

出國報告（出國類別：其他）

參加第18屆放射性物質包件與運送
國際研討會【PATRAM 2016】

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：嚴國城薦任技士

派赴國家：日本

出國時間：105年9月18日至105年9月23日

報告日期：105年12月14日

摘 要

本次奉派赴日本神戶市參加第 18 屆放射性物質包件與運送國際研討會 (The 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials) (以下簡稱 PATRAM)，本研討會係由日本機械工程師協會 (Japan Society of Mechanical Engineers, JSME) 及日本原子力協會 (Atomic Energy Society of Japan, AESJ) 共同主辦，國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA)、世界核子物料管理協會 (Institute of Nuclear Materials Management, INMM)、世界核能運輸協會 (World Nuclear Transport Institute, WNTI) 協辦，該會議一貫宗旨乃希望建立放射性物質包件及運送實務之國際資訊交流整合平台，俾供來自各國政府機關、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。研討會內容包含新燃料及用過核燃料包件設計與測試、結構分析、臨界與屏蔽設計、風險評估、海運與陸運實務、輻射防護、用過核燃料或高放射性廢棄物之運送與貯存等。個人全程參與並於會中發表論文，介紹我國用過核燃料乾式貯存申照程序與公眾參與。

本報告內容主要摘錄與用過核燃料乾式貯存設施貯存安全及用過核燃料運送安全有關議題之國際資訊，以瞭解目前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	27
五、附錄	28

一、 目的

我國核一、二廠將分別將於 107 年與 110 年啟動核電廠除役活動，核電廠除役過程中，放射性廢棄物的處理尤其重要，其中又以用過核燃料的問題最受民眾關心。我國用過核燃料管理策略，係依據行政院 86 年 9 月修正發布之放射性廢棄物管理方針，採「近程以廠內水池式貯存，中程採廠內乾式貯存及在遵守國際核子保防協定下，尋求在國外進行再處理之可行性，長程推動最終處置」等短、中、長程方案對我國最為有利。

台電公司透過工程技術性、貯存安全性、社會、經濟與環境面等進行多面向詳細評估後，認為廠內乾式貯存方式最為恰當，因此目前正積極推動核一、二廠乾式貯存計畫。原能會物管局為力求周延安全管制，多方擷取各國成功管理經驗，並藉由國際研討會進行技術交流，以精進安全管制並確保乾式貯存作業安全。

PATRAM 研討會每 3 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，提供放射性物質(包含用過核燃料)安全運送技術發展與乾式貯存最新資訊，已成為該領域主要盛會。因此，本次行程重點除了解放射性物質包件與運送實務之國際管理趨勢及安全要求外，同時掌握各國對用過核燃料之管理策略以及乾式貯存技術研究發展等。另也藉此次會議，向與會成員簡報介紹我國用過核燃料乾式貯存申照程序與民眾參與，透過技術交流以精進本局之乾式貯存安全管制。

二、行程

日期	行程	工作內容
9月18日	台北→日本	報到
9月19日	日本	PATRAM 會議
9月20日	日本	PATRAM 會議
9月21日	日本	PATRAM 會議並簡報
9月22日	日本	PATRAM 會議
9月23日	日本→台北	PATRAM 會議及回程

本屆研討會係第 18 屆，由日本機械工程師協會(JSME)及日本原子力協會(AESJ)共同主辦，9月18日至23日於日本神戶市波多比亞飯店(Portopia Hotel)舉行，與會人員主要來自美國、英國、法國與日本等核能安全管制機構、核能研究單位、核能電力公司，以及包括放射性物質運送服務、運送/貯存護箱設計及製造商等核能工業界，共計發表 303 篇論文。職於 9 月 18 日抵達神戶市後，隨即前往研討會會場辦理報到手續，自 9 月 19 日起全程參加會議。

開幕典禮於 9 月 19 日上午於波多比亞飯店國際會議廳舉行，由東京工業大學 Masanori Aritomi 先生擔任主席，並進行開幕致詞，主席表示希望透過所有與會人員的經驗分享與技術交流，能夠對於全球的放射性物質運輸作業產生正面影響。主席致詞過後，再分別由日本機械工程師協會(JSME) Kikuo Kishimoto 先生、日本原子力規制委員會(NRA) Satoru Tanaka 先生以及神戶市觀光局 Hisao Katou 先生致歡迎詞。簡短致歡迎詞後，主辦單位隨即安排六場開幕專題演講，分別如下：

- (一) 國際原子能總署(IAEA) Stephen Whittingham 先生專題演講「國際原子能總署的能力建設活動，以發展成員國運輸安全的基礎設施(IAEA Capacity Building Activities to Develop Transport Safety Infrastructures in Member States)」。
- (二) 日本環境部(Ministry of the Environment, Japan) Takashi Nishio 先生專題演講「除污活動產生的土壤和廢棄物之運輸管理，包含東京電力公司福島第一核電廠因核子事故外釋的放射性物質(Transportation of Removed

Soils and Wastes Generated by Decontamination Activities, That Contain Radioactive Materials Released by the Accident at TEPCO' s Fukushima Daiichi Nuclear PowerStation)」。

- (三) 世界核能運輸協會 (WNTI) Henry-Jacques Neau 先生專題演講「核能運輸作業的演進 (Nuclear Transport in a Changing World)」。
- (四) 國際核服務公司 (International Nuclear Services, INS) Mark Jervis 先生專題演講「鈾鈷混合氧化物 MOX 燃料從歐洲到日本的運輸過程 (A Journey in the MOX Transport from Europe to Japan)」。
- (五) 美國運輸部 (U.S. Department of Transportation) Richard Boyle 先生專題演講「新千年新規章的制定 (Developing Regulations in the New Millennium)」。
- (六) 神戶鋼鐵廠 (Kobe Steel) Shohei Manabe 先生專題演講「日本用過核燃料安全貯存和運輸的寶貴經驗 - 40 年的經驗知識 (A Legacy of Safe Storage and Transport of Used Fuel in Japan - 40 Years of Lesson Learned)」。

開幕專題演講結束後，研討會分四個會議廳同時進行投稿論文之專題演講，內容包含新燃料及用過核燃料包件設計與測試、結構分析、臨界與屏蔽設計、風險評估、海運與陸運實務、輻射防護、用過核燃料或高放射性廢棄物之運送與貯存等專題，因上述各項專題同時進行，個人選擇參加與物管局業務相關議題並撰提心得報告。另本次會議個人亦就物管局乾式貯存業務之推展投稿「台灣用過核燃料乾式貯存申照程序與民眾參與 (Licensing program and public involvement of spent nuclear fuel dry storage in Taiwan)」論文一篇 (如附件一) 並由大會安排於 9 月 21 日下午演講，向與會人員介紹我國的用過核燃料乾式貯存發展現況。本次研討會之活動紀要如圖 1~3。



圖 1 PATRAM 2016 研討會於 105.9.19 在神戶舉行開幕



圖 2 本人由大會安排於 9 月 21 日進行簡報



圖 3 研討會中另設有展場供各核能產業之廠家展示其核能產品

三、 研討會心得

開幕專題演講中，針對國際原子能總署 Stephen Whittingham 先生的專題演講「國際原子能總署的能力建設活動，以發展成員國發展運輸安全的基礎設施」及日本環境部 Takashi Nishio 先生的專題演講「除污活動產生的土壤和廢棄物之運輸管理，包含東京電力公司福島第一核電廠因核子事故外釋的放射性物質」兩場演講之重點摘錄如下：

1. 國際原子能總署 Stephen Whittingham 先生於演講中表示：

- (1) 目前放射性物質在世界上所有國家的運輸量已經超過每年 2000 萬次的貨物運輸量。隨著放射性物質在醫療、農業和工業部門的普遍使用，國際原子能總署成員國的需求是發展安全運輸的基礎架構，包括有效的監管措施和監督作業。目前國際原子能總署針對放射性物質安全運送所發佈的安全標準法規為「放射性物質安全運輸條例(SSR-6)」，這些條例會經常審查修訂以順應潮流，並且可作為成員國制定其國內法規的參考。
- (2) 雖然放射性物質的運輸具有良好的安全營運紀錄，但是營運商、運輸團體、政府單位及非政府組織等並不因此感到自滿，因為我們都必須持續保持並且提高我們的標準，以因應未來放射性物質在新興國家中醫療保健計劃、農業和工業應用的快速發展。
- (3) 以過往成功的安全營運記錄作為基礎，除了持續有效的工作確保運輸安全外，也必須開發適當的技術以因應未來的新趨勢。國際原子能總署將持續精進管制策略，讓放射性物質在國際間以及各個國家境內的運輸作業都能順利安全。

2. 日本環境部 Takashi Nishio 先生的專題演講重點摘述如下：

- (1) 2011 年 3 月 11 日受到地震的波及，東京電力公司福島第一核電廠發生的放射性物質外釋對環境造成極大影響。大量的放射性物質外釋，造成的輻射污染其影響範圍達核電廠以外延伸 30 公里的區域(如圖 4)，為了解決這個問題，日本政府、福島地區及其他機關已開始實施除污活動和清理活動。
- (2) 除污活動產生的污染土壤和廢棄物目前暫時貯存在福島地區暫時貯存廠，為了安全的貯存及管理這些污染的土壤及廢棄物，福島縣政府規劃興建一

座中期貯存設施，將這些放射性廢棄物集中貯存，並直到最終處置場啟用。除污活動產生的土壤以及焚燒後的灰渣放射性濃度超過 100,000 Bq / kg 將被貯存在中期貯存設施中(如圖 5)。目前福島縣政府正持續將這些廢棄物送往中期貯存設施，這對於地區的重建與振興是相當重要的。

- (3) 為了確定運輸的安全性，福島縣政府自 2015 年 3 月開始實施為期一年的運輸實驗計劃，從福島縣內 43 個鄉鎮試驗點各自運輸了大約 1000 立方米的污染土壤。移除的土壤及廢棄物會裝在一個具有彈性的運送包件內，其大小約 1 立方米且具有防水功能，可裝入約 1 噸的廢棄物，其表面劑量平均為 $0.5 \mu\text{Sv/hr}$ 。包裝完成後在利用卡車運送，每輛卡車約可放置 6-8 個運送包件，重量約 10 噸，並使用防水布覆蓋在包件上。(如圖 6)
- (4) 試驗中共分為三個階段的運輸路線：暫時貯存廠內的運送、場外運輸以及中期貯存廠內的運送，每一階段的運輸都必須評估：對週邊居民的影響、對工作人員的影響以及運輸操作的效率和流暢性。運輸過程中，除了輻射劑量率外，噪音、振動以及空氣品質都必須監測。
- (5) 試驗的結果確認了運輸的安全性，因此，日本環境部制定了新的實施計劃，自 2016 年 4 月開始運輸，並預計至 2016 年底完成 15 萬立方米運輸量(如表 1)。若環境部持續增加中期貯存設施體積的建設以及改善福島地區道路基礎設施，則本計畫之運輸量預計在 2020 年可達到尖峰，亦即單年度可達 600 萬立方米的運輸量，並且到 2020 年累計之總運輸量估計為 500 萬～1250 萬立方米。

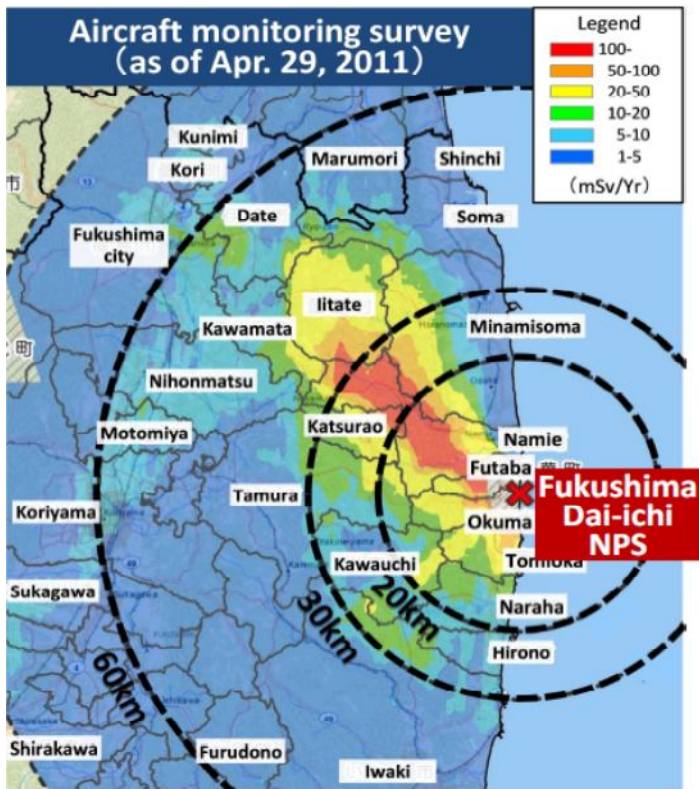


圖 4 福島第一核電廠放射性物質外釋對環境造成的影響

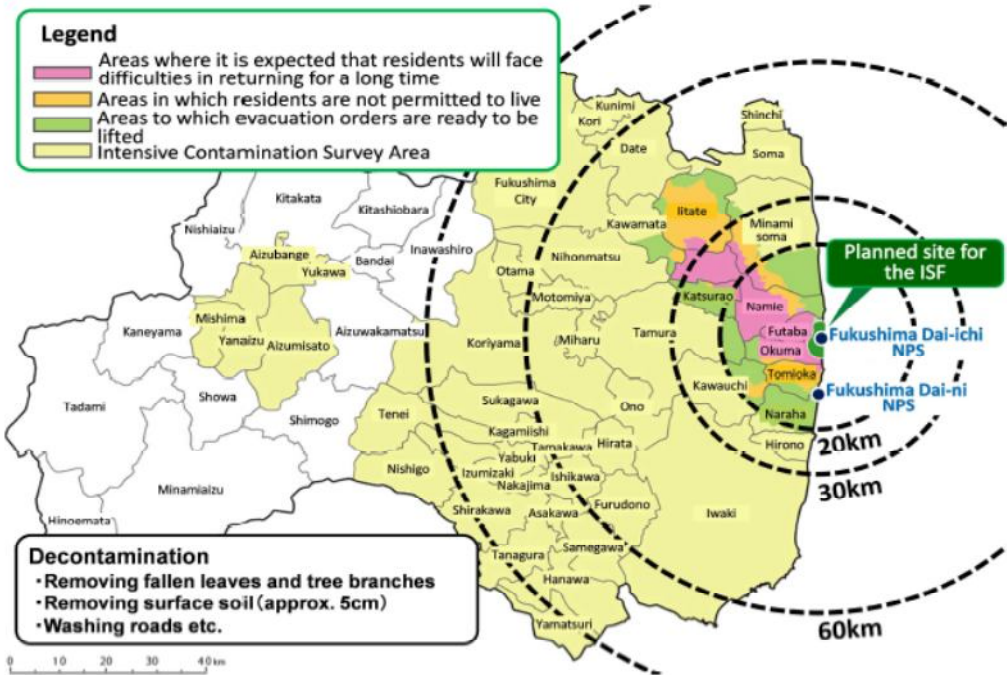


圖 5 除污活動產生的土壤以及焚燒後的灰渣將被貯存在中期貯存設施中

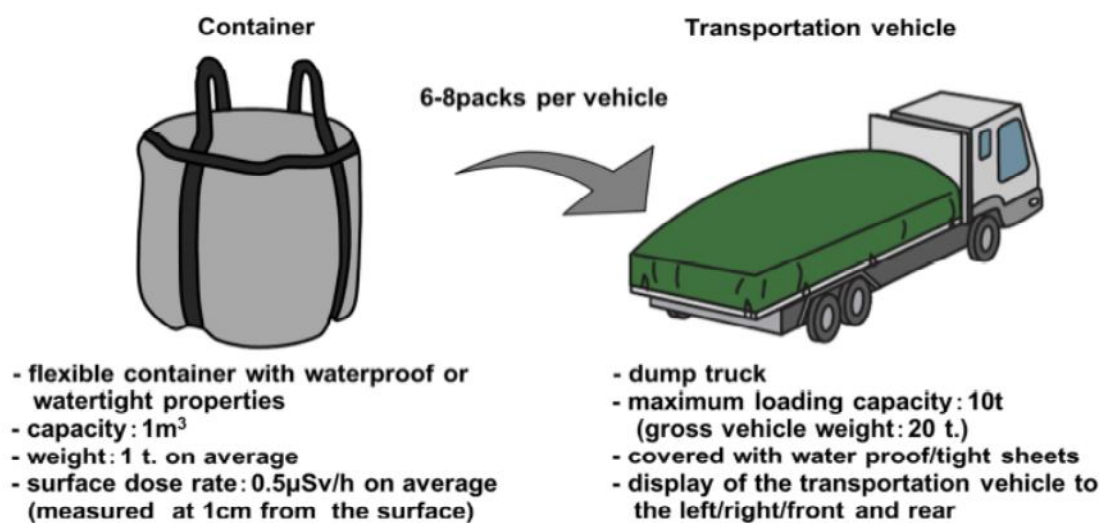


圖 6 運送包件規格及運輸工具

表 1 運送現況及未來規劃

FY (Apr.-Mar.)	Amount of annual transport (estimation) [million m ³]
2014-2015	0.05
2016	0.15
2017	0.3 - 0.5
2018	0.9 - 1.8
2019	1.6 - 4.0
2020	2.0 - 6.0
Accumulation by 2020	5.0 - 12.5

五天研討會期間，主辦單位共計安排 261 場次簡報以及海報展覽(共計 303 論文)，範圍甚廣，個人挑選與本局業務相關且具代表性議題參加，本報告將摘要說明各項議題之重點摘錄，供本局瞭解核能先進國家最新之用過核燃料乾式貯存管制技術與發展，作為推展國內用過核燃料安全管制之參考。另本次會議個人口頭簡報時，關於與會人員對本局乾式貯存業務之提問，將於以下內容一併陳述。本次研討會論文集光碟片將於今(2016)年 12 月底前可寄達參與人員，後續將於收到論文集後，將所有檔案上傳至本局網路硬碟供同仁參閱。

1. 美國能源部(DOE)的核燃料貯存和運輸研發活動

本議題係由 Sandia 國家實驗室 Sylvia Saltzstein 先生簡報，內容摘述如下：

- (1)由於美國能源部停止對雅卡山計畫的工作，導致貯存在核電廠的用過核燃料的大幅增加，截至 2015 年 8 月，美國有 72 座獨立用過核燃料貯存設施 (ISFSI)位於 34 個州(資料補充：依據本局調查統計至 2016 年 7 月美國已有 74 座 ISFSI)。根據美國核能管制委員會的統計，至 2015 年底大約有 2000 個不同重量、尺寸、貯存年度的乾式貯存護箱貯存用過核燃料。其中大多數是雙功能貯存護箱 (Dual purpose cask 可用於貯存和運輸)，但是這些乾貯護箱並沒有被許可長時間 (60 年以上) 的貯存和後續的運輸。
- (2)美國能源部的政策是建立至少一個集中式中期貯存設施貯存這些乾式貯存護箱直到最終處置場場址確認且啟用。這需要在將來進行兩次大規模的放射性廢棄物運輸活動，一次係從當前貯存地點運送到集中式中期貯存設施，另一次則係從集中式中期貯存設施運送到最終處置場。目前能源部資助的研發費用主要係用以開發技術基礎，以確認燃料和乾式貯存護箱在延長貯存後，於道路或鐵路的運輸時，用過核燃料可保持結構完整，乾式貯存護箱可保持密封能力，使其能安全運輸。
- (3)目前的研發重點包含：(a)在濕式貯存、乾式貯存和延長貯存後燃料護套的材料性能，(b)將乾式貯存護箱和燃料暴露在熱條件下，以便了解在貯存多年後燃料和乾式貯存護箱可能產生的應力和化學變化，(c)任何可能降低乾式貯存護箱貯存性能的環境條件，以及(d)在正常運輸條件下針對單個燃料

棒施加的負載和應變。

(4)從目前各項不同領域單獨試驗和研究分析結果顯示，這些結果均共同顯示出用過核燃料比我們過往所想像的更加健全，主要結果如下：

A. 從熱模型試驗顯示，燃料護套溫度的峰值基本上是會低於 400°C 的法規現值。溫度是護套中機械變化的驅動力，當護套之溫度峰值較低時，在乾燥階段跑進溶液中的氫會較少，也因此當護套冷卻時，較少的氫化物會在護套的徑向析出。其次，如果燃料和護套較冷，則燃料棒內部壓力將較低，導致較低的護套環向應力。較低的環向應力也會降低徑向氫化物的形成。這些是重要的發現，因為較少的徑向氫化物形成就能減低徑向應力的形成。

B. 延性轉脆性轉變溫度的研究顯示，當護套達到接近峰值溫度和受到環向應力時是可延展的。在沒有顯著的徑向氫化物形成時，延性轉為脆性的轉變溫度會保持非常低。根據護套的疲勞強度研究顯示，護套可以承受至少數萬次的疲勞循環(Fatigue cycle)，比燃料在正常運輸條件下護套所經歷循環更多。當發生破損時通常是燃料丸間的斷裂，其導致僅少量燃料丸釋出。所有這些不同的效應皆指出燃料/護套系統比先前預測的更強(如圖 7)。高燃耗用過核燃料的研究數據也被預期可以符合這些結果。

C. 脆性燃料通常不會斷裂，除非它經歷外部應力的引發。

(5)本報告提及的各項研發活動係由美國能源部及美國核管會（熱液壓測試部份）資助，並透過各國家試驗室之間合作的完成，包含 Argonne 國家實驗室，西北太平洋國家實驗室，愛達荷國家實驗室，薩瓦納河國家實驗室，Oak Ridge 國家實驗室和 Sandia 國家實驗室。

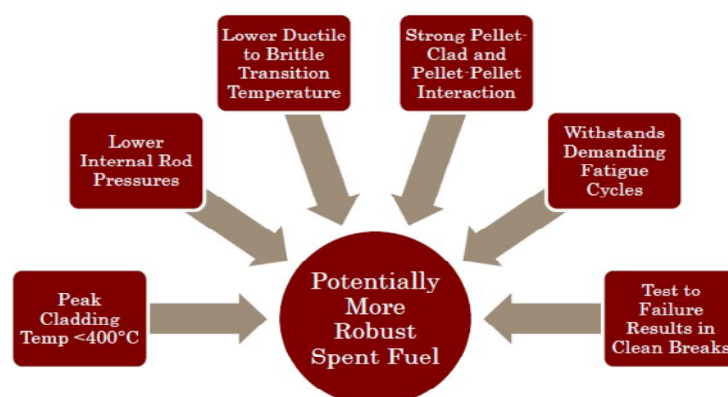


圖 7 各項不同領域單獨試驗和研究分析結果顯示，這些結果均共同顯示出用過核燃料比我們過往所想像的更加健全

2. 瑞士乾式貯存雙功能貯存護箱的老化管理項目

本議題係由瑞士聯邦核能安全檢查局(Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI)Frank Koch 先生簡報，內容摘述如下：

- (1)近幾年，國際間投入用過核燃料乾式貯存護箱的老化管理研究活動已越來越多，瑞士已加入了 IAEA 運輸和廢棄物安全委員會聯合工作組，TRANSSC 和 WASSC。該小組已經發布了一份技術文件，並建議應加強 IAEA 的標準和法規指引。而 TRANSSC 也打算在即將到來的運輸法規(Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material)SSR-6 修訂版中引入老化管理的要求。
- (2)ENSI 的法規指引已包括各種不同老化要求的監管概念，如核電廠定期安全審查，雙功能貯存護箱(Dual-Purpose Cask, DPC)核照要求以及用過核燃料相關元件的設計和操作要求。老化管理活動分為三個層面，包含技術、組織和行政管理，如圖 8 所示。
- (3)研究老化管理問題的主要目的是為了確定瑞士法規監管架構增強的必要性以及進行額外的研究工作。這項工作涉及許多層面的技術能力，包含機械、熱流、核能安全和材料等。目前對於老化管理項目的研究，係由 ENSI 的專家以及其委託的外部專家組成研究團隊來執行。
- (4)在瑞士所有的核電廠都選擇了 DPC 作為用過核燃料最終處置前的處理措施，另外也包括擴展現有的濕式貯存池。DPC 在貯存設施中的使用通常是基於可以安全貯存用過核燃料 40 年為接收標準並且需每十年進行再評估。由於在瑞士尋找最終處置場的進度正面臨著計畫延誤，因此，用過核燃料可以在乾式貯存護箱貯存多久以及貯存期超過 40 年的安全餘裕是如何，這些問題必須進行深入探討。
- (5)目前瑞士對於核電廠的監管架構是採定期安全審查，其中 DPC 的運輸能力和貯存能力的審查亦包含在內。由於有幾個核電廠係使用相同類型的 DPC，因

此，這種類型的安全審查方式會在幾年內被重複執行，但卻不會帶來顯著的效益。因此，採取單獨審查 DPC 的形式將更為合理。

- (6) 運輸法規的修訂可能需要考慮護箱老化現象。為了確保 DPC 的綜合老化評估和老化管理，ENSI 將單獨核發護箱設計的許可，取代護箱的原產地證書。
- (7) 關於 DPC 用於貯存的接收標準，ENSI 將頒發類似符合此一用途的證書，其中還包括對 DPC 定期安全審查的要求。這就是前面所說的採取單獨審查 DPC 的形式。接下來，對於核照年限以及運輸和貯存證書也會採取一致作法。如有必要，也可將每個證書單獨分開。目前沒有計劃將證書合併為一個，因為他們分屬不同法律領域。
- (8) 老化管理要求應該明確定義在 ENSI 的法規指引中，並納入貯存護箱的設計要求。研究團隊建議先在法規指引中實施一般性的老化管理要求，因為目前這項概念還相當新，可能在短時間內需要更新。



圖 8 DPC 老化管理的三層面

3. 混凝土護箱在日本實際運用之技術問題解決方案

本議題係由日立造船公司 (Hitachi Zosen Corporation, Hitz) 的 Masanori Goto 先生簡報，內容摘述如下：

- (1) 金屬護箱已用於日本的用過核燃料乾式貯存。在不久的將來，基於經濟效率、減少廢物的角度考慮以及預期金屬護箱供應短缺的情況下，混凝土護箱將被期待可以用於日本用過核燃料乾式貯存。
- (2) 日立造船公司已在日本市場提供可運送的金屬護箱之設計和製造，目前正在積極開發混凝土護箱系統，以期望可用於未來日本市場的需求。由於日本四面環海，且將來中期貯存設施應會建置在靠海地區，因此，奧氏田鐵不銹鋼貯存罐在長期使用的情況下，必須考慮氯離子誘發應力腐蝕劣化的問題 (CISCC)，這也是混凝土護箱在日本使用所面臨最大的挑戰。防止 SCC 的發生和確保奧氏田鐵不銹鋼貯存罐的長期貯存功能將是重要技術問題。
- (3) 溫濕度、材料殘餘應力以及鹽分沈積三個要件要同時存在時，才會發生應力腐蝕劣化，只要將其中一個因素排除，就能阻止其發生。
- (4) 日立造船公司提出了一個對策去抵抗 SCC 的發生，這個對策是建立在銲道殘留應力的基礎上。首先，為了防止 SCC 發生，殘餘應力的改善（將金屬表面拉伸應力轉換成壓縮應力）需在完成桶身及底板銲接後應用，這部份係使用氧化鋯噴砂 (zirconia peening) 的方法。再來，於完成 primary lid 及 closure ring 的銲接後，執行應力緩解方法（如拋光、超音波噴砂等）。另外考量其他安全性，建議也應該執行裂縫的檢查。有關日立造船公司的 SCC 對策示意圖可參考圖 9。
- (5) 未來混凝土護箱在日本的使用可能需執行定期檢查，因為日本的監管機構可能會關注 SCC 的問題。目前在美國，核電廠有很多混凝土護箱的貯存經驗，他們通常係透過目視來進行護箱表面檢查，但這種方法不容易檢測到 SCC。

所以可能需要利用非破壞檢測方法（NDE）來找到 SCC。使用 NDE 的方法來檢測密封鋼桶表面 SCC 的現象會有幾個問題：

- A. 密封鋼桶與混凝土護箱間可供儀器檢查的空間非常狹小。
- B. 有線儀器很難應用於混凝土護箱，使用無線遙控的儀器是必要的。
- C. 部份的密封鋼桶表面是隱藏在混凝土支撐組件的後面，不易檢查。

(6) 因為 NDE 在使用上有一些限制，因此日立造船公司提出了另一種方法代替 NDE，也就是氦氣洩漏檢測。假設 SCC 產生並且裂縫貫穿桶身，那麼就會產生氦氣洩漏進而影響護箱的熱傳導機制。因此，日立造船公司建議透過護箱表面溫度差異的監測來進行氦氣洩漏檢測。

(7) 目前混凝土護箱在日本仍處於研發階段，相關的貯存及監測方法尚未經日本原子力規制委員會(NRA)的許可，可持續追蹤其後續的研究發展。

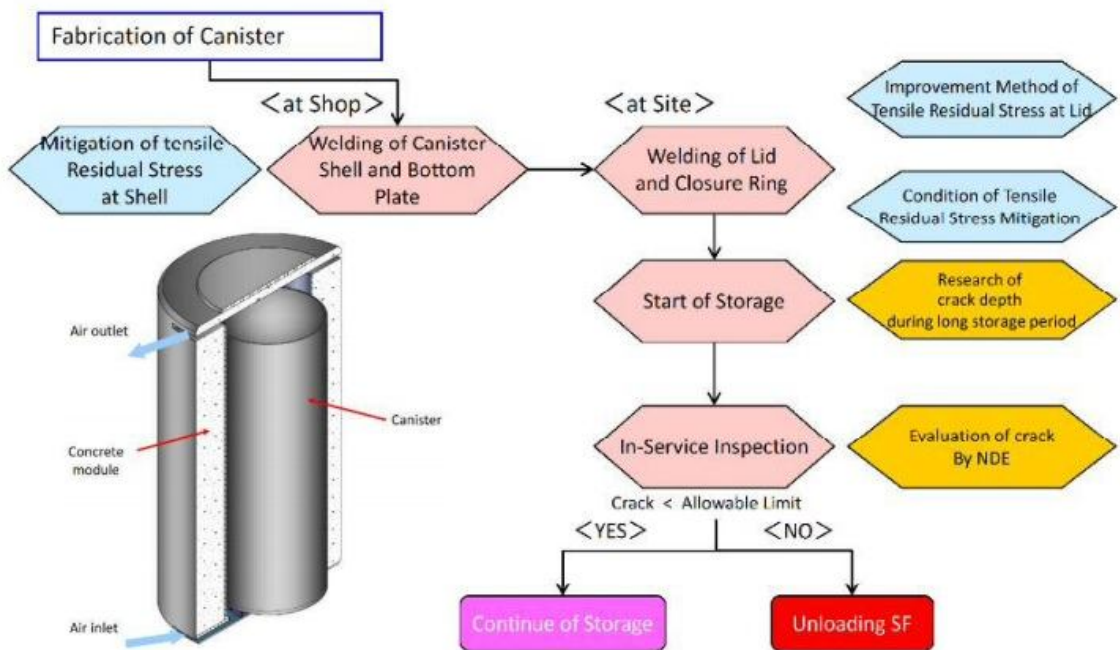


圖 9 日立造船公司 SCC 對策示意圖

5. 美國能源部(DOE)實施美國國家科學院對於用過核燃料運輸建議的進展

本報告係由 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)的 Kevin J. Connolly 先生簡報，內容摘述如下：考量到未來會有大量用過核燃料及高放射性廢棄物運輸的需求，美國國家科學院(United States' National Academy of Sciences, NAS)啟動了一項對於用過核燃料及高放廢棄物運輸安全的研究，並且在 2006 年發了一份報告「Going the Distance? The Safe Transport of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste in the United States (NAS, 2006)」°。在這份報告中針對降低用過核燃料及高放廢棄物運輸風險提出了 14 項建議。本報告將說明這 14 項建議的內容及美國能源部(DOE)至目前為止的參採情形。

(1) 運輸安全(Transportation Security)

建議內容：

用過核燃料和高放廢物安全在開始大量運往聯邦最終處置場或中期貯存設施之前應先進行獨立的安全檢查。這種檢查應該由政府機關以外具備專業技術與知識的團體來執行，並且給予這個小組充分權限去獲得必要的分類文件和保安訊息以執行此任務。檢查的結果和建議應盡可能讓公眾知道。

DOE 參採及辦理進度：

目前能源部並沒有採取由獨立專業技術團體執行審查的作法。然而，能源部也有安全考量的認知，因此對於未來用過核燃料和高放廢棄物運輸的安全性，已經取得長足的進展。能源部放射性物質運輸施行手冊 (*Radioactive Material Transportation Practices Manual*)，最近在 2008 年更新，要求能源部對於用過核燃料和高放廢棄物的運輸必須符合或超過美國核管會 10 CFR part 73 中有關運輸安全要求的保護水平。

(2) 路程中的危害(Routing Hazards)

建議內容：

交通規劃者和管理者應對運輸路線進行詳細的調查，以識別可能的潛在危險，這些危險可能會導致或加劇極端事故持續發生的時間。規劃者和管理者也應該在開始運輸或運輸活動之前採取措施以避免或減輕此類危害。

能源部參採及辦理進度：

因為最終處置場及中期貯存場目前尚未決定，因此目前暫時沒有實施這項建議的必要。

(3) 社會風險(Social Risks)

建議內容：

運輸實施者應及早並主動建立正式的機制，用以收集關於社會風險的高質量和多樣性的建議。

能源部參採及辦理進度：

根據這項建議，能源部已經編寫了風險感知參考書目，其中包含自 1997-2013 中 130 多個參考文獻。

(4) 預防火災(Preventing Fires)

建議內容：

核管會應該去了解包件長時間處在火災中的性能影響。為此，該機構應該對超出預期的持續長時間的火災進行額外事故分析作為包件設計的一組代表性參數組，這些未來可能可以用在大數量的運輸計劃。

能源部參採及辦理進度：

這項建議主要是針對美國核管會而非能源部。

(5) 包件測試(Package Testing)

建議內容：

全面的包件測試應繼續作為整體分析的一部分，透過電腦模擬，尺度模型和測試程序來驗證包件的性能。不應要求對包件進行故意的全面測試以作為整體分析的一部分分析或用於驗收演練。

能源部參採及辦理進度：

根據 1982 年核廢料政策法 (Nuclear Waste Policy Act of 1982, NWPA) 第 180 節中，所有的用過核燃料以及高放廢棄物在運往貯存設施或最終處置場時，必須裝在美國核管會認證的包件中，其必須符合 10 CFR part 71 的要求。

(6) 州和部落的參與(State and Tribal Involvement)

建議內容：

能源部應持續確保各州和各部落有系統且有效率的參與涉及路線與外部調度的決定以及研究用過核燃料的運輸量。

能源部參採及辦理進度：

能源部透過與州地區團體 (state regional groups, SRGs) 的合作協議與州政府及各部落合作進行交通規劃。

(7) 路線規定的合法性(Routing Regulation Compliance)

建議內容：

交通部(DOT)應確保用過核燃料在各州運輸的指定路線應該嚴格遵守其監管要求，並由合理的風險評估支持。交通部和能源部應確保所有潛在受影響的州都知道並且準備履行他們對指定公路路線的責任。

能源部參採及辦理進度：

DOE 正在考慮一種標準的路線規劃方法，其中聯邦、州、部落和運輸者將協助確認裝運路線，並確認在這一運送過程中每一個步驟都有遵守法規。

(8) 鐵路運輸(Rail Transportation)

建議內容：

能源部應充分實施其大多數的鐵路決策 (鐵路包件和運輸工具)，並與商業用過核燃料持有者合作以確保設施在核電廠室可用的，以支持這個選項。這些步驟應在能源部開始大量運輸用過核燃料和高放廢物到最終處置場之

前完成，以避免需要以採購基礎設施和建設設施擴展卡車運輸計劃。能源部還應該進一步研究透過擴大聯合運輸的方式減少跨境卡車運輸用過核燃料需求的可行性。

能源部參採及辦理進度：

能源部正在準備未來用過核燃料和高放廢棄物的鐵路運輸。未來將會以符合美國鐵路協會(AAR)的標準(S2043)火車車廂來運送高放射性物質。

(9) 路線選擇(Route Selections)

建議內容：

能源部應該盡快確定並公佈將用過核燃料和高放廢棄物運往聯邦最終處置場所首選的高速公路和鐵路的路線，以利於各州、部落進行規劃，特別是緊急救援人員的準備。能源部應該遵循其國外研究用過核燃料運輸計劃中涉及州與部落之路線選擇的做法，以獲得在他們管轄權內對事故率，交通、道路條件和緊急應變準備的認同。各州和各部落的參與可以提高公眾對路線選擇的接受度，並可減少可能的衝突造成程序延遲。

能源部參採及辦理進度：

體認到選擇運輸用過核燃料和高放廢棄物的模式和路線的重要性，能源部正在考慮可能的標準路線選擇方法。這種方法會建立在國家科學委員會和藍帶委員會建議的基礎上。

(10) 專用火車(Dedicated Trains)

建議內容：

能源部在大量運輸用過核燃料極高放廢棄物至聯邦最終處置場之前應充分執行其專用火車的決定，以避免需要使用普通列車的替代運輸計劃。

能源部參採及辦理進度：

雖然目前能源部並沒有做任何有關使用專用列車的官方政策決定，但是能源部已經可以預期將來對於用過核燃料及高放廢棄物運往幫處置場或中期

貯存場的主要模式將會以專用火車的可能性較高。火車車廂的設計會符合美國鐵路協會（AAR）的標準（S2043）。

(11)除役電廠的優先順序(Shutdown Site Prioritization)

建議內容：

能源部應與商業用過核燃料持有者協商優先運輸舊燃料到聯邦最處置場或中期貯存場，除非特定核電廠其用過核燃料有貯存危險的情況（如果有的話）並要求及早運輸較新的燃料。如果協商無效的話，國會應考慮立法補救。在與商業用過核燃料持有者的合同中，能源部應透過一個相對上在執行運輸比較簡易的除役電廠執行運輸試驗，以證明能夠以安全和有效的方式履行其職責。能源部應利用從這一試點活動中汲取經驗教訓然後開始全面實施營運中電廠的運輸計劃。

能源部參採及辦理進度：

當前的能源部規劃重點是將用過核燃從除役電廠運輸到暫時的中期貯存場。因此，能源部運輸規劃工作目前正在進行分析這些除役電廠。

(12)第 180c 節的活動（Section 180(c) Activities）

建議內容：

能源部應立即開始執行緊急應變準備，此為核廢料政策法第 180(c)中所規定的責任。

DOE 參採及辦理進度：

DOE-NE(Office of nuclear energy)一直在與利益相關者討論實施 NWPA 第 180(c)的相關政策。DOE 在 NTSF(DOE' s National Transportation Stakeholders Forum)下設立了一個特別工作小組，以便執行第 180(c)條相關的政策，這些政策對利益相關者很重要，在用過核燃料裝運開始之前必需解決。例如在 2014 年 12 月執行了一項政策工作，其目的係為了模擬受用過核燃料運輸影響的州和部落其申請及接受聯邦補助以用於培訓公共安

全人員的過程。這樣的練習過程可作為將來實行政策的經驗，並且可以適時改進。

(13) 訊息分類 (Classification of Information)

建議內容：

能源部、國土安全部、交通部以及核管會應及時完成工作的發展與應用，訊息披露應一致，並且合理的保護關於用過核燃料及高放廢棄物的敏感訊息。他們也應該承諾公開共享不需要此類保護的信息，並應便於及時獲取此類信息。例如，透過網站發布。

DOE 參採及辦理進度：

DOE 計劃重新審視這項建議，以確保這些政策和程序足以保護敏感信息，以及能適當的在聯邦機構、州、部落及公眾分享必要的訊息。

(14) 組織結構 (Organizational Structure)

建議內容：

能源部長和美國國會應該省視改變能源部用過核燃料及高放廢棄物運輸至聯邦處置場這項計劃的組織結構。修改組織結構的主要目為了給予運輸方案更大的規劃權限及預算靈活性來進行這項長年的計畫以及採購和建設必要的交通基礎設施，以支持未來日益擴大的運輸任務。無論選擇什麼組織結構，都應該強調操作的安全性和可靠性，並且回應社會的關注。

DOE 參採及辦理進度：

目前沒有這麼做的必要，若將來有一個新的用過核燃料及高放廢棄物管理單位，獨立於能源部之外的單位，才需要國會建立新的法。

6. 法國用過核燃料運輸管理計畫

本報告係由 AREVA TN 公司的 Catherine Shelton 小姐簡報，重點摘述如下：

用過核燃料運輸計畫需匯集多個領域的專業知識（如工程，鐵路，公路和海上運輸，檢查，通訊，護箱操作，品質保證等）來制定相關運輸程序，並且需要關鍵資產的資本支出，如鐵路系統，運輸護箱，設施維護和運送車廂，以及經合格訓練並符合法規要求的操作人員來執行用過核燃料運輸作業。本簡報將說明實施運輸計畫前置作業主要步驟、執行運輸作業的關鍵要素以及 AREVA TN 公司如何強化其運輸模式。

(1) 運輸計畫的實施分為三個階段，執行運輸作業前，需依照三階段程序做好前置作業，以利後續之運輸作業進行：

長期活動（運送作業開始前 10-15 年啟動），主要活動包含：

- A. 定義運輸的規格，包括燃料特性，年運輸量、設施限制、安全和實物保護規定等。
- B. 運送模式的設計與許可，包括運輸路線規劃、航站（鐵路及海運）、運輸護箱設計、鐵路車廂設計、輔助設施（用於護箱及車廂維護、護箱運送前的準備）及建立程序。

C. 資產採購

中期活動（運送作業開始前 2-10 年啟動），主要活動包含：

- A. 資產的採購與製造，包含鐵路航站、運送護箱、輔助設施。
- B. 供應商的選擇與資格
- C. 發展與利益關係者的溝通計畫與教育
- D. 發展緊急應變計畫
- E. 建立程序及資訊平台
- F. 僱用員工及訓練

短期活動（運送作業開始前 0-2 年啟動），主要活動包含：

- A. 運輸前的整體功能演練
- B. 用過核燃料的包裝與裝載
- C. 運輸調度及運送隊伍管理

(2) 執行運輸作業的關鍵要素：

- A. 溝通協調，包括管制機關、燃料持有者與其他利害關係者之間的溝通以及托運人、接收者及運輸供應商和相關利害關係者之間的溝通。
- B. 運送護箱空桶及鐵路車廂的準備，在運送護箱送往核電廠之前，必須先進行護箱空桶及車廂的驗證工作，包含許可證、內部設備、輻射評估、標籤標記等，這些驗證工作都完成確認後。再將護箱空桶送往核電廠準備進行燃料裝載。
- C. 護箱裝載，這部份係由核電廠經營者法國電力公司(Électricité de France S.A., EDF)來負責。AREVA TN 公司可以提供幫助以確保正在裝載的燃料與護箱裝載圖的一致性，並在其離開核電廠之前執行運輸裝置的驗證（包含輻射量測、標籤標誌、運輸文件等）。
- D. 護箱運輸，將護箱送往最終處置場或是再處理場(La Hague recycling facilities)。

(3) 過去幾年 AREVA TN 公司持續強化運輸模式，其中有兩項主要特色：

- A. 實施運輸風險管理(Transportation Risk Management, TRM)計劃。由一個獨立的運輸經營團隊負責更新運輸流量風險分析，審核和檢查供應商並在事件發生時管理危機。
- B. 加強危機管理能力。儘管我們從未面臨環境影響的事件，但我們仍將危機理計劃升級，以確保事件發生時，能幫助地方當局，並提供對媒體及民眾的即時溝通回應。

另 AREVA TN 公司也將運輸過程的安全防護升級，以因應恐怖主義行為日益增加的威脅。

7. 韓國 KN-18 用過核燃料運輸護箱

本報告係由韓國水力及核電公司(Korea Hydro & Nuclear Power Co, KHNP) Sung-hwan Chung 先生簡報,介紹其公司新發展的 KN-18 用過核燃料運輸護箱,該護箱簡介如下:

- (1) KN-18 運輸護箱(如圖 10)可用來運輸 18 束 PWR 用過核燃料束,其設計符合韓國和 IAEA 對 Type B(U)型包裝的規定。其裝填的用過核燃料可允許的最大初始二氧化鈾豐度為 5.0 wt%,燃料組件的燃耗最大平均值的限制為 60 GWD/MTU,且其最少必須冷卻 9 年以上。可裝填並運輸 CE 16x16 燃料。
- (2) KN-18 運輸護箱係由具有中子屏蔽層的圓柱形桶身,雙桶蓋,燃料提籃,兩對吊耳軸(trunnions)和一對衝擊限制器(impact limiters),如圖 11-12。總桶長為 5,159mm,壁厚為 290mm,桶體的外徑為 2,351mm。每個衝擊限制器的直徑為 3,592mm,並沿著容器的側面在軸向方向上延伸 1,075mm。裝載 18 個燃料組件的搬運重量為 104 噸,帶衝擊限制器的運輸重量為 126 噸。
- (3) 護箱設計的標準係採納韓國的核能安全法及 IAEA 的法規。並且依據美國聯邦法規 10 CFR71 以及美國核管會法規指引 7.8 中定義的負載條件來評估護箱的結構性能。
- (4) 在正常條件下護箱的屏蔽為伽瑪射線與中子合併的最大劑量率維持在表面劑量率小於 2mSv/hr 且距離 2 公尺處劑量率維持小於 0.1mSv/hr。
- (5) 在護箱的每個製造過程中,韓國的監管機構會根據相關法規和規範標準進行製造檢驗。包括材料檢查、焊接檢查、非破壞檢測、目視和尺寸檢查、MNOP 的靜水壓試驗、負載試驗、熱試驗以證明熱傳遞完整性,氬氣洩漏檢驗,屏蔽完整性試驗和功能測試。(護箱製造及相關檢驗測試示意圖如圖 13-16)



圖 10
KN-18 運輸護箱

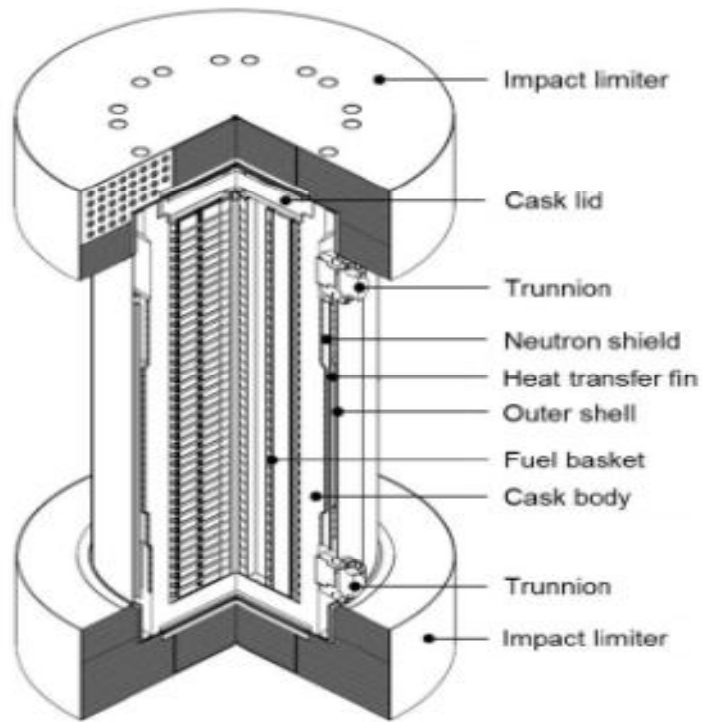


圖 11
Cask overview

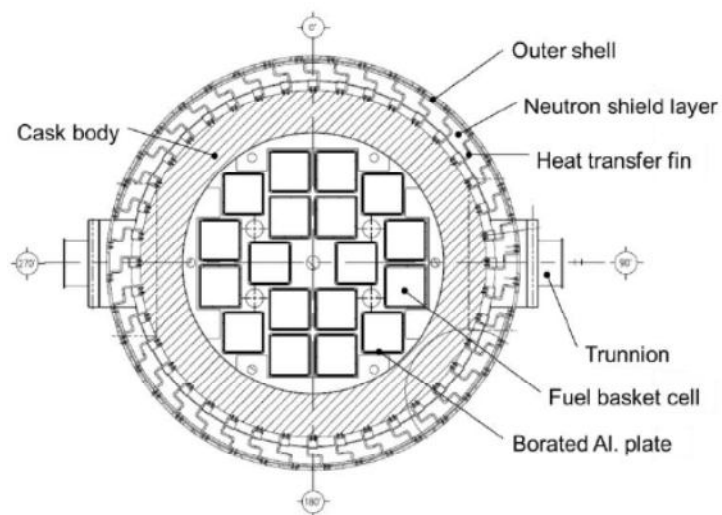


圖 12
Cask section
view



圖 13 9 公尺墜落測試



圖 14 非破壞檢測



圖 15 焊接

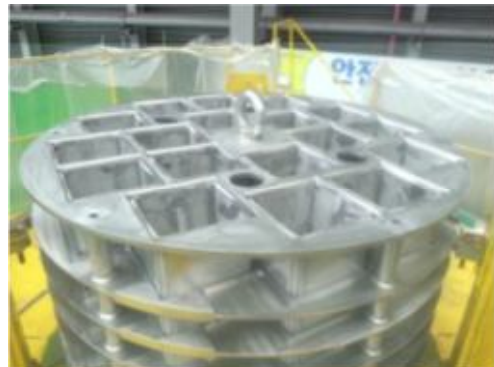


圖 16 提籃結構

8. 個人由大會安排於 9 月 21 日下午進行口頭簡報，簡報題目為「台灣用過核燃料乾式貯存申照程序與民眾參與」，向與會人員介紹我國用過河燃料乾式貯存的申照程序及公眾參與活動，並和與會人員進行問答討論，其內容摘述如下：

- (1) 簡報中有關聽證的總結提到，在核電廠除役計畫中，設施經營者必須確保有一設施可以讓用過核燃料再取出。請問在管制實務上，台灣的管制機關如何要求設施經營者具備此一能力？

本人回答：

原能會已要求台電公司於乾式貯存設施試運轉功能驗證階段，建置用過核燃料再取出技術能力。台灣核一廠乾式貯存設施已於 101 年 11 月完成模擬驗證作業，模擬用過核燃料再取出及回貯等作業測試，各階段作業原能會皆派員進行查核，確保符合安全測試要求。另原能會已要求台電公司應

於核一廠除役期間用過核燃料池不可用之前 1 年，覓妥或設置乾式貯存之再取出作業場所，並於其除役計畫中提出具體規劃，以確保備妥再取出作業場所。未來核二廠除役亦須同樣辦理。

- (2) 從簡報中可以看出台灣管制機關對於乾式貯存設施的申照程序是採取較嚴謹的作法，那麼為何乾式貯存計畫的推展仍然受到這麼多民眾的反對？

本人回答：

台灣自從 2011 年 3 月 11 日東日本大地震後，有關於核能安全的相關議題在國內受到高度關注，由於台灣地狹人稠，民眾擔心若是台灣發生像日本一樣的核子事故，後果恐難以想像。因此，2011 年 3 月後，對於國內各項核能政策的推展，都被予以高度檢視，也迫使乾式貯存計畫無法順利推展。而為了解決此一困境，管制機關建立了各種溝通平台，期望透過溝通交流，紓解民眾對於核能安全的疑慮，促使政策能順利推展。

五、 建議事項

1. 由「日本東京電力公司除污活動的經驗」顯示，放射性廢棄物運輸作業的進行，事前的規劃、運輸試驗、運輸階段的安全評估（輻射劑量、噪音分析、振動及空氣品質）都是運輸安全的關鍵步驟。建議台電公司參考日本福島廢棄物清運的經驗，以作為未來國內執行放射性廢棄物及用過核燃料運送作業參考。
2. 由美國能源部及核管會主導的用過核燃料貯存及運輸研究活動，係由其各國家實驗室之間合作來完成，包含 Argonne 國家實驗室，西北太平洋國家實驗室，愛達荷國家實驗室，薩瓦納河國家實驗室，Oak Ridge 國家實驗室和 Sandia 國家實驗室。用過核燃料貯存及運輸研究活動涉及各種不同的專業領域，包含熱傳分析、輻射屏蔽、結構材料、模擬分析等，美國係由各國家實驗室依其專業領域研析後，再將各領域研究成果整合供管制機關參考。建議台電公司未來執行有關用過核燃料之技術研究可參考此一作法，俾使研究成果更為顯著。
3. 老化管理活動已是國際潮流，IAEA TRANSSC 已打算在接下的運輸法規 SSR-6 的修訂中納入老化管理要求，以作為各成員國訂定其國內老化管理要求的參考依據，我國應持續關注 SSR-6 的後續修訂結果。
4. 日立造船公司正積極研發適用日本用過核燃料乾式貯存的混凝土護箱，其發展過程中也關心氬離子應力腐蝕劣化問題，其對策係藉由在密封鋼筒製程中改善金屬殘餘應力來降低 SCC 發生的機率。另對於混凝土護箱未來貯存用過核燃料時之即時監測，日立造船公司認為可用護箱表面溫度差異的監測來進行氬氣洩漏檢測，以確認護箱之密封完整性。混凝土護箱目前尚在設計階段還未正式在日本乾式貯存設施使用，可持續追蹤其後續監測技術之發展。
5. 國內核能電廠即將步入除役階段，用過核燃料的乾式貯存及運輸作業為除役作業的重點項目，對於國際間相關之管理動態及策略走向應即時掌握，建議編列足夠經費參與國際研討會，俾利國內除役作業的進行。

六、 附錄

- (1)投稿論文「Licensing program and public involvement of spent nuclear fuel dry storage in Taiwan」。
- (2)研討會簡報檔。