

出國報告（出國類別：實習）

赴日參加 ANDES 除役訓練課程 與參訪濱岡、美濱與普賢核電廠

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：許明童 簡任技正

張明倉 技正

張國榮 技正

林駿丞 技士

張維荏 技士

林郁珍 技士

莊宴惠 技士

派赴國家/地區：日本東京/敦賀

出國期間：112 年 8 月 27 日至 112 年 9 月 2 日

報告日期：112 年 11 月 08 日

摘 要

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，核電廠即會進行除役，核能安全委員會(原為行政院原子能委員會)已積極開展除役相關管制作業，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知能。本次出國目的係參加日本原子力除役研究學會(ANDES)舉辦之核電廠除役訓練課程，並參訪日本濱岡、美濱與普賢核電廠等現場除役作業，出國訓練期間(含往返路程)自 112 年 8 月 27 日至 112 年 9 月 2 日，共 7 日。課程內容包含日本的除役現況、除役作業要點、核電廠除役拆除技術、廢棄物處理與管理方法、拆除廢棄物解除管制標準、日本除役經驗與回饋，以及除役作業現場實務管理與技術等課題。訓練期間 ANDES 亦安排參訪除役中之濱岡、美濱與普賢核電廠，由核電廠簡報廠內機組狀況、新增管制規定執行情形、除役作業執行現況與未來規劃外，亦安排到除役機組現場實地觀察瞭解除役作業執行情形；此外，也就除役規劃、實務作業的相關議題及經驗進行討論與分享。

本次參加 ANDES 除役訓練課程，以及參訪濱岡、美濱與普賢核電廠除役中之機組，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，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經驗學習，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.....	3
貳、出國行程.....	4
參、過程紀要.....	3
肆、心得與建議.....	64
伍、附件.....	66

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，除役期間核能安全委員會(以下簡稱本會)仍需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學會(Association for Nuclear Decommissioning Study, ANDES)成立於 1997 年，該會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，定期舉辦除役技術交流與經驗分享等訓練課程。本次核電廠除役訓練課程由 ANDES 籌劃開辦，訓練期間自 112 年 8 月 28 日至 112 年 9 月 1 日，共計 5 日。課堂課程由日本福井大學客座教授及特命教授、Japan Atomic Power Company(JAPC)取締役、關西電力公司除役技術中心所長、ANDES 事務局長等具有除役技術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綜合討論。講授主題包含：

- (1). 日本核電廠除役現況。
- (2). 除役作業要點。
- (3). 除役相關輻射防護。
- (4). 除役相關核子保安與緊急應變。
- (5). 拆除廢棄物的管理。
- (6). 普賢核電廠除役作業實務與經驗。
- (7). 日本壓水式核電廠(PWR)-美濱核電廠除役的實務與經驗。
- (8). 日本除役經驗與回饋。

本次 ANDES 除安排課程訓練外，並安排參訪正進行除役作業之濱岡、美濱及普賢核電廠的除役作業狀況，並參觀日本原子力研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)除役技術示範測試中心。參訪的濱岡(Hamaoka)核電廠共 5 部機組，其中 1 號機及 2 號機進行除役(屬於中部電力公司)、美濱(Mihama)核電廠共 3 部機組，其中 1 號機及 2 號機進行除役(屬於關西電力公司)、普賢(Fugen)核電廠為 1 座進步型熱滋生反應

器(Advanced Thermal Reactor, ATR) (屬於 JAEA)。藉由參加 ANDES 舉辦之除役訓練課程瞭解日本核電廠除役安全管制規範、核子保安與緊急應變、除役相關輻射防護、拆除廢棄物的管理、核電廠除役作業實務與經驗及日本的經驗與回饋，及現場除役實務作業情況與經驗，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、本次公務行程：

本次出國訓練期間自 112 年 8 月 27 日起至 112 年 9 月 2 日止，共計 7 日。行程如下：

日期	行程	摘要
8 月 27 日(日)	台灣→東京	去程
8 月 28 日(一)	東京	參加 ANDES 除役訓練課程 ● 日本核電廠除役現況。 ● 除役作業要點。 ● 除役相關輻射防護。 ● 除役相關核子保安與緊急應變。
8 月 29 日(二)	東京→敦賀	濱岡核電廠參訪活動
8 月 30 日(三)	敦賀	參加 ANDES 除役訓練課程 ● 拆除廢棄物的管理。 ● 普賢核電廠除役作業實務與經驗。 ● 美濱核電廠除役的實務與經驗。
8 月 31 日(四)	敦賀	美濱核電廠參訪活動 普賢核電廠參訪活動
9 月 1 日(五)	敦賀→大阪	參加 ANDES 除役訓練課程 ● 日本除役經驗與回饋。 JAEA 除役技術示範測試中心參訪活動
9 月 2 日(六)	大阪→台灣	返程

二、課程資訊：

本次 ANDES 除役訓練課程係於東京 BDK 會議室、敦賀萬象(Plaza Bansho)會議室及日本福井大學附屬原子力工學研究院舉行，訓練課程表如下：

	09:30-11:30	11:45-12:30	13:30-15:30	15:45-17:30
8月28日 (一)	日本核電廠除役現況 (講師：前 JAPC 取締役 佐藤忠道)	除役作業要點 (講師：ANDES 會長 福井大學客座教授 柳原 敏)	除役相關輻射防護 (講師：前 JAPC 取締 役 佐藤忠道)	除役相關核子保安 與緊急應變 (講師：福井大學特 命教授·井口幸弘)
8月29日 (二)	移動至濱岡核電廠		參訪濱岡核電廠(13:15~16:30) 行程結束後前往敦賀	
8月30日 (三)	除役廢棄物的管理 (講師：福井大學特 命教授·井口幸弘)	普賢核電廠除役作業 實務與經驗(講師：福 井大學特命教授·井口 幸弘)	日本 PWR 核電廠- 美濱核電廠除役的 實務與經驗(講師： 關西電力公司除役 技術中心原茂樹所 長)	綜合討論/Q&A (實踐除役作業重要 事項)
8月31日 (四)	參訪美濱核電廠(10:00~12:30) 概要說明、除役現場、Q&A		參訪普賢核電廠(13:00~16:30) 概要說明、除役現場、Q&A	
9月1日 (五)	日本除役經驗與回饋 (講師：前 JAPC 取締 役 佐藤忠道)	綜合討論/Q&A (除役重要課題與對策)	參訪 JAEA 除役技術示範測試中心 (13:00~15:00)	

參、過程紀要

本次赴日本參加由 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，以及日本除役相關課題為訓練架構外，並以美濱核電廠 1、2 號機及普賢核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，說明日本除役管制與核電廠作業實務現況。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，並與學員進行討論；此外亦安排赴濱岡核電廠、美濱核電廠及普賢核電廠參訪，實地觀察相關現場作業情形。以下分別

摘述課程內容及參訪過程：

一、ANDES 除役訓練課堂課程

(一) 日本核電廠除役現況

本課程由 ANDES 事務局長佐藤忠道先生講授，課程內容包括日本核電廠機組除役現況、日本除役核電廠年表、現行除役核電廠之各階段除役規劃、日本除役法規架構及核准除役計畫之條件與除役階段之安全運轉方案(或稱保安規定「Operational Safety Program, OSP」；以下簡稱 OSP)之架構等。此外，佐藤事務局長說明日本的核能發展和核電廠除役歷程經歷了多個關鍵時刻，這些事件在日本的核能政策和監管環境方面產生深遠影響。在 1982 年至 1996 年，進行日本動力實驗反應器(Japan Power Demonstration Reactor, JPDR)核電廠除役計畫，著重於技術開發，為未來核電廠除役作業奠定基礎，而在 2001 年 12 月東海核電廠成為日本第一部進入除役階段的商用型核電廠。2005 年 12 月日本修訂其除役管制法令(Act on the regulations of nuclear source material, nuclear fuel material, and reactors)，引入核電廠除役的監管框架和廢棄物解除管制系統(Clearance System)，確立核電廠除役的法律管制架構，要求核電廠經營者於核電廠停止運轉時，應拆除核電廠設施，轉移其處理的核燃料物質，清除核燃料物質造成的污染，處理受核燃料物質污染的物料，以及執行其他由原子力規制委員會(NRA)規定之措施。在 Act on the regulations of nuclear source material, nuclear fuel material, and reactors 第 43-3-33 要求業者在機組除役之前先提出計畫書，得到管制機關 NRA 認可後方能進入除役階段。在實務經驗中，除役計畫認可有兩種方式，其中一種方式如東海核電廠及敦賀核電廠 1 號機係以提出涵蓋四個階段的除役計畫申請認可，另外一種方式為階段性申請認可，即每個階段完成後，進入下一個階段前向 NRA 提出申請，核准後方能執行下一階段的除役作業。即使已提出除役計畫書獲得管制機關同意，除役期間若有更改計畫，亦需再重新申請獲准。日本電力公司除了除役計畫依規定須申請核准，還有須遵守除役期間的 OSP，進入除役階段前須將運轉中的 OSP 進行修改，相當於我國除役技術規範。日本核電廠 OSP 詳列相關除役作業細節與規定，經核電廠提送管制機關審核可後據以執行，管制機關亦需定期至核電廠視察，若視察發現核電廠未依照 OSP 執

行，將要求核電廠改正。

日本有 60 部商業核能機組在經歷日本福島 311 事件時，全部停止運轉，至今已有 27 部機組申請重啟運轉，其中 17 部機組經 NRA 審查核准(11 部機組已運轉中，6 部機組準備重新啟動)，另 10 部機組 NRA 仍審查中；其餘 33 部停止運轉機組中，已經進入除役的核電廠機組，分別為東海核電廠、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，以上機組之除役作業狀態如圖 1 所示(另，福島第一核電廠第 1~6 號機屬於特別事故除役機組)。日本除役作業規劃皆區分為四個階段，包含準備階段、反應器周邊設備拆除階段、反應器拆除階段、廠房拆除階段(發生事故的福島第一核電廠將以特案方式辦理除役)。目前日本除役中核能機組除 JPDR 完成除役外，其餘除役機組均在準備階段或反應器周邊設備拆除階段。

Present Situation of Decommissioning NPP in Japan

As of August 2023

Phase	Plant
O Before Approval of DP	0
I Preparation	11 玄海1 伊方1 大飯1,2 伊方2 女川1 玄海2 福島第二1,2,3,4
II Peripheral Dismantling	9 東海 普賢 浜岡1,2 敦賀1 美濱1,2 島根1 文殊
III Reactor Dismantling	Non
IV Building Demolition	Non
V Completed	1 JPDR (1987-1997)

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

圖 1 日本核電廠除役機組現況 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

日本現行放射性廢棄物之管理標準可分為一般、無輻射、解除管制廢棄物(Clearance)、低階放射性廢棄物(分別為 L3、L2、L1 等三級)及高階放射性廢棄物(HLW)，如圖 2。目前日本尚未有就除役產生低階放射性廢棄物(L1~L3)之儲存地點與設施，而位於青森縣六所村(Rokkasho)，由日本核燃料有限公司(Japan Nuclear Fuel Limited，簡稱 JNFL)經營，僅收容運轉中核電廠之低階廢棄物，日本現階段處置低放射性廢棄物仍極具挑戰。日本現階段除役有三大課題，包括除役工期長、拆除之廢棄物處置場所尚未

定案及難以總括性的管理計畫適用於所有業者執行除役作業。因此，預計 2024 年日本將成立新機構以授權來管理所有除役的核電廠，其中亦包含資金的問題，該計畫如圖 3。佐藤事務局長說明除役的責任還是屬電力公司，新機構僅進行統合性管理，目的是讓所有日本除役核電廠順利的進行除役工作。

Decommissioning Waste Clarification in Japan

通称	Class	Volume (ton) 1,100MW BWR	Volume (ton) 1,100MW PWR	Status of achievement
L1	•Intermediate Disposal LLW	100	200	Not Established
L2	•Near-surface Pit Disposal LLW	900	1,800	Existing JNFL disposal facility is only for operating waste
L3	•Near-surface Trench Disposal LLW	11,900	4,100	JAPC Tokai L3 disposal facility 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 2 日本核電廠除役廢棄物分類與處置現況 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

AUTHORIZED CORP FOR SMOOTH DECOMMISSIONING

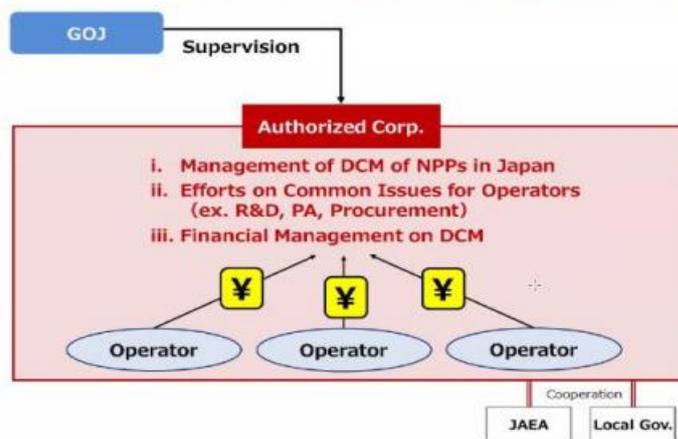


圖 3 日本計畫成立授權管理除役核電廠之機關 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

(二) 除役作業要點

本次「除役作業要點」訓練課程由 ANDES 會長暨福井大學客座教授柳原敏教授講授，內容包括日本除役核電廠的監管、安全規定、運營與除役的差異，以及監管要求等課程，課程內容及討論結果簡述如下：

1. 日本對核電廠除役的監管規定

日本主要的除役法規為 Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors(核原料物質、核燃料物質、及び原子炉の規制に関する法律，通稱：原子炉等規制法)，根據「原子炉等規制法」第 43-3-33 條第 1 款規定，發電用核反應器持照者於運轉發電前，必須撰寫發電用反應器日後除役相關措施之方針(簡稱「除役實施方針」)，並予以公布。其內容包括該發電用反應器拆解、核燃料物質之轉讓、核燃料物質所造成污染之除去、核燃料物質所造成污染物之廢棄等事項。同法第 43-3-33 條第 2 款規定了實施政策內容，包含預期放射性污染的物料數量、估算的除役措施成本及明定資金籌措方法。

核電廠除役相關措施主要規範於「原子炉等規制法」第 43-3-34 條第 1 款中，其內容概述如下：

- (1) 當核電廠持照者計畫對核電廠進行除役時，該持照者必須採取除役措施。有關除役計畫規定，持照者必須預先根據 NRA 的規則條款，制定除役計畫，並獲得 NRA 的審查認可。
- (2) 除役計畫有變更時，仍需根據 NRA 規定送審查認可。
- (3) NRA 得命令已違反前開規定的核電廠持照者，採取必要的措施以防止由核燃料或放射性污染物料引起的災害。
- (4) 在完成除役措施後，核電廠持照者必須獲得 NRA 的確認，以確定措施的結果是否符合 NRA 規定的標準。

除役計畫內容應描述將拆解的設施及拆解方法，須含以下事項：

- (1) 說明除役期間核電廠需持續維護其效能的設備、組件，及其維護週期。
- (2) 核燃料的管理與轉置。
- (3) 清除受到核燃料(放射性物料)的污染。
- (4) 核燃料或受核燃料污染物料的處置。
- (5) 除役處理程序。
- (6) 除役品質管理系統。

除役計畫其附件應包含以下事項：

- (1) 用過燃料已移出反應器爐心之說明文件。
- (2) 除役核電廠設施圖面(Drawings)及除役工區地圖(map)。
- (3) 說明在除役期間輻射曝露的管理重點。
- (4) 在除役過程中由於疏忽、機器或設備故障、地震、火災等可能發生事故的類型、程度與影響的說明文件。

安全監管法(Safety Regulations)為 NRA 對運轉設施管制與監督的工具之一，依「原子爐等規制法」第 43-3-24 條第 1 款規定，動力反應器持照者必須制定安全作業程序，包括以下內容：

- (1) 有關對人員進行運轉安全訓練的規定。
- (2) 運轉前檢查。
- (3) 持照運轉人員的定期檢查。
- (4) 商用核反應器設施現場施工與安裝作業前，需取得 NRA 的核准。

另，隨著除役計畫認可後，除役核電廠可申請豁免項目概略如下：

- (1) 運轉計畫。
- (2) 核反應器總工程師的任命。
- (3) 核反應器定期安全提昇評估。
- (4) 設施管理聲明。
- (5) 老化管理。
- (6) 反應器運轉條件與正常運轉期間要求。
- (7) 核燃料的儲存(當所有核燃料都被移出設施後)。

在除役計畫許可後，運轉相關的規定將會逐漸豁免其規定。即反應核電廠進入除役階段，其運營需求與風險發生改變。除役設施維護/定檢將僅限於「除役實行政策」中的指定設施，以及對反應器設施的措施，將僅限於除役計畫執行過程將發生的重大事故或大規模損壞事件。

2. 運轉與除役之間的差異與適切監管要求

核電廠的除役活動是一個長期的過程，而監管應該隨著這些活動的不斷進展而變得更加實際與靈活，依照各階段作業風險，採用分級監管方法，以確保在不同階段實施適切的監管。監管的放寬反映核電廠生命週期的變化，並且有助於減少不必要的負擔。然而，這也需要確保放寬的監管不會影響到核電廠對公眾健康與安全及環境生態的影響，因此必須仔細考慮除役計畫的細節與風險管理(如圖 4)。

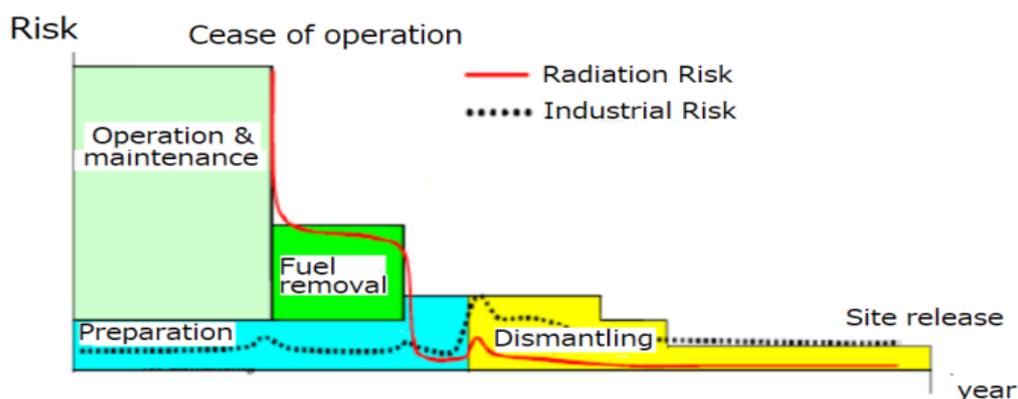


圖 4 除役期間風險隨除役活動的進展 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

考量核電廠營運期間與除役期間生命週期的差異(如圖 5)，營運期間著重於設備維護以確保其安全運轉與功能。相比之下，除役期間著重於管理除役活動，其中包含專案管理與物料管理。在考慮核電廠除役活動的風險變化與除役相關法規規定，應具備以下適當的監管要求：

(1) 充足的除役資金準備

建立適切的除役基金，確保在除役期間有足夠的資金資源，以支持除役期間相關作業的執行與除役成本。

(2) 適當的除役時程架構(timeframe)

制定合理的除役時程架構，以確保除役作業在預定的時間內完成，包括設定項目的期限與期程，以確保除役計畫得以有效實施。

(3) 利害關係人的參與

確保各利害關係人參與除役決策，包括政府機構、當地社區、環境組織與核能業界等，有助於確保決策是全面、透明，並充分考慮各方的立場。

(4) 除役資訊公開

提供有關除役計畫及活動的相關資訊，以便公眾與相關利害關係人能夠了解除役進展與相關風險。透明的資訊揭露有助於建立信任。

(5) 獲取管制知識與資訊

確保監管機構具有足夠的知識與資訊，以有效監管除役活動。持續學習與知識更新是維持有效監管的重要組成部分。

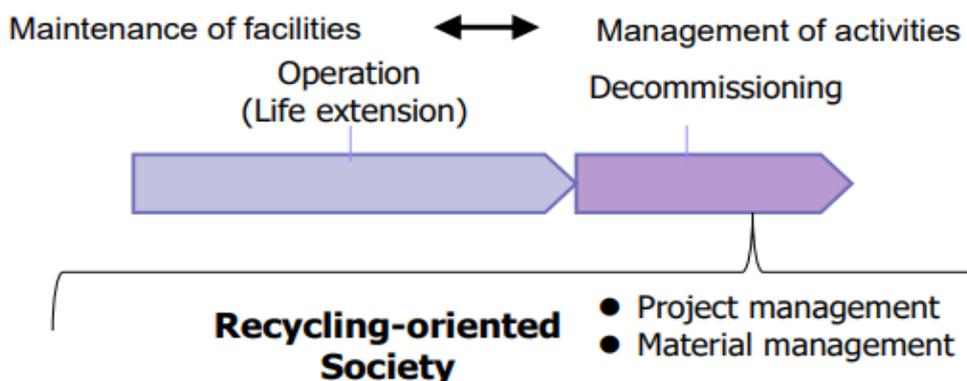


圖 5 核電廠營運期間與除役期間生命週期的差異 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

(三) 除役相關輻射防護

本次訓練課程中，「除役相關輻射防護」主題由 ANDES 事務局長佐藤忠道先生講授，內容包括除役階段之輻射防護、輻射防護人力的變化等課程，課程內容及討論結果簡述如下：

1. 除役階段之輻射防護

本次課程介紹日本核設施運轉階段與進入除役階段之關鍵差異(圖 6)，日本參考 IAEA TRS/No.420 「核設施由運轉到除役的轉變」報告(Transition from Operation to Decommissioning of Nuclear Installations)的建議，分別就設施狀態、作業環境和作業人員之改變等，其管制的作為也要因應除役管制差異而修改。

對於設施狀態部分，運轉期間係系統化管理，而除役階段係依據物料及放射性類別集中管理，並儘量達到放射性廢棄物最少化；作業環境部分，運轉期間的輻射管制區界定較為明確，而除役階段因作業環境時常改變，就無法明確界定管制區，而且低污染區的界定涉及解除管制，重要性相對提高；另針對作業人員部分，運轉期間係以發電營

運為主導，而且作業大多為例行反覆的工作，而除役階段係以各項細部拆除作業為主導，單次性且獨特性的作業，會需要新的專業與訓練，且除役活動與除役廢棄物管理，需增加輻射偵檢與劑量評估等作業，需增加解除管制標準相關輻射偵檢技術的專業人員訓練。

輻射防護的共通性，也是除役作業的共通性。因此，除役過程中輻射防護考量事項如下：

- (1) 非穩定性：在除役階段風險、危害、輻射源、工作程序與設備狀態等因素會隨著時間而變化，因此輻射防護計畫需要針對工作環境的變化進行管理、審查與全面優化。另，除役過程中應特別注意非輻射性危害(non-radioactive hazards)，例如石棉，以確保這些危害不被忽略。
- (2) 人員訓練的重要性：除役階段更依賴人員行為及專業知識，以及經驗回饋(包含工程屏蔽及標準程序等)，因此人員訓練於此階段有其重要性。另訓練宜善用數位技術的優勢，安裝遙控設備、局部排風設備等作業前時，需要進行模擬培訓，以確保工作人員的安全及有效執行作業。
- (3) 溝通的重要性：由於除役工作主要是現場工作，溝通變得至關重要。需要建立有效的溝通管道，包括業者與承包商之間、輻射管理者與現場管理者(radiation manager and the site manager)之間，以及現場經理與工作人員(site manager and the workers)之間的溝通。
- (4) 知識傳承：包括新員工與經驗豐富的員工之間的知識傳遞，以及世代間的知識傳承，特別是在核電廠推遲拆解的情況下，將有助於理解危害、設備歷史等重要資訊。
- (5) 不受現有方法束縛：**(a)**變更輻射管制區，對於順利進行臨時廢物儲存非常有利。在最終處置設施準備就緒之前，建立新的貯存設施作為緩衝，以確保廢棄物的臨時貯存；**(b)**引入各種新技術，以提高除役工作的效率及安全性並減少風險，有助於應對新挑戰，如機器人與遙控操作、數位技術及人工智慧等新技術。

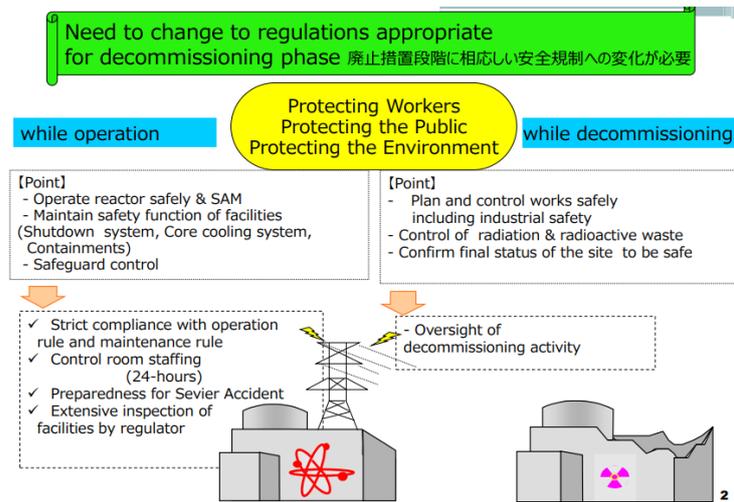


圖 6 核設施例行運轉與除役階段之關鍵差異示意圖
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

2. 輻射防護人力的變化

核電廠除役期間，並不是人力縮減，需針對除役各階段，調整不同專業人力的需求，尤其是增加輻射防護的業務量。除役階段雖然對於運轉、維護和安全人員將逐步取消，總體人數可能減少，但是輻射防護與廢棄物處理的專業人員會增加，尤其是解除管制之輻射偵檢技術的專業人力，需求會大增，核電廠也會對輻射偵檢技術專業，進行訓練與核電廠內部證書的核發。

另外，詳細的合理抑低(As Low As Reasonably Achievable, ALARA)計畫，有助於儘量減少輻射劑量，應包括以下元素：

- (1) 說明執行拆除的輻射工作場所與管制區；
- (2) 說明管制區中的結構、系統與組件(SSC)，以及明確指示哪些 SSC 將被拆解，哪些不會被拆卸(作為風險考慮的基礎)；
- (3) 描述開始作業的條件(例如，系統的電氣安全狀態、壓力釋放、部分系統的隔離或持續運轉系統、預備輻射除污、通風狀態等)；
- (4) 執行拆除作業或項目，以及安全作業程序以避免負面影響；
- (5) 詳細的輻射特性調查數據；
- (6) 主要的工作順序，包括指定的切割、運輸、輻射保護及其他設備，與可能影響人員輻射曝露的詳細步驟；

- (7) 運輸路線和設備；
- (8) 管制區的進入方式，包括氣閘(air locks)；
- (9) 緊急情況與救援路線；
- (10) 監測器、取樣器與其他輻射防護設備的列表，以及防護設備的選擇及規劃；
- (11) 特定設備的詳細分配，用於輻射相關工作步驟；
- (12) 需要調整固定或移動輻射防護監測器的細節(例如，變更劑量率監測器或氣溶膠監測器的警報標準)；
- (13) 考慮特定風險、潛在事件及計畫的應變措施；
- (14) 考慮在計畫中的 ALARA 措施列表，以及在作業過程中輻射防護與環境監測措施。這可能與選擇可以最小化污染釋放，但在物料與物體幾何方面存在限制的切割設備有關。需要考慮輻射防護措施 (例如，是否需要進一步的局部過濾通風)；
- (15) 人員的簡報和指導，特別是關於拆除區域的特性，例如輻射狀況、可用空間、關鍵作業步驟；
- (16) 對作業步驟與整個工作包(work package)之內部、外部個人及集體劑量的估算。分別估算參與人員的劑量(例如，輻射防護人員、拆除人員、監督人員)；
- (17) 對劑量估算進行評估，以符合劑量限值及其他規劃值。工作和作業步驟的持續時間估算包含一些保守性，以允許和鼓勵“安全而正確”的作業，而不是“快速而粗糙”的作業；
- (18) 劑量估算不僅限於拆解，還包括拆解前的準備作業、拆解後的清理和與廢物處理相關的活動。後者通常是工作包的一部分，直到廢棄物轉交給預定的廢物收集區；
- (19) 定義與說明輻射的劑量分布、圖表和圖片。

(四) 除役相關核子保安與緊急應變

本次「除役相關核子保安與緊急應變」訓練課程由日本福井大學核子工程研究所的井口幸弘教授講授，其曾任普賢核電廠副廠長，負責督導核子保安和緊急應變整備作業，並將其相關經驗與學員分享。普賢核電廠決定除役後，井口教授就負責普賢核電

廠除役計畫的規劃。

本次課程主要介紹日本核電廠在除役過程中核子保安與緊急應變整備的轉變，整體課程分 3 大部分：

1. 用過核子燃料冷卻要求的轉變。
2. 除役中核電廠的緊急應變整備。
3. 除役中核電廠的核子保安。

課程內容講授結束後，井口教授邀請學員發問及討論，透過互相回饋的過程中更能清晰地了解，核電廠在除役過程中的管制轉變的要求與除役進程。

1. 用過核子燃料冷卻要求的轉變

以普賢核電廠為例，用過燃料池中有 466 束用過核子燃料，除役期間用過燃料池的管理要求，正常情況下，用過燃料池水位維持在警戒限值以上，經評估在沒補水的情況下，至少要 10 天水位才會下降至警戒限值。另外經實測及分析結果，在沒有冷卻系統運轉下，池水的水溫皆低於規範限值以下。

有關緊急事故方面，保守分析用過燃料池內完全沒有水的假設下，僅靠空氣對流冷卻，燃料的溫度要求維持在 250°C 以下；同樣在完全沒有水的假設下分析天空散射 (Skyshine)，計算用過燃料池內燃料對環境輻射的影響，在離普賢核電廠東方 780 公尺人口較稠密處，輻射劑量率為 0.0279 微西弗/小時，符合日本法規限值。另，經模擬分析，燃料池內完全沒水的情況下，依據人口、距離及地形選取的幾個地點進行評估，輻射劑量率與燃料溫度皆在法規限值與 250°C 內，因此緊急事故等級可以降低。

當燃料池的用過核子燃料可移出時，燃料池的冷卻系統即可開始移除，或部分移除。雖然大部分有關燃料池的冷卻系統設備都可以拆除，但是廢液處理系統還是需要保留。另外做為緊急電源的柴油發電機，已更換為容量供給比較小的發電機(由 1 台 5.25 MW 換為 2 台 1.2MW)。冷卻用的海水泵有 4 台，已撤掉 3 台；在除役的過程中，將不需要的設備先隔離，再陸續撤除。

2. 除役中核電廠的緊急應變整備

在日本有關核子事故緊急應變法的發展，最上位的法規是災害對策基本法，該法

係自 1961 年就開始施行，規範全面性的災害基本法。在 1999 年發生了東海村事故(JCO)後，促成了針對核子事故緊急應變整備的法律制定。

日本核子事故災害等級分類，對不同狀態，有不同因應等級，這部分與我國類似。依事故嚴重程度依序為緊急戒備事故(Alert)、廠區緊急事故(Site Area Emergency)及全面緊急事故(General Emergency)。

一般來說，核設施所在都道府縣發生 6 級以上地震就進入緊急戒備事故；當冷卻水大量流失、喪失所有 AC 電源就進入廠區緊急事故；若失去所有的緊急 DC 電源和停機功能就進入全面緊急事故。

因應不同的核子事故狀態，有不同應變對策，有關核子事故緊急應變優先區域分為 PAZ(Precautionary Action Zone)及 UPZ(Urgent Protective Action Planning Zone)；PAZ 指已做好預防性防護措施的區域，一旦宣布進入全面緊急事故，該區域內的居民應立即撤離，且原則上每個人都會發放碘片，準備服用；UPZ 屬緊急防護措施準備的區域，一般來說，居民會先在室內避難，並根據核電廠事故的發展做好隨時撤離或暫時搬遷的準備，並也會提供碘片，依照命令隨時準備服用。

除役期間，以普賢核電廠為例，假使燃料完全沒有冷卻水覆蓋也不會達到溫度限值(250°C)，就可以向管制機關申請，變更緊急應變區域的範圍，除役核設施在獲得管制機關許可後，UPZ 可降為 5 公里，且不需劃設 PAZ。另，日本管制機關對於許可核電廠變更緊急應變區域範圍，有 3 個原則：

- (1) 燃料護套要完整(即使沒有冷卻水)；
- (2) 不會產生臨界；
- (3) 輻射對周遭環境影響非常小。

3. 除役中核電廠的核子保安

(1) 核子保安

核子保安的定義是：防止、偵知和應變涉及核物料、其他放射性物質或核設施的盜竊、破壞、未經授權的進入、非法轉讓或其他惡意行為。具體來說，是為了防止濫用核物料的恐怖攻擊，及以下四種威脅而採取的措施：

- A. 透過竊盜獲得核武器。
- B. 使用竊盜的核物料製造核爆裝置。
- C. 製造輻射彈(髒彈)。
- D. 攻擊或破壞核設施或核物料的運輸工具。

實體防護包含於核子保安之中，核子保安的概念除了保護核物料和核設施外，還須保護放射性物質、防止利用核物料和放射性物質從事非法活動以及發生非法活動後的應變措施。

(2) 資通安全

核設施的資通安全主要分為資訊的保護以及網路安全，在資訊保護部分，與核子保安相關的資訊，依重要性區分為管制及機密兩類，管制資訊不得洩漏，主要是基於保護而非保密之目的進行管理，受過教育訓練的人員始得存取，需要保密的資訊會被歸類為機密等級，只有被授權的人員可以存取；在網路安全部分，核子保安必要之設備需要與網際網路進行實體隔離，以避免直接的入侵及破壞，重要設備之供應商都要進行可信度查核，以防止設備在製造或檢修時受病毒影響或破壞，且需要訂定資通系統安全計畫，以確保在資通系統受到威脅或破壞時能及時進行應變作業。

(3) 針對內部威脅的對策

內部威脅的定義係設施人員因為工作職責關係，能夠存取、了解和掌握核設施、核物料等相關機敏資訊，而所施行的惡意行為對核子保安構成威脅，或者因威脅、網路釣魚攻擊等可能，迫使違背意願施行惡意行為而成為內部威脅。

在核設施內工作員工的個人行為造成核物料實體防護的威脅稱「內部威脅」。核電廠透過個人可信度調查、兩人規則、存取控制及宣導核安文化等措施，降低內部威脅的風險。內部威脅無法透過外部威脅的對策來預防，因為：

- A. 員工可依正當的程序取得物品入廠及隨身攜帶物品的許可。
- B. 員工無需越過圍籬即可入侵，因此不會被入侵偵測或監控設備發現。

透過「個人可信度調查」降低內部威脅的風險，「個人可信度調查」係針對恐怖主義、黑幫、酗酒、毒品等相關事項，根據個人資訊、自我報告及面談等，確認是否存在

破壞或洩露機密資訊風險的制度。對進入保護區的人員(如進入控制室、維護運轉人員及核子保安工作相關人員)或負責處理核設施機敏資訊的人員進行調查。

(五) 拆除廢棄物的管理

本次訓練課程中有關「拆除廢棄物的管理」主題由日本福井大學核子工程研究所的井口幸弘教授講授，內容包括日本核電廠除役廢棄物處置、普賢核電廠除役廢棄物管理與經驗回饋、普賢核電廠廢棄物解除管制經驗等課程，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：

1. 日本核電廠除役廢棄物處置

核電廠除役是將運轉發電時期有污染的營運設施轉為廢棄物(或分離出有價值的物料)，並加以妥適貯存、處理(或再利用)等處置過程。當核電廠廠房設施拆除廢棄物有明確之最終場所，可更加妥適規劃除役拆除方法及期程；又，拆除廢棄物尺寸符合廢棄物貯存容器及處置容器的大小，為裝載運送廢棄物重要技術管理考量；除役拆除廢棄物在不同程度之放射性污染情形，需對廢棄物進行分類管理，並避免增加二次廢棄物，同時需建立放射性廢棄物產出至最終處置階段可追溯之追蹤管理資料體系。此外，對於放射性廢棄物處理及處置原則，需考量污染者付費原則、合理處理/處置原則、廢棄物最小化原則，以及基於相互理解的實施原則等。

(1) 日本放射性廢棄物類型

日本低放射性廢棄物(LLW)依所含核種及其來源分為 5 類(圖 7)，分別為 L1 級廢棄物、L2 級廢棄物、L3 級廢棄物、TRU 廢棄物、及含鈾廢棄物，其中 L1、L2、及 L3 級廢棄物產自核電廠，TRU 廢棄物多來自核燃料再處理程序及 MOX 混合燃料製造程序，含鈾廢棄物多來自鈾濃縮程序及核燃料製造程序。各類放射性廢棄物處置由負責各類廢棄物的實體分階段進行。

高放射性廢棄物(HLW)則為產生自核燃料再處理程序之玻璃固化廢棄物，因為用過核子燃料(SF)在日本可進行再處理程序，並可製成 MOX 混合燃料再使用，故 SF 在

日本不屬於高放射性廢棄物。

高/低放射性廢棄物以外可解除管制(Clearance)廢棄物，是將低於解除管制標準的廢棄物，視同一般事業廢棄物予以處理、處置及再利用。

Waste Type		Example of Waste	Where Generated	Treatment Method
Low-level Radioactive Waste	Power plant waste	Waste having an extremely low radioactive level L3	Concrete, metal, etc.	Trench disposal
		Waste having a relatively low radioactive level L2	Solidified liquid waste, filters, used tools, materials and consumables	Pit disposal
		Waste having a relatively high radioactive level L1	Control rods, reactor structures, etc.	Medium depth disposal
	Uranium waste	Consumables, sludge, used tools and materials	Uranium enrichment and fuel fabrication plant	Medium depth disposal, pit or trench disposal; in some cases, deep geological disposal
	Transuranic (TRU) radioactive waste	Parts of fuel rods, liquid waste, filters	Reprocessing facilities, MOX fuel fabrication facilities	Geological, Medium depth disposal or pit disposal
High-level Radioactive Waste L0		Vitrified waste	Reprocessing plant	Geological disposal
Waste below clearance level		Most of the waste from demolition of nuclear power plant	All power plants indicated above	Reuse or dispose of as general garbage

圖 7 日本放射性廢棄物及處置方法分類 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

(2) 放射性廢棄物分類、處置方法、估算數量

日本對於放射性廢棄物分類及處置方法如圖 8，各類級廢棄物如下：

A. L1 級廢棄物：中地層處置

活度濃度評估標準為： $\text{Co-60} > 10^{15} \text{ (Bq/ton)}$ $\text{Cs-137} > 10^{14} \text{ (Bq/ton)}$

B. L2 級廢棄物：近地層處置窖

活度濃度評估標準為： $10^{10} < \text{Co-60} \leq 10^{15} \text{ (Bq/ton)}$ $10^8 < \text{Cs-137} \leq 10^{14} \text{ (Bq/ton)}$

C. L3 級廢棄物：近地表處置壕溝

活度濃度評估標準為： $10^5 < \text{Co-60} \leq 10^{10} \text{ (Bq/ton)}$ $10^5 < \text{Cs-137} \leq 10^8 \text{ (Bq/ton)}$

D. 解除管制(Clearance)廢棄物：

活度濃度評估標準為： $\text{Co-60} \leq 10^5 \text{ (Bq/ton)}$ $\text{Cs-137} \leq 10^5 \text{ (Bq/ton)}$

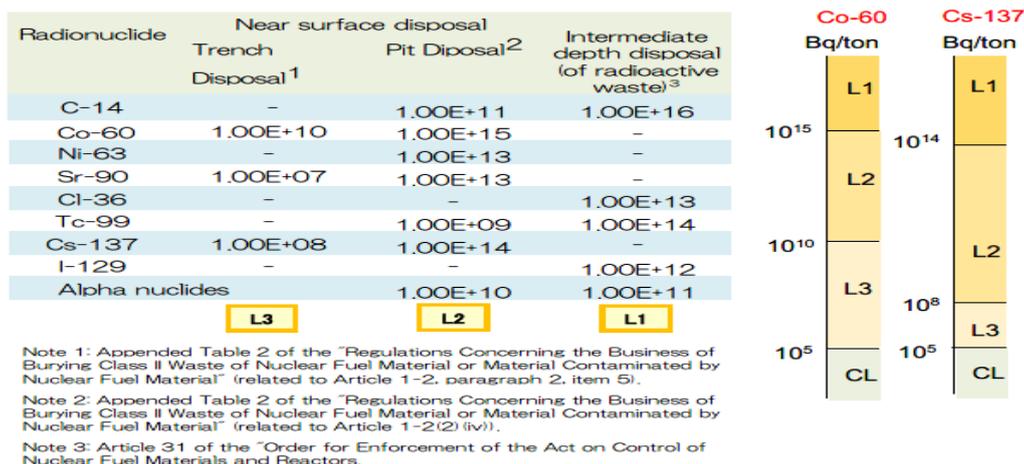


圖 8 核種濃度分類及處置方法 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

(3) 日本核電廠除役廢棄物數量

日本國內 57 部核反應器(含除役)產生之廢棄物數量及分類(圖 9)，L1 級廢棄物約有 8000 噸，L2 級廢棄物約有 63000 噸，L3 級廢棄物約有 380,000 噸，合計約 45 萬噸低放除役廢棄物，約為除役廢棄物總量 2%。解除管制(Clearance)之廢棄物約產生 890,000 噸，約為除役廢棄物總量 5%。非放射性廢棄物約產生 18,500,000 噸，約為除役廢棄物總量 93%。依重量百分比而言，核電廠除役之低放廢棄物約佔 2%、解除管制廢棄物約佔 5%、非放射性廢棄物約佔 93%，合計共 100%。由此類估算統計結果可知核電廠除役產生之廢棄物，以非放射性廢棄物達九成以上佔最多數，低微污染廢棄物經適當除污作業或自行衰變後符合解除管制標準者可達 5%，低放射性廢棄物數量約為 2~3%。

由此統計資料可以得知，落實核電廠除役廢棄物減量作法為必要之放射性廢棄物管理手段，可以減少潛在放射性廢棄物數量達實際放射性廢棄物數量二倍以上，既可以減少放射性廢棄物管理及貯存的費用，也可以降低最終處置設施容量設計需求及建造維護經費，誠為除役廢棄物管理應優先考量採用之措施。

classification	Total commercial nuclear power plants (57 plants)	
L1	Ca.8,000	LLW Total: Ca.150,000 ⇒ca.2%
L2	Ca.63,000	
L3	Ca.380,000	CL:Ca.5%
CL	Ca.890,000	
NR	Ca.18,500,000	NR:Ca.93%
Total	Ca.20,000,000	Total: 100%

圖 9 日本核電廠除役廢棄物估算數量 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

2. 日本放射性廢棄物處置與管理

日本放射性廢棄物處置設施近況如圖 10 所示，說明如下：

Radioactivity level classification	Method	Regulatory system	Operating status, etc.	
L3 Waste (Very low level)	Near surface Trench disposal	Established	JAEA JPDR VLLW disposal was demonstrated at Tokai, Ibaraki. (Closed)	
			JAPCO Tokai is under licensing review. Each utility individually consider own L3 facility.	
L2 Waste (Low level)	Sub-surface Pit disposal	Established	Current JNFL facilities have been operated for only operating waste at Rokkasho, Aomori.	
L1 Waste (Relatively high level)	Intermediate depth disposal with artificial structure	Almost Established, Standard guides are under development	Ground investigation, etc. had been surveyed by JNFL.(referred from JNFL Website)	

圖 10 日本放射性廢棄物處置設施近況 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

日本對於 L3 級廢棄物處置場以近地表壕溝方式加以處置，日本原子力研究開發機構(JAEA)在茨城縣東海村建置日本動力實驗反應器(JPDR)之極低微廢棄物(VLLW)處置場(如圖 11)，用以處置 L3 級廢棄物，目前該處置場已經停止使用。日本原子力發電公司(JAPC)也計畫在東海村附近建置一座極低微廢棄物(VLLW)處置場，其申請許可證由管制機關審查中。



圖 11 JPDR 之 VLLW 處置場
(圖片來源 ANDES 訓練資料)



圖 12 青森縣六所村近地層處置窖
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

對於 L2 級廢棄物處置場，則以近地層處置窖方式加以處置，日本 JNFL 已經在青森縣六所村建置近地層處置窖(如圖 12)，用以處置核電廠營運所產生之 L2 級廢棄物，該處置場目前設有 1 號處置設施及 2 號處置設施，營運許可總容量為 124,672 立方公

尺(約 623,360 個 200 公升廢棄物桶)，目前正向政府申請設置 3 號處置設施。

另有關 L1 級廢棄物處置場，則以中地層處置方式加以處置，日本目前尚未建置完成此類廢棄物處置場，僅由日本 JNFL 進行地質調查階段。

對於目前日本就 L1、L2、L3 級廢棄物處置近況，分述如下：

(1) L1 級廢棄物處置近況

日本核電廠 L1 級廢棄物來源依核電廠類型不同而不同，沸水式核電廠(BWR) L1 級廢棄物來源約為控制棒、通道箱、廢樹脂、反應器壓力容器內結構物等，壓水式核電廠(PWR) L1 級廢棄物來源約為控制棒、廢樹脂、反應器壓力容器內結構物、反應器附近混凝土等，普賢核電廠(ATR) L1 級廢棄物來源約為控制棒、壓力管、反應器壓力容器內結構物等。

以濱岡核電廠 2 號機反應器壓力容器(RPV)為例(圖 13)，該反應器機組為沸水式反應器(BWR)，反應器壓力容器高約為 22 公尺，容器上半部可分類為 L2 級廢棄物，容器下半部則分類為 L1 級廢棄物。

L1 級廢棄物因劑量較高，故將反應器壓力容器上方格架、爐心支撐板拆除並裁切適當尺寸後，放置於專屬盛裝容器先加以暫時貯存。該貯存容器由厚約 5 公分鋼板焊接而成，容器外部尺寸為長寬高各 1.6 公尺之立方體(或高為 1.2 公尺)，容器體積約 3~4 立方公尺，內部可加適當屏蔽，最大重量為 28 噸，容器內部添加填充物質議題尚在研議中未定案。

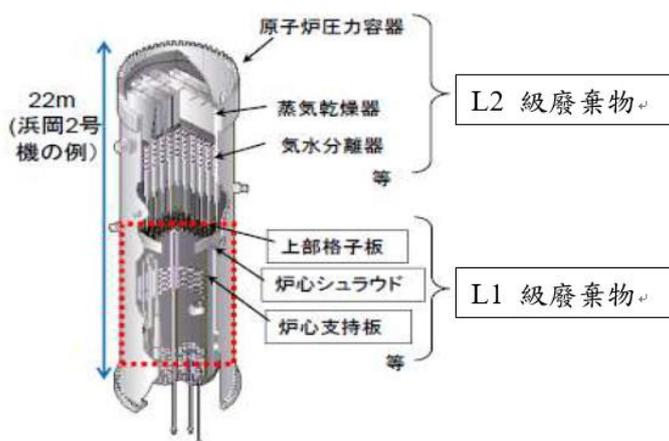


圖 13 濱岡核電廠反應器壓力容器剖面圖及其廢棄物分類
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

日本 L1 級廢棄物必須以中地層處置設施加以處置，其設計原則必須滿足處置設施之封閉性、核種遷移控制性、及輻射屏蔽需求等；同時，透過抑制放射性物質的遷移，減少對地表的影響。

關於由於人類活動引起的事件，基本方針是當放射性濃度尚未充分衰減期間，可透過工程方式減少輻射曝露風險的措施，防止人為事件發生或降低其發生的可能性。

從中地層處置設施概念圖可以看出(如圖 14)，處置坑實體底部及側邊與坑道之間填充鋼筋混凝土，實體上部與坑道之間則填充膨潤土混合物。處置實體內放置 L1 級廢棄物盛裝容器，可堆疊達 4 層容器高度，將 7 個盛裝容器串連後約 14 公尺長成為 1 個處置單元。

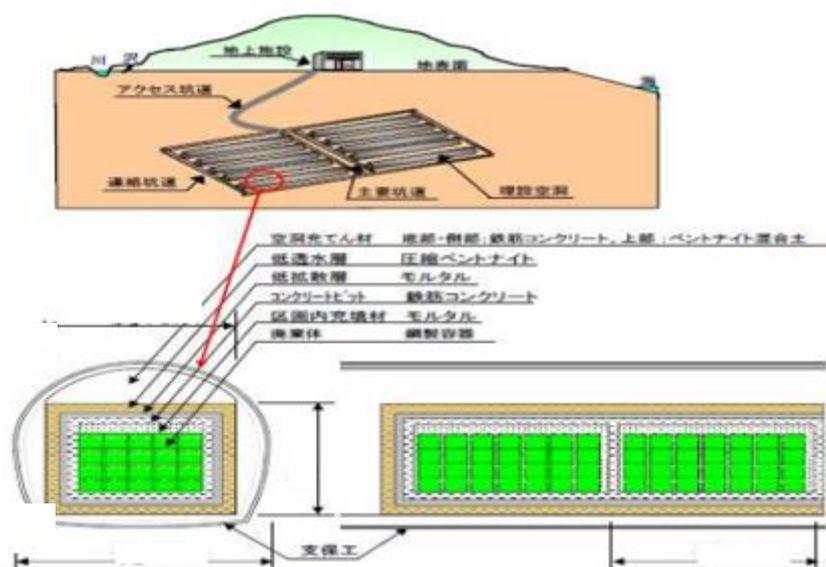


圖 14 中地層處置設施概念圖
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

(2) L2 級廢棄物處置近況

日本核電廠 L2 級廢棄物來源依核電廠類型不同而不同，BWR 核電廠 L2 級廢棄物來源約為反應器壓力容器、蒸汽產生器、汽水分離器等，PWR 核電廠 L2 級廢棄物來源約為反應器壓力容器、蒸汽產生器等，普賢核電廠 L2 級廢棄物來源約為鐵水屏蔽體、廢樹脂等。

同樣以濱岡核電廠 2 號機反應器壓力容器為例(圖 13)，該容器上半部分類為 L2 級廢棄物，將蒸汽產生器、汽水分離器等組件拆除並切割適當尺寸後，裝入尺寸同為長寬

高各 1.6 公尺(或高為 1.2 公尺)之盛裝容器,容器內部不考慮加裝屏蔽或添加填充物質。

目前日本六所村低放處置場接收核電廠營運發電所產生的 L2 級廢棄物(如圖 12), 1 號處置設施於 1992 年 12 月開始營運,處置容量約 204800 桶廢棄物,截至 2023 年 3 月止共處置 149803 桶 L2 級廢棄物;2 號處置設施於 2000 年 10 月開始營運,處置容量約 207360 桶廢棄物,截至 2023 年 3 月止共處置 195112 桶 L2 級廢棄物。

(3) L3 級廢棄物處置近況

JAEA 日本動力實驗反應器(JPDR)之極低微廢棄物(VLLW)處置場位於茨城縣東海村,用以處置 L3 級廢棄物,1993 年 10 月開始申請執照,1995 年 6 月獲得許可,用以處置 JPDR 除役拆解所產生的極低微廢棄物,處置場示意圖如圖 15 所示。從 1995 年至 1997 年共約接收 1670 噸廢棄物,完成建立管制區、監測區、輻射監測、巡邏及檢查等作業。

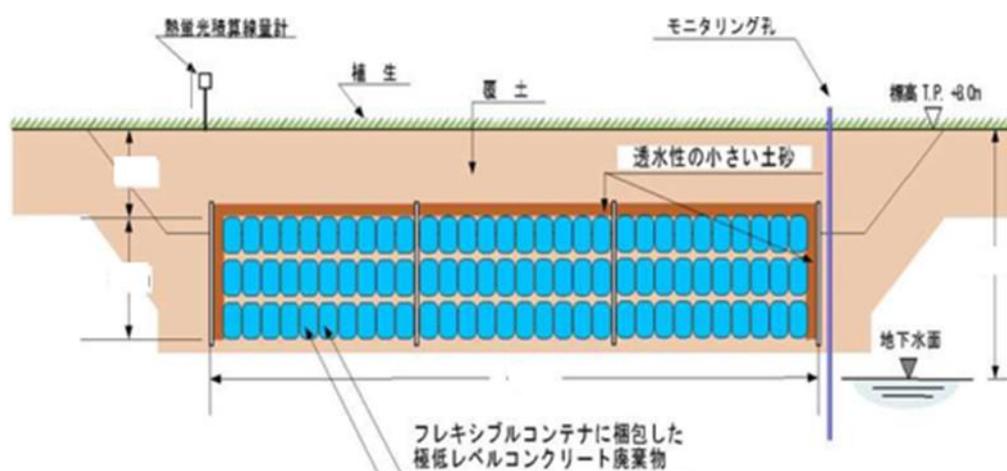


圖 15 JPDR 極低微廢棄物(VLLW)處置場示意圖
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

圖 16 至圖 20 為 JPDR VLLW 處置場實際作業圖,圖 16 為處置壕溝外觀,圖 17 為太空包內裝有混凝土等廢棄物並標示輻射標誌,圖 18 及圖 19 為處置壕溝放滿太空包廢棄物後,於上方覆土並夯實,圖 20 為處置壕溝完工圖。目前該處置場已經停止使用。

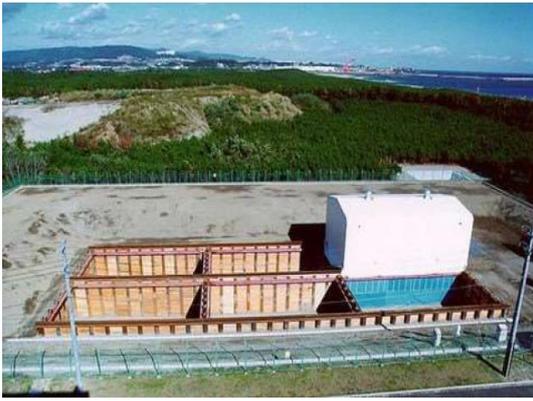


圖 16 JPDR VLLW 處置場外觀



圖 17 太空包盛裝有混凝土等廢棄物並標示輻射標誌



圖 18 處置壕溝放滿太空包廢棄物後於上方覆土



圖 19 處置壕溝覆土層夯實



圖 20 處置壕溝完工

(16 至 17 圖片來源 ANDES 訓練資料)

日本原子力發電公司(JAPC)計畫在茨城縣那珂郡東海村建置一座 L3 級廢棄物處置場，已於 2015 年 7 月向 NRA 申請設置，地點在東海第二核電廠附近，處置容量為 16000 噸，包括廢金屬處置容量 6100 噸，大型廢混凝土塊處置容量 9400 噸，小型廢混凝土塊處置容量 500 噸，設施示意圖如圖 21，設有地下水監測設備，作業壕溝、及具

防水入滲功能作業單元。其申請許可目前仍由管制機關審查中。

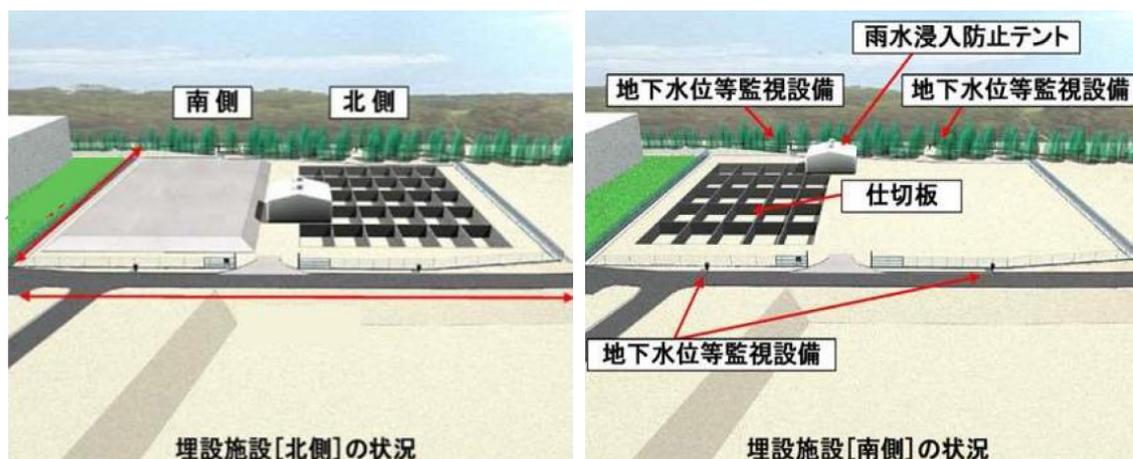


圖 21 JAPC L3 級廢棄物處置場示意圖 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

日本多座核電廠已經進行相關除役計畫作業，但只有日本動力實驗反應器(JPDR)已經完成除役計畫。在日本，低放射性廢棄物分為 L1 級廢棄物、L2 級廢棄物、及 L3 級廢棄物等三類進行處置，六所村最終處置設施目前只接收核電廠發電營運所產生之 L2 級廢棄物，日本目前並沒有專為除役拆除廢棄物設置的最終處置設施。這個事實也導致除役規劃過程耗時較長且一再延後，為了能適當推動除役計畫作業，必須確認除役放射性廢棄物之最終處置去處。

因此，首要任務是確保除役拆除廢棄物的處置設施，就如同確認用過核子燃料的最終去處一樣。此外，還需要制定處置技術相關規範標準。

3. 普賢核電廠廢棄物管理與經驗回饋

依據普賢核電廠提報除役計畫內容，其除役廢棄物管理體系如圖 22 所示，濃縮廢液、過濾污泥、粉狀廢樹脂、及粒狀廢樹脂，先經由減容安定化處理，再經過水泥攪拌固化成均質固化體後，運送至貯存庫貯存。惟若部分污泥、粉狀廢樹脂、或粒狀廢樹脂不適合減容安定化處理或進行固化程序，則直接裝桶運送至貯存庫貯存。可燃固體廢棄物則以批次方式進行焚化處理，焚化後產生之灰渣，可經由固化程序裝桶後，運送至貯存庫貯存。不可燃固體廢棄物以廢金屬及廢混凝土塊為大宗，廢金屬經分類後切割成適當尺寸，視廢棄物特性進行除污作業，或進行壓縮減容與其他安定化處理措施，也視需要在盛裝容器內填充砂漿或砂子。此類廢棄物多為 L2 級廢棄物及 L3 級廢棄物。

廢混凝土塊視需要進行除污作業，也可於廢料桶內填充砂子，此類廢棄物多為 L3 級廢棄物。另有關控制棒等廢棄物則多屬於 L1 級廢棄物。另外非放射性廢棄物或物品(NR)，視需要經簡易除污並經量測放射性濃度確認無污染後，可視同一般事業廢棄物進行處理、處置或再利用。

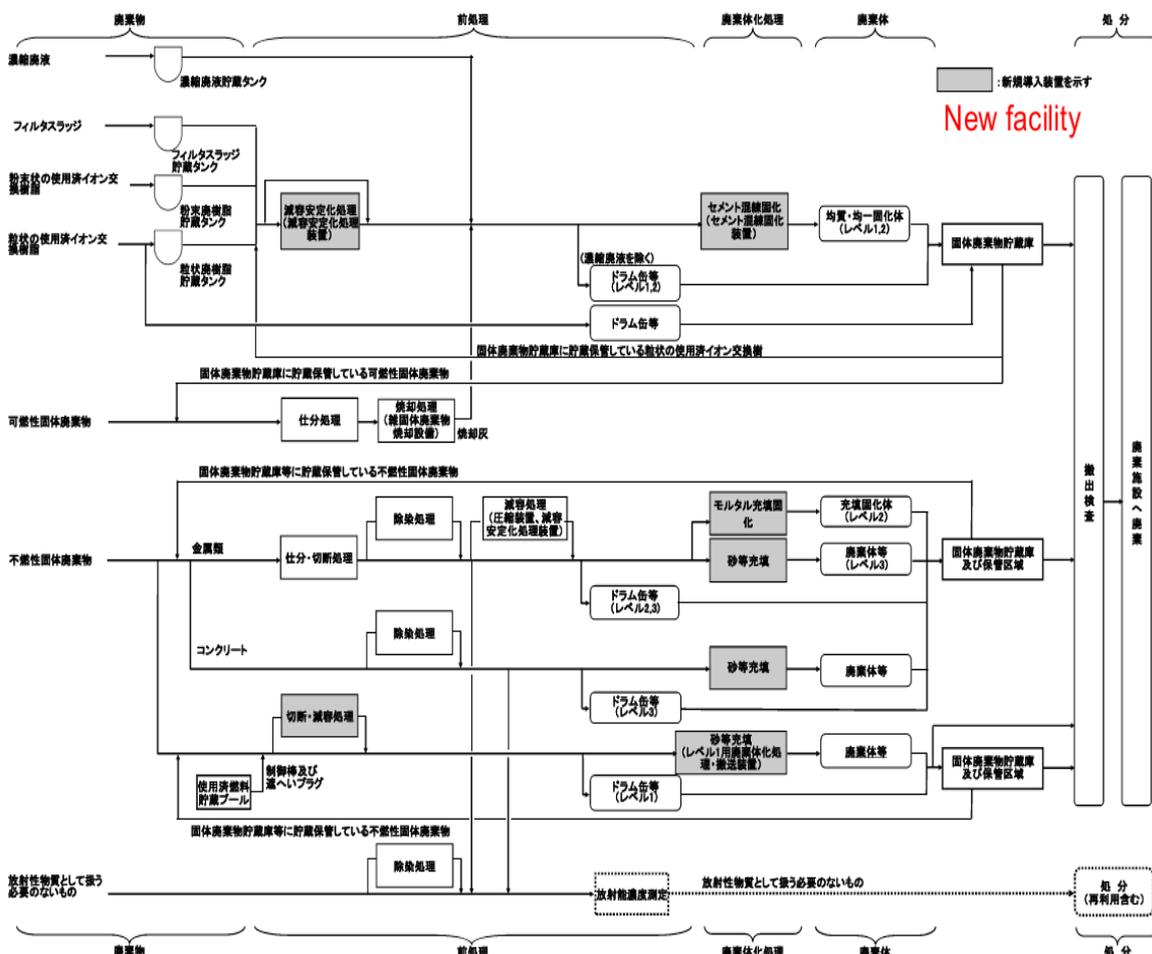


圖 22 普賢核電廠除役廢棄物管理體系 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

另普賢核電廠因為執行除役計畫所產生之除役廢棄物，與運轉發電時產生之廢棄物在質與量上均有所差異，故規劃新增建廢棄物處理設施(如圖 23)，以妥善管理除役廢棄物。

其中減量及安定化設備處理過濾污泥及廢樹脂等廢棄物，焚化爐處理可燃廢棄物，焚化灰渣、安定化廢棄物、及濃縮廢液再以水泥混合固化後裝桶，運送至貯存庫存放。不可燃固體廢棄物則先經由廢棄物分選機予以分類，以砂漿固化後裝桶，運送至貯存庫存放。貯存庫中之廢棄物桶待處置設施建置完成後，再運送至處置設施進行最終處置。

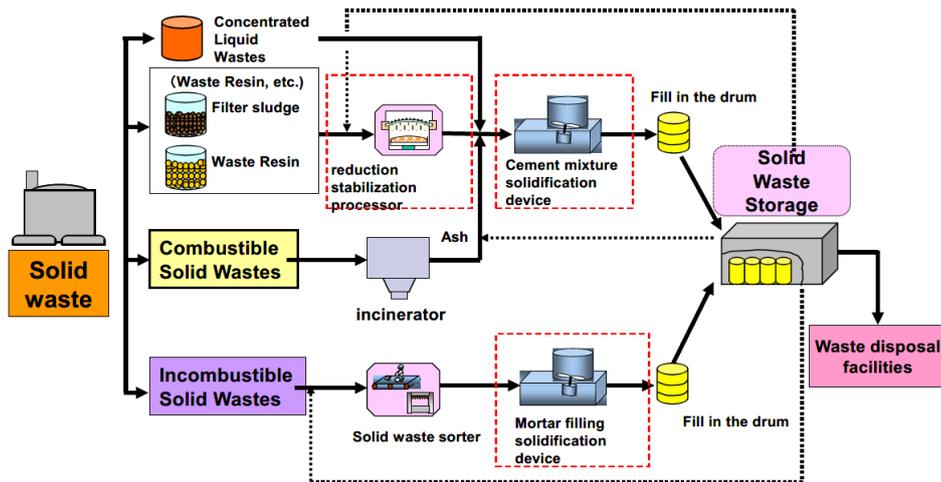


圖 23 新增除役廢棄物處理設施 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

普賢核電廠除役拆除廢棄物或物品，藉由每一批次建立 1 個 QR Code，並將該 QR Code 以標籤黏貼於該批次廢棄物包裝或容器上，作為該批次廢棄物相關資料的資訊查詢工具，相關資訊管理流程及相關 QR Code 對應於該批次廢棄物所登載資料表格如圖 24 所示。記錄了包含廢棄物產生地點、廢棄物污染程度、活度濃度、及重量等資料。

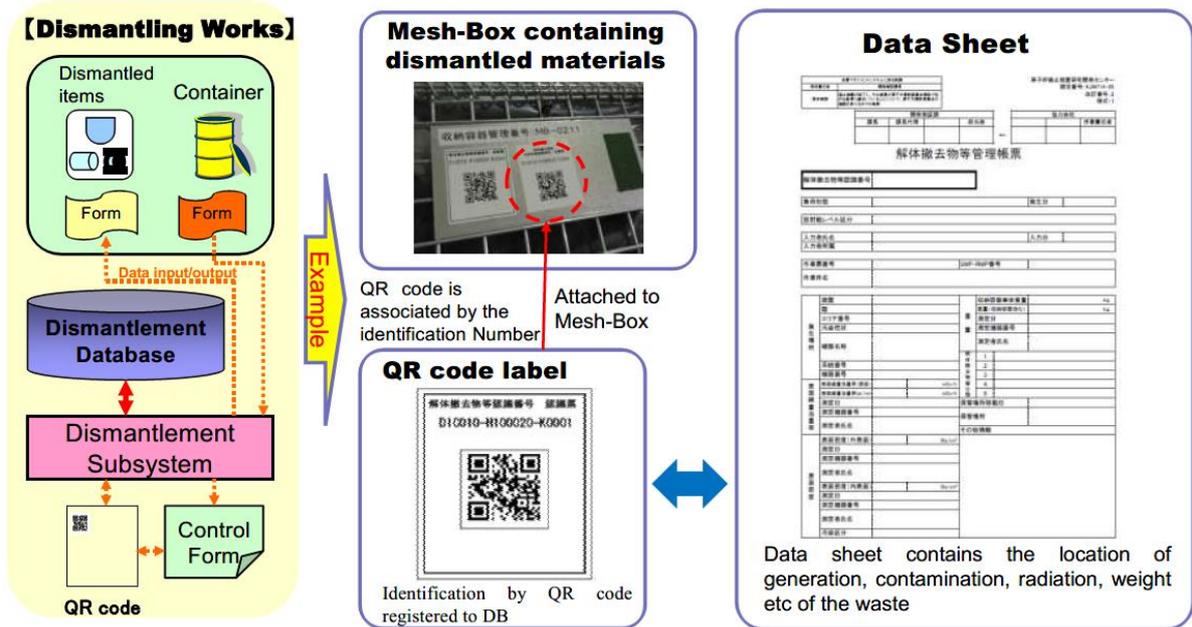


圖 24 除役拆除廢棄物資訊管理流程與 QR Code 作業表單 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

(1) 日本廢棄物解除管制制度

日本核電廠放射性廢棄物解除管制體系，可由圖 25 予以概述。首先由業者提報廢棄物解除管制相關文件及技術資料，包含解除管制物件及其使用與污染歷史、及活度濃度量測及評估方法等要項，向政府申請廢棄物解除管制。

經政府審查許可其廢棄物活度濃度量測及評估方法後，業者可以據以執行廢棄物解除管制相關量測及評估作業，其量測及評估執行結果由政府加以驗證確認無污染後，會對該批次解除管制廢棄物核發認證書，且整個文件審查、執行實施、及結果認證過程，都必須符合相關品保體系相關規範。業者獲得該認證書後，可以將解除管制廢棄物視同一般事業廢棄物，予以適當處置或再利用。

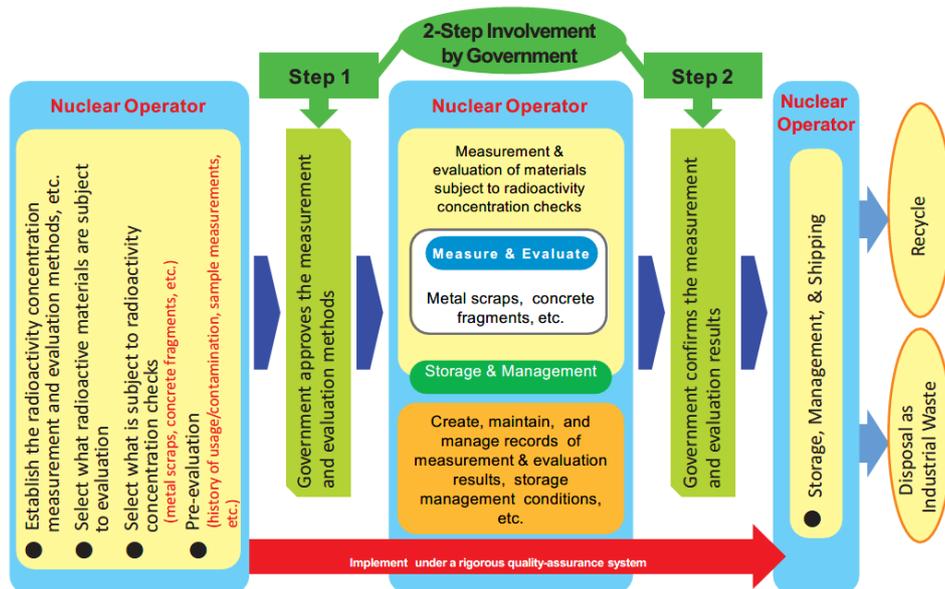


圖 25 日本放射性廢棄物解除管制體系 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

(2) 普賢核電廠廢棄物除役廢棄物解除管制案例

以普賢核電廠申請除役廢棄物解除管制為例，授課講師井口教授提到該廠從提出解除管制申請文件，期間歷經一百多項審查意見之答覆說明，歷時三年半才獲得核可。

普賢核電廠除役廢棄物解除管制的量測設備如圖 26 所示，該量測設備裝置 8 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 78 公分見方、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 IAEA RS-G-1.7 標準相同，Co-60 與 Cs-137 均為 100 Bq/kg。

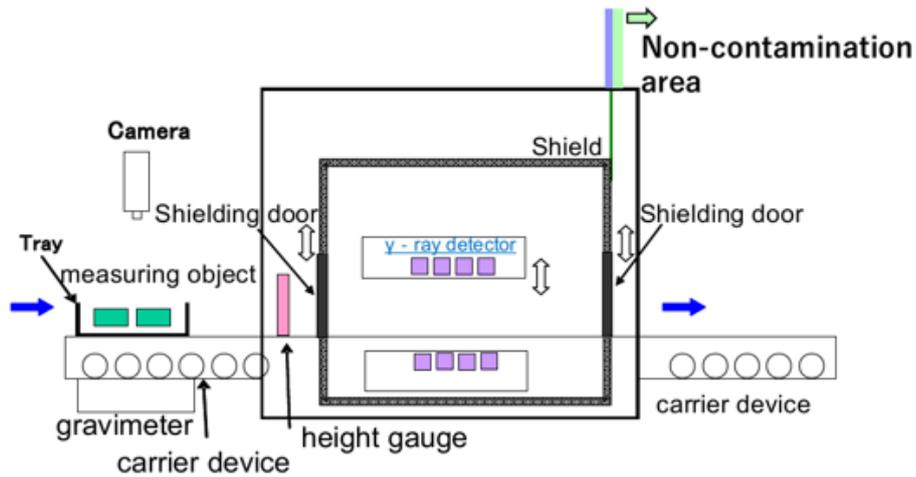


圖 26 廢棄物解除管制量測設備 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

每一個進行解除管制量測的廢棄物包件都有 1 個 QR Code，以資辨別該包件之廢棄物相關資料，完成量測並符合解除管制標準之廢棄物包件會放在一個中型容器中，待解除管制廢棄物包件放滿該容器後，會再給該容器 1 個 QR Code，以資辨別該容器中廢棄物相關資料，相關示意圖如圖 27 所示。

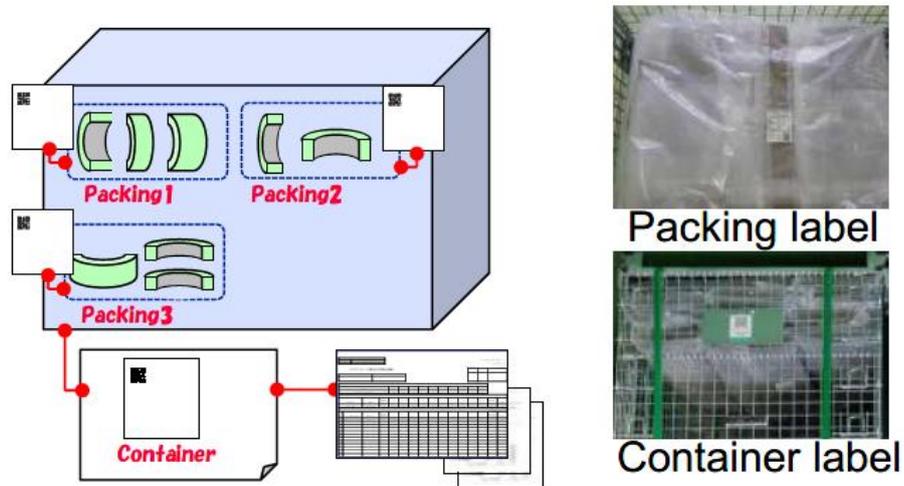


圖 27 廢棄物包件及盛裝容器 QR Code 標示
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

(六) 普賢核電廠除役作業實務與經驗

普賢核電廠除役作業實務與經驗訓練課程由福井大學附屬國際原子力工學研究所井口幸弘教授進行技術分享，內容大綱分為普賢核電廠除役計畫整體概要、普賢核電廠除役技術、結論與建議等 3 單元講述。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：

1. 普賢核電廠除役計畫整體概要

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。與一般商用反應器不同，普賢核電廠是 165 MWe 的壓力管型式的重水緩和併輕水冷卻之實驗型反應器，它使用重水作為緩速劑、沸水式輕水冷卻劑、爐心為壓力管設計之反應器。該反應器於 1979 年開始商業運轉，但由於計畫預算被取消，於 2003 年 3 月決定永久停止運轉。並於 2003 年 8 月，將用過的燃料轉移到燃料廠房進行臨時儲存。普賢核電廠機組現況與特點，如表 1。

表 1 普賢核電廠機組特點與現況

反應器類型	ATR(Advanced Thermal Reactor)
輸出功率	165 MWe
反應器爐心	壓力管型 (Pressure Tube Type)
緩速劑	重水 (Heavy Water)
冷卻劑	沸水式輕水冷卻劑 (Boiling Light Water)
開始運轉日	1979 年
現況	2003 年 3 月永久停止運轉，2008 年 2 月除役計畫獲日本管制機關認可，執行除役作業中。

普賢核電廠之除役計畫分為四個階段，包括重水和氬系統的除污階段、反應器周圍組件的拆解階段、反應器本體的拆解階段以及廠房結構的拆除階段，在 2008 年 2 月獲得日本管制機關審查核准後，隨即展開除役工作，並依據除役計畫預計於 2040 年完成四階段整體除役(如圖 28)。

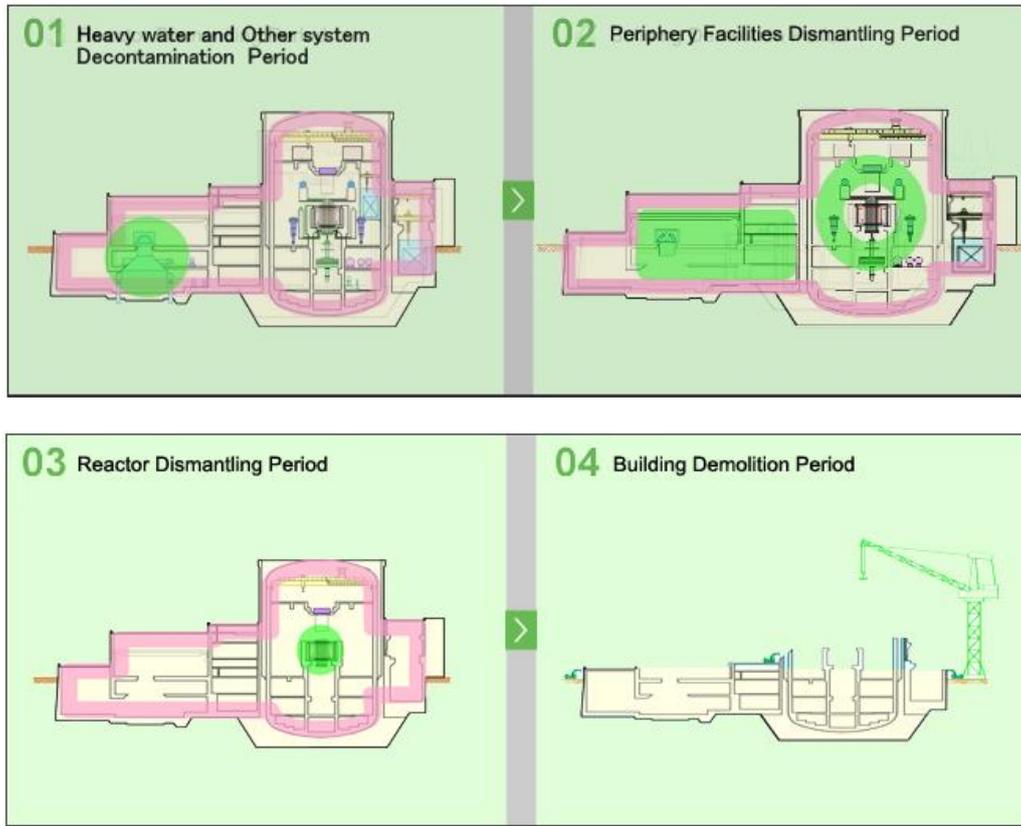


圖 28 普賢核電廠除役階段

(圖片來源 JAEA FUGEN Decommissioning Engineering Center)

普賢核電廠於除役工作推動過程中，為了能在拆除反應器更加安全，因此在處理除氬作業有展延 5 年的變更，以及將燃料廠房的用過燃料移除時程推遲到反應器拆解階段前完成，乃於 2012 年 3 月和 2015 年 4 月分別向 NRA 提出兩次除役計畫的變更申請，變更申請在 2018 年 5 月獲得了 NRA 的批准，隨後進入反應器周圍組件拆解階段。普賢核電廠第一階段優先處理了重水回收和系統除污的工作，重水是核反應的緩速劑，需要妥善處理和回收，以確保安全；而系統除污能減少後續除役作業時人員可能接受的劑量，上述兩項工作為普賢核電廠機組除役拆除前最重要工作，此外，此階段還包括拆除一些較低輻射的設備組件，這些組件拆除後的區域，將成為後續除污作業和臨時儲存的使用空間。

目前，普賢核電廠仍處於拆除反應器周圍的設備組的第二階段，為有效管理空間和處理拆除廢棄物，作業分三個步驟進行。首先拆除 A 迴路冷卻系統側的大組件，同時建立了從反應器廠房到汽機廠房的拆除廢棄物運輸路線。再進行 B 迴路

冷卻系統側的大組件的拆除。最後，拆除剩餘的大型組件，並處理未來第三階段遠端設備操作相關工作。

考量燃料儲存安全及人員輻射防護，除役拆除過程中所產生之廢棄物依其輻射劑量濃度，分類成 L1(高)、L2(中)、L3(低)低放射性廢棄物及解除管制(Clearance)廢棄物及 NR(Non-Radioactive)非輻射廢棄物。不同種類的廢棄物將依其等級進行處理及處置。普賢核電廠放射性廢棄物依照除役計畫放射性污染分布如圖 29，評估將產生之廢棄物等級、組件污染程度分布，並預估拆除廢棄物數量。並統計出運轉期間與除役過程將產生廢棄物數量如圖 30，在對拆解 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。

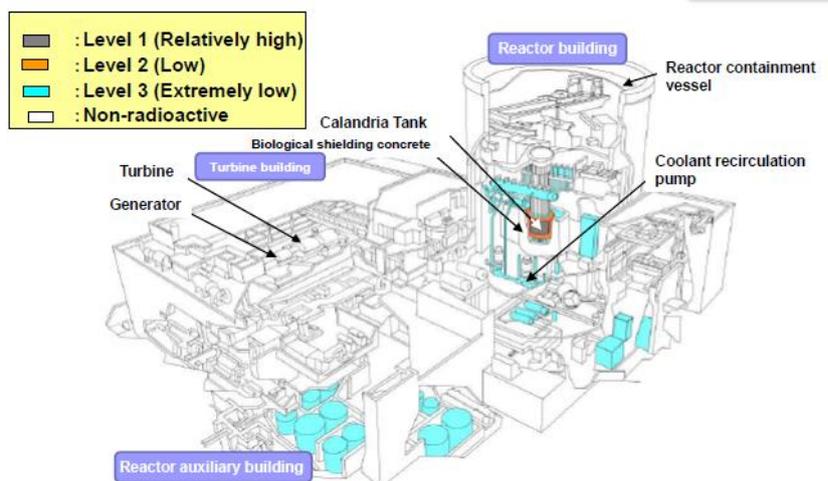


圖 29 普賢廠電之放射性污染分布推估
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

Unit : 10³ Ton

Level of Radioactive waste		In the Operation	In the Decommissioning	Total
Low Level Waste	Level-1 (Relatively high)	0.2	0.3	0.5
	Level-2 (Low)	3.0	1.4	4.4
	Level-3 (Extremely low)	-	45.4 → 5.4	5.4
Cleared Non-Radioactive		-	0.6 → 40.6	40.6
Originally Non-Radioactive			138.5	138.5
Non-contaminated underground structure and buildings (not included in the Program)			170.0	170.0
Total		3.2	356.0	359.2

圖 30 普賢核電廠運轉與除役過程將產生廢棄物數量
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

2. 普賢核電廠除役技術與除污、拆除作業

普賢核電廠是相對較早執行除役的核電廠，通過普賢核電廠在除役作業獲得的成果，將這些經驗分享給其他除役核設施，可使得這些知識和技術在其他地方得到有效利用，在合理應用現有技術下，可有效降低工作環境的輻射劑量率、降低放射性廢棄物處理程序與處置成本，提昇核電廠除役安全和效能。

普賢核電廠的核能除役技術主要可以分為兩大類：一是一般現有的技術，二是為了除役而需要開發的技術。一般現有的技術包括一般設備拆解、材料再利用、特性調查、除污、一般廢棄物處理、輻射量測等。而為了除役而需要開發的技術包括工程資訊管理系統、反應器拆解技術，以及重水移除技術等。普賢核電廠準備採用水下作業和操作遠端遙控機具，進行反應器的拆解，主要考量反應器高輻射與作業空間狹窄的問題，同時也須考量水下作業有洩水與噴濺等風險。普賢核電廠得遠端遙控拆解技術的研發是通過應用 3D-CAD 參數和數位模擬來實現的。目前已實際進行水下拆解技術的遠端遙控機械手臂模擬測試，其中包括使用磨料水刀切割(Abrasive Water Jet; AWJ)、水下電漿切割和 underwater laser cutting 等。

普賢核電廠執行除污作業，其目的為減少工作環境輻射劑量率以減少核電廠管理和拆解作業的曝露劑量，其目標為：(1)組件與管道的表面輻射劑量率控制在小於 0.2 mSv/h，以達到冷卻系統之廢棄物可被分類為 L3 級低放射性廢棄物；(2)在反應器廠房的空間輻射劑量率保持在小於 0.05mSv/h，以實現一年內無需作業人員輪班進行輻射作業。普賢核電廠系統管路化學除污方法係採用 HOP(Hydrazine Oxalic acid Potassium Permanganate)技術，以聯氨、草酸及過錳酸鉀溶液進行氧化還原處理(Reduction and Oxidation process, REDOX)，如圖 31，先進行 B 迴路，再執行 A 迴路，其系統表面劑量率，以及除污因子(DF=除污前放射活度/除污後放射活度)之化學除污前後比較如圖 32。可發現大部分管路劑量率均達成小於 0.2 mSv/h 目標值，少部分雖未達成，仍依低放射廢棄物分類進行貯存，且 B 迴路之 DF=6.9，A 迴路之 DF=10.6，顯示經驗回饋得助益。透過系統管路的化學除污可大幅減少 L2 級廢棄物產量，也降低廢物處理與處置成本，化學除污對於廢棄物數量、效果與廢棄物處理成本影響，如圖 33。

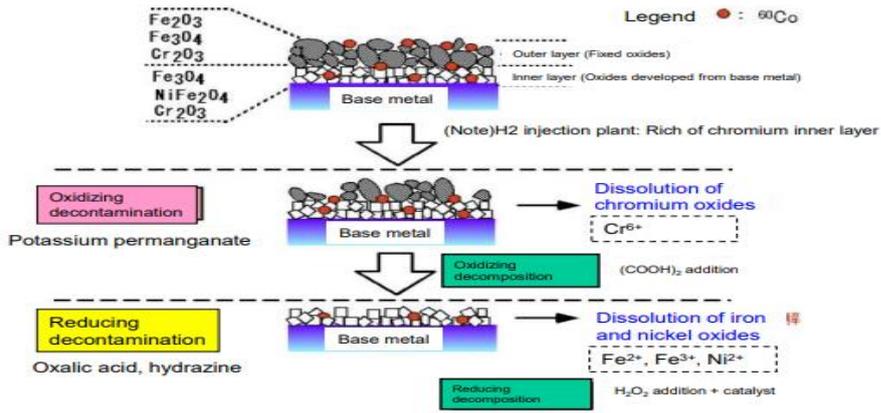


圖 31 普賢核電廠之 HOP 系統化學除污技術
 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

Component	Loop A		Loop B		Target of dose rate (mSv/h)
	Dose rate (mSv/h)		Dose rate (mSv/h)		
	Before	After	Before	After	
Steam drum	0.45	0.23	0.73	0.26	0.20
Down comer	0.23	0.03	0.43	0.08	
Manifold	0.18	0.04	0.17	0.04	
RCP discharge pipe	0.30	0.01	0.40	0.05	
Lower header	0.71	0.10	0.42	0.06	
Inlet tube	0.84	0.04	1.22	0.11	
Riser tube	0.59	0.11	1.76	0.34	
Average DF	10.6		6.9		

圖 32 普賢核電廠系統管路化學除污前後表面劑量率比較
 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

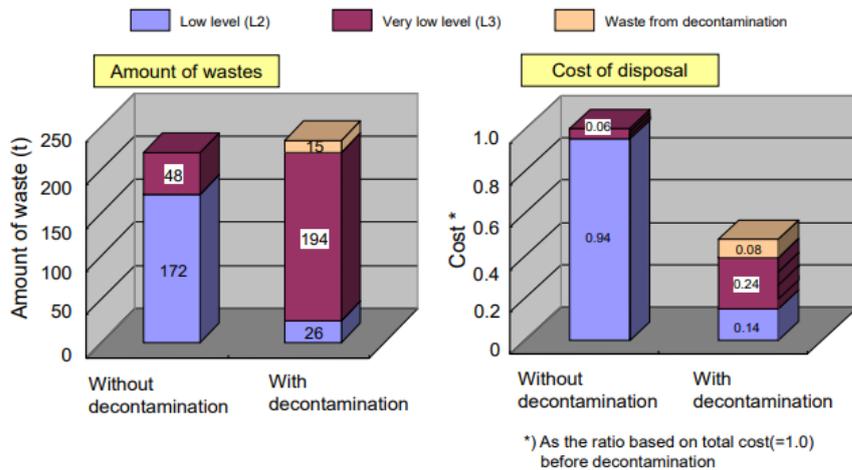


圖 33 化學除污之廢棄物數量與廢棄物處理成本之影響
 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

普賢核電廠執行設備組件拆解之廢棄物，主要包含金屬廢棄物(或不可燃物)與混凝土廢棄物，針對前者，若具放射性不執行除污者將採取壓縮、固化及後續處置；非放射性或除污後之金屬廢棄物經判定符合解除管制(Clearance)標準，則進行廢棄或再利用處置。拆解廢棄物係以濕式噴砂裝置，經送入、除污、噴洗、氣動吹乾、送出等一系列動作自動完成除污工作，如圖 34，以除污時間約 240 秒且 2 噸/天(6 小時)之最大性能，處理除役期間切割後金屬廢棄物。

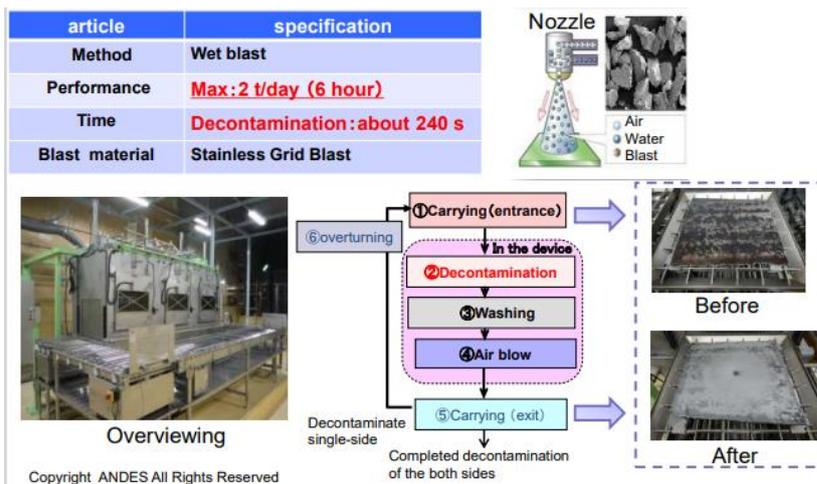


圖 34 普賢核電廠之濕式噴砂裝置 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

選擇適當的拆除作業方法，應針對拆解對象的特點，包括是否具放射性、材料類別、物理結構、拆解產生廢棄物數量，以及拆解環境等因素。以下是影響拆解方法選擇的主要因素：(1)拆解標的物料資訊：對拆解或處置有安全或環境上影響者，如輻射劑量等級、核種的種類、屬活化(Induced)或表面污染；(2)材料性質為碳鋼、不銹鋼或混凝土等；(3)物理結構如厚度、板材或管道；(4)拆解產生之廢棄物數量等資訊；(5)拆解放射性物質的環境：包含劑量率、位置高度、空間、進入路線等。拆解作業還需考量(6)除役時間表或期限；(7)拆解方法的特點，包括：每單位成本、速度、二次廢棄物、公共設施（成本、電力、供水）、作業安全、拆解經驗、專有技術、供應鏈等。

普賢核電廠依照上述說明，用於混凝土拆解將採線鋸、鑽孔取芯、鑽石刀鋸之機械切割技術、機械衝擊式破碎技術及爆破技術等方式，而用於金屬廢棄物有等離子弧熱切割、雷射熱切割及機械切割等拆解技術規劃，詳列如圖 35。各種不同的拆解技術都有其獨特的優點和限制，因此需要根據具體情況進行選擇，以確保拆解工作的安全性、效率性及成本效益。

Targets (of application)	Technology Classification	Examples of dismantling and Cutting Technology	Characteristics
Concrete structure	Mechanical cutting	Wire saw, Core boring, Diamond cutter	Cutting is possible with dismantling materials installed on site, cutting of thick walls and water treatment including cement are required.
	Mechanical Impact Crushing	Breakers, Steel balls, Crushers	Dismantling of general concrete structures
	Explosion	Controlled blasting	Large dismantling speed, explosion control technology required
Metal and concrete structure	Fluid cutting	Abrasive water jet (AWJ)	Free cutting line, remote cutting possible, underwater cutting possible, water treatment required
Metal components	Thermal cutting	Gas, Oxi-gasoline, Oxygen lance, etc	High cutting speed, not applicable to special steel, high secondary waste
		Plasma arc, Arc saw cutting	High cutting speed, capable of cutting thick plates, remote control, more secondary waste
		Laser cutting	Wide applicability of cutting materials, low secondary waste, and remote operation due to fiber transmission capability, Equipment is getting less expensive
	Mechanical cutting	Band saw, Saber saw, Rotary saw, Guillotine saw, Nibbler etc.	Used in human cutting operations on site or tools of remote control cutting

圖 35 混凝土與金屬廢棄物的拆解技術
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

普賢核電廠在周邊設施拆解反應器廠房部分，分為 3 階段執行：(1)首先執行 A 迴路拆解設備管路(不含大型設備)，同時將拆除後的廢棄物從反應器廠房轉移到汽機廠房；(2)拆解 B 迴路；(3)最後拆解大型設備組件。普賢核電廠對於反應器拆解技術應用，還沒有足夠的反應器拆除應用經驗，雖然等離子弧切割方法在初始成本和運行成本方面具有優勢，但雷射切割相較於等離子弧切割特性，雷射切割有可插入式切割頭，切割頭較小、高輸出功率可切割雙管、較窄的切割寬度產生較少的熔渣，以及對定位精度要求較低，更易於遠端控制等技術特性，普賢核電廠判斷採取雷射切割方法更有利於反應器拆解(離子弧與雷射切割技術比較如圖 36)。

	Plasma arc cutting	Laser cutting
Narrow space availability (I.D. φ95mm, inserted in a pipe)	The commercialized small head can cut stainless steel plates up to about 6 mm in thickness in air. ⇒It is difficult to cut the upper extension pipe of the pressure tube with a plate thickness of 16 mm in water. Also, simultaneous cutting of double pipes is not possible.	Pipe insertion type L-shaped cutting head ⇒High-speed cutting (3m/min cutting speed for single pipe) Also capable of cutting double pipes at the same time. (Cutting speed 10mm/min at 6kW output)
Water purification system	Wide cutting width generates much dross. (JPDR found that cut dross accumulated in the lower part of the reactor and increased the radiation rate.) ⇒Dross collection facilities are needed.	Narrow cutting width generates less dross. ⇒Compared to plasma arc, Compact water purification system, eliminating the need for dross collection equipment
Remote controllability	Proven remote cutting technology has been applied to nuclear reactor dismantling in Japan and overseas.	Although there is not enough experience of application to reactor dismantling, Compared to plasma arc, the cutting head is smaller, requires less positioning accuracy, and is easier to control remotely. ⇒should be demonstrated in the future

圖 36 反應器應用等離子弧與雷射切割技術比較
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

(七) 美濱核電廠除役的實務與經驗

本訓練課程係由關西電力公司除役技術中心原茂樹所長進行技術分享，內容大綱分為關西電力公司核電廠除役概要、系統除污、輻射特性調查、拆除作業及反應器周邊設備拆除作業等單元。本課程除講師於課堂上進行講述外，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：

關西電力公司包括美濱、大飯及高濱核電廠，共 11 個機組，其中美濱 1、2 號機與大飯 1、2 號機屬於除役機組。本次講授內容以美濱核電廠除役現況為主。美濱核電廠 1 號機係於 2010 年 11 月運轉滿 40 年，反應器爐心仍裝載核燃料，處於待命狀態，並準備申請重啟，2 號機於 2011 年 12 月停機後進入大修定期檢查，兩部機組受到 2011 年 3 月發生福島第一核電廠事故，以及 NRA 於 2013 年 7 月發布新監管標準，在綜合考慮新監管標準所需的各種措施的可行性、確保供應能力的角度、建設成本、可能的運營期限、新引入的除役相關制度等因素，美濱核電廠 1、2 號機在 2015 年 4 月 27 日決定永久停止運轉。隨後於 2016 年 2 月 12 日提出除役計畫(DP)申請，2016 年 8 月 31 日提出核設施 OSP 變更申請，審查期間經 NRA 要求補正資料後，於 2017 年 4 月 19 日取得除役計畫及 OSP 變更核准。

美濱核電廠 1、2 號機除役作業規劃大致分為四個階段，因核燃料移出與搬運課題導致除役期間較長，歷時約 30 年，目前美濱核電廠 1、2 號機處於第二階段反應器周邊設備拆除作業，之前的第一(準備)階段係 2017~2021 年期間進行，分別執行了新燃料搬運、系統除污、輻射特性調查，以及部分二次側系統設備拆除工作(含汽機)。2022 年進入反應器周邊設施拆除作業的第 2 階段，除持續執行二次側設備的拆除工作外，包括一次側系統設備拆解、發電機設備拆解，以及用過燃料搬出等除役工作，詳參如圖 37。

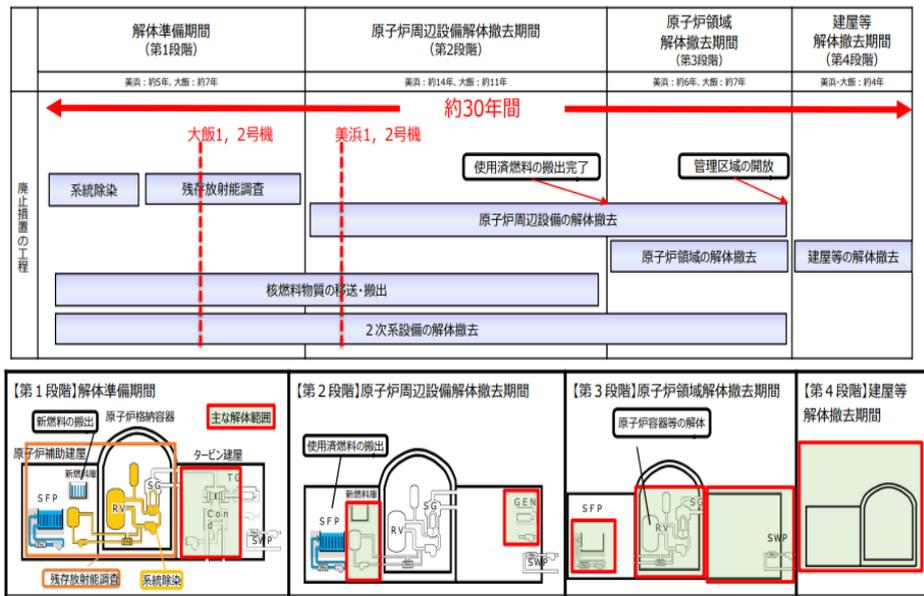


圖 37 美濱核電廠 1、2 號機除役計畫 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

1. 系統除污

美濱核電廠於拆解作業開始之前執行系統除污的目的，係為改善拆解作業環境，減少輻射曝露、使達到人員輻射防護裝備簡便化，及減少放射性廢棄物的產生。此外，系統除污的附帶效益，還可縮減拆解工法的工序，減少遠端遙控設備的使用。另外在系統除污的範圍，係考量運轉期間與一次測冷卻水有關的主要系統，其系統管路內部有輻射污染物附著，如反應器冷卻水系統、水化學控制系統，餘熱移除系統等進行除污(如圖 38)。

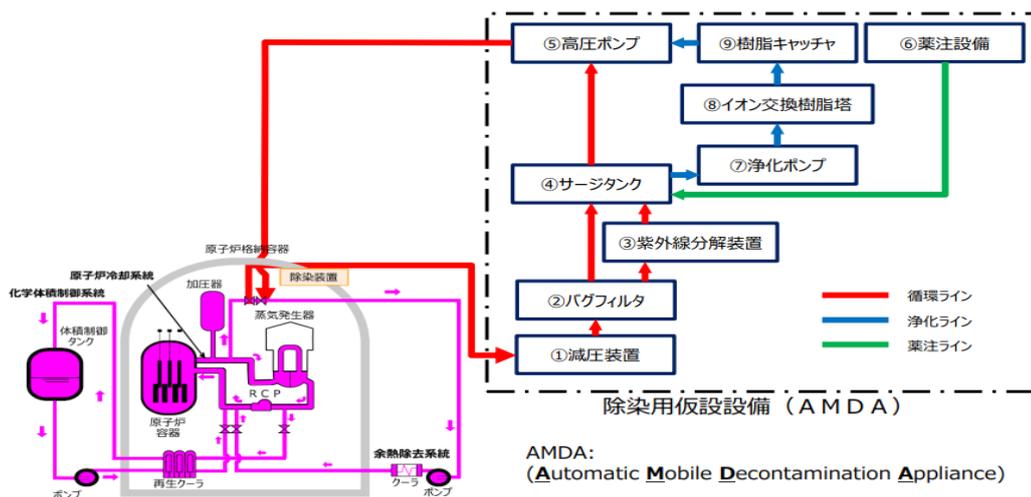


圖 38 美濱核電廠系統化學除污範圍與化學除污裝置 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

美濱核電廠採用的系統除污工法係為「化學氧化還原消除法」(Chemical Oxidizing Reducing Decontamination, CORD)，除污過程包含四個步驟，首先酸化過程利用過錳酸根離子(MnO₄⁻)進行氧化處理，接著使用草酸還原及分離Fe、Ni、Co等離子，並透過紫外線分解草酸等物質，最後使用離子交換樹脂來淨化分離出的放射性核種、金屬及化學物質。美濱核電廠系統除污裝置現場配置狀況如圖39，系統除污執行時程與除污效果如圖40，系統除污結果顯示，蒸汽產生器的熱交換管除污效率約在99%、一次側冷卻系統的管路約97%效率，除污效果顯著。美濱核電廠的系統除污裝置採用法國除污技術，該除污裝置安裝配置於圍阻體頂樓，除污完成後該裝置再拆運回法國，系統除污包含設備安裝之事前準備、裝置試運轉及系統除污執行等作業，應適切考慮設置作業時間及空間規劃。

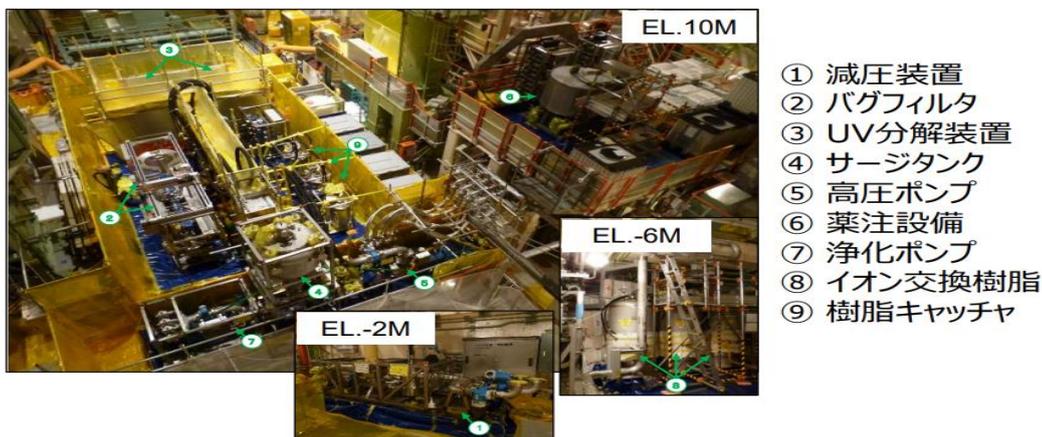
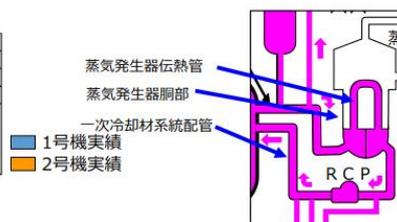


圖 39 美濱核電廠系統除污設備設置情形 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

【系統除染工程 (美浜1,2号の例)】

2017年度	7月	8月	9月	10月	11月	12月
事前準備						
除染装置単体試運転						
除染装置総合試運転						
系統除染						
1サイクル目						
2サイクル目						
3サイクル目						
4サイクル目						



【系統除染結果】

	除染効果 平均値			
	美浜1号	美浜2号	大飯1号	大飯2号
蒸気発生器伝熱管	98.8 %	99.4 %	87.0%	66.3%
蒸気発生器胴部	99.2 %	98.5 %	92.7%	65.8%
一次系冷却材系統配管他	96.9 %	96.7 %	87.3%	94.0%

【下部炉心構造物(除染前後)】

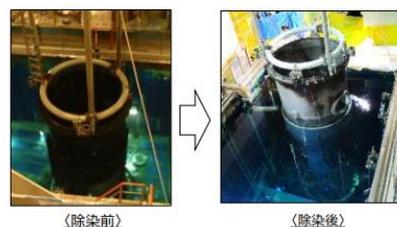


圖 40 美濱核電廠系統除污實績與結果 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

2. 輻射特性調查

核電廠規劃除役第二階段後的拆除工作，須調查反應器內部放射性活度與輻射污染分布的情形，以減少從事拆除工作的人員的輻射曝露，俾能制定適當的拆除工法、拆解程序以及放射性廢物處理計畫。美濱核電廠對反應器壓力容器內部(包括反應器內部及爐內組件)及反應器壓力容器外部(包括一次圍阻體及反應器輔助廠房)的輻射分布情況，執行輻射特性調查調查工作，並依其結果制訂拆除廢棄物處置計畫(輻射偵檢)。美濱核電廠輻射調查工作利用遠端設備對反應器壓力容器及其內部組件進行採樣，並將樣本送廠外機構進行分析/評估。反應器內部取樣位置包括(1)上部爐心結構(2 處)；(2)下部爐心結構(4 處)；(3)爐心下部支撐板(2 處)及(4)反應器容器(4 處)，共 12 點。然後將樣本運送至分析及評估機構進行檢測與評估(如圖 41)。

2018 年 9 月美濱核電廠進行 2 號機反應器壓力容器內取樣作業，並於同(2018)年 11 月再進行 1 號機取樣。取樣方式是使用的遠端取樣機具，搭配放電電極裝置切割樣品進行取樣，切割下樣品將落於機具下半部樣品防掉落網。取出後的樣品須放置於輸送容器內等待分析量測，以便對反應器內部組件放射性濃度(L1~L3) 評估精度，制定廢棄物處置計畫之輻射偵檢評估(如圖 42&圖 43)，以及美濱核電廠之反應器壓力容器內部取樣形狀與輻射劑量情形如圖 44。

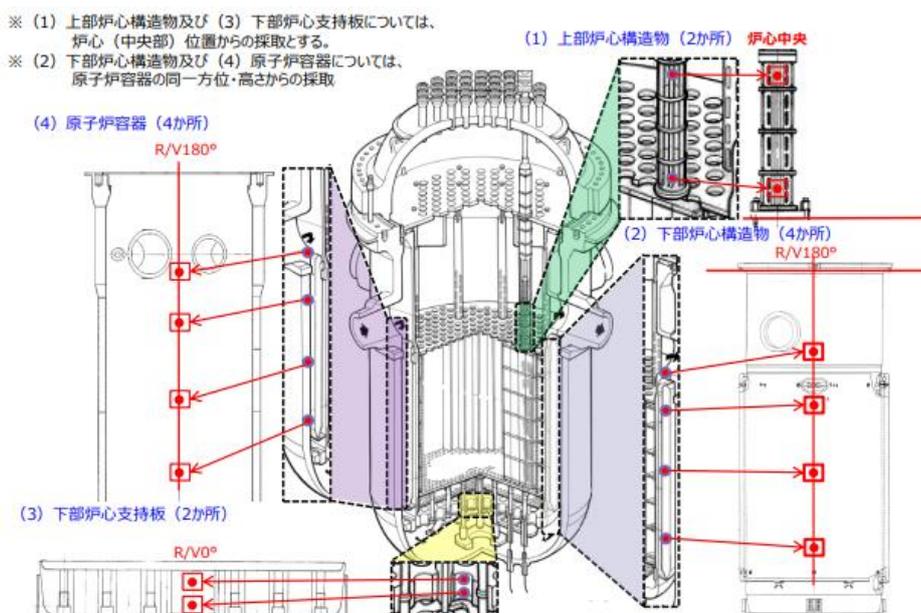


圖 41 美濱核電廠反應器壓力容器內部取樣位置
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

○遠隔装置を用いて試料を採取

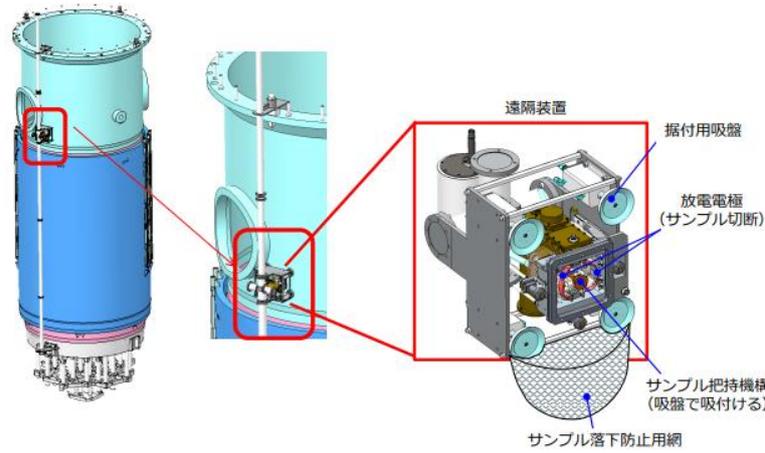


圖 42 美濱核電廠爐心內取樣方法與運輸採樣容器之作業(1)
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

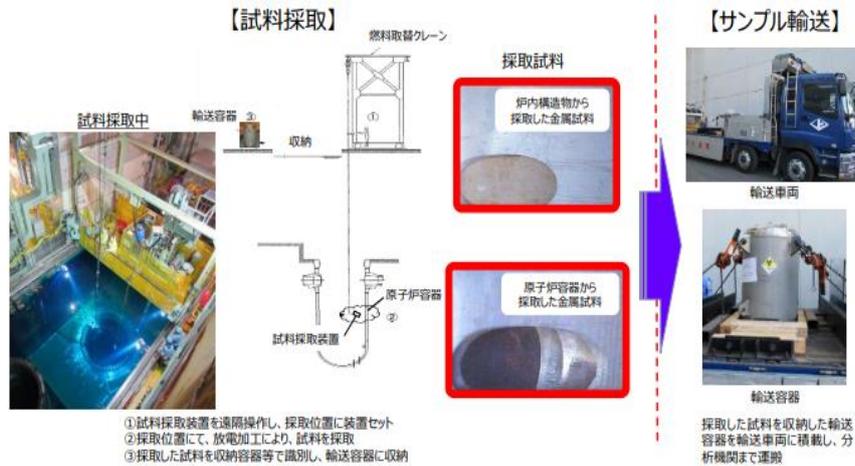


圖 43 美濱核電廠爐心內取樣方法與運輸採樣容器之作業(2)
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

試料形状および放射線量

採取種類	上部炉心構造物	下部炉心構造物	下部炉心支持板	原子炉容器
幅	—	約30mm	約30mm	約40mm
直径	Φ 18mm	—	—	—
長さ	約120mm	約50mm	約60mm	約100mm
厚み	—	約5mm	約5mm	約20mm
質量	約100g	約30g	約30g	約300g
形状イメージ				
放電加工時間	約20分	約5時間	約5時間	約30時間
線量率(@ 1m)	最大0.6mSv/h	最大0.4mSv/h	最大0.05mSv/h	最大0.3mSv/h

圖 44 美濱核電廠之反應器壓力容器內部取樣形狀與輻射劑量
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

反應器壓力容器外部取樣，主要是為了確認 L2、L3、Clearance 的廢棄物分布情況，及根據取樣結果提高放射性活度評估的準確性，採樣地點包括整個主系統管制區(1)爐內測量設備管路穿越器室；(2)生物屏蔽牆；(3)循環室；(4)操作層；(5)操作層下方的一般通道。而取樣的對象包含金屬與混凝土，金屬的部分有 1 次側的設備保溫材外層披覆金屬、鋼架等等；另混凝土部分，則在一次圍阻體牆面及廠房地面鑽芯取樣，相關現場取樣情形如圖 45~圖 47。

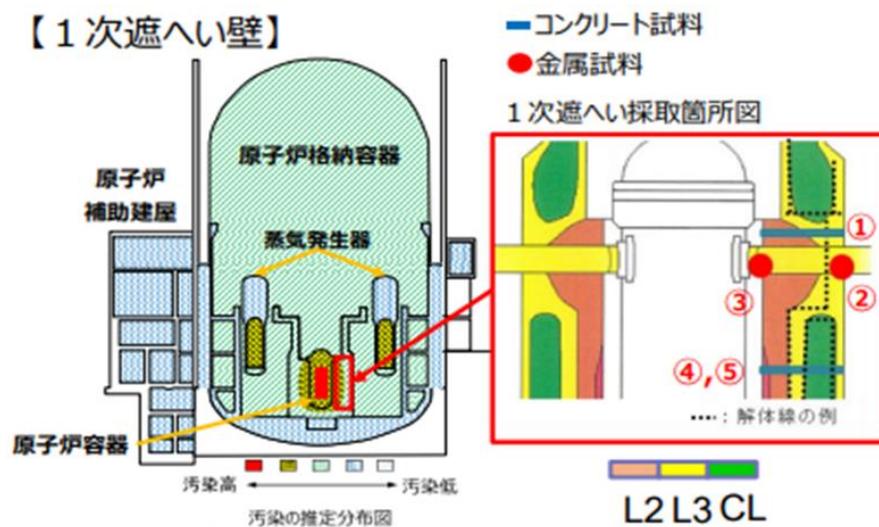


圖 45 美濱核電廠之主系統反應器壓力容器外部取樣位置(1)
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

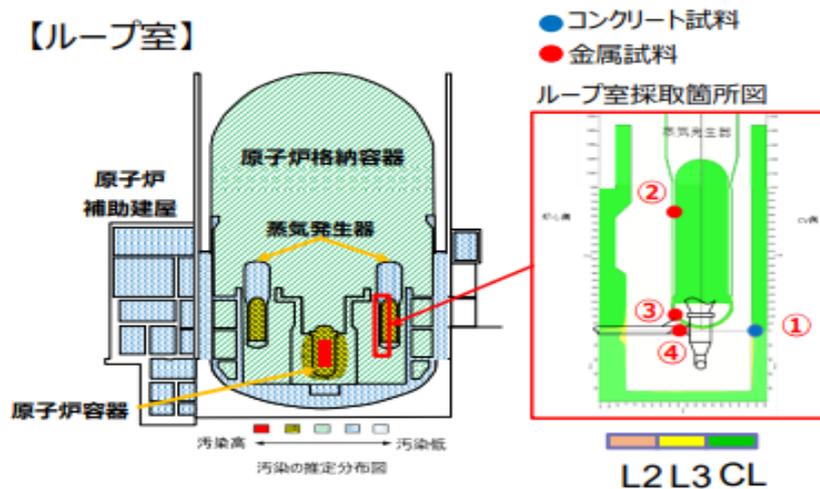


圖 46 美濱核電廠之主系統反應器壓力容器外部取樣位置(2)
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

《コンクリート：1次遮へい壁コアボーリング》



《コンクリート：床コアボーリング》



《金属：SG保温外装板切り取り》



《金属：グレーチング切り取り》



圖 47 美濱核電廠反應器壓力容器外部人工取樣情形
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

3. 拆除作業現況

美濱核電廠 1、2 號機為 PWR 核電廠，目前已執行之汽機廠房二次側系統設備拆除作業，其為未受輻射影響的主汽機、冷凝器、汽機廠房通風過濾器等大型設備組件拆除，其中含有保溫材拆除作業，與干涉物拆除如小型設備、配管、泵等。美濱核電廠已經完成大型設備的拆除包括高壓汽機、低壓汽機、主油箱及勵磁機等。後續預計拆除的大型設備有發電機與汽水分離再熱器。關於二次系統設備的拆除作業，美濱核電廠於 2 號機汽機廠房三樓設立設備切割專用區(即高低壓汽機樓層)，執行拆除的設備切割作業。切割專用區設立包括鋼板地板安裝，用鐵板與周圍區域隔離，並安裝除塵器、鼓風機、油煙器，改善切割時環境。因汽機位於二次側未受輻射污染，採一般工廠廢棄物處置方式，切割大小為大貨車可以裝載運送之尺寸，切割成 10 噸卡車可以運輸的尺寸及重量，切割專區與現場拆解情形如圖 48 ~圖 50。

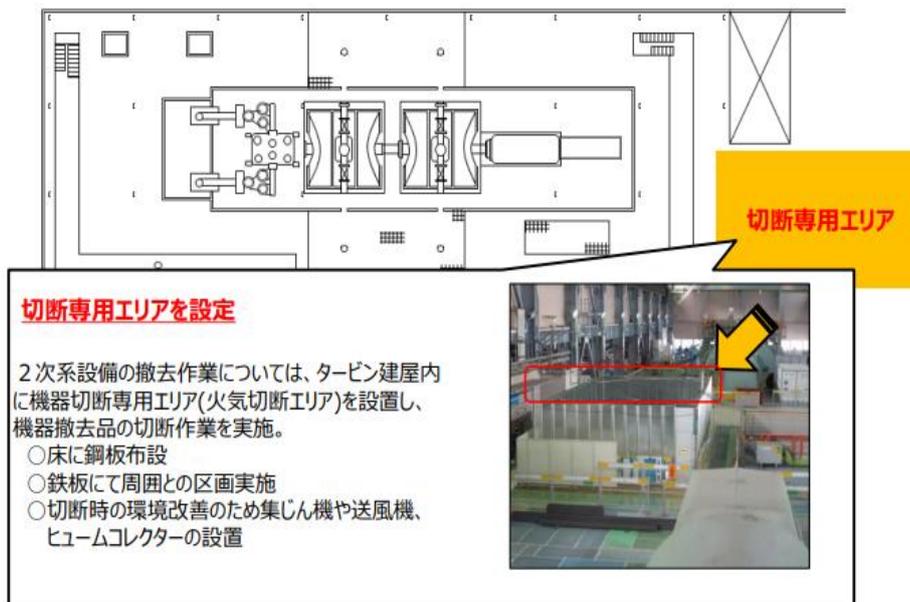


圖 48 美濱核電廠 2 號機器機廠房三樓之熱切割區域設置
(圖片來源 ANDES 訓練資料)



圖 49 美濱核電廠低壓汽機切割情形
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

○ 10 t トラックで運搬可能な大きさ・重量となるように切断実施。

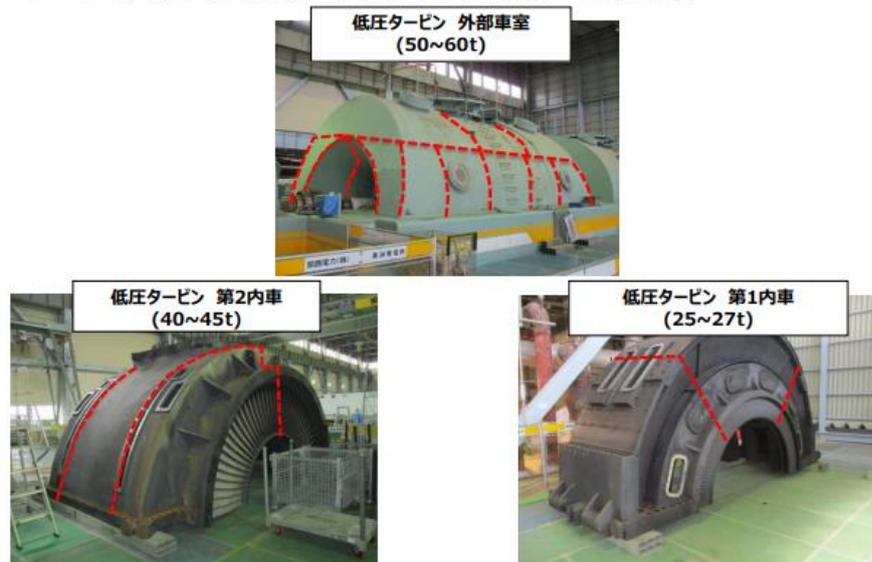


圖 50 10 噸卡車裝載運送之切割尺寸
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

4. 反應器周邊設備拆除作業計畫

本計畫實施前會針對無放射性污染之汽機廠房相關周邊設備執行拆除工作，其拆除廢棄物在符合離廠偵檢標準後，即以一般事業廢棄物處置(含工業再利用)；前述屬於非管制區之拆除項目，之後再就管制區內除反應器外之周邊設備實施拆除計畫，例如新燃料儲存庫、一次側冷卻水體積控制槽等設備拆解及移除。首先須規劃設備拆除後暫存於指定區域，同時間需確保拆解後的物料能夠根據計畫順利處理，因此需要確認保管區域的容量是否足夠，以便後續拆除作業不會受影響；因廢棄物儲存區域有限，應優先考慮可酌情移出的物料，以擴大儲存空間(如非放射性(NR)、Clearance 廢棄物)，在測量確認無污染並經 NRA 認可後，將其搬運到發核電廠外部進行回收或工業廢物處理。

美濱核電廠對於拆解物料之區分與管理，基本分為三個主要類別：「非放射性廢棄物(NR)」、「拆除儲存」及「放射性固體廢棄物」。每類別都必須根據相關的作業安全規定分別實施管理，管理處理原則如下說明(如圖 51)：

- (1) 拆解、移出物料被分類為「非放射性廢棄物(NR)」和「待決定是否為 Clearance 廢棄物或放射性固體廢棄物處理之前的廢棄物」；另拆解廢棄物無除污必要直接歸類為「放射性固體廢棄物」，將直接裝入鐵桶或鐵箱貯存於低放射性廢料倉庫。

- (2) 拆除管制區域內的設施時，應按照放射性污染程度對擬拆除的設施進行分類，原則上從放射性污染最低的開始拆除，防止被拆除的物料受到額外污染。
- (3) 「非放射性廢物(NR)」類先暫存於輻射篩檢量測前之區域，待量測合格後，移出管制區外，以工業廢棄物處置。
- (4) 「拆解貯存物」拆解後裝入方形網狀容器，將按照 OSP 規定進行「Clearance 廢棄物」檢測與申請，符合者依 OSP 追蹤列管，未為符合者以「放射性固體廢物」類別貯存管理。

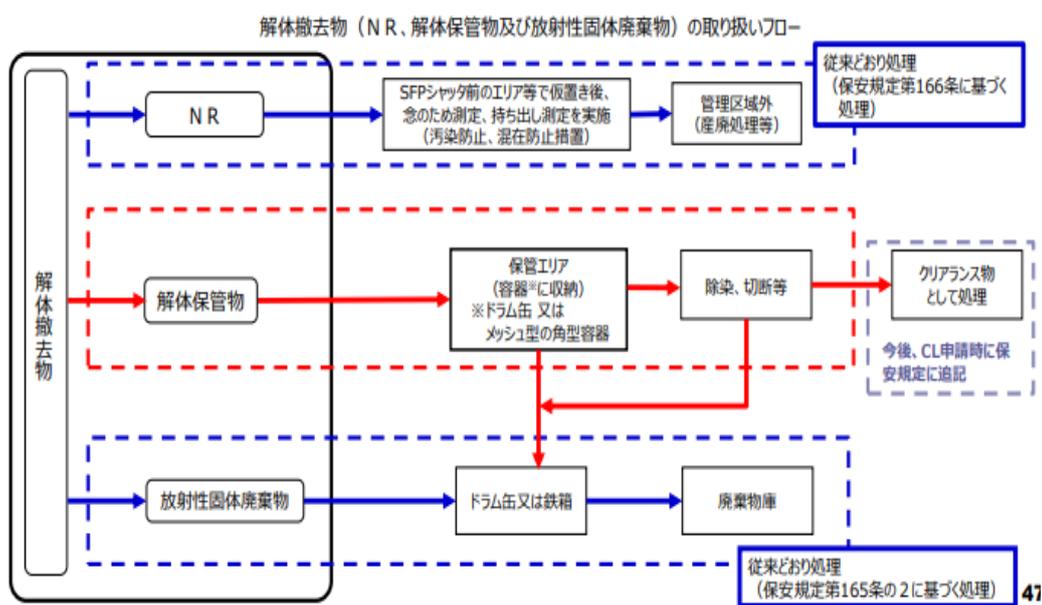


圖 51 美濱核電廠反應器周邊設備拆除實施計畫之物料區分與管理
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

反應器周邊設備拆除與拆解過程應當注意事項如下，以確保安全與遵守相關規定：

- (1) 管路排水處理：在進行拆解作業之前，須排除系統(管路或桶槽等)內的殘留水分。若仍存在積水情況，需採取措施將水排出，以確保工作環境的安全。在切斷管道等操作之後，也要使用乾淨的布將可能的水滴擦拭乾淨，然後將這些布存放於專用袋子中，以確保污染物得到適當處理。
- (2) 拆解暫存物的分類與包裝：在處理拆解暫存物時，需根據其放射性活度、所屬系統以及機器種類(例如管道、閥等)的不同，將其進行分類。每一類別的物料應被放置於專用的袋中，然後妥善裝入鐵桶或方形網格容器中(如圖 52)。

- (3) 袋子的補強：在將拆解暫存物裝袋並放入方形網格容器時，要特別注意凸起可能損壞袋子的風險問題，採取適切措施以確保袋子不會破損，例如使用膠帶進行加固。此外，為了防止污染擴散，應該在網格箱的內部使用防火材料進行保護。
- (4) 袋子的最大重量限制：每個袋子的重量應保持在 25 公斤以下，此為一名工作人員可以單獨提起的最大重量，以確保工作人員的安全，並防止袋子過於沉重而難以處理。
- (5) 不同放射性活度的分開儲存：根據放射性污染程度的不同，不應將被判定為解除管制(Clearance)廢棄物的拆解保管物與被判定為「L2」或「L3」的拆解保管物存放在同一容器中。此項措施是基於相關的 OSP 規定，以確保不同等級的物料得到妥善處理與管理。

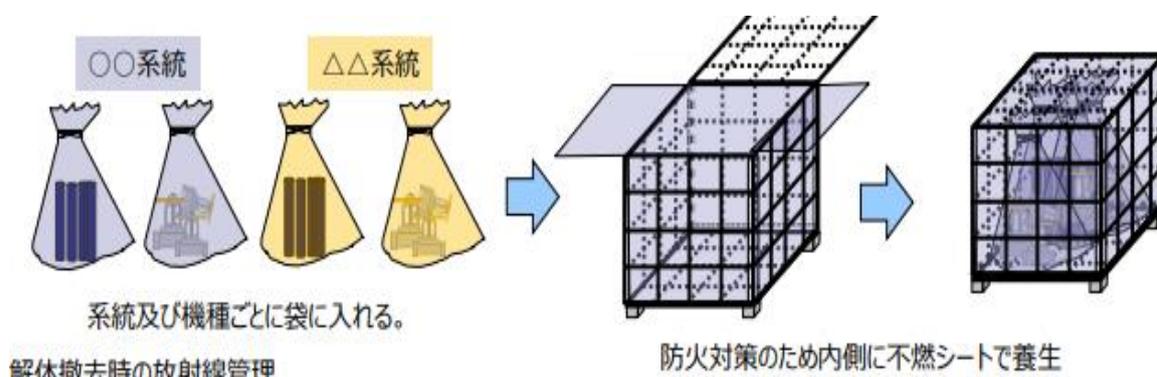


圖 52 美濱核電廠廢棄物處理與管理原則 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

在拆解過程中的輻射管理措施，以確保工作人員的安全及防止污染擴散之注意事項：

- (1) 污染擴散防止措施：在第二階段進行反應器周邊設備時，當處理受污染設備，則必須採取污染擴散防止措施，包括設置污染擴散防護屏障及局部過濾器，以防止放射性污染物擴散到周圍環境中。
- (2) 防護裝備：工作人員必須根據工作環境的輻射劑量，穿戴適當的防護裝備，如防塵口罩等。
- (3) 高輻射環境下的措施：如果工作環境的輻射劑量率較高，則需採取額外的措施，以減少工作人員的輻射曝露，包括設置輻射遮蔽物、縮短工作時間等，以盡量減少輻射曝露。

美濱核電廠為日本第一座 PWR 進行除役作業，關西電力公司積極吸收國內外經驗，累積技術與專業知識，並運用於後續的除役作業中。美濱核電廠除役以安全為首要任務並依照除役計畫執行，並確保不損害日本當地居民對美濱核電廠除役的信任，使除役作業能順利進行，迄今未發生重大問題。

(八) 日本除役經驗與回饋

「日本除役經驗與回饋」訓練課程是由日本原子力除役研究學會(ANDES)佐藤忠道事務局長講授，內容包含佐藤事務局長彙整提出除役作業的重要關鍵因素與核電廠除役經驗。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：

佐藤事務局長依據日本的除役經驗彙整提出除役重要的關鍵要素，整理如下：

1. 確保必要的除役資金

- (1) 確切的成本估算及其更新：設施經營者正確估算除役成本至關重要。這包括對除役的所有活動進行詳細分析，包括拆解、廢棄物處理與場址整理。成本估算應定期更新，以考慮範圍、法規或突發挑戰的變化。
- (2) 了解不確定性：了解並量化這些不確定性、涉及敏感性項目進行分析與風險評估，及可能成本變動評估。

2. 完整的廠址輻射特性調查

設施經營者應確認設施及其周圍的輻射特性調查為其基本步驟，目的在於確認放射性物質的類型及數量、其分佈以及對環境與工作人員的潛在影響。輻射特性調查結果應結合計算模型與測量結果交叉比對，持續更新以確保其準確性；輻射特性調查不可僅依圖面文件，應檢視所有紀錄文件與訪談資深員工，了解可能歷史，包括輻射與非輻射的事件，如工安、火災等；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. 注重廢棄物管理

除役作業係以每個房間為基礎去拆除及管理處理廢棄物，基於完整的輻射調查結果建立的資料庫，包括確定污染情況，制定有效的除污計畫、選擇適當的拆除工法與所需設備、制定現場工作人員輻安與工安防護計畫、廢料處理與處置，包括分級及後續處理、預估所需的資金，建構除役計畫的執行。

4. 設施規模的縮減

「設施規模的縮減」(此與我國核電廠除役之系統停用評估作業(SERT)相當)，須考量除役過程中需持續運轉系統、系統修改、保留設施、新增及拆除等系統與設備進入除役狀態之處置。

5. 廢棄物處置流程規劃

在拆解之廢棄物運送及暫貯的整體規劃完成前，不可急於執行拆除等現場前端作業，並應依序確保暫存區域空間、運輸路徑、廢棄物處理與臨時貯存區域、廠內中期貯存設施、最終處置等作業項目有完整的規劃，再據以執行。在工作場所附近設立臨時貯存區域與廢棄物處理區域，應符合安全作業標準，以防止廢棄物污染擴散或污染環境，做好廢棄物管理與安全存放目標，直到確認最終處置止。除役期間廢棄物包裝內容應詳細與準確記錄，紀錄應包括廢棄物的種類、數量、來源、處理方法與運輸資訊(含日期)，使廢棄物流管理符合可追溯性目的。

6. 除役作業最佳化

除役作業的整體過程，從除污、拆解到廢棄物處理、貯存，與處置的過程中，應詳細考量各種可能方案，以評估最佳化的程序。拆解過程應考慮系統除污範圍、逐項對比設備所在房間與系統、部分拆除或完全拆除、切割尺寸、二次廢棄物產量、貯存與吊運之物料運輸管理及廢棄物之臨時貯存區；廢棄物運輸應考慮運送工具、起重設備、運輸頻率等；拆解/拆除/處理/輸送/運送/處置等作業使用之容器，是重要的事前準備項目，日本不像美國有各種裝置容器的設計，日本容器有固定的尺寸、材質及適用範圍，切割前應考量切割的尺寸。

7. 除役技術與方式

充分了解國內產業的技術並與國外技術進一步結合應用，在一些情況下須採用新研發或創新的技術時，應注意是否導致增加過多的成本風險。

8. 專案管理

核電廠除役是長期且複雜的計畫，因此整體的除役計畫管理非常重要，相較於運轉期間常態性作業有固定作業模式依序執行，除役期間管理應該具有靈活性，能夠迅速應對新情況，依工作性質需要賦予現場管理層應有的權限，需掌握每日作業進度而有更密集的管制與監控，因此除役期間應採取與運轉期間不同的管理制度，專案管理可在執行有限範圍除役項目，降低作業複雜度與有效管理。

9. 除役文化與心態的改變

當核電廠機組由運轉進入除役後，由於運轉、除役過程所關注的安全與工作的重點目標，有很大的不同，在面對除役作業的規劃及管理等等事務時，不能再沿用運轉期間的思維與心態，必需要有所調整改變。其差異如下：

- (1) 由生產為導向的管理，轉變為以計畫為導向的管理。
- (2) 由確保系統功能，轉變為重視廢棄物管理與放射性廢棄物數量最小化。
- (3) 由運轉需憑藉永久性廠房結構安全，轉變為利用臨時設施進行除役拆解作業。
- (4) 由核能運轉安全和放射性危害風險，轉變為降低核能危害風險，與放射性危害風險性質改變，但工安風險顯著增加。
- (5) 從熟悉的工作環境，轉變成可能存在未知風險的工作環境。
- (6) 由不在意作業環境是否為低輻射/污染區，轉變為重視物料清潔與否及作業環境是否為低輻射/污染區。
- (7) 監管重點由運轉管制，轉而加強廢棄物管理與處置之輻安與工安。

10. 組織單位與人力資源的整合

不同階段的除役作業會有不同的需求，因此設施經營者在不同除役階段有具備相應專業與管理知識、技術、供應鏈與領導力。

11. 激勵

核電廠除役需讓員工明瞭除役是長期工作，不是核電廠不運轉就結束了，因此在除役的過程要時常激勵核電廠員工，提醒後續的管理與執行工作依然十分重要。

12. 利害關係人的參與

核電廠除役對當地居民的溝通極為重要，做好民眾的溝通是順利執行除役的重要因素。

綜合上述，依日本的除役經驗，說明除役作業要能夠安全、順利執行的關鍵要素，包括廢棄物管理、組織和管理體系，以及文化和心態的改變。從執行的角度來看，除役作業被視為一種「經驗工程」，可以從一個計畫中獲得的經驗教訓，改進或應用於其他核電廠除役計畫；此外，除役面臨的非技術性課題也是重要考量，同時國際合作和經驗交流有助於提高計畫的效率和安全性，至關重要。

二、濱岡、美濱、普賢核能電廠與敦賀 JAEA 除役技術中心參訪活動

本次訓練課程 ANDES 安排參訪濱岡核電廠、美濱核電廠、普賢核電廠及日本原子力研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)除役技術中心等，實地了解電廠除役作業狀況與研究發展情形，參訪情形簡述如下。

(一) 濱岡核電廠參訪活動

1. 濱岡核電廠背景資料

濱岡核電廠屬於日本中部電力公司所營運之唯一核電廠，位於日本靜岡縣御前崎市，共有 5 部機組，第 1、2 號機組於 2009 年 1 月 30 日停止運轉並進入除役階段；第 3 至 5 號機組，則於 2011 年 3 月日本福島第一核電廠事故後均停止運轉，並進行強化因應海嘯之安全措施，以符合 2013 年 7 月施行之新規定。目前濱岡核電廠第 3 及 4 號分別完成改善措施，並於 2015 年 6 月 16 日及 2014 年 2 月 14 日提送機組重啟文件，NRA 仍在審查中；另第 5 號機，核電廠持續進行強化措施改善及準備送審資料。濱岡核電廠機組相關資訊如表 2。

表 2 濱岡核電廠各機組現況

	1 號機	2 號機	3 號機	4 號機	5 號機
反應器類型	BWR	BWR	BWR	BWR	ABWR
輸出功率	540(MWe)	840(MWe)	1100(MWe)	1137(MWe)	1380(MWe)
開始運轉日	1976 年 3 月	1978 年 11 月	1987 年 8 月	1993 年 9 月	2005 年 1 月
現況	2009 年 1 月 30 日永久停止運轉，執行除役作業中。		2015 年 6 月 16 日申請重啟審查中。	2014 年 2 月 14 日申請重啟中。	仍強化措施改善中，準備申請重啟。

2. 濱岡核電廠除役作業概況及現場參訪

濱岡核電廠 1、2 號機規劃 30 年完成除役，除役作業分為四個階段執行，每個階段完成後，進入下一個階段前必須先向日本 NRA 提出申請，核准後方得執行下一階段的除役作業。除役四階段分別為：第一階段為準備階段，主要作業包含燃料移出燃料池、污染狀況調查、系統除污、輻射管制區外的系統與設備拆除作業；第二階段為反應器周邊設備拆除階段，核電廠仍持續進行污染調查、系統除污等作業；第三階段係拆除反應器區域設備階段；第四階段為廠房拆除階段，濱岡核電廠 1、2 號機除役規劃，如圖 53。

濱岡核電廠於 2016 年 2 月 3 日完成第一階段有關核子燃料移除作業後，即進入第二階段，首先進行系統除污與反應器周邊設備拆除作業。對於系統除污作業部分，中部電力公司規劃兩階段執行，第一階段期間執行一次圍阻體內之再循環系統、爐心冷卻淨化系統、餘熱移除系統的除污作業，第二階段執行反應器內部組件與一次圍阻體外之爐心冷卻淨化系統、餘熱移除系統的除污作業；濱岡核電廠 1、2 號機分別於 2019 年及 2020 年完成系統除污作業，如圖 54。

另外，濱岡核電廠逐步完成 1、2 號機反應器周邊設備包括煙囪、汽機主體、主凝汽器、飼水及凝結水系統設備、備用硼液控制系統設備、主蒸氣管路等拆除作業，目前仍持續進行拆除作業中；第三階段將進行反應器拆除作業，核電廠考量此將是日本首次拆除商用反應器，因此核電廠將開發更安全高效的拆除方法，盡可能減少拆除過程中產生的放射性廢棄物及更有效地存放，故核電廠向 NRA 提出除役計畫變更，將規劃

於 2023 年展開第三階段拆除作業變更至 2024 年執行。

濱岡核電廠 1、2 號機於第二階段拆除作業中，將屬於放射性活度濃度低於解除管制(Clearance)標準的部分，仍存放於 1、2 號機廠房內，核電廠待確定處理方式後，才會進行外釋。核電廠於 2017 年 10 月 17 日提出有關解除管制(Clearance)標準之測量和評估方式，經 NRA 審查後於 2019 年 3 月 19 日核准；核電廠據此自 2019 年 11 月 1 日起陸續提出 5 批約 1386.9 噸，檢測結果符合解除管制(Clearance)放射性廢棄物量測與評估檢測標準，且經 NRA 審核同意，惟該 5 批符合解除管制(Clearance)廢棄物仍存放於廠區，僅 90 噸製成水溝蓋使用於濱岡核電廠內，作為再利用範例，如圖 55。

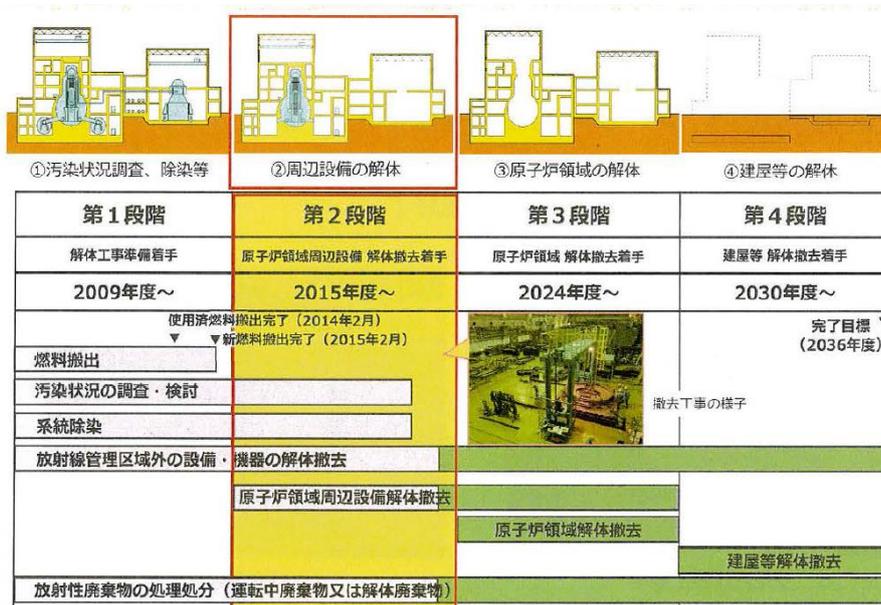


圖 53 濱岡核電廠 1、2 號機 4 階段除役作業規劃 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

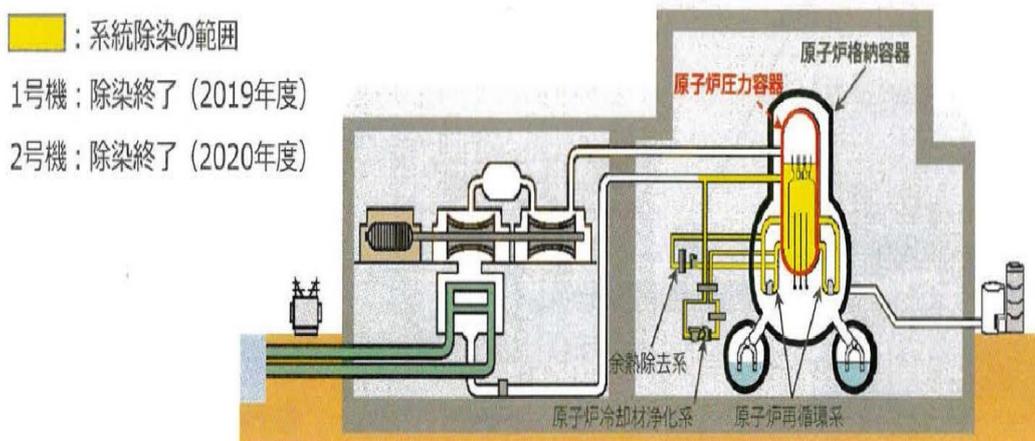


圖 54 濱岡核電廠系統除污範圍 (圖片來源 ANDES 訓練資料)



圖 55 濱岡核電廠解除管制廢棄物(金屬)再利用於廠內設施案例
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

此次參訪濱岡核電廠分別至除役中 1 號機聯合廠房及 2 號機汽機廠房等區域參觀，主要觀察結果與心得如下：

- (1) 1 號機聯合廠房：核電廠為進行系統除污作業，先將液壓式控制棒驅動系統(HCU)移除，利用該淨空區域，建立化學處理系統，進行後續系統除污作業。由現場觀察系統除污前，應考量設備設置空間、動線規劃與除污準備時程。
- (2) 2 號機汽機廠房：核電廠將設備拆除後進行分類，每件材料以顏色做記號分類，並置於專用容器中，並有材料表單可提供溯源的管理，惟因設備拆除無法順利移出，廠區內置放拆除後專用容器(方型鐵網格)，雖然有序排列堆置，但仍會影響整體除役作業進展，故妥適規劃設備拆除後廢棄物處理方式或存放，將有助於除役作業推展。
- (3) 對於廢棄物處置部分，每一個容器都有相關的文件，詳細記錄內容物以及原來的設備名稱與位置，讓廢棄物可以追溯管理，廠內人員說明這是為了符合日本原子力規制委員會(NRA)的要求。
- (4) 廢棄物外釋量測區域：濱岡核電廠將主發電機拆除後之區域，建置廢棄物外釋量測區域，作為未來放行量測廠房，該區域規劃量測設備、量測暫存區與待外釋區域等，濱岡核電廠規劃可作為我國核電廠設置參考。

(二) 美濱核電廠參訪活動

1. 美濱核電廠背景資料

日本關西電力公司分別有美濱、高濱及大飯等 3 座核電廠，其中美濱核電廠 1、2 號機及大飯核電廠 1、2 號機等 4 部機停機進行除役；另美濱核電廠 3 號機、高濱核電廠 1、2、3、4 號機及大飯核電廠 3、4 號機等 7 部機組均運轉中。

本次 ANDES 安排參訪關西電力公司-美濱核電廠，位於日本福井縣美濱町，共有 3 部機組，第 1 號機組於 1971 年 11 月開始運轉，係為日本第一座商業用壓水反應器，其後 2、3 號機陸續加入運轉。核電廠於 2015 年 4 月 27 日正式決定第 1、2 號機組停止運轉並進入除役，除役計畫於 2017 年 4 月 19 日獲管制機關認可。詳細的美濱核電廠歷史請參見圖 56 及各機組現況如表 3。

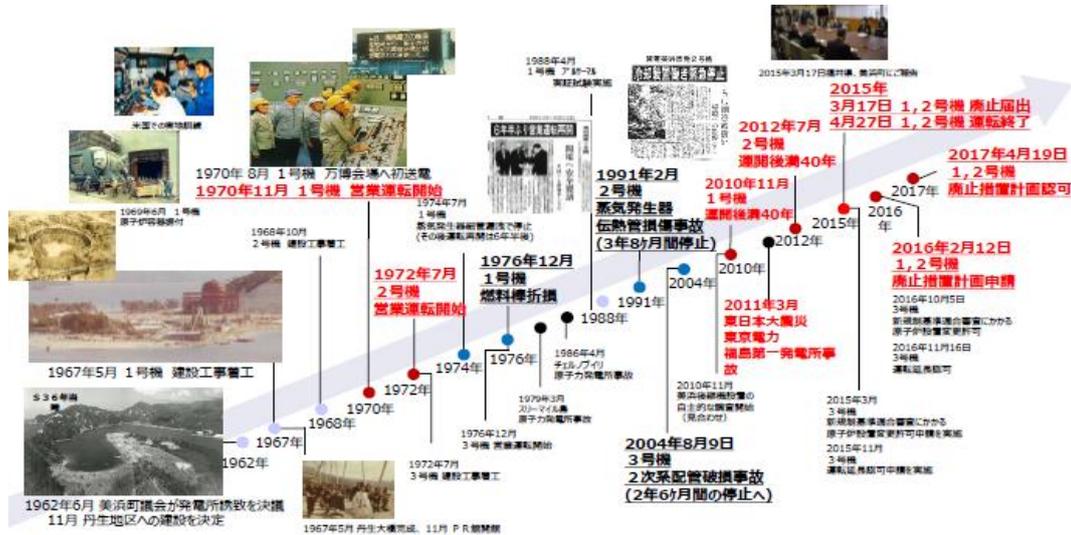


圖 56 美濱核電廠歷史 (圖片來源 ANDES 訓練資料)

表 3、美濱核電廠各機組現況

	1號機	2號機	3號機
反應器類型	PWR	PWR	PWR
輸出功率(MWe)	340	500	826
開始運轉日	1970 年 11 月	1972 年 7 月	1976 年 12 月
現況	2015 年 4 月永久停止運轉， 2017 年 4 月取得除役許可， 執行除役作業中。		2016 年 11 月 16 日運轉延長獲得 核可，2021 年 7 月 27 日正式再 啟動。

2. 美濱核電廠除役作業概況及現場參訪

美濱核電廠 1、2 號機除設計畫主要分別包含拆除準備、反應器周邊設備拆除、反應器拆除、廠房拆除等四個階段，約 30 年完成。美濱核電廠 1、2 號機於 2017 年開始進行第一階段除役拆除準備作業，主要執行項目包含系統除污、輻射特性調查、新燃料移出、部分二次側系統設備拆除(主汽機、冷凝器等大型設備)；2022 年進入第二階段反應器周邊設備拆除，此期間除持續執行二次側主發電機等設備與一次側冷卻水系統拆除，以及用過燃料搬出等作業。

美濱核電廠引用法國除污系統，自 2017 年 4 月開始進行系統除污作業，至 2018 年 3 月完成反應器、蒸汽產生器、調壓槽等一次測系統除污作業，兩部機除污效果平均可達 96.7%以上；另核電廠在完成系統化學除污後，於 2018 年 3 月執行輻射特性調查，並已於 2021 年 3 月完成。

美濱核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，該等設備拆除後，核電廠依運轉期間管制方式進行處理，至現場參訪時，汽機廠房除主發電機待拆除外，其餘空間非常潔淨，並無堆置拆除後之廢棄物。

本次分別至 1 號機汽機廠房及反應器廠房等區域參訪，主要觀察結果與心得如下：

- (1) 因汽機廠房，除主發電機尚待拆除外，其餘均已完成拆除，且未堆置拆除後廢棄物，現場環境空曠乾淨；因美濱核電廠反應器為 PWR 系統，汽機廠房屬二次側未受污染之區域，汽機拆除後可以作為金屬再利用，經切割成卡車可載運尺寸即可清空該區域設備，惟拆除後區域仍需有適當安全處置措施，防止工安意外發生。
- (2) 汽機廠房高、低壓汽機皆已完成拆除，僅剩發電機尚未拆除，主要考量汽機廠房現有吊運設備無法處理發電機之重量，待後續規劃拆除。依現場作業經驗，於設備拆除作業前，應預先了解設備拆解尺寸與吊運設備能力，以妥善規劃與應變拆除方案與時程。
- (3) 核電廠於現場參訪前，先利用 VR 的穿戴裝置於會議室說明反應器廠房設備配置情形與處置狀態，有助於了解實際現場情形；另至反應器廠房參觀輻射特性

調查時相關取樣點位置，其取樣位置周圍皆有用黃色膠布標示取樣框，即使已完成輻射特性調查，仍可於經過時知悉取樣點位置。

- (4) 核電廠已將新燃料移至用過燃料池，將新燃料庫清空待拆除，現場並留有系統除污時新設置管路，依廠區妥適規劃，而非以臨時工程方式配置。
- (5) 另核電廠已於 2022 年 10 月起開始進行 1、2 號機反應器周邊設備拆除，因該等設備拆除後廢棄物，將涉及放射性廢棄物分類及處置，目前暫時存放廠內，尚未外釋。

(三) 普賢核電廠參訪活動

1. 普賢核電廠背景資料

普賢核電廠屬於進步型熱滋生反應器(Advanced Thermal Reactor, ATR)原型爐，為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，位於日本福井縣敦賀市敦賀半島。自 1979 年開始運轉，並於 2003 年 3 月決定永久停止運轉，同(2003)年 8 月將反應器內用過燃料挪移至燃料廠房暫存，核電廠於 2005 年 5 月依據日本法規提出除役計畫，日本管制機關於 2008 年 2 月認可普賢核電廠除役計畫後開始進行除役作業。普賢核電廠機組現況如表 4。

表 4 普賢核電廠機組現況

反應器類型	ATR(Advanced Thermal Reactor)
輸出功率	165 MWe
開始運轉日	1979 年
現況	2003 年 3 月永久停止運轉，2008 年 2 月除役計畫獲日本管制機關認可，執行除役作業中。

2. 普賢核電廠除役作業概況及現場參訪

普賢核電廠除役作業，依除役計畫主要分成四個階段，分別為重水與氬系統除污作業、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，預計於 2040 年前完成相關作業。

普賢核電廠於 2008 年 2 月開始進行重水與氬系統除污作業階段，並分別因除氬作

業耗時而申請展延 5 年，以及燃料廠房內的用過燃料退出時程展延至反應器拆除階段前完成。核電廠陸續完成除污作業及汽機廠房內部設備(如飼水加熱器、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)拆除作業後，於 2018 年 5 月獲 NRA 認可後進入反應器周圍組件拆除階段。

普賢核電廠除將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拆除後空間，設置拆除廢棄物除污及暫存區域外，也陸續完成反應器冷卻系統、緊急冷卻系統等反應器周圍設備及管路拆除作業，目前正辦理拆除汽輪發電機等主要設備，同時進行反應器本體拆除作業方法與規劃。

另對於普賢核電廠拆除廢棄物，屬於放射性活度濃度低於解除管制標準(Clearance)部分，核電廠於 2018 年 8 月 31 日提出有關 Clearance 標準之測量和評估方式，並經 NRA 審查後核准；核電廠據此自 2019 年 11 月起陸續提出 5 批約 525.7 噸，檢測結果符合 Clearance 放射性廢棄物量測與評估檢測標準，且經 NRA 審核同意，該 5 批可外釋廢棄物仍存放於廠區倉庫，另有少部分作為再利用示範。

普賢核電廠在廢棄物的處理，分為拆解之金屬廢棄物(或不可燃物)與混凝土廢棄物。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可除污，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 標準，則進行廢棄或再利用處置。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續處置；若屬非放射性或經判定符合 Clearance 標準，則進行廢棄或再利用處置。歸類為低放射性廢棄物中，大部分屬於 L3 級放射性廢棄物，而 L3 級的處理大部分屬經除污後應可達 Clearance 標準。由核電廠提供的資料，原本 L3 級預估約有 45.4 千噸，但經過除污後，已將原產出 45.4 千噸減低至 5.4 千噸。普賢核電廠於 2018 年經 NRA 同意放射性廢棄物外釋之量測與評估方法。

目前普賢核電廠汽機廠房除汽輪發電機待拆解外，其餘設備均已拆除，冷凝器拆除之空間已設置除污設備，汽機廠房一樓區域除作為管制區拆除廢棄物除污後之臨時貯存場所外，並安裝輻射量測偵檢設備，在量測/評估確認符合出管制區標準後，先運送至非管制區的 1 號倉庫等待主管機關外釋檢查，經主管機關確認符合外釋標準後，

待外釋至合格貯存場前，仍存放於核電廠臨時倉庫貯存。以上廢棄物出管制區前之除污、臨時貯存，以及輻射偵檢與評估等作業，都在汽機廠房內進行；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如下圖 57。

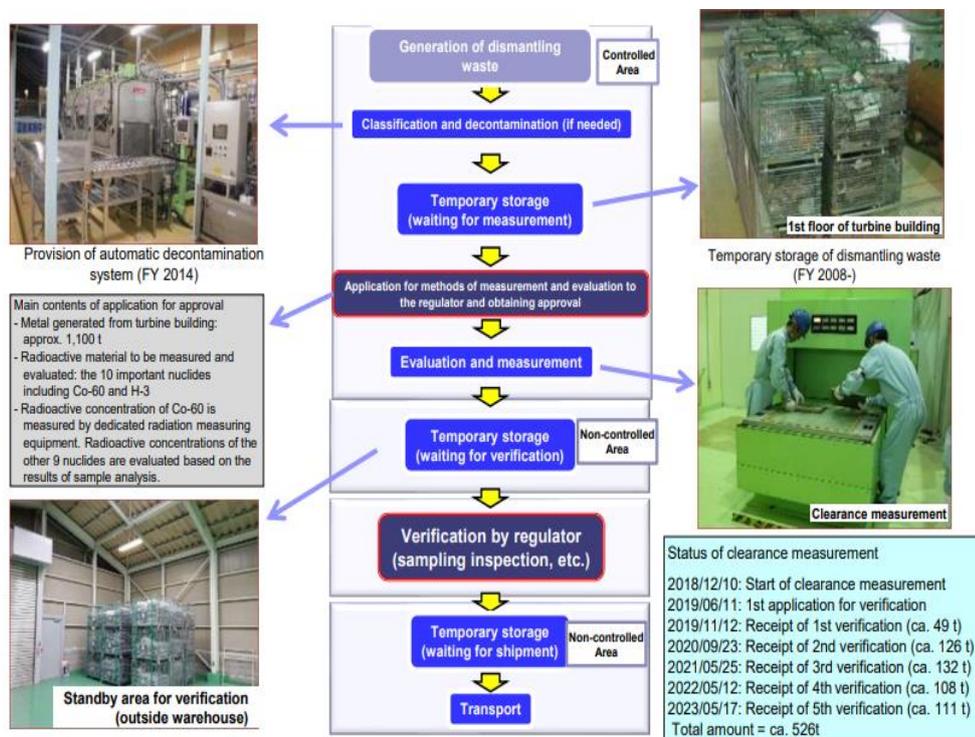


圖 57 普賢核電廠確認放射性廢棄物符合解除管制標準之作業流程 5 批
(圖片來源 ANDES 訓練資料)

本次分別至 1 號機汽機廠房及反應器廠房等區域參訪，主要觀察結果與心得如下：

- (1) 普賢核電廠與美濱核電廠皆於現場參訪前，提供 VR 的現場介紹，說明廠內除役現況，此方式可以增加與民眾溝通的一種方式，讓部分無法實際進入現場的區域，也可透過 VR 讓民眾及來訪者深入了解廠區的實際情況。
- (2) 普賢核電廠廢棄物管理使用 QR code 或 barcode 方式協助進行廢棄物管理，濱岡核電廠及美濱核電廠在廢棄物的管理尚未採用此管理方式，此為普賢核電廠在除役的過程採用數位化管理的一環，將拆解廢棄物資料及工作結果，能盡可能詳實而直接收集在資料庫裡。
- (3) 對於盛裝廢棄物之方形網格容器外側，皆貼有兩種資訊之編碼標籤，包括拆解物系統、設備名稱之資訊標籤，以及方形網格容器的資訊標籤，在標籤旁邊會再貼上顏色標示其廢棄物種類。例如反應器廠房拆除之廢棄物會

在容器上貼紅色貼紙，以辨識為具放射性污染之廢棄物(仍需除污)，其他管制區拆解廢棄物盛裝容器則貼上藍色貼紙(待除污)之廢棄物，及綠色標示為解除管制廢棄物，未來待符合出管制區偵檢標準後運至非管制區臨時儲存。

- (4) 切割後拆除廢棄物將進行除污作業，其設置位置與空間應有適當規劃，並考量配合廢棄物拆解作業、運輸動線、臨時貯存等空間與操作需求進行規劃，除污設備應有區隔、輻射防護、二次污染等遮護設施。
- (5) 反應器廠房拆除廢棄物暫存於汽機廠房區域，原照明設備已移除改採臨時照明，明顯可見度不足，因此拆除作業計畫若將範圍內所有設備，連同照明、空調、消防等系統一併同時拆除，對工安、環境安全，以及意外事件應變等影響，應審慎評估其適當性。

(四) 敦賀 JAEA 除役技術中心參訪活動

日本原子力研究開發機構(JAEA)於 2018 年 6 月在日本福井縣敦賀市設置除役技術中心(FUKUI Smart Decommissioning Technology Demonstration Base, 簡稱 Sumadeco)，主要可分為除役拆除技術示範、雷射切割應用、除役拆除作業模擬等三大領域，以提供當地核電廠除役相關技術支援或訓練，並開放工業界或學術界使用，期能促進經濟發展，以及對解決除役議題能有所貢獻。

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，簡述如下：

1. 除役拆除技術展示研發

本研發重點是開發一套混和虛擬實境(Mixed Reality, MR)系統，以支援除役拆除計畫的準備和執行。這個系統具有多種優勢，可以在工作人員進行除役拆除前，模擬現場巡視和作業位置確認，以確保拆除操作能順利執行。此外，MR 系統還可以将輻射特性調查的結果轉換為可見的等效劑量率(mSv/hr)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(如圖 58)。這個系統的優點在

於它能夠提供即時的視覺化信息，幫助培訓人員確保拆除作業的安全性和效率。而在現場實際穿戴 MR 裝置進行測試的情況，首先說明了除役現場的資訊是使用雷射掃描儀將除役現場資訊數位化，該數位資訊可透過點雲實現量測現場空間的各種距離參數，並讓人員透過穿戴裝置使除役現場的景象依照實際的比例重現，讓人就像在現場一樣，該系統也可測試拿取虛擬的拆解工具進行拆解作業，移動工具的過程中，若發生干涉系統會有顯示，讓操作人員知道。

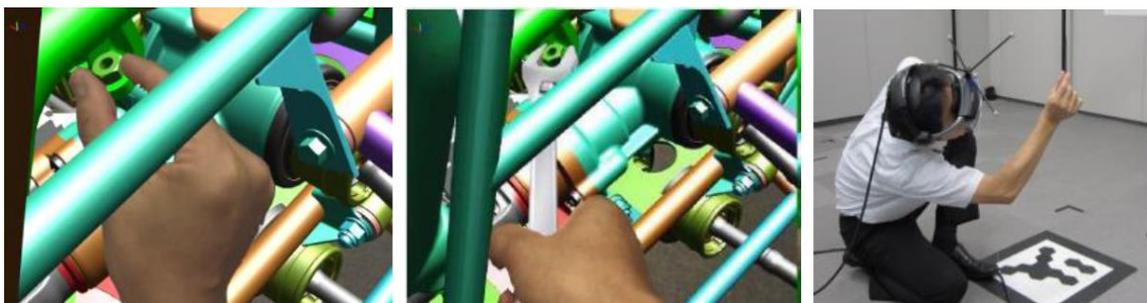


圖 58 JAEA 使用之 MR 系統
(圖片來源 JAEA FUGEN Decommissioning Engineering Center)

2. 進階雷射切割應用

敦賀 JAEA 除役技術中心致力於研發多功能雷射設備，以用於除役拆除工作。這些設備組件包括溫度參數監測、三維角度控制系統和能量維持控制系統。通過進階雷射切割技術，可以實現更快的執行時間、更平整的切割表面，並減少噴濺物的產生。這些技術通過遙控多軸機械手臂系統和適當的雷射切割控制系統，解決了在高輻射環境下使用雷射切割的挑戰。這包括機械手臂安裝融熔切割控制系統並能夠搭載高功率光纖雷射的裝置、用於抓取和回收切割物的設備，還有收集雷射切割噴濺物的設備(如圖 59)。

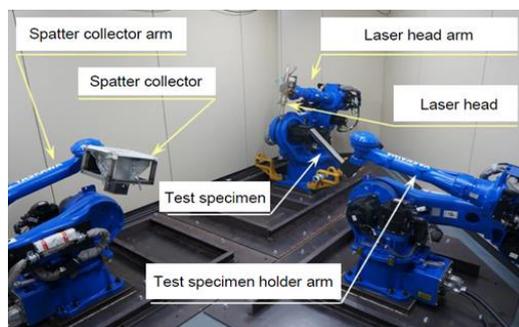


圖 59 多軸機械臂使用雷射切割相關設備
(圖片來源 JAEA FUGEN Decommissioning Engineering Center)

3. 除役拆除作業模擬測試

為了確保除役拆除作業的順利進行，敦賀 JAEA 除役技術中心建立了一個模型水槽(圖 60)，用於進行各種切割技術的測試，包括進階雷射切割技術以及其他常用的切割技術。這個模型水槽的設計參考了普賢核電廠的反應器，並提供了一個仿真的作業環境，以測試水下切割技術。同時，也在切割實驗室進行了空氣中切割技術的研究，並設置了粉塵過濾裝置以確保工作環境的安全。



圖 60 JAEA 除役中心模型水槽

(圖片來源 JAEA FUGEN Decommissioning Engineering Center)

這些研究和測試工作有助於提高核能廠的除役效率，同時確保安全，減少對環境的影響。敦賀 JAEA 除役技術中心在這些關鍵領域的工作為核能除役提供了更多的選項和解決方案，同時也為未來的核能除役工作提供了寶貴的經驗和指導。

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對於除役拆除作業建模測試等區域之參訪，主要觀察結果與心得如下：

- (1) JAEA 研究開發虛擬實境應用於核電廠除役拆除作業之工前訓練及模擬施作，將有助於提升人員訓練及現場拆除作業之成效。
- (2) 除役拆除作業建模測試，雷射熱切割技術除應用於切割不同板材厚度研究，屬於金屬表面除污技術，不同運行速度對表面除污之影響方面，研究人員表示以雷射處理表面除污，若速度太慢可能會導致物件表面粗糙，造成輻射污染物質附著粗糙溝槽，

影響除污品質。

- (3) 現場參訪未實際演示模擬水槽內部運作情形，但現場解說表示已實際測試過使用多軸機械臂搭配雷射切割系統，進行水下模擬切割測試，測試結果顯示有助於提高核電廠的除役效率，同時確保安全，減少對環境的影響。
- (4) JAEA 不定期邀請民間企業舉行公開研討會及技術論壇，每年也有提供有意從事除役作業之除役訓練課程，且不定期舉行研討會邀請民間企業一起解決除役面臨的技術挑戰。

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，而現階段部分機組已進入反應器周邊設備拆除作業，如東海、敦賀、普賢、濱岡、美濱、島根、文殊核電廠等，且濱岡核電廠與美濱核電廠皆有系統化學除污之經驗，而我國核一、二廠已進入除役期間，對於輻射評估、拆除作業、輻射防護與工業安全作業管理、不同階段之除役規劃、系統化學除污等均有相當之實務經驗與細節可再進一步交流，以獲得相關除役拆除作業之寶貴實務經驗。
2. 參訪日本濱岡核電廠與普賢核電廠的現場除役作業，發現日方除對於除役期間產生的大量廢棄物的暫存、除污、切割、檢測與貯存等作業空間有具體規劃與步驟，建議可參考日本核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、離廠偵測之管制作業均有助益，以提昇除役拆除效能與廢棄物處置之管理。
3. 參訪普賢核電廠與美濱核電廠時，電廠除進行簡報說明外，至現場參訪前，均提供 VR 介紹電廠現況及廠區除役作業情形，藉此方式可增加現場參訪前更深入了解廠區的實際情況，有助於提升參訪者現場參訪之效益。
4. 美濱核電廠為日本第一座 PWR 除役核電廠，其系統化學除污與輻射特性調查檢測區之作業區域空間規劃標示，以及拆解後廢棄物、汽機廠房二次側系統設備拆除作業、廢棄物處理及管理系統建置，皆有相當完備之規劃與管理，可供我國核電廠除役管制作業之參考，建議對於電廠除役技術、經驗與專業知識，可持續再了解與交流。
5. 日本敦賀 JAEA 除役技術中心係提供日本核電廠除役相關技術支援或訓練，並持續研究開發虛擬實境應用於核電廠除役拆除作業、雷射切割技術應用於除役作業及除役拆除作業模擬測試等相關技術研發，藉由此次現場參訪更進一步了解該中心為研發普賢核電廠的反應器拆除技術，建置一個仿真的作業環境，以測試水下切割技術發展情形。
6. 日本針對可解除管制廢棄物之管制標準，與我國一致皆參考 IAEA RS-G-1.7 標準制定，經國家批准/確認後，可歸類為「不需要作為放射性物質處理的物品(解除管

制物質)」。惟日本業者(核電廠)除暫存於廠內，亦有少部分作為再利用示範，以推廣與示範方式達成與民眾溝通之成效。另對於審查、檢驗及料帳管理與資訊公開之作法，建議持續交流與了解，以作為本會除役管制之參考。

7. 日本核電廠除役有關核子保安與緊急應變有許多具參考價值的資訊，如緊急應變計畫區域變更部分，可供我國處理核電廠除役緊急應變整備管制作業，以及 PAZ 與 UPZ 範圍變更審理核子反應器設施緊急應變計畫區大小調整之參考；此外日本核電廠需運轉與維護的範圍隨著除役推展而縮減，因此緊急應變整備工作的範圍與規模也跟著縮減，且緊急事故等級也有相應降低作法，可供我國作業管制參考，惟用過核子燃料仍存放在核電廠中，相關核子保安工作要求仍應維持運轉期間之管制方式。

伍、附件

附件一 ANDES-2023 訓練課堂照片

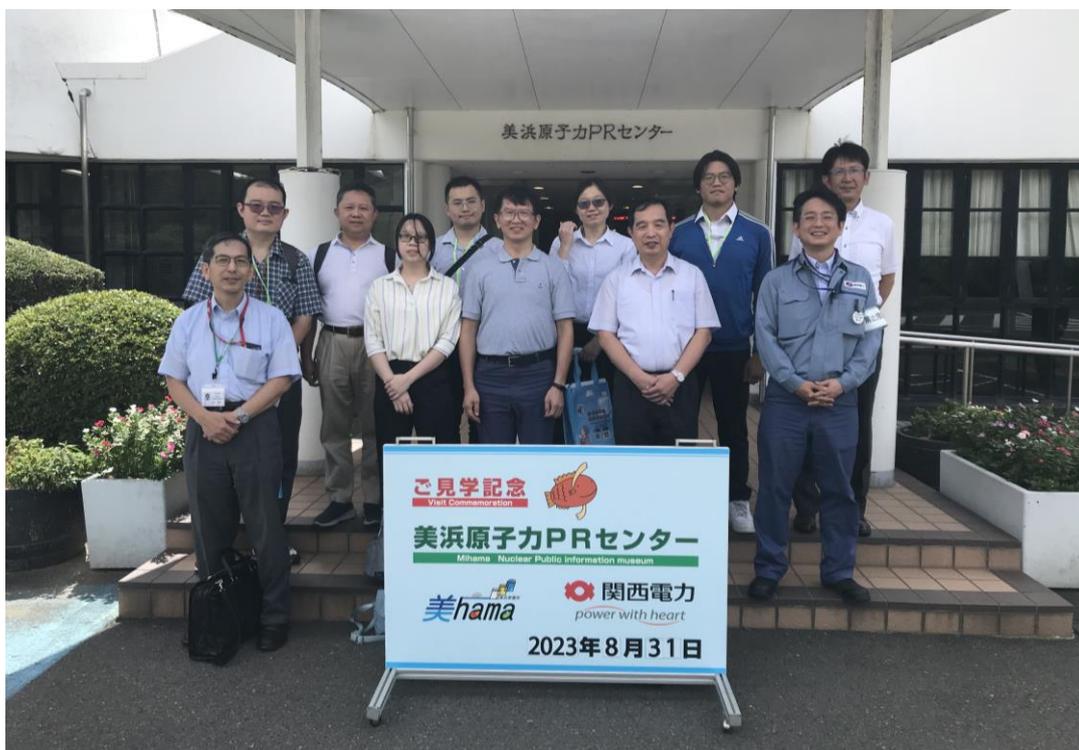
附件二 ANDES-2023 現場參訪照片

附件一 ANDES-2023訓練課堂



ANDES-2023 除役訓練研習課程-授課實景

附件二 ANDES-2023 現場參訪



ANDES-2023 除役訓練研習課程-參訪美濱核電廠合影