



認識核廢料

李敏
工程與系統科學系
國立清華大學



核廢料又稱放射性廢棄物：

- 放射性廢棄物係指含有具放射性核種廢棄物
- 放射性廢棄物依其放射性活度可分為**高放射性廢棄物**與**低放射性廢棄物**
- 高放射性廢棄物：指備供最終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生之萃取液或產物
- 低放射性廢棄物：指其他不屬於高放射性廢棄物者

放射性廢棄物來源：

- (1) 核能電廠、(2) 醫、農、工、研等。



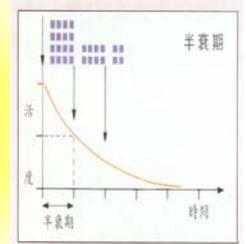
放射性廢棄物特性

含一種或多種的放射性核種，其活度會隨時間的增長而遞減

會放出無色、無臭、無味、無聲的游離輻射

造成體內或體外輻射劑量

使用適當的裝置即可立刻決定游離輻射量是否會超出法規限值



放射性廢棄物來源與特性

- 放射性廢棄物所含之人工放射性核種來自：核分裂及中子活化
- 放射性廢棄物依其物理形態，可分為氣態、液態、固態三種
- 目前我國營運中三座核能電廠六部核能機組，都設有放射性廢棄物的處理系統



低階放射性廢棄物



低階放射性廢棄物來源與特性

核能電廠放射性廢氣的來源

- 活化產物：以 ^{16}N 、 ^{41}Ar 及 ^3H (氚氣)為大宗。
 - 其中 ^{16}N 之加馬能量較高(6.13MeV)，其半衰期僅為7.13秒。 $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$
- 分裂產物：以 ^{135}Xe 、 ^{88}Kr 、 ^{85}Kr 及 ^{131}I 為主。



低階放射性廢棄物來源與特性

核能電廠放射性廢液的主要來源：

- 機件洩水
- 地面洩水
- 化學廢液
- 洗滌廢液



低階放射性廢棄物來源與特性

核能電廠固態廢棄物的主要來源：

- 濕性放射性廢棄物：廢液處理後產生的廢樹脂、過濾殘渣及濃縮廢漿；
- 乾性放射性廢棄物：在運轉中，受污染的廢棄衣物、手套、工具、紙張、塑膠及機具等。



低階放射性廢棄物處理

- 乾性固體廢棄物通常再分為可燃廢棄物、可壓廢棄物與不可燃不可壓廢棄物。
- 可燃廢棄物經焚化處理、可壓廢棄物經壓縮處理，以減少廢棄物的體積。



我國低階核廢料管理策略

- 低放射性廢棄物係採「減少產生、減容固化、安全貯存、妥善處置」之策略
 - 在減少產生方面：原能會已訂定減廢目標值，核能一、二、三廠的放射性廢棄物產生量，業已逐年減少
 - 在減容固化方面：廢棄物須先經過焚化、壓縮或固化處理後，再以鋼桶盛裝

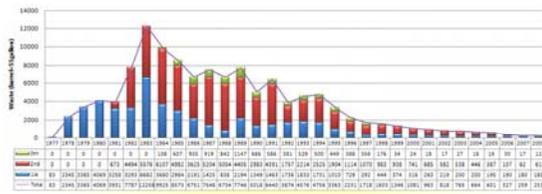
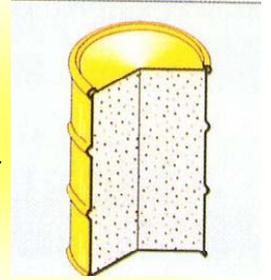
低階放射性廢棄物處理

- 處理的目的：使放射性核種安定化、容易操作、減容減量，所以將液態放射性廢棄物處理成固態，再加以減容與固化，以利未來貯存、運送與最終處置。
- 各階段輻射防護設計，年有效劑量不得超過0.25毫西弗。



低階放射性廢棄物處理

- 濕性固體廢棄物經水泥固化，再以容器盛裝。其固化體須符合固化體品質標準。
- 固化體之抗壓強度須大於15公斤重/平方公分

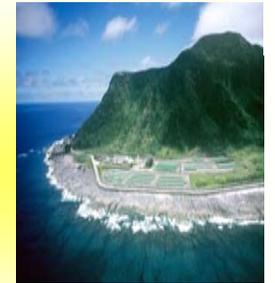


國內三座核能電廠低階放射性廢棄物產量

各核能電廠實際與預估產生之低階放射性廢棄物總量(桶)

	金山	國聖	馬鞍山	其他 ¹	合計
存於廠址	38,263	45,826	6,675	N.A.	90,764
存在蘭嶼	42,028	37,488	6,336	11,820	97,672
合計	80,291	83,314	13,011	11,820	188,436
預估40年產生總量 ²	206,000	280,123	163,000	82,000	976,000 ³

- 其他來自研究、工業用、與醫療低階放射性廢棄物
- 包括運動轉與除役
- 包括核四廠運轉40年與除役之242,000桶



面積 45.7 平方公里，人口 4,183 人(2009 年2月)



1982 年開始營運，1996年停止運送，總儲存量 97,672 桶
政府曾承諾於2002年將全部低階放射性廢棄物運出



核二廠現代化貯存庫(二號)



核二廠現代化貯存庫（二號）



核二廠現代化貯存庫（三號）

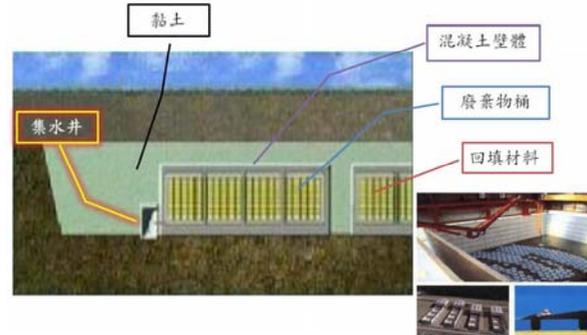


放射性廢料與一般有害廢棄物最大的不同點，在於它產其放射性會隨著時間而衰減，而且它也很容易偵測，所以廢料比較容易集中管理。

有害或有毒廢棄物的處理原則：與生物圈及食物鏈長久

低階廢料放射性廢料的處置方式有：淺層處置或淺地掩地下處置窖等。

全世界已有三十二個國家共七十二座最終處置場在運轉



法國經驗

FRANCE

中環核能發展部 中環電力一處



韓國經驗

項目	單位	單位	單位	單位
總面積	100,000	100,000	57,000	174,000
總容量	100,000	100,000	57,000	174,000
總經費	10,000	10,000	5,000	15,000
總產量	10,000	10,000	5,000	15,000
總銷量	10,000	10,000	5,000	15,000
總進口	10,000	10,000	5,000	15,000
總出口	10,000	10,000	5,000	15,000

KOREA

中環核能發展部 中環電力一處



日本經驗

JAPAN

中環核能發展部 中環電力一處



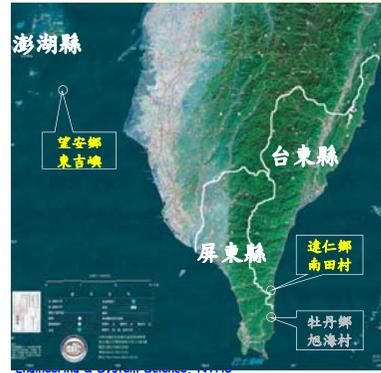
日本六所村核燃循環設施



地面設施鳥瞰圖 設施概念圖
瑞典經驗/海床下坑道處置



低放處置選址管制作業



- 公告潛在場址
- 選址小組於 97/8/19 票選後，經濟部於 97/8/29 公告 3 處潛在場址
- 台東縣達仁鄉
- 屏東縣牡丹鄉
- 澎湖縣望安鄉

← 潛在場址位置圖



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 萬法朗	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 日圓/桶	1,600 法朗/桶	2,246 美元/桶	4,726 瑞典幣/桶	3,605 芬蘭幣/桶	4,259 芬蘭幣/桶
單價	47,496 新台幣/桶	9,670	70,545	20,313	24,040	28,642

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



低階放射性廢棄物



高放射性廢棄物

用過核子燃料

用過核子燃料經再處理所產生之萃取液或產物

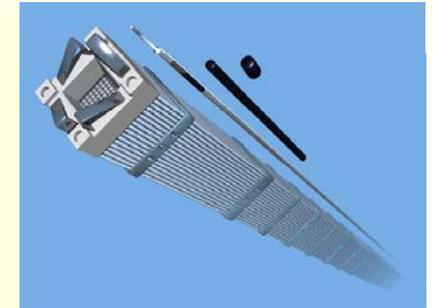
使用過核燃料: 內含大量之可用之鈾-235與鈾-239, 燃料中剩餘之U-235含量高於天然鈾之U-235含量

處理方式: 暫時儲存於電廠—濕式, 乾式
集中儲存於特定場址 -- 暫時(等待再處理)

經適當包裝後深層地質掩埋— 永久



用過核子燃料



壓水式反應器核燃料束

一束核燃料所能產生的電力相當於7萬噸的煤或 25萬桶的石油

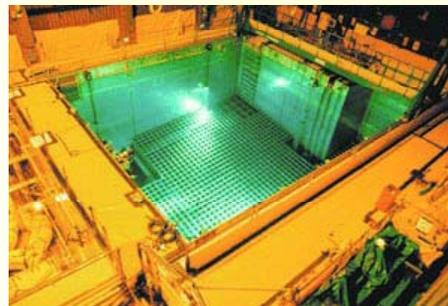


我國現有核能電廠用過核子燃料貯存水池容量

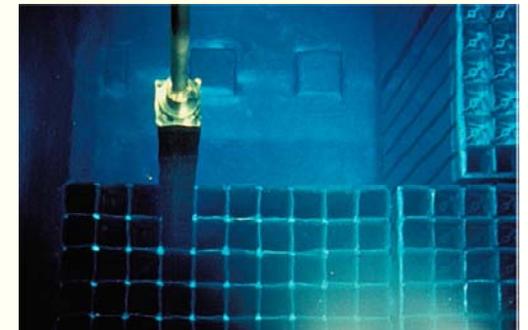
	核燃料貯存水池容量 (組/束)	已貯存量 ¹		預估運轉40年產量		40年運轉水池容量不足數量 (組/束)	預估水池容量用完日期
		組/束	公噸	組/束	公噸		
核一廠	6,166	5,104	880	7,532	1,341	1,366	2010.3
核二廠	10,058	6,864	1,153	11,544	1,947	1,564	2016.9
核三廠	4,310	2,058	828	3,842	1,633	0	NA
核四廠	16,522	0	0	13,808	2,430	0	NA
總計	37,056			36,726	7,351	2,930	NA



過核子燃料貯存水池



過核子燃料貯存水池

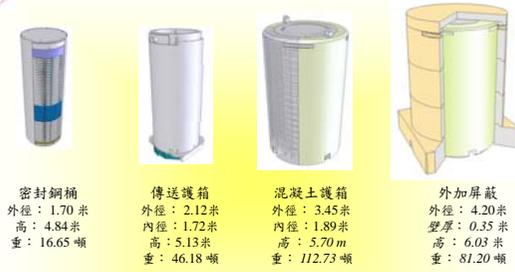




Engineering & System Science, NTHU



國立清華大學 工程與系統科學系



核一廠用過核燃料乾式儲存系統示意圖，可儲存56束燃料

Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



核一乾貯案－貯存模擬示意圖



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



用過核子燃料乾式貯存(續)



美國Maine Yankee 核電廠乾式貯存設施

Engineering & System Science, NTHU



美國Connecticut Yankee 核電廠乾式貯存設施

國立清華大學 工程與系統科學系



美國核電廠乾式貯存設施(以4個電廠為例)



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



美國核電廠乾式貯存設施(以4個電廠為例)



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



用過核子燃料最終處置

2002年12月25日總統簽署頒佈實施『放射性物料管理法』

2003年7月30日公佈『放射性物料管理法施行細則』

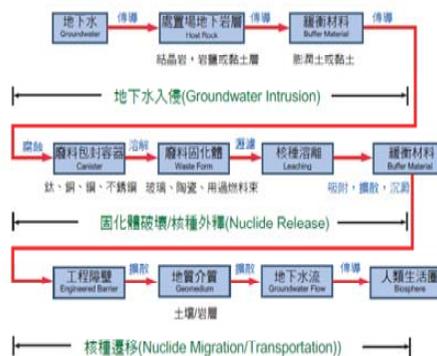
2004年11月16日台電公司完成「用過核子燃料最終處置計畫書(2004年版)」，並陳報原能會審查，經奉原能會於2006年7月13日核備該計畫書

計畫書之規劃時程如下：

- 「潛在處置母岩特性調查與評估階段」(2005~2017年)
- 「候選場址評選與核定階段」(2018~2028年)
- 「場址詳細調查與試驗階段」(2029~2038年)
- 「處置場設計與安全分析評估階段」(2039~2044年)
- 「處置場建造階段」(2045~2055年)

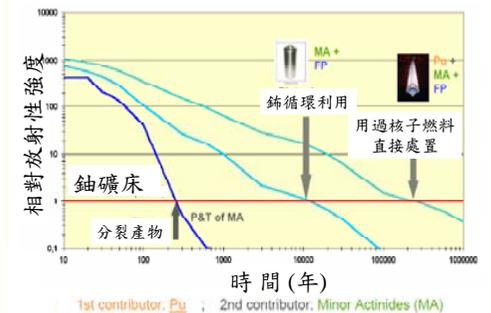
Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



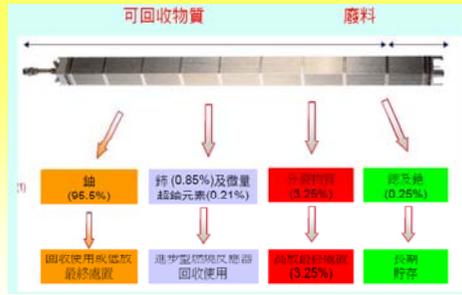
Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系

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
緩衝材質影響滲水	緩衝材料	0.4	25,000	40,000
密封容器腐蝕	密封容器	-	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	-

用過核燃料



高階核廢料：使用過核燃料經過再處理程序，提煉出有用鈾與鈾，剩下之不可用之廢棄物（分裂產物，超鈾元素）。核燃料再處理程序可回收可用之物質，並大幅度的減待處理之放射性物質的總量。

問題：核武材料的擴散，價格，營運安全
積極發展的國家：法國，日本，英國

高階核廢料的處理：減容，減量，玻璃化，抗腐蝕與侵蝕之金深層地質掩埋。

各國用過核子燃料/高放射性廢棄物處置時程

處置方式	國家	核能電力占全國電力 (%)	人口 (2007年估計)	人口密度 (人/平方公里)	處置廢棄物	處置場預定啟用時程	
直接處置	美國	19.9	301,610,970 世界第3名	32 世界第140名	用過核子燃料及高放射性廢棄物(深埋)	2017年	
	加拿大	12.5	32,880,770 世界第35名	3.29 世界第187名	用過核子燃料	預定2006年底提出 長程處置方案	
	芬蘭	27.3	5,246,879 世界第82名	17.1 世界第190名	用過核子燃料	2020年	
	瑞典	49.6	9,044,789 世界第82名	20 世界第153名	用過核子燃料	2023年	
	西班牙	23.6	44,708,964 世界第29名	88.57 世界第84名	用過核子燃料/中強度放射性廢棄物	2035年	
	台灣	13.8	22,894,283 世界第47名	632.44 世界第9名	用過核子燃料或高放射性廢棄物	2055年	
	再循環	日本	25.0	127,333,002 世界第9名	335 世界第18名	高放射性廢棄物	2040年
	再循環	法國	77.7	64,102,140 世界第20名	113 世界第68名	高放射性廢棄物	2065年
再循環	瑞士	39.7	7,523,934 世界第96名	182 世界第44名	高放射性廢棄物	2040-2050年	
再循環	英國	23.7	59,553,800 世界第22名	246.5 世界第33名	高放射性廢棄物	未定	
再循環	俄羅斯	15.9	143,974,059 世界第7名	8 世界第178名	高放射性廢棄物	未定	
再循環	印度	2.62	1,126,000,000 世界第2名	342.50 世界第19名	高放射性廢棄物	未定	
再循環	中國	1.93	1,321,851,888 世界第1名	135.4 世界第51名	高放射性廢棄物	未定	
直接處置或再循環	比利時	55.5	10,511,382 世界第77名	339.50 世界第22名	用過核子燃料及高放射性廢棄物	2035年	
直接處置或再循環	德國	28.1	83,251,851 世界第13名	230.9 世界第50名	用過核子燃料及高放射性廢棄物	2030年	

各國用過核子燃料/高放射性廢棄物處置時程

處置方式	國家	核能電力占全國電力 (%)	人口 (2007年估計)	人口密度 (人/平方公里)	處置廢棄物	處置場預定啟用時程
再循環	日本	25.0	127,333,002 世界第9名	335 世界第18名	高放射性廢棄物	2040年
	法國	77.7	64,102,140 世界第20名	113 世界第68名	高放射性廢棄物	2065年
	瑞士	39.7	7,523,934 世界第96名	182 世界第44名	高放射性廢棄物	2040-2050年
	英國	23.7	59,553,800 世界第22名	246.5 世界第33名	高放射性廢棄物	未定
	俄羅斯	15.9	143,974,059 世界第7名	8 世界第178名	高放射性廢棄物	未定
	印度	2.62	1,126,000,000 世界第2名	342.50 世界第19名	高放射性廢棄物	未定
	中國	1.93	1,321,851,888 世界第1名	135.4 世界第51名	高放射性廢棄物	未定
	直接處置或再循環	比利時	55.5	10,511,382 世界第77名	339.50 世界第22名	用過核子燃料及高放射性廢棄物
直接處置或再循環	德國	28.1	83,251,851 世界第13名	230.9 世界第50名	用過核子燃料及高放射性廢棄物	2030年

目前國際上輕水式用過核子燃料再處理容量

	裝置容量 (公噸/年)	2005處理量 (公噸/年)	累積處理量 (公噸)
La Hague (法國)	1,700	1,100	21,000
Sellafield (英國)	900	150	4,000
Tcheliabinsk (俄羅斯)	400	150	3,900
Rakkasho-Mura (日本, 2007年啟用)	800	0	0
總計	3,800	1,400	28,900

壓縮後之燃料束結構才

玻璃固化後之分裂產物



法國用過核子燃料處理設施
高階放射性廢棄物暫存倉庫



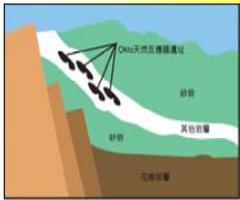
法國用過核子燃料處理設施
高階放射性廢棄物暫存倉庫





非洲加彭共和國
運轉於2億年前之
天然反應器遺址

Oklo天然反應器遺址證實深地層處置可有效防止核種遷移



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



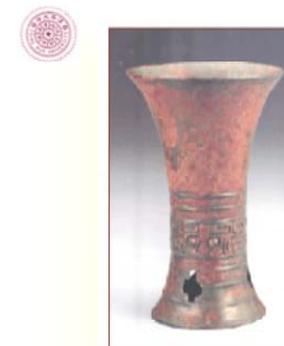
金絲織衣



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

Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



3,700年前商獸面紋觚



2,800年前西周青銅

三千多年的歲月都不能消蝕2公厘厚度的青銅器

Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系

核能發電後端營運基金

- 台電公司於75年7月1日起按每度核能發電量提撥0.17元,作為核能發電後端營運費用基金,以支應未來放射性廢棄物處理及除役拆廠的費用。截至96年底止,該基金已超過1,962億元,並以每年百億元快速累積增加中。
- 該基金屬經濟部主管之「非營業基金」,並由經濟部邀集財政部、主計處、原能會等單位代表,組成「核能發電後端營運基金管理會」妥為管理。未來放射性廢棄物處理費用已經有週全的準備。

Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



Engineering & System Science, NTHU

國立清華大學 工程與系統科學系



染汙重嚴受遭水地下、壤土 廠順安碱台原市南

辛奧戴有·體魚 酚氯五含·水井

【本報記者張景惠報導】南台原市安順廠，因土壤及地下水嚴重污染，導致當地水井含有五種有害物質，包括酚、氯、氰、汞及鉛。當地居民擔心飲用受污染的水井水，會對健康造成嚴重威脅。目前，當地政府已採取緊急措施，封鎖受污染水井，並呼籲居民停止飲用。



地下的毒金
 此片區域土壤及地下水含有五種有害物質，包括酚、氯、氰、汞及鉛。當地政府已採取緊急措施，封鎖受污染水井，並呼籲居民停止飲用。

民國八十一年一月二十二日