

出國報告（出國類別：開會）

# 2024 台日雙邊低放最終處置技術交流 會議

服務機關：台灣電力公司核能後端營運處

姓名職稱：黃秉修資深專業工程師

王郁如課長

派赴國家/地區：日本

出國期間：113 年 10 月 14 日～113 年 10 月 23 日

報告日期：113 年 11 月 25 日



## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：低放射性廢棄物最終處置研習計畫

頁數 22 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/ (02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

台灣電力公司/ 黃秉修/ (02)2365-7210#12323

台灣電力公司/ 王郁如/ (02)2365-7210#12331

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：113.10.14~113.10.23

派赴國家/地區：日本

報告日期：113 年 11 月 25 日

關鍵詞：低放射性廢棄物最終處置、近地表處置、核能後端營運

內容摘要：(二百至三百字)

台灣與日本同樣位於環太平洋地震帶上，深受地震之危脅與影響。然而，日本現已同時具有已封閉、營運中、建造中、規劃中之處置設施，並具有次地表處置實驗坑道，於低放處置方面經驗豐富。故進行本次「台日雙邊低放最終處置技術交流會議」，與日本原燃公司(Japan Nuclear Fuel Limited, JNFL)、日本原子能研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)、日本原子力發電公司 (Japan Atomic Power Company, JAPC)、淺野大成基礎工程有限公司(Asano Taiseikiso Engineering Co., Ltd, ATK)、日本土木協會(Japan Society of Civil Engineers, JSCE)等機構專家進行技術交流，期望透過持續的技術交流，加強雙邊合作，作為國內低放處置技術未來精進方向之參考，並同時達到人才培育及經驗傳承之目標。

## 目錄

壹、行程目的.....	1
貳、出國過程.....	3
參、參訪暨討論議題摘要.....	4
肆、心得與建議.....	21

## 圖目錄

圖 1 日本放射性廢棄物分類以及處置方式 .....	4
圖 2 停靠於小川原港口的專用運輸船及大型吊車 .....	5
圖 3 小川原碼頭放射性廢棄物運輸作業 (資料來源: NFT 網頁).....	6
圖 4 六所村運輸、接收至處置流程 (資料來源: JNFL 網頁).....	7
圖 5 邊坡坡度與土壤含水量監測系統(ATK-SAMS) .....	12
圖 6 ATK 光子感測系統應用案例 (資料來源: ATK 簡報) .....	13
圖 7 口永良部島地表變形分布圖 (資料來源: ATK 簡報).....	14
圖 8 熊本市地表變形分布圖 (資料來源: ATK 簡報).....	14
圖 9 千葉縣地表變形分布圖 (資料來源: ATK 簡報).....	15

# 表目錄

表 1 東海第一核能電廠除役廢棄物規劃策略 .....	18
-----------------------------	----

## 壹、行程目的

本交流活動執行目的係配合「國際低放近地表處置設施設計技術與管理經驗研究」計畫之執行。該計畫擬於歐洲、美國或亞洲等國家中，挑選一處規劃或營運中的低放射性廢棄物近地表處置設施作為研究對象，以利我國規劃低放近地表處置設施。經評估與調查後，有鑑於日本與台灣地體構造環境相近，同屬環太平洋地震帶，針對我國處置環境特性議題，以日本原燃公司(Japan Nuclear Fuel Limited, JNFL)位於六所村的低放處置設施，以及日本原子能研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)位於東海的低放處置設施與日本原子力發電公司(Japan Atomic Power Company, JAPC)位於東海電廠的低放處置設施作為研究對象，並透過辦理技術交流研討會、實地參訪低放處置設施與拜訪低放處置實施相關單位/公司/機構與專家，進行技術交流與相關議題探討，聚焦日本低放處置技術之經驗分享與應用於台灣處置環境之合適性討論。我國 2 處建議候選場址因選址進度遭遇困難，為先行就重新選址提早準備，乃將次地表坑道式處置系統與近地表處置系統同時納入考量。若未來將大多數低放射性廢棄物(極低放射性廢棄物)以近地表處置，將可有效節省低放處置費用。日本現行低放處置設施，已同時具有封閉、營運中、建造中、規劃中之近地表處置設施，並具有次地表處置實驗坑道，於低放處置設施各方面經驗豐碩，此次交流獲益良多。本次出國行程拜訪及實地參訪機構包含：

- 一、日本原燃公司(Japan Nuclear Fuel Limited, JNFL)位於六所村低放處置設施、接收中心、地下試驗設施，以及小川原港(用於接收放射性廢棄物的港口)；
- 二、淺野大成基礎工程有限公司(Asano Taiseikiso, ATK)於東京之總部。該公司具備土壤、水文及建築方面的專業能力，並長期參與處置的技術開發、處置場址調查、以及日本現今放射性廢棄物處置相關研究場址的調查；
- 三、日本原子能研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)位於東海

的除役及放射性廢棄物管理中心。該公司擁有位於茨城縣東海村的多種核能設施，其中包含已封閉的東海第一核能電廠低放近地表處置設施，為日本重要的核能研究機構；

- 四、日本原子力發電公司 (Japan Atomic Power Company, JAPC)位於東海的電廠，並參訪其第一發電廠汽機廠房、熱交換器廠房、未來 L3 處置預定地(位於東海第二核能電廠)以及用過核燃料乾式貯存設施；
- 五、日本土木學會(Japan Society of Civil Engineers, JSCE) ，根據台灣整理、擬定之討論議題，邀請相關領域專家現場及視訊參與技術討論座談會，內容含括低放處置技術、安全策略、環境特性、處置系統規劃、現場作業面臨之挑戰等。

## 貳、出國過程

此次交流自 113 年 10 月 14 日出發，於 10 月 23 日返國(共計 10 日)，停留日本三澤、東京與水戶，行程如下：

時間	地點	工作內容
10 月 14 日(一)	台北至三澤	去程
10 月 15 日(二)	三澤	拜訪日本原燃公司(JNFL)小川原港及低放廢棄物接收站，參訪六所村低放處置設施
10 月 16 日(三)	東京	拜訪淺野大成基礎工程有限公司(ATK)進行技術交流
10 月 17 日(四)	水戶	拜訪日本原子能研究開發機構(JAEA)進行技術交流，並參訪處置設施
10 月 18 日(五)	水戶	拜訪日本原子力發電公司(JAPC)進行技術交流，並參訪東海核電廠
10 月 19 日(六)	東京	整理會議資料
10 月 20 日(日)	東京	整理會議資料
10 月 21 日(一)	東京	至日本土木協會(JSCE)進行技術交流座談會議
10 月 22 日(二)	東京	至日本土木協會(JSCE)進行技術交流工作坊會議
10 月 23 日(三)	東京至台北	返程

## 參、參訪暨討論議題摘要

日本的放射性廢棄物依照其廢棄物的放射性濃度和性質可分為為高放射性廢棄物(HLW)、超鈾元素廢棄物(TRU Wastes)、低放廢棄物(LLW)、貧乏鈾(Uranium Waste)，其處置方式整理如圖 1 所示，其中低放廢棄物(LLW)又可根據所含之核種及活度再細分為三類，包含：

1. 活度相對較高之低放射性廢棄物(Relatively High Waste, L1)
2. 活度相對較低之低放射性廢棄物(Relatively Low Waste, L2)
3. 活度極低之低放射性廢棄物(Extremely Low Waste, L3)

根據目前日本規劃，核電廠產生之 L2 低放射性廢棄物由 JNFL 負責處置，核電廠產生之 L3 低放射性廢棄物由各電廠自行處置，而核能研究、醫療、工業產生之低放射性廢棄物(L2 和 L3)則由 JAEA 負責處置；至於 L1 放射性廢棄物則尚未確定負責處置的單位。

### • 日本放射性廢棄物分類

発生源	廃棄物の種類
原子力発電所	L3 放射能レベルの極めて低い廃棄物
	L2 放射能レベルの比較的低い廃棄物
	L1 放射能レベルの比較的高い廃棄物
ウラン濃縮・燃料加工施設	ウラン廃棄物
MOX燃料加工施設	超ウラン核種を含む放射能廃棄物 (TRU廃棄物)
再処理施設	高レベル放射性廃棄物

### • 日本處置概念

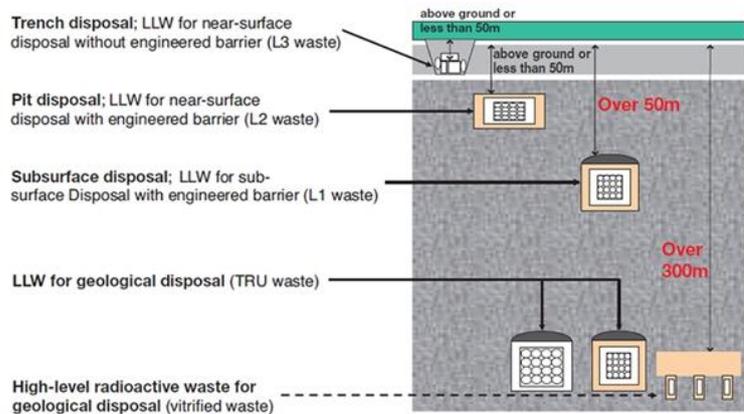


圖 1 日本放射性廢棄物分類以及處置方式

在低放處置設施場址方面，位於六所村之低放廢棄物處理中心即為 L2 最終處置設施，由 JNFL 負責營運和管理；東海電廠內 JAPC-Tokai L3 低放廢棄物處置設施(預定地，尚未施工)則負責處置東海第一核能電廠除役產生的 L3 低放射性廢棄物。而 JAEA 亦已規劃和設計 L2 和 L3 共構的低放處置設施供民生用低放廢

棄物處置，然其場址尚未選定。至於 L1 之放射性廢棄物處置設施場址則仍在研擬中。

以下將依參訪日程、單位，分別描述其交流概要：

### 一、 陸奧小川原港(Mutsu-Ogawara Port)

本次前往六所村參訪的行程正好遇上低放射性廢棄物港口接收作業，參訪當日預計有 60 個 55 加侖桶運輸容器運抵至小川原港(一個運輸容器可裝載 8 桶 55 加侖桶)。當日可見運輸船停靠碼頭，以 50 公噸橋式起重設備吊卸低放射性廢棄物運輸容器至運輸車的作業；圖 2 中顯示低放射性廢棄物運輸船(青龍丸)、50 公噸及 150 公噸橋式起重機。



圖 2 停靠於小川原港口的專用運輸船及大型吊車

日本各核能電廠運轉產生的 L2 低放射性廢棄物，經過固化並符合接收標準後，通過專用運輸容器進行運輸。在廠外運輸時皆採用短程陸運搭配海運的模式進行，運輸船由 JNFL 提供。廢棄物運抵小川原港，完成卸載作業後，會對運輸車輛進行陸運前檢查(圖 3)，確認可進行陸運後，再經由專用道路運輸至廢棄物

處理大樓，放射性廢棄物將於此進行暫時貯存，待後續檢查工作完成後移入處置窖內。

放射性廢棄物處理大樓僅進行目視檢查，包含檢查盛裝容器的外表面，確認是否於運輸過程中受到損傷；在處理大樓內的吊裝作業採全自動模式，運輸車輛到達指定地點後，起重設備逐一將運輸容器吊裝至貯存設施內，工作人員需於貯存區及控制室內監控整個接收流程；如圖 4 所示，於處置前，需將 55 加侖桶從盛裝容器內取出，並對外觀進行目視檢查，確認後將其放置成水平，一組 8 桶為單位，吊裝至運輸車上的支撐架，再運送至處置窖旁等待吊裝至處置窖內。



圖 3 小川原碼頭放射性廢棄物運輸作業 (資料來源: NFT 網頁)

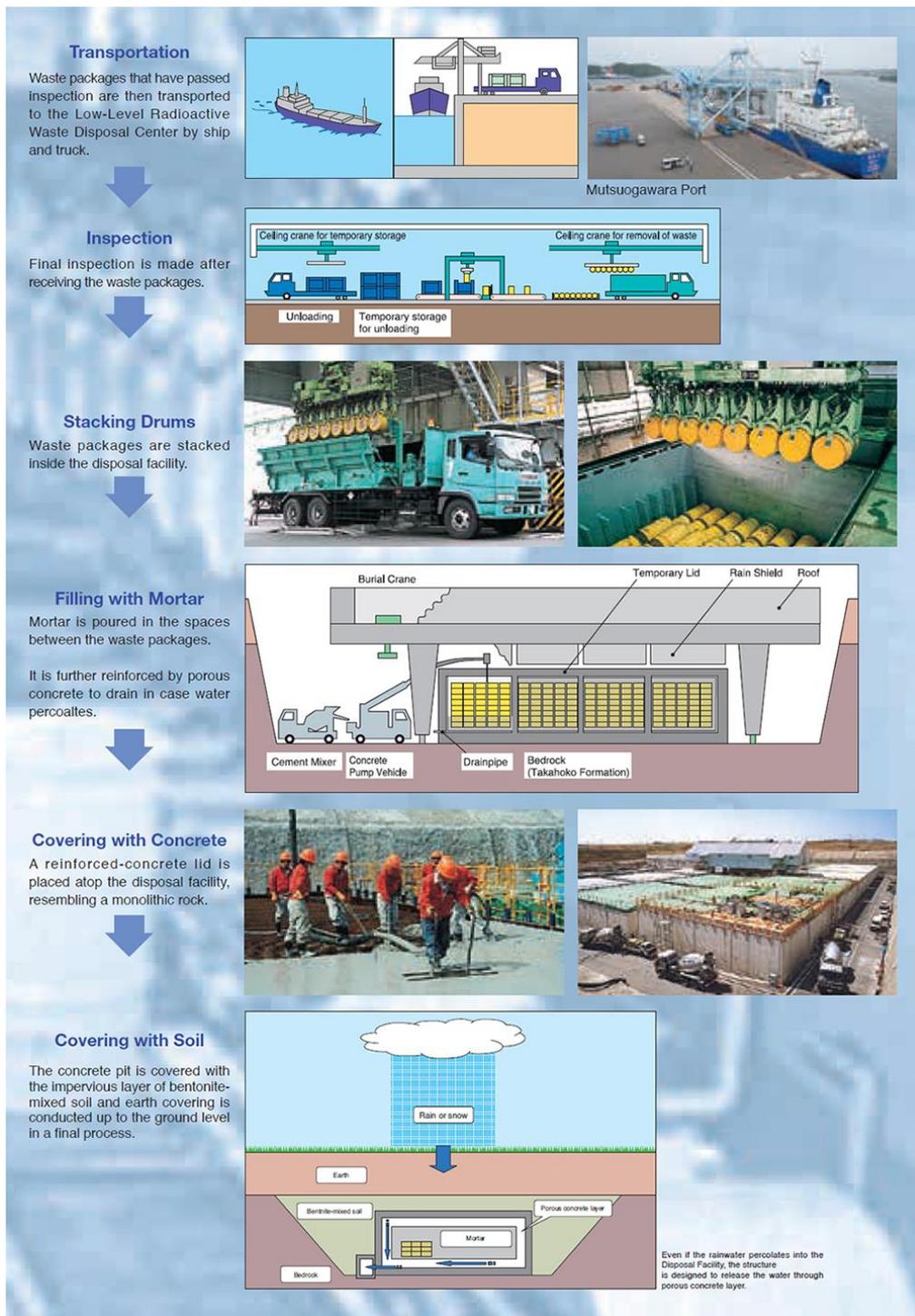


圖 4 六所村運輸、接收至處置流程 (資料來源: JNFL 網頁)

## 二、 六所村低放處置設施

六所村低放處置設施為 JNFL 負責營運。場區原用地為戰備石油儲存區，因閒置而轉作核能循環產業用途。場區內設施包括鈾濃縮廠、用過核燃料再處理廠、

高放射性廢棄物暫存設施、MOX 混合燃料製造廠、低放射性廢棄物掩埋中心、公眾溝通中心(Public Relation Center, PR)等。

六所村 No.1 低放處置設施於 1992 年開始接收各核電廠 L2 低放射性廢棄物，2000 年 No.2 低放處置設施開始營運。No.1 處置設施一開始興建第 1~6 排，主要接收電廠運營產生之液態廢棄物與廢樹脂經均勻固化後的廢棄物，因處置容量需求增加，約於 2022 年開始申請增建第 7~8 排，目前第 6 排已接近滿載，大部分已完成處置窖上蓋封頂作業，第 7~8 排負責接收與 No.2 處置設施相同之廢棄物；No.2 處置設施主要負責接收電廠運營產生固態廢棄物。截至 2024 年 10 月，No.1 處置設施已接收 106,171 桶，No.2 處置設施則接收 203,264 桶，考量處置容量已逐漸趨近額滿，因此 JNFL 於 2018 年提出增設 No.3 處置設施，並於 2021 年 7 月 21 日獲得許可，其設計容量為 20,000 m<sup>3</sup>，預估可處置 26,400 桶，該處置設施正在興建中。

No.1、No.2、No.3 低放處置設施皆採用近地表處置方式，從早期 No.1 低放處置設施的設計規劃到近期 No.3 低放處置設施的設計規劃，可發現處置窖設計的總處置容量皆為 20 至 21 萬桶 55 加侖桶。處置窖的設計則以(1)減少處置窖數量、(2)增加單元格數量、(3)增加單元格處置容量，以及(4)增加處置窖尺寸(No. 2 為 No. 1 處置窖的 2.7 倍，No. 3 為 No. 1 處置窖的 4.8 倍)，為設計方向，主要考量為施工期及運營成本，藉由減少處置窖數量來縮短施工期，並降低建造成本。

在監測廊道方面，早期建造 No. 1 低放處置設施是採環繞處置窖形式的監測廊道；透過營運經驗及相關研究成果，於建造 No.2 低放處置設施時，將監測廊道簡化成圍繞重點需要監測之部位；之後，於建造 No.3 低放處置設施時，監測廊道更由簡化的環繞坑道改為豎井式，大幅度減少監測坑道的長度，降低處置成本。No. 1 至 No. 2 乃至 No. 3 低放處置設施監測廊道的設計變化，主要是在滿足監測需求下，根據建造工期及運營成本所做的改良。

關於監測坑道回填材料選擇，No. 1 及 No. 2 低放處置設施旁的監測坑道，於設施運營階段上不會進行回填，待執行封閉作業時，才會採用與處置窖相似的材料進行回填作業，但尚未決定回填材料適用之泥漿材料或其他設計；No.3 監測豎

井則已經有回填設計，考慮隨深度變化，位於回填砂土層位置的豎井段將採砂土同材質回填，而其下屬於砂漿區段將回填砂漿，意即根據水平位置的材料類型回填，於水平位置保持相同的材料，以達到相同的工程障壁長期安全功能。

在實施覆土作業方面，No.1 第 1~6 排目前仍在申請管制單位許可階段，預計於 2025 年開始，於 2027 年完成覆土工作，至於第 7 及 8 排，規劃於 2033 年左右完成覆土作業。由於覆土作業分兩階段執行，第 1 階段為第 1 到 6 排，第 2 階段為第 7 到 8 排，執行第 6 排覆土作業時，覆土會以斜坡的方式，覆蓋在第 7 排處置窖上方，待執行第 2 階段作業時，才會完成整體覆土作業。另外，JNFL 於 No.3 低放處置設施旁設立一座覆土製造工廠及試驗設施，現階段的成果及後續規劃包含：

- (一)興建覆土製作工廠，屆時於設施旁製作覆土工程所需之材料；
- (二)混合土中預計包含膨潤土、黏土、砂、當地土壤等；
- (三)正在進行試驗工作包含，測試下層覆土及下層低透水性覆土的混合比例；
- (四)下層覆土混合比例的設計目標之一為將其透水性調配成與母岩相同；
- (五)搭配乾燥及潮濕環境，測試混合比例，這部分成果將用於 No.1 處置設施的覆土中。

### 三、 六所村次地表處置試驗坑道

日本對於 L1 低放廢棄物採用次地表處置方式，為了研究 L1 廢棄物之規劃，原子力環境整備促進與資金管理中心(Radioactive Waste Management Funding and Research Center, RWMC)在六所村設置 1 座全尺度次地表處置試驗坑道，深度約 100 m，具有 3 條監測坑道與 1 條主要測試坑道。

本次參訪主要為次地表處置試驗坑道之監測坑道 B 及監測坑道 C，觀察坑道壁面噴漿，以及剝露的含凝灰岩、浮石質、火山角礫的鷹架層，瞭解岩心所展示斷層特性。根據調查資料，該場址所在地過去因古太平洋板塊向西隱沒，火山噴

發後在海底堆積形成含火山灰、浮石的沉積層。之後，約 5 百萬年前受擠壓隆升，輕微受構造活動影響而導致岩層傾斜，此後即維持長期穩定至今，構成六所村處置環境為第三紀沈積岩層上覆薄層第四紀海階沖積物。透過坑道內岩石的定年資料、及岩性調查及斷層破裂帶之岩性定年資料，說明試驗坑道所在場址附近雖有斷層，然而因斷層破裂帶有充填物膠結，顯示未再發生錯動；由於此斷層僅一次活動就停止且受到沉積時火山流體膠結作用的封閉，形成緻密不導水的破裂帶，因此未呈現後期再次破裂(無法提供斷層週期研究)或地下水流通的紀錄。

此外，透過試驗坑道，掌握六所村地區之地質特性、地下水分析技術與實證、海淡水交界分析、岩石力學特性、開挖工程規劃，以及開挖擾動帶之影響範圍，並在主要測試坑道內建置 1 座等比例的處置窖側牆與底座，將非放射性的同位素示蹤劑作為仿放射性廢棄物放置於處置窖內，藉以了解處置窖實務施工方式、膨潤土回脹特性、工程障壁安全性、排水監測，以及混凝土在該環境之變化等，該試驗及調查資料為未來 L1 次地表低放廢棄物處置設施之工程規劃與設計提供了寶貴的經驗及資料。

#### 四、 淺野大成基礎工程 (ATK)

淺野大成基礎工程有限公司(株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング)在日本境內設有 8 個分部及 1 個技術研究所，旗下子公司包括三協建設、鈴木建築設計、Tonokuchi Weir 小型水電公司以及大分地熱開發公司。原本的「大成基礎工程公司」與「淺野建設工程公司」為兩家獨立公司，經過交叉持股與收購後，於 2011 年合併為「淺野大成基礎工程公司」。ATK 公司的專業服務範疇包含地質調查技術開發、土壤及地下水污染調查、地質調查、地熱與溫泉調查、建設工程(坑道、水利設施、道路)、以及建築物檢測等。此次交流之技術議題，摘錄如下：

##### (一)邊坡坡度與土壤含水量監測系統(ATK-SAMS)

日本近年來，因大雨造成超過 1,000 起山體滑坡的災害，有鑑於此，ATK 發

展了一種定量掌握邊坡穩定性的系統「ATK-SAMS」，來作為有效管理邊坡的方式。ATK-SAMS 的主要概念為，藉由降雨量與土壤的含水量，並同時監測邊坡坡度的變化情形，來預測邊坡的穩定性。ATK-SAMS 由傾斜感測器、土壤含水量感測器、雨量計、具有數據通訊能力的感測器節點、電源供應器所組成(圖 5)。ATK 目前已於日本五處地點設置 ATK- SAMS，作為邊坡災害監測與預警之應用。並根據監測結果，以單位時間內邊坡傾斜角度變化速度，作為邊坡災害的評估標準，進行邊坡的整治與附近居民與相關人員避難之依據。此技術若要應用至低放處置設施試驗設施上，例如覆蓋層的坡面監測，因坡面多為人造設施並且由多層不同材料構成，需要另外建立滑坡與土壤含水量、降雨量、土壤位移量等因素之間的關係；在坡度方面，由於覆土層坡面角度可能達 5 度，可於試驗階段，假設不同程度的降雨量，監測期間降雨造成的土體含水量變化，以及坡面土壤長期的變形量，用以取得關鍵量測參數，作為長期穩定性試驗與模擬建置的技術發展參考依據。

## (二)光子感測技術

光子感測器是一種感測器，其感測部分由光纖和光學元件組成。當光纖受到傳感器所處環境(如溫度或壓力)的影響時，光學性質(如強度、頻率)會發生變化，由此進行量測工作，與僅能傳輸數百米距離的電線相比，光纖可以將數據傳輸至數十公里以外的距離。光纖芯直徑僅為 0.9 mm，比傳統銅芯電線更細更輕。透過光纖將光子感測器連接到多個點或將光纖本身作為感測器，可以量測大範圍的區域。可量測項目包含降雨量、風速等氣量資料、邊坡塌陷、河川水位、地震、橋樑與道路之變形與震動、管道壓力、變形、損傷與洩漏、居家火災與溫度等，應用範圍非常廣泛。圖 6 為 ATK 發展之光子感測系統應用案例，主要為量測地下水位，其自 2006 年啟用並使用至今，除了相關維護工作外，並無故障之情況發生。

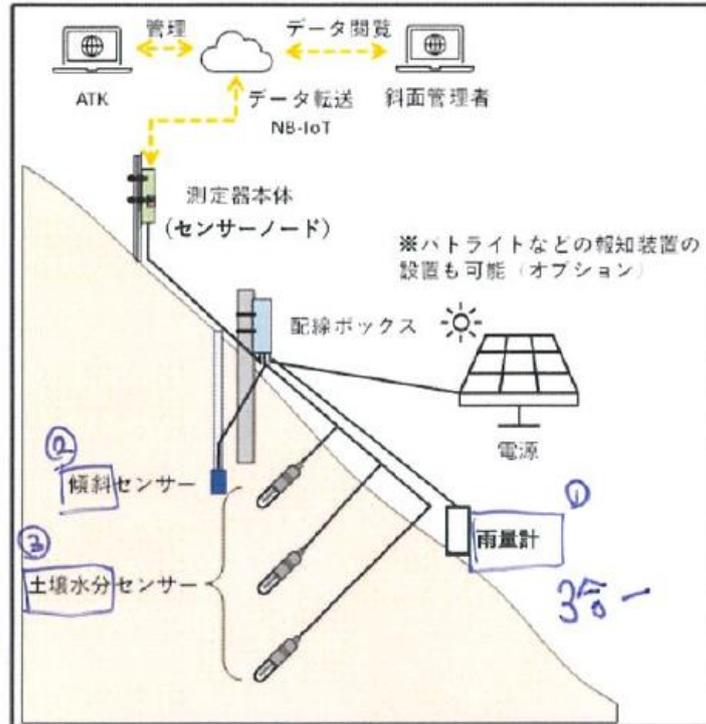


圖 5 邊坡坡度與土壤含水量監測系統(ATK-SAMS)

(資料來源: ATK 簡報)

### (三) 光纖供電系統

ATK 團隊為因應長期監測所需的穩定性，設計了光纖供電系統，該系統假設停電情境下，利用光纖供電為測量土壤含水量等的感測器供電，可用於需要長期測量區域，因光纖與一般電線相比較不易壞；該項系統特點為開發光纖的功能，除了訊號傳輸外，增加可能的供電功能，由另外一條光纖為系統供電，其機制是將外部電能轉為雷射，經過光纖傳輸後，在系統內部轉為電能為監測系統供電。

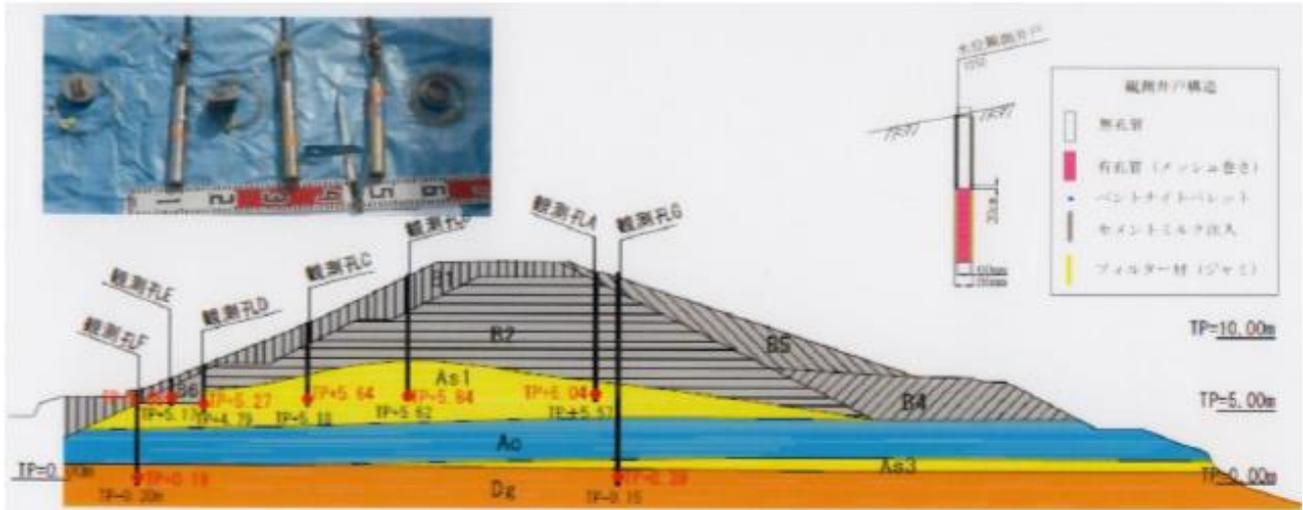


圖 6 ATK 光子感測系統應用案例 (資料來源: ATK 簡報)

#### (四)合成孔徑雷達干涉技術(InSAR)

Synthetic Aperture Radar (SAR)合成孔徑雷達屬於一種微波成像雷達，也是一種可以產生高解析度圖像的(航空)機載雷達或(太空)星載雷達。自合成孔徑雷達發明以來，它被廣泛的應用於遙測和地圖測繪。其優勢在於可以穿透雲層，且不受白天或夜晚的影響。InSAR 技術的基本量測原理係藉由衛星運行軌道的重複性及固定性，利用不同時間、相同區域所獲取之兩張 SAR 影像進行精準的幾何校正與干涉處理，藉以瞭解地表變形。對於放射性廢棄物處置場址調查研究而言，大範圍且連續觀察地表變形是相當重要的課題，ATK 過去使用了 InSAR 來調查日本九州大隅半島南方 60 公里的口永良部島(kuchino-erabu island)火山活動(圖 7)，此外 2016 年熊本市(Kumamoto)大地震對地表影響也透過 InSAR 技術進行調查(圖 8)。此外 ATK 也對於千葉縣地表沉陷進行了調查，並與年度水準調查結果進行比對，得到良好的成果(圖 9)。根據 ATK 團隊之說明，該技術所能辨識之地表變形，可信精度可達 1 公分。

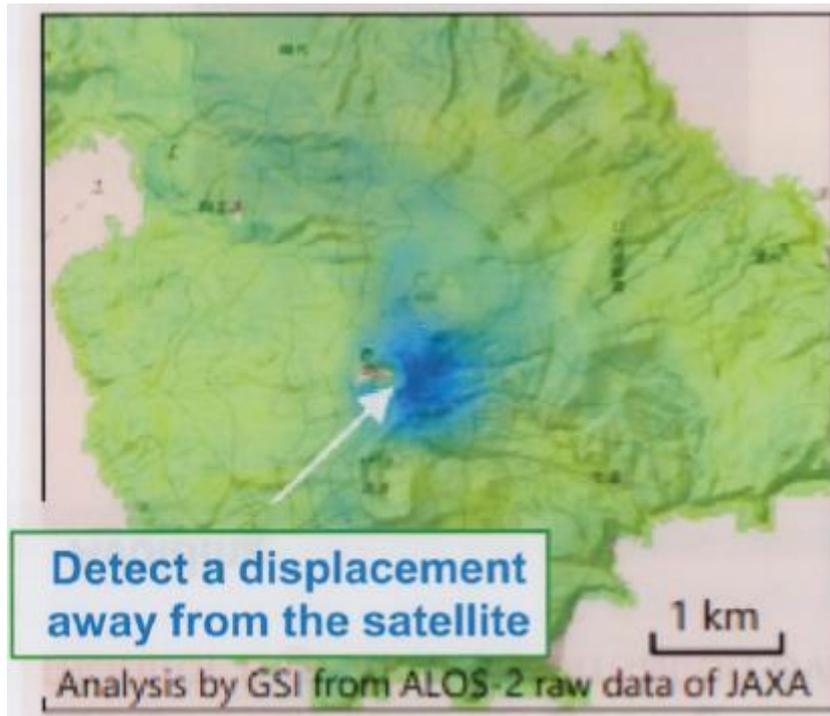


圖 7 口永良部島地表變形分布圖 (資料來源: ATK 簡報)

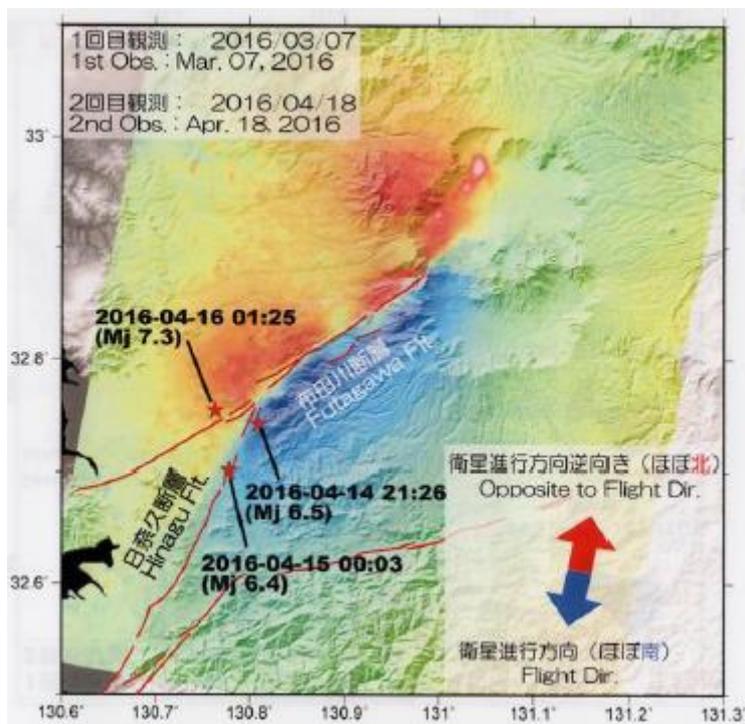


圖 8 熊本市地表變形分布圖 (資料來源: ATK 簡報)



圖 9 千葉縣地表變形分布圖 (資料來源: ATK 簡報)

## 五、 日本原子能研究開發機構(JAEA)

參訪團至東海村後，拜訪 JAEA 核能科學研究所，由除役和放射性管理總部放射性廢棄物處置中心負責低放部門的坂井章浩博士介紹 JAEA 負責核能產業技術發展，核燃料循環經費與核廢棄物最終處置技術的發展，後續實地參訪核能科學研究所內之廢棄物處理中心、低放廢棄物貯存設施及 L3 廢棄物處置場地。

在低放處置方面，坂井博士表示，於 JAEA 東海設施中處置的 L3 設施(JAEA-Tokai L3)，主要處置日本第一座電力示範反應爐(JPDR)除役所產生的極低放射性混凝土廢棄物(L3)，設施內處置活化混凝土約 1,310 噸以及表面污染混凝土約 360 噸，設施監管時間為 30 年，預計於 2025 年解除管制，目前正向日本核能管制單位(Nuclear Regulation Authority, NRA)申請解除主動監管，若通過的話將成為日本第一起解除主動監管的案例，現階段該區土地尚無後續使用規劃。

關於 JAEA 的運作模式，坂井博士解釋 JAEA 接受政府、教育及科學、經產省等單位補助計畫，獲得研發成果再由政府移交給各電廠及六所村運用；此外，技術發展過程中，參與人員互相交流，透過研討會釐清技術問題與解決辦法也是重要的環節。

此外，JAEA 估計 2048 年自身將產出約 97,000 立方公尺低放射性廢棄物，其

他來源則約有 27,000 立方公尺低放射性廢棄物。故已規劃以同一場址以混凝土窖型(位在地下水面之下)與壕溝型(位在地下水面之上)的共構處置設施，預估可容納 150,000 立方公尺低放射性廢棄物(約 750,000 個 55 加侖桶)，其中前者約處置容量達 44,000 立方公尺，後者約達 106,000 立方公尺，然目前尚未選定場址。

有鑑於此共構型處置設施的設計，處置了各種低放射性廢棄物，並依據場址環境做區隔，地下水面以上的壕溝型位於土壤層、最後也回填土壤；位於地下水面下的混凝土窖型則開挖至岩盤，利用岩盤本身低滲透性的特性作為天然障壁，上覆回填的土壤形成覆蓋層。基於兩種類型處置系統所在的環境條件，考量由雨水入滲經地下水流釋出，須進行核種傳輸模擬與安全處置功能評估，以確保符合法規限度，作為可共構設計的依據。

對於壕溝型處置的放射性廢棄物，初始規劃以太空包及混凝土箱，置放在壕溝內，主動監管期約 50 年，覆蓋層可分具防滲漏系統(含防水 HDPE 夾層)或僅覆蓋低滲透性土壤兩類。透過兩種類型覆蓋層採用不同導水係數，進行參數化設定，即可模擬雨水入滲、地下水滲入處置設施與廢棄物內核種傳輸行為與演化關係。

混凝土窖型處置的放射性廢棄物則以混凝土箱及 55 加侖桶，在岩層中開挖數公尺深，設計採用廢棄物罐體、混凝土、膨潤土與砂土混合層等構成多重工程障壁系統，頂部再回填並覆蓋低滲透性土壤，主動監管期約 300 至 400 年。透過參數化設定呈現混凝土窖型工程障壁導水特性與圍岩天然障壁提供的低導水特性，採用有限元素法，導入已建立的地質模型，計算地質模型中地下水流速及流向，在二維模擬計算下，核種透過地下水流動的傳輸路徑得以呈現，並進一步以工程障壁對核種傳輸的安全功能相關特性(如對流、擴散、吸附)，完成劑量評估。其中考慮三種滲流水途徑所造成的劑量，包含(1)經由處置窖、膨潤混合土、下層覆土、上層覆土再到劑量評估點、(2)經由處置窖、母岩、下層覆土、上層覆土再到劑量評估點、(3)經由處置窖、母岩、再到劑量評估點。

為了共構需求的安全評估，模擬工作可將壕溝型與混凝土窖型兩系統疊加，獲得總體劑量評估結果，用以說明在場址未定下，為滿足共構需求而設計之低放

處置之安全可行性。最後，坂井章浩博士表示，未來確定會在同一場址採共構方式處置 L2 及 L3 放射性廢棄物，並同時混合壕溝處置及混凝土窖處置系統，為了在場址未定前儲備處置設施工程障壁所需之技術，JAEA 將會持續根據假設處置場址的地質和自然環境，為工程障壁材料開發適當的安全功能。

## 六、 日本原子力發電公司(JAPC)

參訪團首先在東海電廠的人員帶領下，參觀除役中的東海第一核能電廠，該設施為採用二氧化碳為冷卻劑的石墨氣冷式反應器，目前尚無進行中的除役作業，爐心內燃料已於 2004~2005 年間取出，並運回英國進行再處理，因此第一發電廠內無用過核子燃料，放射性較高之廢棄物為爐心內部的石墨塊，因日本目前尚未選定高放最終處置場址，用過核子燃料經再處理後，產生的玻璃固化體將送回六所村再處理廠暫存。

東海第一核能電廠的熱交換器一共有 4 組，目前已經完成了其中 2 組的拆除作業，No.1 熱交換器採用人工直接拆除，由人工切割方式由底部開始逐步切割並移除，耗時大約 21 個月；No.2 熱交換器則採用遠端切割方式，耗時大約 32 個月才完成拆除作業。依電廠人員表示遠端拆除作業耗費大量的經費與時間，考量人員輻射安全部分，因 Co-60 經歷長時間的衰變，其活度已相對降低，且 No.1 人工拆除作業相較 No.2 遠端作業，整整縮短了 11 個月時間，故剩餘兩座熱交換器將規劃由人工方式拆除。

位於東海第二核能電廠內的用過核燃料乾式貯存設施，最早啟用的乾貯罐體歷經二十年，表面溫度最低，近期啟用的乾貯罐體溫度最高(約攝氏 45 度)。目前已裝有用過核燃料之罐體有 16 座，用以解決濕式中期貯存滿載問題，該型罐體(製造商:Toshiba)為金屬護箱，其中夾層裝填有樹脂及鉛，由於採用鉛屏蔽，罐體的表面劑量相當低(約為 2~3 $\mu$ Sv/hr)，但該型護箱僅有貯存功能，後續需要運輸時，需要將貯存罐傳送回燃料池內，將用過核燃料吊裝至具有運輸功能的護箱內，再經由專用運輸船運至青森縣陸奧市的用過核燃料中期貯存設施。

隨後，參訪團參觀東海電廠 L3 低放處置設施預定場址，該場址尚未施工，目前為一片空地，該設施於 2015 年提出申請，配合 2019 年及 2021 年兩次法規變更，進行申請書修訂，並於 2022 年提交符合法規修訂後的審查文件，2024 年第二次提交許可申請，目前尚在審查中，預計取得執照後一年即可完成設施興建工程。L3 處置設施興建於電廠內，但依據規定，仍需要取得周圍居民同意。東海電廠工作人員表示，設置計畫公開後並未遇到反對聲浪。

L3 處置設施主要處置東海第一核能電廠除役產生之 L3 低放廢棄物。由於第一發電廠是採用氣冷式反應器，蒸氣產生器中的熱交換管輻射劑量較一般輕水式反應器低，然而其劑量經過評估後，部分結構可能為 L2 等級，依照目前的處置規劃，為了降低蒸氣產生器的劑量，可能採用的方法包含物理除污方法(噴砂)，或是靜置處理，以利後續將於 L3 設施中進行處置。根據核種及其濃度，第一發電廠除役產生的低放廢棄物可分為 L1、L2 及 L3(表 1)。

表 1 東海第一核能電廠除役廢棄物規劃策略

低放廢棄物類別	預估重量 (公噸)	廢棄物來源	處置策略
L1	1,600 (約占廢棄物總重 0.8%)	控制棒、石墨塊等	因處置容器及處置設施尚未確定，故維持原樣暫不拆除，待整體電力協會有共識後一同處置。
L2	13,000 (約占廢棄物總重 6.6%)	反應器壓力容器等	由於目前 JNFL 於六所村僅處置電廠運營中產生之 L2 廢棄物，對於除役處置容器及處置設施尚未明朗，同 L1 處置策略，待整體電力協會有共識後一同處置。
L3	12,300 (約占廢棄物總重 6.3%)	熱交換器、建築物混凝土塊等	於電廠廠址內建造 L3 低放廢棄物處置設施，並對周邊居民舉辦說明會。

L1 低放廢棄物因其處置容器尚在開發中，且處置場址尚未選定，故採取暫不處理的策略；L2 低放廢棄物則因六所村的處置設施仍在興建中，無法承載電廠除役廢棄物，故亦暫不處理。L3 低放廢棄物則在廠內進行處置，其中金屬及混凝土碎塊裝入金屬鋼箱，大型混凝土塊則使用塑膠布（太空包）盛裝，已裝箱的 L3 廢棄物暫時存放在處置設施預定地旁的棚架臨時貯存區。

## 七、 台日雙邊技術交流研討會會議摘要

### (一)天然障壁模型之驗證

佐佐木泰副廠長為水文地質博士，他指出設施場址的科學調查資料與現地數據亦是與民眾溝通，獲取支持的重要工具。他在六所村完成的現地調查工作非常全面，包括 L2 近地表低放處置廠區的水文地質特性、分層、定年等調查結果，獲得安全評估所需的流場、流徑、流速，特別是入滲至設施內地下水流的參數化工作，以及由觀測井尺度到宏觀區域尺度的擴尺度概念模型的建構，提供完整的資料於全區地下水流場模擬分析。

針對 L1 試驗坑道，坑道開挖前三年亦進行深層特性調查，調查坑道在開挖擾動前的天然障壁背景資訊，再經由開挖擾動後瞭解地下水流場的入滲與出滲變化，透過開挖時量測的數據與模擬的開挖擾動模型比對，發現真實天然障壁條件更好，其地下水流速比模擬值更低，屬於有利於遲滯效應的研究結果。他認為早期進行地下水年代測量，此時所得之資料尚未受到人為擾動影響，屬於自然狀態，並可增加數值模型之控制點，若後續才執行，數據可能受到不必要的影響。

### (二)低放處置設施試驗場域規劃

佐佐木泰博士表示，JNFL 目前正在六所村 No.3 低放處置設施旁設立覆土試驗場域及覆土製造工廠，預計 2025 年開始執行覆土作業，現階段正在進行低透水性混合土的整備工作，針對混合土的比例、膨潤土品質、混合土混合均勻度、大規模製造流程管控等進行測試，對於覆蓋層試驗工作已有相關設計、規劃、現場施工等經驗。而 JAPC 野口裕史說明東海 L3 低放處置設施的試驗工作，僅有

地質及水文等調查是在電廠廠址內進行，其他試驗項目如覆土、覆蓋層、防水層等工程障壁，都是在其它地方完成。因此試驗場址和實際處置場址可能存在知識差距(knowledge gap)，如何將試驗場當地的環境參數應用於處置系統的設計環節中，以及如何進行合適性的分析與研究，TEPCO 有相關經驗，此類經驗適合台灣方面借鑑。

### (三)東海電廠 L3 處置設施之安全審查

東海電廠 L3 處置設施位於東海電廠廠址內，旁邊緊臨 JAEA 東海 L3 處置設施。該處置設施原本預計採用金屬容器(包含堆高機底座)、太空包、塑膠容器來盛裝相對應之廢棄物，但現據東海電廠人員表示，盛裝金屬及混凝土碎塊的容器將改為無堆高機底座的金屬容器。主要考量為擔心處置設施內採用的膨潤土混合土及防水薄膜，會受到原本金屬容器結構之擠壓而產生損壞，而失去原本的阻、防水功能，因此採用平底的金屬容器可避免處置設施損壞的風險。

依據 JAPC 顧問-苺込敏先生的概述，東海 L3 處置設施的結構設計為因應管制單位的要求，對於處置壕溝側邊、廢棄物之間及覆土層的設計，相比於先前的設計版本有諸多改良的地方，包含膨潤土混合土的使用範圍、簡化中間覆土層、增加防水薄膜及導水層等。關於日本 L3 處置設施的法規部分，第一個主要的改變發生於 2019 年，為了因應法規對覆土透水性的要求，因此將設施設計中部份含砂的設計，改成低透水性混合土；第二個主要的改變發生於 2021 年，要求在安全評估中增加 1000 年尺度的評估，包含公眾劑量影響等，但在設施設計及設備上並無顯著的改動，僅增加法規所要求之長期安全評估。東海電廠亦已於 2024 年提出第二次申請文件，目前該文件正在審查中。預期審查通過後，1 年內即可完成興建工作。

## 肆、心得與建議

### (一)現況分析與未來規劃

1. 本公司須處置境內所有的低放射性廢棄物，來源包含電廠運營、醫療院所、研究產生等涵蓋多種廢棄物類型及活度，與 JAEA 須處置研究用、醫療用及工業用產生之廢棄物的情境相似，且 JAEA 亦尚未選定場址，建議後續可持續關注 JAEA 處置設施的發展規劃及相關進展，並透過交流活動建立合作關係。
2. 日本對於近地表處置已有豐富經驗，其設施表層覆土(覆蓋層)與多重障壁的規劃與設計值得台灣參考，並根據本土情境進行適性分析與改良，以確保低放處置之安全性。
3. 東京電力設計公司(TEPCO)於東海 L3 處置場，已有如何將試驗的環境參數，應用於現地處置系統的設計環節中，以及如何進行合適性的分析與研究，此方面的經驗可供台灣借鑑。

### (二)選址及溝通策略

1. 依據日本之經驗，設施設置計畫公開後，反對聲浪常常並非來自設施所在鄉鎮，而是設施所在鄉鎮之鄰近鄉鎮。因此，處置設施選址溝通對象除設施所在鄉鎮外，設施所在鄉鎮之鄰近鄉鎮的溝通亦同樣重要。

### (三)新技術應用

1. 光纖檢測器：應用相關光纖檢測器，可監測處置設施的應力、應變、環境地下水位、地震、邊坡傾斜等資訊。該檢測器耐用性佳、敏感性強為極佳的處置設施監測設備。
2. 光纖供電系統：參考 ATK 的光纖供電系統，用於無法電纜接通的邊坡或地下設施監測，可實現低放處置設施的長期自動化監測系統，提升數據穩

定性並減少人工維護成本。

3. InSAR 技術：可應用於處置設施(表層覆土的邊坡)及其周圍環境的地表變形或滑動監測，對於地震頻發或是降雨量大的台灣而言，利用該技術可及早預警可能的環境變化，確保處置場的地質穩定性。