

出國報告（出國類別：實習）

參加第34屆除役與放射性廢棄物管理研習並參訪英國室內乾貯設施

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：劉志添組長

派赴國家/地區：英國

出國期間：107年7月7日至7月18日

報告日期：107年9月20日

摘 要

「2025非核家園」是政府的政策，核能發電在台灣將屆40年，我國核一廠、核二廠及核三廠運轉執照將分別於107年12月、110年12月、113年7月屆滿並陸續展開除役；依據電業法修正案第95條亦訂定，核能發電設備應於中華民國114年以前，全部停止運轉。在邁向非核家園的過程中，原能會物管局積極面對核電廠除役廢棄物與用過核燃料安全管制的問題，以落實非核家園政策目標。本次奉派赴英國劍橋大學基督學院參加第34屆除役與放射性廢棄物管理研習（34th Annual Decommissioning & Radioactive Waste Management Summer School），並安排參訪英國Sizewell B核電廠用過核燃料室內乾式貯存設施。其目的即瞭解歐盟會員國面對核電廠除役拆廠廢棄物及用過核燃料之安全管理策略、實務經驗及未來發展趨勢，並藉由參訪英國核電廠用過核燃料室內乾貯設施，技術交流乾貯安全議題，觀察該廠興建鋼構廠房並採用混凝土貯存護箱進行用過核燃料乾式貯存之營運策略考量。

本報告主要說明歐盟在核電廠除役與放射性廢棄物安全管理發展趨勢、廢棄物管理專責機構、歐盟及英國核能安全管制、核電廠除役策略選擇、除役廢棄物解除管制基準等，以及與英國 Sizewell B 核電廠廠方人員技術交流用過核燃料室內乾式貯存設施廠房結構評估、熱移除能力設計以及受損用過核燃料之管理等，以瞭解核能先進國家最新管制技術與發展，供作推展國內核電廠除役放射性廢棄物及用過核燃料安全管制作業之重要參考。

目 次

	(頁碼)
一、目的.....	1
二、行程.....	2
三、研習與參訪心得.....	3
四、建議事項	24

一、 目的

國內核一廠 1 及 2 號兩部機組運轉執照分別於 107 年 12 月及 108 年 7 月到期，即進入停機除役階段；目前原能會已於 106 年 6 月完成「核一廠除役計畫」審查，並成立「核電廠除役安全管制專案小組」，監督核一廠除役準備工作，以確保如期執行核一廠除役計畫，同時要求台電公司應依法於 107 年及 110 年，分別提出核二廠及核三廠除役計畫，展開除役作業，以落實非核家園政策。

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燃料，「乾式貯存設施」為核電廠除役的必要設施。原能會已於核一廠除役計畫之審查結論中，要求台電公司核一廠第 2 期乾式貯存設施，應採具社會共識之「室內貯存」型式，並於 115 年底完工啟用，以利除役拆廠作業進行。

放射性廢棄物之安全管理一向為社會大眾所關心，現階段民眾關注的焦點，尤其在核電廠除役過程將產生大量放射性廢棄物、一般廢棄物以及用過核燃料之後續處理問題上，台電公司應有明確且完整的管理規劃。為追求國家永續發展，加速推動放射性廢棄物及用過核燃料中、長程管理計畫，為政府當前積極推動之重點工作，亦有必要參酌歐、美、日等先進核能國家之管理經驗與發展趨勢，以確保我國用過核燃料管理安全。

此公差行程重點除了解歐盟在核電廠除役策略的考量、放射性廢棄物及用過核燃料貯存關鍵議題及安全要求外，同時研析英國核能安全管制架構、用過核燃料中、長期管理策略並擷取英國用過核燃料室內乾貯設施安全管制作業，與各國學員技術交流相關管制作業經驗，以提升我國核電廠除役安全管制技術。

二、行程

本次公差行程如表 1，主要分為參加 Informa 機構舉辦之第 34 屆除役與放射性廢棄物管理訓練研習與英國 Sizewell B 核電廠用過核燃料室內乾式貯存設施參訪等兩部分。

表 1、公差行程摘要

日期	行程	工作內容
7月07日	台北→英國倫敦	去程
7月08日	劍橋	報到
7月09日	劍橋	除役與放射性廢棄物管理研習
7月10日	劍橋	除役與放射性廢棄物管理研習
7月11日	劍橋	除役與放射性廢棄物管理研習
7月12日	劍橋	除役與放射性廢棄物管理研習
7月13日	劍橋	除役與放射性廢棄物管理研習
7月14日	劍橋	彙整研習資料
7月15日	倫敦	整理參訪交流議題
7月16日	萊斯頓	Sizewell B 核電廠用過核燃料室內乾貯設施技術參訪
7月17日	倫敦→台北	回程
7月18日	台北	回程

三、 研習與參訪心得

Informa 專業訓練機構長年舉辦各項核能安全及除役技術等多樣研習課程，其中，除役與放射性廢棄物管理研習自 1984 年創辦迄今，每年邀集核電業者、核能研究機構、核工業以及政府管制機關等代表辦理一次，本屆係第 34 屆並安排在劍橋大學基督學院(Christ's College in Cambridge University)召開，如圖 1 所示，訓練課程之現場實況如圖 2 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。主辦單位就地利之便，安排多堂課程邀請英國核能安全主管機關—核子法規辦公室(Office for Nuclear Regulation, ONR)、核電廠除役管制機關—核能除役局(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)以及除役拆廠承攬廠家等代表，分享英國核電廠除役與放射性廢棄物管理經驗。



圖 1、基督學院校園一隅



圖 2、研習現場實況

以下內容即針對本次研習課程與技術參訪行程重點摘錄如下：

(一) 除役與放射性廢棄物管理研習

(1)核電廠除役與放射性廢棄物管理新趨勢(Global Decommissioning and Waste Management Updates)

依據國際原子能總署核電廠停機統計資料如圖 3 所示，截至 2018 年 8 月 14 日止，全球有 166 部核能機組永久停止運轉，分布於 20 個國家。其中，歐盟國家就佔了 107 部，並預估至 2025 年，另外將有 38 部核能機組停止運轉。永久停止運轉原因中，因意外或嚴重事故者有 10 部機組、政治決定者有 25 部，其餘為已達停機除役年限或如繼續運轉不符經濟效益者。截至目前為止，全球已有 15 部核能機組完成除役，其中美國 11 部、德國 3 部及日本 1 部。另有超

過 50 部核能機組正進行拆除作業中、超過 50 部機組進行延遲拆除以及 3 部機組正進行就地封存除役。

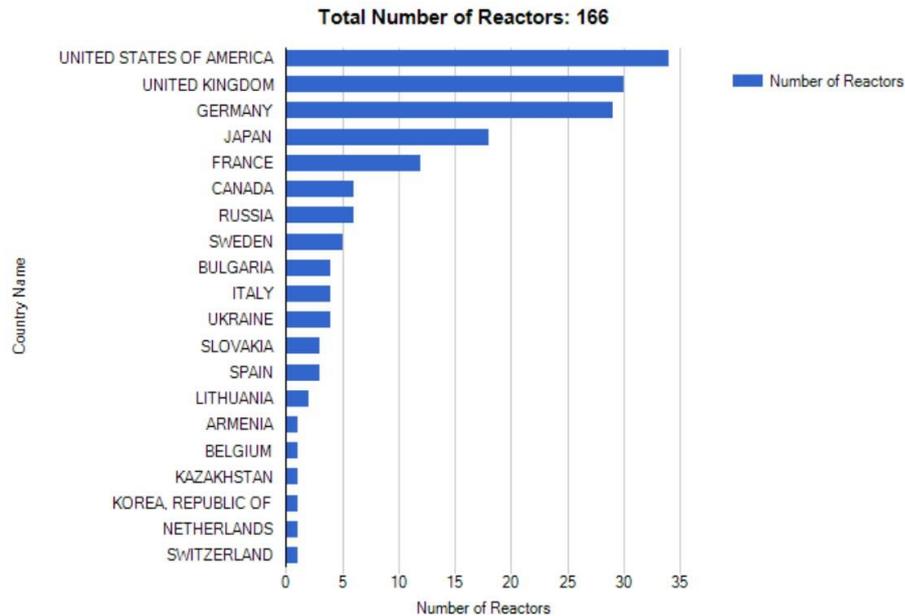


圖 3、世界各國核反應器機組停止運轉數量統計

參照 2018 年 5 月歐洲原子能共同體(European Atomic Energy Community, EAEC/Euratom，以下簡稱 Euratom)在維也納召開第 6 次會議資料，統計歐盟國家自 2004~2013 年產生之放射性廢棄物及用過核燃料數量如表 2。而歐盟放射性廢棄物主要來源係來自法國、英國及德國等三個核能先進國家，且以法國所占比例最高 44.2%，如圖 4 所示。

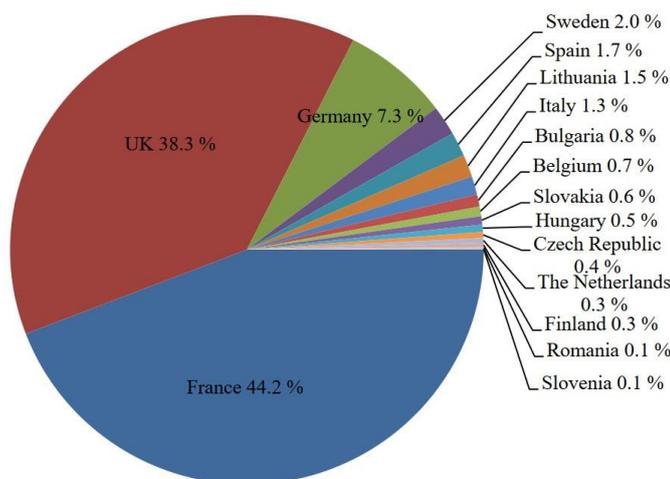


圖 4、統計 2013 年歐盟各國放射性廢棄物產量比例

依據 Euratom 統計至 2013 年底，放射性廢棄物總量共計 3,313,000 立方公尺。其中，低階放射性廢棄物就佔了 74%、高階放射性廢棄物(係指再處理

後之玻璃固化體)約佔 0.2%。完成處置者約占總量 70%、貯存中則有 30%，如圖 5 所示。在用過核燃料方面，截至 2013 年底，共計有 54,000 噸鈾貯存在歐盟各個國家，其中，大約有 800 噸鈾(約總量 1.5%)貯存在第三國家等待再處理。此外，有關再處理過後所衍生之高放射性廢棄物，已自 2017 年開始回運作業。

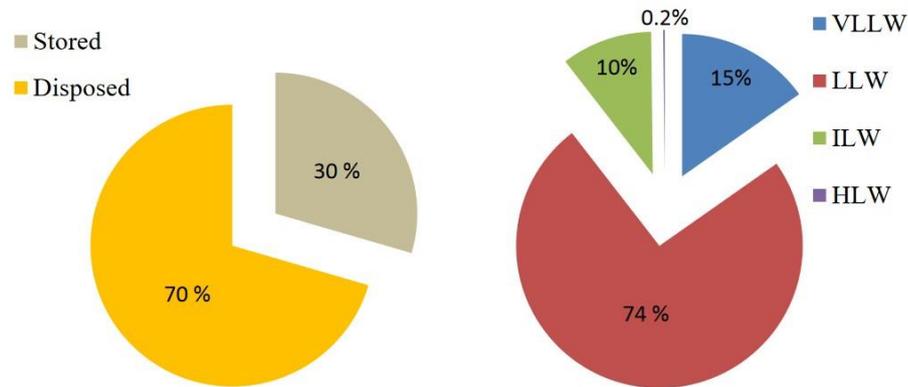


圖 5、歐盟放射性廢棄物統計至 2013 年產量分布

表 2、2004~2013 年歐盟放射性廢棄物及用過核燃料統計表

廢棄物分類	總量 (立方公尺)			
	2004	2007	2010	2013
極低微 VLLW	210,000	280,000	414,000	516,000
低階 LLW	2228,000	2435,000	2356,000	2453,000
中階 ILW	206,000	288,000	321,000	338,000
高階 HLW	5,000	4,000	5,000	6,000

用過核燃料	總量 (噸鈾)			
	2004	2007	2010	2013
	38,100	44,900	53,300	54,300

班主任Derek Taylor教授指出，針對除役核能電廠所產生的放射性廢棄物管理工作，主要在使放射性廢棄物的處理、運送及貯存符合法規及管制要求，讓放射性廢棄物的管理達到合理的狀況(reasonable management)，減少放射性廢棄物對環境的衝擊，符合環境保護、維護民眾健康的目標。

管制機關對核能電廠除役放射性廢棄物的管制目標，應遵循國際原子能總署(IAEA)及歐盟(Euratom)放射性廢棄物管理原則執行，其原則性之要求包括以下各項：

- 確保人類健康在可接受的水準、維護環境在可接受的水準。

- 確保人類健康與環境、後代子孫之輻射影響，不可高於現今可接受的水準。
- 廢棄物產生量應盡可能減少。
- 廢棄物產生與管理各步驟間之相互關係必須考量並妥適安排。
- 各種廢棄物設施在使用期間須確保其安全。

在放射性廢棄物最終處置進展方面，低放射性廢棄物最終處置場的設計，世界各國皆採多重障壁的概念，以隔絕放射性廢棄物於人類生活環境之外，防護措施包括放射性廢棄物固化體盛裝容器、緩衝回填材料等工程及天然障壁等，此種處置方式已獲IAEA及Euratom認可與推薦。

歐盟28個會員國中，設置核能發電廠者有14個國家，目前已有12個國家完成設置近地表處置設施並安全營運中。據原能會統計資料顯示，美國、日本、法國、瑞典、芬蘭、英國及德國等34個國家，都已興建低放射性廢棄物最終處置場，迄今世界各國共計有77 座處置場，均持續安全運轉。

對於高放射性廢棄物的最終處置方面，國際上一致採行「深地層處置」的方式，以多重障壁的設計如圖6所示。將用過核燃料置放於地下數百公尺的穩定地層中，利用廢棄物體、包封容器、工程障壁及周圍岩層等構成層層保護，使其與人類生活圈完全隔離，此種處置方式亦獲IAEA及Euratom認可與推薦。

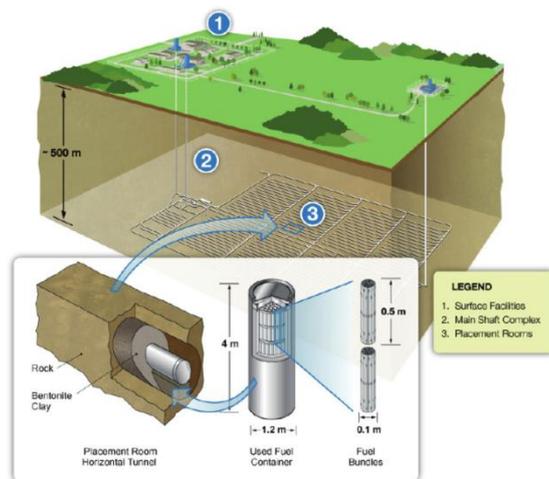


圖6、深地層處置多重障壁示意圖

各核能先進國家如美國、瑞典、加拿大、英國、法國、日本等國，正進行處置技術的相關研究，預計相關技術將陸續成熟。芬蘭政府於2015 年11 月12 日核

發高放最終處置設施之建造執照許可，成為世界首座進入建造階段之高放最終處置場。

國際原子能總署(IAEA)鑒於用過核燃料或高放射性廢棄物對人類生態環境的影響久遠，於1995年發布「放射性廢棄物管理之基本原則」，除保證安全及對人類健康與環境之保護外，亦揭示「不給後代造成不適當負擔」之理念。歐盟各會員國均已擬訂高放最終處置場完工啟用之預定時程，如瑞典及英國將分別於2030、2040年完工啟用，如圖7所示。經檢視我國高放處置設施預定於2055年啟用，與歐盟國家預定時程之比較，應屬適當。



圖7、歐盟會員國高放最終處置預定時程

(2)廢棄物管理專責機構

本次研習課程亦論及廢棄物管理專責機構之議題，Euratom對於放射性廢棄物長期管理之策略，咸認政府應具備以下責任：

- 建立處置設施之健康、安全與環境標準；
- 核定深層地質處置場之選址、建造與運轉；
- 應由獨立的管制機關負責履行政府的責任。

對於負責處置場選址、建造與運轉的專責機構組織型態，歐盟各國較有一致性的看法，且均已成立運作多年，大致可分為4種組織型態：政府機構、民營企業、國營企業與公私合營等。表3說明歐盟24個國家的放射性廢棄物管理專責機構(SWD(2017) 159 final)。

表3、歐盟各會員國放射性廢棄物管理專責機構

國家	專責機構	組織形式
比利時	國家放射性廢棄物與濃化分裂物料署 (ONDRAF/NIRAS)	政府機構
保加利亞	放射性廢棄物機構(SERAW)	政府機構
捷克	放射性廢棄物最終處置場管理局 (SURAO)	政府機構(工業與貿易部轄下)
芬蘭	POSIVA OY	核電廠業界合資成立之民營公司
法國	ANDRA	國營公眾服務機構
德國	聯邦放射性廢棄物處置機構(BGE)	政府機構
匈牙利	廢棄物處理有限公司(PURAM)	政府機構
義大利	核設施除役與核廢料管理專責機構 (SOGIN)	政府機構
立陶宛	核廢料營運機構(RATA)	政府機構
荷蘭	荷蘭中央放射性廢棄物組織 (COVRA)	政府機構
羅馬尼亞	核能與放射性廢棄物署(ANDR)	政府機構(經貿與商務環境部轄下)
斯洛伐克	核子與除役公司(JAVYS)	政府機構(經濟部轄下)
斯洛文尼亞	放射性廢棄物管理署(ARAO)	政府機構
西班牙	放射性廢棄物國營公司(ENRESA)	政府機構(工業、旅遊與貿易部轄下)
瑞典	核子燃料與廢棄物管理公司(SKB)	核電廠業界合資成立之民營公司
英國	放射性廢棄物管理公司(RWM Ltd.)	政府機構(NDA 全資子公司)
克羅地亞	放射性廢棄物管理中心	政府機構
奧地利	核能工程公司(NES Ltd.)	政府機構/民營
希臘	科學研究中心(NCSR Demokritos)	政府機構(教育部轄下)
丹麥	丹麥除役局(DD)	政府機構(科技部轄下)
波蘭	放射性廢棄物管理廠(RWMP)	政府機構
賽普勒斯	高等技術機構(HTI)	政府機構
愛沙尼亞	A.L.A.R.A. AS	政府機構
拉脫維亞	環境地質與氣象中心(LVGMC)	政府機構

綜觀歐盟發展趨勢，反觀國內在這方面卻是有如牛步，目前國內放射性廢棄物最終處置業務係由最大產生者台電公司負責執行。然而，台電公司主要任務為發電及供電業務，多年來所兼負的最終處置作業，受到環保、社會與政治

因素影響，也受到台電公司人事、預決算等限制，業務執行效果有限。面臨核電廠除役、用過核子燃料貯存與最終處置、低放射性廢棄物最終處置、境外合作等議題，成立獨立的專責機構與核能發電脫鉤，實有助業務推展、權責分工及民眾的認可。

放射性廢棄物最終處置作業與技術能力之建立，需長期有系統的推動，參考歐盟各會員國推動最終處置業務有進展的國家，如芬蘭、瑞典、法國、英國及德國等，都設置了專責營運機構，也順利運作低階放射性廢棄物處置場，甚至也有的國家已在籌建高階放射性廢棄物處置場。因此設立放射性廢棄物管理專責機構已是世界趨勢。

國際間對於核廢料最終處置設施的選址作業，多由經濟及能源有關主管部會負責，例如美國能源部(DOE)、日本為經產省及法國為工業部等，並成立專責機構，負責執行高放射性廢棄物最終處置選址及設施建造。

為推動我國放射性廢棄物集中貯存及最終處置等計畫，經查經濟部已規劃設立「行政法人放射性廢棄物管理中心」，並將該專責機構定位為行政法人。行政院於 105 年 11 月 17 日第 3523 次院會決議通過，並於 105 年 11 月 18 日送請立法院審查。為實現「廢核」及「核廢」政策，國內應積極推動設置放射性廢棄物專責機構，真心期盼立法院能儘速通過立法。

(3) 歐盟管制法規更新(EU Regulatory Updates)

1957 年 3 月 25 日，由法國、德國、義大利、荷蘭、比利時和盧森堡等 6 國，在義大利首都羅馬簽署建立歐洲經濟共同體(European Economic Community, EEC)和歐洲原子能共同體(Euratom)的條約，即指羅馬條約，並於 1958 年 1 月 1 日正式組建。其主要目標包括(1)促進原子能研究發展、(2)訂定工作人員及公眾游離輻射防護統一安全標準、(3)建立原子能共同市場以及(4)核物料保安保防制度等。其中，針對原子能應用安全及放射性廢棄物運作安全方面，近年完成更新相關歐盟理事會指令(Directives)如下：

- Directive 2006/117/Euratom: 監督與管制用過核燃料及放射性廢棄物運送

作業安全。

- Directive 2011/70/Euratom: 用過核燃料及放射性廢棄物管理安全與職責。
- Directive 2013/59/Euratom: 游離輻射安全防護安全標準。
- Directive 2014/87/Euratom: 核子反應器設施安全。

依據歐盟理事會指令(Directive 2011/70/Euratom)第 14(1)規定，自 2013 年 8 月 23 日起，Euratom 應每三年向 European Parliament and Council 提報各會員國之國家報告書，主要內容即是各會員國放射性廢棄物及用過核燃料處理貯存及最終處置之管理現況與最新發展。第一次報告已於 2015 年 8 月 23 日完成。截至目前為止，第二次國家報告書已有 25 個國家完成，另 3 個國家仍在草案階段。原則上，各會員國國家報告書應在今(2018)年 8 月 23 日完成定稿並送交 Euratom 審核。

此外，依規定，各會員國有義務至少每十年應邀請國際同儕審查國家報告書內容，包括策略架構、主管機關權責分工以及為確保高安全標準之法規體系等。相關國際同儕審查意見、參採情形亦應提報 Euratom 及各會員國參考辦理。

Euratom 建立法規架構分為三個層級如圖 8：國家法律(Public General Acts)、法定文書(Statutory Instrument)(包括 Regulations 與 Orders 等)、及管制機關發布之導則(Guidances)，各會員國依此原則訂定管制法規、管制導則。

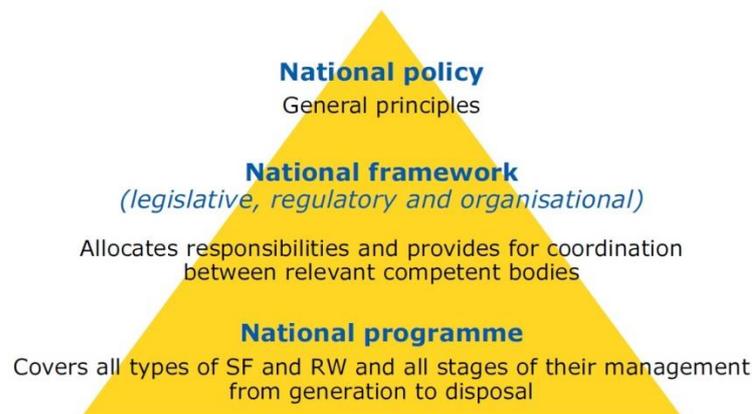


圖 8、歐盟放射性廢棄物管理架構示意圖

(4)英國核能安全管制架構

本次研習特別邀請英國核能安全主管機關 ONR 以及除役電廠主管機關 NDA 代表，分別講解英國核電廠營運及除役安全管制分工如下：

- 參照 1965 年發布之核子設施法(Nuclear Installations Act)，由健康暨安全行政署(Health and Safety Executive, HSE)負責掌管核子設施之運轉安全、放射性廢棄物處理貯存及運輸、核子保防以及緊急應變等事項。依據 2013 年能源法，2014 年 4 月正式成立核子法規辦公室(Office for Nuclear Regulation, ONR)為一獨立法定機關(independent statutory corporation)，負責管制英國境內 36 座核子設施之營運安全(如圖 9)，包括放射性廢棄物在核電廠內之營運以及處置設施。
- 圖 10 說明 ONR 組織架構係由五個部門所組成，包括保安(Security)、新反應器(New Reactors)、運轉設施(Operational Facilities)、電廠除役/用過核燃料/放射性廢棄物部門(Sellafield, Decommissioning, Fuel & Waste)以及技術部門(Technical Division)等。其中，電廠除役/用過核燃料/放射性廢棄物部門下設有四個科，分別是(1)核子設施除役、(2)土地品質管理、(3)放射性廢棄物管理以及(4)地質處置。例如 Sizewell B 核電廠用過核燃料室內乾貯設施之建造及營運管制，即由該部門負責審查核照。

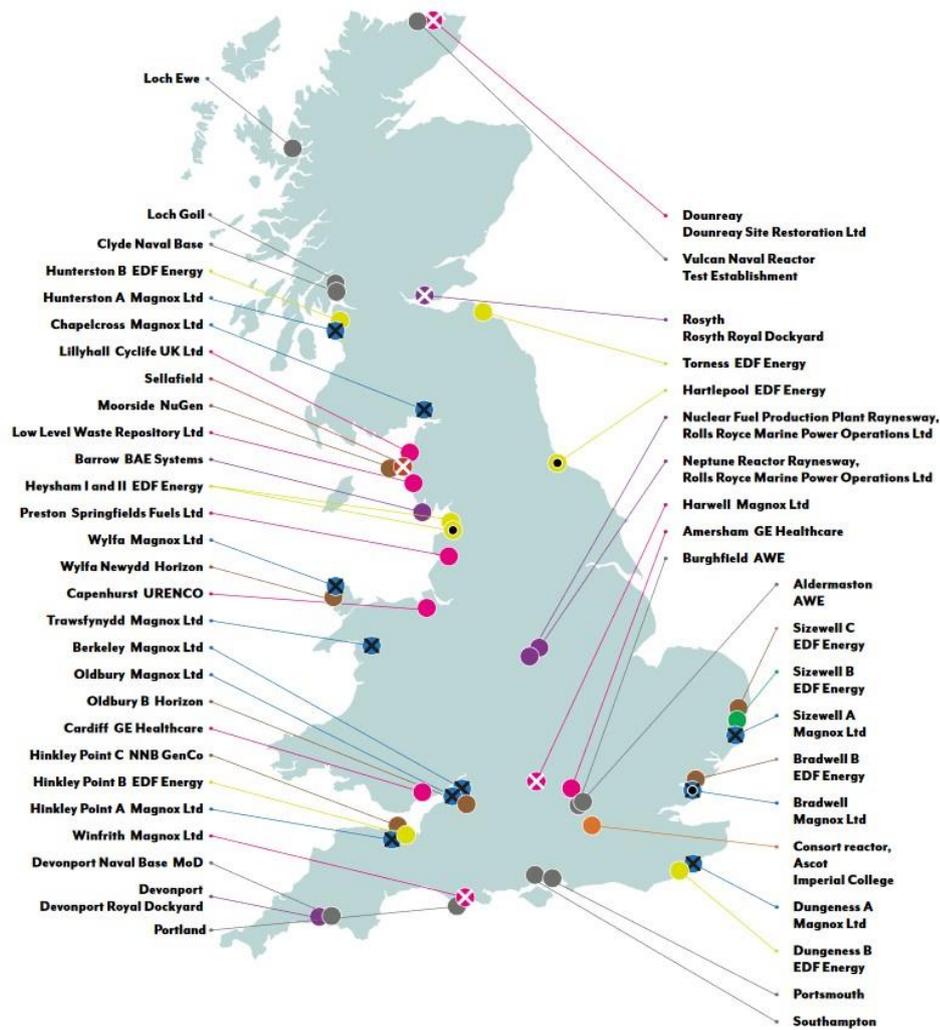
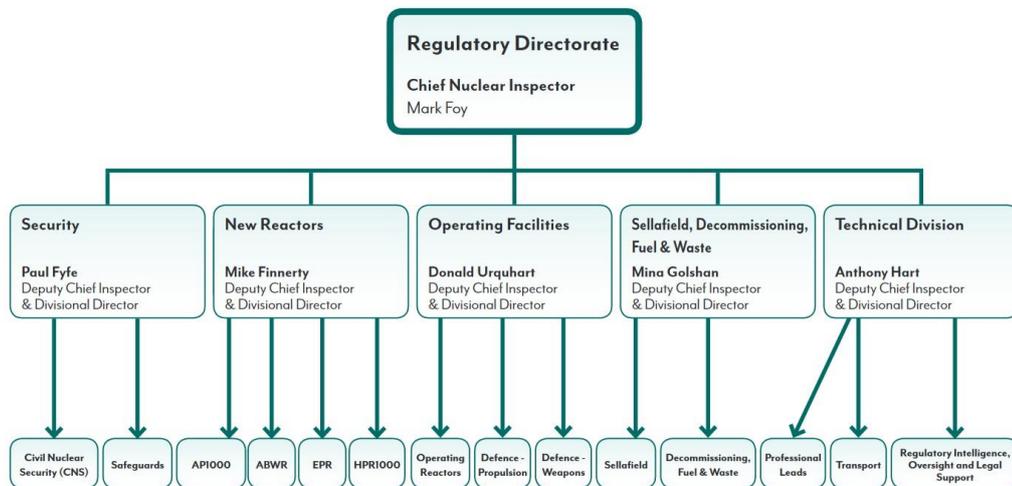


圖 9、英國 36 座核設施分布圖(June 2017 更新)

Regulatory Directorate Structure



January 2018

圖 10、英國核能安全主管機關 ONR 組織架構

- 根據 2004 年能源法，英國於 2005 年成立核能除役局(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)，屬於行政非部會公共組織(Executive non-departmental public body)，意指 NDA 為獨立於政府機關且具有行政執行力的法人組織。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 所交付之營運與除役任務，例如：透過場址執照公司(Site License Companies, SLCs)來執行 NDA 所交付之任務。目前共有 4 家場址執照公司：

- (1) Dounreay Site Restoration Ltd.,
- (2) Low Level Waste Repository Ltd.,
- (3) Magnox Ltd.,
- (4) Sellafield Ltd.

而 NDA 主要工作任務包含以下五項重點：

- 負責英國民用核能設施除役及除污
 - 確保除役電廠所有放射性廢棄物或非放射性廢棄物之安全管理
 - 執行政府對放射性廢棄物長期營運管理之政策
 - 發展英國低放射性廢棄物之管理策略及行動方案
 - 審議 EDF 能源公司之除役計畫
- 英國主要負責推動地質處置作業之專責機構為放射性廢棄物管理公司(Radioactive Waste Management, RWM Ltd.)，屬於 NDA 轉投資的全資子公司，屬非政府部門的公眾組織，向能源部與氣候變遷部(DECC)負責。在某些時候亦須對蘇格蘭部長負責。
 - 除 NDA 外，與放射性廢棄物安全管理有關的環境保護單位包含英格蘭和威爾斯環境署(Environment Agency, EA)與蘇格蘭環境保護署(Scottish Environment Protection Agency, SEPA)，以及北愛爾蘭環境部，主要負責監管放射性廢棄物的處理、貯存、運送及處置，以確保環境品質。
 - 此外，放射性廢棄物管理委員會(Committee on Radioactive Waste Management, CoRWM)，其職責主要是提供高放射性廢棄物長期管理之獨立諮詢和建議給政府與行政權力下放的蘇格蘭、威爾斯與北愛爾蘭部會首長，該委員會純屬諮詢

性非部會公共組織(Advisory non-departmental public body)，如圖 11 所示。

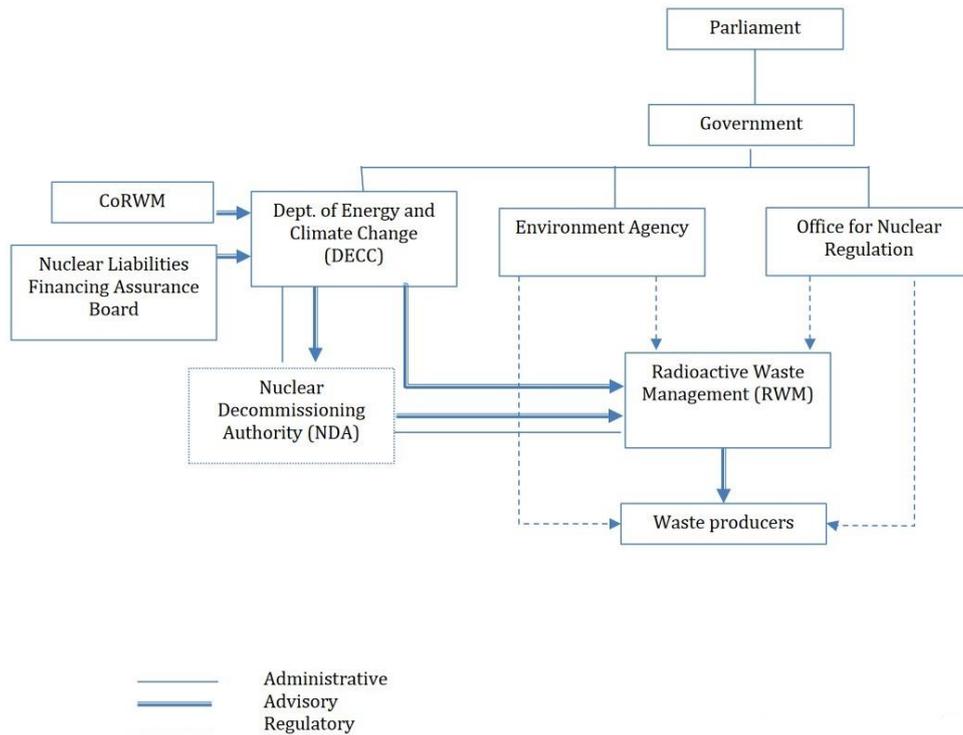


圖 11、英國放射性廢棄物安全管制機關架構

(5)核電廠除役策略選擇及優劣分析

國際原子能總署 IAEA 依反應爐拆除方式之不同，將核能電廠除役策略分成下列三種：

- 立即拆除(DECOR 或 Immediate Dismantling)：在電廠永久停止運轉之後，立即規劃準備，將廠內受到輻射污染的系統設備組件拆除和解體，移到廢棄物倉庫暫存或永久處置場貯存，並在核能電廠位址進行除污工作，讓原地復原後可以作其他用途。
- 延遲拆除(SAFSTOR 或 Deferred Dismantling)：採用先等候核能電廠內的輻射劑量衰減之後，再開始進行除役拆除工作。延遲拆除期間可分為短期（小於 15 年）、中期（15~40 年）及長期（大於 40 年）。
- 就地封存(Entombment, ENTOMB)：移出用過核燃料後，將所有殘留的高放射性及高污染設施密封在混凝土的屏蔽內，建立持續監測系統，直至廠區放射性減低，約時 100 年。

這三種策略雖各有不同程序及優缺點，但其共通點就是當反應器停止運轉後，均先將用過燃料池內所有用過核燃料移至乾式貯存設施；如果國家決定將用過核燃料再處理時，則直接運往再處理廠，這樣做的目的在優先解決可能發生的核安顧慮，大幅解除管制工作並降低運轉操作人力的需求。有關立即拆解與延遲拆解之優劣點如表 4 所示。

我國「核子反應器設施管制法」第二十一條規定：「除役應採取拆除之方式，並在主管機關規定之期限內完成。前項之拆除，以放射性污染之設備、結構及物質為範圍。」意指我國係採取「立即拆除」的作法。

表 4、立即拆除與延遲拆除之優劣點比較表

	立即拆除	延遲拆除
優點	具經驗之現場人力與運轉人力充沛 運轉知識遺失及記錄損壞風險低 沖淡該地區之經濟影響 場址再使用時間短 總除役成本最低 除役拆廠責任不會移轉至後代	因核種衰變，殘餘放射性減少 降低工作人員輻射傷害及放射性廢棄物減容 直接送最終處置機會增加 多機組核電廠可合併除役 除役資金或額外募集時間增加
缺點	工作人員害怕失去工作 拆除作業接受較高輻射暴露 拆除過程有較多限制條件 除役放射性廢棄物產量多 每年所需的現金流量較高	部分材料或廠房結構可能劣化 運轉知識會隨時間遺失 需要新的合格工作人員 後代將承擔拆廠責任 總除役成本增加

影響除役策略選擇的因素包括法令與法規要求、政府對放射性廢棄物與用過核燃料管理策略、廠址除役後再使用規劃、輻射防護因素、技術可行性與其他資源、利害關係者考量、除役成本與後端基金及知識管理等諸多因素。而在除役放射性廢棄物管理上，除健全管制法規之外，主要是放射性廢棄物分類及解除管制基準，由於除役衍生大量低污染物質/廢棄物，需有明確法規與解除

管制基準，對除役時間管理才是有效且必要的。

(6)除役衍生廢棄物解除管制基準

歐盟為因應未來許多核電廠即將面臨除役拆廠作業，產生大量衍生廢棄物的問題，各會員國均積極參照國際原子能總署 IAEA 相關規定，訂定核電廠除役廢棄物之清潔標準，以有效減量除役放射性廢棄物的產量，以及後續處理、貯存及最終處置之人力與成本。

依照國際經驗，除役產生的可外釋廢棄物數量約為全部產生廢棄物數量的 90 % 以上，故考量資源再利用，採取外釋處理，回收有用資源廢棄物，可有效減少低放射性廢棄物產出。國際原子能總署於 2004 年 8 月發布安全導則 **RS-G-1.7 "Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance"**，明確建議各放射性核種之標準，使各國在制訂標準時有所依循。該導則並採用各國共同認可之劑量限值標準，即指個人年有效劑量限值 10 微西弗，其輻射影響小於天然背景輻射之百分之一至可忽略程度，可視為不必理會的輻射劑量，而集體劑量低於每年 1 人西弗者，並不需要做更進一步的劑量評估分析工作。符合此標準之廢棄物，其所含之核種可免除所有輻射防護管制措施，其後續處理與使用均與非放射性物質相同。

同時，國際原子能總署訂定廠址釋出標準，除對關鍵群體個人有效劑量低於每年 10 微西弗的物質可解除管制，對關鍵群體個人有效劑量小於每年 300 微西弗的廠址可解除管制，無限制使用。

未來國內核一廠除役作業所擬訂之外釋計畫，將依據「放射性物料管理法」及「一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」規定辦理。其他還需遵循之法令規定，例如行政院環保署之「廢棄物清理法」、「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」以及經濟部之「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」及其相關規定。外釋計畫所適用之廢棄物，主要以金屬類為大宗，包括碳鋼、不鏽鋼、鑄鐵、銅及鋁等。其他還有磁磚、水泥塊、建築廢棄物、瀝青、保溫材(真珠岩、保溫棉)、活性炭、樹脂、廢乾燥劑、清潔廢棄物焚化灰渣及廢砂土、

礫石等。

經查核一廠放行作業計畫，這些材料被視為小型廢棄物;經過儀器嚴格偵測後，若其加馬輻射劑量率低於 0.2 微西弗(含環境背景輻射)、總加馬比活度低於每公斤 80 貝克或最低可測比活度小於每公斤 10 貝克，則可視為清潔廢棄物並予放行。然而，對於大型廢棄物如無法置入箱型活度偵檢器又不宜切割者，則依其污染狀況分為: (1)非固著性污染及(2)固著性污染。當非固著性污染其阿伐污染值每 100 平方公分低於 1 貝克、貝他/加馬污染每 100 平方公分低於 2 貝克，或固著性污染以手提式污染偵測儀檢測，其總污染每 100 平方公分低於 80 貝克者，均可視為清潔廢棄物進行放行。

(二) 參訪英國 Sizewell B 核電廠用過核燃料室內乾貯設施

7 月 16 日由 Sizewell B 核電廠公關經理 Danny Bailey 先生安排參訪行程並簡介該廠用過核燃料室內乾貯專案計畫，會中與乾貯專案計畫經理 Mr. Carl Greenwood 及 Mr. Colin Telkman, 貯存護箱供應商 Holtec 公司代表 Mr. Gareth R. Thomas 及 Dr. Haizhen Pan 就各項技術交流議題進行深入討論與交換意見，涵蓋英國乾貯計畫推動運作模式、鋼構廠房結構耐震、貯存護箱餘熱移除機制、廠房輻射屏蔽等安全設計、受損用過核燃料乾式貯存等，雙方進行交流與討論。圖 12 及圖 13 分別說明 Sizewell B 鋼構廠房室內貯存設施樣貌，以及參訪結束後與廠方代表合影。參訪心得提列如下：



圖 12、Sizewell B 室內乾貯設施外觀



圖 13、與廠方代表合影

(1)英國用過核燃料乾式貯存營運現況

英國對於用過核燃料之營運係根據能源政策白皮書 (Energy White Paper) ，用過核燃料採取再處理或其它方式乃取決於用過核燃料所有權持有者之商業判斷。如果可以進行再處理及可預見未來仍可繼續使用再處理後所回收的鈾與鈾，則英國政府接受不將用過核燃料視為廢棄物之分類。但是，如果再興建新的核子反應器，則需假設這些新反應器所產生之用過核燃料不再進行再處理。英國用過核燃料貯存管理系統如圖 14 所示。

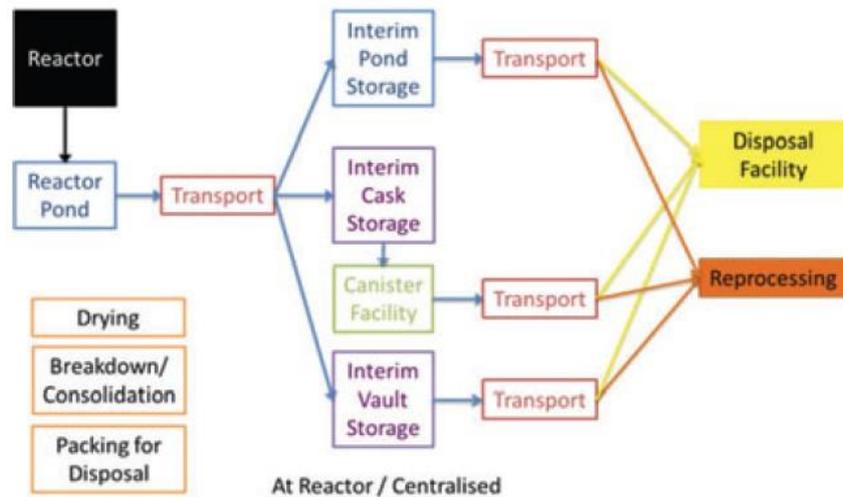


圖 14、英國用過核燃料貯存管理流程

英國除了進行其核能電廠所產生用過核燃料之再處理外，亦為其它國家進行用過核燃料再處理服務。在Sellafield廠區有兩座用過核燃料再處理廠，一座是用來再處理英國早期核子反應器所產生的Magnox燃料，稱為Magnox再處理廠；另一座稱為Thorp再處理廠(Thermal Oxide Reprocessing Plant)，乃用來再處理英國進步型氣冷式反應器(AGR)及其它國家所產生之用過核燃料。這兩座再處理廠原由英國核能公司(BNFL)營運，目前則轉移給核能除役局 (Nuclear Decommissioning Authority, NDA) 營運。據最新資訊顯示，Sellafield再處理廠將於2020年關閉，意謂未來用過核燃料均須進行乾式貯存，等待最終處置場完工啟用。

Thorp再處理廠已再處理2,300噸英國進步型氣冷式反應器所產生之用過核燃料，約佔其總產量8,800噸之26%。同時也已幫其它國家(包括日本)再處理700噸左右之輕水式反應器所產生之用過核燃料，及150噸英國早期先導型反

應器所產生之用過核燃料。

在乾式貯存部分，英國Wylfa電廠內興建兩座用過核燃料乾式貯存窖，如圖15所示。第一座是在1971年3月開始接收用過核燃料，至1981年已貯滿，總計貯存28,922束燃料元件。第二座是在1982年5月開始運轉。Sizewell B核電廠乾式貯存設施係英國首座輕水式用過核燃料乾式貯存設施，採用美國Holtec公司HI-STORM MIC混凝土貯存護箱，於2013年初開始興建，2015年10月完成試運轉後，於2016年8月完工啟用，目前已安全貯存7組混凝土護箱。



Wylfa 電廠用過核燃料貯存窖 Sizewell B 核電廠用過核燃料室內貯存設施

圖 15、英國用過核燃料乾式貯存設施

(2) Sizewell B 鋼構廠房乾貯設施營運概況

英國核能安全主管機關ONR於2014年依Sizewell B乾式貯存建築計劃評估報告(Project Assessment Reports, PARs)審查許可EDF能源公司興建Sizewell B核電廠內之乾式貯存設施。英國EDF能源公司於2016年8月正式啟用Sizewell B核能電廠的乾式貯存設施，預計可讓該核能電廠持續運轉至2035年。Sizewell B核能電廠位於薩福克郡(Suffolk)，供應全英國總電力需求的3%。Sizewell B核電廠規劃在廠址內興建乾式貯存之原因為：

- 英國政府已決定2020年終止用過核燃料之再處理。
- 增加Sizewell B核電廠內用過核燃料池之貯存容量，以確保可安全營運至2035年。
- 因為尚無深地層之放射性廢棄物最終處置場，且假定2080年最終處置設施完成。

A. 鋼構廠房結構設計

Sizewell B核電廠為英國境內首次採用Holtec公司乾式貯存技術的核能電廠，該貯存技術已廣泛應用於美國與歐洲。該廠用過核燃料乾式貯存設施建造計畫在2011年7月取得有條件許可，在達成相關條件要求後，2012年9月薩福克郡海岸區委員會規劃小組核准最終施工許可。設施貯存容量為143組混凝土貯存護箱，其廠房頂部與側邊係為鋼構設計，並以電鍍或烤漆鋼板包覆，且其內側並未襯砌隔熱材料。

根據英國核能管制單位ONR之計畫評估報告顯示，建造的廠房安全分析僅著重於混凝土貯存基座(concrete floor slab, 114公尺長 x 60公尺寬 x 0.75公尺厚)是否能夠支撐重達230公噸貯存護箱的安全分析，鋼構廠房僅提供氣候保護屏障功用並無核能安全相關之防護功能。Holtec公司代表Mr. Gareth R. Thomas補充說明鋼構廠房耐震基準採用Sizewell B核電廠安全停機基準地震0.14g，但貯存護箱HI-STORM MIC之耐震基準可達0.72g。

Sizewell B室內乾式貯存設施之鋼構廠房整地施工自2009年開始，2012年取得地方核發施工許可，2013年初開始興建廠房，2015年10月完成試運轉後，於2016年8月完工啟用，並於2017年3月完成第一組貯存護箱的貯存作業，截至目前共已完成7組貯存護箱。圖16說明Sizewell B室內乾貯設施建造與營運各階段實景。

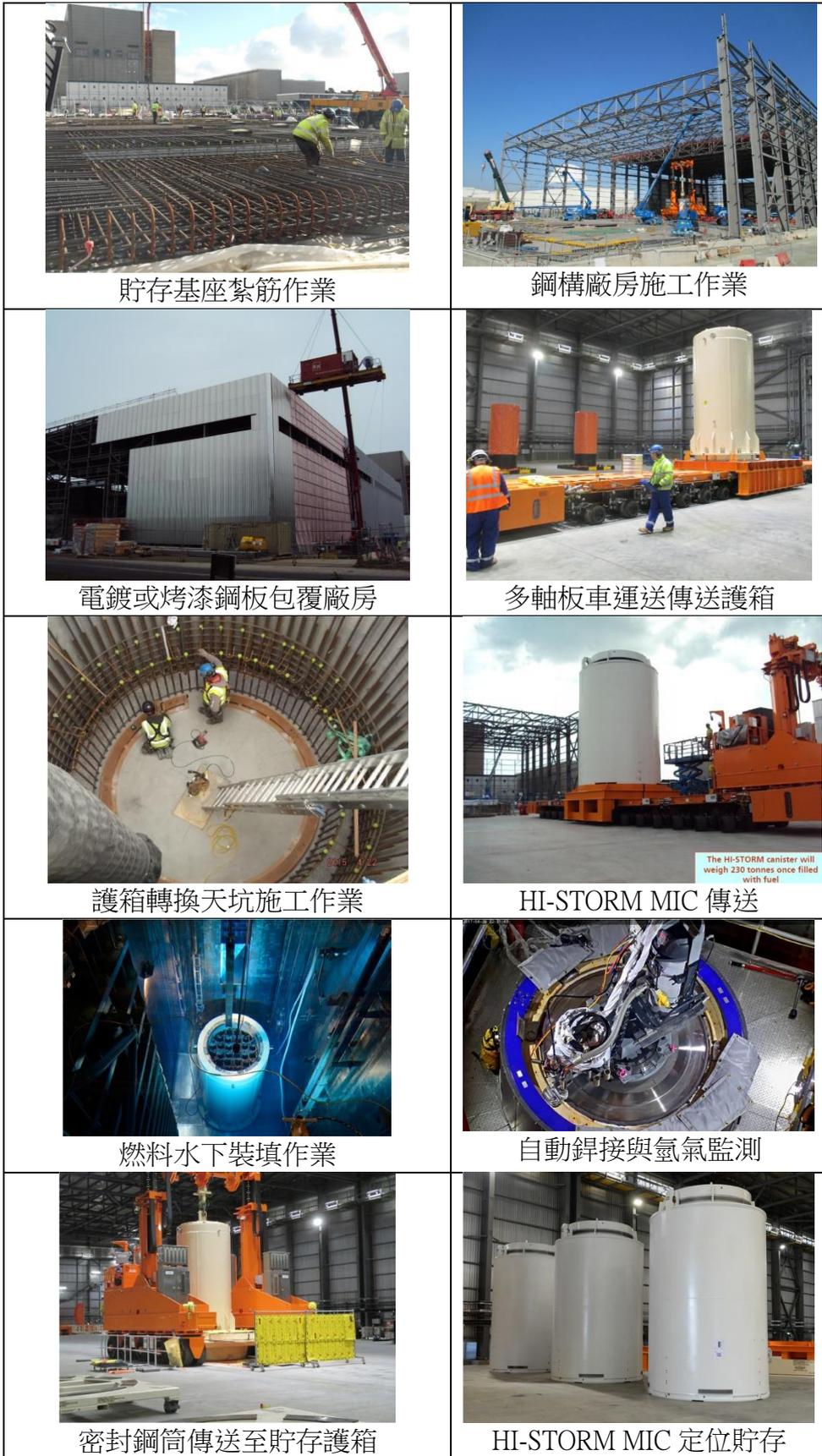


圖16、Sizewell B室內乾貯設施建造與營運

B. 廠房熱移除設計

專案經理Mr. Carl Greenwood說明Sizewell B核電廠採用鋼構廠房(Light weight metal building)搭配內置密封鋼筒(canister)之混凝土護箱(如圖15所示)乾貯系統來達成室內乾貯之設計目的。其輕量化結構有助於簡化地震或外力對廠房結構造成毀損時的處置作業，且簡易廠房藉由保留廠房外牆之底部與頂部通氣孔設計，可幫助貯存護箱藉由被動式散熱之自然對流機制，確保護箱重要組件與用過核子燃料有充足的熱移除能力。經過嚴密廠房熱移除能力計算結果顯示，不需安裝強制換氣設備。同時亦補充說明，假設143組貯存護箱全部貯存時，廠房頂部最高溫將達70°C、廠內地表面溫度約30~35°C。但電廠工作溫度限值為26°C，未來規劃將依工作種類及許可工作時間進行人員管制。

Mr. Carl Greenwood亦強調Sizewell B所使用之HI-STORM混凝土貯存護箱，足以預防長期貯存期間應力腐蝕劣化問題。此外，雖然該類型貯存護箱可安全使用於露天貯存設施，但是EDF能源公司決定興建專用廠房來容納護箱的主要因素，不僅採納地方民眾意見外，主要考量為了能讓Sizewell B核電廠持續安全運轉至2035年，且在深地層最終處置設施完工啟用前，能確保該設施可安全地容納用過核燃料，以進行更長期的貯存作業。

C. 受損用過核燃料乾式貯存

在受損燃料的判定上，英國則是唯一將燃料區分為損壞燃料(failed fuel)和受損燃料(damaged fuel)之國家，其中損壞燃料指的是護套龜裂或是頂蓋破損(end cap failure)其定義大略與美國ISG-1中燃料具有如針孔髮絲裂痕(pin hole)之狀態相當，但不影響其後續處理。而受損燃料則是燃料出現足以影響性能或是處理作業之安全之幾何形狀改變。整體而言，英國ONR與美國NRC之定義相當，皆是以前述之燃料束功能性來作為燃料束完整性之定義基準。

Mr. Carl Greenwood說明現階段完成7組貯存護箱之用過核燃料皆為完整性燃料。因為並未參考美國NRC建議執行真空啜吸試驗，僅以反應器運轉歷史紀錄挑選用過核燃料，為進一步確認所裝填之用過核燃料皆是完整性燃料，在

密封鋼筒抽真空回填氦氣階段，會額外監測氦-85及銫-137。未來電廠內所有受損用過核燃料將委託貯存護箱供應商Holtec公司處理，提供受損燃料罐(Damaged Fuel Can, DFC)裝載受損用過核燃料，並貯存在混凝土貯存護箱中，如圖17所示。

根據IAEA受損用過核燃料管理技術報告(Management of Damaged Spent Nuclear Fuel, IAEA, No. NF-T-3.6, 2009)，有關受損用過核燃料乾式貯存的處理方式有6種，分別為裝罐、更換或修復受損結構性燃料組件、增加結構性支撐組件、燃料棒更換、燃耗效應及改變貯存條件。其中，受損燃料罐(damaged fuel can)為最常使用，也是大眾最能接受處理受損燃料的方法。



HI-STORM受損燃料罐



Figure 2-9. Damaged Fuel Can Lid with Screened Openings
Photo courtesy of NAC International

受損燃料罐密封蓋

圖17、HI-STORM受損燃料罐設計

四、 建議事項

- (一) 綜觀國際放射性廢棄物管理發展趨勢，各國面對核電廠除役、用過核燃料貯存與最終處置、低放射性廢棄物最終處置或區域處置合作等議題時，紛採成立專責機構，方能有效徹底解決核廢料問題。為實現「廢核」及「核廢」政策，國內應參採國際經驗，積極推動設置放射性廢棄物專責機構。
- (二) 核電廠除役策略雖各有不同程序及優劣點，但共通點都是當反應器停機後，優先須將反應器及用過燃料池內用過核燃料移至乾式貯存設施，以降低可能發生的核安顧慮、大幅解除管制工作以及降低運轉操作人力的需求，以利除役拆廠作業之進行。台電公司應參採國際經驗，加速推動核一廠二期室內乾貯計畫，以如期如質完成除役作業。
- (三) 密封鋼筒在貯存期間發生應力腐蝕之疑慮，雖目前尚未有任何案例經證實，然而英國 Sizewell B 核電廠決定採用混凝土護箱貯存用過核燃料，並以室內貯存型式進行貯存，以提高民眾接受度並強化長期貯存安全。原能會已要求台電公司核一廠第二期乾貯設施，應採具社會共識之「室內貯存」型式，並於 115 年底完工啟用，以利除役拆廠作業進行。
- (四) 國內應持續掌握國際間在核電廠除役放射性廢棄物管理及用過核燃料乾式貯存之政策面及管制技術面之發展趨勢與方向，藉由國際發展經驗與問題解決對策，作為我國未來於除役放射性廢棄物安全管制及用過核燃料乾式貯存相關管制措施之經驗借鏡。
- (五) 藉由專題研習核電廠除役放射性廢棄物及用過核燃料安全管理課程，並參訪用過核燃料室內乾式貯存設施，從理論至實務應用層面的技術交流，可充分掌握國際脈動。本研習著重於歐盟各會員國管理實務經驗分享，有助於精進國內核電廠除役安全管制技術，建議在經費許可情形下，爭取機會派員參加，持續更新除役安全管制技術發展。