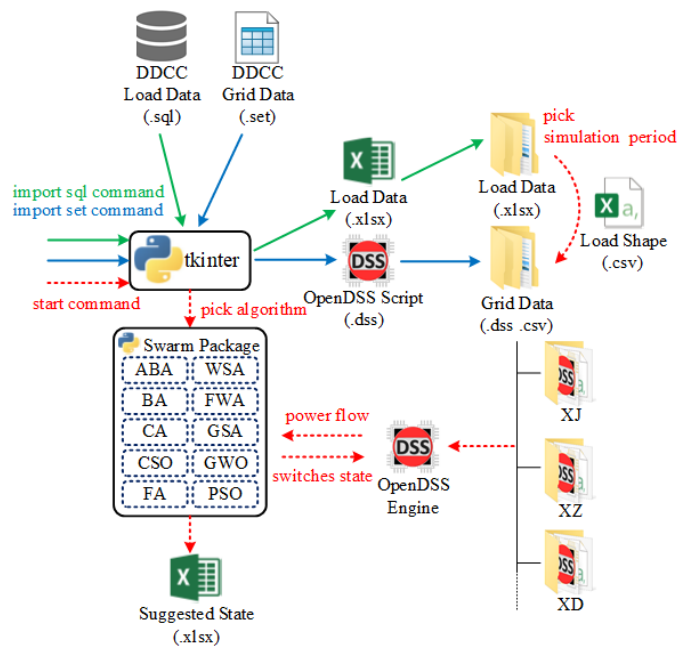


圖 4 配電網最佳拓樸模擬平台架構

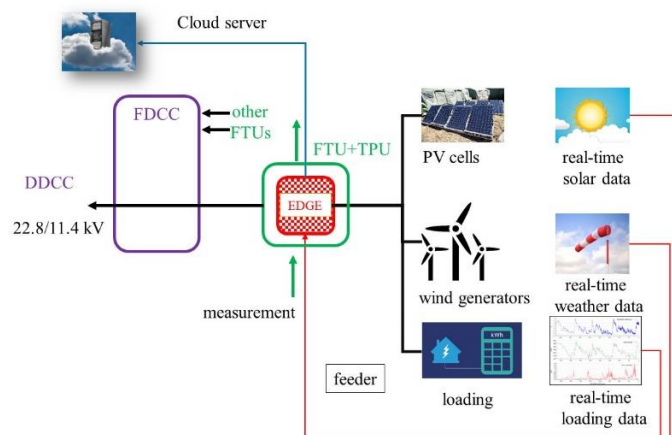


圖 5 整合 TPU 與 FTU 之邊緣運算架構

饋線名稱	線路損耗(kWh)		最大出口中性電流(A)		最大出口電流(A)	
	改善前	改善後	改善前	改善後	改善前	改善後
XE21	72.18	266.24	26.61	27.73	59.49	99.03
XE22	80.01	80.25	3.8	3.81	75.33	75.43
XE23	127.09	127.44	17.69	17.7	103.67	103.85
XE24	7.23	7.25	17.27	17.31	62.89	62.99
XE25	39.52	190.41	14.12	24.24	41.62	115.11
XE31	168.72	304.5	9.94	25.55	97.24	132.89
XE32	342.15	231.31	40.8	30.06	168.39	130.28
XE33	154.55	233.92	26.32	29.2	129.27	134.35
XE34	35.03	35.03	10.72	10.68	66.59	66.61
XE35	149.2	149.24	16.3	16.32	112.45	112.47
XE26	26.53	26.46	10.84	10.84	62.19	62.08
XE27	733.87	332.67	24.51	17.27	206.28	131.64
XE28	300.09	144.75	24.1	26.5	144.01	106.21
XE29	182.24	152.41	26.73	27.53	141.02	122.8
XE30	334.81	334.21	32.43	32.34	127.07	126.9
最大值	733.87	334.21	40.8	32.34	206.28	134.35
總和	2753.22	2616.08				
開關切換數	16					

圖 6 橋村變電所重構前後三相饋線電流

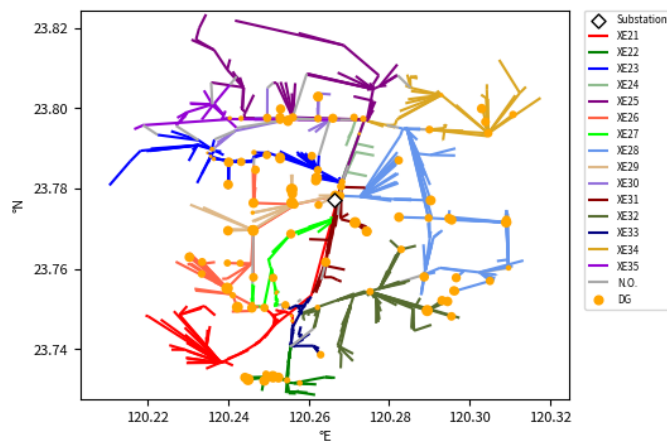


圖 7 橋村變電所重構後拓樸

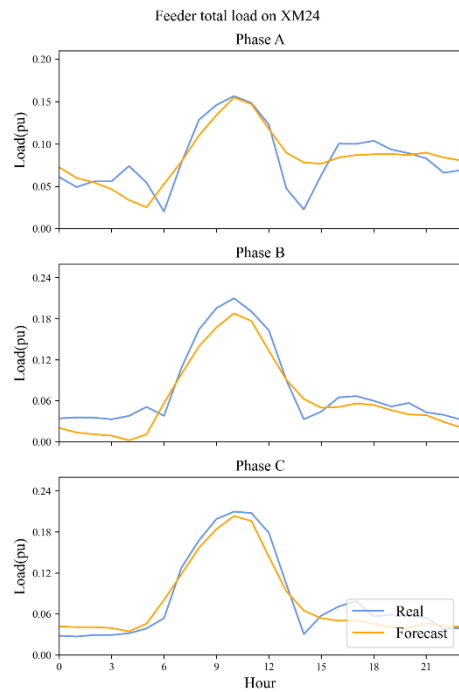


圖 8 濁水變電所饋線日前負載預測結果

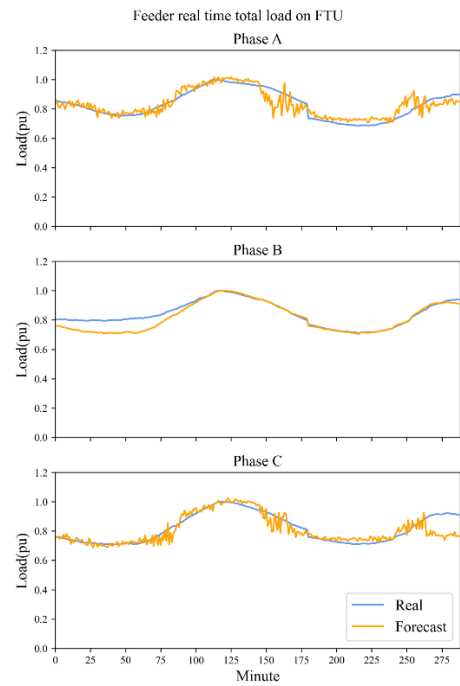


圖 9 FTU 負載即時預測結果

微電網多電源協調與智慧控制技術研究

Study on Multi-Energy Coordination and Smart Control Technology in Microgrid

(計畫編號：110A012)

劉祐任¹ 劉偉名¹ 鄭金展² 張又晟²

中正大學研究所¹ 核能研究所²

電網中的再生能源設置占比達到相當規模時，由再生能源所造成的供電變化恐使得電力供需失衡，從而引發系統電壓或頻率的問題，最終影響整體電網運行之穩定性。因應未來再生能源裝置容量持續提高，為使電網能夠維持穩定運轉，台電公司近年積極推動各式輔助服務方案，鼓勵各界利用其所擁有的非傳統發電資源來參與諸如調頻備轉、即時/補充備轉以及快速負載反應等輔助服務，並設立電力交易平台讓發電業、自用發電設備業者、需量反應提供者及儲能設備擁有者們得以透過此平台參與上述之輔助服務交易。為呼應這股利用非傳統機組參與輔助服務之技術發展熱潮，本計畫係以核研所微電網系統為對象，在 Model-based 模擬環境下開發微電網多能源設備之協調與智慧控制，用於實現透過微電網系統參與各式輔助服務之功能模擬。期望透過本計畫之研究成果，提出有效之微電網設備控制及能源管理，供微電網系統運轉人員作為輔助服務技術建立之參考依據。

When the penetration of renewable energy in the electric grid reaches to a considerable scale, the power violation caused by renewable energy may make an imbalance between power supply and demand sides, which will lead to

system voltage or frequency problems and then impacts to the grid stability. With the continued increase in the installation capacity of renewable energy, Taipower in recent years has actively promoted various auxiliary service solutions and encouraged market participants to use non-traditional generation resources to participate in the auxiliary services like frequency reserve, spinning reserve, supplemental reserve, and fast response resource so as to maintain the stability of the grid operation. Meanwhile, an energy trading platform (ETP) has been established by Taipower for the generation equipment, self-use power generation equipment, demand response providers, and energy storage system owners can participate in the above-mentioned ancillary service. In response to the trend of developing auxiliary service technologies, this project focused on the development of multi-energy coordination and smart control technology for the equipment in Institute of Nuclear Energy Research (INER) microgrid system. It is expected to provide the model-based simulation technique to carry out the purpose of using microgrid system to participant in the ancillary services. Lastly, the research results from this project are also hoped as a valuable reference for the microgrid operator to create the auxiliary service technologies.

壹、計畫目標

本計畫以核研所微電網系統與其新增設能源設備作為研究對象，進行實現輔助服務模擬功能之微電網多能源協調與智慧型控制開發研究。計畫旨在建立完整核研所微電網系統與相關能源設施之模型；開發各式能源管理策略，使得可利用現行 INER 微電網設備資源，在模擬環境下提供調頻、即時與補充備轉和快速反應資源之輔助服務功能。最後，搭配相關實體設備參數與結合現實數據，在不同情境中進行模擬分析，從而驗證本計畫對 INER 微電網所提出執行各項輔助服務之控制策略的可

行性及執行能力。

貳、重要成果

本計畫參考實際 INER 微電網系統架構，完成圖 1 之整體微電網系統模型與各項控制策略建構開發，並依據此系統模型完成以下工作內容：

(1)完成以微電網系統參與快速反應、調頻、即時與補充備轉之輔助服務模擬及其對應使用分散式電源設備之容量評估；(2)完成實現輔助服務模擬時之能源分配管理策略開發；(3)完成微電網分散式電源參與輔助服務時之反應與持續時間分析；(4)完成實際微電網場域現地測試之協助。

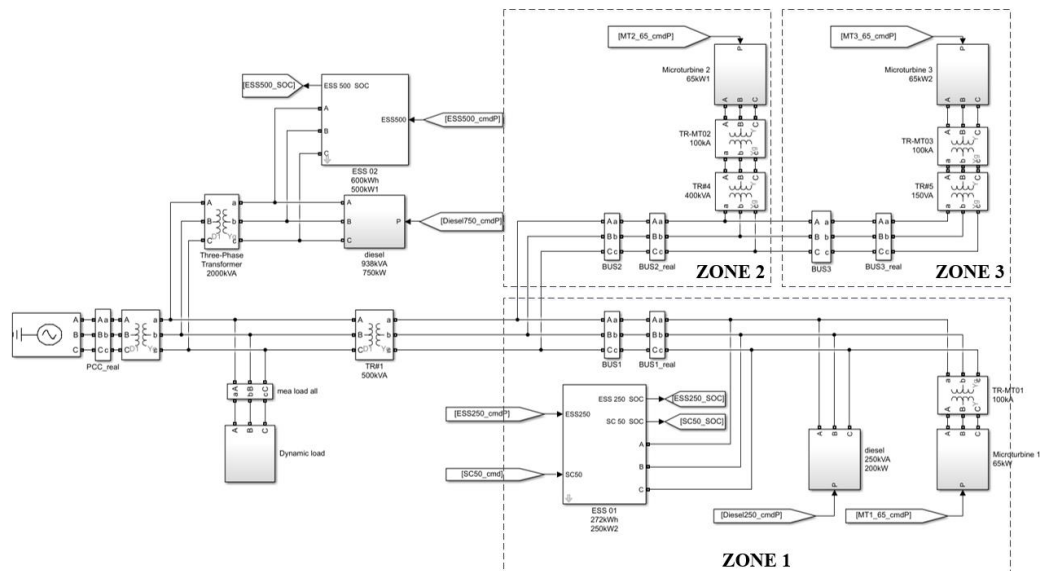
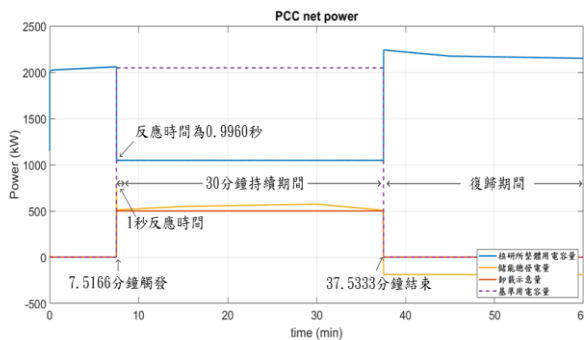


圖 1 核研所微電網系統模型

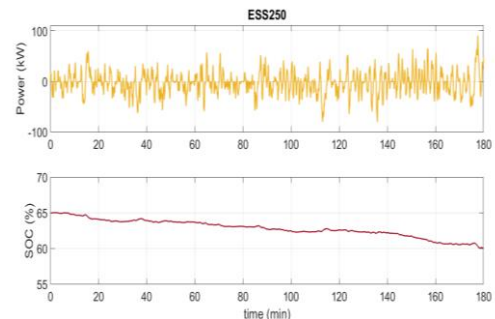
一、說明研發成果之重要貢獻

(一) 台電公司現行係鼓勵電力市場參與者利用非傳統發電資源來參與其所提出之輔助服務方案；當中，可以傳統發電設備、自用發電設備、提供需量反應以及使用儲能系統等方式達成。而微電網系統中以含有多種分散式電源資源，且在適當的操作控制下可進行各種發電調度操作，因此利用微電網系統來參與輔助服務是非常適合之方式。而在進行微電網參與輔助服務之規劃時，必須了

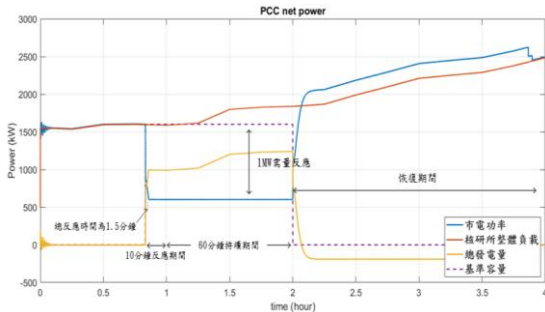
解系統內所有資源之可參與程度，從而開發出有效且適用之協調控制策略。而本計畫最重要之貢獻即利用 INER 微電網系統為對象，開發出利用微電網系統設備資源之操作來達成輔助服務功能之系統模擬環境，讓實體微電網系統操作者，在進行實體設備之控制策略開發時，可先於本計畫所建構之模擬環境中進行各式情境之模擬分析，進而驗證欲操作於實體系統之控制方法的有效性或獲得方法修正之回饋。



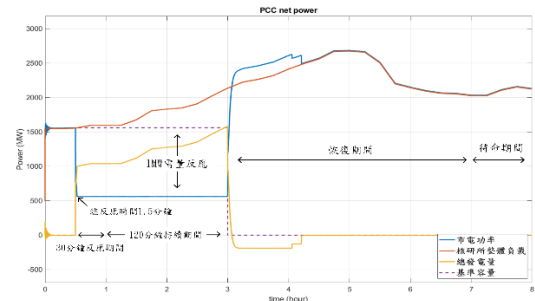
(a) 快速反應負載資源模擬



(b) 動態調頻備轉模擬



(c) 即時備轉模擬



(d) 補充備轉模擬

圖 2：各式輔助服務模擬分析呈現

二、學術成就方面

完成以下論文發表：

- [1] Yu-Jen Liu, Shih-Chen Yang, Wei-Ming Liu, Yih-Der Lee, and Chin-Chan Cheng, "Voltage Regulation of Distribution Feeders by Distributed Energy Resource Coordination Control in Microgrid," *Proc. of IEEE International Future Energy Electronics Conference and*

ECCE Asia (IFEEC), Taipei, Taiwan, Nov. 2021.

- [2] Yu-Jen Liu, Yi-Feng Pai, Cheng-Chieh Lee, Shih-Cheng Yang, Yih-Der Lee, and Chin-Chan Cheng, “Development of multimode photovoltaic static synchronous compensator for voltage fluctuation mitigation in industrial power system,” *Sensors and Materials*, vol. 33, no. 8(4), Aug., 2021. (SCI)

參、展望

本計畫執行上總是參考台電公司所多次招開之電力交易平台相關技術會議資料作為技術開發依據。實務上，欲有效利用各式發電資源來參與輔助服務尚須配合考慮電業的真正執行需求，此方面仍有待電業能提出完整之技術規範或採購規章來達成。現行 INER 微電網系統已運轉多年，其於過去一直扮演著國內先進電網技術重要且領先的開發驗證平台。該系統未來可持續進行擴充或設備汰換升級，讓多樣的資設備資源加入，使致能夠讓各項輔助服務功能更加完整且更具參與容量的被開發利用，進而再次成為國內電業邁向自由化所需電力交易技術之重要開發測試與驗證之場域。

儲能系統電站組件與離網應用技術之研究

Research on Electrical Components of Energy Storage Systems and Their On-
and Off- grid Application Technologies

(計畫編號：110A013)

馬肇聰 官大右

聯合大學電機工程學系

電動車具備高能源使用效率及低排碳特性已成為未來車輛發展的主流趨勢，而先進的充電站系統規劃與發展可行的電能控制方案以降低電網衝擊則是實現車輛全面電動化的重要基礎。有鑒於此，本計畫針對併網型電動車充電站(electric vehicle charging station, EVCS)提出一個以直流匯流排整合再生能源發電與混合式儲能系統(hybrid energy storage system, HESS)之進階電能控制方案並設計相關電力轉換介面。本計畫所提控制方案可根據 HESS 的電量狀態(state of charge, SOC)進行系統運轉模式之即時切換控制，以達到最大程度降低電網衝擊之目標。本計畫已依規劃之時程完成所有的研究工作項目，包含工作項目 1 之電動車充電站(EVCS)系統電能控制相關文獻探討與分析，混合式儲能系統(HESS)種類、相關系統設計、應用與 EVCS 電能控制方案；研究工作項目 2 之整合再生能源發電與 HESS 之 EVCS 系統運轉模式探討與規劃，EVCS 各運轉模式下 HESS 所需之硬體系統、控制架構、相關控制器與演算法及工作項目 3 之 EVCS 全系統軟體模型、相關控制器程式之撰寫與案例模擬、HESS 之 1kVA 小容量硬體實驗系統實作、全系統測試與結果分析。

Electric vehicles (EVs) have become the mainstream trend of future vehicle development due to their high energy utilization efficiency and low carbon emission characteristics. However, the realization of full electrification of vehicles requires proper charging station (CS) planning and feasible power flow control schemes minimizing the impact of power distribution systems. In view of this, this project proposes an advanced power control scheme that integrates renewable energy power generation and hybrid energy storage system (HESS) on CS's DC bus for grid-connected electric vehicle charging station (EVCS) and designs the required HESS and the related power conversion interface. The proposed control scheme can perform seamless switching control of the system operation modes according to the state of charge (SOC) of the HESS to achieve the goal of minimizing the impact of the power grid. All of the research work planned in the original schedule of the project have been completed, including the research work item 1: the discussion and analysis of the related literature of EVCS systems, the types of HESS and related system design and EVCS power control scheme; research work item 2, the discussion and planning of the operation mode for the EVCS system integrating renewable energy power generation and HESS, the hardware control architecture required by HESS in the operation of EVCS, and the development of related controllers and algorithms; finally the research work item 3, modelling the EVCS system, writing the related digital control program and performing case simulation, constructing the 1kVA HESS small capacity hardware and experimental system for overall system verification and performance analysis.

壹、計畫目標

未來的交通運輸系統中車輛電動化與充電站快速發展是必然的趨勢。因此，藉由整合再生能源、儲能系統及適當的即時電能控制技術以降低系

統衝擊，提升充電站系統的穩定度與運轉的靈活性是實務上一種必要的措施。有鑑於此，研發儲能系統所需之電力轉換界面與相關控制技術以整合充電站進階電能控制與管理策略是本計畫主要之研究目標。

貳、重要成果

一、提出整合再生能源發電與 HESS 之 EVCS 運轉模式與控制策略

本計畫所提整合再生能源發電與 HESS 之 EVCS 架構如圖 1(a) 所示。從圖 1(a) 可知所提 EVCS 係由混合式儲能(HESS)、再生能源發電(REPG)、市電網(GRID)、4 個快速充電樁和 2 個慢速電樁組成之充電負載(EV Charging Load)，及一個系統共用的直流匯流排(DC BUS)所組成。本研究案例所選擇的 HESS 是由全鈦液流電池(VRFB)或鋰離子電池(Lithium-ion battery)整合超級電容(SC)模組之單元。EVCS 與 HESS 整合工作時其主要電力介面是由一組併網型 AC/DC 換流器及兩組 DC-DC 轉換器所組成，其中 HESS 的兩組 DC-DC 轉換器分別控制 VRFB 與 SC 的充放電功率流達到控制直流匯流排與系統功率平衡的目的，AC-DC 轉換器則是負責於併網模式時接手控制直流匯流排(DC BUS)電壓與系統功率雙向平衡。此充電站在獨立模式時是一個典型的直流微電網，依條件可切換到併網模式，即透過 AC-DC 轉換器和電壓器連接公共市電網。綜上所述，所提 EVCS 可依照 HESS 的儲能系統實際電量條件分成三種運轉模式；分別為模式 A: 孤島運轉、模式 B: 併網充電和模式 C: 併網放電。圖 1(b) 說明了上述整合再生能源發電與 HESS 之 EVCS 運轉模式切換條件與流程。為了證明本計畫所提整合再生能源發電與 HESS 之 EVCS 架構、所規劃之運轉模式及控制方案的可行性，本計畫以電腦軟體模擬方式及實際建構 1kVA 之硬體系統測試了四個不同的運轉與控制情境藉以展現所提的 EVCS 工作方式與 HESS 的電

能控制過程。所規劃的四個情境分別為：模式 A 轉模式 B、模式 B 轉模式 A、模式 A 轉模式 C 和模式 C 轉模式 A。因頁數限制，本精簡報告僅呈現前兩個情境(情境 1：模式 A 轉至模式 B；情境 2：模式 B 轉至模式 A)之模擬與實作結果。圖 1(c)及(d)分別為情境 1 與情境 2 模擬過程之 EVCS 相關功率時序安排。圖 1(e)及(f) 分別為情境 1 與情境 2 模擬過程之 EVCS 直流匯流排電壓(上插圖)；EVCS 中每個組件的功率(中插圖)及每個組件的電流(下插圖)。實作測試的部分，圖 2(a)所示為本計畫所建構之 1kVA EVCS 全系統方塊圖。為方便與模擬結果比較，實作之系統參數與操作條件與模擬情境之安排完全相同。圖 2(b) 為啟動時 EVCS 系統電壓建立過程。圖 2(c)、(d)、(e) 依序為(c):情境 1 的直流鏈上的電壓(上)、充電負載(中)和再生能源注入電流(下)；(d):直流鏈上的電壓(上)市電網(中)和混合式儲能系統的電流(下)；(e):直流鏈上的電壓(上)、市電網端的交流電流和交流電壓(下)。圖 2(f)、(g)、(h) 為情境 2 的實作量測結果，波形說明內容與上述圖 2(c)、(d)、(e) 相同。

二、學術成就方面

本計畫相關研究成果共發表國際研討會 1 篇及國際 SCI 期刊論文 1 篇。

參、展望

近年來，燃油汽車及交通運輸工具所帶來的排碳與空污問題日益嚴重，從工程技術面來看，發展電動車是改善傳統車輛高排碳問題極為合適的解決方案。而適當的整合儲能與綠能之充電站系統規劃與發展先進的電能控制方案以降低電網衝擊是實現車輛全面電動化的重要基礎。可行之充電站系統架構可分為獨立型及併網型，以應用廣度及運轉彈性來看併網型是主要的發展趨勢，而本計畫所提之整合綠能與混合型儲能之

EVCS 進階電能控制方案經由模擬與小容量硬體系統實作測試已證明其具有最大程度降低電網衝擊之效果與實務應用之可行性。

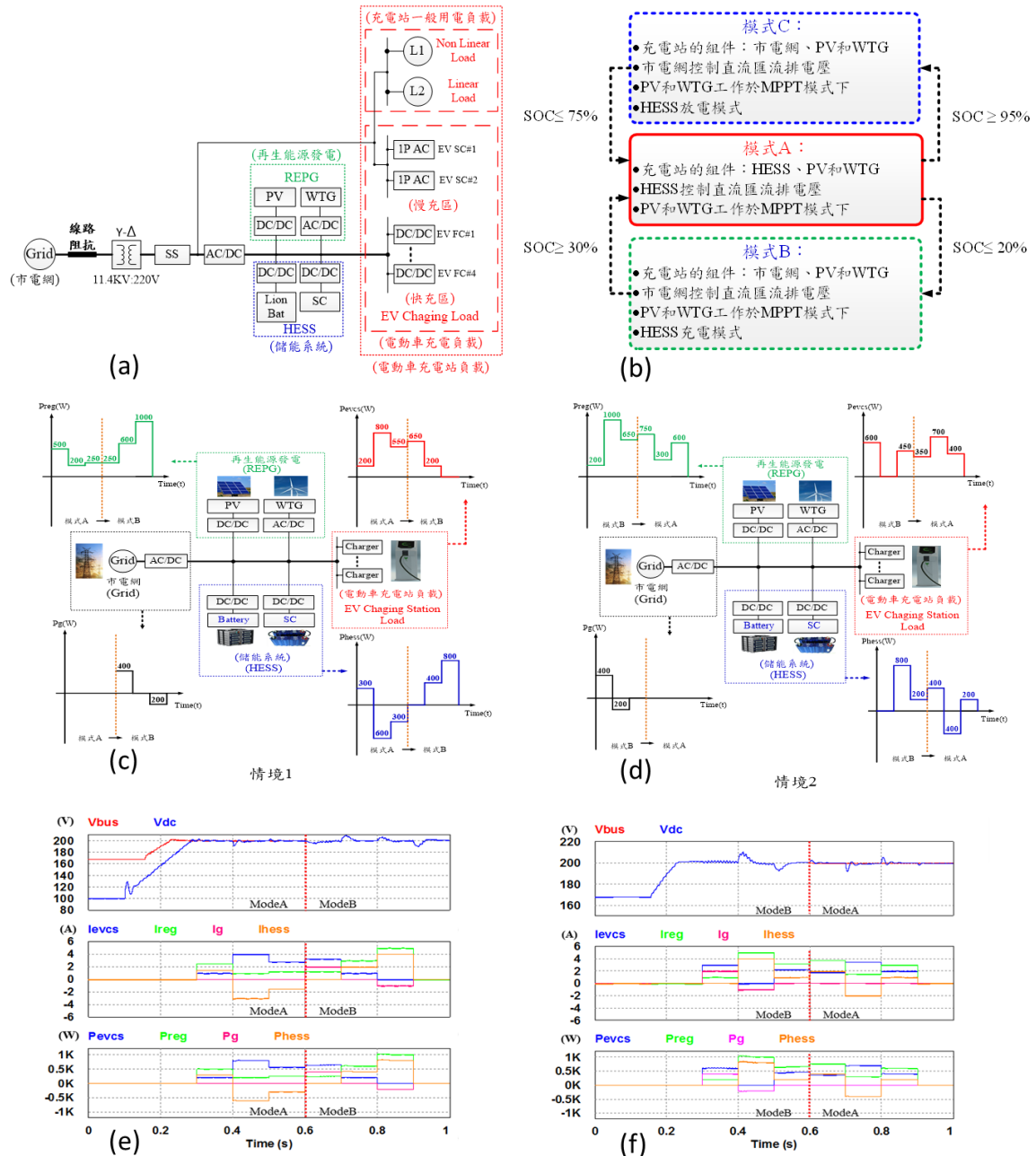


圖 1-(a):本計畫所提整合再生能源發電與 HESS 之 EVCS 架構;(b): EVCS 運轉模式切換條件與流程;(c)、(d) 分別為情境 1 與情境 2 之模擬條件與參數規劃;(e)、(f) 分別為情境 1 與情境 2 之模擬結果。

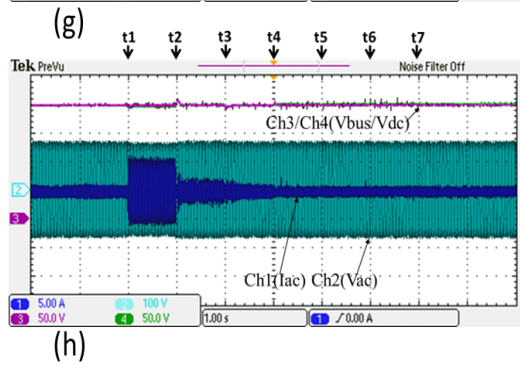
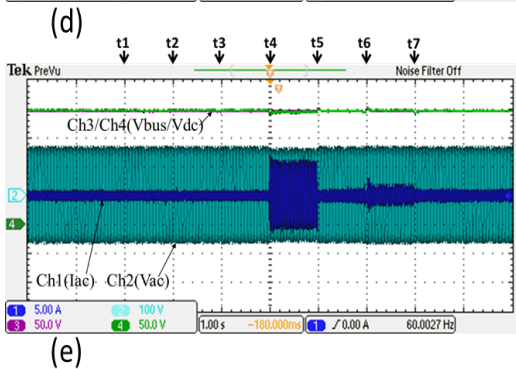
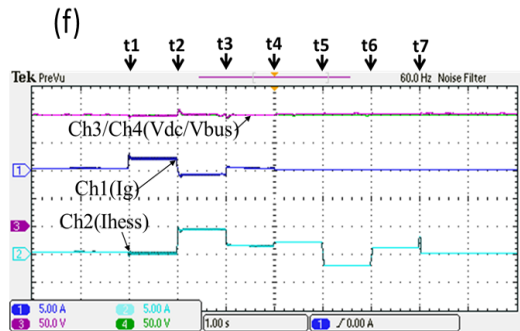
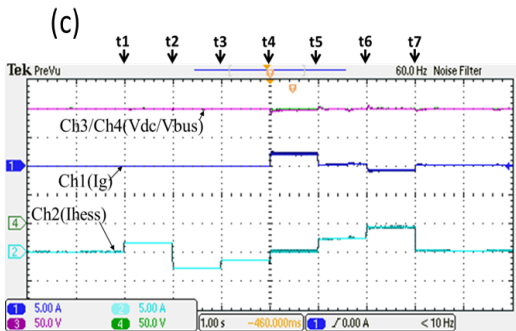
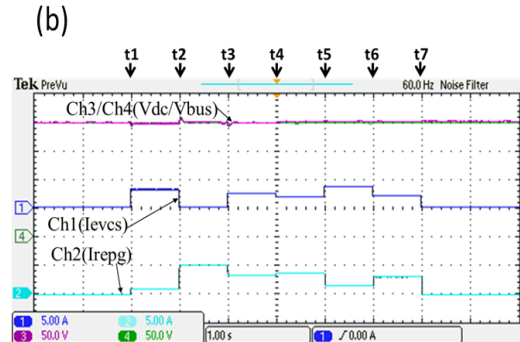
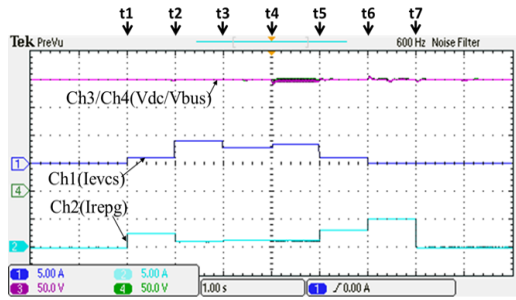
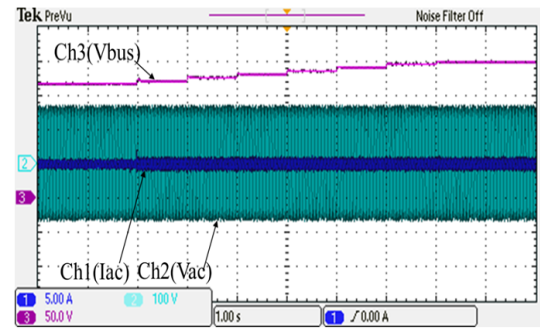
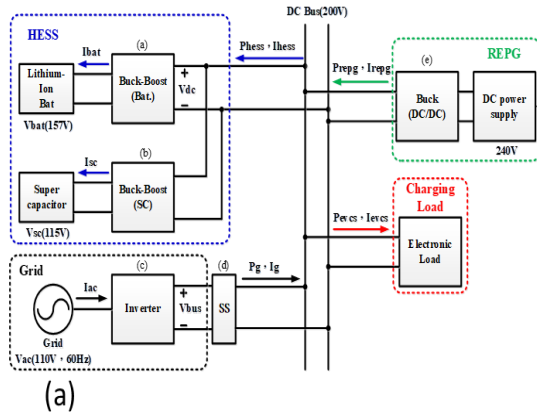


圖 2、(a)本計畫之 1kVA EVCS 硬體實驗系統方塊圖；(b)啟動時 EVCS 系統電壓建立過程；(c):情境 1 直流鏈上的電壓(上)、充電負載(中)和再生能源電流(下)；(d):直流鏈電壓(上)、市電網(中)和混合式儲能系統的電流(下)；(e):直流鏈電壓(上)、市電網端的交流電壓和電流 (下)。(f)、(g)、(h) 為情境 2 的實作量測結果，波形內容與上述(c)、(d)、(e)相同。

變壓器大數據監測與智慧診斷技術研究

Research of Big Data Monitoring for Transformer and Diagnosis Using Artificial Intelligence

(計畫編號：110A014)

郭政謙¹ 孫士文² 沈勁彥²

¹國立臺灣科技大學 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。

本計畫符合 IEC62478 建議，使用 HFCT 及 UHF 感測器監控高壓設備局部放電狀態，盡量避免誤判放電情況，增加判斷準確性，並可由伺服器連線至任一部電腦、平板、手機，即時觀測案場情況，不用特地安排人力去做過多的定期勘查來確保設備狀態。

可即時顯示放電時之電源象限及 PRPD 圖對於放電次數、放電最大值及放電平均值的狀態，此部分可以進一步利用智慧診斷是否為真實內部放電或雜訊，避免誤判成警報。依據對案場設備需求，自行智慧性的設定警報條件，並隨著長時間的觀察，逐步調整改變設定條件，以更符合案場需求，減少產生錯誤警報。

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 plan compliance to IEC62478. Use HFCT and UHF sensors to monitor the partial discharge status of high-voltage equipment. Try to avoid misjudgment of the discharge situation and increase the accuracy of diagnosis. The server can be connected to any computer, tablet, or mobile phone to monitor the situation of the case in real time. No need to often do regular surveys to ensure the status of the equipment.

Real-time display the status of the power quadrant and PRPD diagram during partial discharge for the number of discharges, the maximum discharge value, and the average discharge value. Use AI to diagnose whether it is real partial discharge or noise to avoid false alarms. Set the alarm conditions intelligently according to the different equipment in the field. With long-term monitoring, gradually adjust and change the setting conditions to More in line with the needs of the case and reduce false alarms.

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，即時了解設備狀況就成了必備條件。高壓設備部分放電訊號，除了有低頻成分也有高頻成分，但低頻信號所受到的環境干擾較高頻信號多，故本計畫以高頻成分信號進行局部放電分析。藉由安裝 HFCT 和 UHF 感測器，並進行全時長期線上量測，則可達到趨勢性的定量檢測，並記錄放電次數、放電最大值、放電平均值及畫出 PRPD 圖做放電檢測判斷。本計畫預期

改善過去許多檢測方式的缺點，像是過去使用直流耐壓或電力因數的絕緣品質測試都只能測出高壓設備整體的劣化情形，但透過檢測到的局部放電信號，利用 PRPD 圖的分析診斷出高壓設備的瑕疵放電，而且舊有的檢查方法需要透過斷電才能進行檢查，設備停電的時間將會帶來經濟成本損失，因此本計畫運用高頻電磁波間接量測法，不需要再擔心靠近高壓設備的風險，高壓設備也不需要停電就能做即時傳輸資訊的監控。

貳、重要成果

本計畫提出“基於狀態性維修保養”概念則能夠有效預防事故的發生又能充分利用設備的使用壽命如圖一所示，也因為全時監控的緣故可以利用高壓設備局部放電時流經接地線所產生的脈衝電流，透過耦合裝置(HFCT、UHF)轉化成脈衝電壓信號，篩檢波形傳入 Adlink 擷取卡中。於 Adlink 撰寫 C#程式達到訊號快篩處理，並圖像化讓觀測者可以直觀的觀察是否有局部放電信號，透過簡單的操作配合現場狀況做參數的調整，以達到最符合案場需觀測目標的需求。並且資料擷取即轉換速率可達到 1MHz 以上的取樣頻率，局部放電檢測可達到每分鐘回傳局部放電檢測數據至少一筆。另提供第三方串皆知資料庫介面，此計畫選用的資料庫為 SQL 資料庫可以看到所存取的資料包含系統接收到資料的時間(sysDataTime)、放電資料擷取時間(divDataTime)、放電角度(angle)、放電次數(disum)、放電最大值(dismax)及放電平均值(disavg)等多項檢測數據，如圖二紅框處所示。

此外在人機介面主頁面有簡易單線圖可以一目了然各個設備所對應的裝設位置與監測目標，若有警報時燈號的變化警示監控人員如圖三所示，另外系統也提供警報設定頁面，警報可以有次數、最大值、平均值判斷設定如圖四所示，使用者可依據對案場設備的了解智慧性的設定警報

參數，並隨著時間觀察逐步調整改變設定條件，且此警報設定並不侷限於單一條件設定，使用者若有足夠的經驗，可以新增多項條件，以利用更多的智慧性邏輯條件，使警報的條件更具實用性，避免錯誤警報及危險時不警報之情況。即時警報訊息如圖五所示可依據警報設定使用者告警訊息，即時警報畫面分為兩階，一階為“Warning”提醒使用者需加以注意，另一階為“Danger”提醒使用放電狀態較為嚴重需立即處理。

最後彙整核研所提供之電力變壓器運轉參數，以局部放電為主對其他運轉參數進行關聯性分析與評估以東林系統為例，因 9/18 時發現所測得的數據皆為雜訊，如圖六所示，故在合理的範圍內調大閾值避免雜訊干擾影響判斷，以至之後至今沒有再測得局部放電資訊，有檢查過軟體傳輸皆沒有問題，所以判斷此案場這 3 個月皆無局部放電的現象發生。

參、展望

本計畫依據所擬定目標與工作項目，成功藉由安裝 HFCT 和 UHF 感測器，並進行全時長期線上量測，達到趨勢性的定量檢測，並記錄放電次數、放電最大值、放電平均值及畫出 PRPD 圖做放電檢測判斷改善過去許多檢測方式的缺點，透過檢測到的局部放電信號，利用 PRPD 圖的分析診斷出高壓設備的瑕疵放電。未來這項技術可期應用於高壓變電所的變壓器監測中，隨著時間觀察逐步調整改變設定條件以利用更多的智慧性邏輯條件，使得變壓器監測能有效預防事故的發生又能充分利用設備的使用壽命。

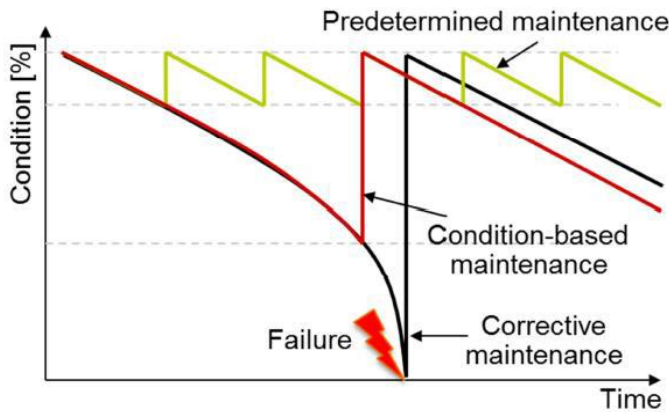


圖 10 設備狀態與時間關係示意圖

```

/***** SSMS 中 SelectTopNRows 命令的指令碼 *****/
SELECT * FROM [Discharge_DB].[dbo].[DC_tb_01BDE9B0_ai05]
WHERE divDataTime>='2021-09-08 02:03:24.000' AND divDataTime<'2021-09-08 02:03:35.000';

```

F_Jay	synDataTime	divDataTime	mode	angle	diamun	diamax	diamv
1	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	2	4	0.187999993562698	0.18299999833107
2	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	2	4	0.187999993562698	0.18299999833107
3	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	3	5	0.188999995589256	0.180999994277954
4	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	4	4	0.19099999642372	0.180000007152557
5	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	5	5	0.184000000357628	0.179000005125999
6	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	6	5	0.179000005125999	0.174999997019768
7	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	7	5	0.178000003099442	0.175999999046326
8	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	8	4	0.187999993562698	0.180000007152557
9	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	9	5	0.180999994277954	0.175999999046326
10	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	10	4	0.1829999933107	0.177000001072884
11	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	11	5	0.180999994277954	0.179000005125999
12	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	12	4	0.1829999933107	0.179000005125999
13	2021-09-08 02:03:24.000	2021-09-08 02:03:24.000	Auto	13	5	0.1850000002384186	0.178000003099442

圖 11 實際資料庫存放的數據

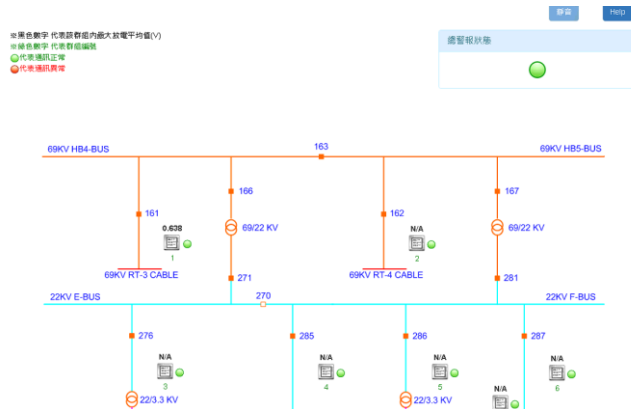


圖 12 警報單線圖

圖 13 警報設定畫面

即時告警-Danger (條件: 次數 > 1 AND 平均值 > 1000 AND 次數 > 4 持續時間: 30分)						
編號	IP	裝置名稱	發生時間	放電次數	放電最大值	放電平均值
16	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 01:00:00	85	340	172
17	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 01:18:00	103	367	190
18	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 01:38:00	123	387	210
19	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 02:00:00	145	409	232
20	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 02:24:00	169	433	256
11	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:00:00	25	299	112
12	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:08:00	33	297	120
13	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:18:00	43	307	130
14	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:30:00	55	319	142
15	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:44:00	69	333	156

即時告警-Warning (條件: 次數 > 5 AND 最大值 > 4 AND 次數 > 3 持續時間: 1440分)						
編號	IP	裝置名稱	發生時間	放電次數	放電最大值	放電平均值
6	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 01:00:00	85	340	172
7	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 01:18:00	103	367	190
8	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 01:38:00	123	387	210
9	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 02:00:00	145	409	232
10	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 02:24:00	169	433	256
1	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:00:00	25	299	112
2	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:08:00	33	297	120
3	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:18:00	43	307	130
4	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:30:00	55	319	142
5	192.168.1.102	EE305-1	2016-03-14 12:44:00	69	333	156

圖 14 即時警報畫面

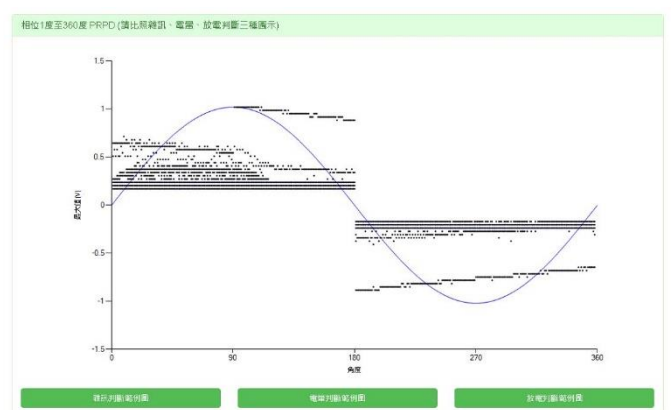


圖 15 9/18 前的雜訊圖譜

智慧電網 II

含分散式電源之饋線節點狀態分析研究	1
配電資料與地理空間資訊整合技術研究	6
配電網即時模擬及其調度策略研究	12
功率調節系統輔助服務及調度策略研究	18

含分散式電源之饋線節點狀態分析研究

Studies on States of Nodes in Feeders Involving with Distributed Generations

(計畫編號：110A008)

洪穎怡 游晴瑋

中原大學電機系

推動再生能源發展是我國能源轉型至關重要之一環，我國能源政策規劃 2025 年再生能源發電占 20% 之目標。分散式電源(Distributed Generation, DG) 是具發展潛力及技術成熟的小型發電系統，相較於，火力、水力及核能發電方式規模小，較易設置。然而，當分散式電源併入配電網時，將使配電網由單電源提供電能的輻射狀結構網路，變為多電源提供電能的系統。大量分散式電源併入使得配電網結構發生改變，由此給配電網帶來最嚴峻的挑戰之一是配電網的安全保護問題。本計畫針對含分散式電源之配電系統進行保護方式解析，探討具逆變器分散式電源接入對配電網狀態估測的影響，並探討配電網反時限過電流保護的優化設定模擬及自我調整電流速斷保護模擬。

Promoting the development of renewable energy is very important for my country's energy transition. The government set a target during 2015, aiming to increase the green electricity generation to 20% before 2025. Distributed Generation (DG) is a small power generation system with potential and mature technology. Compared with traditional thermal, hydraulic and nuclear power generation, DG is small in scale and easier to install. However, when the distributed power sources are interconnected into the distribution network, the

distribution network will be transformed into a system with multiple power sources providing power from a radial structure network provided by a single power source. Distributed power sources has changed the structure of the distribution network, and one of the challenges brought to the distribution network is the safety protection of the distribution network. This project analyzes the protection methods of power distribution systems with DGs, discusses the impact of inverter-based DGs on the state estimation of the distribution network, and conduct the simulation on optimization of the inverse-time overcurrent protection of the distribution network as well as the current quick-break protection scheme.

壹、計畫目標

本計畫針對含分散式電源之配電系統進行保護方式解析，分散式電源改變了配電網單一率流動方向和輻射型拓撲結構，傳統的電流保護方法已不再適用，因此首先探討具逆變器分散式電源接入對配電網的影響，提出了具逆變器分散式電源的配電網電流保護改進整定方案，並分析配電網反時限過電流保護的優化設定模擬及自我調整電流速斷保護模擬。

貳、重要成果

一、反時限過電流保護優化設定的數學模型

反時限過流保護基於該動作特性，可以兼顧保護對速動性和選擇性的要求。

IEC 60255 依照時間—動作電流特性曲線，依反時特性分為正常反時型 (Standard inverse)、非常反時型 (Very inverse)、極常反時型 (Extremely inverse) 與長常反時型 (Long time inverse)。皆使用統一公式，如公式(1)、(2)所示，依照不同的反時特性，有相對應的電驛保護係數，

本計畫使用正常反時型電驛係數。

$$t_{ij} = \left[\frac{TMS \times A}{(PSM)^B - 1} \right] \quad (1)$$

$$PSM = \frac{I_{sc,j}}{PS_i \times CTR_i} \quad (2)$$

式中*i*為保護設備的編號，*j*為故障發生的線路。其中*t_{ij}*為保護動作時間(秒)，TMS為時間標置值，PSM為電流倍數，*PS_i*為針插設定，*I_{sc,j}*為量測電流(A)，*A*,*B*為電驛係數，*CTR_i*為比流器倍數。

優化的目標是在滿足可靠性與選擇性的情況下，配電網任何線路發生故障，主保護與後備保護的總動作時間最小，為了使主保護與後備保護能夠相互配合，需有以下約束條件：1.主保護與後備保護動作時間差的最小值(CTI)選取介於 0.2 秒~0.5 秒之間，本次計畫則採用 0.2 秒進行模擬。。2.電驛動作時，無論故障位置，故障電流都必須大於始動電流值。3.TMS 必須在保護設備正常工作的允許範圍內取值，兩個參數均有上限和下限。本計畫將*TMS_{min}*與*TMS_{max}*分別設置為 0.05 與 0.1，*PS_{min}*與*PS_{max}*則分別設置為 0.5 與 2.5。本計畫所有的反時限過電流保護設備均符合 IEC 60255 標準。

二、自我調整電流速斷保護

自我調整電流速斷保護的整定值確定主要有以下幾步：第一步設定系統等值電勢；第二步線上採集保護安裝處的電壓、電流等數據；第三步判斷系統狀態及短路故障類型；第四步根據等值阻抗和等效電勢計算整定值。

電流速斷保護整定公式如下：

$$I_{set} = K_k I_{kmax} = K_k \frac{E}{Z_{smin} + z_l} \quad (3)$$

式(3)中， K_k 表示可靠係數，通常為 1.1~1.3； E 表示系統等效電勢； Z_{smin} 表示最大短路電流運轉方式下的等值阻抗； z 表示單位長度線路阻抗值； l 表示被保護線路長度。

其保護範圍可表示為

$$\alpha = \frac{K_d(Z_{smin} + zl) - K_k Z_s}{K_k zl} \quad (4)$$

公式(4)中， K_d 表示故障類型係數。因為 $K_k > 1$ ， $K_d \leq 1$ ， $Z_s > Z_{smin}$ ，因此保護的範圍會因為 K_d 的變小或 Z_s 變大而減小。說明電流速斷保護的保護範圍嚴重依賴於系統狀態和發生的故障類型。

自我調整電流速斷保護整定公式如下：

$$I_{set} = K_d K_k \frac{R}{Z_s + \alpha zl} \quad (5)$$

公式(5)中， K_d 表示故障類型參數，三相短路時取 1，兩相短路時取 $\sqrt{3}/2$ ； K_k 表示可靠係數； Z_s 表示系統側阻抗； α 表示故障點距保護設備的距離與線路全長比值。

其保護範圍是

$$\alpha' = \frac{zl - (K_k - 1)Z_s}{K_k zl} \quad (6)$$

由式(6)可知，系統運轉方式改變時，保護範圍也隨之改變，而且保護範圍與短路類型無關。對比式(4)及(6)，可得 $\alpha' > \alpha$ ，即自我調整電流速斷保護相比傳統保護而言保護範圍更大，保護性能更好。

參、結論與展望

分散式電源接入配電網後，改變了配電網單一率流動方向和輻射型

拓撲結構，三段式電流保護方法已不再適用。本計畫提出反時限過電流保護的優化模擬，當發生故障時，以配電網主保護與後備保護的總動作時間最小為目標函數，考慮保護選擇性等約束條件，建立了保護優化整定的數學模型，可替配電網提供可靠的保護。接著通過上述計算實現保護自我調整電流速斷整定，並模擬證明該方案能根據短路位置的改變而自我調整整定值。在傳統電流速斷保護已經失去選擇性，故本計畫提出的自我調整電流速斷保護效果更佳。

配電資料與地理空間資訊整合技術研究

Study on Integration Technology of Distribution Data and Geospatial Information

(計畫編號：110A009)

林嘉宏¹ 辜德典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

台電為強化配電系統強韌度，目前已建置配電自動化系統，當配電饋線發生主幹線故障時，可執行故障區間之定位，隔離及上下游非故障區之自動復電功能。但配電系統之故障大部份發生於分歧線及用戶端，為加速系統故障復電效能，近年來台電佈建大量故障指示器，雖然可藉由指示燈作故障顯示，但仍需派員到現場確認故障位置再執行故障隔離及復電，而影響供電用戶之復電時間。本計畫將規劃具通訊功能之故障指示器及後端主站平台，以支援將故障指示器信息回傳至主站平台，作為故障位置之判斷，以縮小故障範圍之判定。

由於配電系統由於涵蓋面積極廣，設備種類及數量繁多用戶數亦極為龐大，以往皆藉由人工及圖表作為管理、資料維護不易，且因分散不同部門，容易造成資料之不準確及不一致，此外由於系統架構常因施工造成異動，如何從工作單之處理、現場施工、圖資更新及驗證，建立一套標準作業程序，以確保配電管理系統資料庫之準確性，則為資料庫管理系統極其重要之工作項目。為確保配電系統圖檔之準確性，本計畫開發一套人工智慧為基礎之設備圖檔連結工具，另外就設備資料部份如導線、變壓器相別，亦將建立各種資料驗證之規則，使圖檔與設備資料庫能產生正確的對應關係，以確保配電系統資料庫的維護能力，有效支援

本計畫應用此資料庫的彈性。

Taipower has implemented the distribution automation system (DAS) to execute the fault detection, isolation and service restoration of primary feeders. However, most of the distribution faults occur on the laterals and it takes quite a long time to identify the fault location for Taipower engineers to execute the customer service restoration. To solve the problem, Taipower has already installed voluminous simple type fault indicators with LED blinking when it detects the large fault current. The maintenance crews have to go to the field to check all FIs along the faulted line to determine the location where fault occurs. To achieve more effective fault location identification, this project will apply the new type of fault indicators (NFI) with embedded communication module and the energy harvesting device with super capacitors. The NFI can report the fault flag and line current flow to the master station of FIS with the hybrid communication system and the fault is shown on AM/FM system. The integrated AM/FM system has been developed and implemented by Taipower and other utilities to achieve digitized mapping and construction of relational database. In this project, the accuracy and consistency of distribution component information will also be verified to support the applications of the AM/FM system.

壹、計畫目標

本計畫將根據台電配電系統架構，當配電系統分歧線發生故障時，可配合 FDIR 之執行，在自動化開關分歧線斷路器(LCB)跳脫造成停電時，藉由本計畫故障定位系統主站推導故障發生區段，提供調度員更為精準的故障點位置，以加速分歧線故障復電及搶修功能。於配電系統正常運轉時，故障指示器後端平台所收集之線路電流又可透過通信介面，傳送並顯

示於故障指示器圖台，以提升配電系統運轉及規劃效能。

為確保配電系統圖檔之準確性，本計畫將開發一套人工智慧為基礎之設備圖檔連結工具，另外就設備資料部份如導線、變壓器相別，亦將建立各種資料驗證之規則，使圖檔與設備資料庫能產生正確的對應關係。為避免日後系統變更而必須全部資料庫進行轉檔之問題，本計畫亦將發展圖檔及設資料庫連結性與屬性之增量變化，以確保配電系統資料庫的維護能力，有效支援本計畫應用此資料庫的彈性。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

(一)故障指示器佈建

故障指示器於饋線上之佈設策略將根據台電區處需求，針對工業區、海邊鹽害區及地下配電室較容易發生故障區域裝設故障指示器。本計畫所蒐集之即時資料為佈建於高雄區處及台南區處現場的故障指示器，於高雄區處及台南區處分別佈建 DCU19 及 8 具，高雄區處架空故障指示器共 16 處*3 相=48 具，高雄區處地下故障指示器共 34 處*3 相=102 具及台南區處共 16 處*3 相=48 具。

(二)故障定位系統與故障指示器圖台整合控制規劃

本計畫於 2021/04/06 於台南科學園區配電箱(N0709 AE63)饋線地下型 FI 執行 LoRa 通訊測試。另外本計畫與台灣電力公司配合，於高雄軟體科學園區擇一地下配電室(圖號座標 Q0801 GD7204)進行實際試裝(2021/03/21)，針對配電箱中電源端及負載端之饋線進行監控透過 FI 及 DCU 即可蒐集電力資訊如電流、FI 超級電容、溫度、電場、通訊品質等數據。

(三)故障指示器圖台顯示機制規劃

智慧饋線故障定位系統由 FI 及資料集中單元組成，其故障定位功能結合 FI 之圖號座標於地理圖資平台，目前與核研所合作，將 FI 運轉資料顯示於核研所配電圖資平台。根據不同使用情況而有不同顯示模式供使用者選擇，除了可即時監控饋線上之電力資訊，亦可由選擇日期區間進行特定範圍之歷史狀態查詢。

(四)地理圖資資料庫轉檔產生線路上下游拓樸關係，支援故障定位功能

FI 所回報之各項電力數據皆儲存於即時資料庫，平時可供負載大小預測分析及三相不平衡分析改善之依據，而當事故發生時，經由圖號座標快速定位故障點，並且可察看各饋線之上下游連結關係，派遣檢修人員至現場進行故障排除，使系統俱備偵錯及快速排解事故之能力，增加配電網強韌性。

(五)應用故障定位功能縮小故障範圍之判定程式開發

本計畫完成故障定位功能人機介面程式開發，本程式是根據故障指示器所裝在測試饋線之上下游拓樸關係，應用故障舉旗狀態方程式之經驗式搜尋演算法，快速決定故障位置，大幅降低因系統故障造成之用戶停電時間，而提升故障復電效能。

(六)配電圖台資料之設備相別檢核程式開發

為確保配電系統圖檔之準確性，本計畫亦開發一套人工智慧為基礎之設備圖檔連結工具，另外就設備資料部份如導線、變壓器相別，亦將建立各種資料驗證之規則，使圖檔與設備資料庫能產生正確的對應關係，以確保配電系統資料庫的維護能力，有效支援本計畫應用此資料庫的彈性。由結果得知，在配電圖資資料庫中，仍存在相別屬性上下游不一致現象，建議台電區處未來除落實施工管控以維護資料準確性外，亦能全面性進行現場導線之相別量測、線路變壓器之容量相

別核對及用戶與變壓器關聯資料之普查，全面更新 OMS 資料。

二、學術成就方面，共發表國內研討會 1 篇及期刊論文 1 篇

1. Chia-Hung Lin, Te-Tien Ku, Chung-Sheng Li, Chao-Shun Chen, Yih-Der Lee, Jheng-Lun Jiang, Cheng-Yu Chen, " Optimal Phase Balancing in Electricity Distribution Feeders Using Mixed-Integer Linear Programming," IEEE Trans. on Industry Applications (revised).
2. 林嘉宏，辜德典，李鐘生，何姿瑩，徐子堯，邱吉偉，何承祐，陳泳志，"應用彩色派翠網路於配電饋線故障復策略之研究，"第四十二屆中華民國電力工程研討會暨第十八屆台灣電力電子研討會，台灣高雄市 2021 年 11 月 11-12 日。

參、展望

本計畫所提出之配電饋線故障定位系統，在配電饋線上之 FI 在偵測出停電事故時，會透過 LoRa 無線通訊，主動回報故障旗標與前後數週波電流波形至 DCU。由於 FI 回報之訊息應用電力物聯網網路結構回傳資料含時間/日期、FI 設備編號、FI 旗標、線路電流、取電電壓、電池電壓、超級電容電壓及 LoRa 信號強度。透過 RJ-45 介面經由台電既設光纖或 4G 無線通訊網路回傳至網路伺服器後，將其統整後之訊息傳遞至運轉即時資料庫，並結合核研所所發展之配電圖資圖台，建構配電網路模型，並基於網路狀態方程式之經驗搜尋演算法，快速決定故障位置，並顯示於配電圖資圖台，提供台電維護人員快速定位故障地點，並進行復電程序，減少用戶停電時間。台電各區處目前已大量佈建故障指示器，故障指示器資料及其狀態回傳需具備強韌通訊媒介。未來研究將著重於新型故障指示器通訊系統架構，提出通訊模組規劃與擬定通信介面標準及建議資安加密機制。為補強現有配電自動化功能，本計畫亦將故障資料運轉平台之規劃成果，未來能和台電在台灣本島與金門分別建置之先進配電管理系統

(ADMS)作整合，而強化台電配電系統之故障復電功能。



圖 1、FI 現場佈建(高雄柴山)



圖 2、FI 現場佈建(高雄岡山)



圖 3、FI 現場佈建(台南永康)



圖 4、DCU 現場佈建(台南地下饋線)



圖 5、DCU 現場佈建(台南架空
饋線)

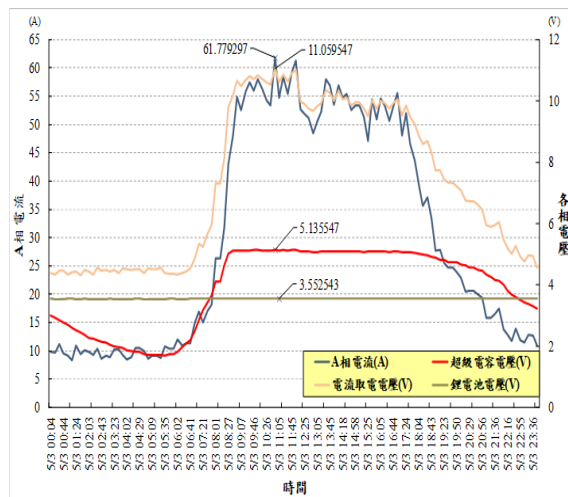


圖 6、饋線 XI27 四路開關
K2258FD4100-S01 全日三相負載量

配電網即時模擬及其調度策略研究

Real-Time Simulation and Power-Regulation Strategy of Distribution Grid

(計畫編號：110A010)

陳正一¹ 談光雄² 許祖隆¹ 張育銘¹

¹ 中央大學電機工程學系 ² 國防大學理工學院電機電子系

由於再生能源與微電網建置之增加，使得穩定電力控制、能源最佳管理、互聯電網電力調度等議題逐漸受到重視。當大量的再生能源併入配電網後衍生之電壓變動問題將影響區域電網之供電穩定性與安全，此乃自然能之間歇特性導致再生能源發電設施之輸出電力產生變動以及系統中能源設施失衡的安裝設置所造成。不當的能源配置與電力調度策略會造成互聯電網系統在傳輸的過程中額外的損失，而控制響應性能不足的電力調控易形成微電網跳脫或減短電力設備的使用壽命。因此，提升系統控制時抗電力品質干擾能力及最佳化能源管理與調度，已逐漸成為電力公司與用戶間所關心的議題。本計畫主要目標為(1)建立含再生能源之配電網即時模擬模型；(2)提出配電系統對多個分散式能源系統之協調調度策略；(3)分析國際上應用調頻、即時與補充備轉容量的適用案例；(4)參考國際上配電系統擾動與故障情境，提出配電系統之調度命令格式；(5)利用即時模擬方式開發配電管理系統之輔助調控策略。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。

Due to the widespread use of renewable energy and microgrids, the issues associated with stable power control, optimal energy management, power dispatch of interconnected microgrids have been of great concerns. With the large amount of renewable energy integrated into the distribution grid, various voltage problems affect the system stability and safety may be caused. This is due to the intermittent characteristics of natural energy which causes the output power variation on the renewable energy facilities and unbalanced installations of renewable power generations. The unsuitable energy arrangement and power dispatch strategy may introduce the additional power loss for the interconnected microgrids, and the insufficient performance of control response would easily lead to the tripping of microgrid and reduce the usage life of the power system equipments. Therefore, improving the robustness to power quality in system control and optimization of energy management and dispatch has become an important issue for both utilities and customers. The main objective of this project is to (1) build up the real-time simulation model for the distribution system with the renewable energy, (2) propose the power-regulation strategy for multiple distributed generations in the distribution system, (3) analyze the international case studies for regulation reserve, spinning reserve, and supplemental reserve, (4) propose the dispatch commands for the distribution system by considering the system disturbances and faults, (5) develop the regulation control strategy with real-time simulation. Besides, the microgrid system of the institute of Nuclear Energy Research (INER) is adopted to establish the simulation models. Based on this system, the regulation and transfer 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

本計畫主要針對核能研究所微電網與配電網間之電力調度策略進行研究，並透過即時模擬系統驗證計畫所開發之策略可行性。主要內容包括：(1)分析國際上應用調頻、即時與補充備轉容量的適用案例；(2)建立含再生能源之配電網即時模擬模型；(3)提出配電系統對多個分散式能源系統之協調調度策略；(4)參考國際配電系統擾動與故障情境，提出配電系統調度命令格式；(5)利用即時模擬方式開發配電管理系統之輔助調控策略。

貳、重要成果

本計畫已完成依據核能研究所微電網系統進行輔助服務控制模擬，由分析及模擬結果可以發現，台灣目前所規劃之輔助服務運作模式相較於國際操作策略差異不大，且在調頻輔助方面規劃更多詳細的操作方案，該因素與台灣電力系統規模較小易受系統擾動而頻率變動有關。原本儲能系統於微電網之功能為調節並提供備援電力，當遠離共同耦合點之系統故障發生時，微電網之儲能系統可順暢地接受電力系統調度依據系統頻率進行輔助服務。然而當共同耦合點發生故障時，輔助服務是否需持續提供則需依據系統保護協調機制及低電壓持續運轉之能力，進行本計畫所建議之圖 1 控制程序，不過由於故障發生於共同耦合點，低電壓持續運轉控制期間無法提供輔助服務，基本上該時程往往已超出調節頻率的黃金時間，基於保護微電網系統之觀點，系統保護協調機制將會及時跳脫市電，則該情況下輔助服務將直接失效。因此本計畫所提出之輔助服務控制程序應於遠離共同耦合點之系統故障發生時才具有系統調節意義，於共同耦合點發生故障時應優先保護微電網而跳脫市電。

一、說明研發成果之重要貢獻

- (一) 透過 Opal-RT 系統開發模型並進行模擬，當共同耦合點於 1 秒發生故障時，若儲能系統操作於輔助服務模式且共同耦合點之保

護開關尚未跳脫時，各類型故障對於微電網儲能系統而言皆視為系統發生需進行調頻輔助服務之重載情況，因此無論短時或是長時故障情況下儲能系統皆能在本計畫所規劃之控制策略下進行調頻輔助服務，將系統頻率穩定至標稱值 60 Hz。而在核能研究所多區域微電網的環境下(如圖 2)，由於各儲能系統間需互相協調充放電功率(如圖 3)以調節系統頻率，因此會有在系統頻率標稱值附近震盪之情況(如圖 4)，此行為可依據微電網系統運轉狀況進行儲能系統電能轉換器控制參數調整即可減少震盪幅度。

(二) 本研究所發展之儲能系統調度策略與控制架構雛型，可用來針對不同配電網運轉情境，進行微電網穩定性調控，達成用電效率及能源安全效益的提昇，此外亦可提升儲能系統多模式操作之選擇方案。除可輔助國內能源廠商作為技術開發之參考，亦能促進國內電力相關產業投入微電網之技術提升。

(三) 主持人於 2022 年 1 月榮獲 110 學年度中央大學學術研究傑出獎。

二、學術成就方面，共發表國際期刊論文及國際研討會論文各一篇。

(一) Kuang-Hsiung Tan, Faa-Jeng Lin, Tzu-Yu Tseng, Meng-Yang Li and Yih-Der Lee, “Virtual Synchronous Generator Using Intelligent Controller for Virtual Inertia Estimation,” *Electronics*, submitted, 2021.

(二) Kuang-Hsiung Tan, Yih-Der Lee, “Intelligent Control APF for Compensation of Harmonic Current,” *Proceedings of 2021 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, November 16-19, 2021, Hualien, Taiwan.

參、展望

隨著微電網系統及儲能技術的發展，再生能源及儲能系統之系統占比與日俱增，這樣的情況會增加配電系統的運作不穩定。現今正值智慧電網相關系統整合與建置階段，加上我國碳中和目標之發展，儲能系統之運轉穩定性與相關多模式輔助控制技術實為值得關注之發展項目。

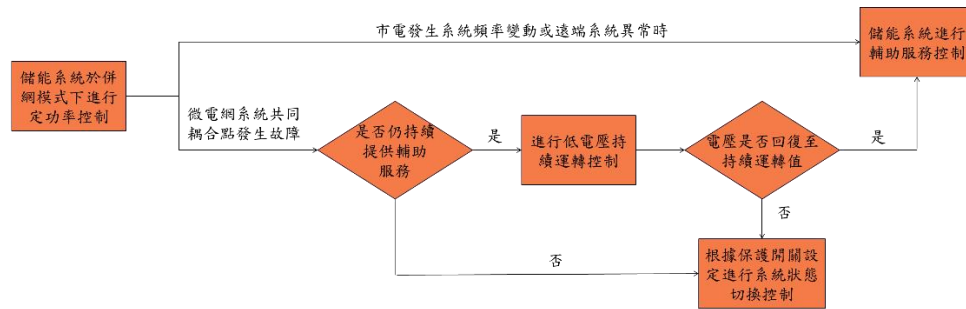


圖 1、本計畫所建議之儲能系統輔助服務控制程序

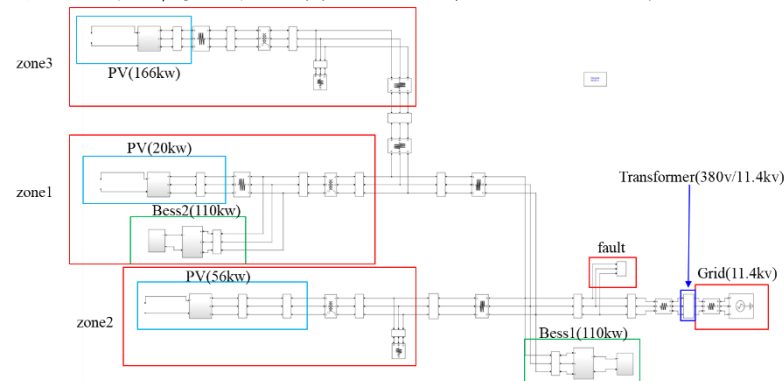
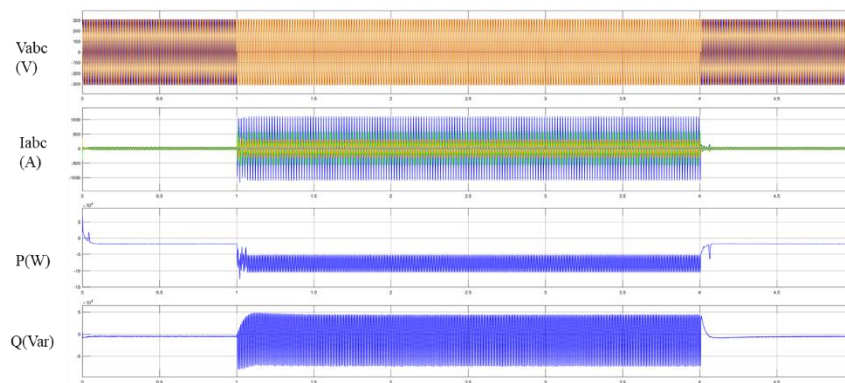
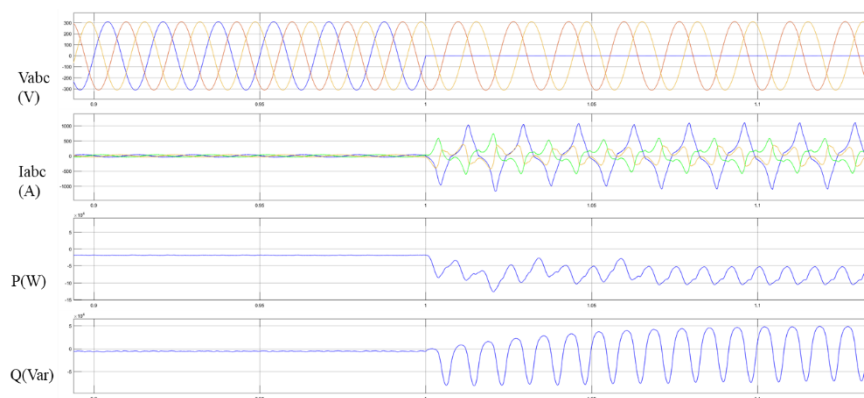


圖 2、核能研究所多區域微電網系統模型



(a)(橫座標：每格 0.5 秒)



(b)(橫座標：每格 0.05 秒)

圖 3、於 1 秒發生故障時市電端電壓、電流、實功與虛功(a)5 秒區間圖、(b)0.25 秒區間圖(縱座標：電壓每格 100 V、電流每格 500 A、實功每格 50 kW、虛功每格 50 kVar)

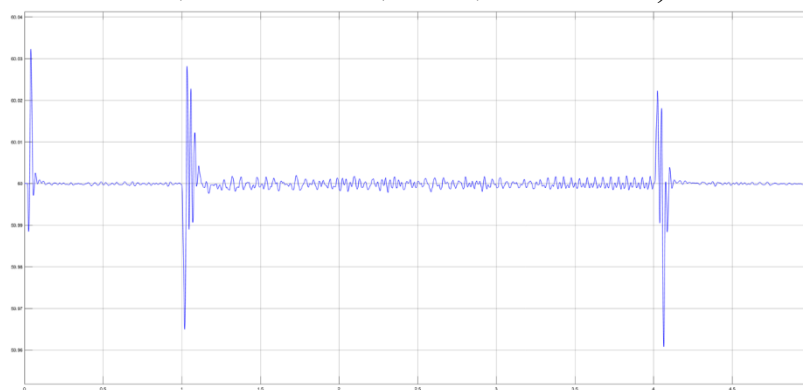


圖 4、於 1 秒發生故障時系統頻率(橫座標：每格 0.5 秒、縱座標：頻率每格 0.01 Hz)

功率調節系統輔助服務及調度策略研究

Study on Ancillary Services and Power Dispatching Strategies for Power Conditioning System

(計畫編號：NL1100263)

羅國原¹ 施建亨¹ 李俊緯¹ 高俊廷²

¹高雄科技大學電機工程系 ²核能研究所

功率調節系統可進行電壓調節以解決再生能源不穩定造成的電壓變動問題，進而改善電力品質與提供電力系統輔助服務。本計畫主要以全橋架構之功率調節系統，完成功率調節系統前饋控制架構設計規劃，以波德圖驗證系統穩定度，開發功率調節系統併網四象限功率輸出功能。針對太陽能應用時，功率調節系統可提供實功平穩輸出。當與再生能源或儲能系統併聯操作時，可以同時執行實、虛功注入和補償，以協助電力系統穩定；當獨立供電給負載時，控制負載端電壓以維持供電正常。最後以開發之 1-kW 功率調節系統與其它微電網相關計畫整合測試，模擬與實作同時驗證其設計理論之可行性。

Power conditioning systems (PCS) are widely used for renewable energy applications, especially in stabilizing the power system with ancillary services. The objective of this paper is to propose an active and reactive power controller for a PCS in microgrids. The proposed controller can operate the PCS with active and reactive power conditions and realize power smoothing and voltage regulation. The demanded active power flow generated through a low pass filter (LPF) is used to control the power smoothing for microgrids. LPF design is presented based on the PCS sizing. The demanded reactive power flow

generated according to the reactive current calculation is used to compensate the microgrid voltage to fulfill the voltage regulation. The analysis of the vector diagram is adopted to validate the proposed controller and to explain the applicability and functionality of the voltage regulation for microgrids. To verify the validity of the proposed controller, a 1-kW grid-connected inverter is built to demonstrate the ability of power smoothing and voltage regulation. Both simulations and hardware experimental results agree well with the theoretical analysis.

壹、計畫目標

The proposed system is planned to be implemented in Institute of Nuclear Energy Research (INER) microgrid test field, suitable for a small community or an industrial park. A compensation strategy using PCS for smoothening the PV/wind power output is also developed and tested. The proposed controller can operate the PCS with active and reactive power conditions and realize power smoothing and voltage regulation. The demanded active power flow generated through a low pass filter (LPF) is used to control the power smoothing for microgrids. The demanded reactive power flow generated according to the reactive current calculation is used to compensate the microgrid voltage to fulfill the voltage regulation. Finally, the energy storage devices integrated with PV/wind systems are intelligently controlled using an appropriate control strategy to reduce the rate of the power output variations and its effect on the voltage smoothening to meet the allowable rapid variation limit. °

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

The circuit diagram and control block of the proposed inverter system,

which contains a battery bank represented by the dc source, a full bridge inverter with sinusoidal pulse width modulation (SPWM), loads, and DRs are shown in Fig. 1. The PCS is connected to the microgrid with an LCL filter, which avoids the resonance between the output capacitor and the parasitic inductor of grids. There are mainly two operation modes: grid-connected mode and standalone mode. In grid-connected mode, the static switch is turned on, and the PCS runs as a current source to provide the real and reactive power. For voltage regulation, the demanded reactive current is used to compensate the microgrid voltage. The demanded active power flow generated through an LPF is used to control the power smoothing for microgrids. In standalone mode, the static switch is turned off, and the PCS supplies its power to the loads as a stable voltage source. A current controller G_c is needed to produce the equivalent duty cycle in both grid-connected and standalone mode.

Experimental waveforms of the microgrid voltage, v_{ac} , the output current of the inverter, i_{ac} , and the utility grid voltage, v_s , are consistent with the simulated ones as shown in Fig. 2. Figs. 2(a)-(c) indicate that the output current i_{ac} show 0° , 40° , and 180° lead over the microgrid voltage v_{ac} . Fig. 2(d) indicates that the output current i_{ac} shows 48° lag behind the microgrid voltage v_{ac} . It can be confirmed that the output power can be achieved by controlling the phase angle between the microgrid voltage and the output current under the different power command.

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) J.-T. Gao, C.-H. Shih, C.-W. Lee, and K.-Y. Lo, “An Active and Reactive Power Controller for Battery Energy Storage System in Microgrids,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 10490-10499, 2022.

(二) 施建亨、李俊緯、鄭金展、羅國原，“應用於微電網之雙向交流-直流介面轉換器，” 第四十二屆中華民國電力工程研討會暨第

參、展望

A microgrid comprising renewable energy and other distributed energy resources is a promising power system topology to increase the penetration rate of renewable energies. Fluctuations in generated power may increase beyond limits with many solar power systems and wind turbines. It may lead to a voltage deviation exceeding the related limits, $\pm 5\%$ of nominal voltage as given by the service voltage limits of IEEE Std. 1547a. There is a risk of a complete power system failure in the fast power fluctuation condition since the power system operator has a minimal response capacity. In order to avoid the negative impacts on the power system, the maximum power fluctuations range of PV is required to be limited. Some limits such as 1% to 5%/min of its installed capacity by Mexico and 10%/min by the Puerto Rico Electric Power Authority (PREPA) and State Grid Corporation of China. This project presents a PCS, which is one feasible solution to smoothen the renewable energies resource power output. It can play an important role for power smoothing between the utility grid and the microgrid, and as a dynamic static synchronous compensator (STATCOM). In addition, the PCS is able to feed reactive power to the microgrid and help the grid recover from a temporary fault that causes the grid voltage to sag momentarily. In comparison to power smoothing, the PCS can also provide voltage and power quality support with reactive power control. For the current controller of the grid-connected inverter for PCS, a PR-type controller is designed in this project to reduce the current distortions and the stead-state error at utility grid frequency.

In the related research, the global battery energy storage market is projected to grow from \$10.88 billion in 2022 to \$31.20 billion by 2029. The shift toward low carbon energy generation to reduce the climate change issue

had propelled the growth of the market in different areas. Therefore, 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.

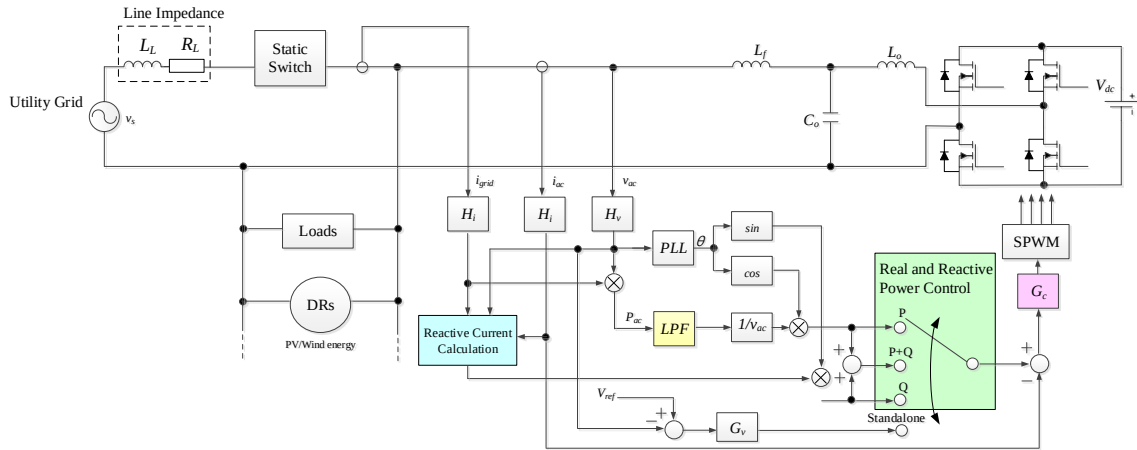


圖 1 、 Configuration of the battery energy storage system.

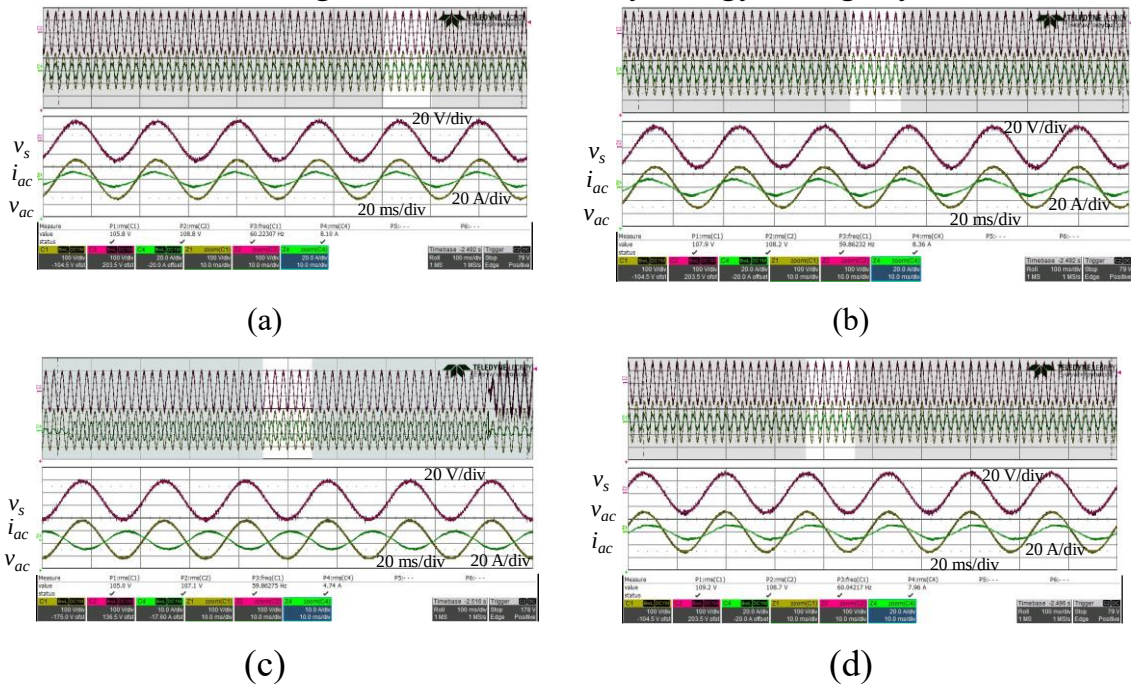


圖 2 、 Experimental waveforms for the mix of active and reactive power conditions (a) + 1-kW active power (b) + 0.707-kW active power and 0.707-kVAR leading reactive power (c) – 1-kW active power (d) + 0.707-kW active power and 0.707-kVAR lagging reactive power.

除役技術

日本核設施除役拆除實施標準之管制實例研究	1
沉積物對核能異質銲接組件於除役過渡階段之加凡尼加速腐蝕之影響評估	5
核設施除役第三方驗證執行策略先期研究	13

日本核設施除役拆除實施標準之管制實例研究

A Case Study on the Standards for Decommissioning and Dismantling of Nuclear Facilities in Japan

(計畫編號：110B011)

許文勝 楊雋之

國立清華大學

日本除役中之濱岡核電廠 1、2 號機與台灣核一廠同為輕水型沸水式反應器(BWR-4 Mark-1)，其除役作業執行上的實務經驗與技術應用相似之處甚多，頗值得國內電廠學習參考。因此，本研究針對濱岡核電廠所提出之除役計畫認可申請書（2009 年認可、2021 年修訂）中與拆除實施有關的各項內容進行細部探討，並分析、彙整研究結果，提供國內管制單位在執行除役拆除審查時之參考。

Hamaoka Nuclear Power Plant Unit 1 and 2 in Japan have been permanently shut down for decommissioning in 2009. Since the reactor type of Hamaoka-1 and Hamaoka-2 is BWR-4, which is the same as that of Chinshan NPP in Taiwan, the regulation experience for dismantling gained by the former could provide the latter with useful information. Therefore, this research will conduct a case study on the dismantling plans which were approved in 2009 and revised in 2021 by gathering materials and performing information analysis. The results obtained by the research could be useful for the regulatory body to review such plans in Taiwan.

壹、計畫目標

福島事故後日本決定除役的商用核電機組大幅增加，包含福島第一及第二核電廠機組在內迄今為止(2021)已累計達 24 部。然而，其中大部分仍處於日本核電廠規劃除役流程中第一階段的「拆除作業準備階段」；僅有在福島事故前就已進入除役狀態的東海核電廠及濱岡核電廠 1、2 號機是處於除役第二階段的「反應器區域周邊設備解體拆除階段」，也是日本除役核電廠中少數實際進行拆除作業的機組。由於日本過去未有商用核電機組完成除役的案例，預期未來其他電廠將以這 3 部機組的除役經驗為借鏡，展開各自的除役作業。

而濱岡核電廠 1、2 號機與台灣除役中的核一廠同為輕水型沸水式反應器(BWR-4 Mark-1)，其除役作業執行上的實務經驗與技術應用相似之處甚多，頗值得國內電廠學習參考。因此，本研究針對濱岡核電廠所提出之除役計畫認可申請書（2009 年認可、2021 年修訂）中與拆除實施有關的各項內容進行細部探討，並分析、彙整研究結果，提供國內管制單位在執行除役拆除審查時之參考。

貳、重要成果

完成濱岡核電廠 1 號反應器及 2 號反應器除役計畫認可申請書之資料蒐集與研析，並深入分析與拆除實施有關的各項內容，瞭解除役作業執行上的實務經驗與技術應用。

一、說明研發成果之重要貢獻

藉由本計畫之執行，深入瞭解日本濱岡核電廠所提出之除役計畫認可申請書中與拆除實施有關的各項內容，並將經過細部探討、綜整分析後的研究結果，提供國內管制單位作為除役拆除審查時之參考。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文

無。

參、展望

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。後續研究工作重點將深入瞭解 JPDR 高活度設備拆除實務經驗與作法，彙整及掌握相關拆除技術與應用範例，提供管制單位參考。

表 1 除役工程主要實施內容

分類	主要實施項目
第一階段 拆除作業準備階段	- 移出核燃料 - 系統除污 - 調查污染狀況 - 設備、組件的拆除作業*2
第二階段 反應器區域周圍設備拆除階段	- 反應器區域周圍設備拆除作業*3 - 系統除污(繼續) - 調查污染狀況(繼續) - 廠房拆除作業*4
第三階段 反應器區域*1 拆除階段	- 反應器區域拆除作業 - 反應器區域周圍設備拆除作業(繼續)*3 - 廠房拆除作業(繼續)*4
第四階段 廠房拆除階段	- 管制區域解除後，廠房的拆除作業 - 反應器區域周圍設備拆除作業(繼續)*3

*1 反應器區域：指受中子活化污染之主要區域，包括爐心支撐結構物等爐內結構物(以下簡稱「爐心支撐結構物」、壓力槽及壓力槽周圍輻射屏蔽體

*2 管制區域內的拆除作業，僅限於以下情況：拆除下來的設備將使用於其他反應器設施或該除役對象設施

*3 包含管制區域外的設備拆除作業

*4 限 1 號機的活性碳惰性氣體吸附設備廠房

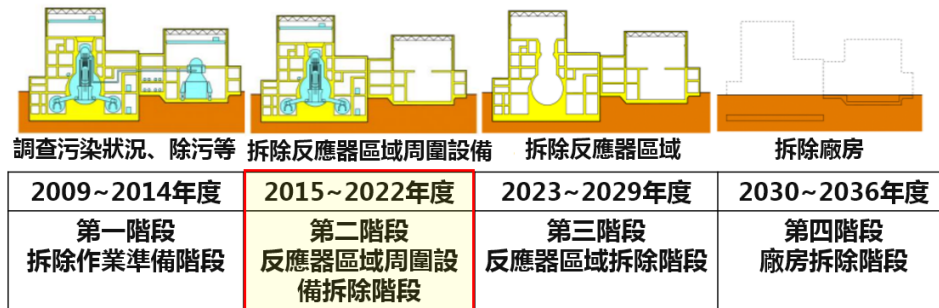


圖 1 濱岡核電廠除役工程規劃

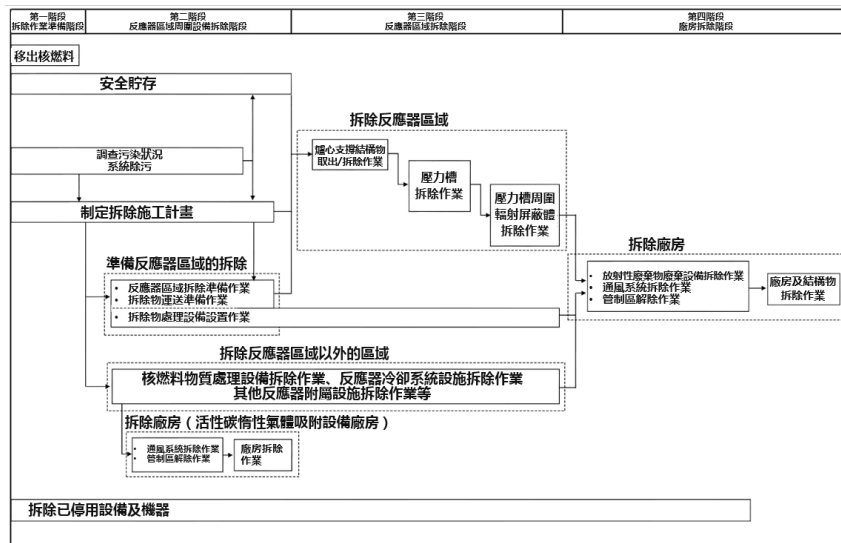


圖 2 濱岡核電廠除役工程整體流程

沉積物對核能異質銲接組件於除役過渡階段之加凡尼加速腐蝕之影響評估

The effect of sedimentary deposit on the galvanic corrosion behavior of dissimilar weldment under decommissioning process for nuclear power plants
(計畫編號：110B016)

王朝正

台灣科技大學機械工程系

本計畫以 A508 低合金鋼-304L 不銹鋼之異質銲接件為底材。利用惰性氣體電弧銲接製程 (Gas tungsten arc welding, GTAW) 於表面製做鎳基 52M 合金 (UNS N06054) 覆層銲接層 (Weld Overlay, WOL)。覆銲件使用放電線切割加工 (Wire electrical discharging machine, WEDM) 切取垂直覆銲/填料銲方向之試片。評估鎳基合金覆銲層與 A508-SS304L 銲接件底材熔合介面進行腐蝕行為評估，利用沉積氧化鐵粉末、鋅離子濃度調整浸泡水溶液的試驗環境，模擬低週期運轉的水溶液環境中的腐蝕型態。透過微觀組織分析、顯微結構觀察及耐蝕能力評估，探討覆銲層異質熔合介面於核電廠除役階段之低週期運轉工作環境之加凡尼腐蝕造成之材料減損行為。

This project aims to investigate the galvanic corrosion behavior of the weld overlay and substrate interface. The filler metal, Alloy 52M (UNS N06054), is used to overlap the weld overlay (WOL) on the dissimilar weld (DSW), which is fabricated by using Inconel 82/182 between A508 low alloy steel (LAS) and 304L stainless steel. The analyses about microstructural observation,

element distribution, and corrosion characteristics are carried out by WEDM (wire electrical discharging machine) samples. Besides, the corrosion testing will be studied in pure water with various amount of iron-oxide sediment or different concentration of zinc ions. The influence of the weld interface on the galvanic corrosion resistance of each zone will also be looked into. Thus, the evaluation of relationship between chemical composition, galvanic couple, corrosion rate is discussed.

壹、計畫目標

核設施除役過程為確保爐心內核子燃料安全，仍會比照運轉期間維持相對較低週期的冷卻水運轉，以確保維護爐水溫度及測試各項組件的功能完整性。其餘時間，冷卻水將靜滯於組件內部。靜滯的流體受到氧化物生長、重力效應，將生成水中離子濃度梯度，組件內部的腐蝕速率將難以使用一般反應爐操作時流體流動狀態進行評估。透過銲接構建之組件，由於兩端工件之成分、結構均不同，亦可稱為異質銲接組件 (Dissimilar Weld, DSW)。管件銲接殘留張應力加上內部的工作壓力將使得管件內部的殘留應力場為張應力狀態，此現象導致裂紋自壓力容器內壁處向外延伸、成長，形成應力腐蝕裂紋 (Stress Corrosion Cracking, SCC)。當應力腐蝕裂紋向外壁方向成長時，裂紋亦同時透過裂紋尖端分枝 (crack branching) 釋放能量，使得裂紋以網狀結構在材料內部延伸。組件經應力腐蝕後，殘餘之金屬材料厚度已無法達到原先設計的結構強度需求，覆層銲接技術 (Weld Overlay, WOL) 在 DSW 外部覆銲一層耐蝕性較高的鎳基合金，能提升管件內部殘留壓應力場分布的範圍，並增加管壁厚度及耐蝕能力。裂紋若延伸至外壁表面時，壓力水溶液將沿著裂紋向外洩漏，初始通常為液滴 (droplets)、滲漏 (seepage) 型態；當多個裂紋洩漏聯合在一

起時，將造成大範圍的噴濺及破裂，不僅增加工作環境內的輻射危險性，裂紋的擴張速率也將大幅地加速，致使管件發生爆裂而失效。

循環水路系統中之管件多使用鎳基合金、低碳不銹鋼等金屬材料，其管件表面與水溶液內的 Co 離子反應，形成不具備保護性的鬆散氧化物，造成管件材料持續耗損。添加鋅離子含量，能與陰極金屬表面反應生成外層 ZnFe_2O_4 及內層 ZnCr_2O_4 ，具有阻隔水溶液環境之氧分子等強氧化劑持續進入腐蝕裂縫中，減緩應力腐蝕裂紋成長速率的效果。為瞭解已受到腐蝕之異質介面、覆層銲接處理、除役過程的冷卻水狀態、已受損材料之長期浸泡耐腐蝕性等條件之相關性，藉由放電線切割加工 (WEDM)，沿異質銲接銲道軸線為截取面、沿管內徑周向截取樣品；透過動電位極化試驗與循環動電位極化試驗、長期浸泡試驗，以及金相分析，觀察水溶液鋅離子濃度、沉積物附著狀態對加凡尼腐蝕行為之影響。

貳、研究方法與過程

一、試件材料與銲接處理

鋼管以熱鍛成形加工，再進行後熱處理：A508 低合金鋼施以 930 °C 持溫 3 小時淬火急冷，640 °C 持溫 3 小時快速冷卻；SS 304L 低碳不銹鋼則施以不銹鋼標準製程之 1050 °C 固溶處理。異質銲接金屬使用鎳基 82/182 合金銲條，以鎳基 82 合金 (Inconel 82, UNS N06082) 為滲透銲接之填料金屬、鎳基 182 合金 (Inconel 182, UNS W86182) 為填料銲接之填料金屬。覆銲層金屬使用鎳基 52M 合金 (Inconel 52M, UNS N06054) 銲線為覆層銲接處理之填料金屬

二、電化學試驗

試驗執行前，先以開路電位模式搭配氮氣除氧 30 分鐘，使電化學試驗槽體內之氧含量降低。其操作參數為電位掃描速率 10 mV/s；掃描

範圍 -500 mV 至 $+1000\text{ mV}$ (相對於開路電位 E_{OCP})；工作電極面積 0.1963 cm^2 ；試驗溶液分別是去離子水 (deionized water)、添加醋酸鋅 10 ppb 之去離子水、添加醋酸鋅 10 ppm 之去離子水。

三、浸泡試驗

樣品經研磨表面 600 號後，浸泡於密封之反應槽中，靜置溫度為 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之水浴槽；試驗水溶液為去離子水 (deionized water)、添加醋酸鋅 10 ppb 之去離子水。浸泡樣品取出後烘乾，再以立體顯微鏡紀錄其表面微觀結構。另製備去離子水 (deionized water) 添加 1 g/L 懸浮氧化鐵粉末之反應槽，探討樣品表面沉積氧化物的腐蝕行為。

四、金相分析

利用立體顯微鏡搭配數位顯微鏡相機 WXCAM4K8MPA 擷取浸泡試樣表面形貌，利用 45 倍放大倍率進行微觀分析。表面腐蝕產物化學液體去除依據 ASTM E407 規範選擇，使用 3.5 g 環六甲基四胺 (hexamethylenetetramine) 溶解於 500 ml 鹽酸 (密度為 1.19 g/ml) 加去離子水至 1000 ml 清洗。

參、重要成果

一、電化學試驗

(一)動電位極化曲線

針對好發異質金屬熔合介面擇優腐蝕的基材，以添加醋酸鋅 10 ppm 的去離子水量測其腐蝕電位的數值，比較各異質材料之化學成分熔合介面與試驗溶液中添加鋅離子的關聯性。鎳基合金之間的化學成分雖有差異 (Inconel 52M: $8\text{Fe}-59\text{Ni}-30\text{Cr}$, Inconel 182: $4\text{Fe}-73\text{Ni}-14\text{Cr}$)，然其介面之腐蝕電位並未受到加鋅離子濃度的影響。低合金鋼 A508 與鎳基合金之間的腐蝕電位隨著鋅離子的添加有提升的趨

勢，增值約 +150~+250 毫伏特。另一方面，該異質介面區的腐蝕電流約上升 1 個級數（見圖一）。

(二)循環動電位極化曲線

A508 低合金鋼於 3 種試驗溶液內的右上方掃描曲線環皆是以順時針方向掃描，顯示低合金鋼於試驗中無法於其表面形成有效的保護層（氧化物）。在去離子水及添加醋酸鋅 10 ppb 溶液內，經掃描完成後，其第 2 腐蝕電位 ($E_{\text{corr},2}$) 較第 1 腐蝕電位 ($E_{\text{corr},1}$) 的值正，即 A508 雖無產生具鈍化性的氧化物薄膜，但具備生成能阻礙溶液離子擴散的氧化層。此現象在添加醋酸鋅 10 ppm 溶液內的曲線中未顯現。鎳基合金於 3 種試驗溶液內的正掃描，還原曲線的電流斜率隨著鋅離子濃度上升而下降，顯示陰極的反應速率逐漸遲緩。另一方面，異質熔合介面：(1) A508/Inconel 52M 介面（見圖二）隨著鋅離子濃度愈上升，其正掃描之還原曲線的電流斜率上升，伴隨右上方掃描曲線環逐漸生成不穩定區域，具有鈍化電位、孔蝕電位等細微的曲線偏折。(2) A508/Inconel 182 介面添加醋酸鋅 10 ppb，正掃描的還原曲線產生不穩定現象、添加醋酸鋅 10 ppm，該循環動電位極化曲線與單一金屬基材 A508 相同，但其腐蝕電流密度增加約 1~2 個級數。(3) Inconel 182/Inconel 52M 介面（見圖三）在去離子水環境，右上方掃描曲線環顯示其具備形成頓態的氧化物薄膜，隨著鋅離子濃度愈上升致使返回掃描的還原曲線逐漸變得不穩定。

二、浸泡試驗

浸泡樣品於試驗模組內 1 至 3 個月，密封後靜置於循環恆溫水浴槽中。實驗結果顯示，浸泡 1 個月後，樣品表面鏽斑分佈較不均勻，除 A508 低合金鋼側有淺黃色斑塊外，其餘基材仍為金屬色澤。為此，以浸泡 2 個月後的樣品為金相立體顯微鏡觀察的標的。

(一)去離子水

異質銲接樣品之 A508 銲接熱影響區內的材料顯示些微的加凡尼加速腐蝕形貌，其表面具有尺度不等的腐蝕凹坑。覆層銲接處理樣品則是靠近覆銲層的 A508 銲接熱影響區內的材料具有較明顯的加凡尼加速腐蝕形貌（樣品外觀與金相圖見圖四）。

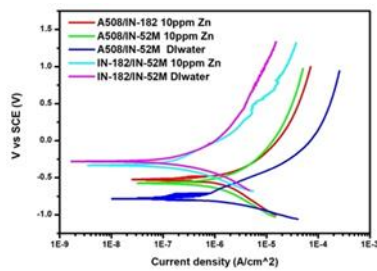
(二)加鋅水溶液

異質銲接樣品之距離緩衝層 2 mm 範圍內，A508 銲接熱影響區內之材料未觀察到明顯的加凡尼腐蝕形貌，其表面為均勻的晶粒腐蝕。覆層銲接處理樣品靠近覆銲層的 A508 銲接熱影響區內之材料具有較明顯的加凡尼加速腐蝕形貌（樣品外觀與金相圖見圖五）。受到施做緩衝層入熱量及異質介面成分差異性的影響，A508 側的熱影響區易產生不均勻腐蝕形貌，其腐蝕坑洞尺度由 0.05 mm 至 0.3 mm 不等。溶液中含有 10 ppb 的鋅離子，該熱影響區範圍內之腐蝕坑洞密度較為低，其腐蝕形貌也轉變為尺度較小的腐蝕孔洞。距離異質熔合介面約 1 mm 範圍中，未觀察到加凡尼腐蝕的現象。添加 10 ppb 濃度鋅離子於去離子水中，可降低低合金鋼側的連續腐蝕坑洞之生成數量與密度，另減緩加凡尼腐蝕造成異質熔合介面旁之熱影響區的材料損失。針對覆層銲接處理異質銲接件，靜置於添加 10 ppb 濃度鋅離子水，其覆銲層與低合金鋼的異質熔合介面未觀察到加凡尼腐蝕現象。熱影響區、二次受熱影響區（Inconel 52M/A508/Inconel 182）受腐蝕產生之孔洞數量及尺度隨鋅離子添加而下降。

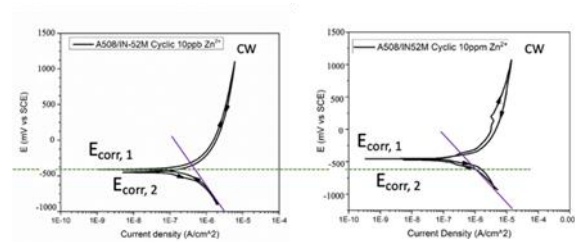
(三)沉積氧化物水溶液

異質銲接樣品緩衝層並未受到侵蝕，A508 銲接熱影響區內之材料表面為均勻的晶粒腐蝕，未觀察到加速腐蝕所造成的腐蝕凹坑。覆層銲接處理樣品緩衝層並未受到侵蝕，靠近覆銲層的 A508 銲接熱影

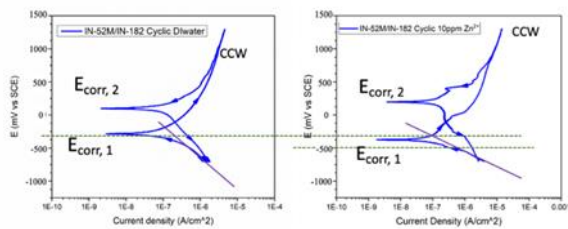
響區內之材料具有微小的腐蝕孔洞，尤以 Inconel 52M 覆鋅層/Inconel 182 緩衝層/A508 低合金鋼交界處的孔洞密度最高（樣品外觀與金相圖見圖六）。相較於去離子水溶液，，經沉積 1 g/L 氧化鐵的樣品於浸泡試驗後，緩衝層、覆鋅層之熱影響區未觀察到明顯的腐蝕坑洞，僅有細小的腐蝕孔洞（約 0.01 mm~0.05 mm）。顯示氧化鐵沉降於基材表面後，可視為一隔絕溶液與基材進行離子反應的阻障層。



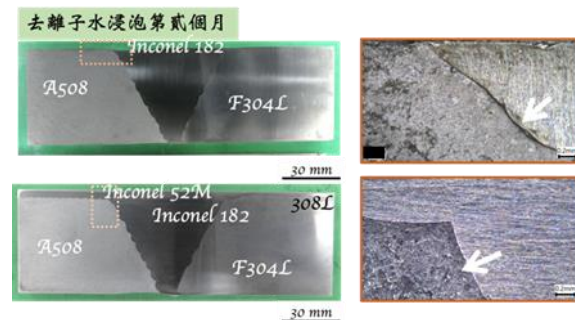
圖一



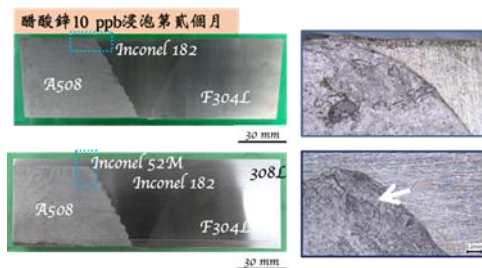
圖二



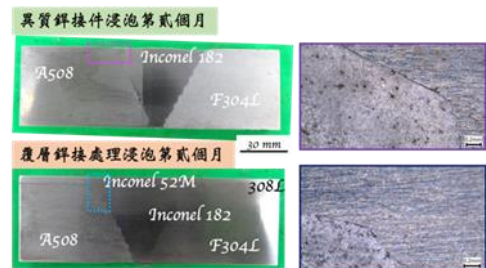
圖三



圖四



圖五



圖六

肆、展望

本研究所執行 A508/Inconel 182/304L 異質銲接件樣品、覆層銲接處理 Inconel 52M 樣品製備後，以恆電位儀量測不同鋅離子濃度下之異質銲接件及其覆層後的試片之腐蝕電位與腐蝕電流；此外，本研究亦針對相

關試片進行添加醋酸鋅 10 ppb 及沉積氧化鐵 1 g/L 之樣品浸泡試驗。歸納後可獲得以下幾項結論，然該結論僅供參考所用，與實際電廠運轉環境條件仍有差異。

1. 添加鋅離子 10 ppb 具有抑制陰極金屬腐蝕速率的效果，然添加鋅離子 10 ppm 會造成金屬表面還原反應不穩定及再鈍化電位下降。
2. 添加鋅離子 10 ppb 之浸泡試驗，低合金鋼側之鐸後熱影響區並未觀察到加凡尼腐蝕的腐蝕形貌，僅具有不連續的腐蝕孔洞。
3. 鐸道熱影響區具有最大的金屬損失量，尤以覆鐸層/緩衝層/低合金鋼基材的緩衝交界處。
4. 異質鐸接件、覆層處理鐸接件之表面沉積氧化物的浸泡試驗結果顯示，相較於單純去離子水環境，異質材料緩衝介面之腐蝕行為多以不連續之腐蝕微孔，未觀察到加凡尼腐蝕現象。

核設施除役第三方驗證執行策略先期研究

Preliminary Study on the Implementation Strategy of Third-Party Verification of Nuclear Facility Decommissioning

(計畫編號：110B019)

蔣安忠 趙得勝 劉鴻鳴

國立清華大學原子科學技術發展中心

本計畫目的在精進核設施除役第三方驗證作業及安全審查技術，以做為管制作業及相關計畫審查之參考，目前國內對於所謂輻射偵檢與調查的第三方驗證的執行策略與時機仍處於探索階段，因此有必要進行先期研究，利用台電執行輻射特性調查的機會執行獨立調查驗證，藉此累積經驗、並逐步建立未來第三方驗證運作的模式。

本研究針對國際第三方驗證案例進行個案分析，對其驗證範圍及抽驗比例進行探討，並針對所使用儀器、採樣方式、分析方法等項目進行合理性及適用性的探討。

The purpose of this project is to refine the third-party verification operations and safety review techniques for decommissioning nuclear facilities to serve as a reference for the review of control operations and related plans. The current domestic implementation strategies for third-party verification of so-called radiation survey and investigation are still in the exploratory stage. Therefore, it is necessary to conduct a preliminary study and use the opportunity of Taiwan Power to perform radiation characteristics investigation to perform independent survey and verification, so as to accumulate experience and gradually establish a third-party verification operation mode in the future.

This research conduct case analysis of international third-party verification cases, discuss its verification scope and sampling ratio, and analysis the rationality and applicability of the instruments used, sampling methods, analysis methods and other items.

壹、計畫目標

獨立確認調查是除役核電廠廠址釋出前的最後關卡，應建立妥適的調查策略及偵檢程序，本研究承接 109 年度原能會委託研究計畫，進行第三方驗證的精進研究，持續蒐集並研析不同的國際案例，期能從中獲取重要資訊，作為管制機關未來執行確認調查的採參資訊，針對國際第三方驗證案例進行個案分析，對其驗證範圍及抽驗比例進行探討，並針對所使用儀器、採樣方式、分析方法等項目進行合理性及適用性的探討。

貳、重要成果

為了瞭解獨立確認調查的實務細節，本研究彙整更多美國 ORISE 第三方驗證機構針對各除役電廠所執行的獨立確認調查案例，針對土壤、建築物、物質與設備各舉一國際案例進行研析，將研析過程所得的相關資訊彙整作為第三方驗證執行策略，包含第三方驗證視察與確認調查計畫的訂定、偵檢與分析的進程序等基本項目的指引。

一、研發成果之重要貢獻

本研究對國際第三方驗證案例進行研析，對其使用儀器、取樣方式、分析方法、驗證標準之選用及適用性評估做個案分析，歸納整理案例中的第三方驗證之驗證範圍及抽驗比例，進行細部討論。

關於土壤的獨立確認調查，本研究以錫安核電廠(ZNPS)獨立驗證案例(犧牲屏障相關的地下土壤)進行研析，本案例對需要特殊化學方法分離的核種(例如 Ni-63、Sr-90、H-3)做歸納說明，也實例展示了複合核

種的解除管制規範。此外，對於土壤樣本的離散顆粒，以一維散布圖的方式加以清楚呈現，可以清楚顯示離散顆粒的可能存在。

關於建築物的獨立確認調查，本研究是以洋基核電廠(YNPS)的汽機廠房和部分建築物為目標執行的第三方驗證，本案例確認調查的主要偵檢方式是表面掃描、表面活度量測、以及針對 H-3 的擦拭取樣，是典型的獨立確認調查項目，由於建築物結構通常複雜且範圍遼闊，需依照使用歷史與現場情形判斷可能有問題的位置進行確認調查，本案例提供受確認調查場所的平面圖，並於其上清楚標示執行偵檢的位置，其分布情形可供未來我國執行類似驗證作業之參考。

關於物質與設備的獨立確認調查，本研究仍以洪堡灣電廠(HBPP)物質與設備確認調查案例為研析對象，此案例亦為目前 NRC 資料庫中唯一以 MARSAME 方式執行的獨立確認調查。案例中值得參考的地方是其決定環境背景值的方法，未來我國核電廠鄰近高污染建築物的低影響物件應可採取類似做法。此外，其驗證取樣點的邏輯性和確認問題點的作業流程也是值得參考的地方。

二、學術成就與人才培育

本研究除完成研究報告之外，亦投稿輻防簡訊刊物一篇(淺談核電廠除役最終狀態偵檢之獨立確認調查，輻防簡訊 165 期，110 年 10 月 15 日)，實際參與研究過程的碩博士班人才培育共 7 名，提供原能會教育訓練 3 個相關講題共 6 小時。

參、展望

第三方驗證包含過程中視察與現場確認調查兩種方式，依照眾多案例來看，核電廠除役的停機過渡階段即可開始逐步進行第三方驗證，除役業主在擬定各階段的輻射偵測計畫時，即應提供對應的驗證機制與執行

方法建議，由於第三方單位執行驗證過程中尚需要主管機關的參與，需掌握第三方驗證排程與除役階段的時程關聯性，在偵檢資源有限的條件下，必須盡早規劃有效率的過程中視察與確認調查，作為除役場址清潔外釋與物件移置的最後把關。

核能安全（核電廠熱水流安全分析程式應用與驗證）

110 年核電廠熱水流安全分析暨管制法規技術精進研究	1
110 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.....	8
110 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.....	13
重要設備主動件監測管理及在除役各階段管制人力資源排程之預警架構 建立研究.....	17

110 年核電廠熱水流安全分析暨管制法規技術精進研究
2021 Thermal-Hydraulic Safety Analysis and Regulation Technical
Improvement for Nuclear Power Plant
(計畫編號：110B012)

陳詩奎 曾永信 楊融華

國立清華大學

本研究係整合材料科學、熱水流分析與風險評估團隊，以精進我國現有機組在不同運轉狀態下之管制能力。經由本計畫的執行，瞭解除役過渡階段共用系統之安全影響，以及處於停機過渡階段之機組是否會因為微生物腐蝕而造成組件之腐蝕，甚或機組在假想事故中的全黑事故影響皆已被加以探討。在綜合各分項之努力後，本研究除了對火山危害以及冷卻水水質監測等程序書提出精進之建議外，亦就除役過渡階段之假想事故提出NUREG/IA技術報告，以作為參與CAMP國際合作計畫之成果。

This research integrated experts in materials science, thermal-hydraulic analysis and risk assessment field to improve the regulation capabilities for NPP units under transitional phase of decommissioning. Through the study, the safety impact of sheared system for the cold shutdown units, the microbial induced component corrosion (MIC) and the Station Black-Out (SBO) during the transitional phase of decommissioning are all discussed. After integrating the efforts of various sub-items, this research provides advanced recommendations for risk mitigation and cooling water quality monitoring standard operation procedures.

Furthermore, this research also proposes a NUREG/IA technical report on hypothetical accidents in the transitional phase of decommissioning as a result of participating in the CAMP international cooperation plan.

壹、計畫目標

日本福島一廠發生事故後的十年，雖然國內政府已決定於2025年終止使用核電；但在此之前營運中的電廠以及進入除役過渡階段的機組，其運轉與維護之安全性仍是主管機關致力之目標。雖然台灣使用之核能機組在基準設計經整體安全評估並改善後，已可因應複合式災害；但對於超過設計基準之天然災害仍需持續精進潛在威脅之評估與管制技術方可確保核安管制品質，增進民眾對核能應用之信心，進而確保核能在我國之安全應用，為達此目的，本研究分別進行以下三個子項的相關研究：

A. 「CAMP合作計畫下核電廠除役過渡階段系統安全分析與評估」部分：

核二廠1、2號機組於2021年及2023年運轉執照屆期後，隨即進入除役階段，為關注核二廠除役過渡階段用過核子燃料暫存於反應器壓力槽內之安全性議題，本研究建立核二廠除役過渡階段開蓋下熱水流分析模式以及進行全黑事故案例分析與安全性評估，以協助管制機關進行審查作業。CAMP國際合作計畫旨在集合世界核能電廠系統之研究經驗，讓參與國能夠互相分享模擬程式的研究成果及分析技術交流，台灣藉由CAMP國際合作計畫以取得最新先進熱水流分析程式版本，並與美方透過技術經驗交流來強化我國安全評估之技術能力。

B. 「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」部分：

本分項利用實方式進行好氧菌(SOB)與厭氧菌(SRB)於不同材料生長時所造成的微生物腐蝕情況，以瞭解除役過渡階段之機組造成局部腐蝕

影響與可能腐蝕速率外，亦透過電子顯微鏡(SEM)與電子散射光譜儀(EDS)進行試片表面受微生物腐蝕之結構與組成，並藉由電化學方法(EIS)進行試片開路電位EOCP、極化掃描與電化學阻抗來探討微生物腐蝕之機制以及其對燃料池各項組件完整性可能之影響。

C. 「核電廠除役期間機組共用系統之安全管制及危害評估技術研究」部分：

我國核二廠兩部機組的運轉執照到期時間不同，分別為110年12月27日與112年03月14日，因此，當一號機運轉執照到期時，二號機仍在運轉。依據核二廠設計，部分系統(包括安全與非安全系統)為兩部機共用系統。對於核二廠除役過渡階段兩部機共用系統，在一號機進入除役期間且二號機仍在運轉時，本計畫運用失效模式與影響分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)與系統化評估方法，找出可能之潛在安全顧慮及其可能之影響程度，並提出注意或建議事項。本子項研究方法與步驟過程可概述為：

- 一、除役期間機組共用系統之安全評估：核二廠兩部機安全與非安全相關均有共用系統，運用系統化評估方法進行，系統設計或運轉變更新對2號機功率運轉期風險之影響，並探討程序書測試/維護對於2號機之影響、或運轉員誤失機率之影響等，評估內容包含定性(深度防禦與安全餘裕)與定量(爐心受損頻率)分析。
- 二、核電廠除役期間之非輻射危害評估：研析國際上核能電廠除役之非輻射危害評估(hazard assessment)相關文獻計3篇。以韓國研究用反應器除役為例，以風險矩陣方法評估結果發現，「墜落」、「火災/爆炸」為主要風險來源。

貳、重要成果

A. 「CAMP合作計畫下核電廠除役過渡階段系統安全分析與評估」部分：

本計畫研究成果含括兩大部分：台美合作案CAMP計畫執行與建立國內核管自主分析模式並強化除役電廠安全管制技術。研析核二廠於除役過渡階段時發生電廠全黑事故，失去內部及外部電源導致爐心處冷卻系統失效時，執行關鍵熱流參數與時序分析，評估結果以停機7天後用過核子燃料衰變熱為9.114 MW為案例，顯示水位於到達飽和溫度後，約93.36小時左右水位會下降至爐心燃料頂端。隨著池水持續蒸發，水位低於用過核子燃料頂端此時燃料開始裸露，以停機7天後用過核子燃料衰變熱為9.114 MW為案例，顯示水位低於燃料頂端後，燃料護套溫度約經過5.6小時左右會升至600°C。本研究也針對不同停機冷卻時間，採用7天、30天、60天、90天、180天、以及365天之衰變熱進行評估，TRACE分析結果之關鍵時序也彙整於成果表中，以建立事故發展關鍵時序資料庫。

本計畫研究成果包括研蒐國際CAMP會議資料、取得最新版本熱水流分析程式、了解國際CAMP會員組織研究技術發展動態、建立國內熱水流分析技術模式與強化分析能力等，有助於提昇台灣與美方程式發展、技術開發、與研究合作，其研究成果更有助於強化我國核能安全管制，協助核二廠除役過渡階段熱水流安全評估作業審查與提出相關管制建議。

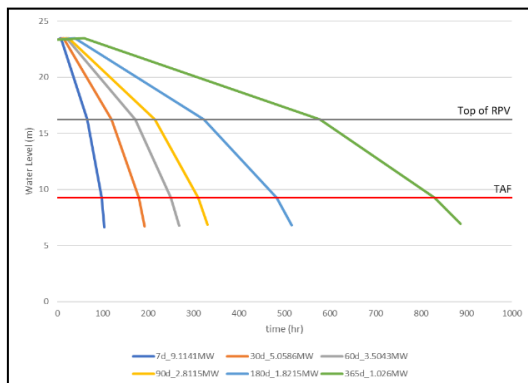


圖1、水位下降趨勢圖

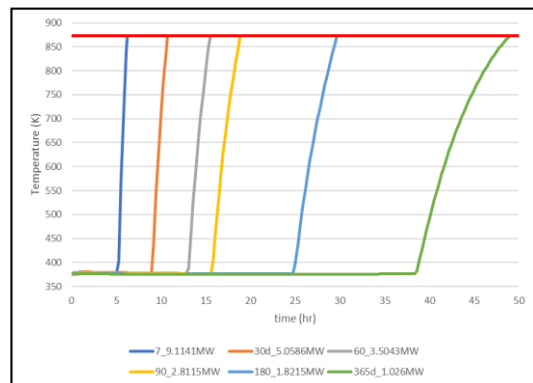


圖2、燃料護套溫度上升趨勢圖

B. 「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」部分：

一、實驗結果指出SOB菌是將元素硫及還原性硫化物氧化而生成硫酸的反應，故碳鋼表面因為SOB活動產生的代謝產物均勻的覆蓋於試片表面，主要形成FeS、Fe₂O₃等化合物，因具有緻密的特性形成屏蔽，降低腐蝕的程度。

二、SRB菌所生成的生物膜，附著於試片表面後對於碳鋼易形成孔蝕現象；對304SS則無顯著影響。透過SEM針對SRB菌浸沒實驗中所獲得之表面沉積物表面結構進行拍攝與鑑別後發現，SRB菌所生成的生物膜，附著於試片表面後對於碳鋼易形成孔蝕現象。

三、整體發現可匯整為以下發現與管制建議：

(一) SRB在衰變熱降低或部分燃料移除(水溫趨降)的狀況，活動將減緩。微生物腐蝕之影響隨著除役過渡階段的時間推展將而減緩其影響。

(二) 不銹鋼對於微生物腐蝕具有一定程度之抵抗能力，除役過渡階段中不銹鋼組件，暫無需顧慮微生物腐蝕之影響。

(三) 碳鋼因SRB菌透過生物膜的效應而產生孔蝕，對於組件的完整性而言確實較需進行關注。

(四) SOB菌非鐵氧化菌，在實際環境下預期其所造成的均勻腐蝕將不若SRB菌之孔蝕嚴重 (水質的管理能有效減少SOB菌的影響)

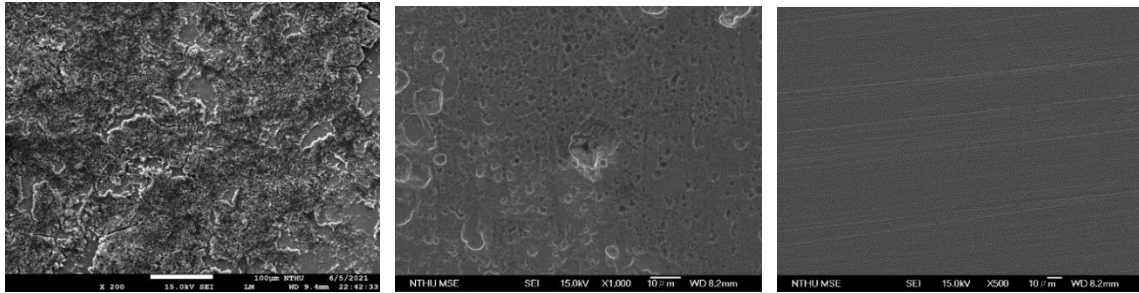


圖3、SRB菌生長狀況與碳鋼、不銹鋼試片表面狀況

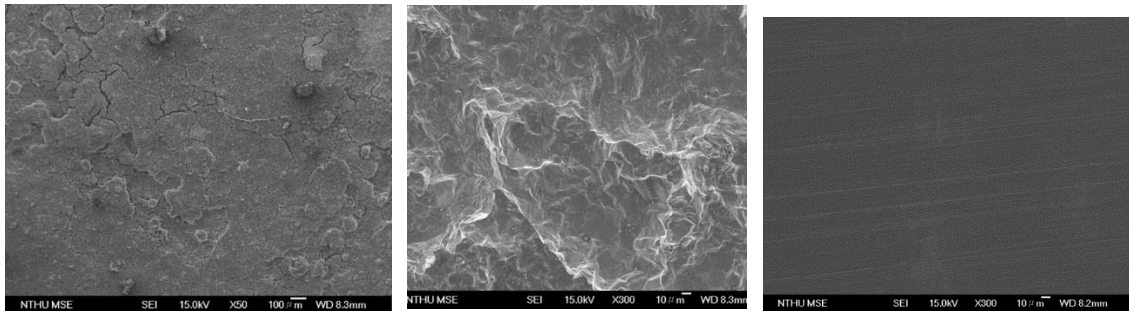


圖4、SOB菌生長狀況與碳鋼、不銹鋼試片表面狀況

C. 「核電廠除役期間機組共用系統之安全管制及危害評估技術研究」部分：

本計畫根據核二廠除役計畫、電廠程序書、及核二廠PRASA等資料，進行1號機除役過渡階段共用系統之安全管制分析，評估結果顯示：

一、僅「一次圍阻體氫氣再結合系統」及「循環水與外部循環水系統」涉及設計或運轉變更，對2號機之影響為：

(一) 前者 ΔLERF (Large Early Release Frequency) $< 1.0\text{E}-08$ /ry，對2號機之LERF風險(降低)並無明顯助益。

(二) 前者 $\Delta\text{LERF} < 1.0\text{E}-08$ /ry，對1號機爐心尚有燃料時，依據RG 1.174之準則，屬於可接受之區域III—風險微小變化。

(三) 後者 ΔCDF (Core Damage Frequency) $< 1.0\text{E}-07$ /ry，依據RG 1.174之準則，屬於可接受之區域III—風險微小變化。

二、有關共用系統之安全管制，本研究提出以下建議或注意事：

(一) 在1號機爐心尚有燃料之狀態，建議「一次圍阻體氫氣再結合系統」維持原設計。

於1號機除役過渡階段，核機冷卻水系統、汽機廠房冷卻水系統、及正常冷凍水系統等3個系統主要設備之區域內，如因除役作業而有新增可燃物或臨時性可燃物、或涉及消防設施變更等，則需評估其廠內火災風險、並加強巡視或動火管制等行政措施。

參、展望

本計畫透過各子團隊之通力合作，達成了與國際交流合作以提升對現有機組安全評估能力、除役過渡階段機組之組件腐蝕監管以及現有機組風險危害之管制措施精進等成果，預期能為國內處於不同狀態之機組提供最新的管制建議，而預期透過目前培育之技術能力與團隊，將可為國內未來所需的核電廠除役過渡階段安全評估、審查與管制作業提供必要之人才與技術。

110 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 (2021)

(計畫編號：110B013)

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，本計畫首先檢視隱沒帶地震地動特性的邏輯樹和權重分配之合理性。其次基於波傳理論，進行地盤反應分析軟體 STRATA 之驗證，並以 PWR 電廠預估理論地層模型輸入 STRATA 進行地表震動特性之預估。接著針對核能結構地震反應分析之導則與案例進行研析，探討包含結構物基礎與地表相對位置不同、土壤組成差異以及分析時之輸入頻率差異等因素對於結構反應分析結果之改變。本計畫除特別考慮不同震源導致之土壤性質差異所造成的效應外，並新增檢視兩個土壤結構互制 V&V 案例，比較不同分析模型建立，以及分析輸入位置等變因對分析結果準確度之影響。為了因應 NTTF 建議 2，美國電力研究院完成加速耐震評估程序報告 EPRI 3002000704，以協助核能管制單位與核電廠業主在短時間完成核電廠重要 SCC 的耐震評估。在核電廠加速耐震評估程序中，有關安全停機路徑中的關鍵結構與設備的耐震能力評估至為重要，本計畫將協助安全停機路徑中的關鍵結構與設備耐震度分析與檢視之管制技術的建立，以期能協助核能管制單位有效檢視核電廠關鍵結構與設備的加速耐震評估程序進行。

The TPC has executed the PSHA SSHAC-3 on its NPPs. At first, this project investigates the reasonability on the logic tree of the ground motion characterization for subduction sources on the later regulatory demand. Then, this project will verify the site response analysis program, STRATA, based on one-dimensional wave propagation theory. Meanwhile, the site model of the PWR plant is adopted to evaluate the ground responses of minor to moderate earthquake events by using STRATA based on the Darendeli model. This project also reports case studies as well as guidelines for NPP structures when the soil-structure interaction under seismic excitation should be considered. Elevation differences between the ground surface and the foundation, composition of the soil profiles, and the consistency of the input spectrum would produce significant impacts on the results of SSI analysis and should always be considered. Our primary investigation also focused on the concerns of the different soil properties caused by the earthquake source that may have somewhat alter the SSI responses. The investigated V&V case studies also compare the influences on the analysis accuracy caused by the initial built/presumed FEM models as well as the location of the excitation input. In response to the NCTF's second recommendation, the Electric Power Research Institute developed the Expedited Seismic Evaluation Process through the report EPRI 3002000704 to assist nuclear energy regulators and nuclear power plant owners to complete the seismic evaluation of the important SCCs of nuclear power plants in short time. In the ESEP, it is very important to evaluate the seismic capability of key structures and equipment in the safe shutdown path. The establishment of control technology for seismic analysis and inspection of key structures and equipment is expected to assist nuclear energy control units to effectively review the accelerated seismic evaluation procedures of nuclear power plants.

壹、計畫目標

為因應台電核電廠執行 PSHA SSHAC-3 計畫完成後之後續相關管制需求，如核電廠地震危害與篩選報告、核電廠耐震度評估相關技術報告、場址地動放大效應分析更新、和土壤-結構互制的樓板反應譜更新等，需建立地震機率風險分析評估所需技術，針對新一代的相關管制與研究技術進行釐清與研析。計畫目標為協助國內核電廠地震災害之安全評估，建立新一代安全管制技術，並培養新一代管制技術人才，提供核能管制單位針對地震危害度分析、加速耐震評估程序和用過燃料池耐震分析實質審查之需。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

利用 Krammer 所提供之案例，驗證理論轉換函數之推導，並探討在剛性岩盤時，土層剪力波速對於轉換函數之影響。土層阻尼比不變時，轉換函數峰值不變，但土層頻率隨著土層剪力波速的增加而提升。將輸入、輸出歷時資料分割為 100 段滿足資料遍歷性，再透過 Hamming window 使分割資料滿足週期性之假設，並計算輸入、輸出歷時之頻譜密度，求得頻率響應函數 FRF，最後與理論地層轉換函數比較，雖然 FRF 會受到雜訊之影響，但峰值大小與主頻位置皆與理論值相對吻合。

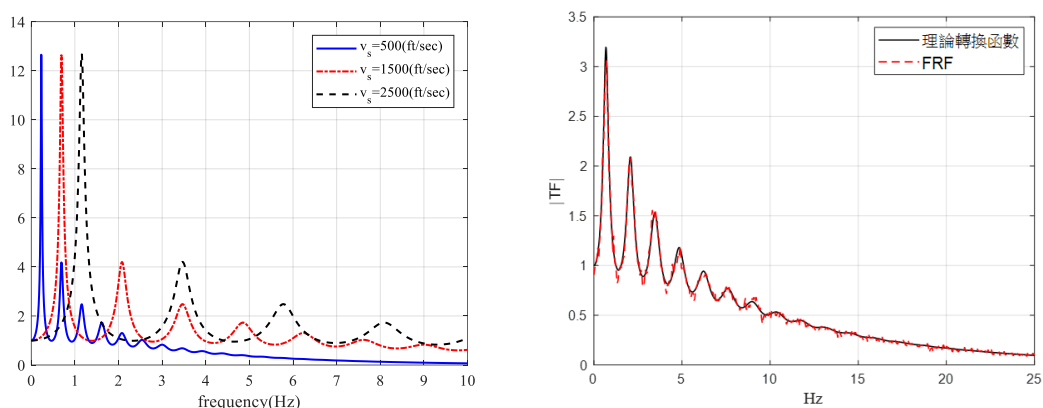


圖 1 不同土壤剪力波速之 FRF 比較 圖 2 FRF 與理論地層轉換函數比較

二、學術成就方面，發表國外研討會論文 1 篇

研究論文「Multiple Criteria Decision Making on Damage Assessments of Target Building Array Subjected to Minor and Destructive Earthquakes」，發表於「Proceedings of the 22nd Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering (SEEBUS 2021), Online Conference, Suwon, Korea, October 15」，延伸針對核電廠圍阻體廠房和相關廠房所發展的三種結構系統識別技巧，進行一般結構多重標準決策的健康診斷，提供管制參考。

參、展望

- 一、進行垂直向對水平向譜加速度比值的平均數和標準差之審視，包含與地震規模、斷層型式、震源-工址幾何方位、和工址地盤條件的關係，藉以評估垂直向反應譜型式。
- 二、配合核電廠地震危害度篩選審查作業，尤其在定義風險導向之 GMRS 或 FIRS 時，透過考量地震危害度曲線在年超越頻率 $1E-4$ 至 $1E-5$ 之地震事件，進行地盤反應分析中土層剪力模數剖面、阻尼比剖面非線性行為探討，以及與預估地層轉換函數之影響。利用近年地震量測記錄，配合井下觀測資料，剖析土壤非線性模型在真

實地震事件下，預估與比較各深度之地盤加速度反應歷時，分析垂直地盤反應之特性。

三、藉由 SAP2000 在場址近域建立全或半之有限元素模型，而在遠域之土層(約為基礎寬度 2.5 倍)則使用無限元素，以 SHAKE 得出土層擾動之後的參數，再輸入至 SASSI 以 Direct Method 進行分析，分別考慮核三廠圍阻體、圍阻體本身與鄰近機組之耦合效應、以及在 OBE 或 RLE 下之反應譜是否符合設計標準並進行比較。將優先使用半有限元素進行分析，與設計標準進行比較，再以全模型檢核半模型之準確度。

四、核電廠依據美國核能研究所出版的多樣式應變策略，進行不同超越設計基礎外部事件的災害侵襲下的減災策略評估分析，其中 Appendix H 依據地震強度大小，分成五個分析路徑。接續研究將專注於路徑 5 的分析，深入檢視與研析地表震動反應譜大於兩倍安全停機地震下的耐震分析程序和耐震力提升之可行性，期能協助核能管制單位有效檢視核電廠關鍵結構與設備的多樣式應變策略耐震評估。

110 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 on flooding
and tsunami hazard reassessment for NPP (2021)

(計畫編號：110B014)

蕭士俊¹ 洪李陵² 吳昀達¹ 陳彥龍¹

¹國立成功大學水利及海洋工程學系 ²國立成功大學土木工程學系

在核電廠的海嘯危害度評估中，除了傳統的定值式評估方法之外，機率式的評估方式已逐漸發展成形且受到重視。本研究以建立美國地震型的機率式海嘯危害度分析程序為目的，參考美國 Thio et al. (2010)之計算方法，以核三廠為標的考慮馬尼拉和琉球隱沒帶進行評估技術之建置，藉此釐清核電廠進行地震型機率式海嘯危害度分析(Probabilistic Tsunami Hazard Assessment, PTHA)所需之評估管制技術內涵。另一方面，海底崩塌型海嘯雖是第二大的海嘯源，卻較少有完整研究評估海底崩塌型海嘯之危害度，其中美國核能管制委員會研究報告中亦無提出具體之操作規範可茲參循。為了詳加瞭解海底崩塌型海嘯對於特定保護目標之影響程度，本研究蒐集並彙整既有文獻針對機率式海底崩塌型海嘯之建置方法，並以此建立一套機率式海底山崩型海嘯之分析方法及流程。最後，完成機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA)研究成果 SSHAC-3 SSC 斷層邏輯樹應用於 PTHA 之可行性探討。

In the tsunami hazard assessment of nuclear power plants, the deterministic method was fully developed and used in tsunami forecasting. On the other hand, the probabilistic method was gradually developed in recent

years. This study was aimed to establish a probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) used in the United States. The methodology was based on Thio et al. (2010) and the probabilistic offshore tsunami wave heights around the NPP3 due to the Manila and Ryukyu subduction zones induced tsunami were established based on the PSHA SSHAC-3 SSC report. Statistically, the landslide is the second largest source of tsunami generation. However, studies related to the landslide probabilistic tsunami hazard assessment (LPTHA) are limited. Even the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) only mentioned an overall framework for describing this issue, indicating specific guideline and flowchart on how to conduct the assessment are lacking. This report, therefore, aims to review the methodologies of LPTHA available in the literature and to clarify its applicability when using in Taiwan. Finally, the feasibility of applying the logic tree of PSHA SSHAC-3 SSC (2019) in PTHA for the fault sources was investigated.

壹、計畫目標

日本福島核災事故發生後，USNRC 組成之 NTTF 的建議事項 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. 鑑於美國和日本的核電廠相關管制尚未於機率式海底山崩型海嘯方面有明確的評估流程，研析相關方法及案例。3. 研析 PSHA SSHAC-3 SSC 斷層邏輯樹應用於 PTHA 之可行性。

貳、重要成果

一、說明研發成果之重要貢獻

(一) 研析美國地震型機率式海嘯危害度分析程序

1.PTHA 於偶然不確定性之量化需透過與歷史海嘯事件之模擬分析。

然而，由於台灣現有觀測到之海嘯事件之波高較小，故建議挑選最大海嘯波高需達 10 cm 以上之測站資料。

2.單位海嘯法資料庫之建置需注意其空間解析度造成之誤差，目前建議至少需有 0.25 度*0.25 度之解析度(如圖 1)。

(二) 研析機率式海底山崩型海嘯分析程序。

1.彙整美國及其他國家之海底山崩型海嘯機率式危害度分析(LPTHA)，並嘗試建立可依循之分析流程以供未來操作及參考使用(如圖 2)。

2.LPTHA 之分析中，為了釐清不確定因子對於海底山崩及海嘯之影響，需要調查可能發生源、發生源之地形、地質條件、發生源之歷史事件乃甚至發生源之海底地形變遷等，方得建立適切之機率模型。

(三) 建立國內機率式地震危害度報告(PSHA SSHAC-3 SSC)中的隱沒帶分析成果。

1.建立國內機率式地震危害度報告(PSHA SSHAC-3 SSC)中的斷層震源分析成果用於 PTHA 之可行性評估及方法流程。

2. PSHA SSHAC-3 SSC 斷層震源分為主要斷層震源和其他斷層震源，本研究依斷層所在位置於海域者研判為可能造成海嘯之斷層並進行應用至 PTHA 研析，共有 6 個主要斷層和 11 個其他斷層，以此建置危害度曲線需分別考慮 990 和 110 個海嘯情境。

二、學術成就方面，共發表 1 篇國內會議論文。

陳彥龍、沈煜修、吳漢倫、蕭士俊，2021。以單位海嘯法建置屏東外海機率式海嘯波高之研究。第 43 屆海洋工程研討會論文集(2021 年 11 月)，343-348。

參、展望

基於未來 PTHA 相關審查之需求，擬進行其細部之研析，透過計算流程建立及案例研究之方式進一步建置審查要點。為建立美國近岸廠區的 PTHA 分析技術，故擬以核三廠區為標的進行方法建置研析。另一方面，海底崩移型 PTHA 在認知不確定性方面，缺少明確的評估流程，故擬規劃以核三廠區為標的進行分析計數之建置研究。

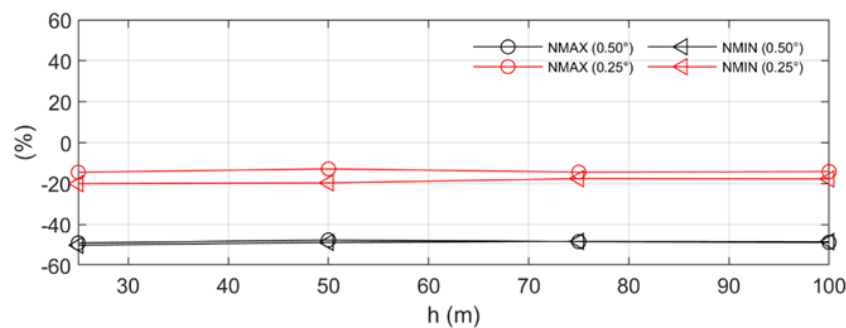


圖 1 兩種不同單位海嘯法解析度於核三廠外海水深 25、50、75 和 100 m 處之水位誤差變化



圖 2 本研究計畫提出之 LPTHA 簡化分析步驟

重要設備主動件監測管理及在除役各階段管制人力資源排程之預警架構 建立研究

Early Warning Framework Establishment with Main Active Equipment
Management and Inspection Resource Estimation on Nuclear Power Plant
Decommissioning Stages
(計畫編號：110B015)

丁鯤

龍華科技大學化工與材料工程系

為確保核能電廠在除役過渡階段留用設備之核能安全，其中主動設備之監測管理是重要的一項指標。由於此類設備已使用相當長的一段時間，會有相當顯著的機會發生故障，進而可能造成電廠冷卻、淨水、通風、電力、偵檢等功能發生異常。本計畫將探討主動設備之管理方法，因核能電廠留用設備其運轉數據仍會持續留存於數據蒐集系統，可以藉由此類數據之分析可了解設備劣化的跡象，進而提早進行維修與歸納其失效原因。若數據顯示並證明設備並無老化/劣化之可能性，電廠亦可減少該設備之例行檢修，減少人力成本及人員劑量。

本計畫亦針對除役各階段管制人力資源排程進行探討，此部分將參考國際上具有核能電廠除役經驗之管制單位，其在除役電廠管制上所耗費之人力及工作內容，做為我國管制單位未來人力訓練、規劃之參考，資料包含美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)所發布之 Inspection Manual Chapter 2561 Decommissioning Power Reactor Inspection Program 及其所指定之相關 IP 程序書。人力資源規劃可能受到主動設備臨時運轉故障之影響，因此前項主動設備運轉狀況之監測預警

或遠端監視亦有助於管制人力資源的調配。另外，管制人員的知識傳承、交流及培訓亦是漫長除役計畫的重要工作之一，本計畫亦將研究成果及相關資料於除役研究知識管理平台中匯集、建置。

In order to ensure the nuclear safety during the nuclear decommissioning transitional phase with the retaining equipment, the monitoring and management of active equipment is an important indicator. The service periods of the kinds of active equipment are almost approached to 40 years. There may be a considerable events related to cooling, water purification, ventilation, electricity, detection and others to cause the abnormality in power plant. This project will explore the data management of retaining active equipment's operation data in the existed data acquisition system. The trends of equipment deterioration can be estimated, and the maintenance and root cause analysis can be carried out in advance. If data identify the possibility of equipment of aging/deterioration to be very low, the power plant can also reduce the routine maintenance of the equipment, both the labor costs and personnel dosage are simultaneously reduced

This project also discusses the scheduling of human resources for control at each stage of decommissioning. The manpower and work content of the experienced regulation in the world will be referenced herein for Taiwan AEC. The Inspection Manual Chapter 2561 Decommissioning Power Reactor Inspection Program issued by the US Nuclear Regulatory Commission (NRC) and related IP procedures specified are major reference. Human resource planning may be affected by the temporary malfunction of active equipment, so the monitoring and early warning or remote monitoring of the operating status of active equipment can also control the deployment of human resources. In addition, the knowledge transfer, exchange and training of regulatory staff is also one of the important tasks of the long-term decommissioning plan. This

plan also collects and builds the research results and related materials in the decommissioning research knowledge management platform.

壹、計畫目標

參考國際核能電廠重要設備主動件監測管理方法或案例，目標以數據建模方式提升主動設備異常發現與預期異常發展的能力，提高設備安全性及可靠度，並可逐步優化主動設備異常之判斷與診斷能力。依國內核能電廠除役計畫進程及參考國外文獻、法規與除役經驗，並配合除役各階段可能之主、被動設備異常狀況，評估除役各階段管制/視察人力資源排程。將上述研究結果及相關內容建置於“除役研究知識管理平台”，使研究結果具備知識交流及傳承之功能與目的，並方便管制單位及相關研究人員了解研究成果之相關技術背景。

貳、重要成果

一、主動件監測管理

在核能發電領域中，線上監測(On-Line Monitoring)目的包含在設施運行時評估組件、設備和系統的健康狀況，如電廠之主、被動組件的自動化監測方法。在主動件診斷與預測部分，其概分為三種類型：(1)理論模型 (Model-Driven)，(2)數據模型 (Data-Based)，(3)混合方法 (Hybrid)，在實務上混合方法較能互補理論與數據模型之優缺點，在本研究中，採用了偏最小平方法(Partial Least Squares, PLS)及主成分分析法(Principal Components Analysis, PCA)作為預測及診斷的方式，並評估其對電廠重要主動設備之適用性。

二、管制人力資源排程

IMC-2561 定義的除役階段類型，適用於台灣為 Cat. 1, 2, 3, 8 階段

類型，依序為：除役過渡階段、燃料存放燃料池的積極除役、燃料池無燃料的積極除役、進行最終調查，燃料池無燃料。在 IMC-2561 附錄 A II. 中，已對各階段類型之 IP 需執行時數提出估計，在 Cat. 1 估計約 446 hrs(不含酌情視察)，其他 Cat. 2, 3, 8 分別為 445, 344, 22 hrs.。各核心程序書所需的視察時數，雖然隨著除役的進展逐步下降，但在 IP 83801 “反應器停機後之最終調查” 視察程序，則從 20 hrs(Cat. 1)升至 78 hrs(Cat. 2, 3)。從上述資料，以換算每年平均執行時數的方式計算，一座兩機組之 BWR 廠在過渡階段前期每年所需要的視察時數平均在 2,644.6~3,114.5 人時。

三、PIRT 於除役綜合性研究之應用

本研究以 NUREG-1738 報告所提及之行業除役承諾(Industry Decommissioning Commitments, IDC)和 NRC 官員除役假設(Staff Decommissioning Assumptions, SDA)為例，展現 PIRT 於除役綜合性研究之應用結果。綜合本計畫之評估結果及 SDA、IDC 要求內容，再基於計畫研究人員對國內現況的了解，計畫研究人員評估 SDA、IDC 要求在 PIRT 分析中，其重要度前 4 項依序為：(11)緊急應變方案、(2)除役規劃、(4)意外安全分析、(8)人員訓練。前 4 項知識度依序為(4)意外安全分析、(11)緊急應變方案、(2)除役規劃、(8)人員訓練。評分結果詳表 1，PIRT 矩陣表示如圖 1。

參、展望

核電廠除役留用設備預估在除役期間再運轉十數年，在除役經費人力縮減下，設備維護資源將比運轉期間更為拮据。電廠設備維護自動化、早期預警系統雖然主要為營運電廠所設計，但該系統目的亦是為了能有效運用營運電廠人力，並節省維護費用所設計，與除役電廠現有的狀況相

當接近。本計畫在此階段主要了解核電廠數據蒐集、紀錄的情況，及透過國外業界經驗了解適用的系統，未來期望能透過量化方式，了解電廠主動設備不可避免之劣化趨勢。

表 1、SDA、IDC 於 PIRT 評分結果

研究主題	重要度	知識度	綜合評分
2. 除役規劃	2.3	1.5	4.03
4. 意外安全分析	2.1	2.5	4.81
7. 輻射劑量與防護	0.6	0.2	0.86
8. 人員訓練	1	2.0	3.1
9. 核子保防物料管理	0.5	0.3	0.85
11. 緊急應變方案	2.5	1.7	4.45

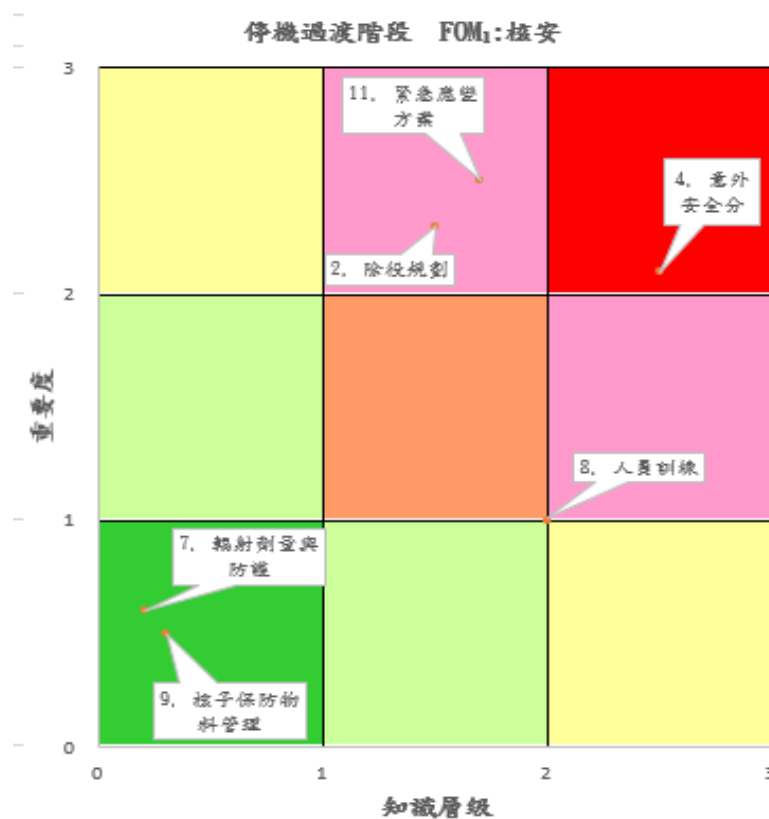


圖 1 以 PIRT 矩陣表現 SDA、IDC 要求在 PIRT 之分析結果

輻射應用

甘胺酸甲基轉移酶剔除鼠作為肝病診斷轉譯研究之動物模式參數建置..	1
第二型鈉－葡萄糖轉運蛋白抑制劑對於動脈粥狀硬化相關併發症之療效 評估	6
鳳梨酵素調節膽固醇代謝和抑制粥狀動脈硬化之分子機轉.....	9
應用 AI 計算前驅物與標準品溶解度研究案	13
國際原子能科研機構發展趨勢及技術布局研究	18

甘胺酸甲基轉移酶剔除鼠作為肝病診斷轉譯研究之動物模式參數建置

Utilization of glycine N-methyltransferase knockout mice as translation research animal model of liver disease diagnosis to develop the diagnosis parameters

(計畫編號：110A004)

林峻楷¹、楊明慧²、田育彰¹

¹高雄醫學大學 ²高雄榮民總醫院

肝癌的死亡率為國人癌症的第二名，本研究建立肝細胞癌之小動物模式，利用甘胺酸氮甲基轉移酶基因剔除小鼠產生自發性肝癌，由於肝癌的進程會影響殘餘肝功能，因此在本研究將在腫瘤形成的不同時期以目前臨床診斷肝癌技術建置相關診斷資訊，並評估肝受體造影劑是否能作為檢測不同肝癌分期的殘存肝功能之診斷方法，進而完成肝癌診斷參數、腫瘤大小與發病時間等臨床表徵相關性之建立，定義不同肝癌分期的發病時間、肝癌標誌表現量和其肝功能參數的閾值，未來將有助於臨床肝癌的期數與殘餘肝功能的診斷。

The mortality rate of liver cancer is the second highest among all in Taiwan. In this study, an animal model of hepatocellular carcinoma was established. Spontaneous liver cancer was generated by knocking out the glycine N-methyltransferase gene in mice. Since the progress of liver cancer affects residual liver function, the current clinical diagnostic markers of liver cancer will be adapted to construct relevant diagnostic information at different stages of tumor formation as well as evaluating the liver receptor contrast agent as a diagnostic method to detect the residual liver function among different liver

cancer stages. This study will complete the establishment of the correlation between liver cancer diagnostic parameters and clinical features such as tumor size and onset time. Defining the onset time of different liver cancer stages, the expression of liver cancer markers and the threshold of its liver function parameters will assist the diagnosis of clinical liver cancer stages and residual liver function in the future.

壹、計畫目標

利用甘胺酸氮甲基轉移酶基因剔除小鼠會自發性肝癌的特性，尋找反映人類肝臟癌化過程中各階段的變化，並能表現出腫瘤形成的生化數值，隨後以目前評估不同肝癌分期和肝功能的技術，建置此動物模式在不同肝癌分期之殘餘肝功能參數，作為肝受體造影劑進入臨床試驗的前期準備。

貳、重要成果

本實驗之腫瘤標誌物(alpha-fetoprotein、alpha-fetoprotein-L3 & des-carboxy prothrombin)數據顯示，4~7 個月齡大的 GNMT 基因剔除小鼠應尚未形成腫瘤，而肝功能指數(GPT、GOT、bilirubin & albumin)、H&E 染色和纖維化染色可以觀察到發炎與纖維化等現象。超音波影像中則有脂肪肝、發炎、纖維化和腫瘤生成，但並未觀察到肝硬化跡象。根據掃描時所發現，腫瘤發生率為 56.25 % (9/16)，且腫瘤幾乎都在生長在肝右葉，公比母為 5:4，平均月齡為約為 11 個月。

參、展望

由於4~7月齡大的GNMT基因剔除小鼠尚未生成腫瘤，位於腫瘤剛開始要生長的階段，肝癌大多在早期或中期階段，標誌物對早期肝癌不敏感，因此無明顯上升的跡象。雖然在10個月齡大前就有掃描到結節，但形成初期仍難以判斷是否為肝腫瘤，未來能考慮以超過10月齡大之雌性小鼠作為實驗對象(腫瘤發生率較雄鼠高)。

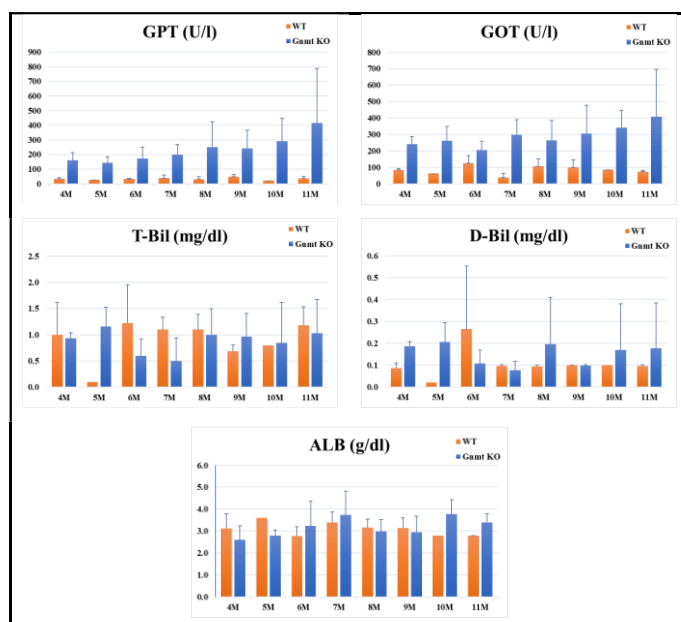


圖 1、五種肝功能指數：GNMT-/-小鼠 GPT 值均超過高標，且有明顯隨著月齡上升的趨勢。4~7 個月的 GOT 落在正常值範圍但仍偏高，而 8~11 個月則有隨著月齡上升的趨勢。GNMT-/-小鼠的 T-BIL 僅些許超標或正常，D-BIL 和 ALB 均在正常範圍內。

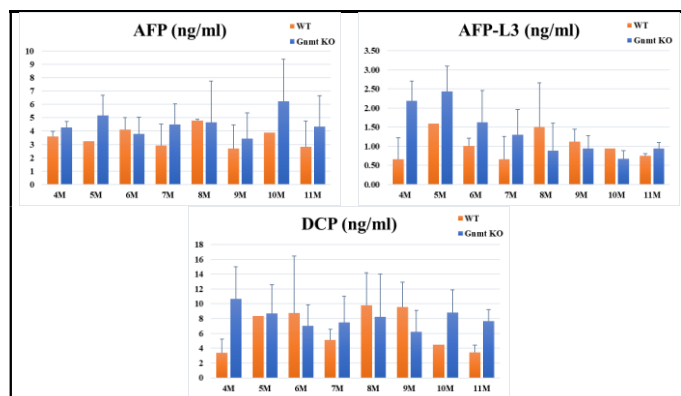


圖 2、三種肝癌標誌物：GNMT^{-/-}小鼠中 AFP 並不與月齡呈正相關，這可能與 AFP 的非特異性變化如發炎或腫瘤惡性程度不同有關；因本次實驗 AFP 值相當低，故 AFP-L3 與 AFP 的比值暫時無法提供有效判斷；DCP 均低於臨界值。

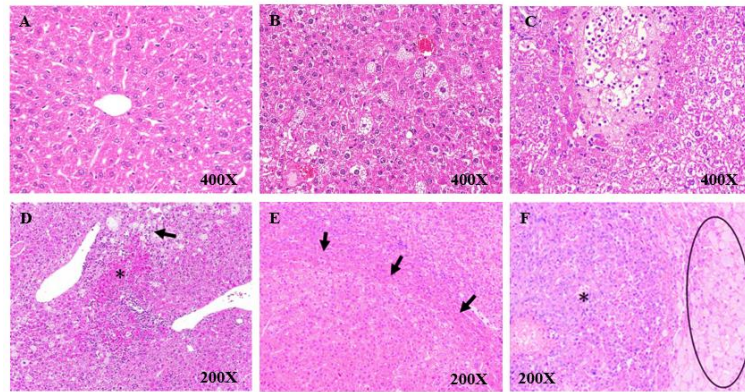


圖 3、H&E 染色：A.對照組 WT 小鼠。B、C.無腫瘤 GNMT KO 小鼠中類似 NAFLD_NAFL 階段。D.無腫瘤的 GNMT KO 小鼠中類似 NAFLD_NASH 階段。E.GNMT KO 小鼠之肝腺瘤。F.GNMT KO 小鼠之 HCC(*), 腫瘤旁有脂肪肝炎(圈圈處)。

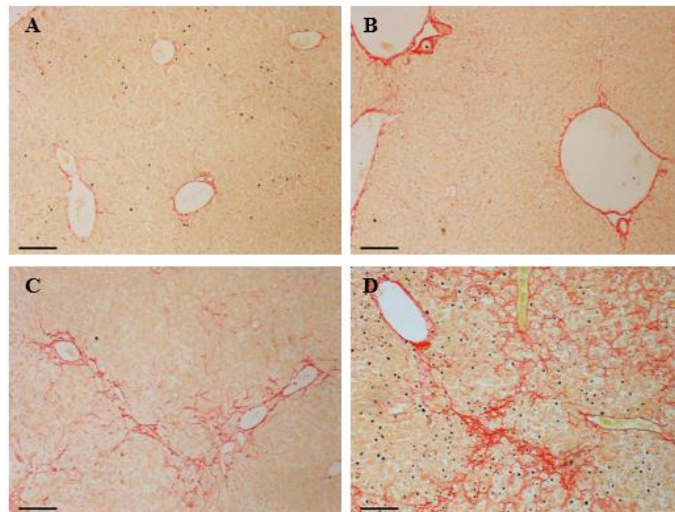


圖 4、纖維化染色：A.相對健康的 WT 小鼠作為對照組，肝組織沒有觀察到纖維化現象(F0)。B.無腫瘤 GNMT KO 小鼠肝組織輕度纖維化(F1)。C.較大月齡的無腫瘤 GNMT KO 小鼠肝組織中度纖維化(F2)。D.有腫瘤 GNMT KO 小鼠肝組織重度纖維化(F3)，但無觀察到肝硬化(F4)。bar scale

= 100 μ m。

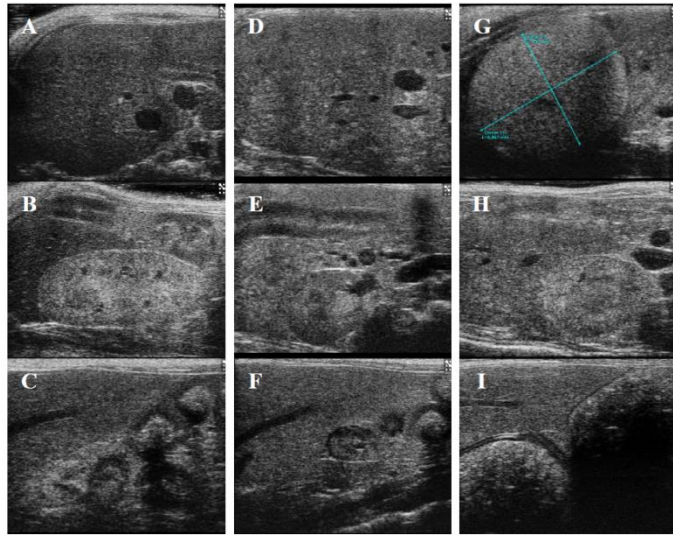


圖 5、超音波影像：A~C.WT 小鼠肝臟組織在超音波下大致呈現回音均勻。D~F.無腫瘤 GNMT KO 小鼠的肝臟質地大致均勻但粗糙，細小均勻的高回音且肝臟回聲接近腎臟，表示有脂肪肝現象，甚至發炎或纖維化。G~I.GNMT KO 小鼠長出腫瘤，HCC 邊緣可看到較明顯的低迴音區，寬度較薄較整齊，內部為混合或高回音。但並未觀察到肝硬化跡象，跳過肝癌三部曲的肝硬化直接生成腫瘤，類似 NAFLD 的特徵。

第二型鈉-葡萄糖轉運蛋白抑制劑對於動脈粥狀硬化相關併發症之療效 評估

Impact of sodium glucose cotransporter 2 inhibitors on atherosclerosis and its complications: integrating FDG and CXCR4-targeted nuclear imaging
(計畫編號：110B023)

柯冠吟

台大癌醫中心分院核子醫學部

第二型鈉-葡萄糖轉運蛋白抑制劑是一種降血糖的藥物，在近幾年的臨床和動物實驗研究顯示，不論在是否有糖尿病的患者皆有保護心血管的功效。這項計畫的目的為結合核子醫學分子影像探究第二型鈉-葡萄糖轉運蛋白抑制劑在粥狀動脈硬化疾病之療效。實驗動物方面使用 APOE 剔除小鼠以高脂飼料餵養，之後進行第二型鈉-葡萄糖轉運蛋白抑制劑的給藥治療，結合核醫分子影像、超音波及血液檢查探究藥物在粥狀動脈病灶、發炎途徑、心臟代謝及功能方面的改變。實驗結果發現第二型鈉-葡萄糖轉運蛋白抑制劑能減緩動脈粥狀硬化、降低發炎指數、改善心臟葡萄糖代謝及心臟舒張功能，並且透過此計畫可得知核子醫學正子影像為有發展潛能具應用價值的工具，可以非侵入性的方式評估疾病嚴重度及藥物的心血管保護療效。

Sodium glucose cotransporter 2 inhibitors (SGLT2i) is a type of glucose-lowering agent. Growing recent research revealed of its cardioprotective effect both in diabetes and non-diabetes. In this project, we aim to investigate the SGLT2i beneficial effect in atherosclerosis and its

associated complications. APOE knockout mice fed with high fat diet was used and further divided into SGLT2i treatment, sham and blank control groups. Nuclear medicine imaging (FDG and CXCR4), blood sampling and echocardiography were performed to study the SGLT2i effects on atherosclerosis, inflammatory process, cardiac metabolism, and cardiac function in Apoe^{-/-} mice model. The main findings of this project were that SGLT2i might attenuate the atherosclerosis as well as inflammation and improve cardiac glucose metabolism and diastolic function. Besides, PET/CT images might be a valuable tool for non-invasively evaluating the disease severity and therapeutic effect.

壹、計畫目標

Recently, C-X-C motif chemokine receptor 4 (CXCR-4) directed nuclear medicine imaging introduced the chance for non-invasive, in-vivo visualization of CXCR4 expression. CXCR4 is expressed on several cell types, particularly rich on macrophage and T cells. And some pilot studies examined the capability of CXCR4 PET imaging for characterize atherosclerotic lesions and myocardial injury. In this project, we aimed to incorporate CXCR-4 PET and FDG PET imaging to investigate the cardiovascular protective effect of SGLT2i in Apoe^{-/-} mice model.

貳、重要成果

We found that Apoe^{-/-} mice gradually gained weight since 8 week-old age and were heavier than healthy control mice. With regard to circulating substance levels, we observed that Apoe^{-/-} mice gradually developed hyperlipidemia and insulin resistance. In cardiac glucose utilization, there was a significant metabolic shift between Apoe^{-/-} mice and C57BL/6J mice. At the experimental endpoint, there was no significant change in cardiac systolic

function. However, diastolic dysfunction was observed in Apoe^{-/-} mice fed with high fat diet. Empagliflozin was administered from 16-week-old through 24-week-old and could significantly improve insulin resistance. In addition, cardiac glucose metabolism was depressed in SGLT2 administrated Apoe^{-/-} mice. Target to background ratios derived from CXCR4 PET/CT images pointed out that decreased tracer activity of aortic root lesion after SGLT2 inhibitor treatment (Figure 1). Diastolic function was also mildly improved after empagliflozin treatment.

一、說明研發成果之重要貢獻

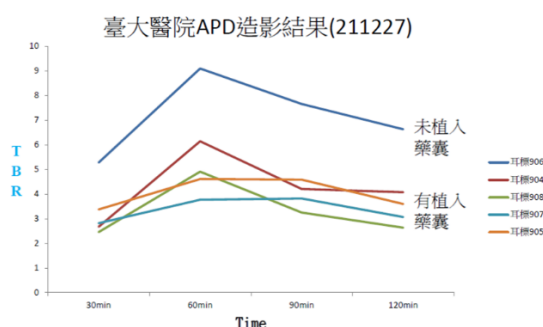
核醫正子掃描為良好的非侵入性影像工具，藉此工具協助臨床了解疾病的嚴重度、進展及評估藥物的治療成效。

二、學術成就方面，發表期刊論文一篇。

參、展望

SGLT2 inhibitor might attenuate atherosclerosis and provide the cardiovascular benefit in Apoe^{-/-} mice model. Additionally, PET/CT imaging could be a valuable tool for non-invasively evaluating the disease severity and treatment effect. In the future, we hope that this nuclear medicine imaging might be incorporated into clinical practice, guide the personalized treatment and become an effective tool for precision medicine.

Figure 1 Target to background ratios of CXCR4 images between treatment and control groups



鳳梨酵素調節膽固醇代謝和抑制粥狀動脈硬化之分子機轉

Molecular mechanism of bromelain on cholesterol metabolism and atherosclerosis

(計畫編號：110B024)

李宗玄¹ 夏建忠²

¹ 台灣大學醫學院生理學科暨研究所 ² 核能研究所

鳳梨酵素 bromelain 於臨床上已被用於緩解手術後及外傷後腫脹、副鼻腔炎等發炎症狀；其於脂質代謝異常之疾病的療效並不清楚。本實驗室近期的研究發現鳳梨酵素 bromelain 有促進脂質分解來達到減緩脂肪肝的療效；根據這些發現，我們將更進一步利用高血脂 apolipoprotein E knockout (apoE KO) mice 來測試鳳梨酵素促脂質分解之特性可否可以改善高血脂和抑制粥狀動脈硬化之形成。在此研究計畫中，我們於 apoE KO mice 16 週齡時餵食 bromelain 4 週的時間，之後犧牲小鼠，抽取血液分離血漿，進行血脂肪分析與發炎細胞激素之分析，心臟主動脈瓣將進行粥狀動脈硬化病變分析血管病變大小與組織免疫染色，血管將抽取蛋白質以 western blot analysis 分析血管壁與膽固醇代謝相關的蛋白質表達。此外，我們利用細胞培養模式來進行 bromelain 抑制粥狀動脈硬化病變進程之分子機轉探討。我們的結果顯示：鳳梨酵素具有降血脂和抑制粥狀動脈硬化病變的效果。此外；鳳梨酵素降低粥狀動脈硬化病變中的發炎反應、增加促進膽固醇的清除作用，並減少肝臟中膽固醇和三酸甘油脂的堆積。核子醫學影像的結果亦支持上述之觀察；根據以上動物實驗的結果，我們得知鳳梨酵素可藉由降血脂和抗發炎來達到抑制粥狀動脈硬化病程發展的效果。

Bromelain is clinically used to relieve swelling, paranasal inflammation and other inflammatory symptoms after surgery and trauma; however, its efficacy in the deregulation of lipid metabolism and atherosclerosis is not clear. Recent studies in our laboratory have found that bromelain can promote lipid breakdown to reduce fatty liver. Based on these findings, we will further use hyperlipidemia apolipoprotein E knockout (apoE KO) mice to investigate the effect of bromelain in lipid metabolism and the progression of atherosclerosis. In this research project, apoE KO mice at 16 weeks of age will be fed with bromelain for 4 weeks, then the lipid profile, expression of cytokines, lipid metabolism-related genes and histopathology of atherosclerosis will be analyzed in these mice. Our results show that bromelain has the effect of lowering blood lipids and inhibiting atherosclerotic lesions. In addition; bromelain reduces inflammation in atherosclerotic lesions, increases the promotion of cholesterol clearance, and reduces the accumulation of cholesterol and triglycerides in the liver. Finally, the results of [68Ga]-APD imaging further support the anti-atherosclerotic effect of bromelain in apoE KO mice. Collectively, the findings of this study suggest that bromelain can be a potent reagent for the treatment of atherosclerosis and related lipid disorders.

壹、計畫目標

Given the impact of bromelain in medicine, it is our intension to propose that bromelain has atheroprotective effect by regulating the lipid metabolism and inflammatory response. In order to clarify the effect and underlying mechanism(s) of bromelain in atherosclerosis; we will adopt cell and animal models to examine the related signaling pathways and to explore molecular mechanisms regulated by bromelain. We first investigated the effect of bromelain on the progression of atherosclerosis by using hyperlipidemia

apolipoprotein E-deficient (apoE KO) mice; and second, we determined the effect of bromelain on the inflammatory response and hepatic lipid metabolism. Our third aim was to explore the effect of bromelain on atherosclerosis by nuclear medicine imaging. Here, we provide new information for understanding the beneficial effect of bromelain on the progression of atherosclerosis.

貳、重要成果

一、研究結果

Our results suggest that bromelain alleviates the hyperlipidemia and deregulates cholesterol metabolism and inflammation in aortas, leading to the retardation of atherosclerosis by histological and [^{68}Ga]-APD analysis.

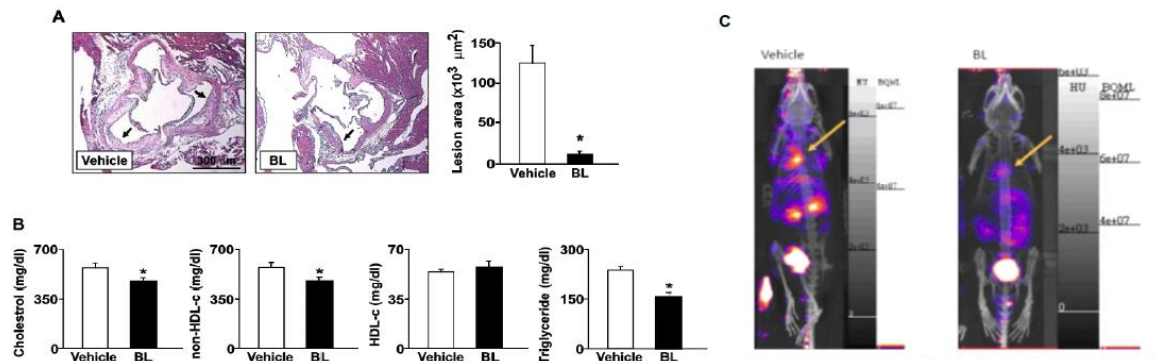


Figure 1. Bromelain attenuates hyperlipidemia and atherosclerosis in apoE KO mice. Male $\text{apoE}^{-/-}$ at 16-week-old were orally administered with bromelain (BL, 20 $\mu\text{g/kg/day}$) or vehicle (PBS) for 4 weeks. (A) Atherosclerotic lesions at aortic roots were stained with H&E. Scale bar = 300 μm . (B) Plasma levels of total cholesterol, non-high-density lipoprotein cholesterol (non-HDL-c), HDL cholesterol (HDL-c), and triglycerides. Data are mean $\pm$ SEM from 7 mice. * $P < 0.05$ vs. vehicle-treated $\text{apoE}^{-/-}$ mice. (C) The TBR of [^{68}Ga]-APD in vehicle-treated and bromelain-treated apoE KO mice. Data are mean $\pm$ SEM from 3 mice.

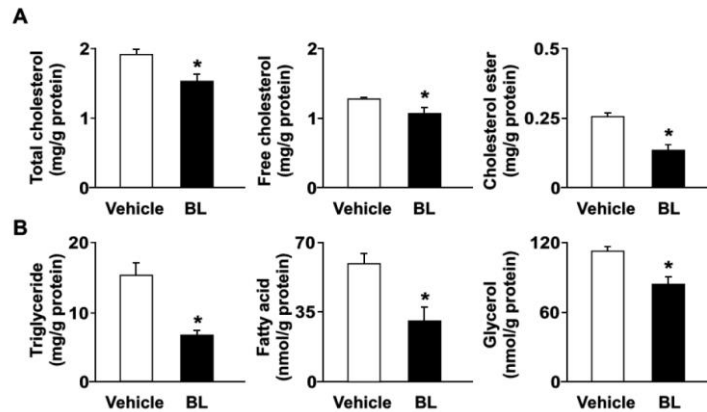


Figure 2. Bromelain reduces the levels of lipids in the livers of apoE KO mice. Male *apoe*^{-/-} at 16-week-old were orally administered with bromelain (BL, 20μg/kg/day) or vehicle (PBS) for 4 weeks. (A) The levels of cholesterol, cholesteryl ester and free cholesterol in the liver of apoE KO mice. (B) The levels of triglycerides, fatty acids and glycerol in the liver of apoE KO mice. Data are mean ± SEM from 7 mice. **P* < 0.05 vs. vehicle-treated *apoe*^{-/-} mice.

二、學術成就方面，共發表國內外及期刊論文

目前已發表研討會論文 1 篇，期刊論文撰寫中。

參、展望

鳳梨酵素 bromelain 於臨床上已知能用於緩解外科手術腫脹等發炎症狀；這個研究的發現更支持鳳梨酵素可應用於脂質代謝異常與發炎相關之疾病的治療。鳳梨酵素在其他老年疾病如：心血管疾病及神經退化性疾病的療效並不清楚，未來我們將朝此方向繼續努力。我們的研究成果也有利於未來推動精緻農業的發展，讓種植鳳梨的果農有更好的經濟效益。

應用 AI 計算前驅物與標準品溶解度研究案

Predicted Solubility of Precursor and Standard Material by Artificial

Intellegence

(計畫編號：110B020)

劉昕^{1,2} 李政緯¹ 卓東昇¹

¹ 分子智藥股份有限公司 ² 台灣大學生醫電子與資訊學研究所

107 年 Nature 刊登 Segler 等人建立了一種以蒙地卡羅搜尋樹為主幹，搭配擴展政策與過濾網路的類神經網路模型，3N-MCTs，在逆合成研究上具有良好的表現，但該文之訓練資料集 (training dataset) 採用 Reaxys，數量級龐大且遠大於可取得的公開資料集，因此本研究討論在僅使用 10% 的數據下，實作該演算法並確立實作細節，並透過圖卷積類神經網路模型 (Graph Convolutional Neural Network, GCN) 置換原本的 ECFP4 (Extended Connectivity Fingerprint) 類神經網路模型，建構出以 GCN 為基底的 GCN-MCTs，增進小資料級在 MCTs 上運作的可行性。我們透過 rollout policy network 的模型實作，發現 GCN 模型的表現較 ECFP4 類神經網路模型優異。在以 GCN 模型取代該論文其他的 ECFP4 類神經網路模型後，所建構出的 GCN-MCTs，也成功規劃出 FEONM、ECD、S-Bz-MAG₃、JNJ311 及其前驅物等 6 個分子的化學逆合成途徑，確立了小資料集在 GCN-MCTs 的運作能力。

In the article “Planning chemical syntheses with deep neural networks and symbolic AI, Nature, 2018”, the researchers established 3N-MCTs, which is based on Monte Carlo search tree, with expansion policy, rollout policy, and in-

scope filter neural network. It has good performance in retrosynthesis planning. However, the MCTs work was demonstrated with a very large non-public available dataset as the training data, making it challenging to adopt the method and apply it. Also, the MCTs published do not work well in the smaller datasets. In this work, we created an algorithm with only 10% of the original datasets by replace ECFP4 (Extended Connectivity Fingerprint) neural network with a modified version of GCN (graph convolutional neural network) and explores the details of its actual implementation. The results showed better performance from the new algorithm using the GCN model than the ECFP4 neural network in the original MCTs with fewer iterations. It also successfully planned the chemical chemistry of 6 molecules including FEONM, ECD, S-Bz-MAG₃, JNJ311 and their precursors. The successful implementation of similar MCTs with modified GCN on more minor data set makes the AI-guided retrosynthetic planning of small datasets more feasible and practical.

壹、計畫目標

逆合成分析是用於規劃有機分子結構合成的技術。傳統上，由化學研究人員的直覺與經驗從既有的反應中優先選擇出最有可能的合成方式，並從中進行評估。然而即便對於最優秀的化學家來說，預測哪種分子能夠能選用哪種特定的合成方式，也充滿了挑戰性。

在 107 年的 Nature 上刊載了一篇探討逆合成的 AI 系統 3N-MCTs，該系統使用深度類神經網路模型配合蒙地卡羅搜尋樹(Monte Carlo tree search, MCTS)，使用化學反應資料庫與基本分子資料庫後，能輸出逆合成的方案建議，並具備一定程度的準確度。

由於原文受限於篇幅未提供可用以完全再現的補充資料，且原文中使用之化學反應資料庫並非公開可取得之資料，因此於再現性實驗時，需探討其可行性與效能，問題如下：

1. 可蒐集的公開化學反應資料庫僅約有原文 10%數量。
2. 資料量不足下，原論文的三個神經網路模型是否能維持相同的表現，或無法運行。

因此本研究將對 3N-MCTs 的類神經網路模型進行替換，以 GCN 模型取代原文的 ECPF4 模型 (後稱為 GCN-MCTs)，確認其可行性與效能，並使用 GCN-MCTs 搜尋 FEONM、ECD、S-Bz-MAG₃、JNJ311 及其前驅物等 6 個分子的化學逆合成途徑設計。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

- (一) 將 3N-MCTs 逆合成規劃演算法之 ECFP4 類神經網路模型成功替換為 GCN 版本，並在相同數量的訓練資料集上超過 ECFP4 版本的性能(表 1)。
- (二) 在資料量僅有 107 年 Singer 等人發表之原文的 10%下，類神經網路仍具有一定表現(表 2、表 3、表 4)，並能對 FEONM、ECD、S-Bz-MAG₃、JNJ311 及其前驅物等 6 個分子進行逆合成規劃，並具有相當合理性 (範例於圖 1)。

二、學術成就

投稿 ASC 2022 fall(美國計算化學協會 2022 年秋季)獲選，將於 11 年 8 月底於芝加哥展出，並於展出後投稿 ASC 期刊。

參、展望

於 3N-MCTS 再現性試驗中，確認其理論在較小的化學反應資料庫仍具備可行性，惟在資料集顯著少於 3N-MCTS 使用之 Reaxys 資料庫的情形下，在 rollout policy network 上難以取得 3N-MCTS 的模型準確度。因

此若欲提升該模型之效能與準確率方法可就兩方面著手：(1) 模型架構設計與 (2)資料集擴增。

以 GCN 方法置換 3N-MCT 的 ECFP4 類神經網路，GCN-MCTs，在資料集不足的情況下仍具有相當的表現，而透過 GCN-MCTs 搜尋並提供的 FEONM、ECD、S-Bz-MAG₃、JNJ311 等 6 個分子的化學逆合成途徑設計，後續將可以實驗驗證，並增加化學反應資料庫數量以提升模型表現。

表 1、同資料集採用 GCN 與 ECFP4 所建立的類神經網路準確度比較

Rollout policy network	Accuracy	top10Acc	top50Acc
ECFP4	0.217	0.413	0.549
GCN	0.273	0.588	0.74

表 2、GCN-MCTs 與 3N-MCTs 在 rollout policy network 的準確度比較

Rollout policy network	#rules	Accuracy	top10Acc	top50Acc
3N-MCTs	17,134	0.501	0.891	0.964
GCN-MCTs	3,365	0.273	0.588	0.74

表 3、GCN-MCTs 與 3N-MCTs 在 expansion policy network 的準確度比較

Expansion policy network	#rules	Accuracy	top10Acc	top50Acc
3N-MCTs	301,671	0.31	0.63	0.72
GCN-MCTs	31,773	0.36	0.57	0.63

表 4、GCN-MCTs 與 3N-MCTs 方法在 in-scope filter 的準確度比較

In-scope filter	AOC-ROC	PR-ROC
3N-MCTs	0.99	0.94
GCN-MCTs	0.86	0.9

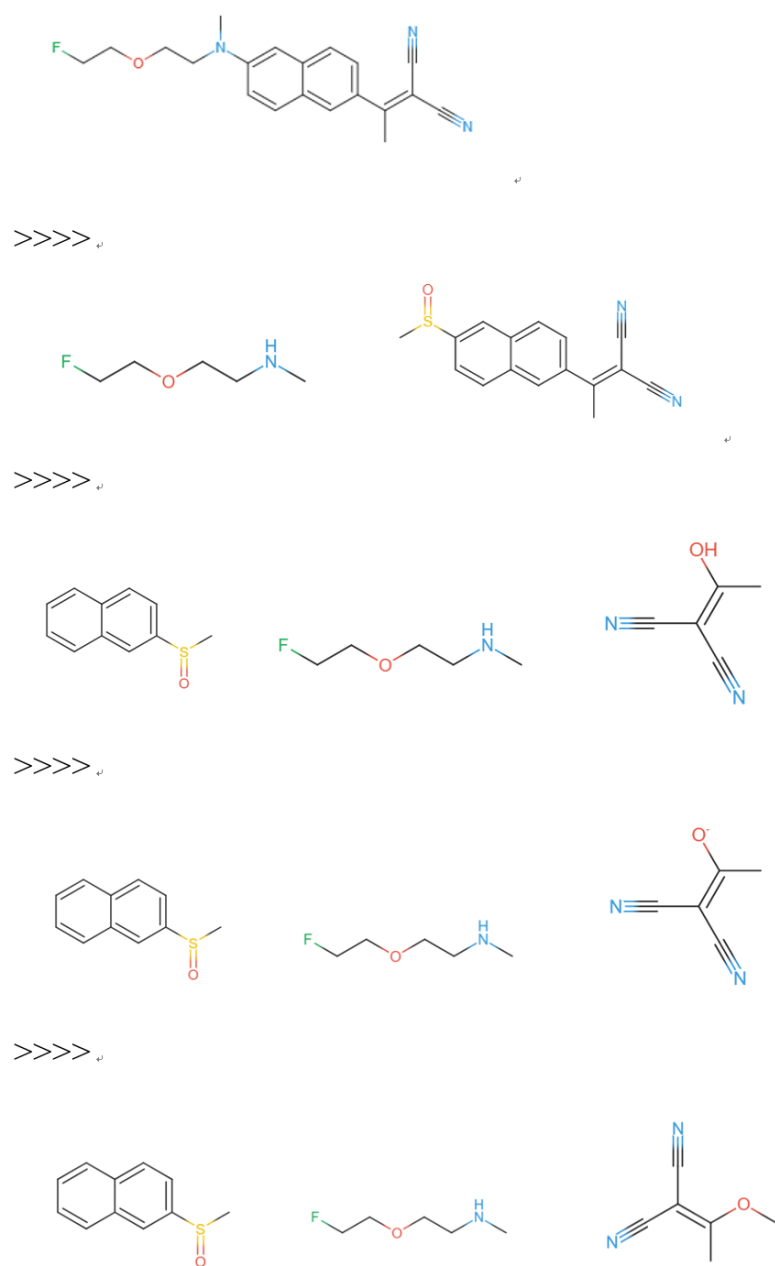


圖 1、GCN-MCTs 規劃之 FEOMN 標準品逆合成路徑

國際原子能科研機構發展趨勢及技術布局研究

Atomic technical layout planning based on the developments of atomic civil applications and related organization regenerations in the advanced nuclear countries

(計畫編號：計畫編號：110B002)

蔡璞

國立虎尾科技大學

本計畫首先探索國際先進國家之原子能科研組織或國家實驗室的任務、目的、願景、技術、關鍵科研基礎設施、與運作模式等重要資訊，進而分析其核心技術及研究能量與佈局；探討的機構主要以日本QST、JAEA、KEK為主。

其次，則針對三個原子能科技民生應用的主題深入探討，包括：研製放射性核種的粒子加速器、下世代半導體微影設備、以及太空游離輻射環境模擬試驗設備等，以供參考。

This research first explores the mission, purpose, vision, core technology, key scientific research facilities, and operation modal of the atomic technology research organizations or national laboratories of the world advanced nuclear energy country. The institutions discussed mainly focus on Japanese QST, JAEA, and KEK as references.

Finally, three topics of civil application of atomic energy technology are discussed in depth, including: particle accelerators for radionuclide manufacturing, next-generation semiconductor lithography equipment, and space radiation environment ground simulation test equipment, etc.

壹、計畫目標

本計畫的目的為：規劃研蒐國際原子能科研組織或國家實驗室之技術發展經驗及關鍵科研基礎設施資訊，進而了解國際原子能科研組織或國家實驗室的相關核心技術及研究能量，可作為我國未來原子能科學發展政策推動及國際交流協議簽署之參考，並協助原子能委員會擬定原子能民生應用科技發展策略及原子能關鍵科研基礎設施建置與經營的策略。

貳、重要成果

一、日本原子能科研機構

日本主要的原子能科技研究機構分別是：國立科研行政法人原子能研究開發機構(簡稱：JAEA)與國立研究開發法人量子科學技術研究開發機構(簡稱：QST)，兩者皆隸屬於文部科學省；以及高能加速器研究機構(簡稱：KEK)，隸屬於日本大學共同利用機關法人，為高能物理學與加速器科學的綜合研究機構。

就分工而言，JAEA為日本唯一的核能綜合性研究開發機構，專注於核能領域的相關研究；JAEA利用核能科學技術期能最大程度地發揮核能的潛力，並汲取福島第一核電站事故的經驗教訓，重新認識核能的安全價值，實現核能創新；QST則專注於原子能科技的基礎研究與民生用途，包括：中子科學、同步輻射、生命科學、醫療、半導體製程、能源、環境與水資源、糧食與農業、能源、以及工業應用等領域，同時核融合的相關國際合作亦屬於QST的業務範圍；KEK則為高能物理學與加速器科學的綜合研究機構，提供日本大學相關領域基礎研究的共用設施。

經研究結果，可總結日本原子能科研機構的特點，整理如下：

(一) 三家科研機構皆經過多次改組：其意義顯示：1. 日本核研究活

動在尋找最佳的組織運作與分工方式；2. 新的議題與挑戰不斷出現，例如：311 核災事件後的核安、核災動員與反應、核暴露醫學、氫能源...等等；

(二) 重視基礎研究：包括：核物理、高能物理、基本粒子、核融合...等等；

(三) 持續發展核電，但更重視安全；

(四) 重視長期發展：三個家機構皆訂有明確的技術地圖(technology roadmap)、中長期發展計畫、或設施更新計畫等；

(五) 重視組織經營管理：皆訂有明確的績效指標與管理績效的提升目標；

(六) 參與國際合作與人才培育；

(七) 自籌經費佔比仍小，政府大力挹注經費：三家機構的廣義自籌經費僅佔總經費的 5%~12%，其他的運作經費皆有賴政府。

二、製備放射性核種的粒子加速器

工業與醫療需要半衰期短的放射性核種，然這種短半衰期的放射性核種需經人為的方式生產，常見的生產方式分別是反應爐、加速器，以及發生器；世界上用於同位素核種生產的加速器主要是迴旋加速器，其中80%用於醫療健康與生命科學領域，學者將迴旋加速器依能量大小分為小型(<20 MeV)、中型(20 MeV~35 MeV)、與大型(>35 MeV)等三類；說明如下：

(一) 小型(<20 MeV) 迴旋加速器：又常被稱為PET迴旋加速器，提供的質子束電流通常在 $60\sim 100\ \mu\text{A}$ 範圍內，用以生產正子發射斷層顯像(PET) 使用的超短壽命核種；大多安裝在醫院、大學以及小型工業放射性核種的生產廠商；依據IAEA的統計，目前各國醫院、大學已安裝超過1,100台；

(二) 中型(20MeV~35MeV) 迴旋加速器：主要生產單光子斷層掃描(SPECT)使用的單光子放射性核種，往往裝置於較大的放射性藥物商業工廠或研究機構；

(三) 大型(>35MeV) 迴旋加速器：為特定的研究目的量身訂製，可以加速多種粒子；大多設置於物理實驗室，在基礎研究之外提供醫用半衰期比較長的同位素；這些設備也會設在大型臨床癌症中心，例如：長庚、榮總、台大等，用於質子束或重離子治療。

三、下世代半導體微影設備

下世代半導體微影設備技術主要由：波長為193nm的深紫外線配合四重圖像(Quadruple Patterning, QP)、波長為13.6nm的極紫外線、極紫外線配合雙重圖像(Double Patterning, DP)、三重圖像(Triple Patterning, TP)或四重圖像(QP)、高數值孔徑極紫外線、奈米壓印微影(Nanoimprint Lithography, NIL)、定向自組裝(Directed Self-Assembly, DSA)、以及極紫外線配合定向自組裝等技術的相互競爭或互補；綜合本計畫的探討，下世代半導體微影設備趨勢說明如下：

(一) 每項下世代微影的候選方案受歡迎程度的上升與下降在很大程度上取決於其晶片產量能力、製造缺陷及其運營成本；

(二) 目前使用的光學微影技術預計未來長時間仍占據主流地位，其最大的因素是重量級製造業者，如台積電、三星、...等，已在此領域投下大量的研發成本，很難改弦易轍，另再投入大量的研發成本開發新的技術；

(三) 在光學微影取得主流地位的態勢下，其他下世代候選技術，則朝互補或利基市場發展，例如：奈米壓印微影、定向自組裝、以及多光束直寫微影(Multiple E-Beam Direct-Write Lithography)等技術。

四、太空游離輻射環境模擬設備

太空輻射是指來自太空帶電粒子游離的輻射，主要有星體攜獲輻射帶、太陽宇宙射線、銀河宇宙射線等；這些高能帶電粒子對人體、材料與元件都會產生破壞作用，影響太空載具與人員的安全；廣義而言，太空輻射環境對太空載具所產生的效應包括：單粒子效應、總游離劑量效應、位移損傷效應、表面充放電效應、內帶電效應、與太陽電磁輻射效應等等，它們的最終影響都是導致元件、電路、電子設備異常或故障；因此為提高載具的在軌可靠度與壽命，就需要在載具的設計、製造、測試、及飛行的過程中考慮太空輻射環境及其對載具的輻射效應，並進行有效的模擬。

各種太空游離輻射環境地面模擬試驗設備整理如下：

- (一) 單粒子效應地面模擬設備，使用包括：重離子加速器、高能質子加速器、鈾源輻照設備、以及脈衝雷射輻照設備等不同種類設施模擬單粒子效應；
- (二) 總劑量效應地面模擬設備，使用包括： ^{60}Co 源輻照設備、質子、電子加速器等不同種類設施；
- (三) 位移損傷效應地面模擬設備：使用質子、電子加速器等設施；
- (四) 太陽電磁輻射環境地面模擬設備：使用氬燈、汞氬燈、氙燈、射流式氣體噴射源等設施；以及
- (五) 綜合以上游離環境的輻照效應模擬設施。

目前航太大國已建立了相對完整的太空輻射環境及效應地面模擬試驗設施體系，具有以下特點：

- (一) 材料級太空輻射效應地面模擬試驗設備朝向多因素綜合環境方向發展，例如同時將電子、質子、紫外、真空、溫度等環境要素一併進行試驗；

- (二) 元件級輻射環境效應通常採用高能加速器進行地面模擬試驗，尤其是單粒子效應、位移損傷效應、總游離劑量效應等；
- (三) 部分測試已達成將待測物置於原來的體系中進行檢測的境界。

參、展望

- 一、參酌日本原子能科研組織運作方式，以及配合原子能民生應用策略藍圖所律定的重點發展項目，建構我國整體性的原子能技術的發展體系(生態體系)；
- 二、繼日本之後，持續深入探討其他國家或地區之原子能科研組織或研究領域：中國大陸、美國、歐盟等；
- 三、建構我國太空游離輻射環境模擬體系，並尋求國際合作；
- 四、在原子能科技民生應用策略藍圖的基礎下，選擇特定主題進行深入探討。

物管局

110 年低放廢棄物處置場封閉及場址特性之安全管制技術研究.....	1
110 年室內乾貯設施輻射特性及乾貯護箱乾燥作業之管制技術研究.....	7
110 年用過核子燃料最終處置場址及工程障壁特性之管制技術研究.....	13
110 年國際間乾貯設施通風除熱及日本 RFS 設施安全再提升之案例資訊 研析	20

110 年低放廢棄物處置場封閉及場址特性之安全管制技術研究

Research on the safety control technology of low-level waste repository
closure and site characterization

(計畫編號：110FCMA003)

董家鈞¹ 楊長義² 李宏輝³ 林文勝⁴ 王士榮¹

¹ 國立中央大學 ² 淡江大學 ³ 國防大學 ⁴ 臺灣大學

台電公司參考國際間處置技術，依國內建議候選場址條件持續發展與精進各項處置技術。原能會放射性物料管理局需同步提升低放處置設施之審驗技術能力，並且精進適合我國處置環境之技術規範。爰此，本計畫針對低放射性廢棄物處置設施安全管制要項及場址特性關鍵議題，提出處置場封閉後管制及安全要項、處置場址土壤及岩體變形區導水特性，以及場址現地應力量測影響因子等研究主題。透過國際低放最終處置技術與法規發展之研析，並探討我國環境地質條件與處置設計概念，提出適合我國低放處置安全管制要項之建議，協助安全主管機關精進審驗技術與管制法規。

Taiwan Power Company refers to international disposal technologies and considers the environmental conditions of domestic proposed candidate sites to continue to develop and strengthen disposal technologies. The Fuel Cycle and Materials Administration(FCMA) needs to simultaneously improve the verification capabilities of low-level disposal facilities, and complete technical regulations of low-level radioactive waste disposal. This project plan includes research topics such as the control and safety requirements after the disposal site is closed, the hydraulic characteristics of the soil and rock mass

deformation area of the disposal site, and the influencing factors of in-situ stress measurement of the disposal site. The research results assist the safety authorities to complete the verification technology and control regulations.

壹、計畫目標

鑑於我國非核家園之政策以及世代正義，放射性廢棄物處置為我國必須妥善處理之議題，依據「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」之規定，台電公司持續針對我國兩處建議候選場址之處置環境，參酌國際間之處置技術與發展精進各項處置技術。放射性廢棄物安全管理制機關亦需同步提升低放處置設施之審驗技術能力，並且精進適合我國處置環境之技術規範。爰此，本計畫針對低放射性廢棄物處置設施安全管理制要項進行研究，探討處置場封閉後之管制及安全要項，另一方面針對處置場址土壤及岩體變形區導水特性，以及場址現地應力量測影響因子兩個與場址特性相關之關鍵議題，透過三個子計畫進行研究，了解國際間低放最終處置技術與法規發展之趨勢，並探討我國環境地質條件與處置設計概念，持續針對我國低放射性廢棄物處置審查技術以及管制法規進行精進。

貳、重要成果

(一)低放射性廢棄物處置場封閉後管制及安全分析要項研析

本子計畫針對低放廢棄物處置場封閉後管制及安全分析要項進行研析，包含蒐集國際(美國、瑞典)對於低放處置場封閉後管制及安全分析相關資料、IAEA 對於處置場址相關安全標準叢書，並針對封閉後安全分析之案例進行研究，最後提出要項建議。研究結果顯示，國際間對於中低放射性廢棄物處置設施的監管要求，常假設人類闖入情節發生的闖入時間，進行無意闖入之入侵防範。發生闖入入侵時間越久遠，輻射風險的潛在影響就越小。這種時間框架的選擇取決於監管期的有效性，

假設人類無意闖入發生的確切時間框架上還沒有達成共識時，不同國家接受的監管期限不同，但一般都在 100 至 300 年之間。美國核能管制委員會(NRC)定義監管期 100 年的持續時間，係根據 10 CFR 61.55 中規定放射性核種濃度限值，就無意闖入者情節進行安全分析。我國低放射性廢棄物分類系統，係參考美國 10 CFR 61.59 中規定的 100 年期限，所以建議我國封閉後管制之監管期時間為 100 年，惟仍須依據我國未來低放處置場接收之廢棄物來源與特性及處置設施設計，就無意闖入者情節進行安全分析，適當調整封閉後管制之監管期要求。低放處置設施封閉計畫之審查運轉單位提交封閉計畫，我國可參考 IAEA-TECDOC - 1260(2001)之流程，其步驟為低放處置設施封閉計畫研擬、提出、審查及執行等，如圖 1 所示。

(二)低放射性廢棄物處置土壤及岩體變形區導水特性研析

本子計畫研析有關估算中尺度岩石裂隙特性之現地量測方法，並且以法國 Coaraze 實驗室以及法國南部的 Tournemire 地下實驗室(URL)進行量測方法應用的說明作討論。結果顯示，Guglielmi 等人所提出之 HPPP 和 SIMFIP 設備皆可有效的量測得到變形區破裂面之水力-力學參數。其中，SIMFIP 設備(圖 2)還可被運用至斷層受地震誘發剪切位移的試驗。變形區之導水特性的議題方面，探討較淺層之未固結沉積層，其水力特性受斷層剪切造成的影響，研析結果發現，斷層核心因為受剪位移面黏土塗抹及顆粒(砂、泥…等)的優勢方向性，使沿著斷層平面之水力傳導係數較垂直於斷層方向高。最後，岩體內變形區之核心區及破裂損傷區導水特性的部分，研究範例中得知(圖 3)，MTL 兩側存在非常不同的導水特性構造，北側高度非均質的導水結構主要受控於岩體破裂、成礦和再破裂程度所影響。南側受粉碎作用和變質黏土產生使滲透率有系統性地朝向中央滑移區方向下降，中央滑移帶受壓碎作用、剪切壓實

作用和黏土形成的相互作用產生非常低之滲透率。

(三)低放射性廢棄物處置現地應力量測影響因子研析

本子計畫蒐整加拿大原子能有限公司於花崗岩基盤之地下研究實驗室與中國四川五峰-龍馬溪組於頁岩氣採收場之現地應力量測成果。

並分別就不同的處置母岩基盤與量測技術注意事項提出建議，重點如下：

1. AECL 地下實驗室(URL)進行的一系列現地應力量測試驗，包括套鑽法、水力破裂法、岩體釋放法(Rock mass relief methods)與微震訊號監測，可看出小孔徑的套鑽法量測結果數據較為分散，其原因可能與 CSIR 套筒採用的應變計貼片基長為 10 mm，但因花崗岩顆粒粒徑為 2-5 mm，應變計貼片基長愈小愈容易受影響。
- 2.根據 Nasehi 與 Mortazavi (2013) 利用 UDEC 進行鄰近斷層帶對水力破裂之影響研究成果，其發現鑽孔鄰近斷層帶，水力破裂引致的初始裂隙發展方向仍與現地應力有關(平行於最大主應力方向)，惟裂隙延伸至斷層帶後即停止擴展，其可能原因為：(1)斷層帶的材料強度相對較低，一旦受到模擬之水壓力作用將導致塊體材料進入塑性變形；(2)斷層帶由兩組正交節理所組成，當模擬之水壓力進入斷層帶後，其滲流路徑數增加，導致滲流壓力降低。
- 3.本計畫利用 UDEC 探討異向性岩體中，弱面間距與鑽孔直徑比(s/d)及弱面位態角度變化對水力破裂誘發裂隙之影響，可知：(1) $s/d \leq 0.6$ ， $\theta \leq 45^\circ$ ，水力破裂誘發之裂隙均沿著弱面發展；當 $\theta > 45^\circ$ ，會隨著弱面角度不同，誘發之裂隙與最大主應力方向有 $0^\circ \sim 15^\circ$ 之誤差。(2)若 $s/d \geq 1.0$ ， $\theta \leq 30^\circ$ ，水力破裂誘發之裂隙均沿著弱面發展；當 $\theta > 30^\circ$ ，誘發之裂隙與最大主應力方向有 $0^\circ \sim 10^\circ$ 之誤差。

參、展望

有關低放處置場封閉後管制及安全分析，建議我國封閉後管制之監管期時間為 100 年，惟仍須依據低放射性廢棄物分類系統及放射性核種濃度限值進行處置場封閉後 100 年至 300 年時間之安全分析，適當調整封閉後管制之監管期要求。參考 IAEA-TECDOC -1260(2001)有關近地表處置設施封閉的程序和技術，建議我國對於封閉後安全分析應使用功能評估(PA)方法來評價處置場的長期安全性。岩體變形區導水特性研析方面，HPPP 和 SIMFIP 設備可測得孔隙壓力及待測破裂面之相對位移，有效得到破裂面之水力-力學參數，並可應用於斷層受地震影響而產生剪切位移之相關研究。另外，HPPP 和 SIMFIP 方法也可透過流量針對水力內寬進行量測，以及現地應力量測，此一現地試驗工具之引進或發展非常值得作為後續技術建置之方向。現地應力量測影響因子方面，現地應力量測受諸多不確定性因素影響，除需配合場址之地質與地形調查、基本岩石力學試驗與不同尺度之現地應力量測技術進行分析比對外，如何透過機率與統計分析相關理論，降低現地應力量測結果的不確定性，為未來值得探討之課題。

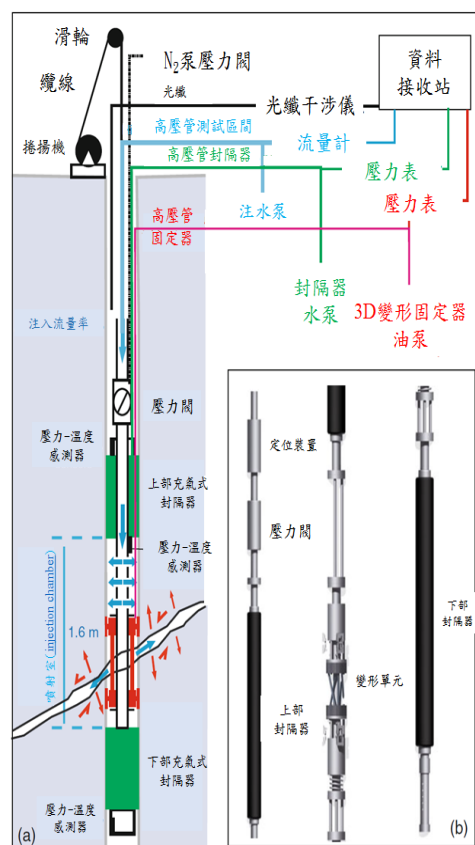
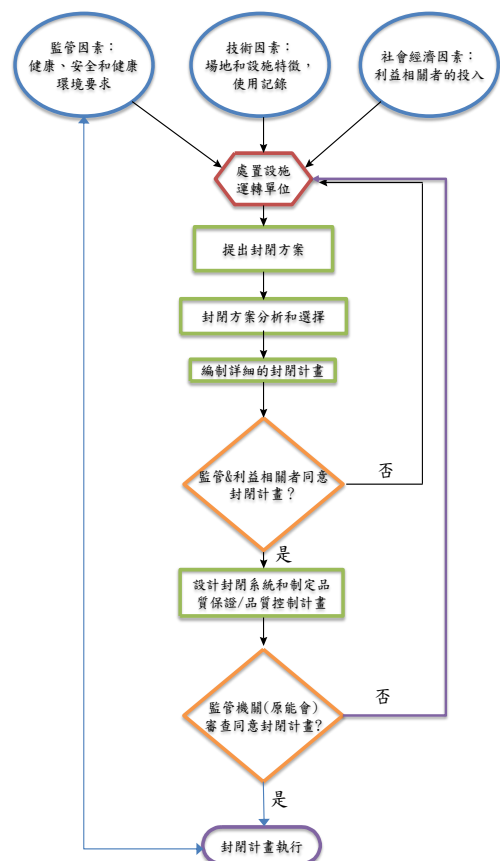
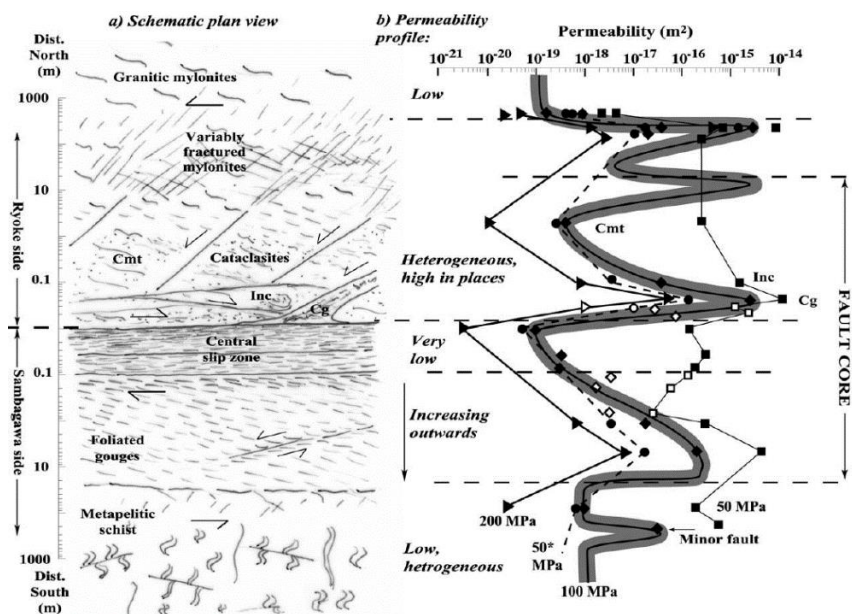


圖 1、低放處置設施封閉計畫研
擬、提出、審查及執行流程圖



110 年室內乾貯設施輻射特性及乾貯護箱乾燥作業之管制技術研究
Regulatory Study of Indoor Dry Storage Facility: Radiation Characterization
and Cask Drying Process
(計畫編號：110FCMA002)

許榮鈞 曾永信 賴柏辰

國立清華大學

為因應國內未來核電廠除役乾貯設施之管制需求，本計畫深入探討室內乾貯設施周遭輻射劑量貢獻路徑及乾貯護箱內殘餘水分對用過燃料貯存安全等關鍵議題，研究成果有助於強化我國核電廠除役用過核子燃料乾貯作業的安全審查與管制。本計畫主要重點有二大方向：(1)室內乾貯設施輻射劑量貢獻路徑的評估研究；(2)乾貯護箱乾燥作業階段殘餘水分趨勢研究。子計畫一利用輻射劑量分析技術評估廠界關鍵群體及設施工作人員之主要輻射貢獻路徑，成功建立一套可有效區分不同路徑輻射貢獻(直接穿透、輻射滲流、天空散射、地面散射、多次散射)的分析模式，此一技術可應用於未來國內乾貯議題所需之平行驗證與審查支援。子計畫二利用熱流分析技術評估護箱經乾燥作業後的殘餘水量，藉以探討其對用過核子燃料長期貯存安全之影響；研究結果指出真空乾燥作業能有效達到乾化目標，作業後之殘餘水量不足以對護套完整性造成顯著影響。

In order to continue improving the regulatory management technology for spent nuclear fuel interim dry storage in Taiwan, this study systematically examined two special topics in radiation shielding and thermal hydraulics: (1) separating dose contributions from various transport pathways in shielding

analysis of an indoor dry storage facility; (2) evaluating the effect of residual moisture on the spent nuclear fuels stored in a dry storage cask. The first sub-project investigated the characteristics of the radiation field around an assumed indoor dry storage facility. Neutron and gamma-ray dose contributions from multiple transport pathways including direct, streaming, skyshine, groundshine, and multishine were identified and separated. The established methodology can provide valuable information for shielding optimization during design phase and generally applicable to Monte Carlo shielding analyses of other nuclear facilities. The second sub-project developed a methodology based on computational fluid dynamics to evaluate residual water in the two selected storage casks. The result demonstrated that the dry drying process is effective, and the amount of the residual water will not impact the safety storage of the fuels inside the casks and also the integrity of key internal components.

壹、計畫目標

為因應未來核電廠除役室內乾貯設施之管制需求，本研究針對(1)室內乾貯設施輻射劑量貢獻路徑及(2)乾貯護箱內殘餘水分對用過核燃料貯存安全等技術議題進行研究。其中，子計畫一擇定一假想設施(如圖 1)並利用輻射劑量分析技術評估廠界關鍵群體及設施工作人員之主要輻射貢獻路徑，以強化室內乾貯設施之輻射屏蔽平行驗證評估技術及安全管制；子計畫二利用熱流分析技術評估兩種不同提籃型式之密封鋼筒(如圖 2)於真空乾燥作業之初始之最終殘餘水量，以瞭解護箱內殘餘水分的主要機制與驅離效果，以期對作為評估用過核燃料長期貯存安全之依據。最後彙整計畫成果與經驗，提出輻射屏蔽與熱傳評估審查重點或注意事項，有利精進我國用過核燃料室內貯存設施安全管制技術。

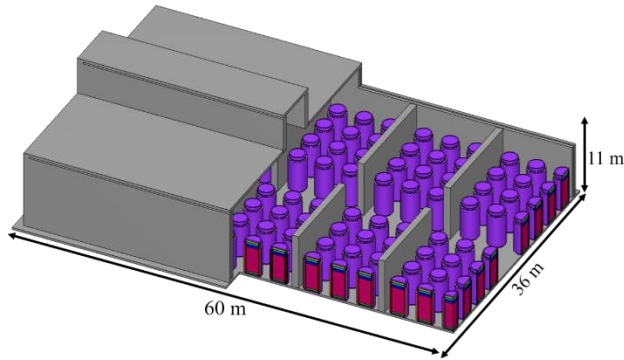


圖 1、假想設施示意圖

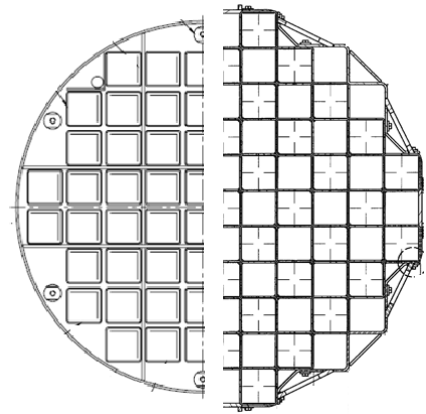


圖 2、兩種選定之護箱提籃設計

貳、重要成果

一、子項計畫 1：「室內乾貯設施輻射劑量貢獻評估研究」

(一)本研究針對室內乾貯設施輻射劑量貢獻路徑之議題，建立了一種特殊的輻射屏蔽分析方法(圖 1 與圖 3)，可以有效地區分各輻射遷移路徑(直接穿透、輻射滲流、天空散射)的劑量貢獻。不同路徑輻射貢獻的分析模式能提供各路徑輻射劑量貢獻占比，供檢視此輻射設施設計是否需要優化。

(二)金屬護箱需特別注意側邊上下兩端無中子吸收材區域，其為屏蔽分析重點區域，護箱側邊以加馬劑量率為主要的貢獻來源，護箱頂部劑量率以中子為主要貢獻。

(三)假想設施周遭劑量分布以加馬劑量為主要劑量貢獻，在距離設施 100 m 處加馬劑量率占比約為 80%，而其中燃料中子產生的二次光子又為最主要的加馬劑量貢獻(74%)，結構光子次之(23%)，燃料光子最小(3%)。假想設施輻射劑量貢獻，以直接穿透輻射與輻射滲流為主要貢獻，至設施邊界劑量率占比皆大於 75%(圖 4)。

二、子項計畫 2：「乾貯護箱乾燥作業階段殘餘水分趨勢研究」

(一)針對國際間尚未發展之護套表面鍵結水分佈，結合燃料軸向功率

分布及燃耗與護套氧化層之關係，建立完整初始殘餘水預估模式。

(二)整合上述初始殘餘水預估技術與汽化熱評估模式後，以計算流體力學技術求解，並獲得如 5 所示之溫度分佈與殘餘水分佈。其結果顯示護套表面的鍵結水需要高操作溫度方可乾化。

(三)圖 6 所示之分析結果顯示，隨著燃料溫度的增加可以有效移除燃料護套表面殘餘水；惟熱負載較低時預期將影響其乾化能力而對於過低熱負載之護箱，研究則顯示可採用邊界溫度的控制同時確保元件溫度表現與驅離水之成效。

參、展望

本研究團隊藉由國際間文獻資訊的研析與技術的發展，建立了堅實的輻射屏蔽與熱流分析技術。並分別對輻射屏蔽中各種輻射傳輸路徑之影響與重要性以及乾貯護箱乾燥作業對殘餘水驅離的有效性進行研析。計畫研究成果不僅對外證實我國管制單位對放射性物料安全管理之嚴謹，亦顯示我國自主分析能力不弱於該領域的國際水準。本研究結果可協助主管機關掌握室內乾貯之輻射防護重點與審查關鍵，亦可確認護箱乾燥作業的有效性，並延伸作為評估長期貯存護套完整性之參考，可為我國用過核子燃料乾式貯存安全審查提供札實的技術支援。

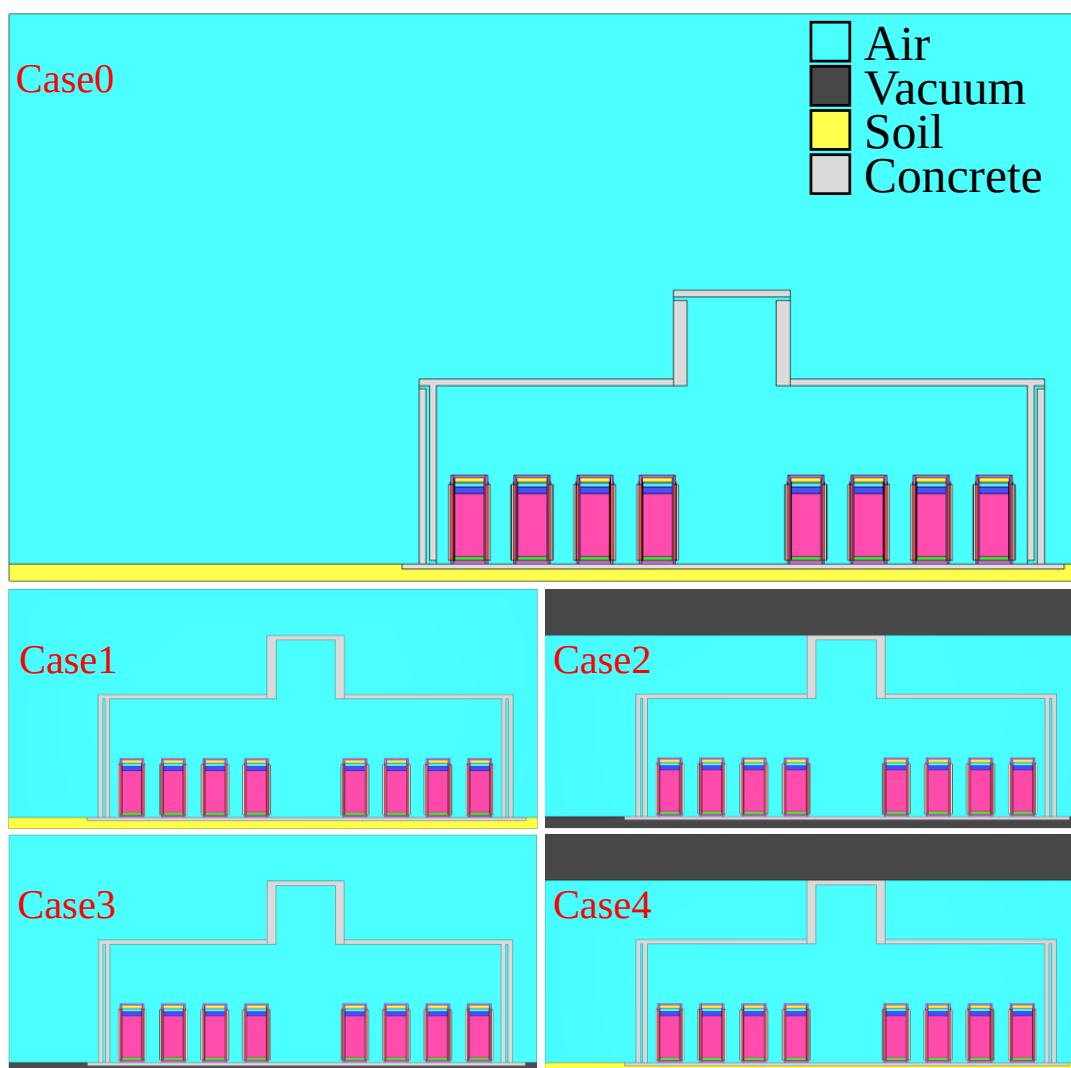


圖 3、區分室內乾貯劑量貢獻分析模式所需之案例模型

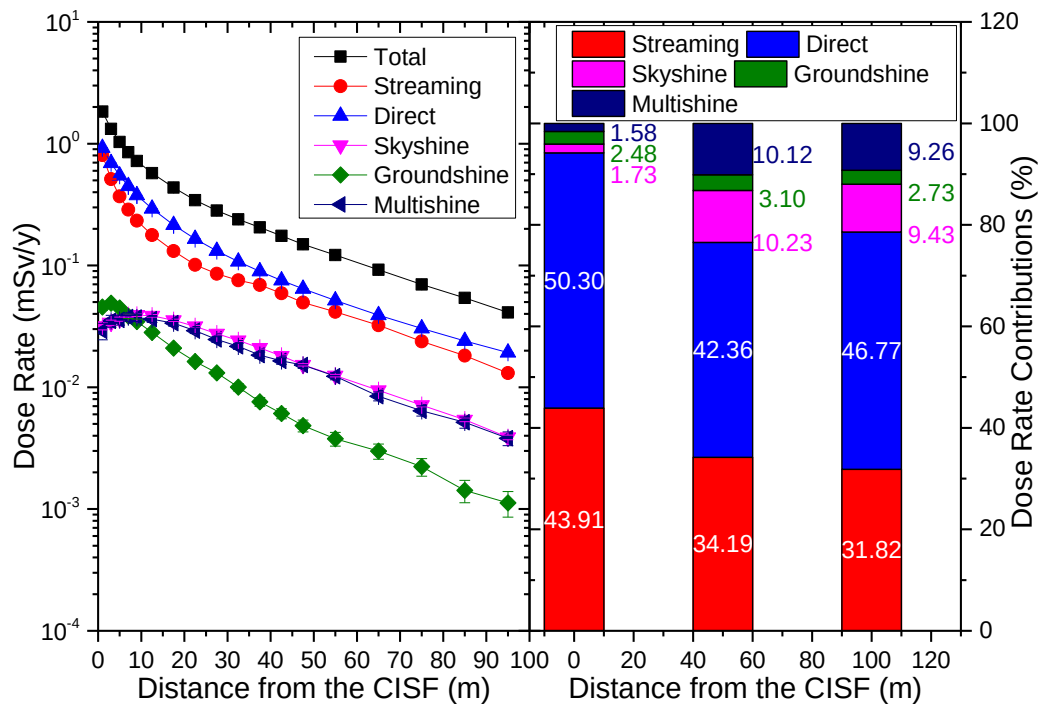


圖 3、設施周遭不同輻射遷移途徑劑量率隨距離變化

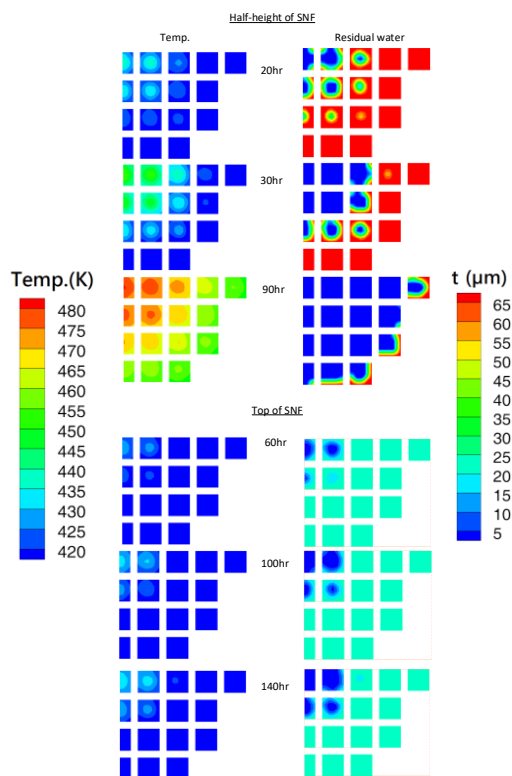


圖 5、護套殘餘水與溫度分佈圖

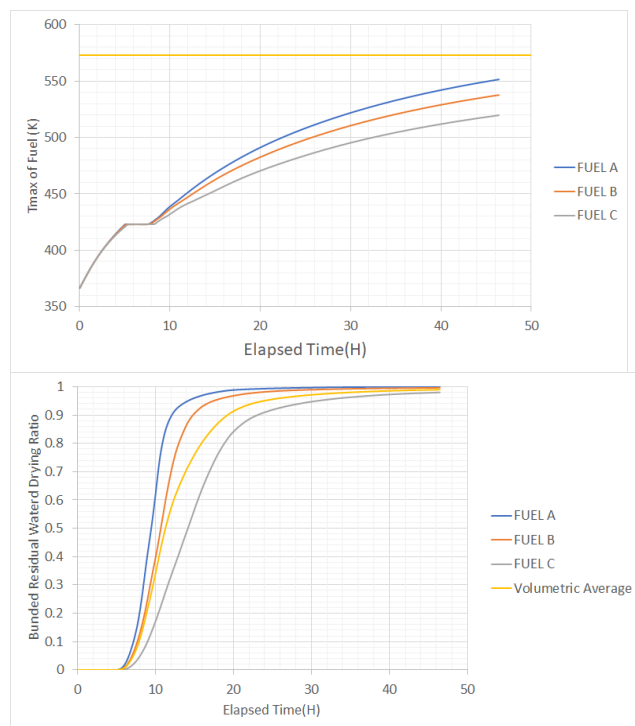


圖 6、燃料溫度與殘餘水變化趨勢

110 年用過核子燃料最終處置場址及工程障壁特性之管制技術研究

Development of Control Capability on Siting and Engineered Barrier

Properties for Final Disposal Facility of Spent Nuclear Fuel

(計畫編號：110FCMA001)

張瑞宏¹ 黃偉慶¹ 楊樹榮²

¹國立中央大學 ²國立屏東科技大學

本年度計畫針對用過核子燃料最終處置設施安全分析報告之場址特性與設施運轉內容需求，研析國際核能組織發布之高放射性廢棄物最終處置有關安全規範或導則，以及主要核能國家對於高放地質處置設施場址特性與設施運轉之相關要求與關鍵技術要項、高放地質處置安全分析報告審查案例等，研提我國用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則之場址特性與設施運轉專章，同時提出對於未來國內階段性安全報告審查要項之建議。此外，針對用過核子燃料最終處置場工程障壁安全評估所需的重要技術，進行實驗分析與數值模擬成果之平行驗證，包括處置罐承載分析與國際合作工程障壁研究計畫平行驗證、緩衝材料之沖蝕機制與流失量評估研析以及實驗技術建立等工作，研究成果有助於工程障壁特性及安全功能的掌握，配合處置場址與設施運轉之審查重點，足以提升國內高放最終處置相關管制技術與審查能力。

In this study, the tasks incorporate consultation of the safety guides/requirements brought up by international organizations and review of key issues encountered by various countries on their safety analysis report for geological disposal program. These are expected to benefit the forthcoming

review of the safety assessment reports to be submitted and the control of the final disposal program administered by Taipower. This study assimilates the safety guides set up by international organizations for geological disposal facility and requirements on site characterization and facility operation for geological disposal facility employed by various countries. Based on careful examination of the information, a draft on the siting characteristics and facility operation for the safety analysis report has been devised, along with suggestions on relevant major technical review issues. In addition, a couple of verification tasks on important safety features of the engineered barriers are included. These were conducted independently such that major findings from Taipower's safety assessment reports and/or international collaborated researches are compared and/or verified. As a result, 2 technical sub-studies, namely, verifications on the loading analyses of canister performed by Taipower and other countries, and experimental study on the erosion mechanism of buffer and estimation of total erosion in a deposition hole, are included in this study.

壹、計畫緣起與目的

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。而行政院國家永續發展委員會於 108 年 7 月提出「臺灣永續發展目標」，確認我國 18 項核心目標。其中第 18 項核心目標為「2025 年達成非核家園」，而項下具體目標 18.3 為「推動『高放射性廢棄物最終處置設施』法制作業，協助核能電廠完成除役」，可見高放處置設施相關法規的制定受到重視，而研擬高放最終處置設施安全分析報告導則的工作，亦須積極推動，以符合我國永續發展的目標。

為完備我國用過核子燃料最終處置相關法規，物管局已於 109 年委

託之研究計畫中，針對用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則（草案）之設施設計與設施建造兩專章進行研擬。110 年度則聚焦於最終處置設施場址特性描述與設施運轉兩專章內容之研擬。透過參酌國際組織高放最終處置安全管制或指引文件、核能先進國家相關法規、安全要求或導則及國際間高放最終處置設施安全分析報告審查案例，研擬我國最終處置設施安全分析報告導則，且以場址特性描述及設施運轉兩專章內容為主，持續研提導則章節條文，以發展完整的安全分析報告導則。相關驗證技術發展方面，針對用過核子燃料最終處置計畫研發重點與管制技術需求，進行處置罐承載能力分析及耦合模型國際合作研究報告之平行驗證工作，以及處置孔緩衝材料沖蝕機制與流失量評估等實驗模型與技術建置，藉以提升我國最終處置計畫相關審驗技術與能力。

貳、研究方法與過程

本研究延續 104 - 109 年高放射性廢棄物最終處置計畫之經驗，針對用過核子燃料最終處置安全分析報告中設施設計所需資訊與技術，進行國際高放最終處置安全分析報告資訊蒐集與研析，並彙整各國處置計畫設施設計審查要項，以研提我國安全分析報告導則場址之特性描述及設施之運轉章節及提升相關審驗技術能力為目標，包含三個子項計畫。

參、主要發現與結論

子計畫一：用過核子燃料最終處置設施安全分析報告導則場址之特性描述及設施之運轉相關資訊研析

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所屬核能總署(NEA)所發表的 6182 號「地質處置長期安全管制」，及 6405

號文件「放射性廢棄物地質處置管制與指引」等兩份報告研析之成果彙整說明；以及由瑞典 SKB、英國 NDA 與 RWM、加拿大 NWMO、法國 Cigeo 及德國 BMU 等高放最終處置計畫之管制機關或專責機構所公開的法規、安全要求、安全分析報告案例、技術及研發報告等內容，進行擇要研析與審查要項建議之撰擬，藉以提升國內相關管制技術與審查能力，並作為安全分析報告導則內容研擬之參考依據；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「場址之特性描述」及「設施之運轉」兩專章章節架構與審查要項建議，以及專章條文與說明內容之研擬，以延續 109 年計畫成果。

子計畫一研究團隊除進行內部分組討論與定期工作會議外，同時藉由舉辦專家學者線上座談會，廣邀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，進行高放最終處置設施安全分析報告導則專章內容之修訂，同時研擬後續規劃與發展建議。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；所提出的場址特性描述及設施運轉專章條文草案，足以為持續發展完整安全分析報告導則的範本，有助於逐步完成導則全部內容，完備我國放射性廢棄物相關管制法規。

子計畫二：處置罐承載分析與國際技術研究計畫平行驗證

子計畫二針對國內報告及國際研究計畫之處置罐承載分析以及耦合模型之國際合作計畫工作進行任務平行驗證。首先，地震為可能導致最終處置隧道不穩定性的自然災害，為了確認最終處置隧道運行期間的穩定性以及保持在安全係數中，進行處置罐地震剪切分析。其次，處置罐亦可能在承受不同類型的外在負重或內部組成結構的改變等情況下形成其他的承載機制，本研究因此在深地層處置設施負載環境下，模擬

分析處置罐的相應力學行為。本研究建立與國際合作計畫中耦合模型之同樣配置，進行平行驗證，求得與文獻報告相近之結果。

1. 依據台電 SNFD2017 報告所提供之設計，進行處置罐地震剪切分析。當剪力位移加載至膨潤土內部時，發現將不會對處置罐造成太大影響。而將剪力位移加載至膨潤土表面時，會對處置罐產生較大影響，不同位置及方向皆會影響結果，大多案例皆有 1 以上的安全係數。
2. 參考國際技術研究計畫內容或案例建立處置罐模型，在深地層處置設施負載環境下，模擬分析處置罐的相應力學行為，適切描述處置設施之現地負載狀態，並針對處置罐之承載過程進行非線性結構應力分析，確保處置罐於各相應載重作用下能維持安全。
3. 參考國際合作計畫針對耦合模型所提供的指定工作任務，使用主要案例進行平行驗證，所得溫度結果與同樣使用三維模型且有考慮隧道靜置通風冷卻(圖 1)的 CNSC、CEA 及 SKI 相當接近(圖 2)；水-力分析中的再飽和時間，結果與 CEA 之結果相當接近。

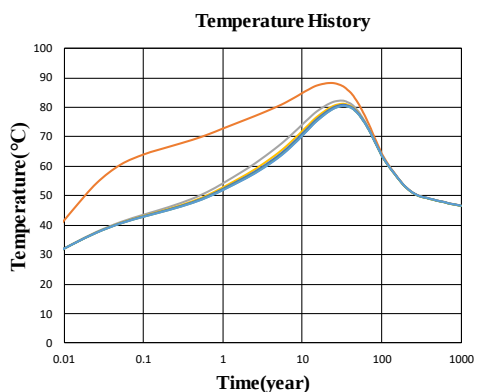


圖 1、各個案例之通風溫度歷時圖

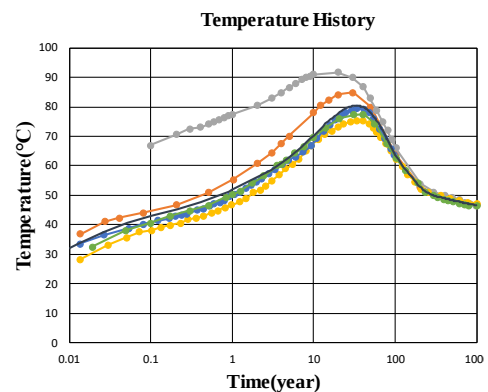


圖 2、本文與文獻各團隊之溫度歷時圖

子計畫三：緩衝材料之沖蝕機制與流失量評估研析及實驗技術建立

地下水藉母岩裂隙流進處置孔可能造成緩衝材料的沖蝕。當地下水入侵後，緩衝材料於處置孔中逐漸飽和並開始回脹，而母岩可能存在裂

隙，這使緩衝材料擠入岩石裂隙中，由於緩衝材料主要成分為蒙脫石，而蒙脫石在特定環境條件下易於被流動的地下水帶走，造成的質量損失則可能導致緩衝材料密度降低。本計畫設計模擬處置孔及岩石裂隙之沖蝕實驗裝置，藉由不同流量之水流通過裂隙內部中的試體周圍來模擬地下水流動情況。透過從裂隙沖蝕而出的膨潤土凝膠來瞭解凝膠的產生和運輸，藉以探討處置孔在不同地下水流量、水化學組成、岩石裂隙內寬下，對緩衝材料沖蝕行為的影響，主要研究成果如下：

1. 沖蝕發生的關鍵在於地下水之化學環境，如圖 3 所示，地下水離子強度低的情況下，發展完整的擴散雙層將促進蒙脫石的釋放，流失量顯著偏高，而在離子強度較高的 4.0 mM 環境，沖蝕則受到抑制。
2. 膨潤土在地下水環境的離子強度較低時，試體回脹壓力會隨著沖蝕行為的發生而下降；而在膨潤土周圍環境的離子強度達到 4.0 mM 時，則因流失量極低，不會使回脹壓力顯著下降，可穩定維持緩衝材料之障壁功能，如圖 4 所示。
3. 狹小的裂隙將對膨潤土產生很大的束制作用(摩擦力)，這將有效減少膨潤土凝膠的釋出。寬大的裂隙給予膨潤土束制力不足，導致副礦物較難透過架橋形成濾層，可能無法有效限制膨潤土凝膠釋出。
4. 本研究中各因子對沖蝕的影響程度，由高到低排序依次為水化學、裂隙內寬與水流量。

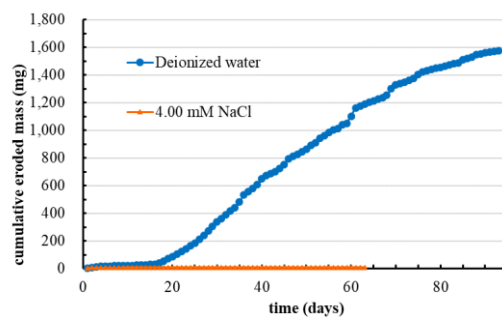


圖 3、不同地下水離子強度之
累計流失量

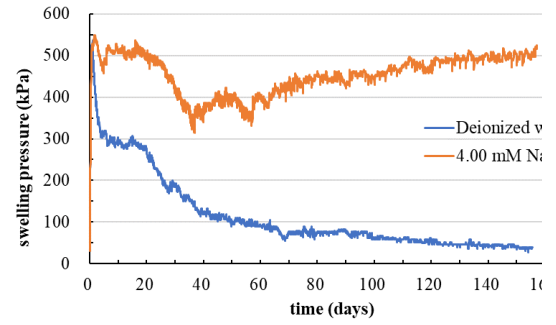


圖 4、不同地下水離子強度之
回脹壓力變化

110 年國際間乾貯設施通風除熱及日本 RFS 設施安全再提升之案例資訊 研析

110th-year Project- Case Study Analyses of Ventilation and Heat Removal of
Drystorage Facilities and Safety Upgrading of Japan RFS Center
(計畫編號：110FCMA006)

張惠雲

國立中興大學

台電公司對核電廠執照屆期後之用過核子燃料貯存，已參採地方政府與當地民眾的共識，規劃興建室內乾式貯存設施。本計畫研究重點包括(1)國際間乾貯設施通風設計與護箱除熱性能資訊研析；(2)日本 RFS 集中貯存設施安全再提升報告資訊研析；(3)室內乾貯設施申照安全審查重點建議。本計畫所獲成果，將可作為管制機關辦理室內乾式貯存設施安全分析報告審查之參考，並用以精進相關設施安全管制技術。

Based on the local government and people's consensus, Taiwan Power Company decided to adopt indoor drystorage facilities for spent fuel after the license period of nuclear power plants. The main focus of this project includes, (1) collection and analyses of international information about ventilation design of drystorage facilities and heat-removal performance of canister systems, (2) case study of Japan RFS Center and the safety upgrading, (3) suggestions and recommendations for reviewing the safety reports of indoor drystorage facilities. The results obtained will provide important references to FCMA, to conduct the safety review of indoor drystorage facilities, and to refine the safety-control measures of spent nuclear fuel drystorage facilities in Taiwan.

壹、計畫目標

台電公司對核電廠執照屆期後之用過核子燃料貯存，已參照地方政府與當地民眾之意見，規劃興建室內乾貯設施。日本原子力規制委員會於 2020 年 9 月審查確認 RFS 設施符合新的安全標準。基於上述背景，本計畫針對乾貯設施之廠房通風設計、貯存護箱除熱性能評估等關鍵議題，進行國際資訊蒐集與研析，以提供國內乾貯設施安全設計審查作參考。

貳、重要成果

本計畫針對室內乾式貯存設施之廠房通風設計、貯存護箱除熱性能評估等關鍵議題，進行國際資訊蒐集與研析。計畫重點與主要結果如下：

一、國際間乾貯設施通風設計與護箱除熱性能資訊研析

本計畫研析了英國 ONR 通風準則(2020)，與德國 ESK 乾貯指針(2013)以及國際原子能總署(IAEA) 最新修訂的用過核燃料貯存之特定安全指針 SSG-15 (Rev. 1.0)(2020)。受 2011 年日本福島事件所影響，相關安全規範要求確認設施設計所需的多重性 (redundancy)和多樣性，特別是系統抵抗內部和外部危害能力，而火災被認為是通風系統的主要挑戰，另外應考慮地震效應。IAEA 用過核燃料貯存之特定安全指針 SSG-15，進一步建議設計考量惡劣環境氣候之影響。

通風系統、設施的設置與操作往往關係著核設施之核照許可條件，特別是在放射性物質與放射性廢物的控制上非常重要。另外，通風系統之設計與運作在火災控制扮演著關鍵的角色，故在設施規劃早期的階段即應先確定相關的監管要求與防護理念等。對於貯存建物，通風系統的量能必須達到要求的氣流量，並考慮正常、異常與事故等狀態的條件。各設計參數須經驗證，避免汙染物質回流或逸散的可能性。

二、日本 RFS 集中貯存設施安全再提升報告資訊研析

福島事件後日本頒布了用過核子燃料貯存設施新安全設計審查基準，日本青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施(即 RFS 設施)在 2014 年提出新規制適法性確認審查，歷經 6 年半的審查於 2020 年 9 月通過。為提供國內加強管安全制作業之參考，本計畫由前述日本 RFS 設施安全再提升審驗資料，抽出相關定量規定或設計控制條件並整理如下：

- (1)提籃在防止臨界上不可發生顯著變形，且考慮設計貯存期間(50 年)再加上搬運相關作業也具有足夠的時間餘裕之 60 年間，設計必須維持結構完整性。
- (2)在臨界評估中，設計對次臨界有顯著影響的因素如下考慮，中子有效放大倍率為 0.95 以下。
- (3)設計考慮貯存期間(50 年)再加上搬運等相關作業也具有足夠的時間餘裕之 60 年間，金屬護箱表面及距離金屬護箱表面 1m 的位置之輻射劑量分別控制在 2 mSv/h 與 100 mSv/h 以下。
- (4)針對金屬護箱表面發出的輻射，用過核燃料貯存建物設計有足夠厚度的混凝土牆，屏蔽百葉，以及貯存區入口處的迷宮結構與屏蔽門，使民眾每年接受到的有效輻射劑量為 50 mSv 或以下。
- (5)若控制區臨時未設置金屬護箱而以其他如混凝土壁等進行屏蔽，用過核燃料貯存建物接收區域的劑量率應小於 10 mSv/h，而控制區外側的劑量率小於 2.6 mSv/h。
- (6)新追加之金屬護箱於設計貯存期間(50 年)再加上搬運等相關作業也具有足夠的時間餘裕之 60 年間，維持用過核燃料束之封存空間的惰性氣體與負壓。
- (7)從長期維持金屬護箱密封機能之觀點，使用金屬墊片與設定洩漏率，以使用過核燃料束封存空間能 60 年維持負壓。
- (8)從維護用過核燃料束健全性之觀點，金屬護箱存放的用過核燃料

束之燃料被覆管於設計時應限制溫度，以使燃料被覆管的累積乾縮應變不超過 1%。

(9) 用過核燃料貯存建物的各區域以及區劃，以 3 小時耐火的混凝土壁，以及 1 小時防火的防火門與防火遮蔽(根據「建築基準法」的特定防火設備)分開。

(10) 包括飛機墜落所致火災(機率 10^{-7} 次/年/設施)，依據輻射強度的計算進行設計檢討，應確認用過核燃料貯存建物外牆溫度低於混凝土容許溫度以下，不影響用過核燃料貯存建物基本安全機能。

三、國內室內乾貯設施申照安全審查重點建議

本計畫比較台日乾貯設施安全審查重點，研析英國與德國等國核電廠與乾貯監管實務，以及國際用過核燃料貯存技術。針對室內乾貯設計審查與安全管制作業，主要研究結果與建議如下：

(1) 日本 RFS 集中貯存設施安全再提升審驗案例中，NRA 審查要求提交了設施設計與人力評估之 2 本報告。參照日本 RFS 審驗案例，建議國內未來提出的設施安全分析報告，內容應逐條對照法規要求，並具體說明相關設施的安全設計，防範措施與/或作業程序，以及評估結果。另外業者應同時提送作業人員之組織，經驗能力，資格證明與品保計畫報告等，以供完整審驗。

(2) 日本考慮設計貯存期間（50 年）再加上搬運相關作業也具有足夠的時間餘裕之 60 年間，要求提籃在防止臨界上不可發生顯著變形、設計必須維持結構完整性，而金屬護箱可使用金屬墊片與設定洩漏率，維持用過核燃料束之封存空間的惰性氣體與負壓，並控制金屬護箱表面及距離金屬護箱表面 1 m 位置之輻射劑量分別在 2 mSv/h 與 100 mSv/h 以下。

(3) IAEA 安全貯存法規與歐洲電廠壓力測試均要求，核能設施安全再

評估應考慮惡劣氣候環境的影響。英國 Sizewell B 核電廠因此在 10 年安全再評估後規劃與進行環境監測，包括了實尺的乾貯護箱之腐蝕模擬試驗。上述 Sizewell B 核電廠內的安全管制作業與環境監測計畫，值得國內主管機關與台電公司借鏡。

- (4)從室外露天貯存改為室內護箱貯存，將增加建築通風與防火措施之新課題。通風系統對建築防火的影響有兩個面向，一方面風勢可能助長火勢，但另一方面通風設施可以為火災初期的排煙所用、有利人員逃生。國內未來可參照日本 RFS 設施，用過核燃料貯存建物設的各區域與區劃以 3 小時耐火的混凝土壁，以及 1 小時防火的防火門與防火遮蔽分開。另外針對意外事故如飛機墜落所致火災（機率 10^{-7} 次/年/設施），應依據輻射強度計算進行檢討，確認用過核燃料貯存建物外牆溫度低於材料容許溫度以下，不影響用過核燃料貯存建物基本安全機能。

參、展望

用過核燃料貯存設施之安全設計與評估，應注意作為屏蔽設施一部分的通風系統之重要性。乾貯廠房建築的通風性能可能影響護箱除熱與設施整體安全。因屏蔽需求而設置的迷道結構，與自然通風動力源(作為熱浮力通風之熱源，貯存用過核燃料的乾貯護箱，與戶外風環境等)為評估的關鍵課題，建議後續研究根據本土環境特性深入探討。

核技處

輻射事件應變技術開發研究(2/4).....	1
強化輻射災害應變與管制技術之研究(2/4).....	5
北部地區輻射災害檢驗分析實驗室之能力精進計畫	9
輻災應變資源建置與實務管理之研究	13
日本福島事故情境於我國之因應處置研析	18

輻射事件應變技術開發研究(2/4)

Research on The Emergency-Response Technology for The Radioactive Events(2/4)

(計畫編號：AEC110002)

袁明程¹ 林聰得² 鄧仁星³

¹ 核能研究所 ² 核能研究所 ³ 中央氣象局

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 SOP。
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

規劃輻災防救訓練研發中心基地戶外場地(以下簡稱基地戶外場地)，放射性物質運送意外處置平面圖，應用於輻射應變技術隊(以下簡稱輻應隊)年度訓練。

建立輻應隊常用之手持式核種辨識儀與污染偵檢器使用手冊，及操作影片。

在放射性物質擴散分析能力建立工作項目上，開發輻射彈爆炸參數資料庫、三維近似建物資料轉換模組，引入內政部所建之我國建物模型，評估輻射彈爆炸後污染擴散分布的情形。

遠端遙控行動式輻射偵測平台(以下簡稱偵測平台)增加機械手臂搭配大夾抓，以及電控收納艙間，可夾取標的物件，並置放於艙間，避免移動過程中發生掉落。

貳、重要成果

完成放射性物質運送意外處置平面圖如圖 1，並於輻應隊年度訓練中實施演練如圖 2；完成手持式核種辨識儀與污染偵檢器使用手冊如圖 3，及操作影片如圖 4；提升輻應隊訓練教材完整性。

模擬板橋運動場與高雄火車站，參考國外文獻以爆炸當量 1.36Kg 及核種鈾-241 模擬，圖形輸出如圖 5 及圖 6，填色部分為濃度柱狀累積分布單位為 Bq/m^3 ，可提供未來地方政府輻災應變演練規劃所需。

偵測平台完成可拆換電動雙片式夾爪設計與裝置，如圖 7 上方搭載深度相機與輻射偵檢頭，可判讀夾爪與待夾物的距離，方便遠端操控人員判斷物件夾取現況，圖 8、9 為夾取包件放置於電動開合之收納箱的測試畫面，此收納艙間可直接遠端操控，有效降低應變人員接近處理 輻射異常物之時間與劑量。

參、展望

本年度輻應隊訓練學員建議定期開設放射性物質意外事故處理、輻射彈應變之實務課程、增加國外輻災案例說明等，將盡量做為未來 規劃

參考。

在放射性物質擴散分析能力建立之工作項目中，經建置模式評估測試發現，僅能預估爆炸後約 15 分鐘之污染分布情形，未來尚需增加沉降模式以符合實際需求。

而偵測平台，未來可考量設計不同功能型夾爪，以滿足不同形狀輻射異常物回收需求。



圖 1、意外處置平面圖



圖 2、輻應隊模擬演練

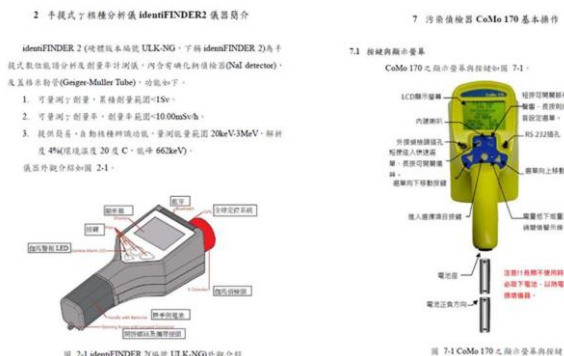


圖 3、使用手冊



圖 4、操作與維護影片



圖 5、模擬板橋運動場區擴散結果



圖 6、模擬高雄車站區擴散結果



圖 7、電動雙片式夾爪搭載深度相機與輻射偵檢頭



圖 8、包件夾取實測



圖 9、電動收納艙收放實測

強化輻射災害應變與管制技術之研究(2/4)

建立南部備援實驗室之環境試樣分析備援技術

Strengthen research radiation disaster response and control technology (2/4)
Establishment the backup technology of environmental sample analysis in the
southern backup laboratory

(計畫編號：AEC110001)

葉一隆¹ 陳庭堅¹ 徐文信¹ 林志忠¹ 黃韋翔¹ 高薇喻²

¹國立屏東科技大學 ²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。

After the Fukushima accident in Japan in 2011, the Atomic Energy Council, AEC, thoroughly reviewed the lessons learned from Fukushima accident and proposed the “Programs for Safety Re-assessment”, make a proposal of the program and then publish the report. According to the report, it implies in case of the nuclear disaster, various radiative samples occurs and must be analyzed. As a result, there is a great demand for the detection and analysis of those environmental samples. The samples include agricultural,

fishery, livestock products, water, air, soil, and biological environmental samples. In conclusion, for the sake of ensuring the environmental radiation safety, the southern backup laboratory has to promote its capacity in radioactivity analysis. Therefore, the aim of this project is to enhance the capacity of radioactivity analysis in environmental samples, and finally acquired the extending accreditation about the items of environmental samples from the Taiwan Accreditation Foundation (TAF)。

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，包括完成環境試樣放射性分析技術增項認證，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通識課程、支援核能三廠周遭鄉鎮里學校核安講習及現場輻射偵檢器檢測展示等項目。平時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，輻射災害備援實驗室亦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 110 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、完成核三廠周圍鄉鎮里及學校核安講習辦理現場輻射偵檢器輻射檢測展示、完成參加國際環境試樣放射性分析能力比較實驗檢討報告、

通過 TAF 水中總貝他分析增項認證。

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

於 110 年的 1、4、7、10 月配合輻射偵測中心安排前往台電核能三廠採集電廠周遭環境樣本，包括岸沙、海水、淡水、土壤、牧草及生物試樣等，並將樣本前處理後上機分析；分析完畢之樣本再與輻射偵測中心交換樣本分析，比對雙方前處理的能力及樣本檢測的能力。

(二)水中總貝他分析增項認證

為了將放射性分析擴展至環境領域並健全各類放射性核種檢測，規劃申請水中總貝他分析增項認證。本實驗於 110 年 3 月 17 完成相關操作程序書，並於 3 月 18 日向 TAF 提出總貝他分析之增項申請，增項項目報包括海水、淡水及空浮微粒等 3 項。TAF 於 10 月 15 日通知增項認證通過並取得證書。

(三)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 110 年報名 IAEA 國際原子能總署試樣比對試驗、TAF 放射性分析能力試驗及輻射偵測中心國內環境試樣比較實驗，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”。

(四)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 301 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。

二、學術成就方面

本實驗室於 110 年 9 月 22 日參加「109 年原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會，並以口頭報告方式發表計畫成果兩篇，計畫名稱分別為「台灣與境外食用菇類與栽種介質的放射性核種分布之初探」以及「台灣菸草(美濃地區)與土壤背景放射性物質 ^{238}U 、 ^{232}Th 與 ^{226}Ra 之初探」。

本實驗室於 110 年 9 月 25 日參加「2021 International Conference on Applied System Innovation」國際研討會，並以口頭報告方式發表論文兩篇，題目分別為「Transfer factor of natural radionuclides from soil to tobacco compartments and tobacco leaves hazard assessment due to smoking」以及「Artificial and natural radioactivity in edible mushrooms from Taiwan」。

參、展望

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

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

(計畫編號：AEC110005)

吳杰 張巧怡 劉世恩 黃上容

國立陽明交通大學

為強化北部地區建置環境試樣之輻射偵測能量，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。本年度已完成建立環境水樣之放射性氚核種分析技術，進一步將量測方法進行優化，並完成相關標準程序書的撰寫。此外，實驗室舉辦食品檢驗先鋒營的營隊活動，以達成輻防教育之推廣。為提升實驗室能力與民眾公信力，實驗室報名參加核能研究所與國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)之放射性核種能力試驗與實驗室間比對，並以高分 A 級通過，進而驗證實驗室之輻射度量能力是值得信任的。

In order to strengthen the radiation detection energy for environmental samples in the northern region of Taiwan, the Atomic Energy Commission of the Executive Yuan entrusts the National Yang Ming University to continue to improve the ability of the northern region radiation disaster inspection and analysis center, so as to improve quick response to the radiation disasters caused by nuclear accidents. This year, the tritium analysis technology for environmental water samples has been established, the measurement method has been further optimized, and the relevant standard procedures have been

written. In addition, the laboratory organized a camp activity of the Food Inspection to achieve the promotion of radiation protection education. In order to enhance the laboratory's capabilities and public credibility, our laboratory signed up to participate in the radioactive sample capability test and inter-laboratory comparison proposed by the Institute of Nuclear Energy and the International Atomic Energy Agency (IAEA). We passed with a high grade of A to prove that the laboratory's radiation measurement capabilities are trustworthy to the public.

壹、計畫目標

當發生重大核子事故時，可能危害周遭居民的民生安全，故有賴建立完善的環境檢測分析技術，並進行環境監測與度量。一般核電廠運作或發生核災事故時會產生氙核種，由於其屬於低能量貝他衰變核種，難以利用加馬能譜分析技術加以檢測，因此建立適當且標準的前處理與檢測流程，將有助於核子事故之緊急應變，完善輻射檢測分析與劑量評估。

貳、重要成果

本實驗室建立以蒸餾法進行環境水樣氙核種之前處理，並透過量測氙核種的回收率作參數優化之分析(如圖一)，由實驗結果得知，收集第二批 7 mL 的餾液進行氙活度量測，其結果較能穩定且接近理論值，因此未來將以此條件作為氙水前處理之標準程序。

在氙核種之量測方法方面，實驗室使用 Tri-Carb 4810 液態閃爍計數器進行檢測，透過建置消光曲線(Quench Curve)來修正樣品的偵測效率，並藉由調整能窗大小以提升氙核種定量的準確性。依據實驗結果發現，能窗在 0 keV ~ 5 keV 之間能保有低背景計數的優勢，同時可避免犧牲過多的樣品計數值，因此決定以此參數作為液態閃爍計數器之參數設定。

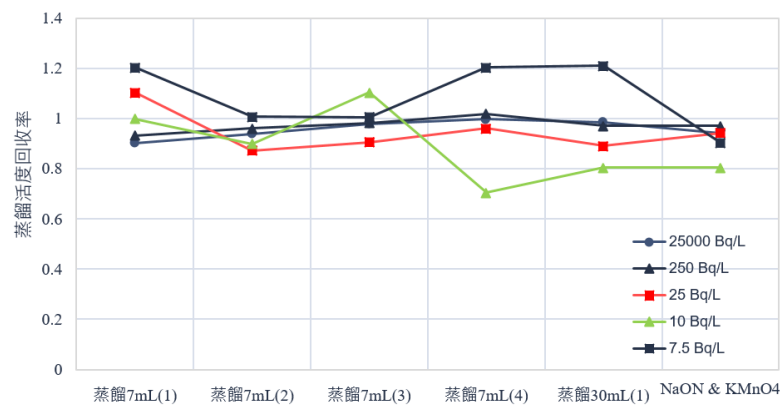
在量測最佳化分析方面，透過增加試樣量來降低最小可測活度值

(minimum detectable activity, MDA)，然而，試樣量的增加會導致閃爍混合液的混濁，因此，實驗室配製不同樣品負載度的閃爍混合液進行實驗，並依據視覺評估法及 tSIE 值的實驗結果選擇最合適的樣品負載度，根據實驗結果，以樣品負載度 35%作為閃爍混合液的配製標準。除了調整試樣量外，增加樣品計測時間亦可有效降低 MDA，由計測時間與 MDA 的實驗結果(如圖二)得知，計測時間 1000 分鐘的 MDA 已低於環境規範標準，故將以此參數作為樣品的量測時間。綜述以上，實驗室完成建立一套完善且具系統性的氚水量測程序。

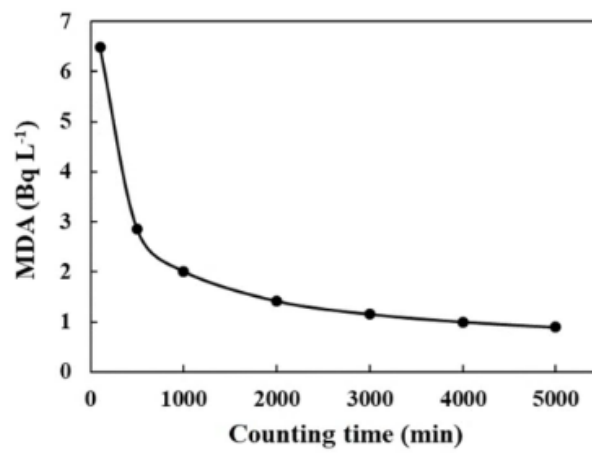
在國內外能力試驗方面，我們共參加三場檢測試驗，包括 IAEA 能力試驗、核能研究所能力試驗以及輻射偵測中心的比對實驗，所有試驗結果皆符合標準合格通過，藉此驗證實驗室在加馬能譜分析以及總貝他活度分析之檢測能力。而在對外服務與教育宣導方面，實驗室辦理「輻射安全與食品檢驗先鋒營」，並參與由原子能委員會舉辦之核安演習，推廣輻射安全的基礎教育與實驗室業務。

參、展望

本實驗室將持續向上提升輻射度量的能力，透過參與能力試驗以維持且精進量測技術水平，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，應為福島食品之開放進口，未來將針對銈-90 核種建立一套快速與準確的前處理及檢驗分析系統，以精進實驗室難測核種之計測能力，增強國內核子事故之應變能力與放射性核種檢驗分析之能量。



圖一、蒸餾回收率



圖二、MDA 與計測時間關係圖

輻災應變資源建置與實務管理之研究

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

(計畫編號：AEC110003)

馬士元¹ 張馨心²

¹銘傳大學 ²瑞鉅災害管理及安全事務顧問股份有限公司

本計畫蒐集德國、法國與歐盟對輻射災害之應變架構、權責單位及現行機制、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；我國災害應變時期，政府與民間團體合作推動現況，以供輻災應變推動參考。

為了協助地方縣市政府的第一線應變人員（以下簡稱應變人員）辨識輻射災害、熟悉輻災應變步驟與注意事項，平時做好演練與準備，災時能有暢通的諮詢管道，本計畫進行輻射災害應變諮詢平台開發之先期評估、「放射性物質意外事件」（火災）情境分析與腳本撰擬，及辦理地方政府輻射災害防救講習（以下簡稱輻災講習）。藉由上述項目的準備與訓練，提升應變人員的輻災應變能力，強化我國的輻災應變能量。

This project collects the response system structure, authorities, and mechanism of radiation disasters from Germany, France, and Europe, as well as the planning management and latest situation of recovery and rehabilitation after the Fukushima incident in Japan. At the same time, it presents the promotion of collaboration between government and public during the disaster response period of the country as a reference to the radiation disaster response promoting campaign.

To assist the first responders of local governments (known as respondents) identifying radiation hazards, and familiarize themselves with radiation disaster response steps and precautions so that they can put practice the drills and preparation usually and have good communication when facing disasters, this project conducts the pre-evaluation of development of radiation disaster consulting platform, drafts the scenario analyzation and drill script of radiation material accident with fire, and holds radiation disaster prevention and rescue workshops for local governments. By providing the preparation and training above, the radiation disaster responding ability of respondents can be escalated, and the resilience of the country can be strengthened.

壹、計畫目標

為了提升我國政府的輻射災害應變能力，本研究透過國外的文獻蒐集、國內有關於防災志工（防災士）之推動，以及針對地方縣市政府第一線應變人員辦理之相關訓練、劇本擬定、訓練系統設定等，強化一般民眾及公部門人員兩大主軸對於輻射的知識與應變能力，在這兩大主軸之相輔相成之下，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處理污水之最終處置

存放於福島第一核電廠的大量儲水槽阻礙廢爐的作業進行，日本政府於 2021 年 4 月 13 日決定預計 2 年後實施存放於福島第一核電廠廠區內的處理水排放至海洋的計畫。排放前用海水稀釋處理水到 100 倍以上，為日本國家標準值的 40 分之 1，相當於世界衛生組織的飲用水水質指引規定的 7 分之 1，以稀釋氚濃度的方法，盡量讓 1 年

釋放氙的數量低於事故前福島第一核電廠設定的標準。

(二) 日本輻射暨 COVID-19 複合式災害應變對策

日本內閣府政策統籌官於 2020 年 6 月 2 日公布《新型冠狀病毒擴大傳染之傳染病流行下核子事故發生時的防護措施基本原則》，設定 COVID-19 大規模流行的情況之下發生核子事故，建議各都道府縣應考量核子事故緊急應變防護措施和流行病因應特別措施法行動計畫如何地同時進行，初擬 4 項方針。避難處所的傳染預防措施，天然災害或核子事故的災害情境下 2 者皆無差異，值得我國參考。

(三) 災害應變政府與民間團體合作推動現況

消防署積極辦理防災士培訓與推動計畫，對象包含社區民眾、民間企業及團體，其中，財團法人中華民國佛教慈濟慈善事業基金會對於防災士的培訓展現出高度的熱誠及參與度，積極申請成為防災士培育機構，協助志工進行訓練與考核。而中華民國紅十字會同樣也致力於國內外的防災及救助行動，為我國不可缺少的防災能量，經聯繫慈濟及紅十字會，均表示未來願意與原能會建立溝通管道，確定合作方向與目標。

(四) 國際上針對輻災之應變架構、權責單位及現行機制

德國的核子事故緊急應變概念與我國相近，由核電廠營運商通報中央的主責機關，中央主責機關進行緊急應變命令之發布，外部研究單位提供專業的應變建議，地方政府接獲中央的應變命令後具體執行。法國則將主要的廠外緊急應變工作交由地方首長負責，中央單位及外部研究單位、警政單位提供支援與協助。德國的核子事故應變參考《基本提議》(Basic Recommendations) 內容，研擬核子設施不同災害狀態下的因應對策，並且建立能夠即時向民眾發布的文件，在取得專業諮詢建議前即能向民眾告知相關的緊急應變對策或指令，值得我國中央

或地方政府參考。

二、輻射災害應變諮詢平台開發之先期評估

為了讓應變人員第一時間抵達輻災（或疑似輻災）現場進行應變處置時能有暢通的諮詢管道，本平台之運用目的與背景設定為輔助災害現場應變人員進行輻射災害辨識與通報，而其他能夠輔助災害現場進行應變之功能為輔，功能包含圖像化辨識輻災、核種資訊、個人防護建議、結合既有之諮詢管道（核安監管中心專線、LINE 帳號）、輻射劑量換算等。

三、「放射性物質意外事件」（火災）情境分析與腳本撰擬

本計畫團隊參考消防署編定之消防人員訓練教材，確認工廠火災之特性與搶救重點，研擬「放射性物質意外事件」（火災）腳本，設定某一工廠進行放射線照相檢驗作業時，突然工廠內部起火燃燒，工作人員情急下未將射源回收、倉皇逃出造成複合式災害。以災害現場未取得輻射偵檢器的情況下，除聽取工廠負責人提供的資訊，還會與相關單位多方查證以取得正確且豐富的救災資訊，在確保應變人員安全無虞的情況下以人命搶救為優先目標儘快將傷者救出。

四、地方政府輻災防救講習

藉由疫情下的災害防救作為、輻射災害第一線應變人員手冊（2 版）、從實際案例看輻射災害第一線應變人員手冊（2 版）之應用、輻射偵檢儀器介紹與操作、輻射災害應變諮詢平台介紹、疏散收容場地參訪等課程，有效提升地方政府及相關單位輻災業務承辦人員以及應變人員對應變機制與防救措施之了解，熟稔相關作業程序以維護自身安全，並以實際案例讓與會人員更熟悉應變手冊之應用，進一步提升輻射災害緊急應變能力。

參、展望

近 10 年氣候變遷的影響下，災害的衝擊強度與發生頻率逐漸上升，同時近 2 年遭遇嚴重的 COVID-19 傳染性疾病與戰爭，天然與人為災害的複雜度與嚴重程度已超乎預期。透過蒐集調研其他國家的經驗、系統開發評估、災害情境腳本撰擬、訓練與演練、與地方團體建立合作管道與機制等作法，提升我國輻射災害的應變能力與建構完整的應變網絡。

日本福島事故情境於我國之因應處置研析

Research and Analysis of the Causes of Fukushima Accident in Japan and the Countermeasures

(計畫編號：AEC110006)

馬士元¹ 鄭銘泰² 馬國宸¹ 辜暘芷¹

¹銘傳大學 ²台大醫院

本計畫透過蒐集日本福島事故應變處置經驗，以核能二廠與核能三廠為設定電廠，進行我國對於核子事故廠外應變與復原階段之整備作業研析，並分析我國萬一發生核災時相關因應處置作為所需人力與物力資源，研析關鍵影響項目與應對作為，進一步提出可供我國檢視各級政府對於跨縣市大範圍災害之應處機制與人力物力等資源整備之參考事項，以及核子事故自緊急應變階段轉換至復原階段所須完成之建議整備事項，並依前述分析結果，提出未來可供核安演習強化演練情境與內容之建議，以及跨縣市應變整備與復原協調議題。

壹、計畫目標

日本東北於 2011 年 3 月 11 日發生規模 9.0 的地震，引發 14-15 公尺之海嘯，包含宮城縣、岩手縣、福島縣等地沿海地區都遭受到海嘯襲擊，二次災害包含氣仙沼市油槽引發大火、仙台機場被淹沒，以及災害情形最為嚴重之福島第一核電廠輻射外洩事故，2011 年迄今依據日本統計，因 311 地震、海嘯襲擊之遇難人數為 15,897 人，失蹤人數為 2,533 人、3,701 人受傷，目前仍有約 4.1 萬人不得回到福島輻射災區居住。隨著日本福島事故的發生，全世界的人民從此案件中了解輻射災害對於日常生活之影

響，但由於資訊不透明與缺乏專業知識，造成許多不必要的恐慌。生活上核能被廣泛應用於許多領域，例如：核能發電、農業、工業、醫學、通訊等，對於人類社會進步、醫療與經濟發展等具有相當重要的應用地位。行政院原子能委員會於 110 年規劃本研究計畫，為提升我國輻射災害應變管理與能力，參考並彙整日本福島事故後進行之應變、復原及重建之經驗與後續整備作業內容，以核能二廠與核能三廠為設定電廠，進行我國核子事故廠外應變與復原之整備作業研析，分析我國一旦發生核災時之相關因應處置作為，與核子事故自緊急應變轉換至復原重建所需完成之建議整備項目，並提出未來核安演習強化演練情境與精進之建議。可供我國檢視跨縣市大規模輻射災害應處機制、人力與物力資源整備之參考。藉由本計畫的推動，提昇我國的核子事故防救災能量，同時盤點跨縣市大規模災害之應處機制與人力物力等資源整備，使第一線的防救災人員對於災害防救災事務的推動可以更加順暢。依據行政院原子能委員會律定之工作項目，以及參考過去執行經驗與中央部會、專家學者等建議，積極進行檢討當前防救工作缺失，主動研擬改善、補強計畫。

貳、重要成果

一、辦理核子事故整備及應變共識營：

日本福島事故發生於福島第一核電廠外海，地震引發之海嘯嚴重灌入福島第一核電廠，導致後續災情發生，依據日本政府於福島事故應變時期所採行的民眾防護措施，及疏散撤離等應變作法，套用於我國核能二廠、三廠之情境想定。本次基本情境想定為重大天然災害併同核能二廠、核能三廠發生核子事故之複合式災害，核子事故發展有時序性，我國已採超前部署策略，並參照國際風險分級及分區分時疏散概念，依事故時序針對特定群眾，執行預防性疏散撤離；因此參考日本福島事故之

緊急應變、疏散撤離時序及輻射空間劑量濃度，本節針對我國核能二廠及核能三廠分別設計複合式災害情境想定，各別模擬核能電廠因地震、海嘯侵襲，功能喪失須預先進行之撤離作業；由於地震造成核電廠設備故障，導致周邊地區需優先進行搶救以進行學生、居民、弱勢族群預防性疏散作業等，地震引發之海嘯易淹之沿岸地區，及海嘯發生後導致核能電廠安全設備無法運作，高壓引發廠房氫爆，地方政府及區公所救災能量及範圍有限，除透過區域聯防協定，請求鄰近縣市救災人員協助外，亦應聯繫中央相關救災單位請求支援。以下為日本福島事故套用於我國核能二廠及三廠之核子事故基本情境想定，依計畫執行大範圍災害應變整備需求研究，想定設計不考慮目前我國電廠的安全措施與應變能力，並依照日本福島事故輻射劑量及範圍套入我國核能二廠及三廠。

- (1).萬一我國發生核災時，相關因應處置之關鍵影響項目與應對作為建議。
- (2).可供我國檢視各級政府對於跨縣市大規模災害之應處機制，與人力、物力及資源整備事項之建議。
- (3).核子事故自緊急應變階段轉換至復原階段所需整備事項建議。
- (4).可納入核安演習強化演練情境與內容之議題建議。

參與單位	北部場	南部場
行政院災害防救辦公室	2	0
衛生福利部	2	0
經濟部	1	1
交通部	2	2
內政部	1	1
教育部	0	0
國防部	1	1
行政院農業委員會	1	2
臺北市	2	-
新北市	2	-

基隆市	2	-
桃園市	0	-
宜蘭縣	1	-
屏東縣	-	7
臺東縣	-	3
高雄市	-	3
行政院原子能委員會	5	4
人數小計	22	24

情境討論由專家引導方式，將各單位人員分組討論，以日本福島事故情境套用於我國核能二廠及核能三廠，在不考慮目前我國核能電廠的安全措施與應變能力及我國地形條件之前提下，依事故後的時序，進行核子事故應變處置之核心對策議題延伸與討論。

表 1 我國核子事故推演時序與應變處置討論內容

項目	核子事故短期整備及應變建議 災害發生(D 日)起 2 週內(D+14 日)+ 災害發生後 2 週 (D+14 日)至約 3 個月內(D+100 日)
應變機制 啟動	1. 先做地區管制並全面撤離熱區內民眾。 2. 應立即封鎖警戒線，並加強災區警力配置，以利管制範圍。 3. 應將即時訊息公開(資訊平台、記者會)。 4. 災區範圍應設置進出管制，避免無關民眾進入。 5. 限制管制區之寧林漁牧產品流通。 6. 應研擬民眾臨時返家規則，並公告給民眾，穩定民心。 7. 應於災區及收容區域加強治安維護。 8. 應評估收容所人數，研議規劃擴大收容空間，建立組合屋，臨時設施以利收容人正常生活。 9. 建立疏散避難交通網路管制(火車、高鐵、國道等)。 10. 建立應變人員安置及輪班機制。 11. 建立防救災人員安全限值及防護機制。 12. 建立報平安專線，以利統整傷亡人數。 13. 建立與穩定通訊平台，供民眾間家人之聯繫。
疏散避難 及救援	1. 建立失聯人口名冊建立與協尋機制，設置失聯人口查報單一窗口。 2. 建立臨時性戶政管控系統，以便追蹤人流。 3. 建議失聯人口調查可利用生活物資利誘，以確認總失蹤人口。

	- 應明確公布社福制度，以利民眾了解社福內容及申請補助。 - 提供宗教關懷，並協助宗教團體安全進入收容避難場所。 - 應維持通訊設施之正常運作。
收容安置	- 建立收容所名冊，以利互相比對及人數掌握。 - 為掌握收容所人員，應建立收容所工作人員名冊。 - 確保收容所人力、物資資源分配。 - 加強警力維持收容區域治安與調解事故。 - 應於收容區域建立 Covid-19 隔離區，與疫情相關規範。 - 應建立收容區域醫療站，提供災後心理輔導、慢性藥物等相關醫療幫助。 - 建議鼓勵民眾依親，及人流情況掌握。 - 收容區域應提供食衣住行之生活輔導，並加強衛教宣導。 - 建立收容區域環境清潔消毒維護制度。 - 應於 D+14 前完成 EPZ 範圍內收容及物資補充。 - 持續針對新進民眾造冊及回報。 - 招募收容區域之醫療人員、社工、清潔人員、志工團體。 - 徵用地區旅館作為避難收容處所。
物資補給	- 民生物資供給：[熱區]運送方式、人員業者防護、食安；[冷區]開口合約廠商供給物資。 - 應維持民生用水、電能源。 - 應於水資源監測公告前，提供民眾瓶裝水。 - 應統一調度提供充足物資，避免哄抬物資行為。 - 加強查緝民生物資惡意囤積、價格之炒作。
劑量監測	- 建議優先針對民生用水源進行輻射檢測。 - 建議建立民眾輻射劑量檢測資料與健康情形。 - 核災影響範圍多為市區，D+14 至 D+100 期間，致力於除汙、清洗市區道路，迅速恢復市區運作。 - 應對於背景輻射持續監測。 - 應於災區設置輻射監測儀器，並公告數值給民眾。 - 應給予民眾輻射傷害資訊及健康檢測醫療服務。 - 應提供各單位值勤人員健康檢測及教育訓練。 - 應公告碘片供應情形與使用標準。 - 應裝設偵檢儀器(門框、劑量筆等)。 - 應於災區進出口設置災民輻射檢測站。 - 請收容所與醫療部門持續追蹤受汙染民眾之健康情形。 - 應實施農林漁牧產業環境輻射監測。

項目	核子事故中長期復原及應變建議 災害發生後 3 個月(D+100 日)至 2 年(D+730 日)+ 災害發生後 2 年(D+730 日)至 10 年(D+3650 日)
應變機制 啟動	1. 政府應重新規劃公務機關與行政組織運作方式及回歸安全性。 2. 政府應協助搬家與安置事宜。 3. 中央單位應媒合民間救援及團體。 4. 應依據受災害程度訂定補助標準。 5. 應依照輻射劑量值調整疏散避難及救援分區管制範圍。 6. 應進行災後宣導與說明災後復原進度。 7. 應公布環境劑量檢測與評估報告，將數據與驗證區域重複確認安全性。 8. 應研議解除範圍管制機制與條件。 9. 應協助捐款金發放與分配。 10. 建議經濟部提供返鄉重建之低率貸款(房屋貸款、商業貸款)。 11. 建議經濟部基於減輕災區民眾負擔，降低稅捐、強化工商發展及提供就業機會。 12. 建議提供幼兒補助。 13. 區域管制制度應依照環境劑量、公共資源、人口回流與經濟復甦進行滾動修正。 14. 針對劑量舒緩地區，研擬開放民眾返鄉策略，並持續追蹤，協力重建家園。 15. 針對生命或健康受損民眾，協助他們恢復健康或給予補助。 16. 應研擬異地生活重建規劃。 17. 應於困難返還地區明確標示，軍、警力持續管制。 18. 應針對輻射災害提出強化災害之預防機制。
收容安置	1. 應調查民眾持續留居收容意願。 2. 部分收容所關閉，並調整人力、物力及資源。 3. 提供中、長期留居之收容住宅及申請條件研擬。 4. 建議困難返還區：長期收容->協助移居（組合屋、收容處所，避免二次遷移）。 5. 恢復學童就學，教育部應安排安置學校。 6. 恢復民眾就業、輔導失業人口就業。 7. 經濟部應提出各項經濟補助條件及申請方式，辦理紓困。 8. 於收容所內提供幼兒教育及師資。 9. 收容安置環境條件提升。 10. 提供弱勢族群經濟、醫療及照護援助。

	11. 提供誘因協助災民搬離收容所，並輔導災民工作需求。 12. 提供社會住宅、包租代管住宅。 13. 提供民眾長期醫療設施與公共設施之設置。 14. 提供收容災民心理輔導與心靈重建。
地區重建	1. 應辦理災後復原策略說明會，以利與災民溝通及配合事項。 2. 應清楚讓民眾了解管制區範圍與不可居住範圍。 3. 應針對核輻射進行衛教宣導。 4. 因應避難區域及管制區域變化，安排民眾陸續返鄉。 5. 協助可返還區域重建原有的生活機能，包括供水、供電、通訊、道路復原，學校復校。 6. 協助可返還區域之房屋修繕與重建。 7. 降低災害區域之稅賦，以利提升區域發展速度。 8. 永久屋與社會住宅之地點選定，應計畫進行結構鑑定，與公告區域安全評估內容。 9. 復原階段應與居民進行討論，瞭解地區重建、人民生活與經濟恢復等議題。 10. 建議提供產業復興與補助紓困(10 倍卷、現金)。 11. 建議提供消費卷振興經濟(糧票、5 倍卷)。 12. 提出長期育兒計畫予補助條件。 13. 提出災區廢棄物及除汙工作處置做法。 14. 提出地區重建之可行性評估。 15. 提供房屋修繕補助申請。 16. 基礎民生設施之改善重建(災區)。 17. 毀損道路與公共設施復原、恢復運作及維護。 18. 推動觀光，建立區域教育紀念博物館。 19. 推動國內外觀光，振興旅遊經濟。 20. 推動災後地區民眾參與公共事務。 21. 應規劃適種區，協助農業復興。
劑量監測	1. 依照國際標準食品管制、訂定食品監測標準。 2. 建議應公告各地區、民生用品及食品之監測結果。 3. 建議建立食品、民生用品之安心標章。 4. 持續監測災區輻射劑量，並公布檢測結果。 5. 持續監測飲用水、食物、廢水排放之輻射劑量。 6. 持續監測農、林、漁、牧之產品輻射劑量。 7. 持續對環境背景輻射量追蹤。 8. 應定期提供健康檢查服務與追蹤。

參、展望

本計畫彙整福島第一核電廠之『情境卡』，未來可搭配核安演習之設計，以情境卡為題庫，規劃核安演習之兵棋推演，可以小規模、特定議題之深入探討方式，來補足大規模核子事故狀況下，各機關單位縱向橫向之連結環節。由於目前核安演習兵棋推演以固定劇本研討方式進行，議題範圍較大且彈性有限，因此運用『情境卡』形成議題系統，或者以隨機抽取方式進行研討，可讓核安演習之兵棋推演深度更具體。再者，兵棋推演之結果，可於次年採取實兵驗證推演成果的方式進行，也可以將演習的規劃與執行更符合國際標準。就我國核子事故廠外應變與復原整備作業之強化，本研究則提出以下結論：

- 一、本計畫之研究分析我國核電廠基礎資料，核災時需要跨縣市大範圍因應處置作為，尤其各縣市地區之收容避難場所之設施設備容量，應逐年與其他大規模災害如地震等整合規劃，以符合可能之情境想定。
- 二、參考日本資料及前項分析結果，提出之核子事故自緊急應變階段轉換至復原階段，所需完成之建議及整備事項，下表為本計畫彙整之重點整備事項及建議。
- 三、未來核安演習可依據本計畫彙整之日本福島事故情境卡，依照事件內容、發生地點及時間，強化核安演習演練情境與內容，進而延伸至跨縣市應變整備與復原協調之討論。
- 四、建議中央部會及地方政府之核子事故災害防救人員，應對於核子事故情境研擬討論，應提高參與度。
- 五、建議於核子事故災後應變及復原階段之各項作為，應嚴正看待資訊正確性及透明性。



圖 1、核子事故整備及應變共識營-北、南部場次

核管處

核子反應器設施安全與除役前期作業管制實務研究	1
110 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	9
核電廠廠址依除役進程可調整管制措施實務研究	15
110 年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析	23

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 Safety and Early-Stage Decommissioning Activities

(計畫編號：PG11008-0111)

林家德

核能研究所

本計畫目的為持續發展與深化核電廠運轉及除役可能面臨之技術能力，以解決管制實務需求為導向，並配合除役管制業務而擬訂。110 年度研究重點在於精進熱水流分析、地震、材料腐蝕與維護、風險評估等相關核安評估能力，同時因應我國核能電廠運轉執照陸續屆期，機組進入除役階段但爐心仍置有核燃料之特殊組態，參考各國核能電廠除役經驗以及法規要求，拓展技術評估與分析視野，強化除役管制作業品質及管制要求，促使國內核電運轉及除役工作均能在確保安全之前提下順利進行。

This project aims to constantly develop and reinforce the technical capabilities required by regulation of the operation and decommissioning of nuclear power plants. In 2021, the research focuses on improving nuclear safety assessment capabilities related to thermal hydraulic analysis, seismic safety assessment, material corrosion and preventive maintenance, and risk assessment. Taiwan is obliged to cope with the special configuration that some nuclear units have entered the decommissioning phase while the reactor cores are still placed with nuclear fuels. This project expands technical assessment and analysis perspective, and strengthens the quality of decommissioning regulatory operations and regulatory requirements, as a result, the domestic

nuclear power operation and decommissioning works can be performed smoothly under the premise of ensuring safety.

壹、計畫目標

本計畫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，精進熱水流分析、地震、材料腐蝕與維護、風險評估等核安管制技術外，同時提供技術支援能力；計畫對於除役管制技術，研擬我國機組進入除役階段而爐心仍置有核燃料之特殊情形，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，以保障國內除役作業符合安全規範。

貳、重要成果

本計畫係依據 110 年 2 月 1 日原能會『會核字第 1100001333 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 2 年。

一、研發成果之重要貢獻

110 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 110 年度秋季會議蒐集熱水流程式最新資訊，配合核二廠除役過渡階段管制需求，使用 TRACE 熱水流分析模式，完成核二廠除役過渡階段初期全黑事故安全評估，建立關鍵時序數據資料表。確認好氧菌與厭氧菌之合適生長溫度，並

確定具較強孔蝕風險的厭氧菌在低溫下將不會被活化，表示除役機組在相同水質條件下，未來因熱源減低受微生物腐蝕之趨勢係為持續降低；並確認不銹鋼對於微生物腐蝕具有一定程度之抵抗能力，故於除役過渡階段下機組中不銹鋼製之組件，暫無需顧慮微生物腐蝕之影響。

2.核電廠後福島管制審查技術精進研究

完成核二廠除役過渡階段共用系統(含安全相關與非安全相關)「設計或運轉變更」或「不可用」對2號機可能之潛在影響。針對美國地震型機率式海嘯危害度分析程序之研析，模擬分析考量馬尼拉和琉球隱沒帶造成之核三廠外海機率式海嘯危害度波高，完成分析程序建置。完成機率式地震危害度報告(PSHA SSHAC Level 3)斷層震源於機率式海嘯危害度分析方法情境可用性探討，並建立海嘯模擬所需參數之計算程序。

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

藉由地震型和海底山崩型機率式海嘯評估方法之研析與評估模型建置，有助於了解海嘯對國內核電廠之影響情形，並協助海嘯相關議題之審查工作。協助審查「核二及核三廠台灣地區核能電廠加速耐震評估程序(Expedited Seismic Evaluation Process, ESEP)報告」和「核一、核二及核三廠地震危害篩選(Screening, Prioritization and Implementation Details, SPID)報告」，並提供核電廠相關系統及結構組件(System & Structural Component, SSC)之耐震安全性管制建議。

(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

於110年研究基礎上，提出大修風險顯著性確立程序之第1階段，納入大修視察發現(先兆類與修件類)以及大修肇始事件(喪失餘

熱移除、喪失外電、與喪失爐心注水)之影響。綜整全盤成果，針對運轉中及除役電廠，完成視察風險顯著性評估工具以及使用者操作手冊，提升風險告知技術能力。

2.核電廠運轉及除役期間事故分析及緩和策略研究

彙整國際案例，完成核電廠除役期間禁制區邊界與低密度人口區變更計畫管制重點研析，提出範圍變更審查要項。延續 109 年度完成之 MELCOR 核二廠在功率運轉狀態之輸入檔，完成核二廠在除役過渡階段前期之開蓋模式並完成穩態運跑，作為管制參考。

3.除役期間核電廠重要設備維護管理安全管制技術研究

蒐集美國重要電氣被動組件維護管理方案資料，研讀整理美國核管會 NUREG-2191, GALL-SLR 建議之電氣被動組件維護管理方案，並與 NUREG-1801, GALL-LR 比對差異，已完成電氣被動組件編號 XLE1(非環境驗證(EQ)絕緣電纜與連接組件)至編號 XLE7(高壓礙子)等項目之比對。研析 IAEA-TECDOC-1957 報告，就除役過渡期間冷卻系統相關泵、馬達、熱交換器等除役留用設備仍持續運行使用，提出因長期運轉產生磨損之經驗回饋。

4.核電廠運轉及除役期間非破壞檢測評估研究

使用 AI 技術中的 Convolutional Neural Network (CNN) 神經網路對渦電流訊號進行影像辨識的技術，以降低人工辨識非破壞檢測訊號所需之人力物力，已成功建置可批次辨識核電廠渦電流瑕疵/分瑕疵訊號的 AI 神經網路系統。

5.核電廠運轉及除役階段材料維護與防治策略研析

進行高程度塑性變形 304L 不銹鋼於高溶氫水化學中之裂縫成長速率實驗，發現高溶氫量之水化學環境可降低塑性變形 304L 不銹鋼之裂縫成長速率。進行碳鋼管材於靜滯水環境中進行腐蝕實驗，

結果顯示在碳鋼管路腐蝕速率較快的條件下，靜滯水中的電導率越高，試片腐蝕速率主要受氧濃度與離子濃度(電導率)影響。

6.核電廠除役視察管制實務研究

研析國際除役與拆除管制框架、實際經驗及法規，如：日本濱岡核電廠之除役現況、拆除作業標準與管制；英國管制機關核能辦公室之核能除役安全評估指南(NS-TAST-GD 026 Revision 5)、除役執照許可條件之核能安全技術視察指南(NS-INSP-GD 035 Revision 6)與建築資訊模型技術評估指南報告(NS-TAST-GD-017 Annex 2)；加拿大除役管制(REDOC-2.11.2)；美國職業安全衛生法(OSHA-1926.55)之粉塵危害章節等。彙整視察員評估指南、除役現況、管制資料數位化與粉塵管制規範之資料，作為我國制定除役管制規範之參考。

二、學術成就

(一)學術成就量化績效

本計畫 110 年度發表國內外研討會及期刊論文共 9 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 32 篇，技術報告及檢驗方法報告計 5 篇。

(二)摘述說明

1. 研究論文「Effects of heat treatments on the microstructure and environment-induced cracking of CF8A steel in simulated BWR water」，刊登於國際期刊「International Journal of Pressure Vessels and Piping」。此篇主要探討在模擬沸水式反應器(BWR)環境下，不同熱處理參數對 CF8A 鑄造不銹鋼之環境效應加速劣化的影響。實驗結果顯示，熱處理後之微觀組織對日後的環境效應加速劣化，詳如圖 1。

2. 研究論文「Multiple Criteria Decision Making on Damage Assessments of Target Building Array Subjected to Minor and Destructive Earthquakes」，發表於「Proceedings of the 22nd Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering (SEEBUS 2021), Online Conference, Suwon, Korea, October 15」，延伸針對核電廠圍阻體廠房和相關廠房所發展的三種結構系統識別技巧，進行一般結構多重標準決策的健康診斷，詳如圖 2。
3. 研究報告「CAMP 合作計劃下核電廠除役過渡階段系統安全分析與評估」，說明核二廠除役階段開蓋狀態下全黑事故發生初期階段池水升溫時，池水體積會膨脹來因應密度的改變，並將熱水流程式分析結果之關鍵時序彙整於成果表中，建立事故發展關鍵時序資料庫，詳如圖 3。

參、展望

本計畫為強化國內核電廠管制技術，替除役前的安全把關，110 年度持續針對核電廠耐震與抗海嘯等管制議題，配合地震危害曲線的更新，建立對應的管制審查能力。本計畫並因應長期停機下的設備保養、材料劣化與管制視察工具等需求，完成年度相關研究。未來核能機組進入除役狀態，亦將配合管制單位，繼續確保用過核子燃料貯存的安全並支援各項除役過渡階段前期可能面臨的管制需求。

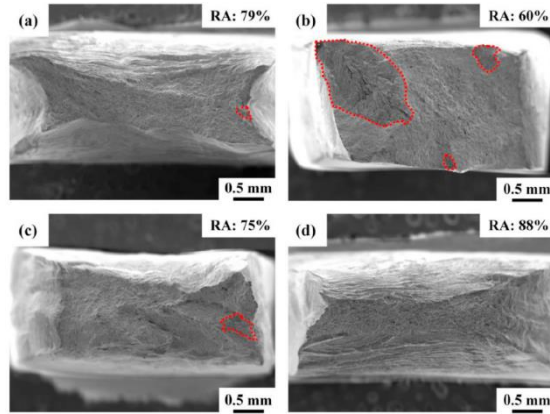


Fig. 3. Macroscopic fracture appearance of the (a) C, (b) A, (c) R and (d) S samples after SSRT tests in simulated BWR water. The red-dotted region indicates the brittle fracture area. (Note: RA indicates the reduction of area of the sample).

圖 1. 不同熱處理參數對 CF8A 鑄造不銹鋼之環境效應加速劣化的影響

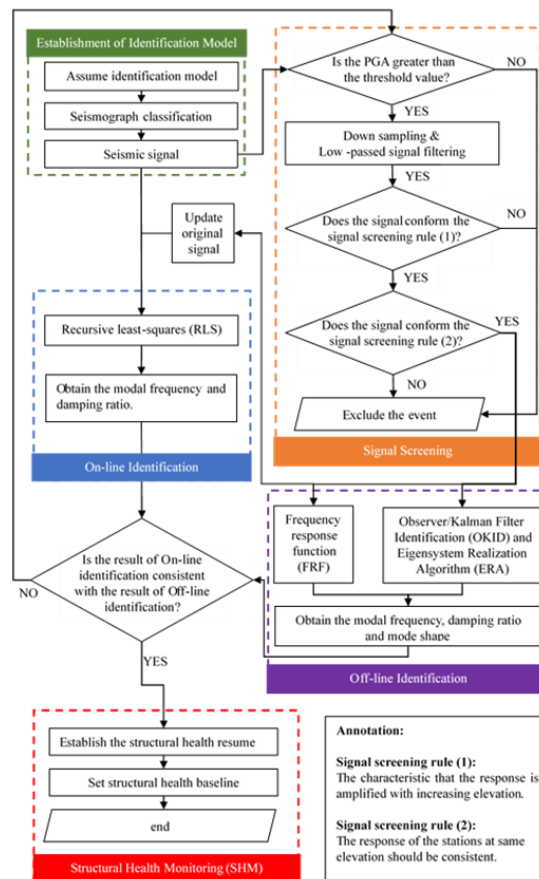


圖 2. 圍阻體廠房和相關廠房結構多重標準決策程序構想

	停機天數 (d)	7	30	60	90	180	365
喪失冷卻後水位降至TAF所需時間 (h)	衰變熱 (MW)	9.1141	5.0586	3.5043	2.8115	1.8215	1.026
喪失冷卻後水溫達到飽和溫度所需時間 (h)	TRACE	7.5	13.94	20.07	25.07	38.54	68.06
喪失冷卻後水位降至上池反應爐交界所需時間 (h)	TRACE	66	119.2	171.70	214.21	323	578.45
喪失冷卻後水位降至TAF所需時間 (h)	TRACE	97.53	179.99	250.37	309.71	428.51	830.91
水位到達TAF後護套溫度到達873K所需時間 (h)		6.2	10.72	15.49	18.85	29.68	49.01

圖 3. 核二廠除役階段開蓋狀態下全黑事故發生初期階段之關鍵時序彙整表

編註：本報告內容係整理自各子項報告，負責人為蔡智明、黃智麟、徐康耀、吳泰宏、蕭伯彬、林書容、李建洲、黃俊源、黃君平。

110 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
2021

(計畫編號：AEC11003006L)

許文勝 歐陽汎怡 林明緯 葉宗洸 王本誠 李進得

楊融華 陳韶萱

國立清華大學

除役核電廠在進行廠房、系統及設備的拆除作業前，通常規劃先進行除污，將其受污染表層及下方的污染物予以移除並隔離，以降低或消除公眾與作業人員的輻射曝露。本計畫以除污組件類型分類，蒐集研析除役過程之封閉系統與開放系統的典型除污工作項目所採取之除污技術，以及相關的廢棄物的處理考量，另亦持續蒐集國外核電廠除役及除污的最新案例與進度，以提供管制單位有關除污技術相關建議與決策參考，並強化管制能量。由於雷射除污技術具有產生少量二次廢棄物、易於控制除污面積與搭配自動化操作等優點，故於本計劃研討彙整當今核電廠雷射除污技術的運作原理、操作特性、除污成效與系統規格等重要特性，以作為管制雷射除污技術之參考。亦進行電化學方法應用於沸水式反應器環境下金屬表面的除污技術之開發研究，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。

而為探討核二廠除役階段用過核子燃料池之安全評估，用過核子燃料之衰變熱於核電廠除役階段為最主要之安全考量，研究中除了針對過核子燃料之衰變熱計算公式進行探討，也針對關鍵因子特性進行靈敏度

解析，並彙整研究結果以提供管制單位安全性建議。

核能電廠除役前應進行輻射偵檢調查以證明廠址的殘餘輻射量符合外釋法規之規範，依據輻射偵檢調查的規劃設計必須符合數據品質目標(Data Quality Objective，簡稱 DQO)之程序規範；輻射偵檢調查結果的評估必須符合數據品質評估(Data Quality Assessment，簡稱 DQA)之程序規範。本計畫研討在實務上如何規劃符合 DQO 程序之取樣設計與進行符合 DQA 程序之取樣結果評估，並 VSP(Virtual Sample Plan)軟體如何應用於偵檢規劃與評估作業中。此外，亦持續蒐集、研析美國核電廠及 NRC 產出與輻射偵檢調查作業之數據品質有關文獻，彙整管制建議以供管制單位參考。

The structures, systems and components of nuclear power plant under decommission, in general, need to be decontaminated before dismantling, which is to remove the radioactive material from them. The purpose of decontamination is to reduce the dose exposure of workers during the decommission process. In order to better understand the applicability of various decontamination processes and technologies, one object of this project is to collect and integrate the typical decontamination work items employing in the closed systems and open systems of the decommissioning process, as well as the considerations of waste management. The latest cases and progress of decontamination of foreign nuclear power plants are summarized to provide relevant recommendations and decision-making references for decontamination technologies. In addition, laser decontamination techniques exhibit high positional for achieving the next-generation nuclear decontamination with low generation of secondary waste, ease of controlling the cleaning area, and the capacity of automation. Therefore, the first task of this project is to investigate the fundamentals, operating characteristics,

performances, and specifications of laser decontamination systems under the goal of contributing to the associated regulation in Taiwan. Moreover, this project carries out the development and research of electrochemical methods applied to the decontamination technology of metal surface in the environment of boiling water reactor, enhancing the research capability of domestic decommissioning technology, and cultivating the talents in the decommissioning technology related to nuclear power plants in the future. The results of research are to provide recommendations and regulatory decisions related to decontamination technology for AEC.

The purpose of this project is to strengthen and apply the safety assessment technology of the Nuclear Power Plant (NPP) in the decommissioning phase. In addition to discussing the calculation formula for the decay heat of spent fuel, the research also conducted sensitivity analysis on the characteristics of key factors, and compiled the research results to provide safety recommendations for the regulatory agency.

According to NRC, the planning and design of radiation survey and site investigation during nuclear power plant's decommission should according to the Data Quality Objective (DQO) process, and the assessment of radiation survey and site investigation to Data Quality Assessment (DQA) process. This project focus on how to progress sampling design planning following DQO process and do the sampling results assessment following DQA process, along with apply VSP (Virtual Sample Plan) software. In addition, through the collection and analysis of documents output by US nuclear power plants and NRC related to the data quality of radiation survey and investigation, regulatory recommendations are compiled for the reference of regulatory 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

本分項計畫對現今雷射除污技術做原理分析與系統規格整理，並彙整近期實驗與測試結果，做為我國未來主要制定相關管制要項與進行除污管制作業的參考；另評析除役過程之典型除污工作項目(封閉式系統與開放式系統)所採取之除污技術和廢棄物管理之考量，持續蒐集各國除役核電廠之相關應用實例。此外，完成電化學分析技術應用於沸水式反應器環境下金屬管件表面的除污方法研究開發，考量不同的金屬材料進行電化學除污條件測試，研析不同材料(碳鋼、不銹鋼、不銹鋼/鎳基)除污特性的評估。

子項計畫二-分項 1：核電廠除役期間安全評估技術強化

本分項計畫透過蒐集國際文獻報告，以了解核電廠嚴重事故下鋁合金火災現象之發生與原因，並針對核一廠除役階段之用過燃料池鋁合金燃料護套進行溫升現象的探討，透過關鍵因子特性進行靈敏度解析，以及建立國內自主分析技術，並針對計算結果進行歸類、探討，彙整評估佐證結果及提供管制單位相關管制建議。

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

1. 研析核電廠除役輻射偵檢作業如何進行符合數據品質目標(DQO)之取樣設計規劃及進行符合數據品質評估(DQA)之統計分析方法。
2. 研析 VSP(Visual Sampling Plan)軟體工具如何應用於取樣設計規劃及統計分析中。
3. 蒐集及研析美國核管會(NRC)與數據品質評估相關文獻，整理彙整有關數據品質管控之建議給管制單位參考。

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

經彙整子項計畫一研究成果，已針對核電廠除役時的典型除污工作

項目(封閉式系統與開放式系統)所採取之除污技術及廢棄物管理方面的考量，並提供國外除役核電廠之相關應用實例，作為後續進行除污管制作業之參考依據並強化管制能量。

子項計畫二-分項 1：核電廠除役期間安全評估技術強化

根據本計畫發展之分析模式以及關鍵參數與靈敏度分析結果，核一廠基本案例電廠全黑事故(SBO)評估結果中得知，電廠於事故後 786 小時用過燃料池水位才會低於 TAF，此時少部分氫氣開始產生，在 1197 小時後用過燃料溫度溫升至 Boral 熔化溫度點 657°C ，接著 1216 小時後溫升至 900°C ，最後約 1233 小時後燃料及護套才會熔毀。因此可知以目前核一廠停機後超過 5 年，且衰變熱如此低的情況下，電廠有充分的時間餘裕來進行救援措施之施行與準備，確保電廠之安全。

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

1. 研析與摘錄核電廠除役所需進行輻射偵檢調查之相關規範文件-MARSSIM(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, NUREG-1575, Rev1)中有關取樣設計及統計分析方法之相關內容。
2. 研析與彙整 VSP(Visual Sampling Plan)軟體工具應用於核電廠除役輻射偵檢調查之取樣設計規劃及統計分析的方式。並蒐集與摘述國際間有關應用 VSP 進行取樣設計及統計分析之相關文獻。
3. 蒐集與研析美國 NRC 著作有關核電廠輻射偵檢數據品質評估之文獻，提出和輻射偵檢數據品質相關之管制建議。
4. 於 2021 CSME 機械年會中，發表研討會論文，論文題目：「運用 VSP 進行核二廠除役最終狀態偵檢之取樣規劃與取樣結果統計分析。」內容主要為介紹說明核電廠除役取樣規劃與結果統計分析之技術與 VSP 工具之應用。

參、展望

子項計畫一：核電廠除役期間除污策略和技術彙整

後續規劃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；且為因應雷射於物理除污技術的新興發展趨勢，將規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，將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。

子項計畫二-分項 1：核電廠除役期間安全評估技術強化

隨著國內核電廠陸續進入除役階段，其放射性污染風險從反應器轉移至用過燃料池之用過核燃料中，因此有必要針對用過燃料池進行安全評估。而用過核子燃料的衰變熱會隨著停機冷卻時間而降低，因此研析用過燃料池之衰變熱計算模式，有助於精算不同時期之衰變熱數值，能強化電廠除役階段之安全審查評估技術，並且協助核管單位作為審查之參考依據，實屬重要。

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

後續將聚焦於管制單位針對電廠除役輻射偵檢相關作業與產出之規範與審查標準。規劃將蒐集、研析及彙整美國 NRC 提出之審查標準，以及 NRC 對美國核電廠輻射偵檢報告之實際審查案例，提出針對核電廠除役輻射偵檢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。

核電廠廠址依除役進程可調整管制措施實務研究

Practical Research on Adjustable Control Measures for Nuclear Power Plant Sites According to Decommissioning Process

(計畫編號：AEC10911046L)

沈政雄¹ 李元德² 吳子毅²

¹ 沈政雄律師事務所 ² 中桂法律事務所

本研究在於參考國外核電廠除役期間管制經驗，依除役進程適時檢視我國核電廠除役期間調整廠址相關管制措施，主要為有關禁制區、低密度人口區或廠址管制之範圍劃設、變更及解除，以配合核電廠除役作業現場實務與管制需求，並針對其行政程序架構，提出涉及執行性、技術性之條文規定與理由說明對照表，或具體建議修正案及其配套措施，以強化除役安全管制作業之適法性。其次，針對除役作業現場管制，有關核子反應器設施或其執照及執照所賦予之權利，於除役期間如有變動，界定其管制範圍，以及核電廠廠址多機組除役完成年限及核電廠除役過渡階段現場設計變更管制實務相關法規，提供法規疑義適用諮詢及建議，以為相關法制作業參考，確保除役期間核電廠設施或其重要組件與設備仍受管制或適當處置。

This research refers to the control experience of foreign nuclear power plants during the decommissioning period, and according to the decommissioning process, timely reviews the relevant control measures for adjusting the site of Taiwan's nuclear power plants during the decommissioning period, mainly related to the delimitation and change of EBA, LPZ or site control. In order to meet the practical and control requirements of nuclear

power plant decommissioning operation sites, and in accordance with its administrative procedure structure, propose a comparison table involving enforceable and technical provisions and explanations, or specific amendments or supporting measures, to strengthen the legality of decommissioning safety control operations. Secondly, with regard to the decommissioning operation site control, the nuclear reactor facility or its license and the rights granted by the license, if there is any change during the decommissioning period, define its scope of control, as well as the completion period of the decommissioning of multiple units at the nuclear power plant site and the nuclear power plant on-site design change control practices related laws and regulations during the transition phase of decommissioning, providing consultation and advice on the application of legal doubts for reference to relevant laws and manufacturing industries to ensure that nuclear power plant facilities or their important components and equipment are still controlled or properly disposed of during the decommissioning period.

壹、計畫目標

- 一、檢視除役期間核電廠禁制區、低密度人口區範圍變更之法規內涵，並提出相關法規修正條文與修正說明對照表，以及行政程序等建議。
- 二、參考國外經驗，探討我國核子反應器設施或其執照及執照所賦予之權利，於除役期間之管制範圍與方向，並提出先期研析結果。
- 三、參考國外法規，針對核電廠廠址多機組除役完成年限及核電廠除役過渡階段現場設計變更管制實務相關法規，提出相關管制建議。

貳、重要成果

- 一、完成我國核子反應器設施禁制區、低密度人口區之變更管制作業相關建議修正條文與修正說明對照表，以及行政程序管制建議。

- (一) 關於禁制區及低密度人口區之解除及變更，雖其劃設程序在舊法時期，但經營者於核發除役許可後，申請解除或變更，參照中央法規標準法第 18 條規定，應適用行為時（提出申請時）之法規，即現行核管法之規定，主管機關並應依核管法規定審查，申請之原因事實是否合致核管法之構成要件。有關解除或變更程序，核管法第 4 條第 1 項明文由經營者提出申請，但第 27 條僅規定解除，且未明文是否應由經營者提出申請，解釋上並無分別處理之必要，就解除而言，亦應由經營者提出申請敘明相關資訊，非主管機關依職權為之。申請解除或變更之時點，核管法第 27 條雖規定於核發除役許可後得解除或變更，但於運轉期間亦得依第 4 條第 1 項後段規定申請變更。
- (二) 核管法第 27 條規定之「視其情況」，係授權主管機關有判斷及裁量餘地，其適用核管法規定辦理解除或變更程序之書件提出，若為申請變更，應依核管法第 4 條第 1 項規定重新提出計畫，並於其內容敘明變更後涉及核管法施行細則第 2 條規定之事項。若為申請解除，似無重提計畫之必要，但應就廠內之用過核子燃料是否皆已妥善處置，並無安全顧慮，敘明其依據之資訊、時程規劃、用過燃料處理、輻射劑量等安全性評估結果。
- (三) 原能會作成劃定、解除或變更禁制區及低密度人口區之行政處分前，經其他機關表示意見及報請行政院核定，因其他機關表示意見及行政院核定並未對外表示，此部分均屬於行政內部行為。依核管法第 4 條第 1 項規定，若屬劃定或變更之行政處分，係交由直轄市、縣（市）政府公告，此應僅是代為通知其行政處分內容之性質，仍應以原能會為作成行政處分機關，並宜採取由原能會公告，同時通知直轄市、縣（市）政府公告方式

，較符法理。

- (四) 有關劃定、解除或變更禁制區及低密度人口區範圍，原能會針對經營者所提出之申請資料，於程序事項及實體事項（含技術審查），均有審查權限，就行政流程而言，可分為「初審」及「複審」階段。於「初審」階段，若認為有未符合規定者，得定期限命經營者補正，若無法補正，則逕行作成不通過之決定。至於會商其他機關表示意見部分，乃屬於實體事項之資訊收集，於原能會就其權責事項初審要件具備後，再會商其他機關就實體事項表示意見，並綜整各機關意見後作成最終決定，此可定位為「複審」階段。若經審查後，程序面及實體面未能符合規定，以致原能會未能作成准許劃定、解除或變更禁制區及低密度人口區範圍之決定，因無劃定、解除或變更禁制區及低密度人口區範圍之先行決定存在，自無須報經行政院核定，逕由原能會不通過經營者之申請即可。

二、完成有關我國核子反應器設施或其執照及執照所賦予之權利，於除役期間之管制範圍與方向之先期研析結果。

- (一) 有關核電廠設施或其執照及執照所賦予權利變更問題，就核子反應器附屬設備之遷移部分，因核管法第 17 條規定僅適用於核子反應器，並未包括附屬設備，應回歸檢視賦予核子反應器設施得以運轉依據之管制基礎加以解決。於運轉期間，依核子反應器設施運轉執照申請審核辦法第 3 條第 3 項規定，此涉及終期安全分析報告有關附屬設備位置之變動，視其是否為核管法施行細則第 8 條「重要安全事項之變更」，應書面報請核准始得為之（若非屬同條前 7 款事由，而實務上有予以核准必要，則由主管機關依第 8 款指定之）。於除役期間，則涉及除役

計畫除污對象之範圍或「廠房及土地再利用規劃」之內容，若未記載於除役計畫，而嗣後擬為遷移，視其狀況，涉及核管法第 25 條第 2 項除役計畫有關「重要管制事項」之變更，應報請主管機關核准，始得為之。

- (二) 就核管法第 19 條規定之適用範圍部分，該規定可能發生之法律行為態樣，實為核子反應器設施之轉讓及設定抵押權，其中，設定抵押權最終影響產生法律關係之變動者，實為遭債權人聲請拍賣，此時與轉讓情形相當，但核管法第 19 條規定，就此部分與轉讓同等處理，並未明文最終若遭債權人聲請拍賣抵押物，是否應再經主管機關許可。至於除役期間有無第 19 條規定之適用，以核管法第三章並無準用第 19 條規定以及已另設有除役計畫審查、除役計畫應切實執行、重要管制事項變更應報請核准等管控機制而言，採取無類推適用第 19 條之見解，較符合法律體系之架構，以避免可能滋生適用第 19 條規定與除役計畫之管控機制應如何配合之疑義。然於除役期間，若有涉及輸配電固定設備之租借，原本應屬於除役計畫內容中規劃之一部分，應納為除役計畫之內容，並藉由核管法第 25 條第 1 項依核定之除役計畫執行或第 2 項其變更應報請核准，加以管控，又因不涉及所有權變動，經營者仍應負確保該附屬設備及其坐落之土地與其他區域整體符合最終輻射標準之義務，仍可於現行核管法架構下執行管制措施。但若為輸配電固定設備及其坐落土地以及地上物拆除後廠址土地之轉讓，因其所有權已非歸屬於經營者，攸關如何確保除役後整體廠址符合最終輻射劑量標準，則另涉及核管法有無必要增設該部分廠址除役活動執行結果之審查程序、審查要件、後續監管等機制，此較

現況管制體制更為複雜，是否均可循前述除役計畫管控機制處理，應評估其所涉現行核管法相關規定之影響性分析，並綜合考量我國立法體例、制度設計完整性及民情關注度，謹慎研議之。

- (三) 台電公司依電業法第 6 條第 5 項規定之組織變動，若仍將核能發電事業部保留於控股母公司，並不發生核管法行政法律關係之主體變動，仍可維持既有管制措施。惟若採取將核能發電事業部自台電公司分割，另成立發電公司，則涉及企業併購法及公司法規定之公司分割（新設分割）程序，被分割公司中一獨立營運部門之營業（含資產及負債），整體移轉至新設公司或既存公司，於新設分割之情形，並由被分割公司取得新設分割公司之股份，且新設分割公司概括承受被分割公司所分割之整體營業單位，故並非單純僅為某一特定財產所有權移轉而已。此與核管法第 19 條規定僅是將核子反應器設施之所有權轉讓予另一經營者而已，不涉及其他資產負債之移轉，已非同等意義及目的，尚非能以核管法第 19 條規定加以解決。縱然台電公司已依企業併購法規定為分割行為，仍須有法律明文其原因、程序及法律效果，始可由新設公司承受基於核管法所賦予原經營者之權利義務。

三、完成我國核電廠廠址多機組除役完成年限及除役過渡階段現場設計變更納入管制之相關管制建議。

- (一) 有關多機組除役完成年限之配合問題，核管法施行細則第 16 條規定以「取得」日起算，應修正明定以除役許可「生效日」起算 25 年。若於同一廠址之除役計畫有數部核子反應器設施，而除役許可所定生效日不同者，則以數部核子反應器設施中

除役許可所定最晚生效日為起算日，以統一除役完成年限之起算。因除役完成年限起算日一致，除役計畫完成日即不發生歧異，則核管法第 28 條規定並無修正必要，亦不至於衍生數部核子反應器設施分別申請除役或解除管制之問題。此外，於核發除役許可公函建議可依修正後規定，除載明生效日之外，亦宜明確載明起算日。

- (二) 有關除役過渡階段現場設計變更管制問題，於核管法所稱之運轉期間，係指運轉執照有效期間而言，至於除役期間核子反應器附屬設備仍維持運轉者，若有發生如核管法第 13 條規定之設計修改或設備變更情形，核管法第三章並無準用第二章第 13 條之規定。因除役計畫書中經營者必須載明仍需維持運轉之系統、設備、組件及其運轉方式，該計畫書核定後即賦予經營者可繼續運轉之權源，並承繼原本運轉執照所核准之設計及設備技術規格，以及經營者應遵循之義務。故有關核子反應器附屬設備之設計修改及設備變更，自應包含於除役計畫中一併提送審查，若其變更涉及重要管制事項，則依核管法第 25 條第 2 項規定，報請主管機關核准後，始得為之，不宜另適用核管法第 13 條之規定。

參、展望

- 一、有關禁制區及低密度人口區之解除及變更程序，建議修正核管法施行細則第 19 條之 1 規定，明定核管法公布施行前已劃設之禁建（制）區或低密度人口區，其解除或變更程序適用核管法之規定，申請時機點為核子反應器已永久停止運轉，除役許可生效後，由經營者提報之。至於應提報事項，至少包括：1. 解除原因事實及時程規劃

、2.廠內用過核子燃料之處置情形及廠區安全分析報告、3.禁制區及低密度人口區解除後之輻射劑量評估報告、4.其他主管機關指定事項。

二、有關除役過渡階段現場設計變更管制問題，因系統或設備如有涉及重要安全事項之設計修改或設備變更，同屬於除役計畫重要管制事項之變更，此部分實質上涉及除役計畫之變更而為核子反應器設施管制法第25條第2項規定之範疇，建議修正核子反應器設施設計修改及設備變更申請審核作業規範第3點，明定適用範圍包括「除役期間核子燃料全部移出核子反應器設施前」。

三、有關多機組除役完成年限之配合問題，建議修正核管法施行細則第16條規定，以明確有關除役許可生效日之起算，以及生效日若為不同日時，統一有關除役完成年限之起算日。

四、有關台電公司依電業法第6條第5項規定之組織調整，因此所生核能管制行政關係之主體變動，建議修正核管法。此可參考日本法規定，於核管法明定經營者依電業法第6條第5項，於控股母公司下成立發電公司，其以公司分割方式將包括核子反應器設施在內之營業移轉予新設發電公司，應由控股母公司與新設發電公司共同申請主管機關許可，並由新設發電公司承受原經營者之地位。有關申請書應載明事項及文件，包括：分割方法及條件、分割理由、分割時期、分割計畫或分割契約書、分割後新設公司之公司章程及登記事項證明書與最近財產目錄、資產負債表及損益表、事業概要說明書，或其他主管機關指定事項等內容。

110 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：AEC11001001L)

陳瑞昇¹ 梁菁萍² 張誠信³

¹ 國立中央大學 ² 輔英科技大學 ³ 開南大學

核一廠運轉期間已發展廠區地下水傳輸模式，並建立地下水防護方案以監測地下水特性參數。除役期間可能因為危害物質進入地下水系統而改變地下水特性，導致除役計畫時程延遲與需投入資金成本提高。本計畫目的為依據美國核能電廠除役期間地下水防護相關指引文件，評析指引文件中所採行之實務作法，藉以檢視目前國內除役電廠地下水宿命傳輸模式以及防護方案，並研擬除役廠址地下水防護管制建議。計畫完成二個重要工作項目，工項一為評估我國核電廠於除役期間地下水文特性的重要參數，工項二為檢視目前國內進入除役期間的核一廠地下水傳輸模式與防護方案之內容，並提出管制建議。本計畫的研究成果可協助原子能委員會掌握核電廠於除役期間重要地下水文特性參數，並提供地下水傳輸模式與防護監測方案精進的建議。

During the operation of the Chinshan Nuclear Power Plant (CNPP), a CNPP site-specific groundwater transport model has been developed. Moreover, a groundwater protection program has been also established to monitor groundwater characteristic parameters. During the decommissioning of the CNPP, the groundwater characteristics may be changed in response to

the inadvertent release of hazardous material into the subsurface system, which will delay the schedule of decommissioning and raise the cost. This project targets to evaluate the current groundwater transport model and groundwater protection program based on the study and the practices of groundwater protection guideline documents for decommissioning nuclear power plants in the United States.

Two major tasks are completed in the project. Task 1 identifies the important groundwater hydrological parameters during decommissioning process. Task 2 evaluates the currently developed groundwater transport model as well as established groundwater protection program, thus a regulatory strategy is created. The results of this project can help Atomic Energy Commission understand the important groundwater hydrological parameters and provide suggestions for improving the groundwater transport model as well as the groundwater protection program.

壹、計畫目標

我國核一廠 1、2 號機運轉執照屆滿，依規定台電公司已向主管機關提出除役計畫，而當核電廠進入除役階段，其作業之樣態與運轉期間不同，地下水可能受危害物質影響而造成特性改變。本計畫將研析美國核能電廠除役期間地下水防護相關指引文件所採行之實務作法，檢視目前國內進入除役期間之核一廠地下水傳輸模式與防護監測方案，並提出管制建議。

貳、重要成果

一、我國核電廠於除役期間地下水文特性之重要參數評估

RESRAD 系列為美國 Argonne 國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)、美國能源部(Department of Energy, DOE)與美國核管

會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)發展的輻射劑量(radiological dose)評估工具，包含 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BUILD、RESRAD-BIOTA 與 RESRAD-RDD 等 5 個程式。RESRAD-OFFSITE 主要用來評估居住或工作於土壤遭受核種污染區個體曝露的輻射劑量與增量致癌風險(excess cancer risk)，其用水來源或曝露位置可分為主要污染區外(離場)、主要污染區內(現場)，以及部份在主要污染區內與部份在主要污染區邊界與部份在主要污染區外等三大類，相關重要地下水文參數如圖 1 所示。

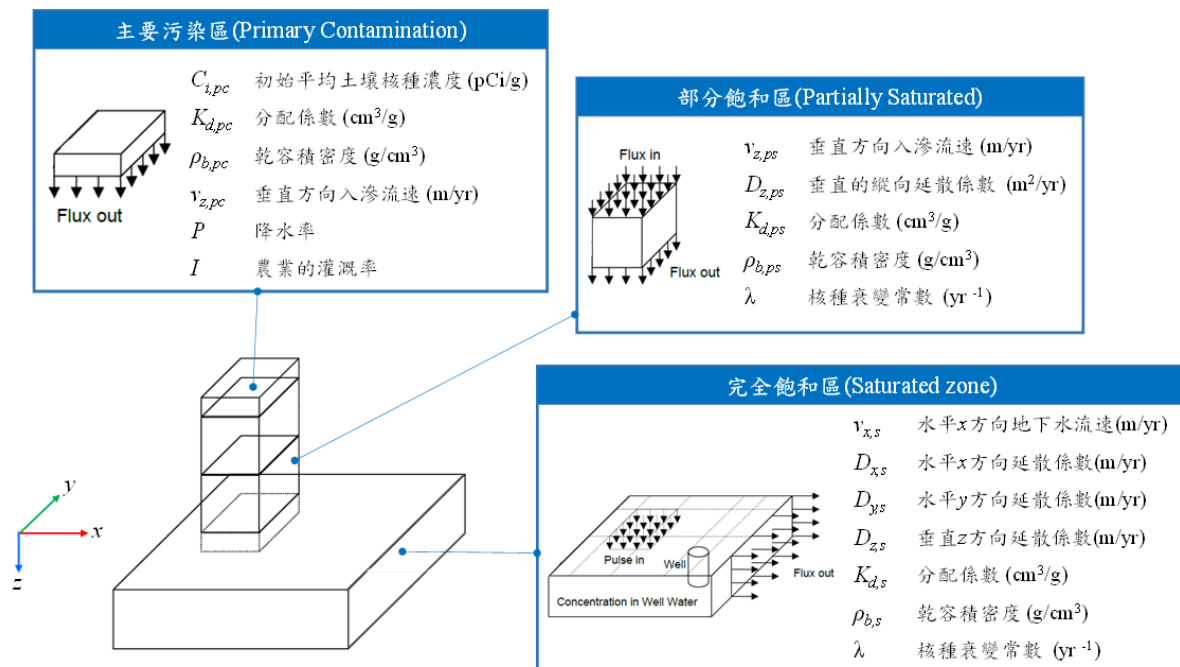


圖 1、RESRAD-OFFSITE 地下水傳輸重要參數

二、核一廠地下水防傳輸模式與護監測方案評析及管制建議

核一廠地下水傳輸模式建立採用 NUREG 0868 報告「A Collection of Mathematical Models for Dispersion in Surface Water and Groundwater」(Codell et al., 1982)所發展的 GROUND 地下水傳輸模式，工作團隊分析 GROUND 模式的發展背景及考量並進行核一廠地下水傳輸模式評析，其評析結果摘要如下：

1. 延散理論發展於 1970 年代，而 GROUND 模式開發於 1980 年，故相關重要理論並未發展成熟。
2. GROUND 模式非目前國際上除役廠址常用模式，且未能考慮核種衰變鏈。
3. GROUND 模式假設水流方向邊界在兩無窮遠處，此假設不符合真實狀況且導致低估濃度。
4. 水流方向與垂直水流方向之延散度相同，此假設不符合真實情形，將導致低估濃度與高估範圍。

「核一廠之地下水防護方案(修定版 Rev.4)」參照美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)的「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」，故工作團隊以其來評析核一廠地下水防護方案。EPRI 指引文件包含 13 個章節與 1 個附錄，工作團隊針對文件內容各章節進行翻譯及評析，並據以研擬除役廠址地下水防護管制建議，研究成果摘要如下：

1. 場址概念模型為監測井網設置最重要的參考依據，建議管制單位要求台電公司視實際需要進行地質及岩心資料整合，以建立更具信賴度之地層層序關係及現地資料。
2. 針對潛在可能污染來源，建議管制單位要求台電公司在完成 SSCs 可能潛在外釋來源評估後，建立持續盤點確認的機制。
3. 地下水水位為決定地下水流向的基本資料，建議管制單位要求台電公司加強地下水位長期監測，以更準確掌握地下水流動的時空變化。
4. 資料不足時得採宿命傳輸解析解模式作為初步篩選級別評估工具，建議管制單位要求台電公司後續逐步充實水文地質資料，並視需要建立數值模型作為地下水污染遷移預測工具。

5. 廠區地下水監測井設置、監測與維護工作，及地下水水質採樣與樣品的保存等應參考國內外規範，建議納入後續管制之要求。
6. 水質指標參數穩定為確認是否取得代表性水樣的依據，建議管制單位要求台電公司應注意以增加數據可信度。

參、展望

EPRI 指引內容實務且具體可行，且與國內標準流程有相同之處，未來在除役期間進行地下水防護時可適切納入國內標準流程的考量，同時應強化地下水專業人才的培育，期待未來可進一步掌握核電廠地下水防護指引目的與執行細節，精進除役期間地下水防護相關工作，並持續蒐集最新除役廠址相關資訊以建構符合國際規範及發展趨勢的管制策略。

輻防處

接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力	1
游離輻射防護法規體系精進研究.....	7
計畫曝露輻射安全與劑量約束評估研究	14
鋼鐵輻射異常物相關回收與熔煉作業人員之輻射劑量及風險評估研究	17
放射性物質生產設施除污及除役規劃暨安全審查技術研究.....	21
含天然放射性物質商品之調查及管理研究	27
核電廠除役階段之輻射安全管理與規劃技術研究.....	32
核一廠汽機廠房輻射評估模式驗證之先期發展研究	37
109 至 110 年度放射診斷設備之醫療曝露品質保證管制作業及項目精進研究	40

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：AEC110012)

袁明程¹ 邱敏綺¹ 林怡君¹ 歐陽芳鈺¹ 廖英蘭¹ 許榮鈞² 朱葦翰¹

¹核能研究所 ²國立清華大學

國際原子能總署、歐盟等國際組織陸續更新輻防管制建議與技術規範；因此，為接軌國際最新輻射防護建議，本計畫考量輻射防護管制系統的全面性，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 radiation protection measurement technology 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

原子能總署 (IAEA)、歐盟等陸續更新輻防管制建議與技術規範，同時體認到輻射度量技術是輻防管制之基礎，核能研究所 (以下簡稱為核研所) 透過『接軌國際輻防技術規範與精進量測技術能力』計畫之執行，能

有效強化與支援原能會的輻防把關工作、精進輻射安全管制技術、推動原子能科技在醫學診療、工業輻安與民生應用之研究發展，並提升國家游離輻射量測與劑量評估技術，使相關技術與國際接軌。而國外先進核能應用國家，建置有國家級生物劑量實驗室，並研究建立人員生物劑量評估與相關技術，國內則透過此計畫，建置與精進輻射生物劑量實驗室，可有效協助意外曝露應變作業，作為法規之科學依據，提升游離輻射安全管制層次及水準，落實原子能科技於社會民生福祉與永續發展之目標。

貳、重要成果

本計畫已達成的績效量化指標為：國際期刊論文 1 篇、會議期刊 1 篇，研究/技術報告 8 篇、舉辦研討會 2 場、形成大會手冊 1 份。績效質化說明依各子項計畫分述如下：

一、建立國際同步之輻射防護規範研究

1.1 依據「美國國家胎兒輻射劑量計算標準(ANSI/HPS N13.54)」完成胎兒劑量評估技術報告。並以學研合作方式，完成胎兒劑量初步評估技術研究，完成「孕婦皮膚表面劑量轉換成子宮劑量」的劑量轉換係數，研究台灣懷孕婦女子宮大小之數學假體及 ORNL 孕婦數學假體進行不同孕期(3 個月、6 個月、9 個月)之胎兒(子宮)劑量評估。未來將進一步以體素假體方式精進台灣懷孕婦女假體，以提升胎兒劑量評估精準度，並以保守條件產出懷孕婦女體內胎兒劑量轉換係數，以供輻射工作人員作為胎兒劑量評估的參考依據。

1.2 完成眼球水晶體劑量之監測系統研究，完成劑量評估系統與劑量計讀及計算作業程序研究，並完成商用眼球水晶體劑量計特性測試。同時，完成臨時交辦任務，與 5 家醫院和 1 家核醫製藥中心

合作，執行眼球水晶體劑量監測先期訪查計畫，相關經驗將回饋明後年的第 1、2 期訪查計畫。提供「我國游離輻射安全標準修正方向及眼球水晶體劑量計離型介紹」等專業演講，於 111 年輻防法規宣導會和放射線醫學會研討會，積極與各界代表溝通，展現政府對於輻射安全之推動與重視。

- 1.3 與清華大學合作，建立醫療工作人員操作核子醫學科藥物與執行透視攝影診療檢查的劑量評估，以蒙地卡羅 MCNP 程式評估不同條件下工作人員所接受之有效劑量與重要器官等價劑量的關係，研究成果作為政府制定法規參考之依據，保障相關輻射工作人員輻射安全。

二、強化國內輻射檢校量測技術能力研究

- 2.1 完成「輻射偵檢儀器校正能力試驗與雙邊比對」研究，7 家測試實驗室合格率达 100%，本次比對試驗納入門框、車輛、區域、手足偵檢器、核醫活度校正儀，以及中子校正等比對項目。並引入雙射源法進行儀器之無感時間修訂。
- 2.2 於 6 月 11 日舉辦「2021 年輻射儀器校正與肢端劑量計能力試驗技術討論會」&「第八次輻射偵檢儀器校正能力試驗研討會」全國性線上技術會議，參與專家代表 33 位，單位 10 個。肢端劑量計能力試驗為第一次正式舉辦，具有接軌國際趨勢，可促使國內第一線實驗室提供具品質服務，為從無至有的里程碑。
- 2.3 完成「110 年度環境試樣放射性核種能力試驗」，參與測試之實驗室合格率达 100%，，本次參與實驗室達到 12 家，包括新增的新北衛○局和高市衛○局，家數為歷年之最，應是反映民眾關心日本食品輻射檢測議題之故。此能力試驗自 93 年度起至今已執行 17 年，參加比對實驗室結果良好，足以證明各實驗室之分析能力。

2.4 完成「110 年度中低活度核種分析能力試驗」，6 家測試實驗室合格率達 100%，本次使用 12 種核種試樣，數量為歷年之最，並新增混合難測核種測試項目，因應核設施除役或處置、核醫製藥或科學研究，對驗證各實驗室的技術能力，中低強度核種分析能力試驗有其必要性與重要性的地位。

2.5 於 10 月 14 日舉辦「110 年游離輻射量測能力試驗總結會議暨氚量測技術研討會」全國性線上技術會議。參與專家代表 72 位，單位 17 個，透過技術交流提升實驗室檢校能力。

2.6 為建置 X 射線眼球水晶體劑量校正系統，完成眼球水晶體劑量校正系統之國際標準化組織(ISO)窄能譜校正射質、3 m 處標準劑量標定、假體設計、監測裝置及擷取程式等相關量測工作，3 mm 處個人等效劑量照射不確定度為 4.2%。未來將持續擴建 ISO 寬能譜等射質校正系統，使眼球水晶體劑量校正系統更臻完備。

三、精進染色體變異分析技術與評估研究

3.1 研究成果已完成，並投稿通過審查發表於國際期刊，並參加中華民國核醫學學會年會暨國際學術研討會與放射線醫學會年會，分別發表研究成果及展示人員生物劑量互動裝置，展現歷年研究成果。

3.2 因 COVID-19 疫情影響，今年度人員生物劑量比對試驗改以國內實驗室比對方式，並藉此機會建立國內實驗室比對機制，驗證衛星實驗室之染色體雙中節分析能力。國內實驗室比對結果之平均正確率達 70%以上。整體而言，國內具一定水準之人員生物劑量分析技術。而衛星實驗室在照射劑量大於 2 Gy 之正確度有偏低情形，後續將藉由經驗分享與教育訓練，積極輔導衛星實驗室之分析技術，強化實驗室分析品質。

3.3 Gamma-H2AX 分析方法優於傳統染色體雙中節變異分析技術，在於能夠減少細胞培養時間並能快速得到分析數據，目前實驗結果證實 gamma-H2AX 蛋白的產生量與照射劑量具有正相關。然而實驗方法仍需進一步優化，並有擴增數據點之必要，始能建立較完善的劑量評估檢量線，因應未來進行大量分析情境時，更快速完成劑量評估分析工作。

3.4 完成 3 例正常國人背景值染色體雙中節分析，共計分析 3,049 顆細胞，僅發現 1 顆細胞中含 1 個雙中節 (dicentric)。統計 101 至 110 年度共完成 31 例正常國人背景染色體分析，一共分析 31,460 顆細胞，發現 23 個雙中節 (dicentric) 於 22 顆細胞中。目前資料庫國人背景雙中節發生率為 0.73 %，代表 1000 顆細胞中有 0.73 個雙中節發生率。

參、展望

整體而言，本計畫規劃與執行的工作，應屬國家輻射防護基礎建設的一環，無論在輻射防護法規的更新或執行，本計畫成果能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。本年度在胎兒劑量、眼球水晶體劑量與人員生物劑量評估的技術上，皆有具體進展；而在能力試驗的辦理上，所有參與實驗室皆通過測試，且有多項測試或參與者突破過往紀錄，顯示此持續不斷的能力試驗，促使各實驗室建立堅實的技術基礎，其成效亦受到各界的重視。基礎建設非一朝一夕之功，須持續投入穩定的資源，方能確保輻射防護法規可持續獲得可靠的技術支撐，保障全民的輻射安全。

游離輻射防護法規體系精進研究

Study on the revision of Ionizing Radiation Protection Act

(計畫編號：AEC110018)

趙自強¹ 程明修² 林宇軒³ 董傳中¹

¹長庚大學 ²東吳大學 ³開南大學

為應對國際輻射環境的變化、人員曝露分布改變、核子事故應變經驗、以及技術增強天然輻射的影響，ICRP 於 2007 年發布了 ICRP-103 報告，補充 ICRP-60 報告，IAEA 也於 2014 年發布了 IAEA-GSR3 補充 IAEA-SS115，以提供更完善、合理、有效之輻射防護建議。原子能委員會為因應 ICRP-103 與 IAEA-GSR3 之最新輻防規範，著手研議修正游離輻射防護法，使之與先進國家之輻防法規同步，計畫內容包括：1.研究各國 ICRP 103 報告實施現況、2.ICRP-103 報告與 IAEA GSR-3 報告在我國之可行性研究、3.收集國內專家意見、4.政策影響評估、5.業界說明及 6. 研提草擬「游離輻射防護法修正草案之建議」。其中前三項已於前一年度完成，本年度工作內容為後三項，完成辦理兩場法學專家座談會，將其主要意見及寶貴建議納入修法建議考量，並舉辦三場業界說明會，收集意見納入政策影響評估，最後考量我國可行性、專家及業界意見後，完成草擬「游離輻射防護法修正草案之建議」。

Due to the technology advancements, social changes and environmental requirements, and the nuclear emergency experience, the International Commission on Radiological Protection revised its ICRP-60 and published ICRP-103 (2007). IAEA also issued the IAEA-GSR3 in 2014 to replace the

IAEA-SS115. ICRP-103 provided more complete framework, reasonable approach and effective implementation than ICRP-60 for the radiation protection of individuals in different exposure scenarios. In order to comply with the ICRP-103 and IAEA-GSR3, the Atomic Energy Commission, Taiwan proceeded to study and amend the Ionizing Radiation Protection Act to keep it synchronized with the radiation protection following international trends. The tasks include, 1. Status of implementation of ICRP-103 in countries around the world; 2. Feasibility study on implementing ICRP-103 and IAEA GSR-3 in Taiwan; 3. Gathering opinions from domestic experts on the revisions of Act; 4. Regulatory impact assessment and Gender impact assessment; 5. industry briefings; and 6. Recommendations for the revision of the Act. The first three tasks have been accomplished last year, and the later ones will be focused this year. We have held two expert forums for gathering law opinions and three industry briefings, and incorporated main opinions and expertise suggestions into the consideration of this revision suggestions. These opinions have also been incorporated into the regulatory impact assessment. This project will help to ensure the quality, smooth the implementation, and avoid any difficulty in the future revisions of Ionizing Radiation Protection Act.

壹、計畫目標

本計畫已完成國際輻射防護新規範之研析，辦理四場專家座談會，將其主要意見及寶貴建議納入修法建議考量；舉辦三場業界說明會，收集意見並納入政策影響評估，考量各界意見後，研提草擬「游離輻射防護法修正草案之建議」，提供原能會作為游離輻射防護法之修正參考，並降低修法對社會、經濟、及整體游離輻射作業產生的衝擊。

貳、重要成果

我國現行游離輻射防護法(總統(91)華總一義字第 09100019000 號公布)的精神與架構，主要以國際放射防護委員會(ICRP)1991 年發布的 ICRP-60 報告及國際原子能總署(IAEA)1996 年公布之安全系列(Safety Series)第 115 號報告(IAEA-SS115)之規範制定。為應對國際輻射環境的變化、人員曝露分布改變、核子事故應變經驗、以及技術增強天然輻射的影響，ICRP 於 2007 年發布了 ICRP-103 報告，補充 ICRP-60 報告，IAEA 也於 2014 年發布了 IAEA-GSR3 補充 IAEA-SS115，以提供更完善、合理、有效之輻射防護建議。原子能委員會為因應 ICRP-103 與 IAEA-GSR3 之最新輻防規範，著手研議修正游離輻射防護法，使之與先進國家之輻防法規同步，研議內容包括：(1)改採「計畫性曝露」、「緊急性曝露」、「既存性曝露」之輻防系統，(2)新增「既存性曝露」之管制，(3)強化「依源管制」之「劑量約束」與「劑量指引」，(4)研訂醫療曝露「品質保證」與「最適化」之劑量標準。比較 ICRP-60、IAEA-SS115 與 ICRP-103、IAEA-GSR3，可歸納出以下幾點改變(參見圖 1)：

- 一、管制「輻射源」或「曝露」，均可避免或抑低「人員劑量」。
- 二、ICRP-103 與 IAEA-GSR3 報告新增「既存性曝露」之管理情境，並利用「劑量指引」規範技術增強天然輻射之補救措施。
- 三、「既存性曝露」還包括歷史上曾發生之核子或輻射事故所殘留之污染曝露。
- 四、ICRP-103 與 IAEA-GSR3 報告建議訂定「診斷劑量指引」加以規範醫療曝露，但非法規管制之用。也建議訂定「劑量約束」給予病人照顧者及生醫研究者最適化措施。
- 五、人員劑量管制分為「依人管制」與「依源管制」，依人管制之標準稱為「劑量限度」，依源管制之標準稱為「劑量約束」或「劑量指

引」。

六、針對「公眾曝露」之輻防管制，ICRP-103 與 IAEA-GSR3 則採用「公眾代表人」之合理推估原則，來評估最具代表性人群之平均個人劑量。

除了這些ICRP-103 報告與IAEA GSR-3 報告在我國之可行性研究外，本計畫也將收集國內專家意見、進行政策影響評估、並舉辦業界說明會。

一、收集國內專家意見

為收集國內專家意見，本計畫原本僅規劃兩場專家會議，然而為避免缺乏法制層面之討論，我們特別將輻防專業部分與法學專業部分分開，並加開兩場法學專家會議。輻防專家會議於 109 年 10 月 21 日及 12 月 2 日舉辦，邀請國內產、學、研各領域共 8 位專家、原能會及核研所，共同討論輻防法修正方向。法學專家會議(圖 2-3)於 110 年 1 月 11 日及 110 年 3 月 22 日進行。專家會議中，委員們及主管機關提出許多具實務經驗之意見，包括：1. 輻射源、輻射作業與輻射防護之定義；2. 劑量指引；3. 「輻射工作人員」或「工作人員」名稱；4. 計畫性曝露與既存性曝露的界定；5. 計畫性商品與既存性商品；6. 如何保障具「公務員」身分之輻射工作人員；7. 違規記點制度…等議題。

二、政策影響評估

本計畫另一重點為政策影響評估，游離輻射防護之問題涉及人民之身體健康，並且會牽動到相關人士的權利義務關係(工作人員之保障，設施經營者之義務等)，為解決此一問題，關鍵在於對輻射源的妥善「管理」與「管制」。國際間之標準已有相當之發展，現行法規之規範體系已無法對接。例如輻射曝露情境已重新劃分為三大類，而新興的輻射添加商品也有進一步管制的必要。現行法的處罰規範彈性不足，亦使得行政機關難以配合具體案件來作出妥當之決定。許多管制措施需要因應實務上的需求

加以補充(例如吹哨者之保護、引進即時追蹤系統等)，故在法規基礎上有增列的必要，以符合依法行政之原則。通過修法措施，將較為陳舊的法規內容與國際標準接軌，嚴格化商品添加放射性物質之管控，並且賦予主管機關更多手段以因應實務上之需求，更能確保政策之執行力。並以劑量指引優化輻射防護的標準，使得整體法規功能更加健全。

三、業界說明會

依本計畫原訂工作進度，110 年第二、三季應分別完成辦理 2 及 1 場業界說明會，收集產官學界對我國修改游離輻射防護法之意見，以瞭解新的輻防架構對各界的衝擊，作為政策影響評估與性別影響評估之參考。本計畫執行團隊於 110 年 4 月起，開始進行前置作業，包含與原能會討論預期人數、邀請講師、印製健康聲明書、預訂場地、擬訂議程、設計報名簡章及文宣等作業。惟我國受 COVID-19 疫情影響，本團隊考量辦理說明會係屬密閉空間之群聚活動行為，為符合 CDC 公告之第三級疫情警戒防疫措施，經原能會同意本校將三場說明會改以全國不分區線上視訊會議方式辦理。三天會議期間皆以截圖記錄學員參與實況，圖 4 為其中一場之部分截圖。與會者提問多聚焦於醫療曝露、劑量約束、劑量指引、外部工作人員、眼球劑量、輻防法修正實施期程、教育訓練、計畫性商品與既存性商品、氦氣、體檢、生醫自願者、核災應變計畫、罰則...等相當多元。在說明會結束之後，本團隊認為視訊會議是各方透過網路與通訊裝置，傳輸視訊和音訊面對面溝通的會議方式，因此在疫情發展充滿不確定性情況下，不僅可以避免群聚外，離島業者亦可免於搭乘飛機或運輸船回本島的染疫風險；此外，因視訊會議已免除「距離」因素，僅需選擇可參與時間，有利提升全國業者參加之意願，尤其對於位於交通偏遠處之業者更為有利。

參、展望

游離輻射防護法修正已經箭在弦上，各界專家和業者也都十分關注此一議題，由說明會報名人數超乎預期可見業者對此議題極感興趣，將來可舉辦更多宣導活動。本計畫成果將提供原能會未來就游離輻射防護法進行修法之參考，以確保修法品質及解決實施問題。本建議僅為輻射防護專業與法學理論考量，主管機關仍可依據我國國情、各子法修正進度、執行面困難與社會衝擊審酌修法進度。

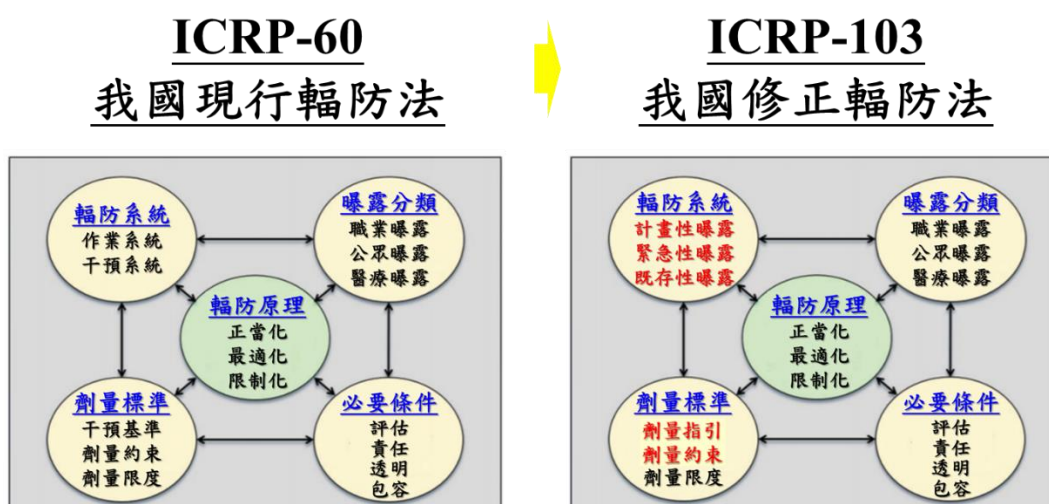


圖 1：輻防基本架構



圖 2：第一次法學專家會議(110/1/11)



圖 3：第二次法學專家會議(110/3/22)

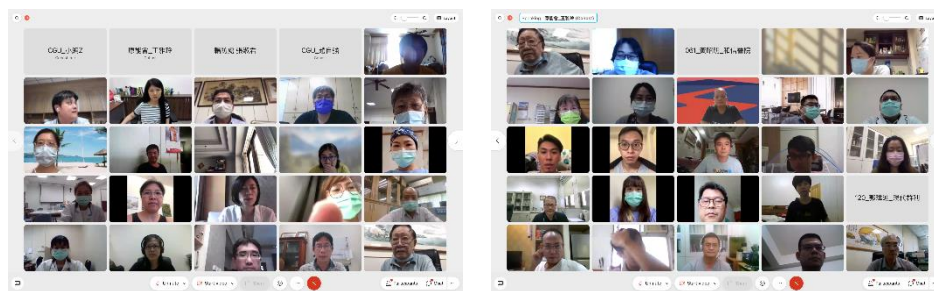


圖 4：視訊業界說明會

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：AEC110017)

許芳裕

國立清華大學原子科學技術發展中心

本計畫接續 105 至 108 年之計畫曝露量測規範建立與輻射安全風險評估研究，自 109 年至 110 年分二年期進行，內容包括蒐集國際間計畫曝露輻射作業之正當性及劑量約束規範及實務作法，研擬適用我國輻射管制體制之評估模式，提出適用國內輻射作業管制之劑量約束值建議，並進行輻射源現況調查。109 年已執行完成 412 件輻射源實際現場作業調查，110 年亦已完成 412 件，並持續統計其類型、用途及評估輻射劑量與風險，檢視正當化及劑量約束之適用性，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 based on the study of "2016-2019 project on establish the measurement guide of planned exposure situation, and assessment of radiation safety and risk". This project is planned to carry out for two years (2020-2021). The content of this project includes the collection of the justification and dose constraint specifications and practices of international planned exposure situations, the development of an assessment model applicable to Taiwan's radiation protection regulation system, and the recommendation of dose constraint values applicable to safety control of domestic radiation practices. This project also conducts a survey of the current status of the radiation sources.

In 2020, 412 radiation sources were inspected, and in 2021 also 412 radiation sources are performed on site surveys. Continuing the tasks such as statistic the radiation practice types and uses, and evaluate radiation doses and risks, and review the applicability of justification and dose constraints, establish radiation protection safety specifications for different types and uses of radiation source applications, so that the radiation facility operators can follow to improve the regulatory effectiveness of radiation safety.

壹、計畫目標

本計畫之研究目標包括：(1) 研析國際實施正當性審查及導入劑量約束概念之實際作法，蒐集相關規範及報告。(2) 了解國內輻射作業之現況及安全防護執行狀況，對不同分級及類型之輻射源執行輻射安全檢查訪查作業，進行劑量及風險分析，掌握國內不同輻射作業劑量差異。(3) 綜合考量國際間規範及計畫訪查結果，提出適用我國輻射防護管制之架構及具體做法，包括正當性審查及劑量約束評估。(4) 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。(5) 使業者了解計畫曝露之合理抑低及輻射防護最適化觀念，藉由與業者直接接觸機會，宣導輻射劑量與風險等輻射安全防護觀念，提升國內相關設施之輻射防護知能。

貳、重要成果

本計畫 110 年完成訪查之非醫用游離輻射源(包括可發生游離輻射設備與密封放射性物質)總計 412 件，包括可發生游離輻射設備總計 72 件，其中含登記備查類 62 件(櫃型 X 光機 29 件，移動型 X 光機 33 件)與許可類 10 件(照相檢驗 X 光機 2 件，非破壞照相檢驗 X 光機 4 件，校正用 X 光機 2 件，學術研究用 X 光機 1 件，移動型 X 光機 1 件)以及密封放射性

物質 340 件之抽樣輻射安全現場訪查。另有發現疑似異常情形而複查 9 件，含複查總計 421 件。有輻射異常疑慮之案件於檢測後回報輻防處，並請使用單位(受檢廠商)限期改善後再行複驗，經複查後均已確認完成改善。其他重要貢獻說明如下：

一、說明研發成果之重要貢獻

本計畫主持人已於 110 年 3 月 15 日及 11 月 24 日至原能會進行 2 次工作方法與進度簡報，且於 110 年已完成超過原規畫(應完成 390 台)之訪查檢測數量，並依據現場訪查與實測劑量結果之統計分析及考量可能發生異常情況所導致人員劑量所評估之風險結果，進一步提出輻防管制及風險控管之具體建議；此外，依國際間輻射作業劑量約束實務作法並結合訪查數據，評估各類別輻射源或輻射作業之劑量約束建議值，提出「非醫用輻射源或輻射作業之劑量約束值評估及審查建議書」，提供主管機關作為管制參考。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文

本計畫於 110 年已達成之具體學術成果包括：論文發表 1 篇：許芳裕，非醫用 X 光機之應用介紹，核後端 2021(12): 20-23。

參、展望

本研究計畫為二年期計畫，110 年為第二年期，已執行完成 412 件非醫用游離輻射源(包括可發生游離輻射設備與密封放射性物質)現場作業調查，預計 111 年將針對可發生游離輻射設備與非密封放射性物質等游離輻射源，統計其類型、用途及評估輻射劑量與風險，檢視正當化及劑量約束之適用性，持續建立不同類型、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。

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
Study on the Radiation Dose and Risk Assessment of Recycling and Smelting
Workers Related to Radiation Anomalies in Steel
(計畫編號：AEC110015)

許芳裕¹ 張似璫²

¹國立清華大學 ²財團法人中華民國輻射防護協會

本計畫為二年期計畫之第二年，工作內容包括對鋼鐵業者通報發現輻射異常物後之現場檢/訪查，對發現之輻射異常物進行研判、分析及調查其後續之處理方式，並對國內鋼鐵業者狀況進行檢/訪查。亦對國內鋼鐵業者之從業人員接觸不同強度天然輻射異常物情境進行模擬分析，及對天然輻射異常物被誤熔後進行模擬評估，探討各種情境下接觸不同強度天然輻射異常物從業人員之輻射劑量與風險評估。此外，本計畫考量鋼鐵輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案)。

This project is the second year of the two-year project. The work content includes on-site inspection after the iron and steel industry reports the discovery of radiation anomalies, and judgment, analysis and investigation of the discovery of radiation anomalies and their subsequent handling methods. And conduct inspections/visits on the status of domestic steel industry. This study also simulated and analyzed the situations in which the employees of the domestic iron and steel industry were exposed to natural radiation anomalies of different intensities, and conducted simulation assessments after the natural radiation anomalies were mistakenly melted, and explored the radiation doses

of practitioners exposed to natural radiation anomalies of different intensities in various situations, and risk assessment. In addition, this project considers the optimal operation process planning and reasonable suppression measures for steel radiation anomalies, and proposes a draft of natural radiation anomaly detection and handling procedure.

壹、計畫目標

本計畫之研究目標包括：(1)對鋼鐵輻射異常物相關回收與熔煉作業針對各項工作單元、場所之從業人員作業環境進行分析探討。(2)模擬評估國內鋼鐵從業人員於不同情境接觸天然輻射異常物之輻射劑量與風險。(3)並考量鋼鐵輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案)。

貳、重要成果

本計畫研究團隊 110 年完成 42 起鋼鐵業輻射異常物通報案件之現場檢/訪查。42 件鋼鐵業輻射異常物中，其中有 39 件為天然輻射異常物、2 件為人工輻射異常物，有 1 件中同時含有天然及人工輻射異常物。42 件之後續處理方式，有 2 件為出口退運，有 40 件為國內處理(送核研所)。110 年完成訪查之輻射異常物偵測報告與對國內 17 家鋼鐵熔爐業者之年度輻射偵檢作業檢查紀錄表，相關檔案均已送原能會備查。其他重要貢獻說明如下：

一、說明研發成果之重要貢獻

本計畫完成對國內鋼鐵業者從業人員接觸不同強度天然輻射異常物情境模擬分析、建立國內鋼鐵業者各項工作單元、場所之從業人員接觸不同強度天然輻射異常物之一般曝露情節與誤熔曝露情節，使用

MicroShield 程式作為計算工具，其中參數則採用 RESRAD-RECYCLE 的處置流程資訊與曝露情節之設定，模擬計算天然輻射異常一般曝露與誤熔情境可能造成之劑量與風險。

除了建立了程式模擬計算方法(惟此方法受到輻射源活度估計誤差的影響較大)，本計畫亦建立以每件鋼鐵輻射異常物之空間劑量率實測結果評估異常物案件的人員可能接受曝露之輻射劑量與風險的方法，可針對每件通報案件進行人員劑量與風險評估。

在輻射劑量與風險評估結果上，評估一般曝露情節與誤熔情節等相關人員可能接受之最大劑量進行保守評估所得之風險，仍小於或相當於接受 1~2 次醫療胸腔 X 光檢查的劑量與風險，其誘發之輻射健康效應風險可忽略。

本計畫於 110 年持續蒐集研析相關國際新資訊，包括 ANSIN42.43-2016 [17]、IEC 62244 (2019)[18]等二份關於偵測輻射異常物門框偵檢器之偵檢技術要求等報告，彙整最適化作業流程規劃與合理抑低措施，提出天然輻射異常物偵檢與處理程序書(草案)供主管機關參考。

二、學術成就方面，共發表國內外研討會及期刊論文

本計畫於 110 年已達成之具體學術成果包括：論文發表 1 篇：許芳裕，門框輻射偵檢儀器之國際測試標準介紹，輻防簡訊(Issue 166)，p3-p5, p11-p15，2021.

參、展望

本研究計畫為二年期計畫，110 年為第二年期，規劃於 111 年將持續精進鋼鐵輻射異常物之最適化作業流程規劃與合理抑低措施，包括：對國內鋼鐵業者進行檢/訪查，蒐集研究所需實測輻射劑量；對國內鋼鐵業者各項工作單元、場所之從業人員接觸不同強度人工輻射異常物情境進行

模擬分析及進行輻射劑量與風險評估；對人工輻射異常物誤熔情境進行模擬評估；研擬人工輻射異常物從業人員注意事項建議；蒐集並研析國際組織對鋼鐵業者發現輻射異常物之應對作為，以精進及強化國內發現鋼鐵輻射異常物後之輻射管制效能。

放射性物質生產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 radioisotope production facilities

(計畫編號：AEC110014)

許榮鈞¹、高潘福²、房博文¹、謝澄憶¹、王冠文¹

¹國立清華大學²中山醫學大學附設醫院

截至 108 年 11 月止，國內合計有 12 家設施經營者，共設有 13 部迴旋加速器生產設施，加速能量介在 10-30 MeV 之間，其中過半數設施自投入營運迄今已逾 15 年，最長逾 25 年。隨著國內生產設施逐漸接近除役年限，放射活化殘存量評估技術及設施除役技術已在業界逐漸形成討論焦點。本計畫針對國內迴旋加速器放射性物質生產設施進行運轉歷程調查、建立蒙地卡羅放射性活化技術、評估有無自屏蔽設施運轉二次中子與引發物質活化的潛勢、建立多種中子與核種量測技術、進行模擬計算與實地量測的比較分析，最後彙整研究成果據以提出除役計畫撰寫導則建議與除役輻射安全審查導則建議。

At present, there are 13 cyclotron-based radionuclide production facilities in Taiwan, whose particle energies are between 9.6-30 MeV, and more than half of them have been in operation for more than 15 years. Secondary neutrons are generated through nuclear reactions during the cyclotron operation and those secondary neutrons potentially induce material activation in the cyclotron body and shield structure to varying degrees. The project collected the operation histories of these facilities and, accordingly, estimated the general trend of material activation around the cyclotrons, including both self-shielded

and non-self-shield facilities. Numerical simulations and experimental measurements of secondary neutrons and induced radioactivities in materials around the cyclotrons were the main focuses of this project. In addition, related guidelines and technical recommendations supporting for decommissioning activities were proposed, including decommissioning planning strategies, assessment, and measurement of radioactive residual activities, etc. The results and experience obtained in this study will be beneficial to all parties involved in decommissioning of radioisotope production facilities.

壹、計畫目標

鑒於目前國內迴旋加速器放射性物質生產設施中已有多座隨著加速器本身逐漸接近使用生命週期期限，終將面臨永久停用的問題。國內有必要逐步建置生產設施除役的相關處理導則與技術建議，放射活化殘存量評估與相關中子與核種量測技術將是未來設施除役分析與安全管制的重點。本研究已建立最先進的蒙地卡羅放射活化分析技術，依照設施參數的調查結果，用以模擬評估加速器設施運轉之二次中子分布(圖 1)，據以探討加速器組件、設施周遭介質與建物結構體等的活化影響程度(圖 2)。本年度著重在相關量測技術的測試與建議(圖 3)，進行二類設施(有無自屏蔽設計)模擬計算與實地量測的比較，最後彙整研究成果研提相關建議，以利國內迴旋加速器放射性物質生產設施未來除施規劃與工程實務的參考。

貳、重要成果

- 一、本計畫基於 109 年度研究成果及相關文獻研析，確立混凝土活化與空間中二次中子的關聯性。有關建物混凝土的活化量測，因相關設施目前皆處於例行運轉狀態，考量混凝土直接鑽心取樣以測定活化核種可能影響設施正常運行，如圖 3 所示，本研究採取 3 種可用

的二次中子量測方法作為替代方案：(a)高靈敏度中子比例計數器(b)含 Li-6 的熱發光(TLD)人員劑量計 (c)中子活化金屬箔片。

- 二、考量國內加速器的運轉參數與國外設施的可能差異，本團隊參考 109 年度各個設施的運轉調查結果作為模擬計算與實驗分析參數，據以評估 3 種不同的二次中子量測方式在有自屏蔽設施中及無自屏蔽設施中的二次中子特性、儀器適用性及預期實驗結果。實驗結果發現在運轉時間、靶電流、自屏蔽材料組成等重要參數有限的前提之下，無自屏蔽設施中的中低能量中子被高估約 2-5 倍，快中子則被低估約 0.5 倍；在有自屏蔽設施中，自屏蔽內側的中低能量中子被高估約 1-3 倍，快中子則被低估約 0.3-0.5 倍；自屏蔽外側的中低能量中子及快中子則大致被高估約 3 倍。考量實際加速器組件與周遭環境細節的掌握程度受限，本團隊認為目前實驗與模擬結果尚屬合理範圍。本研究採三種方式進行實驗，其中亦包含中子活化與加馬能譜 HPGe 測量。未來待設施停止運轉，混凝土鑽心取樣再也不是問題，採集之樣本也是透過前述方法(中子活化與加馬能譜 HPGe)進行測量以直接定量核種，因此目前建立的技術與分析方法以及經驗亦可直接沿用。
- 三、針對設施永久停止運轉廢棄清理計畫相關導則建立，本團隊綜合分析諸經驗國(例如：日本、澳洲、歐盟等)及國際知名機構(例如：IAEA、ICRP、NCRP 等)對除役之法規管制要求、技術措施與處理實例，並廣邀國內 12 間設施管理者集思廣益，配合現行游離輻射防護法規所規定相關事項，據以提出合乎法規及實務可行之導則建議。彙整計畫全期工作成果，研究團隊提出如下三點建議供主管機關參酌：
- 四、導則名稱配合現行《游離輻射防護法》，建議命名為「設施廢棄清理計畫導則」和「設施廢棄清理計畫審查導則」。

五、為能適量減廢，減少設施經營者廢棄處理成本，同時減輕國內低放射性廢料貯存場暫存壓力，建議《游離輻射防護法》第 35 條第 2 項有關「…設施經營者應擬訂設施廢棄之清理計畫，報請主管機關核准後實施，應於永久停止運轉後 3 年內完成。」，能修法適度延長至 5 年以上或增修「但經主管機關核准者，得延長之。」等語，以增加適法彈性，使實務可行。

六、本計畫自 109 年實施生產設施運轉資料調查，至今已有效收集到過往的運轉數據，考量該等資料對設施永久停用活化評估是重要的參數基礎，因此建議國內設施能妥善維護既有的以及未來持續進行的運轉數據，使設施永久停止運轉時之輻射影響評估能更貼近真實。

參、展望

延續 109 年度的研究，本年度(110 年)著重在量測技術的測試，分析模擬計算與實地測量的差異，研析國內加速器設施之活化情形與除役策略，最後彙整全期成果研提二份文件(迴旋加速器放射性物質生產設施除污與除役計畫撰寫導則建議與輻射安全審查技術導則建議)提供主管機關參考。計畫全期針對國內所有迴旋加速器放射性物質生產設施進行運轉歷程調查、建立蒙地卡羅放射活化評估與可行的量測技術、探討設施周遭物質活化潛勢，據以提出相關建議，計畫成果除可協助主管機關精進安全審查與管制作業，亦有利於設施經營者規劃與推動設施除役作業。

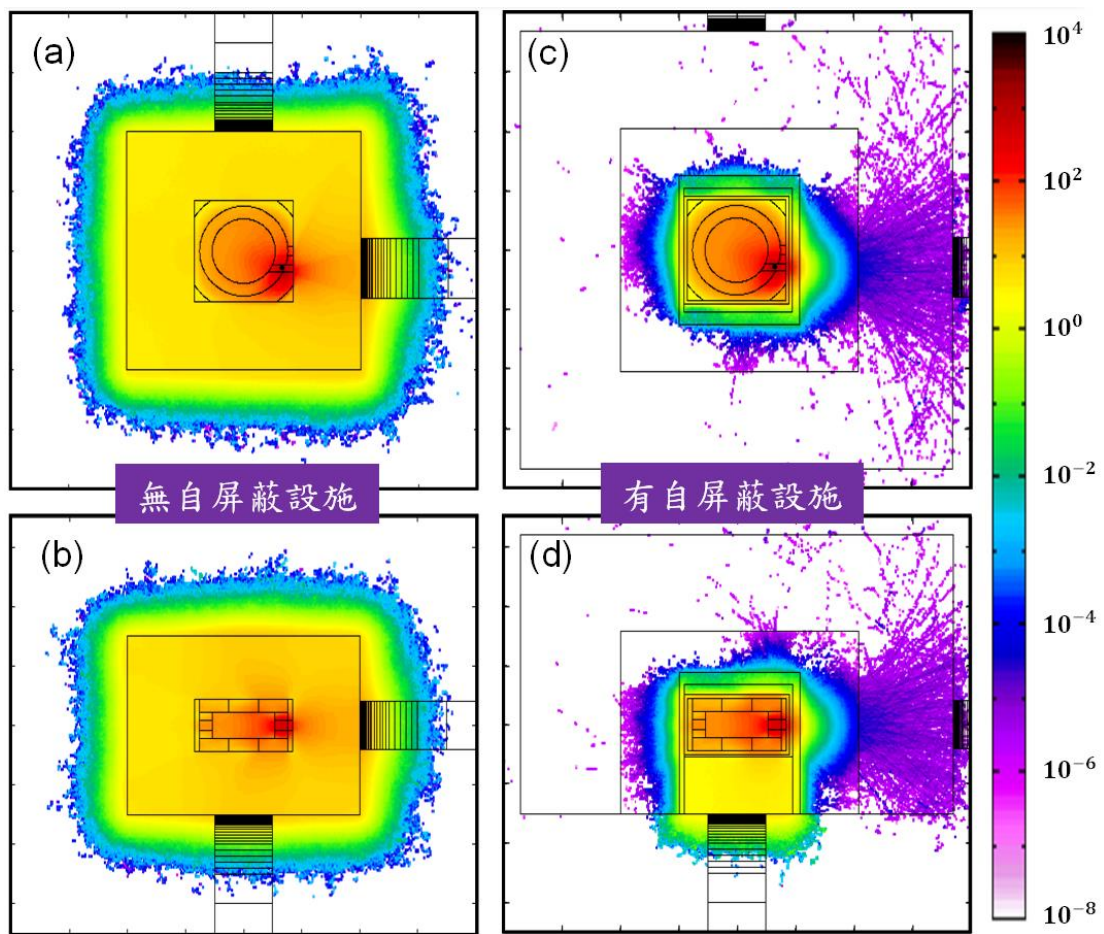


圖 1、設施運轉時的二次中子分布特性：無自屏蔽(左)、有自屏蔽(右)

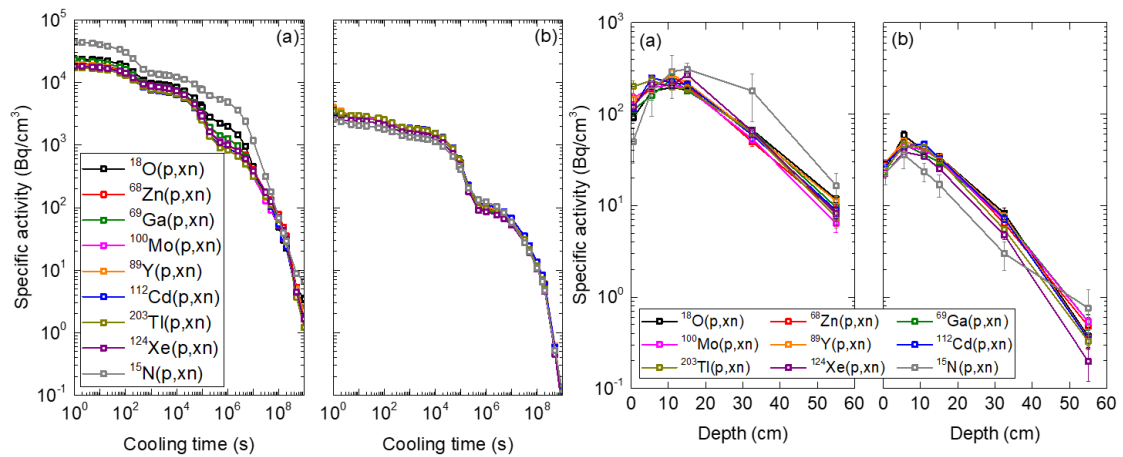


圖 2、中子產率歸一化後，不同核種產製的設施混凝土活化特性：(a)無自屏蔽前向混凝土與(b)有自屏蔽地面混凝土

混凝土的活化潛勢與二次中子特性高度相關，可採間接量測 - 中子分布

- ① 高靈敏度波那柱量測系統
- ② 金屬箔片中子活化分析
- ③ 熱發光劑量計

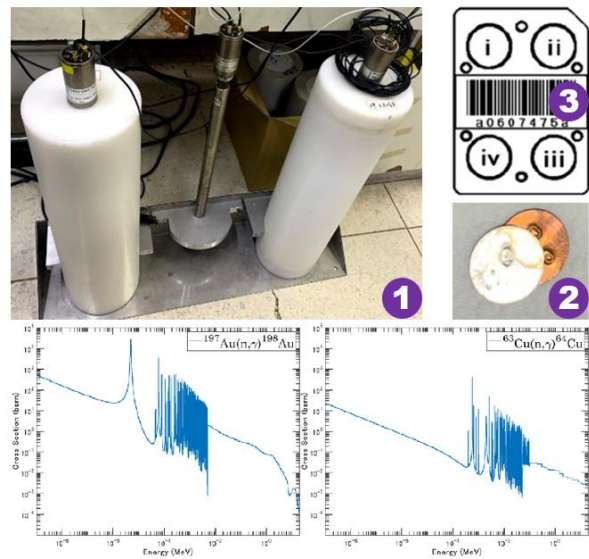


圖 3、本研究採用之三種量測技術評估二次中子所造成的設施活化

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：AEC110013)

黃珏吉 盧苡欣 黃煥景

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

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

壹、計畫目標

本計畫之執行內容，係考量目前因科技之進步、民眾生活品質之提高，游離輻射於民生應用之發展較過去更為快速增長。主管機關本於管制之立場，亟需針對未來游離輻射於民生應用之發展潮流，及參考國際趨勢，

預先進行研究、調查，以為日後建立合宜之管制規範、審查及評估之技術。

貳、重要成果

110 年度研究計畫內容依原能會核定版本計畫書執行，研發成果及其貢獻說明如後：

一、重要貢獻

(一)建立含天然放射性物質商品之氡氣量測技術、標準作業程序及人員劑量評估技術

本研究為確認與評估政府機關或廠商取樣送測含天然放射性物質商品，所逸出之天然放射性物質(氡氣)對人體所造成之劑量，本計畫參考美國環境保護署(EPA)及國際放射防護委員會(ICRP)相關文獻，並依據國內天然放射性物質管理辦法，擬訂氡氣量測作業程序書。

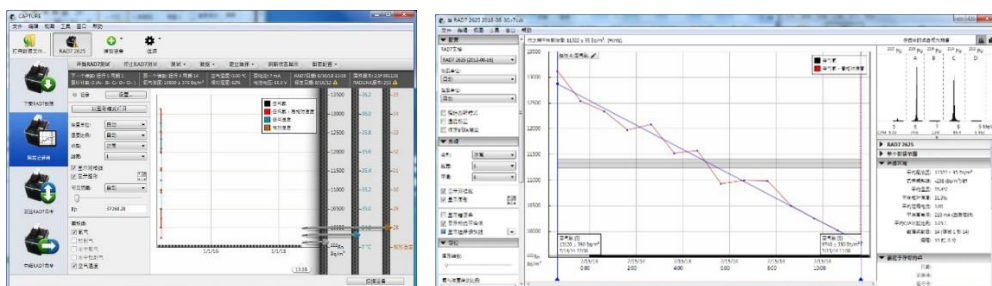


圖 1. 氡氣量測分析軟體 Capture®操作視窗

(二)建立氡氣量測設備之校正或測試系統相關技術與程序

目前核研所氡氣量測設備係以每年送至國外原廠取得校正報告，以確保含天然放射性物質商品氡氣活度檢測結果正確性及可追溯性，為建立我國氡氣量測校正技術，本計畫參考美國國家標準暨技術研究院(NIST)氡氣校正系統設計，建置用於氡氣濃度校正之脈衝式游離腔及其校正方法，以完善氡氣量測結果之追溯鏈。

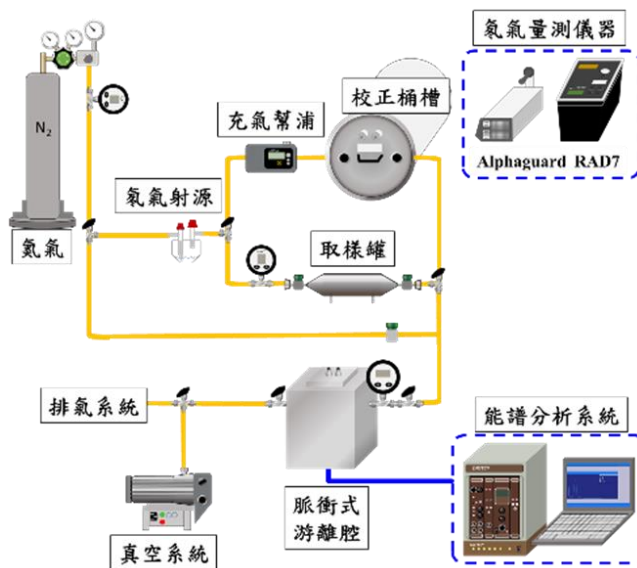


圖 2. 氡氣標定與校正系統配置圖

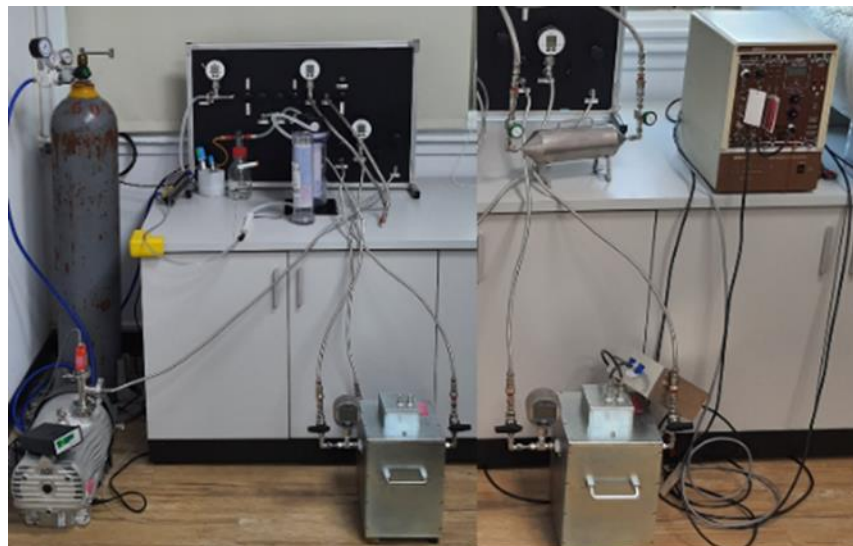


圖 3. 氡氣標定與校正系統配置

(三) 執行含天然放射性物質商品之劑量調查及協助執行商品後市場調查

110 年 1 月至 12 月核研所協助市售商品主責主管機關年度定期抽驗(如經濟部標檢局：眼罩、口罩或寢具等)或原能會不定期抽驗樣品之輻射檢測與劑量評估結果如表 1。其中原能會送檢 3 件及經濟部標檢局送檢 16 件，共計 19 件含天然放射性物質商品送至核研所進行

檢測。其中 2 件商品經檢測評估結果顯示，一般人每日使用相關商品所接受年有效劑量，超過「天然放射性物質管理辦法」所規定之年劑量限值(1.0 毫西弗)，且所含鉀-40、鈾系或釷系核種比活度，亦超過「天然放射性物質管理辦法」所規定之核種比活度限值(1.0 貝克/克)。經檢測有輻射異常之商品，後續則由核研所化工組協助回收銷毀等事宜，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。

表 1.110 年 1 月至 12 月抽驗商品種類統計結果(依樣品種類)

送樣單位	樣品種類	送樣件數	劑量超標(1 毫西弗)件數
原能會輻防處	手環	2	0
	項鍊	1	0
經濟部標檢局	口罩	11	1
	枕頭	3	1
	床墊	1	0
	護套	1	0

(四)研擬輻射異常之含天然放射性物質商品處理方案

為妥善處理輻射異常之含天然放射性物質商品，以避免人員在執行該類商品之貯存、拆解或銷毀作業時接受輻射劑量之影響，本工作項目參酌國內類似處理案例及日本鈦礦場廢棄物掩埋作法，一般係以(一)由廠商自主管理，委託專業輻射偵測業者與合法之廢棄物清除處理機構共同協助處置；(二)破碎後直接掩埋；(三)焚化處理再掩埋等 3 種方法進行輻射異常含天然放射性物質商品之處理，並 107 年回收銷毀輻射異常負離子床墊為例，研擬 3 種曝露情節與相關處理方案，包括由業者自行進行非專案處理，或委由政府單位(核研所)進行專案處理等，如圖 4 所示。

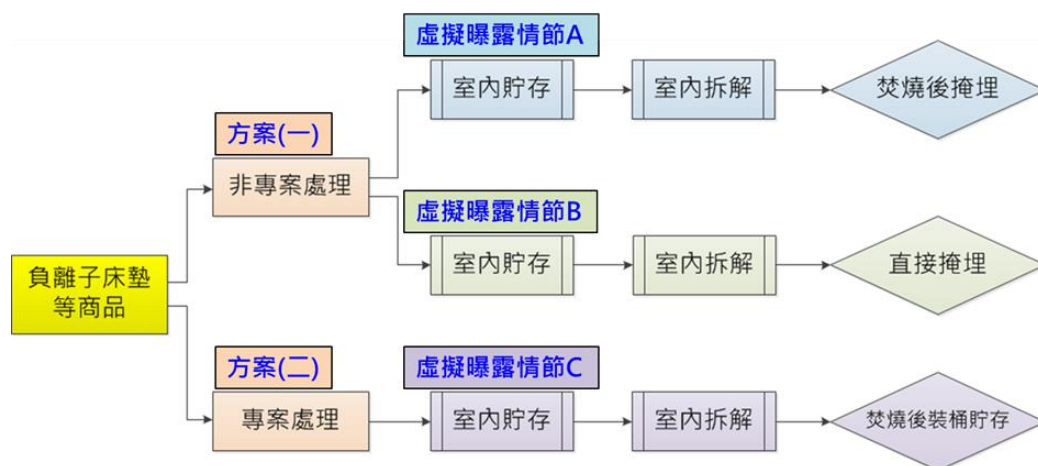


圖 4.負離子床墊等商品下架回收後之方案與曝露情節假設

二、學術成就

- (一) 完成「氡氣量測標準作業程序書」，可做為現場稽查或實驗室人員進行含天然放射性物質商品氡氣量測之參考。
- (二) 完成「氡氣量測儀器標準校正技術與比對驗證」研究報告一篇，以作後續建立氡氣校正量測技術之參考。
- (三) 完成「含天然放射性物質商品之後市場調查(110 年)」技術報告一篇，以作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

110 年度研究計畫為強化氡氣量測儀器標準校正技術，及建立含天然放射性物質商品調查作業之氡氣量測技術與標準作業程序，在技術方面上，藉由建立氡量測標準作業程序，及建立氡氣量測校正系統，以確保氡氣量測之準確性及可追溯性，而在調查面上，協助原能會及標檢局完成 110 年含天然放射性物質商品輻射檢測及劑量評估，以減少含天然放射性物質商品在市場上的衝擊，降低民眾不必要之輻射曝露風險

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：AEC110019)

黃珏吉 唐大維 林聰得 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：導入智慧科技以取代人力的輻射劑量合理抑低手段、精進核電廠除役各階段輻防管制技術、以及建立除役中與除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術及執行訓練。

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: introduction of smart technology to reduce the radiation dose for workers, 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)輻射劑量合理抑低技術開發與應用智慧機械之研究；(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「輻射劑量合理抑低技術開發與應用智慧機械之研究」完成智慧自動化載具之輻射地圖技術研究，本計畫開發之載具(如圖 1)藉由同時使用多種不同環境感測模組搭配機械視覺輔助，透過人工智慧計算規劃路徑，使其具有區域導航自走能力，並適用於各種危害環境偵測。載具在未知場域環境探索與偵測作業中，可由操作人員遠端遙控載具施行場域地圖探索任務。在完成實體邊界與障礙物地圖建置後，由人員在操控端地圖畫面中，直接圈選探測區域，此時載具可自行依探測區域範圍，

與環境感測器量測屬性，自主於特定場域施行環境監測任務。多功能輻射偵測智慧載具在環境資料偵測架構配置，可連續記錄多項環境感測器讀值，含溫度、濕度、粉塵、二氧化碳、空間輻射劑量偵測。並同時記錄當前機器人位置座標。預設記錄頻率為 1 Hz，可依實際應用現況調整記錄頻率。初期採用線性內插方式，將載具蒐集到的環境偵測資訊計算成分布圖(如圖 2)，呈現載具建構地圖空間的各項環境監測數值分布狀態。此外，完成核研所低放射性廢棄物第三貯存庫實地偵測演練，環境偵測資訊可即時傳輸至中控台顯示，並將偵測資訊(含地圖座標與環境偵測數值)即時匯出，可再由後端人員依需求繪製輻射場域地圖。

於「精進除役期間輻射管制技術之研究」完成除役期間常用輻防管制偵測設備(表面污染)特性研究，以 Sr-90 及 Cs-137 之校正射源進行實驗，探討蓋革式偵檢器與塑膠閃爍體偵檢器在不同能量、量測距離、掃描速度及量測時間條件下之性能表現，如儀器效率(如圖 3)、最低可測濃度及最低可測濃度掃描等，並與 ANSI/HPS N13.12-2013 建議之表面污染解除管制基準進行比較，提供主管機關未來選擇輻防管制偵測設備之參考。另外，完成輻射偵檢之第三方驗證執行策略先期研究，針對國際第三方驗證案例進行個案分析，對其驗證範圍及抽驗比例進行探討，並針對所使用儀器、採樣方式、分析方法等項目進行合理性及適用性的探討。

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」研析美國環保署於 EPA QA/G-9 報告所發展之 5 步驟數據品質評估(Data Quality Assessment, DQA)程序，包含審查數據品質目標與偵檢設計、執行初步數據審查、選擇統計方法、驗證統計方法之假設及結論。本計畫舉辦「核設施除役輻射偵檢與廠址調查專業技術訓練」及「核設施除役輻射檢測驗證技術訓練」(如圖 4)，訓練內容包含豁免與解除管制活

度濃度推導與應用、核設施除役輻射偵檢佈點規劃與結果統計分析技術、表面污染偵檢器偵檢原理與方法、輻射偵檢儀器校正原理與方法與環境試樣分析實務等，合計 60 小時，以培訓除役稽核人員。

二、學術成就

本計畫產出論文 1 篇、研究報告 2 篇、技術報告 1 篇及形成教材 1 份，論文投稿於輻射防護簡訊之「淺談核電廠除役最終狀態偵檢之獨立確認調查」，研究報告包含「智慧自動化載具之輻射地圖技術研究」及「除役廠址環境輻射偵測結果評估方法研究」，技術報告包含「除役期間常用輻防管制偵測設備(表面污染)特性研究」，並舉辦「核設施除役輻射偵檢與廠址調查專業技術訓練」、「核設施除役輻射檢測驗證技術訓練」及完成教材製作。上述成果可應用於支援輻射場域環境參數取樣與監測任務施行，減少危險場域作業之人員體外曝露危害、協助主管機關於除役階段之輻射安全管制及提供主管機關未來審查核設施除役輻射偵檢設計及結果之參考，確保核電廠除役過程之輻射安全。

參、展望

未來將持續精進研究成果，「輻射劑量合理抑低技術開發與應用智慧科技之研究」本年度導入「目標優先模式」進行路徑規劃，並以核研所第三貯存庫為標的進行實地偵測演練，成功蒐集繪製輻射場域地圖所需資訊，後續可配合主管機關執行核電廠除役視察需求，進行高輻射區除役標的的偵測演練，以減少人員接受輻射曝露劑量；「精進除役期間輻射管制技術之研究」完成除役期間常用之 2 款手持式表面污染偵檢器性能評估，並與 ANSI/HPS N13.12-2013 建議之表面污染解除管制基準進行比較，提供主管機關未來選擇輻防管制偵測設備之參考。另完成國際第三方驗證案例研析，其中包含環境、建築、物質與設備等案例，供主管機關未來規

劃我國第三方獨立驗證制度之參考。未來持續精進除役期間輻射管制技術之研究，將參考國際之獨立驗證機構，針對核電廠除役獨立驗證機構管理機制進行深入研究探討；「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」未來將研析國際除役廢棄物表面污染容許量標準相關報告，如 IAEA DS-500 與 ANSI/HPS N13.12 等文獻，探討表面污染容許量標準之訂定原則，以提升除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術，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、輻射偵測智慧載具實體圖

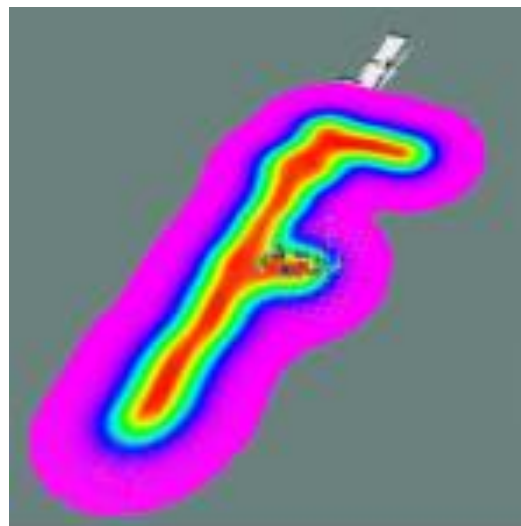


圖 2、空間輻射偵測地圖建模展示

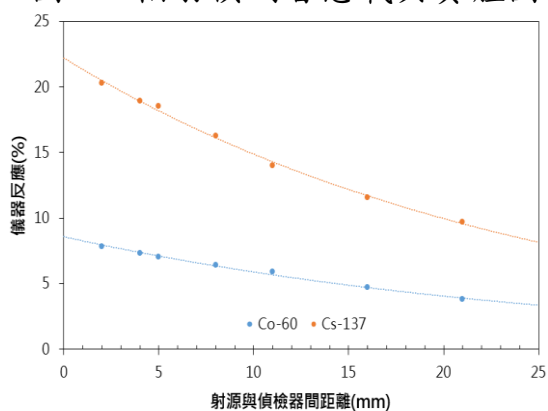


圖 3、蓋革式偵檢器(Ludlum Model 44-9)於不同量測距離下之儀器反應曲線



圖 4、核設施除役輻射檢測驗證技術訓練

核一廠汽機廠房輻射評估模式驗證之先期發展研究

(計畫編號：AEC110020)

許世明

國立陽明交通大學

本先期研究參考 IAEA NW-T-1.18 建議，考量放射核種源項的產生、物理，化學性質、及傳輸途徑。建立汽機廠房輻射評估分析模式，藉以評估低微污染設備，其污染核種種類及存量。本研究探討核一廠汽機廠房空浮污染，及蒸汽/爐水遠距活化污染。空浮污染累積設備表面濃度參考 RESRAD-BUILD 方法論提出評估模式；遠距活化探討受到反應爐水/蒸汽攜帶放射性同位素的影響，在汽機廠房流徑中衰變釋出延遲中子及光子，可能導致未直接與爐水接觸的設備或系統被活化污染。本先期評估模式，主要目的係研究建立設備污染評估模式的可能性，評估結果僅供主管機關管制作業參考，不應引申為受評估對象物的確定污染情形，實際污染情形仍以設備實際量測驗證結果為準。

This pilot study refers to the recommendations of IAEA NW-T-1.18 to consider the generation, physical and chemical properties, and transmission pathways of radionuclides. Establish an analysis model to evaluate the types and inventory of difficult-to-measure radionuclide for low- and micro-pollution equipment. This study explores the airborne contamination of the turbine building and remote activation of steam/ coolant water pollution. The cumulative concentration of airborne contamination can be evaluated by RESRAD-BUILD code theoretical model. Remote activation may affect by the

radioactive isotopes carried by the coolant water/vapor of the reactor, which decay and release delay neutrons and photons in the flow path of the turbine building, resulting in activation of equipment or systems that are not in direct contact radiation. The main purpose of this preliminary research is to study the possibility of equipment pollution assessment by establishing a theoretical model. The simulation calculation results provide a reference for regulatory agencies to administrate radiation safety and should not be seen as the pollution situation of the assessed objects.

壹、計畫目標

本研究參考參考 IAEA NW-T-1.18 的建議，考量放射核種源項的產生、物理，化學性質、及傳輸途徑，並參考 ISO 建議的標準理論活度評估步驟，包含蒐集核一廠特性資料、運轉歷史、材料組成及輻射曝露量差異，並建議以 MCNP 程式及 RESRAD-BUILD 空浮沉降機率評估模式，建立核一廠汽機廠房輻射評估模式，分析核一廠 1、2 號機汽機廠房發電機及勵磁機的可能污染途徑、污染情形及核種濃度。

貳、重要成果

研究從三個方向分別探討可能污染途徑，包括中子活化、光核反應活化及空浮沉降造成表面污染，經分別探討及篩濾核電廠各個射源項後，汽機廠房中子射源主要為爐水中的 O-17 受爐心中子活化，產生延遲中子源 N-17；而分裂產物的延遲中子源含量經評估相比之下可以忽略。光核反應的產生前提係光子最大能量足夠高才有可能產生，經篩濾核電廠存在的放射性核種衰變時可產生足夠高能量的放射性核種為 N-16，為爐水的 O-16 受到爐心中子活化產生，而其他光子射源由於能量不足及評估核種來源過於微量，因此經篩濾後可以忽略。先期評估結果顯示，由於蒸汽中含

有微量延遲中子源，因此對汽機廠房的發電機及勵磁機可能產生中子活化。而光核反應作用情形，以測試模型研究後，由於作用機率過低，認為可以忽略而無須進一步探討。

由於本項研究計畫主要目的係參考國際文獻及 ISO 評估流程建議，研究以建立先期評估設備污染模式的可能性，並且發掘實際執行評估時，應考量那些參數、評估模型選擇、國際標準評估流程等資訊。經由本項計畫實際執行與問題發現，可提供管制機關對業者提出評估申請時，制定決策及技術審查作業參考。參考國際經驗，由於電廠設計及運轉條件不同，各別核能電廠除役方式及過程具有獨特性，故本項研究計畫屬實驗性質之先期污染評估模式研究，其評估模式與初步結果僅供主管機關管制作業參考，實際污染情形仍以設備實際量測與輻射特性調查之結果為準。

參、展望

本項研究計畫污染評估模式先期研究，以參考 IAEA NW-T-1.18 的建議，從放射核種源項的產生、物理，化學性質、及傳輸途徑，以及參考 ISO 建議的標準理論活度評估步驟，實際蒐集待評估物的特性資料、運轉歷史、並以可能污染途徑。經由研究計畫執行經驗，總結對除役廢棄物受污染情形評估，首先應考慮其所處的環境及可能污染來源，並應針對個別污染途徑分別加以合理分析及論述，包含輻射源來源、核種種類、遷移途徑、遷移特性等加以評估，經排除不存在的污染途徑後，針對可能存在的污染途徑，蒐集廠址特性資料，包含射源的產生機制、產生量、待評估物材料及元素組成、所處空間環境、歷史偵測數據等，並以經國際有相似應用實例或經過認證之評估程式或評估模式，加以評估及分析設備可能的污染情形，並且評估及分析過程中，執行者應詳細敘述評估過程及依據，輔以電廠輻射特性調查資料以佐證其評估結果之合理性。

**109 至 110 年度放射診斷設備之醫療曝露品質保證管制作業及項目精進
研究**

Research of Deployment Effectiveness of Medical Exposure Quality
Assurance measures and Items for Diagnostic Medical Imaging Equipments
for 2020-2021

(計畫編號：AEC110016)

杜俊元^{1,2} 楊邦宏^{3,4} 吳東信⁴

¹ 中華民國醫事放射師公會全國聯合會 ² 元培醫事科技大學

³ 臺北榮民總醫院 ⁴ 國立陽明大學

本計畫於 109 年至 110 年完成訪查全國乳房 X 光攝影儀 100 台、電腦斷層掃描儀 100 台及心導管與血管攝影 X 光機醫療曝露品保作業抽檢 200 台，進行乳房 X 光攝影儀與電腦斷層掃描儀品保作業項目精進研究，同時輔導醫療院所執行心導管與血管攝影 X 光機品保作業。分析電腦斷層掃描儀、乳房 X 光攝影儀及心導管與血管攝影 X 光機之訪查品保實測數據並建立資料庫，並研擬可供符合目前臨床現況品保作業參考使用之新版品保作業程序書教材 3 份，並提出精進醫療曝露品保法規的具體建議。

In 2020-2021, this project has conducted nation-wide on-site visits of 100 mammography X-ray scanners, 100 computed tomography scanners, and has spot-checked the examination of the QA program of 200 interventional X-ray equipment surveys. Through these surveys, we have examined the effectiveness of the current mammography X-ray, computed tomography scanners practices

precisely. And we implemented the QA guidelines of interventional X-ray equipment in medical institutions to provide concrete suggestions for program regulations. We can take advantage of the surveys and field data to create a database. We established 2010 to 2021 on-site visits findings as important reference to develop and meet suitable clinical QA program conditions as the latest version QA program procedures in three copies and come up with concrete suggestions for QA program regulations.

壹、計畫目標

行政院原子能委員會依據游離輻射防護法第 17 條推動輻射醫療曝露品質保證作業(以下簡稱品保作業)，從民國 97 年至今，放射診斷品保作業納法已達 13 年，醫學影像設備技術一日千里，為使國內品保作業內容符合現今醫學影像設備的需求，並考量國內醫療院所人力負荷。因此藉由本計畫，提出精進現行放射診斷設備品保相關項目並提出具體建議。

貳、重要成果

一、研發成果之重要貢獻

以放射診斷設備而言，品保作業是醫用輻射安全中重要的一環，其目標是確保設備的穩定性、病人安全與影像品質，在合理的輻射劑量獲得最佳影像品質，使醫師可以進行正確的疾病診斷。透過辦理品保作業專業課程教學、實作訓練，以強化在職人員於輻射醫療曝露的專業知能，提升醫療曝露品質，確保醫療曝露之適當使用。經由現場的輔導訪查、臨床問題的意見交流，有助於讓醫療院所注重醫療輻射安全文化，願意投入資源培訓專業醫療曝露品保專業人員，進而使國人享有安全與高品質的輻射醫療環境。

(一)國際合作

完成檢視現行放射診斷設備品保作業執执行程序，蒐集臨床實測數據並依據檢查結果及彙整國際資訊，並針對我國長期推行品保作業提出精進相關法規之建議等事項，成立電腦斷層掃描儀、乳房 X 光攝影儀及心導管與血管攝影 X 光機醫療曝露品保專業團隊負責執行放射診斷的設備的檢（訪）查，另與國際學者共同組成跨國團隊，共計 4 個團隊。

(二)人才培訓

1. 109 年及 110 年完成電腦斷層掃描儀 2 場、乳房 X 光攝影儀 2 場及心導管與血管攝影 X 光機 4 場之醫療曝露品質保證實作課程(圖 1)。
2. 培訓國內輻射安全研究人才，完成 109 年及 110 年博碩士生各 2 人，共計 4 人。
3. 完成我國放射診斷設備品保作業教材 3 份(電腦斷層掃描儀、乳房 X 光攝影儀及心導管與血管攝影 X 光機)，以作為培育專業品保人員之數位教材，特別是於 Covid-19 疫情當中，仍可做為臨床醫療人員達成品保作業能力標準化之重要參考教材。

二、學術成就之重要貢獻

109 至 110 年完成醫療院所放射診斷設備之醫療曝露品保作業檢查，並進行乳房 X 光攝影儀 100 台、電腦斷層掃描儀 100 台及心導管與血管攝影 X 光機 200 台之醫療曝露品質趨勢分析，蒐集彙整國際間相關品保法規與國內 109 至 110 年實地訪查結果進行研析探討，將相關研究成果撰寫為專題研究報告，相關成果如下：

(一)期刊論文

109 年完成論文投稿 2 篇

1. 題目：Cardiac Catheterization Real-time Dynamic Radiation Dose Measurement to Estimate Lifetime Attributable Risk of Cancer 投稿

發表於 PLOSE ONE 《公共科學圖書館：綜合》。

2. 題目：Three-layer heterogeneous mammographic phantoms for Monte Carlo simulation of normalized glandular dose coefficients in mammography 投稿發表於 Scientific reports 《科學報告》。

110 年完成論文投稿 2 篇

1. 題目：Comparison of Discriminant Analysis Between Visual Inspection and Contrast- Noise Ratio of Low Contrast Detectability Test in Computed Tomography Quality Assurance 投稿發表於《臺灣醫事放射期刊》2021 年第 9 卷第 1 期。
2. 題目：Cardiac Catheterization and Angiography X-ray Machine Medical Exposure Quality Assurance and Refinement Research Project 投稿發表於《臺灣醫事放射期刊》2021 年第 9 卷第 1 期。

(二)國內外研討會

109 年參與之學術研討會

1. 題目：Radiological Equipment as a Role of Radiographers in Taiwan 視訊會議發表於國際放射師總會 (International Society of Radiographers & Radiological Technologists,ISRRT)。
2. 題目：以新型乳房假體建立對比雜訊比與壓迫重量關聯投稿發表於台北市醫事放射師公會 20 周年暨第 7 屆第三次會學術研討會。

110 年參與之學術研討會

1. 電腦斷層掃描儀品保專業團隊、乳房 X 光攝影儀品保專業團隊、心導管與血管攝影 X 光機品保專業團隊於 110 年 10 月 31 日於本會「2021 年第 21 次國際學術研討會」發表本計畫相關研究成果。

參、展望

109 至 110 年放射診斷設備之醫療曝露品質保證管制作業及項目進研究已完成所定之目標。期望藉由已完成的訪查結果的數據分析、彙整國際間放射診斷設備之品保作業相關資料、國內外相關文獻之差異比較、提出我國修訂品保法規之建議，可做為主管機關後續政策、法規及制度推動的參考報告。希望未來能持續推動放射診斷設備之醫療曝露品質保證管制作業，以達成輻射安全與醫療品質的永續提升。



(A)



(B)



(C)



(D)

圖 1、舉辦醫療曝露品質保證實作課程：(A)品保項目說明與執行程序簡介、(B)電腦斷層掃描儀品保項目實作、(C)乳房 X 光攝影儀品保項目實作、(D)心導管與血管攝影 X 光機品保項目實作。

綜計處

原子能科技民生應用於我國發展策略之研析 I..... 1

海陸域環境輻射調查與國民輻射劑量評估(3/4)..... 7

原子能科技民生應用於我國發展策略之研析 I

Research of the Development Strategy of Peaceful Uses of Atomic Energy in
Taiwan

(計畫編號：AEC110007)

蕭子訓 葛復光 洪瑋嶸

行政院原子能委員會核能研究所

本計畫聚焦於兩個研究工作項目：(1) 原子能科技產業趨勢及技術布局研究：太空產業及(2) 國際原子能科研機構發展趨勢及技術布局研究。透過本計畫兩個工作項目的執行，並結合科技發展策略的考量，以精緻化原能會的原子能科技民生應用之策略研擬，進而促進產學及政府之合作，推動政府六大核心戰略產業之原子能技術發展。

This research focuses on two work items : (1) Research of Atomic Energy Technology Industry Trends and Technological Deployment. (2) Research on the Development Trends and Technological Deployment of International Atomic Energy Research Institutions. The results of this study could be used to refine the development strategy of atomic energy technology, to facilitate multilateral cooperation in technology development among governments, enterprises, and researchers institutes, and further, to contribute to the development of the Six Core Strategic Industries outlined by President Tsai Ing-wen.

壹、計畫目標

本計畫基於「原子能科技於民生應用發展之策略藍圖」，針對太空

科技領域提出細部科技發展策略並借鏡國際原子能科研組織經驗，包含兩個工作項目。工作項目 1.「原子能科技產業趨勢及技術布局研究：太空產業」，結合專利分析、市場分析與專家/廠商的訪談/座談，針對「太空用的積體電路」及「抗輻射之電池製程」兩個主題，協助原能會擬定科技發展策略。工作項目 2.「國際原子能科研機構發展趨勢及技術布局研究」(與虎尾科技大學蔡璞教授研究團隊合作完成)，透過研蒐國際原子能科研組織或國家實驗室之技術發展經驗及關鍵科研基礎設施資訊，提供原子能科技技術發展策略的候選方案，並協助原能會擬訂原子能關鍵科研基礎設施建置策略。

貳、重要成果

本計畫包含兩個工作項目，(1)原子能科技產業趨勢及技術布局研究：太空產業；(2)國際原子能科研機構發展趨勢及技術布局研究。以下分段摘錄重要研究成果。

一、原子能科技產業趨勢及技術布局研究：太空產業

本計畫已完成兩個技術策略的案例分析，用於擘劃「太空用的積體電路」及「抗輻射之電池製程」之技術發展策略，可獲得我國具發展潛力之技術，有助於原能會擬訂及統合國內原子能科技民生應用的發展策略。除此之外，透過其中專利分析的研究成果使用，可協助研究者在計畫申請階段評估欲發展技術目前研究的現況，以完善其參考文獻的範疇，並可據此調整研究方向。以下就本研究所聚焦探討的兩個主題：「太空用的積體電路」及「抗輻射之電池製程」，提供技術策略的研擬成果。

(一) 太空產業之「太空用的積體電路」技術策略

從分析結果可知(圖 1)，在「太空用的積體電路」技術領域

中，整體而言較為適合我國進行資源投入研發的抗輻射積體電路技術主要為：「D1 半導體製程，如半導體裝置或其部件之製造或處理」、「F2 由多個半導體組成之裝置，如適用於整流、振盪、放大、切換之半導體元件之裝置」、「A1 邏輯電路之提高可靠性之修飾」、「B3 電性能之測試裝置，如電路之測量」、「C1 錯誤檢測與校正，如容錯」。

從本研究的專利池案例來看，「D1 半導體製程，如半導體裝置或其部件之製造或處理」及「F2 由多個半導體組成之裝置，如適用於整流、振盪、放大、切換之半導體元件之裝置」技術，主要可以用於「b2 互補式金屬氧化物半導體」及「b5 靜態隨機存取記憶體」的開發；「A1 邏輯電路之提高可靠性之修飾」主要可用於「b1 現場可程式化邏輯閘陣列」、「b2 互補式金屬氧化物半導體」及「b5 靜態隨機存取記憶體」的開發；「B3 電性能之測試裝置，如電路之測量」及「C1 錯誤檢測與校正，如容錯」技術，則主要可以用於「b1 現場可程式化邏輯閘陣列」及「b5 靜態隨機存取記憶體」的開發。此研究成果可作為原能會相關研發計畫研擬及資源投入之參考依據。

(二) 太空產業之「抗輻射之電池製程」技術策略

從分析結果可知(圖 2)，在「抗輻射之電池製程」技術領域中，整體而言較為適合我國進行資源投入研發的技術主要為：O 特殊背面、底層、基板或後觸點、J 半導體層厚度、A 塗層、薄膜。從本研究的專利池案例來看，J 半導體層厚度之設計主要用於多接面太陽能電池，由於各子電池的材料、摻雜劑、帶隙、順序、及厚度等，都可能作抗輻射的考量，而子電池之厚度設計，特別是頂電池及中電池之厚度設計如何可增加吸收及提升

輻射耐受度，不少專利申請案例會對厚度作詳細的描述，例如頂電池通常使用對抗粒子輻射能力較強之材料，而第二層之子電池(若三接面則為中電池)因輻射能力較弱，故需減薄厚度以降低被破壞的機會，此時亦可能搭配 L 特殊反射層/反射鏡/透鏡之技術。而在本研究之專利池中發現在太陽短波輻射的光致分解作用下，氧分子轉變為高活性的原子氧，材料發生強烈的氧化與侵蝕，因此 O 特殊背面、底層、基板或後觸點是可研發投入之處，此外導電或放電功效也是技術 O 的重要應用。而 A 塗層、薄膜除了抗輻射之用處外，更廣和更新的應用為達到導電及放電功效。此研究成果可作為原能會相關研發計畫研擬及資源投入之參考依據。

二、國際原子能科研機構發展趨勢及技術布局研究

(一) 本研究已完成「美國能源部國家實驗室對應我國原子能八大議題之研究與設施」盤點，可作為我國規劃原子能科學發展政策借鏡及國際交流協議簽署之合作交流項目參考。

(二) 政府宜加大力度發展原子能技術民生用途。

(三) 宜加大力度進行國際合作；就我國研發能量而言，實無法全面進行各產業的原子能技術發展與應用，國際合作即成為重要的手段。

(四) 日本原子能科研機構運作方式，對我國策略的啟示：

1. 三家科研機構皆經過多次改組，在尋找最佳的組織運作與分工方式；
2. 重視基礎研究；
3. 重視長期發展；
4. 重視組織經營管理；

5. 參與國際合作與人才培育；
6. 自籌經費佔比仍小，政府大力挹注經費。
7. 參酌日本原子能科研組織運作方式，以及配合原子能民生應用策略藍圖所律定的重點發展項目，建構我國整體性的原子能技術的發展體系(生態體系)。

(五) 有效發揮 30~70 MeV 粒子加速器。

(六) 多光束直寫微影技術可思考切入的策略。

(七) 就下世代 EUV 微影設備而言，除非參與台積電的研究團隊，似乎無發揮的空間。

(八) 我國宜建置完整的太空游離輻射環境模擬體系，建議現階段我國應著重試驗體系的建立，尋求國際合作的機會，協助產業的發展，再求爭取國際訂單。

參、展望

透過本研究的研發成果應用，可做為未來相關研究計畫策略規劃之參考，有助於後續原能會研擬原子能科技的研發策略及推動目標。本研究之成果，亦可以做為相關技術團隊研發時的重要參考依據，可用於進行技術之「新穎性」評估，如已不具新穎性者，可朝「進步性」技術進行研發調整，進而提前進行技術及專利布局。

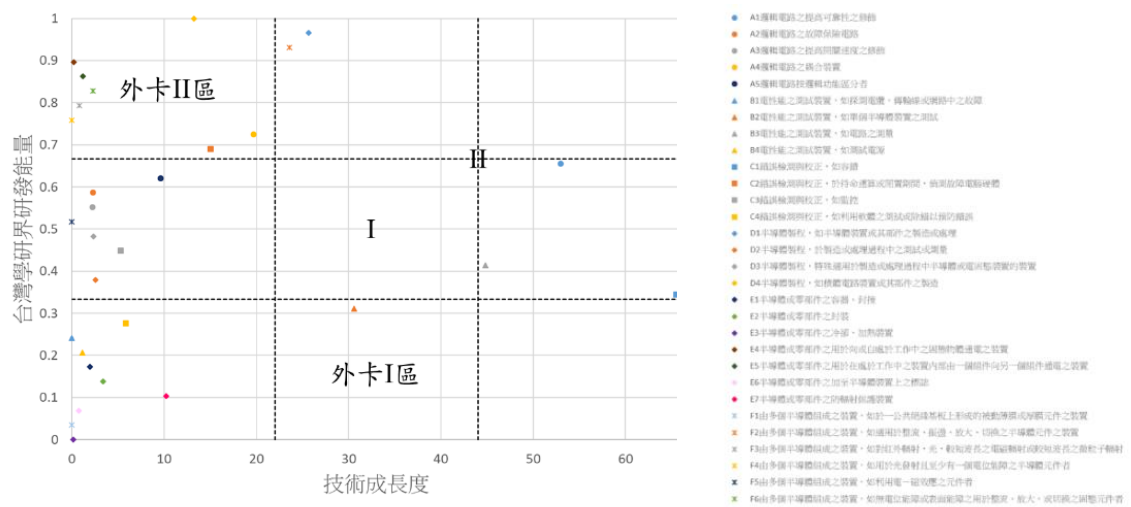


圖 1、「太空用的積體電路」技術策略分析圖

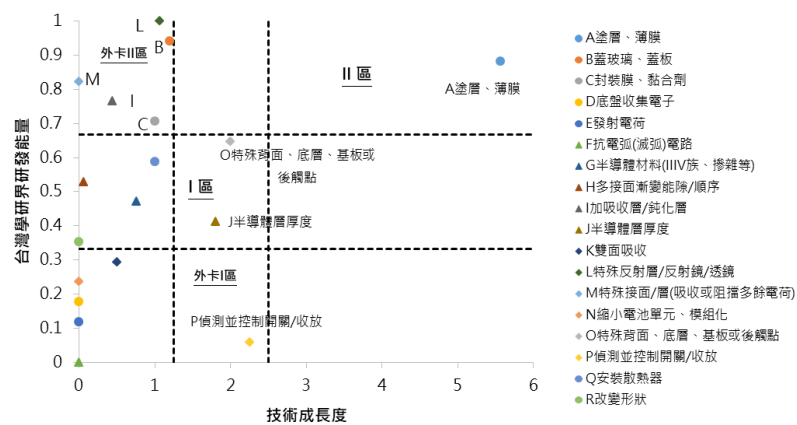


圖 2、「抗輻射之電池製程」技術策略分析圖

海陸域環境輻射調查與國民輻射劑量評估(3/4)

Environmental radioactivity survey of marine and continental area and
population dose assessment in Taiwan(3/4)

(計畫編號：AEC110009)

劉任哲 陶良榆 高薇喻 陳婉玲 柯亭含 洪明崎 徐明德

行政院原子能委員會輻射偵測中心

日本福島事件後，民眾對於環境的輻射劑量與輻射對海域的影響更為關注。為了獲得本土化數據，輻射偵測中心透過跨部會合作與參考國際文獻，執行台灣海陸域輻射監測調查及國民輻射劑量評估作業。本計畫為108年至111年為期4年的計畫，110年的國民輻射劑量評估作業，醫療輻射部分完成8種醫療輻射類別及其對應的51個檢查項目，合計共有138個檢查序列之劑量評估模型及之階段性結果；天然背景輻射部分，新增50處戶外地表輻射劑量結果，完成因攝食魚、豬、牛、雞肉及其內臟中所含鈾-210造成之國民輻射年劑量評估；產業活動部分，完成國內農業用肥料對農民造成輻射劑量的調查評估及國內三個火力發電廠電廠燃煤電廠周圍環境土壤造成之國民輻射年劑量評估；消費性產品部份，完成國人飛航行為調查與劑量初步評估；職業曝露的部分，完成全國輻射從業人員及飛航從業人員之職業曝露輻射劑量評估。

台灣海陸域輻射監測調查部分，本計畫先以海水、海生物及累積試樣(岸沙及海底沉積物等)為海洋主要分析樣品，並選擇銫-137為調查分析之關鍵核種；110年延續109年規劃內容執行，持續建立台灣海域輻射背景

資料庫並健全台灣海陸域環境輻射數據，進而能掌握日本福島核災事故及大陸沿岸核能電廠等放射性廢水排放對台灣海域影響及變化趨勢。

After Fukushima incident, more and more people care about the radiation around our living area and impact of ocean ecosystem. In order to obtain localized data of the health of Taiwanese people, Radiation Monitoring Center of Atomic Energy Council executed the project to promote Taiwan sea area radiation monitoring and population dose assessment by cross-departmental cooperation and reference to international literature. The study is a 4-year research plan from 2019 to 2022. The following population dose assessments had completed in 2021. About medical radiation, 8 types of hospital inspection, 51 types of sampling sequence surveys and total of 138 inspection series dose assessment models have been completed. In the part of natural background radiation, 50 new outdoor surface radiation dose results were added, and the annual population radiation dose assessment caused by ingesting polonium-210 contained in the meat and internal organs of fish, pig, cow and poultry was completed. About industrial activities, the investigation and assessment of the radiation dose caused by domestic agricultural fertilizers to farmers and the assessment of the annual population radiation dose caused by the surrounding soil of three domestic thermal power plants and coal-fired power plants. About consumer products, the investigation and preliminary dose assessment of taking flights has been completed and about occupational exposure, the occupational exposure radiation dose assessment of radiation workers and aviation practitioners has been completed.

About Taiwan sea area radiation monitoring, seawater, marine organisms and cumulative samples (shore sand and seabed sediments) were used as the main analytical samples, and cesium-137 was selected as the key nuclear species for investigation and analysis. Project started from 2019, establish and

refresh a radiation background database to improve the environmental radiation background of Taiwan's sea and land areas, and then grasp the trend of the impact of radioactive wastewater discharge from the Fukushima nuclear disaster and the nuclear power plant in China on Taiwan sea area to ensure radiation safety.

壹、計畫目標

原能會為我國輻射及核能安全的管制監督機關，負責核電廠、輻射作業場所及放射性廢棄物等之安全管制，保障民眾、環境及輻射工作人員之輻射安全。為能讓民眾瞭解環境輻射的現況，達到監測資訊透明化的目的，本計畫分為兩個分項計畫，分別為國民輻射劑量評估與海陸域環境輻射調查，逐年進行調查與評估，以能得到完整之環境輻射資訊，本計畫為4年期中長程計畫，110年為第3期。

貳、重要成果

一、國民輻射劑量評估

110年之研究成果涵蓋醫療輻射、消費性產品、產業活動、職業曝露與食品鈾210攝入之劑量評估。

1. 天然背景輻射-地表輻射

本中心自103年起在國內各縣市量測戶外地表環境輻射，截至109年底共計完成447處之量測作業，為使地表輻射之數據更客觀，特於110年度規劃增加50處戶外地點之量測數據。偵測結果顯示，此50處的戶外地表輻射劑量及總加馬輻射差異不大，地表輻射劑量率平均值為0.053 μ Sv/h，總加馬輻射劑量率平均值為0.08 μ Sv/h；今年度之偵測結果在併入103至109年之地表輻射偵測結果後，戶外地表

輻射已累計達 497 處。依 110 年 11 月底內政部所公佈之各縣市人口數，計算出集體劑量為 11,538 人-西弗/年，戶外地表輻射所造成每位國民平均有效劑量為 0.493 毫西弗/年；進一步，考量不同年齡層之室內與戶外之占用因子，戶外及室內之地表輻射合計年有效劑量為 0.84 毫西弗(如表一)。初步評估約占天然游離輻射之 38%，惟該比例會因其他天然游離輻射之調查評估結果而變動。

2. 天然背景輻射-食品鈾-210 攝入

在主要消費食品攝入部份，110 年進一步針對國人主要消費食品中的魚、豬、牛、雞肉及其內臟進行鈾-210 放射性核種含量分析，共完成 63 件，其中有 8 件(花腹鯖魚肝臟等)活度濃度超過 100 Bq/kg-鮮重，11 件(三線機鱸魚肝臟等)活度濃度介於 10~100 Bq/kg-鮮重，13 件(秋刀魚魚肉等)活度濃度介於 1~10 Bq/kg-鮮重，14 件小於儀器最低可測活度濃度；各食物品項之檢測結果如表二。

依據衛福部食藥署國家攝食資料庫之攝食量調查結果，國人在肉類的攝食上除了肉品及其內臟的食用，依據該資料庫之平均攝食量，以及鈾-210 之放射性核種含量分析結果，估算 16 至 65 歲之族群因攝食魚、豬、牛、雞肉及其內臟中所含鈾-210 造成之輻射劑量(如表四)，初步評估之國民輻射年劑量為 0.598 毫西弗；本研究未來會再整理其他不同年紀族群之肉類攝食量，以更新此項目之評估結果。

3. 消費性產品

在商用飛航部份，美國 NCRP 的作法是將商用飛航宇宙輻射列為消費性產品及其活動分類的子項。輻射偵測中心於 87 年進行第一次國民輻射劑量評估，飛航行為之國民輻射劑量為 0.003 微西弗/年；惟歷經 20 年社會經濟變化，國人在飛航行為上與當時的狀況相比有相

當大的變化，108 年台灣各機場出入旅客人次達到 7,182 萬人次(包含：國際線、兩岸線、國內線)。

本研究利用交通部民航局所提供國人飛航行為調查結果，針對國際線與兩岸線兩個部分的旅遊人次進行熱門航線探討，並使用飛航劑量評估軟體執行劑量計算與分析，以評估國人因搭乘飛機所造成之國民輻射劑量。依台灣熱門航線分析可發現歐美航線因飛行距離較其他航線遠，導致其受宇宙輻射曝露的時間相對較長，因而其輻射曝露劑量評估結果比其他航線高；而亞洲地區之國家大多分布於赤道附近或位於低緯度，再加上距離台灣較近，飛航時間較短，所以劑量評估結果之曝露劑量相對較低。

依國人飛航目的選定國際線 65 條航班與兩岸線 14 條航班之熱門航線進行評估，其涵蓋之旅運人次分別達總人次之 95.17%及 55.74%；劑量計算則使用法國開發的線上版飛航劑量評估軟體-SIEVERT，國際線之總有效劑量範圍為 2 μSv (高雄往返澳門)至 189.2 μSv (桃園至美國紐約)，兩岸線之總有效劑量範圍為 2.4 μSv (高雄往返深圳)至 11.9 μSv (高雄往返北京)。綜上，國際線、兩岸線經計算所得之集體有效劑量結果分別為 453 及 12 人-西弗/年，計算所得之商用飛航宇宙輻射所造成之國民輻射年劑量約為 0.012 毫西弗。

4. 醫療輻射

本計畫透過下列程序來完成國民醫療輻射劑量調查研究：使用全民健康保險研究資料庫來調查台灣醫療曝露人口；記錄抽樣醫院的檢查項目輻射參數與測量輻射輸出；針對 8 種醫療輻射類別(電腦斷層、核子醫學、心臟類介入性透視攝影、非心臟類介入透視攝影、傳統透視攝影、一般傳統 X 光、乳房攝影、牙科攝影)及其對應的 51 個檢查項目，依各檢查項目的醫療曝露模式分別開發劑量評估模型；評估

每個檢查項目的有效劑量，並配合調查醫療曝露人口資訊，以得到集體有效劑量；最後搭配台灣總人口數，推算的平均國民醫療輻射劑量。原訂 110 年完成醫療輻射之整體評估作業，惟受國內 COVID-19 疫情影響，赴醫院實地採樣進度受到影響，預計延至 111 年 6 月完成。

110 年完成的工作進度如下：(A) 精進健保資料庫的人數趨勢評估：完成至衛生福利部衛生福利資料科學中心蒐集健保資料庫之健保代碼對應其檢查項目年頻次等資料之統整與精進；(B) 取樣醫院檢查序列調查：完成 32 個類次；(C) 精進與微調 8 種類別 51 個檢查項目合計 138 個檢查序列之劑量評估模型(如表四)；(D) 推算 8 種類別之集體有效劑量：完成 64 個類次，其中 8 種類別分別以 ICRP 60 號報告報告與 ICRP 103 號報告報告評估台灣國民平均年劑量估算約為每人每年：電腦斷層（10 家）：1.03 mSv、1.05 mSv；核子醫學（6 家）0.15（ICRP 60）mSv；心臟類介入性透視攝影（2 家）0.28 mSv、0.30 mSv；非心臟類介入透視攝影（10 家）0.05 mSv、0.05 mSv；傳統透視攝影（7 家）0.02 mSv、0.02 mSv；一般傳統 X 光（4 家）0.09 mSv、0.08 mSv；乳房攝影（20 家）1.4 μ Sv、3.3 μ Sv；牙科攝影（5 家）1.2 μ Sv、3.4 μ Sv；(E) 彙整國民醫療輻射劑量資料：完成 64 個類次；(F) 建立台灣醫療輻射類別劑量網站之基本架構雛形。目前醫療輻射之集體有效劑量係以 64 個類次結果進行估算國民平均年劑量，此數據於後續會再更新為 96 個類次的估算結果。

5. 產業活動

本計畫為探討評估國內市售肥料對農民造成之輻射劑量，研究使用高純度鍮輻射偵檢器測量國內製造的 13 件市售肥料，分析所含鐳-226、鈷-232 和鉀-40 的放射性核種活度濃度，其中 9 件複合肥料樣品所含鉀-40 和鐳-226 的平均活度濃度相對較高，分別為 3339.4 ± 22.9 、

126.9±2.8 Bq/kg，2 件磷肥樣品所含鐳-226 平均活度濃度相對較高，為 552.3±3.3 Bq/kg，2 件鉀肥樣品所含鉀-40 和鐳-226 平均活度濃度相對較高，為 3279.6±46.4、141.7±11.8 Bq/kg，但所有樣品所含鐳-226、鈾-232 和鉀-40 核種活度濃度均小於天然放射性物質管理辦法的基準值(如表五)。本研究依據檢測結果分別計算 13 件肥料樣品施作於農地後所造成農民之鐳當量濃度、外部危險指數、內部危險指數、吸收劑量、年有效劑量及加馬射線係數(如表六)，結果均遠低於歐盟委員會指導方針所提出的建議值；肥料使用之年有效劑量平均值為 0.606 微西弗($\mu\text{Sv/y}$)，遠低於每年 1 毫西弗之劑量限值，顯示國內正常施作肥料時應不需進行輻射防護措施。但部分國際研究文獻指出在磷礦業、磷肥製造工廠、與肥料倉庫內作業的工人可能接受到較高的體外曝露及體內曝露，未來輻射偵測中心會進行相關研究。

有關國內燃煤電廠周邊土壤進行量測，本計畫係採用美國能源部 HASL-300 現場度量技術進行燃煤電廠周圍之土壤輻射強度調查，並參考燃煤電廠周圍人口分布之情形，評估當地居民因燃煤電廠產生之煤灰所造成的國民輻射劑量。本研究選定之雲林麥寮發電廠、高雄興達發電廠與台中火力發電廠周邊(共 10 處)進行土壤現場量測，檢測結果如表七，鉀-40 所量測活度濃度範圍在每公斤 496 到 635 貝克、鈾系所量測活度濃度範圍在每公斤 18 到 39 貝克、鈾系所量測活度濃度範圍在每公斤 31 到 59 貝克。為進行輻射劑量評估，本研究參考 ICRU 53 號報告將現場度量之活度濃度(Bq/kg)量測結果轉換成加馬劑量率($\mu\text{Sv/h}$)；經轉換之土壤量測結果，鉀-40 之加馬劑量率範圍為每小時 0.019 至 0.025 微西弗、鈾系之加馬劑量率範圍為每小時 0.001 至 0.021 微西弗、鈾系之加馬劑量率範圍為每小時 0.012 至 0.023 微西弗。將計算轉換的鈾系、鈾系與鉀-40 劑量率加總後即可獲得總加

馬劑量率，總加馬劑量率之範圍落於 0.043 至 0.066 $\mu\text{Sv/h}$ ，如表七；以個別電廠的量測結果來看，雲林麥寮電廠、高雄興達電廠與台中火力發電廠之加馬劑量率平均值分別為 0.057、0.054 與 0.052 $\mu\text{Sv/h}$ ，與其他地點之一般地表加馬輻射劑量無異，故居住於該地區的居民並不會因此獲得較高的輻射劑量。

6. 職業曝露

依據 104 年至 109 年之「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」之劑量監測數據，近六年職業輻射曝露之國民輻射年劑量落在 0.234~0.366 微西弗之間，平均值為 0.281 微西弗/年，如表八。整體而言，我國的職業輻射從業人數雖增加，但年集體有效劑量則逐年下降，故職業曝露之國民輻射年劑量呈現長期下降趨勢。

因「全國輻射從業人員劑量資料統計年報」並無民用航空職業曝露相關監測數據，本研究另以 UNSCEAR 1993 報告之飛航從業人員之個人年有效劑量(3 毫西弗/年)及國籍航空飛航工作人數進行估算；依據行政院性平會之統計資料，我國國籍航空公司之受雇員工實際從事飛行工作包括：機長、副機長及空服員，從業人口在過去 10 年呈現逐年增加趨勢，106 年後突破萬人，104 年-109 年之平均人數為 10,780 萬人。綜上，104~109 年民用航空職業曝露之平均年集體有效劑量為 32.34 人-西弗，換算成國民輻射劑量為職業輻射曝露為 1.373 微西弗/年，與劑量監測所得之國民輻射年劑量(0.281 微西弗/年)加總，職業曝露之國民輻射劑量為 1.654 微西弗/年。

二、海陸域環境輻射調查

本計畫係對台灣海域執行環境輻射背景調查的中長期計畫，目的主要為充實台灣海域長期輻射監測背景資料，未來建立台灣海域環境輻射背景資料庫，以利於比對核子意外事故發生時或日本福島事故後對台灣

海域之影響情形，故監測核種以 Cs-137 為主。因台灣海域受黑潮洋流影響深遠，而黑潮洋流於夏、冬季節有明顯的差異，爰參考國際例行海洋監測頻次，例行監測以每季至每半年為原則，如例行監測結果異常，則增加其監測頻次至每季或每月。呈上，原能會參採國際原則及台灣海域洋流現況，離岸樣品於夏、冬 2 季取樣，沿岸樣品每季取樣；取樣分析內容以海水、海生物、海底沉積物及岸沙為主，分別由輻射偵測中心、海委會海巡署艦隊分署、農委會漁業署及委託海洋學術機構等不同取樣單位來提供，如圖二。

目前已初步建立台灣鄰近海域海水、海產物、沉積物等樣品之銫-137 核種背景資料，將持續建立更完整海域環境輻射監測資料，未來即可藉由趨勢變動分析將有助於提早發現污染來源。未來將持續透過跨部會合作持續執行離島區域及台灣海域海水取樣作業，以利進行日本福島氙輻射廢水排放對台灣海域的影響監測與評估。有關海產物持續委由專業漁業單位協助取樣，以達到全海域海產物捕獲點及物種均勻分布具有代表性的目的，如表九。海陸域調查 110 年達成以下成效：

- (1) 建立 106~110 年度台灣海域環境放射性核種含量背景資料，提供未來環境輻射監測分析數據比對佐證之參考，並確認台灣臨近海域目前並無輻射異常之現象。
- (2) 初步建立台灣海域環境樣品之取樣範圍及數量，經過本計畫數據之整理，加上台灣海域海流、潮汐、漁場等因素，規劃未來適合的取樣範圍及監測樣品等項目，以利執行台灣海域輻射之背景調查。
- (3) 訂定「110 年海域海水氙輻射調查計畫」並邀集農業委員會水產試驗所、海洋委員會海洋保育署、海洋委員會海巡署及國家海洋研究院成立「海域輻射監測工作小組」並定期召開工作小組會議，共同研商日本含氙廢水因應措施。

- (4) 依據歷年台灣海域輻射背景資料並參考鄰近國家海域輻射監測作法及考量台灣周邊洋流狀況，研擬「台灣海域環境輻射長期監測」，111 年將以「監測」為目的持續為台灣海洋環境輻射安全把關。
- (5) 海水加馬能譜分析結果，半衰期較短(2 年)的鈾-134 於各分區、各深度之活度皆小於最小可測量值，而半衰期較長的鈾-137 分析結果，台灣鄰近海域各區域之水深 200 至 400 公尺之海水鈾-137 活度較其他水層有較高之趨勢，該水層鈾-137 活度測得最高值為 2.41 mBq/L，但低於原子能委員會「環境輻射監測規範」之環境試樣放射性分析之預警措施基準表中水樣鈾-137 紀錄基準值 0.4 Bq/L(等於 400 mBq/L)及調查基準 2 Bq/L(等於 2000 mBq/L)。
- (6) 沉積物中鈾-137 活度低於 0.64 貝克/千克·乾重，截至目前的數據分析結果，未發現有區域或海底深度的差異性。
- (7) 海產物以大洋洄游漁類鈾-137 (平均活度約為 0.28 貝克/千克·鮮重)較高，其次為沿近海漁類(平均活度約為 0.14 貝克/千克·鮮重)，最低者為藻貝蝦等其他類(平均活度低於 0.07 貝克/千克·鮮重)，少數如杜氏鰱等大型大洋性魚類物種較高於平均值，但數據皆遠低於規定內容之標準值，屬於正常安全範圍內。
- (8) 台灣海域海水中的氡輻射含量都在本中心實驗室最低可測活度範圍內(小於 MDA 2.03 貝克/升)，氡背景資料將持續建立。
- (9) 台灣北部山區土壤平均鈾-137 含量約 13 貝克/千克·乾重；東部山區土壤平均鈾-137 含量約 10 貝克/千克·乾重；南部山區土壤平均鈾-137 含量約 2 貝克/千克·乾重。整體而言，台灣山區土壤鈾-137 含量北部較高，南部較低，全台平均含量約 10 貝克/千克·乾重，相較 109 年測得北部山區土壤約 10 貝克/千克·乾重無明顯差異。

- (10) 台灣西部的稻米未測得銫-137 等人工核種，僅測得稻殼平均鉀 40 含量為 347 貝克/千克·乾重，稻米平均鉀-40 含量為 71 貝克/千克·乾重。

參、展望

透過今年度計畫執行之檢討，未來計畫之強化精進作業包括：

1. 消費產品及產業活動部分，包括飛航劑量、肥料使用以及燃煤電廠周圍量測等，雖占國民輻射劑量比例小，但為民眾關切議題，列為後續規劃重點，並透過持續與其他單位及部會協調合作，完成評估結果之本土化精進。
2. 111 年將彙整歷年國民輻射劑量各分類評估調查結果，進行整體國民輻射劑量評估，完成國民輻射劑量評估調查研究報告
3. 訂定台灣周邊海域長期監測計畫，預計自 111 年度開始執行，用以了解日本福島含氚廢水排放對我國海域環境影響，同時針對中國大陸沿海核電廠等境外放射性污染進行監測，並持續確認我國核電廠周邊海域輻射安全。
4. 核設施周圍土壤銫-137 活度低於 14.9 (貝克/千克·乾重)，初步發現核二廠環境土壤中銫-137 於取樣深度 0~25 公分之活度分布，符合國際文獻資料；於取樣深度 25~45 公分，隨深度有漸趨累積現象，未來尚須針對土壤基質進行探討。

表一、地表加馬輻射對國民造成的有效劑量(103 年至 110 年)

項目	有效劑量率 (微西弗/時)	有效劑量 (毫西弗/人-年)	總有效劑量 (毫西弗/人-年)
戶外	0.0066 ^(a) ~1.9 ^(b)	0.49 ^(c)	0.84 ^(d)
室內	0.077~0.177	0.93	

備註

(a)澎湖縣湖西鄉裡正角

(b)臺南縣將軍區馬沙溝生態園區，屬於特殊地質區

(c)評估年有效劑量率時不列入特殊地質區計算

(d)以各縣市人口數、占用因子、及地表加馬輻射有效劑量率計算出

表二、各食物品項之鈾-210 含量檢測結果

食物種類	樣本數 (件)	平均值	最大值	最小值
		(Bq/kg)		
牛肉	2	0.1	0.2	0
牛內臟	3	0.43	0.58	0.28
豬肉	3	0.43	0.97	0
豬內臟	4	0	0	0
雞肉	4	0.12	0.26	0
雞內臟	6	0.68	3.51	0
淡水魚肉	2	1.05	1.58	0.51
淡水魚內臟	3	84.20	242.81	2.78
鹹水魚肉	22	10.42	112.46	0
鹹水魚內臟	11	190.83	755.85	15.72
頭足類(花枝)	1	1.26	1.26	1.26
貝類	2	47.44	75.95	18.92

表三、16 至 65 歲族群之鈾-210 造成之輻射劑量

攝食種類	平均活度濃度 (Bq/kg)	每日攝食量 (g/day)	年有效劑量 (mSv/year)
牛肉	0.1	13.08	5.73E-04
牛內臟	0.43	0.25	4.71E-05
豬肉	0	77.97	0.00E+00
豬內臟	0.43	5.38	1.01E-03
雞肉	0.68	33.16	9.88E-03
雞內臟	0.12	3.44	1.81E-04
淡水魚	12.52	11.05	6.06E-02
鹹水魚	35.30	28.61	4.42E-01
花枝	1.26	5.27	2.91E-03
牡蠣、生蠔	47.44	3.85	8.00E-02
合計			0.598

表四 8 種類別：檢查項目、檢查序列、劑量評估模型、劑量評估模式

類別	檢查項目	檢查序列	劑量評估 模型	劑量評估模式
1.電腦斷層	11	23	23	CT-Expo 軟體
2.核子醫學	6	12	12	ICRP 報告
3.心臟類介入性透視攝影	6	26	26	PCXMC 軟體
4.非心臟類介入性透視攝影	6	13	13	PCXMC 軟體
5.傳統透視攝影	7	10	10	PCXMC 軟體
6.一般傳統 X 光	7	35	35	PCXMC 軟體
7.乳房攝影	2	2	2	ICRP 報告
8.牙科攝影	6	17	17	PCXMC 軟體
小計	51	138	138	

表五、肥料樣品中所含鐳-226、鈾-232 和鉀-40 的活度濃度

編號	品名	肥料類 型	鐳-226 (Bq/kg)	鈾-232 (Bq/kg)	鉀-40 (Bq/kg)
M1	黑旺特 1 號	複合肥料	85.7±0.9	1.3±0.4	2616.7±47.1
M2	黑旺特 43 號	複合肥料	151.6±8.3	3.8±1.4	3786.8±83.3
M3	寶效 39 號	複合肥料	184.2±9.8	9.2±3.3	3101.0±62
M4	黑旺特 5 號	複合肥料	114.7±5.3	1.6±0.5	2951.0±56.1
M5	黑旺特 4 號	複合肥料	89.8±5.8	1.5±0.4	4932.6±113.4
M6	寶效 105 號	複合肥料	148.7±9.4	1.1±0.4	2773.4±47.1
M7	寶效 43 號	複合肥料	106.2±8.7	6.7±2.3	3722.7±70.7
M8	宜農肥王 1 號	複合肥料	120.5±9.0	1.8±0.6	2762.0±44.2
M9	宜農 43 號	複合肥料	140.5±12.5	8.0±2.9	3408.3±64.8
P1	寶粒磷(1)	磷肥	537.0±4.8	4.6±1.2	258.3±8.5
P2	寶粒磷(2)	磷肥	567.6±4.5	3.5±0.8	360.0±11.4
K1	雋隆 43 號(1)	鉀肥	150.4±19.6	2.9±1.0	3871.8±77.4
K2	雋隆 43 號(2)	鉀肥	132.9±13.3	9.2±1.0	2687.3±51.1

表六、肥料使用之年有效劑量評估結果

編號	品名	R_{acq} (Bq/kg)	H_{ex}	H_{in}	D (nGy/h)	E ($\mu\text{Sv/y}$)	I_{γ}
M1	黑旺特 1 號	0.347	0.001	0.001	0.180	0.221	0.001
M2	黑旺特 43 號	0.538	0.001	0.002	0.278	0.341	0.002
M3	寶效 39 號	0.523	0.001	0.002	0.265	0.325	0.002
M4	黑旺特 5 號	0.413	0.001	0.001	0.214	0.262	0.002
M5	黑旺特 4 號	0.566	0.002	0.002	0.299	0.367	0.002
M6	寶效 105 號	0.437	0.001	0.002	0.223	0.274	0.002
M7	寶效 43 號	0.483	0.001	0.002	0.251	0.308	0.002
M8	宜農肥王 1 號	0.403	0.001	0.001	0.207	0.254	0.002
M9	宜農 43 號	0.497	0.001	0.002	0.256	0.314	0.002
P1	寶粒磷(1)	0.676	0.002	0.004	0.314	0.385	0.002
P2	寶粒磷(2)	0.720	0.002	0.004	0.335	0.411	0.002
K1	雋隆 43 號 (1)	0.543	0.001	0.002	0.281	0.344	0.002
K2	雋隆 43 號 (2)	0.424	0.001	0.002	0.216	0.265	0.002
	平均值				0.255	0.313	

代號說明:鐳當量濃度(R_{acq})、外部危險指數(H_{ex})、內部危險指數(H_{in})、吸收劑量(D)、年有效劑量(E)及加馬射線係數(I_{γ})

表七、燃煤電廠現場度量分析之活度濃度與加馬劑量率結果

電廠	測定場所	活 度 濃 度 (Bq/kg)			加馬劑量率($\mu\text{Sv/h}$)			
		鉀 40	鈾系	鈾系	鉀 40	鈾系	鈾系	合計
雲林麥寮發電廠	長庚雲林分院	572	27	44	0.022	0.014	0.017	0.053
	橋頭國小許厝分校	603	38	57	0.024	0.020	0.022	0.066
	阿媽公園	496	27	44	0.019	0.014	0.017	0.051
高雄市興達發電廠	五福宮附近空地	634	20	34	0.025	0.011	0.013	0.049

	高雄市興達國民小學	525	32	43	0.021	0.070	0.017	0.054
	興達港河堤邊	560	29	59	0.022	0.015	0.023	0.060
台中市火力發電廠	梧棲運動公園	510	18	35	0.020	0.010	0.012	0.043
	台中港旅客服務中心	539	19	31	0.021	0.010	0.012	0.043
	河濱公園槌球場	524	32	45	0.020	0.017	0.018	0.055
	臺中市龍井國民小學	635	39	53	0.025	0.021	0.021	0.066

表八、104-109 年職業曝露之國民輻射劑量評估結果

年分	104	105	106	107	108	109
男(人)	11,712,047	11,719,270	11,719,580	11,712,913	11,705,186	11,673,765
女(人)	11,780,027	11,820,546	11,851,647	11,876,019	11,897,935	11,887,471
總人口數(人)	23,492,074	23,539,816	23,571,227	23,588,932	23,603,121	23,561,236
年集體劑量(mSv)	8589.69	7326.65	5803.61	5775.33	5516.98	6725.03
國民輻射劑量(μ Sv/yr)	0.366	0.311	0.246	0.245	0.234	0.285

表九、臺灣鄰近海域樣品加馬能譜分析結果

	海水 (mBq/L)	沉積物 (Bq/kg)	海生物 (Bq/kg)
Cs-134	-	-	-
Cs-137	<MDA~2.41	<MDA~0.64	<MDA ~0.61
氚	<MDA	*	*

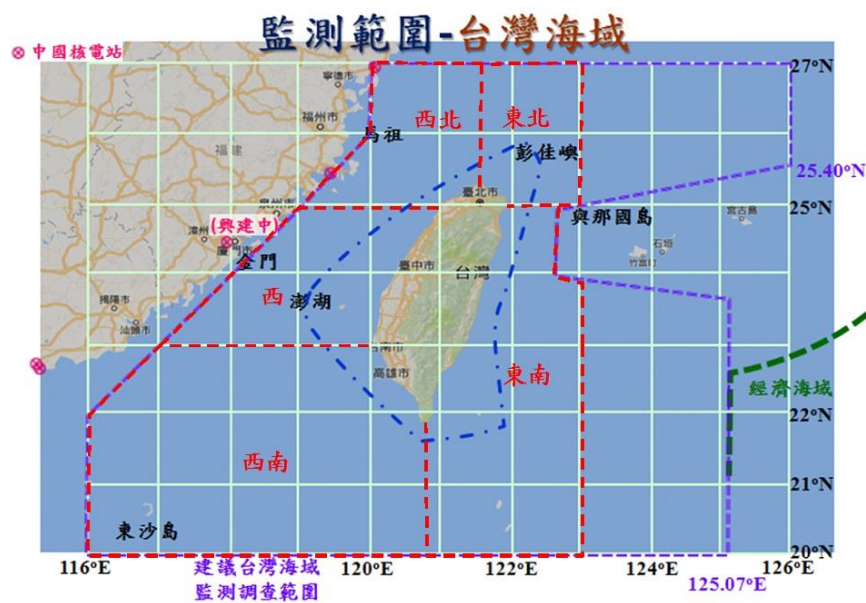
註：

1."—"表示小於最低可測量值(MDA，海水 Cs-134 及 Cs-137 MDA 為 0.5 mBq/L、海水 氚 MDA 為 2.03Bq/L、沉積物 Cs-134 MDA 為 0.09 Bq/kg、沉積物 Cs-137 MDA 為 0.05 Bq/kg，海生物 Cs-134MDA 為 0.03 Bq/kg，海生物 Cs-137 MDA 為 0.04 Bq/kg)。

2."*"表示未檢測。



圖一、國民輻射劑量調查研究計畫



圖二、台灣海域背景輻射監測範圍