

出國報告（出國類別：開會）

## 參加用過核子燃料乾式貯存 國際研討會

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：張凱翔課長、黃子振專員

派赴國家/地區：美國

出國期間：113年10月19日~113年10月27日

報告日期：113年12月6日



## 摘要

2024 年美國電力研究院(EPRI)用過核子燃料乾式貯存國際研討會之用過核子燃料長期貯存合作計畫研討會(ESCP)時程為今(2024)年 10 月 23 至 26 日於美國北卡羅來納州電力研究院舉行，會議參與人員橫跨世界各國之政府機關、核能組織、國家實驗室、核能電廠、及設備廠家等產官學界不同領域，本次會議主題廣泛，從用過核燃料貯存行為研究、乾貯系統運貯期間檢查、應力腐蝕龜裂(CISCC)行為模式研究及乾貯監測系統開發、配套法規與指引發展等進行討論，於會議中經由各與會者腦力激盪過程中，運用國際間協同合作方式，解決乾貯延長貯存相關議題並擬訂未來應注重之領域。

本公司核一、二廠室外乾貯設施，經本公司與新北市府行政調解成立後，計畫推動上有實質的進展，於會議期間核一廠正進行第 1 組護箱熱測試作業，而核二廠室外乾貯將於明(2025)年 1 月開始土建工程，後續依照契約規範將於 630 日內開始試運轉測試（整體功能驗證及熱測試）作業及後續運貯作業。另，本公司刻正推動各廠室內乾貯計畫採購案，預計將於明(2025)年陸續決標、進入履約階段。

自乾貯護箱於乾貯設施正式啟用後，需持續進行老化管理、維護與監測、執照更新及檢驗修復等議題，且本公司三座電廠室內、外乾貯設施護箱總數量預估為 320 組以上，透過參加會議了解國際乾貯管制、研究趨勢、及各電力業者之經驗回饋外，會議期間與與會者交流、分享乾貯計畫推動經驗及運轉經驗，建立互相友好關係，有助於本公司接軌國際乾貯使用經驗及強化乾貯計畫之推動，並於未來統籌、推動乾貯計畫及各廠乾貯設施管理事宜。

本次行程參相關之目的、過程、及心得與建議，於本報告中敘述之。

## 目 錄

|   |     |
|---|-----|
| 摘 要 .....   | i   |
| 目 錄 .....   | ii  |
| 表 目 錄 .....   | iii |
| 圖 目 錄 .....   | iv  |
| 一、 目 的 .....  | 1   |
| 二、 過 程 .....  | 1   |
| (一) 出國行程 .....  | 1   |
| (二) EPRI Extended Storage Collaboration Program (ESCP)..... | 8   |
| 1. 乾貯老化管理相關研究 .....   | 8   |
| 2. 乾貯系統檢測與腐蝕劣化相關研究報告.....                                   | 10  |
| 3. 乾貯系統監測技術發展 .....   | 11  |
| 4. 經驗交流回饋 .....   | 12  |
| 三、 心得及建議 .....  | 14  |

## 表 目 錄

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 表 1 - 出國行程 .....                | 2 |
| 表 2 - ERPI 2025 ESCP 會議議程 ..... | 3 |

## 圖 目 錄

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 圖 1 - 與 EPRI 研究大樓合影..... | 13 |
|--------------------------|----|

## 一、 目的

考量本公司核一、二、三廠現正規劃採購用過核子燃料室內乾式貯存設施，為有效與國際乾貯技術發展接軌，本公司於 2015 年加入美國電力研究所(EPRI)高放射性廢棄物暨用過核子燃料計畫，藉由參加本年度 EPRI 用過核子燃料長期貯存合作計畫研討會(ESCP)，會議中各國專家學者及相關研究機構針對乾貯設施之熱傳分析、應力腐蝕、非破壞檢測技術、老化管理等，進行報告與討論，除能汲取國際電廠相關經驗與技術外，另能與國際中具相關工作經驗之電廠、設備供應商、管制單位、研究機構等建立良好關係並就相關議題進行討論，有助於強化本公司乾貯計畫之推動。

## 二、 過程

### (一)出國行程

行程共計 9 天，10 月 19 日由桃園國際機場出發，搭乘長榮航空公司班機經美國紐約約翰·甘迺迪國際機場並於 10 月 20 轉機至北卡羅萊納州夏洛特市。

於 10 月 21 日至 10 月 24 日期間，參加 2024 年 EPRI 用過核子燃料長期貯存合作計畫研討會(ESCP)。每日討論主題如下：

1. 10 月 21 日討論進步型反應器(Advanced Reactor)及進步型燃料(事故容忍燃料 ATF、高燃耗高濃縮度燃料 HE、HBU)設計及後端處理能力之發展；
2. 10 月 22 日討論電廠乾貯設施檢驗狀況、應力腐蝕龜裂、護箱修復及延緩老化技術等；
3. 10 月 23 日討論燃料貯存行為研究，包含護套裂變、衰變熱、熱傳評估模式等；
4. 10 月 24 日延續討論護箱老化管理議題、燃料貯存行為外，亦邀請有關廠商介紹乾貯系統監測技術之發展。

10 月 25 日由夏洛特機場回程，於 10 月 26 日經紐約約翰·甘迺迪國際機場轉機，次日抵達我國桃園國際機場。本次出國行程如表 1 所示，表 2 為本次 EPRI ESCP 會議議程。

表 1 - 出國行程

「用過核子燃料乾式貯存國際研討會」行程規劃表

| 日期                    | 活動內容   |
|-----------------------|--|
| 2024.10.19~2024.10.20 | 去程（台北 - 紐約 - 夏洛特）                              |
| 2024.10.21~2024.10.24 | 參加 EPRI Extended Storage Collaboration Program |
| 2024.10.25~2024.10.27 | 回程（夏洛特 - 紐約 - 台北）                              |



表 2 - ERPI 2025 ESCP 會議議程



**EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM (ESCP)  
AGENDA**

EPRI Charlotte Office, 1200 West WT Harris Blvd  
Building 3, Conference Room 741\_A-F Charlotte,  
North Carolina 28262

| DATE: MONDAY, OCTOBER 21, 2024 |  |                                   |
|--------------------------------|--|-----------------------------------|
| TIME                           | TOPIC  | PRESENTER                         |
| 8:00 a.m.                      | Welcome, Overview of ESCP, and Review of Agenda          | Hatice Akkurt (EPRI)              |
| 8:25 a.m.                      | NRC Updates  | Cinthya Roman (NRC)               |
| 8:50 a.m.                      | EPRI Updates   | Joe Faldowski (EPRI)              |
| 9:15 a.m.                      | DOE Updates – HBU Demo                                   | Erica Bickford (DOE)              |
| 9:35 a.m.                      | DOE Updates - Forward Looking in Research and Innovation | Paul Cantonwine/Steve Vitto (DOE) |
| 10:00 a.m.                     | Break  |                                   |
| 10:30 a.m.                     | ATF/HE/HBU: Updates                                      | Kurshad Muftuoglu (EPRI)          |
| 10:50 a.m.                     | Westinghouse ATF/HE/HBU Program Updates                  | Michael Boone (Westinghouse)      |
| 11:10 a.m.                     | Framatome ATF/HE/HBU Program Updates                     | Jeff Reed (Framatome)             |
| 11:30 a.m.                     | GE ATF/HE/HBU Program Updates                            | Ian Porter (GE)                   |
| 11:50 a.m.                     | DOE Plans for LTA Testing for Back-end – INL Testing     | Aaron Colldeweih (INL)            |
| 12:10 p.m.                     | Lunch  |                                   |
| 1:10 p.m.                      | DOE Plans for LTA Testing for Back-end – ORNL Testing    | Jason Harp (ORNL)                 |
| 1:35 p.m.                      | NRC Updates on ATF/HE/HBU Back-end Activities            | Lucas Kyriazidis (NRC)            |
| 2:00 p.m.                      | NRC Updates on the Back-end of Advanced Reactors         | Jason Piotter (NRC)               |
| 2:25 p.m.                      | DOE Updates on the Back-end of Advanced Reactors         | Jorge Narvaez (DOE)               |
| 2:45 p.m.                      | OECD/NEA Updates on the Back End of Advanced Reactors    | Gabriele Grassi (OECD/NEA)        |
| 3:10 p.m.                      | Break  |                                   |
| 3:30 p.m.                      | Developments in UK AMR Program                           | David Hambley (NNL)               |
| 3:55 p.m.                      | Management of Irradiated TRISO-X Fuel                    | Theodore Dowling (X-Energy)       |
| 4:20 p.m.                      | TRISO PIRT Updates                                       | Dan Moneghan (EPRI)               |
| 4:45 p.m.                      | NAC Universal Canister Design for Advanced Reactors      | Steve Sisley (NAC)                |
| 5:30 pm                        | Adjourn  |                                   |

**EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM**

October 21-24, 2024 – Charlotte, NC

| DATE: TUESDAY, OCTOBER 22, 2024 |   |                          |
|---------------------------------|---|--------------------------|
| TIME                            | TOPIC   | PRESENTER                |
| 8:00 a.m.                       | SONGS Dry Storage System Inspection Results   | Randall Granaas (SONGS)  |
| 8:20 a.m.                       | Southern Dry Storage Inspection Updates   | Gabriel Grant (Southern) |
| 8:40 a.m.                       | DOE CISCC Revised Research Scope Overview   | Mychailo Toloczko (PNNL) |
| 9:00 a.m.                       | NRC Regulatory Guide 3.78 – Risk Informing Inspections for CISCC  | Darrell Dunn (NRC)       |
| 9:20 a.m.                       | CISCC – Test results  | Mychailo Toloczko (PNNL) |
| 9:40 a.m.                       | Updates on EPRI's Mitigation and Inspection Research  | Shannon Chu (EPRI)       |
| 10:00 a.m.                      | Break   |                          |
| 10:20 a.m.                      | xLPR Development  | Chris Ulmer (NRC)        |
| 10:40 a.m.                      | Demonstration and Validation of a Heat and Radiation Resistant Organic Coating to Prevent SCC in Spent Nuclear Fuel Dry Storage Casks | Laurn Baranowski (TDA)   |
| 11:00 a.m.                      | EPRI Cold Spray Crack Sealing Studies and Demonstration   | JP Lacy (EPRI)           |
| 11:20 a.m.                      | Update on Industry Mitigation Status Report   | John Broussard (DEI)     |
| 11:40 a.m.                      | Updates on ASME Code Case for Mitigation  | John Broussard (DEI)     |
| 12:00 p.m.                      | Lunch   |                          |
| 1:00 p.m.                       | GOTHIC Modeling and Benchmarking  | Matt Nudi (EPRI)         |
| 1:20 p.m.                       | <b>Subcommittee Meeting</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aging Management</li> </ul>                                      |                          |
| 5:30 pm                         | Adjourn   |                          |

**ESCP Aging Management Subcommittee Meeting**

| DATE: TUESDAY, OCTOBER 22, 2024 |  |  |
|---------------------------------|--|--|
| TIME                            | TOPIC  | PRESENTER                                    |
| 1:20 p.m.                       | Welcome and Agenda Review  | Rob Kelly (UVA)                              |
| 1:30 p.m.                       | Overview of ESCP Aging Management Working Group meeting  | Rob Kelly (UVA)                              |
| 1:50 p.m.                       | Inspection and Mitigation <ul style="list-style-type: none"> <li>• Summary of working group recommendations</li> <li>• Discussion on recommended roadmaps</li> </ul> | John Kessler (JVA) & Randall Granaas (SONGS) |
| 3:00 p.m.                       | Break  |  |
| 3:30 p.m.                       | Consequence <ul style="list-style-type: none"> <li>• Summary of working group recommendations</li> <li>• Discussion on recommended roadmaps</li> </ul>               | Hatice Akkurt (EPRI)                         |
| 4:10 p.m.                       | Aging Mechanism <ul style="list-style-type: none"> <li>• Summary of working group recommendations</li> <li>• Discussion on recommended roadmaps</li> </ul>           | James Burns (UVA)                            |
| 4:50 p.m.                       | Interconnection Among Pillars and Path Forward Discussion  | Hatice Akkurt and Joe Faldowski (EPRI)       |
| 5:10 p.m.                       | Discussion on Subcommittee Activities  | Rob Kelly (UVA) / All                        |
| 5:30 p.m.                       | Adjourn  |  |

**EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM**

October 21-24, 2024 – Charlotte, NC

| DATE: WEDNESDAY, OCTOBER 23, 2024 |   |   |
|-----------------------------------|---|---|
| TIME                              | TOPIC   | PRESENTER   |
| 8:00 a.m.                         | Fuel PIRTs and Path Forward   | Cecile Dame (MPR)   |
| 8:20 a.m.                         | Annealing of Used Fuel Cladding in Dry Storage  | Joe Rashid (SIA)  |
| 8:40 a.m.                         | Hydrogen Behavior in LWR Claddings  | Peter Kaufholz (BGZ)  |
| 9:00 a.m.                         | SICRAC: A Creep Simulation Tool for the Justification of Irradiated Fuel Rod Integrity in Back-end Conditions | Akram EL Abdi (EDF)   |
| 9:20 a.m.                         | Evaluation of the Uncertainties in Burnup   | Fredrik Johannson (SKB) and Jesper Kierkegaard (Vattenfall) |
| 9:40 a.m.                         | Simulation of the Thermal Behavior of the TN-32B using SYRTHES Code   | Max Fressonnet (PSL) and Didier Colmont (EDF)               |
| 10:00 a.m.                        | Break   |   |
| 10:30 a.m.                        | Temperature Calculations and Measurements for the TN12 Cask During Wet-Dry-Wet Spent Fuel Internal Transfer   | Stefano Caruso (KKG)  |
| 10:50 a.m.                        | Development of BUC Methodology for BWR  | Fredrik Johannson (SKB)                                     |
| 11:10 a.m.                        | Decay Heat – Overview of Measurements and Key Take-aways  | Hatice Akkurt (EPRI)  |
| 11:35 a.m.                        | Decay Heat – Preliminary Validation Results   | Fredrik Johannson (SKB)                                     |
| 12:00 p.m.                        | Lunch   |   |
| 1:00 p.m.                         | STANDARDS   | Justin Clarity (PNNL)                                       |
| 1:20 p.m.                         | <b>Fuel Subcommittee Meeting</b>  |   |
| 3:00 p.m.                         | Break   |   |
| 3:30-5:30 pm                      | <b>Modeling and Benchmarking Subcommittee Meeting</b>   |   |

### ESCP Fuel Subcommittee Meeting

| DATE: WEDNESDAY, OCTOBER 23, 2024 |   |                     |
|-----------------------------------|---|---------------------|
| TIME                              | TOPIC   | PRESENTER           |
| 1:20 p.m.                         | Welcome and Subcommittee Overview                       | David Hambley (NNL) |
| 1:30 p.m.                         | LWR Fuel - Existing Fuel Discussion                     | David Hambley (NNL) |
| 1:50 p.m.                         | ATF/HE/HBU – Path Forward and Roadmap Discussion        | David Hambley (NNL) |
| 2:15 p.m.                         | Advanced Reactors – Path Forward and Roadmap Discussion | Dan Moneghan (EPRI) |
| 2:45 p.m.                         | Discussion on Subcommittee Activities and Path Forward  | All                 |
| 3:00 p.m.                         | <b>Break</b>  |                     |

### ESCP Modeling and Benchmarking Subcommittee Meeting

| DATE: WEDNESDAY, OCTOBER 23, 2024 |   |   |
|-----------------------------------|---|---|
| TIME                              | TOPIC   | PRESENTER                                     |
| 3:30 p.m.                         | Welcome and Subcommittee Overview   | Maik Stuke (BGZ)                              |
| 3:40 p.m.                         | Thermal Modeling <ul style="list-style-type: none"> <li>• International Thermal Modeling Project</li> <li>• Potential Next Steps</li> </ul> | Hatice Akkurt (EPRI) and Maik Stuke (BGZ)/All |
| 4:10 p.m.                         | Decay Heat <ul style="list-style-type: none"> <li>• Summary of status</li> <li>• Potential next steps</li> </ul>                            | Fredrik Johansson (SKB)/All                   |
| 4:40 p.m.                         | Radiation dose modeling <ul style="list-style-type: none"> <li>• Summary of Status</li> <li>• Potential Next Steps</li> </ul>               | Kaushik Banerjee (INL)/All                    |
| 5:10 p.m.                         | Discussion on Subcommittee Activities and Path Forward  | All   |
| 5:30 p.m.                         | <b>Adjourn</b>  |   |

**EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM**

October 21-24, 2024 – Charlotte, NC

| DATE: THURSDAY, OCTOBER 24, 2024 |  |   |
|----------------------------------|--|---|
| TIME                             | TOPIC  | PRESENTER                                     |
| 9:00 a.m.                        | IAEA Updates on Spent Fuel Activities  | Christoph Gastl (IAEA)                        |
| 9:25 a.m.                        | BGZ research on Inventories  | Maik Stuke (BGZ)                              |
| 9:45 a.m.                        | BGZ Research on Casks  | Ralf Schneider-Eickhoff (BGZ)                 |
| 10:10 a.m.                       | Status of Axpo's Cask Aging Management Program   | David McGinnes (AXPO)                         |
| 10:30 a.m.                       | Break  |   |
| 11:00 a.m.                       | Inspection Results from Spanish ISFSI  | Miguel Martinez and Javier Fernandez (ENRESA) |
| 11:30 a.m.                       | High Burnup Fuel Deployment and Cladding Evolution at Gösgen NPP   | Stefano Caruso (KKG)                          |
| 11:50 a.m.                       | CRIEPI's activities on Interim Dry Storage   | Masumi Wataru (CRIEPI)                        |
| 12:10 a.m.                       | Hanford Update: Cs/Sr Capsule DSC, Multi-Canister Overpack and Lead Canister – Aging Management and Closure Welding  | Gary Cannell (Fluor)                          |
| 12:30 p.m.                       | Lunch  |   |
| 1:30 p.m.                        | Guided Wave Inspection for Spent Nuclear Fuel Dry Storage Canisters  | Russell Love (Guidedwave)                     |
| 1:55 p.m.                        | NDE and Refurbishment Technology Investigation for Hanford's Double-Shell Tanks  | Stephanie Doll (WRPS)                         |
| 2:20 p.m.                        | Updates on Sensor Development  | Dan Xiang (X-Wave)                            |
| 2:40 p.m.                        | Updates from NEA's Nuclear Science Committee   | Julie Fiona-Martin (OECD/NEA)                 |
| 3:00 p.m.                        | Break  |   |
| 3:30 p.m.                        | Subcommittee Updates from Chairs <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuel</li> <li>• Aging Management</li> <li>• Modeling &amp; Benchmarking</li> </ul> |   |
| 4:00 p.m.                        | Updates from Steering Committee  | Hatice Akkurt (EPRI)                          |
| 4:30 p.m.                        | Closing Remarks  | Hatice Akkurt (EPRI)                          |
| 5:00 p.m.                        | <b>Adjourn ESCP meeting</b>  |   |

## (二)EPRI Extended Storage Collaboration Program (ESCP)

EPRI 每年定期召開長期貯存合作會議(ESCP)，目的為提供一個合作論壇，供美國及國際間用過核子燃料領域專家學者共同研發討論並分享技術資訊，使用過核子燃料可以更安全的貯存及保持未來之可運輸性，該組織執行計畫共分三個階段：

目前 ESCP 主要討論議題分三大類：

- 燃料束：包含進步型燃料(advanced fuel)及進步型反應器(advanced reactor) 研究
- 模擬計算：包含熱傳、衰變熱、劑量評估。
- 護箱老化管理：包含老化機制研究、維護、修復等技術研發。

以下將針對此次會議內容主題摘要報告

### 1. 乾貯老化管理相關研究

#### (1) 美國核管會(NRC)RG 3.78 研擬

美國核管會近期針對乾貯 CISCC 檢查機制，研擬新的法規指引 RG 3.78 「Acceptable ASME Section XI Inservice Inspection Code Cases for 10 CFR Part 72」以供乾貯廠持照者、乾貯設備供應商進行乾貯設施營運期間執行檢查作業之依據。

於該規範指引草稿中，已明確表示並認可電力業者可採用 ASME Code Case N-860 所示之檢測要求來進行乾貯設施檢查作業，並說明其檢測結果將可符合 10 CFR 72.42 “Duration of license; renewal” 及 10 CFR 72.240 “Conditions for spent fuel storage cask renewal” 之規定。

美國核管會刻正檢視有關單位對該規範指引表述之意見，將於修訂後頒布。此外，後續也將考量是否納入其他相關的 ASME Code Case，如：N-927。

#### (2) ASME Code Case 發展

對於乾貯系統長期貯存使用，ASME 參考 EPRI 於 2015 年針對乾貯筒於 CISCC 敏感環境下制定之評估標準(“Susceptibility Assessment Criteria for Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking (CISCC) of Welded Stainless Steel Canisters for Dry Cask Storage Systems”)，於 2020 年頒布 Code Case N-860 以規範乾貯設施使用期間之檢測準則，供設施持照者、乾貯供應商遵循以進行檢查作業。

另，考量冷噴塗(Cold Spray)技術已是國際上乾貯筒修復技術之共識，為使設施持照者及乾貯供應商於進行乾貯筒修復時有標準規範依循，ASME 於 2021 年開始針對冷噴塗延緩劣化技術，研擬 Code Case N-927

“Canister Mitigation by Cold Spray Deposition”，其內容包含冷噴塗技術準則、材料使用規範、作業人員資格要求、允收標準等。目前該 Code Case 已於 2024 年完成初稿，由相關組織審閱，將於取得共識後發行。

### (3) 美國電力研究院(EPRI)對於檢測及延緩老化技術之研發

#### A、 檢測技術發展：

EPRI 持續精進開發遠端遙控目視檢測技術(Remote Visual Testing)，近年來特別針對強化目視檢查技術(Enhanced Visual Testing, EVT-1)與 Waygate Technologies 公司合作，並協助測試其 MViQ (Mentor Visual iQ)檢測系統之檢測能力，預計結果報告將於 2025 年發布。

此外，EPRI 近期針對乾貯系統非破壞檢測技術之研究發展，包含：目視檢測(VT)、渦電流檢測(Eddy current)、雷射超音波檢測(Laser UT)等。

#### B、 延緩老化及修復技術開發：

為有效清除表面腐蝕沉積物，EPRI 近期針對粉末清理及雷射清理技術進行研究，藉由調整不同的參數，以探究清除表面腐蝕沉積物之能力，發現使用不同粉末或調整噴擊速度、角度等，對表面清理能力均有顯著之影響。

此外，考量到乾貯銲道處理之空間限制，EPRI 也展示對乾貯模型銲道進行清理之成效，其使用機械工具搭載操作手臂，利用不同的清潔方式，如以氣壓沖流、研磨等，均有不同的清理效果，詳細研究報告將於 2025 年初發布。

### (4) TDA 針對緩解 CISCC 之塗層研究成果

TDA 開發一種耐輻射和耐高溫的塗層，目的為減緩乾貯筒應力腐蝕龜裂之發生，目前的研究則專注於乾貯筒實際環境應用情形、材料特性驗證及遠端操作之可行性，研發成果簡要如下：

#### A、 實際環境應用情形：

透過施加塗層在一個可以加熱的導熱版上，結果顯示其附著力維持良好。針對表面清理方法對塗層附著力之影響，TDA 嘗試以不同的方法來移除表面腐蝕物和灰塵，結果顯示不用預先做任何表面處理即可以得到較佳之附著性。

另外 TDA 亦將塗層材料施加在 Sandia 國家實驗室之測試乾貯筒上以檢測附著能力，結果顯示塗層附著力仍維持良好。

#### B、 塗層材料特性驗證

為確保塗層成分之可用性，TDA 進行額外驗證作業，以確保材料之可靠度，其中包含：揮發性質、熱傳導性質、密封性(氬氣測漏)。

#### C、遠端操作之可行性

TDA 已研發操作手臂並藉由控制流率、壓力、噴頭速度、噴頭行程等，研究塗層應用情形，測試結果顯示均有良好的附著力，噴灑範圍亦可控制。

後續 TDA 將持續與業界合作，測試其塗層應用在鋼筒上之可行性，包含噴頭與檢測機器人整合、於鋼筒模型測試塗層之適用性及探究塗層在真實乾貯環境下之使用情形。

### (5) 冷噴塗密封性研究與展示

為能更有效了解冷噴塗技術應用上之限制，本次會議中 EPRI 報告其於試片上進行冷噴塗之研究成果。

#### A、塗層特性及表面樣態研究

藉由電子顯微鏡(SEM)及能量散佈光譜(EDS)的幫助，EPRI 得以觀察冷噴塗塗層應用於裂縫表面之情形，其結果顯示噴塗材料可以良好地附著在試片上，且塗層之硬度較基材大。

#### B、腐蝕測試

依據 ASTM B117 規範進行加速腐蝕測試，以確認冷噴塗層於腐蝕環境下是否仍可維持其適用性，經由目視及儀器比對結果，雖實驗後噴塗材料表面有腐蝕物沉積，惟仍可保持塗層之附著性。

#### C、密封性測試

考量冷噴塗技術施加於裂縫上，需維持乾貯筒之密封性，故 EPRI 採用複合材料噴塗測試鋼管及模擬鋼筒上並進行氬氣洩漏試驗，結果顯示當裂縫寬度小於一定寬度時，冷噴塗技術可符合測試標準，惟當裂縫寬度較大時，則需考量以其他材料作為塗層施加於裂縫上，以達成密封性。

## 2. 乾貯系統檢測與腐蝕劣化相關研究報告

### (1) San Onofre 電廠乾貯系統檢查狀況：

San Onofre 電廠位於加州洛杉磯(Los Angeles)南方約 75 英里處，鄰近海岸旁，該廠使用 TN NUHOMS 及 HOLTEC UMAX 之乾貯系統。

#### A、HOLTEC UMAX 系統：

自 2022 年起，每 2.5 年檢視一次全尺寸模擬密封鋼筒表面及兩處冷



噴塗修復示範處；另自 2019 年起每 5 年檢視 2 組已裝載用過核燃料密封鋼筒，檢視結果發現殼身僅有些許刮痕，評估是與耐震限制器及屏蔽環接觸所致，惟無腐蝕現象產生。整體而言，檢視結果狀況良好。

#### B、TN NUHOMS 系統：

2021 年檢視 2 具 NUHOMS 密封鋼筒，檢視結果整體狀況良好，僅觀察密封鋼筒上有裝載時產生之刮痕，無腐蝕現象產生。

### (2) 美國 Hatch 電廠乾貯系統檢查狀況

Hatch 電廠係屬南方(Southern)電力公司所持有，自 2001 年開始使用 HOLTEC HI-STORM 100 型乾貯系統，因 2023 年 8 月 2 日該系統之通用執照更新生效，若使用該型乾貯護箱超過 20 年以上之場址，需於通用執照更新日起 365 天內執行老化管理計畫及完成第一次乾貯系統檢查作業。

2023 年 11 月進行檢查作業，作業時均是由上方出氣孔將檢查機器人放入 HOLTEC HI-STORM 系統並進行檢視，結果均顯示正常，無劣化跡象。

## 3. 乾貯系統監測技術發展

乾貯設施除了依據老化管理方案，應定期檢查貯存狀況，因貯存護箱內部空間狹小且輻射劑量率相對較高，需仰賴工具才可執行檢測作業，故研發各式檢測方法外，亦研發即時監測技術，運用於乾貯系統監測上，便可即時發現乾貯護箱貯存狀態及內部燃料貯存狀況。

### (1) 主動式及被動式超音波檢測工具

Guided Wave 公司說明因美國目前各乾貯設施進入護箱檢視密封鋼筒時之空間相當侷限，目前常見的方式僅運用機器人進入以目視檢驗方式，故開發其他非破壞檢測技術有其必要性，且可運用於乾貯週期性檢測作業外，亦可用於長期監測。

主動式檢測方式係使用較低頻率超音波篩選缺陷，產生類似掃瞄雷達的方式，大範圍、高效率尋找潛在發生劣化之位置，掃描範圍預期可達 100% 涵蓋率。

被動式檢測方式係運用聲發射(Acoustic emission)原理，廣泛用於壓力槽檢測及許多業界，特色為可輸入不同之訊號源如：振幅、能量、頻率等參數，且靈敏度高、簡單運用且經業界證實之檢測方式，惟檢測範圍較小，故可運用於長期監測、運輸前評估、偵測裂隙及洩漏較為適合。

### (2) 非接觸性長時間智能監測系統

X-wave 公司因應長期監測乾貯筒及用過燃料束之貯存情形之需求，發展出

一套超聲波傳感器檢測系統(Intelligent Acoustic Sensor Network System, IASN)，嘗試以非接觸性電磁超聲傳感器(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT)或抗輻射超音波傳感器(Radiation-endurance ultrasonic transducer, REUT)搭配大數據資料庫及機器學習技術，以監測乾貯筒表面及內部燃料貯存狀況。

#### 4. 經驗交流回饋

##### (1) 福島一廠將採購混凝土乾貯護箱

本次會議期間與東京電力公司交流，因該公司未來將採購混凝土乾貯護箱，故順道了解美國使用經驗，除拜訪 Catawba 電廠了解使用 NAC 公司 MAGNASTOR 系統之實際經驗外，亦擇日參訪 Orano 乾貯設備製造工廠 TNF、MATRIX 混凝土模組展示區及位於南卡羅來納州之設備維護廠。

##### (2) 乾貯廠家使用者社群(User Group)

Entergy、Southern 電力公司旗下電廠皆選用 HOLTEC 公司同型號之乾貯護箱，且均已加入由電力業者成立之使用者社群，透過該社群平台定期召開會議討論乾貯系統設計、申照、品保、設備製造、運貯程序精進措施、經驗回饋等。

##### (3) 本公司乾貯護箱數量

本公司未來三座電廠之乾貯設施若將運轉 40 年全數用過核燃料共計 24,616 束用過核燃料，裝載至乾貯設施後，預估將使用 320 組乾貯護箱及至少有 2 種以上不同型產品。因乾貯護箱於乾貯設施正式啟用後，需持續進行乾貯監測、檢驗、維護、修復等作業，需由本公司統籌、規劃管理各廠乾貯設施，可藉由國際交流期間，與其他電力業者交換經驗，最佳化乾貯設施營運成本及效益。

本次會議結束後，與 EPRI 機構合影詳圖 1。



圖 1 - 與 EPRI 研究大樓合影

### 三、 心得及建議

本次 ESCP 會議，由 EPRI 主持並邀集國際間乾貯專業領域之專家學者與會討論燃料技術發展及乾貯設施長期貯存議題。

本公司核一、二室外乾貯計畫，於今年以順利與地方政府取得共識，並已著手進行下一步熱測試作業及乾貯設施興建工程，且核一、二室內乾貯計畫亦於此次會議期間進行招標規範公開閱覽程序，此次會議中與各國專家交流之乾貯設施運轉及研究經驗亦可作為本公司將來營運乾貯之參考依據，針對本次會議報告內容，心得及建議如下：

- 美國因多數乾貯設施已運轉數年，美國專家學者亦研發數種延緩設備老化之方式及修補技術，此次會議還特別針對不同修補塗層之耐用性進行討論，因國內目前大多數乾貯法規及使用之系統均是採用美國規範，故本公司亦可參考相關研發技術，做為未來乾貯設施老化管理之方針。
- 本會議邀集世界各國專家報告分享乾貯相關議題與經驗回饋，實為乾貯界的盛會，四天的會議主題內容可證美國及歐洲挹注可觀的人力、經費及資源於用過核燃料及乾貯護箱相關研究、技術發展及法規配套措施；亞洲國家則跟隨歐美之腳步，依照其研究方向再依照國內特殊情境再做研究方向調整。建議持續關注歐美研究發展方向、法規配套研擬、及運轉經驗分享，未來可參考辦理本公司乾貯設施管理事宜、與管制機關交涉、及與利害關係人溝通協調。
- 經本次參加會議，得知美國電力業者因應不同乾貯廠家，由電力業者擔任主席並成立使用者社群 (User Group)，藉此平台就乾貯系統設計、申照、品保、設備製造、運貯方式精進討論、經驗回饋等面向進行討論及分享；本公司刻正辦理各廠室內乾貯計畫招標作業，建議未來決標後，可加入相對應之乾貯廠家社群，促進交流提前獲得關鍵資訊，可提昇本公司後續乾貯設施申照、設備製造檢驗、及運貯作業之效率及成本。