

出國報告（出國類別：其他）

赴西班牙參加核電廠除役技術訓練及 參訪 Zorita、El Cabril 核能設施

服務機關：核能研究所

姓名職稱：	洪毓翔	研究助理
	陳鴻斌	研究員
	鄭世中	研究員
	李振弘	副研究員
	林琦峰	副工程師
	蔡弘毅	助理工程師
	謝賢德	助理研究員
	廖啓宏	助理工程師
	張淑君	副研究員
	李崙暉	副研究員
	戴啓夫	副工程師

趙裕 副研究員

派赴國家：西班牙

出國期間：103 年 3 月 16 日~103 年 4 月 9 日

報告日期：103 年 5 月 8 日

摘 要

本次國外公差係執行台電公司委託「核一廠除役許可申請及除役作業規劃工作」技術服務案之需求，強化本計畫執行團隊之執行能力，規劃委請國際上有核設施除役經驗之廠家，提供核電廠除役技術訓練及除役現場實務參訪。訓練課程期程為 103 年 3 月 18 日至 4 月 7 日，課堂訓練地點在西班牙馬德里（Madrid），實地參訪包括正在進行除役的 Zorita 核電廠及 El Cabril 中低放射性廢棄物最終處置設施。

參與訓練人員包括核研所 12 人、台電公司 2 人、泰興工程顧問公司 2 人、益鼎工程顧問公司 2 人、清華大學 6 人，共計 24 位國內參與計畫人員。

本次訓練由西屋電氣公司配合辦理，課程研討內容包含除役策略分析、分工架構與排程、除役費用估計與廠址再利用、廠址特性調查、拆除切割技術、除役放射性廢棄物管理、除污等。透過與核電廠除役及廢棄物管理各領域專家進行完整的核電廠除役技術經驗交流，並且經由參訪西班牙正在進行除役拆除的 Zorita 核電廠，以及 El Cabril 中低放射性廢棄物最終處置設施之運作，實地體驗除役現場實務，學習國際上核電廠除役規劃、執行及放射性廢棄物處理、處置之第一手經驗。

本次訓練有效融合國內團隊之執行介面，有助於本計畫之執行。課程內容及彙整之資料並可提供未來國內核電廠除役規劃及執行之參考。

關鍵詞：核電廠除役、拆除、除污、中低放射性廢棄物最終處置設施

目 次

(頁碼)

摘 要.....	I
一、目 的.....	1
二、過 程.....	2
(一) 公差行程.....	2
(二) 訓練課程規劃與摘要.....	3
(三) 西屋公司除役經驗.....	5
(四) 西班牙除役現狀.....	6
1. Zorita 核電廠除役.....	6
2. CIEMAT 設施更新整合.....	7
3. Vandellós I 核電廠的除役與拆除.....	7
三、心 得.....	9
(一) 除役訓練課程.....	9
1. 核電廠除役策略管理.....	9
2. 核電廠除役特性調查.....	14
3. 核電廠除役除污作業.....	26
4. 核電廠除役拆除工法.....	29
5. 核電廠除役廢棄物處理.....	31
6. 訓練課程提問與討論 (Q&A)	39
(二) 除役設施實地參訪.....	40
1. Zorita 核電廠除役計畫規劃及管理.....	40
2. Zorita 核電廠除役特性調查.....	45
3. Zorita 核電廠拆解工法與廢棄物包裝.....	51
4. Zorita 核電廠系統除污.....	60
5. 西班牙放射性廢棄物管理.....	61
6. ENRESA 公司與民眾溝通作法.....	64
7. El Cabril 中低放射性廢棄物最終處置設施運作.....	68
(三) 訓練與參訪心得彙整.....	73
四、建 議 事 項.....	75

表目錄

表 1、公差主要行程摘要.....	2
表 2、除役訓練課程內容摘要.....	3
表 3、西屋公司經驗示例-除役研究	5
表 4、Vandellós I 電廠各類介質釋出的放射性核種及其釋出量.....	22
表 5、Vandellós I 電廠廠址之導出濃度指引水平.....	22
表 6、放射性物質分類表.....	25
表 7、示範電廠特性調查報表.....	25
表 8、廢棄物來源調查結果.....	25
表 9、示範電廠之組件分類結果.....	26
表 10、切割工法比較.....	30
表 11、鑽心取樣列表.....	48
表 12、生物屏蔽區域金屬材料的偵檢結果.....	49
表 13、西班牙之管理廢棄物的來源、種類及數量.....	64

圖目錄

圖 1、核電廠運轉和除役程序.....	10
圖 2、除役規劃.....	10
圖 3、除役工作項目樹狀結構.....	11
圖 4、除役設施盤點資料庫建立流程.....	11
圖 5、西屋公司發展核電廠除役 WBS 範例.....	12
圖 6、除役規劃常用的里程碑.....	13
圖 7、除役階段之程序架構.....	13
圖 8、ISDC 成本估算之層次架構.....	14
圖 9、ISDC 與 WBS 關聯性.....	14
圖 10、核電廠污染與活化分布示意圖.....	15
圖 11、MARSSIM 作業流程.....	16
圖 12、MARSSIM 建物與土地污染分級流程.....	17
圖 13、MARSAME 系統分級與偵檢設計流程.....	18
圖 14、導出濃度指引水平之推導流程.....	20
圖 15、Vandellós I 電廠之偵檢規劃流程.....	21
圖 16、除役性除污種類比較.....	27
圖 17、Zorita 電廠之機械除污處理流程.....	29
圖 18、Zorita 電廠之化學除污處理流程.....	29
圖 19、西屋講師與參訓同仁於課程中之討論狀況.....	40
圖 20、西屋講師與參訓同仁於課後之討論狀況.....	40
圖 21、Zorita 核電廠.....	41
圖 22、Zorita 核電廠主要設施.....	41
圖 23、Zorita 核電廠生命週期地圖.....	41
圖 24、Zorita 核電廠用過核子燃料乾式貯存場.....	42

圖 25、Zorita 核電廠除役主要步驟.....	42
圖 26、Zorita 核電廠除役時程規劃.....	44
圖 27、Zorita 核電廠反應槽拆解及運送示意.....	44
圖 28、ENRESA 公司-SGDes 子系統操作畫面示意圖	45
圖 29、Zorita 核電廠接待展示中心外觀.....	45
圖 30、Zorita 核電廠接待展示中心內部.....	45
圖 31、Zorita 電廠污染程度分區圖。.....	46
圖 32、氣流式比例計數器.....	46
圖 33、阿伐貝他閃爍計數器.....	46
圖 34、阿伐閃爍計數器（ZnS）	46
圖 35、扁平型蓋格計數器.....	46
圖 36、NaI 加馬閃爍計數器.....	47
圖 37、塑膠閃爍計數器.....	47
圖 38、低能量加馬偵檢器.....	47
圖 39、生物屏蔽區 3D 示意圖.....	48
圖 40、特性調查鑽心取樣設備.....	48
圖 41、鑽心取樣位置示意圖（一）	48
圖 42、鑽心取樣位置示意圖（二）	48
圖 43、鑽心取樣分析結果與接收限值比較圖.....	49
圖 44、Zorita 生物屏蔽分類圖.....	49
圖 45、內部組件分割圖及量測位置示意圖-熱屏蔽	50
圖 46、內部組件切割件劑量率分布-熱屏蔽（左圖為劑量分佈，右圖為平均活度）	50
圖 47、內部組件分割圖-爐心側板	51
圖 48、爐心側板輻射劑量率量測結果.....	51
圖 49、爐心側板特性調查活度與理論值的比較.....	51
圖 50、Zorita 核電廠除役_圓盤鋸切割.....	52

圖 51、Zorita 核電廠除役_帶鋸切割	52
圖 52、Zorita 核電廠除役_鑽石索鋸切割	52
圖 53、Zorita 核電廠除役_水下切割控制系統	52
圖 54、Zorita 核電廠除役_改建汽機廠房吊掛動線	53
圖 55、Zorita 核電廠除役_反應器內大組件吊至水池	53
圖 56、Zorita 核電廠除役_配合容器尺寸切割作業（一）	53
圖 57、Zorita 核電廠除役_配合容器尺寸切割作業（二）	53
圖 58、Zorita 核電廠除役_配合容器尺寸切割作業（三）	54
圖 59、Zorita 核電廠除役_吊掛工具	54
圖 60、Zorita 核電廠除役_乾貯容器盛裝高階廢棄物（一）	54
圖 61、Zorita 核電廠除役_乾貯容器盛裝高階廢棄物（二）	54
圖 62、Zorita 核電廠除役_一般廢棄物容器盛裝低階廢棄物	54
圖 63、Zorita 核電廠除役_低階廢棄物水泥固化處理	54
圖 64、Zorita 核電廠除役_RPV 內部組件	55
圖 65、Zorita 核電廠除役_RPV 頂部組件	55
圖 66、Zorita 核電廠除役_RPV 底部組件	55
圖 67、Zorita 核電廠除役_切除驅動軸套管	56
圖 68、Zorita 核電廠除役_切除導管組件	56
圖 69、Zorita 核電廠除役_切除頂部支撐板	56
圖 70、Zorita 核電廠除役_帶鋸工具架設安裝	56
圖 71、Zorita 核電廠除役_切除上桶部	56
圖 72、Zorita 核電廠除役_移除熱屏蔽	56
圖 73、Zorita 核電廠除役_切除下桶部	57
圖 74、Zorita 核電廠除役_切除熱屏蔽	57
圖 75、Zorita 核電廠除役_切除底部增壓室	57
圖 76、Zorita 核電廠除役_壓力槽外殼拆解規劃（一）	57

圖 77、Zorita 核電廠除役_壓力槽外殼拆解規劃（二）	57
圖 78、Zorita 核電廠除役_壓力槽外殼拆解規劃（三）	57
圖 79、Zorita 核電廠除役_大管徑管路切割（一）	58
圖 80、Zorita 核電廠除役_大管徑管路切割（二）	58
圖 81、Zorita 核電廠除役_大型桶槽切割	58
圖 82、Zorita 核電廠除役_大型設備切割	58
圖 83、Zorita 核電廠除役_熱切割	58
圖 84、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱吊入水池	59
圖 85、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱裝載	59
圖 86、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱封蓋	59
圖 87、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱裝載設計	59
圖 88、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱吊出	60
圖 89、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱封焊	60
圖 90、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱吊運出廠（一）	60
圖 91、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱吊運出廠（二）	60
圖 92、Zorita 核電廠除役_乾貯容器運往暫貯場（一）	60
圖 93、Zorita 核電廠除役_乾貯容器運往暫貯場（二）	60
圖 94、ENRESA 之廢棄物管理業務	62
圖 95、西班牙放射性廢棄物之分布圖	63
圖 96、以影片配合人員說明除役工作的發展	66
圖 97、現場影像配合人員說明除役工作的發展	67
圖 98、ENRESA 公司儲存設施網站	67
圖 99、文宣資料供參訪民眾索取	68
圖 100、我國國旗飄揚在西班牙 El Cabril	70
圖 101、陳組長致贈紀念品	70
圖 102、Mr. Neri 在接待中心進行說明	70

圖 103、參訪成員聆聽解說..... 70

圖 104、El Cabril 中低放射性廢棄物處置設施..... 71

圖 105、El Cabril 中低放射性廢棄物處置設施..... 72

一、目 的

本次國外出差係執行台電公司委託「核一廠除役許可申請及除役作業規劃工作」技術服務案之需求，強化「核一廠除役計畫」執行團隊及執行能力，規劃委請國際上有經驗之核設施除役廠家，提供除役技術訓練及除役現場參訪行程。訓練課程於 103 年 3 月 18 日至 4 月 7 日，課堂訓練在西班牙馬德里（Madrid）舉行，由西屋電氣公司配合辦理。訓練課程中，安排西班牙、瑞典兩國除役專家講授核電廠除役法規、策略、管理、技術…等，並進行經驗交流及討論。課堂訓練後，再赴 Zotita 核電廠除役作業現場，以及 El Cabril 中低放射性廢棄物最終處置設施參觀訪問，獲得西班牙核電廠除役第一手資訊，對於國內即將面對核電廠除役的規劃準備，將有極大的助益。

本次國外公差之目的如下：

- (一)接受核電廠除役訓練課程，獲取除役相關法規、策略、管理、技術…等應用實例。
- (二)學習各類除役、拆除、除污及廢棄物處理等相關技術，吸收國外除役實務經驗。
- (三)參訪核電廠除役作業現場，實地瞭解執行情形並與工作人員經驗訪談。
- (四)聯繫國際核設施除役相關經營業者、主管、專家，建立交流管道。
- (五)檢討核一廠除役計畫委託西屋公司執行之工作成果，並討論未來可能合作內容。
- (六)完成「核一廠除役許可申請及除役作業規劃工作」技術服務案之履約責任，提供台電公司核一廠除役計畫執行策略分析、除污作業、拆除工法及廢棄物處理等相關技術。

二、過 程

（一）公差行程

本次公差訓練課程於 103 年 3 月 18 日至 4 月 7 日，於西班牙馬德里（Madrid）舉行，由西屋電氣公司配合辦理，公差行程如表 1。參與訓練課程人員包括本所 12 人、台電公司 2 人、泰興工程顧問公司 2 人、益鼎工程顧問公司 2 人、清華大學 6 人，共計 24 位，出國人員名單參見附件一。本次公差行程如表 1 所示。

表 1、公差主要行程摘要

月/日（星期）	工作內容重點	備註
3/16（日）~3/17（一）	去程，由桃園機場出發，經由法蘭克福轉機，翌日抵達西班牙馬德里	
3/18（二）~3/21（五）	訓練課程與技術討論	
3/22（六）~3/23（日）	資料彙整	
3/24（一）~3/28（五）	訓練課程與技術討論	
3/29（六）~3/30（日）	資料彙整	
3/31（一）~4/2（三）	訓練課程與技術討論	
4/3（四）	參訪位於 Pastrana 地區之 Zorita 核電廠	
4/4（五）	訓練課程與設施參訪 Q&A	搭火車轉往 Còrdoba
4/5（六）~4/6（日）	資料彙整	
4/7（一）	參訪位於 Còrdoba 地區之 El Cabril 中低放射性廢棄物最終處置設施	搭火車返回馬德里
4/8（二）~4/9（三）	回程，由西班牙馬德里機場搭機經阿姆斯特丹轉機回抵桃園機場	

(二) 訓練課程規劃與摘要

訓練課程內容如表 2 所示，訓練課程主題含括法規、除役策略分析、分工架構與排程、除役費用估計與廠址再利用、廠址特性調查、拆除切割技術、除役放射性廢棄物管理等，講師由西屋電氣公司及 ENRESA 公司內部各領域經驗豐富之專家擔任。另外，加上 Zorita 核電廠、El Cabril 中低放射性廢棄物最終處置設施等現場參觀訪問，訓練課程時數總計為 136 小時。

表 2、除役訓練課程內容摘要

DAY	ChinShan NPP Decommissioning Training Courses	Time (h)	Responsible Lecturer
3/18 (TUE)	Welcome, introduction, and general instructions	1	Lennart Nilsson
	Regulations IAEA/USA	4	Moises Sánchez
	Decommissioning strategies	3	Antonio Holgado
3/19 (WED)	Decommissioning strategies for BWR/PWR	5	A Holgado/M Sánchez
	Characterization: ctivation analysis (Vandellós I/ Zorita cases)	3	Antonio Holgado
3/20 (THU)	Characterization activated zones sampling Vandellós I and Zorita cases	4	Antonio Holgado
	Vandellós I: overview of a SAFSTOR project	2	Antonio Holgado
	Characterization : waste characterization	2	Julio Garcia/Diego Espejo
3/21 (FRI)	Site preparatory works (site reorganization, general functions and case studies: building modifications for decommissioning (CIEMAT/ Zorita)	8	A Holgado/R Monterroso
3/24 (MON)	Characterization : General strategy and contaminated zones/equipment	2	Moises Sanchez
	Decontamination (full system decontamination, decontamination workshops, concrete decontamination, case studies CIEMAT/ Vandellós I)	6	A Holgado/V Naranjo/JM valdivieso
3/25 (TUE)	Available dismantling techniques	2	Antonio Holgado
	Dismantling techniques for RPV& its internals and large equipment	2	A Holgado/M Sánchez
	Zorita reactor internals and vessel segmentation experience	4	R Garcia

3/26 (WED)	Demolition techniques (removal of activated concrete and demolition techniques)	4	Raul Monterroso
	Estimation of radioactive and hazardous waste	4	Niklas Bergh
3/27 (THU)	Work breakdown structure	8	Niklas Bergh
3/28 (FRI)	Cost estimation	8	Niklas Bergh
3/31 (MON)	Waste Management Plan	8	Ana Alonso
4/1 (TUE)	MARSSIM methodology/MARSAME/ DCGL's determination (soils and parameters)	8	M Peinador/M Sánchez / G Medinilla
4/2 (WED)	Organization and human resource management	2	JM Valdivieso
	Information management system	3	JM Valdivieso
	Stake holder communication and public acceptance	3	JM Valdivieso
	Move to Pastrana	4	All
4/3 (THU)	Visit Zorita NPP and Q&A	8	All, ENRESA at Zorita
	Move to Madrid	4	
4/4 (THU)	Training Q&A, discussion on Zorita NPP waste management	8	All
	Move to Cordoba	4	All
4/7 (MON)	Visit El Cabril site and move to Madrid	8	All
	Move to Madrid	4	All
		SUM 136	

（三）西屋公司除役經驗

西屋電氣公司（Westinghouse Electric Company）核能部門分為四個主要的子部門，分別為服務（Nuclear Services）、燃料（Nuclear Fuel）、核電廠（Nuclear Power Plant）及自動化（Nuclear Automation），其中核設施除役及廢棄物處理之相關業務是由服務部門負責，此部門在美國、比利時、德國、法國、瑞典及西班牙等地均設有分部。

除役的規劃工作包含除役決策、特性調查、除污、系統拆解、建物拆除及廠址封閉等活動，西屋公司於此領域的相關經驗有：極低放射性與低放射性廢棄物處置設施、廢棄物中期貯存設施、用過核子燃料貯存設施、鈾礦復原行動、物質與表面的解除管制行動、核電廠與核設施除役規劃、反應器壓力槽內部組件（RPV Internals）移除、主要組件拆除、除役之除污作業、廢棄物處理設施的設計與建造，以及拆除活動管理規劃等，西屋公司在核設施除役的相關經驗示例如表 3。

表 3、西屋公司經驗示例-除役研究

國別	核電廠/核設施	反應器類型	工作內容	時間
義大利	Latina	Magnox	可行性研究	2001-2002
義大利	Trino	PWR	除役計畫	2001-2002
西班牙	Zorita	PWR	特性調查、除污、拆除計畫	2002-2007
西班牙	Vandellós 1	GCR	除污、拆除、廢棄物回收計畫	2002-2007
瑞典	Studsvik	研究型反應器	除役研究	2001-2003
瑞典	Ågesta	研究型反應器	除役研究	2002-2003
西班牙	CIEMAT	研究型反應器	拆除計畫	2003-2007
義大利	ISPRA	研究型反應器	除役研究	2010-2017
瑞典	Swedish BWR's	BWR	BWR 拆除研究	2008-2010
瑞典	Oskarshamn 2	BWR	除役研究	2009-2010

西屋公司在核電廠除役領域擁有相當豐富的技術與經驗，目前正在執行西班牙 Zorita 核電廠爐體的除役工作；同時承接本所「核一廠除役許可申請及除役作業規劃工

作」技術服務案之工程管理與排程規劃及廢棄物盤點估算工作。本次除役技術訓練選擇在西班牙進行，由西屋公司配合辦理，主要考量西班牙 Zorita 核電廠係委託西屋公司進行除役工作且將近尾聲，可提供其所運用之技術及經驗；再者可以檢討委託西屋公司執行的成果，並且學習西屋公司除役的技術與經驗。以更加精進本計畫團隊的經驗，了解除役計畫管理技術，並從管理者的角度思考，對除役電廠的資產、拆除、復原、廠址再利用及廢棄物管理等層面，整合除役相關策略，提供核一廠除役規劃之參考。。

（四） 西班牙除役現狀

西班牙的核電廠除役工作由公營企業 ENRESA（Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A）統籌規劃，該公司目前執行西班牙國內核設施除役相關專案包括：

- 1.Zorita 核電廠的除役計畫
- 2.CIEMAT 研究中心的核設施更新整合計畫
- 3.Vandellós I 核電廠的除役與拆除

各項專案內容分述如下：

1. Zorita 核電廠除役

Zorita 核電廠，又名 José Cabrera 核電廠，位於 Almonacid de Zorita，Guadalajara，是一座單一機組 160 MWe 壓水式核電廠，自 1968 年開始營運，歷經 38 年運轉，於 2006 年 4 月 30 日永久停機，並展開實質除役工作。進行拆除工作前，有數項重要的準備工作，其中將用過核子燃料自燃料池移出至暫存設施為最主要且最關鍵的準備工作。

Zorita 核電廠用過核子燃料的處理工作有三個重要關鍵點，分別是

- (1) 2006 年電廠業主 Unión Fenosa Generación 公司獲得西班牙工業、觀光及貿易部（Ministry of Industry, Tourism and Trade）核准興建用過核子燃料乾式貯存設施。
 - (2) ENRESA 公司的乾貯規劃獲得西班牙核子安全委員會（Nuclear Safety Council, NSC）核可後，開始建造乾貯護箱及擴建用過核子燃料的乾式貯存設施。
 - (3) 2009 年，用過核子燃料成功移入乾式貯存設施。
- 從此，Zorita 核能電廠便進入拆除及廢棄物移除階段。

Zorita 核電廠的拆除及廢棄物移除工作預計在 2010 至 2015 年這段期間內進行，主要的工作項目包含

- (1) 拆除設備與系統
- (2) 拆除建物
- (3) 拆除主要組件
- (4) 除污作業
- (5) 移除放射性及一般廢棄物
- (6) 廠址的環境復育等。

2. CIEMAT 設施更新整合

CIEMAT 即西班牙的能源、環境與技術研發中心 (Centre for Energy-Related, Environmental and Technological Research)，別名為 PIMIC，其設施改善工程在 2000 年開始，執行的工作項目包含

- (1) 設施現代化
- (2) 改善基礎建設
- (3) 拆除該中心六個廢棄的核設施
- (4) 清理設施內的污染區域

3. Vandellós I 核電廠的除役與拆除

Vandellós I 核電廠位於西班牙 Tarragona 省的 Vandellós i L'Hospitalet de L'Infant，為一座石墨緩速、氣冷式核電廠。該電廠由 Hispano-Francesa de Energía Nuclear (Hifrensa) 公司負責營運，自 1972 年開始商轉，由於發生火災，經評估無修復使用價值，於 1989 年永久停機，總共運轉了 17 年。

拆除工作分成 2 個階段，第 1 階段由 Hifrensa 公司完成三項主要的工作

- (1) 移出用過核子燃料，並送至法國進行再處理
- (2) 移除運轉廢棄物
- (3) 拆除不再需要的裝置

第 2 階段的拆除工作是由 ENRESA 公司負責執行，於此階段拆除了反應器側板（Reactor Shroud）外所有的設施、建物、結構物，並對反應器進行安全貯存（Safestore），自 2003 年開始，貯存期預計將長達 25 年，此期間內 ENRESA 公司會展開大部份廠址區域的復原工作。

三、心得

彙整訓練課程、除役電廠等實地參訪及討論所提出之問題，並將學習獲得的相關技術、經驗、方法以及心得說明如下。

（一）除役訓練課程

1. 核電廠除役策略管理

核電廠除役策略管理為除役規劃的核心，亦為各項除役規劃工作執行的依據，儘早明確訂定除役策略，將有助於執行除役規劃及除役計畫書編寫工作。為能落實除役策略與管理需求，除役工作項目分解及作業排程不可或缺，尤其核電廠除役時間可能由數年至數十年，所需經費龐大，更需要有效且系統化的管理，以輔助除役工作依照設定目標逐步進行，最後安全且順利完成核電廠除役。

核電廠除役首先須考量採何種方式除役，現行國外常用的方式分為立即拆除（DECON）、安全貯存（SAFSTOR）和封存（ENTOMB）等 3 種，其中立即拆除和安全貯存是較常採用的除役方式，例如美國 Big Rock Point 核電廠及西班牙 Zorita 核電廠等採立即拆除，美國 Humboldt Bay 核電廠及西班牙 Vandellós I 核電廠等採安全貯存，不論採用何種除役方式均有其優缺點；而國內核電廠除役則依據核子設施管制法及其施行細則規定，採用立即拆除方式，不考慮安全貯存和封存，除役期限為 25 年。

訂定除役策略（Strategy）所需考量的因素包羅萬象，且各國及各核電廠，均有其特有的文化和背景，因此無法訂定一套全體適用的除役策略，必須針對各核電廠訂定其適用的除役策略。依據西屋公司的除役經驗，可歸納整理並訂定除役策略所需考量的因素，包含安全、放射性衰減/輻射降低、放射性廢棄物數量、廢棄物/物質管理、財務、技術、廠址再利用、法規標準、電廠資訊/紀錄、社會政治及其他等，各因素間彼此互相影響，所代表的權重亦不盡相同，因此，如何獲得最佳化的結果，還要取決於各核電廠所處的環境及特性。

核電廠在運轉階段及除役階段，其程序目的和輸出有所不同，如圖 1 所示，運轉階段程序主要目的是電力生產，程序輸出為分配電力提供消費者使用；除役階段程序主要目的是以拆解和拆除方式去除活化污染物質，程序輸出為管理放射性廢棄物/物質並送至貯存或處置中心。除役規劃主要分為幾個區塊考量，分別為法案/規範、運轉歷史、公眾

接受度、財務工具/基金、具備能力和廢棄物/物質管理，各區塊間的關係如圖 2 所示。

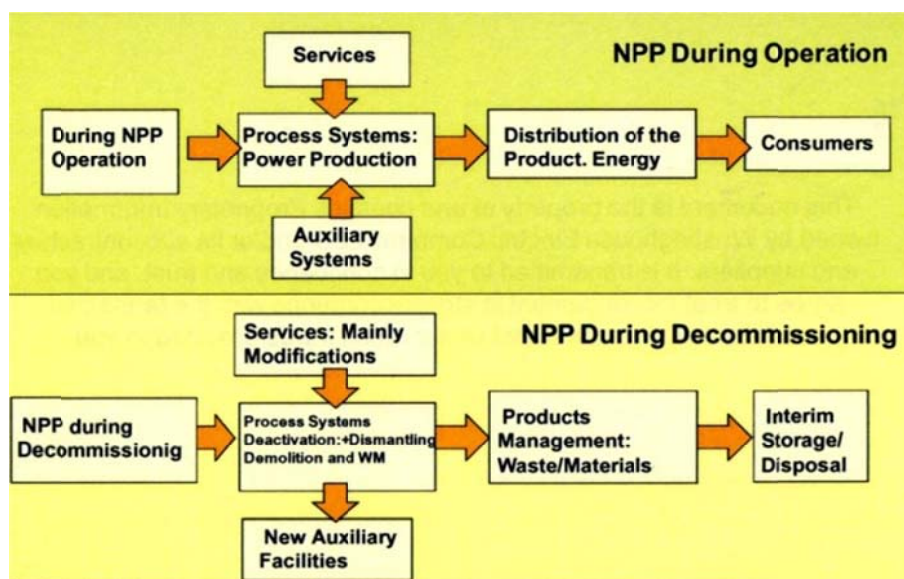


圖 1、核電廠運轉和除役程序

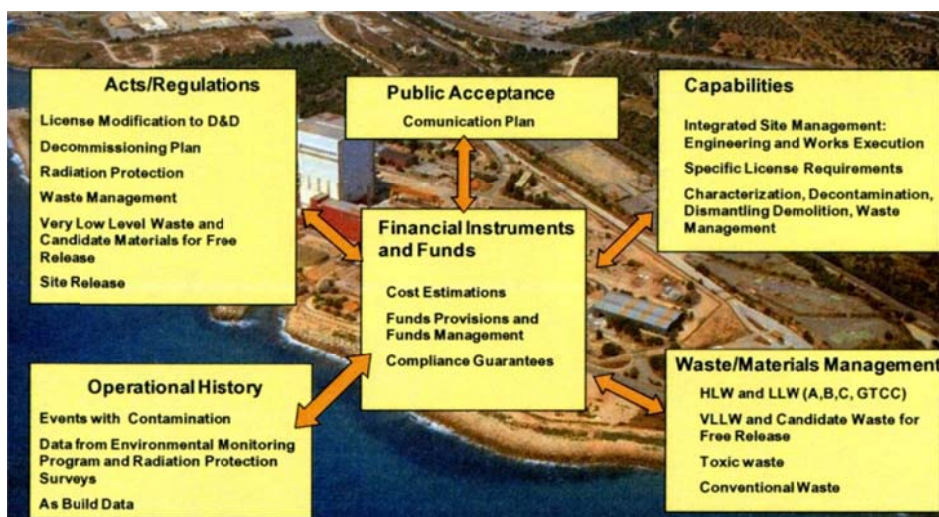


圖 2、除役規劃

為使核電廠能依規劃順利進行除役且符合管理需求，需訂定除役工作分解架構（Work Breakdown Structure，簡稱 WBS），將除役工作以「工作包」方式分解，並以樹狀結構方式表達各「工作包」間的關聯性，如圖 3 所示，其優點為易於遵循和了解，也易於使用圖形工具軟體進行邏輯且系統性地規劃、管理除役工作。應用 WBS 輔助可精準地展現組織規劃，有助於執行職務分配、顯示工作查核點和里程碑、估算除役計畫範圍及提供管理者易於了解的資訊等。

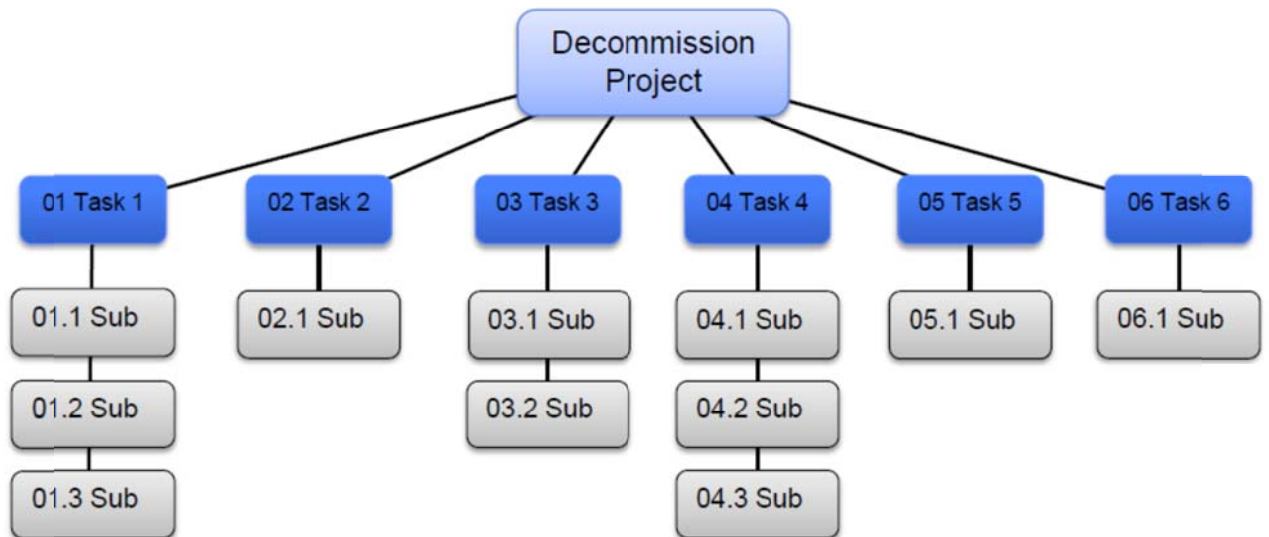


圖 3、除役工作項目樹狀結構

建立除役設施盤點資料庫所採用的方法如圖 4 所示，資料特性應包括以下類別：

- (a) 拆解採「廠房房間」方式規劃，如：建築物、樓層、房間；或「系統劃分」方式規劃，例如海水冷卻系統一次側或二次側之迴路等
- (b) 物理資料：質量、表面積、體積等（可由技術文件、歷史資料、現場檢查或運轉人員經驗獲得）。
- (c) 輻射資料：內部和外部表面污染，如反應器組件和生物屏蔽活度、設備比活度、污染深度或活度與相對應的核種組合等。
- (d) 除役資料：設備分類用於估算，以代表性設備列表，類似特性設備歸納成群組以降低除役成本估算所需考量的因素和參數。

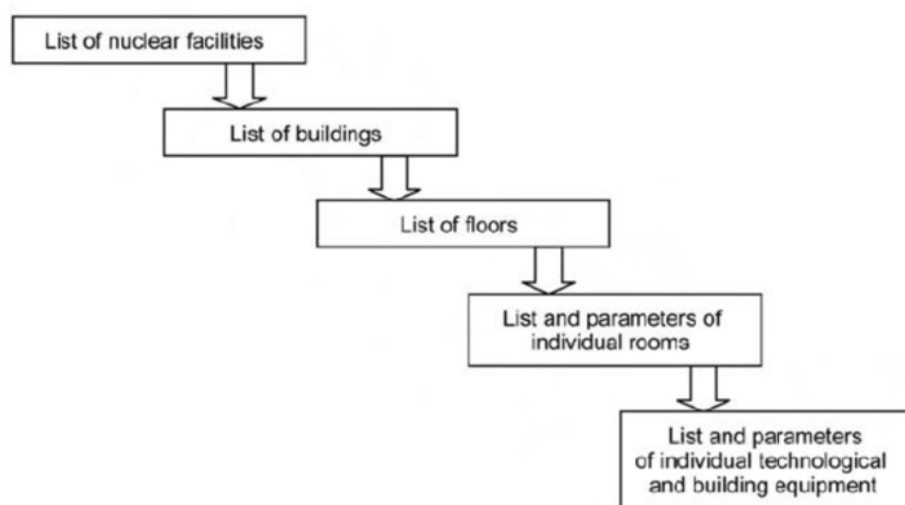


圖 4、除役設施盤點資料庫建立流程

發展核電廠除役 WBS，準備工作和原則訂定亦非常重要。首先需進行計畫拆解，每個拆解項變成核心工作，直到最小工作項目為止，最後再替每個工作項目編碼；此外亦需訂定工作項目階數，此過程必須考量許多因素，才能發展出適用的 WBS，每個工作項目必須與除役有關，且範圍必須涵括內部、外部和臨時工作，採由下而上 (Bottom-up) 的方法，包括除役技術評估、除役策略訂定、除役成本和工作效率影響因數評估等，均應於建立除役 WBS 時進行考量。圖 5 為西屋公司發展核電廠除役 WBS 之範例。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 5、西屋公司發展核電廠除役 WBS 範例

WBS 可用於後續發展除役排程及成本估算。除役排程為 WBS 加入時間因素的考量，變成可執行的規劃；時間因素包含建立里程碑、選用合理可執执行程序 and 人力工時估算等，這些因素分別說明如下：

- (a) 里程碑：除役規劃通常建立的里程碑，包含停止運轉、開始除役、建築物/設備拆除、廠址復原/再利用等，如圖 6 所示
- (b) 程序：通常分為功率運轉、停機/過渡、核設施拆解、傳統拆除和廠址復原等，程序與里程碑關係如圖 7 所示。
- (c) 人力工時：人力需先歸納定義每項工作所需的人力結構，例如西屋公司定義工作團隊是由工程師、領班、保健物理、技術和勞務等五種成員所組成，再依工作性質不同訂定成員比例；工時同樣是先將除役工作項目訂出不同的工作類別，每項工作類別依工程資料庫和經驗訂出所需的工時，然後再經由公式轉換得到每項工作的人力工時。此部分估算準確與否，與工程資料庫準確性有相當大的關係。

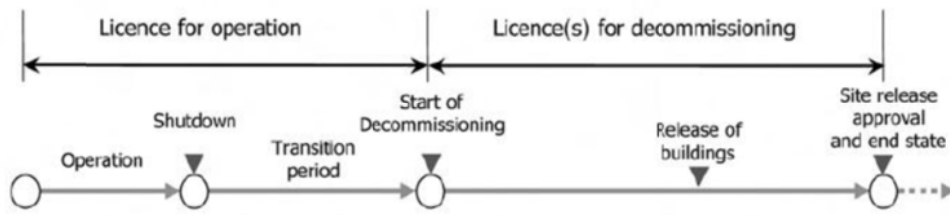


圖 6、除役規劃常用的里程碑



圖 7、除役階段之程序架構

除役成本估算較常採用的評估方式有三類，分別為量級式估算（Order of Magnitude estimate）、預算式估算（Budgetary Estimate）和明確式估算（Definite Estimate），其中以明確式估算準確率較高，約介於-5%~+15%之間。明確式估算是依據除役的詳細規劃，配合所有的工程數據進行估算，這些工程數據包含工程圖面、工程文件和運轉文件等。

如何建立核電廠成本估算，西屋建議使用明確式估算方法，其採用 OECD/NEA，IAEA 和 EC 所共同發展的 International Structure for Decommissioning Costing（簡稱 ISDC）。ISDC 採層次架構設計，如圖 8 所示，共分為三個層次，第一層為主要活動（Principle Activity），第二層為活動群組（Activity Group），第三層為典型活動（Typical Activity）。成本是先由典型活動估算而得，然後再依序往上層累加而得到最後的除役成本。每一層的成本估算將成本區分為四個群組，分別是勞動成本、投資成本、開支和偶發事件。

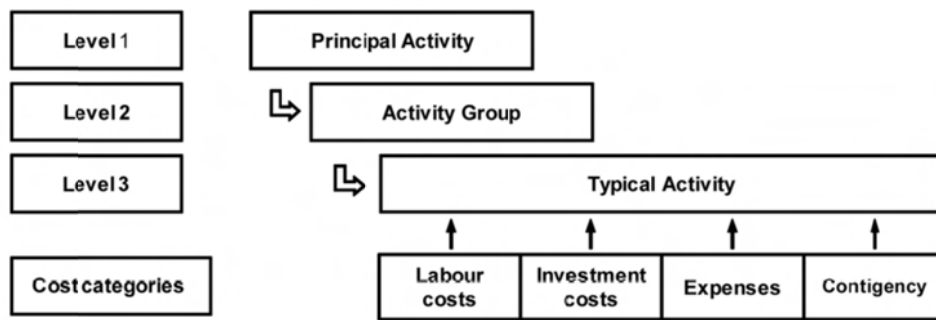


圖 8、ISDC 成本估算之層次架構

如同前面所敘述，WBS 完成之後，除了可繼續發展排程之外亦可發展成本估算，其間的關係如圖 9 所示，成本估算第三層典型活動可由 WBS 最底層的工作項目彙整獲得，再依據排程所獲得的人力工時與成本參數，經過運算得到第三層每個活動的成本，最後再以累加的方式往上逐層計算，進而得到除役成本。依據西屋公司的經驗，除役成本較為重要的經費考量分別是除役準備工作、除污和拆解、廢棄物管理、廠址復原和外釋等。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 9、ISDC 與 WBS 關聯性

2. 核電廠除役特性調查

(1) 輻射特性調查

輻射特性調查之目的在於評估電廠受輻射影響的範圍、型式及程度，其結果將為後續的系統除污、系統拆解與結構體拆除、廢棄物管理、廠址復原等階段性工作提供基礎資訊，例如可藉由輻射特性調查推估系統內之污染量及型式，協助規劃除污技術與拆除排程，進而讓除役團隊得以評估除污時所產生的二次廢棄物數量、工作人員集體劑量與除役成本等。

廠址特性調查的規劃，是由區域、物質或設備對人類和環境所造成的風險作為起始考量，據此分為輻射類與有害類，而輻射類又依其物理性質，分為活化與污染兩類。活化類主要集中在爐心周遭組件及區域，污染類則分布於系統、結構、組件、土壤及水等

介質（如圖 10）；有害類則依介質性質，分為材料與化學品。值得注意的是，西班牙並無混合類廢棄物，具放射性的有害物質也歸類於輻射類。

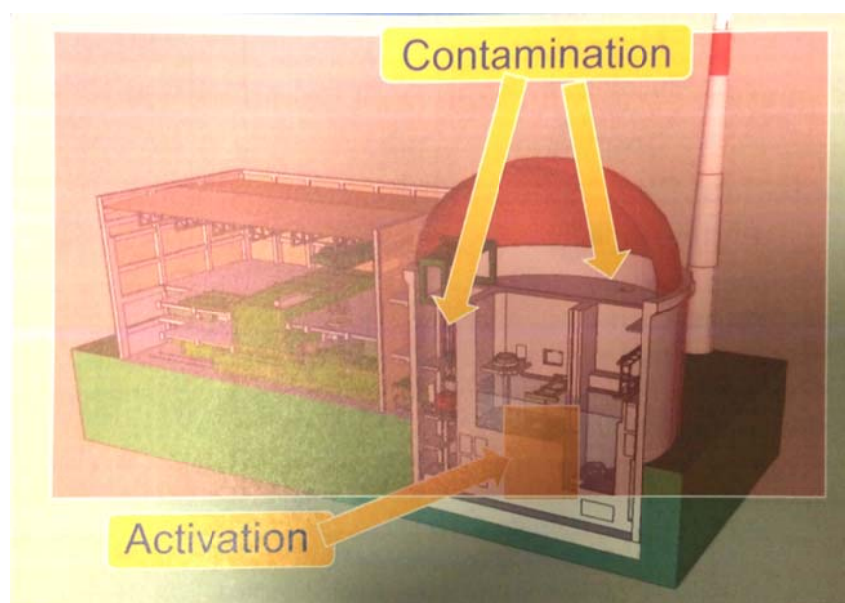


圖 10、核電廠污染與活化分布示意圖

一般而言，對於核設施除役之輻射偵檢，均參考 MARSSIM 與 MARSAME 方法進行規劃，其中 MARSSIM 即美國多部會輻射偵測暨廠址調查手冊（Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual），用於規劃、設計偵檢區域；MARSAME 即美國多部會物質與設備輻射偵檢與評估手冊（Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual），用於規劃物質、設備的輻射量測。本次訓練中，西屋公司也特別安排數小時的課程，說明這兩種規劃方法及相關應用經驗。

A. MARSSIM 概念

MARSSIM 為核設施除役作業之廠址與建物輻射特性調查指引，其作業流程如圖 11 所示，由廠址歷史評估（Historical Site Assessment, HSA）開始，先確認污染源和分布的區域，並依據輻射特性劃分輻射偵檢區；其次，將各輻射偵檢區細分為不同的偵檢單元；最後，選擇適當的背景參考區後進行偵檢設計與規劃。

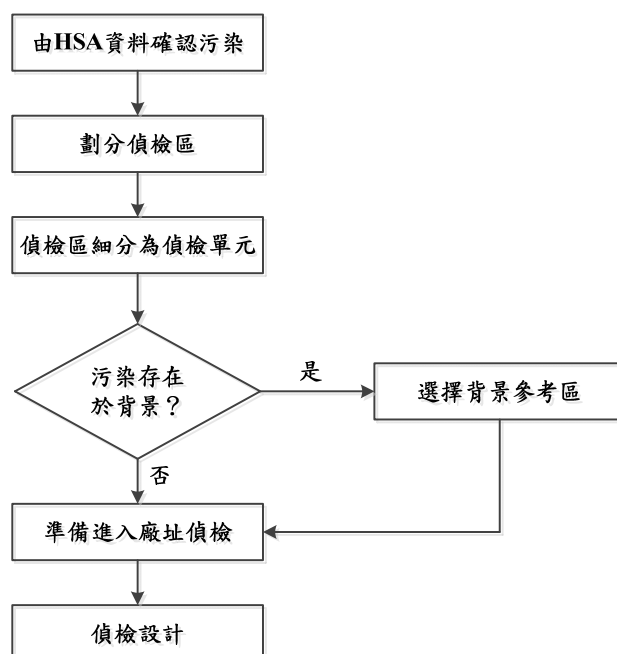


圖 11、MARSSIM 作業流程

核設施除役作業之輻射偵檢可分為範圍偵檢、特性偵檢、改善措施輔助偵檢與最終狀態偵檢等四階段，各階段之輻射偵檢均在核設施永久停止運轉後執行。範圍偵檢與特性偵檢之目的為電廠永久停機後，確認廠址內土地與建物之輻射及污染實際分布狀況；改善措施輔助偵檢為除役作業執行期間，針對拆除、除污等作業執行輻射偵檢，藉此確認除污成效；最終狀態偵檢為廠址外釋前，為了確認廠址是否符合外釋標準所執行的輻射偵檢，若通過最終狀態偵檢，廠址即可外釋作為其他規劃或再利用。

設計最終狀態偵檢時，將根據 MARSSIM 提供的級數法(Graded Approach)對偵檢單元進行分類。對於受影響的土地、建物區域，按其污染程度和導出濃度指引水平 (Derived Concentration Guideline Level, DCGL) 的關係，由高至低依序分為第 1 級、第 2 級與第 3 級 (流程如圖 12)，藉由區域分級，可對各區域規劃適當的偵測點密度、量測位置與偵檢項目。

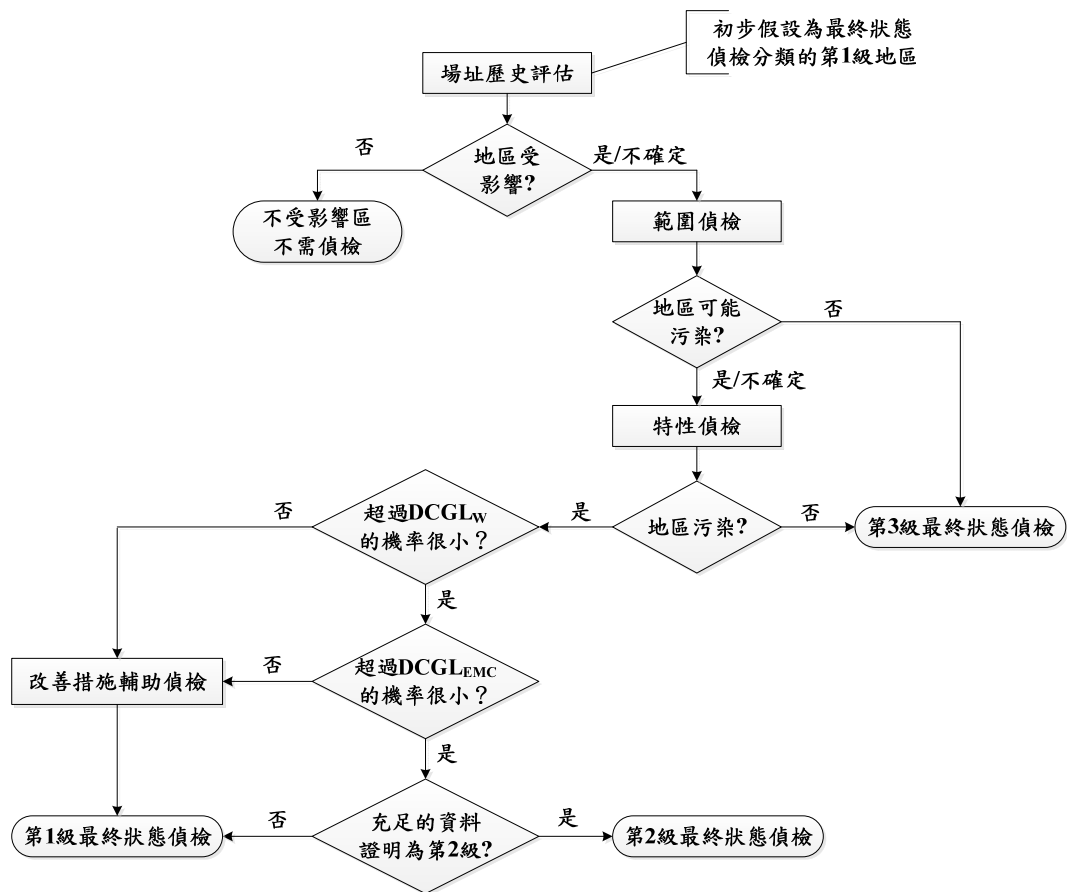


圖 12、MARSSIM 建物與土地污染分級流程

進行最終狀態偵檢的過程如下：首先依據該區域廠址歷史資料進行影響分類，若為受影響區域則對該區域進行範圍偵檢及特性偵檢；若偵檢結果確定該區並無污染則可判定其為第 3 級污染狀態；若地區偵檢結果發現有污染，則需進一步比對偵檢結果與該地區的 $DCGL_w$ 值（ $DCGL_w$ 值由整個地區平均活度推導而得）差異；若偵檢結果發現該區域污染情況大於 $DCGL_w$ 值，則進行改善措施輔助偵檢行動並判定該區域為第 1 級污染狀態。偵檢結果顯示污染小於 $DCGL_w$ 值時，應再與該地區的 $DCGL_{EMC}$ 值（由該區域個別高放射性小區域推導而得）進行比較；若結果顯示該區污染遠小於上述兩種 $DCGL$ 值，則可判定該區域為第 2 級污染狀態。

B. MARSAME 概念

對受影響的系統設計處置偵檢 (Disposition Survey) 時，則根據 MARSAME 的級數法將偵檢單元分級，依污染程度和行動水平 (Action Level) 的關係，將偵檢單元分為第 1 級、第 2 級與第 3 級，再據以規劃適當的量測計畫。圖 13 為

MARSAME 系統分級與偵檢設計流程。首先，對蒐集到的電廠系統資料做初始評估（Initial Assessment，類似 MARSSIM 提到之 HSA），並將系統區分為受影響或未受影響兩類，未受影響系統無須執行進一步的調查行動；而對於受影響系統，為描述系統的物理或輻射分布特性，必要時可執行初步偵檢（Preliminary Survey）；下一步是發展決定規則（Decision Rule），此步驟之目的為確認關鍵核種及其行動水平，並定義偵檢單元邊界與相關參數，以及發展量測品質目標與確認替代行動。經過以上的流程，彙整歷史資料、綜合初步偵檢結果與定義決定規則，藉此分析各偵檢單元的污染及輻射強度，並據以規劃處置偵檢（Disposition Survey），將偵檢單元進行分級，以完成後續偵檢執行、結果評估與處置決定之工作：

- (A) 第 1 級：現在或曾經含有高於行動水平之放射性核種濃度污染的可能性高。
- (B) 第 2 級：現在或曾經含有高於行動水平之放射性核種濃度污染的可能性低，幾乎不會有小區域高活度的可能性。
- (C) 第 3 級：現在或曾經幾乎不會有含有高於行動水平之放射性核種濃度污染的可能性，或沒有證據可以將此區域列入未受影響區。

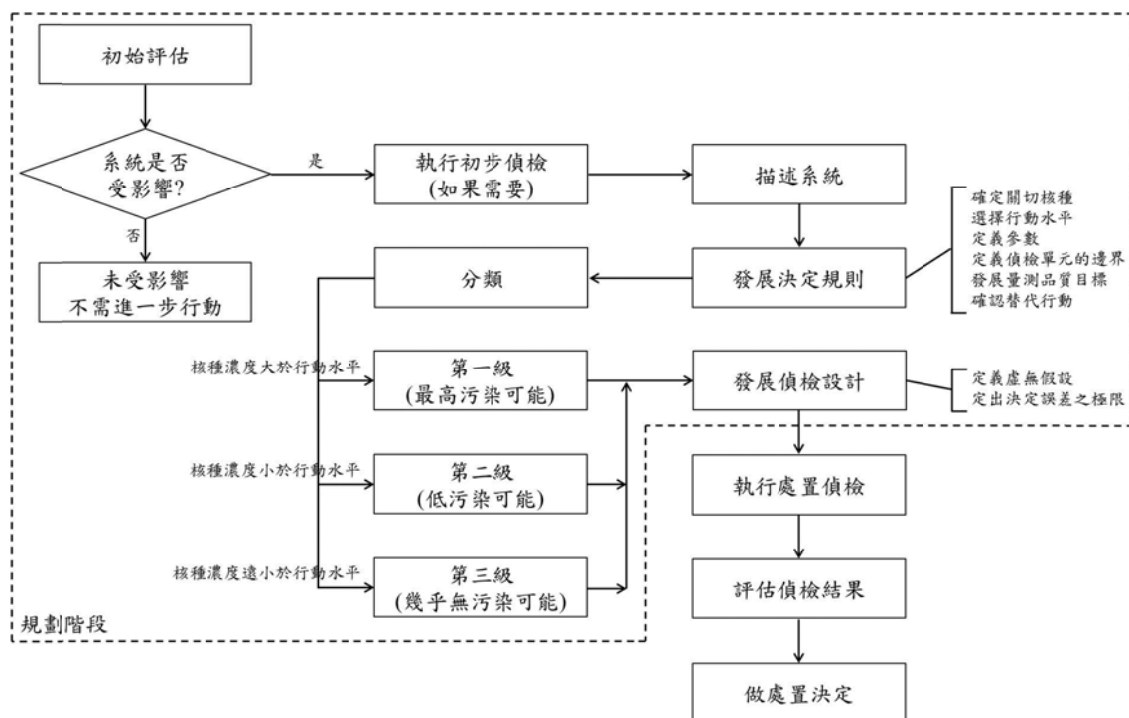


圖 13、MARSAME 系統分級與偵檢設計流程

綜合 MARSSIM 與 MARSAME 方法，可將特性調查流程分為三個主要階段，首先是廠址歷史評估，此階段根據電廠的運轉歷史、意外事件報告、安全評估、流程分析、環境監測及其它有關保健物理、廢料貯存的紀錄，配合人員訪談結果，對電廠可能受影響的區域、系統及其受影響程度進行初評。其次，根據初評結果，進行下列工作：

- (A) 對於資料從缺的區域或介質，執行加馬活度範圍偵檢；
- (B) 規劃與執行廠房建物及系統的量測作業；
- (C) 爐內組件的中子活化評估；
- (D) 廠房外圍環境區域的偵檢及取樣分析；
- (E) 有害廢棄物（例如石棉）的調查作業。

之後，再根據上述的調查及分析結果，進一步對廠址區域及系統進行分類（區分是否受影響）及分級（區分受影響程度），並界定污染來源及評估可能的污染遷移途徑。

即便有上述完善的偵檢規劃方法，西屋公司在規劃 Vandellós I 電廠除役時，對物質與設備的偵檢並未完全採用 MARSAME 方法，這是因為該電廠於 1989 年永久停機並開始進行除役，而 MARSAME 遲至 2009 年才發行出版，所以未能趕上 Vandellós 電廠的除役時程，但西屋公司當時提出充分詳盡的調查資料，使主管機關能接受其調查結果。

C. 導出濃度指引水平

核電廠區域受輻射影響的程度是由導出濃度指引水平作為界定標準，此標準的推導方式依調查區域內的介質不同，大致可分為土壤/建物與物質/設備兩類。推導土壤/建物類的外釋標準時，首先要確保符合劑量標準，而後需建立廠址的曝露情節與污染途徑，再配合可靠的模式，將劑量限值轉為活度限值；另一方面，推導物質與設備的標準時，西屋公司建議參考外釋標準，因這些標準採用常見的情節與轉換模式，普遍受到主管機關認可。

導出濃度指引水平的推導流程如圖 14 所示，該流程可概分為五個步驟。第一步為決定受曝人員的劑量限值，西班牙參照 FUA、ICRP、NCRP 等標準，將人員年劑量限值訂定為各標準中最為嚴格的 100 $\mu\text{Sv/y}$ ；其次，需要分析電廠運轉時產生的核種類別，相關資料可由電廠運轉歷史與分析報告中查得；下一步，

必須參考除役策略，評估可能的人員曝露情節，就西班牙而言，其選擇的情節分為兩階段，第一階段是在除役後 30 年內，廠址採工業用途，即其使用上受到限制（或稱 Brown Field，褐地），第二階段是除役 30 年後，廠址改作居住用途，即廠址的使用未受限（或稱 Green Field，綠地）；第四步，選擇計算模式，目前常用的模式有 RESRAD 和 DandD；最後，根據既有的資料與假設，由模式計算介質中各關注核種的導出濃度指引水平。

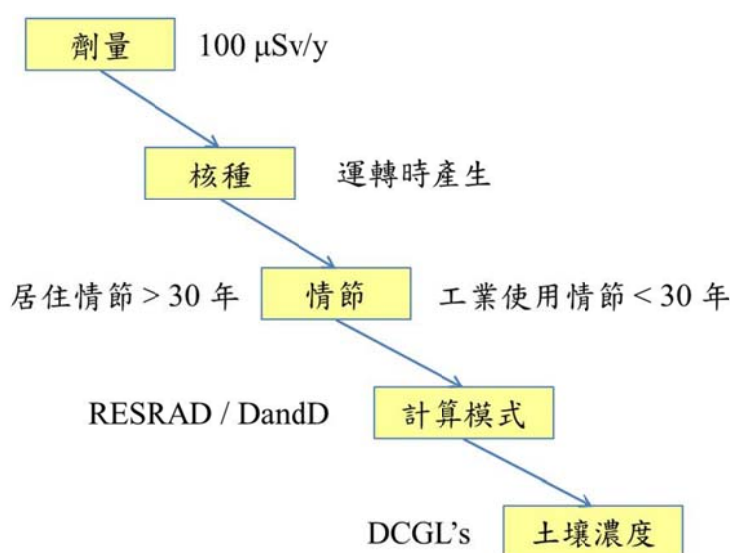


圖 14、導出濃度指引水平之推導流程

西屋公司的講師提到，人員劑量的計算並不困難，甚至人工手算也能完成，但 RESRAD 或 DandD 模式經過驗證，採用其運算的結果較為管制單位接受。使用 RESRAD 或 DandD 等模式計算導出濃度指引水平時，需設定許多參數，理想的情況下，最好提供貼近現況的參數，使計算結果較能符合實際情況；然而並非所有參數都能在調查工作中順利獲得，對此，西屋公司建議執行參數的靈敏度分析，找出對計算結果有顯著影響的參數，將盡可能調查該參數。根據西屋公司經驗，若某些參數確實難以獲得，建議使用模式的預設值。

如關注核種中有難測核種，則應以易測核種建立「替代比率（Surrogate Ratio）」，即以量測的方式推估該系統或區域的易測與難測核種的濃度比，例如 Cs-137 在衰變過程中會產生加馬射線而易於測得，而 Sr-90 為純貝他核種，需經由複雜的放射性化學處理才能測得其活度，故為難測核種。建立代表性的 Cs-137 和 Sr-90 的比例，可大幅簡化導出濃度指引水平的推算流程，國內亦曾於廢棄物分類量測時，採用類似此概念的「比例因數（Scaling Factor）」架構。

D. Vandellós I 電廠特性調查之經驗回饋

西屋公司也於訓練課程中以西班牙 Vandellós I 電廠為例，說明該電廠特性調查作業階段的經驗回饋。圖 15 為 Vandellós I 電廠的偵檢規劃流程，首先依偵檢需求，選擇合適的儀器，並對儀器進行良好的調校作業；其次，現場作業分為調查與取樣工作，取樣樣品必須送回實驗室進行前處理與分析，綜合現場量測結果與實驗室分析結果，可再進一步規劃最終偵檢；俟最終偵檢完成後，才將量測結果陳報給管制機關，證明廠址放射性已低於管制標準。

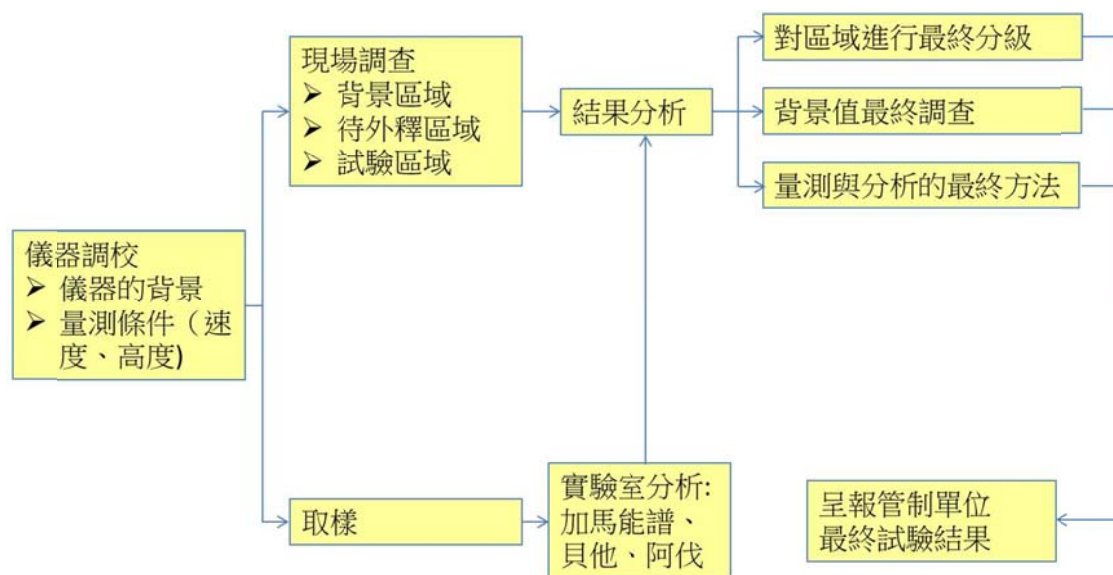


圖 15、Vandellós I 電廠之偵檢規劃流程

西屋公司也以 Vandellós I 電廠為例，說明如何推得其導出濃度指引水平。除役活動中，傳播放射性核種的介質有空氣、土壤與水，在這些介質中，核種是經由空浮、沉降、瀝出、排放等機制擴散，各介質釋出的核種及其釋出量示於表 4。

發展情節時，會依據廠址現今的使用狀況及性質，配合其過往歷史，推估可能發生的情節。在 Vandellós I 的例子中，廠址在興建核電廠前，於該區域植有大量的橄欖樹及穀物，現今則作為工業用途；另外、該處地下水因鹽分較高而難以利用。綜合上述資訊，假設在電廠除役後的 30 年內，廠址將用作工業用途，其對人員造成的曝露途徑為體外直接曝露、空浮吸入及土壤意外攝入；而在電廠除役後再過 30 年，可能演變為居住用途，此時的曝露途徑除體外曝露、空浮吸入外，尚可能經由土壤攝食蔬菜及飲水而造成體內曝露。綜合以上資訊，分別對居住情節及工業情節進行分析，並由 RESRAD 和 DandD 模式評估

Vandellós I 廠址的導出濃度指引水平，其結果示於表 5。由結果可見，對於大多數核種，RESRAD 和 DandD 計算結果的差異在一個數量級範圍內，但若採常用的居住情節，DandD 會有較低的導出濃度指引水平估算值，表示其估算結果較 RESRAD 更為保守。另一方面，比較居住情節與工業情節，一如預期，居住情節因佔用時間較長，會得到較保守的估算值，換言之，若採用居住情節，需耗費較多的除役成本，西班牙假設「工業用途 30 年，其後居住用途」的原因，即是為了降低除役成本。就我國而言，仍應考量除役策略及國情等因素，對情節假設做適當修正。

表 4、Vandellós I 電廠各類介質釋出的放射性核種及其釋出量

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

表 5、Vandellós I 電廠廠址之導出濃度指引水平

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

(2) 廢棄物盤點

廢棄物盤點之目的在於對電廠的組件、結構物等物質進行分類、盤整，因為在核電廠除役的過程中，涉及許多組件或結構物的除污、拆除，以及廢棄物的處理或處置作業，規劃這些作業時，將考量拆除作業的期程、需要的人時、處理或處置技術、作業成本等重要因素，而廢棄物盤點結果正是這些重要因素的基本輸入資訊。

一般而言，廢棄物盤點可分為物質存量盤點（Material Inventories）及活度盤點（Radiological Inventories）兩活動，綜合兩活動結果，便能推估核電廠所含物質之性質、數量與分級，最終評估結果將以資料庫或圖面的型式呈現。

A. 物質存量盤點

物質存量盤點包含系統組件、結構及建物等之數量盤點，具體而言，物質數量盤點關注的除役廢棄物來自於：

- (A) 機械組件、管件；
- (B) 電力設備與纜線；
- (C) RPV 及其內部；
- (D) 處理設備與不鏽鋼；
- (E) 建物尺寸、混凝土與鋼筋體積；
- (F) 廢棄物處理廠房的砂質與活性碳；
- (G) 石棉等有害廢棄物。

依其材料組成，主要可分為鋼鐵、混凝土等類型。鋼鐵的來源為程序設備、引動器、閥件、管線、槽體和鋼筋等，此類廢棄物可採用多種不同的除污和處理技術，例如熔融處理均質化和表面研磨除污；另一方面，混凝土廢棄物則有受污染的結構物與中子活化混凝土等來源，此類廢棄物可採遙控機具的方式進行除污，若部份廢棄物未受污染，便可用於回填廠址內的地下坑道。另需特別注意，此處定義的除役廢棄物，不含運轉期間產生的廢棄物，也未納入超 C 類用過核燃料。

針對上述除役廢棄物，物質存量盤點關注六類重要參數，分別為重量、體積、系統、房間位置、材料、其餘特性（即長度、厚度等不屬於其他類別的參數）。重量參數有助於估算拆除時間及特定填充率下的體積；體積參數可用於分類廢棄物；系統欄位使廢棄物能追溯至原系統，以便和該系統的活度資料結合；房間位置欄位可顯示廢棄物位置，這關係到拆除順序及物流作業；材料種類與廢棄物接收標準有關；長度、厚度等其餘參數，則是在前五類參數難以取得時，作為物質存量的補充資料。

物質存量資料主要來自建廠及運轉紀錄等書面文件，但有時書面文件資料不全，便可能需至現場實地丈量設備或建物的尺寸。此外、為避免書面文件未即時更新，也應至現場勘查，確保蒐集到的資料能符合現況，若有資訊從缺，便有賴工程判斷補足。

參考 Decommissioning study of Forsmark NPP (SKB R-13-3, June 2013) 報告，可以得知系統受輻射影響的可能性愈高，會要求更精準的物質存量盤點結果，對於確定受影響系統，其物質存量盤點結果要求在 $\pm 5\%$ 的準確度範圍內；對於可能受影響的系統，準確度則要求在 $\pm 10\%$ 以內；對電廠的其餘系統，準確度可放寬至 $\pm 20\%$ 。

B. 活度盤點

活度盤點涉及建物、設備等物質的活度估算。一般而言，核電廠的放射性廢棄物有三種來源：第一種是表面污染，即一些介質表面因接觸放射性物質而受到輻射污染；第二種是中子活化，這是指爐心附近的物質受中子照射而活化，使其本身帶有放射性；第三種來自水處理程序，指因處理冷卻劑和緩速劑而產生的過濾器 and 樹脂。因此活度盤點具體項目有：

- (A) 所有系統（包含子系統）的總活度，以及所有組件的比活度；
- (B) 混凝土污染量估算；
- (C) 生物屏蔽內的活度分佈；
- (D) 砂與活性碳中的活度組成；
- (E) 土壤污染量估算；
- (F) 與總活度有關的核種向量（Nuclide Vector）；
- (G) 組件及房間的劑量率。

對於活度盤點，有三個關鍵參數：系統的總活度、核種向量與劑量率。系統的總活度可用於計算組件的污染量；提供核種向量資料，則可計算每一廢料桶中的核種比活度組成；劑量率資料則有助於計算執行拆除及除污作業時的人員集體劑量。這些參數的資料可由歷史運轉資料或特性調查結果提供。

C. 綜和廢棄物盤點與活度盤點結果

放射性廢棄物的體積，是藉著綜和物質存量盤點與活度盤點的結果估算而得。關於廢料桶填充率，西屋公司以經驗或參考現有資料計算各種組件或材料的廢料桶填充率，也考慮到所採用的減容方法。為了評估廢棄物體積與估算人力工時等目的，進行廢棄物數量盤點時，需獲得以下資料：

- (A) 電廠完整存量資料（包含非活化組件與表面）；
- (B) 固化量及其設施需求；
- (C) 廢棄物容器型式；
- (D) 未受限之外釋標準；
- (E) 廢棄物分類；
- (F) 控制棒與燃料資料。

此外，西屋公司也考量廢棄物接收標準及運送規則等當地法規，藉由表 6 的定義，將廢棄物分成紅、黃、綠、藍、白五類。

西屋公司講師除說明盤點方法外，尚提供一實際案例，藉此協助學員熟悉整個廢棄物盤點流程。表 7 為某示範電廠的特性調查報表，其中「System」表系統編號；「Ident.」表組件編號；「Part of system」表組件名稱；「Cont. Id」表污染類型資料，即各廢棄物來源的輻射調查結果（詳見表 8）；「Area」表受污染的表面積；「Weight」表組件重量。由放射性物質分類表（表 6）可知，分類放射性物質時參照指標為物質的比活度（Bq/kg），故對活度單位為「Bq/m²」或「Bq」的組件，應按其尺寸、重量等規格資料進行單位轉換。依上述方法，可將示範電廠之組件依照定義分為紅、黃兩類，其結果示於表 9。

表 6、放射性物質分類表

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

表 7、示範電廠特性調查報表

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

表 8、廢棄物來源調查結果

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

表 9、示範電廠之組件分類結果

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

3. 核電廠除役除污作業

(1) 背景說明

除污的決策與程序，在核設施除役扮演重要角色，其目的為降低或減少職業及公眾輻射曝露，移除物質表面或表面下的污染，儘可能將設備、材料做最大的回收再利用，以減少放射性廢棄物貯存體積，並使廢棄物管理或處置能有經濟效率。雖然國際上已有多座大型核電廠完成除役除污的例子，但是國內對於除役階段所需之除污技術仍舊在研究階段，因此、蒐集國外核電廠除役的除污技術與相關經驗，對於未來國內核電廠進行除役將有一定的助益。

「除污」簡單的來說是藉由物理或化學的方式，將放射性污染物從污染的物質表面移除，常見的除污技術不外乎有高壓水柱、加熱、化學/電化學或機械等方式；如以除污目的為考量，「除污」進一步又可分為運轉性除污與除役性除污兩大類。運轉性除污的目的主要是減少電廠工作人員於電廠運轉時或大修時的輻射曝露，因此，除污效果的要求並不會很高，另外，因為系統未來還會繼續運轉，所以除污過程不能破壞系統的任何零組件。除役性除污其目的在盡可能地將停止運轉核能設施中的污染物去除，以達到廢棄物減量的目標，因此、可以使用除污效果較高的破壞性除污技術。除役性除污又可以進一步細分為兩類，一是設施拆除前的除污，就是所謂的系統除污，二是設施拆除後除污，就是一般的系統組件除污（如圖 16）。設施拆除前除污的目的是降低除污工作人員於設備拆除時的輻射曝露，而拆除後除污是希望能夠達到廢棄物減容及再利用的目標。

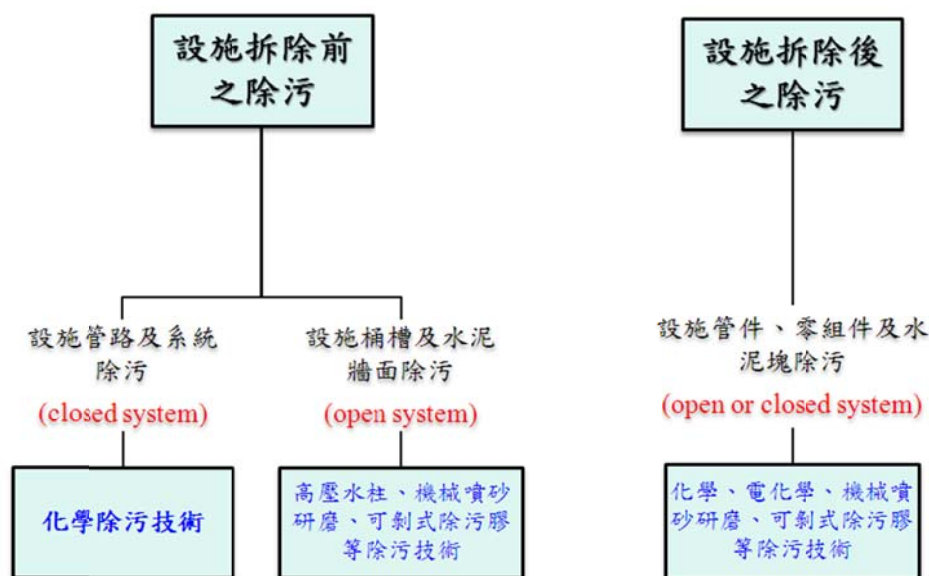


圖 16、除役性除污種類比較

(2) 西班牙電廠除污經驗回饋

本次除役訓練課程有關除污的部分講師為 Mr. Antonio Holgado 及 Mr. Jose Miguel Valdivieso。前者是西屋西班牙分公司的首席工程師，對除役工作深具經驗，而後者是西屋公司 Zorita 電廠除役作業現場負責人，兩人對於 Zorita 電廠目前執行的除污作業均相當熟悉。

課程首先介紹電廠系統除污，內容包含除污的目的、除污技術選擇的要求、全系統除污及組件除污技術等。除污有三個主要目的，第一是降低工作區域的輻射劑量；第二是防止污染物在除役過程中的擴散；第三是降低污染程度以達到廢棄物減容及再利用的目的。相對於運轉性的除污技術，因為除役後之設備將不再運轉，除役性之除污技術可以是具破壞性的除污技術，如此可以達到較高的除污因子(Decontamination Factor, DF)。選擇除污技術時應考慮的因素包含安全性、效率、成本、二次廢棄物、技術成熟度等。

西屋公司曾經使用過的系統除污技術，包括 LOMI、CANDEREM、CANDECON、CITROX、REMCON、CONAP、NITROX-E 及 DFD 等，針對除役性之 DFD 系統除污技術，西屋公司具有使用於美國 Dresden 1、Trojan、Big Rock Point、Maine Yankee 及西班牙 Zorita 等核電廠的經驗。

進行系統除污前，需釐清的主要項目包含：除污目標、二次廢棄物處理成本、除污時程、系統除污路線規劃、除污樣品選擇及如何取樣等。課程中以 Big Rock Point (BWR)

及 Maine Yankee (PWR) 電廠為例，介紹 EPRI 開發之 DFD 系統除污技術，Big Rock Point 除污後所產生之廢離子交換樹脂約為 580 ft³，平均 DF 值約為 27，而 Maine Yankee 除污後所產生之廢離子交換樹脂約為 535 ft³，平均 DF 值約為 31。另外，課程中也提到，Zorita 電廠的全系統除污 (Full System Decontamination, FSD) 是結合 2 種除污技術，先以 NITROX-E 進行系統氧化層的去除，再以 DFD 技術進行系統中 CRUD 層及部分金屬底層的去除，如此可以進一步提升 DFD 的除污效率。Zorita 電廠的全系統除污於 2006 年 9 月開始進行，2007 年 6 月結束，除污範圍涵蓋 RCS (包含 RPV)、RHRS 及 CVCS，平均 DF 值約為 25，除污後產生之總二次廢棄物數量為 13.3 m³。

第二部分的課程是介紹 Zorita 電廠新建的除污設施 (Decontamination Workshop)，該除污設施位於汽機廠房 (Turbine) 一樓。為因應除役工作的需求，將 Zorita 電廠之汽機廠房進行改建，其中一項工作就是在廠房內新增除污及切割設施，以處理除役過程中拆除下來的金屬廢棄物。

該除污設施主要包含兩個部分：機械除污及化學除污。機械除污是利用噴砂技術，使用鋼球作為磨料，在噴砂室裡進行，噴砂室配有手套箱，使人員可以在室外進行污染物件的除污作業，避免人員直接接觸到污染物；另外，噴砂室內也裝設通風及空氣過濾系統，即使人員在室內作業也可將危害降到最低，通風及空氣過濾系統會連接至廠內既有的廢氣處理設施，經監測、處理，達到標準後排放。機械噴砂房之尺寸為 4 m (L) x 2.5 m (W) x 3 m (H)，噴砂過程中用過的磨料會收集並重複使用，以減少二次廢棄物的產生，圖 17 為 Zorita 電廠機械除污之處理流程。

除污設備的另一個部分是化學除污系統，該系統包含除污槽、清洗槽、洗滌塔、中和槽及通風設備。該化學除污技術主要是以 6% 硫酸作為除污劑，除污後產生的廢除污劑由於成本較低，因此不做再生利用。產生之廢硫酸會先到中和槽進行中和後，排至廠內的廢液處理系統進行後續處理，圖 18 為 Zorita 電廠化學除污之處理流程。課程中亦詢問除污時應注意的安全相關事項，如除污過程產生之氣體 (氫氣) 應有適當的通風及收集系統與化學桶槽應具有防漏設施等。目前該除污設施仍在 Zorita 電廠進行測試，還未開始運轉，預估該設施之運轉、安裝及維護費用約為 75 萬歐元。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 17、Zorita 電廠之機械除污處理流程

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 18、Zorita 電廠之化學除污處理流程

4. 核電廠除役拆除工法

切割拆除工法、廢棄物容器、現有處置場狀況三者息息相關。處置場可允許放置的廢棄物容器數量、尺寸規格、劑量率等，決定了廢棄物容器的選用；廢棄物容器選用的規格，也決定了切割拆除工件之切割尺寸，因此，處置場狀況為第一優先考量的項目。

本節針對電廠除役拆除技術工法進行說明。拆除工法應考慮切割速度、維護頻率、粉塵污染、二次廢棄物產生、工具安裝狀況等。現有核電廠除役常用的拆除工法有金屬拆解切割（Metal Disintegration Machining，MDM）、磨料水刀切割（Abrasive Water Jet Cutting，AWJC）、熱切割（Thermal Cutting，TC）、機械切割（Mechanical Cutting，MC）等，各種切割工法技術應用與優點比較如表 10 所示。

西屋公司在執行 Zorita 核電廠爐內組件拆除作業時，曾經規劃將磨料水刀切割也一併納入拆除工法選項之一。但是 ENRESA 公司基於廢棄物處理層面考量，分析磨料水刀切割造成二次廢棄物生成數量將遠遠超過機械切割的幅度，將導致整廠廢棄物處理數量大幅增加。因此，西屋公司為減少廢棄物處理的問題，最後仍選擇以機械切割作為拆除工法選項。

表 10、切割工法比較

切割方法	技術應用	優點	備註
MDM	■ 屬於電火花加工 ■ 圓柱電極常用來去除螺栓與焊接件 ■ 刀片式電極常用來去除複雜的截面 ■ 鑽孔電極常用來鑽取大組件吊掛用的吊裝孔	● 快速、可靠度高 ● 容易控制 ● 工具較輕量、作用力較小 ● 可切削複雜的幾何形狀 ● 切屑易收集 ● 和放電加工(EDM)相似，但速度更快	利用高溫電弧熔化金屬表面，工件材料被火花熔化，再透過介質(水)來冷卻金屬。
AWJC	■ 可切割 20 英吋厚的鐵或非鐵材質 ■ 用來切割高輻射材料 ■ 使用超高壓 ■ 維修技術較高	● 切割線很窄，可精準切割 ● 可全方位切割、作用力較小 ● 可搭配機械手臂遙控作業 ● 無煙霧或廢氣產生	利用高能量的水流與磨料顆粒，以超音波的速度由噴嘴噴射至金屬表面，工件材料被高速磨料撞擊切割。研磨介質無法回收再利用，增加二次廢棄物數量。
TC	■ 氧乙炔切割常用於碳鋼材料 ■ 用來切割反應器外殼、蒸氣產生器、管路、噴嘴、鋼構	● 切割速度快 ● 可切割厚度較高 ● 設備費用較低 ● 可搭配機械手臂遙控作業	利用乙炔和氧混合產生火炬燃燒，經由高溫氣體噴射，工件材料被火炬熔化切割
	■ 電漿切割常用於不銹鋼材料 ■ 用來切割熱屏蔽、管路、噴嘴	● 切割速度快 ● 可切割厚度較高 ● 可搭配機械手臂遙控作業 ● 可在水下遙控作業	利用離子化氣體(通常為氮氣或氬氣)，經由高電壓電極通電，使離子氣體產生高能量，噴射至金屬表面，工件材料被熔化切割
MC	■ 適用於各種組件切割，包含反應器內部	● 最少量的二次廢棄物產生 ● 水下切割作業能見度較好 ● 切屑容易收集 ● 安全、可靠度高	利用圓盤鋸、帶鋸、鑽石索鋸、液壓剪等工具，直接向工件切割

5. 核電廠除役廢棄物處理

(1) 放射性廢棄物簡介

相較於一般產業之有害事業廢棄物，放射性廢棄物（Radioactive Waste, RAW）因含有放射性物質，且具有活度會隨時間自然衰減之特性，其處理方式須特別考慮。核電廠除役時會產生放射性廢棄物，其拆卸、預處理、處理、整備、儲存及處置等活動，應依據國際原能總署（IAEA）之「用過核子燃料管理安全及放射性廢棄物管理安全聯合公約」第二條辦理。放射性廢棄物處理的基本原則為降低影響人員與環境的可能性，因此放射性廢棄物處理是將採取適合的廢棄物包裝處理，確保能儲存或放置於最終處置設施，以達到安全的隔離。

按照現行 IAEA 之放射性廢棄物分類方法，共有豁免廢棄物（Exempt Waste, EW）、極短半化期廢棄物（Very Short Lived Waste, VSLW）、極低放射性廢棄物（Very Low Level Waste, VLLW）、低放射性廢棄物（Low level waste, LLW）、中放射性廢棄物（Intermediate level waste, ILW）、高放射性廢棄物（High level radioactive waste, HLW）等六個廢棄物分類系統。應注意的是針對每種廢棄物類別，其個別核種之最大總活性含量及最終活性（活度濃度）適用的精確值，應依據個別處理方法及處置地點之安全性評估基礎，進行具體指明，這是每個國家相關管理單位應負起的責任，而所採用的數值條件在個別國家可能會有顯著差異。

(2) 核電廠除役之廢棄物處理技術及管理

核電廠低放射性廢棄物處理管制之重點，在於保障系統正常運轉、減少廢液之產生及排放、達成廢棄物減量減容之目標，並確保固化體品質能符合規範要求，使後續貯存、運輸、處置能安全順利進行。無論是在運轉期間或是在除役期間所產生的低放射性廢棄物，須符合低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理之規定，才能送至最終處置設施進行永久隔離處置，或是除污至一定的比活度以下，才得以外釋放行；但有一個重點值得注意：不同核電廠除役時所產生的廢棄物種類、數量與特性可能大相逕庭，且每個電廠的營運狀況及條件亦不相同，因此須個別考量電廠的獨特性，以利開發適合的放射性廢棄物處理系統，以達到核電廠除役之目標。

核電廠除役期間所產生之低放射性廢棄物，可規劃直接在廠裡設置專責之低放射性廢棄物處理中心，執行除役廢棄物之分類、除污、處理、減容、安定化、包裝等作業，

以防範輻射污染擴散、降低輻射污染傷害與保障人員及環境的安全，並就近先暫貯於廠內。低放射性廢棄物處理系統可處理固體、液體及氣體之放射性廢棄物，其處理技術基本原則略述如下：

- (a) 放射性氣體的處理方法：(i) 因大部分放射性氣體之半衰期都很短，可延長其停留時間使其衰變；(ii) 利用高效率過濾器去除含放射性核種之微粒；(iii) 將氣體乾燥，再以活性碳吸附惰性氣體。處理後的放射性氣體經偵測後，符合排放標準，始得排放。
- (b) 放射性廢液的處理方法：主要來源為機件洩水、地面洩水、化學廢液、洗滌廢液。其處理方法為：(i) 機件洩水之水質通常具高放射性、低導電率，經過濾器及除礦器處理後，回收使用；(ii) 地面洩水及洗滌廢液之水質通常具低放射性、高導電率，經過濾器處理後，符合排放標準，始得排放；(iii) 化學廢液主要來自離子交換樹脂之再生廢液，其水質通常具高放射性、高導電率，經蒸發器濃縮處理後，其蒸餾液再經過濾器及除礦器處理，回收使用；其殘餘濃縮廢漿即成為濕性固態廢棄物，再以水泥固化。
- (c) 核電廠固態廢棄物分為濕性固態廢棄物與乾性固態廢棄物。濕性固態廢棄物如過濾殘渣、濃縮廢漿、離子交換樹脂等，除了離子交換樹脂外均經水泥固化，安定其放射性核種，並以容器盛裝；離子交換樹脂則以離心機脫水下料裝桶處理。乾性固態廢棄物如污染防護衣、手套、鞋套、面具、塑膠、橡膠防護墊、污染幫浦、管閥、軸封、軸承及工具等，通常再進一步細分為可燃與可壓廢棄物，經焚化、壓縮處理後，以減少廢棄物的體積。

放射性廢棄物從產生到處置的階段須有一個完整的管理方法，通常依序包含以下步驟：(a) 廢棄物產生及特性調查；(b) 包裝的製備；(c) 處置單元的製備及品質控制；(d) 儲存、處置及記錄。其中，步驟(a)～(b)屬於處理及包裝階段，步驟(b)～(c)屬於運輸階段，步驟(c)～(d)屬於處置單元處理及儲存階段。

- (a) 廢棄物產生及特性調查
 - 廢棄物確認
 - 物理及輻射特性調查
 - 化學、生物及熱穩定性
- (b) 產生包裝
 - 廢棄物固化及包裝

- 表面物理及輻射量測
- 包裝表面污染檢查
- (c) 產生處置單元及品質控制
 - 包裝接收
 - 目視檢查
 - 劑量率量測
 - 隨機活度及機械測試
 - 處置單元的製備
- (d) 儲存、處置及記錄
 - 暫存區域中進行隔離以避免輻射，或進行屏蔽以控制輻射
 - 數量確認及追蹤源頭
 - 包裝紀錄及處置單元的儲存地點

A. 放射性廢棄物分類

依據廢棄物的特性、型式、放射性特性、活度或同位素含量，放射性廢棄物可依物理/化學特性及放射性特性兩方面進行分類。若依據特性、型式分類(物理/化學分類)，可分別區分為(A)乾性固態廢棄物；(B)濕性均質廢棄物；(C)其他液體廢棄物與(D)密封射源，分別說明如下：

- (A) 乾性固態廢棄物：異質性可壓縮或不可壓縮之固態廢棄物，且具有均勻的活性分佈，例如過濾器(液體循環管路)、固體粉末(破碎混凝土、可燃物焚化後之無機殘留物)、除水除濕後的固態廢棄物等。
- (B) 濕性均質廢棄物：包含離子交換樹脂、濾渣污泥、蒸發後的濃縮物等。
- (C) 其他液體廢棄物：包含油或有機廢液等。
- (D) 密封射源：妥善封裝於金屬或合金容器內之放射性物質。

若依據放射性特性、活度或同位素含量分類(放射性特性分類)，可分別區分為豁免廢棄物、極低放射性廢棄物、低中放射性廢棄物及高放射性廢棄物。

B. 放射性廢棄物特性調查

特性調查是一種程序，可取得放射性廢棄物之物理、化學、放射性等特性資料，其目的為檢視廢棄物是否符合處置所建立的廢棄物接收準則。特性調查

之程序可依（一）物理/化學特性及（二）放射性特性兩方面作為區分。物理特性調查以目視檢查及文件檢查定義廢棄物的本質及種類以幫助分類；化學特性調查主要藉由實驗分析廢棄物之組成，以利決定選擇最佳執行包裝固化之處理方式。廢棄物的放射性特性調查分為 Gamma、Beta 及 Alpha 放射體的偵測，Gamma 放射體也被稱為關鍵同位素或易測（Easy to Measure, ETM）核種，最常用的量測方法是 Gamma 能譜測定技術，此方法可應用在未經包裝固化的廢棄物，亦可直接用在最後的包裝；另外，Gamma 放射體亦可利用劑量率與活度的關聯係數（Correlation Factor）之理論方法計算。至於 Beta 及 Alpha 放射體的偵測最常使用的方法是放射化學分析，但此方法所需時間長且成本較高，國際上實務的作法是計算比例因數（Scaling Factor）。Scaling Factor 是由現場取樣後，同時分析關鍵易測核種與難測（Difficult to Measure, DTM）核種，分析兩者得到數學關係式所推導出來的參數，可用易測核種量測值來計算難測核種，該數學關係式必須建立在統計方法上且具有再現性的資料基礎上。

C. 放射性廢棄物的固化與包裝

固化與包裝之目的是為了使放射性廢棄物穩定化，以符合其長期處置穩定性的需求。所有核電廠產生的放射性廢棄物須先進行固化與包裝程序，使其成為廢棄物包裝（Waste Package）及處置單元（Disposal Unit）後，再儲存於處置設施。廢棄物包裝是由經處理的廢棄物（或廢棄物裝置於容器內）、填充材料及特定容器所組成；處置單元是由經處理的廢棄物（或廢棄物包裝）、填充材料（或密封材料）及法定核准的容器所組成，處置單元即為最後儲存的型態。處理乾性固態放射性廢棄物的方法有超高壓縮（Super Compaction）及固定化（Immobilization）等兩種方式。非均質乾性固態廢棄物直接在其包裝的桶內進行壓縮，接著進行超高壓後置於容器內製備為處置單元，非均質或均質固態廢棄物處理通常藉由水性黏合劑（Hydraulic Binder）進行固定化。均質而可分散的固態廢棄物（如飛灰、混凝土顆粒、乾燥粉末等）及其他源自液體循環管路的過濾材質，須確保其長期被封存在容器或桶子中且將之固定化。採用高完整性承裝容器（High Integrated Container, HIC）也是處理固態放射性廢棄物的選項之一。至於濕性均質廢棄物則添加至水性黏合劑基質中，經混合後達到固定化之目的。

D. 放射性廢棄物包裝與處置單元的特性調查

廢棄物包裝及處置單元的特性調查可依照物理/化學特性及放射性特性兩方面作為區分。進行物理/化學特性調查可驗證廢棄物包裝與處置單元是否能符合接收標準，實務上採用目視檢查或文件檢查（物理）及實驗分析（化學）方式執行。廢棄物包裝及處置單元的放射性調查方法與廢棄物的放射性調查相同，分為 Gamma、Beta 及 Alpha 放射體的偵測，若處置單元為包裝及容器之組合，則最終放射性特性調查的結果即為個別放射性資料的總合。

E. 放射性廢棄物包裝的分類

分類方法有三種，如下所述：

(A) 依據產生的時間：根據包裝產生程序的不同，有兩種分類

- 舊的（Historical）或非典型（Not Typified）的包裝：指未能了解其最終產物特性及品質的廢棄物。
- 典型的（Typified）包裝：廢棄物包裝的製備符合文件架構，且最後產物的資訊完整。

(B) 依據廢棄物特性及固化包裝程序

- 乾性固體：異質性、壓縮或非壓縮
- 固定化乾性廢棄物：有、無水性黏合劑
- 濕性均質廢棄物：於混凝土基底中進行固化

(C) 依據包裝之放射性含量

- 極低放射性廢棄物
- 低中放射性廢棄物

F. 放射性廢棄物處置單元的分類

處置單元是由廢棄物包裝、固定化材料（黏合物、混凝土）及容器所構成。具有以下兩種分類：

(A) VLLW-DU

- 穩定化 VLLW-DU：以混凝土、黏合物使有毒廢棄物安定化之處置單元，確保儲存期間具有惰性特徵。
- 未穩定化 VLLW-DU：惰性特徵廢棄物之處置單元，須利用壓縮技

術填補空隙。

(B) LILW-DU

- 限制性 (Level 2)：限制包裝、容器及相關材料（混凝土、黏合物牆）以確保（單獨性或全體性）的活度限制。
- 非限制性 (Level 1)

(3) 放射性廢棄物接收準則之文件架構

文件架構為能達到管理放射性廢棄物並且安全儲存於處置設施，該架構通常由法律規範、包裝及處置單元接收標準的規範及方法論程序所組成。法律規範依各國規定而可能存在些許差異；對接收標準的規範文件，須收集有關廢棄物包裝及處置單元的要求，以確保其儲存時的品質，換言之，該規範文件包含放射性及固化包裝的品質需求、毒性限制條件或活度測定的方法等；方法論程序則是根據廢棄物的特性，並針對廢棄物包裝及處置單元的接收，定義一個可被採納的處理程序及其所需文件。

A. 處置單元的接收準則

處置單元接收標準的規範定義了要求及技術條件，以符合 LILW-DU 及 VLLW-DU 兩種處置單元的接收標準及最終儲存。西班牙處置單元的接收標準乃參考法國的作法，且 VLLW-DU 種類較具有彈性。

關於 LILW-DU 處置單元的接收準則，LILW-DU 由容器、廢棄物或其包裝、固定化材料（混凝土或黏合物）構成。其活度準則分為 Level 1 及 Level 2，分別代表低放射性廢棄物（LLW）及中放射性廢棄物（ILW）。盛裝容器及運輸要求經法規委員會（Regulatory Commission）核准通過才可執行；另外處置單元的機械性質亦有規定，Level 1 及 Level 2 處置單元共通的準則須考慮活度限制（Bq/g）及活度分布（異質性）、盛裝容器、包裝、廢棄物、結構強度、回收性及運輸性、鑑別及功能等條件，Level 1 處置單元尚須測定未包含遮蔽材料的比活度（Specific Activity），另外 Level 2 處置單元至少一種成分能遵從限制性質（Confinement Properties），如成分的機械性質、熱循環及擴散溶出等特性，當成分符合限制要求時才執行比活度量測。Level 1 及 Level 2 處置單元的容器為 CE-2a 混凝土容器，可以存放 220 公升的鋼筒、超高壓產物或直接固化包裝的廢棄物。此外針對 Level 1 處置單元，亦有混凝土屏蔽的 400 公升及 480 公升鋼桶可儲存使用。

B. 中低放射性廢棄物包裝的接收準則

該準則包含活性準則（Level 1 及 Level 2）、包裝製備程序（典型的、舊的或非典型的）、可分裂成分含量、與放射性無關之準則（爆炸性）、一般性準則（包裝辨識確認、尺寸、填充程度、運輸準則、無液體等）及品質要求。

C. 中低放射性廢棄物直接固化包裝（LILW Directly Conditioned）的接收準則

該準則包含活性準則（Level 1、Level 2 及異質性限制）、容器（經 Spanish NRC 核准、CE-2a 及 CE-2b 容器的運輸要求）、活性限制、可分裂成分含量限制、與放射性無關之準則（無有機物質、生物性污染、爆炸性等）、固化包裝材料及品質要求。

D. 極低放射性廢棄物包裝的接收準則

(A) 一般接收準則

- 可接受一整組的 VLLW 作為處置單元
- 容器唯一的功能是預防容器內物質的散播
- 危險廢棄物須經過穩定化程序處理
- 惰性廢棄物及非危險廢棄物可進行填充空隙（Gap Filling）程序
- 纖細狀惰性廢棄物可利用來填充其他 VLLW 以利體積最佳化
- 未含爆炸性、腐蝕性、氧化性、可燃性及腐敗性物質或其限制
- 未允許的物質如未處理液體

(B) 限制條件

- 與放射性無關之成分
- 物理化學特性

(C) 物理化學特性相關準則

- 惰性廢棄物（Inert Waste, IW）：來源、產生過程及物理化學特性描述
- 非危險性廢棄物（Not Dangerous-like Waste, NDW）：非金屬材質（組成及成分比例）及金屬材質（鋁、銅、鉛、石棉含量）

- 危險廢棄物 (Dangerous Waste, DW) : pH 值 ($4 < \text{pH} < 13$)、廢棄物乾重之溶解度 ($< 10\%$)、溶出限制、有機或無機物質。

(4) 放射性廢棄物之接收方法

A. 中低放射性廢棄物之接收方法

- (A) 典型廢棄物包裝：是根據核准的特定文件所產生中低放射性廢棄物包裝，該文件稱為包裝描述文件 (Package Description Document, DDB)。
典型廢棄物包裝的接受標準是依照程序書 (Process Book, LP) 的版本而定。
- (B) 舊的或非典型廢棄物包裝：並非根據包裝描述文件所產生的低中放射性廢棄物包裝。舊的或非典型廢棄物包裝的接受標準是依照接收檔案 (Acceptance Dossier, DA) 的版本而定。

中低放射性廢棄物包裝之接收方法可分為三個階段，依序為一般接收 (Generic Acceptance)、文件接收 (Documental Acceptance) 及契約接收 (Contractual Acceptance)。在一般接收階段，廢棄物包裝製造者提交一份包裝描述文件以通過核准，而管理單位則查核該包裝種類是否符合接收標準；進入文件接收階段時，管理單位則查核每一包裝的正確識別、分類及放射性資料是否符合接收標準；在最後的契約接收階段，管理單位有責任確認包裝鋼桶（容器）的結構狀態、重量及放射性參數（劑量率）。

中低放射性廢棄物處置單元之接收方法與上述中低放射性廢棄物包裝相同，也分為三個階段，即一般接收、文件接收及契約接收等三個階段，其運作內容稍有差異。在一般接收階段時，廢棄物處置單元製造者提交一份處置單元描述文件以通過核准，而管理單位則查核該包裝種類是否符合接收標準；進入文件接收階段時，管理單位根據查核每一包裝的物理及放射性資料；在最後的契約接收階段，管理責任移轉到 ENRESA。

B. 極低放射性廢棄物之接收方法

針對極低放射性廢棄物包裝的接收，西班牙 El Cabril 處置設施有兩種作法：分別為不須再處理及必須再處理。若極低放射性廢棄物包裝不須再處理時，進到 El Cabril 處置設施時直接轉換為極低放射性廢棄物處置單元，反之若必須再

處理時，則透過穩定化（危險廢棄物）、填充空隙及壓縮將其轉換為處置單元。

6. 訓練課程提問與討論（Q&A）

此次除役國外訓練課程所涵蓋的領域包含有：除役策略管理、分工架構與排程、除役費用估計、特性調查、廢棄物數量估算、除污作業、拆除作業、廢棄物管理、利害關係人溝通、最終量測及場址再利用等議題，因此需要各領域的同仁共同參與，參訓成員除有來自本所的同仁外，台電、泰興、益鼎與清華大學等單位也派員參與。為了提升參訓同仁於相關議題之專業知識，以利受訓時能完全理解授課內容，並在必要時可與講師進行討論，此次出國前，便要求參訓同仁以專業分工的方式就其本身的相關領域提出問題，並收集其他未參訓同仁的相關問題；另一方面，也可以藉由問題的思考，讓同仁對於此次受訓的目標更為明確。所有的問題由專人負責彙整，以達到整合各分工介面的目的。

出國前所提出的問題主要以達成計畫整體需求為目標，考量訓練課程所涵蓋的領域進行初步分類，並以五個面向來進行細部分類，包括技術的原理與理論、是否有相關的研究案例、是否有相關的參考文件、針對核一廠的方法及核一廠的解決方案。由於本次受訓的課程是以西屋公司履約內容的工作項目為主，因此，重點問題也著重在這些工作項目的相關議題，包含工法排程、廢棄物數量估算及特性調查。另外，出國前同仁們也模擬了各種提問狀況，包括上課時、休息時間或課後，以充分利用每個提問機會，並安排專人補充提問時遺漏的問題及協助記錄相關的討論內容，確保所有問題及答覆的完整性。

由於事前的完善準備，參訓的同仁在課程中能很快的進入狀況，並在恰當的時機詢問重點問題，達到出發前問題彙整的主要目的。問題的提問也激發了西屋公司講師與參訓同仁間的熱烈討論；此外，參訓同仁也利用講師的休息時間，再進一步深入詢問，讓西屋講師對參訓同仁積極而認真的態度印象深刻，圖 19 與圖 20 為西屋公司講師與參訓同仁於課程中及課後的討論狀況。



圖 19、西屋講師與參訓同仁於課程中之討論狀況



圖 20、西屋講師與參訓同仁於課後之討論狀況

（二） 除役設施實地參訪

1. Zorita 核電廠除役計畫規劃及管理

Zorita 核電廠為單迴路 PWR，熱功率 510 MWth，電功率 160 MWe，廠區內主要設施如圖 21 與圖 22 所示；1969 年開始商業運轉，2006 年停止運轉，除役策略為立即除役，除役目標為無限制性使用之綠地。



圖 21、Zorita 核電廠

- 1 Reactor Building
- 2 Turbine Building
- 3 Auxiliary Building
- 4 & 9 Offices and Workshops
- 5 & 6 Transformer and Diesel
- 7 Liquid Effluent Treatment Building
- 8, 11 & 16 Radioactive Waste Stores
- 10, 12 & 17 Conventional Stores
- 13 Electric Park
- 14 Liquid Release Line
- 15 Cooling Towers
- 18 Radiological Control
- 19 ISFSI



圖 22、Zorita 核電廠主要設施

除役時程規劃如圖 23 所示，原規劃於 2015 年完成除役，現已調整至 2017 年完成，整個除役時程為 12 年。在除役期間電廠所有權轉移給 ENRESA 公司，待完成除役後再由 ENRESA 公司轉回給電廠。除役期間增建、改建的設施主要有：廠內興建用過核子燃料乾式貯存場、汽機廠房改建為放射性廢棄物處理及暫貯場地、拆除冷卻塔場地做為一般廢棄物暫貯場地。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 23、Zorita 核電廠生命週期地圖

除役作業首先執行用過核子燃料移至用過核子燃料乾式貯存場，分別貯存於 12 個 HI-STORM Z 乾貯護箱，如圖 24 所示，施做期間為 2006 至 2010 年，此部分工作業已完成，隨後開始執行拆除作業。

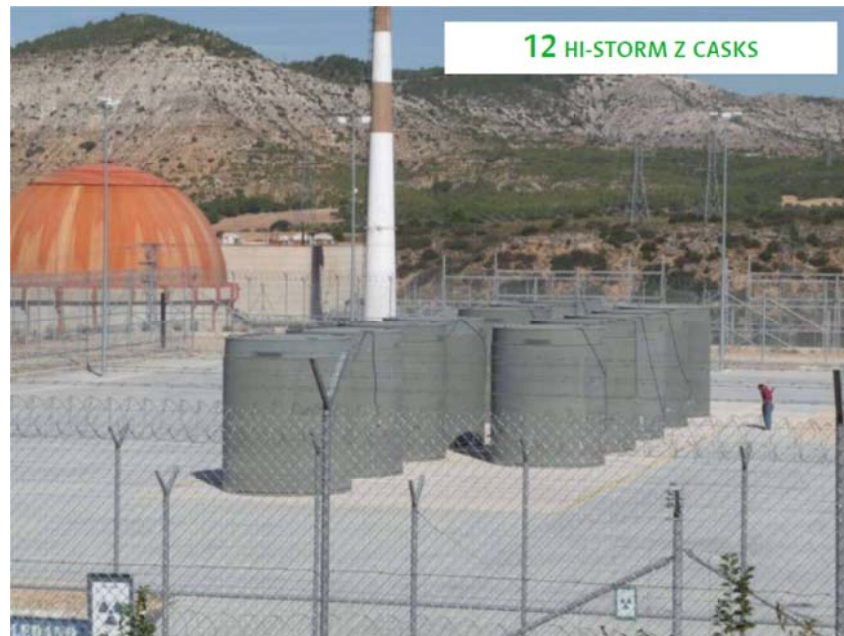


圖 24、Zorita 核電廠用過核子燃料乾式貯存場

核電廠除役主要可分為調查、調整、拆解、拆除到復原等步驟，如圖 25 所示。其中拆解、拆除到復原搭配廢棄物管理一併考量。

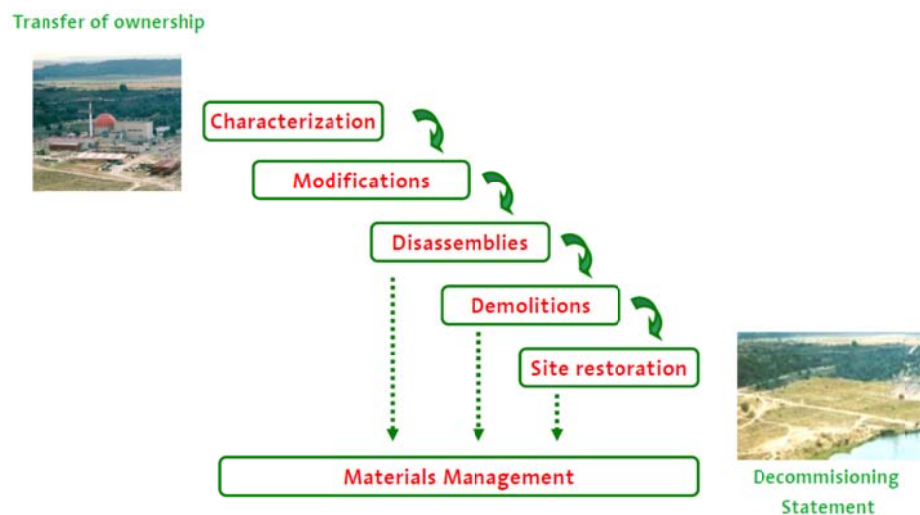


圖 25、Zorita 核電廠除役主要步驟

除役的執行依時間順序，概分為五個階段進行，各階段工作分別明如下：

(1) 階段 0 — 燃料移除和前期工作

- (A) 停機後的活動
- (B) 一次側系統除污
- (C) 初期輻射特性調查更新
- (D) 盤點更新
- (E) 關閉並隔離不需要的系統和組件
- (F) 興建用過核子燃料乾式貯存場
- (G) 用過核子燃料移除（燃料池清空）

(2) 階段 1 — 準備動作

- (A) 動員並設立工地辦公室
- (B) 危險物質移除
- (C) 拆解非放射性系統、區域和設備
- (D) 修改且重新配置系統和設備
- (E) 汽機廠房設備拆解和整建
- (F) 測試並啟動新系統和設施

(3) 階段 2 — 拆解主要放射性組件

- (A) 放射性設備與系統之除污及拆解
- (B) 反應器內部組件拆解
- (C) 大型組件拆解，核能蒸氣供應系統移除
- (D) 設備和系統的解除管制調查
- (E) 放射性廢棄物處理、貯存和處置
- (F) 一般廢棄物管理

(4) 階段 3 — 其他系統和設備移除、清理和拆除

- (A) 其他系統和設備移除
- (B) 放射性結構除污
- (C) 後期輻射特性調查
- (D) 結構和建築物的解除管制調查
- (E) 結構和建築物的拆解和移除

(5) 階段 4 — 環境復原

- (A) 最終清理

- (B) 執照終止目的之最終輻射特性調查
- (C) 廠址回填
- (D) 廠址復原
- (E) 廠址綠化
- (F) 結案報告
- (G) 執照終止獲得主管機關許可
- (H) 歸還所有權

目前 Zorita 電廠除役執行至階段 2 - 拆解主要放射性組件，除役時程規劃如圖 26 所示，西屋（歐洲）公司承包爐體拆除作業，在實際執行工作之前，先經過電腦 3D 模擬與實體測試，因此實際工作均能依照原先的規劃執行。本行程參觀水下切割工作，現場僅有兩名工作人員負責切割機具操作，另外配屬一名輻防管制人員，現場工作環境維持整潔良好，顯示事前完善且充分的準備對於實際作業順利進行至為重要。

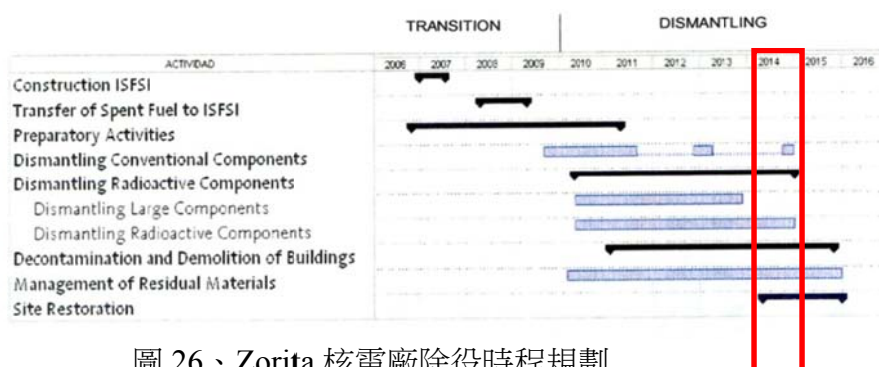


圖 26、Zorita 核電廠除役時程規劃

在反應器廠房內將拆解後的反應器頂蓋裝入傳送容器，經由預先建立的通道，傳送至汽機廠房改建的放射性廢棄物處理及暫存廠房，進行包裝及暫貯，如圖 27 所示。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 27、Zorita 核電廠反應槽拆解及運送示意

ENRESA 公司在營運管理上建有資訊管理系統 (Information Management System)，除原先的子系統之外，配合除役需求亦增加新對應的子系統。資訊管理系統僅限於公司及電廠使用，具有共用文件管理系統 (Document Management System, Generic, 簡稱 SGD)、特定除役管理系統 (Decommissioning Management System, Specific, 簡稱 SGDes)、特定

廢棄物管理系統（Waste Management System, Specific，簡稱 SGR）、共用計畫管理系統（Project Management Ssystem, Generic，簡稱 SGP）和與經費人力資源等子系統，用以輔助除役工作執行與管理。圖 28 所示為 SGDes 子系統操作畫面。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 28、ENRESA 公司-SGDes 子系統操作畫面示意圖

ENRESA 公司在 Zorita 電廠的接待與展示中心，如圖 29 及圖 30 所示，整體設計自然貼切，搭配新型展示科技，可提供參訪民眾除役內容簡報介紹，並比對除役前電廠運轉狀況、目前除役現場場景與將來除役後的願景，予人完全不同的對比，可以大幅消除除役給人落寞感的印象。



圖 29、Zorita 核電廠接待展示中心外觀



圖 30、Zorita 核電廠接待展示中心內部

2. Zorita 核電廠除役特性調查

(1) 廠區特性調查作業

特性調查屬於除役前置作業階段，目的為收集電廠有關輻射分布情形的資料，有助於拆除工作的進行。經過初始評估後，配合程序分析、安全評估、環境量測、電廠紀錄、設備維護更新、人員訪談以及必要時進行加馬偵檢，確定污染來源、區分影響/非影響區域、規劃污染偵檢計畫、評估潛在影響區域。

西屋提供的特性調查流程：首先進行廠址歷史評估，根據電廠的運轉歷史、意外事

件報告及其他有關保健物理、廢料貯存的紀錄，對電廠可能受影響的區域、系統及其受影響程度進行初評；之後根據結果，分別進行規劃與執行廠房建物及系統的量測作業、爐內組件的中子活化評估、廠房外圍環境區域的偵檢及取樣分析、毒性廢棄物的調查作業，最後根據上述的調查及分析結果，進一步對廠址區域及系統進行是否受到輻射影響的區域分類，受到輻射影響的區域則可依照影響程度進行分級。

根據以上方法，將 Zorita 電廠內的區域分別區分為綠色：一般區域、黃色：中低污染區域及紫色：高污染區域（如圖 31 所示）。

（資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考）

圖 31、Zorita 電廠污染程度分區圖。

特性調查作業所採用的輻射偵檢儀器，依據不同偵檢區域及偵檢需求選用儀器，計有氣流式比例計數器、阿伐貝他閃爍計數器、阿伐閃爍計數器（ZnS）、扁平型蓋格計數器、NaI 加馬閃爍計數器、塑膠閃爍計數器以及低能量加馬偵檢器（圖 32~38）。

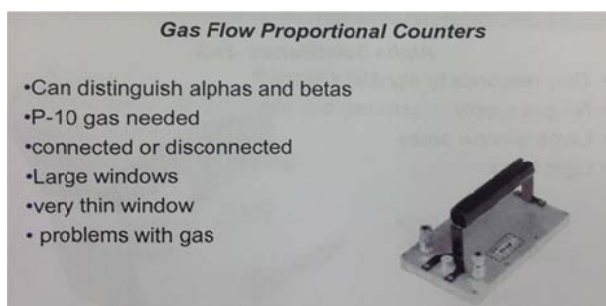


圖 32、氣流式比例計數器

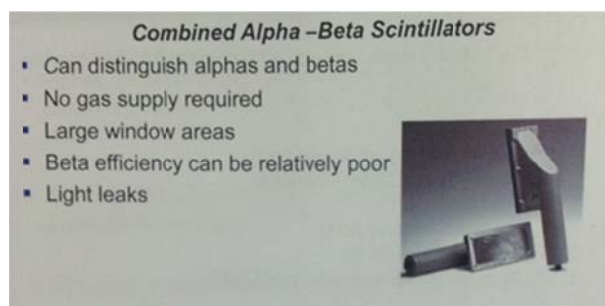


圖 33、阿伐貝他閃爍計數器

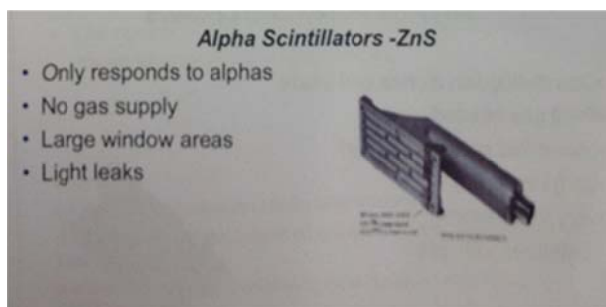


圖 34、阿伐閃爍計數器（ZnS）

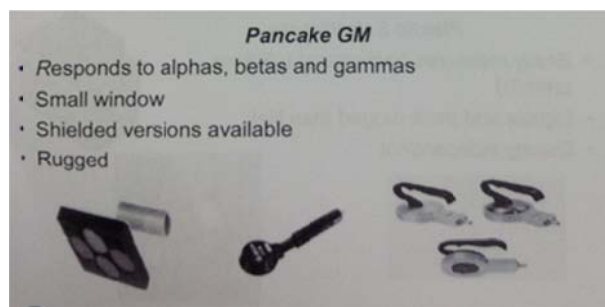


圖 35、扁平型蓋格計數器

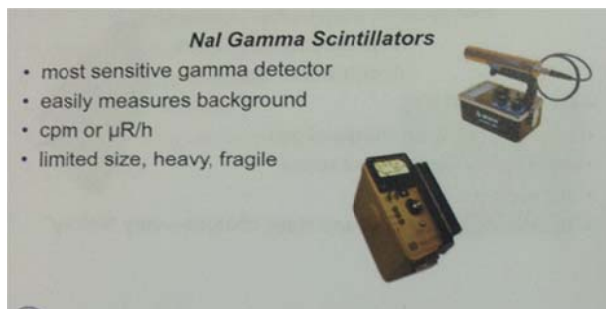


圖 36、NaI 加馬閃爍計數器

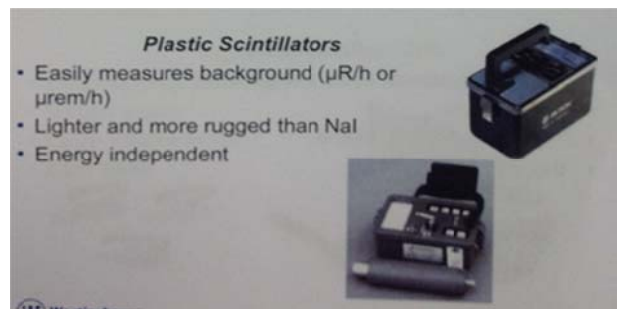


圖 37、塑膠閃爍計數器

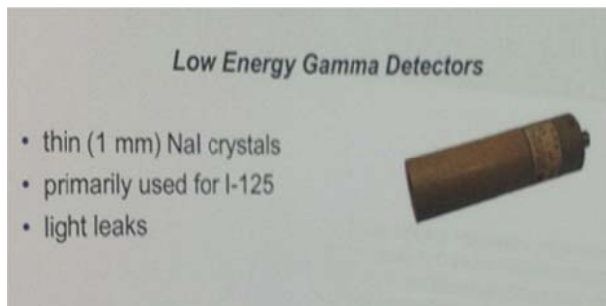


圖 38、低能量加馬偵檢器

(2) 生物屏蔽區域特性調查作業

Zorita 核電廠停機移除反應器後，即針對 Zorita 核電廠反應器的生物屏蔽進行特性調查，該區域會受到爐心部份中子活化影響，影響的範圍在主要內裡屏蔽高度為海拔 602.2 公尺到 597.8 公尺的鋼筋水泥區域，該生物屏蔽區示意圖如圖 39 所示。初步主要屏蔽特性調查是基於中子通量分佈及金屬活化分析進行，根據生物屏蔽所在的不同區域，進行放射性核種濃度與 ENRESA 接受限值的比較，以作為未來廢棄物包裝分類的依據。Zorita 生物屏蔽區域特性調查鑽心取樣工作採用 New Millennium Technology 公司的設備進行（如圖 40 所示）；取樣為採用 12 mm 的鑽頭鑽取水泥區域的水泥粉末，並以吸取的方式收集粉末樣品至過濾袋中。生物屏蔽區的特性調查設計為在主要屏蔽區的特定位置及深度進行一系列的鑽心取樣工作以驗證活化分析的結果，該取樣的位置如圖 41、42 所示。鑽心取樣時在活化程度高的區域取樣間隔應較小，以了解活化的分佈與變化，Zorita 案例中包含以下幾種不同的取樣深度：50 公分、20 公分、10 公分、5 公分和 1 公分，鑽心取樣的位置、深度以及取樣數量列表如表 11 所示。在取得鑽取的樣品後會在現場先對樣品進行加馬分析以估算活度，之後再將樣品送到實驗室進行更詳細的放射化學分析。偵檢的結果如圖 43 所示。圖中的水平線為處置場的接收限值，曲線為不同取樣位置的活度值，綠色為活度分析的結果，由活度分析與特性調查的結果，作為未來

廢棄物盤點及處置的依據。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 39、生物屏蔽區 3D 示意圖

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 40、特性調查鑽心取樣設備

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 41、鑽心取樣位置示意圖（一）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 42、鑽心取樣位置示意圖（二）

表 11、鑽心取樣列表

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 43、鑽心取樣分析結果與接收限值比較圖

用同樣的方式對主要屏蔽區域的金屬材質部分進行特性調查與分類，包含：內裡襯套、爐心外管套、金屬樑等部分。分析的結果如表 12 所示。最後可根據以上結果配合處置場接收標準，對 Zorita 電廠生物屏蔽進行污染程度分類，結果如圖 44 所示。Zorita 提供的經驗為：對生物屏蔽區域可依照中子通量分佈與活化程度分析進行區域分類，部分區域評估出現活度高估的情形，將造成廢棄物估算時高估了該區域的廢棄物分類等級；而鑽心取樣偵檢作業可以作為活度分析的驗證，並作為廢棄物等級分類的依據。

表 12、生物屏蔽區域金屬材料的偵檢結果

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 44、Zorita 生物屏蔽分類圖

(3) 內部組件切割件特性調查作業

為進行內部組件活度估算、分類、切割以及包裝規劃，應對內部組件進行特性調查作業。Zorita 電廠採用的特性調查方法為使用 Canberra 超高頻加馬偵檢探測器（UHF Gamma Probe）對特定位置進行加馬劑量率量測。小切割件因活度較高，因此須以水作為屏蔽進行水下量測，於距離 5 公分處兩點及 20 公分處兩點進行共四點的表面量測；其餘大分割件（例如：熱屏蔽）則進行直接量測，於距離為 5 公分處八點及 20 公分處八點進行共十六點的表面量測。量測該位置的劑量率後利用轉換方程式（Transfer Function）將劑量值轉換為活度，以利後續進行結果分析。圖 45 為熱屏蔽的內部組件分

割圖及量測位置示意圖。

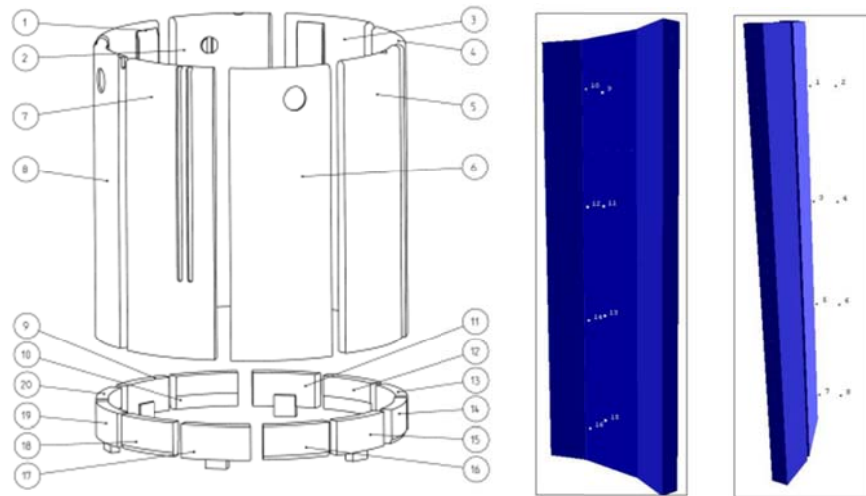


圖 45、內部組件分割圖及量測位置示意圖-熱屏蔽

熱屏蔽內部組件量測的結果如圖 46 所示，分別表示在不同的位置下對各切割件內部及外部所量測得到的劑量率分布情形；並利用轉換方程式求得該位置的平均比活度。由 Zorita 電廠內部組件切割件特性調查作業提供的實務經驗，在實際進行超高頻加馬偵檢探測器操作時，可能會因為探測器位置的誤差造成量測上的困難，因此進行精準的量測位置設定時必須考量探測器以及切割件的相對定位，某些案例中必須對該位置重複進行量測以取得較佳的量測數據；此外，為取得較準確的劑量與活度轉換列表，在進行轉換方程式列表計算時，也必須考慮到是否活度梯度有過大的情形。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 46、內部組件切割件劑量率分布-熱屏蔽（左圖為劑量分佈，右圖為平均活度）

同時對爐心側板部分的切割件進行特性調查，圖 47 為核心檔板的內部組件分割圖。特性調查對每塊不同的切割件內部及外部 5 公分處進行輻射劑量率的量測，量測結果如圖 48 所示。圖中可發現有部分區域的內部及外部的劑量率相差甚大，推測可能是因為熱點或是量測誤差造成的結果。取得劑量率的量測結果之後，配合轉換方程式可求得該

位置的平均比活度。圖 49 為比活度的特性調查與理論推導值的比較結果，由結果可發現，特性調查與活度估算的理論值大致相同，較大或較厚的切割件必須進行活度估算。在低背景的区域，採用手動方式進行固定位置的特性調查可消除不確定性，並增進量測的準確度。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 47、內部組件分割圖-爐心側板

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 48、爐心側板輻射劑量率量測結果

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 49、爐心側板特性調查活度與理論值的比較

3. Zorita 核電廠拆解工法與廢棄物包裝

(1) 反應器壓力槽 RPV 拆解作業

西屋公司在 Zorita 核電廠反應器壓力槽拆解作業之切割規劃有下列的考量：

- A. 壓力槽內部組件輻射程度；
- B. 因切割作業所產生的二次廢棄物問題；
- C. 溼性廢棄物不易處理之問題；
- D. 切割工具可靠度與穩定度...等。

因此反應器壓力槽拆解作業是規劃在水下以機械切割的方式來進行，主要工具包含圓盤鋸切割、帶鋸切割以及鑽石索鋸切割。由於水下作業有相當的困難度，如切割工具的安裝與定位、組件拆解順序、廢棄物檢整、組件吊裝等，都需要依賴遙控系統，而水下切割控制系統的可靠度與應用則是整個爐體拆解作業程序的關鍵所在（如圖 50~

53)。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 50、Zorita 核電廠除役_圓盤鋸切割

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 51、Zorita 核電廠除役_帶鋸切割

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 52、Zorita 核電廠除役_鑽石索鋸切割

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 53、Zorita 核電廠除役_水下切割控制系統

反應器壓力槽拆解作業，首先規劃改建汽機廠房格局動線，將反應器壓力槽和用過燃料池之間的混凝土牆打通（如圖 54 所示），以利反應器內部大組件進行吊掛作業，混凝土牆總高度約 20 米，利用鑽石索鋸溼性切割至適當大小（切割尺寸約 $1.7 \times 1.7 \times 1.7 \text{ m}^3$ ，每塊約 9 噸重，共計切成 24 塊），再吊至除污室進行混凝土除污處理。

接著將用過燃料池填滿水作為輻射屏蔽，將反應器內部的大組件一一運送至用過燃料水池進行細部切割，配合廢棄物容器尺寸，予以體積最大化切割，以減少切割次數及

搬運時間（如圖 55~ 58），並規劃加裝水下過濾系統，以解決切割時造成水的能見度問題。待所有組件切割完成後，再透過液壓夾爪吊掛或勺子抓取、將切割碎屑收集裝籃，無法收集的小碎屑則是採用抽氣吸取的方法，吸出後再過濾之（如圖 59）。最後依照廢棄物放射性等級作各別處理，高階放射性廢棄物（Greater Than Class C，GTCC）以 4 個用過燃料乾式貯存容器盛裝，放置廠區作暫時中期貯存（如圖 60、61）；低階放射性廢棄物以一般廢棄物容器盛裝，並且使用水泥固化後（如圖 62、63），再送到低放處置設施貯存。

（資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考）

圖 54、Zorita 核電廠除役_改建汽機廠房吊掛動線

（資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考）

圖 55、Zorita 核電廠除役_反應器內大組件吊至水池

（資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考）

圖 56、Zorita 核電廠除役_配合容器尺寸切割作業（一）

（資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考）

圖 57、Zorita 核電廠除役_配合容器尺寸切割作業（二）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 58、Zorita 核電廠除役_配合容器尺寸切割作業（三）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 59、Zorita 核電廠除役_吊掛工具

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 60、Zorita 核電廠除役_乾貯容器盛裝高階廢棄物（一）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 61、Zorita 核電廠除役_乾貯容器盛裝高階廢棄物（二）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 62、Zorita 核電廠除役_一般廢棄物容器盛裝低階廢棄物

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 63、Zorita 核電廠除役_低階廢棄物水泥固化處理

反應器內部組件切割作業大致分成頂部與底部組件兩部分，並且由上往下進行切割（如圖 64~66）。首先將上部組件吊掛安裝在分度盤機構，以方便切割時作角度與切割線

的調整；接著利用圓盤鋸切割，分別將驅動軸套管（Drive Shaft Shroud Tubes）、導管組件（Gguide Tube Assemblies）和支撐管（Support Columns）切除後，再依據廢棄物盛裝容器的尺寸，將頂部支撐板利用帶鋸切割作大體積拆除（如圖 67~ 69）。至於底部組件的切割作業則比照頂部組件的方式，將底部組件吊至分度盤機構，利用帶鋸、圓盤鋸等機械式工具來切割組件，舉凡上桶部（Upper Barrel）、熱屏蔽（Thermal Shield）、底部增壓室（Lower Plenum）等都以相同的切割方法來進行作業（如圖 70~ 75），切割後相關廢棄物檢整、收集作業，影響著整體拆解工作時程以及處理成本，反應器內部組件拆解作業已於 2013 年 10 月完成。

西屋公司目前正積極著手進行反應器壓力槽外殼拆解作業，規劃將整個壓力槽外殼吊出，安置在用過燃料池的固定架上，再進行切割拆解作業（如圖 76、77）。主要切割工法仍然採用水下機械式切割，沿續使用原來用於爐內組件切割機具，經過重組將再使用於壓力槽外殼切割，規劃將外殼切成九個圓環狀（如圖 78），再依照廢棄物容器尺寸進行等分細切。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 64、Zorita 核電廠除役_RPV 內部組件

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 65、Zorita 核電廠除役_RPV 頂部組件

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 66、Zorita 核電廠除役_RPV 底部組件

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 67、Zorita 核電廠除役_切除驅動軸套管

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 68、Zorita 核電廠除役_切除導管組件

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 69、Zorita 核電廠除役_切除頂部支撐板

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 70、Zorita 核電廠除役_帶鋸工具架設安裝

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 71、Zorita 核電廠除役_切除上桶部

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 72、Zorita 核電廠除役_移除熱屏蔽

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 73、Zorita 核電廠除役_切除下桶部

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 74、Zorita 核電廠除役_切除熱屏蔽

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 75、Zorita 核電廠除役_切除底部增壓室

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 76、Zorita 核電廠除役_壓力槽外殼拆解規劃（一）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 77、Zorita 核電廠除役_壓力槽外殼拆解規劃（二）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 78、Zorita 核電廠除役_壓力槽外殼拆解規劃（三）

(2) 大型組件拆解作業

由於管線設備特性及形狀多樣化，不論採用何種拆解工法，人工作業是不可避免的，因此人員劑量管控作業格外重要。拆解作業仍以機械切割為主。大管徑管路切割，使用管路切割機（如圖 79、80）、大型桶槽及設備因應切割工具安裝不便，可選擇以鑽石索鋸與熱切割來搭配進行（如圖 81~ 83）。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 79、Zorita 核電廠除役_大管徑管路切割（一）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 80、Zorita 核電廠除役_大管徑管路切割（二）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 81、Zorita 核電廠除役_大型桶槽切割

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 82、Zorita 核電廠除役_大型設備切割

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 83、Zorita 核電廠除役_熱切割

(3) 廢棄物包裝作業

Zorita 核電廠除役估計產生放射性廢棄物總共約 4,000 噸，主要系統等設備拆除所產生的廢棄物約 400 噸，其中 43 噸是經由爐內組件拆除所產生的高放射性廢棄物（GTCC），預計將以 4 個用過燃料乾式貯存容器盛裝。包裝作業流程直接將乾貯容器的內箱置於燃料水池底部，高放射性廢棄物直接在水下進行檢整裝載，容器內預先設計分隔結構，配合切割規劃下的廢棄物形狀與尺寸，目的在求內部裝載物的穩定性。將容器吊出水池後進行封焊。再運往燃料乾式貯存廠與用過核子燃料一起暫貯管理（如圖 84~93）。

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 84、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱吊入水池

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 85、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱裝載

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 86、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱封蓋

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 87、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱裝載設計

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 88、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱吊出

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 89、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱封焊

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 90、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱吊運出廠（一）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 91、Zorita 核電廠除役_乾貯容器的內箱吊運出廠（二）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 92、Zorita 核電廠除役_乾貯容器運往暫貯場（一）

(資料屬西屋公司營業機密，僅供內部參考)

圖 93、Zorita 核電廠除役_乾貯容器運往暫貯場（二）

4. Zorita 核電廠系統除污

核電廠除役時須先進行系統除污以降低劑量，有利於後續工作人員執行除役工作。

當污染程度越低時對電廠設施的拆除與切割作業較有利。在經濟成本的考量上，經過系統除污後可以減少屏蔽設施的運用及降低換氣保護裝置的使用程度，因此可減少拆除作業的整體成本。

根據 Zortia 電廠除役過程的實務經驗，系統除污所採用的最佳程序有 NITROX 和 EPRI DFD 程序。先使用 NITROX 程序除去不銹鋼材質上的氧化層，後續再進行 EPRI DFD 除污程序。NITROX 程序採用稀釋的硝酸及過錳酸鉀溶液為工作流體，草酸破壞形成的二氧化錳，對不銹鋼材質的除污效果甚佳；DFD 技術則是以稀釋的高錳酸鉀溶液做為氧化劑，稀釋的氟硼酸溶液做為除污劑，草酸作為還原劑，操作溫度約為 200°F。Zorita 電廠營運時流體最大濃度小於 4.7×10^{11} Bq/m³，而廢樹脂儲存桶內的最大活度為 3.37×10^{13} Bq。

進行化學除污時分為兩個工作階段。第一階段在反應器冷卻系統（RCS）、餘熱移除系統（RHR）與化學及容積控制系統（CVCS），採用了 3 步驟的 NITROX 及 2 步驟的 DFD 程序，第二階段在輔助系統及增壓器採用了 3 步驟的 DFD。

影響選擇除污程序的因素很多，包含系統運轉狀況（流體、溫度及壓力參數）、化學程序（pH、溶液內的活度濃度、導電度及溶液中溶解的金屬）、樹脂床的活度、DF 輻射點、金屬材質及其活度等。Zorita 電廠經系統除污後產生的廢棄物數量為 13.3 m³，超出預估值 6 m³ 的兩倍以上，其中第一階段產生 11.0 m³（源自於 FSD），第二階段產生 2.3 m³（源自於 Sub System）。產生大於廢棄物預估數量的主要原因為待處理金屬數量和其活度超過預期，以及使用的樹脂未達到其最高吸附量所致。

由 Zorita 電廠系統除污經驗可知，壓力槽內部組件在進行除污時，因溶液含有較高濃度及活度，會使得廢棄物實際量高於預估量、輔助系統操作情況不符合熱水流分析的預期結果、降低除礦器流率導致溶液中含有較高濃度的活度與金屬等；Zorita 電廠在除污第二階段時，將輔助系統從 RCS 分離出來有利於降低輔助系統的劑量率，在除污第一階段時減少 RPV 牆上及內部沉積物則有利於電廠除役時的切割與拆除活動，而執行階段電廠操作員工的積極投入與配合，將是除役計畫成功的關鍵。

5. 西班牙放射性廢棄物管理

ENRESA 公司為國有企業，創建於 1984 年，股東包含 SEPI（Spanish State Industrial Holding）和 CIEMAT 等政府單位，負責西班牙放射性廢棄物管理和核設施除役的執行，

ENRESA 公司依照西班牙政府訂定的放射性廢棄物管理政策，每四年修訂「一般放射性廢棄物管理計畫（General Radioactive Waste Management Plan）」，並參照計畫內容，制定相關的策略及活動，進行廢棄物的管理，符合該國對放射性廢棄物之管理規範。

ENRESA 公司廢棄物管理之業務相關部門，如圖 94 所示，其負責項目如下：

- (A) 放射性廢物（例如小產源者）之處理、固化包裝
- (B) 集中貯存及處置設施的場址設計、施工及營運
- (C) 建立放射性廢棄物的收集、傳遞、運輸系統
- (D) 核能設施的除役、拆除及電廠場址環境復育
- (E) 鈾礦的固化包裝處理
- (F) 在核能緊急事件時，支援民眾保護服務
- (G) 建立及調整研究發展（R&D）計畫
- (H) 管理核廢料基金

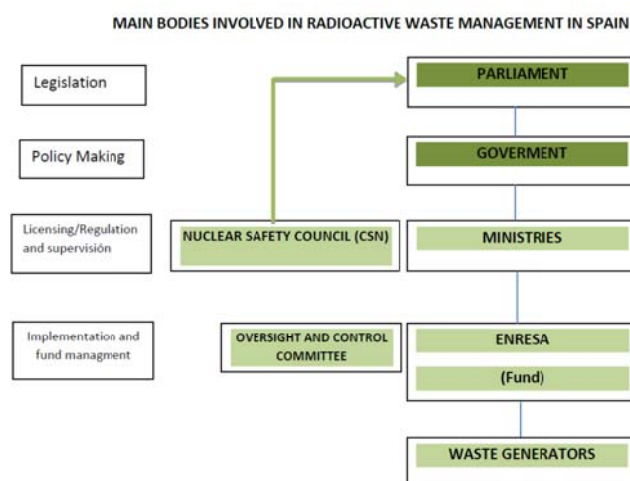


圖 94、ENRESA 之廢棄物管理業務

大部分放射性廢棄物來自核電廠的運作、除役與拆除，另有一小部分來自於製造核燃料的過程。這些放射性廢棄物通常由短半化期的放射性核種組成，活度則分佈於極低、低及中等活度，通常將之稱為極低放射性廢棄物和中低放射性廢棄物。含有較高活度和長半化期之放射性核種列為同一類別的放射性廢棄物，稱之為高放射性廢棄物。此外、核電廠產生的用過核燃料則視為高放射性廢棄物的一種特定類型。西班牙放射性廢棄物的來源、種類及數量如圖 95 所示。

西班牙擁有 8 座核能發電機組，在 2012 年供應的電力佔該國發電總量約 21%。目前西班牙擁有核燃料製造、核能發電及放射性廢棄物管理之設施，但國內並無設置再處

理設施，使用後的用過核子燃料暫時存放在核電廠用過燃料池或以乾式儲存方式存放。核能設施產生的極低放射性廢棄物、中低放射性廢棄物及除役產生的放射性廢棄物，運送至 El Cabril 近地表處置設施（Near-surface Disposal Facility）進行最終處置。

西班牙政府於 2011 年底指定了集中式中期貯存設施（Centralized Interim Storage Facility）之場址，該場址可容納核電廠產生的用過核燃料、高放射性廢棄物及中放射性且具有長半化期核種之廢棄物，解決 El Cabril 處置設施無法接收此類廢棄物之問題。貯存的用過核燃料數量在 2012 年時為 12,906 燃料組件（大約 4,225 t HM）。核電廠池水的平均佔據率為 82%。在適當的時候，集中式中期貯存設施開始運作時，大量的高放射性廢棄物會從國外運回西班牙，該廢棄物為 Vandellós I 核電廠的用過核燃料，經法國再處理程序後產生的高活度殘渣，最後以玻璃固化方式運回集中式中期貯存設施儲存。

除了核電廠以外，其他西班牙工業、醫療和研究機構使用放射性同位素後也會產生放射性廢棄物，目前有超過 1000 個機構已獲授權使用放射性同位素，因此亦為放射性廢棄物的生產機構。2012 年約產生 1,956 m³ 固化包裝之極低放射性廢棄物及中低放射性廢棄物，並在該年底累積處置上述類別的放射性廢棄物約 33,720 m³。

根據目前核電廠的發電裝置容量及假設 40 年運轉壽命，需要管理的極低放射性廢棄物及中低放射性廢棄物之最終數量約 181,000 m³。高放射性廢棄物連同部分玻璃固化廢棄物總量約為 6,700 ton。表 13 統計西班牙到 2012 年底需要進行放射性廢棄物管理的估計量。除上述廢棄物外，估計約有 890 m³ 之非放射性長半化期廢棄物需要進行管理。

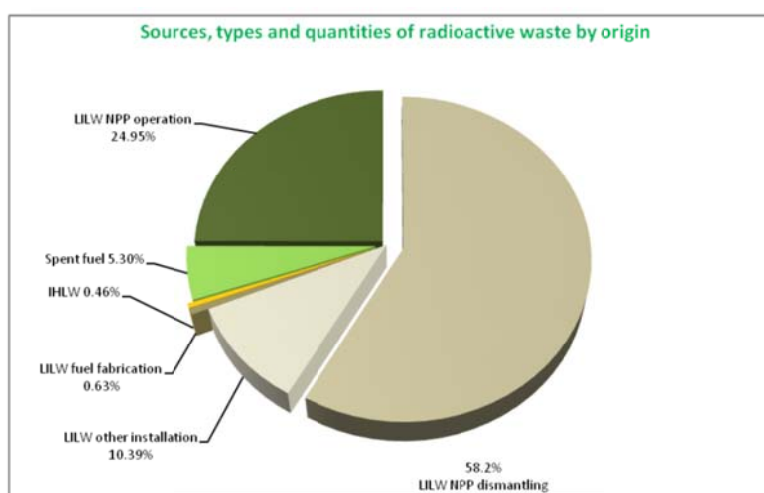


圖 95、西班牙放射性廢棄物之分布圖

表 13、西班牙之管理廢棄物的來源、種類及數量

Waste type	Source	Amount (m ³)
LILW (*)	NPP Operationing	48.000
	NPP Dismantling	112.000
	Other Installations	20.000
	Fuel Fabrication	1.220
Spent fuel	NPPs	10.200
IHLW (**)	NPPs and others	890

(*) Including VLLW

(**) Including Medium Level Radioactive waste that has no place in The Cabril.

Source: Enresa

6. ENRESA 公司與民眾溝通作法

ENRESA 公司組織除具有一般行政部門與技術相關部門，尚有專司公共關係與民眾溝通的部門。此外，該公司也擁有西班牙中低放射性廢棄物最終處置設施 El Cabril 的所有權與經營權。除了 ENRESA 在技術上的努力外，該公司採取一系列有效的民眾溝通以消除民眾疑慮，亦為 El Cabril 處置設施得以成功啟用的關鍵之一。

對於民眾溝通，ENRESA 採取的方法是持續不斷提供適當資訊，使民眾瞭解處置設施的特性及其對社會、經濟、環境等面向的影響。另外也特別對地方議會進行溝通，確保相關法案或決策能順利通過。規劃執行者（ENRESA）亦率先與地方政府進行一個廣泛的溝通及諮詢，在過程中，儘早公開規劃工作給地方民眾是需要的：如機動性巡迴展覽與附近的所有村落溝通；地方新聞在地方電台與電視台定期製作與播送廠內工作內容，如同官方諮詢由主管機關進行一般，規劃執行者必須與地方政府代表持續進行對話，可能選擇溝通的管道還包含當地的新聞媒體、大學新聞部門、核能與全球氣候變化研討會等。同時，ENRESA 也很重視把研究結果更新於相關科學報告中，和當地新聞記者交流並合作回答核子議題，並刊載於文化與社會的定期刊物上，維持相同人員負責核能議題，在文化社會等方面尋求有知名度的新聞記者參與相關核能問題的探討。過程包含：會面的準備（地方、區域、國家）、組織對新聞媒體與畢業學生的研討會（Workshops）、辦理相關廠址的參訪活動、發佈視聽教材、贊助能源議題的報導、網頁宣導、提供研究能源獎學金給學生、教師和教授（及相關專業人士）。

自 El Cabril 處置設施計畫開始，ENRESA 即不斷向該處置設施附近的 Còrdoba 和

Hornachuelos 居民提供相關資訊，除說明 El Cabril 處置設施具有專業設計和嚴格的品保計畫外，也藉由採取一系列的互利措施，讓雙方得以有合作空間，例如 ENRESA 承諾將改善 El Cabril 附近的交通、通訊及電力設施，此改善計畫除有助於處置設施的興建，更能改善週遭居民的生活品質；此外，ENRESA 和居民也成立了合作委員會，有系統且持續地討論優先改善當地資源所應採取的策略。

與鄰近地方當局就共同利益彼此合作是提升民眾接受度之良方，如：藉由於當地勞工廣泛參與處置設施之各項作業，對於設施及設備有深入瞭解，並透過其親戚朋友的口耳相傳後，使大家能認識、瞭解及接受處置設施。由於處置設施之設置確有助於改善鄰近區域之經濟，有效提高大家之接受程度，且培訓當地勞工及採用當地公司之服務，除可降低處置設施之運轉成本外，亦可提升當地勞工及公司之素質。由於處置設施與地方當局之充份合作，處置設施已逐漸降低其高度政治性爭議。在處置設施所在之大都會區選舉時，報紙及政見辯論會上已不再對處置場提出反對的意見。目前 ENRESA 仍藉由資訊、溝通及合作等方式與 El Cabril 附近的社區持續地互動，其主要策略如下：

- (a) 採門戶開放政策及提供處置設施詳細的資訊，以避免民眾對放射性廢棄物產生無謂的恐懼，及使放射性廢棄物營運透明化，El Cabril 處置設施之資訊中心每年約接待 4,000 位訪客。
- (b) 聘請專家對處置中心附近之學校老師及意見領袖，傳授基本的放射性原理及放射性廢棄物營運知識。
- (c) 定期與政治代表及其他意見領袖如記者、公司主管等集會，使其瞭解放射性廢棄物營運有關之議題，並以理性態度對待處置設施之相關議題。
- (d) 與鄰近社區在社經上合作，包括：儘量使用當地的社會及經濟資源；技術支援地方的城市規劃及執行工作；在共同利益有關之行政及財務上彼此合作。

進行除役工作時，要考量利害關係人對除役計畫的影響，可能有：對除役計畫有潛在的影響力、決策通常會牽連到正反議題的衡量、對未來決策提供先期意見以及反映大眾的意見。更進一步來說，利害關係人會影響到除役計畫的表現，利害關係人分類及關心的議題如下：

- (a) 法規與經濟面要考量政府、當地機關、設施、公營事業，考量的議題為整體花費、獎勵投資、當地經濟的影響...等；
- (b) 環境面要考量環保法規、當地機關、環保團體，考量的議題為廢棄物運送、躁音、粉塵、水處理、民眾健康、環境維護...等；

- (c) 社會面要考量公會、當地供應商、當地機關，考量的議題為健康安全、勞工、對當地的影響...等；
- (d) 技術面要考量核工法規、研發機構、大學，考量的議題為核能安全、教育、工作規劃、輻射防護...等議題。

參考 IAEA 報告 - An Overview of Stakeholder Involvement in Decommissioning 時要注意除役工作利害關係人與廢棄物利害關係人（例如：處置設施）的不同之處，除役為移除放射性廢棄物到其他位置，處置則是將其他地方的放射性廢棄物接收到該地點，其指引可能會受限於社會、經濟、政治等不同區隔造成的影響，應注意確認誰是利害關係人及其與除役的相關性；同時，目前受到全球化的影響，要注意可能會有很多與當地距離很遠、難以預期的利害關係人。總結來說，除役行動會影響到很多的利害關係人，早期溝通、事前與利害關係人的討論有助於決策的進行，而且策略、社會經濟、技術、安全與環境議題都是很重要的問題。

ENRESA 為增進與民眾、相關人員的溝通工作，利用不同管道設計多媒體教材，配合現場人員互動式的解說作為增進大眾溝通的輔助工具，並提供相關的宣傳手冊與光碟資料給民眾索取；相關的資料內容顯示 ENRESA 對民眾溝通十分的重視，目前已有歐洲、美國、加拿大、英國、日本等國超過 2,300 人參訪過此設施。ENRESA 設置網站說明貯存設施的設計與常見問題的回答，以利大眾能夠清楚了解（圖 96~99）。



圖 96、以影片配合人員說明除役工作的發展



圖 97、現場影像配合人員說明除役工作的發展



圖 98、ENRESA 公司儲存設施網站



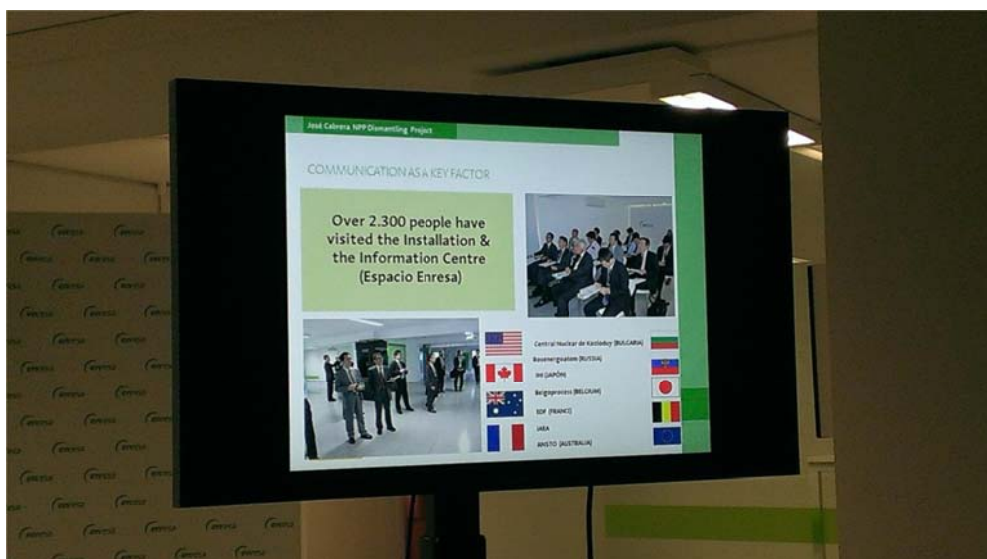


圖 99、文宣資料供參訪民眾索取

7. El Cabril 中低放射性廢棄物最終處置設施運作

ENRESA 於 1986 年引進法國 L'Aube 處置設施的設計概念，興建 El Cabril 處置設施，El Cabril 設置目的為安全地處置在西班牙產生的極低放射性廢棄物及中低放射性廢棄物。

西班牙中低放射性廢棄物最終處置設施的場址評選過程較為特殊，係先決定廠址，再進行特性調查。El Cabril 位於馬德里西南方約 450 公里的哥多華（Cordoba）省山脈中，海拔 400 公尺，屬於片麻岩及雲母片岩之地質構造。總面積 12 平方公里，但處置設施僅佔 3 平方公里。在 1950 年代 El Cabril 是一鈾礦區，停產後曾被利用為放射性廢料貯存場，ENRESA 於 1986 年接收後，就開始進行長達 5 年的特性調查，鑽孔超過 100 個，最深達 8000 公尺，並與法國合作進行工程設計。1988 年 ENRESA 提出設置處置設施之安全分析報告，獲得許可後，於 1990 年 1 月開始施工，建造費時 2 年，於 1992 年 10 月啟用。處置容量估計約 3 萬 5 千立方公尺，可供西班牙 2015 年以前全部低放射性廢棄物之處置。

El Cabril 採用近地表之多重障壁設計原理，處置設施設計的目標為：（1）必須確保民眾與環境之安全，避免放射性核種離子化及擴散。（2）300 年之後應確保土地在無輻射安全顧慮下，可以自由使用。為了達到此一目標，El Cabril 處置設施採取下列措施：

(a)有效的隔絕放射性廢棄物，以避免可能的擴散。為達此目的，放射性廢棄物以三重障蔽隔絕其與環境的接觸。第一道屏蔽是將廢棄物固化並置於強化混凝土製造的容器；第二道屏蔽是工程障蔽，第三道屏蔽是藉由處置場本身的天然岩層結構。

(b)限制廢棄物的活性。為達此目的，El Cabril 處置場僅接收核種半衰期在 30 年以下的廢棄物，或者是半衰期較長但是活度極低的廢棄物。

El Cabril 處置設施設有三條活動主線，其中兩條為放射性廢棄物之處置（極低放射性廢棄物及中低放射性廢棄物），另一條為廢棄物之包裝固化、輔助設施建物及放射性廢棄物之品質驗證實驗室。

中低放射性廢棄物的處置系統為一個近地表多重屏障之組合，廢棄物包裝置於混凝土製容器裡進行水泥固化，因放射性含量不高，極低放射性廢物及中低放射性廢棄物的管理及執行面較不複雜，而採取的處置系統是填埋類型（Land-fill Type）。

在一般情況下，極低放射性廢棄物的比活度介於 1~100 Bq/g，但在某些情況下一些低毒性的放射性核種的比活度可允許至數千 Bq/g。此類廢棄物大多由核能設施除役時所產生，或來自於含有放射性物料的潛在事件。El Cabril 處置設施也配有適當設備，針對所謂小規模生產的機構廢棄物（Institutional Waste），進行高壓減容措施以減少可壓縮廢棄物之體積。該處置設施也處理本身產生的廢棄物，使用混凝土容器盛裝待處理的廢棄物包裝。放射性廢棄物的固化包裝系統及處置系統都可藉由控制中心進行遙控操作，僅有處理劑量率非常低的廢棄物或焚化爐操作等程序才以非遙控方式操作。

管理中低放射性廢物的策略是建立在能使廢棄物符合處置設施要求及設計的基礎上，以容納該廢棄物。管理活動流程分為兩個主要領域：第一個關注領域的項目是放射性廢棄物的固化包裝、運輸、特性鑑定、接收準則，以及上述項目所需要的檢視查核，以確保能完成上述關注項目的承諾；第二個關注領域是處置設施的設計、建造和營運，以確保能安全的貯存處置放射性廢棄物。

對於小型規模的機構生產者（工業、醫療和研究機構）而言，所有廢棄物處理及固化包裝是在 El Cabril 處置設施執行。除了機構生產者以外，極低放射性廢棄物及中低放射性廢棄物的初始處理及包裝固化是放射性廢棄物生產者的責任，其有義務提供廢棄物包裝以符合 ENRESA 規定的接收標準。針對後續的固化包裝及 El Cabril 處置設施，上述標準是由負責安全的權責機關所核准。放射性廢棄物管理過程中，El Cabril 的品質驗證實驗室扮演關鍵的因素。

El Cabril 處置設施設有展示中心，藉由模型、多媒體簡介及現場導覽等方式引導參觀人員了解整個處置設施的運作，該參觀活動適合所有類型的參觀團體，但是主要重點是在中學以上的學生及專業人員，參觀活動是免費的，但是需要事先預約。

本次參訪是由 El Cabril 處置設施國際關係部門主管 Mr. Emilio Garcia Neri 接待，當日並升起我國國旗，對本所參訪禮遇有加。Mr. Neri 在接待中心介紹說明，我方由領隊陳鴻斌組長致贈禮品感謝對方的接待，並於提問討論後到控制中心參觀。討論過程相當踴躍，由於當天時間有限，Mr. Neri 還允諾我們返國後，可以將問題彙整，其再書面答覆（圖 100~圖 103）所示。



圖 100、我國國旗飄揚在西班牙 El Cabril



圖 101、陳組長致贈紀念品



圖 102、Mr. Neri 在接待中心進行說明



圖 103、參訪成員聆聽解說

El Cabril 處置設施具有兩個不同功能的區域，一是建物區；另一是處置區，這樣的分離二個區域有助於提高整體效率，有利於監測、控制並劃分不同的放射性管制區域。建物區設有兩個實驗室，其功用為廢棄物品質的鑑別、整理廠房（Conditioning Buildings）

與進行廢棄物的處理作業；控制室亦設在建物區，處置設施所有的運轉資訊均集中到控制室，此一資訊也同步傳送到 ENRESA 位於馬德里的總部，控制室可以進行操作控制，以減少人員的曝露劑量。此外，包括行政、工業安全、技術服務、暫貯設施、貯存容器製造、維修工作站及餐廳等，皆設在建物區範圍內。

處置區則再分為中低放射性廢棄物處置區及極低放射性廢棄物處置區。處置系統結合天然障蔽及工程障蔽，以確保能安全地隔絕被處置的廢棄物。中低放射性廢棄物處置區分為南、北二個平台，北方平台有 16 個貯存窖 (Cell)，南方平台有 12 個貯存窖，總計 28 個，自 1992 年開始運轉，目前已接收之廢棄物累計達 30,000 m³，為設計容量的 68%。極低放射性廢棄物處置區規劃由四座結構物組成，目前已經建成兩座，自 2008 年開始運轉，目前已接收之廢棄物累計達 8,000 m³，其中一個貯存設施將於 2014 年底達到飽和。所有的建物、設施均具有耐震設計，可以承受此地區預估的地震規模（如圖 104）。



圖 104、El Cabril 中低放射性廢棄物處置設施

El Cabril 處置設施除了接收核電廠運轉及除役所產生的廢棄物之外，同時也接收醫療單位、工業及研究機構所產生的放射性廢棄物。前者所產生的廢棄物，需事先經過固化、安定化等處理，並裝入符合接收標準的包件容器；然而後者並無能力對其所產生的放射性廢棄物進行上述處理，所以 El Cabril 處置設施也設置了包括超高壓壓縮機、焚化爐及固化系統等處理設備。

處理後的中低放射性廢棄物放入 220-L 的鋼桶，每 18 個鋼桶裝入一個混凝土容器，裝滿之後，灌漿使其固定化，然後移入貯存窖，貯存窖為強化混凝土構成。當貯存窖裝滿 320 個灌漿固定後的混凝土容器，貯存窖上方以強化混凝土蓋板覆蓋並進行耐風雨（Weatherproofed）處理。每一個貯存窖在平台下方都設有集水坑並與滲漏偵測網路連結，以偵測是否有滲水的情形。一旦平台已經達到飽和容量，其將進行最後的覆蓋程序，包括多層不同物質，最上方則鋪設表土，使其與周圍環境相容。自此將開始長達 300 年的監測與控制期。

極低放射性廢棄物都是碎屑、橡膠等固體物質，僅僅受到少量同位素的污染。通常以袋、桶或是容器盛裝運抵處置設施。有時可以直接送入特製的處置結構進行最終處置，或是暫放在處理設施旁等待後續處理。當每個處置結構達到飽和容量，其將進行最後的覆蓋程序，包括多層不同物質，最上方則鋪設表土，使其與周圍環境相容。自此將開始為期 60 年的監測與控制期（如圖 105 所示）。



圖 105、El Cabril 中低放射性廢棄物處置設施

當核設施要將其產生的低、中放射性廢棄物運往 El Cabril 處置設施前，需先與 ENRESA 公司聯繫，以安排廢棄物的收集及運送工作。低、中放射性廢棄物的運輸是採用公路運送，運送卡車經過特別設計，具有特別的屏蔽設計及自動連鎖裝置等。卡車駕駛必須受過放射性廢棄物的運送訓練課程，確保在意外事故發生時，有能力採取適當的應變。所有廢棄物的運送均由 ENRESA 公司監管，並提供運送資料至西班牙核子安全

委員會(CNS)等相關單位。累積至今，ENRESA 公司已經達到 300 萬公里的運送里程，從未發生過重大的意外事故。

(三) 訓練與參訪心得彙整

1. 本次公差訓練係執行「核一廠除役許可申請及除役作業規劃工作」技術服務案之需求，參與人員除本所外，還包括台電公司、泰興工程顧問公司、益鼎工程顧問公司、清華大學等。所內成員分屬工程組、保物組、化學組、化工組及核後端中心，本次核電廠除役國外訓練提供不同專長領域成員學習合作的機會，藉由訓練所獲得的經驗與技術資訊，確實可以強化國內執行團隊的能力。
2. 此次訓練是本所繼核四建廠技轉、乾貯計畫之後所參與較大規模的國外異地訓練，參與本次訓練成員均已具備相當技術專業，事前準備充分，在安排訓練課程時，即不斷提出要求，請西屋公司配合，在訓練過程中，透過與講師的雙向溝通，獲得經驗與本身知識映證，同儕間長時間相處，除可以切磋交換彼此的看法與心得，同時對核電廠除役的各領域及界面之間也有顯著的調和效果，對未來在工作的溝通聯繫上必能更加順利。
3. 西屋公司在核電廠除役領域擁有相當豐富的技術與經驗，目前正在執行西班牙 **Zorita** 核電廠爐體拆解作業，同時承接本所「除役許可申請及除役作業規劃工作」技術服務案之工程管理與排程規劃及廢棄物盤點估算工作。本次除役技術訓練一方面可以檢討委託西屋公司執行的成果，另一方面可以學習西屋公司除役的技術與經驗，精進除役計畫管理技術，從管理者的角度思考切入，對除役電廠的接收、改建、拆除、復原以及廢棄物管理等層面，整合管理除役相關策略規劃，提供未來國內核電廠除役之參考。
4. 西屋公司訓練課程講授包括西班牙及瑞典兩國之 **BWR**、**PWR** 及 **GCR** 等各式核電廠的除役經驗，內容包含除役法規、策略、管理、技術…等面向，學員與講師充分進行交流討論，面對面澄清作業程序的疑惑。訓練後再赴 **Zotita** 核電廠及 **El Cabril** 中低放射性廢棄物最終處置設施參訪，更能驗證課堂資料的內容，並獲得核電廠除役作業的現場資訊。

5. 西班牙 Zorita 核能電廠於 2006 年 4 月 30 日停止運轉，進入除役階段。其除役規劃、執行、廢棄物管理等經驗完整，為目前國際上十分值得參訪及學習的除役中核電廠。El Cabril 處置設施提供西班牙國內核電廠、醫院、學術研究單位與一般工農產業之中低放射性廢棄物管理最終處置方案，親臨現場一片綠色映入眼簾，展現優良的執行管理與自然復育能力，可提供國內未來在射性廢棄物處置研究之參考。
6. 西班牙的核後端業務由公營企業 ENRESA 公司統籌規劃執行，包括核能後端基金管理、放射性廢棄物處置、核電廠除役等，ENRESA 能充分整合電廠除役時的減廢措施，且廢棄物包裝也能配合爾後之處置作業管理，其整套制度值得國內參考。國際上現有商用核電廠逐漸步入其生命週期之後端，西屋公司、AREVA 公司與西班牙 ENSA 等著名核能系統供應廠家都已開始跨入核設施除役業務，國內應與相關廠商保持良好的互動，以熟悉國際除役技術的發展現況，以因應未來國內核電廠的除役工作。
7. 核能設施生命週期後端作業包括核電廠除役、放射性廢棄物處理與處置、用過核子燃料乾式貯存、用過核子燃料再處理…等，所需的跨領域專業團隊人力需要長期培育及整合管理。國內擬成立專責機構，統合核後端業務，本所應藉由接受委託計畫之際，培養核後端技術人才，建立技術團隊與規劃完整作業能量，並與國內工程顧問公司及核電廠作業公司組成國內團隊，截長補短，相互支援。
8. 核能電廠除役工作，從規劃到執行的各個階段，包括設備盤點、拆解、廢棄物管理、工期排程管理等各個作業層面，如能於實際作業前先以電腦模擬方式進行作業前教育，可達減少工作人員劑量、省時、省錢，並對工作安全有實際功效。

四、建議事項

1. 西班牙的核能後端業務由公營企業 ENRESA 公司統籌規劃執行，包括管理核能後端基金、放射性廢棄物處置、核電廠除役工作、放射性廢棄物減廢措施、廢棄物盛裝容器等所有核能後端業務，其整套管理制度值得學習，也可做為我國正在籌備設立的「核能後端營運專責機構」的參考。
2. 國際上現有商用核電廠逐漸步入其生命週期之後端，相關作業包括核電廠除役、放射性廢棄物處理與處置、用過核子燃料乾式貯存、用過核子燃料再處理…等，所需的跨領域專業團隊人力需要整合管理及給予適當教育訓練。國際間著名核能系統供應廠家都已開始重視核設施除役業務，我國亦應持續注意除役技術的發展現況及其相關產業鏈，以因應未來國內核電廠的除役工作。
3. 工程視覺輔助技術應用可以提供核電廠除役之工程數據、輻射數據及視覺資訊整合的整廠模擬應用效益，建議及早投入人力進行相關專業技術之研究。