

出國報告（出國類別：開會）

高放射性廢棄物最終處置技術交流
年會暨地下設施概念規劃技術會議
及地下設施參訪
(日本)

服務機關：台灣電力公司

核能後端營運處

姓名職稱：邱鴻杰 組長

蘇鈺婷 安全評估專員

派赴國家/地區：日本

出國期間：113年8月22日~113年8月29日

報告日期：113年10月9日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高放射性廢棄物最終處置技術交流年會暨地下設施概念規劃技術會議及地下設施參訪

頁數 43 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/黃惠淪/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

邱鴻杰/台灣電力公司/核能後端營運處/組長/(02)2365-7210

蘇鈺婷/台灣電力公司/核能後端營運處/安全評估專員/(02)2365-7210

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 年 8 月 22 日至 113 年 8 月 29 日

派赴國家/地區：日本

報告日期：113 年 10 月 9 日

關鍵詞：最終處置、除役、乾式貯存、地下設施

內容摘要：(二百至三百字)

台電公司目前委由日本東電設計株式會社執行「用過核子燃料最終處置地下設施概念規劃」技術服務案，該案合約要求計畫執行過程中須安排實際參訪相關地下設施。本次赴日本參加該案工作會議，除實地檢驗計畫執行成果，以增進了解本案執行現況，並就東電設計株式會社目前最新發展技術進行討論，以回饋至台電公司核能後端營運技術發展需求。為強化本次出國效益，考量日本地質條件與臺灣相似，藉由參訪日本相關核能後端營運設施與地下設施，包含除役中且已啟用乾式貯存設備的東海發電廠、位於地下的首都圈外圍排水設施、幌延深地層研究中心以及福島核電廠等，以學習日本建設實績之經驗，進而回饋至我國核能端營運相關技術的研發及工程設計工作之規劃。

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

摘要

台電公司依法執行用過核子燃料最終處置計畫，依照處置計畫的規劃期程，目前已進入第 2 階段—候選場址評選與核定階段，本階段預期里程碑之一為於 2025 年完成處置場概念設計。台電公司為達成處置計畫書里程碑要求，目前委由日本東電設計株式會社與財團法人中興工程顧問社共同執行「用過核子燃料最終處置地下設施概念規劃」技術服務案，以協助台電公司完成處置場初步概念設計與規劃。本次赴日本參加該案工作會議，除實地檢驗該案執行現況與未來工作期程安排，並就東電設計株式會社目前最新發展技術進行交流，以回饋至台電公司核能後端營運技術發展需求。

由於台電公司目前已陸續開展除役及乾貯工作，故本次出國行程亦安排參訪日本相關電廠之除役作業與乾貯實績。過程中習取東海核電廠、福島第一核電廠之除役與乾貯經驗，日本的實務經驗將有助於台電公司進行相關工作之參考與推展；並於幌延深地層研究中心參訪其高放射性廢棄物最終處置地下實驗室之全尺度試驗坑道，以及學習該研究中心在地方公眾溝通策略與作法；在地下設施部分亦訪查大型排水隧道之工程設計，學習地下大型設施所需具備之結構；同時透過參訪仙台富澤遺址的天然類比案例，了解長期保存的重要因素與關鍵因子。

本次日本參訪行程，因在過程中可積極與各單位實務專家進行經驗交流，可有效提供參訪人員寶貴的技術經驗，並透過現地考察和技術交流，讓參訪人員深入了解核能相關設施的管理與安全技術。日本在核能廢棄物處理和核電廠除役方面的實際經驗，可作為未來臺灣面對相似問題之依據，並透過交流過程中增進對於核能後端營運整體技術之信心與了解目前不足之處，以期望能持續精進相關技術的能力。

目錄

摘要	i
目錄	ii
圖目錄.....	iv
表目錄.....	vi
壹、出國目的	7
貳、出國過程	8
參、工作內容	9
一、赴東電設計株式會社召開工作會議.....	9
二、參訪東海核能電廠.....	13
(一) 除役現況與意見交流.....	13
(二) 乾式貯存設施參訪與意見交流.....	15
三、參訪首都圈外圍排水設施.....	18
四、參訪幌延深地層研究中心.....	22
(一) 現階段研究內容.....	23
(二) 地震監測.....	23
(三) 地區承諾與交流事務.....	24
五、仙台富澤遺址(天然類比案例).....	34
(一) 地層特性及保存條件.....	34
(二) 地下水質研究.....	34
六、參訪福島第一核電廠.....	37
(一) 損害概況與反應爐狀況.....	37
(二) 輻射控制與地下水管理.....	37

(三)	ALPS 技術及水處理.....	38
(四)	環境輻射與安全防護.....	38
肆、	出國心得	42
伍、	建議.....	43

圖目錄

圖 1：中間貯存設施設計實績.....	11
圖 2：地下岩盤水封式儲存槽實績.....	11
圖 3：地下大型洞窟設計實績.....	12
圖 4：東海核電廠人員簡報電廠除役的現況與挑戰.....	17
圖 5：地下排水設施架構.....	20
圖 6：調壓水槽的大型支柱.....	20
圖 7：調壓水槽上方空地設置為足球場，遠方建築為排水泵浦站.....	21
圖 8：首都圈外圍排水設施教育館-龍 Q 館.....	21
圖 9：深地層研究中心人員簡要說明中心概況.....	26
圖 10：Horonobe URL 研究計畫各階段期程.....	26
圖 11：各任務中規劃的實驗位置.....	27
圖 12：幌延町鄰近地震站設置位置空間分布圖.....	27
圖 13：北海道北部地區地震發生之震源分布.....	28
圖 14：地下實驗室設施布設地震站之空間位置圖.....	28
圖 15：2019 年地震振動於不同測定位置之紀錄差異.....	29
圖 16：地震儀於不同測定位置記錄地震振動之差異說明.....	29
圖 17：日本高放最終處置工程障壁展示.....	30
圖 18：日本處置容器.....	30
圖 19：「用漫畫探索！幌延地下研究中心」出版品.....	31
圖 20：幌延深地層研究中心對社區三項承諾事項.....	31
圖 21：幌延町沿路標語.....	32
圖 22：本次參訪前往地下 250 公尺深處研究坑道圖.....	32

圖 23：幌延深地層研究設施地下 250 公尺深處研究坑道	33
圖 24：富澤遺址地層剖面	36
圖 25：富澤遺址保存與展示及人員現場解說	36
圖 26：抑制汙染水擴散與增加的對策	40
圖 27：ALPS 處理水介紹	40
圖 28：距離福島電廠 5 公里外的大野站輻射劑量	41
圖 29：距離福島電廠 15 公里外的休息站輻射劑量	41

表目錄

表 1 : 出訪行程及工作內容	8
-----------------------	---

壹、出國目的

台電公司目前依照核能安全委員會(以下簡稱核安會，其前身為原子能委員會)核定之「用過核子燃料最終處置計畫書」，切實執行用過核子燃料最終處置技術發展相關工作，依處置計畫書之規劃，目前為第 2 階段—「候選場址評選與核定」階段，階段重要里程之一為在 2025 年完成處置場概念設計，台電公司為如期完成階段里程，委託日本東電設計株式會社與財團法人中興工程顧問社(以下簡稱中興社)共同執行「用過核子燃料最終處置地下設施概念規劃」技術服務案(以下簡稱本案)，協助台電公司完成初步處置場概念設計。

本次出國計畫安排先與東電設計召開工作會議，實際了解目前工作執行現況與東電設計在日本地下設施以及核能後端營運相關設施的實績。會議結束後，在出國行程的時間允許下，為達最大效益，前往日本茨城、北海道、福島等地，分別參訪東海發電廠、幌延深地層研究中心、福島第一核電廠等，並與相關工作人員召開會議了解日本於核能後端營運相關業務的執行現況，內容包含除役、乾式貯存、地下設施與地下實驗室等，並與之交流。透過本次出國計畫之行程，強化台電公司掌握核能後端營運相關業務於國際技術最新發展現況，以及了解處置領域中現地試驗相關技術，以期能回饋至台電公司後續工作規劃與推動。

貳、出國過程

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。首先於東京拜訪東電設計株式會社，除召開工作會議外，亦了解東電設計營運與承攬工作的經驗與情況；參訪東海核電廠，實際走訪除役中的熱交換器廠房與乾式貯存設施，並了解該廠的除役現況；參訪首都圈外圍地下排水設施，學習日本大型地下隧道、豎井等建設工程。東京行程結束後前往北海道參訪 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。最後赴福島第一發電廠，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發電廠現況與輻射污染之抑制與除汙對策。本次開會行程及工作內容如表 1 所示：

表 1：出訪行程及工作內容

日期	地點與行程	工作內容
08 月 22 日	臺北－東京	往程/ 拜會東電設計株式會社
08 月 23 日	茨城縣	參訪日本原電東海核電廠
08 月 24 日	埼玉縣	參訪首都圈外圍地下排水 設施
08 月 25 日	北海道稚內町	路程/參訪 JAEA 幌延深 層研究中心
08 月 26 日		
08 月 27 日	仙台	路程/參訪富澤舊石器時 代遺跡
08 月 28 日	福島	參訪福島核能發電廠
08 月 29 日	東京－臺北	返程

叁、工作內容

一、赴東電設計株式會社召開工作會議

本次會議先由東電設計株式會社(以下簡稱東電設計)的後端技術部長兼設施設計組經理押部先生進行說明。東電設計位於東京都，為一成立於 1960 年的電力工程顧問公司，員工人數約 930 名，長期支援東電發電設備及工程設計相關工作，包含的領域如核電廠建築、土木、地質、機械、水力與火力、配電、再生能源等，並設有原子力(核能)本部、建築本部、土木本部、地下空間本部、DX 事業本部等共 13 主要部門。東電設計在能源相關設施從開始建設前的調查、設計，到建設完成後的維護管理與營運等提供技術支援。東電設計在核能相關實務經驗則包含核能電廠中的環境調查、設備設計、安全評估以及營運維護，主要的委託單位為電力公司與建設公司，委託的業務則涵括耐震評估、反應爐外建築的設計、海嘯模擬等。

東電設計亦有執行放射性廢棄物後端處置的相關設施的業務，像是用過核子燃料貯存設備及放射性廢棄物處置設施中，地質調查、耐震安全性評估、地下設施設計、人工障壁評估與自然現象的影響評估等。日本用過核子燃料中間貯存設施位於青森縣陸奧市(圖 1)，使用金屬製乾式護箱(CASK)，屬於自然對流的方式來貯存，可容納 3000 噸的用過核燃料，總建築面積約 8200 平方公尺。該貯存設施執照申請已成功，但尚未放置用過核燃料，預計將接收東電相關核電廠與東海核電廠等的廢棄物。日本低放射性廢棄物處置設施分為 L1、L2 及 L3 三種處置形式，L1 為地下 100 公尺的中等深度處置，L2 為地下 20 公尺的淺地表處置，L3 則為近地表的溝槽處置，目前 L2 及 L3 執行中。經與東電設計人員確認後，日本低放射性廢棄物相關處置設施由東電設計負責相關設計，如處置設施性能評估試驗、防災設計、設施長期狀態影響、排水監控設施設計、監控等研究。而在高放射性廢棄物方面，雖然日本尚未選定處置母岩及場址，但東電設計亦有投入

參與地質調查、自然環境長期評估、安全評估、地質處置地下設計與地震影響等相關的技術發展，主要委託機關包含日本原子能研究開發機構 JAEA (Japan Atomic Energy Agency)、政府機構原子力發電環境整備機構 NUMO (The Nuclear Waste Management Organization of Japan)。

除與核能相關業務外，東電設計亦有執行其他大型地下設施設計的實績。如地下岩盤水封式儲存槽的設計(圖 2)，其為在地下 150 公尺至 180 公尺深的花岡岩盤中，以水壓封住來儲備石油氣，該設計獲得日本 2013 年度土木學會的技術大獎。另一項地下設施工程經驗為超級神岡(Hyper-Kamiokande)，其為東京大學為進行中微子與質子衰變等物理觀測裝置，於岐阜縣飛驒市神岡町地下約 600 公尺處挖掘大型洞窟並設置觀測儀器(圖 3)，該設施便委由東電設計執行相關建設的設計，包含地質調查計畫的制定與調查、地下空間位置的選定與形狀檢討設計等工作內容。

目前東電設計於本案例中與台電公司主要合作部門為地下空間本部，主要執行放射性廢棄物處置相關業務，包含地質評估與分析、地下設施設計、安全評估等工作。本次參訪前，本案例之工作已完成處置場初步概念規劃，包含隧道、豎井及處置孔等相關設施，並於本次參訪確認本案例相關作業之後續規劃與時程安排。

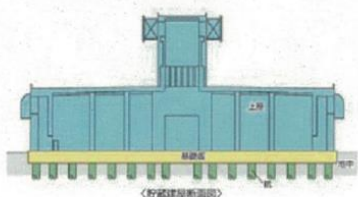
◆用過核燃料中間貯存施設の概要

Engineering for the NEXT

◎施設概要

- ◆所在地 : 青森縣 MUTSU 陸奥市
- ◆貯藏方式 : 金屬製乾式匣倉CASK
- ◆最大貯藏能力: 用過核燃料約3000噸
- ◆換氣方式 : 自然換氣式
- ◆建屋規模 : 約131m×62m×28m

構造	RC造/一部SRC造及びS
基礎形式	杭基礎
階数	地上1階建て
建築面積	約8,200m ²
延床面積	約8,000m ²



出典: 本資料掲載のデータ・図表等は、全てリサイクル燃料貯蔵(株)HPより引用

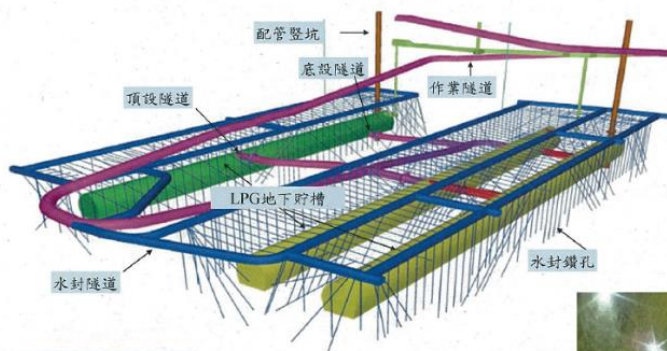
株式会社

圖 1: 中間貯存施設設計実績

◆地下岩盤水封式LPG貯存槽の設計

Engineering for the NEXT

◎敝公司設計の地下岩盤水封式LPG貯存槽得到2013年度土木學會技術賞



貯槽量: 40萬t (80萬m³)
規模: H24m×W18m×L497~640m



平成25年度
土木學會技術賞受賞
「国家石油氣
備蓄基地の建設」



【秘密情報】 目的外使用・複写・複製・開示禁止 東電設計株式会社

9

TEPCO 東電設計株式会社

圖 2: 地下岩盤水封式貯存槽実績

◆ 超級神岡：大規模地下空洞的建設工程

Engineering for the NEXT



超級神岡中微子探測

- 東京大學
- 為了進行中微子和質子衰變等物理觀測的裝置
- 於岐阜縣飛驒市神岡町地下約600公尺處挖掘大型洞窟並設置觀測儀器

敝社工作
地下空洞建設

- 地質調查計劃的制定與調查
- 空洞位置的選定與形狀檢討
- 支撐設計
- 測量管理

資訊化設計施工

圖 3：地下大型洞窟設計實績

二、參訪東海核能電廠

東海核能發電廠(以下簡稱東海核電廠)位於日本茨城縣東海村，該電廠由英國設計，電廠的機組較舊，且與目前日本大多數電廠有所差異，其為氣冷式反應爐，以金屬天然鈾作為燃料，發電機組容量為 166,000 kW，控制棒為石墨，冷卻系統則使用二氧化碳。東海核電廠於 1966 年 7 月 25 日正式商業運轉，為日本第一個商業運轉的核電廠，並於 1988 年 3 月 31 日停止運轉，停止運轉的原因為經濟效益差(發電量太小，維護成本高)，運轉時間共計 32 年，亦為日本第一個進行除役的電廠，故為其他電廠學習除役的模板。1998 年開始取出用過核燃料，燃料取出作業至 2001 年完成，於同年底開始執行除役拆除作業，並於 2015 年申請現地處置低放射性廢棄物，預計於 2035 年完成全廠的移除。

(一) 除役現況與意見交流

本次參訪由日本原子能發電株式會社東海事業本部中，廢止措置室長兼 保室長的木村秀明室長，簡報東海核電廠除役的現況與挑戰。本次參訪活動無法攜帶手機及任何照相設備進廠記錄，故僅能於會議室中記錄簡報過程(圖 4)。由於除役及相關設備切割大小、使用容器與動線等都須事先規劃，整體規劃後，東海核電廠除役的期程包含兩個部份，第一部份為反應爐區域，由於反應爐的放射性較高，尚未進行拆除作業，目前為安全貯藏階段，維持其原本狀態並待放射量衰減，預計將於 2029 年開始拆除。第二部份為反應爐以外的區域，由渦輪、發電機及其他位於輻射管制區外的設備最先開始拆除。已完成的工作依序為燃料冷卻池的設備拆除與清理(2001 年至 2003 年)、渦輪與發電機等設備的拆除(2003 年)、供水幫浦和燃料交換及搬運設備(2004 年至 2005 年)、蒸汽產生器(熱交換器)周邊設備(2006 年至 2015 年)。現階段則正在進行蒸汽產生器本體的拆除作業。根據木村室長的說明，東海核電廠

內具四座蒸汽產生器，自 2006 年起已順利拆除其中兩座，尚有兩座蒸汽產生器仍在進行拆除作業。蒸汽產生器除役的準備期約 5 年，拆除一座 3 年，搬運相關廢棄物則須 2 年。第一座採用手動切割工法，第二座則採遙控切割工法。遙控切割法為將整座蒸汽產生器分為 9 等分，使用大型吊具自上方懸吊固定蒸汽產生器，並自底部遠端操控切割設備進行作業，而由下面開始拆除的原因為拆除作業是使用遙控機器人切割，而機器人高度較低，所以由下面拆除。透過蒸汽產生器的拆除過程進行遙控切割工法的技術演練，以達到後續應用於反應爐的拆除工作。另外，由於東海核電廠位於海邊，故會有鹽害等因素造成金屬材質的煙囪產生劣化問題，為避免煙囪倒塌造成施工的障礙，所以進行煙囪切割縮短的作業。煙囪總長度為 37 公尺，移除約 29 公尺，剩餘部分則因為廠房仍有氣體須排放，故仍繼續作為排放氣體的煙囪使用。參訪過程中有詢問東海核電廠的人員，前述的煙囪因其過往的功能為排放氣體，故當時有些為放射性氣體從此排出，在煙囪底部有偵測儀器用以偵測放射性濃度，確認符合規定的氣體才會排出；而在進行煙囪切割縮短作業前亦有進行檢測，確認拆除的煙囪幾乎無測出放射性存量並符合規定後，才開始拆除作業。東海核電廠在除役作業中，依據放射性進行分類，目前預估將產生的廢棄物量如下：

1. L1 廢棄物(較高劑量放射性廢棄物，如控制棒等)：約 1600 噸
2. L2 廢棄物(較低劑量放射性廢棄物，如反應器閘門等)：約 13,000 噸
3. L3 廢棄物(非常低劑量放射性廢棄物，如熱交換器等)：約 12,300 噸
4. 無須視為放射性廢棄物，除汙後即可回收再利用：約 41,100 噸
5. 無放射性之廢棄物：約 128,700 噸

其中 L3 廢棄物預計於東海核電廠原地貯存，目前正在申請執照中，當

掩埋工程完成後，將由日本原電負責監管 50 年，主要包含場址周圍地下水的監測。

東海核電廠於 2005 年導入廢棄物清潔系統，在 2007 年獲原子能規制委員會認證，並於當年首次由東海村鑄造業者將清潔後的回收材料再利用，回收再利用的材料主要用於核電廠及相關的電力設備，後期則包含其他城市內相關公共設施，如座椅、花壇、路障等，且前述設施皆會註明材料來源。

（二）乾式貯存設施參訪與意見交流

在用過核燃料乾式貯存(以下簡稱乾貯)部分，東海核電廠採室內乾貯，藉由自然循環的通風散熱，並無開啟任何空調設備。乾貯設施尺寸長約 26 公尺、寬約 54 公尺、高約 21 公尺，為鋼筋混凝土、基樁基礎結構，其為直徑 80 公分的基樁深入地下 20 公尺直達岩盤，共有 435 支，以穩定貯存設施達到耐震的效果。貯存容量為可存放 24 個貯存容器，目前則有 21 個容器，其中 15 個容器已放置用過核燃料，一個容器可容納 61 束用過核燃料。乾貯容器高約 5.7 公尺，外徑約 2.4 公尺，總重量為 118 噸，主要材質為不鏽鋼。在乾貯容器的設計上考量以下幾個因子：在除熱部分，內部充填氦氣，並於容器內部設置導熱扇葉；而在封閉的部分，除了最上層的蓋口以外無其他開口，其採用內外蓋的雙重蓋構造，並以金屬封條密封；為防止臨界現象，內部隔板使用添加硼的鋁合金，用以吸收中子。乾貯容器的設計使容器表面所量測到的輻射劑量大約降至 0.005 毫西弗/小時至 0.010 毫西弗/小時。於參訪過程中了解到，最新一批燃料棒於 2011 年置入貯存容器，當天有觸摸乾貯桶，其溫度約為 50°C，但於冬天因天候因素則會降至 35°C。首批燃料棒則為 2001 年置入，透過直接觸摸可以顯著比較及感受兩者表面溫度的差異。東海核電廠人員表示乾貯容器表面有溫度計，並可於中央控制室監控乾貯容器的相關數據並記錄，包含表面溫度、雙重蓋間的壓力、排氣口及進氣口的溫度等，並可透過現場監視畫面即時監控。另，在詢問東海核電廠人員中了

解到，因燃料棒外的包覆材料保護燃料，故在進行乾貯作業中並無發現有受損的用過核燃料。



圖 4：東海核電廠人員簡報電廠除役的現況與挑戰

三、參訪首都圈外圍排水設施

首都圈外圍排水設施是為防洪而建的地下河道系統，建於埼玉縣國道 16 號地下約 50 公尺深處，由江戶川河川事務所管轄，其所在的埼玉縣中川與綾瀨川流域，因被利根川、江戶川、荒川等大河所包圍，為低窪的地形，加上河川坡度平緩，水流速度較慢導致容易積水，河水也較難流入大海，所以此區域因前述的地形因素長期受水災所擾，為解決問題而建造首都圈外圍排水設施。日本政府於 1992 年展開首都圈外圍排水設施的建造，歷時 14 年後於 2006 年完工。該設施主要由長達 6.3 公里、位於地下約 50 公尺深處的地下隧道(排放水)、5 個巨大的豎井(導入河水至地下)、調壓水槽(減低水勢以便於排水)，以及將洪水排到江戶川的排水泵共四種設備所組成。以下簡要說明首都圈外排水設施相關設備的用途(圖 5)：

1. 調壓水槽：為一座巨型蓄水池，目的為減弱河水從地下隧道流入時產生的衝擊，使水流可以更加順暢地排入江戶川，且可確保排水泵浦穩定運轉。其位於地下 22 公尺深處，長 177 公尺、寬 78 公尺、高 78 公尺。水槽內部共有 59 根巨大的支柱(圖 6)，支柱長 7 公尺、寬 2 公尺、高 18 公尺，形狀類似橢圓，其主要功能為因調壓水槽所處的地下水位較高，地下水造成的浮力可能導致水槽上浮，所以以支柱支撐牆頂來抵抗下方的浮力，防止水槽上浮。除此之外，為抵抗地下水浮力，調壓水槽必須具備一定重量，所以牆頂以泥沙加重，且還建有混凝土橫樑。而為了當地居民要求，調壓水槽上方的地面建造了多功能廣場如足球場等。調壓水槽為本次參訪時主要所在位置。
2. 豎井：首都圈外圍排水設施共建有 5 座豎井，豎井約 70 公尺深，內部直徑為 30 公尺，5 座豎井相互連通，其中第 2 至第 5 豎井為將各流入設施的水導入地下，第 1 豎井的作用則是把從其他豎井中的水導入調

壓水槽。在施工時，豎井亦可以當作隧道工程中的作業基地；完工後，豎井除發揮前述功能外，還可以用於維護管理用的車輛運輸以及安裝通風設備等，其在外圍排水設施的維護管理中發揮極為重要的作用。

3. 隧道：位於地下 50 公尺深處，全長 6.3 公里，內徑約 10 公尺，其為使來自各河川的洪水流入江戶川而建造，並連接 5 個豎井，每秒最多可讓 200 平方公尺的洪水流通。該隧道為採密封行泥水式盾構工法的隧道，據現場解說人員表示，該工法為一邊將圓筒形的鋼製筒推向土體、一邊掘削而成，依序反覆相同作業逐漸建構出隧道。
4. 排水泵浦站、排水暗渠：透過 4 台日本最大規模排水量(約 50m³/s)的巨大排水泵，將洪水通過 6 道 5.4 公尺 x4.2 公尺的排水暗渠，從地下將洪水排出至江戶川。

根據現場提供的說明資料顯示，自 2006 年啟用開始，至今每年引進洪水的平均次數為 7 次，最高紀錄達 1,900 萬平方公尺的排水量，已累計減輕將近 1,484 億日圓的災損。參訪前最近的排水為 2024 年 6 月 21 日，而在參訪後 6 日亦因為颱風因素而啟動排水設施。除了地下排水設施發揮疏洪效果之外，江戶川河川事務所也力求與當地合作，依當地居民的需求將調壓水槽上方空地設置為足球場(圖 7)，並設置龍 Q 館展示及介紹地下排水設施，成為具備綜合性學習的科普教育設施。(圖 8)



圖 7：調壓水槽上方空地設置為足球場，遠方建築為排水泵浦站



圖 8：首都圏外圍排水設施教育館-龍 Q 館

四、參訪幌延深地層研究中心

北海道地下研究實驗室 (Horonobe Underground Research Laboratory, Horonobe URL)計畫(以下簡稱 Horonobe URL 研究計畫)為日本 JAEA 進行的一項研究計畫，旨在透過對北海道幌延町沉積岩層深部地質環境的調查，提高對處置相關技術的信心，其分為三個階段，分別為第一階段(2002 年至 2006 年)的地表調查、第二階段(2007 年至 2015 年)的建設，與第三階段(2016 年後)的營運(圖 9、圖 10)。自 2023 年起，則進行了地下 350 公尺至 500 公尺的開挖建設工程，並開啟國際合作計畫(Horonobe International Project, HIP)，主要目標為開展用於處置設施設計、營運與封閉的相關技術，並進行深地層處置的安全評估，同時透過與國際處置社群組織分享技術資源與經驗，鼓勵與培育下一代之專業人才。國際合作計畫共分三項任務進行多邊合作，任務 A 為溶質遷移實驗及模型測試、任務 B 為處置技術系統整合，以及任務 C 為全尺度工程障壁實驗(圖 11)。

高放射性廢棄物最終處置的評估中，其中一項為考量地質環境的長期穩定性。JAEA 就 Horonobe URL 研究計畫提出一種創新方法，其為結合「數據流程圖」和「過程圖」來評估地質環境的長期演化。前述方法特別關注地下水流動特性與鹽度分布，同時考慮了如隆起、沉降、剝蝕、沉積以及海平面與氣候變化等外部因素的影響，並進一步透過整合野外調查結果與水文地質模型，進而模擬過去的地質變化，以作為未來安全評估的基礎。此外，研究亦就可能影響處置設施的主要自然事件與過程進行綜合評估，包含地震、火山活動、氣候變化和地質變動等，該作法不僅提高對地質環境長期穩定性的了解，也為建立安全論證提供重要的基礎。研究的最終目標為發展地質處置技術的基礎設施，透過將調查技術和模型建置與分析技術應用於幌延深地層研究中心地下設施(以下簡稱幌延深地層研究設施)的地質環境，以驗證深地層地質處置的可行性。以下簡要說明目前的研究內容。

（一）現階段研究內容

幌延深地層研究設施共由 3 個垂直豎井，以及在地下深度 140 公尺、250 公尺、350 公尺處研究坑道的水平孔相互連接的設施所組成。在 Horonobe URL 研究計畫中包含三項主要任務：

1. 工程障壁性能在實際地質環境中的適用性

試驗項目包含工程障壁性能確認試驗、封裝材料的腐蝕試驗與穿透試驗、示蹤劑試驗，以及了解位於處置深度的地下水、母岩應力、化學變化等因子對於緩衝材料的影響。

2. 論證處置概念方案的工程可行性

試驗項目包含處置孔的湧水防治措施、隧道支撐技術、工程障壁高溫 (100°C) 性能測試，以及處置罐運輸、埋設與回收試驗。

3. 驗證沉積岩對地殼變形的緩衝能力

評估沉積岩環境對地震與斷層活動等地殼變形機制的影響，以及地殼形變對工程障壁的影響和恢復行為。

（二）地震監測

由於臺灣與日本同為經常發生地震的地區，本次出國也特別向日本專家請益地震相關議題。經與現場專家確認，為了精確估計包含幌延町在內的北海道北部地區所發生地震的震源位置，以掌握該地區的地震和斷層活動區域，JAEA 在 2002 年至 2003 年間，在幌延町內共設置 4 處地震觀測點(圖 12)，並持續觀測。從圖 13 顯示了從 2002 年 12 月 20 日到 2006 年 9 月 30 日期間，在北海道北部地區發生的地震震源分布。圖中紅色圓點表示使用 JAEA 地震觀測點所收集的數據重新計算的地震震源位置。根據分析結果，發現幌延地區周邊的地震震源大致呈現北北東-南南西方向的分布，這種趨勢在幌延町東部尤為明顯。此外，自 2002

年 12 月開始觀測以來，可以觀測到地震一直在相似的位置發生。

為評估第二階段實施的「地下設施耐震設計技術」，進行地震觀測的調查項目，於地下設施的地表及地下深度 250 公尺及 350 公尺處調查坑道安裝地震設備(圖 14)，並彙整地震觀測資料。從過往地震紀錄彙整結果，地震引致的振動，地下數值為地表的 1/3 至 1/5(圖 15、圖 16)。而經由地震設備觀測到的波形紀錄，則可以於耐震評估中進行使用。此外，若未來處置設施封閉後，岩盤與工程障壁將一同振動，可預期其被破壞的可能性相當低。

(三) 地區承諾與交流事務

幌延深地層研究中心在 Horonobe URL 研究計畫所執行的整體規劃，從各階段的監測、監測結果呈現及衍生資料的應用說明，除了技術上的發展之外，也透過建造「夢地創館(ゆめ地創館)」展覽館，以導覽的方式將地質處置中的技術轉成科普教育館(圖 17、圖 18)，提供一般民眾預約參訪，更出版「マンガで探検！幌延深地層研究センター(中譯參考：用漫畫探索！幌延地下研究中心)」漫畫(圖 19)，透過淺顯易懂的方式使民眾能更加深對研究中心設立的目的、實驗研究和技術開發的了解。此外，JAEA 為推動 Horonobe URL 研究計畫，於 2000 年召開會議，並由北海道知事、幌延町市長、JAEA 理事長簽訂三方協議，主要內容包含：(1)絕不允許將放射性廢棄物帶入幌延町進行研究、(2)深層地質研究完成後將回填地下設施、(3)不會在幌延町興建放射性廢棄物最終處置場或臨時貯存設施(圖 20)。本次參訪前往幌延町時，也能在幌延町街上電線桿看見相關標語，隨處皆能看見該研究中心致力於提高當地民眾對其的信任與接受程度(圖 21)。透過公開透明化地質處置研究與設計的所有細節，除了能讓民眾更加理解實際處置程序的整體樣貌外，也能進一步消除民眾在處置安全上的相關疑慮。

本次參訪幌延深地層研究設施為前往地下 250 公尺深處的研究坑道(圖 22)，研究中心人員表示，實驗規劃預計將挖至地下 500 公尺深處，而目前已挖達地下

492 公尺深。地下實驗室共有東豎井、西豎井及換氣豎井，東豎井及西豎井可將施工後的岩塊移出，而換氣豎井的電梯僅供緊急情況下使用。由於幌延深地層研究設施為沉積岩為主，故其需要使用鋼筋支架支撐，並噴漿約 25 公分加強結構，同時利用 2 公尺之岩栓，使岩體達一定的穩定性。



圖 9：深地層研究中心人員簡要說明中心概況

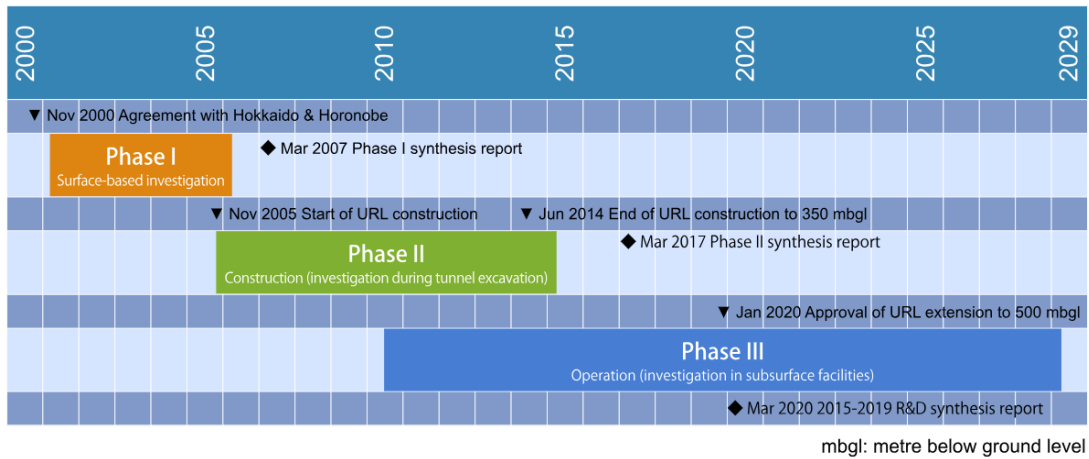


圖 10：Horonobe URL 研究計畫各階段期程

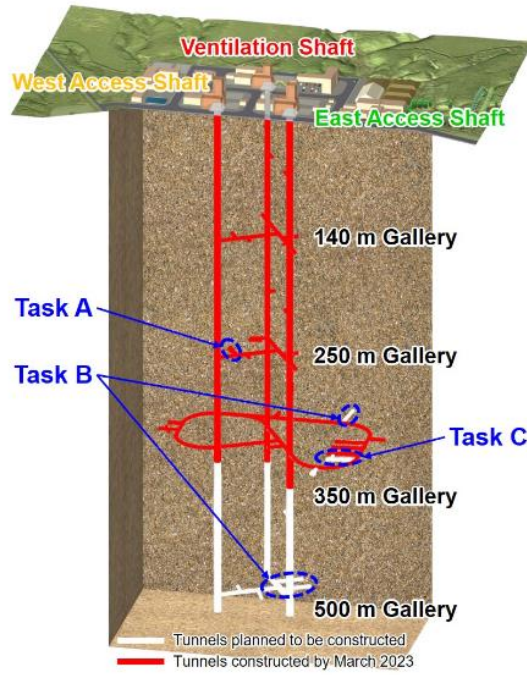


圖 11：各任務中規劃的實驗位置



圖 12：幌延町鄰近地震站設置位置空間分布圖

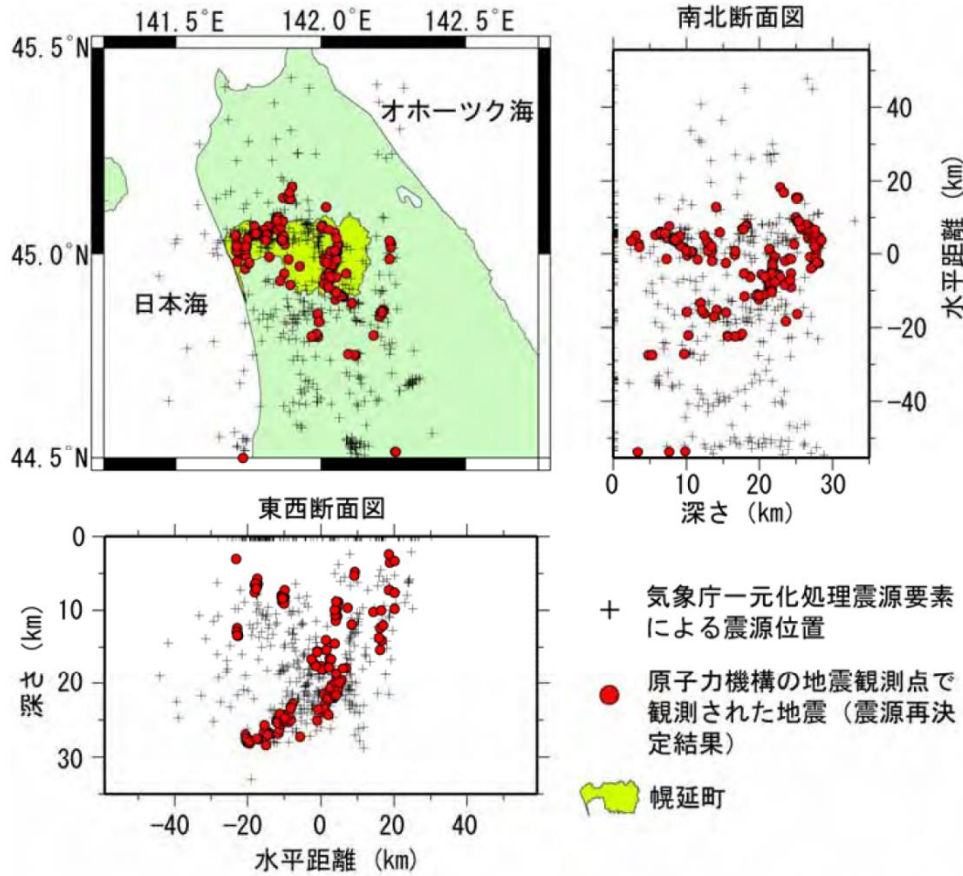


圖 13：北海道北部地區地震發生之震源分布

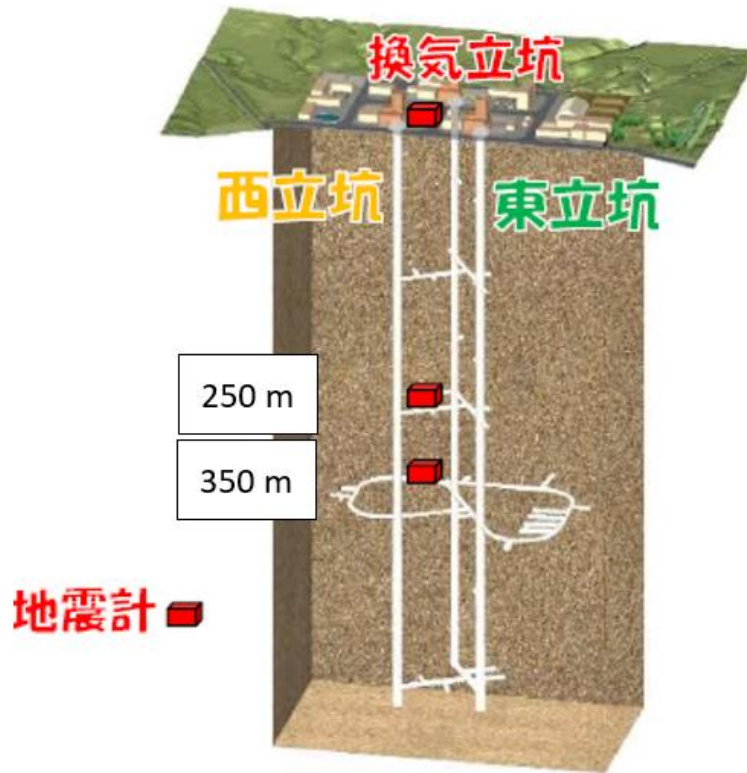


圖 14：地下實驗室設施布設地震站之空間位置圖

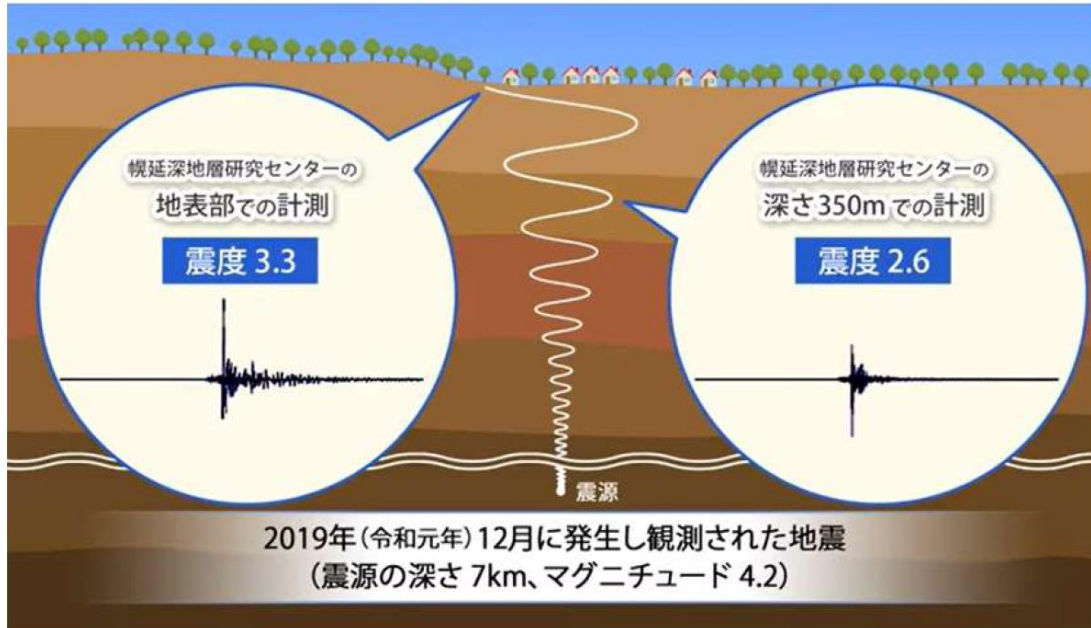


圖 15：2019 年地震振動於不同測定位置之紀錄差異



圖 16：地震儀於不同測定位置記錄地震振動之差異說明

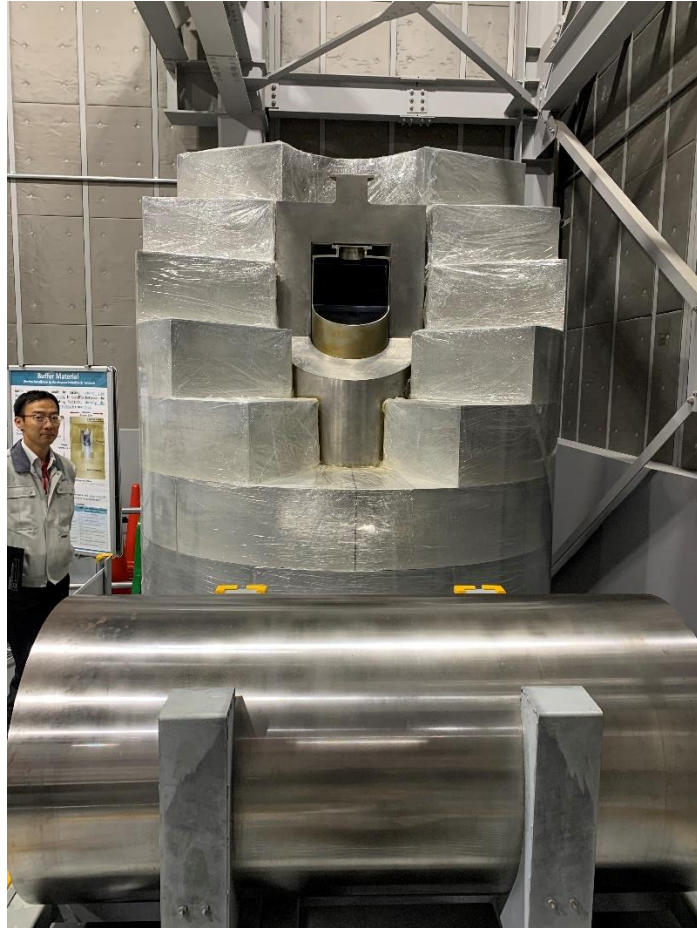


圖 17：日本高放最終處置工程障壁展示



圖 18：日本處置容器



圖 19：「用漫畫探索！幌延地下研究中心」出版品

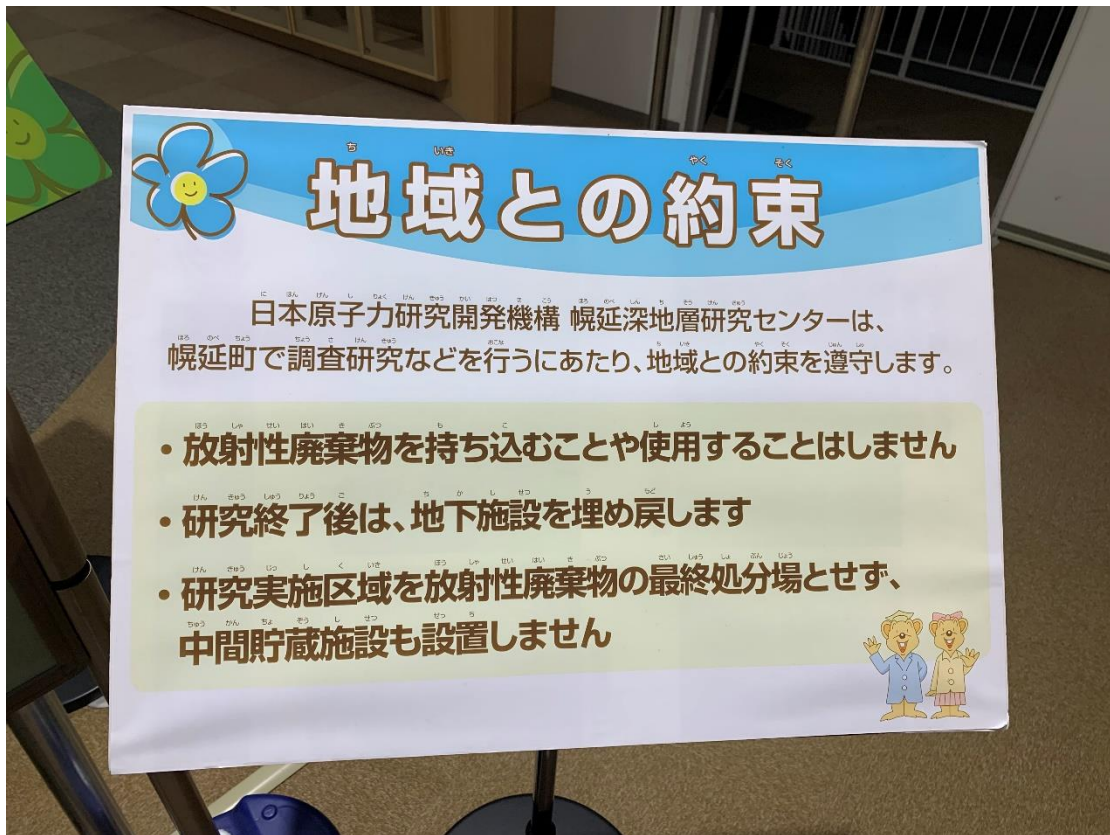


圖 20：幌延深地層研究中心對社區三項承諾事項



圖 21：幌延町沿路標語



圖 22：本次參訪前往地下 250 公尺深處研究坑道圖



圖 23：幌延深地層研究設施地下 250 公尺深處研究坑道

五、仙台富澤遺址(天然類比案例)

仙台富澤遺址(Sendi Tomizawa Site)為日本一處重要的考古遺址，其位於宮城縣仙台市，該遺址的保存狀況與地下水研究一直是學術界關注的焦點。該遺址的考古對於日本舊石器時代環境的變遷及人類活動提供寶貴的線索，且地下水質與地層特性的研究更進一步揭示了遺址能夠長期保存的重要條件。

(一) 地層特性及保存條件

富澤遺址的良好保存其中一項條件來自於其獨特的地質結構。遺址內的地層可追溯至約 2 萬年前的舊石器時代，當時該地區覆蓋冰期的原始森林，而樹木和遺物被深埋在土層中，並由多層沉積物所覆蓋。根據相關研究，富澤遺址的地層橫截面展示約 7 公尺高的舊石器時代層，其上方有距今約 1.4 萬年至 3000 年前的繩文時代層，而再上方為一層沼澤泥炭層，這些地層因富含黏土和有機質，能有效隔絕空氣，進而提供穩定的保護，使得下層的遺址能盡可能避免外界環境影響，並阻止遺物的氧化和腐蝕(圖 24)。而遺址被埋於地下約 5 公尺處，且地表以上的土壤具較強的滲透性，這樣的結構使地下水能夠在某些地層中穩定流動，為遺址的長期保存創造適宜的環境。前述地層的保護作用在其他考古遺址也曾出現過，但如同富澤遺址保持較為完整的木材案例則相當罕見。

(二) 地下水質研究

地下水質在遺址保存中亦為相當重要的一項條件。富澤遺址的研究顯示，該地區的地下水位穩定且水質相對純淨，沒有遭受到現代污染源的大量影響。前述條件使地下的遺物和化石能處於相對穩定的環境中，避免因水質變化而引起的物理或化學劣化。另，研究也顯示該地區地下水呈現較低的礦化度，其有助於減緩遺物的風化過程。在地下水的長期浸泡下，富澤遺址中的樹木和植物並沒有完全被分解，而是形成了類似化石的狀態。(圖 25)

總結前述的研究，富澤遺址的保存狀況存在以下兩項關鍵的自然因素：(1)地

層中的泥炭層有效地阻絕上下地層的地下水交換，使得環境長期保持在厭氧狀態、(2)地下水的低礦化度降低水中成分與交界面的化學反應。前述的研究顯示地下環境的化學穩定性對於物質的保存具關鍵影響。而在高放射性廢棄物的深地層處置中，便是希望能透過地下環境的化學穩定性來減緩金屬材質的氧化速度，以維持人工障壁，進而延長其保存的時間。



圖 24：富澤遺址地層剖面

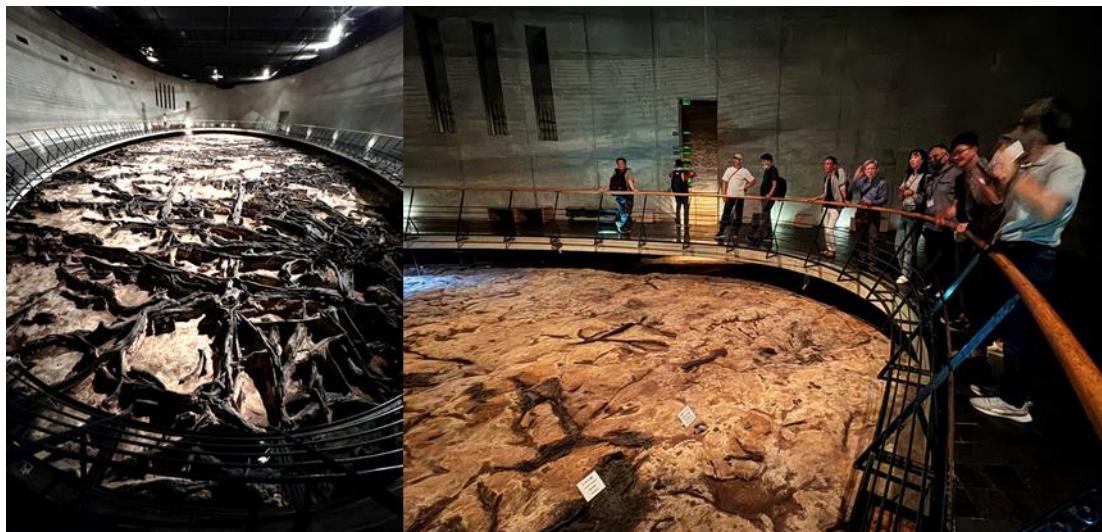


圖 25：富澤遺址保存與展示及人員現場解說

六、參訪福島第一核電廠

本次的參訪是由東京電力公司(以下簡稱東電)計畫與設計中心小川智広副所長為我們簡介 1 至 4 號機的現況與輻射污染之抑制、除污對策，以及廠區內的解說，並實際前往發電機組外圍與 ALPS 處理水放流設施。

(一) 損害概況與反應爐狀況

311 大地震以及隨後的海嘯對福島第一核電廠造成嚴重破壞，當時 1 號機、2 號機、3 號機組正在運行中，故受到嚴重的損壞，尤其是 1 號機損毀嚴重，反應爐內的燃料棒碎片殘留，且屋頂瓦礫仍待清除。機組中的燃料棒處理將在安裝大型起重機及頂蓋後進行，藉此屏蔽開啟反應爐時的輻射外釋。參訪時已完成用於屏蔽的圓頂穹頂，並正在建造外圍高架裝置。目前 1 號與 2 號機組的燃料棒碎片仍未取出，而 3 號與 4 號機組的燃料棒已完全移除。福島第一核電廠仍然持續注水用以冷卻反應爐，並使用 ALPS 技術過濾受污染的冷卻水後貯存於廠區內的儲存槽。

(二) 輻射控制與地下水管理

核電廠持續進行多重輻射控制措施，尤其就地下水污染議題進行探討(圖 26)。主要方法包含以下三點

1. 修復建築物與防雨遮棚：減少因降雨造成的污染，阻止雨水進入受損區域，防止更多水被污染。
2. 凍土牆技術：為防止外部地下水流入，使用凍土牆技術阻隔水流。凍土牆是以注入氯化鈣的方式維持零下 30°C，管線兩側處於凍土狀態，形成約 8 公尺厚、30 公尺深的有效隔離屏障，以阻止地下水受到輻射污染。
3. 抽水系統：配置多部抽水機於廠區內，以約 300 至 500 立方公尺/天的

抽水量，將地下水維持在低於海平面 2 公尺的深度，換算約為地表下 11 公尺左右，以減少地下水與污染源接觸的機會，而被抽出的水也會進行 ALPS 技術處理，ALPS 技術將在下方章節介紹。

（三）ALPS 技術及水處理

在參訪過程中，福島第一核電廠的人員不斷向我們說明其淨化處理產生的水中放射性物質，是以 ALPS(多核種去除設備)處理水的方式來進行(圖 27)。ALPS 為福島第一核電廠用來處理受污染水的關鍵技術，其做法為污染水經過多核種去除設備等的淨化處理後，直到氚以外的放射性物質確實降至安全相關規定的標準值以下，並將 ALPS 處理水存放於廠區內部的儲存槽中。在 ALPS 處理水中含有無法以淨化設備去除的「氚」，氚會釋放微弱的放射線(β 射線)，其半衰期為 12.3 年。氚大多像其他氫一樣會與氧結合，以水的形態(HTO)存在，也因此性質幾乎與水相同，所以僅要分離含有氚的水在目前的技術上並不容易。人類生活圈中的雨水、河流，甚至是自來水也含有每一公升相當於 0.1 至 1 貝克的氚，但因為氚的放射線能量微弱，無法通過皮膚，因此被認為幾乎沒有體外輻射的影響。隨者儲存槽的數量逐漸增多，且未來因將進行反應爐內燃料碎片的清除作業，所以有建造暫時儲存設施的需求，核電廠也將面臨空間不足的問題，因此部分 ALPS 處理水會與海水混合稀釋後排放至外海。ALPS 處理水經過與海水混合稀釋至少 100 倍以上，確認氚的濃度低於 1500 貝克/升，透過管線排放至 2 公里遠的外海，並持續監測，確保距離發電廠 3 公里範圍內的濃度低於 700 貝克/升，且距離發電 10 公里範圍內的濃度則低於 30 貝克/升。

（四）環境輻射與安全防護

福島第一核電廠周圍的環境輻射依然被列為高風險區域，特別是 1 號機外的參觀台，其輻射劑量約達到每小時 0.052 毫西弗，而本次參訪便位於該參觀台，參訪人員僅待 10 分鐘左右便受到 0.01 毫西弗的劑量，也是本次參訪中唯一受到的輻射劑量值。而在 5 公里外的大野站，輻射劑量為 2.14×10^{-4} 毫西弗/小時(圖

28)，15 公里外的休息站輻射劑量則降至 10^{-4} 毫西弗/小時(圖 29)，顯示輻射隨距離減弱的趨勢。進入福島第一核電廠內的某些區域需要嚴格的安全防護措施，穿戴必要的防護裝備，包含安全帽、口罩、護目鏡、一次性防塵外衣、雙層手套、雙層襪子和安全鞋等，同時避免觸摸任何物品、禁止飲食和上廁所，以防止攝入輻射污染。

雖然福島在 311 事件 13 年後的今日已逐步開放，但本次參訪在前往福島第一核電廠的過程中，沿途仍能見到廢棄的房舍。而在福島第一核電廠內保留著被海嘯衝擊的建築與大水槽凹損的痕跡，參訪人員親眼見證當年海嘯的巨大破壞力。311 事件對日本的核電廠管理與安全措施也產生了深遠的影響，尤其是在防災應變方面，其中包含提升防波堤高度等。而臺灣在 311 事件後進行核電廠耐震性及防洪措施的全面檢討，除了同樣提升防海嘯高度外，並強化緊急冷卻系統的措施，以確保即使在發生地震或海嘯時，核電廠依然可以安全運行。但隨著核能機組因運轉執照陸續屆期而停轉，部分強化措施經再檢討可無繼續進行之必要。

1 汚染水対策 [基本方針]

從山邊流向海邊的地下水 或是 從受損建築物流入的雨水，以及建築物內存留地含有放射性物質的水混合時，會產生污染水。

東電的污染水對策的三項基本方針為 ①清除污染源。②遠離污染源、③不洩漏污染水多層次的污染水對策，以穩定地控制地下水。

	取り除く
汚染水の浄化処理を進めて、リスクの低減を図っています。	
	近づけない
地下水が汚染源に触れることで、汚染水とならないように取り組んでいます。	
	漏らさない
汚染水が漏えいするなどして、環境に影響を与えることがないように取り組んでいます。	

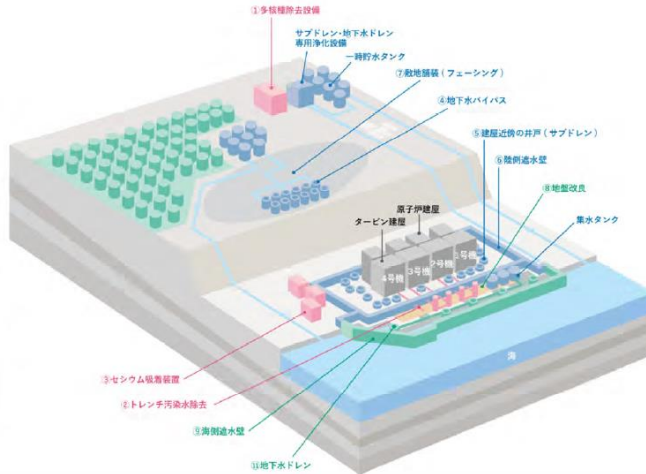
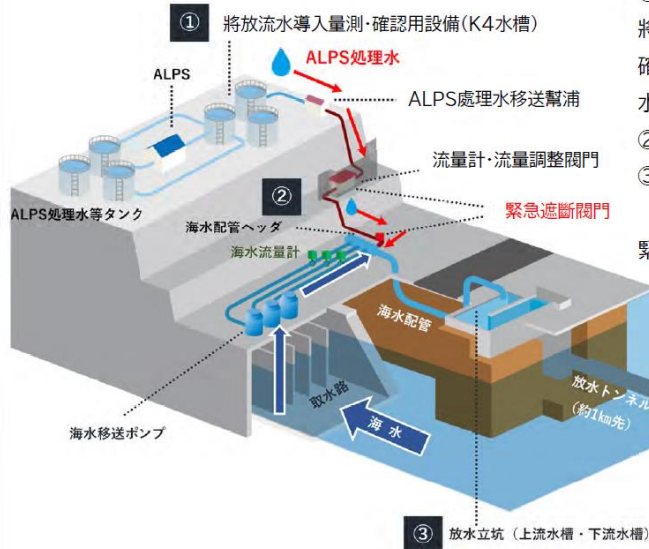


圖 26：抑制汚染水擴散與增加的對策

2 處理水對策【放流到海洋的流程】

利用ALPS系統將污染水中除了氚以外的放射性物質均去除完畢



- ①將放流水導入量測・確認用設備 (K4水槽) 將水槽內的水充份攪拌均勻後進行量測。確認除了氚以外的核種均達到標準後移至移送水槽。
- ②與海水進行混合，稀釋至100倍以上。
- ③確認氚的濃度低於1500貝克/L

圖 27：ALPS 處理水介紹



圖 28：距離福島電廠 5 公里外的大野站輻射劑量



圖 29：距離福島電廠 15 公里外的休息站輻射劑量

肆、出國心得

本次赴日本的主要目的為參加委託日本東電設計執行的「用過核子燃料最終處置地下設施概念規劃」技服案工作會議、參訪地下實驗室與地下設施，以及實際走訪日本具除役及乾貯相關設備的電廠進行交流，與日本團隊互動的過程中，學習日本在核能後端營運相關業務的實績與經驗，心得如下：

- 一、透過本次工作行程中汲取日本於深層岩體進行最終處置設施設計概念與經驗，包含隧道排水設施與豎井規劃等，透過日本的發展經驗，精進本土團隊的能力，且將有助於未來計畫相關工作的規劃。
- 二、透過實際與日本進行除役、高放處置及乾貯等相關技術經驗的交流，增進對於其在核能後端營運相關業務整體技術的通盤了解，並透過東海除役、福島除污程序，瞭解其後續在電廠除役及放射性廢棄物的處理流程，將有助於回饋至我國於相關業務的實際應用。
- 三、學習日本建置地下實驗室的經驗與公眾溝通之方法，將可供我國下階段地下實驗室推動的整體規劃，以及過程中需持續推展的公眾溝通之技巧與做法之參考。
- 四、持續強化國際技術交流並汲取相關技術最新趨勢，如日本與臺灣地質條件相近，將面對地震等相關議題，借鏡其在各項技術的分析與設計方法，將有利我國相關評估技術之發展。

伍、建議

本次赴日本參加會議及參訪後之相關建議如下：

- 一、持續強化與日本合作與交流，如本次與東電設計召開之工作會議中提及其最新 3D 模型技術，可嘗試協助台電公司運用於除役拆除作業。建議我國應持續強化與日本的交流並學習其最新技術之發展，並透過合作計畫，將有效降低技術發展的初期門檻。
- 二、應借鑒日本除役、乾貯等核能後端營運相關業務的實績，如學習日本在各項工作的整體規劃及安排，以及相關設備與系統的設計等之經驗，並應透過持續交流與合作，全面瞭解相關作業的設計考量，將有益於我國未來推動相關作業並達到最大效益。
- 三、高放射性廢棄物最終處置技術要求水平極高，建議我國應持續強化與國際技術相關社群交流，並透過參與國際合作計畫，在過程中汲取國際團隊之經驗以有效培養本土團隊技術能力；亦建議未來應持續投入資源及提供發展環境，鼓勵相關專業人才長期投入，方能掌握最終處置相關技術議題之整合。