

出國報告（出國類別：開會）

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

張仁坤組長

劉芳棻專員

派赴國家/地區：日本

出國期間：112年8月21日~112年9月1日

報告日期：112年10月5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 23 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/ 張仁坤/ (02)2365-7210#12320

台灣電力公司/ 劉芳琴/ (02)2365-7210#12334

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：112.8.21~112.9.1

派赴國家/地區：日本

報告日期：112 年 10 月 5 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)

日本現於低放射性廢棄物處置設施的發展上，同時具有已封閉、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，且與台灣地理位置相近，地質條件相似，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)、原子力環境整備促進與資金管理中心(Radioactive Waste Management

Funding and Research Center, RWMC)、東京電力設計公司(Tokyo Electric Power Services Company Limited, TEPCO)、電力中央研究所(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)、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)等機構專家進行交流，並參觀 JNFL 六所村 L2 低放處置設施及 L1 低放處置試驗坑道、JAEA 研究設施及低放處置設施、JAPC 東海電廠 L3 低放處置設施預定地，作為國內低放處置技術未來精進方向之參考。

目錄

壹、 目的.....	1
貳、 過程.....	4
參、 工作內容.....	5
肆、 心得與建議.....	22

圖目錄

圖 3-1	日本放射性廢棄物分類以及處置方式	5
圖 3.1-1	六所村低放射性廢棄物處置設施配置圖	7
圖 3.1-2	六所村低放射性廢棄物 3 號處置設施配置圖	7
圖 3.1-3	六所村低放射性廢棄物處置設施布置圖	9
圖 3.1-4	六所村 L1 全尺寸試驗處置窖施工前(左)和施工後(右).....	10
圖 3.1-5	日本地體構造與塊體地質	11
圖 3.2-1	JAEA 極低放射性廢棄物處置設施示意圖.....	12
圖 3.2-2	東海電廠 L3 預定處置設施位置圖	13
圖 3.2-3	東海電廠 L3 預定處置設施場址配置圖.....	14
圖 3.2-4	東海電廠 L3 預定處置設施示意圖	14
圖 3.4-1	JAEA 低放射性廢棄物貯存設施	17
圖 3.5-1	日本核電廠除役規劃期程圖	18
圖 3.5-2	六所村 1 號低放處置設施布置示意圖	19
圖 3.5-3	L1 次地表處置試驗坑道布置示意圖	20

壹、 目的

我國從事核能發電事業已有 40 年的歷史，隨著核能電廠的運轉執照期限到期，核能電廠陸續邁入「除役」階段，故需迫切規劃低放射性廢棄物處置。參考國際低放處置經驗，低放處置概念依處置深度不同大致可區分為近地表與次地表兩大類。日本現於低放處置設施的發展上，同時具有已封閉、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，且與台灣地理位置相近，地質條件相似，故進行本次「台日雙邊低放最終處置技術交流會議」與日本相關領域機構及專家進行交流，並參觀 JNFL 六所村 L2 低放處置設施及 L1 低放處置試驗坑道、JAEA 研究設施及低放處置設施、JAPC 東海電廠 L3 低放處置設施預定地。本次交流單位包含：

一、 日本原燃公司(JNFL)

六所村低放處置設施為日本原燃公司(JNFL)負責營運，目前具有 3 座淺地表低放射性廢棄物處置設施，主要接收核能電廠運轉產生之 L2 廢棄物，1 號處置設施在 1992 年開始營運，2 號處置設施於 2000 年開始營運 2 座低放射性廢棄物處置設施之設計容量共可處置約 400,000 桶 55 加侖桶廢棄物，統計至 2023 年 8 月，已處置約有 346,000 桶 55 加侖桶廢棄物。考量處置容量已逐漸趨近額滿，因此 JNFL 於 2018 年 8 月提出增設 3 號處置設施之業務變更許可，並於 2021 年 7 月 21 日獲得許可，其設計容量為 20,000 m³，亦採用淺地表處置方式。

二、 原子力環境整備促進・資金管理中心(RWMC)

RWMC 成立於 1976 年，當時主要任務為進行低放廢棄物陸地上及海洋處置的研究；於 1980 年代開始近地表處置設計；於 1985 年，針對六所村 1 號處置設施展開研究；於 1990 年，針對六所村 2 號處置設施展開處置技術研究，因應當地地形環境與條件，成功應用研究成果於六所村低放處置設施中，至 1992 年開始運營迄今超過 30 年；於 2000 年，增加高放射性廢棄物處置研究，並於同年開始放射性廢棄物處置基金的管理工作；於 2005 年，增加用過核子燃料處理相關的基金管理工作；於 2008 年，展開超鈾元素(Transuranic waste, TRU)的最終處置工作。

三、 東京電力設計公司(TEPCO)

東京電力設計公司(TEPCO)成立於 1960 年 12 月，為東京電力公司的子公司，是日本首屈一指的電力綜合工程顧問公司，與核能產業相關的部門包含核能本部、建築本部、土木本部以及地下空間開發本部，與放射性廢棄物相關的經驗可分為(1)用過核子燃料中期暫時貯存設施，實際經驗包含地質調查、地質安定性評估、貯存設施設計、輔助設施設計和耐震安全評估等；以及(2)低放廢棄物處置設施，實際經驗涵蓋地質調查、地質安定性評估、地下坑道設施設計、工程障壁評估和自然災害影響評估等。

四、 電力中央研究所(CRIEPI)

CRIEPI 成立於 1951 年，由 9 家電力公司出資成立。研究領域包含核能發電、水力發電、火力發電、再生能源、輸配電、客戶服務、環境保護與評估、事業管理，以及跨領域合作，並設有 6 個研究中心。

五、 日本原子能研究開發機構(JAEA)

JAEA 成立於 2005 年 10 月，是日本負責原子能相關研究和技術開發的國立研究開發法人，由日本原子能研究所 (JAERI) 和核燃料循環發展組織 (JNC) 兩個半政府組織合併成立。JAEA 擁有位於茨城縣東海村的多種核能設施，其中包含已封閉的低放近地表處置設施，為日本重要的核能研究機構。

六、 日本原子能電力公司(JAPC)

日本原子能電力公司(JAPC)創立於 1957 年，主要從事核能發電事業，共營運 2 座核能發電廠，6 部機組，分別為東海(Tokai)2 部機組與敦賀(Tsuruga)4 部機組，其中東海核能電廠 1 號機更是日本首座運轉的商用核能反應器(氣冷式反應器)，在 1966 年正式運轉，隨即 1970 年在敦賀核能電廠 1 號設施啟用日本首座輕水式反應器，因此 JAPC 在日本核能事業發展具有領先的技術。東海電廠 1 號機運轉達 32 年，在 1998 年 3 月 31 日運轉執照到期後，JAPC 決定將此機組除役，並在 2001 年 12 月 4 日展開除役工程，成為日本首座除役的商用核能發電機組，並於東海電廠廠區內規劃建造 L3 近地表處置場。

七、 淺野大成基礎工程有限公司(ATK)

原為大成基礎工程有限公司(Taiseikiso Sekkei Co., Ltd.)，成立於 1962 年，於 2011 年與淺野公司合併(Asano Kenko Co., Ltd.)，更名為淺野大成基礎工程有限公司(ATK)。總部設於東京，日本境內有 8 間分部及 1 處技術研究所，以及三協建設、鈴木建築設計、

Tonokuchi Weir 小型水電與大分地熱開發子公司。具備土壤、水文及建築方面的專業能力，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。

貳、 過程

自 112 年 8 月 21 日出發，迄 9 月 1 日返國(共計 12 日)，停留日本三澤、東京與水戶，行程如下：

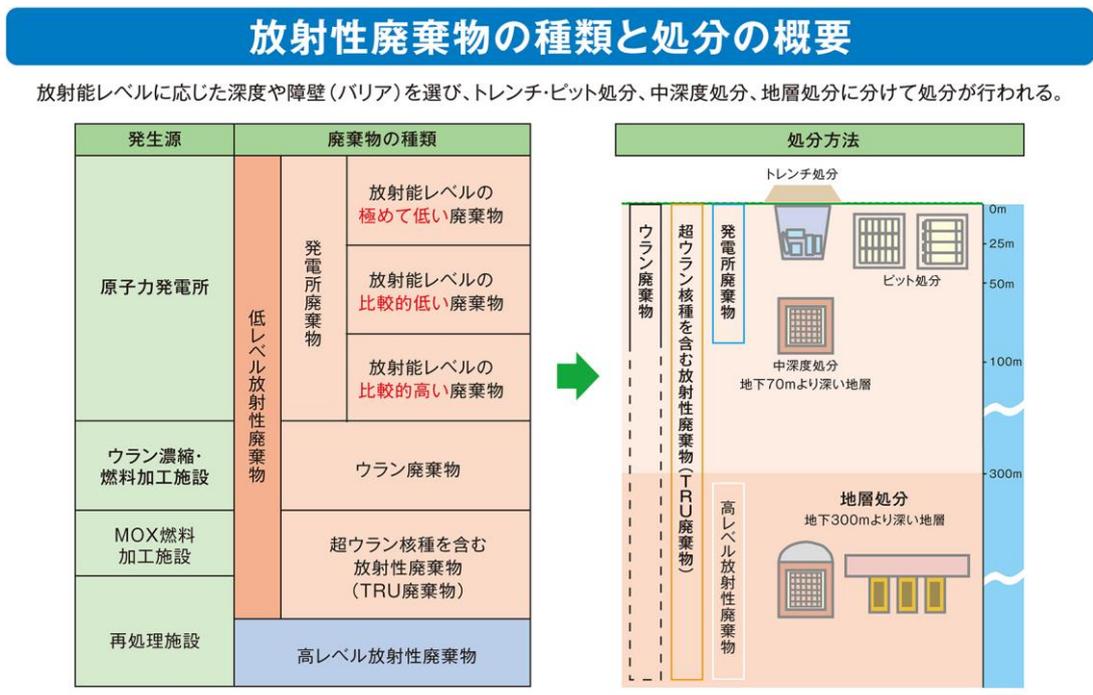
時間	地點	工作內容
8 月 21 日(一)	台北至三澤	去程
8 月 22 日(二)	三澤	拜訪 JNFL，參訪六所村低放處置設施
8 月 23 日(三)	三澤、東京	1.與 JNFL 進行技術交流 2.前往東京
8 月 24 日(四)	東京	1.拜訪 RWMC 進行技術交流會議 2.拜訪 TEPCO 進行技術交流會議
8 月 25 日(五)	東京	參訪 CRIEPI 土木工程研究室，並進行技術交流
8 月 26 日(六)	東京	例假日，整理會議資料
8 月 27 日(日)	東京	例假日，整理會議資料
8 月 28 日(一)	東京、水戶	1.拜訪 JAEA 進行技術交流會議 2.前往水戶參訪 JAEA 研究設施及低放處置設施
8 月 29 日(二)	水戶、東京	1.參訪 JAPC 東海電廠與除役設施 2.返回東京
8 月 30 日(三)	東京	於 JSCE 進行技術交流會
8 月 31 日(四)	東京	拜訪 ATK 進行技術交流
9 月 1 日(五)	東京至台北	返程

參、 工作内容

日本對於放射性廢棄物是依照其輻射水平和性質進行分類，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)、廢棄鈾(Uranium Waste)，除高放射性廢棄物以外之廢棄物種類及處置方式，如圖 3- 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. 活度相對較高之放射性廢棄物(Relatively High Waste, L1)
2. 活度相對較低之放射性廢棄物(Relatively Low Waste, L2)
3. 極低之放射性廢棄物(Extremely Low Waste, L3)

根據目前日本規劃，L2 放射性廢棄物處置由 JNFL 負責，L3 放射性廢棄物則由各電廠自行處置，至於 L1 放射性廢棄物則尚未確定；關於處置設施場址，L1 放射性廢棄物處置設施場址仍在研擬中，位於六所村之低放廢棄物處理中心即為 L2 最終處置設施，L3 放射性廢棄物處置設施場址，目前已有位於東海電廠內的 JPAC-Tokai L3 低放廢棄物處置設施(預定地，尚未施工)，以及位於 JAEA 東海廠址內已封閉的 JAEA-Tokai L3 低放廢棄物處置設施。



8-1-5

出典：資源エネルギー庁ホームページより作成

原子力・エネルギー図面集

圖 3- 1 日本放射性廢棄物分類以及處置方式

一、 六所村 JNFL 低放處置設施

日本原燃公司(JNFL)是一間總部位於日本青森縣的核燃料公司，負責業務內容包含(1) 鈾濃縮、(2) 用過核子燃料再處理、(3)與(2)相關之回收燃料材料和廢棄物貯存、(4) 低放廢棄物最終處置、(5) MOX 核燃料生產、(6)鈾、高放射性廢棄物及低放廢棄物之運輸，其主要使命為在日本建立核燃料循環基礎設施。目前股東組成包含日本 9 間電力公司（中部 Chubu、中國 Chugoku、北海道 Hokkaido、北陸 Hokuriku、關西 Kansai、九州 Kyushu、四國 Shikoku、東北 Tohoku、東京 Tokyo）及日本原子力發電(Japan Atomic Power Corporation, JAPC)等 74 間公司；截至 2023 年，員工人數約為 3075 人，其中 1982 人任職於日本青森縣的設施中。

JNFL 公司歷史可追溯至 1980 年代，於 1980 年日本核燃料服務有限公司(日本原燃サービス株式会社)成立，於 1984 年日本電力公司聯合會(FEPC)主席提出將青森縣閒置的工業區轉作核能循環產業用途，同年 12 月於青森縣舉行的特別會議上進行了回顧，青森縣政府同意將閒置的工業區轉為核燃料工業發展用，包括再處理廠、核燃料濃縮廠、中期貯存場、低放處置場等規劃；1985 年 4 月締結了「核燃料循環設施選址合作標準協議」於 1985 年日本核燃料工業有限公司(日本原燃産業株式会社)成立，選址於青森縣六所村興建核燃料循環設施並經營相關業務，鈾濃縮業務之許可證申請及核發許可證，分別於 1987 年 5 月及 1988 年 8 月完成，並於同年 10 月開始興建鈾濃縮相關設施；低放廢棄物最終處置業務之許可證申請及核發許可證，分別於 1988 年 4 月及 1990 年 11 月完成，並於同年 11 月開始興建廢棄物處置設施；高放射性廢棄物管理業務之許可證申請及核發許可證分別於 1989 年 3 月及 1992 年 4 月完成，並於同年 5 月開始興建廢棄物管理設施，主要對用過核子燃料進行再處理；於 1992 年，由日本核燃料服務有限公司與日本核燃料工業有限公司合併成立日本原燃公司，並於同年開始運營低放廢棄物處置中心。

六所村低放處置設施為 JNFL 負責營運，目前具有 3 座淺地表低放射性廢棄物處置設施，主要接收核能電廠運轉產生之 L2 廢棄物，1 號處置設施在 1992 年開始營運，2 號處置設施於 2000 年開始營運，3 號處置設施正在興建中，處置設施之配置如圖 3.1- 2 所示。1 號及 2 號低放射性廢棄物處置設施之設計容量共可處置約 400,000 桶 55 加侖桶廢棄物，統計至 2023 年 8 月，已處置約有 346,000 桶 55 加侖桶廢棄物。考量處置容量已逐漸趨近額滿，因此 JNFL 於 2018 年 8 月提出增設 3 號處置設施之業務變更許可，並於 2021 年 7 月 21 日獲得許可，其設

計容量為 20,000 m³，亦採用淺地表處置方式。

處置設施所處置之廢棄物分為 3 種類型，第 1 種廢棄物處置於 1 號處置設施，主要為核能電廠運轉產生之液態廢棄物與廢樹脂，透過與水泥、瀝青或塑料均勻固化後，裝進 55 加侖桶。第 2 與第 3 種廢棄物皆為固化廢棄物，第 2 種廢棄物如金屬、塑膠和濾器等，經適度的分類與減容後，在 55 加侖桶內用砂漿固化，第 3 種廢棄物為熔融固化廢棄物，經減容後，在 55 加侖桶內用砂漿固化。



資料來源：修改自 JNFL 提供資料

圖 3.1-1 六所村低放射性廢棄物處置設施配置圖



資料來源：修改自 JNFL 提供資料

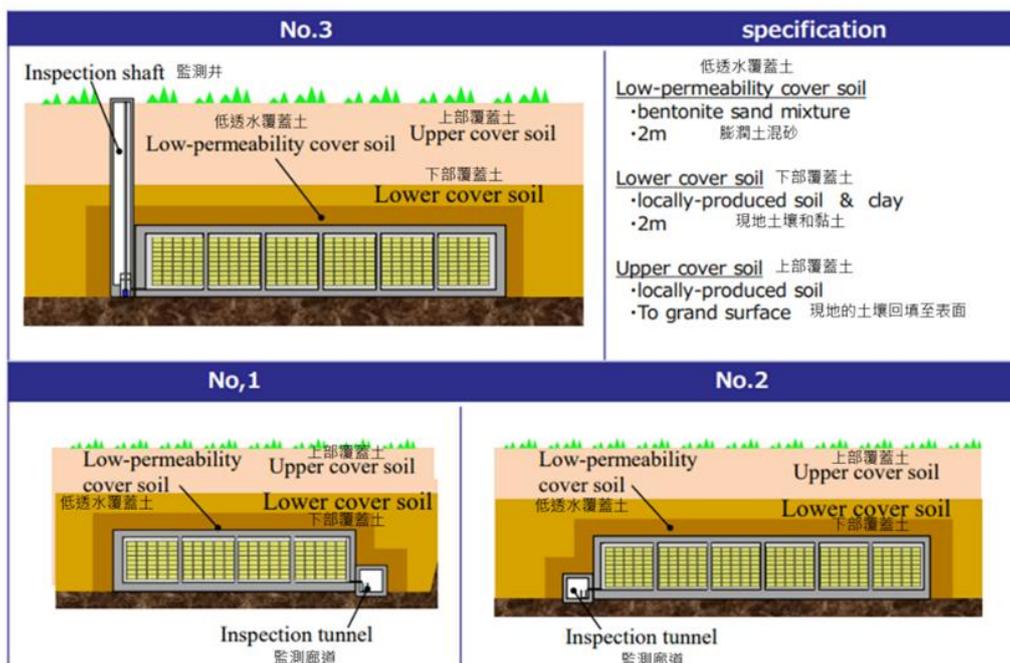
圖 3.1-2 六所村低放射性廢棄物 3 號處置設施配置圖

(一) 六所村 L2 近地表低放處置設施設計

六所村低放處置設施之障壁系統設計如圖 3.1-3，1 號處置設施的處置窖內分為數個小處置單元(cell)用於處置廢棄物桶，而當廢棄物桶放滿一個小處置單元時將進行水泥回填。檢查廊道(inspection tunnel)為排水系統與檢查設備位置處，可用於監測排出之水是否具有放射性核種。處置窖外以回填膨潤土-砂混合物，作為阻水之功能。

2 號處置設施的處置窖工程障壁功能與 1 號處置設施相同，使用鋼筋混凝土建造處置窖，以水泥回填小處置單元內之廢棄物桶間空隙，排水系統與檢查廊道作為取水樣監測，膨潤土-砂混合回填作為阻水功能。

3 號處置設施的處置窖同樣以鋼筋混凝土建造處置窖。和 1 號與 2 號處置設施相比較，其顯著差異為，其排水與水樣監測系統不使用監測廊道之形式，改以監測井形式進行蒐集監測。



資料來源：修改自 JNFL

圖 3.1- 3 六所村低放射性廢棄物處置設施布置圖

(二) L1 次地表處置試驗坑道

日本對於 L1 廢棄物採用次地表處置方式，為了研究 L1 廢棄物之規劃，在六所村設置 1 座全尺度次地表處置試驗坑道，該設施僅為實驗用途，於 2003 年開始挖掘工程，建造全尺寸坑道模型以及一個處置窖全尺寸模型，具有 3 條監測坑道與 1 條主要測試坑道；於 2005 年開始試驗坑道的實驗，主要由 RWMC 進行，並埋設多樣感應裝置監測及蒐集坑道內各項長期數據；於 2014 年完成全尺寸模型試驗，開始工程障壁之長期監測與試驗研究。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(如圖 3.1- 4)，藉以了解處置窖實務施工方式、膨潤土回脹特性、排水監測，以及混凝土在該環境之變化等，作為未來 L1 廢棄物處置之工程規劃與設計參考依據。



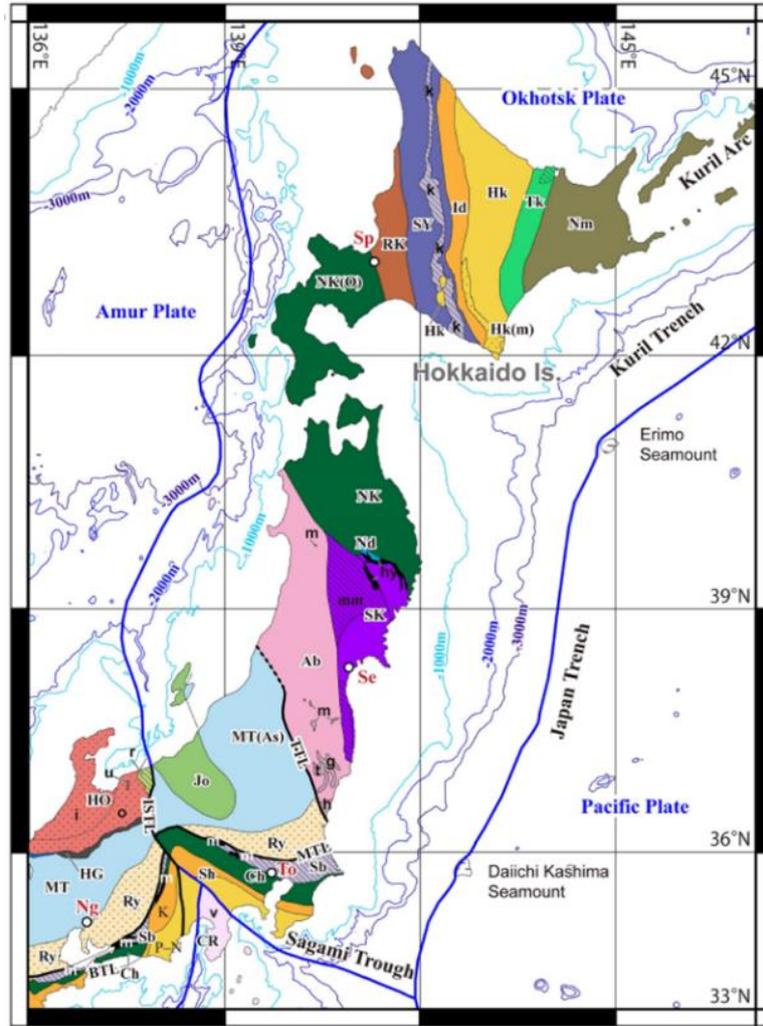
資料來源：來自 JNFL 提供資料

圖 3.1-4 六所村 L1 全尺寸試驗處置窖施工前(左)和施工後(右)

(三) 六所村地理與地形

全區處置環境均屬於板塊隱沒帶邊界的日本(圖 3.1- 5)，其東北區青森縣延至北海道西南，屬於侏羅紀隱沒帶的增積岩體，屬於長期穩定的地塊，青森縣東岸出露的晚第三紀沉積層(如鷹架層)則是古太平洋隱沒作用在西方形成的火山噴發，在海底堆積形成的含火山灰、浮石的沉積層，約 5 百萬年前受擠壓隆升，輕微受構造活動影響而岩層傾斜，此後即維持長期穩定至今(第四紀堆積層為水平堆積物構造切過)，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。

日本青森縣上北郡六所村處置環境因同屬於板塊隱沒帶邊界，與台灣部分地區地質環境相似，其位於日本本州青森縣東北部臨太平洋岸的丘陵地形區，依谷地而建，六所村處置場址在海拔 30-60 m 高的海階堆積層上，其基盤屬於第三紀沈積岩層，上覆數公尺厚的第四紀沖積層。



資料來源：Wallis (2020)

圖 3.1-5 日本地體構造與塊體地質

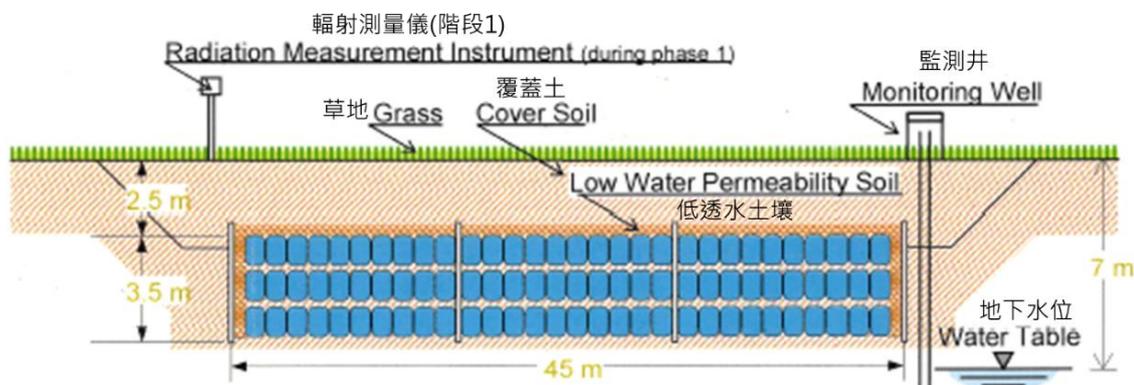
二、 東海村 L3 低放處置設施

(一) JAEA L3 極低混凝土廢棄物處置區

JAEA 擁有位於茨城縣東海村的多種核能設施，其中包含已封閉的低放近地表處置設施極低混凝土廢棄物處置區為處置實驗用反應器除役產生的極低(Very Low-Level, VLL)混凝土廢棄物，約產 1,670 噸廢棄物，其中活化混凝土約佔 1,310 噸，表面污染混凝土約為 360 噸，處置設施布置圖如圖 3.2-1 所示。

為確保環境安全與廢棄物有效管理，此處置設施封閉後分為 2 階段，於階段 1(1995 年至 1997 年)建立監測區與控制區，監測其地下水位和地下水的放射性濃度，持續至廢棄

物完全被土壤覆蓋 1 年為止。於階段 2(1997 年至 2025 年)制定保護區，限制區域內特定人類行為(如挖掘、耕作、生活)，在必要情況下，測量環境地下水/土壤的放射性濃度。



資料來源：修改自 JAEA 提供資料

圖 3.2- 1 JAEA 極低放射性廢棄物處置設施示意圖

(二) JAEA 新 L3 近地表處置設施設計概念

關於 JAEA 設計中的 L3 低放處置設施，由於需符合原子能管制委員會(NRA)2013 年起頒布的規定，於廢棄物上方採用土坡型態之覆蓋層設計，並採用膨潤土混合土作為工程障壁的一環；在地下水位方面，採取策略分為

(1)與地下水位保持一定距離，廢棄物處置下方無設計低透水層，該型處置設施用於處置混凝土塊及金屬廢棄物，混凝土塊預計裝入大型塑料包裝中(太空包)，金屬廢棄物及混凝土碎屑則預計以金屬箱型容器盛裝。

(2)若考量地下水位可能觸及處置設施下方，採取外層防水內層排水的措施因應，該型處置設施於前項不同之處在於增加防水層及滲漏水蒐集/排水設施，用於處置液體、污泥、灰燼固化後之固體廢棄物，以 55 加侖桶盛裝；設施週圍以鋪設防水層，防止地表水及地下水滲透，處置設施底部鋪設防護層並設置滲濾液收集和排水系統，用以監控可能的滲漏及核種遷移情況。

(三) JPAC 東海電廠 L3 低放處置預定地

東海電廠 L3 處置設施預定地，位於茨城縣那珂郡東海村東岸的沙丘地形，選址地質環境類似六所村平緩丘陵與海岸地形，屬於海階平緩堆積，地下水面位於地表下約 7 m。距離海岸線約 400 m，位於東海第二電廠西北方約 500 m (圖 3.2- 2)，L3 場址地表約海平

面+8 m，處置設施向下開挖 4 m (圖 3.2- 3)，設施底部約海平面+4 m，地下水調查顯示地下水位約介於海平面+1.4~+2.6 m 之間，因此，處置設施位於地下水面上方有近 2 m 的差距；上層覆土層在設計上考慮低透水性設計，地面凸起高度約為 2 m 其中包含 1 m 厚的膨潤土混合土層，如示意圖圖 3.2- 4 所示。



圖 3.2- 2 東海電廠 L3 預定處置設施位置圖

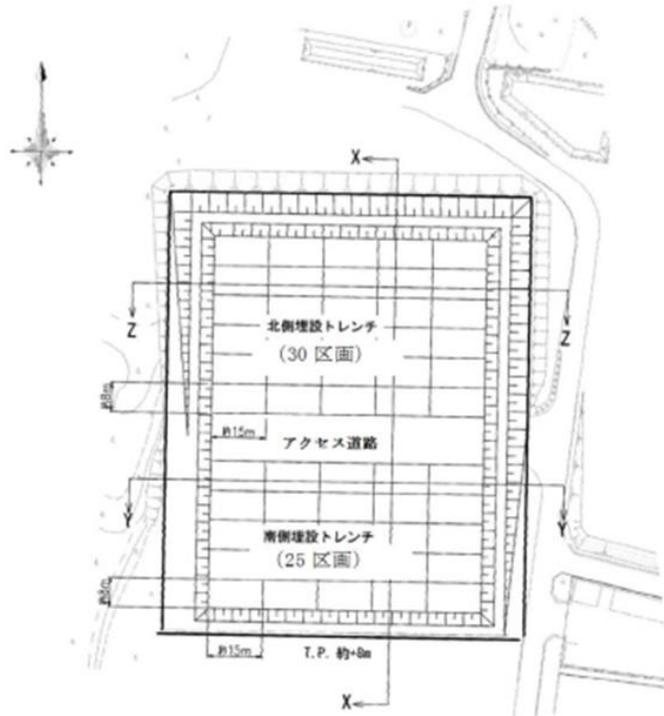


圖 3.2- 3 東海電廠 L3 預定處置設施場址配置圖

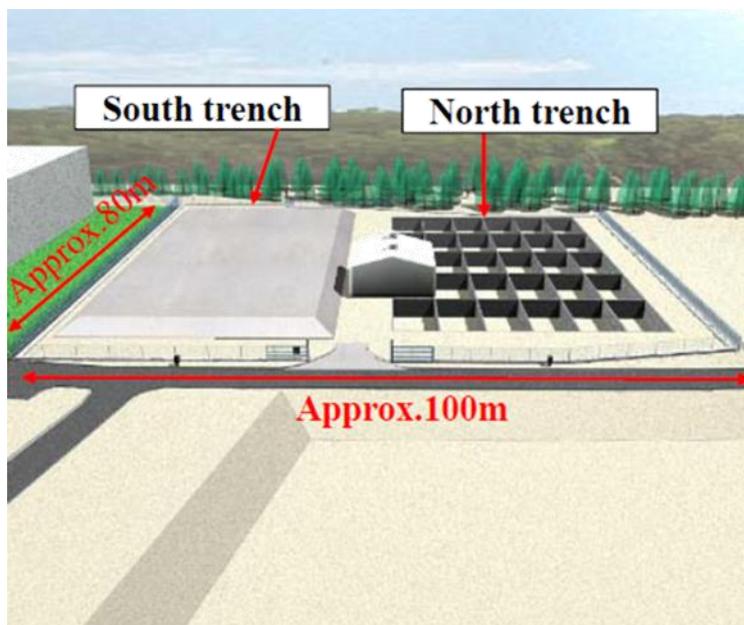


圖 3.2- 4 東海電廠 L3 預定處置設施示意圖

三、 CRIEPI 實驗室參觀

CRIEPI 共有 6 個研究中心，此次參訪為位在我孫子市的土木工程研究實驗室，主要研究天然災害之電廠防護技術、電廠維持技術，以及放射性廢棄物處置技術。

本次在土木工程研究實驗室參訪了高加速度震動疲勞試驗實驗室、CT 斷層模擬實驗室、地下水年代測定實驗室、膨潤土實驗室，以及大尺度海嘯物理模擬實驗室，各實驗室概述如下：

(一) 高加速度震動疲勞試驗實驗室

地震對於放射性廢棄物處置設施的影響，是非常重要的課題，當地震引起的地表加速度，對於設施會隨著設施高度而逐漸放大，CRIEPI 試驗室透過一系列不同加速度試驗，可以了解處置設施元件承受振動能力範圍。

(二) 電腦斷層模擬實驗室

電腦斷層模擬實驗室為利用醫療用的電腦斷層掃描儀(CT)，來進行研究，電腦斷層掃描為結合 X 光與電腦科技的診斷工具，以 X 光輻射源由不同角度照射物體，並利用電腦將資料組合成物體橫截面影像，或再進一步重組成精細的 3D 立體影像。透過 CT 裝置可以完整得到沙箱內 3 維斷層發展過程，包含了斷層大小、長度及位態，並且可以得到掃描區域密度變化，來推估地層孔隙改變等特性。

(三) 地下水年代測定實驗室

地下水定年可以提供放射性廢棄物處置設施規劃時，可以了解處置區域地下水遷移時間資訊，為此 CRIEPI 也發展了地下水定年試驗設備，使用的分析方法包括碳 14 定年法及氬定年法。

(四) 膨潤土實驗室

膨潤土實驗室主要在研究膨潤土相關之物理及化學特性，包含了在不同環境下的回脹特性、透水性、吸附特性及孔隙率等，包含了淡水環境、海水環境及處置場址地下水環境，藉由透過一系列的試驗可以完整了解膨潤土的性質與參數。

(五) 大尺度海嘯物理模擬實驗室

CRIEPI 建立了大尺度海嘯物理模擬實驗室，透過大尺度海嘯試驗研究海嘯對於混凝土牆與結構物衝擊力研究，透過大尺度物理試驗量測到之成果，可以回饋到數值模擬分析成果，來進行相互比對驗證。

四、 JAEA 實驗設施參觀

(一) 膨潤土壓密試驗

在過去膨潤土研究中發現，當膨潤土在壓密過程中會有 2 階段的壓密行為，第 1 階段大概在 10 天左右便完成，第 2 階段目前僅試驗觀測到 1 年。因此對於當壓密持續更長時間下，膨潤土會如何反應是本試驗的探討重點。

(二) 腐蝕(Corrosion)試驗

JAEA 為了瞭解碳鋼(Carbon steel)材質的處置罐長期被膨潤土包覆情況下，2 個材料介面間的化學行為，因此設計一系列試驗，利用膨潤土包覆碳鋼片，在不同環境條件下進行試驗，實驗結果顯示，碳鋼表面會受到腐蝕影響，而產生大小以及深淺不一的腐蝕痕跡。

(三) 吸附以及擴散試驗

本試驗主要探討膨潤土及母岩在還原狀態環境狀況，配合不同地下水水質，探討膨潤土以及母岩吸附及擴散性質。

(四) 電腦斷層掃描

JAEA 同樣與 CRIEPI 研究所均利用醫療用的電腦斷層掃描儀來進行研究，透過 CT 的掃描能力來研究膨潤土或母岩的內部構造。

(五) 廢棄物處理

JAEA 建置之超高壓縮機可將 55 加侖桶壓縮到原本體積的 1/3~1/4 左右，最後在以 3 個 1 組或 4 個 1 組放入新 55 加侖桶內進行封裝。

除了壓縮減容處理之外，對於廢棄物也會採高溫熔融處理，熔爐將廢棄物熔融後，再裝入特定容器待冷卻後，再將冷卻固化的廢棄物放置入 55 加侖桶。

(六) 研究用反應爐

Japan Research Reactor No.4(以下簡稱 JRR-4)為水池型反應爐，自 1965 年 1 月 JRR-4 達到初始臨界點後開始運轉，直到 2010 年 12 月，一共持續運轉約 45 年。在 2015 年 JRR-4 除役計畫提出申請，並且在 2017 年被許可，目前 JRR-4 已經開始除役工作，主要完成項目包含反應爐永久關閉、拆除實驗準備室及燃料棒退出，後續將持續進行除役工作，預計 2036 年可完成大多數拆除作業。在除役過程中預估可能產生之低放射性廢棄物量為 L1 類約 0.002 噸，L2 類約 3 噸，L3 類約 1,400 噸。

(七) 貯存設施

目前廢棄物貯存設施設計有 2 類型，1 類為混凝土建築物，另外為窖型貯存設施。廢棄物貯存設施(混凝土建築物)目前一共有 2 棟，分別為廢棄物貯存設施 I 以及廢棄物貯存設施 II，以 55 加侖桶為單位，容量分別為 18,000 桶以及 23,000 桶，目前約已放置 17,885 桶及 22,681 桶。而廢棄物貯存設施(窖型)目前容量約為 17,000 桶，已存放 14,612 桶。



資料來源：來自 JAEA 網站

圖 3.4- 1 JAEA 低放射性廢棄物貯存設施

五、 討論議題

(一) 低放射性廢棄物處置長期安全策略

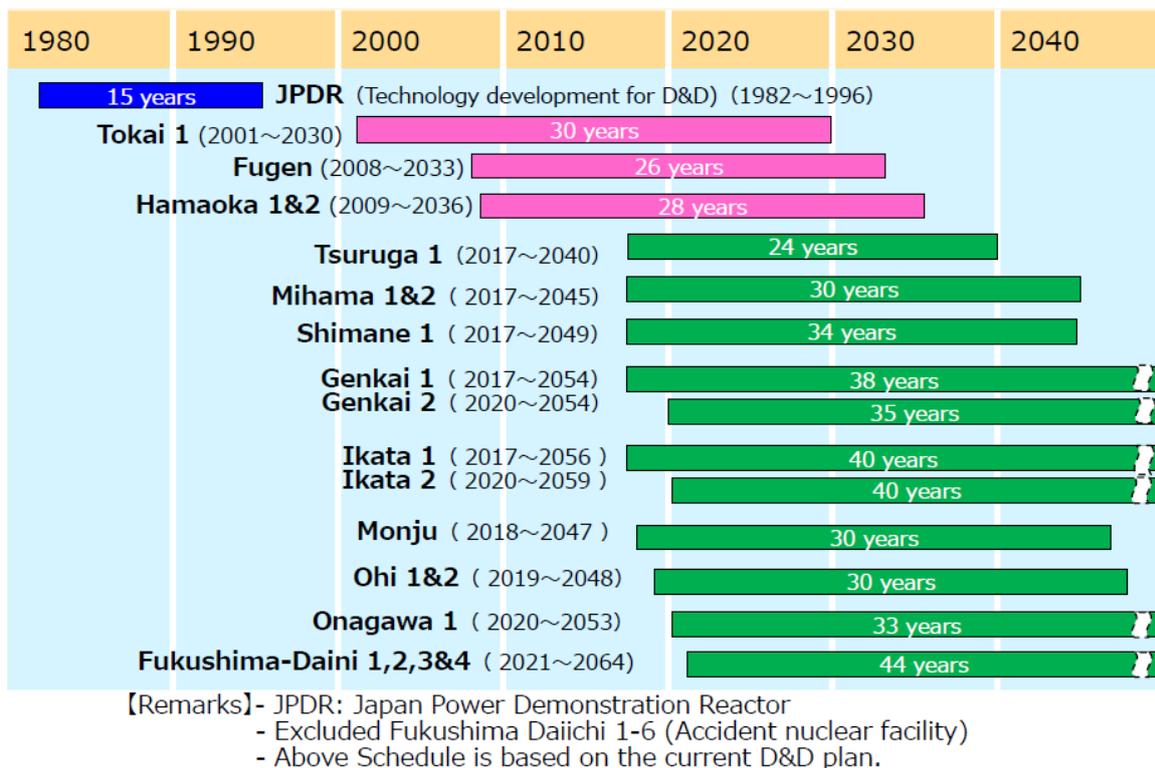
日本 JNFL 低放廢棄物處置專家佐佐木博士提出日本目前對於 L1、L2 以及 L3 廢棄物在運轉及封閉後可能的情節，包含了「較少可能情節(Less-likely scenario)」、「可能情節(Likely scenario)」以及「人類入侵情節(Human intrusion scenario)」等，情節考量範圍主要是在未來地質環境、處置設施狀態及人類居住環境改變等影響。「較少可能情節」主要是評估在合理的情況下最大可能接受劑量，因此在情節設定上均採保守條件。「可能情節」則是預期可能接受平均的劑量值情況下進行情節的設定。「人類入侵情節」則是主要為特殊人類活動造成接收到劑量值，因此情節會假設一小部分可能發生情況，以避免過度保守假設。

(二) 東海電廠極低放射性廢棄物(L3)處置之除役現況

日本目前商轉中核電機組有 10 座，預計重啟核電機組共有 7 座，而在除役階段一共有 20 組機組。2001 年 12 月開始進行除役工作的東海 1 號機組，是日本第 1 個商轉核電機組進行除役，接續 JAEA Fgen 也在 2008 年 2 月開始進行除役，中部電力公司的 Hamaoka

1 號以及 2 號機組也在 2009 年 11 月開始除役工作，在 2011 年福島事件之後，2015 年一共有 5 部機組停止運轉，而 Ikata 1 號機則是在 2016 年停止運轉，接著陸續有 10 部機組決定要停止運轉，進入除役階段。

目前東海電廠預計將 L3 廢棄物在電廠內處置，為了申請建照許可，因此對於地質以及地下水環境進行深入瞭解，並於 2015 年 7 月提送基於安全協議的建照計畫至茨城縣東海村，並提送申請第 2 類廢物掩埋設施許可證至原子力規制委員會(NRA)。



資料來源：來自 JAPC 提供資料

圖 3.5- 1 日本核電廠除役規劃期程圖

(三) 以離心機試驗發展地質處置工程障壁與近場之長期穩定性評估技術

CRIEPI 專家提出離心機模型試驗是屬於物理模式試驗，一般常被使用於研究地質工程問題，例如土壤壓密、水壩、地下坑道、邊坡及土工基礎穩定性等研究。

此外，一般物理模型試驗都必須討論相似率來說明模型試驗與實際尺度的相關性，以離心機試驗為例，離心機試驗可以將 1/N 縮比的模型，加速到 N 倍重力加速度(G)的環境下，來模擬實際尺度的現象，在這個情況下 1/N 縮比模型應力-應變的特性會與實際尺度模型一致，但是在時間尺度上會縮短為 1/N²。因此在離心機模型試驗中，演化的時間是被

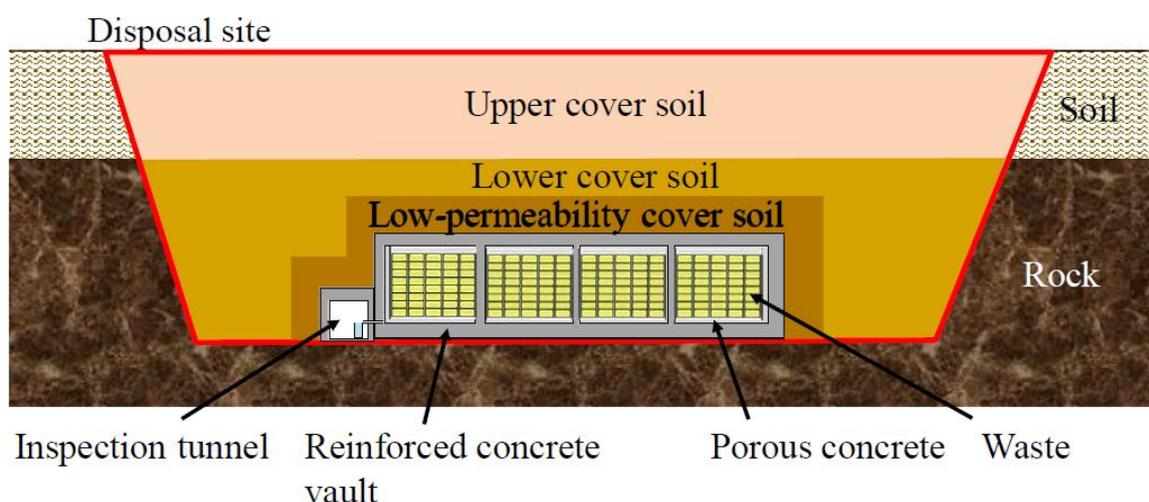
加速的，而地下水流速同樣也變為 N 倍，對於長期試驗而言使用離心機可以加速試驗過程。

目前 CRIEPI 離心機試驗將坑道以及回填材納入試驗中，試驗目的將探討處置坑道中的緩衝材料與上方的坑道以及回填材料之間的相互影響。

(四) 日本低放射性廢棄物(L2&L1)處置當前研究與發展(R&D)趨勢

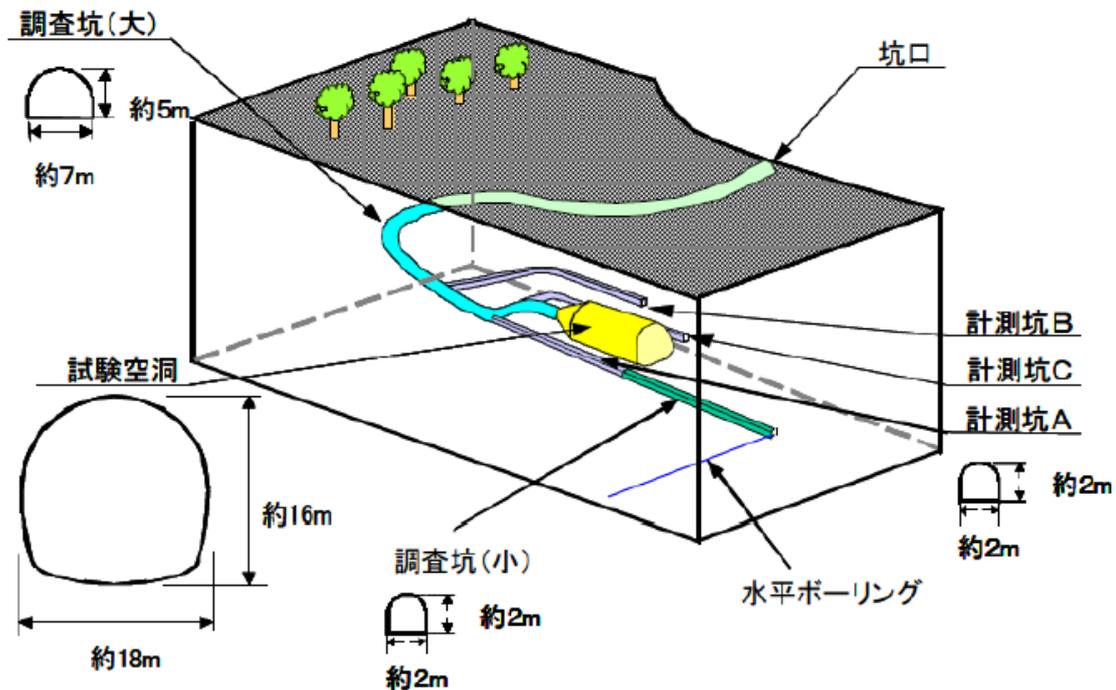
日本 L2 廢棄物目前處置方法為近地表處置包含了工程障壁系統，目前 JNFL 有 1 號、2 號以及興建中的 3 號近地表處置設施，1 號處置設施布置如圖 3.5- 2 所示，除了混凝土處置窖外，回填時採用不同透水性土壤進行回填，確保地下水儘可能不要流向處置窖，在設計時各障壁有其功能要求，主要需求為低透水性以及提供核種吸附能力。

L1 廢棄物目前規劃處置方法為次地表坑道處置，處置深度為 70 m 或更深，透過工程障壁設計以及天然障壁可以讓核種遷移至生物圈的時間盡可能延長。目前 L1 次地表處置在青森縣的六所村進行了現地處置設施性能研究以及封閉相關技術驗證研究，如圖 3.5- 3 為現地次地表設施布置示意圖，相關研究內容包含了不同膨潤土施工方法、混凝土窖施工方法以及回填施工方法等研究，透過現地等比例試驗坑道進行研究，了解在施工方法可行性，是否可以達到設計要求，例如乾密度、透水性以及均勻程度等可能對於材料性能之影響。此外也透過長期觀測調查地震對於設施影響以及障壁材料劣化的行為，例如低擴散層(混凝土材料)裂縫分布等。



資料來源：來自 JNFL 提供資料

圖 3.5- 2 六所村 1 號低放處置設施布置示意圖



資料來源：來自 RWM 提供資料

圖 3.5-3 L1 次地表處置試驗坑道布置示意圖

(五) 淺地層坑道(L2)處置設計上的注意事項

地下淺地層處置窖對 L2 廢棄物的安全要求主要考量：防止滲漏、抑制傳輸、屏蔽等安全機能。其中針對防止滲漏機能進行介紹，為了達成防水性，在 L2 內訂定了 2 個設計方針，其方針如下。

1. 外部防水：防止雨水或地下水滲入地下與廢棄物接觸。
2. 內部防水：處置期長達 30 年，為防止混凝土劣化，水泥系砂漿產生裂隙，造成滲水情形，需設置內部防水設備。

(六) 天然障壁對放射性核種遷移的遲滯係數探討

天然障壁中對於放射性核種遷移的遲滯係數(Retardation factor)，會受到岩石組成、地下水質以及溫度等因素影響，因此如何透過試驗分析或是不確定性分析等方法來獲得合理的遲滯係數是 1 個很重要的課題。東京電力設計公司顧問大江 俊昭博士對於此議題提出了個人看法與建議。傳統獲取母岩的遲滯係數有 3 種常見方式，分別為：

1. 直接使用文獻資料庫中相同母岩的遲滯係數。
2. 透過比例係數考量環境影響中的變化，例如 pH 值、離子組成(ionic composition) 以及離子交換能力(Cation Exchange Capacity, CEC)等，來對於文獻資料庫中的遲滯係數進行修正。
3. 直接採用地球化學分析模式來進行模擬，並推估實際遲滯係數。

然而上述 3 種方法也有各自的限制與不確定性存在，例如文獻資料庫中，相同母岩可能有遲滯係數會有很大範圍的變化，而在地球化學分析方法，部分關鍵參數例如 CEC、離子強度(ionic strength)等資料往往很難獲得。

大江博士對此提出了 2 個分析方法，首先利用質量守恆的概念假設 CEC 的能力與溶液中離子濃度呈正相關，建立一質量守恆方程式來描述遲滯係數、CEC 以及離子濃度的相關性，透過 JAEA-SDB 熱力學資料庫來推估該質量守恆方程式中相關係數。在完成相關參數推估計算後，便可以得到一完整方程式來描述在不同離子濃度以及 CEC 狀態下，該母岩對應之遲滯係數值為何。

另一方法則是考量母岩遲滯係數主要為表面錯合反應(Surface complexation)為主時，在假設溶液中放射性核種濃度相當稀薄，同時溶液中電解質不改變情況下，可以利用表面錯合反應之平衡常數來推估溶液中放射性核種濃度改變的量，在推估出放射性核種改變量後，便可進行遲滯係數的推估。

對於不確定情況解決策略，大江博士也提出一點看法，在 JAEA-SDB 熱力學資料庫中，可以發現某些放射性核種在不同文獻資料中，遲滯係數變化相當大，大江先生認為並非遲滯係數不確定性大，這些結果是反應 CEC 的空間分布變化。一般理論模式推求得到的是在某個特定環境條件下，單一遲滯係數值，缺乏了時間以及空間上的演變，大江博士認為應採用隨機取樣(Random sampling)技術來進行不確定性探討。

最後大江博士給了幾點結論，首先遲滯係數對於安全分析是一個重要的參數，如同地下水流速以及移動距離般重要。文獻資料庫中大變異性的分布資料，主要是受到試驗的條件影響，這些可透過理論模型來說明。

肆、 心得與建議

本次「台日雙邊低放最終處置技術交流會議」拜訪了 JNFL 六所村低放處置設施、RWMC、TEPCO、CRIEPI 土木工程實驗室、JAEA 實驗室及已封閉近地表處置設施、JAPC 規劃中之近地表處置設施、ATK 等單位，透過拜訪各機構，獲得詳盡的介紹與更深入的技術交流對談，讓整個參訪團隊對於核能電廠除役與低放射性廢棄物處有更進一步的了解。同時感謝 ATK 的河西基博士與竹川先生，在參訪過程中，細心且耐心的協助大家在英語、日語及中文之間的翻譯溝通，並感謝中藺先生對行程的規劃與確認，讓本次參訪可更加順遂。

一、 心得

(一) 覆蓋層設計的重要性

日本已有多年近地表處置設施營運及封閉之經驗，仍就覆蓋層的設計、選用材料等持續進行研究，JNFL 於 1 號處置設施營運後仍修改其覆蓋層設計，並依據營運經驗設計使 3 號處置設施並非採用 1、2 號處置設施的設計，而是採用新設計。JAEA 亦持續發展近地表處置設施的設計，CRIEPI 及 TEPCO 亦持須對相關材料進行研究或發展更進步的工法，顯見覆蓋層的材料研究及設計為發展近地表處置重要工作。

(二) 地下水水位為處置窖防水及排水設計重要考量項目

由於日本目前規劃 L3 廢棄物在電廠內進行處置，為因應不同電廠的地質環境，JAEA 在精進 L3 近地表處置設施設計時，依地下水水位分為兩種設計概念(1)與地下水水位保持一定距離，廢棄物處置設施下方無設計低透水層、(2)若考量地下水水位可能觸及處置設施下方，採取外層防水內層排水的措施因應，因此地下水水位為決定處置設施下方設計的重要因素。

(三) 遲滯係數是安全分析的重要參數

遲滯係數對於安全分析是一個重要的參數，如同地下水流速以及移動距離般重要。文獻資料庫中大變異性的分布資料，主要是受到試驗的條件影響，這些可透過理論模型來說明。對於安全分析而言地下水流速、流徑長度以及遲滯係數對於最終劑量值影響均相當顯著，故如何得到合理的遲滯係數是相當重要的課題。

二、 建議

(一) 需特別考量近地表處置覆蓋層設計

綜觀國際間之近地表處置設施覆蓋層設計，就安全功能考量其設計單元可能包含：表層植生、緩衝層(保護層)、排水層與阻水層。部分國家除了組合出排水與阻水系統功能外，為了延長功能有效期會採用雙系統設計。亦有如日本 JNFL，雖然各層之設計阻水能力不同，但均屬於阻水設計。滿足處置安全功能需求後，亦須考量處置設施興建與運維可行性。

(二) 處置窖設計須考量處置設施運轉期間防水功能

依據日本經驗處置設施運轉期長達 30 年，為防止混凝土劣化，水泥系砂漿產生裂隙，造成滲水情形，需設置內部防水設備。六所村 3 號處置設施的處置窖之設計，因應此段期間內混凝土劣化的可能性以及 1 號及 2 號處置設施之運營經驗回饋，於處置窖內部增加防水層設計，並對其水密性及變形適應性進行研究與評估。

(三) 六所村 L1 處置試驗坑道為我國低放處置發展重要參考對象

RWMC 於六所村建置的 L1 處置試驗坑道，其相關實驗和安全分析包括以下內容：研究不同開挖工法的可行性，評估開挖過程對地層的影響，進行地質鑽孔和地層分析，模擬地下水流場的行為，探討處置設施的建造方法，以及實地進行各種處置設施實驗等。這些經驗和數據可以供我國在低放射性廢棄物處置坑道開挖方面參考，同時也可以成為未來我國低放處置設施的安全分析基礎，確保處置設施的穩妥運營。

(四) 與日本低放處置技術專家保持密切聯絡

本次交流收獲頗豐，獲得許多資訊可供我國低放處置發展未來方向參考。日本與我國地理位置相近且地質條件相似，在近地表及次地表處置設施設計上我國與日本亦多有相似之處，可多交流了解日本的發展及相關研究。日本在工程障壁及施工方法研究甚多，可做為我國未來參考及學習對象。六所村次地表試驗坑道的相關實驗和安全分析，若可取得更多資料，則可做為我國低放處置設施的安全分析基礎。我國低放處置每 4 年提出技術評估報告，近期將於 2024 年提出新版技術評估報告，建議邀請日本專家參與技術評估報告國際同儕審查。透過持續的密切交流，可更深入了解日本低放處置技術發展方向，並吸取其實際營運經驗，對我國目前低放處置設施設計及各項模擬評估將良有助益。