

有害廢棄物焚化爐排放毒性物質控制技術

司洪濤* 翁瑞舟**

摘 要

一個整合性的空氣污染防治控制技術“通量力/冷凝洗滌技術”(Flux-Force/Condensation Scrubbing)成功地應用在有害廢棄物焚化爐排氣控制上，此冷凝技術乃是利用廢氣中過飽和的濕度冷凝在次微米的粒狀物上，有效地使粒狀物長大，使此粒狀物更容易去除，而通量力乃是描述此程序的機制，此力量來自兩方面，一為氣流與粒狀物之間的溫度梯度“熱泳”(Thermophoresis)，另一為水蒸汽冷凝在粒狀物冷的表面所造成的濃度梯度“掃掠擴散”(Sweep Diffusion)，此兩種作用結合起來稱之為通量力(Flux-Force)。此通量力/冷凝洗滌技術再加上高效率衝撞式洗滌塔(Collision Scrubber)更提高了排氣中粒狀物、重金屬、酸氣、戴奧辛及呋喃(Furans)的去除效率，此篇論文將介紹其理論、設計參數以及實際運轉的測試數據。

* 中國技術服務社工業污染防治中心工程師

** 美國CALVERT環境公司研究部主任

Control of Air Toxics from Hazardous Waste Incinerators

Hung-Tao Szu* Shni-Chow Yung**

ABSTRACT

An integrated air pollution control technique, termed Flux-Force/Condensation Scrubbing, has been successfully applied to hazardous waste incineration processes. This method uses the flue gas moisture to condense on the submicron particles in the gas stream, effectively growing these particles to a larger size for seas of capture. The term Flux-Force describes the mechanics of the process. The force developed by the temperature gradient between the gas stream and particle (thermophoresis) and the sweeping effect as water condenses on the cold particular surface (sweep diffusion) combine to enhance the particle collection process. These two actions, thermophoresis and sweep diffusion, are termed Flux-Force. This technology, combined with a high efficiency Collision scrubber, produces a synergistic result of highly efficient removal of particulate, heavy metal, acid gas, and dioxin/furan compounds from the gas stream.

This process along with as operational theory, design parameters, and performance data, will be discussed.

* Engineer, Industrial Pollution Control Corps, China Technical Consultants, Inc.

** Research Director, Calvert Environmental Inc.

一、前 言

焚化爐已被廣泛應用於有害廢棄物之處理，因為它能夠促成有害廢棄物毒性之安全轉換，永久性地減少廢棄物之體積達80至90%，且所產生的灰燼能夠安全性地丟棄。此外，焚燒方式能夠提供一種對長期生態環境影響最小之廢棄物處理的最佳永久性解決方案。

雖然焚燒方式能夠摧毀有害或毒性廢棄物，但它亦伴隨產生空氣污染問題，其廢氣必須加以適當處理後，方能將乾淨的燃燒氣體排放到大氣中。而這類焚化爐排氣中所含之污染物種類可分為下列七種：

1. 粒狀物
2. 硫氧化物 (SO_x)
3. 氮氧化物 (NO_x)
4. 氯化氫 (HCl) 及其它鹵素化合物
5. 微量金屬及其複化物
6. 不完全燃燒之產物 (PICs)
7. 戴奧辛及呋喃 (Dioxins and Furans)

氯化氫、硫氧化物及其它酸性氣體之排放濃度為廢棄物本身及輔助燃料中硫、氯、氟及溴化物含量之直接函數。由於廢棄物及燃料中各種不同元素之濃度有頗大的變化，在未加控制設備時，焚化爐排氣中硫氧化物之濃度在10~12,000ppm間變動；氯化氫濃度在50~22,000ppm間變動，而氟化氫濃度則在20~200ppm間變動。

粒狀物可能源自於廢棄物及輔助燃料中所含的無機或有機物質，或是含有此無機或有機物質的其它混合物，此無機物質諸如鹽類及在廢棄物及燃料中之微量金屬，因其可以被分解或轉變成其它形態，但無法以焚燒方式加以摧毀。灰份的含量一般在液狀廢棄物中較低，但在污泥及固態廢棄物中較高。無機氧化物可以如同核種一般，吸附高分子量碳氫化合物而形成粒狀物。最後形成之粒狀物的本質（如體積、分子量、形狀及表面結構）係決定於焚燒的條件，如溫度、滯留時間及粒狀物處於昇溫狀態下受到氧化或還原的情況。

粒狀物的排放受到廢棄物及輔助燃料之化學組成、焚燒爐型式及其操作參數及空氣污染控制系統之強烈影響。大多數受到關切的污染物，諸如重金屬及有機毒性副產品，因排放氣體冷卻後而凝結成微細粒狀物或附著於微細粒狀物表面上。

自焚化爐排放出的微量金屬對人體健康構成威脅。於燃燒時，這類金屬變成金屬氧化物，其粒徑大小已歸於次微米。被人體吸入時，則將被運送到肺臟深部並迅速被血液吸收。

有害廢棄物焚化爐廢氣所含的粒狀物其粒徑分佈狀況如圖 1 所示，由圖 1 明顯可見廢氣中粒狀物的粒徑分佈有很大的變動，這完全視焚化爐所燒的有害廢棄物種類與其成份而定。其中值粒徑 (Mass Median Particle Diameter) 一般在 0.35 到 25 微米間變動。當焚化的有害廢棄物中金屬物質之含量增加，金屬氧化物的量亦增加。這些粒狀物之直徑大多小於一微米，可能包含鉛、汞、鎘、矽、鈉、鈣、鋅、鎂、鐵及鋁之氧化物，並含有較低百分比之微量金屬。這些金屬氧化物的粒狀物會反射光線並產生明顯可見之不透光度問題。而自有有害廢棄物焚化爐排放出的粒狀物濃度在 460 ~ 22,900mg/DNm³ 之間。

二、控制技術

粒狀物及酸性氣體之去除為控制有害廢棄物焚化爐排氣之任何一種空氣污染控制系統之首要需求。這些污染物之去除係透過多種特殊控制技術來達成。半乾式吸收塔及填充洗滌塔係用來去除酸性氣體。袋濾集塵機、靜電集塵機及洗滌塔係用來控制粒狀污染物，這些互不相同的設備單元可以互相搭配組裝成可運作之廢氣處理系統。任何特定廢氣處理系統的組合或安排必須對很多因素進行分析，包含排放標準需求、製程溫度、廢氣所含之腐蝕性物質特性、粒狀物粒徑分佈及可用之公用設施等。

2.1 通量力／冷凝洗滌技術

通量力／冷凝洗滌塔 (Flux-Force/Condensation Scrubber) 是一種濕式洗滌塔系統，其設計係利用水蒸汽之冷凝效應來增進粒狀物、重金屬

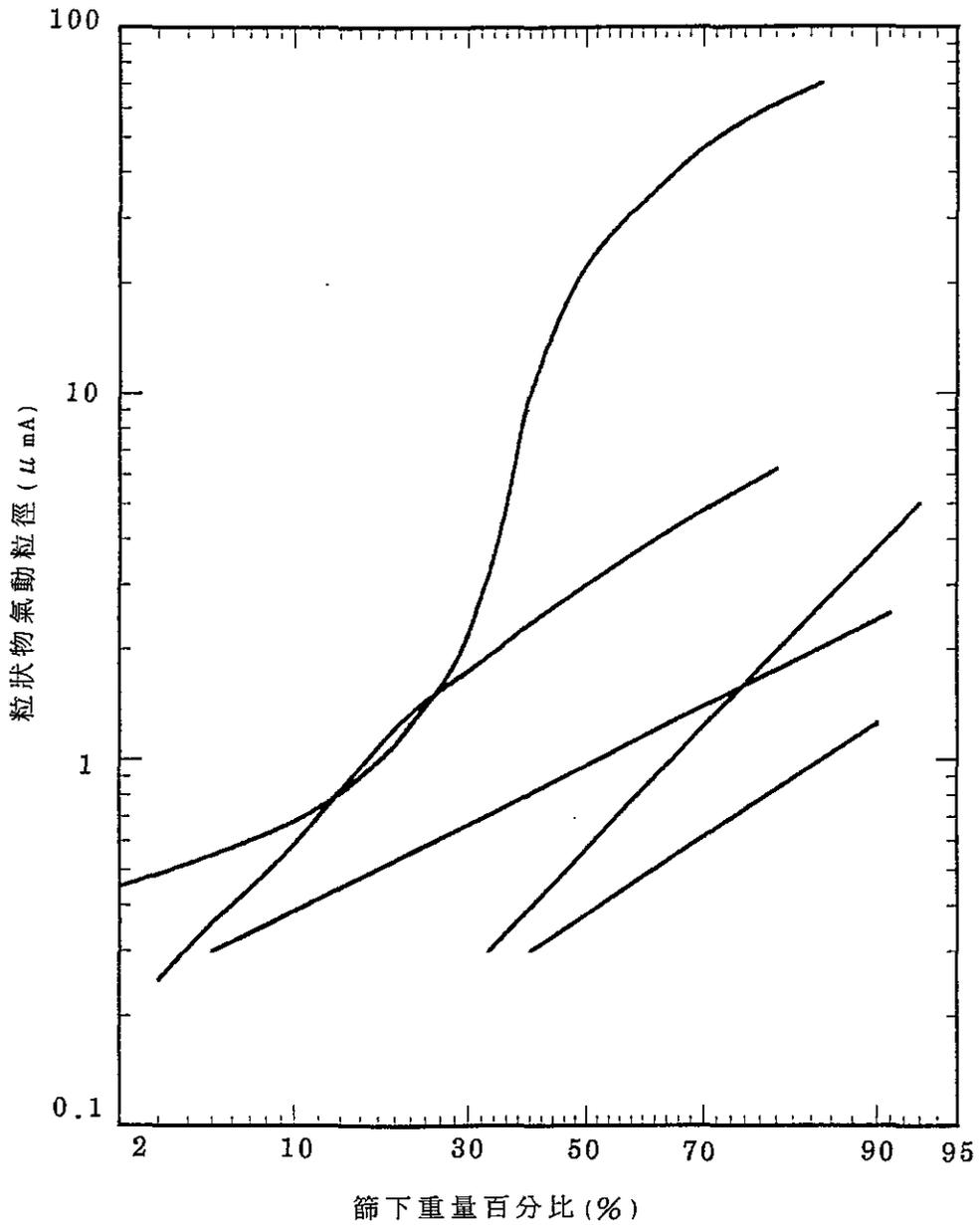


圖 1 有害廢棄物焚化爐典型的粒徑分佈圖

及酸性氣體之去除效率。當溫熱的飽和氣體和冷水或冷表面接觸，則水蒸汽之冷凝作用即發生。粒徑細微的粒狀物可視為凝結核，故一部份的水蒸

汽凝結於粒狀物核種上。如此，粒狀物將由於其所搭載之水份層而增加質量，並易於為慣性衝擊作用所收集。

當水份凝結時，水蒸汽向冷表面方向趨進，由於水蒸汽在冷表面的濃度梯度將對粒狀物產生拖曳作用，促進粒狀物的收集。此一步驟稱為“掃掠擴散”(Sweep Diffusion)，另外粒狀物之收集亦可由氣體和冷表面間之溫度梯度所造成的“熱泳”(Thermophoresis)現象來增強。此掃掠擴散與熱泳兩種作用力結合起來，合稱為“通量力”(Flux-Force)。以冷凝技術促成之粒狀物成長並結合掃掠擴散及熱泳兩種粒狀物收集機制，即稱為通量力／冷凝洗滌技術(簡稱F/C洗滌技術)。F/C洗滌作用增強微細粒狀物之去除，並提供一種降低空氣污染控制成本的方法。F/C洗滌作用適用於處理高濕度的氣體或高溫氣體或兩者兼具的場合，因為廢氣中濕度愈高，則能用於冷凝的水蒸汽量就愈多。同樣地，廢氣的入口溫度愈高，飽和溫度亦愈高，相對地可冷凝的水蒸汽量也就愈多。

2.2 通量力／冷凝洗滌之程序

圖 2 顯示一種處理有害廢棄物焚化爐高溫廢氣的典型F/C洗滌系統。自焚化爐排出的高溫廢氣首先和清水及循環水直接接觸冷卻後，此高溫的廢氣立即被冷卻到接近其絕熱飽和溫度。此一快速冷卻作用減少後續燃燒中產生戴奧辛及呋喃之潛在可能。冷卻後的氣體隨後通過冷凝／吸收塔(Condenser/Absorber)以去除酸性氣體並對飽和氣體做次冷卻。冷凝／吸收塔將把大部份酸性氣體及一部份粒狀物去除。在流經冷凝／吸收塔之後，此一氣體再通過高效率衝撞式洗滌塔以進一步去除酸性氣體及粒狀物，再通過氣液分離器以去除液狀水滴。最後，此氣體由煙囪排放到大氣中。

此一系統之設計可另於冷卻過程中加入一蒸發罐使構成零污水排放。此蒸發罐將洗滌塔系統必須排放的污水水份蒸發，亦即將污水中粒狀物及鹽份加以濃縮，濃縮後的泥漿體積小到可以噴灑在焚化爐灰渣中一同丟棄。此外亦可採用其它處理方式，如濃縮泥漿可經過濾以除去鹽的晶體及灰份或在泥漿中加入穩定的固化劑，以將液體固化以利掩埋處理。而所有蒸發洗滌塔污水所需能源皆由焚化爐高溫的廢氣來供應。

面對諸如 $10\text{mg}/\text{DNm}^3$ 之極嚴格的粒狀物排放標準，可以在氣液分離器

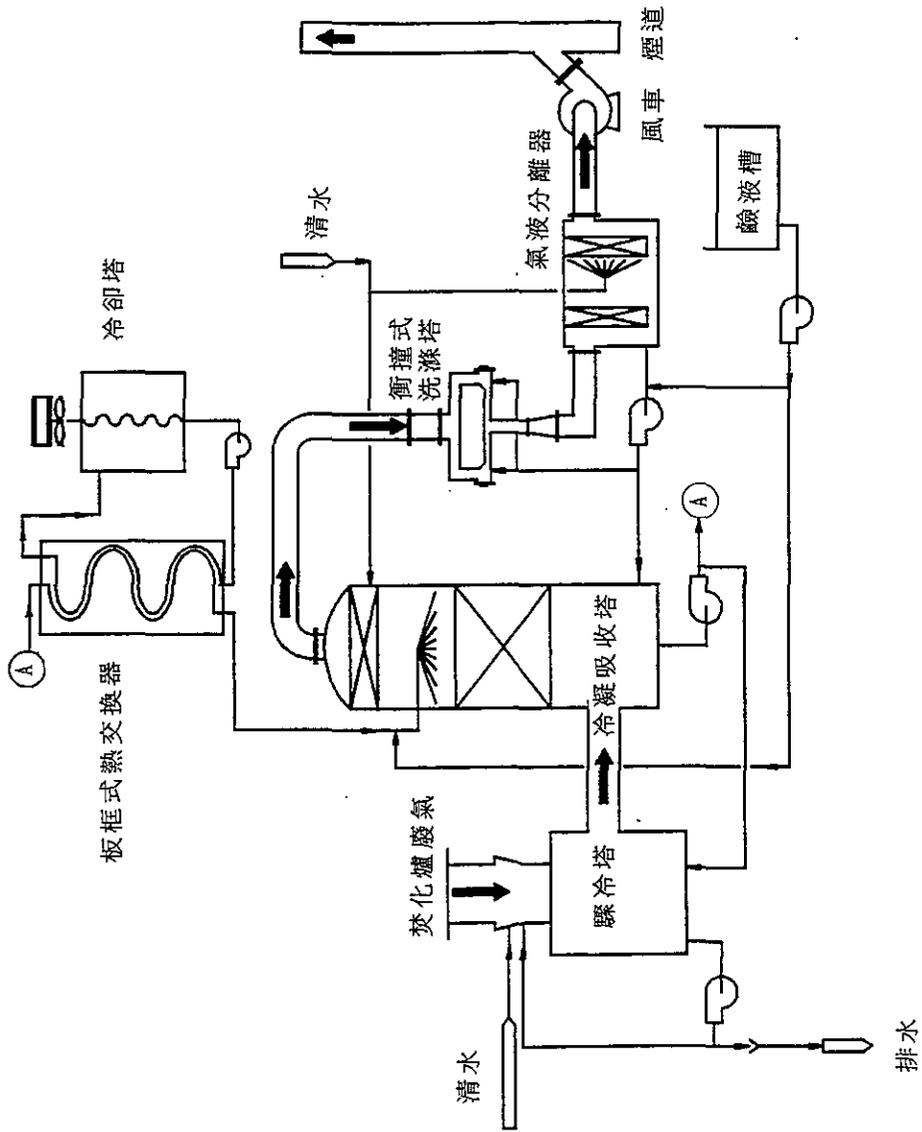


圖 2 通量力 / 冷凝洗滌系統流程圖

下游增加一種濕式靜電集塵機來完成粒狀物之收集。

在超過20個有害及醫療性廢棄物焚化爐廢氣處理實例中，F/C洗滌技術被證實在去除粒狀物、酸性氣體、重金屬及戴奧辛等污染物之控制上具有高效率，並由於減少耗用能源而降低初設成本及操作成本。其所具備的優點如下：

1. 酸性氣體的去除效率極高。在一典型的安裝實例中，採樣結果顯示洗滌系統排除掉99.9%之氯化氫及97%之二氧化硫。
2. 揮發性重金屬的去除效率高於其它控制技術，包含袋濾集塵機及靜電集塵機。這些揮發性重金屬包含粒狀物“前半”(Front Half)及可凝結之氣體種類“後半”(Back Half)。

有害廢棄物之焚燒操作溫度達到1250℃。在此一高溫下，重金屬及重金屬化合物變成揮發性並歷經熱量轉換。有些金屬將被氧化，其它則和氯氣反應而形成金屬氯化物。當高溫的煙道廢氣冷卻時，揮發性化合物在表面上或核種子上凝結而形成粒徑極細的粒狀物。因為微細的粒狀物和較粗大的粒狀物比較時有較大表面積，以致金屬在微細的粒狀物表面上附著得較多。因此，若一控制系統對微細的粒狀物去除效率較高的話，則其對重金屬之去除效率也相對地提高。

控制系統去除重金屬之效率亦和粒狀物收集區之煙道氣體溫度有關。圖3顯示數種金屬化合物之蒸氣壓力，可以看出，此數種金屬化合物具揮發性且若煙道氣體在收集區未充份地冷卻，則其收集效率將降低。

汞及砷由於其高蒸氣壓而特別難以收集。圖4顯示汞之去除效率和溫度的關係。其排除效率明顯地和溫度關係重大且當氣體溫度降低時，去除效率即提高。袋濾集塵機及乾式靜電集塵機通常大約在200℃下操作。在此溫度下，汞處於蒸氣狀態。除非輔以諸如活性焦炭或碳噴射之吸附方法，否則袋濾集塵機及靜集塵機之汞排除效率將會很低。

在F/C系統中，重金屬會如同水蒸汽般凝結。煙道氣體通常冷卻到低於50℃。其所造成的低溫氣體使得更多重金屬蒸氣凝結並核化成粒徑極細的粒狀物(金屬燻煙)。此重金屬燻煙隨後藉著和凝結水包住次微半粒狀物而長成較大粒狀的粒狀物。圖5顯示初始粒徑分佈與長大後之粒徑分佈情形，由於粒狀物在F/C系統冷凝後長成較大的粒狀物，所以

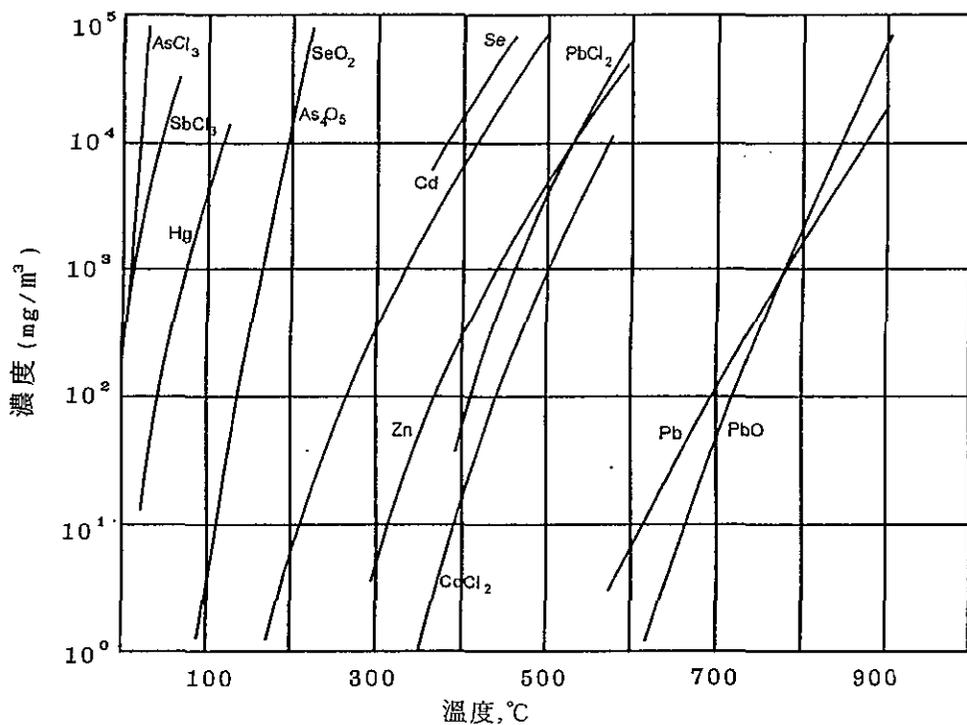


圖 3 數種金屬化合物的蒸氣壓

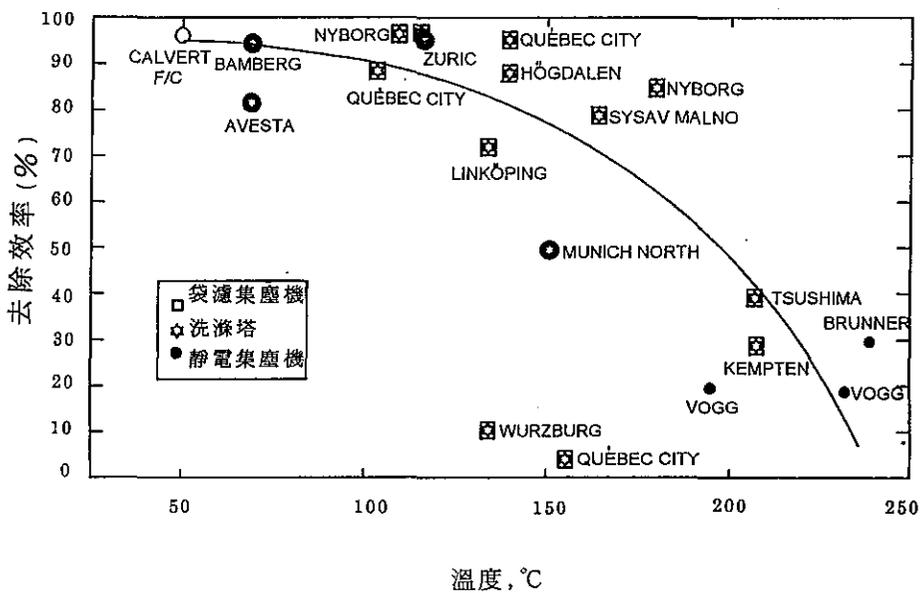


圖 4 溫度對汞金屬去除效率的影響

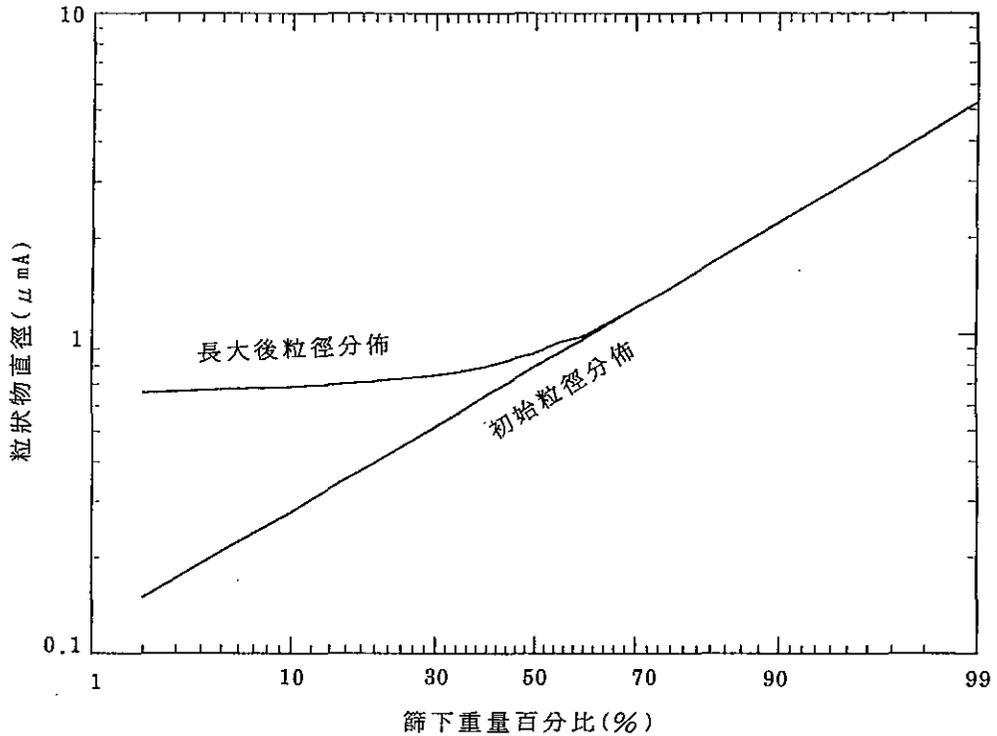


圖 5 初始粒徑分佈與長大後之粒徑分佈

變得較容易去除。因此操作壓損比一般系統低 20 到 30% 是常有的事。

3. 戴奧辛及呋喃之去除效率亦高於袋濾集塵機及靜電集塵機。戴奧辛及呋喃之去除效率也和收集區之溫度密切相關。圖 6 顯示數種戴奧辛化合物之蒸氣壓。由圖中可看出，從大多數袋濾集塵機之操作溫度範圍到濕式洗滌塔之操作溫度範圍，其蒸氣壓降低了兩個數量級。而通量力／冷凝洗滌系統對蒸氣壓再降低兩個數量級。這表示戴奧辛將凝結下來以利於洗滌塔之收集。圖 7 顯示溫度對戴奧辛去除效率之影響。再一次地強調，溫度對戴奧辛去除效率的影響力很清楚可以看出來。
4. 經處理後之煙囪排氣清淨略帶有少許水蒸汽柱。而在 F/C 系統中煙囪之排放氣體大約只有非 F/C 系統 1/5 的水份。圖 8 顯示煙囪排放後氣體之冷卻效果。自焚化爐排出之高溫煙道氣體通常在大約 82°C 達到飽和，其水份含量為每克乾燥氣體中 0.57 克。水份含量在經過 F/C 洗滌系統後降至每克乾燥氣體中僅 0.1 克。當此一低水份之排放氣體通過高壓風車，由

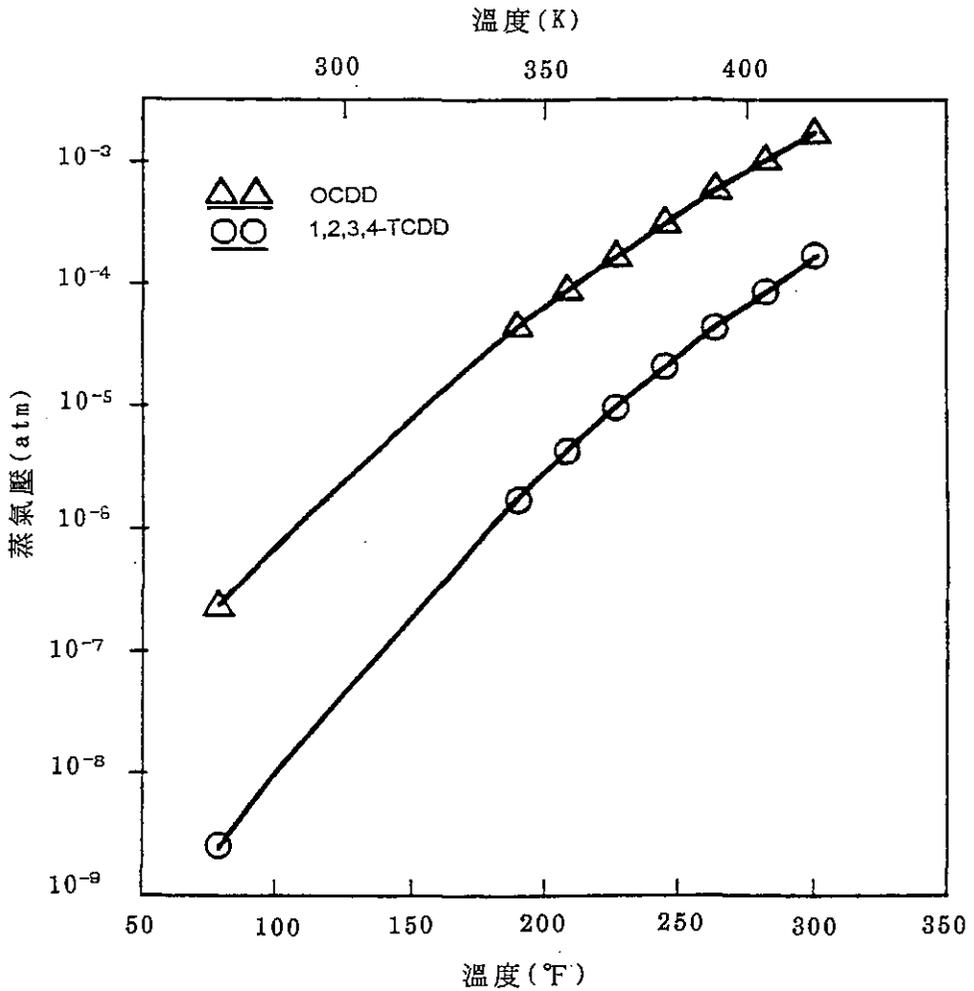


圖 6 戴奧辛化合物的蒸氣壓

於壓縮作用產生的熱量使氣體溫度升高約 10°C 。這種藉風車進行的再加熱是減少水蒸汽柱所必須的。

5. 處理氣體體積流率的減少將導致較低的能源消耗。當焚化爐的高溫廢氣溫度冷卻到其絕熱飽和溫度（約 82°C ）時，其體積流率大約減半。若飽和煙道氣體進一步冷卻到 50°C ，則其體積流率再次降低約50%，使得使用較小風車即可運作整個廢氣處理系統。

F/C洗滌系統之主要系統單元如下：

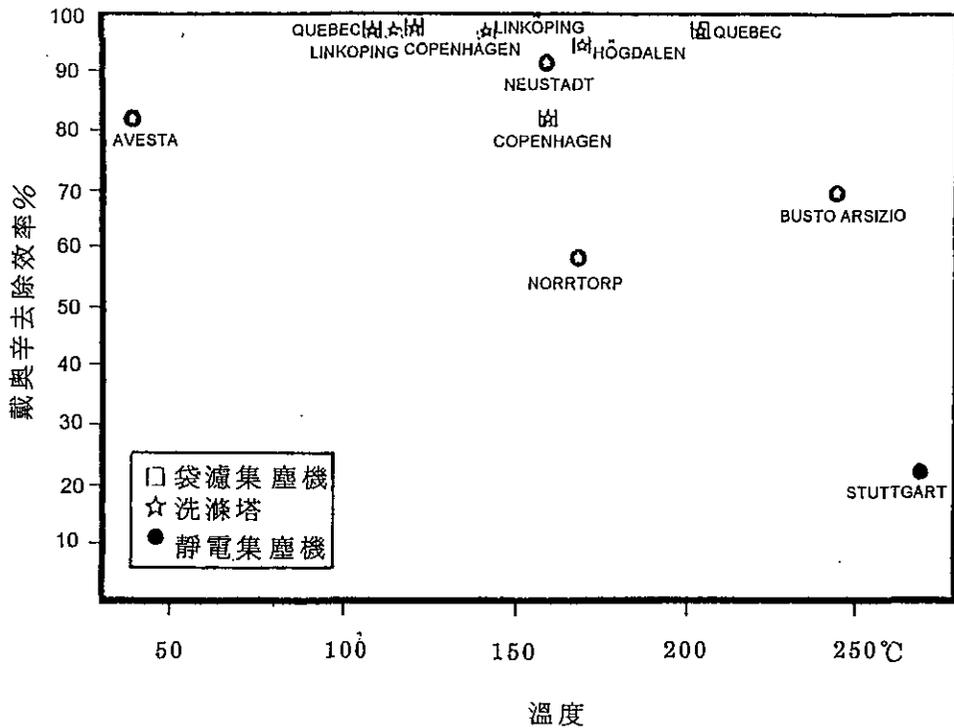


圖 7 溫度對戴奧辛去除效率的影響

- 驟冷塔
- 冷凝／吸收塔 (Condenser/Absorber)
- 衝撞式洗滌塔 (Collision Scrubber)
- 氣液分離器
- 洗滌液冷卻系統
- 高壓風車
- 鹼液加藥系統
- 管路
- 儀控設備

以下為主要系統單元之描述

1. 驟冷塔

驟冷塔係設計來將高溫廢氣冷卻到其絕熱飽和溫度附近，而特殊的

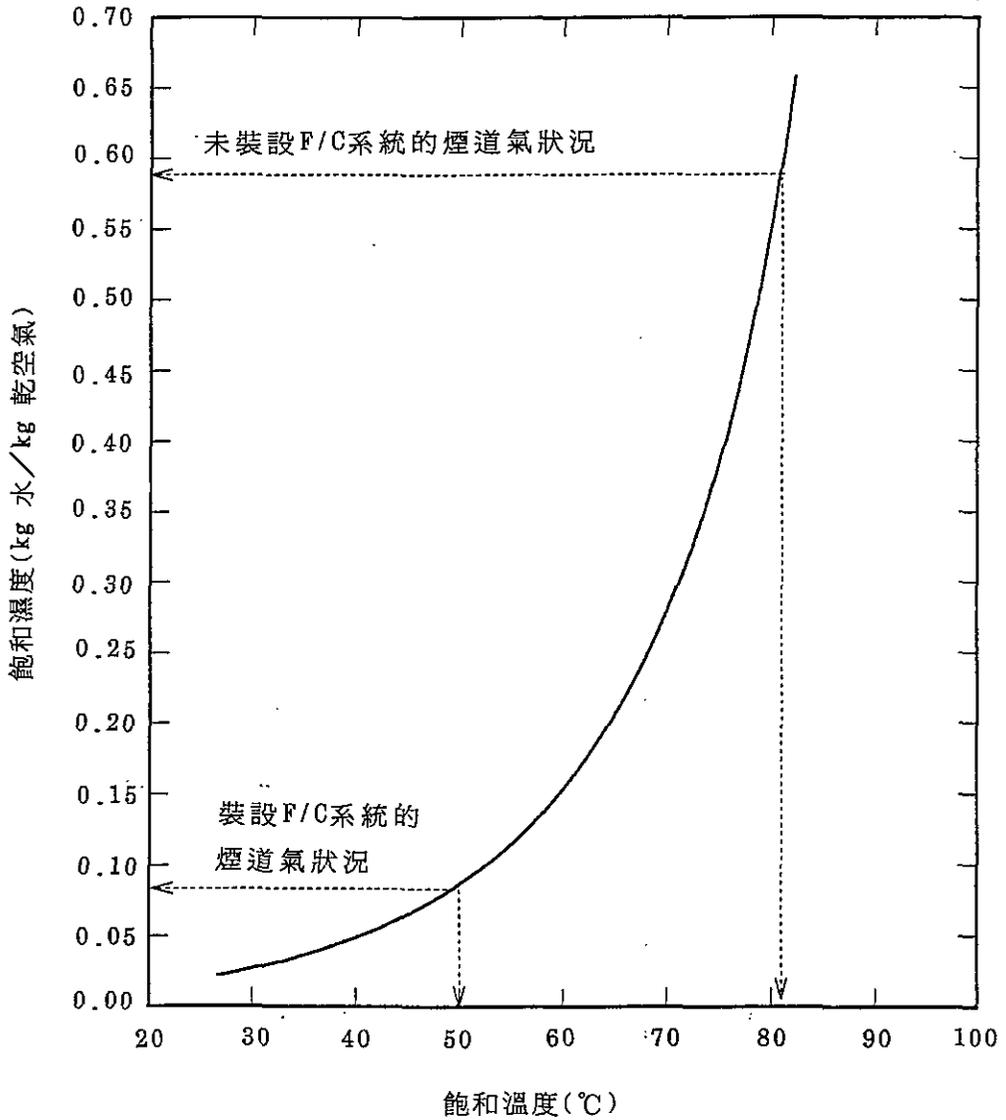


圖 8 溫度與濕度之飽和曲線

設計將不致產生二次粒狀污染物。同時亦能夠承受焚化爐排氣量忽高忽低的不穩定性。此驟冷塔是一種兩段式、低壓損噴霧／文氏管設計，以能夠承受 1000°C 到 1250°C 範圍之高溫煙道氣體，且含有粒狀物、氯化氫、二氧化硫及其它酸性氣體。高溫廢氣先以清淨的水加以冷卻，再施以循環水以減低噴霧乾燥的效果。驟冷塔提供足夠的滯留時間以確保廢氣達

飽和狀態。其具有自己的水槽及洗滌液再循環管線以致當焚化爐排氣時突然噴出一陣黑煙時，其粒狀物仍可被驟冷塔捕捉，而不會造成下一個單元設備超負荷的情況。

驟冷塔之設計具有相當低的壓損(100mm Aq)。另外在某些特殊操作條件下驟冷塔可用Hastelloy C-276、Inconel 625 或Rolled Alloy AL 6XN製造而成，但通常係以酸性磚當做內襯以抵抗酸氣的腐蝕性。

2. 冷凝／吸收塔

冷凝／吸收塔是一種填充洗滌塔的特殊設計以對廢氣溫度做次冷卻，並同時吸收酸性氣體。其可以設計成水平或垂直型態的填充塔。其採用的填充物與一般填充洗滌塔不同，為一種濕膜、貫通式凹槽結構的填充物。這種型式的填充物已證實對粒狀物阻塞及氣體亂流具有抵抗力。另外，藉增加填充物之高度，吸收塔可以設計來符合各種酸性氣體排放標準的要求。

冷凝／吸收塔兼具第一階段去除粒狀污染物的功用。其粒狀物去除效率和水蒸汽凝結之莫耳體積成正比。若飽和氣體以82℃進入冷凝／吸收塔並以49℃離開，則將近有35%的粒狀物會被冷凝／吸收塔收集下來。

3. 衝撞式洗滌塔

衝撞式洗滌塔乃利用氣流互相對撞，產生細微的小水滴，提供一大表面積來確保可以達成非常低的出口排放標準。衝撞式洗滌塔外形共有三個文氏管型態的喉管排列成“T”字型。進入衝撞式洗滌塔的氣體於進入洗滌塔喉管之前先分開成為兩股氣流再迴轉互相對撞。水在各喉管入口處被噴入並被高速的氣流霧化成非常細微的小水滴。這些水滴於加速朝向“T”字型中心時可收集粒狀物。

在中心處，兩股氣流面對面碰撞。這些水滴由於其慣性而具有較高的相對速度而衝進對面的氣流中。此一碰撞過程將水滴撕成較細之小水滴，可以更有效率地收集次微米粒狀物，並產生較大質量傳遞面積以利氣體之吸收。此一衝撞式洗滌塔本身容許於系統中使用較低pH（小於8.0）之洗滌液，即可達到99%的酸性氣體去除效率。因為使用低pH值的洗滌液可防止二氧化碳的吸收及碳酸鹽之形成。

4. 氣液分離器

當排放標準限度更為嚴格時，氣液分離器的特性變得更為重要，因為氣液分離器為洗滌塔系統中最後一個處理單元。由於洗滌塔再循環水含有5%到10%重量百分比的固體，少量穿過氣液分離器的液滴便足以使洗滌塔系統排氣超過排放標準。因此，氣液分離器必須去除排氣中所有的水滴。

去除排氣中的水滴乃使用一種水平、交叉流式的氣液分離器。其具有第一段撞擊區除去較大粒徑的水滴再跟隨有第二段之平行波浪型擋板去除較小粒徑的水滴。

5. 洗滌液冷卻系統

冷凝／吸收塔的填充物通常注入38°C的冷水。離開冷凝／吸收塔的熱水在其可被再循環之前必須通過水冷迴路。傳統型直接接觸冷卻塔可用來將冷凝／吸收塔之洗滌液蒸發冷卻。另一種方法是採用熱交換器，可用來將洗滌液的熱量轉移到另一種液體上，諸如二乙二醇(ethylene glycol)或水中。熱交換器可以和蒸發冷卻塔或氣冷式熱交換器結合來冷卻洗滌液溫度。氣冷式熱交換器具有降低傳到大氣中之蒸發損失的優點。熱水亦可當做熱泵之驅動力來達成能源回收。

三、商業化設置實例

在北美各地已有許多有害廢棄物焚化爐設施中安裝通量力／冷凝洗滌塔系統。表1顯示通量力／冷凝洗滌塔系統的設置情形。以下為其中三處設置此套系統的實例概述。

3.1 Rollins 環保服務處 (RES)

RES於美國境內經營三座100~150百萬BTU/hr之有害廢棄物焚化爐工廠。此一經營之範圍在於將各式各樣的工業廢棄物包含不合規格的醫療用品、用過的溶劑、高分子聚合物污泥及廢棄物、化學廢棄物及含充滿油污或PCB之有機質廢液等摧毀掉。

RES原先的空氣污染防制系統處理後之排氣被認為無法符合未來將修訂的粒狀物、氯化氫及硫氧化物排放標準，因此他們決定修改紐澤西工廠

表 1 通量力 / 冷凝洗滌系統設置實績一覽表

工廠名稱	設置年份	處理流量 (AM ³ /hr)	粒狀物濃度 (mg/m ³)	氯化氫 去除效率 (%)	二氧化硫 去除效率 (%)	洗滌塔 操作壓損 (mmAq)
Rollins, Bridgeport, NJ	1983	254,900	45-69	99.9+	98	1,016-1,270
Rollins, Deer Park, TX	1985	373,800	18-23	99.9+	98.0, Lime	1,016-1,270
Pfizer, Groton, CT	1985	102,000	91	99.9+	99.0	508
Am. Cynamid, Hannibal, MO	1987	136,000	91	99.9+	99.0, NaOH	890
Eli Lilly, Mayaguez, PR	1987	42,500	91	99.9+	99.0, NaOH	890
Rollins, Deer Park, TX	1987	254,000	18-23	99.9+	98.0, Lime	1,016-1,279
DuPont, Sabine River, TX	1988	250,000	9	99.9+	99	890
Am. Cynamid, Hannibal, MO	1988	136,000	91	99.9+	99.0, NaOH	890
Chem Waste Mgmt, Tijuana, Mexico	1988	85,000	68	99.9+	99.0	1,143
Chem-Security, Swan Hills, Canada	1989	102,000	50	99.9+	99.0	1,143
Uniroyal Chem., Geismar, LA	1989	16,500	46	99.9+	99.0	890
Hoechst-Celanese, Pasadena, TX	1990	147,000	<68	99.9+	99+	815
Syntex, Freeport, Grand Bahamas	1991	17,000	<90	99.9+	95	1,090
GDC Engineering, Baton Rouge, LA	1991	110,000	<35	99.9+	>98	1,270
Burroughs-Wellcome, Greenville, NC	1991	46,000	<35	99.9+	>98	1,140
Sandoz Crop Protection, Beaumont, TX	1992	18,700	<22	99.9	>99	1,145
Nucor Steel, Hickman, AK	1992	12,400	16	99.9+	>99	1,400

的空氣污染防制系統。另外，由於排氣中硫氧化物的限制，RES必須限制有害廢棄物的燃燒量。

紐澤西工廠有一文氏洗滌塔，操作於1020mm水柱壓降下以控制粒狀物。隨後有一填充塔用來去除酸性氣體。此一系統只符合粒狀物排放標準180mg/DNM³ (0.08gr/dscf) 之要求。

由於RES已經營該工廠多年，因此於空氣污染防制系統方面經驗豐富

。在其對紐澤西工廠做系統修改時，其原有空氣污染防制系統中，沒有一個被認為能符合他們所要燒的廢棄物特性及廢棄物處理量的要求。

在考慮並評估過各種不同的洗滌塔系統後，衝撞式洗滌塔系統連同通量力／冷凝洗滌塔被選中，因為經過實地的模廠測試，證實其處理後之排氣符合所有現有以及正在修訂中的法條所規定的排放標準。此一系統之設計在冷凝／吸收塔入口處大約在 $2,250 \text{ m}^3/\text{min}$ ，而在衝撞式洗滌塔的入口處約為 $1,275 \text{ m}^3/\text{min}$ 。為降低焚化爐停機的時間，一套全新的空氣污染防制系統被設計並予安裝，同時原先的空氣污染防制系統仍於爐中繼續運作。當新的系統正式連接到爐體後，爐體才予以關機。新裝的空氣污染防制系統於五日後正式開機並予運轉。

為決定粒狀物的去除效率，一連串的測試以廢棄物平均燃燒率每小時 $5,270$ 公斤，平均灰含量超過每小時 500 公斤的狀況下進行。這些廢棄物包含：

- 醫療用品，包含鈉化合物，其灰含量為 60% 。
- 含矽藻之土壤
- 來自漏油清理操作後之燃油／砂礫混合物
- 實驗室廢棄物
- 大約每小時 10 公斤之金屬鹽（如鉛、汞、鎘、鐵、鋇、鋁及砷等產生的金屬氧化物）
- 含氯或非氯溶劑及聚合物廢棄物之廢液

上述廢棄物之燃燒產生極細之粒狀物（其中值粒徑為 1 微米）。以 12% 二氧化碳為校正基準，粒狀物濃度的測試結果為 $45\sim 68 \text{ mg}/\text{DNm}^3$ 。此數值遠超過原防制設備出口粒狀物濃度 $148 \text{ mg}/\text{DNm}^3$ 的保證。基於上述測試結果，紐澤西州環保單位將粒狀物排放標準自 $180 \text{ mg}/\text{DNm}^3$ 降到 $90 \text{ mg}/\text{DNm}^3$ 。

氯化氫去除效率的測試係以包含大約 40% 氯含量的混合物，或有大約兩倍於一般廢棄物氯含量的廢棄物混合物來進行。測試物質包含氯苯、過氯乙烯、三氯乙烯及其它含氯之芳香族複合物。氯化氫平均燃燒率為 $1,850$ 公斤／小時，而平均排放率為 7.5 公斤／小時—遠超過 99% 之去除效率。

硫化物去除效率之測試係針對得自硫酸混合物及聚合物廢棄物之燃燒廢氣來進行。平均而言，以590公斤／小時輸入系統的硫，將從洗滌塔排放出18.6公斤／小時的二氧化硫。其達成的97%去除效率遠超過設計目標效率90%。若洗滌塔所使用的洗滌液為石灰泥漿，則所達成的去除效率變得更為突顯。

測試過程亦顯示此一設備將可以處理更大操作噸數的焚化爐除了硫的份量可增加到295公斤／小時外（和先前的125公斤／小時相比），爐體之整體廢棄物燃燒容量可以增大15~20%的程度。同時可以預期的，其排煙不透光度目前維持在0~5%。

由於紐澤西工廠得到良好的運轉結果，使得RES在其Dear Park之德州工廠以同樣的衝撞式洗滌塔系統取代原有的空氣污染防治設備。表2顯示在此一工廠所得到的測試結果之總結。平均粒狀物排放率為20mg/DNm³。

3.2 製藥廠

一家大製藥廠安裝一種熱分解爐以處置其液態廢棄物。熱分解爐製造商相信此種設備將會摧毀液態廢棄物而不致產生空氣污染問題。但當此種設備安裝並運轉後，其排氣仍含有一股藍色霧狀煙柱，超過20%不透光度。隨後的煙囪測試顯示離開煙囪的粒狀物主要係屬於次微米的粒狀物且中值粒徑為0.35微米。

自煙囪測試資料，欲達成有效的粒狀物收集，需要一套文氏洗滌塔於2,800mmAq壓損下操作。而欲達成同等的粒狀物收集效率，預期衝撞式洗滌塔必須在1,500mmAq之壓損下操作。衝撞式洗滌塔操作壓損方面的需求已由隨後的現場模廠測試中加以確定。

在污染源現場之模廠測試中，發現此一工廠有可利用的海水當做冷凝／吸收塔之冷卻水，針對F/C系統之模廠測試顯示當整個系統之壓損在457~510mmAq之間時，所要求的粒狀物收集效率將可達成。

一套廢氣處理流量每分鐘850立方米的系統被安裝在工廠焚化爐上，其主要單元如下：

表 2 RES有害廢棄物焚化爐德州廠廢氣處理後之檢測結果

檢 測 項 目		實 測 值			平 均 值	單 位
		第 一 次	第 二 次	第 三 次		
排 放 氣 體 流 量		2425	2376	2414	2405	DNm ³ /min
粒 狀 物	濃 度	23.1	19.2	18.1	20.1	mg/DNm ³ @7%O ₂
	質 量 排 放 率	2.85	2.4	2.2	2.47	kg/hr
	不 透 光 度	0	0	0	0	%
酸 氣 排 放 量	氫 化 氫	0.21	0.22	0.38	0.27	kg/hr
	氮 氧 化 物	<0.016	<0.016	0.077	<0.036	kg/hr
氣 體 排 放 量	一 氧 化 碳	0.59	0.32	0.045	0.32	kg/hr
	氮 氧 化 物	7.86	7.23	6.73	7.27	kg/hr
	二 氧 化 硫	0.23	0.091	0.32	0.23	kg/hr
	總 碳 氫 化 合 物	0.14	0.17	0.17	0.17	kg/hr
金 屬 排 放 量	砷 As	0.0004	<0.0002	<0.0002	<0.0003	kg/hr
	鉍 Be	0.00004	<0.00004	<0.0004	<0.00004	kg/hr
	鎘 Cd	0.0007	0.0005	0.00075	0.0006	kg/hr
	鉻 Cr	0.0048	0.0064	0.0087	0.0066	kg/hr
	銅 Cu	0.012	0.0071	0.0068	0.0085	kg/hr
	鐵 Fe	0.0107	0.02	0.014	0.015	kg/hr
	鉛 Pb	0.061	0.036	0.064	0.054	kg/hr
	汞 Hg	0.0013	0.0006	0.00077	0.0009	kg/hr
	鎳 Ni	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	kg/hr
	釩 V	0.00027	0.00045	0.00027	0.00036	kg/hr
戴奧辛	總 PCDDs	2.9×10	1.0×10	1.1×10	1.6×10	kg/hr
呔喃	總 PCDF	5.9×10	6.3×10	7.7×10	6.8×10	kg/hr

主要單元	結構材料
文氏 / 驟冷塔	Hastelloy C-276
冷凝 / 吸收塔	FRP / 聚丙烯
衝撞式洗滌塔	Hastelloy C-276
氣液分離器	FRP / 聚丙烯
風車	FRP

完工系統之排煙測試顯示排煙口粒狀物濃度在 $68\text{mg}/\text{DNm}^3$ 之範圍，而其出口不透光度在5%或5%以下的範圍內。此一系統之能源消耗大約只有文氏洗滌塔的10%，原因在於其較低的操作壓損及通過風車時較少氣體體積流量。

3.3 化學工業（赫斯特－賽拉尼斯）

赫斯特－賽拉尼斯化學集團在其德州的清澈湖工廠運轉一座液態廢棄物焚化爐。原來的空氣污染控制系統包含驟冷塔、可變喉管之文氏洗滌塔、氣液分離器、及感應式風車等。在890到1,000 mmAq的文氏洗滌塔操作壓損下，此一系統剛好可以處理到排放標準 $180\text{mg}/\text{DNm}^3$ 及格的邊緣。

預期未來排放標準將會降低到 $70\text{mg}/\text{DNm}^3$ ，赫斯特－賽拉尼斯請CALVERT將其污染控制系統更新。CALVERT在工廠進行了模廠試驗研究並在其現有的可變喉管文氏洗滌塔的入口處量測粒狀物濃度及其粒徑分佈。其濃度範圍在 $1,100\text{mg}/\text{DNm}^3$ 到 $2,065\text{mg}/\text{DNm}^3$ 之間，其中大約75%為“後半”可凝結性的粒狀物（硫酸鹽類）。而“前半”粒狀物之中值粒徑為1.0微米。

CALVERT之F/C模型試驗設備之模廠測試在三組狀況下操作：

1. 冷凝 / 吸收塔出口溫度 82°C （無進一步冷卻）。
2. 在冷凝 / 吸收塔出口處將氣流溫度中度冷卻到大約 65°C 。
- 及3. 將出口溫度做最大冷卻到 49°C 。

在洗滌塔操作壓損為890mmAq下，所測得之粒狀物去除效率對無冷卻狀況者為71.8~75.4%，中度冷卻狀況為91.9~92.0%，最大冷卻狀況為93.9~94.3%。

根據模廠測試之結果，赫斯特－賽拉尼斯選用中度冷卻之F/C系統，亦即將冷凝 / 吸收塔之氣體溫度自 82°C 冷卻到 69°C 。針對全尺寸系統所進

行的測試結果顯示：洗滌塔壓降在762~840mmAq範圍內之粒狀物排放濃度符合70mg/DNm³之排放標準，且低於排放標準值甚多。

四、結 論

通量力／冷凝洗滌系統為一種已被證實之技術。以此一技術對有害廢棄物焚化爐廢氣做處理的量每日超過每分鐘50萬立方米。和其它的廢氣處理系統相比起來，它具有其優勢。當廢棄物同時排放粒狀物及酸性氣體時，它能去除較大總量的污染物。當酸性氣體含量增加，其優勢亦增加。同一技術可成功地運用於醫療性廢棄物焚化爐、污泥焚化爐以及都市垃圾焚化爐等等。

五、參考文獻

1. Turco, M. J. G. Jordam, and C. P. Wickersham, "Hazardous Waste Incineration Facility Boosts Particulate, HCl, SO_x removal, Increases Capacity by 15~20%," Chemical Processing, December 1984.
2. Patterson, R. G. and Yung, S. C., "Control of Air Toxics from Hazardous and Medical Waste Incinerators", Paper Presented at the AIChE 1993 Spring National Meeting, Houston, Texas, March 28 -April 1, 1993.
3. Schifftner, K. C., Yung, S. C., and Panttterson, R. G., "Engineering Efficient Wet Scrubber for Industial Waste Incinerators", Paper presented at the International Symposium on Incineration of Industrial and Hazardous Wastes, Washington D. C., May 5-6, 1988.
4. Attebhofer, K. A., and Elnagger, T., "Use of Multiple Air Pollution Control systems to Surpass All Emission Requirements at a Superfund Site", Proceedings, Thermal Treatment of Radioactive,

- Hazardous Chemical, Mixed, Energetic, Chemical Weapon, and Medical Wastes, Knoxville, Tennessee, May 3-7, 1993.
5. Schiffther, K. C., Hahn, H. F., and Patterson, R. G., "Air Pollution control for Hazardous Waste Incineration", IGCI Forum 1987, Air Quality Control Systems: Retrofit and Upgrading of Boilers and Solid Waste Incinerators, September 22-23, 1987.
 6. Calvert, S., Goldsmid, J., Leith, D., and Jhaveri, N, "Feasibility of Flux force/Condensation Scrubbing for Fine Particulate Collection", NTIS No. PB 227307, October 1973.
 7. Calvert, S. and Yung, S., "Study of Horizontal spray Flux-Force/Condensation Scrubber", EPA-600/2-76-200, July 1976.
 8. Calvert S. and Gandhi, "Fine Particle Collection by a Flux Force/Condensation Scrubber:Pilot Demonstration", EPA-600/ 2-77-238, December 1977.
 9. Whitmore, P. J., "Diffusiophoretic Particle Collection Under Turbulent Conditions", Ph. D. Thesis, University of British Columbia, Canada, 1976.