

出國報告（出國類別：實習）

參加**Informa**公司舉辦之第**38**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：袁懿宏薦任技士
派赴國家：英國
出國期間：112年7月9日至112年7月15日
報告日期：112年9月5日

摘要

有鑑於我國核電廠逐步走向除役，後續關於除役後可能面臨的問題，需做好先期規劃及相關管制技術精進，俾利後續漫長的除役作業，因**Informa**公司過去每年均舉辦除役及放射性廢棄物管理課程，除了介紹電廠的除役規劃、簡述世界核能發展現況、電廠除役計畫概念、英國除役核設施現況及新除役技術介紹等，因成員可能來自全世界各地，是個非常好的機會與其他國家核工業機構或電廠設施人員交流。

基於上述理由，前去英國劍橋大學基督學院參與第38屆除役及放射性廢棄物管理夏季學校。因參與課程之講師大多於英國本地相關研究機構或除役機構中工作，本次課程內容主要有關於英國電廠除役後面臨的管制議題、歐洲核能發展現況、英國拆除規劃、放射性廢棄物貯存及老化管理技術、除污技術等，本次來參加的學員大都來自EDF能源公司，亦有來自於英國環境部門、德國GNS、瑞典電廠及其他有關核能工業等人員參加，約30餘人。

目錄

一、目的.....	1
二、行程.....	2
三、研習心得.....	3
四、建議事項.....	34

一、目的

依據我國目前核一、二、三電廠除役規劃，核一廠除役許可已於108年7月16日生效，必須於核一廠除役許可生效後的25年內依除役計畫完成除役工作；核二廠兩部機組運轉執照分別於110年12月及112年3月屆期，原能會並於109年10月完成核二廠除役計畫安全審查作業；核三廠依據目前規劃一號機及二號機之預定停止運轉日期，將分別於民國113年7月27日及民國114年5月17日停止運轉。依據我國用過核燃料處理採近期於用過核燃料池冷卻、中期採乾式貯存、長期採地質處置等短中長期策略，而台電公司核一、二、三廠均規劃興建室內乾式貯存設施，以因應用過核燃料未來中期貯存需要；而未來核一、二、三廠拆除作業進行後，所產出之低放射性廢棄物，需要額外低放廢棄物貯存，目前我國各電廠亦陸續規劃提出貯存庫興建申請；依據我國核電廠除役規劃，除役期程長達25年，後續核電廠反應器圍阻體中所既有之用過核燃料貯存、移出及設備除污、拆除等，為確保周遭環境、民眾不受到電廠除役影響，有必要持續精進管制技術。

由於歐美等先進國家營運核發電設施或核工業設施較我國進步許多，對除役核電廠的經驗亦較我國豐富，由Informa公司舉辦的除役及廢棄物管理夏季學校是很好的交流平台與機會，除了可以獲取目前歐美各國執行除役設施現況及其他技術發展資訊，亦可與有關核工業從業人員探討相關議題，俾利我國未來逐漸增加的除役管制工作。

二、行程

本次至英國參加 Informa 機構舉辦之第 38 屆除役與放射性廢棄物管理訓練行程如下表所示:

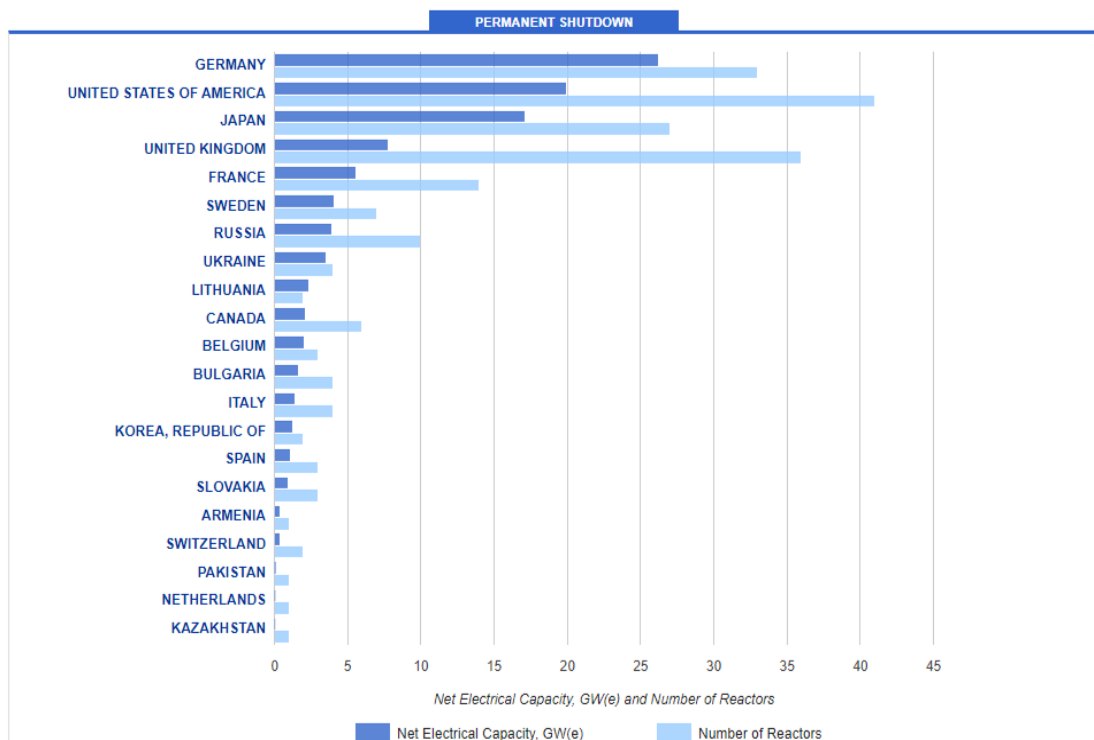
日期	行程	工作內容
7/9	台北→英國倫敦	去程
7/10	英國倫敦→劍橋基督學院	報到&上課開始
7/11	劍橋基督學院	除役及放射性廢棄物管理夏季學校
7/12	劍橋基督學院	除役及放射性廢棄物管理夏季學校
7/13	劍橋基督學院	除役及放射性廢棄物管理夏季學校
7/14	劍橋基督學院→英國倫敦	除役及放射性廢棄物管理夏季學校
7/15	英國倫敦→台北	回程

三、研習心得

本次課程除包含講師與學員總共約有 40 餘位，分別來自政府機關、核子設施、專責機構及研究機構等核能相關人士參與訓練。主辦單位亦邀請英國核能安全主管機關 ONR (Office for Nuclear Regulation)、核子除役機構 NDA(Nuclear Decommissioning Authority)以及執行中除役拆廠家等代表，分享英國核電廠除役與放射性廢棄物管理經驗。以下就課程內容作整理後概述:

1. 全世界永久停止運轉(shutdown)的反應器統計

目前全世界永久停止運轉的商用反應器(如圖 1)，以總發電量排名已德國為首，總計約 26GW(e)以及 33 個停止運轉反應器，其次為美國為次，總計約 20 GW(e)以及 41 個反應器，第三為日本，第四為英國。除役的工作對於全世界使用核能發電國家都是重要的議題。



Source : IAEA PRIS (Power Reactor Information System) July 2023

圖 1、全世界目前永久停機之反應器統計

2. 英國廢棄物處理專責機構及核子設施介紹

目前英國所有的核子設施去除國防相關設施外，商用核電廠數量為7個電廠共14個反應器的AGRs電廠，含1個壓水式反應器的電廠及除役中具有26個Magnox反應器的10個電廠；4個位在Dounreay、Harwell、Winfrith的核子研究機構及Ascot帝國學院的一個已除役設施；核燃料設施2處，分別是位在Capenhurst的Urenco鈾濃縮廠及位在Preston的Springfields核燃料製造廠；核醫藥製造機構位於Amersham的GE Healthcare；於2020年7月結束運轉的核燃料再處理及廢棄物管理場Sellafield的Magnox再處理廠；屬於能源公司EDF集團位在Lillyhall的金屬回收中心Cyclife；位在Drigg的低層度放射性廢棄物(LLWR)處置場一座；屬於Inutec公司位在Winfrith的低與中放射性廢棄物處理設施；英國各設施位置圖請參考圖2所示。

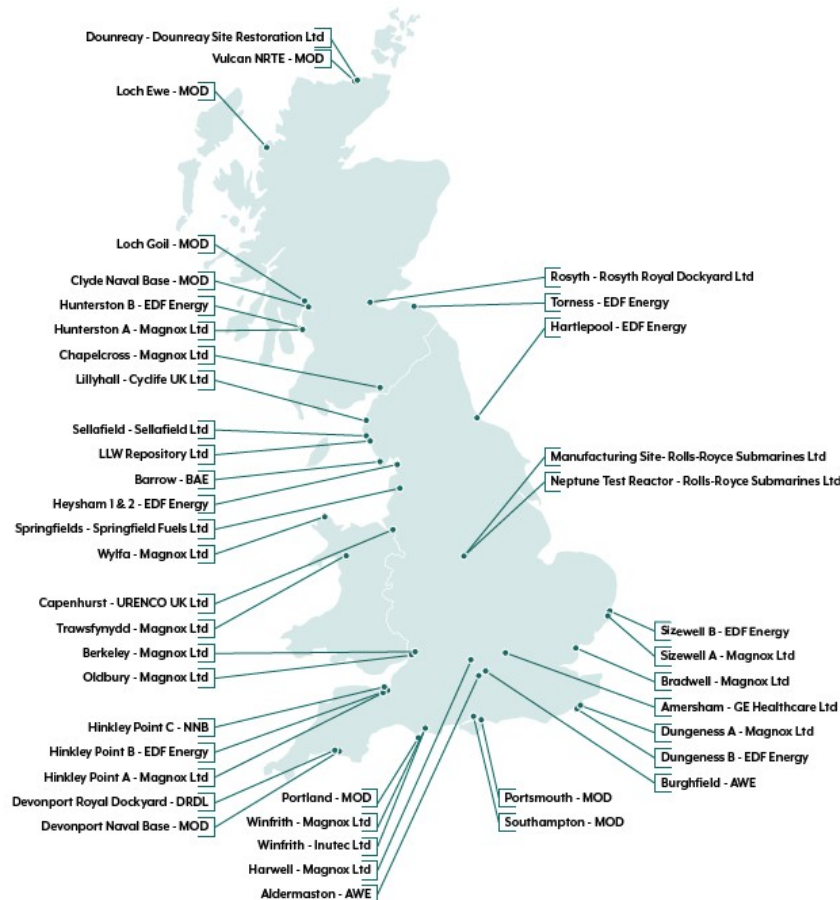


圖 2、英國各核子設施位置圖(Source: Simon Morgan, Regulation of Decommissioning and Radioactive Waste Management at Nuclear Sites in the UK)

英國於2022年整合了低層度廢棄物貯存（LLWR）、放射性廢棄物管理（RWM）以及核子除役管理局（NDA）中有關廢棄物管理計劃（IWMP）等相關單位的人力與專業知識成立新的核廢棄物服務公司(NWS)，請參考圖3所示。



圖 3、英過新專責機構 NWS 組成圖(Source: Charlotte Pickering, Packaging Higher Activity Waste for Geological Disposal)

新的放射性廢棄物管理專責機構NWS，仍為英國核子除役管理局(NDA)的一部分，將有助於整合英國國內力量，並為廢棄物產生者提供更有效的服務，建立英國最合適與整合的廢棄物管理作法，未來將統籌負責英國境內低放射性廢棄物處置場的營運與以及中、高放射性廢棄物深層地質處置計畫的推動，包含相關的社會溝通與地方回饋活動。該機構的使命在於確保核能產業的廢料產生和管理遵循最高標準，以保護人類健康和環境的安全。

NWS擁有高度專業的團隊，由核能領域的專家、科學家和工程師組成。他們在不同領域擁有豐富的經驗，並通過各種科學和技術手段來處理不同類型的核廢料。NWS與英國環境監管機構（Environment Agency）、蘇格蘭環境保護署（Scottish Environment Protection Agency）以及威爾斯自然資源署（Natural Resources Wales）等監管機構緊密合作，確保核廢料管理的合法性。

後續NDA仍負責全英國17個核能電廠的管理、除役與清理工作。而NWS

則將負責整體廢棄物管理計畫，NWS的具體業務將包括：

- 推動中與高放射性廢棄物深層地質處置計畫。
- 安全與有效的運轉既有的低放射性廢棄物處置場。
- 提供服務與解決方案，協助廢棄物產生者管理廢棄物。
- 發展新的機會與能力配合 NDA 管理除役廢棄物。

3. 除役基金及目前主要花費

英國成立除役基金，基金主要為除役專責機構(NDA)所擁有之氣冷式反應器Magnox機組專用，由政府出資，此基金每年審查一次；另外是新建機組專用，建造前就須由營運商自行提出除役基金的規劃。現有在EDF能源公司下的電廠則由電價中收取除役基金，但也有部分為政府支付。

以英國NDA所提供的資料如表1所示，明確列出NDA 2023/24年的預期收入和支出。受到物價通膨的影響，對於除役的支出確實帶來了巨大的成本壓力，但相對應的也帶來收入的增加。2023/24年的計劃總支出為 41.33 億英鎊，其中 29.63 億英鎊將由英國政府支付，11.7億英鎊來自內部收入。場址項目計劃支出共39.48 億英鎊，而非場址支出預計為 1.85 億英鎊。這種非場址支出包括技術開發、社會經濟、研究、保險和養老金成本、廢棄物處置和NDA運營成本。

英國NDA目前的主要花費支付已sellafield再處理設施為最大部分(如圖4)，占比為75.4%，其次為GDF深地質處置場8.1%、發電廠、燃料製造及濃縮廠等。就現有詳細的資料，是可以評估未來長期除役所需的花費，但面對未來可能的通膨情況，仍有調整的空間。

£m Businesses/Sites	Decom and Clean-up Costs (A)	Total Operations Costs: Running Cost (B)	Total Operations Costs: Capex (C)	2023/24 Plan Total (A+B+C)	2022/23 Plan Total
Sellafield Limited	1,462	731	607	2,800	2,345
Magnox Limited	530			530	515
Dounreay Site Restoration Limited	221			221	205
Nuclear Waste Services	240			240	*202
Nuclear Transport Solutions		111		111	86
Springfields Fuels Limited	22			22	30
Capenhurst	24			24	31
Non-site expenditure	185			185	*231
Total	2,684	842	607	4,133	3,645
Income				1,170	820
Net (grant funded)				2,963	2,825

表 1、英國 NDA 除役工作的支出及收入(Source : NDA Draft Business Plan April 2023 to March 2026)

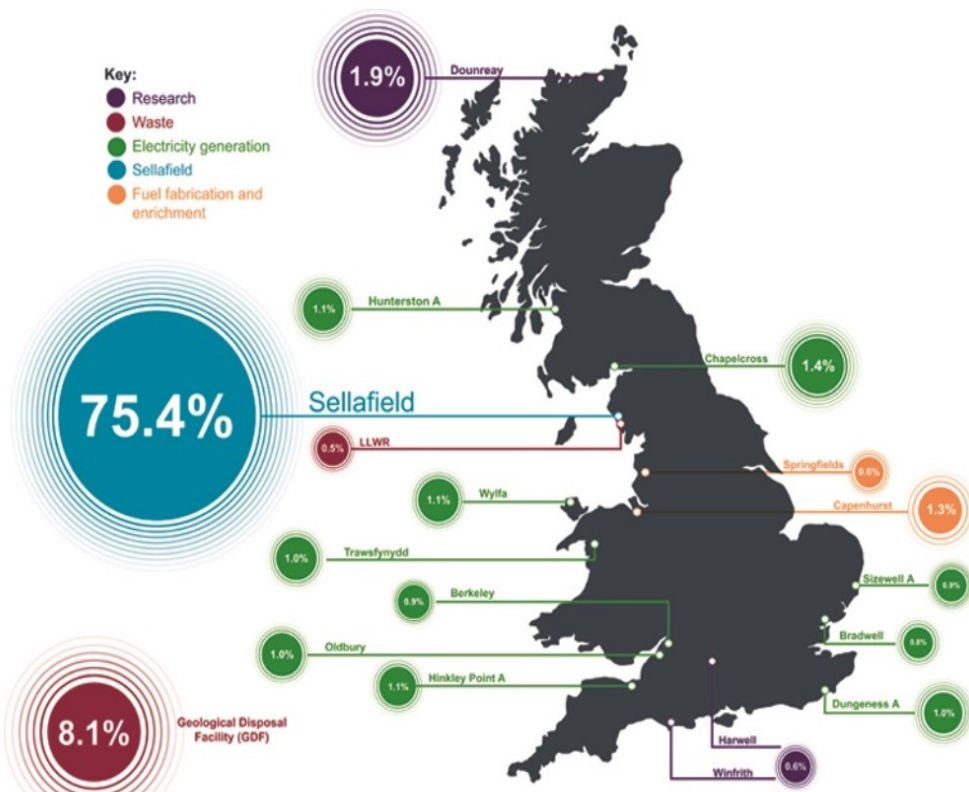


圖 4、英國 NDA 目前支出花費主要對象(Sourese:Martyn Jenkin, Examining Nuclear Costs and Financing for Decommissioning)

4. 除役電廠拆除策略

前述核能電廠除役的花費及財務規劃是在核電運轉前期就需要積極規劃，因涉及到各國能源政策發展策略、反應器的形式、除役基金長期規劃、預估及識別除役執行費用等議題影響，會使得電廠在永久停止運轉後，可能會採行立即執行除役計畫拆廠或是延遲執行兩種不同策略，講師就前述兩個狀況做優劣分析，但特別強調無論是哪個路線選擇，都需要有適當的財務規劃，亦如同如下重要事項：

- 人員訓練計畫
- 法規完整性檢視
- 具有合適的廢棄物貯存及處置設施

早期且清楚的決定無論對於設施的封閉或是傾向未來使用，都是相當重要的。

對於電廠立即的執行除役計畫具有的優勢為：

- 具有足夠充沛、經驗、知識及熟知操作歷史之人力可使用。
- 輻射特性調查較為輕鬆且減少衰變及老化的影響。
- 較低的知識流失及獲取紀錄的風險。
- 降低區域的經濟影響。
- 可較早再次利用場址。
- 除役的責任不必再移轉至後代子孫。

立即的執行除役計畫具有的劣勢為：

- 拆廠時可能會面臨人員積極性，因為將失去工作機會。
- 拆廠期間高輻射風險暴露
- 拆廠期間需要更多的預警措施
- 具有放射性的除役廢棄物體積是更龐大

延遲的執行除役計畫具有的優勢為：

- 由於衰變使得放射性減少。
- 拆廠的輻射危害風險降低及放射性廢棄物體積減量。

- 對高危險廢棄物等待可能的處置期程或有新的技術發展(例如機器人)。
- 偕同其他廠址不同機組除役的可能性。
- 經由有效的投資政策，除役基金可以再增加。

延遲的執行除役計畫具有的劣勢為:

- 設施建築中的某些材料，包含鋼筋及水泥可能已劣化。
- 持續的維護費用/處置的花費增加。
- 運轉歷史的知識將漸漸流失
- 新的合格員工引進
- 對運轉的末期未有前瞻規劃，例如可用的廢棄物貯存期程或管制法規架構的改變。
- 將承擔的責任移轉到下個世代。
- 除役基金的花費風險

英國擁有廣泛的實驗性和原型設施，大多數都由國家擁有。這些設施的除役拆除策略因某些原因而各不相同。有些設施立即被拆解，是為了收集資料和吸取經驗，測試新技術，或是因為它們處於不佳的物理狀態。有些設施之所以被拆除，僅只是因為它們所佔用的空間須作為它用。反應爐則在安全封存狀態下保留約 30 年，使得放射性核種衰變，減少拆除期間工作人員的輻射劑量，並從安全封存期間，取得新的或正在發展中的技術（如遠程遙控機械）而受益，這也說明了適當選擇除役策略有其目的及重要性。

對於英國商用氣冷式反應爐的停運解體，目前偏好的策略是延遲拆除約 100 年，並在移除用過核燃料和某些周邊設備及建築物後進行安全封存，可參考圖 5 電廠生命週期示意圖。這樣的選擇也將影響還沒有處置設施的石墨材料，且因長期貯存而使放射性衰變更多，更有利於執行手動拆除。另一個好處是減少廢棄物產生量和大幅降低除役成本。

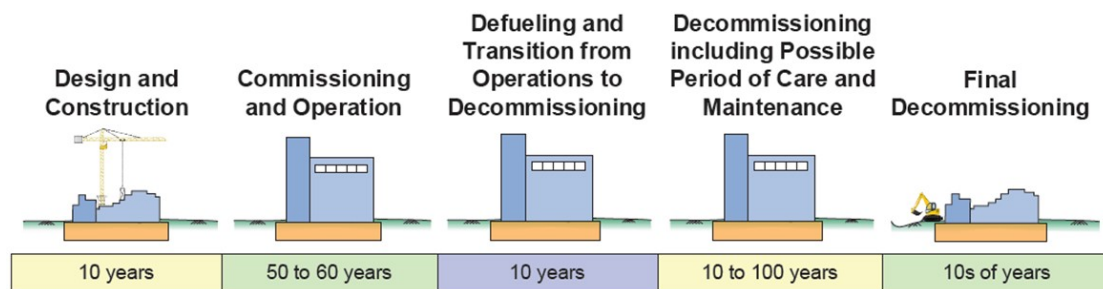


圖 5、商用核能電廠生命週期示意圖(Source: Jo Farrow, Requirements & Guidance on Releasing Nuclear Sites from Radioactive Substances Regulation)

另以 Magnox 核能電廠為例，除役拆除的策略也已改變，不再將所有待拆除設施都延長放置，而是採用特定的拆除方法，可能使得部分位置比預期更早地完成拆除。英國的其他一些核子設施，例如 Dounreay、Harwell 和 Winfrith，則正在進行迅速的拆除作業，以符合所設定的最終狀態。

目前在 Sellafield 進行的計畫包括核燃料再處理、核材料和放射性廢棄物儲存，以及核設施除役拆除。Sellafield 是具有占地 265 公頃，包括 200 多個核設施和 1000 多棟建築物的核子複合設施。Sellafield 現在的焦點主要對該地除役後的核子設施進行拆除和清理，其中包括一些最危險的核設施。其他拆解的電廠包括 Windscale Piles、Calder Hall 以及歷史悠久的再處理和廢棄物貯存設施，為減少拆除這些設施潛在的風險及具有挑戰性的活動，英國鼓勵採取實用和創新方法進行除役，以及時有效的完成拆除工作。位在 Sellafield 的設施，各處於不同的生命週期階段，在除役拆除階段的設施都有各自的計劃和策略；有些則處於延遲拆解階段，而其他則準備進行拆除作業。

5. 放射性廢棄物中、長期貯存策略

目前（除了蘇格蘭以外）的放射性廢棄物處理策略是進行中期貯存（在幾十年的時間範圍內），貯存設計壽命約為 100 年左右。對於半衰期相對較短（約 30 年或更短）具有放射性的廢棄物，採取適合的衰變貯存管理。如下為對中期貯存重要的要求：

- 安全可靠的儲存，以應對預估的貯存期
- 保護人類和環境

- 對廢棄物進行檢查、監測和再取出
- 保持廢棄物處於適合後續管理的狀態
- 防止廢棄物封存容器的裂解
- 持續採用被動安全特性

另外目前在蘇格蘭地區，近地表貯存和處置的實施策略分為三個階段：

第一階段（2016-2030 年）- 審查蘇格蘭高活度廢棄物的產生情況。

第二階段（2030-2070 年）- 開發近地表處置概念。

第三階段（2070 年以後）- 建造替代近地表貯存設施和新的近地表處置設施。

這些階段的安排旨在確保蘇格蘭的高活性廢物在未來得到安全和可持續的處理，並根據不同階段的需求進行規劃和實施。

長期貯存又可簡要分為延長貯存、無限期貯存，其兩者之特性如下：

- 延長貯存（至 100 至 300 年的時間）：多個國家已考慮過，荷蘭是其中之一；目前在技術上是可行的，可以提供靈活性和易於回收性。可通過減少在貯存期間需要處置的數量而達到節省成本，因貯存期間放射性衰變使得輻射劑量再降低。
- 無限期貯存：允許進一步發展最終管理策略的時間存在社會崩潰和專業知識流失的風險，需要長時間內保障資金和承諾來管理廢物並確保其安全

6. 英國放射性廢棄物分類及法規介紹

目前相關的法規要求有

- 1965 年核設施法案（已修訂）
- 1974 年勞動安全和健康法案
- 2013 年能源法案
- 2017 年游離輻射法規
- 2016 年環境許可法規（適用英格蘭和威爾士）
- 2018 年環境授權法規（適用蘇格蘭）

目前有關的許可授權法規為：

- 核設施許可條件（ONR，2017 年）
- 環境署的環境許可（在英格蘭和威爾士）
- SEPA（蘇格蘭環境保護局）根據 2018 年環境授權法規。

監管指引文件：

- 放射性廢棄物管理聯合管制導則
- ONR 的安全評估原則（SAPs）
- 環境署的監管環境原則（REPs）

其他英國的指引文件：

- RWM 廢棄物包裝規格和指導文件（WPSGD）
- 中期貯存的指引

放射性廢棄物及用過核燃料貯存國際上的指引

- IAEA-安全標準、指引及 TECDOCS 系列文章
- OECD 下的 NEA 世界核能協會
- 西歐核能管制聯合組織(WENRA)
- 美國電力研究所(EPRI)

英國產生的放射性廢棄物在下列各區的法規中有所定義：

- 《環境許可規則 The Environmental Permitting Regulations》（適用於英格蘭和威爾斯地區）
- 《蘇格蘭環境許可法 Environmental Authorisations (Scotland) Regulations》
- 《北愛爾蘭放射性物質法 The Radioactive Substances Act 1993 (Amendment) Regulations (Northern Ireland) 》

這些法律文件中的定義可簡述為”放射性廢料是一種物質、物品或物體。它是廢棄物，即沒有進一步的使用價值，將被處理或丟棄，並且其含有的放射性元素超過法律中所定義的放射性元素特定門檻值。”

依據上述法律文件中之定義，英國再將放射性廢棄物依據其放射性強度及其

生成方式進行分類，包括：

- 非常低階廢棄物 (VLLW)
 - 總活性不超過 4 MBq/te (氙的額外限制)
- 低階放射性廢棄物 (LLW)
 - α 活性不超過 4 GBq/te， β/γ 活性不超過 12 GBq/te。
- 中階放射性廢棄物 (ILW)
- 高階放射性廢棄物 (HLW)

其中 HLW 和 ILW 產生方式有所不同。HLW (係來自用過核燃料再處理產生的高放射性活度廢液 (HAL))，且會產生大量的熱 (通常熱功率高於約 2 kW/m³)，需要在其儲存和處置過程中考慮熱量的問題。

反應器圍阻體作為生物屏障含有水泥與鋼筋，混凝土表面 10mm 深處計量可超過 20 GBq/te，內側層劑量超過 4 GBq/te，大於 50mm 深度的混凝土劑量會超過管制低限值，使得其他深度超過 1 公尺的水泥可歸類為 LLW 或 VLLW，其遭中子活化核種例如 H-3、C-14、Cl-36、Ca-41、Ni-63、Sm-151、Eu-152 等。

在反應器的水池複合結構中污染來源自污泥、樹脂、燃料元件碎片等，含有分裂產物及銻系元素，例如 Cl-36、Sr-90、Cs-137 等分裂產物及 Pu-238、Pu-239、Pu-240、Am-241、Pu-241 等，在水池接縫和排水口可能具有高層度的污染。以 Magnox 除役反應器場址為例，統計歸類為 LLW 廢棄物體積如下表二所示，估計大約 20 個反應器的拆除會產出約 1.5Mm³ 的 LLW。

Volume of steel LLW (m ³)	7,000
Volume of concrete LLW (m ³)	54,000
Volume of excavated soil LLW (m ³)	5,000
Volume of other LLW (m ³)	3,000
Total waste volume (m³)	69,000

表二、拆除一座 Magnox 反應器估計產生的 LLW 體積(Source: Jo Farrow, Requirements & Guidance on Releasing Nuclear Sites from Radioactive Substances Regulation)

其餘的材料經過劑量計算 $<10 \mu\text{Sv/y}$ 及限制值介於 0.1 至 1 Bq/g 之間 (0.4 至 4 MBq/te) 則不在管制範圍內，但對於可能涉及到各個核種的限值仍需要依規定個別計算。

LLW 的放射性活度每噸 α 射線活度不超過 4 GBq 或每噸 β/γ 不超過活度 12 GBq 。非常低階廢棄物 (VLLW) 是 LLW 的一個子類，可以與一般商業或工業廢棄物一起做最終處置，在經核准的廢棄物處置設施進行處理，但需要符合設施活度接收標準的限制；LLW 和 VLLW 通常被稱為低活度廢棄物 (LAW)。

某些放射性廢棄物可能因其活度低於法律中所定義的門檻值而被豁免管制，因此此類廢料不需要英國環境機構的許可或授權。

高活性放射性廢棄物 (HAW)，其實包括 HLW、ILW 及少量不適合存放在現有 LLW 處置設施的 LLW，原因是其具有特定的化學、物理或輻射特性。HAW 將在英格蘭和/或威爾斯進行深地質處置，或在蘇格蘭的地表設施中進行長期貯存管理。目前英國的用過核燃料和其再處理分離出來的鈾、鈾材料，目前仍未被歸類為廢棄物。除非被認定為沒有使用價值，它們才會被宣布為放射性廢棄物，交由放射性廢棄物管理有限公司 (RWM) 負責，並安排放置於深地質處置設施 (GDF)。中階放射性廢棄物(ILW)的貯存方式，多採取貯存在場址內的特規容器、筒槽或地窖中，或是對原廢棄物貯存採取避免劣化措施，具有允許對其再取出並持續等待未來的處置機會。對廢棄物執行貯存管理方式，可視為合理抑低原則、最佳可行技術(BAT)/最佳可行方案(BPM)或其他方案的一部分。

目前英國的放射性廢棄物，分為電力設施產生、醫療使用、研發機構、一般工業、國防工業等五個主要來源。目前累積的廢棄物總體積已達 4.5km³，近期英國對於所有的放射性物質及核子設施除役，仍採取保持對於所有廢棄物分類分級的方式分別管理，並對於某些 ILW 尋找是否有潛在替代處置的選項。依據核能電廠除役後所產出的放射性廢棄物體積及輻射活度占比，參考下圖 6 所示，可發現高階廢棄物占整體預估體積比率僅為 0.03%左右，大部分廢棄物均歸類為中、低放射性廢棄物。

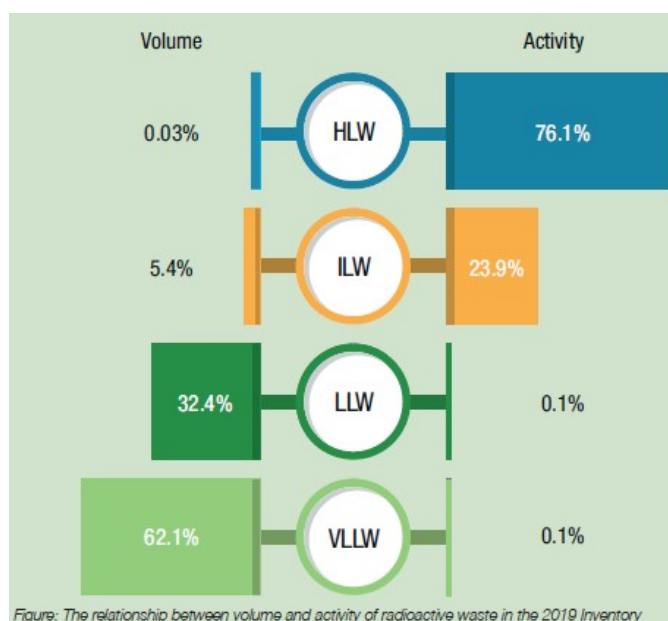


圖 6 核能電廠除役後放射性廢棄物體積及輻射活度占比(Source: Jo Farrow, Requirements & Guidance on Releasing Nuclear Sites from Radioactive Substances Regulation)

7. 英國最終處置設施興建策略

對於目前英國所產出的高活度廢棄物，英格蘭地區及威爾斯地區採取相同策略，採取建置深地質處置設施(GDF)作為最終方案，GDF 的設置會遴選有意願及適合的地區。而蘇格蘭地區的政策是，高活性放射性廢物的長期管理應該在近地表設施進行，這些設施應該盡可能靠近廢棄物產生的設施場址。

為了成功尋找出合適 GDF 的地點，除了需要有地方政府及願意參與的社區支持。整個過程本身必須在公開、透明、靈活和民主負責的原則下進行。關於 GDF 擬訂位置的討論，可以由任何人發起並向 RWM 提議一個區域。所有利害

關係人都可提出建議的區域，無論其區域大小。若 RWM 和有意願群體初步交換訊息後，同意該提案並進一步討論後，則必須聯合當地政府相關部門成立 GDF 建置的工作小組。在該區域中更廣泛的與當地人們進行接觸並進行討論，搜索可以考慮設置的潛在場址地點。建立工作小組或區域夥伴關係，且不需要任何人承擔參與 GDF 的責任，參與的地區團體也可以隨時退出選址過程。在英格蘭地區，社區夥伴關係的建立至少需要一名地方政府和 RWM 的代表，在威爾土地區，社區夥伴關係建立則是需要取得地方政府的同意。

在同意後則須簽屬合約，並明示社區夥伴關係裡各個扮演的角色及所需負擔的責任，包含如何建立其他任務分組。當然在選址過程中，場址及區域調查階段也是一樣。建立社區夥伴關係應視為有效且長久的方法，以取得場址和進展。在取得地方政府及環境部門的同意後，進行詳細地質調查，所需的時間可能長達 15 年，當 RWM 取得足夠的資訊確認適合作為 GDF，並確認經過該區域居民同意，RWM 則進行建設規劃及辦理許可證申請，在取得環境部門及 ONR 的許可證後執行興建，可參考下圖 7 所表示之示意圖。

英國目前想定的地質處置概念設計圖，如圖 8 所示，以放射性廢棄物產出之熱量為標準，將產生高衰變熱及低衰變熱之廢棄物分區處置。



圖7、英格蘭地區或威爾土地區與地方溝通建立地質處置設施之流程示意圖
(Source: Charlotte Pickering, Packaging Higher Activity Waste for Geological Disposal)

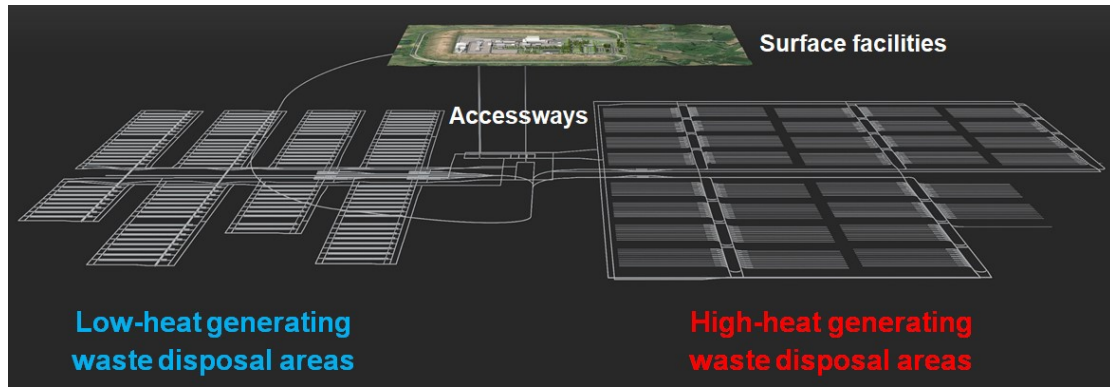


圖8、目前英國地下處置場設施示意圖(Source: Charlotte Pickering, Packaging Higher Activity Waste for Geological Disposal)

8. 英國放射性廢棄物管理優化策略

目前英國採行優化廢棄物管理策略並仍持續推動，提供靈活可持續的廢棄物基礎管理架構，以實現有效且具成本效益的廢棄物管理解決方案；以現行的廢棄物管理政策和策略都支持這種優化方式，並發展多樣性的管理選擇。

在2018年，英國環境部門發布了一份名為「來自除役核子場址放射性廢棄物管理:放射性物質解除管制外釋要求之指引|(Management of radioactive waste from the decommissioning of nuclear sites: guidance on the requirements for release from radioactive substances regulation；簡稱GRR)」的指引。該指引解釋了環境部門期望核子設施營運商在制定除役放射性廢棄物管理計劃時需遵循的要求，及如何實施這些計劃，使場址達到復原解除管制的狀態。經由GRR的指引，增加廢棄物處理的靈活性及對剩餘的管理風險採取適當應對方法，其中要求營運商需提出廢棄物管理計劃（WMP）和場址環境安全論證（SWESC）展示並合理證明對人類和環境保護的優化可行方案，使其場址至最終清理後狀態才算符合標準解除監管。

可參考圖9制定廢棄物管理計劃(WMP)流程圖，就WMP來說其內容至少要有:

- 確認所有在場內既有及預計產出的放射性廢棄物適當處置方式
- 證明所有放射性廢棄物在場內的處置方式都是最佳方案
- 對於場外處置的放射性廢棄物也需進行同樣的證明
- 對整個設施的生命週期中所採取的廢棄物管理方法都有經過驗證。

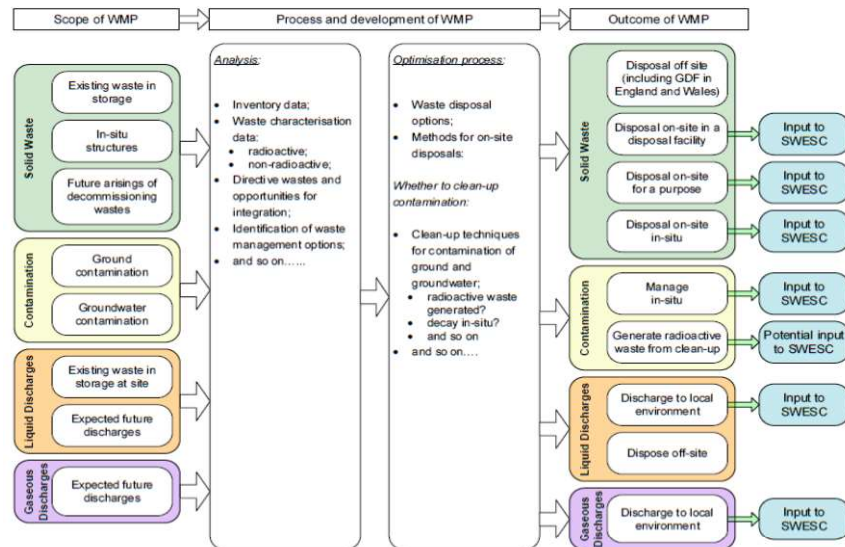


圖 9、WMP 擬訂流程圖(Source: Jo Farrow, Requirements & Guidance on Releasing Nuclear Sites from Radioactive Substances Regulation)

有關核子設施場址環境安全論證 (Site-wide Environmental Safety Case ,SWESC) ，其目的主要是對除役拆除場址整體驗證可否滿足基本防護目標 (Fundamental Protection Objective , FPO) 。設施生命週期中需要定期執行監控措施，需對整體設施場址納入範圍以確保最終可符合要求並達到解除管制的狀態，並對關鍵群體健康及完整環境評估，無論在監管期間或之後的未來狀態，提升公眾信心並納入除役花費成本考量。核子設施場址環境安全論證(SWESC)也需要考慮到場址在無人管理控制後的變化。下列有五項營運商需符合的原則，以達到期望的基本防護目標(FPO):

I. 適當層度的防護以應對放射性危害 (Level of protection against radiological hazards) 。

- 保護人類和環境所需的措施
 - 在監管期間及之後的防護措施
 - 適用標準比照相關活動執行時的標準
- 數個輻射防護要求
 - 監管期間的劑量限制
 - 從 RSR 釋放後剩餘風險的風險層度

- ◆ 包括對整體/同材質均勻的自然干擾後果
- 從 RSR 釋放後人類侵入的劑量層度
- ◆ 包括對局部/集中的自然干擾後果
- 場址的輻射效應對周遭環境的影響。

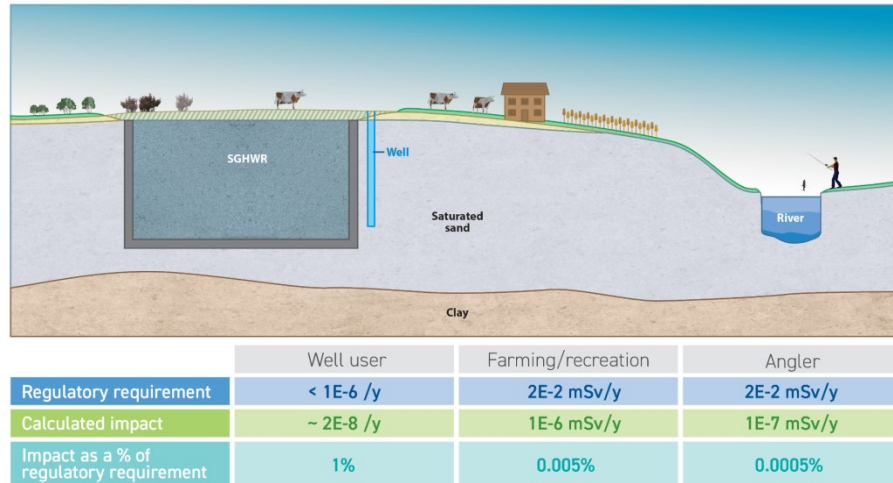


圖 10、除役後場址復原後對周遭環境及人員活動影響評估示意圖(Source: Jo Farrow, Requirements & Guidance on Releasing Nuclear Sites from Radioactive Substances Regulation)

II. 是否是最佳方案(合理抑低原則)

- 在合理可行的情況下（ALARA 原則），將個人和群體的輻射風險保持在最低限度。
- 考慮經濟和社會因素
- 對相關的非輻射危害和其他生物的輻射風險必須管理
- 對於監管期間與解除後的標準皆相同
- 最佳方案的方法
 - 在執行替代處置措施前先進行結構除污
 - 選擇最小化和延遲放射性核種釋放的設置方法
 - 隔離廢物（例如混凝土灌漿箱涵）
 - 封閉結構，使水的侵入延遲和最小化，降低人類侵入意外的可能性
 - 排除潛在水流途徑

- 增強工程措施-內襯結構、不透水層、截水牆和屏障。

III. 對非放射性危害是否有適當的防護

- 在場址上仍然存在的一些放射性物質，可能會因其非輻射特性，而在整體或部分上，對健康危害具有潛在風險。
- 防護層度應適當地與國家標準要求的防護一致
 - 人群和環境防護
 - 在監管期間和解除之後的防護
 - 適用標準比照相關活動執行時的標準。

IV. 對於人們活動的關聯層度

- 避免不合理地仰賴人類行動來保護人類和環境免受輻射和任何相關非輻射的危害影響，無論在場址釋放之前還是之後。
 - 在場址釋放之前，可以通過被動措施（包括場址控制）提供防護。
 - 在場址釋放之後，不再仰賴未來人類的控制措施而得到防護。

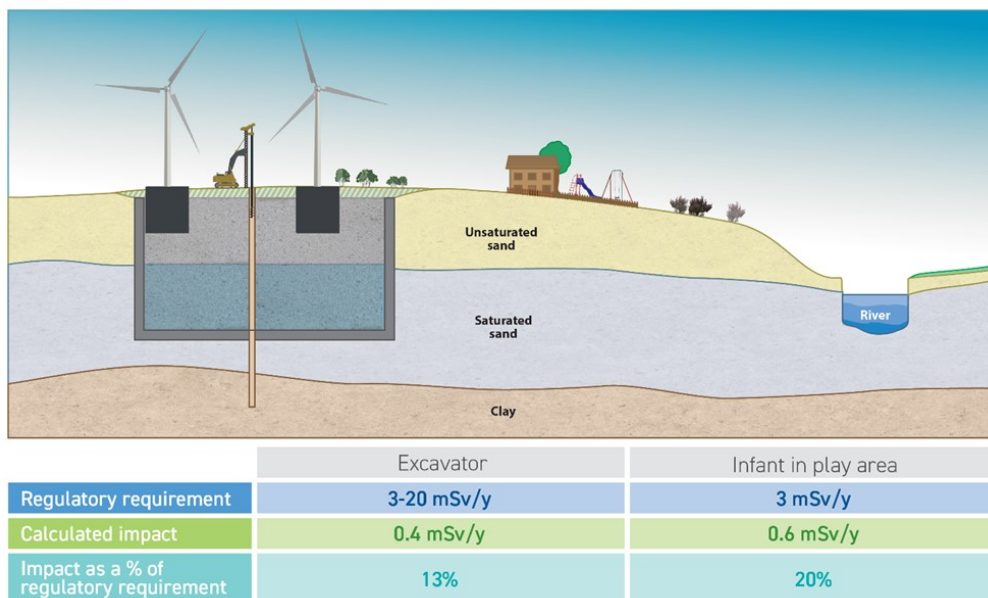


圖 11、除役後場址解除管制後人類活動影響評估示意圖(Source: Jo Farrow, Requirements & Guidance on Releasing Nuclear Sites from Radioactive Substances Regulation)

V. 開放性與包容性

- 適用於營運商及監管機關

- 監管機關應
 - 在適當的情況下進行諮詢
 - 解釋監管的決策依據
 - 解釋如何判定不確定性的重要性
 - 提出監管決策的審查軌跡
 - 以適當的方式履行我們自身應扮演的角色
- 對於營運商在與監管機關或其他關係人洽談的要求

上述五項原則，可由完成下圖12所示15項要求後，證明其符合，其中管理方面含有六項要求:最佳化策略、WMP、前期意見徵詢、地方利害關係諮詢、管理及安全文化、紀錄與知識保存等；另外技術方面則有九項要求:SWESC、場址特性與監控、4項放射性影響要求、最佳化策略、環境防護、非輻射性危害等。

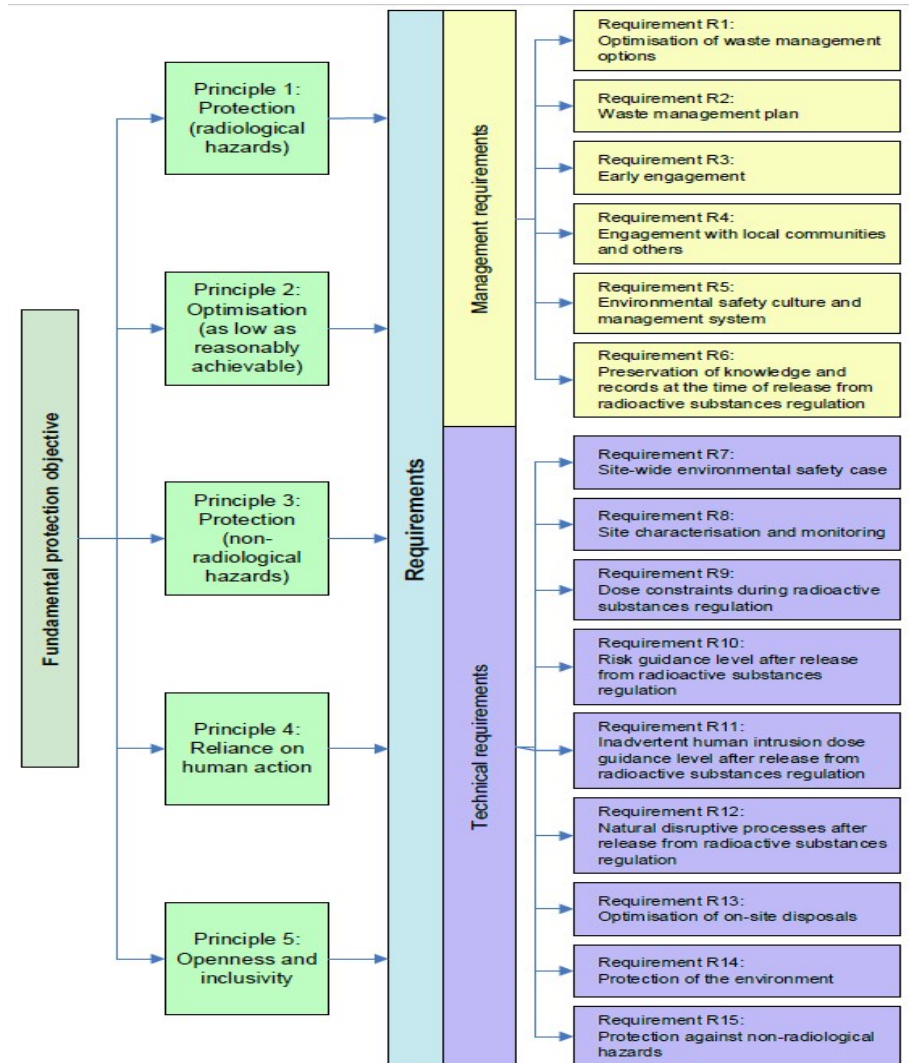


圖 12、符合 15 項特性要求以證明達到基本防護目標的 5 個基本原則(Source: Jo Farrow, Requirements & Guidance on Releasing Nuclear Sites from Radioactive Substances Regulation)

GRR 經由三個目前 NDA 處理場址（Winfrith、Dounreay 和 Trawsfynydd）進行「Lead and learn」優化試驗，從中學習經驗並納入最終的監管指引中。在 GRR 發布後，環境機構為英格蘭區域內的所有核子設施營運商設立了新的申照條件，要求提出可符合 GRR 中描述的 WMP 和 SWESC。目前英國環境部門正與核能業界合作，制定一個國家級計劃建立資訊平台，可適用在每個英國核子設施編寫的 WMP 和 SWESC，確保英國各地處於不同除役階段的設施，可不斷的從同業中學習和經驗共享。另外一個特點是在發展優化的廢棄物管理和場址清理方法方面所提供其他形式的處置方式選擇。例如下圖 13 所示可能的廢棄物清理方

法。

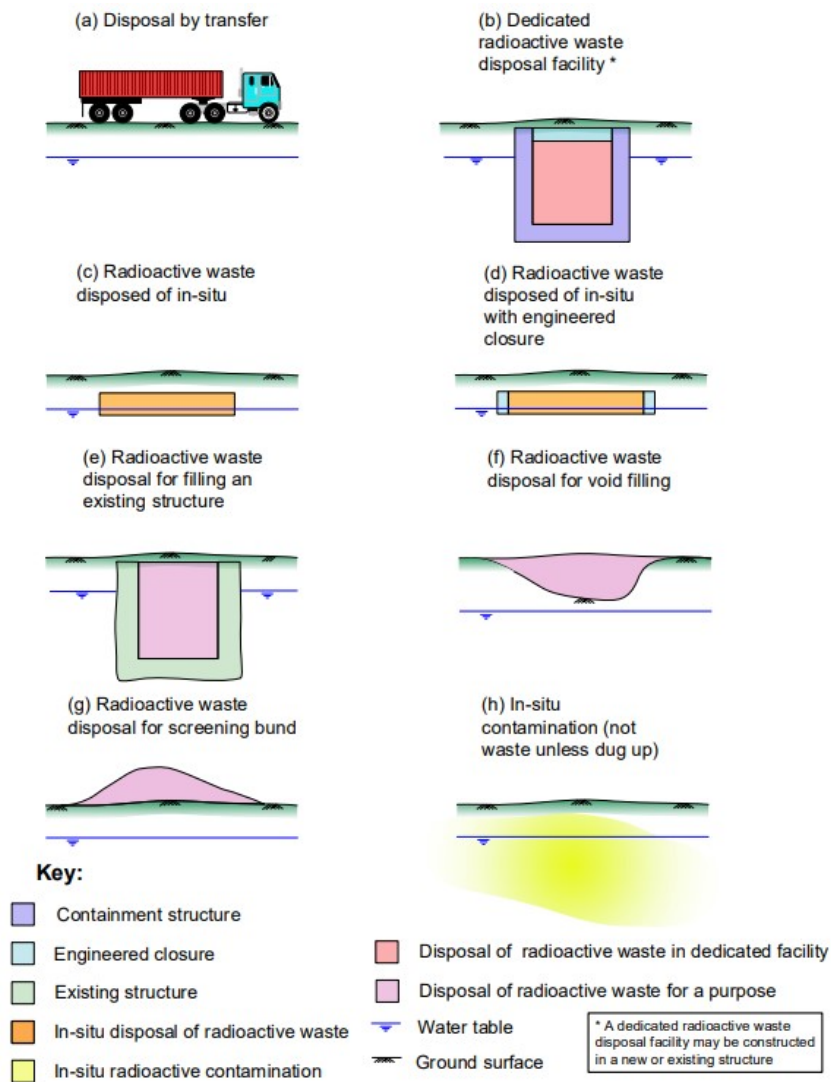


圖 13、核子設施場所除役後放射性物質依其特性有不同的處置選項(Source: The United Kingdom's Seventh National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention)

對於已拆除的設施場址的最終場址清理(Final site clearance (FSC))要求，需符合無限制使用標準，並要證明對於人類和環境無受任何殘餘放射性活度的影響，而至解除管制，不再列入放射性物質法規 RSR(Radioactive Substances Regulation) 指引的範圍，才算完成。

9. 除污技術基本概念

除污技術選擇以下列五個基本原則為主：

1. 安全性-不能增加輻射或其他典型的危害出現。

2. 有效性-足夠的設施除役目標可以達成。
3. 廢棄物再生最小化-因執行除污所產生之廢棄物不可在而外大量增加，且增加處理費用及工作人力、輻射暴露。
4. 花費有效性-不可以花費太多對廢棄物處理與處置的經費。
5. 工業化的可行性-項目、工作或流程不應該需要過多的人力，不應該難以處理，也不應該難以自動化。

對於除污的三個基本考量:

1. 從組件中清除污染，降低設施中的輻射劑量（在拆解過程中減少暴露）：這個目標是為了減少在拆解過程中工作人員的劑量暴露，以及減少污染物對環境的影響；通過清除組件上的污染，可以降低拆解過程中的輻射風險。
2. 在解體過程中最大程度地減少污染擴散的可能性：這個目標旨在防止在解體過程中污染物的擴散，避免污染物在設施內部或周圍的傳播，以確保拆除過程的安全性和環境保護。
3. 降低組件的污染程度，使其可以達到以下結果：
 - 歸類為較低輻射之廢棄物進行處置：指的是降低組件上的輻射劑量，使其可以歸類為較低之放射性廢棄物進行處置，這包含將廢棄物放置於低危害風險場所進行處置。
 - 可在常規工業中進行回收或再利用：指的是將組件中的放射性污染物降低到足夠低的程度，以便在常規工業中進行回收或再利用，而不會對工業製程造成影響。

而除污率(Removal(%))代表除污效果，可以通過除污因子(DF)如下公式來表示。除污因子(DF)是指除污前材料的污染水平與除污後材料的污染之比。有關DF值對應除污率對照表如表三所示。

$$DF = \frac{\text{Contamination level of material or component before the decontamination application}}{\text{Contamination level of material or component after the decontamination application}}$$

$$\text{除污率(\%)}=(1-1/\text{DF})\times 100$$

Conversion of decontamination factor to percent removal of contamination,

DF	Removal (%)
1.11	10
1.33	25
2.00	50
4.00	75
10	90
20	95
100	99
1000	99.9

表三、DF 值對應除污率對照表(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

目前放射性除污技術大致分為五大類:電化學(電解、電泳和電滲透)法、化學去污法,機械去污法、機械化學去污法、物理去污法。現在的化學除污方式是以 1998 年,保羅·阿納斯塔斯 (Paul Anastas) 和約翰·華納 (John Warner) 創建了綠色化學的 12 項原則作為發展基礎,這些原則如下:

1. 預防廢棄物:設計化學合成過程以預防廢棄物生成。不留下需要處理或清理的廢棄物。
2. 最大化原子經濟性:設計合成過程,使最終產品包含最大比例的起始材料。減少或不產生多餘的原子。
3. 設計較少有害的化學合成:設計合成過程使用和生成對人類或環境幾乎無毒性的物質。
4. 設計更安全的化學品和產品:設計化學產品既具有完全效用又幾乎無毒性。
5. 使用更安全的溶劑和反應條件:避免使用溶劑、分離劑或其他輔助化學品。如果必須使用這些化學品,則使用更安全的選擇。
6. 增加能源效率:盡可能在室溫和常壓下進行化學反應。
7. 使用可再生的原料:使用可再生而非可耗盡的起始材料。可再生原料的來源通常是農產品或其他過程的廢棄物;可耗盡原料的來源通常是化石燃料(石

油、天然氣或煤炭)或採礦操作。

8. 避免化學衍生物：盡量避免使用阻塞或保護基團，或任何暫時性修改。衍生物使用額外的試劑並生成廢棄物。
9. 使用催化劑，而非化學當量試劑：通過使用催化反應最大限度地減少廢棄物。催化劑在小量下有效，可以多次進行單一反應。它們優於化學當量試劑，後者使用過多，僅能進行一次反應。
10. 設計化學品和產品在使用後分解：設計化學產品在使用後分解為無害的物質，以免其在環境中累積。
11. 實時分析以防止污染：在合成過程中包括過程內的實時監控和控制，以最小化或消除副產物的形成。
12. 減少事故的可能性：設計化學品及其物理形態（固體、液體或氣體）以最小化化學事故的可能性，包括爆炸、火災和對環境的釋放。

這些原則指導化學產品在設計、製造和應用過程中，減少或消除有害物質的使用或產生。綠色化學的目標是實現可持續和環保的化學過程，以減少對環境和人類健康的影響。這些原則提供了一個框架，幫助化學工業更好地設計產品和流程，以確保更可持續的未來。有關核設施執行化學除污，所使用之除污方法亦遵守前述綠色化學原則。

9.1 表面污染分類及清除方式

物體表面污染分類包含表面附著污染及表面氧化層固著污染兩種。表面污染可使用化學方式除污，針對多孔性材料和非多孔固體材料（如混凝土、磚、木材和鋼材）的表面和次表面去除有機物、重金屬和放射性核種的技術，包含專用的化學藥劑（巨觀或微觀乳化劑、有機酸、無機酸、水解、電解、濕潤、懸浮、螯合劑等），這些藥劑可以將污染物並將其帶到表面後清除。

另外有廠商開發放射性污染物提取和輻射性脫污技術。該技術旨在從表面和材料中去除放射性污染物，以減少其對人體健康和環境的潛在影響。這個技術是使用特殊的化學提取劑，含有特殊的有機或無機化合物，塗抹在表面後經由滲

透，可與次表面中或材料中的放射性污染物進行交互作用，例如將內層銫離子與提取劑鉀離子替換，達到將特定核種分離出污染物的效果，再經由表面清理後脫離。這項技術的應用可使用在各種材料，包括建築材料、金屬、土壤等，可以降低工作場所和環境中的輻射風險，保護工作人員和公眾的健康。

9.2 物理除污方式

表面除污可使用的物理(機械)除污方式包含乾冰噴射、雷射除污、自乾高分子塗料或(水基)可剝離高分子塗料。

- 乾冰噴射

是針對表面鬆散污染的除污技術，對於材料表面不會造成損壞或改變被污染材料外觀，且不會殘留廢棄物；唯一產生的廢棄物是從基材表面上去除而掉落的污染物，且此項技術不適用於較深層的污染。

- 雷射除污技術

通過使用雷射激光照射，從物質表面去除已嵌入的污染物，如圖 14 示意圖。雷射激光除污的物理機制包括蒸發/剝離/脫離/震波生成。這些機制可以有效的將污染物去除，而且不會對基材造成額外的損害，如圖 15 所示。其優點具有可精確處理和靈活性；缺點則是需要選擇適當的雷射激光設備，並在清理過程中特殊保護設備和廢棄物收集系統。雷射除污對受污染物件除污後 DF 值可參考表 4 所示。

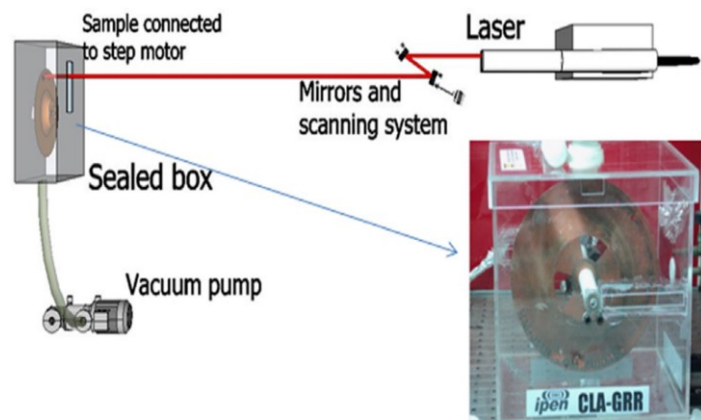


圖 14、雷射除污工作示意圖(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques:

Polymeric Gels)

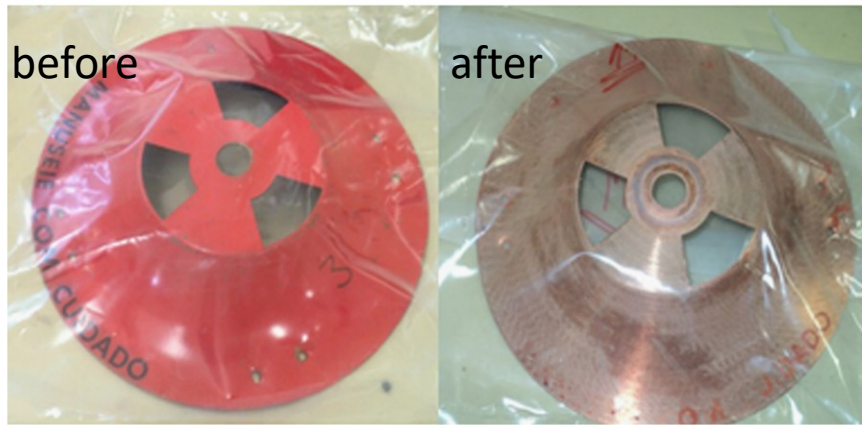


圖 15、雷射除污後表面差異圖(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

Decontamination factors obtained with laser cleaning.

Plate	Surface	Before cleaning (cpm)	After cleaning (cpm)	DF ^a (%)
1	Upper	33771	3875	89
	Lower	8962	1662	81
6	Upper	13773	286	98
	Lower	10754	199	98
4	Upper	18218	902	95
	Lower	1858	162	91
2	Upper	8909	4723	47
	Lower	3207	2358	26
5	Upper	4036	566	86
	Lower	1077	212	80
8	Upper	123	3	97
	Lower	65	2	96
7	Upper	812	129	84
	Lower	209	28	87
3	Upper	10501	4006	62
	Lower	4144	1805	56

^a DF=Decontamination Factor

表 4、雷射除污後物件 DF 值(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

9.3 化學除污方式

- 高分子凝膠

高分子凝膠其作用機制是透過操作人員噴灑於表面後，等待期乾燥後，使用刷子或手動剝離或使用吸取設備清理移除。如下操作示意圖 16。

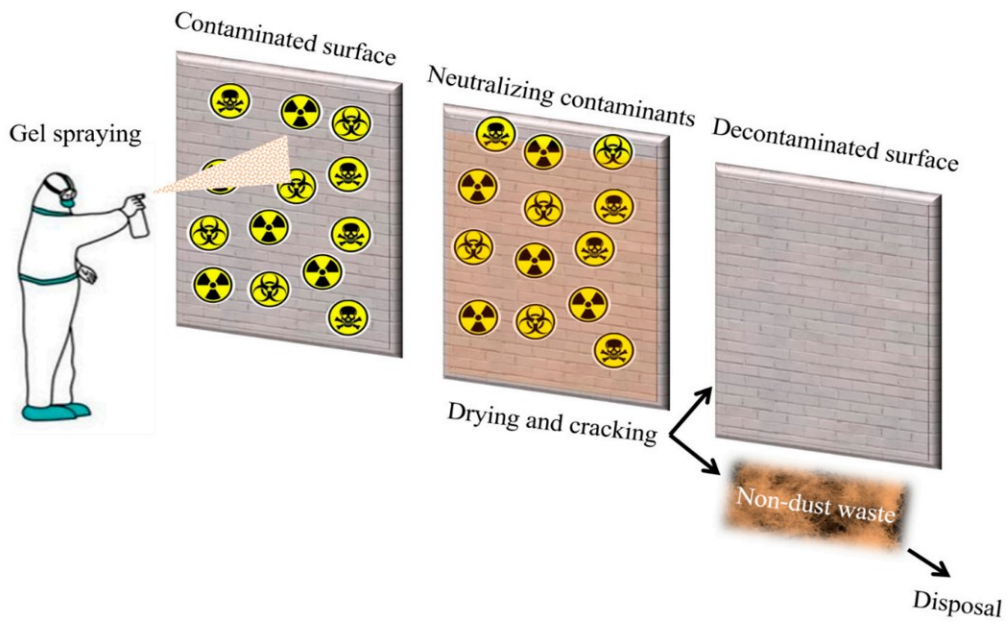


圖 16、高分子凝膠操作示意圖(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

吸收污染物的方式類似於尿布中的吸收材料 SAP，自乾式高分子凝膠可從多孔結構（如磚和混凝土）中去除放射性銫、鈷、銳、銅等污染物。去除率通常在 80%至 100%之間。其作用機制是將洗滌溶液噴塗在表面上後促使污染物移動，再使用親水凝膠噴塗在表面上吸收洗滌溶液及污染物，再等待凝膠乾後去除達到除污效果。如圖 17 示範操作圖



圖 17 自乾式高分子凝膠示範操作圖(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

其優點與其他除污產品相比，不產生液體廢棄物。並延長與受污染面接觸時間，可去除次表層固著污染：侵蝕深度 $>1\mu\text{m}$ ，如圖 18 所示。

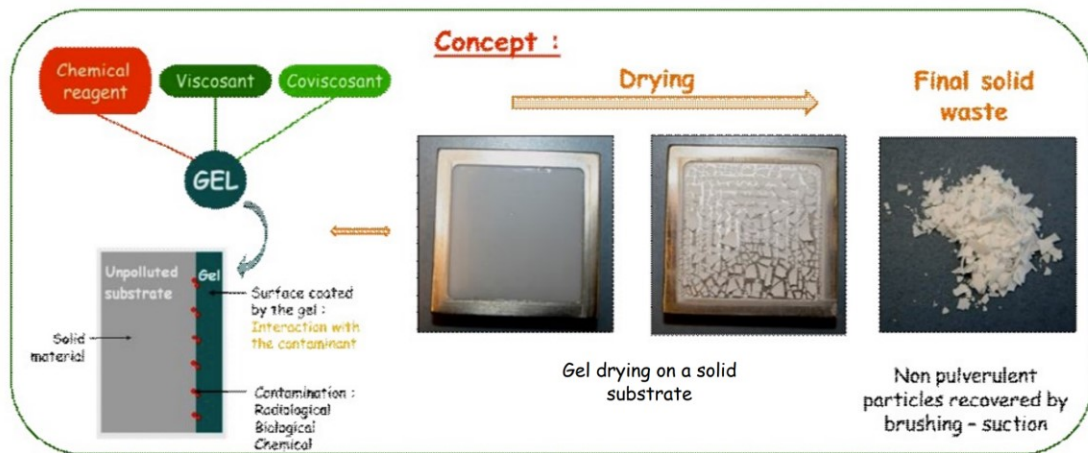
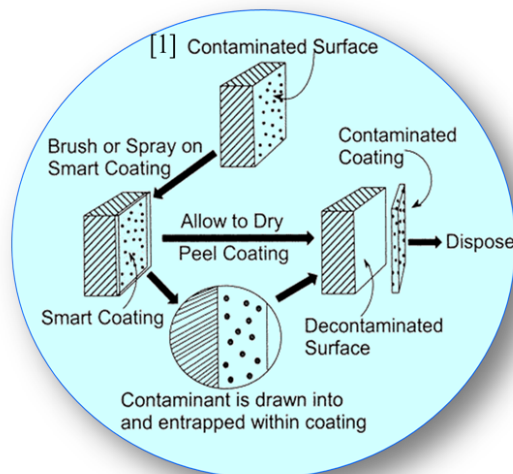


圖 18、自乾式高分子凝膠乾燥後呈現細小碎粒狀剝離(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

- 可剝離高分子聚合物

其包含了各種添加劑，如酸洗劑、去污劑、配位劑等，以提高去污能力。易於操作和使用。乾燥凝固後超強拉伸強度可乾淨剝離於物體表面，其材質環保，可應用在置於水平及垂直之待除污物體表面；其所再生之廢棄物體積最小化，亦同時有效降低來自污染物的潛在暴露。其有效性經過驗證確定，且降低人力勞動成本。



H. N.Gray et. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2001**, *40*, 3540–3546

圖 19、可剝離高分子聚合物除污示意圖

另有廠家開發出一種新型高分子聚合物除污技術，可應付放射性核種和化學威脅。並具有安全、水溶性、可剝離的親水凝膠，可以結合、包封和去除表面的放射性和化學污染物。如下圖 20 操作示範圖



圖 20、可剝離高分子聚合物除污操作示範圖(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

- 新型 PVA-TTA 水溶液

聚乙烯醇 (Polyvinyl alcohol , PVA) 與三氟乙酰丙酮 (Thenoyl trifluoroacetone , TTA) 的結合形成的化學物質在核化學除污技術中展現出令人注目的潛在應用能力。TTA 是一種有機化合物，在化學和工業領域中被廣泛用作螯合劑、化學反應的試劑以及指示劑。它的化學性質賦予對金屬離子具有高度的結合能力，這種化學物質不僅具有優越的去污能力 (DF>97%)，還對不同金屬離子顯示出不同的色比效果特性，不同金屬離子例如 UO_2^{+2} 、 Ni^{+2} 、 Cu^{+2} 、 Fe^{+3} 、 V^{+5} 、 Eu^{+3} 對 PVA-TTA 的反應是不同的，由於金屬離子的放射性同位素存在可能對環境和健康產生負面影響，可參考圖 20 顯示出含有 TTA 溶液測試具有 Fe^{+3} 金屬離子溶液的顯色效果，這種色比效果能夠提供一種直觀的方式來識別是否有金屬離子的存在，可作為有效檢測的方式並去除這些污染物資，這對核廢料處理、環境監測和殘留污染分析等方面具有重要意義。

研究人員將 PVA-TTA 水溶液，對不同 TTA 含量下對不同金屬離子的顯示效果做測試，透過在受污染的樣品表面上進行實驗，發現對於不同金屬離子 (如 Fe^{+3} 、 UO_2^{+2}) 可以極低的 TTA 含量 (≥ 2.5 毫克/樣品片，對於 Fe^{+3} 和 UO_2^{+2} 不到 20 秒) 迅速出現可視的顏色變化。其測試結果如下圖 21 及表 5 所示。

Contaminant color performance

(Limit of detection 2.5 $\mu\text{g}/\text{coupon}$)



圖 21、PVA 溶液與 PVA-TTA 溶液對不同程度 Fe^{+3} 顯示比較(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

Limit of Detection of the metal ions in PVA-TTA solution

amount metal ion	0.5 $\mu\text{g}/\text{coupon}$	2.5 $\mu\text{g}/\text{coupon}$	5 $\mu\text{g}/\text{coupon}$	50 $\mu\text{g}/\text{coupon}$	500 $\mu\text{g}/\text{coupon}$
UO_2^{+2}	*	✓	✓	✓	✓
Eu^{+3}	✓	✓	✓	✓	✓
Fe^{+3}	*	✓	✓	✓	✓
Cu^{+2}	*	*	✓	✓	✓

表 5、PVA-TTA 溶液不同比例檢測不同金屬離子顯色效果比較表(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

為確定溶液是否確實與溶液作用，研究人員再經由拉曼特性光譜實驗，確認 PVA-TTA 與不同金屬離子作用後會使光譜上呈現不同程度的紅位移現象，如圖 23 所示，對作用後的實驗溶液亦可目視觀察到不同顏色的顯現，例如 UO_2^{2+} 顯示出粉紅色、 Cu^{2+} 顯示出紅色等。

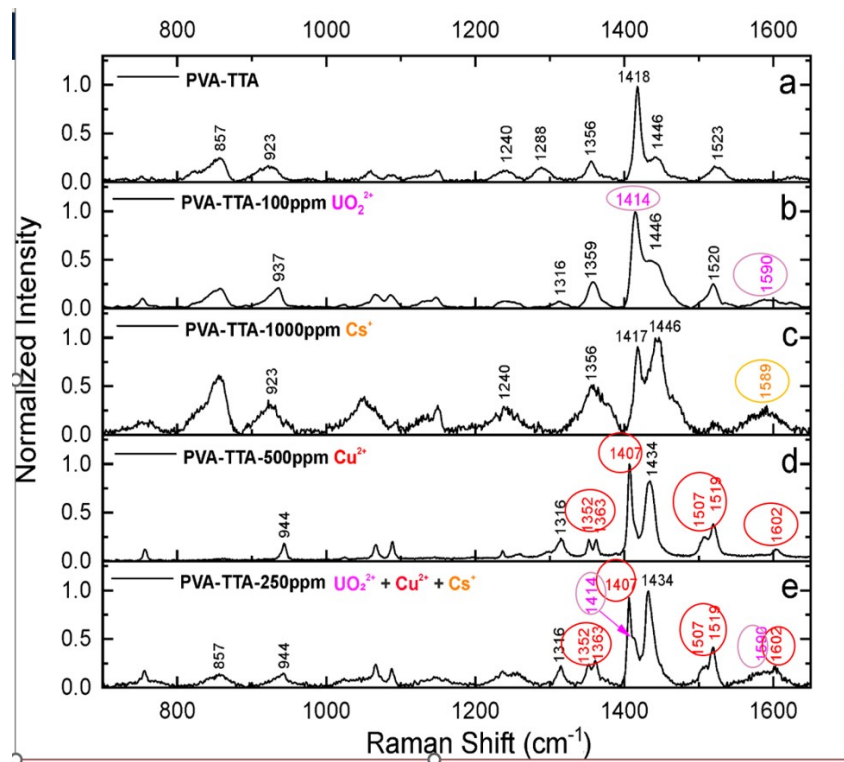


圖 23、拉曼特性光譜呈現不同程度的紅位移現象(Source: Ofra Paz Tal, Decontamination Processes and Techniques: Polymeric Gels)

但此種混合溶液亦有其缺點，例如其去除表面產生之塗層所需的時間可能很長，另外在高度污染的区域，特别是混凝土表面，去污效果就可能不足。

PVA-TTA 溶液對特定微量的污染物相當敏感，可用作感測污染物、除污的塗料，用於檢測和去除非多孔表面的污染物。此外，它經由污染區域展現了一定程度看似“標記”的反應。這對設施解除管制是一個相當重要的功能，這可使用塗層來“標記”哪些部分受污染，方便將未受污染區域做區分，後續關於此技術實際應用效果仍有待觀察。

四、建議事項

- (一)、 英國 Sellafield 再處理廠場址內含有眾多核設施，其設施除役清理也是英國核子除役管理局（NDA）的重點業務，因英國政府鼓勵新技術開發並使用在除役設施上，該場址內設施將會作為實施新技術試驗對象，以供歐洲或世界其他國家參考，建議我國除役作業單位應持續關注並蒐集國外實驗或新技術驗證發展資料，俾利未來我國除役電廠設施除污作業。
- (二)、 為符合英國環境部門提出之「來自除役核子場址放射性廢棄物管理:放射性物質解除管制外釋要求之指引(GRR)」，Magnox 公司配合為其除役設施場址撰擬廢棄物管理計劃（WMP）和場址環境安全論證（SWESC）；另除役的 Trawsfynydd 水池設施與 Winfrith 研究設施兩處場址也向英國政府提出變更申請允許就地處置，並規劃在 2023 年底及 2024 年初遞交符合 GRR 要求的 SWESC 及 WMP，其中應會有放射性廢棄物優化處理方案，建議相關機關(構)關注其發展，優化我國電廠除役後產出之放射性廢棄物處理方式。
- (三)、 由於氣候變遷問題，全球對於綠能及核能使用都有更積極廣泛的討論，惟核能發電牽涉到放射性廢棄物處理問題及後續設施除役規劃執行，國際上許多設施除役經驗及技術發展，十分值得借鏡及學習，透過參加此課程方式是很好的與核能工業相關及專責機構人員交流的機會，建議除役作業相關機關(構)持續派員研習課程，精進管制技術。