

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

參加美國 EPRI 舉辦之「2022 ESCP(Extended Storage Collaboration Program)研討會」

頁數 31 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/服務機關/單位/職稱/電話

陳俊宇/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#12288

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：111.11.05 ~111.11.13

派赴國家/地區：美國

報告日期：111.12.07

關鍵詞：

用過核燃料、用過核燃料最終處置、應力腐蝕、乾式貯存老化管理

內容摘要：

ESCP 研討會其主要功能是以 EPRI 為推動中心，以用過核燃料長期安全貯存處理為主軸，建立平台與各參加成員分享最新之相關研究成果及討論共同進步。本次主要議題包含：1.美國能源部(DOE)針對利用雙重功能密封鋼筒(DPC)直接進行最終處置之可行性研究及規劃，由桑迪亞國家實驗室(SNL)主導，成員包含多個國家實驗室。2. DOE、美國核能管理委員會(NRC)、國際原子能總署(IAEA)等機構對於目前用過核燃料研究及規劃的相關狀況更新，以及各方相關研究成果。3.用過核燃料貯存老化管理最新研究，以及應力腐蝕(SCC)相關現象乾貯系統實際開蓋檢驗結果更新。4.國際間相關國家(含德國、瑞典、日本等)，分享最新之研究成果及相關貯存處置規劃。

本次行程參與用過核燃料長期貯存合作計畫研討會，相關之目的、過程、及心得與建議，於本報告中敘述之。

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

出國報告(出國類別：開會)

參加美國EPRI舉辦之「2022 ESCP(Extended Storage Collaboration Program)研討會」

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：陳俊宇/乾式貯存技術分析專員

派赴國家/地區：美國

出國期間：111.11.05 ~ 111.11.13

報告日期：111.12.07

一、 摘要

ESCP 研討會其主要功能是以 EPRI 為推動中心，以用過核燃料長期安全貯存處理為主軸，建立平台與各參加成員分享最新之相關研究成果及討論共同進步。本次主要議題包含：1.美國能源部(DOE)針對利用雙重功能密封鋼筒(DPC)直接進行最終處置之可行性研究及規劃，由桑迪亞國家實驗室(SNL)主導，成員包含多個國家實驗室。2. DOE、美國核能管理委員會(NRC)、國際原子能總署(IAEA)等機構對於目前用過核燃料研究及規劃的相關狀況更新，以及各方相關研究成果。3.用過核燃料貯存老化管理最新研究，以及應力腐蝕(SCC)相關現象乾貯系統實際開蓋檢驗結果更新。4.國際間相關國家(含德國、瑞典、日本等)，分享最新之研究成果及相關貯存處置規劃。

二、 目次

一、 摘要.....	1
二、 目次.....	2
三、 目的.....	3
四、 過程.....	4
五、 研討會關注重點內容整理.....	8
(一) 不開啟密封鋼筒情況下，直接進行最終處置之可行性研究.....	8
(二) DOE 目前研究計畫整理.....	13
(三) 福島事件後用過核燃料開蓋檢查結果.....	16
(四) PNNL 針對用過核燃料熱循環實驗的第一階段實驗成果.....	18
(五) Calvert Cliffs 電廠針對乾貯護箱檢查檢果.....	20
(六) 針對乾式貯存長期貯存下密封鋼筒延緩/修復技術發展.....	22
(七) 應力腐蝕相關機制研究.....	27
六、 心得及建議.....	30
(一) 心得.....	30
(二) 建議.....	31

三、 目的

本次出國係參加 2022 年 EPRI 用過核燃料長期貯存合作計畫研討會(ESCP)，會議時程為 2022 年 11 月 7 至 10 日於美國北卡羅來納州舉行，會議期間針對用過核燃料長期貯存相關研究主題進行討論，包含：熱傳分析、應力腐蝕、非破壞檢測技術、老化管理等，於會中與各會員成員交流經驗、分享心得，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。

四、 過程

行程共計 9 天，11 月 5 日由桃園國際機場出發，搭乘長榮航空公司班機至美國紐約甘迺迪國際機場(JFK)，次日抵達北卡羅萊納州首府夏洛特市。

於 11 月 7 日至 11 月 10 日期間，參加 2022 年 Electrical Power Research Institute(EPRI)用過核燃料長期貯存合作計畫研討會，議程如圖 4-1~4-4，會場照片如圖 4-5、4-6。

11 月 11 日由夏洛特機場出發返國，11 月 12 日於甘迺迪國際機場轉機，次日抵達我國桃園國際機場。行程如表 4-1 所示：

表 4-1 出國行程表

日期	活動內容
111.11.05-06	去程（台北 — 紐約 — 夏洛特）
111.11.07-10	參加 2022 EPRI Extended Storage Collaboration Program 研討會
111.11.11-13	返程（夏洛特 — 紐約 — 台北）

**WORKSHOP ON DIRECT DISPOSAL
DRAFT AGENDA**

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

DATE: MONDAY, NOVEMBER 7, 2022		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Breakfast/Registration	
8:00 a.m.	Welcome, Overview of ESCP, and Review of Workshop Agenda	Hatice Akkurt (EPRI)
8:15 a.m.	DPC Disposal Overview	T. Gunter (DOE)
8:45 a.m.	Operational, Cost, Engineering, Thermal Management	G. Freeze (SNL)
9:15 a.m.	Reactivity Margins	K. Banerjee (PNNL)
9:45 a.m.	BREAK	
10:15 a.m.	Post-Closure Criticality Consequence	L. Price (SNL)
10:50 a.m.	Post-Closure Quasi-Static Criticality Consequence	G. Davidson (ORNL)
11:30 a.m.	Injectible Fillers - Cements	M. Rigali (SNL)
12:00 p.m.	LUNCH	
1:00 p.m.	Injectible Fillers - Molten Metals	J. Fortner (ORNL)
1:30 p.m.	Neutron Absorber Corrosion Performance Testing	R. Repukaiti (INL)
2:00 p.m.	Loading Pattern Optimization	J. Clarity (PNNL)
2:30 p.m.	Independent Technical Review Observations	S. Bader (Orano)
3:00 p.m.	BREAK	
3:30 p.m.	Direct Disposal Panel <ul style="list-style-type: none"> • T. Gunter (DOE) • L. Price (SNL) • K. Banerjee (PNNL) • S. Bader (Orano) 	Moderator: TBD
5:00 p.m.	Closing Remarks	Hatice Akkurt (EPRI)
5:30 p.m.	Adjourn	

圖 4-1

November 7-10, 2022 – Charlotte, NC

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

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

DATE: TUESDAY, NOVEMBER 8, 2022		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Breakfast/Registration	
8:00 a.m.	Welcome, Overview of ESCP, and Review of Agenda	Hatice Akkurt (EPRI)
8:15 a.m.	Status of DOE R&D for Spent Nuclear Fuel	Ned Larson (DOE)
8:30 a.m.	Looking to the Future for DOE R&D for Spent Nuclear Fuel	Scott Sanborn (SNL)
8:45 a.m.	NRC Updates	Carrie Safford (NRC)
9:15 a.m.	IAEA Updates	Christoph Gastl (IAEA)
9:35 a.m.	DOE ATF/LEU+/HBU Program Overview and Update	Bill McCaughey (DOE)
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Industry ATF/LEU+/HBU Program Overview and Update	Al Csontos (NEI)
10:55 a.m.	Westinghouse ATF/LEU+/HBU Program Updates	Ben Maier (Westinghouse)
11:15 a.m.	Framatome ATF/LEU+/HBU Program Updates	Jeff Reed (Framatome)
11:35 a.m.	GEH ATF/LEU+/HBU Program Updates	Rich Augi (GEH)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Update on NMSS Fuel Activities	Jason Plotter (NRC)
1:25 p.m.	Fuel Inspection After Re-opening of the DCS at Fukushima – After Earthquake and Tsunami	Hideaki Matsumoto (TEPCO)
1:50 p.m.	JRC Updates on Fuel Failure Tests and Consequence	Vincenzo Rondinella (JRC)
2:15 p.m.	Investigations at BAM on Fuel Cladding Integrity and DPC Seal Performance	Uwe Zencker (BAM)
2:40 p.m.	Updates on Sister Rod Testing & Plans for Phase II	Brady Hanson (PNNL)
3:05 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	Subcommittee Meetings <ul style="list-style-type: none"> • Fuel Assembly Subcommittee • Modeling and Benchmarking Subcommittee 	
6:00-8:00 p.m.	ESCP Reception – Hilton Charlotte University 8629 JM Keynes Drive, Charlotte, North Carolina, 28262, USA	

圖 4-2

EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 7-10, 2022 – Charlotte, NC

DATE: WEDNESDAY, NOVEMBER 9, 2022		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Continental Breakfast	
8:00 a.m.	Calvert Cliffs Inspection Results	Jack DeSando (Constellation)
8:20 a.m.	SONGS Inspection	Randall Granaas (SONGS)
8:45 a.m.	Assessment of Recent Inspections	Jimmy Burns and Rob Kelly (UVA)
9:20 a.m.	Aging Management Program in Spain	Javier Fernandez (ENRUSA)
9:40 a.m.	NAC Aging Management Activities	Jay Wellwood (NAC)
10:00 a.m.	Break	
10:30 a.m.	Assessment of Coating Technologies for Mitigation of CISCC	Jon Tatman (EPRI)
10:55 a.m.	Use of Coatings and Cold Spray to Prevent and Remediate Stress Corrosion Cracks	Rebecca Schaller & Andrew Knight (SNL)
11:20 a.m.	Path Forward Plan for Cold Spray R&D	Ken Ross (PNNL)
11:40 a.m.	EPRI Mitigation & Repair Activities	Shannon Chu (EPRI)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	ASME Code Case Updates	Jon Tatman (EPRI)
1:15 p.m.	Canister Deposition Field Demonstration Project	Steve Ross (PNNL)
1:35 p.m.	Possible Aerosols Through Hypothetical Cracks	Sam Durbin (SNL)
2:00 p.m.	TBD	TBD
2:30 p.m.	TBD	TBD
3:00 p.m.	Break	
3:30-5:30 pm	Subcommittee Meetings <ul style="list-style-type: none"> Aging Management/Canister Integrity Subcommittee 	

圖 4-3

EXTENDED STORAGE COLLABORATION PROGRAM

November 7-10, 2022 – Charlotte, NC

DATE: THURSDAY, NOVEMBER 10, 2022		
TIME	TOPIC	PRESENTER
7:30 a.m.	Continental Breakfast	
8:00 a.m.	Development and testing of the hydrogen behavior tool for Falcon – HYPE	Piotr Konarski (PSI)
8:20 a.m.	Hydrogen Diffusion in Zirconium Alloy at the Scale of a Full-length Rod	Marc Péridis (BGZ)
8:40 a.m.	Structural Integrity Investigations of Guide Tubes After Long-term Dry Interim Storage	Stathis Vlassopoulos (NAGRA)
9:00 a.m.	Korean Maritime Transportation Test	Woo-seok Choi (KAERI)
9:25 a.m.	Transportation of Irradiated Nuclear Fuel Between Reactor Sites for Further Use	Fredrik Johansson (SKB)
10:00 a.m.	BREAK	
10:30 a.m.	SCIP IV status and the plans for SCIP V	Radomir Josek (Studsvik)
10:55 a.m.	BGZ's LEDA (Long term Experimental Dry storage Analysis) Program	Maik Stuke (BGZ)
11:15 a.m.	Decay Heat Update	Hatice Akkurt and Bob Hall (EPRI)
11:40 a.m.	Thermal Modeling Phase I Results and Phase II Planning	David Richmond (PNNL) and Maik Stuke (BGZ)
12:00 p.m.	Lunch	
1:00 p.m.	Updates on Advanced Reactors	Dan Moneghan (EPRI)
1:25 p.m.	Remote Sensors for Loaded SNF Canisters	Ryan Meyer (PNNL)
1:45 p.m.	Pulse Induction Coupled Temperature and Pressure Sensor System for Spent Fuel Assemblies in Dry Storage Casks	Shawn Stafford (Westinghouse)
2:05 p.m.	TBD	TBD
2:30 p.m.	TBD	TBD
3:00 p.m.	BREAK	
3:30 p.m.	Subcommittee Updates	
5:00 p.m.	Closing Remarks	Hatice Akkurt (EPRI)
5:30 p.m.	Adjourn ESCP meeting	

圖 4-4



圖 4-5

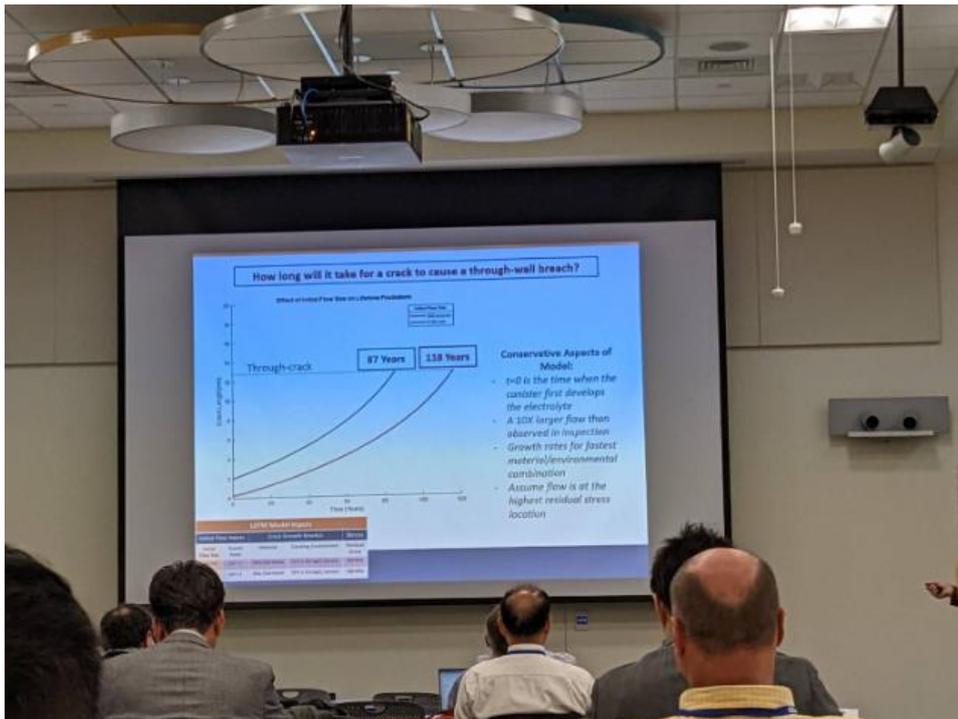


圖 4-6

五、 研討會關注重點內容整理

(一) 不開啟密封鋼筒情況下，直接進行最終處置之可行性研究

DOE 首先介紹一系列有關展開直接採取密封鋼筒(DPC)進行深地層最終處置之相關可行性研究成果及計畫，其目標主要係為美國提供更多的用過核燃料處置可行技術方案。DOE 已開使發展相關技術與工程工具以為計畫提供必要的技術支援，以及參考國際間相關經驗增加計畫推動可行性(圖 5-1)。

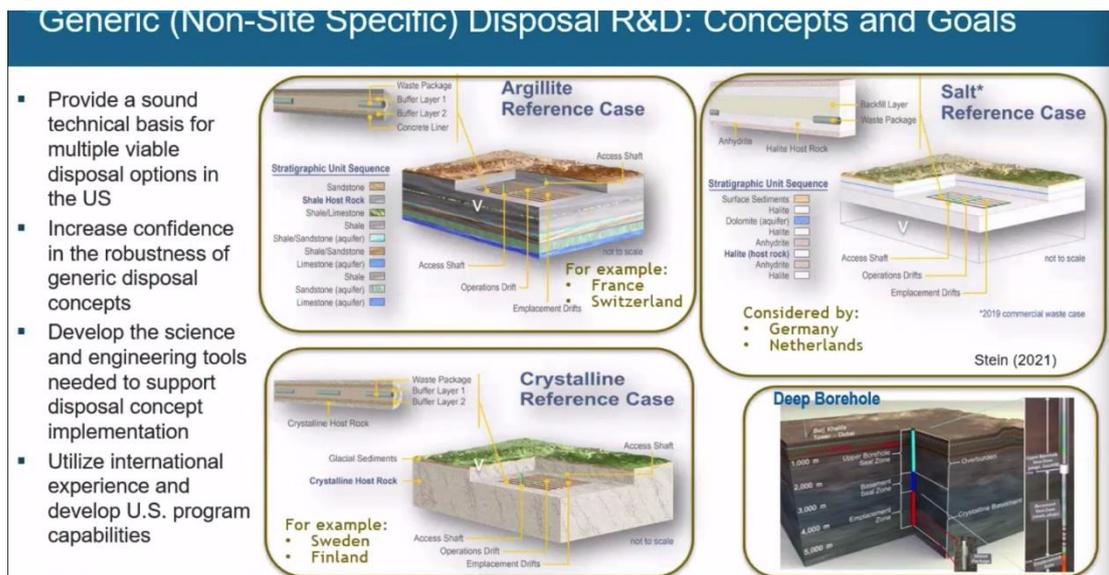


圖 5-1

DOE 提出本計畫主要考量點如下：

- 美國眾多電廠產生的大量用過核燃料需處理，到了 2075 年甚至有 10000 筒左右的數量；
- 比起再取出重新包裝，直接進行最終處置具有經濟效益、操作安全、風險可控的優點，人員劑量也更低(約減少 220~393 mrem/筒的集體劑量)。

原本密封鋼筒設計及授權目標為貯存及運輸雙重用途，並不包含最終處置。而此研究的目標就是希望可提出一個替代方案，不將現行商用的密封鋼筒開蓋將燃料再取出，直接外套一層處置容器(overpack)進行最終處置。故研究團隊由桑迪亞國家實驗室(SNL)主導，成員包含：美國國家橡樹嶺實驗室(ORNL)、愛德華國家實驗室(INL)、西北太平洋國家實驗室(PNNL)、洛斯阿拉莫斯國家實驗室(LANL)、勞倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL)，開始對於密封鋼筒的直接處置適用性展開研究。

DOE 認為未來直接採取密封鋼筒進行最終處置是可行的，但仍然有許多的技術挑戰需要逐一克服，包含：長期貯存下密封鋼筒內部組件劣化、燃料衰變熱的影響、處置場封閉後的臨界議題等。DOE 也盤點了適用於未來或現在的密封鋼筒可能改善方向條件 (圖 5-2)。

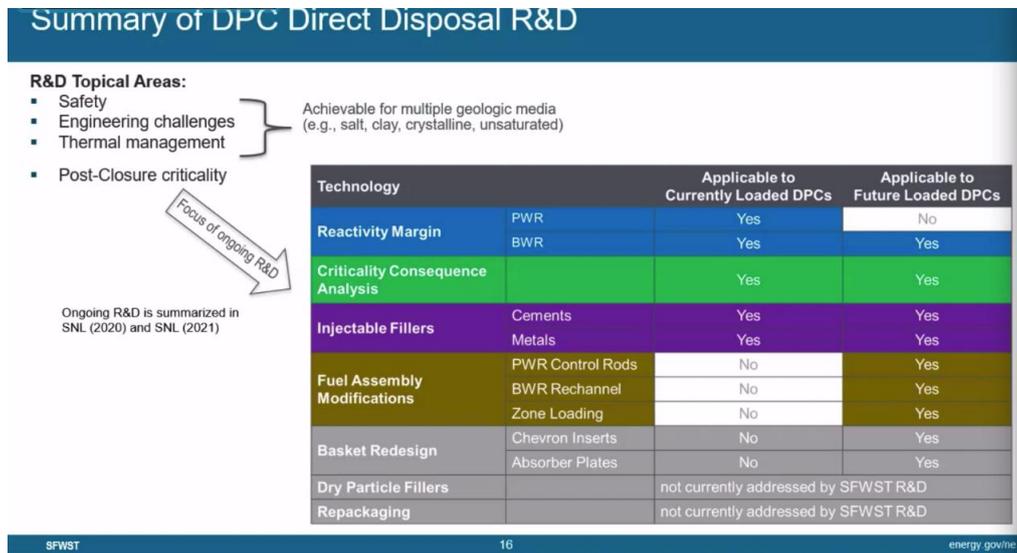


圖 5-2

而研究主導者 SNL 提出相關計畫的地質條件研究不僅限於 salt(亞卡山)，甚至包含但不限於 clay、crystalline、unsaturated 等岩層都是評估範圍，但是工程可行性、衰變熱以及封閉後的長期問題都是需要進一步評估的關鍵，不同的地質條件對於自然或工程的障壁有非常大的差異。另外，其未來相關的研究規畫包含：用過核燃料特性資料及模式建立(含衰變、核種、機械性質等)，核種遷移分析以及生物圈影響評估等，這些都會輔以開發程式進行結果分析(圖 5-3)。

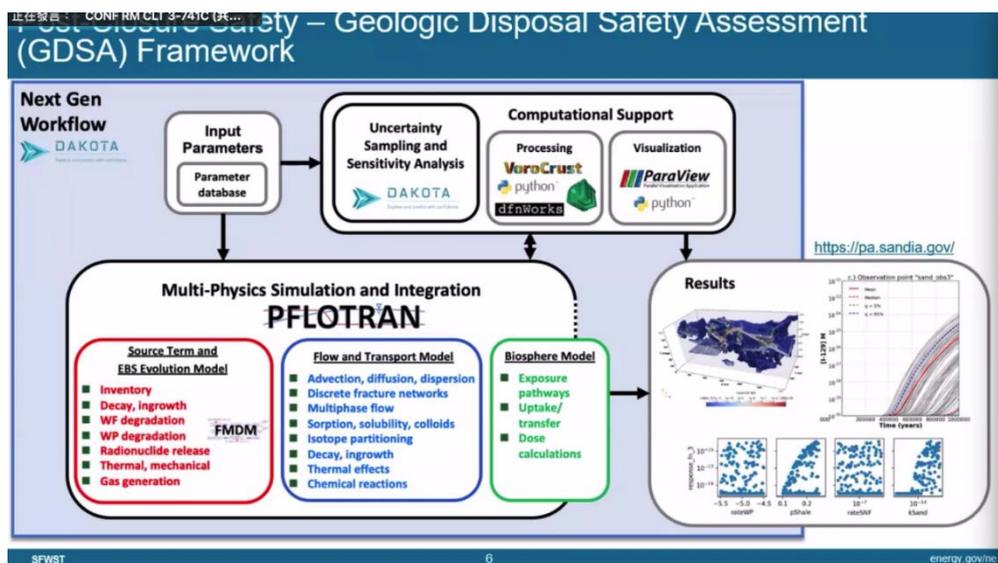


圖 5-3

除上述外，SNL 還提出一些需額外考量的因素，他們認為工程障壁的表現與下列特性息息相關：

- 密封鋼筒外包封處置容器(overpack)的結構及抗腐蝕能力；
- 密封鋼筒本身結構的使用壽命；
- 溫度對於處置坑道填充材料的影響。

SNL 亦先行選擇特定條件的案例進行初步分析(已貯存>100 年的乾貯系統)，發現熱對於處置場仍有緩慢的的老化影響，並整理了針對熱負載管控分析結果：

- 熱負載限制可以保護天然或工程障壁；
- 比起於處置階段時，於貯存或運輸階段就限制熱負載更為合適；
- 不同地質條件的可接受溫度不同如：crystalline (本身可承受超過 200 度，但受限於填充材只能 100 度~200 度)、clay(約能承受 100 度)等、salt(約能承受 270 度)；
- 如果在 salt/unsaturated/unbackfilled 的地質條件，可以處置冷卻小於 100 年的用過核燃料；如果在 argillite/ crystalline 等填充材佔主導地位的地質條件，則最好處置冷卻時間超過 150 年的用過核燃料。

SNL 認為安全及工程挑戰是可以滿足的，不過仍須注意熱負載管控以及封閉後的臨界評估。

PNNL 則是針對了兩種不同形式的提籃(egg crate 與 flux trap 圖 5-4)處置後，進行長期老化加上地下水入侵的嚴苛條件的臨界分析，其假設：

- 10000 年以上時間；
- 密封鋼筒內進水(無水則不會發生臨界)；
- 中子吸收材料完全失效；
- 燃料提籃損毀；

- 貯存受損燃料。

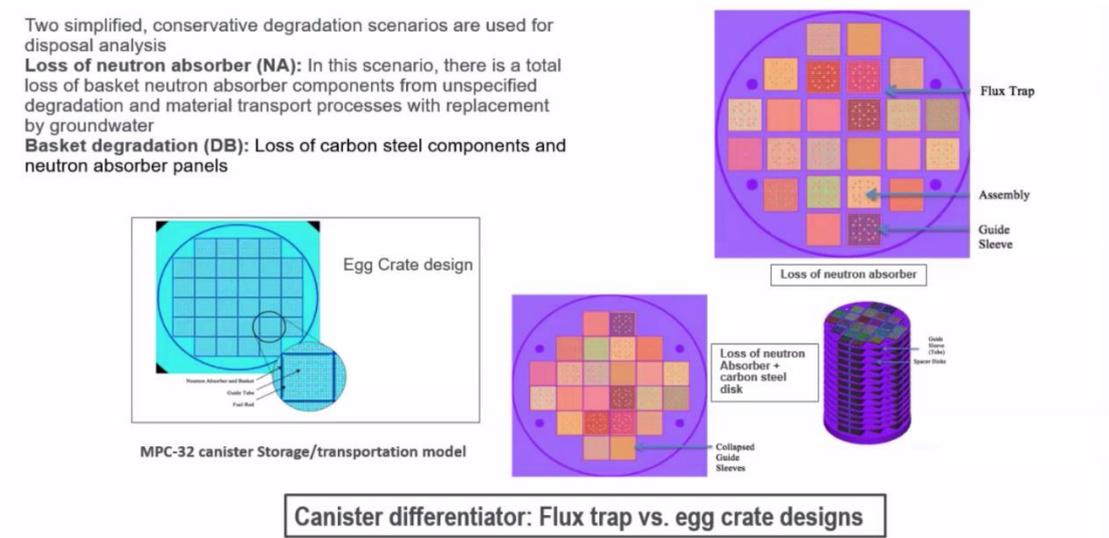


圖 5-4

經分析後 PNNL 提出 flux trap 結構在此極端條件下的表現比 egg crate 結構具有更高的反應裕度，而部分地質條件(clay、granite、crystalline)地下水含有 NaCl 成分，有助於抑低反應度。此研究可用於未來燃料組件、提籃組件、中子吸收材等使用材料改善上。PNNL 將朝減低模擬不準度方向精進，以及若於密封鋼筒填入填充材料(如水泥)進行評估。

此外，SNL 及 ORNL 開始著手進行地質條件、地下水、核種衰變、臨界、熱源及核種遷移的複合性分析，以探討對生物圈可能的輻射劑量影響(圖 5-5)。

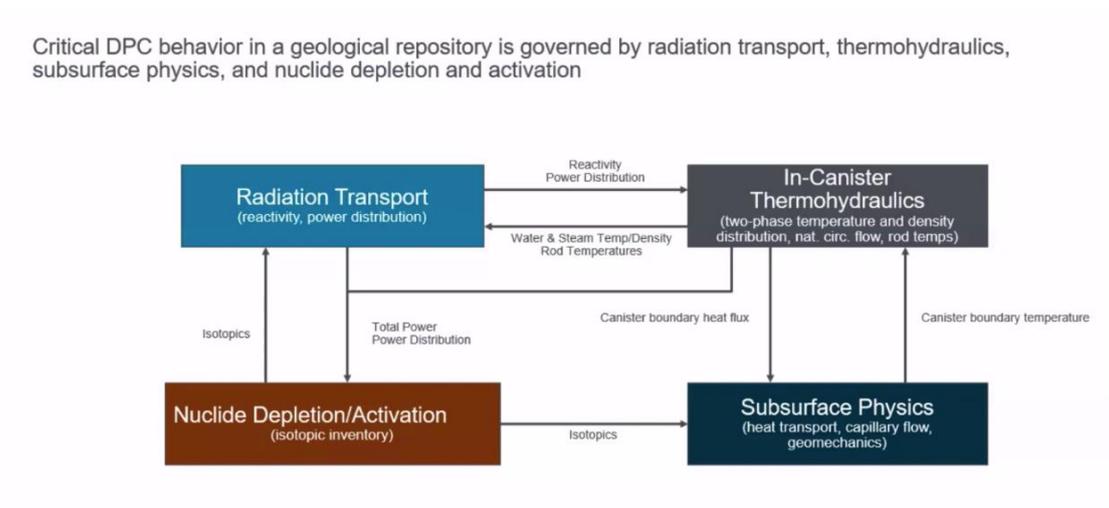


圖 5-5

除了模擬及分析方面，SNL、ORNL、PNNL 亦開始針對長期封閉處置下的穩定度發展硬體設備的研究和替代方案，目前提出密封鋼筒填入填充材料，以避免燃料因為受到地下水侵入造成的臨界可能性。此一研究主要目標為現行已使用的密封鋼筒，因為現行已貯存的密封鋼筒已

經無法利用重新設計，並更換內部組件使其具備更良好的抗老化能力。

其填充材主要包含：水泥(SNL 執行)、低熔點金屬(ORNL 執行)、特殊的顆粒填料(PNNL 執行)(圖 5-6)。這些材料須具備適用性、易於注入、不易產生氣體、長期化學穩定性、核種包覆性及減少中子緩速等特點。惟，相關的填充材料在使用上仍有各種挑戰待克服，如水泥具有需長時間凝固的特性，並且必須在高輻射下保持材料穩定性，故仍須測試更多的組成來選出適合的材料。此外，溫度也是重要的影響因素之一。



圖 5-6

(二) DOE 目前研究計畫整理

DOE 目前執行中的計畫：

- 高事故容忍性燃料(ATF)、先進反應器燃料、快滋生反應器燃料特性研究；
- 密封鋼筒貯存時的表面沉積物研究；
- 密封鋼筒表面沉積物分析模式建立(圖 5-7)；
- 乾貯護箱熱流模式建立與驗證
- 應力腐蝕研究(包含：環境分析、環境腐蝕實驗、應力腐蝕成長速率實驗，圖 5-8)；
- 裂隙擴散實驗(圖 5-9)；
- 全尺寸密封鋼筒模型實驗(包含加熱、乾燥、沉積物、冷噴塗等，圖 5-10)；
- 亞卡山計畫暫停後，提出了 Gap Analysis 來支持長期的用過核燃料貯存計畫；
- 高燃耗用過核燃料研究，包含於 North Anna 電廠的實際貯存實驗等，以了解高燃耗燃料的特性，目前取得的相關數據有助於作為高燃耗燃料長期貯存及運輸安全的基礎；

DOE 未來規劃：

- 持續發展貯存燃料棒對照比對實驗(持續高燃耗數據收集，並拓展至 ATF 等燃料數據蒐集)；
- 地震研究，規劃於 2024 年在 LHPOST UCSD(加利福尼亞大學戶外超大規模地震模擬設施)進行實驗(圖 5-11)，主要測試 HSM(混凝土模塊)結構、土壤互制機制、量化貯存時的地震影響等耐震數據，並建立地震分析模型；
- 持續進行應力腐蝕機制探討(包含環境影響、腐蝕速率等)、全尺寸沉積物分析模式以及密封鋼筒延緩老化/修復技術發展；
- 研究可預防應力腐蝕的覆膜(coating)技術；
- 燃料運貯作業中真空乾燥的熱循環對燃料影響研究；

CDFD Deposition Modeling

- Modeling Objectives:
 - Develop models which predict contaminant deposition on SNF canisters.
 - Incorporate realistic physical phenomenon:
 - Aerodynamic deposition, gravitational settling, thermophoresis, turbulent dispersion, droplet evaporation.

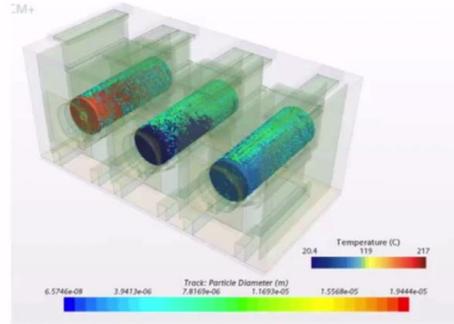


圖 5-7

Stress Corrosion Cracking

Canister surface environment controls corrosion susceptibility, pit growth, and SCC initiation and growth.

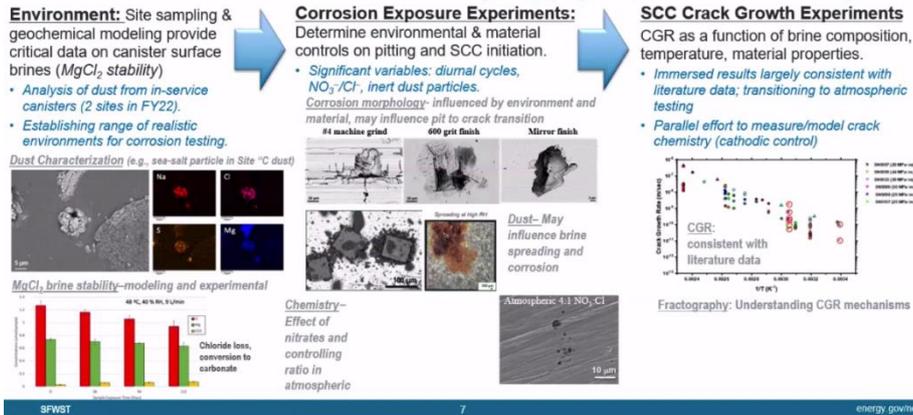


圖 5-8

Transmission of Aerosols Through Cracks

- Tests with linear slot orifice to represent SCC
 - Simplified microchannel
 - Linearly diverging from 13 to 25 µm
 - Aerosol mass transmission fraction from 0.1 to 0.8
- Lab-grown crack testing
 - Non-destructive characterization
 - Optical imaging
 - X-ray CT
 - Planned flow tests
 - Flow vs. pressure drop
 - Aerosol transmission

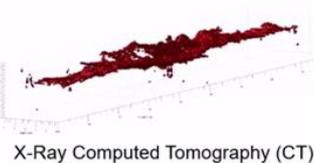
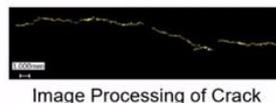
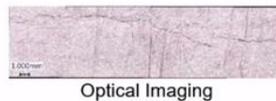
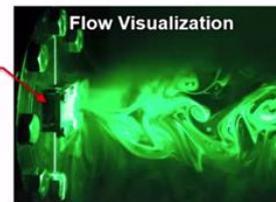
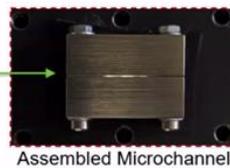


圖 5-9

Full-Scale Canister Testing

- DOE-NE supplied canisters
 - 6 TN-32PTH2 and 9 TN-24PT4
 - Delivered to SNL, PNNL, ORNL, and EPRI
- Several different research projects scheduled and proposed
 - Canister deposition sampling
 - Thermal and drying
 - Stress corrosion cracking
 - Seismic
 - Cold sprays
 - Filler (moderator exclusion)



SFWST

17

energy.gov/nc

圖 5-10

Next: Dry Storage Seismic Testing

Purpose: Quantify loads on fuel during seismic event and compare to HBU Mechanical Integrity

- Tests planned Feb. 2024 at UCSD LHPOST facility
- Steel-Concrete Friction data analysis report
- Soil-Structure Interaction (SSI) analyses & report for Horizontal Storage Modules (HSMs)
- Procuring domestic assembly and use of Korean assemblies through partnership
- Planning HSM base transfer to test facility
- Teaming with [NEUP project A Validated Framework for Seismic Risk Assessment of Spent Fuel Storage Facilities](#)
- Shake table simulations of the proposed time histories pre-test with UCSD – an input for final sets of time histories to be used in the test.
- Developing detailed test procedure that includes schedule, handling operations, on-site instrumentation, data acquisition, budget, and other information



11

energy.gov/nc

圖 5-11

(三) 福島事件後用過核燃料開蓋檢查結果

福島事件後，日本東京電力公司將福島核電廠中受到海水浸泡的 9 只原金屬運輸護箱，共 408 束用過核燃料貯存於臨海的外加混凝土模組中(圖 5-12)。近期，東電為了確保經過福島事件後護箱及內部燃料的貯存安全，針對其中一組護箱開蓋目視檢查 3 束燃耗較高的用過核燃料(圖 5-13)。



圖 5-12

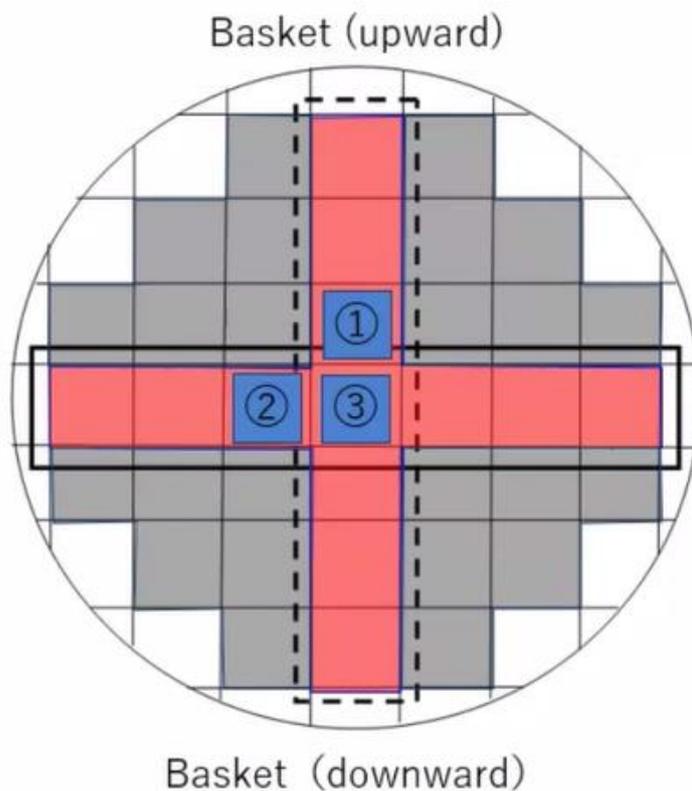


圖 5-13

經過檢查後，不論護箱內部提籃組件，或是進行目視檢查的燃料都沒有任何損壞或劣化的跡象，護箱內部的氬氣成分亦沒有明顯的變化，僅中子劑量在災害前後有些許改變。此外，為了預防應力腐蝕的可能性，東電對於護箱本體和二次蓋的表面做了液滲檢測，並沒有發現裂隙出現。

東電總結本次檢查結果：即使經過福島事件的地震衝擊及海水浸泡影響，9 只護箱不論是在臨界、熱傳、屏蔽、密封性和護箱內部的安全性都已經過確認，安全無虞。惟考量二次蓋部分因為材質使用鋁合金，有些微的氧化造成的白色沉積物，經過檢查後已進行替換。

(四) PNNL 針對用過核燃料熱循環實驗的第一階段實驗成果

PNNL 針對了 3 種不同的燃料棒進行了溫度變化影響的對照實驗，其 3 種不同的燃料護套包含：M5(由 AREVA 開發的含 1% 鈮的鋳合金)、Zr4 合金以及 ZIRLO(一種對於燃料和分裂產物有高耐腐蝕能力的先進鋳合金)。PNNL 針對其中一組樣品進行了預熱到 400 度並以小 5 度/小時速度降溫至 100 度的實驗，並事後針對燃料尺寸、氧化層厚度、氫含量、顯微硬度以及機械性質進行比對(圖 5-14)

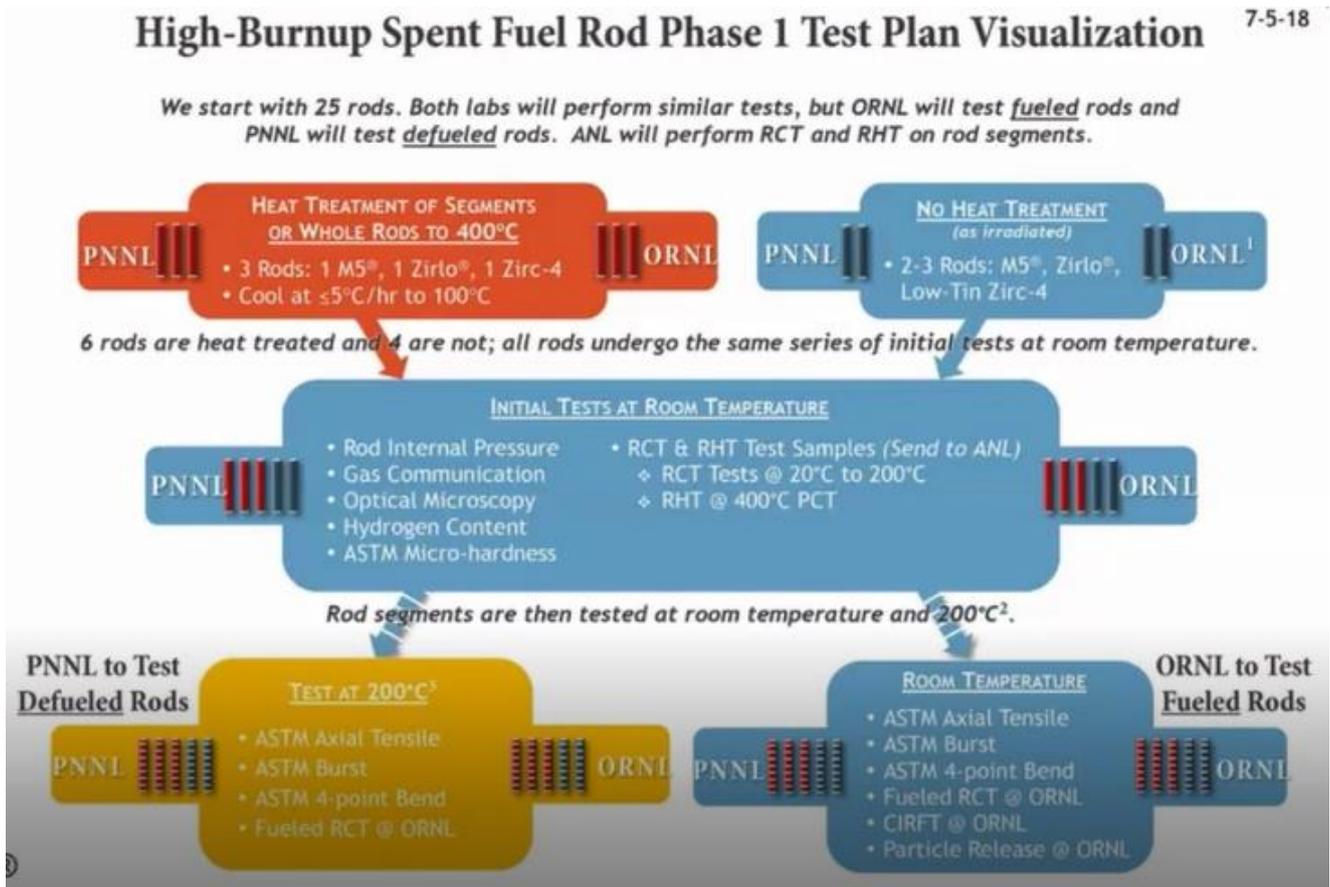


圖 5-14

另外，亦針對 M5 及 ZIRLO 進行了模擬真空乾燥過程的加熱實驗(以 10 度/小時溫升到 400 度後維持 8 個小時，並以 3.7 度/小時降溫)，過程中同步施以 6 個方向的加壓(圖 5-15)。最後比較其應力-應變曲線。

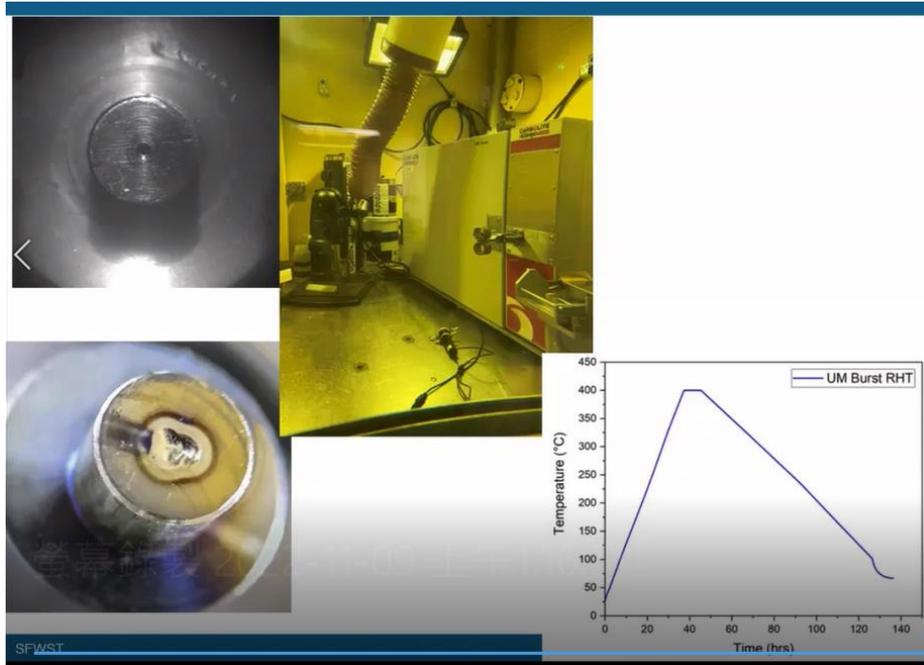


圖 5-15

經過第一段實驗後，PNNL 初步做出以下結論：

- 在同一根燃料棒中不同位置的氫含量差異非常明顯；
- 顯微硬度從底部到頂部開始遞減；
- 不管是經過預熱或是燃料熱循環模擬，顯微硬度都有所下降；
- 經過燃料熱循環後：韌性、降伏應力降低，彎曲剛度則差異不大；
- 位於樣品前端 1/4 處的測試結果與其他部位有些微不同；
- 推測降伏應力降低是因為降溫退火造成的材料疲勞；

PNNL 表示目前僅為初步的實驗數據展示，相關的結論及成果尚待正式報告發表。

(五) Calvert Cliffs 電廠針對乾貯護箱檢查檢果

2017 年 Calvert Cliffs 電廠針對混凝土模組進行了檢查後，於 2022 年再次檢查了混凝土模組的模組及內部相關結構，並進行 5 年間的貯存狀況比對(圖 5-16)。

檢查結果顯示混凝土模組表面狀況大致良好，並不影響結構及強度。另外混凝土結構內部組件部分狀況良好，只有在內部支撐架及接環部分油漆有些微侵蝕及表面鏽痕，但並沒有任何裂痕。而地下水樣品的檢測也都處於正常標準。

針對密封鋼筒檢測部分，Calvert Cliffs 電廠檢查了於 1993 年就開始貯存的第一筒密封鋼筒，因為其最低的熱負載，也是電廠中評估最容易受應力腐蝕影響的護箱。Calvert Cliffs 電廠對其進行了遙控車目視檢查以及將混凝土蓋卸除，以蒐集 5 年累積的表面沉積物樣品。其檢查結果顯示，除原本就存在因過去運貯作業或雨水造成的刮痕及污漬外，並沒有發現有任何的腐蝕及劣化跡象，且在五年間沉積物中的氯鹽濃度並沒有危害性的增加(圖 5-17~20)。

5-Year Inspection Techniques

- Inspection of the HSM interior and DSC were performed by remote visual inspection.
 - ✓ The PTZ camera was lowered through the HSM Rear Outlet Vent allowing for inspection of the DSC Top Cover Plate, DSC Shell, and HSM interior.
 - ✓ The HSM Door was raised a couple feet to allow for the PTZ camera to be inserted into the module for inspections of the DSC Bottom Cover Plate, HSM Door, and HSM Docking Collar.
- The door of HSM-1 was removed, and a shield plug was installed into the HSM to allow access for collecting DSC surface samples. The samples were taken, using the deposit sampling tool.



圖 5-16



EPR1 ESCP – 2022 Fall Update

Constellation

圖 5-17

DSC AMP Inspections

2022 5-Year DSC Inspection Results:

- DSC-1: No indications of crevice corrosion, heavy pitting corrosion or cracking in the material. The DSC had several scratches without active corrosion. The bottom of the DSC shell had multiple water marks. No new areas of concern and no changes or degradation from previous inspections.
- DSC-6: No indications of crevice corrosion, heavy pitting corrosion or cracking in the material. The DSC had several scratches without active corrosion. Some inactive rust stains were observed. No new areas of concern and no changes/degradation from previous inspections.
- The chloride concentrations remain below the SCC initiation threshold (Risk of CISC is Low). There is no deleterious increase in the chloride concentration identified in the 2022 inspection over the 2012 and 2017 inspections.



圖 5-18

DSC AMP Inspection (HSM 15, DSC 6)



DSC top cover plate/weld are in good condition with no signs of corrosion/cracking.

圖 5-19

DSC AMP Inspection (HSM 15, DSC 6)



Thick coat of dust on top of DSC shell.

圖 5-20

(六) 針對乾式貯存長期貯存下密封鋼筒老化延緩/修復技術發展

- NAC 發展冷噴塗技術

NAC 最早於 2017 於 EPRI 的研討會介紹了相關技術，並持續進行研究及發展。2020 年 NAC 進行了冷噴塗試片的腐蝕對照實驗。

冷噴塗係將一種鉻鎳合金(coupon)粉末加熱後在不鏽鋼上進行塗層的技术，NAC 進行的腐蝕實驗包含：316L 的沸騰氯化鎂實驗腐蝕 (圖 5-21)、電化學極化實驗(圖 5-22)、電位差腐蝕 (圖 5-23)、鹽霧實驗(圖 5-24)。經實驗後，發現經過冷噴塗處理後的試片皆有良好的抗腐蝕能力。此外，冷噴塗也可以很好的減緩殘留應力的存在。

不過目前的一些研究也發現，冷噴塗的過程可能會有一些因為局部高溫造成的游離鐵再分配，進而形成游離鐵團簇，而噴塗材料中的鐵成分與這些團簇的形成有顯著的影響。目前 NAC 正與製造商合作，希望可以使用鐵含量更低的材料成分改良冷噴塗技術。

- PNNL 於 2021 年為 NRC 撰寫了有關冷噴塗使用指引報告。

- EPRI 目前的研究及關注方向：

針對目前的密封鋼筒的老化延緩及修復技術發展，EPRI 也與眾多合作夥伴發表一系列相關研究成果，並提出了修復計畫的制定指引，包含處理銲接表面的關鍵技術及困難點、適用冷噴塗技術修復的案例、接受準則、檢查建議及驗證等。而 EPRI 經研究後亦提出經過冷噴塗後的銲接處可以有效減少殘留應力

除冷噴塗外，EPRI 也開始進行各項密封鋼筒老化的延緩/修復技術測試(實驗用設備及項目如圖 5-25 及圖 5-26)，並在進行修復後進行氬氣測漏。此外，更進一步測試了：

- 鹽霧的腐蝕實驗，再測試一次壓力測漏。
- 四種技術(冷噴塗、無機材料、電弧銲接、無機聚合材料)的慢速拉伸實驗。
- 電化學極化實驗中。
- 附著力實驗中。

EPRI 對於目前的測試進行總結：冷噴塗以及電弧銲接有最好的老化延緩/修復效果，而無機物塗層則是在所有非金屬材質的塗層中表現最好。未來將選擇冷噴塗、銲接以及無機物塗層進行下一階段的實驗。

除了直接的老化延緩/修復技術外，EPRI 亦進行其他方面的研究，包含：無水清潔技術(去除密封鋼筒表面的灰塵、腐蝕產物等)、研磨去除缺陷、分裂產物取樣技術等。EPRI 在發展利用遙控車拓展清潔、採樣、修復等技術。此外，未來 DTS(Dry Transfer System)也可能可以作為

密封鋼筒老化延緩/修復的支援設備。

- 南加州愛迪生公司發展了可佈署於乾貯現場的冷噴塗裝置(圖 5-27)，並在 SONGS 電廠測試成功。
- ASME Code 的規範案例 N-860 定義了密封鋼筒檢查的需求及流程，目前正在研擬冷噴塗等老化延緩/修復技術，未來可能也會納入 ASME Code 的案例中。

2020

Boiling MgCl (ASTM G36) testing

Bare 316 lasted less than 24 hours before cracking.



VS.

Coupons coated in Inconel lasted over 30 days without cracking

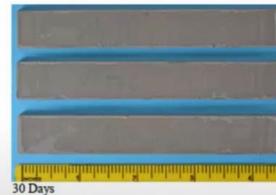
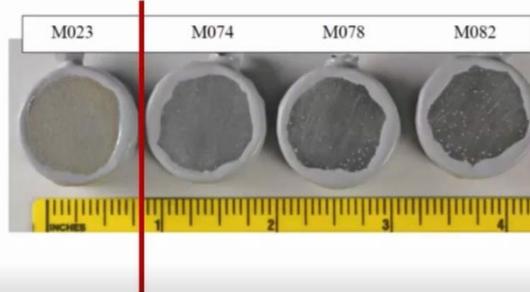


圖 5-21

2020

Electrochemical Polarization (ASTM G61) testing

The coupon coated with Inconel did not exhibit pitting corrosion even after probing with a dull instrument.



The uncoated 316 coupon exhibited pitting corrosion after the surface was probed with a Dull instrument.

圖 5-22

2020

The Galvanic testing (ASTM G71) of the Inconel coating demonstrated a low driving force for galvanic corrosion.

- E Gal < 50 mV between the Inconel
- Coating and the 316L base metal was noted by the testing Lab.
- Well below the recommended threshold of 200 mV.

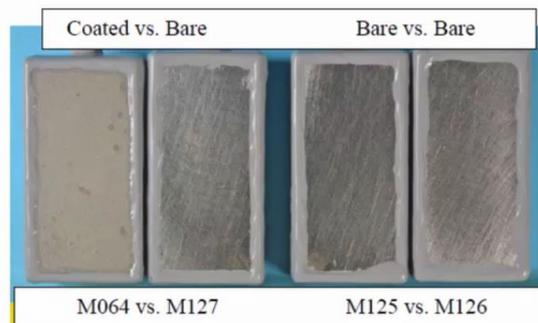
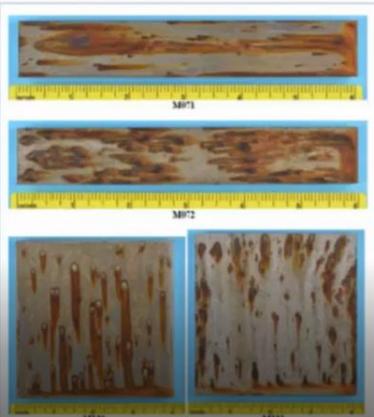


圖 5-23

2020

Salt Spray Testing (ASTM B117) of Inconel coated coupons revealed an unexpected condition after 360 hours of exposure.



But wait...

Inconel alloy designed to resist a wide range of severely corrosive environments and is especially resistant to pitting and crevice corrosion....?

圖 5-24

EPRI Phase 2 Demonstration Mockup



Mockup Concept for Spray Demo (courtesy of Restochem)



圖 5-25

Leak and Salt Fog Testing

- Several coating technologies tested, along with weld and cold spray repair
- Helium leak testing performed on cracked plates before and after coating application

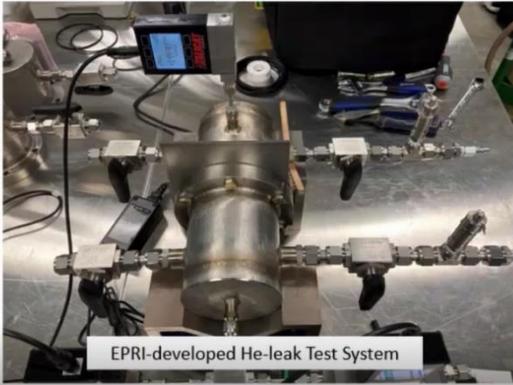
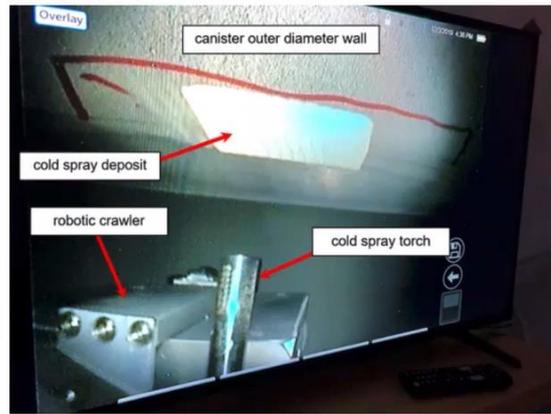


圖 5-26

SONGS Test Canister



Cold Spray Buildup within SONGS Test Canister



www.epri.com

© 2022 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

EPRI ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

圖 5-27

(七) 應力腐蝕相關機制研究

- 維吉尼亞大學的應力腐蝕速率推算分析：

維吉尼亞大學建立了藉由輸入環境、材料、貯存狀況、負重、時間、殘留應力等參數，模擬裂紋拓展與時間關係的公式(圖 5-28)，用以量化若發生應力腐蝕後的風險評估，相關參數連結的關係如圖 5-29 所示。

維吉尼亞大學目前試做了兩個案例的初步評估：

- 通用設定：材料為 304L，厚度 15.875mm，應力為 600Mpa(大於銲接可能的最大應力 450Mpa)，不論是濕度、溫度或氯鹽環境都以最適合應力腐蝕發展的條件進行設定，並假設初始應力腐蝕深度為 0mm；
- 分別設定：初始的缺陷分別假設為：0.3mm 以及 2mm。

其以 80%的密封鋼筒厚度作為蝕穿的評估點，跳過前面的應力腐蝕發生前置條件，直接以應力腐蝕發生作為初始點計算，依據分析結果維吉尼亞大學認為密封鋼筒即使發生應力腐蝕也不會有立即的安全風險，或者需要立即的因應行動。

此外，維吉尼亞大學亦分析了應力及可能發生應力腐蝕的必要缺陷尺寸，其認為大部分的區域要發生應力腐蝕的必要缺陷尺寸非常大，所以甚至無法發生應力腐蝕現象。

維吉尼亞大學認為目前的分析公式仍有可精進甚至是不完善的部分，其中有些參考文獻提供的機制及參數可能並不嚴謹，其次還有人因部分沒有考慮，以及缺乏彈性或適用性等。未來希望可以減少過度保守估算的部分，以及更精確的參數關聯性，並且期望未來可以發展風險量化並作為老化管理的參考。

- SNL 針對應力腐蝕機制研究：

SNL 主要研究重心在於發生應力腐蝕的機率，以及若發生應力腐蝕後，其裂紋生長的速率(圖 5-30)。SNL 用於分析的溫度資料主要源自於 Calvert cliff 電廠及 Diablo Canyon 電廠的實際貯存數據，相關數據亦結合場址的天氣溫度變化。SNL 認為在影響應力腐蝕裂紋成長速率的環境因素中，溫度扮演了重要的角色，而氯鹽的成分(NaCl 或 MgCl₂)則是對裂紋的型態有強烈影響。未來將持續進行更多的測試以更加了解及建立的影響因素，並且進行環境影響測試。

- PNNL 針對應力腐蝕機制研究：

PNNL 目前主要研究 300 系列的不鏽鋼材料於(1)浸泡氯鹽溶液、(2)氯鹽潮解濕度環境的裂紋成長速率。他們採用試片並以 4 點加壓方式進行加速實驗，相關實驗的環境因子包含：溫度、應力、氯鹽成分、氯鹽濃度等，以及不同材料(包含老化延緩/修復方式)的表現。他們希望可以藉由這些實驗取得環境因子影響的參考數據，以及進一步研發消除鹽分遷移至裂紋尖端影

響的方法。後續將設計可以自由替換氯鹽成分的實驗，以了解其特性(圖 5-31)。

目前的研究僅針對 $MgCl_2$ 及 $NaCl$ 兩種氯鹽成分進行分析，其結果顯示於鹽分潮解環境中，裂紋成長速率於 $MgCl_2$ 遠高於 $NaCl$ 環境。而浸泡於 $NaCl$ 溶液的腐蝕裂紋成長速率較處於潮解環境更為明顯。 $MgCl_2$ 的試片部分則尚在檢查中。

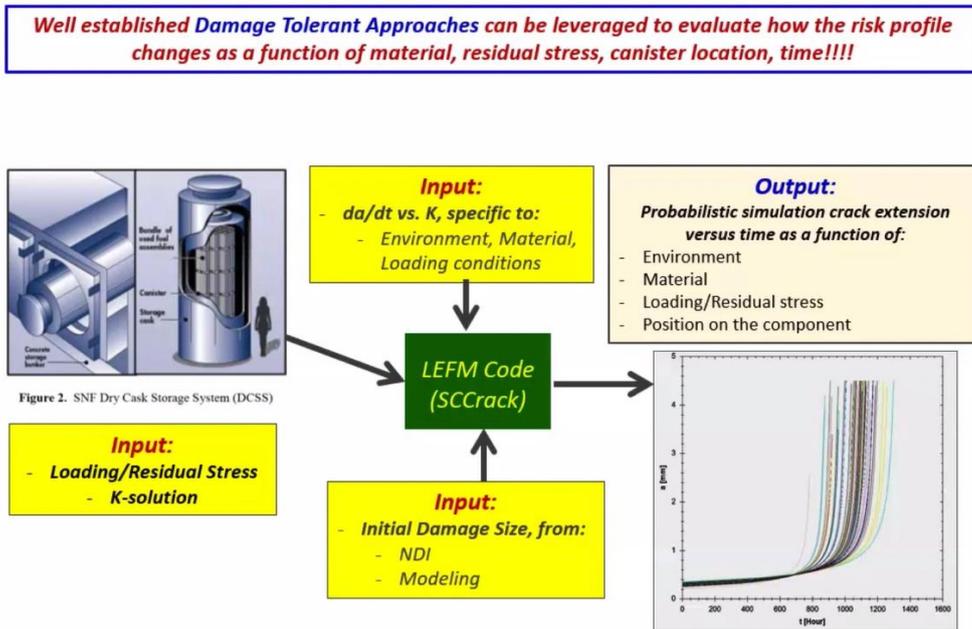


圖 5-28

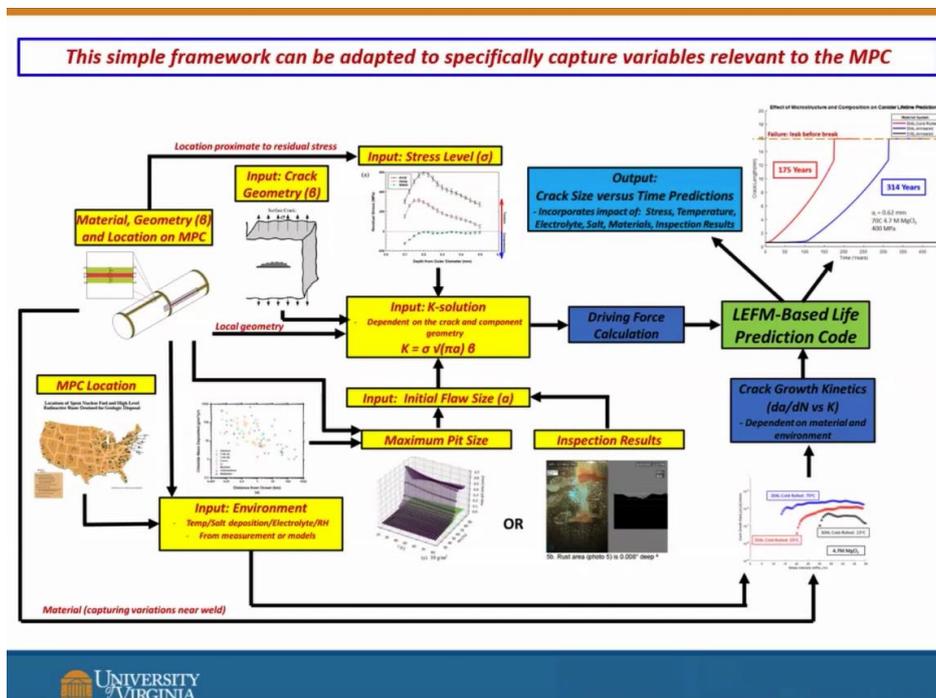


圖 5-29

Understanding Canister Corrosion and SCC

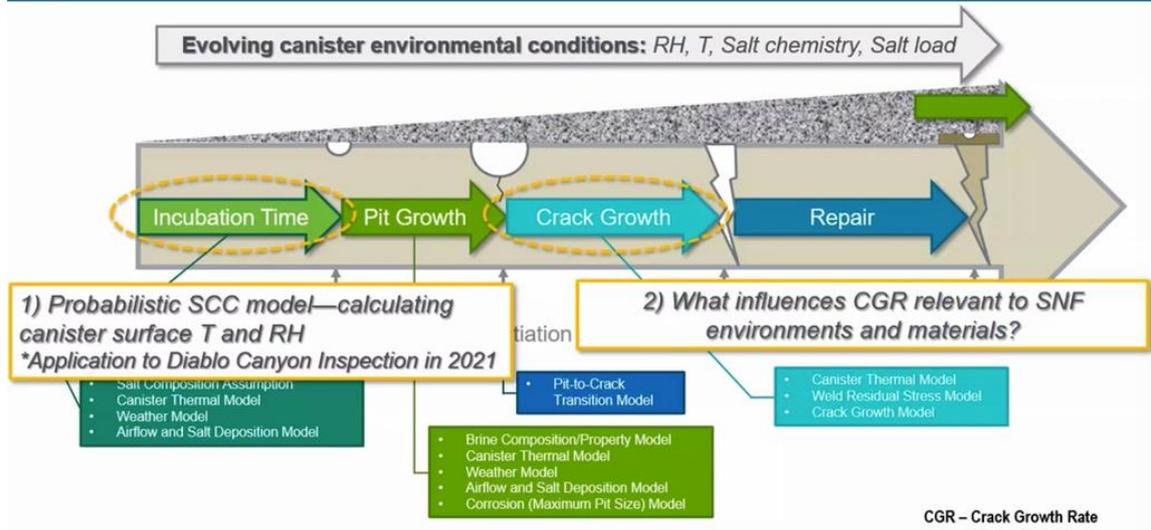


圖 5-30

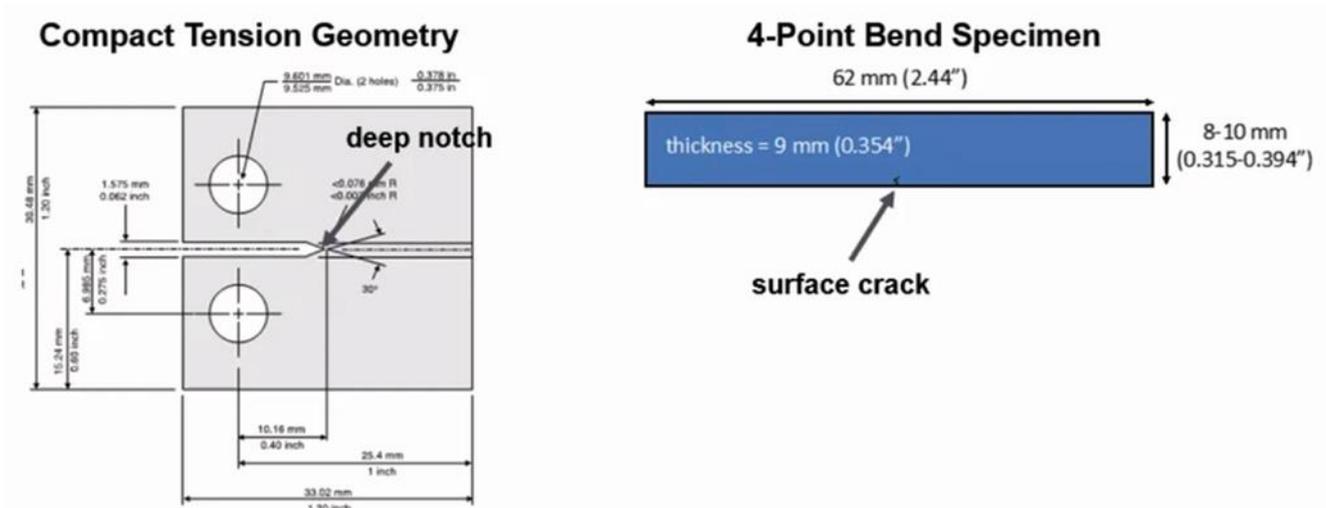


圖 5-31

六、心得及建議

(一)心得

- 用過核燃料最終處置未來可能有更多元的作法

美國與台灣政策不同，在台灣係由台電公司負責處置用過核燃料，而美國則是由各電廠提供經費，但由國家統一進行用過核燃料處置，故不論從經濟量體或是公眾執行力上，推動相關計畫都更具備量能。本次會議中，美國負責處置用過核燃料的美國能源局(DOE)提出與歐洲國家芬蘭、瑞典不同的處置方案。該方案雖然同樣是以用過核燃料進行深地層處置為目標，但與芬蘭或瑞典不同，不將用過核燃料進行再取出再重新裝罐，而是直接將密封鋼筒連同用過核燃料，直接置入外包封容器進行最終處置。DOE 認為此種做法的風險更加可控，且可以減少人員輻射劑量，並更具經濟效益。雖然相關研究仍在持續進行，也仍然具有諸多的困難點尚未釐清，但目前已有美國眾多國家實驗持續參與各方面的研究，未來並非沒有發展出另一套成熟技術的可能性。

- 用過核燃料貯存老化管理仍為美國核能界重要關注議題

亞卡山用過核燃料最終處置計畫暫停後，美國也開始積極尋求其他的替代方案，但這些都可能會是長期的研究及規劃，需要乾式貯存作為其中的過度選項。故如何使乾貯系統進行良好的老化管理、延長貯存壽命，以及在長期貯存時間下可以確保安全性，對美國來說至關重要。目前美國不僅針對密封鋼筒檢測技術作全方位發展外，亦持續發展延緩老化及修復的研究，並以各種研究數據為基礎提出執行導則。不過，依目前的研究顯示，尚無發現任何應力腐蝕對於營運中密封鋼筒造成影響的實際案例。

隨著國際上老化管理研究的持續發展，將有著更完善延緩乾貯系統老化的技術及設備，故持續參與國際相關研究計畫、蒐集文獻以及進行國際交流，對於台電提升貯存安全技術有所助益。

- 美國仍然在持續發展核能發電技術

本次會議中，美國的管制機關 NRC 及國際原子能總署 IAEA 提出未來需要調整法規及更多研究，以因應更高燃耗、更多型的用過核燃料貯存問題，包含：高事故容忍性燃料(ATF)、先進反應器燃料、快滋生反應器燃料等，這些燃料都有別於過去反應器燃料的特性，需要更多瞭解其特性並制定合適的貯存規範，而本次會議中亦提出眾多相關的研究成果。由美國的眾多研究有關更多類型的用過核燃料特性可以推測，美國並沒有停下進一步發展核能技術的腳步，而是朝著更多元、更有效率以及更安全的的方向持續推進，在全球出現能源危機的現在，這也許是美國能源政策中的其中一環。

- 福島事件後乾貯經驗及與東電人員交流

本次會議中日本東京電力公司發表了有關福島事件後，放置於外加混凝土模組貯存的用過核燃料護箱，以及內部燃料貯存情況的檢查結果。東京電力公司有 9 只已放入用過核燃料的運輸護箱，原本暫放於電廠臨海的建築物內，但福島事件時廠房遭受地震的影響並且被海嘯侵入，而使護箱接受過海水的浸泡。東電公司為確保安全性，另外設置 9 組外加混凝土模組作為保護貯存運輸護箱，並且於本次會議中發表了近期進行的一系列檢查結果，顯示貯存狀態良好安全無虞。

東電此次的檢查證明了乾貯對於意外事故的良好抵抗能力，即使經過地震以及海嘯的衝擊，不論是護箱、內部組件及用過燃料仍可保持良好狀態確保安全。過去日本因採用過核燃料再處理策略，並沒有設置多少乾貯設施而以濕式貯存為主，但未來規劃會有越來越多的乾式貯存設施設置，於研討會中與東電的人員交流時渠也提及這一點。此外，東電人員亦表明對於台灣目前的乾式貯存有興趣，因為雖然過去日本並沒有混凝土護箱的貯存核可，但他們未來是朝這個方向進行規劃，而東電人員也對於未來法規許可採用混凝土護箱進行貯存持樂觀態度。

(二) 建議

- 雖然台灣目前的政策為不再進行核能發電，但已有的用過核燃料貯存及處置仍為重要議題。在目前國際間主要趨勢為延長乾式貯存時間的策略下，老化管理及安全相關技術勢必為其中的關鍵，故建議仍需多關注國際間的相關研究，以及保持國際間合作交流並持續參與國際研討會，獲取最新的技術及經驗。
- 台灣大多的核能相關法規為參考美國所發展，美國近年針對乾貯老化管理、系統檢測、修復等逐步建立相關的參考指引並修訂法規，建議持續關注相關發展，並適當參考納入乾貯相關規劃。
- 未來最終處置可能會有更多元化的發展，建議需要持續關注最新的研究及動向，並保持處置計畫彈性。
- 日本福島事件後的乾貯檢查及未來發展，或可作為台電後續乾貯相關規劃的參考或借鏡，未來應該持續關注。