

出國報告(出國類別：開會)

## 參加 2016 美國 EPRI 之 ESCP 研討會

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：葉丞勛/主辦乾式貯存技術分析專員

張凱翔/燃料技術專員

郭嘉祐/核心營運專員

派赴國家：美國

出國期間：105.11.28 ~ 105.12.03

報告日期：106.01.10

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加 2016 美國 EPRI 之 ESCP 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/ 陳德隆 / (02)2366-7685

出國人員姓名/台灣電力公司/單位/職稱/電話

葉丞勛 / 台灣電力公司 / 核能後端營運處 / 主辦乾式貯存技術分析專員  
/(02)23657210#2224

張凱翔/台灣電力公司/核能一廠/燃料營運專員/(02)26383501#3098

郭嘉祐/台灣電力公司/核能二廠/核心營運專員/(02)24985990#2417

出國類別：1.考察 2.進修 3.研究 4.實習 5.其他(開會)

出國期間：105.11.28 ~ 105.12.03 出國地區：美國

報告日期：106.01.06

分類號/目：

關鍵詞：乾式貯存、延長貯存、應力腐蝕

內容摘要：(二百至三百字)

本次參加之 2016 ESCP(Extended Storage Collaboration Program)研討會為冬季會議，議程為期三天。會議主要針對用過核子燃料延長貯存所需要注意的不鏽鋼材料應力腐蝕防治議題進行探討，與會人員有美國核能管制單位、各大核能研究機構、核電廠營運單位、乾式貯存設施設計製造廠商以及日本、韓國、瑞典、西班牙等國之相關專業人士提供目前最新研究、監測或評估之現況，彼此交流討論並經驗回饋。美國目前最終處置場場址尚不明朗，因此未來須面對延長核電廠區內用過核子燃料乾式貯存設施使用期限的狀況，透過與研究單位和營運單位的交流討論，研擬出尚待精進的技術項目，共同面對乾式貯存設施材料老化管理方面的問題，惟目前運轉中的用過核子燃料乾式貯存設施並無發現不鏽鋼應力腐蝕所造成實質上的影響。

(本文電子檔已傳至出國報告資訊網 <http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

## 目次

壹、出國目的 .....	1
貳、出國過程 .....	2
參、會議內容摘要 .....	3
肆、心得與建議 .....	14
附件 1 會議議程 .....	16
附件 2 相關照片 .....	21

# 圖目錄

圖 1、CISCC 的發展過程示意圖.....	5
圖 2、乾式貯存系統風險排序流程圖 .....	6

## 壹、出國目的

本公司核一、二廠目前規劃使用之用過核子燃料乾式貯存系統，其密封鋼筒皆採用 304L 不鏽鋼材料。美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)2012 年底以「資訊通告」，提醒業主需慎防 304、304L、316 及 316L 等四種不鏽鋼材質之密封鋼筒產生應力腐蝕，提醒業主需注意監測。國際上目前並未發現使用該等材質之用過核子燃料乾式貯存設備發生應力腐蝕案例，但我國核能主管機關原能會仍要求台電公司進行相關研究並列管追蹤。

此外，國內相關環保團體及反核民眾亦相當關心乾式貯存設施密封鋼筒不鏽鋼材料應力腐蝕問題，並蒐集各種相關資料，多次於新北市核安監督委員會、核一、二廠乾式貯存環評監督委員會及各種公開場合中提出相關質疑。

考量本研討會中用過核子燃料乾式貯存系統之老化研究部分包含不鏽鋼密封鋼筒應力腐蝕議題，且有世界各核能國家之相關人員與會，故藉由本次參與之過程，可充分了解國際研究趨勢及成果，並汲取國際乾式貯存相關經驗，有助於強化本公司乾式貯存工作之推動。

## 貳、出國過程

美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)於 2016 年 11 月 29 日在美國北卡羅萊納州夏洛特市召開「2016 ESCP(Extended Storage Collaboration Program)研討會」，本次會議主題包括：用過核子燃料延長貯存、應力腐蝕、乾式貯存設施非破壞檢測及各國對於乾式貯存老化管理研究等議題，議程詳如附件 1，時間為 11 月 29 日~12 月 1 日，共 3 日。

## 參、會議內容摘要

### 一、會議概述

由於美國用過核子燃料及高放射性廢棄物之最終處置場址遲遲無法確定可供存放，因此將延長核電廠區內用過核子燃料乾式貯存設施之使用期限，以爭取最終處置場或集中式貯存場之尋覓與建造時間。伴隨而生的是用過核子燃料乾式貯存設施的老化管理議題，故藉由本次研討會，核能管制單位、研究機構與核電廠業者可就管理層面、研究層面與實務面互相交流，了解需要注意的核心議題，以確保乾式貯存設施之安全性。

所謂應力腐蝕劣化現象，是指由拉伸應力(tensile stress)及腐蝕環境結合效應所導致的破裂。在產生應力腐蝕期間，金屬表面通常只受到很輕微的侵蝕，但局部裂縫卻很快沿著金屬橫斷面傳播。產生應力腐蝕所需的應力可以是殘留應力或施加應力，裂縫會開始於金屬表面上的蝕孔或其他不連續處。在裂縫開始成長時，其尖端會開始向前，此時作用在金屬上的拉伸應力會在裂縫尖端處形成高應力，當裂縫尖端向前傳播時，在裂縫尖端處也會產生電化學腐蝕而使陽極金屬溶解。裂縫會沿著垂直於拉伸應力的方向成長，直到金屬破壞為止，只要應力或腐蝕其中任一停止，則裂縫將停止成長。

應力腐蝕是一種應力與腐蝕相互作用的結果，因為在材料受到局部應力或應力作用不平均時，受到高應力作用的區域會形成陽極，而受較低應力作用的區域則形成陰極，因此作用應力會使得腐蝕作用更為加速，稱為應力電池(stress cells)。應力腐蝕發生在材料冷加工時，高度冷加工的區域會較低度冷加工的區域更具陽極性，另外在材料存在裂縫的情況下，也會造成應力腐蝕。

## 二、會議內容

### 第一天

第一天會議的主題包含了美國核管會對目前管制現況的更新說明、各單位對氯離子引發應力腐蝕龜裂(Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking, CISCC)議題的研究現況和電廠營運單位對 CISCC 問題的評估等。

美國核管會表示，由於美國的最終處置場 Yucca mountain 計畫遭到終止，美國現階段規劃以「集中式貯存場」作為替代方案，以貯存目前存放於美國各地原廠址的用過核子燃料。2016 年 4 月 Waste Control Specialist (WCS)已提交申請案給美國核管會，並於 12 月底提交補充資料，美國核管會將在 2017 年初，決定是否通過審查。美國乾式貯存設備製造商 Holtec 公司預期將於 2017 年 3 月提交申請。未來美國能源部(DOE)將建立集中式貯存場的技術安全分析規範。

美國核管會為了乾式貯存設施需繼續延續使用的現況，建立了一份 Managing Aging Processes in Storage (MAPS)報告，用以評估乾式貯存設施組件材料在環境下的劣化狀況，以表格方式建立材料、劣化機制與環境的關係對照表，可快速篩選出各種材料應注意的劣化方式。MAPS 報告已於 2016 年 9 月與美國核管會內部的核安諮詢委員會討論過，將於 2017 年第一季公布草稿，第三季再經委員會討論，第四季定稿。

用過核子燃料乾式貯存密封鋼筒於銲接後，會在銲道周圍留下殘留應力，且該貯存設施多位於海岸邊含有鹽分的環境，使得不鏽鋼材料可能發生 CISCC。CISCC 的發展過程可以分為三個階段(詳如圖 1)：第一階段為孕育期 (incubation)，當密封鋼筒裝填用過核子燃料開始貯放後，因環境濕度的影響，使鋼筒表面開始出現孔蝕(pit)；第二階段為孔蝕成長(pit growth)，孔蝕成長速率受環境、鹽分累積(孔蝕大小決定)和材料表面應力場的分布狀況三個要素影

響，使孔蝕成長為初始裂縫(crack initiation)；第三階段為裂縫成長(crack growth)，裂縫成長速率僅能用實驗數據和環境狀況來評估。

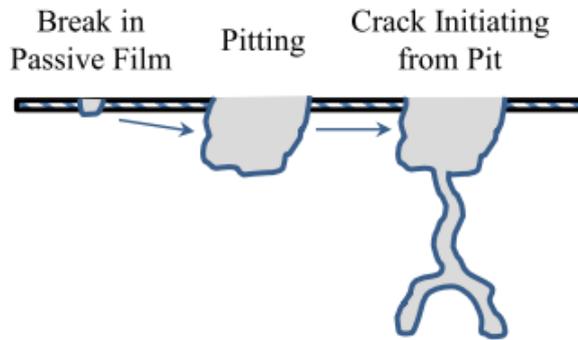


圖 1、CISCC 的發展過程示意圖 (Ref. EPRI report # 3002005371)

美國核管會委託 Sandia National Laboratory (SNL) 進行 CISCC 實驗，依照 ASME SCXI code case N-860 工業規範進行三組實驗，第一組砂塵環境為控制組使用 98%  $\text{CeO}_2$ 、0.8%  $\text{NaCl}$ 、0.8%  $\text{KCl}$  和 0.4%  $\text{CaCl}_2$  組成，測試溫度為  $50^\circ\text{C}$ ，濕度大於 50% RH；第二、三組使用 50% 水洗過的海砂、12.5% 高嶺土、12.5% 長石和 25% 的人工海鹽作為砂塵環境，測試溫度為  $50^\circ\text{C}$ 、濕度分別為 30% RH 和 50% RH。在經過五個月的暴露時間後，第一組的砂塵呈現潮濕狀，提供足夠的電解質使材料發生孔蝕和龜裂，在裂縫面上發現有氯離子沉積的證據。第二、三組的砂塵呈現乾燥狀態，並無明顯潮解狀況發生，僅有發現少量的氯離子，材料並無發生孔蝕或龜裂的狀況。

南方核能公司(Southern Nuclear)在美國營運三座電廠，分別為 Hatch、Farley 和 Vogtle；Hatch 為 BWR-4 核電廠，使用美國 Holtec 公司的乾式貯存系統，目前已裝填 69 組 HI-STORM 100 和 3 組 HI-STAR 100，最長貯放時間已達 16.4 年。該公司應用 EPRI 報告進行乾式貯存系統風險排序(ISFSI Risk Ranking)，相關流程如圖 2 所示，此排序雖無法預測 CISCC 的發生，但可比較發生 CISCC 的敏感度。排序共需 4 個參數， $Z_{\text{ISFSI}}$  參數、沉積參數、密封鋼筒材料和鋼筒熱負載，透過以上 4 個參數計算出各組鋼筒的排序值。而 HI-STORM 為直立式的系統，可對每組系統計算出一個  $V_{\text{CAN}}$  值，若為水平式的

系統，則有不同計算方式  $H_{CAN}$ 。此外，HI-STAR 系統的密封鋼筒是包封在氬氣環境中，不直接暴露於大氣環境中，免除了含鹽分環境的影響，因此不適用風險排序。

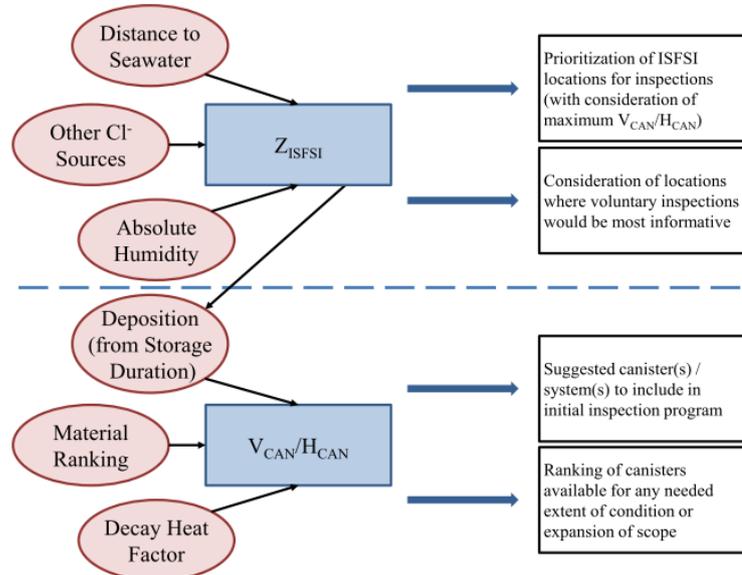


圖 2、乾式貯存系統風險排序流程圖 (Ref. EPRI report # 3002005371)

曼徹斯特大學(University of Manchester)對 304L 和 316L 材料進行了 CISCC 的研究，實驗環境鹽分為  $MgCl_2$  及海鹽、溫度為  $70^{\circ}C$ 、濕度為 33% RH 和 50%RH，其中  $MgCl_2$  鹽分為高氯濃度，一般認為最容易使不鏽鋼材料發生 SCC。經過加速實驗後，發現在濕度 33% RH 下，304L 在兩種鹽分環境中皆發生 SCC 現象，但在海鹽環境中的裂縫長度較短；316L 在  $MgCl_2$  鹽分環境下發生 SCC，但在海鹽環境中則未發生 SCC。而當濕度提升至 50% RH 時，304L 在兩種鹽分環境中同樣發生 SCC 現象，且嚴重程度相同；316L 在海鹽環境中亦發生 SCC。在濕度較高的環境中，兩種不鏽鋼材料皆受到較嚴重的 CISCC 現象，主要為鹽分潮解產生的水合物及水份會加速金屬材料與鹽分環境間的電化學反應速率，使得 SCC 的過程加速。

## 第二天

第二天會議的主題包含了各電廠對非破壞檢測的評估及維護應用、自動化

機械製造公司 RTT 對電廠機械運輸系統設計的發展、各電廠乾式貯存現況等。

對於老化管理，目前最廣泛發展的技術為應用非破壞檢測(NDE)。因無法將裝載用過核子燃料棒的護箱做結構上的拆解，為了解經過長時間存放後，內部結構是否發生應力腐蝕、孔蝕甚至劣化，故透過發展由外部非破壞的檢測方式以期辨認出乾式貯存護箱內部劣化的原件和表面磨損。其中多種被應用的技術包含：常見之渦電流檢測、放射源斷層攝影、音波發射(acoustic emission)、超音波及繃子(muon)影像。由於這些非破壞檢測的方法尚在發展階段，故學界和業界的共同研究合作將是乾式貯存老化管理技術進步的重大關鍵。參與此延長乾式貯存共同合作計畫的成員有密西西比大學、佛羅里達大學、南卡羅納大學、各洲國家研究實驗室、美國能源部、美國核管會、EPRI、IAEA、GE、AREVA、Exelon、自動化機器製造科技公司、及 Maine Yankee 核電廠等。

放射源斷層顯影為透過觀察用過核子燃料棒放出的加馬及中子輻射在介質中散射能譜來建構出內部結構情況。這項技術由佛羅里達大學所主導研發，將收集不同散射能譜以重建內部結構，同時藉由擺放不同位置的加馬偵測器測量出護箱和燃料提籃對偵測器位置的靈敏度。另外，由已知的結構與燃料束擺放位置和模擬建構出的資料進行比對驗證。透過結合理論計算和實驗數據，佛羅里達大學將建立完整的放射源斷層顯影技術。

音波發射應用在結構偵測上已經有一段時間，可了解到音波在不同材料中之速度不同，且會發射出超音波。大至上來說，音波應用在結構上的檢測可以分為兩類：主動和被動。主動式係使用壓電轉換器發出音波至材料結構內，再使用探測器陣列接收壓反還的音波。被動式音波應用則由材料內部的裂縫晶格或張力引起的晶格邊界位移發出。近來，結構缺陷造成的非線性音波反應已成為研究主題，密西西比大學將進行一項材料結構對音波產生的線性和非線性震動能譜研究，這些震動是透過發射一連串頻率將材料激發，再由音波接收器觀察其反應。經由一系列的研究後，音波感測器、引動器的位置將被最佳化。同

時，針對欲了解的內部結構，可將其共振透過有限元素之分析及研究尺寸的護箱實驗中進行辨識，結構對音波產生的非線性共振有反應，將進行結構損傷產生的頻率轉移靈敏度、品質因素、及非線性參數研究。南卡羅納大學將進行一項結合主被動超音波方法的來監測放射出的音波，隨後用特定超音波進行探測。

一項相對新式的結構完整性監測(structural health monitoring, SHM)發展為繚子影像。繚子的質量為  $105.7\text{MeV}/c^2$ ，大約是電子質量的 200 倍。由於繚子的性質與電子相似，因而可以把繚子想像成一個「加重版」的電子。由於質量更大，繚子在電磁場中的加速和偏轉比電子要慢，發出的制動輻射(bremsstrahlung)也較電子少，這使得繚子比相同能量的電子能夠穿透更厚的物質。例如，宇宙射線中的繚子能夠穿透厚達數百千米的大氣層到達地表，甚至能到達數百米深的礦井之中。宇宙射線中的繚子可以被看作是「免費」的粒子源，繚子的強穿透能力使它可以穿透很厚的屏蔽層從而用於對重元素材料的檢測。近年來繚子成像技術得到了關注和研究，即利用繚子穿過原子質量不同的物質時具有不同的散射角原理，對大型物質進行輻射成像。這種新型的檢測方法應用於核安全領域，能夠有效探測到封裝良好的核材料，如鈾-235、鈾-239 等。目前有關繚子的技術正被應用在福島電廠 1 號機反應爐內部檢測，同時提供新興技術保證。

在非破壞檢測的研究上，兩個業界參與者 AREVA 和 EPRI 將會是這個老化管理結構完整性監測計畫研究成功的最終關鍵。裝載護箱的一些細節，包括材料結構等等對問題研究是非常重要的，故 AREVA 的參與將確保實驗能應用於 TN32 貯存護箱上，並有機會轉換為成功的實地測試。同時在研究進行一段時間後，AREVA 將會把每種發展方法都以實際全尺寸的護箱來進行實驗，而 EPRI 則會召集電力業界領導者，討論如何將研究發展的技術推展到應用層面。

另外為了要比對不同試驗得到的資料差異，各州參與計畫的國家實驗室，

如美國西北岸國家實驗室、橡樹嶺國家實驗室等皆針對「Sister Rods」進行相應地測試。所謂 Sister Rods 指的是從相同設計和相似運轉歷史燃料束中取出的燃料棒，而這些 Sister Rods 將被放入同樣型式的研究計畫裝載箱。進行計畫測試的 Sister Rods 包含四種型式護套: Zirlo、M5、Zircaloy-4、low tin Zircaloy-4，而這些用過核子燃料束燃料棒同時也是高燃耗。從電廠取出被用送到國家實驗室中並被裝入研究用的護箱後，將依訂定的時程進行不同階段的工作，如非破壞檢測、破壞檢測、延伸分析、清潔及處置。其每一項內容將會分為破壞檢測或非破壞檢測進行，如在目視、渦電流、加馬檢測下的壓力曲線、燃料轉移選項、乾燥議題、燃耗貢獻、護套氫化和脆化及護套潛變等。

詳細的檢驗內容將提供對 Sister Rods 實驗得到的資料特性差異瞭解，或代表不同乾式貯存條件差異的燃料棒在護箱中貯存的結果。可以預見資料差異將受燃料材質、設計、於反應爐內運轉歷史影響，故於不同國家實驗室所進行的 Sister Rods 測試將提升對高燃耗用過核子燃料束於護箱中貯存後機械應力、材料腐蝕劣化等表現評估的信心。為了涵蓋乾式貯存桶存放時不同的裝載方式、真空度、相對溼度等環境變數，一些在研究護箱內的燃料棒將以熱電偶和預測模組進行熱分析處理，以代表不同的邊界條件。破壞性檢測在所有運送和貯存的壓水式反應器用過核子燃料束上提供了具體足夠資料的資料，使分析預測得以更精確。

在整個延長乾式貯存合作計畫中，參與成員又依不同研究需求及專長領域，分為不同小組定期進行小組會議交流整合，如氯鹽潮解引起的應力腐蝕劣化、應力腐蝕非破壞檢測發展、減輕及修護應力腐蝕發展、公眾健康、資料差異解決及未來 ESCP 計畫會議預定排程等。

為了解不同研究機構進行相同實驗時，得到數據資料間的差異來源，將使用 DATA GAP ANALYSES 方法來探討任何可能影響實驗數據結果的原因。在

ESCP 計畫中，同樣有一負責 DATA GAP ANALYSES 工作的小組，其目的為：

- (1) 引導國際資料差異和各國研發計畫共享資料，以縮短資料差異報告中辨認出的差異。
- (2) 與 IAEA 共享「超長期貯存之用過核子燃料及有關乾式貯存系統元件表現」計畫資訊。
- (3) 啟動各參與計畫國家未來之研發。
- (4) 每年於各會員國舉辦兩次會議，並邀請後端營運基金保管機構與會。
- (5) 撰寫重大議題技術報告。

此小組之成員包括匈牙利、英國、美國、日本、德國、西班牙、韓國，未來可能參與的國家有阿根廷、法國、俄羅斯，這個計畫小組從 2009 年開始，至 2015 完成了第一版的「延長乾式貯存計畫國際小組報告」。這份報告總結出一些影響數據差異的重要因素，包含燃料護套氫化程度、乾式貯存護箱受到一般腐蝕及內部焊道應力腐蝕劣化程度、內部螺栓或密封環的劣化程度及外部混凝土劣化程度等。

雖然目前設計之乾式貯系統皆能使用過燃料安全地存放至法規限制的期間，仍須有技術上的驗證以做為貯存時間延長的依據，而進行數據差異分析即是提供了延長執照的必要基礎論述。

進行差異分析的方法包括：考慮材料和應力在延長貯存時間下產生劣化的機制辨識；將目前對資料差距的最新了解納入考慮的辨識；將辨識後的資料對在貯存安全上的關係做排序並且評估更新(排序程度)；以及建立在考慮特殊邊界條件下縮短資料差異方法的優先順序。在排序資料差異時，首先要定義出影響延長乾式貯存安全因素的低、中、高程度，這在研發上是很重要的一件事。對影響實驗資料因素排序的準則包含：

- (1) 對安全目標物件屏蔽、安全密封、次臨界及熱移除等的重要性；

- (2) 組件是否易受環境干擾影響；
- (3) 已知之安全餘裕較大或較小；
- (4) 隨時間改變會使應力增加或減小；
- (5) 與正常運轉、意外事故、或特殊場址條件的關聯。

總體來說目前在乾式貯存執行上，會碰到的困難或實際貯存情況可以美國 **Maine Yankee** 核電廠做為典範，其使用之乾式貯存設施為與我國核一廠同型號之 **NAC-UMS** 系統。該電廠於 1997-2005 進行除役拆除及場址復原工作，目前用過核子燃料已處於乾式貯存階段並擺放於其建立之獨立用過核子燃料貯存場。然而其電廠正面臨無法將乾式貯存中的燃料移出並放至最終處置場的困境，故延長乾式貯存的執照和方法將成為其迫切需解決的問題。

### 第三天

第三天會議主要由各出席人員針對各自國家乾式貯存之研究、設備研發、應力腐蝕、非破壞檢測及相關規劃現況進行簡報說明。

韓國 **KAERI**(韓國核能研究機構)目前已發展出自己的用過核子燃料乾式貯存系統，有運輸貯存兩用的 **KORAD 21** 系統以及貯存用的混凝土護箱 **KORAD 21C** 系統，每組可貯存 21 束 PWR 用過核子燃料，設計基準為 45,000 MWD/MTU 燃耗、初始鈾濃縮度為 4.5w%、最少冷卻時間 10 年以及每組護箱衰變熱最高 16.8kW，**KAERI** 正進行 **KORAD 21** 及 **KORAD 21C** 系統的貯存與運輸之安全評估測試及模擬。

韓國政府已於 2016 年 7 月份決定了高放射性廢棄物營運的計畫時程，預定於 2028 年決定處置場址、2035 年中期貯存設施開始運轉以及 2053 年最終處置場開始運轉，對於用過核子燃料營運進一步的深入規劃也正在進行中。

日本許多用過核子燃料乾式貯存設施都建在海邊，因此在鹽分濃度較高的環境下，不鏽鋼材料上的拉伸殘留應力將容易引發應力腐蝕。

應力腐蝕需要在應力、材料及環境三大因素同時滿足觸發的條件時才會產生，因此只要將其中一項條件移除即可防止應力腐蝕，由於材料及環境已固定，故可利用珠擊(Zirconia Shot Peening, ZSP)、拋光或水柱擊打等應力減輕技術(stress mitigation method)，將拉伸應力轉化為壓縮應力，移除產生應力腐蝕所必須的一項條件，以阻止應力腐蝕發生。

經研究顯示，即使不鏽鋼材料表面產生孔蝕現象，只要孔蝕深度未蝕穿壓縮層(compressive layer)，便不會產生應力腐蝕，而利用加速實驗之結果進行保守估算後，經過應力減輕技術處理之 316L 不鏽鋼材料，在貯存 60 年間所產生的孔蝕深度仍小於壓縮層之厚度，可確實防止應力腐蝕的產生，目前也正在考慮將這個技術正式投入實際的乾式貯存護箱中。

我國核能研究所針對用過核子燃料乾式貯存不鏽鋼密封鋼筒目前正在進行應力腐蝕監視試片的研究，不同於美國使用 C 型及 U 型試片進行研究，採用與日本類似的長方形不鏽鋼材料，利用四點加壓方式施加應力於試片上以模擬密封鋼筒真實狀況。另外也利用熱流分析模式來計算應力在密封鋼筒貯存期間可能造成的影響，如前所述，由於應力腐蝕需要在應力、材料及環境三大因素同時滿足觸發的條件時才會產生，因此貯存期間同時滿足前述三大條件之時間並不多，因此初步評估，在 40 年的貯存期間內，應力所造成的影響並不會使密封鋼筒失去功能而影響安全性。

此外，EPRI 人員亦補充說明：美國核管會於 1980 年代中期開始核發用過核子燃料乾式貯存設施之執照，期限為 20 年，提供有效的短期貯存，以維持核電廠全爐心退出之能力，但由於高放射性廢棄物最終處置場址遲遲無法確定，

因此開始額外核發 40 年的更新執照予乾式貯存設施，甚至朝延長貯存期間至超過 60 年邁進。

該人員並說明，NRC 於 2014 年「AVAILABLE METHODS FOR FUNCTIONAL MONITORING OF DRY CASK STORAGE SYSTEMS」報告中提到，在延長用過核子燃料的貯存年限後，隨之而生的是老化及環境所可能引發的劣化問題，這些現象在工業界跟核能電廠中都很常見，而且可以利用設計、製造及運轉上的工程規範來預防此種劣化現象。然而用過核子燃料乾式貯存系統在設計上為被動式安全系統，所以相關的設備檢查與監測會受到一些設計上的限制，以至於沒有辦法精確地了解設備中的確切環境狀況，以及是否有劣化現象產生。該報告中也說明，尚未確認有監測乾式貯存系統設備中氯鹽沉積量的標準方法，目前可行的方式只有利用監視試片蒐集氯鹽沉積量後再進行分析。

所以，必須要有特殊的感測器及監測系統，才能發展出因應現有乾式貯存系統進行設備組件檢查與量測作業的監測設備，這也是目前許多國家(包含美國)開始規劃進行研究的議題，只有發展出完善的監測系統與設備，才能真正預防並了解用過核子燃料乾式貯存系統在延長貯存期間所可能產生的劣化與老化問題。

## 肆、心得與建議事項

### 心得：

- 一、用過核子燃料密封鋼筒應力腐蝕議題在國內外受到許多非政府組織與民眾的關切，美國與日本兩國也投入許多心力及預算在相關的研究上，經由現階段的各式檢測數據顯示，目前運轉中的用過核子燃料乾式貯存設施並無發現不鏽鋼應力腐蝕所造成實質上的影響，但由於美國未來將朝超過 60 年的延長貯存邁進，故對於老化管理方面的研究亦持續進行，美國核管會(NRC)也規定未來在申請延長貯存執照時，需要有應力腐蝕的相關監測計畫與監測結果佐證，經過審查通過後才能取得執照更新。
- 二、我國原子能委員會也相當重視不鏽鋼密封鋼筒的應力腐蝕問題，故制訂「用過核子燃料乾式貯存設施維護與監測計畫導則」，要求本公司依照前述導則附錄中附件所列之「乾式貯存設施強化密封鋼筒應力腐蝕劣化監測之研究發展」進行相關研究，為因應管制機關要求以及民眾之關切，目前正規劃執行應力腐蝕之研究發展計畫，並會同時參考美國與日本等先進核能國家的研究成果及研究方向，藉由參加本次會議，能夠更了解目前世界對應力腐蝕研究的現況。
- 三、有關美國應力腐蝕的研究，目前已接近尾聲，接續進行的是如何針對用過核子燃料乾式貯存設施進行非破壞性檢測之研究，必須利用特製的載具搭配專用的檢測儀器進入貯存設備中進行，現在有許多機構正在研究如何能更全面地透過機器監測到的畫面，來判定乾式貯存系統是否有劣化情形或劣化傾向，因此監測儀器的精進也是本項研究中相當重要的一環。
- 四、本次參加 EPRI 的 ESCP 會議在每年夏、冬季各舉辦一次，過去的夏季會議只有一天，而冬季會議有三天議程且參加人數較多(會議相關照片詳如附件 2)，交流時間充分，深刻地感受到世界上先進核能國家對於用過核子燃料延長貯存與老化管理議題的重視，除在會中分別提出各自研究成果報告外，在會議進行中經常主動提出許多經驗進行分享，對於有所質疑的地方亦立即提出討論，且會議中有管制單位人員、研究人員及業者同時在場，可以直接就法規面、研究面及營運面進行溝通，意見交流相當迅速有效。此外，並利用會中分組會議時間研商未來研究方向及項目，亦可見用過核子燃料延長貯存相關議題在核能後端營運上的重要性。

### 建議事項：

此次為台電公司近年首度參加旨揭會議，由於美國在乾式貯存延長貯存之趨勢下，老化管理議題日趨受到重視，因此美國及日本已針對乾式貯存護箱之材料與應力腐蝕問題進行一段時間之研究，建議本公司未來除參加美國 EPRI 召開之 ESCP 研討會外，亦可規劃派員至日本參加相關研究機構所召開之應力腐蝕研討會，畢竟日本與我國位置較近，且有多核電廠之乾式貯存設施處於臨海條件，不論是在研究成果的適用性或溝通討論的相近度上，可能會有更多的共通性，故在引用相關資料時也許較能為外界人士及民眾接受。

# 附件 1 會議議程



## DRAFT AGENDA

### 2016 Used Fuel – High Level Waste

#### Extended Storage Collaboration Program

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

November 29-December 1, 2016

DATE: TUESDAY, NOVEMBER 29, 2016		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Breakfast/Registration	
8:00 a.m.	Welcome and Review of Agenda	Hatice Akkurt (EPRI)
8:15 a.m.	DOE Activities on Extended Storage	Ned Larson (DOE)/ Ken Sorenson (SNL)
8:45 a.m.	NRC Activity Update	Mark Lombard (NRC)
9:15 a.m.	Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report	John Wise (NRC)
9:35 a.m.	Railcar Development for a Commercial Spent Fuel Transportation System	Joe Carter (SRS)
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Overview of EPRI Activities on CISCC	Shannon Chu (EPRI)
10:50 a.m.	Residual Stress Final Results and CISCC Model Development	Charles Bryan (SNL)
11:15 a.m.	SCC Growth Evaluation for Canister Flaw Disposition	Bob Sindelair (SRNL)
11:40 a.m.	CISCC Susceptibility Assessment for Southern Nuclear ISFSIs	Gabriel Grant (Southern)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Perspective on Ductile-to-Brittle Transition Temperature Testing	Albert Machiels (EPRI)
1:30 p.m.	Effects of Hydrogen Content and Drying-Storage Hoop Stress on PWR Cladding Ductility	Mike Billone (ANL)
2:00 p.m.	PNNL Thermal Modeling Results	Brady Hanson (PNL)
2:20 p.m.	Sister Rod Test Plan	Brady Hanson (PNL)
2:40 p.m.	ORNL NDA Progress Update	John Scaglione (ORNL)
3:00 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	Subcommittee Meeting <ul style="list-style-type: none"> <li>• CISCC</li> </ul>	
6:00-7:30 pm	ESCP Reception – Hilton Charlotte University 8629 JM Keynes Drive, Charlotte, North Carolina, 28262, USA	

## EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 29-December 1, 2016 – Charlotte, NC

### ESCP CISCC Subcommittee Meeting

DATE: TUESDAY, NOVEMBER 29, 2016		
TIME	TOPIC	PRESENTER
3:30 p.m.	Welcome and Introductions	Shannon Chu (EPRI)
3:40 p.m.	CISCC related Activities in Canada	Roger Newman (University of Toronto)
4:00 p.m.	CISCC R&D Roadmap	Shannon Chu (EPRI), ALL
4:40 p.m.	Path forward	ALL
5:30 p.m.	<b>Adjourn</b>	

## EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 29-December 1, 2016 – Charlotte, NC

DATE: WEDNESDAY, NOVEMBER 30, 2016		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Continental Breakfast	
8:00 a.m.	CNL NDE and Repair Activities	Richard Lakhan (CNL)
8:20 a.m.	Multimodal Nondestructive Dry Cask Internals Evaluation	Wayne Prather (Ole Miss)
8:40 a.m.	ASME Code Development Updates	Kenn Hunter (Exelon)
9:00 a.m.	EPRI NDE Activities on DCSS Inspection	Jeremy Renshaw (EPRI)
9:20 a.m.	RTT Robotic Delivery System Development	Jamie Beard (RTT)
9:30 a.m.	GE NDE Development	Jim Stadler (GE)
9:40 a.m.	McGuire Demo	Matt Keene (Duke)
9:50 a.m.	Maine Yankee Demo	Paul Plante (MY)
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	<b>Panel Discussion – NDE SC Path-forward</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Jeremy Renshaw (EPRI)</li> <li>• Steve Glovsky (RTT)</li> <li>• Jim Stadler (GE)</li> <li>• Neil Fales (MY)</li> <li>• Matt Keene (Duke)</li> <li>• Kenn Hunter (Exelon)</li> </ul>	
11:30 a.m.	Friction Stir Welding	Ben Sutton (EPRI) and Glenn Grant (PNNL)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	<b>Panel Discussion – Mitigation/Repair SC Objectives and Path Forward</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dana Couch (EPRI)</li> <li>• Gary Cannel (Fluor)</li> <li>• Al Csontos (EPRI)</li> <li>• Mark Joseph (SIA)</li> <li>• TBD</li> </ul>	
2:00 p.m.	Multi-Nodal Transportation Test	Paul McConnell (SNL)
2:20 p.m.	Update on CRIFT Tests	Jy-An Wang (ORNL)
2:40 p.m.	Update on NEUP drying project	Travis Knight (USC)
3:00 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	<b>Subcommittee Meetings</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• NDE followed with Mitigation/Repair Subcommittee meeting</li> <li>• Fuel Assembly Subcommittee</li> </ul>	

## EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 29-December 1, 2016 – Charlotte, NC

### ESCP Fuel Assembly Subcommittee Meeting

DATE: WEDNESDAY, NOVEMBER 30, 2016		
TIME	TOPIC	PRESENTER
3:30 p.m.	Welcome and Status Update	Mike Billone (ANL)
3:40 p.m.	Discussions	TBD
5:30 p.m.	<b>Adjourn</b>	

### ESCP NDE Subcommittee Meeting

DATE: WEDNESDAY, NOVEMBER 30, 2016		
TIME	TOPIC	PRESENTER
3:30 p.m.	Welcome and Introductions	Jeremy Renshaw (EPRI)
3:40 p.m.	NDE SC Report and Path Forward	ALL
4:00 p.m.	<b>Adjourn NDE SC Meeting</b>	

### ESCP Mitigation/Repair Subcommittee Meeting

DATE: WEDNESDAY, NOVEMBER 30, 2016		
TIME	TOPIC	PRESENTER
4:00 p.m.	Welcome and Introductions	Dana Couch (EPRI)/Gary Cannel (Fluor)
4:10 p.m.	Roadmap Development for Mitigation/Repair SC	ALL
5:30 p.m.	<b>Adjourn</b>	

## EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 29-December 1, 2016 – Charlotte, NC

DATE: THURSDAY, DECEMBER 1, 2016		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Continental Breakfast	
8:00 a.m.	ESCP Subcommittee reports – International Objectives, Summary and Outcomes of previous ESCP International SC Meetings	Holger Volzke (BAM, Germany)
8:20 a.m.	Update on IAEA CRP Activities	Amparo GONZALEZ ESPARTERO (IAEA)
8:50 a.m.	Fukushima Spent Fuel Defueling Status	Takao Shimura, Shinichi Ishioka (Hitachi-GE)
9:15 a.m.	Spent Fuel Storage Status in Korea and KAERI's Research and development activities - Part 1: Performance evaluation tests for storage cask	Woo-seok Choi (KAERI)
9:40 a.m.	Spent Fuel Storage Status in Korea and KAERI's Research and development activities - Part 2: Spent fuel integrity evaluation	Donghak Kook (KAERI)
10:00 a.m.	BREAK	
10:30 a.m.	Update on Germany's Extended Storage Activities	Holger Volzke (BAM)
10:50 a.m.	Summary of recent results from the CEA-GNS-CRIEPI project on metal seals	Masumi Wataru (CRIEPI)
11:10 a.m.	A Proposed Proof-Test Method on Verifying the Confinement Integrity of Dry Storage Canisters in Operation	Kuei-Jen Cheng (INER)
11:30 a.m.	A concept for the monitoring technique of the dry storage canister integrity by surveillance specimens	Hsiao-Ming Tung (INER)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Update on Studsvik activities and plans focused on failed fuel and dry storage	Joakim Karlsson (Studsvik)
1:30 p.m.	Results from the Monitoring of a Spanish Cask	Javier Fernandez Lopez (ENRESA)
2:00 p.m.	TBD	TBD
2:30 p.m.	TBD	TBD
3:00 p.m.	BREAK	
3:30 p.m.	ESCP Subcommittee reports – Fuel Assembly	Michael Billone (ANL)
3:50 p.m.	ESCP Subcommittee reports – CISC	Shannon Chu (EPRI)
4:10 p.m.	ESCP Subcommittee reports – NDE	Jeremy Renshaw (EPRI)
4:30 p.m.	ESCP Subcommittee reports – Mitigation/Repair	Dana Couch (EPRI)
4:50 p.m.	ESCP and Subcommittee General Discussion <ul style="list-style-type: none"> <li>• Subcommittee Health</li> <li>• Resolution of data gaps</li> <li>• Future ESCP Meetings</li> </ul>	Hatice Akkurt (EPRI)
5:30 p.m.	<b>Adjourn ESCP meeting</b>	

附件 2 相關照片



EPRI 會議室照片



ESCP 會議進行照片



與會人員參觀 EPRI 辦公室環境照片



本公司與會人員於 EPRI 辦公室前合影