

銷毀鈾 (The Disposition of Plutonium)

蔡春鴻

國立清華大學工程與系統科學系

E-mail: chtsai@ess.nthu.edu.tw

最近媒體轉載外電報導稱美俄的限制核武談判獲得突破性的進展，雙方已同意要逐步銷毀已有之核子武器；外電報導中尚提到『鈾』的銷毀計畫。到底銷毀核武器和銷毀鈾有什麼關係呢？

核子彈大家比較熟知的有第二次世界大戰美國投在廣島長崎的原子彈和韓戰時差點也用到的氫彈。原子彈是利用核分裂反應產生的能量，氫彈則是利用氘氚原子(氫的同位素)融合放出的能量。而原子彈所使用的可分裂物質材料有兩種：一種是鈾 235，一種是鈾 239(英文 plutonium，對岸使用的右半邊用“不”取代“布”)。也就是說鈾 239 可以用來製造原子彈。

鈾的產生

鈾的原子序 94，並不是自然穩定存在的元素，它的產生必須經過鈾元素一連串的核反應和衰變的所謂“反應鏈”而產生。鈾有 8 種同位素(原子量從 236 到 244，其中缺 237)，但其中只有鈾 239 和鈾 241 可經由吸收熱中子產生核分裂，而鈾 239 在所有同位素中佔的比例最高。鈾 239 的產生主要由鈾 238 吸收中子後轉變為鈾 239，再經兩次衰變(放出貝他射線)後成為鈾 239。鈾 239 是不穩定的元素，會釋放出阿爾伐粒子(相當於氦原子核)而衰變成鈾 235，但是半衰期長達 2 萬 4 千年，其釋放出的阿爾伐粒子能量高達 5MeV，所以我們說鈾 239 是“有毒”的，必須很小心處理。

鈾產生的來源主要是在核子反應爐裏面使用鈾燃料，其中鈾 235 吸收中子後產生分裂來維持連鎖反應，而鈾 238 吸收中子後就產生鈾。但是鈾仍和其他分裂產物或衰變元素一齊混合在用過的核燃料棒裏面，要取出其中的鈾，則必須經過一串化學分離的過程，通常稱為再處理(reprocess，對岸稱為“后處理”)。一般核電廠每取出 1 噸用過核燃料可分離出約 10 公斤的鈾，一座 1000MW 的 PWR 電廠每年約產生 25 噸用過核燃料，也就產生約 250 公斤的鈾(其中約 140 公斤是鈾 239)。俄國建有專用來生產鈾的反應爐或核電廠(例如發生嚴重事故的車諾比)，其產量則更高。

鈾的再使用

這些鈾雖然是有毒物質，但是由於它和鈾 235 一樣是可分裂物質，因此也可以用來作核電廠的核燃料使用，這種燃料是混合鈾和天然鈾作成氧化丸子，所以叫做混合氧化燃料(MOX fuel)，這種程序又叫做鈾再循環(plutonium recycle)。所以說鈾不是“廢物”，而是人造的能源，若它都能經由用過燃料再處理之後再循環使用的話，可以減少鈾的消耗量約 15%，所以將鈾用來製造 MOX 燃料可以說是“

銷毀鈾”的一種方法，但是也算是資源回收的有效利用吧！

但是前面我們提到，鈾 239 也是製造原子彈的材料，萬一經再處理的鈾被恐怖份子偷走了，是不是就可以用來作原子彈了呢？因此，美國從卡特總統開始，一直禁止國內發展再處理技術，也不希望其他國家發展。事實上，可以用來製造原子彈的鈾(或稱“核武器等級鈾”)要求鈾 240(吸收中子但不產生分裂)必須要少於 6%，而核電廠用過燃料中的鈾經再處理後含有 24%的鈾 240，因此不能直接用來製造原子彈，必須再經過同位素分離的技術，將鈾 239 的比例再濃縮。無論如何，世界上公開的知道具有同位素分離和鈾再循環技術的國家有美、俄、法、英、日、中國大陸等，可是核子俱樂部似不只這幾個國家？

有多少鈾要銷毀？

即使是美國呼籲其他國家向他們看齊，不要發展再處理技術，法國為了避免用過燃料最終處置的困難，仍堅持要發展再處理。英國早期積極發展再處理，近期為了經濟因素，已打算放棄。日本有小型的再處理廠，但是大多數用過燃料仍委託英法作再處理。美俄則是從二次世界大戰到冷戰時期累積了很多核武器等級的鈾。

根據美國去年公布的資料，他已有 85 噸武器級鈾(可是只稱 excess 量為 38.2 噸)，14.5 噸非武器級鈾(號稱 excess 量也是 14.5 公噸)；俄國的量多少不清楚，但他說既然美國號稱 excess 總量約 50 噸，他也號稱願意銷毀“excess”50 噸。本文開頭提到最近美俄有突破性的進展，可惜國內媒體報導不夠詳細，筆者猜測或許可能美國號稱的 excess 不再打折扣，而俄國也不再以“你說多少我也多少”的態度(因俄國鐵定總量多於美國)，若然，則其發展應是令人欣慰的。

現實的問題

美俄核武大國對銷毀鈾的意願令人欣慰，但在執行上有那些現實的問題呢？

若採取上述將鈾與鈾混合的 MOX 燃料放入商用核能電廠中，把鈾“燒掉”的方法，首先面臨的問題是：MOX 燃料和傳統使用鈾燃料(通稱 LEU 燃料)何者便宜？根據美國能源部委託的一項研究結果，影響 MOX 和 LEU 燃料相對成本最重要的因素是天然鈾的價格，若以目前天然鈾價格每公斤 30 美元計算，MOX 成本為 LEU 的六倍；若天然鈾價格上升，則 MOX 成本下降，而 LEU 成本上升，直到天然鈾價格達到每公斤 580 美元時，MOX 和 LEU 成本拉平(break-even)。什麼因素會讓天然鈾的價格上升呢？主要是鈾的使用量和鈾礦蘊藏量間的消長，以目前核能發電的發展減緩的趨勢來看，應不致於有讓鈾價格大幅上升的因素。另外，鈾的來源除了礦場外，尚可由海水中提煉，以目前的技術來估算，海水提鈾的成本不會超過每公斤 260 美元。換句話說，即使鈾的使用量將來大增，其價格也不可能超過源源不絕的海水提煉成本。因此，可以說 MOX 燃料永遠不可能比 LEU 燃料便宜，那麼有什麼誘因可以讓美國的民間電力公司使用 MOX 燃料呢？既然是價格的因素，美國政府或許可以用價格補貼的方式以經濟手段解決。但是

俄國境內則沒有太多核能電廠可使用 MOX 燃料，據估計即使 G-7 同意補貼價格，俄國每年也只能燒掉 0.75 公噸的鈾。法國的核電廠比例最高，他堅持採用再處理用過燃料，但是由於電力公司是國營的，他也最有把握把庫存的鈾和將來產生的鈾在自己國內的核電廠燒掉。

總而言之，從有銷毀鈾的意願到執行上所面臨的現實的問題之間，尚有一段距離。難道 MOX 燃料是銷毀唯一的途徑嗎？美國另外還考慮將鈾稀釋連同高強度放射性廢料進行最終處置，這個方法尚在評估中。另外可使用將長半衰期核種經由高能離子撞擊誘發核反應轉變成短半衰期核種或甚至穩定核種的技術(稱為 transmutation)來銷毀鈾，但是避開成本因素不談，要能大量進行 transmutation 的技術仍尚有待研究發展。