

出國報告（出國類別：實習）

參加 2023 世界核能大學暑期機構

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：王亭懿 7 等外釋管制專員

派赴國家：日本

出國期間：112 年 06 月 24 日至 112 年 07 月 29 日

報告日期：112 年 08 月 25 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加 2023 世界核能大學暑期機構

頁數 31 含附件：■是 □否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/翁玉靜/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

王亭懿/台灣電力公司/核能發電處/7 等外釋管制專員/23667072

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：112 年 06 月 25 日至 112 年 07 月 28 日

派赴國家/地區：日本

報告日期：2023 年 08 月 18 日

關鍵詞：世界核能大學、核能大學暑期機構、WNU SI

內容摘要：(二百至三百字)

本次核能大學暑期機構(WNU SI23)於日本大阪舉辦，筆者經世界核能發電協會東京中心甄選後獲選獎學金，並於 112 年 06 月 25 日至 112 年 07 月 28 日獲派前往日本參加 WNU SI23，本報告內容摘要說明此次課程內容、小組討論、創新領導力專題討論及日本核能設施技術參訪，課程內容主要包含全球核能發展趨勢、核燃料循環、新型及進步型核能電廠研發技術、核能電廠安全穩定運轉、核子保防及保安、核能電廠除役與領導力訓練；報告結語為此次參加之心得與建議。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

一、 出國目的.....	- 3 -
二、 出國行程.....	- 4 -
三、 世界核能大學暑期機構課程介紹.....	- 5 -
四、 WNU SI 課程設計與行前預習課程簡介	- 7 -
(一) 行前課程預習準備.....	- 7 -
(二) 課程主軸與流程設計.....	- 7 -
五、 WNU SI 23 課程內容簡介	- 8 -
(一) 第一周：領導力訓練、核能與我們周遭的世界.....	- 8 -
(二) 第二周：基礎設施、新建機組、安全運轉.....	- 12 -
(三) 第三周：日本核設施技術參訪.....	- 15 -
(四) 第四周：核燃料循環、創新及長期穩定運轉.....	- 24 -
(五) 第五周：除役、領導力培訓審視及小組創新領導力專題討論.....	- 27 -
六、 心得與建議事項.....	- 30 -
附錄一、 WNU SI 23 完訓證書	- 31 -

一、 出國目的

(一)緣由：

世界核能大學暑期機構課程(World Nuclear University Summer Institute, WNU-SI)每年於不同國家舉辦，由美洲、歐洲、亞洲輪流擔任地主國舉辦，本年度WNU-SI23於日本大阪舉辦，世界核能發電協會東京中心(World Association of Nuclear Operators Tokyo Center, WANO-TC)為培育年輕世代之核能專業人員，每年提供所屬會員企業公司獎學金參與世界核能大學暑期機構課程，由各會員企業公司提名具領導力及專業技能之年輕從業人員參與甄選，職經過書面審查及線上面談甄選後獲選本年(112)度獎學金，並於6月25日至7月28日獲派至日本大阪參與世界核能大學暑期機構課程。

(二)目的：

藉由世界核能大學暑期機構課程安排之專家及核能領域學業界之專業人士授課與引導，精進職之核能各領域相關知識、學習並吸收世界核能趨勢與新知、了解世界各國目前原子能發展現況，包含核能之全供應鏈、安全運轉、核子保防及除役相關規劃與發展，除專業技能外，透過暑期機構課程之分組(Working Groups)安排，針對講師所提之各項核能及領導力議題進行分組討論，透過分組中不同角色之輪替，在短時間內學習與世界各國不同背景、文化、語言、性別之年輕世代同儕進行討論、激盪與協調，藉此培養領導與整合能力，以期在修習完此課程後除可精進自我能力外亦可幫助公司辦理相關業務並拓展國際視野。

二、 出國行程

本次出國期間為 112 年 6 月 24 日至 7 月 29 日，第一、二週於日本大阪希爾頓飯店進行訓練，第三週前往福島及福井進行技術參訪，第四、五週返回日本大阪希爾頓飯店進行訓練與小組專案討論。本次出國行程簡要如下表：

日期	地點	行程摘要
6 月 25 日~7 月 8 日	大阪希爾頓飯店	第一、二週課程
7 月 9 日~7 月 15 日	福島、福井	第三週技術參訪
7 月 16 日~7 月 28 日	大阪希爾頓飯店	第四、五週課程

三、世界核能大學暑期機構課程介紹

世界核能大學暑期機構(以下簡稱 WNU SI)，每年於不同國家不同區域舉辦，透過全方位的核能領域新知課程演講、工作小組(Working Group)團隊合作、核能相關設施技術參訪、文化交流體驗活動，讓來自世界各國的專業人才相互進行同儕交流學習。

本公司係為世界核能發電協會東京中心(World Association of Nuclear Operators Tokyo Center, WANO-TC)之會員公司，WANO-TC 為培育會員公司之年輕世代核能從業人員之領導力與專業技能，每年度提供其所屬會員公司兩名全額獎學金參加 WNU SI，圖 1 為本次 WANO 獎學金之受獎人與 WANO 執行長 Dr Naoki Chigusa 合影，職亦當面致謝其提供獎學金，WANO 獎學金相關要求條件如下，供未來有興趣參與甄選之同仁參考：

- (1)現職為 WANO-TC 會員公司，至少有三年核能相關工作經驗
- (2)大學核能相關科系學位(碩士學位或相當於四年工作經驗)
- (3)年齡須介於 20-39 歲
- (4)需檢附英文檢定證明文件，英文能力須可與母語系國家同儕流暢溝通及討論

本次 WNU SI23 為 6 月 25 日至 7 月 28 日，總計共來自超過 30 個國家、68 位學員、10 位導師分別來自七個國家，及超過 60 位來自世界各地核能領域領袖之講者，其中女性學員比例為 25%，工作經驗平均為七年。學員雖皆來自核能領域，但專業技術背景不同，函括核燃料循環最前端之鈾開採至除役相關工程，學員組成來源大致可分為核燃料生產公司、核能學界及業界、核能研究中心研究人員、核設施經營者、核能管制單位人員、國際核能組織人員及放射性廢棄物處理設施從業人員。



圖 1. 本次 WNU SI23 WANO 獎學金之受獎人與 WANO 執行長合影，王君為右二。

四、 WNU SI 課程設計與行前預習課程簡介

(一) 行前課程預習準備

由於 WNU SI 課程及小組討論內容涵蓋極廣範圍，且學員專業背景皆不同，故 WNU SI 安排各學員需於開始課程前先行上 IAEA(International Atomic Energy Agency) 學習網站進行 11 小時之課程學習，其中包含核能各領域之基礎介紹，課後亦須通過各項課程測驗，須於行前取得完訓證明後始得前往 WNU SI。

(二) 課程主軸與流程設計

本次 WNU SI 課程主軸為 Leadership，期透過核能領域優秀傑出領導人之演講與引領、課程設計、每日分組小型專案議題討論及為期一周大型專案分組討論，培養學員之領導力與協調統籌能力。本次課程為期五周，第一周為領導力訓練、核能與我們周遭的世界，第二周為基礎設施、新建機組、安全運轉，第三周為技術參訪，第四周為核燃料循環、創新及長期穩定運轉，第五周則為除役、領導力培訓審視及小組創新領導力專題討論。課程內容分別以下列方式進行：

1. 導師生培養 (The Mentoring relationship)
2. 同儕學習 (Peer-to-peer learning)
3. 領導力演講 (LEAD Talks)
4. 專家領域專題演講 (Expert-led seminars)
5. 分組討論活動 (Experiential Learning Activities)
6. 創新領導力專題討論 (Innovative Leadership Project)
7. 重要設施技術參訪 (Curated technical visits)

五、 WNU SI 23 課程內容簡介

(一) 第一周：領導力訓練、核能與我們周遭的世界

1. 世界核能協會(World Nuclear Association, WNA)主席介紹 WNA、世界核能新聞(World Nuclear News, WNN)及願景，期許透過個人及團隊領導與實際行動確保世界各國之能源永續發展、能源安全及能源公平，其說明多國已將核能納為可達成淨零碳排之能源之一，並透過延長現有機組達到有效之減碳工具且同時可維持核能供應鏈及相關技術之傳承。除此之外，其介紹許多新型反應器，包含大型進步型反應器及新興之小型模組化反應器(Small Module Reactor, SMR)，其於結語鼓勵在座之學員同心協力一同為氣候變遷、能源永續發展戮力。
2. MZConsulting 的主席授課核能經濟，能源關鍵要素須包含可負擔、可靠、安全及乾淨，在此世界動盪之時期，能源危機儼然不可忽視，能源危機顯示出能源成本飛漲及現有能源系統之脆弱與不堪一擊，投入潔淨能源之投資不可忽視且須加速進行。其提及當國家在制定電力政策時需考量之層面甚廣，包括市場結構、電力供應鏈之安全可靠度、電力貧窮、供電韌性、環境及國際競爭，並應定義及分層所有電力之成本，以確保平衡。其亦講授核能計畫之架構與風險管理，包括興建之預算、時程規劃、市場變化、技術管理與傳承、監管單位之溝通及不可控之政治因素。
3. Clean Air Task Force 之執行長授課全球能源使用現況與氣候變遷之關係，全球人口仍在成長中、經濟穩定成長仍是各國所追尋之目標，於此同時亦須正視氣候變遷與致力於淨零碳排，需更加緊腳步創建健全之再生能源體系與供電系統。關於核能目前及未來須面對之瓶頸包括新型反應器之執照許可核發、各核能供應商是否願意承擔興建成本與時間之風險等等，然核能除瓶頸外亦有正向轉型，包括新技術研發、監管單位之再造、新型市場型態與商業模式，其中新技術包括多元之冷卻方式、更耐高溫之燃料結構、不同尺寸之反應器與工廠化之興建。在其授課後，並進行小組討論，各小組需利用 En-ROADS

模擬器(用來模擬不同能源組合造成之全球溫升)進行分析與討論，本組之角色為期刊專欄記者，透過小組討論擬定相關專欄內容並將不同能源組合所造成之溫升進行解析。

4. McMaster University 輻射防護經理講授輻射基礎知識、輻射防護實務應用，其亦代 Canada Nuclear Safety Commission 環境風險評估專家講授加拿大之人與環境之保護，加拿大除將核能監管單位與環境保護監管單位分別獨立外，任務亦包含保障人類健康和環境免受放射性物質與有害物質之影響、需考量整個核燃料循環系統、將整體環境範圍納入考量（例如淡水與海洋環境）、保護公共及原住民社區及原始傳統土地、強調資訊透明且公開，其環境保護架構包含下列原則：污染防治、預防措施、污染者付費、適性管理與永續發展。
5. 日本關西電力公司講授在福島事故後之嚴重事故預防與核能緊急計畫準備工作，其中透過多重電源、水源及氫氣再結合器之配置大幅抑減嚴重事故發生之可能性，並強化電廠系統之異常識別與警示系統及加強人員訓練，以盡早意識異常事件及培養於高壓環境下之適當決策訂定與團隊合作；核能緊急計畫整備亦調整當值人力與近廠救援支援人力之配置，並訂定預防性疏散範圍 (Precautionary Action Zone, PAZ) 及緊急防護行動計畫範圍 (Urgent Protective action Planning Zone, UPZ)。
6. 關於領導力培訓，IAEA 團隊領導管理與心理學專家在授課前，先請學員進行 DISC 測驗，了解自身是哪一種人格，分別有 Dominant、Influence、Conscientiousness、Steadiness，透過小組討論了解不同人格之行為表現與對自身或團隊之期望。其說明 Management(管理)及 Leadership(領導)之相同與不同，管理包含穩定、可靠、一致性、控制及要求，需透過量化的分析來"確保"一切安全；然領導則需包含願景、藍圖連結、對彼此賦能與鼓舞，領導為非線性且細微的，與管理不同之特點為使彼此"感到"安全，身為一名領導者，需了解所有的一切都與"關係"有關、需有敏銳的察覺並需培養團隊之適應力。

講師亦透過行動劇之展現，帶領學員們了解同儕之間之不同情緒與行為表現會帶給團隊不同程度的影響，並討論當團隊成員遇到衝突或成員感受到不安時應如何適當尋求解決方案與協助。

7. 第一周共有六次小組討論與報告，包含以下討論主題：

- (1) 個人之品牌形象創建與參與此次 WNU SI 想獲得之提升或改變
- (2) 訂定工作小組中的 Rules(規則與規範)與 Roles(角色)，本組訂定每次討論過程皆須輪替不同角色，包括簡報者、協調者、挑戰者、研究員與紀錄及時間掌控者，透過不同角色輪替之學習，學習與不同文化及專業背景之人員進行合作與交流，進而學習領導力與協調統整不同意見之能力。
- (3) 小組透過行動劇之演練，模擬身為主管遇到不配合或不積極之下屬時，應如何適當進行理性與感性之溝通，帶領團隊繼續積極向前完成任務。
- (4) En-ROADS 模擬器，模擬不同能源組合造成之全球溫升，並針對結果進行解析與討論可行方案。其他工作組之任務為運用不同電力組合盡可能達到全球溫升僅有 1.5 度 C，本組之角色為期刊專欄記者，經過討論後，訂定出四個主軸對已發展國家、發展中國家進行提問及總結，包含能源安全、氣候變遷、工作機會及能源價格。
- (5) 小組任務為建造一個新的 SMR，然需擬定政策並決定將 SMR 建造於陸地上或漂浮於海上，需分析各項優劣利弊因素、並考量輻射防護與緊急應變計畫之擬訂。
- (6) 講師設定各個小組為不同虛擬國家，有其國家相關背景，包括地理環境、政治環境、天然資源與經濟發展等要素，需依此虛擬國家設定來擬定五項能源政策，並同時須與鄰近國家商擬合作或弭平衝突。圖 2 與圖 3 分別為小組討論過程與王君報告此項小組成果。



圖 2. 小組討論過程，王君為右二並擔任協調者



圖 3. 王君報告小組討論成果

(二) 第二周：基礎設施、新建機組、安全運轉

1. 鈾燃料公司 Cameco 公司的執行副總講授現今全球核能發展現況與趨勢，其以氣候變遷、人口急遽成長與空氣汙染開頭，講述淨零碳排之重要性，並說明核能可為上述之問題提供解方。目前現行運轉之機組為 428 部，興建中之機組共有 63 座(其中包括中國大陸、印度、法國、英國及南韓等國家)，國際核能組織及機構期許在 2050 年前核能發電量能達成雙倍。俄國原為鈾燃料前端供應鏈供應大國，然因烏俄戰爭之影響，各大燃料供應商及供應國皆極力尋找替代方案。其除介紹現有之 Cameco 公司採鈾礦及鈾濃縮之技術外，並介紹目前正積極發展透過雷射將鈾濃縮技術(Global Laser Enrichment, GLE)。
2. Rolls-Royce 的爐心研發經理講授小型模組化反應器(Small Modular Reactors, SMRs)，相關重要內容摘述如下：
 - (1) SMR 的關鍵技術與原則皆雷同，然所有的 SMR 種類都是不同的，超過 70 種反應器設計皆可應用於 SMR，包括較傳統之輕水式反應器、氣冷式反應器、融鹽式反應器、快中子反應器及進步型反應器，可於陸地上、漂浮式建造，亦可遠端遙控或移動式發電，可達成區域型直接供電或供熱之需求，並皆可透過製造廠大量且制式化製造，以達成準時、快速、不超預算(On time, on budget)等優點。
 - (2) SMR 之興起原因大致可分為以下：
 - 全球面臨共同挑戰：能源安全與淨零碳排，淨零碳排之目標不僅止於發電方式，亦包含致力於減少運輸、工業發展與建築時導致之碳足跡。
 - 傳統大型核能電廠高昂之建造成本與過往經驗顯示建造往往超時超預算等缺點。

- 透過 EMA 工廠標準化製造(Engineering, Manufacturing, Assembly)、準確工期、簡化與標準化之商業模式大幅降低專案風險及減少不必要經費支出。

(3) SMR 所面臨的挑戰包含以下：

- 與監管單位之協調，包括監管方式的變化、設計證照核發、施工與運轉許可等費用不一定少於傳統大型核能電廠。
- 未確定供應鏈之量能，以該公司之量能預估，一年僅能製造四部 SMR，可能面臨供應鏈飽和之潛在挑戰。
- 與傳統經濟發展所造成之競爭與利益牴觸。
- 需要更多具有適當資格及足夠經驗 (Suitably Qualified and Experienced Person, SQEP)人才。
- 社會大眾對於新建核能機組之接受度，且仍需各國政府與監管單位支持此項新型技術。

3. 西屋(Westinghouse)公司資深副總主講西屋公司設計之 AP300SMR，重點摘述如下：

- (1) AP300-SMR 係以西屋公司設計之 AP1000 為基礎進行設計，AP1000 已有完整運轉執照與經驗，且在進步型被動安全設計上已在全球擁有 30 年技術與執照。其中，被動安全設計包括自動失效安全、自給自足(透過被動安全方法以減少備用電源及冷卻供應之需求)、災害防護驗證及深度防禦。
- (2) 透過西屋公司與合作廠家既有的供應鏈，透過快速且簡化但安全的設計大幅縮短施工時間，可快速有效為當地提供電力。
- (3) 目前西屋公司規劃於 2022 至 2027 年之間完成設計與取得執照，2027 至 2030 年之間完成專案籌備，並於 2030 年開始興建，預期建造工期為 36 個月。

4. 來自 WANO 的主講核能安全，重點摘述如下：

- (1) 核能安全文化之根本可溯源至個人文化，個人的行為模式、信仰皆會影響團隊之相處模式；下一階為組織之安全文化，由組織領導者塑型並引領所有組織成員內化價值觀與行為，進而使安全為首要優先事項；最後且最重要的則是核能安全文化，領導者和個人共同集體承諾此為組織之核心價值觀與行為模式，強調核能安全並不是相互競爭的目標，進而確保民眾和環境安全。
- (2) WANO 透過多元的方式以協助各電廠分析趨勢與績效表現，包含
 - 由各會員公司提交 WANO Event Reports (WER)，透過運轉經驗計畫，蒐集、過濾、分類及分析各項運轉經驗資訊供各會員公司參考。
 - 透過追蹤個別電廠或會員公司之發展趨勢與績效分析，進而增進運轉安全。
 - 藉由各會員公司訂定績效指標作為標竿學習與分析數據使用。
 - 除上述方式外，亦有重要運轉經驗報告 (Significant Operating Experience Reports, SOERs)、重要事件報告 (Significant Event Reports, SERs)等共享資訊，以增進全球核能發電業界運轉安全。
5. 日本 Japan Atomic Industrial Forum (JAIF)之資深管理處長主講日本核能供應鏈，包含長程商業經濟循環模式、不同階段之不同層面之企業所負責之項目，包含下列設計與供應：爐心燃料、安全系統、氣渦輪機、發電組件及控制系統，除此之外，講者亦說明維持供應鏈所面臨之挑戰，包括因核能未來不確定因素導致人才流失與資金轉移，可能導致供應鏈無法完整維持。
6. 日本 Hitachi 公司主講日本核能人才培育發展計畫，日本於 2010 年建立日本核能人才發展網絡(Japan Nuclear Human Resource Development Network , JN-HRD.NET)，旨在建立一跨政府、企業與學術界之合作平台、有效促進人力資源發展，並與國際組織及機構合作。
7. 第二周共有五次小組討論與報告，包含以下討論主題：
 - (1) 透過 WANO 提供之 WER，情境假設為某電廠因未完整進行工作交接與

落實核安文化，導致系統故障及機組跳機，進而討論應如何改進(Even Better If)。

- (2) 各工作小組預設該虛擬國家即將開始建立核能機組，各工作小組需討論如何架構核能發電之財務體系及風險分攤，包括政府資金、國外資金注入及各承攬商獲利。
- (3) 各虛擬國家需分析自身內部需求、地理環境與政治因素等因素後，選擇可因應經濟市場需求之相關適當核能技術應用。
- (4) 選定適當核能技術應用後，下一階段之任務為建立該虛擬國家之核能法規與核能監管單位組織架構。
- (5) 各工作小組延續第一周之虛擬國家背景設定，需討論如何落實在地化核能供應鏈，其中需討論產業內需、人才培育與技術輸出。

(三) 第三周：日本核設施技術參訪

1. 福島第一核能發電廠

目前四部機組皆為冷停機狀態，其中三號及四號機中之燃料皆已全數移出，首先為四號機，四號機於事故期間正處於大修期間，爐心內皆無燃料，故無發生爐心熔毀之情形，也已於 2014 年 12 月 22 日將用過燃料池中所有 1535 束燃料移出；三號機在事故期間反應器廠房有所破損，因先前需移除爐心中之燃料，故於反應器廠房上加蓋一圓筒狀之屋頂，將燃料吊運之設備建置於其中，已於 2021 年 2 月 28 日將共計 566 束燃料全數完成移出；二號機目前因需將燃料熔渣移除，目前已先在反應器廠房外建置一灰色外蓋以防止在鑽孔調查機組內部情況時，可能產生之放射性粉塵飛散至環境與廠區中，導致不預期之工作人員之污染，此外，為了移除二號機中剩餘之燃料與熔渣，目前工作平台之興建已接近完工。參訪過程中主要待在電廠提供之小巴士中，僅有部分地點下車參訪，其中一站為四部機組前 80 公尺處架設之觀景平台，就近觀察與了解目前四部機組狀態，於平台上之輻射劑量率約為 0.085 毫西弗/小時，故可知目前廠區內之輻射劑量仍偏高，且全程參訪為避免人員有不

預期之放射性體內污染，故全程皆需配戴口罩，以防止攝入空氣中可能之放射性物質。圖 4 為福島第一核能電廠四部機組前平台之合影。



圖 4. 福島第一核能電廠四部機組前合影，王君為前排右二)

2. 福島第二核能發電廠

福島第二核能發電廠與第一核能發電廠相同，皆是隸屬於東京電力公司，於 311 東日本大地震時並無與第一核能發電廠一樣發生爐心熔損及輻射外釋事故，此次參訪主要了解其於 311 大地震時未發生類似第一核能發電廠之嚴重事故之原因、311 事故後緊急應變救援之設置與電廠除役規劃與進度，重點摘述如下：

- (1) 第二核電廠在事故期間仍保有一外部電源供應可供部分緊急設備使用，故相較第一核電廠情況較不險峻；海嘯所造成之淹水並未完全淹沒廢料處理廠房及三號機海水熱交換器廠房，故可將此部分之電力借由電源供應車與電源線列置將電力供給四部機組作為緊急電源使用。

- (2) 自 2015 年 3 月後，四部機組爐心中之燃料皆已全數移至用過燃料池存放，為因應用過燃料池之冷卻安全，其亦設置相關緊急應變救援設備，包括氣渦輪發電機車、可供注水之消防車、未防範因地震或海嘯導致之大型瓦礫所配置之重型搬運及破碎機具、因應新分析之海嘯高度新建之防海嘯牆。
- (3) 於 2021 年 4 月 28 日取得日本原子能管制委員會核發之除役取可，四部機組之除役預計於 44 年內完成，目前除役第一階段工項主要為輻射污染分布狀態調查、放射性污染除污、輻射管制區外之戶外設備之拆除與移除。

3. 福島電廠廢爐資料館(TEPCO Decommissioning Archive Center)

在福島事故後，東京電力公司建立一廢爐資料館供民眾參觀，資料館共兩層樓，一樓主要展示事故後之整治與復原，包括 ALPS(Advanced Liquid Processing System)處理水之除污過程與排放、事故後電廠除役過程與環境復原期間工作人員所採用之輻射防護裝具(如圖 5 所示)、汲取燃料熔渣與爐心剩於燃料取出所設計之水下與耐高溫高輻射機械手臂(如圖 6 所示)；二樓主要展示事故時嚴重發展進程，包括影音廳之 311 東日本大地震與福島事故紀錄片撥放、3D 立體模型及時間軸重現福島第一核能發電廠於事故時事故進程與事故搶救及注水救援。



圖 5. 事故後電廠除役過程與環境復原期間工作人員所採用之輻射防護裝具



圖 6. 水下與耐高溫高輻射機械手臂

4. Naraha 遠端遙控技術中心(JAEA Naraha Centre for Remote Control Technology Development, NARREC)

Naraha 遠端遙控技術中心(Naraha Center for Remote Control Technology Development, NARREC)為日本原子能研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)福島研究與發展部門研究中心於日本福島縣雙葉郡楢葉町所設置之技術研究中心，主要任務為福島第一核電廠除役過程中所需之相關技術，包括研發燃料熔渣移除技術、放射性廢棄物處理與處置技術、ALPS 再處理水之核種移除技術與排放。目前該研究中心為實際模擬研發之機械手臂進入其中拾取燃料熔渣，已建造福島第一核電廠機組一比一模型(如圖 7 所示)；另亦因機組內部仍處於高溫高輻射區，故工作人員無法實際進到現場工作，故研究中心研發 VR 系統讓工作人員可模擬及熟悉內部狀況，亦研發多樣遠端遙控設備與裝置，包括可運走於不同階梯型態之機器人、全尺寸水下作業機器人與輻射偵測無人機。



圖 7. 用以模擬機械手臂進入機組拾取燃料熔渣之一比一模型¹

¹ 取自 NARREC 簡報資料

5. 福島環境再生館與特定廢棄物掩埋場(Reprun Fukushima and the specified waste landfill site)

為了特定廢棄物掩埋計畫的資訊公開，日本環境署於福島縣雙葉郡富岡町 2018 年 8 月設置了福島環境再生館，透過介紹指定廢棄物掩埋場計畫內容及相關確保環境與居民之計畫方案，公開廢棄物處置進展、環境監測結果等最新資訊，以降低當地居民的疑慮與不安，並提高福島縣內外民眾對此計畫之了解。館內透過多樣可供民眾自由手動操作之生動影像與 3D 設備以了解特定廢棄物掩埋整體計畫、安全措施、最新進展並讓民眾了解輻射基本知識。特定廢棄物掩埋整體計畫大致流程如下：

- (1) 首先由環境署劃分地震、海嘯及受福島事故輻射外釋影響之區域中的建築物、家庭廢棄物與樹林之廢棄物，將其放射性比活度盡可能降低至 100,000 Bq/kg，若可降低至此標準以下者則將掩埋於此特定廢棄物掩埋計畫，反之若無法降至此標準以下這則將其掩埋於另一中期儲存設施 (Interim Storage Facility)。
- (2) 符合上述放射性比活度之標準之廢棄物先運送至水泥固化廠進行固化，固化後再運送至掩埋場，進入掩埋場前會通過門框偵檢器與掩埋場管制站，確認廢棄物固化體完整與比活度符合標準、重量與標示正確、文件審核後才放行進入掩埋場，卸下廢棄物後離廠之車輛皆需清潔輪胎並測量是否有放射性污染後才可放行離廠；另，沿途所有運輸過程皆透過 GPS 定位，由總監控中心即時追蹤所在地。(門框偵檢器與管制站如圖 8 所示)
- (3) 掩埋場為防範環境污染，於底部鋪設水泥及防水帆布，另於掩埋場較下層處裝設水處理設施，時時監測與處理可能受污染之水，取樣分析後符合標準才可將其排放。(掩埋場俯瞰模型如圖 9 所示)



圖 8. 特定廢棄物掩埋場門框偵檢器與管制站²



圖 9. 特定廢棄物掩埋場俯瞰模型

6. 大飯核能發電廠(Ohi NPP)

大飯核能發電廠隸屬於日本關西電力公司，共有四部 PWR 機組，其中一、二號機已於 2018 年 3 月 1 日停止運轉，僅剩三、四號機仍在運轉中，目前總發電量為 2,360MW，此次參訪主要透過現場導覽搭配 VR 虛擬眼鏡參觀電廠相關設施，參訪設備包含以下：

(4) 用過燃料池與新燃料儲存區觀景台，由其工作人員介紹燃料吊運過程與

² 取自 Reprun Fukushima 官方網站

新燃料檢查與儲存過程

- (5) 福島事故後臨海新建之海嘯牆
- (6) 因應嚴重事故所新建之耐震緊急應變中心與新設置之注水設備與發電機設備
- (7) 因該電廠位處國家公園中大片山坡地上，其興建混凝土邊坡，以防止野生動物與森林野火入侵該電廠

7. **Mihama Nuclear Emergency Support Centre(M-NEACE)**

Mihama 核能緊急支援中心由日本原子能公司聯合會(Japan Atomic Power Company)於 311 福島事故後因應核能電廠嚴重事故救援所需之遙控設備與人員訓練而成立，其中心位於福井縣美濱町，目標為透過平時集中部署、管理遙控機器人或設備及人員培訓，倘若發生核能事故，可及時向發生事故之電廠派遣救援物資、設備及人員，並確保相關物力人力可耐受事故電廠可能產生的高輻射環境。參訪重點摘述如下：

- (1) 人員訓練包含緊急核子事故時之救援策略與措施、事故時之多方聯繫與運送以確保人力物力資源正確且及時投入、事故時所需進行之輻射量測與輻射防護訓練，另其中心亦研發遙控機器人與無人機，故平時亦須對人員進行操作訓練、設備維護管理與精進改良。
- (2) 該中心目前擁有各類型無線遙控機器人，其中小型機器人配有攝影鏡頭可隨時遠端監控環境狀況且可運行於不同型態之樓梯與爬坡之間、可抓取約 14 公斤重之物體及精密操作以拿取鑰匙開啟門鎖；中型機器人與小型機器人設備相同，但抓取重量可達 100 公斤重(圖 10 為該中心之遙控機器人)。
- (3) 該中心亦研發無人機，可透過 GPS 設定飛行路線與量測地點，並搭配相機、遠紅外線相機與輻射偵測計來進行資料蒐集(圖 11 為該中心之無人機)。
- (4) 除無線遙控機器人與無人機，為因應事故中可能會遭遇大型障礙物或破

損建築之瓦礫堆，該中心亦研發無線重型機具，包含大型挖土機、大型破碎機及大型搬運機具。

- (5) 除上述無線遙控機具外，因人員亦須有輻射屏蔽與輻射防護措施，其亦研發具輻射屏蔽功能之遙控設備控制車輛，人員可待在救援車中遙控並監控上述之遠端遙控機具，亦可確保人員之人身安全。

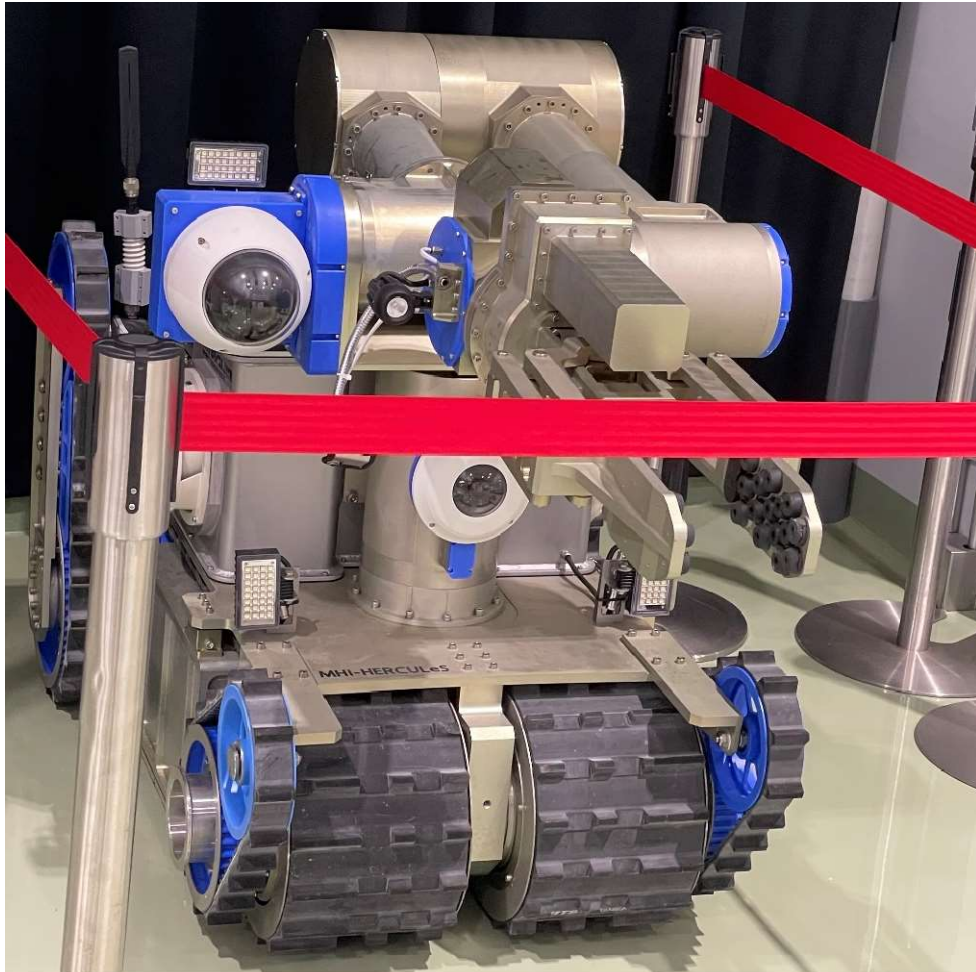


圖 10. M-NEACE 之遙控機器人



圖 11. M-NEACE 之無人機設備

(四) 第四周：核燃料循環、創新及長期穩定運轉

1. 國際核子保安協會(World Institute for Nuclear Security, WINS)主講核子保安，重點摘述如下：
 - (1) 核子保安主要防範核物料被偷竊做為核子爆炸裝置、防止核物料未經授權之擴散及核能電廠遭受恐怖攻擊致使放射性物質外釋。
 - (2) 因應目前科技變化，對核子保安最具威脅者係屬駭客網路攻擊，不僅可能來自外部威脅，最難預防者則是內部威脅。
 - (3) 核子保安方面之風險管控則應依循提前預想可能的威脅、偵測到實際威脅、延後威脅入侵的時間點，最後則為盡快的反應抵擋威脅。
2. 日本 Integrated Support Center for Nuclear Nonproliferation and Nuclear Security(ISCN)主講該單位與日本原子能研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)如何致力於日本各電廠核子保安之培訓，重點摘述如下：
 - (1) 因核能電廠實際現場無法做為平時訓練用場地，故其建造一實體隔離訓練場，除實體圍籬外，亦架設監控攝影機及各樣防範入侵偵測系統。
 - (2) 除了實體訓練場外，亦透過 VR(Virtual Reality)架設一虛擬核能電廠，並 3D 顯示虛擬核能電廠，可實際行走或飛行於虛擬核能電廠。

3. Framatome 公司燃料科技策略副總主講新核子燃料科技，重點摘述如下：
 - (1) 在福島事故後，嚴重事故下核燃料可承受之風險餘裕成為關注重點，各大核燃料製造廠家亦積極研發事故容忍燃料(Accident Tolerant Fuel, ATF)，目前最新研究方向為採用 Cr 塗層，未來將研發 SiC-SiCf 是否可做為新型燃料護套材料。
 - (2) 其中，Cr 塗層已有效驗證可在爐心冷卻水流失事故中有效抑止燃料 Balloon 效應；SiC-SiCf 做為護套材料可減少氫氣及氧氣產生。
 - (3) 目前各大燃料製造廠商亦積極研發低鈾濃縮及高燃耗之新型核燃料，以達到能源永續發展。
4. OECD 主講核能電廠長期穩定運轉(Long-Term Operation, LTO)管理及老化管理(Aging Management)，重點摘述如下：
 - (1) 相比於新建一核能電廠，延長原舊有核能機組能有效降低興建中所造成之碳足跡，多數核能電廠的大小零組件皆可做替換，且組件之老化現象皆已熟知且可被有效管理。
 - (2) 老化管理議題評估為一循環，首先為蒐集運轉經驗、回顧研究調查結果、評估技術落差、列出較優先之落差、強化老化管理方案、電廠特徵化影響、
 - (3) 在此議題中，供應鏈風險是個逐步浮現的隱憂，包含因市場與政策的不確定性、吸引並且留住技術專業人才之困難是否可以因應高資質需求。
5. 日本福島第二核電廠前廠長主講 311 地震後之經驗學習，重點摘述如下：
 - (1) 核能電廠在遇到 311 東日本大地震時，先由控制棒插入進行停機，停機後須冷卻爐心中燃料、持續透過注水與長期冷卻循環將爐心燃料餘熱移除，並且同時確保將放射性物質完整包封於反應器壓力槽內。
 - (2) 在停機後，廠長立即指示電廠人員實地走向海岸邊之設備廠房，確認其可用性，將設備災損在最短時間內條列式出來並將搶救優先順序排出，積極恢復冷卻能力與供電能力，盡可能維持電廠於冷停機狀態。講者提

及因電廠超過 200 名員工同心協力在一天內將長達九公里長的替代電纜人工搬運並成功連接緊急電源與冷卻水。

- (3) 為了強化韌性，已新增多項應對措施，包含新建海嘯牆、防水閘門、建置多重多元電源供應方式、冷卻注水系統、放射性物質過濾排氣系統。
- (4) 在整體災害救援行動中，講者亦分享幾項身為領導者之作為，首先須確保所有人員的安全、重視團隊工作，並且最重要的是讓每一個人都明確感受到自己的付出让整體災害救援行動中往前邁進，也就是領導力中最需具有的：願景與藍圖。

6. 第四周共有六次小組討論與報告，包含以下討論主題：

- (1) 實體隔離防護策略與核子保防，本組之任務為於一大學中新建研究型核子反應爐，需與當地居民報告針對實體隔離防護所採行之措施及如何確保核子保防。
- (2) 核燃料供應鏈中包括鈾燃料採挖、鈾燃料濃縮及燃料製造，講師將七個分組分別設定為擁有不同核燃料技術之國家，包括鈾燃料採挖、鈾濃縮、燃料製造廠家，然因地緣政治因素與國際關係緊張，需隨時滾動調整國家政策以確保核燃料供應無虞，各小組需擬定相關政策以供各國政府官員參考。圖 12 為王君報告本次小組討論成果。
- (3) 各組依據虛擬國家情境設定，針對核燃料循環系統擬定核子保防及防止核擴散之策略，確保核能和平應用及防止製造核子武器。
- (4) 本組分配到之任務背景為：該國已有現行核能機組運轉，但已有十年之餘未興建新核能機組，為達成淨零碳排目標且同時確保經濟成長所需之用電量，該國政府決議興建新核能機組，小組任務為商擬政策發表以因應社群媒體與當地居民可能提出之異議或問題。
- (5) 透過小組腦力激盪，將核能的運用不僅侷限於發電，本組討論後選定兩項核能創新主題，包括透過輻射照射可將酒的品質提升，以及將鑽石透過輻射照射後，達成降低雜質及改變顏色等功能。

- (6) 為達成減碳目標，需考慮是否將機組延役，講師將各小組拆分為兩個小組，分別為政府單位與核能電廠經營者，需針對監管單位、環境保護、經濟發展、供應鏈等相關因素進行全盤考量並提出周全的政策。



圖 12. 王君報告本次小組討論成果，王君為左二。

(五) 第五周：除役、領導力培訓審視及小組創新領導力專題討論

1. Hylko Nuclear 公司顧問主講核能電廠及核料循環設施除役，重點摘述如下：
 - (1) 燃料退出爐心後維持安全之重要條件(Important to the Defueled Condition, ITDC)分別有電廠內通訊暢通、防火偵測與保護系統、電源供應與用過燃料池島區中之水泵、熱交換、除礦器、管路及過濾系統、與水源供應補給，除上述外，亦有廢水處理、樹脂更換。
 - (2) 在燃料退出爐心後，與過往運轉經驗不同的事故情境與輻射源項皆是需注意的，包括燃料吊運與墜落事故、用過燃料喪失餘熱移除能力、放射性廢棄物或廢樹脂容器掉落事故。

- (3) 關於機械切割技術的進步，講者提及第一至三代切割技術，其中目前第三代切割技術已可產生較少的二次性廢棄物且沒有水質清澈度問題；另外其提及圓周液壓切割設備 (Circumferential Hydraulically Operated Cutting Equipment, C HORSE)，為圓周旋轉履帶式洗床，可進行七次圓周切割、用於穿過下內部組件，切割厚度可達 10 公分。其引用 Vermont Yankee 及 IAEA 報告中分析各切割方法的利弊，包括切割速度及切割所產生的氣體懸浮微粒等。
 - (4) 關於電廠除役所需耗費之金額，其分享兩座核電廠(Haddam Neck 與 Maine Yankee)實際耗費金額皆比預估金額高出許多(分別多出 71%與 34%)，另，Trojan 電廠實際耗費金額比預估金額少 4%，其點出了幾項原因，包括嵌入式管道修復和調查降低了清除成本和低放射性廢物產量及利用利用 VLLW(Very Low Level Waste)處置設施處理輕微污染的混凝土。
2. OECD Nuclear Energy Agency 執行長主講新核能時代之領導力需求，其呼籲各界領導人所需之領導力重點摘述如下：
 - (1) 企業方面：認知目前已知的現實考量、需要新的承攬商與雇主的模式並了解一個專案的成功發展是各方共同的目標。
 - (2) 監管單位：對於外來的意見與專業抱持開放的心態，監管單位的獨立並非指封閉，認知並接受新的科技會挑戰所有現行已知已做的，但同時認知維持現狀終將帶來失敗。
 - (3) 政府單位：將氣候變遷及淨零碳排不再是口號，而是認真地動起來。
 3. 第五周之小組專案討論內容為期一周，主軸為一虛擬國家，目前能源結構包含 8%核能發電、國家電網區分為南北兩區塊，因應國家經濟發展及人口成長，電力需求預計在 2050 年成長至 3~7%，國家能源政策擬定於 2050 年前達成核能發電占比 20%並達到 23GWe。每個小組皆代表不同立場，包括前端燃料循環供應廠家、高耗能產業供應鏈供應商、核能公司、SMR/進步型

反應器新創企業、監管體系、政府能源轉型諮詢委員會、核能後端處理組織，各小組之間需進行協商，以確保彼此之間可透過多重多樣形式的合作關係以達政府能源政策，並且須與不同利害關係者(Stakeholder)進行協商並且擬定自身組織或企業策略路徑規劃藍圖。圖 13 為王君之工作小組報告後合影。



圖 13. 王君之工作小組報告後合影，王君為右五。

六、心得與建議事項

- (一) 感謝公司推薦職參加本次 WNU SI23 WANO 東京中心之獎學金甄選，並感謝 WANO 東京中心給予職獎學金。此次參與 WNU SI 受益良多，除對全球核能發展趨勢與核能技術更甚了解外，亦透過平時小組不同類型專案討論，學習與不同文化背景、語言及專業知識背景之同儕溝通協調，在一次又一次的專案討論中，其中更歷經換小組成員，過程中不斷踏出原有舒適圈，並勇於學習擔任團隊中不同角色。其中擔任 Coordinator 一職係為較艱難且具挑戰性，當團隊中有需分工、遇到瓶頸或需要處理相左的強勢意見時，需積極介入協調，甚至為團隊政策方向做決定，以上種種係為平時較不常遇到之難處，職受益良多。
- (二) 此次 WNU SI 亦有一導師生制度，共歷經兩名導師，其中職分別有一日本男導師與美國女導師，透過導師對職的問題解惑、從旁引導與迷惘時方向指引，對職之職涯發展受益良多，會後導師亦與職留下長久的聯繫方式，並表示一日為師終身為師。故建議本公司可建立長期導師導生制度，不僅限於一對一之導師制度，藉由不同世代間之充分溝通、互相了解與解惑，讓新生代專業人才可即時解惑並建立自我職涯發展目標，同時亦培育年輕世代重要領導力，培養新生代領導人。
- (三) 此次 WNU SI 總體學費共一萬七千歐元(含機票支出，折合台幣約 65 萬元整)，實屬一大經費支出，故建議本公司持續舉薦優秀年輕同仁參與 WANO TC 獎學金之甄選，並透過參與過 WNU SI 之前輩帶領，於甄選前充分準備及平時專業技職能之培養，積極爭取獲選獎學金並持續參與世界核能大學，與世界年輕同業同儕交流學習、與世界接軌並拓展國視野。

附錄一、WNU SI 23 完訓證書

