

# 放射性廢料的產生與處理

楊 家 琪

## 一 前 言

自公元 1942 年美國費米 (Fermi) 教授等在芝加哥大學操場上引發原子能以來，人類即進入一新的紀元——原子能世紀。隨着原子能使用不斷的推廣與發展，科學家又面臨到另一項煩惱，即用以產生原子能的放射性物質其用過後廢料的處理。因不論中、外、古、今那一種工業製造一種產品，必有其他物質伴同產生。此伴同產生的物質，如另有其他的用途，則成爲副產品，如一無所用，即爲廢料 (Waste)。一般的廢料雖然無用，但對人類亦不會有害，有些如不考慮經濟因素時，多少仍可加以利用，可是放射性廢料則不然，因雖成廢料，但仍不斷進行衰變 (Decay)，放出各種射線，而此種射線均含有極大能量，能破壞人體的組織，危害生命。此外，許多放射性廢料其放射壽命或半生期 (Half-life) 極長以  $\text{Sr}^{90}$  而言，半生期爲 28 年，即 28 年後才變去原來量的一半，其對人體的影響並非限於個人本身，危害程度可能及於後代子孫。以目前的情況而論，這些廢料的性質很少能予以改變，亦無法將其毀滅；但是，另一方面，由於世界各國已群起研究原子能，廢料的產量正急劇增加，根據國際原子能委員會的估計，在不久的將來，全世界放射廢料性的產量即將達到每年 60 噸的數字，而到原子能成爲世界能量的主要來源時，每年廢料產量更將高達 1000 噸<sup>1</sup>。此一數量實屬驚人，且尚係保守的估計，因此目前研究放射性廢料處理的問題已屬刻不容緩，我國自清華原子爐運轉以來亦已步入原子能時代，故對放射性廢料處理的問題，實應早日予以正視。

## 二 放射性廢料的來源

1. 鈾礦的開採——鈾礦開採時，有大量粉末產生，空氣亦受到感染而帶有放射性，均成爲放射性廢料。鈾礦中主要放射性成分爲  $\text{U}^{238}$  及  $\text{U}^{235}$ ，此外尚有鈾放射衰退系 (Radioactive decay series) 中的 26 種同位素，其中危害最大者爲  $\text{Ra}^{226}$ ， $\text{Rn}^{222}$ ，及鈾本身，過去德國及捷克各鈾礦礦工死亡率在 50% 以上，死因多由吸進氣氣而致染上肺癌。礦坑中氣氣的濃度在過去猶未知道其傷害性時平均均爲  $2.9 \times 10^{-9}$  居里/每呎空氣，且有高至  $2.5 \times 10^{-8}$  居里/每呎空氣者。1955 年國際放射性防護委員會才訂定礦坑中氣氣最大含量不得過  $10^{-10}$  居里/每呎空氣<sup>(2)</sup>。表 1 爲天然鈾礦中中重要幾種成分的放射性強度。

表 1 (3)

同 位 素	半 生 期	幅 射 線	未限制區域允許濃度 微居里/每毫溶液
U		$\alpha$	$7 \times 10^{-6}$
$\text{Th}^{234}$	24.5天	$\beta$	$3 \times 10^{-1}$
$\text{Th}^{230}$	$8.0 \times 10^4$ 年	$\alpha$	未定
$\text{Ra}^{226}$	$1.6 \times 10^3$ 年	$\alpha$	$4 \times 10^{-9}$
$\text{Rn}^{222}$	3.825天	$\alpha$	$2 \times 10^{-7}$
$\text{Po}^{210}$	138.4天	$\alpha$	$3 \times 10^{-6}$

2. 鈾礦的研碎 (Milling) 及分離——鈾礦經開採後即送往磨碎分離以取得其中純鈾，分離的方法甚多常用者有硫酸瀝濾 (Leaching) 及碳酸鈉與碳酸氫鈉混合物瀝濾二種。處理過程中包含離子交換 (Ion-exchange) 成萃取 (Extraction)，水洗，沉澱，過濾，乾燥等步驟。在這些過程中時時都有各種放射

性廢料產生。一般而言，如用硫酸法，每噸礦石產生4噸廢料。廢料中鏷及鈾的含量均應甚低，但亦有鏷的含量就每噸礦石而言達0.6毫克之多者，鈾在廢液中含量更多至每呎0.5—50毫克<sup>(4)</sup>。此種廢料均不能直接放掉，必需先加以處理。

3. 鈾的精製——由上述處理所得產物含鈾約70%，但用於作原子爐燃料，還需再加處理。先用硝酸溶解，再以三丁基磷酸(Tributyl-phosphate)萃取，此時每處理1噸鈾約有1000加侖的液體廢料產生，其主要放射性物質為V, Ra, Pa<sup>234</sup>及Th<sup>234</sup>。萃得的硝酸鈾溶液受熱分解為三氧化鈾，為氫還原再和氟化氫作用得UF<sub>4</sub>，最後為鎂還原為金屬鈾。操作中又有氣體廢料產生。

4. 燃料的裝配(Fuel fabrication)——經過第三步處理後的鈾或鈾的氧化物再於外層另加其他金屬以防止在原子爐中受侵蝕然後置於燃料單元(Fuel element)中，始成為原子爐燃料，此時所產生的廢料有固體亦有液體，固體廢料為各種包裹物、石棉手套，紙片及其他感染物，多為鈾所感染，液體廢料則為洗刷金屬及其他固體感染物而產生。

5. 原子爐的運轉——當鈾燃料置於原子爐中使用時，除有能量、熱量的產生用於動力，中子的產生用於各項研究外，亦有各種廢料產生。鈾元素分裂所產生的同位素多達250種，其含量由10<sup>-7</sup>%至7%不等，半生期由多少分之一秒至多少萬年，衰退時多放出β粒子而成為原子序增一的元素，平均而言，每一放射性分裂產物約需經過三次的衰變始成為穩定的元素，此亦所以分裂產物中有如此多種的同位素。原子爐所產生廢料的種類與數量因原子爐而不同。茲以二種原子爐為例：(a)沸水式原子爐(Boiling-water reactor)，冷卻水中主要放射性產物如表2。(b)研究用原子爐(Research reactor)冷卻水清淨法採用離子交換

表2 沸水式原子爐冷卻水中放射性產物<sup>(6)</sup>

同位素	半生期	濃度(每毫升每分鐘讀數)
Na <sup>24</sup>	15小時	3×10 <sup>5</sup>
Mn <sup>56</sup>	2.6小時	8×10 <sup>4</sup>
Co <sup>60</sup>	71天	8×10 <sup>3</sup>

方式，其主要放射性產物有Na<sup>24</sup>，Co<sup>58</sup>，Co<sup>60</sup>，及N<sup>16</sup>，N<sup>17</sup>，O<sup>19</sup>，A<sup>41</sup>等<sup>(7)</sup>。概括而言，正常因原子爐而產生廢料有下列幾種：(a)需要置換的冷卻劑，(b)用作離子交換用的樹脂(Resin)，(c)各種洗滌水，(d)部份原子爐置換的物質，(e)受感染的日常用品；(f)原子爐本身。這些廢料、固、液、氣態都可能有，強度亦各不等，最後一項廢料要等原子爐燃料失效才會有。原子爐的壽命長短不一，決定的因素亦多，通常大的動力用原子爐壽命約在20年左右。

6. 燃料的再處理(Fuel reprocessing)——所謂燃料再處理亦即原子爐中的燃料已失效，設法回收其中的鈾及鏷。這些用過的燃料，雖然多為分裂產物，但仍含有大量猶未分裂的鈾及鏷，這些鈾及鏷能否回收對於原子能成本的降低，有莫大的關係，其處理方法甚多，視燃料種類而不同，一般有水溶液化學處理法(Aqueous chemical processing)，揮發法及火熱冶鍊法(Pyrometallurgical processing)。後法中包括無機物的萃取，離子交換，吸收沉澱及等步驟。但不論使用何種方法，必有大量液體及氣體廢料產生，其放射強度有高達1000居里/呎者，廢料的組成除和所用方法有關外和原來燃料成分的關係更為密切。前節曾說明原子爐用過後的燃料中分裂產物甚多，但這些分裂物的半生期大多甚短，如放置若干時間後，其同位素的數目即減少許多，可省却很多處理的困難。

表 3 強度廢料中同位素數目與時間的關係<sup>(8)</sup>

衰 變 時 間 (年)	同 位 素 數 目	衰 變 時 間 (年)	同 位 素 數 目
0.5	16	10	7
1	13	50	5
2	12	500	4
5	8	100	2

表 3 即表明了放射性同位素種類與時間的關係，故燃料的再處理最好在用過燃料放置一段時間後，茲以水溶液處理法中的 Purex 法為例。Purex 法以硝酸為溶劑，俟燃料單元的外層除去後，將燃料溶解，在酸度控制下以三丁基磷酸萃取鈾及鈾，其他則作為廢料，此時液體廢料的量達每噸鈾 1225 加侖之多，但蒸發後容積可減少至每噸鈾僅 41 加侖<sup>(9)</sup>。為 4 表用 Purex 法廢料的組成：

表 4 鈾燃料以 Purex 法再處理後廢料的組成<sup>(10)</sup>

成 分	原 來 廢 料	蒸 發 後 廢 料	蒸 發 並 中 和 後 廢 料
Na <sup>+</sup>	0.02 M	0.5 M	5.1 M
Al <sup>3+</sup>	0.004	0.1	0.08
Fe <sup>3+</sup>	0.01	0.3	0.2
Cr <sup>3+</sup>	0.0004	0.01	0.008
Ni <sup>2+</sup>	0.0002	0.005	0.004
H <sup>+</sup>	2.36	5.6	—
OH <sup>-</sup>	—	—	0.1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2.40	5.8	5.7
PO <sub>4</sub> <sup>≡</sup>	0.0004	0.10	0.008
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.025	0.75	0.56
Si	0.0007—0.007	0.02—0.2	0.015—0.15
U及Pu	%>99.9	< 0.1	< 0.1
分裂物	%< 0.1	>99.9	<99.9
容積、加侖/噸鈾	1,225	41	55

由於溶解、蒸發及其他操作產生大量的氣體，內中除含有氫、氫、碘等主要分裂物外，其他主成分氣體或為 NH<sub>3</sub>，或為 H<sub>2</sub>，亦有為 NO，NO<sub>2</sub> 及 NOCl 等者，視所採用方法而不同，無氣體放射強度太高需以空氣沖淡，故最後離開氣體中空氣含量仍最多，加上通風需要大量空氣，因此所用空氣總量極為可觀，亦即有大量氣體廢料產生。

7. 同位素的利用——放射性同位素的使用在原子能利用方面佔有相當可觀的比例。由 1946 年 8 月到 1959 年 8 月，美國橡樹嶺國家實驗室曾送出 78,598 批同位素貨品到 5200 個單位供實驗或使用<sup>(11)</sup>，其使用範圍遍及醫學、科學、工業、農業以至於其他各方面。放射性同位素的使用產生二大類廢料，一類為已用過放射性同位素的本身，則由於本來就已密封，處理較為簡單。另一類則為因同位素而感染的空氣或其他物品而產生的廢料，其種類多，容量亦大，處理就比較麻煩了。

### 三 放射性廢料的種類

1. 放射性強度的單位——未討論放射性廢料的種類前，先說明二種放射性強度有關的單位：

(a) 倫琴 (Roentgen), 為常用的放射強度單位。其定義為使 0.001293 克的空氣各帶 1 靜電單位的正負離子所需的放射能量稱為 1 倫琴 (r), 亦即相當於 1 克空氣吸收 83.3 爾格的能量。倫琴數用以表示放射線的強度, 但人體受射線的影響除和強度有關外並和遭受射線的時間成比例。放射劑量是放射強度和曝露時間的乘積, 每秒 0.4r, 10 分鐘放射劑量為 240 倫琴, 一般而言, 在一分鐘內接受 400 倫琴的放射劑量死亡的可能性在 50% 以上, 現國際原子能委員會規定職業性工作人員每年最大放射線容許量為 5 倫琴。

(b) 居里 (Curie), 乃表示放射性物質的濃度。1 居里為任一放射性同位素每秒蛻變  $3.7 \times 10^{10}$  次數所應存在的量。凡放射性物質半生期長者, 其相當量多, 半生期短者, 其相當量亦少。以鐳而言, 1 居里恰相當於 1 克鐳, 1 居里的千分之一為毫居里 (mc), 百萬分之一為微居里 ( $\mu\text{c}$ )。

對相同的  $\alpha$ -線及  $\gamma$ -線, 倫琴與居里的關係, 可以下列說明以 0.1 微居里量的鐳而言, 如存在人體內, 相當於每年 5 倫琴的放射劑量, 但若置於體外 1 公尺處, 所相當放射劑量, 1 年中猶不及千分之一倫琴。

2. 放射性廢料的種類——放射性廢料因其性質、強度以及狀態的不同而有各種區分的方式, 一般區分的方式有二種: 一種依其形態分為固、液、氣三種。另外依其所含放射性強度又可分為強度 (High-level) 或熱 (Hot) 及輕度 (Low-level) 或冷 (Cold) 放射性廢料二種。輕度廢料指放射物濃度為每呎 1 微居里或每小時強度為 50 毫倫琴以內者, 強度廢料的濃度可能千百倍於前者。

#### 四 氣體放射性廢料的處理

1. 輕度——輕度氣體廢料多半來自實驗室, 處理方法最簡單者莫過於以高烟囱排至大氣中由空氣稀釋之。一般用於排洩強度放射性氣體的烟囱應高 60 至 90 公尺。但輕度廢料放射性很弱, 並無必要以高烟囱排洩。如果實驗室附近並無如高度的烟囱, 則只要在廢氣出口處加一過濾器 (Filter) 即可以短烟囱代替, 過濾器的種類及尺寸極多, 多半為石棉及纖維構成, 表 5 為美國原子能委員會 (AEC) 所規定的數量尺寸

表 5 AEC 過濾器規格及特性<sup>(1,2)</sup>

尺 寸	容 量 立方呎/分, 壓力下降=2.5 呎水柱
20×20×15 <sup>呎</sup>	1.4
51×51×22	12.5
61×61×22	14
61×61×30	22

“濾紙”由特別處理的化學紙漿及 Bolivian 的藍石棉 (—15%) 製成  
 每層濾紙厚度: 0.0—0.115 呎  
 濾紙重量 (每令): 59 公斤  
 阻力: 空氣流速為 8.5 公尺/分時為 11 呎水柱百分透過率空氣流速為 8.5 公尺/分時,  
 0.3  $\mu$  ( $10^{-4}$  呎) 粒子的透過率為 0.1 %

及其排氣量。近年來為防火及高溫使用過濾器中纖維改用玻璃纖維代替。另用鋁片作分隔板, 可以在 350°C 以上使用。過濾器的壽命需視使用的情況及氣體廢料的強度而定, 一般約為 18 個月。

輕度氣體廢料除來自實驗室外, 尚有來自鈾礦的開採, 研碎, 精煉以及再製。如分離工廠採用氣體方式分離, 也免不了有氣體廢料產生。這些氣體放射性廢料的顆粒較大約由小於 0.2  $\mu$  至約 25  $\mu$ , 濃度約為 0.5—1.0 毫克/立方公尺, 故分離所用裝置略有不同。美國哈佛大學 Silverman 教授曾歸納各種氣體分離裝置數達 20 種<sup>(1,2)</sup>, 說明各種分離器適用的範圍, 效率, 空氣的流速, 壓力的下降以及費用等, 前數種分離器用在分離氣體中有 5  $\mu$  以上的固體粒子時, 中間數種為洗滌器 (Scrubber) 用於較小的粒子, 最後數種為過

濾器，其效率有高達 99.9%，二端最高壓力差可達 25 厘米水柱，此外 Lepage 氏以旋風分離器 (Cyclone separator, 除去  $10\mu$  的塵粒, Jordan 及 Welty 二氏以 Venturi 洗滌器用燒鹼溶液除去細微的粒子, Browder 氏則採用靜電沉澱器 (Electrostatic separator) 使氣體中固體粒子減少至  $8.5 \times 10^{-5}$  毫克/立方公尺 (14)。

過濾器除用於防止放射性氣體或微粒逸入大氣中外，亦可用於進入空氣的過濾。室外空氣往往帶有塵沙，如不予以過濾，受放射性感染後沉於室內不易清除，沉於通風管及過濾器則影響使用壽命，故室外空氣進入前最好先予以過濾，此種過濾裝置稱為初步過濾器 (Prefilter)，使用普通材料即可。

2. 強度——來自原子爐及燃料再處理部門的氣體由於放射強度甚大，列為強度放射性氣體，此種廢料經過處理後必需以 60—90 公尺的高煙肉排至高空大氣中以策安全。強度放射性氣體中最令人頭痛者為  $I^{131}$  及稀有氣體如  $Kr^{85}$  及  $A^{41}$  等， $I^{131}$  除去方法甚多，美國 Hanford 分離工廠的方法為將氣體加熱至  $200^\circ C$  隨後通過吸收塔，塔中的填料先以硝酸銀處理過，放射性碘即為銀結合除去，此法效率可達 99.99%，用過的填料可以硝酸銀溶液重生 (Regenerate)，效率仍可達 99.5%，此外，加拿大 Bancroft 氏以活性碳除去  $I^{131}$ ，效率亦高達 99.9%。Chamberlain 氏曾以碳酸鈉，銅絲網嘴試除去  $I^{131}$ ，但效率不及活性碳。

稀有氣體由於惰性關係，比較不容易除去，通常  $A^{41}$  的半生期短，故只是採用空氣稀釋法然後送至高空中。橡樹嶺實驗室使稀有氣體通過 55 公尺長管，內含 900 公斤活性碳，管外以水冷卻，停留一段時間後  $A^{41}$  已衰變除去，但  $Kr^{85}$  依舊留在氣體中 (15)。亦曾有設法在低溫下以特殊碳或有機溶劑吸收  $Kr^{85}$  但均尚在實驗階段 (16)。

美國 Brookhaven 國家實驗室 L. P. Hatch 氏處理氣體廢料的方法為使氣體先通過吸收塔，吸着物中含有放射衰變而得的鈾及鈾，送入鍛燒爐 (Incinerator) 中，所得灰渣浸入酸中，最後再送入陶土吸收塔中以陶土吸着，陶土可吸着除鈾以外的分裂產物，吸收至適當情況後，加熱至  $900-1000^\circ C$ ，放射性物質即和陶土牢牢結合，如有固體鈾，則需將氣體另行通過金屬顆粒，高溫加熱後鈾亦熔成合金 (17)。

強度氣體廢料經過處理後仍需以高煙肉放出，此種煙肉除具有相當的高度外，煙肉內部並有特殊襯裡，此外尚有噴洗，取樣等附設裝置，其目的不外乎在判明放出氣體的強度，防止超過限度的氣體逸入大氣中，一般經過如此處理後，至少有 99.5% 的放射性粒子在氣體進入大氣前已被除去。

## 五 液體放射性廢料的處理

1. 輕度——一般又可分為三等：(a) 極輕者，強度在每毫升  $10^{-6}$  微居里以下，來源為器皿、儀器的洗液以及原子爐的冷卻水，後者含有半生期甚短的同位素，儲存數小時使放射性衰退後與前者及其他排洩水同時送入河流的底部或直接送入海洋中，由於稀釋後的強度低於  $10^{-8}$  微居里/毫升，不會造成任何傷害。(b) 輕度，亦由沖洗儀器而來，放射性強度約為  $10^{-6}-10^{-4}$  微居里/毫升。(c) 中度，放射性強度約為  $10^{-3}-1$

表6 幾種水處理法除去放射性物質的比較 (18)

同 位 素	廢 料 組 成 %	除 去 率 (%)				
		化 學 凝 結	化 學 凝 結 外 加 100ppm 泥 土	沙 濾	鹼—石灰 軟 化 (150ppm過量)	磷 酸 鹽 結 凝 (240ppm量)
Sr	19.6	3	0—51	4	97.3	97.8
Ce	15.2	91	85—96	—	—	99.9
三價稀土族 (含Y)	30.4	91	—	87	90.0	—
Cs	29.9	0.5	35—65	50	無效	—
Ru	1.9	77	—	—	—	—
	97.0					

微居里/毫升，由各實驗用液而來，(b) (c) 二項處理的方法有下列四種：(a) 凝結 (Flocculation)，(b) 離子交換，(c) 蒸發，(d) 排於海水中。四項中前三項於本節討論，(d) 項於 VI 中與固體同時討論。

(a) 凝結——凝結法主要目的在減少液體中固體的含量，凝結劑種類甚多，橡樹嶺常用者有明礬，硫酸亞鐵或氯化鐵，石灰，鹼灰或氫氧化鈉及矽酸鈉等，表 6 為橡樹嶺實驗室以上述凝結劑及其他處理法除去幾種放射性物質的比較，其中沙濾及以鋁及鐵鹽的化學凝結劑對除去鈾及鈾的效率不高，但鹼—石灰法及磷酸鹽可以除去 90% 以上的鈾，而後法中鈾的除去亦超過 90%，酸度的調節在此時極為重要。

(b) 離子交換——離子交換法只可用於溶液中固體總含量在 1000ppm 以下時，故一般在離子交換前必需先以過濾或化學方法加以處理。本法效率極高，但費用亦大。英國所使用的離子交換劑為 Vermiculite，其除去鈾及鈾的效率較一般合成樹脂為高。美國 Hanford 工廠則用 Clinoptilolite，效率也極高，尤其對鈾來說情況比鈾更佳。用過的 Clinoptilolite 以水通過時不會帶走鈾或鈾。此外，在橡樹嶺，Rimshaw 及 Winkley 二氏將磷酸鹽經 600°C 的高溫處理後，其除去鈾及鈾的效率比 Vermiculite 高 4 倍，廢料中如有鈉可以 Descloisite 除去<sup>(19)</sup>。

除上述各種礦物質外，褐煤 (Lignite) 及木屑均可用作離子交換劑。前者需先以酸處理，效率和褐煤的大小有關。後者需先以氯氣處理，如廢料已先經過磷酸鈣的沉澱處理除去一部份的分裂物質，則剩餘放射性物質為木屑吸收的效率亦可高達 99%<sup>(20)</sup>。

(c) 蒸發——此一處理方法主要在於減少液體廢料的容積，或甚之使成爲固體，使最後的處理較爲容易，處理過程中如何使帶有放射性的氣體不致進入大氣中爲最要注意的一點，蒸發操作可用蒸發罐 (Evaporator)，一般的蒸發罐都可使用。

2. 強度——強度液體廢料由燃料處理部門及分離工廠產生，處理方法有：(a) 改變方法 (Process change)，(b) 濃縮，(c) 轉變爲固體，茲分別討論如下：

(a) 改變方法——液體廢料的容積與原來燃料處理的方法有關，譬如以某種處理方法而所得廢料中含有鈾或鈾，則此廢料必需再另用其他溶劑來萃取回收其中的鈾，於是即增加廢料的容積，但如所使用處理方法不會使鈾存在於廢料中，則可減少很多其他液體的使用量。此外，在使用溶劑時，如有多個萃取或洗滌器，則將溶劑循環的路線加以適當的安排，亦可減少液體廢料的容量，

(b) 濃縮——濃縮的目的亦在減少液體廢料的容積俾便於暫時儲存或運送。濃縮的最好方法爲蒸發，已如前述。輕度廢液所用各種蒸發罐在此均可使用，但由於強度廢液本身會發出大量熱量，故強度廢液存於空槽中會自行濃縮。濃縮後剩餘液體如能凝結爲固體則作固體廢料處理，否則加入水泥使轉變爲固體，此時容積雖因而增加，但以後處理較爲方便。

(c) 轉變爲固體——將液體廢料變爲固體後對以後運送，搬動及儲存都可以方便得多，同時放射性物質經結合爲固體後，比較不易受外界譬如水的侵蝕等的影響，故目前很多科學家均着重於如何將廢料變爲固體的研究，茲就二種方法說明如下：

(1) 以天然物質吸收——此種方法使用者甚多，用爲吸着劑的天然物質有泥土，方解石 (Calcite)，矽酸鈉，石灰石及磷酸鈉等等，吸着後需加高溫至約 1000°C，使放射性物質牢牢結合於固體上，有時由於酸性太高，放射性物質不易附着於吸着劑，則必需先將酸中和，L. P. Hatch 氏曾以泥土爲吸着劑，使廢液經過吸收塔而以泥土吸着其中放射性物質然後加熱至 1000°C 高溫，此時每克泥土陽離子的離子交換容量爲 1.2 毫克當量，此法除去鈾的效率甚高，Hatch 氏將所得固體置於海水中約 4 年之久，猶無任何鈾溶解於水中<sup>(21)</sup>。以天然物質吸收放射性分裂產物時，高溫鍛燒爲最重要步驟之一，高溫鍛燒，爐種類甚多，其加熱裝置可有三種方式：(i) 電加熱，(ii) 直接加熱，(iii) 間接加熱，茲以美國 Argonne 國家實驗室及 Idaho 化學處理工廠所使用者爲例，其加熱方式爲第一種，整個爐子爲一圓柱形容器，內有圓椎多孔不銹鋼的隔板，空氣經過預熱通入爐內，廢液自噴管由爐的四週噴入爐內，電熱器置於爐內但亦可由外部加熱，爐內溫度約 400~500°C，真空度約 1.3~12.5 厘米汞柱。此時所處理廢液爲硝酸廢液 (多爲硝酸鈾)，

處理後變為氧化物，體積減小了 6~10 倍，爐頂另有過濾器先除去 2~3 $\mu$  的粒子，其他氣體產物以氣體廢料處理之<sup>(22)</sup>。

(2) 融成玻璃——放射性液體廢料融成玻璃為加拿大 Watson, Aikin 及 Bancroft 三氏的研究結果<sup>(23)</sup>。所用原料為 Nepheline syenite, 乃矽岩石之一種，及石灰石。處理時，使 Nepheline syenite 及石灰石三種原料在乾燥時按比例混合，加水調成小球和廢液以 6:5 的份量分層加入電坩堝中，廢料中的硝酸與 Nepheline 作用或為一種矽膠以吸收所有的液體。加熱分為二階段，第一階段為 900°C 的電爐，目的在乾燥並使硝酸鹽分解，第二階段為 1350°C 的電爐，用以使整個混合物熔化而成玻璃，然後冷卻至室溫。操作過程中有氣體產生，其中含有硝酸蒸氣，氮的氧化物，水蒸氣及放射性物質。使氣體先通過吸着塔以除去鈎及鉍，再通過填料塔冷凝硝酸及水汽並除去氮的氧化物，剩餘的硝酸以氣體洗滌塔除去，最後氣體再經過過濾器始送入大氣中。

在鍛燒過程中，根據 Erlebach 及 Durham 二氏的研究<sup>(24)</sup>。如有石灰石的存在，或高溫時通入大量的氫或二氧化碳可防止鈎的揮發，且可使鈎易於沉積在氧化鐵上，矽酸鈣的存在可減少鉍的揮發，因此前述吸收塔中一般填有硝酸鐵溶液已飽和的矽磚，如此當含有鈎及鉍的氣體在 400~800°C 下使通過約 10 公分厚的此種矽磚後，氣體中鈎的含量已不足 1%，鉍亦減至 5% 以下。在整個處理過程中，放入大氣中放射性物質只有原來的 10<sup>-8</sup>。

Watson 三氏將各種組成、大小及在不同冷卻速率下凝固而得的玻璃浸於蒸餾水及地下水（埋入地下）中，試驗其滲濾速率（Leaching rate, 克/平方呎，每天），得到下列各項結論：(i) 1 年後滲濾速率不會超過 1×10<sup>-8</sup> 克/平方呎，每天，(ii) 氧化鈣的含量在 30% 以下時，含量多少對滲濾速率影響不大，含量超過 40~45% 時，可增加溶解阻力。(iii) 玻璃組成不同影響不大，但含鋁氧石（Alumina）者阻力較小。(iv) 冷卻速率愈快者，阻力愈大。(v) 量多表面積愈大者，滲濾速率愈大。(vi) 地下水流速為 7.5~12.5 米厘/每天時，滲濾速率極小，玻璃埋於地下極為安全。(vii) 地下自冷然却，散熱效果甚佳。

## 六 固體放射性廢料的處理

1. 輕度——輕度固體放射性廢料的範圍很廣，任何東西只要略受沾染，就會帶有放射性，諸如同位素實驗室中的紙片、玻璃器皿，儀器，個人的服裝，手套以及大如設備，傢俱甚至整個實驗室都可能成為放射性物體，此外再加上由氣體及液體廢料經過處理後而得的固體廢料，因此其數量確實可觀，固體廢料的最終處理方法為掩埋，但事前必先設法使其容積減小，燃燒為減少容積最有效的方法，最佳情況下，容積減少可達 95%，重量減少亦可達 70%，但燃燒後有氣體產生，為美中不足之處，所產生氣體必需先以洗滌器水洗以除去  $\alpha\mu$  以上的固體，再通過過濾器而後放掉，另一種減小容積的方法為壓捆（Baling），容積減小率較小，多用在可以加壓的物體，但該物體所具有放射性不得超過 200 毫倫琴/小時，也不能有鈾以外能放射  $\alpha$  粒子的物質。使用壓捆機必需有通風設備，空氣流速應至少每分鐘 10 立方呎，通風設備中並應裝有過濾器，表 7 為 Knoll 原子動力實驗室中各種固體廢料因燃燒或壓捆容積減少的情況。

表 7 (25) 固體廢料容積減小的比較

類 別	處 理 前 容 積 立方呎	燃 燒 後 容 積 立方呎	壓 捆 後 容 積 立方呎
紙 張 衣 服 等	355	5	50
過 濾 器	60	30	6
蒸 發 後 的 殘 渣	40	40	40
其 他	185	185	185
總 計	260	640	335

固體廢料的最後處理為掩埋，掩埋的方式又分地面上掩埋及地下掩埋二種。地面上掩埋的好處在於不受地下水的影響，一般多在荒僻的空地上以混凝土在各邊砌起掩體，將固體廢料置於特殊容器中堆於掩體內，強度大者置於中心，愈弱者愈靠近外層，掩體高度視容器堆置層數而定，但層數又與地基的強度有關，每層容器與另層容器間必需隔以適當厚度的混凝土，最上層亦鋪以混凝土，所用混凝土必需耐裂，耐縮，耐凍及防水。法國在 Marconle<sup>(26)</sup> 所建掩體為一六邊形建築，內部隔成六個三角形，每邊混凝土厚度為 30 呎，每層容器間及頂層上厚度亦為 30 呎。

地下掩埋則多利用舊隧道、廢礦坑，但亦有另掘壕溝者，但不論何者，必有一相同的原則，即廢料必需分段放置，亦即每放置一部份後即必需予以隔斷，而所建隔牆及鋪在頂層上混凝土的厚度必需到達安全厚度，有時容器與容器間亦澆以混凝土，以策安全，如所用為壕溝，則應注意其地質的強度。

近年來，美國有建議以鹽礦作為廢料的地下掩埋地區。鹽礦的優點是：(a) 和地下水絕緣，(b) 導熱佳，(c) 張力大，(d) 不易滲透，橡樹嶺國家實驗室現正在 Kansas 州進行此項實驗，正就六大問題加以研究：(a) 廢料掩埋後是否穩定？(b) 放射性物質會否在鹽礦中滲透？(c) 廢料與食鹽將起何種反應？(d) 有何種副產品會產生？會否有害？(e) 食鹽傳熱效果如何？(f) 如為液體廢料，酸性應否預先中和？美國目前所用作實驗的為液體廢料，乃由鋁—鈾燃料而得的廢液<sup>(27)</sup>，實驗時將廢液分為二份，一份保持原來的酸度，另份 pH 已調整至 11。廢液中除放射性物質外有硝酸、硫酸、硝酸鐵及硫酸鈉等，皆已預先用食鹽飽和，試驗初步結果，以溶液已中和者為佳，但最後結果應至少一二年後始能有定論。

2. 強度——當固體廢料放射性甚強時，其容量一定較少，故常有直接裝於特殊容器中即埋於地下如前節所述，亦有暫時儲存俟部份放射物質衰變後再行掩埋，但一般還是先使用各種溶劑將高度放射性固體加以清洗，使部份放射性物質溶於溶劑中成為輕度固體廢料然後按照前節方法處理，亦有採用沙流法(Sandblast)者，以含有沙粒的高速度空氣或水蒸氣沖擊帶有放射性的固體廢料，將其表面含有高度放射性的物質帶走，留下的固體則作輕度廢料處理，不過以上二種方法都只限於固體僅有表層為強度放射性物質時，如該固體所含放射性物質並不限於表面，則只有完全溶解並萃取其中放射性物質，才能使此固體成為輕度廢料。

## 七 廢料棄於海水中處理

由於地球上海洋與陸地之比為 3:1，且有些區域，海洋有深達數哩之多，故海洋實為放射性廢料一最好的存放處所。雖日積月累，如不斷將於放射廢料棄於海洋中，理論上必有一日海洋中放射性強度亦有達於限度的可能，但為時究屬尚早，以目前而論，將廢料棄於海洋中仍不失為一最安全及便利的方法。茲將廢料棄於海洋分液體與固體二項說明如下：

1. 液體廢料——液體廢料如欲棄之於海則可直接以管線通至海水中，此時應考慮問題有三：(a) 廢液排於海中之最大流速或強度可為多少？(b) 排水管線應長多少？應進入海中若干遠始為安全？(c) 對魚類的影響如何？英國 Windscale<sup>(28)</sup> 的原子能工廠對液體廢料的處理即採取直接以管線排洩於海水中的方法，經數月試驗的結果，情況甚佳，Windscale 排洩管線伸出海中近 2 哩，每天放射性強度排出量， $\beta$  粒子達數百居里， $\alpha$  粒子約數十分之一居里，但水面上最大濃度僅  $10^{-10}$  居里/立升，此一數值甚小，不但對人類不會有害，即對魚類也不會有任何影響，而且此一數值尚係在連續 50 天沒有風浪的情況下所測，如在一般情形下，則放射性物質應散佈得更開，濃度應更小故液體廢料排洩於海水中的處置，可說甚為安全。

2. 固體廢料——固體放射性廢料，就一般而言，適於棄於海水中。因為如埋於陸地上，為安全起見，必需留出一部土地，所防放射性物質的滲透，但如沉於海水中，可不佔任何地方，不過，目前固體沉於海水中限於輕度廢料，強度廢料目前不採用棄於海水中的方法，其原因一則強度廢料目前存量尚少，不需要很多土地，二則有關強度廢料運輸、搬動及密封等專門技術猶未臻完善，萬一沉於深海中，容器因壓力過高而致破裂，強烈放射性物質外洩，則危害甚大，故目前強度廢料僅於陸上掩埋。



## 八 放射性廢料的密封搬動與運送

廢料的密封與搬運並不限於固體，液體廢料亦有需要密封搬運者，但多限於強度液體廢料，且為量甚少，一般又多先使轉變為固體，故本節所討論僅限於固體廢料。

1. 密封——廢料的密封為一極專門且重要的技術，尤其密封後的廢料要棄於深海中時，更應考慮到容器所受的高壓，密封時應注意者有下列四點：

(a) 容器材料——由於海水的壓力，每深 10 公尺增加 1 大氣壓，深海中海水壓力極大，故容器材料必需極為堅強，一般多為不銹鋼，且為雙層中間填以鉛或混凝土。此外容器材料還得便宜並易於製作。

(b) 密度——廢料裝於容器擲於海中後不但要沉到海底，而且還要很快沉下去，此點和密度有關，故密封後廢料的密度要到達一定的數值。如海水的密度為 1.03，廢料的密度應至少 1.2，如沉於近岸的海水中，更應超過 1.5。

(c) 空隙——由於深海中的高壓，密封後的廢料中不能有空隙存在，否則極易受海水壓擠而破裂，這些空隙必需加入混凝土、瀝青或其他物質予以填塞、無法填塞時，容器本身要極堅強耐得住海底的壓力，否則只能沉於淺海中。

(d) 耐撞強度 (Strength against impact) ——廢料密封於容器中擲於海水內要受到二次撞擊，第一次和水面相撞，第二次和海底相撞，此一相撞力量 and 容器密度或下沉速度有關，要容器下沉快，則碰撞力量大，一般容器下沉的最大速度可達每秒 5 公尺，如海底很硬時，碰撞的力量相當的大，故設計容器時，必需考慮此項因素<sup>(20)</sup>。

以上四點係就廢料封裝後沉於海水中而言，實際上不論廢料在陸地掩埋或沉於海中，裝廢料的容器必需要能耐壓、耐撞、防火、防震、防水以及耐其他的扭力、要在任何情況下不致漏裂，一般常採用雙層容器，內層為不銹鋼，外層為耐浸蝕鋼，中間填以鉛，鉛的厚度，視廢料的放射性強度而定，有厚達 10 吋者，因此廢料容器的重量，往往超過廢料本身達 20 倍。法國原子能委員會所用容器<sup>(30)</sup>為鍍鋅鋼製成，內層襯有聚乙烯的襯裡，容器口能自行封閉，甚為堅固，不致漏裂。

2. 搬動與運送——輕度固體廢料都可直接搬動，運送亦無任何困難，一般承裝的容器多漆以鮮艷的顏色或放射性標記，以示與普通容器有所區別，這些廢料或直接埋於地下，或送向他處另作處理。

強度放射性廢料已裝於特殊容器中者，搬動問題不大，困難者在於運送，廢料的運送一定利用汽車而不用火車，運送的是否困難端視運送途徑的長短，是否需經過公路及城市或人烟稠密處而定，如果運送途徑極長，必需行徑公路則應多作各項準備，因怕萬一半途容器有所漏裂，故除去車輛必需有 20 噸以上的拖車，電引車及起重機外，並必需有下列各項準備<sup>(31)</sup>：(a) 行動前必需與主管部門、保健部門及治安部門密切連絡，得到允許行動的通知後，必需完全依照預先的計劃，按時行動。(b) 必需攜帶各種用具如：放射性計數器，電照明設備，危險標幟，攔阻器材及鋤、鏟等。(c) 車隊上必需掛以標示牌，說明所載放射性廢料的種類、強度、數量、容器材料、掩體厚度，距離 1 公尺遠的幅射強度等。(d) 每人都必需備有大衣、手套、帽子，長靴及面具，但即使有了這些準備，運送時仍應當盡可能避免行經公路、城市、並在夜深人靜時行動，以策安全。

## 九 臺灣放射性廢料處理的現況

自從新竹清華大學建立原子爐以來，我國也步入原子能時代，放射性廢料處理問題亦隨着發生。但清華原子爐開工不久，且動力運轉較小——最大功率為 1000 瓩，故所得廢料放射性強度尚低，如今廢料的種類及處理方式<sup>(32)</sup>如下：

1. 氣體廢料——原子爐室及附屬各實驗室的空氣均帶有放射性，必需時時予以更換，室內空氣在送入高空大氣中前必先經過過濾裝置，包括排氣管，鼓風室，過濾器，洗滌設備，自動安全控制，然後以煙囪送入大氣中，清華目前使用的過濾器亦為石綿填以玻璃纖維，煙囪的高度約 30 公尺。

2. 液體廢料——清華的液體廢料有二個來源：(a) 原子爐的冷却水，其強度極弱，冷却水經過原子爐後本應直接流回游泳池中，由於其中含有  $N^{16}$ ，故必需先送經處理櫃稍作停留使  $N^{16}$  衰退， $N^{16}$  的半生期為 7.35 秒，故稍停留後， $N^{16}$  大部衰變，流回游泳池中冷却水內  $N^{16}$  的含量只有原來的 3~4%，處理櫃中置有樹脂，以離子交換方式除去冷却水中的放射性物質，樹脂作用失效後，可以化學藥品還原重新使用約每一、二月需處理一次，但到樹脂中強度過高無法還原時則另作固體廢料處理。(b) 各實驗室的實驗用液及洗滌液。實驗室中因放射性同位素的存在，一切物品均受感染，到達一定程度時，必需加以處理，其中玻璃器皿，玻璃纖維及塑膠地板或桌面均可以硝酸或鹽酸清洗，所得洗液即成為液體廢料的一部份，此液體廢料強度不高時稀釋後可直接放掉，如強度稍高，則應暫存於地下特製不銹鋼儲存槽中，裝滿後再用特製幫浦抽出移入特製容器中送往偏僻郊區掩埋。

3. 固體廢料——包括不能灰化的玻璃纖維，可以灰化的濾紙，實驗室中不能洗淨或無法清洗的器皿，裝置以及用以清淨水的樹脂等，清華固體廢料目前數量甚少，亦均暫時儲存於地下槽中，容量增多後亦將運往荒野偏僻地方掩埋。

## 十 結 論

自從人類進入原子能時代後，放射性廢料的處理問題即一直不斷在因惱各國的科學家，雖然目前對這方面問題加以研究的人，不計其數，亦早已有了不少處理的方法，但迄今為止，尚沒有一個能為大家都接受的方法，但不論如何每種方法的原則一定相同，即：1. 使具有放射能的廢料和人類隔離，不致危害人類，最好能回收利用。2. 以經濟、方便為原則，實際處理時，應採用何種方法，最大的因素為當地的環境如：水源的所在，人口的密度，海岸的遠近以及當地的礦產等。以自由中國現在的情況而論，目前放射性廢料量雖不多，但原子爐既已開始運轉，各項研究工作亦正加強進行，廢料量急劇的增加當在意料之中。臺灣廢料處理已早具規模，今再就個人所見對今後廢料處理所應着重處，申述如下：

1. 氣體廢料——臺灣氣體廢料，由於原子爐運轉功率不大，在最近幾年中強度不致過高。現在的辦法甚為恰當，似無加强的必要，俟他日原子爐燃料需，再處理時再以硝酸銀及活性碳或其他物質進行時去  $I^{131}$  及  $Kr^{85}$  的實驗，猶未嫌遲。

2. 液體廢料——臺灣目前的液體廢料，除少部份外，因放射性強度甚低而都直接放掉。少部份強度較高者，則埋於地下，此種方式，在現在來說似屬最經濟、便利的方法，但臺灣地下水為水源的重要來源，輕度廢料直接放掉，日積月累後，是否有可能導致影響？似應加以進一步試驗，此外較強廢料埋於地下，亦將佔去部份可用土地，故液體廢料的處理，是否亦可以海洋為最後場所？因為臺灣四面環水，原子爐所在地新竹更是面臨大海，將廢料或先濃縮或直接裝於適當容器中運往海上，途徑甚短，困難不多，或者仿然英國 Windscale 原子能工廠由廠區鋪設管線，將廢液直接排往海水中，但後法所費不貲，以我國目前財力，獨力負擔，無法辦到，其優點是，一勞永逸，可免搬動、運送的不便。

3. 固體廢料——臺灣的固體廢料，目前採用掩埋方法，對民生不致會有任何影響，但為將來計，是否亦應棄於海水中，較為妥當？廢料棄於海水中時，容器需特別製備，已如前述，臺灣盛產水泥，容器夾層中是否可用水泥代替鉛以作遮蔽材料，似可就其遮蔽力與厚度的關係及強度等加以試驗，在可能範圍內似可以之代替。此外，放射性物質燒成灰分後是否可與水泥結合，結合後其滲透率如何？又高雄鋁業公司的紅泥含有氧化鐵，高雄塑膠公司的氫氧化鈣均為無用的廢料，似亦可試驗其與放射性物質結合後的穩定性，如能有所成就，非但放射性廢料得以處理，對臺灣的其他工業並能有所幫助，則可一舉兩得也。

## 參 考 文 獻

1. H. Brynielsson, Radioactive Waste Disposal into Sea, 21.
2. F. R. Bruce, The Origin and Nature of Radioactive Waste in the United States Atomic Energy Programme, 6 Disposal of Radioactive Wastes, Vol. I.
3. F. R. Bruce, *ibid*, 6.
4. F. R. Bruce, *ibid*, 8.
5. F. R. Bruce, *ibid*, 8.
6. F. R. Bruce, *ibid*, 17.
7. F. R. Bruce, *ibid*, 15.
8. F. R. Bruce, *ibid*, 20.
9. F. R. Bruce, *ibid*, 27.
10. F. R. Bruce, *ibid*, 26.
11. L. R. Rogers, management of Waste from the use of Radioisotopes, 53, Disposal of Radioactive wastes, vol I.
12. W. A. Rodger, Treatment and Processing of Radioactive wastes, 453, Disposal of Radioactive wastes, vol I.
13. L. Silverman, Economic Aspect of Air and Gas Cleaning for Nuclear Energy Processes, 145, Disposal of Radioactive wastes, vol I.
14. C. A. Mawson, Processing of Radioactive wastes, 13.
15. C. A. Mawson, *ibid*, 14.
16. L. Silverman, Ref. 13, 152.
17. W. A. Bain, The Industrial solution, 323, Atomic Energy in Industry.
18. W. A. Rodger, Ref. 12, 463.
19. C. A. Mawson, Ref. 14, 24.
20. C. A. Mawson, *ibid*, 25.
21. W. A. Rodger, Ref. 12, 469.
22. W. A. Rodger, *ibid*, 471.
23. L. C. Watson, A.M.Aikin, A.R.Bancoft, The Permanent Disposal of Highly Radioactive wastes by Incorporation into Glass, 375, Disposal of Radioactive wastes, vol I.
24. L. C. Watson, *ibid*, 377.
25. W. A. Rodger, Ref. 12, 457.
26. P. Cohen, C. Gailledreau, A solution for the Storage of Radioactive sludge in the Ground at Marconle, 251, Disposal of Radioactive wastes, vol I.
27. Chemical Eng. News, 24, Nov. 2, 1959.
28. P. V. Danckwerts, The Disposal of Radioactive Effluent in the Sea at Windscale, 317, Atomic Energy in Industry.
29. H. Brynielsson, Radioactive wastes Disposal into the Sea, 63.
30. P.Cohen, Ref. 26.
31. J. Pomarola, Handling and Transport problems, 291, Disposal of Radioactive wastes, vol I,
32. 楊毓東, 清華大學原子核反應爐之報導, 23.核子科學, 第二卷, 第四期。

## The Production and Disposal of Radioactive Wastes

Yang Chia-chi

The radioactive wastes are different from the wastes produced from other industries because of their radioactivity. They are harmful to human beings. They are produced from the mining, milling and separation of ores, refining of uranium, fuel fabrication, reactor operation, fuel reprocessing and the application of radioisotopes. The radioactive wastes are usually classified into "hot" and "cold" according to their radioactivities. They all may be in the form of gas, liquid or solid.

The radioactive wastes have to be treated before discarded. The "cold" gaseous wastes are usually sent through a filter and then entering a stack and the "hot" gaseous wastes must be treated to exclude the radioactive contents before filtering. The "cold" liquid wastes are sometimes sent directly into the sea and the "hot" liquid wastes are usually treated by flocculation, evaporation and solidification processes to reduce the volume to make the transportation more convenient. The solid wastes are buried under the ground or put into special containers and sunk into the sea.