

核廢棄物

蘇賢錫

國立臺灣師範大學物理系

一、將來的資源

一般認為 19 世紀是石炭的時代，而 20 世紀是石油時代。但石油也是有限的天然資源。譬如說，羅馬尼亞一向以石油輸出國而聞名，可是最近幾乎沒有產量。中國大陸的撫順則以煤炭的露天開採而著名，但 1989 年的產量銳減，最近積極探勘新產地。據說美國的石油還可以維持 200~300 年，但是無論如何，天然資源當然是愈用愈減少，遲早將消滅，只是時間的問題而已。

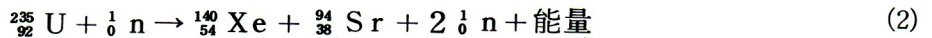
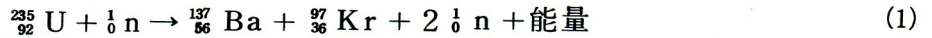
我們即將邁入 21 世紀。我們應以何物當做 21 世紀的能源呢？有人認為太陽能的利用最有希望。不錯，陽光確實是取之不盡，而且是免費的天然資源。然而，陽光是能量密度很低的能源。為了有效利用它，必須讓陽光照射在循環中的液體（通常這液體是水），而要轉變成為熱能時也需要寬廣的嵌板。原料雖然是免費，其設備投資卻是龐大。有人或許主張，既然如此，索性把太陽能直接轉變成為電能好了。但在現在的階段，像袖珍電子計算機的小電力是可能辦到，可是大電力就沒有這麼簡單。

車諾比與三哩島的事故，使大家對核能發電產生恐懼感。然而，大家的共識是，要立即供應幾百萬人份的能量，惟有依靠核能發電始可。目前的情況是，不管願意不願意，將來不得不依賴核能發電，而問題是輻射能的危險性。於是且來探討核能發電所產生的放射性廢棄物（即核廢棄物）的毒性。

首先簡單介紹核燃料的製造過程。

二、核燃料

核燃料要使用鈾 235。鈾 235 遭到中子的撞擊就分裂成為比原來的原子核小的兩個原子核，同時放出兩個或三個中子。這些中子又撞擊其他的鈾 235 而引起核分裂的連鎖反應。這時產生很多能量。其反應例如下：



原子彈與核能發電的原理都是一樣，前者是一下子進行連鎖反應來放出大量能量，而後者則將連鎖反應控制起來慢慢放出能量。因此，核能發電要利用控制棒（通常是碳棒）來控制中子，以便調節核分裂反應的速率。

存在於天然界的鈾，大部分是鈾 238，而當核燃料的是鈾 235。

核燃料的生產過程如下。首先要把鈾礦粉碎，以化學方法來處理而生成氧化鈾（ U_3O_8 ）。氧化鈾通常稱為 Yellow Cake，其純度大約 70 ~ 80 %。其次，把氧化鈾變成氟化鈾（ UF_6 ）。這階段的鈾 235，其濃度是 0.7 % 左右，要用擴散分離法來把它濃縮到 4 %，再把它變成二氧化鈾（ UO_2 ）或一碳化鈾（ UC ）。在這階段的二氧化鈾是粉末狀，故要把它做成小球狀，封入金屬圓筒內，作成燃料棒（fuel rod），這就是核燃料的主體。

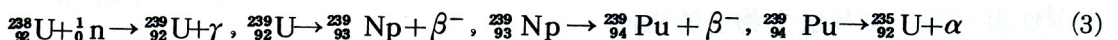
三、伴隨核能發電的毒性

對人類的危險性，在核能發電的任何階段都存在，幾乎都是由輻射能所導致的。

採礦，特別是粉碎時，鈾礦的灰塵浮游在空氣中，被人類吸進後沉降在肺部。鈾 235 與鈾 238 都是會自然蛻變的。在蛻變過程中，將放出 γ 射線或 β 射線，故對人體有害。

(1) 核燃料的使用

核燃料中含有大量的鈾 238。雖然鈾 238 不會發生核分裂的連鎖反應，但是一旦遭到中子的撞擊，原子核還是裂成兩塊，放出各種放射線（ α ， β 與 γ 射線），如下列反應式所示：



核能發電廠的原子爐都是預先設計好，周圍用厚厚的水泥牆圍起來，以免輻射能外洩。然而，如果因為故障而冷卻水的循環發生問題，爐心的溫度就上升，燃料棒也裂開。而在最糟糕的情況之下，爐心的一部分將溶解，輻射能隨之外洩，十分危險。

由上述的反應式可知，鈾 235 或鈾 238 與中子反應就產生核分裂生成物。核能發電時，核燃料被封入圓筒中，所以核分裂生成物不至於跑出去外面，但用完的燃料愈來愈多，必須想辦法處理它。

(2) 核廢棄物

核廢棄物，亦即用完的核燃料，其輻射能頗強，極其危險。尚未使用的核燃料，其輻射能是 3 居里 / 噸，但核廢棄物（又稱核廢料）的輻射能高達數十億居里 / 噸。大部分輻射能是因核分裂生成物的衰變而產生的。事實上，用完的核燃料棒含有下列核分裂生成物。

Se、Br、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Mo、Tc、Ru、Rh、Pd、Ag、Cd、
In、Sn、Sb、Te、I、Cs、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、
Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Th、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、

因此，核廢棄物的處理，任何國家都傷透了腦筋。

於是，燃料棒要在現場冷卻 150 天到 1 年。這是為了使壽命較短的核自然衰變的。這些核包括 ^{133}Xe 、 ^{131}I 、 ^{239}Np 、 ^{237}U 、 ^{233}Pa 等。

其次，要把燃料棒儲存在核能發電廠內的水槽中，為時 10 年左右。

核廢棄物中包含有用的鈾 235 與因鈾 239 的核分裂所產生的鈾，這些物質當然要以化學方法來處理後，將其予以回收。其餘的核廢棄物要使其固態化，置於永久處理場，可是問題是要置於何處？美國是決定置於內華達州，但內華達州的住民絕對反對。一般而言，核廢棄物的永久性儲藏所是廢坑、海底、深井底等處，可是往往不容易找到理想的場所而令人頭疼不已。縱使除去鈾與鈾的同位素，要輻射能達到足夠低的程度，需要 1000 年左右的時間。含有鈾時需時更長，其半衰期高達 25,000 年。由此可知，核廢棄物的輻射能可以流傳到子子孫孫。

(3) 熱污染

熱污染與人類沒有太多關係，但它對生態系的影響很大，所以值得提一提。

核能發電就是要利用鈾 235 被中子撞擊〔見式(1)，(2)〕所產生的熱量。這時產生的熱量相當龐大，必須用水來冷卻原子爐。美國核能發電廠所使用的冷卻水，每年大約 1 兆 24 億加侖（1 加侖等於 3.8 公升），相當於美國整個工業界所使用的水量之一半。被加熱的冷卻水直接排放到附近的河川。這溫廢水就是問題的根源。水溫 12.8℃ 是鱒與鮭的生存界限。水溫一上升，能溶於水的氧量就減少，需氧微生物也減少。相反地，厭氧微生物隨之增加。植物浮游生物的生存與增殖各有其適當溫度，水溫一上升，能生存的植物浮游生物之種類就減少。水溫達 34.5℃ 以上時，藍藻類就增殖。如果水溫高達 42℃，則能在水中生存的微生物，為數不多。因此，來自核能發電廠的溫廢水，如果直接排放到河川，則環境發生變化，而生態系將受到莫大影響。

（下接第 79 頁）

(上承第 39 頁)

參考資料

1. Glasstone, Samuel, "Sourcebook on Atomic Energy" 2nd ed. (1958)
2. Cohen, Bernard L, "Environmental Hazards in Radioactive Waste Disposal" Physics Today 29 , (January 1976)