

出國報告（出國類別：實習）

參加Informa公司舉辦之第35屆除役
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：藍泰蔚薦任技士

派赴國家：英國

出國期間：108年7月7日至108年7月13日

報告日期：108年9月16日

摘要

第 35 屆除役放射性廢棄物管理訓練課程在英國劍橋大學基督學院 (Christ's College, Cambridge) 舉辦，此課程過去每年舉辦，在為期 5 天的課程中，提供有志於核設施除役、放射性廢棄物管理、環境問題技術解決方案之從業人員交換意見、學習新知及入門初探之捷徑。鑒於國內正面臨核電廠除役之際，核一廠、核二廠之除役之安全管制將是未來管制業務之重點，此次奉派出國實習重點放在包括除役實務及除役放射性廢棄物之管理，又研習地點位於英國，課題多與英國現況相關，尤其英國第一代 Magnox 核電廠大多邁入除役階段，也藉此機會深入了解英國放射性廢棄物之管理與核設施除役現況，另英國已有營運中之低放處置設施，故亦研習相關處置設施選址及公眾溝通政策。

本次研習課程議題涵蓋了全球除役和廢棄物管理現況、歐盟放廢法規更新、除役、廢棄物特性調查技術介紹、英國低/中放射性廢棄物管理、英國放射性廢物運輸、放射性土地整治和最終場地清理、用過核子燃料的貯存等面向，參加學員多來自歐盟成員國及英國，學員背景涵蓋政府管制機關、實驗室、除役和放射性廢物處理領域的營運單位或諮詢公司約 40 多人。

目錄

一、	目的.....	4
二、	過程.....	6
	(一) 行程概要.....	7
	(二) 訓練概要.....	8
三、	心得.....	14
四、	建議事項.....	45

一、目的

原能會於 104 年 11 月 25 日收到台電公司依核子反應器設施管制法第 23 條規定，提出之核一廠除役許可申請與相關文件，台電公司復於今(108)年 7 月 4 日提出環保署認可之環境影響評估及相關資料。經原能會審查結果，確認核一廠除役作業規劃符合相關法令規定，且台電公司之技術與管理能力足以勝任除役之執行，合於核管法第 23 條第 1 項規定，爰依法核發核一廠除役許可。台電公司另於 107 年 12 月 27 日提送核二廠除役許可申請，原能會於 108 年 1 月 21 日完成核二廠除役許可申請案之程序審查，確認台電公司送審文件之完整性符合申請要件，開始進行核二廠除役計畫實質審查作業。

台電公司取得核一廠除役許可後，應依核定之除役計畫執行相關作業，原能會亦將於除役期間執行視察及審查作業，確認台電公司確實按照除役計畫，推動除役拆除等相關作業，並妥善辦理除役期間之各項輻射防護、用過核子燃料與放射性廢棄物管理、環境輻射監測及工程管理等工作，以維護民眾健康與環境安全。為精進除役視察及審查作業技術，以為未來管制預做準備，故而參加本次 Informa 公司舉辦之第 35 屆除役放射性廢棄物管理訓練課程，瞭解國際目前核電廠除役實務及放射性廢棄物管理做法，該課程已獲得認證標準組織(Criteria and Procedures Division CPD)認證所有相關協會認可符合 CPD 要求，學員們在完成課程後均可取得出席證明。

二、過程

(一)行程概要

參加 Informa 公司舉辦之第 35 屆除役放射性廢棄物管理訓練課程行程

表如下：

7月7日(日)	臺北至倫敦
7月8日(一)	倫敦至劍橋，課程報到， 除役放射性廢棄物管理訓練課程
7月9日(二)	除役放射性廢棄物管理訓練課程
7月10日(三)	除役放射性廢棄物管理訓練課程
7月11日(四)	除役放射性廢棄物管理訓練課程
7月12日(五)	除役放射性廢棄物管理訓練課程- 劍橋至倫敦搭機返台
7月13日(六)	抵達臺北

(二)參加 Informa 公司舉辦之第 35 屆除役放射性廢棄物管理訓練課程

整體課程為時五天，課程表如下，並簡單介紹第一、二天課程重點：

第一天	
12:00-13:00	註冊-午餐
13:00-13:20	主席開幕致辭及學員自我介紹
13:20-13:50	歐洲電廠除役概述
13:50-14:45	歐盟核能及放射性廢棄物管理
14:45-15:00	午茶
15:00-15:40	英國核能除役局(NDA)在民用核能設施之除役及清潔外釋策略
15:40-16:30	核能議題公眾認知-除役及放射性廢棄物管理
16:30-17:00	結束第一天課程

第二天	
09:00-09:40	核電廠除役
09:40-10:30	除污程序和技術
10:30-10:50	早茶
10:50-11:35	檢視核能成本和除役資金
11:35-12:15	拆解技術和方法
12:15-13:15	午餐
13:15-14:45	英國核設施除役和放射性廢棄物管理條例
14:45-15:05	午茶
15:05-16:50	除役研討會
16:50-17:00	- 第二天結束

第三天	
09:00-10:00	德國的最新情況：除役的現狀和發展
10:00-10:45	案例研究：鈾礦尾礦
10:45-11:00	早茶
11:00-11:45	案例研究：除役保持在簡單狀態 – Dounreay 的經驗
11:45-12:30	案例研究：Winfrith End State 的發展
12:30-13:30	午餐
13:30-14:15	核融合介紹-其產生之放射性廢棄物以及除役產物
14:15-15:15	解除放射性物質管制釋放核場址之規定和行政指導
15:15-15:30	午茶
15:30-16:40	了解低階（LLW）和中階（ILW）放射性廢棄物管理
16:40-17:00	討論會
17:00	第三天結束

第四天	
08:45-09:30	定義特徵
09:30-11:00	研討會：廢棄物特徵
11:00-11:20	早茶
11:20-12:10	為地質處置目的，包裝高活度放射性廢棄物
12:10-13:00	放射性廢棄物和用過核子燃料貯存 - 英國和國際視角
13:00-14:00	午餐

14:00-14:50	核物質運輸 - 概述
14:50-15:50	放射性土地復育和最終場址清理
15:50-16:10	午間咖啡
16:10-17:30	實際練習：放射性土地復育
17:30-17:40	第四天結束
19:30-20:30	晚宴

第五天	
09:30-10:30	放射性廢棄物地質處置
10:30-11:15	芬蘭的放射性廢棄物管理和除役
11:15-11:40	早茶
11:40-12:30	英國脫歐衝擊和歐洲的除役和放射性廢棄物管理 未來前景
12:30	課程結束

7月7日(日)、7月8日(一)辦理研習課程有關手續

7日晚間7時許抵達英國倫敦希斯洛機場，次日一早前往位於英國劍橋郡劍橋市的劍橋大學基督學院(Christ's College, Cambridge)，大門接待中心人員簡單說明上課地點及住宿位置後，便開始研習課程，註冊資訊則係事先透過網路完成。



劍橋大學基督學院校園一角



課程講師授課情形

7月8日(一)、7月9日(二)-第一天、第二天研習課程介紹

首先由前歐盟核能政策，核安全，放射性廢物管理和核裝置除役部門主席以及未來五天課程的導師 Derek Taylor 先生介紹歐洲電廠除役未來除役作業及最近的發展情形，另外也介紹了歐盟的放射性廢棄物管理情形，包括歐盟的放射性廢棄物產量、以及其放射性廢棄物管制法規框架等內容，使學員對後續要進行之課程兩大重點，除役及廢棄物管理，能有大致的輪廓。



與課程導師 Derek Taylor 先生合影

第一天下午課程，由英國核能除役局 (Nuclear Decommissioning Authority ,NDA)策略執行經理 Lan Lowles 先生擔任本課程講師，Lan Lowes 先生在英國核能除役局的工作聚焦在 Sellafield 場址的營運過渡轉換，及清理和除役場址方面，在課程中 Lowes 先生介紹英國核能除役局在民用核能設施之除役及清潔外釋策略，說明英國核能除役局在除役作業中扮演的角色及任務，探討英國核能除役局在近期至 2021 年的策略與未來面臨的挑戰。

第二天的課程大部分都是與除役有關課程，首先由西屋電力公司 (Westinghouse Electric Company)所屬全球除役及拆解及廢棄物商業發展部門主任 Joseph Boucau 先生介紹核電廠除役課程，對除役專案所涵蓋重要的作業項目，以及核子反應器除役所運用的拆解技術和流程做了概略描述，此外，在現有核電廠陸續進入除役階段下，Boucau 先生也提出了對電廠除役未來前景的看法。

恩康諮詢公司(Enkom Consulting)管理主任 Martyn Jenkins 先生談到有關核能成本和除役資金的評估議題，介紹除役費用類型、成本估算、長期提供資金來源以及可能面臨的挑戰等面向。

Nuvia 公司資深專案經理兼首席顧問 Nick Brown 先生講授除役作業可能使

用的拆解技術和方法，包含應對不同情況下適用的拆解技術及切割方法，並且從實務經驗中，獲得的參考資料以及經驗教訓。

英國核能設施場址對除役及放射性廢棄物管理的管制課程，由英國核能管制辦公室（Office for Nuclear Regulation ,ONR）檢查員 Simon Morgan 向學員授課，Morgan 先生將英國核設施的安全和環境監測規定大致區分為放射性廢棄物管理、放射性廢棄物最終處置、土地污染控制及管理、除役等四個方面說明，並引用了低危害和高危害性設施的除役案例研究，學員從實際案例研究中，能夠理解並學習應用管制規定於實務中。

三、心得

自 20 世紀 50 年代以來，英國持續建設新核電廠，一直到 1995 年 Sizewell B 核電反應器機組商轉後，便幾無再興建新的核能機組，目前英國共有 15 座反應器運轉中，分布在 8 個場址，但大部分電廠將於 2024 年以前陸續除役，此外英國也具有與核燃料循環所有階段的相關設施，包括：運轉和除役中的核電廠，研究設施，鈾濃縮，燃料製造，用過核子燃料貯存和再加工，以及放射性廢棄物處理，儲存和處置設施，本課程大部分之專題為與英國放射性廢棄物及除役管理有關內容，課程心得整理如下：

一、英國放射性廢棄物之定義

英國依放射性廢棄物之活度與發熱能力將其分為高放廢棄物、中放射性廢棄物、低放廢棄物、極低放射性廢棄物等主要類別的廢棄物，在將廢棄物正式歸類為放射性廢棄物之前，必須對其進行準確的特性調查。特性調查通常不僅限於放射性性質調查，並須額外調查其物理和化學性質。精確特性調查能使作業人員確定廢棄物的危險程度，並且評估廢棄物在貯存和處置作業可能產生的風險，從而決定適當的廢棄物處理，固化和運輸策略，有助於廢棄物減量和規劃未來處置路線。各分類的簡要圖示如下圖一，以下說明各分類的區別標準：

(1)高放射性廢棄物 (High Level Waste, HLW)：廢棄物具有大量放射性，放射性物質衰變時產生的高熱是管理高放廢棄物的重要考量。高放射性廢棄物來源主要為用過核子燃料，和用過核子燃料加工後產生的高活度液體或玻璃固化廢棄物，但目前沒有用於再處理的用過核子燃料和部分核材料（例如分離出的鈾和鈾）則不歸類為廢棄物，除非被認定為沒有其他用途並聲明其為廢棄物。

(2)中放射性廢棄物 (Intermediate Level Waste, ILW)：放射性廢棄物的 β 或 γ 核

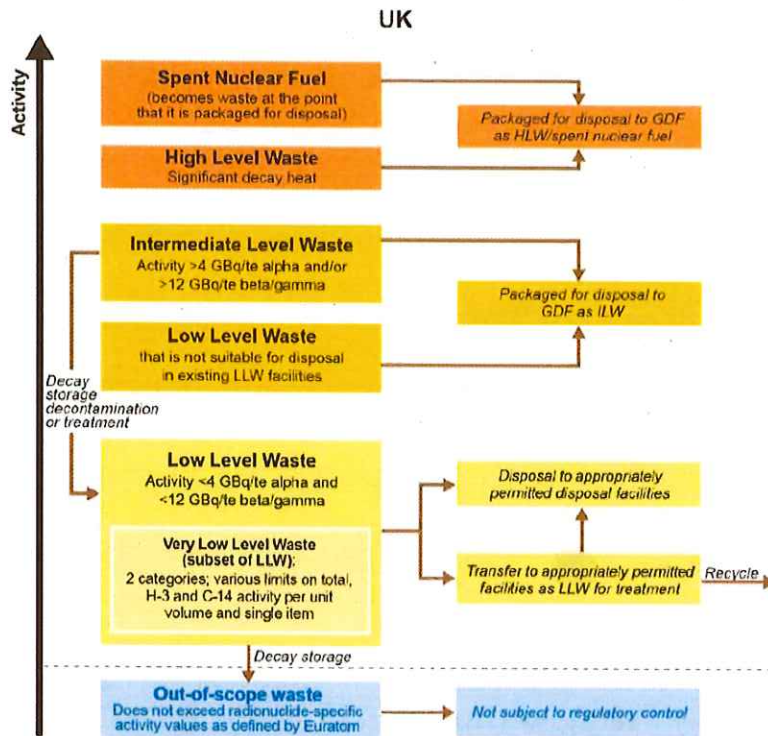
種活度高於每公噸 12GBq 或 α 核種的活度高於每公噸 4GBq 屬於此類，但不會產生明顯的熱量。中放射性廢棄物之來源主要來自用過核子燃料再處理、反應器運轉，維護和除役，或同位素製造產生的廢棄物等，因不會產生明顯的熱量，中放射性廢棄物地質處置設施設計中不需要特別考慮其發熱因素。

(3)低放射性廢棄物 (Low Level Waste, LLW)：放射性廢棄物的 β 或 γ 核種活度低於每公噸 12GBq 或 α 核種的活度低於每公噸 4GBq 屬於此類，雖沒有訂定正式下限值，但實際上大於豁免限值才會被認定為低放射性廢棄物。低放射性廢棄物之來源主要來自設備，衣物等的污染，和放射性物質設施例行運轉，廢棄物處理作業，除役等來源。

(4)極低放射性廢棄物 (Very Low Level Waste, VLLW)：極低水平廢棄物是低放射性廢棄物下的子分類，又分為高體積極低廢棄物及低體積及低放射性廢棄物兩類，低體積極低放射性廢棄物可做為一般廢棄物進行處置，其活度限值為每 0.1 立方公尺不超過 400kBq，或單一廢棄物總活度不超過 40kBq，若廢棄物僅含 H-3 和/或 C-14，則活度限值為每 0.1 立方公尺不超過 4000kBq，或單一廢棄物其總活度不應超過 400 kBq。高體積極低廢棄物活度上限值為每公克 4Bq，若廢棄物僅含 H-3 和/或 C-14，則其活度限值為每公克 40Bq，應於授權的陸地掩埋場進行處置，並受到環境主管機關的管制。

(5)豁免管制廢棄物(Out-of-Scope waste)：廢棄物未含有超出放射性物質法 (Radioactive Substances Act 1993)或 2018 年環境許可法規(The Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2018)限制的任何放射性核種，根據法律被認為不具有放射性。

Figure 21: Summary of UK radioactive waste classification



圖一、英國放射性廢棄物之分類

二、英國放射性廢棄物管理策略：

英國的放射性廢棄物貯存主要由幾個機構負責管制，核能管制辦公室（The Office for Nuclear Regulation, ONR），負責管制核能場址的營運。及環境管制機關，英格蘭環境局(Environment Agency, EA)，威爾斯自然資源（Cyfoeth Naturiol Cymru / Natural Resources Wales）和蘇格蘭環境保護局(The Scottish Environment Protection Agency, SEPA)，負責管制核設施場址放射性廢水和廢棄物的排放和處理。

根據英國 NUVIA 公司估計，豁免管制廢棄物每立方公尺的處置費用約為 40 歐元，極低微放射性廢棄物(在經許可陸地掩埋場處置)之處置費用約 400 歐元，低放射性廢棄物約為 4000 歐元，而中放射性廢棄物需地質處置，每立方公尺中放射性廢棄物處置費用達 40000 歐元。因此防止廢棄物產生是英國放射性廢棄物

管理的基本原則，有著顯著的環境和成本效益，對於金屬或稀缺資源而言，重複使用或回收再使用更是首選方式。

(一)較高活度廢棄物管理策略

在英國，較高活度廢棄物(Higher-Activity Waste, HAW)被英國政府定義為：高放射性廢棄物，中放射性廢棄物以及目前不適合在現有低放處置設施中處置的部分低放射性廢棄物（由於具有某些化學，物理或放射性性質，而與現存廢棄物接收標準不符）。英國對於較高活度放射性廢棄物採取中期貯存的策略，設計之貯存期間約為數十年，衰變貯存管理認為適用於含有半衰期相對較短（約 30 年或更短）放射性核種的廢棄物。其他國際間採用的策略亦有如延伸貯存，其設計之貯存期間約為 100 至 300 年的區間，並且已被數個國家認可(荷蘭已經將其作為國家的政策)，優點包括技術可行性，靈活性和易於再取出廢棄物的特性，並且因放射性在貯存期間衰減，而能減少預備送往處置場處置的廢棄物量，藉此節省成本。其他尚包括無限期貯存，此策略有利於爭取時間進一步發展出最終管理策略，缺點是隨時間過去，相關專業知識及技術將會逐漸缺失，並且需要持續的資金需求和管理措施，使廢棄物在長期地保持安全的狀態。

(二)低放射性廢棄物管理策略

低放射性的管理策略主要基於「英國核能工業固體低放射性廢棄物管理策略」(UK Strategy for the Management of Solid Low-level Radioactive Waste from the Nuclear Industry)的要求，幫助引導低放射性廢棄物管理者提出確保安全，環保和具有成本效益的管理解決方案，其管理策略核心分三面向：1.為適當運用廢棄物分類等級。2.充分利用現有的低放射性廢棄物設施資產及 3.開發新的合目的性的廢棄物管理路線。由於未來陸續有核設施進行除役，現有低放處置設施容量將面臨不足，英國政府鼓勵放射性廢棄物產生者使用更廣泛的方式來管理低放射性廢

棄物，而不完全依賴於處置設施。

為了達到上述目的，英國核能除役局下的子公司低放射性廢棄物處置公司 (Low Level Waste Repository Ltd.) 提供了廣泛的廢棄物管理服務，包括：金屬廢棄物處理、可燃廢棄物處理、超壓縮、極低放射性廢棄物處置、運輸服務、替代處理方案等以減少進入處置設施的低放廢棄物量。統計至 2016 年 4 月 1 日，英國累計未經處置的低放射性廢棄物量約為 30,100 立方公尺。其中大部分是臨時貯存，等待回收或處置。透過低放射性廢棄物處置公司提供的管理服務，使 2016/17 年期間產生的低/極低放射性廢棄物的 88% (約 13,500 立方公尺) 引導至更適合的廢棄物管理路線，而不直接進入低放射性廢棄物處置場。

(三) 極低放射性廢棄物管理策略

極低放射性廢棄物管理涵蓋了放射性活度非常低的廢棄物，根據豁免規定，低體積極低放射性廢棄物管理可以安全地在未特定的地點進行處置，高體積極低放射性廢棄物管理可以安全地在指定的垃圾掩埋場進行處置。統計至 2016 年 4 月，極低放射性廢棄物管理庫存量約為 935 立方公尺，其中 728 立方公尺存放在 Harwell 場址，並且所有極低放射性廢棄物管理都在臨時貯存的狀態等待置垃圾掩埋場進行處置。

三、英國放射性廢棄物處理及貯存

(一) 英國高放射性廢棄物

在英國主要的用過核子燃料分為三種類型，Magnox 用過核子燃料、先進氣冷式反應器用過核子燃料及壓水式反應器用過核子燃料，過去的政策是先進行暫時貯存，等待進行用過核子燃料再處理，但隨著 THORP 再處理場於 2018 關閉，Magnox 再處理廠預計 2020 年關閉，此一政策也正在對應進行修正。英國對用過核子燃料的暫時貯存分為濕式和乾式，用過核子燃料在退出反應爐的初期，為快

速移除燃料束殘餘熱量，通常會進行至少 90 天以上等待燃料冷卻，此為濕式貯存，此外國際間目前採用集中式水池貯存的場址包括：瑞典的 CLAB、瑞士 Gösgen 場址，及英國 Sellafield 進行燃料再處理前的暫貯也會使用濕式貯存。乾式貯存則有多種形態，例如：

- (1)地窖式(Vault)，設施由包含貯存管的混泥土結構井或結構坑組成，並有建築結構提供屏蔽保護，用過核子燃料貯存在貯存管中，其內之燃料可以直接貯存或是另裝於容器內，並透過外表面藉由空氣對流進行散熱。
- (2)護箱式(Cask)，採用混凝土或金屬結構提供密封和屏蔽，不需要建築物提供額外屏蔽，根據設計的不同，可通過對流或傳導效應來移除用過核子燃料的熱量，並且可取得貯存和運送許可。
- (3)筒倉式(Silo)混凝土模組，利用單片或模組化固定式混凝土結構提供容器及屏蔽的功能，採用此種貯存方式的設施包括加拿大 AECL 混凝土筒倉設施或美國 Transnuclear 公司的 NUHOMS 筒倉式貯存設施。

(二)中、低放射性廢棄物

1.處理及固化

在英國，產生的中放射性廢棄物會置入不銹鋼桶容器，並且水泥灌漿進行固化作業，部分中放射性廢棄物會進行超壓縮和切割等處理，藉此減少廢棄物數量，並且幫助節省寶貴的貯存空間，或是透過除污減低活度，使廢棄物降階（例如將除污後的中放射性廢棄物重新歸類於低放射性廢棄物）。廢棄物進行超壓縮可幫助減少至原來體積 20% 以下，對於可燃廢棄物而言，採用焚化處理，可減少體積至原來的 5% 以下，為確保不對作業人員構成任何風險，處理過的廢棄物必須符合廢棄物接收標準(Waste Acceptance Criteria, WAC)，例如超壓縮過程中釋放的自由液體(Free liquid)必須小於廢棄物全體積 1%，釋放的非水液體(non aqueous

liquid)體積必須小於廢棄物全體積 0.05%，為了作業人員的安全，廢棄物最大表面劑量率亦不得超過每小時 2-3 毫西弗，包括個別放射性核種活度和總 α 值都應符合廢棄物接收標準。水泥灌漿進行固化作業方面，廢棄物產生者應限制廢棄物中的兩性(amphoteric)金屬（如鋁，鋅和鎂）的接觸表面積，任何情況下，這些兩性金屬總接觸表面積均不得超過 10 平方公尺，因此含有鋁，鋅和鎂成分廢棄物可透過前處理例如適時的塗佈表面或包覆來減少接觸表面積，其他如焚化處理，亦設有 PVC 塑膠或橡膠不得超過總重量 5%之限制。

低放射性廢棄物處置設施廢棄物接收標準亦提到一項重點，廢棄物產生者應當對放射性廢棄物作最佳適當處理，一般情況下，只有在產生者採用最佳可行環境選項和最佳可行方法來管理放射性廢棄物時，方可接受在低放射性廢棄物處置設施進行處置。因此產生者應採用最佳可行技術來隔離廢棄物的組成，輔以其他類別的廢棄物處理或處置方式，減輕或避免在低放廢棄物處置設施中進行處置，若產生者沒有採用替代方式處理或處置廢棄物時，應提出該廢棄物於低放處置設施處置之適當理由。

由於處置設施的成本昂貴，加以設施的除役又將產生龐大數量的廢棄物，使得廢棄物回收也是重要的廢棄物處理策略，因此英國核能除役管理局於 2006 年針對場址許可證公司（Site License Company, SLC）訂定了關於綜合廢棄物策略（integrated waste strategy, IWS）指南，引導場址許可證公司訂定了各自的綜合廢棄物策略，描述廢棄物生產者如何以整體方式優化其廢棄物管理方法、預期目前和未來運營中可能的廢棄物流程和改進廢棄物管理方法所需的行動。

其中具永續性的廢棄物管理策略包括對金屬、拆除材料，現有建築物/設施和基礎設施的最大限度再利用，同時最大限度地減少對新建築和廢棄物產生的需求。例如放射性污染廢金屬即是適合回收再使用對象之一，金屬和污染物經過熔

融過程後分離，污染物聚集在爐渣中，剩餘清潔金屬形成鑄錠而可回收再利用，除英國以外，目前美國、瑞典亦設有專門設施進行金屬回收再利用作業，瑞典將回收金屬繼續供應當地市場，美國則在核能界內重複使用。混凝土亦可進行回收，重新用作核設施新建現場建築物的基礎材料或用作場址道路材料。

雖然英國政府策略是建議將廢棄物盡可能回收再使用，但實際上仍有許多窒礙難行之處，很多情況下不可能回收運轉或除役作業產生的廢棄物，其中原因包括對核能工業的回收材料持消極需求態度，或是將材料除污到允許其再利用的成本可能過高，或技術上過於複雜，例如具有高孔隙率的材料，或到氬已遷移至塊狀材料中的情形。

2. 貯存

英國中放射性廢棄物的貯存，具有多種樣態，未經處理的中放射性廢棄物有貯存在儲槽、筒倉(silo)或貯存窖(vault)之中，亦有如部分廢棄物被在取出後，以未固化的形式包裝貯存著(例如 Sellafield 場址之雜項 β 或 γ 廢棄物)，這些未經處理的廢棄物必須貯存在適當的環境下，避免廢棄物劣化，並允許再取出以進行後續的處理及最終處置。對於已經再取出，進行包裝和固化後預備進行處置的中放射性廢棄物，目前為存放在現有建築物中或貯存在取得許可核設施場址內，目前英國境內大約有 20 個左右類似的貯存區，另外在 Tounfield, Dounreay, Harwell, Trawsfynydd, Windscale 和 Winfrith 等地則設有中放射性廢棄物包裝設施，迄今為止，英國已產生約 42,000 立方公尺中放射性廢棄物，約包裝成 61,000 個廢棄物包件，英國雖目前尚未有中放射性廢棄物處置設施，但所有中放射性廢棄物均已包裝並安全貯存。未來計畫建造更多類似貯存區，以因應需求。

貯存區域的設計需求端看廢棄物包件的屏蔽和防護需求而定，對於低放射性廢棄物和允許直接操作的中放射性廢棄物而言，也有不同的形式，例如採用簡易

棚屋或機庫，其價格低廉，具有基本的天氣保護，但沒有環境控制機制，例如在 Dounreay 場址內的 Whatling 低放射性廢棄物貯存場。亦有採用工程建造的貯存場，採用強化混凝土建造的貯存場，提供屏蔽和較佳的保護措施，例如 Sellafield 場址的 Drum 貯存場，或是荷蘭 COVRA 公司營運之 LOG(Laag-en-middelradioactief afval OpslagGebouw)中低放射性廢棄貯存設施。

對於需要遙控處理的中放射性廢棄物，可採用的貯存設施之設計有：(1)插梢式(charge-plug)貯存：廢棄物包件存放在可移動鋼或混凝土製插梢或蓋子下方的垂直鋼管或混凝土襯裡管內，例如 Sellafield 的 EPS1 場址、Winfrith 的 TRS 場址，法國位於 Cadarache 的 CEA CEDRA 設施，瑞士的 SCISF 設施等等。(2)貯存窖(Vault)貯存：廢棄物包件貯存在設施內的坑區，採用類似設計的貯存設施包括 Sellafield 的 EPS 2 場址、Harwell 貯存窖設施、或是荷蘭的 COVRA 公司之 HABOG 設施，且此設施也貯存高放射性廢棄物。(3)外包裝(overpack)式貯存，廢棄物包件另外再使用外包裝以提供放射性屏蔽，類似設計包括，Trawsfynydd 的中放射性廢棄物設施，以及 Sellafield 的 WAGR 設施。

在設計新建中期貯存設施時，由於預期設施運轉期間將超過 100 年，有許多設計因素須納入考量，例如設計時需要長期人工干預的維護作業應最大限度地減少，相關機械設備須能從故障情況中恢復，也必須針對組件可能的劣化，提供備援組件或採用其他策略來管理防範，其他如廢棄物包件再取出機制最佳化，進行外包裝作業或修復外包裝功能、貯存狀態監測、記錄保存措施等，

在許多設計因素中，監測貯存狀態扮演重要的角色，監測的主要目的是確認設施繼續依原有設計運作，並且對任何變更或功能喪失提供預警的功能。大致上可分為三個面向：

(1)對廢棄物包件監測：例如對廢棄物包件的目視檢查，或週期性的包件目視檢

查和非破壞性試驗檢查等，此涉及設施對廢棄物包件再取出，及運送至專門檢查設施的配套措施。

- (2)對設施監測：主要針對容易出現故障而影響設施生命週期的組件，確保設施在設計年限適當運作。設施完整性的監測方式，包括目視檢查，可以檢測由一般腐蝕引起的染色，混凝土的點蝕(pitting)或開裂(cracking)等，嵌入式腐蝕感測儀器可測量鋼筋的腐蝕電位或腐蝕速率，亦有採用將鋼筋腐蝕試樣替代一部分金屬鋼筋進行劣化監測或將混凝土塊放入設施內貯存以監測混凝土劣化，如 Sellafield 產品與殘餘廢棄物貯存庫 (Sellafield Product and Residues Store, SPRS)
- (3)對環境狀態之監測：部份環境因素會對設施的生命週期和廢棄物包件完整性起到重要影響，例如在溫度和相對濕度快速變化的環境下，會增加冷凝和污染物沉積的風險。

為了提供設施經營者、設計者或管理人員在中放射性廢棄物設施設計示範案例及設計生命週期超過 100 年的貯存設施時需要考慮的關鍵因素，英國政府於 2017 年發布了「較高活度放射性廢棄物中期貯存貯存設施工業指南」第 3 版，涵蓋了在設計中期貯存設施時的關鍵要項，包括廢棄物包件設計、貯存設計、操作系統等，從而幫助設計該類設施時得選擇最佳執行方案。

四、英國放射性廢棄物最終處置

(一)較高活度廢棄物地質處置

英國放射性廢棄物包含研發，發電，國防，醫藥和工業產生大量並性質相異的廢棄物，部分來自 20 世紀 50 年代以來產生的遺留廢棄物，其中一些貯存條件以現行管制觀點來看是有風險的，再者，未來核電廠仍將繼續產生運轉放射性廢棄物和除役廢棄物。因此英國核能除役局所屬放射性廢棄物管理公司

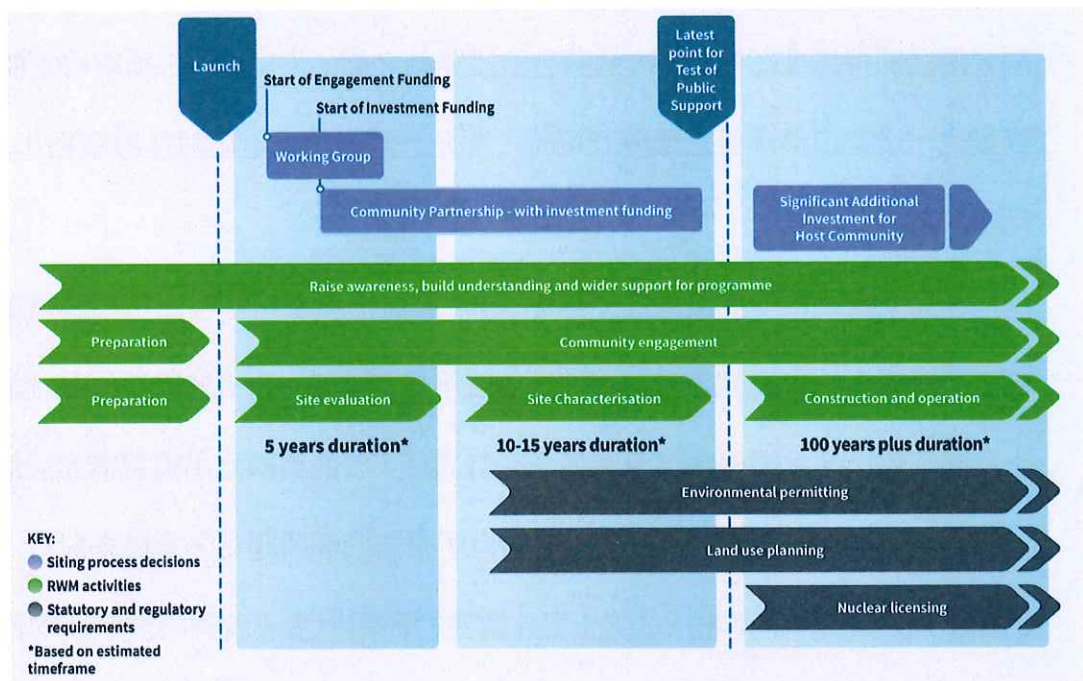
(Radioactive Waste Management Ltd.)為解決較高活度放射性廢棄物問題，將負責為英國尋求地質處置設施，提供廢棄物管理解決方案，以減少對處置設施之危害及負擔。該公司的任務是透過與國家和地方政府及社區合作，確定地質處置設施場地，為處置系統制定技術規範、設計、安全案例，環境和可持續性評估，與廢棄物產生者合作，提供放射性廢棄物管理解決方案，以最適化方式管理較高活度廢棄物。

1.地質處置設施選址程序

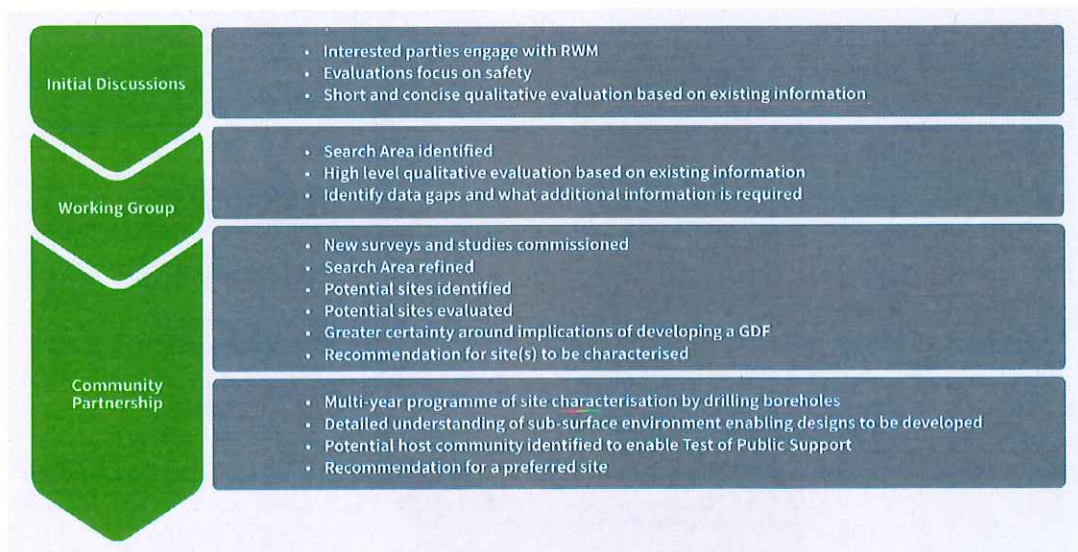
英格蘭政府於 2018 年 12 月發布了政策說明書：「實施地質處置-與當地社區的合作：放射性廢棄物的長期管理」，威爾斯政府則於 2019 年 1 月發布「高放射性廢棄物地質處置：與當地社區合作」的政策說明書，同意由英國放射性廢棄物管理公司作為地質處置計畫的推動單位。地質處置設施選址過程是放射性廢棄物管理公司的關鍵工作流程，選址過程可能需要長達 20 年或更久，主要的關鍵工作項目如下圖二，目前選址初步作業已經完成國家地質篩查，包括陸地和沿海 20 公里地質條件的篩選工作。目前正在執行以同意為基礎(consent-based)的選址流程，目標是在自願社群地區中找尋合適場址，因此對於確定場址和營運最終處置設施的時程並未固定。

根據政策說明書，以同意為基礎(consent-based)的選址流程可以由對選址過程感興趣的任何人發起關於地質處置設施的提案位置的討論，此稱為初始討論(Initial Discussions)。一旦各方初步交換信息並同意提案值得進一步考慮，放射性廢棄物管理公司必須通知所有相關的主要地方當局，並在社區中更廣泛地開展討論。放射性廢棄物管理公司接續會組成由相關利益團體、放射性廢棄物管理公司、獨立主席和協調人組成的工作組(Working Group)。工作組將收集有關該地區可能受到影響或對地質處置設施感興趣的人員和組織的訊息，以便確定正式社區

夥伴關係(Community Partnership)的成員。社區可以隨時退出選址流程，直到進行公共支持測試(Test of Public Support)為止，此即撤回權(Right of Withdrawal)，撤回權應由相關社區夥伴關係成員中的主要地方當局決定是否執行，如果有多個相關的主要地方當局，則所有當局都必須同意，下圖三表示了場址評估的主要工作。



圖二、英國選址程序

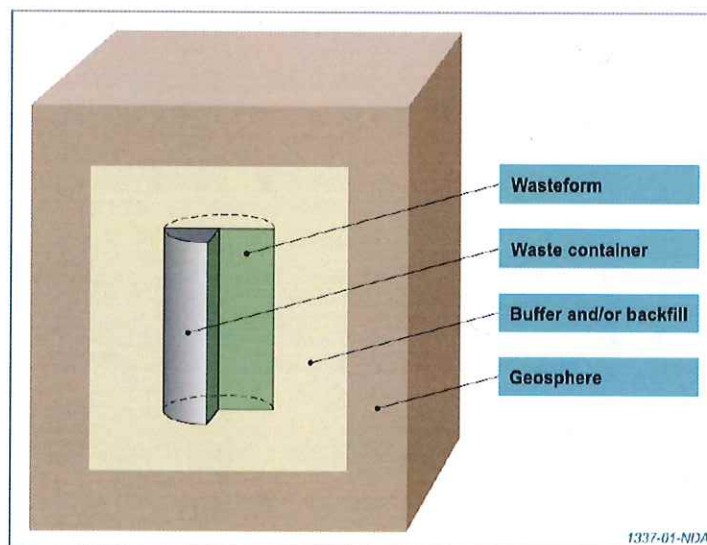


圖三、選址及場址評估主要工作及說明

在管制體系方面，確定了潛在調查地點之後，相關環境管制機關將根據 2016 年環境許可（英格蘭和威爾士）法規(the Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2016, EPR16)規定，採用分階段流程來規範未來地質處置設施的發展。此分階段管制作法將從地質處置設施的調查和開發階段的早期階段開始管制。它使環境管制機關能夠從現場調查到設施興建和營運，最終到關閉的整個開發階段都持續進行管制。每個開發階段開始之前，開發單位必須取得管制機關的批准，沒有取得應備之環境許可時，不允許該設施處置放射性廢棄物。

2.地質處置概念

在完成對英國境內廢棄物的盤點工作，放射性廢棄物管理公司根據盤點結果制定了處置系統規範來定義英國地質處置設施的要求，再根據硬質結晶地層、粘土層及鹽床 3 大類型國際處置概念設計案例，發展英國通用處置概念設計，雖然不同地質環境有著不同的處置概念，但所有概念都將應用多重障壁設計，利用工程和天然屏障共同作用，以防止可能對生命和環境造成危害的放射性物質釋放地面，其工作原理如下圖四：



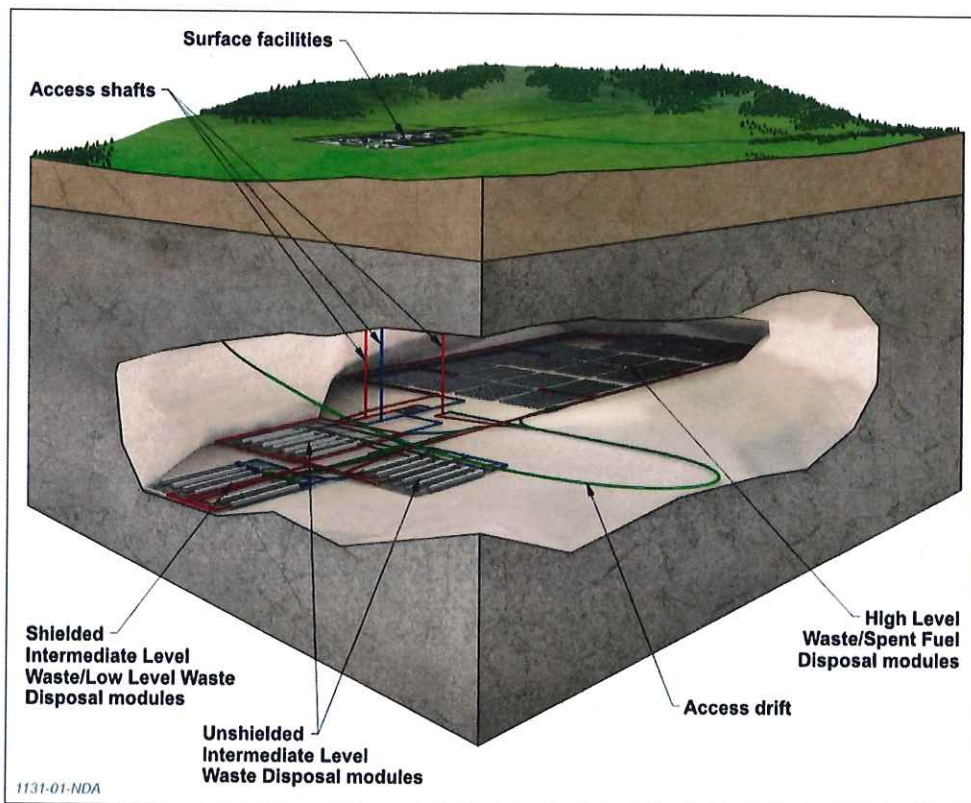
圖四、英國多重障蔽概念圖

- (1)廢棄物形式：廢棄物固化後轉化成適合處置形態，能夠抵抗地下水浸透出放射核種效應，例如將高活性液體再處理廢棄物轉化為玻璃廢棄物。
- (2)廢棄物容器：將經過處理的廢棄物放入容器中，形成所謂的廢棄物包件，經由適當選擇容器設計和材料，可在處置條件下長時間提供可靠的保護，例如選擇具有高度耐腐蝕性材料（例如銅）或使用足夠厚度的金屬（例如碳鋼）。
- (3)緩衝材或回填(The buffer or backfill)：此指在處置設施中緊鄰廢棄物包裝周圍放置的材料。適當的選擇材料和設計可使緩衝或回填提供更多功能。例如控制最終與廢棄物接觸的地下水化學性質，可使核種在水中不易溶解。
- (4)質量回填(Mass backfill)：除了要立即放置在廢棄物包裝周圍的緩衝材或回填之外，還需要其他類型的質量回填來填充挖掘出的通道或豎井。透過選擇足夠的機械強度回填材，可支撐屏障系統的其他部件。
- (5)密封系統：密封系統可用來控制流體並提供通往地下水的通道，在開發密封系統設計時通常考慮使用極低滲透性材料。
- (6)地質：地質屏障可以提供多個功能確保處置的安全性，包括：1.藉由母岩的低滲透性，限制地下水流入廢棄物貯放區，使從廢棄物浸透出放射性核種的可能性有限。2.從廢棄物貯放區域到地面環境間，為地下水設定長而緩慢的流動路徑，使放射性充分衰減，有害量無法到達地表。3.母岩可提供接觸表面積，藉由天然的化學過程從地下水去除放射性核種;岩石毛孔將使含有放射性核種的地下水有效停滯。4.防止廢棄物產生的氣體直接釋放到地面環境中。5.保護廢棄物免受可地球表面人為或環境氣候變化影響，例如冰川作用或人類活動。

儘管地質處置設施的設計有多種選擇，但設置地面設施、通道豎井和/或通道、地下處置窖(Vault)和/或處置隧道等對所有設計都是通用的，下圖五圖示說明

了地質處置設施的概念，其中所有廢棄物處置在相似深度處。但中低放射性廢棄物和耗乏鈾、天然鈾及低純度濃縮鈾(depleted, natural and low enriched uranium, DNLEU)的地下處置區，與包含高放廢棄物，用過核子燃料，鈾和高純度濃縮鈾(HEU)的處置隧道區域之間互相物理隔離，下圖亦顯示地面設施的位置及通過垂直軸或傾斜入口通道進入地下區域的各種選擇。在初始施工階段之後，大部分施工和安置作業將同時進行。至於處置場所需面積，基於廢棄物盤點所得結果及包裝之間的理想間距，並且考慮不同地質條件，當處置場位於較高強度之處置母岩時，地下處置區域的平面面積大約需要 5.6 平方公里；岩石強度較低，沉積岩類型之處置母岩，需要 10.3 平方公里；位於鹽床類型之處置母岩，則需要 8.8 平方公里的地下處置區域面積。

Figure 2 Illustration of a generic co-located GDF



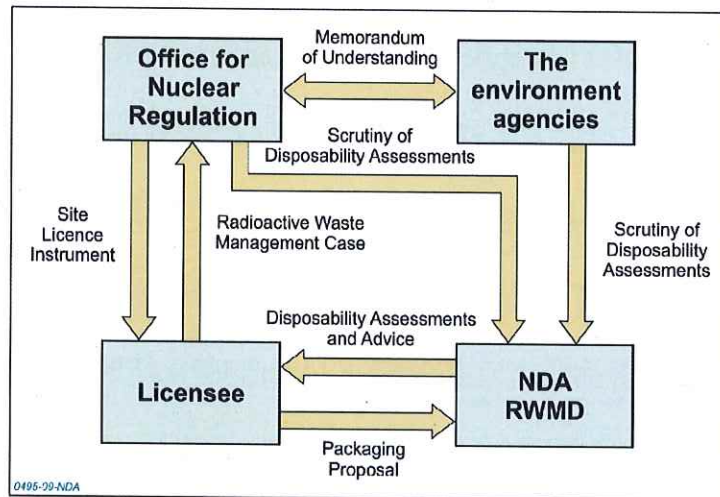
圖五、英國通用地質處置設施概念圖

3.廢棄物包件規範

此外，放射性廢棄物管理公司亦負責開發通用處置系統的安全論證(safety case)和廢棄物包件規範，以便在場址確定之前即能進行廢棄物包裝作業，並減少危害。同時放射性廢棄物管理公司做為未來的地質處置設施的經營者和營運單位，為備供處置廢棄物之最終接受者，因此也負責產出廢棄物接受標準(waste acceptance criteria, WAC)，但在規畫地質處置設施的早期階段，並無足夠數據可訂出廢棄物接受標準，作為廢棄物接受標準的前身，放射性廢棄物管理公司訂定了廢棄物包件規範(waste package specification, WPS)，廢棄物可依據這項規範，轉換為被動安全並且具備可處置性的形態。廢棄物包件規範是一個基準，放射性廢棄物管理公司藉此評估較高活度廢棄物包裝計劃與當前地質處置計劃的兼容性，此即可處置性評估程序(RWM Disposability Assessment Process)，此程序係用以確認廢棄物產生者提出之包裝計畫符合相關廢棄物包件規範的處理概念和要求，證明包裝可以根據地質處置概念和通用安全案例進行處置，此一程序與管制機關審查機制緊密結合，幫助廢棄物產生者在地質處置設施完成之前即可產出合乎處置要求的包裝廢棄物，降低作業場址危害、並減輕未來二次作業風險。

可處置性評估程序在廢棄物回收和包裝設施的發展及申請許可的過程中扮演的角色如下圖六所示，管制機關一般會要求場址執照持有人提出放射性廢棄物管理論述(Radioactive Waste Management Case, RWMC)，以證明對各種廢棄物均有適當的管理，從廢棄物產生、貯存、固化直到處置都符合長期安全及環境影響要求。由於英國核能除役局認可放射性廢棄物管理公司具備對較高活度廢棄物處置前包裝及固化程序提出建議的適當單位，因此場址執照持有人將會尋求放射性廢棄物管理公司的可處置性評估程序來證明廢棄物包裝方案符合廢棄物包件規範並且與將來的運輸及地質處置計畫兼容。當放射性廢棄物管理公司認為提出之

方案確實符合廢棄物包件規範，便會提供符合聲明(The Letter of Compliance)，從而給予管制機關更多信心通過審查，藉此機制，目前英國貯存於設施的絕大多數固化廢棄物包裝都附有符合聲明，代表該包裝可以根據地質處置概念和通用安全案例進行處置。



圖六、執照持有人、管制機關及 RWM 公司透過可處置性評估程序之審查機制。

(二)低放處置

英國主要有兩個低放處置設施，一個是 Drigg 處置場進行處置，一個是 Dounreay Site Restoration 公司興建的 Dounreay 低放處置設施。

1.LLWR 低放處置設施：

Drigg 是英國唯一的國家處置設施，英國大部分的低放射性廢棄物將會送到低放射性廢棄物處置公司(LLW Repository Ltd., LLWR Ltd.)負責營運的 Drigg 低放處置設施進行處置。Drigg 處置設施佔地約 100 公頃，距離 Sellafield 場址約 7 公里。2016 年 7 月，低放射性廢棄物處置公司獲得了坎布里亞郡議會的規劃許可興建 2 個新處置窖，並擴建第 3 個處置窖，在使用混凝土製處置窖之前，其尚有採用貯存溝型式處置廢棄物的 7 個貯存區，目前已經貯滿並覆土封閉。送交低

放射性廢棄物處置公司處理的廢棄物會放置在金屬複合式運送貯存箱(metallic Intermodal Shipping Containers , ISO)中，並填充灌漿以消除空隙，然後容器會置入混凝土製的近地表處置窖(Vault)中。

少部分未能符合低放射性廢棄物處置公司現有的接收標準的低放射性廢棄物，不會送到 Drigg 處置設施或垃圾掩埋場處置，原因除了核種性質外，還可能因為含有一些非放射性有害物質所以必須限制其不能在 Drigg 處置設施處置。其他部分廢棄物則是因為需要開發新的處理技術才能達到接收標準，或者無法處理時，則需要認定為較高活度廢棄物進行管理。Drigg 處置設施預計將持續接受、處理及處置低放廢棄物直到 2050 年，在 2059 年封閉，並除役剩餘設施、安裝工程封蓋及其他措施，以確保場地的長期隔離。



圖七、Drigg處置設施興建第9個處置窖

2.Dounreay 低放處置設施

Dounreay 低放處置設施用來處置 Dounreay 核設施場址的營運和除役廢棄

物，因此處置設施位於 Dounreay 核設施場址附近，目前已使用兩個處置窖：「低放廢棄物處置窖」和「拆除低放廢棄物處置窖」。處置方式與 Drigg 處置設施類似，廢棄物被裝入金屬複合式運送貯存箱中，然後灌漿封裝中。未來的處置窖將根據需要興建，最多可擴充到 6 個。



圖八、Dounreay低放處置設施

(三)英國除役經驗

除了壓水式反應器的 Sizewell B 反應器機組外，所有英國的核能發電機組都使用氣冷技術。英國發展的第一代 Magnox 反應器使用天然或微量濃縮鈾和鎂合金覆層壓力容器。第二代先進氣冷式反應器(advanced gas-cooled reactor, AGR)則是使用濃縮二氧化鈾燃料和不銹鋼覆層壓力容器。過去為了尋求最適合英國發展的商業核子反應器系統，英國成立 Winfrith 核能發電研發中心，透過建造多個實驗反應器來達成此一目的。本課程其中之一課題即由 Manox 公司的 Winfrith 專案經理 Susan Holdroyd 說明 Winfrith 的除役經驗。

1.研究用反應器場址 Winfrith 除役經驗

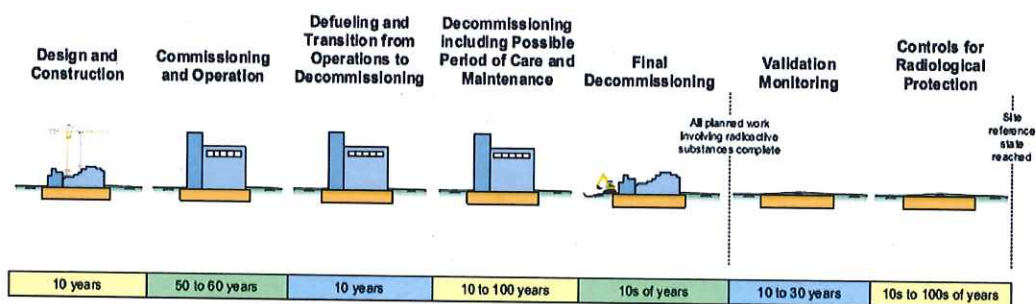
Winfrith 研發中心成立於 1957 年，目的是開發實驗反應器，以便後來進行全尺寸建造。建設工作始於 1957 年 9 月，第一座反應器 Zenith 於 1959 年投入營運後，其後又陸續建造了 8 個不同類型的實驗反應器。

Winfrith 因 2 個主要的反應器項目而聞名。第 1 個是蒸汽發電重水反應器 (Steam-Generating Heavy Water Reactor, SGHWR)，作為英國唯一 1 座水冷式反應器，蒸汽發電重水反應器的冷卻塔成為多塞特郡(Dorset)最知名的地標。它在 1967 年開始發電，1990 年關閉。另一個是高溫氣冷實驗反應器(High Temperature Gas-Cooled Experimental Reactor)，或稱為龍(The Dragon)反應器，它是始於 1960 年，涉及 12 個歐洲國家的一項國際合作項目，設置在場地西側的一個大型收容大樓內，從 1964 年開始運作，於 1976 年關閉。

Winfrith 場址在 1990 年取得執照，營運至 1990 年代初期開始除役，目前東邊部分區域為 Winfrith 技術中心的科學和技術部分，西部占地 218 英畝的區域已經除役，7 個反應器和許多輔助建築物除役並完成場地整治，土地也已逐步從核管制中解放出來，尚餘 3 個主要設施等待除役。

在說明 Winfrith 場址除役經驗前，首先說明英國核電廠除役的除役過程，下圖九顯示了英國核電廠除役的時間表，在英國，核電廠或機組運轉結束後，隨後可能需要長達數十年的除役作業，首先會先移除用過核子燃料，將主要危害因素降低，除役可能包括「關心和維護」(Care and Maintain)期間，在此期間，場址將在拆除場址建築結構之前處於靜止狀態，經一段時間使放射性物質活度衰減，以利最終場址清理(Final site clearance, FSC)作業。在最終場址清理階段，所有涉及放射性物質工作將依計畫完成，使場址達到其最終狀態 (End State, ES)，然後續可能還需要幾十年的監測及管制才能從放射性物質管制狀態中釋放該場址，以確

保人員和環境的放射防護，直到達到場址參考狀態(Site Reference State, SRS)，確認現場剩餘放射性物質的殘留風險與指引水平(guidance levels)一致，滿足所有管制要求，才能從放射性物質管制狀態中釋放該場址。在最終狀態和場址參考狀態之間的監測及管制期間，可再使最終狀態的場址剩餘活度進一步衰減，但在此期間場址仍可作為其他用途使用。



圖九、英國核電廠場址除役時間表

為了Winfrith順利除役，首先必須確定除役最終目標為何，因此必須持續與利益相關團體溝通，2006-07年Winfrith場址利益相關團體與英國核能除役局的諮商期間，建議Winfrith場址應完全的去執照化，並且回復成乾淨的土地，並將「最終狀態」(End State)定義為具有公共訪問權限的原野地景觀。在2013-14年間，負責Winfrith場址除役專案的Magnox公司與利益相關者持續合作，並且討論如何運作以及如何實現除役目標，例如向公眾提供園林綠化和管理方案、建立一個限制公眾訪問的自然棲息地，或是與某種形式的社區設施（如教育中心）相互結合等方向，再透過和當地社區交流，聽取計劃看法。經過討論首選方案為向公眾開放，用於休憩目的的原野地，管理並縮減核許可場址區域，持續控制管理殘留污染風險，並確保公眾允許進入的安全場所。



圖十、Winfrith場址正在除役，部分區域已經釋出

在確立除役目標後，必須對除役標的進行研究分析並找出最適合的除役方案，為了幫助設施經營者提出清理核設施場址和放射性廢棄物管理的最佳計畫，英國環境署、威爾士自然資源局和蘇格蘭環境保護局，訂定了「來自核設施除役放射性廢棄物管理：從放射性物質管制釋放要求指南」(Management of radioactive waste from decommissioning of nuclear sites: Guidance on Requirements for Release from Radioactive Substances Regulation, RSR)，最終版本於2018年7月發布，它規範現地處置及釋放管制的標準，指南中要求設施經營者提出廢棄物管理計劃 (Waste Management Plan, WMP) 及場址廣泛環境安全論證 (Site Wide Environmental Safety Case, SWESC) 兩項文件，以證明場址除役及廢棄物管理符合該指南的要求，保護公眾和環境成員免受放射性物質的傷害。

根據蒸汽發電重水反應器的廢棄物管理計劃，該場址高活度結構物的除役將考慮2項方案，1.拆除所有結構，並以非放射性材料回填，離場處置放射性物質。2.主要建築結構留在原地，將高活度區域移除並離場處置其放射性廢棄物，剩餘低污染結構則以低放射性及來自原場址之低活度廢棄物回填，為了找出最佳方案，針對2方案個別進行地下水通道及人類侵入情節分析，人為意外侵入和地下

水通道的評估案例計算所得放射性暴露，遠低於管制水平，其中人為意外侵入是潛在暴露的最重要途徑，但暴露劑量在初期隨著短半衰期核種的衰變，特別是Co-60的衰變而急遽下降。由於蒸汽發電重水反應器有著Winfrith場址中最大結構體和地下空隙，其最適化方案為方案2的現地處置結構，可大幅減少環境負擔和風險。至於另外兩個設施的最佳除役方案，高溫氣冷實驗反應器因結構較小，污染相對低，最適化方案為現地處置位於地面下之結構體。至於活性液體排放系統（ALES）由於活性液體排放系統是建於地下的排放管路，橫跨9.7公里的土地，部分管路更延伸至Arish Mell海岸外3.7公里海洋區域，涉及6個土地所有者、農業用地、工業園區、住宅計畫區、道路、預定紀念碑及觀光景點等區域，雖然埋管深度較淺，但因涉及私人土地和各類型的利害關係者，因此尚在進行最適化方案的評估，後續將繼續完成管道的除役選項評估，在完成環境影響評估及申請許可後，才會實際執行除役工作，最終目標是從放射性物質管制(Radioactive substances regulation, RSR)狀態釋放。

在找出最適合的除役方案後，後續便是依方案執行除役作業，目前Winfrith場址剩餘3個設施也都依照規劃進行除役，首先是蒸汽發電重水反應器，Magnox Ltd團隊的規劃是將反應器與相鄰的工廠及設備隔離，以便可以進入反應器的核心並安全地拆除，因此2015-2016年間已從反應器移除括重水迴路(heavy water circuit)，冷卻水迴路(cooling water circuit)等系統，從而能夠接近蒸汽供給器(steam feeder)和蒸汽立管(steam riser)，2018-2019年間持續進行移除反應器核心細部設計的研發工作，並完成一次圍阻體的拆除，2019-2020年預計將完成反應器除役設備的最終設計和組建，目標在2023年完成除役。另外2個Winfrith設施中，高溫氣冷實驗反應器尚在進行除役作業，預計在2022年完成除役，而活性液體排放系統（Active Liquid Effluent System, ALES），包括海水排放管道，則尚在規劃除役

作業中。

2. 商用反應器Trawsfynydd核電廠除役經驗

根據統計，除役一座Magnox機組大約會產生7,000立方公尺的鋼鐵、54,000立方公尺的混凝土塊，5,000立方公尺的土方、及3,000立方公尺的其他廢棄物，總計約產生69,000立方公尺的低放射性廢棄物，由於Drigg低放射性廢棄物處置場目前8個貯存窖已處置約100萬立方公尺的低放射性廢棄物，無多餘的貯存空間，9號貯存窖容量大約為11萬立方公尺，然而估算大約將還有55萬立方公尺的除役低放射性廢棄物會產生，故現有的低放處置設施將難以容納未來繼續產生的除役低放射性廢棄物，而英國核能除役局認為處置場容量不足的問題，其可能的解決方法是將部分的放射性物質在現場進行處置。此次課程課題之一即由Galson Sciences Ltd的首席顧問Roger Wilmot講述關於Trawsfynydd核電廠的除役經驗，其重點在於如何評估出Trawsfynydd核電廠最佳的除役方案，亦即將部分的放射性物質在現場進行處置。

Trawsfynydd核電廠係以天然鈾為燃料，石墨為減速劑的2個氣體冷卻反應器組成，雙機組功率共為800MW，屬於第一代Magnox反應器機組，1965年3月開始商業運轉。用過核子燃料會被排放到冷卻池中儲存，然後送到BNFL Sellafield燃料後處理廠進行再處理。獨特的是，該站是內陸核能發電機組，從內陸湖泊Trawsfynydd湖獲得冷卻水，由於該電廠必須將具放射性之污水排放到湖中，但該湖泊兼為另一小型35MW功率水力核能發電機組的蓄水池，因此允許的排放標準很低，此也導致處理排放水所產生中放射性廢棄物數量較一般核能發電機組更多，Trawsfynydd 電廠運轉至1991年，自1995 年開始進行除役，目前正在「關心和維護」準備階段，在此期間，預計於2022年會將所有的中放射性廢棄物取出並包裝後運到場內中放貯存倉庫，減低輻射危害，2028年會進行降低反應器建築

高度、燃料貯存池的拆除作業，而在進入「關心和維護」階段後，2050年左右會將所有的中放射性廢棄物運送到地質貯存設施，並且拆除中放貯存倉庫，預計場址到2083年進行最終場址清理，進入最終狀態。由於Trawsfynydd 電廠鄰近Afon Tafarn-helyg河，為了確認對Trawsfynydd核電廠最適合的除役方案，Magnox公司對下列關鍵情節進行了放射學評估：

(1)液體釋出

- 1.從現場和拆除的混凝土中浸透和擴散出的放射性核種
- 2.排入Afon Tafarn-helyg河流的地下水
- 3.以垂釣者和農民作為關鍵群體的代表

(2)人為入侵

- 1.以不同尺寸和深度侵入地下結構，鑽孔和地樁陣列
- 2.考慮挖掘者，及用以存放回填物料的土地使用者的暴露劑量

放射學評估的結果顯示需要執行額外的措施來減低輻射風險，例如去除某些放射性物質並進行離場處置、採取工程措施，例如將廢棄物塑形及進行適當配置、改造排水系統、採用非放射性材料進行覆蓋等方式，並且延長管制期間使殘餘放射性物質活度降低，將場址殘餘放射性劑量及風險降低至指南要求之水平，依據RSR規定，風險指引水平為每年 10^{-6} ；而劑量指引水平，假定人為無意間侵入放射性物質管制釋放之場址存在的任何放射性物質濃度，評估侵入期間和之後對代表性人員的有效劑量，其不應超過每年約3毫西弗至約20毫西弗範圍內的劑量指引水平，該範圍的下限值適用於長時間曝露，上限值僅適用於短暫曝露。

根據上述的放射學評估結果，Magnox公司基於最適化原則、考慮對個別公眾和整個人口的輻射暴露應保持合理抑低（ALARA）、可能受影響的地點（例如放射性廢棄物處置場所）的工人和公眾、及環境影響等因素，認為Trawsfynydd

核電廠基本上有兩個達成場址終端狀態的策略方案：方案1為從場址中移除所有放射性物質，方案2則是留下部分現場污染的結構和材料。這兩種潛在的策略選擇各有不同的安全，環境和經濟影響。例如，從現場移除的放射性物質越多，廢棄物處理需求就越大，通過公路鐵路運輸到另一個處置場所的影響也就越大。如果在現場留下更多的材料，則可減少在其他地方處理，運輸和處置的需求，但需要更大幅度地減少場址的放射性物質殘餘風險。Magnox公司在經過多面向評估後，認為方案2對許多方面表現更好，特別是對於健康、安全和環境因素。方案1表現更好的唯一區域是社會經濟面向影響較方案2更大。最終Trwafynydd核電廠的除役也朝向方案2來發展，並計劃邁入「關心與維護」階段，對此，英國核能除役局亦表示Trwafynydd核電廠場址剩餘輻射會隨著時間推移自然衰減至2029年，最終場址清理則預定於2090年前後。

四、建議事項

- (一)、英國管制機關對於地質處置設施的管制係採用分階段管制，確定了潛在調查地點後，環境管制機關即可依法從現場調查階段、設施興建、運轉至關閉階段，採取對應管制措施，此一方式可確保地質處置設施漫長的開發過程維持執行品質，有利提升民眾信心。建議可參考英國作法，對於處置設施現場調查期間採取適當之管制措施。
- (二)、根據英國政策，地質處置設施選址應尋求社區同意，顯示民眾的意願是選址是否成功的關鍵。為強化公眾參與，英國設計完整程序使有意願的社區、相關利害單位及地方主管機關等團體能夠充分對設置地質處置場址可能的影響面向進行廣泛的討論，建議台電公司參考英國作法，選址時，應設計程序使公眾有充分機會能參與多面向的討論，理解處置場與地方安全及地方發展的關係。
- (三)、核電廠除役產生的廢棄物，以及核設施運轉持續產生的運轉廢棄物，使英國積極面對處置問題，雖然我國尚未有處置場，廢棄物產生者仍應思考從源頭減廢，及採取類似英國廢棄物管理策略，以合理可行之處理技術使廢棄物分類變更、減少處置空間需求，以求永續發展。
- (四)、英國與我國類似，均有核電廠進行除役，本次課程從實務角度由淺而深，並以模擬案例除役最適化方案及對應的放射性廢棄物管理策略，都是未來管制機關與營運單位將面臨的關鍵課題，建議持續派員研習有關課程，精進除役管制能量及技術水平。