

出國報告（出國類別：開會）

放射性廢棄物集中式貯存技術研討會議暨相關設施技術參訪

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：葉丞勛

葉久萱

楊淳堯

簡天隆

派赴國家：日本

出國期間：107年12月13日~107年12月22日

報告日期：108年01月24日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：放射性廢棄物集中式貯存技術研討會議暨相關設施技術參訪

頁數 26 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

陳德隆/台灣電力公司/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

葉丞勛/台灣電力公司/核能後端營運處/核能工程師/02-23657210 ext:2325

葉久萱/台灣電力公司/核能後端營運處/核能工程師/02-23657210 ext:2339

楊淳堯/台灣電力公司/核能後端營運處/核能工程師/02-23657210 ext:2325

簡天隆/台灣電力公司/核能安全處/核能工程師/02-23667181

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：2018/12/13-2018/12/22 出國地區：日本

報告日期：2019/01/24

分類號/目

關鍵詞：放射性廢棄物、乾式貯存、除役、核能安全

內容摘要：(二百至三百字)

- 一、日本目前之乾式貯存設施均採室內金屬護箱貯存型式，惟由於金屬護箱造價較為昂貴，所以經濟成本較為實惠的混凝土護箱開始受到日本許多核能產業的青睞，但目前日本僅就金屬護箱設有規範，正在研究混凝土護箱之相關規範。
- 二、日本用過核子燃料乾式貯存設施採用被動式空氣對流設計，利用衰變熱的熱浮力將冷卻空氣自位置較低的進氣口帶入，而加熱後的熱空氣則由位置較高的排氣口排出。
- 三、日本電力公司目前除了透過共用用過核子燃料池、格架新增或重整、廠內乾式貯存等作法來增加電廠內貯存用過核子燃料的空間外，有鑑於 JAPC 與 TEPCO 合作的集中式貯存設施(リサイクル燃料備蓄センター)，未來也將考慮此種模式，透過公司間的整合與合作，興建在電廠外的集中式貯存設施。
- 四、核電廠除役期間所產生的廢棄物中有部分為清潔廢棄物，其放射性活度極低或並無放射性，為使資源能有效被再利用，應建立妥善制度使清潔廢棄物能外釋。
- 五、與運轉期間不同，在除役過程中所產出的廢棄物量較大，在規劃拆除作業時，除了工序之外，在廠房內設計良好的動線及貯存空間也是相當重要的一大課題。

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

目錄

目錄	I
表目錄	II
壹、目的	1
貳、過程	2
參、工作內容	3
一、拜訪日本原子力発電株式会社之東海核電廠	3
二、拜訪東京電力ホールディングス株式会社	11
三、拜訪日立造船株式会社之有明工廠	15
四、拜訪中部電力株式会社之濱岡核電廠	18
五、拜訪株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング	20
肆、心得及建議	22

表目錄

表 1 核能後端基金 107 年 1-1 號出國計畫行程表.....	2
表 2 JAPC 持股表.....	9
表 3 JAPC 擁有之核電廠列表.....	9
表 4 東海核電廠低放貯存設施相關資訊表.....	10
表 5 台灣與日本核能電廠品保方案章節比對表.....	10
表 6 福島第一核電廠災前(用過)核子燃料貯存情形表.....	14
表 7 HITZ 公司近年金屬護箱供給情形(自 2006 年起).....	17

壹、目的

為強化台電公司就放射性廢棄物中期貯存方面之管理與技術能力，選定在地質、地理、氣候等自然條件與我國相仿之日本為目標，安排拜訪日本原子力発電株式会社(The Japan Atomic Power Company, JAPC)之東海核電廠、東京電力ホールディングス株式会社(Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., TEPCO)、日立造船株式会社(Hitachi Zosen Corporation, Hitz)之有明工廠、中部電力株式会社(Chubu Electric Power Co., Inc., CEPC)之濱岡核電廠以及株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング(Asano Taiseikiso Engineering Co., Ltd., ATK)等機構，並與各機構進行技術交流會議，以獲取日本對於放射性廢棄物中期貯存、電廠除役之相關技術及經驗，包括：

- 一、日本中期貯存之策略、法規與現況；
- 二、放射性廢棄物貯存容器；
- 三、放射性廢棄物中期貯存技術；
- 四、放射性廢棄物中期貯存設施營運經驗；
- 五、電廠除役相關經驗；
- 六、核能品質保證方案。

貳、過程

核能後端基金 107 年 1-1 號出國計畫「放射性廢棄物集中式貯存技術研討會議暨相關設施技術參訪」自 107 年 12 月 13 日出發，迄 107 年 12 月 22 日返國（共計 10 天），停留東京都、茨城縣、熊本縣及靜岡縣等四地。詳細行程如下：

表1 核能後端基金107年1-1號出國計畫行程表

日期	地點與行程	工作內容
107 年 12 月 13 日	台北→東京都→茨城縣	去程
107 年 12 月 14 日	茨城縣→東京都	拜訪 JAPC 之東海核電廠(茨城縣) 路程 茨城縣→東京都
107 年 12 月 16、17 日	東京都	整理會議資料(例假日)
107 年 12 月 17 日	東京都→熊本縣	拜訪 TEPCO 路程 東京都→熊本縣
107 年 12 月 18 日	熊本縣→靜岡縣	拜訪 Hitz 之有明工廠 路程 熊本縣→靜岡縣
107 年 12 月 19 日	靜岡縣	拜訪 CEPC 之濱岡核電廠
107 年 12 月 20 日	靜岡縣→東京都	路程 靜岡縣→東京都 整理會議資料
107 年 12 月 21 日	東京都	參訪 ATK
107 年 12 月 22 日	東京都→台北	返程

參、工作內容

一、拜訪日本原子力発電株式会社之東海核電廠

日本原子力発電株式会社(The Japan Atomic Power Company, JAPC)成立於西元 1957 年 11 月 1 日，係當時日本為了導入商用核能發電，由電氣事業連合會(The Federation of Electric Power Companies of Japan, FEPC)中除了沖繩電力株式会社(The Okinawa Electric Power Company, Inc., OEPC)之外的 9 個日本電力公司會員(北海道電力、東北電力、北陸電力、東京電力、中部電力、關西電力、中国電力、四国電力)，加上電源開發株式会社 (Electric Power Development Co., Ltd., EPDC) 共同出資組成(目前 JAPC 之持股如表 1)。根據最新資料(107 年 3 月 31 日)，該公司之資本額為 1,200 億日圓(依匯率 0.28 計，約新台幣 336 億元)，員工共 1,169 人。

JAPC 目前擁有 2 座核能電廠(如表 2)，本次參訪位於茨城県那珂郡東海村正在進行除役中的東海核電廠 1 號機。東海核電廠 1 號機為氣冷式反應爐(Gas-Cooled Reactor, GCR)，爐本身熱交換器大但是輸出功率小，和輕水式反應爐比較發電單價高，而且日本國內僅此 1 座，因而維運成本較高，因此在 1998 年 3 月 31 日停止運轉，預計花費 27 年時間，於 2025 年完成除役。此外，東海核電廠是日本首座商用核電廠，亦是第一個進行除役的商用核電廠，其 1 號機反應器型式為英國發展的 MAGNOX，該反應器型式雖最早為英國發展並使用，但東海核電廠 1 號機除役計畫的進度較英國其他同型式反應器之除役計畫來的快，可能成為全球首例完成除役之 MAGNOX 電廠，故其建設、運轉和除役所獲得的技術和經驗，將可成為日本、乃至於世界電廠除役工作之借鑑。

東海核電廠 2 號機於 1978 年開始運轉，目前處於暫時停止運轉狀態，在日本新的安全法規下，分別於 2014 年 5 月提出新的安全分析報告、2017 年 11 月提出延役申請。日前於 2018 年 11 月通過延役安全審查，後續將依照報告之內容，進行強化電廠之安全相關措施，在措施完成後也會邀集周邊居民進行溝通與討論，待相關事務皆無虞後才會重新運轉。

東海核電廠的參訪行程由 JAPC 東京總公司除役計畫部(Decommissioning Project

Department)的調查役刈込敏(Satoshi Karigome)先生，以及負責東海核電廠除役(1 號機)及營運(2 號機)的東海事業本部所屬地域共生部の部長代理柳原寬司(Hiroshi Yanagihara)先生、杉原義邦(Yushikuni Sugihara)先生接待、帶領參訪，並與我方進行技術交流會議。

由於訪客不得攜帶個人物品(包含行動電話、相機、香煙、打火機、鑰匙等)，故於進入廠區參觀前都被要求將個人物品置於會議室；在廠區均須依規定穿著安全帽及配帶劑量計；進入管制區前，每人都必須進行爆炸物質檢測及金屬物質檢測。爆炸物質檢測會要求用手觸摸試紙，再用儀器檢測之，主要應是測量手上的火藥殘留；金屬物質檢測則類似海關，藉由通過金屬探測門進行檢測。進入管制區後，職等依序參觀用過核子燃料乾式貯存設施及 1 號機的熱交換器(Steam Raising Unit, SRU)廠房，最後回到會議室就參觀內容進行技術交流會議，內容如下：

(一) 東海核電廠用過核子燃料乾式貯存設施

東海核電廠是日本最早設置用過核子燃料乾式貯存(下稱乾貯)設施的核電廠，自 2001 年開始啟用。其乾貯設施採室內貯存，設施建築物長約 54 公尺、寬約 26 公尺，高約 21 公尺，設計容量可貯存 24 組金屬護箱，有 3 組護箱在製造中，目前已存放 21 組貯存專用的金屬護箱，其中 15 組已裝填用過核子燃料，6 組為空箱。該護箱由 JAPC 自行設計，分別由日立造船(Hitz)、日立及東芝公司製造，每組護箱可容納 61 束 BWR 燃料，護箱含燃料重約 118 公噸，呈圓筒狀，高約 5.7 公尺，直徑約 2.4 公尺，採用五層結構製造而成，筒身(胴部)由裏到外依序為(1)不鏽鋼、(2)鉛、(3)不鏽鋼、(4)樹脂及(5)不鏽鋼，與一般歐洲較常使用的運輸／貯存兩用金屬護箱構造有明顯差異。金屬護箱內的燃料格架(仕切版)具備防止用過核子燃料達到臨界狀態的功能；金屬護箱採用雙層蓋密封機制，所有密封部分皆設有金屬密封(金屬シール)，並以螺栓確保密封蓋與金屬護箱的緊密結合；一次蓋與二次蓋之間的空間將以正壓的氬氣充填，並裝設氣壓監測器(圧力センサー)，全時監控是否有洩漏情形；金屬護箱底部以支持構造物固定。

貯存設施內大致可分為檢查區與貯存區，檢查區設有檢查台(検査台)，可供工作人員上下檢查金屬護箱；貯存區則設有橋式起重機(天井クレーン)，可吊運金屬護箱至定位。金屬護箱內部用過核子燃料的衰變熱移除功能，主要藉由熱對流、熱傳導與熱輻射機制向外側的提籃與組件傳遞，並逐漸傳遞到護箱表面將熱散逸至室內乾貯設施

的空氣中。而乾貯設施則藉由被動式空氣對流設計，利用衰變熱的熱浮力將冷卻空氣自位置較低的進氣口(給氣口)帶入，而加熱後的熱空氣則由位置較高的排氣口(排氣口)排出，進氣口下則設有排水溝避免雨水濺入後流入。設施內亦設有溫度及輻射之監測器，全天候監控金屬護箱表面溫度、設施內溫度及輻射。貯存設施內目前無人駐點管理，相關監控資料皆透過監控設備遠端監控。

(二) 東海核電廠低放射性廢棄物貯存

日本的低放射性廢棄物分為 L1、L2、L3 與 TRU 廢棄物四類。L1 屬相對高放射性廢棄物，包括反應器維護、拆除時所產生的控制棒、燃料匣箱、其他爐心組件等，實行淺地層處置；L2 屬相對低放射性廢棄物，實行近地表處置；L3 屬非常低放射性廢棄物，直接實行地表處置即可；TRU 廢棄物則計畫與高放射性廢棄物共同實行深層地質處置。電廠產生的低放射性廢棄物之處理方法為氣體、液體之放射性廢棄物經處理至合於法規的限制標準後排放或再利用，而固體之放射性廢棄物中，L1 及 TRU 廢棄物將先放廠內貯存等候最終處置場營運，L2 廢棄物則陸續送六個所村的最終處置場進行處置，L3 廢棄物則規劃於場區內進行地表處置(壕溝)。

在會議期間與東海核電廠人員討論低放貯存相關議題，概要了解東海核電廠貯放低放射性廢棄物之容器有兩種，一種為鋼桶(容量為 200 公升)，一種為鋼箱(1.25m×1.25m×0.9m，可裝 4 只鋼桶)。東海核電廠目前設有 2 座低放射性廢棄物貯存(下稱低放貯存)設施，相關資訊如表 3。

(三) 東海核電廠除役工作

東海核電廠 1 號機除役時程，自 1998 年停機後，約花費 3 年左右時間完成燃料移出，正式開始除役時間為 2001 年底。東海核電廠 1 號機除役可分為兩大部分：反應器區域及反應器以外區域，反應器區域部份自 2001 年底開始進入安全貯存階段，預計貯存至 2018 年底為止，自 2019 年開始進行拆除工作。而反應器以外區域自 2001 年底已陸續開始進行除役，已完成的工作有：燃料廠房之設備拆除、燃料吊掛設備拆除、熱交換器等設備拆除等。俟前述區域拆除作業進入尾聲後，將進行建築物拆除工作。

JAPC 對 SRU 的拆除工作進行了相當詳細的規劃。SRU 為一大型桶槽，內部有熱交換管、擋板及鋼樑等。首先將 SRU 規劃橫向切割為 9 大塊(Tiers 1-9)，因切割順序為

由下而上進行，須於 SRU 上方設置大型起重機(Large Jack)，並以遙控切割方式進行切割。其切割方式為先沿 SRU 桶身外部設置環型軌道，上設可沿軌道移動之機械手臂夾持(氧-丙烷)火炬先在 SRU 桶外部做首次切割(Primary cutting)，先切分出 1 大塊(Divide tiers)，然後再就切分出來的部分進行二次切割(Secondary cutting)，切割成適當的尺寸後放入容器中貯存。

東海核電廠 1 號機運轉期間所使用的控制室，於反應器停機後僅用來控制消防系統，原先所採用的電力系統僅保留部分，另外有建置新的電力系統，於新的控制室進行操控。

在核電廠除役、運轉或大修期間會產生各式各樣的廢棄物，除了需要特別管理的放射性廢棄物以外，尚有未被放射性物質污染或放射性活度極低的非放射性廢棄物，非放射性廢棄物對人體可說是不會有影響的。基於上述原因以及資源的回收再利用，許多國家已有類似法規制度可供依循，日本在 2005 年修訂相關法規，亦導入清潔廢棄物制度。

同樣在東海核電廠 1 號機除役過程中，除了放射性廢棄物的處置外，很重要的一點是要將清潔廢棄物盡量外釋或再利用，以減少倉貯空間的壓力。清潔廢棄物外釋或再利用的流程中可歸納出有幾項重點如下：

1. 如何選擇可能符合外釋標準的物件。
2. 偵測及評估方法需經過主管機關的認可及確認。
3. 紀錄的妥善保存。
4. 經過妥善貯存及管理，進行外釋或再利用。

可外釋的金屬目前已加工試作為內部容器，但尚未經過其他屏蔽測試。除作為廢棄物容器外，亦可作成長椅、桌子、金屬屏蔽等。

在會議期間與東海核電廠人員討論其他除役相關議題，簡要敘述如下：

1. 蒐集資料時發現東海核電廠 1 號機除役時程較先前預估較為延遲，其反應器區域的安全貯存期間及反應器以外區域的拆除期間較原先規劃時程來的長，其原因主要為處理設施尚未設計完成，導致拆除作業時程延遲。東海核電廠人員也分享在反應器區域安全貯存期間，為了降低維護費用，必須考量適度的進行設備換裝工作。

2. 日本核電廠除役作業主要係由原電廠員工繼續負責，有關東海核電廠 1 號機除役期間人力及組織變化討論如下：

(1) 在運轉期間設有發電室(負責運轉相關業務)、安全管理室(負責保健物理/化學/燃料/廢棄物管理等業務)、保修室(負責設備維護管理業務)。除役期間則改設除役作業室(負責除役作業/維護/除役廢棄物管理等業務)、安全管理室(負責保健物理/化學/燃料移出前管理等業務)。在發電室原負責運轉相關業務人員在除役期間轉換為除役作業室，安全管理室及保修室之人員亦改為負責除役期間類似業務。

(2) 為使工作人員能熟悉除役作業，該廠訓練中心亦開設除役相關課程。

(四) 日本核能品質保證方案

在會議中雙方亦就核能品質保證方案進行交流，1970 美國核管會 NRC 發布了適用於核能電廠及燃料再處理廠之品質保證方案 10CFR50 App.B，兩年後日本電氣協會 JEA(Japan Electric Association)在 1972 年參考 10CFR50 App.B 後發行 JEAG4101-1972 作為核能電廠之品質保證指引，之後 JEA 於 1981~1993 年間參考 IAEA 國際原子能機構所制定 50-C-QA 「Code of Practice for Quality Assurance for Safety in Nuclear Power Plants」並進行 4 次修訂(JEAG4101-1981、1985、1990、1993)。到了 1996 年 IAEA 50-C-QA 進行修訂並改名為 50-C/SG-Q 「Quality Assurance for Safety in Nuclear Power Plants and Other Nuclear Installations: Code and Safety Guides」，JEA 以此版本內容為基礎，同時考量日本的知識、經驗和成果並反映相關運轉狀況及結果，發行了 JEAG4101-2000，自此之後該指引在核能工業被廣泛使用，除作為核能電廠之品質保證指引外，對於建立品質保證體系及提升品質保證作業方面有相當大的貢獻。2003 年 10 月日本法規「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(俗稱：原子炉等規制法)進行修訂，要求經營者對於涉及核能安全的品質保證作業須制定規範，為符合該項要求，JEA 另參考了 ISO9001：2000 品質管理系統標準後發行 JEAC4111-2003 「原子力安全のためのマネジメントシステム規程」，作為日本核能電廠品質保證作業之依循準則，同時亦發行其作業指引 JEAG4121-2005，此後隨著 IAEA 及 ISO 之相關文件/標準內容修正，JEAC 與 JEAG 便進行對應之修訂(至目前為止最新版本為 JEAC4111-2013 及 JEAG4121-2015)。

日本的運轉中及除役中核能電廠均係依同一份品質保證標準 JEAC4111 來執行相關品

保作業，其品質理念係參照 ISO9001 品質管理系統：經營者對顧客負責，依照顧客需求並利用資源來製作產品，最後進行檢驗、試驗、稽核及改善等方式以確保產品之品質；JEAC 將此概念套用在核能系統上，電力公司對全體人民負責，依法規及管制機關之要求並利用資源來進行相關作業，同樣最後進行檢驗、試驗、稽核及改善來確保核能電廠各階段之品質及全體人民的安全。相較於台灣，因台灣核能電廠之反應爐係由美國奇異公司(核一廠與核二廠之 BWR)或西屋公司(核三廠 PWR)製造，故營運中核能電廠與除役中核能電廠之品質保證方案，其內容係參考 10CFR50 App.B 之架構來制定。

另粗略比較台灣與日本的品質保證方案內容(如表 5)，雖 10CFR50 App.B 之章節架構與 JEAC4111 不同，惟大部份均可找到互相對應之處，以本公司核安處之主要品保業務---稽查為例，10CFR50 App.B 規範於第十七章，而 JEAC4111 則規範於第 8 章「測定、分析及改善」內容，其執行稽查之流程，從訂定稽查計畫開始，選定稽查團隊、事先審閱相關文書資料並擬定 check list、執行稽查並作成報告書、以及追蹤改善情形等，與本公司相同；另 ISO9001 之文書體制結構，一次文書為品質方針/手冊，二次文書為管理規定、業務規定，三次文書為作業程序書、圖面、技術標準等(對應 10CFR50 App.B 第五章)，經由三次文書執行後所產生之相關文件即為品保紀錄。

日本電力公司之核能系統組織架構，以 JAPC 為例，在東海核電廠設有「品質保證室」(Quality Assurance Division)負責核電廠之品質保證作業，於公司總處設有「安全室」(Safety Division)負責整個公司品質管理系統之相關作業(包含品質保證)，另總處設有另一獨立部門「考查・品質監查室」負責品質稽核(Quality Audit)。而本公司核能品質保證之分工，於電廠設有品質組負責品質管制以確保相關作業依程序書執行並能達到所要求之標準，於總處設有核能安全處負責品質保證，除制定相關品質保證方案，以稽查方式檢視品質保證方案之執行成效並發現核能安全之潛在問題。

表2 JAPC持股表

公司名稱	持股比重(%)	公司名稱	持股比重(%)
東京電力	28.23	中國電力	1.25
關西電力	18.54	北海道電力	0.63
中部電力	15.12	四國電力	0.61
北陸電力	13.05	電源開發	5.37
東北電力	6.12	其他公司	9.58
九州電力	1.49	總計	100

表3 JAPC擁有之核電廠列表

電廠名稱	所在地	反應爐型式	反應爐	輸出功率(MW)	開始商轉	備考
					商轉期限	
東海核電廠	茨城県 那珂郡 東海村	氣冷式(GCR)	1 號機	166	1966.07.25 1998.03.31	2001.12.04 開始除役，目前仍持續進行除役工作中。
		沸水式(BWR)	2 號機	1,100	1978.11.28 -	<ul style="list-style-type: none"> ● 日本第一座 1,000MW 等級的核電機組。 ● 目前停止運轉中。 ● 2014.05 申請審查是否符合新的安全法規要求。 ● 2017.11 申請延長運轉期限。 ● 2018.11 通過延役安全審查
敦賀核電廠	福井縣 敦賀市	沸水式(BWR)	1 号機	357	1970.03.14 2015.04.27	<ul style="list-style-type: none"> ● 1 號機是日本第一座輕水式反應爐，2017.05.15 開始除役。 ● 2 號機目前定期檢查中。 ● 2 號機於 2015.11.05 申請審查是否符合新的安全法規要求。
		壓水式(PWR)	2号機	1,160	1987.07.25	<ul style="list-style-type: none"> ● 3、4 號機準備興建中。

表4 東海核電廠低放貯存設施相關資訊表

設施名稱	設計貯存容量 (單位：200 公升桶)	現有貯存量(統計至 2018.9) (單位：200 公升桶)
低放貯存設施 1	1,600	運轉廢棄物：1,163 除役廢棄物：144 總計：1,307
低放貯存設施 2	73,000	運轉廢棄物：10,721 除役廢棄物：50,555 總計：61,276

表5 台灣與日本核能電廠品保方案章節比對表

品保方案 要求事項	台灣 核能營運品質保證方案	日本 原子力発電所における安全のための 品質保証規程(JEAC-4111)
組織與計畫	Ch1-組織 Ch2-品質保證方案	4.1 一般要求事項 4.2 文書化に関する要求事項 5.5 責任、権限及びコミュニケーション
設計	Ch3-設計管制	7.3 設計・開発
採購	Ch4-採購文件管制 Ch7-採購材料、設備和服務之管制	7.4 調達
程序書	Ch5-工作說明書、作業程序書	*ISO9001 文書體制之三次文書
文件 品保紀錄	Ch6-文件管制 Ch17-品質保證紀錄	4.2 文書化に関する要求事項
標識 裝卸 運儲 特殊製程	Ch8-材料、零件及組件之標識與管制 Ch9-特殊製程之管制 Ch13-裝卸、儲存與運輸	7.5 製造及びサービス提供
檢驗 試驗 稽查	Ch10-檢驗要求 Ch11-試驗管制 Ch18-稽查	8.1 一般 8.2 監視及び測定
	Ch14-檢驗、試驗和運轉狀況之管制	
量測 測試設備	Ch12-量測及測試設備管制	7.6 監視機器及び測定機器の管理
品質不符合	Ch15-不符合材料、零件或組件之管制	8.3 不適合製品の管理
改正	Ch16-改正行動	8.5 改善

二、拜訪東京電力ホールディングス株式会社

本次出國行程安排拜訪東京電力ホールディングス株式会社(Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., TEPCO) 瞭解福島第一核電廠目前之狀況，該核電廠受 2011 年 3 月 11 日之日本東北地方太平洋近海地震(下稱 311 事件)的影響，造成 1F 所有的渦輪機及反應爐自動停止，隨地震而來的海嘯淹沒了緊急發電機室，損毀了緊急柴油發電機，令爐心冷卻系統停止運作。地震與海嘯造成的損毀也阻礙了外來的救援，在之後的幾個小時到幾天內，福島第一核電廠 1、2、3 號發生了爐心熔毀。目前福島第一核電廠 1 號機至 4 號機均已維持在冷爐停機狀況，並於 2012 年 4 月 19 日決定永久停止運轉；5 號機及 6 號機亦於 2014 年 1 月 31 日永久停止運轉，目前除役工作持續進行中。

為了聚焦於福島第一核電廠除役與除汙的工作，以期提升專業知識與效率，並且於該工作引入其他組織的合作夥伴同時清楚界定 TEPCO 的責任，TEPCO 於 2014 年 4 月成立福島第一核電廠除汙與除役工程公司(Fukushima Daiichi Decontamination & Decommissioning Engineering Company)，於公司總裁(President)兼首席除役長(Chief Decommissioning Office, CDO)下設除役與除汙推動辦公室(D&D Promotion Office)、專案計畫部(Project Planning Dept.)、除汙與除役工程與維護設計中心(D&D Engineering and Maintenance Design Center)、除汙與除役採購中心(D&D Procurement Center)、除汙與除役溝通中心(D&D Communications Center)及福島第一核電廠。本次拜訪由該公司負責制定除役策略的除役與除汙推動辦公室(D&D Promotion Office)的經理武田和仁(Kazuhiro Takeda)先生、副經理井原隆文(Takafumi Ihara)先生及清水英介(Eisuke Shimizu)先生接待，並與我方進行技術交流會議。

(一) 福島第一核電廠用過核子燃料乾式貯存

福島第一核電廠共有 6 個反應器機組，除各反應機組設有用過核子燃料池外，尚有設置一共用水池(Common Pool)及一乾貯設施貯放用過核子燃料，在災前的(用過)核子燃料貯存情形如表 3。共用水池的設計容量為 6,840 束，在 311 事件前已貯存 6,375 束；而既有的室內乾貯設施規劃可貯存 20 組金屬護箱，從 1995 年開始使用，在 311 事件前已貯存 9 組。雖然福島第一核電廠既有乾貯設施有部分遭到海嘯淹沒，但災後經過檢查，確認功

能正常無安全疑慮，燃料皆維持其完整性。

雖然共用水池與既有乾貯設施於 311 事件後均仍保有功能，惟共用水池幾近滿池，為能就近將 1~4 號機組的用過核子燃料先移往共用水池貯存，故水池內原貯存用過核子燃料將陸續送往 311 事件後新建之暫時性室外乾貯區域(Temporary Cask Custody Area)進行貯存。

暫時性室外乾貯區域使用金屬護箱搭配水平的混凝土模組進行貯存，推測應是為避免被其他物品意外撞擊金屬護箱故外設混凝土模組，且可以縮短裝置的時間，對於未來的擴充性亦較佳。現有之暫時性室外乾貯區域可容納約 50 組乾貯護箱，後續正在考慮繼續擴建。原貯存於既有乾貯設施內之 9 組金屬護箱已移至暫時性室外乾貯區域。此舊有存放之 9 組乾貯護箱有分為大型及中型兩種型號，大型的護箱有 5 組，每組可貯存 52 束用過核子燃料，總重約 115 公噸，長約 5.6 公尺；中型的護箱有 4 組，每組可貯存 37 束用過核子燃料，總重約 96 公噸，長約 5.6 公尺。此外，TEPCO 另外向 Areva TN 公司採購了 11 組金屬護箱，用來貯存自各機組內移出的破損燃料，共可貯存 452 束用過核子燃料。

(二) 福島第一核電廠除役工作

福島第一核電廠的除役工作主要有幾項重點：工作環境改善、用過核子燃料妥善貯存、放射性廢水營運、放射性固態廢棄物營運等。以下僅針對放射性廢水營運及放射性固態廢棄物營運兩部分進行簡介。

放射性廢水營運有三大方針：去除污染源、將乾淨的水與污染區域徹底隔離、避免污染水的滲漏。

去除污染源作法包括：

1. 利用多核種去除處理系統 (Advanced Liquid Processing System, ALPS)淨化處理。
2. 將水溝(或地下埋管)內的放射性廢水移除。
3. 放射性廢水處理流程為，每日大約有 130 立方公尺的地下水流入廠房中，經過處理(吸附銻並減少碘、銻含量)且淡化後進行貯存，每日大約有 200 立方公尺水再送入反應爐內進行冷卻；放射性廢水會再經過 ALPS 處理後再進行貯存。

將乾淨的水與污染區域徹底隔離的具體作法則有：

1. 從地下水旁通井抽取地下水泵送至貯存槽暫存，可降低地下水水位，貯存的地下水

經過分析後若低於限值則可進行排放。

2. 自反應器廠房及汽機廠房附近的地下水井抽取地下水送至貯存槽暫存，經淨化處理後再進行分析，經過分析後若低於限值則可進行排放。
3. 在反應器廠房及汽機廠房周圍建置凍土牆，防止地下水滲漏至反應器廠房及汽機廠房區域中。
4. 進行地面鋪設避免雨水滲入土壤。

避免污染水的滲漏方面則是有下列工作：

1. 改以焊接方式製成的貯水槽進行貯存(原先採用的貯水槽係以法蘭螺絲組合，有漏水之虞)。
2. 以液態玻璃改善地質。
3. 建置連續壁擋水牆，避免海水遭受污染。

目前已產生的低放射性固體廢棄物截至 2018 年 3 月為止共有 430,000 立方公尺，若不採取任何措施則預估 10 年後共產生 770,000 立方公尺固體廢棄物，如增設焚化、減容設備進行廢棄物處理，則預估固體廢棄物可減少至 250,000 立方公尺。然目前電廠低放射性廢棄物並無實質進行 L1-L3 之分類，僅針對種類粗分，其主要考量為目前尚未知道後續將採用何種方式處置且盛裝容器為何亦尚未確定。總體來說目前低放廢棄物在廠內的處理方式仍屬於緊急處理階段，並非正式之處理流程。

表6 福島第一核電廠災前(用過)核子燃料貯存情形表

機組/設施	用過核子燃料	新燃料
1 號機組	292	100
2 號機組	587	28
3 號機組	514	52
4 號機組	1,331	204
5 號機組	1,374	168
6 號機組	1,456	248
共用水池	6,375	0
乾貯設施	408	0

三、拜訪日立造船株式会社之有明工廠

日立造船株式会社(Hitachi Zosen Corporation, Hitz)於 1881 年在日本大阪創立，原始名稱為 Osaka Iron works，1943 年改名為日立造船株式会社(Hitachi Zosen Corporation, Hitz)，於 1974 年開始從事壓力容器製造工作，1980 年開始接受海外的各種護箱製造訂單，1999 年開始接受美國廠商委託製造用過核子燃料乾貯護箱與密封鋼筒，資本額約 450 億日圓，員工約 10,000 人，業務範圍相關廣泛，包括環境系統、工廠、水處理系統、工業機器、核能設備、公共建設相關設備、災害預防系統及精密儀器製造等，並擁有 ISO9001、ISO14001、ASME N、OHSAS18001 及 ASME U/U2 等品保及專業認證。此外，Hitz 公司於 2013 年收購美國 NAC 公司，該公司為美國乾貯系統廠商，我國核一廠及核二廠第 1 期乾貯系統皆源自於 NAC 公司之產品。本次 Hitz 公司之有明工廠的參訪行程由 Hitz 公司製程設備事業體(Process Equipment Business Unit)下的製程設備與核能系統業務部(Process Equipment & Nuclear Systems Sales Department)部長寺井智則(Tomonori Terai)先生、Sumin Kim 小姐，核能設備事業推廣部(nuclear Equipment Business Promotion Department)部長森本好信先生、資深經理淺野良二(Ryoji Asano)先生，以及有明工廠的核能技術資深經理野一色宏志(Hiroshi Noishiki)先生、顧問網干威(Takeshi Aboshi)先生接待、帶領參訪，並與我方進行技術交流會議。

首先由 Hitz 公司向職等介紹有明工廠及該公司近年於護箱業務上之情形。有明工廠是世界頂尖的壓力容器製造工廠，擁有全日本第二大的製造廠房，主要製造國內外工業界的壓力容器，特別是核能發電產業相關的壓力容器，可滿足 10CFR50, Appendix B、10CFR71, Subpart H、10CFR72, Subpart G 及 ASME NQA-1 的核能品質保證要求。產品包含有用過核子燃料的運輸護箱、乾貯金屬護箱、密封鋼筒以及放射性廢棄物焚化設施等。截至 2018 年 12 月，Hitz 公司在日本國內已完成交貨 67 組金屬護箱，有 2 組仍在製造中；日本國外方面，護箱部份已交貨 18 組，13 組製造中，密封鋼筒部分已交貨 731 組，44 組製造中(包含美國 NAC 公司賣出的產品)，合計已交貨及正在製造中的金屬護箱與密封鋼筒達 875 組。

Hitz 公司在 1978 年設計並製造了日本國內第一組運輸護箱 HZ-75T，之後亦設計製造

了日本東海核電廠乾貯設施專用的金屬護箱，除了日本國內使用的許多運輸護箱外，還製造了來自海外 NAC 公司設計的 NAC 100 S/T 金屬護箱、MAGNASTOR 密封鋼筒(即為我國核二廠第 1 期乾貯設施規劃使用的貯存系統型號)，以及 TN 公司設計的 NUHOMS 系列傳送護箱，近年主要提供給美國的核能電廠乾貯設施使用，少部分則提供給中國大陸及瑞士使用(如表 5)。

在進入工廠參觀前，依工廠規定必須穿著安全帽、護目鏡(有配戴眼鏡者免)、綁腿(避免褲腳勾到雜物導致意外發生)以及大衣，做好全身上下之安全防護。由此一系列嚴謹之措施，可以看出 Hitz 公司對於工安的注重。進入工廠後，職等依序參觀實際焊接作業、燃料提籃、護箱等罐體，也看到大型退火爐(退火：將金屬緩慢加熱到一定溫度，保持足夠時間，然後以適宜速度冷卻的一種金屬熱處理工藝。目的是使經過鑄造、鍛軋、焊接或切削加工的材料或工件軟化，改善塑性和韌性，使化學成分均勻化，去除殘餘應力或得到預期的物理性能)、自動焊接與雷射焊接設備、液態鉛灌注設施等設備。

結束參觀行程後，雙方進行交流會議。由於金屬護箱造價較為昂貴，所以經濟成本較為實惠的混凝土護箱開始受到日本許多核能產業的青睞，但目前日本僅就金屬護箱設有規範，正在研究混凝土護箱之相關規範。Hitz 公司由於併購美國乾貯廠商 NAC 公司，已具備了混凝土系列貯存護箱主要組件-密封鋼筒的製造技術，除了協助製造 NAC 公司在美國的密封鋼筒訂單外，更自行提升加強密封鋼筒的製造技術；此外，日本電力中央研究所也針對混凝土系列貯存護箱主要組件-密封鋼筒進行了許多年的研究，在在顯示日本未來希望朝混凝土系列貯存護箱的方向邁進的規劃。是故，Hitz 公司未來將積極持續推動混凝土護箱合法化，拓展國內市場，並給予日本核能產業更多選項。

表7 Hitz公司近年金屬護箱供給情形(自2006年起)

護箱型號	數量	年份	國家	使用者
TN 公司 NUHOMS - OS187H 傳送護箱	2	2006	美國	Dominion 公司 Surry & North Anna 電廠
TN 公司 NUHOMS - OS197L 傳送護箱	1	2006	美國	OPPD 公司 Fort Calhoun 電廠
TN 公司 NUHOMS - OS197H 傳送護箱	1	2006	美國	Dominion 公司 Millstone 電廠
	1	2007	美國	Exelon 公司 Limerick 電廠
	1	2009	美國	Constellation 公司 Ginna 電廠
TN 公司 NUHOMS - OS197FC 傳送護箱	1	2015	美國	Duke 公司 Brunswick 電廠
	1	2018 (製作中)	美國	-
TN 公司 NUHOMS - OS200 傳送護箱	1	2007	美國	Florida Power & Light 公司 St. Lucie 電廠
	1	2013	美國	Southern California Edison 公司 SONGS 電廠
	1	2013	美國	-
	1	2017	美國	-
	3	2018-2019 (製作中)	中國大陸	中廣核工程有限公司
TN 公司 NUHOMS - MP197HB 傳送護箱	1	2018 (製作中)	瑞士	AXPO 公司

四、拜訪中部電力株式会社之濱岡核電廠

中部電力株式会社(Chubu Electric Power Co., Inc., CEPC)之濱岡核電廠位於日本靜岡縣，在靜岡市西南約 50 公里、濱松市以東約 50 公里的御前崎市(Omaezaki-shi)，面積約 1.6 km²。廠內共有 5 部機組，其中 1、2 號機正進行除役中，3、4、5 號機原因 2011 年福島核災事件發生後，日本政府要求停機，並進行設備改善與強化安全措施(包含地質重新調查、設置海嘯牆、圍阻體排氣及配置臨時電源車、消防車等做為複合式災害時之緊急電源、水源之移動式供應)，以符合新核能法規。本次濱岡核電廠的參訪行程由濱岡核電廠除役部(Decommissioning Dept.)部長山元章生(Akio Yamamoto)先生、課長三澤尊久(Takahisa Misawa)先生以及總公司原子力本部原子力土建部課長大津正士(Ootsu Masashi)先生接待、帶領參訪，並與我方進行技術交流會議。

與東海核電廠相同，訪客不得攜帶個人物品，故於進入廠區參觀前個人物品都留置於會議室。在進入廠區參觀前，依規定必須褪去全身衣物(男子僅著內褲，女子著內衣褲)，穿著電廠準備之內衣褲、連身外衣、鞋襪、安全帽，並配戴劑量計。更衣過程中由山元章生先生及三澤尊久先生逐一步驟示範穿著方式，尤其是穿鞋過程中，必須確保鞋子不能踏入更衣區(套上鞋子後僅能踩入管制區)。由此一系列嚴謹之措施，可以看出 CEPC 對於工安的注重。進入後，職等參觀除役中之一號機廠房，參觀後回到會議室進行技術交流會議，內容如下：

濱岡核電廠 1 號機及 2 號機自 2009 年 1 月停機，預計整體除役拆除時程共 28 年，區分為四個階段，已於 2016 年 2 月正式進入第二階段。第一階段已完成燃料搬移，原先放置於燃料池中的用過核子燃料已搬移至 5 號機的用過核子燃料池中，而新燃料則是運回燃料製造商。

第二階段的主要工作為第一階段工作的延續，主要有下列幾項：

- (一) 系統除污。
- (二) 污染分佈調查。
- (三) 控制區外的系統組件拆解。
- (四) 放射性廢棄物營運管理。

以下便針對上述工作的規劃進行詳細說明。

在第一階段時已針對圍阻體內的幾項系統(PLR、CUW、RHR)進行系統除污，在第二階段時規劃針對反應器壓力槽內及圍阻體外的幾項系統(CUW 及 RHR)進行除污，系統除污分為兩階段進行，主要是因為第一階段進行除污的系統在運轉期間已有除污經驗，可以提早進行。在第二階段的除污規劃所需要花費的時間約為 2 年，預估的除污目標 DF 值為 50~100。

污染分佈調查主要是為了使廢棄物產量預估能更加精準，經過第一階段的詳細調查之後，1 號機和 2 號機預估產生的廢棄物總量從 480,000 噸降低到 450,000 噸，雖然放射性廢棄物的預估產量自 17,000 噸增加至 20,000 噸，但清潔廢棄物預估產量自 25,000 噸增加至 78,000 噸，非放射性廢棄物則從 440,000 噸降低為 354,000 噸。第二階段主要將針對反應器壓力槽周邊進行污染分佈調查，希望能將實際取樣分析結果與模擬計算結果進行比較；同時電廠人員為培養自身技術能力，前述取樣係由電廠內原本已廢止的實驗室改善後自行執行分析。

第二階段截至目前為止已產出約 4,000 噸的 L3 放射性廢棄物，唯因日本法規政策尚不明確，所產生的放射性廢棄物均暫時安全貯放於 1、2 號機的建築物內。為使廢棄物管理的安全性更加提升，在拆除及除污過後，放射性廢棄物均存放於容器內，以確保可依廢棄物分類不同進行管理，並盡量減少需要特別進行輻防管理的廢棄物量，也能降低污染擴散的可能。因前述放射性廢棄物仍貯存於機組建築物內，如何妥善運用設備拆除後的空間進行貯放是一重大課題。

拆除工作於第二階段已開始進行，包括：系統組件拆解(管制區外之系統組件、汽機、發電機、反應器區域外之反應器廠房及汽機廠房系統組件、煙囪拆解等。2019 年開始將進入第二階段的後半段，將持續完成如：系統除污、污染情形調查、反應器周圍設備拆解等工作，並同時進行第三階段工作的準備。

和東海核電廠一樣，濱岡核電廠 1、2 號機拆除計畫中亦規劃將可外釋的清潔廢棄物進行外釋解除管制，目前主要對象是主發電機及熱交換器拆除後之廢棄物，重量大約為 6,900 噸。

五、拜訪株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング

株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング(Asano Taiseikiso Engineering Co., Ltd., ATK)成立於 1962 年，總公司設於東京，擁有 6 間分公司及 1 間學術機構，並於 2013 年於新加坡成立代表處。本次拜訪該公司位於東京的總部，由該公司核能後端事業部(Nuclear Back-end Division)的河西基(Motoi Kawanishi)博士、部長竹延千良(Kazuyoshi Takenobu)先生、副部長大森將樹(Masaki Omori)先生以及宋宜蓉女士接待，並與我方進行技術交流會議，探討目前 FEPC 對於用過核子燃料貯存的策略。

FEPC 的基本考量如下：

- (一) 依據日本目前的能源基本計畫(エネルギー基本計画)，從資源的有效利用、高放射性廢氣物的減量以及減少危害等方面之觀點來看，目前日本對於核子燃料循環的基本方針仍是用過核子燃料送再處理以回收鈾鈾進行有效利用；
- (二) FEPC 的成員們將持續推動六個所村的用過核子燃料再處理廠計畫，以達成前述方針下的核子燃料循環；
- (三) 在規劃未來將用過核子燃料運往六個所村再處理廠的前提下，每個核電廠都應規劃用過核子燃料的安全貯存對策。FEPC 規劃推動興建廠內乾貯或廠外集中式貯存設施，來增加用過核子燃料的貯存容量；
- (四) 未來將加強 FEPC 成員間的合作，持續推動相關計畫。

在上述 FEPC 的基本考量下，日本各電力公司的策略方針如下：

- (一) 北海道電力公司的泊核電廠目前將先規劃運用現有的貯存設施，未來將視電廠情況考量包含乾貯在內的各種貯存策略。
- (二) 東北電力公司的女川、東通 2 座核電廠目前規劃運用現有的貯存設施，未來將評估包含廠內外乾貯在內的各種貯存策略。
- (三) TEPCO 就其所屬核電廠分別規劃如下：
 1. 福島第一核電廠規劃將所有用過核子燃料都運至暫時性室外乾貯區域(Temporary Cask Custody Area)進行貯存。
 2. 福島第二核電廠目前將先規劃運用現有的貯存設施，之後將評估貯存策略。

3. 柏崎刈羽核電廠規劃將用過核子燃料送往與 JAPC 共同出資興建的集中式貯存設施(リサイクル燃料備蓄センター)貯存。
- (四) 中部電力公司的濱岡核電廠目前規劃將用過核子燃料送到廠內的乾貯設施進行貯存，未來將評估包含廠內外乾貯在內的各種貯存策略。
- (五) 北路電力公司的志賀核電廠目前規劃運用現有的貯存設施，未來將評估包含廠內外乾貯在內的各種貯存策略。
- (六) 關西電力公司的美濱、高濱、大飯等 3 座核電廠規劃設立電廠外的集中式貯存設施，預計在 2020 年確定場址，2030 年開始營運，未來也不排除與其他電力公司合作。
- (七) 中國電力公司的島根核電廠目前規劃運用現有的貯存設施，未來將評估包含廠內外乾貯在內的各種貯存策略。
- (八) 四國電力公司的伊萬核電廠目前規劃運用現有的貯存設施，廠內乾貯設施也於 2018 年 5 月提出擴增 500tU 貯存容量的申請，目前審查中，未來將評估包含廠內外乾貯在內的各種貯存策略。
- (九) 九州電力公司的玄海、川內等 2 座核電廠目前規劃運用現有的貯存設施，未來將評估包含廠內乾貯在內的各種貯存策略。
- (十) JAPC 的東海(2 號機)、敦賀等 2 座核電廠目前規劃運用現有的貯存設施，未來擬將用過核子燃料送往與 TEPCO 共同出資興建的集中式貯存設施(リサイクル燃料備蓄センター)貯存。

目前日本各核電廠對於廠內貯存設施的運用規劃，有以下四種作法：

- (一) 增設格架；
- (二) 格架重整；
- (三) 機組公用用過核子燃料池；
- (四) 廠內乾貯。

肆、心得及建議

一、有關用過核子燃料乾式中期貯存部分：

- (一) 由於日本的核能產業原本是規劃走用過核子燃料再處理的流程，必須將用過核子燃料運送至電廠外的用過核子燃料再處理廠，故對運輸專用的金屬護箱有需求。藉由本次參訪 Hitz 公司之有明工廠亦了解到該公司在金屬護箱方面有相當豐富的經驗，過去已製造了相當多種類的運輸護箱，故日本的核能產業在選擇金屬護箱時，也優先選用在日本國內已有成熟技術的金屬護箱。
- (二) 由於金屬護箱造價較為昂貴，所以經濟成本較為實惠的混凝土護箱開始受到日本許多核能產業的青睞，但目前日本僅就金屬護箱設有規範，正在研究混凝土護箱之相關規範。Hitz 公司由於併購 NAC 公司，已具備了混凝土系列貯存護箱主要組件-密封鋼筒的製造技術，故 Hitz 公司未來將積極持續推動混凝土護箱，拓展國內市場，並給予日本核能產業更多選項。
- (三) 以東海核電廠用過核子燃料乾式貯存設施為例，該設施亦是採被動式空氣對流設計，利用衰變熱的熱浮力將冷卻空氣自位置較低的進氣口帶入，而加熱後的熱空氣則由位置較高的排氣口排出，與歐洲的中期貯存設施之設計理念相同。
- (四) 日本電力公司目前除了透過共用用過核子燃料池、格架新增或重整、廠內乾貯等作法來增加電廠內貯存用過核子燃料的空間外，有鑑於 JAPC 與 TEPCO 合作的集中式貯存設施(リサイクル燃料備蓄センター)，未來也將考慮此種模式，透過公司間的整合與合作，興建在電廠外的集中式貯存設施。

二、有關電廠除役部分：

- (一) 核電廠除役期間所產生的廢棄物中有部分為清潔廢棄物，其放射性活度極低或並無放射性，為使資源能有效被再利用，應建立妥善制度使清潔廢棄物能外釋。
- (二) 與運轉期間不同，在除役過程中所產出的廢棄物量較大，在規劃拆除作業時，除了工序之外，在廠房內設計良好的動線及貯存空間也是相當重要的一大課題。