

出國報告（出國類別：開會）

參加第21屆放射性物質包裝及運送國際研討會(PATRAM 2025)

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：洪進達科長

派赴國家/地區：美國/聖安東尼奧

出國期間：114年7月26日至8月3日

報告日期：114年10月7日

## 摘要

核能的應用領域除商用核能發電外，亦廣泛應用於工業（如滅菌程序及非破壞檢測）、醫學（如電腦斷層掃描及放射治療）、農業（如作物育種及病蟲害防治）及科學研究（如碳-14 定年法）等。隨著核能技術的蓬勃發展與廣泛應用，放射性物質的包裝與運送已成為一項關鍵且不可或缺的環節，它不僅支撐核能應用、醫療和科學研究持續發展的後勤命脈，更是保障公共安全及環境保護的關鍵防線。

核能安全委員會因應放射性物質包裝及運送管制業務需求，於114年7月26日至8月3日派員前往美國德州聖安東尼奧，參加由核子材料管理協會（INMM）與世界核子運送協會（WNTI）合作主辦的第21屆「放射性物質包裝及運送國際研討會」（21<sup>st</sup> International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2025）。本次研討會匯集來自管制機關、研究單位及業界超過700位學者專家與會，發表300 餘篇論文。會議探討內容涵蓋放射性物質運送法規、安全分析與測試（結構、臨界、輻射屏蔽、熱傳）、輻射防護、人工智慧（AI）應用、運送容器/貯存護箱之維護與老化管理及意外事故風險評估等。

透過參與相關國際研討會，得以掌握國際上先進國家與相關國際組織在放射性物質包裝及運送研究與實務上的進展，包括相關計畫的推展成果、技術精進與克服挑戰的經驗，並檢討這些資訊對我國管制需求的回饋，有助於我國放射性物質包裝與運送安全與國際接軌，提升我國在此面向之安全管制技術能力，確保放射性物質包裝與運送作業安全。

# 目次

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 一、 目的 .....                     | 1  |
| 二、 過程 .....                     | 2  |
| (一) 行程 .....                    | 2  |
| (二) 第21屆「放射性物質包裝及運送國際研討會」 ..... | 2  |
| (三) 會議議題 .....                  | 4  |
| 三、 心得及建議 .....                  | 22 |
| (一) 心得 .....                    | 22 |
| (二) 建議事項 .....                  | 24 |

## 一、目的

放射性物質的運送，為放射性物質應用中重要的一環，國際間有用過核子燃料送往再處理及送回原委託國之跨國運送、商用核子反應器燃料運送等，我國內亦有低放射性廢棄物可減容廢棄物的運送及核能電廠核子燃料運送等，此外，台電公司蘭嶼低放貯存場低放射性廢棄物的遷場為我國政府一貫的政策，未來待台電公司規劃妥適後，遷場作業亦將涉及低放射性廢棄物的海上運送及陸上運送作業。

核能安全委員會為掌握國際上放射性物質包裝及運送之最新安全標準與技術，除平時透過蒐集國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）、美國核能管制委員會（Nuclear Regulatory Commission, NRC）所發布之相關技術報告，並掌握核能相關國際期刊所揭露之技術與產業訊息外，亦適時派員參加國際相關研討會議，交流各國相關技術發展與管制經驗，期能持續與國際標準接軌，有效提升我國核能技術應用之安全管理能力。

第21屆「放射性物質包裝及運送國際研討會」由核子材料管理協會（Institute of Nuclear Materials Management, INMM）與世界核子運送協會（World Nuclear Transport Institute, WNTI）合作主辦，於114年7月28日至8月1日在美國德州聖安東尼奧舉行，為期5天，共超過700位學者專家與會，發表300餘篇論文，內容涵蓋法規、安全分析/測試（結構、臨界、輻射屏蔽、熱傳）、輻射防護、人工智慧（Artificial Intelligence, AI）應用、運送容器/貯存護箱之維護與老化管理及意外事故風險評估等。

本報告內容主要說明本次研討會中，放射性物質包裝與運送有關議題之國際資訊，以瞭解目前核能先進國家最新技術資訊與發展，作為推展國內放射性廢棄物包裝與運送安全管制作業之參考。

## 二、過程

### (一)行程

| 日期(114 年)        | 地點                                                 | 工作內容                      |
|------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|
| 7 月 26-27 日      | 臺北→美國聖安東尼奧                                         | 路程                        |
| 7 月 28 日-8 月 1 日 | San Antonio Marriott River-center on the Riverwalk | 參加第 21 屆「放射性物質包裝及運送國際研討會」 |
| 8 月 2 日-8 月 3 日  | 美國聖安東尼奧→臺北                                         | 路程                        |

### (二)第21屆「放射性物質包裝及運送國際研討會」

#### 1. 會議背景

依本次研討會主辦方於網頁上之說明，「放射性物質包裝及運送國際研討會」(International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials)，旨在彙集放射性物質包裝及運送領域之專家學者，分享在放射性物質運送法規、包裝設計、測試與分析、操作和運送安全等主題領域的理念與經驗。本次為第21屆，第1屆於 1965 年由美國核能管制委員會 (NRC) 發起，並由美國桑迪亞國家實驗室 (Sandia National Laboratory) 主辦；本研討會大約每三年舉行一次，在美國和美國境外輪流舉辦，美國境外部分曾於德國柏林 (1980年)、瑞士達沃斯 (Davos) (1986 年)、日本橫濱(1992年)等地舉辦。本研討會議自1965年開辦以來，規模持續擴大，投稿論文數從1965年第1屆的49篇論文，增加到最近幾屆研討會均有近400篇的論文發表，為具相當規模之放射性物質包裝及運送系列研討會。

#### 2. 會議相關簡介

本屆 (第21屆) 放射性物質包裝及運送國際研討會，由核子材料管理協會 (INMM) 與世界核子運送協會 (WNTI) 合作主辦，其他協辦單位有

美國能源部（Department of Energy, DOE）、美國核能管制委員會（NRC）和美國運輸部（Department of Transportation, DOT）以及國際原子能總署（IAEA）等，會議地點為聖安東尼奧 San Antonio Marriott Rivercenter on the Riverwalk 飯店的2樓及3樓會議中心，會議現場包括接待區、主要會議室（照片1）、專題討論會議室（照片2）、海報展示區及廠商展示區等。會議於114年7月28日至8月1日舉行。

本屆放射性物質包裝及運送國際研討會，除第一天上午開幕致詞及全體大會專題研討於主要會議室進行外，其餘時間皆於5個專題討論會議室同時進行分項研討會，各專題討論會議室由參加人員自由入座。第三天上午開始並開放海報展示區域供研究單位張貼研究成果海報。



照片1 第21屆放射性物質包裝及運送國際研討會主要會議室



照片2 第21屆放射性物質包裝及運送國際研討會專題討論會議室

### (三)會議議題

本屆研討會除了8個場次之全體大會（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3至5個技術議題於各別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、安全分析/測試（結構、臨界、輻射屏蔽、熱傳）、輻射防護、人工智慧（AI）應用、可運送核子反應器（Transportable Nuclear Power Plant, TNPP）的運送、高豐度低濃縮鈾（High-Assay Low-Enriched Uranium, HALEU）燃料運送、包封容器/貯存護箱之維護與老化管理、意外事故風險評估等。會議發表及海報發表內容重點摘述如下：

#### 1. 「國際合作：歐洲主管機關協會」( International Collaboration: European Association of Competent Authorities, Frank Koch, ENSI, Swiss)

講者 Frank Koch 任職於瑞士聯邦核能安全檢查局（Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI），同時也是歐洲主管機關協會（European Association of Competent Authorities, EACA）及國際原子能總署（IAEA）運送安全標準委員會（Transport Safety Standards Committee, TRANSSC）的主席。

講者首先描述了歐洲的多樣性挑戰。歐洲由 47 個獨立國家組成，擁有 24 種官方語言和 47 套不同的國家法律與輻射防護規定，這使得放射性物質的國際運送變得極為複雜。為了解決這些挑戰，歐洲採取了兩種主要的協調方法：

- (1) 協調法規：透過「危險貨物公路運輸協定」（Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road, ADR），這是一個涵蓋 54 個成員國（超越歐洲範圍）的統一管制框架，極大地便利了各成員國間的放射性物質運送。
- (2) 合作途徑：透過歐洲主管機關協會（EACA），這是一個由 27 個歐洲主管機關組成的自願性、非法律約束力組織，旨在為放射性物質運送的法規解釋和實施提供共同且統一的方法，並維持運送的安全性。EACA 是一個自行組織的團體，儘管許多成員同時也是歐盟成員國，其章程不隸屬於任何特定機構。

EACA 的運作方式包括每年兩次會議、電子郵件交流、問卷調查、雙邊聯繫和聯合檢查。他們也設有網站（<https://www.euraca.eu>）用於內部文件共享和向公眾提供資訊。EACA 討論的議題包括分享運輸經驗，也關注檢查與管制、運送包件審查與核准及包件老化議題。EACA 的成果包括開發了包裝設計安全報告導則（已納入 IAEA 編號 SSG-66 報告）和檢查導則，並致力於更新其網站以提供更好的公共資訊。目前正在進行的工作包括分析成員國家運送法規的差異表、收集過去 EACA 內運送事件經驗，並計劃透過網站擴大公眾溝通，以建立信任。

講者也探討了美國與歐洲在放射性物質運送關係上的差異。美國擁有單一的國家政府和少數主管機關，運輸多為長距離國內運輸；而歐洲則有 47 個國家，超過 47 個主管機關（有些國家有多個，有些國家可能與他國合作），運輸距離較短但涉及多個國際邊界。在監管框架方面，美國依據聯邦法規第 49 和 10 條，而歐洲則依據「危險貨物公路運輸協定」（ADR）及其他針對鐵路和內河航運的協議。一個關鍵差異是，美國的法規是基於 IAEA 2009 年版的運送規定（報告編號 TS-R-1），而歐洲則基於 IAEA 2018 年版運送規定（報告編號 SSR-6），這導致了在處理用過

核燃料和包件型式審查上需要協調和經驗分享。

講者總結指出，協調的法規和國際合作是促進放射性物質運送安全的基本要素。他建議透過參與國際委員會（如 TRANSSC）、建立和發展國際網路（如 EACA），並提供論壇讓所有利害關係人保持聯繫（如本次 PATRAM 研討會議）來實現這些目標。

## **2. 「超高性能混凝土材質之用過核燃料水平貯存模組評估」(Rethinking Spent Nuclear Fuel Horizontal Storage Modules with Ultra High Performance Concrete, Mustafa Hadj-Nacer, University of Nevada Reno, USA)**

這場演講由 Mustafa Hadj-Nacer 博士主講，旨在探討並展示超高性能混凝土（Ultra High Performance Concrete, UHPC）建構之用過核燃料乾式貯存水平貯存模組（Horizontal storage module, HSM）在正常熱條件下的熱性能和力學性能，並將其結果與一般混凝土之性能進行比較。

超高性能混凝土（UHPC）指的是較一般混凝土強度更高的特殊混凝土材料，其抗壓強度至少 150MPa 以上（一般混凝土約 30 至 60 MPa），抗拉強度至少 15MPa 以上（一般混凝土約 2 至 5 MPa），抗彎強度至少 50MPa 以上（一般混凝土約 30 至 40 MPa）。講者說明其超高性能混凝土（UHPC）組成材料包含水泥、水、細砂、輔助膠凝材料和纖維等。

該研究考慮的荷載包括靜載重（HSM 的重量）、活載重（貯存罐的重量）和正常熱負載（貯存罐發出的熱量）。分析利用 ANSYS 公司之 ANSYS Fluent 及 ANSYS Mechanical 程式，進行熱流分析與有限元素之結構模擬分析（圖 1），並考量熱輻射及熱對流等相關熱特性。熱分析的結果並作為最終結構分析的輸入，以評估支撐部件上的應力。此外，他們定義了「需求容量比」，即模擬得到的應力值與導致失效的應力值之比。

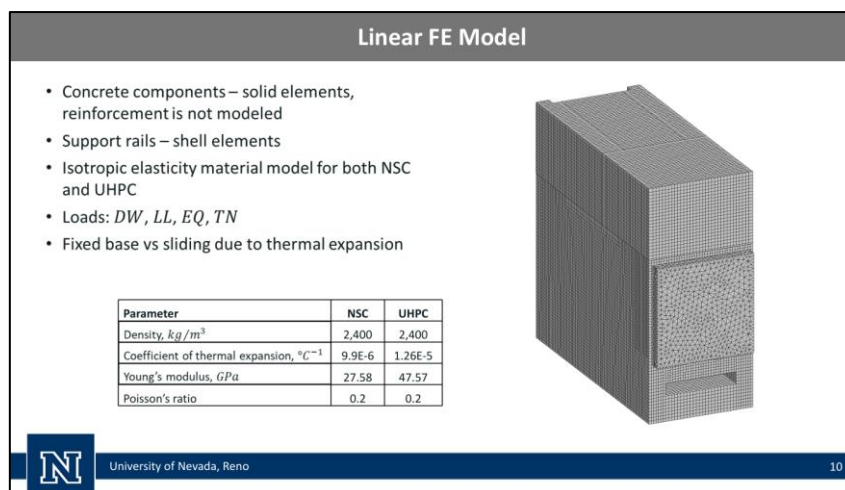


圖1 H 氏博士之用過核燃料水平模組有限元素法分析模型

研究的主要發現包括：

- 超高性能混凝土（UHPC）具有比一般混凝土更高的熱傳導率。分析結果顯示，UHPC 建構系統的最高溫度比一般混凝土低 5°C。
- 在選定的結構部件中，一般混凝土的需求容量比在 25% 到 57% 之間，而 UHPC 的需求容量比則在 11% 到 30% 之間，約為一般混凝土的兩倍低。這意味著 UHPC 擁有更高的貯存容量，需要施加兩倍以上的應力才能使其失效，或者 UHPC 的橫截面可以減半，仍能達到與一般混凝土相同的性能。

總結來說，講者指出超高性能混凝土（UHPC）提供了比一般混凝土更好的冷卻效果，由於其更高的容量，UHPC 被認為是替代一般混凝土的良好候選材料。儘管目前其價格非常高，限制了廣泛應用，但它具有巨大的潛力。

### 3. 「IAEA 放射性物質安全運送規則 2018 年版之審查與改版」(Review and Revision of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2018 Edition, IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev. 1), Eric H. Reber, IAEA)

1959 年，聯合國經濟及社會理事會（Economic and Social Council, ECOSOC）在第 724 C(XXVIII)號決議，授權 IAEA 起草放射性物質運送建議。1961 年，IAEA 出版了第一版運送規則。自 2005 年起，IAEA 理事會

確立了每兩年審查一次運送規則的現行政策；如果審查週期中提出的變更提案對安全足夠重要，且需要盡快發布，則會進行修訂。

IAEA 出版之「放射性物質安全運送規則」(2018 年版) (「Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material」, 2018 Edition, SSR-6 (Rev. 1)) 最近一次審查週期從 2021 年 11 月開始，邀請 IAEA 成員國提出變更提案，至 2022 年 12 月結束；2022 年 11 月/12 月 IAEA 運送安全標準委員會 (TRANSSC) 會議決定啟動運送規則的修訂，預計 2026 年 1 月完成。

本次修訂內容包含：

- A1 和 A2 值的更新：A1 和 A2 值是甲型(Type A)運送包件可運送的放射性物質數量，也用於其他類型運送包件之運送限值。A1 和 A2 值上次更新是在 1996 年，於 2013 年左右的審查結果認為 A1 和 A2 值需要進行更新。為讓適用作業人員有足夠時間調整操作，新數值之應用將有 10 年的過渡期。
- 定義的引入和刪除：引入了「天然放射性物質 (naturally occurring radioactive material)」和「天然放射性核種 (naturally occurring radionuclides)」的定義；並刪除了「圍堵系統 (confinement system)」的定義，因為「放射性物質安全運送規則」中沒有必要使用此定義，且該定義被認為會引起混淆。
- 特殊形式放射性物質 (Special form radioactive material) 的設計應考慮老化機制。
- 澄清不同組別的低比活度物質 (Low specific activity material, LSA) 和表面污染物體 (surface contaminated objects, SCO) 在一起包裝時，如何適用相關要求；及修訂貨櫃用作包裝時應適用的要求。
- 澄清當一個包裝內之放射性內容物，適用兩個或更多聯合國編號時的標記和運送文件中的資訊要求。
- 目前「放射性物質安全運送規則」中要求包件經自由墜落測試後，包件外表面最大劑量率增加不得超過 20%。本次修訂對於外表面最大劑量率低於 50 微西弗/小時的包件，測試後的劑量率，不得增加超過 10 微西弗/小時。

- 空載大型貨櫃和運載工具：新增了關於曾用於運送未包裝第 1 類低比活度物質（LSA-I）或第 1 類表面污染物體（SCO-I）的空載大型貨櫃和運載工具的要求（包括標牌要求和運送文件中的資訊）。

#### 4. 「日本低放射性廢棄物運送包件的設計與發展」(Design and Development of Future Transport Packages for Low Level Radioactive Waste in Japan, Takuya Takahashi, Nuclear Fuel Transport Co., LTD, Japan)

這場演講由來自日本核燃料運輸公司（Nuclear Fuel Transport Co., LTD, NFT）設計開發部門的 Takuya Takahashi 發表。

主要問題源於日本有 24 座核電廠正在或即將進行除役。這個過程預計將產生大量低放射性廢棄物（Low level Radioactive waste, LLW）。報告中說明，一座 1100 百萬瓦的核子反應器除役估計會產生約 536,000 噸拆除廢棄物，其中約 2%（13,000 噸）被歸類為 LLW。由於核電廠的營運壽命有法律規定，進行除役的核電廠數量將會增加，因此如何有效管理和運送這些廢棄物成為關鍵議題。

目前，日本的放射性廢棄物分為高放射性廢棄物（High level Radioactive waste, HLW）和低放射性廢棄物（LLW），而核電廠產生的 LLW 則依放射性核種種類與濃度進一步分為 L1、L2 和 L3（圖 2）。L2 和 L3 廢棄物的最終處置方法已在日本實施，日本核燃料運輸公司（NFT）負責將這些廢棄物（如作業時產生的防護衣和液體廢棄物）運送到最終處置設施。傳統的運送流程涉及將廢棄物進行預處理（剪切、壓實），裝入 200 公升的桶中並進行固化，然後裝入 LLW 運送容器，再由專用船隻和車輛運往位於日本北部的最終處置設施。自 1992 年以來，已運送超過 35 萬桶廢棄物。

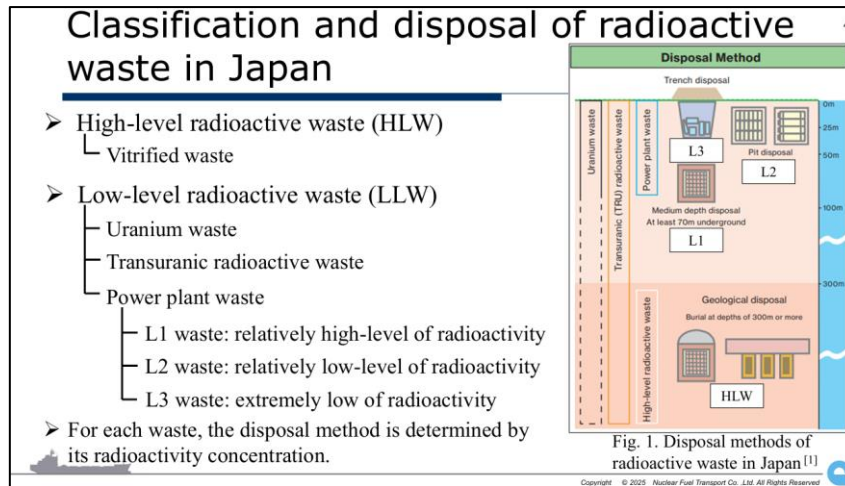


圖2 日本放射性廢棄物分類

為了應對未來除役產生的 LLW，日本核燃料運輸公司（NFT）正與電力公司及相關公司合作，設計 L1 和 L2 廢棄物運送包裝。

關於 L2 運送包裝：

- 其設計理念是能夠處理比核電廠營運期間產生多 100 倍的量及可由現有設施處理，並同時具備運送與最終處置功能。
- L2 運送包裝設計成果，為邊長約 1.6 公尺、重約 17 噸的立方體形狀。立方體的設計可充分使用運送裝載與最終處置空間，以提升效率，且較大的包裝體積也減少了預處理（如廢棄物切割）的需求。
- 包件之墜落測試高度為 5.3 公尺，是基於最終處置設施設計的考量。

關於 L1 運送包裝：

- L1 廢棄物具有相對較高的放射性，設計裝載於最終處置容器中。
- 運送時，規劃將含 L1 廢棄物之最終處置容器，置於圓柱狀之乙型（Type B）包件的包裝中進行運送（圖 3），設計時考量了每只乙型包件運送 1 只或 2 只處置容器的兩種模型，以適應不同的廢棄物特性。

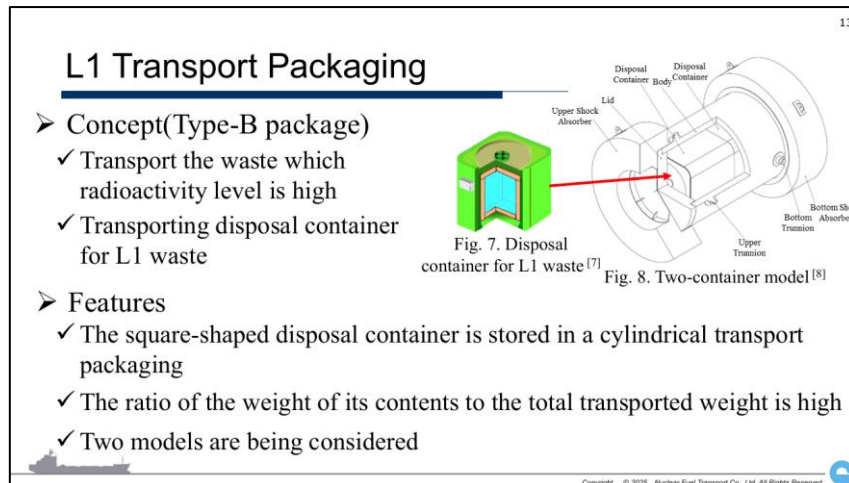


圖3 日本核燃料運輸公司的 L1廢棄物運送設計

##### 5. 「德國放射性物質運送包件的老化管理經驗」(Experience with the Implementation of the Aging Management for Packages for Transport of Radioactive Materials in Germany, Martin Neumann, BAM, Germany)

本專題由德國聯邦材料研究與測試研究所（Federal Institute for Materials Research and Testing, BAM）的 Martin Neumann 先生進行演說。

IAEA 對放射性物質運送包件的老化管理規範，在2018年出版的「放射性物質安全運送規則」（Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, SSR-6）中引入，該規則第613A 項，要求運送包件設計時，應考量老化效應。

德國面臨的特殊情況是擁有大量貯存設施，包括數千個貯存用過核燃料和放射性廢棄物的貯存容器，以及許多用於醫療、探測和加馬射線照相的射源容器。由於德國預計在未來幾年內將啟用中放及低放廢棄物最終處置場，許多現場已貯存數十年的包件將需要運輸，這使得老化管理尤為關鍵。

德國 BAM 出版「放射性物質運送包件老化管理」指南（Ageing Management for Competent Authority Approved Package Designs for the Transport of Radioactive Material, BAM-GGR 023），供業界參考，該指南有德語和英語版本，於網路上即可搜尋得到。

BAM-GGR 023指南將運送包件的使用，分為三種類型：

- 一次性使用包件：對於預計僅供一次性使用且不會預先貯存的包裝，可省略老化管理措施，惟該指南規範設計時應評估老化機制及其後果。
- 重複使用包件：定期（例如每三年）進行檢查，但對不易接觸的部件需要長期評估。
- 長期貯存後運送的包件：需要進行全面性的老化評估。

BAM-GGR 023指南並闡述了其老化管理架構，包含老化管理系統（Ageing management system, AMS）和老化管理計畫（Ageing management plan, AMP）及老化管理文件（Ageing management documentation, AMD）（圖4）。老化管理系統（AMS）包含管理層面的組織措施、包件設計規範及文件要求；老化管理計畫（AMP）則是老化管理系統（AMS）的一個組成部分，闡述包件老化管理規劃做法，並且必須納入安全報告中。老化管理計畫評估的輸入參數包括操作條件（如環境、溫度、負載、輻射類型和劑量等）和操作階段（如該操作環境下存續時間），重點關注包件和內裝物的行為；而老化管理文件（AMD）包括持續記錄符合規範的情況，並考慮了相應包裝中的老化因素以及包裝專用文件。

講者還提到，在過去幾年發現的主要老化關注點包括螺栓連接的鬆弛及彈性體的結構變化等，這些現象都已涵蓋在 BAM-GGR 023指南中。

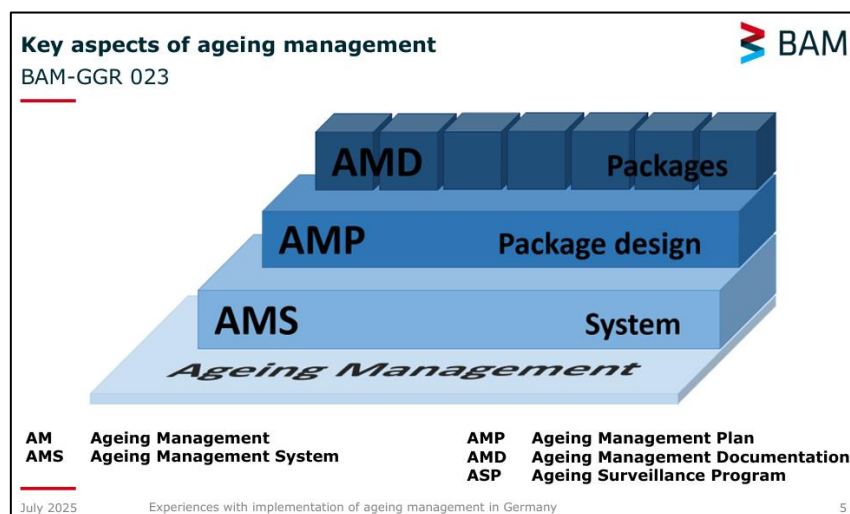


圖4 德國 BAM-GGR 023指南之運送包件老化管理架構

6. 「日本用過核燃料與放射性廢棄物專用運送船舶之維護管理」  
(Maintenance Management of Dedicated Ships for Transporting Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste in JAPAN, Junnosuke Fujita, Nuclear Fuel Transport Co., LTD, Japan)

目前日本核電廠產生的用過核燃料會被運往日本青森縣進行中期暫時貯存，同時也會將低放射性廢棄物運往日本青森縣最終處置設施（圖 5）。由於日本的大多數核電廠都位於海岸線，因此海運是將這些物質運往日本青森縣的主要方式。為此，他們使用了三艘專用船隻：Rokuei-Maru（1996 年建造，用於運送用過核燃料）、Kaiei-Maru（2006 年建造，也用於運送用過核燃料）和 Seiei-Maru（2019 年建造，用於運送低放射性廢棄物）（圖 6）。

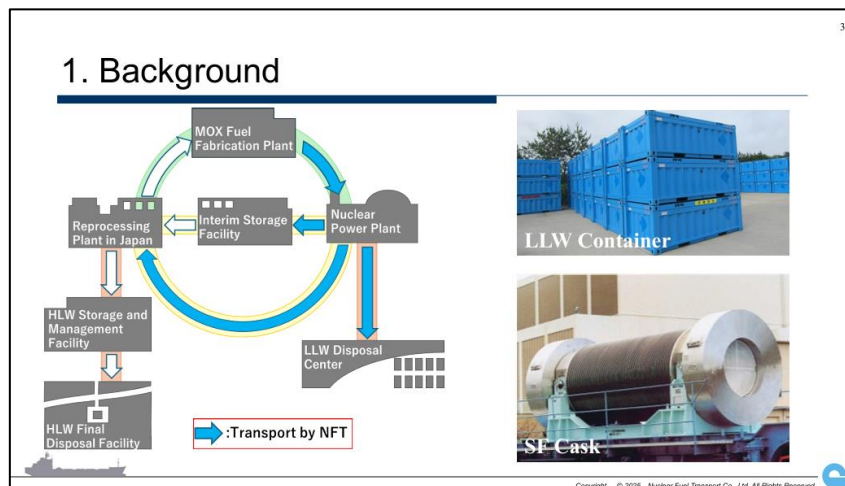


圖5 日本用過核燃料與低放射性廢棄物運送途徑

4

## 2. Overview of the ship

|            | Rokuei-Mar                                                                        | Kaiei-Mar                                                                         | Seiei-Mar                                                                          |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Built      | September 1996                                                                    | August 2006                                                                       | March 2019                                                                         |
| Ship's Age | 29 years                                                                          | 19 years                                                                          | 6 years                                                                            |
| Purpose    | SF                                                                                | SF                                                                                | LLW                                                                                |
|            |  |  |  |



Copyright © 2025 Nuclear Fuel Transport Co., Ltd. All Rights Reserved

圖6 日本用過核燃料與低放射性廢棄物運送船舶

在運送船舶維護管理方面，船東日本核燃料運輸公司（Nuclear Fuel Transport Co., LTD, NFT）採取預防性維護策略，預先為船舶上重要組件設定使用壽命或時間，並在一定運行時間後進行更換，以減少故障風險並提高整體安全性。他們持續根據運行數據和歷史表現審查及改進這些計畫；重要組件一旦發生故障，他們會調查原因，並採取糾正措施，將經驗應用於其他船隻，以防止問題再次發生。此外，他們會參考業界報告的事故和故障資訊，評估是否會影響其船隻並採取適當措施。他們也進行除鏽和油漆工作，以維持其優良的外部狀態，這也是為了給大眾帶來安全感。

運送船舶的檢查和維護在船塢進行，分為乾塢（船隻完全離開水面）和浮塢（船隻保持浮動）兩種。主要的檢查類型包括年度、中期和特別檢查。除了這些檢查，他們還會接受日本海事協會（NIPPON KAIJI KYOKAI, ClassNK）的檢查，以維持其分級狀態。由於這些船隻裝備了許多運送用過核燃料容器所需的專業系統和結構，需要額外的檢查和維護工作，因此相較於一般商船，它們在船塢中的停留時間更長，約需兩到三週。特別是 Seiei-Mar 專用船，因為配備了船載起重機，其檢查和維護工作更為複雜，浮塢作業需約一個半月，乾塢作業甚至長達兩個月。

演講中並提到 Rokuei-Mar 的延役計畫。Rokuei-Mar 原定於 2030 年（服役 34 年時）退役，但 NFT 公司進行了一項可行性研究。他們對類似尺寸和船齡的船隻進行了比較調查，發現了與船舶老化相關的兩大風險：一是老化導致的潛在故障，二是許多組件已停產，更換零件的採購困難。

鑒於此，他們決定對船上的系統進行全面更換，以延長其使用壽命。根據 2023 年中期檢查結果以及對船隻狀況的評估，NFT 公司確認 Rokuei-Maru 的船體、船載設備和管道系統的功能可以透過現行的檢查和維護流程、必要的預防性和維修工作來維持。因此，他們確定 Rokuei-Maru 可以安全地延長服務期至 2035 年，屆時它服役期間將達到 39 年。這次延長服務期的經驗和見解也將應用於 Kaiei-Maru 和 Seiei-Maru 的日常維護管理。

總結來說，NTF 公司透過持續檢查、維護和預防性維護計畫，確保所有船隻的良好狀況，以實現用過核燃料及低放射性廢棄物的安全運送。

## **7. 「法國 CEA 流體物質運送包裝的維護」(Maintenance of CEA Effluent Packages, Nicolas Gammella, CEA, France)**

這場演講由 Nicolas Gammella 主講，他來自法國原子能與替代能源委員會（Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, CEA）的運送組織。CEA 是法國的研究機構，致力於核能與再生能源的低碳能源、產業技術、物理與生命科學基礎研究等領域，CEA 轄下設有 10 個研究中心。

為處理 CEA 內各研究中心間流體物質之運送需求，CEA 設有運送組織，扮演著包裝設計者、供應者、維護者和執行運送作業的角色。CEA 運送之流體物質之性質相當廣，放射性含量從數千貝克（kBq）至數十億貝克（GBq），類別包含水溶性或有機化合物，且部分含有可分裂放射性物質，他們擁有一支運送車隊，並有多種運送包裝（圖 7）。



圖7 法國 CEA 擁有之流體運送包裝

CEA 的流體運送包裝之維護工作，主要分為三種方式：

- 年度維護：這項維護作業主要檢查泵浦、感測器、電氣檢查和軟管的目視檢查。
- 基本維護：每 2.5 年至 3 年進行一次。除了年度維護的操作外，還包括安全閥的驗證與評估，以及對貯罐和設備進行洩漏測試。
- 主要維護：每 5 年至 6 年進行一次，是最全面且技術性最高的維護。它需要打開貯罐並徹底清潔。維護內容除了前述年度維護和基本維護外，還包括內部組件檢查、功能測試、更換密封件、貯罐內壁檢查與徹底清潔，以及對貯罐進行液壓測試（Hydraulic test）。

講者說明在進行這些維護操作時，主要的風險是人員曝露於輻射環境和放射性物質散佈的空間中。為了管理這些風險，CEA 實施了多項防護措施，包含作業前確認貯罐的接觸輻射劑量率及環境劑量率，及有空浮放射性物質（Airborne radioactive materials）存在的顧慮時，佩戴呼吸防護口罩或於作業範圍外加設圍阻罩等措施。

8. 「使用 ISO7195 標準之替代檢查與測試方法於含有 UF<sub>6</sub> 之 30B 圓柱形包件」（Use of the ISO 7195 Alternative Five-Year Inspection and Testing on 30B Cylinders Containing Uranium Hexafluoride at the International Atomic Energy Agency Low Enriched Uranium Bank, Carmen Good,

## IAEA)

講者 Carmen Good 女士來自國際原子能總署 (IAEA)，主要介紹了 IAEA 低濃縮鈾銀行 (Low Enriched Uranium Bank, LEU bank)，及其含有六氟化鈾 (Uranium Hexafluoride,  $UF_6$ ) 之 30B 圓柱形包件的替代性非破壞外部檢查與再認證程序。

演講背景是 IAEA 於 2010 年建立低濃縮鈾銀行 (LEU bank)，作為成員國核燃料供應保障機制，以在商業供應中斷時提供。該銀行位於哈薩克共和國，並由該國託管，實體貯存 90 噸低濃縮鈾 (以  $UF_6$  形式存在)，裝載於 60 個 30B 圓柱形包件中，濃縮度為 1.6% 或 4.9% (圖 8)。這些圓柱形包件均為製造後首次使用，製造作業為根據 ISO 7195 標準 (「Packagings for the transport of uranium hexafluoride」, 2005 年版) 進行。



圖8 IAEA 低濃縮鈾銀行貯存情形

IAEA LEU bank 的運營，遵循 IAEA 的「放射性物質安全運送規則」(編號：SSR-6) 安全與標準；另根據 ISO 7195 標準 (2020 年版) 的要求，30B 圓柱形包件需每五年進行定期再認證。傳統的再認證方法包括圓柱形包件的外部 and 內部檢查，這需要將圓柱形包件傾倒、清潔和沖洗。然而由於低濃縮鈾預計將進行可能長達 10 至 20 年或更久之長期貯存，且貯存設施不具備傾倒圓筒的能力，IAEA 決定採用 ISO 7195 標準中新增的替代性非破壞性外部檢查方法。此方法允許 30B 圓柱形包件在仍裝有  $UF_6$  的情況下進行檢查和測試。選擇這種方式是為了證明 30B 圓柱形包件處於安全可用狀態，並降低未來運送時可能被拒絕運送的風險。

為此，IAEA 制定了符合規範的非破壞性檢測程序，這些程序包括：目視檢查、焊道的超音波檢查、殼體厚度檢查，以及閥座洩漏測試。其中，由於市面上沒有現成的閥座洩漏測試設備，IAEA 自行設計和製造氣體輸送系統及測試儀器（圖 9）。此外，他們還設計了一個可旋轉 30B 圓柱形包件的支架，以改善檢查程序並縮短檢查時間。

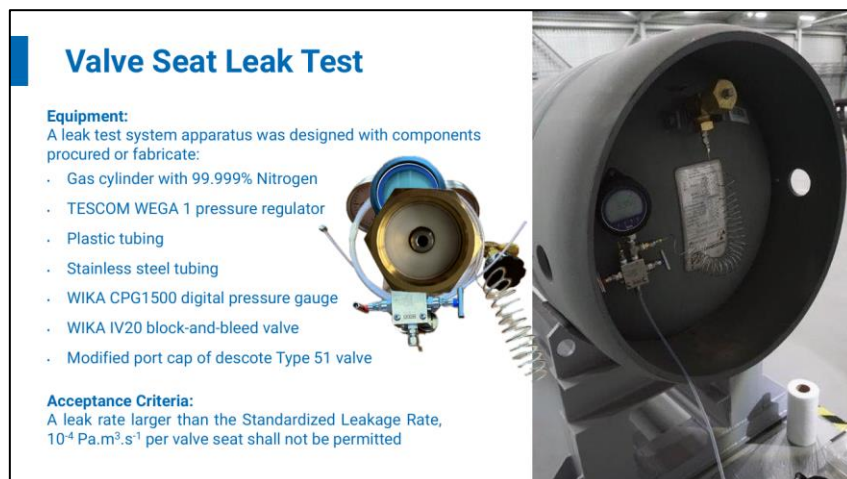


圖9 IAEA 設計之30B 圓柱形包件閥座洩漏測試設計

這項計畫的成果成功驗證了替代性測試方法的可行性，並於 2023 年檢查了 24 個圓柱形包件，2024 年檢查了 36 個圓柱形包件，這些 30B 圓柱形包件均獲得再認證證書。講者認為，這是業界首次採用這種替代性測試方法，並證明它是一個有效的替代方案，特別適用於無法進行內部檢查的情況。

## 9. 「放射性物質包裝與運送之新趨勢」(New Trends in Packaging and Transport of Radioactive Materials, Isata Sesay, University of Maryland, USA)

講者 Isata Sesay 為美國馬里蘭大學（University of Maryland）的研究人員，其研究重點為整合分析輻射安全與放射性物質運送，特別關注人工智慧（AI）賦能的物流、無人機運送和可運送核子反應器（TNPP）。講者說明，雖然放射性物質運送是推動研究進展和清潔能源的關鍵，但運送安全是一項高風險的挑戰，迫切需要創新。隨著新技術的出現，放射性物質的包裝和運送日益複雜，這主要由四個趨勢所驅動：提供靈活能源解決方

案的可運送核子反應器（TNPP）、用於下一代反應爐的高豐度低濃縮鈾（HALEU）、用於物流支援和監測的無人機技術，以及在路線優化和風險評估方面具備潛力的人工智慧（AI）。然而，這些技術在提升運送效率的同時，也引入了新的挑戰，例如網路安全問題等。

講者指出，經統計，全球每年有超過 2000 萬次放射性物質運送，其中美國獨佔 300 萬次以上。儘管有嚴格的法規，運送仍是一個脆弱的環節。從 1993 年到 2021 年，國際原子能總署（IAEA）接獲 630 起涉及放射性物質失竊的事件報告，其中 310 起發生在運輸過程中，且有 57% 至今未能追回，這凸顯了精進與創新在該領域的急迫性。

為應對這些挑戰，講者整合文獻、國際與國家框架、機構放射性物質運送紀錄，以及芬蘭無人機走廊(Drone corridor，為無人機安全合法運行而指定的飛行路線)和 AI 監控系統的案例研究的定性研究方法。資料來源包括國際原子能總署（IAEA）、美國核管會（NRC）、運輸部（DOT）等監管文件，以及最重要的，來自她任職的環境健康與安全部門於 2022 年至 2025 年的實證數據。她本人在 2023 年至 2025 年期間親自參與了這些數據的記錄和分析，並使用描述性統計和決策樹模型，透過工具識別包裝分類的關鍵預測因子。

研究的關鍵發現顯示，AI 在物流優化方面具有強大潛力，能縮短旅行時間並減少人員曝露於輻射的風險，因為監控工作可由 AI 完成，放射性物質運送正進入一個由創新、複雜性和對敏捷性的迫切需求定義的新時代。然而，現有包裝標準和法規未能完全適應新型反應器、無人駕駛車輛和 AI 輔助系統。

演講結論強調，AI 和無人機監控等技術，具有降低人體曝露、優化路線並改善緊急應變之潛力。然而，這些工具也帶來了網路安全風險及監管不確定性等挑戰。對此，講者提出了幾項建議：法規現代化，要求 IAEA 的安全系列指南和美國聯合法規（10CFR71）明確涵蓋無人機使用、AI 驅動的監控和智慧感測器。此外，還需要先進的包裝創新以適應小型模組化反應器（Small Module Reactor, SMR）和高豐度低濃縮鈾（HALEU），並推動國際研討與交流。

## 10. 「放射性物質運送的新興技術」(Emerging Technologies in Radioactive Materials Transport, Daniel Fisher, NUVIA, UK)

講者說明國際原子能總署(IAEA)發布的「放射性物質安全運送規則」(編號:SSR-6)等現行法規,並未將新型反應器、無人機等新興技術納入考量,面對到2050年全球電力需求預計增加44%的挑戰,核能發電量預期將佔總量的6%到12%,因此新興核能技術及其運送變得至關重要。

講者將新興核能技術分為幾類:新型燃料(如高豐度低濃鈾(HALEU))、小型模組化反應爐(SMRs)和可運送核子反應器(TNPPs)。同時,他也提到了非傳統運送型式的興起,包括電動卡車運輸危險物品,無人機移動放射性物質等,及人工智慧(AI)應用的引入可能改變運送的評估或監測。針對新興技術對運送帶來的挑戰,講者分別說明:

- 先進反應器:由於其模組化特性,需要釐清它們是否應被歸類為「包件」。一些設計甚至可能在運送過程中維持臨界,這與IAEA「放射性物質安全運送規則」(編號:SSR-6)的基本原則相悖,需要進行充分的討論和變革。
- 先進燃料:這些燃料通常更富集,意味著可能需要更厚重的包裝以增加屏蔽,並導致資源需求增加,例如需要更多的武裝護送和更高的安全級別。
- 國際運輸:跨國界運輸(特別是涉及國際水域)時,現有框架和責任劃分存在困難,儘管有國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)針對船舶的「核動力商船安全規則」(Code of Safety for Nuclear Merchant Ships)。
- 新運送方式的挑戰:
  - 鋰離子電池和氫燃料電池:它們引起的火災熱量和持續時間可能不符合IAEA「放射性物質安全運送規則」(編號:SSR-6)的規定,這可能意味著需要修改SSR-6的測試要求。

- 無人機：構成額外的安全威脅，包括故障墜毀後如何遠程回收物資、潛在的網路攻擊。
- 人工智慧（AI）：其學習依賴於數據，錯誤的數據會導致錯誤的學習。外部篡改可能使其忽略安全功能，以及出現不可預測的行為。

講者說明，世界核子運送協會（WNTI）作為一個由工業專家組成的國際組織，致力於推動放射性物質運送安全，且 WNTI 在 IAEA 中擁有觀察員地位，並積極參與相關工作組。

講者最後強調，這些新技術已經存在並在全球範圍內運行，各國（如德國和加拿大）也在積極推動相關解決方案。他呼籲應加強國際合作，以找到全面的解決方案，確保未來核能技術的安全運輸。

#### **11. 「透過 AI 驅動風險評估強化放射性物質運送安全」(Enhancing Safety and Security through AI-Driven Risk Assessment in Radioactive Material Transport, Jessica Dapelo, JESSICA DAPELO ENTERPRISES INC., USA)**

講者 Jessica Dapelo 女士為美國 JESSICA DAPELO ENTERPRISES INC. 公司的創辦人兼產品長。該公司為美國國土安全部、能源部等聯邦客戶提供支援，開發用於化學、生物、放射性和核子保安以及關鍵基礎設施的人工智慧（AI）強化解決方案。

講者指出，放射性物質運送對於核能、醫用同位素和工業放射學應用至關重要，而隨著人工智慧（AI）的發展，AI 在強化放射性物質運送安全方面的潛力，包含預測性分析、即時監控與動態路線優化等，主要結合物聯網感測器、全球定位系統（Global Positioning System, GPS）追蹤和 AI 分析，AI 可利用大數據集預測事件及偵測回應，特別針對熱門區域、天氣事件、駕駛行為和情報數據，實現即時異常偵測及自動化報告，這有助於降低風險、確保符合法規及規範要求。

然而，講者也提到，AI 的使用也面臨嚴峻挑戰與風險，包含：

- 數據品質與來源：不良的數據品質會損害預測性分析，不一致的舊有數據、誤報和不必要的路線可能導致風險提升。
- AI 的偏見與「幻覺」：AI 模型可能存在偏見，並產生看似合理但實則

錯誤的「幻覺」，這需要極度謹慎。

- 缺乏現實世界考量：AI 推薦的路線可能忽略當地安全狀況，例如高竊盜風險區域，這凸顯了人類監督的重要性。
- 網路安全威脅複雜化：車輛及其部件（如擋風玻璃、後視鏡）日益智慧化，帶來更多網路攻擊風險，駭客技術越來越複雜。
- 隱私問題：車輛感測器可能收集周圍環境的數據，引發隱私擔憂。

為應對這些挑戰，講者提出了以下建議：

- 人類監督至關重要：AI 應被視為一個助理，一個重新塑造思維方式的催化劑，而不是取代人類的工具。決策仍需由專業人員來做出，因為 AI 並不能消除工作，而是需要更高階職能的專家來解讀和決策。
- 「零信任」原則：使用 AI 必須遵循「永不信任，始終驗證」的原則，確保決策的正確性。
- 跨職能團隊合作：安全、物流、法務和資訊部門應保持溝通，避免資訊落差等問題。
- 投資培訓與供應商評估：對所有人員進行培訓以保持警惕，並仔細評估 AI 應用與設備相關供應商，以降低風險。
- 謹慎使用開放原始碼 AI：切勿在線上分享敏感資訊，因為開放原始碼 AI 系統可能被監控。

在當今複雜的供應鏈和網路威脅時代，透過 AI 進行的風險評估能提供即時洞察，增強安全性、法規符合性並降低成本。然而，這需要仔細的規劃、高品質的數據、網路安全及專家的參與，以及最重要的，持續掌握天氣事件、駕駛行為和情報數據，以提高效率並降低風險。

### 三、心得及建議

#### (一) 心得

1. 參與本次國際研討會，得以深入了解放射性物質包裝與運送在全球範圍內的最新發展、法規演進及技術創新。隨著核能技術的蓬勃發展（如小型模組化反應器 SMRs、可運送核子反應器 TNPPs、高豐度低濃縮鈾 HALEU 燃

料)以及各國核電廠陸續進入除役階段，放射性物質(包括用過核燃料與除役廢棄物)的運送量預期將大幅增加，使得確保運送安全成為全球核能領域的關鍵挑戰。

2. 放射性物質包件及貯存護箱的長期貯存後再運送已成為普遍趨勢，因此其老化管理的重要性日益凸顯。國際原子能總署(IAEA)的「放射性物質安全運送規則」(編號:SSR-6)已納入包件的老化機制考量，德國聯邦材料研究與測試研究所(BAM)也發布了相關指南，對包件進行老化評估和管理計畫。日本核燃料運輸公司在船舶維護管理和延役計畫上的經驗，也顯示了預防性維護對於確保長期運送安全至關重要。
3. 人工智慧(AI)、無人機、電動車等新興科技正逐步應用於放射性物質的運送管理，展現出優化物流、即時監控、動態路線規劃及降低人員輻射暴露的潛力。然而，這些技術也帶來了數據品質、AI 偏見、網路安全威脅及監管不確定性等新挑戰，突顯了人類監督和零信任原則在 AI 應用中的關鍵角色。
4. 國際原子能總署(IAEA)持續審查並修訂「放射性物質安全運送規則」(編號:SSR-6)，以因應新興技術發展與操作經驗的累積，例如 A1/A2 值的更新、老化機制考量納入特殊形式放射性物質設計等。歐洲主管機關協會(EACA)透過協調法規和國際合作，為放射性物質運送的法規整合和實施提供統一方法，確保跨國運送的安全。這些經驗表明，國際合作與法規的現代化是確保放射性物質安全運送不可或缺的環節。
5. 針對不同類型放射性廢棄物(如除役產生之低放射性廢棄物)，各國積極開發高效率、多功能的新型運送包件，如日本為因應核電廠除役而設計的立方體 L2 運送包裝和乙型 L1 廢棄物運送包裝。同時，研究超高性能混凝土(UHPC)等創新材料應用於用過核燃料貯存模組，以提升熱傳導與結構強度，也顯示了在包裝材料領域的持續進步。

## (二) 建議事項

1. 考量國內核電廠除役及用過核子燃料貯存的需求，應借鑒國際經驗（如德國 BAM-GGR 023 指南），建立並實施用過核燃料貯存的老化管理計畫。這應包括定期評估包件狀況、精進非破壞性檢測技術、制定維護與檢修規範，以確保其在整個生命週期內皆能符合相關規範要求。
2. 建議密切關注國際間小型模組化反應器（SMR）、可運送核子反應器（TNPP）、高豐度低濃縮鈾（HALEU）燃料等新興核能技術的發展，及其對放射性物質運送法規和安全評估帶來的影響，並掌握人工智慧（AI）、無人機、電動車等新興科技應用於放射性物質運送的可行性，同時關注國際上先進國家相應的管制策略、安全分析方法及網路安全防護措施，確保在運用新技術提升效率的同時，維持甚至強化運送安全。
3. 建議持續派員參與放射性物質包裝與運送相關國際研討會，以即時掌握先進國家的放射性物質包裝與運送管理經驗與技術發展，及國際原子能總署（IAEA）「放射性物質安全運送規則」（編號：SSR-6）等國際法規的最新修訂動態。透過強化國際交流與合作，借鑒他國成功經驗與管制實務，促進我國放射性物質運送安全管理體系與國際標準全面接軌，並提升本土的技術能力。