

垃圾即能源、商品

張克勤*

摘要

「垃圾即能源、商品」，在近代的科技發展下，已不再是一句空話。在土地有限、能源缺乏、環境污染日受重視的臺灣，處理與日劇增的垃圾量遂變成——須面面兼顧的高度科技問題。

本文將介紹一種目前最先進的垃圾處理方式，不但可回收其中的能源，且又能解決國內日愈嚴重的垃圾問題。

垃圾的傾棄問題，最近接二連三的在全省各地爆發開來。先是臺北市計劃將垃圾運送到臺北縣淡水的下庄掩埋，結果引起當地居民的「護土」抗拒；緊接著中壢市更是在將垃圾強迫銷往鄰近鄉鎮時，和桃園縣間引發一場「垃圾大戰」，迄今未能有一妥善的解決方法。從國內報章雜誌上有關垃圾問題的報導中看來，國內目前所矚意的未來垃圾處理方法中，以焚化法最受歡迎。實際上現在一般先進國家中，已將垃圾視為一種能源，一種可資利用的原料，不再是傳統上毫無價值的廢物。本文將從這個觀點上，對國內的垃圾問題，提出一新的處理構想。

垃圾的來源及可能處理方法

一般我們所指的垃圾，主要是指日常生活中的丟棄物，這可被歸類成固體垃圾；另外還有一種從下水道或水溝中清理出來的爛泥巴 (Sewage sludge)，以國人喜將垃圾倒入水溝的習慣言，在臺北市或高雄市這類大都市，此類垃圾量必屬可觀。下水道垃圾的成份和固體垃圾有一些不同，主要是下水道垃圾的含水量極高（約佔95%，相對於固體垃圾的25%含水量而言——指美國的垃圾），同時下水道垃圾內含的無機物如金屬、玻璃等較少，可燃燒的物質相對增加。以國外通常的處理方法這類下水道垃圾甚至在採用衛生掩埋法之前，都需經過乾燥的處理，以免所含污水到處漫流。廣義的垃圾更可包含農產品的殘渣如稻穀、甘蔗渣、鳳梨皮等及木屑、工業廢物等。這些都可包含在本文的討論範圍內。

垃圾的成份，依其所產生的地方及時間，有很大的不同。拿美國和日本的垃圾來比較，日本的垃圾較為潮濕，且含廢塑膠物（如 PVC、PE 等）較高。就其中熱值言，美國垃圾約為 2400 kcal/kg，而日本垃圾只及 1300 kcal/kg。依中興工程顧問公司的調查，臺北市的垃圾是潮濕低熱值，推測應和日本的垃圾較為類似。

若拿垃圾和我們日常使用的主要能源之一，煤來相比較，很明顯的垃圾中的無機物成份（約佔12%）及水份（約佔26%——指美國的垃圾）比煤中此類成份高出許多。表一為垃圾中的有機物成份和煤的比較情形⁽¹⁾：

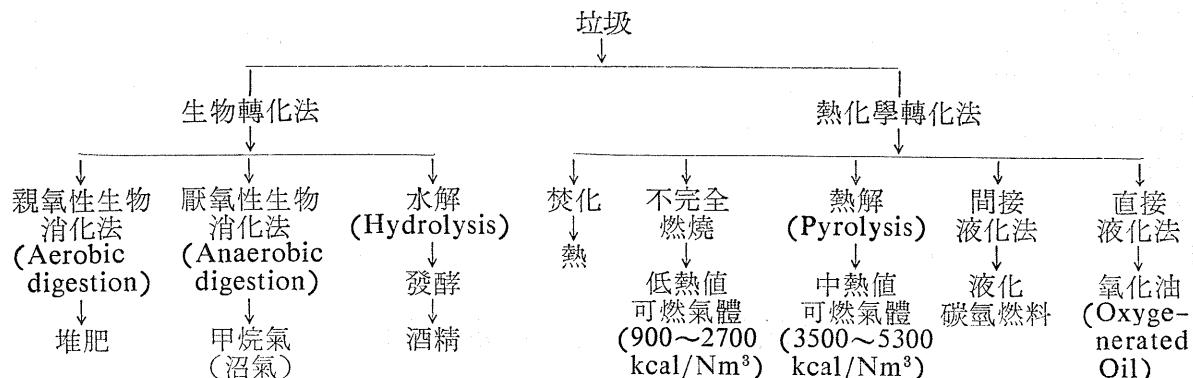
*芝加哥伊利諾大學機械系研究生

表一 垃圾中有機物質和煤的比較

	碳	氫	氧	氮	硫	灰份 (ash)	熱值 (乾基) kcal/kg	揮發物 wt%
煤	70~80	4~6	5~20	0.5~2	1~5	5~30	5300~8300	30~50
垃圾中有機物質	35~55	4~6	25~50	<0.5	0~2	5~30	3600~5300	60~90

由於垃圾裏的揮發物質比煤中揮發物質高出很多，若模倣煤的氣化程序來製造合成氣體 (Synthesis gas)，則垃圾的轉合成氣體程序只需較低溫，低壓的操作條件（相對於煤的轉化程序）即行。

垃圾的處理方法，通常而言，可有以下的選擇（圖一所示）：



圖一 垃圾的處理方法

就生物轉化法言，通常需要很長的處理時間來讓微生物分解垃圾，對垃圾中的成份比較敏感；若垃圾中含有較多那些對處理池中微生物來講是有毒的物質，則垃圾還需預先加以特別處理以免毒死池中的微生物。其中用親氧化性生物消化法來將垃圾轉化成堆肥，國內已有臺中仁成及高雄大同兩廠依此法來處理部份垃圾。最近報上也有報導鹿港鎮有人用這種方法將鹿港鎮的垃圾製造成果園或庭園的基肥。問題是這類堆肥的市場有限，不能大量的運用來處理垃圾。厭氧化性生物消化法適用於處理動物的糞便或含水量高的下水道垃圾。發酵處理法適用於處理那些具纖維素較多的農、林產品殘渣。

熱化學轉化法對垃圾成份較不敏感，且可大量的用來處理垃圾⁽²⁾。其中焚化法是目前世界上較盛行的垃圾處理法。不完全燃燒法和熱解法皆可將垃圾轉化成可燃燒之氣體。間接液化法則是將不完全燃燒／熱解法製造出來的合成氣 (synthesis gas) 進一步的製成液體燃料。直接液化法利用較低溫的熱解將垃圾中的揮發物質直接轉化成黏稠狀的液中間物，再將這中間物經分餾製成具商業價值的成品。這兩種液化法目前都在試驗階段，距可商業化設廠來處理垃圾尚有一段距離。熱化學轉化法中的焚化法，不完全燃燒及熱解法目前都可考慮作已可商業化或近商業化 (near-term commercial) 的垃圾處理技術。其中焚化法已較為國內一般大眾所熟知，本文將着重介紹目前已實際設廠的幾種不完全燃燒，或熱解法的垃圾處理程序。

環境污染的考慮

在熱解／不完全燃燒反應爐中產生的可燃氣體，在被使用為氣體燃料前，一定要先經過一道除塵的處理，以清除掉氣體中所挾帶的塵粒，然後再送往發電或產生蒸汽之用。這和中鋼對其煉焦工廠所產生出來的煉焦煤氣（熱值 4400 kcal/Nm³）或高爐產生出來的較低熱值（800 kcal/Nm³）高爐氣的處理方式極為接近。所以除非在焚化爐的廢氣排放煙囪後也附加一套除塵設備來淨化排放廢氣，否則由直接燃燒垃圾的焚化爐煙囪排出的廢氣是遠比使用乾淨的垃圾合成氣為燃料的工廠排放廢氣骯髒多了。不過請注意一點：垃圾合成氣是可再利用的能源，而焚化爐的排放廢氣却是毫無回收價值的。日本當初會對熱解／不完全燃燒法產生興趣，就是因為焚化爐的廢氣污染情形不易處理，同時由於日本的垃圾中含有大量的塑膠廢棄物（如 PVC 等），在高溫的焚化過程中，對爐壁產生不容忽視的腐蝕作用，減低焚化爐的使用壽命。國人使用塑膠製品的習慣，和日本差不多，因此以後在設置垃圾焚化爐時，在爐壁材質的選用上要考慮到這類腐蝕問題。對大規模的熱解／不完全燃燒法垃圾處理流程，可加設一廢水處理廠來處理從垃圾處理過程中產生的廢水，並將處理過後的乾淨水打回流程中循環使用，以節省能源。

目前已被採用的七種熱解／不完全燃燒法垃圾處理系統的介紹

本節中所將介紹有關此類垃圾處理系統，都是指目前已設有商業化規模或試驗規模 (demonstration scale) 工廠的系統而言。對一個嶄新的處理系統提議，首先要經過實驗室中及模擬工廠 (pilot plant) 中的證實其可行性，為了減少在放大設計 (scale up) 成商業規模廠時所遭遇的設廠風險，通常在正式商業化前，該設計公司都會先蓋一座較小規模的試驗工廠來試行這套擬議中的處理程序。對垃圾處理工廠言，將處理量在 30~150 噸／天的工廠定義成試驗規模，而處理量在 150 噸／天以上者，定義成已達商業規模。

實際上，一座達經濟規模的熱解／不完全燃燒法垃圾處理工廠，處理量應達 1 千噸／天。依據一座日處理量 150 噸的試驗工廠之操作資料來放大設計成一座日處理量一千噸以上的工廠，其所擔當的設計風險自然比自模擬工廠來直接放大，小太多了。

(1) 日本鋼鐵公司發展出來的一套不完全燃燒法垃圾處理系統⁽³⁾

已在日本 Ibaragi 市設有一日處理量 450 噸的工廠（1980 年開始運轉），另有一座日處理量 100 噸的工廠，據日鋼聲明，已在 Kamaishi 市落成。日鋼的這套垃圾處理程序具有下列的幾種特色：垃圾不需經過預先的分類處理；使用焦炭為其反應爐的輔助燃料，而輔助燃料的使用多寡，取決於垃圾的潮濕情況，愈潮濕則所需加入的焦炭愈多；垃圾中的無機物質（如玻璃、金屬等）在高溫的爐底熔融形成爐渣從爐底排出。爐渣的利用，可參考中鋼爐石處理工廠（針對高爐及轉爐的爐渣）的處理方式回收其中的金屬成份，爐石能當作路基的碎石使用，或當用水泥公司的填加料使用。垃圾處理工廠所產生的垃圾合成氣可送往發電或製造蒸汽。

(2) 美國 Union Carbide 公司發展出來和日鋼系統相類似的不完全燃燒垃圾處理系統。

除在西維吉尼亞州的 South Charleston 設有一座日處理量 200 噸的工廠外，在日本 Chichibu 市亦建有一日處理量 150 噸的小廠（1981 年 3 月開始運轉）⁽⁴⁾。值得一提的是 Chichibu 這個城市

是在東京北面的山區中，為避免流往東京的地下水被垃圾中的重金屬污染，當初在選擇合作建廠對象時，就是看中 Union Carbide 公司所提供的技術能將垃圾中的重金屬轉化成極安定的爐渣，不致溶解於地下水中造成污染。這個處理系統另有兩個特色，一是在反應爐中直接引進氧氣（不是空氣）來助燃，產生出較高熱值（ $2700 \sim 3600 \text{ kcal/Nm}^3$ ）的垃圾合成氣也因此需要一座氧氣廠來提供反應爐所需的氧氣。另一個特色就是在其處理流程中附有一座廢水焚化爐，可避免造成廢水污染。

(3) 美國 Andco-Torrax 不完全燃燒法垃圾處理系統¹。

這和前述兩種系統都很類似。屬於這個系統的垃圾處理有：盧森堡 Luxembutg 一座（200噸／天，1976年），法國 Grasse 一座（170噸／天，1977年），西德法蘭克福一座（200噸／天，1978年），法國 Cretell 兩座（ 2×200 噸／天，1979年）。據報導，屬於這個系統工廠的操作並不十分順利，其中西德的法蘭克福廠因操作上的困難已計劃停工。但是最近美國能源部却在佛羅里達州的廸斯奈樂園附近蓋一座日處理量 100 噸的此系統工廠。主要目的在於研究將含有輻射物質的污染物質於反應爐中熔融成較易處理的爐渣之可行性。國內目前對核能電廠廢棄物均暫儲存在蘭嶼離島，為減少將來需投海終極處理的放射性廢物量，此種垃圾處理系統值得做進一步的探討。

(4) 美國 Monsanto 環境及化學工程公司發展出來的不完全燃燒法垃圾處理系統^{(5),(6)}。

其特色是採用旋轉窯式（rotary kiln）的反應爐，爐內熱分解時所需的熱量來自垃圾本身及噴入的輔助燃油。1975年在美國的巴爾的摩市建造了一座日處理量 1 千噸的此型工廠，當時估計每處理 1 噸垃圾只需 7.6 美元（1977年，總投資額達兩千萬美元）。這座工廠在試車時即有很多問題出現，最後不得不在1977年變更設計成一日處理量 550 噸的垃圾焚化工廠。

(5) 美國西方研究公司 (Occidental Research Co.) 所發展出來的熱解垃圾再將產生的合成氣液化成燃油的垃圾處理系統^{(1),(7),(8)}。

1977年在加州 El Gajon 曾設有一座日處理量 200 噸的垃圾處理工廠，但由於反應爐的操作發生問題，已停工多年。其產生出來的液化燃料，性質和一般鍋爐使用的 6 號重油之比較如表二所示。

表二 液化燃油和 6 號重油之比較

	碳	氫	硫	氯	氮	氧	灰份	比重	熱值 kcal/kg	黏度 N-Sec/m ² at 88°C
6 號重油	85.7	10.5	0.7~3.5	—	2.0	2.0	0.05	0.98	10,100	0.064
液化燃油	57.0	7.7	0.2	0.3	1.1	33.2	0.5	1.30	5,900	0.23

從表二的比較看來，這種熱解燃油其黏滯性及腐蝕性均比 6 號重油來的高，和中鋼的副產品，煤瀉 (coal tar)，倒有些相似，目前中鋼將煤焦當作高爐的輔助燃油使用。若欲將此種熱解燃油當作鍋爐用油的話，或許還需加一道精餾的手續才行。西方研究公司推出的垃圾處理系統和上述的 Monsanto 系統，其所以在建廠時遭遇到失敗，究其原因不在於兩種垃圾處理系統本身有重大毛病，差錯出於不當的工廠放大設計。因此在這類新穎的垃圾處理工廠的放大設計上，一次

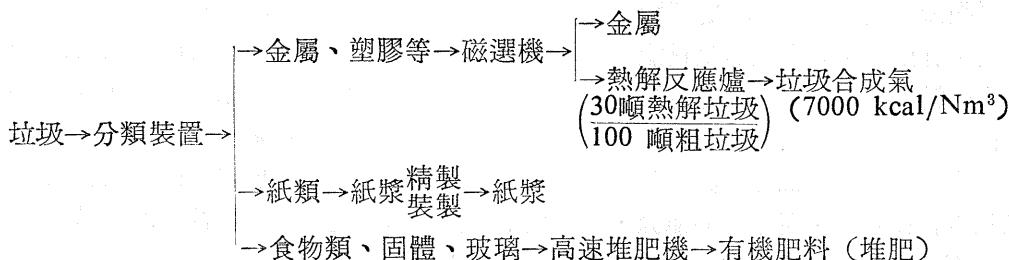
放大50倍（美工國業界的習慣做法）是非常冒險的；相比較之下，日本人在這種新技術的發展上就保守謹慎多了，他們每次僅以兩倍的倍數來漸次放大工廠規模。

(6) 日本 Tsukishima Kikai 公司推出的垃圾熱解處理系統⁹

已在日本船橋市 (Furabashi) 設有一日處理量 450 噸的垃圾處理工廠 (1981年建廠完成，投資額 3千5百萬美元)。這個系統的特色是垃圾不需經分類處理即可送入反應爐，反應爐採用循環式的流體化床以砂粒 (日本工業標準) 來作為流體化床裏的熱媒。產生的較高品質垃圾合成氣，一部份當作加熱熱媒的燃氣之用，大部份可被送至附近的發電廠發電，或產生蒸汽供其他工廠使用。據報導處理 1 噸的垃圾需美金 17.85 元。

(7) 日本 AIST-Ebara 公司所推出的分類垃圾熱解處理系統¹⁰

這個垃圾處理系統目前僅發展到試驗廠階段而已 (100 噸／天，橫濱市)。最大的特色為將送進來的垃圾先經一道分類處理，再分別製成不同的產品，流程如圖二所示。這個系統中所採用的熱解反應爐型式和 Tsukishima Kikai 公司所發展的極為相似。垃圾分類及分別處理的作法只能適用於有極大量垃圾來源的大都會如紐約、東京等。據中興工程顧問公司的估計，臺北市一天的垃圾產生量是 1 千 9 百噸，這個數目將隨著國民所得的提高及臺北市本身的發展，大幅度的增高，因此 AIST-Ebara 的垃圾處理系統也值得我們好好的研究一下。一般而言，這個系統及 Tsukishima Kikai 的系統所使用的循環式流體化床反應爐，能產生較高品質的垃圾合成氣，適合再繼續進一步的製成易運輸的液體燃料或用來提煉化學品。若生產出來的垃圾合成氣只計劃提供在附近的工廠或發電廠充作燃氣的話，則採用較低處理成本的不完全燃燒反應爐較為划算。



圖二 AIST-Ebara 垃圾處理系統

選擇垃圾處理方法時的考慮因素

選擇何種垃圾處理方法，因地而異。以日本的情況為例，日本和臺灣一樣都是地狹人眾的地理環境，可提供掩埋垃圾的地方不多，因此日本政府在考慮選擇垃圾處理方法時，第一個因素是這個垃圾處理方法必需能有效的將垃圾的體積減至最低，同時避免造成環境污染。所以對諸如生物轉化法（無法處理垃圾內的重金屬成份，垃圾體積的降低量也有限），熱化學液化法（在較低溫下操作，對減少垃圾體積不如高溫的熱解／不完全燃燒法來的有效）等則缺乏興趣。並且日本政府要求新建立的這類熱解垃圾工廠注重工廠環境的美感以減緩工廠附近居民的反感。因此這些新成立的垃圾處理廠周遭被經營成花木扶疏的景象，甚至煙囪，主要大機件都籠罩在漂亮的建築物後。加上一座座這類現代化的工廠可在當地提供不少就業機會，目前被國內民眾視為最不受歡

迎的垃圾在找尋垃圾處理廠地點時，就不致遭受到當地居民的莫大阻力。

對那些已快達飽和的「漫手」垃圾堆積場，如臺北市內湖，高雄市西青埔等垃圾堆積場，選擇熱解／不完全燃燒方法來處理垃圾更是給予這些近飽和的垃圾堆積場一大再生機會。我們知道大都市的垃圾產生量，會隨著國民所得的提高及都市本身的發展，逐漸提高，因此在現時的設廠，就必需考慮十年、廿年後的垃圾處理量。有現成堆積一旁的垃圾可用，地方政府大可放心依十年、廿年後的需要量去設廠。在工廠運轉的前十、廿年間所不足的垃圾量，就直接挖這些堆積如山的垃圾來充當，一方面解決這些臭氣四溢的罪魁禍首，另一方面可延長這些垃圾堆積場的使用壽命（垃圾內的無機物質無法被加熱氣化成垃圾合成氣，仍需以掩埋方式來處理）。

解決國內的垃圾問題，對政府或對一般大眾來講，都是勢在必行。依國內的各種情況看來，採用焚化法或熱解／不完全燃燒法最為適宜。或許有人認為，國內的垃圾太過潮濕且資源含量低（中興工程顧問公司的調查結果），以加熱回收可燃氣的方式來處理這些垃圾可能不合經濟原則。在此有一點觀念需加以澄清的是：若是採用目前國外最普遍使用的焚化法來處理國內的垃圾，因為其熱值低，所需加入焚化爐內的輔助燃量為數也不少。因此欲討論熱解／不完全燃燒法的經濟效益時，需拿焚化法的處理成本來相比較才够客觀。

生質能 (Biomass) 與垃圾處理廠的配合

對鄉間或小城鎮言，或許其垃圾產生量太少，不足以去設立一座熱解／不完全燃燒的垃圾處理廠。不過須強調一點的是：垃圾處理廠既能處理一般垃圾，更沒有問題來處理那些成份較均勻的木屑、稻穀、甘蔗渣、鳳梨皮等生質能。在一般對生質能氣化的研究中，常將垃圾視為其擬議中氣化流程的原料「下限」，也就是說假若這個氣化流程能勝任以垃圾為原料，對其他種的植物原料，大概都能接受了。夏威夷在利用生質能及垃圾方面頗為成功，夏威夷本身不產油、煤，主要的能源，需靠進口，其情況和臺灣頗為相似。但夏威夷近年來大力推展本地的自產替代能源，據報導其利用生質能及垃圾所產生的能源，能提供 7% 島上所需的電力。因此在垃圾量少的鄉間城鎮，熱解／不完全燃燒法垃圾處理系統仍然是可行的！

結語

在地狹人眾且又缺乏能源的臺灣，熱解／不完全燃燒法垃圾處理方式可以提供一個既能大量縮減所需掩埋處理的垃圾量，又能回收可利用的能源，且又符合不污染環境的要求。很值得目前為垃圾問題鬧的不可開交的國內有關單位坐下來好好參考一下。在進一步的研究這類垃圾處理方法時，政府應該主動參預且予以財力支持，畢竟這是有關國民健康及生活環境的重大問題之一。以日本政府的做法為例，由政府內有關部門組成一個委員會來審核這類由地方提出的垃圾處理要求，同時為鼓勵地方上設立現代化的垃圾處理廠，對小城鎮輔助 75% 的建廠經費，對大城市則只補助 50%。在我國即將由開發中國家昇成開發國家的同時，和一般大眾息息相關的垃圾問題希望能早日得到妥善的解決。

参 考 资 料

1. Wilson, E. M. et. al., "Waste in the United States", Appendix A in Engineering and Economic Analysis of Waste to Energy Systems, EPA-600/7-78-086(1978).
2. Klausmeier, W., Applications for Biomass Thermochemical Conversion Volume I, U. S. DOE Report (1982).
3. Kuester, J. L. Trip Report (Japan), U. S. DOE Report No. COO-2982-65 (1981).
4. Yasui, K. and T. Masuda, "Solid Waste Disposal by the Purox System at the Chichibu Clean Center", First International Waste Recycling Symposium, Tokyo (Nov. 1981).
5. Fuels From Municipal Refuse for Ultilities: Technology Assesment, EPRI 261-1, Electric Power Research Institute (1975).
6. "Pyrolysis of Solid Wastes with Energy Recovery—the Baltimore Experience," Panel Discussion. AIChE 84th National Meeting, Atlanta, Georgia (Feb. 27, 1978).
7. Pyrolysis of Industrial Wastes for Oil and Activated Carbon Recovery, EPA Report, PB-270961 (1977).
8. Chiang, S., et. al., "A Critical Analysis of the Technology and Economics for the Production of Liquid and Gaseous Fuels from Waste," AIChE 84th National Meeting, Atlanta, Georgia (1978).
9. Kunii, D. et. at., "Research and Development of Circulation System between Fluidized Beds of Application of Gas-Solid Reactions" Proceedings of the Second Pacific Chemical Engineering Congress, Denver, Colorado, pp. 176~182 (1977).
10. Report — First International Waste Recycling Symposium, Clean Japan Center, Tokyo (1981).