

# 廢棄物加熱分解處理法

## ——焚化、熱解、氣化——

楊 義 崇\*

### 前 言

廢棄物之處理方法甚多，如掩埋法、堆肥法，利用生物的喜氣性及厭氣性的分解作用使廢棄物得以安定化，但這些均需要相當長的時間，如前者約需十五年，後者約數日至數週不等；相反地，利用加熱分解法（Thermal Decomposition）可使廢棄物可燃有機成份經由燃燒氧化過程或熱解反應分解成氣狀物，如  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ……及熱能或碳化氫液狀物，加以回收利用，達到資源有效利用之效益，並能於短時間內將廢棄物處理至安定化程度，所剩之灰燼，其重量僅為原廢棄物之10—20%，故廢棄物若要求減量化，無毒化及安定化等目標，則加熱分解法最為可行。

加熱分解法依其反應過程分為三種：

- 焚化 (Incineration)：包括廢棄物固定碳的熱解、氣化、燃燒等化學過程及上述化學反應產生之揮發性有機氣體燃燒成  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$  及粉塵。
- 热解 (Pyrolysis)：阻絕能令廢棄物產生氣化作用之物質（主要為空氣）的加熱分解法，通常操作溫度在 250—900°C 間，廢棄物轉化成部份低分子氣體外，大多化為液狀產物，成份為碳氫化合物、水、 $\text{H}_2\text{S}$  等結合之濁油、固定碳及不燃性之殘渣。
- 氣化 (Gasification)：廢棄物在與氣化物質如水蒸汽，少量  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ，空氣接觸下，於高溫發生轉化反應，此反應與水煤氣，發生爐煤氣之製造原理相同。

目前國內已有許多民營公司與美、日等先進國家技術合作或進口焚化設備，顯示工業界已漸重視廢棄物之處理問題，同時臺北市環保局亦正積極規劃設置大型家庭垃圾焚化爐。本文主旨旨在以簡單之敘述配合十數幀圖表說明以上三種廢棄物加熱分解處理法之概略情形，提供有興趣研究者參考。

### 一、焚 化

對熱值不高，含有砂土量多之家庭垃圾或對含有害物質之工業廢棄物（固體或流體）或從廢電線電纜回收銅原料，均須依廢棄物種類，操作容量及條件選擇適當之焚化爐，比如說：  
• 處理醫院特殊廢棄物可用小型焚化爐。

\* 經濟部工業局第七組技士

- 家庭垃圾，類家庭垃圾之事業廢棄物可用大型焚化爐，在特殊情況下，尚可用來處理有害廢棄物，廢熱並可用來作污泥乾燥用、發電、產生蒸氣之用。處理能量可達 50 t/h。
- 特殊焚化爐可用以處理固體、膏狀及流體狀之工業廢棄物或廢電線電纜。
- 燃燒堆肥或回收廢棄物設備之低熱值固體殘留物之焚化爐。

表一 炸為各種焚化爐處理能力及一些特性數據。

表一 廢棄物焚化爐處理能力之範圍

焚化爐 種類	熱值 KJ/kg	空密度 (t/m <sup>3</sup> )	處理能量			熱能回收
			m <sup>3</sup> /h	kg/h	J/h×10 <sup>6</sup>	
燒檔案易燃物之小型設備	<12,500	<0.1	0.05—0.5	5—50	0.08—0.6	無
一般小型設備	<12,500	>0.1	0.3—5	30—500	0.4—6	通常無
中型設備	<10,100	>0.2	1—15	200—3,000	2—30	無／有
大型設備	<8,000	>0.2	>7.5	>3,000	>25	通常有

## 1-1 焚化

反應過程廢棄物之焚化反應包含以下各種交互重疊之物理、化學過程：

### □脫水乾燥

在高於 100°C 時，廢棄物受燃燒室之輻射熱及經預熱助燃空氣之對流熱作用，所含水份隨廢氣蒸發出來；為消除此廢氣之惡臭，將此廢氣再導入溫度更高之後燃室，再燃燒一次。

### □傳熱、變形、熱解脫氣

在 250 至 600°C 間，廢棄物接受燃燒室、熱空氣或廢氣之熱能，產生揮發性之乾餾氣體。

### □點燃

廢棄物所含之固定碳及揮發性有機成份，在約 500°C 即可點燃，並開始燃燒。

### □燃燒

在 500° 至 800°C 間，可燃物經揮發乾餾氣體逐漸碳化，乾餾氣經點燃，幫助爐床上乾廢棄物之燃燒，此時燃燒床若作適當攪動，有助於燃燒速度之增加。

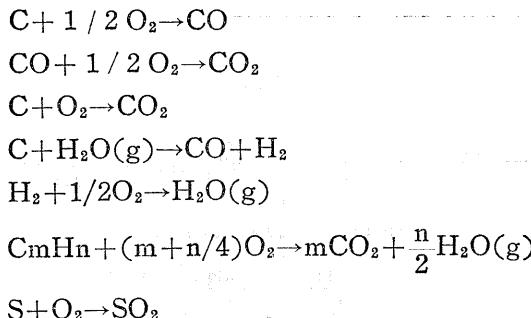
### □熔燒

在 1,000°C 左右，如燃燒床廢棄物有攪動現象，則碳化生成物有氣化及高溫燃燒現象。

### □燒化

溫度達 1,100°C 以上，在氧氣足夠情形下，殘存之碳完全燃燒成無機性之灰燼。乾燥及脫氣區約占爐格長度的一半，而由熱解作用產生之揮發性有機氣體呈現擾流狀態與二次助燃空氣充份混合後，在後燃室中保持 2—3 秒之停留時間以燒卻惡臭及有機成份。

對碳素及其化合物之氣化及燃燒，以及其他廢棄物成份之氧化，如供應足夠氧氣，理論上可以以下幾個反應方程式表示：



完全燃燒所得之最終產物為  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ , ……等。而完全燃燒須以廢棄物種類，配合焚化系統，適當之燃燒室造形，燃燒停留時間及供應足夠之空氣為條件。未完全燃燒將產生危害環境之空氣污染物，如  $CO$ ,  $HC$ , 黑煙及惡臭等。

完全燃燒所需最少之空氣量可以下式表示：

$$m_{L, \min} = 8.88 \cdot W_c + 26.44 \cdot W_H + 3.32 \cdot W_S - 3.33 \cdot W_O$$

$m_{L, \min}$ ：最小空氣量 [ $m^3_N$  空氣/kg 廢棄物]

$W_c$ ：含碳重量比       $W_S$ ：含硫重量比

$W_H$ ：含氫重量比       $W_O$ ：含氧重量比

根據上式，須對廢棄物作元素分析，始能計算得之。

另一簡易算法如下：

$$m_{L, \min} = 0.24 \cdot \frac{Hu + 2303}{1,000}$$

$Hu$ ：廢棄物之熱值 [KJ/kg]

而真正空氣需要量  $m_L$  為

$$m_L = \lambda \cdot m_{L, \min}$$

$\lambda$  為過剩空氣因數，視焚化爐系統、廢棄物燃燒性質、空氣供給及預熱諸因素而定，其值由 1.5 至 2.5。對爐格式焚化爐，其過剩空氣因數為 1.8~2.0，旋轉窯爐為 2.0~2.5，流體床爐為 1.1~1.2。

在焚化過程產生之廢氣量可用以下經驗式算出

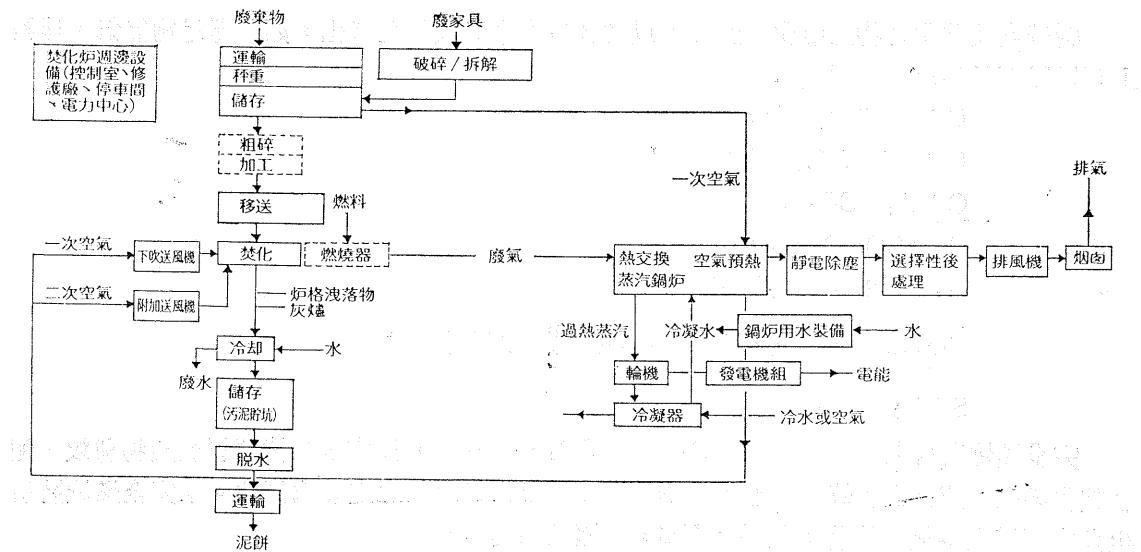
$$V_R = 1.17 + 0.22 \cdot \frac{Hu + 2303}{1,000} + (\lambda + 1) \cdot m_{L, \min}$$

$V_R$  單位  $m^3_N$  廢氣/kg 廢棄物

一般之經驗值如下：

- 熱值約在 5,000KJ/kg 者，4.2~5.3
- 熱值約在 7,500KJ/kg 者，4.7~6.3
- 熱值約在 10,000KJ/kg 者，6.8~8.5

廢棄物若含較多塑膠類，需較長之燃燒時間，且塑膠受熱熔化後，有堵塞爐格之虞，故可考慮使用非爐格式之焚化系統，如較高爐室溫度之旋轉窯焚化爐。



圖一 大型廢棄物焚化系統各主要部門之方塊流程

PVC 塑膠是目前最通用塑膠之一種，但其於焚化爐中，應儘量避免產生低溫乾餾或不完全燃燒之現象，否則極易產生對環境有害之毒性物質，國內露天焚燒廢電線電纜產生 Dioxin 即為一例。另廢棄物中如含有食鹽亦與 PVC 塑膠一樣，燃燒時產生氯化氫氣體，對焚化爐體及管線有腐蝕作用，故在設計時應注意材料的選擇。

## 1-2 焚化爐之建造及操作

一座現代化廢棄物焚化爐應照下列條件建造及操作：

- 高度自動化控制系統
- 操作穩定
- 高度安全性、耐腐蝕、耐高溫
- 經濟化之處理成本
- 無惡臭、飛灰、有毒排氣及粉塵問題、產生爐渣、洗塵廢液、污泥不致危害水資源
- 最好靠近發電廠及掩埋場
- 附設熱能及有價資源回收設備

### 1-2-1 廢棄物之貯存與進料

圖一為附設廢熱回收之焚化爐主要部門之方塊流程圖。一般而言，包括秤台、廢棄物傾棄坑及其建築、轉車空間、抓斗吊車、進料裝置的供應系統面積，約占全部焚化場面積約 80%，傾棄坑至少應有三天廢棄物之容量。

廢棄物傾棄坑之最小容量  $V_B$  可以下式得之：

$$V_B = 72 \cdot \frac{m_h}{\rho_M}$$

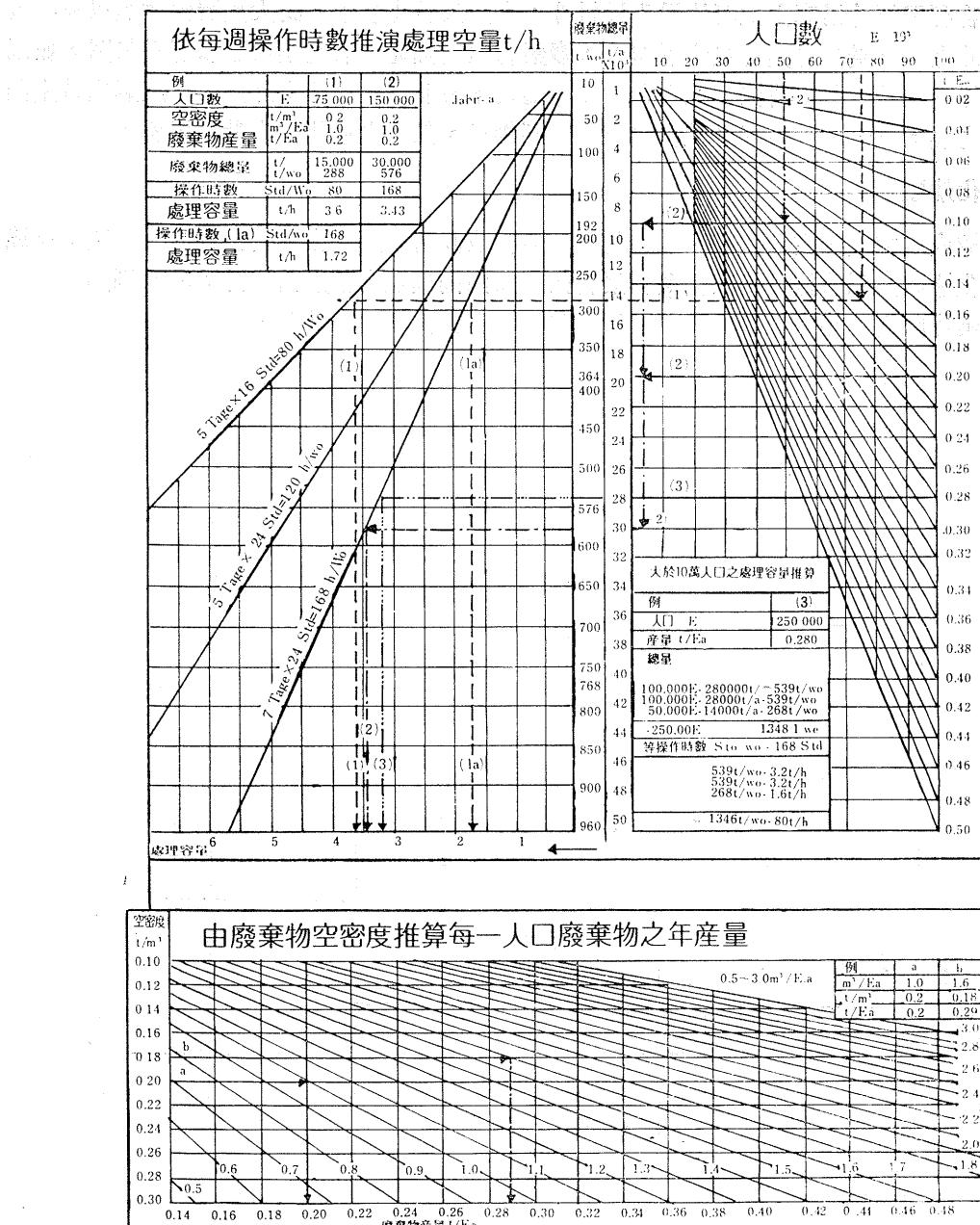
$m_h$ ：單位焚化爐體之處理容量 [t/h]

假設有配置四組各 10t/h 單位爐體之焚化爐，廢棄物之空密度  $\rho_M=0.4t/m^3$  (通常為

$0.3 - 0.45 \text{t/m}^3$ ），故傾棄坑之最小容量。

$$V_B = 72 \cdot \frac{4 \cdot 10}{0.4} = 7,200 \text{m}^3$$

例：在一天可分三班操作（天數為全年之 85%）之焚化爐，每年有 7,450 小時之操作時間，可營運範圍約可涵蓋五十萬居民，其每年焚化之最大容量為 275,000 公噸，其每小時處理容量  $\text{m}_h$



圖二 由人口、廢棄物密度、產量推算焚化爐之處理容量圖解法

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}}{t}$$

$$\text{即 } \dot{m}_b = \frac{275,000}{7,450} = 36.91 \text{ t/h}$$

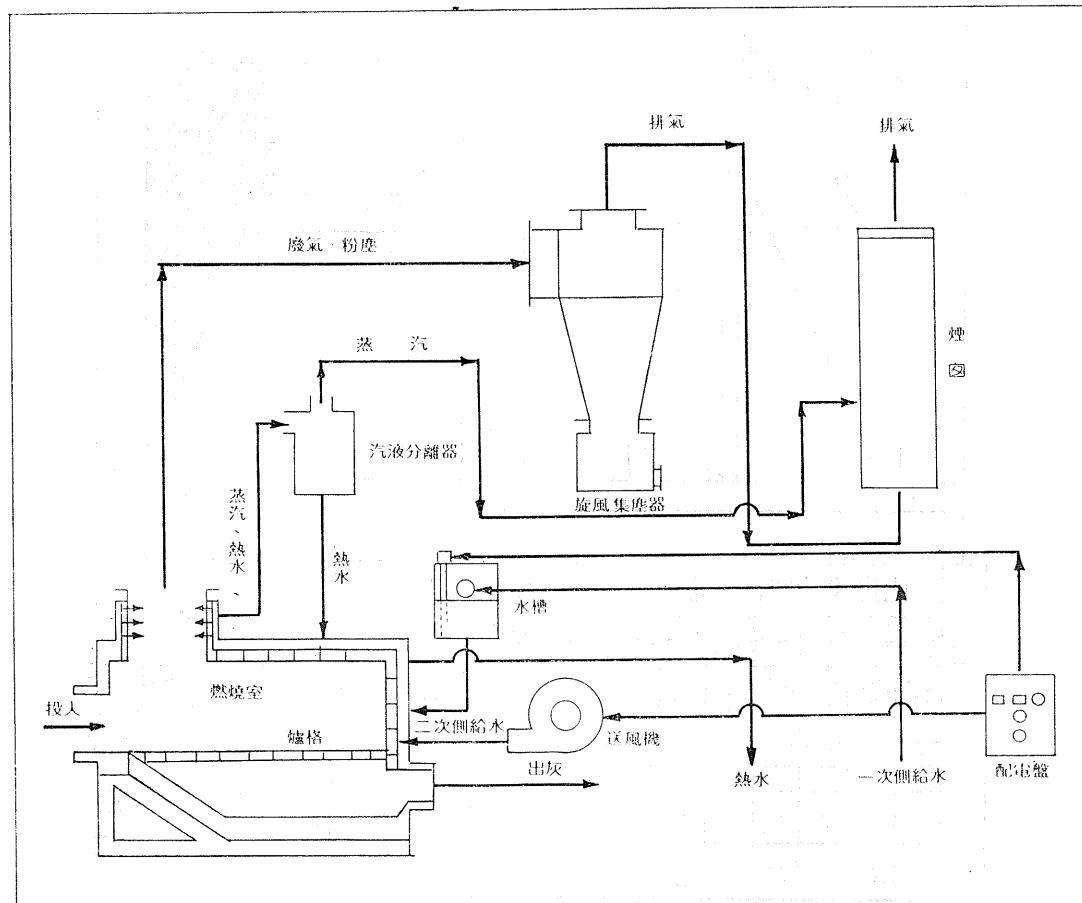
由人口數推算焚化爐之處理容量可使用圖二列線圖解法求得，圖中各舉七萬五千及十五萬人口之市鎮垃圾焚化爐之處理容量圖解兩例。

廢棄物利用抓斗吊車由傾棄坑送入進料斗，推送入焚化爐中。對大型廢棄物須以抓斗或粗碎機破碎之。為避免惡臭污染附近環境，廢棄物傾棄坑通常有建築物予以適當封閉，並以抽風機維持室內些微負壓情況，抽引之空氣作為焚化爐助燃用，即由外面新鮮空氣代替室內惡臭污濁空氣，故一設計良好之焚化設備可達到無臭、無害之最佳觀光教育場所。

## 1-2-2 焚化爐體

利機械或重力式無段輸送段、推進器或前爐格設備將廢棄物由加料器送入燃燒室。燃燒室（即焚化爐體）係依據燃燒系統及廢棄物與廢氣同向或逆向移動而設計，其原則為

□廢棄物應盡可能完全燃燒成可利用之熱能及適於掩埋之灰燼及泥餅。



圖三 小型爐格式焚化爐流程

□廢氣盡可能不含粉塵，並能順利通過燃燒室，不會造成局部過熱，積氣現象。

廢棄物焚化爐體分為兩大類：

(1) 爐格式系統 (Grate system)

適於燃燒固體廢棄物，但不適合處理流體狀者，處理容量通常在 50t/h 以下，有時可超過。圖三、四為典型之爐格式焚化爐。

□非自行煽火式或爐格 (爐格負荷在  $1.9\text{GJ/m}^2\text{h}$ ,  $G=10^\circ$ )

固定型：板格爐、傾斜爐、階梯爐、桶式爐。

移動型：移動床爐、旋轉樑爐。

多層移動撥火型：多層移動床爐、滾動爐。

□煽火式爐格 (爐格負荷在  $2.7-3.6\text{GJ/m}^2\text{h}$ )

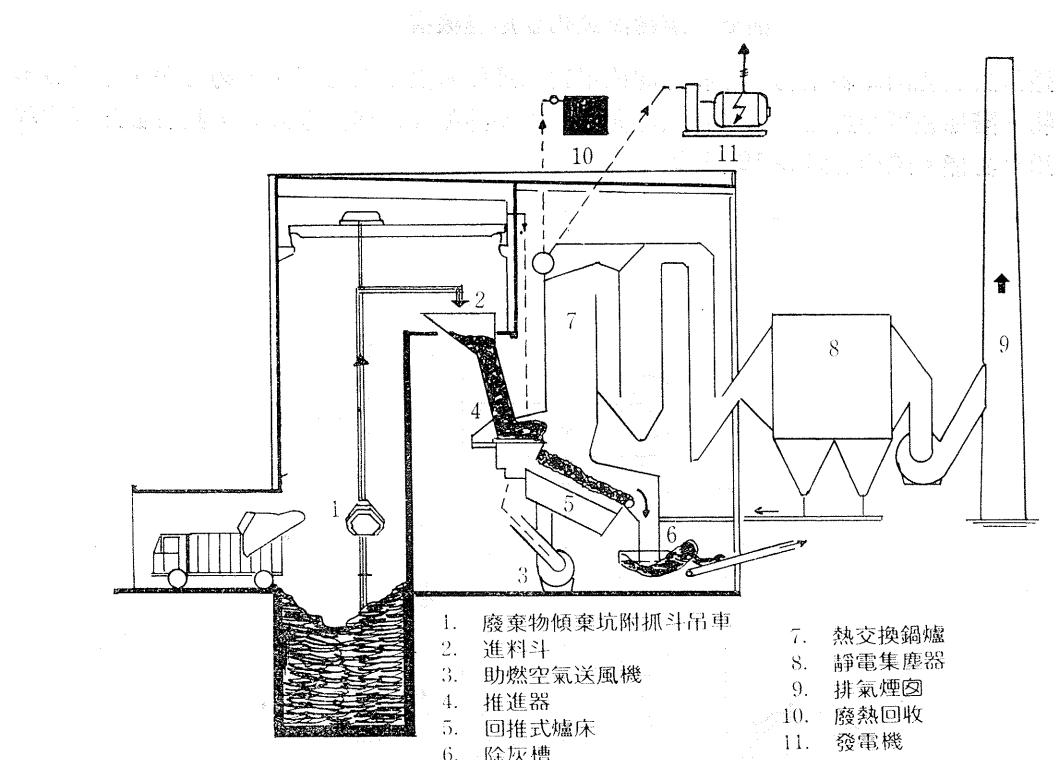
前推式爐格、同推式爐格、躍轉式爐格、迴轉式爐格、籃筐式爐格。

(2) 非爐格式系統 (Non-grate system)

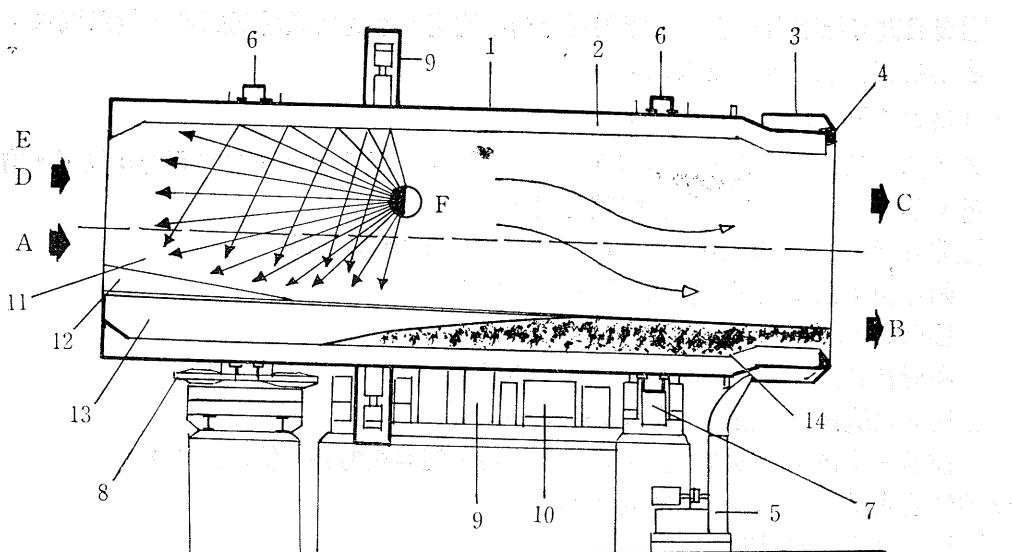
□旋轉窯爐 (如圖五)

適於處理流體狀（氣體、液體）、污泥狀、膏狀或固態廢棄物、與低灰燼軟化點之混合廢棄物（如廢油、含油污泥）。一般之處理容量在 10t/h 以下，在歐洲廣用於工業特殊廢棄物之焚化處理。適當停留時間可控制在 1 小時以下，滾筒直徑可至 4 m，長度可至 15m，廢棄物與廢氣可採用同向或逆向流動。

□迴轉耙階梯爐 (如圖六)



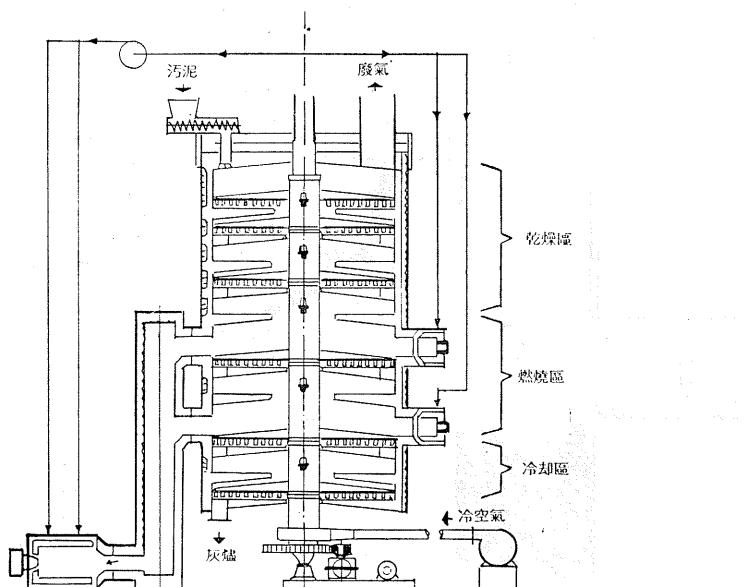
圖四 大型廢棄物回推式焚化爐附設熱能回收裝置



A. 廢棄物／投入	1. 滾筒外套	8. 導引器
B. 灰燼／移出	2. 耐火物襯裡	9. 齒輪
C. 廢氣	3. 筒端套	10. 可調推進機
D. 燃料	4. 筒端環	11. 乾燥區
E. 助燃空氣	5. 冷空氣通氣口	12. 廢棄物
F. 熱輻射	6. 連動環	13. 燃燒區
	7. 滾輪	14. 灰燼／爐渣

圖五 旋轉窯焚化爐爐體機構

通用於焚化固體廢棄物與生物汙泥或單獨處理脫水之工業汙泥、生物汙泥、膠狀廢棄物。階梯爐可作為流體床焚化爐汙泥燃燒之預熱乾燥之前處理設備，具有廢熱回收利用之功能。燃燒容量在 10t/h 以下。



圖六 回轉耙階梯式焚化爐

#### □流體床爐（如圖七）

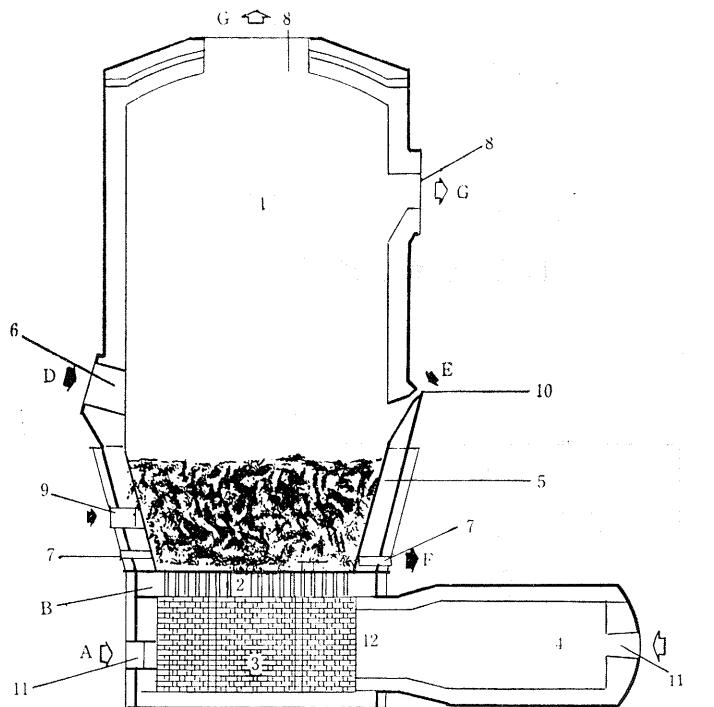
藉著爐底熱空氣從某個角度的向上吹送，使直徑約 0.5mm 之石英砂（作為焚化媒介物）懸浮擾動，形成的高溫流動燃燒床，適合處理不含太多不燃物之固體潮濕廢棄物或經預熱之生物污泥或工業污泥。其優點為燃燒室所形成的高度亂流與廢棄物有較大的燃燒表面積，較大的燃燒速率，焚化條件調整範圍彈性大。

#### □階梯流體床爐（如圖八）

為階梯爐與流體床爐之結合型，用於燃燒工業及生物污泥，有時利用特殊廢棄物（如廢油、廢塑膠、橡膠）助燃。廢棄物在旋轉室中預熱，落入有細砂的燃燒床而迅速焚化。

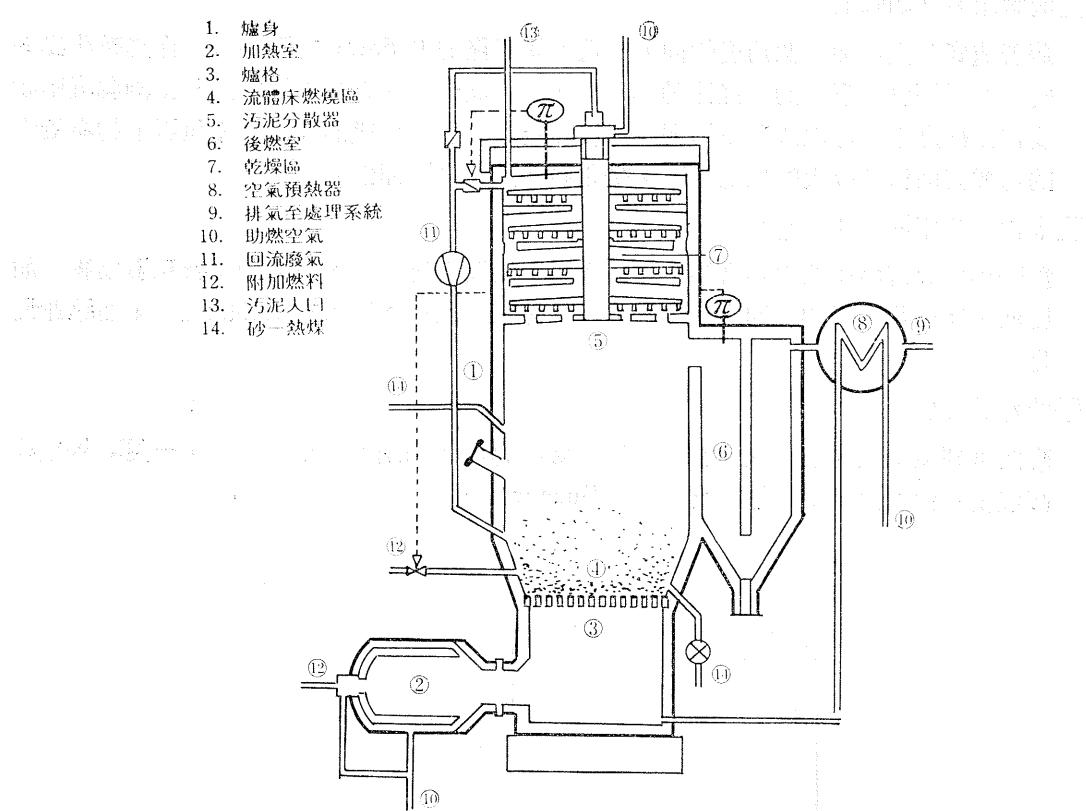
#### □特殊焚化爐

專門處理氣霧狀、液體狀、膠狀之工業廢棄物者，如圖九、十，而圖十一為專為燃燒高濃度廢液所設計焚化爐之燃燒器（Burner）。

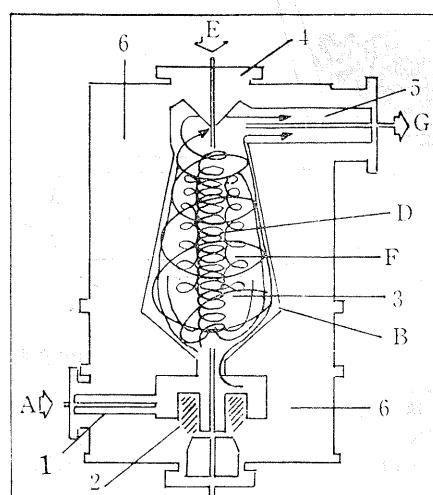


- |         |               |            |
|---------|---------------|------------|
| A. 助燃空氣 | 1. 爐身         | 8. 廢氣出口    |
| B. 噴嘴   | 2. 火格子（爐格）    | 9. 附加燃料噴入口 |
| C. 流體床  | 3. 風盒子        | 10. 燃燒器    |
| D. 廢棄物  | 4. 加熱設備       | 11. 助燃空氣入口 |
| E. 附加燃料 | 5. 耐火物內襯      | 12. 熱風入口   |
| F. 灰爐   | 6. 廢棄物／石英砂投入口 | 13. 空氣噴嘴   |
| G. 廢氣   | 7. 出灰口        |            |

圖七 流體床焚化爐爐體主要構造

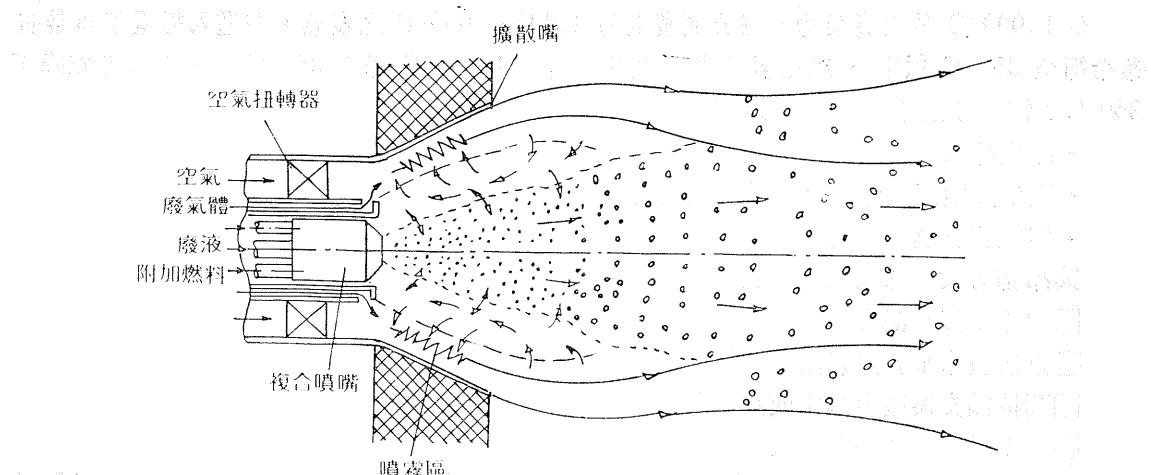


圖八 階梯流體床焚化爐爐體

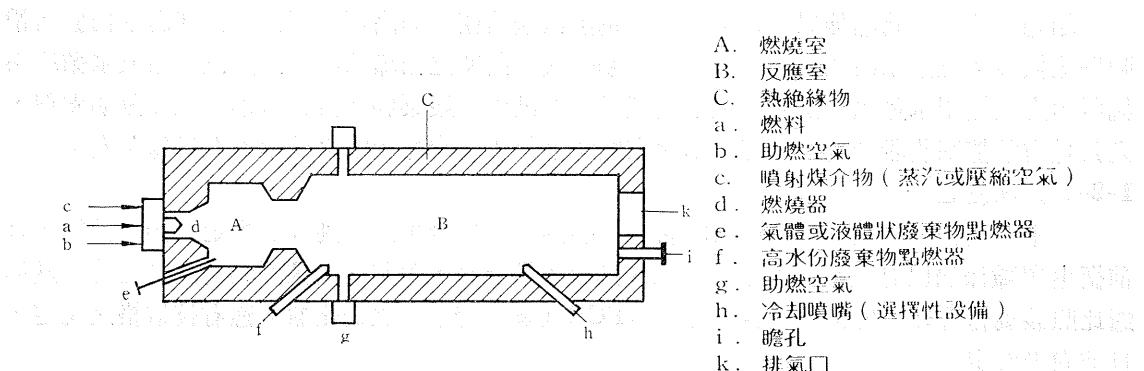


- A. 热氣
- B. 涡旋主氣流
- C. 廢氣
- D. 回氣流
- E. 氣霧狀廢棄物
- F. 亂流區
- 1. 热氣進口
- 2. 扭轉室
- 3. 反應室
- 4. 耐火物裡襯
- 5. 廢氣排出管
- 6. 鋼鐵外套

圖九 亂流式焚化爐爐體：氣霧狀廢棄物高速率燃燒器



圖十 火焰噴射式燃燒器：專門焚化流體狀有害廢棄物



圖十一 添加燃料處理液體廢棄物、廢氣體之燃燒室

### 1-2-3 廢熱回收、灰燼處理

廢棄物經焚化處理後之殘留物——從爐體內產生之灰燼、飛灰、泥餅，及廢氣處理收集的粉塵及洗塵污泥之數量，主要視廢棄物之成份而異，同時亦與燃燒程度及焚化系統有關。一般而言，固體殘留物量約為原廢棄物重量約25至40%，而體積可減少85至90%。

燃燒殘留物必須隨時自焚化爐及廢熱回收，廢氣處理系統中移除，以免發生空氣—廢氣流通系統阻塞現象，故各種焚化系統均需有適當設計移除機構。從後燃室移出灰燼直接落入移除設備中，經由滑動漿、旋轉螺旋或桶槽輸送機與經由抓斗，輸送螺旋送入粉塵、飛灰在水中混合，以熄滅其火焰、降低溫度。每一公噸灰燼爐渣估計需用水移去630,000至1,000,000 KJ，如不計水份蒸發量，平均增加10°C時，每公噸灰燼須使用15至24m<sup>3</sup>水以熄滅之。此熄滅之灰燼先存放於貯坑中，經由固液分離器分離爐渣，再經粗碎、分類、回收金屬等過程，再視其性質以卡車運往掩埋場或作為道路建材用。

燃燒所需空氣，以鼓風機輸送一次空氣，每公噸廢棄物約需5-8公噸空氣，實際上需比理論值多1.5至2.5倍。為提高燃燒室燃化效率，通常需引入二次空氣。空氣的輸送與廢棄物分佈的相對效應，影響燃燒效率甚鉅。

在  $1,000^{\circ}\text{C}$  焚化廢棄物，每公噸產生約  $4,000\text{-}5,000\text{m}^3$  之廢氣，在進入靜電集塵器前應冷卻至  $350^{\circ}\text{C}$  以下，以免影響集塵效率。而從  $1,000^{\circ}\text{C}$  降至  $350^{\circ}\text{C}$ ，甚至可考慮降至  $250^{\circ}\text{C}$  以下，其熱能可回收作以下用途：

- 產生熱水
- 產生高壓蒸汽作為自來暖氣或發電用
- 作燃燒空氣預熱用

其冷卻方式可採用以下方法：

- 與冷空氣相混合
- 直接噴冷水於熱氣流中
- 間接熱交換產生熱水或高壓蒸汽
- 與助燃空氣間接熱交換

如廢氣比熱為  $1.34\text{KJ/m}^3\cdot\text{K}$ ，則燃燒一公噸廢棄物，回收其廢氣由  $1,000^{\circ}\text{C}$  至  $350^{\circ}\text{C}$  之熱能約  $3.5\text{~}4.5 \times 10^6\text{KJ}$ ，這些熱能若全部利用約可產生 1.5~2 公噸蒸汽。

如想利用廢棄物熱能以發電，熱量經過蒸汽鍋爐產生的高壓熱蒸汽，藉其衝擊輪機而帶動發電機後，經過水冷或氣冷冷凝器，與鍋爐成一封閉之循環系統。此蒸汽一冷凝水循環系統所用之鍋爐用水係以一獨立之上水處理設備所供應。廢棄物在焚化處理前宜作分類處理，尤其是有熱能回收設計者，未經分類之家庭垃圾焚化爐廢熱發電之效率約在 15% 左右。

#### 1-2-4 廢氣處理

廢棄物焚化爐排放之廢氣所含有害成份須透過處理設施以達到政府規定之排放標準，目前衛生署環保局已訂定廢電線電纜焚化、熱解設備規範，對其他事業廢棄物之焚化爐或熱解爐比照該規範辦理，惟對廢電容器等所含 PCB（多氯聯苯）之焚化爐，應有較嚴格之規定，目前尚未訂定。

表二 焚化爐設備規範及排氣標準草案

焚化爐 標 準		400kg/h 以上 廢電線電纜	400kg/h 以下 廢電線電纜	熱解爐
粒 狀 物 質 乾基 $12\% \text{CO}_2\text{mg/Nm}^3$		100	250	250
不 透 光 度 %		10	20	20
氯 化 氫 HCl 濕基， $4\% \text{O}_2$ , PPm		80	80	80
總排數量 Kg/h		1.8	1.8	
後 燃 室 溫 度 $^{\circ}\text{C}$		850	850	850
停 留 時 間 秒		1	1	
備 註		①後燃室，助燃系統之設計溫度在 $1,000^{\circ}\text{C}$ 以上 ②需有不透光度、氧氣、CO、溫度自動監測紀錄器		①需有不透光度自動監測紀錄器 ②廢氣洗滌需有獨立之水電藥品紀錄器

廢棄物

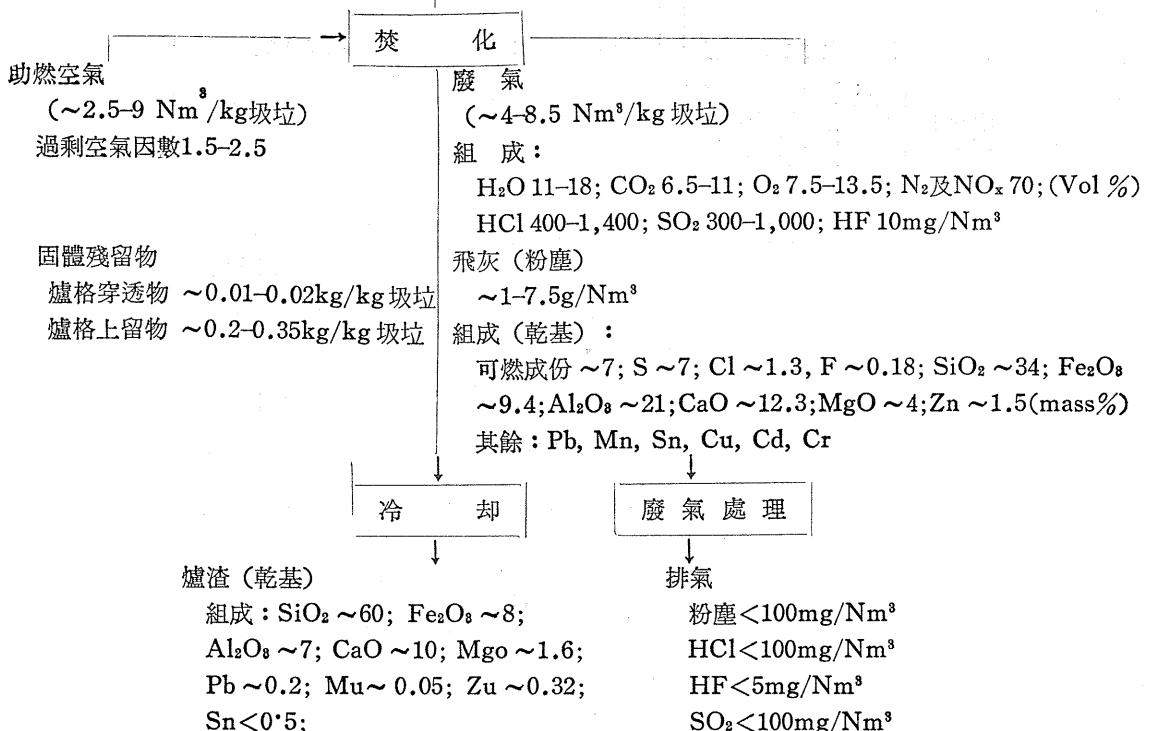
空密度  $\sim 0.1\text{--}0.3\text{t/m}^3$

組成  $\sim 35\%$  可燃物  
 $\sim 30\%$  不可燃物  
 $\sim 35\%$  水

元素分析：(mass%)  
C 20-26; H 20-3.5; N 0.15-0.4; O 9-20; Cl 0.2-0.4; S 0.2-0.75; F 0.03; Fe 1-7.5; 氧化物 ( $\text{SiO}_2$  14-18.5;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  1.5-3.5;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1.5-4.5; CaO 2.5-4.5; MgO 0.5-1.5;  $\text{K}_2\text{O}$  0.4-0.8;  $\text{Na}_2\text{O}$  1.3-2.5;  $\text{P}_2\text{O}_5$  0.2-0.6); 重金屬 0.1-0.5

大小：  
細 (0-8mm)  $\sim 36\%$   
中 (8-40mm)  $\sim 29\%$   
粗 (40-120mm)  $\sim 22\%$   
篩餘物 ( $>120\text{mm}$ )  $\sim 13\%$

熱值：  
市鎮垃圾  $\sim 5,000\text{--}11,000\text{KJ/kg}$   
鄉村垃圾  $\sim 4,200\text{--}7,600\text{KJ/kg}$   
家具廢棄物  $\sim 11,000\text{--}17,000\text{KJ/kg}$   
類家庭垃圾之事業廢棄物  $\sim 7,500\text{--}13,000\text{KJ/kg}$

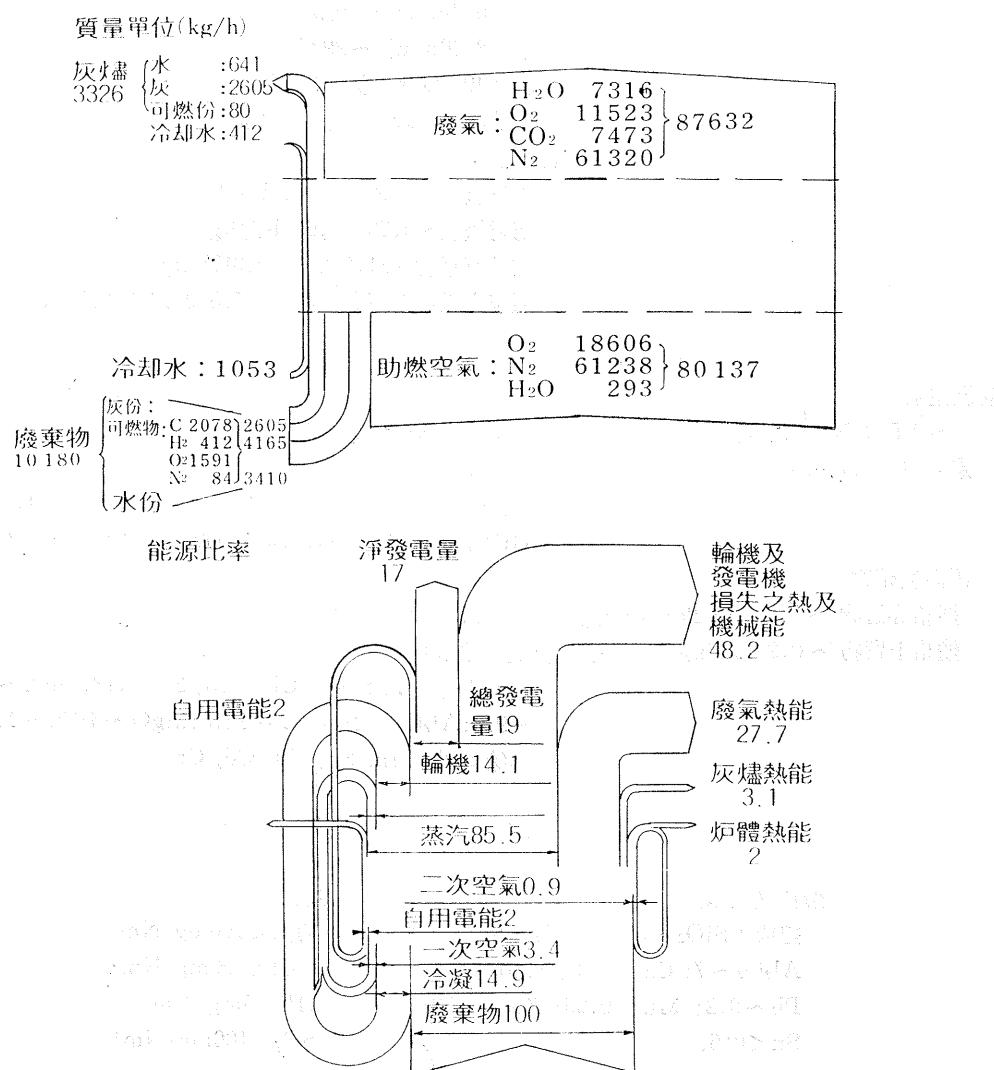


圖十二 廢棄物種類、組成、性質、數量以及焚化後殘留物之質量平衡結算

通常使用的靜電集塵器可去除廢氣中大部份烟塵、粒狀污棄物，廢氣接著通過吸收或吸附設備，以除去其餘微粒塵及減少有害氣體如  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{NO}_x$  等。

以濕式氣體吸收裝置而言，係以液體溶劑（如  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$  溶液）與廢氣在塔柱吸收器或特殊洗滌塔逆向接觸，吸收部份有害物質。在乾式廢氣吸附裝置中，藉著固態吸附劑，如活性碳、煅燒過之  $\text{CaO}$  之表面物理或化學吸附作用，以除去有害物質。最近發展一種半濕式的廢氣吸收設備，分為前後段，係利用後段濕式洗滌的  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$  廢液，導入前段之噴霧乾燥器，利用已回收廢熱之廢氣餘溫，蒸發廢液成粉末，而直接運往掩埋場併爐渣處置，可省去濕式洗滌設備需附設廢水處理設備之投資，且比乾式法有更高之處理效果。

經去塵及吸收處理之排氣，藉排風機之抽送，經由管道從烟囱排出，如排氣溫度太低，



圖十三 10t/h 可回收能源廢棄物焚化爐之質量及熱能、電能平衡核算

宜利用廢熱提高排氣溫度，以加速排放速度，減少排風機負荷。

### 1-3 質能平衡及成本經濟

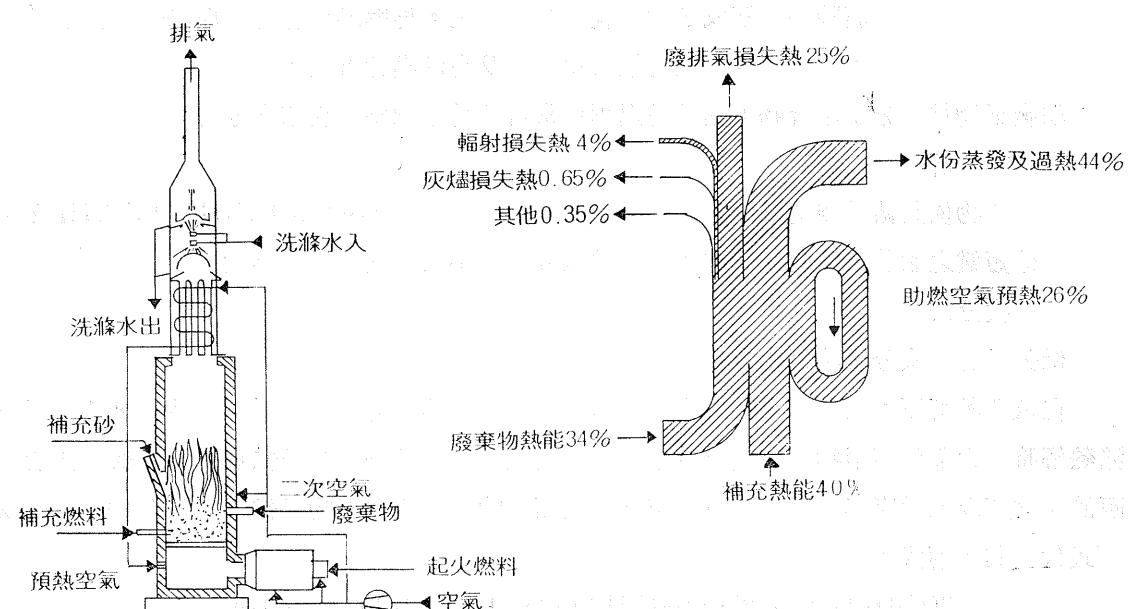
由於各種廢棄物種類、組成、性質的差異，所設計焚化爐因而有所不同，各爐之質能結算平衡不能一概而論，為說明家庭垃圾之種類及數量於焚化過程產生之殘留物及所需之助燃物（空氣、燃料）間之關係，本節以圖敘述二種焚化爐之質能平衡情形。圖十二表示依據質能平衡結算之數據，圖十三為每小時處理約10公噸之焚化爐之質能結算之經驗值，由某一大型家庭垃圾格式焚化爐調查所得數據，整理歸納而得。圖十四為專門處理煤油廠餾餘污泥之流體床焚化爐，利用廢熱預熱助燃之空氣，以節省添加燃料，其回收之熱能有26%。廢棄物焚化設備之處理成本計算，需考慮因素甚多，通常以個案計算為依據而散見於各種報告中。以1976年西德家庭垃圾焚化爐之設置成本加操作成本，分述如下：

- 處理容量每年在5萬公噸以下之小型焚化爐為45至50馬克／公噸。
- 處理容量每年在5萬至15萬公噸之中型焚化爐為35至40馬克／公噸。
- 處理容量每年在15萬公噸以上之大型焚化爐為20至30馬克／公噸。

以上成本不包括廢氣洗滌成本及廢熱回收利益。

總之，焚化法成本雖然比掩埋法高，但仍有它的許多優點。

- 焚化技術已能滿足廢棄物的高速分解率，如短時間內重量可減少60-75%，體積減少85-90%，大大地延長掩埋場的使用年限，在地狹人稠的地方甚為適宜。
- 熱能可回收，達到資源有效利用，而掩埋法則無此效益。
- 廢氣、廢水均能控制在規定排放標準範圍內。
- 焚化殘存物為無機物，已使廢棄物迅速達到安定，無毒化之境界。



圖十四 煤油餾餘物流體床焚化爐及其能量平衡

## 二、熱解

熱解又稱為脫氣、碳化、乾餾及悶燒，其定義為有機化合物在隔絕氧氣下加熱分解，產生氣體，冷凝可燃燒液體及碳化殘留物。

### 2-1 热解反應過程

廢棄物所含有機化合物在斷氧加熱條件下，呈不穩定態分解為簡單之流體（氣體及液體）狀分解物及碳化炭。在增加反應時間及提高溫度（超過500°C），通常所得之熱解產物，除 C, H 元素外，尚有 H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>，雙烯及芳香族穩定物，其在各溫度下之化學反應如下：

100—120°C 脫水及乾燥（物理性變化）

250°C 脫氧、脫硫、脫除結合水，產生 CO<sub>2</sub> 開始裂解作用，產生硫化氫氣體。

340°C 脂肪族化合物開始分解成甲烷及其他較短脂肪族烴。

380°C 乾餾生成物粘結在碳化炭上呈膠著狀態。

400°C 含碳一氧化及碳一氮化合物開始分解。

400—600°C 漚青化合物分解成乾餾油，溶類之膠狀液。

600°C 漚青化合物裂解或氣狀短鍵碳氫化合物之熱安定化物質。

>600°C 依據以下之假設反應產生芳香族（苯之衍生物）化物：

石臘烴裂解成丁烯，脫氫成丁二烯，再與乙烯化合成環己烷、環己烯類，如此再經高溫脫氫轉化為苯及高沸點芳香族。

如廢棄物為高分子聚合物，其熱解過程通常可分為下列兩種交錯之分解反應：

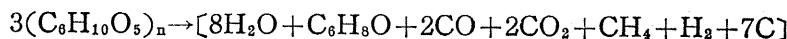
#### □一次分解

聚合物依其結構作選擇性之分解，如側鍵首先分解為 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> 及其他短鍵之脂肪族烴或其單體，而主鍵則分解成不同長度之烴類溶油。

#### □二次分解

低分子之一次分解物再化合為溶油。

在低溫熱解下，聚合物大部份化為溶油，一部份溶油分解成碳化炭及高熱值氣體。而高溫熱解時，大部分廢棄物之有機成份分解為穩定態一次分解物。含纖維物質，如紙、紙漿、廚餘、園藝及木材廢棄物，大部份由家庭垃圾而來的，這些廢棄物纖維素 (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>，以下式代表其反應式：



以下為木材低溫熱解過程及生成物組成一例：

溫度範圍(°C)	反 應 過 程	木材乾餾生成物組成 (ma%)
170	脫除自由水及結合水 產生少量醋酸、二氧化碳、一氧化碳、甲醇	氣體 14.2—16.8 木精 1.6—2.1
170—270	產生反應水、甲醇、醋酸、二氧化碳、一氧化碳	醋酸 3.6—7.7
280	木材高速分解成氣體及溶油	溶油 12.3—16.2
380	殘留物再受熱形成少量溶油、甲烷、氫氣，剩餘物為木炭	木炭 31.0—36.5

溫度 550°C 以下者，產生大量的燃油及溶膠，謂之低溫熱解。550 至 800°C 主要生成物為高熱值之可燃氣體及少量燃油及溶膠，為中溫熱解。而高溫熱解 (800 至約 1100°C) 所產生者大多為低熱值之氣體。假如對高熱值廢棄物行 1400°C 之熱解反應，除產生低熱值氣體外，所剩餘之殘留物為完全無菌、小體積，可回收利用作鋪路材料之單純爐渣。

表三為在某些操作溫度下，家庭垃圾經熱解產生各種生成物之一例。

表三 家庭垃圾在不同熱解溫度下之典型熱解生成物

熱解溫度 (°C)	熱解氣(kg/kg 垃圾)	酸、冷凝液、溶油 (包含水)(kg/kg 垃圾)	垃圾炭(kg/kg 垃圾)
482	0.123	0.611	0.247
648	0.186	0.186	0.592
815	0.237	0.597	0.172
926	0.244	0.587	0.177

熱解氣組成 (Vol.%)		溫 度 (°C)			
氣 體 項 目		482	648	815	926
H <sub>2</sub>		5.56	16.58	28.55	32.28
CH <sub>4</sub>		12.43	15.91	13.73	10.45
CO		33.50	30.49	34.12	35.25
CO <sub>2</sub>		44.77	31.78	20.59	18.31
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		0.45	2.18	2.24	2.43
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		3.03	3.06	0.77	1.07

垃圾炭組成 (Vol.%)		溫 度 (°C)			
成 分		482	648	815	926
揮 發 份		21.81	15.05	8.13	8.30
結 合 碳		70.48	70.67	79.05	77.23
灰 分		7.711	14.28	12.82	14.47

\*賓夕凡尼亞煉焦法焦炭之比較值

熱解為一種吸熱反應，所需熱量可經由下列方法獲得：

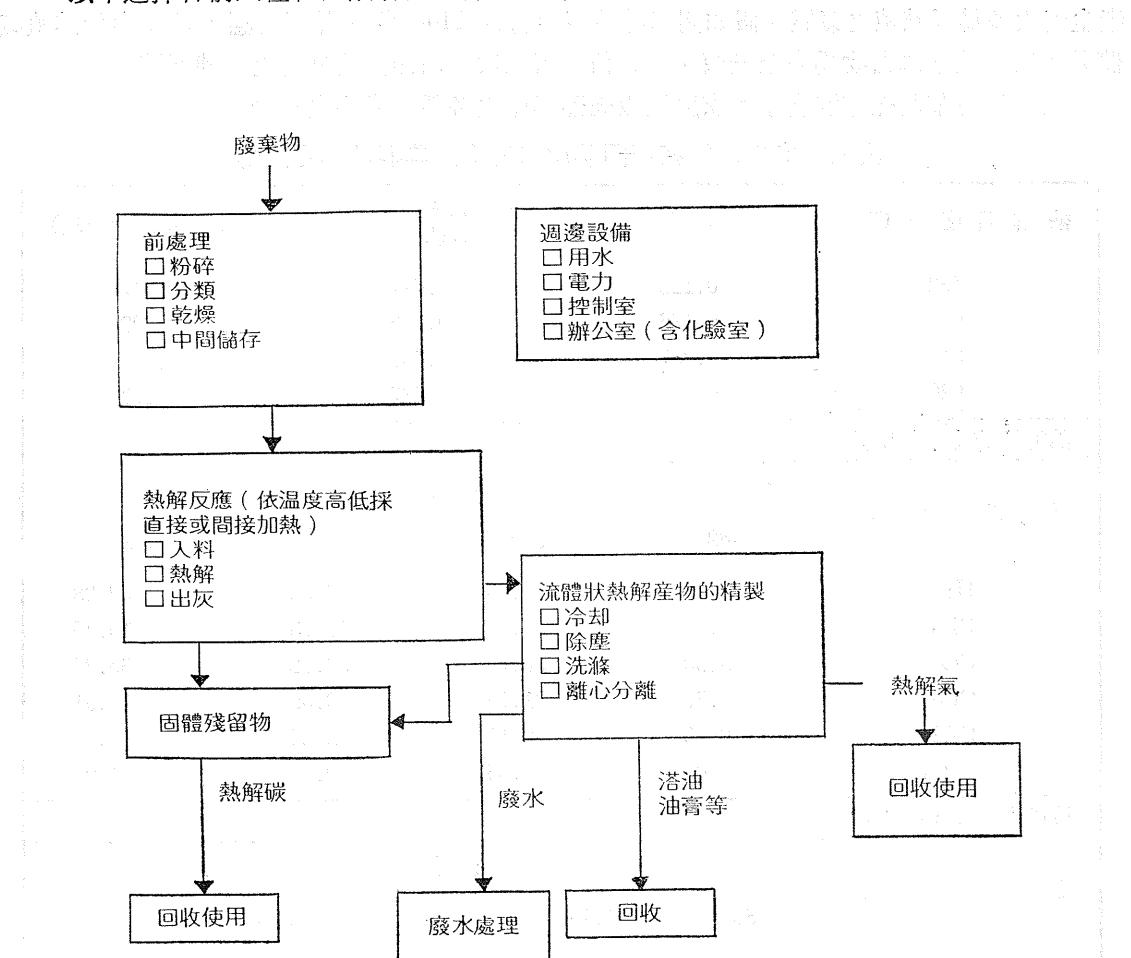
COMING UP

- (1) 經由金屬或耐火之壁間接傳熱。
- (2) 使用循環熱能媒介物，如鋼珠、熱砂、碳粉、熱廢氣、熔鹽或熔融態金屬直接加熱。
- (3) 藉碳素及自產可燃氣體或補助燃料的內部燃燒能。
- (4) 藉電弧通電直接發射熱能。

## 2-2 热解處理法及實例

廢棄物熱解法由於近十年來用於處理單純之廢棄物（如廢塑膠、廢輪胎）才漸受重視。熱解法可依其原理、反應條件、廢棄物種類、反應器型式、熱能傳送方式等分類，圖十五以方塊圖顯示熱解法各單元之流程。

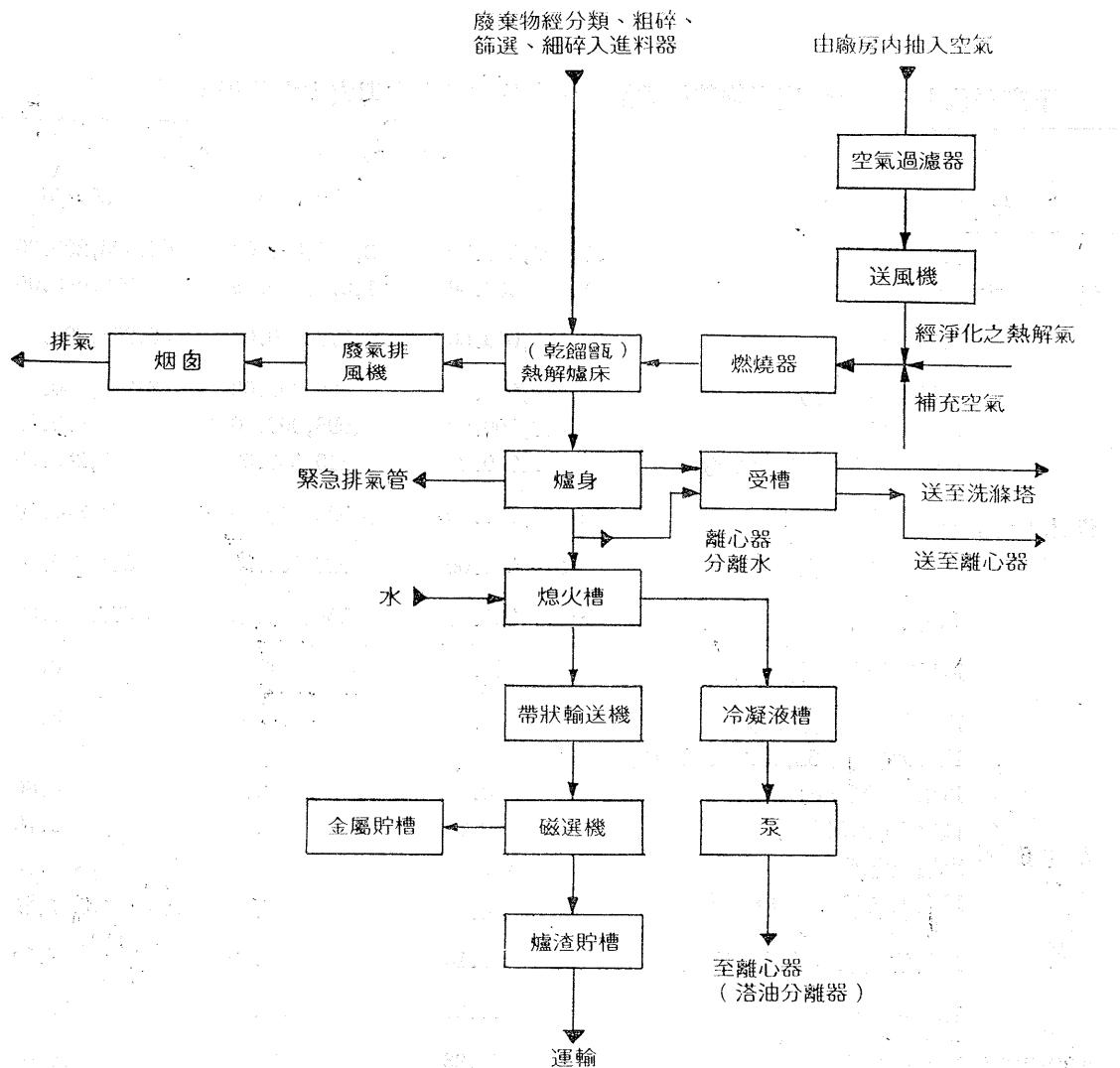
以下選擇目前六種在西歐各國已採用熱解法作簡單介紹：



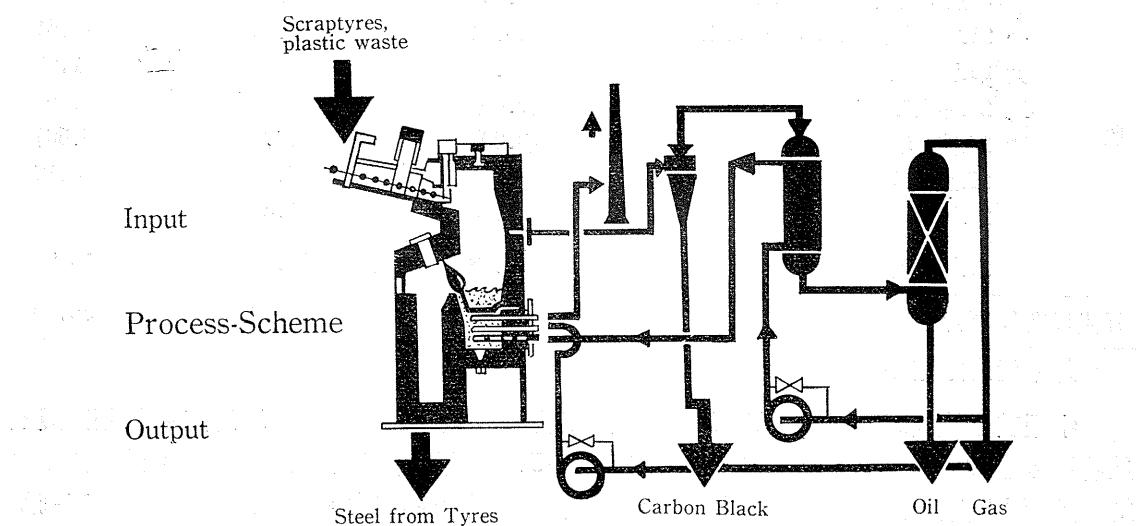
圖十五 热解法各單元處理流程

熱解法及反應器型式	廢棄物(例)	生 成 物 (例)	熱 解 氣 體 (例)
(1) Destrugas-Process  高溫同向流熱解爐，處理經破碎之大件垃圾， 和乾餾氣間接加熱，乾餾餌由耐火材料製成， 為垂直式爐，附設半靜止加料系統。圖十六為 本法流程。	廢棄物 有機物 42.0ma% 無機物 27.6ma% 水 份 30.4ma% 0.291kg 廢棄物	垃 圾 炭 乾粉53ma% (灼燒減量24%) 水份47% 空密度720kg/m <sup>3</sup> 熱含量Hu=5500kJ/kg CnHm 5%	垃 圾 炭 H <sub>2</sub> 47% CO 15% CO <sub>2</sub> 21% CH <sub>4</sub> 12% CnHm 5% Hu=14400kJ/kg
(2) Occidental Petroleum—(Garrett) Process  低溫同向熱解法，專處理經粗解後之家庭垃圾。 廢棄物在爐內以灼熱之碳粒呈渦旋狀之亂流 ，可作熱交換回收熱能。溫度500°C，垂直式 爐內安裝管狀反應器引出生產物。	家 庭 垃 圾	垃 圾 炭 油 C 57.5ma% H 7.6ma% O 33.4ma% S 0.1—0.3% N 0.9% Hu=21000kJ/kg	垃 圾 炭 C <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 8Vol% CO 14% H <sub>2</sub> 20% CH <sub>4</sub> 3% O <sub>2</sub> 3% CnHm 1% N <sub>2</sub> 51% Hu=5500kJ/kg
(3) Kiener-Goldshöfe-Process  經破碎之垃圾與其他廢棄物於旋轉窯爐中熱解 ，以氣體回轉機廢棄熱行間接加熱。溶油氣經預 熱空氣後，經過乾餾炭逐漸化分解，再經冷卻 ，後處理淨化，送至氣體回轉機發電。熱解溫度 450—500°C。	家 庭 垃 圾	垃 圾 炭 41ma% 28% 31% Hu=7000 kJ/kg(最小)	熱解氣 1.4kg/kg 垃圾 CO <sub>2</sub> 8Vol% CO 14% H <sub>2</sub> 20% CH <sub>4</sub> 3% O <sub>2</sub> 3% CnHm 1% N <sub>2</sub> 51% Hu=5500kJ/kg

(4) Babcock-Krauss-Maffel Process	廢棄物 粗碎廢棄物於特殊鋼製之旋轉窯爐行中溫熱解 ，使用乾餾氣燃燒間接加熱。熱解產物經除塵 、分離，部分預整空氣，再冷卻、洗滌。熱解 溫度在500—700°C。	熱解氣（淨化後） H <sub>2</sub> : 15—25% CO: 8—15%	
(5) Herko-Pyrolyse-Recycling-process	細碎廢輪胎於旋轉窯中中溫熱解，窯中置加熱 管以乾餾氣奏熱行間接加熱。油氣經冷凝器回 收熱解油，餘氣經淨化處理後送至氣體渦輪機 發電。熱解碳渣經細碎、篩分，回收廢鐵。  燒減量88.3% Hu=30200kJ/kg	固體熱解殘留物 (0.365kg/kg廢輪胎) 煤屑83.5ma.% 鐵 16.5% C 85.5% H 1.1% S 2.6% N 0.4% Cl 0.7% 燃燒減量88.3% Hu=30200kJ/kg	熱油 (0.468kJ/kg廢胎) CO24.6Vol% CO 4.66% O <sub>2</sub> 0.31% H 16.36% N 0.7% S 1.3% Cl 1.3% 燃燒減量88.3% Hu=40161kJ/kg
(6) 西德政府研究發展部與漢堡大學 Eckelman 公司合作發展的流體床熱解法(流程如圖十七) 。廢塑膠、廢輪胎於流體床熱解爐中，藉石英 砂高溫流動床 800 °C 分解，藉鋼管傳送熱氣 間接加熱。	廢胎 廢輪胎 廢塑膠	熱解油、碳黑、ZnO，鋼絲、氣體供作熱解燃料。 Hu34580kJ/mns	



圖十六 Destragas 热解法之方塊流程圖



圖十七 廢胎、廢塑膠之流動床熱解爐流程

下表係依 Destrugas 廢棄物熱解設備三種處然容量之處理成本之分析：

馬克 DM/DM/年/DM/t		DM bzw. DM/a bzw. DM/t 垃圾		
費用／收益		180t/d	270t/d	360t/d
資 本	1.設備資本	37,000,000.00	52,400,000.00	64,423,200.00
	2.流動資本(1)之 3 %	1,110,000.00	1,572,000.00	1,932,696.00
	3.(1)+(2)計	38,110,000.00	53,972,000.00	66,355,896.00
資 本 費 用	4.折舊(1)之 5 %	1,850,000.00	2,620,000.00	3,221,160.00
	5.設備利息(1)之 4 %	1,480,000.00	2,096,000.00	2,576,928.00
	6.流動資本利息(2)之 7 %	77,700.00	110,040.00	135,289.00
	7.資本服務費(4)+(5)+(6)	3,407,700.00	4,826,040.00	5,933,377.00
	8.保險(1)之 1 %	370,000.00	524,000.00	644,232.00
	9.(7)+(8)計	3,777,700.00	5,350,040.00	6,577,609.00
	10.以1t廢棄物計算(7)+(8)	57.49	54.29	50.06
	11.維修費用(1)之 2 %	11.26	10.63	9.81
	12.電力(各為 62,67,74kwh/t)自動電力			
操作 成 本	13.水(1DM/m³)	0.80	0.80	0.80
	14.廢水(2DM/m³)	0.70	0.70	0.70
	15.爐渣處理	( )	( )	( )
	16.人工(24/28/33，每人每年 30000DM)	10.96	8.52	7.53
	17.其他(藥品、事務用品…)	7.15	7.15	7.15
	18.(1)至(17)計	30.87	27.80	25.99
	毛處理成本 19.(10)+(18)計	88.36	82.09	76.05
	20.氣體售出 20DM/Gkal	*[14.96]	*[14.96]	*[14.96]
	21.電力售出 0.06 DM/kwh	10.54	10.96	11.61
收 益	22.廢 鐵	1.98	1.98	1.98
	23.非金屬	[0.85]	[0.85]	[0.85)
	24.玻 璃	[3.60]	[3.60]	[3.60]
	25.活性碳	4.16	4.16	4.16
	26.燃料油	1.80	1.80	1.80
	27.(20)至(26)計	18.48	18.90	19.55
	淨處理成本 28.(19)-(27)	69.88	63.19	56.50

\* 外來產生之電力

中型焚化爐(140~410t/d)處理每噸廢棄物為例，其成本為 35—40 馬克，但相同規模熱解法則需 50—80 馬克，成本較焚化法高出 30—50%，惟以資源有效利用觀點，熱解法不失為一重要之廢棄物回收可用資源之方法，值得繼續研究降低成本，故西方各國政府及工商業積極斥資興建甚多之具生產規模之試驗廠(Demonstration Plant)以資研究改進。

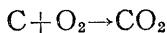
### 三、氣化法

於高溫條件下，使固體廢棄物中之含碳成份轉化為氣體可燃物之方法謂之氣化法。通常作為氣化劑者為氧氣、空氣、廢氣、水蒸氣、空氣、二氧化碳等，視氣化反應機之機構不同使用一種或一種以上之氣化劑。

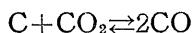
#### 3-1 氣化反應

經前處理過之固體廢棄物在氣化過程中亦有發生乾燥、乾餾等熱解過程而碳化（Carbonization），如圖十八係以方塊圖表示氣化各程序之關係。

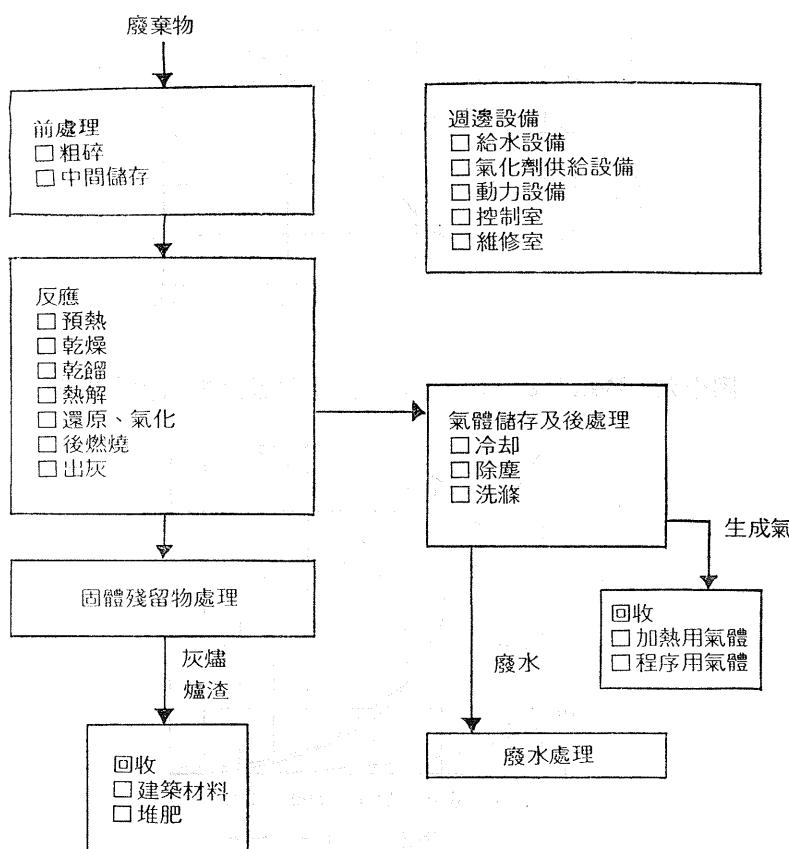
停留在乾餾狀態之碳素部份與空氣、氧氣發生放熱反應生成二氧化碳及一氧化碳。



此時燃燒床呈熾熱狀態，而二氧化碳經床體時會發生 Boudouard 還原反應與碳化合成一氧化碳。

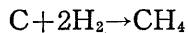


假如燃燒床溫度愈高，則 Boudouard反應愈能向右進行，其反應生成物與溫度之關係如十九圖。



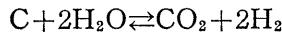
圖十八 固體廢棄物氣化處理法各操作單元一覽圖

氯化亦有加氫成放熱反應而得甲烷氣者，

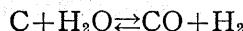


惟此法因成本及技術問題甚少使用。

氯化反應若使用水蒸氣，可與碳素進行吸熱反應，低溫下



高溫下



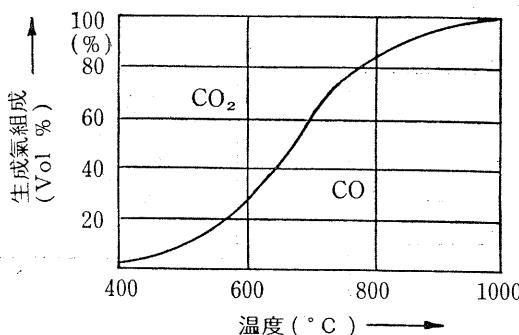
氯化速率依溫度、孔隙率、粒子大小及通過燃燒床的擴散速度而定，所需反應熱可由氣化反應器中之碳素部份燃燒熱獲得。

除有以上反應外，反應器中氯化區亦伴隨以下氣態反應：

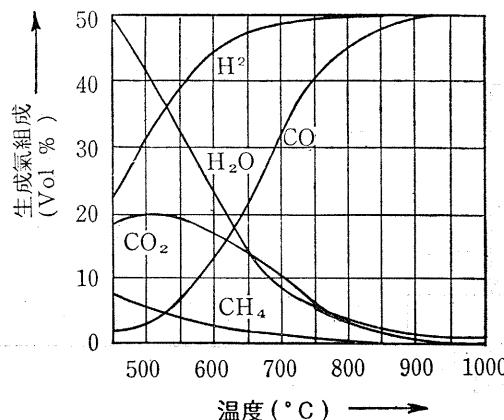


其反應生成物與溫度之關係，如圖二十。

在高溫氯化反應（800—1100°C）下，產生大量通常為低熱值之可燃氣體為本法之主要收益。對高熱值廢棄物在超高溫氯化反應（>1400°C）下，發生熔融態氯化殘留物，凝固後此種完全無菌，小體積熔渣可回收作其他用途之材料。



圖十九 Boudouard 反應在常壓下於溫度生成物之組成



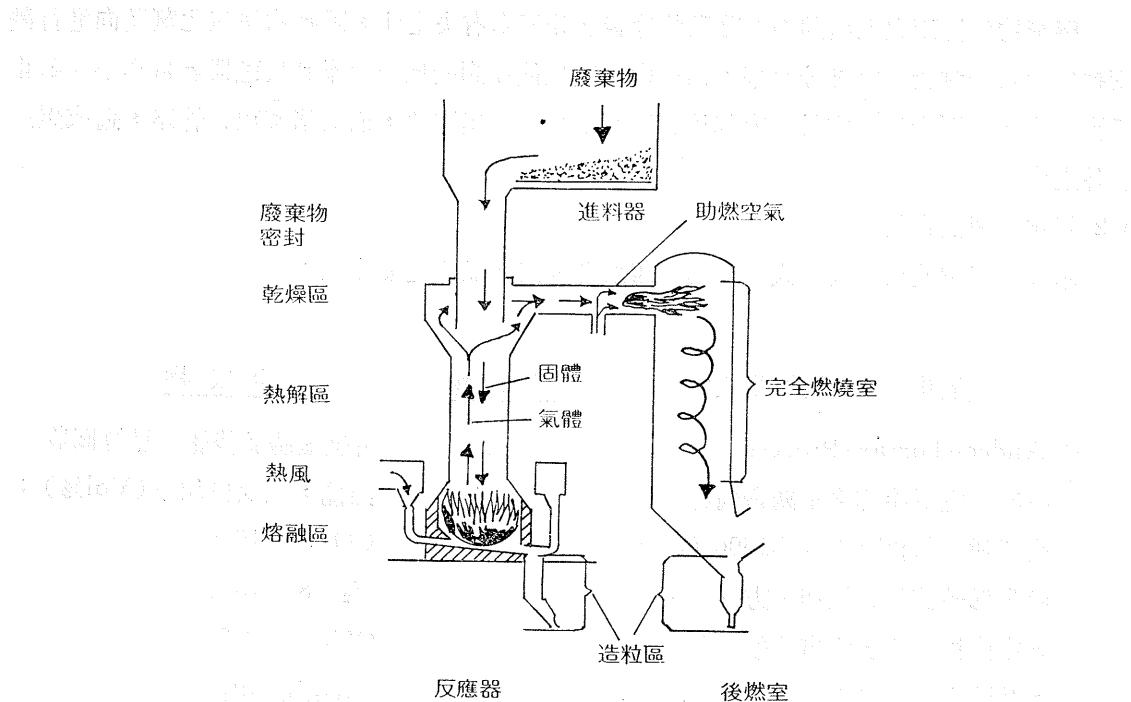
圖二十 在不同溫度下，炭素加水蒸氣氯化生成物之變化

廢棄物燃燒床與氣體間相之移動狀態對熱分解率有決定性，固體物與氯化劑逆向進行熱交換作用可達到較高之熱分解率，而同向反應只能達到較低分解率且反應器容量亦小。氯化反應器應注意到含煙類成份生成氣於高溫區出口有析出現象，而有堵塞出口管路，造成爆炸意外之虞。

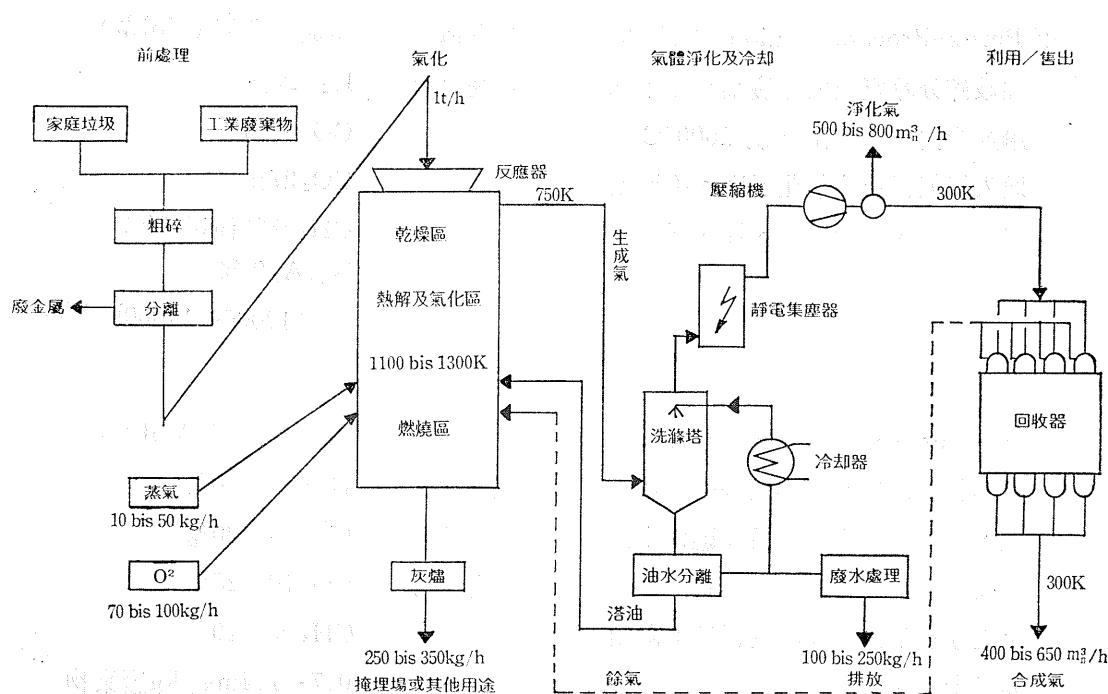
### 3-2 氯化處理法實例

本節以三個使用不同型式反應器在西歐各國已商品化之氯化法：

<u>氯化法、反應器型式</u>	<u>廢棄物</u>	<u>生成物</u>
(1) Andco-Torrax-Process 在有通空氣冷卻之不銹鋼爐身行超 高溫逆流氯化反應（約1600°C）， 產生低熱值氣體以切線方向進入後 燃室直接燃燒，附有連續出灰系統 ，其流程如圖二十一。	垃圾	可燃氣體於後燃室燃燒回收 熱能，且成份如下(Vol%)： CO 8—15% H <sub>2</sub> 8—15% CH <sub>4</sub> 1—4% C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> 測不出 熱值3000—6000k J/Nm <sup>3</sup>
(2) Purox-Process (Union Carbide) 經破碎分離廢金屬之廢棄物在不銹 鋼爐身內以超高溫（約 1600°C） 通入氧氣行逆流氯化反應，附連續 出灰系統、氣體冷卻、淨化系統。	經處理之 家庭垃圾	生成氣分析 (Vol%) H <sub>2</sub> 23% CO 38% CO <sub>2</sub> 27% CH <sub>4</sub> 及其他烴 10% N <sub>2</sub> , Ar 2% 熱值 12000—14000k J/m <sup>3</sup>
(3) Saarberg-Fernwärm Process 廢棄物經破碎、磁選及篩分所得細 粒，與氧氣、水蒸氣於反應器中以 超高溫行逆流氯化、附氣體冷卻、 淨化分離系統、程序及質量平衡如 圖二十二。	經處理之 垃圾及工 業廢棄物	生成氣分析(Vol%) H <sub>2</sub> 15—30% CO 25—30% CO <sub>2</sub> 10—25% CH <sub>4</sub> 5—10 0.7—1.4 m <sup>3</sup> /kg 廢棄物 供氧量 0.1 kg O <sub>2</sub> /kg 廢棄物



圖二十一】Andeo-Torrax Process 使用垂直氣化爐及後燃室之流程



圖二十二】Saarberg 自來暖氣系統之流程及其質量平衡

## 四、結語

- (1)加熱分解法可使廢棄物於短時間內達到減量化、無菌化、安定化及資源化之目的，對地狹人稠的臺灣可說是適當的廢棄物處理方式之一，政府現行對家庭垃圾處理法政策上亦朝此方向擬訂，而工業廢棄物依法賦予業者自行處理之責，惟全國七萬家工廠所產生之事業廢棄物部份其污染性較家庭垃圾更為嚴重，就95%屬中小企業來說，如由政府要求業者均依規定處理，限於政府人力亦無法全面管理，且不甚經濟，故宜輔導成立廢棄物代處理中心，而焚化爐為其中一必要之設備。
- (2)加熱分解法中以焚化法較易造成二次公害問題，故在建造之前，即應詳細調查廢棄物之種類、成份、組成及質、量變化情形，據以作為規劃設計適當之收集方法，前處理方式、焚化爐體、材料及廢棄處理系統。這些因素在熱解及氣化法中亦需考慮，惟後兩者仍均限於處理成本及技術問題，在先進國家仍不如焚化法來的普遍，惟在資源有效利用觀點，對某些日益增加之特殊廢棄物（如廢輪胎、免洗餐具、廢雜塑膠、高有機成份垃圾等）之處理仍值得研究發展。
- (3)國內廠商自行開發或引進國外技術製造之小型焚化爐，在防止二次公害方面，尙未能作周全之設計，加以若充分考慮這些因素，則加重設置成本，影響企業購買意願。故為徹底解決家庭垃圾或工業廢棄物焚化問題，因設備之投資動輒上億元，非一般企業所能負擔，由工業界或政府投資成立財團法人（非營利組織）成立大型焚化爐，則可充分考慮二次公害之防治，代家庭及工商業團體處理廢棄物，酌收處理費用，以求收支平衡，並以盈餘逐年攤還政府貸款。此法可減輕工商界自行設置焚化爐，而因國內技術、市場不足帶來的二次公害之困擾。
- (4)上述困擾在大發工業區廢五金專業區有十數家工廠擬設置廢電線電纜焚化爐表露無遺。按廢電線電纜有粗細長短之別，其包覆材料有塑膠（PE, PVC）橡膠、棉線、油線等之分，各有不同之燃燒速度及條件，若不先予分類，則易造成細線被氧化之過焦現象及粗線包覆不完全燃燒，徒增後處理之困難，降低銅價。如採用熱解法因爐內缺氧，銅線不致遭氧化，且不需事先分類，節省人工，並可利用熱解氣及分解之溶油作燃料，無需像焚化爐一樣須額外添加燃料，以保持後燃室在 850°C 以上，惟因設備較昂貴，故需予考慮該設備之處理能量、成本及回收年限等經濟因素。