

出國報告（出國類別：開會）

參加 2023 年美國機械工程師協會(ASME)  
環境整治及放射性廢棄物管理國際研討會

服務機關：行政院原子能委員會

出國人：曹松楠技正

出國地區：德國

出國期間：112 年 10 月 1 日至 8 日

報告日期：112 年 12 月 1 日

## 摘要

我國三座核能電廠陸續於運轉執照屆期後進行除役，由於國內並無核能電廠除役相關經驗，並有用過核子燃料無法退出核子反應器之情形，更增國內核能電廠除役管制情境的複雜程度，為蒐集國際間核電廠除役之重要技術進展、趨勢及內容，汲取國外核能電廠的除役管制經驗及相關技術作法，於 2023 年 10 月 3 日至 6 日赴德國司徒加特參加由美國機械工程師學會(ASME)與國際原子能總署共同舉辦的環境整治與放射性廢棄物管理國際會議(International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM)。會議中與國際專家學者交流、蒐集國際間核電廠除役之重要技術進展、趨勢內容，以及國外核能電廠的除役管制經驗，對增進我國核能電廠除役安全與精進本會除役管制技術，有正面助益並可順遂除役相關事務的推動。

# 目 次

	頁碼
壹、目的.....	1
貳、出國行程.....	2
參、過程紀要.....	3
肆、心得與建議.....	16

## 壹、目的

目前我國三座核能電廠中核一、二廠之運轉執照均已屆期進行除役期間，核三廠亦將於 2025 年 5 月 17 日 2 號機組之運轉執照屆期後全廠進入除役期間。由於國內並無核能電廠除役相關經驗，而核一、二廠核子反應器內的用過核子燃料無法退出，亦增國內核能電廠除役管制情境的複雜程度，因此藉由參加國際核能專業研究機構舉辦之核電廠系統安全及除役經驗研討會議，與國際專家學者交流並蒐集國際間核電廠除役之重要技術進展、趨勢及內容，汲取國外核能電廠的除役管制經驗及相關技術作法，對增進我國核能電廠除役安全與精進本會除役管制技術，有正面助益，同時亦可順遂除役相關事務的推動。

美國機械工程師學會(ASME)環境整治與放射性廢棄物管理國際會議(International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM)係由 ASME 環境系統部門(Environmental Systems Division, ESD)與 ASME 核能部門(Nuclear Engineering Division, NED)共同負責，自 1987 年於香港召開後不定期於世界各地舉行，邀集國際核電廠除役、輻射防護、放射性廢棄物處置管理、環境等領域的學者、產業者專家及管制機構人員，共同就核電廠除役、核廢棄物管理、放射性污染除污、環境復原等核能工程與環境工程交互關聯領域等的動態、技術發展與重要議題進行交流討論。透由參加此一會議可瞭解歐美日各國核能電廠除役現況與當前所面臨的重要議題，以及除役技術研發現況與課題，可提供我國未來執行相關事項之參考，有助我國核能安全管制工作之推展。



圖一、德國司徒加特國際會議中心

## 貳、出國行程

此次出國係自 2023 年 10 月 1 日起至 2023 年 10 月 8 日止，共計 8 天，行程如下表：

日期	行程	摘要
2023 年 10 月 1-2 日	台北→德國法蘭克福→德國司徒加特	去程
2023 年 10 月 3~5 日	德國司徒加特	出席 2023 年 ASME International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 研討會
2023 年 10 月 6 日	德國司徒加特→德國法蘭克福	1. 出席 2023 年 ASME International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 研討會 2. 返程(司徒加特→法蘭克福)
2023 年 11 月 7~8 日	德國法蘭克福→台北	返程

ICEM 2023 -Stuttgart, Germany - October 3 - 6							
Times	Exhibit Hall	C4	C5.1	C5.2	C5.3	C6.1	C6.2.1 C6.2.2
Tuesday October 3							
2pm - 5pm	Registration is Open in Foyer						
Wednesday October 4							
7:00am - 5:00pm	Registration is Open in Foyer						
8:00am - 8:30am		Opening Welcome by Olena Mykolaichuk - IAEA/Conference Chairs					
8:30am - 9:30am		Dr. Erica Bickford - USDOE					
9:30am - 9:50am	Break - Exhibit Hall Open						
9:50am - 11:20am		Chernobyl Panel					
11:20am - 12:50am	Lunch w/ Exhibit Hall Open						
12:50pm - 2:30pm		02-03	04-01	05-06	03-01	Student Contest	10-01 08-02
2:30pm - 3:50pm	Break - Exhibit Hall Open						
3:50pm - 4:00pm		02-02	04-02	05-05	05-01	03-02	07-01 01-01
4:00pm - 5:20pm		Ansaldo D&D/ JRC Panel		INL Panel			
5:30pm - 7:00pm	Opening Reception - Exhibit Hall Open						
Thursday October 5							
7:00am - 5:00pm	Registration is Open in Foyer						
8:00am - 9:00am		Pasi Tuohimaa - Posiva					
9:10am - 10:10am		Dr. Joerg Feinhals - German-Swiss Association for Radiation Protection					
10:10am - 10:40am	Break						
10:40am - 11:40pm		Commissioner Annie Caputo - U.S. Nuclear Regulatory Commission					
11:40am - 1:10pm	Lunch w/ Exhibit Hall Open						
1:10pm - 2:50pm		Finland Panel					
2:50pm - 3:10pm	Break						
3:10pm - 4:50pm		04-03	05-02	05-03	06-01	10-02	08-01
5:20pm	Bus Leaves for Dinner						
6:00pm - 8:30pm	Dinner - Offsite						
Friday October 6							
8:00am - 12:00pm	Registration is Open in Foyer						
8:30am - 10:10am		Fukushima Panel					
10:10am - 10:40am	Break						
10:40am - 12:00pm		02-01	05-04	05-07	Student Contest	10-03	
12:00pm	Conference Ends/Breakdown						
2:00pm	Tours - Offsite						

For more information on Special session speakers visit: <https://event.asme.org/ICEM/Speakers>

圖二、第 15 屆 ASME ICEM 會議議程

## 參、過程紀要

此次第 15 屆 ICEM 會議係由 ASME 與國際原子能總署共同主辦，於 2023 年 10 月 3~6 日在德國司徒加特國際會議中心舉行。本次會議計有 10 個技術主題，包括：除役機器人與遠程處理與觀察技術、核設施除役之拆解/除污技術與策略、設施意外事件/事故處理經驗、用過燃料和高階廢棄物(HLW) 管理、低放射性廢料(L/ILW)管理、環境復原、公眾參與/跨領域問題/全球合作/人力資源開發、新設施規劃/環境管理(EM)/健康與安全、學生/青年工程師計劃、除役除污及拆除分解(D/D&D)研發等。會議期間除以大會(Plenary)型式，邀請歐盟各國、日本及美國學者專家及管制官員就車諾比核能電廠現況、芬蘭用過核子燃料處置經驗、日本福島核能電廠復原現況、除役技術與策略等進行專題報告或小組討論外，會議主辦單位亦針對此次會議主題召開 24 場次的分組研討會發表超過 120 篇之論文。

本次會議在 10 月 3 日(週二)辦理註冊，當日抵達德國司徒加特國際會議中心辦理註冊後，並就會場環境進行瞭解。

### ■ 10 月 4 日

10 月 4 日(週三)舉行正式會議，首先由此次會議主席比薩大學 Rosa Lo Frano 博士及國際原子能總署 IAEA 核燃料循環與廢物技術部主任 Olena Mykolaichuk 女士分別說明此次會議主題及致歡迎辭後，由美國能源部(DOE)整合廢棄物管理辦公室(the Office of Integrated Waste Management)主任 Erica Bickford 博士以「Consent-Based Approach to Siting Spent Fuel Management Facilities in the US」為題分享美國用過核子燃料處置現況資訊。



圖三、會議主席 Rosa Lo Frano 博士致辭



圖四、美國 DOE Erica Bickford 博士



Erica Bickford 博士首先說明整合廢棄物管理辦公室的目標之一，是在推動核能作為應對氣候變化及潛在的電力需求解決方案下，如何安全、長期且持久性地處理後端管理的問題，並簡介美國核能機組運轉與除役現況，特別是美國用過核子燃料處置的目前現況。美國由於 Yucca Mountain 計劃在 2010 年被取消，因此美國的用過核子燃料，目前是以存放在產生它的核能電廠內做為解決措施。Erica Bickford 博士指出雖然目前的情形是安全的，但這導致美國境內有多達 70 個以上的地點存放有用過核子燃料的情境，同時這只是臨時性的，仍然要尋求最終的解決方案。目前已產生的用過核子燃料計有 90,000 公噸，未來並可能多達 140,000 公噸，由於美國核能電廠產生的用過核子燃料，其接收處置是由美國能源部負責，因此不僅現有的用過核子燃料需要加以處置，如果美國未來仍要繼續使用核能，都有需要建立一個長期安全、可靠持久的後端管理體系，重拾美國大眾對於用過核子燃料處置的信心及信任。Erica Bickford 博士說明，由於 Yucca Mountain 計劃中止後，至目前為止，並沒有最終處置有關的授權法案，所以其目前推動的後端管理體系，肇基於 Yucca Mountain 計劃中止後所成立的委員會的建議，在最終場址啟用前以徵求同意的方式來尋求臨時接收儲存處置當時已關閉核能電廠的用過核子燃料，因此並不涉及最終處置及場址的選址；由於這個中期性的後端管理體系，除了要解決儲存、處置、用過的核燃料、老化管理、事故應變等問題外，由於減少用過核子燃料的儲存地點也是目標之一，因此運輸問題也需要納入考量。另對於目前正在發展的小型模組化反應器，其用過核子燃料特性需加以研究了解。依 Erica Bickford 博士的說明，此一計畫推動大致分為：尋找可能有意願的場址，此時需要扭轉與鄰近社區的關係，並協助其建立對話能力；徵求志願場址，此時會提出初步標準，包括土地面積、交通便利性、土地擁有權狀況；託管協商，在同意的基礎上制定具有約束力的託管協定，包括但不限於：對鄰近社區的影響限制、設施的規模、可以儲存的燃料數量、營運期限、除役復原條件。簽訂協議後，才可以進行臨時儲存設施的許可申請、建造和營運。Erica Bickford 博士估計整個進程大約需要 10 到 15 年，其也表示其中存在很大的變數，同時該辦公室目前所推動的計畫也才處於第一階段，而其也同時關注國外進行中的案例，希望能從中獲取經驗。

針對車諾比核災現況會議主辦單位分別邀請烏克蘭國家科學院環境地球化學研究所 Viktor Dolin 博士、烏克蘭基輔地質科學研究所資深研究員 Dmitri Bugay 博士、烏克蘭車諾比核電廠輻射安全部門副主任 Rybalko Serhii 先生及 IAEA Olena Mykolaichuk 處長擔任與談人，會議中與談人主要就其研究及工作經驗，說明車諾比核電廠現況，以及車諾比核災環

境影響現況與復原的主要技術，包括：近年來國際與地緣政治(如：烏俄戰爭)的影響、電廠鄰近區域森林火災所造成的二次區域輻射污染影響，以及鄰近地區環境與地下水輻射變化情形等進行說明。



圖五、車諾比核災現況與談人

其中印象較深刻的是烏克蘭車諾比核電廠 Rybalko Serhii 先生提及的 2010 年製作的車諾比核電廠 4 號機新屏蔽結構體 (New Safe Confinement, NSC)的現況。由於 1986 年事故發生時緊急施作的臨時性混凝土屏蔽結構出現破損，所以在 2010 年時重新施作了 NSC。NSC 同時屏蔽了臨時性混凝土屏蔽結構及 4 號機反應器，NSC 的目標是在未來 100 年防止放射性污染物的釋放、保護作業人員安全、避免水侵入反應器及外部環境因素的影響，以利反應器及相關設施的拆除作業安全。NSC 仍然有技術挑戰和潛在問題需要關注，以避免 NSC 劣化失效的可能。為了確保 NSC 的長期效能及安全，目前已針對 NSC 結構完整性設置一系列特別的監測保護設施(措施)，包括：結構基礎、腐蝕、外部極端氣候因素，而為了避免放射性微粒粉塵對現場作業人員，以及火災排放而對外界環境的影響，對於 NSC 內部火災防護與通風系統強化也是重點事項。

在核設施除污及拆除的技術、策略與挑戰 (Facility Decontamination and Dismantling: Technologies, Strategies and Challenges) 方面，會議主辦單位邀請歐盟委員會聯合研究中心 (Joint Research Centre , JRC)專案計畫主持人 Antonio Bulgheroni 博士、比利時核能研究中心 (SCK CEN: Belgian Nuclear Research Centre)副主任 Christophe Bruggeman 博士、義大利 Ansaldo



Nucleare SpA 公司資深工程師 Thomas Coltella 先生擔任與談人，分享 JRC、SCK CEN、Ansaldo Nucleare SpA 公司在研究用反應器及核能發電機組等核設施除污及拆除方面的經驗。



圖六、核設施除污及拆除的技術、策略與挑戰與談人

Antonio Bulgheroni 博士介紹 JRC 係依據 1957 年依歐洲原子能共同體(Euratom)條約成立，總部設在比利時 Brussels，目前約有 2800 位員工，在五個歐盟國家(比利時 Geel、德國 Karlsruhe、義大利 Ispra、荷蘭 Petten、西班牙 Seville) 都設有研究單位，在核能領域主要專注核能安全與保安應變，以及廢棄物處置與除役方面的研究。Antonio Bulgheroni 博士在會議除介紹 JRC 的研究能力外，亦分享 JRC 在義大利 Ispra 三座不同型式研究用反應器的除役經驗。而他也特別強調需要做好廢棄物管理，確實得到場址與除役廢棄物的輻射特性，以正確評估三座不同型式反應器除役的放射性廢棄物種類數量，在過程中 JRC 發展出許多量測不同元素核種偵檢與關聯性的技術。Christophe Bruggeman 博士除了介紹 SCK CEN 在 SMR、加速器驅動反應處理用過燃料，以及核醫癌症治療等方面的研究應用情形外，並介紹該所化學除污技術 MEDOC 減少比利時杜爾核電廠 3 號機(BR-3)除役金屬廢棄物產量，以及拆除分解 BR-3 生物屏蔽牆的設備技術。依 Thomas Coltella 先生的介紹 Nucleare SpA 公司為來自英國的核能工程公司，在核融合、核電廠興建、廢棄物處理、除役等方面均具有相關技術及研究，目前在英國及義大利也有多項計畫在執行。而 Thomas Coltella 先生在會中亦特別介紹 Nucleare SpA 公司在義大利 Caorso 電廠使用的低放射性廢棄物封裝筒(55 加侖)傳輸系統與 JTC Ispra 使用的廢棄物固化系統，以及裁切 Garigliano 核電廠控制棒的切割設備。

## ■ 10月5日

10月5日，大會首先邀請芬蘭 Posiva Oy 公司傳播溝通經理 Pasi Tuohimaa 先生以芬蘭用過核子燃料最終處置方法(Finland's Approach to Final Disposal of Spent Nuclear Fuel)為題介紹 Posiva Oy 公司的 Onkalo 用過核燃料最終處置場的興建歷程。



圖七、芬蘭用過核子燃料最終處置方法 與談人 Pasi Tuohimaa 先生

Pasi Tuohimaa 先生首先介紹 Posiva Oy 公司是在 1995 年由芬蘭 Teollisuuden Voima Oy 及 Fortum Oy 兩家公司所共同成立的，而 Pasi Tuohimaa 先生也特別強調，如果不包含 100 人的外包人員及 150 人的現場施工人員，Posiva Oy 公司只是一家 90 人左右的私人小公司與世界上核廢料處置都是由政府支持的組織有所不同。接著 Pasi Tuohimaa 先生說明，芬蘭大約是在 1980 年代初期前後，展開最終處置場址的調查與研究，芬蘭政府則約在 1980 年代中期訂定了處置的時程，在 2000 年代前期發布相關處置的原則要求，Posiva Oy 公司則在大約相同的時間投入，並於 2015 年獲得 Onkalo 的興建執照。目前 Onkalo 處置場開發(挖)完成的掩埋貯存容量，已可滿足芬蘭至 2035 年所需(預計可容納芬蘭歐基洛托核電廠(Olkiluodon) 1/2/3 號及洛維薩核電廠(Loviisan) 1/2 號機的用過核燃料)，至於營運許可雖然已在 2 年前提出申請，但目前芬蘭政府仍在審查，預期 12 月可能會獲得同意。

介紹過程中 Pasi Tuohimaa 先生主要說明 Onkalo 處置場概略配置，以及貯存隧道內部與儲存筒(Canister)裝填、封銲、搬運等作業情形，雖然有介紹 Onkalo 處置場所使用瑞典

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) KBS-3 技術，是將用過核燃料掩埋貯存於 400~500 米深岩盤的豎井內，以及其多重包封屏蔽結構：燃料棒 (fuel rod)、燃料束組合(fuel assemble)、內外儲存筒(Canister)、緩衝包封蔽屏層(膨潤土)，但未過於著重技術細節的說明，而是予人注重公眾溝通，建立社區對於安全文化信任與核能認同的觀點，隱約表達 Onkalo 計畫成功的基礎。例如：Pasi Tuohimaa 先生在會議除提到網路社群溝通的重要性外，並指出就地質條件，芬蘭適合最終處置的場址可說到處都是，即使在進一步考量的交通、技術，成本等方面因素後也有幾個，但最後場址的選定的因素仍在公眾的認同上。Pasi Tuohimaa 先生也進一步指出這或許和他們長期工作的成果有關，或當地民眾對於工業、電力需求的認知，以及當地民眾大多有參與 Onkalo 計畫的現場工作，對 Onkalo 計畫工作人員的安全文化有所了解認同的結果。

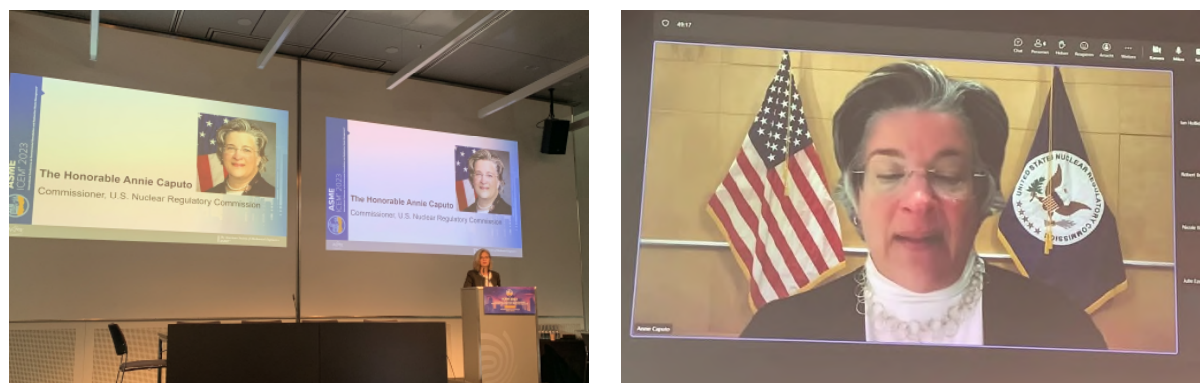


圖八、核電廠除役廢棄物清潔外釋議題 與談人 Joerg Feinhals 博士

在核電廠除役廢棄物清潔外釋議題方面，大會邀請德國和瑞士輻射防護協會執行長 Joerg Feinhals 博士就核電廠除役廢棄物清潔外釋管制面臨的挑戰(Challenges in Clearance)分享其觀點。Joerg Feinhals 博士先就歐盟核電廠除役廢棄物清潔外釋管制規定發展的演進歷史進行說明，其說明在 1980 年代之前並沒有清潔外釋的觀念，然而隨著處置設施的關閉(如：德國於 1978 年關閉 Asse Mine)及新設處置設施困難或成本昂貴的因素，1980 年代開始出現清潔外釋的觀念，並在 IAEA 及歐盟各國共同的努力下，陸續提出清潔外釋的安全標準，而歐盟各國也依據這些標準去制訂各自國內的規定要求標準。不過 Joerg Feinhals 博



士也指出與德國、瑞士，訂有一般與特定(如土壤、金屬等)的清潔外釋標準的情形不同，法國似乎是一個例外，它對於除役廢棄物是否需依清潔外釋規定辦理，是依廢棄物所在區域是否有受輻射影響可能做為歸類判斷準則。然 Joerg Feinhals 博士也又再指出，即使是德國與瑞士間的規定也是有所差異的，且方式上也有不同的做法。對此 Joerg Feinhals 博士說明，存在於各國間，以及與歐盟規定的觀點與清潔外釋標準差異，是需要面對處理的第一項挑戰。清潔外釋的標準與規定詳盡程度，對放射性廢棄物量具有非常決定性的影響，所以這會是與各國放射性廢棄物處置計劃是有相依性的，他具體說明，德國目前 97% 的除役廢棄物是屬可以清潔外釋標的，如果這個比例降低為 91%，就將導致除役放射性廢棄物增加為目前的 3 倍。Joerg Feinhals 博士進一步延續清潔外釋的輻射偵測問題，其指出清潔外釋的輻射偵測是一系列偵檢測量的作業，並非僅僅單一偵檢測量的作業，需要考量除役廢棄物是否受輻射影響可能性、量測偵檢技術/方式、數量等問題，所以需要輻防專業人員的參與執行，以落實規定，實現除役廢棄物清潔外釋。然而 Joerg Feinhals 博士指出，因同時有許多核電廠將進行除役，德國目前乃至未來數十年可能都將面臨，沒有足夠的輻防專業人力的窘境，因此勢必會對清潔外釋作業造成影響，這亦將是未來需要面對的挑戰之一。



圖九&十、美國核能管制委員會委員 Annie Caputo 女士

接者主辦單位邀請美國核能管制委員會 (U.S. Nuclear Regulatory Commission, USNRC) 委員 Annie Caputo 女士於美國，以遠端視訊方式在大會發表演說。在演講中 Annie Caputo 女士首先由後端燃料循環角度 (back-end fuel cycle) 分享其對先進反應器安全管制的看法，以及 USNRC 在這方面國際合作的情形。Annie Caputo 女士指出在整個核燃料循環週期中需要考量的安全議題，也包括運輸、管理和用過燃料的儲存。就儲存而言，新一代的先進核反應器具有可提高發電安全性、降低成本並提高效率的設計特性，這在一定程度上將可減少核能發電後廢棄物的產生，並可能通過回收實現燃料循環的優化。目前核能產官學術界都正在共同努力研究評估新一代先進反應器燃料的廢物管理方法和可能的再處理技術，希

望能實現這個目標。所以 USNRC 需要繼續加強對整個燃料循環技術的理解，以確保管制法規和規範框架能有效管制及支持在燃料循環領域的任何許可活動及新技術。她舉例，有廠商計劃提出再處理設施申請，商業化一種比傳統的再處理技術更簡單，可以在反應器地點附近設置小型工廠的創新再處理技術。因應這一可能的申請活動和廠商技術設計的成熟，USNRC 可能需要重新評估是否應建立新的再處理設施許可法規框架，或者是依現有的法規框架下規範再處理設施的許可活動。此外，她也舉出一些可能會對監管、技術和政策有影響的研究及發現：具有更高濃縮和更高燃耗率的事務容忍燃料、美國電力研究所(EPRI)有關先進反應器設計和運轉差異可能影響後端燃料循環過程的發現等。針對這些研究發現 Annie Caputo 女士說明，USNRC 將持續了解先進反應器燃料的特性，檢討燃料與安全儲存、運輸和處置許可有關的法規，也將繼續關注先進反應器射源項、臨界和屏蔽評估、熱性能和材料劣化等方面技術的發展，及時獲取收集正確的資訊以做出合理、具風險認知的監管決策。另外 Annie Caputo 女士也分享了 USNRC 與加拿大核能安全委員會（CNSC）合作關於 TRISO 燃料資格、安全分類、假設啟動事件，以及 GE Hitachi BWRX 300 等共同監管審查及預審查的成果情形。演講發表後 Annie Caputo 女士並接受及回答現場與會人士有關：美國當年不設置再處理設施考量、目前防止核子擴散的機制與監管單位、美國 SMR 和先進反應器的燃料是否泛括在與美國能源部處置合約的範圍、美國 SMR 和先進反應器監管法規制訂情況、未在機組所在地設置中期貯存設施的法規問題、美國 SMR 申請審查情形等的提問，以及 USNRC 近年面臨的人力離退招募問題。



圖十一、芬蘭 Onkalo 高階核廢料處置場經驗與談人

芬蘭 Onkalo 高階核廢料處置場預計將成為全球首座營運的深層地質處置場，因此本屆 ICEM 會議主辦單位邀請芬蘭技術研究中心（Technical Research Centre of Finland）首席科學家 Maria Oksa 博士及客戶關係經理 Erika Holt 博士、芬蘭 Fortum Power and Heat 公司 Antti Ketolainen 先生、芬蘭 Mitta Engineering Oy 公司 Timo Seppälä 先生及芬蘭 Posiva Oy 公司傳播溝通經理 Pasi Tuohimaa 先生等參與 Onkalo 處置場建設者擔任與談人分享相關經驗。在與談人自我介紹時，Erika Holt 博士曾簡單介紹芬蘭技術研究中心，其肩負芬蘭國家研究中心的角色，負責支援產業研發創新，引入新技術，特別是在非標準化的技術，例如深層地質處置場相關的機器人技術、遠程車輛、監測等技術的開發，此外，還扮演著監管機構技術支援的角色，協助芬蘭政府制定廢物管理和清潔能源相關的政策和藍圖；Pasi Tuohimaa 先生則再次介紹 Posiva Oy 公司，並強調的 Posiva Oy 公司的目標是為核能創造公共信任。接著與談人以相互提問方式，討論 Onkalo 處置場的成功的原因、Posiva Oy 公司是如何由研究單位，變為處置場的開發及未來的營運單位，以及像是這個案子獲得的經驗教訓，與相關研究、設計和示範，特別是公眾信任和利害關係者的信心，在這個案子的重要性。

討論過程與談人首先指出 Onkalo 處置場成功的因素包括：技術、安全、溝通、財務激勵、政府意願、監管框架與運作等，但對於最重要的因素則各有不同的看法，例如：有人認為芬蘭監管單位獲得民眾高度的信任及運作的獨立性是相當重要的關鍵因素，因為民眾不見得會信任從業人員；但有人則認為溝通才是重要的關鍵因素，因為溝通才能取得信任，而要溝通取得信任的對象不僅僅是監管單位，包括利害關係者。對此 Pasi Tuohimaa 先生指出，溝通要取得信任的關鍵在於要有勇氣說出不好的事情，畢竟第一次做某事時，總會是會有風險的或時間上的延誤；承認某些不好的事情，意味著會延遲多久或可能會發生什麼？我們自然擔心會有反彈，所以會試圖安撫人們，而且當下處理可能的後果較好。因此仍然須要快速回應，但可以試圖將其與技術相關聯，確保我們理解民眾的恐懼所在，嚐試用數字、科學和事實來支持，希望通過誠實地溝通來保持信任，因為信任的建立可能需要幾十年，但可能在一分鐘內就失去它，同時要重新建立是十分困難或緩慢的。關鍵點是信任，但最重要的因素，或溝通重點仍然是會隨計畫的進程狀況，與溝通對象關切的目標與背景不同而有差異，例如：有些人關注的是技術問題，或在計畫不同的階段與環境氛圍，人們關注的事項也會受到影響。另外談者有提到因為廢棄物的生產者亦是處理者，即廢棄物所有者掌握了整個廢棄物的生命周期管理，即核燃料的整個生命周期(rock to rock)，所以核燃料所有者需要制定由生產、電廠運轉使用至最後處置的良好計劃，並說明如果達成實現的



藍圖(road map)。而與談者也說明，芬蘭目前的成功，可能是他們依據規劃藍圖堅守進度、預算的結果，希望芬蘭目前的經驗可以提供其他國家參考，能在廢棄物處置方面以更快、更便宜、更準確地進行資源配置。針對經驗分享學習，與談者除再重覆提出芬蘭是由廢棄物產生者電力公司負責最終處理的作法，有別一些國家即使是醫療廢棄物，也是由國家負責處理的方式差異部分外，也針對芬蘭在人口數量，以及社會經濟政治制度差異的影響提出看法，例如：與談者以形容芬蘭為一個彼此認識的俱樂部，這使得廢棄物處置的共識容易溝通與凝聚上，與數千萬人口的國家是有不同差異的，並以 Onkalo 處置場公民投票有 80% 以上的同意但反對的只有 6%，與瑞士公投常有 20% 反對的情形做對比，此外芬蘭民眾公眾事務參與由下而上的習慣，以及政治人物與一般民眾的生活距離近，也有助於凝聚共識與了解差異，同時政治人物也因此較為民眾信任；而在經濟方面，芬蘭的大公司一般不會由少數人控制，以及管理階層與基層間的薪資差異也不會那麼巨大，所相對較易獲得信任。

在回覆現場與會者提出有關對當地經濟方面的助益，以及相關研究和開發技術應用於其他場址，與貯存安全性方面問題時，與談者由對當地學校師生比與就醫等待時間降低，以及當地數量眾多的貯存場協力廠商，對當地民眾生活及經濟上的助益。至於研究開發技術應用與貯存安全風險評估方面，與談者也有概略說明並認芬蘭在 Onkalo 處置場開發建置所獲得的選址、地質岩層、膨潤土行為、深層水樣取樣、包封銅材料及銲道長期行為等方面的技術經驗，雖然有地質環境條件的差異問題，但應該仍深具參考價值。

## ■ 10月6日

10月6日上午大會邀請 IAEA Horst Monken Fernandes 先生、日本環境省 Yoshitomo Mori 先生、東京電力公司福島第一核電廠除役拆除工程公司 Michal Cibula 先生擔任與談人就日本福島第一核電廠機組現況、爐心受損燃料調查、氙水排放及廠外復原等情形進行說明。

Michal Cibula 先生首先簡要說明 2011 年事故發生不久後，日本政府即為福島第一核電廠訂定了除役計畫，規劃分三階段在事故後 30 至 40 年內完成除役工作。整個福島第一核電廠的除役計畫並概分七大議題，包括污染水處理、燃料池中燃料組件移出、爐心燃料碎片取出、廢棄物處理措施、工作和勞動環境、研究開發及安全改進；本次會議 Michal Cibula 先生說明將就現況進行簡要的介紹。



圖十二、日本福島核災現況與談人

在污染水處理現況方面，Michal Cibula 先生首先澄清經由取樣檢測，污染水是來自滲入反應器廠房底層的地下水或雨水，並非電廠注入冷卻反應器的水。目前是依去除水中污染物(remove)、將地下水或雨水與受損爐心燃料隔離(keep away)及防止收集貯存的污染水洩漏(prevent leakage)等 3 個策略訂定了許多處理措施。例如設置抽水井將地下水或雨水抽出，使其無法與污染物質接觸，或回收污染水循環用做爐心冷卻水。其中最重要的是凍土牆的防止或隔離措施，它使得污染水生成量由每天約 500 立方米減少到 2022 年的每天約 100 立方米。由於貯存在廠區內的污染水輻射劑量，相較於事故時或事故後初期已降低了六個數量級( $10^6$ )，因此日本政府決定以受控方式將廠區內經 ALPS 處理過的貯存水排放入海洋。排放的計畫及設施都已通過 IAEA 專家小組的審查符合國際安全標準，而為了建立公眾的信心，福島第一核電廠將擴大和加強監測範圍，不僅在釋放期間監測水質，還將擴大環境樣本監測的範圍，此外除了他們，也有許多獨立的組織也在進行這方面的監測分析。同時福島第一核電廠也設置了專門的網站建立，使公眾可以迅速易於了解的方式，便利地了解排放的過程和已發布的所有監測結果。截至 10 月 6 日福島第一核電廠已進行了兩批次的排放，整個排放期程將長達 30 年。

接著 Michal Cibula 先生簡單說明福島第一核電廠 1 至 4 號機用過燃料池內燃料移出的過程，這個階段的工作目標，是要將燃料放置於廠區內另一個在事故後仍能維持其功能的用過燃料儲存設施，也就是要轉移到一個更安全、更容易管理的設施中。實際進行燃料吊

運前，每部機組都要先配合遠程遙控監視設備進行現場勘察及清理作業，並進行作業規劃及防護外蓋與吊運機具的安裝。

在爐心受損燃料取出作業方面，目前還是在獲取數據的階段，並規劃在明(2024)年 3 月底前開始進行受損燃料碎片取出的試驗。因此需要盡可能地獲取 1 至 3 號機燃料受損的資訊，以了解受損分布和性質等之狀況。在 2017 年時，獲得 2 號和 3 號機壓力容器正下方基座區域的影像資訊，至於 1 號機組也在今(2023)年 3 月獲得區壓力容器正下方基座區域的影像資訊，顯示出有嚴重損壞的情形。另外 Michal Cibula 先生除介紹，在進行 2 號機燃料受損調查過程，成功利用遠程遙控設備抓取微小受損燃料碎屑的經驗，並展示該公司目前正在規劃，利用長達 15 米左右的遠程遙控機械手臂來抓取受損燃料碎片的影片。最後 Michal Cibula 先生有指出取回的受損燃料燃料碎片雖然是非常少量，看起來常微不足道，但經由專業的分析後，可以提供許多重要的訊息，可用於除役作業。

在廢棄物處理方面，現在正優先將受到高污染混凝土碎塊和其他受到高污染的廢棄物轉移到室內儲存，並已規劃建置儲存設施，以及焚燒設施，這類可減少最終需要處置廢棄物體積和數量的處理設施。此外 Michal Cibula 先生表示東京電力公司也在考量廢棄物清潔外釋或進行金屬回收重熔的可能性。至於在福島第一核能發電廠的除役工作和勞動環境方面，Michal Cibula 先生說明現在電廠現場 96%區域都是僅需濾罐口罩和一般性制服的綠色區域，相較於 2011 年 3 月事故發生後初期，全廠基本上都是需要戴全臉罩或半臉罩，或是在防護衣內再增塑膠布的紅色區域或黃色區域，已有非常顯著的改善。

接著由日本環境省 Yoshitomo Mori 先生在日本以遠端視訊方式，就日本福島第一核電廠廠外環境復原情形進行說明，福島第一核電廠廠外周邊區域依受污染程度分為特殊除污區域 (special decontamination areas, SDA) 及強化污染調查區域(Intensive Contamination Survey Areas, ICSA)前者由中央政府執行除污作業，後者則由地方政府執行，並在 2018 年 3 月時就已完成除了 SDA 中的限制性區域 (restricted area) 以外區域的除污作業；至於 SDA 中的限制性區域，目前也都完成除污作業並已開放解除管制了。而廠外復原除污產生的移除土壤和廢棄物及重建產生的特定的廢棄物，送至中期貯存場 (interim storage facility, ISF) 或掩埋場前均會先運送至減容設施減容後，再轉運至 ISF 或其他處理設施，會議中 Yoshitomo Mori 先生並以影片介紹位於福島第一核電廠附近大熊町和太田町的 ISF 設施。目前貯存移除土壤的 ISF 佔地達到 1600 公頃，數量已累積達到 1346 萬立方米。針對移除土壤數量龐

大的處置問題，Yoshitomo Mori 先生除說最終處置場不可能容納如此龐大數量的移除土壤，且超過 3/4 的土壤其受污染的輻射劑量十分低微，有進行再循環使用的可能性外，並補充拆除重建土壤的數量更高達 3000 萬立方米，因此減容及再循環使用應該是處理 ISF 設施內的土壤，較為可行合理的方案。Yoshitomo Mori 先生也說明環境省 2019 年通過的 Technology Development Strategy for Volume Reduction & Recycling of the Removed Soil and Waste under Interim Storage 就土壤體積減容和循環使用辦理示範計畫，例如在 2021 年 4 月提供經過處理的土壤供農地大規模種植使用，以及水稻種植測試示範計畫。此外日本環境部研究單位除了進行回收土壤的研究調查，希望能在 2025 年 3 月之前完成基本技術的開發外，並在日本各地舉辦會議及參觀示範設施的活動促進國際及民眾的了解，而回收土壤亦開始在相關公部門、機構以及日本首相辦公室的盆栽內使用。

最後由 IAEA 的 Horst Monken Fernandes 先生說明 IAEA 對於福島廠外環境整治的觀點，首先 Horst Monken Fernandes 先生指出 2011 年事故發生初期，日本社會主要擔憂對環境污染的影響，但後來焦點轉向福島第一核電廠現場的狀態情形，其認為這顯示當時對於廠外區域實施的措施在某種程度上是成功的。接著他以 IAEA 安全術語彙編對於 remediation(整治；any measures to reduce the radiation exposure) 的定義闡述 IAEA 的(輻防)安全理念，其指出依 IAEA 的觀點，整治只是要減少輻射曝露。但在某些語言中可能沒有一個詞能夠表達整治的含義，不幸日語就有這種情況，只有可以用來涵括相關作為的除污這個詞語。但是除污和整治的含義並不相同，除污只是整治的一部分，而且提到整治時，就不是要完全去除污染，這不是整治試圖實現的目標。他特別強調這是環境整治上一個非常重要的概念，所以也不建議用修復或復原(rehabilitation, restoration)的詞語及說法。他進一步指出，人們對於被污染的東西似乎有一個具有立即危險的認知，想要加以清除，但如果是那種對人們並不會造成顯著的危害的污染，那將之清除可能並無意義，不僅將增加成本，也產生需要管理的廢棄物。接著 Horst Monken Fernandes 先生解釋福島或核子事故緊急應變的狀態是屬於既存曝露情境 (existing exposure situations)，其輻射曝露的管制框架與電廠在正常運轉狀態下依計劃曝露情境 (planned exposure situations) 採用限值或約束劑量管制的作法並不相同；現存曝露情境是採取參考水平的框架進行管制。在解釋 IAEA 的安全理念後，Horst Monken Fernandes 先生接續說明 2011 及 2013 年 IAEA 對於福島環境整治的提醒建議，如：在確保曝露劑量減少條件下，謹慎地平衡影響整治措施淨效益的各個因素；避免無法有效減少曝露劑量的保守性措施，特別是保守地將不會增加曝露劑量的廢棄物，

分類為放射性廢物的措施；在進行投入資源進行整治前要評估是否有助於減少曝露劑量，確保資源應用在最有效力的整治作業上；有效地整合各個參與整治者的工作；在整治的情形下符合國際標準的整治結果都是可接受的；落實重建及整治方案各單位及作業的溝通協調，減少重建及整治作業的不確定因素；以整個生命周期角度，全面性思考環境整治各項工作，如：除污需同時考慮到衍生廢棄物處理問題；事故後之整治政策法規與計畫等，應如同緊急應變相關政策法規與計畫等預先進行制訂規劃等。

## 肆、心得與建議

1. 本次 ASME ICEM 會議內容，包括：美國用過核燃料處置現況與先進反應器燃料後端管理、芬蘭 Onkalo 用過核燃料最終處置場建置經驗、烏克蘭車諾比核電廠現況、日本福島第一核電廠除役及廠外環境整治現況、歐盟研究用反應器及核能發電機組等核設施除污及拆除/拆解技術、歐盟核電廠除役廢棄物清潔外釋規定涵括核電廠除役輻射偵測、設備拆除、除污與除役拆除廢棄物外釋及處置的等，不僅涵括歐美日各國核電廠除役、高階廢料處置與技術研發最新情況，對於目前面臨或未來可能遭遇之課題與困難狀況，亦有廣泛性的討論，故參加此一會議除可收集國際最新的核電廠除役及廢棄物處置的狀態資訊與技術經驗外，亦有助掌握可能遭遇之課題與困難狀況，建議未來 ASME ICEM 會議如有召開，應優先派員參加。
2. 藉由此次參與 ASME ICEM 會議初步接觸環境整治議題，雖環境整治可能較偏向核子或輻射事故後處置之議題，但我國各核電廠已提交之除役計畫亦有廠址復原之部分，由會議中 IAEA 人員所揭櫫之整治(remediation)安全理念與目標，若日後我國各核電廠除役廠址有污染除污需要時，其相關作業名稱建議宜使用 IAEA 該術語。另鑑於環境整治相關作法及技術，相對於除役拆除、輻射調查及廢棄物管理等技術較未被關注，建議可加強此部分資訊之收集了解。
3. 依此次 ICEM 會議，除主辦單位有警示年輕世代參與會議的人數比例偏低外，美國核管會委員亦有提及該會近年來離退率增高，以及德國將長期面臨除役輻射偵測人力不足情形，顯示核能業界人力不足可能為未來潛存之問題。建議宜加以關注並加強對關鍵技術的學習引進，建立自有能力，降低可能影響。