

出國報告（出國類別：其他）

赴瑞典西屋公司進行核電廠除役技術  
交流及參觀 SKB 公司用過核子燃料處  
理設施出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：鄭敬瀚 助理研發師  
黃崇豪 副工程師

派赴國家：瑞典

出國期間：104 年 5 月 16 日~104 年 5 月 25 日

報告日期：104 年 6 月 29 日



## 英文摘要

This business trip to Sweden was visited Westinghouse Company for discussing about nuclear power plant decommissioning experience. Also, visiting SKB's nuclear facilities was included in the trip such as final repository for radioactive operational waste (SFR) in Forsmark, canister laboratory, central interim storage facility for spent nuclear fuel (CLAB) as well as Äspö hard rock laboratory for geological disposal in Oskarshamn. The trip is from May 16 to May 25.

The technique meeting was held by Sweden branch of Westinghouse and the topic of discussion as following, (a) preliminary investigation and estimation of radioactive waste amount; (b) RPV and internals activation analysis; (c) project management and WBS (Work Breakdown Structure) during decommissioning of Chinshan NPP. After complete discussions with WEC's experts, it's provided good understanding for the international nuclear power plant decommissioning planning, implementation and radioactive waste inventory information.

Besides, it is clearly understood the research objectives and current states on nuclear waste disposal after visiting the SKB's nuclear facilities. Taiwan doesn't have any nuclear fuel processing laboratory and treatment facility so far, therefore the experiences of treatment for spent fuel that handled by SKB Company could serve as helpful reference for domestic nuclear power plant in the future work.

**Keywords:** *Decommissioning, Radioactive Wastes, Quantitative Estimation, Disposal Technology*

## 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，赴瑞典西屋電氣公司進行核電廠除役技術經驗交流與討論；並參觀SKB公司的幾個核能相關設施如位於Oskarshamn的廢棄物罐實驗室、用過核子燃料中期貯存廠、Äspö地質處置地下實驗室。期程為104年5月16日至5月25日共計10天，參與人員包括核研所8人、台電公司1人。

本次除役技術經驗交流與討論係由西屋電氣公司配合辦理，研討內容主要包含除役放射性廢棄物活度估算程序、初步盤點結果及核一廠分工架構與排程等，藉此與專家進行完整討論後，更加了解國際上核電廠除役規劃、執行及放射性廢棄物盤點相關資訊。

此外，經由參訪SKB的核能相關設施後更清楚了解核能廢棄物處置研究與相關設施之研究目的與現況，由於我國現階段並無用過核子燃料的地下處置實驗室與設施，因此瑞典SKB公司對用過核子燃料的處理方式，可提供未來國內核電廠用過核子燃料處置與貯放之參考。

關鍵詞：核電廠除役、放射性廢棄物盤點、活度估算程序、處置技術

## 目錄

英文摘要 .....	1
摘要 .....	2
一、 目的 .....	6
二、 過程 .....	7
(一) 公差行程 .....	7
(二) 西屋公司除役經驗 .....	11
(三) SKB 公司廢棄物管理經驗 .....	12
三、 心得 .....	12
(一) 放射性廢棄物數量及特性之推估 .....	12
(二) 反應器壓力槽及內部組件之活化分析 .....	21
(三) 核電廠除役作業之工作分解架構 .....	26
(四) 參觀 SKB 公司相關核能設施 .....	35
四、 建議事項 .....	48

## 圖目錄

圖 1 瑞典出差參訪城市位置圖(來源: www.skb.se) .....	11
圖 2 放射性廢棄物數量及特性之推估程序.....	13
圖 3 廢棄物盤點資料庫示意圖.....	17
圖 4 為不同管線外徑下，接觸劑量率與管線內部表面污染程度之關係.....	19
圖 5 為不同管壁厚度下，接觸劑量率與管線內部表面污染程度之關係.....	19
圖 6 空間劑量率與混凝土表面污染程度之關係.....	20
圖 7 軸向相對中子通量示意圖.....	22
圖 8 爐心射源強度空間變化示意圖.....	23
圖 9 除役作業之工作人時規劃流程圖.....	26
圖 10 SVALA 針對廢棄物處理之功能關聯.....	29
圖 11 Document management system (SGD)文件管理系統資料庫.....	30
圖 12 西屋公司在熱交換器切割之隔離帳篷建置、切割機具架設與切割深度經驗 .....	32
圖 13 西屋公司講師以及參與計畫人員於第一天會議結束後與西屋公司合影..	34
圖 14 西屋公司講師以及參與計畫人員於第二天會議結束後與西屋公司合影..	34
圖 15 瑞典核電廠分布圖.....	35
圖 16 瑞典 SKB 公司在用過核子燃料及核子廢棄物上之管理系統圖.....	36
圖 17 廢棄物罐實驗室全景圖.....	37
圖 18 螺旋摩擦焊接頭.....	38
圖 19 焊接完成後進行拉力試驗之試片結果.....	39
圖 20 螺旋摩擦焊接示意圖.....	39
圖 21 超音波檢測設備.....	40
圖 22 X 光攝影機.....	40
圖 23 廢棄物罐組件測試後展示圖.....	40
圖 24 用過核子燃料的海運船.....	41
圖 25 用過核燃料運送過程.....	42
圖 26 瑞典中期貯存設施 CLAB 剖面圖.....	43
圖 27 瑞典 CLAB 中期貯存設施運作圖.....	43
圖 28 地下貯存池的實景照.....	44
圖 29 進入貯存池所需著裝的配備.....	44
圖 30 為 Äspö 硬岩實驗室地下隧道建置的情形.....	45
圖 31 原型處置場試驗.....	47
圖 32 緩衝材料長期效應實驗.....	47

## 表目錄

表 1 西屋公司除役討論會議議程.....	8
表 2 公差行程表.....	10
表 3 西屋公司經驗示例-除役研究 .....	12
表 4 電廠除役之工作程序.....	28

## 一、目的

本所執行台電公司委託「核一廠除役許可申請及除役作業規劃工作」與 NAC 公司委託「核二廠乾貯案技術支援工作」之技術服務計畫，因計畫需求須赴分包商瑞典西屋電氣公司（Westinghouse Electric Company）進行除役技術議題討論，包含反應器壓力槽及內部組件之活化分析、核電廠除役放射性廢棄物產量估算與比例因數之分析、核電廠除役作業之工作分解架構人力工時盤點等；以及赴瑞典 SKB(Svensk Kärnbränslehantering AB)公司進行放射性廢棄物處置與用過核子燃料中期貯存設施技術議題交流，包含處置與工程障壁技術與設計、安全評估方法、情節模擬與案例分析等交流議題，並參訪 Öskarshamn 廢棄物罐實驗室、用過核子燃料中期貯存設施與 Äspö 地下實驗室行程，進行經驗與心得之交流，討論延續性議題如下：

(1)反應器壓力槽放射性廢棄物分類、活化分析源項設定、比例因數之分析方法、核電廠除役放射性廢棄物產量盤點方法、核電廠除役作業之工作分解架構。

(2)廢棄物處置與工程障蔽技術與設計、安全評估方法、情節模擬與案例分析等重大議題之討論與研究，並與相關領域之專家進行技術交流。

而本次出國報告將分成兩部分，本報告主要係針對參訪西屋公司討論上述議題(1)的內容，以及參訪 SKB 相關核能設施，彙整出相關心得與建議事項，以助於本所未來除役規劃與發展核設施除役等相關議題之參考。

## 二、過程

### (一)公差行程

本次赴瑞典公差從104年5月16日到5月25日共計10天，此行第一個行程(5/18-5/19)是到位於斯德哥爾摩的西屋公司進行除役議題討論，表 1 為本會議之議程，其中第一天討論議題分為上午與下午兩個部分，上午是針對核一電廠除役放射性廢棄物盤點問題與西屋電氣公司所提交之報告進行討論，下午則是針對核研所已自行完成核一廠反應器壓力槽內部組件與生物屏蔽活化分析進行經驗交流，參與人員為施副所長、邱一夫先生、黃崇豪先生、鄭敬瀚先生，其餘人員則是參觀Forsmark最終處置場。第二天討論議題上午則為核一電廠除役之工作分解架構(WBS) 規劃、工作人時規劃、除役資訊系統建置等問題，下午則是針對西屋電氣公司所提交之報告進行問題討論與參考文件查核，參與人員為黃崇豪先生與鄭敬瀚先生，其餘人員則是赴SKB公司討論雙邊合作議題與成果交流。而西屋公司準備了相關簡報，但考量到需要討論之議題較多，且經本團隊快速審閱其簡報內容，發現仍多流於表層理論介紹，仍缺乏針對議題較為精準的相關經驗之分享，故施副所長建議直接切入議題進行討論，以利會議進行。本議程主要會談人員為瑞典西屋公司化學與輻射部門資深工程師 Peter Cronstrand 博士、核電廠除役廢棄物管理工程師 Niklas Bergh 先生與 Niklas Leveau 先生，以及除役計畫專案經理 Lennart Nilsson 先生。

第二個行程(5/20-5/22)則是往南到 Oskarshamn 參觀廢棄物罐實驗室、CLAB 用過核子燃料中期貯存設施與 Äspö 地下實驗室，最後再返回斯德哥爾摩赴 SKB 總公司交流相關議題，此行也進行計畫研究內容交流，建立後續協同合作之機會，拓展研究深度與了解國際先進除役相關工程案例與研究重點，參與人員為計畫全體同仁，而此行程詳細參訪內容請參照「赴瑞典參訪 SKB 公司及參訪相關核能設施國外公差報告」。

本次赴瑞典公差之行程及工作日誌如表 2 所示，上述幾個城市的相關位置如圖 1 所示，細部討論如下各節內容。

表 1 西屋公司除役討論會議議程

日期	時間	議題	主講人
104.05.18 (一)	10:00-12:00	<b>Implementation of preliminary investigation and estimation of radioactive waste production amount during Decommissioning of Chinshan NPP:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Review of waste estimation for Chinshan site</li> <li>2. Derive Chinshan scaling factor(including Primary Surfaces, Cleanup Systems and Concrete)</li> <li>3. Implementation of activity estimate for radioactive waste (Take the inventory template for example)</li> <li>4. Activity classification according to NRC regulation</li> <li>5. Practice of the inner surface area estimate for irregular components</li> <li>6. Assessment of uncertainty of Chinshan scaling factors</li> </ol>	Peter Cronstrand Niklas Leveau
	12:00-13:00	<b>Lunch</b>	
Date	Time	Activities	Responder
104.05.18 (一)	13:00-15:00	<b>Implementation of RPV and internals activation and contamination analysis:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. RPV classification</li> <li>2. Source term setting for activation</li> <li>3. Implementation of control rods and instruments</li> </ol>	Peter Cronstrand Niklas Leveau

		<p>activation and contamination analysis</p> <p>4. Implementation of structure material activation and contamination analysis</p> <p>5. Bio-shield classification</p> <p>6. The Impact of tramp uranium</p>	
104.05.18 (一)	15:00-16:00	<b>Future needs and cooperation</b>	INER/WEC
<b>Date</b>	<b>Time</b>	<b>Activities</b>	<b>Responder</b>
104.05.19 (二)	10:00-12:00	<p><b>Implementation of project management and operations scheduling for the decommissioning of Chinshan NPP :</b></p> <p>1. Information system setting of NPP decommissioning project</p> <p>2. Implementation of man-hour estimate for decommissioning work</p> <p>3. Implementation of cost estimate for decommissioning work</p>	Niklas Bergh
	12:00-13:00	<b>Lunch</b>	
104.05.19 (二)	13:00-17:00	Other question and technical documents review	Lennart Nilsson

表 2 公差行程表

日期	行程	公差地點	工作內容
104.05.16 (六) ~ 104.05.17 (日)	台北→瑞典	斯德哥爾摩	去程
104.05.18 (一)	斯德哥爾摩	斯德哥爾摩	赴西屋公司進行除役議題討論
104.05.19 (二)		斯德哥爾摩	赴西屋公司進行除役議題討論
104.05.20 (三)	斯德哥爾摩→ Oskarshamn	Oskarshamn	參觀廢棄物罐實驗室
104.05.21 (四)	Oskarshamn→ 斯德哥爾摩	Oskarshamn	參觀 CLAB 用過核子燃料中期 貯存設施與 Äspö 地下實驗室
104.05.22 (五)		斯德哥爾摩	赴 SKB 公司討論議題
104.05.23 (六)		斯德哥爾摩	資料整理
104.05.24 (日) ~ 104.05.25 (一)	瑞典→台北	斯德哥爾摩	返程



圖 1 瑞典出差參訪城市位置圖(來源: [www.skb.se](http://www.skb.se))

## (二)西屋公司除役經驗

西屋電氣公司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

### (三) SKB 公司廢棄物管理經驗

SKB 公司係由瑞典四家電力公司(分別為 Vattenfall、Forsmarks Kraftgrupp、OKG、Barseback Kraft)合資於 1978 年成立，為瑞典最大核燃料和核能廢棄物管理公司，其發展核電廠放射性廢棄物處置方案及其相關之最新安全評估技術超過 30 年，近年致力發展放射性廢棄物處置技術與建置相關設施，並發展現場監測技術用以驗證各樣安全評估模式與情節案例分析。

### 三、心得

彙整核電廠除役技術經驗交流與討論所提出之問題，將學習獲得的相關技術、經驗、方法及心得說明如下。

#### (一)放射性廢棄物數量及特性之推估

本團隊除役產生之放射性廢棄物數量及特性之推估程序，係參考西屋公司之

經驗，流程如圖 2 所示，其中主要的議題包括探討除役放射性廢棄物之來源、輻射特性調查方法、比例因數推估方法、廢棄物數量盤點方法、放射性廢棄物活度估算方法等。

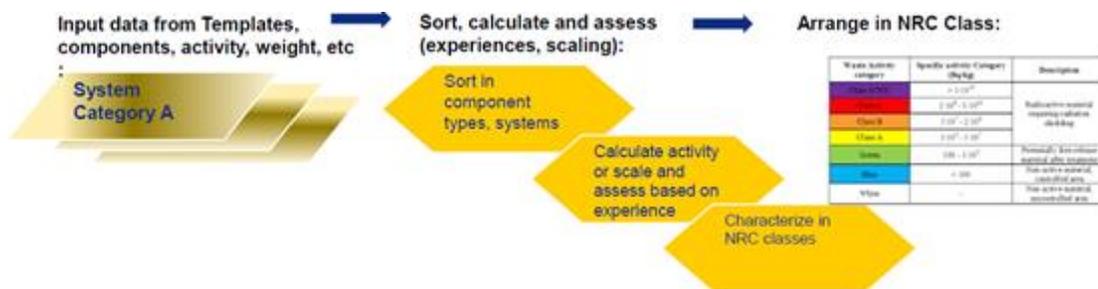


圖 2 放射性廢棄物數量及特性之推估程序

### 1. 除役放射性廢棄物之來源

根據西屋公司之經驗，核一廠除役產生之低放射性廢棄物，其污染程度可歸因於各結構、系統與組件受中子活化及或受活化腐蝕產物與分裂產物附著沉積而有所差異。

其中，中子活化係指爐心周圍的結構、系統與組件受到中子照射後，在其本體內部生成活化核種；以反應器系統組件為例，常見的活化核種，主要為 Co-60、Fe-55、C-14、Ni-59、Ni-63 及 Nb-94 等。源自中子活化所產生之低放射性廢棄物，主要為反應器壓力槽與其內部組件及生物屏蔽，其活度及特性可藉由長期運轉累積中子通量、材料規格與其相對應的中子截面來進行估計。根據過去之經驗，這些組件材料內部均被中子輻射穿透活化，無法利用表面除污來降低其活度，且通常這些遭活化所產生核種的半化期較長，其放射性活度隨時間衰減不顯著；因此，被中子活化之低放射性廢棄物，部分會達到 C 類或超 C 類之狀態。

另一種來源則是表面污染低放射性廢棄物，可分為兩種，第一種是來自活化腐蝕產物(Crud)，成因為反應器之冷卻系統、冷凝系統及飼水系統的管路會日積月累的被爐水沖刷，造成管線系統內壁微量的金屬粒子因沖蝕或腐蝕而剝落，之後流經爐心受中子照射活化後而產生放射性腐蝕產物；隨後這些被活化腐蝕產物

將會擴散到所有與反應器冷卻相連的系統，而這些活化腐蝕產物在管線中沉積的程度，與液體的流速、溫度及系統的幾何構造有關；此外，須注意的是，這些管線系統若有滲漏，則污染物很有可能會隨之散佈到結構表面等，因此，活化腐蝕產物主導了與爐水或蒸汽接觸之系統組件設備的表面污染，而根據西屋公司之經驗，主要的核種為 Co-60。第二種污染源為燃料破損所造成分裂產物釋放到反應器冷卻系統，主要會積聚在廢氣系統中之過濾延遲單元(活性炭)的表面，而分裂產物的污染程度則取決於燃料洩漏歷史及爐水或蒸汽的長期洩漏率等。

由此可知，沸水式反應器電廠除役可能產生低放射性廢棄物的分布範圍，以核一廠為例，其涵蓋範圍包含聯合結構廠房(反應器廠房、廢料廠房、聯合廠房)與汽機廠房的管線、組件與設備，以及這些廠房結構進行表面除污所移除的受污染混凝土等。

## 2. 輻射特性調查方法

輻射特性調查及評估結果為建立放射性廢棄物數量及特性推估方法之主要數據來源，因應除役低放射性廢棄物產量比例多，且多來自大量物質與設備(materials and equipment, M&E)，故為建立完善回收利用、再使用、處置等管理作業。針對此部分，西屋公司則建議可參考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, MARSAME)(以下簡稱 MARSAME) 進行偵檢與評估，該手冊係由美國國防部(Department of Defense, DOD)、能源部(Department of Energy, DOE)、環保署(Environmental Protection Agency, EPA)及核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)四個具有放射性物質管制職權的聯邦部會所共同建立。

MARSAME 是美國多部會輻射偵檢與場址調查手冊(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)的補充報告，主要是透過 MARSAME 程序來提供物質與設備相關偵檢的規劃、執行、評估及文件化等技術資訊，使解除管制作業之調查與偵檢技術更趨完善，達到資源回收再利用之目

的。

簡述 MARSAME 系統分級與偵檢設計流程，首要蒐集電廠系統資料以做為初始評估(Initial assessment)，並於廠址歷史資料調查與評估，將系統區分為受影響或未受影響兩類，未受影響系統不需進一步的調查行動。對受影響系統必要時可執行初步偵檢(Preliminary survey)，以獲得額外的資訊；可幫助描述系統的物理或輻射分布特性，以及因應接下來的處置偵檢(Disposition survey)。於發展決定規則(Decision rule)方面，包含確認關鍵核種、行動水平、定義參數、定義偵檢單元邊界、發展量測品質目標、確認替代行動，依照不同的污染潛力設計處置偵檢單元以進行分級，透過後續偵檢執行及評估結果，據以做決策及落實決策資料文件化，確保回收利用、再使用、處置等管理安全。

### 3. 比例因數推估方法

由於除役中實際執行時，需考量除役作業時程與成本之限制，因此，無法逐批進行取樣分析，針對於本項作業實行的困難，西屋公司建議採用比例因數(Scaling Factor)作為估算活度之方式。但須注意由於不同系統間污染及放射活度沉積程度有所差異，因而影響廢棄物內含核種的相對分佈，故除役時需依據輻射特性調查結果，依照系統特性將電廠分區，再建立各分區之比例因數。

建立比例因數時，需將所欲量測的核種活度分為易測核種(easy to measure (ETM) nuclides)與難測核種(difficult to measure (DTM) nuclide)，加馬核種可以直接量測方式分析獲得定量活度，如 Co-60、Cs-137 等，故稱為易測核種；阿伐、貝它核種需取樣後透過化學前處理才能進行定量分析，因相對耗時不易大規模進行，故稱為難測核種。電廠同一分區之污染應有近似的核種組成與比例，建立同一分區污染之難測核種與易測核種的關係式，即為比例因數。再配合分區批次抽測易測核種之加馬活度，利用比例因數計算出難測核種活度，即可減少為取得難測核種活度之作業時間與成本。

而根據西屋公司電廠除役之經驗廢棄物來源主要可分為五類，分別是爐心活化組件(Core support)、一次側環路內表面(Primary surfaces)、淨化系統(Cleanup systems)、排氣系統(Off-gas)及污染混凝土廢棄物(Concrete waste)。

#### 4.廢棄物數量盤點方法

除役放射性廢棄物盤點數量推估是依據西屋公司之經驗，將電廠之除役廢棄物分類為 23 個盤點表，細分如下：

1. 電纜與電纜架(包含聯合結構廠房與汽機廠房之電纜及纜架)
2. 電力組件(包含 I&C 組件、變壓器等)
3. 電力櫃(包含控制盤、配電箱等)
4. 吊裝設備(包含單軌吊車、小型吊具等)
5. 熱交換器(包含飼水加熱器、冷卻塔等)
6. 加熱及衛生用水處理組件(包含生水池、廢水過濾器)
7. 加熱及衛生用水處理管線(包含衛生用水及加熱設備之相關管線)
8. 其他汽機廠房組件(包含其他未被分類之汽機廠房組件)
9. 天車(聯合結構廠房與汽機廠房之天車)
10. 儀器管線(包含取樣及偵測管線等)
11. 內襯鋼板(包含燃料格架、乾井與濕井之內襯鋼板等)
12. 泵件(包含反應器再循環泵、冷凝水泵等)
13. 反應器壓力槽(單指反應器壓力槽體、不含內部組件)
14. 反應器壓力槽內部組件(包含爐心側板、噴射泵等)
15. 鋼材(包含樓板、鋼架等)
16. 桶槽(包含廢污泥槽、冷凝水儲存槽等)
17. 汽機組(包含高低壓汽機與發電機等)
18. 廠房建材(包含混凝土、鋼筋等)
19. 雜項製程組件(包含空壓機、乾燥器、過濾器)
20. 管路連接件(包含 T 型管、彎管、漸縮管等)
21. 製程管線(包含與運轉系統相關之管線、地下管線等)
22. 閥件(與運轉系統相關之閥件)
23. 通風元件(包含寒水機、風管等)

各設備組件之幾何尺寸及數量可根據核一廠終期安全分析報告(FSAR)、核一廠竣工報告、歷年大修紀錄文件、核一廠運轉知識庫、6 in 以上管線、閥件及



移方程式之解，並進行光子屏蔽設施外劑量計算，目前為保健物理專業領域之國際認可程式；而所謂的點核仁計算法為解決屏蔽計算問題時的一個基本演算法，其原理是將體積分佈之射源分割成微小的體積元素(點核仁)，把每個體積元素視作一均相點射源；因各個均向點射源皆會對偵測點造成劑量率，利用射源活度與偵測點間之距離平方反比定律(Inverse-square Law)，加以考慮行經介質所造成之指數衰減及增建因數(Buildup Factor)進行計算後，將各個均向點射源對偵測點造成之劑量率加總以獲得偵測點之總劑量率。

根據西屋公司過去除役經驗，對於管線內部污染程度之估算，須依據核電廠實際之管線幾何尺寸探討：「不同管線外徑」以及「不同管壁厚度」等條件下，接觸劑量率與管線內部表面污染程度之關係。以參考電廠為例，圖 4 為不同管徑尺寸在充滿水的情況下接觸劑量率與管線內部表面污染程度之關係，因此根據此結果，即可透過量測之管線劑量率推估其內部污染程度。此外除了管徑大小，管壁厚度也為劑量率與管線內部表面污染程度之控制因子，例如圖 5 為比較不同管壁厚度接觸劑量率與管線內部表面污染程度的關係，根據其計算結果，在相同的污染程度下，管壁越厚所測得之劑量率越低。而對於污染混凝土之活度推估，同樣需進行放射活度沉積度之模擬，例如圖 6 空間劑量率與混凝土表面污染程度之關係，可發現表面污染程度與劑量率成正比。而後再根據輻射特性調查所量測之劑量率，即可推估換算表面污染程度，最後，再與該設備、組件及污染混凝土之內表面積相乘，即可估算得到活度。

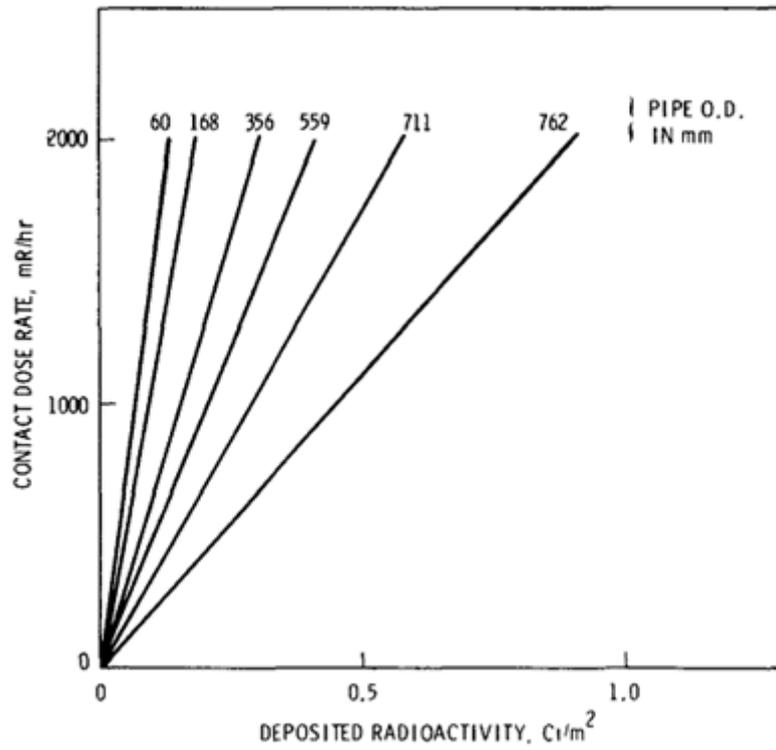


圖 4 為不同管線外徑下，接觸劑量率與管線內部表面污染程度之關係

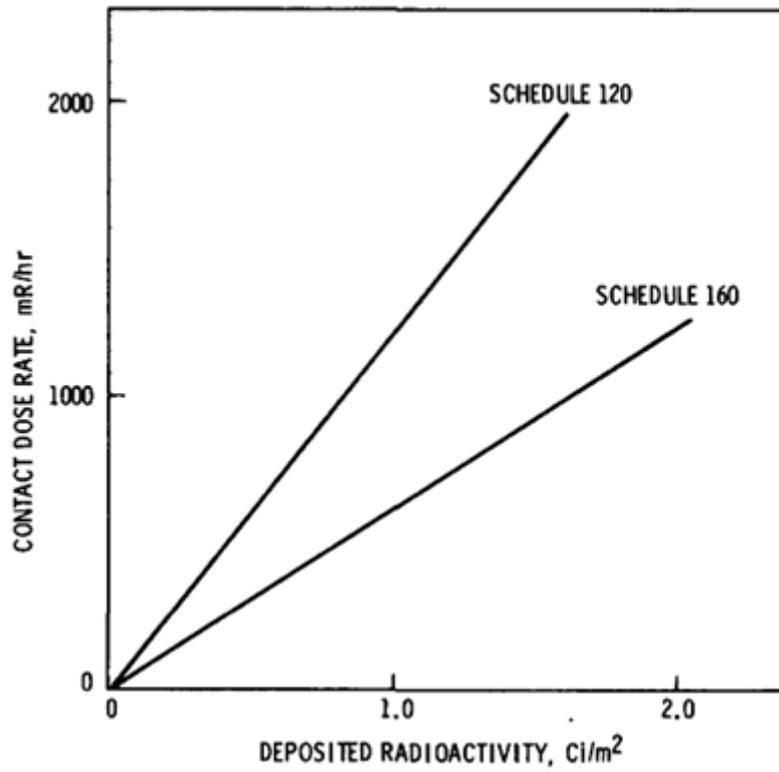


圖 5 為不同管壁厚度下，接觸劑量率與管線內部表面污染程度之關係

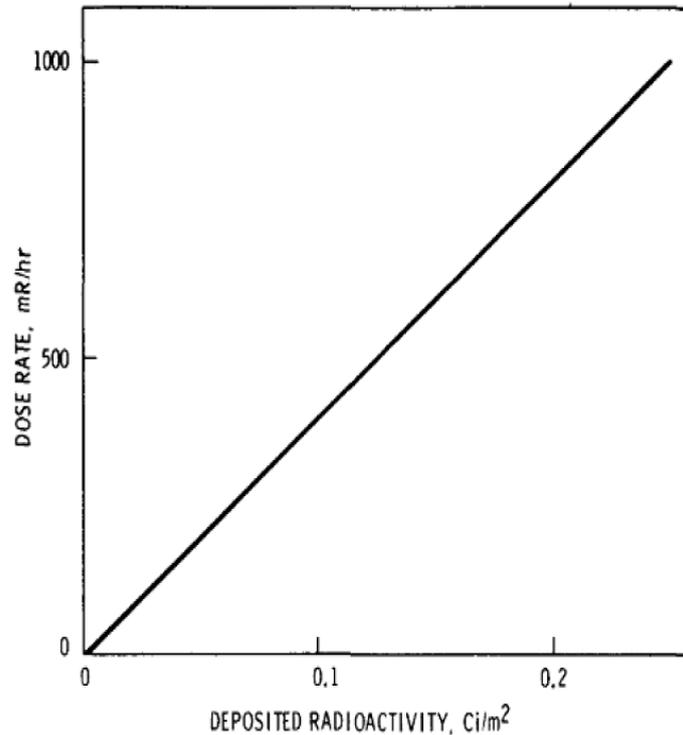


圖 6 空間劑量率與混凝土表面污染程度之關係

## 6.問題討論

- (1) 在推估換算內部表面污染程度時，需與該設備及組件之內表面積相乘才可估算得到活度，但某些設備及組件之幾何構造複雜且內部呈現不規則形狀之下，該如何求得內表面積？

西屋電氣公司的回答是：在缺少設備及組件之內表面積詳細資料的情況下，建議可使用類比推估來進行估算，其方法為計算在不同管徑尺寸下，面積/重量比與表觀密度(Apparent density)之關係，其中重量的部分可由直徑、壁厚和材料密度來計算，而後再根據不同曲線即可求得趨勢線，因此，未來則可依設備及組件之表觀密度來推估換算面積/重量比，最後再與重量相乘，即可估算面積。

- (2) 由於除役規劃階段核一廠尚在運轉，目前僅能取得少量爐水、排氣系統用過活性碳與一次測環路閥件樣品，且現階段分析結果僅測得加馬核種活度，難測核種活度均為 MDA。分析其原因可能因取樣需配合核一廠大修進行，取樣

位置有所限制，樣品數量亦有所不足，故無法完全代表相關系統污染程度，而在此情況之下，該如何建立比例因數？

西屋電氣公司的回答是：考量取樣分析數據之代表性有所疑義，西屋公司建議可使用核一廠過去之用過爐水淨化樹脂放射化學分析數據，並採用幾何平均法進行統計，得到一組代表淨化系統之比例因數(以下稱為「核一廠運轉歷史比例因數」)。而後再根據參考電廠之比例因數以及其除役經驗報告，以統計方式計算出另一套比例因數(以下稱為「參考資料比例因數」)，將其中屬於淨化系統之數值與「核一廠運轉歷史比例因數」比對，依其差異進行修正，再依照其修正的幅度，同步微調「參考資料比例因數」中其他系統數值，得到一次側環路內表面與排氣系統之比例因數。同樣地、由於無法自核一廠取得建物表面的樣品，因此可採取同樣的方法，將參考電廠的建物表面活度資料轉換至核一廠，作為建立混凝土廢棄物比例因數的基礎。

## (二) 反應器壓力槽及內部組件之活化分析

主要議題包含反應器壓力槽放射性廢棄物分類、活化分析源項設定、結構材料、爐內儀器以及控制棒的活化與污染分析、生物屏蔽放射性廢棄物分類、迷離鈾之影響等幾項議題進行經驗交流。

### 1. 反應器壓力槽放射性廢棄物分類

本團隊參考 IAEA TR-389 號報告中子活化分析流程獨立完成中子活化分析，並提供西屋公司盤點表所需相關活化之活度數據，西屋公司據此進行放射性廢棄物盤點，根據西屋公司的經驗，反應器壓力槽由於運轉期間，軸向中子通量率變化極大，甚至高達九成的活化是形成在爐心腹帶區(core beltline)如圖 7 所示。故根據本所評估之單一結果，直接採用典型軸向中子通量率分布，距離中平面越遠，中子通量下降劇烈，造成活化程度改變，而廢棄物分類也會有所差異。

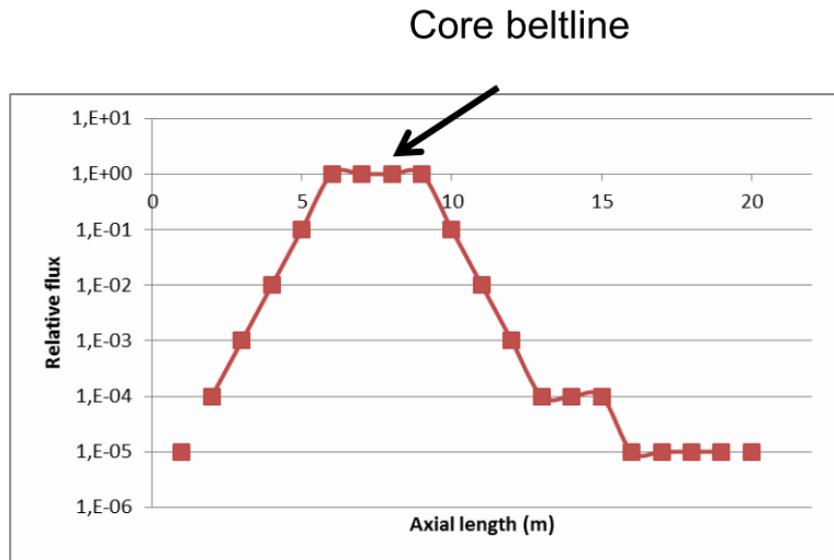


圖 7 軸向相對中子通量示意圖

## 2.活化分析源項設定

活化分析射源項須設定其空間分布、強度分布與能譜等資訊，西屋公司提出他們並非僅單純考量 U-235 所產生的分裂，而是整個週期內其餘可能的分裂射源亦納入作為考量，此項設定無法單純疊加取得其能譜與強度，故須使用相關程式進行設定。

另外射源項須考量到的主要參數有冷卻劑的平均與入口溫度、週期燃耗資訊、爐心功率與燃料束功率分布、爐心配置圖(core loading map)、軸向功率分布、中子能群等參數資訊。活化分析之射源為各個燃料組件，燃料組件裝載由燃料丸填裝成束的燃料棒，燃料丸中的 U-235 與熱中子作用發生分裂產生巨大能量，其分裂過程也產生數個中子，形成 chain reaction，而分裂產生之中子則成為活化分析中的射源。射源是與時間、空間與能量分布相關，如圖 8 所示，單一時間點即得到空間分布之資訊，而隨著運轉週期時間累積，則會有隨時間變化之分布資訊，由於累積取得的參數資訊眾多，將其合理簡化為具代表性之參數對模擬評估有極大幫助，西屋公司建議採用年或月平均方式將冷卻劑溫度、功率分布(包含徑向與軸向)等參數數據進行整理比較適當。

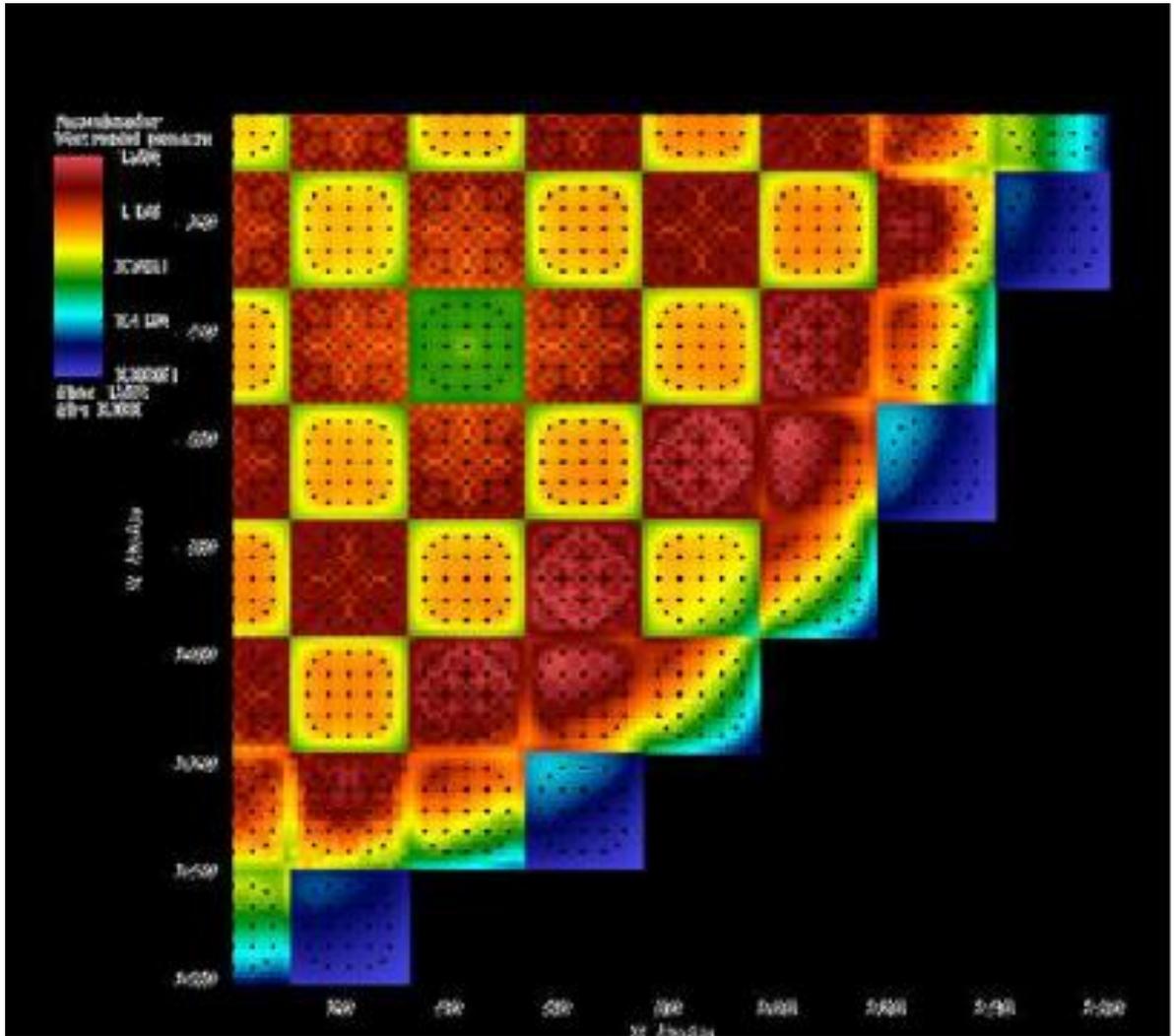


圖 8 爐心射源強度空間變化示意圖

### **3.結構材料、爐內儀器以及控制棒的活化與污染分析**

有介於內部組件可能在運轉過程中遭受到鏽蝕鐵沉積等表面污染，綜合整體活化與污染才為整個組件之放射性活度評估，而本團隊現階段已完成活化分析，欲將整體考量納入說明，故請西屋公司分享相關處理經驗。西屋公司表示，對於反應器壓力槽內部組件而言，表面污染是極為微小到可以忽略。

### **4.生物屏蔽放射性廢棄物分類**

由於根據我們的評估，反應器壓力槽內部組件與生物屏蔽之活化程度將會根據材質與幾何特徵有不規則形狀擴散之趨勢，對於反應器壓力槽與生物屏蔽的切割，是否採用沿其不規則分布邊緣進行切割與進行放射性廢棄物分類，西屋公司表示，由於現場施作之技術與時間等考量，將會採用先行以保守方式將切割區域分配好，切割方式則採用最精簡之縱向與橫向切割，以利施作。

### **5.迷離鈾之影響**

介於本團隊執行乾式貯存之審查經驗，提出反應器壓力槽內部組件是否考量迷離鈾之影響，西屋公司表示完全不考慮。

### **6.問題討論**

由於核一廠除役計畫內的活化分析評估部分由本所獨立執行，西屋公司單方面認定關於此議題之討論會超出合約範圍，可以討論但需要額外顧問費用(但實際上活化分析是含括在整體除役放射性廢棄物盤點內)，故相關討論較無法深入核心。另外，本團隊前次赴西屋公司所安排西班牙受訓的內容(“Vandellos I GCR

Activation Analysis Westinghouse D&D Training to INER, March 17-April 7, 2014, Madrid”)中有提及採用 MCNP 程式進行中子遷移分析，西屋公司現場則表示不建議使用 MCNP，因為太耗時間，MCNP 較適合單點評估，而整個切面或組件之中子通量率分布則建議採用其他程式。西屋公司針對中子通量評估基本上是參照 NRC 1.190 報告進行評估，但西屋公司有三點進行改進，第一為 Anisotropic scattering 採用  $P_5$  Legendre expansion(NRC 1.190 則對於所有輕水式反應器架構採用  $P_3$  Legendre expansion 處理散射截面)；第二為 angular discretization 採用  $S_{16}$  order of angular quadrature(NRC 1.190 則採用  $S_8$  fully symmetric angular quadrature)；第三為能群設定，西屋公司採用 BUGLE-96 程式提供之 67 能群結構，而 NRC 1.190 則採用 20 能群(>0.1 MeV)之能群結構，本研究團隊進行評估時也同樣採用 BUGLE-96 提供之 67 能群結構進行評估。

針對評估時所使用之程式，一般而言多採用商業軟體，DORT/TORT 進行中子通量率分析，有介於 mesh 設定之記憶體限制，西屋公司則採用自行研發的 RAPTOR 程式進行中子通量率評估，(本團隊則採用 DORT 與 ANISN 整合方式以及蒙地卡羅 MAVRIC 程式進行中子通量率評估)，RAPTOR 之優勢在於，有 CAD 介面；整合視覺化程式(對於幾何架構繪製有相當大幫助)；平行運跑可大幅縮減計算時間；亦整合後端活化程式 ACT2。原則上，西屋公司對於他們自行研發程式僅作特性說明、優勢與簡介之介紹，並未深入說明或是以案例進行示範。經討論，將其使用之自行研發程式與版本進行確認與紀錄如下，射源設定部分採用 SORCERY Version 5.3，其為一定射源設定程式；中子遷移評估部分則採用 RAPTOR-M3G Version 2.0，RAPTOR-M3G (RAPid Parallel Transport Of Radiation – Multiple 3D Geometries)是三維解線性波茲曼方程式之遷移程式，具備平行運跑能力；活化分析則採用 ACT2 Version 1.1，為活化分析材料計算程式。

### (三)核電廠除役作業之工作分解架構

#### 1.核一電廠除役之工作分解架構與工作人時規劃

圖 9 為除役作業之工作人時規劃流程圖，由該流程圖可知在規劃除役工作人時的時候，須包含特性調查、工作程序、工作組件、困難因子等項目，才有辦法進一步評估除役作業之工作人時。

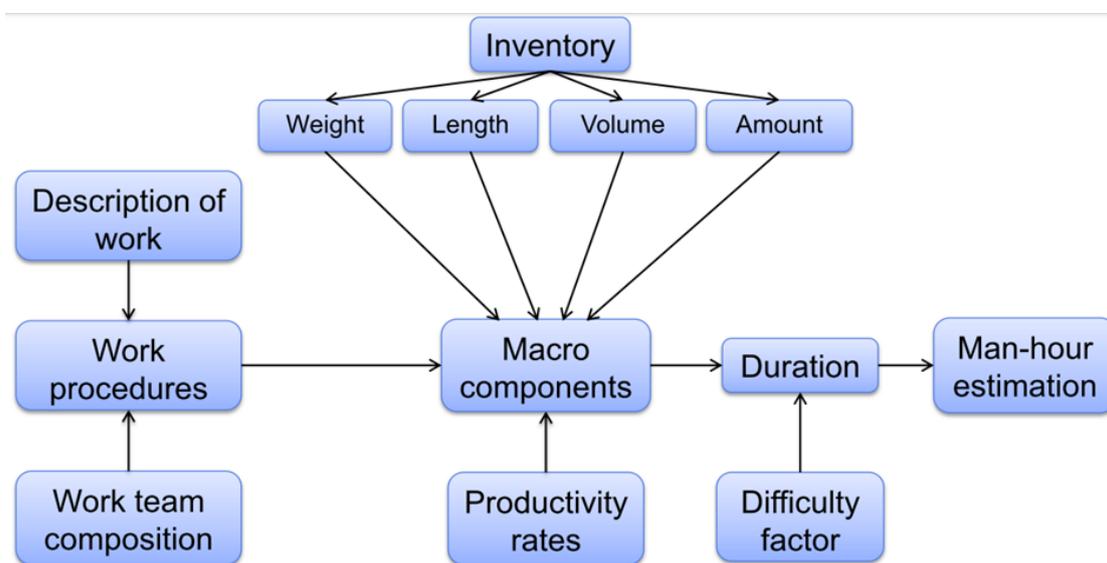


圖 9 除役作業之工作人時規劃流程圖

除役工作人時規劃流程項目如下：

##### 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、放射性廢棄物等，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

針對電廠除役的標準工作程序，整理於表 4。其每一類的工作程序

詳細又有相對應之描述與工作團隊組成。吾以工作程序 3a - 較高活度且管徑大於 DN50(管徑約為 2 in)之管路拆解為例，該項任務為將較高活度且管徑大於 2 in 之管路切割成適當長度，切割位置的選擇，考量廢棄物管理適合的尺寸與重量。管路被拆解的部分需先固定以防止掉落，接著管路切割與準備運送。因此，該工作程序中應考慮到的問題有：(1)防範管路掉落與張力可能引起的問題、(2)拆解切割管路到合適的尺寸、(3)已拆解管路，其上閥及驅動器拆解準備、(4)拆解閥及驅動器、(5)拆解 U 型彎頭及操縱台、(6)拆解連接到管路的儀表。此外，每個除役設備的除役不是僅一種指定工作程序就能完成，大部分是包含多個指定工作程序的結合，這完全取決於除役設備的特性。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 Cat.1：工程師；Cat.2：領班；Cat.3：保物技術人員；Cat.4：技工；Cat.5：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.系統零件彙整資訊

依對電廠各系統之特性調查與工作程序分配，將各系統零件做分類，再彙整成一張系統零件彙整結果，而後根據前述之特性調查結果與工作程序分配，結合西屋電氣公司在各工作團隊之除役作業生產率，則可大約推估出團隊之工作時間。

#### D.持續時間與工作時數估算

每項系統零件會有相對應之特性調查結果，而且每項系統零件的拆除會對應到不同的工作程序與作業生產率，將調查結果填入為西屋電氣公司所提供評估計算表計算後，可以得到團隊的工作時間，再將團隊的工作時間依工作團隊分配比例即可得到各類工作人員的工作時數。

表 4 電廠除役之工作程序

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

## 2.除役資訊系統

SVALA 為西屋電氣公司於瑞典使用之電廠除役資訊系統資料庫，SVALA 是一套針對廢棄物管理所開發的資料庫，其資料庫產出內容包含廢棄物資訊之資料庫、廢棄物處理、廢棄物情況、量測結果之整合、內部與外部的運送、廢棄物貯存的介面展示、各式報告產出(例如：活度、生產與其他)等，因此，SVALA 可說是包含一個詳細架構的規則。圖 10 為 SVALA 針對廢棄物處理之功能關聯，由圖中各關聯可瞭解到廢棄物裝桶後，運往最終處置場貯存這段期間，包含廢棄物運送、廢棄物處理、包裝與活度量測等資料，都可以匯入至 SVALA 資料庫進行數據蒐集整合。

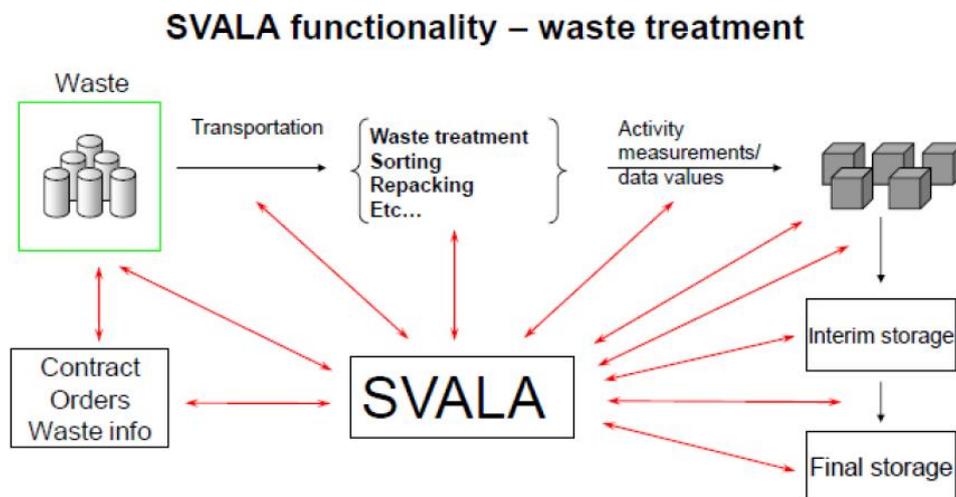


圖 10 SVALA 針對廢棄物處理之功能關聯

在進行除役計畫的時間，由於時程相當的壟長，再加上會面臨工作人員的陸續離退，因此，做好公司與計畫的文件管理就變得相當的重要。目前 ENRESA 公司在西班牙正在進行電廠除役工作，而 ENRESA 公司所使用的是一套 Document management system (SGD) 文件管理系統資料庫，如圖 11 所示。此資

料庫是針對 ENRESA 公司目前所進行的工作，不只有除役作業，執行文件管理的資料庫，管理的內容包含(1)文件的登記、編目、檢索、查閱和下載；(2) 所有類型的文件檔貯存（包含電子郵件、信件、程序書、報告、招標書、詢價單、投標單、獎勵紀錄等）；(3)所有 ENRESA 公司的計畫和組織紀錄等。



圖 11 Document management system (SGD)文件管理系統資料庫

### 3.問題討論

針對核一廠除役規劃，工作小組也提出幾點問題與西屋電氣公司之各領域經驗豐富專家進行討論，包含聯合結構廠房與汽機廠房之樓層拆解順序、熱交換器之拆解、各項拆解任務之人時分配方式討論。

工作小組所提出之除役相關問題與討論結果如下：

- (1)在核一廠除役規劃中，詢問西屋電氣公司在聯合結構廠房各樓層與汽機廠房各樓層的拆解與拆除，為何將聯合結構廠房各樓層之拆解與拆除，規劃先從一樓開始，然後為地下二樓、地下一樓、二樓、三樓、四樓及五樓？

又為何將汽機廠房各樓層的拆解與拆除，規劃先從一樓開始，然後為二樓及地下一樓？

西屋電氣公司的回答是：因為聯合結構廠房與汽機廠房各樓層拆解與拆除時所產生之廢棄物，配合廢棄物管理區域之建置，方便所除役過程產生廢棄物之暫貯與清理，因此，才有此樓層拆除與拆解順序規劃。

(2)在核一廠除役拆解時，目前文獻上皆描述汽機廠房的熱交換器是具有比較高的輻射強度，有案例是在熱交換器拆解切割前，將熱交換器灌滿水，並將熱交換器內的水冰凍起來後，再進行切割。請問若以西屋公司的經驗來看，在汽機廠房的熱交換器其輻射強度大小為多少？是使用遙控切割嗎？切割是採用熱切割或是冷切割？

西屋電氣公司的回答是：針對熱交換器的切割，西屋公司採用的方法是使用隔離帳篷先圍出一個切割區域，再派功過人員將切割的機具設備架設好後，再退避至安全處，以遙控的方式進行切割，切割的深度約 10 公分深。一般在組件的切割拆解上可以使用機械切割或熱切割技術來執行，至於使用那一種技術，是根據組件的活化程度，以西屋公司的經驗來說，較高活度組件會使用機械切割(冷切割)技術來拆解，低活度組件則使用熱切割技術來拆解。圖 12 為西屋公司在熱交換器切割之隔離帳篷建置、切割機具架設與切割深度經驗。



圖 12 西屋公司在熱交換器切割之隔離帳篷建置、切割機具架設與切割深度經驗

(3)在核一廠除役規劃中，西屋電氣公司有提出一套除役工作分解架構與工作人時，為何有些除役工作的工作人時是有推估，但有些工作則沒有推估，例如廢棄物處理這項工作就未推估工作人時？針對西屋電氣公司所提供之聯合結構廠房與汽機廠房之工作人時並未分配至各樓層，核研所目前規劃以各樓層拆除規劃時間來做比例上的分配，請問合理可行嗎？

西屋電氣公司的回答是：西屋電氣公司未推估廢棄物處理工作人時的原因，是因為以廢棄物處理這項任務來說來說，包含了量測、處理、減容、組件除污及包裝運送等工作，而這些工作分佈在除役拆廠階段的整段時間中，由於不好推估單項工作的工作工時，因此，西屋公司就未推估廢棄物處理的工作人時。至於核研所以各樓層拆除規劃時間來做比例上的工作人時分配規劃，西屋公司是可以接受這樣的推法，但因為在各樓層的資訊提供並不完全，因此可能無法精確的初估出各樓層之工作人時，這是因為工作人時的準確是取決於各樓層所提供的資訊完整度來做規劃與判斷。

在參考文件查核過程中，工作小組針對工作分解架構之困難因子與放射性廢棄物盤點表格進行查核，發現西屋電氣公司在提交之報告中缺少困難因子所使用參考電廠之數據表單，因此，透過此次查核已帶回相關表單。

由於事前的完善準備，使得參與討論之人員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，進而激發講師與同仁間的熱烈討論，達到出發前問題彙整的主要目的。此外，計畫同仁也利用會議中間的休息時間，再進一步深入詢問，這讓西屋公司講師對計畫同仁積極且認真的態度印象深刻。由於西屋公司對於財產保護非常嚴密，因此，公司內部除了禁止攝影外也禁止攜帶任何照相設備進入，圖 13與圖 14則為西屋公司講師及參與計畫同仁，於5/18~5/19會議結束後於西屋公司入口處合影。



圖 13 西屋公司講師以及參與計畫人員於第一天會議結束後與西屋公司合影

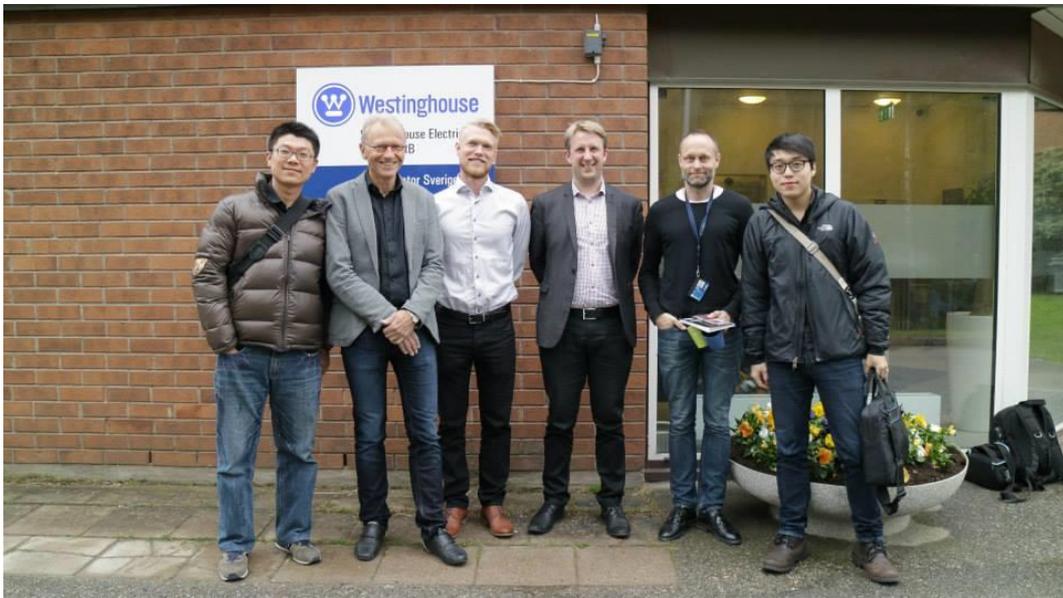


圖 14 西屋公司講師以及參與計畫人員於第二天會議結束後與西屋公司合影

#### (四) 參觀 SKB 公司相關核能設施

瑞典用過核子燃料處理的方式是利用廢棄物罐將用過核子燃料裝起來，送到用過核子燃料中期貯存設施，未來再送到地下貯存庫存放，瑞典的用過核子燃料主要是來自 4 座商用核電廠、1 座材料測試反應器與 1 座研究用反應器(如圖 15)。而根據瑞典法律，核設施運轉執照的持有者需負責進行用過核子燃料及放射性廢棄物的安全處理和處置，與核設施的除役及拆除，由於這樣的原因，因此有了 SKB 這家公司，負責電廠外部所有的用過核子燃料及放射性廢棄物的裝卸、運送及貯存。

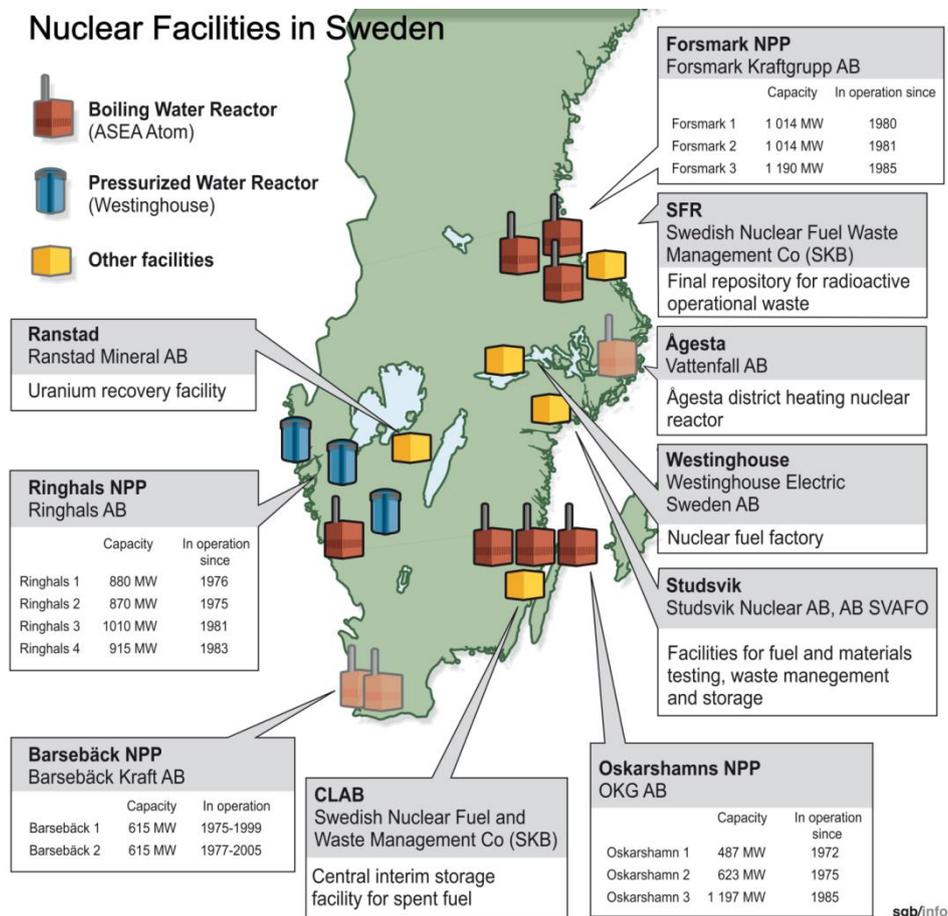


Figure A1: Nuclear facilities in Sweden.

圖 15 瑞典核電廠分布圖

圖 16 為 SKB 公司在用過核子燃料及核子廢棄物上的管理系統圖，由於瑞典目前還有 10 座反應器還在運轉，根據瑞典所有的核電計畫可推估未來會產生用過核子燃料約 19000 立方米，中低放射性廢棄物約 60,000 立方米，除役廢棄物約 160,000 立方米(每座反應器運轉 40 年來計算)。由於所有的核設施都位於海岸邊，因此所有的用過核子燃料與放射性廢棄物都是靠海路運送，而此運送系統自 1982 年開始運行，包含運送船(M/S Sigrid)、運輸桶槽與容器、用於裝載與卸載的終端車輛。而核反應器產生的用過核子燃料至少貯放在燃料池 9 個月後，才會被運送到用過核子燃料中期貯存設施(CLAB)，接著再存放 30 年，才會再送到地下貯存庫，以下針對各項設施說明參訪心得。

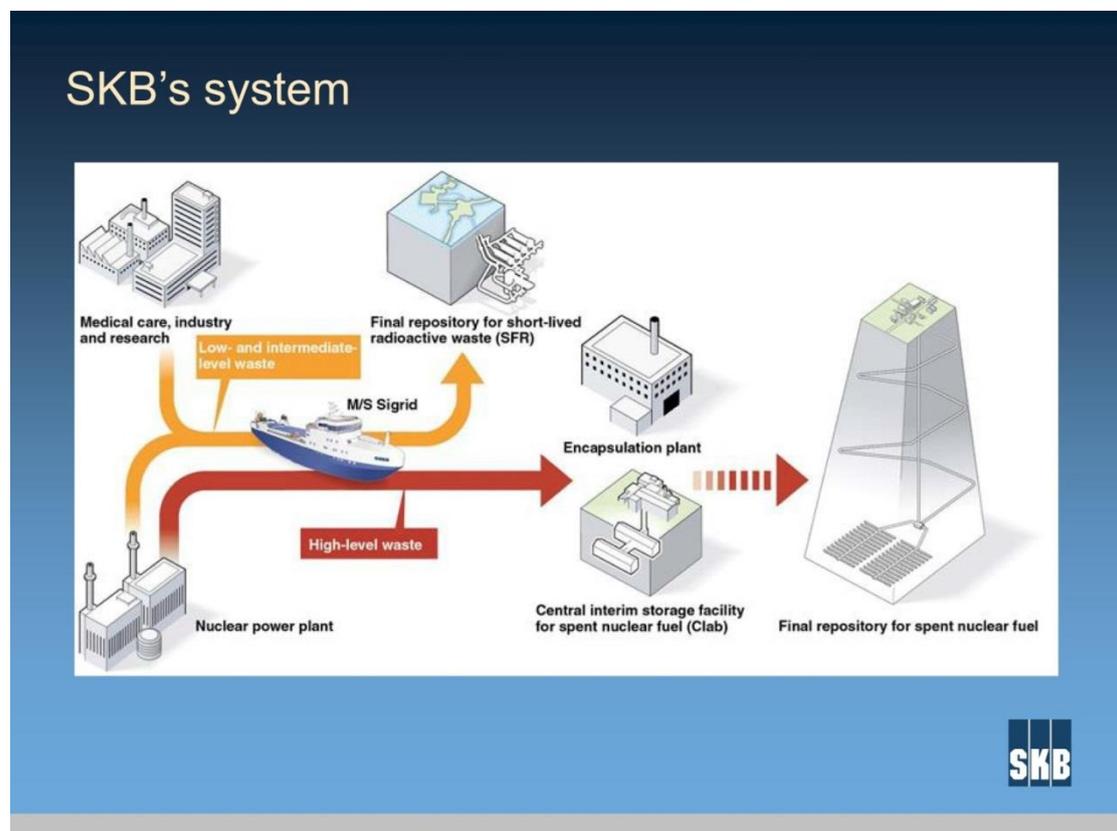


圖 16 瑞典 SKB 公司在用過核子燃料及核子廢棄物上之管理系統圖

## 1.廢棄物罐實驗室

首先我們第一個參訪的是廢棄物罐實驗室，該實驗室位於 Oskarshamn 海港碼頭旁，此行程是由 SKB 公司公關部的 Stefan Bergli 先生負責接待並且介紹廢棄物罐的製作方法以及相關設施的功能，廢棄物罐實驗室的全景如圖 17 所示。



圖 17 廢棄物罐實驗室全景圖

根據 Stefan Bergli 先生的敘述，該實驗室是從 1988 年開始營運，其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，而實驗室成立的主要目標有兩項，第一為開發廢棄物罐蓋板與廢棄罐體之全尺寸焊接技術，第二則是研發焊接後的相關品質查驗與非破壞性(non-destructive testing, NDT)驗證技術。

其中針對於焊接技術，其中最令人感興趣的是 SKB 公司於 2005 年所研發的「螺旋摩擦焊接法(Friction stir welding, FSW)」，現階段已達到非常高品質的焊接結果，其原理是由一種旋轉接頭(圖 18)塞到預定焊接的兩個物件之間隙(廢棄物罐本體和蓋板間)，透過工具進行摩擦加熱達 850 度後將前述兩個物件焊接融熔相連，此有別於一般傳統銅焊接方法，它則是類似國內鋼筋之摩擦焊接續接法，

利用摩擦生高熱融化母材直接融合，不須使用焊條，但此熱度僅使銅產生塑性狀態，並未達熔點溫度。該焊接方法可採用和母材相同的材料進行焊縫，並可確保廢棄物罐焊道兩側的銅材料可以完美焊接，就異電位腐蝕和焊道腐蝕的觀點來看，也可避免後續長期處置造成的腐蝕缺陷破壞。而 Stefan Bergli 先生也展示利用該技術對金屬試片進行焊接後，再進行拉力試驗來驗證破壞處非原焊接點(圖 19)。銅廢棄罐焊接示意圖如圖 20 所示。

而對於非破壞性檢測方面，SKB 則是發展超音波檢測(圖 21)及放射照射檢測(圖 22)兩種方式來驗證廢棄物罐的各組件在製作或組裝過程中是否發生瑕疵或產生損壞。SKB 的廢棄物罐實驗室也放置許多測試後全尺寸相關的廢棄物罐組件(如圖 23)，除了作為試驗與展示外，也可供後續相關品質檢核或新技術開發後之驗證試片。



圖 18 螺旋摩擦焊接頭



圖 19 焊接完成後進行拉力試驗之試片結果

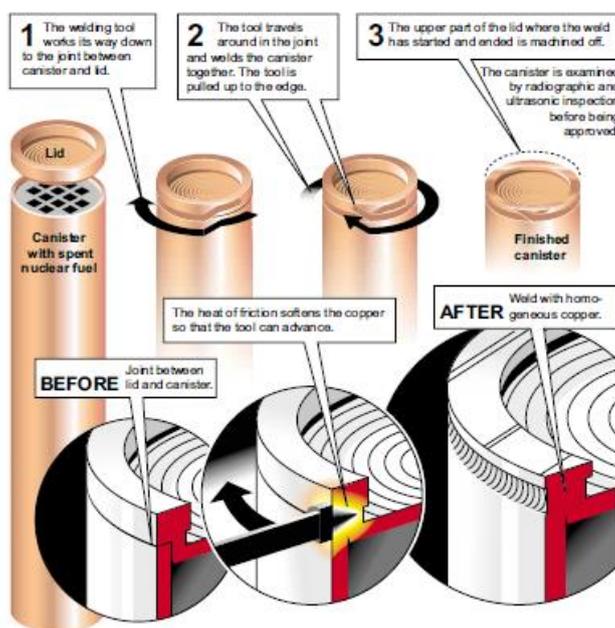


圖 20 螺旋摩擦焊接示意圖

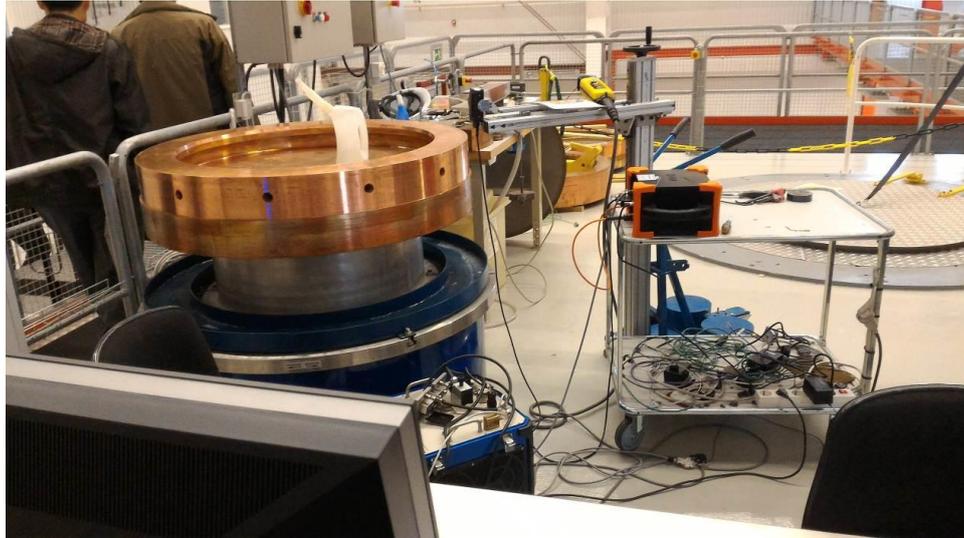


圖 21 超音波檢測設備



圖 22 X 光攝影機



圖 23 廢棄物罐組件測試後展示圖

## 2.用過核子燃料中期貯存設施

接著我們參訪的則是用過核子燃料中期貯存設施(CLAB)，該貯存場位於 Oskarshamn 北方約 20 公里處，緊鄰 Oskarshamn 核能電廠，於 1980 年開始建造，1985 年開始運轉，貯存容量 11000 噸，每年接收約 200 噸，全部水的體積是 40000 立方米。

圖 24 為 SKB 運送用過核子燃料的海運船，其中 Sigyn 已經除役 (1982-2013)，自 2013 年之後開始由 Sigrid 來接替運送。圖 25 為從船上卸載下來的承裝容器以及吊入水槽的過程，由圖可推估此容器的盛裝重量可達很高，因為 SKB 是使用 120 噸的吊車在進行吊運。



圖 24 用過核子燃料的海運船



圖 25 用過核燃料運送過程

而 CLAB 設施剖面如圖 26，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 27 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罐運入 CLAB 接收區後，先吊運至冷卻區並於其外加裝防護外包裝，以避免運送罐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罐內以再度冷卻用過核子燃料，同時也對運送罐進行初步除污；3)運送罐吊運至操作池再轉運至換裝池，於此地將運送罐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)運送罐於保持表面不與 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 28 為地下貯存池的實景照，須注意的是進入貯存池時，大家須穿著安全帽，防護衣，鞋套，劑量佩章 2 個及識別證，且有戴眼鏡的人，眼鏡還需要穿上繩子，預防低頭時眼鏡不小心掉進池子裡(圖 29)。



圖 26 瑞典中期貯存設施 CLAB 剖面圖

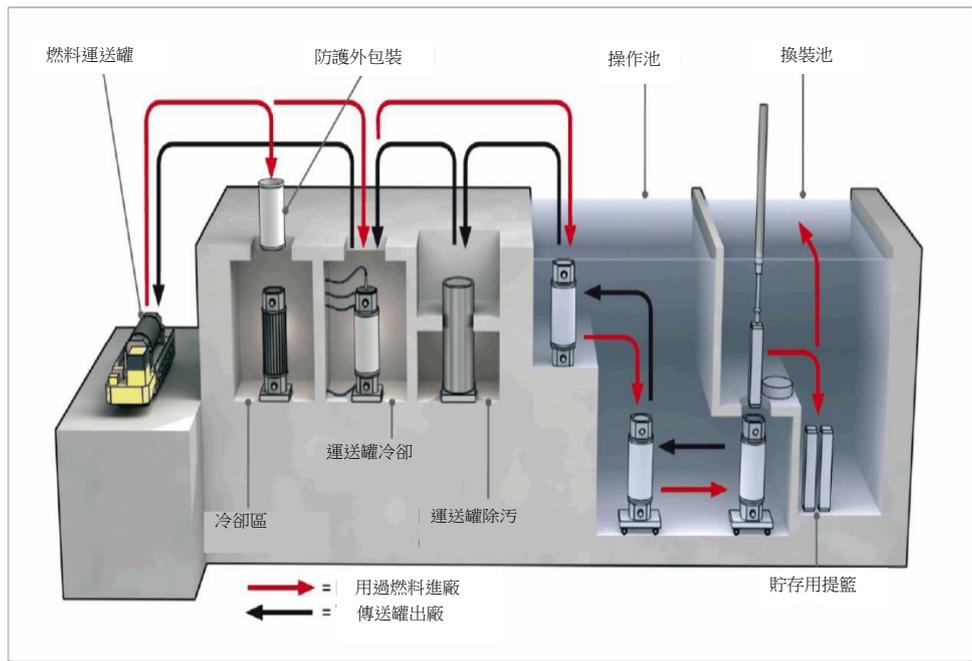


圖 27 瑞典 CLAB 中期貯存設施運作圖

Clab



SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

圖 28 地下貯存池的實景照

Correct equipment during visit



SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

圖 29 進入貯存池所需著裝的配備

### 3. Äspö 硬岩實驗室

最後我們參訪的是 Äspö 硬岩實驗室 (HRL)，該實驗室建造期間是 1990-1995 年，坐落於 Oskarshamn 核電廠的北邊，為一座地下實驗室，其建造之目的為提供一個實際且不受干擾的岩石環境使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。其主要扮演的角色如下：

- (1) 為最終貯存庫的建造與運轉，提供開發與示範方法。
- (2) 測試替代技術可以改善及簡化最終貯存庫的設計，不影響其高品質和安全。
- (3) 提高安全邊際的科學認識，並對貯存庫系統的長期安全性之安全評估提供真實的數據。
- (4) 在最終貯存庫的各項任務上，提供經驗及培訓人員。
- (5) 為最終貯存庫的開發技術和方法提供資訊讓大眾了解。

圖 30 為 Äspö 硬岩實驗室地下隧道建置的情形，深度約 460 米，各種實驗都是在主隧道所分出之短隧道中的洞穴裡進行。

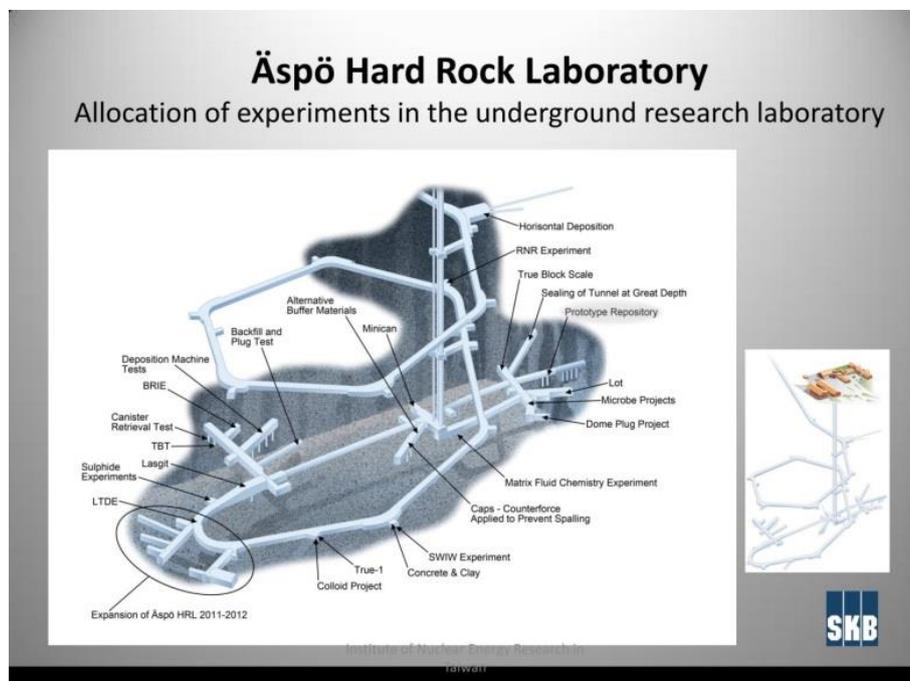


圖 30 Äspö 硬岩實驗室地下隧道建置情形

而 Äspö HRL 計畫是從 1986 年開始規劃，歷經三個主要階段，包括第一階段(1986-1990)：場址特性調查；第二階段(1990-1994)：建造階段；第三階段(1995-)：運轉階段。須注意的是在當時有一個至關重要的決定，就是此地下實驗室僅是用於研究目的，在未來並不會被轉換成貯存庫。

而內部實驗區可大致分成：地下水流與核種傳輸(Groundwater Flow and Radionuclide Transport)、岩石力學(Rock Mechanics)、工程障壁(Engineered Barriers)、原型處置場(Prototype repository)以及廢棄物管理(Waste Handling)五部份，分別執行相關之實驗。

例如圖 31 為原型處置場試驗，裡面的隧道可裝 4 個 KBS-3 廢料罐，外面的隧道可裝 2 個 KBS-3 廢料罐，裡面的隧道回填是在 2001，外面的隧道回填是在 2003。而在 2010-2013 年，則進行原型處置場的拆除，參與的國家有日本、加拿大及歐盟等國家，而本實驗的主要目標是：

- (1) 緩衝和回填的密度與含水飽和度的調查。
- (2) 經過 7 年的濕潤，在緩衝回填與回填岩石表面之間，進行介面調查。
- (3) 外部洞穴的研究。
- (4) 廢料罐的檢查與量測（如位置，機械應力和腐蝕等）。
- (5) 拆解後，進行基石的調查。
- (6) 在緩衝和回填中，研究生物與化學活動。
- (7) 透過溫度和飽和的過程，研究緩衝材料之可能的變化。

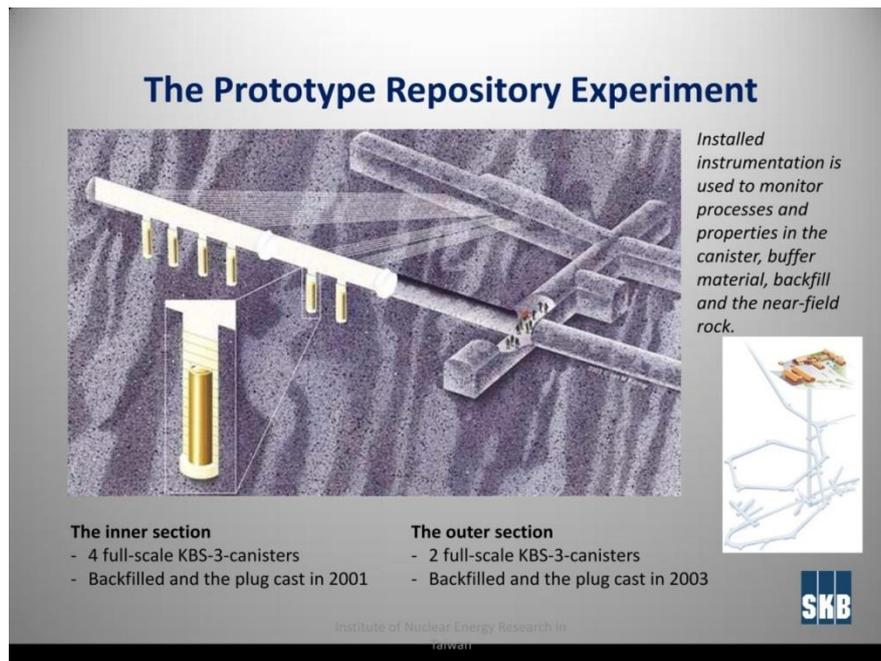


圖 31 原型處置場試驗

其他例如像工程障壁也有進行緩衝材料長期效應實驗(Long-Term test of buffer materials, LOT)如圖 32，主要是測試膨潤土的緩衝性能和礦物質穩定性，額外的測試還包含了銅腐蝕程度和產物以及細菌的生存、活動和遷移等。

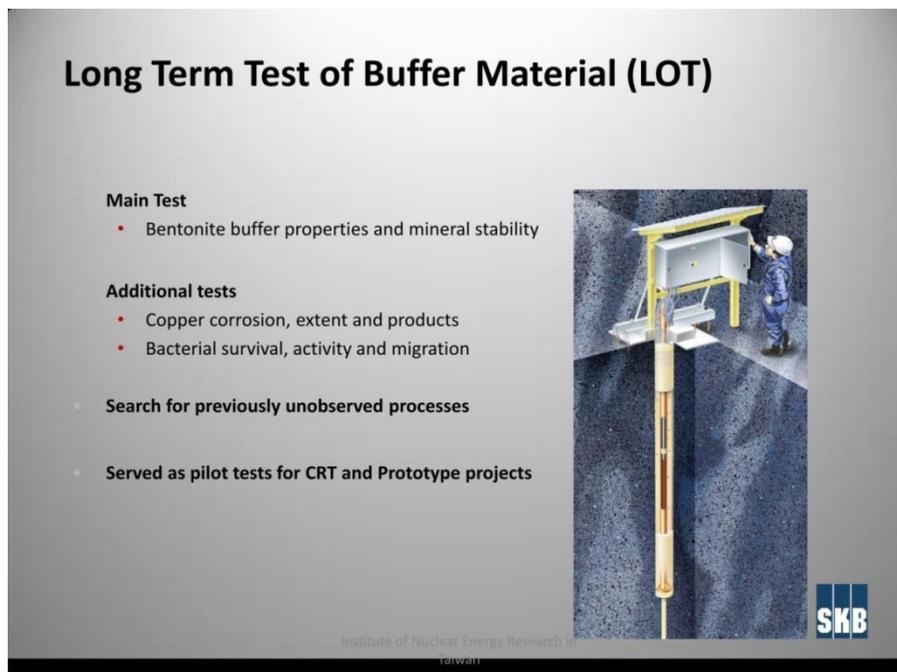


圖 32 緩衝材料長期效應實驗

#### 四、建議事項

- (一) 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。本次討論一方面是對西屋公司執行的成果進行訪查，另一方面，是將核研所目前在核一廠除役規劃中所遇到的問題，進行面對面的討論，透過這樣的交流，可以直接學習到西屋公司在面對相關除役問題時的處理程序以及解決方法，建議未來可持續採行此溝通模式。
- (二) 本次赴西屋公司進行討論，除獲取工程管理與排程規劃及廢棄物盤點估算之技術與經驗外，也精進除役計畫管理技術，建議我國未來執行除役相關計畫時，應多從管理者的角度思考切入，尤其是對於除役廢棄物管理等層面，應審視長期的規劃。
- (三) 西屋公司針對反應器壓力槽內部組件與生物屏蔽之活化分析已有相當充分之經驗，但基礎技術與方法論採用 NRC1.190 所提及之評估技術，也與本所採用之 IAEA TR-389 號報告方法論雷同，但西屋公司因具商業規模，所以自行開發較適合串聯中子通量率分析與活化分析之工具程式，而我們則是採用國際上通用之商業套裝軟體進行評估，以至於在整體中子通量率評估模型設定與簡化的過程中有所差異存在，且多數以程式內已有考慮進行說明(但未提供程式進行交流研究)，故活化分析項目僅取得定性上較粗略的概念認同，建議未來若能將此部分規畫於合約範圍內容，相信可以有較多較深入之討論。
- (四) 本次訪談發現西屋公司對於智慧財產保護過度嚴密，因此，偶爾會有溝通障礙與誤會的情況發生，建議本所於後續執行計畫需引以為戒，謹慎拿捏，以避免溝通上之誤會而延誤計畫時程。
- (五) 此次有機會參訪瑞典 SKB 公司處理用過核子燃料的 Canister 實驗室、用過核子燃料中期貯存設施 CLAB 與 Äspö 硬岩實驗室，瞭解瑞典在用過核子燃

料處理的方式是利用廢棄物罐將用過核子燃料裝起來，送到用過核子燃料中期貯存設施，再送到地下貯存庫存放。由於現階段我國並無用過核子燃料的處理實驗室與設施，建議國內應盡早建立相關設施，並仿效瑞典 SKB 公司的做法可提供參訪，以便有效地與民眾進行溝通，增加國民的信心。