

出國報告（出國類別：實習）

赴日參加 ANDES 除役訓練課程 與參訪敦賀與普賢核能電廠

服務機關：行政院原子能委員會

姓名職稱：曹松楠 科長

鄭永富 科長

聶至謙 技正

馬志銘 技士

黃郁仁 副研究員

派赴國家/地區：日本敦賀

出國期間：108 年 6 月 2 日至 108 年 6 月 8 日

報告日期：108 年 8 月 26 日

摘 要

依政府非核家園的政策，國內核能電廠在運轉執照屆期後，即會進行除役，原能會已積極進行安全管制相關作業，其中包括蒐集國際除役安全管制與技術之經驗，並積極參與國際討論與經驗交流，以強化除役安全管制的專業能力與品質。本次出國目的係參加日本除役研究學會(ANDES)舉辦之核能電廠除役訓練課程與參訪敦賀 1 號機與普賢核能電廠，出國訓練期間(含往返路程)自 108 年 6 月 2 日至 108 年 6 月 8 日，共 7 日。課程內容包含日本的除役管制現況、除役計畫作業要點、除役電廠拆除方法、廢棄物處理與保管方法、拆除廢棄物清潔放行外釋、日本除役經驗與教訓，以及除役計畫現場課題等。訓練期間 ANDES 亦安排參訪除役中之敦賀 1 號機與普賢核能電廠，由電廠簡報說明各廠除役作業的執行現況與未來規劃，亦安排到除役機組現場實地觀察瞭解除役作業執行情形。此外雙方也就除役規劃與實務作業的相關議題，包括技術與經驗進行討論與分享。

本次參加 ANDES 除役訓練課程，以及參訪敦賀 1 號機與普賢核能電廠除役中之機組，除瞭解日本除役安全管制規範與除役作業相關技術與經驗外，更藉由參訪機會實地瞭解設施經營者對除役作業的執行現況與實務經驗，對強化我國除役安全管制的專業知能有相當助益。

目 次

| | 頁碼 |
|---------------|----|
| 壹、目的 | 1 |
| 貳、出國行程 | 2 |
| 參、過程紀要 | 4 |
| 肆、心得與建議 | 53 |
| 伍、附 件 | 54 |

壹、 目的

依政府非核家園的既定政策，我國核能電廠於執照有效期屆滿後，即會進入除役階段，除役期間本會亦將持續執行除役作業安全管制業務，因此本會持續掌握國際除役資訊脈動，蒐集國際除役安全管制與技術之經驗，並積極參與國際討論與經驗交流，以強化除役安全管制的專業知能。

日本原子力除役研究會(Association for Nuclear Decommissioning Study, ANDES)成立於 1997 年，該會由日本核能工業界富有除役專業知識與經驗的專家學者組成，定期舉辦除役技術交流與經驗分享等訓練課程。本次核能電廠除役訓練課程由 ANDES 籌劃開辦，訓練期間自 108 年 6 月 3 日至 108 年 6 月 7 日，共計 5 日。課堂課程由日本核能工業界與學術界富有除役技術專長與經驗的專家學者擔任講座，講師除於課堂進行授課內容說明外，ANDES 亦安排參訓成員於課程中就講授主題提出相關問題與講師進行討論。講授主題包含：

- (1). 日本的除役管制現況。
- (2). 除役計畫作業要點。
- (3). 敦賀 1 號機拆除方法。
- (4). 敦賀 1 號機廢棄物處理、保管方法。
- (5). 普賢電廠拆除廢棄物清潔放行外釋。
- (6). 普賢電廠拆除方法。
- (7). 日本除役經驗與回饋。
- (8). 美濱電廠除役計畫現場課題。

本次訓練期間，ANDES 亦安排參訪除役中之敦賀與普賢核能電廠，瞭解敦賀 1 號機與普賢電廠的除役作業規劃、執行狀況，以及分享執行期間的經驗等，參訪期間並實地至除役機組現場瞭解除役現況。藉由參加 ANDES 舉辦之除役實務訓練課程，並實地參訪除役中核能電廠，從制度面及執行實務面，瞭解日本核能電廠除役安全管制規範、除役作業相關技術，以及現場除役實務作業情況與經驗，有助於強化我國除役安全管制之技術與能力。

貳、 出國行程

(一) 本次公務行程：

本次出國訓練期間自 108 年 6 月 2 日起至 108 年 6 月 8 日止，共計 7 日。行程如下：

| 日期 | 行程 | 摘要 |
|------------|----------|---|
| 6 月 2 日(日) | 台灣→大阪→敦賀 | 去程 |
| 6 月 3 日(一) | 敦賀 | 參加 ANDES 除役訓練課程 ● 日本的除役管制現況 ● 除役計畫作業要點 |
| 6 月 4 日(二) | 敦賀 | 參訪敦賀核能電廠 ● 敦賀 1 號機拆除方法 ● 敦賀 1 號機現場參訪 |
| 6 月 5 日(三) | 敦賀 | 參加 ANDES 除役訓練課程 ● 敦賀 1 號機廢棄物處理、保管方法 ● 普賢電廠拆除廢棄物清潔放行外釋 |
| 6 月 6 日(四) | 敦賀 | 參訪普賢核能電廠 ● 普賢電廠拆除方法 ● 普賢電廠現場參訪 |
| 6 月 7 日(五) | 敦賀→大阪 | 參加 ANDES 除役訓練課程 ● 日本除役經驗與回饋 ● 美濱電廠除役計畫現場課題 |
| 6 月 8 日(六) | 大阪→台灣 | 返程 |



2019 日本福井大學 ANDES 除役訓練研習課程結訓與講師合影

(二) 課程資訊：

本次 ANDES 除役訓練課程係於日本福井大學附屬原子力工學研究院舉行。

| | 09:30-11:30 | 11:45-12:30 | 13:30-15:30 | 15:45-17:30 |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------|---|----------------------------|
| 6月3日(一) | 日本除役計畫現況 (講師：ANDES·事務局 長 佐藤忠道) | 小組討論 (台灣與日本除役的課 題) | 除役計畫作業要點 -JPDR 除役經驗分享 (講師：福井大學·特命教 授 柳原 敏) | 小組討論 (除役作業的重要事 項為何) |
| 6月4日(二) | 敦賀 1 號機拆除方法 (講師：JAPC·葦內広伸) | 小組討論 (拆除方法要點為何) | 參訪敦賀 1 號機 | |
| 6月5日(三) | 敦賀 1 號機廢棄物處理 (講師：JAPC 調查役 菊込 敏) | 小組討論 (廢棄物處理、保管的 重要事項為何) | 普賢電廠拆除廢棄物的 外釋 (講師：JAEA·山本耕輔) | 小組討論 (廢棄物外釋的重要 事項為何) |
| 6月6日(四) | 普賢電廠拆除方法 (講師：JAEA·荒谷健太) | 小組討論 (拆除方法要點為何) | 參訪普賢電廠 | 參訪 JAEA 除役研 發中心 |
| 6月7日(五) | 日本的經驗與教訓 (講師：ANDES·事務局 長 佐藤忠道) | 小組討論 (除役的重要課題與對 策) | 13:00-14:00 | 14:00-15:00 |
| | | | 綜合討論 (ANDES 主要人員與參 加者的討論) | 特別演講 (關西電力公司·田 邊) |

參、 過程紀要

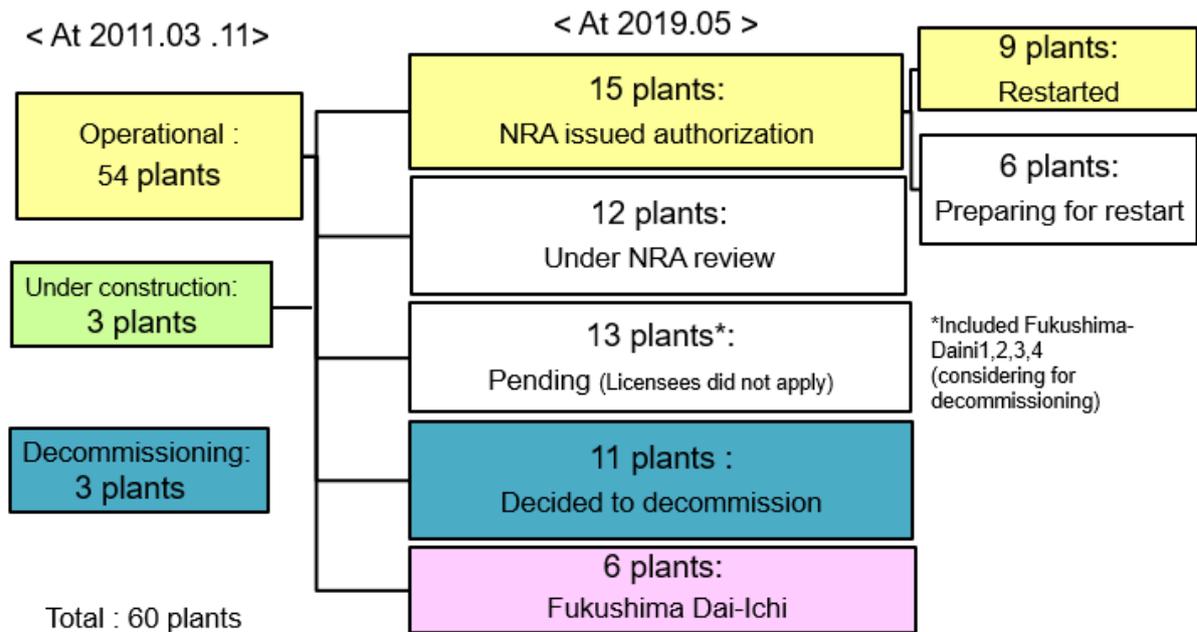
本次赴日本參加由日本原子力除役研究學會(ANDES)所舉辦之除役訓練課程，除針對日本核電廠除役法規、經驗與現況進行介紹外，並以除役拆廠相關作業為此次訓練課程主題，以敦賀(Tsuruga)電廠 1 號機及普賢電廠的除役拆除作業規劃與工法，以及拆解後廢棄物之管理處置等為例，分別由敦賀電廠及普賢電廠實際負責執行相關除役作業之人員，就相關作業於課堂進行介紹說明，並與學員進行討論，此外亦安排赴敦賀電廠及普賢電廠參訪，實地觀察相關現場作業情形。以下分別重點摘述課程內容及參訪過程：

一、ANDES 除役訓練課堂課程

1. 日本的除役管制現況

本課程由 ANDES 秘書長佐藤忠道 (Tadamichi Satoh)先生講授，課程內容包括日本核能及除役機組現況、日本除役法規架構、日本除役廢棄物分類與處置法規發展現況、IAEA 2016 年執行管制議題整體評估(Integrated Regulatory Review Service , IRRS) 除役管制建議辦理現況等，此外佐藤秘書長並綜整說明由運轉過渡到除役，在工作(安全)文化與心態的改變與差異。

2011 年 311 福島事故前，全日本共有 60 部商用核電機組(含建造中 3 部、除役中 3 部)，核能發電佔比約 28%。311 福島事故後，核電機組曾全部停止運轉，但迄今已有 15 部機組通過 NRA 新安全基準的審查，並有 9 部機組已重啟運轉發電。依日本目前規劃的能源政策規劃，至 2030 年時日本的核能發電佔比約為 20~22%，較福島故事前減少 6~8%。在核能電廠除役方面，311 福島事故前，僅有 3 部機組宣布除役，而目前共有 17 部機組已宣布除役(含福島電廠 6 部機組)，而除了 JPDR(Japan Power Demonstration Reactor)已於 1996 年完成除役外，前述 20 部機組(另含研究用 3 部)均仍在進行除役中，日本核能電廠相關的運轉與除役現況如圖一。



圖一 日本核能電廠運轉與除役現況

關於核電廠除役期限，我國係要求必須於 25 年內完成除役拆廠與土地復原(育)，然日本對於除役的期限，依佐藤秘書長之說明僅於經產省的導則有 30 年之說明，然該導則並非屬法規，故並無拘束力。因此日本多數核電廠之除役期程規劃雖多以 30 年為期，但亦有少數超過之情形。在除役作業方面，目前除了東海、普賢、濱岡及敦賀 1 號機已進入現場設備拆除階段外，其他均仍在進行像是除污、輻射性特調查的除役準備作業階段。

依日本現行核電廠除役有關法規之要求，除役的重要管制點分別為除役計畫獲 NRA 認可，以及設施內之核子燃料均已移出。電廠在宣告除役，向 NRA 提報的除役計畫，其內容除需包含：用過核子燃料管理與移送、拆除方法、除污、放射性廢棄物管理、除役程序、除役期間需維持功能/運轉設備(施)維護、人員劑量曝露管理與評估、事故評估、資金規劃、組織架構及品管程序等內容外，電廠另外還需提出適用於除役期間的安全運轉方案(或稱保安計畫「Operational Safety Program, OSP」)，即修訂版之 OSP 相當於運轉技術規範。

在除役計畫獲原子力規制委員會(NRA)認可前，電廠雖可以進行除役準備作業，但不能進行現場設備拆除作業，同時仍需依運轉期間的運轉安全方案(OSP)執行各項的維

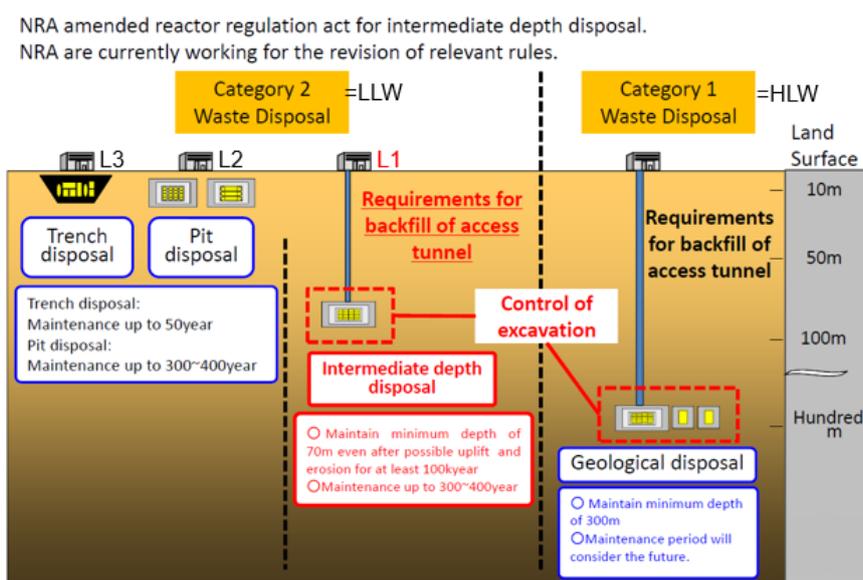
護、輻防、放射性廢棄物管理、緊急計畫等工作，同時 NRA 亦會持續執行設施定期視察、安全管理審查、OSP 視察等之管制作業；除設計畫獲 NRA 認可後，即依除役期間之 OSP 執行。而當設施內之核子燃料均已移出後，NRA 才會停定執行設施定期視察。

2016 年 IAEA 受日本邀請派遣視察團隊執行 IRRS(Integrated Regulatory Review Service)時，曾就日本核電廠除役之 L1 放射性廢棄物處置及廠址外釋管制提出建議。

日本現行放射性廢棄物之管理標準可分為一般、無輻射、清潔廢棄物、L3、L2、L1 低階放射性廢棄物及 HLW 高階放射性廢棄物，如圖 2。其處置方式及規劃如圖 3 所示。分別簡述如下：

| 通称 | Class | Volume (ton) 1,100MW BWR | Volume (ton) 1,100MW PWR | Regulatory Standard |
|----|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| L1 | Intermediate Disposal LLW | 100 | 200 | Preparing |
| L2 | Near-surface Pit Disposal LLW | 900 | 1,800 | Established |
| L3 | Near-surface Trench Disposal LLW | 11,900 | 4,100 | Established |
| CL | Clearance Material | 28,500 | 11,700 | Established |
| NR | Non-radioactive Material in RCA | About 500,000 | About 480,000 | Established |
| GN | General Material | | | |

圖二 日本現行放射性廢棄物之管理標準分類



圖三 日本現行放射性廢棄物之管理標準分類

(一)低階放射性廢棄物：

1.L3：近表面之溝渠處置，其期間最高為 50 年。

2.L2：近表面之地窖算置，其期間最高為 300 至 400 年。

3.L1：離地表至少 70 公尺之中度深度處置，其期間最高為 300 至 400 年。

(二)高階放射性廢棄物：離地表至少 300 公尺之深度處置。

目前日本 NRA 已針對 L1 放射性廢棄物處置深度，提出中深度處置(intermediate depth disposal)之管制規定變更草案，並修訂相關規範。我國核電廠之低階放射性廢棄物，將先存放於核設施既有之貯存倉庫，等待終期處置場完成使用後，再移至終期處置場做永久性之處置。

至於在廠址外釋管制法規方面，雖日本尚無此方面的需求，但 NRA 目前已組成專案小組，就廠址外釋標準進行討論研擬。

2. 日本動力實驗反應器(JPDR)的除役計畫執行經驗

本次訓練課程中，有關「日本動力實驗反應器(JPDR)的除役計畫執行經驗」之主題係由福井大學柳原敏(Satoshi Yanagihara)教授負責講授，課程內容包含核能除役的計畫管理、JPDR 的核能除役實務(Practice)、JPDR 除役計畫的執行成果(Outcome)與經驗回饋(Lessons learned)等，課程內容及討論結果簡述如下：

2.1. 核能電廠除役計畫管理

柳原敏教授首先對於核能電廠(NPP)除役計畫的特性進行說明，他指出核能除役的最大目標就是移除作業，而在這個目標下要面對 3 個主要議題：

- (1)短期間內要處理所產生的大量廢棄物
- (2)工作人員劑量的最小化及降低危害風險
- (3)從安全與經濟的觀點做計畫的評估

對於核能電廠除役的基本議題說明後，柳原教授簡要引述美國國際專案管理學會所發行的「專案管理知識體系指南(PMBOK@Guide)」對於計畫的定義與計畫管理內容

後，開始介紹 JPDR 的除役計畫。

2.2. JPDR 的核能除役實務(Practice)

JPDR 為日本由美國直接輸入的小型沸水式(BWR)反應器，原始的功率為 45 MWt，後曾進行功率提升為 90 MWt。自 1963 年開始運轉到 1976 年停機，為日本第一部進行除役的核子反應器設施。拆除期間為 1986 年 12 月到 1996 年 3 月，所使用的除役經費為 230 億日元(包括 R&D 部分)，前 5 年主要是進行除役技術的研究開發，總產生的放射性廢棄物數量為 3,770 公噸，工作人員的接受劑量為 306 mSv/人。對於 JPDR 的除役重要時間表如表 1，而此項除役的主要目的有下列 3 項：

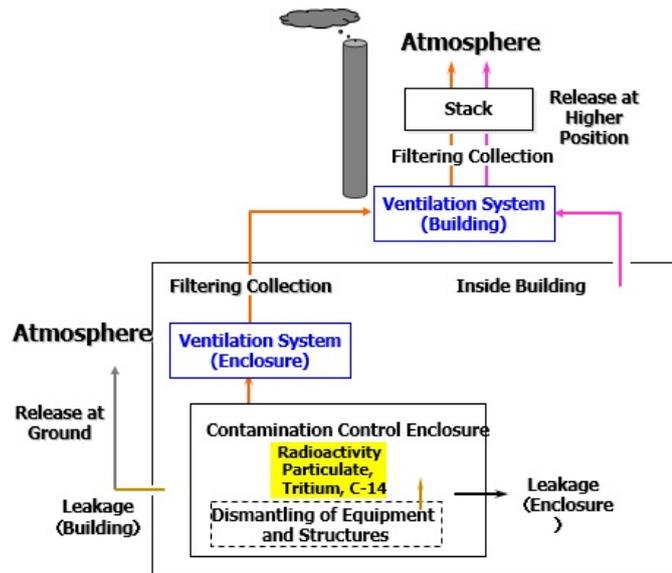
- (1)獲得核能電廠的實際拆除經驗
- (2)藉由實際的拆除作業驗證發展的技術
- (3)收集 JPDR 拆除作業的資料

表 1. JPDR 除役計畫的期程概要

| 日期 | 重要工作內容 |
|---------|--|
| 1979.10 | 設置 JPDR 的研究委員會 |
| 1980.03 | 擬定 JPDR 除役計畫 |
| 1981.04 | 開始除役的 R&D 計畫 |
| 1982.06 | 原子力委員會(AEC)發表聲明：要使用 JPDR 進行除役技術的展示 |
| 1982.12 | 第一階段：提出 JPDR 除役計畫，並進行公告 |
| 1985.12 | 原子力安全委員會(NSC)對於 JPDR 的除役提出「拆除核子反應器設施的安全保證基本概念」 |
| 1986.07 | 第一階段：提出 JPDR 除役計畫修正版 |
| 1986.12 | 開始進行 JPDR 的除役作業 |
| 1996.03 | 完成 JPDR 的除役作業 |
| 2002.10 | 日本管制機關核准 JPDR 除役完成 |

早期日本管制機關原子力安全委員會(NSC)對於 JPDR 的除役安全概念曾進行檢視，如停止核能電廠系統設備功能程序、拆除階段核能電廠維護方法、確保拆除階段安全、確認拆除作業完成方法，以及其他放射性廢棄物處理與安全評估等。因此 JPDR 拆除計畫是依據 NSC 導則所撰寫，基本原則包含工作人員安全與避免放射性物質外釋。課堂上有詢問日本核能電廠對於除役環境影響評估審查作法，以及對於工作人員安全防護的權責單位，日方表示核能電廠除役環評部分，地方政府並沒有法律權限，但雖然如此，核能電廠還是會對地方口頭說明環評結果，而 NRA 也會要求注意。在工作人員防護部分，除 NRA 監督除役拆除作業安全外，核能電廠會另外向厚生勞動省陳報工作人員劑量。

此外，柳原敏教授除了說明除役與拆除作業的基本過程、工作人員的輻射防護基礎，對於如何降低工作人員劑量而選擇適當拆除的方式，例如對於高劑量區域外加輻射屏蔽、水下拆除切割作業，以及遠端遙控機械設備的應用，一般除役作業人員劑量管制限值與運轉期間相同，劑量估算與運轉期間大修作業一致。同時亦介紹了拆除作業時的劑量評估方法，可以從兩大類進行評估，分別為：公眾劑量評估與工作人員劑量評估。其中對於放射性物質在正常情況下如何外釋到大氣中，他使用圖四進行說明。從圖中可以看到拆除設備與結構後所產生放射性物質(氬與 C-14)，將從污染控制的圍阻體(Enclosure)洩露出來，爾後可能從建築物的牆面漏洞外釋到大氣中，亦可能從建築物的通風系統經由過濾後排至大氣中，另外也有考量發生除役事故情境的劑量評估。再者，柳教授提到要有放射性廢棄物處理計畫，而且每年要依據拆除作業對於貯存在設施內的廢棄物數量進行更新。有關廢棄物處理計畫內容要包括廢棄物重量、體積、放射性濃度、表面密度。至於盛裝容器也應該說明，是 200 公升桶、1 m³ 與 3 m³ 的屏蔽容器等。



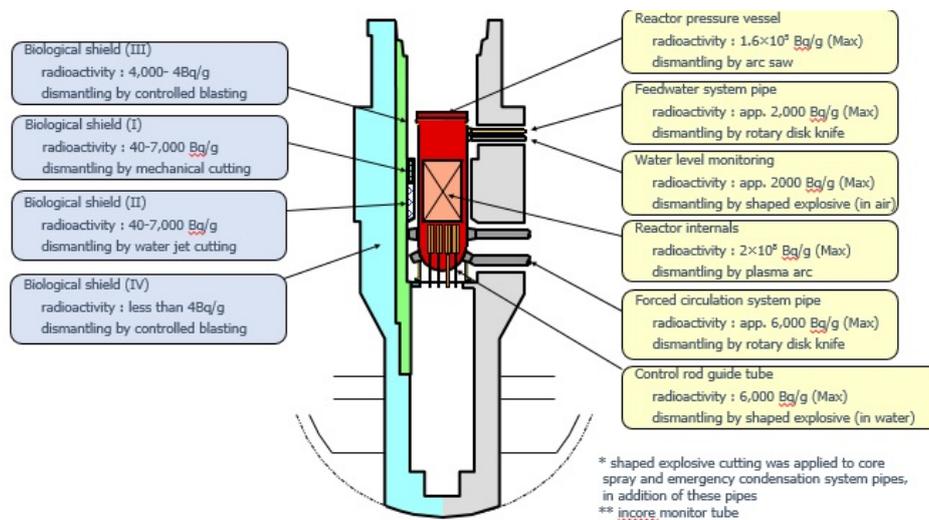
圖四 放射性物質外釋的正常情節

課程中柳教授提到了 JPDR 利用電腦程式(COSMARD)對計畫的參數進行評估，並針對除役工作架構(Work Breakdown Structure, WBS)包含輻射管控、拆除活動與廢料管理建立一套資料收集系統，除役計畫管理流程包含初期準備作業、廠址設施特性調查、除役計畫規劃、除污與拆除活動、廠房拆除作業、最終輻射偵檢與執照終止除役完成。JPDR 廠房表面污染特性調查包含現場污染量測與歷史紀錄收集兩部分，做法是從現場污染量測進行佈點、輻射調查污染深度與範圍，並規劃廠房結構除污計畫。課堂有提到其汽機廠房收集 1963~1985 年期間污染事件的紀錄，這些紀錄資料都可以做為後續輻射特性調查的分析來源，並舉例除役後保留回填的廢料廠房基礎樓板共取樣 2000 量測點，佈點距離為邊長 2 公尺正方形網格內取點進行量測，若有發現表面與深度污染，依 FSS 要求清除到背景輻射加 3 個標準差的外釋標準才可保留回填。課堂上有詢問日本核能電廠對於 MARSSIM 所述地下水輻射特性調查與無污染的地下埋管議題如何處理，日方解釋因目前除役中機組廠區仍有其他運轉中機組，如敦賀 2 號機等，廠區地下水仍在運轉期間廠界監測範圍，土地尚未進行外釋，故此地下水議題仍不急於處理。另 JPDR 並無地面 1 公尺以下管路，所以埋管保留是否需填實並無相關經驗。

課程中介紹除役工作人員工業與輻射安全，包括消防、污染擴散、輻射曝露、人員意外，並說明 JPDR 除役經驗案例曾發生氣體切割產生的火花引燃附近可燃物，以

及切割未在計畫內的管路造成污染擴散。

課程中介紹爐心及其組件的拆除技術(詳圖五)，左半部是混凝土的生物屏壁拆除，使用的技術有遙控爆破、機械切割、水柱切割等。右半部是組件拆除，使用的技術有弧鋸切割、轉盤刀具、空氣中與水中的成形裝藥爆破、電漿切割等。針對反應爐水下電漿切割設計，會分別於反應爐與用過燃料池上方安裝主要與次要遙控切割系統，於上方設置塑膠防塵罩將反應爐與用過燃料池與廠房空間隔離，並收集切割所產生的放射性氣體。



圖五 JPDR 的爐心及其組件的拆除技術

2.3. JPDR 除役計畫的執行成果(Outcome)

JPDR 在拆除中不可避免要處理低放射性廢棄物，其應用的處理方式有蒸發、熔融、壓縮、及裝桶貯存等。課程中亦分享了拆除廢棄物的管理流程及近地表處置設施設計概念。至於拆除計畫所獲得的成果，可以從以下幾點分析：

- (1)各項拆除作業的人力需求及工作人員劑量
- (2)在拆除作業準備階段、執行中及清理階段的工作人員劑量分佈
- (3)拆除作業所產生的各種類廢棄物(放射性與非放射性)
- (4)拆除計畫各個項目的費用估算

課程中介紹 JPDR 拆除廢棄物處理流程，若管制區內非放射性廢棄物(NR)包含設備組件的金屬廢棄物或廠房結構混凝土與金屬廢棄物，經電廠量測後會暫存於廠內，

部分清潔的混凝土會回填掩埋地下層保留結構。管制區外 NR 混凝土與金屬廢棄物，經電廠自主量測後作為一般事業廢棄物外運。對於管制區內放射性廢棄物則依法定放射性廢棄物標準容器如 200L 桶、1 m³ 與 3 m³ 屏蔽容器送入低放貯存庫進行存放。

2.4. 經驗回饋(Lessons learned)

針對 JPDR 的除役經驗，柳原教授表示在計畫管理方面，應注意分析與規劃、紀錄保存與資料蒐集，以及決策制定；技術方面應關注在安全系統、遙控處理，以及資料庫建立；對於未來除役計畫主要的考量方面應著重在系統化的衡量、紀錄保存與資料蒐集，以及對新申請或變更修改案件的管制系統審查。

3. 敦賀核電廠 1 號機除役措施

本課程之講師藏內広伸先生為日本原子力發電株式會社（JAPC）敦賀核電廠除役室室長，主要工作為負責敦賀核電廠 1 號機現場除役作業執行及安全管理。因此課程從電力公司與核能電廠的角度，講述核電廠除役與拆除作業的規劃與實務，以及除役時的工作安全對策。

課程首先介紹日本敦賀核電廠 1 號機除役作業時程規劃與實務現況，最後講述除役電廠的工作安全對策。整體課程分為四部分：

- (1).敦賀核電廠 1 號機概要；
- (2).敦賀核電廠 1 號機除役計畫；
- (3).敦賀核電廠 1 號機近 3 年除役計畫執行現況；
- (4).敦賀核電廠 1 號機工作安全對策。

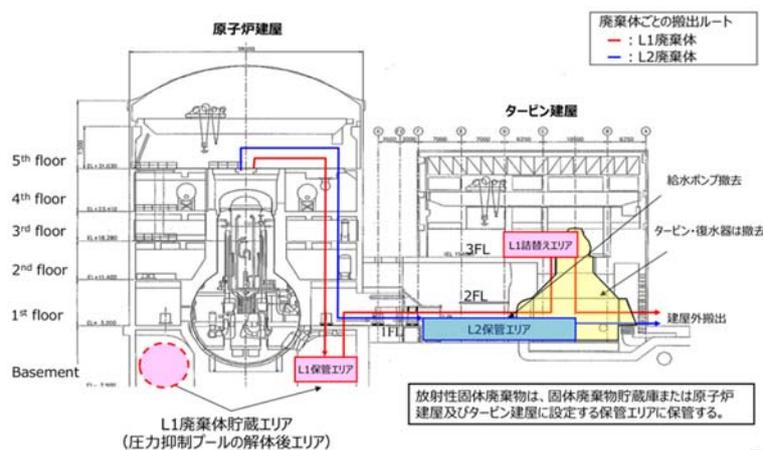
3.1. 敦賀核電廠 1 號機概要

敦賀核電廠 1 號機自 2011 年 311 福島事故機組進行大修後未再起動，並宣布 2015 年永久停止運轉，2016 年提出除役計畫審查，2017 年取得除役計畫許可。除役工程規劃 24 年完成，包含原子爐拆解準備(9 年)、原子爐拆解(9 年)及建築物拆解(6 年)，推估之廢棄物總量及費用分別約為 16 萬噸及 363 億日元。敦賀 1 號機目前原子爐拆解準備階段，本階段將執行原子爐周邊設備拆除、一般除污作業、廢棄物管理、新燃料與用

過燃料移出等除役作業。目前部分 1 號機用過燃料已移至 2 號機用過燃料池存放，但 1 號機用過燃料池還存放有 119 束用過燃料，因此持續進行機組安全系統設備之維護管理。敦賀 1 號機除役計畫範圍不限於反應器與汽機廠房，有部分 1、2 號機共用設備如 1 號機汽機廠房焚化爐亦將規劃拆除，並另地新建供 2 號機使用的焚化爐。

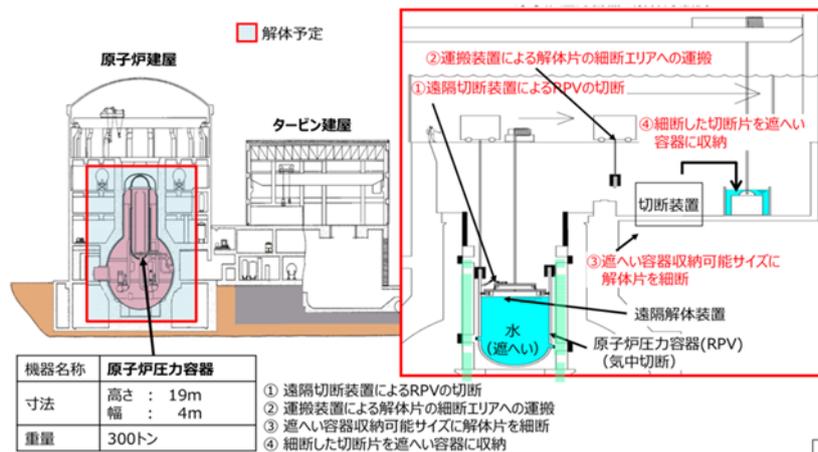
3.2. 敦賀核電廠 1 號機除役計畫

原子爐拆解準備期間，主要考量原子爐拆解工程之人員與機具空間問題，規劃先行拆除較低污染之抑壓池、主汽機及主冷凝器組件，並將 L1 放射性廢棄物暫存於原抑壓池(Torus)區域，而 L2 放射性廢棄物暫存於汽機廠房(如圖六)，並待後續檢整之作業。因 Torus 池水內含防鏽劑，已規劃放置在控制棒液壓驅動系統(HCU)空間內，所以先規劃完成拆除 HCU 系統後再開始拆除 Torus。



圖六 反應爐及汽機廠房之暫存低放射性廢棄物規劃

至於原子爐拆解之工法目前尚在評估最佳處理方式，預估採行以遙控切割方式執行如圖七，將反應器槽體(RPV)進行解體。由於反應器槽體輻射强度高，考量人員及空間輻射劑量之影響，計畫將於反應器槽體進行充水作業，提供有效之屏蔽體，並透過遙控切割後之反應器槽體置於水中適當容器，待後續處置。



圖七 敦賀核電廠 1 號機之原子爐拆解規劃

而建築拆解作業，則會於原子爐及汽機廠房之設備與組件拆除後，再進行建築物之拆除。

3.3. 敦賀核電廠 1 號機近 3 年除役計畫執行現況

由於過去敦賀電廠在永久停機前曾執行爐心襯板及再循環管路換管作業，因此並無系統除污之規劃，但因日本租稅特別措置法令有取得除役許可後 1 年內進行相關工程的經費可以減抵稅額之規定，因此，該廠遂針對汽機廠房週邊設備除污室之 Sump 排水管路進行高壓水除污作業，同時宣示正式開始進行除役工程。今(2019)年 2 月敦賀電廠 1 號機完成前述除污室 Sump 排水管路除污作業、反應器廠房控制棒液壓驅動系統(HCU)與汽機廠房 1 樓高壓注水系統(HPCI)設備拆除作業，並持續執行汽機廠房 3 樓高低壓汽機、發電機、勵磁機、格蘭蒸汽氣封與廠房通風系統拆除作業。

3.4. 敦賀核電廠 1 號機工作安全對策

敦賀電廠除役計畫所述工作安全對策，包含污染擴散防止對策、輻射工作人員劑量合理抑低對策、防止工安事故影響 2 號機運轉機組迴避對策。對於大型設備或組件，及高輻射劑量之配管等，必需採取工安與輻安的因應措施，如以鉛毯或架設鉛屏蔽以降低工作區域或週邊之劑量；於拆除作業前對環境進行量測確認除污作業需求與廢棄物分類；於熱切割工作站增設排氣過濾系統或廢液回收裝置，以防止粉塵或污染擴散。

另該核電廠考量設備或組件拆解後之管線或機具能有所聯結，於拆除後皆會進行標誌識別，以區分何處已進行拆解或切割或規劃後續拆除作業，以進行拆除工程之管

控。

課堂上有詢問管制單位於核准除役計畫後電廠是否須定期向管制單位陳報，除役計畫執行進度，依講師之說明日本管制單位是透過除役期間保安規定(技術規範)、定期檢查(大修視察)來確認電廠是否依規定執行，但電廠會定期向地方政府報告除役計畫執行過程，而地方政府勞動部門也會依規定對電廠、包商能否符合除役作業的工作安全進行檢查。

電廠表示目前日本原子力發電株式會社(JAPC)負責敦賀1號機除役業務僅8個人，多數參與除役工作為包商人員，因此對於除役計畫的管理比新技術應用更加重要，敦賀電廠除役方針主要利用既有除役技術、地方政府與居民參與，以及考量除役為長期事業，所以運轉經驗的維持與除役人才培育均是重要課題。

4. 敦賀1號機廢棄物處理、保管方法

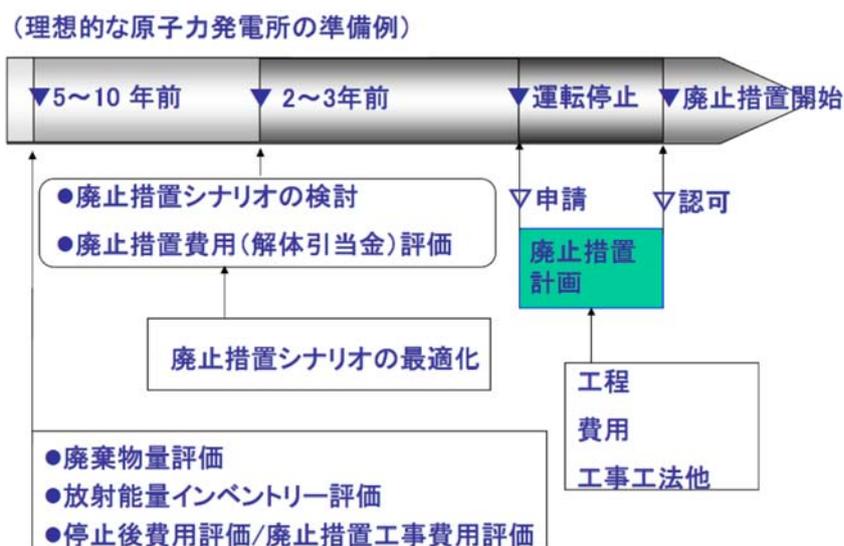
有關敦賀1號機廢棄物處理、保管方法之訓練課程，係由日本原子力發電株式會社(JAPC)除役部門資深經理刈込敏(Satoshi Karigome)講授，內容包括：敦賀與東海電廠的除役計畫、放射性廢棄物的區分、放射性廢棄物的處理與處置方法對策、東海電廠L3廢棄物處理與處置、清潔外釋的運用及非放射性廢棄物放行等議題。核電廠「除役」作業，係指將放射性污染之設備、結構或物質予以拆除，此與拆除一般用途建物之最大不同處，即為拆除「含放射性活化或受污染」之物，因此除役作業期間之放射性廢棄物分類、不同分類處理與處置方法對策對於廠房暫存空間利用，以及後續拆除作業能否順利進行均為重要課題。訓練課程除由講師於課堂上進行授課內容說明外，我方亦於課程中提出相關問題，進行討論，課程及討論內容簡述如下：

4.1. 敦賀與東海電廠的除役計畫

日本核能電廠在除役計畫制定流程，首先會針對除役設施的放射性污染分布情形進行評估，其內容包含輻射劑量量測、放射性活度計算與廢棄物產量估算等，屬於除役計畫準備作業最先需完成之事項，並可用於各階段除役作業及工項如拆除計畫、廢棄物處理與處置計畫、清潔放行外釋計畫、安全評估、除役經費預估與程序書編寫等

工項的評估規劃與檢視依據，雖日本在除役設施的放射性污染分布評估方式沒有像美國 MARSSIM 有明確的導則作業依據，但日本管制單位仍要求業主提送除役計畫內容應包含相關評估結果。因此，日本核電廠對將邁入除役之機組，原則上會規劃先就結構管路受中子活化與組件污染情形進行評估，評估放射性廢棄物之數量及分布情形，並將評估結果，依比活度大小分區分第一級（Relatively high radioactive waste, L1）、第二級（Relatively low radioactive waste, L2）、第三級（Very low level waste, L3）及無需特別處理（Clearance material）4 個等級，其中 Clearance material 為無需再進行除污處理，可視為一般廢棄物處理或回收再利用，另比活度大於 L2 數值者，為第一級放射性廢棄物。

依理想的核能電廠除役計畫準備時程規劃(圖八)，業主應於機組預定永久停止運轉的 5~10 年前開始準備，並於 2~3 年前對除役計畫內容如輻射存量評估、廢棄物產量估算及除役經費等進行檢視調整後，於機組永久停止運轉時提出除役計畫申請，並獲管制單位認可後開始執行除役計畫所述相關設施拆除、廢棄物處理與處置、維持管理等作業。然日本電力公司近年都較晚才宣布機組是否永久停止運轉，因此去年管制單位有要求電力公司須儘早提出規劃，並提交除役計畫實施方針。



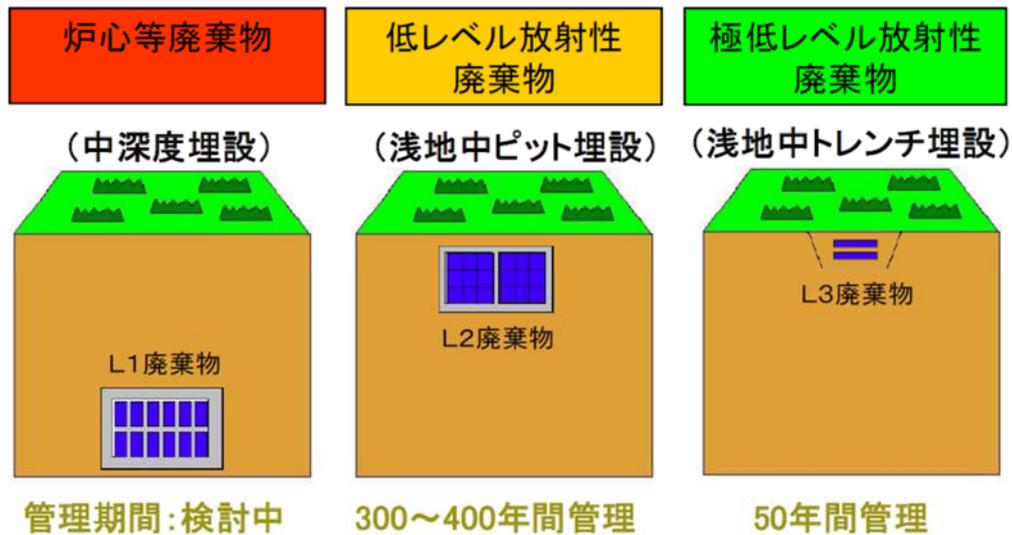
圖八 日方採行的理想核能電廠除役計畫準備時程規劃

以日方的評估經驗來看，不同核子反應器設計，除役所衍生之放射性廢棄物數量

也不盡相同，氣冷式核子反應器（gas-cooled reactor, GCR）之放射性廢棄物量最多，沸水式核子反應器（boiling water reactor, BWR）次之，壓水式核子反應器（pressurized water reactor, PWR）則最少。以沸水式反應器 BWR 除役計畫拆除時程規劃，主要可分為反應爐周邊設備拆除與主體結構拆除兩階段執行，會首先執行反應爐周邊設備拆除目的是為了確保用過燃料安全貯存，並於周邊設備拆除過程，讓反應爐本體的殘餘輻射劑量自然衰減，因此該階段作業包含燃料移出、系統除污、設備停用隔離替代、汽機廠房設備拆除，並建置反應器本體、汽機廠房與反應器廠房結構等相關拆除程序書。另反應爐主體結構拆除作業包含爐內組件拆除、生物屏蔽牆拆除、廠房結構除污拆除。其中除爐內組件屬 L1 進行處理外，其餘可歸類為 L2、L3 與 CL 進行處理。因此，隨著除役拆除作業進程，所需放射性廢棄物處理與處置設施需求會逐漸增加。另外日本東海電廠亦因除役而修訂許多法規，包含駐廠、除役計畫申請改為許可制、清潔廢棄物放行外釋 CL 等制度修訂。

4.2. 放射性廢棄物的區分

在日本核能電廠因用過燃料可以外運到再處理設施進行處理，因此運轉期間所產生的放射性廢棄物主要以低階放射性廢棄物為主，包含反應爐控制棒、爐內組件等爐心廢棄物(L1)、廢液、過濾器、廢棄設備、消耗品等低放射性廢棄物(L2)，以及混凝土、金屬等極低放射性廢棄物(L3)，其依法所對應低放廢棄物處置方式可分為中深度埋設、300~400 年管理的淺埋地下坑道，以及 50 年管理的淺埋地下壕溝，其中中深度埋設的管理年限，目前日本還在檢討當中尚未定論(圖九)。另針對低放廢棄物在不同等級處置方式亦訂出相對應的核種濃度(比活度)上限值，並說明因目前輻射特性調查仍在進行，因此敦賀 1 號機與東海電廠放射性固體廢棄物目前預估的數量，未來仍會因輻射特性調查與除污作業而有所改變。



圖九 低放廢棄物處置方式

4.3. 放射性廢棄物的處理與處置方法對策

敦賀電廠放射性廢棄物種類包含用過樹脂、濃縮廢液、高放射性廢棄物及可燃性/不可燃雜項固體廢棄物，其中 1 號機固體廢棄物處理設備可針對濃縮廢液、可燃性/不可燃雜項固體廢棄物進行減容固化裝桶，並暫存於固體廢棄物貯存設施。針對敦賀 1 號機規劃除役拆除作業放射性廢棄物處理暫存區與處置區，L1 廢棄物預定暫存於反應器廠房底樓 Torus 拆除後的空間區域，後期再移出至待興建的中深度埋設處置地點；L2 廢棄物規劃暫存於汽機廠房 1 樓，後期再移出至待興建的 300~400 年管理的淺埋地下坑道；L3 廢棄物目前暫存於現有 3 座低放廢棄物貯存設施(A、B、C 棟)，待結構廠房拆除階段前才移出；CL 清潔放行外釋廢棄物目前暫存於汽機廠房 1 樓，等待管制單位檢查確認後，即可釋出再利用。

L1 廢棄物處理與處置流程範圍包含：拆除下來的爐內組件、除污使用過的廢樹脂等，其中拆除下來的爐內組件經高壓水柱除污與空氣吹淨、除污使用過的廢樹脂利用濕式分解處理，兩者均利用 L1 廢棄容器裝箱、乾燥、沙填充、封箱焊接與檢查後，暫存於反應器廠房底樓 Torus 拆除後的空間區域，待輻射劑量降低後將 L1 廢棄物移至汽機廠房 1 樓拆除後的飼水加熱器區域來進行檢查確認，並利用拆除後冷凝器區域放置於 B 型輸送容器內，運送至低放貯存庫。

L2 廢棄物處理與處置流程範圍包含反應器廠房拆除下來的廢棄物、二次廢棄物、

可燃性廢棄物、使用過樹脂與液體廢棄物等，其中反應器廠房拆除下來的廢棄物裝箱於 L2 廢棄物容器、填充、封箱後同樣暫存於汽機廠房 1 樓區域，待檢查確認後，運送至低放貯存庫。另其他可燃性廢棄物、使用過樹脂與液體廢棄物等，則依循原運轉期間放射性廢棄物處理流程如焚化、熔融填充、蒸發固化等，暫存於低放貯存庫。

L3 廢棄物處理與處置流程範圍包含汽機廠房拆除下來的廢棄物、二次廢棄物等，裝箱於 L3 廢棄物容器、填充、封箱後同樣暫存於汽機廠房或低放貯存庫，待廢棄物運送至 50 年管理的淺埋地下壕溝處置。

CL 清潔放行外釋廢棄物釋出流程包含局部除污等前處理、放置於標示清潔廢棄物的鐵箱收納，並暫存於汽機廠房檢測符合標準後釋出。

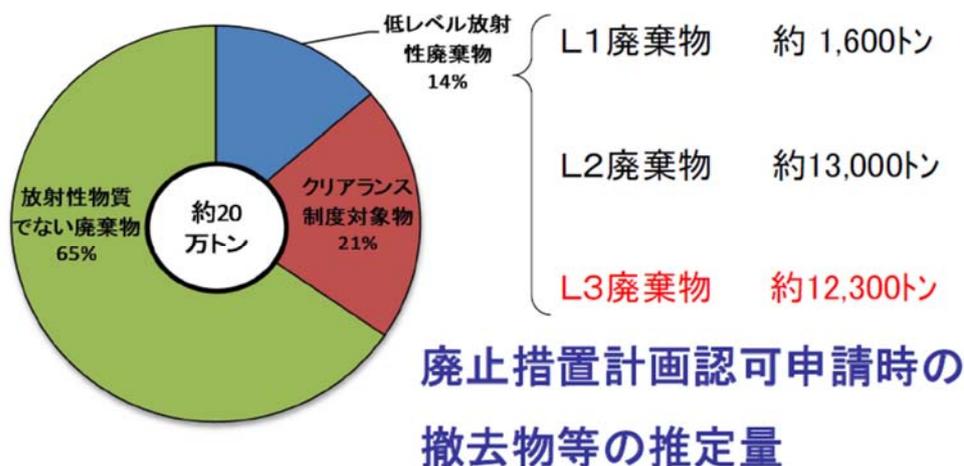
日本對放射性廢棄物埋設處置設施運作現況，目前僅青森縣六所村（Rokkasho）的「低放射性核廢料填埋中心」，由日本核燃料有限公司（JAPAN NUCLEAR FUEL LIMITED，簡稱 JNFL）經營，但該中心僅接受運轉中 L2 廢棄物如濃縮廢液、用過樹脂、灰燼等進行存放，並不接受 L1、L3 及除役電廠所衍生的放射性廢棄物，對於除役期間拆除下來的 L1~L3 低放廢棄物埋設處置設施目前仍在檢討當中。依日本法規，核電廠（電力公司）須自行設置低放射性廢棄物掩埋場所，東海電廠針對 L3 廢棄物埋設處置設施申照作業向管制單位提出申請，目前 NRA 仍在進行安全審查中。另早期 JPDR 研究用反應器除役期間拆除下來的廢棄物，已於原廠址設置 L3 廢棄物埋設處置設施，並已完成掩埋，目前仍處於 50 年的管理期間。日本對於 L1 廢棄物中深度處置設施、L2 廢棄物 300~400 年管理的淺埋地下坑道，以及 L3 廢棄物 50 年管理的淺埋地下壕溝設施與裝箱容器均有不同設計規範，對於現行 L2 廢棄物處置容器以 200L 桶為主，並試行另一種運送與處置兼用的 20 噸鐵箱容器。

由於日本除役電廠放射性廢棄物處置設施尚未決定，存放廢棄物的規格尚未確定，導致除役工作無法積極推進。因此，有關高、低放射性廢棄物處置場，就日本核電廠而言，亦為極具挑戰。惟日本核電廠之除役現狀，除福島電廠外，均為部分機組除役、部分機組維持運轉，而非整廠除役，因此，用過核燃料及除役所衍生之低放射性廢棄物，目前均以移至運轉機組場所內貯存方式處理。

4.4. 東海電廠 L3 廢棄物處理與處置

東海電廠於除役期間在廠區將規劃新增建置 L3 廢棄物埋設處置設施，並於興建前須完成地質、地下水等地貌調查作業，確認其場址符合作為處置設施之規定，並在提出規劃申請前向茨城縣東海村地方政府進行多次溝通後，向 NRA 提出第二種廢棄物埋設事業許可申請。

東海電廠 L3 廢棄物埋設處置設施設計貯存的廢棄物主要以除役拆除作業產生的 12300 噸、運轉中產生與新設置的拆除工具耗材等共約 16000 噸，其事前評估的放射性核種種類為 Co-60、Sr-90、Cs-137 等均有規定相關 L3 濃度比活度上限，而除役計畫所預估低放射性廢棄物約佔廢棄物總量 14%(圖十)，其比例 L1 廢棄物僅佔 10%，其餘 L2 與 L3 廢棄物各佔約 45%，並隨不同放射性廢棄物種類而有不同收納處置容器。



圖十 東海電廠除役計畫所預估的低放射性廢棄物產量

東海電廠 L3 廢棄物埋設處置設施預定地位於廠址監視區範圍內，埋設原則須高於地下水位上，鐵箱上下堆疊中間層需覆蓋土壤，最後在於地表面上覆蓋約 2m 厚土層，場址地面上相關設施包含地下水水位監視、雨遮結構等。

日本對於 L3 廢棄物埋設設施設計的規範基準的要求事項，包含設置場所條件、埋設設施設計條件、輻射劑量基準，以及輻射遷移至場外環境的劑量評估等要求逐項說明：

1. 設置場所條件：現行許可基準即針對廢棄物埋設設施地盤、地震、海嘯外部事件危害度進行評估，包含地質調查、斷層活動、地震力檢核，以及海嘯上溯高度評估補強。

2. 埋設設施設計條件：新修訂許可基準即針對設計時應注意事項、放射性物質洩漏減低、外部事件危害影響評估與防治，包含最佳建設施工技術、抵抗自然劣化損傷能力、對於放射性物質洩漏釋出減緩的能力，以及外部事件如洪水、豪雨、颱風、龍捲風、火山、極端氣候等危害衝擊評估。
3. 輻射劑量基準：在營運與管理期間的設施法規所容許的工作人員劑量限值為 1mSv/yr，業主內部管制的目標值為 0.05mSv/yr，另在管理期間結束後做為非限制性使用情況下，對於位於場址上的居民可能攝取場址鄰近區域的地下水、海洋生物的輻射劑量影響亦需進行評估，並針對不同分析情境訂定不同限值，如基本情境限值 0.01mSv/yr、變動情境限值為 0.3mSv/yr、自然現象及人為事件 1mSv/yr 等不同接受標準(同 10CFR 61、NRC 審查導則 NUREG-1200、評估方法論 NUREG-1573)。
4. 輻射遷移至場外環境的劑量評估：針對前述場外輻射劑量影響不同分析情境評估定義，基本情境是依科學技術理論最可能發生狀態，訂定 0.01mSv/yr 限值、變動情境是依科學技術理論考量假設可能會發生狀態，訂為 0.3mSv/yr 限值，以及自然現象考量海水河流變動與人為事件限制飲用井水，訂為 1mSv/yr。

日本新修訂的許可基準，將 L2 廢棄物埋設處置設施的人為事件場外輻射劑量評估限值修改為 1mSv/yr，另 L3 廢棄物埋設處置設施部分，則將自然事件修改為一般與嚴苛狀態，其場外輻射劑量限值等同於基本情境的 0.01mSv/yr 與變動情境的 0.3mSv/yr，新法規修訂結果趨於嚴謹。

另於參訪敦賀電廠 1 號機過程，發現汽機廠房中有部分非金屬廢棄物放置於鐵箱收納容器，電廠澄清現場為暫時存放，最後封箱前會再進一步檢整處理，確認廢棄物重量與表面劑量能分別符合 20 噸與 2mSv/hr 以下的要求。

4.5. 清潔外釋的運用

東海電廠於除役期間拆除作業有大量 CL 清潔廢棄物待處理外釋，因此 NRA 參考國際原子能總署 IAEA 最新 Clearance Level 清潔放行外釋標準，新修訂 Clearance Level

清潔放行外釋標準，業主於除役期間 Clearance Level 制度處理程序，依除役計畫拆除作業屬於 CL 對象物，業主需向管制單位提出第一次量測評估方法申請，經管制單位認可後，業主即可針對 Clearance Level 對象物進行量測評估，在完成量測評估結果後，業主須向管制單位提出第二次量測評估結果外釋申請，管制單位會針對電廠量測結果執行抽樣約 10%數量來確認業主評估結果正確性。

該放射性廢棄物之比活度，如為 Clearance Level 以下，經日本管制機關現場檢查核可後，即可以一般廢棄物處理或回收再利用，東海電廠對於 Clearance Level 廢棄物金屬回收、熔融加工與再利用已有良好實績，如公共椅子、人行道鋪設、車輛進入立牌等，但僅限於原子能或電力公司相關機構使用(圖十一)。另東海電廠對於待管制單位確認與完成確認待釋出的 CL 廢棄物均有量測，業主會定期巡視保管場所與執行檢點作業。



圖十一 東海電廠對於 CL 廢棄物回收再利用之實績

東海電廠與敦賀 1 號機在 Clearance Level 廢棄物金屬部分檢測 11 項核種比活度標準，主要為 Co-60、Cs-137 再去推算其他核種濃度關係，其對於 Clearance Level 廢棄物有專用的大型六面體鐵箱偵測器，相對於我國運轉期間小型的六面體鐵箱偵測器，未來除役期間要處理大量的廢棄物是一項重要課題。另日本除役經驗回饋顯示對於 Clearance Level 廢棄物認定範圍有擴大的必要，希望於管制單位檢查認可後能獲得利害關係者的理解，並使其能順利外釋。

日本放射性廢棄物之處理，參照我國國情與民眾對輻射安全之關心，其清潔外釋之經驗則可讓本會參用。經審視日本放射性廢棄物清潔外釋之標準，與我國「一定活

度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」一致，顯示我國法令與國際無異，然日本幾項作法，或可供本會思考。

(一) 日本除役所拆除之設備物件，雖符合日本放射性廢棄物清潔外釋標準，依法可外釋，然日本環境大臣仍強烈建議，在未取得民眾同意前，不建議放射性廢棄物予以外釋，因此日本目前僅少量再利用製為桌椅或條凳放置於公務體系或核電廠中，大部分仍未外釋。

(二) 日本外釋物品，電廠檢測時需攝影佐證，檢測合格後仍放置於暫存區，須待主管機關抽檢合格後，方能外釋。目前抽檢比例為 10%，且抽檢有一件不合格，則該批次之物品皆須退回重測。

(三) 大型物品，無法放置偵檢器中，因考量偵測低限與可信度，目前皆暫存不予處理。鑑於我國民眾之關切，擬建議抽檢之機制應予以採用，同時考量公眾參與共同抽驗之機制，以昭公信。

4.6. 非放射性廢棄物放行

對於非放射性廢棄物(NR)處理與篩選方式，不是用量測的方法而是從過去的運轉歷史紀錄來判斷，其判斷依據之紀錄文件必須符合保安規定、品保方案等要求，但如果過去運轉顯示有污染的歷史紀錄，雖然目前處於非受污染區域，仍必須對潛在污染設備進行除污作業，否則無法當作非放射性廢棄物(NR)來處理。

東海電廠在非放射性廢棄物 NR 放行已有相關實績，例如二次側從熱交換器廠房連通至汽機廠房的屋外蒸氣管路約 160 噸金屬拆除作業，完成拆除後的廢棄管路屬於 NR 並於室外選址進行保管，在業主自主性進行量測確認無污染後即可以一般廢棄物放行外釋處理。

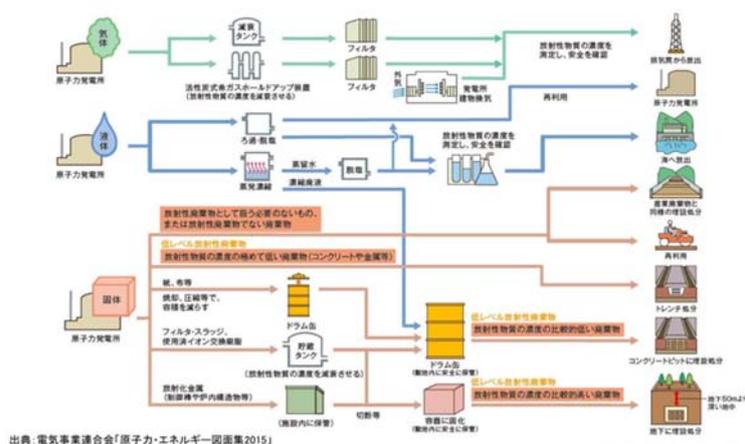
5. 普賢核電廠拆除 Clearance 之外釋處置

有關普賢核電廠拆除 Clearance 之外釋處置訓練課程部分，係由日本原子力研究開發機構(JAEA)之山本耕輔(Kosuke Yamamoto)主講，課程內容包括原子力發電之放射性廢棄物管理、日本 Clearance 清潔標準制度與執行、普賢核電廠 Clearance 清潔標準執

行與品保規定等 3 項議題。訓練課程除由講師於課堂上進行授課內容說明普賢核電廠拆除廢棄物之外釋作法外，受訓學員亦於課程中提出相關問題與講師進行討論，相關課程議題內容及討論簡述如下：

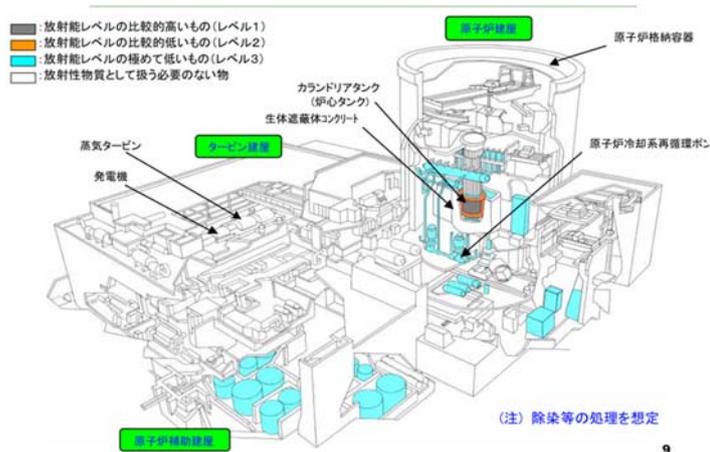
5.1. 原子力發電之放射性廢棄物管理

對於核電所產生之固、液、氣態放射性廢棄物處理原則如圖十二所示，液態與氣態放射性廢棄物皆需過過濾系統後，並經放射性活度濃度確認符合規定後排放，其管制標準為管制區外周邊年劑量不超過 1 毫西弗(安全審查方針為 50 微西弗/年-目標值；保安規定為 3.4 微西弗/年-普賢核電廠除役計畫)；固態放射性廢棄物則因其類型不同而有不同之處置方式，例如低放射性廢棄物之布或紙料，以焚燒或壓縮等方式減容，金屬放射性廢棄物則進行切割與固化，後置於放射性廢料桶或廢料箱，再依放射性活度濃度類別(L1、L2、L3)執行最終處置。



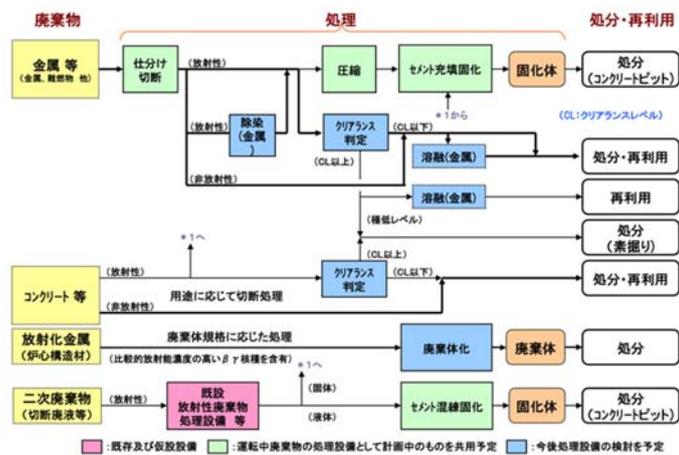
圖十二 原子力核電之放射性廢棄物處理方法

普賢核電於取得除役許可前已完成輻射特性調查與除污作業，該廠所推估之放射性污染分佈如圖十三，除部分歸類為 L1、L2、L3 之低放射性廢棄物外，大部分屬 L3 放射性廢棄物，經除污後應可達 Clearance 清潔標準，預估所產生之廢棄物分別約為 0.5、4.4、5.4、40.6 噸(相關預估值由輻射特性調查及驗證所得)。



圖十三 普賢核廠電之放射性污染分布推估

對於普賢核電廠除役，於設備拆解所產生之不同類型放射性廢棄物處方式如圖十四所示，例如經拆解之金屬廢棄物(或不可燃物)需區別其是否具放射性及是否以除污，若具放射性則進行壓縮、固化及後續處置；若屬非放射性或除污後經判定符合 Clearance 清潔標準，則進行廢棄或再利用處置。其他拆除之混凝土廢棄物亦區別是否具放射性，若具放射性則進行固化及後處置；若屬非放射性或經判定符合 Clearance 清潔標準，則進行廢棄或再利用處置。

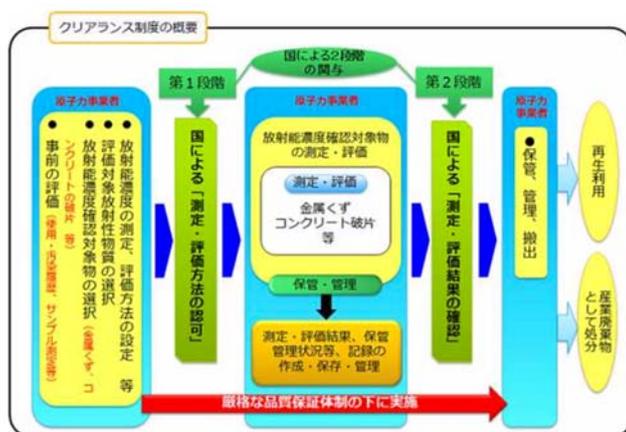


圖十四 普賢核電廠除役之拆解廢棄物處置方式

5.2. 日本 Clearance 清潔標準制度與執行

針對放射性廢棄物 Clearance 清潔標準管制規定如圖十五，日本管制主要分為兩階段：(1)符合 Clearance 清潔標準之放射性廢棄物外前，其量測與評估方式需 NRA 認可；(2)符合 Clearance 清潔標準之放射性廢棄物量測與評估結果需 NRA 確認，其可分為書

面紀錄及現場查核。此作法些與其他國家管制規定有些許不同，主要差異在於第二階段現場查核之確認。對於規劃外釋符合 Clearance 清潔標準之放射性廢棄物，需確認所含核種活度濃度是否符合圖十六所列 33 種(關鍵核種)核種之活度濃度值，其最初為 150~160 種核種，經討論篩選後而留下 33 種代表性關鍵核種作為檢核依據，經量測及評估符合者，得以一般廢棄物外釋或再處理。相較我國之管制規定，依據「一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」，計劃外釋之放射性廢棄物所含核種需符合一定活度或比活度以下放射性廢棄物之限值(共 261 種核種)。



圖十五 日本符合 Clearance 清潔標準之放射性廢棄物外釋管制規定

| 放射性物質の種類 | 放射能濃度 (Bq/g) | 放射性物質の種類 | 放射能濃度 (Bq/g) | 放射性物質の種類 | 放射能濃度 (Bq/g) |
|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| ³ H (トリチウム) | 100 | ¹⁰⁶ Ru (ルテニウム) | 0.1 | ²³² U (ウラン) | 0.1 |
| ¹⁴ C (炭素) | 1 | ^{108m} Ag (銀) | 0.1 | ²³⁴ U (ウラン) | 1 |
| ³⁶ Cl (塩素) | 1 | ^{110m} Ag (銀) | 0.1 | ²³⁵ U (ウラン) | 1 |
| ⁴¹ Ca (カルシウム) | 100 | ¹²⁴ Sb (アンチモン) | 1 | ²³⁸ U (ウラン) | 10 |
| ⁴⁶ Sc (スカンジウム) | 0.1 | ^{123m} Te (テルル) | 1 | ²³⁸ U (ウラン) | 10 |
| ⁵⁴ Mn (マンガン) | 0.1 | ¹²⁹ I (ヨウ素) | 0.01 | ²³⁸ U (ウラン) | 1 |
| ⁵⁵ Fe (鉄) | 1000 | ¹³⁴ Cs (セシウム) | 0.1 | | |
| ⁵⁹ Fe (鉄) | 1 | ¹³⁷ Cs (セシウム) | 0.1 | | |
| ⁵⁸ Co (コバルト) | 1 | ¹³³ Ba (バリウム) | 0.1 | | |
| ⁶⁰ Co (コバルト) | 0.1 | ¹⁵² Eu (ユロビウム) | 0.1 | | |
| ⁵⁹ Ni (ニッケル) | 100 | ¹⁵⁴ Eu (ユロビウム) | 0.1 | | |
| ⁶³ Ni (ニッケル) | 100 | ¹⁶⁰ Tb (テルビウム) | 1 | | |
| ⁶⁵ Zn (亜鉛) | 0.1 | ¹⁸² Ta (タンタル) | 0.1 | | |
| ⁹⁰ Sr (ストロンチウム) | 1 | ²³⁹ Pu (プルトニウム) | 0.1 | | |
| ⁹⁴ Nb (ニオブ) | 0.1 | ²⁴¹ Pu (プルトニウム) | 10 | | |
| ⁹⁵ Nb (ニオブ) | 1 | ²⁴¹ Am (アメリシウム) | 0.1 | | |
| ⁹⁹ Tc (テクネチウム) | 1 | | | | |

この濃度は、埋設処分場で地下水を通じて食物や飲料水に移行したものを人が経口摂取したり、建築資材や一般の材料として再利用されたとしても、**人体への影響が年間線量 0.01mSv (10μSv) 以下となるよう**に定めている。
国内では、R5-G-1.7の値をほぼそのまま採用している。

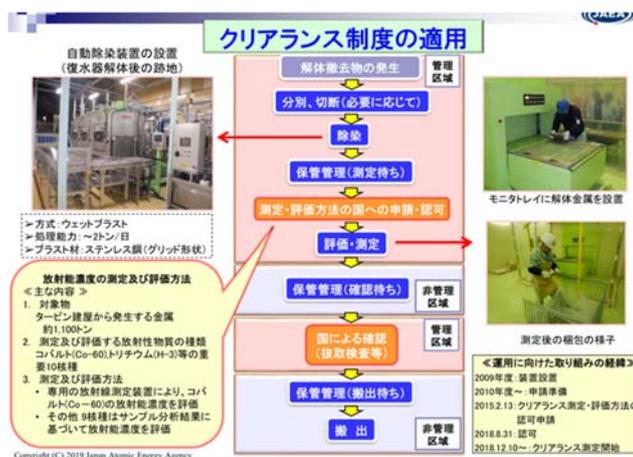
製錬事業者等における工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度についての確認等に関する規制別表第一及び別表第二より作成

圖十六 原子力規制委員會規範符合外釋之核種活度濃度標準

5.3. 普賢核電廠清潔標準執行與品保規定

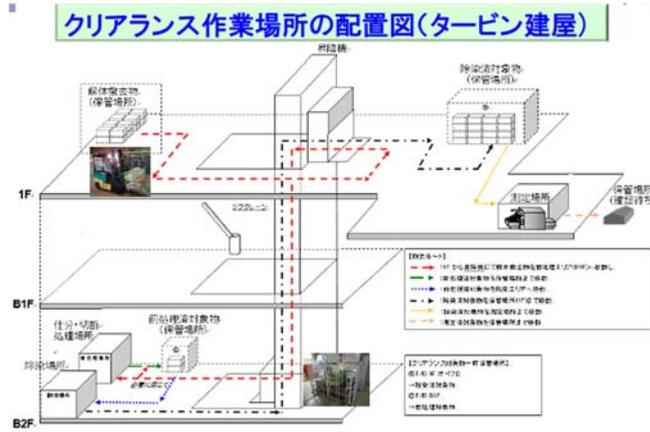
普賢核電廠 2015 年已向 NRA 申請第一階段外釋許可，並於 2018 年經同意放射性廢棄物外釋之量測與評估方法，該廠於 NRA 同意後即開始進行量測作業，並於今(2019)

年報請 NRA 執行第二階段外釋檢查。其中作業流程如圖十七所示，其中量測與評估放射性核種活度濃度之種核數量為 10 種，主要因評估此 10 種核種即具 90%之代表性，且量測系統係由 Co-60 標準射源進行校正，因此量測系統可得較精確之 Co-60 活度濃度，其餘核種(Mn-54、H-3、Sr-90、Cs-134、Cs-137、Eu-152、Eu-154、Pu-239、Am241)則以種核組成比例評估方式決定。經量測與評估各核種活度濃度之結果再與管制值比較，以確認符合清潔標準。



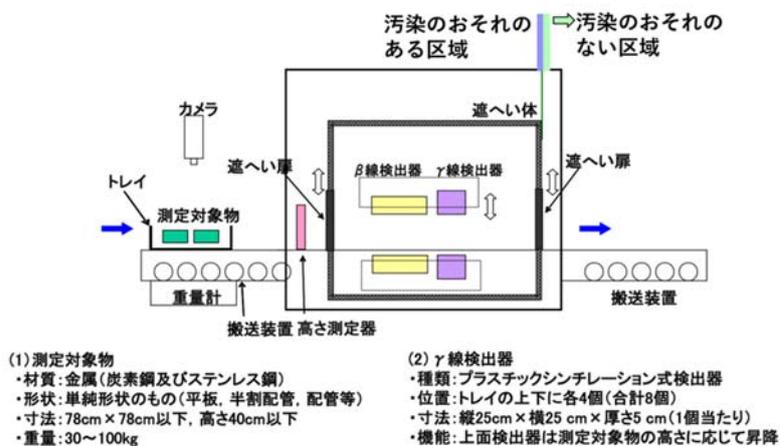
圖十七 確認放射性廢棄物符合清潔標準之作業流程

針對普賢核電廠規劃放射性廢棄物執行 Clearance 清潔標準量測作業，需執行系統性管理，例如汽機廠房規劃除污空間以進行拆解組件之表面除污、規劃暫存場所與運送路線、收納容器之分類與標識及量測與評估系統之建置。當系統設備執行初步拆除後，廢棄物會於汽機廠房 1 樓現場拆除後暫存場所放置，接續送至地下 2 樓分類收集、細部切割、手動與自動表面除污後，再送回 1 樓除污後暫存場所放置，並等待測定場所的量測系統確認能否符合 Clearance 清潔標準如圖十八。



圖十八 汽機廠房拆解組件之表面除污、規劃暫存場所

其中普賢核電廠所建立之量測系統如圖十九，該系統主要包含重量計、攝影裝置、 γ 偵檢器等(β 偵檢器並未使用)，分別為建立待測物之相關量測佐證資訊，其中 γ 偵檢器由上、下共 8 個塑膠閃爍偵檢體組成，並透過 Co-60 於 X-Y-Z 分佈之 16 個測點進行量測系統的儀器與射源校正，以確認量測之有效性。最後將符合 Clearance 清潔標準之放射性廢棄物進行包裝及收納，並標示 QR code，以管控其相關資訊。電廠後續將量測包裝收納完成的 Clearance 廢棄物暫存於廠外非管制區的 4 號倉庫，目前普賢電廠存有約 50 噸廢棄物待管制單位抽樣檢測，未來管制單位完成檢測合格的待標售清潔廢棄物會暫存廠外非管制區的 1 號倉庫，目前普賢電廠已於今年向管制單位申請第二階段外釋檢查，尚未通過管制單位檢查的 Clearance 廢棄物則放置於 4 號倉庫。



圖十九 放射性廢棄物之活度濃度量測系統

6. 普賢電廠拆除方法

有關普賢電廠拆除方法訓練課程部分，係由日本原子力研究開發機構(JAEA)敦賀除役計畫實證部門荒谷健太(Kenta Aratani)主講，課程內容包括普賢電廠除役計畫整體概要、普賢電廠設備拆除實績、拆除作業細項說明、複雜特殊結構拆除方法及未來除役計畫規劃實績等 5 項議題。訓練課程除由講師於課堂上進行授課內容說明外，參訓學員亦於課程中提出相關問題進行討論，相關課程議題內容及討論簡述如下：

6.1. 普賢電廠除役計畫整體概要

核能電廠除役的基本方針為安全與有效率的執行除役計畫所述各項作業，首先是要確保各項作業活動安全，對於現行技術能合理的應用於除役計畫，減輕除役廢棄物產量對環境影響，除役活動能對外界資訊公開，以及除役事業能獲得地方政府與相關民眾的支持。日本在電廠除役安全管制作為上，於機組運轉階段進入除役階段前必須提出除役計畫送審，除役計畫內容則必須說明除污與拆解方式、時程、放射性廢棄物處理，以及安全分析等等，除役計畫經審查同意後，在機組除役期間，則依據除役計畫進行相關除污與拆解、燃料運送，以及除污廢料處置等作業管制。電廠並於除役作業末期提出除役計畫完成之確認申請，經管制單位確認完成後，即終止其執照許可。

普賢電廠設計固有特性為反應器本體結構較複雜，並使用重水作為中子緩速劑。JAEA 根據以上電廠固有特性來開發除役反應器拆除工法與氬除污技術，除前述固有特性外，其餘系統設備與沸水式核能電廠(BWR)相同，其核種種類與殘餘輻射活度亦與商用反應器相同，因此，可對於除役現行技術再進行改良與精緻化。

普賢電廠早期於 1979 年開始運轉，後來因實驗計畫預算被刪除取消，所以在 2003 年 3 月決定永久停止運轉，並於同年 8 月將反應爐內用過燃料挪移至燃料廠房暫存，在停機過渡階段期間，普賢電廠利用定期檢查期間(即我國現行大修維護作業)已先針對一次側管路執行系統除污作業，目的為了降低拆除工作人員輻射劑量與合理抑低，因此相關系統除污作業於大修期間執行完成，故未納入除役計畫內容。

NRA 於 2008 年 2 月認可普賢電廠除役計畫申請後開始進行除役作業，依除役計畫拆除作業程序大致分成四個階段，分別為重水與氬等除污作業、反應器周圍組件拆

除作業、反應器本體拆除作業，以及廠房結構拆除作業等階段。其中拆除作業期間，必須考慮到燃料儲存安全及人員輻射防護，拆除所產生之廢料則依其輻射劑量狀況分成 Level 1~3 及 CL 放射性廢棄物等不同等級進行處理及處置。

普賢電廠在第一階段除執行重水回收與氙核種的除污作業外，亦優先針對汽機廠房飼水加熱器、冷凝器、汽水分離器、主蒸汽與飼水管路等放射性較低設備組件進行拆除作業，以作為拆除廢棄物除污及暫存區域。

目前普賢電廠已進入第二階段反應器周圍組件拆除作業期間，將規劃拆除反應器廠房兩串蒸氣管路、4 台再循環泵，以及汽機廠房 3 台飼水泵，相關作業期間應注意事項包含管制區域工作人員輻射防護與合理抑低、現場拆除技術與切割裝置的選用、危害物品管制如早期電廠會使用石綿作為管路保溫材料、拆除作業所產生的粉塵擴散，以及工安防護如動火管制、重物墜落與高空作業。

未來普賢電廠進入第三階段反應器本體拆除作業期間，將規劃拆除反應爐、汽機與發電機本體，相關作業期間應注意事項包含現場拆除技術與切割裝置的選用、使用水下遙控切割技術避免工作人員於高輻射區超曝露，反應器廠房內反應爐與周邊系統設備拆除預估會產生 2000 噸廢棄物處置與管理，以及工安防護如動火管制、重物墜落與高空作業。

課堂中有針對普賢電廠在永久停止運轉到除役計畫獲得認可期間的管制標準，講師說明目前運轉人員訓練與資格仍維持，但員工人數已減少一半，而 NRA 對普賢電廠保安檢查(即現行核安紅綠燈視察)的標準與頻率與運轉期間相比是不變，但執行視察時間縮短，而定期檢查項目(即我國現行大修視察)則減少一半。另對於反應爐本體拆除所使用水下遙控切割技術，首先在爐心頂板區域是利用金屬線鋸切割出空間後，利用雷射切割爐心放置燃料的壓力管，其從爐心取出後再放置於反應器廠房上池進行二次細部切割，並將容納器放置於反應器廠房暫存區。

6.2. 普賢電廠設備拆除實績

普賢電廠除役拆除作業目前已完成汽機廠房部分設備拆除作業包含飼水加熱器、冷凝器、汽水分離器、主蒸汽與飼水管路等放射性較低設備組件，拆除後的空間可作

為拆除廢棄物除污、分類、暫存保管區域，如第 5 號飼水加熱器完成拆除作業後，設立除污裝置與暫存保管區域；第 3、4 號飼水加熱器完成拆除作業後，設立廢棄物分類裝置；主蒸汽管路完成拆除作業後，設立暫存保管區域；冷凝器 A、B 台拆除作業後，分別設立手動與自動除污工作區域(Green House)。反應器廠房地下一樓部分設備拆除作業包含主蒸汽管路、隔離冷卻系統熱交換器、乾井緊急過濾通風系統 B 串等放射性較高設備組件，拆除廢棄物需執行表面除污，拆除後的空間可作為除污後廢棄物的暫存保管區域。非輻射管制區域拆除作業包含，汽機廠房輔機冷卻系統熱交換器與相關管路、緊急柴油發電機進出空氣管路、消音器等相關設備。普賢電廠除執行前述整體系統設備拆除作業外，還會對反應爐與周邊設備邊界如一次側主蒸汽上昇管與入口管路進行局部切除的實體隔離作業，並將切除管路進行盲封，以利下階段反應器本體拆除作業邊界劃分與執行。

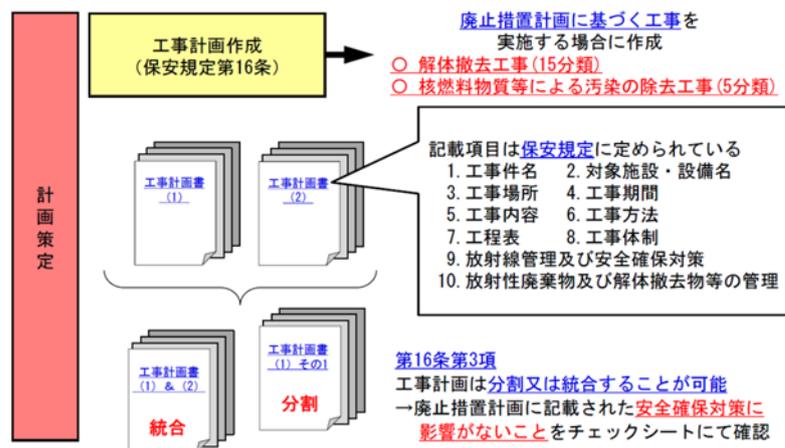
課堂中有針對普賢電廠優先針對乾井緊急過濾通風系統進行拆除作業是否會影響除役期間包封容器避免輻射劑量外釋的能力，電廠說明所規劃拆除的緊急過濾通風系統目前均已不使用，但反應器廠房正常通風系統現階段仍維持可用狀態。另前述反應爐與周邊設備邊界相關實體隔離切除作業，若未涉及安全及輻射曝露事項，則原則由電廠自行管制，NRA 並沒有對相關除役活動執行檢查作業。

6.3. 拆除作業細項說明

日本除役電廠在執行拆除作業之前，除需於除役計畫敘明拆除作業內容外，並依保安規定完成工事計畫書編寫(圖二十)，編寫內容包含工事名稱、執行設施與設備、工事地點、工事期間、工事內容、工事方法、工程表、工事體制、放射線管理與安全確保對策，以及放射性廢棄物與拆除廢棄物管理。另除役拆除作業的工事計畫書依保安規定可以整合性的系統或獨立的設備組件等形式提出。

工事計畫書內容需針對拆除作業範圍的設備組件污染狀況說明輻射調查情形，並對現場試片檢測執行狀況與實驗室檢測結果進行確認，簡單的檢測作業會由電廠化驗分析部門負責執行，較難檢測的作業會委託外面實驗室來執行，但不一定須為管制單位認可實驗室。普賢電廠早期於運轉期間於廠房內執行輻射調查較少，因此在拆除作

業前會利用試片取樣進行核種分析，再進一步評估拆除對象的殘餘輻射污染程度。



圖二十 依保安規定編寫工事計畫書之內容

業主在除役拆除工事計畫書完成後，會依保安規定要領建置相關拆除作業程序書，包含拆除設備隔離停用確認、輻射防護管理與安全確保對策、氬濃度監測與重水回收方法等相關程序書，而過去除役經驗顯示程序書應針對工事期間事故防範項目進行檢視，包含輻射防護管理與一般勞工安全防護事項，其中電廠亦針對拆除範圍潛在會發生意外區域如人員路徑上的設備突出部位是否有緩衝包固進行調查，以及過去重水洩漏經驗回饋，對於包封容器、管路內洩漏情境建立止漏處理、洩漏液體抽除等相關對策。

普賢電廠對於拆除設備執行拆除作業前，為落實拆除期間之輻射防護措施，於拆除之前需依管制機關核定之除役計畫及前述輻射評估結果，仔細對每一項設備或組件，依活度、施工危害管理要求、及是否為現階段拆除等因素，以不同顏色標示進行分類。舉例來說，電廠會事先對設備運轉、停用與預定拆除範圍等狀態進行圖面修訂與不同顏色標註，其中運轉中設備以黑色標註，停用設備內有殘留水以藍色標註，以及完成停用設備洩水可以進行拆除作業以綠色標註。

普賢電廠對於現場執行拆除作業前，會先針對拆除區域建立防止污染擴散的集塵裝置，以及工作人員輻射防護裝備(圖二十一)。對於早期電廠金屬設備管路所使用的石棉保溫材料，現今是屬於有害物質，相關保溫材料的撤除亦須分類、減容處理。



圖二十一 拆除保溫材使用的集塵裝置示意圖

普賢電廠在執行拆除作業會根據拆除對象選擇最適當方法與工具，例如機械類的切割機具適合於高污染防塵室內使用，其優點為粉塵容易回收，以及高污染區域遙控切割技術，可以減少工作人員接受劑量並符合合理抑低需求。另熱切割機具適合用於硬度較高合金鋼材的拆除，其優點為可利用高於金屬母材熔點溫度將其溶解，切除較厚的金屬材料，並縮短拆除作業時間。

普賢電廠在拆除廢棄物會進行分類管理，依據除役計畫預估、核種分析結果與污染歷史紀錄對於不同污染廢棄物進行等級區分，不同廢棄物材質亦會進行分類，以及資料登錄管理，並於外觀標示 QR Code 可供現場掃描查對，以 CL 廢棄物適用的觀點可容許不同材質混合在同一鐵欄的收納容器進行處置，但是絕對禁止 L3 以上廢棄物與 CL 廢棄物一起存放處置，另大型廢棄物組件如泵或閥體則另外找現場暫存區域進行存放，待殘餘輻射衰減後，儘量以不切割方式進行外運處置。在拆除廢棄物依規定暫存於保管區域後，對於屬於 CL 廢棄物後續還須再執行除污與外釋前處理作業。

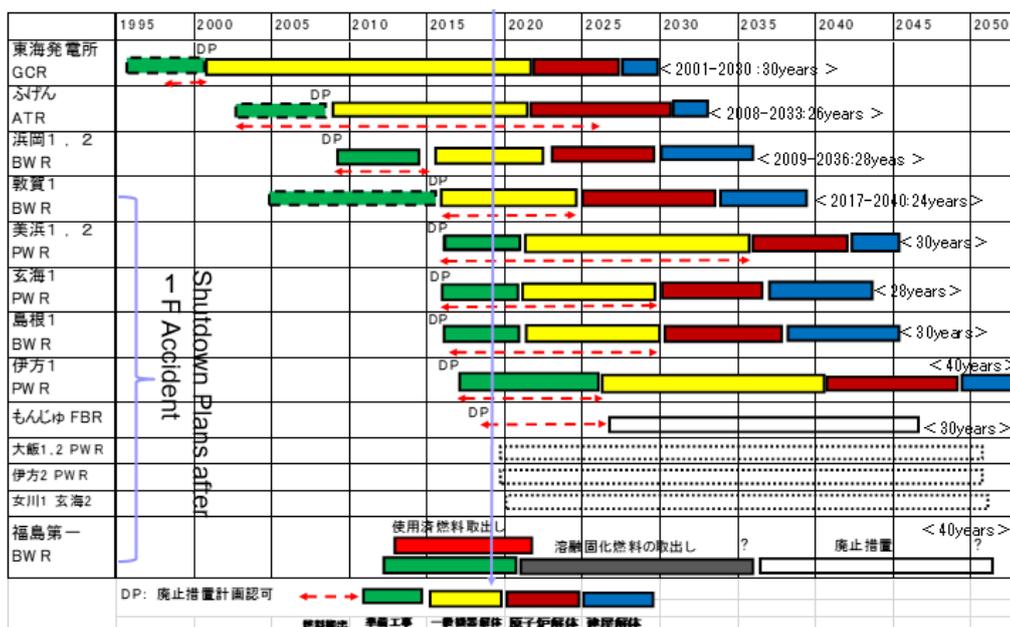
課堂中有詢問普賢電廠拆除廢棄物暫存區域狀況，講師說明目前依反應器周邊設備拆除進度，廢棄物暫存區仍足夠，並已將部分屬於 CL 廢棄物外釋作業向管制單位提出申請，NRA 還在審查並會於未來執行抽樣檢查，待 CL 廢棄物順利釋出後，現場就會有多餘空間可繼續存放拆除廢棄物，因此除役期間拆除作業能否順利進行，與廢棄物處理進度，以及現場能暫存廢棄物的空間息息相關，被日方視為是除役拆除作業一

個很重要的環節。另詢問電廠執行拆除後規劃暫存區域空間的消防設備仍保留，並未隨設備一起拆除，此與敦賀電廠一起拆除消防設備的作法有所不同，但仍會重新評估消防對策並提供臨時性的消防設備，以符合除役期間保安規定要求。

7. 日本的除役經驗與回饋

本次訓練課程中，由主辦此次受訓課程的日本原子力除役研究學會(ANDES)佐藤忠道(Tadamichi Satoh)秘書長，介紹日本的除役經驗與回饋，課程內容包含東海電廠的除役經驗，以及佐藤秘書長彙整提出安全除役作業的重要關鍵因素。訓練課程除由講師於課堂上進行授課內容說明外，本會參訓成員亦於課程中提出相關問題與講師進行討論，課程內容及討論結果簡述如下：

課程首先說明日本已進入除役與即將除役電廠及其時程規劃(圖二十二)，分別為東海發電廠、普賢電廠、浜岡電廠 1 號及 2 號機、敦賀電廠 1 號機、美浜電廠 1 號及 2 號機、玄海電廠 1 號機及 2 號機、島根電廠 1 號機、伊方電廠 1 號機及 2 號機、文殊動力試驗爐、大飯電廠 1 號及 2 號機、女川電廠 1 號機、福島第一發電廠。日本除役作業共區分為四個階段，包含準備階段、周邊設備拆除階段、反應器拆除階段、廠房拆除階段。由於目前各核能電廠均未進入反應器拆除階段，因此日本對除役作業的經驗主要係準備階段與周邊設備拆除階段的經驗。



圖二十二 日本已進入除役與即將除役電廠及其時程規劃

7.1. 東海電廠的除役經驗

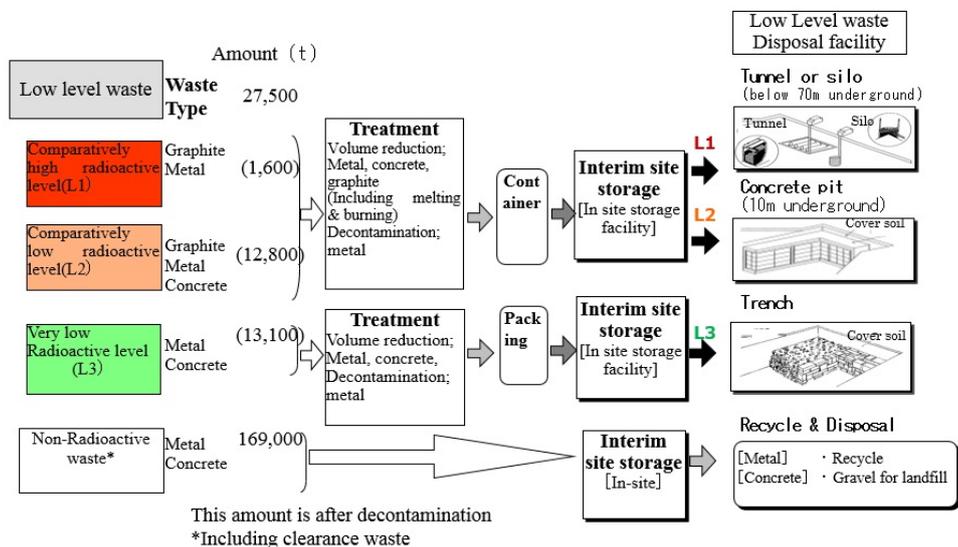
佐藤秘書長再以東海發電廠的除役作業與我方人員分享，原因係東海發電廠為日本第一座亦是最早商業運轉的核電廠，其除役過程的經驗值得參考。該電廠於 1966 年啟用，基於經濟成本等因素於 1998 年停止運轉，並於 2001 年開始除役，於此期間有 5 年的時間進行除役前的準備作業，包含退出用過核子燃料並將燃料運出廠外，以及提交除役計畫的通知。針對東海電廠初期的除役作業規劃，電廠於 2001 年起至 2010 年止，於反應器區域進行 10 年的安全貯存，執行此項作業主要係考量鈷 60 的半衰期為 5 年，經過安全貯存期後核種活度可降低為原活度的 1/4。經過安全貯存期後，2011 年開始進行反應器區域的拆除作業，在原本的除役規劃期程，大約只要 17 年的時間即可進入建築物拆除的最終階段，目前因移除蒸汽產生器及廢棄物處理問題，整體除役期程往後展延 13 年，預計 2030 年方可進入最終階段，其反應器廠房的安全貯存年限亦從 10 年，延長到 23 年，其他區域則拆除一般性設施(如汽機)，並完成兩個蒸汽產生器的拆除作業。

東海電廠執行輻射特性調查作業係以低放射性廢棄物的核種活度為標準，將廠房區域分為 L1 至 L3 與解除標準等四個類別。其中一次生物屏蔽體內層為 L3 而兩側為 L2，主要原因係中子活化範圍除一次生物屏蔽體內側外，亦經由管路穿越至一次生物屏蔽體外，進一步活化一次生物屏蔽體外側。此經驗顯示現場實際取樣分析很重要，另一點是必須注意中子藉由何種方式活化結構或組件。雖然東海電廠係氣冷式核能電廠，同樣的現象可能不會發生在沸水式的反應器，但基於這樣的經驗說明，電廠在執行作業前應該先思考或預先瞭解、設想各項可能發生的情節。

目前東海電廠已完成燃料冷卻池的清理作業、清洗及切割燃料格架、移除汽機廠房的汽機發電器及混凝土基座、移除支援反應器的設備(消防用水槽、緊急柴油發電機)、移除水處理系統。佐藤秘書長也說明兩個蒸汽產生器(Steam Raising Unit, SRU)的拆除作業，第一個蒸汽產生器的拆除作業係以遠端遙控機械方式進行，主要先將周邊設備拆除後再裝設臨時性基座、夾具以及遠端切割設備，對於蒸汽產生器主體部分則分為數個主要部分分別進行切割作業，完成後轉移至其他地區進行第二次切割作業，

將其切割為小碎塊進行貯存。第二個 SRU 係用人工的方式執行拆除作業。東海的 SRU 污染很低，所以人員受到的輻射劑量較低，可用人工方式進行拆除作業，現場輻射劑量低或無輻射劑量的話，用人工方式會比較簡單。針對兩次所花費的時間資源相比，兩種 SRU 拆除作業所花費的時間資源相近，惟考量設備裝設作業時，遠端拆除方式因需要裝運設備、安裝與調整，因此花費較人工拆除方式長。另外，SRU 拆除作業所產生的保溫材佔據了廢棄物產生量的最大宗。

有關東海發電廠 1 號機除役的廢棄物處理與處置概念，有一份完整的圖說(圖二十三)。其中 L1 及 L2 的低放射性廢棄物會經過減容與除污的過程，再裝入盛裝容器，先暫存於廠址所在的設施中，後續 L1 廢棄物會放入地下 70m 深的坑道式處置場；而 L2 廢棄物會放入地下僅 10m 深的混凝土窖，並以土壤覆蓋的處置場。L3 的低放射性廢棄物同樣經過減容與除污的過程，直接包裝起來後，亦暫存於廠址所在的設施中，後續 L3 廢棄物會放入地表面的壕溝進行處置。至於非放射性廢棄物(包括解除管制的廢棄物)則是暫存於廠址所在的設施中，爾後金屬的部分就回收再利用，混凝土則可用於土地回填(Landfill)。



圖二十三 東海發電廠 1 號機除役的廢棄物處理與處置概念

7.2. 除役安全的關鍵要素

佐藤秘書長依據日本的除役經驗彙整提出除役安全的關鍵要素，整理如下：

(1). 要取得必要的除役資金

設施經營者執行成本估算後應定期更新，並瞭解成本估算中的不確定性。

(2). 完整的廠址輻射特性調查

設施經營者應結合計算模式與量測結果發展廠址輻射特性調查，並檢視及分析比對調查結果，確認其正確性，以及維持更新。另外提到輻射特性調查可以房間為基礎，專注於區域內的放射性物質與廢料，而非僅組件，除役階段以房間為單位，運轉中以系統為單位；不要只看圖面，應檢視所有紀錄文件與訪談資深員工，了解可能歷史；注意所有可能風險，包括輻射與非輻射，如工安、火災。

其調查結果應建立完整資料庫，以作為除污、拆除工法與所需設備、現場工作人員輻安與工安防護、廢料管理(包括分級、後續處置)，以及經費預估之決策參考。

(3). 設施規模的縮減因素

確立是否持續運轉、修改、持續保留、新增及拆除之系統與重要設備，儘速減縮電廠的公用設備，並即早進入冷與黑(Cool and Dim)時期。

(4). 建立放射性廢棄物的規劃與處理路徑

在確定放射性廢棄物的整體規劃藍圖前，無須急於執行部分前端作業。應依序對工作區域內之暫時作業區域、運輸路線、廢棄物處理與貯存的臨時區域、廠內中期貯存設施、最終處置等項目先有完整的規劃再據以執行，且執行期間對廢棄物包件的內容物應有詳細且正確地紀錄。

(5). 整體除役作業最佳化

自除污拆除作業至廢棄物處理、貯存、處置的過程中，應詳細考量各個方案，以評估最佳化的程序。

(6). 掌握除役技術與方式並進行整合

參考非核能工業界或國外的技術並進一步結合應用，但採用新研發或創新的技術時，應注意是否增加計畫的風險。

(7). 除役階段與運轉階段的計畫管理區分

除役期間的計畫管理非常重要，相較於運轉期間的作業多為常態性並可由固定工作人員依規劃執行，除役期間有各種新且多樣的除役作業，可能需要依工作性質，每日就相關作業採取更密集的管制與監控，因此除役期間應有新的或不同的管理制度，該管理制度應具有靈活性，以便能夠對最新的狀況及時快速反應。

(8). 文化與心態的改變

機組由運轉階段進入除役階段後，由於運轉、除役兩階段所關注的安全與工作的重點目標，均將會有很大的不同，在面對除役工作的規劃及管理(制)等事務時，不能再沿用運轉期間的思維與心態，必需要有所調整改變。

- (一)由生產導向管理，轉變為計畫完成導向管理。
- (二)由確保系統功能，轉變為重視放射性物料管理與數量的最小化。
- (三)由依賴永久性結構，轉變為利用臨時結構物進行除役拆除作業。
- (四)由核能和放射性危害風險為主，轉變為核能危害風險降低，放射性危害風險性質改變，但工安風險顯著增加。
- (五) 由不在意作業環境是否為低輻射/污染，轉變為重視材料清潔與環境是否為低輻射/污染水平。
- (六) 監管重點不著重於運轉管制。

運轉期間對管理制度、關注焦點、風險、設施結構以及低輻射或低污染水平等議題將於除役期間有所改變，其差異如整理如表 2。

表 2 運轉期間與除役期間的差異性

| | 運轉期間 | 除役期間 |
|--------|-----------------|---------------------------|
| 管理制度導向 | 生產為導向的管理制度 | 完成計畫或達成目標為導向的管理制度 |
| 專注焦點 | 系統的功能 | 放射性物料貯存的管理 |
| 結構 | 依賴設施運轉期間的永久性結構 | 引入臨時性結構以協助拆除 |
| 風險 | 主要為核能與輻射的風險 | 核能風險降低、輻射風險的性質改變、工業風險顯著增加 |
| 輻射或污染 | 低輻射或低污染水平相對較不重要 | 低輻射或低污染水平對解除管制很重要 |

(9). 電廠專責的組織單位與人力資源的整合

除役作業依不同的階段有不同的需求，因此設施經營者應具備所需不同的知識、技術與領導力。

(10). 激勵

對於電廠的人員要進行鼓勵，讓工作人員明白除役並非最終過程與完結，除役後的管理仍為重要。

(11). 避免過度保護或過度管制

執照持有者應避免過度保護，而管制機關應避免過度管制。

(12). 利害關係人的參與

執照者對地方居民的溝通至為重要，做好當地公眾的溝通將為促成順利除役的重要因素。

最後講師總結日本的經驗，說明除役作業能安全、順利與合理的執行，其關鍵點在於廢棄物的管理、組織與管理制度、以及文化與心態的改變。從執行面而言，除役作業屬於「經驗工學」，可由一個計畫得到的經驗教訓，改善或應用於下一個計畫。並且應注意非技術性因子將比技術性因子更為重要。且國際合作與經驗交流將有助於改善計畫的效益與安全性。

8. 美濱電廠除役作業執行現況與現場課題

本次訓練課程中，有關「美濱電廠除役作業執行現況與現場課題」之主題係由關西電力公司田邊一裕(Kazuhiro Tanabe)負責講授，課程內容包含美濱電廠除役作業執行現況與現場課題。訓練課程除由講師於課堂上進行授課內容說明外，參訓學員亦於課程中提出相關問題與講師進行討論，課程內容及討論結果簡述如下：

8.1. 美濱電廠除役作業執行現況

日本關西電力公司所屬核能電廠有美濱、大飯與高濱電廠，其中美濱 1、2 號機與大飯 1、2 號機共 4 部機組於 2017 年決定進行除役，本次課程針對美濱電廠除役作業

執行現況與現場課題進行講授，美濱電廠 1、2 號機除役計畫主要可分為四個階段，包含拆除準備階段、反應器周邊設備拆除階段、反應器拆除階段、廠房拆除階段共 30 年。美濱電廠為 PWR 核能電廠，於 2017 年除役計畫獲管制單位認可後，開始進行第一階段反應器拆除準備作業，主要執行項目包含系統除污、輻射特性調查、新燃料移出、二次側系統設備拆除與反應爐安全貯存作業。美濱電廠在爐心用過燃料移出後，便委請三菱重工執行反應爐、蒸汽產生器、調壓槽等一次測系統除污作業，除污目標為降低 90%的拆除工作人員劑量(DF>10)，目前正執行反應器廠房與輔機廠房輻射特性調查作業，以及汽機廠房主汽機與冷凝器拆除作業。對於一次圍阻體內的輻射特性調查，因執行系統除污過程可能會改變放射性核種比例，日方是建議待系統化學除污完成後，再執行輻射特性調查，以利於反應爐內外核種分布污染狀況的掌握，而一次圍阻體外的輻射特性調查，因利用物理除污方式，兩者執行的先後順序不致影響核種比例因素。

美濱電廠汽機廠房二次側系統設備拆除作業，拆除對象主要為無污染的主汽機、冷凝器、汽機廠房通風過濾器等大型設備拆除作業，其中含有保溫材拆除作業、干涉物拆除如小型設備、配管、泵等。該階段仍保留二次側冷卻水系統、電氣室、變壓器、空壓機等仍需運轉設備。現階段 1、2 號機汽機廠房有暫存 3 號機福島事故後強化改善的設備，待 2019 年底 3 號機 CWP 耐震補強完成後，將於 2020 年開始進行 1、2 號機汽機廠房大型設備拆除作業，預定 2036 年開始進行汽機廠房結構拆除作業。

8.2. 美濱電廠除役作業現場課題

依據美濱電廠除役經驗彙整提出除役計畫與工事主要課題，整理如下：

表 3 除役計畫與工事主要課題

| | 項目 | 檢討課題 | 目的與必要的技術 |
|----|----|--------------|-----------------|
| 計畫 | 工程 | 拆除廢棄物處理、動線整合 | 拆除、廢棄物固化、物流管理複雜 |
| | | 用過燃料長期保管對策 | 除役經費影響評估、費用處置 |
| | | 工程縮短 | 用過燃料儘早搬出、維持管 |

| | | | |
|------|-----------|----------------------------|---------------------------|
| | | | 理設備縮小、部分設備、廠房拆除費用減少 |
| | 費用 | 除役作業經費精算與減低 | 除役經費影響評估、費用精算 |
| 工事 | 偵檢 | 輻射特性調查 | 拆除工法、廢棄物處理處置最佳化(安全、效率、花費) |
| | 拆除 | 切斷、拆除技術 | 2 次廢棄物、2 次作業產生 |
| | | 重件吊運技術 | 補強、維護必要 |
| | | 合理化與省力化 | 安全、效率、低成本 |
| | | 搭架費用減少 | 高空拆解作業 |
| | | 合理抑低、身體污染防止 | 空間遮蔽、污染標示 |
| | | 有害廢棄物 | 含有石綿、PCB、水銀等設備的安全、效率的拆解 |
| | 除污 | 拆除設備除污 | 2 次廢棄物、2 次作業產生 |
| | | 廠房混凝土除污 | 2 次廢棄物、2 次作業產生 |
| | | 拆除作業區域除污 | 部分管制區域解除 |
| | 廢棄物管理 | 拆除廢棄物區分處理處置 | 廢棄物處理、物流最佳化 |
| | | 處置容器、管理方法 | 3D 技術與工程管理結合 |
| | | 水處理、廢樹脂處理 | 維持管理設備縮小、拆除範圍擴大 |
| 用過燃料 | 燃料外運、乾式貯存 | 維持管理設備縮小、拆除範圍擴大 安全的乾式貯存 | |

最後講師總結美濱電廠除役的經驗，說明除役作業可能直接面對的問題如(1)現場作業合理化、省力化，需透過除役經驗與技術訣竅共有化、知識管理、想法、技術開發、挑戰精神來完成；(2)思想改變，須培養除役安全文化、管制規則規定的寬鬆、廢棄物分級分類方法；(3)長期管理項目因應，如核工程師減少、新手與中堅份子離職、員工激勵、參與除役動機、除役作業的魅力。未來因應對策對於(1)現場作業合理化、省力化、改善工法的檢討、提案；(2)技術製品開發、研究開發的推進；(3) 業主各電

廠特性標準化；(4) 運轉期間轉變到除役期間規制改良。

二、參訪敦賀、普賢核能電廠與敦賀除役研究發展機構

此次在 ANDES 的安排下到敦賀、普賢核電廠與敦賀除役研究發展機構參訪，實地了解其除役作業狀況，其參訪情形整理如下。

1.1 敦賀核電廠背景資料

敦賀核電廠位於日本福井縣敦賀市的敦賀半島，為日本原子力電力公司(JAPC)所營運之核能電廠，共設有 2 部機組，第 1 號機組於 2011 年 311 福島事故發生後進入大修未能起動，2015 年 4 月 27 日宣布永久停止運轉，其除役計畫於 2017 年 4 月 19 日獲 NRA 認可後進入除役階段；第 2 號機組則於 2011 年 3 月福島第一核電廠事故後，接受日本首相下令全國核電廠均停止運轉，要求強化因應地震海嘯安全措施之要求而停止運轉。於符合 2013 年 7 月施行之新規定，並重新送件審查，審查通過後始得重新啟動。目前敦賀核電廠持續執行 1 號機除役作業，同時於 2015 年 11 月提送第 2 號機組之重啟文件，送 NRA 進行審查中，敦賀核電廠相關資訊如表 3。

表 3 敦賀電廠各機組現況

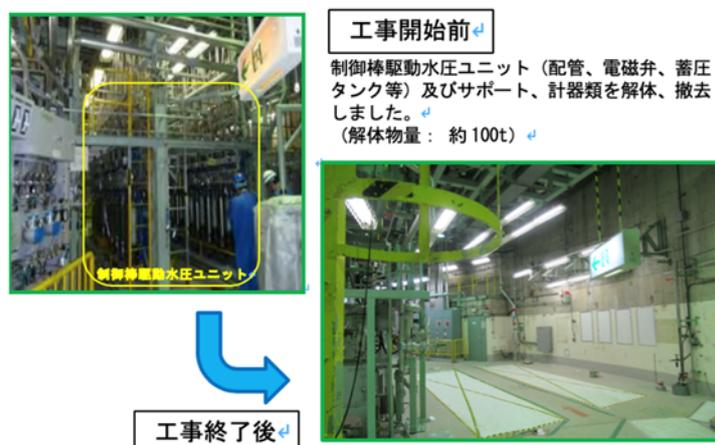
| | 1 號機 | 2 號機 |
|-----------|--|--------------------------------|
| 反應器類型 | BWR | PWR |
| 輸出功率(MWe) | 357 | 1110 |
| 開始運轉日 | 1970 年 3 月 | 1987 年 2 月 |
| 現況 | 2015 年 4 月 27 日永久停止運轉，2017 年 4 月 19 日除役計畫獲 NRA 認可，執行除役作業中。 | 2015 年 11 月完成強化措施，向 NRA 申請重啟中。 |

1.2 敦賀電廠現場實地參觀

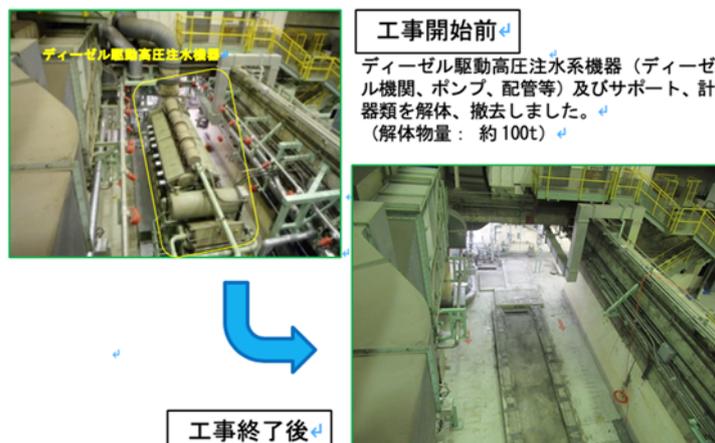
本次參訪日本核設施之第一個行程為敦賀核電廠，主要為瞭解現行該設電廠除役規劃、拆除現況及低放射性廢棄物處置情形。參訪行程先由日本原子力發電所中村又司簡要說明敦賀核電廠 1 號機除役計畫之放射性劑量評估及放射性廢棄物處置規劃與現況，再分別到低放射性廢棄物貯存倉庫與反應器廠房瞭解廢棄物管理，以及現場設備拆除情形。

敦賀核電廠 1 號機透過輻射特性調查及放射性劑量評估，將反應器廠房及汽機房

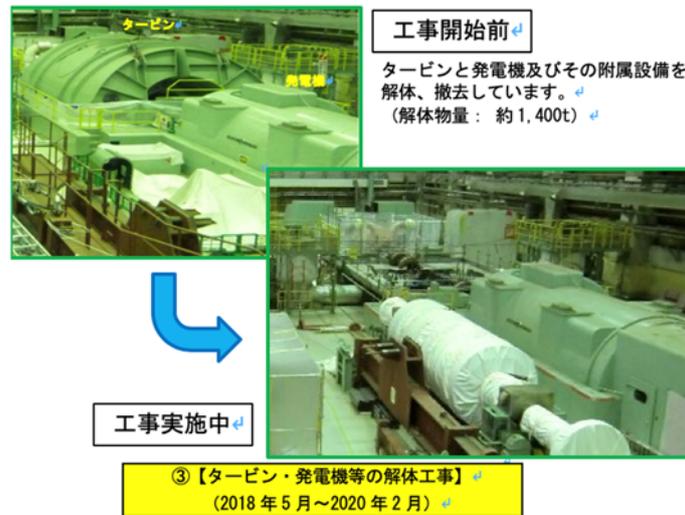
區別為 L1(高)、L2(中)、L3(低)低放射性廢棄物及清潔(clearance)廢棄物，其評估之數量約分別為 40 噸、1990 噸、10760 噸、7800 噸，共計約 20600 噸；而非具放射性之廢棄物推定約為 176000 噸。目前如圖二十四與圖二十五，敦賀核電廠 1 號機已拆解之設備與組件為反應器廠房之控制棒液壓控制系統(包含配管、電磁閥等)，以及汽機廠房之柴油驅動高壓注水系統(包含柴油發動機、泵、管路等)，其拆解之廢棄物約各 100 噸。另外，如圖二十六，汽機廠房之渦輪機與發電機及其附屬設備尚處於拆解中，預估拆解後之廢棄物約重 1400 噸。



圖二十四 反應器廠房之控制棒液壓控制系統拆解前後



圖二十五 汽機廠房之柴油驅動高壓注水系統拆解前後



圖二十六 汽機廠房之渦輪機與發電機及其附屬設備拆解現況

低放射性廢棄物採用 55 加侖桶或貯存箱存放，並集中貯存於低放射性廢棄物貯存倉庫，該貯存倉庫共分為 3 館，共可貯存約 7 萬桶，預估 1 號機拆解後應有足夠空間可存放。為便於管理，各貯存容器皆標示有條碼、劑量率等資訊，以掌控其來源。另外，該貯存倉庫亦透過束帶固定最外層之貯存箱(桶)，以避免地震影響其貯放。

此次分別至除役中之 1 號機之反應器廠房控制棒液壓系統、汽機廠房 3 樓主汽機與發電機、Clearance 廢棄物除污、測定系統、低放射性廢棄物貯存倉庫等區域參觀，主要觀察結果與心得如下：

- (1) 至低放射性廢棄物貯存倉庫 C 參觀，現場放置廢棄物盛裝容器 200L 桶，以及存放運送與處置兼用的 20 噸鐵箱容器，其堆置第一排均加裝防震墜落設施，並於容器間預留檢查走道空間，以便於定期執行輻射偵檢量測與目視檢查外觀完整性。
- (2) 至汽機廠房 Clearance 廢棄物除污、測定區域參觀，現場 Clearance、Non-Radioactive 廢棄物除污設備包含手動與自動除污系統，對於金屬廢棄物可利用噴砂與高壓水柱去除表面與次表面污染，噴砂使用過的鋼珠會進行處理回收再利用。另現場 Clearance 廢棄物測定區域，架設一台放射性廢棄物活度濃度量測系統，現場擺設廢金屬與管路示範如何利用 γ 偵檢器量測 Clearance 廢棄物核種種類與濃度，並利用重量計、攝影裝置建立待測物相關量測紀錄資訊。
- (3) 至反應器廠房控制棒液壓系統拆除後區域參觀，現場依未來放射性廢棄物暫存空

間進行評估設備拆除範圍，系統設備拆除完成後樓板、牆面人孔與穿越孔完成覆蓋、填封作業，現場殘餘的管路、電纜支架等凸起部進行包封，前述拆除切割後現場殘留組件均有良好標示，以避免人員誤撞造成工安意外。

- (4) 至汽機廠房主汽機發電機拆除中樓層參觀，設有除污與切割作業間，並以防塵罩將大型拆除設備隔離包覆，以避免工安與輻安相關污染擴散。另小型拆除組件之表面均經輻射偵測並留有完整紀錄後，依其污染程度分類、收集、放置於現場拆除廢棄物暫存的鐵箱或鐵欄。由個人配戴之劑量計顯示，觀察期間並未接受到劑量(其係 2015 年停機迄今)。

2.1 普賢核電廠背景資料

普賢核電廠位於日本福井縣敦賀市敦賀半島，為日本原子力研究開發機構(JAEA)所營運之研究用反應器，與一般商用反應器類型不同，其屬於進步型熱滋生反應器(ATR)原型爐，包含重水緩速劑、沸水式輕水冷卻劑、爐心為壓力管設計之反應器。早期於 1979 年開始運轉，後來因實證計畫預算被刪除取消，所以在 2003 年 3 月決定永久停止運轉，並於同年 8 月將反應爐內用過燃料挪移至燃料廠房暫存，NRA 於 2008 年 2 月認可普賢電廠除役計畫申請後開始進行除役作業，依除役計畫拆除作業程序大致分成四個階段，分別為重水與氬系統除污階段、反應器周圍組件拆除階段、反應器本體拆除階段，以及廠房結構拆除階段等階段。普賢電廠分別於 2012 年 3 月與 2015 年 4 月向 NRA 提出兩次除役計畫變更申請，主要變更內容分別為重水與氬系統除污階段的重水處理需花費時程故展延 5 年，以及用過燃料廠房內的用過燃料退出時程展延至反應爐拆除階段完成，並於 2018 年 5 月獲 NRA 認可後進入反應器周圍組件拆除階段，普賢核電廠相關資訊如表 4。

表 4 普賢電廠機組現況

| | |
|-----------|--------|
| 反應器類型 | ATR |
| 輸出功率(MWe) | 165 |
| 開始運轉日 | 1979 年 |

| | |
|----|--|
| 現況 | 2003年3月永久停止運轉,2008年2月除役計畫獲 NRA 認可,執行除役作業中。 |
|----|--|

2.2 普賢核電廠現場實地參觀

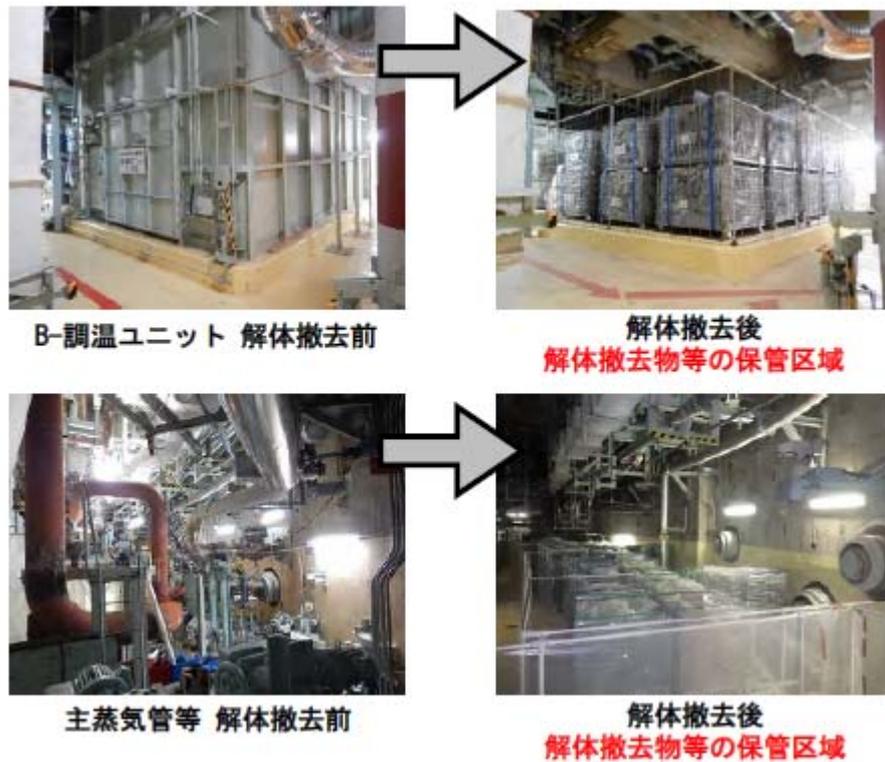
本次參訪日本核設施之第二個行程為普賢核電廠，主要為瞭解現行研究用反應器除役規劃、拆除現況及低放射性廢棄物處置情形。參訪行程先由日本原子力研究開發機構 JAEA 荒谷健太(Kenta Aratani)簡報說明普賢核電廠除役拆除方法，再由普賢電廠副所長井口幸弘(Yukihiro Iguchi)親自引導分別到反應器及汽機廠房瞭解拆除作業及廢棄物除污暫存情形。普賢電廠於汽機廠房飼水加熱器、冷凝器、汽水分離器、主蒸汽與飼水管路等放射性較低設備組件進行拆除後，規劃拆除廢棄物除污及暫存區域如圖二十七、二十八，其汽機廠房拆解之廢棄物約重 1273 噸。另反應器廠房緊急通風過濾系統 B 串(原設計有 A、B、C 三串)與主蒸汽管路等放射性較低設備組件進行拆除後，亦規劃為拆除廢棄物暫存區域如圖二十九。



圖二十七 汽機廠房之飼水加熱器拆解前後與除污、分類、保管區域設置



圖二十八 汽機廠房之主蒸氣管路、冷凝器拆解前後與手動/自動除污裝置、保管區域設置



圖二十九 反應器廠房之緊急通風過濾 B 串與主蒸氣管路拆解前後現況

現場參訪時分別至普賢電廠反應器廠房乾井內反應爐及生物屏蔽牆現況、主蒸汽管路拆除、汽機廠房飼水、冷凝器等拆除後廢棄物除污及暫存區域參觀，主要觀察結果與心得如下：

- (1) 至反應器廠房乾井內反應爐與生物屏蔽牆參觀，普賢電廠反應爐內燃料已利用既有的燃料傳送裝置移至用過燃料廠房暫存，而重水緩速劑則卸除收集存放至廠內暫存區，並將反應爐蓋回蓋封存，等待長半衰期核種如 Co-60、Cs-137 殘餘活度減低。

另電廠亦針對生物屏蔽牆執行鑽心取樣之輻射特性調查，並先以 Co-60 核種污染的深度能否符合外釋限值進行核種分析初判，若無法外釋則以適當放射性廢棄物盛裝容器裝桶處理，除 Co-60 核種外，對於混凝土產生其他污染核種如 Eu-152、Eu-154 外釋限值亦會進行考量。

現場亦有觀察到部分一次側管路切除送核種分析，其原因為普賢電廠之前第一次執行輻射特性調查時，機組仍在運轉期間，部分劑量較高區域人員無法接近或取樣量測，故待除役機組停機後規劃補充調查資料，若有修訂除役計畫部分則須向管制單位提出申請。

- (2) 至汽機廠房飼水加熱器、冷凝器等拆除後廢棄物除污及暫存區域參觀，普賢電廠冷凝器與熱井拆除後設置除手動/自動除污區域，現場以防塵罩將除污裝置隔離，並安裝粉塵過濾系統。另現場拆除 3、4、5 號飼水加熱器後，設置除污與廢棄物檢整分類區域，每件材料以顏色做記號分類，並包裝置於現場暫存區域的專用容器中。每個專用容器均有材料表單，記載內容物及原設備名稱與位置，可提供溯源的管理(電廠表示此為 NRA 要求)，前述執行除污與檢整作業人員之輻射防護裝備均完整著裝。由個人配戴之劑量計顯示，觀察期間並未接受到劑量(其係 2003 年停機迄今)。
- (3) 在現場參訪普賢電廠過程也可看到許多停用設備管閥以綠色標籤或膠帶可供清楚識別，預定要拆除設備範圍以黃色標籤或膠帶識別，以及拆除設備切割位置以藍色標籤或膠帶識別。於拆除作業開始前，以不同顏色進行不同危害程度分類，確

保工作人員進行正確之除污作業及其拆除程序。此做法有助於現場識別，可作為國內作業之參考。

本次參訪敦賀核電廠之除役規劃、機具拆解及安全管理現況，係一套具程序性之除役作業，針對其組件拆除先後、預定暫儲、標識管理及輻防措施等措施，皆可作為日後本會視查核一、二廠現場除役作業之參考，並可提供台灣電力公司規劃拆除作業之意見與構想。

現場負責介紹普賢電廠除役作業的副所長井口幸弘經驗分享提到，在除役拆除期間拆除設備組件應先從低劑量與空間較大區域作為優先選擇，因為優先拆除的清潔廢棄物無需等待污染活度低於劑量限值，經管制單位認可後即可外釋，外釋後的空間再繼續暫存下一批拆除廢棄物，以獲得更大的暫存利用空間。拆除廢棄物去存化與暫存區域再利用，將影響電廠執行除役拆除進度時程，目前普賢電廠也急於向管制單位提出清潔廢棄物外釋申請，否則廢棄物存滿就無法再執行後續拆除作業，被視為是除役拆除作業管理很重要的一環，值得作為國內除役拆除作法之參考。

3.1 敦賀 JAEA 除役技術中心背景資料

敦賀 JAEA 除役技術中心位於日本福井縣敦賀市，為 JAEA 所營運之除役技術中心，於 2016 年由日本教育文化運動科學技術部下科學技術展示建構計畫的預算支持，敦賀 JAEA 除役技術中心"Sumadeco"於 2017 年 5 月開始興建，並於 2018 年 6 月開始營運。此設施主要提供當地核能電廠除役相關技術支援，並讓工業界、學術界、政府部門能對於研發經濟效益與解決除役議題有所貢獻。

依日本原子力管制法規，在除役期間普賢除役工程中心對於設施安全拆除過程，亦須考量該設施仍需運轉與維護。JAEA 想要積極的發表除役拆除技術研發的成果，並獲得除役資源與技術合作，以利其他日本核能電廠在參與除役過程能利用相關技術。

JAEA 除役技術中心"Sumadeco"獲得福井縣當地 15 座不同類型的核能電廠業主支持所建構而成，可提供許多核能業界公司、教育與研究所一個地方讓他們能穩定工作，持續在除役技術基礎研究到展示。其目標為與當地核能電廠業主建立除役事業與夥伴

關係，並強化除役技術能力。

3.2 敦賀 JAEA 除役技術中心現場實地參觀

敦賀 JAEA 除役技術中心目前針對除役拆除作業所需的技術進行研發，主要研發項目可分為除役拆除技術展示研發、進階雷射切割應用、除役拆除作業模擬測試三大領域。有關除役拆除技術展示研發，主要針對普賢電廠廠房內規劃將拆除設施，發展一套混和虛擬實境(Mixed Reality, MR)系統，此系統優點可以在廠外模擬除役拆除準備作業前所需現場巡視與位置確認，確認拆除作業不會影響仍需運轉設備，以及工作人員可能接受的劑量進行合理預估。MR 系統能夠將輻射特性調查的結果輸入，並將現場劑量較高的熱點(Hot spot)區域轉換為可見的等效劑量率(mSv/hr)與顏色數值來進行警示、檢視最佳的現場拆除作業程序、檢視現場放置臨時性的設備可行性，如拆除工具、輻射屏蔽安裝位置，以及確認攜入的臨時設備與現場欲拆除設備間的干擾影響。MR 系統藉由 6 組光學鏡頭偵測訓練人員所攜帶的頭戴式顯示器(Head Mounted Display, HMD)與手持式遙控工具的動作與位置，透過高效能電腦處理從現場收集輸入的參數資料後，可以讓訓練人員看到現場 3D 實地影像，一旁培訓人員可以透過螢幕顯示器看到現場 2D 簡略影像。目前該設備是作為除役工作人員訓練使用，主要優點可作為檢視拆除最佳作業流程、工作人員曝露劑量，以及確認拆除作業執行效率。

其次為進階雷射切割應用，日本核能電廠在除役拆除技術有使用雷射射源，針對進階雷射切割應用研發多功能雷射設備組件包含溫度參數監測、三維角度控制系統、能量維持控制系統，並利用 SPLICE 程式來評估雷射射源在執行切割作業前模擬狀況。在除役經驗使用雷射射源作為切割金屬會遇到有些限制，而此問題可透過遙控機械手臂系統與安裝適當雷射切割控制系統來解決，此系統允許搭載 10kW 能量的光纖雷射、機械手臂安裝融熔切割控制系統、可抓取 15kg 切割物的抓勾與噴濺回收裝置。另雷射熔融與凝結物計算模擬，可利用 SPLICE Code 程式來針對雷射切割金屬精準度模擬、雷射射源參數設計、輔助氣體流量率與切割掃描速率進行評估，SPLICE Code 是透過複雜的物理參數包括雷射熔融與凝結物材質變化、每單位面積輸入的雷射能量與輔助氣體的比例，以及融熔溫度梯度的變化來確認雷射切割的品質成效。雷射切割的優點

為執行時間較快，切面也較為平整，不易產生噴濺物。參訪時詢問如何收集金屬切割產生氣體時，日方表示可於切割物外圍加裝排氣過濾系統，去除因切割所產生的揮發氣體而將金屬深層污染帶出。

最後為除役拆除作業模擬測試，比照普賢電廠反應爐建造相同 10.5 公尺高度，但半徑約 1/3 比例大小的反應爐水槽來進行各種切割技術測試模型，包含前述進階雷射切割技術，以及其他目前在除役現場所使用的切割技術。此模型主要是針對普賢電廠未來即將執行的爐心組件水下切割技術進行研究，於建模水槽安裝遙控機械手臂，可以調整水槽水位來測試，以便於收集水下電漿切割與水下雷射切割相關參數資料，除此之外，核能電廠亦有許多同類型的貯存槽，其工作環境如切割與焊接均可確認模擬、安全與有效率的作業方法。另建置切割實驗室針對空氣中切割技術進行研究，同時也設置安裝粉塵過濾裝置，研究空氣中切割方式包含氣體切割、鑽石線鋸切割、遙控雷射切割，以及驗證執行設備與材料的切割作業。

此次分別至敦賀 JAEA 除役技術中心之除役拆除技術展示、進階雷射切割應用及除役拆除作業建模測試等區域參觀，主要觀察結果與心得如下：

- (1) 除役拆除技術展示研發，我國亦有針對不同核能領域如緊急應變與放射性廢棄物研發類似虛擬實境軟體，惟目前僅應用於科普與對外宣導展示。對於日方已將相關技術應用於核能電廠除役拆除作業之工前訓練與模擬施做部分，可作為國內除役技術應用之參考。
- (2) 進階雷射切割應用，日方為研究反應爐水下切割技術，發展遙控與評估雷射切割技術之精進作法，雖與目前核一廠反應爐拆除應用方法不同，然未來若我國核能電廠有考量應用此切割技術與方式，亦可作為國內除役技術應用之參考。
- (3) 除役拆除作業建模測試，日方為研究反應爐水下切割技術，建置反應爐模型提供各項拆除技術方法如雷射、電漿切割等技術進行測試，雖與目前核一廠反應爐拆除作業並未要求執行前之模擬測試，然考量反應爐切割技術模擬與訓練，並減低人為失誤，亦可作為國內除役技術應用之參考。

肆、心得與建議

1. 日本早期 JPDR 研究用反應器已有完成除役之實務經驗，近年來多部核能機組已陸續進入除役階段，如東海、敦賀、普賢電廠正進行除污與拆除作業，而我國核一廠也於今年進入除役期間，對於事先的輻射評估、不同階段之除役規劃、拆除作業、輻射防護與工業安全作業管理等均有相當之實務經驗可再進一步交流，以獲得相關除役拆除作業之寶貴實務經驗。
2. 針對日本管制機關目前對除役計畫實施、保安檢查、拆除作業等相關法令與管制作法與可能研修作業已有相關規定，例如對於除役中核電廠一般與系統除污、不同設備組件所對應拆除作業之工法、以及放射性廢棄物外釋之審查與管制之接受標準的研訂規劃等，建議可再持續瞭解與交流，並收集適合我國核能電廠除役作業之最佳作法，以作為本會除役安全管制之參考。
3. 日本放射性廢棄物之處理、清潔外釋標準與我國之「一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」一致，雖日本除役所拆除外釋之設備物件，經回收再利用後，目前仍放置於核能相關機構或電廠中，尚未應用於公共場合，然對於除役過程拆除外釋廢棄物須經主管機關複檢合格後方能外釋之作法，建議可參考其外釋複檢做法，研擬適當之管制檢查標準、品保管控機制並酌予採用。
4. 本次參訪日本敦賀 1 號機與普賢電廠的現場除役作業，除對於現場拆除作業的事先規劃、圖面管理與現場標示相當完備外，除役期間產生的大量廢棄物的暫存、除污、切割與檢測區域規劃，建議可參考日本核能電廠除役作業規劃與經驗回饋，對於我國除役核電廠的廢棄物處理、外釋或放行之管制作業均有助益，以減少既有電廠廢棄物貯存的壓力。

伍、附件

附件一 ANDES-2019 訓練課堂照片

附件二 ANDES-2019 現場參訪照片

附件一 ANDES-2019訓練課堂



ANDES-2019 除役訓練研習課程課堂照片



ANDES-2019 除役訓練研習課程結訓與講師合影

附件二 ANDES-2019 現場參訪



參訓學員於敦賀電廠行政大樓合影



參訓學員於普賢電廠行政大樓合影



參訓學員於 JAEA 除役研發中心行政大樓合影



參訪 JAEA 除役研發中心之混和虛擬實境 MR 系統拆除技術展示研發