

核燃料應該再利用嗎？

把用過核燃料回收再處理的計畫在美國蓄勢待發，但此種做法的優點遠不及它可能帶來的危險。

撰文／馮希普爾（Frank N. von Hippel） 翻譯／甘錫安

重點提要

- 用過的核燃料中含有鈾，可提煉來製成新的燃料。
- 為減少長壽命放射性廢料量，美國能源部提議再處理用過的核燃料，並以特殊的反應器「燃燒」這些鈾。
- 但是再處理過程相當昂貴。同時，用過的燃料會釋放致命的放射線，但分離的鈾相當容易攜帶。因此再處理可能招致恐怖份子竊取鈾，用以製造原子彈。
- 作者不贊成再處理核燃料，並認為應將廢料放置在儲存桶中，等到地下儲存庫完成再移入。

美國已經10多年沒有新的核能發電反應器上線，但核能發電最近有重新抬頭之勢。核電的誘因確實存在：天然氣與石油價格飛漲、社會大眾越來越排斥燃燒化石燃料所排放的溫室氣體、美國聯邦政府因為延遲發給執照所付出的補貼與賠償金已有80億美元（已有新法律簡化此流程），貸款抵押更多達185億美元。在這種態勢下，核能發電業界到底欠缺什麼，以至於無法脫離目前停滯不前的狀態呢？

它們只欠缺一樣東西，就是少了個地方來儲存用過的反應燃料。確實如此，對於整個核能發電產業而言，處置廠不足一直是個潛在威脅。美國內華達州亞卡山聯邦核廢料儲存場的預定啟用日期已經延後20年（目前預計最快於2017年啟用），而全美國核能發電廠存放用過的核燃料的冷卻池空間也逐漸飽和了。

因此，核電廠大多已經開始將年代較久的用過燃料封入大型儲存桶，存放在乾燥地面，每個儲存桶通常可容納10公噸核廢料。發電量為1000百萬瓦的反應器，

每年的用過核燃料可裝滿兩個儲存桶，一個造價約100萬美元，但業界當然不肯吃悶虧，美國核電廠目前正在跟美國聯邦政府打官司，因為如果美國能源部依照原訂計畫，於1998年啟用亞卡山儲存場，他們就不用花這些錢。結果，美國政府還必須負擔儲存桶與相關基礎建設運作的經費，每年大約要再花費三億美元。

在亟需開始將用過核燃料移出發電廠的壓力下，美國能源部重拾1970年代曾經放棄的構想：以化學方式「再處理」用過的核燃料，將各種元素分離，以便循環使用其中某些元素。大規模的再處理廠已在法國和英國運作10多年，日本耗資200億美元建造的自有廠房也於2006年開始營運。因此，這類做法並非沒有先例可循。但我接下來會討論，再處理核燃料這個方式不僅昂貴，而且危險。

來自地獄的元素

只要對核燃料循環稍有了解和具備基本常識，就能理解我反對核燃料再處理的理由。核電廠的反應器不斷進行核子連鎖反



應，分裂原子產生熱能，再以熱能產生蒸汽，推動發電機的渦輪。核能發電的燃料大多是鈾，以人工方式加以濃縮，使可產生連鎖反應的鈾235的比率達到4-5%，其餘則為鈾238。濃縮程度僅5%時，核反應燃料即使遭竊也無法用以製造核彈。

在反應器中，有些鈾238會吸收一個中子變成鈾239，鈾239也會產生連鎖反應，如果加以提煉及適當處理，原則上它也可部份「燃燒」。不過這種方式有許多缺點，例如提煉及處理的成本遠高於新燃料，而且回收再處理鈾只能縮減極小部份的廢料問題。最重要的是，分離出來的鈾萬一落入有心人士手中，可隨即用以製造核彈，所以必須多花許多心力維持安全，直到它再度使用完畢為止。

看看已經實行再處理計畫的國家的經驗，這些缺點更加明顯。在再處理技術領先全世界的法國，分離出來的鈾（與氧結合成二氧化鈾）與鈾238（同樣也是氧化物）混合，形成混合氧化物（MOX）燃料。MOX燃料用於發電之後，其中所含的鈾仍有剛生產時的70%左右。不過，加入

反應器內產生的高放射性核分裂產物後，這些鈾很難取得及製成炸彈，用過的MOX燃料再運回再處理廠無限期存放。因此，法國實際上是透過再處理，將用過燃料的問題由發電廠轉移到再處理廠。

日本的再處理遵循法國的前例，英國和俄羅斯則直接將民間核電廠分離出的鈾存放起來。到2005年底，兩國大約共有120公噸鈾，足可製造1萬5000枚原子彈。

不久之前，法國、俄羅斯和英國還藉著協助日本和德國等國家再處理用過的燃料收取費用，因為這些國家的反核人士要求政府提出處理用過核燃料的解決方案，否則就必須關閉核能電廠。這些國家的政府發現，將用過的燃料送到外國再處理雖然昂貴，卻是解決核廢料問題很方便的辦法——至少暫時是如此。

取得這類合約之後，法國和英國輕鬆地獲得了新的再處理廠所需的建造經費，俄羅斯最近也採行了類似的政策。不過，這些合約中特別指定，分離後的鈾與其他高放射性廢料日後仍必須運回原產國。因此，就算將用過的燃料送到國外，最後仍

▲位於法國諾曼第海岸的拉海格處理廠，擁有規模龐大的設施，用以再處理核能電廠使用過的核燃料，提煉出其中的鈾，再製造新燃料。美國能源部最近也提議建造類似的再處理廠。

核能復興？

經過數十年乏人問津之後，核能又有捲土重來的可能，主要原因為：

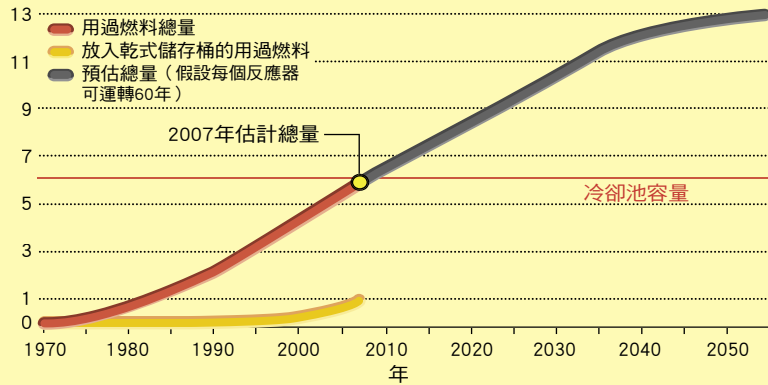
- 化石燃料價格高漲
- 核能不會排放碳
- 政府提供大筆補貼

逐漸惡化的問題

廢料太多、儲存空間太少

全美所有核能反應器的用過燃料總量

(鈾與相關反應器產物量，單位為萬公噸)



即使不建造新的反應器，未來數十年內，用過的燃料量也會大幅增加。核電廠管理者不得不將冷卻池中年代最久的用過燃料移入乾式儲存桶，放置在附近。可以想見，核能業界也在催促美國政府協助尋找解決此問題的方案。

臨界點

目前美國核能產業使用過的燃料總量（大約500公噸），大致等於發電廠中放置用過燃料的冷卻池容量。到21世紀中期，總量將增加近一倍。

然必須準備儲存地點，存放回籠的放射性廢料。幾乎所有付費使用外國再處理服務的國家不久後都發覺，最好還是將用過的燃料存放起來，省下每公噸約100萬美元的再處理成本（為乾式儲存桶的10倍）。

因此，法國、俄羅斯和英國的外國客戶幾乎完全流失，英國也計畫在未來數年內關閉再處理廠，這還必須另外花費92億美元來清理廠房所在地。2000年，法國開始考慮是否要在2010年結束再處理業務，結論是這麼做可降低核電成本。不過進行這類變革，或許也會引發與核廢料有關的激烈爭議，畢竟在反核行動相當少的法國，這是核能機構最不樂見的。

日本在政治上更依賴再處理程序，因為它的核能發電機構和美國不同，無法取得擴建廠內儲存庫的許可。俄羅斯目前只有一座再處理廠，處理容量只佔該國所有核能反應爐使用燃料的15%。俄羅斯曾經試圖提高再處理量，但由於1980年代經濟崩潰，相關計畫也隨之擱置。

冷戰期間，美國在華盛頓州及南卡羅萊納州設立了再處理廠，將鈾分離供核子武器使用。這項工作總共分離出約100公噸的鈾，其中有超過一半被認為超出美國的

需求。美國能源部預測，處理這些鈾將花費超過150億美元。原先在再處理廠工作的人員，現在的主要工作是清理再處理廠的爛攤子，總花費將高達1000億美元。

除了這些軍事行動之外，1966~1972年還有一座小型商業再處理廠在紐約北方運轉。這座再處理廠共分離了1.5公噸的鈾，後來宣告破產，轉為美國聯邦政府與州政府共同投資的清理公司，這家公司估計花費了美國納稅人50億美元。

您可能會覺得奇怪，既然再處理會造成這麼多問題，為什麼還有人要這麼做？部份原因是民用核能發電廠開始運轉的這些年來，核能業界一直擔憂鈾原料會耗盡（這點也有爭議），所以美國核能委員會（AEC）不斷宣導在國內外進行再處理，宣稱它對核能發電的未來相當重要。

但不久後鈾生產的安全風險開始從理論化為真實。1974年，印度在美國協助下取得再處理技術，並使用自己分離的鈾製造出核子武器。大約在同時，當初為美國設計核子武器的泰勒（Theodore B. Taylor）提出警告：計畫中每年將分離及回收的數千公噸鈾，會讓恐怖份子有機可乘，竊取足以製造不只一枚核彈的原料。

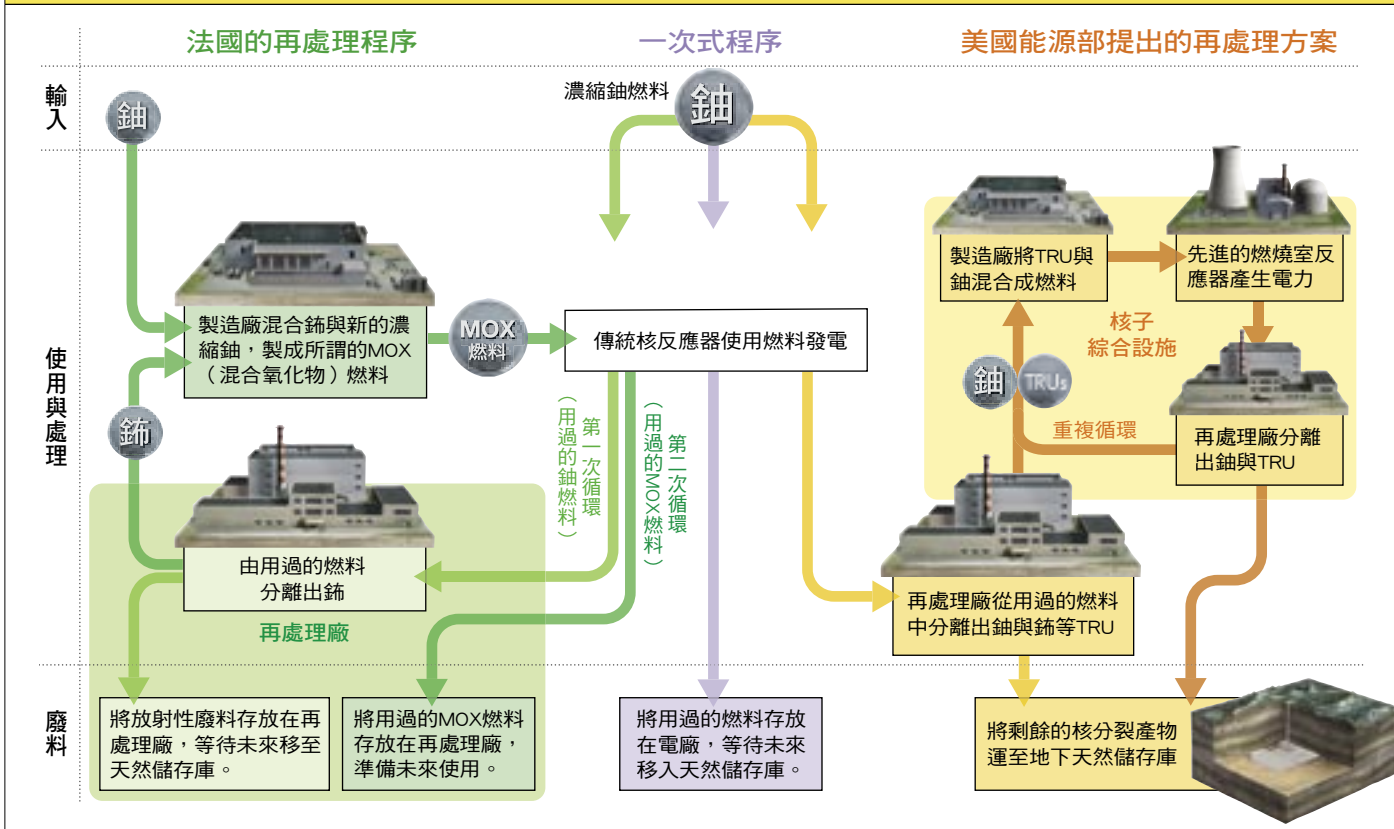
分離後的鈾放射性很低，相當容易攜帶。不過在用過的核燃料中的鈾是與一些會放射致命 γ 射線的核分裂產物混合在一起，由於放射性極強，用過的燃料在運送時必須裝入重達數十公噸的桶中，因此其中的鈾相當不容易取得，通常必須穿上厚厚的防護衣，以遙控設備操作。就算用過燃料中未分離的鈾落入壞人之手，所造成的風險也小得多。

由印度經驗體認到再處理過程可能造成核子武器擴散的危險之後，美國福特政府（以及後來的卡特政府）重新檢視了美國原子能委員會的定位，同時認為再處理工作沒有必要也不經濟。因此放棄了讓民用反應器將用過燃料再處理的計畫，同時強烈要求法國和德國取消輸出再處理技術給

燃料處理的三種選擇

在處理核反應器用過的燃料方面，核能產業有幾種選擇。第一種方式是在燃料使用一次後將廢料儲存起來，就如美國目前的做法（中圖）。第二種方式是再處理用過的燃料，分離出可再次使用的成份。法國將鈾提煉出來，再放入反應器中使用（左圖）。美國能源部提議的第三種

方式，則是重複回收鈾與其他比鈾重的元素（超鈾元素，TRU），用於新型反應器（右圖）。將用過的燃料回收再利用，乍看之下相當不錯，因為如此可減少需要無限期存放的廢料量，但作者指出，這種方式有重大缺點（請參閱本頁右下〈優點與缺點〉）。



巴基斯坦、南韓與巴西等國的合約。

後來的雷根政府對美國國內再處理工作的看法和福特與卡特時期相反，但美國核能業界已經不感興趣。雷根政府最後也認同以目前的一次式燃料供給系統而言，使用回收再處理的鈾在經濟上沒有競爭力。至少在美國，再處理工作就此終結，或者說看起來是終結了。

核廢料死灰復燃

最近，布希政府又讓核燃料再處理燃起一線生機，將再處理工作納入新一代核能反應器的興建提案。根據這項計畫，超鈾（由傳統反應器燃料中提煉出來的鈾與其

他重元素）可回收不只一次，還可在新型反應器中重複使用，透過核分裂將它分解成半衰期大多較短的較輕元素，如此可減少必須妥善存放數千年的核廢料。有些科學家套用原子彈之父歐本海默對氫彈設計的說法，認為這種新方法「技術上很棒」，但真的這麼好嗎？

這種回收用過核燃料的提議其實不算新穎。的確，1990年代中期，美國能源部曾要求美國國家科學院研究這種長壽命放射性廢料的減量方式，最後提出的研究報告《核廢料分離與變化技術》所持的態度相當負面。研究小組認為，回收第一批約6萬2000公噸的超鈾原料（原本準備存放

優點與缺點

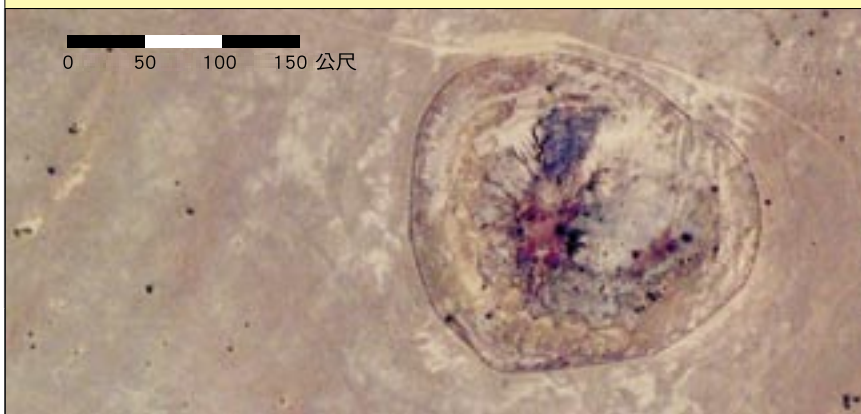
理論上，再處理用過的核燃料並重複使用於反應器中，可減少鈾的開採量，廢料的放射性延續時間也可由數千年縮短至數百年。但實際上，這種方式問題很多，因為成本相當昂貴，而且廢料的減少幅度相當小（除非建造成本極高又複雜的再循環基礎設施）。同時，用過燃料中的鈾被用於製造核子武器的風險也會提高。

重大危險

毀滅性的威脅？

再處理用過核燃料最主要的問題是製造出大量的鈾之後，敵對國家或恐怖份子可能藉此製造原子彈。因為分離的鈾放射性相當低，只要有少量遭竊，就可輕易藏匿（如上圖）及非法運出。只要幾公斤鈾，就可製造出核彈。

美國還沒有體認到這種危險時，曾將核燃料再處理技術提供給其他國家，但發生印度使用自己分離的鈾製造核子武器的事件後，這項技術已經禁止輸出。下圖為印度於1974年5月首次地下核子試爆所造成的彈坑的衛星影像。



運用效率高出許多，所以又稱為滋生反應器。當時預測滋生反應器很快就會取代傳統水冷式反應器，但鈉冷卻反應器造價高出許多，運作也比想像中困難，因此多數國家都放棄商業化。

美國能源部現在提議發展及建造的就是這種曾經失敗的反應器，但核心從滋生器改為純鈾燃燒室。美國必須建造40~75座發電容量為1000百萬瓦的反應器，分解超鈾元素的速率才趕得上全美國104座傳統反應器的產生速率。如果每座新型鈉冷卻反應器的造價比容量相同的水冷反應器高出10~20億美元，聯邦政府必須補貼400~1500億美元，而且再循環基礎設備的建造及運作還要花費1000~2000億美元。以美國的預算赤字看來，這樣的計畫真正實行的可能性似乎不高。

如果功能完整的再處理廠建造完成（美國能源部直到最近仍提議於2020年建造），但沒有建造鈉冷卻反應器，分離出來的重鈾元素就只能無限期存放，派不上用場，英國目前就面臨這種尷尬狀況。英國於1960年代開始實行再處理計畫，目前已分離出約80公噸鈾，要安全地處理這些燃料將花費數百億美元。

再處理使用過的燃料，將分離的鈾與放射性廢料無限期存放在再處理廠，絕非妥當的處置方式，因為這種做法會使分離的鈾更易招致竊賊覬覦。英國皇家學會在1998年的報告中，對於英國民間鈾儲存量逐漸增加提出警告，表示「存放的鈾可能被用於製造非法武器，這點相當令人憂心」。2007年，英國皇家學會另一份報告再度指出「目前持續堆置危險物質的做法，長期下來令人難以接受」。

就長遠看來，鈾當然不應該以容易遭竊的形式存放在再處理廠中，從常理就可推斷鈾根本不應該分離。在長期儲存地點啟用之前，用過的反應器燃料應保存在原本的發電廠中。

這種儲存方式危險嗎？我認為將一次式

在亞卡山處置場的數量）所需的花費「至少要500億美元，而且很可能超過1000億美元」，全美的國民每人平均要負擔500美元。如果要處理美國所有反應器在使用年限內使用過的燃料，這個金額可能還必須加倍。

花費為什麼這麼龐大？因為傳統反應器不能使用這種燃料。傳統反應器用水冷卻，同時降低鈾原子核分裂時釋出的中子速度，中子減速後可引發其他鈾235原子分裂，進而使核子連鎖反應持續進行。將回收再處理的燃料放入傳統反應器，會使較重的超鈾原子（如鈾242、錒和錒）逐漸累積。建議的解決方案是建造完全不同的核反應器，其中的中子減速幅度較小，可擊碎這類較難分裂的原子核。

1960和1970年代，美國等先進工業國家花了超過相當於現今幣值500億美元，將快中子反應器商業化，這種反應器的冷卻劑不是水，而是熔化的鈉；它在設計上的鈾產生量多於消耗量，因此鈾能量的

關於作者

核子物理學家馮希普爾為美國普林斯頓大學科學與全球安全計畫公眾及國際事務教授。1993年與1994年，他擔任白宮科技政策辦公室副主任，2006年起擔任國際裂變材料委員會副主席，曾於*Scientific American*撰寫或合著七篇專文。



系統產生的老舊燃料存放在乾式儲存桶內，對周遭居民增加的核子風險小到可以忽略。10公噸燃料在乾式儲存桶內放置20年所產生的10千瓦放射性熱能，只會以對流方式加熱附近的空氣。居心不良的恐怖份子可能會試圖以反戰車武器或墜毀飛機的引擎破壞儲存桶，但大多數狀況下只會讓少量放射性燃料碎片散佈在有限的區域內。相反地，如果鄰近反應器的冷卻劑被切斷，燃料將會過熱，在幾分鐘內釋出大量核分裂產物蒸汽。如果放置用過燃料的儲存池水流失，包裹在燃料棒表面的銦的溫度會在幾小時內升高到燃點。在這個角度上，乾式儲存桶顯得安全得多。

有足夠的空間存放這些燃料嗎？有的，美國核能發電廠內有許多空間可存放更多儲存桶。即使是美國運轉最久的反應器，都已申請將執照延長20年，新的反應器可能會建造在同樣的地點，因此沒有理由認為這些儲存空間即將消失。當然，最後

還是需要將用過的燃料移到其他地方，但不需要恐慌及採用再處理政策，因為再處理只會使狀況變得更加危險，同時花費的金錢也會更多。

對核廢料的恐懼與反感

美國放射性廢料的長期命運，決定於亞卡山目前的僵局如何解決。各方對這個地點的看法相當分歧。法規方面的要求相當嚴苛：美國能源部必須證明這座山可安全容納核廢料、防止場外輻射劑量明顯提高，而且時間必須長達100萬年之久。

證明許久之後的安全程度並不容易，但就算是儲存庫設計不良，如果跟核子武器原料更易取得相比，所造成的風險實在微不足道。從這個觀點看來，很難理解局部放射性污染10萬年或100萬年的危險在美國激起的政治反彈，為什麼遠大過核子武器持續造成的立即威脅。

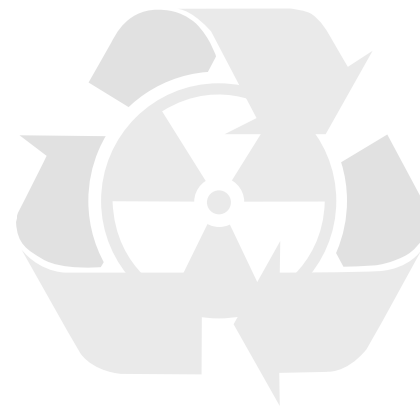
一部份問題是內華達州認為1987年時雷根政府與國會明顯不公，中止對其他候選地點的客觀評估工作，直接指定亞卡山為未來核廢料儲存廠址。為了克服這個看法，或許有必要重新研議選擇其他地點，這項行動應該不困難。的確，1987年的核廢料政策法案要求能源部長於2010年向美國國會報告第二個儲存場所的必要程度。不過由於美國能源部處理核廢料的過往記錄一向不佳，我們也該考慮針對此目標成立更專業但較不政治化的機構。

在此同時，用過的核燃料可放入乾式儲存桶，存放在核電廠內。即使放置在天然儲存庫中，至少100年內仍可使用，因此就算將來科技或經濟狀況大幅改觀，使再處理的優點超越成本與風險，我們依然可加以回收利用，但目前實在不必急於採用昂貴又可能造成災難的措施，半信半疑地寄望它減輕核能發電業界造成的長期環境負擔。

甘錫安 專事科技類翻譯

亞卡山近況

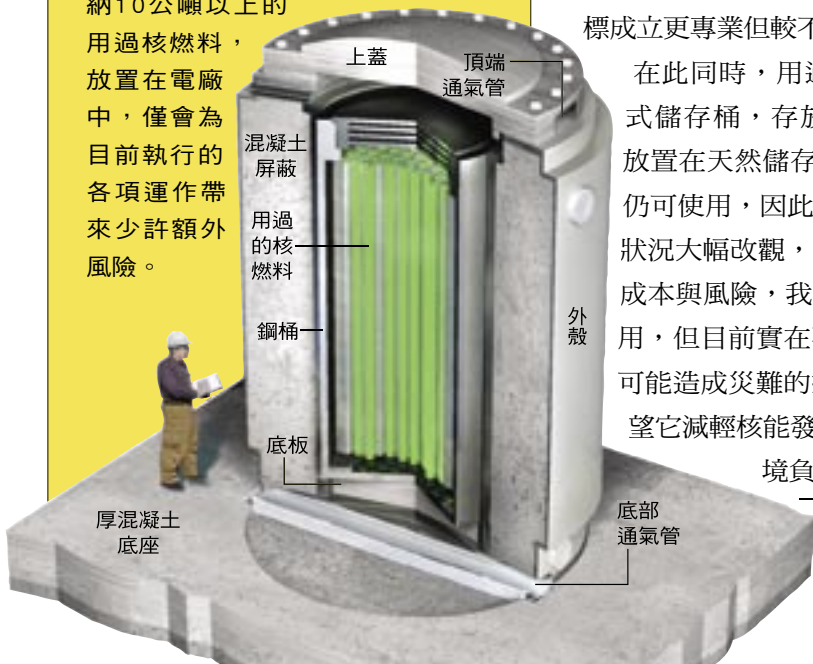
美國準備在內華達州亞卡山設立核子儲存庫，進展仍相當緩慢。其建造計畫最早也要2011年才能獲得許可，工程則至少要2016年才能完工。因此，美國核能業界至少要等到2017年才可開始存放用過的核燃料，如果工程因科學爭議、法律質疑或資金短缺而延宕，啟用時間還會再推遲。



對應方案

投乾式儲存桶一票

在存放用過核燃料的地下天然儲存庫啟用之前，作者認為，美國核能業界有個相當好的替代方案，就是用乾式儲存桶儲存目前放置在冷卻池中的用過核燃料。這種儲存桶重150公噸，以鋼筋混凝土製成，每個可容納10公噸以上的用過核燃料，放置在電廠中，僅會為目前執行的各項運作帶來少許額外風險。



延伸閱讀

Nuclear Wastes: Technologies for Separation and Transmutation. National Academies Press, 1996.

The Future of Nuclear Power. An Interdisciplinary MIT Study, 2003. 參考網址：<http://web.mit.edu/nuclearpower>

Managing Spent Fuel in the United States: The Illogic of Reprocessing. Frank von Hippel in a research report of the International Panel on Fissile Materials, January 2007. 參考網址：www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/ipfmresearchreport03.pdf