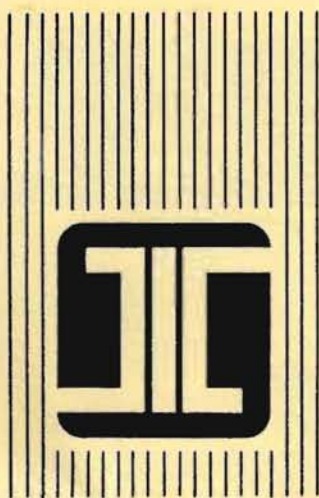


1990-03-02



事業廢棄物之焚化處理

洪美雲、張榮興

抽印自

能源、資源與環境季刊 Vol. 3, No.3, 1990.

Reprinted from

Energy, Resources & Environment Quarterly Vol. 3, No.3, 1990.



事業廢棄物之焚化處理

洪美雲、張榮興

工業技術研究院能源與資源研究所

焚化系統的設計、建造及操作，國外已累積相當可觀的經驗，並且已有多種商業化系統應市。國內對焚化系統中的部分零組件雖已具備自製能力，卻仍甚缺乏整個系統的設計、規劃經驗。對焚化技術的相關研究也仍在起步階段。

本文將介紹事業廢棄物焚化技術發展現況，說明焚化系統的種類及其使用範疇，最後再說明焚化技術中燃燒破壞效率及空氣污染防治相關問題。

■緒論

近年來由於工業快速成長，國人生活水準提高，廢棄物產量大增；加上各地的工業區及零星工廠又如雨後春筍般設立，使得事業廢棄物產量遽增，性質亦趨複雜。雖然我們創造了「台灣式奇蹟」的工商業成長，但在工業快速成長的背後，我們卻也使寶貴的環境受到嚴重的污染。工業生產所造成的公害亦時有所聞。例如七十五年四月間台灣南部二仁溪受含銅離子的工業廢水污染，導致茄苳一帶漁民養殖的牡蠣變綠且大量死亡，造成養殖戶的重大損失。又如同年十一月間廢五金專業區燃燒廢五金產生的煙塵，造成灣裡一帶居民千餘人感染呼吸疾病，且使當地果園農作物大量枯萎。這類公害事件促進了國人環保意識的高漲，法規管制漸趨活躍，很明顯地，有害事業廢棄物的管制，將成為我國未來數年中主要的全國性活動之一。往後將會有愈來愈多的廢棄物受到管制，新興廢棄物處理工業將可預期呈現高速的成長。

我國有害事業廢棄物年產量估計高達 290 萬多公噸，並仍將隨經濟成長而增加，因此，其管制已勢在必行。有害事業廢棄物的管制措施基本上可分為三大類：一、減少廢棄物產量，二、處理或破壞，三、固定化、包裝及掩埋。但近年來，由於環境保護意識的覺醒，法規管制的漸趨嚴格，使得廢棄物的管理方法產生明顯的改變。較傳統且費用較低廉的直接掩埋法、和地面掩埋體儲存法及深井注入法，在短期內可能部份將被下列方法所取代：

- 一、產生源的廢棄物減量化
- 二、廢棄物再利用
- 三、物理／化學／生物處理法
- 四、焚化處理
- 五、化學安定化／固化法

其中廢棄物減量化及再利用，除了具有環境保護的功能外，更具資源有效利用之意義，應優先考慮。對於無法回收利用的廢棄物，則必須考慮以適當的技術加以處理。

而在這些處理技術中，又以正確設計的焚化系統最能有效處理、破壞各種有害事業廢棄物。焚化系

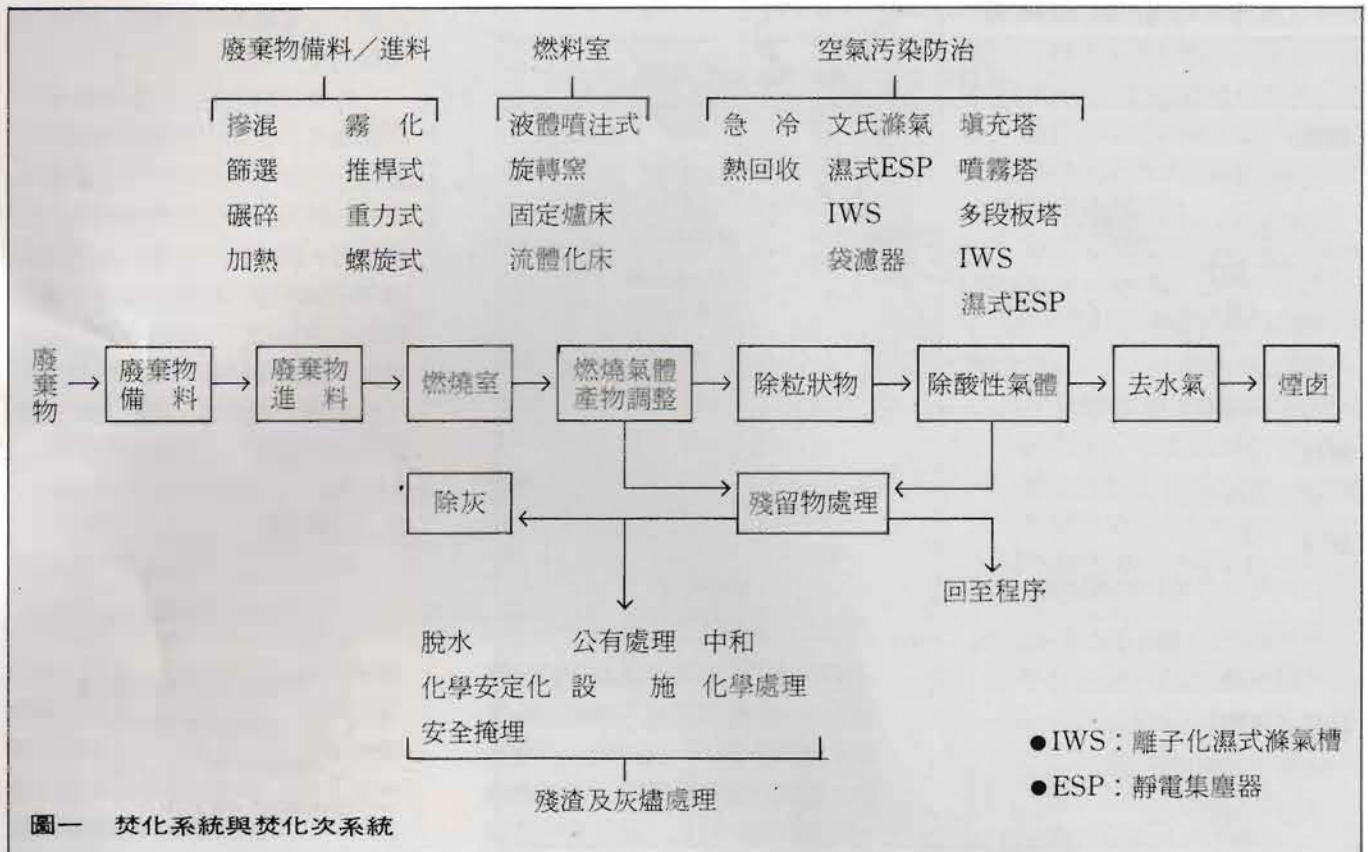
統的設計及操作，國外已累積相當可觀的經驗，並且已有多種商業化系統應市。國內對焚化系統中的部份零組件雖已具備自製能力，但仍缺乏整個系統的規劃及設計經驗。有鑑於此，工業技術研究院能源與資源研究所刻正在經濟部科技顧問室的資助下，積極進行焚化技術研究開發工作，希望在近期內建立焚化系統設計能力，並與國內廠商合作，興建示範性焚化爐，累積焚化系統的設計、建造能力。然後，利用這些示範性焚化爐進行系統化的事業廢棄物焚化技術研究工作，提供國內相關業者使用。

本文的目的在於介紹事業廢棄物焚化技術的發展現況，說明焚化技術未來的研究方向。

■焚化技術

事業廢棄物焚化系統的選擇與設計極為複雜，依其使用頻率，四種最常見的焚化爐設計依序為：液體噴注式、旋轉窯、固定爐床、及流體化床焚化爐。雖然，文獻上已有許多資料可資依循〔U.S.EPA, 1981；Niessen, 1978；Brunner, 1984〕，國外工業界亦已累積許多寶貴經驗。但因限於篇幅，本文無法針對各種事業廢棄物焚化爐的設計原理作詳盡說明，僅就各焚化系統最重要的特徵及重要的設計考慮因素作一概略性介紹，相信對其操作及污染排放性能的了解必有所助益。

事業廢棄物焚化系統可區分成四個主要次系統：一、廢棄物備料及進料系統；二、燃燒室；三、空氣污染防治設施；四、殘渣／灰燼處理系統。這些次系統的正常排列次序如圖一所示。各單元的適當組合，則視所要焚化的廢棄物之物理及化學性質而異〔Oppelt, 1987〕。以下分別就四個主要次系統作一扼要說明。



一、廢棄物備料及進料系統

廢棄物物性決定所適宜採用的進料方法。通常液體廢棄物均先摻混後，即送經噴嘴或特殊設計的霧化燃燒器，再進入燃燒室中焚化。廢棄物中若含有懸浮的粒子，則必須先用濾網過濾，以防止噴嘴或霧化器的小開口被堵塞。雖然，廢棄物的熱值低到 4,000 Btu/lb. 仍可維持燃燒，但通常液體廢棄物都摻混到熱值超過 8,000 Btu/lb. Ackerman 等人(1983)曾焚化過氯含量超過 70% 的廢棄物，但基於安全理由，操作員通常將氯含量限制在 30% 以下。摻混到這種含量以下，可獲得最好的燃燒控制，並有效抑制燃燒產物中生成有害的氯氣。

體積較大的固體廢棄物可能需先碾碎控制其粒子大小，再利用推桿 (Rams) 進料器、重力進料器、氣鎖式進料器、振動式或螺旋式進

料器、或皮帶進料器送至燃燒室焚化。以容器包裝的廢棄物通常利用重力或推桿進料器投料。

二、燃燒室

燃燒室型態的選擇主要決定於廢棄物物理性質及灰份。表一為四種主要的焚化爐型式及其適用範圍與廢棄物種類之關係。以下分別就其特徵、使用狀況、及優缺點加以說明。

● 液體噴注式焚化爐

液體噴注式焚化爐主要用於焚化可啣送的液體廢棄物。其結構簡單，爐體本身通常為一內襯耐火材料的圓筒狀結構，並裝有一或多具廢液燃燒器。液體廢棄物由燃燒器射出，霧化成微粒，呈懸浮狀燃燒。燃燒器或獨立的廢液噴嘴可由軸向、徑向或切線方向射入。而採用渦旋燃燒器設計，則更可提高其使用效率。

渦旋燃燒器焚化爐及旋風焚化

爐為兩種最常被使用的液體噴注式焚化爐，其中後者尤適用於高熱值、低灰份、高黏度、高水份的液態廢棄物。廢液焚化爐要達到高破壞效率的主要瓶頸在於霧化效果的良窳，一般燃油燃燒器通常可獲得 10 至 50 μm 的油滴，而良好設計的廢液噴嘴則可使平均粒徑低至 1 μm 。霧化媒介可採用低壓空氣或蒸汽 (1 至 10 Psig)，高壓空氣或蒸汽 (25 至 100 Psig)，或利用機械方式霧化。

若廢液中含有高濃度無機鹽類及可溶性灰份，則以採用垂直式液體噴注式焚化爐為宜；低灰份的廢棄物，則可採用水平式焚化爐。

液體噴注式焚化爐的典型釋熱容量為 30×10⁶ Btu/hr。滯留時間通常在 0.3 至 2 秒間，操作溫度在 700 至 1600°C 間。進料速率通常為 1 至 25 gpm。

液體噴注式焚化爐的優點為：

表一 常見焚化爐系統適用範圍(Oppelt, 1987)

	液體噴注式	旋轉窯	固定爐床	流體化床
固體				
均勻小粒子	—	○	○	○
不規則形狀大型廢棄物	—	○	○	—
低熔點物質	○	○	○	○
含有可溶性灰份的有機化合物	—	○	—	—
未經處理的大型廢棄物	—	○	—	—
氣體				
富含有機蒸氣	○	○	○	○
液體				
含高濃度有機物的水溶液廢棄物	○	○	—	○
有機液體	○	○	—	○
固體/液體				
含鹵化芳香族化合物	○	○	—	—
水溶性有機污泥	—	○	—	○

- 可以焚化的有害廢液種類相當廣泛
- 不需排灰系統
- 縮載率(Turndown Ratio)相當好
- 活動配件最少
- 維護費用低

其缺點則為：

- 只有可由燃燒器噴嘴霧化的廢液可被焚化
- 可能需要輔助燃料
- 燃燒器可能堵塞

● 旋轉窯焚化爐

旋轉窯焚化爐由於可適用於固體廢棄物、污泥、桶裝廢棄物及液體廢棄物之焚化，是用途最廣的焚

化爐，也是最適用於商業化集中處理場的焚化系統。

爐體的轉動除了可造成廢棄物的輸送外，更可使廢棄物得到良好的混合，提高其焚化效率。固體廢棄物在窯內的滯留時間通常為 1 至數小時。旋轉窯焚化爐的進料速率通常控制在爐內廢棄物量約佔爐體體積的 20% 以下。固體廢棄物在旋轉窯內的滯留時間決定於窯體轉速（通常每分鐘約 0.25 至 5 轉）、廢棄物進料速率、及爐體的傾斜角，並可用以下的經驗方程式(Perry, 1973) 表示之

$$\theta = 0.19 (L/D) / (SN) \quad (\text{min})$$

其中

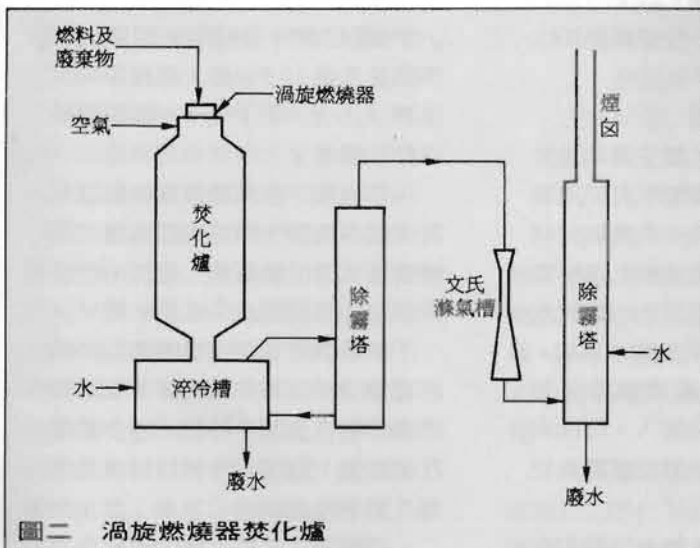
θ = 固體廢棄物滯留時間

L, D = 爐體長度及直徑 (m)

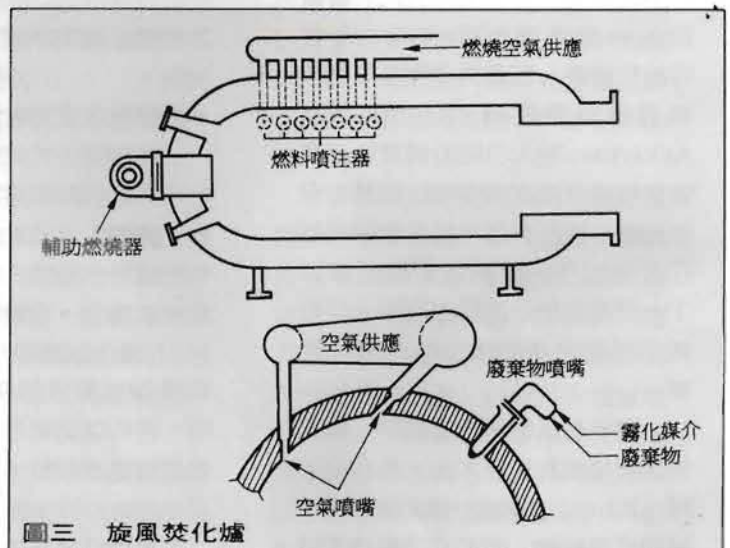
S = 爐體斜率 (m/m)

N = 轉速 (RPM)

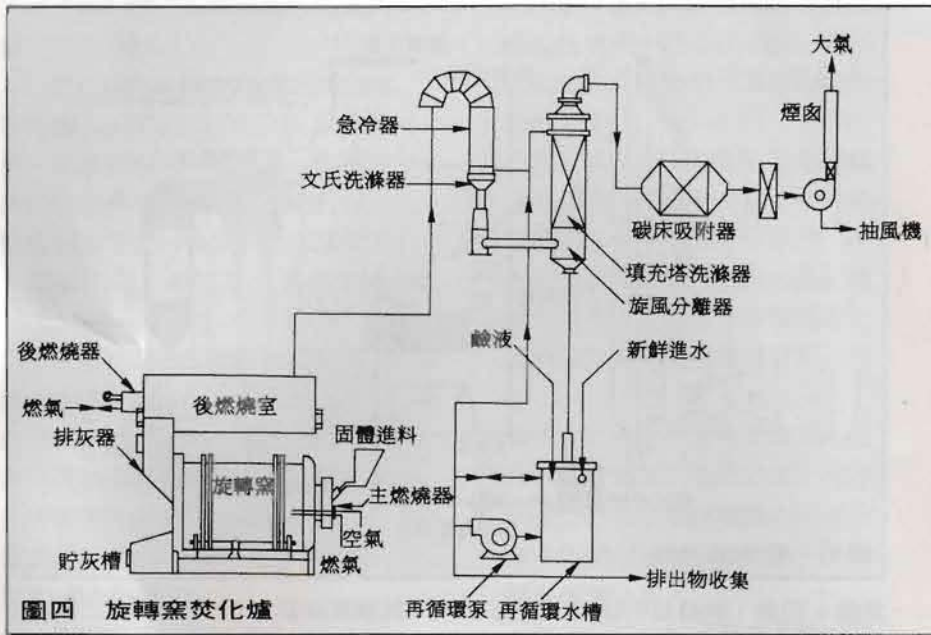
旋轉窯焚化爐的釋熱容量通常設計值為 60×10^6 Btu/hr。操作溫度通常為 600 至 900°C。旋轉窯本身主要功能是有將有害廢棄物轉化成氣相。以固體廢棄物為例，在旋轉窯內，基本上可分割成乾燥、熱解及燃燒三部份。所產生的氣體可能含有部份未完全燃燒的有害氣體



圖二 渦旋燃燒器焚化爐



圖三 旋風焚化爐



產物，因此，必須再採用後燃燒室使其在高溫(約 1000 至 1300°C)狀態下完全燃燒。氣體產物在後燃燒室中的平均滯留時間約 1 至 3 秒。旋轉窯焚化爐的優點為：

- 可處理絕大部份固體及液體有害廢棄物(包括PCBs)
- 可分別處理廢液及固體廢棄物
- 可處理體積較大的容器
- 可連續除灰
- 可控制固體廢棄物的滯留時間

其缺點則包括：

- 建造費用高昂
- 維護費用高
- 操作技術要求，人員訓練需求高
- 挾帶高量粉塵
- 燒渣可能熔融結塊

● 固定爐床式焚化爐
 固定爐床式焚化爐也有人稱為控氣式焚化爐或熱解式焚化爐，是近年來用於有害事業廢棄物的焚化的第三種主要技術。這類焚化爐基本架構與旋轉窯焚化系統相仿，均採用兩段式燃燒。廢棄物利用推桿送至第一燃燒室，在 50 至 80% 化

學計量需氧量的條件下，使廢棄物熱解成氣體，所需熱量則由固定碳的氧化反應提供。所產生的煙氣及熱解產物，主要為揮發性碳氫化合物及一氧化碳，及其他燃燒產物。由於採用控氣熱解式操作，一次爐的燃燒反應及系流速率均可維持在較低水平，可防止或減少粒狀物的排出。後燃燒室則提供過量空氣，使有害氣體在高溫及過量空氣狀態下，完全燃燒破壞。

固定爐床式焚化爐由於採用推桿送料，並且需在爐體內推送大量的廢棄物，因此，其單爐設計容量

通常均較液體噴注式焚化爐及旋轉窯焚化爐小。由於造價較便宜，且能有效地減少粒狀物控制要求，因此，廢棄物產生者擬在廠內建造焚化設施時，此種焚化爐較旋轉窯焚化爐更具吸引力。

固定爐床式焚化爐一次爐的操作溫度通常維持在 500 至 850°C，廢棄物在爐體內的滯留時間視其性質而異，通常在 1 秒至數小時間。二次燃燒室操作溫度通常維持在 800 至 1000°C，處理有害廢棄物時，溫度需高達 1200°C。一次燃燒室中熱解所產生的氣體產物，在二次燃燒室的滯留時間通常約為 0.5 至 2 秒。

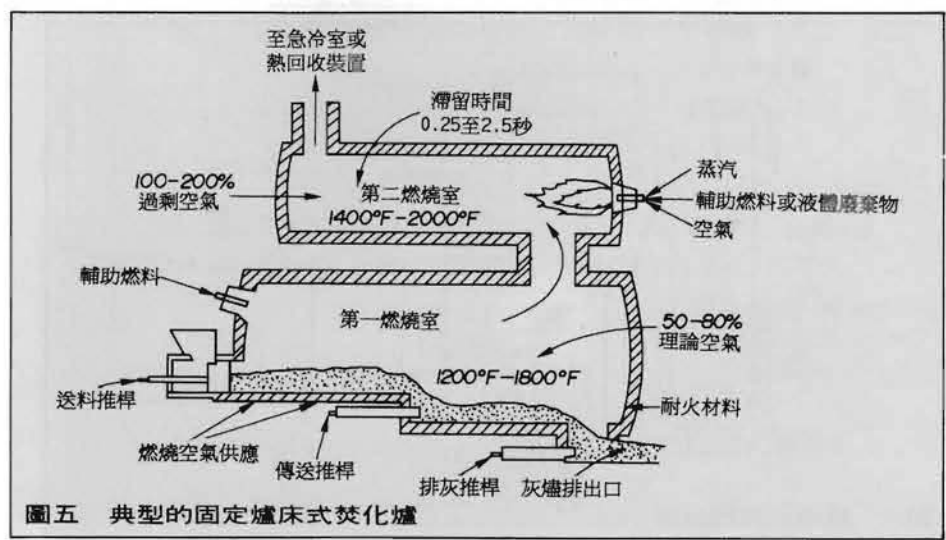
固定爐床式焚化爐的優點為

- 具副產品回收潛力
- 所需補充燃料較少
- 可將含碳化合物轉化成氣體，並使之完全燃燒
- 可抑制粒狀物的排放

其缺點則包括：

- 可能生成致癌性分裂產物
- 大件物品的處理能力略差

● 流體化床焚化爐
 流體化床在化學工業程序中是一種極為常見的單元操作，為一相當成熟的技術。但流體化床燃燒系統，尤其是在有害事業廢棄物的焚化應用上，則是近年來正在開發中

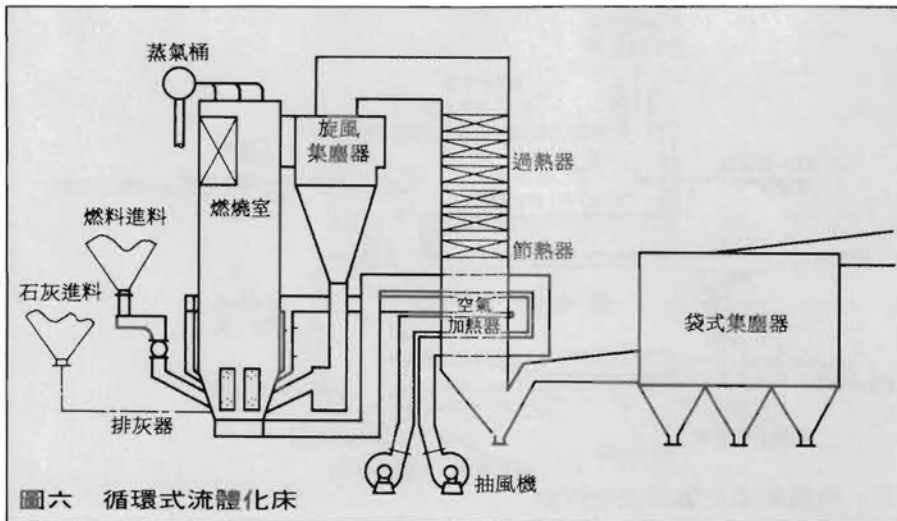


的技術。流體化床焚化爐又可分為循環式流體化床及氣泡式流體化床兩類，如圖六及圖七所示。兩種流體化床都含有一個內襯耐火材料的燃燒室，其中部份填裝了砂、氧化鋁、碳酸鈉、或其他材料製成的小粒子。燃燒空氣由粒子床底部的空氣分散板高速流入，使粒子床流體化（氣泡床）或將粒子帶走（循環式流體化床）。

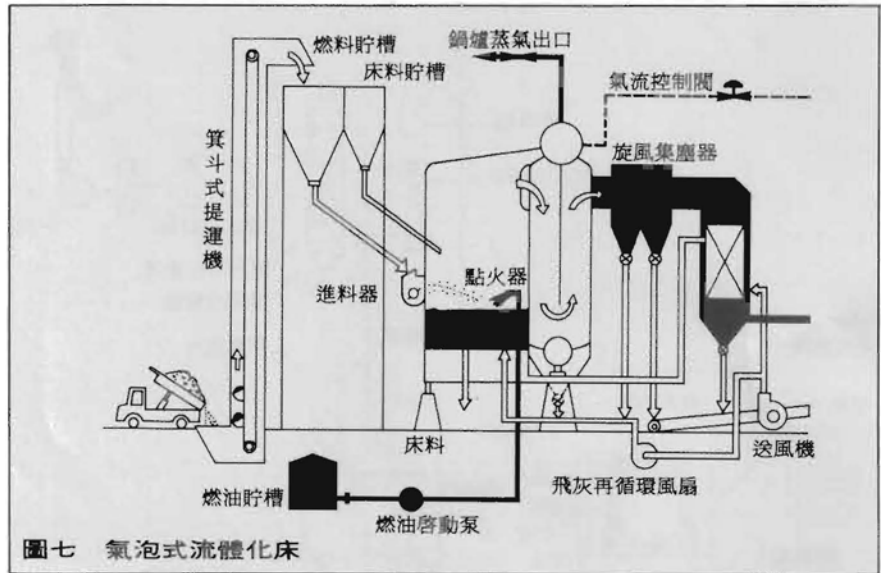
循環式流體化床設計，空氣流速通常較高，可將固體粒子吹出燃燒室，然後利用一旋風分離器分離固體與氣體，再讓固體回流至燃燒室。流體化床焚化爐的操作溫度通常為 450 至 850°C，操作溫度上限決定於流體化床介質（固體料子）的軟化點（砂約 900°C）。過剩空氣通常為 100 至 150%。

流體化床焚化爐主要用於污泥及切碎的固體廢棄物之焚化。為了要使廢棄物在流體化床內能均勻的分佈，並且能由流體化床內取出固體殘留物，固體廢棄物通常均需先做篩選處理，或碾碎至粒徑小於 2 吋。

流體化床焚化爐提供較高的空氣/固體比值，較高的熱傳效率，氣相及固相均有較高的紊流混合機會，且流體化床內溫度較均勻，又可加入石灰式碳酸鹽直接中和酸性



圖六 循環式流體化床



圖七 氣泡式流體化床

氣體。但是，若廢棄物進料中含有鹽類，流體化床內的固體粒子可能會聚結成大粒子；此外，微小粒子在流體化床內的滯留時間可能過短。

流體化床焚化爐的優點：

- 可處理可燃性固體、液體及氣體廢棄物
- 可動零件不多
- 操作溫度低，滯留時間及接觸時間長
- 流體化床表面積大，強化燃燒效率
- 進料速率變化對系統影響較小
- 可處理含水量高的廢棄物

其缺點則為：

- 由流體化床中除去殘留物較不易
- 廢棄物需作前處理
- 固體粒徑需在 2 吋以下
- 操作費用高
- 有害廢棄物的焚化技術尚未完全建立
- 廢棄物可能腐蝕爐床材料
- 可能生成共析物而造成困擾

●有害物質的破壞模式

探討有害有機物質的焚化破壞效率時，基於熱傳及質傳速率的考慮，固態及液態廢棄物所產生的化學反應通常不必予以考慮。雖然，由固相及液相變成氣相的物理化學反應對焚化速率也有顯著的影響，但只有發生在氣相的化學反應對焚化破壞去除效率才有決定性的影響。

焚化程序中的氣相反應亦極為複雜，有害物質的破壞方法基本上可區分為火焰區直接破壞 (Direct-Flame Destruction) 及非火焰區熱破壞 (Thermal Destruction) 兩大類。二者並非完全獨立，火焰區直接破壞模式包括化學反應及在火焰內的分解作用；而在熱破壞模式中，由火焰所產生

的高溫則可提供作為熱源，促進有機物質的分解。

焚化程序中，火焰區最高溫度通常約 1,000°C 至 2,000°C，且富含氫、氧及氯原子、氫氧基、甲基及其他自由基；對有機物質之分解、破壞相當有利。熱破壞區通常位於火焰區周圍，其特點是溫度約在 650°C（第一燃燒室）至 1,400°C（第二燃燒室）間，反應環境含有氫、氧、一氧化碳、水、氯化氫、氯、有機化合物、中間產物及自由基。雖然在熱破壞區的反應條件較差，但滯留時間卻遠較火焰區長（在熱破壞區約 1~2 秒鐘，在火焰區約 0.01~0.1 秒鐘）。

影響火焰區直接破壞效率的因素主要有以下四項：

1. 霧化效果—若液體廢棄物噴嘴故障或設計不良，所形成的大液滴在點燃前可能已穿越火焰區，而使破壞效率變差。
2. 混合效果—若燃燒器設計不良，可能使混合效果變差，導致廢棄物與氧分子無法充分混合產生反應，而使破壞效率變差。
3. 熱傳效果—若熱傳效率過高或與大量的過量空氣混合或與熱值過低或混合不均的廢棄物混合，導致火焰溫度驟降，將使破壞效率變差。
4. 急冷效果—反應物若與冷氣體或與冷爐壁接觸，可能造成急冷效果 (Quenching)，導致破壞效率變差。

而影響非火焰區熱破壞效率的主要因素則在於燃燒室的設計，若再加以細分，則可區分為下三大因素：

1. 滯留時間分佈—焚化爐設計及法規要求通常有滯留時間的要求，但由於第二燃燒室中的紊流效應、流場分佈的不均及高速火焰前端所帶走的物質均可能使部分物質在燃燒室中的滯留時間變得

非常短。因此，燃燒室的設計必須極為講究，務必使滯留時間分佈範圍儘可能變窄，以提高熱破壞效率。

2. 二次空氣分佈—妥善的二次空氣注入設計，將有助於使空氣與有害物質作分子間的充分混合，以提高熱破壞效率。此外，避免燃燒室內產生死角或冷空氣通路，也是設計時必須注意的要點。

3. 溫度分佈—注入蒸汽或補充用的冷空氣所造成的急冷效果，及冷爐壁均可能使燃燒氣體中的部分產生明顯的溫度下降效應，而影響熱破壞效率。

焚化程序由於涉及太多難以完全量化的流體力學、熱傳、質傳、化學反應及反應動力學，因此，目前仍無足夠的理論及實驗數據可對整個焚化程序作完整的描述，但相關的資料及數據正在快速地累積中。如上討論，焚化程序中的氣相反應可區分為火焰直接破壞區及非火焰熱破壞區兩部份。但二者間如何交互影響，對 DRE 有何貢獻，或影響程度如何則待進一步探討。

● 破壞去除效率

廢棄物的焚化基本上亦為一化學反應系統，因此，可利用化學反應動力學的觀點來探究影響有機廢

棄物破壞效率的因素。Dellinger et al. (1986) 曾利用一次化學反應描述典型的有機物質之破壞動力學。採用此種近似處理，則有害有機物質的破壞效率可寫成

$$DE_1 = 100 \{ 1 - \exp[-\tau_1 A \exp(-E_a/RT_1)] \} \quad (1)$$

其中 DE_1 = 破壞效率, (%)

τ_1 = 氣相平均滯留時間, (s)

A = Arrhenius 常數, (1/s)

E_a = 反應活化能, (cal/mole)

R = 氣體常數, (1.99 cal/K-mole)

T_1 = 絕對溫度, (K)

典型的有害有機化合物之氣相燃燒反應 Arrhenius 常數及反應活化能如表二所示。

有害有機物質之破壞可分成火焰區破壞及熱破壞二部分，故系統之總破壞效率可寫成

$$DE = 100 \{ - [1 - (1 - \eta_1)f] \eta_2 \} \quad (2)$$

其中 f = 經歷火焰破壞區之有害物質部分

η_1 = 火焰區之破壞效率 ($\cong 1 - DE_1/100$)

η_2 = 非火焰區之熱破壞效率 ($\cong 1 - DE_2/100$)

若氣體在燃燒室內的滯留時間分佈函數為 $C(\tau)$ ，則非火焰區之熱破

表二 典型的有害有機化合物之化學動力學參數

[數據取自 Dellinger et al (1986)]

化合物	Arrhenius 常數 A, (1/s)	活化能 E_a (cal/mole)
Acetonitrile	4.7×10^7	4.0×10^4
Benzene	2.8×10^8	3.8×10^4
Chloroform	2.9×10^{12}	4.9×10^4
Tetrachlorobenzene	2.9×10^{12}	3.0×10^4
Tetrachloroethylene	2.6×10^6	3.3×10^4
Trichlorobenzene	2.2×10^8	3.8×10^4

破壞率 η_d 需表示成

$$\eta_d = \int c(\tau) \text{Exp}[-\tau A \text{Exp}(-E_a/RT)] d\tau / \int c(\tau) d\tau \quad (3)$$

為了作初步的探討，只考慮最簡單的情況，假設有 90% 的廢棄物會經過火焰區，火焰區溫度 1,700 K，滯留時間 0.01 秒；非火焰區平均滯留時間 1~2 秒，操作溫度為 1,000 K 至 1,400 K。則所得代表性有害有機物質之破壞效率，如表三所示。由表列數據可知燃燒室溫度在 1,300 K 以上，若滯留時間為 2 秒，則 DRE 均可達 99.9999+。但若滯留時間只有 1 秒，則燃燒室溫度下限宜訂在 1,400 K 以上。就管制目的而言，法規要求宜訂在 1,400 K，2 秒以上，才可收事先防範之功效。

圖八及圖九分別為乙腈及四氯乙烯的破壞效率與燃燒室溫度之關係。就同一滯留時間而言，升高燃燒室溫度將使破壞效率顯著升高。以乙腈為例，滯留時間為 2 秒時，溫度由 1,200 K 上升至 1,250 K，將使破壞效率升高達 10² 倍。

就相同的燃燒室溫度而言，延長滯留時間，對破壞效率亦會產生極顯著的影響。就焚化爐的設計、

製造觀點而言，延長滯留時間代表著較高的製造成本、較高的燃料及操作費用。因此，法規要求常是設計的基本準則。表三及圖八、圖九顯示目前的法規要求均能使破壞效率達到合理的標準。

此處必須強調，以上分析並未將滯留時間分佈及溫度場分佈列入考慮。由圖八及圖九可知破壞效率對滯留時間及溫度均極為敏感，在焚化爐設計上，如何使滯留時間及溫度分佈均勻，將是研究的主要課題之一。

三、空氣污染防治設施

事業廢棄物經燃燒後，所生成氣體產物可能需在空氣污染防治系統中作進一步的處理。此外，空氣污染防治系統對於未完全破壞的廢棄物產物之意外排放，亦可提供一層有限度的緩衝效果。

常見的空氣污染排放物包括：

- 一、氯化氫(HCl)或其他鹵素
- 二、粒狀物
- 三、氮氧化物(NO_x)
- 四、硫氧化物(SO_x)
- 五、未完全燃燒產物(PICs)
- 六、微量金屬及其複合物

為了要控制這些污染物的排放，焚

化系統通常都需要備有一組或多組空氣污染防治設施(APCDs)。在有害事業廢棄物處理場中，最常被使用的空氣污染防治設施如表二所示。這些APCDs通常串連使用。最常見的組合如下：

- 一、急冷室(氣體冷卻及調節)
- 高能量文氏洗滌器(去除粒狀物)
- 填充塔吸收器(去除酸性氣體)
- 除霧器(去除可見的蒸汽煙柱)
- 二、急冷室→洗滌器→袋式集塵器或靜電集塵器

● 急冷室

急冷室的目的是要降低燃燒氣體產物的溫度，使其溫度由 800 至 1,200°C 降至約 100°C，以便適合洗滌器之操作。降低溫度同時可以減少廢氣處理設備之處理量(體積流率)，降低空氣污染防治設備所需成本。此外，在冷卻系統中，亦可以回收熱量加以利用。

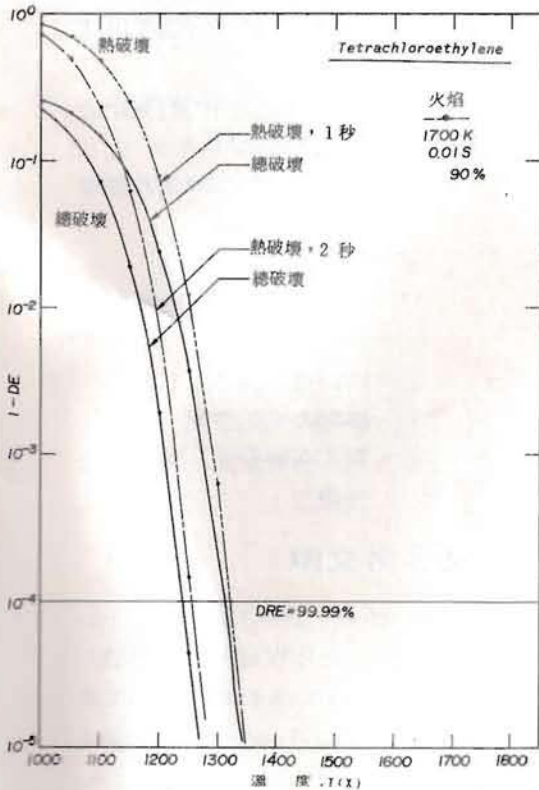
● 文氏洗滌器

文氏洗滌器基本原理是將洗滌液體(通常為水或鹼性水溶液)注入流經文氏管喉部的高速氣流中(流速通常為 30 至 130 m/s)，使液體霧化成微液滴。這些微細的液滴與廢氣接觸，即可帶走部份粒狀

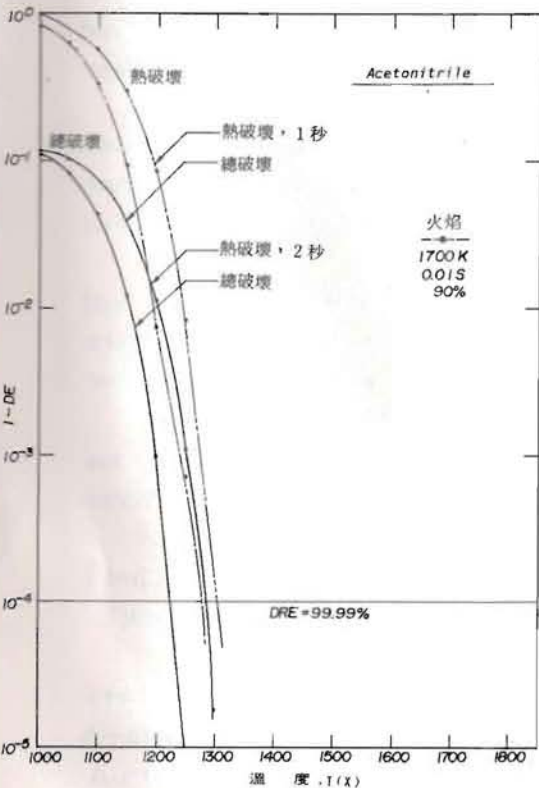
表三 有害有機物質之破壞效率

化合物	1,000K		1,100K		1,200K		1,300K		1,400K	
	熱DE	總DE	熱DE	總DE	熱DE	總DE	熱DE	總DE	熱DE	總DE
Acetonitrile	8.1481 15.6323	88.0091 88.9861	41.1321 65.3457	92.3150 95.4760	91.2403 99.2327	98.8565 99.8998	99.9857 99.9999+	99.9981 99.9999	99.9999+	99.9999+
Benzene	74.9777 93.7389	97.4978 99.3739	99.9623 99.9999+	99.9962 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+	99.9999+
Chloroform	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+	99.9999+
Tetrachlorobenzene	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+	99.9999+
Tetrachloroethylene	14.7265 27.2842	74.1166 77.9283	51.3734 76.3546	85.2402 92.8228	92.0913 99.3745	97.5994 99.8102	99.9362 99.9999+	99.9806 99.9999+	99.9999+	99.9999+
Trichlorobenzene	66.3289 88.6626	96.6329 98.8663	99.7956 99.9996	99.9796 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+ 99.9999+	99.9999+	99.9999+

* 火焰 0.01 秒, 1,700K, 熱破壞區滯留時間第一組數字為 1 秒, 第二組數字為 2 秒。



圖八 乙腈之焚化破壞效率與溫度之關係



圖九 四氯乙烯之焚化破壞效率與溫度之關係

表四 最常使用的空氣污染防治設施 [Oppelt, 1987]

APCD種類	使用百分比
急冷室	23.3%
文氏洗滌器	35.6%
濕式洗滌器	7.8%
濕式靜電集塵器	5.5%
離子化濕式洗滌器	5.5%
其他種類洗滌器	13.3%
填充床式吸收塔	20.0%
噴沫塔式吸收塔	2.2%
多層平板式吸收塔	1.1%
其他種類吸收塔	2.2%

物及可吸收性氣體。由於液體霧化成微細液滴後，質傳面積增大，質傳效率即可顯著提高。文氏洗滌器具有信賴度高、操作簡單的優點。但是由於流體流經文氏管喉部會造成顯著的壓力降(約 60 至 120 吋水柱)，因此其操入費用將會佔焚化設施的操作費用之顯著的百分比。

● 填充床式吸收塔及多層板式吸收塔

酸性氣體的去處，通常採用填充床吸收塔或多層板式吸收塔。填充床式吸收塔通常為一裝滿任意堆積的填充材料之容器(填充材料可能為PE或陶瓷材料製造的環狀物或鞍狀物)。洗滌液由容器上方注入，氣體則可與液體同向、逆向或交錯流過填充床。當液體流過填充床時，將填充材料表面濡濕，形成一層薄膜液，提供質量傳遞所需的界面，以達成有效地吸收酸性氣體之目的。

多層板式吸收塔基本原理與填充床式吸收塔相仿，主要是藉著多孔板來分散向上流動的氣體，使質量傳遞面積變大，提高質傳效果。其設計基本上是一圓柱形容器，內裝許多層分散氣體用的多孔板。洗

滌液由最上層板注入，依次向下流動，直到塔底的液體出口處。廢氣由塔底引入，流經液體接觸可促進質量傳遞效果，有效地將酸性氣體吸收，氣體最後再由吸收塔上方出口排出。

填充床式吸收塔及多層板式吸收塔最常用於產生粒狀物少的液體噴注式焚化系統。用於旋轉或固定爐床式焚化系統，則通常與文氏洗滌器串聯使用。

● 靜電集塵器

靜電集塵器基本原理是使懸浮在氣流中的粒狀物帶電，藉著電場的作用，將它由氣流中分離出來。靜電集塵器為一種高效率的集塵設備，其集塵效率除受電壓、電場強度、集塵器幾何形狀、溫度、壓力等因素之影響外，也受氣流中含塵量、塵粒粒徑大小及分佈之影響。

基本上，靜電集塵可分為四個步驟：(1)使塵粒帶電，(2)塵粒被極板吸引而向極板移動，(3)塵粒到達極板並放電，(4)敲擊極板使塵粒鬆動落下。

● 乾式滌氣器

乾式滌氣器(Dry Scrubber)是近年來最受重視的空氣污染防治技術之一。圖十為典型的乾式滌氣器對Hg, SO₂, HCl, PCB, PCDD及PCDF等有害物質之去除效率與溫度的關係。由圖可知，操作溫度低於125°C，高於145°C時，PCB的去除效率均會明顯的降低。而HCl及SO₂卻需在較低溫才可獲得良好的去除效率。Hg需在較高溫度才有較佳的去除效率。因此，在規劃設計時，如何依實際需要選擇適當操作條件，及如何提高其去除效率，為待研究的主要課題。

由圖十所示，HCl的去除效率仍未能達有害廢棄物焚化系統99%去除效率的要求，因此，乾式滌氣器目前在有害廢棄物焚化應用上仍極少見。少數採用乾式滌氣器的商

業化有害廢棄物焚化處理設施，則將氯含量限制在 2~4% 以下，以期滿足法規的要求。

乾式滌氣器使用時不產生廢水是最吸引人的優點，因此，若能提高其吸收效率，將可使其應用範疇大為增廣。

四、殘渣灰燼處理系統

有害事業廢棄物中的無機化合物並無法以焚化爐處理破壞之。這些物質可能部份變成一次燃燒室的爐底灰燼，部份由空氣污染防治設施的洗滌液帶走，部份成為 APCDs 的殘留物，部份則由煙囪排出。

灰燼由一次燃燒室排出後，通常利用空氣或用水冷卻。收集後，脫水、固化/安定化後，送交有害廢棄物掩埋場處理。

空氣污染防治設施所產生的殘留物通常為含有粒狀物、被吸收的酸性氣體（通常為 HCl）及少量有機污染物之廢水。這類廢水通常利用水池或容器收集，加鹼中和後，

回至系統重複使用。只有少部份排出後，作處理再排放。

■ 結論

焚化技術是一項已商業化的成熟技術，但並非是一項完美的技術，國外已累積相當可觀的設計、製造及操作經驗，但國內焚化技術開發則僅在萌芽階段，仍待積極開發研究。

對於各種不同的有害事業廢棄物，已有多種不同的技術或程序可供選擇採用。最常被使用的焚化爐設計為：液體噴注式焚化爐、旋轉窯焚化爐、固定爐床式焚化爐及流體化床焚化爐。最常使用的空氣污染防治設施則包括急冷室、文氏洗滌器、填充床式吸收塔、及水蒸汽消除器。本文對其特徵、基本原理及適用範疇作了簡要的介紹。

● 待研究的問題

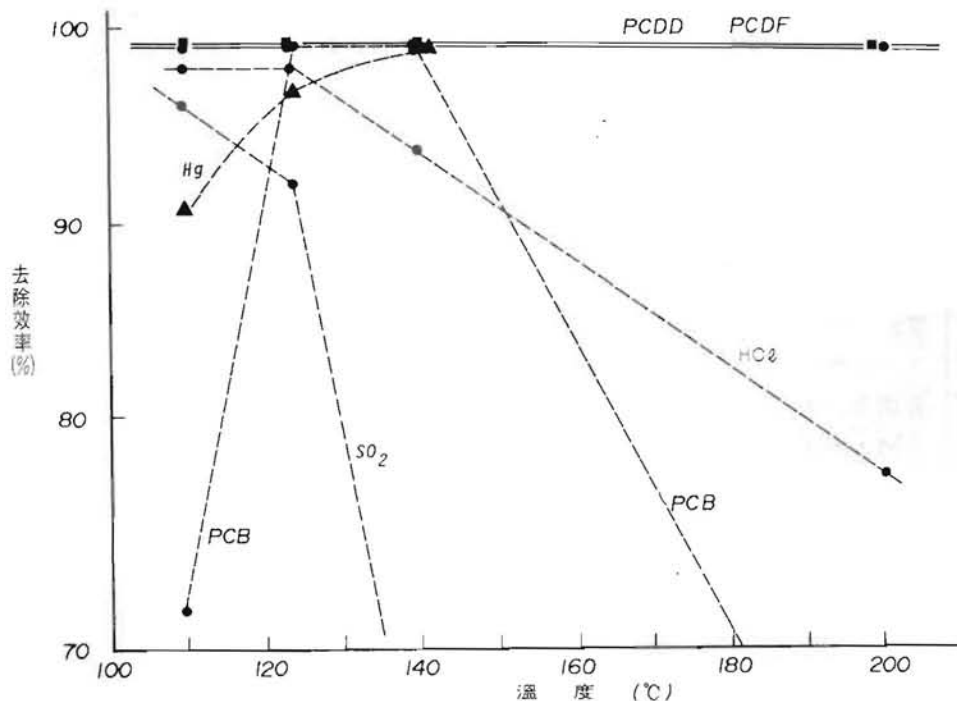
事業廢棄物焚化技術是一項日益更新的技術，需隨著工業的成

長、廢棄物種類及特性的變化而更新。展望未來，有許多相關問題有待研究：

- 一、未測試或獨特的廢棄物之破壞效率測試
- 二、焚化系統監控設備及故障的偵知
- 三、重金屬排放的控制
- 四、燃燒副產品的排放及其防治技術
- 五、即時性能評估
- 六、斬新技術的發展
- 七、焚化系統安全、衛生系統的建立

■ 參考文獻

1. Ackerman, D.G., J.F. McLaughley and D.E. Wagoner. (1983). "At-Sea Incineration of PCB Containing Wastes on Board the M/T Vulcanus" U.S.A. PA. 600/7-83-024.
2. Brunner, C.A. (1984). "Incineration Systems-Selection and Design". Van Nostrand Reinhold Co.
3. Brunner, C.A. (1985). "Hazardous Air Emissions From Incineration" Chapman and Hall.
4. McCabe, W.L., J.C. Smith and P. Harriott (1985). "Unit Operations of Chemical Engineering". McGraw-Hill.
5. Niessen, W.R. (1978). "Combustion and Incineration Processes". Marcel and Dekker.
6. Perry, J.H. (ed). (1973). "Chemical Engineer's Hand-book", 5th ed McGraw-Hill.
7. Oppelt, E. T. (1987). "Incineration of Hazardous Waste—A Critical Review" JAPCA. 37(5):558-586. □



圖十 乾式滌氣器之去除效率與溫度關係