

出國報告(出國類別：開會)

參加放射性物質包裝與運輸國際研討會 (PATRAM 2016)

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：蕭向志 技術組長

鄭素琴 核析組長

吳樹實 運二課長

派赴國家：日本

出國期間：105.09.18 ~ 105.09.24

報告日期：105.11.01

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加放射性物質包裝與運輸國際研討會(PATRAM 2016)

頁數 17 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

蕭向志/台灣電力公司/核能後端營運處/技術組長/(02)23657210

鄭素琴/台灣電力公司/核能技術處/核心組長/(02)23667069

吳樹實/台灣電力公司/核能安全處/運二課長/(02)23667182

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：105.09.18 ~ 105.09.24 出國地區：日本

報告日期：105.11.01

分類號/目：

關鍵詞：核能電廠除役

內容摘要：(二百至三百字)

- 1.放射性物質包裝與運輸國際研討會(PATRAM 2016，International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material)於105年9月18-23日在日本神戶(Kobe)召開。PATRAM是全球唯一專注在放射性物質包裝與運輸方面的國際性研討會。首次於1965年由美國AEC主辦，每隔三年舉辦一次。
- 2.PATRAM主要目的是聚集國際上來自政府、研究機構、學界、業界等相關放射性物質包裝與運輸方面的專家，研提系統性、技術性及管理性等各方面資訊共同研討交流。PATRAM會議主題相關廣泛，但首重在放射性物質包裝與運輸的安全上，尤其在全球恐怖攻擊興起之後，運輸安全觀點的議題更加強化。另外，包括運輸系統概念、制度層面及法規需求等。會議期間也可公開討論不同包裝物質可能提高效率與滿足新法規要求等的相關議題。
- 3.本公司正積極規劃辦理高低放最終處置計畫、用過核子燃料再處理計畫，或是放射性廢棄物集中式貯存計畫等，皆須考量放射性廢棄物之包裝及安全的運輸作業，尤其涉及國際海上放射性物質的運輸業務，本公司在這方面經驗較少，為與國際包裝及運輸管理資訊接軌與精進，且與相關專家機構建立良好關係，並就本公司需求議題進行討論，即為本次派遣人員出國參與研討最主要目的，並從中汲取國際放射性物質包裝及運輸相關經驗，確實有助強化本公司相關工作之推動。

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

目 錄

壹、出國目的.....	4
貳、出國過程.....	4
參、會議內容摘要及出國心得.....	5
肆、心得與建議事項.....	64
伍、參考文獻.....	68
附件一、PATRAM 2016 會議議程	

壹、出國目的

放射性物質包裝與運輸國際研討會(PATRAM 2016, International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material)於105年9月18-23日在日本神戶(Kobe)召開。PATRAM是全球唯一專注在放射性物質包裝與運輸方面的國際性研討會。首次於1965年由美國AEC主辦，每隔三年舉辦一次，舉辦本項研討會的主要緣由是因為在1960年代放射性物質包裝設計及運輸經驗快速進展，以及國際原子能總署頒行「放射性物質安全運送規則」的發展所致。

PATRAM主要目的是聚集國際上來自工業界、政府、研究機構等相關放射性物質包裝與運輸方面的專家與廠商，研提系統、技術及管理層面等各方面資訊共同研討交流。該研討會可說是全球各個相關國家對放射性物質包裝與運輸業務，在越來越重視的情形下而列為首要交流的平台。PATRAM會議主題相關廣泛，但首重在放射性物質包裝與運輸的安全上，尤其在全球恐怖攻擊興起之後，運輸安全觀點的議題更加強化。環境方面也是主要議題，包括風險評估技術及潛在放射性對環境的影響等。另外，營運上的議題包括運輸系統概念、運輸路線、海上運輸、廠址內運送、制度層面議題，以及法規的需求等。會議期間也可公開討論不同包裝物質可能提高效率與滿足新法規要求等的相關議題。

基本上可將大會安排之主題分類為容器及包裝設計相關、法規及執照相關、結構、熱及屏蔽分析相關、安全及老化管理相關、貯存及處置管理相關、運輸(路運與海運)相關、其他(風險評估、溝通與訓練)等共七大項主題，而目前本公司正規劃辦理的高低放射性廢棄物最終處置計畫、用過核子燃料貯存及再處理計畫，或是放射性廢棄物集中式貯存計畫等，皆須考量放射性廢棄物之安全的包裝及運輸作業，尤其涉及國際海上放射性物質的運輸業務，本公司在這方面經驗較少，為與國際包裝及運輸管理資訊接軌與精進，且與相關專家機構或專業廠商建立良好關係，並就本公司需求議題進行討論，派遣適當人選出國參與研討會是必要的。預期與會人員藉由本次研討會的機會，能汲取國際放射性物質包裝及運輸相關設計、系統管理及實務經驗等，有助強化本公司相關工作之推動。

貳、出國過程

一、會議期間說明

本次參加會議事先已依據個人工作業務專長進行會議議題之分類，共計分成七大主題，俾盡可能吸收來自全球在各項領域專家之演講內容。在會議進行當中，上下午各有次咖啡休息時段，在該時段可以參觀各項設備儀器供應商之攤位，藉此機會了解各供應商之特色，也可與來自全球的專家學者或核電設施業者進行交流，多方了解放射性物質包裝與運輸之經驗及甘苦談，各供應商都提供他們相關介紹與解說服務，甚至製作相關產品模型，供與會者索取。其中一天在大廳提供海報論文之展示，來自各界之海報論文約有50多篇，內容亦是包容在我們所預先規劃的七大領域內。

二、PATRAM 2016會議議程及內容說明

本次PATRAM 2016會議由日本機械工程師協會(Japan Society of Mechanical Engineers)主辦，以及由日本原子力協會(Atomic Energy Society of Japan)協辦，於105年09月18-23日於日本神戶的Portopia飯店舉行。台電公司由主辦放射性物質包裝及運輸業務的核能後端營運處蕭向志組長、核能技術處鄭素琴組長及核能安全處吳課長一行三人參加，會議議程如附件一。本次會議共計有14項技術主題提出報告進行技術交流，共計口頭報告249篇及海報報告53篇。

三、會場參展廠商

本次會議參展廠商都與放射性物質包裝及運輸相關者，共計25家。

主要的有Areva TN、Argonne、Årup、BOHLER、CRIOFT、ENSA、GENERALPLASTICS、GNS、Hitz、HOLTEC、INS、KCPC、KOBELCO、MITSUBISHI、NAC、NICHIAS、ACT、Nuclear Fuel Transport Co.、ROBATEL、RSB LOGISTIC、Savannah River National Laboratory、TAM、TOSHIBA、WNTI、WORTHINGTON。

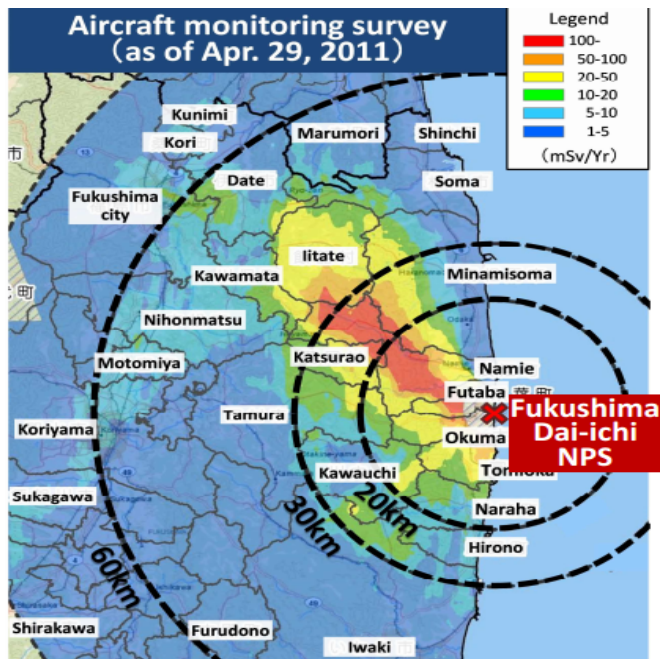
參、會議內容摘要及出國心得

參加會議之成員主要來自美國、德國、法國、日本、瑞典、荷蘭、瑞士、韓國等主要擁有核能發電設施或核能相關研究實驗室的國家，報告內容係以其核能設施或核能電廠所產生的用過核子燃料之包裝及運輸進展情形為主，當然也有不少廠家介紹其在放射性物質包裝容器的測試成果、優點及特色，也有廠商介紹其幫業主在運輸上所碰到的經驗及其與利害關係人溝通的互動過程，所以本出國報告在撰寫摘述其內容時，為便於閱讀及整體了解，自行將報告分成七大類，就各類之重點加以陳述。

在西元 2011(民國 100 年)311 地震的福島事故後，日本政府中央及地方已在合作執行受輻射污染的土壤及廢棄物除污及處理，污染範圍如圖 1-1 及 1-2。為了福島縣的重建及復原所需，福島縣並規劃建置了轉運儲存場(Interim Storage Facility;ISF)，以應付縣內各處不同位置暫存的污染土壤及廢棄物的安全儲存及管理所需，直到最終處理為止。

為了確保大量受污染土壤運送的安全問題，從 2015 年 3 月開始執行了一年實驗性質的先期試運計畫，並自縣內 43 處市區移運了約 1000 立方米的廢土。在檢視這些運送過程的裝載、運送、以及 ISF 區的卸載等作業，運送計畫的檢討可以分成三方面說明: (1) 對居民的影響; (2) 對作業人員的影響; (3) 運送作業的效率及順暢性，並確認整個運送作業的整體安全性。

日本環境部(MOE; Ministry of the Environment) 已經決定自 2016 年起加速執行運送作業，並配合 ISF 土地取得的進度，ISF 設施建設，及福島縣內公路設施的建設改善進度，分階段增加處理的量。



Survey by Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) and U.S. Department of Energy (DOE)

圖 1-1、福島事件後污染土壤

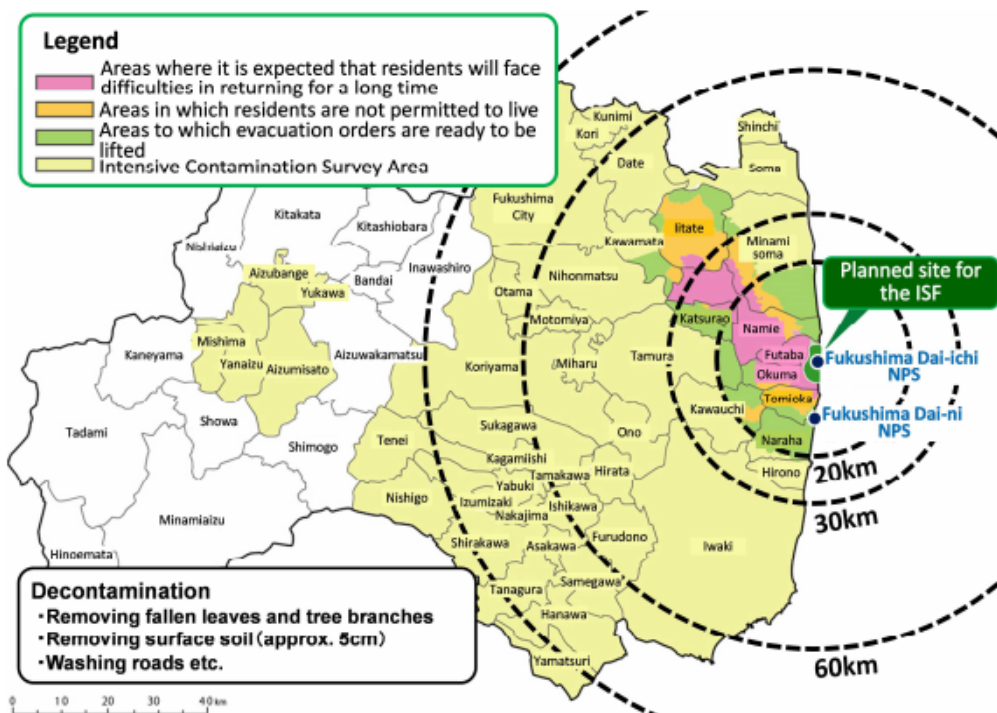


圖 1-2、福島縣污染區域(2013 年)

一、 容器及包裝設計相關

有關運輸用的完整包封放射性物質的容器及包裝設計之相關規範，係來自於國際原子能總署(The International Atomic Energy Agency (IAEA)制定之放射性物質安全運輸條例(Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material，2012版為最新版)的安全系列6-具體安全要求(Safety Series No. 6, SS6, specific safety requirements)，其基本概念是安全首要在包裝設計，要能提供屏蔽以保護工人，公眾和環境免受輻射的影響；能防止不必要的鏈反應；能防止因熱量產生而造成損害；並且還要提供足夠保護以防止放射性包容物的擴散。上述條件無論在正常條件下、或在高放射性材料的運輸事故條件下都必須能維持。此外，在包裝過程與方法，亦要做到盡可能合理地減少工人和公眾的輻射劑量。基此，國際運輸組織(international transport organizations)及各國管制單位均據以訂定該國相關要求，如美國核管會制定10CFR71及10CFR72、我國原能會亦頒行之「放射性物質安全運送規則」，據以規範運送放射性物質之包裝設計。

運送用之包裝設計，係以其盛裝放射性包容物之數量、性質及包裝之設計，分為甲型(Type A)、乙型(Type B)、丙型(Type C)、工業(Industrial)、微量(Excepted)等五種不同類型包件；包件若含有可分裂物質(fissile material)或六氟化鈾(uranium hexafluoride)者，另訂定相關應遵守之規定。包裝設計分類除了考量包容物所含放射性物質的活性和物理形式及數量，國際原子能總數還依據包裝方法及運輸時可能潛在危及包裝完整性的狀況，訂定每種包裝類型所須具有之性能標準 - 設計要求和試驗程序。其考慮的運輸條件有日常運輸中可能遇到的情況;正常運輸輕微故障狀況;事故情況，以確保包件在運送過程可以安全和容易地處理，正確地固定，並能夠承受任何加速和振動的影響。各型之設計需符合之規定，詳SSR6及放射性物質安全運送規則，包封容器、屏蔽完整性及評估臨界安全性之試驗相關規範包括有溫度、壓力、輻射劑量、臨界條件，以及需進行噴灑試驗、自由墜落試驗、貫穿試驗、熱體試驗、浸水試驗、堆積試驗、衝擊試驗、撞擊試驗、彎曲試驗、瀝瀘試驗或容積洩漏試驗…等各項相關試驗，證明具有承受一般運送狀況能力、及具有承受運送時意外事故狀況能力之試驗，以確認能保持容器及屏蔽之完整性，防止放射性包容物之失落或逸散。不論何型包裝設計，使用前均須取得管制單位之設計使用許可。

本次會議有關容器與包裝設計，依主題分為（一）包裝設計(S01 Package Design #1、S30 Package Design #2及S26 SF Package Design)；（二）包裝材料(S12 Packaging Material

#1及S47 Packaging Materials #2)；(三)設計改良(S16 Design Improvements #1及S51 Design Improvements #2)；(四)特定設計議題(S34 Special Design Issues)與(五)包容物特定設計方面(S46 Content Specific Design Aspect)等五大項。茲分別介紹如下：

(一) S01/S26/S30 包裝設計

放射性物質包裝設計基本上包括有一個或多個盛器、吸收物質、分隔物、輻射屏蔽物及冷卻裝置、避震及防撞裝置、隔熱裝置等。包裝可為一箱匣、圓桶、或類似之盛器，亦可為貨櫃或罐槽。本次會議有英國、日本、德國、印度、美國、比利時、法國、中國、伊朗等國，由發表的論文可知放射性物質包裝設計之趨勢，為發展兼具符合永久貯存及運輸要求的可裝載不同尺寸容器的通用、多功設計，並設計相關的自動化運輸系統，以及說明設計如何進行試驗來驗證符合法規要求，以取得管制單位的認證。此次會議中發表的論文大部分與B型包裝設計的發展有關。以德國 DAHER Nuclear Technologies GmbH公司發展的(U)F型最終存儲容器的運輸系統 SD-20K，如圖1.1-2，為例，其設計是發展可裝載不同尺寸的低放廢料IP型貯存桶的可作為永久貯存的傳送護箱，使整個包裝能升級為B型包裝，且設計為可自動卸載之運輸系統，可減少工作人員的接受劑量；典型的用過燃料貯存桶，則可以Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (Japan)發表之MSF運輸貯存桶為例，如圖1.1-2所示，貯存桶設計有吊籃、中子及熱導體等，傳送護箱設計有避震及防撞裝置等；各廠家在此次會議發表的包裝設計整理如表1.1-1所示。

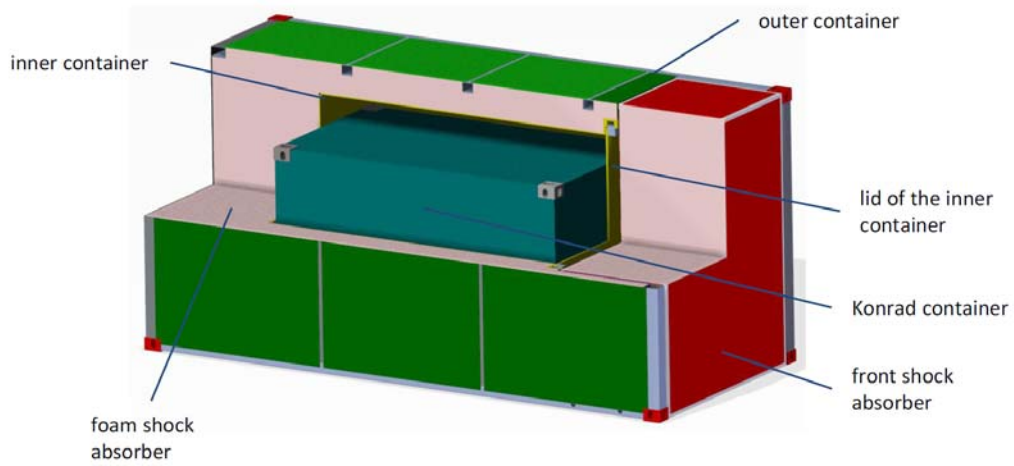
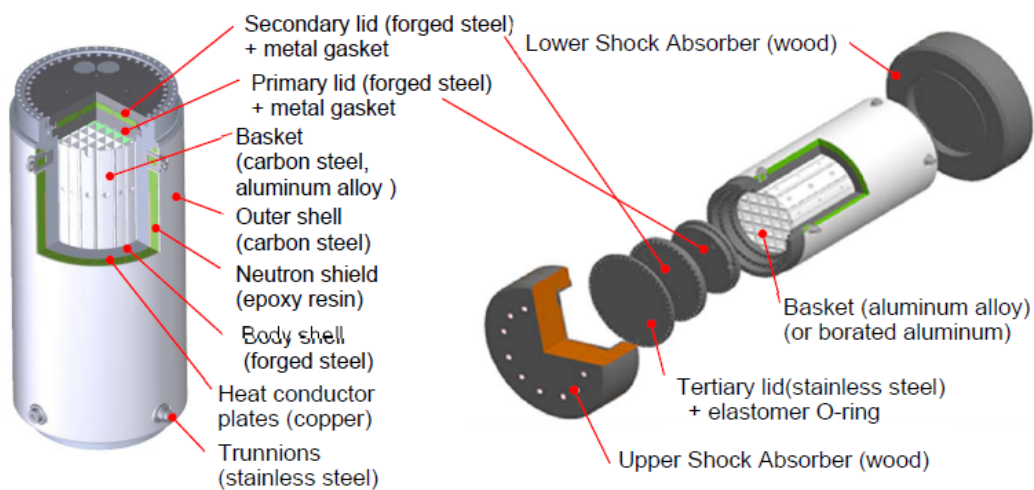


Figure 1 Main design parts of the SD-20K

圖

1.1-1 SD-20K主要設計介紹

圖1.1-2 MSF傳送貯存箱



(a)MSF-52B (Storage configuration) (b)MSF-21P (Transport configuration),

Figure 1 MSF-52B & MSF-21P Transportable Storage Casks

表1.1-1 各廠家包裝設計資料

廠家	型號	用途
KSL/日本	TN12 transport casks	spent fuel transportation
	TN17	spent fuel transportation
	TN24 dry storage casks	spent fuel transportation
	TN28VT transport casks	High level wastes transportation
	TN-68 dry storage casks	spent fuel transportation
	TN-40 / TN-40HT dry storage casks	spent fuel transportation
	TK-69	BWR spent fuel transportation
	TK-26	PWR spent fuel transportation
	TN843 compacted waste canisters	RAW
	TNG3	PWR or BWR spent fuel transportation
	NFT casks	spent fuel transportation
DAHER/ 德國	SD-20K Final storage container	type B(U)F package radioactive wastes
	DN30 Package Packaging (PSP)	type AF, IF and B(U)F package for the Transport of UF6
BRIT/ India	Multi Position Source Changer (MPSC)	Type B (U) Transportation Package Ir-192 industrial radiography sources
T.Dessel/ Belgium	CAROLINE-R80	Type B(U) packaging radioactive waste
Arup/UK	SAFSTORE	Robust Shielded Containers (RSCs) Intermediate Level Waste
ROBATEL/France	ROBATEL NL R79	type B package radioactive waste for medicine and industry
CIRP/ China	FCTC10 container	a Type B(U), Category III (yellow) package and TI(Transport Index) 9.8 Co-60 special form radioactive sources
MHI/ Japan	MSF-52B Transportable Storage Casks	BWR spent fuel assemblies
	MSF-21P Transportable Storage Casks	PWR spent fuel assemblies
AREVA FS/USA	6625B-HB Transportation Cask	Type B(U)F-96 shipping container Bare High Burnup Spent Nuclear Fuel
INS/ UK	DCTC transport container	High Level Waste and spent fuel
Holtec /USA	HI-STAR 180 Dual Purpose Cask	spent fuel
NSTR/ Iran	Dual Purpose Cask	Spent Fuel Assemblies of Bushehr Nuclear Power Plant

(二) S12/S47 包裝材料

1. 屏蔽與吸收材料新發展

在各種核能應用中，屏蔽和吸收材料在降低劑量率是一個非常關鍵的因素。良好的屏蔽材料，除了須具有較高的吸收和散射率，材料在高溫下的熱穩定性也是一個重要的關鍵因素，常被使用於核能設施具熱穩定性的中子屏蔽材料，主要為混凝土或金屬複合材料。但這些材料要應用各種核燃料運輸包裝設計來講，實在太重了，且製造和安裝也是相當昂貴的。因此，良好的運輸包裝設計熱穩定屏蔽材料，除了要有較高的吸收和散射率，重量也是一個重要考量因素。目前也有一些低密度屏蔽材料，如硼化聚乙烯或尼龍，被使用，然這些材料在高溫下會呈現不穩定現象，影響屏蔽效果，不適用於高能放射性物質運輸設計上。具熱穩定性的低密度屏蔽材料的研發，仍有待突破。

石墨烯(Graphene)是一種相對較新且令人興奮的碳同素異形體。石墨烯具有高電子遷移率、高強度和其它令人驚奇的性質，目前受到相當多的研究關注，但是還沒有研究其輻射屏蔽和吸收能力。美國Dartmouth大學針對新的超低密度石墨烯結構進行輻射屏蔽和吸收能力應用相關研究，發現該結構具有相當好的可調節導熱性和高熱穩定性，應用於用過燃料儲存和運輸的屏蔽設計上，是具有發展潛力的。

2. 避震及防撞裝置與隔熱裝置材料新發展

依IAEA對運輸包裝設計在運輸狀況下所發生的加速效應，仍必須保持整個包裝的完整性，不得發生顯著的放射性釋放。運輸包裝設計的衝擊限制器是滿足完整性要求的關鍵安全避震及防撞裝置，必須通過9m墜落試驗，確認能吸收下落能量，以確保結構完整性。到目前為止，大部分運輸包裝設計如重型運輸或雙用途桶的衝擊限制器所使用的減震材料，主要是木材。木材具有很多優點，特別是其具有非常高的能量吸收率，且其重量較輕。然這些具減震特性的木材，目前已經難以不斷地大量取得，故各廠家也在研究其他減震材料。

本次會議有3篇避震及防撞裝置之減震材料的論文發表：

- (1) 日本Hitachi Zosen Corp.正在研究使用硬質聚氨酯泡沫(Rigid Polyurethane Foam, R-PUF)作為木材的替代減震材料的可能性。該公司針對該材料應用

於運輸包裝設計的衝擊限制器，進行相關減震特性研究，包括有變化密度和溫度的壓縮試驗的恆定應變率數據庫之建立、靜態單軸位移法設計1/3比例模型的衝擊限制器之9m墜落試驗的進行、以LS-DYNA數值模擬9m墜落試驗的最大響應加速度評估模式之建立，以及密度在0.1~0.65g / cm³之間的R-PUF的動態物理性質數據獲得在-20℃至80℃之間變化的溫度的重量測試之建立等，該研究證實了R-PUF的衝擊吸收性能，確認其應用於運輸包裝設計的衝擊限制器具有預期的減震性能。

- (2) 法國AREVA TN研發許多其他有效的減震材料，有Honeycomb、聚合物泡沫體(polymer foams)、及具有高能量吸收能力的Alveolar metallic solutions等，這些具有高能量吸收能力的減震材料的開發，進行濕度和溫度對材料低分散性的影響評估，以確認減震性能。
- (3) 美國Y-12 National Security Complex使用鑄造陶瓷材料(cast ceramic material)製作用於衝擊限制和阻熱的B型傳送護箱設外筒絕緣體，在發展Y-12新容器MD-2絕緣體時，發現原使用的預混凝土絕緣體商業產品Kaolite 1600 TM “後澆鑄”密度無法符合容器設計規格中的所需密度，故開始研發新的絕緣體產品Packcrete，該產品基本上與Kaolite 1600 TM具有相同的成分，只是原料配比例不同。Packcrete，經具體的機械和熱試驗證實具有與Kaolite 1600TM相當的材料性能，將開發應用於MD-2和所有未來的容器絕緣體製造上。

3. 防撞及隔熱裝置材料新發展

美國General Plastics Manufacturing Company生產的LAST-A-FOAM®FR-3700系列泡沫成功應用於放射性物質運輸護箱的防撞和防火設計已有相當歷史，本次發表有關LAST-A-FOAM®FR-3700 產品進行衝擊試驗及熱體試驗的成果，各項試驗結果顯示產品在防撞及防火具有卓越的因應能力。

4. 中子吸收材料新發展

放射性物質包裝設計的分隔板，需使用具中子吸收能力的材料用，以防止乾式貯存桶、運輸包裝設計和用過燃料池架中的燃料組件間的臨界反應。至今，由於不銹鋼具可靠的拉伸強度和耐力，故不銹鋼基中子吸收劑已被廣泛用作中子吸收劑和乾貯桶的結構材料，然最近，因高燃耗用過燃料的增加，使得對移熱

能力的要求更多，具有高導熱性的鋁基中子吸收劑材料對於應用於乾貯桶的設計相對的更具優勢。

- (1) 由法國、日本及中國合作開發的Al-Mg-Si合金（6000系列鋁合金）及Al-Mn合金（3000系列鋁合金）。試驗顯示6000系列鋁合金雖具有優異的可擠壓性和機械性能，然其抗拉強度和屈服強度會隨時間急劇惡化的熱老化效應，限制其應用在具有高燃耗用過燃料的容器中的可行性。至於3000系列鋁合金的新型鋁/碳化硼中子吸收劑，在高溫下仍具有優異的機械穩定性，這使得它成為未來包裝設計的突破性候選者。
- (2) 由日本Nikkei Niigata Company, Ltd.基於Al / B₄C複合材料的碳化硼濃度中子吸收性能與複合材料的厚度有關，然為確保性能而增加厚度將導致複合材料的延展性降低。為解決此一問題，添加具有比硼更大的熱中子吸收截面的另一種元素鐳的鋁/氧化鐳金屬基複合材料（“Al / Gd₂O₃複合材料”）隨之而生，不僅改善延展性，同時保有相同的中子吸收性能，顯示其包裝設計的潛力。
- (3) 加拿大開發Boralcan TM W3004N以解決原有核能級碳化硼（B₄C）的Boralcan TM鋁金屬基質複合材料（MMC）系列如AA6351的熱穩定性問題，試驗顯示Boralcan TM W3004N在高溫下仍具有優異的機械穩定性，成為更具挑戰性的產品。

5. 耐腐蝕性研究

日本Hitachi Zosen Corporation針對位於海岸附近的戶外型的用過燃料貯存護箱所需面臨的鹽水中氯化物所引起的應力應變腐蝕（SCC）的問題，評估貯存罐外殼材料之選擇，在比較普通不銹鋼316L(Ordinary S.S.)、超級不銹鋼(Super S.S.)及複合不銹鋼(Duplex S.S.)後，發現無論在耐腐蝕性(特別是鹽水空氣誘導的SCC)、可加工性和可焊性、及可用性和經濟性，普通不銹鋼最佳。

6. 密封性研究

日本NICHIAS Corporatio基於長期穩定的密封性能需求，金屬墊圈替代橡膠墊圈，被使用在貯存和運輸容器密封邊界的密封材料上，故針對金屬墊圈表面粗糙度對密封性的影響進行研究，發現藉由改變容器法蘭表面粗糙度，可以為任何尺寸的法蘭提供金屬密封墊的良好的密封性能。

(三) S16/S51 設計改良

在本議題中所提到的設計改良有

1. 德國GNS針對其中、高放廢棄物包裝設計MOSAİK®, CASTOR®, 除了用應力分析外，另真實地在道路和鐵路進行運輸加速度的測量活動，以確認設計確認設計符合IAEA SSR-6及國家和國際法規（CTU Guideline iii，UIC Guideline iv和VDI v）要求
2. 螺栓鬆脫及斷裂事件
 - (1) 法國IRSN基於過去5年中，包裝卸貨作業期間發現了大約20次螺栓鬆脫事件，故針對在運輸過程中的振動下如何造成緊固的螺栓鬆脫原因的研究，理論和實驗研究結果顯示螺栓尺寸，螺栓預載和摩擦係數，都是造成螺栓自鬆脫的關鍵參數。此外，AREVA TN也針對螺栓材料、螺紋材料、墊圈材料、油脂…的摩擦係數，對包裝容器能否保持閉合，作進一步的實驗顯示，在第一次緊固期間，由於接觸表面的摩擦，存在顯著的磨損效應。這種磨損效應的程度取決於扭矩水平，潤滑劑的性質和接觸材料的性質。然在5個循環之後的緊固程序，發現該磨損效應對摩擦係數的分散的影響已不復見，且分散也降低了。根據實驗結果顯示測試每種特定構造的摩擦係數及考慮螺栓的磨損，可以更進一步減小對預載荷的變化，確保包封容器的完整性的維持。
 - (2) 日本NFT也針對發生在低放射性廢物（LLW）容器的13,600個蓋螺栓中確認有5個破裂事件進行調查與評估，確定為“延遲斷裂”。基於“延遲斷裂”有發生在高壓材料上的傾向，以慢應變速率試驗（SSRT）對LLW的蓋螺栓的延遲斷裂敏感性的定量評估後，調整拉伸應力等級由12.9調至9.8後，就沒有再發生螺栓斷裂事件。

(四) S34 特定設計議題

在本議題中所提到的特定設計議題，主要是說明各廠家如何擴展原有的包裝設計轉換或成為多功能包裝設計的成功經驗，有

1. NAC International (USA)發表如何改造MPC STC用過燃料乾貯桶成為裝載玻璃化高放廢棄物的多功能MPC-WVDP system，同時利用相同的分析方法論來證明該系統確實可安全包裝玻璃化高放廢棄物（HLW），並取得符合10 CFR 72和10 CFR

71系統設計的許可。以及將NAC-LWT發展成硝酸鹽放射性液體的B型運送包裝設計的成功經驗容器的設計和許可及適用的裝載和包裝系統

2. GNS與Höfer & Bechtel合作設計可將損壞燃料棒放置於CASTOR®V / 19 (PWR) 和CASTOR®V / 52 (BWR) 吊籃槽裡的Quiver，該設計已得到德國當局監督的一系列測試和資格認證程序的肯定。
3. 美國DAHER-TLI 將AF型包裝Versa-Pac改良成為通用性包裝設計，可直接使用，亦可其他容器結合使用，提供貯存，運輸和處理等多功能通用選項與應用。
4. 英國Sellafield Ltd. (UK) 介紹Magnox Swarf貯存庫MSSS的廢棄物包裝設計的運作情形

(五) S46 包容物特定設計方面

1. 日本介紹如何乾燥處理、及貯存和運輸因福島事故產生的放射性污水污泥的情形
2. DAHER介紹B級(U) F型包裝NCS 45應用於運輸和貯存損壞與高燃燒燃料棒的鈎焊和焊接罐的情形
3. AREVA TN介紹稱之為飛豬概念，能空運的小量輻射材料的創新運輸包裝設計的發展現況
4. 美國針對處理一些已老化不再使用醫療、研究、和工業用的射源、大型屏蔽設備拆解廢棄物，開發兩款新的B類多功能的運輸包裝設計，以解決舊有被設計成運輸特定的裝置，材料或廢物包裝設計，無法裝載包封不同類型放射性物質的問題。
5. ARGUS介紹該公司的除役和去污技術。

二、法規及執照相關

在放射性物質運輸法規有關議題部分，大會依報告內容性質分類，細分成六個組進行報告及討論，分別介紹如下：

(一) S-11 申請放射性物質運送有關法規指引

針對放射性物質運送的安全及管理，世界各國都有對應事務的政府主管機關。本單元報告人討論的重點，包含了法國及德國的管制單位，介紹執行安全評估作業的經驗回饋，還有來自 1998 年即由英國 British Nuclear Fuels Limited (BNFL)、法國 (COGEMA)、日本(Federation of Electric Production Companies of Japan ;FEPC)等公司

聯合成立的國際合作組織 WNTI(World Nuclear Transport Institute)介紹天然鈾礦的優良運輸經驗等。

以法國為例，政府的核能安全主管當局(French nuclear safety authority;ASN)提供了一個申請指引，供有關單位有需要提出申請放射性物質的包件運送時參考。為使申請單位瞭解有哪些規定必須滿足，哪些建議可供應用以及要向哪些對應政府部門提出申請，同時解釋國際法規要求並展現政府管制立場。類似的申請指引(European PDSR Guide ISSUE 3, 2014)在 EACA 網站亦可取得供各國參考使用(www.euraca.eu)。在法國的 IRSN(French Institute for radiation and nuclear safety)並且將 20 年來負責執行安全評估分析給有關當局審查參考紀錄當中，最常遇到的問題，及將值得有關各單位參考的經驗回饋表列，並定期更新內容，提供申請者在申請前能透過設計去改善防範問題的發生，並縮短主管機關審查時間及確保運送安全。

(二)S-15/S-19/S-23 各國管理制度與國家規定

在放射性物質的運送規定中，國際原子能總署 IAEA 的全世界通用規定固然早已制定多時，然而各國自行訂定的法規內容細節則可能會因時因地而有不同的差異。各國的國內規定與 IAEA 的規定不同之處以及其理由，唯有各國執法機關最為清楚。有關規定是否落實執行以有效防止放射性物質的不當擴散或失控，各國管制機關利用 PATRAM 提供的平台，彼此溝通交流，實是經驗分享共同進步的好方法之一。本次報告內容包括了：

1. 加拿大的核安委員會(CNSC)說明如何配合 IAEA 的法規變動時時更新。
2. 比利時的聯邦核子管理局(Federal Agency for Nuclear Control)以及西班牙的 CSN(Consejo de Seguridad Nuclear)、巴基斯坦、孟加拉及瑞典等，均提供了法規管制單位的管制立場或是說明法規不足之處的處理經驗或是法規修訂的流程或經驗分享。
3. 中國大陸的核子輻射安全中心(Nuclear and Radiation Safety Center)提出了兩篇，一篇是說明其國內的放射性物質法規的特色，另一篇則提出含有輻射物質 Kr-85 及 Th232 的高強度燈泡(HID)進出口及運送的管制經驗。

4. 英國則提出了一個具有爭議的問題，由於 IAEA 針對放射性物質運送的豁免管制限值在運送規定(Transport Regulation)及放射性物質管制的基本安全標準(Basic Safety Standard)兩處有不同的豁免管制限值，造成了管制單位的困擾。
5. AREVA 公司提供一個經驗分享：在美國以獲得授權最大衰變熱為 80W 的包件，運送超過 80W 衰變熱的廢棄儲槽作業，申請放寬管制成功獲得 NRC 同意的經驗。
6. 美國 Oak Ridge 國家實驗室的專家提供經驗分享，對於美國用過核燃料及高放射性廢棄物運送議題，NAS(National Academy of Sciences)曾於 2006 年提出的評估報告” The Safe Transport of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste in the United States (NAS, 2006)” 其中建議內容及採取措施不足之處，國家能源部(DOE)的目前作法。

以本次西班牙管制單位 CNS 所提為例，當運送放射性物質的包件設計經過核准之後，修改設計是否仍需再申請核准，IAEA 的法規內容並未明確提供答案。亦即運送者是否可以針對包件執行局部的修改，或是是否可以改變它的作業程序，西班牙管制單位特別對此提出了他們的因應作法，以下便是他們提出的判斷流程，如圖 2.2-1 及圖 2.2-2。

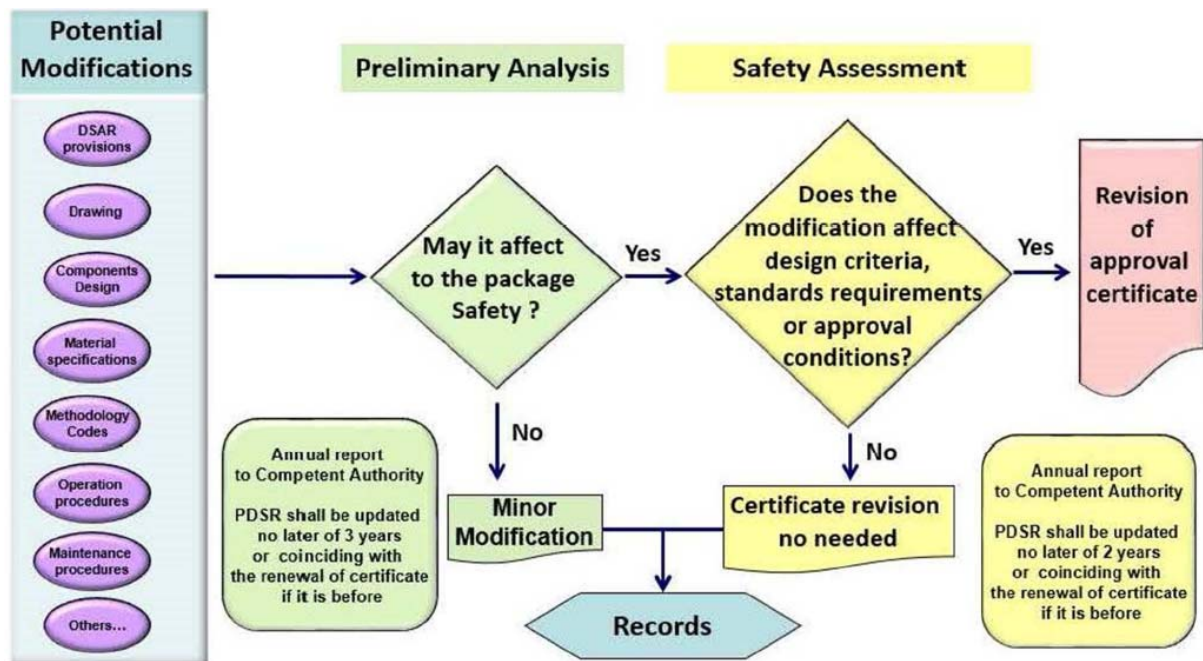


Figure 1. Process for design modifications on approval packages

圖 2.2-1 西班牙已核准運送包件設計修改流程

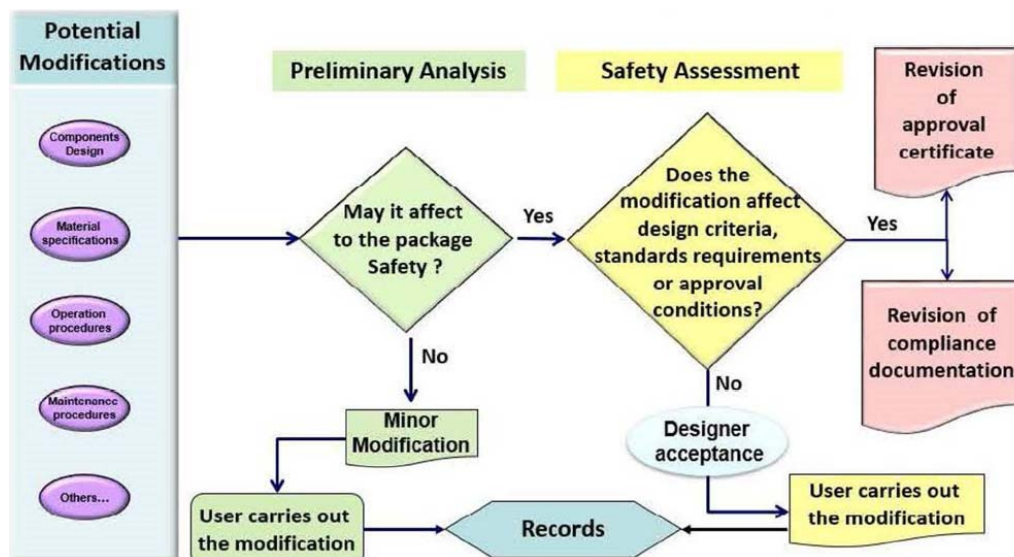


Figure 2. Process on potential modifications to be made by users on packaging

圖 2.2-2 西班牙運送包件作業程序修改流程

(三)S-28 各國管理制度與區域性議題

除了核能設施所產出的放射性廢棄物之外，醫療、工業用的放射性廢棄物甚至於核武試驗的放射性廢棄物等都存在儲存運送的安全問題(馬紹爾群島)。在 IAEA 的法規之下，許多開發中國家或是未設置核設施的國家由於政府核子專業技術人員缺乏，國民對放射性物質的普遍瞭解不深，儲存及運送的管制及安全都還需要長遠的努力。因此在 IAEA 的支持下，區域性合作已成為一個重要的平台。例如在 IAEA 的支持與歐盟出資成立了地中海區域的合作網 MedNet (Mediterranean Network) 以確保該域區的放射性物質運送安全。本次研討會該組織亦以 SWOT 分析(Strengths,Weaknesses, Opportunities and Threats) 分享在該區域的合作情形。除了歐洲，另外 IAEA 也在亞太地區藉由舉辦會議、研討會、訓練課程等方式，協助東南亞至南太平洋群島中的會員國，建立有效的放射性物質運送安全確保計畫。其中 IAEA IAEA Regional Technical Cooperation (TC)自 2014 年 4 月起在紐西蘭、斐濟、帛琉三國舉辦了三次研討會，希望藉由紐澳及德國的專家協助，建立太平洋地區島國包括 IAEA 的成員甚至非會員國家的放射性物質運送安全，尤其是在缺乏法規體系、專家及資源的情況下，協助亞太地區各國重視放射性物質的運送安全，建立必要的官方制度。

(四)S-32 執照與審核有關議題

在運送高放射性物質或是用過核燃料時，必須使用經過核准的運輸裝載容器，每一次有新型裝載容器設計完成在量產之前，亦需遵照法規要求，完成有關的必要測試。以國際間運送核燃料原料(濃縮 UF₆)常用的 UX-30 運送包件 PSP(Protective Shipping Package)及 30B 圓柱體容器為例，在獲得美國運輸部的驗證許可後，它也已經獲得了 11 個國家的核准使用。目前全世界使用中的 PSP 包件共有約 2000 件左右。而這些使用 UX-30 的利害關係者(Stakeholder)更成立了 UX-30 使用者群組以確保:持續取得全世界國家的核准使用執照、強化運作、改善維護作業及測試認可、延續包件的使用壽命。

相對而言，某些特殊案例，如墨西哥的 Husman Irradiator 可能因為找不到適合的包件，但是在經過適當審慎的評估程序後，仍有可能獲得主管機關豁免有關規定而以不同的方式載運至安全的再處理或儲存場所。

本單元發表報告的主題包括:

1. 法國的 AREVA 及 CEA 公司共同提出了對於載運包件的新框架設計，如何確保不影響原包件的安全功能設計。
2. 由於 IAEA 運送放射性物質規定(SSR-6 2012)要求:” 運送時任何加諸於包件的外物，不得減損其包件的安全性”。而在 WNTI(World Nuclear Transport Institute)工業研究發現:運送包件密切相關的運送框架，在不同國家的法規屬性研究(包括美國、英國、法國、德國、日本等)顯示並無太大的爭議。
3. 工業界有效管理使用運送包件(UX-30)於全球的方法：UX-30 使用者群組。
4. 法國的 AREVA 公司發表運送及儲存兩用的雙重功能護箱(TN-24)的 20 年持照經驗。
5. 美國 Savannah River National Laboratory 經驗分享一個使用 30 年後的鈾-137 輻射照射器自墨西哥運回美國豁免依 TYPE B 類包件運送的適當性判斷。

(五)S-41/S-45 IAEA 運送法規有關

全球現今每年約有超過 2000 萬次的放射性物質的運送作業，而且這個數字仍會持續增加，因為有更多的國家正在發展包含使用放射性物質的醫療及工業活動。IAEA 的放射性物質運送法規(SSR-6)已經被聯合國採用以規範國際間的空運及海運交通，可以確保運送的安全。然而在陸運的交通(馬路及火車貨運)有關管制法規，IAEA 的現行 168 個會員國當中，尚有許多國家極待努力建立自己國內的放射性物質的陸運法規，尤其是要讓這些國家的官方監督單位有效的管理放射性物質的運送，因此，如何在短時間內快速建立這些國家法規管制單位具監督能力，已成了 IAEA 的極大挑戰之一。在這個有關運輸法規的議題下，共有以下幾篇報告:

1. 依區域性的基礎來建立運送放射性物質管制能力的經驗分享。(IAEA)
2. 國際放射性物質運輸安全法規要求的技術基礎文件的演進及現階段狀態報告。(IAEA)
3. 國際放射性物質運輸安全法規的架構更新建議。(IAEA)
4. 世界核運輸研究所(WNTI)工作團隊對未來運輸法規的挑戰所作的努力。(WNTI)
5. 在正常情況下，英國放射性物質利用公路及鐵路運輸，放射性對工作人員及民眾的衝擊評估。(Public Health England, CRCE, Chilton, United Kingdom)

6. IAEA 放射性物質運送法規(SSR-6)對於低比活度物質管制要求之安全概念檢視。(德國)
7. 對於表面受污染的物質以船運送之安全基準的新思維。(德國)
8. 對於大型物件表面受污染者的運送法規建議。(CNSC 加拿大核安委員會)
9. IAEA 放射性物質運送法規對於開放式貨物容器有關條款的檢視。
10. 伴隨新科技在運送傳輸的演進及運用，IAEA 有關放射性物質運送法規調整的需要。(AREVA)

(六) S-49 雙重用途用過燃料護箱的執照與法規面問題

為了將用過燃料自電廠的用過燃料池移出，早期的處理運送過程，除了中期儲存場所(ISF;Interim Storage Facilities)必須取得主管機關核發的執照，運送過程的燃料包裝容器設計亦必須經過主管機關核發許可，確認符合運送法規要求後，用過燃料才能順利執行運送作業。2010 年 6 月 IAEA 所舉辦的國際用過核燃料管理會議上，兼具儲存運送雙用途的用過燃料護箱(DPC)概念及計畫，被多個會員國提出，由於它兼具處理的便利優勢及彈性，在 2011 年 4 月 IAEA 便發起了一個工作群組(WG;Working Group)，以建立 DPC 在儲存及運送的整體安全性套件指引。然而 IAEA 運送法規(SSR-6)引用 DPC 的概念，是到 2013 年時，修改法規的建議才正式被提交審查流程，並不斷經過討論修改到 2015 年被批准，成為進入法規修訂程序中與安全有關最重要的修訂事項之一。經過多年的努力，長期使用儲存的雙用途用過燃料包件，在儲存期結束後的運送法規，包括技術及管理要求等，將在 2018 年公布。依據國際經驗，通常運送包件設計的使用許可有效期只有 5 年，而中期儲存場址的執照有效期為 40 至 50 年左右，因此，為解決使用「運送及儲存」雙用途的用過燃料包件，存放在中期儲存場所期間使用許可效期逾期的問題，定期向主管機關提出展延申請是必須的。IAEA 的運送安全法規 SSR-6 內文中對於儲存期後的再運送作業有關要求，管理事項(包含技術面及行政管理面)可簡述如下：

1. 包件設計必須考慮老化機制。
2. 儲存期後要再執行運送的包件，在儲存期間必須執行維護作業以滿足適用法規及許可證的承諾內容。
3. 包件設計使用申請許可時，申請者必須同時提出老化管理計畫(AMP; Aging Management Programme)及差異分析計畫(GAP;Gap Analysis Programme)

在本單元的 5 篇報告發表內容包括:

1. 瑞士的用過燃料中期儲存設施所使用燃料護箱的製造過程以及運送監測要求。
2. 德國雙用途用過燃料護箱(DPC)製造及運作過程的品質保證作業。
3. 為使雙用途用過燃料(DPC)包件長期符合德國及IAEA的運送法規要求，監測流程的建立經驗。
4. IAEA運送法規對於雙用途用過燃料護箱(DPC)概念的考慮事項。
5. 瑞典以海運系統運送用過燃料的設計有關參數控制。

三、 結構、熱及屏蔽分析相關

運輸系統中，包裝容器之結構、熱及屏蔽分析可視為是最重要的項目之一，其設計的良好與否，將會直接影響到運輸的安全。本次會議大致可分結構測試與分析、熱分析、輻射分析、利用電腦模擬分析研究等四個議題，茲說明如下：

(一) S-06/S-14/S-16/S-22/S-29/S-33 結構測試與分析有關

包裝、運輸容器在運輸的過程中有可能受到外力衝擊，因此需要對其進行掉落測試(Drop Test)或利用電腦進行模擬分析，確保在受到衝擊後，包裝運輸容器未損壞，以保障安全。掉落測試通常利用縮小模型來實驗結構穩定性，另外也會利用軟體模擬(如圖3.1-1) (如LS-DYNA、SCALE and ANSYS)建立模擬分析以比較結果，依據俄羅斯及日本在本會議所報告之經驗，軟體模擬應可得到相對保守的數據。

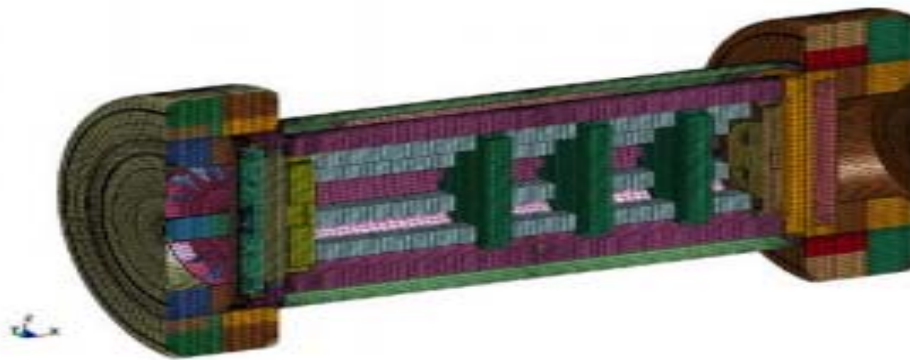


圖 3.1-1 1/3 墜落試驗有限元素模式

除了外包裝運輸容器之結構需要穩定外，在運輸過程中，用過燃料本身結構也會受到應力影響，若是燃料受應力影響破損，將會釋放出放射性氣體，造成輻射外釋的疑慮，因此研究用過燃料所受到的應力，也需要研究。美國有研究直接利用卡車載運的實驗來分析應力，而德國與美國也利用LS-DYNA及Finite Element Modeling (FEM) 建立模擬分析，所得到初步的結果係為在一般運輸狀況所造成之應力，應不影響燃料棒。

包裝運輸容器之結構設計係為一項複雜之工作，從建立模擬分析技術、評估分析技術、螺栓、防震設計、到內容物與包裝的間隙皆為設計學問。在本會議中提到研究的如下：

1. 日本提及運輸罐都裝有orifice作為保護，但它可能會在事故中被鄰近的鋼棒弄壞，所以需要考慮造成的影響。
2. 西班牙ENSA介紹了 ENUN 24P罐的在衝擊事件中罐子情況的分析方法，建模技術和評估方法。
3. 日本建立FEA模式並利用LS-DYNA計算作Slap-down Drop(會造成包裝蓋第二次衝擊)分析。以及進行Slap-down Drop(會造成包裝蓋第二次衝擊)的實驗，討論掉落後震動頻率，但其結果影響不大。
4. 運輸包裝在BOLT 對運輸包裝的影響，以及BOLT若壞掉的影響。
5. 德國研究包裝蓋子與內容物間隙的影響，撞擊會造成蓋子與內容物的相互衝擊，內容物會造成蓋子上固定零件的負擔。內容物與包裝間隙可能本來就存在包裝中，或掉落測試中自然產生，且可能超出原始設計。美國研究實際運輸中產生之內容物和包裝蓋之中間隙大小與應力關係。日本則研究內容物與包裝間隙將造成內容物的延遲衝擊，造成損愛，此現象來自於蓋子於自由落體中上升，若避免此現象，則可避免延遲衝擊。
6. 日本認為導彈影響評估是評估核電廠安全中重要的一項工作，故應該也需要對受到導彈衝擊後的金屬cask做一下損害評估，並且評估金屬cask的應變 (STRAIN)。
7. 展示了英國TRU-Shield Waste Package受到衝擊時的性能，TRU-Shield是具有不銹鋼 - 鉛 - 不銹鋼夾層結構的圓柱形容器，做了很多測試以及改善，暫現了許多優勢。

8. Canister要放入vcc內時掉落的結構評估，NACMAGNATRAN: nac公司的系統(與核一核二同公司)，利用剛性聚氨酯泡沫(R-PUF)作為緩衝材料，做測試都可meet要求。
9. 西屋公司利用LS-DYNA finite element analysis (FEA) model對於其TYPE A 包裝做了很多靈敏度分析，如溫度、元件厚度等。確保設計有餘裕且符合規範。
10. 俄羅斯進行用過核子燃料在一般及事故下運輸的數值應力分析，利用自己開發的LOGOS («STRENGTH» module)來處理 3D數值應用模擬，並證明了包裝能夠承受正常的運輸條件和假設的事故條件。

目前美國正在進行螺栓閉合之設計GUIDE (指南)準備，以前的分析技術沒現在好，而以前的NUREG / CR-6007 GUIDE 是在1992年就弄好的，所以現在分析技術進步了，應該要訂出較適宜的GUIDE。GUIDE內容涵蓋說設計期間必須考慮的負載，包括預載（兩者都是張力和扭轉），熱負載，內部和外部壓力負載，來自正常條件的負載運輸，衝擊和振動，以及來自假想事故序列的負載，以及計算方式的比較等。另外現在很多關於用過核子燃料運輸包裝，貯存罐的分析中，都透過電腦分析，但方法很多樣，沒有明確的guide，所以應該要建立一個適當的guide。

NRC和ASME想要建立一套完整之Explicit Dynamics 電腦分析 GUIDE指南，包含

- 使用坐標系統來定義幾何，材料屬性取向和負載應用(use of coordinate systems to define geometry, material property orientation, and load application)
- 元件選擇(element selection)
- 元件寬高比(element aspect ratios)
- 元件和網格轉換(element and mesh transitioning)
- 元件網格設計(element mesh design)
- 使用質量尺度(use of mass scaling)
- 沙漏控制(hourglass control)
- 扣件構件的模型(modeling of components that buckle)
- 焊接和螺栓連接的模型(modeling of welded and bolted joints)
- 材料模型和材料屬性輸入(material models and material property input)
- 考慮接觸定義，接觸點，摩擦，間隙和邊界條件(consideration of contact definitions, contact points, friction, gaps, and boundary conditions)

- 材料失效模型(modeling of material failure)
- 衝擊限制器的模型(modeling of impact limiters)
- 衝擊目標的模型(modeling of impact targets)
- 負載應用(application of loading)
- 適合的計算多軸度係數(proper calculation of the triaxiality factor)
- 正確的求解技術(correct solution technique)
- 應力和應變輸出(stress and strain output)

(二) S-37熱分析

包裝運輸容器的熱分析大致可分成兩部分，內部燃料相關之熱分析與外部容器相關之耐熱分析，在會議中，共有五篇討論相關議題。

- (1) 用過核子燃料一般都是乾式貯存，但若過程中出了問題需要將燃料拿出來或重新包裝，就需要再注水，然而因為乾式貯存會讓燃料的溫度升高，將冷水注入，會造成溫度震盪(thermal shock)，並且應避免產生蒸汽，導致在包裝中、在安裝過程的壓力升高。同時因加水，中子緩速劑變多，必須採取預防措施以避免臨界問題。壓力(cavity pressure), 溫度(temperature of lid and body, outgoing medium temperature) 水位(the water level inside.)都是在注水過程需要監控的參數。也可考慮注硼液替代水，可增加安全餘裕，及減少廢水。
- (2) 裝用過燃料束之內藍流體流動特性，入口處流動阻力相對較高，但該流動阻力對總壓降的影響是可忽略的，因為入口的長度與總流動長度相比太短。研究以不同方式計算比較滲透性（粘性流動阻力）係數，也利用假設內部管道流動的理論方法計算，以及利用CFD計算。最終理論方法比CFD計算結果少了50%，這是因為由於複雜幾何（格架和燃料棒）的流動阻力，未完全考慮所致。
- (3) IAEA對交通火災事故要求耐火測試要求情境係800°C，30分鐘，但與目前交通事故(非只放射性物質運輸)實際狀況有所差異，因此利用較接近的實際情況來做分析。模擬交通事故火災需要高度動態性、複雜的計算流體動力學分析工具，如利用ANSYS Fluent化學燃燒反應及其與動態流體流動的相互作用分析。本文還探討了用於描述運輸碳氫化合物火災模擬的假設，例如包裝位置，包裝取向，可用燃料量，燃料流量，事故現場和環境因素。
- (4) 印度為了確保運輸安全，且輻射不外洩。就需要對包裝運輸容器作各種測試例

如噴水試驗，自由落體試驗，堆積試驗和滲透試驗。另外，事故情況如碰撞，翻轉，從橋樑掉落，火災等也被考慮。為了克服熱測試要求，使用外包裝保護容器免受火災和由於事故衝擊的損害。低密度絕緣材料，如特定厚度的剛性酚醛或聚氨酯泡沫可用於外包裝的熱保護。外包裝必須通過熱試驗，即暴露於情境800°C，30分鐘下。但Hydrocarbon Fire火溫度遠高於1000°C，且由於運輸卡車和油輪時常使用 Hydrocarbon作為燃料。這種情況可能會導致Hydrocarbon火焰中吞噬外包裝，即1000°C。因此，需要建模分析研究以評估外包裝暴露於1000°C，30分鐘。因為在夏季，印度次大陸的環境溫度遠超過45°C，現在研究也認為初始溫度為45°C，而不是如IAEA SSR-6中給的38°C。發展模型是使用包含依賴溫度的Crank-Nicholson有限差分法進行評估導熱係數。研究已執行重要參數對傳熱和界面溫度的影響。研究表明150 mm的厚度可產生較佳的數據。

- (5) 美國利用FDS(Fire Dynamics Simulator) 程式來鐵路隧道火災，道路隧道火災等事故情境分析。最後研究了外殼，密封件和其他關鍵包裝部件的峰值溫度，並且對每個火災事故情況討論了劑量和釋放結果。總結係現行NRC之規定和標準是一個高標準，可提供民眾應有的保障

(三) S-18/S-40輻射分析

對於運輸放射性物質，輻射分析可算是民眾最關心之議題，所有包裝運輸容器所有之設計皆係為了避免輻射外洩，在本會議中有各公司與研究單位發表相關議題

- (1) 法國AREVA TN為了符合政府和法規要求，調整了申照流程，並且開發新的更精密的屏蔽分析：利用燃料組件的特性、內燃料可被外燃料屏蔽、燃料的個別位置差異等特色，分析其個別造成的劑量，結果仍可符合法規限直要求
- (2) 美國利用The methodology of transfer functions (TF) 來評估外部輻射水平，此種方法是計算每個輻射源所在光譜中個別能量群所產生的劑量的所有貢獻，此種方式有些許限制，但若用在評估燃耗對於燃料鄰近劑量的影響是很有用的。
- (3) 容器中放射源的活性，結構和佈局等對輻射源運輸容器的外部輻射水平的監測結果具有重要影響。但用過燃料包裝表面上的中子劑量率太難以精確測量，監測結果並不總是可靠。中國研究比較了使用不同光譜儀的監測結果，各有各的限制，最後也進行了MCNP(蒙地卡羅)模擬與利用SCALE計算以研究放射性材料包裝的屏蔽性能測量。

- (4) point kernel code, QAD-CGGP2R 或 discrete ordinates code (Sn code), DOT3.5 / DORT.被應用來設計CASK的屏蔽，也用來做CASK的安全分析，最近也利用蒙特卡羅MCNP，程式非常多樣，因此確認各程式的特色來適當的利用分析方法很重要。日本研究經過使用QAD-CGGP2R，DORT和MCNP5-1.60計算結果比較，通過MCNP的計算可能較於精確。計算中合理的變異數降低參數(variance reduction parameter)也很重要，最近有一套ADVANTG程式可以自動產生較合理的參數。最後確認了合理的CASK安全分析方式，以後CASK安全分析可能可以考慮使用。
- (5) 目前對於A TYPE包裝的輻射評估，係利用Q system、A1/A2(劑量標準：人的有效劑量不應超過50 mSv，對皮膚的等效劑量不應超過500 mSv，A1 -值是針對特定形式（不可散布的）放射性物質導出的劑量，A2 -值則是針對“非特定形式”（可以散布的）放射性物質導出的劑量。）是相當舊的評估方式，故應該要依據現況，對於以前IAEA運輸中未列出的核種，對一些額外的A1 / A2值，更新。德國成立一個研究，利用計算工具BerQATrans，目的是分析當前Q系統使用的方法，並建立一個計算Q和A1 / A2值的程序。
- (6) 日本通過蒙特卡羅方法計算Q值之BRACES程式的開發，目前BRACSS在自設條件下可以更好地模擬Q系統。未來A1 / A2值應包括事故下更合理的參考劑量，暴露途徑，輻射照射幾何和運輸週期。目前計劃實施模型和數據（核數據，劑量係數等）來驗證。
- (7) 當前的A1和A2值是依據1996年確定的五個暴露途徑，已相當舊，拜現今電腦硬體和軟體的進步所賜，已有更新更好的計算方法。也因此2013年9月，NRA，PHE，GRS和IRSN決定設立一個國際工作團隊來研究。

(四) S-48 利用電腦模擬分析研究

由本會議許多發表可見，利用電腦做模擬分析是重要的趨勢，而 finite element analysis (FEA)是一個非常有價值的工具，將會有越來越多人使用 FEA 分析，因此 FEA 的發展，也是本會議中許多單位的研究主題之一。

- (1) 英國研究 FEA 的使用可以幫助降低製造成本並且可能可以給相關物理測試做驗證，甚至在某些情況下取代一般的掉落測試實驗，未來對 FEA 的可靠性和可信度將增加，掉落測試實驗可能會減少。但最後認為每種情況都是獨一無二的，需求

是不同的，FEA 與實驗同等重要

- (2) 核能相關包裝運輸 FEA 中使用 Sub-modelling Technique(較小的模組)的方法，係因為包裝元件很大，建立完整大結構模擬需要花很多時間，所以建立較小的模組技巧來獲得較精確且快速的結果。如下圖 3.4-1

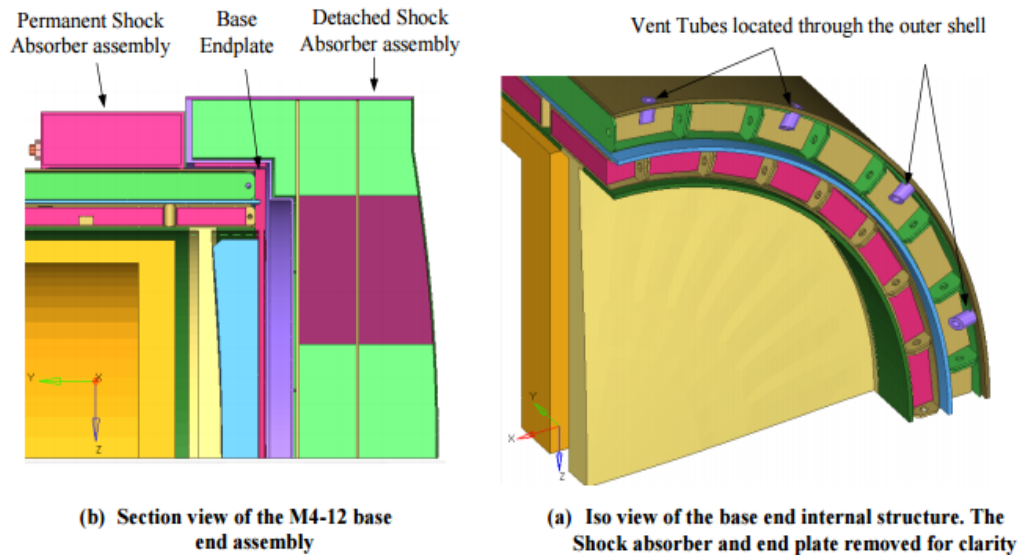


圖 3.4-1 小模組模擬大結構

- (3) 英國研究也用程式交叉驗證進行輻射物質運輸包裝桶薄壁在法規要求的火災分析的熱應力分析，整體研究的結論是內殼不會失效，因此包裝容器邊界保持完整。研究中使用 Abaqus 和 LS DYNA 來比較分析。結論是兩種程式都能夠解決暫態熱傳遞和熱應力。Abaqus / Standard 似乎提供較好的問題解決速度和方法
- (4) 開發貯存罐熱傳評估模擬工具，安全散熱是其中一個重要的目標，桶內的高溫可導致所用材料的強度明顯降低，且產生由不同材料熱膨脹引起的熱應力。

各種部件之間的氣體填充間隙對於貯存罐的熱行為起主要作用，因為相比之下，氣態比液態有較低的導熱性，但也有附加的熱傳遞機制，例如自然對流、氣體介質的熱輻射。(FEA) 用於評估熱容器的性能中，必須考慮每個熱傳遞機制每個間隙用於精確模擬。這導致模擬的擴大和計算時間延長。ENSI 與合作夥伴開發了一個用於快速熱評估的模擬工具，其結合了分析方法和 FEA。將充氣間隙不網格化，對熱過程的影響通過使用分析方程式來考慮。通過數學方法來處理。這些功能像邊界條件並且被稱為熱間隙條件 (TGC)。通過使用 TGC，顯著的優點是減少時間。新開發的 TGC 成功地與 FEA 結合，並通過實驗測試驗證。這個軟體解決方案使 ENSI 能夠對各種類型的桶進行獨立的熱分析。

四、安全及老化管理相關

在安全及老化有關管理問題方面，包括分析或測試的經驗分享，大會所安排的報告可分成三個群組如下：

(一) S-13/S-31/S-39老化管理問題

用過燃料儲存在乾式貯存設施，並非最終處置場所，在 20~40 年的儲存期後，終究還是要運送到回收再處理廠或是最終儲存場所。因此用過核燃料放入乾式貯存的設施必須考慮潛在的材料老化劣化問題，確保在長期儲存的過程及後續的運送過程不會發生問題。在儲存期中貯存設施的結構及元件材料老化管理及監測檢查，亦是必要的作業。有效的老化管理計畫必須對於材料老化劣化機制及評估技術充分瞭解，才能採取有效的劣化防範作業及老化抑減策略。

在本單元中的報告包括：

1. 德國業者 GNS 公司為了提供暫存及運送兩種用途，發展了所謂的 Dual Purpose Casks (DPC)，並說明了 PDSR(Package Design Safety Report)評估的架構，以及長期監測的差異分析(Gap analysis)技巧等。實際應用於貯存情形如圖 4.1-1。
2. 日本電力中央研究所(CRIEPI)則提出了用模擬過燃料貯存罐的 304 不銹鋼材料，在經過 Low Plasticity Burnishing (LPB)處理過後與未處理的應力腐蝕龜裂試驗結果。
3. 日本原子力規制委員會的法規標準及研究部(Regulatory Standard and Research Department)則針對日本國內 PWR 燃料乾式貯存容器，提出了以容器表面溫度監測護套完整性的電腦模擬。
4. 法國的 AREVA 公司則提供了老化管理的方法及經驗等。
5. 日本的 Hitachi Zosen 提出使用水泥護箱時，如何確保用過燃料不銹鋼儲存罐不發生 SCC 的方法建議。
6. 經歷福島事故後，日本檢視受海嘯衝擊用過燃料乾貯使用 20 年後的乾貯護箱 DSC(神戶鋼鐵製造)確認並未受損。
7. 日本 PWR 用過燃料的乾貯長期監測計畫及測試用儲罐(Dual Purpose Cask)設計說明。

8. 為能預估乾貯燃料罐的應力腐蝕龜裂的影響，美國 Sandia National Laboratories 提出以機率性電腦模擬應力腐蝕預測的研究計畫。
9. 日本三菱重工提出了使用鋁合金(A6N01、A3004)做為運送用過燃料的儲存護箱內格架，經過 60 年儲存期後的老化效應評估。
10. 美國 Eyre Nuclear Energy Consultancy 公司與日本兩家公司合作發表了使用於用過燃料池格架的常用金屬 MAXUS，在經過 3~5 年的加速腐蝕環境模擬測試一般環境條件 50 年的腐蝕情形，驗證該金屬的耐腐蝕性。
11. 日本 CRIEPI 公司與法國 CEA、TECHNETICS 及德國 GNS 等公司合作發表用過燃料護箱金屬襯墊(HELCOFLEX®)執行 100,000 小時的老化測試結果，如圖 4.1-2。
12. 日本 CRIEPI 公司與法國 CEA、TECHNETICS 及德國 GNS 等公司合作發表用過燃料護箱金屬襯墊(HELCOFLEX®)執行數值分析模擬老化機制。
13. 德國的 BAM 公司發表了用於中子屏蔽的人造橡膠密封墊及高分子聚合物的長期使用效果。
14. 美國國家能源部(Department of Energy)，及國家實驗室(Savannah River National Laboratory)分享了某些放射性物質包件由於特殊因素而未能依法規規範之原有包件設計基礎執行運送的原因及經驗。



Figure 1 DPCs in an Interim Storage Facility Gorleben (Photo: GNS)

圖 4.1-1 德國 Gorleben 的一處用過燃料乾式貯存場(採用 DPC)

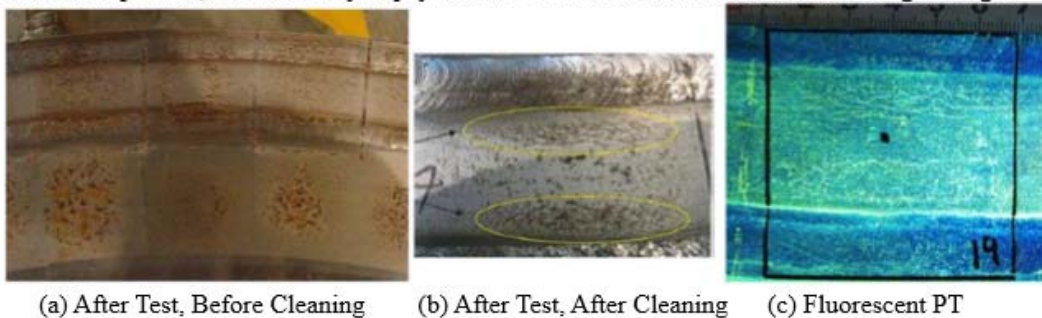


Figure 9 Results of VT and Fluorescent PT in the area near the ring plate welding

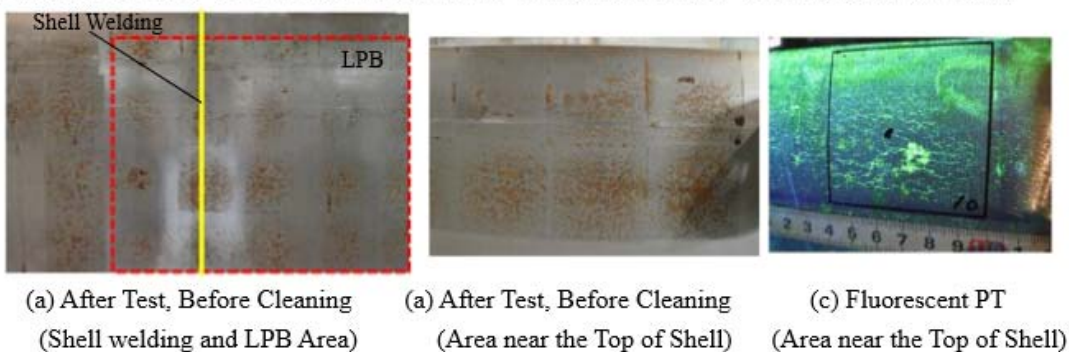


Figure 10 Results of VT and Fluorescent PT in the area near the shell welding and top of the shell

圖4.1-2 日本以LPB(Low Plasticity Burnishing)處理儲存罐的耐SCC測試結果

(二) S-05/ S-42-法規要求的運送容器測試經驗

有關放射性物質包括用過核燃料的運輸及包裝，必須符合 IAEA 國際通用的法規以及各國國內的有關包裝運輸法規，因此各國生產運輸包件的廠家必須在提出新產品的過程，執行法規要求的有關測試程序並獲得良好的測試結果。本單元即在探討各種產品執行測試的有關成果展示，以及法規符合性的討論。各國的製造廠家都充分運用本次會議執行成果發表。包括了

1. 法國 AREVA 公司的用過燃料包件 TN®-G3，不明廢棄射源包件(380-B)介紹。
2. 德國 DAHER Nuclear Technologies 的 DN30。
3. 日本的 Transnuclear and Kobe Steel(神戶鋼鐵)公司的 TK 系列產品。
4. 韓國原子能研究所研發的 KORAD21。
5. 美國 Sandia 國家實驗室對包件熱測試驗證的設施能力介紹。
6. 德國執行運送包件內木質填充的衝撞緩衝介質在包件耐火測試的變化過程表現。
7. 德國(DAHER NuclearTechnologies)執行六氟化鈾的運送包件 DN30 熱測試結果。
8. 德國聯邦材料研究中心(BAM)與日本數間公司合作執行 RAM 放射性物質運送包件依法規條件執行測試的結果。
9. 美國 Oak Ridge 國家實驗室發表高 α 活度的鈾系物質囊封射源特別形式測試。以下特別針對法商 AREVA 發表的報告摘要分享。

針對廢棄的密封放射性射源或物質，AREVA 公司在與美國 Los Alamos 國家實驗室的合作計畫合約要求下(Offsite Source Recovery Program)，提供 B 類(B(U)-96)包裝容器的新包件(380-B)。其包件設計目的在於承裝加馬射線屏蔽狀態不明的廢棄放射性物質以便運送，因此該包件本身並包含了加馬輻射屏蔽及緊密不洩漏的設計。本項計畫目的是基於保護國家安全及民眾健康安全的利益下，回收美國國內外的廢棄放射性物質。380-B 包件的能力驗證測試是以實體尺寸一半的大小，執行自由墜落及鑿穿測試以確保是否滿足 10 CFR 71 and SSR-6 等美國 NRC 及國際原子能總署 IAEA 的有關規定。本篇報告即在說明有關的測試規畫及測試結果。詳如圖 4.2-1 及圖 4.2-2。



Figure 3 – CTU Condition after P3 Puncture Drop Test

圖 4.2-1 380-B 包件執行鑿穿測試後的組件狀態



Figure 4 – CTU Condition after D3 Free Drop Test

圖 4.2-2 380-B 包件執行墜落測試後的組件狀態

(三) S08-因內容而異的包件安全分析及有關運輸作業經驗

用過核燃料的運輸作業，在全世界先進國家已行之多年，在英國國內早從 1960 年代 EDF 前身 CEGB 公司開始已有 50 年的經驗，到今天已經執行過合計超過 45,000 次的運輸行程。如同英國專家 Richard James(EDF Energy)所發表案例所指，運輸作業的設計必須盡可能的排除組裝容器過程、運輸過程的人因疏失，考慮使用保守設計參數，保留未來新法規的適用彈性，以及評估作業所需，甚至容器運送費用，品保分級等等因素。在作業過程並應考慮容器餘裕的組態管理，安全文化的精神，虛驚事件及事故經驗回饋，國內及國際經驗的合作等等。

本單元各篇報告包含了如何運用其它國家或公司的運作經驗，來提升確保本國用過核燃料的運送安全、可靠及符合相關法規。發表報告除了英國經驗，跨國公司 DAHER NUCLEAR TECHNOLOGIES 則介紹分別從兩個國家的用過核燃料聯合運送經驗，Studsvik 公司的運送接收介面處理經驗，法國 AREVA 公司介紹研究用反應爐的放射性廢棄物運送、儲存問題，以及專以回收用過燃料中的鈾為目的的用過燃料運送作業，並特別提及新燃料放進反應爐後卻因國家政策而停役的核燃料運送經驗等等。以下是 DAHER NT 協助瑞士 BASEL 大學以 GNS16 包件運送用過燃料的過程寫真，如圖 4.3-1~圖 4.3-4。



Figure 1: View of the basket of the packaging GNS16 loaded with fuel elements

圖 4.3-1 GNS-16 運送包件裝載用過燃料的盛箱



Figure 2: View of the packaging GNS16 in the pool after completed loading

圖 4.3-2 GNS-16 在池中裝填用過燃料完畢後加蓋



Figure 4: Package GNS16 as presented for transport

圖 4.3-3 GNS-16 裝填用過燃料後準備運送



Figure 5: Transport leaving University of Basel

圖 4.3-4 GNS-16 帶著用過燃料準備離開 Basel 大學

五、 貯存及處置管理相關

在貯存及處置管理相關主題的報告裡，主要著重在用過核子燃料運輸容器的選擇、長期貯存計畫、運輸管理計畫與風險、代表性公眾的運輸輻射劑量評估、再處理技術的發展，當然也有英國用過核子燃料運輸50年的運維經驗分享。

(一) AREVA TN公司(Shelton)特別針對用過核子燃料持續性運輸所建立的管理模式提出專業報告，因其在過去50年的經驗裡，已經執行超過7000次的用過核子燃料運輸作業，其運輸模式的發展是從1970年代開始，不斷修訂以符合今日更多的法規要求與限制，當然包括滿足顧客的需求，也兼顧到公眾利害關係人的關切議題，並從過去的學習改進當中，提供業界相關資訊與指引。其實用過核子燃料每年全球運輸量與有害物質或其他類放射性物質比較是屬於非常小的。但是用核子燃料的運輸計畫是需要工程、鐵路、公路、海路、檢查、溝通、運輸鋼筒操作及品質保證等各項專家的配合才能成就運輸作業。在其整個執行過程有三個關鍵要項：

1. 長期活動(在開始營運前15至10年間)

在長期的活動中其運輸模式考量包括燃料特性、年度運輸量、運輸硬體的限制、與設施間的介面、安全與輻射防護法規修訂情形、計畫時程規劃、....等。而運輸模式之設計，則包括運輸路徑、交通方式、鋼筒與運輸車輛設計、輔助設施、程序與步驟等都須納入設計內。

2. 中期活動(在開始營運前10至2年間)

中期活動在開始運輸作業前主要考量的有火車、鋼筒及輔助設施、供應商的選擇與製造、展開溝通計畫與利害關係人的教育、發展緊急應變計畫、確定運輸步驟與選擇智慧工具，以及在各種活動中執行輻射偵測與試驗，在這階段中須由專人負責追蹤辦理情形。

3. 短期活動(在開始營運前2至0年間)

短期活動的內涵主要包括依運輸計畫執行訓練與模擬測試整體運輸模式，俾修正其中可能存在缺失的程序與步驟。

對法國國內的用過核子燃料運輸，從籌備將空的鋼筒離開La Hague再處理廠到各核能設施將鋼筒裝填回運到相同設施大約須花4週時間。而通知管制機關則須在從

核能電廠裝填用過核子燃料離開前8週。主要的步驟包括運輸作業與管制機關及其他利害關係人等各方面的協調，另外也須與船主或其他運輸供應商、接收者等之協調，最後確認運輸交運文件與表單，當然在運輸前須判斷空鋼筒與運輸工具之符合性情形(例如運輸許可、維修情形、內部設備、輻射狀態、標籤、標誌等)。

AREVA TN從過去累積的運輸經驗及法規趨於嚴苛，學習得到運輸計畫是用過核子燃料貯存或再處理之主要挑戰之一。而必須考量之因子包括反應器廠房吊運設備的安全性、業者能提供的資源、運輸鋼筒、運輸工具等，除此外，更重要的是安全及保安的要求，以及其他可能影響運輸計畫的限制與氣候。一個不預期事件，如天候、媒體、技術事件等，可能造成計畫的排擠壓力，這時就需要快速的反應。AREVA TN就是從過去多年的運輸經驗中修正改善或強化溝通程序，對於運輸容器與步驟的簡化操作也適時做技術性的改善，再透過每次運輸前的訓練以便了解運輸上不同的環境與限制，促進運輸供應商與業者間的意見交換。而永遠須將焦點擺在安全、保安及品質上。

- (二) 在英國備用密封放射性材料(Sealed Radioactive Sources, SRS)廣泛使用在醫學、學術研究及商業用途上，通常收集合併交由特定公司移除沒有活度的組成，而將中階放射性廢棄物送至核能設施作為安全的長期貯存，而很不幸的，為了放射性物質的安全運輸，IAEA法規在2012年做了更新，導致一些運輸包件的執照無法再取得，其中運輸法規之617章^[註1]及648章^[註2]旨在強調包件須證明放射性限值的符合性，為了長期貯存而發展一新的運輸途徑，英國的INS公司(Stephen Middleton)在2014年有一機會接受英國核能除役局(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)的委託，利用已存在之1648C作為運輸包件之發展，並成功將SRS中階廢棄物送至Sellafield場址。1648C包件原目的主要是作為B(M)類放射性物質之運輸而開發設計及取得執照，在1993年經由陸運成功將中階放射性廢棄物從Chapelcross核電廠送至位於Sellafield場址的混合式 β/γ 廢棄物貯存庫(MBGWS)。然而在2013年Chapelcross核電廠不再使用此包件，並建議將其除役。1648C包件是一個圓柱狀長頸瓶屬於不銹鋼材質，具鋁質緩衝吸收器，約1.3m高、1m寬、232mm壁厚、裝填容積28公升，該包件送至MBGWS時，內部襯墊就在熱室中移除，並轉移至長期安全貯存的地窖裡。INS公司首先修改1648C鋼筒掉掛作業之輔助設備，包括從業主端至目的地等相關軟硬體

改善使作業更加有效率，並透過模擬展示整體作業過程之管理與品質系統，並取得1648C鋼筒能符合Type A包件運輸之許可。

INS公司從2015年7月開始使用1648C鋼筒之運輸作業，已完成五批次Type A運輸，而且INS公司已經更進一步向英國管制機關提交1648C鋼筒用於Type B(M)包件運輸之執照申請，目前管制機關正審查核准中，俾使更高活度之中階放射性廢料能送至MBGWS場址。這項計畫不僅重啟1648C鋼筒的再利用，且讓廢料運輸更安全及成本效率控制

註1:617章

A package shall be so designed that it provides sufficient shielding to ensure, under routine conditions of transport and with the maximum radioactive contents that the package is designed to contain, the radiation level at any point on the external surface of the package would not exceed the values specified in paras 516, 527 and 528, as applicable, with account taken of paras 566(b) and 573.

註2:648章

A package shall be so designed that if it were subjected to the tests specified in 719-724, it would prevent:

(a) Loss or dispersal of the radioactive contents;

(b) More than a 20% increase in the maximum radiation level at any external surface of the package.

(三) 美國能源部對於用過核子燃料的政策是至少建造一座共用的乾式貯存設施，直到最終處置場址被選出來及營運，所以在未來將會有兩個大規模的運輸活動，一是從現在的貯存設施至共用貯存設施，另一是從共用貯存設施至最終處置場。而現在美國能源部對於用過核子燃料貯存及運輸的相關研究裡，山帝亞國家實驗室的 Sylvia Saltzstein 研究團隊就是在著手發展相關技術來證明用過核子燃料在延長貯存後的結構完整性，以及經道路或火車安全運輸的性能限制情形。而目前的研究的焦點如下：

1. 是擺在用過核子燃料在經過濕式貯存、乾式貯存及延長乾式貯存後之燃料包覆材料的性質。
2. 在經過上述多年的貯存後，用過核子燃料及其貯存系統應力及化學變化導致密封鋼筒所曝露的放熱情況。
3. 乾貯系統在貯存期間任何環境降低的情況。

4. 在正常運輸過程中，負載及拉力施放在個別燃料束上的情況。

對於燃料結構完整性之相關研究，首先是針對共用中期貯存設施，可讓用過核子燃料獲得較好的管理，也能提供在送往最終處置場前重新包裝選項的彈性，因此重複運輸及貯存之機械效應是共用貯存所關切能提供保證燃料不會接觸到戶外的環境。實際上用過核子燃料有數層保護可避免曝露在環境當中，主要的有燃料丸的硬質纖維結構、燃料丸放入燃料束才前的金屬包封、維持燃料在固定幾何形狀的裝置以及不銹鋼密封鋼筒及貯存、運輸套筒等。金屬包封材料的性質在吊運、貯存與運輸期間，對於維持燃料完整無缺、固定配置方位與可再取出等行為是相當重要的。其中在燃料包封期間徑向氫化物的形成對於用過核子燃料的長期貯存及運輸是相當關鍵的，所以氫化物的形成可由包封溫度及燃料束內部壓力來決定。阿岡諾國家實驗室目前正在執行在不同溫度及壓力情況下，利用不同反應器的燃料包封來測定產生易碎及損壞的過渡溫度，因為這個結果可以指出在較低包封溫度及較低燃料束內部壓力時，包封可保持的其延展性。使得燃料在長期貯存後的最終運輸時，溫度能更低，因此了解過渡溫度範圍是相當重要的。

對於燃料結構完整性之相關研究，其次是探討放熱情況，在包封期間因化學反應導致溫度及機械性質的改變，而法規指引所要求的限值是設定在400°C以下，西北及橡樹嶺國家實驗室共同合作開發在預期高燃耗研究計畫密封鋼筒及乾貯系統下研發一套熱分佈模式，模擬結果顯示頂端包封溫度值較先前所認知的且更低於法規限值的400°C，詳圖5.3-1。他們為了得到更真實的包封溫度，國家實驗室採用真實的衰變熱計算比工業上已知的許多保守的模式所做的計算結果更加接近實務。另外在能源部與核管會所共同出資的研究裡，山帝亞國家實驗室得到了額外的數據足以證實流體動力熱水力學之計算上的假設可應用在BWR用過核子燃料鋼筒熱耗設計分析上，從這些實驗所得到的數據可用來測定上述的穩態包封溫度，而且在評估貯存整體循環中的包封完整性也是需要這些數據的，如地面上的直立具密封鋼筒的乾式貯存系統，詳圖5.3-2。地面下的乾貯系統，詳圖5.3-3。

對於燃料結構完整性之相關研究之一，高燃耗用過核子燃料資料收集計畫係由能源部及電力研究所(EPRI)共同進行，其目的主要是想得到高燃耗用過核子燃料在乾式貯存至少十年期間的物理性質相關數據，以提高我們對鋼筒內部環境的

了解及用過核子燃料在貯存期間的降解程序。而為了得到在貯存期間的溫度測量，在鋼筒內徑向與軸向將布置63組熱電偶，經十年後將打開密封鋼筒測試燃料束的機械性質與先前做比較。

在了解用過核子燃料包封機械完整性的同時，也須了解其在整個生命週期過程中受到衝擊及震動負載的真實經驗，而運輸會是最大衝擊及震動負載的時刻，山帝亞及西北國家實驗室已開始共同合作進行本項測試及發展模式來量化燃料在正常運輸情形下的負載變化，並考量不同的鋼筒、不同的運輸工具(各種貨車、火車、船舶..)、運輸方式、鋼筒擺在運輸平台上的布置情形以及各種部正常的條件下，修訂模式來預測燃料受到衝擊及震動所受到的應力變化。最近山帝亞實驗室就在利用兩座振動平台進行試驗，所有測試輸入及結果數據將再提供給西北實驗室來發展模式

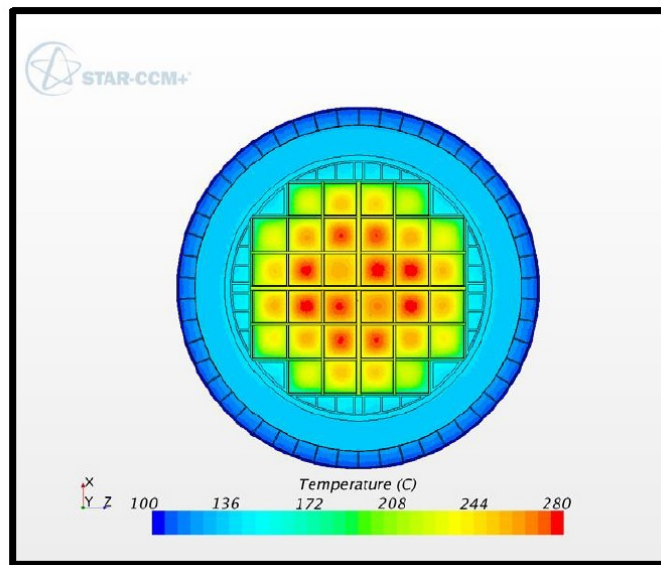


圖 5.3-1 在包封的頂端徑向溫度分布



圖 5.3-2 地面上乾貯系統

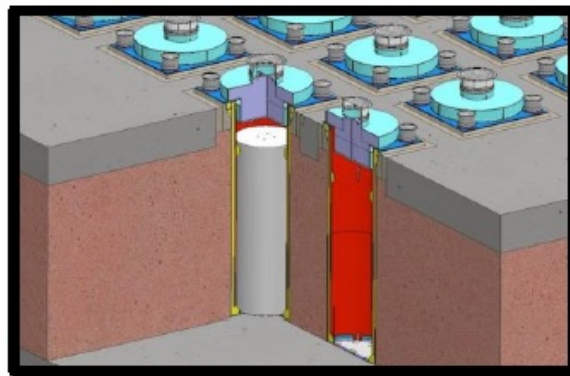


圖 5.3-3 地面下乾貯系統

(四) 用過核子燃料須貯存至決定再處理或深層地質處置的關鍵點，這關鍵點的選擇主要依據法規、未來基金、許可及其他無法預測的因子(Brett Carlsen)。過去對關鍵點的推測常常是錯的，且可能導致錯失用過核子燃料正確管理與決策的機會。例如乾貯系統原先是構想能在反應器燃料池需求的空間及提供用過核子料貯存達40年直到再處理或/及深層地質處置可使用為止，但看起來全球數百座的乾貯系統依據目前發展趨勢極有可能超出原先考量的設計壽齡，根據目前核電使用計畫的速

率，用過核子燃料貯存勢必延長，甚至長達數個十年，美國核管會最近已經在考量300年的貯存而進行老化效應及包括延長用核子燃料貯存與隨後運輸在內的整體老化管理作業。當然國家的政策須盡早決定用過核子燃料是採再處理亦或是採深層地質處置方案，只是依據過去選址經驗來看，目前面臨的政策挑戰是持續貯存的相對低成本及風險，似乎助長貯存較想像中更延長，或許需要好幾個十年或更久。因此為了確保其貯存安全，未來所增加的用過核子燃料數量及貯存時間將提高其技術挑戰性，而管理這些技術挑戰性將影響包裝及貯存設施的決定、設計及策略。

未來用過核子燃料貯存設施及包件應該考量當貯存期間的條件、法規、社會價值等發生改變時的設計與促使延長貯存及可適合於不同的安全決策，縱使這些設計可能導致投資成本的提高，但整個壽齡成本還是可能比更多傳統假設固定條件所為更低。因此，延長用過核子燃料貯存系統的設計必須包括提供減緩老化相關的應力，譬如機械的、放熱的、化學的、輻射的及其他在貯存期間內可能累積或改變的應力等。包裝或/及乾燥技術應該選擇減少未來包封失誤的可能性，且燃料貯存及包件方式也應該確認檢查及監測系統，所以延長貯存期間的文件品質管制及記錄也都是挑戰。為執行整體的結構或組件的老化管理可透過系統化著名的規劃-執行-查核-行動循環來持續改善。說明如下：

步驟1. 規劃--發展系統設備組件老化管理最適化的活動，進入步驟2。

步驟2. 執行--系統設備組件的營運操作，進入步驟3。

步驟3. 查核--系統設備組件的檢查、監測及評估，進入步驟4。

步驟4. 行動--系統設備組件的維護，然後針對老化管理程序的效率進行檢討改善，再回到步驟1規劃修訂。

監測及檢查系統應該考慮事前的調查與非破壞檢驗技術來監測貯存情況及透過預防及預測維護支援老化管理。

對於一個成功的包裝策略是避免未來重新包裝的需要，因此需選擇一個可符合全程貯存、運輸及最終處置等需求的密封鋼筒。因為重新包裝的計畫可能增加風險、成本及個人輻射曝露，也產生額外的放射性廢棄物，對於未來包裝之成本估算是高度依賴在經濟分析上所做的假設條件，從一些估算結果指出定期性的重

新包裝所增加的成本幾乎達到一個次方大小。

在整個延長貯存期限的過程中，已經出現關切的聲音，主要是對於安全地延長貯存所發展的架構存在不確定性，因此政治上的決定與承諾可能受到延遲，事實上用過核子燃料的管理有其專業及道德上的義務來確保安全及有效的貯存系統，安全上是必須有足夠的餘裕，以便容納未來所遭遇各式各樣的情節直到決定再處理或地質處置。如果最後解決方法受到延遲，各種成本將勢必逐步上升，使得要完成基本解決方案越來越困難，而這也將為大眾的信心帶來負面的壓力，因此強烈警告最終方案的政策決定是相當重要且須持續解決。

(五) 瑞士聯邦核能安全檢查局(ENSI)在考慮用過核子燃料貯存運輸雙用鋼筒之使用接受性，通常考量40年的貯存壽齡，但是在瑞士，運輸包件的設計核准是架購在貯存接受性的時間內，最近尋找最終處置的程序正面臨稍微的落後，使得用過核子燃料最終處置的營運被迫延後數年，所面臨的焦點問題是用過核子燃料的乾式貯存需要多久，超過40年的貯存期間其安全性如何確保，這些都是與包件組成及用過核子燃料的性質有關。總括言之，貯存運輸雙用鋼筒使用的全壽齡週期就顯得相當重要，其考慮以下的步驟:

1. 反應器運轉
2. 用過核子燃料池冷卻
3. 用過核子燃料裝載在貯存運輸雙用鋼筒
4. 鋼筒的封閉與乾燥
5. 貯存運輸雙用鋼筒運至中期貯存設施
6. 乾式貯存超過40年
7. 將貯存運輸雙用鋼筒運輸至位於最終處置場的廢棄物檢整設施
8. 從鋼筒中取出用過核子燃料放入為最終處置而設計的容器內。
9. 將處置容器送入深層地質處置。

為達成上述之目標，首先各領域的專家就其專業領域進行分析，然後不同領域之專家進行許多次內部及外部討論，並指出包括國內及國際活動不同領域的界面。對於界面的討論主要將焦點放在以下的面相:

1. 機械意外分析的邊界

2. 用過核子燃料的運輸
3. 熱分析的能力
4. 在特別乾燥程序中，為運輸準備
5. 考慮用過核子燃料外送至處置之關鍵分析
6. 用過核子燃料包封準則
7. 在熱室用過核子燃料的處理
8. 在最終處置場的用過核子燃料

相關評估分析結果，可分成下列重要部份來檢討:

1. 包件組成

在瑞士所使用的包件其設計已與國際上研究的結果進行比較，瑞士為考慮更長遠的活動而提升包件的設計，譬如由於長期溫度的效應所採用的金屬密封墊、由於材料性質的困難追蹤所採用的合成橡膠密封墊、在長期溫度的影響下因為減弱(weakening)採用鋁合金及因為遲緩(creeping)採用銅、由於冷卻導致脆化而採用特殊不銹鋼合金、由於負載前因為鬆弛效應導致的損失採用附蓋螺栓。

2. 用過核子燃料

瑞士在面對各種與封裝材料及燃料組成有關之用過核子燃料束設計時，為其設計變化及得到更精準的運轉參數需求，在每個瑞士核電廠的用過核子燃料之細部分析是需要執行及建立用過核子燃料資料庫。

3. 最終處置

在大部分的情境下，貯存運輸雙用鋼筒在貯存期間之後的運輸可不用打開直接送至最終處置場，深層地質處置的地表設施操作員將第一個定義用過核子燃料的最後狀態。他必須優先考慮到每個燃料的狀態，縱使因為運輸、貯存或處理之故，使得用過核子燃料束發生缺陷或損壞的可能性，最終處置專責機構NAGRA計畫為每一個用過核子燃料束的狀態安裝營運設備，俾確保包封完整性、在開啟貯存運輸雙用鋼筒前包封完整性之確認、缺陷與損壞的取出與處理、損壞燃料包件設計之核准等。

因此，貯存運輸雙用鋼筒的老化管理是由三個面向組成，包括技術上的包件組成與用過核子燃料束、組織上的知識管理與幕僚作業管理、以及行政上的執照

管理、貯存接受性與老化指引等，目前有關瑞士核能電廠相關法規定期安全審查，而貯存運輸雙用鋼筒之運輸性及貯存性也在法規審查內，縱使有數座核電廠採用相同的鋼筒容器，但是這些包件的安全審查仍然在幾年內須重複，尤其是運輸法規對包件設計的修正將可能需要考量老化現象，為了確保貯存運輸雙用鋼筒可理解的老化評估及老化管理，ENSI將提議以自身包件設計同意方式來取代原始許可國家的單純批准方式。另外，運輸與貯存執照之許可的期間和內容應該做好協調，如果有需要，在特別的地方也可以彼此分開來規範，其實將執照合為一，在現階段並不是在計畫中的，因為它們是分屬不同法規，也就是危險物品條例及核能法規，基於定期安全審查概念，所有在專案內確認的測量及行動將被提出給營運者遵循。

六、運輸(路運與海運)相關

(一) IAEA規範與採行

根據IAEA在放射性射源安全及保安防護管理規範上，對於第一類及第二類放射性射源的定量方面，考量最大的顯著風險，尤其是在運輸期間的遺失及被偷所提升的風險。在美國放射性物質安全與控制的架構是需要協調的，如放射性物質運輸職責上的政府當局主要有運輸部(Department of Transportation, DOT)、國土保安部(Department of Homeland Security, DHS)及核管會(Nuclear Regulation Commission, NRC)等，對於顯著風險物質的運輸保安尤其複雜，主要是幾個相關的美國政府當局在執行上有不同的角色及職權。本報告(Kim Lukes)主要將焦點放在美國境內或跨越美國邊境，有關政府當局間自2013年3月19日起採行新法規(10 CFR Part 37)在放射性物質保安運輸的協調與溝通上，同時也提出核管會目前的努力在執行一個可追溯的計畫審查來確保在放射性物質保安上的有效性，當然包括運輸保安。這個評估的廣度包括國際法規及標準的內外部評估與分析，甚至延伸到利害關係人得到通知的決定。最終NRC、DOT及DHS三方在2015年簽屬運輸保安備忘錄，這紙備忘錄建立政府當局間為完成共同作業的一個架構，包括須要求一個有效性的方法、大眾健康及安全防護，以及確保共同防禦與保安之共同目標。這個備忘錄定義每個機構的角色、責任及界面協調與合作機制，每個機構主要的業務描述說明如下：

1. 風險評估~係針對放射性物質在運輸時對人的威脅，當然主要包括包裝上的配置，每個機構的資源及在符合安全與保安範疇上應該維持。
2. 法規與指引~標準、規則、指引、公告、命令及指令等都是美國政府當局發布要求、指導和通知典型的方法。這些要求的發展用來解釋如何執行要求的手段。
3. 檢查及施行~每個機構依組織架構所認知的執行檢查與施行相關活動。這些活動的協調以最大可運用的資源來服務。
4. 技術支援~因為每個機構的資源有限，可以由其他機構提供支援的可能性，且將視緊急事件或環境情況，如果所需求資源仍超出，可以由特別機構來支援。
5. 在緊急回應的資訊分享~由機構間提供緊急回應活動的分享。
6. 立法素材~立法推展的協調，機構間協調提供立法要素以避免資源浪費而草擬立

法。

7. 預算~主要是釐清每個機構的預算不會超過所撥用的資金。
8. 協調溝通~提供每個機構與存在機構間界面討論場所的官方溝通協調方式。
9. 背景調查~美國法規須要背景調查，以便去得核准執行放射性物質調查與取得運輸相關資訊，同時放射性運輸工具之司機也得取得核准。
10. 研究與發展~研究發展可促使最近完成的或正在進行中的安全與保安計畫之合作。這樣的關係將節省資源與確保整個計畫管理以符合兩個或更多機構的需求。

對於運輸或準備運輸的許可證持照者而言，10 CFR Part 37對第2類放射性物質(核管會運輸保安要求的數量，詳表6.1)的數量要求如下：

- 1.在轉移材料之前，須驗證受讓人的許可證授權要轉讓的放射性物質的接收、類型、形式和數量。
- 2.採用已建立包件追蹤系統的承運人。
- 3.驗證並記錄(a)運輸“到達時間不晚於”的到達時間和(b)與接收許可證持照者的實際到達時間。

上述10 CFR Part 37對保安要求的評估中，美國聯邦政府利用各種方法定期監測和公開記錄聯邦政策和法規的充分性，效率和有效性。這些可以由內部機構政策來引導，例如自我評估或機構檢查員一般的稽查，例如外部事件由政府責任辦公室(Government Accountability Office, GAO)稽查或立法授權。2015年，NRC開始審查10 CFR part37的要求，因為NRC承諾應對GAO稽查和立法授權。然而，以便作為NRC對監管有效性和效率所作的承諾的一部分，該審查比立法指導更加廣泛。NRC並計畫此審核將在2016年冬季完成，且此審核的建議將提供給NRC委員會。這個綜合評論由9個獨特的部分組成：

- 1.評估10 CFR Part 37實施前兩年的檢查結果，尋求持照人實施的趨勢。
- 2.評估2005年以來所發生的盜竊事件（發布9月11日安全命令後），以確定事件指明在監管架構中是否尚存有差距。
- 3.評估10 CFR part37的B部分，進行背景調查和可信賴性和可靠性測定的要求和指導。

- 4.通過檢查員訪談評估用於資源的配置，並評估材料聚集的定義。
- 5.評估檢查員關於第1類和第2類放射性物質安全的培訓計劃。
- 6.評估國家來源追蹤系統。
- 7.將10 CFR Part 37要求與原子能機構的建議和其他國家的要求進行比較。對美國和其他國家之間差異的觀察進行評估和分析，以便在10 CFR part37或支持性指導中考慮其可能性。
- 8.由具有放射性物質安全和保安方面擁有重大經驗的顧問對10 CFR part37進行外部評估。聘用三名顧問提供報告如下：
 - (1)10 CFR Part 37要求和工作人員自我評估的充分性和完整性。
 - (2)10 CFR Part 37法規和指南的清晰性。
 - (3)NRC推出10 CFR Part 37要求和指導的充分性。
 - (4)收集和評估利益相關者對10 CFR part37的有效性和清晰度的意見。

表6.1 美國核管會對第一類及第二類
放射性物質運輸保安要求數量

<i>Category 1 and 2 Threshold Quantities</i>		
	<i>Category 1 (TBq)</i>	<i>Category 2 (TBq)</i>
<i>Americium-241</i>	<i>60</i>	<i>0.6</i>
<i>Americium-241/Beryllium</i>	<i>60</i>	<i>0.6</i>
<i>Californium-252</i>	<i>20</i>	<i>0.2</i>
<i>Curium-244</i>	<i>50</i>	<i>0.5</i>
<i>Cobalt-60</i>	<i>30</i>	<i>0.3</i>
<i>Cesium-137</i>	<i>100</i>	<i>1.0</i>
<i>Gadolinium-153</i>	<i>1000</i>	<i>10.0</i>
<i>Iridium-192</i>	<i>80</i>	<i>0.8</i>
<i>Plutonium-238</i>	<i>60</i>	<i>0.6</i>
<i>Plutonium-239/Beryllium</i>	<i>60</i>	<i>0.6</i>
<i>Promethium-147</i>	<i>40,000</i>	<i>400</i>
<i>Radium-226</i>	<i>40</i>	<i>0.4</i>
<i>Selenium-75</i>	<i>200</i>	<i>2.0</i>
<i>Strontium-90(Yttrium-90)</i>	<i>1,000</i>	<i>10.0</i>
<i>Thulium-170</i>	<i>20,000</i>	<i>200</i>
<i>Ytterbium-169</i>	<i>300</i>	<i>3.0</i>

(二) 瑞典破損用過核燃料運輸與貯存規劃

在瑞典(Anna Wikmark)對於破損用過核子燃料經由運輸至貯存場所建立的解決方法是值得我們學習的，儘管今天核電廠的營運更加可靠，但所有瑞典核電廠都存在破損的燃料棒。管理這些燃料棒的中間貯存和之後的最終處置已經是一個日益增長的問題。瑞典用過核子燃料管理系統係興建集中式中期貯存設施（Clab）對用過核子燃料進行中期貯存，然後根據KBS-3方法在最終處置場中處置。然而，

中間貯存設施並不接受貯存破損的燃料，而且最終貯存場對積存在燃料中的水分具有限制，因此不能接受故障或破損的燃料棒。

瑞典的核電公司已經聯合成立了瑞典核燃料和廢棄物管理公司，管理用過核子燃料燃料和操作廢棄物。為了找到解決方案將破損的燃料運輸到貯存場，SKB已經建立了一個計畫，目標是在2020年之前將所有瑞典核電廠的所有當前破損的燃料棒修復並運輸到中間貯存設施。計畫已經確定了在最終處置場中修復破損燃料的接受標準，並且評估了用於破損燃料棒的處理、封裝和運輸的多個選項。此外，兩家供應商已開發出符合標準的更新方法，並於2016年5月與兩家供應商簽訂了契約。

本文概述了瑞典運輸破損燃料到貯存設施的解決方案的細節，包括從運輸商和營運商的角度來看，必要的修復，包件選擇和許可議題等必要的步驟等。

修復破損燃料的SKB驗收標準

SKB已經在最終處置場以及處理、運輸和中間貯存中建立了修復破損燃料的驗收標準。

一般要求所有方法

設備和程序應滿足瑞典所有核電廠和Clab所有機組的工作和設備批准的要求。

處理要求

處理要求包括設計要求和操作要求。重要的是，容器配合在當前的設施和處理設備中，它是可運輸的，並且它可以與來自瑞典發電廠的其餘用過核子燃料一起封裝在最終處置場中的銅和球墨鑄鐵中。因此，容器應與已經在瑞典系統內的任何燃料組件，包括BWR或PWR在尺寸和重量、處理和臨界性方面相符合對應。

材料要求

核電廠對其允許在其設施中使用什麼樣的材料有要求，SKB對要貯存在Clab設施及最終貯存場中的項目之材料性能有所要求。為了保持長期貯存期間的密封性和在最終貯存場中的輻射安全性，SKB對材料具有以下接受標準。

- (1)膠囊的密封部件必須用不銹鋼或具有相同或更高耐腐蝕性的材料製造。
- (2)膠囊密封部分的材料厚度不應小於 3 mm。對於鋁合金，由於已證實的高耐腐蝕性，最小材料厚度為 0.7mm。

(3)膠囊容器不能含有任何有機物質。

乾燥要求

由於瑞典最終處置場要求有存在水分的限制，破損燃料棒必須在包封之前乾燥。且須證實在燃料棒的頂部和底部充氣室中沒有剩餘的水分，並且燃料棒應被乾燥至滿足ASTM C1553 “用過核子燃料乾燥行為標準指南” 的乾燥度，或者等效標準。為了限制膠囊和燃料棒中水分和氧氣的存在，在密封之前，應將乾燥的膠囊填充惰性氣體。

密封要求

待封裝破損燃料棒的容器應為氦氣密封。

運輸要求

修復的燃料必須能運輸到Clab設施。

試車計畫

SKB已經完成了一個試車計畫，旨在根據ASTM C1553 “用過核子燃料乾燥行為標準指南” 測試真空乾燥的方法。來自Ringhals 核電廠的濕破損燃料棒被運送到Studsvik熱室實驗室。 Studsvik已經建立並批准程序來封裝被檢測的輻射燃料的切片，以便在SKB系統內處置，但是檢查的燃料在處理時總是乾燥的，因此從未需要額外的乾燥程序。由於沒有用過核子燃料在運輸許可上所做要求的包件，因此運輸作業即在特別安排下，利用SKB所擁有的INF-3船來運輸。在Studsvik熱室實驗室，燃料棒切成一米長度，以適合裝在Studsvik容器中運輸到貯存設施。此外，壓力通風系統被切斷，以滿足並驗證頂部和底部充氣室中沒有水的接受標準。真空乾燥可以完成且驗證符合ASTM C1553標準，然後在密封和氦氣洩漏測試之前用惰性氣體沖洗容器兩次。

破損燃料的包裝

SKB有10個TN17 / 2包件，用於從Clab核電站之用過核子燃料運輸。 TN17 / 2容器的認證可允許少量有針孔般破損的燃料棒被運輸，但是不允許運輸如裂縫和斷裂般的破損燃料棒。 SKB目前正在獲得HI-STAR 80型新包件的過程。對於這種鋼筒，允許穿孔的燃料棒（即針孔和碎屑磨損）按原樣運輸，並且如果放置在損壞的燃料容器中，則可以運輸較大的破損。然而，在2021年後期，新的鋼筒車隊將

不會完全實施。

“困難情況”的包裝

對於燃料棒由於卡在骨架中而不能與燃料棒分離時的故障，必須清除所有完整的燃料棒，並將破損的燃料和骨架作為單獨的廢棄物處理。處理這種廢棄物的一種方法是切割核電廠燃料池中的骨架，或者將整塊送到熱室實驗室進行分割。對於BWR燃料尺寸的運輸，可以使用NCS 45。這種包件曾在瑞典施行，並持有許可證，允許運輸有限數量的破損燃料棒，沒有封裝，也與輻射材料一起。對於PWR燃料尺寸，情況遠非最佳，可以將PWR骨架或PWR尺寸的貯存罐送到熱室，這是舊的29噸燃料鋼筒。此包件並不符合今天的許可證要求，只能在特殊安排的情況下使用補償措施來運輸。

評估和選擇

SKB已經根據最終處置場中破損燃料的驗收標準，評估了可用於重新調整破損燃料棒的不同選項，並決定選擇封裝方法，並在不久的將來完成封裝。為了承包商的最終選擇，交貨時間也很重要，特別是對於具關閉決定性的設施之燃料的重新調整。

運輸

用於現場修復破損燃料所選擇的解決方案，當前對於核電廠的大部分破損燃料都在沒有密封封裝的情況下運輸，為了管理瑞典不用限制的核廢料運輸系統，西屋公司Quiver的運輸作業是需要將許可內容納入包括在SKB運輸鋼筒證照內。

在Studsvik熱室實驗室進行非現場處理破損燃料棒，則將需要大量的運輸作業，以便利用現有的鋼筒許可證來進行。Studsvik目前正在努力擴展該證照，以便包括更多破損的燃料棒，這可能會減少三分之一的運輸數量。

來自BWR反應器的困難案例已經可以在瑞典電廠獲得許可的NCS 45內容中進行。為了使得困難案件能夠從PWR反應器運輸，當局在特殊安排下的運輸建置條件方面扮演非常重要的角色。

(三) 對於比利時Doel核電廠1 & 2號機組封裝有缺陷燃料棒的乾式貯存之挑戰和進展

為了實施包括各種類型的有缺陷燃料組件的用過核燃料的長期乾式貯存，Synatom

正在尋找一種能夠確保Doel DFR(Defective Fuel Rods)的長期穩定性的解決方案，從而為可能的最終管理選擇保持開放，不需要在再處理或直接處理之前重新調節程序。

在徹底檢查了可能的DFR乾式貯存選項之後，Synatom選擇AREVA技術，亦即採用乾燥和封焊膠囊與相關的運輸貯存雙用的鋼筒(DPC)，適用於所有約束類型的缺陷。AREVA提供多年的DFR運輸和再處理解決方案，今天提出了這種封焊燃料棒膠囊概念，基於現有的和經驗豐富的螺桿燃料棒膠囊概念，已經用於濕式貯存和/或運輸目的中。

該過程的原理如下（見圖6.3-1）：

- 有缺陷的燃料棒/燃料碎片的準備和前處理;
- 將DFR（或用於碎屑的匣筒）轉移到位於池底部的封裝設施中的燃料棒膠囊中;
- 封裝設備內部：
 - 燃料棒膠囊內的DFR（或匣筒）的脫水和乾燥;
 - 通過焊接氣密地封閉燃料棒膠囊;
 - 焊道的非破壞檢測;
- 將燃料棒膠囊轉移到膠囊罐中，安裝膠囊罐的頂端部件;
- 裝載和轉移裝載的膠囊罐至DPC，然後將其與完整的用過核燃料組件一起貯存和運輸;
- 將DPC轉移到中期貯存設施。

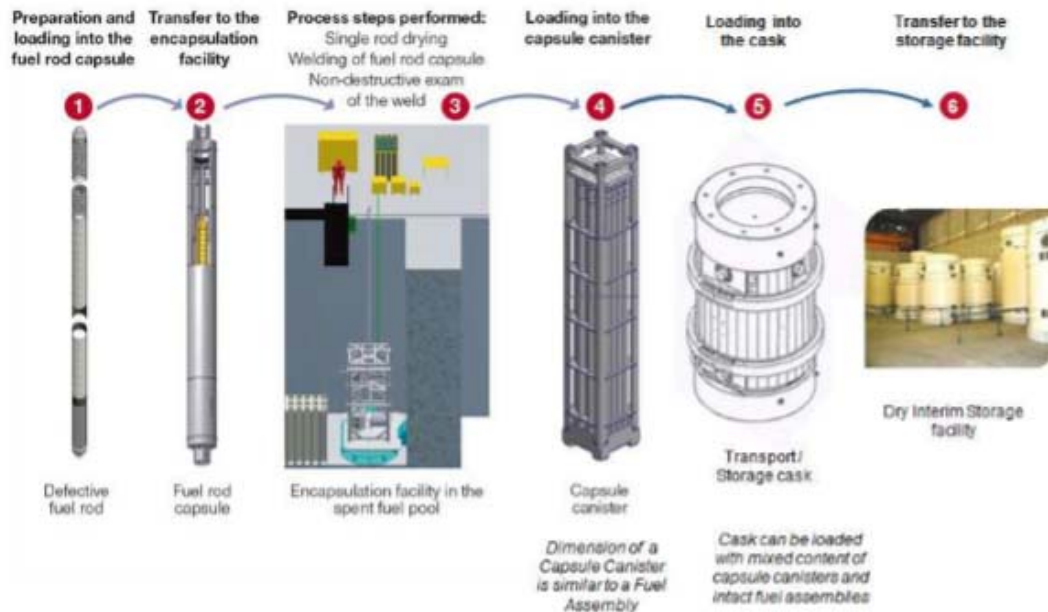


圖 6.3-1 用於運輸和/或乾式貯存的 DFR 的封裝程序

這種技術的優點很多，包括：

- 膠囊替代DFR的破裂包封（恢復包封完整性以避免放射性外釋：氣體和/或顆粒）；
- 用熱氣乾燥插入膠囊中的DFR是一種有效率的方法；
- 封裝DFR的乾燥度可通過溫度和壓力測量進行物理驗證；
- 逐一處理DFR（乾燥和焊接含有一個DFR的膠囊）限制了潛在故障的影響；
- 在DPC中用一個膠囊罐替換一個燃料組件的方法可促進取得許可；
- 封裝執行在永久滿足ALARA原則的水下進行，使輻射曝露最小化；
- 這種封裝是符合用過核子燃料最終管理的選項，再處理和直接處置，包括運輸等。

總而言之，AREVA所開發的這項技術在DFR中的殘留水分方面非常有效，這使得能夠證明DPC的運輸和貯存許可證的安全裕度，故其應是乾式貯存安全要求的最佳可行技術。

Synatom，Engie Electrabel和AREVA聯合為Doel核電廠 1 & 2號機開展 DFR的長期營運之安全管理。該團隊正在基於一種全面且堅固的技術實行DFR的長期乾式貯存：乾燥和封焊的膠囊以及相關的TN®24SH DPC容器(圖6.3-2)以符合兩種用過核子燃料管理選項~再處理和直接處置。從2014年開始，該項目進展相當順利，在2015年和2016年分別達成主



圖 6.3-2 TN[®] 24 SH DPC

七、 其他

(一)加拿大運送表面污染大組件的法規修訂建議

最近加拿大更新了以原子能總署SSR-6規範為基礎的“加拿大包裝和運輸核子物質條例(2015年版)”（PTNSR 2015），主要是以“原子能總署規章”現行版本及2011年原子能總署綜合監管評審服務（IRRS）訪問加拿大時的參考建議而加以綜整修訂。同時，也根據加拿大多年來的經驗，包括增加裝運大型物件的規定，並刪除“專案特別安排”所提及的內容，這些變化是因為認知到大型物品的運輸已成為常規，不需要專案特別安排。

PTNSR 2015將大型物件定義為已從核設施除役的物件，其內部符合原子能總署規定的SCO-I或SCO-II所適用要求之核物料污染程度，並且因其尺寸無法以PTNSR / IAEA條例所述的任何一種包件來運輸。PTNSR 2015要求任何希望運輸大型物件的人向加拿大放射性物質運輸主管當局 - 加拿大核安全委員會（CNSC）申請運輸許可證，申請運輸許可證的資訊與依國際條例申請SCO-III裝運核准的建議大致相同。

在許多情況下，大型物件是可以歸類為表面污染物(SCO)，但是因為它們的尺寸無法滿足用於運輸的所有包裝要求，即使它們不會造成運輸風險，因此根據原子能總署“效率包件”概念，制定了一套根據新的SCO-III分類運輸大型物件作為表

面污染物件的標準規定，以便將其納入國際條例和諮詢材料。在SSR-6中主要加入與SCO-III分類和要求有關的規定，且新分類的批准和行政要求是有關的。此外，SCO-III被加進UN 2913的正式運輸名稱中，且SCO-III的運輸限制也已修訂，還為新增的要求起草了諮詢材料，該諮詢材料的主要部分係基於SSG-26附錄VII中對大型物件所作的修訂。這些資訊被移入SSG-26法規內，以支持這些規定，並從附錄七中刪除，但是由於經驗不足及考量更大的放射性強度，所提出的建議規範並不包括反應器等的大部組件。SCO-III的概念構成基礎後，未來可以擴展到涵蓋低比活度（LSA）的大尺寸物件。

關於表面物件SCO-III的主要增修內容：

SCO-III：大型固體物件，由於其尺寸，不能以本規章所述的一種包件類型運輸，其中：

- (i) 所有開口均被密封，以防止在例行常規運輸情形下放放射性物質的外釋；
- (ii) 物件的內部在可行範圍內盡量乾燥；
- (iii) 外表面上的附著性污染物不得超過所規定的限值。
- (iv) 在平均超過300cm²表面上，對於 β 和 γ 發射體和低毒性 α 發射體的附著性污染加上固著性污染不得超過 8×10^5 Bq/cm²，或對於所有其它的 α 發射體則為 8×10^4 Bq/cm²，除非能夠證明在運輸事故後，事故附近的人的活動攝入量不超過 10^6 A₂或相對應50mSv的吸入劑量。

(二)IAEA運輸規範(SSR-6)對於LSA-II及LSA-III安全概念的評估

LSA-II和LSA-III材料要求在70年代初就被引入原子能總署運輸條例中，並曾在80年代修訂過，改變這些要求的建議也是原子能總署“運輸條例”在90年代和2000年以後的第一年修訂過程的一部分，但從來沒有足夠的資訊證明和批准任何的改變。但同時在國際上已經在LSA-II和LSA-III的材料特性技術以及它們在運輸事故條件下的外釋行為方面取得了很大的進展。今對這些進展進行全面審查後，可得出簡化和澄清適當規定的合理變化。

近年來進行了全面的實驗和理論的研究工作，以研究各種LSA-II和LSA-III材料在不同機械衝擊條件下的外釋行為，並且使用結果來評估在嚴苛操作及運輸事故情況下，由這種材料引起的潛在輻射曝露。基於這項研究工作，對LSA-II和LSA-III

要求進行了全面審查，它主要側重於這些要求所基於的安全概念，特別是LSA-III瀝率浸出試驗的需要性和正當性，這在過去經常被質疑，以及關於整個LSA-II和LSA-III材料的活度分佈，如何證明符合均勻性要求的改進指引。

該綜述所得結論，整個LSA安全概念是基於LSA-II和LSA-III平均比活度的限制，以及從LSA-III材料中排除粉末可以被確認為是有根據和保守系統提供高水平安全性，而不需要對LSA-III材料進行瀝率浸出試驗。基於在實驗中發現的經驗方程式的靈敏度研究證實了對於不同包件體積，墜落高度和曝露時間的這個結論，而且特別證明了對於室內事故的最關鍵情節，吸入放射性物質的量總是保持在10mg以下，這是原始安全概念非常基本的假設。

本報告主要研究結果是對安全概念審查得到結論，其中包括敏感性研究和對原子能總署“運輸條例(SSR-6)”以及諮詢材料(SSG-26)的提議修改，並提供原子能總署對SSR-6和SSG-26修訂過程的變化。

對於嚴重運輸和處理意外事故情況分析，本報告已經分析了各種具有保守假設的運輸和處理意外事故情況，並且確定意外事故附近的個體其活動攝入量已測定。這些事故情況包括

1. 道路和軌道的意外事故，相當於9米的B型墜落試驗，採用不同包裝尺寸（0.2立方米、1立方米和10立方米）含有粉末的LSA-II材料（最保守的假設）和以具有最大比活度的其他脆性材料如採用混凝土為代表的LSA-III材料。
2. 在具有3米和6米高度的小型和大型大廳中處理意外事故，採用不同包裝尺寸（0.2立方米，1立方米和10立方米）含有粉末的LSA-II材料（最保守的假設）和以最大比活度的混凝土當作LSA-III材料。
3. 補充LSA-III材料的河水浸入事故和室內處理意外事故，導致LSA-III包裝污染的水溢出或噴霧，此假設意外事故使得水侵入IP包件，以研究瀝率效應。

關於所分析的意外事故情景和相關附近人的潛在輻射曝露之主要結果如圖7.1-1。在圖7.1-1中，在意外事故附近因吸入的個體其所得曝露約為 $10^6 A_2$ 的等級，相當於50mSv的有效劑量。對於所有情況，有效劑量將遠低於 $10^6 A_2$ 的參考限度。從這結果也顯示，因運輸意外事故條件下，從LSA-III包裝材料的外釋非常有限，接近事故位置的人其所得吸入劑量在最嚴重的情況下，至少低於50mSv限值的20

倍以下(一個具中型包件的室內意外事故之最關鍵情節)。而在室外道路或鐵路意外事故的情況下，這個劑量將遠低於前者(約50mSv限值的100倍以下)。

圖7.1-1還顯示，對於所有類型的意外事故，粉末形式的LSA-II的吸入劑量高於LSA-III，但仍低於50mSv限值的5倍。這證實了外釋放射性物質的量顯著地取決於物質的物理形式。LSA-II和LSA-III放射性物質之間的本質區別是LSA-III限於除粉末之外的固體材料，而這項調查結果顯示，在運輸機械事故條件下，LSA-III固體因空浮外釋放射性物質導致吸入劑量至少比粉末形式的LSA-II固體低於100倍(如圖7.1-2)。由於LSA-III物質的不易分散形式，與粉末形式的LSA-II固體相比，沒有必要從瀝率試驗中來證明LSA-III和LSA-II之間的平均比活度所允許的20倍差異，故從安全角度來看不需要進行LSA-III瀝率試驗，也根據原子能總署“運輸條例”的安全概念，沒有瀝率試驗的LSA-II和LSA-III即可提供適當的高水平運輸安全，因此可進一步得出結論，不需要替代或附加放射性物質的其他要求。

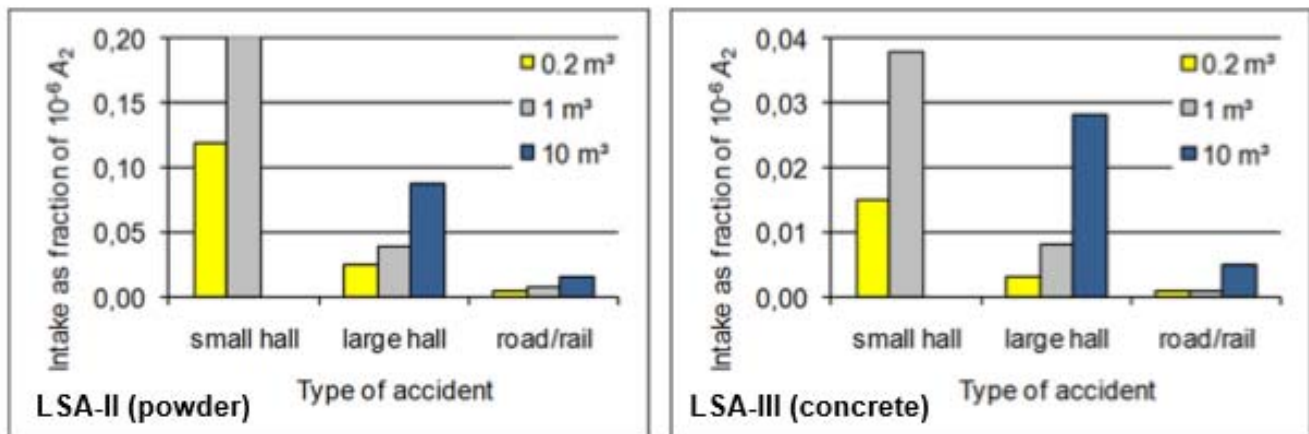


Figure 1 Resulting exposures due to inhalation intakes for various accident scenarios and package sizes for LSA-II and LSA-III material

(三) 在用過核燃料包件運輸期間嚴重事故的安全距離計算

使用HotSpot擴散計算模式對用過核燃料運輸過程中，假設嚴重事故下分裂產物之放射性外釋影響之計算。計算得到兩個主要結論：

1. 假設運輸包裝TN12中包含的5%PWR燃料棒被損壞，使得整個氣體分裂產物外釋到空氣中，法國報告導出安全距離為450m，而日本JAEA重複計算估計安全距離則為33米。如此大的差異歸因射源項的差異。
2. 日本核設施緊急應變在2000年5月建議15m的安全距離，係假定每週A₂外釋10小時。而經過JAEA重新計算的結果是一致的。

本報告的主要目的是計算在運輸用過核子燃料之包件期間距離嚴重事故的安全距離，前NSC建議為15 m，但在參考文獻中並沒有詳細相關描述。

HotSpot是一種電腦模式，其提供放射性物質外釋相關輻射效應的一階趨近方式，是由Lawrence Livermore國家實驗室所開發，並經美國DOE評估。該發展是遵循法國文獻中所公佈的計算情節，即假定用過核燃料運輸箱TN12中所含的5%的用過核燃料棒在火災之前受到機械衝擊而破裂，並且在非常惡劣的天氣條件下將整個氣體分裂產物外釋到環境中。根據參考文獻，外釋³H的量為 2.42×10^{15} Bq，且所得

計算之安全距離為450m。

通過採用相同的假設，我們首先使用ORIGEN 2計算射源項，該電腦模式用於模擬核燃料循環並計算其中包含放射性物質的核種組成和特性。計算結果外釋³H量為約 9×10^{12} Bq。由於這個數量比參考文獻中描述的小兩個數量級。參考文獻作者經檢查他們的計算，並承認在其計算中每個燃料棒的分裂氣體和每個燃料組件的分裂氣體（每個組件中有264根棒）之間存在混淆，也就是多乘以了264倍。

肆、心得與建議事項

綜合本次會議來自全球的專家、供應商與從業人員齊聚，個別提出與放射性物質運輸與包裝相關的報告論文，內容相當廣泛，由於用過核子燃料劑量高、處理不易，所以與會專家及供應商等，都著重在用過核子燃料之包裝、運輸及貯存方式，本次參加PATRAM 2016研討會議後，研提心得與建議事項說明如下：

- 一、本研討會是全球關注在放射性物質包裝及運輸上最專業的，吸引全球相關供應商、研究單位或核能發電業者參與，每三年舉辦一次，當然相關發表的論文數量自然很多，基本上可將大會安排之主題分類為容器及包裝設計相關、法規及執照相關、結構、熱及屏蔽分析相關、安全及老化管理相關、貯存及處置管理相關、運輸(路運與海運)相關、其他(風險評估、溝通與訓練)等共七大項領域，而目前本公司正規劃辦理的高低放射性廢棄物最終處置計畫、用過核子燃料貯存，或是放射性廢棄物集中式貯存計畫等，皆須考量放射性廢棄物之安全的包裝及運輸作業，尤其涉及國際海上放射性物質的運輸業務，本公司在這方面經驗較少，為與國際包裝及運輸管理資訊接軌與精進，且與相關專家機構或專業廠商建立良好關係，並就本公司需求議題進行討論，建議持續關注國際發展趨勢，派遣適當人選出國參與研討會，汲取國際放射性物質包裝及運輸相關設計、系統管理及實務經驗等，有助強化本公司相關工作之推動。
- 二、本次會議經驗告訴我們，國際原子能總署及先進國家為了防範放射性物質的擴散，或是為了有效侷限具污染性的物質不當進入環境，不論從法規制度面或是技術面，國際間的教育訓練及在溝通面向上都做了許多的努力。然而在美國三哩島、蘇聯車諾比及日本福島等核能事故後，因當時釋出的放射性物質對環境所造成的衝擊，使得世人對於核能電廠的不安心理，更因為101年3月11日日本福島事故而大幅改變了各國對核能政策的立場。但是有趣的是，將矛頭指向核能電廠後，似乎對於地震海嘯所造成的天然災害愈來愈嚴重的原因，就沒有太多人關注或繼續深究了。事實上倘若人類為了經濟活動所需，不斷增加開發地殼底下資源的速度不作改變，則可預見未來自然界力量的反撲，溫室氣體的直線增加，未來整個地殼板塊運動的失衡或無可預期，對地球環境的破壞力量只會有增無減。矛盾的是，為了補足核能電廠停役後的電力缺口，全世界各國普遍的政策，皆少不了以大量石化燃料的能源替代。

而地底下大量石化燃料的開採及消耗，亦正是推動更大規模的天災事故的重要推手。由此可見，除了在正常的放射性物質包裝運輸過程，運用尖端科技使其作業活動對環境衝擊降至最低非常重要之外，努力降低核能電廠發生人為疏失致生事故，或降低因事故而造成對環境的衝擊，實在是核能從業人員的另一個重大責任。

三、從發表有關包裝設計相關的論文，可知未來包裝設計的發展趨勢是朝向多功能的通用性包裝設計，不但可以裝載不同類型、形狀、規格的放射性廢棄物，且同時兼顧貯存、運輸等用途，可用性大大提高；此外，在安全上，廠家有建立模型進行實體測試，也有用分析方法模擬驗證設備符合法規要求情形，甚至有廠家還直接用飛彈射擊實驗設備，或將設備放在交通工具上，直接進行交通情境測試，以確認設備的可用性。各國管制單位有鑒於放射性廢棄物日漸增多，貯存與運輸議題越顯重要，也了解放射性廢棄物非廠家可獨立處理，也會與廠家合作處理包裝設計面臨的相關議題。

四、各廠家均積極研發多功能及用途的通用性包裝設計，IAEA也進行相關法規的制定，我國核電廠將陸續除役，未來用過核子燃料或放射性廢棄物貯存包裝設計的選擇，建議選擇此類兼具適用貯存及運輸的通用性包裝設計，在處置上會更有彈性，且更具經濟效益。當然須對台灣環境及民意都有相當程度共識能接受的包裝設計。

五、放射性物質運送包裝設計，法規要求要進行相關試驗，為取得使用執照，製造廠家有的會進行實體模擬，然所費不貲，採用程式分析模擬來確認，相對較經濟，且經由實驗數據驗證後，能精確模擬各種效應，是值得發展與建立。對於公司而言，放射性物質的貯存與運輸包裝在處置場所或運送過程的狀況瞭解與掌握是必須的，若能建立包裝容器之結構、熱及屏蔽分析的自主評估能力，適時評估包裝的狀態，對電廠除役後放射性物質的處理，及包裝的選擇與功能驗證，均有莫大的助益，亦更能有效管制及確保輻射防護與安全。

六、雖然我國的核能科技發展很早開始，產官學各界的菁英不虞匱乏，然而由於在政府政策極為有限的輔導及開放之下，50年來的核能工業似乎仍只侷限在代理國外技術業者的階段，缺乏獨立開發創設的公司，或是政府輔導成立的核能產業。尤其在有關放射性物質運送包裝的核能工業，本國業者似乎極為少見，令人惋惜。但未來台灣的核能發電將漸漸走入除役的階段，在此階段裡，實際上有許多值得台灣工業自

行研發設計與拆除、包裝與運輸有關的項目，可設法培植台灣廠商或經由台電提出構思後交由廠商設計製造，再回到台電核電廠除役端實際上的應用。

七、放射性物質在全球已經普遍運用在工業、醫療、甚至軍事用途之後，廢棄物中含有放射性物質的可能性已然大增，而且可能隨時必須面對。政府對於放射性物質的管理態度，已經不能停留在目前“不要把放射性廢棄物留給子孫處理的思維”，任由民眾普遍的因無知、恐懼、排斥、NIMBY效應甚至於核能電廠等同於炸彈等等的錯誤認知，進而成為誤導國家放射性廢棄物管理，甚至於對能源政策的破壞力量。應該在高中小學課程中編入輻射應用及管理的基本知識，在大學教育中更應成為必修的通識教育課程，讓國家的中堅分子，能夠有足夠的知識，協助政府判斷能源政策中正確的核能適當佔比，以及核廢料妥善管理的國家政策與方針。

伍、参考文献

(Proceedings of the 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2016)

Ai Saito, Akihiko Terada, Dai Yokoe, Hiroki Sakamoto and Hiroaki Taniuchi, The Study of Analysis Methods of Shielding Calculation Codes for Casks. (Paper No. ID3033)

Alexia Favre and Franz Hilbert, Thermal Test of the DN30 Package for the Transport of UF₆ Paper No. ID1012)

Andrey M. Kirkin, A.V. Kuryndin, A.A. Stroganov, I.A. Lyashko and M.Y. Karyakin, Experimental Verification of Computational Models for Evaluation of Safety Parameters during Spent Nuclear Fuel Transportation. (Paper No. ID2007)

Andy D. Cummings, Cross Code Verification of a Thermal Stress Analysis of a Thin Walled RAM Transport Package during and after a Regulatory Pool Fire. (Paper No. ID2039)

Anna Wikmark, Establishment of a Solution for Transporting a Large Amount of Failed Fuel to Storage. (Paper No. 6020)

Anne Presta and Jan Van Aarle, WNTI Working Group on SSR-6 Regulation TRANSPORT REGULATORY CHALLENGES FOR THE FUTURE (Paper No. ID4043)

Annette Rolle et al, Design Approval of Special Form Radioactive Material – Important Aspects (Paper No. ID4004)

Arnaud Cazalet and Jonas Martinsson, Unloading/loading Challenges of Heterogeneous Transport Casks in Nuclear Facilities and Specifically at Studsvik (Paper No. ID6014)

Arangunram N. Nandakumar et al, The Interface of Safety and Security in Transport: A Regional Perspective (Paper No. ID4062)

A. Sean Duvall, Testing vs Finite Element Analysis – What Should the Balance Be?. (Paper No. ID2038)

Atsushi Yoshida, Akira Higuchi and Akio Oiwa, Crushing Characteristic of Rigid Polyurethane Foam as Shock Absorbing Material for Transport Cask. (Paper No. ID1041)

Baptiste Louis, S. Vecchiola, G. Sert, A. Konnai, U. Büttner, T. Cabianca, T. Anderson and I. Brown, Findings and Future Work of the International Working Group on Review of A1 and A2 Values. (Paper No. ID4028)

Benoit Eckert et al, IRSN's Experience Feedback List for the Package Design Safety Assessment

- (Paper No. ID4027)
- Benjamin Kerr*1 and Thierry Delon, TNR106 - IR200: A New Frame without Impact on the Safety of the Package (Paper No. ID4018)
- Brett Carlsen, Extending Spent Fuel Storage until Transport for Reprocessing or Disposal. (Paper No. 5036)
- Brian E. Hempy, Mechanical Sensitivity Considerations for Finite Element Analysis Supporting Type A Package Licensing. (Paper No. ID2003)
- Bruno Desnoyers et al, The Need to Adapt IAEA Radioactive Materials (RAM) Transport Regulations to Evolutions in Use and Technology of Transport Conveyances (Paper No. ID4013)
- Carlos Lopez and Walter Gill, Packaging Certification Thermal Testing at Sandia (Paper No. ID1065)
- Catherine Shelton, French Management Model for Sustainable Transportation of Used Fuel. (Paper No. 3013)
- Cao Fangfang, Regulatory Requirements for the Transport of Radioactive Materials in China (Paper No. ID4008)
- Charles R. Bryan et al, A Probabilistic Model for Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel SNF Interim Storage Canisters (Paper No. ID5048)
- Christel Fasten and Frank Nitsche, Implementation of the Latest EURATOM Council Directive (Basic Safety Standards for Radiation Protection) with Regard to the Transport of Radioactive Material in Germany. (Paper No. ID4015)
- Chris Berry, Why Use the Sub-modelling Technique in a Finite Element Analysis of a Nuclear Transport Package?. (Paper No. ID2037)
- Christian Dinkel, Michael Frisch, Daniel Billenstein, Bernd Roith and Frank Rieg, Development of a Simulation Tool for the Thermal Evaluation of Transport and Storage Casks. (Paper No. ID2008)
- Daiichi Ishiko et al, Properties of Aluminum Alloys for Transportable Storage Cask Basket after Long Term Storage, (Paper No. ID5032)
- Danielle C. Castley and Ulrike G.K. Wegst, Radiation Effects on Graphene--Oxide Hybrid Materials. (Paper No. ID1066)

Dhiren K. Sahoo, M.K. Sharma, P. Srivastava, A.K. Kohli and G. Ganesh, Design and Development of Multi Position Source Changer (MPSC) as a Type B(U) Transportation Package. (Paper No. ID1061)

Douglas J. Ammerman, Development of a Benchmark Series of Cask Drops for Validation of Explicit Dynamic Finite Element Analyses. (Paper No. ID2048)

Edward Ketusky et al, Justifying a Type B Packaging License Exemption for Returning 30 Year Old Husman Irradiators to the USA (Paper No. ID4025)

Fabien Labergri, Mathias Chazot and Christopher Dane, The New ROBATEL-NL R79 Type B Package Design for Waste Transportations. (Paper No. ID1016)

Fabien Hue and Vanessa Laloy, Transport of Small Quantities of Irradiated Materials: Flying Pig Concept Update. (Paper No. ID6010)

Fernando Zamora and Victoria Acena, Regulatory Instructions and Guidance Published by the CSN to Overcome Some Difficulties to Apply the Regulatory Requirements (Paper No. ID4011)

Florent Ledrappier et al, Numerical Simulation of HELICOFLEXR Metallic Gasket Ageing Mechanism for Spent Fuel Cask (Paper No. ID5009)

Frank Koch, Dry Storage Ageing Project for Dual Purpose Casks in Switzerland. (Paper No. ID5012)

Frank Nitsche et al. Review of the Safety Concept of the LSA-II and LSA-III Material Requirements of the IAEA Transport Regulations SSR-6 (Paper No. ID4016)

Frank Wille, Viktor Ballheimer, Thomas Quercetti and Jens Sterthaus, Package Design Assessment Aspects of Gaps between Content and Lid. (Paper No. ID2004)

George Carver and Juan Subiry, Adaptation of an MPC Dry Cask Technology for Safe Packaging of Vitrified High Level Waste (HLW). (Paper No. ID1028)

Glenn Abramczyk et al, Extra-Regulatory Performance Criteria for US Certified Radioactive Material Packages (Paper No. ID4054)

Gordon S. Bjorkman, Jr., The Effect of Gap Size and g-Loading from Real Transportation Accidents on the Response of Closure Lid Bolts. (Paper No. ID2056)

Gordon Bjorkman and Douglas J. Ammerman, Status of the ASME Guidance Document on Computational Modelling for Explicit Dynamics. (Paper No. ID4055)

Hervé Ripert, Mickael Lemoine and Damien Sicard, Determining Robust Friction Coefficient for Bolted Closure System. (Paper No. ID1039)

Hideki Yagihashi et al, Study on Temperature Estimation Method of PWR Spent Fuel Cladding in Dry Storage ID2010 (Paper No. ID2010)

Ingo Reiche et al, New Consideration on the Safety Basis for Shipment of Surface Contaminated Objects (Paper No. ID4014)

Inia Kubuabola et al, The Beginnings of a Pacific Islands Regional Network for Developing a Common Approach to Safe Transport of Radioactive Materials (Paper No. ID4059)

J. Becker, Roland Hüggenberg, T. Finger and J. Holtorf, Accelerations Acting on a Nuclear Transport Package during a Routine Transport. (Paper No. ID1002)

Jeff Ramsay and Sylvain Faille, Proposed Regulations to Ship Large Objects as Surface Contaminated Objects (Paper No. ID4023)

Jens Uwe Büttner, Florence-Nathalie Sentuc and Janis Endres, Review of Current Q System and the A1/A2 Values of the IAEA Transport Regulations. (Paper No. ID4005)

Jimmy Chang, Joseph Borowsky, James Fort, Judith Cuta, and Harold Adkins, Spent Fuel Transportation Package Response Analysis to Severe Fire Accident Scenarios. (Paper No. ID2021)

Jin Hirakawa, Fumito Shigeyoshi, Takao Shirakura and Kiyoshi Takahama, Delayed Impact of the Contents of a Transport Package for Nuclear Fuel. (Paper No. ID2009)

John L. Bignell, Gregg J. Flores and Douglas J. Ammerman, Explicit Transient Dynamic Finite Element Analyses Supporting the Certification of ENSA's ENUN 24P Spent Nuclear Fuel Transportation Package. (Paper No. ID2054)

Junichi Kishimoto, Hiroki Tamaki, Daiichi Ishiko, Yuichi Saito and Takeshi Ichihashi, Design Outline of MSF Transportable Storage Casks for Spent Fuels and the First "Type Approval" Experience in Japan. (Paper No. ID1049)

Junichi Kishimoto, Yuichi Saito, Yoshiyuki Saito, Akio Kitada and Hideaki Mitsu, Structural Integrity Analysis of MSF Transportable Storage Casks based on Test Results Used Full-scale and 1/2.5-scale Model. (Paper No. ID2064)

Jun Shimojo et al, Drop Test of 1/3 Scale Model for Modified TK Type Transport and Storage Cask - Experimental Results of Drop Test - (Paper No. ID1042)

Justo Garcia*1 and Prakash Narayanan, Leading the Way with Aging Management (Paper No. ID5019)

Jy-An Wang, Hong Wang, Hao Jiang and Bruce Bevard, Spent Nuclear Fuel Transport Reliability Study. (Paper No. ID5001)

Karsten Muller et al, Prototype Testing of a Protective Structural Packaging for 30B-Cylinder (Paper No. ID1018)

Kenji Ito et al, Eperience of Storage by Dry Storage Cask in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (Paper No. ID5028)

Kevin J. Connolly and Judith Holm*, US DOE Progress on Implementing US National Academy of Sciences Recommendations for Spent Nuclear Fuel Transportation (Paper No.ID4009)

Kim Lukes and Margaret Cervera, U.S. Nuclear Regulatory Commission’ s Activities Pertaining to Transportation Security for Category 1 and Category 2 Quantities of Radioactive Material. (Paper No. 4053)

Kim Lukes et al, Multijurisdictional Incident Response to Lost and Stolen Radioactive Material During Transit (Paper No. ID4052)

Liang Zhang et al, Regulation of HID Lamps Containing Small Amount of Radioactive Substances in China (Paper No.ID4041)

Madhusoodan Ojha*, D. Dhavamani, K.C. Guha, Smt. S.B. Roy, S. Sarkar and A. Vinod Kumar, Modeling and Simulation Study for Safety Evaluation of an Overpack Designed for Exposure to Accidental Hydrocarbon Fire (1000°C). (Paper No. ID2055)

Maik Hennebach SD-20K: A B(U)F Transport System for Final Storage Containers. (Paper No. ID1024)

Makoto Hirose et al, Consideration of the “Dual Purpose Cask Concept” in the IAEA Transport Regulations (Paper No. ID4021)

Makoto Hirose et al, Review of Freight Container Related Provisions in the IAEA Transport Regulations (Paper No. ID4022)

Marcel Tardy , S. Kitosos and G. Grassi, Overview of 30 Years of AREVA TN’ s Burnup Credit Practices for Transport and Storage of Used Fuels. (Paper No. ID2040)

Martin Feldkamp et al, Behaviour of Wood Filled Impact Limiters during Fire Test(Paper No. ID1011)

Martin Neumann et al, Introduction of BAM Safety Assessment Experience Feedback List (Paper No. ID4002)

Martine Liebens et al, Revision of the Belgian Legislation for the Transport of Radioactive Material (Paper No.ID4034)

Marc-Andre Charette and Trevor Dixon, Evolution of the WNTI Uranium Concentrate Transport Good Practice (Paper No. ID3044)

Masanori Goto et al, Solution to Technical Issue for Practical Use of Concrete Cask in Japan (Paper No. ID5033)

Masumi Wataru et al, SCC Tests of the Canister for Spent Nuclear Fuel Storage Using Full Scale Lid Model (Paper No. ID5025)

Masumi Wataru et al, Ageing of HELICOFLEX® Metallic Gasket for Spent Fuel Cask: Results of Sealing Performances of a 100,000h Campaign (Paper No. ID5026)

Matthew L. Eyre et al, MAXUS® Corrosion Performance in Spent Fuel Pool Environments after 3-years of 5-year Accelerated Testing (Paper No. ID5040)

Matthias Jaunich et al, Long-term Behavior of Elastomer Seals and Polymers for Neutron Shielding (Paper No. ID5022)

Meherum Nahar, The Role of National Competent Authority in Facilitating Regulation for the Safe Transport of Radioactive Material in Bangladesh (Paper No. ID4030)

Michio Yokozeki, Fumito Shigeyoshi, Masahiko Ouchi and Norihiro Kageyama, Influence of Body Vibration on Deceleration under the Slap Down Drop Test. (Paper No. ID2047)

Mike Yaksh and George Carver, Structural Evaluation of a Canister Drop inside a Vertical Concrete Cask. (Paper No. ID2025)

Minoru Nagai and Toshiya Kitamura, Impact Analysis of the Package Having Additional Protector of Orifice near the Containment Boundary of the Primary Lid in the Drop Test II. (Paper No. ID2033)

Michael Wallin and Helmuth Zika, Joint Authority Inspections in Dangerous Goods Law Enforcement (Paper No.ID4003)

Muhammad Muneer et al, Regulatory Experience of PNRA for Certification of Type B(U) Packaging (Paper No.ID4019),

Nancy Capadona, Proposal of a New Structure for the IAEA Transport Regulations (Paper No.

ID4058)

Nelson Catoja et al, Survey Requirements of Transport and Storage Cask Manufacturing for Interim Storage in Switzerland (Paper No. ID4029)

Nicholas A. Klymyshyn, Philip J. Jensen and Nathan P. Barrett, Modeling Used Fuel Response to 30 cm Package Drops. (Paper No. ID2043)

Nobuhiro Hayakawa and Yoshihiro Hirao, Development of BRACSS Code for Recalculating Q values by Monte Carlo Method. (Paper No. ID4031)

Norikazu Irie et al, Demonstration Test Program for Long-term Dry Storage of PWR Spent Fuel (Paper No. ID5047)

Olaf Schilling et al, Quality Assurance in Fabrication and Operation of Dual Purpose Casks for Spent Nuclear Fuel in Germany (Paper No. ID4026)

Oscar A. Martinez, Special Form Testing of Sealed Source Encapsulation for High-Alpha-Activity Actinide Materials (Paper No. ID5044)

Paul McConnell, Sylvia Saltzstein and Ken Sorenson, Fuel Assembly Tests under Normal Conditions of Transport. (Paper No. ID5007)

Philip Jensen, Nicholas Klymyshyn, Steven Ross and Paul McConnell, Modeled Structural Transmissibility of a Used Nuclear Fuel Conveyance Applied to Over the Road Test Data and Finite Element Modeling. (Paper No. ID2005)

Philip W. Noss*1 and Todd E. Sellmer, TRUPACT-III License Exemption Request (Paper No. ID4006)

Pierre Cavelius et al, TNR 24 Dual Purpose Casks: 20 Years of Licensing Experience (Paper No. ID4035)

Pierre Lefebvre and Franz Hilbert, Brazed and Welded Cans for Transport and Storage of Damaged and or High Burn up Fuel Rods. (Paper No. ID6008)

Pierre Lefebvre et al, Specialized Transportation of Highly Sensitive RAM (Paper No. ID3011)

Rainer Nöring and Sascha Klappert, Establishing of a Monitoring Process to Support Long-running Package Approvals of Dual Purpose Casks (Paper No. ID4012)

R.I. Il'kaev, A.A Ryabov., V.I. Romanov, Sergey S. Kukanov, E.E. Maslov, K.V. Tsiberev and L.N. Kozhaev, Numerical Stress Analysis of Spent Nuclear Fuel Transport Package in Normal and Accident Conditions. (Paper No. ID2041)

Richard James, Operational Experience of over 50 Years of Irradiated Fuel Transport in the UK (Paper No. ID3005)

Rick J. Brown, Tod Maurmann, Jerry Langston and Steve Calson, LAST-A-FOAM® FR-3700 Series Foam: Crash & Fire Protection for Nuclear Transportation Containers. (Paper No. ID5002)

Samir Sarkar, Regulatory Assessment of a Dual Purpose Cask TN81 for Interim Storage of Intermediate Level Waste. (Paper No. ID4048)

Sandrine Toupial et al, UX-30 Users Group: An Industry Players Global Approach to Safely and Efficiently Managing Transport Package Use(Paper No. ID4040)

Seung-Hwan Yu, Kyoung-Sik Bang, Ju-Chan Lee and Woo-Seok Choi, Flow Characteristic inside Single Basket Includes a Fuel Assembly. (Paper No. ID2034)

Shadi Ghayeb and Veronica Wilson, Regulatory Research on Use of Burnup Credit for Criticality Safety in BWR Spent Fuel Transportation Packages. (Paper No. ID2023)

Shivakumar Sitaraman and Brian Anderson, Transfer Function Method in Estimating External Radiation Levels. (Paper No. ID2027)

Slade Klein, Rick Migliore and Dan Wick, Transportation Cask for Bare High Burnup Spent Nuclear Fuel. (Paper No. ID1006)

Stavroula Vogiatzi et al, Mediterranean Network (MedNet) - Overview of the Regulatory Infrastructure for the Safe Transport of Radioactive Material (Paper No. ID4042)

Stefan Anton and John Zhai, Aircraft Impact Test on the HI-STAR 180 Dual Purpose Cask. (Paper No. ID2060)

Steffen Komann et al, Gap Analysis by Periodical Reviews of Transport Package Design Safety Reports of German SNF/HLW Dual Purpose Casks (Paper No. ID5004)

Stephane Brut , AREVA TN-G3 Drop Test Program (Paper No. ID1019)

Stephen Middleton, Developing a new waste route for the transport of UK spent sealed sources for long term storage. (Paper No. 5024)

Stephen Whittingham, Developing Transport Regulator Capacity on a Regional Basis (Paper No. ID4007)

Stephen Wittingham, Status Report on the Development of the Historical Technical Basis Document for the Requirements of the International Transport Safety Regulations (Paper No.

ID4060)

Sun Hongchao, Li Guoqiang, Wang Xuexin, Zhuang Dajie, Wang Renze, Sun Shutang and Meng Dongyuan, Research on Shielding Performance Measurements of Radioactive Materials Transportation Package. (Paper No. ID2002)

Sylvia Saltzstein, Ken Sorenson, Peter Swift and Paul McConnell, United States Department of Energy Spent Nuclear Fuel Storage and Transportation R&D Activities. (Paper No. 5010)

Sylvain Faille and Isabelle Tremblay ,Publication of the Packaging and Transport of Nuclear Substances Regulations, 2015 (Paper No.ID4024)

Takashi Arimatsu, Kentaro Tanaka, Toshihiro Shunya and Hiroshi Akamatsu, Fabrication Technology for Storage and/or Transport Casks Based on Wide and Long-time Fabricating Experience. (Paper No. ID1046)

Takeru Koga*1 and Yoshiyuki Fujita, Industry Study on Regulatory Harmonisation of Transport Frames (Paper No. ID4044)

Takashi NISHIO et al, Transportation of removed soils and wastes generated by decontamination activities, that contain radioactive materials released by the accident at TEPCO' s Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station (Paper No.5042)

Tanya Sloma, Norman A. Kent and Charlie Murphy, Developments That Are Making the Versa-Pac Indeed More Versatile (and More Useful to Industry). (Paper No. ID2016)

Thierry Granier et al, The Applicant' s Guide of the French Nuclear Safety Authority (Paper No. ID4050)

Thomas J. Criddle and Philip W. Noss, 380-B Transport Packaging Testing for NRC and IAEA Compliance (Paper No. ID1005)

Thomas Quercetti et al, Experimental Testing of RAM Packages within Japanese German Projects(Paper No. ID1043)

Tiberio Cabianca and Kelly Jones, Exemption Values in the UK Transport Regulations - Crossing the Rubicon? (Paper No.ID4038)

Tiberio Cabianca et al,Assessment of the Radiological Impact of the Transport of Radioactive Material by Road and Rail under Normal Conditions in the United Kingdom (Paper No. ID4039)

Toshiya Kitamura and Kunio Maruoka, Effect of the Drop Attitude during 9m Slap-down Drop by

Dynamic Analysis. (Paper No. ID2032)

Vangelina K. Parami et al, Establishing and Sustaining a Compliance Assurance Regime for Transport Safety in IAEA Member States (Paper No. ID4061)

Vincent Léger and S. Kitsos, Impact of the New IAEA Shielding Recommendations on the Used Fuel Storage and Transport Cask Performances. (Paper No. ID2015)

Vincent Leblanc, Jurgen Claes, Michel Sonck and Guy Lourtie, Alternative Activity Limits for Exempt Consignments in Belgium - Feedback and Lessons Learned. (Paper No. ID4036)

William Marshall, Brian Ade and Stephen Bowman, Study of Axial Burnup Profile Effects on BWR Burnup Credit. (Paper No. ID2050)

William S. Edwards, Shipment of Contaminated Fresh Fuel from Closing Nuclear Reactor Facilities (Paper No. ID6009)

Woo-seok Choi et al, Performance Evaluation Tests for the Newly Developed Transportation and Storage Casks in Korea (Paper No. ID1026)

Xavier Domingo et al, Research Reactors Spent Fuel (RRSF) Management: Transportation and StorageSolution (Paper No. ID6019)

Xavier Van Mierloo and Wim Boeckx, Critical Reflooding of Spent Fuel Packages. (Paper No. ID6002)

Xavier Van Mierloo and Wim Boeckx, Design Challenges for a New Packaging for the Shipment of Radioactive Waste. (Paper No. ID1007)

Yang Sui, Combustion Simulation of Transportation Package Performance in Severe, Long Duration Fire Using Computational Fluid Dynamics Tools. (Paper No. ID2049)

Yuko Sakamoto, Koji Shirai and Kosuke Namba, Proposal for Evaluation with Strain-Based Criteria of Impact on Metal Cask Due to the Tornado Missile. (Paper No. ID2042)

附件一、PATRAM 會議議

PATRAM2016 Program

as of 12 September, 2016

	SUNDAY	MONDAY	TUESDAY	WEDNESDAY	THURSDAY	FRIDAY
07:30 08:00		Speakers' Breakfast	Speakers' Breakfast	Speakers' Breakfast	Speakers' Breakfast	Speakers' Breakfast
08:15 - 08:45		Exhibition Open, Registration	Exhibition Open, Registration	Exhibition Open, Registration, Poster Display (- 16:00)	Exhibition Open (- 13:00) Registration	Registration (- 10:00)
09:00 - 10:40		Morning Plenary - ORNL	Morning Plenary - NFT	Morning Plenary - INS - MLIT	Morning Plenary - INS - MLIT	Morning Plenary - TEPCO
		Welcoming Remarks - General Chair - JSME, NRA, Kobe City	S09) Programmatic Storage, Transport and Disposal Interactions #1	Poster Session	09:10 - Panel Discussion 1 - Delay and Denial of Shipment	Panel Discussion 2 - A Worldwide Perspective on Regulatory Views for Type B RAM Packagings - 10:20
		Opening Plenary - IAEA - MOE - WNTI	S10) Criticality Analysis S11) Regulatory Guidance S12) Packaging Material #1			
		Coffee break				
11:00 - 12:40		Opening Plenary - INS/KEPCO/TNI - US DOT - Kobe Steel	S13) Ageing Management #1 : Gap Analysis S14) SF Structural Performance in NCT S15) Regulatory and Institutional National Issues #1 S16) Design Improvements #1	S25) Fukushima Lessons Learned S26) SF Package Design S27) Systems for Transport, Storage and Disposal #2 S28) Regulatory and Institutional Regional Issues	S37) Thermal Analysis S38) Transport Security S39) Ageing Management #3 S40) Basic Radionuclide Values	10:40 - S49) Regulatory and Licensing Aspect of Dual Purpose Cask S50) UFs Transport S51) Design Improvements #2 S52) Risk Assessment
	Registration for Exhibitors	Lunch break				Closing Plenary
14:00 - 15:40	Registration for Delegates, Exhibition Setting	S01) Package Design #1 S02) Burnup Credit S03) Management System #1 S04) Waste and NORM Transport	S17) Lessons Learned from Experience S18) Shielding Analysis S19) Regulatory and Institutional National Issues #2 S20) Systems for Transport, Storage and Disposal #1	S29) Structural Analysis – Drop Events S30) Package Design #2 S31) Ageing Management #2 S32) Licensing and Approval Issues	S41) IAEA Transport Regulations #1 S42) Testing #2 S43) Spent Fuel Transport S44) Security: Addressing the Challenge	13:00 - 18:00 <u>Technical Tour</u> - E-Defense (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience) - Earthquake Museum (Disaster Reduction and Human Renovation Institution)
		Coffee break				
16:00 - 17:40		S05) Testing #1 S06) Structural Benchmarking S07) Management System #2 S08) Content Specific Safety Aspects	S21) Emergency Preparedness S22) Structural Analysis Guidance S23) Regulatory and Institutional National Issues #3 S24) Programmatic Storage, Transport and Disposal Interactions #2	S33) Structural Analysis S34) Special Design Issues S35) Maritime and Rail Transport S36) Communication and Training	S45) IAEA Transport Regulations #2 S46) Content Specific Design Aspect S47) Packaging Materials #2 S48) Analytical Techniques	
	At 17:00 Welcome Reception			Poster Dismantle		
19:00 - 22:00					Symposium Bauquet	

