

出國報告（出國類別：實習）

赴比利時莫爾參加
「Decommissioning of nuclear
installations」
訓練課程

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：臧逸群 科長

派赴國家/地區：比利時莫爾

出國期間：112年12月01日至112年12月11日

報告日期：113年01月31日

摘要

本次出國主要目的是赴比利時莫爾參加核能研究專業機構 SCK · CEN 「核設施除役 (Decommissioning of nuclear installations)」訓練課程，該項訓練課程從 112 年 12 月 4 日至 8 日總共為期 5 天，配合我國核能電廠運轉執照屆期即除役之政策，透過本次參加歐洲除役訓練課程，對比利時核電廠進行除役管制的現況及拆除作業技術經驗加以瞭解，掌握核能電廠除役及拆除作業管制相關最新資訊，將有助於本會除役安全管理專業能力之精進，並可作為我國核能電廠除役安全管理的重要參考。

核設施除役相關的作業與在運轉期間所執行的作業有顯著的差異，除役作業參與的人員(包括管理階層、工程師、技術人員、保健物理人員、及管制單位等)要面對包括環境變化、眾多“一次性”操作、大量廢棄物產生、設施在原設計與最終狀態的差異等特定議題；而針對法規的要求以及有關許可的程序，都須要對拆除策略、安全評估、風險管理及環境影響評估等做好充分的準備，在必須建立除役項目時出現的許多問題，利益關係者的參與至關重要，也是本訓練課程的目標。

「核設施除役」訓練課程目標為學員提供除役專案管理的基本要求，並分享正在進行的拆除專案公司的經驗，本訓練課程規劃的主題涵蓋：法規和管制架構(Legal and regulatory framework)；除役策略(Strategies for decommissioning)；除役專案管理(Decommissioning project management)；安全面相及管理(Safety aspects and management)；放射性物料存量(Inventory)、設施和廠址特性(facility and site characterization)；案例研究(BR3、BN、Thetis)；拆除作業(Dismantling operations)；最佳化工具(Optimization tools)；物料管理和特性描述(Material management and characterization)；最終調查計畫和安全報告(Final survey plan and safety report)；除污技術(Decontamination techniques) 等項目，實際訓練課程內容為歐洲核設施除役背景、法律和管制面相、除役專案規劃、專案管理、除污、物料（包括廢棄物）存量管理和初始特性、物料管理、利害關係人互動、BR3 除役及 M2 熱室除役及翻新專案、除役及拆除過程輻射及工業安全主題、除役及拆除期間 ALARA(As Low As Reasonably Achievable)的實施、拆除作業、Thetis & Belgonucleaire 兩個案例研究、除役專案小組練習等科目。

本課程的學習目標主要在於了解歐洲除役作業的背景、反思推動除役工作的重要性以及了解需要在除役過程中培養能力。另針對比利時進入除役之機組 BR3，進行除役或拆解

的規劃及安全管制作業之相關案例研究，並探討構成拆除許可程序的安全評估項目。在過去這段時間歐盟及其會員國安全管理機關已累積了豐富的除役管制經驗；針對本次訓練課程所探討的不同面向，對我國後續除役作業管制之精進應能有所助益。

目 錄

| | 頁碼 |
|---------------|----|
| 壹、目的..... | 1 |
| 貳、出國行程..... | 2 |
| 參、過程紀要..... | 3 |
| 肆、心得與建議 | 26 |
| 伍、附件..... | 27 |

壹、目的

本次出國主要目的是參加比利時核能研究專業機構SCK·CEN「核設施除役(Decommissioning of nuclear installations)」訓練課程，配合我國核能電廠陸續進入除役之政策，透過本次參加國際除役訓練課程，對比利時核電廠進行除役管制的現況及拆除作業技術經驗加以瞭解，掌握核能電廠除役及拆除作業管制相關最新資訊，將有助於本會除役及拆除作業管制專業能力之精進，並可作為我國核能電廠除役安全管理的重要參考。

「核設施除役」訓練課程目標為學員提供除役專案管理的基本要求，並分享正在進行的拆除專案的經驗，因為核設施除役的相關作業與在運轉期間所執行的作業有明顯的差異，而除役作業參與的人員要面對包括環境變化、“一次性”操作、拆除廢棄物產生、除役設施之原設計與最終狀態的差異等特定議題；而針對相關法規的要求以及作業許可的申請程序，都須要對拆除策略、安全評估、工作排程、防護措施，風險管理及環境影響評估等做好充分的準備，在必須建立除役項目時需考量的諸多議題，以及利益關係者的參與程度，也是本訓練課程的目標。

本訓練課程規劃包括：法規和管制架構(Legal and regulatory framework)；除役策略(Strategies for decommissioning)；除役專案管理(Decommissioning project management)；安全面相及管理(Safety aspects and management)；放射性物料存量(Inventory)、設施和廠址特性(facility and site characterization)；案例研究(BR3、BN、Thetis)；拆除作業(Dismantling operations)；最佳化工具(Optimization tools)；物料管理和特性描述(Material management and characterization)；最終狀態調查計畫和安全報告(Final survey plan and safety report)；除污技術(Decontamination techniques)等項目(課程表如附件)。本報告將摘述說明公差過程及訓練之重點內容，並提出心得與建議。

貳、出國行程

此次國外公差行程自 112 年 12 月 01 日起至 112 年 12 月 11 日止，公務行程共計 11 天，相關行程如下表。

| 日期 | 行程 | 摘要 |
|-----------------------------------|------------------------|---|
| 112/12/01(五) ~ 112/12/02(六) | 台北—巴黎戴高樂機場— 比利時布魯塞爾 | 去程 |
| 112/12/03(日) | 比利時布魯塞爾— 比利時莫爾 | 路程 |
| 112/12/04(一) ~ 112/12/08(五) | 比利時莫爾 | SCK·CEN「核設施除役 (Decommissioning of nuclear installations)」訓練課程 |
| 12/9(六) | 比利時莫爾— 比利時布魯塞爾 | 路程 |
| 112/12/10(日) ~ 112/12/11(一) | 比利時布魯塞爾—巴黎戴 高樂機場—台北 | 返程 |

參、過程紀要

核能設施除役計畫包含與核設施停止運轉、拆除作業以及至包括廠址環境復原的解除管制等有關之所有技術與管理的面相，核設施除役相關的工作與在運轉期間所執行的作業有顯著的差異，除役作業參與的人員(包括管理階層、工程師、技術人員、保健物理人員、及管制單位等)要面對包括環境變化、眾多“一次性”操作、大量廢棄物產生、設施在原設計與最終狀態的差異等特定議題。

本次參加的「核設施除役」訓練課程為期5天，係由位在比利時莫爾的核能研究專業機構(SCK•CEN)辦理，SCK•CEN是比利時最大的研究中心之一，負責推動之工作項目包括核設施安全、輻射防護、放射性廢棄物的安全處理和處置、永續發展、教育和培訓。本次「核設施除役」課程規劃綱要包括：法規和管制架構；除役策略；除役專案管理；安全面相及管理；放射性物料存量、設施和廠址特性；案例研究；拆除作業；最佳化工具；物料管理和特性描述；最終狀態調查計畫和安全報告；除污技術等項目。實際訓練課程內容為歐洲核設施除役背景、法律和管制面相、除役專案規劃、專案管理、除污、物料（包括廢棄物）存量管理和初始特性、物料管理、利害關係人互動、BR3除役及M2熱室除役及翻新專案、除役及拆除過程輻射及工業安全主題、除役及拆除期間ALARA的實施、拆除作業、Thetis & Belgonucleaire兩個案例研究、除役專案小組練習等課程，訓練課程表如附件。

課堂的訓練課程在SCK•CEN旁的Lake House一樓之教室；僅有12月6日下午參訪(Belgium Reactor 3, BR3)後進入SCK•CEN研究中心。以下分別就5天訓練課程的重要內容摘要說明如下：

■ 12月4日(一)

本日上午課程首先由 SCK•CEN 的 Michèle Coeck 先生及 Sven Boden 先生分別針對「歡迎，參加者的介紹(Welcome, tour de table by the participants)」、「課程摘要(overview of the course programme)」主題，包括訓練機構 SCK•CEN 的工作內容、課程期間的注意事項以及對本訓練課程提出概要說明。兩位除介紹此一訓練課程希望提供學員了解除役過程

(包括安全、管制要求、業主與安全管制機關的互動、風險管理等)的複雜性以及多元性，並從工業及輻射兩觀點描述全面風險管理，以及可用的安全工具之實例，掌握除役專案之規劃及除役作業管理的全貌。並為學員提供除役專案管理的基本要求，並分享正在進行的拆除專案運營商的作業經驗。

接著由 Pierre Kockerols 博士及 ENGIE 電力公司 Chantal Mommaert 專家依序提出「歐洲核設施除役背景(Nuclear decommissioning in a European context)」、「法律和管制面相(Legal and regulatory aspects)」課程。

「歐洲核設施除役的背景」課程強調「核設施除役」訓練課程的學習目標為了解歐洲除役作業的背景，考量推動除役工作的重要性，明瞭在除役過程中需要培養之能力。同時並介紹需要在核設施除役方面取得進步的動力包括：(1)尊重道德和社會原則；(2)安全及環保的最佳化；(3)符合國際法規和協議；(4)經濟效益；(5)社會信心。並說明作為核設施生命週期最後一個步驟，大規模的除役作業示範，對於民眾建立核能工作的信賴度至關重要。

在「法律和管制面相」課程中，介紹核設施生命週期的六個主要階段：「選址」、「設計」、「施工」、「測試」、「營運」和「除役」。「除役」一詞是指為移除設施的部分或全部管制而採取的行政和技術措施，包括關閉設施、拆除作業、建築物/場地清理後解除管制。除役的各個面向都必須在其他五個主要階段中考慮，而拆除是指為除役目的而對設施的結構、系統和組件進行拆解的技術行為。

課程說明歐洲國家除役三個不同的選項，為立即拆除(DECOM)、長期安全封存(SAFSTOR)及固封(ENTOMB)。並提及歐洲核設施除役國際原子能總署一般安全要求(IAEA GSR Part 6)，包括最佳化防護和安全、分級分類方式、安全評估、政府與管制機構及經營者的責任、綜合管理系統、除役策略的選擇、財務資金、最終除役計畫、導入行動、緊急應變、放射性廢棄物管理等。

依國際原子能總署 IAEA GSR Part 6 要求，持照人應依照國家規定實施最終除役計畫，並應對除役中的所有廢棄物流進行放射性廢棄物管理。而國際原子能總署 IAEA GSR Part 1 定義放射性廢棄物的分類取決於它的來源、其半衰期、輻射強度，最後是其處置途徑，

而處置途徑與國家貯存庫策略和可用性息息相關。而人造放射性核種之豁免(Exemption)及放行(Clearance)的許可申請，乃是依 IAEA 安全導則 RS-G-1.7 執行。

國際原子能總署 IAEA GSR Part 3 輻射源的輻射防護與安全規定之一般標準所述：(1) 已放行物料產生的輻射風險是可接受的，並且發生導致無法滿足此標準的情況的可能性不明顯。(2)對物料的持續管制不會產生任何淨效益，因為任何合理的措施都無法在減少個人劑量或健康風險方面取得有價值的回報。

除役成本的估算，主要與機組形式、廠址狀況(機組數目)、國家及國際要求(安全與廢棄物路徑)、計畫期長等有關。

國際原子能總署 IAEA GSR Part 6 設施除役，規定完成除役行動並終止除役授權方式，完成除役行動後，持照人應證明最終除役計畫中規定的最終狀態標準和所有管制要求均已符合。管制機構應查核其符合最終狀態標準後，核准終止除役許可。另依西歐核能安全管制機關協會(Western European Nuclear Regulators Association, WENRA)安全參考基準(safety reference level ,SRL) DE-58 敘述，持照人於除役結束時需提交最終除役報告，以證明除役已完成並且已達到設施或廠址的最終狀態。WENRA SRL DE-60 亦敘明在設施或場所解除管制之前，持照人應進行最終調查，並證明已達到管制機構批准的最終狀態。

最後介紹「法律和管制面相」課程的結論為：(1)除役是核設施生命週期的一部分，應根據國際安全標準以安全的方式執行；(2)首選除役策略是立即拆除；(3)核設施從運轉到除役的過渡應以安全的方式進行，重點是減少放射性危害，並且為拆除作業做好準備；(4)除役計畫是除役成功的基石計畫，內容應包括符合國家法規的放射性廢棄物管理；(5)除役工作完成時，核設施達到預期的最終狀態，並透過最終調查報告向管制機構提報；(6)如果核設施無法達到最終狀態，則需要製定清理計畫，並且可以選擇限制性使用或申請新的許可證。

本日下午課程首先由斯洛伐克核能與除役公司 JAVYS 的 Tibor Kukan 先生針對「除役專案的規劃(Planning of a decommissioning project)」主題提出說明，探討除役三個不同的選項，即立即拆除(DECOM)、固封(ENTOMB)及長期安全封存(SAFSTOR)等問題。

立即拆除可分為專業團隊(即為持照人)與合約商來執行兩選項，其中專業團隊具有除役最新的所需相關知識，具備相關操作安裝人員；合約商除了必須具除役許可證，工作人員必須進行相關訓練，而且有除役作業產生的輻射劑量率仍然較高等問題。固封可由專業團隊與合約商來執行，其中專業團隊不須建造新建築物來儲存廢棄物，當然也不能開發新場所。而合約商可能經驗不多或沒有經驗，導致存放地點缺乏彈性。延後除役亦可由專業團隊與合約商來執行，專業團隊有更多時間等輻射衰變，準備拆除及建造儲存設施，是利於未來的除役作業；合約商會因時間因素造成該核設施知識流失，另在延長期間該核設施仍然屬於 1 級設施，相關安全措施必須持續維持。

課程並以比利時核能電廠 BR3 為例來介紹除役，BR3 是西屋單一迴路(一台蒸汽產生器，兩台主泵)的壓水式反應器輸出電功率為 10.5 MW(熱功率 40.9 MW)，此研究用反應器是歐洲第一個併網發電的壓水式反應器，其在 1962 年至 1987 年共 25 年間運轉發電，除提供為後續核電廠反應器運轉員的訓練中心，同時作為壓水式反應器進步型燃料的試驗台，BR3 在 1987 年永久停機。比利時自 1987 年即開始研究發展並針對 D&D 技術、效能及成本等項執行小型先導計畫，並在 1989 年由歐盟選定 SCK · CEN 的 BR3 作為先導拆除計畫，1994 年 BR3 開始進行拆除作業，預計 2028 完成除役工作。

目前 BR3 的情況為所有設備(管道、泵浦、反應器等)均已拆除(主汽機位於訓練機構外)，部分的建築物也已除污完成並經過測量無污染，仍必須進行一些混擬土的除污和活度測量。在 BR3 拆除過程得到經驗為：(1)工作空間所使用的標準切割技術機械類是最常用的；(2)新設備/工具/方法可以因為廢棄物成本的增加而變得更有價值；(3)物料需要分類及整理；(4)許多物料可以被放行或外釋(回收、無條件和有條件釋放)；(5)必須考慮管制機構、利害關係人和周邊社區的民眾。

在斯洛伐克 Bohunice 核能電廠延後除役案例的經驗回饋為：(1)儘早與管制機構互動以獲得批准；(2)考慮所有相關利害關係人的要求；(3)首次訂定計畫時考慮納入專家諮詢；(4)讓合格的工作人員熟悉核設施；(5)考慮拆除工作的介面；(6)借鏡國際經驗考慮最佳的可用技術。

最後一堂由 SCK•CEN 的 Robby Nijs 先生對「安全面相管理(Safety Aspects Management)」課程說明，介紹內容關於安全與除役、除役專案的主要特點、危害、拆解作業、安全管理、輻射防護、最佳化原理、SCK•CEN 之 ALARA、SCK • CEN 拆除作業等。

一般工業的危害包括火災爆炸、設施拆除、火災負載、焊接和切割、機械的重載、索具和吊掛、重型設備和電動工具、車輛動向、墜落防護、化學、石棉、溶劑、重金屬、電力、生物、通風系統中的藥劑、昆蟲、動物、人體工學、熱、冷、濕、滑、能見度有限，照明、密閉空間、建築垃圾、拆除碎片等。核能相關風險的危害包括輻射照射(加馬、貝他、中子)、外部/內部輻射污染、除污作業等。

拆解作業所需考量問題包括：在具有潛在高輻射場的區域、打開環路和管道造成內部污染、意外情況、將放射性風險從一項操作轉移到另一項操作、主迴路淨化、模型的使用、除污可能有劑量成本、特別劑量測定、拆除造成廢棄物的產生，廢棄物管理議題、團隊的多樣性，例如來自同一家公司的不同團隊，以及來自不同公司和/或不同國家的不同團隊，具有不同的安全文化等。

安全管理原則介紹所有傷害和事故都是可以預防的，而健全的安全管理計畫包括安全要求、績效標準、實施程序等，而人員訓練應涵蓋安全程序以及與工作相關的內容。執行層面應定期檢視績效以確保持續改善，雖對錯誤採取寬容的政策，但對紀律疏忽則須採取快速糾正缺陷，管理層需要對健康和 safety 之高標準承諾。

課程介紹輻射防護計畫，包含實現輻射防護和安全目標的計畫、方法和時間表，其目的是保護工作人員、公眾和環境免受游離輻射造成的危險。遵守 BSS(*IAEA GSR Part 3，2011 年，簡稱“IAEA BSS”)、國際、歐洲指南以及有關該主題的國家法規。輻射防護計畫是發展安全文化的關鍵因素，計畫主要包括區域劃分(控制、監督)、當地法規和執行情序、個人保護設備、工作場所監控、職業曝露評估、劑量紀錄、作業人員健康監測計畫、以及資訊、指導、培訓等內容。

SCK•CEN 之 ALARA 的介紹，先說明 ALARA 為儘可能合理可行抑低劑量，SCK•CEN 進一步為 ASARA(As Safe As Reasonably Achievable)是儘可能達到安全之意。考量輻射防

護的三個基本原則為(1)正當化；(2)限制值（考量確定性效應 - 法律限制）；(3)最佳化（考量機率性效應 - 使用“局部”限制方式）。SCK•CEN 之 ALARA 的計畫須考量合理性，規劃採取的行動含括(1)問題的規模；(2)操作類型（檢查、維護、停用、安裝、停電…）；(3)工作時間；(4)涉及人數；(5)工作地點；(6)動作頻率；(7)動作順序；(8)考量涉及哪些輻射風險；(9)考量涉及哪些行業風險等。

SCK•CEN 拆除作業要考量對 ALARA 產生的影響，問題包括(1)不斷變化的現場環境；(2)基礎設施正拆除時，結構可以充當屏蔽；(3)現場移動便利性差，易發生跌倒、絆倒；(4)暫時存放切割物件將產生一個具有更高輻射或污染風險的位置；(5)核電廠和其他核子設施的設計目的不是為了拆除；(6)以真正準確的進行劑量率測量具困難度，故需使用估計方式，並要考慮偏差；(7)電廠的某些部分沒有進行輻射特性調查，導致不了解該部分輻射或污染；(8)建築物的品質計畫沒有好的存檔等。

考量除役期間的健康與安全，整體而言，在整個拆除過程中，放射性危害逐步減少，但工業危害增加，而情況可能每天都在變化，必須採取方法來強化作業人員的安全意識。健康和安全是必須的要求，每個人都必須對自己和同事的安全負責。

課程經驗回饋包括(1)需要一個正式的事件通報系統；(2)損失控制的概念是從事故前兆中學習並預防嚴重事故和事件的發生；(3)為了提高效率，事件通報系統需要制定「容錯」管理政策；(4)必須鼓勵員工報告輕微事件，並確信管理階層會通報這些事件。

■ 12月5日 (二)

本日上午課程首先由斯洛伐克核能與除役公司 JAVYS 的 Tibor Kukan 先生介紹「專案管理(Project management)」課程，說明關於 SCK•CEN 除役團隊組織架構、除役專案管理、比利時的管制架構、除役期間的安全、SCK•CEN 其他領域應用的專業知識等。

除役專案管理包括選擇除役策略、資金與財務配合、除役計畫章節規劃、除役各階段的準備行動、人員管理等要項，若規劃除役方式不是立即拆除，則必須說明理由。

BR3 除役屬於立即拆除方式，自 1987 年永久停止運轉，1989 年被選為歐洲四個試驗

計畫之一，BR3 是比利時第一座除役的反應器和發電廠，比利時政府將該項目視為技術和管制流程的試驗站。而比利時核電除役的管制架構，FANC(Federal Agency for Nuclear Control)是比利時 1994 年成立的聯邦核能管制機構，2001 年起依皇家法令運作；Bel V 係 FANC 的附屬機構，2001 年立法授權委託技術支援 FANC 任務，正式成立在 2008 年，FANC 及 Bel V 即比利時的核能管制單位，主要負責核安、輻安及保安。NIRAS/ONDRAF 成立在 1980 年，1981 年起依皇家法令運作，即比利時的廢棄物管理機關，主要負責廢棄物管理、財務及技術可行性。依比利時管制機構的管制經驗，BR3 在除役的法律架構管制下逐步進行除役拆除作業。

在除役安全專案管理面相，經整理除役期間有下列的挑戰(1)改變拆除-安裝新基礎設施；(2)環境改變（如設施、經濟壓力等等）基礎設施，各分包商之間的潛在干擾，核設施拆解設備，切割件和物料的暫時儲存；(3)作業路徑便利性差，如不考慮拆解、疏散路線/操作員進入/物料移除；(4)工作者（多元、能力、語言等）；(5)發生事件或事故時應採取的方法（例如緊急路線）。

課程結論為 BR3 除役方面累積了豐富的經驗：(1)除役準備作業應備齊拆除計畫、成本估算、廢棄物處理規劃；(2)最佳化、物料管理、ALARA 和安全研究技術支援、多種切割、淨化和特性技術方面的經驗；(3)安全評估和輻射劑量管理的相關經驗；(4)教育與訓練的重要經驗；(5)與所有利害關係人/管制者的溝通；(6)在不斷變化的環境中，除役所有階段均仍應關注安全文化。

第 2 堂由 SCK•CEN 的 Kurt Van den Dungen 先生介紹「除污(Decontamination)」課程，說明除污的概念、除污相關的不同面向、常見除污技術分類、比較不同除污技術、分析實際除污案例研究策略等。

以壓水式反應器除役為例，當機組發電營運（40-50 年）結束，在反應器永久停機後，約等待 3 年的安全冷卻期，再花 2 年將燃料裝載到乾貯容器中，共計有約 5 年的過渡期間，再開始執行約 10 年期間之拆除作業，在確認核設施達到預期的最終狀態，花 2 年時間透過最終調查報告向管制機構提報，於核准後解除管制。

除役作業之放射性污染源分為(1)污染與曝露，源自放射性物質在表面或內部沉積或意外而存在的固體、液體、氣體；(2)中子活化產物，源自中子輻射造成物料中的放射性。以上對除污作業之方式的選擇和除污效率均有影響。

污染源除污的定義是去除或減少各種物料、表面和環境中的放射性污染物，從目前的位置，移轉到可以控制、儲存或處置的地方，除污工作亦為核能安全、除役和廢棄物管理的關鍵作業。除污方法包括傳統的、化學/電化學、機械的、融化等除污方式。污染源需要除污的原因為(1)防止污染擴散；(2)降低設施內/周圍的輻射劑量水平，強化職業安全；(3)減少作業人員的劑量水平吸收；(4)減少放射性廢棄物的數量和成本；(5)減少放射性廢棄物類別；(6)物料清潔與外釋，導入回收、再利用。

課程並說明化學除污方法，將凝膠/泡沫/糊劑使用於大體積/複雜組件除污作業，如池壁、閥門、熱交換器、熱室等位置以相片舉例解說。另化學除污透過溶液循環執行，具有處理難以到達的表面、可以「遠距離」除污、具高除污係數、封閉迴路故無空氣污染等優點，但亦因作業複雜性、系統需修改、需處理安全問題（密封性、健康與安全、訓練等）之挑戰，而且有二次廢棄物問題，更應詳細評估。

後續亦針對機械除污說明，機械除污一般適用於：建築基礎設施除污、除污外表面（牆壁、物料外部）、除污內表面（鬆散組件）、拆除中的裝置、固定污染、易受污染的材料（例如金屬和混凝土），並透過 CO₂ 乾冰顆粒噴砂之機械除污的實例進行優劣分析。

最後說明金屬融化除污技術的優點，具除污效果、同質化效應、複雜結構融化後可以輕鬆測量、體積縮小等，當然也介紹如運輸問題、二次廢棄物、大眾接受度、核物料融化設施的能力之相關挑戰。

在課程中講師提供 BR3 一次側管路、BR3 蒸汽產生器、氬實驗室除役等實際案例執行除污作業相片，來協助學員了解執行除污之現場實際狀況。

除污課程結論為：(1)除役策略和規劃受到廢棄物管理和物料放行或外釋路線的影響；(2)基於完整的成本效益分析，除污成為不同階段除役策略的規劃內容；(3)除污會導致放射性物料轉移，因此輻射安全和二次廢棄物是關鍵；(4)除污工作量由應用的間隙決定；(5)除

污的方法要遵循法規；(6)除污的應用涵蓋範圍廣泛；(7)核除污一般採用成熟技術，未來發展主要集中在自動化領域。

第3堂由 SCK•CEN 的 Sven Boden 先生介紹「物料（包括廢棄物）存量管理和初始特性(Material (including waste) management Inventory & initial characterization)」課程，包括實體物料存量、放射性物料清單及輻射特性方法。

核設施自運轉階段進入除役，關於初始輻射特性調查重要的原因：(1)核設施開發過程中缺乏資料收集、品質計畫、歸檔，設施開發期間的資料收集可能與除役及拆除期間所需的資料收集不同（例如事件報告），核設施已經過設計修改或設施設計資料遺失；(2)因新的廢棄物、驗收等問題導致作業範圍的擴展，放射性物料體積或質量大幅增加；(3)放射性物料數量大幅增加，一段時間內其組成成分可能會發生變化；(4)輔助設施導致輻射屏蔽或不準確的採樣或測量，或不是為了拆除和移除而設計的設施和建築物造成影響。

物料盤點的第1部分來源是歷史紀錄，包括物理/化學物料存量、竣工圖、修改、物料存量、質量、表面積、危險物料（如石棉、PCB等）裝置、基礎設施等。第2部分來源是經營許可證和紀錄、洩漏或事故、經營者訪談或之前的調查結果等。

核設施藉由初始輻射特性調查，可以量化設施的輻射狀態、輻射的性質和範圍，以及潛在問題領域，以便做出以下決定：(1)於拆除程序中規劃手動、半遠端或完全遠端工作和所需工具、屏蔽；(2)安全評估和 ALARA 規劃，例如作業人員、公眾和環境的放射防護；(3)量化物料存量並將其與放射性狀態結合：廢棄物分類：拆除過程中和拆除後的廢棄物管理和運輸（回收、再利用、臨時儲存、最終處置）；(4)除污過程以對某些廢棄物進行分類；(5)以廢棄物為主導的方法來制定策略，從廢棄物和物料最終狀態來進行分析。

輻射特性調查方法和數據收集，如果可能混合使用多種方法，主要以方便使用、技術上可行、適合目的為優先考量。包括非破壞性檢測(NDT)及破壞性分析(DA)，找到資料收集和處理方法的最佳組合來計算和建立模型。而對於不確定性來源之活度計算，需要考量近似建模、幾何簡化、中子源不確定性、軸向和徑向分佈的不確定性、物質成分(含微量元素)、遠距離活度-串流效果等因素。而物料存量和除役前輻射特性調查開始方式，適當輸

人完善的設施除役前輻射特性清單，有助於除役其他階段有效率且有效執行。

除役和拆除的主要目標是優化成本、減少劑量和放射性廢棄物，但需要考慮的是進行測量可能造成測量人員輻射劑量增加。

第 4 堂由 SCK•CEN 的 Robbe Geysmans 及 Tanja Perko 先生介紹「與利害關係人互動 (Interaction with stakeholders)」課程，課程一開始說明為何與利害關係人互動，因為如果利害關係人的互動和參與納入除役早期規劃的一部分，往往能更有效率的執行除役計畫。因為它增加了對決策過程的信任，亦可能會強化對決策的支持。

課程提出有 40 年運轉歷史的核反應器除役為案例，首先定義潛在互動主題，包括提高當地居民對除役過程的認識、了解民眾對除役風險的看法、定義該廠址未來的潛在用途、決定為子孫後代保存哪些紀錄、知識或文物、決定重型機械和物料的運輸路線，以及為核電廠員工提供新的就業機會等。其次，要確定利害關係人，定義利害關係人群體，利害關係人應相當等於在除役過程中感興趣或發揮作用的任何參與者，包含機構、團體或個人。過程中要思考的關鍵問題為：誰可能會受到影響？誰可能影響該過程？（例如促進、反對、影響他人等）。針對定義廠址未來的潛在用途之主題，需要考慮將哪些利害關係人群體與本項主題連結起來。

為使利害關係人群體更加具體，要考量項目為(1)在特定的背景下，群體有什麼特徵；(2)一個群體不一定是同質的；(3)誰代表這些群體；(4)目前與利害關係人之間有哪些關係；(5)法定利害關係人與非法定利害關係人的區別；(6)可能需要透過其他利害關係人識別利害關係人。

課程介紹利害關係人參與形式，包含(1)選擇參與度；(2)告知或教育；(3)收集資訊；(4)討論；(5)參與；(6)夥伴等，選擇互動方式含括溝通、傾聽、諮詢、引導、合作等。

課程結論為(1)與利害關係人互動可提高除役過程的有效性；(2)需要利害關係人範圍界定、完成利害關係人的識別；(3)需要與利害關係人互動；(4)選擇參與程度和技術、互動意見後續處理；(5)利害關係人互動是一個複雜的過程，需要充分的思考、準備和參與。

■ 12月6日(三)

本日第1堂由 SCK•CEN 的 Sven Boden 先生介紹「物料(包括廢棄物)管理 (Material (including waste) management)」課程1, 包括除役和拆除期間的輻射特性和最終確認與接受。

放射性廢棄物的類型分為(1)新廢棄物: 為可追溯的特性程序生成, 歷史已知且特性穩健, 過程知識充分保存, 亦可能是不久前生成的; (2)歷史廢棄物: 在沒有完整的可追溯特性程序或品質管理系統的情況下生成, 亦可能是在今天生成。

廢棄物驗收標準乃廢棄物包裝在運輸、暫時儲存和最終處置方面, 必須滿足的要求, 乃是滿足以下要求: (1)過程或設施的條件限制; (2)過程之條件參數控制; (3)各階段的工作人員安全; (4) 法律要求; (5)運輸限制; (6)臨時儲存要求; (7)綜合績效評估; (8)處置設施績效評估; (9)整體品質保證要求。

課程介紹比利時 Dessel -cAt 工程的表面處置 A 類廢棄物案例, 2006 年比利時聯邦政府委託 NIRAS/ONDRAF 實施 CAAt 項目, 比利時低放射性和中放射性短壽命廢棄物(簡稱: A 類廢棄物)的處置, 直到 2012 年進入設計階段, 2013 年起實現儲存庫建置及所有相關子專案。在比利時深層地質處置 B 類及 C 類廢棄物研究中, 穩定地質層深度處置被視為放射性廢棄物長期管理的適當解決方案。

提及比利時法律框架, 其中主要利害關係人是比利時的聯邦核能管制機構 FANC(Federal Agency for Nuclear Control), 主要負責核安、輻安及保安, 以及廢棄物管理機關 NIRAS/ONDRAF, 主要負責廢棄物管理、財務及技術可行性。FANC 自 2001 年 7 月 20 日起運作, 一般任務涉及(1)游離輻射防護許可證; (2)放射性物質的運輸許可; (3)核設施(從運轉測試到除役); (4)放射性氣體的外釋和廢水的排出許可; (5)來自核設施的物料的解除管制管制; (6)非核設施的控制(自然產生的放射性物質的處理); (7)管制持照人或承攬商的作業。

Bel V 是 FANC 的下屬單位, 權責為(1)負責比利時主要核設施的管制和安全評估; (2)自 2008 年 4 月 14 日起, 接管了原由授權檢查組織 AVN 負責的核設施管制工作;

(3)FANC 藉由 Bel V 的技術專長對比利時的核電廠和其他核設施進行檢查。廢棄物管理機關 NIRAS/ONDRAF 自 2002 年 11 月 18 日起，對 RA 類廢棄物儲存、處理的基礎設施進行認證，包括對廢棄物特性方法包括技術資料、審計、評估方法等進行審查。

最終量測的策略來自「放射性物料存量和除役前輻射特性」有三項重點：(1)核種和比例因子的計算，對於除役輻射特性調查至關重要；(2)輻射特性調查另一個重要步驟仍然是“歷史調查”；(3)如果可能的話，將多種方法混合使用，技術可行且適合達成目的。

最終驗收量測關於設計參數的影響考量，包括可能的放射性成分、可能的放射性強度、放射性分佈類型（表面污染、活化、均勻/非均勻分佈等）、材料類型（高/低密度、屏蔽等）、材料的尺寸和幾何形狀等。

課程結論為：(1)放射性廢棄物最小化原則；(2)考量成本效益及可用空間；(3)減少 RA 類廢棄物，包括開發高效率、有效的除污方法；開發高效且有效的測量方法並證明符合法規；考慮到驗收之前的整個過程；(4)除污和測量方法應根據計畫的規模進行調整。

第 2 堂由 SCK•CEN 的 Isi Verwaest 先生介紹「物料（包括廢棄物）管理 (Material (including waste) management)」課程 2，包括物料流的可追溯性與最佳化。

放射性物料外釋方式包括：(1)清潔放行(Clearance)：分為無條件許可（ARBIS 第 35 條）及有條件許可（ARBIS 第 18 條）；(2)熔化：分為熔化後放行或外釋，如瑞典 Cyclife/德國 Siempelkamp 或核工業的再利用，如美國 Energy Solutions。

放射性物料分為兩種，(1)主要物料：開始拆除時核電廠內的所有物料。必須區分管制區內的物料和管制區外的物料。(2)輔助物料：所有物料在拆除開始後，加到核電廠並用於拆除主要物料。而放射性物料管理的出發點是來自拆解的物料，為了能夠確定拆除過程中不同物料的放行或外釋路線，物料管理團隊、拆除團隊和物理控制團隊之間的密切互動是必不可少的。在 BR3 除役過程，物料管理團隊參與作業的審查流程。有時拆除團隊和物料管理團隊的活動會重疊，特別是拆除後的物料切割作業。

課程中說明除役物料外釋申請方式：(1)除役物料發送外釋申請後，外釋申請中的所有批次都進入已要求外釋；(2)經工作場所預防及保護之內部控制單位(Internal Service for

Prevention and Protection at Work , ISPPW)批准後，外釋申請中的所有批次，將顯示為已外釋狀態；(3)如果嚴格遵循此流程，則每年 3 月 1 日之前交付 FANC 要求的外釋物料的一覽表即可。

另熔化物料批次解除管制方式為，所有測量儀器都必須符合驗收標準，需要向 FANC 申請外釋許可證，待收到外釋許可證後，熔化物料運輸商可以與熔化設備一起合併運輸。

第 3 堂課程由 SCK•CEN 的 Luc Denissen 先生介紹「2 項案例說明(Presentation two case studies)」案例分為(1)BR3 除役(BR3 decommissioning)及(2)M2 熱室除役及翻新專案(M2 hot cell decommissioning & refurbishing project)。比利時自 1987 年即開始針對 BR3 之 D&D 技術、效能及成本等項執行小型先導計畫，1989 年歐盟選定 BR3 作為先導拆除計畫，1991 年 BR3 主迴路全系統除污 1994-1995 拆除反應器內部構件，1998-2000 拆除反應器(RPV)，2002 BR3 用過燃料移出核設施，2002-2003 蒸汽產生器及調壓槽除污，2005 拆除蒸汽產生器及調壓槽，2007 - 2013 拆除中子屏蔽槽(Neutron Shield Tank, NST)，2008 年拆除主煙囪，2010 拆除基礎建設，如輔助廠房等，2020 拆除基礎設施如反應器廠房集水池，目前所有高輻射組件已被移除，預計 2028 完成除役工作。透過這個專案，SCK CEN 獲得了除役及拆除之營運、技術、管理、安全和成本相當廣泛的知識。

BR3 除役現場參訪由 SCK•CEN 的 Luc Denissen 先生及 Jérôme Dadoumont 先生帶領參訪，首先由 SCK•CEN 的 Luc Denissen 先生針對「BR3 除役」之主題，做概要的說明包括參訪 BR3 現場期間的注意事項。之後，Luc Denissen 先生及 Jérôme Dadoumont 先生(BR3 除役計畫負責人)兩位陪同至 BR3 除役現場了解。現場參訪依據管制規定穿著輻防衣物、手套、鞋套及安全帽，進入廠房區，由於大多數除污及拆除工作已完成，講員在參訪區域大致說明相關除役作業，現場參訪說明 BR3 已完成除污作業，除污因子大約為 10，爐心的用過燃料移出裝在 7 只 CASTOR 桶存放在 Belgoprocess 廢棄物管理服務公司，爐心內部組件、蒸汽產生器及反應爐槽經過拆解並切割。計畫所採取的策略是發展/測試/最適化相關技術，由各種不同的作業蒐集成本/放射性廢棄物/劑量的數據資料，發展拆除核電廠的專業知識，針對高活度的中子屏蔽槽(NST)設施，由於結構複雜只適合現地拆除，是將

高壓水刀切割裝置架在機械臂之技術做水下切割，拆解採取三種方式；對所有重要拆解作業，先在測試槽內先行測試完成，才在反應器水池內進行實際作業；將反應爐槽與一次迴路分離後，移動到用過燃料池，重建用過燃料池完整性後，在池中採水下切割，耗時一年的前置與準備作業，依計畫順利完成。拆解前的重要步驟如下：對一次迴路採全面廣泛的CORD®程序除污，俾在切割一次側管線、爐心內部組件及反應爐槽時降低人員劑量；一次迴路管線以三次連續循環的除污程序(CORD®程序、置放 10 年衰減、再以 MEDOC®程序除污)移除一次迴路 90%的活度，並在切割之後的金屬採 MEDOC 化學除污作業，有 85%以上可以外釋，廢棄物減量逾 95%。建築物混凝土的除污主要採手持重工具機對所有表面為之，依污染程度分成五類(0~4 級)，表面須刨除深度從 0 mm 至數十公分不等。BR3 拆解計畫的廢棄物管理遵循符合 ISO 9002 的品保系統，在移除燃料及重要爐心組件(反應爐槽、一次迴路、蒸汽產生器等)之後，2%屬中高階放射性廢棄物，10%屬低階放射性廢棄物，其他 88%屬放行之可回收使用或視為一般廢棄物移除。

BR3 除役計畫與實施期間主要的經驗回饋，包括應該處理含非輻射之所有危害，在全面輻射特性調查完成前不要急著完工進度，另要注意輻射風險隨著除役的過程降低、但是工安風險逐步增加，須備有後援計畫，業主可將作業分包給承攬商，但仍須負除役的全部責任等。

原來 BR3 的用過燃料池位置已清空並完成除污，改裝成透明密閉之方形帳篷(Green house)，供研磨、切割等工作空間，由於該處劑量較高並未入內。圍阻體雙重氣鎖門的位置亦更換成透明膠布的簡易門框。廠房結構的除污主要採取機械式表面移除(刮擦、錘擊、氣動機具、鋼刷，噴砂等)技術，依不同污染程度刨除不同表面之深度的作法，實際使用的技術有錘擊、金剛石線鋸、取芯鑽等。在靠近反應爐及鄰近地方，其周圍的混凝土基礎在長期受中子的照射範圍內，從而產生了高活化的混凝土和鋼筋。這些被活化的部分可能佔據壁厚的很大一部分。因此，建築物的穩定性也成為重要的考量課題，可使用的拆除技術包括錘擊、圓鋸、金剛石線鋸等。

BR3 現場由於保安規定不得攜帶手機、相機等進入，但 BR3 拆下的汽機轉子就放在上

課教室 Lake House 的入口處，BR3 的主控制室亦搬遷至 Lake House 的地下室，分別如圖 1 及圖 2。



圖 1. BR3 拆下的汽機轉子

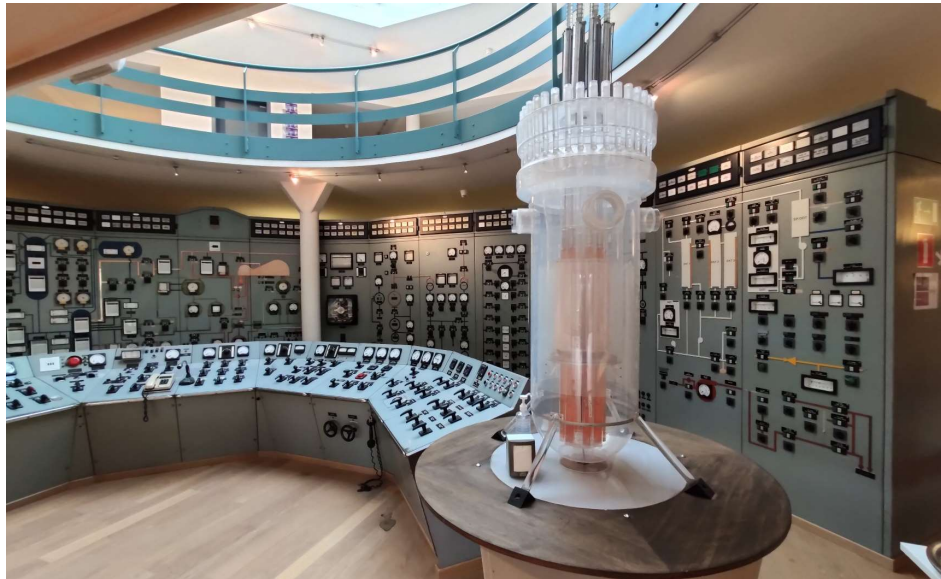


圖 2. BR3 的主控制室

接下來第 2 段課程由 SCK•CEN 的 Michel Estas 先生提出「M2 熱室除役及翻新專案 (M2 hot cell decommissioning & refurbishing project)」課程的介紹。1977 年服役的 M2 熱室，內部尺寸：3 x 3 x 5 m，結構為澆築混凝土和鉛（0.6-1.0m）和不銹鋼襯版，設計目的為進行用過燃料的破壞性機械測試以及特殊材料的各種實驗。設備包括 1 噸門式起重機、車床、工具等，配置 2 個遠端操縱器（<15 kg）。2010 年 5 月由於輻射和老化產生大量故障，規

劃除役及翻新專案：(1)修復現有物料出入口；(2)修復通風；(3)維修設備工具（包含照明電源、測量設備和相機電纜）；(4)設計和創建新的廢棄物放行或外釋路線；(5)在熱室頂部建造一間控制室；(6)同時進行在熱室中及熱室上方工作，重點是高劑量物品、超大物品、物料移除及除污；(7)保證足夠低的劑量率，以降低劑量率為重點的拆解和除污。

工作排程如下表：

| | |
|-------------|--|
| 2010/5 | 進行策略、規劃工作 |
| 2011-2015 | 同時進行在熱室中及熱室上方工作 |
| | 在熱室中：1.解決缺陷；2.根據熱室開發許可證，切割內部結構和結構 |
| | 在熱室上方：1.搭建控制室、通風系統、橫隔膜、氣閘；2.獲得控制室使用許可證 |
| 2011-2018 | 熱室放射性物料移除 |
| 2011 | 高放射性廢棄物 HLW/HAVA |
| 2011-2018 | 中放射性廢棄物 ILW/MAVA |
| 2016-2018 | 低放射性廢棄物 LLW/LAVA |
| 2014 - 2015 | 非手動：1.進一步拆除；2.除污；3.蒸發站 |
| 2015-2018 | 手動工作判定的臨界點：平均熱點(20-60 mGy/h) |
| | 手動工作(1.搭建鷹架；2.拆除；3. 外釋和測量活動) |
| 2018 | 廠址清理：1.控制室；2. 擴充塢；3.一些系統 |

熱室專案執行經驗為：(1)早期 3D 模型、模擬和風險分析是非常有用的；(2)同時工作縮短所需時間；(3)有效達成解決故障並更新現有公用設施；(4)完成遠端控制自動化、360 度平移/變焦/傾斜彩色攝影機架設；(5)創造新的廢棄物疏散路線；(6)依靠多功能團隊的創造力和經驗，整合技術操作員、機械和操作專家、電工以及管理人員等，最終找到了解決方案；(7)沒有對廢棄物進行系統除污。僅針對法律上要求，或廢棄物分類是財務考量需要者除污；(8)必須事先準備事故逃逸行動的模擬方案。

■ 12 月 7 日 (四)

本日上午課程由 SCK•CEN 的 Philippe Antoine 先生針對「除役及拆除過程輻射及工業安全主題(Radiation and industrial safety aspects during D&D)」之課程，提出除役及拆除過程輻射及工業安全之概要說明。講員逐步介紹：(1)拆除階段的應用安全評估；(2)放射學和非放射學風險；(3)SCK•CEN 之 ALARA 程序，風險管理基礎；(4)BR3 反應器的拆解之 ALARA 程式的應用與劑量結果；(5) M2 熱室拆解之劑量結果。

講員首先談到影響整體安全的拆除作業的特殊性，包括基礎設施正在拆除、屏蔽層拆除、長距離運輸拆卸的設備、暫時存放切割件、無臨時屏蔽、難以實現準確的劑量率測量、在開發過程中修改安裝、電廠某些部分缺乏輻射特性描述、拆解內部污染的迴路和管道、存在具有潛在高輻射場的區域、放射性風險從一項操作轉移到另一項操作、核子設施的設計目的不是為了拆除等相關影響因素，皆需要納入考量。再來是應該要考慮對工作人員、公眾和環境的所有相關危害，例如：(1)輻射照射，例如，直接輻射和其他輻射源（包括臨界）造成的外部照射，由於吸入、攝入或割傷和擦傷造成的內部照射，以及由於密封失效而導致放射性核種不受控制的釋放；(2)有毒和其他危險物質，例如石棉、易燃材料、致癌物、用於淨化目的的化學物質、窒息劑；(3)工業危害，例如墜落負載、高空作業、火災、高溫、高壓、噪音、灰塵和石棉。並且應考慮這些危害的綜合效應和累加效應，以及它們可能引起放射性後果的程度（例如火災導致圍阻體失效等）。

課程說明放射性始發事件，歸納須考量的項目有臨界、設備和生產線中的裂變材料殘留、儲槽中裂變放射性液體的殘留物、易裂變材料附近有緩和劑（例如水、聚氯乙烯）、污染擴散、圍阻體完整性或屏障喪失、放射性物質和包裹以及放射性廢物的掉落、建築物的清理之輻射污染、外部曝露、活性材料及設備、直接輻射源、內部曝露、放射性物質的物理和化學狀態、污染或腐蝕等、氣態和液態放射性廢水。非放射性之內部肇始事件，如火災、爆炸、洪水、有毒有害物質、電氣危險、物理危害(重物墜落、結構倒塌、高空作業等)，最後加上人類和組織發起的事件，如操作員失誤或違規、不慎進入輻射區域、動作辨識錯誤、承包商和分包商的行動未相容、人體工學條件差等，都是除役及拆除過程應審慎考量之項目。

接下來並介紹 SCK·CEN 的 ALARA 程序是在 BR3 反應器 1991 年拆除作業開始時制定的，當時確定了不同的需求，需要組成 ALARA 人員，開發操作劑量測定法，並且推動管理階層和工作人員的參與。而 ALARA 程序實施帶來的進展為：(1)各級作業人員、負責執行、管理人員等，對劑量管理的重要性有所認知；(2)ALARA 委員會內部就減少劑量的提案進行了辯論；(3)ALARA 應用程式的開發能夠集中有關 ALARA 的所有資訊，以及與操作相關的其他風險；(4)有關 ALARA 的資訊流通得到了極大改善，其中包括透過 ALARA 委員會的報告。

從 BR3 的拆解中吸取不同的經驗為：(1)首先進行一次迴路除污操作，可以大大減少工作人員後期的劑量；(2)對於測試非放射性模型拆除技術很重要；(3)在水下切割高度活化的碎片，顯著減少人員的劑量。熱室 M2 拆解，所有拆卸操作均使用遙控器操作器和專用工具遠距離完成，並透過高壓水除污。

本日第 2 堂課程由 SCK·CEN 的 Robby Nijs 先生對「除役及拆除期間 ALARA 的實施 (ALARA implementation during D&D)」之主題，做分析工具 VISIPLAN 介紹及使用之概要的說明。在核設施應用 ALARA 需要針對不同的作業及環境評估劑量，會影響劑量評估結果的因素，包括有設施的幾何形狀、射源的分佈與強度、屏蔽的構型配置、工作的組織等，在除役作業迅速變動的環境之最適化更為複雜。VISIPLAN 軟體的目的係針對給定的作業預測可能的劑量，於此給定的作業評估可達到降低或最適化劑量的措施或方法，納入不同工作情境之相關資訊(包括採用技術或工作的型態、工作期長、工作人員數量、勞動力的分佈、屏蔽的要求及採用屏蔽的方式、評估如化學除污之射源對作業的直接影響等)做劑量評估結果的比較，並發展適用工具模擬 3D 環境工作情境的劑量評估及規劃。

VISIPLAN 軟體採點核仁(point kernel)方法考量增建因素(buildup factor)計算劑量，功能包括評估工作、移動軌跡及不同情境的劑量，個人與集體劑量的評估，由量測劑量率數據組計算射源的強度，以及射源的靈敏度分析等。劑量計算的核心採用 ANSI/ANS-6.4.3-1991, “Gamma-ray attenuation and build-up factors for engineering materials.”，並與類似工具軟體包括 MicroShield、QAD 及 MCNP 等分析結果做過比對。VISIPLAN 軟體建立模式在

三個階段要提供三組數據資料：(1)空間尺寸資料：技術圖面、調查技術、攝影量測、雷射掃描等建立原始容積，(2)物料資訊：技術資料、廠內專家等建立物料資料組，(3)輻射輸入資料：技術資料、調查、廠址歷史資料等建立射源資料組。接續的是一般分析階段、詳細規劃階段、以及後續追蹤階段。

VISIPLAN 軟體的應用案例，包括 BR3 除役廠址、IRMM Geel, Gelina 加速器、HADES 地下實驗室、BR2 反應器、BR2 熱交換器、CELL 10 拆除、CORALUS 劑量計算、BP 熱室拆除、BR3 除污範圍、REBUS 用過燃料束載重研究、過濾器更換研究、燃料池除役研究、BR2 實驗裝置室及 Cel 40 除役等個案。VISIPLAN 軟體可提供 ALARA 分析者劑量評估及最適化的必要功能，可輔助由設計、維護及除役設施之應用，目前仍持續發展精進軟體之功能，例如改善精進現有圖形介面、提供虛擬實境之分析結果等。

課程結論說明 VISIPLAN 軟體工具為 ALARA 分析師提供了劑量評估和劑量優化所需的功能，事實證明這些工具對於從新安裝到維護直至除役的應用程式都很有價值。該工具有助於包括：幾何和輻射源建模、輻射源強度評估、3D 環境中的劑量評估、真實軌跡模擬和劑量評估、靈活編輯放射性環境或軌跡以優化規劃任務、ALARA 利害關係人之間的溝通等用途。

本日第 3 堂課程由 SCK•CEN 的 Jérôme Dadoumont 先生對「拆除的作業(Dismantling operations)」之主題，介紹選擇正確拆除的工具的影響因素，以及不同切削工具的概述。

藉由 BR3 計畫案例來說明最重要的切割作業，BR3 使用遠端切割反應器容器的極高放射性組件，1989-1991 年切割隔熱罩，1991-1995 年拆解 2 套反應爐內部構件。1995 起開始拆除受污染的環路和設備，包括 1999-2000 年拆除反應器容器、2001-2005 年拆卸反應爐蓋及底部、蒸汽產生器與壓力調節器；後續開始拆解 NST 作業，2007 年-2011 年執行遠端拆除，2012 年-2013 年執行手動拆解作業。

課程介紹選擇正確拆解切削工具考慮的影響因素，包括(1)輻射方面；(2)物理方面；(3)二次廢棄物；(4)常規安全方面；(5)常規經濟方面；(6)物料的最終處置。

輻射方面，需考量(1)高劑量率工件，操作員不得觸摸，而且必須有足夠的屏蔽；(2)需

要納入「遠端」切割技術（例如屏蔽隔間、水下切割等），使用經過工業驗證的技術。隨後這一概念被應用到「遠端操作」和「遠端維護」策略；(3)注重切割環境和操作人員的安全裝備；(4)必須區分內部/外部污染。物理方面，需考量(1)要切割的材料，包括 CS、SS、Al、Pb 各種合金；(2)切割厚度從幾毫米（槽殼）到幾分米（反應器蓋）；(3)要切割的組件兩側或僅一側有障礙，組件後面是否有自由空間。

二次廢棄物的產生，需考量(1)產生的二次廢棄物取決於要切割的工件以及所使用的技術；(2)二次廢棄物的最終體積是最重要的決定經濟因素；(3)尺寸分佈對於二次廢物收集至關重要；(4)可以產生不同形式的物理廢棄物（固體、液體、氣體等）。

物料的最終處置規劃，需考量(1)HLW 和 MLW 廢棄物：需要輻射屏蔽和特殊疏散路線；(2)除此之外，切割技術的選擇將取決於二次廢棄物的產生；(3)低放射性廢棄物大部分可淨化至無排放水平，或可重複使用或回收；(4)切割技術的選擇將考量除污技術及測量設備；(5)非常低放射性廢棄物的量最大，也包含已清潔可外釋的低放射性廢棄物。

最後，講員進行不同拆解工具概述，並輔以相片圖示解說，包括機械切削工具，如油壓剪板機、往復式鋸、帶鋸、銑刀、鑽石電纜、衝擊解鎖機、油壓解鎖器等。熱切割工具，如氧氣切割、等離子弧切割、雷射光束切割、放電加工 (EDM)。液壓切割則需使用磨料進行水刀切割。課程結論為：(1)一般使用經過驗證的工業技術，其中大部分是機械技術；(2)事實證明這是非常可靠的；(2)兩套反應爐內部高輻射組件，已統計整體拆解之總輻射劑量；(3)該技術的靈活性以及易於維護在劑量、成本和時間方面具有真正的優勢；(4)成熟的技術可以避免因經驗不足而導致錯誤；(5)水下切割技術僅適用於在放射性環境和水下遠端工作。

■ 12月8日(五)

本日上午課程由 SCK•CEN 的 Luc Ooms 針對「示範兩個案例研究 (Presentation two case studies : Thetis & Belgonucleaire)」之主題，分別對 Thetis & Belgonucleaire 除役提出概要說明及經驗回饋。

Thetis 反應爐位於比利時根特大學，距離根特市中心 3 公里，自 1967 年開始營運，配置 25 個燃料元件，輕水式以石墨做緩和劑之反應爐，功率 150 kW（最大 250 kW），開放式水池直徑 3 m 深度 7.5 m，主要用途是生產放射性同位素的醫療應用。Thetis 反應爐 2003 年 12 月 19 日關閉進入除役準備，分 2 階段除役，於 2010 年完成用過燃料的移除後，開始拆除基礎設施；用過燃料平均燃耗為 3.15 GWd/t，最大值為 5.15 GWd/t，UO₂ 豐度 5%。用過燃料的現場移出作業，操作順序為(1)裝載及運輸；(2)使用水下攝影機進行目視檢查和識別；(3)用過燃料密封性啜吸測試；(4)將用過燃料元件裝載到運輸容器中；(5)將用過燃料組件運送至 Belgoprocess 機構。之後是用過燃料整理後進入暫時儲存，順序為(1)自運輸貨櫃卸載；(2)將用過燃料組件移至帕梅拉熱室設施；(3)用過燃料元件頭部和底部的鋸切；(4)調整 400 公升桶中的燃料組件，每桶內裝有 4 個燃料組件；(5)切割零件裝入中心管中；(6)總共 7 個桶被裝載並填充混凝土；(7)暫時儲存等待最終處置。

2010 年完成用過燃料的移除後，Thetis 反應爐於 2012 年 9 月開始拆除合約文件、工作說明、ALARA 和安全研究，2013 年第 12 週開始拆除反應爐爐心，2013 年第 21 週完成水池除污，活度組件移除後於 2013 年第 27 週關閉通風系統。2014-2015 年建築物釋出，2015 年底設施除役完成並解除管制。計畫時程有延誤的主要因為反應爐穴下部的輻射活度及石棉殘存。

1986 年至 2006 年間，Belgonucleaire 一直以工業規模營運比利時德塞爾 MOX 燃料製造工廠。在此期間 40 公噸鈾，被加工成 90 次重新裝載的 MOX 燃料，用於商業輕水反應器，2006 年決定停止生產並申請 MOX 工廠除役。MOX 除役計畫的重要組成部分，計劃除役約 170 個中型手套箱(污染隔離用的設備)以及 1300 噸的結構和設備。2008 年 MOX 工廠取得除役許可證，於 2009 年 3 月開始除役工程，2016-2018 年除役完成獲得解除管制。

MOX 工廠設施拆除之需考慮關鍵因素和方法，包括(1)使用經過充分驗證的技術，並徹底確保工作人員持續的符合資格認證；(2)來自熟練的外部團隊的支持；(3)現場拆除手套箱以及拆除帳篷的使用；(4)安全項目，(如禁止使用有火災危險的切割工具、開發特定的

培訓講座、主要關注內部污染風險、維持除役期間的監測計畫如法定劑量測定、操作劑量測定等、緊急應變準備工作。)

MOX 設施除役結論及現況為：(1)設施已成功除役；(2)安全（事故、劑量攝取、訓練、資格）要求已達標；(3)放射性廢棄物產生；(4)來自不同公司的綜合專案機構相互配合 (Belgonucleaire、SCK•CEN、Tractebel、Tecnubel、Belgoprocess、Studsvik)；(5)比利時第一塊除役完成解除管制之綠地。

本日第 2 堂課程由 SCK•CEN 的 Nico Mangelschots 及 Luc Ooms 先生對「小組練習：開始您的除役專案(Group exercise: start your decommissioning project)」之主題，帶領學員進行小組專案規劃實作演練。課程開始規劃除役專案，學員採用立即拆除策略，並假設以下資源可用：必要的許可證、安全檔案、除役計畫、品質體系、資源、財務金融、工作人員。開始制定設施除役的策略及計畫，對於安全注水迴路，需考量：(1)主迴路洩漏時泵送冷卻水連接至反應器主迴路與水池；(2)蒸汽和空氣保持槽泵；(3)非核島區集水；(4)疑似洩漏造成內部污染；(5)與脫氣罐連接的迴路可能會產生氣態產物。其餘也需考量項目如：(1)歷史資訊；(2)計畫推動方法；(3)初步輻射特性和物料清單；(4)器材運輸（機械、電氣）；(5)放射性安全性；(6)除污技術（內部/外部）；(7)拆解技巧；(8)移除物料的路徑；(9)物料管理（含測量/分類/移除）；(10)所有利害關係人批准文件。

基本拆解步驟要注意的項目：(1)確定輻射強度；(2)確定是否系統仍然需要使用；(3)確定是否水需要被移除（在儲存、管道、使用場所）；(4)斷開所有泵浦和閥門的接線電源；(5)如果設備受壓縮空氣控制，確保壓力釋放就安全；(6)清除管道和泵浦中可能殘留的水。

本次進行小組專案規劃實作演練，所進行的規劃除役專案如圖三所示，圖中紅色的點為高輻射的熱點，經所參與小組成員討論後，納入課程中所學習的經驗，最後完成該區域管路設備，除役拆除的專案規劃。專案規劃報告內容自輻射特性調查開始，並尋定工作所需的注水來源與規劃集水區，然後將區域內系統進行隔離，包括水及電力等。另一方面，在工作前引入 ALARA 控管小組，以確保輻射劑量合理抑低。然後進行系統迴路除污，除污期間須使用樹脂及過濾器來淨化除污後之二次廢水。準備操作房間，包括(1)安裝屏蔽、；

(2)表面除污；(3)檢查支援系統，例如通風、水、氣動空氣、電力供應、排水、燈光、廢棄物收集、帳篷、運輸、消防等。準備完成後進入拆解操作，完成切割方式選擇（尺寸、污染、薄弱零件...），使用各種拆卸技術：磨削方式在這案例可能是最簡單好用的，可以移動組件並在專用空間中將其拆解。拆除時考量的風險包括：火災、高地作業、化學、溫度、高壓水/氣體，均應規劃應變方案。最後是提出放射性廢棄物處理之相關規劃。



圖 3. 小組除役規劃專案

肆、心得與建議

本次赴比利時莫爾參加核能研究專業機構 SCK • CEN 「核設施除役(Decommissioning of nuclear installations)」訓練課程之心得與建議，可歸納下列幾項：

1. 核能研究專業機構 SCK • CEN 是比利時最大的研究中心之一，工作項目包括核設施安全、輻射防護、放射性廢棄物的安全處理和處置、永續發展、教育和培訓。本次「核設施除役」訓練課程可以了解歐洲除役作業的背景及除役作業安全管制議題，與最新的除役拆除技術之開發與發展，以及在除役過程中需要強化之能力，更有機會深化了解歐盟及其會員國家的除役安全管制技術之發展進程。因此，建議本會未來在經費許可下，持續派員參加 SCK • CEN 的除役訓練課程。
2. 本項訓練課程所探討的內容主要涵蓋歐洲核設施除役背景、法律和管制面相、除役專案規劃、專案管理、除污、物料（包括廢棄物）存量管理和初始特性、物料管理、利害關係人互動、BR3 除役及 M2 熱室除役及翻新專案、除役及拆除過程輻射及工業安全主題、除役及拆除期間 ALARA 的實施、拆除作業、Thetis & Belgonucleaire 兩個案例研究、除役專案小組練習等項目；並包括正在除役拆除程序中之 BR3 反應器設施之參訪，相關案例之除役時序較我國核電除役時程為先行，故其作業經驗可以做為我國對除役作業之安全管制的具體參考。因此，建議本會未來應持續密切注意歐盟國家除役管制的相關作法，以能有效精進國內除役作業之管制效能。
3. 訓練課程的主題涵蓋比利時之核能設施與機組，進行除役或拆解的安全管制作業，及獲得拆除許可程序及成功解除管制的案例。在過去這段時間歐盟及其會員國安全管制機關已累積了豐富的除役管制經驗；針對本次訓練課程所探討的除役及拆除作業案例，在國內核電廠除役拆除作業計畫有關之輻射及工業安全管控、全面性拆除的作業安全管理、安全工具及設備、與利害關係人互動、除污作業等，值得持續了解掌握歐盟及其會員國在核能電廠執行除役作業時的案例作法。

伍、附件

「Decommissioning of nuclear installations」訓練課程表



Decommissioning of nuclear installations
December 4 - 8, 2023 | SCK CEN Lakehouse, Mol, Belgium



Programme

| Day 1 Monday December 4, 2023 | | |
|---------------------------------|--|---|
| 09:00 | Welcome, tour de table by the participants, overview of the course programme | Michèle Coeck (SCK CEN) Sven Boden (SCK CEN) |
| 09:30 | Nuclear decommissioning in a European context | Pierre Kockerols |
| 10:45 | Break | |
| 11:15 | Legal and regulatory aspects (FDP, SAR, high level strategies) | Chantal Mommaert (ENGIE) |
| 12:30 | Lunch | |
| 13:30 | Planning of a decommissioning project | Tibor Kukan/Tibor Rapant (JAVYS) |
| 14:45 | Break | |
| 15:15 | Safety aspects Management | Robby Nijs (SCK CEN) |
| 16:30 | Closure | |

| Day 2 Tuesday December 5, 2023 | | |
|----------------------------------|--|---|
| 08:30 | Project management | Tibor Kukan/Tibor Rapant (JAVYS) |
| 10:00 | Break | |
| 10:30 | Decontamination | Kurt Van den Dungen (SCK CEN) |
| 12:00 | Lunch | |
| 13:00 | Decontamination | Kurt Van den Dungen (SCK CEN) |
| 14:30 | Break | |
| 15:00 | Material (including waste) management Inventory & initial characterization | Sven Boden (SCK CEN) |
| 16:15 | Interaction with stakeholders | Robbe Geysmans (SCK CEN) Tanja Perko (SCK CEN) |
| 17:00 | Closure | |

Exploring
a better tomorrow



Day 3 | Wednesday December 6, 2023

| | | |
|-------|---|---|
| 08:30 | Material (including waste) management Characterization during D&D and final confirmation/acceptance | Sven Boden (SCK CEN) |
| 10:00 | Break | |
| 10:30 | Material (including waste) management Material streams traceability and optimization | Isi Verwaest (SCK CEN) |
| 12:00 | Lunch | |
| 13:00 | Presentation two case studies: <ul style="list-style-type: none"> BR3 decommissioning M2 hot cell decommissioning & refurbishing project Visit to BR3 | Luc Denissen (SCK CEN, BR3) Michel Estas (SCK CEN, hot cell decommissioning) |
| 16:30 | Closure | |

Day 4 | Thursday December 7, 2023

| | | |
|-------|--|----------------------------|
| 08:30 | Radiation and industrial safety aspects during D&D | Philippe Antoine (SCK CEN) |
| 10:00 | Break | |
| 10:30 | ALARA implementation during D&D | Robby Nijs (SCK CEN) |
| 12:00 | Lunch | |
| 13:00 | Dismantling operations | Jérôme Dadoumont (SCK CEN) |
| 14:30 | Break | |
| 15:00 | Dismantling operations | Jérôme Dadoumont (SCK CEN) |
| 16:30 | Closure | |

Day 5 | Friday December 8, 2023

| | | |
|-------|---|--|
| 08:30 | Presentation two case studies: <ul style="list-style-type: none"> Thetis Belgonucleaire | Luc Ooms (SCK CEN) |
| 9:45 | Break | |
| 10:15 | Group exercise: start your decommissioning project | Nico Mangelschots / Luc Ooms (SCK CEN) |
| 13:00 | Lunch | |
| 14:00 | Multiple choice test (optional) | All participants |
| 15:00 | Closure | |