

出國報告(出國類別：開會)

參加 2017 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

黃正宏/主辦核安分析專員

張凱翔/燃料技術專員

派赴國家：美國

出國期間：106.11.11 ~ 106.11.19

報告日期：106.12.28

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加 2017 美國 EPRI 之 ESCP 研討會

頁數 26 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

黃正宏/台灣電力公司/核能三廠/主辦核安分析專員/(08)8893470#2761

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：106.11.11 ~ 106.11.19 出國地區：美國

報告日期：106.12.28

分類號/目：

關鍵詞：乾式貯存、延長貯存、應力腐蝕、用過核子燃料

內容摘要：(二百至三百字)

本次參加之 2017 ESCP(Extended Storage Collaboration Program)研討會為冬季會議，議程為期三天半。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、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，除目前正持續規劃興建集中式貯存設施外，未來亦將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，因此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，以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	16
附件 1 會議議程	18
附件 2 相關照片	24

圖目錄

圖 1、EPRI 與 NRC 針對用過核子燃料乾式貯存設施風險評估之結果 ...	5
圖 2、應力腐蝕裂隙成長過程.....	8
圖 3、各鹽類潮解所需之相對濕度(DRH)	9
圖 4、LUT 工作元件示意圖	10
圖 5、LUT 超音波信號於材料表面之傳遞特性示意圖.....	10
圖 6、LUT 初步應用修護策略之示意圖.....	11
圖 7、非破壞性檢測載具.....	14

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 2017 年 11 月 13 日在美國北卡羅萊納州夏洛特市召開「2017 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、乾式貯存設施應力腐蝕監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 13 日~11 月 16 日，共 3 日半。

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。在面對沒有最終處置場可放置用過核子燃料的狀況下，必須繼續使用乾式貯存設施，因此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，但局部裂隙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，裂隙會開始於金屬表面上的蝕孔或其他不連續處。在裂隙開始成長時，其尖端會開始向前，此時作用在金屬上的拉伸應力會在裂隙尖端處形成高應力，當裂隙尖端向前傳播時，在裂隙尖端處也會產生電化學腐蝕而使陽極金屬溶解。裂隙會沿著垂直於拉伸應力的方向成長，直到金屬破壞為止，只要應力或腐蝕環境消失，裂隙將停止成長。

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，另外在材料存在裂隙的情況下，也會造成應力腐蝕。

二、會議內容

本會議報告內容包含了美國核管會對目前管制現況與管制技術的更新說明、相關單位對氯離子引發應力腐蝕劣化(Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking, CISCC) 議題的研究現況和電廠營運單位對應力腐蝕裂化問題的評估等。

美國核管會(US NRC)

集中式貯存及延長貯存管制現況

美國核管會(以下簡稱 NRC)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「集中式貯存設施」(Consolidated Interim Storage facility, CISF)作為替代方案，以貯存目前存放於美國各地核電廠中的用過核子燃料，正持續辦理分別由 Waste Control Specialist (以下簡稱 WCS)及 Holtec/Eddy Lea Energy Allianceje (以下簡稱 ELEA)公司所提出的集中式貯存設施申請案，其中 WCS 公司將興建之設施位於德州，同時採用法國 Areva 公司及美國 NAC 公司之乾式貯存系統；Holtec/ELEA 公司將興建之設施位於新墨西哥洲，採用美國 Holtec 公司之乾式貯存系統。WCS 在 2016 年 4 月提交申請案給 NRC，並於 12 月底提交補充資料，NRC 已於 2017 年 1 月接受申請，準備開始後續審查事宜，惟 WCS 公司面臨財務問題，考量與美國 Energy Solutions 公司的合併案尚未完成，故主動於 2017 年 4 月提出暫停申請，NRC 已接受並暫停所有的審查工作。此外，Holtec/ELEA 公司已於 2017 年 3 月提出申請，目前還在申請程序的審查階段中。而美國能源部(Department of Energy, DOE)亦將集中式貯存設施之專題安全分析報告(Topical Safety Analysis Report, TSAR)提送 NRC 審查，作為未來集中式貯存設施場址選定後的核照依據。

NRC 為了因應乾式貯存設施未來可能會持續延長貯存的需求，建立了一份 Managing Aging Processes in Storage (MAPS)報告(即 NUREG-2214)，用以評估乾式貯存設施組件材料在環境下的劣化狀況，以表格方式建立各種貯存系統之材料、劣化機制與環境的關係對照表，篩選出各種材料應注意的劣化模式，可藉由評估

已知的老化結構，來決定在乾式貯存設施在延長貯存 20-60 年的條件下，是否會影響系統相關組件之安全功能，並提供一些可接受的老化管理範例做為參考依據。此 MAPS 報告將作為該會技術檢驗員審查之指引，以及乾式貯存設施執照申請及延長時之檢查基準，目前正在 NRC 內部技術審查階段。

乾式貯存密封性研究

有關用過核子燃料乾式貯存的密封性研究，NRC 及 EPRI 分別針對混凝土護箱系統(使用密封鋼筒，銲接密封)及金屬護箱系統(無使用密封鋼筒，以螺栓密封)進行風險評估，得出對於個人的潛在癌症致死率，皆遠低於安全標準(如圖 1)，故可印證乾式貯存的密封性安全無虞。

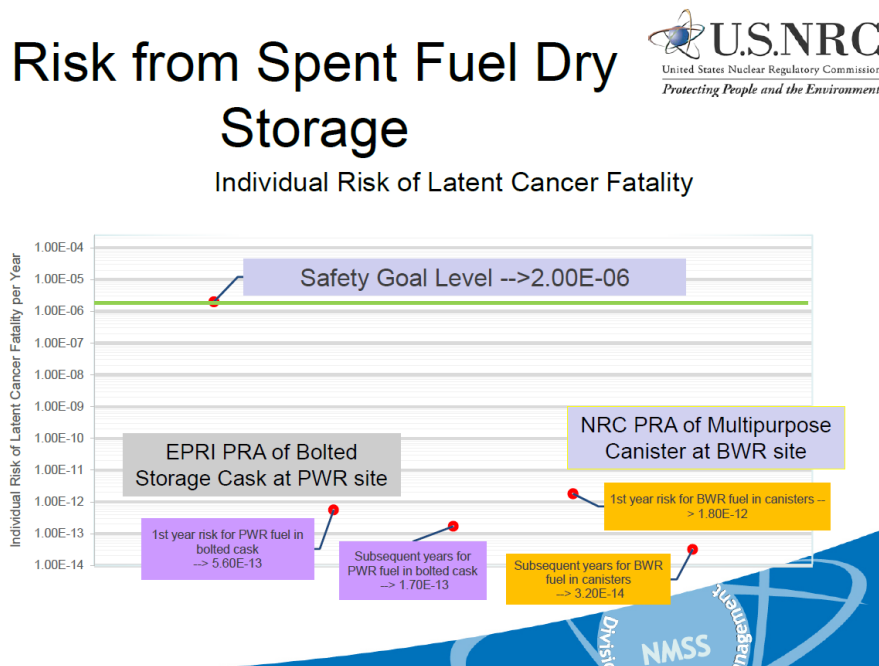


圖 1、EPRI 與 NRC 針對用過核子燃料乾式貯存設施風險評估之結果

用過核子燃料完整性探討

乾式貯存作業在進行排水乾燥的程序時，須確保乾式貯存密封鋼筒內達到乾燥狀態後，再灌入惰性氣體後進行密封，然而在美國有部分核電廠於乾式貯存排水乾燥作業過程中，偵測到分裂氣體，故在經歷這些事件後，NRC 開始思考用過核子燃料的完整性判斷法則是否確實完善？在乾化作業的過程中是否會導致燃

料護套發生嚴重破損(grossly rupture)？同時也認為目前在燃料完整性判斷的導則上仍有不明確的地方，且部分可能可用以判斷之資料屬於廠家機密。在 NRC 的立場上，將致力於乾式貯存運轉經驗的聯繫溝通，並精進燃料挑選導則及其技術基礎，以避免乾式貯存作業期間發生非預期的分裂氣體釋放、增加輻射工作人員工作劑量和非必要的豁免申請等情事。

在 NRC 之燃料完整性分類導則(ISG-1)中，定義了非破損燃料(undamaged fuel)和破損燃料(damaged fuel)兩種，非破損燃料代表其燃料棒和組件可以符合燃料特定和系統相關的要求，在燃料護套的表現上有完整(intact)和輕微裂隙(breached)兩種，輕微裂隙表示燃料護套上存在有針孔洩漏或髮絲裂隙，但內部燃料物質無法大量釋放出來；破損燃料則代表其燃料棒和燃料組件無法符合燃料特定和系統相關的安全要求，燃料護套上若有大於 1mm 的裂隙，則屬於嚴重破損(grossly breached)。

目前可透過以下方法來進行用過核子燃料之完整性檢驗：

- 檢視爐心運轉紀錄，可應用於 PWR/BWR
- 目視檢驗(Visual Inspection)，可應用於 PWR/BWR
- 吊桿啜吸檢驗(Mast sipping)，為 Areva 公司技術，可應用於 PWR/BWR
- 吊桿中啜吸檢驗(In-mast sipping)，為西屋公司技術，可應用於 PWR
- 望遠鏡啜吸檢驗(TELESCOPE sipping)，為西屋公司技術，可應用於 PWR/BWR
- 真空啜吸檢驗(vacuum can sipping)，可應用於 PWR/BWR
- 燃料束內個別燃料棒超音波檢驗(Individual-rod (in-bundle) ultrasonic testing)，可應用於 PWR/BWR
- 個別燃料棒渦電流檢驗(Individual-rod eddy current)

若爐心運轉紀錄顯示僅有氣體或揮發性的衰變物質(沒有重金屬同位素)，則表示為燃料護套之裂孔狀況不會超過針孔洩漏或髮絲裂隙的程度；超音波檢驗與

啜吸檢驗可用來分辨燃料護套為完整或輕微裂孔；而目視檢驗僅被接受用來判斷嚴重破損，若能直接從護套裂孔處直接觀察到內部燃料丸的表面，即為嚴重破損。

NRC 整理了 ANO 核電廠 2014 年案例的經驗回饋，該電廠在進行用過核子燃料乾貯作業過程時，其中一個乾式貯存密封鋼筒在 FDH 乾燥過程中偵測到分裂氣體後，顯示密封鋼筒內的用過核子燃料護套有破損的狀況，在暫停乾貯作業後立即安裝緊急通風系統，過濾處理從護套釋放出來的放射性氣體。此密封鋼筒內裝有 24 束 PWR 燃料，其中有 13 束是來自於有 GTRF (Grid to Rod Fretting，格架－燃料棒微振磨損，此為 PWR 核電廠才可能發生之現象，BWR 核電廠之燃料有燃料匣包覆，不會發生此現象)疑慮週期的燃料，原先被分類為非破損燃料，但此次事件發生後基於保守性原則被重新分類為破損燃料。由於此乾式貯存系統之原設計並沒有被核准可貯存破損燃料，ANO 核電廠在重新評估人員劑量和再取出重新裝筒之風險後，向 NRC 申請豁免並獲同意依照現有狀況繼續進行乾式貯存作業。

NRC 重新檢視了 ANO 核電廠的超音波檢驗歷史，發現此次超音波檢驗的可靠度未達 94%，且 2004 年時曾對該廠之超音波檢驗數據作二次複查，發現有 5 束應該分類為破損燃料的用過核子燃料，被誤歸類為非破損燃料進行乾貯，分別貯存於 4 個乾式貯存護箱中，已於 2005 年時申請豁免同意。NRC 認為，用過核子燃料護套在乾式貯存乾操作業降壓過程中失效的可能性較低，造成前述事件之原因應為 ANO 核電廠的超音波檢驗可靠度過低，因此 ANO 核電廠往後不再使用 UT 檢驗作為燃料分類之依據。

在 2013 年 EPRI 破損燃料檢驗和經驗回饋報告(Failed Fuel Inspection and Lessons-Learned Practices, report# 1026831)中整理了幾個用過核子燃料超音波檢驗可能產生誤判的原因：(1)在超音波檢驗的高程位置上，燃料棒內沒有水；(2)燃料丸與護套間的作用形成多個回聲訊號導致判讀困難；(3)燃料護套上的積垢/氧

化層和燃料棒彎曲/幾何形狀改變等現象，可能導致超音波傳感器未校準/信號衰減。

未來 NRC 將針對進行乾式貯存用過核子燃料完整性檢驗之標準審查計畫 (Standard Review Plan, SRP) 進行修改，此外也將重新評估 ISG-1 Rev.2 中關於嚴重破損(gross ruptures)的定量定義，同時拓展技術基礎至高燃耗燃料。另，藉由發展技術基礎來支持乾式貯存作業乾燥過程不會使非嚴重破損(non-gross breaches)的燃料護套劣化成嚴重破損之論述，並持續和 EPRI 合作，以建立用過核子燃料完整性檢驗方法的特性與限制之導則。

美國 Sandia 國家實驗室(以下簡稱 Sandia)

乾式貯存密封鋼筒在裝入用過核子燃料封鋸密封後開始貯放，在鋸道周圍會留下殘留應力，若乾式貯存設施位於海岸邊或含有較高鹽分的環境，不鏽鋼材料有發生應力腐蝕劣化(Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking, CISCC)之可能。此過程可分為三個階段(如圖 2)：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，因環境鹽分和濕度的影響，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，使孔蝕產生初始劣化(crack initiation)；第三階段為裂隙成長(crack growth)，裂隙成長速率僅能用實驗數據和環境狀況來評估。

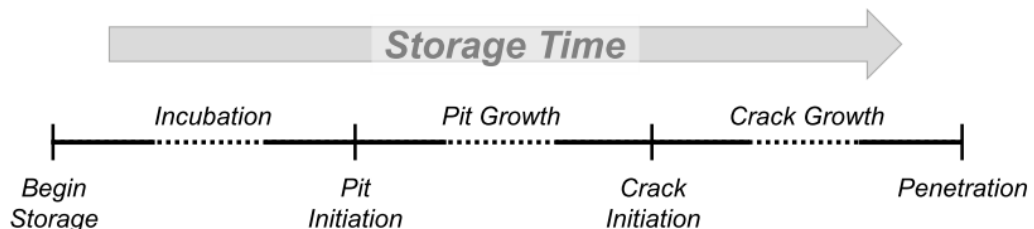


圖 2、應力腐蝕裂隙成長過程

Sandia 為提升預測應力腐蝕裂隙在密封鋼筒上可能產生穿牆裂隙的時間與位置之能力，從三個方向進行研究：(1)加強瞭解鹽分潮解之物理和化學性質；(2)

建立材料表面環境與損傷(孔蝕和應力腐蝕)分布及速率之關係；(3)建立材料特性和應力環境之定量腐蝕關係。鹽分的潮解與環境的溫濕度息息相關，一般認為當鹽分處在濕度滿足潮解相對濕度(DRH)的環境才會開始潮解，亦可認為達到其潮解點(Deliquescence Points)才會開始作用，如圖 3(海鹽並非由單一鹽分所組成，而是多種鹽分之混合物且隨環境不同而改變)。

Deliquescence points:

Salt composition	Mineral	DRH
Ca-SO ₄	gypsum, anhydrite	>99%
Mg-SO ₄	four different hydrates	93-84%
NaCl	halite	77%
KMgCl ₃ :6H ₂ O	carnallite (±sylvite)	55-49%
MgCl ₂ :6H ₂ O	bischofite	36-29%
MgCl ₂ :6H ₂ O + other salts:	bischofite + other salts	~Same as MgCl ₂ :6H ₂ O

圖 3、各鹽類潮解所需之相對濕度(DRH)

然而 Sandia 認為實驗室中的數據，並不一定能代表實際環境狀況，主因為通風換氣量之差異，氣流中的二氧化碳和水氣量會影響鹽分潮解反應，實驗室中受限於實驗儀器，無法模擬實際貯存狀況，因此 Sandia 目前規劃以孔蝕試片和調整應力參數的應力腐蝕試片，放置在實際乾式貯存場環境中，以瞭解會形成初始裂隙點的腐蝕狀況特徵，並分析孔蝕試片，針對 304 系列不鏽鋼材料在表面有海鹽條件下進行陰極掃描，以此建立由氯鹽離子引起最大孔蝕程度之模型，將相關研究成果推展至後續應力腐蝕的研究上。

美國能源部(Department of Energy, 以下簡稱 DOE)

DOE 之 SBIR(Small Business Innovation Research)計畫，委託 IOS 公司(Intelligent Optical Systems, INC.)建立應力腐蝕檢驗技術。IOS 公司提出利用 LUT(Laser Ultrasonic Testing，雷射超音波檢驗)來檢驗應力腐蝕現象，LUT 工作元件概略如圖 4：

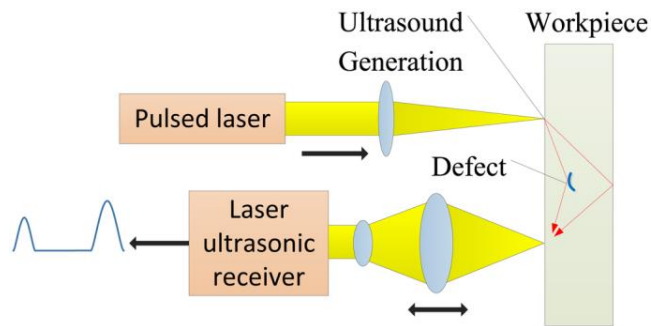


圖 4、LUT 工作元件示意圖

LUT 工作元件有兩個雷射發射探頭，第一個雷射探頭會發出雷射脈衝以激發材料表面產生熱震盪，熱震盪效應會產生超音波；第二個雷射探頭用於偵測材料表面的超音波信號。測得之超音波信號可透過頻譜輸出圖形，進行頻率響應分析，以計算出材料表面裂隙的幾何深度。LUT 超音波信號於材料表面之傳遞特性示意如圖 5。

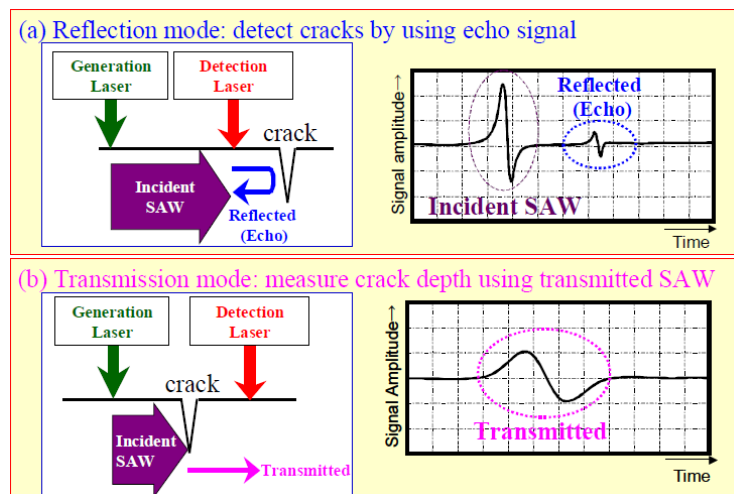


圖 5、LUT 超音波信號於材料表面之傳遞特性示意圖

IOS 公司於本次會議發表第一/二階段的 LUT 應用測試結果，其測試共針對四種試驗樣品（該計畫 IOS 公司尚未公開發佈，樣品量測結果限制公開）：

- (一)EDM(Electrical Discharging Machining)陣列刻痕的不鏽鋼鋼板 (DOT 前期計畫樣品)
- (二)鋼管的應力腐蝕試樣(DOT 前期計畫樣品)

(三)EDM 窄縫刻痕試樣(本次 EPRI 計畫樣品)

(四)實際使用於流體的疲勞裂化(Fatigue Crack)試樣

LUT 在工業界已有應用經驗，已知的工業檢驗含括晶圓、航太複合材料與無縫鋼管的厚度量測，其中因為 LUT 可線上執行檢驗的特性，無縫鋼管檢驗的 LUT 應用作為廣泛成功；業界亦有 PWR 電廠使用 LUT 進行爐心的 BMI(Bottom Mounted Instrumentation)檢測。LUT 的優點如下：

- (一)雷射產生/超音波信號接收的特性，檢驗過程不需接觸受檢材料；
- (二)不受材料表面幾何特性限制，可檢驗各種彎曲、粗糙及受腐蝕材料；
- (三)可精確量測材料表面腐蝕或裂孔的深度；
- (四)雷射產生/超音波信號傳遞由光纖纜線傳遞，光纖纜線之可撓性使得 LUT 有優異的機動性，可在侷限空間內執行。

此外，LUT 亦可伴載雷射修補技術(例如使用雷射脈衝消除表面殘餘應力，避免應力腐蝕現象產生)，搭配 LUT 檢驗同步執行線上維護或修補，目前業界初步的 LUT 應用修護策略如圖 6。

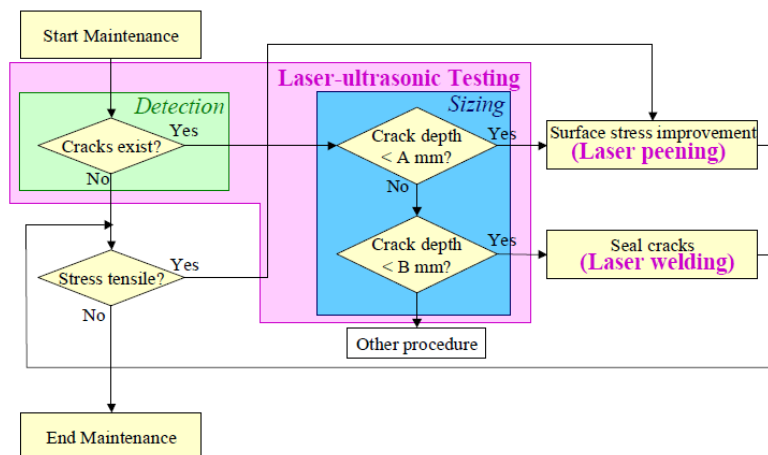


圖 6、LUT 初步應用修護策略之示意圖

業界 LUT 應用的近期發展，目標為整合雷射珠擊(Laser Peening)與雷射焊接(Laser Welding)，與 LUT 檢驗同步執行即時維護。IOS 公司針對應力腐蝕檢驗的

下階段 LUT 應用目標為：

- (一)提升材料表面破裂深度量測的精準度；
- (二)評估破裂劣化的影響；
- (三)開發微型的 LUT 光纖設備及探頭；
- (四)整合 LUT 於移動搭載設備；
- (五)於 EPRI 標準模擬程序，執行 LUT 全系統的功能測試。

美國橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory, 以下簡稱 ORNL)

ORNL 正在進行一項先期的概念性研究：研發一套可移動式的乾式貯存檢測及修補設備。開發這套系統的構想主要也是來自於，解決乾式貯存延長貯存所可能衍伸的問題，目前乾式貯存設施如果要延長貯存，則必須提出老化管理計畫及週期性檢查計畫，意即須具備預防、檢查及修補乾式貯存系統的能力。但目前核電廠陸續除役，用過核子燃料池也隨著核電廠除役而拆除，而乾式貯存密封鋼筒大多數的運貯、維護甚至修補作業都必須使用到用過核子燃料池，因此在面臨未來沒有用過核子燃料池的狀況下，這種可移動式的檢測及修補設備將有其必要性。

預期此設備將具有以下功能：

- (一)不須重大修改即可容納各式密封鋼筒進行各項作業；
- (二)可在廠區內簡易組／拆裝且維持堅固性，並可在不同貯存設施上移動；
- (三)為電腦控制的半自動設備；
- (四)移動便利。

此設備包含四個系統：

- (一)維修系統：提供商業上可行的修復方法與技術，使系統回到可接受的狀態。
- (二)檢驗系統：提供商業上的檢測、定位及確認維修區域完整性的非破壞檢驗功能。
- (三)再包裝系統：提供將用過核子燃料移至其他乾式貯存護箱之功能。
- (四)結構屏蔽系統：提供結構完整性及輻射屏蔽之功能。

美國電力研究院(Electric Power Research Institute, 以下簡稱 EPRI)

EPRI 為因應未來眾多的乾式貯存設施延長使用需求，持續積極整合美國各大電力公司、國家實驗室、乾式貯存系統廠家以及檢測載具製造公司，發展使用遙控載具(類似小型的磁輪車機器人，示意如圖 7)搭載非破壞性檢測設備進入乾式貯存系統之檢查之技術，非破壞性技術包含：目視檢測、渦電流檢測、超音波檢測、電磁感應檢測、聲波檢測、X 光檢測、穿透檢測、熱成像檢測以及繃子(muon)影像檢測等。

在美國各相關單位的合作協助下，EPRI 已經在五個地點完成了現地實驗，分別為：

- (一) Areva 公司的 Aiken Facility；
- (二) APS 公司的 Palo Verde 核電廠；
- (三) Duke Energy 公司的 McGuire 核電廠；
- (四) 3 Yankees 公司的 Maine Yankee 核電廠；
- (五) Southern Company 公司的 Hatch 核電廠。

EPRI 表示，透過每次的現地實驗模擬，可不斷精進非破壞性檢測的整體技術，包括檢測技巧以及載具功能等，待整體技術逐漸成熟後，預計在 2018 年開始實際檢測裝載用過核子燃料的乾式貯存護箱。



圖 7、非破壞性檢測載具

三、問題與答復

本公司人員針對會議報告內容與公司關心事項，提出四項問題請教 EPRI 相關專家，依據渠之回復及會中討論內容，彙整說明如下：

- (一)針對乾式貯存設施使用之不鏽鋼密封鋼筒，有關觸發應力腐蝕之閾值，目前最新研究成果為何？是以電腦程式模擬或是進行實驗而得？美國核管會(NRC)是否有針對此觸發值訂定相關法規或規定？

答復：在美國並沒有針對應力腐蝕訂定觸發的閾值，美國核管會亦無規定，在 EPRI 的乾式貯存老化管理研究中，氯離子濃度高低只代表影響應力腐蝕產生的敏感度及可能性，並沒有所謂絕對會產生應力腐蝕的低限值，未來將在貯存一定年限後，透過各種檢查技術來確認乾式貯存不鏽鋼密封鋼筒的貯存情形，若情況可接受則准予繼續延長貯存，若有劣化情形，則依照建議的方法進行修補加強後，再經檢查才准予繼續延長貯存。

- (二)目前在美國是否有乾式貯存設施在檢查後發現應力腐蝕現象？

答復：EPRI 目前所發展之非破壞性檢測技術，係利用可移動之載具(類似小型的磁輪車機器人)，搭載攝影機，經由乾式貯存系統混凝土護箱／模組之通風口進入其中，對不鏽鋼密封鋼筒表面進行目視檢查，在目前的攝影機解析度下，

檢查了 Maine Yankee 核電廠之乾式貯存系統後，尚無發現有應力腐蝕現象存在。

(三)當發現乾式貯存不鏽鋼密封鋼筒有孔蝕或劣化時，是否已經有修補的技術？
這些技術有包含銲接嗎？

答復：在美國，已經有發展許多修補不鏽鋼密封鋼筒的技術，包含冷噴塗法(cold spray)及銲接等，但目前都還在發展階段，尚未進入商用階段，且依照最新的檢查結果，也還沒有在現存的乾式貯存密封鋼筒表面發現孔蝕或其他劣化現象。

(四)在美國，是否有考慮使用其他抗腐蝕性較佳的材料來製造乾式貯存之密封鋼筒？有針對這些材料去進行氯鹽沉積及腐蝕的研究嗎？

答復：據 EPRI 了解目前並沒有更換材料的規劃，在美國，對於乾式貯存的概念是，不論未來貯存多久，只要依照法規，在限定的時間透過各種檢查方法，確認乾式貯存系統的狀況是否符合安全性且可否繼續貯存後，若是則繼續下一階段的貯存，若否則進行修補措施，直到通過檢驗後再繼續貯存。

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，並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，可藉由參加本次會議，更了解目前世界對應力腐蝕研究的現況與我國未來的發展方向與需求。
- 三、有關美國應力腐蝕的研究，目前持續進行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，以及各項預防及修補技術的精進。
- 四、經過會議中的討論過程，可以很明顯地發現美國對於核能或是各種工業界的要求準則，即只要經過相關的專家審查及程序確保安全性無逾，就可以繼續使用的概念。除了本次會議主題，核能界的乾式貯存延長貯存議題可以具體表現出這個概念外，在紐約市地底下默默運作了百餘年的龐大地鐵系統亦是如此。紐約市的地鐵歷史悠久，一年 365 天每天 24 小時不停歇地為來自世界各種國家各種行業的人們行駛著，即使有入口狹小、電梯數稀少、設施老舊、牆壁滲水、軌道生鏽、環境衛生條件不佳等外觀上之瑕疵，人們仍舊心無罣礙地搭乘。因為地鐵系統仍會維持整體運轉的安全性，例如利用離峰時間、假日及半夜進行維護保養，維持列車可正常運作，而一旦出現問題，也會馬上調度其他班車來支援，至於外觀，只要不影響安全功能，並不會多花費資源。與我國相比，的確有相當大的不同，也部分體現出西方世界與東方世界的文化差異。

五、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，而這次冬季會議議程共三天半且參加人數較多(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：

- 一、美國在乾式貯存設施走向延長貯存之趨勢下，老化管理議題日趨受到重視，並逐漸朝精進檢查與修補技術方面發展，建議本公司未來可持續參加本會議，以了解國際間乾式貯存老化管理及延長貯存須注意之議題，並借鏡其發展技術與經驗。
- 二、針對本公司核電廠人員部分，建議儘早決定擬派之與會人員，於會前先了解前次探討議題項目，統籌並篩選出可運用於核電廠之技術議題以及探討電廠實務可能面臨之問題，再於 EPRI 會議中提出予同業專家討論，更能裨益於電廠之實務應用。
- 三、本 ESCP 會議議題雖然係針對乾式貯存計畫，但有些相關研究議題之工程技術，亦可應用於運轉中之核電廠維護。與會人員之選派，或相關資訊之傳遞，建議可不必限於乾式貯存或除役相關人員。

附件 1 會議議程



Potential Consequences of Dry Storage Aging Mechanisms Workshop DRAFT AGENDA

EPRI Charlotte Office, 1200 West WT Harris Blvd
Charlotte, North Carolina 28262

November 13, 2017

DATE: MONDAY, NOVEMBER 13, 2017		
TIME	TOPIC	PRESENTER
1:00 p.m.	Welcome – Objectives and expected outcomes	Hatice Akkurt (EPRI)
1:05 p.m.	Dry cask storage welded stainless steel canister breach consequence analysis scoping study and planned CISCC leak rate modeling	Shannon Chu (EPRI)
1:45 p.m.	Dry cask storage fuel database – Material at risk (MAR)	John Scaglione (ORNL)
2:00 p.m.	NRC perspectives	Meraj Rahimi (NRC)
2:20 p.m.	Consequence analysis	Sam Durbin (SNL)
2:40 p.m.	Opportunities for research	Charles Bryan (SNL)
3:00 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	Dose Consequence Panel Discussion - Problem statement - Population of interest - Scenario of interest - Conditions of interest - Exposure pathways (submersion, inhalation, ingestion) - Input assumptions - Future research	Panelists: - Al Csontos (EPRI) - Facilitator - Kaushik Banerjee (ORNL) - Meraj Rahimi (NRC) - Sylvia Saltzstein (SNL) - Suzanne Leblang (Entergy)

EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 14-16, 2017 – Charlotte, NC

DRAFT AGENDA

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

DATE: TUESDAY, NOVEMBER 14, 2017		
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)
8:40 a.m.	DOE data gap report update	Brady Hanson (PNNL)
9:05 a.m.	ENSA/DOE transportation test summary	Paul McConnell (SNL)
9:35 a.m.	Demonstration of integrity of Zr-4 spalled fuel during transportation	Ana Muñoz Sicilia (ENUSA)
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Response of spent fuel rods to external mechanical loads under accidental conditions	Dimitrios Papaioannou (JRC-Karlsruhe)
10:50 a.m.	High burnup demo test update and sister pin test plan	Sylvia Saltzstein (SNL)
11:15 a.m.	Sister rod test results to date	R. Montgomery, B. Bevard, and Yan (ORNL)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Spent fuel cladding performance during drying	Ricardo Torres (NRC)
1:30 p.m.	Experimental determination and modeling of used fuel drying by vacuum and gas circulation for dry cask storage	Travis Knight (USC)
1:50 p.m.	Investigation of spent fuel properties under conditions relevant for dry storage, transportation and handling: project goals and progresses	Stefano Caruso (NAGRA)
2:10 p.m.	Fuel fragmentation R&D and implications to used fuel storage and transportation	Robert Daum (EPRI)
2:30 p.m.	Update for spent fuel integrity evaluation R&D activities in Korea	Donghak Kook (KAERI)
3:00 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	Subcommittee Meeting - Fuel assembly subcommittee - Mitigation/Repair subcommittee	
6:00-8:00 p.m.	ESCP Reception – Hilton Charlotte University 8629 JM Keynes Drive, Charlotte, North Carolina, 28262, USA	

EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 14-16, 2017 – Charlotte, NC

ESCP Fuel Assembly Subcommittee Meeting

DATE: TUESDAY, NOVEMBER 14, 2017		
TIME	TOPIC	PRESENTER
3:30 p.m.	Welcome and agenda review	Mike Billone (ANL)
3:35 p.m.	Annealing discussion	Mike Billone (ANL)
4:10 p.m.	Rewetting discussion	Mike Billone (ANL)
4:40 p.m.	Update on end-of-life rod internal pressures	Mike Billone (ANL)
5:30 p.m.	Adjourn	

ESCP Mitigation/Repair Subcommittee Meeting

DATE: TUESDAY, NOVEMBER 14, 2017		
TIME	TOPIC	PRESENTER
3:30 p.m.	Welcome and introductions	Dana Couch (EPRI)/Gary Cannel (Fluor)
3:40 p.m.	Evaluation of mitigation/repair options	All
4:45 p.m.	Discussion	All
5:30 p.m.	Adjourn	

EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 14-16, 2017 – Charlotte, NC

DATE: WEDNESDAY, NOVEMBER 15, 2017		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Continental Breakfast	
8:00 a.m.	SNL CISCC R&D update	Charles Bryan and Eric Schindelholz (SNL)
8:25 a.m.	CISCC pit to crack transition studies	Jennifer Locke (Ohio State)
8:45 a.m.	Pitting initiation and growth testing	Zhen Yu (Colorado School of Mines)
9:05 a.m.	Multimodal nondestructive dry cask basket structure and spent fuel evaluation	Josh Gladden (University of Mississippi)
9:25 a.m.	NEUP IRP: Robotic inspection of dry storage casks	Cliff Lissenden (PSU)
9:45 a.m.	Update on EPRI NDE activities	Jeremy Renshaw (EPRI)
10:05 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Diagnostics of CISCC using laser ultrasonics	Marvin Klein and Max Wiedmann (Intelligent Optical Systems)
10:50 a.m.	Results from six years of atmospheric monitoring at Maine Yankee	Paul Plante (Maine Yankee)
11:10 a.m.	Canister monitoring via acoustic emission	Bruce Greer (EPRI)
11:40 a.m.	In-situ robotic canister containment mitigation/repair	Edward Petit de Mange (Diakont)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	NRC activity update	Yaira Diaz-Sanabria (NRC)
1:25 p.m.	Evaluating canister repair technologies to address stress corrosion cracking	Nicholas Klymyshyn (PNNL)
1:45 p.m.	Cold spray stress corrosion crack repair and prevention	Kyle Johnson and Quentin Goley (VRC Metal)
2:05 p.m.	Addressing postulated canister confinement boundary degradation during extended storage at SONGS	Randall Granaas (SONGS)
2:25 p.m.	MERF – A mobile examination & remediation facility for on-site repair of dry storage systems	S. Chatzidakis and J. Scaglione (ORNL)
2:45 p.m.	Review of day 2	Hatice Akkurt (EPRI)
3:00 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	Subcommittee Meetings - Thermal modeling subcommittee - NDE followed with CISCC subcommittee	

EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 14-16, 2017 – Charlotte, NC

ESCP Thermal Modeling Subcommittee Meeting

DATE: WEDNESDAY, NOVEMBER 15, 2017		
TIME	TOPIC	PRESENTER
3:30 p.m.	Welcome and introductions	Aladar Csontos (EPRI)/ Sam Durbin (SNL)
3:40 p.m.	Thermal modeling subcommittee path forward	All
5:30 p.m.	Adjourn	

ESCP NDE Subcommittee Meeting

DATE: WEDNESDAY, NOVEMBER 15, 2017		
TIME	TOPIC	PRESENTER
3:30 p.m.	Welcome and introductions	Jeremy Renshaw (EPRI)
3:40 p.m.	NEUP updates and discussion	Jeremy Renshaw (EPRI) and NEUP PIs
4:00 p.m.	NDE activities discussion	Jeremy Renshaw (EPRI)/All
4:20 p.m.	Path forward	All
4:30 p.m.	Adjourn	

ESCP CISCC Subcommittee Meeting

DATE: WEDNESDAY, NOVEMBER 15, 2017		
TIME	TOPIC	PRESENTER
4:30 p.m.	Welcome and introductions	Shannon Chu (EPRI) /Paul Plante (Maine Yankee)/Bob Sindelar (SRNL)
4:40 p.m.	Stochastic risk based inspection methodology for ISFSI	Zeev Shayer (Colorado School of Mines)
5:00 p.m.	CISCC R&D roadmap	All
5:20 p.m.	Path forward	All
5:30 p.m.	Adjourn	

EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 14-16, 2017 – Charlotte, NC

DATE: THURSDAY, NOVEMBER 16, 2016		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Continental Breakfast	
8:00 a.m.	Overview of international subcommittee activities	Jose Conde (ENUSA)
8:10 a.m.	IAEA activities on ageing management programmes for dry storage systems	Paul Standring (IAEA)
8:35 a.m.	Overview of NEA report on long term storage	Jose Conde (ENUSA)
9:00 a.m.	Spent fuel management and research activities in Korea	Woo-seok Choi (KAERI)
9:20 a.m.	Temperature distribution of used nuclear fuels in the dry storage system using rod base calculation	Kwangheon Park (KHU)
9:40 a.m.	Thermal modeling	Aladar Csontos (EPRI)/Sam Durbin (SNL)
10:00 a.m.	BREAK	
10:30 a.m.	Thermal modeling panel • Yoira Diaz-Sanabria (NRC) • Brady Hanson (PNNL) • Miriam Lloret (ENUSA) • Zita Martin (TVA)	Panel Co-Chairs: Aladar Csontos (EPRI)/Sam Durbin (SNL)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Update on long-term investigations of metal seals at BAM and future perspectives of spent fuel management in Germany	Holger Völzke (BAM)
1:25 p.m.	Update on CRIEPI's studies of dry storage	Masumi Wataru (CRIEPI)
1:50 p.m.	Drying/dry storage of AGR fuel	David Hambley (NNL)
2:10 p.m.	Review and discussion on demonstrating fuel cladding integrity during extended interim storage regarding future safety assessment in Germany	Teresa Orellana Pérez (BAM)
2:30p.m.	R&D needs for research reactor fuel panel • Nigel Motte (NWTRB) • Michael Connolly (INL)	Panel Chair: Paul Murray (AREVA)
3:00 p.m.	BREAK	
3:30 p.m.	ESCP subcommittee reports – NDE	Jeremy Renshaw (EPRI)
3:45 p.m.	ESCP subcommittee reports – CISCC	Shannon Chu (EPRI)
4:00 p.m.	ESCP subcommittee reports – Mitigation/Repair	Dana Couch (EPRI)
4:20 p.m.	ESCP subcommittee reports – Fuel Assembly	Michael Billone (ANL)
4:40 p.m.	ESCP subcommittee reports – Thermal Modeling	Aladar Csontos (EPRI)
5:00 p.m.	ESCP and subcommittee general discussion • Subcommittee Health • Resolution of data gaps • Future ESCP Meetings	Hatice Akkurt (EPRI)
5:30 p.m.	Adjourn ESCP meeting	

附件 2 相關照片



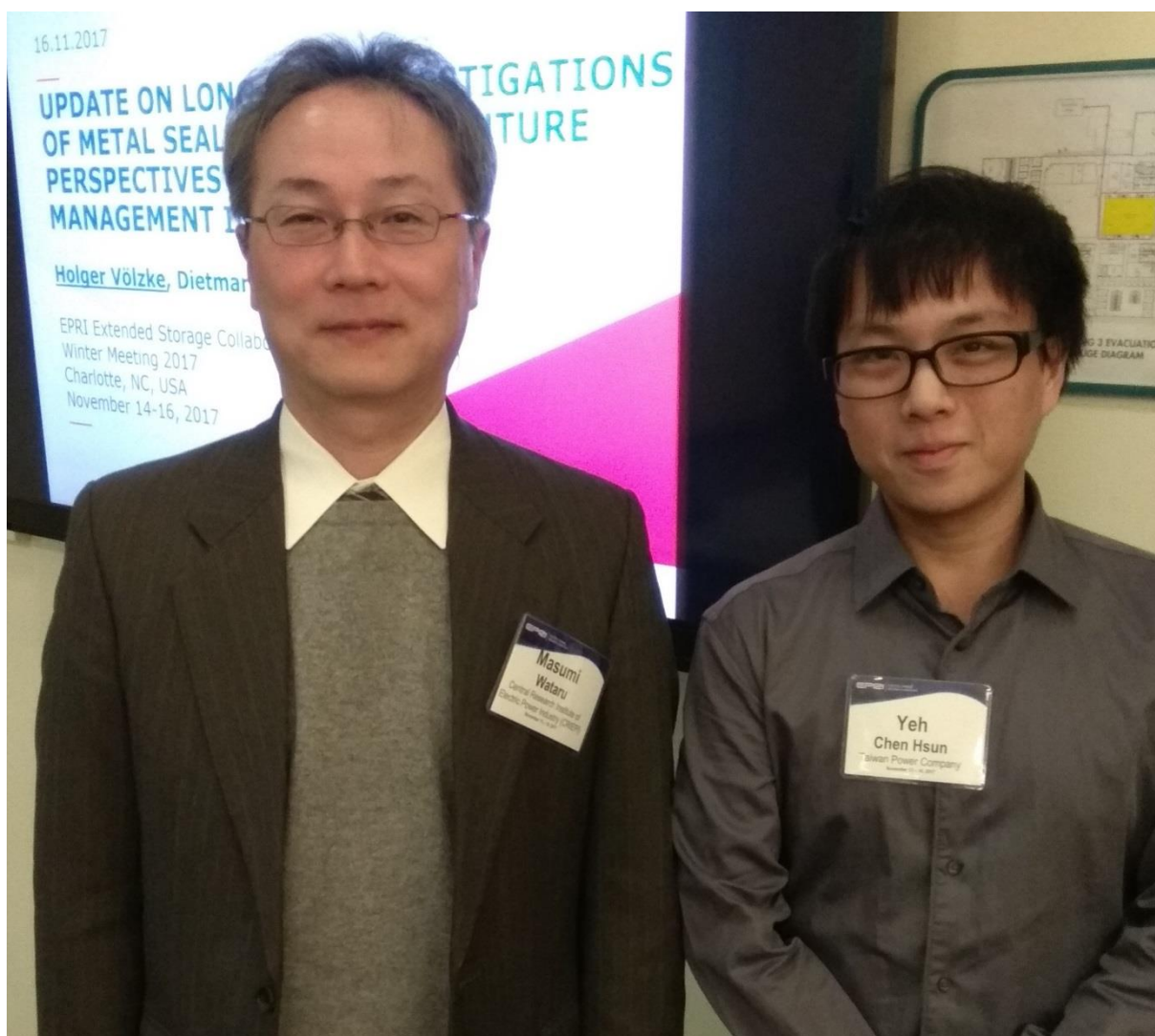
EPRI 會議室照片



EPRI 辦公室外照片



本公司人員與 EPRI 人員合影照片



本公司人員與日本 CRIEPI Wataru 博士合影