

出國報告(出國類別：實習)

參訪英國核能除役局(NDA)及參加
Informa 公司舉辦之第 33 屆除役與
放射性廢棄物管理訓練課程

服務機關：行政院原子能委員會放射性物料管理局

姓名職稱：鄭敬瀚 技士

派赴國家：英國

出國期間：106 年 7 月 12 日至 106 年 7 月 23 日

報告日期：106 年 9 月 18 日

摘要

本次赴英國出差目的是為了解國際核設施除役現況，以提升我國核電廠除役之安全管制技術，出差行程可分為兩部分，首先是與核能除役局(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)專家交流討論除役相關議題，有關英國除役現況，目前 NDA 所擁有之早期氣冷式反應器(Magnox)已全部停機，並採取延遲拆除方式進行除役中，截至目前為止，只有位於 Wales 的 Wylfa 及 Sellafield 內的 Calder Hall 仍在用過核子燃料移除階段，其餘的 9 個場址，皆已進入監護準備階段，值得注意的是，位於 Essex 的 Bradwell 將在 2019 年成為英國第一個進入監護階段(Care and Maintenance)的 Magnox 廠址，這對 NDA 來說非常的重要，因為這意味著距離完成除役又邁進了一大步；而在法規的部分，所有的除役活動必須符合法規所規範的執照許可條件(Licence Condition)，申請者被要求在執行除役工作前須做充足的準備，且應對除役計畫以及可能涉及安全的活動預先規劃與安排，而主管機關核能管制辦公室(Office for Nuclear Regulation, ONR)將負責審核所有除役活動是否符合安全之要求，此外，對於核反應器在取得除役許可前，也應詳細評估與考慮除役所造成的環境影響；最後，也藉此了解英國如何藉由成立 NDA 這個獨立於政府機關且具有行政執行之功能的法人組織，成功執行除役與核廢料管理相關作業。

第二部分則是參加 Informa 機構所舉辦之第 33 屆除役與放射性廢棄物管理訓練課程，課程內容除包含國際核能現況、除役策略、除役財務成本、拆除及除污技術、放射性廢棄物類別與處置等較為技術層面的議題，同時也著重於國際經驗分享，尤其課程中多次強調落實資訊公開以及民眾參與溝通為成功推動除役相關作業之關鍵因素，更重要的是業者在執行除役與放射性廢棄物管理規劃須站在利害關係人之觀點進行全面性的考量分析，其核能先進國家之相關經驗可作為我國除役安全管制與放射性廢棄物管理之參考。

關鍵字：除役、放射性廢棄物管理

目錄

一、 目的.....	1
二、 過程.....	2
三、 心得.....	24
四、 建議事項.....	26

一、目的

核電廠除役即是指核子反應器設施永久停止運轉後，為使設施及其土地資源能再度供開發利用，所採取之各項措施。由於除役工程將龐大複雜，且須跨領域整合多方的專業技術，因此如何發展出一個兼顧安全與效率的除役，不僅是我國，這也是國際上核能先進國家一直以來共同努力的目標。

我國「電業法」已明訂核能發電設備應於中華民國一百十四年以前，全部停止運轉，依據「核子反應器設施管制法」及其施行細則之規定，我國核子反應器設施之除役，應採取拆除之方式，並於取得主管機關核發之除役許可後二十五年内完成，因此在 2025 年非核家園為政策目標之下，我國核電廠在運轉執照屆滿後將陸續開始進行除役，由於除役作業為一項長期且複雜之工作，依據國際之經驗，除役規劃除需考量專業技術層面，對於政策、社會與經濟層面，更是除役作業能否順利執行的關鍵因素，因此執行除役作業前必須要有妥善的規劃。

因此本次赴英國與英國核能除役局(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)人員溝通討論，目的除了解英國除役現況、除役策略與規劃、除役管制法規與組織結構外，期望藉此了解該專責機構是如何推動核後端相關業務，以供我國未來成立行政法人放射性廢棄物管理中心之參考。此外，藉由參加 Informa 機構舉辦之第 33 屆除役與放射性廢棄物管理訓練，其目的是期望藉此掌握國際上核設施除役作業之先進作法及管理方式，以提升我國核電廠除役安全管制能力與技術。

二、過程

(一)行程概要

本次出差行程如表 1，內容主要分為與 NDA 專家交流討論除役相關議題及參加 Informa 機構舉辦之第 33 屆除役與放射性廢棄物管理訓練課程兩個部分。

表 1 本次英國出差行程表

日期	行程
7 月 12 日(三)	出發前往英國倫敦
7 月 13 日(四)	抵達英國倫敦
7 月 14 日(五)	與核能除役局國際關係負責人交流討論除役相關議題
7 月 15 日(六)	整理會議資料
7 月 16 日(日)	從倫敦前往劍橋
7 月 17 日(一)	在劍橋大學參加第 33 屆核設施除役與放射性廢棄物管理訓練課程
7 月 18 日(二)	在劍橋大學參加第 33 屆核設施除役與放射性廢棄物管理訓練課程
7 月 19 日(三)	在劍橋大學參加第 33 屆核設施除役與放射性廢棄物管理訓練課程
7 月 20 日(四)	在劍橋大學參加第 33 屆核設施除役與放射性廢棄物管理訓練課程
7 月 21 日(五)	在劍橋大學參加第 33 屆核設施除役與放射性廢棄物管理訓練課程 結束後從劍橋返回倫敦
7 月 22 日(六)	從倫敦搭機返國
7 月 23 日(日)	抵達台北

負責安排 7 月 14 日會面與討論事宜的人員為 NDA 國際關係負責人 John Mathieson 先生，在他的帶領之下，了解該組織的運作模式，並就核電廠除役、放射性廢棄物處置與管理、用過核燃料貯存等相關技術性議題，雙方進行交流與討論，圖 1 為會議結束後與 John Mathieson 先生之合影。另一部分則是參加 7 月 17 日至 7 月 21 日由 Informa 機構舉辦之第 33 屆除役與放射性廢棄物管理訓練課程，本訓練課程於劍橋大學基督教學院舉辦，該學院入口處如圖 2 所示，訓練課程之現場情況如圖 3 所示。本次的除役訓練課程包含講師與學員總共約有 40 餘位，分別來自許多國家之政府機關、核能產業界、學術與研究機構等核能界人士參與訓練，其中由於英國為本訓練的主辦國家，因此安排相對多堂的課程，以分享英國國內之除役與放射性廢棄物管理經驗。



圖 1 會議結束後與 NDA 國際關係負責人 John Mathieson 先生之合影



圖 2 劍橋大學基督教學院入口處



圖 3 訓練課程之現場情況

(二)與 NDA 人員進行交流討論

英國核設施除役相關單位

由於英國政府行政部門組織架構與我國有顯著差異，因此再探討除役相關議題之前，須釐清其相關單位及其角色，才得以劃分職責。英國主要負責核設施營運與除役相關任務的單位為 NDA，該局是依據 2004 年英國能源法 (Energy Act 2004) 於 2005 年所成立之執行性非部會公共組織 (Executive non-departmental public body)，也就是 NDA 為一個獨立於政府機關且具有行政執行之功能的法人組織，此外須注意的是 NDA 為一個策略性機構，因此 NDA 不直接執行核設施相關營運、管理及除役活動，而是以契約方式委託承包商來完成 NDA 所要求的營運與除役任務，而英國政府之商業，能源與工業部 (Department for Business, Energy & Industrial Strategy, BEIS) 為其主管機關。

主要負責核能管制業務的機關則是核能管制辦公室 (Office for Nuclear Regulation, ONR)，該辦公室最初為健康與安全執行 (Health and

Safety Executive, HSE)下的一個非法定機構，而後依據 2013 年能源法 (Energy Act 2013)，ONR 於 2014 年 4 月 1 日正式成為一獨立法定機構 (Statutory Public Corporation)，主要負責核子安全、核子保安、核設施除役、放射性廢棄物管理等管制與監督工作，該辦公室之主管機關為就業及退休金事務部(Department for Work and Pensions)。

而與除役有關的環境保護單位包含有英格蘭和威爾士的環境署 (Environment Agency, EA)與蘇格蘭環境保護局(Scottish Environment Protection Agency, SEPA)，主要負責監管放射性廢棄物的排放與處置，這兩個機構同樣屬於執行性非部會公共組織。

此外，另有放射性廢棄物管理委員會(Committee on Radioactive Waste Management, CoRWM)，其職責主要是向英國政府提供高放射性廢棄物長期管理之獨立的諮詢和建議，雖然與 NDA 相同，BEIS 為其主管機關，但該委員會則是屬於諮詢性非部會公共組織(Advisory non-departmental public body)。

英國除役相關管制法規之概述

管制機關 ONR 於 2017 年 2 月發布一本作為核設施檢查員的備忘錄而編寫之手冊「Licence Condition(LC) Handbook」，該手冊內容詳細規範了核設施從建造、運轉到除役許可證所需具備的許可條件，其中與除役有關的許可條件分別有：LC4 廠內放射性物質之限制(Restrictions on nuclear matter on the site)，LC6 文件、記錄、權限和證書(Documents, records, authorities and certificates)，LC11 緊急安排(Emergency arrangements)，LC14 安全文件(Safety documentation)，LC15 定期審查(Periodic review)，LC28 檢查、視察、維護和檢測(Examination, inspection, maintenance and testing)，LC32 放射性廢棄物之累積(Accumulation of radioactive waste)，LC33 放射性廢物之處置(Disposal of radioactive waste)，LC34 放射性物質與放射性廢棄物之洩漏(Leakage and escape of radioactive material

and radioactive waste)與 LC35 除役(Decommissioning)等。

針對 LC35 除役之許可條件，內容概述如下：

- 申請人應對可能影響安全之除役廠址或過程進行適當安排。
- 申請人應對廠址除役計畫之作業與執行作出安排。
- 申請人應提送上述相關的文件給 ONR 並申請核准。
- 申請人應確保申請一經核准後，即不得對已核准的安排或計畫進行修改，除非 ONR 核准進行修改。
- 上述安排應妥善地將除役期程劃分階段，且未經 ONR 同意，申請人不得開始或進行至除役的下一個階段，且申請人需提供足夠文件以證明除役之安全，並在適當的情況下將相關文件提交給 ONR。
- 若 ONR 指示所有行動確實符合安全之要求，申請人可按照上述安排或除役計畫開始除役。
- 若 ONR 命令持照人應停止對廠址的除役，未經 ONR 許可，持照人不得再次開始進行除役作業。

另一方面，英國曾經於 1999 年修訂核反應器除役環境影響評估條例 (Environmental Impact Assessment for Decommissioning Regulations, EIADR)，該條例為一項法律文件，主要是為執行歐盟環境影響評估指令 (85/337/EEC)中，相關核設施除役之要求而制訂，內容主要是要求核電廠與其他核反應器在取得除役許可前，應詳細評估與考慮除役所造成的環境影響。

EIADR 適用於所有除役之核電廠與其他核反應器，甚至也適用於國防之項目，例如核能潛艇反應器除役，但對於除役計畫的具體要求，則是取決於該計畫執行的時間點是在 EIADR 生效(1999 年)前還是生效後，一般來說，在 1999 年後才開始執行的除役計畫，皆需要取得 HSE 的同意且須符合該同意的相關條件才能開始執行，而在 1999 年前就已開始執行之除役計畫則不需要遵循上述規定，但當除役計畫進行更改或延長時，被許可人仍必須向

ONR 與 HSE 申請是否需要進行環境影響評估，因為這可能會對環境產生嚴重不利影響，而在確定之前，更改或延期作業皆不會被執行。

而獲得同意的過程可以從申請人選擇性請求之申請前意見 (Pre-Application Opinion, PAO) 開始，而 PAO 會向申請人提供哪些事項被 ONR (考慮到被諮詢者的意見) 認為應在後續的申請同意書中加以說明。為了取得同意，申請人應向 HSE 提交一份環境聲明，其內容主要包含提出的除役項目之詳細的環境影響評估 (Environmental Impact Assessment) 以及避免或減少對環境產生重大不利影響的緩解措施，此規定是由 HSE 與相關機構如環保機構與地方公路機構以及公眾與利害關係人等進行廣泛協商時而被考慮的。

如果該項目被 HSE 認為是可接受之同意除役項目，該決定會以決策報告的形式發布，一般而言，同意通常另有附帶條件，例如要求定期報告環境管理計劃 (Environmental Management Plans, EMPs) 進展情況，EMPs 內容主要是描述如何實施減輕與緩和措施及其有效性，通常 EMPs 每年出版，持照人必須將 EMPs 的副本發送至 HSE，並向公眾公開，且一旦獲得同意，除役項目必須在同意後 5 年內開始執行。

NDA 之職責

如同上述，NDA 是依據 2004 年英國能源法 (Energy Act 2004) 的規定，所成立之行政法人機構。目前 NDA 共有 200 多名員工，其總部設在 Cumbria 西部，目前橫跨英格蘭，威爾斯和蘇格蘭總共擁有 17 個場址，位置分佈如圖 4。

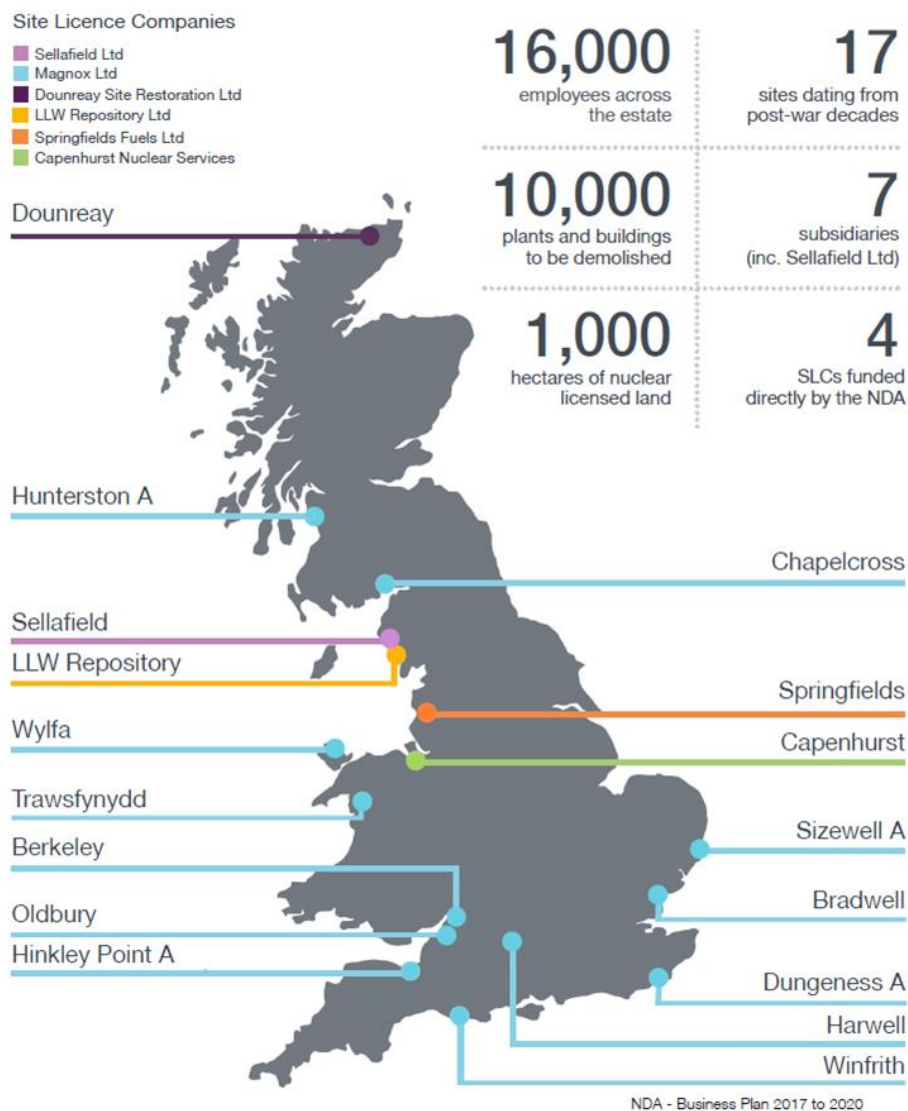


圖 4 NDA 資產分布圖及其所屬廠址執照管理公司

NDA 的職責主要有列幾項：

(1) 擬訂除役策略

NDA 是依據政府政策來擬訂除役策略，且每 5 年會對此策略進行審查及更新，以確保提出正確的決策，而目前最新版除役策略已於 2016 年 4 月發布，內容詳細記載 NDA 待完成任務與長期目標，其策略方向可分為五個部分：

- 廠址除役和復原：除役和復原廠區並將其外釋至其他用途使用
- 用過核子燃料：確保在生命週期內能夠安全且有效地管理用過核子燃料

- 核物料：確保核物料之安全並提供具有成本效益的管理
- 綜合廢棄物管理：確保廢棄物管理不論是在現在或未來皆能保護民眾與環境安全，同時也需符合政府政策
- 關鍵性的推動措施：提供穩定和有效的實施框架，使任務得以實現

圖 5 顯示 NDA 這五項策略如何彼此交互作用，其中廠址除役和復原為整個除役策略的主軸，若要成功推動除役作業則需有綜合廢棄物管理的支援，其中管理用過核子燃料與核物料屬於綜合廢棄物管理前期之工作，而整體皆需有相關的關鍵推動措施任務才得以實現。

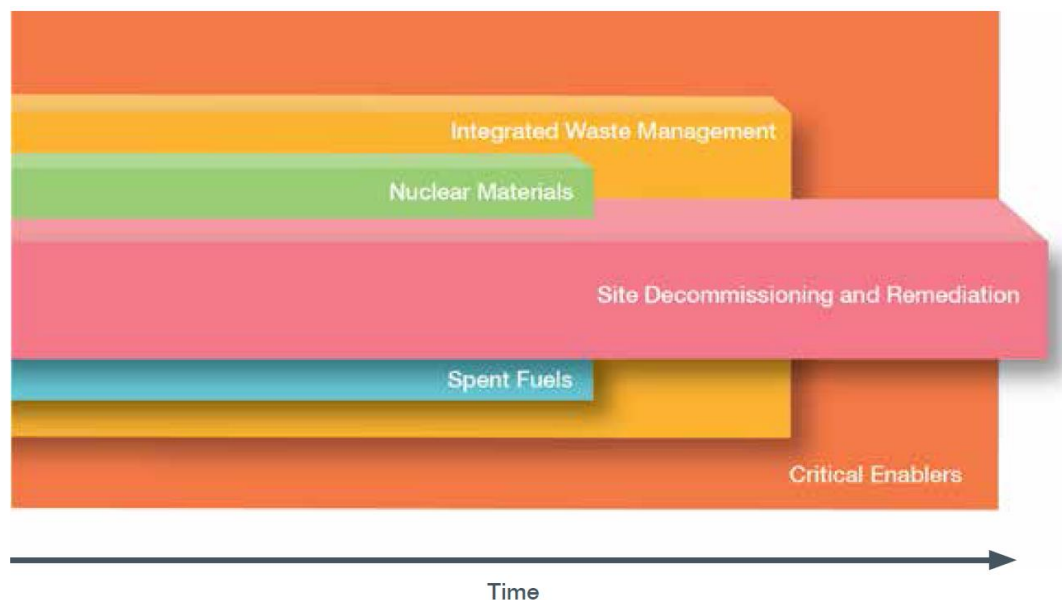


圖 5 NDA 之除役策略及其關係圖

(2)提出計畫

NDA 每年都會發佈商業計畫(Business Plan)，其內容除了仔細檢討未來 3 年 NDA 的關鍵活動以及資產外，也概述了未來財政年度預期的收入和支出。此外，NDA 也會發布年度報告及帳目(Annual Report & Accounts)，其內容總結了上一個財政年度的財務和整體績效。

(3)落實績效管理

為確保能有正確的契約模式，以達最安全且最具成本效益的清理，NDA 建立一系列契約模式及管理協定，對有效率的績效管理提供執行框架。

(4)研究與開發

NDA 將確保在整個除役的期程內，會有正確的技術以及適當的研究與開發，以有效地解決除役所面臨相關挑戰性的問題，並盡可能地減少納稅人所負擔的成本。

(5)發展社會經濟

NDA 將確保當地社區在清理任務期間和之後能得到社會和經濟支持，故其社會經濟任務是「支持可持續發展社區之維護(Support the Maintenance of Sustainable Communities)」，其目標為：

- 通過教育、培訓和技能開發，提高當地人參與除役工作或其他經濟活動的機會
- 支持當地經濟多元化以減少社區對核設施就業的依賴
- 增加 NDA 廠址附近地區之生活、工作和投資的吸引力
- 與鄰近組織合作，共同努力發展社會經濟，並最大限度地發揮社區的潛在利益

(6) 確保健康與環境之安全

NDA 將確保所有廠址皆為安全與可靠，使公眾可接受的危害和風險降到最低，並採取公開透明的方式來取得利害關係人的支持和信任。

NDA 之營運模式

如上所述，由於 NDA 是屬於策略性機構，主要負責規劃核設施除役與廢棄物管理策略、分配預算、設定目標以及檢討除役進展情況等工作，因此 NDA 不直接執行核設施相關營運、管理及除役活動，而是以契約方式，委託廠址執照公司(Site Licence Companies, SLCs)來完成 NDA 所要求的營運與除役任務，而所謂的 SLCs 即是指持有由 ONR 核准的廠址許可證而營運核設施之公司。

為提升 SLCs 之執行效能，NDA 還會對 SLCs 的所有權和經營管理權進行競標，而得標者稱為母體組織(Parent Body Organisation, PBO)，緊接著

NDA 會與 PBO 簽屬協議書，使其在合約期間管理 SLCs 並擁有其股份，目的是希望藉由 PBO 所提供額外的除役資源和管理專長，來提高廠址作業效率。

英國核電廠除役過程與現況

NDA 其中的一項任務，即是對其擁有之英國早期所建造氣冷式反應器 (Magnox) 進行除役，總計 11 個廠址共 26 部機組目前已全部停機進行除役中，各廠址停機時間與運轉年份如表 2 所示，由於英國目前是採取延遲拆除方式進行除役，因此所有廠址都將經過下列階段完成除役：

1. 營運和發電階段 (Operations and Electricity Generation)
2. 用過核子燃料移除階段 (Defueling)：此階段將燃料從反應器中移出並運送至 Sellafield 進行再處理。
3. 監護準備階段 (Care and Maintenance preparations)：此階段主要是進行反應器以外相關設施及建物之拆除與安全貯存前之準備作業，並將放射性廢棄物 (如污泥、樹脂) 與有害廢棄物 (如石棉) 從廠址移出。
4. 監護階段 (Care and Maintenance)：此階段主要是將廠址和反應器廠房維持在安全狀態下 (Safe State) 數十年使活度衰減，直到最終廠址清理及復原階段為止。
5. 最終廠址清理及復原階段 (Final Site Clearance)：本階段為除役的最終階段，主要執行最後的拆除及廠址復原作業，並將剩餘的放射性廢棄物移往地質處置設施 (Geological Disposal Facility, GDF) 進行深地層處置，本階段結束即代表該廠址已達到所指定的最終狀態。

截至目前為止，只有位於 Wales 的 Wylfa 及 Sellafield 內的 Calder Hall 仍在用過核子燃料移除階段，其中 Wylfa 預計於 2018 年完成，Calder Hall 預計於 2019 年完成。剩餘的 9 個廠址，皆已進入監護準備階段，值得注意的是，位於 Essex 的 Bradwell 將在 2019 年成為英國第一個進入監護階段 (Care and Maintenance) 的 Magnox 廠址，此時它的兩座反應器和中放射性廢棄物貯存設施將被密封，此活度衰減時期將持續數十年之久，因此對於

現場安全、監測、維護和記錄管理等制度，NDA 正進行適當的安排與管理。

表 2 英國 Magnox 反應器之運轉與停機年份

UK Magnox reactors				
Reactor	MWe net	Startup	Status	Operating life (years)
Berkeley 1	138	1962	Shutdown 1989	27
Berkeley 2	138	1962	Shutdown 1988	26
Bradwell 1	123	1962	Shutdown 2002	40
Bradwell 2	123	1962	Shutdown 2002	40
Calder Hall 1	50	1956	Shutdown 2003	47
Calder Hall 2	50	1957	Shutdown 2003	46
Calder Hall 3	50	1958	Shutdown 2003	45
Calder Hall 4	50	1959	Shutdown 2003	44
Chapelcross 1	49	1959	Shutdown 2004	45
Chapelcross 2	49	1959	Shutdown 2004	45
Chapelcross 3	49	1959	Shutdown 2004	45
Chapelcross 4	49	1960	Shutdown 2004	44
Dungeness A1	225	1965	Shutdown 2006	41
Dungeness A2	225	1965	Shutdown 2006	41
Hinkley Point A1	235	1965	Shutdown 2000	35
Hinkley Point A2	235	1965	Shutdown 2000	35
Hunterston A1	160	1964	Shutdown 1990	26
Hunterston A2	160	1964	Shutdown 1989	25
Oldbury 1	217	1967	Shutdown end Feb 2012	45
Oldbury 2	217	1968	Shutdown mid-2011	43
Sizewell A1	210	1966	Shutdown 2006	40
Sizewell A2	210	1966	Shutdown 2006	40
Trawsfynydd 1	196	1965	Shutdown 1993	28
Trawsfynydd 2	196	1965	Shutdown 1993	28
Wylfa 1	490	1971	Shutdown Dec 2015	44
Wylfa 2	490	1971	Shutdown April 2012	41
Total: 26				

此外，在除役期間，若土地達到可釋出的程度時，可以申請解除管制 (De-Licensed) 使其再使用，根據 2005 至 2016 年的統計資料，Berkeley 廠址約有 49.75%、Harwell 廠址約有 21.42%、Oldbury 廠址約有 70.32%、Winfrith 廠址約有 15.68% 的土地已申請解除管制，其餘 NDA 所屬之廠址目前仍未釋出土地再利用。

(三) 除役與放射性廢棄物管理訓練課程

本訓練課程於英國劍橋大學舉辦，主要探討核設施陸續屆齡的情況下，所面臨除役作業與核廢料管理等相關議題，其課程內容除包含國際核能現況、除役策略、除役財務成本、拆除及除污技術、放射性廢棄物類別與處置等較為技術層面

的議題，同時也著重於國際經驗之分享，相關重點摘記，說明如下：

國際核電廠除役現況與成本估算

課程是由目前國際上核電廠除役概況開始，依據國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 統計資料，截至 2017 年 7 月為止，目前國際上正在運轉的核反應器共計 447 部機組(OECD/NEA 會員國包含 350 部)，停機或正在進行除役共計 162 部機組(OECD/NEA 會員國包含 150 部)，已完全除役共計 16 部機組(OECD/NEA 會員國包含 16 部)，由此數值可知未來將有非常多的電廠將面臨除役，這對於擁有許多核設施的國家來說，將會是個很大的挑戰。

而在除役費用估算方面，由於不同國家所含機組數量、類型及運轉時間皆不相同，因此除役費用會隨著時間而有所變化，根據 OECD/NEA 的估算，以 2030 年為例，該年度所累積之除役費用預估將可達 38 億美元，其中 Eurasia/Middle East 約佔整體除役費用 60%，Asia/Pacific 與 North/South America 約各佔 20%；須注意的是，相關除役成本估算具有高度不確定性，因為除役成本可約略包含拆除與除污作業、廢棄物管理、計畫管理與廠址復原等四個部分，其中各個部分隨著時間可能變動極大，因此應定期重新估算除役成本，以確保除役經費之充足。

除役方式之比較

英國是採取延遲拆除的方式進行除役，與我國採取立即拆除的方式不同，而所謂的拆除是指在除役期間，拆解與移除任何系統、結構或組件的活動，以下針對兩者的優缺點進行說明。

立即拆除之優點為：

- (1) 可以獲得較多熟悉電廠運轉歷史及經驗的工作人力執行除役工作
- (2) 較易掌握廠址輻射之特性，減少廠址狀態惡化及老化所造成之影響
- (3) 減少失去電廠知識或記錄流失之風險
- (4) 廠址可儘早再使用
- (5) 除役的責任避免轉移到未來的世代

立即拆除之缺點為：

- (1)員工可能會受到刺激，因為除役可能會使他們失去工作
- (2)在拆除時有較高的輻射曝露
- (3)會產生較多的放射性廢棄物

而延遲拆除之優點為：

- (1)藉由衰減可大幅減少殘留的放射性廢棄物活度
- (2)工作人員在拆除作業時能減少輻射曝露
- (3)在安全狀態的期間能持續開發除役相關技術
- (4)不同除役廠址間彼此能相互合作
- (5)可累積除役基金，減輕財務負擔

延遲拆除之缺點為：

- (1)物質或建築物(鋼筋或混凝土)可能會惡化或退化
- (2)維護的費用可能會增加
- (3)運轉歷史的知識可能會流失
- (4)待拆除作業執行前，可能需要尋求新的員工
- (5)除役責任將由未來的世代所承擔

由此可知，立即拆除與延遲拆除各有其優缺點，因此得考慮各自國家除役之法律、政策、資源、社會環境等因素，以決定最適當的除役方式；此外，需特別注意的是，無論何種方式被選擇，都得提早且明確地決定除役時程與規劃，如此才可以發展出一個安全且具成本效益的除役計畫，以英國為例，所有 Magnox 廠址採取延遲拆除方式進行除役的另一個主因，即是為了配合英國地質處置設施啟用的時間。

除役之除污技術

在除役的過程中，常為降低輻射劑量或放射性污染程度而進行除污，而所謂的除污，即是將物體表面之放射性物質利用物理或化學方式移除的過程，這也是除去放射性危害最主要方法。依照國際上除役的經驗，相關除污作業通常會在停

機後不久進行，會這麼早執行除污作業大致為下列幾點原因：

- (1)為使運轉或拆除期間周圍輻射劑量最小化，以降低工作人員之曝露
- (2)減少放射性廢棄物的數量，以提升廢棄物管理效益
- (3)避免拆除作業時污染物擴散，導致增加除污面積
- (4)為了允許設施或物質再利用
- (5)為了使設施能儘早拆除

除污作業除了要達到上述目的外，最重要的是作業過程須確保工作人員與環境的安全，而在除污之前也應謹慎評估進行除污的必要性，其中評估的因素包括目標除污程度、工作人員的輻射劑量、污染形式等，隨後再根據評估結果進行成本與效益分析，以找出最佳除污的方式；所謂的成本與效益分析即是進行除污作業所花費之成本(含人力)與所減少的輻射、所帶來的廢棄物管理利益之比較分析，例如得在拆除前除污，以降低輻射劑量並防止污染擴散，或是在拆除後除污，以降低污染程度並減少放射性廢棄物數量；最後則是須確保除污作業所產生的二次廢棄物能妥善的處理。

常見的除污方式可略分為三類，各類方式皆有其優缺點，需依情況選擇最妥適的除污方法。第一類為物理除污法，其中最基本也最為簡單的方式為水洗法(Washing)，但由於無法去除沉積於隙縫中細小微粒，因此另有物理作用較強的機械作用法，此法包含了吸塵/擦洗法(Vacuuming/Scrubbing)、可剝塗層法(Strippable Coatings)、蒸汽清洗法(Steam Cleaning)、高壓水柱法(High Pressure Water Jetting)、研磨法(Abrasive)以及表面刨除法(Surface Shaving)等，但須注意此類除污方式通常需有二次廢棄物處理設備加以輔助，以避免污染擴散。

相對於物理方式，另一類即為化學除污法，主要是藉由化學溶劑來清洗受污染區域，此法包含了有機酸處理法(Organic Acids)、無機酸處理法(Mineral Acids)、化學泡沫法(Foam)、化學凝膠法(Gels)、氧化劑處理法(Oxidising Agents)等。此類除污方式若使用適當的溶劑，除污因子也可以達到很高，且空

氣傳播污染的情況相對於物理除污法也較少，但由於化學除污通常會產生較多的除污廢液，且為增加除污過程的動力學，除污溶劑有時需要加熱到 70-90 度，因此作業程序上較為繁瑣，此外，溶劑通常具有腐蝕性與毒性，易對人體會造成傷害等缺點。

最後一類則為國際上所研發之新興技術，例如美國與日本目前已發展出利用雷射束照射金屬或混凝土，藉由受熱分解將污染的表層給移除，而除污效率取決於污染物質對於雷射束波長的吸收程度，且此方式為乾性處理，因此產生較少二次廢棄物；另一種新技術則是使用微波加熱混凝土表面使其剝落達到除污之效果，而除污厚度取決於微波的功率強度，此方式同樣屬於乾性處理；最後還有一種新技術則是利用微生物進行除污，將含有微生物的特殊溶液應用於污染表面，污染物質會隨著時間被溶液中的微生物給濃縮並分離，但此類新興的除污方式仍在研發當中，實際效率目前仍不明。

除役之拆除技術

核電廠除役的過程中，必須將反應器槽體、管線、設備、組件與混凝土等加以拆解，以便進行後續的工作，至於拆解方式的選擇，則是會受到拆解設備尺寸與種類、拆解效率、設備與廢棄物運輸路徑、設備污染程度、輻安與工安等因素而有所影響，以輻安與工安為例，若拆除污染程度較嚴重的設備可選擇拆解效率高的方式以縮短作業時間或是採用遙控操作以減少輻射曝露，至於有些拆除方法會產生噪音及火花，也須考慮配戴防護裝備是否會影響作業，並評估發生火災等意外事故的風險。因此在執行拆除作業之前，應明確訂定各物件之拆除工法，並規劃拆除的順序、時機與運送途徑，以確保在符合法規要求的情況下，安全快速地完成拆解。此外，如同除污作業，拆除也會產生二次廢棄物，例如切割過程產生之灰塵、煙霧、懸浮微粒等，工作人員仍須注意防護，避免吸入核種，並配合相關處理設備(例如 HVAC 過濾系統)，並盡可能地減少其產生、避免污染擴散。

目前常用的切割方式可分為冷切割(切割刀具直接接觸待切割物體)與熱切割(切割刀具未直接接觸待切割物體)。常見的冷切割方式包含有鋸切(Sawing)、

鑽石索鉅(Diamond wire)、剪切(Shearing)、銑削(Milling)等；常見的熱切割方式有氧-乙炔切割(Oxy Acetylene)、電漿切割(Plasma Arc)、熱矛切割(Thermic Lance)、爆炸切割(Explosive Cutting)等。

不論使用何種方式，在進行拆除作業之前，必須多方面的思考，並依據廠址輻射特性調查結果，完成切割設備之安裝、廢棄物運送與包裝等規劃，同時也須進行成本與效益分析，以選擇最佳拆除方式，但確保人員與環境安全仍是最重要的準則。

放射性廢棄物之分類與處置方式

除役將產生數量龐大的放射性廢棄物，而這些廢棄物最終皆需送往最終處置場進行處置，而放射性廢棄物不論是在進行貯存或處置前必須確認其分類，原因為不同類別的放射性廢棄物所需之安全管理要求不同，且會直接影響成本。IAEA是將放射性廢物依其活度與半化期長短分為高放射性廢棄物(High Level Waste, HLW)、中放射性廢棄物(Intermediate Level Waste, ILW)、低放射性廢棄物(Low Level Waste, LLW)、極低放射性廢棄物(Very Low Level Waste, VLLW)以及極短半化期廢棄物(Very Short Lived Waste, VSLW)等五類。而英國則是依放射性廢棄物之活度與發熱能力分為 HLW、ILW、LLW 與 VLLW 等四類，各類廢棄物之法規限值與特性如下所述：

- 高放射性廢棄物：此類廢棄物所含的放射性物質在衰變的過程中，會產生熱量使溫度顯著上升，因此在設計貯存及處置設施時必須考慮到這個因素，其來源主要是用過核子燃料及其再處理所產生之玻璃固化體，目前英國的做法是將這類固體玻璃廢棄物貯存數十年，待放射性大幅度的衰減後再進行深地層處置。
- 中放射性廢棄物：此類廢棄物所含的放射性物質之 α 含量超過 4×10^9 貝克/公噸或 β / γ 含量超過 1.2×10^{10} 貝克/公噸，且不會有顯著地熱量產生，其來源主要來自用過核子燃料再處理以及核設施運轉和維護所產生之廢棄物，例如燃料護套和反應器組件等乾性廢棄物或處理廢液所產生之濕性污泥

等，隨著核設施的除役和清理工作的進行，未來將會產生更多此類廢棄物，英國目前的做法是將其予以固化後包裝在不銹鋼、鐵或混凝土所製成的專用容器中貯存，未來將採取中地層處置。

- 低放射性廢棄物：此類廢棄物所含的放射性物質之 α 含量不超過 4×10^9 貝克/公噸或 β / γ 含量不超過 1.2×10^{10} 貝克/公噸，其來源主要來自醫院、研究機構和核工業所產生之廢棄物，且大部分被運往位於 Cumbria 西部的 Drigg 低放廢棄物最終處置場進行處置，而在處置前通常需先經過壓縮處理，再放入大型鋼製容器並以水泥進行灌漿，隨後採取淺地表方式進行處置。
- 高體積極低放射性廢棄物(High Volume Very Low Level Waste)：此類廢棄物所含的放射性物質總含量不超過 4×10^6 貝克/公噸；若廢棄物含有氚，則氚含量限值為 4×10^7 貝克/公噸，此類廢棄物可以至指定的掩埋場進行處置。
- 低體積極低放射性廢棄物(Low Volume Very Low level Waste)：此類廢棄物每 0.1 立方公尺所含的放射性物質總活度不超過 4×10^5 貝克或單一項廢棄物總活度不超過 4×10^4 貝克；若廢棄物含有碳-14 或氚，則每 0.1 立方公尺所含的碳-14 和氚活度限值為 4×10^6 貝克或單一項廢棄物所含的碳-14 和氚活度限值為 4×10^5 貝克，此類廢棄物可以連同一般商業或工業廢棄物至未指定的掩埋場進行處理。

如同上述，不同類別的放射性廢棄物所要求的包裝型式也會不同，以 HLW 與 ILW 為例，兩者的差異如圖 6 所示，此外，根據英國 NUVIA 公司估算，處置每立方公分 ILW 的費用約為 LLW 的 7.5 倍、約為 VLLW 的 250 倍，這也是為何要積極減少廢棄物產生或藉由除污而降低廢棄物活度的原因之一。

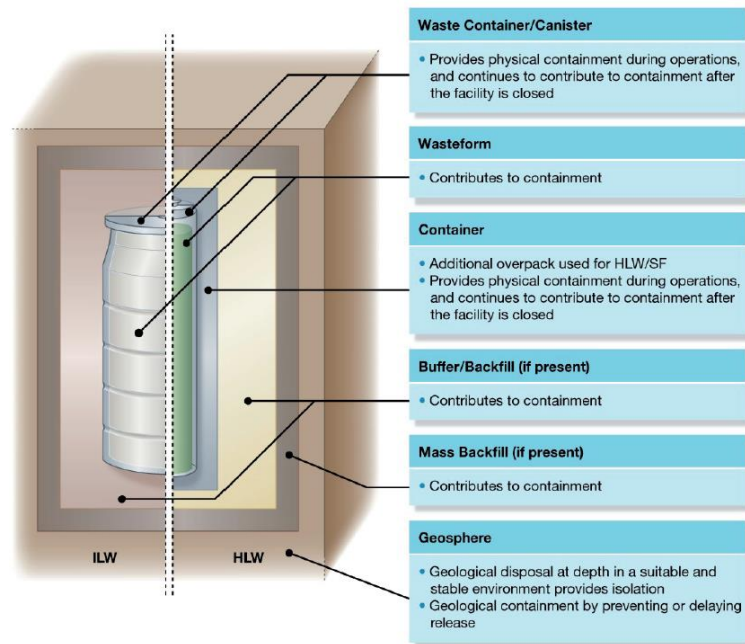


圖 6 HLW 與 ILW 包裝型式之差異

英國地質處置設施之簡介

而英國主要負責推動地質處置作業之機構，為 NDA 的子公司放射性廢棄物管理局(Radioactive Waste Management, RWM)，和其他國家一樣，英國地質處置設施(Geological Disposal Facility, GDF)是屬於高程度工程設計之設施，目的是圍阻和隔離物放射性廢棄物，所謂的圍阻即是將廢棄物包裝在多屏障中，並利用周圍的岩石提供長期的保護屏障，隔離即是將此放置在 200~1000 公尺地下，避免對環境造成影響。

圖 7 為英國 GDF 示意圖，目前對其初步的規劃可分為地面設施與地下設施；在地面設施的部分，主要是接收來自鐵路和道路之廢棄物包件並將其轉移到地下進行處置的相關設施，其佔地面積估計約為 1 平方公里；至於地下設施的部分，則包含處置 ILW 的處置窖系統及處置 HLW(含用過核子燃料)的工程處置隧道，而 HLW 與 ILW 擁有不同處置結構之設計，原因在於 HLW 會產生熱量，因此從圖中可看出 GDF 在不同深度下擁有兩個處置區；此外，兩區域彼此分離的另一個原因，是為了避免彼此工程障壁互相交互作用而危及安全，設施實際的深度及處置區間的距離將取決於廠址地質情況而定，目前規劃深度介於 200~1000 公尺之間。

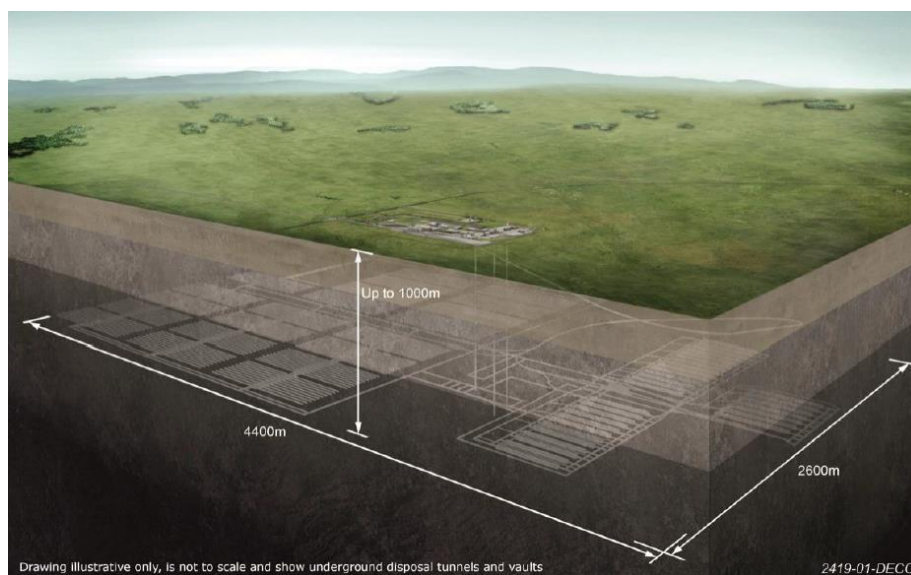


圖 7 英國地質處置設施示意圖

英國地質處置設施選址方式與進度

英國政府採取 CoRWM 的建議先採取中期貯存再進行地質處置，而為了找尋 GDF 的潛在場址，將採取自願的方式進行徵選，也就是與願意參與選址過程的社區相互合作並建立夥伴關係；而所謂的夥伴關係則是與地方居民與代表，共同對地質處置設施的設計、規劃以及可能造成的影響共同討論與溝通，而依據瑞典的經驗顯示，這是目前最可行同時也是最為有效的選址方式。

而英國政府也承諾 GDF 也將帶來長期就業機會並對該社區提供額外的投資以帶來顯著的經濟利益，因此英國的地質處置將依三階段進行，如圖 8 所示，第一階段期間約 2 年，工作內容包含以全國為範圍進行地質調查與篩選、準備與社區合作以及發展土地使用計畫；第二階段期間約 15 至 20 年，工作內容主要是與社區進行溝通並提供相關資訊、場址調查及設施之設計與規劃；第三階段期間約 100 年，工作主要是建造與營運處置設施、提升社區就業機會並對社區進行投資及封閉後放射性廢棄物安全處置；而現階段已完成的工作內容如圖 9 所示，預計將於 2018 年正式進入選址作業，而不管在哪一階段，英國政府強調皆需落實資訊公開。

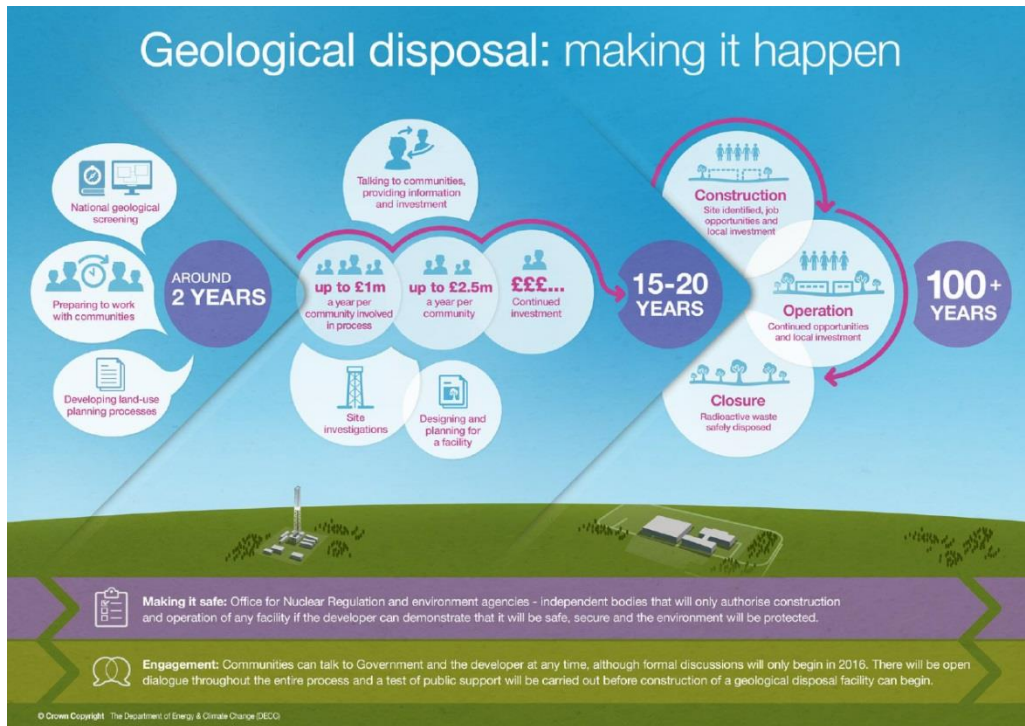


圖 8 英國執行地質處置之步驟

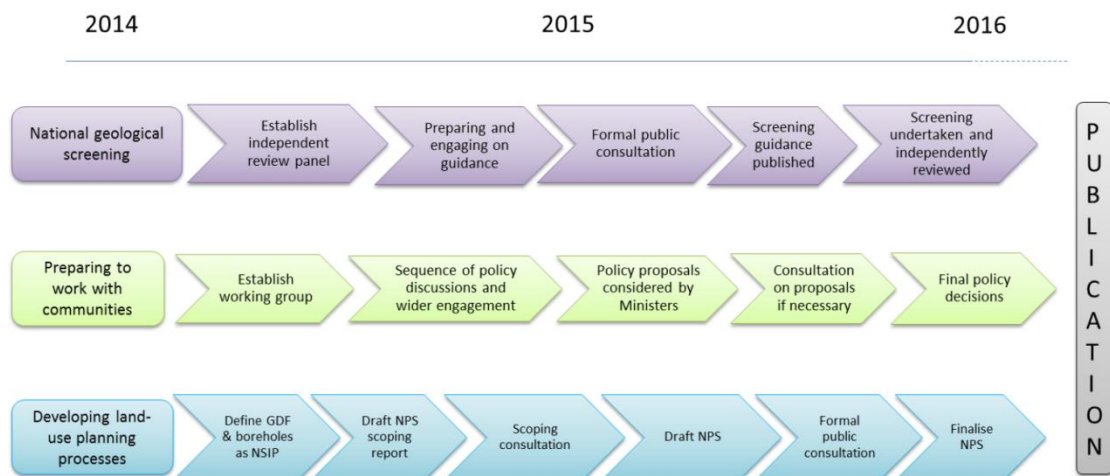


圖 9 英國地質調查與篩選、社區合作之準備及發展土地使用計畫之時程與規劃

以利害關係人的觀點探討廢棄物管理

本議題是以瑞典最終處置場選址過程為例，在探討瑞典目前如何順利推動處置作業前，必須了解瑞典核子燃料及廢棄物營運公司 (Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB) 已發展了 KBS-3 相關系統做為瑞典用過核子燃料最終處置之設計，該系統能確保高放射性物質能有效阻隔在深地層內，因此不

論是盛裝用過核子燃料的內襯與包封容器或是緩衝與回填材料皆有設計上的要求；此外，對於岩盤也須經過詳細的調查與嚴格的要求，例如須遠離板塊確保岩層的穩定、岩層的種類須足夠緊密以降低地下水之傳導；至於使用緩衝與回填材料之目的是為了保護廢棄物罐能在岩層發生運動時盡可能不受到破壞，另一方面也能藉此抑制地下水中所存在著腐蝕性的物質到達廢棄物罐的速度，或是吸附所釋出的放射性核種，而 SKB 在過去已執行非常多安全評估試驗，已證實該系統設計能確保長期穩定及安全。

至於瑞典高放廢棄物最終處置場選址程序，可從 1977 年 SKB 著手進行國內各處場址初步調查研究而開始，在歷經了十幾年的調查後，於 1993 年至 2002 年這段期間，對所遴選出的 8 個區域進行可行性評估調查研究，經過評估後，SKB 決定以 Östhammar 與 Oskarshamn 兩個區域進行後續的場址調查，隨後至 2008 年的這段期間，SKB 則對此兩個區域展開了細部調查與評估作業，最後是依據技術執行、場址安全性、健康與環境、社會資源等四項評選因子，於 2009 年選定了 Östhammar 內的 Forsmark 做為高放廢棄物最終處置場，並於 2011 年提出建造許可申請(包含預計於 Oskarshamn 興建包封廠)。

至於如何以利害關係人的觀點來推動相關的措施，得先了解他們所在乎的是什麼，舉例來說，SKB 在 Oskarshamn 成立了 Äspö 硬岩實驗室，目的除提供一個真實的岩石環境，以作為深地層處置場之設計與建造先期研究外，SKB 為解除民眾對處置安全的疑慮，更是開放該實驗室供大家參觀，使民眾了解放射性廢棄物如何安全營運與管理。

另一方面，SKB 在獲得最終處置場建造許可前，除了瑞典管制機關外，還需取得土地環境法庭(The Land and Environmental Court)、Östhammar 地方政府、Oskarshamn 地方政府及瑞典政府的同意；再以 Östhammar 地方政府為例，為審查此申請案，其政府內部也成立了環境影響評估委員會、長期安全委員會、諮詢委員會等新組織，其成員主要是由政府代表、非政府代表及專家學者所組成，目的是藉由各方廣泛的溝通討論，並徵詢相關利害關係人的意見，以作為核准與否

之參考。

此外，SKB 決定要以 Östhammar 或 Oskarshamn 作為最終處置場之前，除了承諾除了會增加工作機會外，他們也將撥出 20 億瑞典幣(約 2.1 億歐元)之回饋金協助地方進行發展與提供相關福利，其中值得注意的是，此資金並非由單一方獨得，而是 25%提供給被選為最終處置場的 Östhammar，75%則是提供給未被選擇的 Oskarshamn，目的是期望藉此投資與發展公共建設，使最終處置場的設置能為當地社區發揮潛在利益，因此面對核廢處置問題，須靠雙方共同努力合作，並採取負責任的態度來面對與處理，無論何者被選為最終處置場，雙方都必須是贏家。

三、心得

- (一)目前許多核能先進國家都透過專責機構以推動除役或廢棄物營運相關業務，成立專責機構之目的，無非是希望藉由獨立且客觀的機構使在執行業務時能獲得民眾的信賴。以行政院通過的「行政法人放射性廢棄物管理中心設置條例」草案為例，該中心董事會成員除了規劃由政府相關機關(構)代表及相關學者專家組成外，還需包含社會公正人士、民間團體、候選為最終處置設施場址之當地住民代表，目的是使公民參與決策機制，且財務、業務資訊公開受全民平行監督，此法或許較易取得民眾信任，能更有利推動我國核後端相關作業。
- (二)核電廠除役將產生大量的放射性廢棄物，其數量會直接與除污與拆除作業有關，因此除役執行單位在作業執行前，須多方面的思考，並依據相關調查與評估結果進行成本與效益分析，以找出最適當之除污與拆除的方式，而在除役作業的過程中，同樣須嚴格控管二次廢棄物的產生並防止污染擴散，待作業完成後，放射性廢棄物之管理也須妥善的規劃與安排，而不論採取何種方式進行除污與拆除作業，確保人員與環境安全應是最優先與最重要的準則。
- (三)不論核設施是在運轉階段或除役階段，減廢策略首要的目標是避免廢棄物的產生，若無法避免其產生時，依序才是盡可能地使廢棄物減少、再利用、循環，必須謹記「最終處置」才是廢棄物管理最後的選擇。
- (四)放射性廢棄物之管理須妥善的規劃，且須建立完整的廢棄物調查與盤點清單，其內容須明確顯示廢棄物來源、種類、數量與活度，並依其特性與類別進行不同方式之處理、貯存與處置規劃，最重要的是廢棄物管理應與除役計畫相連結，以確保從運轉到除役階段已全盤進行考量。
- (五)核電廠除役首要關鍵在於移出核反應器與用過燃料池之用過核子燃料，乾式貯存設施為核電廠除役的必要設施，儘早移出核反應器之用過核子燃料，可

更加確保安全。目前英國現階段仍無高放射性廢棄物最終處置設施，如何解決用過核子燃料貯存的困境，經查管制機關ONR近期所發布的計畫評估報告，ONR已於2014年核准運轉中的Sizewell B 壓水式電廠興建室內乾式貯存設施，並以HI-STORM混凝土護箱與MPC密封金屬鋼桶搭配鋼構廠房做為GDF營運前，貯存用過核子燃料之中期貯存設施。

- (六)藉由國際上成功之案例，了解先進國家如何以利害關係人之觀點，進行放射性廢棄物長期營運與管理規劃，其相關經驗可供我國推動放射性廢棄物最終處置計畫之參考。

四、建議事項

- (一)藉由本次出國實習機會，與英國 NDA 專家就核電廠除役相關技術議題交流討論，並參加國際除役與放射性廢棄物管理訓練課程，能充分掌握國際核能電廠實際除役現況，本訓練課程著重於國外實務經驗分享，有助於我國未來推展核能電廠除役的安全管制技術，建議未來在經費允許的情況下，能持續派員參加，掌握國際除役最新管制技術發展。
- (二)除役成本與放射性廢棄物之類別、特性、數量、拆除與除污技術、減量措施、貯存與最終處置規劃直接相關聯，建議我國後端基金主管機關參考國際經驗，責成台電公司應審慎進行除役相關活動，定期檢討後端基金之充足性，避免給後代子孫不當的財務負擔。
- (三)目前英國壓水式核電廠所產生之用過核子燃料貯存設施係採用室內乾貯方式為之。台電公司的核一廠除役計畫中，亦將參採社會共識，將二期乾貯設施改採室內貯存方式。建議台電公司參採國際經驗，加速推動二期室內乾貯計畫，以利遂行核一廠除役作業。
- (四)台電公司推動放射性廢棄物最終處置設施之選址作業，面臨許多挑戰而停滯。依據外國的選址經驗，成功推動選址作業的關鍵因素除了在於資訊公開以外，選址作業單位須以利害關係人之觀點進行民眾參與溝通，建議國內選址作業單位能參考國際經驗，強化低放處置設施選址作業的公眾溝通方式，以突破目前的處置計畫執行困境。