

出國報告（出國類別：實習）

核二廠除役研習計畫

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：程維慶 核機課長

鄭富聰 主辦儀控維護專員

張全斌 主辦汽機維護專員

陳勇志 反應器維護專員

廖弘宇 核機維護專員

王致勝 放射性廢料運儲專員

劉紹楷 品質檢驗專員

派赴國家：瑞典

出國期間：106年2月11日至

106年3月08日

報告日期：106年4月26日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：除役研習計畫

頁數94 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/ 陳德隆 / (02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

程維慶/台灣電力公司/核一廠/核機課長/ (02) 26383501-3265

鄭富聰/台灣電力公司/核一廠/主辦儀控維護專員/(02) 26383501-3354

張全斌/台灣電力公司/核一廠/主辦汽機維護專員/ (02) 26383501-3385

陳勇志/台灣電力公司/核二廠/反應器維護專員/ (02)24985990-2346

廖弘宇/台灣電力公司/核二廠/核機維護專員/(02)24985990-2642

王致勝/台灣電力公司/核二廠/放射行廢料運儲專員/ (02)24985990-2575

劉紹楷/台灣電力公司/核後端處/品質檢驗專員/(02)23657210-2342

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：106 年 2 月 11 日至 106 年 3 月 8 日 出國地區：瑞典

報告日期：106 年 4 月 26 日

分類號/目

關鍵詞：核能電廠除役 瑞典 西屋 爐心組件切割

內容摘要：

本次出國係由「核二廠除役許可申請及除役作業規劃」案承包商核研所委請分包商西屋公司規劃辦理赴瑞典研習。計畫內容包含除役技術（工作人員劑量估算、成本估算、廢棄物數量估算等）、切割技術及實務（RPV 及內部組件切割實務、多種切割方法訓練、廢棄物包裝訓練等），並安排參訪除役中電廠（Barsebäck）及 SKB 設施（集中式用過核子燃料中期貯存設施、Canister Lab、Äspö Hard rock Lab）。

目錄

零、 概述.....	9
一、目的：	9
二、行程：	9
壹、韋斯特羅斯西屋公司切割實習.....	10
一、至 瑞典 韋斯特羅斯 西屋公司 實習：	10
(一)Reactor Vessel Internal Segmentation.....	10
(二)切割工具操作實習訓練	17
(三) 機械切割方式之經驗	25
(四)心得及建議事項	25
二、生物屏蔽體拆除(Bioshield Demolition)	27
(一) 生物屏蔽體結構組成.....	27
(二) 水泥結構拆除技術及工具.....	27
(三) 生物屏蔽體活化深度.....	28
(四) 生物屏蔽體拆除規劃及準備.....	29
(五) 拆除生物屏蔽體技術比較.....	30
(六) 課題學習—SVAFO R-2 研究型反應器之生物屏蔽體拆除工法案例分享	32
(七) 心得.....	33
(八) 建議事項.....	33
貳、核能電廠除役作業人員劑量評估與除污作業.....	34
一、核能電廠除役作業人員劑量評估	34
(一)背景	34
(二)除役人員劑量評估方法論	34
(三)國際電廠經驗	36
二、除污作業	40
(一)背景	40
(二)除污考量與技術	41

(三)NITROX 除污方式	43
(四)燃料未移出之除污方式	44
(五)執行除污作業的流程	45
三、心得.....	45
四、建議.....	45
參、成本預估與工作分解結構.....	47
一、成本組成	47
二、ISDC	48
三、CBS	49
四、不確定性分析.....	50
五、WBS	51
六、心得與建議	53
肆、除役現地實習.....	54
一、除役實地參訪心得	54
(一). 瑞典用過核子燃料貯存及包裝管理設施(CLAB+CLINK)	54
(二). 瑞典放射性廢棄物處置研究設 (ASPO)	65
(三). 瑞典 Barsebäck NPP 反應器內部組件拆解	70
二、建議	75
伍、附錄.....	77
附件一、訓練課程資料及受訓名單.....	77
附件二、瑞典 Barsebäck NPP 參訪資料	79

圖目錄

圖 1 典型之沸水式反應爐內組件機械切割方式	13
圖 2 雪地行走防滑訓練	17
圖 3 夾持工具	18
圖 4 夾持工具操作訓練	18
圖 5 剪切工具實習情形	19
圖 6 圓盤鋸切割操作實習現場照片	20
圖 7 帶鋸切割模擬操作實習	21
圖 8 壓縮工具實習過程	22
圖 9 Nibbling Tool 外觀圖示	23
圖 10 Nibbling Tool 切割實習	23
圖 11 水泥結構表面汙染移除工具	26
圖 12 水泥結構表面汙染移除工具	27
圖 13 Barsebäck 1 電廠停機後 3 年之劑量數據	28
圖 14 影響除役作業人員劑量因素	34
圖 15 大修時期對人員劑量的貢獻度	35
圖 16 各核種對人員劑量之貢獻度	36
圖 17 各系統對人員劑量之貢獻度	37
圖 18 核一廠#1EOC-18 及#2EOC-17 再循環管路化學除汙成效	39
圖 19 NITROX 與 CORD 的樹脂量與除汙時間比較	43
圖 20 NITROX 與 CORD 的溶解速率與草酸鐵沉澱的風險比較	43
圖 21 ISDC 基本架構	48
圖 22 基本成本、準備金與風險示意	49
圖 23 成本結構隨時間之變化	50
圖 24 WBS	
圖 25 WBS 評估人員時數	

圖 26、瑞典放射性廢棄物處理系統	53
圖 27、參訓學員於 CLAB 外合照	55
圖 28、CLAB 設施剖面	55
圖 29、瑞典 CLAB 中期貯存設施運作圖	56
圖 30、地下貯存池的實景照	56
圖 31、參訪人員於 SKB 廢料罐實驗室外合照	59
圖 32、廢料罐設施簡報	59
圖 33、使用高真空電子束銲接(High Vacuum Electron Beam Welding, EBW)技 術	60
圖 34、各式旋轉接頭	60
圖 35、廢料罐本體和蓋板焊接完成展示	61
圖 36、摩擦攪拌銲接設備	61
圖 37、內襯鑄鐵的製作方法	62
圖 38、銅殼製做方式	63
圖 39、內襯鑄鐵放入銅殼之展示模型	63
圖 40、The Äspö Hard Rock Laboratory is situated in the Misterhult Archipelago close to the Oskarshamn nuclear power plant.	66
圖 41、The Äspö Hard Rock Laboratory	67
圖 42、The Äspö Hard Rock Laboratory	67
圖 43、Äspö 試驗室安排導遊解說員向一群遊客解說情形	68
圖 44、反應器內部組件切割計畫(蒸氣乾燥器)	70
圖 45、Barsebäck 電廠不銹鋼儲存箱	71
圖 46、Barsebäck 工作臺車(左邊)	72
圖 47 Barsebäck、電廠反應器內部組件示意圖	78
圖 48 Barsebäck、電廠與對岸丹麥首都哥本哈根(擷取自網路)	79

表目錄

表格 1 西屋公司之爐內組件機械切割經驗	10
表格 2 鑽石線鋸優缺點	29
表格 3 打擊拆除-遙控機具優缺點	30
表格 4 商業化之化學除污技術	42
表格 5 處置介質相對貢獻度一覽表	64

零、概述

一、目的：

核二廠一、二號機分別自民國 70 年 12 月及 72 年 3 月開始商業運轉，經過 40 年運轉執照有效期，將分別於 110 年 12 月與 112 年 3 月屆滿；按照我國之「核子反應器設施管制法」第 23 條之規定，台電公司須於核二廠預定永久停止運轉(以下簡稱停機)3 年前向行政院原子能委員會提出核二廠之除役計畫，取得除役許可，才可進行除役；也就是台電公司必須在 107 年 12 月前向原能會提出核二廠之除役計畫，以取得除役許可。因此，台電公司預定於 107 年 12 月前，將「核二廠除役計畫」併同其他申請文件，向原能會提出核二廠除役許可申請。

各項除役之議題是相互關聯的，並無法獨立考量，例如人力運用將會影響到除役組織架構及除役成本，進而影響到除役基金運作；而用過核子燃料貯存規劃，會影響用過核子燃料運離反應器廠房或燃料廠房時間，甚至影響廠址外釋等。然而，由於台電公司為國營電力公司，核二廠除役將依照國家政策及法規辦理，因此，有部分議題基本上可假設已經有明確方向或規定，包括預定永久停機日期、除役方式及除役基金等議題。依據目前政府政策指示，核二廠除役時程將於運轉 40 年永久停機後即進入除役階段，我國法規要求 25 年內完成除役，而除役所需費用將由核能後端營運基金負責支應。

另由於我國低放射性廢棄物最終處置場尚未完成，未來核二廠除役產生的低放射性廢棄物，並無法像美國、日本、德國、法國、瑞典、西班牙等核能國家，可將除役之低放射性廢棄物直接運往最終處置場進行處置，因此，低放射性廢棄物的營運在核二廠除役需要過渡規劃。

考量本公司現已開始執行前揭電廠的除役規劃作業，為加強電廠同仁對除役相關技術及實務之了解，並能與除役中電廠就實際面臨的問題與技術進行討論以建立良好關係，且可赴放射性廢棄物營運專責機構(SKB)了解其設施及實驗室，對旨案之執行與未來核電廠除役作業推動有相當助益，實有必要派遣適當人選出國參與本項訓練。讓本項出國計畫的同仁能藉此一計畫，能汲取更多國外核電廠除役技術及實務相關經驗，對未來實際參與執行除役工作將有一定的幫助。

二、行程：如附件一。

壹、韋斯特羅斯西屋公司切割實習

一、至 瑞典 韋斯特羅斯 西屋公司 實習：

(一)Reactor Vessel Internal Segmentation

本項課程中，主要說明西屋公司以往及進行中之核能電廠爐內組件之的除役拆除切割經驗、比較各種不同之切割方式優劣及西屋公司進行機械切割方式之整體規畫作法及經驗，並由參訓學員實際操作多種機械切割所使用之機具，模擬切割 mockup 爐心組件。

核電廠爐心內組件，於電廠除役拆除時會採取切割或拆解之方式，來減少除役廢棄物之體積及方便管理。

切割作業技術可概分為冷切割及熱切割兩類。冷切割方法，又稱為機械式切割，例如鋸切、剪切、研磨、鑽石索鋸、磨料水刀等。熱切割方法有氧氣切割、電漿火炬、氧乙炔火炬、放電加工、金屬破碎機等。各種金屬熱切割及機械式切割皆有其優缺點，以目前之電廠除役經驗及已驗證之技術，除磨料水刀外之機械式切割方式較為實用且無其它空浮、水質清晰度、二次廢棄物之影響，亦為本次實習之西屋公司之專長技術。

根據西屋公司之經驗，採用機械式切割技術之優點如下：

1. 不會有汙染碎屑漂浮於水面上也不會有空浮氣體產生。
2. 整個切割過程中皆能保持良好的水中能見度。
3. 切割碎屑維持沉於池底狀態。
4. 切割工作完成後，切割碎屑易於以各種不同之清理設備收集。
5. 僅會產生少量之二次廢棄物需處理。
6. 幾乎所有厚度及材質之物件皆能被切除。
7. 使用安全、最佳化且經測試驗證之切割設備，切割期間僅需極少維護。
8. 切割技術可適用於沸水式及壓水式之爐內組件。

歐洲多座電廠於運轉階段即因進行功率提昇等原因而有部分爐心組件進行更換，故於運轉階段即有針對爐心內組件進行切割之經驗。西屋公司執行過之機械切割經驗如表格 1：

表格 1 西屋公司之爐內組件機械切割經驗

	機組名稱	組件名稱	執行年份
以往執行過之經驗	Forsmark 2	Core Shroud	2000
	Forsmark 2	Core Support Grid	2000
	Forsmark 1	Core Shroud	2001
	Forsmark 1	Core Support Grid	2001
	Oskarshamn 2	Core Shroud Cover	2003
	Oskarshamn 2	Core Support Grid	2003
	Oskarshamn 2	Feed Water Spargers	2003
	Oskarshamn 2	Core Spray Riser Pipes	2003
	Oskarshamn 2	Test Channels	2003
	Oskarshamn 2	Core Shroud Cover	2004
	Oskarshamn 1	Core Support Grid	2004
	Oskarshamn 1	Core Spray Riser Pipes	2004
	Oskarshamn 1	Test Channels	2004
	Olkiluoto 2	Steam Separators, 19 pcs	2004
	Olkiluoto 2	Core Support Grid	2004
	Olkiluoto 2	Core Shroud Cover	2004
	Forsmark 3	Core Spray Piping & Support	2005
	Olkiluoto 1	Steam Separators, 19 pcs	2005

	Olkiluoto 1	Core Support Grid	2005
	Olkiluoto 1	Core Shroud Cover	2005
	Oskarshamn 3	Control Rod	2006
	Olkiluoto 1	Steam Dryer	2008
	Olkiluoto 1	Control Rod Shafts, 120pcs	2009
	Olkiluoto 2	Control Rod Shafts, 81pcs	2009
	Forsmark 3	Control Rod Shafts, 46pcs	2009
	Forsmark 2	Steam Dryer	2010
	Forsmark 2	Core Shroud Cover	2010
	Forsmark 3	Control Rod Shafts, 62pcs	2010
	Forsmark 1	Steam Dryer	2011
	Forsmark 1	Core Shroud Cover	2011
	Forsmark 3	Core Shroud Cover	2012
	Grand Gulf	Steam Dryer	2012
	Olkiluoto 2	Steam Dryer	2013
	Oskarshamn 3	Control Rod Shafts, 27 pcs	2013
	Studsvik R2	Iodine Rigs	2013
	José Cabrera	Upper & Lower Internals	2013
	Oskarshamn 3	Core Shroud Cover	2013
	Oskarshamn 3	Steam Dryer	2014
	Peach Bottom	Steam Dryer	2014
	José Cabrera	RPV	2015
	Mühleberg	Fuel channels	2016
已取得合約	Chooz A	RPV, Upper & Lower Internals	2017

將執行項目	Barsebäck 1 & 2	All reactor vessel internals	2016
	Philippsburg 1	All reactor vessel internals	2017
	Neckarwestheim 1	Upper & Lower Internals	2017

參考 EPRI 之經驗，在擬定反應器內部組件切割計畫前，應詳細調查及考慮以下因素：

1. 評估反應器內部組件的活度。
2. 確認各種金屬廢棄物可再回收之處理方式。
3. 廢棄物包封容器的尺寸。
4. 處置場接收標準（最大活度限值，總重限值，輻射劑量限值等）。
5. 運輸、交通限制等因素（總重限值，輻射劑量限值等）。
6. 放射性廢棄物暫時貯存設施。
7. 決定切割尺寸及順序。
8. 決定封裝方式。
9. 評估及選擇既有的切割技術，視需要開發新的切割方法，並決定哪些內部組件需切割。

典型之沸水式反應爐其爐內組件之機械切割使用切割方式如圖 1 所示：

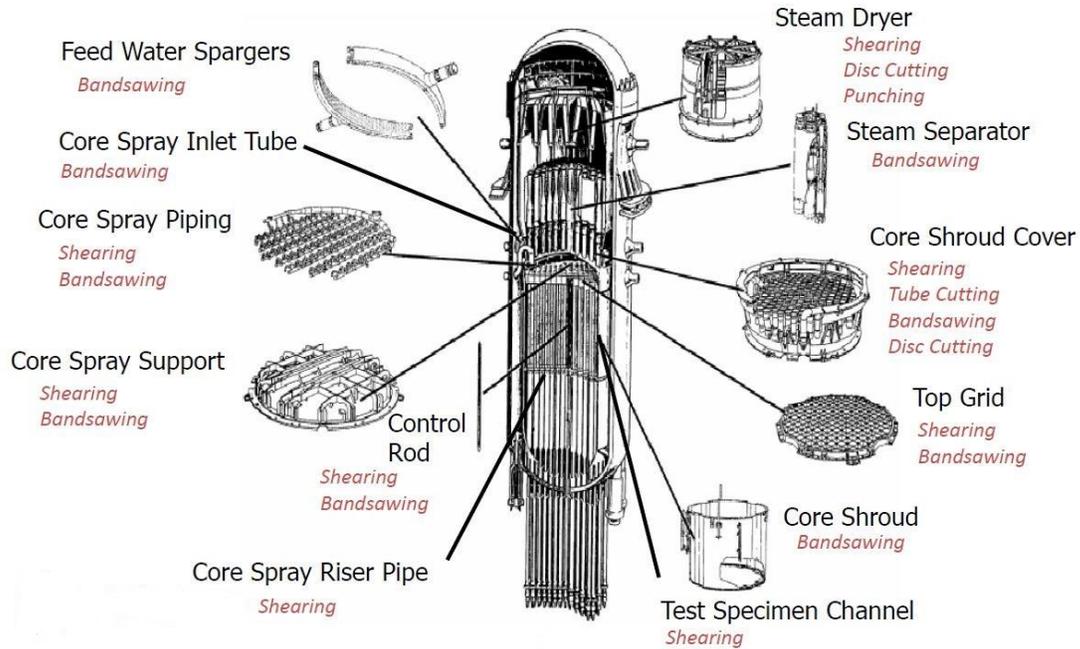


圖 1 典型之沸水式反應爐內組件機械切割方式

由於反應器內部組件切割影響著整體除役拆除計畫進度，EPRI 亦曾提供成功完成切割案例需注意之關鍵要項如下：

1. 擬定詳細的各項內部組件切割計畫，包括任務，職責和選擇最適切割工具是整體工作否順利完成的關鍵因素。
 - (1) 早期美國多數電廠選擇磨料水刀 (AWJ)，但 Yankee Rowe 核電廠使用電漿電弧 (Plasma Arc) 切割，Rancho Seco、HBPP、Zion 核電廠則使用機械切割 (Mechanical Cutting)。
 - (2) 機械切割方式通常可以快速完成內部組件切割，惟需配合不同組件，選擇不同切割工具。
 - (3) 磨料懸浮水刀在切割過程中產生的二次性廢棄物雖然較「磨料水刀」少，但仍比機械切割方式多。但隨著機械切割技術進步，愈來愈多電廠開始採用機械切割。
 - (4) 進步的輸送系統是所有切割系統成功應用的關鍵。
2. 在人員訓練部分，經驗豐富的現場技術人員及機械工程師是缺一不可。
3. 在工作現場進行切割設備及相關工具測試是必要的。

4. 切割設備的設計必須便於現場維護。
5. 內部組件切削動作的重複性是節省關鍵的設計特點
6. 組件切割後的尺寸，其誤差不應太大，需能滿足方便封裝廢棄物為原則，如果可以，盡可能增加封裝容器的尺寸，並最小化切割數量、長度及最大化物件尺寸。
7. 在切割過程中，水質處理系統的設計必須能保持水質清澈。
8. 磨料水刀切割過程中，有效隔離切割區及非切割區是必要的（避免污染擴散）。
9. 為合理抑低輻射劑量(ALARA, as low as reasonably achievable)，保健物理人員有必要積極參與各項規劃作業。
10. 詳盡的廢棄物管理計劃是必須的。

西屋公司針對爐內組件的切割流程規劃，可區分為以下之步驟：

1. 爐心內部組件、水池、盛裝容器之 3D 模型圖面繪製。
2. 組件之虛擬切割。
3. 設計製造切割分解所需工具。
4. 規劃切割及裝填計劃。
5. 規劃細部程序。
6. 設計製造 1:1 模型。
7. 驗證工具之性能及人員操作能力。
8. 執行切割分解工作。
9. 廢棄物裝填及工具清潔。

以下即針對上述之各步驟進行說明。在 mockup 部分，西屋公司設有 2.8m 寬 X5.7m 長 X3.2m 深之 Mockup 模擬水下切割水池及 mockup 燃料填換樓吊車及爐內組件設施。

針對需切割之爐心組件、試切割水池、盛裝容器，皆會繪製其 3D 圖面，以利後續之切割規劃。

在進行實際切割前，先以 3D 圖面模擬之方式，繪製虛擬切割之圖面，了解規劃之可行性，並使現場執行切割人員能從圖面清楚認識所規畫之切割方式。

針對所規畫之切割方式，進一步設計製造或改造現有之切割工具。西屋公司所使用之切割工具，多為模組化設計，並於可能範圍內採用現有商業化商品進行組裝或改裝，有些機具原為市面上設計用來切割混凝土之現有機具。此外，該公司並與當地知名但規模不大(僅 10 名員工)之液壓工具廠商(Powertools Swedn AB)合作，針對其特殊需求設計製造專用之切割工具。針對水下作業所需之液壓工具，西屋公司使用非油質液壓工作流體 Ultra-Safe 620 取代一般液壓式機械之液壓油，避免液壓工作流體洩漏時，造成水質之影響。

在擬定切割計畫及裝填計畫時，較無一定之原則可供遵循，需依靠工程人員以往之經驗為基礎，來進行規劃。擬定裝填計畫時，除考量空間尺寸及劑量之限制外，還須考量切件裝填之順序、放置角度等，才能順利置入規劃裝填之容器內。

在實際執行切割之前，會先製造 1:1 比例之爐心組件模型之代表性部分，以計畫之切割工具進行試切割，以驗證工具之切割能力及人員之操作能力。爐心組件之材質，尚須考慮輻射照射可能對材質產生之硬化現象，故驗證切割工具之切割能力時，可能採用較原材質硬度更高之材質作為驗證。

細部之工作規劃，包括工具之放置地點、盛裝容器之放置位置、盛裝容器吊離水面後之乾燥設施及方式機具、後續之護箱裝填與運送、輻防及工安計畫、相關程序書等。

在電廠實際執行切割工作時，通常安排兩人一組執行切割，但輻防及工安人員由電廠提供。以西屋公司目前於 Barsebäck 電廠之人力安排，派駐有一名專案經理、4 名切割工作人員，同時操作兩組切割工具，執行切割工作。切割進行時，使用原有之池水過濾系統或外加之備用過濾系統，切割後之切屑，主要利用周末時機進行水下清理及收集，95%之切屑可以抓勺收集，僅 5%之切屑須以水底吸塵收集設備收集。

工作完成後，則將所有工具從切割池內移除，移出水面時以高壓水柱噴灑清理，收集所有產生二次廢棄物。

(二)切割工具操作實習訓練

工安為所有工作之基本要求，不僅在工作場所針對工作環境有其基本的要求，對於較特殊之生活環境，為保障所有工作人員的安全，亦應特別注意其生活經驗上的差異，加以特別的提示或特殊訓練。

本次舉行實習訓練的國家瑞典，由於地處較高緯度，實習的時間點又為冬季，室外下雪及積雪濕滑的路面環境，非屬生活於亞熱帶國家的學員所熟悉。故於訓練課程一開始，西屋公司特別安排了雪地行走防滑訓練，以保障訓練學員於整個訓練過程中的日常生活安全，足見其對工安之重視及落實。

訓練設施利用吊掛帶先將訓練學員進行吊掛，確保於真正發生滑倒時不會摔倒之情形下，請學員換穿上特別滑溜之硬底鞋，行走在特製的光滑地板上，以一般之方式行走，體驗滑溜產生時的感覺，再以所教導於雪地行走之特別方式行走，體驗兩者之差異。為了加強學員的體驗，地板上甚至噴灑肥皂水，加強滑溜感，或設置障礙物給學員跨越，模擬路上可能遇到之行走狀況。其訓練設施及相關之訓練情形如下圖 2：



圖 2 雪地行走防滑訓練

本次赴瑞實習課程，利用西屋公司所提供之 mockup 設備及切割工具，參訓學員實際操作夾持工具、圓盤鋸、帶鋸、剪切工具、壓縮設備、打孔切割工具等設備，實際對 mockup 爐心組件進行切割。

夾持工具的操作訓練，利用西屋公司的 mockup 燃料填換樓吊車及爐心設備，由學員從燃料吊車上逐一裝設延伸操作桿，將油壓夾具降至爐心深處，再依講師指示將爐心內物件夾持制不同位置放置，或夾持至裝填容器內，體驗經由延伸桿由遠處操作夾持工具之感覺。西屋公司之所有工具的接頭，皆製作成與其延伸桿相同之接頭型式，以便能透過延伸桿操作。相關之訓練情形如下圖 3、圖 4：



圖 3 夾持工具



圖 4 夾持工具操作訓練

剪切工具訓練，剪切工具主要利用油壓方式推動油壓剪，對管路或薄板進行剪切，西屋公司的剪切工具設計，主要在物件後方設有防止被剪切物件旋轉之裝置，

防止剪切過程中，被剪切物件發生旋轉，導致剪切工具損壞。實習過程中，學員操作剪切工具至 mockup 水池內建行對板材的剪切，該板材厚度近似於爐心內組件之 Core support grid。過程中，西屋示範人員亦曾在將剪切工具之防止物件旋轉裝制拆除之情況下，示範進行剪切時可能發生之物件旋轉情形，並真的導致剪切工具之損壞，並從而示範工具損壞後的更換方式。相關實習情形如下圖 5：



圖 5 剪切工具實習情形

圓盤鋸切割工具，西屋之圓盤鋸切割工具之控制模組，主要引用切割混凝土之工具，原始設計是採用液壓驅動馬達作為驅動圓盤鋸之動力，但由於噪音較大，工作人員需長期忍受工作噪音，近年已改採電動馬達作為驅動。其使用之驅動馬達及電源控制模組主要為 BRAUN Maschinenfabrik 公司產品。整組圓盤鋸採模組化之設計，使其可視現場需要，便利架設在各種不同之軌道載具上，進行組件切割工作。鋸片之選擇，則依據所需切割之組件材質，選用業界口碑較好之鋸片鋸齒設計。

本次實習針對圓盤鋸之操作，主要於水下切割約 10 公分之厚板材與類似控制棒導管之圓型管材。圓盤鋸對組件之切割，可利用圓盤鋸於載具軌道上之行走，來控制進刀之速度，另一方式為控制圓盤鋸旋轉臂之旋轉，來進行進刀速度之控制。利用旋轉臂旋轉方式進行切割時，圓盤鋸旋轉臂機構可承受之力量較小，刀具之負載要控制在較小的程度進行切割。本次實習學員之現場操作照片如圖 6：

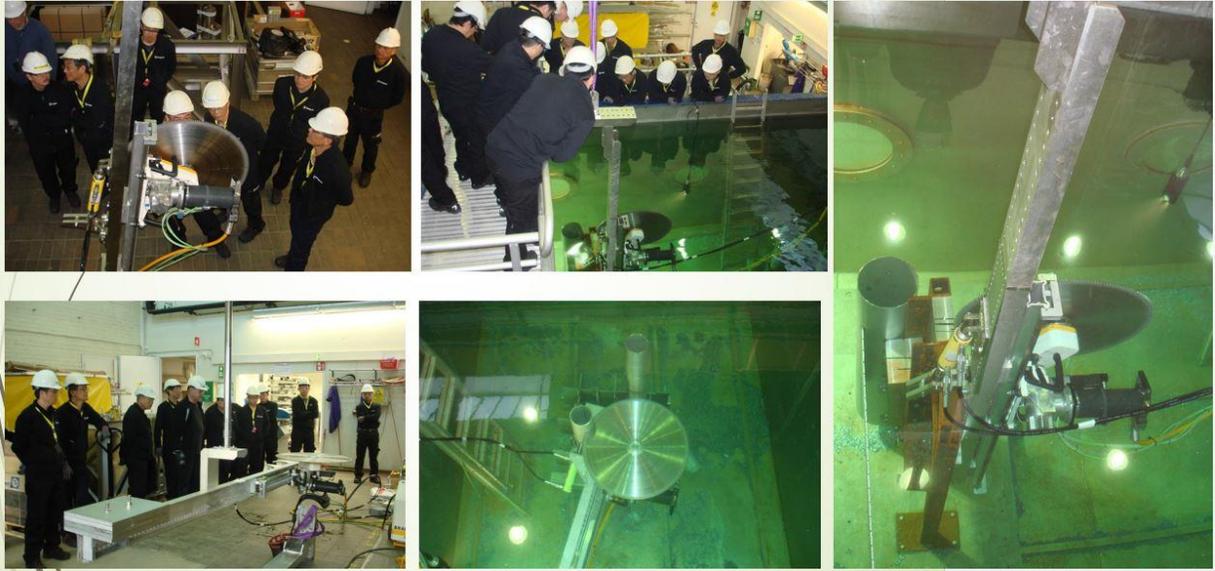


圖 6 圓盤鋸切割操作實習現場照片

帶鋸切割工具，西屋公司設計之帶鋸之跨距及切割深度皆約為 1 米，可水平或垂直架設於載具上。帶鋸之載具，亦有設計成可延伸圓柱座之形式，可視需要調整高度。帶鋸之支撐，由一只液壓驅動動力輪及三只從動輪來支撐，帶鋸之張力，由液壓方式推動從動輪來控制。帶鋸本身之鋸片切割角度，可以由帶鋸上之機構進行 90 度變換。本次實習有關帶鋸之部分，並未於水下進行切割實習，僅於西屋公司工具工廠直接以噴水冷卻潤滑，以乾切方式進行對壓水式電廠之控制棒導管 mockup 組件進行切割，如圖 7。實習過程中亦曾發生帶鋸脫落及斷裂之情形，但故障排除過程並未花費太多時間，故實際進行爐心內組件切割時，機具之故障應為無法避免之情形，備用機具、配件之準備及故障之排除，亦為事先應準備及熟練之項目。



圖 7 帶鋸切割模擬操作實習

壓縮工具實習，西屋公司設計之壓縮工具，由三只大型油壓缸進行推動，該工具重約 4200kg，具備 4200kN 之壓縮力，可壓縮約 20mm 厚度之管材。本項實習由西屋公司技術人員進行示範，測試壓縮類似控制棒導管之圓形管件。壓縮工具實習之情形如下圖 8：



圖 8 壓縮工具實習過程

打洞切割工具或稱為壓穿式電剪(Nibbling Tool)，此工具為利用衝擊打洞之方式，將薄板鋼件以逐一接續打洞之方式，對鋼板進行切割，該工具之外型如圖 9。該工具可調整兩種不同之衝斷速度，慢速約每分鐘 30 次衝斷，快速約每分鐘 60 次衝斷。衝斷工具之衝斷裝置上方有一制止擋板，故操作此工具由上而下進行切割時，每次衝斷後機具可下降之距離，剛好可使衝斷裝置接續衝斷前一被衝斷之板材孔洞位置。本項實習時，學員實際操作將該工具置入水中，由上而下逐一打洞方式將薄鋼板及圓形管件切割，如圖 10。實習過程中亦曾發生沖斷裝置斷裂而需更換之情形，故可觀察到所更換之沖斷裝置全貌。



圖 9 Nibbling Tool 外觀圖示

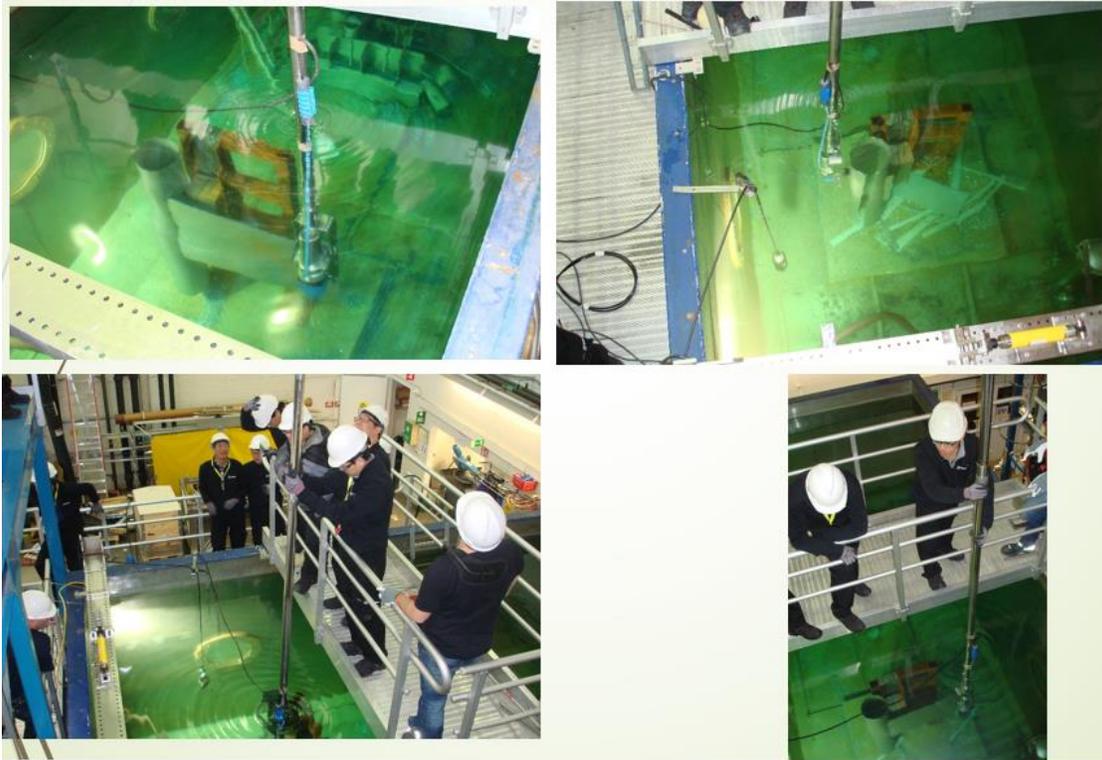


圖 10 Nibbling Tool 切割實習

(三) 機械切割方式之經驗

西屋公司以機械切割方式進行爐內組件之切割已有多年之經驗，總結來說其經驗及建議如下：

1. 機械切割方式很適合用來做為爐心內組件及反應爐本體之分解。
2. 若能使用小巧而彈性變動之工具將很有助益。
3. 組件材料性質可能有差異，例如可能因中子照射硬化。
4. 備用或多組工具準備亦相當重要。
5. 偏好使用較大之廢棄物裝填容器。
6. 維持好的能見度是必須的。
7. 準備工作不可忽視省略。
8. 將工作保持簡單化。

(四) 心得及建議事項

一、至 瑞典 韋斯特羅斯 西屋公司 實習：

(一) 切割計畫及裝填計畫之擬定，無一定之法則可遵循，需靠經驗之累積。

建議：利用核研所實驗用反應器除役拆除期間之規劃過程、執行過程、執行成果，學習其切割計畫及裝填計畫之擬定及執行經驗。

(二) 較大之盛裝容器可減少須切割之總長度，但必須考量現有吊車之承重及後續運輸傳送過程之可行性。盛裝容器所容許外部劑量限值，亦影響裝填計畫之規劃。

建議：

1. 盡早訂定本公司處置場可接受之盛裝容器外部劑量限值及可能使用之容器規格。
2. 未來若於盛裝容器規格確定前即有不得不開始進行切割之需求時，亦可參考 Barsebäck 電廠之作法，先以當下已知儲存場可能接受之容器大小進行切割規劃，但不進行水泥封裝，預留未來需重新裝填之可能性。

(三)電腦 3D 模組化繪圖技能，對於切割計畫、裝填計畫及虛擬切割皆有明顯助益。

建議：本公司於實際開始進行切割拆解前，應有相當充裕之時間可進行規劃作業，故宜培養本公司電腦 3D 圖形繪製之專業人員，配合執行切割計畫、裝填計畫、虛擬切割作業之擬定集 3D 圖形繪製。

(四)西屋公司所用機械切割工具，部分利用商業化之產品加以改裝設計，並與當地之液壓工具業者合作，依需要靈活製作所需工具，具備自主之設計工具能力。

建議：本公司可嘗試利用商業化之產品加以改裝設計，自行設計製作改裝部分切割壓縮工具。

(五)西屋公司於實際進行切割前，會先以 mockup 方式進行機具及人員操作之驗證測試，提前發現可能遭遇之問題。

建議：本公司可嘗試製作部分部份 1:1 爐心內模型組件之具象徵性部分，並建製 mockup 試切割水池，於水下進行測試切割，一方面可驗證自行設計機具及人員操作之可行性，另一方面可對外展示示範，說明本公司對於反應爐內組件除役之準備及已具備能力。

二、生物屏蔽體拆除(Bioshield Demolition)

(一) 生物屏蔽體結構組成

生物屏蔽體為裝置在反應器周圍之大質量吸收材料(重混凝土)，以降低輻射劑量達安全等級，重混凝土質量密度在 3500-4000kg/m³(一般混凝土為 2,300 kg/m³)，添加鐵屑、鐵礦石或其他雜項金屬以增加屏蔽效果。鋼筋、型鋼、穿越孔套、金屬襯板、保溫材都是在生物屏蔽體上而不是在 RPV 上。

(二) 水泥結構拆除技術及工具

依現有的經驗及心得找尋拆除技術及工具。

1. 水泥結構表面汙染-移除方式鑿，鏟。



Remotely operated floor scabbler
www.pentekusa.com



Floor shaver
www.srs.gov

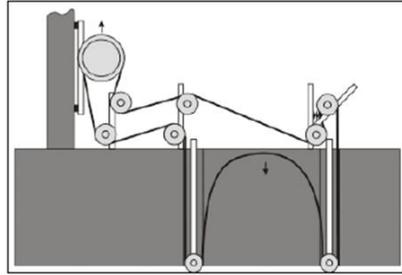


Floor scabbling piston heads
www.directindustry.com

圖 11 水泥結構表面汙染移除工具

2. 水泥結構內層汙染-移除方式鑽石線鋸，圓盤鋸，打擊(遙控)及粉碎

鑽石線鋸



www.hydro-pumps.co.uk/index.php?/services/diamond_sawing_drilling/P6/

打擊(遙控)



Brokk 400 remote controlled demolition robot

www.brokk.com

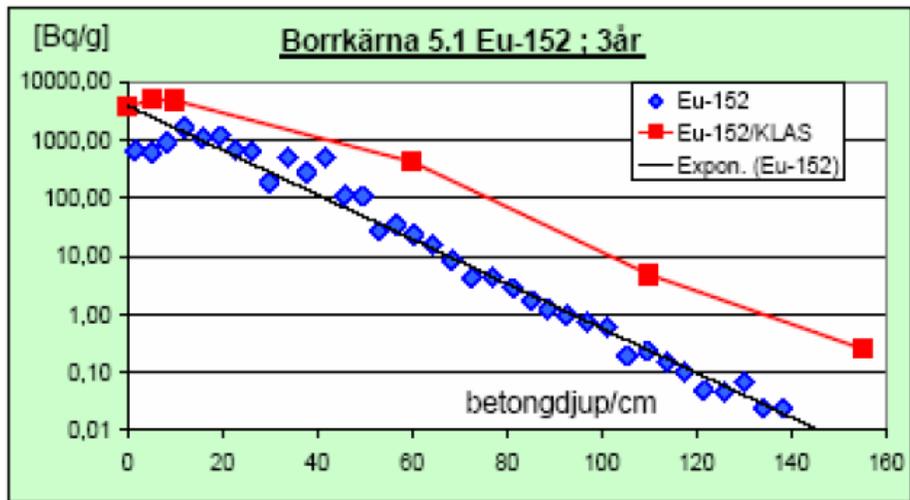
<https://www.youtube.com/watch?v=ADYVQf17c70>

<https://www.youtube.com/watch?v=-ru6YOh7nAQ>

圖 12 水泥結構表面汙染移除工具

(三) 生物屏蔽體活化深度

大部分的生物屏蔽體都被活化，且金屬部分的活化程度高於純混凝土的部分，RPV 上緣及下緣的生物屏蔽體活化深度較淺，以計算的方式評估放射性活度，在水泥深度越深的情況下計算的結果越不準，有明顯低估的情況，必須以鑽探方式驗證及調整評估劑量值(圖 13 紅色線條為鑽探後調整的評估劑量較原計算值高)，外釋標準跟台灣同為 100 Bq/Kg，生物屏蔽體內的金屬被活化後形成 Hot Spot，Hot Spot 因為背景劑量太高的關係不易判定位置。



borrkärna = drill core / core sample
betongdjup = depth in concrete

圖 13 Barsebäck 1 電廠停機後 3 年之劑量數據

(四) 生物屏蔽體拆除規劃及準備

大致規劃及準備項目如下

1. 評估生物屏蔽體的放射線性物質總量。
2. 選擇拆除方式
 - (1). 生物屏蔽體結構
 - (2). 預期高輻射，遙控拆除需求
 - (3). 可外釋生物屏蔽體使用傳統拆除方式
 - (4). 廢料管理
 - (5). 使用水許可
 - (6). 時間跟花費

3. 臨時性電廠修改

- (1). 交叉汙染控制(建造阻隔箱減少散佈汙染)
- (2). 廢料移動路徑修改(圍牆拆除)

4. 廢料管理

- (1). 減少活性廢料體積
- (2). 中期及終期放置場之許可容器尺寸
- (3). 廢料移動路徑從拆除場地到廢料管理區域
- (4). 廢料偵測
- (5). 廢料管理及包裝站：位置，破碎，分離水泥及金屬，包裝，運送
- (6). 破碎數量-包裝及容器數量
- (7). 分離破碎機
- (8). 水泥及鋼鐵分離或一起處置
- (9). 容器的數量及型式
- (10). 二次廢料處理
- (11). 無放射線但危險性廢料

(五) 拆除生物屏蔽體技術比較

1. 鑽石線鋸(Diamond Wire Sawing)

表格 2 鑽石線鋸優缺點

優點	缺點
----	----

<ul style="list-style-type: none"> ✓ 容易清理 ✓ 減少灰塵(切割時使用水) ✓ 數台鑽石線鋸可以同時使用 ✓ 人員僅需控制設備及維修設備 ✓ 可直接處置不需多餘的破碎 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 造成交叉污染 ✓ 造成 2 次污染 ✓ 如果需要破碎可能造成污染 ✓ 生物屏蔽中的金屬會造成鑽石線鋸變形 ✓ 鑽石線鋸斷裂可能有危險 ✓ 需要人工操作
---	--

2. 打擊拆除-遙控機具(Remote Controlled Demolition Robots)

表格 3 打擊拆除-遙控機具優缺點

優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 容易移除活化物質 ✓ 僅有必要工作需在現場執行(減低交叉污染) ✓ 有多種工具可供拆除使用 ✓ 可以遙控 ✓ 乾式使用 ✓ BROKK 公司製造的遙控機械人，曾使用在瑞典 KTH 反應器拆除工作 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 需要進行灰塵管理 ✓ 拆除機器故障將造成工作暫停 ✓ 現場工作時間較長

(六)課題學習—SVAFO R-2 研究型反應器之生物屏蔽體拆除工法案例分享

1. 避免生物屏蔽體拆除時散佈污染
 - ✓ 建造阻隔箱減少散佈污染
2. 盡可能移除清潔的水泥
 - ✓ 降低廢料
3. 廢料傳送路徑分為清潔的水泥及污染的水泥
4. 執行前規劃要求廢料容器分為 3 種
 - (1). 被活化生物屏蔽體，劑量超過 2 mSv/h，金屬箱外有水泥護套，可容納大約 3 噸重。
 - (2). 污染或被活化生物屏蔽體，劑量低於 2 mSv/h 但不可外釋，金屬箱可容納大約 3 噸重。
 - (3). 可以被外釋，容器可容納大約 1 噸重。
5. 實際執行加入以下要求
 - (1). 可以被外釋水泥要破碎成小於 100mm 大小，容器大約裝 0.9 噸重。
 - (2). 不能被外釋水泥要破碎成小於 300mm 大小。
6. 執行中的挑戰
 - (1). 空間很小且屬於同步執行專案-很難設置廢料傳送路徑，沒有空間擺放拆除設備。
 - (2). 早期的研究型反應器-有很多的修改導致圖面與現場不符，當時使用的石綿材料現在需要特別處理。

(3). 在以下困難情況下提升拆除速度：

- 物流不易。(離瑞典西屋公司太遠)
- 空間太小。
- 廢料核准規範-依材料及劑量(與訂約要求不同)。

(七) 心得

生物屏蔽拆除工作因為生物屏蔽被活化的關係屬於高輻射工作，也造成了拆除工作難度，在拆除前要先行規劃以抑低人員劑量，尤其是拆除工具的選擇，將影響拆除工作整體的工期及人員劑量，以施工環境進行優缺點比較，可以選出最適當的施工工具，課程內的課題學習也提到拆除後的廢料，儲存用的包裝容器的尺寸及規格要先確定，如果拆除工作開始後變更尺寸及規格，將使已包裝的廢料要花費時間及人力重新切割尺寸並包裝。

(八) 建議事項

1. 廢料尺寸及包裝容器的規格尺寸，在執行工作前要制訂標準，而且不要輕易更改，否則在廢料包裝後更改標準，已完成的廢料處理工作都要重新再作一次。
2. 有污染及可外釋的廢料要分別存放，以降低廢料儲存場的廢料量。

貳、核能電廠除役作業人員劑量評估與除污作業

一、核能電廠除役作業人員劑量評估

(一)背景

所謂的除役作業人員劑量，指的是在除役各階段，作業人員進行系統、設備與組件之除污、拆除、包裝與廢棄物處理等除役活動時，所接受到之輻射劑量值。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 ALARA 的原則。

根據 NUREG/CR-6174，沸水式核電廠若採取立即拆除之除役策略，造成作業人員劑量之主要除役作業可分為

1. 用過核子燃料相關處理作業(SNF management)
2. 除污作業(Other decontamination activities)
3. SSCs 拆除作業(Systems, structures, and components removal)
4. 大型組件拆除作業 (Large component removal)
5. 低放射性廢棄物包裝與運輸作業(Package & Transportation)

(二)除役人員劑量評估方法論

1. 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 14。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。對於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。

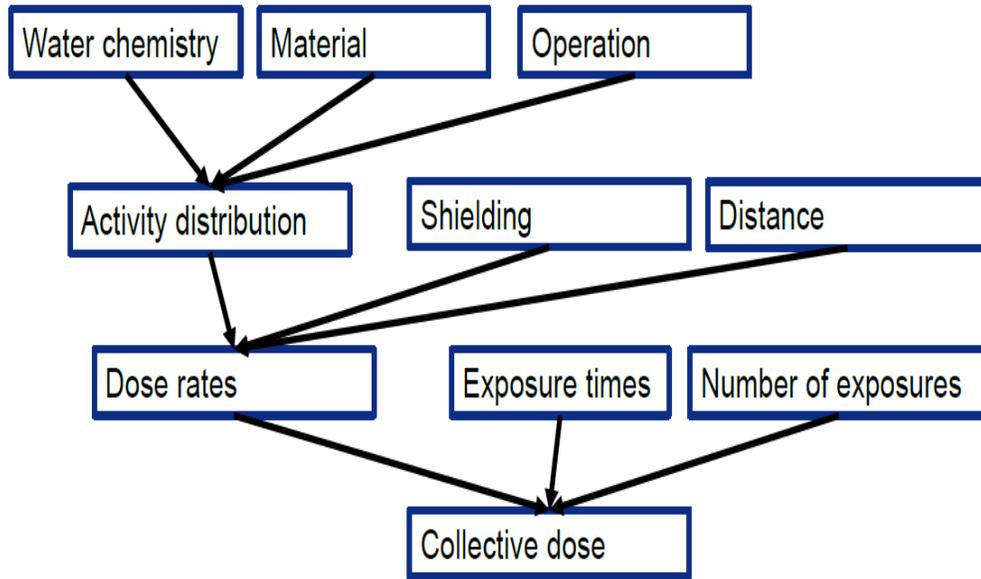


圖 14 影響除役作業人員劑量因素

2. 劑量評估公式

除役作業人員劑量評估由作業接受之平均劑量率、作業時程、作業人數三者相乘而得，而三者又分別受到實際作業差異因素所影響。

(1) 影響劑量率之重要參數：

- I. 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。依國外除污經驗，執行良好的系統除污，至少可降低到原活度的十分之一。
- II. 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。

III. 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，故除役策略上，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，亦應考量放射性物質的衰變。

(2) 影響作業時程與人數之重要因素

對於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之時程規畫、工法規畫與人員組成進行計算。

(三) 國際電廠經驗

1. 大修期間

依據西屋公司提供之電廠運轉與除役經驗數據，可歸納下列幾點：

(1) 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 15。

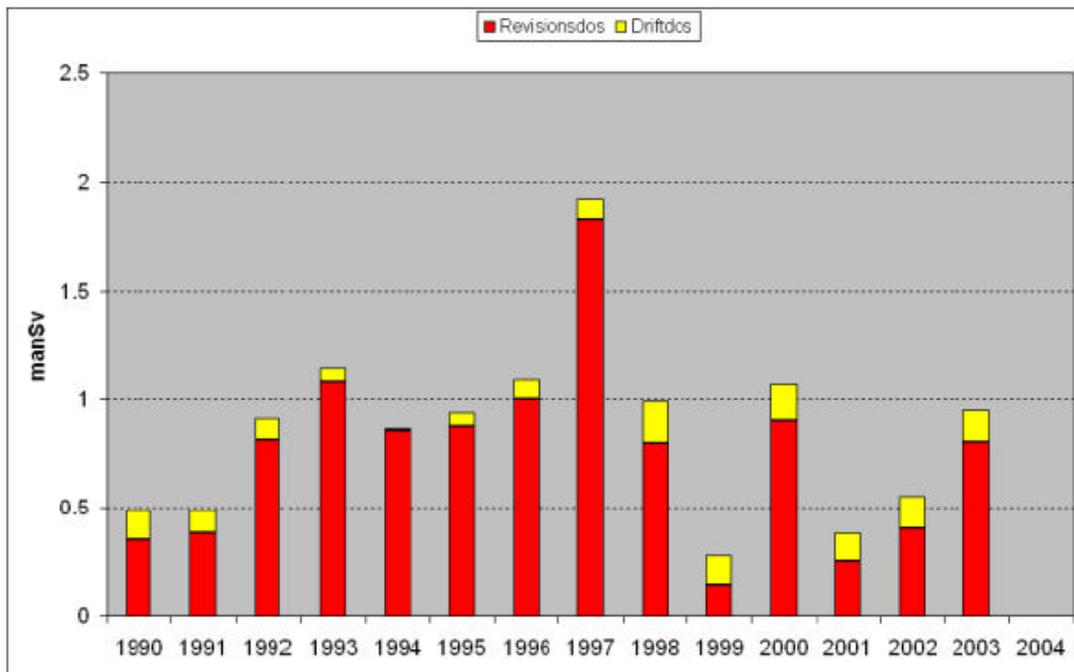


圖 15 大修時期對人員劑量的貢獻度

(2) 大修期間造成劑量的主要核種為 Co-60，而在部分的電廠亦有其他核種具有明顯的劑量貢獻影響，如圖 16。

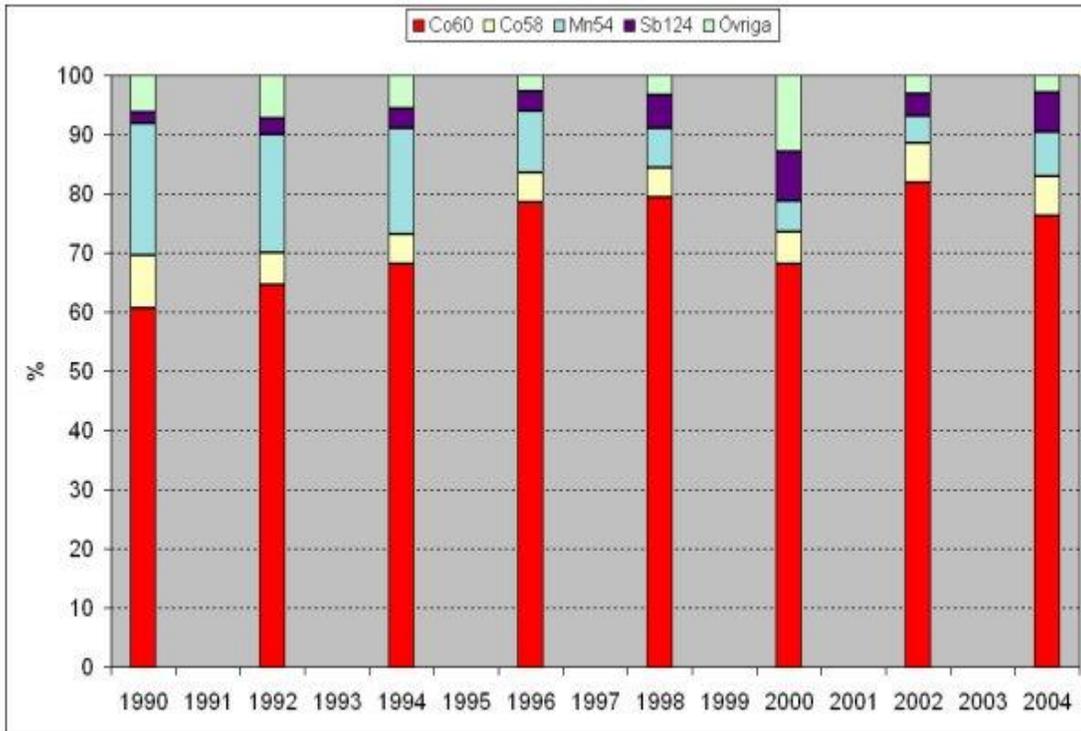


圖 16 各核種對人員劑量之貢獻度

(3) 大修期間造成人員劑量的主要工作在 Primary loop+Cooling system(321+313)、RWCU(331)，如圖 17。

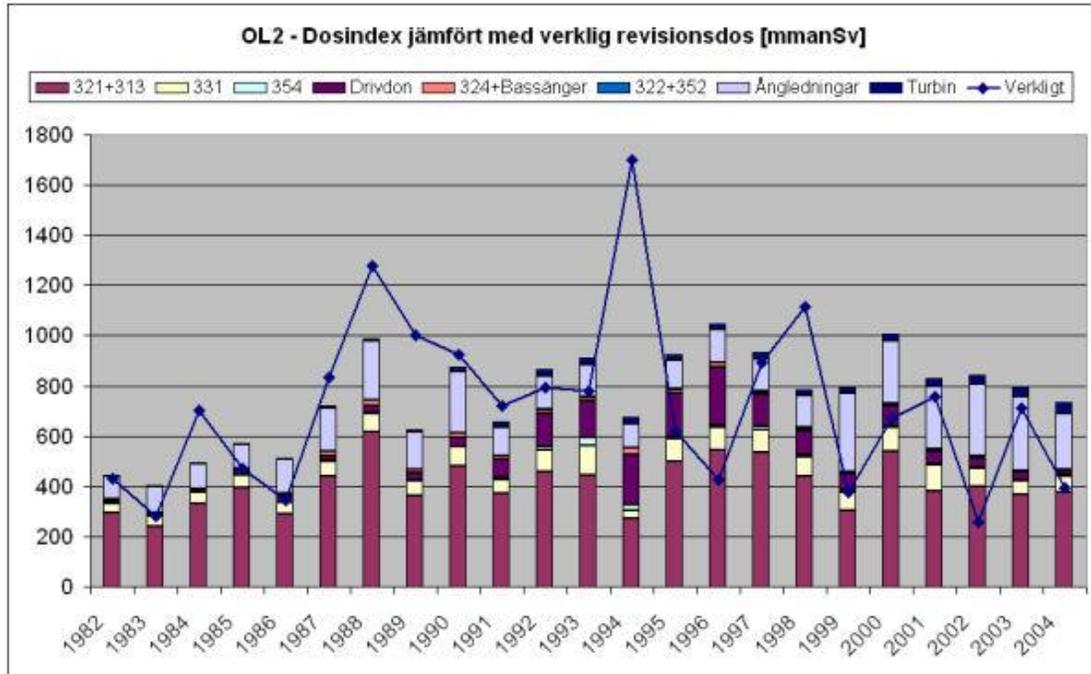


圖 17 各系統對人員劑量之貢獻度

(4) 大修作業造成的集體劑量約在 1~4 人西弗。

2. 除役與大修比較

(1) 基本上皆沒有突發狀況

(2) 除役作業相較於大修，時程上的安排更具有彈性，且有同樣的作業程序管制與防護措施

(3) 除役後，系統/設備狀態持續變化

(4) 停機後，放射性的影響會逐漸降低，人員可接近的區域更多，故可採取更完整的樣品

(5) 除役作業會新增大量的廢棄物包裝、處理與運送作業(潛在劑量暴露)

(6) 除役造成的集體劑量約為大修集體劑量的 10~20%

(7) 人員劑量多寡取決於工作排程、現場環境清潔、系統除污、作業經驗、初期現場勘查、劑量率連續監測及預防行動

二、除污作業

(一)背景

核電廠於運轉期間，為降低工作人員於運轉或大修期間的輻射暴露而進行化學除污，通常採取除污效果較溫和之化學試劑，以避免金屬管線過度腐蝕而受損，核一廠壹號機 EOC-18 及貳號機 EOC-17 Recirculation Piping 的化學除污成效，如圖 18。

在除役期間，除污目的在於儘可能移除系統內部、管件及零組件之放射性污染物質，以達廢棄物減量之功效，並有效降低工作人員實際拆除時接受之輻射劑量，也降低除役活動對大眾的輻射曝露程度。根據 IAEA 之建議，針對除役階段之系統除污，應選擇除污效果較好或除污因子(Decontamination Factor, DF)較高之除污技術。

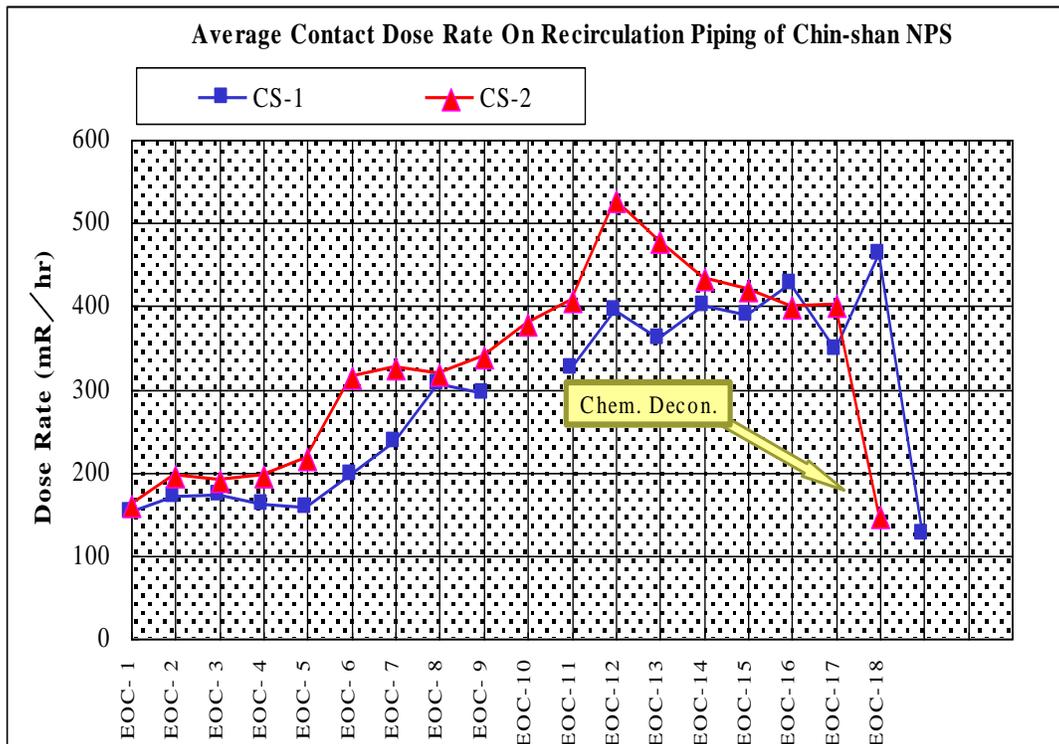


圖 18 核一廠#1EOC-18 及#2EOC-17 再循環管路化學除污成效

(二)除污考量與技術

1. 除污應考量因素

執行除污作業前，必須考量使用不同的除污技術在安全性、效率性、成本-效益性、除污二次廢棄物少量性、實務採用可行性等因素。而針對不同的電廠更須考量下列因素：

- (1) 電廠的形式及電廠的程序
- (2) 反應器種類、再處理設施工廠等
- (3) 電廠的營運歷史
- (4) 基底材質之種類：鋼、鋁合金、水泥等
- (5) 表面型態：粗糙、多孔性、塗佈面等
- (6) 污染物形式：氧化物、渣滓、污泥等
- (7) 污染物組成：活化產物、分裂產物、放射性元素
- (8) 內部或外部表面須清理
- (9) 除污因子
- (10) 組件除污後之去處：處置、再利用
- (11) 所需的時間
- (12) 針對存在於現有設施內的污染，證明程序之有效性
- (13) 組件的形式種類：管線、桶槽

2. 除污技術

目前國際間已有多部核電廠執行過除污並完成除役作業，依照目前使用之除污技術，其基本原理有三：化學除污技術之主要機制有三種，分別為螯合作用（Chelation, complexation, sequestration）、酸性溶解（Acid

dissolution) 及氧化還原反應 (Oxidation/reduction) 。表簡述目前商業化之化學除污技術。

表格 4 商業化之化學除污技術

除污技術	化學藥劑	二次廢棄物	二次廢棄物處理方法
CORD	高錳酸(HMnO ₄) 草酸(H ₂ C ₂ O ₄)	金屬離子, H ₂ C ₂ O ₄	<ul style="list-style-type: none"> ■ H₂C₂O₄ 藉由HMnO₄或H₂O₂氧化分解 ■ 金屬離子藉由離子交換樹脂吸附及過濾法移除
LMI	高錳酸鉀(KMnO ₄) 甲酸鈣 Picolinic acid,NaOH	金屬離子, C ₆ H ₅ NO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ■ Picolinic acid藉由離子交換樹脂吸附移除 ■ 金屬離子藉由離子交換樹脂吸附及過濾法移除
NITROX or CITROX	硝酸(HNO ₃) 或檸檬酸(C ₆ H ₈ O ₇) 草酸(H ₂ C ₂ O ₄)	金屬離子, H ₂ C ₂ O ₄	<ul style="list-style-type: none"> ■ H₂C₂O₄ 藉由HMnO₄或H₂O₂氧化分解 ■ 金屬離子藉由離子交換樹脂吸附及過濾法移除
DFD	氟硼酸(HBF ₄) 高錳酸鉀(KMnO ₄) 草酸(H ₂ C ₂ O ₄)	氟離子 金屬離子 H ₂ C ₂ O ₄ HBF ₄	<ul style="list-style-type: none"> ■ H₂C₂O₄ 藉由HMnO₄或H₂O₂氧化分解 ■ 金屬離子藉由離子交換樹脂吸附及沈澱法移除 ■ 氟離子藉由氫氧化鈣(CaOH)過濾法移除 ■ HBF₄藉由電滲析法(electrodialysis)再生

(三)NITROX 除污方式

NITROX 除污是採用螯合作用及有機酸進行。NITROX 的除污技術演進由一開始的 CITROX with NP 經過三次改良後，現在商用的產品為 NITROX-H。

NITROX 的特色如下：

1. 在使用同樣去除氧化物及活性效果下，NITROX 產生的樹脂稍高於於使用 CORD 的產量，但除污的時間遠小於 CORD，如圖 19。

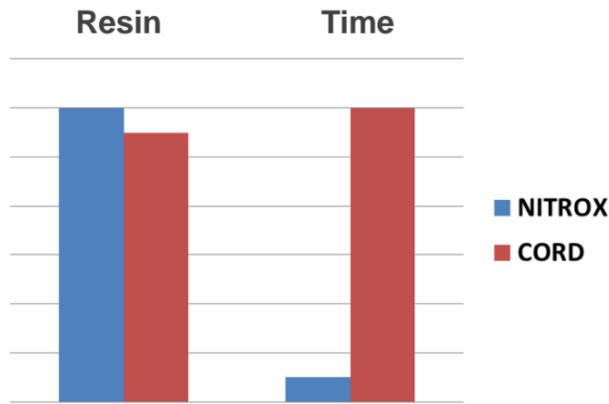


圖 19 NITROX 與 CORD 的樹脂量與除污時間比較

2. NITROX 與 CORD 的溶解速率相近，但 NITROX 在草酸鐵沉澱的風險上較低，如圖 20。

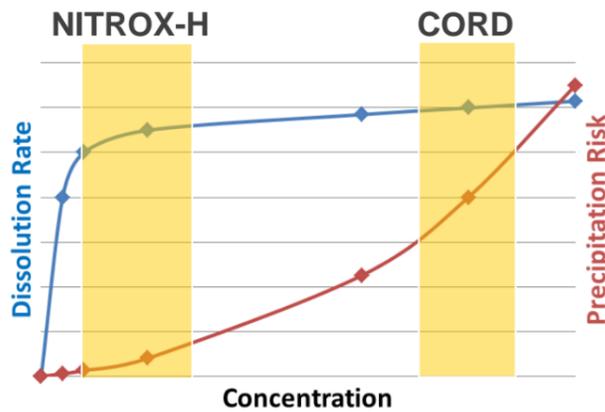


圖 20 NITROX 與 CORD 的溶解速率與草酸鐵沉澱的風險比較

(四)燃料未移出之除污方式

機組停機後，最需要立即執行化學除污的三個主要系統為分別 RWCU、Recirculation System 及 RHR。系統化學除污的最主要目的是降低熱交換器、泵、閥及管路等組件表面劑量率，以大幅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進行拆除切割作業，可以採用傳統工法接近施工。

電廠停機後，優先進行高污染系統化學除污，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，應將高接觸劑量組件的除污因子提高，以確保能大幅降低空間劑量，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。

(五)執行除污作業的流程

1. 初始決策(18~24 個月)：執行前現場探勘，成本效益評估，以及進行提案與簽約。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 復原階段：結束除污作業後 30 天提交除污結果報告。

三、心得

依照西屋的經驗，當燃料在爐心的情況下，仍可進行再循環管路系統除污以移除系統內部及管件表面之放射性污染物質。其提出堵塞管路方式加以化學藥劑循環機制，並使反應爐壓力高於再循環管路系統壓力，排除爐心燃料與化學藥劑之接觸，避免使得二次廢液活度過高，而增加放射性廢液處理成本及廢液處理系統之負荷，而爐心燃料冷卻功能仍可由燃料池冷卻系統提供。

四、建議

ntamination Factor, DF)較高，課程中說明 NITROX 的演變(改進)過程，並舉例以另一除污技術「CORD」於溶解速率、金屬離子及草酸的沉澱比較、樹脂的產量、除污的時間等各方面進行比較，最後提出國外核電廠除役實績輔證。故核一廠系統化學除污技術之可行性評估時，可將 NITROX-H 納入考量，以期降低除役工作人員於進行系統拆除作業時之輻射曝露。

參、成本預估與工作分解結構

一、成本組成

1. 依據工程性質：直接與除役工程的花費有關，又可以分為四大子項目
 - i. 人力：人員的薪資、保險與加班等費用。
 - ii. 投資：主要是指設備與耗材上面的投資成本。
 - iii. 花費：除了人力與投資以外的花費，像是稅金、水電與辦公室租金等花費、電腦、電話傳真、專利、認證等之費用。
 - iv. 準備金：除役工作依現場環境，可能多餘之費用；如因為颱風造成作業工期之延後。
2. 依據工程期間：相關之除役項目持續時間，在每個階段完成內，在工作範圍估算人力負擔，編列成本。像是，拆解管理、許可證、與健康與安全，保安等費用。
3. 工程特殊項目：無法於工程性質與工程期間分類之成本，如建築或拆除設備，現場準備，財產稅，健康物理用品，液體放射性廢物處理和獨立驗證調查等。
4. 工程特別因應費用：在確定的工程範圍內，依以前有關之估計與成本的經驗表是，可能會出現的增加成本。與風險之定義有所不同，風險是有可能不會發生之事件，而不確定性之準備金，則是會發生但估不準之事件。如颱風造成之停工，工程延遲之損失。
5. 成本組成分析方法
 - i. 自下而上的累積評估：把工項詳細的列出後，從最低階的加總至最高階的，是一種最精確的評估方法。
 - ii. 具體的類比評估技術：參照已評估過但相似的工項，做為評估之參考。
 - iii. 參數對比評估技術：研究歷史資料之參數，用來評估複雜的工程。
 - iv. 審查和更新評估技術：重新評估原來做的成本分析。

- v. 專家意見評估：當以上方法都不容易分析時，即請多位學者專家，討論建立一套評估方法來做估算。

二、ISDC(International Structure for Decommissioning Costing of Nuclear Installations)，是核電廠除役成本的國際標準結構，相對其他的成本估算，ISDC 有不同的技術應用。

1. 除役前準備：相關費用包含申請執照、工作規劃與文件之準備。
2. 電廠停機工作：停機至除役執照拿到時這段過度期間的工作成本。
3. 設備封存之準備工作：立即拆除就不會有這一個成本分析，但在安全貯存與延遲拆除的方法之下，將設備封存之成本就需要考慮進去。
4. 管制區拆除之工作：管制區所以的拆除工作，含先前準備工。
5. 廢棄物之處理與貯存：依不同種類之廢棄物有不同處理與貯存方法。
6. 基礎設施之建立與營運：除了所需之基礎設施之建立與營運外，並視設施狀況設立保安設備。
7. 拆除與現場之復原：拆除後將場地整理並復原。
8. 計劃管理與工程：計劃與工程之管理與進度追蹤。
9. 研究與發展：如果目前拆除方法不適用時，將投入研發或者與國內外有相關技術之廠家合作。
10. 核燃料之處理：依各國定義，廣泛的包含有中期之燃料貯存與最終之燃料處置。
11. 雜項支出：社區補償金或外部服務費用、保險、稅額等等。

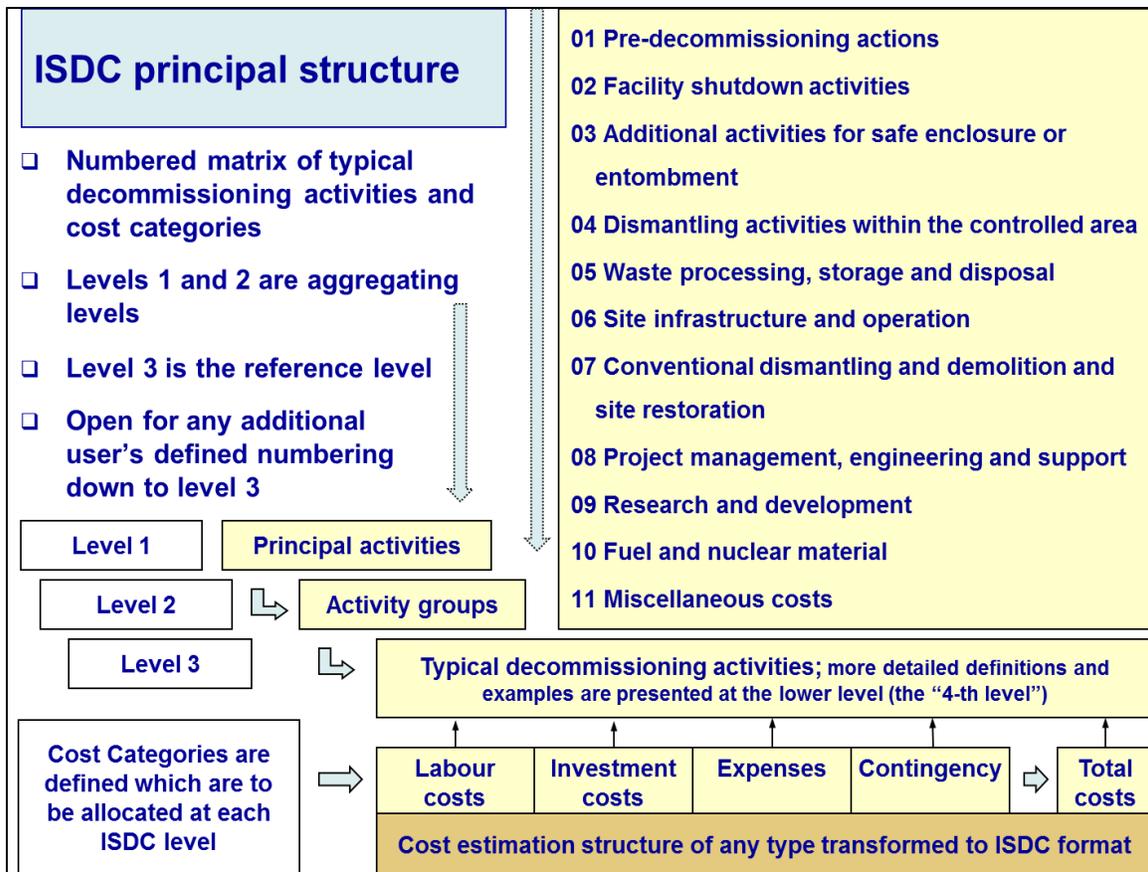


圖 21 ISDC 基本架構

12. 估計的基礎有以下幾個要素

- i. 假設
- ii. 排除
- iii. 邊界條件
- iv. 初始點
- v. 結束狀態
- vi. 範圍
- vii. 不確定性計算

三、CBS：Cost Breakdown Structure 費用明細結構，是一個工程的成本要素分析與成本類別，成本要素包含有

1. 去污和拆除
2. 廢棄物管理
3. 現場回復
4. 行政、管理等周期性作業

四、不確定性分析

1. 成本的組成可以分成三部分
 - i. 基本開支
 - ii. 準備金
 - iii. 風險：又分類成包含在預算內之風險與預算外之風險

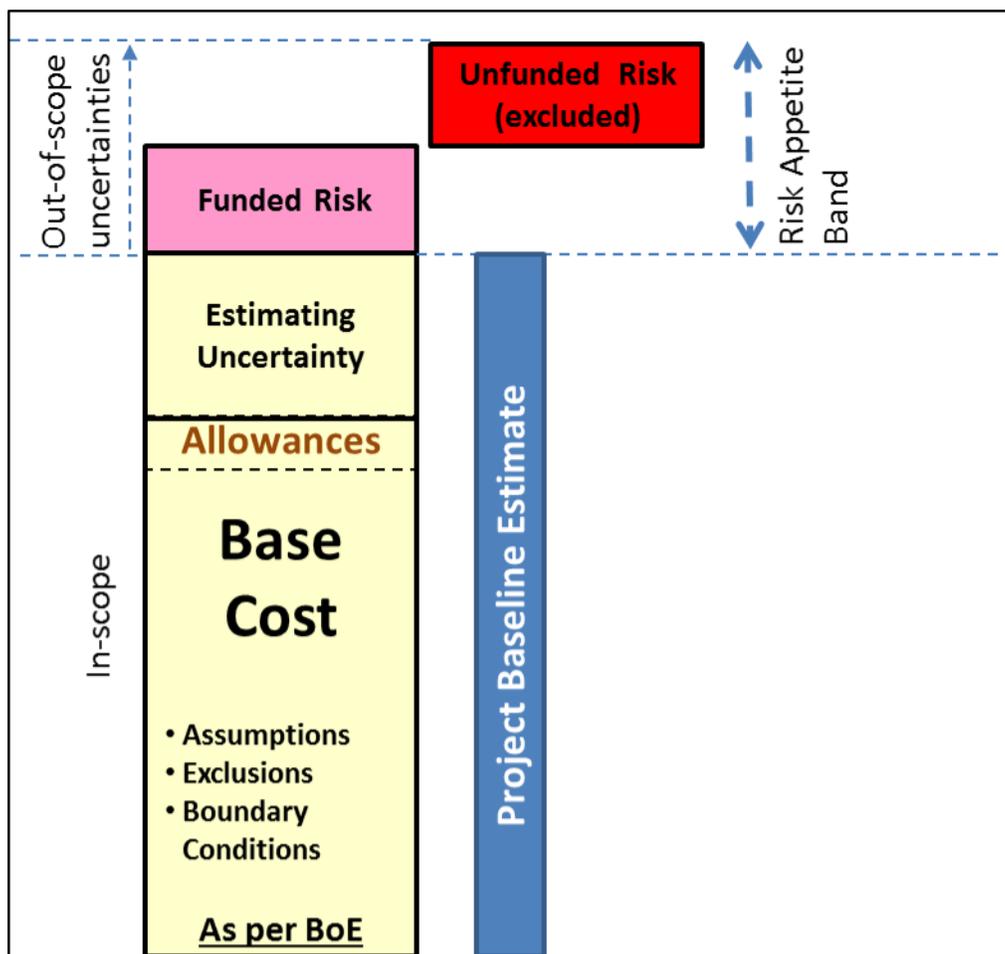


圖 22 基本成本、準備金與風險示意

2. 準備金之決定：由多位專家決定，適用於整個除役計劃或者計劃中的各子項目。
3. 風險評估：決定風險後做定性分析，再使用蒙地卡羅做風險定量分析。

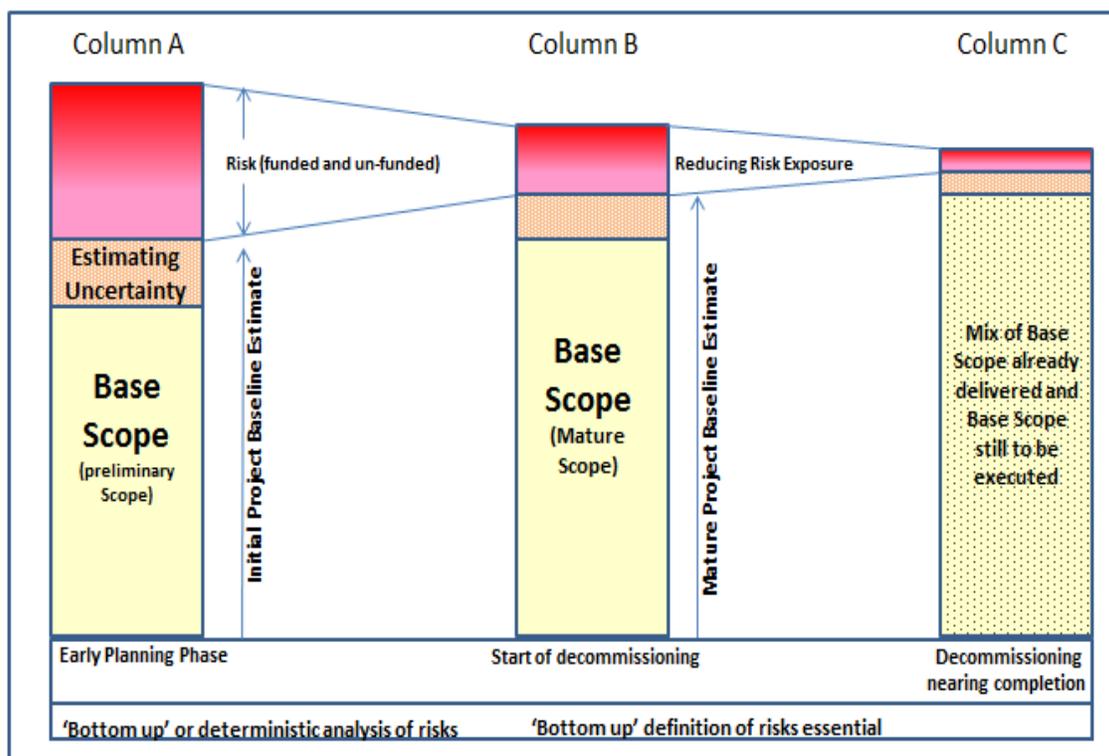


圖 23 成本結構隨時間之變化

五、WBS：(Work Breakdown Structure) 工作分解結構

1. 為完成此工作目標中的所有工作項目
2. 創建一個通用數據庫作為所有參與方的參考

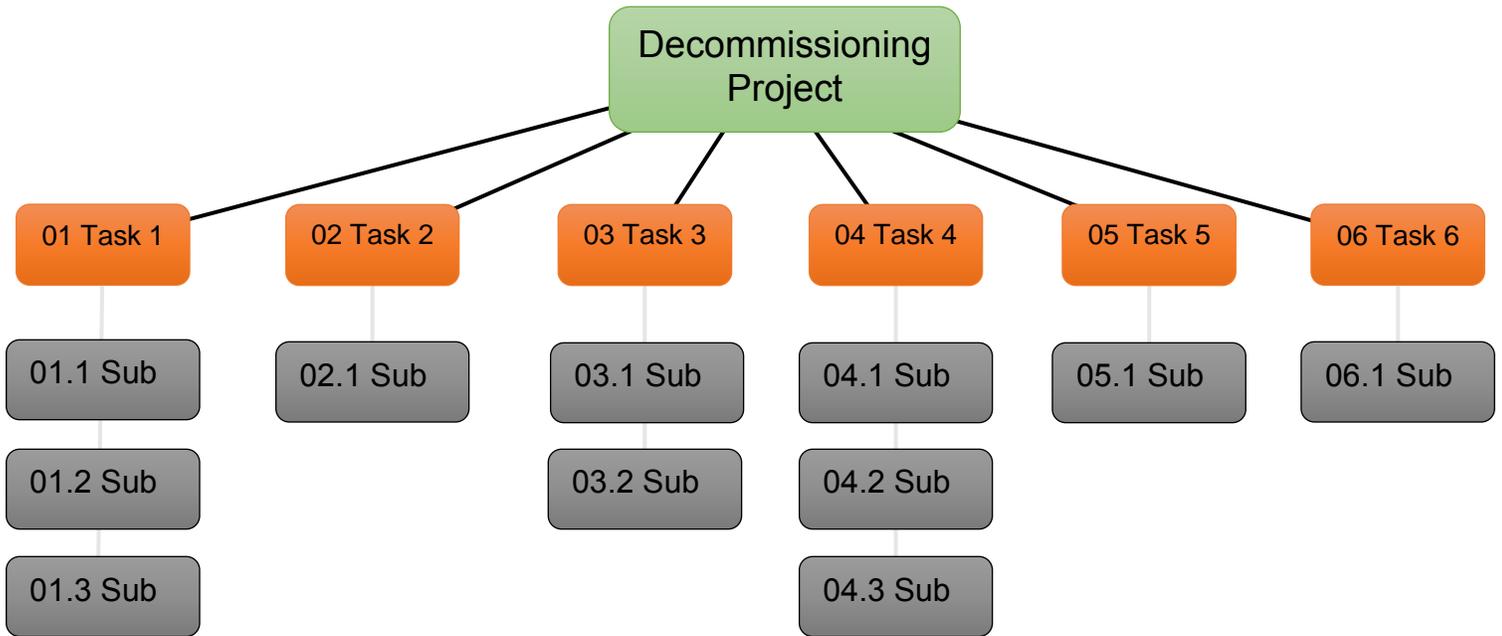


圖 1 WBS

3. 通常包含以下子項目：

i. 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。

ii. 現場作業：

架設、內部組件及 RPV 的切割及包裝、乾燥、運輸廢棄物容器。

iii. 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)。

iv. 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。

v. 消耗品：

鋸片、圓盤、濾芯、剪切刀具等其他。

4. 並可應用在其他方面：如人力工時之估算。

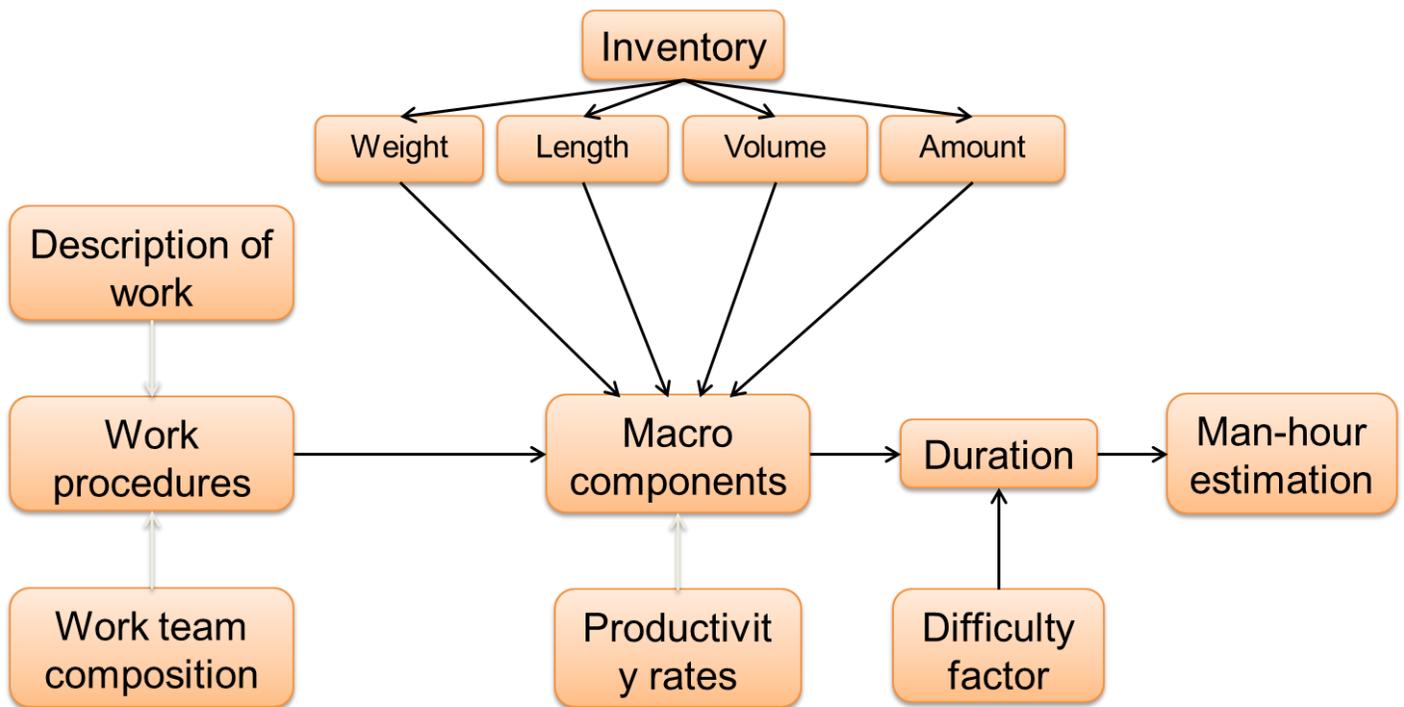


圖 2 WBS 評估人員時數

六、心得與建議：

台灣目前並沒有執行除役計劃之經驗，故於成本估算這一部分都僅只能從國外的成本分析來做定性分析，再加以定量。但本國的環境狀況(如颱風)與政治等因素，需在原來的預算上面再增加準備金與風險準備，而這一塊並沒有前例可以作為參考。核一廠除役計劃為台灣第一個核電廠的除役工作，未來核二廠與核三廠將有許多評估，需藉由核一之經驗做參考，所以核一廠除役計劃之回饋資料庫將顯的特別重要。

肆、除役現地實習

一、除役實地參訪心得

(一). 瑞典用過核子燃料貯存及包裝管理設施(CLAB+CLINK)

SKB 公司簡介

本次參訪 SKB 公司其全名為 Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company(以下簡稱 SKB)，SKB 為瑞典放射性廢棄物營運專責機構，SKB 將短半化期與長半化期(包含用過核子燃料)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(如圖 26 所示)：

- 海上運輸系統 M/S Sigrid
- 用過核子燃料濕式中期貯存設施 (CLAB)
- 中、低放射性廢棄物均送至位於 Forsmark 電廠附近之最終處置設施 SFR (Swedish Final Repository) 進行處置
- 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。

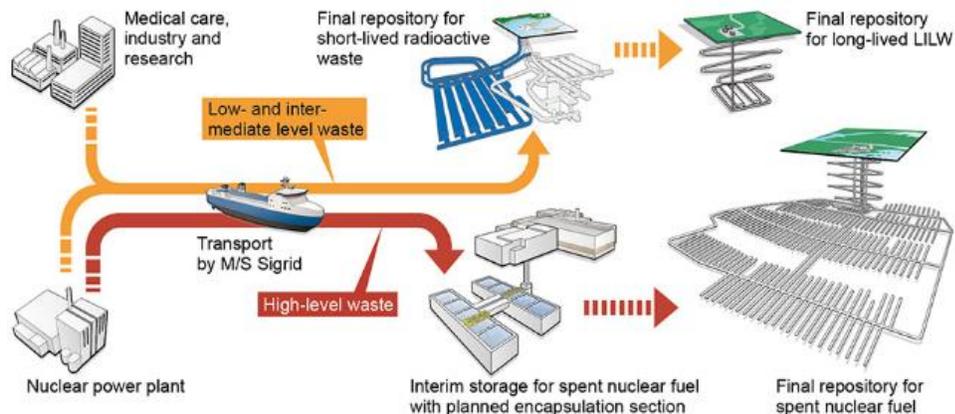


圖 26、瑞典放射性廢棄物處理系統

瑞典用過核子燃料貯存(CLAB)

本次訓練安排 3/1 星期三參訪其中之用過核子燃料中期貯存設施 (CLAB) 貯存場位於 Oskarshamn 北方約 20 公里處(圖 27、參訓學員於 CLAB 外合照)，

緊鄰 Oskarshamn 核能電廠，所謂中期貯存(Interim storage)。瑞典用過核燃料在退出爐心後原則上在各核電廠內燃料池貯存9個月年後，即裝入運輸護箱，再以專用運輸船 M/S Sigrid 運至 CLAB(Oskarshamn 核電廠例外，因緊臨 CLAB 以陸運運送)附近碼頭，再陸運轉至 CLAB 進行長達 30-40 年的濕式中期貯存，最後目標則於換裝入處置廢料罐後，待位於 Oskarshamn 市的 Forsmark 用過核子燃料最終處置場營運之後，再將封裝過的用過核子燃料以專用運輸船運送至該地處置。

CLAB 於 1980 年開始興建，1985 進行用過核子燃料接收，CLAB 設計濕式貯存燃料池位於地下 30-40 公尺處以有效降低保安及故意破壞之顧慮，以及燃料池結構與地下岩石間設有防震動傳遞裝置以大幅降低地震的影響等。

CLAB 設施剖面(如圖 28)包含兩部份，地上建築物將用過核子燃料從運輸護箱卸下與地下建築物即所謂的岩穴 (rock cavern)，用來貯存用過核子燃料。最初岩穴共包含 4 個貯存池及 1 個備用池，總容量為 5,000 噸，CLAB 後來又建造另一個岩穴以增加貯存容量，於 2008 年開始運轉，擴充後之貯存容量可達 8,000 噸，每年接收量為 200 噸，該貯存容量可以維持 40 年的營運。

圖 29 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 30、地下貯存池的實景照，進入貯存池時參訪者須戴安全帽、穿著防護衣、鞋套、劑量佩章及識別證方可進入，且戴眼鏡的人還需要穿上繩子，預防眼鏡掉落池子內，可以看見國外的 FME 做得相當確實。



圖 27、參訓學員於 CLAB 外合照

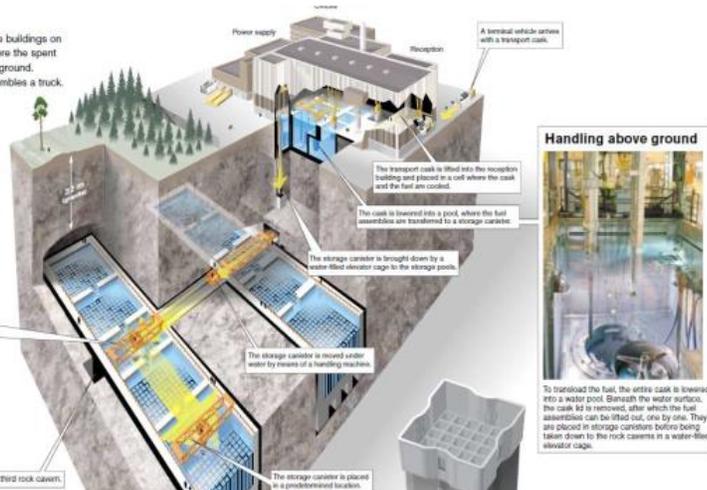
The facility

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 fit it out of the elevator cage. The machine then places the storage canister in a predetermined location in one of the pools.



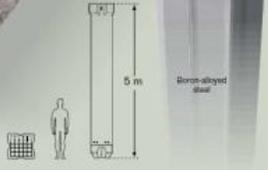
Handling above ground



To stabilize 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 lifted 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

Location	Next to the Oskarshamn nuclear power plant
Start of construction	1980
Start of operation	1985, second cavern finished in 2005
Capacity	8,000 tonnes of spent nuclear fuel
Reception	About 220 tonnes of uranium plus six storage canisters of core components per year
Surface facility	Reception, offices, ventilation, electricity
Underground facility	Two rock caverns with eight storage pools, 40 metres beneath the surface
Personnel	About 80 Full-Time Equivalents



Storage canisters

The fuel will remain in the storage canisters throughout the storage period in 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, SKB has developed a new type of storage canister that holds more fuel.

圖 28、CLAB 設施剖面

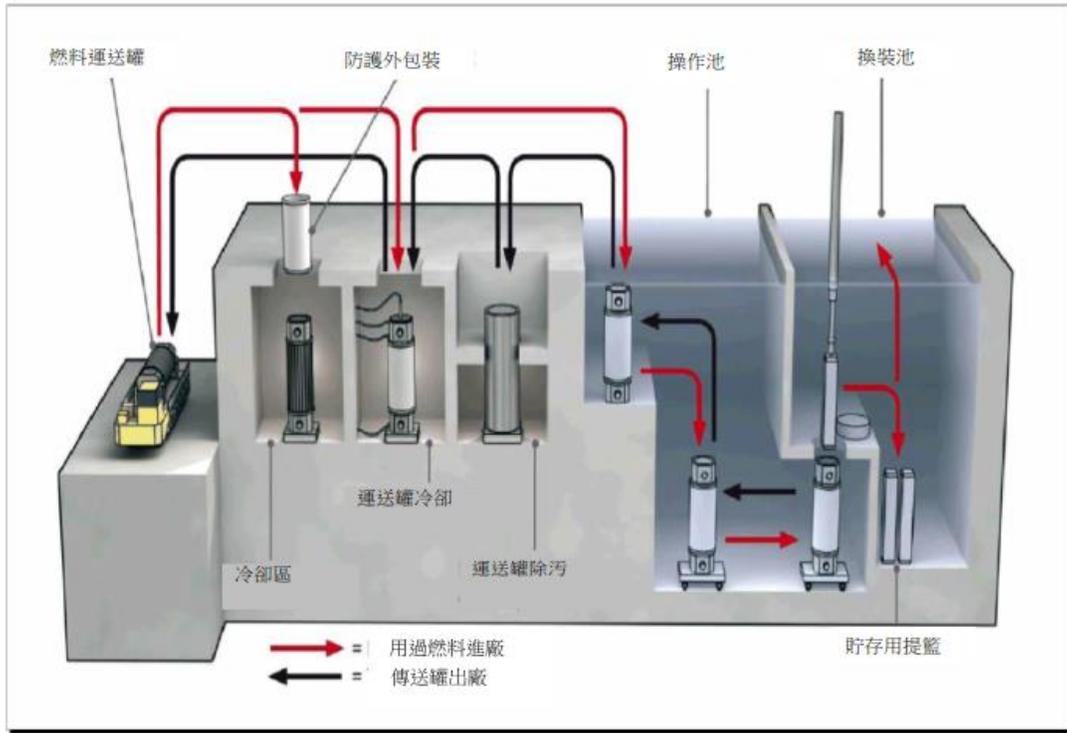


圖 29、瑞典 CLAB 中期貯存設施運作圖



圖 30、地下貯存池的實景照

瑞典廢料罐實驗室(SKB Canister Laboratory)

本次參訪安排於 3/2 星期四至 SKB 位於 Oskarshamn 海港碼頭旁的廢料罐實驗室進行參訪(圖 31)，此行程是由 SKB Canister 部門負責接待並且介紹廢料罐的製作方法以及相關設施的功能(圖 32)

廢料罐實驗室是 SKB 所屬的重要研發機構為瑞典廢棄物罐封裝技術與安全相關問題之發展研究中心，該實驗室從 1988 年開始營運，用途為廢料罐封裝技術與封裝後安全研究相關問題之研究中心，實驗室主要的作業在於開發廢料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(non-destructive testing, NDT)驗證技術。

SKB 在廢料罐初期銲接方式使用高真空電子束銲接(High Vacuum Electron Beam Welding, EBW)技術銲接廢料罐，銲接過程容易有瑕疵(圖 33)，參訪時告知目前不使用此方法銲接，改用摩擦攪拌銲接法(Friction stir welding, FSW) 現階段已達到非常高品質的銲接結果，其原理是由一種旋轉接頭(圖 34)塞到預定銲接的廢料罐本體和蓋板間過工具進行摩擦加熱達 850 度後將前述兩個物件銲接融熔相連，此有別於一般傳統銅銲接方法，利用摩擦生高熱融化母材直接融合，不須使用銲條，但此熱度僅使銅產生塑性狀態並未達熔點溫度。該銲接方法可採用和母材相同的材料進行銲接並確保廢料罐銲道兩側的銅材料可以完美銲接(圖 35)

SKB 在製作盛裝用過核子燃料之廢料罐之工法，主要分為外部之銅殼與內襯鑄鐵兩部分：

內襯鑄鐵的製作方法有兩種(圖 37)，首先將模具填滿高溫熔融 狀態的鐵，第一種方法是採用從頂部澆鑄灌製，將熔融狀態的鐵從模具頂部垂直向下灌鑄；另外一種方法則是透過一個灌注管從底部灌鑄，隨著灌注量的增加逐漸向上填滿，經 SKB 的研究比較發現兩種灌鑄方法在品質上無任何顯著差

異。灌鑄後則是需要經過幾天的冷卻方可移除模具，確保鑄鐵內的管是筆直以確保後續燃料組件置入，不致產生卡住不順等安裝問題

銅殼為廢料罐的最外層容器結構，可分為銅管側、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(圖 38)。滾壓製作則是將銅塊滾壓成板狀後，在彎取加工成圓形後進行縱向銲連，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。

另現場已有展示將內襯鑄鐵放入銅殼之展示模型如圖 39



圖 31、參訪人員於 SKB 廢料罐實驗室外合照

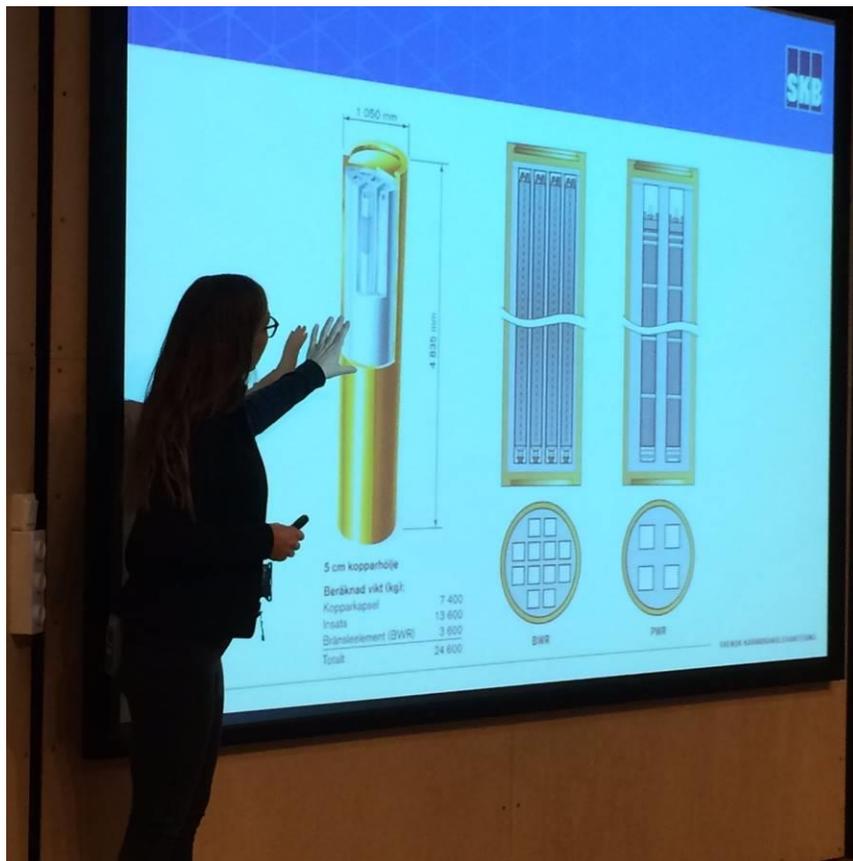


圖 32、廢料罐設施簡報



圖 33、使用高真空電子束銲接(High Vacuum Electron Beam Welding, EBW)技術
銲接廢料罐



圖 34、各式旋轉接頭

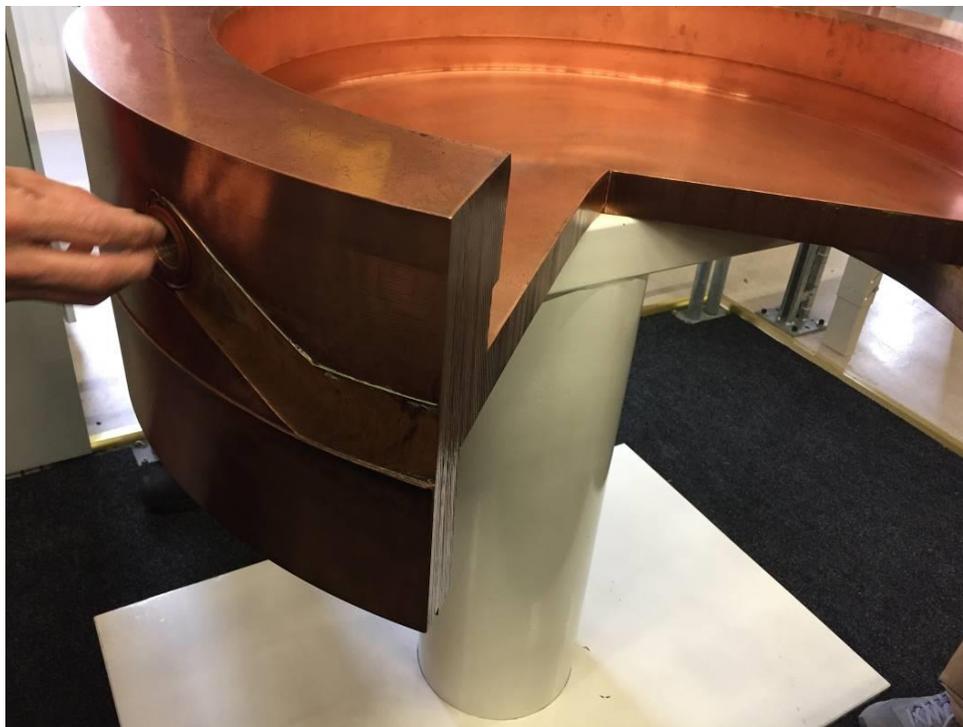


圖 35、廢料罐本體和蓋板焊接完成展示



圖 36、摩擦攪拌銲接設備



圖 37、內襯鑄鐵的製作方法



圖 38、銅殼製做方式



圖 39、內襯鑄鐵放入銅殼之展示模型

(二). 瑞典放射性廢棄物處置研究設 (ASPO)

瑞典與芬蘭利用 KBS-3 方法建造其用過核子燃料最終處置場，KBS-3 方法基礎是利用工程與天然障蔽的設計將用過核子燃料及其核種與生物圈隔離，多種障蔽包括廢料罐、廢料罐四周緩衝材料、用來填滿開挖空隙的回填材料及處置場母岩。處置於垂直鑽孔(KBS-3V)或水平處置隧道(KBS-3H)的金屬罐四周被一系列黏土基緩衝與回填材料環繞。於花崗岩處置母岩加拿大亦採用銅金屬罐作為參考金屬罐障蔽。不同處置介質相對貢獻度如表 1 所示(Argonne national laboratory, 2014)。

表格 5 處置介質相對貢獻度一覽表

貢獻	鹽岩	油頁岩	花崗岩	深層鑽孔
熱傳導性	高	低	中	中
滲透性	低	低	低(非裂隙) 可滲透(裂隙)	低
機械強度	低	低	高	高
變形行為	黏塑性	可塑性至脆	脆	脆
洞穴穩定性	低	低	高	中
溶解行為	高	很低	很低	很低
化學條件	還原性、高梨子強度、相對簡單化學系統	還原性、複雜化學系統	還原性、相對簡單化學系統	還原性、相對簡單化學系統、中至高離子強度
核種滯留	很低	高	中至高	中至高

熱限制	相對高	相對低	無限制	無限制
可利用地質	寬	寬	寬	寬
地質穩定性	高	高	高	高
工程障蔽系統	最少；廢棄物包漸被處置是封閉時破壞	最少；廢棄物包漸被處置是封閉時破壞	需要；可利用工程障蔽系統	深孔需密封
廢棄物回取性	可能	可能	容易回取	困難

瑞典、芬蘭與法國正在進行用過核子燃料與高放射性廢棄物地質處置設施建造申照的程序，其他國家亦進行用過核子燃料與高放射性廢棄物處置相關研究與發展 (IAEA, 2014)。

瑞典用過核子燃料最終處置場於1977~1985開始進行研究場址，1990年代開始進行一般選址研究，1992~2001年進行可行性研究，2002~2007年進行場址調查，2011~2020年進行申照，2020~2030年開始建造(Sjöland, 2016)。

依據瑞典用過核子燃料與廢棄物管理公司 SKB 發布的新聞稿，SKB 已於 2011 年 3 月 16 日向瑞典輻射安全主管機關(SSM)及土地與環境法院提出用過核子燃料深層地質處置場與包封工廠建造許可申請，另一方面，瑞典輻射安全主管機關已向 OECD/NEA 要求邀請國際專家進行獨立審查(IAEA, 2011d; Rehak, 2012)。

瑞典SKB承裝用過核子燃料的金屬罐原先只考量垂直式的KBS-3V，芬蘭Posiva於2002年開始考量水平式KBS-3H，Posiva開始與SKB合作共同發展水平式KBS-3H，採用水平式KBS-3H的優點包括最小化開挖岩石體積及無需回填處置隧道。

自 2011 年 3 月瑞典輻射安全主管機關(SSM)審查 SKB 所提位於 Oskarshamn 包封工廠與位於 Forsmark 供用過核子燃料最終處置的地質處置場等建造許可申請，

審查期間瑞典輻射安全主管機關提出的關鍵議題包括，廢棄物罐腐蝕與機械穩定性、膨潤土水飽和、包封工廠安全原則及環境影響評估所需內容等關鍵議題。瑞典環境法院於 2015 年 12 月宣布 SKB 執照申請程序完成，將開始正式審查(Sjöland, 2016)。瑞典輻射安全主管機關已完成 SKB 申請品質與 SKB 能力，目前正更深一層審查安全關鍵審查議題決議。為促進廣泛的社會參與申照審查，瑞典輻射安全主管機關正安排兩項國家磋商，瑞典輻射安全主管機關審查目的是在 2015 年向瑞典的土地與環境法院提交一份聲明作為公聽會基礎，並於 2016 年向政府提交最後審查聲明與建議(Ministry of the Environment, 2014)。

SKB 在奧斯卡爾翰(Oskarshamn)北部 Aspö 地下硬岩試驗室正進行用過燃料最終處置場所大量研究（圖 40）。這是現實環境中全面用不同技術測試解決方案地方。

Aspö 試驗室是一個獨特的研究機構，世界其他地區只有幾個。地下近 500 公尺，瑞典和國際專家合作進行合作。研究在現實條件下可研究膨潤土和銅罐與岩石相互作用影響。在這裡進行實驗已確定岩石作為障礙物的作用。例如，這可以關注岩石如何減緩放射性物質的移動，或微生物如何影響這個深度的條件。



圖 40 、The Äspö Hard Rock Laboratory is situated in the Misterhult Archipelago close to the Oskarshamn nuclear power plant.

試驗室不僅當做實驗現場試驗，還可以被描述為用於設置用過燃料貯存庫設施。Aspo 地下硬岩試驗室開發與測試不同的岩石研究技術與方法，設計儲存庫與沉積罐。例如，它正測試機械與設備具有完全獨特全球技術（圖 41，圖 42）。



圖 41 、The Äspö Hard Rock Laboratory



圖 42 、The Äspö Hard Rock Laboratory

此外瑞典在許多方面，Aspo 試驗室用於未來乏燃料儲存庫。有隧道，安置孔、銅罐、黏土與機器。但兩個設施在兩個重要的設備有所不同，試驗室當然沒有用過

燃料。Aspo 試驗室所做的大部分是與其他學院，大學學術機構和組組織進行合作。再與世界其他地區的 SKB 同行組織分享技術專長和經驗同時，也進行了廣泛的合作。Aspo 試驗室的一些研究是在歐盟研究和技術發展框架計畫下進行的。其他組織也可以在 Aspo 試驗室進行自己研究，這可以通過新型研究開發平台或通過 SKB 的子公司 SKB 國際組織。

Aspo 試驗室也與外界社會人士、環保人員、當地居民做許多公開透明化溝通，取得道德與技術信任。平時有預約時間參觀安排導遊解說員向一群遊客，解說放射性廢棄物最終貯存庫設施，同時歡迎來自學校、公司，組織機關或協會等訪客團體，經由更多民眾參與溝通及建議以獲得更多民眾了解與認同，當地民眾深信環境必能與放射性廢棄物和平共存。（圖 43）



圖 43 、Äspö 試驗室安排導遊解說員向一群遊客解說情形

(三).瑞典 Barsebäck NPP 反應器內部組件拆解

106 年 3 月 3 日依原計畫行程參訪 Barsebäck 電廠，首先由電廠公關人員進行簡報，簡報內容包含電廠選址說明、政策性停機說明、目前駐廠人力及永久停機後電廠除役規畫等，另由西屋反應器內部組件切割駐廠經理說明目前組件切割狀況。隨後安排參訪人員辦理入廠手續完成後，由公關人員帶領進入廠房內並針對重要設備如發電機、汽機、冷凝器等簡單介紹，最後抵達燃料填換樓之反應器內部組件切割現場。Barsebäck 電廠由#2 號開始執行反應器內部組件拆解作業，目前正在進行側板蓋(Core Shroud Head)切割，在先前已完成蒸氣乾燥器、汽水分離器切割、控制棒導管切割裝箱，燃料墊塊自爐心移除並完成裝箱等，頂部導架自爐心移除置放於用過燃料池內等待切割。#1 號機預計於#2 號機完成後接續執行。

由參訪行程之介紹及相關說明，有關反應器內部組件拆解心得分為下列幾點：

1. 切割計畫：

電廠與西屋人員於執行前先擬定切割計畫，包含切割流程，切割工具選用，切割分離件夾持工具，及裁切尺寸規劃等。另西屋人員強調以往執行反應器內部組件之切割經驗，若能有精確尺寸的 3D 模型，可規劃出較佳的切割流程，減少切割工具干涉及避免切割死角(圖 44)，亦有助於後續裝填至儲存箱的規畫，增加儲存箱的裝填率(Packing density)。除了反應器內部組件有 3D 模型需求，若考量燃料填換池(如蒸氣乾燥氣/汽水分離器儲存池)可用空間有限，執行大型組件切割時，可能亦須於池內置放大型切割設備，若能於規劃時以 3D 模型進行模擬(包含池內空間配置、吊運路徑、裝填區域等)，並將欲切割之大型組件及選用切割工具進行模擬切割，可精確的驗證切割計畫可行性，並對於切割計畫之審查及作業溝通，增加效率及助益。

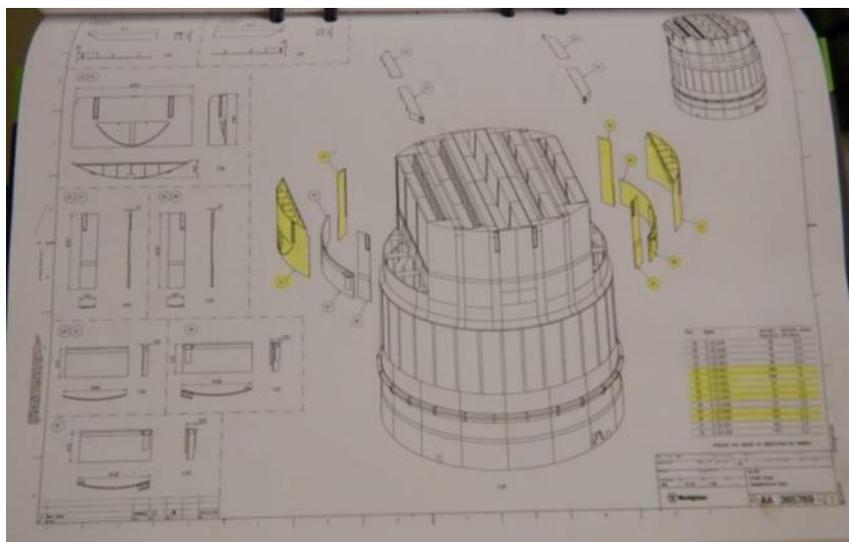


圖 44、反應器內部組件切割計畫(蒸氣乾燥器)

2. 切割組件裝填及運送計畫：

反應器內部組件受輻射照射活化影響，及電廠業主在評估化學除污成本效益後，部分須分解切割的內部組件(如蒸氣乾燥器、汽水分離器等複雜組件)可能並未包含於永久停機後化學除污的範圍內，故內部組件仍有相當強度的輻射劑量。Barsebäck 電廠反應器內部組件切割後之裝填計畫係依據模擬程式事先評估內部組件之活化劑量率並先行分類(預測輻射活化程度最高的爐內組件為爐心頂部導架及爐心側板)，並依分類將切割後之內部組件於水中填裝至指定之不銹鋼儲存箱(cassette tank)後(圖 45)，吊離水中進行密封及真空乾燥，並運至電廠暫存設施(interim storage)。

不銹鋼儲存箱由 Barsebäck 電廠提供，其外表尺寸為 3X2X1 公尺，但分為三種不同之壁厚，預計提供反應器內部組件裝填共 81 個(壁厚為 50mm 之儲存箱 64 個，100mm 15 個，150mm 2 個)，爐內組件或高劑量之組件填裝後之儲存箱外表接觸劑量須小於 200mSv/hr 之限制，若是超過劑量限值，須重新裝填(Repacking)。另瑞典針對長期放射性廢棄物最終處置場(Final repository for long-lived radioactive waste，或稱 SFL)正處於規劃階段，未來若 Barsebäck 使用之儲存箱與最終處置場規範不符合，亦有重新裝填的風險。

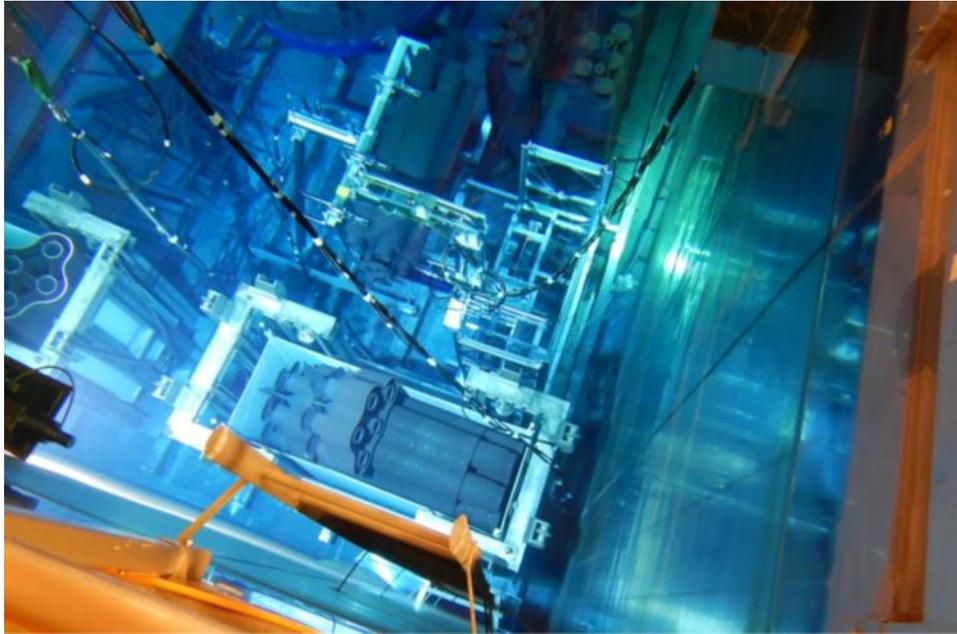


圖 45、 Barsebäck 電廠不銹鋼儲存箱

由目前 Barsebäck 電廠執行執行高劑量之反應器內部組件切割經驗，未來本公司執行核能電廠除役時，對於反應器內部組件劑量評估(核種評估)、儲存箱規範選用、後續運送至暫存設施或最終處置廠等皆須有明確規劃，以避免未來須重新裝填，甚至須重新裁切高劑量之反應器內部組件。

3. 工作臺車使用：

現場參訪 Barsebäck 電廠實際切割作業，須架設水底攝影機，液壓夾具夾持切割分離件，專用切割工具等設備，現場除了使用廠房吊車外，其工作臺車之捲揚吊索亦為切割作業必要之設備(圖 46)，工作臺車吊索荷重能力為 1000 公斤。以目前本公司營運電廠所使用之工作台車或燃料台車之吊車，其

設計荷重僅約 1000 磅，未來若執行切割拆解相關作業工作臺車或燃料台車之吊車能力略顯不足，可能須進一步評估提升吊運能力，以利分解切割作業。

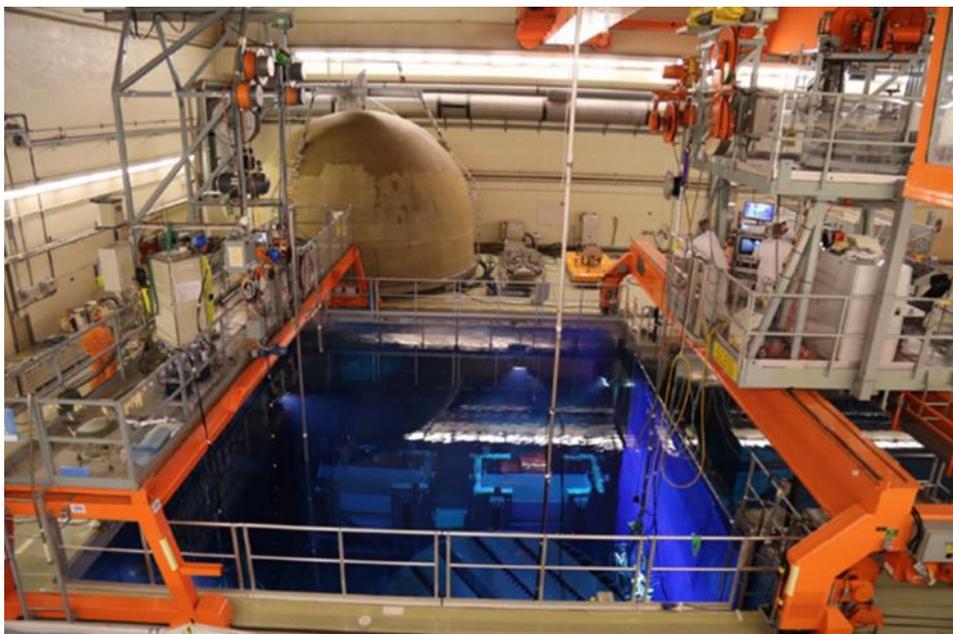


圖 46、 Barsebäck 工作臺車(左邊)

4. 切割工具 mock up 驗證：

反應器內部組件受中子通量影響，會導致材質有明顯脆化或硬化現象，故切割前，切割工具之能力及特性須能事前驗證，以確認適用性及可靠性。現場西屋公司切割人員特別說明，反應器內部組件材質脆化或硬化，是機械切割所需要考量的因素之一，故於工具 mock up 驗證時，會以相較於內部組件材質更高強度之合金或鋼材進行測試，驗證切割工具可用性。

切割工具如帶鋸機和圓盤鋸等，大部分係以市面上切割設備整合而成，技術門檻不至於太高。若未來考量由本公司或國內廠商自行執行反應器內部組件切割，可先評估進行切割工具之研發及可行性驗證，將有助於未來執行內部組件切割成本估算及決策依據。

5. 水質及可見度：

能維持水質良好的可見度是機械切割優點之一，因爐內或高劑量組件皆須於水中進行分解切割並減容後裝箱，故須作業人員須以水中攝影機進行監視，若分解過程產生過多小顆粒或氣泡影響水中可見度，皆不利於作業進行並增加作業風險。而機械切割所產生之切屑，可自行沉澱至池底，另以額外過濾設備(如水底吸塵器)進行池底清理，亦不會產生過多之二次性廢棄物。未來推動用過燃料乾儲設施仍有變數，若政策面決定用過燃料仍留在電廠內，仍逐步進行除役工作時，反應器內部組件切割作業是否會影響用過燃料池之水質亦須特別考量。

二、建議

本次赴瑞典參加除役訓練課程部份分為三部份：

- 1、西屋公司介紹反應爐內組件切割、劑量評估、化學除污、廢棄物估算及成本分析等內容，本次上課最難得的是除了課程的講解介紹外，另外安排實習課由學員動手操作課程中講解的設備如圓盤鋸、線鋸、剪刀等切割機具的應用，在操作中也遇到設備故障，對於設備的故障排除及切割機具的維修更換西屋公司講解也非常的詳細，一系列的課程中理論的講解與實物的應用讓我們對於整個切割的工法更為了解及印象深刻，對於未來除役時反應爐內組件切割的工具選擇與應用有相當大的幫助，對於未來若有機會安排相關同仁再出國實習，這樣的課程安排是相當不錯的。
- 2、參訪 SKB 在 Oskarshamn 的用過核子燃料中期貯存設施 CLAB、Canister Laboratory 和 Äspö 地下實驗室，在參訪過程中經由講解與實地參觀，過核子燃料中期貯存設施 CLAB 為濕式儲存與台灣目前發展的乾儲方式有所不同，而 Canister Laboratory 可以看到自行研發的攪拌摩擦焊接技術用於用過燃料的儲存，Äspö 地下實驗室更可以看出瑞典當局花費很多心思與金錢研發未來最終儲存場的用心，從 SKB 公司的各個場所可以看到要做除役工作需要投入大量的人力及物力，且在與民眾的溝通方面也是相當的重要，我們參訪的每個點，網頁上皆可自行申請，參觀相當的便民，建議國內未來除役時應建立相同的場所讓民眾參觀，同時可以讓參訪民眾對於核廢料的處置有更為深入的認識，幫助民眾了解整個除役時的規劃與存放，也助於當地民眾之溝通。
- 3、參觀 Barsebäck 核能電廠，瑞典 Barsebäck 核電廠 2 部機組反應器內部的除役作業，由西屋公司得標，西屋公司將負責把反應器內部組件，拆除、分割並包裝後，由瑞典作最終的處置。此次參觀時西屋公司正在切割反應爐內的爐心側板蓋(Core Shroud Head)，可以看到西屋公司使用圓盤鋸切割，與上課內容講解方法相同，切割方法驗證上課內容中所講解的方

式，整個參訪內容相當不錯，比較可惜的是只有安排一天時間，應安排較長時間會有更多的收獲。

伍、附錄

附件一、訓練課程資料及受訓名單

date	Title
2017/2/13	Westinghouse segmentation technology
2017/2/14	Preparatory work for segmentation
2017/2/15	Hydraulic training
2017/2/16	Working bridge, handling and Shearing tool training
2017/2/17	Disc cutting training
2017/2/20	Band sawing training
2017/2/21	Packaging training & Introduction to Repair and Modification
2017/2/22	RPV & Internal dismantling plan case study
2017/2/23	Full system decontamination
2017/2/23	Worker dose estimation
2017/2/24	Waste estimation
2017/2/27	Bioshield demolition
2017/2/27	Waste package form, waste management from dismantling to storage and free release(SKB)
2017/2/28	WBS methodology
2017/2/28	Cost estimation

附件二、瑞典 Barsebäck NPP 參訪資料

1. Barsebäck 電廠共兩部機組，每部機發電量 615MW(Gross capacity)。其反應爐為 ASEA ATOM(ABB)公司設計之沸水式反應爐，高約 20m，內徑為 5.45m(詳如圖 47)；其爐內組件包含蒸氣乾燥器、汽水分離器、爐心側板組件(含側板蓋、下側板組件等)、頂部導架、控制棒導管等，與本公司核一二廠使用之 GE BWR4 和 BWR6 反應器內部組件類似，但最主要差異為 ABB 設計反應器內部組件大部分直接由螺栓施加預力鎖固(非以焊接接合)，故如將爐心側板之鎖固螺栓鬆脫後即可吊離爐心進行分解切割。另爐心冷卻水由 4 台再循環泵直接驅動強迫冷卻水流過爐心燃料，並無使用噴射泵，故其反應爐環狀區(annulus)設計較為單純。

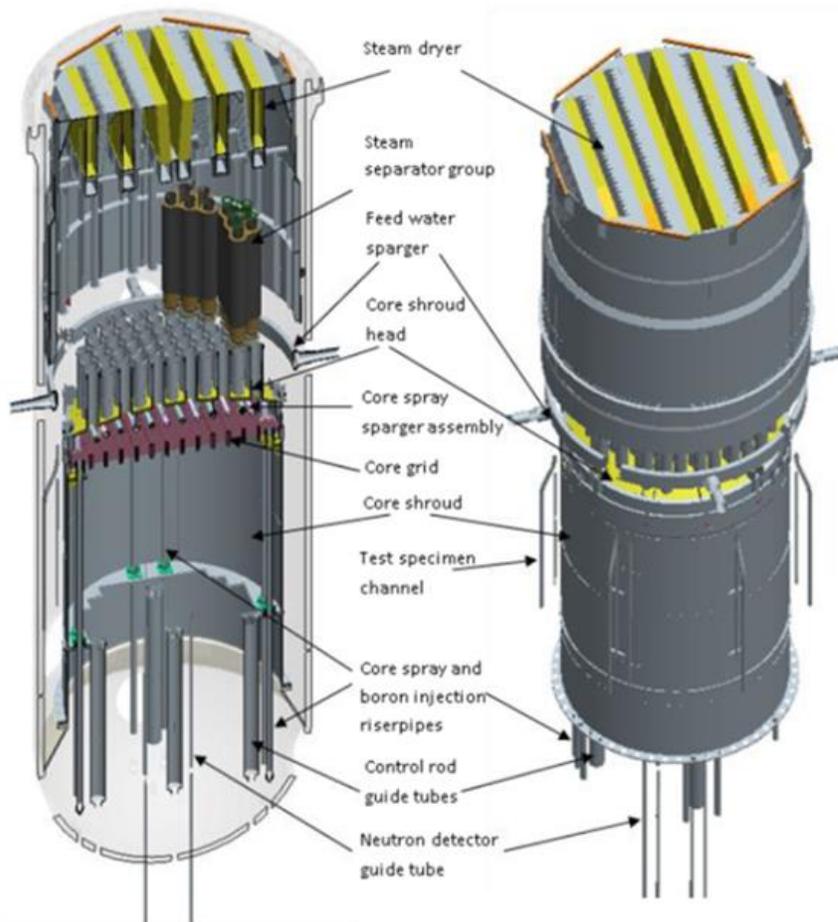


圖 47 Barsebäck、電廠反應器內部組件示意圖

2. Barsebäck 電廠#1 及 2 號機分別於 1975 年及 1977 年開始商轉，起初規劃提供瑞典南部及鄰國丹麥穩定電力來源，但因距離丹麥首都哥本哈根僅約 20 公里(如圖 48)，故自啟用起即爭議不斷，最後兩部機皆因政治因素迫使提早停止運轉。#1 號機於 1999 年，#2 號機於 2005 年進入永久停機狀態，機組原設計使用年限為 40 年，但分別僅運轉約 25/28 年。



圖 48 Barsebäck、電廠與對岸丹麥首都哥本哈根(擷取自網路)

3. 瑞典用過核燃料濕式集中儲存場(CIab)於 1985 年即開始營運，核電廠用過燃料自反應器退出 9 個月後，即可規劃將用過燃料運至 CIab 存放。故 Barsebäck 電廠內之用過燃料皆已移出至 CIab，用過燃料池內之燃料格架亦已切除清空，目前用過燃料池之區域用來規劃暫存反應器內部組件如頂部導架或其他爐內高劑量物件。
4. 電廠於兩部機皆停止運轉後，依國際除役經驗，及早執行系統化學除污，可達到減少人員劑量的最大效益，且於對於電廠系統熟悉的運轉維護人員尚留駐廠裡，有助於系統化學除污之規劃及執行順利，Barsebäck 電廠已於 2007/2008 年完成兩部機反應器下半部及冷卻水/主蒸氣系統等化學除污(即#2 號機確定進入永久停機狀態時，開始規劃化學除污)。未來若正式除役工作開始(預計 2025 年)，已不用考量用過燃料管理的相關規範，且經除污後，反應爐一次側的劑量亦大幅降低，對於後續除役作業人員可能接受劑量亦可大幅減少。

5. Barsebäck 電廠目前仍處於永久停機狀態，須待長期最終處置場營運後，電廠才會正式進入電廠拆解(Dismantle)階段。故目前機組除了反應器內部組件，經特別向管制單位申請同意後，正在進行切割外，其餘電廠設備大部分處於完整狀態。而目前切割後的反應器內部組件，將儲存於電廠內，2016 年啟用之暫存設施(interim storage)內進行管理。
6. 反應器內部組件切割專案由於 2015 年由西屋公司得標，並由#2 號機開始作業(#1 號機尚未開始切割作業)；因為 ABB 反應器內部組件設計是以螺栓施加預力鎖固為主，進行組件更換相對容易；且瑞典政府於約 2000 年初，曾同意多部核能機組功率提升並進行反應器內部組件更新的緣故，須將換下的舊內部組件進行切割，故西屋公司執行本切割專案前，即有多次在 Forsmark, Oskarshamn 電廠運轉中執行反應器內部組件切割之經驗及實績。
7. 電廠正常營運時之組織人力共約 450 人，目前駐留於電廠人力約為 50 人，包含運轉、維護、保健物理及保安等必要人力。在參訪時，電廠人員特別強調，電廠因政策性因素提早停止運轉，故由政府、Sydkraft 公司(Barsebäck 電廠母公司)與 Vattenfall 公司(佔 Ringhals 核電廠約 70%股權)達成協議，經由股權交換，Ringhals 核電廠由收購 Barsebäck 電廠股權，做為 Barsebäck 電廠提早停止運轉損失補償之一。永久停機後約 30%人力轉移至 Ringhals 核電廠，另外約 30%自願離職，其餘人力執行停機後續作業及除役規劃；另永久停機之機組則成為訓練的最佳場地，提供其他瑞典核電廠運轉及維護人員進行相關實物訓練。