

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：洪國鈞組長、黃子振專員

派赴國家/地區：美國

出國期間：112年10月22日~112年10月31日

報告日期：112年12月11日

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加用過核子燃料乾式貯存國際研討會

頁數 22 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/黃子振/(02)2365-7210#12222

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

洪國鈞/台灣電力公司/核後端處/乾貯一組組長/(02)2365-7210#12220

黃子振/台灣電力公司/核能後端營運處/乾式貯存技術分析專員  
(02)2365-7210#12222

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：112.10.22~112.10.31

派赴國家/地區：美國

報告日期：112.12.11

關鍵詞：乾貯設施檢查、乾式貯存老化管理、應力腐蝕、乾貯設施供應商、  
用過核子燃料貯存行為

## 摘要

考量國內核一、二、三廠現正規劃採購室內乾貯設施，為蒐集國際間乾貯使用經驗及處理環保團體針對乾貯設施所提出之疑義，此次參加 2023 年美國電力研究所 (EPRI) 用過核子燃料乾式貯存國際研討會，有利後續本公司乾貯計畫能夠順利推動。

2023 年美國電力研究所(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(112)年 10 月 23 至 26 日於美國北卡羅來納州舉行，會議參與人員由政府機關、國際核能組織、國家實驗室及電廠人員組成，本次會議特別針對燃料貯存行為研究、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進行討論，於會議經由各專家學者討論過程中，汲取國際乾貯管制、研發、及使用單位的相關經驗與技術外，另於會後與國際中具相關工作經驗之單位交流並建立關係，有助於強化本公司接軌國際乾貯使用經驗及強化乾貯計畫之推動。

除參與 EPRI 國際會議外，此次亦赴 Orano TN 參訪該公司乾貯筒製造工廠，於該公司技術交流過程中，瞭解其產品之優勢及劣勢，有助於本公司後續乾貯設施採購之規劃。

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).....	7
1. 各機關研究發展方向概述 .....	7
3. 腐蝕劣化相關研究報告 .....	9
4. 乾貯系統老化管理報告 .....	10
5. 乾貯系統監測技術發展 .....	11
(三) Orano TN 參訪 .....	14
三、 心得及建議 .....	15
(一) ESCP 會議 .....	15
(二) Orano TN 技術交流 .....	16

## 表 目 錄

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

## 圖 目 錄

圖 1 - 與 EPRI 研究大樓合影 .....	12
圖 2 - 2023 年 ESCP 與會人員合影 .....	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，本公司於民國 104 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將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。

此外，本次亦安排赴美國乾貯廠商 Orano TN 參訪其乾貯設備製造工廠及討論相關乾貯議題，相關經驗回饋可作為本公司後續辦理室內乾貯採購帶安裝案之參考依據。

## 二、 過程

### (一)出國行程

行程共計 10 天，10 月 22 日由桃園國際機場出發，搭乘長榮航空公司班機經美國舊金山國際機場轉機至北卡羅萊納州夏洛特市。

於 10 月 23 日至 10 月 26 日期間，參加 2023 年 EPRI 用過核子燃料長期貯存合作計畫研討會(ESCP)。10 月 23 日主要討論議題為各管制機關對用過核子燃料貯存活動的看法及由美國各國家實驗室報告 Sibling Pin 計畫；10 月 24 日主要討論電廠乾貯設施檢驗狀況、燃料測試、先進燃料棒等相關研究等；10 月 25 日主要討論主題為老化管理及相關維護技術；10 月 26 日主要討論乾貯系統監測技術。

於 10 月 27 日至 10 月 28 日則赴 Orano TN 於北卡 Kernersville 製造廠及南卡 Aiken 維護廠參訪，並討論乾貯技術議題。

10 月 29 日由夏洛特機場回程，於 10 月 30 日經舊金山國際機場轉機，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 ERPI 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
112.10.22	去程（台北 - 舊金山 - 夏洛特）
112.10.23~112.10.26	參加 EPRI Extended Storage Collaboration Program
112.10.27~112.10.28	參加 Orano TN 乾貯技術交流會
112.10.29	轉機（夏洛特 - 舊金山）
112.10.30~112.10.31	回程（舊金山 - 台北）



表 2 - ERPI 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 23, 2023		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Breakfast/Registration	
8:00 a.m.	Welcome, Overview of ESCP, and Review of Agenda	Hatice Akkurt (EPRI)
8:20 a.m.	Future Plans and Activities for DOE R&D Program for SNF	Ned Larson (DOE)
8:40 a.m.	Recent Activities in the DOE R&D Program for Storage and Transportation of SNF	Scott Sanborn (SNL)
9:00 a.m.	NRC Updates	Shana Helton (NRC)
9:30 a.m.	IAEA Updates on Spent Fuel Activities	Christoph Gastl (IAEA)
9:50 a.m.	OECD/NEA Updates on Spent Fuel Activities	Rebecca Tadesse (OECD/NEA)
10:10 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Updates on PNNL Sibling Rod Test Results	Brady Hanson (PNNL)
10:50 a.m.	Summary of ORNL Phase 1 Test Results from the Sibling Pin Program	Rose Montgomery (ORNL)
11:10 a.m.	Sibling Pin Cladding Ductility	Mike Billone (ANL)
11:25 a.m.	Sibling Pin Phase II Test Plan Overview	John Bignell (SNL)
11:50 a.m.	Q&A for Sibling Pin Tests (Phase I and Phase II)	
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Overview and Summary of Fuel PIRTs (Fuel, GR, AFM)	Keith Waldrop (EPRI)
1:30 p.m.	<b>Panel: PIRTs and next steps</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• George Carver (NAC)</li> <li>• Darrell Dunn (NRC)</li> <li>• John Massari (Constellation)</li> <li>• Ricardo Torres (PNNL)</li> </ul>	Chair: Cecile Dame (MPR)
3:00 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	<b>Subcommittee Meetings</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modeling and Benchmarking</li> </ul>	

## EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

October 23-26, 2023 – Charlotte, NC

DATE: TUESDAY, OCTOBER 24, 2023		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Breakfast/Registration	
8:00 a.m.	LEDA Long-term Investigation on Used Fuel Rods	Peter Kaufholz (BGZ)
8:20 a.m.	SKB Strategy for Handling of Damaged Fuel Rods	Johan Ljungberg (SKB)
8:40 a.m.	Bi-Axial Burst Test Rig for the Examination of Long-Term Dry Storage Fuel Rods	Noel Harrison (CNL)
9:00 a.m.	Slow Cooling Effect of Hydride Reorientation with Unirradiated Zry-4	Donghak Kook (KAERI)
9:20 a.m.	IE rulemaking for ATF/HE/HBU	Jason Piotter (NRC)
9:40 a.m.	Advanced Fuels Research	Raj Iyengar (NRC)
10:00 a.m.	Break	
10:20 a.m.	NRC New Fuels Atlas	Jason Piotter and Jesse Carlson (NRC)
10:40 a.m.	DOE BEMAR Project for Assessment of Different Advanced Reactor Designs	Jorge Narvaez (DOE)
11:00 a.m.	Preliminary Gap Analyses for Disposition of Advanced Reactor Spent Fuel	Edward Matteo (SNL)
11:20 a.m.	Evaluation of HTGR Fuel Cycles for the UK	David Hambley (NNL)
11:40 a.m.	TRISO Back-end PIRT and Future Opportunities	Dan Moneghan (EPRI)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Yankee Rowe Inspection Results	Neil Fales (Maine Yankee)
1:20 p.m.	Holtec Experience in Recent Inspections	Kalyan K. Niyogi (Holtec)
1:40 p.m.	Orano Experience in Recent Inspections	Raheel Haroon (Orano)
2:00 p.m.	Maine Yankee Corrosion Test Sample Results	Charles Bryan (SNL)
2:20 p.m.	Overview of SNL Stress Corrosion Cracking Research Results	Rebecca Schaller and Charles Bryan (SNL)
2:40 p.m.	Comparison of CISCC Between Immersed and Deliquescent Conditions	Mychailo Toloczko (PNNL)
3:00 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	<b>Subcommittee Meetings</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuel</li> </ul>	
6:00-8:00 p.m.	<b>ESCP Reception – Hilton Charlotte University</b> 8629 JM Keynes Drive, Charlotte, North Carolina, 28262, USA	

## EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

October 23-26, 2023 – Charlotte, NC

DATE: WEDNESDAY, OCTOBER 25, 2023		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Continental Breakfast	
8:00 a.m.	EPRI Research Activities on Aging Management	Shannon Chu and Jon Tatman (EPRI)
8:20 a.m.	Evaluation of Corrosion Resistant Coatings to Prevent, Mitigate, or Repair Potential Stress Corrosion Cracking on Spent Nuclear Fuel Canisters	Andrew Knight (SNL)
8:40 a.m.	Heat and Radiation Resistant Organic Coating for Preventing Stress Corrosion Cracking in Spent Nuclear Fuel Dry Storage Casks	Lauryn Baranowski (TDA)
9:00 a.m.	Nickel Cold Spray Magnetostrictive Electromagnetic Acoustic Transducers to Monitor Nuclear Spent Fuel Canisters - Target life: >1000 years	Bill Glass (PNNL)
9:20 a.m.	Improving the Stress Corrosion Cracking Resistance of Austenitic Stainless-steel Welds through Micro-shot Peening	Tai-Cheng Chen (NARI)
9:40 a.m.	ASME Code Updates	John Broussard (DEI)
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Testing of Microchannels and Lab-Grown Stress Corrosion Cracks for Quantification of Aerosol Transmission	Sam Durbin (SNL)
10:50 a.m.	Vent Stack Radiation Monitor Indications During Vacuum Drying	John Massari (Constellation)
11:10 a.m.	SONGS Operating Experience (Empirical Data): Radioactive Material Migration During Spent Fuel Storage Canister Drying	Randall Granaas (SONGS)
11:30 a.m.	Analysis of SONGS Filters	Susan Asmussen (PNNL)
11:50 a.m.	Lunch	
1:00 p.m.	CISCC Consequence Analysis	Darrell Dunn (NRC)
1:20 p.m.	Advances in Fracture Mechanics Modeling of Stress Corrosion Cracking of Dry Cask Storage Canisters	Jimmy Burns (UVA)
1:40 p.m.	Panel Discussion: Aging Management and Path Forward <ul style="list-style-type: none"> <li>• Darrell Dunn (NRC)</li> <li>• Suzanne Leblang (Entergy)</li> <li>• Charles Bryan (SNL)</li> <li>• Jay Wellwood (NAC)</li> </ul>	Chair: John Kessler (JKA)
3:10 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	<b>Subcommittee Meetings</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aging Management</li> </ul>	

## EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

October 23-26, 2023 – Charlotte, NC

DATE: THURSDAY, OCTOBER 26, 2023		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Continental Breakfast	
8:00 a.m.	Progress of Spent Nuclear Fuel Management Projects in Korea and R&D Activities in KAERI	Woo-seok Choi and JaeHoon Lim (KAERI)
8:20 a.m.	Update on PSI Activities Related to Dry Storage Modeling	Piotr Konarski (PSI)
8:40 a.m.	Progress on Commissioning of AGR Drying Rig	James Goode (NNL)
9:00 a.m.	Preliminary Simulation of Commercial Drying Cycles Using the Advanced Drying Cycle Simulator	Ramon Pulido (SNL)
9:20 a.m.	Overview of BGZ's Research on Casks and Fuel Assemblies	Maik Stuke (BGZ)
9:40 a.m.	Passive Measurement of Peak Cladding Temperature in Spent Fuel Cask During KKG Internal Transfer	Stefano Caruso (KKG)
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Wireless Sensor Signal Transmission Effectiveness in a Commercial Spent Fuel Storage Cask and Temperature Characterization	Shawn Stafford (Westinghouse)
10:50 a.m.	Acoustic/Ultrasonic Methods for Monitoring Canister Internal and Exterior Conditions	Ryan Meyer (ORNL)
11:10 a.m.	A Non-Contact, Intelligent Sensor Network System for Long-Term Health Monitoring of Spent Nuclear Fuel Dry-Storage Canisters and Fuel Assemblies	Dan Xiang (X-Wave)
11:30 a.m.	Distributed RAMM-TM for Canister Gas Leakage Detection	Yung Liu (ANL)
11:50 a.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Thermal and Depositions Modeling of the Canister Deposition Field Demonstration	Sarah Suffield (PNNL)
1:20 p.m.	Decay Heat Updates	Fredrik Johansson (SKB)
1:40 p.m.	An Update on Planning of Seismic Shake Table Test and Pre-Test Modeling for Benchmarking	Elena Kalinina (SNL) & Nick Klymyshyn (PNNL)
2:00 p.m.	Dry Transfer System Technology Readiness Assessment	Shannon Chu (EPRI)
2:20 p.m.	Bauer Technology for Underground Storage	Dan Dragone (Bauer)
2:40 p.m.	Break	
3:00 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>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sven Bader (Orano)</li> <li>• Sam Durbin (SNL)</li> <li>• Maik Stuke (BGZ)</li> </ul>
4:00 p.m.	Closing Remarks	Hatice Akkurt (EPRI)
4:30 p.m.	<b>Adjourn ESCP meeting</b>	

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

EPRI 召開 ESCP 會議之主要目的為提供一個合作平台，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有未來之可運輸性。

目前 ESCP 主要討論議題：

- 燃料束：包含先進燃料(advanced fuel)及先進反應爐(advanced reactor)
- 模式建立：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。

以下將針對會議內容主題摘要報告

### 1. 各機關研究發展方向概述

#### (1) 美國 Sandia National Laboratories (SNL)報告進期美國能源部用過核子燃料貯存及運輸研發狀況

主內容包含監測、乾操作業、銲接、應力分布、燃料護套劣化研究等

112 年主要研究如下：

##### A、 Sibling Pin 計畫：

ANL、ORNL、PNNL 等國家實驗室已於 2023 年分別針對 Zr-4 合金護套之延展性、燃料棒測試及破壞性實驗進行發表，目前已完成第一階段研究，將開始第二階段研究作業，主要發現有：

- a. 燃料熱處理會影響燃料棒的表現。
- b. 燃料丸會影響氯化物的位置並影響疲勞壽命。

##### B、 地震試驗計劃：

已製作垂直、水平護箱測試模型，並架設測試平台，先行以電腦模擬結果，之後再與實地測試實驗比對。

##### C、 SCC 環境研究：

嘗試建立 SCC 預測模型，除了針對影響 SCC 之環境因子進行研究外，並對 SCC 發展行為進行模擬分析，同時研究 8 種不同的防蝕塗層之適用性及維護和檢測方法。

##### D、 熱力與乾燥技術研究：

- a. SNL 使用 17x17 的 PWR 全長棒，內有加裝電子加熱器模擬高燃耗燃料之行為模式，已模擬乾貯真空乾操作業之情形。
- b. PNNL 採用小型乾燥模型，目的在真空乾燥時取得氣體偵測數據後，可以回推乾貯筒內之殘餘水量。
- c. 研究真空乾燥對受損燃料的影響。
- d. 研發鋼筒殘餘水檢測方式，透過 TN-32 全尺寸金屬護箱研析水汽偵測與分布模式。

##### E、 鋼筒沉積示範實驗

本計畫首先構建熱傳計算模型確認熱傳遞模式，再透過安置於測試場之全尺寸密封鋼筒，驗證鹽化沉積的物理行為模式。

#### (2) NRC updates

NRC 表示其注重公眾信任與人力負荷，將依循科學方法，針對乾貯規範導入風險評估，發展極低重大安全議題之處理程序，避免此類議題對於整體安全考量產生偏差，並針對典型乾貯系統燃料認證方法發布安全評估草案。

管制機關也針對新式燃料在貯存、運輸與燃料製造設施間生命週期管制點建立管制獲核發執照機制，以確保新式燃料能符合管制機關的管制立場。

### (3) IAEA Updates on Spent Fuel Activities

依國際原子能總署(IAEA)統計，國際間目前用過核子燃料貯存情形如下：

- A、貯存型式：65%置於水池中、35%置於乾式貯存中；
- B、燃料處理狀況：70%貯存、30%再處理；
- C、貯存地點：53%貯存於電廠外、47%貯存於電廠內

IAEA 近期協助研究項目如下：

- A. 針對電廠嚴重意外事故(三哩島、車諾比、福島)發表「Management of Severely Damaged Spent Fuel and Corium - IAEA CRP No T13015」，旨在強化處理電廠嚴重事故之最佳辦法。
- B. 針對燃料長期貯存狀態研究發表「Spent Fuel Research and Assessment (SFERA, CRP T13020)」，其內容包含燃料材料、護套、燃料束組件等。
- C. 針對乾、濕貯系統延長貯存研究發表「Performance Assessment of Storage Systems for Extended Durations (PASSED, CRP T13019)」，其內容包含系統表現、監測與檢測、老化管理及修理措施等。

## 2. 乾貯系統檢測與腐蝕劣化相關研究報告

### (1) Yankee Rowe 電廠乾貯系統檢查狀況

Yankee Rowe 距離海岸有 120 英里遠，空氣鹽類含量較低，該電廠使用 NAC 之乾貯系統並於 2022 年由 NAC 以檢測車從 VCC 出氣口進入檢查 14 組 TSC 銲道表面(包含底部、垂直及上蓋銲道)、VCC 進出氣口、內襯碳鋼塗層及混凝土表面等。檢測結果如下：

- A、TSC 貯存階段，即使是在很潮濕之天氣，其表面可始終保持乾燥。
- B、檢測之 14 組 TSC 及 VCC 均保持良好之狀況。

### (2) Holtec 針對 Palisades、Trojan、ANO 電廠乾貯系統之檢測結果

#### A、Palisades 電廠

該電廠是 Holtec 收購之電廠並進行後續除疫工作，該電廠是使用早期 Pacific Sierra Nuclear Associates 所製造之 VSC-24 系統，於 1993 年 5 月裝載，本次檢查作業已於 2023 年 7 月完成，並沒有發現顯著劣化跡象。

B、 Trojan 電廠

該電廠是採用 Holtec MPC-24E 鋼筒，並裝載於 BNFL Fuel Solution TranStor 的混凝土護箱中，於 2003 年 1 月裝載，本次檢查作業於 2023 年 9 月完成，沒有發現顯著劣化跡象。

C、 ANO 電廠

該電廠採用 HI-STORM 100S 系統並裝載 MPC-24 鋼筒，於 2003 年 12 月裝載，本次檢查作業於 2023 年 10 月進行，亦沒有發現材料劣化之情形。

(3) Orano 報告乾貯系統之檢測結果

Orano 建議密封鋼筒、混凝土模組、傳送護箱 5 年檢查一次，混凝土模組進出氣口表面則每日進行外觀檢查，並搭配溫度監測已確認進出氣口並無堵塞。

過去 4 年 Orano 已對美國境內 7 座電廠進行檢查作業，檢查結果均無發現會使乾貯系統功能失效之跡象，且經由表面沉積物分析，認為發生 CISC 之機率很小。

3. 腐蝕劣化相關研究報告

(1) Maine Yankee 腐蝕測試研究

美國 Maine Yankee 電廠依據 DOE 之計畫，於 2017 年 8 月時在其 4 組乾貯筒置放測試試片，並於試片上方會置放灰粒收集器，以進行表面成分分析，所有試片均放在 4 點彎曲(4-point bend)夾具上，以模擬乾貯筒表面殘餘應力。

主要發現如下：

- A、 試片經過 6 年多之存放，表面沉積物多為灰塵、植披碎屑、蜘蛛網及昆蟲碎屑等，進氣口由為明顯。
- B、 粗糙表面如刮痕或摩擦痕，均容易發現鏽斑；而光滑表面如研磨過後之表面，則不太會發現腐蝕現象。
- C、 進行液滲檢測後，無發現任何 SCC 跡象。
- D、 以電子顯微鏡(SEM)觀察，沉積在進氣口表面之物質主要為有機物、微生物；沉積在出氣口表面之物質主要為礦物微粒。
- E、 使用能量色散 X 射線譜(EDS)分析試片表面沉積成分，可得知表面沉積鹽類以氯鹽為主。

(2) SCC 模式行為研究

為了解鋼筒腐蝕劣化模式，SNL 特別針對環境因子與腐蝕之關係進行研究，主要探討環境成分與材料與蝕坑(pit)之關係、環境對蝕坑到劣化(pit to crack)過程之影響、環境因子對腐蝕劣化速率(crack growth rate)之影響等，摘要結論如下：

- A、在粗糙表面比較容易產生較深之蝕坑，且蝕坑外觀較為破碎；反之，在光滑表面所產生之蝕坑較淺，且形狀接近半球型。
- B、表面灰塵會影響鹽類沉積狀況，暴露於灰塵環境中的試片，容易發生較深的蝕坑，不過目前仍待更多實驗數據佐證。
- C、刻痕深度會影響腐蝕情況，刻痕愈深，腐蝕情況愈嚴重。
- D、環境溫度及環境成分會影響腐蝕劣化速度，如加入硝酸鹽類可以降低裂縫成長速率，而溫度提高則會增加裂縫成長速率。

### (3) 發生 CISCC 之結果分析

除了研究 CISCC 之行為模式及預防方法外，美國亦研究發生 CISCC 後，可能會對環境造成之影響，此項研究之目的在於評估 CISCC 所造成之風險，並作為老化管理之參考依據。

NRC 過往已針乾貯設施受意外、天然災害、人因事故等，進行結果評估並發表 NUREG-1864 「A Pilot Probabilistic Risk Assessment Of a Dry Cask Storage System At a Nuclear Power Plant」，惟其內容並未提及乾貯設施老化機制及其影響，為評估乾貯設備老化所導致之影響，NRC 參考前述報告內容外，亦參考 2012 年發表之 CNWRA-2012-001 報告「Potential Releases Inside a Spent Nuclear Fuel Dry Storage Cask Due To Impacts: Relevant Information and Data Needs」，收集乾貯設施長時間運貯後，可能釋出之放射性物質及相關參數，依照前述參考文獻內容及其方法論，經計算後得出乾貯設施正常貯存時，並不會超過 10 CFR 72.104 每年 25 mrem 之限值，即使有大量燃料棒失效，亦不會超過 10 CFR 72.106 對意外事故容許之限值。

## 4. 乾貯系統老化管理報告

為確保乾貯系統於長期貯存情況下，仍可保持系統功能正常，尤其是密封邊界之完整性、故發展乾貯系統老化管理方法，包含非破壞檢測、修補、延緩老化等技術的研發及法規之制定等。

### (1) EPRI 老化管理研究概述

EPRI 近年來針對密封鋼筒系統之老化管理，著重在非破壞檢測技術、修補技術之研究。

有關非破壞檢測技術，目前國際上主要以傳送車從進出氣口進入密封鋼筒鐸道表面並進行目視檢查為主，惟近年來亦持續發展其他非破壞檢測技術如雷射超音波(laser UT)、渦電流(Eddy Current)等，可在不開啟護箱頂蓋之狀況下，進行鐸道表面及內部結構整體檢查，EPRI 預計在 2025 年發表 NDE 應用技術可行性報告，2024 年到 2025 年發表乾貯模型 NDE 測試報告，可提供未來非破壞檢測技術指引。

針對密封鋼筒延緩老化及修復技術，EPRI 近年來積極與各界專家合作並提出報告，目前常見之修復方法有冷噴塗法，EPRI 表示 2024 年 3 月將會發表冷噴塗及表面清潔程序對於腐蝕劣化之應用報告，另 EPRI 目



前亦研究不同塗層對於延緩 CISCC 之有效性。

## (2) SNL 探討密封鋼筒之延緩老化及修復方法

如發現乾貯筒劣化，一般會採用之修復方式是將劣化部分以塗層 (coating) 修補，惟因護箱表面屬於高溫、高輻射環境，及其他操控上之限制，綜合需考量事項包含：環境適用性、抗蝕性、耐高溫、耐輻射、操作便利性等。

SNL 針對前述研究成果，將塗層之適用性製表，後續仍會針對塗層之抗腐蝕能力進行研究並歸納整理。

## (3) 國家原子能科技研究院(NARI)報告微型珠擊(mirco-shot peening, MSP)對沃斯田鐵(Austenite)之影響

乾貯筒製程階段，其鋼板會經由冷軋、銲接等過程，材料內部可能會有殘留應力，容易導致應力腐蝕龜裂，故國原院研究微型珠擊技術(珠擊大小  $< 100 \mu\text{m}$ )延緩金屬劣化之可能性。

該院使用不鏽鋼 304 及 316 試片，分別進行冷軋、銲接、MSP 等過程，並在試片表面噴灑  $80^{\circ}\text{C}$  10% 之 NaCl 溶液後，靜置 672 小時以掃描式電子顯微鏡(SEM)及背向散射電子繞射技術(EBSD)觀察表面結構及材料特性。

初步結果如下：

- A、冷軋後之鋼板，表面會呈現張應力，惟經珠擊後，表面則會改為壓應力。
- B、從 EBSD 結果顯示，銲道區域相較基板材料受為珠擊之效果更為顯著，主要是因為基板材料在經過冷軋後，其硬度會變硬，故減少塑性變形之可能性。
- C、以顯微鏡觀察，微型珠擊技術確實可以減少蝕坑數量，並進一步減緩應力腐蝕龜裂之發生。

## (4) ASME 針對延緩老化及修補之規範更新情形

ASME 於 2021 年組織一個任務團隊，目標建立乾貯密封鋼筒延緩老化及修補之規範要求(code case)，其將運用於延緩腐蝕劣化、裂縫蝕穿等問題，並提供修補人員之資格要求、檢驗要求等。該組織目前仍在蒐集實驗及現地測試數據，發布後將可提供乾貯運貯人員老化管理之遵循依據。

## 5. 乾貯系統監測技術發展

乾貯設施除了依據老化管理方案，定期檢查貯存狀況外，亦研發即時監測乾貯系統之技術，運貯人員便可第一時間發現乾貯設備劣化之位置及內部燃料貯存狀況。

### (1) 西屋公司報告無線偵測器應用於商用乾貯筒之可行性

發展無線偵測器之目標如下：

- 直接監測乾貯筒內部狀況(護套溫度、壓力等)：

- 最佳化乾貯筒燃料布局：
- 最佳化乾貯筒真空乾燥程序：
- 即時監測高燃耗燃料貯存狀況。

西屋公司首先在其實驗室以小型鋼筒模型測試訊號傳遞之性能，同時亦模擬鋼筒乾燥階段以最佳化訊號傳遞及蒐集能力，再搭配以程式編寫之數據擷取系統，可得知乾貯設備運貯階段之貯存狀態。

除上述鋼筒模型測試外，西屋公司亦與 DOE 合作，於實體乾貯筒進行測試，初步結果可以成功擷取鋼筒內部訊號，後續將持續最佳化感應器與接收器之配置，以準確取得乾貯筒內狀況。

## (2) 非接觸性長時間智能監測系統

X-wave innovations 公司為即時監測 CISC 及彌補傳統聲音發射傳感器之使用限制，該公司嘗試以非接觸性電磁超聲傳感器 (Electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 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。

近年來 X-Wave 公司積極與 Orano 乾貯廠商合作並進行實地測試，其將 EMAT 置於 Orano 水平式乾貯系統之支撐軌道上，目前已完成一次實地測試，後續將持續收集測試數據，並與 SNL 國家實驗室合作針對不同乾貯筒進行測試，同時精進其軟體使用介面。

本次會議結束後，與 EPRI 機構及相關與會人員合影詳圖 1 及圖 2。



圖 1 - 與 EPRI 研究大樓合影



圖 2 - 2023 年 ESCP 與會人員合影

### (三)Orano TN 參訪

本次參訪 Orano TN 位於美國北卡羅萊納州 kenersville 之乾貯筒製造廠，其原是屬於 AREVA 旗下子公司 Columbiana Hi Tech (CHT)之資產，CHT 於 1985 年成立，於 2013 年被 Orano TN 收購成立 TNF 並於 2015 於北卡設立製造廠房，該廠房於 2018 年轉型作為 Orano TN 密封鋼筒設備製造廠，廠區大小約 140,000 平方英尺，主要分成三部分說明如下：

- 金屬機械加工區：可進行乾貯筒零組件金屬加工，包含：底板、上蓋、提籃等。此外，另有材料化學加工區。
- 提籃組裝區：該區域主要進行提籃堆疊組立作業。
- 密封鋼筒筒身成型、組裝及鋼筒與提籃組合區：該區域主要用於密封鋼筒殼身製造、提籃與殼身組合及進行相關測試。

本次行程亦參訪 Orano TN 位於南卡羅萊納州艾肯(Aiken)之設備維護廠，Orano TN 展示其傳送板車、真空乾燥系統、自動銲接機及銲道切割機，展示內容摘要如下：

- 傳送板車：Orano TN 之傳送板車類似於本公司現行核一廠室外乾貯之多軸油壓板車，惟其更具操作便利性。
- 真空乾燥系統：Orano TN 之真空乾燥系統，亦類似於本公司乾貯之相關設備，惟其效率更好。
- 自動銲接機：該自動銲接機可匹配 Orano TN 所設計之乾貯筒，主要用於上蓋銲接作業。
- 銲道切割機：Orano TN 配有上蓋銲道切割機，如需要時亦可將乾貯筒上蓋銲道移除。

本次除了參訪 Orano TN 設備及工廠外，亦和相關人員進行乾貯技術意見交流，摘要如下：

- 適用於 EOS 系統之運輸護箱 - TN eagle 已於 2023 年 10 月 23 日由美國核管會取得執照(Docket number: 71-9382)。
- 因 Orano TN 之護箱系統是採水平式貯放，其優勢包含：耐震力較強、輻射屏蔽力好、定期檢測之操作較為容易等，此外 Orano TN 亦有開發「檢測環(Inspection Ring)」，可進行鋼筒表面 100% 檢查及修復作業。

### 三、 心得及建議

#### (一)ESCP 會議

本次 ESCP 會議，由 EPRI 召集國際間乾貯專業領域之專家學者一同與會，參加代表包含各國研究機構、政府機關、電廠及相關國際核能組織等，足見乾貯設施長期貯存，已是國際上大家需共同面對的議題。

本公司雖尚未有乾貯使用時機，惟相關國際運轉及研究經驗亦可作為本公司將來運貯乾貯之方針，針對本次會議報告內容，心得及建議如下：

- 本次會議期間，有不少乾貯廠家提供乾貯設施運貯後之檢查結果，目前相關設備(尤其是密封鋼筒)均可保持其完整性，雖然可能在鋼筒表面有擦傷、生物跡象或水痕等情形，均不影響乾貯系統之功能性，且參考相關電廠之乾貯運貯經驗，亦可以回饋至本公司後續之操作程序，如本公司於護箱進出氣口加裝防護網，可減少生物棲息之機會；改善護箱裝載過程中之程序，則可減少鋼筒與混凝土護箱擦撞之機會。此外，乾貯護箱檢測工具日新月異，現已發展機械檢測車可以從進出氣口深入鋼筒表面，檢測表面結構狀況，亦可提高貯存狀態之信心度，後續本公司乾貯系統之老化管理，亦可參考此作法。
- 本次會議有不少國家實驗室針對 CISC 提出相關研究成果報告，如蝕坑發生原因，蝕坑發展成裂縫之機制及裂縫成長速率等，均可作為本公司對外答復說明之依據。此外，相關研究亦有發現可以延緩腐蝕劣化速率之方法，建議可以持續關注相關研究發展狀況，相關經驗也可回饋至本公司後續乾貯設施營運管理。
- 雖然防止 CISC 一直是近年來大家討論之議題，不過本次會議認為即便發生 CISC 後，其對環境之影響微乎其微，相關研究成果表示，即便鋼筒內部燃料有受損，對外界之劑量影響仍符合法規限值，該觀念較為新穎值得省思，後續建議可以持續追蹤相關研究成果，蒐集之數據有助於強化本公司對外界質疑之答復說明。
- 美國因多數乾貯設施已運轉數年，部分設施將面臨使用執照到期之情況，惟因該國尚未擬定最終處置場址，多數乾貯場均需透過老化管理計畫及設備檢查以確保乾貯設施之適用性，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。
- 因本公司室內乾貯計畫貯存高燃耗用過核燃料，參考美國 DOE 領銜展開之用過核燃料貯存行為研究，其中包含高燃耗燃料護套經熱循環後材料性質之改變、燃料丸結構對護套之影響等，配合現在國內國原院之用過核燃料長期穩定性監測與行為研究計畫，經由互相比對研究成果，有助於瞭解未來用過核燃料實際於乾貯設施中之貯存行為，建議可以持續追蹤相關研究報告，部分經驗亦可作為本公司後續乾貯到處置階段之營運參考。

## (二)Orano TN 技術交流

此次參訪 Orano TNF，全廠生產線僅製造乾貯筒，其為半自動生產製造，且製造廠房內亦保持整潔，製造動線良好，不會有不同製造計畫相互干涉之情形，其製造品質依循美國法規及 ASME NQA-1 之相關規定，符合核能對品保制度之要求。

經由與 Orano TN 相關人員交流後，得知該公司在核能各領域，舉凡前端燃料設計到後端電廠除役拆廠及用過核子燃料貯存規劃，均有充足之服務經驗及能力。

本公司刻正規劃核一、二、三廠室內乾貯計畫，後續將依國內採購法規採購室內乾貯設施，蒐集相關乾貯設計廠家之資料將有助於本公司乾貯計畫之規劃及獲取相關經驗回饋，建議持續透過各種管道蒐集國際上各乾貯廠家之設計參數及使用經驗，可作為本公司未來乾貯設施運貯作業之技術基礎。