

B

附錄B 核廢料難處理，是虛擬，還是實境？



高放射性廢料體積很少

高放射性廢料是指核能發電後產生的用過核燃料 (Spent fuel) 經再處理程序 (Reprocessing)，萃取出其中鈾、鈾等元素回收利用，將殘餘物燒製成之玻璃或陶瓷固化體。由於目前燃料再處理程序不具經濟競爭力，故用過核燃料成為需要處理的物件。

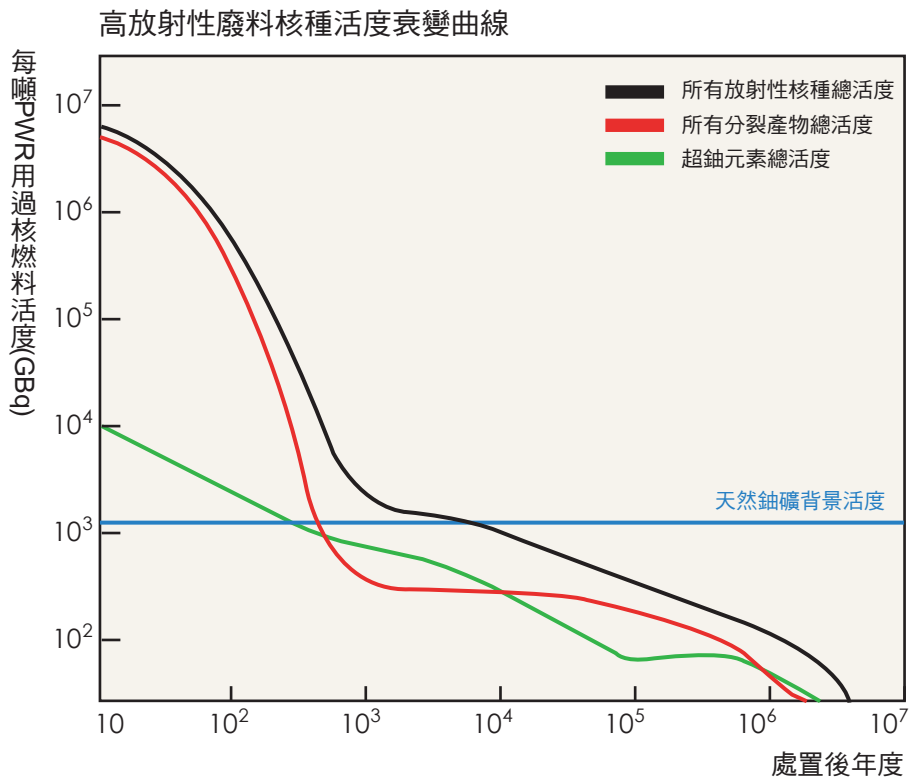
用過核燃料的放射性強度的確很高，但絕大部分屬於非常短命的分裂產物 (fission product)，輻射強度會快速的降低。如果剛從反應爐退出來的核燃料總活度是1，30天之後剩下1/16 (6.4%)；1年後，剩下1/75 (1.3%)；10年後，就只剩下1/454 (0.22%)。至於鈾-239，只佔高強度核廢料總活度的1/500,000。我國所有用過核燃料 (含核四) 總共只有2.82噸的鈾-239。

核能發電提供我國 20% 的電力達40年之久，所累積之所有用過核燃料總重只有7,200噸，體積不超過1,000立方公尺，大概等於1棟30坪3層樓的小公寓。

核廢料是否真的萬年無解

圖 B.1 分析高放射性廢料隨時間衰變情形，如果把用過核燃料中鈾、鈾等元素萃取出來，經三、四千年，廢料總活度就與鈾礦天然背景輻射相同。自使用過核燃料萃取出之鈾與鈾可以重新製造成燃料再利用，從降低廢料總活度或資源利用效率來看，廢料再處理都是最好的策略。數千年對個人而言可能是無法想像的長，但對數十億年之地質年代(地球年齡)而言，數千年不過是相對的短時間。近代化工程與科技製造業產生許多有毒廢棄物，其毒性即使經過數十億年仍然不會有任何的改變，但人們對有毒廢棄物的關心遠低於核廢料。

現在，問題就縮小到如何確保核廢料能在數千年內可以妥善保存，維護民衆安全了。根據現有科技能力與徵諸考古證據，我們認為達成以上目的並不困難！



圖B.1 核廢料絕非萬年無解而是千年能解

為高放射性廢料找個安靜的家園

深地層處置 (Deep geological disposal) 是各國為高階核廢料找一個最後安息處所的共識，也是目前最安全處置核廢料的方法。要分析深地層處置到底有多安全，就必須先了解廢料裡的放射性核種究竟怎樣遷移，後怎麼影響到人類的生活圈 (Biosphere) ？

各國處置場的設置須經過安全分析 (Safety Analysis Report, SAR)、功能性評估 (Performance Assessment, PA) 或生存性評估 (Viability Assessment, VA)，各類型分析的數值運算模式均極為複雜的。圖B.2描述放射性核種如何由深地層處置場向人類生活圈遷移的過程。核種遷移過程如下：

通常，處置場的設置地點須選擇適當的地層母岩，再在地下300~1,000公尺深處設立處置場，經過數十年，甚至百年的監控後，才會進行關場作業。適合的處置場地質，通常可以分成3類：

1. 堅硬的結晶岩層 (crystalline rock)

例如美國內華達州Yucca Mountain處置場 (凝灰岩, tuff) 深達320公尺、日本H-12計畫在東濃 (沉積岩層)、釜石 (花崗岩層)，建立深達500-1,000公尺的處置場。

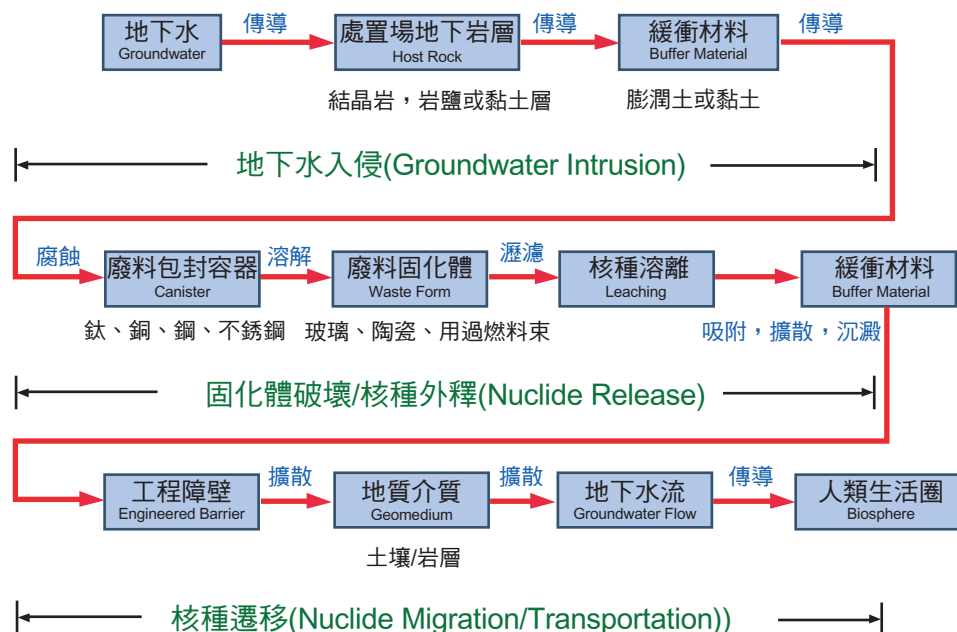
選擇結晶岩層做為處置場母岩，主要著眼於岩體緻密完整，地層穩定，熱傳導性、機械強度較好。

2. 可塑性強的岩鹽礦坑 (rock salt)

如美國在新墨西哥州Carlsbad，設立深達665公尺的岩鹽洞穴處置場，稱為「廢料先導處置場」計畫 (Waste Isolation Pilot Plant, WIPP)；德國計畫選擇西南Gorleben地區，深達1,000公尺的岩鹽洞穴，做為處置場。結晶化的岩鹽，具有非常好的塑性，而且遠離地下水層。當處置場封閉後，先前挖掘的坑道會逐漸癒合，使廢料永久保存其中。

3. 核種吸附能力優異的黏土層 (clay)

比利時選擇東北部的Mol - Dessel深達220公尺左右的黏土 (Boom clay) 層、法國也選擇東北部鄰近比利時的Bure區深達500公尺的黏土層、瑞士選定Zürcher Weinland地區的Opalinus黏土層 (Opalinus clay area, OPA) 等。比較結晶岩層與岩鹽地質，黏土礦物可謂兼有兩者之長。黏土層的不透水性遠超過結晶岩層，對於核種的吸附能力又遠超過岩鹽，是相當優良的母岩。表B.1總結各國HLW處置場母岩地質的重要參數。



圖B.2 深地層處置概念與放射性核種遷移途徑

表B.1 各國HLW處置場母岩地質的重要參數

處置計畫名稱	母岩岩相	深度(公尺)	擴散係數 ($\times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	水力傳導係數 ($\times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
日本H-12	沉積岩或花崗岩	500 - 1000	0.03	1
美國Yucca Mountain	凝灰岩	325	0.01	5
法國Bure URL	頁岩/黏土	490	0.01	0.1 - 0.001
芬蘭TILA-99	花崗岩	500	0.001 - 0.0001	-
英國 Sellafield	石灰岩	750	42	3.2

一、地下水接近

關場後，在處置場上方的地下水逐漸在地層裡滲透，慢慢接近處置區域。這段時間到底有多久，可從母岩水力傳導係數 (hydraulic conductivity) 來推估，由於地層深處的地下水流動非常緩慢，所以適用傳統水力學的達西定律 (Darcy's Law)，水力傳導係數可以簡化成地下水在地下岩層中的流動速度。

如表B.1所示，各處置場母岩地質的平均水力傳導係數大約是 10^{-10} m/s左右，換言之，地下水每滲透1公尺，大約需要300年。日本H-12報告認為大部分處置場距離透水層約有30~60公尺，換言之，關場後10,000~20,000年，地下水才能真正接觸到處置場。

二、緩衝材料阻止地下水接觸廢料包封容器

許多處置計畫另外設計一層50~100公分厚的緩衝材料 (buffer material)，通常是夯實膨潤土 (bentonite) 與石英砂的混合物。膨潤土是一種非常有趣的礦物，除了可以把核種牢牢吸附之外，它另有「遇水則發」的特性；只要有水，它就會迅速膨脹，阻擋地下水的侵入。表B.2總結各國處置計畫中關於緩衝材料的設計。緩衝材料的水力傳導係數一般都比母岩還要低得多，大約是 5×10^{-13} m/s左右 (約為母岩的1/200)，換言之，地下水在緩衝材裡每滲透1公尺，大約需要60,000年。就算緩衝材料只有30公分厚度，理論上也可以阻止地下水20,000年。

表B.2 各國處置計畫中關於緩衝材料的設計

計畫名稱	材質	厚度(cm)	夯實密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	最大擴散係數 ($\times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	水力傳導係數 ($\times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
日本H-12	70%膨潤土 +30%石英砂	70	1800	6	0.0045
美國YMP	無緩衝材料設計	-	-	-	-
瑞典KBS-91	MX-80膨潤土	35	1750	1	0.0055
瑞士Kristallin-1	膨潤土	40	1710	2	0.005
加拿大AECL	膨潤土+石英砂	45	1660	0.003	0.001

三、地下水腐蝕包封容器

地下水即使在30,000~50,000年有機會接觸到廢料，要造成核種的外洩，也必須破壞金屬包封容器 (canister)；破壞機制就是腐蝕。由於緩衝材料有阻絕水分、調節地下水酸鹼度的功效；一般預期，包封容器的腐蝕將非常的緩慢均勻。為求慎重，許多國家甚至設計了雙重包封容器，以延長其壽命。表B.3總結各國對於包封容器的設計。

若純銅的腐蝕率為每年2微米，則純銅或鈦製的金屬包封容器的理論壽命約在32,000年至2,000,000年之間；這項估計已經相當保守；如果根據考古資料，銅的腐蝕率可能小於每年0.1微米。廢料容器包封有100,000年的平均壽命應該是非常合理的估計。

表B.3 各國處置計畫中關於包封容器的設計

計畫名稱	內層包封容器				
	材質	厚度 (mm)	腐蝕率 ($\mu\text{m} \cdot \text{y}^{-1}$)	理論壽命(年)	設計壽命(年)
日本H-12	鈦	6	0.003	2,000,000	1,000
美國YMP	Alloy22	20	0.06	330,000	20,000
瑞典KBS-3	銅	60	1.9	32,000	1,000
加拿大	鈦	20	1	200,000	1,000
芬蘭TILA-99	銅	55	2	28,000	2,000

計畫名稱	內層包封容器				
	材質	厚度 (mm)	腐蝕率 ($\mu\text{m} \cdot \text{y}^{-1}$)	理論壽命(年)	設計壽命(年)
日本H-12	碳鋼	190	14	13,000	1,000
美國YMP	碳鋼	100	30	3,300	1,000

四、地下水與廢料體作用，造成核種外釋

如前述須處理的高放射性廢料存在的形式 (waste form) 有用過核燃料與硼矽酸玻璃固化體兩大類。在1980年代，學界廣泛曾研究多種可能的廢料保存型式，如陶瓷固化體、二氧化鈦 (TiO_2) 固化體、人工合成岩 (SYNROC) 等。最後，基於性能、價格等考量，還是以玻璃固化體最受矚目。唯澳洲仍堅持發展SYNROC技術，這種固化體滲濾率 (即每天自每平方米滲露出之質量) 最低，比通用的玻璃固化體要低10到100倍，但製造成本也最高。

硼矽酸玻璃固化體廣泛用於固化再處理程序所產生的高階放射性廢液，然而每廠均有其獨特配方，通常滲濾率介於1/10,000到1/100 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 之間，如果換算成溶解率，相當於每年溶解廢料體的1/650,000到1/6,500左右。日本H-12計畫溶解率的設計值為每年1/65,000；換言之，廢料體的平均壽命大約在65,000年。

用過核燃料主要成分就是二氧化鈾的陶瓷體，本身就有相當低的滲濾率，研究指出，二氧化鈾的陶瓷體溶解率大約是每年1/15,000左右，所以平均壽命大約是15,000年。廢料固化體的壽命在30,000年左右，是相當合理的預估。經歷了140,000年後，地下水終於可以把放射性核種帶離廢料埋存的地點了。

五、核種在地層中遷移

放射性核種被地下水帶離廢料體，並不等於核種已經與生物圈接觸。核種必須經過地層中的遷移才能達到生物圈，核種在地層中得遷移主要受到4項因素的影響：

1. 核種在地下水中的溶解度與化學行為

地下水的酸鹼度、氧化電位、離子成分等都會影響對核種的溶解度。一般來說，陰離子型的核種，譬如C-14、Tc-99或I-129、Cl-36等核種的溶解度、遷移速度都會比陽離子來得快些。至於Pu，因為非常容易形成沉澱，根本很難離開處置場周圍。

2. 處置場的工程障壁設計

前述緩衝材料對於大多數核種，都有極優越的離子交換與吸附能力，可以有效阻止核種的遷移。譬如Pu，在緩衝材料的行進速度，通常只有在地下水中的1/100 - 1/1,000。

3. 地質環境是否完整單純

事實上，深地層母岩絕不如想像中的「一體成型」般單純，或多或少都有裂縫（fracture），一旦核種遷移到裂縫附近，行進速度就會大幅增加，所以裂縫分布的調查，是選擇場址時最重要的工作之一。如前述，許多國家處置場不設在堅固的結晶岩層，反而設在岩鹽或黏土地層，就是著眼這些地層塑性較佳，很容易在封閉後慢慢癒合，以減少裂縫的影響。

4. 處置場地下水文特性

處置場址地下水文特性，如流速、流量、流向、途徑等，都是影響處置計畫成敗的關鍵因素。以美國Yucca Mountain計畫而言，由於得天獨厚的地質環境，它設立在地下水的飽和帶，因此地下水非常難接觸到處置區，所以可以省略許多工程障壁的設計。核種在地層中的遷移所需的時間，與處置場距地表深度，及母岩的擴散係數（diffusion coefficient）有關。根據表B.3的數據，除英國Sellafield處置場的擴散係數較大之外，一般都在 $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 左右。以Pu為例，即使完全不考慮核種的衰變，要讓鈾從300公尺的花崗岩層擴散出總量的1%，都需要50萬年以上。如果考慮Pu-239只有24,000年的半化期，50萬年後鈾的活度只剩下原來的1/1,000,000。我們可以歸納HLW處置計畫各層工程障壁系統的功效如表B.4。

表B.4 深地層處置場保護措施功效

主要影響機制	多重障壁系統			累積時間（年）
	種類	平均尺寸（公尺）	平均有效時間（年）	
地下水接近	處置場地層	30 - 60	10,000-20,000	15,000
緩衝材質膨潤防水	緩衝材料	0.4	25,000	40,000
包封容器腐蝕	包封容器	-	100,000	140,000
廢料體溶解	廢料體	-	15,000 - 65,000	170,000
核種在地質遷移	處置場地質	300 - 1000	500,000-1,000,000	

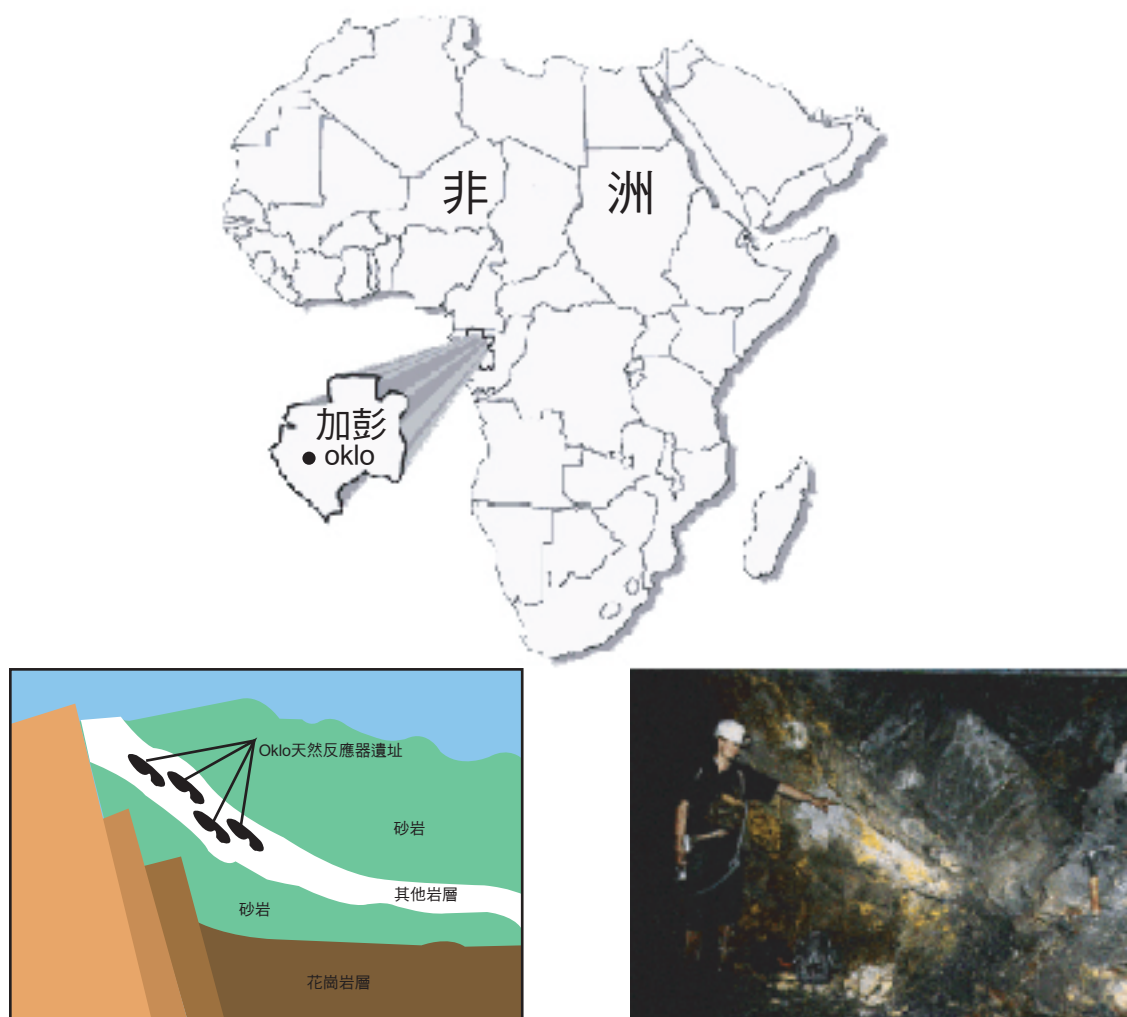
以古為鑑，可以知興替

許多人士可能認為核廢料處置時間是以萬年為單位，我們如何確保設施在這麼久遠之後還能保持完好呢？我們總不能在萬年之後才知道這些設施管不管用吧？好在我們可以從近年考古與地質研究，從類似處置場各種設計的自然遺跡，找尋能支持現代處置場可以達成設計目標的充分證據，這門學問做自然類似現象學（Natural analogue）。

Oklo天然反應遺址證實深地層處置可行

1970年代，法國科學家在非洲加彭Oklo發現一座18億年前的露天天然反應器遺址（現在已在地下300公尺），如圖B.3所示。數十億年前，鈾礦中的鈾-235含量較目前為高，Oklo 鈾礦區有河流通過，形成了一個天然的反應器。這個天然反應器持續發生緩慢之連鎖核分裂反應達數十萬年之久，產生分裂產物與鈾元素。調查Oklo 礦區地層中分裂產物及鈾元素的分佈，可提供核種於地層中遷移的確實資料。調查結果顯示，大家所擔心的Pu-239等超鈾元素在地層中的遷移速度比喻其中的小非常多。其原因如下：鈾元素對於環境的氧化還原電位非常敏感，容易在深地層缺氧環境中沉澱，因此經過18億年，現存最長壽的放射性核種也只移動了10公尺。相似的現象，也同時在巴西的Morro de Ferro、加拿大的Cigar Lake 發現。

因為Oklo與一般深地層處置場的地下環境很類似，所以我們有充分理由相信深達200-400公尺的地下岩層，應該有相同沉澱吸附效果，足以防止放射性核種與生物圈接觸。



圖B.3 Oklo天然反應遺址證實深地層處置可有效防止核種遷移

黏土膨潤特性使馬王堆遺跡千年不壞

1972年湖南長沙近郊的馬王堆發現2100年前西漢初年長沙丞相利蒼及其夫人、公子的大型墓葬群，消息傳出震驚海內外。除了出土3,000多件精美絕倫、華麗依舊的楚地文物之外，最令人好奇的是利蒼夫人辛追遺體與相當多有機物質，雖然經歷2100年歲月，居然沒有任何腐敗跡象。

大陸專家證實主要是墓葬中一層厚達50公分夯實高嶺土（kaolinite），發揮遇水膨脹的膨潤（swelling）特性，有效隔絕地下水與氧氣入侵，使得所有有機物質不會腐敗。

處置場的緩衝物質也扮演相同角色。只是我們使用膨潤能力更強的膨潤土（bentonite）來取代高嶺土。根據分析，相同夯實密度下的膨潤土其水力傳導係數是高嶺土的1/100以下、膨潤壓高出40倍。理論上，與高嶺土相較，膨潤土可以地下水傳導時間延長100倍。50公分的高嶺土就可以防止地下水入侵漢墓達2,100年，那麼能延長傳導時間100倍的膨潤土，實在沒有理由達不到相同功效。

三千年前青銅器印證包封容器防蝕功能

在故宮裡有太多三千多年前的青銅器都能證實金屬包封容器（canister）經得長期防蝕考驗，如圖 B.5 的商代早期的獸面紋觚有3,700年歷史、西周晚期的宗周鐘則有2,800年歷史，但現在連上面的細紋（平均高度約1.5 mm）都完整無缺。顯示3000年的歲月竟然不能消蝕掉2mm的厚度，更何況多出100倍厚度的廢料包封容器？從出土或自海底撈起的古物的狀況，證明在適當的環境之下，文物可以保存數千年，甚至數萬年。製作於科技不發達年代的容器，都可以長時間的維持功能；我們似乎不應該認為以現代高科技製造的廢料包封容器會經不起環境的考驗。



圖B.4 馬王堆遺址發現大量易腐敗有機質居然可以完整保存2100年,足見黏土礦物可以長期隔絕氧氣與水份入侵



3,700年前早商獸面紋觚



2,800年前西周宗周鐘

圖B.5 三千多年的歲月都不能消蝕2公厘厚度的青銅器

核能後端營運經費

核廢料的處理需要經費，核電廠結束運轉後將環境回復至可做其他用途所需的經費，依使用者付費的原則，理應由目前的用電客戶支付。台灣電力公司於民國75年成立「後端營運基金」，每度核能發電提撥0.17元存入基金。後端基金由經濟部成立的委員會管理，任何的動支均須委員會的認可；至94年3月止，後端基金以累積至1,599億元。民國93年的核能發電成本為0.646元/度，其中已包含後端營運基金0.17元/度的提撥，佔比達26.3%。

後端營運基金日後將用於低階核廢料的最終處置、使用過核燃料的處理、以及拆廠相關費用。表 B.5 所示為世界各國實際營建低階核廢料的處置廠成本。如表所示，處置成本依處置方法與國情的不同而有很大的差異。台灣電力公司預估 8 部機組營運 40 年，連同拆廠所產生的廢料，國內的低階核廢料共約 98 萬桶。處置費用與廠址及採用的處置方法有關，台電公司在尋覓處置廠址時均會粗估所須費用，一項估算的結果顯示：設施設計建造費用約 153.4 億、設施營運費用約 135.3 億、封場後監控費用約 4.2 億，總計 292.9 億；平均單位成本約新台幣 30,000 元/桶。

根據世界其他國家的技術資料、規劃報告、與實際執行經驗，若國內的使用過核燃料將採最終儲存的方式處理，台電公司預估使用過核燃料的處置經費約需 1,280 億。核電廠的拆廠已有多次的經驗，2003 年 4 月號的科學人對美國緬因州楊基電廠的拆廠過程及相關問題有完整的描述，該廠址已回復到可以做任何用途的程度。台灣電力公司每經過一段時間即會根據最新的資訊估算拆廠費用，目前六部機組拆廠費用估計為 499.2 億元。

根據以上的估計，再加上核廢料運輸、中期儲存、使用過核燃料乾式儲存等費用，目前六部機組所需的總費用為 2,754 億元 (90 年幣值)。「後端營運基金管理委員會」要求台電隔段時間，即必須依據最新的資料與數據估算各項成本，作為調整後端基金提撥比例的依據。

表B.5 低階核廢料處置廠營建費用與單位成本

國家	日本	法國	德國	瑞典	芬蘭(1)	芬蘭(2)
處置技術	地表	地表	地下坑穴	海床下	地下	地下
成本	6,480,000 萬日圓	800,000 萬法郎	73,000 萬美元	150,000 萬瑞典幣	15,200 萬芬蘭幣	11,500 萬芬蘭幣
容量(桶)	400,000	5,000,000	325,000	315,000	42,160	27,000
單價	162,000	1,600	2,246	4,726	3,605	4,259
	日圓/桶	法郎/桶	美元/桶	瑞典幣/桶	芬蘭幣/桶	芬蘭幣/桶
單價 ¹ 新台幣/桶	47,496	9,670	70,545	20,313	24,040	28,642

表註

1 匯率計算依據網站<http://www.xe.com/ucc> 93年5月20日之數值

結 論

1. 核廢料不是萬年難解的問題，核廢料經數千年衰變，其強度已達背景輻射的範圍。現代科技足以保證核廢料在數萬年內不會威脅到生物圈。
2. 核廢料深地層處置，即將核廢料用厚達 10~30 公分的鈦、鎳或銅合金完全密封後，埋藏在地下 500~1,000 公尺深的堅固岩層裡。
3. 核廢料的深地層處置並沒有非常特殊的工程技術，它與地下礦藏開採、油井鑽探相當類似，技術成熟。
4. 深地層處置計畫的技術核心，主要在處置場的地質、地下水文調查，重要參數取得與驗證，評估模式與決策分析程序的建立。
5. 目前全球先進核能國家的廢料處置工作，都已進入特定場址細步調查階段，預計在未來 10 年都將選定廠址，20 年內陸續營運，核廢料難處理將是歷史名詞。
6. 2002 年 5 月，世界第一座高強度廢料處置場在芬蘭 Olkiluoto 誕生，當地居民與芬蘭國會都以超過 2/3 的壓倒性多數同意興建。

7. 2002年7月美國布希總統正式同意Yucca Mt.成為世界第二座高強度廢料處置場，預定2013年啓用。
8. 除了美國Yucca Mt.計畫外，所有處置場設計均要求民衆的外加輻射劑量都小於自然背景輻射的1/10,000。在處置後10,000年內，除美國外，所有處置場的外加輻射劑量都不會超過自然背景的1/100,000。
9. 鈾-239非常容易沉澱，所以根本沒有機會經遷移作用離開處置場，並不會對生物圈造成威脅。
10. 從著名的非洲加彭Oklo天然反應器現象、加拿大Cigar Lake鈾礦現象，都足以證明，即使經歷10億年，所有的放射性核種，都無法逃離處置場10公尺外。顯示深地層處置的安全性無庸置疑。

結語

台灣使用核能發電已經有一段時間，核能發電也如預期的協助我們渡過數次能源危機，目前台電六部核能機組的發電成本還不到平均發電成本的一半，是這波能源危機中最重要穩定發電成本的籌碼；未來我們還得依賴它們繼續提供大量的無碳電力。我們享受了核能發電的優點，也必須面對核能發電衍生的問題。核廢料的處置是一個嚴肅的問題，推動「非核家園」也許阻絕了我們未來使用核能的選擇，但已經存在的核廢料不會憑空消失！低階核能廢料的處置技術已經成熟，世界許多國家都已建構完成處置場。處理國內的低階核廢料，欠缺的不是技術與施工能力，缺的是主事者的重視與解決問題的魄力。做個負責任的執政者、做個永遠的執政者，應主動的面對問題總不能期望政黨輪替後再來解決核廢料問題！