

出國報告（出國類別：研究）

赴瑞典參加核電廠除役技術訓練及參  
訪 SKB 核設施、Barseback 核電廠

服務機關：核能研究所

姓名職稱：林英璋 研究助理  
陳立言 研究助理  
陳建富 助理研究員  
陳鴻斌 研究員  
楊慶威 副研究員  
任天熹 副研究員  
彭正球 副研究員

派赴國家：瑞典

出國期間：106 年 2 月 11 日~106 年 3 月 5 日

報告日期：106 年 3 月 31 日



## 摘要

本次公差目的為強化國內執行大型核能設施除役之技術。國內使用核能設施，包括核能發電廠，面臨進入其生命週期之除役階段。核能設施具有運轉、維護經驗之人員，經由訓練，建立除役專業技術，為確保國內大型核能設施順利安全除役所必須。

國內核能研究所已有研究用反應器除役經驗。本次公差之主要目的為對於商用核能機組除役，借鏡國際已有之技術及經驗，彙整強化建立國內之技術量能。本次訓練課程期程為 106 年 2 月 13 日至 3 月 3 日，選擇有 9 部核能發電機組，共約 9 百萬瓩容量，供應其全國約一半的電力，且投入核能後端營運規畫較早的瑞典，為訓練學習對象，訓練地點在瑞典偉斯特羅斯 (Västerås)。課程安排瑞典除役專家討論全系統除污、反應器壓力槽(RPV, Reactor Pressure Vessel)內部組件拆解技術及模擬實務訓練、工作分解架構與排程(WBS, Work Breakdown Structure)、除役成本估計與除役放射性廢棄物管理等核能設施除役相關技術。課程內容並包括瑞典核能後端相關設施的參訪，包括於正在進行反應器壓力槽內部組件拆解的 Barsebäck 核電廠參觀及現地討論；及瑞典核子燃料及廢棄物管理公司(SK B, Svensk Kärnbränslehantering AB)所屬的廢棄物罐實驗室 Canister Laboratory、用過核子燃料濕式中期貯存設施 Clab、及用過核子燃料處置地下實驗室 Äspö Hard Rock Laboratory，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。

本次訓練內容兼顧理論及實務，吸取瑞典核能後端營運的經驗，同時建立國際核設施除役相關經營業者、主管、專家，後續技術交流管道。對於國內即將面對核電廠的除役實際作業，將有極大的助益。

關鍵詞：核能設施除役、反應器壓力槽內部組件拆解、除污、放射性廢棄物管理、核能後端營運。

# 目 次

(頁碼)

摘 要.....	I
一、目 的.....	6
二、過 程.....	8
(一) 公差行程.....	8
(二) 訓練課程規劃與摘要.....	9
(三) 瑞典核電廠除役及廢棄物管理現狀.....	11
1. 瑞典核電廠除役.....	11
2. 瑞典廢棄物管理現狀.....	12
三、心 得.....	14
(一) 除役訓練課程.....	14
1. 核電廠除役反應器壓力槽內部組件拆除工法.....	14
2. 核電廠除役生物屏蔽體拆除工法.....	28
3. 核電廠除役人員劑量評估.....	32
4. 核電廠除役除污作業.....	36
5. 核電廠除役工作分解架構(WBS).....	39
6. 核能電廠除役廢棄物估算、管理及包裝.....	47
7. 訓練課程問題(Q&A).....	50
(二) 除役實地參訪.....	51
1. 瑞典用過核子燃料貯存及包裝管理設施(Clab 及 CanisterLaboratory).....	51
2. 瑞典放射性廢棄物處置研究設施(Äspö Hard Rock Laboratory).....	58
3. 瑞典 Barsebäck 核電廠反應器壓力槽內部組件拆解參訪.....	60
(三) 訓練與參訪心得彙整.....	62
1. 反應器內部組件切割.....	62
2. 生物屏蔽拆解.....	63
3. 系統化學除污.....	63
4. 瑞典系統經驗學習.....	63
四、建 議 事 項.....	65

## 表目錄

表 1、公差主要行程摘要.....	8
表 2、除役訓練課程內容摘要.....	9
表 3、瑞典核電廠近況.....	11
表 4、機械式及熱切割之優缺點比較.....	14
表 5、各式水下動力源比較.....	15
表 6、鑽石索鋸與衝擊式拆除機器人比較.....	29
表 7、溫和型與侵略型除污技術比較.....	36
表 8、核電廠除役之工作程序.....	44

# 圖目錄

圖 1、大型核能設施除役流程及技術需求.....	6
圖 2、瑞典各核電廠位置圖.....	12
圖 3、瑞典廢棄物管理圖.....	13
圖 4、液壓動力單元.....	16
圖 5、剪切機具.....	17
圖 6、圓盤鋸的操作面板.....	18
圖 7、圓盤鋸操作面板上的燈號.....	18
圖 8、帶鋸機固定架.....	19
圖 9、帶鋸機安裝於爐穴中心柱上.....	20
圖 10、帶鋸機切割爐心筒(壓水式反應器內部組件).....	20
圖 11、壓穿式電剪.....	21
圖 12、工作橋架.....	22
圖 13、夾爪工具.....	22
圖 14、雙夾爪工具.....	23
圖 15、液壓夾具操作.....	24
圖 16、Stellit Pin Cutter.....	25
圖 17、液壓剪.....	25
圖 18、操作圓盤鋸直立式切割.....	26
圖 19、利用夾具夾住被切割件.....	27
圖 20、影響除役作業人員劑量因素.....	32
圖 21、電廠運轉期間作業與人員劑量關係圖.....	34
圖 22、電廠大修期間主要劑量影響核種.....	34
圖 23、除役階段之不同時程之除污技術及方法.....	37
圖 24、ISDC 與 WBS 關聯性.....	39

圖 25、核電廠除役工作分解架構範例.....	41
圖 26、除役規劃常用的里程碑.....	42
圖 27、除役階段之程序架構.....	42
圖 28、ISDC 成本估算之層次架構.....	43
圖 29、除役作業之工作人時規劃流程圖.....	44
圖 30、全系統除污三階工作分解架構.....	45
圖 31、反應器壓力槽(RPV)及其內部組件(RVI)拆解 WBS 分類圖 .....	46
圖 32、講師與參訓同仁於課程中之討論狀況.....	50
圖 33、Clab 設施剖面 .....	52
圖 34、Clab 接收、處理、分裝、貯存用過核子燃料之操作示意圖 .....	53
圖 35、Clab 的配置與作業概況 .....	54
圖 36、銅製廢棄物罐與內部鑄鐵展示.....	56
圖 37、摩擦攪拌銲接法鑽頭與銲接成果展示.....	56
圖 38、摩擦攪拌銲接法設備.....	57
圖 39、燃料裝填設施.....	57
圖 40、垂直處置示範坑道.....	59
圖 41、設施載運廢棄物罐工程車.....	59

# 一、目的

本次公差目的為強化國內執行大型核能設施除役之技術。國內使用核能設施，包括核能發電廠，面臨進入其生命週期之除役階段。核能設施具有運轉、維護經驗之人員，經由訓練，建立除役專業技術，為確保國內大型核能設施順利安全除役所必須。大型核能設施除役流程及技術需求如圖 1 所示。



圖 1、大型核能設施除役流程及技術需求

國內核能研究所已有研究用反應器除役經驗。本次公差之目的為對於商用核能機組除役，借鏡國際已有之技術及經驗，彙整強化建立國內之技術量能。尤其是面對經過將近四十年運轉，已經活化及污染的組件系統之除污及拆解。

本次訓練課程之規劃，選擇有 9 部核能發電機組共約 9 百萬瓩容量，供應其全國約一半的電力，且投入核能後端營運規畫較早的瑞典，為訓練學習對象。訓練地點在瑞典偉斯特羅斯 (Västerås)。課程安排瑞典除役專家討論全系統除污、反應器壓力槽(RPV, Reactor Pressure Vessel)內部組件拆解技術及模擬實務訓練、工作分解架構與排程(WBS, Work Breakdown

Structure)、除役成本估計與除役放射性廢棄物管理等核能設施除役相關技術。課程內容並包括瑞典核能後端相關設施的參訪，包括於正在進行反應器壓力槽內部組件拆解的 barsebäck 核電廠參觀及現地討論；及瑞典核子燃料及廢棄物管理公司(SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB)所屬的廢棄物罐實驗室 Canister Laboratory、用過核子燃料濕式中期貯存設施 Clab、及用過核子燃料處置地下實驗室 Äspö Hard Rock Laboratory，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。

本次訓練內容兼顧理論及實務，吸取瑞典核能後端營運的經驗，同時建立國際核設施除役相關經營業者、主管、專家，後續技術交流管道。對於國內即將面對核電廠的除役實際作業，將有極大的助益。

## 二、過 程

### (一) 公差行程

本次公差訓練課程於 106 年 2 月 13 日至 3 月 3 日，於瑞典偉斯特羅斯 (Västerås)、奧斯卡港市(Oskarshamn)及 Barsebäck 舉行，公差行程如表 1。

表 1、公差主要行程摘要

月/日 (星期)	工作內容重點	備註
2/11 (六)~2/12 (日)	去程，由桃園機場出發，翌日經由法蘭克福轉機，抵達瑞典斯德哥爾摩後，前往偉斯特羅斯。	
2/13 (一)~2/17 (五)	訓練課程與技術討論	
2/18 (六)~2/19 (日)	資料彙整	
2/20 (一)~2/24 (五)	訓練課程與技術討論	
2/25 (六)~2/26 (日)	資料彙整	
2/27 (一)~2/28 (二)	訓練課程與技術討論	
3/1 (三)	參訪位於 Oskarshamn 地區之用過核子燃料中期貯存設施(Clab)	
3/2 (四)	參訪位於 Oskarshamn 地區之 Canister Laboratory 及 Äspö Hard Rock Laboratory	
3/3 (五)	參訪位於 Barsebäck 地區之 Barsebäck 核電廠	
3/4 (六)~3/5 (日)	回程，由丹麥哥本哈根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，訓練課程主題含括化學除污、工作分解架構、除役成本估計、人員劑量、拆除切割技術、除役放射性廢棄物管理等。另外，並包含 Barsebäck 核電廠、用過核子燃料濕式中期貯存設施(Clab)、廢棄物罐實驗室(Canister Laboratory) 及用過核子燃料處置地下實驗室(Äspö Hard Rock Laboratory)等現場參觀訪問，訓練課程時數總計為 121 小時。

表 2、除役訓練課程內容摘要

DAY	Training Courses	Time (h)	Responsible Lecturer
2/13 (MON)	Welcome, introduction, and general instructions	2	Nicklas Bergh
	Full system decontamination	4	Darik Tippetts
	Safety and general information on segmentation technology	3	Per Segerud
2/14 (TUE)	Preparatory work for segmentation	8	Per Segerud/Par Camitz
2/15 (WED)	Advanced segmentation technologies	4	Per Segerud
	Hydraulic training	4	Westinghouse
2/16 (THU)	Working bridge, pole handling and camera training	4	Per Segerud
	Shearing tool training	4	Per Segerud
2/17 (FRI)	Disc cutting training	8	Per Segerud
2/20 (MON)	Band sawing training	8	Per Segerud
2/21 (TUE)	Packaging training.	4	Per Segerud
	mock up training Summary	5	Per Segerud
2/22 (WED)	RPV & Internal dismantling plan case study	8	Per Segerud
2/23 (THU)	RPV & Internal dismantling plan case study	4	Per Segerud
	Worker dose estimation	5	Peter Cronstrand
2/24 (FRI)	Waste estimation	8	Peter Cronstrand
2/27 (MON)	Bioshield demolition	4	Ylva-Li Lindh
	Waste package form, waste management from dismantling to storage and free release	4	Anders Eriksson

DAY	Training Courses	Time (h)	Responsible Lecturer
2/28 (TUE)	WBS methodology	4	Nicklas Bergh
	Cost estimation	4	Nicklas Bergh
	Summary and discussion	2	All
	Visit SKB`s Clab central interim spent fuel storage facility in Oskarshamn	6	SKB Guide
3/2 (THU)	Visit SKB`s canister lab and Äspö hard rock lab in Oskarshamn	6	SKB Guide
3/3 (FRI)	Barsebäck NPP visit	8	Thomas Dahl
		SUM 121	

### (三) 瑞典核電廠除役及廢棄物管理現狀

#### 1. 瑞典核電廠除役

瑞典有 4 座核能電廠，目前共有 9 部機組在運轉中，總裝置容量為 8,849 MWe，其中 6 部為 BWR，3 部為 PWR。四座核能電廠分別為 Oskarshamn 核電廠、Forsmark 核電廠、Ringhals 核電廠及 Barsebäck 核電廠。其中 Barsebäck 核電廠 1 號及 2 號機組分別於 1999 年和 2005 年停機。Oskarshamn 核電廠 2 號機於 2015 年停機，而 1 號機則因經濟因素預計提早於 2017 年停機。各電廠之型式、發電量、商轉年份、預定除役年份等資料如表 3。Barsebäck 核電廠目前正進行除污、反應器內部組件切割及廢棄物處理，而 Oskarshamn 除役規劃於停機後五年才開始進行除役。瑞典核電廠地理位置如圖 2 所示。

表 3、瑞典核電廠近況

Reactor	Operator	Type	MWe net	Commercial operation	Intended decommissioning
Oskarshamn 1	OKG	BWR	473	1972	2017
Oskarshamn 2	OKG	BWR	638	1974	Closed in 2015
Oskarshamn 3	OKG	BWR	1,400	1985	2035 or 2045
Ringhals 1	Vattenfall	BWR	878	1976	2020
Ringhals 2	Vattenfall	PWR	807	1975	2019
Ringhals 3	Vattenfall	PWR	1,062	1981	2041
Ringhals 4	Vattenfall	PWR	938	1983	2043
Forsmark 1	Vattenfall	BWR	984	1980	2040
Forsmark 2	Vattenfall	BWR	1,120	1981	2041
Forsmark 3	Vattenfall	BWR	1,187	1985	2045
Barsebäck 1	EKS	BWR	615	1975	1999
Barsebäck 2	EKS	BWR	615	1977	2005

## Nuclear Power Plants in Sweden



圖 2、瑞典各核電廠位置圖

## 2. 瑞典廢棄物管理現狀

瑞典放射性廢棄物的來源，主要為核電廠運轉時產生之廢棄物、核電廠除役時產生之廢棄物和研究、工業及醫療行為所產生之放射性廢棄物。瑞典放射性廢棄物管理說明如圖 3。其中核電廠廢棄物部分，比活度低於 500 Bq/kg 之廢棄物進行外釋，極低放射性廢棄物(VLLW, very low level waste)則送至近地表設施進行貯存，短半化期之中低放射性廢棄物(short lived LILW, short lived low and intermediate level waste)則進入 Final Repository for Short-Lived Radioactive Waste (以下簡稱 SFR)，長半化期之中低放射性廢棄物(long lived LILW, long lived low and intermediate level waste)則進入 Final Repository for Long-Lived Radioactive Waste (以下簡稱 SFL)，用過核子燃料則先經封裝廠(Encapsulation plant)封裝並於 Clab 暫時貯存後，再送最終用過核子燃料貯存庫。而於用過核子燃料封裝及中期貯存所產生之放射性廢棄物，則依短半化期或長半化期分類後，送至 SFR 或 SFL。除役期間之廢棄物亦比照相同邏輯進行分類及貯存。

SFR 係從 1976 年開始規劃，1983 年取得執照，1988 年完成第一期工程建造(SFR-1)，開始接收低放射性廢棄物。SFR-1 以處置核電廠運轉 40 年的廢棄物為目標，其設計處置容量約 60,000 m<sup>3</sup>，足供處置瑞典境內核能機組運轉 40 年所產生之低放射性廢棄物。而 SFL 規劃案仍在審查中。

瑞典於 1977 年通過「放射性廢棄物法(Waste Act)」，要求各電力公司就核能發電所產生之放射性廢棄物的處理、貯存與最終處置進行整體規劃。因此，瑞典 Forsmaks

Kraftgrupp、OKG、Vattenfall 及 Barsebäck Kraft 四家電力公司合資成立 SKB 公司，以專責形式推動執行瑞典核能發電所產生低放射性廢棄物及用過核子燃料處理、貯存與最終處置等計畫。本次參訪之用過核子燃料中期貯存設施(Clab)、Canister Laboratory 及 Äspö Hard Rock Laboratory 皆為 SKB 旗下組織。

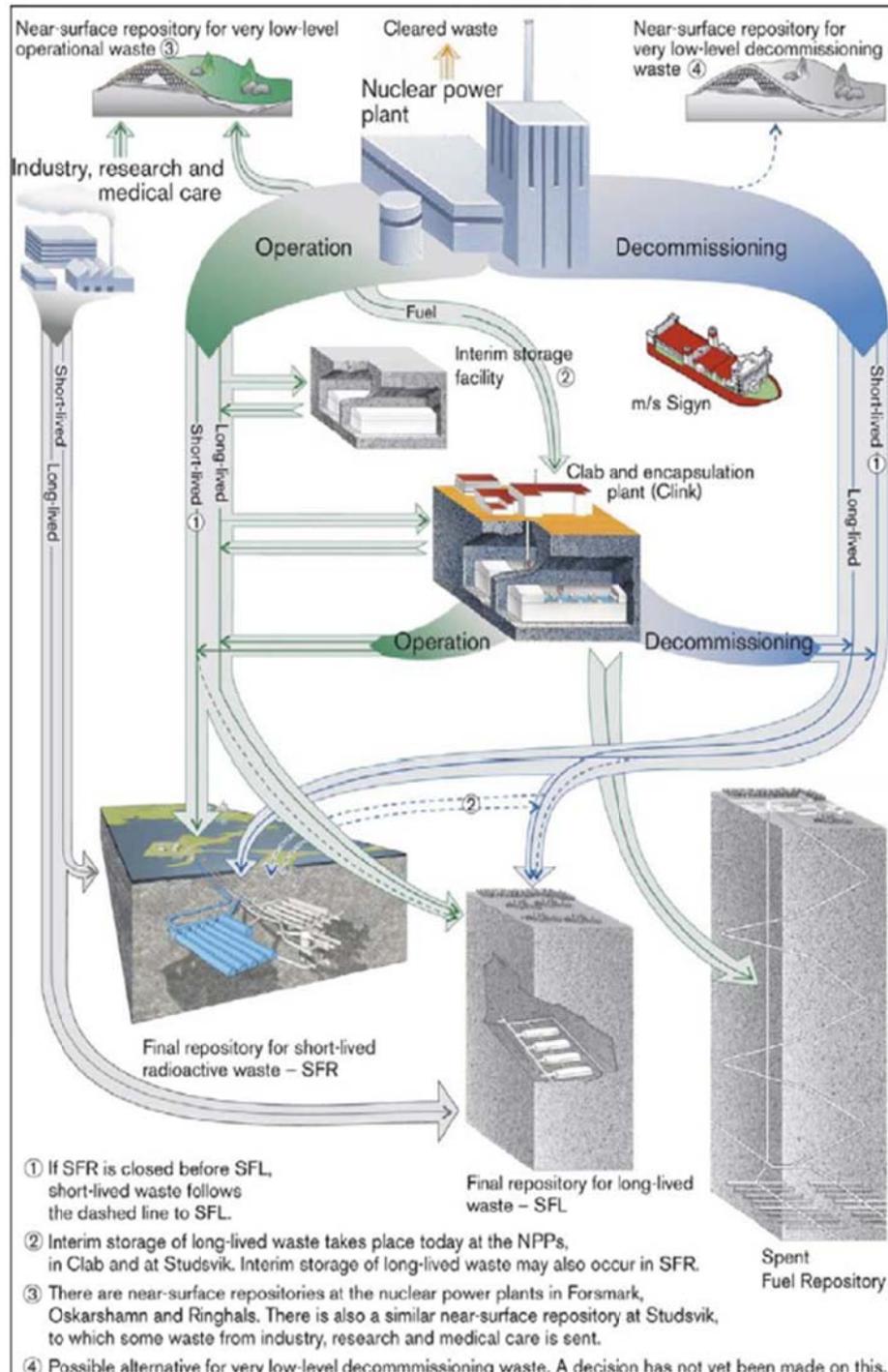


圖 3、瑞典廢棄物管理圖

### 三、心得

彙整訓練課程、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、方法以及心得彙整說明如下。

#### (一) 除役訓練課程

##### 1. 核電廠除役反應器壓力槽內部組件拆除工法

反應器壓力槽(RPV)內部組件由於具有高放射性之特性，因此，移除、切割及包裝都是具有挑戰性的工作。依據國外核電廠除役的經驗，高放射性的反應器壓力槽內部組件多數採水下拆解及切割的作業方式。水下切割技術可分為冷切割及熱切割兩大類，熱切割係利用熱能將材料熔化並使其分離，例如火焰切割、電弧切割、雷射切割等，而冷切割又可分為機械式及磨料水刀。各項優缺比較如表 4，因此國際近年來的趨勢是採用機械式方法來切割反應器壓力槽及其內部組件。以下將介紹此次公差所獲得之機械式水下切割機具、輔助設備及系統等相關資料。

表 4、機械式及熱切割之優缺點比較

	優點	缺點
熱切割	<ul style="list-style-type: none"><li>● 切割速度快</li><li>● 可沿曲線做較有彈性的切割</li><li>● 切割工具小巧靈活</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 切割過程會產生氣溶膠，造成空浮</li><li>● 在空氣中或水中需要設置大流量的過濾系統，收集切割產生之細小顆粒</li><li>● 空氣中或水中的過濾器濾芯都將成為二次廢棄物</li></ul>
機械式切割	<ul style="list-style-type: none"><li>● 切屑顆粒大易收集</li><li>● 無大量熱量輸入，不易造成空浮</li><li>● 二次廢棄物數量少</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 切割速度較慢</li><li>● 需要強壯的結構支撐以抵抗切割時的反作用力</li><li>● 狹小空間之活動與近接性較差</li><li>● 不易做曲線軌跡切割</li><li>● 刀具易磨損需定期維護更換</li><li>● 發生故障、刀具破損或刀具卡入切縫等，故障排除耗時</li><li>● 在空氣中使用需要液體的潤滑及冷卻</li></ul>

## (1) 機械式水下切割機具

### A. 水下動力源

水下機具常用的動力源，包括電動馬達、液壓動力、氣壓動力等，其中液壓有可分為油壓及水壓兩種。表 5 為針對動力源用於水下環境之優缺點比較：

表 5、各式水下動力源比較

	電動馬達	氣動馬達	油壓馬達	水壓馬達
價格	中	低	低	高
可控制性	高	低	中	中
污染水質可能性	無	無	有	無
周邊系統	有	有	有	有
輸出功率/體積	中	低	高	高
防水設計需求	有	無	無	無

依據上表可知，如果機具的移動速度或定位，需要精密的閉迴路控制，則電動馬達為首選，但需要有良好的防水設計，以避免滲水而發生電器短路狀況。表 5 中的輸出功率/體積比值以液壓動力為最佳，也就是液壓馬達的體積小但輸出功率高，但油壓馬達有管路破損進而污染水質的疑慮。氣動馬達的最大缺點則是輸出功率過低，無法產生足夠的切割扭矩。

依據國際上水下機具設計及使用的經驗，其水下機具動力源的發展歷程，最初在圓盤鋸、帶鋸機、剪切工具及夾具等機具所採用的動力源以液壓為主，但其液壓流體並非市面上常用的礦物油，而是使用水與乙二醇混合調配而成的液體(Houghto-Safe 620 或 Ultra-Safe 620)，因為這種液體發生洩漏時，不會嚴重污染水質，造成水質過濾器的負擔，進而產生大量的二次廢棄物。而這種液體原本是用於有火焰、熱表面或熔融金屬等高溫環境，其不可燃的特性可避免發生液壓流體燃燒的狀況。

隨著技術的發展，目前已有部分機具的動力源改為電動馬達，例如圓盤鋸，主要原因是易於控制，其次是放置在岸上推動液壓馬達的動力單元(Power Pack，如圖 4)會持續發出噪音，並不受操作人員所歡迎。雖然目

前帶鋸機仍使用油壓馬達帶動鋸條，但未來不排除嘗試改用電動馬達。

電動馬達及液壓馬達通常須配合減速機以降低輸出轉速，同時可提高輸出扭矩，減速機一般由齒輪所組成，內部需灌注油脂以潤滑齒輪，減少使用時的噪音及震動，且可增加減速機的使用壽命。但在減速機旋轉過程，不可避免會有少量油脂沿著旋轉軸溢出，但詢問具相關經驗的工程人員認為油脂洩漏數量太少，對於水質的影響在可接受的範圍，況且在除役階段水質的要求並不如運轉時期的要求一般嚴苛。



圖 4、液壓動力單元

## B. 剪切與擠壓機具

剪切機具(圖 5)及擠壓工具同樣是使用液壓動力，剪切機具利用液壓缸來推動前端的刀刃，而擠壓工具則是利用多組液壓缸同步前進，改變受擠壓物的外型。

剪切機具通常適用於管狀、棒狀或片狀等形式的鋼材，其優點是幾乎不產生切屑，而缺點則是其應用將受被切割材料的形狀及尺寸而有所限制。剪切的原理是利用兩片刀刃夾住工件，兩刀刃夾緊時產生方向相反的力量作用在工件上，進而使工件產生塑性變形直到斷裂。擠壓工具主要是改變廢棄物的形狀，達成體積縮減的目標，進而提高廢棄物在包裝時的效率，適用於中空的物件(如圓管)。



圖 5、剪切機具

### C. 圓盤鋸

圓盤鋸片在鋼製圓盤的邊緣帶有一整圈的鋸齒，旋轉圓盤利用鋸齒來削除材料，使用馬達帶動圓盤鋸片的旋轉，再配合機具的移動進行切割。一般切削金屬材料的線速度約 8~20 m/sec，因此針對不同直徑的鋸片，需選擇不同的轉速，例如圓盤鋸片的直徑為 800 mm，當其鋸齒的線速度為 8 m/sec 時，則圓盤鋸片的轉速約為 200 rpm。

水下圓盤鋸動力機構採用模組化設計，初始設計為使用液壓馬達帶動圓盤鋸片，但由於液壓馬達在岸上的動力單元噪音大，已改用電動馬達驅動的模組。

圓盤鋸的操作面板如(圖 6)，在操作面板上方有 5 個燈號(圖 7)用於顯示圓盤鋸的鋸切狀況(亦即帶動鋸片的馬達狀況)，前三個綠燈亮起時，表示正常，若亮 4 個燈或 5 個燈全亮時，表示即將超過或已超過馬達的負荷，這時應讓鋸片後退或停止進給。

但是，圓盤鋸載具與切割目標物的固定方式仍然是使用液壓缸，因為液壓缸的動作簡單，可提供較大的夾持力量，將提供圓盤鋸載具牢牢地與切割目標物固定在一起，這點是非常重要的，因為圓盤鋸片在鋸切過程對於震動是非常敏感的，若固定不夠牢靠會造成鋸片震動，進而降低圓盤鋸的切削效率，甚至會造成鋸片被卡住或破壞。此外，當夾持壓力到達設定

值後，液壓動力單元即停止運轉，而不必持續不斷地輸出動力。

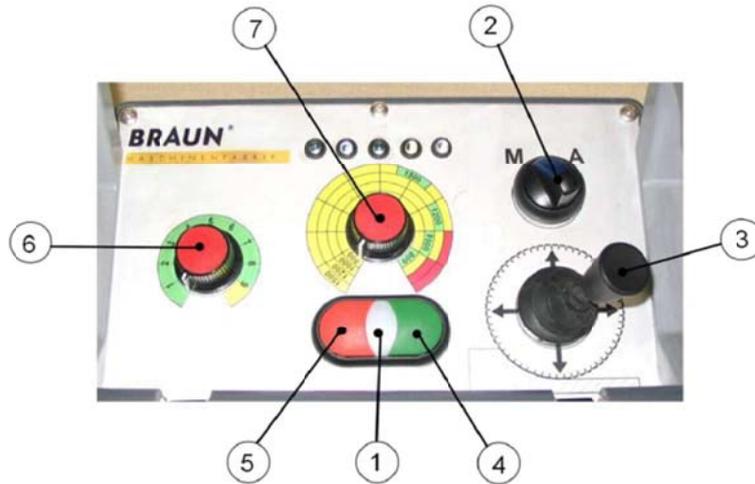


圖 6、圓盤鋸的操作面板

圓盤鋸操作說明如下：

1. 操作燈號
2. 手動(M)與自動(A)切換
3. 進給方向切換搖桿(上下為擺動旋轉臂，左右為前後移動)
4. 操作開始(ON)
5. 操作結束(OFF)
6. 速度控制旋鈕(用於改變旋轉臂及前後移動的速度)
7. 鋸片旋轉速度控制旋鈕(實際操作時使用全速)



圖 7、圓盤鋸操作面板上的燈號

#### D. 帶鋸機

帶鋸機是將一條環狀鋸條環繞在一組滾輪上，滾輪的數量在兩個以上，其中一只滾輪裝有馬達(電力或液壓)稱為主動輪，主動輪利用摩擦力帶動

鋸條移動，其餘的滾輪稱為惰輪，惰輪的位置可調整使鋸條保持一定的張力，另有帶鋸導引裝置，可以扭轉鋸條改變角度。

一般切削金屬材料的帶鋸機鋸條線速度約 10~150 m/min。

課程現場的帶鋸機與市售帶鋸機最明顯的差異是，市售帶鋸機由兩只大鋼輪組成，而現場的帶鋸機為四只小鋼輪組成。此外，帶鋸機可安裝一只側邊液壓缸，帶動帶鋸機前後移動。

帶鋸機可安裝於固定架上，視不同狀況可水平或垂直安裝帶鋸機(圖 8)，固定架上有兩條軌道，軌道中央有一條螺桿，液壓馬達帶動螺桿旋轉，使帶鋸機能沿軌道左右移動。當配合工件旋轉盤(Turn Table)進行大型組件切割時，帶鋸機固定架與工件旋轉盤之間並不需要結合條件限制其相對位置，主要是依賴帶鋸機的自重來抵抗切削所產生的反作用力。帶鋸機還有另一種安裝方式是裝在可旋轉的爐穴中心柱(Center Pillar)上(圖 9)，爐穴中心柱上有軌道可讓帶鋸機上下移動，且可帶動帶鋸機旋轉，這種安裝方式適合中空圓筒狀之內部組件(圖 10)，可將爐穴中心柱置於圓筒組件的中心，帶鋸機則由頂部往下切割。

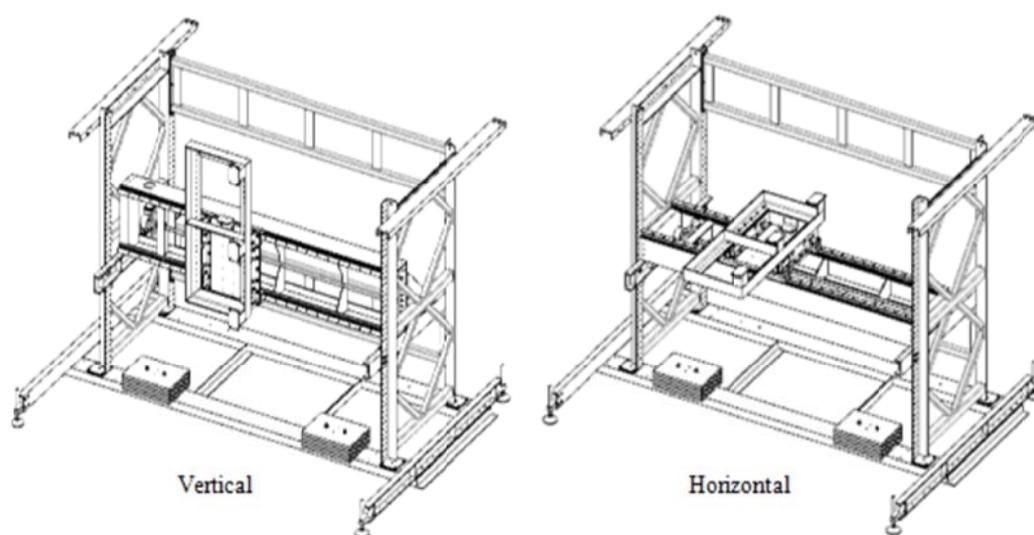


圖 8、帶鋸機固定架

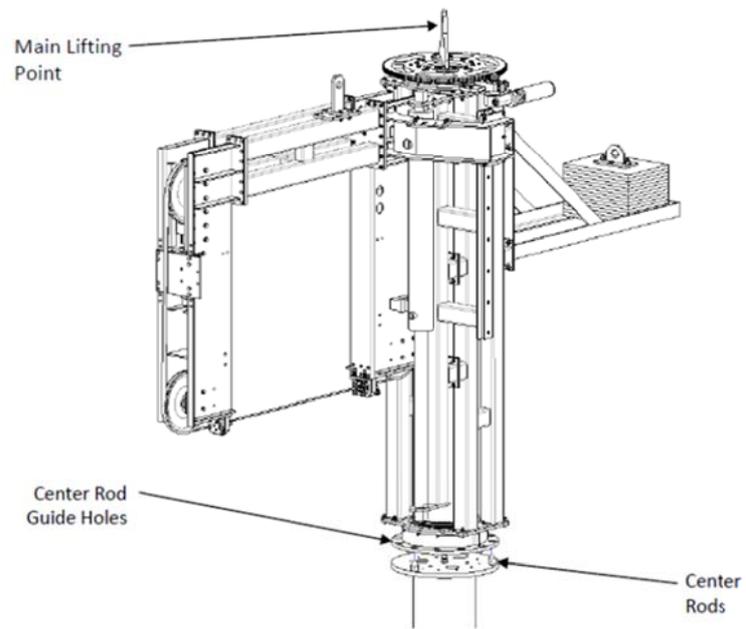


圖 9、帶鋸機安裝於爐穴中心柱上

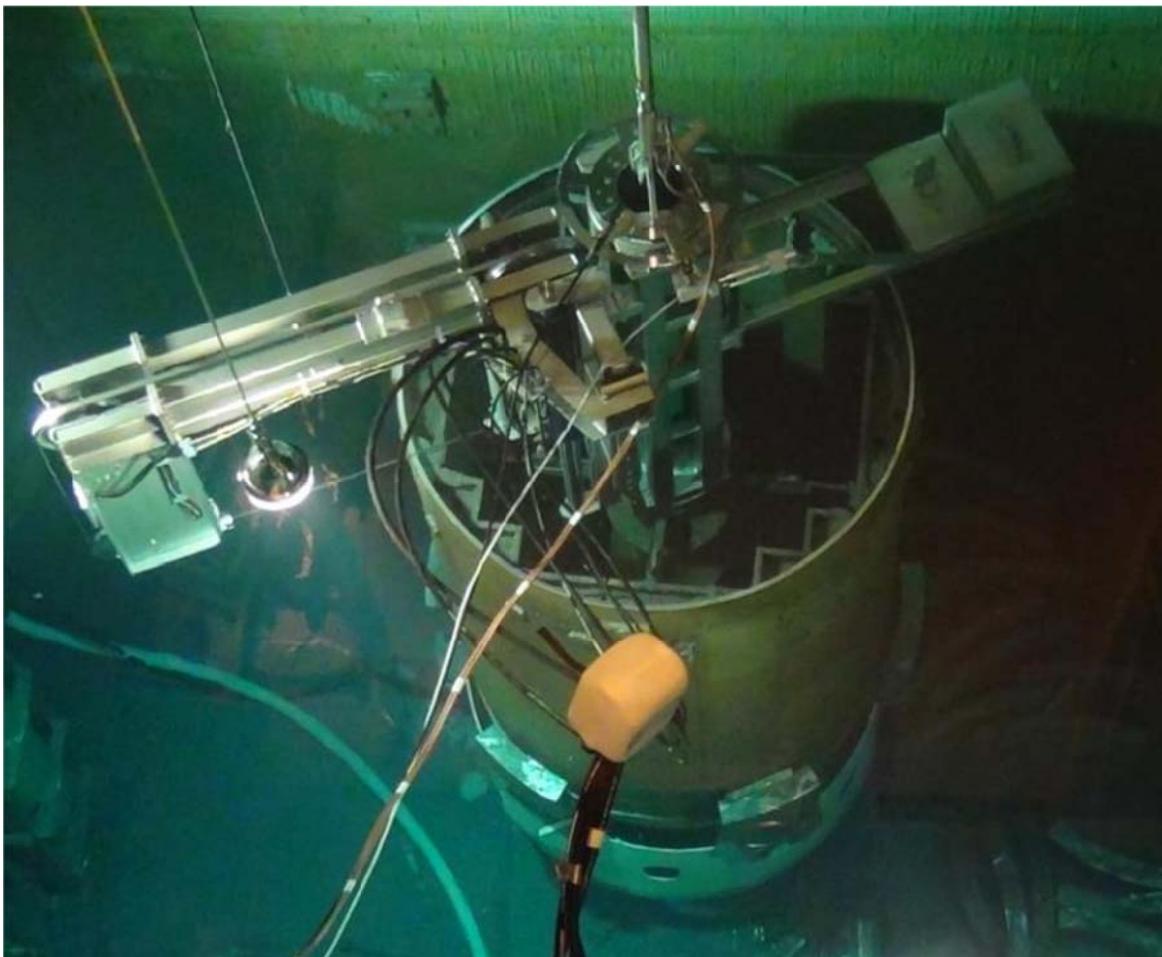


圖 10、帶鋸機切割爐心筒(壓水式反應器內部組件)

帶鋸機使用的液壓動力單元，如圖 4 所示，此外還有一套控制單元，係由液壓控制閥及控制面板所組成。

#### E. 壓穿式電剪

壓穿式電剪(Nibbler)也是屬於剪切類型的工具，其工作原理是利用一組沖頭及模具，利用電動馬達帶動沖頭做往復運動，沖頭撞擊模具後，將夾在沖頭與模具間的材料剪斷(圖 11)。壓穿式電剪適用於薄板，常用於鈹金件或桶槽的切割作業，其優點是剪切速度快，產生的碎屑體積大易蒐集。依據現場工程人員描述，壓穿式電剪原先也是使用液壓馬達，目前已經改採電動馬達，主要也是控制容易及噪音小，但液壓馬達的工作速度略高於電動馬達。

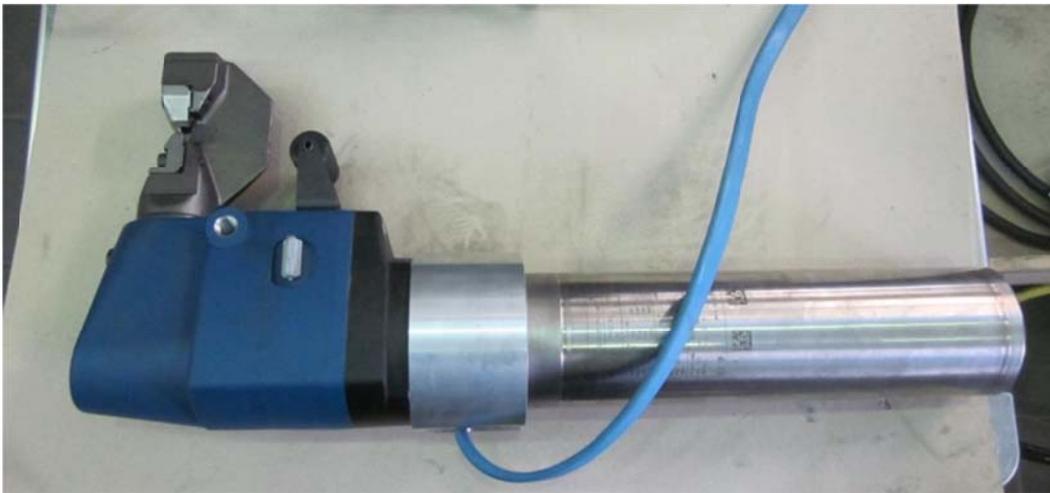


圖 11、壓穿式電剪

### (2) 水下切割的輔助設備及工具

#### A. 工作橋架

工作橋架(Working bridge)橫跨於切割池上方，工作人員可在工作橋架上操作、控制或觀察工作的進行。工作橋架具有動力可沿軌道移動，並配置吊車以操作各式機具或吊運物件(圖 12)。

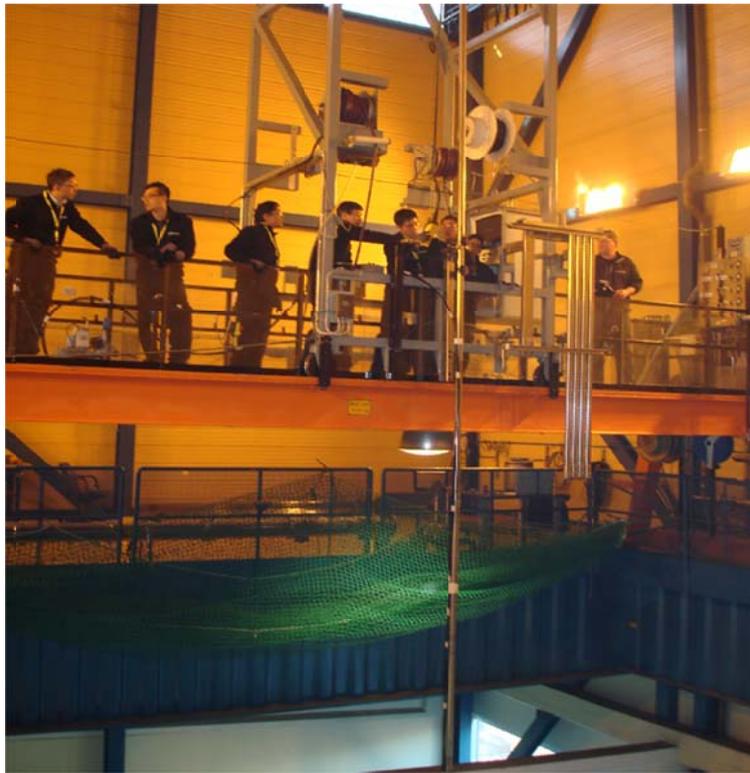


圖 12、工作橋架

#### B. 夾爪工具

拆除切割作業的過程不可避免的要使用吊運系統及夾爪工具(圖 13)，來搬運組件或切割件。其中夾爪工具須配合被搬運的物體進行適合的設計，如圖 14 所示是雙夾爪用於汽水分離器的抓取。



圖 13、夾爪工具

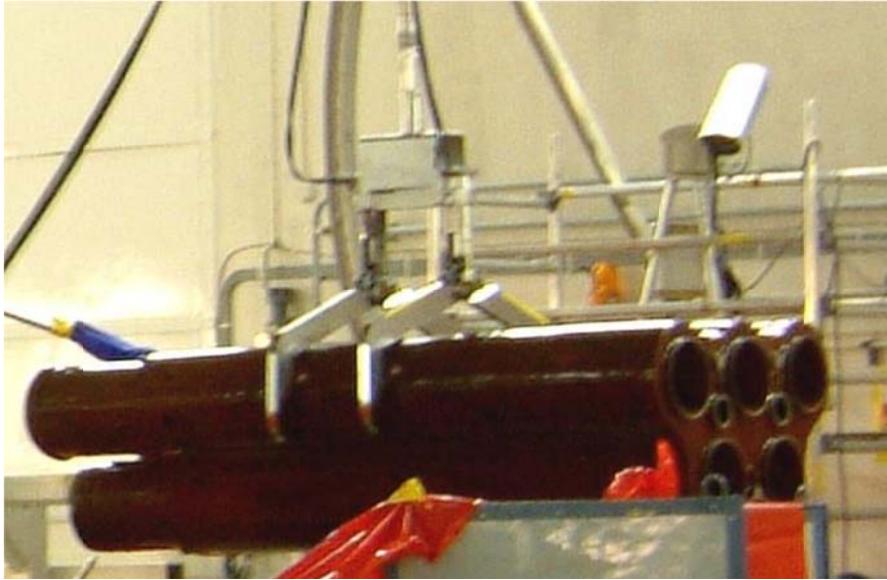


圖 14、雙夾爪工具

C. 工件旋轉盤

工件旋轉盤(Turn Table)作為反應器內部組件的載台，提供旋轉功能，但其旋轉與切割刀具進給不會同時進行，亦即當旋轉至某定位後，切割才會進行。旋轉盤適用於圓形組件，可以有效節省操作空間。

D. 水下攝影系統

水下攝影鏡頭組，配合鏡頭控制單元，可以縮放影像、調整角度及調整光源強弱。

E. 3D 電腦切割模擬

3D 電腦切割模擬的優點是不需要建立實體模型，可快速地修改設計，節省切割機具的設計時間，提高設計的可行性。3D 電腦切割模擬可應用於反應器內部組件切割的規劃作業，首先是蒐集內部組件 2D 圖面，再繪製出內部組件的 3D 模型；同樣地，所設計的各式切割機具也將繪製成 3D 模型。然後將切割機具模型與被切割的內部組件模型進行組合，以評估設計的可行性，並進行適當的設計修改。

(3) 水下切割的模擬訓練

A. 模擬切割水槽介紹

模擬切割水槽尺寸約為長 6 m、寬 3 m、高 3 m。池內有水質過濾系統、水中切屑收集系統、水下攝影機系統、切割件切割區、工具暫存區。切割

水槽上方架設 2 層平台，以供近距離觀看。

## B. 液壓操作訓練

切割作業時使用之動力源，不外乎液壓及電力。其中剪切、夾具皆使用液壓進行操作，且液壓若操作不慎將造成嚴重工安事件，因此，在實務訓練的第一堂課就進行液壓操作安全說明及操作訓練(圖 15)。而除了液壓工具的操作外，現場工作人員亦示範了擠壓機的操作，進行空心圓柱管的壓縮減容。

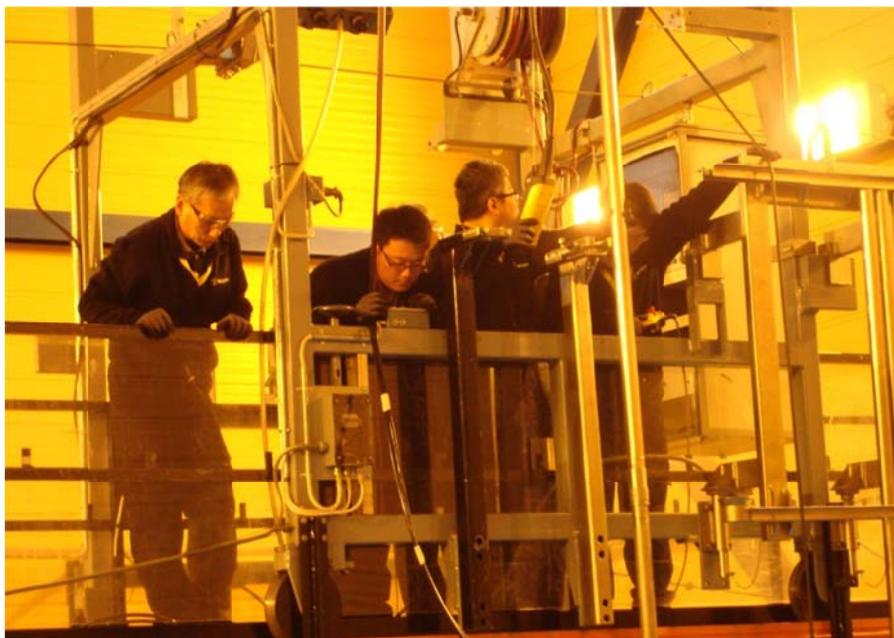


圖 15、液壓夾具操作

## C. 剪切操作訓練

剪切工具有很多樣式，此次訓練針對切割時常用到的剪切工具進行實務課程，包含 Stellite Pin Cutter (圖 16)及液壓剪(Hydraulic Shear)。在操作液壓剪的過程中，由於未掌握適當的剪切角度，而使刀具磨損，導致切割作業暫停，如圖 17。此次經驗讓參訓人員體認到實際作業上常會遇到突發狀況，得仰賴現場經驗做出判斷及適當的調整。



圖 16、Stellit Pin Cutter



圖 17、液壓剪

#### D. 圓盤鋸操作訓練

由安裝圓盤鋸片開始，再吊運至模擬切割水槽內，利用圓盤鋸載具上的液壓夾具夾住工件，便可進行切割(圖 18)。圓盤鋸載具的形式不只一種，在此操作訓練中，使用了直立式與水平式兩種載具，以進行兩種不同方式的切割。



圖 18、操作圓盤鋸直立式切割

#### E. 帶鋸機操作訓練

帶鋸機的架設方向除了直立式、水平式外，亦可裝在可旋轉的爐穴中心柱上(圖 9)，而現場僅讓參訓人員進行直立式的帶鋸機操作，為展示另兩種配置方式，現場工作人員將帶鋸機從固定架上拆卸，並示意如何改裝成水平式及爐穴中心柱上。在進行直立式的帶鋸機操作時，將固定架上的夾具夾住被切割件(圖 19)已進行切割。切割期間，發生帶鋸片從從動輪脫落，且部分鋸片仍陷在工件內的狀況，依據工作人員的使用經驗，若發生類似情況，可用剪切工具將鋸片剪斷拉出後更換新鋸片，並避開原切割路徑，在不同位置切割以避免刀具受損。



圖 19、利用夾具夾住被切割件

#### F. 壓穿式電剪(Nibbler)操作訓練

壓穿式電剪用於切割薄板或薄圓管，操作上將壓穿式電剪的剪切縫對準被切割件，由上而下進行直線切割，其進給依靠重力，沖頭完成衝程移除材料後，壓穿式電剪利用重力移動至下一個位置，以進行下一步切割。

## 2. 核電廠除役生物屏蔽體拆除工法

### (1) 背景說明

生物屏蔽體圍繞反應器而建，以混凝土為主要材料，用於降低反應器運轉期間工作人員接受的輻射劑量率。建造生物屏蔽體時，通常會在混凝土中添加高密度材料(如重晶石、褐鐵礦等骨材)以增加屏蔽效果，此種重質混凝土的密度可達到 3,500~4,000 kg/m<sup>3</sup>(常重混凝土密度約為 2,300 kg/m<sup>3</sup>)。

在反應器長期運轉下，部分生物屏蔽體受到中子活化，活化的區域主要集中在靠近爐心一帶，其頂部和底部的活化深度相對較小。而結構中的不同材料也會影響中子活化的程度，金屬通常比純混凝土活化程度更高，而混凝土中所添加的骨材可能形成熱點。生物屏蔽體活化部分需與未活化部分分開拆除，並執行不同的廢棄物管理途徑，因此在拆除工作進行前，須評估生物屏蔽體的中子活化狀況，利用運轉歷史資料進行計算，並透過鑽孔取樣的結果驗證，描繪出各個位置的活化深度。

### (2) 拆除工法

混凝土的拆除通常使用已驗證的技術與工具，以降低設備故障的可能性，並可利用現有的經驗調整工法。拆除作業進行時，先用表面刨除機刨除混凝土的外側薄層，將表層污染去除，再使用鋸切或衝擊及破碎技術拆除大部分的混凝土。大型混凝土的鋸切以鑽石鎖鋸(Diamond Wire Saw)為主，而衝擊及破碎技術則以衝擊式拆除機器人最具代表性。

鑽石索鋸可進行較高精準度的拆解，可切割成任何尺寸的塊狀廢棄物。其產生的粉塵較少、空浮較不嚴重，人員劑量在可以接受的範圍內。產生的二次廢棄物包含用過的鑽石索以及放射性泥漿，其中放射性泥漿是由切割時用於冷卻、潤滑及粉塵抑制的水與混凝土碎屑混和產生，需要過濾及回收廢液的系統再處理。

衝擊式拆除機器人相較之下精準度較低，並會造成較多的粉塵及較嚴重的空浮。為了降低工作人員劑量，可採遙控操作，並配合水霧噴灑或局部抽吸提高作業時的能見度。產生的二次廢棄物包含雜項操作廢棄物(例如液壓軟管、工具)及放射性泥漿。

鑽石索鋸與衝擊式拆除機器人的優缺點比較如表 6。

表 6、鑽石索鋸與衝擊式拆除機器人比較

	鑽石索鋸	衝擊式拆除機器人
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可於廠外進行大部分的廢棄物管理流程(可快速清理拆除現場)</li> <li>● 用水輔助可抑制粉塵</li> <li>● 可同時使用多條鑽石索以縮短工時</li> <li>● 僅於裝配鑽石索及設備維護時需要人員操作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 對於只移除活化部分的要求較容易達成(降低交叉污染的可能)</li> <li>● 可針對廢棄物種類選擇不同的工具裝配</li> <li>● 可遙控操作(包含利用螢幕進行遠端遙控)</li> </ul>
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 有交叉污染之可能</li> <li>● 產生大量的二次廢棄物，需要規劃出廢液管理策略</li> <li>● 屏蔽體內的其他物質(如管線)會導致切歪</li> <li>● 鑽石索可能斷裂</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 需進行粉塵管理</li> <li>● 機器可能故障以導致工作停擺</li> <li>● 廠內操作階段所使用的時間較長(降低並行工作的可能性)</li> </ul>

### (3) 規劃及準備

生物屏蔽體拆除作業進行前，需進行完整的規劃與準備，如以下各項所述：

- 生物屏蔽體的放射性盤點，評估各類別廢棄物之產量。
- 拆除技術的選擇，可針對以下各點進行考量：
  - 生物屏蔽體結構；
  - 可否使用遙控操作以符合輻射劑量合理抑低的要求；
  - 將可外釋的部分留在最後的傳統式拆除；
  - 廢棄物形式及管理；
  - 水的使用是否可以接受；
  - 時間及成本。
- 暫時性電廠修改（Temporary Plant Modifications）：
  - 交叉污染控制；
  - 廢棄物運送路徑修改，例如牆面移除等。
- 廢棄物管理：
  - 減少放射性廢棄物的體積；
  - 塊狀廢棄物是否可被中期貯存設施及最終處置設施接收；
  - 從拆除地點到廢棄物管理區域間之運送路徑；

- 廢棄物尺寸；
  - 廢棄物管理及包裝工作站(如破碎、混凝土/金屬分離、包裝設施等)的位置規劃；
  - 廢棄物的破碎程度(決定了容器的使用數量)；
  - 混凝土與鋼筋是否分開處置；
  - 容器的數量和類型；
  - 二次廢棄物處理；
  - 有害的非放射性廢棄物。
- 各項模型測試(mock-up)所需進行的冷試車

#### (4) 實際案例- SVAFO R2 研究用反應器生物屏蔽體拆除

R2 反應器由 Allis-Chalmers 製造，為 50 MW 的研究用反應器，其生物屏蔽體內有 3 個水池，R2 反應器位在最西邊的一號池中。而在東邊的三號池中有另一反應器 R2-0，其為 1 MW 的移動式反應器。

R2 反應器的生物屏蔽結構係由鐵礦混凝土構成，厚度為 1.5 m 至 2.5 m。拆除工作於 2016 年 02 月 01 日開始進行，預計 2017 年秋季完成。在拆除技術上，使用曾用於瑞典 KTH 反應器拆除的 Brokk 拆除機器人，以提供安全且有彈性的拆除，並構建隔離帳篷以避免污染擴散。拆除過程分為兩個階段，第一階段為上半部生物屏蔽體的拆除，第二階段則拆除下半部。

為了不使清潔混凝土與活化混凝土相互混和而提高活化混凝土在整體廢棄物中所占之比例，兩者之拆除、運送及包裝等作業皆有不同的規劃。在拆除方面，清潔的混凝土從外側移除，而活化混凝土則從內側移除(以遙控的方式操作 Brokk 拆除機器人於已洩水的水池內進行)；因為拆除地點不同，後續運送至包裝工作站的路徑也分為清潔混凝土的外側路徑及活化混凝土的內部路徑(透過生物屏蔽體開口運出)；在廢棄物的包裝方面，清潔混凝土採用塑料容器盛裝，其裝箱粒徑必須小於 100 mm，而活化的部分則依廢棄物之劑量率選擇盛裝容器，大於 2 mSv/h 的廢棄物裝入鋼箱後放入混凝土箱，小於 2 mSv/h 的廢棄物裝入 BLL 鋼箱。

在此拆除計畫中所得到的經驗如下，可供相關作業參考：

- 廢棄管理的例行程序和要求須明確定義：
  - 當報價給潛在供應商時，應定義廢物要求和例行程序；
  - 廢棄物管理核心團隊應積極參與計畫，使得技術限制和廢棄物要求受到重

視；

- 當每個人都能理解廢棄物的管理要求時，每個人都朝著同一個目標努力。
- 用足夠的時間規劃拆除工作：
  - 沒有規劃時間進行團隊建構是不理想的；
  - 詳細的規劃可識別出拆除及廢棄物需求上的問題，規劃越詳細，則越多問題可被解決；
  - 盡早讓關鍵人物加入規劃，可協助解決問題。
- 發現許多未預期到的事物：
  - 鐵礦石混凝土中含有大塊鐵(部分大於 200 mm) ；
  - 圖面規格和先前得知的資訊有落差。
- 透過靈活的解決方案進行管理：
  - 保持現場有足夠備品；
  - 為各種假設的情況做出相應安排；
  - 考慮拆除方法時，盡可能多的考量各種可能性。

### 3. 核電廠除役人員劑量評估

#### (1) 背景說明

核電廠除役作業人員劑量評估為評估在核電廠停機後，執行除役作業期間，作業人員執行各項活動中接受的輻射劑量。而劑量評估的目的在於除役作業前，先鑑別出可能使作業人員接受劑量的程度與途徑；並依評估結果於實際作業中，採取適當之防護措施，以確保個別作業人員輻射劑量不超過劑量限值並達到輻射防護人員劑量合理抑低 (ALARA, As Low As Reasonably Achievable) 的原則。

依照國際除役經驗，造成工作人員劑量之主要除役作業為：

- 用過核子燃料相關處理作業
- 除污作業
- SSCs 拆除作業(Systems, Structures, and Components removal)
- 大型組件拆除作業
- 低放射性廢棄物包裝與運輸作業

#### (2) 評估方法論

##### A. 參數收集與假設

除役作業人員劑量會受到執行各項活動方式的影響，例如除役的策略、拆除的時程、工法、防護措施的採用、參與的人數、執行的時間、除污的效果等，如圖 20。

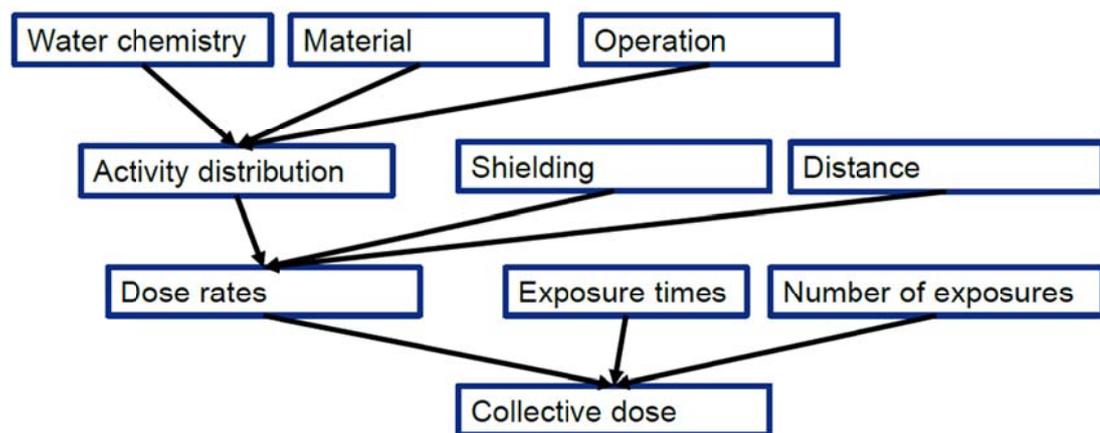


圖 20、影響除役作業人員劑量因素

因此，在評估過程中需收集上述之相關資料；對於具有不確定性之參數則依照輻防

評估原則進行保守性假設。因此，相關參數的假設須具有保守性，惟仍不得與現實狀況差距過大。因此相關假設可參考過去之作業經驗、國內外相關文獻或佐以相關評估工具為之。

## B. 劑量評估公式

除役作業人員劑量評估概念為個別作業接受之平均劑量率、作業時程、作業人數三者相乘而得。

影響劑量率之重要參數如下：

- (A). 除污效果：除役作業採行之除污，包含系統除污、其他系統初步除污、廠房初步除污等作業，將可有效降低作業區域空間劑量率。在國外除污經驗可見，執行良好的系統除污，至少可降低到原活度的十分之一。
- (B). 屏蔽效果：對於作業人員近距離拆除放射性污染之組件時，為避免接受過高累積劑量，一般會採用臨時屏蔽。臨時屏蔽的使用雖可降低工作人員的輻射劑量率，惟亦可能增加整體作業的工作時間。因此，在屏蔽設備的選擇上，應整體考量其效果。
- (C). 放射性物質衰變：核設施停止運轉後，放射性物質活度將隨時間衰減。因此，在除役策略，可在停機經過一段時間後再執行拆除作業。在人員劑量評估上，為確保評估準確性，應考量放射性物質的衰變。衰變之相關假設，在立即拆除策略之核電廠可參考 NUREG/CR-0672，以劑量主要貢獻核種 Co-60 之半化期 5.26 年計算。

影響作業時程與人數之重要因素：作業規畫時程與執行人數主要受到執行之作業工法影響。如傳統工法、遙控工法、水下切割等不同工法條件的選用，會影響作業之時間、參與人員類別與數量。因此，在人員劑量評估上，應考量工作分解架構規劃之時程規畫、工法規劃與人員組成進行計算。

## (3) 國際電廠經驗

### A. 大修期間

依據國際上電廠運轉與除役經驗數據，可歸納下列幾點：

- 電廠運轉期間，造成人員劑量的作業主要發生於大修時期，如圖 21。

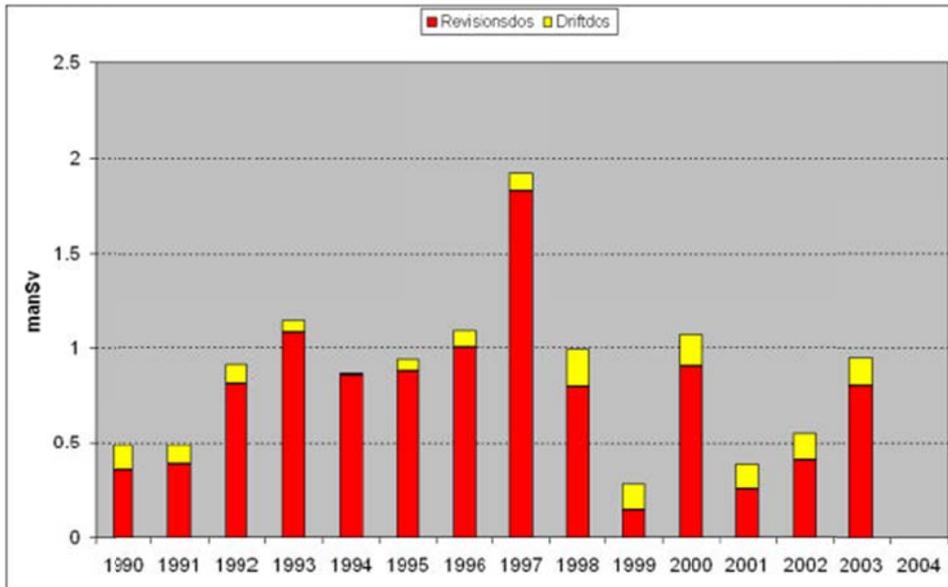


圖 21、電廠運轉期間作業與人員劑量關係圖

- 大修期間造成劑量的主要核種為 Co-60，而在部分電廠亦有其他核種具有明顯的劑量貢獻影響，如圖 22。

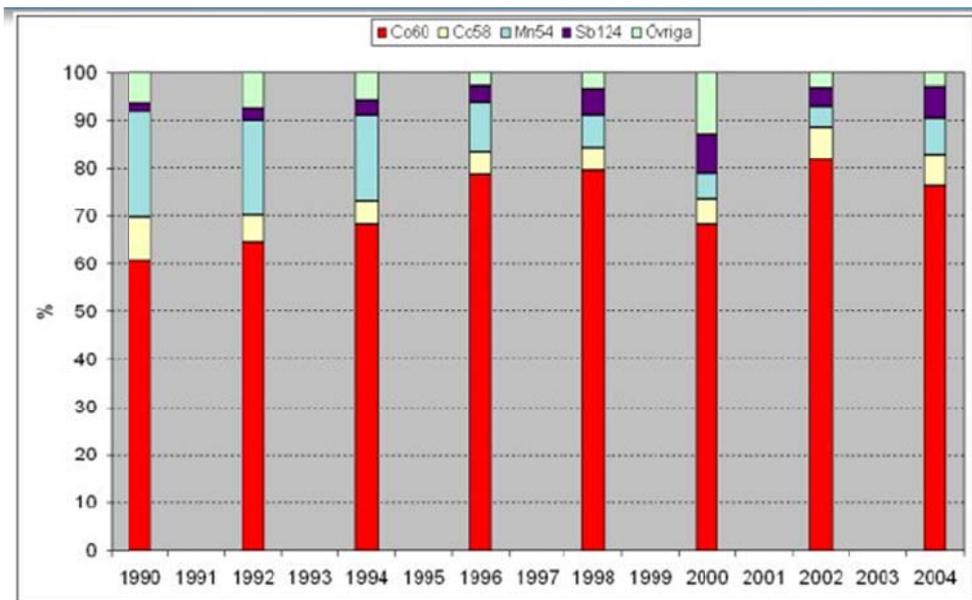


圖 22、電廠大修期間主要劑量影響核種

- 大修期間造成劑量的主要工作在 Primary loop、Cooling system 以及 Shutdown reactor。
- 大修作業造成的集體劑量約在 1~4 人西弗。

## B. 除役與大修比較

- 除役作業相較於大修，雖有同樣的操作程序與防護措施。惟時程上的安排更具有彈性。
- 停機後的電廠，放射性的影響會逐漸降低。
- 人員可接近更多的區域，採取更完整的樣品。
- 新增大量的廢棄物包裝、處理與運送作業。
- 除役造成的集體劑量約為大修的 10~20%

## 4. 核電廠除役除污作業

### (1) 背景說明

核電廠除役中，除污作業扮演重要角色。台灣核電廠雖然在例行運轉期已有除污經驗，但是例行運轉除污目的僅為降低工作人員劑量，且除污過程不能造成組件的破壞；而在除役期間，除污目的在於盡可能清除停機後電廠中的零組件所含有的放射性物質，以達廢棄物減量功效，並降低工作人員實際拆除時接受之輻射劑量。因此，除役中的除污效果具有一定的要求。

依據核能電廠生命週期階段的不同，化學除污可分為運轉時的溫和型除污與除役時的侵略型除污，其比較如表 7 所示。運轉時的除污是核能電廠運轉時期內所進行的除污程序，是為了降低電廠工作人員於電廠運轉時或大修時的輻射曝露，除污須避免組件受損，使其可繼續利用，因此，須採用較溫和之除污技術。核電廠除役時所進行之除污程序主要目標是盡可能地移除放射性物質，包含系統除污(設施拆除前)、組件除污(設施拆除後)及建物結構除污，如圖 23 所示。除役期間的除污作業是為了移除核能電廠系統、組件及結構表面或表面下的污染，以減少工作人員進行除役作業時輻射曝露風險，也降低除役活動對大眾的輻射曝露程度。

表 7、溫和型與侵略型除污技術比較

Technique/reagent	Fields of application	Advantages	Limitations	Remarks
Mild chemical decontamination, e.g.: • Detergents • Creams • Foams • Dilute acids/alkalis	Decontamination of large flat pieces on-site Decontamination of doors, pools, liners, reactor containment in situ	Easy to use Inexpensive Low exposure of workers	Only removes loose contamination High secondary waste generation: • If additional wet cleaning is needed • Involves use of pads, brushes, rubber, gloves, etc. Not applicable to porous surfaces	Measures needed to prevent recontamination, e.g. in large area applications
Aggressive chemical decontamination, e.g.: • Concentrated acids/alkalis • Oxidizing/reducing reagents	Removal of thin layers of metal surfaces, e.g. corrosion Decontamination of relatively complex components and shapes	Removal of highly contaminated surface Decontamination to release limits feasible if sufficient materials is removed Commercially available, relatively inexpensive Low secondary waste production if reagent is reused (regeneration and/or removal of contaminants)	Dismantling, segmentation, etc., required Application on-site usually necessitates use of baths to achieve effective decontamination Higher exposure of workers	Additional ventilation required Possible increased hazard from toxic or corrosive solutions or gases Multistep/alternate treatments often used

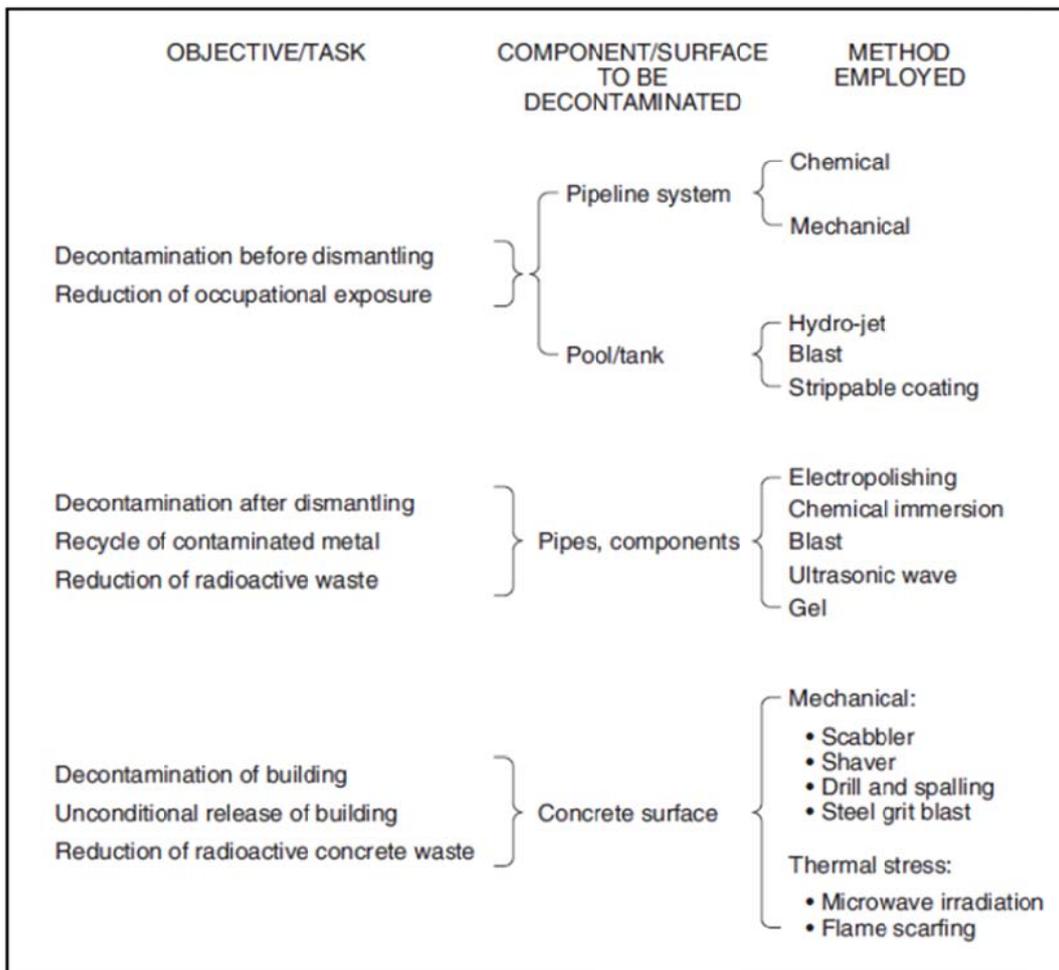


圖 23、除役階段之不同時程之除污技術及方法

## (2) 化學除污方法

CORD、DFD 及 NITROX 為目前國際上常見的化學除污方法，CORD 使用的化學藥劑為高錳酸( $\text{HMnO}_4$ )及草酸( $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ )，產生的二次廢棄物為金屬離子及  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 。DFD 使用的化學藥劑為氟硼酸( $\text{HBF}_4$ )、高錳酸鉀( $\text{KMnO}_4$ ) 及草酸 ( $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ )，產生的二次廢棄物為金屬離子、氟離子、 $\text{HBF}_4$  及  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 。

本次訓練提及之 NITROX 除污方法，其使用的化學藥劑為硝酸( $\text{HNO}_3$ )及草酸( $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ )，產生的二次廢棄物為金屬離子及  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 。至於未來電廠除役時需使用何種除污方法，將考量電廠當時之污染狀況與除污因子等因素後再決定。

## (3) 除污作業規劃

停機後，最需要立即執行化學除污的三個主要系統為爐水淨化系統(RWCU, Reactor Water Clean-Up System)、再循環管路系統(Recirculation System)、餘熱移除系統(RHR, Residual Heat Removal System)。系統化學除污的最主要目的應是降低泵、閥、熱交換器、管路等組件表面劑量率，大幅度降低系統廠房空間劑量，降低人員工作曝露，若日後上述高污染系統組件拆除切割作業可以採用傳統工法接近施工，系統化學除污的施作才能得到最高的成本效益。

另亦討論到燃料在爐心的情況下，欲進行再循環管路系統除污的可能性。結論為特殊的塞管方式、化學藥劑循環機制、爐內水頭壓力高於再循環管路系統內化學藥劑溶液壓力等作業方式，應可防止燃料與化學藥劑接觸之可能性，但仍需收集國外經驗、與各專家學者進一步研究詳細步驟。

電廠停機後，優先進行主要污染系統化學除污，應是成本效益最高的作法，因機組已不再運轉，泵、閥、管內部將不再有新增污染附著，在二次廢棄物可容忍的條件下，應要求高接觸劑量組件的除污因子提高，以確保能大幅度降低空間劑量，達到最高的成本效益。再循環管路、RHR 管路很多是大尺寸管路，也具備較高的除污後外釋之效益。

#### (4) 執行除污作業的流程

- A. 初始決策(18~24 個月)：執行前現場探勘，成本效益評估，再進行提案與簽約。
- B. 工程階段(簽約後的設備移置)：簽約後的啟動作業，進行細部項目規劃，以及工程圖面收集與測試。
- C. 動員階段(除污作業執行前 3~4 個月)：設備裝置、測試、現場訓練與簡報。
- D. 除污執行階段(執行時程取決於系統數量)：現場工作約 6~12 週，執行包含設置、操作與設備包裝。
- E. 復原階段：結束除污作業後 30 天提交除污結果報告。

## 5. 核電廠除役工作分解架構(WBS)

### (1) 目的及背景

為使核電廠能依規劃順利進行除役且滿足管理需求，需製定除役工作分解架構 (WBS, Work Breakdown Structure)，將除役工作以工作包方式分解，並以樹狀結構表達各工作間之關連性，其易於管理和了解，也易於使用圖形工具軟體進行邏輯並系統性地規劃、管理除役工作。

而工作分解架構完成之後，除了可繼續發展細部排程之外，亦可發展成本估算。各廠址之工作分解架構應與國際核設施除役成本架構 (ISDC, International Structure for Decommissioning Costing) 對應及連結，其關係圖，如圖 24 所示。

成本估算可從工作分解架構最底層的工作項目彙整起，再依據排程所獲得的人力工時與成本參數，經過運算得到每個作業的成本，最後再以累加的方式往上逐層計算，進而得到除役成本。

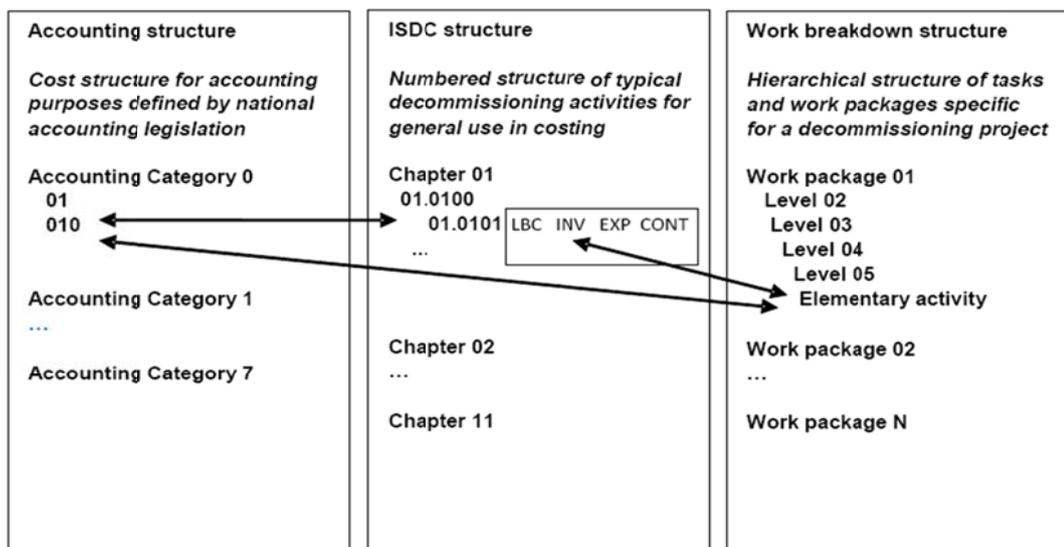


圖 24、ISDC 與 WBS 關聯性

### (2) 方法論

#### A. 工作分解架構

除役作業排程規劃方法可考慮以下項目：

##### (A) 工作的範圍

工作的範圍必須明確地指出，此範圍需確定系統與結構移除、拆解與

廠址復原所需效益的假設及不包括的項目。

#### (B) 除役策略

一般來說，除役策略都是對立即拆除、延遲拆除、就地封存等方式，且根據法規規定、需求考量進行評估。

#### (C) 資訊的收集

每個電廠的除役時間估算與作業排程是不同的，須依據每個電廠的工程數據，包括廠址與平面佈置圖、一般的配置與建築圖面、管路與儀表圖、電氣單線圖、設備規範及參考手冊等，作為設施、系統與結構所需除污與拆解的評估基礎。資訊收集的種類如下：

- 定義資料：房間或系統規劃，結構描述例如建築物、樓層、房間，系統描述例如一次或二次側迴路等。
- 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)。
- 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。
- 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。

#### (D) 時間估算的準備

時間的估算分為兩類，對每個拆解作業而言，系統與結構調查的應用提供了依活度而定的拆解時間要求，計畫管理人員在計畫期間的推估，則提供了依週期而定的時間。

#### (E) 排程的準備

整體的排程是從拆解工作的邏輯及計畫的順序來發展，每個工作的期間是從個別的作業步驟及順序進行評估，並獲得關鍵路徑(最長的時間)，來完成該項工作。為得到一個合理的排程，經常需要以疊代的方法完成，故該工作必須經常使用電腦軟體來執行。

發展核電廠除役工作分解架構，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，才能發展出適用的工作分解架構，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、除役策略、成本和效率影響因數評估等，上述均應於建立除役工作分解架構時進行考量。圖 25 為核電廠除役工作分解架構之範例。

WBS no.	TASK / Component
<b>1</b>	<b>POWER OPERATION</b>
<b>1.1</b>	<b>PLANT OPERATION COSTS</b>
<b>1.1.1</b>	<b>Personnel costs</b>
1.1.1.1	Management and administration
1.1.1.2	Information and public relations
1.1.1.3	Radiation and environment protection
1.1.1.4	Chemistry, waste
1.1.1.5	Fire protection, guard
1.1.1.6	Maintenance of buildings and equipment
1.1.1.7	Plant system operation
<b>1.1.2</b>	<b>Operational costs</b>
1.1.2.1	Radiation and environment protection
1.1.2.2	Chemistry, waste
1.1.2.3	Fire protection, guard
1.1.2.4	Maintenance
1.1.2.5	Energy and water
<b>1.1.3</b>	<b>Organizational costs</b>
1.1.3.1	Costs for administrator and information management related to decommissioning
<b>1.2</b>	<b>PROJECT COSTS</b>
<b>1.2.1</b>	<b>Purchasers project management, administration and technical support</b>
1.2.1.1	Project management
1.2.1.2	Planning and controlling
1.2.1.3	Quality management and control
1.2.1.4	Technical support
1.2.1.5	Documentation
1.2.1.6	General and supplier administration
<b>1.2.2</b>	<b>Decommissioning preparation activities</b>
1.2.2.1	Preliminary EIA work
1.2.2.2	Decommissioning planning work
1.2.2.3	Information gathering

圖 25、核電廠除役工作分解架構範例

除役排程為工作分解架構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、選用合理可執行程序和人力工時估算等。其中以停止運轉、開始除役、建築物外釋、廠址外釋和除役結束作為里程碑，如圖 26。

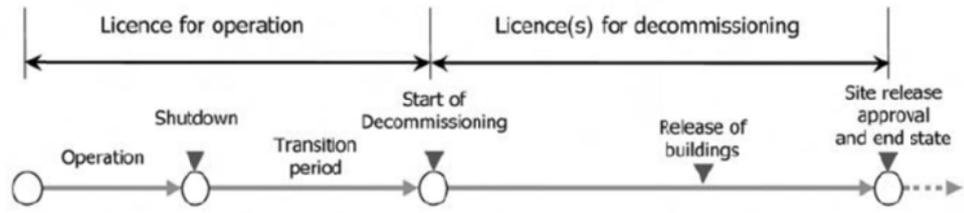


圖 26、除役規劃常用的里程碑

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 27 所示。



圖 27、除役階段之程序架構

## B. 核電廠成本估算

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 28 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，分別為勞動成本、投資成本、開支和偶發事件。依據國際上的經驗，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。

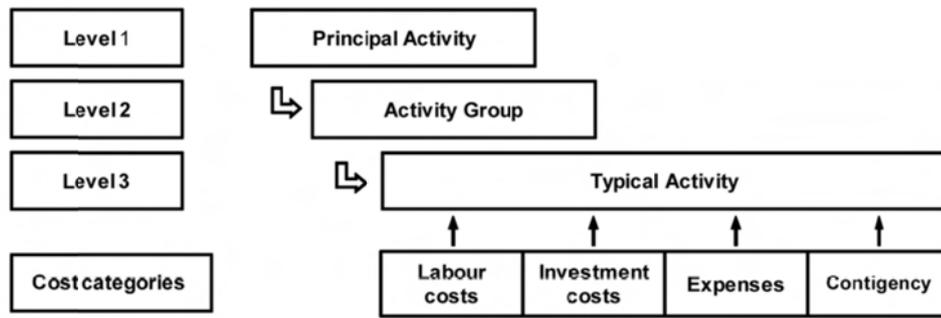


圖 28、ISDC 成本估算之層次架構

### (3) 訓練資料彙整

以下針對人時預估、全系統除污及拆解作業進行說明。

#### A. 人時預估

人時預估主要分為三部分，一為特性調查，二為工作程序，最後即為人時預估。詳細流程如圖 29。

##### (A) 特性調查：

首先從設備廠房之特性調查開始，其中設備廠房包含機械設備、管路、反應器壓力槽及內部組件、廠房等，對上述之設備廠房進行數量、重量、長度與體積等參數之調查。

##### (B) 工作程序：

整體拆解作業可參考 16 個工作程序。其工作程序如表 8。每個工作程序是以工作團隊的方式執行，其工作團隊所需的工作人員類別區分為五種，分別為工程師、領班、保物技術人員、技工及雜工。每個工作程序所需的工作團隊是由此五種人員所組成，不同的工作程序對應至不同的工作團隊組合。

##### (C) 人時預估：

由先前的特性調查結果可得各項系統零件之物理參數(如數量、質量、表面積與長度)，拆解各項系統零件會對應到不同的工作程序與作業生產率，將調查結果參考困難因子後，可以得到工作時間。再將工作時間依工作團隊分配比例，得到各類工作人員的工作時數。

表 8、核電廠除役之工作程序

WP No	WP Description
1a	Preparations of work area - radiological areas
1b	Preparations of work area - non radiological areas
2	Removal of insulation from pipes and components
3a	Dismantling of high-active pipes >DN50
3b	Dismantling of low-active pipes >DN50
3c	Dismantling of pipes up to and including DN50
3d	Dismantling of valves and actuators
4	Internal transports of waste
7	Dismantling and internal transportation of large components and tanks
8	Dismantling of steel (pipe supports, gratings, ladders, beams etc)
10	Dismantling of cables and cable trays etc
11a	Dismantling of HVAC ducts
11b	Dismantling of HVAC components
13a	Pool Liner - preparations, scaffolding and lifting preparations
13b	Pool Liner - decontamination by HP-cleaning
13c	Pool Liner - cutting, dismantling and removal
14	Dismantling and transportation of cranes
15a	Dismantling and transportation of cabinets
15b	Dismantling and transportation of electrical components
16	Dismantling of turbine & generator

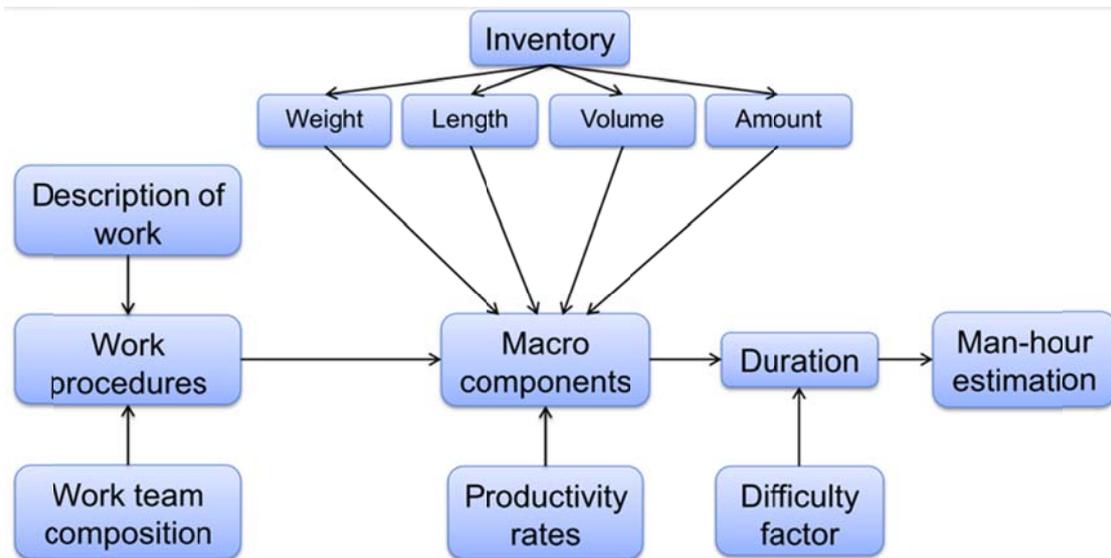


圖 29、除役作業之工作人時規劃流程圖

## B. 全系統除污工作分解架構

一般而言，針對單一工作項目的分解架構通常只往下列出三階即可，過多過細則會造成困擾且無效率。對單一工作項目的三階工作分解架構，其第一階主要為準備工作、現場作業、解散及關閉等三部分，規劃者可依其工作性質增加或是刪減。而再針對第一階的項目往下思考，需要什麼設備或工作。而第三階則是沿著第二階再往下思考規劃所需的設備或工作內容。而針對全系統除污，其三階工作分解架構如下：

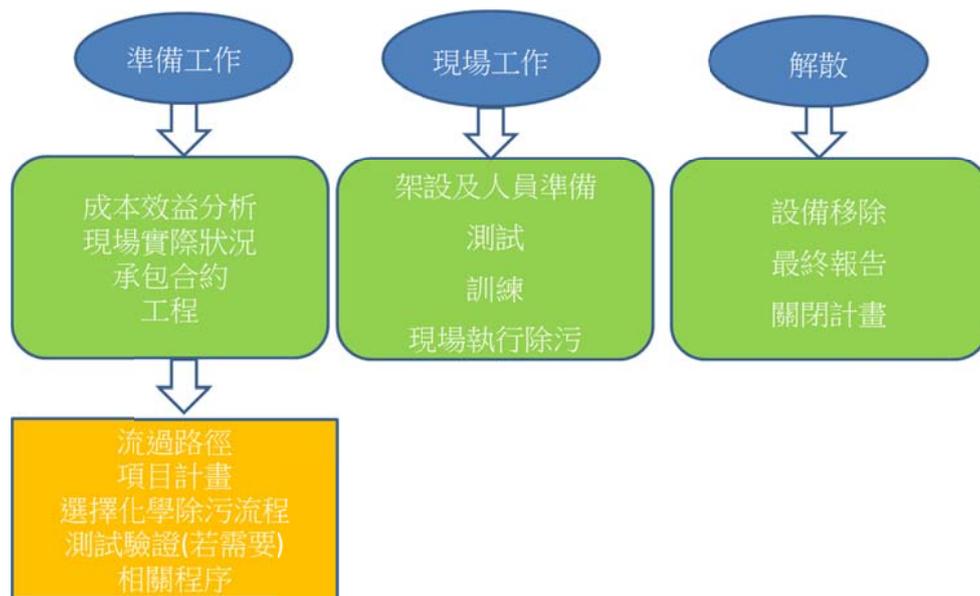


圖 30、全系統除污三階工作分解架構

## C. 拆解作業之工作分解架構及成本

國際上用於成本管理的方法稱成本分解架構(CBS, Cost Breakdown Structure)。其組織架構與工作分解架構不同，成本分解架構中某個項目可能包含不同種類的成本分類。發展成本分解架構時須考慮到下列事項：

- 與時間有關的成本分解架構項目應該與作業有關的項目分開(材料和設備不在此限)；
- 成本分解架構應可與國際公認的成本結構相聯，以便進行比較；
- 針對每個廠房、或相似功能的分解架構，都應由現有的盤點表資料、合理的廢棄物預估推得；
- 每個成本分解架構的項目應該都是有跡可循的。

以反應器壓力槽拆解的 WBS 如下：

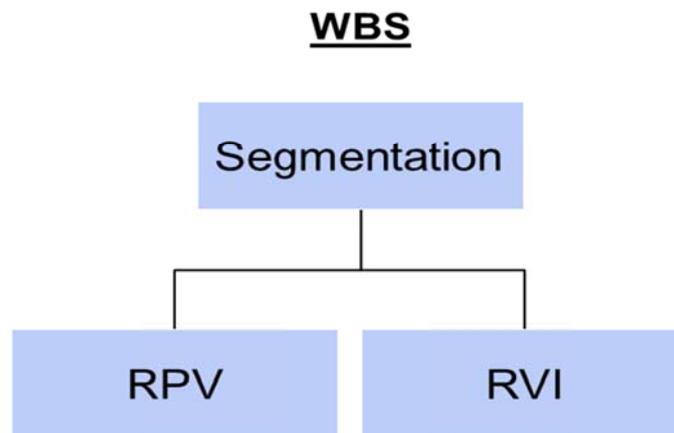


圖 31、反應器壓力槽(RPV)及其內部組件(RVI)拆解 WBS 分類圖

而所有的 BWR 拆解工作(含反應器壓力槽及其內部組件)應包含準備工作、現場作業、包裝和清理。期間成本需考量大部分的設備成本、預備金及風險。下面將分別呈現準備工作、現場作業、包裝和清理、人員組成、消耗品等項目。

- 準備工作：  
3D 模組、虛擬切割、切割計畫、包裝計畫、設計設備及工具、製造設備及工具、測試設備及工具(FAT)、程序規範。
- 現場作業：  
架設、內部組件及反應器壓力槽的切割及包裝、乾燥、運輸廢棄物容器。
- 包裝和清理：  
清理水池(舀或吸)、工具除污及清潔、一般清潔打掃、最終文件(包裝文件及計畫報告)。
- 人員組成：  
計畫經理、現場經理、現場技術員、設計團隊、QA/QC、HP、除污人員、吊車操作人員、預估拆解期間所需的人力。
- 消耗品：  
鋸片、圓盤、濾芯、剪切刀具等其他。

## 6. 核能電廠除役廢棄物估算、管理及包裝

### (1) 廢棄物估算

在電廠除役的過程中，涉及各系統、結構及組件的除污、拆除、以及廢棄物處理、包裝、運輸及處置等作業，在規劃階段，須將作業期程、所需人時、廢棄物管理技術成本等納入考量，因此需要進行廢棄物盤點以獲得規劃所需的資訊。以下就廢棄物估算的範圍及方法進行細述：

#### A. 除役廢棄物的範圍與依據

盤點調查工作原則上盡可能涵蓋除役期間可能產生之廢棄物，根據國外電廠除役經驗，用過核子燃料及用過控制棒並不在除役廢棄物的盤點範圍。

#### B. 除役廢棄物的型態與類別

廢棄物的型態是指其產生的機制，主要分為中子活化與表面污染。

(A) 中子活化：爐心周圍的結構、系統與組件受到中子照射後，在其本體內部生成活化核種；以反應器內部組件組件為例，常見的活化核種，包含了 Co-60、Fe-55、C-14、Ni-59、Ni-63 及 Nb-94 等。

(B) 表面污染：主要來自活化腐蝕產物(Crud)或燃料破損造成分裂產物釋放至反應器冷卻系統。

廢棄物的類別則依其材質分為金屬、混凝土及其他三類。

##### (A) 金屬類

- 反應器壓力槽及內部組件，大型組件(如汽機、主冷凝器)等
- 製程相關設備、閥件、管線、桶槽等
- 鋼筋、管路吊架等

##### (B) 混凝土類

- 結構牆面、結構基礎、生物屏蔽等
- 刨除下來的污染混凝土

##### (C) 其他

- 活性碳
- 污染土壤
- 除役期間產生之二次乾性廢棄物，如防護衣、擦拭紙等

#### C. 除役廢棄物估算的方法與流程

廢棄物盤點工作的第一階段為物理資訊盤點，根據電廠的設備清單、閥件

清單、管線清單、維護管理控制系統(MMCS, Maintenance Management Control System), 將電廠中的各項設備組件依其類別分列於盤點表中, 並輔以終期安全分析報告(FSAR, Final Safety Analysis Report)、竣工報告、工程圖面等資料, 填列各項目的幾何尺寸、重量、數量等物理資訊。若上述物理資訊難以從電廠既有資料取得時, 則須採用其他方式推估, 如透過其他同類型參考電廠類比、類似商用設備類比、實地量測估算、經驗判斷等。

第二階段為輻射資訊估算, 透過建立各系統之比例因數(Scaling factor), 對電廠做全系統的分類, 並根據輻射特性調查的結果, 藉由經驗證的輻射劑量評估軟體, 建立劑量率與表面污染程度之關係, 進而完成廢棄物活度的估算, 最後依法規規範進行廢棄物分類。

## (2) 廢棄物管理

廢棄物管理的實際作為包含廢棄物處理、貯存、運送乃至於最終處置。廢棄物處理以改變廢棄物的型態來達到放射性包容物安定化、廢棄物減容減量等目的。接著廢棄物會於廠內的貯存設施貯放一段時間, 待廢棄物之活度降低後, 運送至最終處置設施進行處置。

以瑞典為例, 在電廠的除役計畫中, 包含了廢棄物的分類、處理、固化、中期貯存等, 符合外釋標準的廢棄物將解除管制, 而極低放射性廢棄物有可能直接在原廠址進行近地表處置, 其餘的廢棄物則交由瑞典的核子燃料及廢棄物管理公司 SKB 進行後續的管理行為。SKB 所負責的範圍包含用過燃料及中低放射性廢棄物的運送及處置, 用過燃料先運往中期濕式貯存設施進行貯存, 之後於封裝廠完成封裝, 最後運往用過燃料最終處置設施進行處置; 中低放射性廢棄物則分為長半衰期及短半衰期, 分別於 SFL 及 SFR 進行最終處置, 目前 SFL 尚未建造, 短半衰期的中低放廢棄物目前暫貯於原廠址, 將來亦有可能於 SFR 進行暫貯。

## (3) 廢棄物包裝

廢棄物容器選用的考量大略可分為監管要求及廢棄物流要求兩方面, 監管要求是以廢棄物的安全性為主, 包含:

- A. 可接受的抗壓強度
- B. 固化的廢棄物型式
- C. 可分裂物質的限制
- D. 有機物含量的限制

- E. 廢棄物、固化劑及包封材料間的物理、化學相容性
- F. 廢棄物包件承受各種事故狀況的能力，如火災及墜落或其他衝擊事件
- G. 放射性物質之固定

而廢棄物流主要以執行面做為考量重點，其內容包含：

- A. 廢棄物裝桶(箱)的難易度
- B. 灌漿和封蓋的難易度
- C. 充填率
- D. 廢棄物處置效率
- E. 彈性
- F. 實績
- G. 與下游程序和設施的相容性
- H. 運送
- I. 安全
- J. 成本

在經過以上各項考量後，訂出各類型廢棄物所使用的容器及裝箱原則。

## 7. 訓練課程問題(Q&A)

目前國內核電廠即將面臨除役之際，本次國外訓練課程雖主要為反應器壓力槽內部組件拆除作業，但仍有全系統除污、分工架構與排程、生物屏蔽拆除作業、人員劑量、廢棄物數量估算等議題。

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。

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，包括技術的理論與實務、是否有相關的研究案例、是否有相關的參考文件、針對核一廠與核二廠的方法、核一廠與核二廠的解決方案。另外，出國前同仁們也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講師與參訓同仁間的熱烈討論，圖 32 為講師與參訓同仁於課程中的討論狀況。



圖 32、講師與參訓同仁於課程中之討論狀況

## (二) 除役實地參訪

本次訓練安排參訪用過核子燃料濕式中期貯存設施 (Clab)、製造於用過核子燃料最終處置使用之廢棄物罐的實驗室(Canister Laboratory)、用過核子燃料處置地下實驗室 (Äspö Hard Rock Laboratory)以及 Barsebäck 核電廠。

### 1. 瑞典用過核子燃料貯存及包裝管理設施(Clab 及 CanisterLaboratory)

#### (1) 參觀 Clab 用過核子燃料濕式中期貯存設施

瑞典核燃料與廢料處理公司(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 以下簡稱 SKB)為瑞典於 1977 年由四家核能公司聯合創建之處理放射性廢棄物公司, 並專職於核廢料的處置事宜。SKB 將短半化期與長半化期(包含用過核子燃料)放射性廢棄物分類處置, 並訂定各自之安全處置的解決方案, 以及各方案完成的時程表。經過數十年來對核廢料處置的研究, 瑞典已發展出完整的核廢料處置系統。包含:

- 1983 年開始運行的運輸系統 (M/S Sigyn)
- 1985 年開始運行的用過核子燃料濕式中期貯存設施 (Clab)
- 1988 年開始運行的短半化期中低放射性廢棄物最終處置場所(SFR)
- 2008 年開始申請用過核子燃料深地層最終處置場所, 用於處置用過核子燃料。

本次訓練於 3 月 1 日(星期三)專車赴 Oskarshamn 參訪 Clab 用過核子燃料濕式中期貯存設施。貯存設施位於 Oskarshamn 市區北方約 20 公里處, 緊鄰 Oskarshamn 核能電廠, 於 1985 年開始運作接收瑞典所有核能電廠用過核子燃料, 並進行所謂中期貯存 (Interim storage)。瑞典用過核子燃料在退出爐心後, 原則上在各核電廠內燃料池貯存至少 1 年至數年後, 即以船運至 Clab (Oskarshamn 核電廠例外, 以陸運為之)附近碼頭, 再陸運轉至 Clab 進行長達 30 至 40 年的濕式中期貯存, 最後目標則於換裝入處置廢棄物罐後, 再以海運轉陸運送至北方約 400 公里處之最終處置場場址 Forsmark。Clab 在 1985 年即興建並進行用過核子燃料接收。為確保安全, Clab 之用過核子燃料池結構與岩體間設有防震動傳遞裝置以降低地震的影響等。

Clab 設施剖面如圖 33, 圖面遠端即為用過核子燃料進廠接收處理設施, 燃料接收後以水下處理方式經多次傳送、分裝後送至兩大地下貯存池貯放。圖 34 為 Clab 接收、處理、分裝、貯存用過核子燃料之操作示意圖, 以下分別說明其基本操作概念: 1)用過

核子燃料以運送護箱運入 Clab 接收區後，先吊運至冷卻區並於其外加裝防護外包裝，以避免運送護箱受到廠內池水之可能污染而不易迅速出廠執行再運送；2)用過核子燃料由核電廠至 Clab 之運送過程中為乾燥狀態，故於此時需灌水入運送護箱內以再度冷卻用過核子燃料，同時也對運送護箱進行初步除污；3)運送護箱吊運至操作池再轉運至換裝池，於此地將運送護箱內用過核子燃料分裝至 Clab 專用之貯存用提籃，最後將提籃送至指定位置貯存；4)運送護箱於保持表面不與 Clab 廠內池水接觸下，循反方向逐步退出廠外再回去執行運送工作。



圖 33、Clab 設施剖面

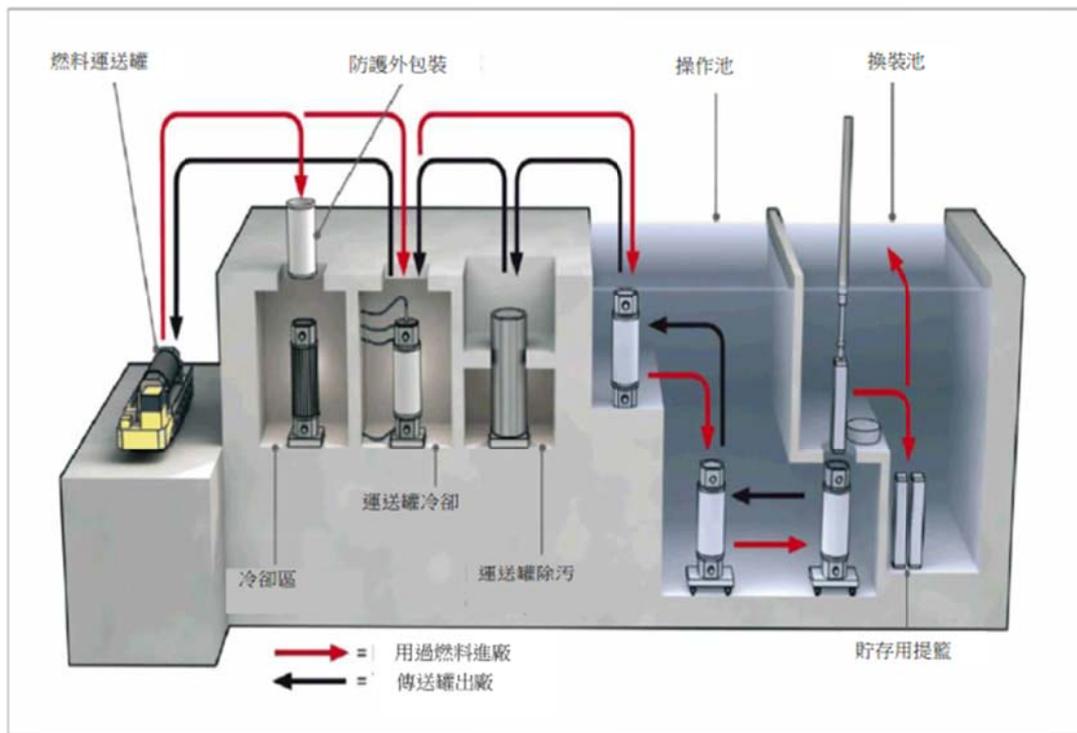


圖 34、Clab 接收、處理、分裝、貯存用過核子燃料之操作示意圖

Clab 原設計總容量為 5,000 噸鈾重之用過核子燃料(BWR 燃料每束總重約 300 kg，鈾重約 186 kg；PWR 燃料每束重約 620 kg，鈾重約 430 kg)，後已擴充至 8,000 噸鈾重之容量，足以容納所有瑞典核電廠壽命期間(含可能之延壽)產生之用過核子燃料貯存之用。Clab 目前每年約接收 220 噸鈾重之用過核子燃料以及一些爐心高放射性廢棄物(如更換下來之爐心偵測設備)，而其員工數約在 100 人左右。如果 2011 年送入申請建造執照之高放最終處置場(Forsmark)安全分析報告於近期內獲得核准，SKB 規劃將於 Clab 現有廠房地面外側同步建立用過核子燃料封裝廠(Encapsulation plant)。此封裝廠之預定位置為圖 33 之近端，即在用過核子燃料地下貯存池之上方靠現有接收廠房處，Clab 的配置與作業概況詳圖 35。另一個值得提到的是地下的水池特殊設計，其結構體考慮地震可能影響，混凝土底座及水池側壁與花崗岩接觸面並非固定而允許移動；而為了監測水池可能的漏水問題並允許進行修補，在池底設計有通道供人員進行檢修。

### The facility

Clab consists of two parts: one above ground and one underground. The buildings on the surface contain offices, workshops and control room. This is also where the spent nuclear fuel enters the facility and is transloaded prior to transport underground. The fuel comes to Clab in a transport cask on a terminal vehicle that resembles a truck.

#### Handling under ground

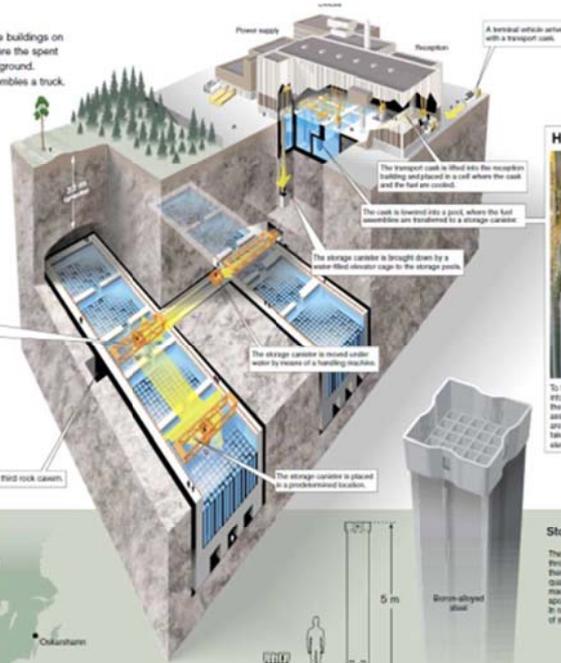


The underground part of Clab consists of two rock caverns. Each rock cavern contains four water pools for storage plus a reserve pool. All handling underground is performed by a handling machine. When a storage canister comes down, the machine is used to lift it out of the elevator cage. The machine then places the storage canister in a predetermined location in one of the pools.

#### Handling above ground

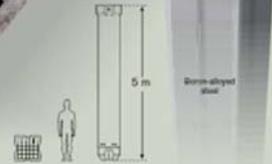


To initialize the fuel, the entire cask is lowered into a water pool. Beneath the water surface, the cask lid is removed, after which the fuel assemblies can be shut out, one by one. They are placed in storage canisters before being taken down to the rock caverns in a water-filled elevator cage.



#### Facts about Clab

<b>Location</b>	Next to the Oskarshamn nuclear power plant
<b>Start of construction</b>	1980
<b>Start of operation</b>	1985, second cavern finished in 2005
<b>Capacity</b>	8,000 tonnes of spent nuclear fuel
<b>Reception</b>	About 200 tonnes of uranium plus six storage canisters of core components per year
<b>Surface facility</b>	Reception, offices, ventilation, electricity
<b>Underground facility</b>	Two rock caverns with eight storage pools, 40 metres beneath the surface
<b>Personnel</b>	About 80 Full-Time Equivalents



#### Storage canisters

The fuel will remain in the storage canisters throughout the storage period at Clab. They therefore have to meet stringent requirements on quality and design. The storage canisters are made of steel and specially designed to prevent spontaneous nuclear fission during storage. In recent years, BND has developed a new type of storage canister that holds more fuel.

圖 35、Clab 的配置與作業概況

## (2) 參觀廢棄物罐實驗室

SKB 於瑞典執行用過核子燃料最終處置場址設置計畫，已提送該國主管機關申請建造案。本次訓練特別安排 3 月 2 日(星期四)至 SKB 於 Oskarshamn 海港碼頭旁的廢棄物罐實驗室進行參訪。

廢棄物罐實驗室是 SKB 所屬的重要研發機構。該實驗室從 1988 年開始營運至今，用途為廢棄物罐封裝技術與封裝後安全研究相關問題之發展研究中心，實驗室主要的作業在於開發廢棄物罐頂蓋與廢棄罐之銲接技術，以及研發銲接後的相關品質查驗與非破壞性驗證技術。

SKB 在廢棄物罐開發的摩擦攪拌銲接法(Friction stir welding, FSW)以及高真空電子束銲接(High Vacuum Electron Beam Welding, EBW)技術，已達實際應用程度。實驗室同時提供廢棄物罐的詳細結構計算和驗證實驗，以及廢棄物罐研發、製造和組裝過程中的非破壞性檢測。

SKB 在製作盛裝用過核子燃料之廢棄物罐之工法，主要分為外部銅殼與內襯鑄鐵兩部分。銅殼為廢棄物罐的最外層容器結構，可分為殼體、頂板、底板三組件。製作的工法可分為滾壓製作、熱擠出和分段抽製。滾壓製作是先將銅塊滾壓成板狀，並於彎曲加工成圓桶形後進行縱向銲連，該法的縱向銲道易受熱影響會改變其晶粒結構及應力分布，此法適用於厚約 30~40 mm 的薄銅管。熱擠出則是先將銅錠置入壓製機組中，初步將銅塊加熱擠壓成中空銅管，再置入具有 30,000 噸壓力容量的機組中壓製成所需厚度之成品。分段抽製則是先將銅錠熱壓成較大直徑之短銅塊，置入具有 4,000 噸之壓力容量的垂直式特殊機具中壓製，然後再置於具有 1,500 噸壓力容量的水平式特殊機具中壓製，在製程中需再加熱壓制。另銅罐的頂部和底部則採用高溫鍛造方式製作。

廢棄物罐實驗室配置包含：

1. 燃料吊裝天車
2. 摩擦攪拌銲接機
3. 電子束銲接機
4. X 光攝影控制機
5. 銲接超音波檢測機
6. 廢棄物罐組件超音波檢測區
7. 氣墊搬運設備。

在參訪期間，由 SKB 解說人員說明廢棄物罐製作方法、燃料裝填流程、封銲技術以及各項設備的用途。如圖 36 至圖 39。



圖 36、銅製廢棄物罐與內部鑄鐵展示



圖 37、摩擦攪拌銲接法鑽頭與銲接成果展示



圖 38、摩擦攪拌銲接法設備



圖 39、燃料裝填設施

## 2. 瑞典放射性廢棄物處置研究設施(Äspö Hard Rock Laboratory)

結束廢棄物罐實驗室參訪行程後，即前往同樣由 SKB 營運之 Äspö 地下實驗室(又稱硬岩實驗室，Hard Rock Laboratory, HRL)進行參訪。

Äspö 硬岩實驗室(Hard Rock Laboratory, HRL)於 1995 年開始運轉。

Äspö 地下實驗室的營運組成分為六個部門：

- (1) 土工障壁與岩石工程(Geotechnical barriers and rock engineering, TDG)：主要負責安裝緩衝材料、回填材料技術的研發、測試與驗證，並執行處置孔和探勘鑽孔的回填密封技術研發。
- (2) 機械與系統工程(Mechanical and system engineering, TDM)：主要負責處置場所需之設備、機具與載具的研發、測試與驗證。
- (3) 實驗部門(Project and experimental service, TDP)：主要負責在 Äspö HRL 實驗相關之管理、設計、安裝、量測與監測等。
- (4) 公關部門(Public relations and visitor services, TDI)：執行 Äspö HRL 相關公關服務與資訊。
- (5) 廠房維護部門(Facility operation, TDD)：主要負責 Äspö HRL 辦公室與地下廠房的運轉維護，並開發、運轉和維護監管系統。
- (6) 品管部門(Administration, quality and planning, TDA)：進行計畫、報告、品質、經費與環境等相關的管理工作。

實驗室建造之目的主要作為用過核子燃料最終深地層處置場之設計與建造先期研究。地下實驗室入口位於 Simpevarp 半島，以螺旋隧道下降至地下深度 460 m 的 Äspö 南端。隧道總長約 3,600 m，隧道開挖主要以傳統的炸挖方式進行，最後的 400 m 才以全斷面挖掘機(Tunnel Boring Machine, TBM)進行直徑 5 m 的開挖，地下隧道與地面以一條升降豎井與兩條通風豎井連接。由地表地質探勘可知 Äspö 地區主要岩層有四種，分別為 Äspö 閃長岩(diorite)、Småland(Ävrö) 花崗岩(granite)、細粒花崗岩(fine-grained granite)和綠岩(greenstone)(Rhén et al., 1997)，而由鑽井地層研究發現在主要岩層之外並夾雜角閃岩(amphibolite)、玄武岩(basalt)或偉晶岩(pegmatite)岩脈(Staub et al., 2003)。參訪照片如圖 40、圖 41。



圖 40、垂直處置示範坑道



圖 41、設施載運廢棄物罐工程車

### 3. 瑞典 Barsebäck 核電廠反應器壓力槽內部組件拆解參訪

本訓練於行程最後一天(3/5)至 Barsebäck 核電廠參訪，主題為反應器反應器壓力槽內部組件拆解。Barsebäck 核電廠位於瑞典南方，鄰近丹麥首都哥本哈根，當時規劃在此建立核電廠是考量可以同時提供瑞典南部及丹麥電力，但 1979 年發生三哩島事件，隔年瑞典進行全國性的公民投票，針對核電廢除的議題進行表決，於此之後，瑞典國會決議展開逐步廢核作業；而在丹麥方面，也因為三哩島事件發生，其國會於 1985 年投票表決通過在丹麥未來的能源規劃中，將不會使用核能，並積極呼籲瑞典關閉鄰近的 Barsebäck 核電廠，因此，Barsebäck 核電廠只有走上關閉一途，一、二號機分別於 1999 與 2005 年停機。

Barsebäck 核電廠一、二號機的反應器壓力槽及內部組件拆解計畫於 2016 年 9 月開始進行，預計 2019 年 6 月完成。該計畫先由反應器壓力槽內部組件拆解著手。

Barsebäck 核電廠內部組件拆解採水下機械切割的方式，進行作業時所需的設備包含廠房吊車與兩座橋架。該廠房吊車於建廠時設定的額定荷重為 430 公噸，曾用於吊運整體反應器壓力槽，目前管制使用的荷重上限為 130 公噸。除了廠房吊車之外，設有工作橋架(Working Bridge)與燃料吊運橋架(Fuel Reloading Bridge)，兩橋架可於切割池兩側同時作業，分別進行不同組件的切割，單一橋架上通常配置兩位作業人員，一位控制橋架移動，另一位控制切割工具。

在實際切割作業之前，所有標的組件都先經過評估，依照其外型特性及盛裝容器的限制，規劃出最適當的切割方式與廢棄物尺寸。每件廢棄物及盛裝容器皆予以編號，廢棄物的裝箱方式，如幾號廢棄物裝載於幾號容器、該容器內廢棄物應如何堆疊等皆於切割作業進行之前完成規劃。於切割作業進行時，除了依照事前規劃執行切割及裝箱外，每件廢棄物之輻射劑量率及實際重量等資訊亦詳細記錄。

目前已完成切割的組件包含控制棒導管(Control Rod Guide Tube)、蒸氣乾燥器(Steam Dryer)、汽水分離器(Steam Separator)及爐心側板頂蓋(Core Shroud Head)。控制棒導管的切割使用了圓盤鋸及壓穿式電剪，圓盤鋸用於橫向切割，先將控制棒導管之兩端移除，再於中間處下刀以將其分割為適當長度的圓管；而壓穿式電剪則用於縱向切割，將前述圓管沿長度方向進行剪切，進行兩道剪切後，該圓管分為兩片具弧度之片狀廢棄物，於裝箱時可有效地利用空間。蒸氣乾燥器的切割使用圓盤鋸，切割過程中所使用的

圓盤鋸不是只有單獨一種，基本上圓盤鋸本體模組都是相同的，只是隨著切割方向、夾持位置外型的改變，而將本體模組安裝在不同的載具上。

Barsebäck 核電廠規劃使用 BFA-Tank 承裝內部組件切割完成之廢棄物，在廢棄物裝箱及運送過程中，所使用的設備除了主要的 BFA-Tank 以外，其附屬設備還包含提籃 (BFA-Cassette)、運送容器(Transport Box)、提籃屏蔽吊具(Wet Hood)等。在切割進行之前，先將提籃吊至池底放置，以利切割後之廢棄物直接在水中裝載，提籃裝載完成後則使用提籃屏蔽吊具吊放至預先放置於運送容器中之 BFA-Tank 內，為了準確地將提籃放入 BFA-Tank 內，吊運過程中可配合攝影機操作，最後進行 BFA-Tank 及運送容器的封蓋並完成輻射劑量率量測，將容器運往中期貯存設施貯存。

### (三) 訓練與參訪心得彙整

心得將以反應器內部組件切割、生物屏蔽拆解、系統化學除污及瑞典系統經驗學習呈現。

#### 1. 反應器內部組件切割

反應器內部組件切割技術以機械式切割為主體，主要優勢有大幅度降低二次廢棄物量體、切屑容易收集、切割池池水能見度(Visibility)容易維持不需要持續過濾、作業機具可靠度高，切割作業人員集體劑量低。

反應器內部組件切割主要機械設備有圓盤鋸、帶鋸機、液壓剪切工具、液壓夾具、模組化連接吊桿與結構件，配合工件旋轉盤(Turn Table)、爐穴中心柱(Center Pillar)、水下耐輻射攝影機、工作橋架(Working Bridge)，進行各類組件切割作業。瑞典核電廠反應器內部組件切割機具與作業規劃，值得學習之處整理如下：

- (1) 先期縝密規劃，利用 3D 技術模擬空間規劃，建立特定組件模擬切割規劃，預先建立整套切割步驟與相對應之裝箱計畫(package plan)，切割機具與操作預先在 Mockup 廠房設備中驗證。
- (2) 機械設計簡潔(keep it simple)、操作介面具備負載回饋顯示增加可靠度、模組化設計具備高度組合彈性。現場切割作業僅需二名工作人員。
- (3) 善用齒條、軌條、螺桿、液壓缸、鋁擠型等工業級產品，簡化設備設計組裝與保養維護，不鏽鋼結構件銲接組合後表面電解拋光處理，減少污染附著並易於除污。
- (4) 水下轉動設備由液壓驅動改為防水馬達配合減速機作動，增加操控方便性，減少安裝吊運時液壓管路操作干擾與後續除污工作，降低現場作業環境噪音。
- (5) 模組化剪切工具與夾具仍採液壓系統驅動液壓缸，液壓流體採用 Ultra-Safe 620 Hydraulic fluid，工作壓力可達 1,000 bar，各種剪切工具與夾具可彈性組合更換。
- (6) 帶鋸機 90 度調整鋸片方向之設計，增加切割方向工作可能性。
- (7) 廢棄物減容：管狀物體應盡量減容，厚管採高壓減容、薄管(如 CRB Guide Tube)採剪切減容，而乾燥器減容效益不高。

## 2. 生物屏蔽拆解

目前執行中的 SVAFO R2 Reactor 生物屏蔽拆解，主要採用 Brokk 400 remote controlled demolition robot 可遙控混凝土敲鑿機具，為可參考選用之機具。

美國 Big Rock Point、La Crosse，德國 Stade 等電廠，生物屏蔽拆解主要仍採用鑽石索鋸(diamond wire)，建議收集最近除役核電廠所使用的工法與機具，再行深入評估，尤其是鋼構 Liner 切除、鋼構與混凝土分離工法、污染與可外釋混凝土分離工法、如何避免交叉污染等工程關鍵技術，應再參考國外電廠除役案例。另當反應器壓力槽移除後，生物屏蔽內爐穴區的空間劑量率為可選用工法的主要限制條件之一，建議應先行評估並收集國外資訊，才能作為選擇最佳工法(Best Available Technology, BAT)的參考依據。

未活化部份混凝土與鋼構解除管制為生物屏蔽拆解工法選擇關鍵，生物屏蔽活化範圍並非線性分佈，且混凝土中可能有 Hot Spot 存在，需研究建立分析與取樣技術，以確保能將污染廢棄物數量盡量減低。

## 3. 系統化學除污

有關燃料在爐心下，欲進行再循環管路系統除污時，特殊的塞管方式、化學藥劑循環機制、反應器壓力槽內水頭壓力高於再循環管路系統內化學藥劑溶液壓力等作業方式，應可防止燃料與化學藥劑接觸之可能性，但仍需收集國外經驗、與各專家學者進一步研究詳細步驟，以提供國內核電廠除役時之參考。

電廠停機後，優先進行主要污染系統化學除污，應是成本效益最高的作法，因機組已不再運轉，泵、閥、熱交換器、管內部將不再有新增污染附著，在二次廢棄物可容忍的條件下，應要求提升高接觸劑量組件的除污因子，以確保能大幅度降低空間劑量，並達到最大的成本效益。再循環管路、RHR 管路很多是大尺寸管路，除污後也具備較高的解除管制效益。

## 4. 瑞典系統經驗學習

有關於 SKB 之放射性廢棄物管理，值得學習之處彙整如下：除役電廠 Waste Plan 為除役計畫重要文件；明確廢棄物分類標準；放射性廢棄物盛裝容器標準化；廢棄物減容為既定政策，尤其是廢棄物解除管制(Clearance)；場址地表一公尺以下的無污染結構

物得就地掩埋；處置場接收標準明確，特定廢料容器表面劑量率可高達 500 mSv/hr；低放處置場已設置運轉且後續擴充計畫按規劃執行中；用過核子燃料集中濕式貯存在 Clab，且已規劃後續擴充計畫；用過核子燃料處置封裝方式已確立，自主研發之封裝關鍵技術成熟；高放處置場廠址已確定，申照審查中；高放之封裝、運輸、接收、處置、封填，以及再取出等關鍵技術均已成功驗證。

## 四、建議事項

國內使用之核能設施，包括核能電廠，已面臨進入其生命週期之除役階段。核能設施運轉的後端階段工作仍然攸關環境安全。瑞典的核能工業供應全國約一半的電力，且投入核能後端營運規畫較早，其經驗值得借鏡，相關建議如下：

- (一) 瑞典 **Barsebäck** 核能電廠設置目的為供應瑞典南部地區因為居住人口增加及工商業發展所需的電力；目前因為政治議題而提前停止運轉進入除役。電廠工作人員小部分留下執行除役工作，大部分移往瑞典另一核能電廠 **Ringhals** 繼續服務。核能電廠除役經費由後端基金支應。瑞典經濟發展果實全民共享，核能設施除役需求國家承擔，務實精神值得參考。
- (二) 瑞典設置核燃料與廢料處理公司(**SKB**)，專職於核廢料的處置事宜。國內處置場尚未備妥，即將面對核能電廠除役，及早規劃建立國內放射性廢棄物容器系統，將極有助於解決目前困境，利於未來國內核能電廠除役的順利進行。
- (三) 反應器內部組件拆解為核能電廠除役程序中，具有技術挑戰性的工作項目。國內核能電廠以核一廠最有可能先進入除役拆解階段。及早評估規劃核一廠 **BWR** 反應器內部組件拆解技術需求，有助於建立國內六部核能機組未來拆解除役的關鍵技術掌握能力。
- (四) 核能設施組件經過長時間運轉而具有放射性，基於放射性物質跨境處理、處置之困難，除役工作大部分都必須是本土化執行。核能設施具有運轉、維護經驗之人員，經由訓練，建立除役專業技術，為確保國內大型核能設施順利安全除役所必須，應持續進行。