

出國報告(出國類別：實習)

赴日參加 **ANDES** 除役訓練課程
與參訪美濱核電廠及智慧除役技術
展示基地

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：臧逸群 科長

廖柏名 技正

黃議輝 技正

林子桀 技士

簡劭純 技士

派赴國家：日本

出國期間：114 年 7 月 6 日至 114 年 7 月 12 日

報告日期：114 年 9 月 9 日

摘要

依我國核子反應器設施管制法規定，核電廠於運轉執照屆期後，即進入除役期間，須開始進行電廠除役工作。核能安全委員會(以下簡稱本會)為有效且安全執行除役管制作業，積極蒐集國際除役安全管理與技術之經驗，並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。

本次出國目的係參加日本原子力除役研究學會(Association for Nuclear Decommissioning Study, ANDES)舉辦之核電廠除役訓練課程，並參訪日本美濱核電廠除役作業及日本原子力研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)轄下的智慧除役技術展示基地(Fukui Smart Decommissioning Technology Demonstration Base, Sumadeco)。

出國訓練期間自 114 年 7 月 6 日至 114 年 7 月 12 日，共 7 日。課程內容包含日本的除役現況、日本動力實驗反應器除役的經驗與回饋、核子反應器及周邊組件拆解技術、日本核電廠除役管制、除役安全評估、除役技術的整體概要與要項、濱岡核電廠 1 & 2 號機除役作業、普賢核電廠當前除役活動，以及美濱核電廠 1 & 2 號機除役作業等課題。

除前述課程外，ANDES 亦安排參訪除役中之美濱核電廠，由廠方簡報廠內機組狀況、管制規定執行情形、除役作業執行現況與未來規劃外，亦安排參訪日本原子力研究開發機構轄下的智慧除役技術展示基地，參觀目前開發中之除役技術與開發成果，並進行討論交流。

本次參加 ANDES 除役訓練課程及參訪行程，可瞭解日本在除役安全管理規範、除役技術與經驗，以及設施經營者對除役作業的執行現況、未來規劃與相關考量等除役相關工作之重點，對強化我國除役安全管制的專業知能有相當助益。

目錄

壹、目的.....	1
貳、出國行程.....	3
參、過程紀要.....	5
一、ANDES 除役訓練課程	5
二、參訪美濱核電廠與敦賀 JAEA 除役技術中心.....	29
三、心得及建議.....	33
附件一.....	34
附件二.....	34

壹、目的

依核子反應器設施管制法規定，國內核電廠在運轉執照屆期後，即進入除役階段，除役期間本會為執行除役安全管理業務，持續掌握國際除役資訊脈動，蒐集國際除役安全管理與技術之經驗，積極參與國際討論與經驗交流，以強化除役安全管理的專業知能。

日本原子力除役研究學會成立於 1997 年，係由日本核能工業界中，具有豐富除役專業知識與經驗的專家學者組成，該會定期舉辦除役技術交流與經驗分享等研討會與訓練課程。本次核電廠除役訓練課程由 ANDES 籌劃開辦，課程自 114 年 7 月 7 日開始，於 114 年 7 月 11 日結束，共計 5 日。

課程由日本 ANDES 事務局長、福井大學客座教授及特命教授、中部電力公司除役組副長、關西電力公司除役技術中心所長、JAEA 技術主管等具有除役技術與實務經驗的專家學者擔任講師，講師除於課堂進行授課內容說明外，亦安排綜合討論時間，由雙方進行經驗交流及討論。講授主題包含：

1. 日本核電廠除役現況及挑戰。
2. 日本動力實驗反應器除役經驗。
3. 反應器及周邊組件拆解技術。
4. 日本核電廠除役管制。
5. 除役安全評估。
6. 除役技術的整體概要與要項。
7. 濱岡核電廠 1 & 2 號機除役作業。
8. 普賢核電廠當前除役作業。
9. 美濱核電廠 1 & 2 號機除役作業。

除前述課程外，亦安排參訪位於日本福井縣正進行除役作業之美濱核電廠，以及日本原子力研究開發機構轄下的智慧除役技術展示基地。

藉由訓練課程瞭解日本核電廠除役安全管理規範、除役相關輻射防護、廢棄

物的管理、核電廠除役作業實務與經驗，並至現場參訪除役中核電廠實務作業情況，有助於強化我國除役安全管制之能力。

貳、出國行程

一、公務行程

本次出國訓練行程自 114 年 7 月 6 日起至 114 年 7 月 12 日止，共計 7 日，行程如下：

日期	行程	摘要
7 月 6 日 (日)	台灣→日本	去程
7 月 7 日 (一)	東京	● 參加 ANDES 除役訓練課程 ➢ 日本核電廠除役現況 ➢ JPDR 除役經驗 ➢ 核子反應器及周邊組件拆解技術
7 月 8 日 (二)	東京	● 參加 ANDES 除役訓練課程 ➢ 日本核電廠除役管制 ➢ 除役安全評估 ➢ 除役技術之整體概要與要項
7 月 9 日 (三)	東京→敦賀	● 參加 ANDES 除役訓練課程 ➢ 濱岡核電廠除役實績與計畫 ➢ 普賢核電廠除役實績與計畫
7 月 10 日 (四)	敦賀	● 參加 ANDES 除役訓練課程 ➢ 美濱核電廠除役實績與計畫 ● 參訪美濱核電廠
7 月 11 日 (五)	敦賀	● 參訪 JAEA 智慧除役技術展示基地
7 月 12 日 (六)	日本→台灣	返程

二、課程資訊

本次除役訓練課程分別於東京以及福井縣敦賀市舉行。

日期	09:00 - 12:00	13:00 - 17:30
7 月 7 日 (一)	● 日本核電廠除役現況摘要與挑戰 講師：ANDES 事務局長佐藤忠道	● JPDR 除役經驗及所學 講師：ANDES 會長柳原敏 ● 核子反應器及周邊組件拆除技術 講師：ANDES 堀內精彥
7 月 8 日 (二)	● 日本核電廠除役管制 講師：ANDES 事務局長佐藤忠道 ● 除役安全評估 講師：福井大學特命教授井口幸弘	● 除役技術之整體概要與要項 講師：ANDES 事務局長佐藤忠道 ● 綜合討論
7 月 9 日 (三)	東京前往敦賀	● 濱岡核電廠除役工作 講師：中部電力公司宮崎保志 ● 普賢核電廠除役實績與計畫 講師：JAEA 藤田薰
7 月 10 日 (四)	● 美濱核電廠除役實績與計畫 講師：關西電力公司所長原茂樹	● 參訪美濱核電廠
7 月 11 日 (五)	● 參訪 JAEA 智慧除役技術展示基地	課程結束

參、過程紀要

本次赴日本參加 ANDES 所舉辦之除役訓練課程，除針對日本的除役現況、動力實驗反應器除役的經驗回饋，以及日本除役相關課題為訓練架構外，並以濱岡核電廠 1 & 2 號機、普賢核電廠與美濱核電廠 1 & 2 號機的除役拆除作業規劃，以及除役廢棄物之管理處置等，說明日本除役管制與核電廠作業實務現況與實績。課程主要由 ANDES 會長暨福井大學客座教授柳原敏(Satoshi Yanagihara)、ANDES 事務局長佐藤忠道(Tadamichi Satoh)先生、福井大學附屬國際原子力工學研究所井口幸弘(Yukihiro Iguchi)教授，以及關西電力公司除役技術中心原茂樹(Shigeki Hara)所長等講師授課，並與學員就雙方除役現況與規劃交流進行討論；此外亦安排赴美濱核電廠，及日本原子力研究開發機構轄下的智慧除役技術展示基地參訪，實地參觀除役現況與技術開發情形。以下分別摘述課程內容及參訪過程：

一、ANDES 除役訓練課程

(一) 日本核電廠除役現況與安全管制

本課程由 ANDES 事務局長佐藤忠道先生就日本國內核電廠除役狀況進行概要說明，日本首座完成除役之機組為動力實驗反應器 (Japan Power Demonstration Reactor, JPDR)，除役工程自 1982 年開始，1996 年結束；另有 21 部機組處於除役階段，包括東海核電廠、普賢核電廠、文殊反應器(研究設施)、美濱核電廠 1 & 2 號機、玄海核電廠 1 & 2 號機、大飯核電廠 1 & 2 號機、伊方核電廠 1 & 2 號機、濱岡核電廠 1 & 2 號機、敦賀核電廠 1 號機、島根核電廠 1 號機、女川核電廠 1 號機、福島第二核電廠 1 ~ 4 號機，至於福島第一核電廠的 6 座機組，正在進行穩定化和事故後清理工作，各核電廠機組的除役進度詳見圖 1。

圖 1 以圖表方式呈現日本核電機組從「永久關閉(Permanent Shutdown)」起，至「除役計畫核准」到最後「除役完成」的時間軸分布，以橫向長條線表示除役

預計總期程。日本對於核電廠除役工作並未明文規定須於多少年限內完成除役，但普遍介於 30~40 年，圖表可看出，不同機組的除役時程存在差異，有些機組在永久關閉後數年內即啟動除役計畫，並進入初期準備階段；亦有機組則在關閉多年後才進行除役申請與核准程序。各機組的除役進程受到多項因素影響，例如燃料搬出所需時間、現場設施狀況、廢棄物貯存規劃、除污需求、地方行政協調等，因此呈現不同的進度樣態。

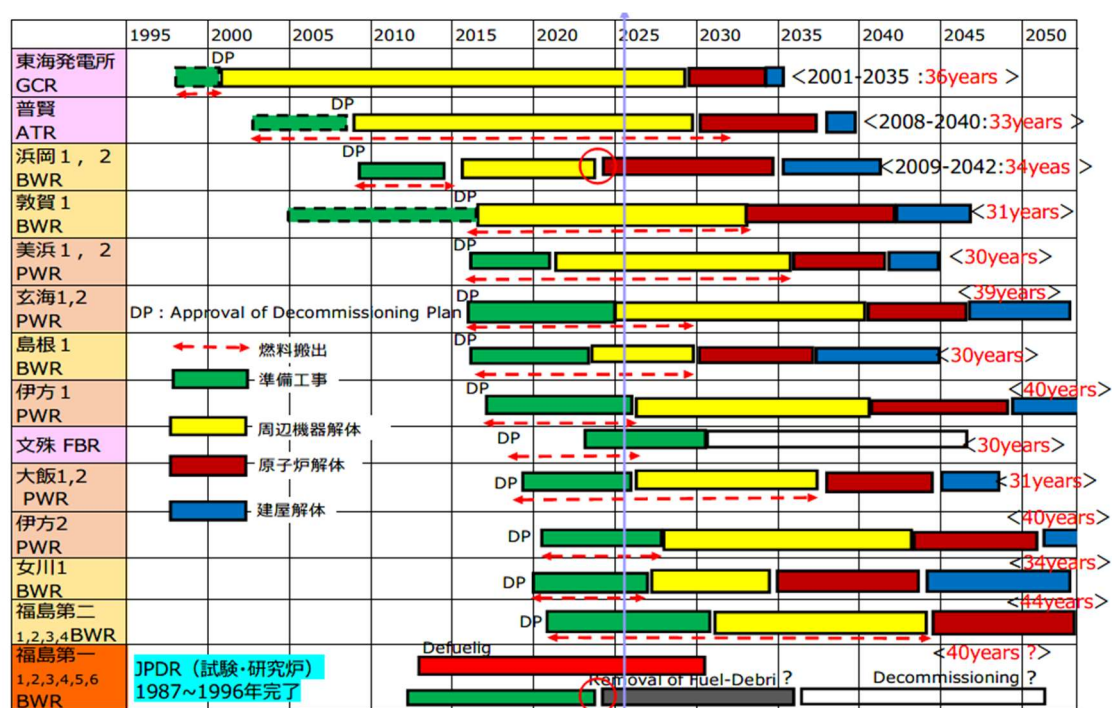


圖 1 日本各核電廠除役進度 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

核電廠除役進度可分為六個階段(Phase 0~Phase V)，圖 2 顯示目前這些機組於各階段所屬之機組數量：

1. Phase 0(尚未核准除役計畫)：目前未有機組處於此階段，此階段代表機組雖已停機關閉，但尚未獲得除役許可核准，仍停留在前期規劃階段。
2. Phase I(除役準備階段)：為規劃與設施調查階段，共有 11 座機組進行中。此階段主要進行燃料移出、除役計畫細部設計、設施輻射調查與污染確認、工作區域封鎖與隔離、廢棄物分類與暫存系統建置等準備作業。
3. Phase II(周邊設備拆除階段)：目前有 7 座機組進入此階段，開始進行非輻射區域及輔助系統(如冷卻水系統、渦輪機房、輔助建築物等)的拆除，

清理外圍設備與管線，為日後主體結構的拆解創造作業空間。

4. Phase III(反應器本體拆除階段)：為高放射性設施的拆除階段，目前僅 2 座機組進入，表示開始進行反應器壓力槽、控制棒驅動機構、爐內構件與爐腔結構等區域的拆解，是除役過程中最關鍵且技術最具挑戰性的階段。

5. Phase IV(建物拆除階段)：截至目前尚無機組進入此階段。此階段的工作為拆除建築主體，完成後方可進入場址復原階段。

6. Phase V(除役完成階段)：目前僅有 JPDR 機組已完成除役，達成「綠地狀態」(Green Field)。達成標準包含完成所有結構物拆除、放射性清除、場址土壤及地下水檢測合格、具備重新開發使用之環境條件等。

目前機組多數集中在 Phase I 與 Phase II 階段，代表大部分核能機組仍處於除役初期或中期，尚未進入反應器拆除或建物解體階段。此外，簡報特別標註福島第一核電廠的狀況。由於該廠不屬於常規除役作業範疇，而是進行「穩定化與事故後清理作業(Stabilization and Post-Accident Cleanup)」，因此未納入上述分階段統計。

Phase	Plant
0 Before Approval of DP	0
I Preparation	11 玄海1 伊方1 大飯1,2 女川1 玄海2 伊方2 福島第二1,2,3,4
II Peripheral Dismantling	7 東海 普賢 敦賀1 美浜1,2 文殊 島根1
III Reactor Dismantling	2 浜岡1,2
IV Building Demolition	Non
V Completed	1 JPDR (1987-1997)

Fukushima-Daiichi (6 units) is under Stabilization and Post-Accident Cleanup

圖 2 除役中機組各階段分布情形 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

機組進入除役前，業者除須依「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」第 33 條 3-34 之要求，擬定廢止措施計畫(相當於我國核電廠

除設計畫)，由主管機關進行安全審查，確認計畫對於核燃料之管理與挪移，核燃料與放射性廢棄物的管理、處理與處置，以及針對核燃料、受污染物料與反應器所造成的危害所採取的防護措施等內容之適切性，且用過核子燃料已從反應器移出，才會核准廢止措施計畫。

針對低放射性廢棄物(Low-Level Waste, LLW)，日本已建立一套分層且制度化的廢棄物分類與管理體系，依據放射性濃度、來源、性質與處置方式等要素進行明確劃分，並搭配相應的管理策略，分為以下六個獨立類別，包括三種處置類型(L1、L2、L3)與另外三種非處置類型(CL、NR、GN)(如圖 3)：

Decommissioning Waste Clarification in Japan

通称	Class	Volume (ton) 1,100MW BWR	Volume (ton) 1,100MW PWR	Status of achievement
L1	中深度処分 • Intermediate Disposal LLW	100	200	Not Established
L2	浅地中ピット処分 • Near-surface Pit Disposal LLW	900	1,800	Existing JNFL disposal facility is only for operating waste
L3	浅地中トレンチ処分 • Near-surface Trench Disposal LLW	11,900	4,100	JAEA JPDR VLLW disposal was demonstrated. JAPC Tokai L3 disposal is under licensing review.
CL	• Clearance Material	28,500	11,700	Limited to Conditional release
NR	• Non-radioactive Material in RCA	About 500,000	About 480,000	Established
GN	• General Material			

圖 3 日本低放射性廢棄物分類制度 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

1. L1 類(Intermediate Depth Disposal)：需採用中深層地質處置，通常埋設深度為離地表至少 70 公尺以上，主要處置放射性濃度較高但未達高放射性廢棄物(High-Level Waste, HLW)標準的物料，例如部分受中子照射之金屬結構件。此類廢棄物需經長期隔離，並處置在地質穩定區域所建構的專屬設施。
2. L2 類(Near-surface Pit Disposal)：採用地表以下坑式掩埋處置方式，常見於具中低放射性濃度的廢棄建材、受污染金屬、設備與部分管線。埋設深度通常介於數公尺至十餘公尺，處置場具備混凝土結構、覆土、防滲與排水設計，以防止雨水滲入或廢液外洩。

3. L3 類(Near-surface Trench Disposal)：為最表淺層的溝渠式掩埋處置，處置對象主要為低放射性與短半衰期的輔助材料，例如電纜、保溫材料、非關鍵構件與表面污染物。處置方式以低成本、高覆蓋、簡易設施為原則，惟仍須具備適當監測與管制設施。
4. CL 類(Clearance Level Material)：依管理標準稱為解除管制廢棄物，在經放射性量測確認，其濃度低於國家所定的管制標準(如：Cs-137 為 0.1 Bq/g)，可視為一般廢棄物進行再利用、掩埋或焚化處理。CL 類物料在除役工程中佔據極大比重，須以系統性檢測設備進行「個別確認」或「批次驗證」，以證明其可安全釋出。
5. NR 類(Non-Radioactive Material in Radiation Controlled Area)：依管理標準稱為無輻射污染廢棄物，位於輻射管制區內，但經確認無受污染之物料。其來源雖可能來自輻射管制區，但未直接接觸或累積放射性，因此可按非放射性廢棄物方式處理。
6. GN 類(General Material)：依管理標準稱為一般廢棄物料，不屬於輻射管制區範圍內的普通建築或設備材料，未涉及任何放射性活動，可依照一般廢棄物標準進行分類回收或廢棄。

圖 3 亦提供了發電量為 1100MWe 的典型 BWR 與 PWR 反應器的除役廢棄物預估重量。以 BWR 為例，CL 類約為 28,500 公噸、NR 及 GN 類合計約為 50 萬公噸，是重量佔比最高的兩類。PWR 則 CL 為 11,700 公噸、NR 及 GN 類合計約 48 萬公噸，顯示 CL 類的妥善管理對於整體除役作業至關重要。

至於高放射性廢棄物(High-Level Waste, HLW)部分，日本核能設施除役過程中，用過核子燃料屬於此類廢棄物。目前的作業實務如圖 4 所示，用過核子燃料的貯存及再處理程序主要可分為下列四種方式：

1. 暫存於廠內用過燃料池(含擴充容量)

首先，所有使用過的核燃料自核反應器的爐心中取出，並放入廠區內既有的用過燃料池中進行濕式貯存。由於部分反應器在設計時燃料池容量

有限，為因應燃料貯存需求，廠區實施貯存容量的擴充工程，以增加濕式貯存的容量。此方式為燃料取出後的初期貯存手段，也可能成為部分機組長期存放策略之一，直到再處理或轉移運送至其他設施為止。

2. 移送至同一廠址其他機組之用過燃料池

當單一機組的燃料池容量無法再擴充時，部分燃料會被移送至同一電廠內其他機組的用過燃料池中集中管理。這種方式已應用於多個核電廠，包括敦賀、女川、美濱、玄海、大飯及伊方等核電廠。此種「場址內再配置」能更有效率地運用既有空間資源，減少現階段對乾式貯存設施的依賴。不過，此方式多為暫時性方案，未能解決中長期貯存或最終處置問題。

3. 轉移至乾式貯存設施

為進一步提升貯存安全性並因應濕式貯存之燃料池逐步飽和的情況，部分用過核子燃料會移送至乾式貯存設施中。若場址條件允許，燃料可先轉入廠內設置的乾式貯存設施中；若無足夠空間，則會運送至廠外的乾式貯存設施進行長期貯存。乾式貯存採自然對流方式，具有較高的被動安全性與管理穩定性，是目前中期貯存的重要選項。

4. 運送至國內外再處理設施

另有部分用過核子燃料會被送往再處理設施，以回收可再利用的鈾與鈾，同時將剩餘的高放射性廢液轉化為玻璃固化體(vitrified waste)以利最終處置。圖 4 中指出，日本先前將來自「普賢(ふげん)」與「文殊(もんじゅ)」核電廠的用過核子燃料送往法國進行再處理，另亦有部分核電廠的用過核子燃料曾被運送至英國的再處理設施。再處理作業屬於高成本、高技術的長期工程，對放射性物質的減量與可回收性具正面效益，但也伴隨貯存與運輸上的風險與挑戰。

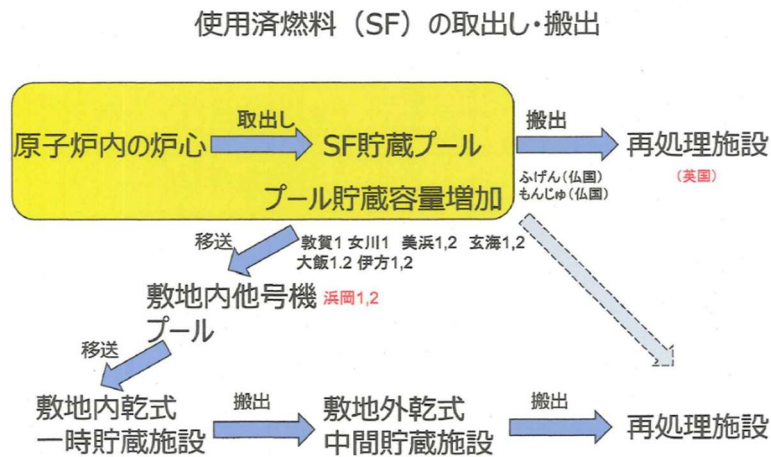


圖 4 日本用過核子燃料之處理方式 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

圖 5 進一步以圖示說明各類廢棄物對應的處置方式，其中 L1 類為離地表至少 70 公尺以上的中深層處置設施，L2 與 L3 類則屬於地表淺層處置設施，分別為混凝土地窖與溝渠式設計。概念圖亦標示出高放射性廢棄物與低放射性廢棄物的處置深度與位置關係，突顯出不同廢棄物類別在管理上的複雜性與技術需求差異。

Conceptual Diagram of Radioactive Waste Disposal

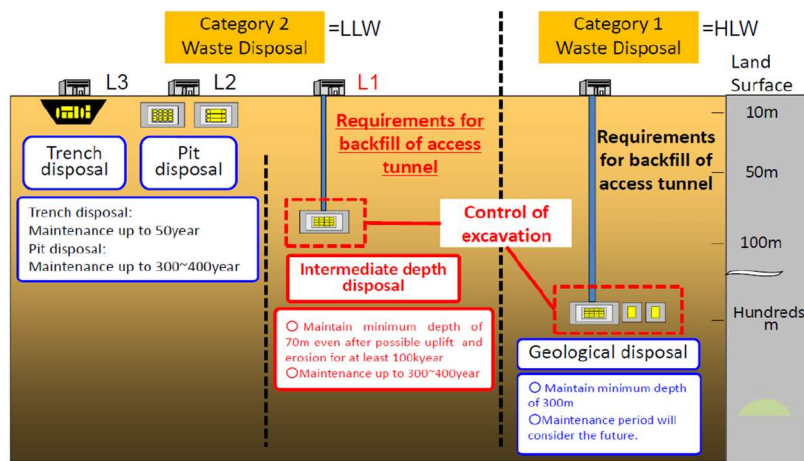


圖 5 各類放射性廢棄物對應的處置方式 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

(二) 除役技術概要與要點

核電廠除役是指核電廠由運轉狀態轉變為拆除、除污、廢棄物處理，並最終使場址恢復為可再利用狀態的一套完整流程，係一項高難度且複雜的工程，涉及大量實務操作與工程技術管理，不僅需要長期規劃，也須在安全、效率與成本之

間取得平衡。

除役實務工作可分為擬訂計畫與準備作業、設施除役工作、廢棄物處理等三類：

1. 擬訂計畫與準備作業：包含基本計畫、事前調查、準備作業、階段性的個別計畫。
2. 設施除役工作：包含除污、設備拆除、建物拆除、最終偵檢、解除管制、廠址再利用。
3. 廢棄物處理：包含分類、處理、貯存、驗證、回收或處置。

除役作業的核心關鍵技術主要圍繞在除役設施的輻射特性評估、設備與建物的除污技術、設備與建物的拆解技術、廢棄物處理技術、輻射量測技術等工作，簡述如下：

1. 除役設施的輻射特性評估係除役作業的基礎，其目的係藉由文件紀錄、實地調查、取樣分析或電腦分析等方式，來確認空間及設備之活化情形與輻射污染程度。
2. 設備與建物的除污技術可分為設備拆除前與拆除後除污，以及建物除污。拆除前除污的目的是為了降低作業人員的輻射劑量，採用的方法有化學式的系統除污、機械式噴砂或水刀除污等方式；拆除後除污則是為了降低污染的程度，採用的方法有乾式、濕式或使用不同的研磨材來進行除污，須注意拆除前及拆除後除污有二次廢棄物處理的問題；建物除污是針對燃料池及建物，以研磨或噴砂等方式進行大範圍的表面除污。
3. 設備與建物的拆解技術係考量拆解對象的材料或特性，選擇適用的拆解切割方式，針對設備之切割，可採用的技術包含有空氣中或水下的熱切割與機械切割工法；針對結構物的切割可使用鑽石索鋸、鑽石切割法、破碎法等方式。此外，對於具難以接近、重複性高、高危險、高污染等性質的除役工作，可考慮使用遠端操作技術，但須考量機具的功能，是否易維修以及故障時之對策。

4. 依放射性濃度及材質類型，規劃廢棄物之處置方式，需考量使用既有處理設施，或新設處理設施的需求。廢棄物分類與篩選後進行減容(如壓縮、焚化、熔融、切碎或破碎)處理，再貯存於容器中，必要時採取固化處理。處理後，確認輻射劑量率、污染狀況，以及進行強度測試與目視檢查，並依其性質達成最佳化管理，確保除役廢棄物之處置安全與效率。
5. 依除役之進程，配合廠址輻射特性調查、除污成效的確認、輻射作業場所工作人員劑量管理、放射性廢棄物的確認、廢棄物外釋量測、廠址最終狀態偵測等每個階段的必要作業，以中子偵測器、加馬輻射偵測器、表面污染偵測器等不同類別的量測設備或技術，針對各種不同型態之樣品或廢棄物，依性質選擇適當之量測方法或技術，來確認其輻射狀況。

除役涉及多樣不同類別的作業，過程中會消耗大量資源，同時也會產出許多數據及資料，需就拆解、處理、運送、處置等除役工作進行完整考量，擬定適切做法，達到除役工作最適化，讓除役工作能夠順利進行。

(三) 日本核電廠除役經驗

ANDES 本次訓練課程安排，分別就 JPDR、濱岡、普賢與關西電力所屬等核電廠的除役經驗及規劃進行講解，以下逐一就相關課程內容進行說明。

1. JPDR 除役經驗

日本動力實驗反應器(JPDR)除役課程是由 ANDES 會長柳原敏先生就 JPDR 除役經驗進行講解，JPDR 是日本首座除役的核電廠，作為日本核電廠除役先驅，主要著重於技術開發，提供技術和人力資源發展，對日本核電廠除役作業奠定基礎，具有重大貢獻。

JPDR 為小型沸水式反應器，自 1963 年 10 月開始運轉，並於 1976 年 3 月停機，1981 年 9 月開始進行反應器拆除研發工作，1986 年 12 月開始進行除役專案，除役工作(Decommissioning and Dismantling, D&D)於 1996 年 3 月完成，並成功地將場地恢復到綠地狀態，最後於 2002 年 10 月獲得監管機關的批准。

JPDR 拆除計畫之內容是依據日本原子力安全委員會(Nuclear Safety

Commission)，即現原子力規制委員會(NRA)的前身，所發布的導則所撰寫，基本原則為確保工作人員安全與避免放射性物質外釋。除役期間之組織包含行政部門、除役專案管理部門、除役營運部門、廢棄物管理部門、技術實驗室等單位，並有輻射管理部門、反應器管理實驗室和品質保證委員會等三個支援單位。

整體除役進度時程可參考圖 6，1986 年完成 JPDR 除役準備工作後，即開始著手反應器及周邊相關設備之除役工作，依序依爐心周邊組件設備、反應器內部組件、反應器壓力槽、生物屏蔽牆、反應器廠房之次序進行拆除。於反應器及其周邊相關設備拆除期間，同步實施廠房內其他設備之拆除作業，並配合進行必要之除污及輻射偵測，以確保作業安全與輻射防護。

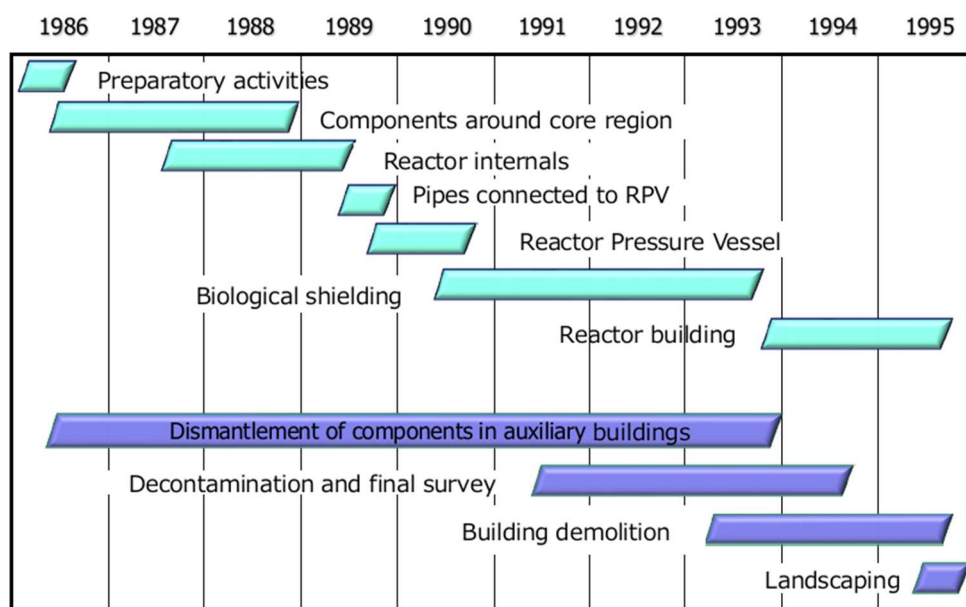


圖 6 JPDR 除役進度 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

除役的拆除工作主要可分為遠端工作、手動拆除、除污作業、輻射偵檢、建物拆除等 5 個分類，以一個完整的拆除流程來說，包含了準備、拆除、包裝、運輸、清潔等多項作業，各項工作要項如下：

1. 準備作業包括事前的輻射調查、確認作業流程、作業樓層鋪設防污染墊、設置除污作業包封、除役工具攜入、將欲拆除之組件進行隔離，並提供臨時電力設施。
2. 將設備或設備進行拆除後，運送至包裝工作區域。

3. 於工作區域內，將拆除物件切成小塊，包裝後置入盛裝容器中。
4. 將切割工具以及盛裝容器攜出工作場所。
5. 移除防污染墊與包封，並針對工作場域進行輻射偵檢，以及進行復原工作。

執行除役工作期間，為減少工作人員輻射劑量，採取了以下輻防措施：

1. 拆除作業前必要的輻射防護工作，包括：執行現場輻射量測調查、確認拆除作業程序、使用乙烯基薄膜覆蓋地面、安裝污染防治罩和/或鷹架。
2. 拆除作業期間劑量紀錄，包括：進入管制區須刷工作識別卡、工作人員配戴個人劑量警報計、工作區域及環境的輻射量測紀錄，將拆除工項、人工時、個人與集體劑量資料彙整成資料庫。
3. 拆除作業劑量控管，包括：依據個人的輻射劑量紀錄、進出輻防管制區的時間、以每日/每月/每年頻次產生工作人員劑量報表，並依拆除作業工項或工作群組分類工作人員曝露情況。
4. 拆除作業完成後的清理作業，包括：移除地面覆蓋的乙烯基薄膜、拆除污染防治罩和/或鷹架、完工區域的輻射調查、場地的修復與復原作業。

依據 JPDR 拆除作業的經驗回饋，分析除役各年度耗費的人工時、累積的集體劑量與拆除作業產生的廢棄物總重，如圖 7。圖中表示在 JPDR 除役各年度，人工時數依現場作業需求有所增減、持續拆除及產出廢金屬，並於除役後期開始產生大量建物拆除混凝土，而工作人員的集體劑量則主要集中於 1989 年至 1990 年之間。

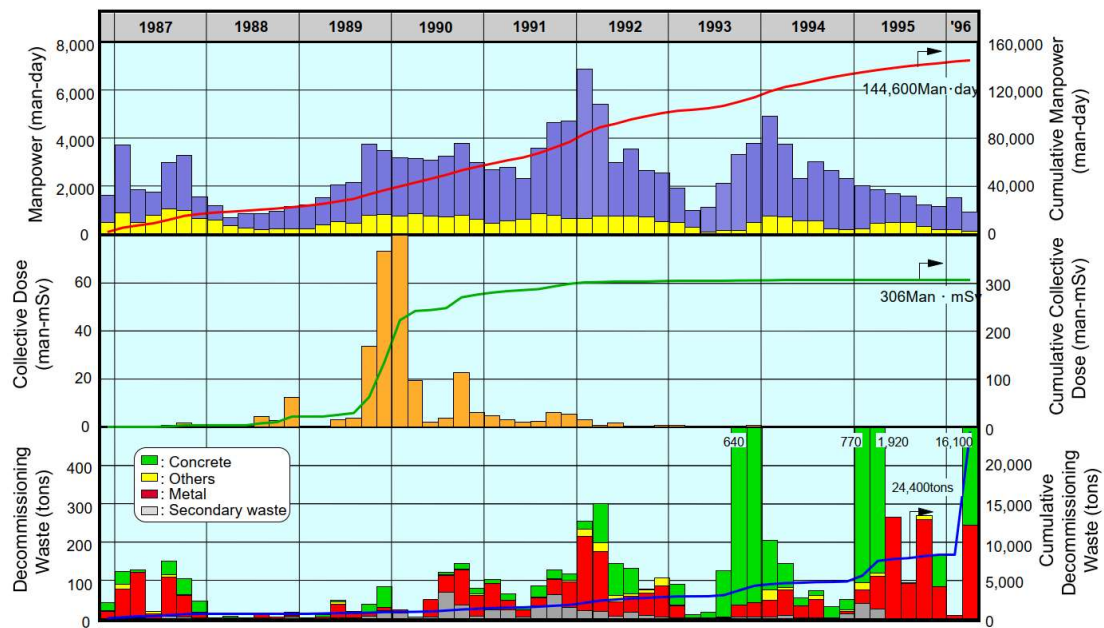


圖 7 JPDR 除役人力支出、作業人員的輻射劑量與產生的廢棄物統計圖

(圖片來源：ANDES 訓練資料)

進一步分析 JPDR 除役工項與工作人員集體劑量關係，JPDR 除役使用最多人工時的工作類別，占比前三名分別為：反應器廠房內的設備拆除(27.4%)、監督拆除作業活動(20.4%)、除污與輻射偵測(13.6%)。分析除役工作類別集體劑量占比前三名的工作項目分別為：反應器壓力槽(RPV)拆解(35.2%)、RPV 內部組件拆解(23.9%)、連接 RPV 管路拆解(20.7%)，均為 RPV 相關的拆除工作，合計占了所有拆除作業 80%的集體劑量，各項作業之劑量佔比如圖 8。

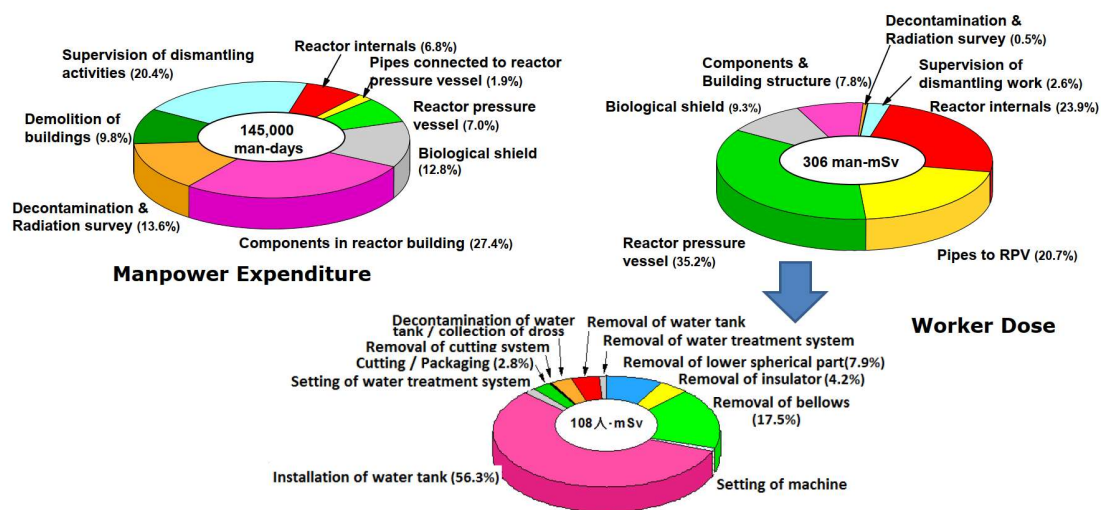


圖 8 JPDR 除役人力支出、作業人員的輻射劑量統計圖

(圖片來源：ANDES 訓練資料)

由於 RPV 本體輻射劑量率高，因此拆解作業選擇水下遙控切割，為使 RPV 置於水下，須在切割作業前，於 RPV 周圍區域焊接相關盛裝容器及封板，但由於焊接作業區域鄰近 RPV，作業區域空間劑量率高，因此「安裝盛裝容器」單一工項，即佔了 RPV 本體拆解工項中 56.3% 的集體劑量。參考 JPDR 除役經驗，RPV 相關的拆除工作即佔所有拆除作業約 80% 的集體劑量，因此我國核電廠未來針對 RPV 相關的拆除作業，將是輻射防護管制作業的重點工作項目之一。

針對 JPDR 除役拆解作業方式對空氣中放射性空浮濃度的影響分析如圖 9。圖中實心黑點為拆除作業時於氣簾內測到的空浮濃度，白圈則氣簾外測到的空浮濃度。圖 9 指出 RPV 及其內部組件係位於水下以電漿進行切割，切割對象包含燃料匣(Channel Box)、RPV、Lower Grid、Core Shroud、CM tube，其中反應器下格架(Lower Grid)的放射性比活度約為 10^6 Bq/g，水下進行切割時，於氣簾內測得空浮濃度最高為 10^{-5} Bq/cm³，該空浮濃度與執行爐內上部組件(汽水分離器)切割造成的空浮濃度相當，而汽水分離器的比活度為 10^3 Bq/g 並且置於空氣中進行切割。比活度相差約 1000 倍的組件，分別於水下切割及空氣中進行切割，最終測得相當的空浮濃度，結果顯示採用水下切割作業方式，對於抑低空浮濃度具有顯著成效。

另外圖 9 也指出爐內組件 Lower Grid、Core Shroud 進行切割作業時，於氣簾外的空浮濃度約為氣簾內的三十分之一，顯示以氣簾收集切割後的放射性氣體並經過濾後排放，對於抑低廠房內空浮濃度同樣具有顯著效果。

已完成除役的動力實驗反應器實務經驗與統計資料顯示，RPV 採用水下切割及氣簾收集過濾切割產生的放射性氣體作法，對於廠房空浮濃度具有一定程度的抑減效果，可以作為我國核電廠未來針對 RPV 及周邊組件執行拆除作業規劃參考。

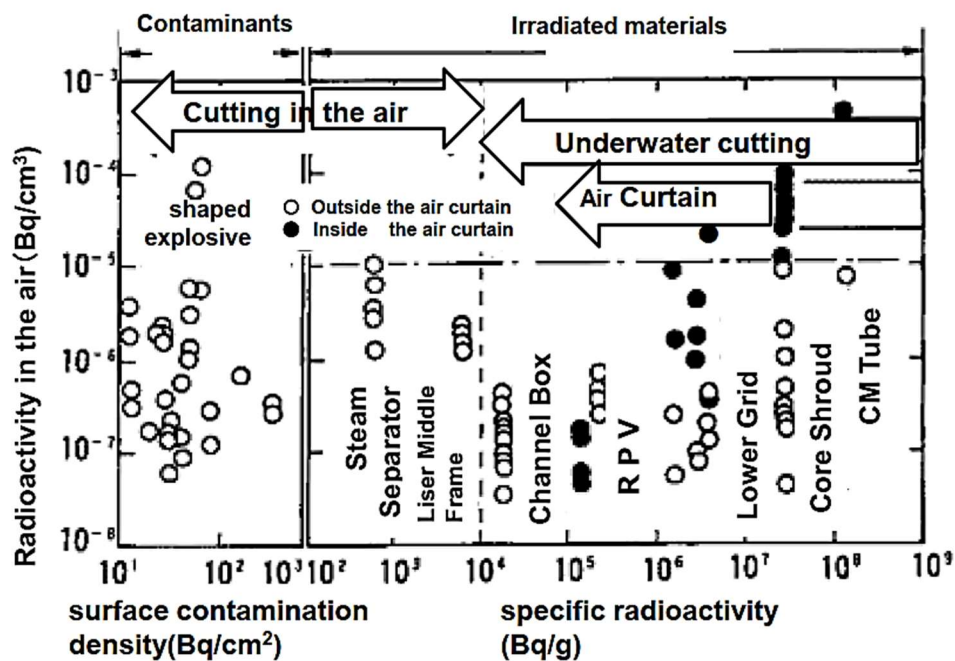


圖 9 JPDR 除役放射性程度、拆除方法和空氣中的放射性濃度圖

(圖片來源：ANDES 訓練資料)

JPDR 除役所產生的廢棄物重量統計如圖 10，總共產生 24400 噸廢棄物，放射性廢棄物為 3770 噸(15.4%)，其中 1660 噸(6.8%)貯存於設施內，1670 噸(6.8%)的 L3 級廢棄物以淺表層處置方式貯存於茨城縣東海村的處置場，440 噸(1.8%)為二次廢棄物。非放射性廢棄物共 20700 噸(84.6%)，且高達 71.5%是自輻射管制區內產出，非管制區則僅佔 13%。

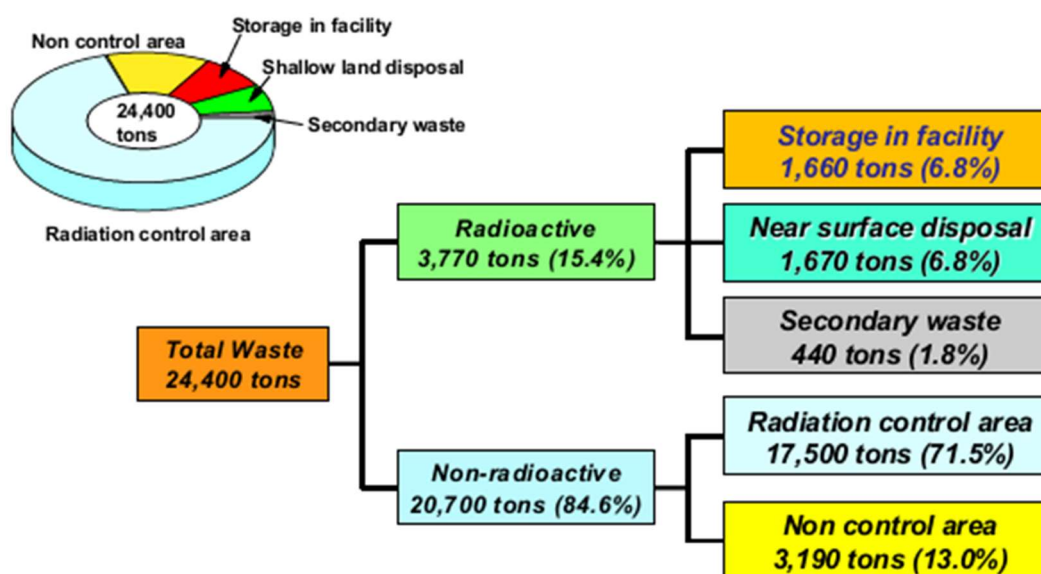


圖 10 JPDR 除役廢棄物重量統計 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

日本自 JPDR 除役工程過程中，不僅累積了寶貴的除役經驗，亦獲得有關各項工作之人力投入、廢棄物產出與管理、作業人員輻射劑量等統計資料，並據此建立完整資料庫，以保存與整理相關資訊。上述成果可作為我國後續核電廠除役作業之評估與參考依據。

2. 濱岡核電廠除役現況及規劃

濱岡核電廠除役現況是由日本中部電力公司的宮崎保志先生進行介紹，濱岡核電廠位於靜岡縣御前崎市，是中部電力公司所營運之核電廠，廠內共 5 部機組，均為沸水式反應器，1 & 2 號機於 2009 年 1 月停止運轉並進入除役階段；第 3 至 5 號機，則係因應於 2011 年 3 月日本福島第一核電廠事故進行強化改善措施，本次課程主要著重於 1 & 2 號機的除役工作。

濱岡核電廠 1 & 2 號機所使用之燃料，包括用過核子燃料總計 1,370 束(1 號機 206 束，2 號機 1,164 束)，全數於 2014 年 2 月運至 5 號機的燃料池進行貯存；而尚未使用的新燃料則於 2015 年 3 月全數返還至原燃料製造商。現已完成反應器周邊設備拆除，並於 2024 年進入除役第三階段，是日本國內目前唯一正執行反應器拆解的核電廠。

反應器拆除順序為抑壓池(Suppression Chamber)、爐內組件、反應器壓力槽、輻射屏蔽牆及乾井牆，如圖 11。

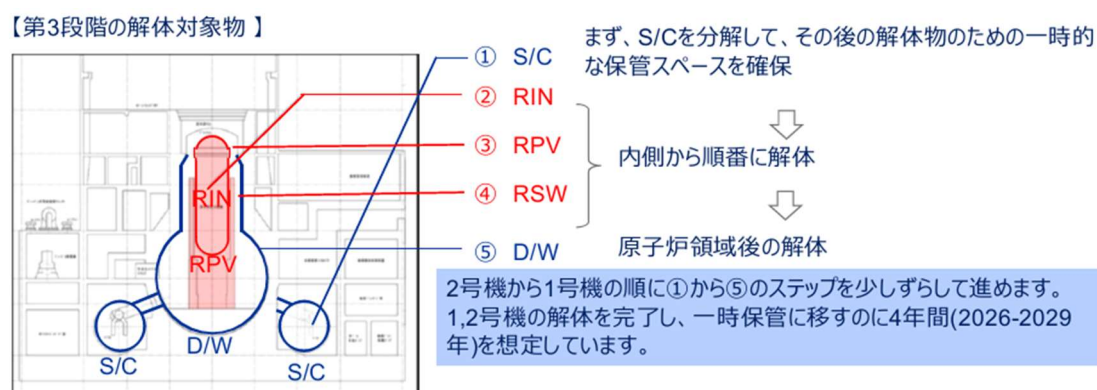


圖 11 濱岡 1 & 2 號機反應器及周邊設備拆除規劃 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

先拆除抑壓池係為提供後續拆除物件的臨時存放空間，目前正進行 2 號機抑壓池與反應器壓力槽上蓋的切割作業，抑壓池係使用熱切割技術以縮短工時，反

應器壓力槽上蓋係使用大型龍門鋸床進行切割以降低工作人員輻射曝露的風險。規劃的反應器切割工法，係先切割爐內組件，再切割反應器壓力槽。爐內組件的切割順序，先於水下遠端遙控以一次切割裝置作第一次切割，再將切割的物料傳送至上部乾燥器儲存水池，以二次切割裝置進行第二次的細部切割。反應器壓力槽的切割順序，先進行上部乾燥器儲存水池緩慢洩水，洩水同時以遠端遙控一次切割裝置進行反應器壓力槽上部切割，再將切割的物料傳送至上部乾燥器儲存水池(無水狀態)，以二次切割裝置在空氣中作第二次切割。

在濱岡核電廠 1 & 2 號機的除役作業中，廢棄物管理是整體除役工程中最具挑戰性與關鍵性的部分之一。該計畫自 2009 年起展開，歷經多階段工程，而廢棄物的分類、處理與再利用措施，皆在法規與技術雙重依據下有系統地推動，並明確指出廢棄物管理的首要原則為「確保安全」，此政策細分為三大面向：

(1) 安全設施的維護管理

於整個除役期間內，所有為確保安全之必要設施均須接受定期檢查與性能確認，包括耐震評估。

(2) 防止放射性物質洩漏與擴散

在拆除與廢棄物處理期間，將持續監控並確保不會對廠外環境產生任何放射性物質的洩漏或擴散。

(3) 作業人員的輻射防護

針對參與作業的人員，除採取放射性物質去除與衰減措施外，也將遵循輻射防護三原則(時間、距離、屏蔽)，以降低作業曝露風險。

濱岡核電廠除役作業中所採行的解除管制制度(Clearance System)，係依據《原子爐等管制法》於 2005 年制定。解除管制制度的核心在於透過嚴格的偵測與判定程序，確認廢棄物的放射性活度濃度低於法定標準，並經完整紀錄與可追溯程序後，視為非放射性廢棄物。

核電廠除役中解除管制制度的處理流程，適用來自反應器或建築物內，經除污與分類後的廢棄物，針對那些廢棄物，會先進行第一次放射性活度濃度偵測，

確認是否符合可從輻射管制區搬出的條件。接著進行第二次偵測，確認是否符合解除管制標準。經確認的廢棄物將依序暫存，最終可移出廠外進行再利用或採一般性處置。

濱岡核電廠的除役過程中，經解除管制制度確認的金屬材料再利用成果。共計有 1,387 噸金屬符合解除管制標準，其中 115 噸被熔融加工成排水溝蓋板，使用於電廠內及其他設施。自 2022 年起，濱岡核電廠廠區已安裝 3,774 個蓋板，2023 年又擴展至駿遠變電所與東清水變電所，分別安裝 102 與 108 個蓋板，如圖 12 所示，這些再利用實例顯示解除管制制度在資源循環與除役透明化上的具體成效。

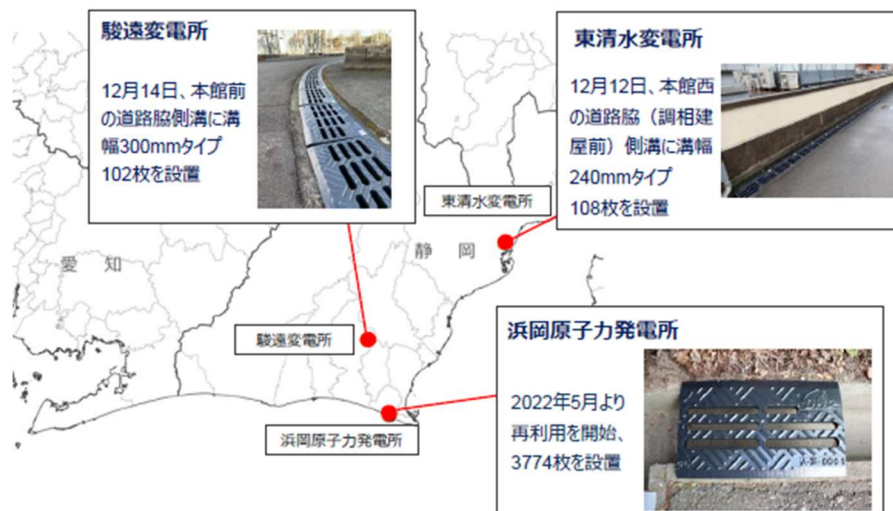


圖 12 廢棄物再利用 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

3. 關西電力公司所屬核電廠除役現況及規劃

本課程由關西電力除役技術中心所長原茂樹先生進行講解，課程一開始先簡單介紹關西電力公司所屬之高濱、大飯與美濱三座核電廠，主要以美濱核電廠之除役作業規劃及實務作業為主。

高濱核電廠有四部機組，目前均仍在運轉中；大飯核電廠有四部機組，1 & 2 號機已進入除役，目前處於除役準備階段，第 3、4 號機仍在運轉中；至於美濱核電廠，其 1 & 2 號機於 2017 年除役，目前執行第 2 階段的反應器周邊組件拆除作業，第 3 階段的反應器拆除作業預計 2036 年開始執行。

在除役準備階段，美濱核電廠為降低拆除作業時的劑量，即選定反應器冷卻水系統、水化學控制系統，餘熱移除系統等高放射性系統進行系統除污，除污範圍見圖 13，針對蒸氣產生器熱導管，蒸氣產生器本體、一次側冷卻管路部分可有效降低劑量，效果良好，選定使用系統除污技術時，也須將產生的二次廢棄物以及除污試劑處理納入考量。

為有效規劃作業人員的輻射曝露防護措施和拆除廢棄物的合理處理方式，需要對反應器容器內部(如反應器容器內壁、爐內構造物)及反應器外部(如反應器圍阻體、反應器機房)的輻射分佈狀況進行詳細調查。美濱核電廠透過遠端操作裝置進行樣品採集(例如在反應器內的 LCI 噴嘴下部採集樣品)，並將採集到的樣品進行分析。

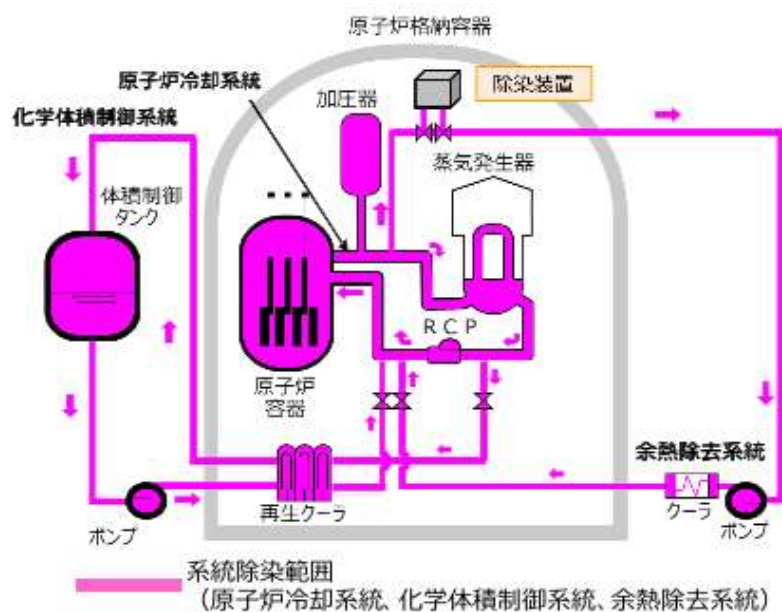
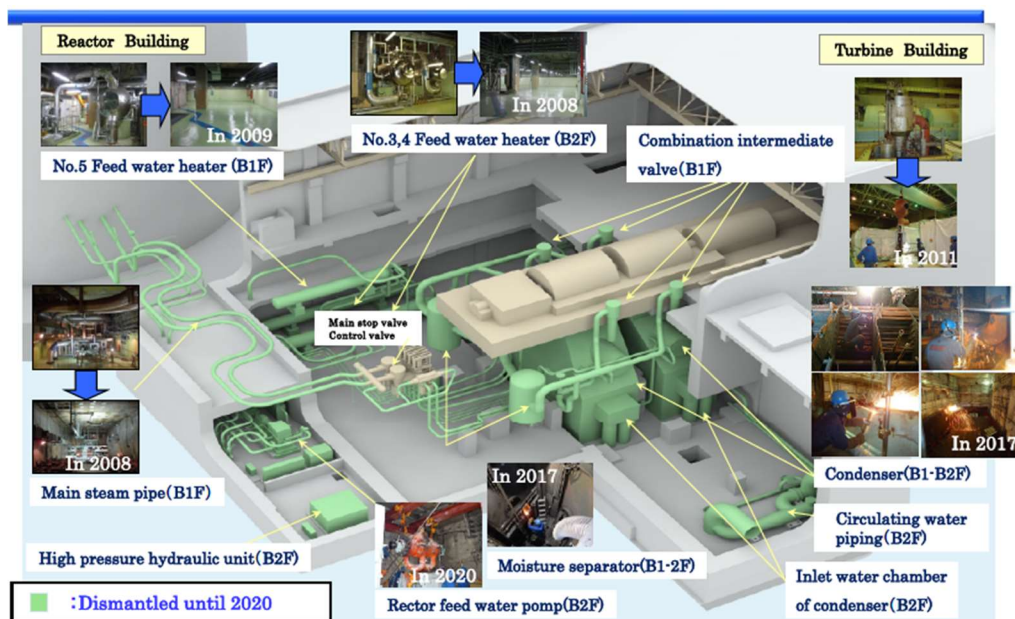


圖 13 系統除污範圍 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

針對反應器及周邊組件拆除技術之選擇，將從降低公眾與作業人員輻射劑量、操作的難易度及工安事故預防等觀點進行選擇。對金屬設備的拆除，基本上選擇使用機械切割方式如帶鋸切割，對於筒槽及大口徑管路等大型設備的切割作業，應選擇使用熱切割方式如電漿切割，以縮短工時提高工作效率。對於運轉期間產生的高劑量廢控制棒、廢可燃毒物等，則選擇採以專用設備進行水下遠端控制的機械切割方式處理。

在除役廢棄物處理方面，關西電力公司與福井縣預計合作推動的「福井縣解除管制廢棄物集中處理事業」。該計畫擬在敦賀市浦底地區設立處理設施，集中收集經解除管制制度確認符合解除管制標準的金屬廢棄物。福井縣與關西電力及日本核電等業者已於 2025 年規劃成立專責公司，並進行場址地質調查與詳細設計，預計於 2030 年左右啟動正式營運，此一集中處理平台不僅提升流程效率與安全性，也對推動福井地區原子能除役與廢棄物再利用產業化具有指標性意義。

本課程由日本原子力研究開發機構(JAEA)除役部門香田有哉先生進行講解，普賢核電廠位於日本福井縣敦賀市敦賀半島，是進步型熱滋生反應器(Advanced Thermal Reactor, ATR)原型爐的研究用商業反應器，由日本原子力研究開發機構負責營運，1979 年開始運轉，2003 年停止運轉，2008 年除役計畫獲主管機關認可。



普賢 ATR 反應器的冷卻水系統有 A、B 兩串，該系統的拆除作業分為 A 串、B 串與大型組件三個部分如圖 15，A 串(綠色部分)拆除作業於 2019 年 7 月至 2021 年 3 月期間執行，共產出 340 噸廢棄物，B 串(藍色部分)拆除作業於 2021 年 3 月至 2022 年 9 月期間執行，共產出 580 噸廢棄物，現正執行第 3 部分大型組件的拆除作業，預計可於 2026 年完成，並產生 800 噸廢棄物。

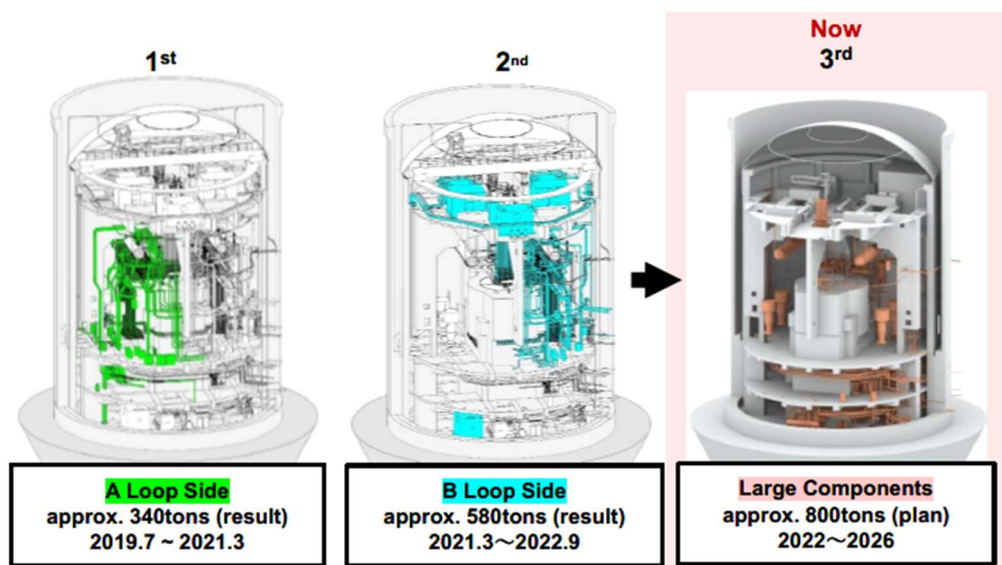


圖 15 普賢 ATR 反應器冷卻水系統拆除 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

反應器爐心拆除作業預計於 2030 年開始執行，普賢核電廠的 ATR 反應器上方並非如常見的輕水式反應器上方設有水池，為降低反應器上部拆除後的污染水滲漏風險，普賢核電廠規劃於反應器上方增設一水池作為設備切割屏蔽，該水池與反應器槽體底板直接焊接接合如圖 16，能夠避險洩漏的風險，並開發遠端切割與檢查裝置。拆除工法使用水下雷射切割技術，此技術由 JAEA 轄下的智慧除役技術展示基地(Sumadeco)開發，需進行穿孔、傾斜板切割與遠端操作性等多項測試，且須收集因使用雷射切割所產生的放射性粉塵，實驗結果顯示集塵效率可達約 90%以上，這些高污染的拆除廢棄物則是規劃存放於蒸汽釋放池(steam release pool，相當於輕水式反應器的液壓池)區域。

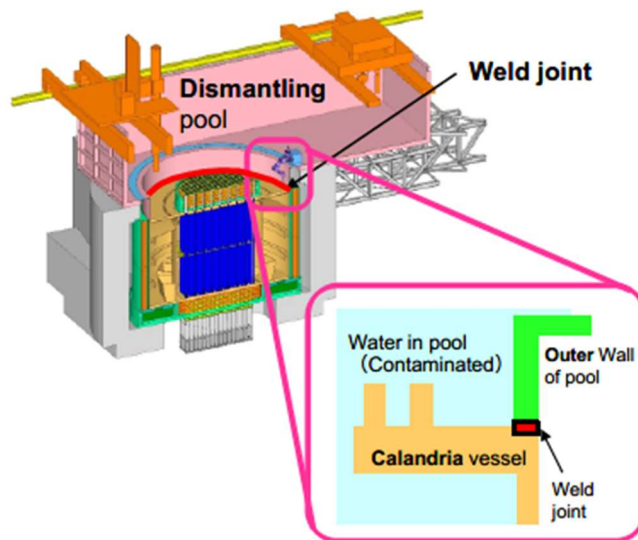


圖 16 普賢反應器拆除規劃示意圖 (圖片來源：ANDES 訓練資料)

(四) 核子反應器拆除技術及國際應用實例與經驗

「核子反應器及周邊組件拆除技術」是由 ANDES 原子力除役研究會堀內精彥先生進行介紹，本課程蒐集國際核子反應器拆除技術與應用實例經驗，說明各類技術之適用對象及其優缺點。

1. 核子反應器拆除技術簡介與應用實例

核子反應器拆除技術主要分為機械切割(Mechanical Cutting)和熱切割(Thermal Cutting)兩大類，機械切割係以物理接觸、摩擦或研磨等方式進行切割，切屑通常較大而易於收集，在控制放射性物質擴散方面具有優勢，但切割速度與適用範圍較為受限，相關技術包括：圓盤鋸(Disk Cutter)、鑽石索鋸(Diamond Wire Saw)、帶鋸(Band Saw)、手鋸(Hacksaw)及磨料水刀(Abrasive Water Jet)等；熱切割係利用介質(如高能量光束或高溫火焰)產生熱源，以高溫熔化、昇華、燃燒或弱化金屬之方式進行切割，切割速度快，但產生二次廢棄物較多，且可能產生氣體懸浮微粒(Aerosol)而需進行大規模的過濾管控，相關技術包括：電漿切割(Plasma Arc Cutting)、電弧鋸(Arc Saw)、放電加工(Electrical Discharge Machining, EDM)、接觸電弧熔斷切割(Contact Arc Metal Cutting, CAMC)、氣體切割(Gas Cutting)、雷射切割(Laser Cutting)等。以下就各種拆除技術之特性與應用實例分別進行說明。

(1) 圓盤鋸

透過圓盤狀的多齒刀刃從內或外表面擠壓工件，使其塑性變形而切斷。設備較大，不適用於狹窄空間。日本 JPDR 曾應用此技術進行壓力槽連接管路之切割。

(2) 鑽石索鋸

將帶有鑽石磨料顆粒的鋼索圍繞於工件周圍，藉與工件摩擦進行切割。可一次性切割大尺寸物體，金屬與混凝土均能應用此技術進行切割。美國 Vermont Yankee 核電廠曾應用此技術進行蒸汽乾燥器切割。

(3) 帶鋸機

將工件固定，利用帶狀鋸條在兩個輪子上環繞運動，將刀片壓向工件進行切割。因設備體積較大，不易在狹窄空間使用。德國 MZFR 核電廠曾應用此技術進行反應器壓力槽切碎(Shredding)。

(4) 磨料水刀

將磨料混入高壓水下，產生高速水射流進行切割。可在水下切割，無熱影響區，切割縫窄，但會產生大量二次廢棄物。德國 VAK 核電廠曾應用此技術切割爐心側板，美國 Rancho Seco 核電廠曾使用機械手臂攜帶水刀噴嘴進行 RPV 切割(細切)。

(5) 電漿切割

利用高溫高速的電漿流熔化金屬並吹走熔融金屬以形成切縫，優點為切割速度快、切縫狹窄、熱影響區小、工件變形小，適用狹窄空間切割，材料加工厚度可達 150mm，廣泛應用於國際間反應器除役作業，特別是反應器爐內組件切割。日本 JPDR 曾應用此技術於反應器爐內組件切割，美國 Yankee Rowe 核電廠曾應用於水下切割反應器爐心阻板(core baffle)。

(6) 電弧鋸

在工件與旋轉鋸片之間施加直流電壓產生電弧放電，利用放電產生的熱熔化工件材料，再藉旋轉鋸片將熔化的工作材料去除，特別適用於厚壁金屬件的

切割。JPDR 曾應用此技術於反應器爐內組件切割。

(7) 放電加工

利用高電壓低電流的火花熔化或昇華工件材料，並利用氣泡爆裂產生的衝擊波移除加工材料，可用於精密加工，但切割速度慢，且因切屑細小需使用淨化裝置(Purification equipment)。比利時 BR-3 壓水式反應器於 1987 年除役，曾應用於此技術於反應器爐內組件切割。

(8) 接觸電弧熔斷切割

係透過施加大電流(4,000 安培)使工作材料快速膨脹並進行切割，電極短可用於切割不易觸及位置，適用於厚壁爐內部結構之切割，但切屑微細會產生大量二次廢棄物。比利時 BR3 核電廠曾使用此技術於螺栓頭之切除，德國 KRB-A 曾使用此技術於汽水分離器之切割。

(9) 氣體切割

利用氧氣與燃料(如乙炔、丙烷、汽油)之間的放熱化學反應進行切割，適用於厚壁碳鋼材料的反應器，但不適用於不銹鋼切割。德國 Stade 核電廠曾使用機械手臂攜帶氧-燃料火炬切割 RPV 殼體。

(10) 雷射切割

利用雷射光進行切割具備優勢包括切縫窄，可有效降低二次廢棄物產生量；切割速度快，提升作業效率；並具有良好的遠端操控特性，但目前應用於核子反應器切割之經驗不足。

2. 核子反應器水下切割技術比較與安全評估

核電廠除役過程中，反應器內部高輻射強度，RPV 及爐內組件之拆除通常需採用水下切割方式進行，由於水的屏蔽作用，可以顯著減少放射性氣體懸浮微粒的擴散，以降低工作人員的輻射劑量。常見用於水下切割的技術有鑽石索鋸、磨料水刀及電漿切割。

核子反應器相關組件水下拆除技術之選擇，就機械切割與熱切割兩個大分類來看，可參考以下兩個輻射安全評估特點：

(1)機械切割產生的切屑尺寸約為毫米級，而熱切割產生的切屑尺寸約為微米級。因此，機械切割的切屑傾向於沉降且易於收集，而熱切割的切屑則會漂浮並將高放射性物質擴散到反應器壓力槽池水中，進而增加工作環境的輻射劑量率。

(2)熱切割通常使用輔助氣體，很難防範放射性懸浮微粒擴散至空氣中，存在工作人員內部輻射曝露風險。

3. 國際核子反應器拆除技術使用趨勢

(1) 爐內組件

在 2000 年以前，爐內組件拆除主要使用熱切割和磨料水刀切割，但從 2000 年之後，機械切割成為主流。Orano 公司從 1990 年至 2020 年長期使用磨料水刀進行爐內組件切割，西屋公司在 2000 年以前也是使用磨料水刀，但 2000 年以後僅使用機械切割。

(2) 反應器壓力槽(RPV)

美國在 2000 年以前，RPV 拆除主要以 RPV 整個移出方式進行，但近年來，將其切割成小塊再進行廢棄物處置的方法越來越普遍。

4. 國際核子反應器拆除經驗

(1) 西班牙 Jose Cabrera 核電廠

使用帶鋸(Band Saw)作為爐內組件分段切割的主要工具，以圓盤鋸作為輔助工具，執行約 16 個月，規劃與準備約 18 個月。

(2) 美國 Yankee Rowe 核電廠

使用電漿切割反應器爐心阻板，切割作業由安裝在爐穴上方橋車的多軸電腦控制系統控制，並在滿水的爐穴內進行。在實際執行過程中發現，電漿火炬於切割作業時所產生的排放氣體，導致放射性微粒漂浮於爐穴水面，進而使圍阻體內空間的輻射劑量升高，對其他作業活動造成影響。

(3) 美國 Rancho Seco 核電廠

使用磨料水刀進行反應器壓力槽分段切割(Segmentation)，RPV 總切割長度

為 1075 米，總切割時間為 773 小時。執行過程中曾因大量細小的磨料顆粒導致能見度差。

(4) 美國 Vermont Yankee 核電廠

Vermont Yankee 為一座 GE BWR-4 型沸水式反應器，使用鑽石索鋸以分段切割方式進行 RPV 頂蓋及蒸汽乾燥器之切割，以及使用磨料水刀以遠端水下的方式進行爐內組件之切割，其精度高且反作用力小，有利於後續包裝裝筒。

(5) 德國 Stade 核電廠

反應器爐內組件使用磨料水刀在水下作業進行切割，壓力槽體則使用遠端控制的氧-丙烷之氣體切割方式，從槽體外部由上至下分段切割。

二、參訪美濱核電廠與敦賀 JAEA 除役技術中心

(一) 美濱核電廠參訪

114 年 7 月 10 日下午前往參訪位於福井縣三方郡美濱町的美濱核電廠，美濱核電廠為關西電力所屬。進廠時，先由廠方人員協助辦理進廠手續，核對我方人員身分後，由副廠長就美濱核電廠現況進行介紹，再前往除役機組實地觀察。廠方安排至圍阻體內部及汽機廠房區域進行參觀，美濱核電廠目前處於反應器周邊設備拆除階段，因此尚未執行反應器相關設備之拆除工作。

本次參觀的圍阻體內部區域屬輻射污染區，進入前須先更換污染防護衣，再由廠方人員帶領我方人員進入，並介紹目前機組狀況，機組一次側設備已有進行系統除污，輻射劑量已大幅下降，此區域參觀完畢後，前往汽機廠房，汽機廠房屬於非污染區，因此無須穿著防護衣。

圖 17 分別為一次側與二次側系統之拆除工作及拆除成果，右圖為一次側噴灑泵之拆除，左圖為二次側無污染的汽機廠房內汽機拆除作業，現今汽機轉子已完成拆除作業，圖 18 為汽機拆除過程之圖片，拆除後現場留下一大坑洞，為避免人員墜落，因此於坑洞周遭圍起護欄。

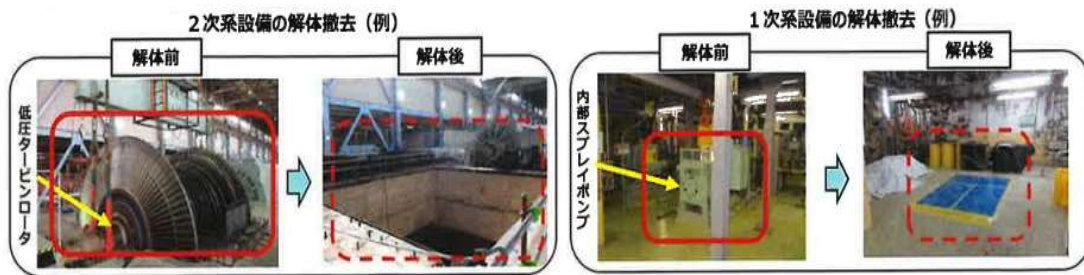


圖 17 美濱核電廠拆除作業執行成果 (圖片來源：美濱核電廠資料)



圖 18 美濱核電廠汽機拆除過程 (圖片來源：美濱核電廠資料)

(二) 敦賀 JAEA 除役技術中心參訪

114 年 7 月 11 日上午前往日本原子力研究開發機構，該機構位於福井縣敦賀市的敦賀綜合研發中心(Tsuruga Comprehensive Research and Development Center)，參訪該中心設立的智慧除役技術展示基地(Sumadeco)，福井縣內具有各類核子反應器設施 15 座，約佔日本全國四分之一，從事核能相關產業的公司與學術機構很多，Sumadeco 由日本政府文部科學省「地區科學技術示範基地建設項目」之扶持政策預算設立，目的係為支持福井當地企業在核電機組除役相關技術發展及促進產官學合作，為地區經濟發展及解決除役相關技術問題有所貢獻。Sumadeco 由 3 個核心場域組成，分別為：除役拆除技術示範場(Decommissioning Dismantling Technology Demonstration Field)、雷射加工試驗場(Laser Processing Test Field)及除役模擬試驗場(Decommissioning Mock-Up Test Field)，以下就各場

域之技術內容及參訪心得，簡要說明。

1. 除役拆除技術示範場

此示範場以混合實境(Mixed Reality, MR)系統重建 JAEA 普賢核電廠多個區域的等比例三維環境，讓工作人員在不進入現場的情況下，先行檢討工作程序、設備可操作性(工具及工作姿勢限制等)、搬動路線與人員劑量率等，支援除役前的規劃與教育訓練。該 MR 系統由 HMD(頭戴顯示裝置)、專用電腦、光學相機與 50 吋顯示器等構成，MR 可移動體驗空間約 $4.5\text{ m} \times 4.0\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 。經實際穿戴體驗，戴上頭戴顯示裝置後，除役現場的景象出現於眼前，如同人就在現場一樣，當嘗試操作一顆位於多條管路下方的閥門，手在移動過程中以及與管路碰觸時，系統會有顯示讓操作人員知道。該系統還可將輻射特性調查的結果轉換為可見的等效劑量率和顏色數值，用於警示、最佳作業程序的檢視以及臨時設備的放置位置確認等。

MR 系統具有可「身歷其境」感受除役現場的優點，對於規劃相關的檢查及拆除動線、屏蔽與鷹架設立位置，預估不同工法的人員輻射劑量等除役工作，可於事前藉由 MR 系統模擬相關作業的情境，妥善規劃相關工作，降低作業風險及失誤之可能，提升作業的流暢度。

2. 雷射加工試驗場

此試驗場進行在除役作業環境下，以雷射進行除污及切割之技術研究開發。開發的雷射加工機械手臂，為 3 組關節之多軸機械手臂(雷射頭、試件夾持臂〈最大 15 kg〉、濺落物收集臂)，雷射源為 10 kW 連續波光纖雷射，以光纖連接雷射頭，計算模型可依熱輸入與熱傳機制預測材料的熔融/凝固行為，可實現更快執行時間、更平整切割表面並減少噴濺物的產生。

這組開發的雷射加工機械手臂藉由先模擬各種參數，包括雷射功率、移動速度及雷射頭與工件距離等，再用實驗驗證與修正，可提升厚板或複合材切割的穩定性；以 3 組機械手臂分別負責持刀、夾持及收集飛濺物，可拉長操作者與工件的距離，為未來遠端控制奠定基礎。

針對雷射切割技術之應用，先進行計算再以實驗確認，以及三臂協同作業降低人員輻射曝露的作法，因目前在國際間仍欠缺以雷射技術進行除污、切割的相關經驗，可於後續追蹤其實際應用的效益。

3.除役模擬試驗場

此試驗場提供水下切割作業與大氣切割作業的示範區，水下切割作業示範區配置圓柱形水槽(高約 10.5 m、外徑約 4.5 m，水深可至 10 m)、七軸水下載具、循環與淨化系統，能以遠端控制水下雷射，模擬高劑量爐內組件之切割作業，亦可模擬核設施常見的貯槽內拆解或焊補作業之進行；大氣切割作業示範區的室內空間約高 4 m × 寬 5 m × 深 7 m，內建過濾排煙裝置，可執行粉塵粒徑的分布量測、在地企業開發之工具的能力驗證、以及提供使用鑽石索鋸、磨料水刀及氣體切割火炬等多種切割技術的人員訓練與能力驗證。

此除役模擬試驗場設置水下 10m 等級的深槽，空間中設置排煙過濾及吊車等裝置，讓執行單位能用真實環境、設備及材料等，驗證作業流程與安全措施的適用性與合理性後，再把成熟的作法帶到核電廠現場使用；於示範場中，先行量測切割過程中煙霧的分布與粒徑，再依據測量結果設置過濾與排煙設備，以確保未來現場作業時，空氣及水的污染均能獲得妥善控制。

三、心得及建議

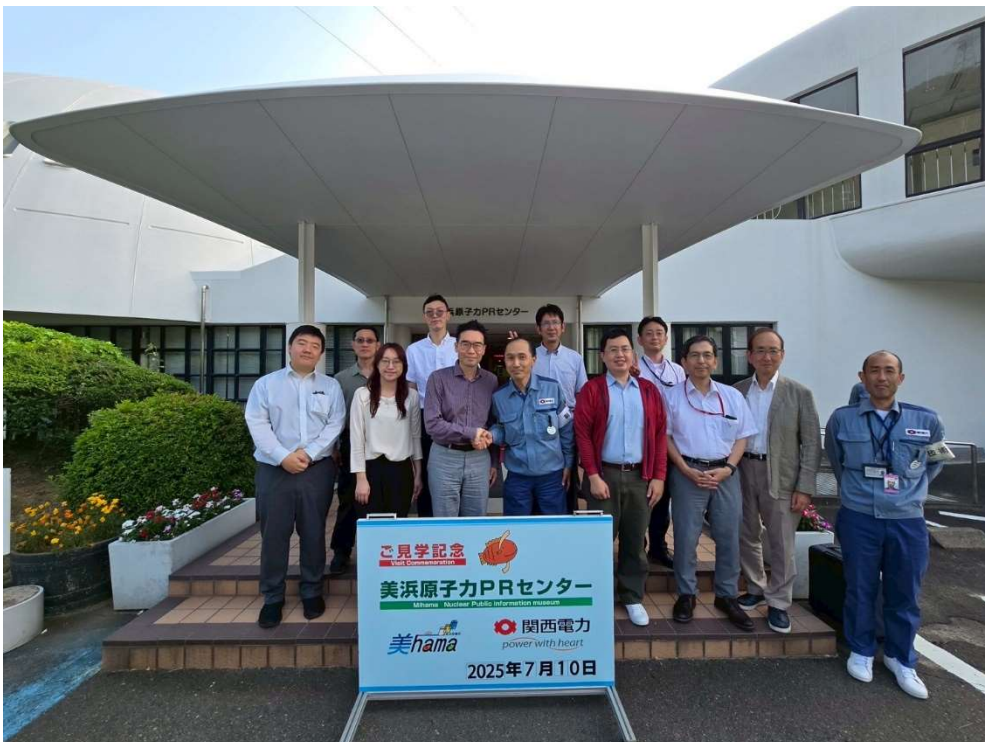
1. 本次赴日參與 ANDES 主辦的除役訓練課程，透過課堂講授與現場參訪，獲得日本核電廠現況、除役規劃、實務作業，以及放射性廢棄物的分類、管理與最終處置策略之詳細資訊，並於課堂中與日方進行交流，就雙方除役作業相關考量與技術進行討論，受益良多。
2. 我國核電廠進入除役階段，目前核一廠的除役工作係規劃自低污染區開始拆除相關設備，並已累積有相關經驗，但位於高污染區之設備，為能安全管制，順遂相關工作，持續收集國際經驗為首要之務。針對本次日本核電廠除役進度、規劃與實務之相關經驗，對於我國除役安全管制有相當助益，可作為管制之參考，未來可持續就雙方當前除役重要議題進行交流。
3. 我國目前開展核一廠汽機廠房主發電機相關設備之除役拆除作業，期間產生的廢金屬經偵測合格後，經營者須依本會核定之離廠偵測方案進行解除管制，迄今已累積相關解除管制作業之實務經驗，未來可與日方就核電廠除役廢棄物解除管制作業之實務經驗，進行更進一步的技術及經驗交流。
4. 對照我國現行的核設施除役與廢棄物管理制度，台灣同樣已建置廢棄物分類之管理機制，相關法規與實務操作均以安全為最高原則，本次透過實務分享提升除役管理效能與精進管制技術，後續可再持續交流。
5. 日本 JPDR 除役實務經驗與統計資料顯示，RPV 採用水下切割及氣簾收集過濾切割產生的放射性氣體作法，對於廠房空浮濃度具有一定程度的抑減效果，可作為我國核電廠未來針對 RPV 及周邊組件執行拆除切割作業之管制參考。
6. 日本原子力研究開發機構轄下智慧除役技術展示基地，正在開發混合實境技術，該技術結合現場輻射狀況資訊，建置仿真作業環境，用於核電廠除役拆除前的模擬作業。後續可持續關注此技術之發展方向與應用領域，以及其在日本核電廠除役作業中的實際成效。

附件一



ANDES-2025 除役訓練研習課程-授課實景

附件二



ANDES-2025 除役訓練研習課程-參訪美濱核電廠合影