

用過核燃料 何去何從？

用過的核燃料可以再循環利用，也可以直接埋存處置，該怎麼做才能兼顧安全與發電效率，考驗著我們的智慧。

撰文／李敏

核能發電的原料因體積小，具有運輸和貯存方便的優點。略小於一截中指大小的燃料丸所含的能量，相當於568公升的石油或807公斤的煤，產生的電力可以供給一個人一年平均家用所需電量。而且在核能發電成本中，燃料成本所佔的比例較低，較不容易受到國際能源價格波動的影響，因此依賴進口能源的國家都將核能視為準自產能源。核能發電的另一項優點是不會排放二氧化碳；在京都議定書二氧化碳減量的壓力下，已經存在近50年、但被大多數國家忽略的核能，再度成為許多國家重要的能源選項之一。

核能發電的使用一直是備受爭議的議題。過去50年來，人們對核能發電的好惡會隨著外在環境的改變及偶發事件的影響，有大幅度的改變。就如同其他能源的使用，核能發電也會對環境帶來影響，但是與化石燃料所造成的空氣污染以及二氧化碳的排放相比，世界上許多環保團體與人士已經逐漸認知，核能發電可以視為潔淨能源。

多年來，核能發電發展兩個最具爭議性的議題，就是核能安全及核廢料的處理，

這兩個議題都與輻射有關。放射性物質是天然存在的東西，人類文明的發展亦大量利用放射性物質於工業設施及醫療診斷與治療，這些放射性物質均會對生物造成輻射。使用核能發電不可避免地會排放微量的放射性物質到外界環境，但透過嚴謹的設計及法規管制監督，可以將排放的放射性物質所導致的劑量，減少至遠低於天然輻射造成的劑量。

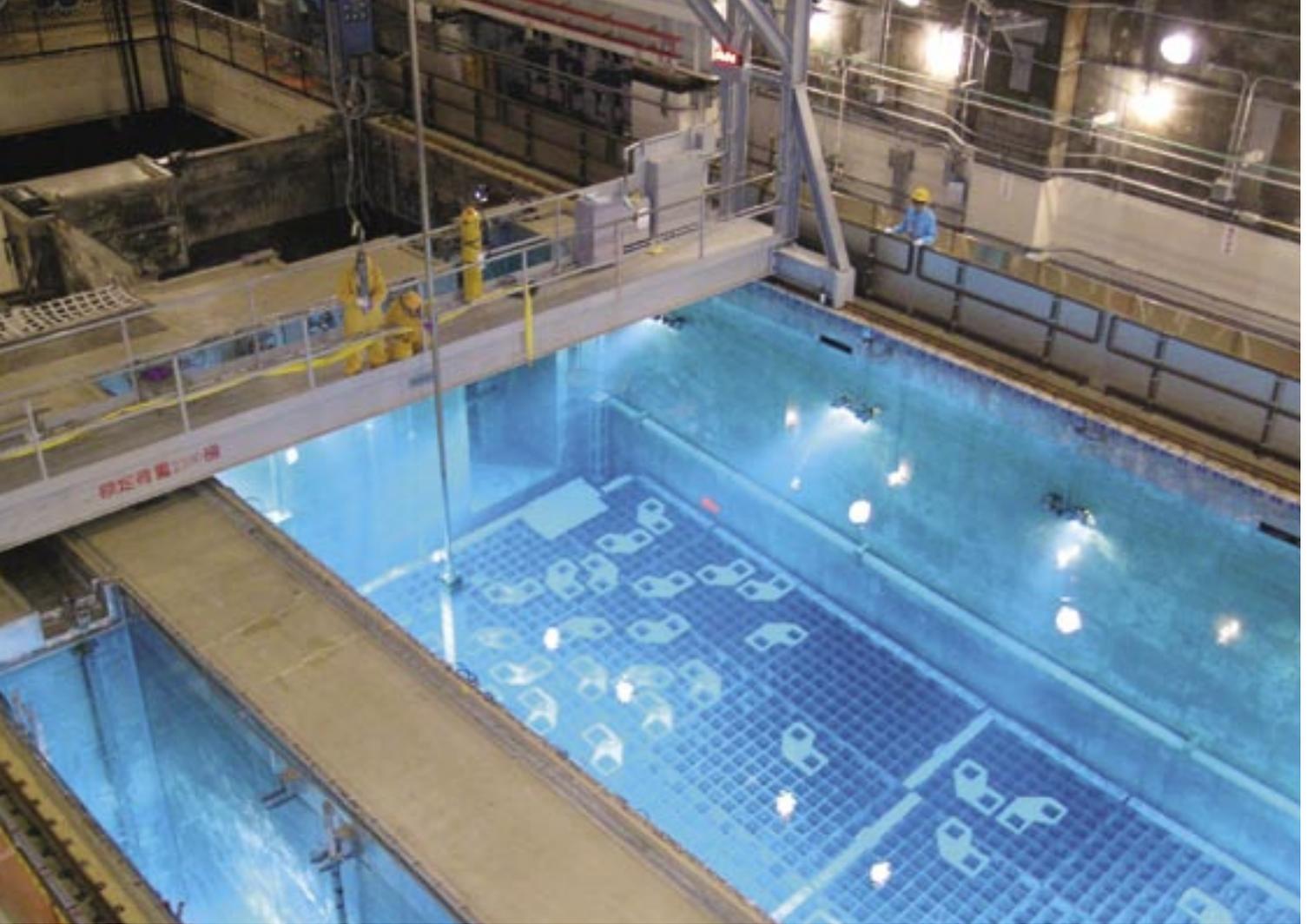
用過核燃料的價值與顧慮

核能發電會產生需要處置的含放射性物質的物料，包括低放射性核廢料、高放射性核廢料及用過核燃料。核電廠每運轉18~24個月後，就必須更換燃料，自反應器退出的燃料束稱為用過核燃料。用過核燃料的營運策略包括「直接處置」及「再循環」兩種方式。「直接處置」是將經妥善封裝的用過核燃料，長期或永遠貯存於合適的地質環境；「再循環」則是指回收用過核燃料中尚可使用的鈾與鈾，這種做法可以將高放射性核廢料的體積與重量減至1/10，符合資源回收與垃圾減量的普世價值，並大幅降低輻射的強度以及衰變所需的時間。如果人類在未來數十年內無

關於作者



李敏是清華大學工程與系統科學系主任、中華民國核能協會常務理事、美國麻省理工學院核工博士，主要研究核電廠工程、熱水流分析、核電廠安全、核電廠安全度評估、系統可靠度分析等，並長期關注能源議題。



法找到可以替代化石燃料的能源，前述再回收的核燃料將在人類能源供應上扮演非常重要的角色。

由於擔心用過核燃料再處理時，回收的鈾239有可能用於製造原子彈，造成核武擴散，美國卡特政府於1979年宣佈終止用過核燃料再處理的技術發展，改為規劃將用過核燃料直接運至深層地質處置場做最終處置。1987年美國國會通過以亞卡山做為美國用過核燃料最終處置場址，並責令美國能源部開始進行場址特性調查，該最終處置場預定於2017年開始運作。

在此項政策下，美國的電力公司會將用過核燃料較長期地暫存於電廠的核燃料儲存池。核燃料儲存池是原本就存在於電廠的設施，用來暫存剛從反應器退出的用過核燃料，待其衰變熱適當降低、可以運送時，再送到場外的設施處置。由於用過核燃料最終處置場的廠址尋覓及興建，均遭遇很大的阻力，用過核燃料最終處置設施

遲遲不能完工，有部份電廠的核燃料儲存池已經無法容納所有自反應器退出的用過核燃料，必須再找其他替代方案。做法不外於電廠內另外再興建乾式、濕式兩種儲存設施。

濕式儲存就是再興建一個用過核燃料儲存池；乾式儲存則是將用過核燃料束置於層層包覆的結構體內（如96頁插圖所示），利用自然對流將衰變熱帶走。由於乾式儲存的照管與維護較容易，而且部份包裝也可用於日後的廠外運輸作業，絕大部份的電廠都選擇乾式儲存。

美國政策的改變，直接影響了許多核子技術依賴美國之國家的政策；但是日本、法國、英國、前蘇聯等自產能源不足的國家，仍然持續發展用過核燃料再處理技術，目前的能力已經足以協助其他國家。

我國核能發電基本上是跟隨美國系統發展，現有核電廠均採用美國廠商的設計。台灣雖然不是國際原子能總署防止核武器

核三廠的燃料儲存池水深約12.5公尺，總共可以儲放2160組、共計1339.2公噸的核燃料。



核一廠用過核燃料是以乾式儲存系統層層防護（上方為示意圖），可儲存56束燃料。

擴散條約的簽約國，但當初發展核能時，透過美國與國際原子能總署簽有三邊協定：台灣的核子設施將接受國際原子能總署的監督，台灣對核子物料做任何處置，均須美國同意。因此，用過核燃料營運策略也參考美國做法，規劃在國內建造深層地質處置場，永久儲存用過核燃料。台電公司於2004年11月16日完成了「用過核燃料最終處置計畫書（2004年版）」，依該計畫書的規劃時程，將於2055年完成處置場建造。

近幾年來，為了降低對進口石油的依賴、減少二氧化碳的排放、促進能源的永續利用、防止核武擴散及推動反恐政策等考量，核能發電量居世界首位的美國在推動用過核燃料「直接處置」策略近30年後，重新考量用過核燃料「再循環」策略。美國發現，如果大規模發展與使用核能發電，亞卡山的用過核燃料最終處置場將不敷使用，勢必要尋求第二個場址。

雖說技術層面並無問題，但政治面將是一個頭痛的事情。用過核燃料再循環牽涉到核子武器擴散的問題，所以必須世界各國通力合作。2006年2月美國布希政府提出全球核能夥伴（Global Nuclear Energy Partnership, GNEP）方案，美國及其核能夥伴將會提供核燃料給其他國家，同時也提供用過核燃料再循環的服務，協助回收

用過核燃料中尚可利用的鈾與鈾。

為了避免鈾、鈾分離後造成核武擴散的顧慮，美國業已規劃發展新的技術，確保鈾與鈾在處理過程中不會分開。為了推展這項方案，美國規劃與俄羅斯、法國、英國、日本和中國等具有再循環與鈾濃縮技術的核能先進國家合作，並已獲得這些國家的支持。美、法、日、俄及中國等國已於2007年5月21日正式發表聯合聲明，將合作推展GNEP方案，預計GNEP建立的機制將成為未來國際上用過核燃料營運策略的主流。

目前國際上具備商用再處理設施的國家為法、英、俄、日四國，其中法、英、俄三國至2005年底止，總計已處理約2萬9000公噸（鈾當量）的用過核燃料，其中約74%是由法國再處理廠處理。日本於青森縣六所村興建的再處理廠（容量為每年800公噸）正進行試運轉，預定2007年8月開始商業運轉。GNEP的構想為各國現存用過核燃料的處置提供了一個新思維，也為台灣用過核燃料的處置提供了一個新的規劃方向與契機。

大自然留下了證據

用過核燃料處理後，取出可用的物質，剩下的高放射性物質即為高放射性核廢料。即使我們可以利用GNEP的概念，將

用過核燃料送往其他國家處理，我們仍須面對高放射性核廢料的處置議題。高放射性核廢料的體積與重量遠低於低放射性核廢料，處置方式為將廢棄物玻璃化，置入可以防止放射核種外釋至環境的包裝容器後，長期儲存於建築在仔細挑選之地質結構中的工程設施內。

世界陸地及海底的考古發現的實例均指出，在與外界環境長時期隔絕的狀況下，許多人工製造物都可以維持其原有形狀及功能，因此我們可以相信，層層的人造工程屏障能夠有效地阻礙放射性物質進入地質結構。1970年代，法國科學家在非洲加彭的鈾礦區發現一座18億年前的露天天然反應器遺址，緩慢的核分裂連鎖反應在這個天然反應器持續進行達數10萬年之久。而且，經歷了18億年，反應產生的放射性物質在地質環境中遷移的距離，只有10幾公尺（見2005年12月號〈誰啟動了20億年前的核反應？〉、〈天然核反應堆誕生之謎〉）。

這代表即使高放射性核廢料的封存機制禁不起時間的考驗而喪失功能，大自然條件本身也不適合放射性物質的遷移。我們應該可以相信，經適當處置的高放射性核廢料內所含的放射性物質，不太可能有機會與生物圈接觸。

再循環永遠是一個選項

〈核燃料應該再利用嗎？〉作者馮希普爾對布希政府提出的用過核燃料再循環政策有不同的看法。他的論點包括用過核燃料最佳處置方式為暫放於乾式中期儲存設施，待永久處置場完成後，就將用過核燃料「直接處置」，事實上這也是台灣目前用過核燃料的處置政策。

台電公司核電廠運轉產生的用過核燃料均存放在廠內的燃料池，預估運轉40年總共會生產3萬6726束燃料（相當於7351公噸）。核一、二廠燃料池貯存空間預計分別於2010年、2016年用罄，核

三、四廠的燃料池將足以存放運轉年限中所有的用過核燃料。為了讓核一、二廠持續運轉發電至滿40年的運轉執照效期，台電公司必須在核一、二廠的廠區內，分別興建用過核燃料乾式中期貯存設施，以便將經多年冷卻的用過核燃料移入，這種用過核燃料的乾式中期貯存設施，在國際上已有19年以上的安全使用經驗。

依據2004年版「用過核燃料最終處置計畫書」規劃的時程，自2005年起到完成處置場的建造為止，將分成下列五個階段來進行：「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），而且用過核燃料在這種設施貯存期間，仍可取出進行再循環或最終處置。只要用過核燃料尚未置入永久處置場、美國GNEP政策可以順利推動，加上外界條件允許、經濟及政治上均具有可行性，將用過核燃料進行再循環，永遠會是一個選項。

能源是人類近代文明發展的基石，沒有了能源，人類文明不可能繼續發展；尋找與利用新的能源，也是人類科技發展的目的，因此也有人將能源列為人類未來50年所面臨10大議題的第一位。

人類使用能源的歷史，可以用「摸著石頭過河」來形容。工業革命後，大量使用燃煤造成的空氣污染，曾經一度被視為理所當然；利用水庫集水進行水力發電，也曾被認為是絕佳的再生能源利用；100年前，沒有任何人質疑過大量使用化石燃料會造成氣候的變遷，而現在的認知則是大氣中二氧化碳累積導致的氣候變遷，可能會威脅到人類的生存！化石資源在可見的未來將會用罄，而人類使用再生能源或核融合的技術尚未成熟，傳統的核電廠可能是人類無法輕易捨棄的選擇。 

只要用過的核燃料還沒有置入永久處置場、GNEP政策可以順利推動，加上外界條件允許，「再循環」永遠會是一個選項。