

出國報告（出國類別：開會）

## 參加第 20 屆放射性物質包件與運送 研討會（PATRAM 22）

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：王清鍾薦任技士

派赴國家：法國

出國時間：112 年 6 月 9 日至 6 月 17 日

報告日期：112 年 9 月 5 日

## 摘要

本次奉派赴法國昂蒂布(Antibes)參加第 20 屆放射性物質包裝與運輸國際研討會，本屆研討會係由世界核能運輸協會(WNTI)與核能材料管理研究所(INMM)聯合主辦，法國核能協會(Sfan)、法國輻射防護與核能安全研究所(IRSN)及歐安諾集團(Orano)等合作贊助。該會議專門研討放射性物質的運送和貯存，為該主題全球最重要的交流論壇之一，與會人員來自業界、政府單位、學術與研究機構，就放射性物質(含用過核子燃料)包件和運輸的各項議題進行科學技術交流與實務經驗分享。

本屆研討會為期 5 日，有來自 28 個國家七百多人與會，合計發表約 280 餘篇論文。研討會除 6 個場次之全體大會專題研討及壁報論文時段外，另以 13 個時段，每個時段分 5 個技術議題，同時分別進行口頭論文發表。本報告主要就所參與之全體大會專題研討與口頭論文發表之分組會議的重點進行摘述說明，期能汲取目前國際間法規發展、管理與管制實務，以及容器製造設計、老化管理技術等最新資訊，作為精進我國用過核子燃料安全管制作業之重要參考。

## 目次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 摘要.....                          | i  |
| 一、目的.....                        | 1  |
| 二、過程.....                        | 1  |
| (一) 行程.....                      | 1  |
| (二) 出席「第 20 屆放射性物質包件與運送研討會」..... | 2  |
| 1. 會議背景.....                     | 2  |
| 2. 會議議程及議題.....                  | 4  |
| 3. 全體大會專題研討重點紀要.....             | 4  |
| 4. 口頭論文重點紀要.....                 | 6  |
| 三、心得及建議.....                     | 24 |

## 一、目的

我國核電廠陸續進入除役階段，核一廠於 108 年取得除役許可，核二、三廠除役計畫分別於 109 年、112 年經原能會審查通過。放射性廢棄物的處理與貯存均為電廠除役作業的重點工作項目，其中用過核子燃料的管理最為民眾所關心。我國用過核子燃料之管理策略，係參照國際發展與經驗，採行「近程燃料水池貯存、中程乾式貯存、長程最終處置」，管理作法與國際一致，目前所有用過核子燃料皆貯存於核電廠燃料池中。

台電公司目前正持續推動核一、二廠乾式貯存計畫以及核電廠除役廢棄物之處理與貯存設施興建計畫。乾式貯存設施為核電廠除役必要設施，有助除役作業推行。原能會已核發核一、二廠第一期（室外）乾式貯存設施建造執照，惟因地方政府尚未核發水保完工許可及逕流廢水排放許可，因此設施迄今尚無法啟用及興建。台電公司為核電廠除役之需求，未來採具社會共識之室內貯存型式，將可容納電廠除役之全部用過核子燃料，相關興建計畫已獲行政院核定，原能會正督促台電公司積極推動設施興建。

PATRAM 研討會是放射性物質運送和貯存的大型國際研討會，為該主題全球最重要的交流論壇之一，與會人員來自業界、政府單位、學術與研究機構，就放射性物質（含用過核子燃料）包件和運輸的各項議題進行科學技術交流與實務經驗分享。原能會物管局為掌握國際間放射性物質安全運送與貯存法規發展趨勢，瞭解先進國家用過燃料的管理策略、管制作為以及乾式貯存技術的研究發展，爰派員參與本次研討會，期汲取各國成功管理經驗，並藉由國際間之技術交流與資訊分享，以精進及提升我國用過燃料乾式貯存安全管制工作。

## 二、過程

### (一) 行程

| 日期               | 行程                                     |
|------------------|--|
| 6 月 9 日(五)       | 台北 → 荷蘭阿姆斯特丹（去程）                       |
| 6 月 10 日(六)      | 荷蘭阿姆斯特丹 → 法國尼斯（轉機）                     |
| 6 月 11 日(日)      | 報到與研討會資料準備                             |
| 6 月 12 日(一)      | 參加「第 20 屆放射性物質包件與運送研討會」                |
| 6 月 13 日(二)      |  |
| 6 月 14 日(三)      |  |
| 6 月 15 日(四)      |  |
| 6 月 16~17 日(五~六) | 法國尼斯 → 荷蘭阿姆斯特丹（轉機）<br>荷蘭阿姆斯特丹 → 台北（回程） |

## (二) 出席「第 20 屆放射性物質包件與運送研討會」

### 1. 會議背景

第 20 屆放射性物質包件與運送研討會 (The 20th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, 下稱 PATRAM 22) 於 2023 年 6 月 11~15 日假法國昂蒂布 (Antibes) 展覽中心 (Palais des Congrès Antipolis) 舉行。本屆會議原訂於去 (2022) 年舉行, 但因新冠疫情肆虐而順延至今年。首屆 PATRAM 研討會於 1965 年在美國 Albuquerque 舉行, 之後該會議每三年舉行 1 次, 第 1~5 屆在美國, 自第 6 屆 (1980 年) 起則在美國及其他國家 (如德國、瑞士、日本、法國等) 輪流舉行。下一屆 PATRAM 研討會預定在 2025 年於美國 San Antonio 舉辦。

PATRAM 是放射性物質運送和貯存的大型國際研討會, 是該主題全球最重要的交流論壇之一, 也是唯一專門討論該主題的會議, 與會人員來自核工業界、政府單位、學術界和研究機構, 就放射性物質包件和運送的各项議題進行科學技術交流與實務經驗分享, 會議還提供展覽空間以供相關企業與機構展示他們的產品、技術和服務。本屆研討會由世界核能運輸協會 (World Nuclear Transport Institute, WNTI) 與核能材料管理研究所 (Institute of Nuclear Materials Management, INMM) 聯合主辦, 法國核能協會 (Société française d'énergie nucléaire, Sfen)、法國輻射防護與核能安全研究所 (Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety, IRSN) 及歐安諾集團 (Orano) 等合作贊助。

會議主席 WNTI 秘書長 Martin Porter 說明本屆會議有一個宣傳標語「Bringing Transport Together」, 這個標語有多重涵義, 它可以表示聚會、重新召集、包容以及對新核能技術的接納等。簡單來說, PATRAM 會議讓大家能夠重新相聚, 進一步保持放射性物質安全運輸的優良紀錄, 這點尤為重要, 因為展望核能未來的發展和其對能源安全與脫碳 (decarbonization) 挑戰的貢獻, 現在正是將迄今所學知識運用到進步型模組化反應器 (advanced modular reactor, AMR)、小型模組化反應器 (small modular reactor, SMR)、微型反應器和核動力推進裝置技術發展的最佳時機。

本屆會議徵文涵蓋下列四大主題：

- (1) **包件之設計、效能與安全分析**：材料與試驗、結構、熱傳、屏蔽、臨界與風險評估, 議題涵蓋「包件的數位設計與分析 (數位模型、人工智慧等)」、「防護測試」、「老化議題 (包件、包容物的行為等)」、「兩用護箱」、「製造 (螺栓、銲接、容器等)」、「六氟化鈾的包裝和運送」、「核子保安」...等。此外, 此主題的一些議程亦特別關注用過燃料管理相關議題, 以及 SMR、進步型反應器燃料、高純度低濃縮鈾 (high-assay low enriched uranium, HALEU)、可載運式反應器 (transportable reactor) 等新興技術。
- (2) **運輸**：運輸安全規定的遵守與執行, 包括追蹤、路線規劃、應變整備、輻射防護

等。探討議題包括「運輸規定的執行及作業」、「變更物質分類的影響」、「事件及事故報告與文件紀錄」、「民眾接受度以及與利益關係人（當地政府和社區等）的對話」、「應變及整備：應變演習、媒體/社交媒體的影響」…等。

- (3) **法規與管制**：法規、規範與標準，以及主管機關、技術服務機構、國家和國際組織等相關機關（構）的活動，議題包含：「進步型反應器及 HALEU 燃料」、「浮動式核電廠（Floating Nuclear Power Plant, FNPP）與可載運式核電廠（Transportable Nuclear Power Plant, TNPP）」、「核設施除役」、「安全挑戰」、「老化機制」…等。
- (4) **培訓與教育**：核能包件及運輸產業的安全、保安與管理技術等方面的教育及培訓，議題包含「加強民眾參與」、「推動各國（包括新興國家）之間的知識共享」、「強化訊息、溝通和教育的創新方法」、「改進培訓計畫」…等。

本屆研討會有來自 28 個國家 751 人報名與會，合計發表約 284 篇論文（口頭論文發表 223 篇，壁報論文發表 61 篇）。圖 1 為研討會舉辦地點，圖 2 為研討會會場入口，圖 3 為全體大會會場，圖 4 為壁報論文展示區。

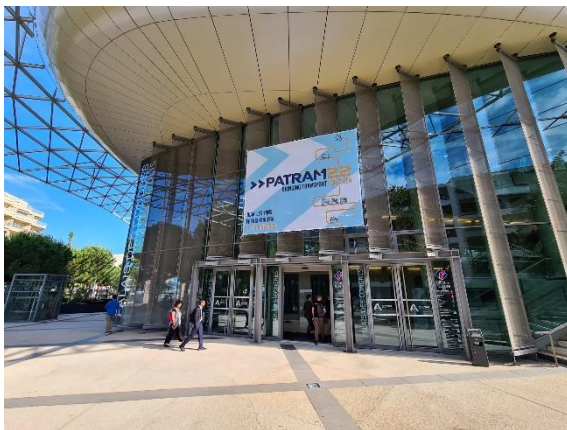


圖 1 研討會舉辦地點(昂蒂布展覽中心)



圖 2 研討會會場入口



圖 3 全體大會會場



圖 4 壁報論文展示區

## 2. 會議議程及議題

本屆研討會議程如附件一，整個研討會除了 6 個場次共 17 位專家之全體大會（plenary session）專題研討及壁報論文發表（poster session）時段外，另以 13 個時段，每個時段區分 5 個技術議題於五個會議廳同時進行口頭論文發表（technical session）。口頭論文發表之議題涵蓋法規、安全管制、安全分析/測試（結構、臨界、輻射屏蔽、熱傳）、輻射防護、HALEU 與 LEU+燃料、TNPP/FNPP/SMR 預期的管制架構、放射性廢棄物/用過核子燃料之安全評估/運送/貯存/管理、包件之設計/裝載/運送/性能評估/執照申請、包封容器/貯存護箱之設計/製造檢查/維護與老化機制/管理、保安/意外事故風險評估、運輸安全挑戰等，發表之口頭論文及壁報論文詳如附件二。

## 3. 全體大會專題研討重點紀要

本屆研討會全體大會主要由主持人與受邀專家針對特定主題以訪談問答方式進行，內容多為專家針對該主題說明其觀點與未來展望，並分享實務經驗。6 個場次全體大會專題名稱、受邀專家及主持人臚列如下：

- (1) 專題名稱：「**Challenges (SMRs, TNPPs...)**」；受邀專家：Marc Fialkoff（美國橡樹嶺國家實驗室（ORNL）放射性物質運送法規專家；主持人：Kurtis Hinz（加拿大 TAM International LP 公司執行長）。
- (2) 專題名稱：「**Regulatory Change**」；3 位受邀專家：Eric H. Reber（IAEA 運輸安全專家）、Fabien Féron（法國核能安全署）、Catherine Haney（美國核管會運轉執行主任辦公室）；主持人：Eileen Supko（WNTI 區域代表）。
- (3) 專題名稱：「**Denial of Shipment**」；5 位受邀專家：Paolo Alvano（義大利核能安全與輻射防護稽查署（ISIN））、Terry Lee Soulsby（加拿大 Nordion 公司）、Simon Chaplin（WNTI）、Shazia Fayyaz（巴基斯坦核能管理局）、Alastair Brown（英國 Nuclear Transport Solutions/Aitken Consulting 公司）；主持人：Serge Gorlin（WNA 產業合作主席）。
- (4) 專題名稱：「**Attractiveness of Transport Industry & Young**」；2 位受邀專家：France Cubas-Loyauté（法國 Orano Nuclear Packages and Services 人資主管）、George Burnett（英國 Nuclear Transport Solutions 公司策略顧問）；主持人：Valérie Faudon（法國核能協會執行長）。
- (5) 專題名稱：「**Security of the Future (Cyber, War...)**」；2 位受邀專家：Christian Tertrais（法國能源部核子保安局）、Kimberly Anderson（ORNL 核子與輻射安全部門主管）；主持人：Ben Whittard（英國 Nuclear Transport Solutions 公司執行理事）。

- (6) 專題名稱：「**Openness to Society**」；2 位受邀專家：Michel Badré（法國公共辯論特別委員會主席）、Frank Harris（力拓集團放射性監督和產品管理首席顧問）；主持人：Rick Boyle（美國交通部放射性物質運輸處處長）。

謹就全體大會專題研討之主要重點，擇要說明如下：

### (1) IAEA《放射性物質安全運輸規則》現行版本（SSR-6, Rev. 1）的審查與修訂

國際原子能總署（IAEA）運輸安全專家 Eric Reber 先生說明《放射性物質安全運輸規則》（Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials）（下稱《運輸規則》）自 1961 年發行首版以來已歷經數次修訂，現行版本為 2018 年 SSR-6 修訂一版。IAEA《運輸規則》的審查與修訂策略，基本上審查週期（review cycle）為兩年，由 TRNASSC/CSS<sup>1</sup> 評估決定是否需要進行修訂，倘 TRANSSC 認為審查週期期間提出的變更建議對於安全性足夠重要且需儘快發布，則由秘書處啟動《運輸規則》的修訂程序，並將 TRANSSC 核准的變更內容提交給 CSS 認證。最近一次審查週期於 2022 年 11 月結束，修訂週期（revision cycle）於 2022 年 8 月開始，預計在 2025 年末或 2026 年初發行新修訂版，整個修訂週期約耗時 3 年。

Reber 先生說明現行版本的審查與修訂所面臨的問題或改進建議包含：（1）很難對既定的規則做出重大修改，因為會對現行運輸作業造成影響；（2）SSR-6 對於可載運式核電廠（TNPP）和小型模組化反應器（SMR）等新興技術的適用問題；（3）向 TRANSSC 提出審查週期和修訂週期變更的提案。

### (2) SMR、TNPP 等新興技術帶來的挑戰

美國橡樹嶺國家實驗室放射性物質運送法規專家 Marc Fialkoff 先生概述大規模部署 SMR、TNPP 所面臨的主要挑戰，包括：（1）技術選擇問題：眾多 SMR 設計中可能僅有少數幾種最終可商業化；（2）許可審查架構和法規調和：SMR（特別是非輕水式）概念和設計的經驗基礎有限致使安全評估論證和申照面臨挑戰、傳統的海事法與現行核能法規的調和、各國審查規範和標準的協調、監督管制的國際合作；（3）供應鏈和燃料循環問題：關鍵組件與新型燃料（含 HALEU）的生產製造能力、用過燃料處理、透過戰略合作以達到規模經濟；（4）民眾接受度：向民眾說明可能潛在的效益與風險、回應民眾的恐懼等。

儘管 SMR 提供可靈活調度的低碳電力及多個領域應用（製氫、供暖、海水淡化等），但在技術、經濟和市場方面仍有許多問題尚待克服，SMR 未來發展將需要更廣泛的國際合作和政府支持，才能在全球建立一個強韌的市場。

---

<sup>1</sup> CSS：安全標準委員會（Commission on Safety Standards）；TRNASSC：運輸安全標準委員會（Transport Safety Standards Committee）。



### (3) 美國核管會維持核能管制計畫 (Regulatory Program) 的靈活性：

美國核管會 (NRC) 運轉執行主任辦公室副主任 Catherine Haney 女士概述 NRC 轉型為「Modern Risk Informed Regulator」的願景，其目的在使 NRC 成為一個更能適應現代需求和挑戰的管制機關。該願景的核心思想是將風險資訊納入管制決策過程，以確保核能發展的安全、可靠和效率，其主要內涵包括：(1) Our People：人才的招聘、培訓與維持，確保 NRC 在現代管制工作挑戰中擁有足夠的專業知識和技能；(2) Be riskSMART：將風險管理應用於管制決策制定，包含開發風險評估方法、風險資訊蒐集和分析工具 (如提升許可審查效率、用過燃料貯存密封鋼筒的風險告知工具、應用於微型反應器的風險告知方法)、對外風險溝通等，期能在管制作業中更有效地納入「風險洞見」(risk insight)、「檢討改進事項」(lessons learned) 與「最佳做法」(best practices)，確保制定的決策是明智且能夠妥善處理預知的風險；(3) Using Technology：運用先進技術可以更聰明地執行管制任務，包括使用數據分析來識別需加強關注的面向，以及採用新技術來提高管制效能；(4) Innovation：於快速變化的環境中希望成為創新者，能於考量不同觀點與選項後即時做出決策。上述目標旨在使 NRC 能夠更好地應對新興核能技術的挑戰，確保核能產業的安全與永續發展。

另外在法規與國際標準銜接部分，NRC 於評估《運輸規則》(SSR-6, Rev. 1) 變更的規則所造成的影響後，目前正在進行 10 CFR Part 71(放射性物質的包裝和運輸) 法規的修訂，預計 2024 年完成。

### (4) 英國吸引年輕世代投入核能產業

英國 Nuclear Transport Solutions 公司策略顧問 George Burnett 先生分享其踏入核能產業的心路歷程，另簡述英國核學會 (Nuclear Institute) 為吸引年輕世代投入核能領域，於 2020 年發起的「YGN<sup>2</sup> Strategy 2020-2025」行動計畫，該計畫訂定 YGN 於 2020-2025 年的願景、目標和發展方向，目的在鼓勵和培育英國年輕一代核能專業人士，並確保核能產業的未來發展能夠充分聽取他們的意見。整個計畫任務包含吸引各類人才進入英國核能產業、在職涯初期提供個人專業發展機會、促進國際合作交流等，希冀英國年輕核能人才能發揮關鍵影響力，在核能領域成為領先世界的專家。

## 4. 口頭論文重點紀要

以下謹就此屆研討會所參與之技術議題分組會議口頭論文發之重點簡報內容，擇要說明如下：

---

<sup>2</sup> YGN (Young Generation Network)：年輕世代網絡。

## 4.1 盛裝與運輸容器

### (1) Licensing of CASTOR<sup>®</sup> geo26JP for PWR Fuel in Japan

此論文由德國 GNS 日本子公司 (GNS Japan K.K.) T. Saegusa 先生簡報 GNS 為日本市場開發盛裝 PWR 用過燃料組件的 CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 金屬製運輸兼貯存兩用護箱 (dual purpose cask, DPC)，報告內容摘述如下：

- A. 過去 40 幾年國際間採用 GNS 開發的 DPC 系統已超過 2,000 組，其中 CASTOR<sup>®</sup> 系列護箱約 1,600 組。GNS 為符合日本市場需求及 JSME<sup>3</sup>工業標準，爰依據 CASTOR<sup>®</sup> geo 系列護箱設計基礎開發 CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 護箱系統 (主要參數及組件如圖 5 所示)。該款護箱材質與所有其他 CASTOR<sup>®</sup> 系列護箱相同，皆採用球墨鑄鐵 (ductile cast iron, DCI) 製成，可盛裝為 26 個 PWR 燃料組件，比日本市場迄今已獲准盛裝 PWR 燃料組件之護箱的裝載容量為高。

Table 4. Key Parameters of CASTOR<sup>®</sup> geo26JP

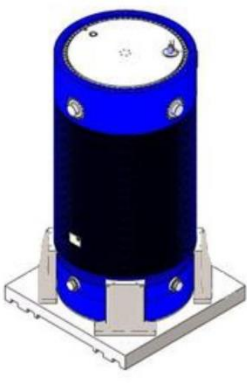
| Item                     | Features                     |  |
|--------------------------|------------------------------|---|
| Storage period           | 60+ years                    |   |
| Cask body material       | Ductile Cast Iron (no welds) |   |
| Cask mass                | approx. 118 Mg               |   |
| Length                   | approx. 5 m                  |   |
| Diameter                 | approx. 2.5 m                |   |
| Installed SNF assemblies | 26 PWR                       |   |
| Manufacturing            | Local with domestic partners |   |
| Type certification       | Japanese NRA (in progress)   |   |

圖 5 CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 護箱系統主要參數

- B. 日本對於 DPC 在防止臨界、屏蔽、熱移除、密封等安全功能相關規定與歐洲國家大致相同，惟在防範天然災害之標準有較為明顯的差異，如在歐洲國家中沒有表 1 所列對於海嘯和龍捲風危害的相關要求。

表 1 NRA 對 DPC 在地震、海嘯和龍捲風的安全要求

| 安全功能 | 規定   |
|------|--|
| 地震   | 在下列(1)或(2)條件下保持安全功能：<br>(1) 加速度：水平 2,300 gal (2.35 g)，垂直 1,600 gal (1.64 g)；速度：水平 200 cm/s，垂直 140 cm/s<br>(2) 特定廠址設計地震 |
| 海嘯   | 評估(1)浸沒深度：10 公尺，速度：20 m/s，漂流物質量：100 Mg，或(2)設計海嘯衝擊力   |
| 龍捲風  | 最大風速：100 m/s，需要考慮不同設計飛射物   |

<sup>3</sup> JSME：日本機械學會 (The Japan Society of Mechanical Engineers)

C. GNS 已於 2021 年 3 月向日本原子力規制委員會(NRA)提交 CASTOR® geo26JP 的認證申請。在日本，地震、海嘯和龍捲風等可能的事故情境與歐洲許多國家並不相同，為了符合對地震負載的要求，GNS 開發一種新型的固定夾緊系統 (clamping system) 連接到護箱本體以避免護箱在強烈地震中傾倒及滑動。GNS 為滿足其他國家需求開發的 CASTOR® geo 系列護箱亦正在申請認證中，如比利時 (geo24B、geo21B)、瑞士 (geo32CH) 及美國 (geo69)。


## (2) Development of a New Dual Purpose Cask for Dry Intermediate Storage for Long-Term Cooled Spent Fuels

此論文由日本三菱重工 J. Kishimoto 先生簡報該公司專為日本電廠冷卻時間達 20 年以上的用過燃料開發的高容量兩用護箱，報告內容摘述如下：

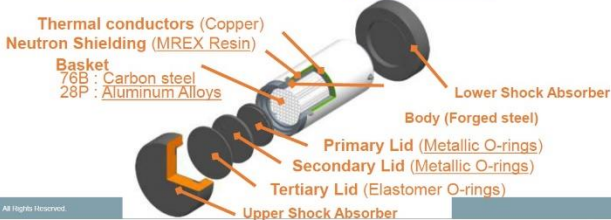
- A. 自 2011 年東日本大地震發生後，該國的 BWR 電廠至今皆未重啟運轉，但福島第一核電廠已開始移除用過燃料池中的燃料以便電廠除役。此外，近幾年日本已有 10 座 PWR 電廠陸續重啟，由於這些 PWR 電廠的用過燃料池接近貯滿，因此日本對用過燃料乾式貯存的需求正在快速增加。為滿足此一需求，三菱重工特別為已在燃料池中長時間 (20 年以上) 冷卻的用過燃料開發一款新的金屬兩用護箱 (簡稱 MSF 護箱)，如 MSF-76B 及 MSF-28P，其可分別裝載 76 個 BWR 和 28 個 PWR 燃料組件。
- B. MSF 護箱的基本規格如圖 6 所示。護箱主要由本體外殼 (body shell)、外殼板 (outer shell)、中子屏蔽、導熱板與吊耳軸組成。本體外殼的圓柱和底座部分由低合金鍛造鋼製成，作為主要伽馬屏蔽和圍阻邊界的一部分。銅製導熱板沿著本體外殼板縱向銲接。由三菱重工開發的中子屏蔽材料 (MREX®) 置入本體外殼和外殼板之間。主上蓋 (primary lid) 和次上蓋 (secondary lid) 由低合金鍛造鋼製成，裝有以螺栓固定在護箱本體法蘭上的金屬 O 型環，另裝有彈性體 (elastomer) O 型環的不銹鋼製三級上蓋 (tertiary lid) 用螺栓固定在護箱本體法蘭的頂部。上蓋構成密封系統的主要部分。在運送燃料過程中，一對裝有不銹鋼板的木質減震器 (wooden shock absorber) 安裝在護箱兩端。減震器可以減少意外墜落時對護箱及其裝載物的衝擊。在貯存期間，護箱通常以垂直擺放在乾貯設施中，但如預計會有較大的地震力，裝有減震器的護箱可以水平方式擺放。
- C. 安全分析方面，在考量貯存期間的熱劣化 (thermal degradation) 效應，MSF 護箱經原尺寸護箱 9 米墜落測試及模擬分析驗證，發現即使在長期貯存後 (60 年以上) 進行運輸時發生意外事故，MSF 護箱在臨界、屏蔽、餘熱移除、密封完整性等方面均可維持其安全功能。三菱重工已於 2022 年 12 月向 NRA 提交

MSF-76B 護箱認證申請。

**2. Characteristics of MSF Casks**



| Cask type             | MSF-76B         | MSF-52B       | MSF-28P                | MSF-24P                | MSF-21P                |
|-----------------------|-----------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Payload               | <b>76</b>       | 52            | <b>28</b>              | 24                     | 21                     |
| Fuel type             | 8x8 BWR         | 8x8 BWR       | 17x17 PWR<br>15x15 PWR | 17x17 PWR<br>15x15 PWR | 17x17 PWR<br>14x14 PWR |
| Burn-up (Max.)        | 50 GWd/MTU      | 50 GWd/MTU    | 48 GWd/MTU             | 48 GWd/MTU             | 48 GWd/MTU             |
| Cooling time (Min.)   | <b>22 years</b> | 12 years      | <b>20 years</b>        | 15 years               | 15 years               |
| Thermal power (Max.)  | 14.2 kW         | 13.7 kW       | 15.7 kW                | 15.8 kW                | 13.9 kW                |
| Weight(w/o/with S/As) | 120 / 133 ton   | 118 / 132 ton | 121 / 135 ton          | 119 / 134 ton          | 117 / 131 ton          |
| Dimensions            | Φ3.6×6.8 m      | Φ3.6×6.9 m    | Φ3.6×6.8 m             | Φ3.6×6.8 m             | Φ3.6×6.8 m             |



© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved. 4

圖 6 MSF 護箱基本規格

### (3) Assessment of Existing Transportation Packages for Use with LEU+ and HALEU Material

此論文由美國橡樹嶺國家實驗室（Oak Ridge National Laboratory, ORNL）A. Lang 先生簡報，說明現行五款已獲運輸許可執照的包件用於裝運低濃縮度鈾燃料（LEU+）及高純度低濃縮鈾（HALEU）的可行性評估，報告內容摘述如下：

- A. 由於進步型反應器及 SMR 設計等新興技術已逐漸成為未來核電發展主流，相關設計使用的燃料已將 U-235 濃縮度提高到 LEU+（濃縮度在 5-10 wt%）及 HALEU（10-20 wt%）範圍，而現行包件設計對這類燃料的裝運能否滿足次臨界要求仍不確定。現階段若要讓現行包件設計裝運這類燃料，勢必做出一些會衝擊到這類燃料使用經濟性的權衡考量。
- B. 爰此 ORNL 進行一項研究，評估現行已獲得許可的運輸包件用於裝運提高鈾濃縮度之燃料(未照射過)的可行性。該研究擇定五款包件進行分析，包含 Traveller（盛裝 PWR 燃料組件、PWR 和 BWR 燃料棒）、CHT-OP-TU（UO<sub>2</sub> 粉末和燃料丸）、Versa Pac（鈾金屬/三層結構等向性（TRISO<sup>4</sup>）燃料）、TN-B1（BWR 燃料組件）、以及 DN-30（UF<sub>6</sub>）。
- C. 該研究探討前述五款包件裝運燃料的濃縮度及配置（如最大運送陣列尺寸）所受之限制，確認包件可能需要進行設計修改或申照基準修訂。評估結果顯示儘

<sup>4</sup> 高溫氣冷式反應器使用 TRIStructural ISOTropic（TRISO）燃料，其為數以千計的 TRISO 顆粒被分散在球型（或卵石狀）石墨基質中，TRISO 是一種微型燃料顆粒，燃料核心是氧化鈾（或碳酸鈾）構成，由三層各向同性材料（熱解碳層、碳化矽層）包覆，構成全陶瓷型球型燃料元件，在 1,600°C 或更高的溫度仍可維持穩定。TRISO 燃料 U-235 濃縮度為 10~20 wt%，換料週期可達 5 年至 20 年。

管每款包件都有各自需面臨的問題，但在多數情況下，透過合理的限制，是可以裝運少量不同型態的 LEU+/HALEU 燃料，而大量運送 HALEU 燃料仍有問題待克服。該研究成果對於進步型反應器燃料循環及使用 LEU+燃料的輕水式反應器（LWR）尤為重要，未來工作仍須解決經濟方面的限制，以便在減少燃料運輸量和包件設計修改之間作出最好的權衡考量。

#### (4) Optimization of the EOS® Storage System for Next Generation Fuel Designs

此論文由法國 Orano TN 公司 P. Narayanan 先生簡報說明 NUHOMS®擴展優化貯存系統（Extended Optimized Storage, EOS）的設計特點與靈活性，以及通過設計優化、變更則可用於貯存 SMR 和先進燃料設計（advanced fuel design, AFD）的用過燃料，報告內容摘述如下：

- A. TN America 設計的 NUHOMS® EOS 貯存系統（圖 7）已於 2017 年獲得 NRC 核發許可執照（CoC No. 1042），其可分別盛裝 37 個 PWR（EOS-37PTH）和 89 個 BWR（EOS-89BTH）用過燃料組件。在美國已有幾個獨立用過核子燃料乾式貯存設施（ISFSI）使用 EOS 貯存系統，其中有些 EOS 貯存系統的熱負載超過 45 kW（為目前全球最高的熱負載值）。
- B. 隨著全球對 SMR 和 AFD（圖 8）日益關注，這類先進反應器/燃料設計需在設計階段就把用過燃料的管理與處置納入考量。由於各種 SMR 設計的運轉週期變化很大，用過燃料中期貯存的需求也會明顯不同。進步型 LWR 燃料的型態與現行 LWR 的相似，有些設計 U-235 濃縮度近 7.5 wt%（LEU+），燃耗值達 80 GWd/MTU，如此將導致熱負載增加近 15%，射源項增加約 10%。液態金屬冷卻快中子反應器燃料的型態與 LWR 的相似（如棒狀），其使用鈾或鈾鈾混合之金屬或陶瓷形式燃料，濃縮度為 LEU+或 HALEU。依據爐心大小及輸出功率的不同，其燃料更換週期可達 18 個月到 30 年不等。

#### 2. NUHOMS EOS Storage System

37 PWR / 89 BWR / 50 kW  
Maximize Heat Load in DSC  
Faster Offload from Pool  
Optimized Spent Fuel Management

Innovative design  
Patented Basket layout  
High performance materials  
State-of-the-art methods  
Proven horizontal storage  
Certified for Storage by USNRC  
under CoC-1042 since 2017




Next generation storage system

Optimization of the EOS Storage System for Next Generation | An Design - PA311048 May 2022

#### 4. SMRs and Advanced Fuel Designs

TRISO Based fuel

SMR / Advanced Fuel Designs can be classified into:  
High Temperature / TRISO Design  
Advanced LWR Design  
Metallic / Fast Reactor Design

Used Fuel Management  
Compatible with EOS System  
May need modification



Optimization of the EOS Storage System for Next Generation | An Design - PA311048 May 2022

圖 7 NUHOMS® EOS 貯存系統

圖 8 SMRs 與先進燃料設計

- C. EOS 貯存系統設計的獨特之處為稍微變更現有設計，即可適用前述三種 AFDs。變更項目可僅限於提籃幾何形狀和材料配置，藉以優化裝載容量、熱負載、臨

界控制和屏蔽效能，詳如下表所示。

| EOS Features        | Advanced LWR                          | Liquid Metal Fast                  | TRISO Fuel        |
|---------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| Design Changes      | None for Standard<br>Minor for others | Basket Layout<br>Fuel Segment      | Basket Layout     |
| Criticality Control | Fixed Absorber,<br>Burnup Credit      | Basket Geometry,<br>Fixed Absorber | Basket Geometry   |
| Capacity            | 37 PWR / 89 BWR                       | Variable                           | Limited by weight |
| Heat Load           | > 50 kW / DSC                         | > 50 kW / DSC                      | ~ 25 kW Loaded    |
| Cooling Time        | > 1.5 Years                           | > 3 Years                          | > 30 Days         |
| Dose Rates          | No Change                             | Small Increase                     | Decrease          |

## 4.2 法規與管制

### (1) IAEA Activities to Promote the Safe, Secure and Sustainable Transport of Radioactive Material

此論文由國際原子能總署(IAEA)輻射、運輸與廢棄物安全組(Division of Radiation, Transport and Waste Safety) E. Reber 先生簡報，說明 IAEA 在協助會員國建立放射性物質運輸安全和保安能力所做的工作，報告內容摘述如下：

- A. 原子能的應用涉及在公共領域運輸放射性物質，因此 IAEA 會協助其會員國能夠以安全、可靠與可持續的方式執行運輸作業。隨著會員國對創新技術（如 TNPP 和 SMR）部署的關注日益增加，與這些技術相關之放射性物質的安全運輸，已成為 IAEA 安全標準需要解決的新議題。鑒於放射性物質運輸所涉層面廣而多元（涵蓋新興技術和廣大利害關係人），IAEA 的各個組織單位會給會員國提供協助，藉以改善放射性物質運輸的安全、保安、成本效益和時效。
- B. IAEA 於 1961 年發行安全系列第 6 號《放射性物質安全運輸規則》(Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials)（下稱《運輸規則》），之後並持續與會員國及相關國際組織進行諮詢，並在適當間隔時間進行修訂，現行《運輸規則》版本是 2018 年發行的 SSR-6 (Rev. 1)。IAEA 出版的刊物中與《運輸規則》要求相關的安全指引（圖 9）包含：安全標準系列編號 SSG-26 (Rev. 1)（advisory material）、SSG-33 (Rev. 1) (schedules)、SSG-65 (emergency response)、SSG-66 (package design safety report)、TS-G-1.3 (radiation protection programmes, 修訂版準備中)、TS-G-1.4 (Management System)、Ageing Management and Maintenance of Radioactive Material Transport Packages（準備出版的新指引）。

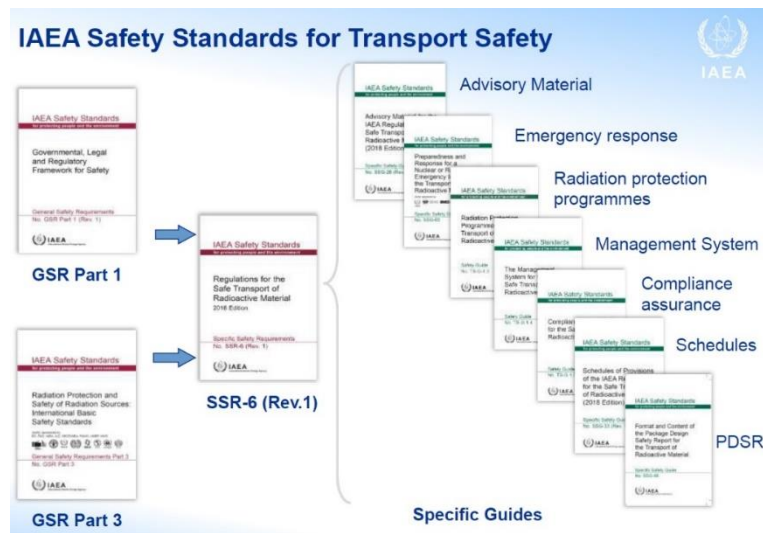


圖 9 IAEA 與運輸安全相關之安全標準

C. 放射性物質安全運輸線上學習課程（e-learning）：IAEA 在 2019 年推出《運輸規則》的線上學習課程（圖 10），至隔年就有來自 100 個國家 1,000 多名學員註冊上課。該線上學習課程共有 11 個學習單元，學習單元 0 至 4 開始介紹運輸安全基礎議題，包括放射性物質運輸的法規體系與責任，運輸過程的輻射防護，以及《運輸規則》的架構與內容。學習單元 5 至 9 與管制工作有關，著重在主管機關制定與執行法規遵從保證計畫（compliance assurance program）以監管放射性物質運輸安全。學習單元 10 提供特定主題指引，例如將《運輸規則》納入國家法規中，以及說明 2018 年版《運輸規則》的更新內容。

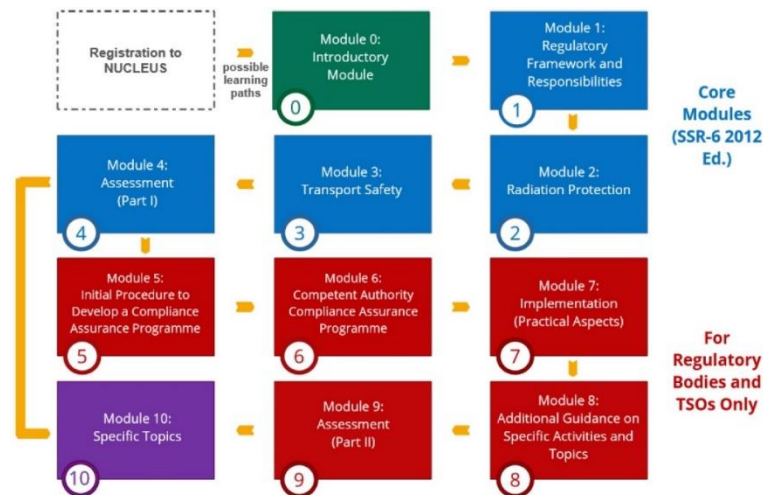


圖 10 IAEA 的放射性物質安全運輸線上學習課程

D. 放射性物質與包件的行為（特別是在長期貯存後）對於放射性物質的可運輸性至關重要。這些議題在「用過燃料研究與評估」（Spent Fuel Research And Assessment, SFERA）和「貯存系統於延長貯存期間的效能評估」（Performance Assessment of Storage Systems for Extended Durations, PASSED）這兩個獨立的

合作研究計畫（**coordinated research projects, CRP**）進行探討，其研究項目將納入用過燃料特性技術知識庫，包含不同貯存系統延長貯存的時限。

(a) 用過燃料研究與評估（**SFERA**，計畫時間：2021-2025 年，仍在接受提案）：

貯存系統的持續運轉及執照更新需瞭解用過燃料及貯存系統所使用之材料的長期效能。由於貯存期間不斷延長、退出燃料的燃耗也在提高，因此需持續針對用過燃料貯存的問題與挑戰進行合作研究，**SFERA** 的具體研究目標如下：

- 記錄會員國用過燃料在濕式與乾式貯存中的效能
- 蒐集並交換會員國用過燃料處理作業的相關經驗
- 對確認用過燃料於貯存期間的狀態與可能行為的研究提出報告
- 整理進行中的計畫得到的經驗，包括用過燃料監測所採用的新技術
- 利用參與研究項目的會員國之間的協作領域（**areas of synergy**），確立一致的研究和結果分析方法
- 藉由用過燃料貯存技術基礎文件紀錄，促進知識的傳遞
- 用過燃料長期行為的預測

目前已有 7 個組織與 **IAEA** 簽署協議，涵蓋各種不同燃料類型與材料，另有其他組織準備加入中。

(b) 貯存系統於延長貯存期間的效能評估（**PASSED**，計畫時間：2022-2026 年，仍在接受提案）

大多數投運轉中之乾貯系統的設計壽命通常在 20 至 50 年之間。過去六十年的濕式儲存與四十年的乾式貯存取得良好實績並獲得寶貴的運轉經驗。隨著這些乾貯系統達到其原始設計壽命，人們正在開發其他的監測與檢查技術，以確保用過燃料持續貯存的安全性。合作研究計畫促進會員國之間的知識交流並提供彙整研究結果的平台，讓相關領域的首席專家進行審查。

**PASSED** 具體研究目標如下：

- 確認用過燃料濕式與乾式貯存系統所使用之材料的劣化機制
- 就「濕式與乾式貯存系統」、「運輸護箱（廠內傳送/廠外運輸）」、「裝載燃料之護箱系統」的維護和檢查提供範例和新方法，確保護箱系統符合運輸規定
- 乾式貯存系統密封容器監測方法的開發（新型感測器）
- 在檢查與評估貯存系統未來可運輸性（**transportability**）後，確認是否需要採取矯正措施的標準及方法
- 濕式和乾式貯存系統組件的運轉經驗及劣化（老化效應）

目前已有 15 個組織簽署此研究項目協議，當中已涵蓋大部分現行的貯



存系統。

- E. 用過燃料運輸經驗與經驗傳承：IAEA 為提供會員國用過燃料運輸作業經驗，目前正在編寫一份成功運輸作業案例的研究報告，當中介紹不同的運輸作業模式以及強調過去數十年安全運輸的經驗教訓。這份報告將使首次執行運輸作業的會員國能夠瞭解其他國家採行的措施，以確保放射性物質運輸的安全、保安和效率。這份報告提供八個國家的案例研究，包括：(1) 法國用過燃料的運輸；(2) 德國用過燃料陸運-河運結合的運輸方式；(3) 日本五十年的用過燃料運輸經驗；(4) 荷蘭用過燃料運輸至法國的四十年經驗；(5) 俄羅斯聯邦用過燃料運輸的最佳做法和經驗教訓；(6) 瑞典成功運輸作業的一般要求；(7) 瑞士 Mühleberg 核電廠的用過燃料管理；(8) 美國研究反應器用過燃料裝運的經驗教訓。上述每個案例研究均有說明運輸前、中、後所應考量的事項。

## **(2) Implementation of the New Provisions on Ageing Management of the 2018 Edition of the IAEA Transport Regulations SSR-6 in the Procedures of Approving and Monitoring Designs of Dual Purpose Casks in Germany**

此論文由德國聯邦核廢料管理安全辦公室 (BASE) F.-M. Börst 先生簡報德國對於兩用護箱設計許可證申請在老化管理方面的新規定，內容摘述如下：

- A. 由於德國的最終處置場規劃在 2031 年完成場址選定，2050 年運轉 (圖 11)，因此高放廢棄物會存放在運輸兼貯存兩用護箱 (許可期限最高 40 年) 進行中期貯存直到本世紀下半葉。如此將對護箱產生新的挑戰，因護箱在更長的貯存時間後需要運輸到最終處置場，且還要符合當時的安全運輸法規。目前德國約有 1,400 個兩用護箱貯放在 16 個乾式貯存設施中。
- B. IAEA 《放射性物質安全運輸規則》(SSR-6, Rev. 1) (下稱《運輸規則》)，當中首次訂定用於貯存後裝運 (shipment after storage) 之包件的相關要求，其要點如下：
- (a) 包件的設計應考量老化機制 (第 613A 條規定)
  - (b) 許可證申請應包括下列事項：(1) 在安全分析及擬定的運轉與維護說明中考量老化機制的合理性 (第 809(f) 條規定)；(2) 針對用於貯存後裝運的包件，提出差距分析計畫 (gap analysis program) 藉以說明定期評估運輸規定改變、技術知識發展變化和貯存期間包件設計狀態變化的系統化程序 (systematic procedure) (第 809(k) 條規定)

上述規定在 IAEA 安全標準 SSG-26 (Rev. 1)<sup>5</sup> 第 613A.1 到 613A.6 條、第

---

<sup>5</sup> IAEA Safety Standards Specific Safety Guide No. SSG-26 (Rev. 1), "Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2018 Edition)."

809.3 和 809.4 條規定有詳細說明。這些規定要求包件設計應考慮及評估包裝組件（packaging component）與包容物（radioactive content）於貯存期間的劣化機制和老化過程，如腐蝕、磨損、疲勞、裂隙擴展、材料成分或機械性質的改變。新包件設計在提出許可申請前，於設計階段就應完成這些事項的評估。

- C. 《運輸規則》要求用於貯存後裝運之包件的老化管理應有「老化管理計畫」與「差距分析計畫」的支持。老化管理計畫應考量包件整個生命週期內所有可能的操作情況，如用過燃料裝填、裝運至中期貯存場、中期貯存以及貯存後裝運至廢棄物處理設施或直接運往最終處置場。依據老化評估結果，應制定老化監測計畫以確保在進行公共運輸前，包件狀態也能符合當時的規定。差距分析計畫需定期評估運輸規則的要求、技術知識的發展、貯存期間包件設計的狀態，並確認與原始設計的任何差距。定期評估的結果應用來驗證現有包件設計許可的有效性，或作為包件設計許可更新的額外輔助資料。
- D. 德國已將 SSR-6 修訂一版的內容納入該國危險貨物運輸規範中，該規範於 2021 年初生效實施。主管機關 BASE 和聯邦材料研究與測試研究所（BAM）要求新包件設計許可申請或現有許可證書更新，應於申請文件中考量老化管理的新規定。BAM 負責監管放射性物質運輸包件設計的品質管理，已於 2022 年 6 月發布運輸包件設計的老化管理指引<sup>6</sup>（BAM-GGR 023），作為護箱設計廠家制定老化管理計畫及差距分析計畫的依據。

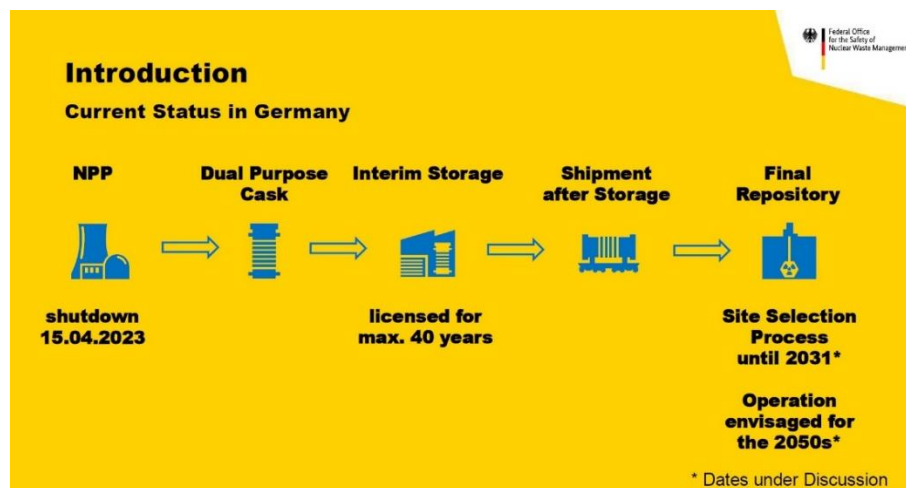


圖 11 德國核廢料處理時程

### (3) Swiss Implementation of Ageing Management: Assign Activities and Responsibilities

此論文由瑞士聯邦核能安全督察署（ENSI）F. Koch 簡報該國對於用過燃料乾貯護

<sup>6</sup> BAM-GGR 023 (2022.06.20): Ageing Management for Competent Authority Approved Package Designs for the Transport of Radioactive Material.

箱老化管理採取的作為與職責分工，內容摘述如下：

- A. IAEA《運輸規則》(SSR-6) 修訂一版已將包件老化管理納入，如第 613A 條要求包件的設計應考量老化機制，第 503(e)條要求用於貯存後裝運的包件，在貯存期間應依《運輸規則》與許可證規定對包裝組件及放射性包容物進行維護。此外，由於兩用護箱 (DPC) 的貯存涉及的利害關係人包含貯存設施經營者和包容物持有人等，因此 ENSI 認為有必要規劃安排老化管理程序，明定各方的職責與闡明之間相互關聯。
- B. 瑞士自從 2006 年起停止用過燃料再處理作業，其所有用過燃料均採取乾式貯存以等待最終處置場的啟用。瑞士目前有兩個乾貯設施在運轉中，一個位於 Beznau 核電廠內，另一個是在瑞士北部 Würenlingen 由 ZWIALG 公司<sup>7</sup>經營的集中式中期貯存設施 (Central Interim Storage Facility, CISF)。該 CISF 設施目前已存放 77 組 DPC (計有 9 種不同類型的護箱)，盛裝來自電廠及研究用反應器的用過燃料與早期再處理所產生的高放射性廢棄物。當中最早的一個 DPC 是 CASTOR Ic-Diorit 金屬護箱，自 1983 年裝載用過燃料至今已存放 40 年。
- C. DPC 的安全合理性係依據 40 年設計壽命及考量貯存設施的條件來進行評估。根據瑞士目前的國家廢棄物管理計畫，預計於 2060 年開始高放廢棄物深地質處置。因此人們則轉而關注 DPC 中的用過燃料能在乾燥條件下存放多久、如何量化超過 40 年貯存期間的安全餘裕 (safety margin)。
- D. 老化管理的管制架構：
  - (a) ENSI 已將《運輸規則》第 613A 條的要求納入所有包件許可證申請。對於新的設計，申請人必須提供老化報告，說明可能的老化機制。該報告應作為制定相應包件設計老化管理計畫的基礎。對於已獲許可之設計的修訂，ENSI 接受以老化管理計畫取代老化報告。第 613A 條的要求也納入 2021 年 10 月發布的用於中期貯存的運輸與貯存容器的設計和製造用於中期貯存之兩用護箱的設計和製造指引 (ENSI-G05)，其規定用於乾貯設施之 DPC 設計必須確保在至少 40 年的運轉期間內符合所有要求。
  - (b) 對於《運輸規則》第 503(e)條的老化管理要求，ENSI 則將其納入廢棄物中期貯存設施運轉指引 (ENSI-B17<sup>8</sup> Operation of Storage Facilities for Radioactive Waste)，要求於貯存期間必須對 DPC 和放射性包容物建立老化監測。對於已獲得許可且使用中的 DPC，根據 ENSI-B17 的規定，至少每十年要對 DPC 的運輸與貯存功能進行評估。基本上 ENSI-B17 的規定即是要

<sup>7</sup> ZWIALG 公司於 1990 年初由瑞士 4 間擁有核電廠的電力公司以不同比例出資成立。

<sup>8</sup> Guideline ENSI-B17: Betrieb von Zwischenlagern für radioaktive Abfälle (Operation of interim storage facilities for radioactive waste), October 2021 Edition.

求須制定老化管理計畫，當中包含老化監測。

- (c) ENSI 為協助申請人提供必要的老化評估與合理性說明，已於 2018 年 12 月發布一份中期乾式貯存老化指引（Ageing Guide for Dry Interim Storage）。

E. 老化管理職責分工：

由於老化管理作業涉及多個利害關係人，如包容物持有人、貯存設施經營者及管制單位等，ENSI 將各利害關係人之職責界定如圖 12 所示。

- (a) 運輸與貯存的安全文件由包件設計廠家提供。對於貯存用包件設計之申請，包容物持有人（即 DPC 持有人與核電廠經營者）應作為申請人。對於運輸許可申請，第一個主管機關（competent authority, CA）是包件設計廠家所在國家的 CA，其可能與貯存設施所在國家的 CA 不同。為協調一致，ENSI 決定依據原始國家的核准證書來核發運輸包件之設計許可。
- (b) 貯存設施經營者負責執行設施老化監測。管制機關 ENSI 則透過視察來管控這些作業的執行情形。DPC 持有人提供十年一次的老化評估以確認 DPC 運輸與貯存（差距分析）的合適性（suitability）。根據 ENSI-B17 的規定，貯存設施所在國家的主管機關負責任何必要的許可審查。如果差距分析確定與運輸或貯存安全文件所訂標準存有偏差，將啟動相關的許可修訂程序，修正包括必要補救措施的安全論證說明（safety justification），以確保能持續符合運輸與貯存的安全要求。

**Responsibilities**

|              | What   | Who                          | When                                   | Applicant        | Authority                              |
|--------------|--|------------------------------|--|------------------|--|
| If necessary | Package Design Approval for Transport          | Package designer             | Before first use for transport         | Package designer | CA for Transport                       |
|              | Package Design Approval for a Storage Facility | Package designer             | Before first use in a storage facility | DPC owner (NPP)  | CA for Storage Facility                |
|              | Ageing Surveillance during Storage             | Operator of Storage Facility | During Storage                         | None             | CA for Storage Facility by Inspections |
|              | Gap Analysis                                   | Owner of the DPC             | After 10 years                         | Owner of the DPC | CA for Storage Facility                |

Swiss Ageing Management Implementation | PATRAM22 | Frank Koch  
ENSI

圖 12 老化管理作業職責分工

F. 老化管理實施方式：

瑞士的核電廠經營者、研究機構和 CISF 設施經營者等利害關係人已成立一個工作小組，負責處理包含 DPC 老化的問題。另有一個獨立的工作小組則研究與燃料和護套相關的議題。這些小組針對 DPC 組件和包容物的老化問題已開展多項工作，簡述如下：

- (a) DPC 組件部分，目前工作包含材料檢驗（檢測不同硼鋁合金）及執行螺栓鬆弛試驗計畫，在 CISF 設施的監測技術方面則開發特殊屏蔽設備來測量中子量測劑量率。
- (b) 包容物部分，目前正在研究燃料和護套的材料特性，特別是高燃耗和 MOX 燃料。這些研究結果對於進行最終處置前的老化問題考量以及老化管理步驟規劃特別重要。
- (c) 為了記錄所有老化管理作業和論證說明，並總結 DPC 的運輸與貯存的合適性，ENSI 制定一個合適的論證文件紀錄（documentation）概念，其由三個層級的文件組成（圖 13）：（1）第一層級文件涵蓋一般性層面，如：「一般老化機制（與具體 DPC 設計無關）」、「研發項目及成果」、「法規沿革（據以反映所有相關規定的變更）」、「老化管理組織」；（2）第二層級文件涉及具體設計層面，例如：「設計說明、零件清單、組件的老化機制、設計變更」、「特定 DPC 設計的老化監測計畫」、「相關安全文件變更的歷史紀錄」；（3）第三層級文件需說明 DPC 設計的型號系列（製造批次）甚或單一樣品的問題，如：「老化監測測量和分析結果」、「製造及運轉期間與老化相關的偏差」、「製造、運輸與貯存時的有效許可證書清單」、「確定持續保有的運輸與貯存能力的評估報告」。

瑞士的設施經營者已按上述概念編寫完成第一份報告，目前正與主管機關討論中。該報告證明現行許可證書及安全文件的所有要求，在進行評估的當下都能符合，且在接下來的期間內（通常為 10 年）也可能符合。

### Implementation: documentation concept

| Level 1<br>Generic   | Level 2<br>DPC designs  | Level 3<br>DPC series or specimen  |
|--|---|--|
| Generic ageing mechanism   | Description of design, part list, ageing mechanisms of components, design changes | Results of ageing surveillance measurements and analysis                                 |
| Research and development projects and results                          | Ageing surveillance program for the specific DPC design                           | Deviations during fabrication and operation relevant for ageing                          |
| History of regulations to reflect all relevant changes of requirements | History of relevant safety file changes   | List of valid certificates at the time of manufacturing, transport and storage           |
| Organization of the ageing management                                  |   | <b>Evaluation report to conclude on the continuous ability for transport and storage</b> |

Swiss Ageing Management Implementation | PATRAM22 | Frank Koch  
ENSI

12

圖 13 老化管理論證說明文件分級概念

#### **(4) Regulatory Readiness for a Possible Increase in Commercial Shipments of Spent Nuclear Fuel in the United States**

此論文由美國核管會(NRC)核物料安全與保防辦公室燃料管理組資深專案經理 D. Pstrak 說明美國針對用過核子燃料(SNF)可能增加的商業裝運量所做的管制準備，報告內容摘述如下：

- A. NRC 已分別於 2021 年 9 月與 2023 年 5 月核發 Interim Storage Partners 公司位於德州 Andrews 郡與 Holtec International 公司位於新墨西哥州 Lea 郡的集中式中期貯存設施(CISF)興建與運轉執照。NRC 預期未來 CISF 設施的啟用，全美各地的乾貯場會進行大規模 SNF 商業運輸，因此需對其核能管制計畫(regulatory program)進行深入全面審視，以確認其在執行 SNF 運輸監管的準備狀況。截至 2023 年 3 月止，美國核電廠的 SNF 存放在 36 州的 84 個運轉中/除役中電廠內用過燃料池和乾貯系統中，共使用 3,930 組乾貯護箱(計有 19 種 NRC 核准的護箱設計)。
- B. 審視工作包含評估(1)聯邦法規 10 CFR 71《放射性物質的包裝和運輸》、10 CFR 72《用過核子燃料和高放射性廢棄物獨立貯存之許可執照規定》、10 CFR 73《核電廠和核子物料的實體保護》；(2) NRC 的指引文件及審照、視察程序和其他監管職責，包括對外溝通、推廣服務(outreach)和監管工作所需的資訊；(3) NRC 與其他負責監管 SNF 運輸之聯邦機構的角色和職責，如美國運輸部(DOT)和國土安全部(DHS)。整個審視作業的目標是確認 NRC 的準備狀況，提出可能的改進事項，以確保 SNF 商業運輸的監管能夠透明、穩健和有效。
- C. 對於 SNF 商業運輸，NRC 也評估其在安全及保安方面的角色和職責，重點為：(1)現有與 SNF 運輸安全和保安相關的法規、指引文件和程序是否適切；(2) NRC 管制行動所需的具體資訊，還有 SNF 目前和預估的存量及運輸路線資訊的可用性；(3) NRC 的監督角色，包含其他聯邦機構、運輸路線上的州和部落各自的角色，以及核工業界在 SNF 裝運安全和保安應負的責任；(4) NRC 的聯邦合作夥伴、州、部落和民眾的協調、溝通和推廣服務。
- D. 為期 18 個月的審視工作得到的結論是 NRC 現有的法規和管制架構足夠完整，並已與其他聯邦機構的法規適當整合。NRC 在 2021 年 12 月發布《NRC's Regulatory Readiness for Oversight of Large-Scale Commercial Transportation of Spent Nuclear Fuel》報告，並於 2022 年 2 月舉行一次公開會議，向 NRC 的利害關係人與民眾說明討論前述報告及其所提建議，其他與運輸作業相關權責機關也在會議上作報告。回饋意見顯示這次公開會議受到利害關係人的好評，他們表示不同政府單位共同出席說明顯示各單位之間的協調良好。
- E. 審視工作提出 6 項具體改進建議：(1) 為用於裝運之包件建立新的或改進現行

的安全視察程序 (inspection procedures, IPs); (2) 建立新的或更新現有的 IPs, 包括用於裝運之包件的 IPs, 以確保與核子保安視察的方式能夠一致; (3) 為 SNF 裝運作業之安全與保安的視察頻率及時間排定制定指引; (4) 依據修訂後的 IPs 來加強視察員的資格和訓練要求; (5) 制定新的或改進現行的視察手冊章節以納入修訂後的 IPs; (6) 制定全面性的溝通策略和推廣服務計畫, 提升公開透明度, 促進聯邦機構、州、部落和其他合作夥伴之間的協調合作。

### 4.3 教育訓練

#### (1) IAEA Spent Fuel Management Dissemination and Outreach Materials

此論文由 IAEA 核燃料循環與廢棄物技術組 (Division of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology) A. G. Expartero 女士介紹 IAEA 在用過燃料管理領域開發製作的線上工具 (線上學習課程與互動式出版品) 及推廣資料 (outreach material), 報告內容摘述如下:

A. 近年來 IAEA 為開發適合不同階層民眾的宣傳資料付出相當大的努力, 成果包括下列三類資料:

- (a) **線上學習資料** (圖 14): IAEA 透過多種方式協助會員國建立相關能力, 當中包含提供用過燃料管理線上學習課程。該課程內容涵蓋「用過燃料管理的政策和策略」、「用過燃料基本安全和保安原則」、「用過燃料特徵」、「用過燃料運輸」、「用過燃料貯存」等主題, 目前整個課程計有 5 個學習單元共 10 堂課程, 另有「用過燃料再處理與循環」、「第四代反應器先進燃料」等兩個單元共計 7 堂課程正在製作中。由於目前用過核燃料管理線上課程相當成功, 線上學習工具正擴展到更為深入的技術性主題, 藉以強化 IAEA 技術資料的傳播。IAEA 為善用協調研究計畫項目的技術知識成果, 正在開發「用過核燃料行為」、「用過核燃料特性」和「用過核燃料貯存設施老化管理」相關課程。目前用過燃料管理線上學習課程提供英、法、日、俄和西班牙語等版本。
- (b) **互動式電子書**: IAEA 《用過燃料貯存選項及系統指南》(Guidebook on Spent Fuel Storage Options and Systems, TSR-240) 第三版最終定稿本尚在準備中, 預印本可在 IAEA 資料庫中取得。為提高讀者閱讀體驗, 該指南也提供互動式電子書版本, 可在 IAEA 官網上試用。
- (c) **圖解資訊** (infographics) (圖 15): IAEA 從所蒐整的數據製作三張圖解資訊:
  - (1) 「動力反應器用過燃料貯存狀況」提供全球用過燃料貯存概況, 呈現用過燃料的地理分布以及各種貯存系統貯存用過燃料的數量;
  - (2) 「乾式貯存技術: 時間表」圖示各種乾式貯存技術的開發與應用, 包含最初的濕式貯存

到目前的乾式貯存技術的歷史發展，並附上各類技術首創系統照片以及各種乾貯系統的數量與地理分布；(3)「乾式貯存技術：特點」說明每種乾貯系統的特點，並提供一些目前使用中的商業系統案例資訊。

B. IAEA 積極協助會員國在技術知識方面的保護與轉移，強化專業人員（特別是年輕一代）的技術能力。線上學習被證實是一個適合的工具，可同時滿足一般民眾與專業人員需求。相關人員具有正確的科學技術知識和工程能力與用過燃料的安全管理密切相關。用過燃料管理線上學習課程涵蓋燃料從爐心退出到處置的各階段主要管理面相。互動式指南與圖解資訊為民眾及專業人員提供一個更具視覺化且友善的方式來獲得可靠的訊息。



圖 14 IAEA 線上學習資料

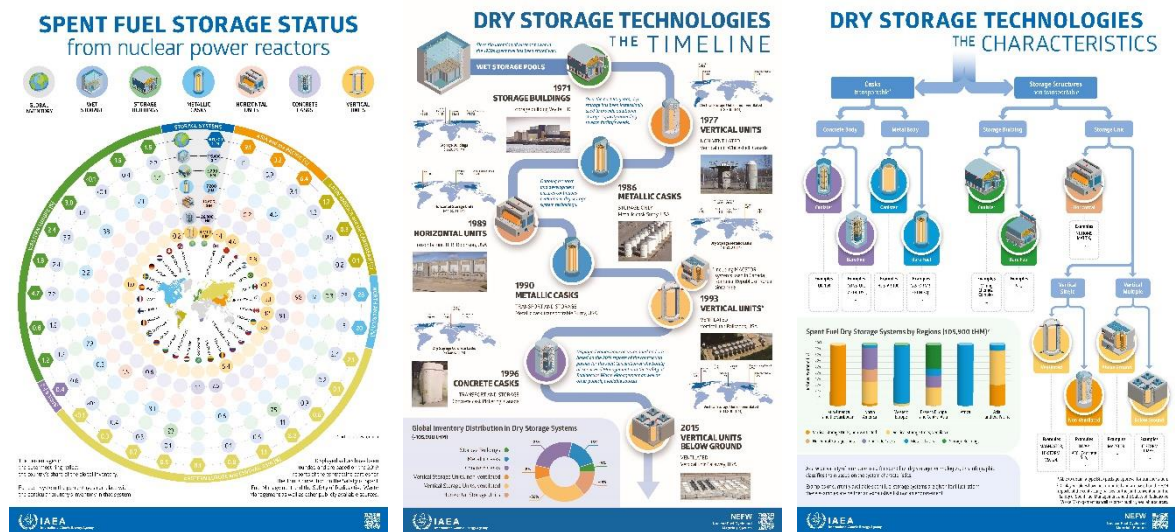


圖 15 IAEA 製作的用過燃料貯存圖解資訊

## (2) Application of VR Technology for Emergency Response Training Assuming an Accident during Nuclear Fuel Transportation

此論文由日本原燃輸送株式会社 (Nuclear Fuel Transportation Co., Ltd., NFT) J. Yamashita 先生介紹該公司將虛擬實境 (virtual reality, VR) 技術納入緊急應變人員訓練的成效，報告內容摘述如下：

A. NFT 主要負責運輸核電廠產生的用過燃料和低放射性廢棄物到位於青森縣六



所村的日本原燃公司的再處理廠和處置場，NFT 表示過去 30 多年的運輸作業無發生任何事故，安全運輸紀錄良好。

- B. NFT 會定期辦理各種緊急應變演練，包含在該公司運輸船舶進行船上演練。平時訓練係通過使用手冊和圖片，讓人員瞭解各種事故或問題對應的應變作為及熟悉船上的設備。然而在教室內的訓練往往無法有效重現事故發生當下船上的實際情況，且囿於時間和成本的限制，人員無法時常在運輸船舶上進行訓練。因此新進人員不容易獲得必要的知識經驗，而現有人員也難以維持自身應變技能。為解決這些問題，NFT 建構一個可以在個人電腦上利用 VR 技術自由檢查船舶的每個角落，有效學習如何在緊急情況下執行應變。
- C. VR 技術一個重要應用是走查（walk-through）功能（圖 16），其結合照片、影片和電腦繪圖，透過螢幕環視船上的各個區域（如貨艙、輻射控制室、駕駛艙和起居艙等），讓學員有身歷其境之感。學員可以通過該功能在 NFT 擁有的兩艘船舶上自由行走，有效瞭解船舶結構和船上設備配置。為強化訓練成效，走查功能亦提供貨艙失火或冷卻系統故障時該如何處理及相關設備的訊息，螢幕上也會顯示應變處置的具體內容以及所需的手冊和資料。

D. 應變訓練引入 VR 技術的成效：

(a) 降低訓練成本，提高訓練參與度與效率：

因為每次應變訓練需要五名人員連上四天課程，囿於時間和成本，每年約僅能進行兩次訓練。另為讓更多人員參加訓練，每次都指派不同人員參訓。結果導致受訓過的人員需經過很長時間才能回訓，進而難以維持自身應變技能。然而在引入 VR 技術，無須實際登船即可有效進行數次沉浸式演練。這樣的演練方式可降低訓練成本，增加受訓人數。實際登船訓練前透過 VR 技術進行培訓，現有學員可以自我評估，找出改進之處，確認最佳的實務作法，使人員更易獲得和維持應變技能。

(b) 營造緊急事件真實感：

學員可透過 VR 技術體驗無法實際重現的危險事件（如貨艙失火），讓其有面對危機的真實感，這種感受將使學員能夠重新確認訓練的目的和重要性。

(c) 提高資訊分享準確性以推斷事故狀況：

當運輸用過燃料的船舶發生火災或擱淺時，NFT 會立即成立應變工作小組。此時應變工作小組需要從船長身上獲取船舶和貨艙的資訊，俾準確發布應變措施及迅速將訊息分享給相關人員。VR 系統可作為應變指揮中心分享資訊和制定決策的有效工具，因為其可以利用影像而非僅是圖面來確認船舶內部的情況。

- E. 目前 VR 技術的應用主要針對海上運輸過程中船舶失火和冷卻系統故障等典型事故。未來 NFT 將利用 VR 技術來重現其他事故情境，如護箱從船上卸載到車輛時從起重機上墜落、用過燃料陸運過程中運輸車輛與其他車輛發生碰撞、自然災害(如龍捲風)及恐攻事件的應變，其將有助於提高用過燃料的安全運輸。

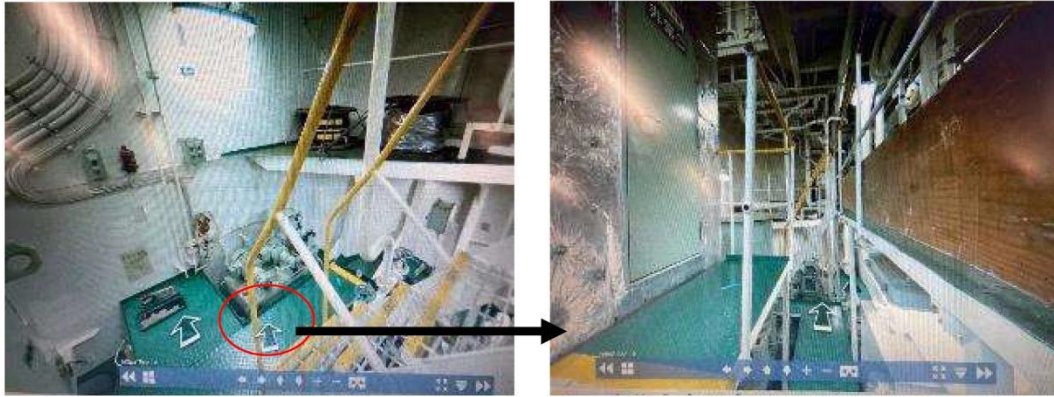


圖 16 VR 走查功能在螢幕上顯示的影像

### 三、心得及建議

- (一) IAEA 於 2018 年發行的放射性物質安全運輸規則 (SSR-6) 修訂一版已納入用於貯存後裝運之包件的老化問題，要求包件設計應考量老化機制、貯存期間定期評估包件狀況與提出老化辯證/驗證文件等。因應未來可能延長中期貯存期限的需求，部分國家（如德國、瑞士等）的管制機關已對乾貯包件設計之申照、換照及乾貯設施的運轉，要求執行老化管理。物管局業於民國 108 年 1 月訂定用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告審查導則，要求乾貯設施經營者應提送「用過核子燃料乾式貯存設施維護與監測計畫」，併同運轉執照申請文件送審。未來俟乾貯設施取得運轉執照後，原能會將嚴格要求設施經營者切實執行乾貯系統監測及老化管理，以確保設施營運安全。
- (二) IAEA 正在編寫歐美日等計 8 個國家於用過燃料成功運輸的案例研究報告，將提供這些核能先進國家過去數十年用過燃料安全運輸的作業經驗，讓首次執行用過燃料運輸的國家瞭解運輸作業前、中、後應考量的事項與採行的措施，以確保用過燃料運輸的安全和效率。建議可持續追蹤該案例研究報告提供的經驗作法，以作為我國未來執行用過燃料運輸作業管制之參考。
- (三) 近年來數位科技正快速發展，人工智慧 (AI)、巨量資料 (big data) 分析技術逐漸被應用於核電領域，促進核電廠通過自我診斷、優化、調控，以提高發電效率、降低運轉成本、提升運轉安全性等。未來將持續關注數位科技在核電領域應用的發展趨勢，特別是應用於放射性廢棄物的資料管理，以提升廢棄物安全管制技術。
- (四) 國內核電廠陸續進入除役階段，核一廠已取得除役許可，核二、三廠除役計畫亦經原能會審查通過；另核一、二廠室外乾式貯存計畫正持續推動中，原能會亦督促台電公司積極推動室內乾式貯存設施興建。乾式貯存設施為核電廠除役必要設施，有助除役作業推行。參與放廢相關國際研討會，即時掌握國際間重要的管理/管制動態，瞭解先進國家法規的修訂與管理策略的建立、推行、調整，以及核能工業的技術發展，有助於提升並強化我國用過核子燃料管理與安全管制作為，建議未來在經費許可下，可持續派員參加。

# PROGRAMME AT A GLANCE

## SUNDAY 11 JUNE 2023

### EVENING

|   |                      |  |
|---|----------------------|--|
| PATRAM 22 Exhibition Opening                    | 6:00 pm              | Exhibition Hall                            |
| PATRAM 22 Welcome Reception<br>Sponsored by NTS | 7:00 pm -<br>9:00 pm | Exhibition Hall and<br>Espace Méditerranée |

## MONDAY 12 JUNE 2023

### MORNING

|      |  |          |            |
|------|--|----------|------------|
| 001a | PATRAM 22 Introduction / Opening Plenary | 9:00 am  | Auditorium |
| 001b | PATRAM 22 Opening Plenary                | 11:00 am | Auditorium |

### AFTERNOON

|     |   |         |                      |
|-----|---|---------|----------------------|
| 002 | International Security and Safeguards - The Big Picture | 2:00 pm | Auditorium           |
| 003 | Operational Experience                                  | 2:00 pm | Room Ella Fitzgerald |
| 004 | Criteria for Modeling of Material Failure               | 2:00 pm | Room Miles Davis     |
| 005 | Risk Assessment for Transport Planning                  | 2:00 pm | Room Sidney Bechet   |
| 006 | Content Specific Aspects                                | 2:00 pm | Room Louis Armstrong |
| 007 | HALEU Fuel and LEU+                                     | 4:00 pm | Auditorium           |
| 008 | Research and Development on New Materials               | 4:00 pm | Room Ella Fitzgerald |
| 009 | Security at a National Level                            | 4:00 pm | Room Miles Davis     |
| 010 | Design Beyond and Beside IAEA SSR-6 Requirements        | 4:00 pm | Room Sidney Bechet   |
| 011 | Transportation of Targets and Sources                   | 4:00 pm | Room Louis Armstrong |

**TUESDAY 13 JUNE 2023****MORNING**

|     |  |          |                      |
|-----|--|----------|----------------------|
| 012 | Anticipating the Regulatory Landscape for TNPPs, FNPPs and SMRs  | 8:00 am  | Auditorium           |
| 013 | New package designs for Samples and Waste  | 8:00 am  | Room Ella Fitzgerald |
| 014 | Criticality  | 8:00 am  | Room Miles Davis     |
| 015 | Thermal Analysis Codes and Modelling of Test   | 8:00 am  | Room Sidney Bechet   |
| 016 | U.S. DOE Packaging Certification Program-Nuclear Packaging Graduate Program with The University of Nevada-Reno | 8:00 am  | Room Louis Armstrong |
| 017 | Keynote - Topic: Challenges (SMRs, TNPPs...)   | 9:50 am  | Auditorium           |
| 018 | A1 and A2 Values and Exemption Values  | 11:00 am | Auditorium           |
| 019 | Regulatory Requirements/Approvals  | 11:00 am | Room Ella Fitzgerald |
| 020 | Shielding Analysis   | 11:00 am | Room Miles Davis     |
| 021 | Normal Conditions of Transport / Shock and Vibration   | 11:00 am | Room Sidney Bechet   |
| 022 | Digital Solutions  | 11:00 am | Room Louis Armstrong |

**AFTERNOON**

|     |  |         |                      |
|-----|--|---------|----------------------|
| 023 | IAEA Activities to Support Member States   | 1:40 pm | Auditorium           |
| 024 | Material Aspects / Corrosion   | 1:40 pm | Room Ella Fitzgerald |
| 025 | Spent Nuclear Fuel   | 1:40 pm | Room Miles Davis     |
| 026 | Structural Analysis of Impact Limiters   | 1:40 pm | Room Sidney Bechet   |
| 027 | U.S. DOE Packaging Certification Program-Nuclear Packaging Graduate Program-Course Development | 1:40 pm | Room Louis Armstrong |

**TUESDAY AFTERNOON CONTINUED**

|     |   |         |                      |
|-----|---|---------|----------------------|
| 028 | Keynote - Topic: Regulatory Changes                                       | 3:10 pm | Auditorium           |
| 029 | Regulatory Infrastructure   | 4:20 pm | Auditorium           |
| 030 | Advanced Technologies in Packaging and Transportation Safety and Security | 4:20 pm | Room Ella Fitzgerald |
| 031 | Ageing Management of Casks  | 4:20 pm | Room Miles Davis     |
| 032 | Transport Dose Assessments  | 4:20 pm | Room Sidney Bechet   |
| 033 | Welding Qualification and Inspection                                      | 4:20 pm | Room Louis Armstrong |

# ETMD

## EUROPEMBALLAGE

---

### TYPE A PACKAGE

SAFE SOLUTION FOR TRANSPORT

For Solid, Liquid & Gas

Test reports from approved laboratories

UN approval certificate for subsidiary hazards

Vibration tests for Air transport








cyrielle@europemballage.fr

www.europemballage.com

Several sizes available

# TYPE A PACKAGE

# C1256

**WEDNESDAY 14 JUNE 2023****MORNING**

|     |                                      |          |                      |
|-----|--------------------------------------|----------|----------------------|
| 034 | Drop Testing                         | 8:00 am  | Auditorium           |
| 035 | Thermal Analysis Codes and Modelling | 8:00 am  | Room Ella Fitzgerald |
| 036 | Radioactive Waste Management         | 8:00 am  | Room Miles Davis     |
| 037 | Transport Safety Security Interface  | 8:00 am  | Room Sidney Bechet   |
| 038 | IAEA Transport Regulation Concepts   | 8:00 am  | Room Louis Armstrong |
| 039 | Keynote - Topic: Denial of Shipments | 9:50 am  | Auditorium           |
| 040 | Poster Session                       | 11:00 am | Poster Area          |

**AFTERNOON**

|     |  |         |                      |
|-----|--|---------|----------------------|
| 041 | Structural Analysis 1  | 1:40 pm | Auditorium           |
| 042 | Leak Testing / Containment 1   | 1:40 pm | Room Ella Fitzgerald |
| 043 | Auxiliary Equipment for Handling Packages                                | 1:40 pm | Room Miles Davis     |
| 044 | New Solutions for the Transport of Radioactive Waste                     | 1:40 pm | Room Sidney Bechet   |
| 045 | Spent Fuel Transportation Programs                                       | 1:40 pm | Room Louis Armstrong |
| 046 | Keynote - Topic: Attractiveness of Transport Industry & Young Generation | 3:10 pm | Auditorium           |
| 047 | History/Future of IAEA Transport Regulations                             | 4:20 pm | Auditorium           |
| 048 | Thermal Analysis of Casks  | 4:20 pm | Room Ella Fitzgerald |
| 049 | Ageing Evaluation of Gaskets   | 4:20 pm | Room Miles Davis     |
| 050 | Spent Nuclear Fuel Assessment  | 4:20 pm | Room Sidney Bechet   |
| 051 | Dual Purpose Casks   | 4:20 pm | Room Louis Armstrong |

**THURSDAY 15 JUNE 2023****MORNING**

|     |   |          |                      |
|-----|---|----------|----------------------|
| 052 | Structural Analysis 2                                       | 8:00 am  | Auditorium           |
| 053 | Safety Demonstration Strategies 1                           | 8:00 am  | Room Ella Fitzgerald |
| 054 | Spent Nuclear Fuel and Waste Transport                      | 8:00 am  | Room Miles Davis     |
| 055 | Security  | 8:00 am  | Room Sidney Bechet   |
| 056 | Leak Testing / Containment 2                                | 8:00 am  | Room Louis Armstrong |
| 057 | Keynote - Topic: Security of the future (cyber, war...)     | 9:50 am  | Auditorium           |
| 058 | Testing – Facilities and Experiences                        | 11:00 am | Auditorium           |
| 059 | Ageing Management Guidance                                  | 11:00 am | Room Ella Fitzgerald |
| 060 | General Packaging and Transportation Training and Education | 11:00 am | Room Miles Davis     |
| 061 | Transport Security Challenges                               | 11:00 am | Room Sidney Bechet   |
| 062 | Management Systems  | 11:00 am | Room Louis Armstrong |

**AFTERNOON**

|     |  |         |                      |
|-----|--|---------|----------------------|
| 063 | Implementation of Ageing Management Provisions | 1:40 pm | Auditorium           |
| 064 | Spent Nuclear Fuel Transport Planning          | 1:40 pm | Room Ella Fitzgerald |
| 065 | Transport Incident Analysis                    | 1:40 pm | Room Miles Davis     |
| 066 | Manufacturing Inspection                       | 1:40 pm | Room Sidney Bechet   |
| 067 | Safety Demonstration Strategies 2              | 1:40 pm | Room Louis Armstrong |
| 068 | Keynote - Topic: Openness to Society           | 2:50 pm | Auditorium           |



## THURSDAY AFTERNOON CONTINUED

|     |   |         |                             |
|-----|---|---------|-----------------------------|
| 069 | SCO-III   | 4:00 pm | Auditorium                  |
| 070 | Spent Nuclear Fuel Canister Ageing              | 4:00 pm | Room Ella Fitzgerald        |
| 071 | Operations and Maintenance Issues               | 4:00 pm | Room Miles Davis            |
| 072 | National & International Standards              | 4:00 pm | Room Sidney Bechet          |
| 073 | Boronated material for criticality-safety       | 4:00 pm | Room Louis Armstrong        |
| 074 | Award Ceremony                                  | 5:20 pm | Auditorium                  |
| 075 | Gala Celebration sponsored by NAC International | 7:30 pm | Belles Rives Hotel<br>Beach |

Start times listed in the Final Programme for Oral Presentations are fixed. The sessions Co-Chairs will try to manage each paper to the published start time in the final programme. If a paper is withdrawn, the remaining presentations will NOT move

up in time. There may be gaps of 20-40 minutes in a session due to cancellations (1-2 papers). This may allow time to visit the Exhibit Hall, the Poster Area or to attend a presentation in another technical session.

**THE FULL PROGRAMME IS ACCURATE AS OF 19 MAY 2023.**

**For the most up to date programme, please view the online programme by scanning the QR code below or download the PATRAM 22 app from the Apple App Store or Google Play:**



## 附件二、研討會論文及簡報

另詳電子檔案。