

出國報告（出國類別：開會）

參加用過核子燃料乾貯設施
設備使用單位經驗交流會議

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：張睿恩

游士德

派赴國家/地區：日本

出國期間：113年8月22日至29日

報告日期：113年10月8日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：用過核子燃料乾貯設施設備使用廠家經驗交流會議

頁數 34 含附件：■是 □否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/ 黃惠瑜 / (02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

張睿恩/台灣電力公司/核能後端營運處/主管除役計畫/(02)2365-7210-12285

游士德/台灣電力公司/核能後端營運處/專員/(02)2365-7210-12276

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：113.8.22 ~ 113.8.29

派赴國家/地區：日本

報告日期：113.10.8

關鍵詞：除役(Decommission)、用過核子燃料乾式貯存(Spent Nuclear Fuel Dry Storage)、放射性廢棄物(Radioactive waste)、核後端營運(Nuclear Backend Management)

內容摘要：(二百至三百字)

本次行程與日本唯二擁有核電廠址內乾式貯存設施，且已在進行除役相關作業之東海核能電廠及福島第一核能電廠，進行用過核子燃料乾貯設施設備使用經驗交流會議，實地與日本的乾貯設施營運實務，交流核電廠除役及乾貯設施營運經驗，並參觀位於北海道稚內的幌延地下實驗室及其他的日本地下設施，以瞭解日本高放處置技術發展現況及地下設施管理方式。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

表目錄	iii
圖目錄	iv
壹、目的	1
貳、過程	2
參、會議內容摘要	3
一、拜會東電設計株式會社及參加工作會議	3
二、至東海核能電廠參加會議	7
三、參訪東京都外郭放水路及幌延地下實驗室	12
四、參訪富澤遺跡保存館	18
五、至福島第一核能電廠參加會議	21
肆、心得與建議	28

表目錄

表 1 核能後端基金 113 年 38-7 號出國計畫行程表	2
表 2 福島第一核能電廠用過核子燃料現況統計表	23
表 3 室內乾式貯存設施金屬護箱檢查結果表	24

圖目錄

圖 1 我國中期暫時貯存設施規劃圖.....	4
圖 2 中期暫時貯存設施概念示意圖.....	5
圖 3 幌延地下實驗室模型圖.....	13
圖 4 日本原子能研究開發機構(JAEA)地方溝通圖	14
圖 5 玻璃固化物模型圖	16
圖 6 膨潤土功用圖.....	17
圖 7 地層年代圖	19
圖 8 富澤遺跡圖	20

壹、目的

日本自 1966 年東海核電廠商業運轉後，全日本核電廠迄今一共有 33 部持有有效運轉執照的機組，其中 12 部機組發電中，另有 26 永久停止運轉機組、3 部新建中機組及 9 部計畫中機組，並有其他營運中的核能產業相關設施，可見日本對於核能產業鏈各方面皆有規劃或營運等實務經驗。

本公司因應核能後端營運策略，目前正積極推動核能電廠除役作業乾式貯存設施興建計畫，本次應日本東電設計株式會社邀請，與東海核電廠及福島第一核能電廠進行用過核子燃料乾貯設施設備使用經驗交流會議，該兩電廠為日本唯二已有執行除役相關作業經驗且擁有廠址內乾式貯存設施之核能電廠，透過本次參訪工作實際了解日本核能設施除役期間工作規劃營運、執行現況、績效評估方式與乾貯設施營運等，並透過本次行程將實際掌握日本室內及室外乾貯設施相關業務推動之現況與規劃；藉由與日本團隊的交流，將有效了解日本於核能後端營運之發展現況，進一步掌握日本乾貯與除役等最新規劃與相關技術，以提供我國核能後端營運各專案後續相關工作規劃之參考。

本次會議時間訂於 113 年 8 月 22 日至 29 日，地點主要涵蓋日本東京、茨城及福島等地區，參與經驗交流的單位包括位於茨城縣的東海核電廠，東海二號機規劃 24 組乾式貯存金屬護箱，每組可以貯存 61 束沸水式用過核子燃料，迄今已完成 15 組乾貯護箱運貯作業；本次參與經驗交流的單位亦包括於 2011 年 3 月日本福島事件後，正在進行除役作業的福島第一核能電廠，除其原有之室內乾式貯存設施，該電廠已另規劃再興建室外乾式貯存設施；另會參訪位於東京與北海道的其他核能後端營運設施。

貳、過程

本次出國自 113 年 8 月 22 日出發，迄 8 月 29 日返國(共計 8 天)，前往東京、茨城、北海道、仙台、福島等地。首先於東京的第一個行程為拜會東電設計株式會社並進行工作會議，了解東電設計營運與承攬核能後端相關工作的經驗與情況；第二個行程目的為東海核電廠，實際走訪除役中核能機組與乾式貯存設施並與現場人員進行交流；第三個行程為參訪首都圈外圍地下疏洪道，學習日本大型地下隧道、豎井等建設工程與其排水設施。東京行程結束後前往北海道拜訪 JAEA 幌延深層研究中心，透過地上設施的夢地創館學習日本科普教育的作法及公眾溝通的成效，並深入地下實驗室實地參訪其研究設施。接著前往仙台富澤舊石器時代遺跡參觀其文物之地質與地下水文自然保存條件，類比於地質處置之地質環境選擇。最後赴福島第一核電廠，實際走訪電廠受損機組外圍、ALPS 處理水放流設施，並由電廠人員簡報說明福島第一核電廠現況與輻射污染之抑制與除污對策。本次開會行程及工作內容如表 1 所示。

表 1 核能後端基金 113 年 38-7 號出國計畫行程表

日期	地點與行程	工作內容
8 月 22 日	台北→日本東京都	去程、拜會東電設計株式會社及參加工作會議
8 月 23 日	東京都→茨城縣→東京都	至東海核能電廠參加會議
8 月 24-26 日	東京都→埼玉縣→東京都 →北海道	參訪東京都外郭放水路及幌延地下實驗室
8 月 27 日	北海道→宮城縣(仙台)→ 福島縣	移動、參訪富澤遺跡保存館
8 月 28 日	福島縣→東京都	至福島第一核能電廠參加會議
8 月 29 日	日本東京→台北	回程

參、會議內容摘要

一、拜會東電設計株式會社及參加工作會議

東電設計株式會社(東電設計公司)隸屬於東京電力公司，創立於 1960 年 12 月，業務範圍涉及原子力(核能)、土木、電氣、機械、地質、水力、火力、配電、建築、再生能源等領域，其中與核能業務相關的部門有原子力本部、建築本部、土木本部、地下空間本部、DX 事業本部。

在核能相關事業方面，東電設計公司除了協助日本各電力公司所屬核電廠處理環境調查、設備設計、安全度評估、營運及維護等相關業務之外，東電設計公司亦參與很多核能後端相關工作，包含用過核子燃料乾式貯存設施的設計、核能電廠除役工作規劃、高放射性廢棄物最終處置相關地質分析，及低放射性廢棄物最終處置設施的設計，其中特別有關耐震安全度評估擁有卓越的技術成就，亦於美國太平洋地震工程研究所(PEER)舉辦的國際比賽中脫穎而出，利用 FLIP 軟體分析地盤液狀化造成淺層基礎的解析，評估結果最接近實驗值。

東電設計公司負責規劃並興建，位於日本青森縣陸奧市(Mutsu)，由東京電力股份有限公司(TEPCO)和日本原燃公司共同出資而設立的「用過核子燃料中期貯存設施(Recyclable-Fuel Storage Center, 後稱 RFS)」，其中東電設計參與的工作內容涵蓋事前調查與檢討、建物的動態耐震評估、建築物的構造設計，以及相關的執照申請。

RFS 預計貯存來自東京電力公司所屬核電廠及東海核電廠的用過核子燃料，目前最大貯存容量約 3000 噸(288 個護箱)，未來將擴充至 5000 噸(等於 500 個護箱)，採用日立-GE(Hitachi-GE)之運輸及貯存兩用之金屬護箱，金屬護箱設計使用年限為 50 年，設施內採用自然換氣來移除衰變熱，建築面積約 8200 平方公尺，自 2002 年 4 月起以兩年時間進行場址可行性評估，於 2010 年 8 月 31 日取得建照後開始動工興建，並於 2013 年 8 月完成建造，目前已取得運轉執照，預計在今(2024)年 10 月開始進行運貯作業。

相比於我國中期暫時貯存設施(集中式放射性廢棄物貯存設施)規劃，針對興建中期暫時貯存設施的推動，初步可分為選址、申設、興建等三階段。場址選定後進入申設階段，台電公司將辦理環境影響評估、申請重大公共建設計畫、土地開發許可及建照等相關行政作業，同時，本階段也將辦理場址調查、工程基本及細部設計、土地取得、工程招標等相關設施興建預備作業，保守估計需時 6 年。獲發建造執照後將進入興建階段，台電公司考量未來中期暫時貯存設施的場址或者可能會位於偏遠或不具其他開發價值的地區，可能會面臨基礎建設(例如水、電、油、通訊、交通等建設)尚未普及的情形，並且也可能有需要額外新建一個港口專供放射性廢棄物運輸之用。上述的工程考量都會拉長施工期程，因此初步保守估計中期暫時貯存設施的興建需時 10 年。因此預計在今(2024)年 10 月開始進行運貯作業之日本用過核子燃料中期貯存設施(Recyclable-Fuel Storage Center)，可以做為本國相關貯存規劃的參考。



圖 1 我國中期暫時貯存設施規劃圖

用過核子燃料中期暫存設施將採用國際上成熟的乾式貯存技術，並配合核電廠內乾式貯存已採用的型式，來進行規劃設計。相比之下，日本採用全新製造的日立-GE(Hitachi-GE)之運輸及貯存兩用之金屬護箱(設計年限 50 年)，作法不同。如此將大幅

增加製造乾貯護箱的費用，但是在用過核子燃料中期貯存設施內可以統一護箱型式方便管理，並且考量到金屬護箱的設計年限，可以再做延長。與本國相同的是，日本境內的乾貯護箱雖然都是金屬護箱型式，但是大多數僅具有貯存的功能，未來也必須要先換裝到運輸護箱後，才能進行後續的廠外運輸，而原本的金屬護箱將會被留在當地核電廠內成為待處理的放射性廢棄物。相比之下，我國如還要再使用原本的乾貯護箱，則需要額外運輸(空筒)乾貯護箱至中期暫存設施。

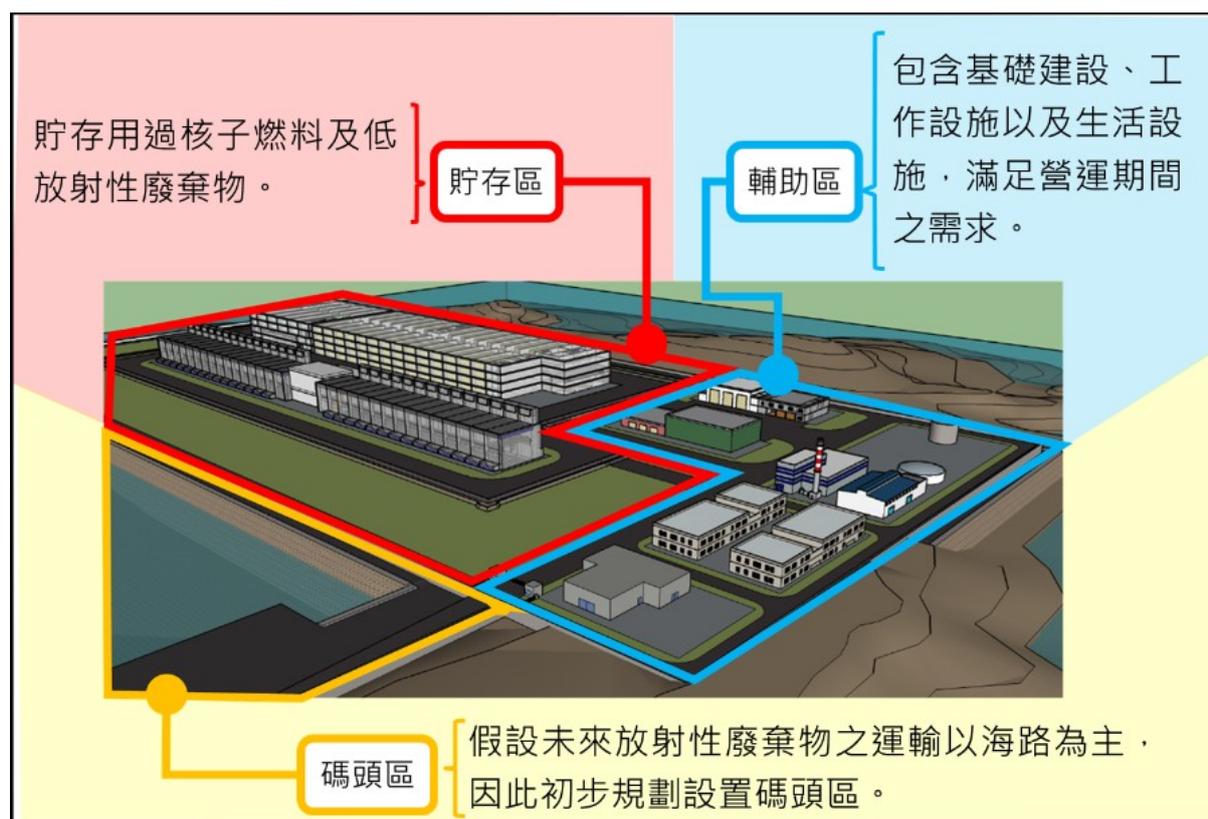


圖 2 中期暫時貯存設施概念示意圖

有關高放射性廢棄物的相關業務，東電設計公司在目前日本尚未確定最終處置場址的情況下，承接許多日本政府的官方研究與分析，在放射性廢棄物貯存設施上，東電設計公司的專長著重於設施的耐震設計，分別由土木本部負責計算建築物的耐震評估、原子能本部負責計算金屬護箱的耐震評估。

東電設計公司 DX 部門，使用 3D 點雲掃描技術建置電廠的 3D 模型，並建置 3D 模型在自建的 3D 展示平台上可檢視電廠的 3D 模型，目前亦在建置公用平台，不同的電廠可將自己的 3D 模型共享在平台上；東電設計公司亦將辦公室所在大樓以點雲掃描建置 3D 模型，並共享於平台上。

建置好的 3D 模型，可作為人員訓練教材，讓維護人員在未實際到現場，即可初步了解現場狀況，抑低人員接收劑量，也可用來輔助執行災害模擬，例如防火/水區間檢示，或確認火災時是否適合破壞特定牆面以建立排煙、逃生通道；在進入除役期間以後，3D 平台可針對特定 SSC，設定其材質、尺寸，以估算放射性廢棄物產量，也可輔助進行切割規劃，確認切割後的組件如何以最佳路徑運離現場，透過事前更詳細的規劃增加切割作業的工作效率。

二、至東海核能電廠參加會議

東海核能電廠位於茨城縣東海村，營運業主為日本原子能發電株式會社(後稱日本原電)，廠址內有兩部商用核能發電機組，本次會議重點為交流東海核能電廠第一部機組(日文為東海發電所，本文後稱東海一號機)執行除役與處理低放射性廢棄物的相關經驗，及第二部機組(日文為東海第二發電所，本文後稱東海二號機)營運用過核子燃料室內乾式貯存設施的經驗。

東海核能電廠基本資料

東海一號機為一氣冷式機組，以天然鈾為燃料，控制棒為石墨，冷卻劑為二氧化碳，自 1966 年 7 月開始商轉，為日本第一座商用核反應器，日本國內並無同型機組，1998 年因運轉效益較差，雖機組本身狀態良好、無重大事故紀錄，但仍決定永久停止運轉，2001 年開始正式執行除役作業。

東海二號機為一 BWR 機組，額定功率 1100MW，1978 年 11 月正式商轉，於 2011 年 3 月 11 日的東日本大地震後即停止運轉，2018 年雖獲管制機關許可，其運轉執照延長至 60 年(即 2038 年)，但迄今仍未重新啟動，目前廠內仍在進行防海嘯牆的建置作業。

東海一號機除役及放射性廢棄物處理經驗交流

正式展開除役作業後，東海一號機第一步為盡速移除機組內的用過核子燃料，之後依序執行用過燃料池設備清理、發電機及相關輔助設備拆除作業，目前工作重點為蒸汽產生器的拆除及反應器及其內部組件拆除準備作業。

由於是日本國內第一部商轉、也是第一部進入除役的商用核能機組，東海一號機並沒有太多國內經驗可供參考，其作業規劃即需考量如何於先期的除役作業累積更多的經驗，以使後續的除役作業執行更加順利。於是，東海一號機於拆除前兩座蒸汽產生器時，刻意分別採用人工切割及機器人切割等兩種不同工法，除了要驗證不同工法的差異外，也因為未來進行反應器內部組件拆除作業時必須採用機器人執行切割作業，此時的切割作業可增加機器人使用經驗。

東海一號機的反應器廠房有一座高 37 公尺的排氣煙囪，因為廠址臨近海岸，排氣煙囪長期受鹽害，其結構可能已經受損，為免煙囪倒塌，2021 年時評估可將超出反應器廠房屋頂部分，長約 29 公尺的煙囪切除，並取得拆除許可，目前已完成拆除；在煙囪拆除前，東海發電廠即評估該結構體受放射性污染的程度輕微，已屬於可外釋等級 (clearance level)，故進行拆除時，不需要進行太多的防放射性物質擴散措施，拆除過程中，電廠運轉期間已建置的輻射偵檢器，皆未有不正常的量測值，顯見拆除作業確實未造成放射性物質非預期擴散。

依日本放射性廢棄物分類標準，分類為 VLLW (Very Low-Level Waste, 或稱 L3) 的放射性廢棄物可進行近地表壕溝處置，其中，金屬及碎混凝土等廢棄物需以金屬處置容器盛裝，而完整的混凝土塊廢棄物需以防水塑膠布包覆後才能置於處置壕溝中；東海核能電廠即於場址內規劃一基地，做為 L3 廢棄物掩埋場，若獲准使用，於全部的掩埋工程完成且由日本原電負責監管 50 年後，該處土地即可恢復一般使用；東海核能電廠已於 2015 年 6 月向管制機關申請於廠址內進行 L3 放射性廢棄物處置作業，但迄今尚未獲得管制機關許可。

有關核電廠營運及除役產生可供回收再利用的低放射性廢棄物(主要為金屬)，東海核能電廠於 2005 年 12 月導入除污系統，包含廢棄物核種量測與評估方法的離廠計畫於 2006 年 9 月獲管制機關同意實施，之後即開始針對可離廠的放射性廢棄物進行處理，目前每年最多有近 400 噸的可供回收再利用放低放射性廢棄物離廠，離廠後的材料可交由東海村的鑄造業者鑄成新的金屬材料，標明材料來源後可用於生產鐵器，以這些材料生產的鐵器，主要由日本國內的核能相關業者使用，亦有少量用於民間公共設施。針對東海核能電廠判定為可離廠的放射性廢棄物，需待日本核能管制機關確認量測結果符合原先計畫後，才能使放射性廢棄物作為可回收再利用材料離廠，在整個離廠計畫剛實施時，管制機關曾經對部分放射性廢棄物進行再檢測，以確認電廠量測結果與離廠計畫相符，在實施一段時間以後，管制機關發現再檢測的結果皆與電廠量測結果相符，故管制機關不再實施再檢測作業，目前管制機關的確認方式僅為檢查電廠產出的品質文件。

東海二號機用過核子燃料乾貯設施設備使用單位經驗交流

東海核能電廠依循日本核燃料循環策略，採行用過核子燃料再處理規劃，但是在中間貯存設施(再回收燃料備蓄中心)尚未明朗之前，東海二號機用過核燃料乾式貯存設施扮演重要角色。東海核能電廠建設建築物以保存東海二號機的用過核子燃料乾貯設施設備，如此得以擴充核電廠的用過核子燃料貯存能力。上開室內乾式貯存設施，長 54 公尺，寬 26 公尺，高 21 公尺，由鋼筋混凝土建成，並搭配基樁基礎耐震構造，其鋼管樁自地底延伸至地下 20 公尺，基樁直徑約 80 公分，基樁厚約 1.6 公分，基樁數目達 435 支，以確保建築物的結構強度。

室內乾式貯存設施內預計可以存放 24 組金屬護箱，由東海核能電廠委託乾貯設計商完成金屬護箱設計後，額外委請乾貯製造商進行金屬護箱製造，目前分別由 HITACHI 及 TOSHIBA 獨立製造。此金屬護箱尺寸，高約 5.7 公尺，外徑約 2.4 公尺，總重量約 118 噸(包含容器及用過核子燃料)，容量為 61 束天然鈾燃料(約 11TU)，主要材質為不銹鋼，由上而下包含外蓋、壓力感應器、壓內蓋、壓筒狀容器、壓內部隔板、壓支撐構造物。金屬護箱設計採用容器內部充填氬氣，並設置導熱片，將熱傳導到容器表面進行冷卻，並於護箱底部設計耐震裝置，同時可以架高護箱的高度，以利護箱周圍空氣對流熱傳效果，此外除了上蓋口外完全無其他開口，並採用雙重蓋構造，並以金屬封條進行密封，分別以不銹鋼、鉛及合成樹脂，對 γ 射線及中子輻射進行屏蔽，金屬護箱內部隔板使用添加硼的鋁合金用以吸收中子，維持次臨界狀態，乾式貯存容器表面輻射劑量率實測值約 0.005~0.010mSv/h，相比本公司核二廠室外乾貯護箱系統 NAC MAGNASTOR 設計基準，當核二乾式貯存系統裝載符合熱負載 14.6kW/護箱之設計基準燃料後，混凝土護箱側邊表面輻射劑量率小於 0.003mSv/h，如深究其原因，應為中子輻射屏蔽的極限，因未能使用良好中子屏蔽材料混凝土，又受限於合成樹脂的耐熱溫度。

東海二號機室內乾式貯存設施工作人員，會進行設施內劑量率、護箱表面及進出氣孔溫度、雙重蓋間壓力的監控，並且每日派員到場進行目視檢查，確認護箱表面情形，自設施啟用後，相關數據皆未有任何異常情況。該設施目前已裝載完成 15 組金屬護箱，並有 6 組金屬護箱待運貯。有關貯存護箱的佈置，設有中間走道，此外以每四

組護箱為一單位，或是以每兩組護箱為一單位放置，有利於貯存護箱的移動，現場並備有護箱工作架於作業區，以提高相關作業的便利性。室內乾式貯存設施預計貯存 24 組金屬護箱，約可以延長東海核電廠再運轉 10 年。

東海核能電廠目前的 21 組金屬護箱皆只有貯存的功能，不能直接進行廠外運輸，未來若有離廠需求時，如運輸到青森縣的中間貯存設施再處理廠進行再處理作業，需要先將目前存放在船艦上的運輸護箱運至核電廠內，並且在現有的用過燃料池中，將貯存護箱內的燃料轉移到運輸護箱內，才能再進行相關離廠作業，特別是因為東海二號機採用的金屬護箱無密封鋼筒的設計，因此無法像大多數混凝土護箱的設計，可以利用傳送密封鋼筒至運輸護箱，完成燃料的轉移，不需要重新將貯存護箱下水，再次進行燃料吊運作業，及承擔燃料再次下水改變溫濕度的風險，因此東海核能電廠現有的用過燃料池有存在的必要性。

東海核能電廠除役現場及放射性廢棄物貯存相關場所參觀

會後由東海核能電廠廠內人員陪同至東海一號機廠房內的蒸汽產生器、控制室的所在地參觀，目前正在進行剩餘 2 組蒸汽產生器的拆除作業；東海一號機廠房內部遵循國際核能電廠除役期間的 cool and dim 原則，已無常設的空調系統及照明系統，廠房內僅配置簡易的臨時照明設備。

此外亦參觀東海二號機的室內乾式貯存設施、L3 低放射性廢棄物最終處置設施預定地，其中，後者目前經過整地，四周設有圍籬，待管制機關許可後即可開始營運；另針對室內乾式貯存設施，從外可以看到兩道圍籬，高度分別約 3 公尺及 50 公分，兩道圍籬間隔約 1 公尺，從內圍籬到設施約間隔 3 公尺。相比美國法規要求，內圍籬到設施約間隔 6.1 公尺，兩道圍籬間隔約 6.1 公尺，略有不同。此外，有關保安相關措施，可以觀察到內圍籬上有鐵絲網纏繞，並設有壓力感測裝置，與本公司核一廠及核二廠室外乾式貯存設施，設計概念相似，貯存設施設有門禁管制，並分為人員通道及大門，當人員通道開啟時，會播放音樂以表示門處於開啟狀態，進入小門後尚需一道旋轉門關卡，表示進入輻射管制區，之後再從側面開口則可進入乾貯設施貯存區。

經詢問設施代表表示，整個室內貯存設施僅有被動式自然空氣對流，在建築物的兩側上下設有通風口，並可以觀察到下方進氣口採用迷道設計，空氣會先從一定高度往下到設施底部，即使室內乾式貯存設施位於海邊不遠處，但是並沒有相關防治鹽害的設計，即使在使用多年後，也並未發現任何乾貯護箱腐蝕情形。此次參訪時為夏季，護箱表面溫度約為攝氏 50 度左右，經設施代表服部正次先生表示，以往冬天時，護箱表面溫度會下降至約攝氏 35 度左右，全年溫差約攝氏 15 度。參訪結束後，東海核能電廠以代表劑量方式涵蓋本次參訪人員接受到的劑量，結果顯示低於偵檢器最低可偵測範圍。

三、參訪東京都外郭放水路及幌延地下實驗室

參訪東京都外郭放水路

過去埼玉縣中川與綾瀨川流域，因為地勢低窪，常受到水患的影響，因此日本在此地興建世界最大規模的地下排水道，其中鑽 5 座豎井，並連結成全長至 6.3 公里的隧道，豎井深度約 70 公尺，隧道內徑約 10 公尺，最後再匯流到一巨大調壓水槽，長 177 公尺、寬 78 公尺、高 18 公尺，並改裝飛機用渦輪，可以將洪水送到排水暗渠，排水量約每秒 200 立方公尺，約等同一座長 25 公尺的小學游泳池，此一地下設施的概念與用過核子燃料最終處置場類似，雖然深度不及最終處置場，但是地下設施的規模相當龐大，值得關注的是在巨大蓄水池中，排水做的很好，在未執行排水任務時，甚至可以開放民眾進入參觀，並且地下設施的通風也很好，比地面上涼爽許多，所採用的混凝土結構柱子，雖然可以看見表面有一些侵蝕所留下的坑洞，但是整體表面並沒有看到沉積物、發霉或是苔蘚，因為在地底下，所以整體照明較差，此外，架構柱採橢圓柱設計，並且分為一樓二樓三樓頂立天花板，場址上的導覽也做的很好，甚至有設計 AR 虛擬實境的 APP 供民眾體驗在洪水泛濫下身歷其境。

參訪幌延地下實驗室

幌延地下實驗室由日本原子能研究開發機構(JAEA)運作，屬於用過核子燃料最終處置的沉積岩技術研究，地下實驗室於 2007 年啟用，目前累積 14 萬參觀人次，另一個由日本原子能研究開發機構(JAEA)運作的地下實驗室位於越浪，屬於花崗岩的地質實驗。



圖 3 幌延地下實驗室模型圖

在地方溝通上，由北海道地方政府、幌延町政府、日本原子能研究開發機構(JAEA)三方簽訂約定:第一項這裡不會使用任何的放射性物質，包含放射性釋縱劑。第二項未來地下實驗室研究結束後，會進行回填，不再使用。第三項未來不會作為用過核子燃料最終處置設施。並且在設施周圍，可以看到很多電線桿上貼著上述約定，用以強化地方溝通，值得我國學習。



圖 4 日本原子能研究開發機構(JAEA)地方溝通圖

此次參訪我們到達地下設施 250 公尺深，結構上分為東豎井、西豎井、換氣豎井，豎井大小依序是西豎井、東豎井、換氣豎井。挖掘技術採用奧地利的技術(類似東電設計公司的豎井規劃設計)，環向結構內徑約 6.5 公尺，在建立環向結構後，一天約挖掘 1 公尺深，目前東豎井還在挖掘當中，目前已到達 492 公尺深，實驗規劃預計挖到 500 公尺深。但是因為太平洋板塊導致水平壓力不一樣，因此環向結構並非正圓型，需要於開挖前就先模擬計算，再進行設計。雖然沉積岩屬於易變形的地質結構，但是在開挖後就不會再持續變形。東、西豎井設計成可以將施工後的碎石移出，但是換氣豎井電梯僅供緊急情況下使用，且限乘 2 人。操作人員有進入坑道的人數限制，以利人員疏散。

東、西豎井排氣方向往下，換氣豎井排氣方向往上，以建立換氣循環，另外設有水平方向主動式換氣，增加地下區域的空氣流通。本場址以前是海洋，所以甲烷存量

豐富，但是於開挖後，大部分氣體都已溢散，仍隨時監控二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)氣體濃度，以策安全。此外因為地下深層氧氣不足，此還原狀態恰好適合物質長期貯存，對於避免腐蝕扮演很重要的角色，另外搭配特殊非鹼性混凝土以避免膨潤土劣化發生，將原本的酸鹼度 pH=11 控制到 pH=7.5。

該場址是屬於海底沉積物的泥岩，沉積岩雖然孔隙率達 60%，但是因為是不連續面，所以不利物質遷移。沉積岩也是一種軟岩，因此需要使用鋼製支架加強結構支撐，在每次向下開挖 1 公尺後，需要先做一些簡單的實驗分析觀察地質後，再接續建立鋼製支架，並噴漿 25 公分以加強結構，此外利用長度約 2 公尺之岩栓，將深層結構穩定度傳遞到近隧道端。

目前日本採用用過核子燃料再處理策略，因此用過核子燃料在發電過後，預計將被送到再處理設施進行處理，目前已處理完成的玻璃固化物約 2000 多支，全日本預計將有 2 萬 7 千支，目前規劃的用過核子燃料最終處置場規模將可以處置 4 萬支玻璃固化物，總長度約 200~300 公里，相比幌延地下實驗室總長度僅有 0.8 公里。



圖 5 玻璃固化物模型圖

目前日本的使用過核子燃料最終處置設計，分為三層結構，最內是玻璃固化物，中間曾為金屬外殼（overpack），最外層為膨潤土（7 成膨潤土加 3 成細砂）。玻璃固化體裝填時約 200~300 度，輻射劑量率很高（接觸 10 秒即達到致死劑量），通常會先貯存玻璃固化物 30~50 年後，再進行最終處置。碳鋼製成的金屬外殼（overpack）有 19 公分厚，並在頂部進行焊接，經過計算後 15 公分已足夠，為確保 1000 年的腐蝕後，也不會外釋放射性物質，設計多增加 4 公分的餘裕，目前所有的工程障蔽設計年限都是 1000 年，因為放射性物質隨時間衰變後將所剩無幾。相比歐洲設計規劃採用 100% 膨潤土，日本膨潤土混加 3 成細砂，可以讓結構更強，而且較便宜，可以供本國參考。膨潤土可以防止地下水入侵，同時固定放射線物質，阻止放射性物質外釋，並且膨潤土在吸水後，膨脹可以填滿原有的縫隙。目前的設計皆有考慮再取出的可能性，留給未來有更先進技術的運用空間。另外除了垂直式的處置方式，日本也有考慮橫躺的設計，在已完成三道防線，玻璃固化物、金屬外殼、膨潤土填充後，再利用空氣抬舉 400 公斤重的物件送入處置位置。



圖 6 膨潤土功用圖

四、參訪富澤遺跡保存館

富澤遺跡保存館位於日本宮城縣仙台市，該址原預計於 1987 年左右開始興建小學，但在興建前的現地調查時，於地面下發現冰河時期的森林化石及史前時代人類活動的痕跡，這是世界上唯一一次在同一地點發現上述兩種遺跡，於是原先的小學興建計畫被迫中止，改於原地興建遺跡保存館。此處的地層條件為何能將上萬年前的生物跡證留存至今，值得探討，並可做為放射性廢棄物最終處置場設置的參考。

遺跡推測為 2 萬年前冰河時期所留下，當時氣溫較現今更低，氣候類似現在的北海道，森林中的樹種為針葉林，這可由今日仍可在保存館當中見到的樹根化石得知，而經過調查後，確認那些成為化石的樹種並非今日現存的任一樹種，屬於一種特殊的樹種，側面證實該化石推測年分的真實性。

場址西邊而來的水分提供保存條件之一，在彌生時代屬於泥碳層，剛好阻擋住上方與下方的地下水源，並建立起特殊的缺氧環境，維持還原狀態，亦輔以合適的保存溫度。



圖 7 地層年代圖

此處冰河時期是一個充滿森林的濕地，泥碳層不易種植及生火，因此場址附近人煙稀少，依照座位推測有三個人，屬於愛斯基摩人的座位習慣，場址附近有鹿的糞便，因此推測可能是在狩獵途中，在場址附近發現一些修理矛頭的痕跡，留有一些碎石，敲下來的碎片可以拼湊回去一個石頭，在山形縣也有發現類似的石頭，此外也有發現一些石頭上有割肉的痕跡，也有一些昆蟲翅膀及松果，實驗分析此處燒過的木炭並非自然碳化，屬於人為燒烤碳化，是人為生火的遺跡，也有一些人為挖掘的坑洞，研究推論屬於舊石器時代。

場址南邊及北邊各有一條河流經過，造成兩側地下水位高度不同，導致當時遺跡發現時都被泡在地下水裡，在阻斷地下水後，仍留有一些碳酸鈣的沈澱，在當時先掩埋處理後，從發現遺跡到保存館建成共花費 8 年時間，很多時間在研究適合的保存藥

劑，目前使用矽酸來保存遺跡，並在開蓋後噴灑藥劑保存，目前原本的樹都沒有碳化或是腐化的情形，樹木的年輪也有被完整的保存下來。

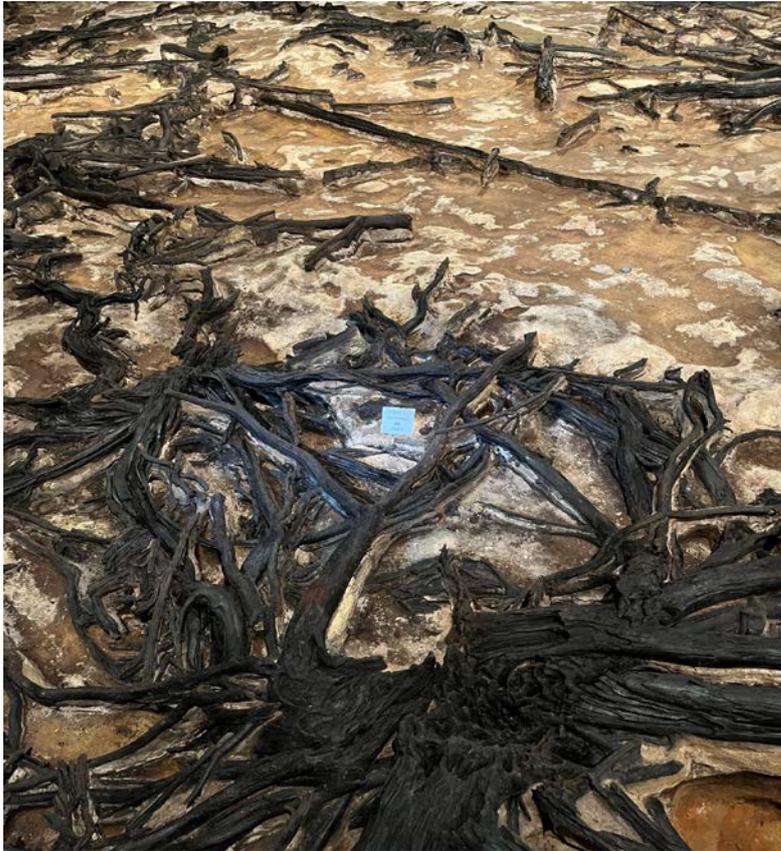


圖 8 富澤遺跡圖

五、至福島第一核能電廠參加會議

福島第一核能電廠位於日本福島縣雙葉郡，業主為東京電力控股株式會社(即東京電力公司)，共有 6 部 BWR 機組，自 2011 年 3 月 11 日的東日本大地震後，受損較嚴重的 1~4 號機及未受損的 5、6 號機陸續永久停機，由於機組受損嚴重，福島第一核能電廠目前屬於非典型的除役中核能電廠，主要工作為善後，尚未規劃及執行大量機組組件拆除作業，可以想見，未來執行除役作業時，執行方式也會跟一般除役電廠有相當的差異；本次會議就福島第一核能電廠乾貯設施營運經驗及除役相關規劃與管制作業經驗進行交流，先由福島第一核能電廠人員就該廠現況進行介紹，之後參觀乾貯設施及除役作業現場，最後進行問答交流。

福島第一核能電廠現況

311 震災之後，電廠 6 部機組陸續永久停機，與一般除役電廠相同，福島第一核能電廠首先規劃將機組內的用過核子燃料移出，但與一般電廠不同的是，因為爐心有燃料熔毀的狀況，且反應器廠房的結構亦有受損，機組內的燃料搬運吊車全數無法修復，造成用過核子燃料取出作業的困難程度大幅增加。其中，爐心未有受損燃料的 4 號機，地震當下僅機組內用過燃料池存有 1,535 束用過核子燃料，已全數於 2014 年 12 月移到機組外，而 3 號機用過燃料池中的 566 束用過核子燃料，則於 2021 年 2 月完全移出，目前正在進行 2 號機用過燃料池的用過核子燃料移出作業。因為機組原有的冷卻系統皆已不可使用且無法修復，且用過燃料池中的用過核子燃料及爐心與機組內熔毀的燃料會持續放出衰變熱，1~3 號機需要從機組外部持續注入冷卻水，直到機組內熔毀的燃料完全移出；另外，由於福島第一核能電廠建廠時的平面高程已低於海平面，故發生 311 事故後，除機組外部注入的冷卻水及因為廠房受損而進入廠房的雨水外，原先就可能滲入廠房的地下水，皆有可能帶著廠房內四散的放射性物質擴散到環境，因此電廠在廠址周圍的地表下方設置總長約 1,500 米的凍土牆阻隔污染水擴散到環境，廠址內搜集到的污染水則需要透過多核種移除系統(ALPS)處理並貯存一段時間後，才能分批排放到海水當中，目前廠址內部建有大量貯存槽，貯存經 ALPS 處理後的水，處理後的水中僅存的放射性核種為氚。

截至 2024 年 5 月，福島第一核能電廠共有 59 組乾式貯存護箱存放於室外乾式貯存設施中，其中包含 12 組中型乾式貯存護箱、8 組大型乾式貯存護箱，以及 39 組運輸貯存兩用護箱。乾式貯存設施建於高地，以降低海嘯風險，每個護箱都覆蓋著混凝土模組。目前該設施容量為 65 組護箱，並規劃向東擴建約 25 公尺，以便容納額外 30 座運輸貯存護箱。

福島第一核能電廠乾式貯存護箱設計採用金屬護箱搭配混凝土外板，並設有壓力及溫度監控系統。311 大地震後，東京電力公司對室內乾式貯存設施 9 組乾式貯存護箱進行全面檢查，確認護箱未受損，證明其安全性。

然而，擴建計畫在審查過程中遭遇挑戰。日本原子力規制委員會 (NRA) 在 2021 年 2 月福島近海發生大規模地震後，修訂了耐震設計標準，將地震動提高至 900gal (9 m/s²)。由於現有乾式貯存設施的耐震設計標準為 600gal，東京電力公司承認在 900gal 的地震動下，支撐架和混凝土基礎的支撐功能將無法發揮作用。為此，東京電力公司決定採用以護箱本身的穩固性為重點的設計方案，並參考 NRA 於 2019 年制定的「核電廠用於運輸和貯存的乾式貯存護箱的安全審查指南」，評估護箱在「不假設地面充分支撐」和「未固定於基礎等」情況下的安全性。

除了擴建現有乾式貯存設施外，東京電力公司也在考慮引進以混凝土護箱，作為金屬護箱的替代方案。與金屬護箱相比，混凝土護箱的燃料貯存容量更大，所需的護箱數量更少，可以減少佔地面積，並降低最終處置的廢棄物數量。東京電力公司表示，將持續與相關單位合作，解決這些技術問題，並致力於推動乾式貯存，以降低福島第一核能電廠的風險。

表 2 福島第一核能電廠用過核子燃料現況統計表

	Dry storage casks building		Unit 4	Unit 3	Dry cask temporary storage area		
	Medium type	Large type	NFT-22B casks (wet type)		Medium type	Large type	
	Storage	Storage	Transfer	Transfer	Storage	Storage	Transport storage
Weight [t]	96	115	91	46.3	96	115	119
Length [m]	5.6	5.6	5.5	5.6	5.6	5.6	5.3
Diameter [m]	2.2	2.4	2.1	1.4	2.2	2.4	2.5
Assemblies in a cask	37	52	22 or less	7	37	52	69
Number of casks	4	5	2		12	8	39
Fuel type	8 x 8(burn-up < 30,000MWd/t) New 8 x 8(burn-up < 33,500MWd/t) STEP1(burn-up < 33,500MWd/t) Cooling-off period (at least 4 or 13years)						

福島第一核能電廠用過核子燃料乾貯設施設備使用單位經驗交流

福島第一核能電廠於 311 大地震前即設有室內乾式貯存設施，設施內有 9 組金屬護箱，地震發生後，這些護箱受到海嘯所帶來的海水淹淨，但外部觀察、溫度和劑量測量結果顯示，其安全性能仍然維持。為確保安全，東京電力公司將所有 9 組護箱運至共用池進行檢查，檢查結果顯示，所有 9 組護箱的安全功能和燃料完整性均未發現

異常，但在金屬護箱上蓋的法蘭表面上觀察到白色物質。為確保安全，東京電力公司已將所有墊片進行更換，並對法蘭進行洩漏測試，確認無任何異常。

此外，考量 9 組護箱內共有貯存 3 種不同形式的燃料束，故開啟了一組護箱(其餘 8 組護箱並未開啟)，每種燃料束各抽 1 束，共檢測 3 束燃料，以目視檢測方式評估氫化狀況，檢查結果並未檢測到有氫氣洩漏，故可認定內存的燃料護套沒有受損，且護箱內部沒有變形，地震產生的剪力雖會影響建築物的結構，但是並不至於影響到護箱結構，檢查結果發現兩層封蓋都沒有受損，海水並未進入護箱內。以上檢查工作，除了委外廠商提供水下攝影機外，其他檢測作業皆由福島第一核能電廠自行辦理執行，並在檢查計畫執行前，向管制單位報備。

表 3 室內乾式貯存設施金屬護箱檢查結果表

	Inspection Items	Result
Containment function	Leak test of the primary and secondary lids	Good
	Visual inspection of sealing parts	Good*
Heat Removal function	Measurement of Surface temperature	Good
Shielding function	Measurement of equivalent Dose rate	Good
Sub-Criticality function	Visual inspection of fuel cladding	Good
Spent fuel integrity		

有關乾式貯存作業前用過核子燃料完整性評估與檢驗計畫，日本目前沒有受損燃料，乾貯護箱內只能貯存完整燃料。福島第一核能電廠表示，除了用過核子燃料完整性評估外，並不會對每一束燃料進行真空啜吸檢驗，僅在乾貯護箱燃料裝填後，真空乾燥的時候檢測是否有分裂氣體釋出，並且燃料完整性評估與檢驗計畫並非日本管制單位著重項目，因此並不需要於作業前或是作業後陳報管制機關。

但是福島第一核能電廠未來尚需要處理受損燃料，目前正在與管制機關溝通處理方式，並且評估使用混凝土護箱，因為目前金屬護箱受損燃料罐的設計，為以 1 根受損燃料棒為單位進行裝填，但是混凝土護箱已經有純熟的受損燃料罐設計，可以以 1 束受損燃料束為單位進行裝填，以核二廠曾使用過的沸水式燃料 ATRIUM-10 為例，1 束燃料束內有 91 根燃料棒，對於處理大量受損燃料，可以帶來莫大的效益，但是日本過去尚沒有使用混凝土護箱的經驗，因此需要先進行充分的資料收集。

有關假設性意外事件需要之再取出設施規劃，福島第一核能電廠表示，首先目前廠內乾式貯存設施所採用的金屬護箱，並非皆有運輸的功能，而且皆沒有密封鋼筒的設計，無法在不將燃料再取出的情況下進行護箱的更換，因此若未來有需要將燃料運出核電廠的規劃，除了一些本身具有貯存、運輸雙功能的金屬護箱可以逕為運出核電廠，為了可能的燃料再取出的需要，一定至少要保留一座燃料池，目前福島第一核能電廠已有規劃新建一個小型燃料池，用以取代舊的大型燃料池。日本過去曾有將用過核子燃料從金屬護箱再取出檢查的經驗，在檢查過後，有填換入不同的用過核子燃料，但是並沒有因為乾貯護箱的因素，將護箱內用過核子燃料更換到另一個乾貯護箱的案例。如果未來金屬護箱壓力監測系統發現異常，存在金屬護箱密封功能的疑慮，原則上將只會轉開第一層上蓋進行墊片檢查，不會再打開第二層上蓋，亦不會再取出用過核子燃料。

除役執行經驗交流

311 大地震過後各機組反應器廠房損壞，福島第一核能電廠即已面臨廠房外部的水侵入並將放射性污染物質帶離廠房的問題，初期將污染水收集後未進一步處理，直接使用藍色大型水槽暫存，共計使用 367 個，目前該些水槽已將內部水體移除，規劃未來使用雷射對藍色大型水槽內部進行除污以將內部受污染的纖維強化塑膠(FRP)塗層汽化，處理時先將水槽外部凸起的地方移除，再將一個水槽分為 13 段，每段分別使用雷射處理，處理後進行冷凍，就可以剝除纖維強化塑膠(FRP)塗層，剩餘的金屬槽體經偵檢確認無污染後可外釋，雷射處理時需將處理空間維持負壓，並配置輻射偵測系統，預估處理全部槽體約需時 3 年，雷射處理的優點為輻射劑量低，效率高，二次廢棄物少。

如前所述進入廠房的水可能使廠房內因爐心熔毀產生的放射性物質擴散到環境，為減緩放射性物質進入環境，福島第一核能電廠必須蒐集這些污染水，並要嘗試將這些污染水進行處理以符合一般核能電廠的含放射性物質廢水外釋標準，故福島第一核能電廠導入 ALPS，將污染水中除了氚以外的核種去除而產生 ALPS 處理水，ALPS 處理水貯存後需要進一步將其稀釋，以使其中的氚濃度達到外釋標準，目前的排放策略是每次排放約 7800m³ 的含氚水，每次排放約會間隔 1 個月。ALPS 運作過程會產生的二次廢棄物和一般營運中電廠的廢污水系統差不多，多為樹脂，但因為處理成本很高，僅會用來處理流入廠房中而含有爐心熔毀物質的污染水，正常營運產生的放射性廢水，例如：5~6 號機的爐心與用過燃料池裡的水，仍透過一般的污水處理系統進行處理。

福島第一核能電廠除役現場及放射性廢棄物貯存相關場所參觀

依據電廠管制規定，廠址內除主要辦公大樓外，幾乎全部視為輻射管制區，而主要辦公大樓並未與輻射管制區外的輻射管制站連通，通過管制站前先要進行安檢，確認身分且未攜帶違禁品，接著需要更換衣服、穿上兩層襪子、手套，背心，頭套，之後請領臨時劑量徽章 APD，穿戴好工安帽、鞋子及口罩，顯見通過管制站以後就是嚴重污染區；本團隊此次所見的核能電廠，包括東海核能電廠及福島第一核能電廠，對於安檢的執行都十分確實，現場除了核對身分證件外，不管進入管制站的是工作人員或參觀人員，都需要嚴格確認身上有無金屬物件，且工作人員帶入管制站所用的背包、工具袋和文件夾都是透明的。

配合福島第一核能電廠安排，本團隊於觀景平台上觀看 1~4 號機工作現況，發現各機組外觀仍可看出震災後嚴重損壞的狀態，其中 1 號機反應器廠房的上半部只剩下零星的鋼筋及碎屑，目前正在興建新外殼，並且為了防止煙囪傾倒，已將煙囪剪短，3 號機則因用過燃料池內燃料轉移完畢，所以已加蓋圓形屋頂以減少廠房內熔毀燃料對環境的劑量貢獻，現場共有四台大吊車協助進行建物外蓋建置或是執行燃料吊運，由一旁架設之量測儀器可知，觀景平台上的劑量率約 50 μ Sv/hr，依據身上所配戴的 APD，本次團隊於福島第一核能電廠中參觀所吸收的個人總劑量約 0.01mSv。

原先現場安排本團隊進入室外乾貯設施參觀，但因故未能通過乾貯設施的保安圍籬，僅在乾貯設施的保安圍籬外側參觀乾貯設施設置狀況；乾貯設施設有兩道圍籬，外圍籬低，內圍籬高，且並未參考美國法規要求，兩道圍籬之間的距離須達 6.1 公尺以上，內外圍籬的距離僅約 3 公尺。此外，在保安措施方面，設有上下鐵絲網，及拉力感測元件，與本公司核一廠及核二廠的室外乾式貯存設施設計概念相似。

福島第一核能電廠室外乾貯設施設計容量 65 組，採用金屬護箱搭配約 30 公分的混凝土外板，長邊 3 片混凝土外板，短邊 2 片混凝土外板，再加上屋頂混凝土外板，其空氣通道為長邊上下各 3 孔，短邊上下各 2 孔，並設有壓力及溫度監控系統。金屬護箱於室外乾貯設施中配置為 6 排平行排列，現場並備有軌道式門型吊車，額定荷重為 150 噸。目前福島第一核能電廠規劃再新增 30 組乾貯護箱，將達 95 組乾貯護箱，擴建工程已在興建中，現場參觀時，可以看到在現有的室外乾式貯存設施後方，已整地混凝土平台，並插立數根紅色立樁。

肆、心得與建議

一、 除役作業的規劃與執行，需對未來其他機組、電廠的相關作業有正面效益：

以日本東海核能電廠來說，在執行蒸汽產生器切割作業時，並未直接選定一致的切割方式，而是於不同的蒸汽產生器運用不同的切割方式，以投入成本的角度來看，很有可能因為需要準備兩套不同的器具及團隊，而耗費更多的成本，但因為規劃者認為，在電廠本身甚至整個日本來說，因為缺乏與執行核能電廠除役相關拆除作業的經驗，可以接受使用不同的作業方式，搜集更多資料，以便於未來有更好的決策。

本公司自 108 年起就開始執行核一廠除役作業，而核二廠目前尚未取得除役許可、核三廠二號機尚在營運，建議本事業部各單位於適當場合加強宣導，鼓勵同仁於規劃與執行核一廠的除役作業時，思考如何能更加有利核二、三廠的除役作業進行。

二、 日方在低放廢棄物的離廠、廠內貯存設施建置與營運等方面的經驗，可做為本公司與外界溝通的正面案例。

依以往執行核能電廠除役溝通作業的經驗，我國管制機關及居住於核電廠周圍的民眾，常期許本公司多搜集國際同儕資訊，以作為我國核能電廠規劃除役相關作業的參考。以本次出國所見，日本核能電廠執行除役相關放射性廢棄物的離廠作業及營運用過核子燃料室內乾貯設施皆已有十數年以上的經驗，特別在東海核能電廠的除役低放射性廢棄物離廠作業上，成功透過以往實績使日本管制機關降低管制強度，建議未來與外界溝通低放射性廢棄物離廠作業管制強度能否降低時，將日方經驗納入正面案例。

三、 嘗試參考日方的 3D 平台，加深本公司核電廠 3D 模型於除役作業的應用。

本公司先前已於撰寫核一、二、三廠除役計畫時，分別建立三座核電廠部分建物、設備及管路之 3D 模型，作為撰寫除役計畫時，估算除役期間放射性廢棄物產量及說明反應器結構時的參考，在除役計畫獲管制機關核備後，目前各核能電廠所建立的 3D 模型，除了可用於反應器及其內部組件切割作業規劃外，尚未有進一步應用規劃；若要

使 3D 模型的效益更加提高，可參考日本東電設計公司運用 3D 模型之方式，建立共用平台以更加活用既有 3D 模型，例如可協助規劃除役拆除相關工作。此外，也應持續追蹤日本最新的技術發展，例如透過定期會議、技術研討、人員互訪等方式，並可與日本相關單位簽署合作備忘錄，建立更穩定的合作關係，共同推動核能後端營運技術的發展。

四、 本公司可和日方於乾式貯存方面的經驗有更進一步的交流，包括再取出、外運及室內設施營運等。

因我國核一廠室外乾式貯存設施尚未取得運轉執照、核二廠室外乾式貯存設施尚在興建中，我國尚未有乾式貯存設施運轉經驗，並且未來亦規劃興建核一廠、核二廠、核三廠室內乾式貯存設施。本次參加用過核子燃料乾貯設施設備使用單位經驗交流會議，其中東海二號機室內乾式貯存設施相關基樁基礎耐震構造、廠房內金屬護箱配置及維護與監測經驗、被動式自然空氣對流相關設計、運輸護箱配套方案，以及配合護箱型式綜合考量的再取出設施規劃，都值得本公司做為參考。此外，福島第一核能電廠室內乾式貯存設施 9 組金屬護箱的檢查結果，可作為未來與外界溝通的案例。有關用過核子燃料完整性評估與檢驗計畫、受損燃料處理規劃、廠界劑量率評估、再取出設施規劃及假設性意外金屬護箱檢查流程，亦都值得本公司和日方於乾式貯存方面的經驗有更進一步的交流。