

行政院原子能委員會
委託研究計畫期末研究報告

核電廠除役階段之輻射安全管理與規劃 技術研究(2/4)

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

計畫編號：109- - - -

(GRB 系統科技計畫編號：)

受委託機關(構)：原子能委員會核能研究所

計畫主持人：黃○吉

聯絡電話：(03)4711400 ext 7681

主要工作項目負責人：梁○京、許○霞、黃○吉

聯絡人：彭○琪

報告日期：109 年 12 月 22 日

目 錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	ii
壹、前言(計畫緣起).....	1
貳、研究目的.....	4
參、研究方法、過程、結果與產出.....	7
肆、結論與建議.....	29
伍、參考文獻.....	33
附件.....	35

中文摘要

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，故有必要加強精進輻射安全管制技術，包括防護措施的適用性分析、應用對策研擬、及核電廠除役之輻射潛在意外事件蒐集與分析，俾利精進提昇國內輻射防護與管制技術，增進完善管制核設施除役之輻射安全，提昇國內輻射防護與管制技術。針對此需求，本計畫擬執行工作包括：精進核電廠除役各階段輻防管制技術與輻安意外潛在分析、導入智慧科技以取代人力的輻射劑量合理抑低手段、以及除役中與除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術。

關鍵字：潛在輻安意外分析、除役、智慧科技取代人力、輻射偵測
報告審查、輻射防護管制

Abstract

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 applicability analysis of protective measures, the research of countermeasures, and the collection and analysis of potential radiation accidents during the decommissioning of nuclear power plants to improve the technologies of domestic radiation protection and regulation.

In response to this demand, the proposed implementation of this project includes: improving the technology of radiation safety regulation and potential radiation accident analysis, introduction of smart technology to reduce the radiation dose for workers and review technology for the environmental radiation monitoring report for the decommissioned nuclear power plant.

Keywords: Potential radiation accident analysis, smart technology, review technology for radiation monitoring report, radiation safety regulation.

壹、前言(計畫緣起)

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，是為尚未進入實質除役階段的當下應優先執行的要務。在實務上則考量(一)核一廠除役主要分成四個階段，包括停機過渡階段8年、除役拆廠階段12年、廠址最終狀態偵測階段3年，以及廠址復原階段2年，共計長達25年。核電廠除役期間潛在輻射風險，運用機器人或遠端遙控技術輔助輻射調查作業，可避免人員直接曝露於輻射風險，相較一般工業機器人應用將更具人工替代效益。另外發展相關應用之機器人載具，透過人工智慧及原子能技術之跨領域整合，尚有助政府「智慧機械」創新產業之加值化，落實「發展工程跨域整合技術」策略目標之邊際效益。(二)核電廠除役計畫安全審查的關鍵要項，包括廠址輻射特性調查、除役作業安全分析、拆除與除污技術、除役放射性廢棄物管理、輻射劑量評估及環境輻射監測、廠址解除管制等範疇，蒐集並研析國外除役核電廠之管制法規、安全標準、技術規範及實際除役案例與技術，建立國內核電廠除役計畫安全審查相關之管制法規、技術規範及評估驗證技術。計畫內容所參考之目前環境需求與未來方向預測如下：

- 一、為使除役計畫中有關輻射劑量評估、拆除工法與除污技術選擇、廢棄物量估算及除役成本評估等，得以進行精確與縝密規劃，以及後續主管單位檢查、複查等管理機制之施行，針對設施現場高背景輻射區域可能投入之輻射工作人員所累積劑量，就輻射防護管理層面考量，具有輻射劑量

合理抑低的需求與相對應的施行方法備置，以利有效核實未來設施經營者於除役期間提報輻射分析資料之正確性及完整性，確保我國核設施除役階段輻射防護與管制之落實。

二、為有效確保環境、民眾與工作人員之輻射安全，進行核電廠停機後過渡階段之除役作業場所輻射分析技術相關文獻蒐集，以有效核實未來設施經營者於除役期間提報輻射分析資料之正確性及完整性，提升我國核設施除役輻射防護與管制技術。建構強化完整的精進除役作業、強化合理抑低除役作業人員接受輻射劑量之防護作業措施、放射性廢氣液體排放相關輻射防護作業程序及方法，落實輻射管制措施、確保核設施除役作業之工作人員個人劑量符合法規限值。重要參考文獻計有：U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, REGULATORY GUIDE 1.191, “FIRE PROTECTION PROGRAM FOR NUCLEAR POWER PLANTS DURING DECOMMISSIONING AND PERMANENT SHUTDOWN”, (May 2001)、U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION 「Inspection Manual Chapter (IMC) 2515 G - Baseline Inspection Guidance For Power Reactors Preparing For Transition To Decommissioning Phase」(NRC, 2016) 和其視察程序書「Inspection Procedure (IP) 71124等。

三、我國核能一廠與二廠分別於1978年和1981年開始商轉，核能一廠一號機已於2018年12月5日停止運轉。依據「核子反應器設施管制法」第28條及「核子反應器設施管制法施行

細則」第16條規定，核設施經營者應於主管機關核准除役後規範期限內完成除役作業，並由主管機關審查除役後之廠址環境輻射偵測報告。除役後廠址須確保土壤或建物中殘餘輻射量能符合法規劑量限值之要求，方可釋出進行他用，而廠址殘餘輻射之量測及驗證，則須於除役後廠址環境輻射偵測報告中有詳實之描述。本計畫將參考國際規範，針對除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術及重點，進行深入研究探討，以建立本土化除役審查技術能力，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。

為落實除役期間各階段之輻防管制工作、輻射防護作業，並完備的防護措施與技術能力，保障輻射工作人員，必需精進加強輻射安全管制技術，包括防護措施的適用性分析、應用對策研擬、及核電廠除役之輻射潛在意外事件蒐集與分析，俾利精進提昇國內輻射防護與管制技術，增進完善管制核設施除役之輻射安全，提昇國內輻射防護與管制技術。針對此需求，本計畫擬執行工作包括：精進核電廠除役各階段輻防管制技術與輻安意外潛在分析、導入智慧科技以取代人力的輻射劑量合理抑低手段、以及除役中/除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術。

貳、研究目的

本計畫之具體內涵包括下列三個主題(子項工作項目)，係以核研所之技術為中心，依據原能會函文之指示與需求而訂定，報陳原能會審查同意後執行。

一、輻射劑量合理抑低技術開發與應用智慧科技之研究

為使輻安管制工作中，核設施或核災場域探測，工作人員劑量得以合理抑低，智慧機械科技取代人力有其必要價值。例如除役過程中有關輻射特性調查、輻射劑量評估、拆除工法與除污技術選擇、廢棄物量估算及除役成本評估等，得以進行精確與縝密規劃，以及後續主管單位檢查、複查等管理機制之施行，針對設施現場高背景輻射區域可能投入之輻射工作人員所累積劑量，就輻射防護管理層面考量，具有輻射劑量合理抑低的需求與相對應的施行方法備置，以利有效核實未來設施經營者於除役期間提報輻射分析資料之正確性及完整性，確保我國核設施除役階段輻射防護與管制之落實。

二、精進除役期間輻射管制技術之研究

本子項計畫目標包含二部份：一是除役之輻射意外事件其影響之案例分析研究；建立除役之輻射意外事件影響潛勢與風險分析與檢討改善措施。並完成國內除役輻射意外事件源項之參考研究，提供主管相關單位審查參考。其二則是人員劑量與排放相關作業程序及準則研究；建立除役作業相關的放射性廢氣、液體排放偵/監測、影響評估技術，除役期間環境輻射監測技術研析，強化精進除役作業合理抑低除役作業人員接受之輻射劑量及防護措施。

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

一般核電廠除役過程中，係以數據生命週期(Data Life Cycle)來進行輻射偵檢規劃與評估輻射偵檢結果。輻射偵檢規劃階段，一般利用數據品質目標(Data Quality Objective)程序發展偵檢設計(survey design)，以確保輻射偵檢結果之數量及品質，可用於支持最終之決策；此外，於輻射偵檢執行與評估階段，則使用數據品質評估(Data Quality Assessment)，以評估輻射偵檢結果、確認數據品質目標是否符合偵檢目標，以及詮釋用於決策之偵檢結果所代表之意義。本計畫將參考美國環保署相關導則，進行核電廠除役輻射偵檢數據品質目標(DQO)及數據品質評估(DQA)技術研究，以確保我國核電廠除役工作之規劃及執行，能符合預定法規規定及要求；此外，將參考國際核電廠除役輻射偵測規劃及審查技術文件，包括國際原子能總署(IAEA)Safety Guide No. WS-G-2.1 及 Safety Report No.45 等，針對除役後廠址環境輻射偵測報告審查技術及重點，進行深入研究探討，以制定符合國情之除役審查導則文件，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。

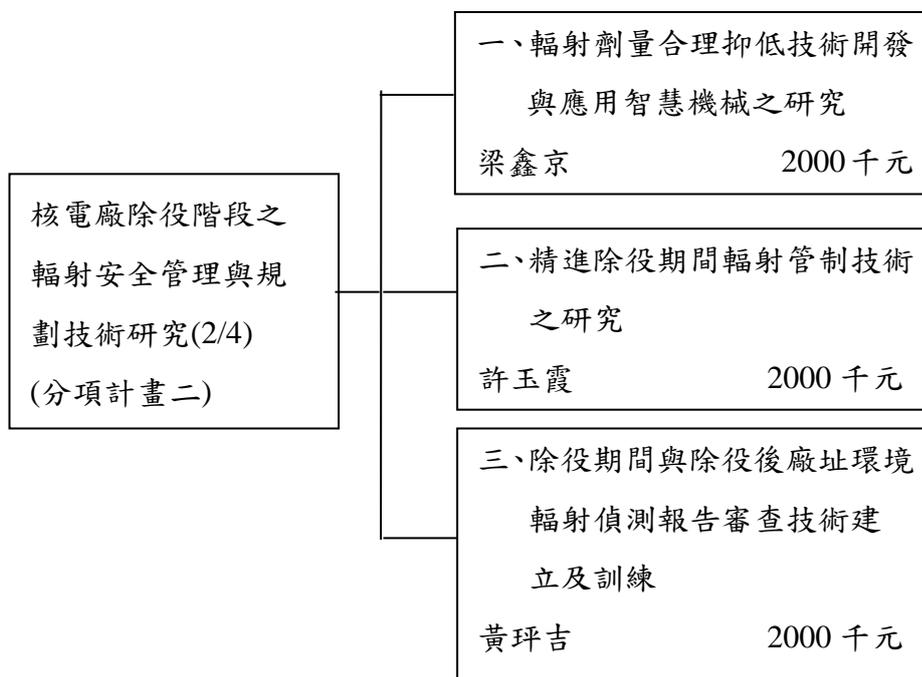


圖 2-1. 109 年度計畫架構

參、研究方法、過程、結果與產出

本(109)年度研究計畫工作項目依原能會核定版本計畫書執行，各項目研究過程與產出說明如後：

一、輻射劑量合理抑低技術開發與應用智慧科技之研究

本工作本年度研究方法、過程與產出詳述如下：

1. 載具之智慧自走可行性與應用範疇研究

現有載具主體運算核心架構採用嵌入式系統，運用開源架構之機器人作業系統(Robot Operating System)編輯移動載具操控模式，導入同步定位與地圖建構(Simultaneous localization and mapping, SLAM)演算法。載具硬體功能架構如藍色區塊，紅色區塊部分為後續擴增路徑規劃與影像里程定位模組單元後之產物(圖 3-1)，為輻射偵檢智慧載具自走功能應用架構。

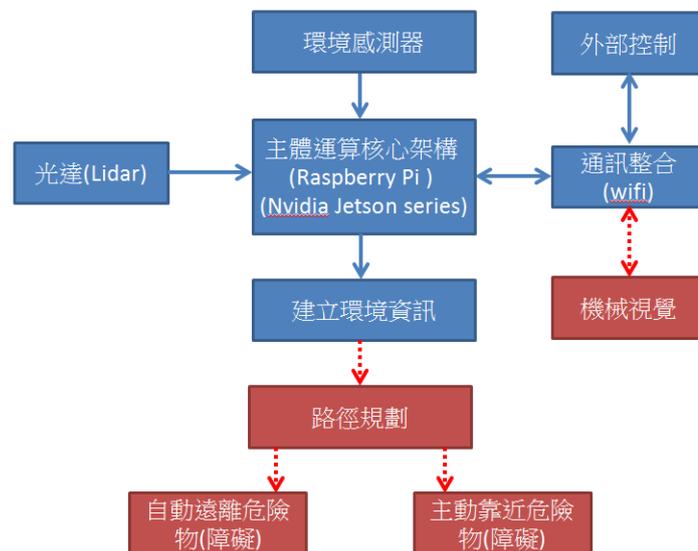


圖 3-1. 輻射偵檢智慧載具架構圖

移動偵測型機器人載具組成部分具備環境感知、路徑規劃與動態執行等諸多功能的智慧化機電整合系統，隨著開源的機器人操作系統 ROS(Robot Operating System)大幅度的推展，提供機器人開發者程式庫和相關應用工具的架構，其需在 Linux 系統架構下操作^[1]。ROS 能夠提供類似傳統操作系統的許多功能，如設備控制、實現常用功能及操控之間訊息傳遞等功能。

組成移動載具的基本元件可由執行機構、驅動裝置、檢測裝置和控制系統所組成。主要可分成三大模組(感測器模組、控制模組和驅動模組)和六個子系統(驅動系統、機械結構系統、感受系統、機器人-環境交換系統、人機交換系統和控制系統)組成。移動載具自主導航利用大腦(CPU)來控制運作，它收集周圍環境的訊息，並根據收集到的環境情況向執行機構發出命令，驅動機器載具完成各種指令動作。以兩輪差速驅動的機器人載具為例，其簡易系統架構如圖 3-2 所示，載具移動主要是依靠馬達控制，由行控電腦發出命令，經由微處理器處理後，再傳送相對應速度給伺服馬達。

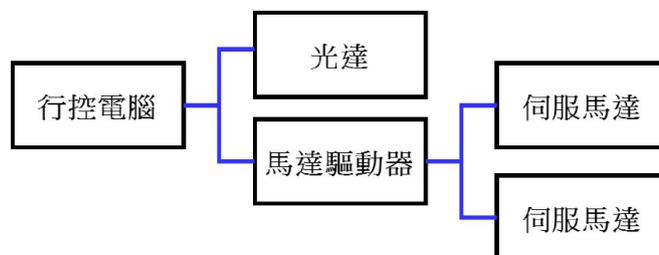


圖 3-2. 簡易移動載具系統架構圖

載具自走技術關鍵在於同步定位與地圖構建技術，對於載具自主行走與施行路徑規劃工作基礎，其必須先在未知場域中構建出可靠的地圖與精準定位的能力。定位層面的議題主要是載具對環境的感知，常用來執行地圖建模的環境傳感器有里程計、光學雷達與深度攝影機等裝置。現有輻射偵測載具原型機採用 2D 光學雷達及輪型里程計作為其定位與距離判讀依據，其 SLAM 基礎架構可參照圖 3-3。當載具移動時，機組上輪型里程計可即時反應載具運行位置，經由光學雷達回饋世界座標，計算出載具現實位置，達到載具定位需求。

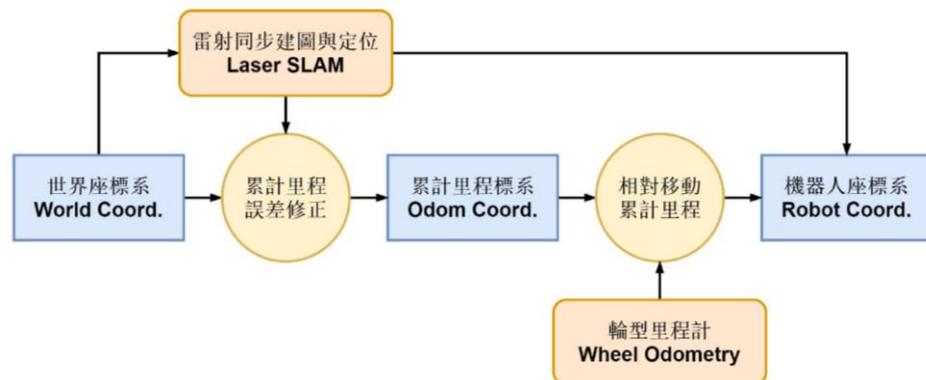


圖 3-3. 載具原型機 SLAM 架構圖

載具原型機(圖 3-4)搭載即時影像與塑膠閃爍體輻射偵檢器，可在室內平緩地形中，利用 WiFi 通訊鏈結方式，遠端遙控載具施行未知場域建模與輻射偵檢作業。當載具完成偵測場域平面地圖建模作業後，可在已知建模地圖中操控載具至地圖中的任意位置，唯在大場域廠房中，2D 光學雷達偵測反饋速度稍弱，且僅採用輪型里程計感測載具累計移動距離，當輪胎打滑或在地面平整性較差的地貌，容

易產生較大里程偏差量，因為地形變化與周邊物體變化影響，導致建模地圖失真現象。



圖 3-4. 輻射偵測機器載具原型機

為符合多元地貌與未知場域自主路徑規劃行走探測目的，載具可經由搭載 3D 光學雷達，及擴充 VO 視覺裝置(如深度相機，3D 結構光掃描儀)輔助定位機制，提升載具地圖建模速度與精確度，圖 3-5 為利用卡曼率波演算模式，搭載光學雷達、里程計與影像輔助裝置，施行載具移動同步定位與建圖的架構。

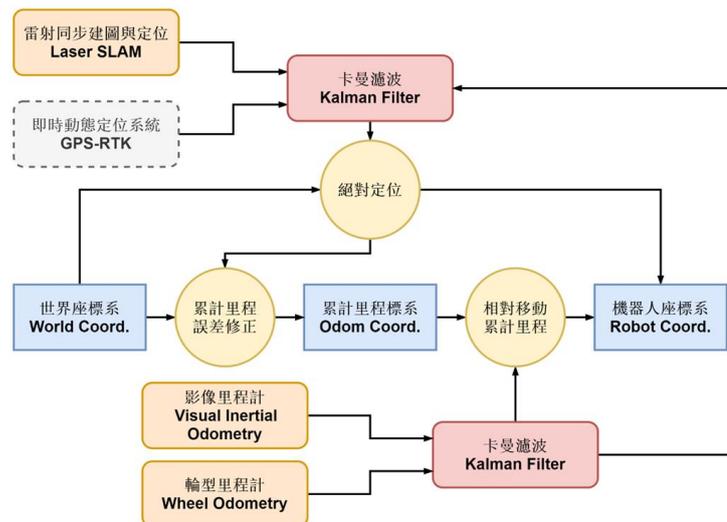


圖 3-5. 多元測距感測器 SLAM 架構圖

依上述架構所示，可使載具同步定位與建圖架構更具

彈性、擴充性及適應性。透過卡曼濾波器將多個絕對定位及相對移動的結果，經由疊代演算得到更準確的定位結果。將相對移動的結果作為絕對定位的預估輸入，使得絕對定位的響應更加快速且正確。

移動載具目前可支援雷射光學雷達應用的同步定位與地圖構建演算法，主要有 Gmapping、Cartographer 及 LeGO-LOAM 等三種。目前採用 Gmapping 與視覺里程計方式結合的效果最佳，且該方式在封閉型場域地圖建模能力較好，因此室內場域環境地圖建模，搭配光學雷達裝置，本階段採取 Gmapping 模式作為同步定位與地圖構建演算法。未來亦可因應不同需求更換 SLAM 演算法。

Gmapping 算法是一種基於粒子濾波器的 SLAM 技術，使用光學雷達與里程計兩種感測器資料作為演算法的輸入來源產生地圖。基於粒子濾波器的 SLAM 演算法，主要是將 SLAM 轉為一種同時推測載具空間姿態與地圖的問題，並使用粒子濾波器來推測載具的移動路徑。將粒子隨機分布進行取樣，每個粒子代表了根據某一種可能的移動路徑以及感測資料所產生的地圖。這些粒子透過加權的方式留下比較接近實際環境的部分，並依此分布結果重新取樣進行下一輪的計算。隨著機器人持續在空間移動，粒子會逐漸聚集在機器人在空間中最有可能的位置，即時更新地圖與完成場域地圖建模，如圖 3-6 所示。其優點是在低特徵與小場景中建圖效果好，計算量較小且精度高。但也因其僅依賴里程計作為主要距離感測器時，則無法適用於

無人機及地面不平坦的場域。

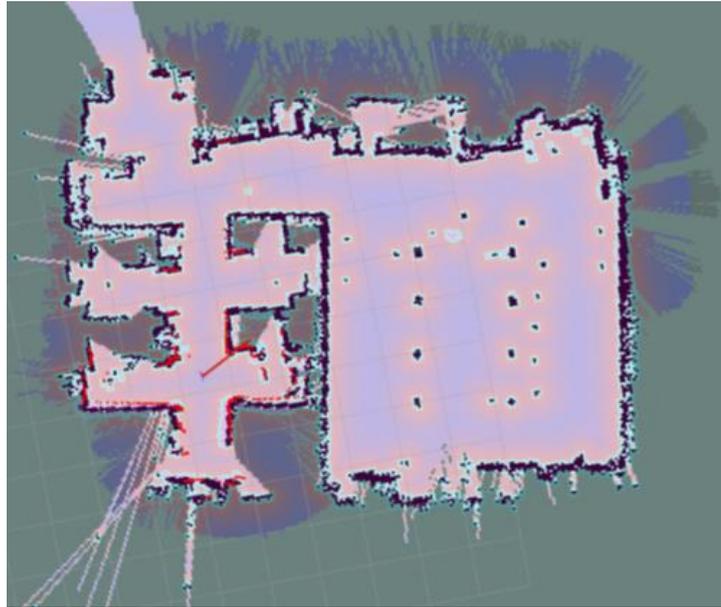


圖 3-6. 載具實體建構實驗室場域地圖

針對自主移動機器人載具受限於特定用途及場域等困難點。透過環境感測、環境建模、機械視覺、人工智慧以及通訊整合等單元，計畫中建置輻射偵測智慧載具機器人系統(如圖 3-7 所示)，可針對各種特殊場域搭配對應的環境感測模組，或是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，且透過任務需求指令設定，可自動接近或遠離危險物與障礙，進而減少人員暴露於危險環境，亦可找出最佳運行或撤離路徑。此機組意配合委託單位需求，於原子能科普展活動中主舞台區即時導覽展示，民眾反應熱烈且評價優良。



圖 3-7. 輻射偵測智慧載具實體圖

未知場域環境偵測分佈建置部分，現階段採人員在遠端操控載具施行場域探索，完成實體邊界與障礙物地圖建置後，在人員操控端地圖畫面中，直接圈選探測區域，由載具自行依探測區域範圍，與環境感測器(如空間輻射、溫度、濕度、粉塵或二氧化碳)量測屬性，採地毯式弓字型全域掃描探測模式，自主於特定場域環境監測任務(如圖 3-8 所示)，再依差分方式建構疊加整合於載具建模地圖，根據場域地圖實體障礙物與環境偵測熱區資訊，提供載具運行避障與自主路經規劃作業。

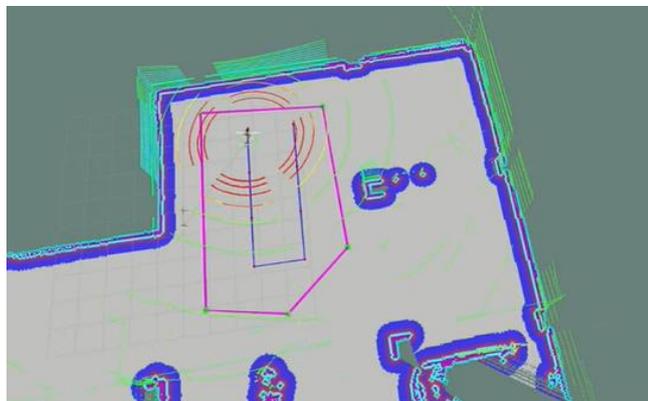


圖 3-8. 地毯式弓字型環境探測運行

載具以偵測安全或危險區域之方法可同時具備即時作動、感知、思維以及溝通的功能，可用以取代人類從事各種人力所不及或有安全疑慮之場域，諸如高危險工作區域的輻射區域檢測、有害氣體檢測、疾病傳染地區取樣以及人員搜救等工作，進而大幅提升智慧機械載具的實用性。

2. 污染區載具防污技術研究

核電廠用機器人的輻射防護需要先從受輻射影響較大的元件和材料方面展開研究，以提高機器部件的輻射耐受度水準。針對移動式載具而言，受限於載具裝載空間與操控能力，無法全尺度採用屏蔽方式進行輻射防護。當下較為可行的方式，是評估現有載具各式光電元件輻射耐受度，依現有空間，採用重點局部屏蔽，脆弱點採取可靠度分析，最佳化零組件定期更換作業，以維持輻射場域智慧機械應用之最佳化壽期效益。此外先前智慧輻射偵測載具原型機組試驗場域，並無輻射粉塵等污染物質，為適應各式場域應用，智慧機械載台將考量 IP 防塵防水結構設計，用以評估運行於污染區環境偵檢任務施行。

一般在核電廠溫和環境 40 年輻射累計劑量為 2×10^3 rad，且商業級馬達與電纜等組件在輻射場域的應用，也都平均可達 10^8 rad 累積劑量率。半導體元件通常僅能承受 10^4 rad 累積輻射照射劑量，且隨著太空科技腳步推展，及半導體元件製程技術提升，相關光電元件耐輻射可靠度將是重要議題。

現階段智慧機械組件輻射耐受度實測作業部分，以核

研所現有輻射照射廠作為試驗環境場域，初期採用載具上動力電池模組與視覺影像裝置進行鈷 60 照射試驗。在動力部分，實際採用 18650 系列鋰電池，在輻射場域中實際放電測試，用以模擬載具於輻射場域運作模式，當放電完畢後，在於一般環境下進行充電模式。參考 IEC62620 規範^[2]定義二次鋰電池(可重複充放電)經 500 次循環充放電測試後，仍需有 60% 以上的電池容量率。

以國際知名品牌電池為樣品，受測電池標稱容量為 3000 mAh，該電池初次實測容量約計 2800 mAh。在核研所輻射照射場以鈷 60 射線照射，依受測鋰電池芯原廠對外公告之測試條件，採電池充電電流 0.909A/中止充電電壓為 4.15V，及放電電流 3.030A/中止放電電壓為 2.5V 的標準模式下實測。經過 500 次充放電循環測試後，與原廠充放電測試數據分析比對，受測鋰電池芯於輻射場域重複性充放電試驗後電池容量曲線如圖 3-9 所示。輻射場域單鋰電池芯充放電測試過程中，採數顆電池同步充放電循環測試，在 500 次循環測試過程中，其電池容量率偏差都在 1% 以內，顯示該批受測電池品質特性相近，故圖中僅顯示原廠電池資料與單電池芯輻射場域充放電循環數據。參考受測電池樣品出廠資料所示，其經過 500 次全充放電形成測試後，仍有 80% 以上電池容量。而在輻射場域施行 500 次循環充放電程序中，受測鋰電池輻射累積劑量約計 2×10^7 rad，且由實測資訊中發現單鋰電池芯在此輻射環境及充放電條件下，亦可維持有 84.4% 之電池容量率，此顯示單鋰電池芯在

輻射場域應用中，與一般室內場域應用差異性不大。

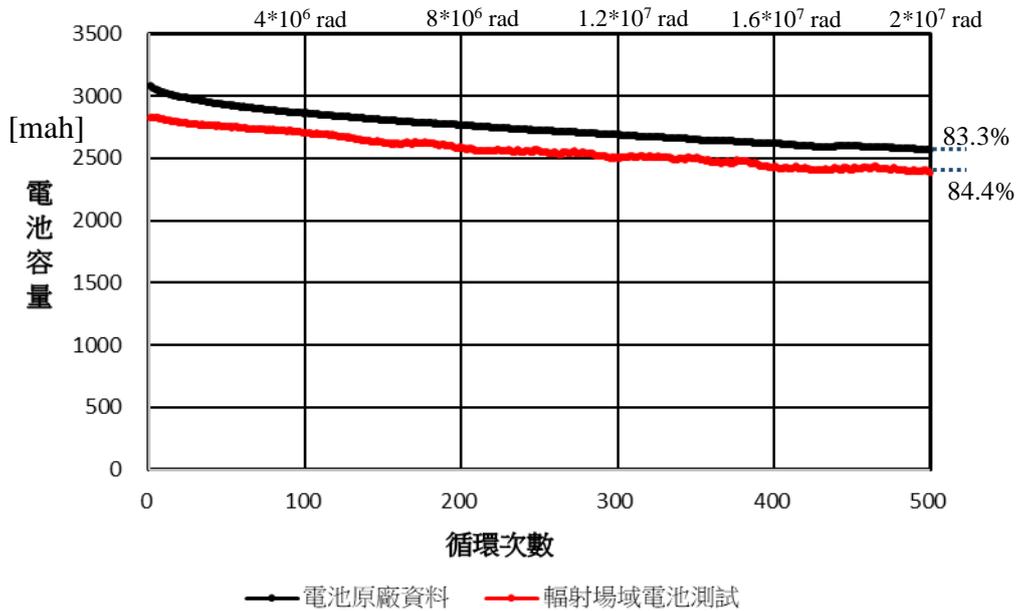


圖 3-9. 鋰電池芯輻射場域充放電循環測試電池容量曲線圖

圖 3-10 為受測鋰電池芯經 500 次充放電循環測試後，受測鋰電池容量衰退實測曲線圖，輻射場域單鋰電池芯循環測試電池容量衰退趨勢與一般場域近似，且衰退率差異偏差在 2% 以內，顯示受測鋰電池芯經此循環充放電測試過程中，受輻射照射影響不是很明顯，可推估輻射環境對未具 BMS 保護板裝置電池組件影響甚小。然在依實際使用經驗，一般具 BMS 保護版的鋰電池模組，在高輻射環境下，短時間內就無法正常開機使用，此現象與一般電子元件輻射環境下使用耐受度不佳程況相似。依此評估可採用局部防護 BMS 組件，提升其輻射耐受度。

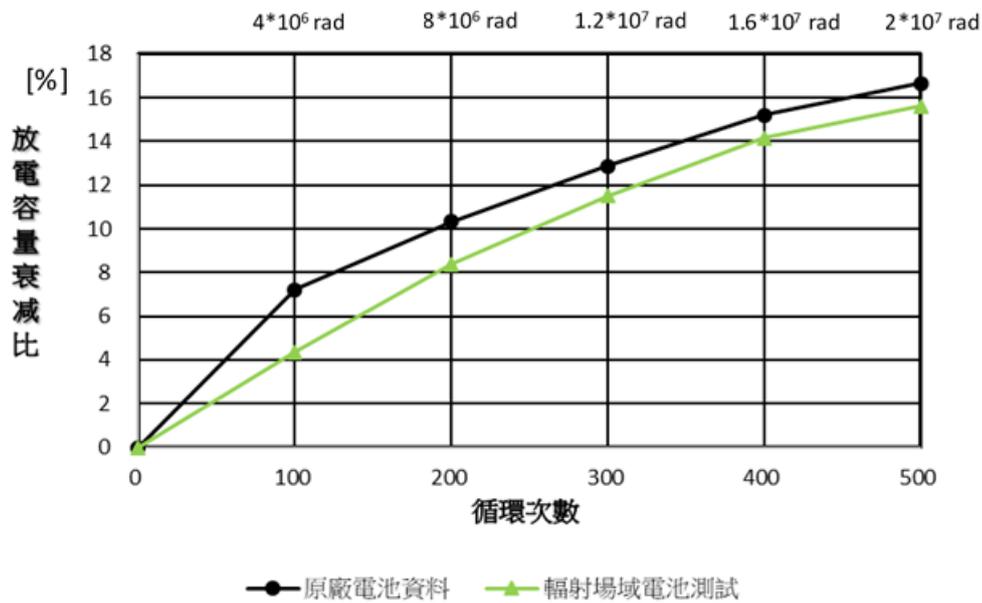


圖 3-10. 輻射場域鋰電池芯放電容量衰退曲線圖

在載具視覺影像裝置輻射耐受度試驗部分，依據實際輻射照射測試經驗，影像監視器承受 8×10^4 rad 累積劑量率照射後，開始產生色調偏差現象。 1.2×10^5 rad 累積劑量照射後，機體則無影像傳出顯示。

3. 論著產出

一篇研究報告「輻射偵檢智慧載具自走應用研究」，以開源架構機器人操作系統(ROS)為基礎，採用輪組機構作為機器人載具移動方式，搭載輪型里程計、光學雷達及深度相機等感測器，進行場域實體障礙物偵測，達成同步定位與地圖建模作業。依輻射偵測等特殊場域探索需求，疊加環境偵測資訊於機器人載具建模地圖中，可做為遠端決策參考依據。經無線網路通訊架構佈建，可經遠端遙控操作，減少人員暴露於危險作業環境中，並可推展於定點巡航環

境偵測及未知場域環境探索作業需求。

二、精進除役期間輻射管制技術之研究

本工作本年度研究方法、過程與產出詳述如下：

1. 研究方法

本子項工作主要著重核電廠運轉後過渡階段(永久停機至燃料自反應器壓力槽中永久移除前之階段)，相關放射性危害評估與曝露管制以及職業合理抑低計畫。

電廠視察程序主要參考 NRC 視察手冊「Inspection Manual Chapter (IMC) 2515 G - Baseline Inspection Guidance For Power Reactors Preparing For Transition To Decommissioning Phase」(NRC, 2016) (1)，及其視察程序書「Inspection Procedure (IP) 71124.01- Radiological Hazard Assessment and Exposure Controls」(NRC, 2018)(2)以及「Inspection Procedure (IP) 71124.02-Occupational ALARA Planning and Controls」(NRC, 2018)(3)架構與內容。

本報告另補充美國運轉中三座核電廠(Dresden Nuclear Power Station、Duane Arnold Energy Center and James A. Fitzpatrick Nuclear Power Plant)以往的視察案例(4)(5)(6)(因美國除役電廠適用 IP 71124.01 及 71124.02 以來，尚未有違反案例)，供我國主管機關參考。

2. 研究過程

處於永久停機至燃料自反應器壓力槽中永久移除前階段之電廠，美國核管會參考多個已永久停止功率運轉之除役核電廠(例如 Vermont Yankee(VY), Kewaunee, Crystal

River (CR), and San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS)等), 依循 IMC 2561 「Decommissioning Power Reactor Inspection Program」(7)視察及評估之經驗, 基於相關法規及 IMC 0308 「Reactor Oversight Process Basis Document」(NRC, 2017), 發展 IMC 2515 附錄 G, 適用於持照者向美國核管會遞交核准持照者核燃料永久移除意願書(10 CFR 50.82(a)(1))起, 至確認燃料自反應器壓力槽中永久移除(10 CFR 50.82(a)(1)(ii))間之過渡時期。

2.1 停機過渡期間放射性危害評估與曝露管制視察程序

首先釐清視察目的：審查和評估設施經營者對於其工作場所和執照上所准許之作業，以及執行適當輻射監測和曝露管制時所進行之評估放射性危害時的表現。

依視察目的訂定視察要求，主要分為：

放射性危害評估、對工作人員指示、污染和放射性物質管制、放射性危害管制與工作涵蓋、高輻射區與非常高輻射區管制、輻射工作人員表現與輻射防護技術之熟練。

2.2 停機過渡期間職業合理抑低計畫與管制視察程序

視察目的：

- (1) 評估設施經營者在維持個人與集體曝露的合理抑低表現，這個視察可以決定設施經營者的合理抑低計畫，其中包括行

政上的、作業上的和工程上的管制是否在有效維持職業曝露合理抑低。

- (2) 依視察程序 IP 71152，「Problem Identification and Resolution.」(NRC，2015)，對每個視察樣本導入對問題之確認與解決行為的例行檢視。

視察要求(各抽取一個樣本視察):

- (1) 放射性工作計畫
- (2) 劑量評估與曝露追蹤系統的證明
- (3) 完成合理抑低與放射性工作管制
- (4) 輻射工作人員表現
- (5) 問題之確認與解決

2.3 美國核能管制委員會視察發現案例

根據上述視察要求發展相對應之各視察導則，並參考美國核能管制委員會視察 Dresden Nuclear Power Station 2&3、Duane Arnold Energy Center 以及 James A. Fitzpatrick Nuclear Power Plant 三個電廠時分別發現前兩個違反視察程序書「Inspection Procedure (IP) 71124.01 - Radiological Hazard Assessment and Exposure Controls (放射性危害評估與曝露管制)」以及後一個違反視察程序書「Inspection Procedure(IP) 71124.02 - Occupational ALARA Planning and Controls(職業合理抑低計畫與管制)」的案例，提供佐證提供管制單位參考。

(1) Dresden Nuclear Power Stations

在 Dresden Nuclear Power Stations 設施經營者對進入離輻射源 30 公分處之劑量率達到每小時 3,000 毫侖目區域的一個入口點，沒有上鎖，同時無法證明對該入口點可進行正向控制，美國核能管制委員會視察員確認是一個極輕微安全影響(也就是綠燈)以及不需引用的違規(NCV: non-cited violation)10 CFR 20.1601 (a)(3)之自我揭發的視察發現。

設施經營者對於人員可以進入離輻射源 30 公分處一小時劑量可能是深部等效劑量(deep dose equivalent) 0.1 侖目(1 毫西弗)的一個入口，沒有上鎖，且無法證明對該入口可以正向控制，該區域標示為高輻射區，而根據 10 CFR 20.1601 (a)(3)之規定用上鎖之門管制，一般區域劑量率最高是每小時 3 侖目。

視察員用 Appendix C, “Occupational Radiation Safety SDP.” 來評估此發現的意義，視察員斷定非常低的安全意義(也就是綠燈)，因為(1)與合理抑低計畫或工作管制無關(2)沒有發生超曝露(3)也沒有超曝露實質可能(4)評估劑量能力未被危害削減。

(2) Duane Arnold Energy Center

Duane Arnold Energy Center 案例中，2018 年 8 月 22 日，有兩個員工離開輻射管制區時個人污染警報器響起，隨後進行人員除污並且評估出因為微量吸入而有體內污染劑量(小於 2 毫侖目)。

經過調查發現，這些人員當班時在沒有輻射防護知識下已經用車床機器做出一個污染主蒸氣隔離閥的盤狀物。其作業程序書 RP-AA-100-1002 “Radiation Worker Instruction and Responsibilities” (輻射工作人員指示與責任)要求，輻射工作人員在擴大工作範圍與用磨碎工具前，應通知輻射防護人員來確保適當管制到位，輻射工作人員沒有通知輻射防護人員，且在主蒸氣隔離閥的盤狀物上作業，導致各種放射性管制不能進行，其中包括沒有在機器製作盤狀物之前，或製作中途，以及所安裝高效率顆粒空氣過濾器(HEPA)從未對車床中引進吸入東西進行污染偵測，後續對盤狀物的檢測顯示，有固定式的高達每小時 40 毫雷得貝他污染，以及機器修理場之一般污染程度比預期還高。

視察員用 Appendix C, “Occupational Radiation Safety SDP.” 來評估此發現的意義，特別是視察員斷定非常低的安全意義(也就是綠燈)，因為 (1)與合理抑低計畫或工作管制無關(2)沒有發生超曝露(3)也沒有超曝露實質可能(4)評估劑量能力未被危害削減。

Duane Arnold Energy Center 所完成矯正行動包括機器修理場除污，以及分發事件的摘要與經驗教訓給廠內人員。

(3) James A. Fitzpatrick Nuclear Power Plant

在 James A. Fitzpatrick Nuclear Power Plant 的案

例中，設施經營者 Exelon 公司在最近一次的停機更換燃料時，沒有遵照合理抑低程序，被判定為自我揭發的綠燈視察發現。特別是當他們面對一個擴大作業範圍時，沒有考慮臨時可能增加之劑量，而且也沒有調整現存劑量評估， Exelon 並未遵守程序書 RP-AA-401, “ALARA Planning and Controls,” 來執行工作進度檢討，這個擴大作業範圍造成累積劑量超過原先估計安全釋放閾作業的 50%。

Exelon 公司進行立刻矯正行動，包括在工作完成後之事後檢討會中，檢討學習所得之經驗，以及將這個議題帶入矯正行動計畫。

視察員斷定表現缺失是比輕微高，其理由是與職業輻射安全的計畫與過程相關。特別是真實集體劑量超過 5 人-侖目並且還超過規劃預期劑量 50% 以上。

視察員用 Appendix C, “Occupational Radiation Safety SDP.” 來評估此發現的意義，也用 IMC 0609, Appendix C, “Occupational Radiation Safety – Significance Determination Process.” 來評估此發現的意義。

2.4 論著產出

一篇研究報告「除役階段危害鑑別與輻射防護措施需求方案研究」。

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

1. 應用於核電廠除役輻射偵測數據品質評估(DQA)技術研究

進行核設施除役決策過程中，通常需審視輻射偵檢結果，並利用偵檢結果之數據進行統計分析。因此，美國多部會輻射偵檢與廠址特性調查手冊(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)建議可透過資料生命週期(data life cycle)進行數據之蒐集規劃、執行及評估等，以處理輻射偵檢結果中所含的不確定度及選擇合適之統計檢定方法，確保數據之正確性而做出正確且妥當的決策。

資料生命週期分為四個階段，分別為規劃階段、執行階段、評估階段與決定階段，如圖 3-11 所示。規劃階段使用數據品質目標(Data Quality Objective, DQO)程序規劃輻射偵檢計畫，可提升輻射偵檢之有效性(effectiveness)及效率(efficiency)；執行階段 MARSSIM 並未針對量測技術提供詳細導則，而是建議決策者依據輻射偵檢目標(例如：偵測下限)，評估可行的量測技術，使設施經營者可彈性選擇適合該廠址之量測技術；評估階段通常包含三個步驟，分別為數據確認(data verification)、數據確效(data validation)及數據品質評估(Data Quality Assessment, DQA)。其中 DQA 屬科學及統計的數據評估方法，經過一系列程序評估數據是否符合正確的型態、質及量要求，並選擇及執行合適之統計檢定方法，以做出正確之結論。最後，於決定階段使用經確認之數據或結論進行決策。因此，美國 MARSSIM 手

冊除使用 DQO 來執行輻射偵檢設計外，亦使用上述 DQA 程序，來進行核設施除役輻射偵檢數據之驗證及評估。

數據品質評估(DQA)由美國環保署所提出，為數據及統計方法之分析程序，以確保獲得之數據型態正確且具有質與量，並確保選擇合適之統計分析方法及執行，以符合目標用途。DQA 為一迭代之程序，分為 5 個步驟，依序為：

(1) 審查數據品質目標與偵檢設計(review the DQO and survey design)：此步驟首要目標為審查 DQO 並確認其適用性，若未制定 DQO，則需在審查數據前詳細說明 DQO。本步驟除審查 DQO 外，需審查數據生命週期於規劃階段之關鍵產出，如：取樣設計或其他相關文件；(2) 執行初步數據審查(conduct a preliminary data review)：審查所有相關之 QA 報告，報告中可能描述實際執行數據收集之程序，並包含潛在數據問題或數據異常等具價值之訊息。此外，本步驟須審視基本之統計量，並使用圖形化表示以進行審查，使用圖形化表示可顯示數據間之關係及趨勢，並發現可能之潛在問題。綜上所述，本步驟之目的為使分析人員熟悉數據之特性，並找出可能對數據分析結果造成影響之異常值，數據審查結果將用於後續確認統計方法之假設(DQA 步驟 4)，以支持決策；(3) 選擇統計方法(select the statistical test)：此步驟根據對 DQO 的審查、取樣設計和初步數據審查，選擇最合適的統計方法來分析數據，並確定關鍵基本假設以確保統計方法有效，以利後續利用統計結果進行結論；(4) 驗證統計方法之假設(verify the assumptions of the

statistical test)：此步驟中，分析人員應確認於 DQA 步驟 3 中選擇之統計方法及其假設之有效性。可確認數據是否支持統計方法之基本假設，或確認在執行統計分析前是否已對數據進行修正。若數據可支持統計檢驗之所有假設，則 DQA 將進入下一步驟，利用數據進行結論(DQA 步驟 5)。若在過程中對一個或多個假設產生疑問，則須對先前步驟進行重新評估，此迭代過程可確保結果之有效性和實用性，為 DQA 之重要精神；(5)結論(draw conclusions from the data)：此步驟為 DQA 之最後步驟，分析人員進行統計假說之檢驗，並依據檢驗結果(拒絕或接受假說)配合目標進行結論。

除探討 DQA 之基本原則外，本研究研析在 MARSSIM 附錄 A 中，使用 MARSSIM 程序進行最終狀態偵檢(final status survey)之案例，其中包含最終狀態偵檢之偵檢前準備、數據品質目標(DQO)及數據品質評估(DQA)，由於 DQA 屬資料生命週期後期評估階段，其將利用前期之規劃及執行階段之資訊及數據進行上述五步驟之程序。經由研析上述案例，除可了解 DQA 程序之實際應用外，亦可發現使用 DQA 程序進行輻射偵檢數據評估時，可確保獲得之數據型態正確且具有質與量，以及選擇合適之統計分析方法及執行，以符合目標用途，並做出正確結論。

2. 核電廠除役輻射偵檢取樣佈點規劃技術訓練

Visual Sample Plan (VSP)係於美國能源部、環保署、國防部及國土安全部等部會支持下，由美國西北太平洋國家實驗室開發，用於輻射偵檢佈點規劃之軟體。其具備多種取樣設計與統計分析模組，提供偵檢點位置視覺化等功能，並可藉由內建統計分析方法(如：常態分佈及無母數數據分析法)分析偵檢結果，確認所蒐集之數據類型、品質及數量，可應用於決策。除輻射偵檢外，VSP 亦被應用於環境特性調查、整治、除污、除役及建築物污染評估等。

本所於 109 年 9 月 18 日派員赴原能會進行「核電廠除役輻射偵檢取樣佈點規劃技術訓練」，如圖 3-12，訓練內容包含 MARSSIM 程序簡介、VSP 程式操作介紹、VSP 統計方法介紹及 VSP 參數輸入方法等，此外，分別介紹使用兩種不同統計方法(sign test 及 WRS test)之實務應用案例，及建築物建模與區域分級方法，並進行操作說明。

VSP 程式除了可確保輻射偵檢數據類型、品質和數量外，亦可透過地圖輸出功能將輻射偵檢佈點位置視覺化，有助於後續污染情況追蹤與研究。程式內支援統計分析方法，使用者可視需求搭配不同檢定方式，用於支持核設施除役之最終決策。

3. 論著產出

本工作項目完成「核設施除役輻射偵測數據品質評估技術研究」一篇研究報告。

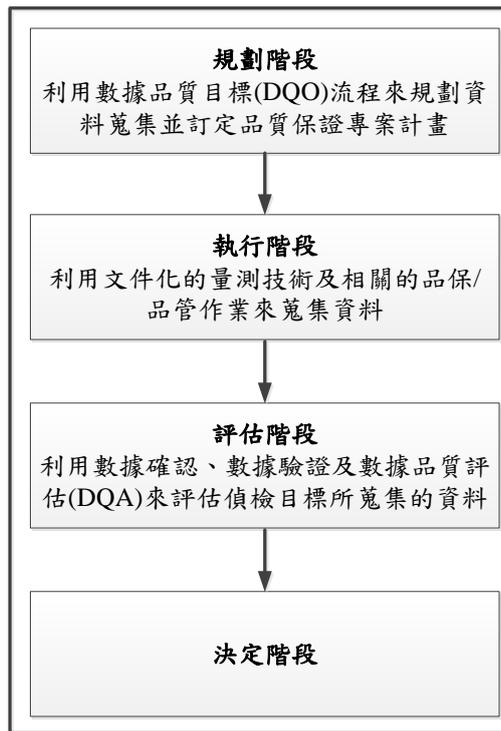


圖 3-11. 資料生命週期(Data Life Cycle)



圖 3-12. 核電廠除役輻射偵檢取樣佈點規劃技術訓練

肆、結論與建議

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，建立基礎。相關結論與建議依各子項工作具體說明如下：

一、輻射劑量合理抑低技術開發與應用智慧科技之研究

本年度完成的技術項目主要有二，一是提升智慧機械載具自主路徑規劃行走性能，搭載里程計、3D 光學雷達與 VO 視覺輔助定位機制，以擴增載具移動搜索範圍、地圖偵測速率及定位可靠度，以達到地圖建模功能。場域環境偵測分佈地圖建置，規劃在完成場域實體邊界與障礙物地圖建置後，直接於操控端地圖圈選探測區域，由載具自行依探測區域範圍，及環境感測器(如空間輻射、溫度、濕度、粉塵或二氧化碳)屬性，自主於特定場域施行環境偵測任務，採用差分方式建構疊加整合於建模地圖上。可根據場域地圖實體障礙物與環境偵測熱區資訊，提供載具運行避障與自主路徑規劃作業。其二是智慧機械組件輻射耐受度測試，採用鈷 60 照射實測動力鋰電池與影像監視器模組，單鋰電池芯受輻射線照射影響不大，可經由局部防護電池管理系統(BMS)模組，提升載具動力系統之輻射耐受度。而影像監視器承受 8×10^4 rad 累積劑量率照射後，會產生色調偏差現象，因應成本效益考量，建議可採備品替換方式，提升載具於輻射場域使用壽期。

二、精進除役期間輻射管制技術之研究

關於永久停機至燃料自反應器壓力槽中永久移除前階段之電廠視察，可參考美國 NRC 觀點，將其視為運轉後過渡階段，在此期間持照人將建立安全停機狀態和執行設備、系統和組件之拆除和除污作業。亦即持照人將執行反應設施永久停機和卸除核燃料之政策、方案和計畫。對於放射性危害評估與曝露管制以及職業合理抑低計畫與管制視察，美國 NRC 參考 IP71124.01 與 02 文件，因此，本研究章節 2 與 3 提供該文件視察目的、要求與導則相關內容，而章節 4 敘述相關案例並進行介紹，建議管制單位納入參考。

本子項工作規劃全程四年完成美國 NRC IP71124 八個附件研究如下表：

年度	附件編號與名稱
108	Attachment 06: Radioactive Gaseous and Liquid Effluent Treatment
109	Attachment 01: Radiological Hazard Assessment and Exposure Controls Attachment 02: Occupational ALARA Planning and Controls
110	Attachment 03: In-Plant Airborne Radioactivity Control and Mitigation Attachment 04: Occupational Dose Assessment
111	Attachment 05: Radiation Monitoring Instrumentation Attachment 07: Radiological Environmental Monitoring Program

Attachment 08: Radioactive Solid Waste Processing and Radioactive Material Handling, Storage, and Transportation
--

至於我國核能電廠運轉後停機過渡階段可能發生意外的評估，可以大致區分為與用過核子燃料貯存相關之意外事件、除役作業活動潛在之輻射意外事件、火災及爆炸事件、地震、洪水土石流及雷擊事件、功能喪失事件以及其他，詳細內容可參考原能會網站上各電廠除役計畫書第七章。

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

在應用於核電廠除役輻射偵測數據品質評估(DQA)技術研究方面，DQA 程序為美國環保署提出評估數據之方法，其審視核設施除役過程中之輻射偵檢設計、偵檢結果與統計方法等，以確保除役廠址輻射偵檢之數據可符合預定目標，並利用數據做出正確決策。本研究以美國 MARSSIM 手冊中提供之案例，說明如何利用 DQA 進行數據評估、選擇統計方法及執行統計檢定等，以做出正確之結論，並供做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。

另外，核電廠除役輻射偵檢取樣佈點規劃技術訓練方面，本研究研析 Visual Sample Plan (VSP)程式，VSP 係美國能源部、環保署與國防部等多部會支持下，應用於輻射偵檢佈點規劃之軟體，其具備多種取樣設計與統計分析模組，提供輻射偵檢佈點視覺化之功能，並藉由應用統計抽樣原理與分析方法，確保所蒐集之輻射偵檢數據類型品質與數量，可用於支持和設施除役之最終決策。此外，透過執行技術訓練，介紹 VSP 程式並以實務應用案例進行操作說明，供主管機關未來審查核設施除役輻射偵檢設計之參考。

伍、参考文献

- [1]. W. Bing, W. Di, L. Maosheng, Y. Qiccai, “The Resraech of Wheeled Mobile Robot System Based on ROS,” Metrology & Measurement Ttechnique, Vol. 46, no. 6, 2019.
- [2]. IEC 62620: 2014, “Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications”.
- [3]. U.S. Nuclear Regulatory Commission Guidance, NRC Inspection Manual, Manual Chapter 2515 Appendix G, “Baseline Inspection Guidance For Power Reactors Preparing For Transition To Decommissioning Phase”, 2016.
- [4]. U.S. Nuclear Regulatory Commission Guidance, NRC Inspection Manual, Manual Chapter 2561, “Decommissioning Power Reactor Inspection Program”, 2018.
- [5]. U.S. Nuclear Regulatory Commission Guidance, NRC Inspection Procedure 71124 Attachment 06, “Radioactive Gaseous and Liquid Effluent Treatment”, 2018.
- [6]. U.S. Nuclear Regulatory Commission Guidance, NRC Regulatory Guide 1.184, “Decommissioning Of Nuclear Power Reactors”, 2013.
- [7]. U.S. Nuclear Regulatory Commission Guidance, NRC Regulatory Guide 1.109, “Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance With 10 CFR Part 50, Appendix I”, 2013.
- [8]. U.S. Nuclear Regulatory Commission Guidance, Grand Gulf Nuclear Station – NRC Integrated Inspection Report 05000416/2013004, 2013.
- [9]. U.S. Nuclear Regulatory Commission Guidance, Palisades Nuclear Plant NRC Integrated Inspection Report 05000255/2015003, 2015.
- [10]. 実用炉規則第 119 条，2017。
- [11]. 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律，2017。
- [12]. 原子力規制委員会，「検査ガイド試運用版一覧」，<http://www.nsr.go.jp/data/000244873.pdf>，2018。
- [13]. 原子力規制委員会，「廃止措置段階の発電用原子炉施設における保安規定の審査基準」，2017。
- [14]. 原子力規制委員会，「発電用原子炉施設及び試験研究用等原子炉施設の廃止措置計画の審査基準」，2013。
- [15]. 日本原子力発電（株），「敦賀発電所 1 号炉廃止措置計画認可補正申請書」，2017。

- [16]. 日本原子力発電（株），「敦賀発電所 1 号炉周辺公衆の被ばくに関する説明書」，2016。
- [17]. 日本原子力発電（株），「敦賀発電所 1 号炉の放出管理目標値の変更」，2016。
- [18]. 日本原子力発電（株），「敦賀発電所 1 号炉放出管理目標値に関する説明書」，2016。
- [19]. 陳建源，「美國核管會除役反應器視察方案介紹」，台電核能月刊，413 期/2017 年 5 月號。
- [20]. 台灣電力公司，「核一廠除役計畫第十章輻射劑量評估及輻射防護措施」，2019。
- [21]. 核子反應器設施除役計畫導則，中華民國 103 年 9 月 19 日行政院原子能委員會會物字第 1030016959 號令修正發布。
- [22]. United States Environmental Protection Agency, “Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process,” EPA QA/G-4, 2006.
- [23]. United States Environmental Protection Agency, “Data Quality Assessment Statistical Methods for Practitioners,” EPA QA/G-9S, 2006.
- [24]. United States Nuclear Regulatory Commission, “Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boiling Water Reactor Power Station,” NUREG/CR-0672, 1983.
- [25]. United States Environmental Protection Agency, “Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM),” 402-R-97-016, Rev.1, 2000.
- [26]. American National Standards Institute, “Characterization in Support of Decommissioning Using the Data Quality Objectives Process,” ANSI/HPS N13.59-2008, 2014.
- [27]. Walpole RE, Myers RH, “Probability and statistics for engineers and scientists,” New York: Macmillan Publishing Company, 3rd ed, 1985.

附件

附件一、輻射偵檢智慧載具自走應用研究

輻射偵測智慧載具自走應用研究

輻射偵測智慧載具自走應用研究

Application Research on Automatic Navigation for Smart Vehicle of Radiation Detection

林聰得*
Lin, Tsung-Te

姜欣辰*
Chiang, Hsin-Chen

許怡儒**
Hsu, Yi-Ru

摘要

本研究以開源架構機器人操作系統(ROS)為基礎，以輪組機構作為機器人載具移動方式，搭載輪型里程計、光學雷達及深度相機等感測器，進行場域實體障礙物偵測，達成同步定位與地圖建模作業。依輻射偵測等特殊場域探索需求，結合各式環境感測資訊，疊加環境偵測資訊於機器人載具建模地圖中，以規劃適合機器人載具或人員最適化之安全通行路徑。經無線網路通訊架構佈建，可經遠端遙控操作，減少人員暴露於危險作業環境中，並可推展於定點巡航環境偵測及未知場域環境探索作業需求。

Abstract

The purpose of this study is based on robot operating system (ROS) to implement smart vehicle automatic navigation in real field. It uses wheeled mobile robot, with odometer, LiDAR and depth camera and other sensors to detect the obstacles and carry out the simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithm. According to different needs in specific areas such as radiation detection, the smart vehicle can integrate environment information and add into modeling map, so it could program the safest path for both vehicle and personnel to evacuate. Through wireless communication network system, the vehicle can control remotely to protect operator from dangerous environment. Furthermore, it also can apply to patrol and detect the environment in fixed route or discover the unknown area.

*原子能委員會核能研究所

**優利資源整合股份有限公司

關鍵詞(Key Words)：機器人操作系統(Robot Operating System)、載具(Vehicle)、光學雷達(LiDAR)、同步定位與地圖建模(Simultaneous Localization and Mapping)。

附件二、除役階段危害鑑別與輻射防護措施需求方案研究

除役階段危害鑑別與輻射防護措施需求方案研究

楊雍穆

摘 要

本研究為「精進除役期間輻射管制技術」四年期科技發展子項方案之第二年，目前我國原子能委員會已許可核一廠除役許可並正審查核二廠除役計畫，也已成立「核電廠除役安全管理專案小組」，進行規劃除役期間各項安全管理作為以確保台電公司之除役與拆除作業符合原先計畫書。

因此，本報告主要參考美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)針對核電廠於停機過渡階段，放射性危害評估與曝露管制以及職業合理抑低計畫與管制兩個視察程序導則進行研究，並且選對兩個視察程序相關的三個案例進行研究(Dresden Nuclear Power Station 2&3、Duane Arnold Energy Center 以及 James A. Fitzpatrick Nuclear Power Plant)，以提供管制單位參考。

關鍵字：放射性危害、合理抑低、視察

核能研究所 保健物理組

附件三、核設施除役輻射偵測數據品質評估技術研究

核設施除役輻射偵測數據品質評估技術研究

林士軒

摘 要

數據品質評估(Data Quality Assessment, DQA)程序為美國環保署提出評估數據之方法，其審視核設施除役過程中之輻射偵檢設計、偵檢結果與統計方法等，以確保除役廠址輻射偵檢之數據可符合預定目標，並利用數據做出正確決策。本研究以美國 MARSSIM 手冊中提供之案例，說明如何利用 DQA 進行數據評估、選擇統計方法及執行統計檢定等，以做出正確之結論，並供做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。

關鍵字：除役、數據品質評估。

核能研究所 保健物理組