

出國報告（出國類別：其他）

參加2015年核燃料循環國際研討會
【Global 2015 Nuclear Fuel Cycle
for a Low-Carbon Future】

服務機關：行政院原子能委員會放射性物料管理局

姓名職稱：劉志添組長

派赴國家：法國

報告日期：104年11月23日

出國時間：104年9月18日至9月27日

摘 要

本次奉派赴法國巴黎參加第12屆核燃料循環國際研討會(GLOBAL 2015 Nuclear Fuel Cycle for a Low-Carbon Future, 以下簡稱GLOBAL), 今年會議主題定位為「低碳未來」, 強調核能發電是有效減緩溫室氣體排放的綠能之一, 試圖營造有利氛圍, 以接續今年11月底將在巴黎舉行之「聯合國環境變遷綱要公約第21次締約方會議, COP21」。本次會議分別由法國核能協會(SFEN)、美國核能協會(ANS)、日本核能協會(AESJ)及韓國核能協會(KNS)共同主辦, 國際原子能總署(the International Atomic Energy Agency, IAEA)、歐洲核能總署/經濟合作發展組織(OECD/NEA)、加拿大核能協會(CanadianNS)、中國核能協會(ChineseNS)及歐洲核能協會(ENS)等單位協辦。

歷屆會議一貫宗旨乃希望從核原料開礦、使用、貯存、再循環到最終處置之全面性核燃料循環建立資訊交流平台, 俾供受邀來自各國政府機關、工業界及研究機構等專家學者交換最新研發成果並促進經驗回饋。核能作為高強度基本負載電廠, 可一連18個月到24個月無間斷日夜供電, 對高科技工業及公共設施尤其重要, 可比作工業國家之供血心臟, 尤其在地球暖化減碳大環境下, 不靠燒碳發電, 廣義上已普遍被界定為減碳綠色能源。鑑於核能在能源選項中具有碳減排的特性, 主辦單位期許核能發電可列入今年巴黎COP21低碳能源選項並列為會議結論之一。

本報告內容主要說明法國、德國、英國、日本、南韓及美國等國家對用過核燃料管制現況及未來發展趨勢, 以及美國就用過核燃料延續貯存應評估之關鍵議題所採行之管制立場, 以瞭解核能先進國家最新管制技術與發展, 作為推展國內用過核燃料安全管制作業之重要參考。

目 次

	(頁碼)
一、目的.....	1
二、行程.....	2
三、研討會心得.....	5
四、建議事項	25
五、附錄	25

一、 目的

放射性廢棄物之安全管理一向為社會大眾所關心，其中有關用過核燃料運送、貯存及最終處置，更是現階段民眾關注的焦點。為追求國家永續發展，加速推動用過核燃料中、長程管理計畫，為政府當前積極推動之重點工作，亦有必要參酌歐、美、日等先進核能國家之管理經驗與發展趨勢，以確保我國用過核燃料管理安全。

對於用過核燃料的處理，各國均有其長程管理方案，有的國家傾向於採用再處理，有些則準備直接進行最終處置，但目前最終處置技術尚於研究發展階段，因此在核電廠用過核燃料池逐漸貯滿之際，必須採取適當之中期貯存方式，以紓解燃料池貯存空間不足的問題，確保發電的安全穩定性。既使當核電廠進行除役拆廠作業，也是需要適當的中期貯存設施，以利搬移燃料池中的用過核燃料後，方能順利拆除燃料池。

GLOBAL 研討會係每 2 年召開乙次，邀請來自各國政府機關、工業界及研究機構等專家學者與會，研討範圍涵蓋國家政策、新型反應器設計、混和氧化物燃料(MOX)、軍需剩餘核物料、先進再處理、廢料容器及用過核燃料之長期行為、核子禁止繁衍及核能之延續性、最終處置計畫及核轉換之研究與趨勢分析。

台電公司核一、二廠正面臨用過核燃料池貯存空間不足的問題，雖不會影響核電廠的安全，卻可能被迫提前停機除役，衝擊國內電力供應的穩定度。台電公司遂採國際標準作法，積極推動核一、二廠用過核燃料乾式貯存計畫。由於該項計畫誠屬國內核能技術本土化首例，應多方擷取各國成功管理經驗，以確保用過核燃料長期貯存安全。

因此，此行重點除了解用過核燃料延續貯存應評估之關鍵議題及安全要求外，同時掌握各國對用過核燃料中、長期管理策略趨勢以及最終處置計畫推展進度等，作為推展國內用過核燃料安全管制作業之重要參考。會議後，特別委由原能會駐 OECD/NEA 侯榮輝博士，安排拜會駐法台北代表處，說明我國用過核燃料安全管制現況及本次研討會的豐碩成果。

二、行程

日期	行程	工作內容
9月18日	台北→法國巴黎	去程
9月19日	巴黎	準備會議資料
9月20日	巴黎	報到
9月21日	巴黎	GLOBAL 會議
9月22日	巴黎	GLOBAL 會議
9月23日	巴黎	GLOBAL 會議
9月24日	巴黎	GLOBAL 會議
9月25日	巴黎	拜會駐法國台北代表處
9月26日	巴黎→台北	回程
9月27日	台北	回程

該研討會自 1993 年創辦迄今，每二年召開一次，本屆係第 12 屆，由法國核能協會(SFEN)、美國核能協會(ANS)、日本核能協會(AESJ)及韓國核能協會(KNS)共同主辦，自 9 月 21 至 24 日於法國巴黎 Paris Palais des Congres 國際會議中心舉行，共有 500 餘人參加本屆盛會，主要來自美國、英國、法國、德國、日本、韓國與中國等核能工業界，包括安全管制機構、核能研究單位、核能電力公司以及放射性物質運送服務業、運送/貯存護箱設計及製造商等相關產業，共計發表 450 篇科技論文，範圍涵蓋國家政策、混和氧化物燃料(MOX)、軍需剩餘核物料、先進再處理、廢料容器及用過核燃料之長期行為、核子禁止繁衍及核能之延續性。職於 9 月 20 日中午前往會場辦理報到手續，並自 9 月 21 日起全程參加會議。另於 25 日偕同原能會駐 OECD/NEA 侯榮輝博士、核研所陳健湘博士及陳孝輝博士拜會駐法國台北代表處張銘忠大使，說明本次行程豐碩成果。

GLOBAL 2015 開幕式於 9 月 21 日上午 9 時 15 分開始，由法國原子能委員會核能處處長(Nuclear Energy Division Director, CEA) Christophe Behar 先生擔任主席，法國 EDF 副主席 Dominique Minière 先生、法國 Areva 執行長 Philippe Knoche

先生以及歐盟 DG Energy 副處長 Gerassimos Thomas 先生等三位擔任與談人，簡短致歡迎詞後，隨即安排三場與談人引言，其報告重點分別摘記如下：

(一) 法國 CEA 核能處處長 Christophe Behar 先生

今年 11 月 30 日至 12 月 11 日，於巴黎將召開聯合國環境變遷綱要公約第 21 次締約方會議(COP21)，該會議的結論將對我們未來的地球極為重要，而核能在對抗全球暖化上則扮演重要的角色，Global 2015 會議的關鍵議題，就放在闡釋核能如何協助對抗氣候變遷。假如抑制全球能源消費就可減少石化燃料的使用量的話，隨著世界各國對能源需求量的增加，顯然它不是個好方法。據最新估計，2050 年全球人口數將達到 100 億，屆時，能源需求量將會是現今 2 倍以上。在考量確保能源獨立性及供應安全上，核能是具有競爭性的無碳能源，既使在日本福島事故過，部分國家放棄核能是事實，然而如美國、英國、俄羅斯、中國、印度、巴西及南非等國家，則是陸續推動核電廠興建計畫，日本在修正安全管制標準之後，也重新啟動核能發電，不僅考慮經濟發展的需要，更是環境永續發展不得不的選擇。



(二) 法國 EDF 副主席 Dominique Minière 先生

石化燃料提供全世界大部分的電力，為減緩氣候變遷，就必須要降低溫室氣體的排放，而核能就是最佳的解決方法。根據統計資料顯示，油、煤、汽等石化燃料約佔全球電力組合 2/3，其中煤碳部分即佔有 41%，是主要電力產源。而低碳能源(核能、水力、太陽及風力等)約佔全球電力 32%，而核能僅佔其中 12%。Dominique Minière 先生也談到既使日本福島核事故後，核能在世界上仍是正成長的趨勢，IAEA 資訊顯示目前有 72 核能機組興建中、160 個機組規劃中，面對氣候

極端變化，必須降低對石化燃料的依賴，核能會是可信賴的選項。

(三) 歐盟 DG Energy 副處長 Gerassimos Thomas 先生

歐盟國家面臨能源挑戰與日俱增，主要挑戰有三項：

1. 氣候變遷加速，應立即提出應變對策
2. 面臨能源短缺的問題仍無計可施
3. 能源基礎建設與市場投資長期低迷不振

Gerassimos Thomas 先生指出，為解決以上問題的策略就是需要能源市場現代化、基礎建設現代化以及投資體系現代化。歐盟日前採取能源聯盟策略(energy union strategy)與其行動方案，最終目標乃期望提供民生及工業界安全、價格平實且具競爭力的能源。今年 7 月中，採取夏季方案(Summer Package)以展現減碳決心，方案內容包括能源消費新方案、歐洲電力市場再設計、更新能源效率標章及修訂歐盟排放貿易系統(EU Emissions Trading System)等。

此外，將會在明年初適當時機宣布冬季方案(Winter Package)，其方案內容將包括煤氣供應安全法規的修訂、政府間能源協議(IGAs on energy)資訊交換決定書的審查、核能說明計畫之溝通(Communication on the Nuclear Illustrative Programme, PINC)等。PINC 將釐清核能部門(如新建核電廠、安全提升、除役及廢棄物處置等重要計畫)投資的需求性，並作為下年度推展「新電力市場設計倡議」之重要考量因素。



(四) 會議議程(如附件)。

三、 研討會心得

主辦單位特別邀請法國原子能委員會主席 Daniel Verwaerde 先生專題演講「核能如何對抗氣候變遷」及法國 ANDRA 執行長 Pierre-Marie Abadie 先生專題演講「高放射性廢棄物最終處置」等兩場精闢演講之重點摘錄如下：

1. 法國原子能委員會主席 Daniel Verwaerde 先生指出，我們須快速扭轉以石化燃料為主力的發電現況，並以低碳能源供應絕大部份電力，才可能達成 2009 年哥本哈根氣候會議所訂平均升溫在攝氏 2 度內的減碳目標。

(1) 未來數十年內，主要的低碳能源選項有水力、風力、核能、生質能、太陽能，以及具有碳捕捉及封存技術（Carbon Capture and Storage，簡稱 CCS）的燃煤和天然氣發電廠。

(2) 水力、風力和太陽能的可用性隨著各地條件不同有很大的差異。其中，只能間歇性發電的風力和太陽能無法提供基載電力（baseload power），用串聯電網和大規模儲存能源等改善方式又會增加成本。至於生質能潛力，則視植物作為燃料的供應情形而定。因此，將需要推出混合型的能源方案（Energy Mix）以穩定電力供應。

(3) 經由生命週期評估(包括興建、營運與最後除役等階段)可發現，各類能源二氧化碳排放量比較如圖 1，其中核能發電每千瓦小時會產生 15 公克二氧化碳(15g/kwh)，而天然氣發電所排放的二氧化碳量則是核能發電的 30 倍左右，燒煤排碳量更達核能排碳量 60 倍以上。其中，屋頂型太陽能板集電系統的碳排放量還是核能發電的 3 倍。

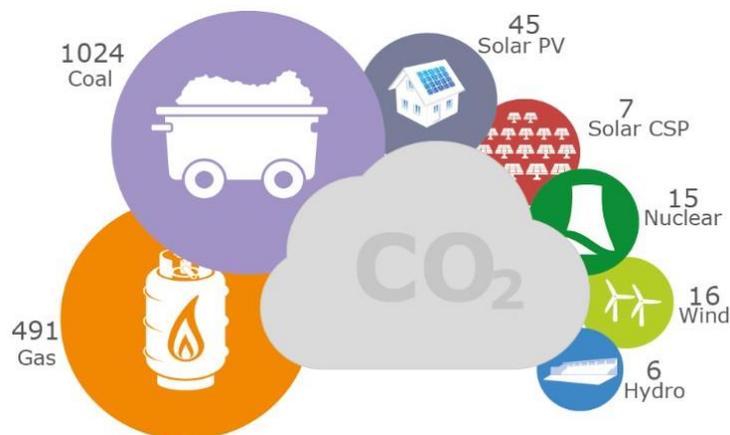


圖 1、各類能源二氧化碳排放量比較圖(g/kwh)

(4) 現實中，我們仍遠遠落後於限制升溫攝氏 2 度內的減碳目標，排除目前任何一個主要的低碳能源選項，都會增加減碳的困難度和面對氣候變遷的風險。如何在核能的諸多問題與對氣候變遷及其他能源政策目標的貢獻之間權衡，將是無可迴避的兩難。

2. 法國國家放射性廢棄物管理署(National Agency for Radioactive Waste,簡稱 ANDRA)執行長 Pierre-Marie Abadie 先生在專題演講中強調：

- (1) 法國高放射性廢棄物處置計畫規劃於 2025 年完成最終處置設施的建造；經過 20 年的調查評估作業，法國於 2013 年開始展開建議地區(Meuse)的民眾溝通作業，該地區雖於 2010 年取得地方政府同意進行相關研究，但因公眾意見對立、安全性受質疑，國家公共辯論委員會（CNDP）認為 2015 年的時程太趕，計畫安全性也需要更多事實佐證，未能依時程於今(2015)年如期動工。
- (2) ANDRA 會繼續這項計畫，且仍於 2025 年啟用，但考量大眾的疑慮和要求循序漸進，第 1 階段改為「大規模試驗期」，先以仿製品取代放射性物質儲存箱，再逐漸以小部分放射性物質代換，最後才真的放置高放射性廢棄物。
- (3) “Cigeo” 計畫於法國東部 Meuse/Haute Marne 地區（ANDRA 已於 1999 年在此處建立布雷(Bure)地下試驗室如圖 2），建造一地下深度 500 米之地質處置場（地下設施規劃如圖 3），利用布雷特有的黏土構造形成天然的地質屏障，以防止任何放射性物質外釋的可能性。預定處置之放射性廢棄物包含約 2,700 立方公尺的高放射性廢棄物，以及約 40,000 立方公尺的中放射性廢棄物，約 99%廢棄物都是來自於核能發電廠。【註：Cigeo 計畫係為 ANDRA 與 Gaiay（Technip 及 Ingérop 共同承攬）簽署 6 年合約名稱】

1. 法國

法國AREVA之子公司TransNuclear(TN)公司所發展之水平混凝土模組 NUHOMS系列，目前是較被廣泛使用在沸水式反應器(BWR)與壓水式反應器(PWR)用過核燃料之乾式貯存。NUHOMS貯存系統係將密封鋼筒以水平方式置入鋼筋混凝土模組中，透過外部混凝土結構達到輻射防護，並利用空氣自然對流方式，達到冷卻之目的。該護箱型式於1989年起就陸續使用在美國各核能電廠，截至目前為止，全美已使用超過800組。此系統包含三個主要組件，包括(1)密封鋼筒(Dry Shielded Canister, DSC)、水平貯存模組(Horizontal Storage Module, HSM)及傳送護箱(Transfer Cask)如圖4。

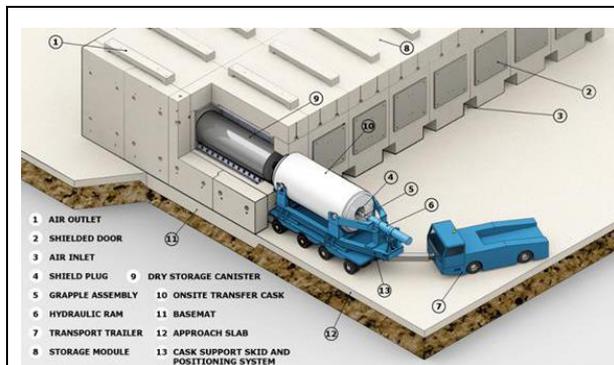


圖4、NUHOMS水平貯存模組DSC裝載作業示意



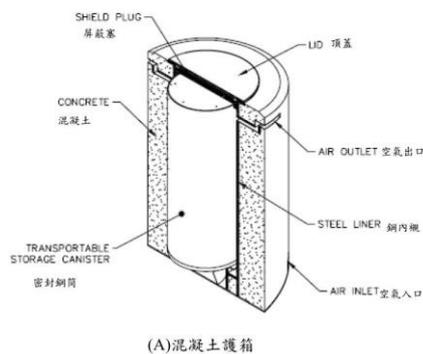
圖5、NUHOMS水平貯存模組設施

TN公司針對BWR與PWR核能電廠，開發各種型式之密封鋼筒，包括貯存BWR用過核燃料之NUHOMS-52B、NUHOMS-61BT、NUHOMS-61BTH以及NUHOMS-69BTH等DSC型式；以及貯存PWR用過核燃料之NUHOMS-24P、NUHOMS-24PHB、NUHOMS-24PTH、NUHOMS-24PT1、NUHOMS-24PT4、NUHOMS-32PT、NUHOMS-32PTH1、NUHOMS-32PTH、NUHOMS-37PTH 等DSC型式。

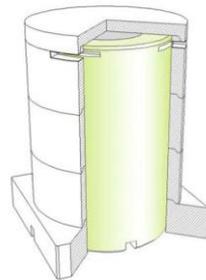
水平貯存模組由鋼筋混凝土單元組合而成，在上下部均有設置空氣流通之通氣口(penetrations)如圖5所示。依據DSC熱負載及貯存場址耐震基準等條件，發展三種型式如HSM、HSM-H及HSM-HS。HSM之設計基準地震力為0.25g(水平向)/0.17g(垂直向)，可接受最高熱負載為24kW之DSC。HSM-H之設計基準地震力為0.37g(水平向)/0.25g(垂直向)，可接受最高熱負載為40.8kW之DSC。HSM-HS則

適用於高地震帶，其設計基準地震力為1.0g(水平向)/1.0g(垂直向)，可接受最高熱負載為40.8kW之DSC。

我國核一、二廠乾式貯存設施分別採用經美國核管會審查認可之NAC公司UMS、MAGNASTOR直立式混凝土貯存護箱如圖6及圖7所示，全美已使用超過390組，其可承受的地震力更高，舉核二廠乾式貯存設施為例，貯存護箱在混凝土基座上可承受之地震力為1.348g(水平向)/0.89g(垂直向)。



(A) 混凝土護箱



(B) 外加屏蔽

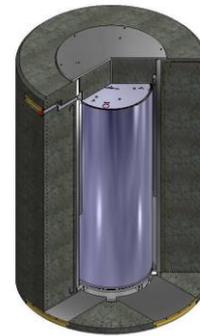


圖6、NAC-UMS貯存系統示意

圖7、NAC-MAGNASTOR示意

另一方面，TransNuclear(TN)公司發展之TN系列金屬護箱，其設計概念來自運輸護箱的設計，其燃料提籃係直接安裝在護箱體內部，而頂蓋系統採螺栓式密封方式，其箱體結構為兩層滾軋鋼板(rolled steel plate)或鍛造鋼(forged steel)所組成，內層主要提供密封邊界，而外層是提供輻射屏蔽之功能，一般採用碳鋼材質。在其外層壁體設置垂直向之散熱片，以提供其熱傳導之冷卻效果。在散熱片間填注中子屏蔽，並在中子屏蔽最外層再加一層鋼板包覆，使護箱整體成光滑圓筒狀，可利於在護箱離開燃料池後之除污工作。另外，經搭配緩衝器 (Impact limiter) 後，可使用於運輸用途。而其中的燃料提籃部分材質則是使用不銹鋼。圖8為TN-24金屬護箱之示意圖。

TN-24、TN-32與TN-6金屬護箱體外殼是碳鋼材料，側壁採用鍛造(forging)製成，底部再以銲接方式與底板連結，內部提籃則採用不銹鋼材料，箱體與頂蓋係利用螺栓密封。

近年來AREVA公司也在發展以密封鋼筒為貯存容器之金屬護箱，稱為TN NOVA乾式貯存系統，其主要組件包括密封鋼筒、運送護箱及貯存護箱，如圖9所示，其傳送方式類似HUHOMS混凝土模組之操作方式，採水平傳送，但採垂直貯

存。

Metal casks (TN™ 24):

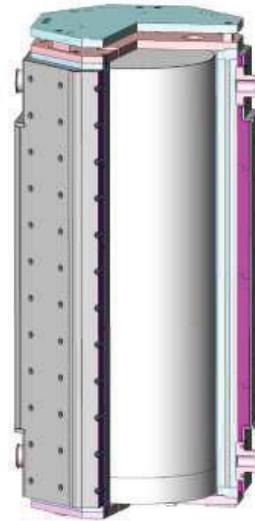
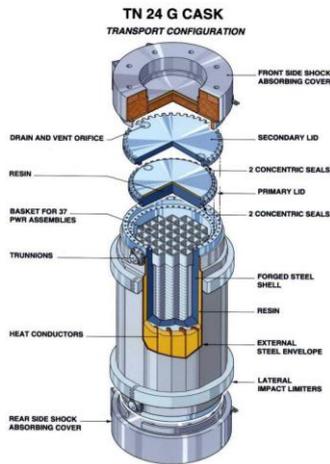


圖 8、TN-24 金屬護箱示意圖

圖 9、TN-NOVA 金屬護箱示意圖

國內部分環團針對核一、二廠乾式貯存設施採用混凝土護箱之安全性，提出許多質疑，亦強烈要求改用可偵測護箱壓力之金屬護箱，物管局本於安全主管機關職責，亦多次公開澄清核一、二廠乾貯設施之安全性。

若進一步以風險評估的角度說明，根據美國核管會委託電力研究所(EPRI)進行金屬護箱安全度評估(Probabilistic Risk Assessment of Bolted Storage Casks) 結果顯示，金屬護箱潛在癌症致死機率第1年為 5.6×10^{-13} 、貯存第2年之後為 1.7×10^{-13} 。相對於Nureg-1864(A Pilot Probabilistic Risk Assessment of a Dry Cask Storage System at a Nuclear Power Plant)有關混凝土護箱之安全度評估結果，發現潛在癌症致死機率第1年為 1.8×10^{-12} 、貯存第2年之後為 3.2×10^{-14} 。

當以美國環保(EPA)、食品藥品管理(FDA)及消費性產品安全委員會(CPSC)皆使用百萬分之一(10^{-6})作為個人一生可接受的參考風險值，這個數值目前已普遍為社會大眾所接受。上述結果顯示用過核燃料乾式貯存護箱不論是採用混凝土或是金屬型式，其貯存安全性幾乎是相同的。然而，由於金屬護箱上、下密封蓋是由金屬密封環 (metallic seals) 加上螺栓鎖緊裝置完成箱體密封，不是採用混凝土護箱之雙層焊接密封作業，因此必須加裝壓力計，隨時監測上、下兩層密封蓋之間的壓力(非直接監測護箱內部用過核燃料之壓力)，以確保護箱之密封性能，但可能因螺栓及O型環銹蝕而影響密封性能，造成貯存期間的安全性略低於混凝土護箱的

安全性。

2. 德國

目前德國有兩座集中式用過核燃料乾式貯存設施運轉中，分別位於阿奧斯（Ahaus）及高勒本（Gorleben），貯存容量分別為 3960 噸及 3800 噸。在阿奧斯已貯放 6 組護箱共 58 噸輕水式反應器(LWR)用過核燃料，未來將再貯放 305 組護箱之高溫反應器（THTR）用過核燃料。高勒本已貯放 5 組護箱共 39 噸 LWR 用過核燃料，該設施主要貯存經再處理後之玻璃固化高放射性廢棄物，目前已經貯放 15 組高放射性廢棄物護箱，依計畫每年將增加 12 組護箱。

德國計畫在兩個已經除役之核電廠中增加乾式貯存設施，朱利希（Juelich）設施將建造 152 組護箱以貯放高溫先導反應器（AVR）用過核燃料，葛蕾福沃得（Greifswald）則將貯放前東德 VVER 反應器之用過核燃料，預計有 65 組護箱約 585 噸鈾。

依據 2001 年 7 月修訂之原子能法，規定自 2005 年 7 月 1 日起，德國禁止用過核燃料進行再處理後，目前用過核燃料均暫貯在各核能電廠內。為配合該項政策要求，12 座電廠均已決定採用由德國 GNS 公司製造的乾式貯存護箱 CASTOR 系統，未來亦有可能改採 TNTM 24E (AREVA TN International, TNI)及 MSF-57 BG (Mitsubishi Heavy Industries, MHI)護箱系統。而廠內貯存設施之設計包括以下三類：

- (1) WTI(Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung)地表廠房設計如圖 10 所示。



圖 10、WTI 地表廠房乾式貯存設施

(2) STEAG 地表廠房設計如圖 11 所示。



圖 11、STEAG 地表廠房乾式貯存設施

(3) 坑道之設計如圖 12 所示。



圖 12、坑道式乾式貯存設施

德國 12 座電廠各採取不同設計概念之用過核燃料乾式貯存設施，彙整如表 1. 所示。

表 1. 德國 12 座用過核燃料乾式貯存設施之設計彙整表

場址	電力公司	貯存設施設計	設計容量 (組)
Brunsbüttel	ENE	STEAG	80
Krummel	ENE	STEAG	80
Brokdorf	E.ON	STEAG	100
Unterweser	E.ON	STEAG	80
Grohnde	E.ON	STEAG	100
Lingen	RWE	STEAG	130
Biblis	RWE	WTI	135
Grundrem	RWE	WTI	192
Philipsburg	EnBW	WTI	152
Grafenrh	E.ON	WTI	88

Isar	E.ON	WTI	152
Neckarw	EnBW	Tunnel	151
總計			1440

德國主管機關要求用過核燃料乾式貯存設施之設計使用年限為四十年，貯存技術主要藉由貯存護箱置放在隔離數個空間之建築物中，予以安全管理，並明列主管機關對貯存護箱之安全規定包括：

- (1) 以自然對流 (natural convection) 確保用過核燃料餘熱移除能力，不論在正常、異常或意外事故發生時，均可確保餘熱溫度不會影響材料機械性質。
- (2) 由雙層系統及兩個金屬密封環 (metallic seals) 嚴密封緊 (leak tight)，經由兩層間空隙 (spacing) 之壓力偵檢器以瞭解密封狀況。(監測溫度及壓力)
- (3) 護箱之結構設計足以防範外來事故 (例如地震、龐大飛行器之撞擊及大火燃燒等)，並應符合乙 (U) 型包件規定，以及可承受大火與機械外力撞擊之要求。
- (4) 貯存建築物須採分區管理，以保障安全，包括貯存區、維修區及運送區。

另外，2001 年德國反應器安全委員會 (German reactor safety commission) 公布用過核燃料乾式貯存技術要求之安全導則，並應用於核照作業中。該導則各項標題內容類似於國內「申請設置用過核燃料乾式貯存設施安全分析報告導則」及美國用過核燃料獨立貯存設施之標準審查計畫(NUREG-1567)，如表 2. 所示。

表 2. 德國用過核燃料乾式貯存技術要求

1	放射性物質之密封性能	10	與現有核能設施之影響分析
2	臨界安全	11	乾式貯存設施之獨立性
3	熱移除能力	12	品質保證
4	屏蔽功能	13	貯存設施之運轉作業
5	輻射防護	14	緊急應變計畫
6	結構組件	15	材料長期及耐久性之影響
7	技術系統	16	長期監測
8	內部衝擊 (internal impacts)	17	除役規劃
9	外來衝擊 (external impacts)		

為緊急因應各核能電廠用過核燃料池貯存容量用罄之際，「短期貯存」之概念遂因應而生，以銜接集中式貯存設施尚未營運前之作業需求，其設計使用年限規定為5年，採用大型屏蔽護箱置放於簡便之建築物中，目前已經有三個核能電廠取得執照營運中。

3. 英國

2011年日本福島核事故震撼全球，德國取消了核能計畫，降低核能發電比例，並宣布到2050年，60%的德國能源將會是再生能源。然而，英國政府於福島核災同年宣布英國20年來的第1座新一代核能電廠辛克萊C點(Hinkley Point C)正式上路，但這並不表示英國朝野對核能工業和未來能源政策沒有存疑。(註：該核電廠由中國設計並投資，估計將斥資245億元英鎊，中國擁有40%股權)

核電在1990年代末期，登上英國能源最高峰，全英25%能源供應來自核能發電，不過，隨著老舊核電廠逐步關閉，電力事業私有化及核廢料處理等問題，核能在英國一路下滑。然而，隨著能源需求量增加，能源價格飆漲以及溫室氣體減排的壓力驅使下，英國政府不得不重新思考能源政策。

2011年英國「能源與氣候變遷部」公布的國家能源基礎報告中，明確兩大基本目標為：「能源安全」與「大幅降低溫室氣體排放」。這也成為英國政府大力推動核能發電的基石。強調辛克萊C點核電廠完工後，不但可提供32億瓦特電量，並可減少每年約900萬噸的碳排放量，相當於兩百萬輛汽車的排碳量。氣候威脅甚於核能，英國政府強調核電是打擊溫室效應最有效的能源策略，並訂下2050年減少碳排放量80%的長期目標。最近民調結果顯示，過去10年，英國民眾支持核能的比例呈現正成長的趨勢，但這種支持是有條件的支持，是一項非情願的支持，主要原因在於公眾對於溫室效應造成全球氣候變遷的威脅重視，甚於對核能的恐懼。

英國對於用過核燃料之營運係根據能源政策白皮書（Energy White Paper），用過核燃料採取再處理或其它方式乃取決於用過核燃料擁有者之商業判斷。如果可以進行再處理及可預見未來仍可繼續使用再處理後所回收的鈾與鈾，則英國政府亦接受不將用過核燃料視為廢棄物之分類。但是，如果再興建新的核子反應器，則假設這些新反應器所產生之用過核燃料不再進行再處理。英國用過核燃料貯存

管理系統如圖13所示。

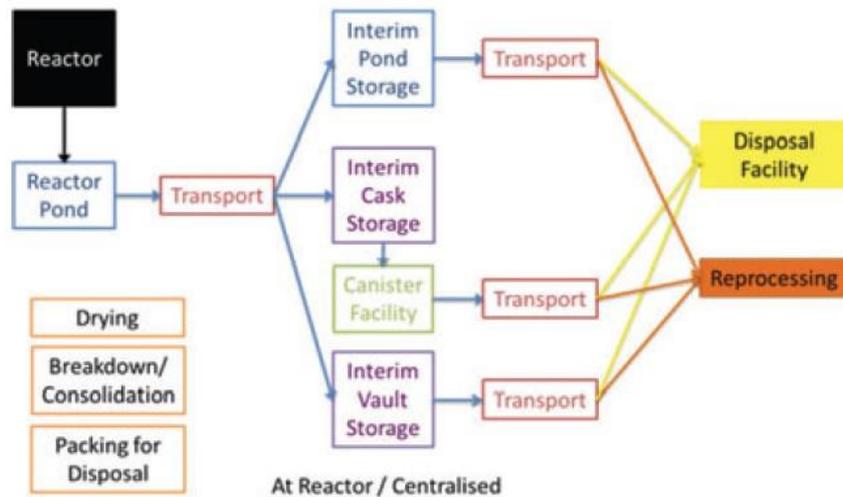


圖 13、英國用過核燃料貯存管理系統

英國除了進行其核能電廠所產生用過核燃料之再處理外，亦為其它國家進行用過核燃料再處理服務。在Sellafield廠區有兩座用過核燃料再處理廠，一座是用來再處理英國早期核子反應器所產生的Magnox燃料，稱為Magnox再處理廠;另一座稱為Thorp再處理廠(Thermal Oxide Reprocessing Plant)，乃用來再處理英國進步型氣冷式反應器(AGR)及其它國家所產生之用過核燃料。這兩座再處理廠原由英國核燃公司(BNFL)營運，目前則轉移給核能除役局(Nuclear Decommissioning Authority, NDA) 營運。

Thorp 再處理廠已再處理2300噸英國進步型氣冷式反應器所產生之用過核燃料，約佔其總產量8800噸之26%。同時也已幫其它國家(包括日本)再處理700噸左右之輕水式反應器所產生之用過核燃料，及150噸英國早期先導型反應器所產生之用過核燃料。

在乾式貯存部分，英國Wylfa電廠有兩部550MWe Magnox機組，Wylfa電廠內興建兩座用過核燃料乾式貯存窖，如圖14所示。第一座是在1971年3月開始接收用過核燃料，至1981年已貯滿，總計貯存28,922束燃料元件。第二座是在1982年5月開始運轉。



圖 14、英國 Wylfa 電廠用過核燃料貯存容

4. 日本

日本福島核災後，福島第一(Fukushima-Daiichi) 核能電廠之室內乾式貯存設施因受到海嘯侵襲而難以再繼續使用，如圖 15 所示，因此在鄰近該電廠附近設置一臨時護箱貯存區(temporary cask custody area)，如圖 16 所示，除提供貯存原在福島第一核能電廠之乾式貯存設施 9 個金屬護箱之外，也提供貯存福島第一核能電廠共用之用過核燃料池及其四座機組之受損用過核燃料。

新設置之用過核燃料乾式貯存設施為類似混凝土模組之設計，與德國採用之中期貯存區相同，係利用金屬護箱裝載用過核燃料，以水平貯放方式，再以預鑄的混凝土版覆蓋。該貯存設施設計貯存容量為 50 組混凝土模組，採露天貯存方式。截至 2014 年 9 月已貯存 28 組混凝土模組，共 1,004 束用過核燃料。



圖 15、日本福島第一核能電廠室內乾式貯存設施

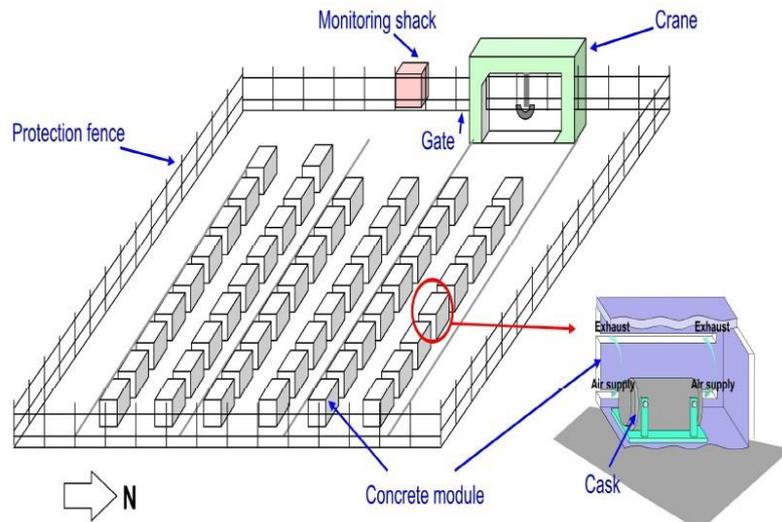


圖 16、日本福島第一核能電廠露天乾式貯存設施示意圖

參考核能信息實時網

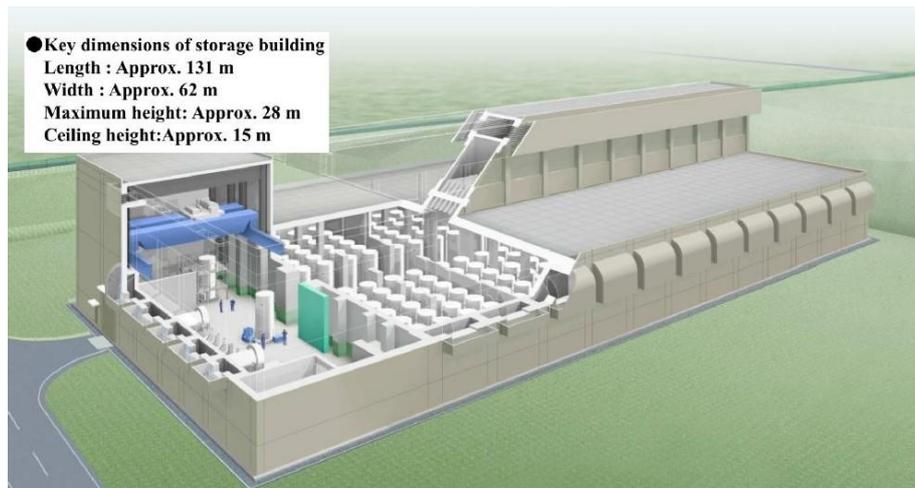
(<http://realtime.xmuenergy.com/newsdetail.aspx?newsid=114246>)報導，日本政府制訂有關核能電廠用過核燃料貯存能力的行動計畫，由日本政府和電力公司成立一個協商機構，研究提高貯存容量的方法和目標等具體問題。

日本用過核燃料大部分貯存於核電廠內，目前已有17,000噸貯存數量，已達核電廠貯存池容量的70%以上。如果核電廠再次運轉，部分核電廠的貯存能力在往後幾年將超過負荷，面臨貯存池貯存空間嚴重不足的問題。日本政府有感於危機逼近，將大幅提高用過核燃料貯存能力。為此，日本政府將依據用過核燃料貯存量，調整對地方政府補償的制度。針對新建設施提升貯存能力的情況，增加補償金額，以便電力公司在擴建貯存設施時，可以獲得地方政府的理解。同時，日本政府還有減少用過核燃料貯存量的計畫，即從用過核燃料提取可用的鈾和鈾，回收再利用。然而，青森縣六所村的用過核燃料再處理廠目前故障不斷，日前又再次宣布將展延至2018年上半年正式投入運轉。

目前日本境內共有兩處乾式貯存設施，一為隸屬於東京電力公司（TEPCO）的福島第一(Fukushima Dai-ichi)電廠內之貯存設施，另一則為日本原子力電力公司（JAPCO）之東海第二(Tokai Dai-ni)貯存設施，兩者皆使用金屬護箱做為用過核燃料之貯存容器。另外，TEPCO亦計畫在Sekinehama建造日本第一座廠外

（away-from-reactor, AFR）用過核燃料獨立貯存設施---Mutsu Recycle Fuel Storage Center，並已自2002年4月起以兩年時間進行場址可行性評估，於2010年8月31日動

工興建。此貯存設施是採用日立-GE(Hitachi-GE)之運輸及貯存兩用之金屬護箱，且貯存在廠房內。初期規劃之貯存容量為3000 噸(288 個護箱)，未來將擴充至5000 噸(等於500個護箱)，設計壽命為50年，採用自然對流冷卻方式，如圖17所示。此貯存設施正式名稱為再循環燃料貯存中心(Recyclable-FuelStorage Center) ，已於2013 年8 月完成建造，但因受到福島核災之影響，目前正依據日本政府公布新的法規標準，於2014年1月提出執照更新之申請。



August 2013 (Construction rate: 100%)

圖 17、日本再循環燃料貯存中心

5. 南韓

南韓Wolsong電廠採用加拿大CANDU重水式反應器，該廠之用過核燃料在冷卻6年後，即移至乾式貯存設施。Wolsong 電廠從1991至2010年間是使用AECL 所

發展之混凝土護箱，共興建有300個混凝土護箱，可貯存162,000束用過核燃料。從2010年後，Wolsong改採用AECL所發展之模組空氣冷卻系統（Modular Air-Cooled Storage System, MACSTOR），如圖18所示，MACSTOR 主要是利用自然對流來移除用過核燃料之熱量，每一模組可貯存24,000束用過核燃料，和混凝土護箱相較之下，所需之土地面積約只有混凝土護箱之1/3。目前之總容量為168,000束，Wolsong之乾式貯存設施如圖19所示，左側兩列為混凝土護箱，右側則為MACSTOR模組。南韓其他壓水式(PWR)核電廠則尚未採用乾式貯存設施，乃運用燃料池貯存格架再密化(high-density storage racks)或跨機組傳送作業，彈性調整用過核燃料貯存管理策略。但南韓預計在2016年興建一座貯存容量為20,000噸之集中式乾式貯存設施，不過，據了解，目前已延後到2024年。

2015年8月間，韓國Doosan重工與美國NAC公司對外宣布，兩家公司已簽訂用過核燃料貯存護箱發展協定。該類型護箱為高5公尺、重超過100公噸的容器，兼具運輸與貯存用過核燃料功能。針對運輸與貯存功能，該貯存系統需有特殊的設計與製造技術，並具有輻射屏蔽和散熱功能，未來將有利於韓國管理用過核燃料。韓國用過核燃料管理公眾參與委員會(Public Engagement Commission)表示，2024年涵碧(Hanbit)電廠將面臨用過核燃料貯存空間不足問題，有鑑於貯存系統需求日益漸增，Doosan與NAC公司計畫合作發展貯存護箱，有助於未來的核能新興產業。

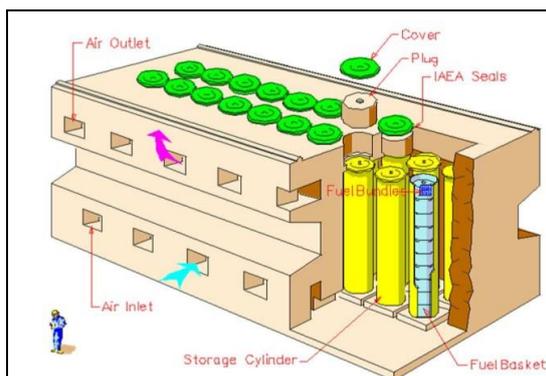


圖18、加拿大MACSTOR貯存護箱



圖19、Wolsong乾式貯存設施

6. 美國

歐巴馬總統上台後決定停止雅卡山最終處置計畫(Yucca Mountain Project)，並於2010年1月29日要求美國能源部(DOE)成立美國核能前途藍帶委員會(Blue

Ribbon Commission on America's Nuclear Future, 簡稱 BRC), 俾就美國的核後端營運進行廣泛且深入之探討後, 提出重要建議及替代方案。

2013 年美國能源部提報「用過核燃料與高放射性廢棄物管理及處置策略(簡稱 DOE 2013)」時, 重新確立各項工作之預定時程如下:

- (1) 2021 年完成先導型集中式貯存設施並進行營運測試。
- (2) 2025 年完成集中式貯存設施(CISF)並營運。
- (3) 2026 年選定最終處置場址。
- (4) 2042 年完成場址特性調查、安全設計並取得興建執照。
- (5) 2048 年完成處置場興建並開始營運。

針對集中式貯存設施之推動概況而言, 美國 Waste Control Specialists LLC (簡稱 WCS) 公司於 2015 年 1 月 20 日獲得德州 Andrews County 當地郡政府全數通過於該郡內設置集中式乾式貯存設施 (Consolidated Interim Storage Facility, CISF)。WCS 公司預計至 2020 年順利完成持照申請及硬體設施興建後, 可處理 40,000 MTHM (metric ton of heavy metal) 核燃料, 貯存期限為 40 年或更長, 持照申請規劃為 40 年並可再後續申請 20 年之延役。目前該公司已於 2015 年 2 月 9 日對美國核管會提出持照申請意願書 (Letter of Intent) 並陳述於 2016 年 4 月將正式對核管會提出持照申請, 如果順利, 該公司將可成為美國境內第 1 座用過核燃料集中式乾式貯存設施, 該設施採地表面貯存。

目前 WCS 公司針對該集中式延續貯存設施規劃為 8 個階段執行, 每階段可貯存 5,000 MTHM 用過核燃料, 初期第 1 階段的持照申請將處理 AREVA 公司 3 種 NUHOMS 貯存護箱, 其來源包含美國境內 3 座除役電廠與 7 座運轉中電廠用過核燃料。(現階段並未考慮接收國外核電廠用過核燃料)

WCS 公司與 AREVA 及 NAC International Inc (NAC) 公司也在 2015 年 2 月宣布共同合作意向, 包含此集中式貯存設施計畫的設計、開發、建設、運轉、維護及核子物料運輸等項目, 且 AREVA 與 NAC 兩間公司將一同執行此設施執照的申請作業。因 AREVA 與 NAC 公司在美國現今的乾式貯存系統具有 68 % 的市場佔有率, 所以該協議將可確保此集中式貯存設施處理美國大多數商用電廠的用過核燃料及高放射性廢料, 並充分運用兩公司在用過核燃料運送上的專業知識。針對

未來於 WCS 之集中式乾式貯存計畫所設計之 NUHOMS EOS 水平貯存系統，以及集中式乾式貯存設施如圖 20、21 所示。

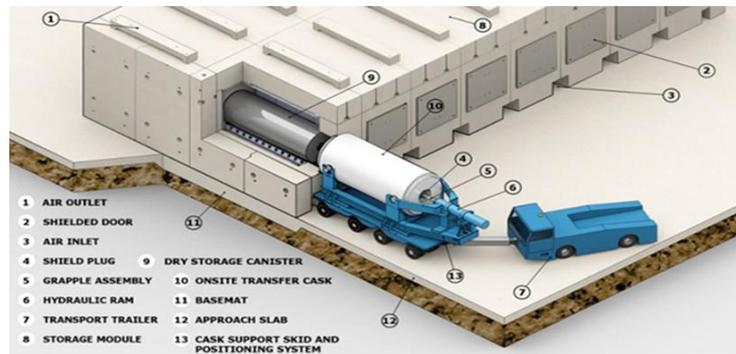
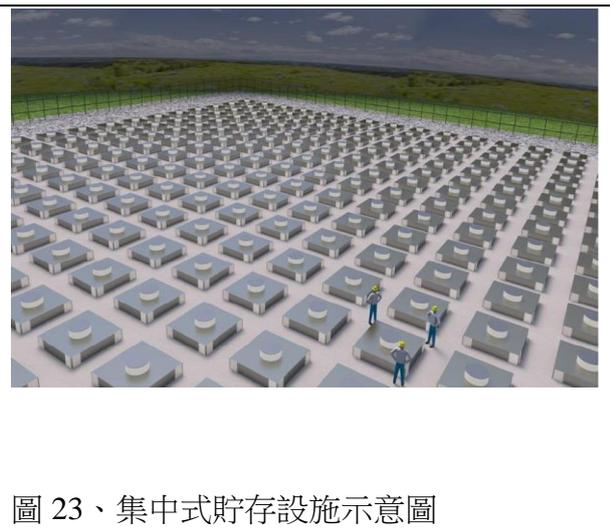


圖 20、NUHOMS EOS 系統示意圖



圖 21、WCS 集中式乾式貯存設施示意圖

美國境內另一規劃案則是新墨西哥州 Eddy Lea Energy Alliance (ELEA) 公司與貯存護箱製造商 Holtec International 公司，目前也簽定合作契約，未來將預定於新墨西哥州 Eddy and Lea 郡設立集中式乾式貯存設施。Holtec International 公司將改良 HI-STORM UMAX 貯存護箱系統，以適用於該集中式乾式貯存設施，其系統設計如圖 22、23 所示，為一地表下貯存設施。



Holtec 公司表示，HI-STORM UMAX 系統目前已實際應用於南加州愛迪生電力公司 San Onofre 除役電廠之用過核燃料貯存，該公司將依據既有的經驗，改良 HI-STORM UMAX 系統成為 HI-STORM CIS (Consolidated Interim Storage) 系統，未來可應用於集中式乾式貯存設施。HI-STORM CIS 系統在設計上，主要不同點為每個貯存護箱可容納 2 個裝填用過核燃料之密封鋼筒，以有效節省設施所需土地面積，如圖 22 所示。

7. 用過核燃料延續貯存應評估之關鍵議題

用過核燃料延續乾式貯存 (Continued Storage) 是針對用過核燃料於乾式中期貯存 (Interim Storage) 40~60 年後，因應用過核燃料最終處置 (Final Disposal) 設施尚未備妥前之暫行替代方案，目前美國與 OECD/NEA 成員國也正在發展此貯存方式以紓解用過核燃料貯存壓力。以美國核管會 10CFR Part 51 用過核子燃料延續貯存之定義而言，短期之延續貯存為 60 年，長期貯存期限為 100 年，最高可達 300 年。

美國能源部目前為發展適用於集中式延續貯存之老化管理方案，已發行 “Managing Aging Effects on Dry Cask Storage Systems for Extended Long-Term Storage and Transportation of Used Fuel, Rev.2” 進行時限老化分析 (Time Limited Ageing Analysis, TLAAs) 及老化管理方案 (Ageing Management Program, AMPs) 的比較與研究。經更新與修訂後，適用於集中式延續貯存之老化管理所包含之時

限老化分析與老化管理方案如表 3 所列項目。

表 3、用過核燃料老化管理方案

老化分析項目	老化管理方案
(1) 時限老化分析範圍訂定	(1) 混凝土結構監測方案
(2) 金屬與混凝土結構與設備之疲勞	(2) 碳鋼結構物表面保護塗層監測方案
(3) 金屬設備腐蝕分析	(3) 機械設備外表面監測方案
(4) 中子吸收材料劣化老化效應	(4) 通風系統監測方案
(5) 輻射屏蔽材料劣化老化效應	(5) 銲接式密封鋼筒密封完整性與洩漏監測方案
	(6) 密封鋼筒/護箱內部結構與功能完整性方案

美國核管會現今仍未有用過核燃料集中式延續貯存申照審查之經驗，所以目前核管會對申照審查及設施監管立場仍以現行制度為之。但是，針對未來集中式延續貯存設施執照申請與監管要求，預先訂定相關管制立場，提供申請者先行瞭解與準備，其範圍包含從日常運轉、事故及相關管制措施如下：

- (1) 貯存場現地評估與自然現象因素調查、
- (2) 運轉系統與設施運轉方式、
- (3) 保安及緊急計畫、
- (4) 廢料管理與設施除役、
- (5) 環境衝擊影響評估。

用過核燃料乾式貯存不銹鋼密封鋼筒從開始啟用至今已有二十年歷史，尚未有任何直接案例顯示在貯存期間遭受應力腐蝕破裂問題。而在長期貯存(100~300年)期限上，為徹底防止密封鋼筒的腐蝕劣化，確保用過核燃料長期貯存安全，法國AREVA公司發展雙層密封鋼筒(double walled canister)概念如圖24所示，目前仍是處於研發階段。

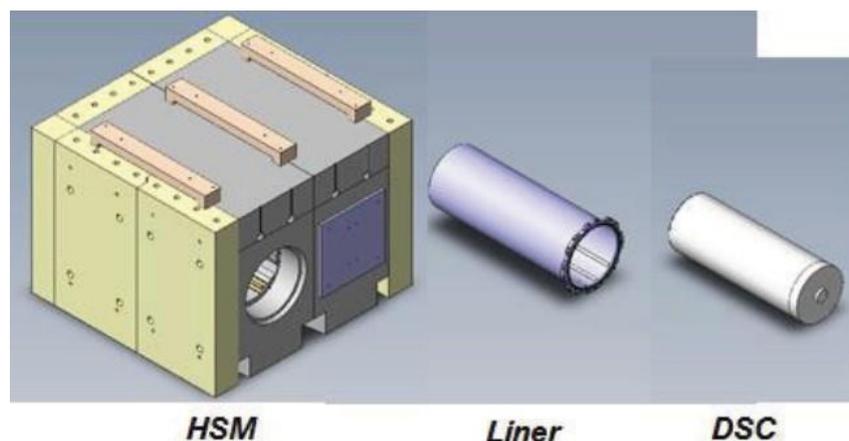


圖24、NUHOMS雙層密封鋼筒示意圖

8. 拜會駐法台北代表處

研討會議後，參訪經濟合作暨發展組織核能署（OECD/NEA），就核能署會員國資訊交流方式、聯繫管道、國際合作研究計畫、法國現階段放射性廢棄物安全管理資訊等議題，與原能會駐該署之侯榮輝博士進行交流討論，並由侯榮輝博士安排拜會駐法台北代表處張銘忠大使，說明我國用過核燃料安全管制現況及本次研討會的豐碩成果。同時，亦分享會議主辦單位(SFEN)設定本次研討會主題為「低碳未來」的用心，強調核能是有效減緩溫室氣體排放的綠能之一，期望營造有利氛圍，以接續今年底將在巴黎舉行之「聯合國環境變遷綱要公約第 21 次締約方會議，COP21」。張大使也表示國內核能環境的艱困，也是多少會影響台灣在國際外交上的擴展，駐外單位人員必須要更努力。



圖 25、與張銘忠大使(中)合影

四、 建議事項

1. 在考量確保能源獨立性及供電安全上，核能是具有競爭性的無碳能源，既使在福島核事故後，部分國家放棄核能是事實，但許多國家仍是陸續推動核電計畫，主因不外考慮經濟發展的需要，更是環境永續發展不得不的選擇。國內更應以開放且理性的態度，面對國際碳減排壓力以及氣候變遷的威脅，尋求能源配比最佳策略。
2. 法國在 1979 年即成立國家放射性廢棄物管理署（ANDRA），作為處理放射性廢棄物之專責機構，負責規劃、興建及營運法國的高階及低階放射性廢棄物處置工作。不僅成功營運兩座低階處置場外，更是完成規劃 2025 年開始啟用高階處置場的國家。法國為解決放射性廢棄物議題的發展模式及組織運作體系，可作為我國未來成立專責機構之重要學習對象。
3. 雖目前尚未有任何案例顯示，在貯存期間密封鋼筒遭受應力腐蝕之安全疑慮，台電公司應持續進行腐蝕劣化機制與防止對策研究，並與國外專業機構進行技術交流，不斷更新資訊，以確實做到讓民眾能夠安心、放心。
4. 建議台電公司應積極加強用過核燃料長程處置技術研究工作，以雙邊或多邊合作方式加入國外地下實驗室之研究計劃（如瑞典 SKB、美國 WIPP、法國 Bure 及日本 Horonobe），克服國內建置地下試驗室之困境，並逐步建立我國處置技術能量。
5. 本局應持續整合國內學術及專業機構資源，掌握國際間在用過核燃料乾式貯存之技術面、管制與政策面之發展趨勢與方向，藉由國際發展經驗與問題解決對策，作為我國未來於用過核燃料乾式貯存相關管制措施之經驗借鏡。

五、 附錄

1. 會議議程。
2. 會議主席 Christophe Behar 先生講稿全文。