

都市垃圾焚化廠採用旋轉窯焚化爐之設計簡介

林 傳 鑑*

一、前 言

垃圾焚化廠是將垃圾燃燒使成無機質，可達減量化、無害化、安定化之目標，焚化廠規模足夠時不但可以有效處理都市垃圾，避免造成公害，又可能源回收再利用達到經濟之目標。由於目前台灣都市土地難求，掩埋土地取得困難，而且垃圾未經焚化即掩埋容易產生危害，亦減短用地壽命，因此，目前已朝向將垃圾分可燃性與不可燃性兩種收集，而可燃性垃圾則儘量採用焚化爐加以燃燒，焚化過程所產生之廢熱予以回收，可供鄰近工廠之蒸汽、用戶溫水及發電之用。而將焚化之灰渣送到掩埋場作最終處置。

每日處理量大於三百噸之垃圾焚化爐，可歸類為大型都市垃圾焚化廠，國內負責規劃設計之顧問較偏好使用混燒機械床式焚化爐，由於焚化廠之垃圾處理量大時容易在設廠時遭到居民之反對，因而環保單位皆要求設置焚化爐時亦需建造能源回收設備系統，不但可節省操作方面之花費，又可利用能源回收之副產品回饋附近居戶，真正完全把有害物燒成無害之氣體如水蒸汽、二氧化碳及氮氣等。本文介紹之旋轉窯焚化爐則較不受到經濟規模之限制，在國外，已使用伍拾到佰噸之類似焚化廠處理都市垃圾成功之例子非常多，若國內環保單位及工程顧問公司對於其承辦之都市垃圾焚化廠能即時改變觀念，選用旋轉窯焚化爐來焚化處理垃圾，對於垃圾處理能減少民怨、解決用地取得方面困難，應是最理想之抉擇。

二、旋轉窯焚化爐

乙座現代化焚化系統中最重要的部份在於燃燒垃圾之焚化爐，旋轉窯式焚化爐是一種多用途焚化爐，它可以用來燃燒不同之垃圾包括臭氣、廚餘、固體甚至都市污水處理廠之污泥。其主要構造是一堅固耐火之圓筒，類似水泥窯。外殼為鋼製之旋轉窯，裝置稍微傾斜，其目的在於利用旋轉時使垃圾能夠靠重力移動，使攪拌均勻，混合加熱燃燒完全。由於旋轉窯內之停留時間不足，其在窯內除了加熱乾燥燃燒外，尚可將垃圾中之可燃分從固體轉化成氣體。為了使氣體完全燃燒，通常設計時包括了二次燃燒室，使前後兩窯之燃燒成為一連串以發揮其效能。一般而言，分解蒸餾及部份燃燒過程發生於旋轉窯內而二次燃燒室則完全保持氣相下之燃燒過程，因此二次燃燒室皆直接和窯之末端相結合。

*中華工程股份有限公司技術發展處副經理

旋轉窯式焚化爐，一般可分兩種型式：基本型及擴充型，兩種型式焚化爐在輔助設備上略有不同，但其目的都是要使揮發性及有機性垃圾在第二燃燒室中完全燃燒。一般垃圾產生氣體在第二燃燒室中完全燃燒只需1~3秒。一套完整之旋轉窯式焚化系統之流程及設備示意如圖1、圖2所示。基本型焚化系統僅包括了旋轉窯及第二燃燒室。垃圾進入窯內燃燒時圓筒保持全天24小時緩慢轉動，垃圾一般由爐頂投入，慢慢往下移靠轉動推向末端；液態之廚餘或油類可用泵直接壓入，以管子注入爐中，在旋轉垃圾向下移之過程中，垃圾中之有機物成分逐漸被熱分解破壞而產生可燃性氣體，所產生之氣體可用作旋轉窯本身及第二燃燒室之補充燃料。

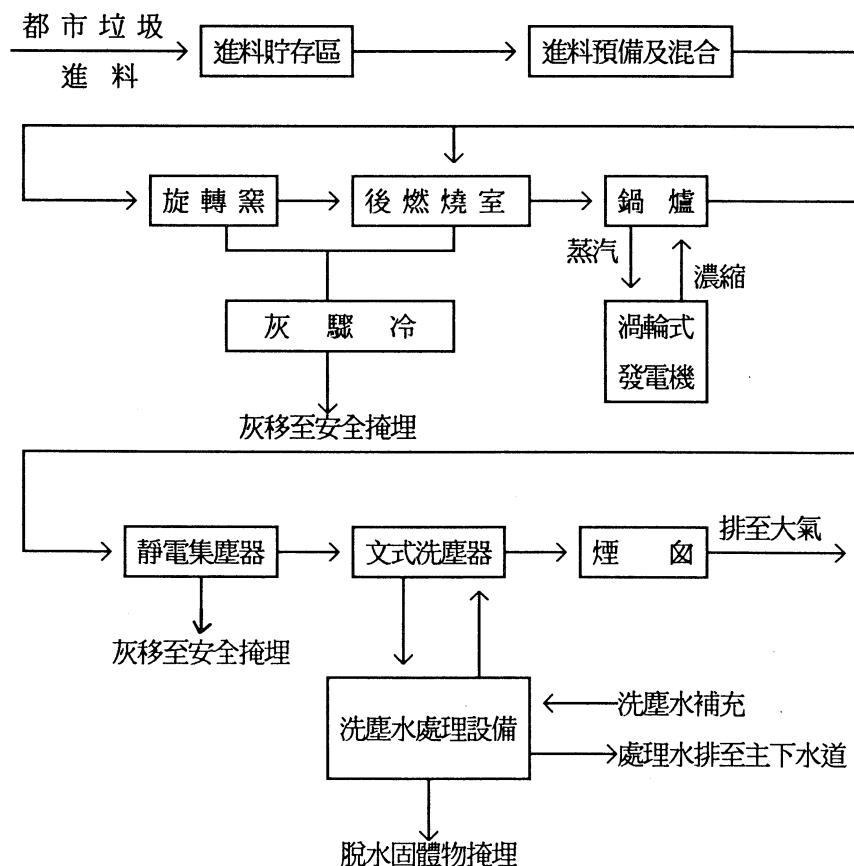


圖1 典型旋轉窯焚化處理流程圖

擴充型比基本型多了乾燥及燃燒設備，一般用於工業廢棄物或濕度較大之廢棄物。在燃燒區內，固體廢棄物於進入旋轉窯之前先行燃燒，而垃圾進入燃燒區之前，必須在

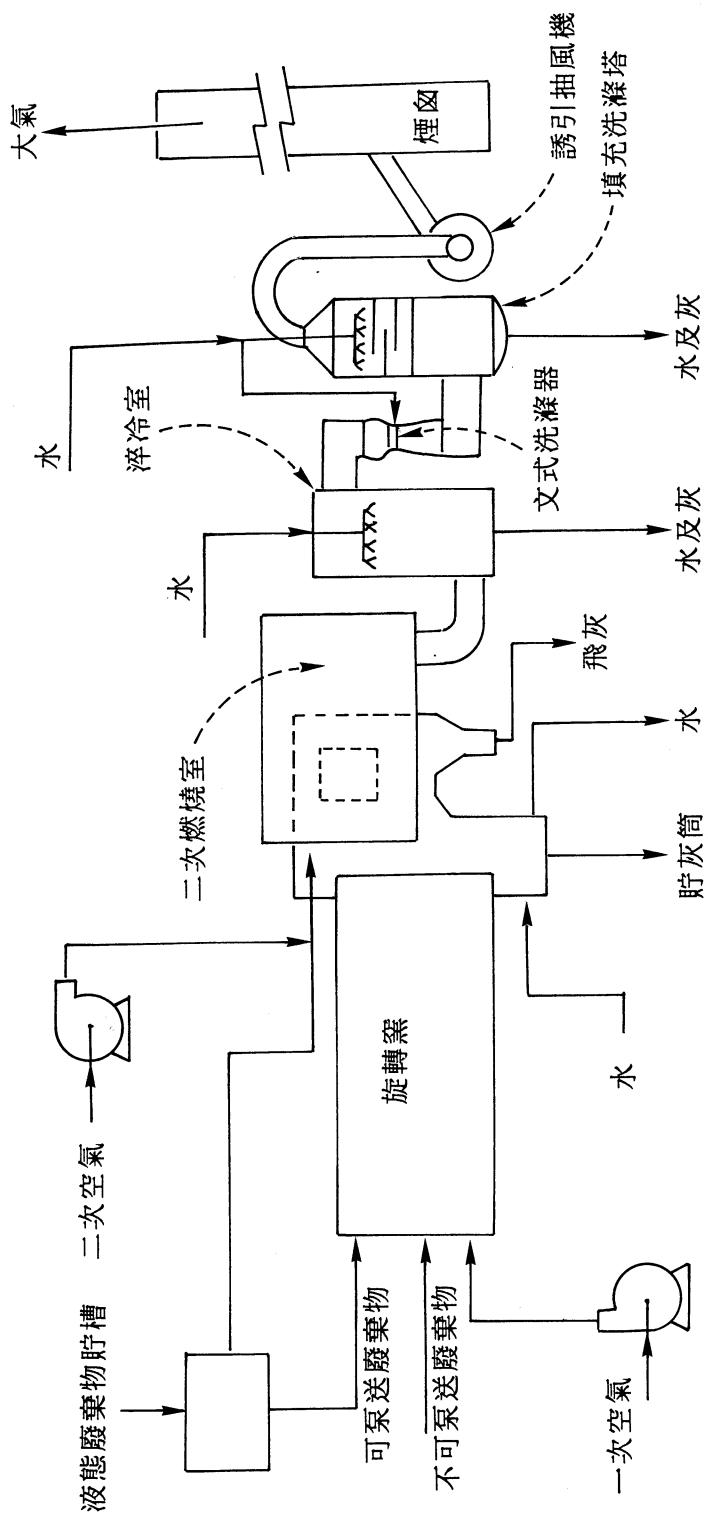


圖 2 旋轉窯式垃圾焚化系統

乾燥區內預熱乾燥；如果廢棄物是氣體或液體就不在前二區內乾燥或燃燒，而直接進入旋轉窯或第二燃燒室內燃燒，含水量高之垃圾宜在乾燥區內，將垃圾中之水及揮發性有機物蒸發後，通過旋轉窯再進入第二燃燒室。因此旋轉窯本體之主要功能為將固態垃圾中之可燃分轉變成氣相，作為第二燃燒室之燃料。

三、旋轉窯焚化爐設計及操作要項

焚化爐設計需要考慮之三要素，即所謂三T：溫度、停留時間及攪動，以達到三效即溫效、時效、燃效。試分述如下：

1. 溫度：溫度是控制焚化過程中垃圾燃燒是否完全之主要因素，操作人員必須依照垃圾之熱含量、進料量、出灰量和空氣量來加以調整控制焚化溫度。燃燒溫度必須控制在達到垃圾燃燒氣化、分解及化學反應最佳時間之溫效。
2. 停留時間：停留時間亦可由旋轉窯之傾斜度及轉速來控制，主要是達時效，務使垃圾在燃燒室中與空氣接觸之時間，能夠達到完全燃燒之有效時間，以避免產生有害之中間產物。有效時間之長短，視垃圾本身之特性，燃燒溫度，及進料垃圾粒子大小而定。
3. 攪動：即時效再達燃效便須使燃燒旺盛，使垃圾與空氣或輔助燃料充分混合，以期達到完全燃燒；設計上常藉機械法或氣流動力法，以達完全混合之目的。

焚化處理有機物如垃圾，於焚化後必須達到排放標準避免造成二次污染，通常人們對於垃圾焚化處理對環境之影響，問題爭論點集中於「戴奧辛」一種塑膠物在不完全燃燒下產生之有毒物質。事實上，焚化爐若採用較高溫操作，如旋轉窯操作溫度可控制在 $1300^{\circ}\text{F} \sim 2500^{\circ}\text{F}$ 範圍內，而戴奧辛在 1300°F 就已開始分解，而到了 1800°F 則已被分解徹底銷毀。飛灰和其他塵粒物質均經由最進步之空氣污染防治輔助設備處理控制得宜，所以只要焚化爐系統運用及設計上加以審慎設計，並在操作進料控制得宜，在台灣選用旋轉窯型垃圾焚化爐，其廢氣排放均可達台灣地區之空氣污染物排放管制之要求標準。

四、旋轉窯焚化爐本體及煙囪之設計範例

為有效解決台灣地區垃圾問題，及避免二次公害問題之發生，對於垃圾焚化爐之建造必須要有完善之規劃設計及採購施工計畫，尤其是焚化都市垃圾採用旋轉窯型式中最為重要之本體及煙囪設施功能之計算，更必須審慎進行。

假設有某一城市之垃圾每天收集量為 130噸，均為可燃性，經評估篩選後選擇旋轉窯焚化爐，規劃為2 線操作，每線之處理容量為6 噸／天 經調查分析垃圾之含水量為

30%，分析乾垃圾之熱值平均為6,500 BTU/1b，則每線焚化爐之基本假設及設計資料如下：

1. 設計基準及假設

- (1) 進料率 = 65 噸／天 = 6,067 1b/hr，每天皆24小時操作。
- (2) 含水率 = 30%。
- (3) 乾基垃圾熱值平均為6,500BTU/1b。
- (4) 設計過量空氣為30%。
- (5) 水份之蒸發熱為1,060 BTU/1b。
- (6) 經分析每磅乾垃圾經燃燒會形成0.56磅之水。

2. 熱量之平衡計算

- (1) 因垃圾投入所產生之熱量。

$$0.7 \times 6,500 \times 6,067 = 27,604.850 \text{ BTU/hr}$$

- (2) 假設有15%之輻射損失，因此扣除水份蒸發熱及熱損失後剩餘熱值為

$$27,604.850 \times (1 - 0.15) - (6,067 \times 0.3 + 6,067 \times 0.7 \times 0.56) \times 1,060 = 19,013.857 \text{ BTU/hr}$$

3. 選擇旋轉窯之尺寸

一般而言旋轉窯之表面積熱值負荷容許300,000 BTU/ft² · hr

而體積熱值負荷容許20,000 BTU/ft² · hr

$$\text{因而需要窯體之體積} = \frac{27,604.850}{20,000} = 1,380 \text{ ft}^3$$

爐床長度與直徑之比值L/D

L/D，主要係視廢棄物或垃圾之種類而定，一般為L/D = 2~10，假設以平均值5.5代入停留時間公式計算S

$$T = 0.19 \times \left(\frac{L}{D}\right) S \cdot N$$

上式中，S為窯之傾斜度（公尺／公尺）或（ft/ft）

N為窯之轉速RPM 或轉／分

由於旋轉窯之優點為停留時間較長可達2小時，可以用高溫處理分解

PCB，選用T = 90分鐘，轉速採用1RPM。

則90 = 0.19 × 5.5 × S × 1

$$S = 86.12$$

$$S = \frac{L}{2 \times D \times \tan \phi} = \frac{5.5}{2 \times 86.12} = 0.0319$$

$$\tan \phi = \frac{5.5}{2 \times 86.12} = 0.0319$$

$$\phi = 1.8288646 \text{ 度或 } 3.1919 \text{ Rad}$$

旋轉窯之燃燒室熱負荷受體積控制，可計算出需要之長度，因為
 $L = 5.5 \cdot D$

$$\frac{\pi D^2}{4} \times 5.5D = 1380 \text{ ft}^3$$

$$D^3 = \frac{1380}{0.7854 \times 5.5} = 319.47$$

$$D = 6.84 \text{ ft} \text{ 採用 } 7 \text{ ft, 得知}$$

$$L = 38 \text{ ft}$$

結論為採用有效內徑 7 ft，長度 38 ft 之旋轉窯，其與水平之傾斜角
 $\phi = 3.19 \text{ Rad}$ ，轉速 1 RPM，停留時間 90 分鐘。

五、二次污染防治分析

垃圾經旋轉窯及二次燃燒室焚化完畢後需經空氣污染防治處理，再由煙道以強制送風排入煙囪。操作時需對二氧化碳、一氧化碳、懸浮微粒及廢酸氣做監控和測試，設計時預測可能排出之廢氣量及溫度，方可求出需要煙囪高度及大小。目前全世界可應用於廢氣冷卻及廢氣處理之技術有多種。空氣污染處理技術，屬於另一範疇之科技，因限於篇幅在此僅就計算排氣量及煙囪設計作一範例介紹，茲續前述設計介紹，再計算如下：

1. 廢氣之重量計算

一般乾垃圾焚化完全，在超量空氣 30% 條件下，每磅乾垃圾會產生 9.461b 之廢氣，而垃圾中之水分燃燒每磅水分會產生 0.3 lb 之廢氣，因每磅垃圾中含有 30% 之水分，故總共會產生廢氣重量為 $6,067 \times 0.7 \times 9.462 + 6,067 \times 0.3 = 42,004.3 \text{ lb/hr.}$

2. 產生廢氣在 60°F 時之體積

因在前述條件下之每磅垃圾可衍生廢氣體積為

122.096 ft³/lb 垃圾，計算產生廢氣在 60°F 之體積或量。

$$(6,067 \times 0.7 \times 122.096 + 6,067 \times 0.3 \times \frac{379}{28}) \times \frac{1}{60} \text{ cfm}$$

$$= 640 \text{ cfm} + 8642 \text{ cfm} = 9,282 \text{ cfm} (60^\circ\text{F})$$

3. 預測廢氣未經冷卻之溫度

假設廢氣之比熱數 $0.26\text{BTU}/1\text{b} \cdot ^\circ\text{F}$ ，室內自然爐溫 88°F

$$\frac{19,013,857}{42,004.3 \times 0.26} + 88^\circ\text{F} = 1,829^\circ\text{F}$$

4. 轉換成煙道氣在出爐溫度 1829°F 之廢氣體積

$$9,282 \times \frac{1829+460}{60+460} = 40,860 \text{ cfm}$$

5. 設計煙囗尺寸及自然排放之水柱壓力

假設廢熱經能源回收鍋爐吸熱後，其他空氣污染防治設備排氣溫度為 480°F ，排氣量變為

$$40,860 \times \frac{480+460}{1829+460} = 16,780 \text{ cfm}$$

理想之煙囗排出速度為 40ft/sec ，求煙囗直徑D

$$40 = \frac{16780}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2 \times 60} \quad D^2 = 8.9 \quad D \approx 3\text{ft}$$

再假設為達現行排放標準及煙囗之最低高度要求為 200ft ，因排進煙囗之溫度為 480°F ，而煙囗頂之週界溫度僅 78°F ，高度H為 200 ft ，可計算自然抽取水柱壓力

$$Dt = 0.52PH \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

$$= 0.52 \times 14.7 \times 200 \left(\frac{1}{78+460} - \frac{1}{940} \right)$$

= 1.2153 英吋水柱之向上吸壓

再考慮煙囗內之摩擦損失Fs

$$Fs = \frac{0.008H V^2}{DT} = \frac{0.008 \times 200 \times 40^2}{3 \times (480^\circ + 460^\circ)} = 0.9078$$

得到淨存向上吸壓為 $1.2153 - 0.9078 = 0.3075$ 英吋水柱吸壓。

結論為採用2呎直徑200呎高，不銹鋼製內襯防火材料之煙囗。

採用旋轉窯焚化爐之最大優點在於垃圾能夠完全燃燒，所產生廢熱溫度高易於利用廢熱鍋爐有效產生蒸汽發電，一般每磅垃圾可回收之蒸氣量為垃圾重量之1~2倍。熱量回收率約60~70%，照本文所作範例可計算理論蒸氣量及可發電量，其計算如後：

1. 假設可產生蒸氣量以重量計

如前述鍋爐出口之排氣溫度為480 °F，在鍋爐內有 3% 之輻射損失，產生蒸氣之比熱為 1,250 BTU/lb

$$\frac{42,004.3 \times 0.26 \times (1829 - 480) \times 0.97}{1250} = 11.423 \text{ lb/hr}$$

2. 可發電量

共計有2 線之65T/day 焚化爐，共用一多段凝結式汽輪發電機估計每17 lb/hr 蒸氣可產生1KW 之電量

$$\text{故可產生電量 } \frac{2 \times 11,432}{17} = 1345 \text{ KW}$$

估計垃圾燃燒所發生之蒸氣可穩定產生至少1000KW之電量，足夠供給全焚化廠之自用電力，同時亦可剩餘約一半之電力售予台電。

七、結語

本文所介紹之2 × 65噸／天，處理都市垃圾之旋轉窯焚化爐系統，全部系統係兼有廢氣處理及廢熱能源回收發電利用之現代化焚化爐，可徹底解決目前全國普遍發生之都市垃圾無法適當處理之問題。基本型之簡單旋轉窯焚化各項設備示意如圖3 所示，而本文所舉範例，假若初期投資金額地方政府一時無法籌足，可先行建造乙線65噸／天焚化爐乙座，暫不投資發電部份，可利用鍋爐產生溫水或蒸汽先回饋鄰近住宅或售給需要蒸汽之工廠，俟試用該套焚化爐操作成功滿意後再考慮擴建第二線65噸/天焚化爐及發電機設備，完工後即可短期內回收全部投資成本，節省焚化爐之操作費用，圖4 示出第一線設備之立體圖謹供讀者參考。

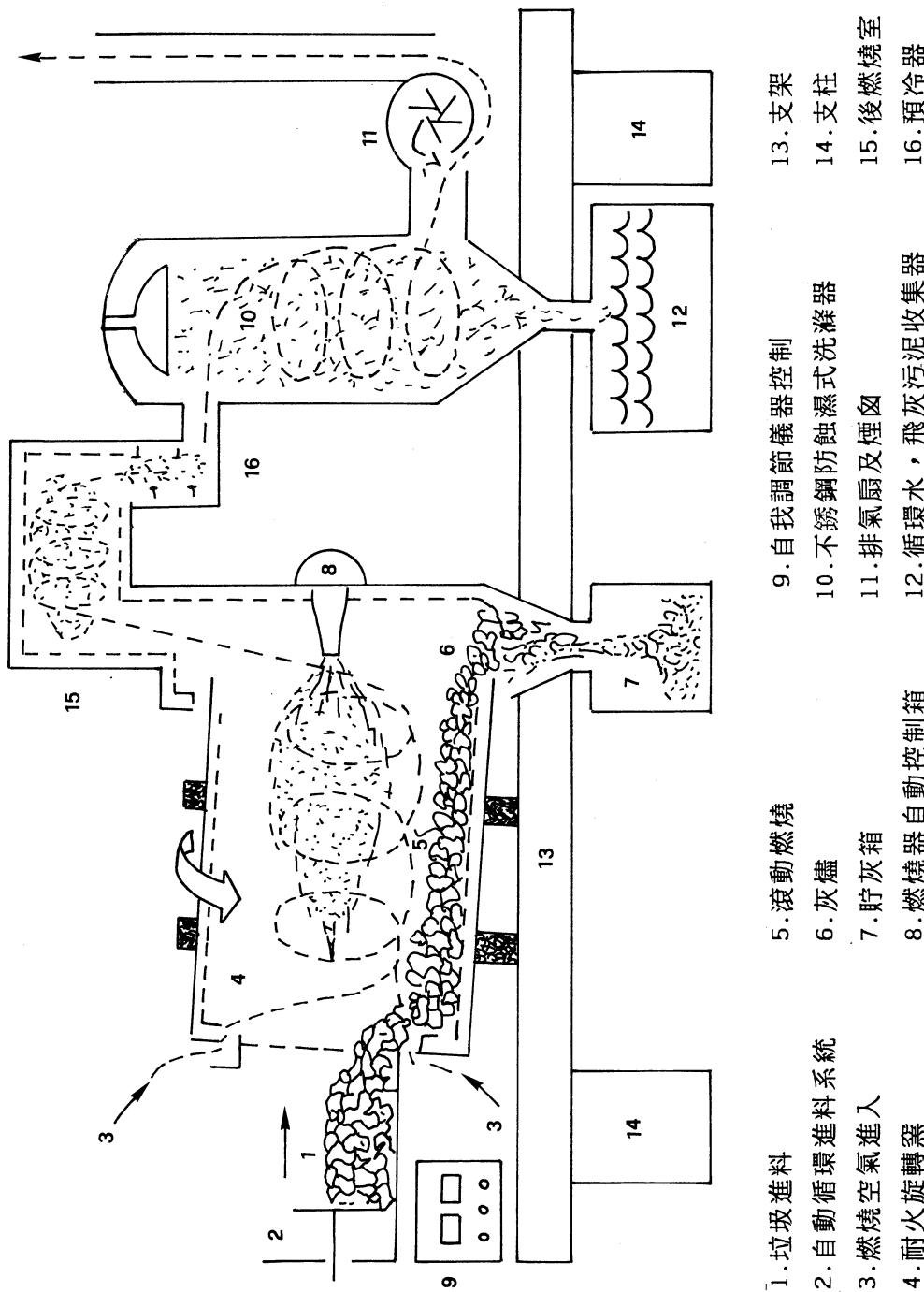


圖3 簡單旋轉窯焚化爐示意圖說明

1. 回收貯存區
2. 提昇倒入斗
3. 走板進料
4. 據壓進料機
5. 主要燃燒室
6. 灰燼調理（需要才設置）
7. 二次燃燒室
8. 壓粒出口
9. 緊急排煙道
10. 水管式鍋爐
11. 廢氣繞流扇
12. 節熱器
13. 酸中和室
14. 石灰貯存槽
15. 細粒去除系統
16. 排放煙囪

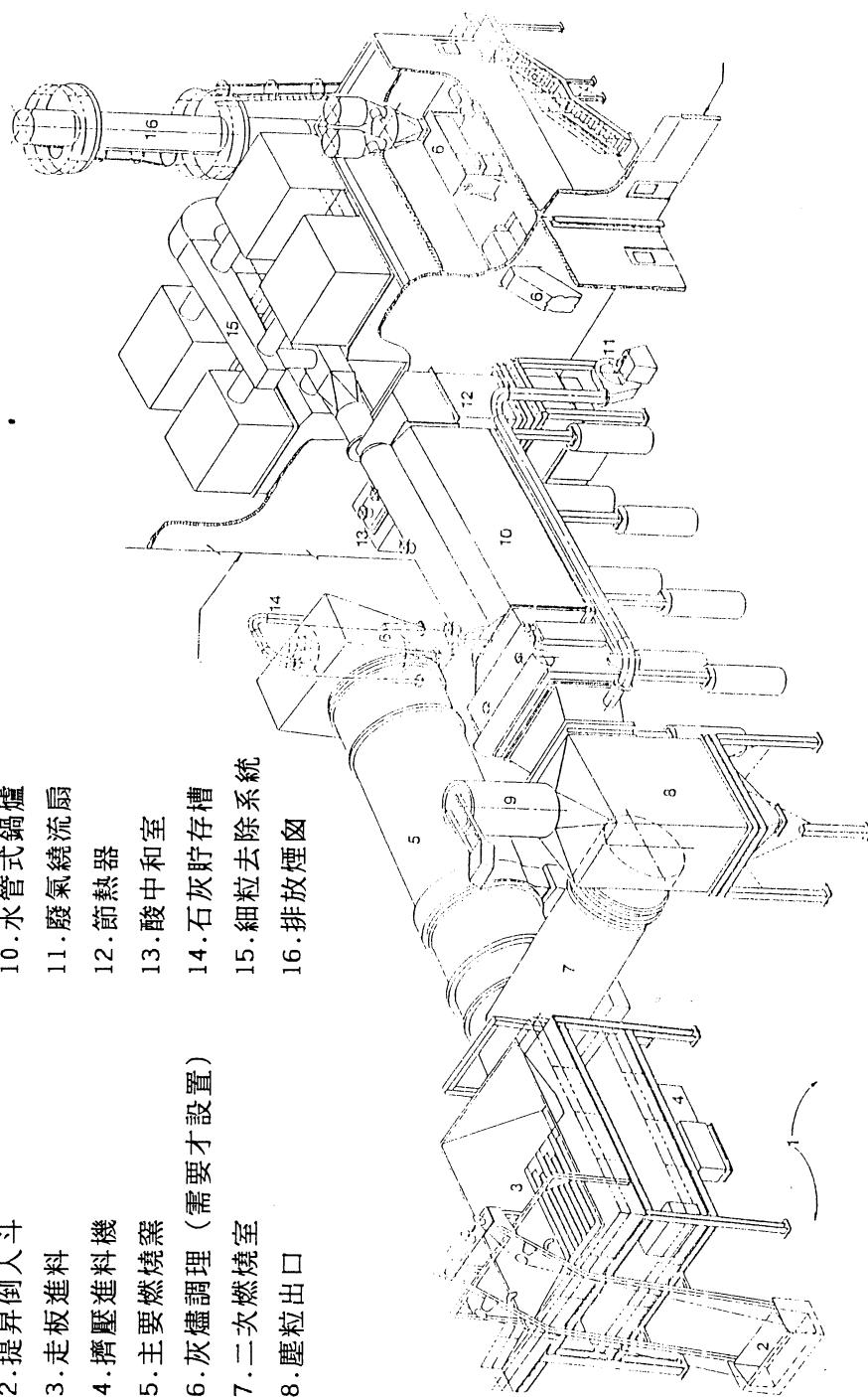


圖 4 旋轉窑焚化爐系統立體圖