

出國報告（出國類別：開會）

日本核能電廠除役拆除廢棄物離廠輻射安全技術交流參訪與觀摩

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：翁雅慧組長

呂世紀課長

沈承緯課長

張馥謙專員

白庭耀專員

派赴國家/地區：日本

出國期間：2024 年 12 月 1 日～113 年 12 月 6 日

報告日期：2025 年 1 月 17 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：日本核能電廠除役拆除廢棄物離廠輻射安全技術交流參訪與觀摩

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/ 黃惠渝/ (02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

翁雅慧/台灣電力公司/核能發電處/保健物理組組長/(02)2366-7074

呂世紀/台灣電力公司/第一核能發電廠/廠區環境課長/(02)2638-3501 #3133

沈承緯/台灣電力公司/第二核能發電廠/劑量評估課長/(02)24985990#2731

張馥讌/台灣電力公司/核能發電處/輻射防護專員/(02)2366-7076

白庭耀/台灣電力公司/第三核能發電廠/劑量評估專員/(08)889-3470#2871

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：2024 年 12 月 1 日~2024 年 12 月 6 日

派赴國家/地區：日本

報告日期：2025 年 1 月 17 日

關鍵詞：除役離廠量測 解除管制

內容摘要：(二百至三百字)

此次赴日本參加原子力除役研究學會 (Association for Nuclear Decommissioning Study, ANDES) 辦理之核能電廠除役拆除廢棄物離廠輻射安全技術交流研討會，並參訪日本濱岡核電廠現場除役作業，整體行程涵蓋設備切割、除污技術及解除管制量測之實務經驗分享，另赴濱岡核電廠進行實務參訪，共計 4 天行程；第 1 日研討會主要聚焦於日本核電廠相關除役架構作經驗分享，包含核電廠除役現況介紹、除役適用相關法規以及普賢核電廠解除管制實務經驗等；第 2、3 日研討會則於 ATOX 技術發展中心，該中心為研究目的導向，提供目前日本核能電廠技術服務及人力資源

開發；第 4 日研討會赴靜岡縣濱岡核電廠進行現場參訪，參訪重點為廠內現場除役作業執行現況，廢棄物物流程序及倉庫貯存作業，以及離廠量測作業執行介紹。

目錄

壹、 出國目的.....	6
貳、 出國行程.....	7
參、 研討會內容記要.....	8
一、 第一天研討會內容記要	11
二、 第二天研討會內容記要	22
三、 第三天研討會內容記要	26
四、 第四天研討會內容記要	28
肆、 心得與建議.....	33
一、 心得	33
二、 建議	34

表目錄

表 1	赴日本行程規劃.....	7
表 2	12 月 2 日~12 月 4 日研討會議程	8

壹、出國目的

本公司核一廠除役許可已於 2019 年 7 月 16 日生效，目前已處於除役排程中的第一階段「除役過渡階段」，核二廠兩部機組運轉執照亦已分別於 2021 年 12 月及 2023 年 3 月屆期，依法規要求，本公司必須於核電廠除役許可生效後的 25 年內依除役計畫完成除役工作，因此為精進本公司除役核心技術，需引進與持續學習國際除役技術與經驗，核能電廠除役期間產生之廢棄物應妥善區分管理並適當離廠處理或回收再利用，故須訂定廢棄物離廠偵測作業計畫，以確保廢棄物離廠無輻射安全顧慮。為精進未來廢棄物離廠通案之量測作業，以利核電廠除役作業之推動與執行，故安排本次出國規劃與日本除役中電廠與相關單位開會交流，並觀摩現場輻射量測技術細節與實務經驗，工作內容如下：

- (一) 與具放射性廢棄物離廠量測實績之相關單位開會交流，並觀摩現場輻射量測技術細節與實務經驗，以了解其使用之量測技術與應注意之經驗回饋。
- (二) 赴除役電廠觀摩現場量測技術細節，以了解國際作法及相關管制措施。
- (三) 綜上所述，藉由開會討論與實地參訪，可精進台電公司廢棄物離廠偵測計畫及技術，強化各核電廠之除役輻安管制與專業知能。

貳、出國行程

此次赴日本行程規劃為 2024 年 12 月 1 日至 6 日，共計 6 日，本次研討會係日本原子力除役研究學會(ANDES)辦理之核能電廠除役拆除廢棄物離廠輻射安全技術交流研討會，並安排參訪日本濱岡核電廠現場除役作業，地點主要停留在東京柏葉開放創新實驗室(KOIL)及 ATOX 公司之技術發展中心會議室進行研討會交流以及赴靜岡縣濱岡核電廠參訪交流，行程規劃如表 1 所示。

表 1 赴日本行程規劃

時間	地點	工作內容
12 月 1 日(日)	台灣至日本	去程
12 月 2 日(一)	柏之葉校區 KOIL 會議室	研討會-議題交流
12 月 3 日(二)	ATOX 技術發展中心 會議室	研討會-議題交流
12 月 4 日(三)	ATOX 技術發展中心	研討會-實務操作
12 月 5 日(四)	濱岡核電廠	參訪機構及議題交流
12 月 6 日(五)	日本至台灣	返程

參、研討會內容記要

日本原子力除役研究學會(ANDES)辦理之核能電廠除役拆除廢棄物離廠輻射安全技術交流研討會，並安排參訪日本濱岡核電廠現場除役作業，第一天地點主要停留在 KOIL 會議室，第二、三天於 ATOX 技術發展中心會議室進行研討會交流，第四天赴靜岡縣濱岡核電廠參訪交流，台日雙方兩個電廠就解除管制/離廠量測議題實務面進行交流及意見交換，整體研討會議程詳表 2。

表 2 12 月 2 日~12 月 4 日研討會議程

日期/時間	Agenda 議程	主講者
12/2 Mon	會場：KOIL Room A3	
10:00-10:20	・オリエンテーション (歡迎、介紹)	ANDES 事務局長
10:20-11:00	・日本の廃止措置の現状 (日本核電廠除役現況)	ANDES 事務局長
11:00-12:30	・日本解除管制制度、規制 (日本解除管制制度和法規) ・日本のクリアランス測定/判断方法と実績 (日本解除管制測量/判斷方法和實績)	福井大学 教授
13:30-15:00	・ふげん発電所のクリアランス測定/判断の経験 (普賢核電廠解除管制測量和判斷經驗)	日本原子能研究 開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA) 專員
15:15-16:15	・台湾のクリアランス測定/判断の計画と実績 (台灣解除管制測量/判斷方法和實績)	台灣電力公司 課長
	・質疑応答と意見交換 (Q&A)	ANDES

16:15-17:00		會長
12/3 Tue	會場：ATOX 技術發展中心會議室	
09:00-09:15	歡迎介紹	ATOX 技術發展中心負責人
09:15-10:45	・放射能測定裝置（開發中）の説明（放射能測定裝置説明）	ATOX 技術發展中心專員
11:00-12:30	・除染裝置の説明（除汚裝置的説明）	ATOX 技術發展中心副主任
13:30-14:00	ATOX 介紹	ATOX 技術發展中心副主任
14:00-16:00	・放射能測定裝置のデモ（輻射能測定裝置示範） ・除染/解体裝置の見学（除汚/拆解裝置的參觀） －原子炉ウェル壁面除染裝置（反應爐井壁面除汚裝置） －ブラスト除染裝置、化学除染裝置（噴砂除汚裝置、化學除汚裝置） －粉碎減容處理裝置、ドラム缶切断裝置（粉碎減容處理裝置、鐵桶切割裝置）	ATOX 技術發展中心副主任
16:00-16:30	質疑応答と意見交換（Q&A）	
12/4 Wed	會場：ATOX 技術發展中心	
09:00-12:00	・表面汚染測定実習（表面汚染測量實習） －汚染サーベイメータ（汚染調査儀）	ATOX 技術發展中心

		係長
13:00-14:15	・ 表面汚染測定実習（表面汚染測量実習） ー スミアサンプル測定（擦拭取様測量）	ATOX 技術發展 中心 係長
14:30~	路程(柏➡掛川)	
12/5 Thu	會場：濱岡核能發電廠	
9:00~12:00	一、電廠簡介 二、現場參訪 解体现場（拆解現場） 解体物仕分け、除染、一時保管作業（解體物 分類、除汚、暫時儲存作業） クリアランス測定作業（解除管制測量作業） クリアランス検認後保管場所（解除管制確 認後儲存場所） 外周、安全強化対策工事（外圍、安全強化對 策工程）	中部電力 部長
13:00~14:00	濱岡 NPP のクリアランス測定/判断の経験 (濱岡解除管制測量/判斷方法和經驗)	中部電力 副長
14:00~15:00	・ 台湾のクリアランス測定/判断の計画と実 績（台灣解除管制測量/判斷方法和實績）	台灣電力公司 課長
15:00~15:30	質疑応答と意見交換（Q&A）	

一、 第一天研討會內容記要

日本原子力除役研究會(ANDES)成立於 1997 年，由具除役實務經驗的專家組成之非政府組織，針對於除役核電廠相關作業人員提供相關經驗及訓練，並加強彼此間的合作。本日研討會主要聚焦於日本核電廠相關除役架構作經驗分享，包含核電廠除役現況介紹、除役適用相關法規以及普賢核電廠解除管制實務經驗等，接著由台電核一、二廠介紹台灣核電廠解除量測/判斷和實績，並於會後針對雙方提供之議題進行交流。今日議程及內容說明如下：

(一)日本核電廠除役現況

1. 講者介紹

本課程由 ANDES 事務局長講授，其曾服務於東海核電廠並負責核電廠除役工作長達 20 年的時間，課程內容包含日本核電廠除役年表、日本除役核電廠現況、日本除役廢棄物說明等。

2. 議題內容摘述

(1)日本核電廠除役相關技術的建立，源於 1982 年由日本原子能研究所開展之日本動力示範反應器 (Japan Power Demonstration Reactor, JPDR)除役計畫。整個計畫由兩個階段組成，第一階段旨在開發拆除反應器所需之技術，第二階段則是利用前一階段發展的技術實際應用於反應器之拆除作業中，各項技術之有效性也經由 JPDR 除役計畫獲得驗證並為未來核電廠相關除役作業奠定基礎。另外隨著各核電廠相繼停止運轉，如 2001 年 12 月日本第一座進入除役階段之東海核電廠，以及 2003 年 3 月普賢電廠等，日本於 2005 年 12 月提出反應器管制修正法案，引入廢棄物解除管制制度 (Clearance System)並建立核電廠除役之監管框架，確立核電廠除役之法律架構。依照該法案核電廠在停止運轉前須向主管機關提出除役計畫以及除役階段運轉安全計畫修正方案

(Operational Safety Program, OSP), 獲得管制機關審查核可後方可進入後續除役階段。除役流程分為四個階段, 分別是前置作業準備、反應器周邊設備拆除、反應器拆除以及廠房拆除, 最後經主管機關核准核電廠完成除役計畫。

(2) 日本核電廠歷經 2011 年發生的 311 福島事件後全數停止運轉, 而後於 2013 年 7 月日本原子能管制委員會(Nuclear Regulation Authority, NRA)針對各電廠提出新的管制基準要求。目前有 17 部機組通過 NRA 審查, 其中 13 部機組運轉中, 4 部機組準備重新啟動, 另外有 9 部機組正在審查中; 剩餘機組中有 21 座進入除役階段, 執行第一階段準備工作的 12 個機組分別為玄海核電廠 1、2 號機、伊方核電廠 1、2 號機、大飯核電廠 1、2 號機、女川核電廠 1 號機、福島第二核電廠 1~4 號機以及文殊反應爐; 進入第二階段反應器周邊設施拆除的 8 個機組分別為東海核電廠、普賢核電廠、敦賀核電廠 1 號機、島根核電廠 1 號機、濱岡核電廠 1、2 號機、美濱核電廠 1、2 號機, 目前日本完成除役作業的是 JPDR 機組。此外福島第一核電廠 1~6 號機正處於事故後清理階段。

(3) 日本現行除役廢棄物主要分為一般廢棄物、非放射性棄物、解除管制廢棄物、低階放射性廢棄物(分別為 L3、L2、L1 等三級), 三者以 L1 活度值最高。非放射性廢棄物的離廠作業由各核電廠自行訂定, 經 NRA 審查核可後即可視為一般廢棄物放行, 且用途不受限制; 解除管制廢棄物如金屬, 目前僅限於電廠內進行材料再利用, 若未來情況允許, 也可做為事業廢棄物放行; 現階段日本並無針對除役產生低、高階放射性廢棄物的存放設施, 此類廢棄物均放置於核電廠內管理。

(4) 日本核電廠除役作業原由核電廠各自執行, 但是為了解決除

役過程所遭遇難題如低階放射性廢棄物貯存設施未定案、工程延宕等，日本政府於 2024 年 4 月授權法人成立核燃料再處理及除役促進機構，由其負責進行核電廠除役統整規劃以推動核電廠除役作業之順利執行。

(二) 日本解除管制制度和法規以及日本解除管制測量/判斷方法和實績

1. 講者介紹

本課程由福井大學特聘教授講授，其曾任普賢核電廠副廠長，而後普賢核電廠決定除役時，係由其主導普賢核電廠除役計畫之建立，課程內容包含解除管制系統簡介、日本的解除管制制度與方法、實際應用以及最新趨勢。

2. 議題內容摘述

(1) 廢棄物解除管制系統係指核電廠除役拆除階段所產生的廢棄物例如金屬材料等，若經量測僅有極低放射性比活度並且對人體所造成的影響微乎其微，考量環保與經濟效益，可將其解除管制並重複利用於產業界。核電廠須對欲解除管制之廢棄物提出量測評估方法並經由管制單位核可後方可執行偵測作業，量測結果符合放行標準並且經監管單位驗證後，該廢棄物即不再被視為具放射性物質並不需受核管機關管制，可作為一般事業廢棄物處理或是重新加工使用於各行各業。

(2) 放射性廢棄物解除管制量測流程首先選擇需評估之核種，並設定評估單位，接下來選擇偵測設備以及量測情況，最後執行偵測得到量測結果並藉由評估單位得到比活度。第一步選擇欲評估之放射性核種，針對不同物件有其對應考量之核種，並由下列方程式篩選出需評估之核種。

$$\frac{\sum(D_j/C_j)}{\sum(D_k/C_k)} \geq 0.9$$

D：量測比活度

C：解除管制之比活度。

將各核種 D/C 比值(%)相加直到超過 90%即為解除管制需考量之核種。針對不同的材料有不同考量的核種，例如反應爐

設施需考量 5 種核種，而核燃料須考量 49 種，其他材料則需考量 274 種核種。第二步須設定評估單位，考量到污染的歷史紀錄等，且污染程度有顯著不同的物體不作為單一單位進行測量，另外評估重量不超過 10 噸。第三步則是選擇測量方法，例如直接輻射測量、核種組成比例、活化計算、平均放射性比活度等方法，以上各方法所得到之量測結果須考慮到不確定度，確保偵測值加上 95%可信度的偵測結果要小於管制限值。接著選擇適當的偵測設備以及量測環境，儀器應評估並管制最小可測值，並考慮測量位置周圍背景條件和檢查物體的屏蔽效果。另外在將設施中欲拆除或移除的材料作為解除管制量測前，必須先符合法規規定的表面污染放行標準。

(3) 日本核電廠從 2001 年第一部進入除役階段的東海核電廠開始，至今已經累積大量解除管制量測之案例，因應不同尺寸以及重量的零組件，各核電廠使用不同類型的偵檢儀器執行量測任務，偵測核種類型也是影響因素之一。

- A. 濱岡核電廠拆除低壓渦輪機轉子的金屬葉片，使用移動式純鍺偵檢器及碘化鈉閃爍偵檢器進行直接輻射量測 10 個主要核種。
- B. 濱岡核電廠拆除除役的一號機以及二號機的金屬零件則是使用上下各 2 組純鍺偵檢器來進行量測 10 個主要核種以及 C-14。
- C. 東海核電廠量測除役的金屬零組件則是使用塑膠閃爍偵檢器偵測 10 個主要核種以及 C-14。
- D. 東海研究用反應爐 3 號(Japan Research Reactor No.3, JRR-3)混凝土，因考量其核種含有 H-3、Co-60、Cs-137 以及 Eu-152，使用純鍺偵檢器及液態閃爍偵檢器偵測。

- (4) 有關核子設施的解除管制概念已經在很多國家建立並實施，日本在差不多的時間點引入此觀念且在各地解除管制的案例也逐年增加，但是日本經過解除管制的低放射性廢棄物目前仍僅於核電廠內再利用，近年僅嘗試極少部分作為一般事業廢棄物離開核電廠，間接導致已通過解除管制的材料循環再利用的進度陷入停滯狀況，此情形必須獲得包括公眾、地方政府和相關企業在內的利益相關者對系統和安全方面的理解才有可能突破，這也是台灣核電廠未來會面臨到的課題。
- (5) 目前日本正在規劃由地方相關企業合組一聯盟，負責將各核電廠等待解除管制量測的廢棄金屬集中收集，執行後續分類、切割及除污等處理，並使用熔爐將待測金屬加熱至融熔狀態，再將其製成統一規格之造型以便後續執行量測及保管作業，此方法可減少各電廠之負擔，值得持續關注此項制度進展供台灣參考。

(三)普賢核電廠解除管制測量和判斷經驗

1. 講者介紹

本課程由日本原子能研究開發機構(JAEA)專員講授，目前普賢核電廠之除役作業係由其負責，課程內容包含普賢核電廠除役簡介、普賢核電廠解除管制執行現況等。

2. 議題內容摘述

- (1) 普賢核電廠位於日本福井縣敦賀市的敦賀半島上，由日本原子力研究開發機構(JAEA)負責營運，是一座研究用商業反應器，採用進步型熱滋生反應器(Advanced Thermal Reactor, ATR)的原型設計，該反應器於 1979 年開始商業運轉，並於 2003 年 3 月決定永久停止運轉。
- (2) 普賢核電廠之除役計畫分為四個階段，包括重水和氬系統除污階段、反應器周圍設備拆解階段、反應器拆除階段以及廠房拆除階段。普賢核電廠處於拆除反應器周圍的設備的第二階段，現已拆除 A 迴路冷卻系統側以及 B 迴路冷卻系統側的組件拆除，建立從反應器廠房到汽機廠房的拆除廢棄物運輸路線，目前正執行反應器廠房剩餘大型組件的拆除作業，並預計第三階段反應器拆除作業於 2030 年展開。評估除役過程中將產生之廢棄物等級、組件污染程度分布，以及拆除廢棄物數量，針對拆解 L3 級廢棄物執行除污作業後，已將原產出 45.4 千噸 L3 級廢棄物減低至 5.4 千噸，使大部分 L3 級廢棄物變為符合解除管制(Clearance)標準之廢棄物。
- (3) 普賢核電廠解除管制執行現況，普賢核電廠於 2015 年即向主管機關申請提出解除管制之量測與評估方法的審查，中間經過數次修改，最終於 2018 年取得 NRA 核准執行解除管制之量測與評估方法。有關普賢核電廠確認放射性廢棄物符合

解除管制標準之作業流程，首先針對拆除作業過程中產生的廢棄物進行分類及除污，並暫存於廠房內，由電廠提出解除管制之量測與評估方法給管制單位審查，例如從汽機廠房拆除下來的金屬廢棄物共有 1,100 噸重，此金屬待測物將針對 10 個關鍵核種進行偵測，其中 Co-60 的比活度由偵測儀器所測得，而其餘 9 個關鍵核種則由樣品分析得到其比活度。管制機關核准後即可以該量測評估方式執行偵測，最後偵測結果經監管機關驗證後，該批廢棄物即可運出廠房等待後續規畫處理。自 2018 年起至 2024 年普賢核電廠已完成七批廢棄物的解除管制之量測與評估並由管制機關驗證，總重達 628 噸。

- (4) 普賢核電廠解除管制量測及評估方法範例，首先須找出待測廢棄物所需評估核種，由經濟產業省決定核子反應器設施需考量 33 個核種，再經量測並計算出解除管制時需納入考量之核種，待測廢棄物的 Co-60 比活度可由儀器偵測獲得，其餘核種則可藉由各核種與 Co-60 組成比例或是核種分析資料之平均比活度得，接著由各核種比活度與解除管制的標準值比值總和來判斷該廢棄物是否符合解除管制之要求。
- (5) 普賢核電廠廢棄物的切割與除污，因廢棄物大小、尺寸均不相同，為了方便後續量測作業以及減少偵測死角，藉由切割將廢棄物一固定尺寸，例如普賢核電廠為了配合偵測儀器之量測空間，而將待測物切割成固定為 50 公分 x 50 公分或更小，且重量介於 10~25 公斤，以利量測作業並且也可以節省大量的存放空間。另外為移除低放射性廢棄物之表面污染或鐵鏽，在執行解除管制量測前也會先進行除污作業，除污的方式又可分成濕式以及乾式兩種類型。濕式除污是藉由壓縮空氣將水和膠質噴灑於物體表面以去除放射性物質或是烤漆，其中又可分人工操作以及全自動除污，人工最大的優點

是除污過程不會受到物體形狀影響，針對死角處都可以順利完成，不過缺點是會消耗大量人力以及時間，導致進度緩慢；全自動除污則相反，在短時間可以完成人工數倍以上的工作量，且作業品質穩定，不過缺點則是除污效果極度受物體外型影響而降低。乾式除污主要使用噴砂等材料，其不受物體外型影響，且可減少人力的損耗並維持穩定的表現，不過缺點則是僅能較小尺寸的物件進行除污。

- (6) 普賢核電廠除役廢棄物解除管制的量測設備，該量測設備裝置上下各 4 個塑膠閃爍偵檢器、重量計、監視器、輸送平台等組件，可以量測長、寬各 78 公分、高 40 公分以內，重量 30~100 公斤之平板、剖面切管、及管狀等幾何形狀廢棄物，其解除管制標準與國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA) RS-G-1.7 標準相同，Co-60 與 Cs-137 均為 100 Bq/kg。
- (7) 每一個解除管制量測的廢棄物都有 1 個 QR Code，包含該廢棄物之相關資料，完成量測並符合解除管制標準之廢棄物包件會放在一個容器中，待該容器放滿之後會再給該容器 1 個 QR Code，可清楚且快速的讀取該容器中廢棄物相關資料。
- (8) 普賢核電廠解除管制之金屬再利用，於福井縣內的各個地點安裝和展示由重複使用解除管制金屬製成的產品，以促進社會大眾對解除管制的金屬份器物重複使用的理解。

(四)台灣解除管制測量/判斷方法和實績

1. 講者介紹

由台電公司核二廠課長說明離廠量測計畫架構、量測分析方法及標準及相關儀器簡介，核一廠課長進行核一廠離廠再確認中心建置及營運經驗分享。

2. 議題內容摘述

- (1) 台灣核電廠離廠量測計畫及量測分析方法，針對核電廠除役過程中產生之廢棄物，經由初始評估包含目視檢查、歷史紀錄檢視等方式來判斷該廢棄物是否遭受輻射影響，若確實有遭受輻射影響之可能，接著執行污染特性分類及分級，依廢棄物輻射狀況可分成 3 級，例如 Class 1 的廢棄物因其輻射狀況可能高於解除管制標準，所以必須採取 100%量測；Class 2 則是因輻射狀況可能符合離廠標準，故量測比例至少為 25%，再驗算是否提升；Class 3 的廢棄物因輻射偵測僅為背景值且無充分證據顯示無受輻射影響，仍需至少量測 10%或是抽樣 14 點以防止不當離廠。量測所使用的儀器也依照廢棄物的不同而有差異，例如大型物件不易切割的廢棄物多採用加馬能譜分析方式，量測物件所含核種及比活度；而小型物件或是可切割的廢棄物則是使用總比活度量測方法，將待測物放置於箱型偵檢器中量測總加馬放射性比活度；若分類為 Class 3 僅具有潛在表面污染之廢棄物可利用表面污染定點量測的方法，於物件表面進行布點，以手持式儀器進行定點量測；若廢棄物的表面推導值過低或是表面結構不易偵測，則可採用表面拭跡於物體表面布點取樣，以低背景計測系統量測拭跡樣品。上述四種量測分析方法進行離廠量測前都須通過相關之認證，例如執行總比活度量測法與加馬能譜分析法的實驗室必須通過財團法人全國認證基金會(Taiwan Accreditation Foundation, TAF)認證，而表面污染定點量測法與表面拭跡偵測法則是通過由國家實驗室舉辦能

力比對試驗。針對量測標準則是參考國際原子能總署(IAEA)發布之技術文件 GSR Part 3.以及 GSG-18 所訂定核種解除管制標準，建立與國際一致的量測標準。

- (2)核一廠建置之離廠再確認中心為台灣第一座執行除役核電廠廢棄物解除管制的偵測中心，除役過程中所拆卸的物件，考量廢棄物減量且其仍具有再利用之價值，針對此類具有通過離廠標準之潛力之廢棄物進行量測及評估，讓符合解除管制之物件重新循環使用以發揮最大經濟效益。受輻射影響物質經初始評估判定為具有離廠潛力的廢棄物在輻射管制區內先經過一次偵測，確認符合解除管制標準即被運送到離廠再確認中心進行再次量測，離廠再確認中心於低輻射背景區執行通過 TAF 實驗室認證或國家實驗室的能力試驗比對之偵檢程序以確保量測結果品質，通過離廠標準且經主管機關驗證之廢棄物即可做為下腳回收。
- (3)核一廠已執行主發電機設備如勵磁機外蓋、主發電機鐵芯銅片等拆除偵檢，主要量測由核一廠人員進行，另外配合管制機關要求而委請獨立驗證單位例如輻射防護協會針對每批次進行抽樣量測，主管機關也會不定期委託第三方驗證以確保偵測品質符合要求。整個主發電機拆除案目前解除管制重量為 192 噸，大約占核一廠總拆除重量約 6%。

二、 第二天研討會內容記要

本日研討會移至 ATOX 技術開發中心，ATOX 係於 1988 年 8 月成立於千葉縣柏市，並致力於開發除役所需的新技術，透過開發設備和施工方法，提供機器人和遠端技術服務；該中心利用研究設施提供技術服務以及人力資源開發，以使福島第一核電廠能順利除役之目標。該中心亦具備大量與日本國內電力公司、設備製造商和附屬公司合作的經驗。另針對 ATOX 技術開發中心將於本日第三個議題進行詳細介紹，本日議題及相關說明如下：

(一)放射能測定裝置說明（本議題因含有 ATOX 技術發展中心內機密資訊，故本報告無法揭露相關資訊。）

(二)除污及除役技術裝置說明

1. 講者介紹

本議題由 ATOX 技術發展中心副主任負責介紹，其負責各項核電廠所需技術之開發作業。其亦負責本日下列兩議題，ATOX 介紹及 ATOX 除役發展設備實體介紹。

2. 議題內容摘述

本議題將介紹 ATOX 中心研發除污和清潔相關之技術及產品，並應用至日本國內核能電廠例行維護作業之案例，分述如下：

(1) 除污裝置

為因應福島第一核電廠執行廠房地面除污作業，開發可遠端遙控之清潔設備，如 RACCOON；另為因應電廠例行大修執行反應爐牆面除污作業，開發自動化洗牆設備，可降低人員受曝劑量，如 Wall cleaner。

(2) 切割技術

電廠除役將拆解設備，並對原有大型設備進行切割，以利後續進行廢棄物處置、處理及輻射量測。ATOX 中心針對設備外殼部分，考量設備厚度不得大於 10 公分、表面須盡可能平整等條件，開發半自動切割及全面切割設備；另針對設備管路部分，開發管路切割設備，長管路將先裁切至 3~4 公尺之短管，再將短管縱向剖開變成兩個半圓片。

(3) 廢棄物管理及減容技術

為有效減少廢棄物體積，開發固體廢棄物破碎機，可破碎廢棄物如水管、塑膠容器、橡膠類物品及木製產品。另為利檢整作業執行開發爬桶機器人及機械手臂，可確認廢料桶桶身及桶底之破損情形。經淘汰之廢料桶，將由廢料桶切割機進行桶槽切割，以達到減容目標。

(三) ATOX 介紹

ATOX 技術發展中心之總公司成立於東京都港區，該中心之員工 1,784 人(截至 2024 年 3 月)中具資格處理輻射的人員約有 650 名。其負責處理與核設施和其他設施工作相關的各種輻射管理任務。

技術開發中心由主任及副主任領導共 6 個部門，分別為商業推廣、輻射分析、化學處理、遠端設備開發、廢棄物處理，以及品保、安全設備管理等 6 部門。

日本 ATOX 技術發展中心主要研究設施共有六項，分別為大型模擬池設施、加馬射線照射設施加馬射線照射設施、放射性同位素(非密封)使用設施、化學實驗設施化學實驗設施、分析測量設備分析測量設備。

該中心為日本第一間，設立專任辦公室於核能電廠內之私人機構，目前主要負責任務如下：

1. 福島第一核電廠重建計畫

- (1)、 廠房及反應爐相關除污作業
- (2)、 劑量調查與測量
- (3)、 多核種廢水處理作業(Advanced liquid processing system, ALPS 系統)

2. 核電廠例行維護計畫

- (1)、 輻射控制（工作環境測量、劑量監測）
- (2)、 放射性廢棄物處理（收集、儲存並減少放射性廢棄物的產生量）
- (3)、 設施管理（熱洗衣操作，鉛玻璃保養）

3. 醫療商業計畫

- (1)、 核醫藥物製作
- (2)、 腦部正子斷層造影設備研發
- (3)、 Ge-68/Ga-68 產生器

(四) ATOX 除役發展設備實體介紹

1. 參觀輻射能測定裝置。
2. 參觀除污/拆解裝置。
3. 參觀反應爐井壁面除污裝置。
4. 參觀噴砂除污裝置、化學除污裝置。

三、 第三天研討會內容記要

本日研討會地點一樣為 ATOX 技術發展中心，議題主要針對污染偵測儀器及擦拭取樣等設備進行交流，本議題係由 ATOX 技術發展中心的專員報告，其對於輻射偵測儀器開發及污染偵測有多年的實務經驗；日本核能設施所使用之輻射偵檢儀器大多為日本國內所設計、製造，故整個核工業界內經常可回饋輻射偵測儀器的使用經驗供研發單位參考，有利於精進並設計出更符合第一線操作人員使用需求之偵檢儀器；今日研討會內容主要為實際操作由 ATOX 開發輻射偵檢儀器，並了解日本核能設施的污染偵測作為：

(一)輻射偵測實習

在實習課堂上，講者準備了簡單的實驗器材，包括蓋格偵檢器、Ra-226 標準射源，以及作為屏蔽用的厚書本；藉由調整偵檢器對射源之距離，來模擬偵檢人員使用蓋格偵檢器搜尋低微污染（接近背景範圍）時的儀器反應。

(二)污染拭跡偵測見習

介紹完輻射偵測儀器的操作後，ATOX 講者提供了污染拭跡紙，說明日本核能工業界在檢查或追蹤各類物料或地面上是否殘留有非固著性之輻射污染時，主要係以污染試紙進行擦拭取樣，再將樣品貼置於手持式蓋格輻射偵檢器上，檢驗是否有高於管制標準的鬆散性放射性物質被蒐集在試紙上；而在擦拭時，力道要適中，每次擦拭取樣範圍以 100cm^2 為原則，並在實務上會教導偵測人員可擦拭更大的面積及路徑，以得到較保守的偵測數據。前述污染偵測追蹤之方法基本上與本公司各核能電廠相同，惟使用之試紙形狀略有不同，且樣品之度量主要係以專用的阿伐、貝他比例計數器系統進行準確定量後，再回推待測物的表面非固著性污染，而手持式蓋格輻射偵測器僅用於初步確認試紙樣品是否殘留有高污染，以利後續判別是否使用低背景計數系統或一般計數系統進行計測，避免精密儀器受

到污染。

(三)核種分析見習

最後由 ATOX 講者引領見習人員至核種分析實驗室並介紹分析儀器；核種分析儀的主要構造為高純鍍偵檢器、屏蔽箱、冷卻用液態氮桶及工作電腦，其原理係藉由高純鍍偵檢器對於伽馬射線有良好的能量解析度，進而對樣品所放出的輻射進行能譜分析，並達到核種鑑別及定量之功能，為全球核能工業界普遍採用之分析設備，而本公司各核能電廠及放射試驗室在輻射防護管制、放射性廢棄物管理及環境輻射監測方面，也已大量應用此類儀器進行各類試樣（例如空氣、水、土、草樣）分析。

比較特別的是，ATOX 自行設計開發了樣品自動計測裝置，量測人員可將待分析之樣品排列於盤面上，由機器自動依序將樣品送入量測腔室內，完成後再將樣品退回盤面並送入下個樣品；由於環境試樣通常所含輻射極低，故需要大量的分析時間來蒐集足夠的輻射訊號，此自動計測系統可使分析人員無須定時手動更換樣品，可於非上班時間安排並完成一系列的樣品分析作業，大幅提升工作效率。

四、 第四天研討會內容記要

本日研討會移師至中部電力公司濱岡核電廠，上午由濱岡核電廠廢止措置部部長說明介紹濱岡核電廠及全程陪同設施參訪說明，下午部分分別由濱岡核電廠及台灣電力公司就解除管制測量/判斷方法和經驗進行交流，議題及相關說明如下：

(一)電廠簡介及設施參訪

1. 電廠簡介

- (1) 濱岡核電廠位於靜岡縣御前崎市，設施規模包含 5 座機組，1 至 4 號機為沸水反應爐(BWR)，5 號機為進步型沸水反應爐(ABWR)，而 1、2 號機已於 2009 年 1 月 30 日停止運轉，目前正在進行除役作業，3、4 號機正在接受新規制標準的適合性審查(分別於 2014 年 2 月及 2016 年 6 月申請)，5 號機準備提交審查申請的階段。
- (2) 核電廠的員工情況，工作人員（包括中部電力及協力廠商）總數約為 2,800 人，統計至 2024 年 10 月 1 日之數據，中部電力員工約 700 人，協力公司員工約 2,107 人，總計共 2,807 人，員工居住地分布大部分約占 42%於御前崎市：1,179 人（42%）。領導層發電所所長負責核電廠的全面管理，地域事務所所長負責與地方相關的業務協調。其中電廠部分劃分 9 個部門，如供應及品質保證部-負責核電廠的整體管理與品質保證，廢止措置部-專門處理 1、2 號機的除役計劃與相關作業，另外有核能相關技術負責人（如原子爐主任技術者、電氣主任技術者）負責核能技術與安全的具體實施；地域事務所處理與地區相關的具體事務，如與當地政府、居民的溝通與合作等，並設有原子力館(類似展示館)負責與核能教育

相關的展示與公眾交流負責與地方相關的業務協調。該組織圖顯示了濱岡核電廠以專業分工為主的多層次管理模式，涵蓋了從運營、技術、安全到地區合作的各個領域，以確保核電廠的運行和除役作業的安全與高效進行。

- (3) 濱岡 1、2 號機除役概況：1 號機於 1976 年運轉，2 號機於 1978 年運轉，兩部機於 2009 年 1 月結束運轉進入除役，除役計畫分成四個階段，第 1 階段-拆除準備與污染狀況調查（2009 年～2015 年），執行燃料搬出與系統的除污，主要確保除役工程的基礎安全，用過燃料已於 2014 年 2 月完成移出至五號機，新燃料則於 2015 年 2 月移出送回燃料廠家。第 2 階段-周邊設備拆除（2016 年～2024 年），包括放射線管理區域外的設備與設施拆除，目前正在進行周邊設備的拆除作業。第 3 階段-原子爐區域拆除（2024 年～2036 年），包括原子爐壓力容器等主要設施的拆除。2024 年 3 月 14 日已向政府提交除役計畫的變更許可申請進入第 3 階段。第 4 階段-建物拆除（2036 年～2042 年）將進行整體建築的拆除。
- (4) 除役廢棄物分類及管理：除役拆除廢棄物分類，分成非放射性廢棄物：完全不含放射性物質，即作為一般廢棄物處理；解除管制廢棄物（Clearance）：放射性濃度極低且對人體無害，可作為普通材料再利用；低放射性廢棄物：需要專門處理的放射性廢棄物。除役作業兩部機預計產生約 45 萬噸廢棄物，其中非放射性廢棄物 35.4 萬噸(占比 78%)、解除管制廢棄物 7.8 萬噸(占比 17%)、低放射性廢棄物 2 萬噸(占比 4%)，而截至 2024 年 6 月底統計數據，管制區內非放射性廢棄物約 479 噸、解除管制廢棄物約 1,387 噸、低放射性廢棄物約 0.2 噸；管制區外均為非放射性廢棄物共 5,316 噸，如氮氣槽及主變壓器等均為非放射性廢棄物之案例。於日本濱岡核電廠管制區外均為非放射性廢棄物，而管制區內可針對廢棄物

過往歷史資訊及流程知識判斷是否屬於非放射性廢棄物，如濱岡核電廠之主發電機即屬此案例。

- (5) 廢棄物解除管制流程，在專用測量室進行放射性偵檢，確認其是否可被解除管制。量測完成後廢棄物暫時存放於專用倉庫等待主管機關審查，倉庫每棟可存放約 350 噸，截至 2024 年 6 月已存放 835 噸廢棄物，經過主管機關最終確認後，部分廢棄物將被搬出以進行再利用。金屬廢棄物再利用案例，經確認為安全的金屬廢棄物被加工為排水溝蓋板，敷設於核電廠內及其周邊地區，如濱岡核電廠與周邊加工廠（如木村鑄造所）合作加工做為排水溝蓋板，應用實例使用在濱岡核電廠的內部道路及設施周邊敷設排水溝蓋板，總數達到 3,771 塊。

2. 設施參訪：

本次參訪之重點為廢棄物解除管制之現場作業了解，濱岡核電廠指派專人全程陪同，含防護衣物更換/離開時脫除、電子式劑量領用/使用以及離開管制區之人員偵檢指導及各參觀點之解說等，均安排足夠人力引導及說明，對於路線安排均事先妥善規劃並搭配手板以利現場解說，另外並於汽機廠房主發電機及低壓汽機段區域設置參觀解說平台，可見電廠對於來賓參訪及解說已視為常態並駕輕就熟；本次路線為先至兩部機共通之汽機廠房，該區現已將主發電機及低壓汽機段拆除，並將該區域作為廠房內廢棄物之暫存區，現場使用施工架架高等方式提高現場暫存容積及空間，完成切割之物件均整齊擺放放置於容器內並以帆布覆蓋；並接著至廠房內之表面偵檢站，了解解除管制量測前之偵檢篩選方式，物料現場拆除後會先進行表面掃描，以確認無熱點殘留，廠房內之表面偵檢站採用塑膠閃爍之隧道式平面偵檢儀，判定符合標準後才可裝箱送至進解除管制量測中心進行偵檢，該隧道式平面

偵檢儀雖可提高量測速度，但受限於儀器高度，物件需裁切至適當高度才能進入，當下參觀時即看到作業人員在現場丈量確保待量測物件可進入隧道式平面偵檢儀，完成此站偵檢之物件將裝箱並上封籤後運送至解除管制偵檢站；接著參訪點安排至廠房外之解除管制量測中心，該區域劃設為管制區域，設置一台配有 4 台 Ge 半導體檢測器（上下各 2 台）進行比活度測量之儀器，因現場物件均裝箱並上封籤故現場僅作測量作業，對於不合格物件將整箱退回機組現場處理，合格之物件將整箱送至外圍倉庫暫放等待主管機關確認；最後參訪點安排至外圍倉庫，箱子均妥善設計可堆疊增加倉儲量能，另外對於來賓參訪有特別規劃放置一箱經主管機關確認後開箱之物件，讓來訪人員了解除役廢棄物的樣態。

(二)台日雙方解除管制測量/判斷方法和經驗交流

1. 由中部電力公司濱岡核電廠發電部廢棄物管理課副長進行濱岡解除管制測量/判斷方法和經驗說明，議題內容說明摘述如下：
 - (1) 解除管制程序，由業者向主管機關申請放射性比活度測定與評估方法(認可申請)，依照核准方式測量並獲得主管機關確認(確認申請)，經確認物品可進行再利用或一般廢棄物處理，不再視為放射性廢棄物。其解除管制標準對於 Co-60 比活度須符合 0.1 Bq/g 以下。
 - (2) 測定與評估方法的演進：過去作法針對單一系統設備進行平面測量，計算簡單。目前採多系統設備整合到容器中進行一體測量，考慮輻射屏蔽效應與核種狀態的綜合影響。將拆解物裝入測量容器並測量重量與高度，使用 4 台 Ge 半導體檢測器（上下各 2 台）進行測量。將容器內部虛擬分為 8 個「測量單位」，分兩次測量完成。放射性比活度計算方式以測量

主要核種（如 Co-60）的計數率並使用轉換係數將計數率轉為放射性比活度以確認是否符合解除管制之要求。

(3) 解除管制認可實績自 2024 年 6 月底到現在主要三個案例，包括每個案例的申請、認可及測量進展，並對相關數據進行了整理。以下為詳細內容：

- A. 案例 1：5 號機舊低壓汽機轉子約 530 噸，申請時間為 2013 年 5 月，主管機關於 2014 年 5 月認可並於 2017 年 11 月確認完成，完成後相關金屬已進入再利用流程。
- B. 案例 2：1、2 號機除役拆除物共 7700 噸，申請時間為 2017 年 10 月，主管機關於 2019 年 3 月認可，2023 年涉及重量變更(約 13,000 噸)重新提報申請並於 2024 年 5 月獲准，測量進度-已測量約 1,600 噸，管制機關已確認約 1,400 噸，目前存放於發電廠內，約 150 噸金屬已運出進行再利用。
- C. 案例 3：4 號低壓汽機轉子約 330 噸，申請時間為 2020 年 6 月，主管機關於 2021 年 4 月認可並於 2022 年 3 月確認完成，完成後相關金屬已進入再利用流程。

2. 台灣解除管制測量/判斷方法和實績

由台電公司核二廠課長說明離廠量測通案架構、量測分析方法及標準及相關儀器簡介，核一廠課長對於核一廠離廠再確認中心建置及營運經驗，以及主發電機離廠量測案例實績進行意見交換。

肆、心得與建議

一、心得

本次參加日本 ANDES 舉辦除役相關研討會，理解日方除役核電廠現況與解除管制實際執行方式等資訊，特別是廢棄物離廠量測之流程規劃，從廢棄物的切割、依污染程度分類處理、執行解除管制量測及後續倉儲管理等均可做為我國核電廠除役之重要參考，尤其是選擇離廠量測之評估核種的方式更是至關重要。藉由與國外從業專家經驗交流，可有效地吸收他國優秀作法，供我國未來執行相關作業提供完善之範例。

藉由參訪日本 ATOX 技術發展中心，觀摩目前日本國內核能電廠輻射量測儀器、除污及切割技術，以及相關遠距遙控設備。察覺日本核能工業界具有很強之研發量能，除因有諸多核能設施的市場需求外，更重要的是如 ATOX 的技術研發公司不斷蒐集國內各設施的現場實務經驗，並引入其他工業技術（例如金屬加工、化學工程）。透過跨領域合作，持續開發出可符合使用者需要的各式除污、切割及量測設備。藉由產業合作模式，將成為推動除役工作成功之關鍵，可供作為未來本公司各核能電廠發展除役技術之參考。

觀摩濱岡核電廠除役拆廠作業，理解廢棄物營運管理及離廠量測/輻防管制至關重要，廢棄物拆除後續物流涉及分流運送各站處理，如切割站、除污站及量測站等，須作整體動線考量及規劃，廢棄物搬運應規劃適當容器以利堆疊並搭配封籤方式封鎖管制，針對尚未裝箱之廢棄物物件應以塑膠套/袋妥善包覆避免污染擴散等疑慮，日方亦於外包裝標示物件流水號掌握物件動向，這些實務經驗都可以作為本公司未來執行廢棄物物流管理時的參考，或以此為基礎精進現有作法。

二、 建議

(一)作業精進回饋：

1. ATOX 技術發展中心目前研發組合式純鍺半導體偵檢器之輻射設備，針對熱點及非熱點之偵檢效率處理程序，可回饋至本公司未來離廠量測中心建置軌道式輻射量測系統時使用，以利妥善計算廢棄物之活度值。
2. 除役廢棄物離廠為民眾關心之議題，濱岡核電廠亦深耕民眾溝通，包含汽機廠房設置參觀平台，主管機關確認完之解除管制廢棄物，並於現場擺設一箱開封的廢棄物，作為解說範例，以利參觀民眾理解廢棄物狀態，此範例可供本公司做為借鏡。
3. 觀察日本濱岡核電廠所採用的廢棄物容器箱，其頂部四個頂點處設計有半球狀的突出結構，可輔助容器堆疊定位；此外，廢棄物計測系統的輸送平台兩側也設置有斜向導板，可輔助容器箱正確定位。以上均可供未來本公司離廠量測中心儀器設置及量測箱設計之參考。

(二)增進自動化設備：

觀察普賢核電廠以及濱岡核電廠之解除管制量測評估作業，不論待測物除污、切割、量測等作業均大量使用機器自動化處理，此舉可有效減少人力資源之過度耗損並且獲得穩定的作業品質。未來我國電廠除役階段也會產生大量廢棄物，針對大型物件之除污及量測若以人工方式將耗時費力，可參考日本開發相關機器以自動化協助解除管制量測評估作業，不僅可以更有效地使用人力資源，也可加快除役作業之進展。