

出國報告(出國類別：開會)

參加 2024 年國際核能除役研討會
(ICOND 2024)

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：許明童 簡任技正

吳文雄 技正

沈煜翔 助理研究員

派赴國家/地區：德國

出國期間：113 年 11 月 16 日至 113 年 11 月 23 日

報告日期：114 年 01 月 10 日

摘要

國際核能除役研討會 (International Conference on Nuclear Decommissioning, 簡稱 ICOND) 係核電廠除役及放射性廢棄物處理貯存領域重要的研討會，由德國亞琛核能訓練機構 (Aachen Institute for Nuclear Training, 簡稱 AINT) 例行舉辦。今年是第 13 屆 ICOND，AINT 於 2024 年 11 月 18 日至 11 月 21 日假 Eurogress 會議中心舉辦。研討會分為會議前工作坊及專題會議兩部份，專題會議議題包括除役及拆除的挑戰、除役計畫狀態及最佳實踐、除役技術、創新及數位化、廢棄物管理、專業能力及訓練、剩餘物質管理及解除管制等項目。與會者於研討會中分享的核電廠除役經驗、除役面臨的挑戰與對策，以及除役相關技術發展的趨勢，可作為我國核電廠除役安全管制之參考。

目次

摘要.....	i
目次.....	ii
壹、目的.....	1
貳、出國行程.....	2
參、過程紀要.....	3
肆、心得與建議.....	15
伍、附件.....	16

壹、目的

國際核能除役研討會 (International Conference on Nuclear Decommissioning, 簡稱 ICOND) 係核電廠除役及放射性廢棄物處理貯存領域重要的研討會，由德國亞琛核能訓練機構 (Aachen Institute for Nuclear Training, 簡稱 AINT) 例行舉辦，探討全球的核電廠除役策略，包含除役相關的授權、財務、管理，以及放射性廢棄物的處理貯存及處置。今年是第 13 屆 ICOND，AINT 於 2024 年 11 月 18 日至 11 月 21 日假 Eurogress 會議中心舉辦，與會者主要來自歐洲各國，亦有來自美洲、亞洲部分國家的人士參加。本次公差參與該研討會，可了解各國核電廠除役的實務經驗，對我國核電廠除役安全管理制工作有所助益。

貳、出國行程

2024 年第 13 屆 ICOND 於 2024 年 11 月 18 日至 11 月 21 日舉辦，本次出國行程自 2024 年 11 月 16 日至 11 月 23 日，共計 8 天，行程如下：

日期	地點與行程	工作內容
11 月 16 日(六)~ 11 月 17 日(日)	台北→法蘭克福→亞琛	去程
11 月 18 日(一)~ 11 月 21 日(四)	亞琛	參加 2024 年國際核能除役研討會(ICOND 2024)
11 月 22 日(五)~ 11 月 23 日(六)	亞琛→法蘭克福→台北	返程

參、過程紀要

本次研討會分為 11 月 18 日的會議前工作坊(workshop)，以及 11 月 19 日至 11 月 21 日的專題會議，重要內容摘要如下：

一、11 月 18 日會議前工作坊

1. ENGIE 公司在比利時擁有 7 部核子反應器機組(Doe1 核電廠 4 部機組、Tihange 核電廠 3 部機組)，其中 Doe1 核電廠 3 號機及 Tihange 核電廠 2 號機正除役中，其餘機組也將於 2025 年進入除役期間。比利時政府原能源政策為於 2025 年底關閉所有核電廠，然而自 2022 年烏俄戰爭爆發後，比利時政府為確保能源安全，選擇將 Doe1 核電廠 4 號機及 Tihange 核電廠 3 號機延役運轉 10 年，並盡一切努力於 2025 年 11 月重啟這兩部機組，以在 2025 年及 2026 年的冬季提供電力。Doe1 核電廠 4 號機及 Tihange 核電廠 3 號機延役後，所有權將轉移至比利時聯邦及 ENGIE 公司共同出資的合資公司，未來的除役作業及暫貯在廠內的廢棄物由 ENGIE 公司負責。
2. 德國 AVR 反應器於 1966 年初次臨界，於 1988 年永久停止運轉進入除役期間，除役作業由 JEN 公司負責，隨著反應器壓力槽於 2015 年移除及主要組件拆除作業於 2018 年完成後，AVR 反應器的潛在風險已大幅降低。因 AVR 反應器除役計畫未隨著除役進展重新評估，在進入除役的後階段並未見到除役成本降低，取而代之的是出現計畫期程延宕。為了解決此一問題，JEN 公司於 2019 年針對 AVR 設施除役計畫進行全面評估，結論包含：(1)應調整安全關鍵系統的分類，以反映設施潛在風險降低；(2)應調整組織結構，以因應設施狀態變化；(3)現有流程應隨著組織結構調整而調整。在完成以上調整後，計畫期程延宕情形已得到改善，以拆除混凝土結構作業為例，該作業於 2020 年底期程延宕約 10 個月，於 2023 年底期程延宕已改善至約 2 個月。此外，透過調整現有的除役及檢查手冊，預期未來幾年除役成本將顯著降低。
3. 德國 PreussenElektra 公司擁有 8 部核子反應器機組，而 iUS 公司為 PreussenElektra 公司建置放射性廢棄物分類站，未來 10 年內將用於其擁有的所有機組，為此，iUS 公司研發 VRDose 系統，評估輻射作業場域之環境劑量率，以完善除役之輻射安全評估。評估過程使用 3D 模型展示，可將

輻射作業流程、作業時間、射源項、設備建築、屏蔽需求、曝露情節納入考慮，建置時變的空間劑量分布，提供設施經營者針對局部屏蔽強化的科學數據。由於 VRDose 系統視覺化的優點，除了用於評估環境劑量率之外，也被用於製作訓練影片，以利人員了解不同情節下環境輻射場的變化，合理抑低人員輻射劑量。

4. 「數位雙生(Digital Twin)」一詞係由密西根大學 Michael Grieves 教授及美國國家航空暨太空總署 John Vickers 先生所創造，並將其定義為「一組虛擬的資料結構，從微觀的原子層面到巨觀的幾何層面全面描述潛在或實體製造的產品，在最佳的情況下，任何可透過檢查實體製造產品得到的資訊都可從數位雙生得到」。aixITem 公司針對核電廠除役研發數位雙生框架，其整合了網路應用程式、3D 視覺化技術，以及測量儀器。aixITem 公司的經驗認為，應用數位雙生的重要因子為整合來自各種測量儀器的數據，建立視覺化的輻射特性調查紀錄，這些數據使數位雙生準確反映除役各階段之輻射狀況，並可支持除污的程序。另，核電廠除役數位雙生有助於加強風險評估、優化資源分配，並提高對管制法規的合規性。
5. 相較於傳統去除表面塗層的方法(例如研磨)，雷射燒蝕具有較低的風險，有利於減少防護措施及個人防護設備的需求，從而降低除役計畫成本。德國去除石棉的技術規則 TRGS 519 將低排放濃度標準訂為 $10,000\text{F}/\text{m}^3$ ，cleanLASER 公司研發的 CL1000 雷射可用來去除石棉，搭配防護設備的使用可將操作人員接受到的石棉濃度降至不超過 $2,000\text{F}/\text{m}^3$ ，此方式已得到盧森堡管制機關認證。在放射性物質除污方面，cleanLASER 公司評估，由於雷射燒蝕高效、乾燥、低噪音的特點，配合使用適當的抽吸系統，雷射燒蝕產生的排放物可被有效且低本地過濾。
6. 完整的輻射偵檢器校正程序可提高輻射量測數據的可信度，正確之量測結果才能作為解除管制判斷之依據，確保將決策錯誤的後果降至最低；而環境條件、射源幾何、能量依存性等因素，需要在校正過程中加以考慮。美國 MIRION 公司介紹研發之 Super ISOCS (In Situ Object Counting System)軟體，其優勢在效率校正過程中，可以軟體定義各式容器之幾何與物理性質來取代傳統標準射源，完成效率曲線，提升加馬偵檢器之幾何校正效率。除役廢棄物中若具有複雜核種組成，量測結果不準確會造成核種

比例誤判，最終錯估比活度。目前 MIRION 公司除了以高純度鍺偵檢器 (High purity Germanium, 簡稱 HPGe) 執行核種組成分析，另引進塑膠閃爍體之能譜分析儀進行偵檢，其導入不同密度基質的能量校正因子執行補償修正，提升低能加馬核種的辨識能力，完成雙重確認。

二、11月19日專題會議，主題包含除役及拆除的挑戰、除役計畫狀態及最佳實踐

1. PreussenElektra 公司在營運核電廠超過 50 年後，已轉型為專職的核電廠除役及拆除公司，目前正執行其擁有的 8 部核子反應器機組之除役作業。移除爐心內用過核子燃料是降低放射性存量的第一個重要步驟，移除期程延宕對拆除計畫及預算將產生重大影響，PreussenElektra 公司的目標是在機組永久停止運轉後 4 至 5 年內移除用過燃料池內用過核子燃料。對於因除役作業產生的廢棄物，大部份可無限制外釋或外釋到特定掩埋場。然而，確定特定掩埋場為除役作業的最大挑戰之一，雖德國輻防法規明確授權此種做法，但因利害關係者疑慮等因素，確定特定掩埋場相關工作往往無法如期完成。由 PreussenElektra 公司的除役經驗，務實的外釋程序對於如期執行除役計畫至關重要。
2. 國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, 簡稱 IAEA)一般安全要求「設施除役」¹中，將除役定義為「為解除設施部份或全部的管制所採取的行政及技術行動」。除役準備工作包含制定除役計畫並得到管制機關核准、選擇除役策略、評估除役成本、建立除役基金、建立廢棄物(因除役及除污作業所產生)管理基礎設施等。IAEA 制定了利害關係者參與除役的要求²，並發布了一系列的報告，以收集成員國中不同利害關係者團體參與除役的途徑、方法、形式、相關的經驗及經驗學習，例如核能系列報告 NW-T-2.5³。由過去的經驗顯示，儘早規劃利害關係者參與有助於除役活動的成效。以先進除役及除污技術為例，數位模型的應用可在協助物質運

¹ IAEA Safety Standard, “Decommissioning of Facilities,” General Safety Requirements Part 6.

² IAEA Safety Standard, “Decommissioning of Nuclear Power Plants, Research Reactors and Other Nuclear Fuel Cycle Facilities,” Specific Safety Guide No. SSG-47.

³ IAEA Nuclear Energy Series, “An Overview of Stakeholder Involvement in Decommissioning,” No. NW-T-2.5.

輸、模擬試驗等方面提高安全及效率；遠端技術的應用可讓設備進入高輻射場中工作；擴增實境(Augmented Reality，簡稱 AR)及虛擬實境(Virtual Reality，簡稱 VR)的應用可加強除役過程中的訓練。可能的利害關係者如下：

	利害關係者
直接負責	(1)經營者、(2)設施擁有者、(3)經理及得到授權的人員
負責或影響決策	(1)科學及研究機構、(2)技術支援組織、(3)核能管制機關、(4)其他管制機關、(5)政策制定者、(6)廢棄物管理機構
合作或感興趣	(1)國際組織、(2)國內承包商、(3)國際承包商

IAEA 並評估了利害關係者參與不足的負面影響，例如除設計畫期程延宕、除役成本增加等。

3. Amentum 公司提出其參與的 4 個實務案例，分享除役及廢棄物管理相關的技術與國際經驗，說明如下：

(1)案例一：地理資訊系統(Geographical Information Systems，簡稱 GIS)應用

Amentum 公司在英國建立 GIS 平台，可為英國多個核電廠在除役階段提供標準化的廠址地理空間資訊，包含建築物、道路、廠界等。GIS 平台並可將廢棄物存量視覺化，使用者可依據需求篩濾單個或多個廠址、廢棄物種類、單年份或複數年份的資料，所得的資料有助於評估廢棄物搬運及掩埋所需的成本。

(2)案例二：遠端操作的車輛(Remotely Operated Vehicles，簡稱 ROV)及機器人

為因應複雜的除役環境，Amentum 公司研發各式可遠端操作的車輛及機器人，例如在擁擠的環境使用高機動履帶式 ROV、用於部署樓面除污設備及廢棄物桶使用重型輪式 ROV、用於清理來自潮濕筒倉(silo)及水下區域的廢棄物使用潛水履帶式 ROV、用於檢查管道內部的管路爬行器等。這些遠端操作裝置可依不同需求裝設機械手臂，且具有高輻射耐

受性。

(3) 案例三：放射性分析技術

Amentum 公司為比利時的放射性廢棄物管理機關 ONDRAF/NIRAS 設計實驗室，以分析數千個廢棄物桶，該實驗室可進行放射化學分析、非破壞檢測。除設計實驗室外，該公司亦建立了實驗室吞吐量模型，以提升分析效率。

(4) 案例四：低碳廢棄物固化技術

英國低碳混凝土團體(Low Carbon Concrete Group)於 2022 年提出混凝土及水泥應用至 2050 年達到淨零排放的路徑，為協助達到該路徑限制的隱含碳排放(embodied carbon)量，Amentum 公司發展了無機聚合物固化技術 SIAL，以減少水泥的使用，目前 SIAL 已在數個國家取得管制機關的使用許可。

4. NUKEM 公司已完成 5 個反應爐壓力容器的拆除工作，反應爐壓力容器的切割計畫取決於切割後貯存容器的尺寸、技術可行性等，而可能採用的技術包含機械加工(例如線鋸切割)，以及熱加工(例如電漿切割)。該公司依其經驗提出優化的切割程序，並以將反應爐壓力容器切割成約 300 片切片的程序進行說明。切割程序分為兩類方法，方法一為依序將反應爐壓力容器切割成方形切片；方法二為兩階段切割，先將反應爐壓力容器切割成環狀切片，將環狀切片移至後處理區域，再將環狀切片切成方形切片。經比較，方法二由於兩階段切割工作可同步進行，且所需相關作業(例如移動切割設備)時間較短，可大幅縮短總作業時間。然而，應用上須注意此種方法須準備後處理區域，及須執行較多工作步驟。

三、11 月 20 日專題會議，主題包含除役技術、創新及數位化、廢棄物管理

1. 中國重水式研究用反應器(Heavy Water Research Reactor, 簡稱 HWRR)為中國原子能科學研究院(China Institute of Atomic Energy, 簡稱 CIAE)所有，其為中國第一部核子反應器，也是第一部進入除役期間的核子反應器。CIAE 採取將 HWRR 立即拆除的除役策略，分為兩階段進行，第一階段為 2021 年至 2023 年，進行準備工作及輔助系統拆除；第二階段為 2024 年至 2027 年，進行主要系統拆除、受放射性污染的混凝土拆除及廠址復原。為執行第二階段除役作業，CIAE 已購置特性偵檢設備、切割及拆除設備、除

污設備，及輻射監測設備，另已新建廢棄物暫時貯存設施、切割作業廠房、除污作業廠房。在數位化方面，CIAE 建立了 HWRR 的數位模型，並研發模型快速切割演算法、人員體外輻射劑量計算演算法等相關應用。

2. Uniper 公司為瑞典 Barsebäck 核電廠的擁有者，及 Oskarshamn 核電廠的主要擁有者。該公司亦負責 Barsebäck 核電廠 1、2 號機及 Oskarshamn 核電廠 1、2 號機的除役及除污(Decommissioning & Decontamination，簡稱 D&D)作業，這 4 部機組在除役過渡階段結束後，自 2020 年起開始執行大規模的 D&D 工作，預計在 2028 年完成。Uniper 公司將 D&D 作業切分為 15 個工作包(例如反應爐壓力槽切割為其中一個)，並採取「fleet approach」策略，即工作人員及設備在一部機組完成 D&D 作業後，轉移到下一部機組繼續執行相同工作，此策略可幫助工作人員累積經驗及改善技術。實際執行時，每個工作包再依據個別機組的狀況進行調整，這種作法已得到瑞典輻射安全管制機關的支持。
3. 法國 EDF 公司擁有的核子反應器機組中，有 11 部正在執行除役作業，包含 3 部輕水式反應器、6 部石墨輕水式反應器、1 部重水式反應器、1 部快滋生反應器。EDF 公司依不同的反應器型式採取不同的除役策略，例如輕水式反應器採取立即拆除策略、石墨輕水式反應器採取延遲拆除策略。以靠近德國邊境的 Fessenheim 核電廠為例，該電廠擁有兩部壓水式反應器機組，分別於 2020 年 2 月及 6 月永久停止運轉，用過燃料池中用過核子燃料於 2022 年 8 月移出，一次側管路除污於 2023 年 6 月完成，拆除作業規劃於 2026 年初開始，原廠址於除役完成後將作為工業用途。Fessenheim 核電廠拆除作業由 Cyclic 公司負責，該公司為 EDF 公司的子公司。為了更快、更方便地進行設備及廢棄物搬運，反應器廠房通道(hatch)已完成改建，將原氣鎖門拆除，並以更輕、更大的工業用門取代。關於反應器壓力槽及其內部組件，Cyclic 公司採用水下切割技術，切割後產生的切片將送至 EDF 公司的 ICEDA 設施處理及貯存。
4. 比利時 Doel 核電廠 3 號機於 2022 年 9 月永久停止運轉後，依 ENGIE 公司規劃於 2023 年初執行一次系統化學除污，主要目的為整體性降低一次系統的劑量率，次要目的為盡可能達到可熔融除污標準。執行化學除污期間同時進行廢水處理，以縮短工期。化學除污的概念係利用強無機酸、螯合劑

等化學物質移除金屬表面的氧化層，再使用過濾器及樹脂捕捉被移除的氧化物。為盡可能達到可熔融除污標準，Doe1 核電廠 3 號機執行了 5 個循環的化學除污，每個循環費時約 1 個星期，總活度移出效果約為 99.3%。Doe1 核電廠 3 號機一次系統化學除污為 ENGIE 公司的首次經驗，該公司認為，在達到可熔融除污標準方面，化學除污的成效優於預期，而除役廢棄物之劑量率降低，可使除役作業期間之人員輻射劑量結果小於劑量管理目標值，未來執行系統化學除污時應將這些效益列入考量。

5. 德國 BGE 公司負責 Konrad 低放射性廢棄物(low level waste)及中放射性廢棄物 (Intermediate level waste)處置場的建造及營運，該處置場目前仍在建造中。Konrad 處置場的啟用與是否有充分的、受流程控制的廢棄物包裝有關，而整個流程控制包含拆除計畫、廢棄物狀態確認及包裝、廢棄物包裝文件製作，及廢棄物包裝運輸。為此，BGE 公司建立了數位化流程控制系統，該系統加速了處理過程。對參與流程控制的各參與方而言，數位化流程控制系統的應用提升了透明度、流程可靠性，及效率。然而，BGE 公司評估目前的流程控制尚不足以因應每年 10,000m³ 的廢棄物，流程控制須持續改善，改善重點例如減少系統閒置時間等。
6. 物質解除管制及大量的低放射性廢棄物處理為除役的重要挑戰，為因應這些挑戰須採取策略性的方法。英國 Amentum 公司提出的策略性方法分為 3 個領域，分別為永續發展、知識管理，及文化，說明如下：
 - (1)永續發展：廢棄物管理的永續性意味著採用創新的技術、較好的材料（例如低碳水泥）、永續性的能源，產生較少的二次廢棄物等。在廢棄物處理方面，大量可再使用的物質可能會被運送至處置場，這個問題會隨著除役及廠址復原的進展變得越來越重要。因此，須創造循環經濟的機會，可能的方法例如將未解除管制的金屬用於工業用設施結構材料等。永續發展的推動因子包含有效率的解除管制方法、高品質的廢棄物資訊、明確的用途、積極的供應鏈、整合的組織。
 - (2)知識管理：知識管理的關鍵在於廢棄物生命週期中的知識保留、資料品質及管理，而應用數位化及資料科技，可強化資料分析，以及支持決策的過程。人工智慧(Artificial intelligence, 簡稱 AI)的相關應用正在探索中，目前的發展方向為利用 AI 作為檢索及分類工具(例如分類廢

棄物的組成及來源)，而非生成工具。知識管理中 AI 應用的推動因子包含克服安全問題、克服保安問題、克服文化問題。

(3)文化：從運轉思維轉換到除役思維的組織變革可能很困難，因此，須從組織文化層面著手，需要的組織內部支持例如探索如何利用訓練及最佳實踐來協助變革。文化的推動因子包含確定何為最佳實踐及如何分享、職涯發展規劃。

7. 位於英國的歐洲聯合環狀反應器(Joint European Torus，簡稱 JET)為核融合實驗裝置，其為托卡馬克型式，使用的核融合燃料為氘及氚。JET 於 2023 年底進行最後一次實驗之後，現已進入除役期間。核融合反應與核分裂反應，因涉及與中子的交互作用，會產生放射性廢棄物，來源包含核融合容器內部及鄰近區域的金屬等。近期的 JET 除役研究結果發現，氚會滲透進結構材料中，亦成為放射性廢棄物(其被歸類為中放射性廢棄物)，經評估約有 250 噸的氚廢棄物產生。由於核融合不會產生高放射性廢棄物，萃取氚為降低放射性存量的關鍵。這是一項挑戰，目前英國原子能管理局(UK Atomic Energy Authority)的挑戰環境遠端應用中心(center for Remote Applications in Challenging Environments)正在研發獨特的氚萃取設施，該設施利用機器人系統來處理受高能粒子影響最大的組件，及利用加熱的過程來加速氚在受污染材料中的擴散，預期得到的相關數據將成為氚萃取的重要資訊。
8. 德國 Aurivus 公司引進 AI 技術來加速拆除作業(AI for Dismantling Acceleration, AIDA)，現階段起步於與德國萊茵能源公司(Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk)之合作計畫，規劃用於 Gundremmingen 核電廠除役階段，AI 應用於除役作業之優勢彙整如下：
 - (1)AI 輔助 3D 雷射造影系統，提升數位雙生之模型效益。傳統移動式 3D 雷射造影系統可紀錄大量位置及幾何資訊，並執行 3D 建模；導入 AI 影像辨識技術，可進一步自動將除役目標物件分群與材質辨識，提供除役廢棄物拆除前快速分類與量體估算。而精確地廢棄物量體估算可提供完善的長期規劃，避免執行過程臨時計畫變更，造成除役期程及計畫成本增加。
 - (2)除役目標物件之資訊細節提升，可增進拆除作業效率，並於高劑量輻射

作業區引進遙控技術執行相關作業，預期可降低進入輻射管制區作業之人力需求。該公司說明以此除役專案執行經驗，每年可降低 180 人力，提升整體除役作業的輻射安全。

(3)AI 輔助商業智慧 (Business Intelligence)，完善除役物流之規劃。AI 透過連結公司之核電廠資料庫和 IT 工具，提供更好的檢索分析，提升物聯網通訊功能；其優化後之物料流程，可避免運輸瓶頸，並減少除役設備互相等待之空檔，達成準時完成除役作業之目標。

(4)未來應用端將從金屬組件推展至建物結構與電廠主系統之應用，並導入網格化模組，整合自動輻射偵檢設備之量測資訊，提供除役計畫更完善之廢棄物輻射特性調查資訊。

9. 西班牙除役及廢棄物管理公司 Enresa 介紹其負責西班牙 GAROÑA 核電廠之除役經驗，Enresa 公司從電廠經營者 Nuclenor 接管所有權，採取兩階段拆除之除役策略，預計於 2033 年完成建築物除污、解除管制等作業。西班牙政府規劃於 2035 年前再關閉 7 座機組，期能將此電廠之除役相關經驗回饋至後續規劃。現階段應用雷射系統物理除污和化學除污技術，可提升中低放射性廢棄物 (Low and Intermediate Level Waste)和極低微活度放射性廢棄物(Very Low Level Waste)減容效益，再進入放射性廢棄物分類系統 (Segregation and Classification workshop)進行分類管理。Enresa 公司說明分類系統需依據輻射特性調查分析結果，其挑戰來自於大容積批次偵檢，活度不均勻可能導致污染分級誤判，因此需優化解除管制流程與方法。目前已建立離廠量測設備，使用 4π 幾何之塑膠閃爍偵檢器，能夠在 30 至 60 秒的測量時間內，確定核種活度分布及比活度；亦應用機器狗、無人機和無人車對於建物及土地表面進行特性調查，最後以數位化之放射性廢棄物監測與追蹤系統來管理除役廢棄物之生命週期。

四、11 月 21 日專題會議，主題包含專業能力及訓練、剩餘物質管理及解除管制。

1. 自 Isar 核電廠 2 號機於 2023 年 4 月永久停止運轉後，德國達成其能源政策中的非核目標。為了安全地拆除核設施及處理因拆除產生的放射性廢棄物，有必要維持所需的專業能力，德國 Westphalian 應用科學大學因而設計了繼續高等教育方案「核廢棄物管理安全」，以傳授相關專業知識。該教

育方案提供 5 個領域的課程：放射性及輻射防護、放射性物質處理、核能管制及審核程序、放射性廢棄物貯存及運輸、核設施除役及拆除，完成各領域課程的學生可獲頒高等研究證書。

2. 建物解除管制與廠址外釋過程涉及牆面及地面上的大面積輻射測量，關於牆面測量，涉及的高處作業、鷹架或大型結構物的使用對測量作業形成挑戰；關於地面測量，廣闊的區域、複雜的地形則對測量儀器的使用造成困難。傳統上，前述測量工作係依靠手動的工具及設備來完成，隨著科技進步，優化的平台/輻射測量裝置需求日益增加。為因應此需求，Enresa 公司研發以探測器(rover)或無人機搭載偵檢器執行除役輻射偵檢，遵循美國多部會輻射偵檢與場址調查手冊(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual)方法，無人機可執行直接測量及掃描，其具有靜態測量模式（定點測量 300 秒）與動態掃描模式（每秒移動速率約 0.2 至 0.3 公尺）。兩種模式經以平面射源建立之牆面及地面進行測試，確認該裝置具有足夠的測量準確性。未來研究將持續提高無人機負載能力，以搭載解析度更高的偵檢器進行量測。
3. 核電廠除役最後的步驟為將建築物外釋再利用或將其拆除，而解除管制所需的輻射測量方法主要使用表面直接測量，以及透過採樣確定核種比活度。其中採樣取得的樣本分析須在「解除管制實驗室」中執行，由分析結果可得知核種的種類、數量，及空間分布。Dornier Hinneburg 公司已在多個德國除役核電廠廠址完成「解除管制實驗室」的整體規劃，並舉其中一個廠址的實驗室為例說明，該廠址具備 1 個放射性化學實驗室、1 個輻射防護實驗室、1 個環境監測實驗室，共有 7 個加馬能譜分析儀。以既有的加馬能譜分析儀為基礎，建築物除污及外釋作業規劃以 8 年的時間執行，須採集的樣本數量約 25,000 個(預期在第 6 年須採集數量最多，超過 6,000 個)。若假設測量站為一班制(每週工作 5 天，每年工作 45 週)且每個樣本測量所需時間為 1 小時(每天測量 6 個樣本)，則最大的測量站需求為 5 個⁴，另所需的測量人員及分析人員數量亦隨之變化。Dornier Hinneburg 公司認為，由於需測量的樣本數量很多，健全的規劃至關重要，而測量的

⁴ 實驗室每天運作 6 小時為理想化的參數，若測量過程不如預期，則可能需更多時間。

時間會受限於測量儀器的狀態(例如數量、測量效率等)。優化所需測量時間的可能方法包含測量程序自動化、使用高效的測量儀器、良好的溝通與協調等。

4. 瑞士 PSI(Paul Scherrer Institute)研究所針對其擁有的核設施制定通用的建築物解除管制程序，首先利用歷史評估將建築物受污染情形加以分類，第零類為無污染、第一類為不太可能污染、第二類為可能污染、第三類為有污染。接著決定須採取的程序，第零類採用簡化程序，第三類採用標準程序(包含特性偵檢)，第一、二類則須透過確認偵檢確定受污染狀況，再決定是否可採用簡化程序。這個解除管制程序正在 PSI 研究所的 Saphir 研究用反應器進行應用測試，瑞士核能安全管制機關 ENSI 亦參與其中。Proteus 為 PSI 研究所的另一部研究用反應器，主要用於不同核子燃料的中子物理實驗，其運轉時的熱輸出被限制在 1kW。Proteus 反應器於 2011 年 4 月永久停止運轉，於 2017 年開始執行除役作業，目前廠房中所有裝置幾乎皆已移除，未來廠房建築物規劃留用。Proteus 反應器的歷史評估結果將其廠房建築物內的所有區域皆分類為第一類，即不太可能污染。經使用加馬能譜分析儀執行 3 個階段的確認偵檢後，確認應可採用簡化程序解除管制。PSI 研究所期望其通用的建築物解除管制程序可得到 ENSI 核准，並可應用在其他瑞士將除役的核設施。
5. 德國除役及廢棄物管理公司 NUKEM 介紹該公司發展放射性廢棄物監測系統，應用於計測除役廢棄物包件之表面劑量率，及鑑定表面污染核種、廢棄物中之核種組成與比活度，以確認廢棄物貯存安全與是否符合外釋條件，重點摘要如下：
 - (1)污染分級監測系統(Sorting Monitors)：可執行現場量測之影像偵檢系統，也能對於焚化、壓實處理之放射性廢棄物執行分類。常見之影像偵檢系統為針孔準直儀偵檢器，雖可提供高解析度活度影像，但會降低偵檢器靈敏度，該公司分享發展之 256 孔針孔影像偵檢器，提升 16 倍之偵檢效率；另一系統為軌道式掃描系統，搭載鎘鋅碲(cadmium zinc telluride)半導體偵檢器，提供相對於碘化鈉(NaI)晶體更高能量解析度之影像分析，增加核種辨識能力。
 - (2)離廠計測系統(Facility Exit Monitors)：此為除役廢棄物外釋前最重

要之輻射監測設施，由下列偵檢器所組成：(a)劑量率偵檢器，執行表面劑量率量測；(b)擦拭量測設備，執行表面污染核種辨識；(c)中子偵檢系統，以 60 組偵檢器圍繞廢棄物桶監測中子劑量率，以回推除役廢棄物中阿伐核種之活度；(d)桶型(Drum)偵檢系統，設有加馬能譜分析儀，以量測除役廢棄物桶之加馬能譜並辨識其他核種，完成比活度量測。

- (3)土壤無條件釋出監測系統(Free Release Monitors)：可執行可能污染區域之土壤或粉碎之建材的比活度計測。NUKEM 公司研發之 FREMES(Free Release Measurement System)偵檢系統，已應用於燃料製造廠之土地釋出階段，提供土壤 U-235 核種特性調查及污染分級。其計測系統利用輸送帶執行土壤樣品傳輸，搭載 2 台高純度鍺偵檢器 (HPGe)執行活度計測，應用秤重儀獲得樣品重量，再搭配 AI 輔助之材料能譜分析完成校正，獲得比活度定量分析結果。

肆、心得與建議

- 一、第 13 屆 ICOND 包含會議前工作坊及專題會議，專題會議議題則含括除役及拆除的挑戰、除役計畫狀態及最佳實踐、除役技術、創新及數位化、廢棄物管理、專業能力及訓練、剩餘物質管理及解除管制等項目。參與此會議可了解世界核能先進國家核電廠除役的經驗、除役面臨的挑戰與對策，以及除役相關技術發展的趨勢，可作為我國核電廠除役安全管制之參考。因此，建議未來持續派員參加與除役相關之國際會議。
- 二、國內核一、二廠及核三廠 1 號機已進入除役期間，核三廠 2 號機亦將於 114 年 5 月進入除役期間。由本次會議內容觀之，核電廠除役相關的除污、拆除、及輻射測量作業，其技術發展的重點之一在於視覺化技術、AR 及 VR、數位雙生，及 AI 的應用，鑒於國內除役中核電廠未來亦可能採用相關技術，建議持續關注並了解各國管制機關相應的管制作法。
- 三、核電廠除役期程可能長達數十年，為使除役作業能順利進行，除役相關知識、經驗的傳承至關重要，本次會議有許多核能先進國家除役團隊在專題會議討論中亦強調此一環節。知識、經驗傳承的重要性對管制機關而言亦然，因此，除掌握核能先進國家除役管制的經驗外，建議應落實除役管制經驗傳承，以增進我國核電廠除役安全與輻防管制作業之知能。

伍、附件

附件一、2024 年國際核能除役研討會 (ICOND 2024) 議程



ABOUT ICOND

PROGRAM

SPEAKER ABSTRACTS

COMPANY PROFILES

MONDAY - NOV. 18TH, 2024

PRE-CONFERENCE WORKSHOP

(Presentations are held in English)

11:30 REGISTRATION

12:00 QUICK LUNCH

DECOMMISSIONING SERVICES & PRODUCTS

13:00 Welcome

Dr. Luc Schlömer – AiNT GmbH & Michael Köbl – GNS mbH

13:15 Belgian Nuclear Landscape Opportunity to Collaborate

Peter Berben - ENGIE

13:40 General Approach to the Decommissioning and Processing of Sludge Generated in the Long-Term-Storage at the A1 NPP

Miroslav Toth – Vuje Norge A.S.

14:05 Change Management in the AVR Dismantling Project - Well-Prepared for the Final Dismantling Phase

Marco Steinbusch – JEN mbH

14:30 Metrological Challenges in Dismantling and Possible Solutions - a Brief Overview

Dr. Matthias Fritzsche – Mirion Technologies (Canberra) GmbH

14:55 COFFEE BREAK

15:30 Radiological Monitoring Systems for Waste Characterisation in the Environment of our Decommissioning Solutions

Dr. Marina Sokcic-Kostic – NUKEM Technologies Engineering

15:55 Application of 3-D Modelling in Practical Radiation Protection Applications and Training

Franz Borrmann – IUS Institut für Umwelttechnologien und Strahlenschutz GmbH

ABOUT ICOND

PROGRAM

SPEAKER ABSTRACTS

COMPANY PROFILES



16:20 A Digital Twin Approach to Radiological Clearance and Nuclear Decommissioning using modern web applications and 3D visualization

Alexander Willkomm – aixITem GmbH

Jakob Hirn – BuildInformed GmbH

16:45 Industrialization of the cleanDECON Laser Decontamination Technology for NPP - New Market Driven Solutions

Sergej Retich – Clean Lasersysteme GmbH

**17:10 Technology update on Wave Blast:
Innovative Complex Geometry Metal Decontamination**

Brian Gihm – Hatch Ltd.



TUESDAY - THURSDAY
DIENSTAG - DONNERSTAG



ABOUT ICOND

PROGRAM

SPEAKER ABSTRACTS

COMPANY PROFILES

TUESDAY - NOV. 19TH, 2024

10:00 REGISTRATION

11:30 QUICK LUNCH

13:00 Welcome

Dr. Luc Schlömer – AiNT GmbH

Michael Köbl – GNS mbH

KEY NOTE - THE CHALLENGE OF D&D - EFFICIENT COOPERATION BETWEEN AUTHORITIES, EXPERTS AND WASTE PRODUCERS? HERAUSFORDERUNG RÜCKBAU - EFFIZIENTES ZUSAMMENSPIEL VON ABFALLVERURSACHERN, BEHÖRDEN UND SACHVERSTÄNDIGEN?

13:15 Challenges in Decommissioning and Dismantling from the Perspective of PreussenElektra

Herausforderungen bei der Stilllegung und im Rückbau aus Sicht der PreussenElektra

Michael Bongartz – PreussenElektra GmbH

13:40 Nuclear Licensing and Regulations for Supervision of the Decommissioning and Dismantling of the Gundremmingen II Nuclear Power Plant (KRB II)

Atomrechtliche Genehmigung und Aufsicht bei Stilllegung und Abbau des Kernkraftwerks Gundremmingen II (KRB II)

Ulrich Wiedenmann – Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

14:05 Current Status of Nuclear Administrative Procedures in Niedersachsen - Germany

Aktueller Stand kerntechnischer Verwaltungsverfahren in Niedersachsen

Silva Smalian – Nieders. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

14:30 Challenges in Dismantling of Nuclear Facilities from the TSO's Perspective

Herausforderungen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen aus der Sicht der Sachverständigen

Dr. Hans Koopman – TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG



- 14:55 The Challenge of D&D - Efficient Cooperation between Authorities, Experts and Waste Producers - From an International Perspective**
 Herausforderung Rückbau - Effizientes Zusammenspiel von Abfallverursachern, Behörden und Sachverständigen – Aus internationaler Sicht
 Tetiana Kilochytska & Shinichi Higuchi – IAEA

15:20 COFFEE BREAK sponsored by 

PROJECT STATUS & BEST PRACTICE PROJEKTSTATUS & BEWÄHRTE VERFAHREN

- 16:15 International Experience and Technology Benchmarks in Decommissioning and Waste Management for Site Regeneration**
 Internationale Erfahrungen und technologische Benchmarks bei der Stilllegung und Abfallentsorgung für die Standortregeneration
 Rudy Koenig – Amentum Clean Energy Ltd.
- 16:40 Boiling Water Reactors - Optimised Dismantling through Parallel pre- and post-Dismantling - Experiences from Projects in Germany and Sweden**
 Siedewasserreaktoren – Optimierter Rückbau durch parallele Vor- und Nachzerlegung – Erfahrungen aus Projekten in Deutschland und Schweden
 Fabian Attenberger – NUKEM Technologies Engineering GmbH
- 17:45 DEPARTURE OF BUSES TO DINNER LOCATION**
 Abfahrt der Busse zur Dinner Location
- 18:15 CONFERENCE DINNER AT „DAS LIEBIG“** sponsored by **TUVNORD**
 Conference Dinner im „Das Liebig“



TUESDAY - THURSDAY
DIENSTAG - DONNERSTAG



ABOUT ICOND

PROGRAM

SPEAKER ABSTRACTS

COMPANY PROFILES

WEDNESDAY - NOV. 20TH, 2024

DECOMMISSIONING TECHNOLOGIES RÜCKBAUTECHNOLOGIEN

- 09:00** **Project Statuses of HWRR Decommissioning and Digitalization Technology Application**
Projektstatus des HWRR Rückbaus und der Digitalisierungs-Technologieanwendung
Zhang Yu – China Institute of Atomic Energy
- 09:25** **Success Factors and Lessons Learned from Uniper's Swedish D&D Program's first Half-Time**
Erfolgsfaktoren und Erfahrungen aus der ersten Halbzeit des schwedischen D&D-Programms von Uniper
Dr. Martin Amft – Sydkraft Nuclear Power AB
- 09:50** **COFFEE BREAK** sponsored by 
- 10:45** **Strategies, Innovation and Optimization on Waste Optimization at Garoña NPP D&D by Enresa**
Strategien, Innovation und Optimierung der Abfälle beim AKW D&D Garoña von Enresa
Diego Espejo Hernando – Enresa S.A.
- 11:10** **Decommissioning Strategies in France - The Fessenheim NPP Example**
Rückbaustrategien in Frankreich - Das Fessenheim AKW Beispiel
Hugo Mejia – Cyclife Germany GmbH
- 11:35** **Full System Decontamination - A Sustainable Way to Reach More Challenging Targets on Waste Reclassification**
Vollständige Systemdekontaminierung - Ein nachhaltiger Weg zur Erreichung anspruchsvoller Ziele bei der Abfallneueinstufung
Pedro Moreira – Framatome GmbH
-



INNOVATION AND DIGITALIZATION INNOVATION UND DIGITALISIERUNG

- 12:00 Counting, Measuring, Weighing with AI and 3D Scans for Enhanced Efficiency in Nuclear Power Plant Decommissioning**
Zählen, Messen, Wiegen mit KI- und 3D-Scans für mehr Effizienz beim Rückbau von Kernkraftwerken
Dr. Stefan Hörmann – Aurivus GmbH
- 12:25 AI in Practice: Experience and Perspectives from the Decommissioning Plant Gundremmingen**
KI in der Praxis: Erfahrungen und Ausblick von der Rückbauanlage Gundremmingen
Carsten George – RWE Nuclear GmbH
- 12:50 LUNCH**
- 13:45 MEET YOUR COMPANY**
- 13:45 Product Control: Increase of Efficiency and Transparency by Digitalisation and KPIS**
Produktkontrolle: Steigerung von Effizienz und Transparenz durch Digitalisierung und KPIS
Philip Borck & Karolin Möhle – Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- 14:10 An Example of how Modern KI Tools can Lead to an Effective Decommissioning Process through the Use of Interpretable Machine an Hybrid Intelligence**
Ein Beispiel dafür, wie moderne KI-Tools zu einem effektiven Stilllegungsprozess durch den Einsatz von interpretierbaren maschinellen und hybrider Intelligenz führen können
Thomas Kopinski – FH Südwestfalen

WASTE MANAGEMENT, DECOMMISSIONING & CHARACTERIZATION ABFALLMANAGEMENT, RÜCKBAU & CHARAKTERISIERUNG

- 14:35 Feasibility Study for the Usage of 3D Printed Tools in a Radiochemical Laboratory**
Machbarkeitsstudie für den Einsatz von 3D-gedruckten Werkzeugen in einem radiochemischen Labor
Patrick Haass & Lars Grooten – NRG



ABOUT ICOND

PROGRAM

SPEAKER ABSTRACTS

COMPANY PROFILES

- 15:00** **Thoughts on German Waste Management Strategies**
 Überlegungen zu deutschen Abfallwirtschaftsstrategien
 Michelle Dickinson – Amentum Clean Energy Ltd.
- 15:25** **A Review of the Challenges of Waste Management and Decommissioning of Future Fusion Power Plants**
 Ein Überblick über die Herausforderungen der Abfallentsorgung und der Stilllegung künftiger Fusionskraftwerke
 Nick Sykes – UK Atomic Energy Authority
- 15:50** **COFFEE BREAK** sponsored by 
- 16:15** **Development and Test of a Sorting System for Soil with Conventional and Radiological Contamination**
 Entwicklung und Test eines Sortiersystems für konventionell und radiologisch kontaminierten Boden
 Dr. Christoph Klein – NUKEM Technologies Engineering Services GmbH
- 16:40** **Radiological Characterization of the Control Area of the Large Hot Cells of the JEN in Jülich**
 Radiologische Charakterisierung des Kontrollbereichs der Großen Heißen Zellen der JEN in Jülich
 Uwe Königs – WTI GmbH

RULES AND REGULATIONS
REGELN UND VORSCHRIFTEN

- 17:05** **Successor Regulations of the KTA Standards for Nuclear Power Plants and Research Reactors**
 Nachfolgeregelungen der KTA-Regeln für Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren
 Dominic Krönung – BMUV
- 17:00** **BUSINESS SPEED NETWORKING**
- 17:30** **GET TOGETHER**
 sponsored by 



TUESDAY - THURSDAY
DIENSTAG - DONNERSTAG



THURSDAY - NOV. 21ST, 2024

COMPETENCE & TRAINING KOMPETENZ & WEITERBILDUNG

- 09:00** **Safety: Today and Tomorrow**
Sicherheit: Heute und morgen
Dr. Daniela Gutberlet – Westfälische Hochschule
- 09:25** **EducTUM - An Interactive Platform for Education and Training as well as the Maintenance of Competence in the non-destructive Analysis of Radioactive Materials from Decommissioning and Dismantling**
EducTUM - eine interaktive Plattform zur Aus- und Weiterbildung sowie dem Kompetenzerhalt im Bereich der zerstörungsfreien Analyse von radioaktiven Stoffen aus Stilllegung und Rückbau
Dr. Thomas Bücherl – TU München

09:50 **COFFEE BREAK** sponsored by 

RESIDUE MANAGEMENT & CLEARANCE RESTSTOFFMANAGEMENT & -FREIGABE

- 10:30** **Materials and Surfaces Release Use of Advanced Devices for Process Scaling**
Werkstoffe und Oberflächen Freigabe der Nutzung fortschrittlicher Geräte für die Prozessskalierung
Dr. José Luis Leganes Nieto – Enresa S.A.
- 10:55** **Planning a Laboratory for Release-Related Laboratory Measurements**
Planung eines Labors für freisetzungsbegleitende Labormessungen
Dr. Bettina Grauel – Dornier Group GmbH
- 11:20** **Radiological Clearance of Buildings using the Example of the Decommissioned Proteus Research Reactor at PSI**
Radiologische Freigabe von Gebäuden am Beispiel des stillgelegten Proteus-Forschungsreaktors bei PSI
Dr. Fritz Leibundgut – Paul Scherrer Institut
-



ABOUT ICOND

PROGRAM

SPEAKER ABSTRACTS

COMPANY PROFILES

- 11:45 Clearance in Bavarian Nuclear Facilities Using the Example of KKI 1**
Die Freigabe in bayerischen kerntechnischen Anlagen am Beispiel von KKI 1
Sven Böhringer – LfU Bayern
- 12:10 The Challenge of Radioactive Waste Disposal - Between Heritage Protection and High-Tech**
Die Herausforderung der Entsorgung radioaktiver Abfälle - zwischen Denkmalschutz und Hightech
Dr. Thomas Lautsch – Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- 12:35 FINAL STATEMENT AND OUTLOOK**
- 13:00 QUICK LUNCH**



TUESDAY - THURSDAY
DIENSTAG - DONNERSTAG

附件二、活動照片



2024 年國際核能除役研討會開幕式



2024 年國際核能除役研討會主席 Luc Schlömer 博士致詞