

出國報告(出國類別：其他)

出席 2005 美國電力研究所 低放射性廢棄物國際研討會

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：唐大維 薦任技士

派赴國家：美國

出國期間：94 年 6 月 26 日 至 94 年 7 月 2 日

報告日期：94 年 9 月 30 日

摘 要

本次出國主要為參加美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)在奧蘭多所舉辦之「低放射性廢棄物國際研討會」(International Low-Level Waste Conference)。時間為六月 28 日中午至 30 日共兩天半會議，共計有 13 個主題，約五十餘篇論文集發表。

由於這次會議所發表的講演者大都為美方從事低放射性廢棄物處理之技術業者，所以其所發表的題材內容較偏重其經驗與實務性，使職獲益匪淺，其中有幾個主題與我國國內低放射性廢棄物實務較有關聯的主題分別為：「管制的變遷」、「運輸安全管制」、「廢棄物減量與型態」、「大型廢棄物處置的選擇」、「液態廢棄物處理技術」、「除役廢棄物管理」。將選擇其中有代表性的論文內容於報告內摘要介紹。

與會議中從各方專家進行論文發表與交換意見討論。獲得相當多的寶貴經驗，對於日後我國低放射性廢棄物的安全管制，必定更加精進與提昇。

目 次

摘要.....	1
一、 目的.....	3
二、 過程.....	4
三、 心得.....	5
四、 建議事項	28

一、目的：

目前國內正積極推動低放射性廢棄物處理貯存及處置安全管制作業、放射性廢棄物減量計畫，解除管制作業，以及廢棄物之運輸安全管制皆需要借重核能先進國家之經驗。更由於美國低放射性廢棄物之最終處置也已經營運多年，對於尚未有最終處置場的我國可提供相當實務的經驗，可作為未來最終處置場安全營運與管制的重要參考。

美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)是美國電力公司所組成的研究單位，有關發電相關技術之實務經驗相當豐富成熟，其中有關低放射性廢棄物相關的經驗亦相當先進。今年在奧蘭多舉辦「低放射性廢棄物國際研討會」(International Low-Level Waste Conference)。時間為六月二十八日中午至三十日共兩天半會議，共計有十三個主題，約五十餘篇論文發表(議程如附件一)，值得前往參加，以汲取其作業之實務經驗與技術。

由於這次會議所發表的講演者大都為美方從事低放射性廢棄物處理之專業業者，另有法國、加拿大、瑞典、日本、韓國專家發表數篇論文。而演講者所發表的題材內容偏重其經驗與實務性，使職獲益匪淺。其中有幾個主題值得我國國內低放射性廢棄物營運管理之參考，這些主題分別為：「管制的變遷」、「核能工業趨勢與轉變」、「運輸安全」、「廢棄物減量與型態」、「液體廢棄物處理」、「大型廢棄物處置的選擇」。

經由參加美國 EPRI 之低放射性廢棄物國際會議藉以吸取國際最新經驗及蒐集相關資料，將對我國放射性物料管制作業之精進有所助益；對於低放射性廢棄物處理設施了解其實務經驗，亦能提升我國放射性廢棄物處理管制作業規劃與減量之效能。

二、 過程：

日期	行程	備註
06月26日	台北 → 洛杉磯	路程，因轉機機位皆已無，故須再從亞特蘭大轉機。
06月27日	洛杉磯→亞特蘭大→奧蘭多 大會報到，參加會議(WORKSHOP)	約中午抵達奧蘭多
06月28日	參加會議	
06月29日	參加會議	
06月30日	參加會議	傍晚結束
07月01日	奧蘭多→亞特蘭大→洛杉磯	回程
07月04日	洛杉磯→台北	1.7月2、3日為周末。 2.搭7月4日凌晨班機。
07月05日	抵達台北	該日清晨抵達上班。

三、心得：

職於二十七日中午抵達舉辦會議之飯店，並向大會辦理註冊，但是該日之議程為 ASME/EPRI 廢棄物專題討論會(ASME/EPRI Radwaste Workdhop)，參加會議者必需是會員才可參加，所以舉辦單位並未接受職之額外要求與會，雖然未能拿到書面相關資料，但是職仍然進入會場旁聽吸取經驗，所以從二十七日下午至二十八日上午參加一天免費的會議，雖然未能拿到該場會議資料，但仍對於其中講演者所發表的演說印象深刻。

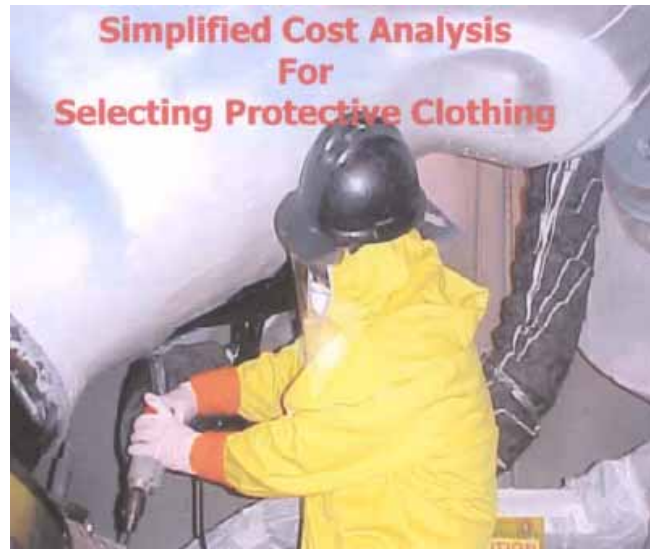
以下是針對 ASME/EPRI 廢棄物專題討論會中較為印象深刻的一篇論文：

「Minimizing Cost and Radwaste with Protective Clothing」，提出心得。

目前美國的核能電廠內現場工作人員所使用的輻射防護衣物大多不是由電廠本身清潔處理，而是須送至專門清理或是銷毀的廠商，並負責清運處理。所以在這些衣物的選擇考量上，除了要符合美國聯邦法規之相關規定以外，剩下的就要顧及耐用性、舒適性與成本的其他考量。因為事前的規劃，除可節省成本外(如圖一)，最大的好處就是減少因焚化銷毀污染防護衣物後所產生的低放射性廢棄物。

在輻射防護衣物的選擇上，是以員工可以更容易進行工作為考量出發點，其整體的考量因子如下：體型的需求/尺寸，熱應力的考量(包含耐蒸氣、熱能)、衣物本身的重量、耐久性(需考量工作的特性與環境)、防止穿透的性能、環境變異的效能表現、防火的性能等。講演中亦提及個人污染事件(Personnel Contaminant Event, PCE)發生的成因概分為：錯誤的穿著，不當的控管、缺乏工作訓練、空浮、不明原因等。但可藉由良好的內部管理與設備的除污(Better Housekeeping/Facility Decontaminant)、放射性工作的核准與正確的防護措施等(Radiation Work Permit/Right Protection for job)將可有效降低遭受污染

發生的機會，並減少防護衣物因此而需焚化銷毀所產生的放射性廢棄物。



圖一 輻射防護衣之選擇試算成本之分析軟體封面

講演者並提供一份輻射防護衣物的簡易試算規劃清單(如表一)，雖然我國輻射防護衣物皆由電廠各自管控，但是隨著乾性放射性廢棄物的管制，也可藉此機會對於日後若要更換輻射防護衣物提供不同角度的思維。

表一 選擇輻射防護衣之簡易成本分析表

**SIMPLIFIED COST ANALYSIS FOR SELECTING
PROTECTIVE CLOTHING**

	Cost	Launderable Poly/Cotton	Single Use OREX
A	Total Dress-Outs	25,000	25,000
B	Required Inventory	6,000	25,000
C	Existing Inventory	6,000	0
D	Amount Required to Purchase (B - C)	0	25,000
E	Garment Purchase Cost, including shipping (per unit)	\$23.90	\$3.50
F	Number of Uses per Garment	75	1
G	Cost Per Use (E ÷ F)	\$0.32	\$3.50
H	Inventory Purchase Cost (D x G)	\$0.00	\$87,500.00
I	Damage/Rejected Wornout Replacement Cost	\$11,684.00	\$8,750.00
J	Garment Receiving Cost (12 shipment total)	\$16,800.00	\$11,100.00
K	Shipping Cost (for laundry: 12 shipment total)	\$6,000.00	\$0.00
L	Laundering Cost	\$50,000.00	\$0.00
M	Radwaste Cost (includes all that applies: labor, shipping, dissolving, burial, etc.)	\$3,270.00	\$48,447.00
N	Total Cost (H + I + J + K + L + M)	\$87,754.00	\$155,797.00
P	Total Cost per Dress-Out (N ÷ A)	\$3.51	\$6.23

**SIMPLIFIED COST ANALYSIS FOR SELECTING
PROTECTIVE CLOTHING**

Below is an explanation of the items / service that are included in each line item:

- A. Total amount of dress-outs for the analysis.
- B. Total required inventory to support workload
- C. Total existing inventory of items.
- D. Amount of inventory that you are required to purchase (required inventory – existing inventory)
- E. Total garment purchase cost including shipping, handling and applicable in-house stores charges.
- F. Average total number of uses per garment (i.e. average life span).
- G. Total cost per use (garment purchase cost ÷ number of uses).
- H. Weighted Inventory purchase cost (required amount to purchase x cost per use).
- I. Damage/Rejected Worn-out Replacement Cost (includes all that applies: labor, shipping, dissolving, burial, etc.). For single use items, this includes purchase for extra items to accounts for damaged items that must be replaced during use (i.e. worker rips out a coverall and must replace it).
- J. Total cost for labor to receive goods into facility (i.e. security, HP, worker, etc.).
- K. Total cost for labor to prepare paperwork and coordinate laundry shipments to the processing facility (i.e. security, HP, worker, etc.).
- L. Total laundering cost for reusable items.
- M. Total of all costs to disposition items as radwaste (includes all that applies: labor, shipping, dissolving, burial, etc.). This line item cost will vary depending on method of disposition selected. The example shown includes labor cost of preparing shipment, transportation to incinerator and final burial costs.
- N. Total cost for amount of dress-outs in analysis.
- O. Total cost per dress-out (total cost of analysis ÷ total number of dress-outs).

Individuals performing their own analysis are urged to request quotes from suppliers to confirm rates with respect to their application.

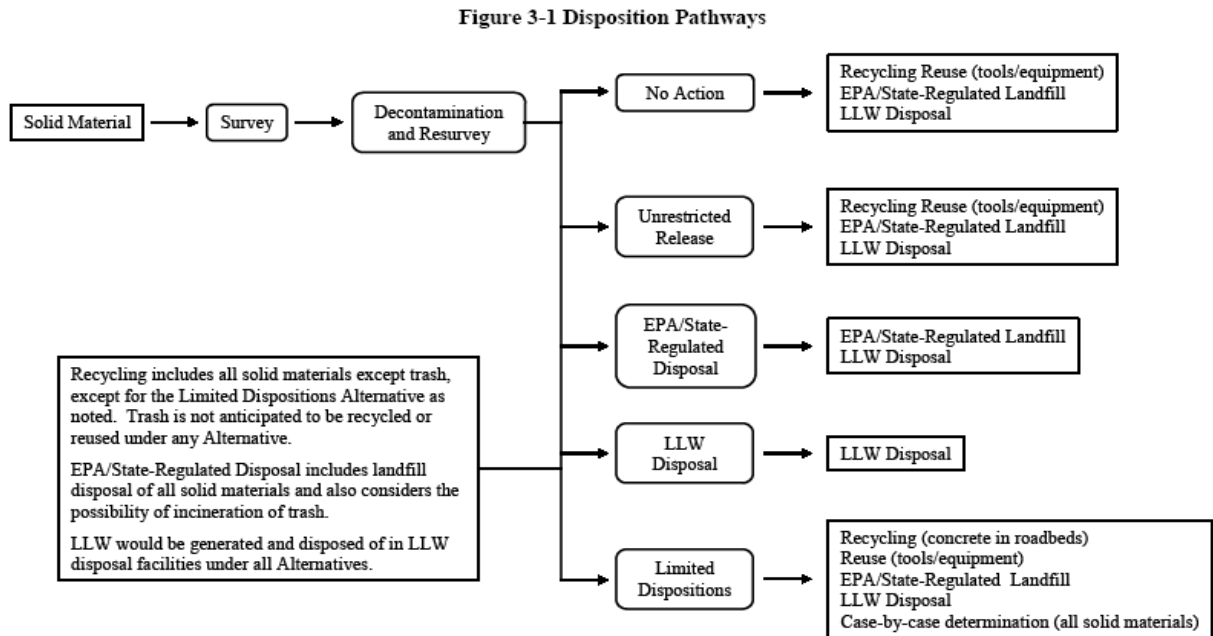
在二十八日的下午繼續參加本次的「低放射性廢棄物國際研討會」。(會議之議程如附件一)雖然本次會議共有十三個主題，但是與國內低放射性廢棄物安全營運與管制較有實務關聯的主題有「管制的變遷」、「核能工業趨勢與轉變」、「運輸安全」、「廢棄物減量與型態」、「液體廢棄物處理」、「乾性廢棄物處置的選擇」。職認為其中部分有較為重要論文可供參考，其內容摘要如下：

(一) 管制的變遷：

目前美國核能管制委員會(以下簡稱 NRC)，正針對 10CFR Part 20 「輻射防護標準(Standards for Protection Against Radiation)」正針對核設施內限制區所產生未含有或是含有極低微之殘留放射性固體物質(solid material)訂定輻射標準以作為清除之管控依據。因為該章節並未對於這些固體物質訂定釋出標準。而目前正準備以偵測的設備性能來訂定指導方針。

NRC 其實針對此項議題公開接受各界討論，並已在 1999 至 2003 年期間來收到自於各利害關係團體約 3500 封信件與電子郵件表達不同意見。也在 1999 至 2005 年二月間與這些團體舉辦了九次公開會議，NRC 也出資請國家研究機構研究該項議題，同時這些研究單位也在 2001 年的一至六月間與這些團體舉辦了三次公開會議討論該議題。目前美方準備訂定在管制區內劑量限值在 0.01mSv/yr 以下的固體廢棄物可送至環保署所核准的垃圾場處置掩埋，或是可作為特定用途之再利用，例如作為路面的路基填方等。但是這些固體廢棄物的記錄需要保存以便日後查核之用。而且 NRC 也在今年三月擬妥出版了 557 頁的環境影響報告草稿 (Draft Generic Environmental Impact Statement (DGEIS)，編號為 NUREG-1812)，經由科學方法驗證探討此一措施與配套的管制作為，對於公眾的健康與安全的影響是可以接受的，圖二是該報告中針對固體廢棄物的清理流程，若此一修正通過，勢必對於堆積於各核能電廠的倉儲解決不少壓力。相對於我國已實施

類似的豁免管制或解除管制措施，可見美國與我國一樣對此一問題的重視與關切，美國的作法值得我國長期追蹤與了解其進一步發展。



圖二 美國擬定未來低放射性廢棄物清理流程

(二) 核能工業趨勢與轉變

近來在核能工業界提出了一個「遠景 2020 年(“Vision 2020”)」，主要是認為在未來 20 個年度時，核能發電將佔美國總發電量的百分之二十三的比例，相對的在低放射性廢棄物的管理方面也要符合未來之需要而有所進步，所以美國電力協會(EPRI)針對低放射性廢棄物管理範圍中，訂定數項重要行動計畫，分別是：

1. 低放射性廢棄物最終處置場不確定因素的管理。
2. 低放射性廢棄物減量與成本。
3. 極低微之低放射性廢棄物清理(即為解除管制)的成本節省。
4. 低放射性廢棄物運送安全與責任。

5. 低放射性廢棄物排放風險管理。

就上述項目中美方發現其中上開數項議題是該國的潛在的核能工業障礙 (potential industry barriers)，所以積極計畫解決這些將要面臨的問題，摘錄其中兩項分述如下：

1. 低放射性廢棄物處置與運送：

由於在 2008 年底，Barnwell 處置場即將關閉，這將衝擊到該區域亞特蘭提與西北聯盟 (Atlantic or Northwest compacts) 的電廠 B 級與 C 級廢棄物的去處，即有可能先暫貯於廠內，但是必須先挪出空間，相對於這些廢棄物的極低微廢棄物，若能及時的外釋，則貯存空間則較無問題，同時不為運送安全法規所規定的放射性物質運送作業，也可免除送至最終處置場，可使每立方呎的廢棄物節省超過百分之三百的處置成本。

2. 低放射性廢棄物減量與成本

由於過去在美國本地核能工業中放射性廢棄物處理的市場較無法配合其他應用工業的引進，因此限制了處理技術的發展。而在目前先進的核能電廠 (Advanced Nuclear Plant (ANP)) 雖然依照其運轉方式，也能符合聯邦法規與排放標準；卻不大願意引進這些化學與製造業的新技術應用在放射性廢棄物處理上，可使廢液排放量接近於“零排放”。但是由於民眾公共意識提升，所以放射性廢棄物處理與排放、以及民眾接受度和公眾環境安全風險之議題，在公眾議題討論上比例日趨增加。若能適時的引進其他技術，將放射性廢棄物的管理效能提昇而達成輻射風險的降低，將可卻除公眾的疑慮。這或許是美國電力協會正積極推動該計畫的原因之一。

目前在美國核能工業，對於放射性廢液體積與活性的減量與改進其處理效能是認為對環境負責的一種成功表徵，而這已經形成了一個潮流趨勢。有此可見就算美國國土面積如此之大，先天環境比其他國家都要優渥的情形之下，但該國核能界仍然將此議題列為重要工作來推行，可見低放射性廢棄物不論其型態為何，低放射性廢棄物減量之議題已是各國重視的議題。

(三) 運輸安全管制

去年(2004年)1月，美國NRC參考國際原子能總署(International Atomic Energy Agency (IAEA))於2000年6月修訂之「放射性物質安全運送規則(Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material)」最新版本(代號為TS-R-1)。公告該國聯邦法規10CFR Part 71的「放射性物質安全運送規則」，並在於同年10月1日開始施行此項新規定，新法規的主要變異有十一項，分別為：1.增列公制單位(International System of Units(SI))。2.核種豁免值(radionuclide exemption values)。3.A1與A2值的修訂(revision of A1 and A2)。4.六氟化鈾(UF₆)包件規定(uranium hexafluoride (UF₆) package requirements)。5.臨界安全指數規定解釋(introduction of the criticality safety index requirements)。6.丙型包件形式與低擴散物質(type C packages and low dispersible material)。7.深度浸水試驗(deep immersion test)。8.先前所核准之包件不受新規定限制(grandfathering previously approved packages)。9.各式定義的改變(changes to various definitions)。10.分裂物質包件設計之衝擊試驗(crush test for fissile material package design)。11.運輸分裂物質包件設計之航空器衝擊試驗。(fissile material package design for transport by aircraft)。

除此之外，NRC 新增訂八項規定，這些改變分別為 1.特殊包件之認可核准 (Special package authorizations)。2.在本法規中對持有者承諾證明之品質保證擴大要求(expansion of part 71 Quality Assurance (QA) requirements to Certificate of Compliance (CoC) holders)。3.採用美國機械工程師協會 (ASME)規範(adoption of the American Society of Mechanical Engineers (ASME) code)。4.對雙重用途包件證明持有者改變授權(change authority for Dual-Purpose Package Certificate holders)。5.分裂物質豁免與一般執照規定 (fissile material exemptions and general license provisions)。6.PRM-71-12 法規制定的申請判決，鈾的雙重包封(decision on petition for rulemaking on PRM - 71 - 12, Double Containment of Plutonium)。7.用過核燃料與高放射性廢棄物的污染限值(contamination limits as applied to Spent Fuel and High-Level Waste (HLW) packages)。8.修訂事故報告相關規定 (modifications of event reporting requirements)。

上述的修訂除了與該國運輸部(Department of Transportation (DOT))共同協商，也與各利害關係團體開會討論以及上網公告徵求公眾意見修訂完成。除此之外，為防範恐怖份子的攻擊，對於放射性物質運送的安全資訊也提高其保密等級，例如不公開運送行程等資訊。

由於美國在2001年遭受911攻擊事件後，美國國會立法成立了運輸安全管理局(Transportation Security Administration (TSA))，該單位負責美國所有運輸安全之管制，新增了一些管制措施以「敏感性安全資訊」(Sensitive Security Information, or SSI)通稱，相關規定訂於49 CFR 15 與 1520。

NRC並在2004年末至2005初該段期間中，也新增訂其保安資訊分類條款，稱

之為Safeguards Information-Modified Handling (SGI-M)，並完成修訂美國聯邦法規10CFR Part 73.21以作為SGI-M中物質的審核與補充。而其中有關放射性物質運送部份，不論是用過核燃料或是放射性廢棄物等皆提高其資訊保密等級，與加強運送保安等措施，其目的就是確保此類物質能夠安全無虞的抵達目的地，以免恐怖份子搶奪來製造輻射彈進行恐怖事件或攻擊將污染擴散。使得放射性廢棄物的運送風險性不光是侷限在科技層面與技術層面，而也必須將之視為政治議題處理。

其實不論低放射性廢棄物的運輸資訊是否受到限制，但是站在管制者的角度看來仍應維持一致的立場，採取仔細審核、嚴密管制措施，確保低放射性廢棄物運送安全無虞，保護社會大眾環境的安全與健康。

(四) 廢棄物減量與型態

在本議程中有一篇有關用過離子交換基質與活性碳(Spent Ion Exchange Media and Activated Carbon)的進步型聚合物固化專利經驗(Advanced Polymer Solidification (APS™)，以下簡稱APS)發表，可提供處理方式的另一參考。

在過去的歷史資料看來，位於南卡羅蘭納州的Barnwell處置場對於B與C級(class B and C)的廢棄物較偏重使用高完整性容器(High Integrity Containers (HIC))盛裝要求，但是從1993年起，處置場要求B與C級廢棄物須以混凝土外包裝(concrete overpack)，甚或是使用NRC核准的HIC桶或是廢棄物型態能確保穩定性也不能避免，這趨使電廠改採用簡易型之聚乙烯材質HIC桶。目前美國核電廠著眼於這些廢棄物將有可能長期貯存於電廠內，考量其在HIC桶的檢視與再脫水的成本與人員劑量，所以在Diablo Canyon核電廠(以下簡稱DCPP)採用此種專利技術來固化用過之廢樹脂，以便面對日後貯存於廠區過度期的窘境。

本項技術之始創公司Diversified Technologies Services, Inc. (以下簡稱DTS)早在1990年就已在除役之潛艇內進行一連串實驗，剛開始發現使用乙烯基酯(Vinyl Ester Styrene (VES))可以固化用過廢樹脂，但是在固化過程中仍產生二次廢液而難以處理。後來發現使用另一種進步型聚合物(advanced polymer，簡稱AP)，將Diablo Canyon核電廠中高活性的用過廢樹脂不需做任何前處理而予以固化成功。

此外，DTS公司與DCPP進一步使此種廢棄物取得可視為處置場掩埋的資格，進行試驗，將活性炭、有機離子交換樹脂、等物質層層盛裝於容器中。進行鑽心試驗，試驗項目是依據NRC的相關要求法令所做，分別是：1. 抗壓試驗 (compression)。2. 耐候性(thermal cycling)。3. 照射試驗(irradiation)。4. 生物降解試驗 (biodegradation)。5. 滲濾率 (leaching) 6. 浸水試驗 (immersion)。7. 自由水試驗(freestanding water)。8. 全尺寸廢棄物型態 (full-scale waste form)(如圖三)。

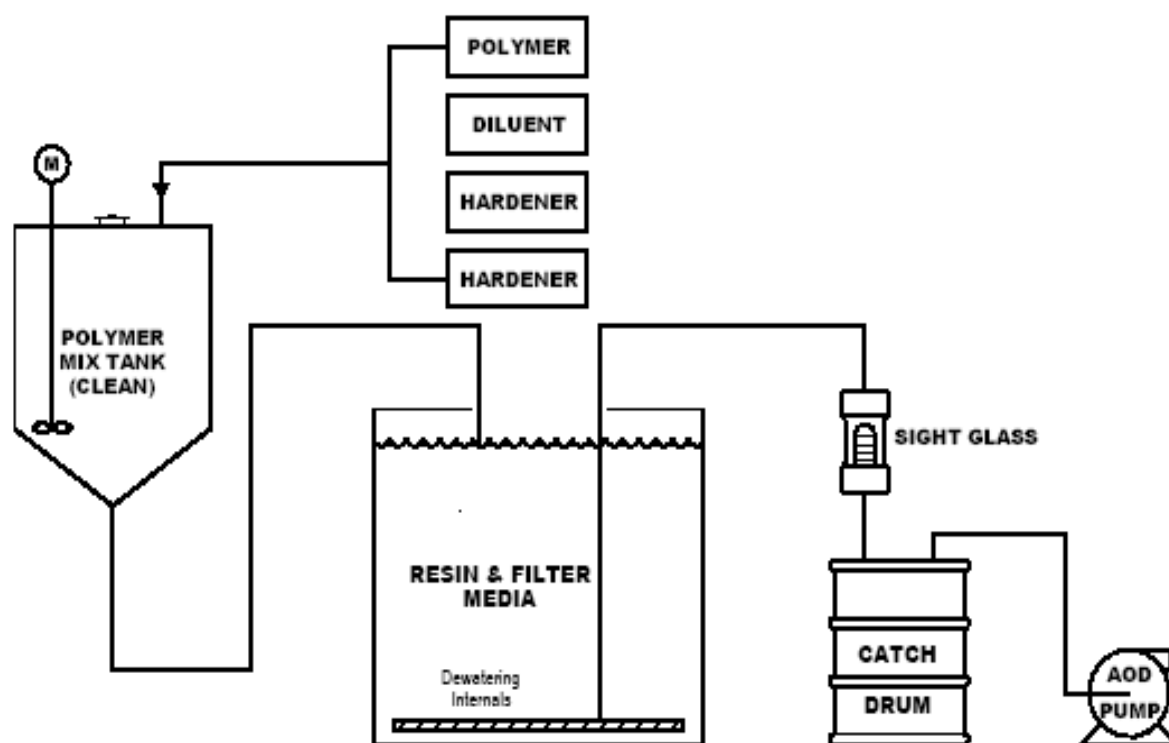


圖三 為加速樣品試驗速率，使用烤箱加熱樣品

經試驗後發現固化切片每層之固化效果皆符合相關規定，並在2002年元月

份時得到Barnwell處置場的核准為可接收之低放射性廢棄物。

原本以為此項固化技術必定使用特殊之固化劑，但是據該篇演說者說明所使用之固化劑為四種商業用途可買到的修正型的環氧固結物(modified epoxy binder)，再加上環氧凝固劑後，將形成堅硬安定的固化物。其操作流程示意圖如圖四。



圖四 APS簡易流程示意圖

本技術在2004年末也被英國BNFL公司驗證其效果，亦能證實此技術在固化過程中，固化體不會與盛裝之金屬容器產生反應，而且在2005年初，該公司購置全尺寸的固化系統。

同時作者亦比較放置於HIC桶與本技術之間的優劣處，值得注意的事，因為

用過之樹脂暫貯於電廠中，每隔固定時間須開蓋檢查其積水，甚至須再脫水，也因此會有劑量與成本的增加，若是採用此一技術，甚至不需要封蓋，不過這是職所較為懷疑的，詢問筆者後才得知是因為貯存於廠內時，並不會有溼氣之凝結水於此固化體之上，但是若要運送出去，則仍需遙控封蓋即可。如附圖五，為使用該技術所製成的用過廢樹脂固化體。



圖五 經APS固化系統製程之用過廢樹脂固化體

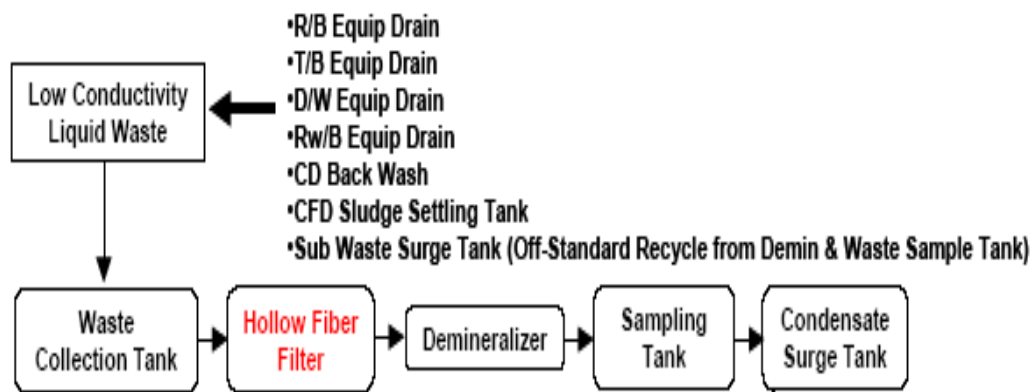
(五) 液體廢棄物的處理

在本次會議中來自亞洲的講演者只有日本與韓國，由於日本講演者是針對廢液處理預敷過濾系統的改善，也許可提供目前同為沸水式的核二廠作為參考。

於 1996 年日本 Shimane 核電廠一號機(屬於中國電力公司，(The Chugoku Electric Power Co., Inc.)位於東京西方 800 公里遠)，將原先使用的預敷樹脂過濾系統換為中空纖維過濾器(Hollow Fiber Filter (HFF)，以下簡稱 HFF)，

由於固定周期的反沖洗與使用雙氧水化學清洗，此過濾器甚為穩定只有在 2000 年時更換過一次，因為不再使用樹脂，所以不再有此類放射性廢棄物產生，對於廢棄物的減量有相當助益。所以該篇論文是介紹 HFF 系統在該電廠使用九年的經驗回饋。

該廠原先的洩水處理系統，包含了廢液收集槽，預敷過濾器、除礦器、取樣槽、濃縮調節槽等(如圖六)，而在預敷過濾器所產生的粉末樹脂在反沖洗時將產生二次廢棄物，所以該廠早在 1993 年對 HFF 系統進行六個月的試驗，對於懸浮微粒的有較佳的去除效果。

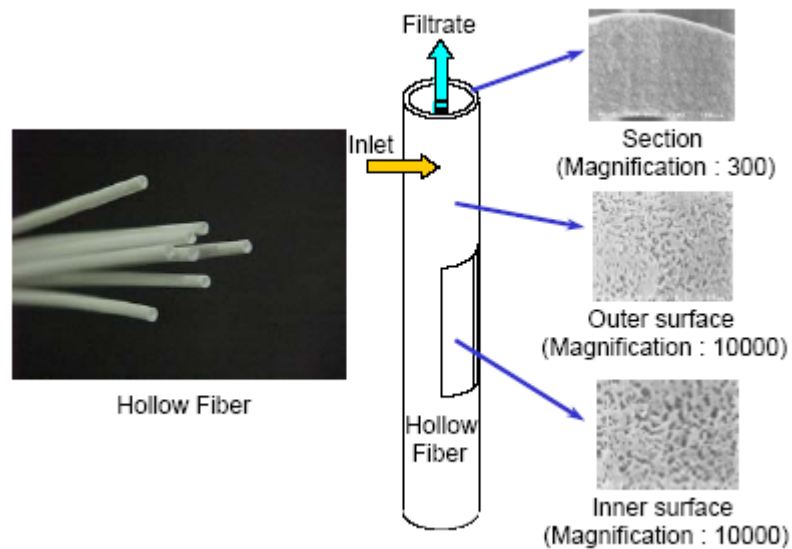


圖六 日本Shimane核電廠一號機洩水處理系統示意圖

可由該圖看出，來自於除礦濃縮器(Condensate Demineralizer (CD))反沖洗水、過濾濃縮除礦污泥沉澱槽(Condensate Filter Demineralizer (CFD) Sludge Settling Tank)表層液體等低導電度廢液先至收集槽，再經 HFF 系統處理。

中空纖維過濾器的材質為多種聚合物合成，其中有聚乙烯(polyethylene，(PE))、聚磺胺(polysulfone)、聚烯烴(polyolefin)等，該系統是由許多中空纖維薄膜所包圍形成的細管狀過濾器(如圖七)，其過濾薄膜規格表如表二。由於相當密實、所以單位體積的表面積就相當的高，也因為不會預敷樹脂，所以不會產

生二次廢棄物，所以近年來，日本已經將此系統廣泛應用於沸水式與壓水式反應器的廢液處理的濃縮過濾系統(Condensate Filtration System (CFS))上。



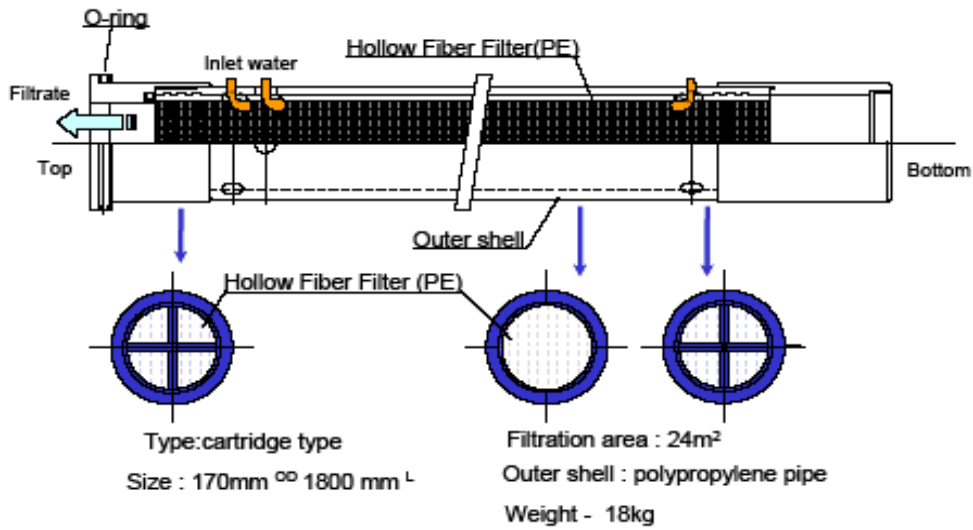
圖七 中空纖維過濾器結構材質圖

表二 PE材質中空纖維薄膜成份規格表

Table-1 PE Hollow Fiber Membrane & Module Specifications

Fiber material	Polyethylene
Pore size	0.1 micron
Fiber cross section	1.2 mm ^{OD} / 0.7 mm ^{ID}
Module material	Polypropylene
Module size	5 B×1800 mm ^L
Number of fibers	4,200 fibers / module
Filtration Area	24m ² / module

該薄膜的表面細孔徑僅 0.1-micron，可去除廢液中所含的懸浮微粒，而該系統所使用的每一個卡匣模組含有 4200 個中空纖維薄膜管，其結構組成示意圖如圖八所示，所以每個模組將含有 24 平方公尺的過濾面積，因為有該模組的外殼保護內層的過濾纖維，所以搬運拆裝相當容易，其外觀圖如圖九。

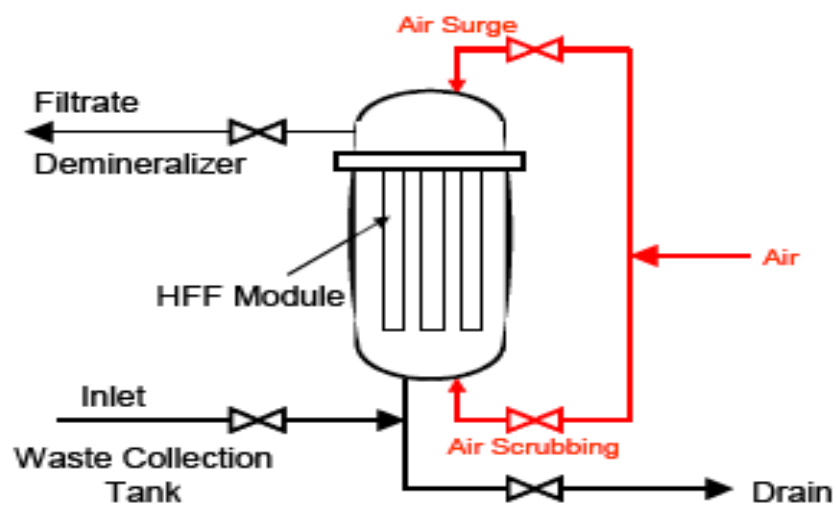


圖八 HFF過濾系統卡匣結構示意圖



圖九 過濾系統卡匣外觀圖

而HFF的廢液處理流程如圖十，其規格如表三。



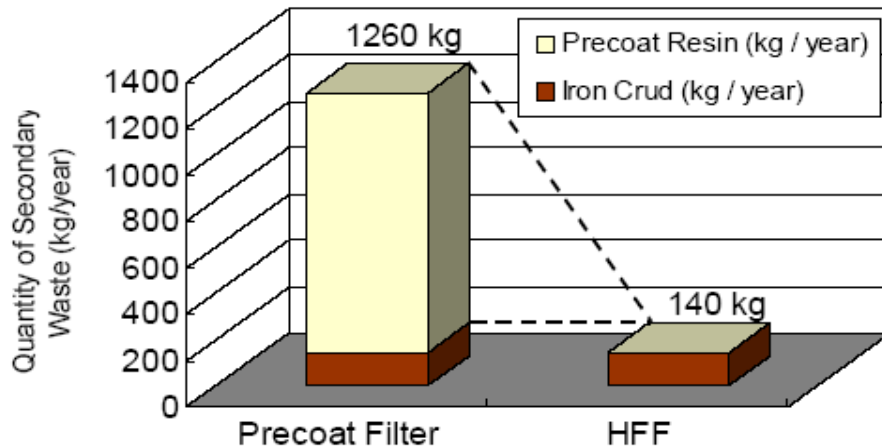
圖十 廢液經由HFF系統之處理流程

表三 預敷樹脂系統與HFF系統規格比較表

	Precoat System	HFF System
Flow Rate	74 m ³ /h (326 gpm)	74 m ³ /h (326 gpm)
Number of Vessels	1	1
Vessel Diameter	950 mm (37.4 inch) ^{ID}	950 mm (37.4 inch) ^{ID}
Vessel Height	3500 mm (138 inch) ^H	3500 mm (138inch) ^H
Module (Element) material	SUS27	Polypropylene
Number of Modules (Elements)	46 / vessel	15 / vessel
Precoat material	16 kg / vessel	None
Filtration Area	15 m ² (161 ft ²)	360 m ² (3875 ft ²)
Flux	4.9 m/h (2.0 gpm/ft ²)	0.2 m/h (0.082 gpm/ft ²)
Backwash Method	Air-Surge	Air-Surge & Air-Scrubbing H ₂ O ₂ Soaking Wash
Backwash Frequency (actual performance)	70 times / year	16 times / year

而該過濾系統之清潔方式有物理與化學兩種方法，而物理清潔法：又分為氣體洗滌反沖洗法(Air scrubbing backwash)與氣體壓力反沖洗法(Air surge backwash)兩種，可去除過濾薄膜表面的氧化鐵等固體物，但是當有機物堵塞而用物理清潔法無法有效降低其壓差時，此時就需要使用以過氧化氫(hydrogen peroxide, H₂O₂)作為清潔藥劑的化學清潔方式處理。

經過許多調整流量與調整清潔方法後，所處理的廢液進流鐵垢濃度為 10,000 至 30,000ppb，經過該過濾器處理之出流濃度降至 100pb 以下。而且據該廠統計，原先樹脂預敷系統一年需要反沖洗 70 次，但因使用 HFF 系統後，一年反沖洗次數僅為 16 次，可減少不少操控人員的現場工作壓力。另一方面，因不再使用粉末樹脂，每年可減少 90%重量的二次廢棄物(如圖十一)，對於採購粉末樹脂的成本與日後處理處置費用的節省，有相當的助益。



圖十一 樹脂預敷系統與HFF系統所產生之二次廢棄物量比較

其實該系統也並非沒有缺點，據職於休息時間與該講演者 YUSUKE SUWA 工程師請教得知，因為長期廢液化學清潔，造成過濾薄膜的拉硬力變化使其損壞，所以調整方法是盡量減少化學清潔次數與避免廢液流進含有較骯髒之有機物質，經過這些措施，可使該薄膜使用壽命超過五年之久。

(六) 大型廢棄物處置(Large Component Waste)的選擇

以核能電廠經營者的立場而言，當核電廠運轉了一定時期，為求擴充其發電容量，必須更換一些組件。這些組件有些仍為堪用，有些則是異常損耗。但是這些組件已遭污染，體積相當龐大而且重量亦十分笨重，所以在最終處置上面臨了挑戰，相信這也是我國核電廠在未來也會遇到的類似情形，所以在此將美方的經驗借鏡參考。

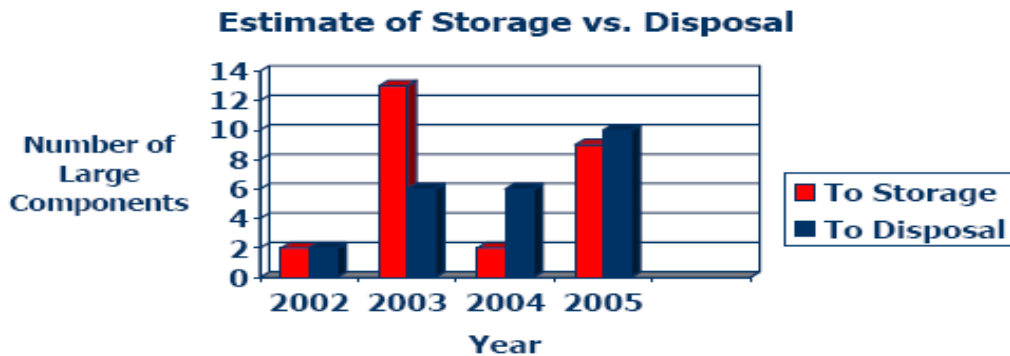
在美國核能電廠中，由於須要汰換一些大型組件，而這些組件不易切割拆解做進一步處理，同時也為輻防考量，所以面臨這些大型組件汰換後需選擇在廠內貯存或是立即送至最終處置的經濟考量，而在廠內貯放也是暫時貯存，因為當核電廠運轉執照到期後除役時，依據除役計畫仍需將這些大型組件廢棄物送至最終處置場。但是暫貯於廠內仍需注意一些事項，並非任意棄置於廠內不管，還須考

量到財務的預算問題。

日後再送最終處置場的考量因素為：1.短期成本與預算；2.可縮減計畫範圍；3.廢棄物貯存衰變的益處。而選擇當時送至最終處置場的考量因素為：1.減少長期財務之債務。2.減少廠內安全與劑量的不利影響。3.較有利的公眾接受度。4.對於此些大型物件清理運送路徑之確認。5.已知的生命週期成本。6.免除拆解之考量。7.可減少管制之不確定性。上開各項因素詳細說明將在下文補充說明。

講演者也補充說明目前對於核電廠經營者而言，這些大型放射性廢棄物清理的最少成本，也許不是最佳整體財務考量與最低的風險總額。而且在設施經營者也不情願使用現有資產去支付這些大型組件的最終處置費用，而想使用充足的除役計畫基金來處置這些物件。

在今年(2005年)壓水式反應器已有超過 50 台蒸氣產生器於廠內汰換，而在未來的五年內，壓水式反應器還有 30 台蒸氣產生器需於廠內汰換。根據美方估算，若現在直接最終處置，長期債務將需 2000 萬美金，但是貯存於廠內 20 年後再送至最終處置，依照現值淨值(net present value (NPV))將負債 80 億美金。圖十二為過去 2002 年至 2005 年，美國核電廠汰換之大型物件數量估算統計。這也就是說明有些電廠選擇背負長期債務將此些大型物件當時即送至最終處置場處置。



圖十二 2002至2005年大型組件廠內貯存與直接處置數量圖

前文曾提到兩種選擇的各項考量因素，在此詳細分述之，先針對「廠內暫貯」考量因素詳細說明：

1. 成本與預算：

當電廠中組件到一定時限或是某些理由需更換時，若採用處置計畫，其預算必定會列入其中呈報董事會，所以將影響是否立即處置的決定，因此這也是這些大型物件清理費用被延期到電廠除役時再考量，然而這樣的決定將造成額外建造廠內貯放設施與貯存維護費用的增加，勢必將列入清理的最終成本。

2. 建造貯存設施：

若是電廠內並無多餘空間貯放這些大型物件時，必須建造設施貯存，雖然建造與維護對電廠也是一項資金支出，但此貯存設施對電廠仍是一項資產。

3. 貯存時的衰變：

藉由組件貯存於廠內之管制，使其自然的衰變而減少其放射性，也是一項優點，在這些組件中，主要的核種是 Co-60，其半衰期是 5.6 年，20 年後，放射性仍是運送的重要考量，然而 Co-60 已經經歷約四次半衰期，放射性將減低約百分之九十。

4. 可縮減計畫範圍：

若組件處置計畫未列入組件替換計畫範圍內，可簡化計畫範圍以及更加有效率的進行節省時間。

由上可知，可輕易的看出這就是為何某些設施訴諸大型組件於廠內貯存方案。但是為何仍有核電廠選擇替換後直接送至最終處置場呢？詳細原因如下：

1. 成本確定性：

將大型組件貯放於廠內延後處置，經過長時間後通常將增加成本支出，尤其是當未來處置成本不確定時而目前直接處置費用確定時，業者較會採用此一模式。

2. 法規與管制之確定性：

隨著未來的管制法規的變動使的處置的成本變的不確定，因為在去年 2004 年 10 月，美國運輸部(DOT)針對放射性物質運送採取了新措施，與 IAEA 相符合的運送安全標準(TS-R-1)類似，而且新的安全運送計劃規定已修正完成(Code of Federal Regulations (CFR) Title 10 Subpart I - Security Plans § 172.800.)，所以依據管制法規日趨嚴謹的方向看來，日後的運送至最終處置場的費用勢必比現階段要高。

3. 減免保安規畫制定：

依據美國 911 後對核電廠的保安要求，若這些大型物件貯放於廠內，則將增加電廠安全計畫的內容，對於公眾的接受度也易造成負面影響，若直接處置，可不需增加廠內保安的規定。

4. 減少廢棄物容積、免除二次拆裝、減少建造：

對於貯存於廠房內，平時保養所產生的廢棄物，與日後移動拉出貯存庫再送處置時，需要二次拆解，也會產生廢棄物。所以直接處置可避免額外廢棄物的產生。

5. 成本的減少：

延後清理的貯存生命週期成本(The lifecycle cost of storage)超過及時清除所需成本，講演者並依蒸氣產生器實例以物價通貨膨脹比例 3 至 6% 額度列出金額試算表(如表四)證明 20 年後延後處置成本的確比直接處置要多出將近一百萬美金。

表四 典型大型物件案例成本分析

Case Study for Typical Large Component

	Timing of Cost	In Today's Dollars	Inflated Cost	NPV
Option 1: Onsite Storage				
Cost of Mausoleum	Current	\$1,000,000	\$1,000,000	\$1,000,000
Cost to Store (\$20k per year)	Annual – 20 yrs	\$400,000	\$537,407	\$202,543
Cost to Decommission Storage	21st Year	\$50,000	\$90,306	\$34,035
Cost to Mobilize (to Mausoleum)	Current	\$100,000	\$100,000	\$100,000
Cost to Mobilize (to transport)	21st Year	\$100,000	\$180,611	\$68,070
Cost to Transport	21st Year	\$2,000,000	\$3,612,222	\$1,361,409
Cost to Dispose	21st Year	\$1,500,000	\$4,810,703	\$1,813,103
Total		\$5,150,000	\$10,331,250	\$4,579,161
Option 2: Current Disposal				
Cost to Mobilize (to transport)	Current	\$100,000	\$100,000	\$100,000
Cost to Transport	Current	\$2,000,000	\$2,000,000	\$2,000,000
Cost to Dispose	Current	\$1,500,000	\$1,500,000	\$1,500,000
Total		\$3,600,000	\$3,600,000	\$3,600,000
NPV of Potential Savings				\$979,161

Assumptions for case study:

- 5% Assumed Risk Free Interest Rate (current: 4.74%)
- 6% Very Conservative assumption of increase in disposal cost
- 3% Average U.S. Inflation Rate - 1985 to 2004: 3.02%
- 20 Years Until Disposal

講演者亦針對除役基金之使用(Use of Decommissioning Funding)作一補充，設施在為替換大型組件進行處置時可使用一些措施籌措資金，依據美國聯合法規 10 CFR 50.82, 50.2 and 50.75 相關規定，允許反應器持照者進行類似更換大型組件之合法除役行動時或是移除重大殘留放射性時可使用除役基金。但是須符合 10 CFR 50.2 除役的定義終止執照，而其他相關條文解釋業者可修正當初除役基金使用條件與範圍，可領回部份基金作為大型組件處置之用，但仍需向 NRC 申請同意。

由本議題可看出，美國核能電廠經過多年運轉，已經陸續有大型乾性廢棄物

處置問題，反觀我國，因最終處置場尚未興建營運，目前核三廠正已規劃興建廠內倉庫貯放汰換大型組件，但是日後仍須送至最終處置場處置，所以建議日後在最終處置場的規劃上要將大型組件的處置列入考量之中。

四、 建議事項

雖然核能工業有復甦跡象，但是以美國幅員如此遼闊的國家，也開始重視放射性廢棄物減量的相關議題，由本次的會議中所發表的論文與討論可看出，美方嘗試著應用研發許多新技術來提升放射性廢棄處理系統的營運績效，因為的確有部分核能電廠並非鄰近海洋，這些內陸的核電廠，雖然其排放流量所含劑量甚至低於取水進流的劑量，但仍朝向零排放目標邁進，因為隨著民眾的環境自主意識的抬頭，核能電廠必需求新求變，這樣才能被社會一般大眾所接受。

自從核能電廠商轉以來，迄今也有數十年之歷史，核電廠除役的壓力已經不可忽視，而位於領導地位的美國也開始籌劃相關準備。反觀我國，雖然已有除役方案，但是細部規劃仍方興未艾，這還需我國核能界多努力才是。在此心得與結論有下列五點，分述如下建議參考：

(一)美國目前也正積極訂定其解除管限制值，其劑量限值建議為每年 0.01mSv，可解決不少電廠廠內貯存壓力，相對我國已經實施了「一定比活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」，兩者皆採用 IAEA 的輻射劑量限值。但是在實施層面上，仍應由業者台電公司主動提出申請，並應優先考量「易度量、極低活度、少量釋出」之廢棄物，較能為社會大眾所接受。

(二)由本次會議各國發表專題看出，這些科技進步的國家，在實務上仍繼續創新發展有關放射性廢棄物處理的相關技術，而且為數不少的是由核能電廠內的技術工作人員所提出經驗技術分享。反觀我國，相關研發大都由核能研究所負責，DTS 公司所發展出的進步型聚合物固化技術，以解決廢樹脂之問題，值得核研所參考。

由此可知，用過之廢樹脂與活性碳並非不能固化，在增加安定性的條件下，其固化體品質仍能達到法規標準之要求，目前國內廢液處理系統之樹脂採用

不再生，用完直接廢棄暫貯，經時間的累積必會有一定量產生，雖然目前已準備已濕式氧化處理，但處理完後產生廢漿仍須固化，配合最終處置場貯放的接收標準，國內這方面倒是可以開始著手開始研究此類之發展相關技術。

(三)放射性物質安全運送此一議題，一向為社會大眾所關切，美國與我國皆採用 IAEA 之運送規定，而且美國為了防恐，採取資訊保密措施，亦值得國內參考，但是不論低放射性廢棄物的運輸資訊是否受到限制，站在管制者的角度看來仍應維持一致的立場，採取仔細審核、嚴密管制之措施，確保低放射性廢棄物運送安全無虞，並保護社會大眾環境的安全與健康，這亦是管制單位應盡的職責。

(四)目前國內固化放射性廢棄物產量已有減量成效，但是對於其他廢棄物，例如廢樹脂，依照目前每年產量來看，若是不進一步處理，則將形成倉貯壓力來源。過去，我國核能電廠曾經進行 HFF 試驗，但因水質因素造成系統快速失效，使 HFF 過濾系統無法發揮功能。但是若從源頭廢液管制進流水質，徹底減少雜質，屆時或許可改採用此種系統，則樹脂使用量必可減少，將減輕倉貯壓力，節省購買樹脂成本。

(五)迄今我國最終處置場雖尚未選定，電廠亦尚未除役，但是終究會面臨電廠大型組件替換貯放的問題，如核三廠蒸氣產生器之汰換，所幸該廠已規劃興建新的廢棄物貯存庫，該貯存庫可貯存其汰換後的蒸氣產生器，未來我國最終處置場仍須考量大型組件處置的問題，此一部份需請業者及早因應，妥善規劃。