

處理技術

最 新 熱 破 壞 技 術

林 典 岳* 李 春 正**

一、摘要

本文中所描述及選擇的五種美國最新熱破壞處理技術研究，作一概要性之介紹，分別為(1)富氧焚化，(2)西屋公司／O' Connor 燃燒，(3)流體化床，(4)紅外線熱解系統，(5)電漿弧。這些技術在選擇時，至少需要具備二種指標，即這些技術應已在實驗室有實驗模型的示範設備，並顯示及證實其有效的破壞去除率的資料。

二、前言

固體廢棄物的處理是1980年代環境保護的刊物，此類技術只要廢棄物繼續的產生，則會繼續地出版。在環境保護署的研究資料和工業界的操作運轉經驗中，明顯地指示出：焚化在跟別的處理技術相比較，焚化有較高層次的破壞，且能處理較廣泛的各類型廢棄物，（參考資料1）。廢棄物的類別包括，有害廢棄物、都市廢棄物、有毒物質（如PCB）、醫院廢棄物、使用過期的殺蟲劑、由都市和工業廢水處理過程中的污泥和其他未歸類的廢棄物（如軍方的廢棄物）。

用焚化來處理廢棄物已有二十多年，其主要的傳統焚化技術，處理各種類型的廢棄物，可歸納如表(1)。

美國環境保護署的功能之一是在資源回收與保護法 (RCRA) 和超級基金 (Super fund) 的計畫中，協助工業界對於廢棄物的破壞，發展出創新的處理技術。美國環保署在此方面的活動描述如下。

在 1980-1984 年間，美國環保署有害廢棄物工程研究實驗室（在辛西那堤，俄亥俄州），在資源回收保護法之資助下，舉辦一個研究計畫評估，有害廢棄物各種最新的熱破壞技術。這個評估計畫，選出及測試下列六種最新的技術，測試結果於1983年已由李春正博士發表之「最新有害廢棄物熱破壞技術之比較」中刊出。參考資料 2.

- * 流體化床
- * 鹽浴爐

* 工業技術研究院，能源與礦業研究所燃料與燃燒研究室：主任

**美國環保署、災害減少工程實驗室計畫研究部：經理

表(1) 廢棄物類別和其傳統焚化處理技術

廢棄物類別	傳統的焚化技術
1.有害廢棄物	* 旋轉窑 * 液體噴射焚化
2.醫療廢棄物	* 可調整式過剩空氣焚化 * 可調整式缺氧(二段式)焚化。
3.都市廢棄物	* 大量焚燒 * 以垃圾為燃料(RDF)焚化
4.工業的污泥	* 多床式焚化 * 流體化床
5.都市的污泥	* 多床式焚化 * 流體化床

- * 先進電子反應器
- * 電漿弧
- * 濕空氣氧化法
- * 超臨界水法

在1980年由於超級基金(Superfund)，工業界開始發展可運輸型活動的焚化系統，目的在於破壞去除工業界和傾倒場地需要處理的廢棄物。在1986年由於超級基金及再簽署法案(re-Authorization Act)的要求，美國環保署成立了一個超級基金最新技術評估計畫(SITE)，每年特別用來支助最新技術模擬示範，到目前為止，在 SITE 計畫下環保署已選定了21種技術。在這21種技術中，有五種是為熱處理技術如表(2)所示。

表(2) SITE 支助之最新熱處理技術

技術類別	測試情形
1.紅外線熱處理系統	測試結果將在本文中介紹
2.流體化床燃燒器	測試結果將在本文中介紹
3.西屋公司電漿弧	目前尚無測試結果
4.西屋公司電熱解	目前尚無測試結果
5.離心反應器	目前尚無測試結果

本文將對李春正博士在1983年所發表之論文再加以補充最新資料。它描述由環保署的資源回收保護法 EPA'S RCRA 或超級基金要求的再簽署法 (SARA) 所支助的在工業界由1980年起發展的一些最新技術。在選擇這些技術上，有兩個重要的指標。他們（或曾經）是至少需經由實驗模擬示範設備的步驟，來證實或顯示，提供這些項目的破壞去除效能，現就本文所選擇的技術列於表(3)。

表(3) 美國最新熱破壞技術

技 術 別	主 要 特 點
1.富氧焚化 (Oxygen-Enriched) Incineration	高溫氧化 (1500~2000°F) 用高純度的氧氣來替代燃燒用之空氣 (因此排氣及其含氮量降低)。
2.西屋公司之 O'connor 燃燒設備	高溫氧化 (1500~2000°F) 據報告所言，能用來焚化有害廢棄物和都市廢棄物。
3.流體化床燃燒設備 (Circulating-bed Combustor CBC)	低溫氧化 (1000~1500°F) 焚化時能同時藉着床體所添加的石灰或石灰粉去除有害產物。
4.紅外線熱系統 (Infrared System)	高溫熱解或氧化 (1500~2000°F) 它能在缺氧或過剩氧氣中操作。
5.電漿弧 (Plasma Arc)	超高溫熱解 (1800°F) 是一種離子化的氣流，能在微秒之很短時間內，打斷化學物質的鏈結鍵。

三、技術說明

A. 富氧焚化技術

1. 流程說明

有害廢棄物在連續有效地焚化時，需要加入氧氣來澈底、完全的破壞、氧化廢棄物的分子。一般的焚化，需要 150% 的過剩空氣，提供足以氧化的氧氣和所謂 3-T 的需要，3 個 T 即溫度 (Temperature)、渦漩 (turbulence)、滯留時間 (residence time)，來滿足與確保有效的熱破壞。因為空氣中 79% 是氮氣，因之任何過剩的空氣，並不能全用來提高焚化的效率，而導致大部份的額外熱能是在提高氮氣的燃燒溫度，且增加排氣量的處理及其淨

化的設備需求。實際上 3-T's 中的兩個 T 涡漩 (turbulence) 、滯留時間 (residence time) 是基本的物理參數，用來增進有害廢棄物的顆粒和氧氣的接觸，因此增加氧氣的濃度以改進焚化之熱破壞效率是合乎邏輯的。

於1987年，在美國環保署研究發展部之支助下，聯合碳化公司 (Union Carbide Corporation) 測試其富氧燃燒器，此林達富氧燃燒系統 (Linde Oxygen Combustion System OCS)，裝於環保署之活動焚化系統，(EPA'S Mobile Incineration System MIS)，而燃燒位於密蘇里州馬克杜威的丹尼鎮農場之受戴奧辛污染之固體及液體廢棄物，環保署之可移動式焚化爐建於1981年（參考資料 3），此可移動式焚化系統由四部重型拖車所組成，構造如下。

- * 第一拖車：旋轉窯 (4.9MMBTU/hr，相當於百萬 BTU/hr) 。
- * 第二拖車：二次燃燒室 (3.9MMBTU/hr) 。
- * 第三拖車：洗滌槽及空氣污染防治控制設備 (APC) 。
- * 第四拖車：燃燒和煙道氣監測設備。

以林達富氧燃燒系統 (Linde OCS) 代替傳統的空氣燃燒器，林達富氧燃燒系統是由有專利之“A”燃燒器，此燃燒器是一個氧流量控制器之制輪器和控制盤所構成（參考資料 4,5,6），控制盤是利用一個可程式控制器，作最佳整合所有系統的元件，以進行靈活地控制燃燒設備，並提供簡易之界面操作系統和安全的連鎖。這種“A”燃燒器可以使用高至 100% 之純氧以取代空氣進行焚化而不造成高溫火焰，高 NO_x、混合不均及不均勻地熱分佈。但由於不可避免之空氣滲漏，即使在些微的負壓下（些微的真空中），焚化要在幾乎 100% 之富氧燃燒是很困難達成的。

2.個案研究結果

修改過後之可移動式焚化系統 (MIS)，由1987年六月初至九月中的操作報告中，已肯定此系統可達到下列的主要研究目標。

- * 廢棄物處理量 (throughput) 增加。
- * 燃料可節省達 60% 。
- * 旋轉窯之噴氣量 (Puff) 減少。

每個達成目標分述如下：

a. 處理量之增加

可移動式焚化系統在以一般空氣燃燒器來操作時，其所能處理最大污染土壤量、設計值為 2000lb/hr，但此設計值卻未曾達到，例如在1985年春季所進行的四個測試其最高處理量平均為 1478lb/hr，當改裝林達富氧燃燒器，此可移動式焚化系統 (MIS) 在處理被污染的土壤時處理量達 4000lb/hr，此系統由此測試而被肯定，兩者條件比較如表(4)。

b. 節省之燃料

若沒有富氧狀態，旋轉窯必須添加補助燃料，以提供足夠的熱量使之能在 1500~1600°F 及二次燃燒室在大約 2100°F 下操作，因為大部份之廢棄物均沒有足夠之熱值，足以維持本身之高溫自燃 (Self-Combustion) 。

表(4) 環保署可移動式焚化系統、純氧燃燒系統示範結果

	空 Case ⁺	純 Case	百 分 比
被污染土壤 (lb/hr)	1478	4000	+ 171%
燃燒速率 (MMBTU/hr)			
旋轉窯	4.9	3.9	
二次燃燒室	3.9	5.4	
小計	8.8	9.3	+ 6%
燃燒使用比 (MMBTU/Ton Soil)	11.9	4.7	- 61%
純氧量 (lb/hr)			
旋轉窯*		574	
二次燃燒室		0	
小計		574	
氧氣消耗量 (Ton O ₂ /Ton Soil)		0.14	
節省燃料量 (MMBTU/Ton O ₂)		50	
窯內氣體表面速度 (ft/Sec) **	8.1	3.3	- 59%
二次燃燒室停留時間 (Sec) **	2.6	2.6	0
急冷後排氣流	3250	2500	- 23%

註：+：四次測試之平均值，最高處理量2000lb/hr

*：58%之氧氣進入密爐中（相當於40%富氧）

**：計算數據

節省之燃料比，在 EPA/MIS 若以 Linde 富氧燃燒系統操作下可達 60%，亦可用每噸的氧氣可節省 50MMBTU 來表示，如表(4)。使用純氧以節省燃料在經濟層面來考慮，則依使用之燃料與氧的相對價格而定，以使用 2 號燃料油為例，其每加侖 0.7 美元 (5.5 美元 / MBTU) 和使用每噸氧氣可節省 50MMBTU 來換算時，此氧氣之換算價格約為每噸 275 美元。然氧氣之價格依氧氣之生產方式、工廠大小與地點而有不同，一般而言，在大的生產設施現場價格每噸氧氣為 50 美元，若用液氧輸送則需要每噸 120 美元。

c. 旋轉窯之噴氣 (Puff) 降低

當高熱值之廢棄物送入旋轉窯焚化爐時（以間歇性方式進料），這些廢料在瞬間燃燒時會造成大量不穩定之排氣釋放，且會因此在瞬間缺氧現象發生，這種短暫缺氧狀況，會造成

不完全燃燒產物 (PIC) 之釋放，這種現象稱為窯爐之「噴氣」 (Puff)，參考資料7,8。

在 EPA/MIS 之現場操作，要週期性地燃燒大量塑膠廢棄物，這些廢棄物每 1 ~ 2 分鐘以推桿推入旋轉窯爐中，為了反應燃燒這些廢棄物時瞬間所需要之大量氧氣量，Linde 富氧燃燒系統已設計一套氧氣供給及回饋邏輯控制系統，以精確地控制燃燒時之需氧量，旋轉窯內若需要時可以裝一套自動噴水系統以控制爐內之溫度。

在裝設此 Linde 氧氣控制設備以前，MIS 一直無法順利地燃燒這些塑膠廢棄物，部份原因也可能是相對地容量太小。如圖(1)早期試驗之結果為例，在正常地操作中雖然含過量之氧氣，但在進料操作之時會引起噴氣等擾亂流發生，此時氧氣的濃度愈急速降低（甚至趨近於零）且有一氧化碳伴隨產生。在裝設此氧氣控制設備後，燃燒時與燃燒後排氣釋放有關之瞬間擾亂，在 MIS 實際操作下，此現象明顯地被去除了。如圖(2)所示，進入二次燃燒室之氧氣被控制在設定點 9 %O₂ ± 1 %，而在二次燃燒室內之氧氣含量則維持在 6 % (乾基)。在煙道中則偵測不到一氧化碳，在圖(2)所示，在瞬間需氧時，氧氣的流量有快速的反應動作。

3. 目前技術現況

雖然聯合碳素公司 (UCC) 已完成在 MIS 之燃燒評估，但美國環保署仍繼續使用聯合碳素公司 (UCC) 之燃燒器去試燒其他廢棄物，其測試結果對於破壞去除率 (DRE) 在稍後可獲得結果，除了用 UCC 的富氧測試外，美國燃燒公司 (American Combustion Company Acc) 也用其派立登 (Pyreton) 富氧燃燒器，於阿肯色州傑佛遜郡之環保署燃燒研究設備中測試 (EPA Combustion research facility CRF)，在撰寫本文時，其測試結果仍正在進行評估中。

4. 技術之優點 (參考資料 4)

- a. 當使用富氧時，焚化爐之廢棄物處理量（此處理量通常受到空氣引風機之容量的限制）及燃氣停留時間會顯著地增加。
- b. 若系統需要補助燃料時，則由於廢氣中帶走之顯熱降低而致使燃料之消耗亦減少。
- c. 由於高濃度的氧含量，故當燃料與氧混合後加上更長之滯留時間，使破壞去除率大大地提高。
- d. 因廢氣減少，使污染防治控制費用減少且更具效用。

5. 技術上缺點

- a. 由於在廢氣中減少像氮氣 (N₂) 之稀釋劑，使於富氧焚化時火焰的溫度較傳統僅用空氣之焚化爐之火焰溫度為高，此種高溫度之火焰會造成高的氮氧化物生成及局部的過熱。
- b. 富氧焚化爐氧氣之供應與價格將是主要的問題。

B. 西屋公司 O' Connor 燃燒器

西屋公司之 O' Connor 燃燒器系統之心臟，是由一個水冷式旋轉圓筒，由可換式軸向水管和水平的洞板鉗接在一起而形成圓形之構造物，燃燒室裝置成稍微傾斜而以鏈條驅動滾筒作緩慢的旋轉。水管間之洞板的圓孔控制燃燒空氣之分佈，而以水冷式水牆移去熱量並保護旋轉圓筒不至於過熱。

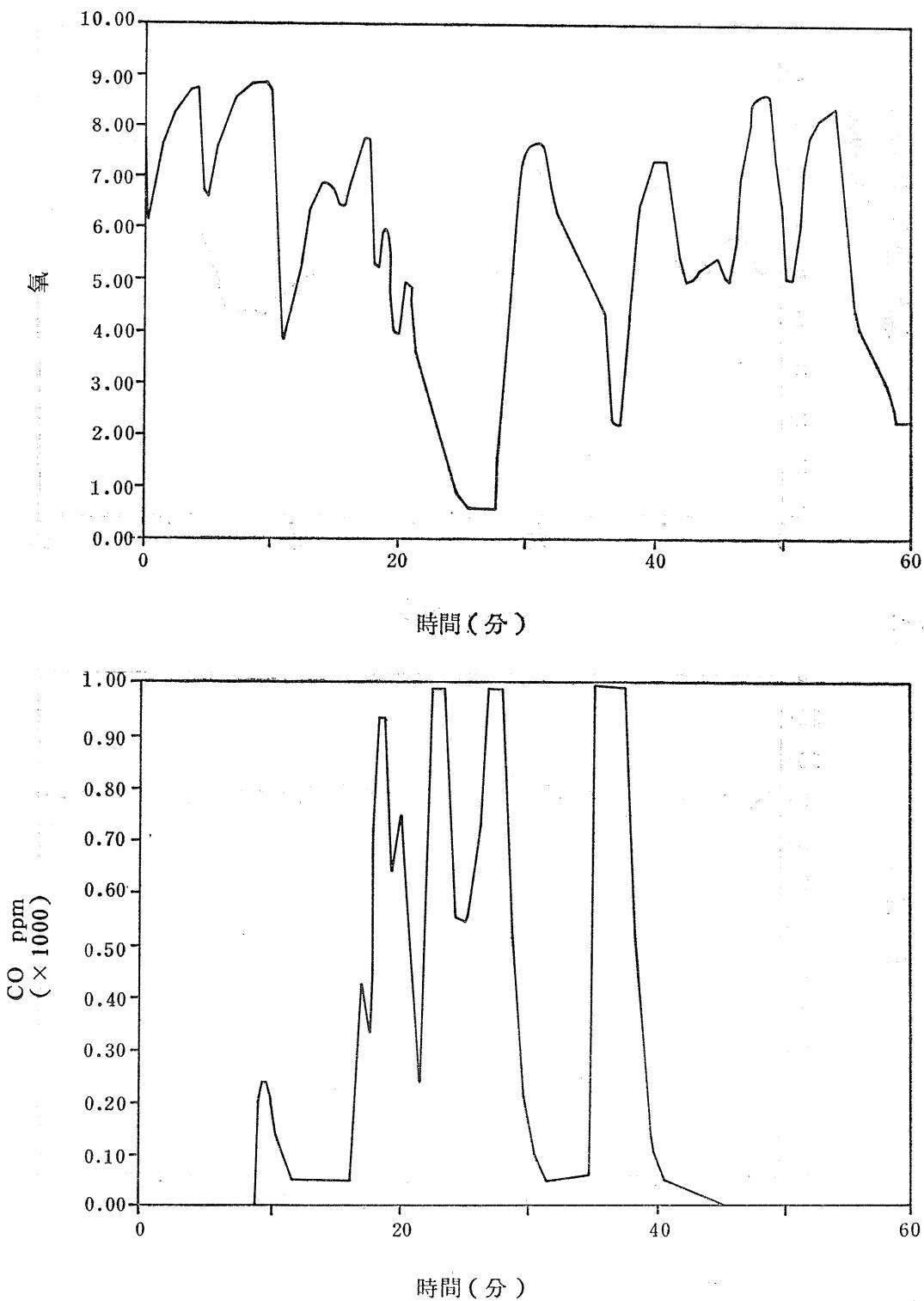


圖 1 燃燒爐氣

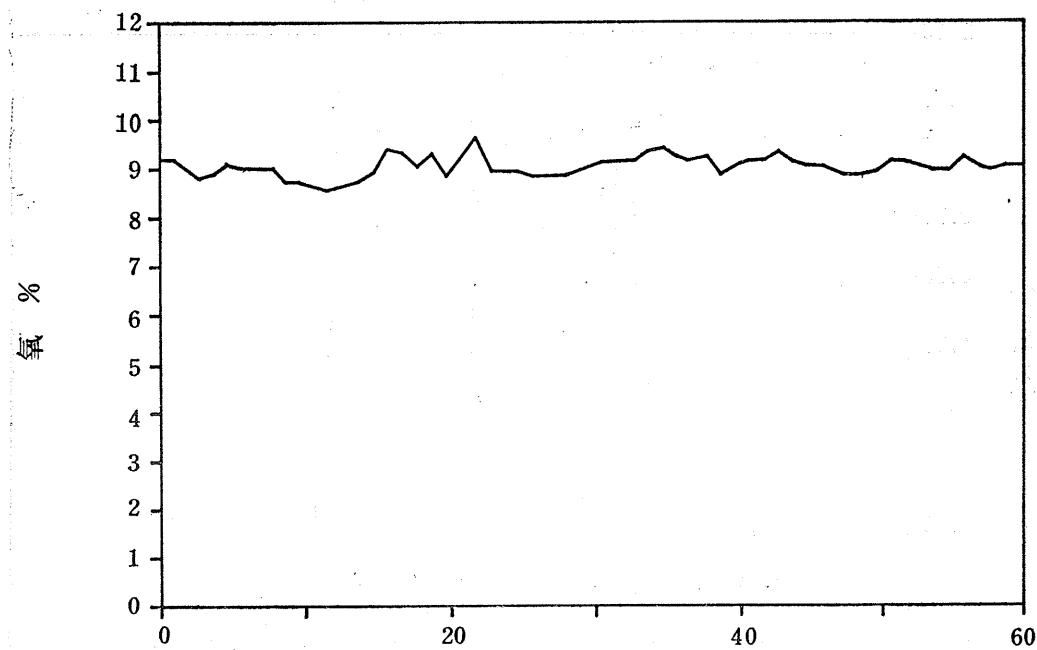
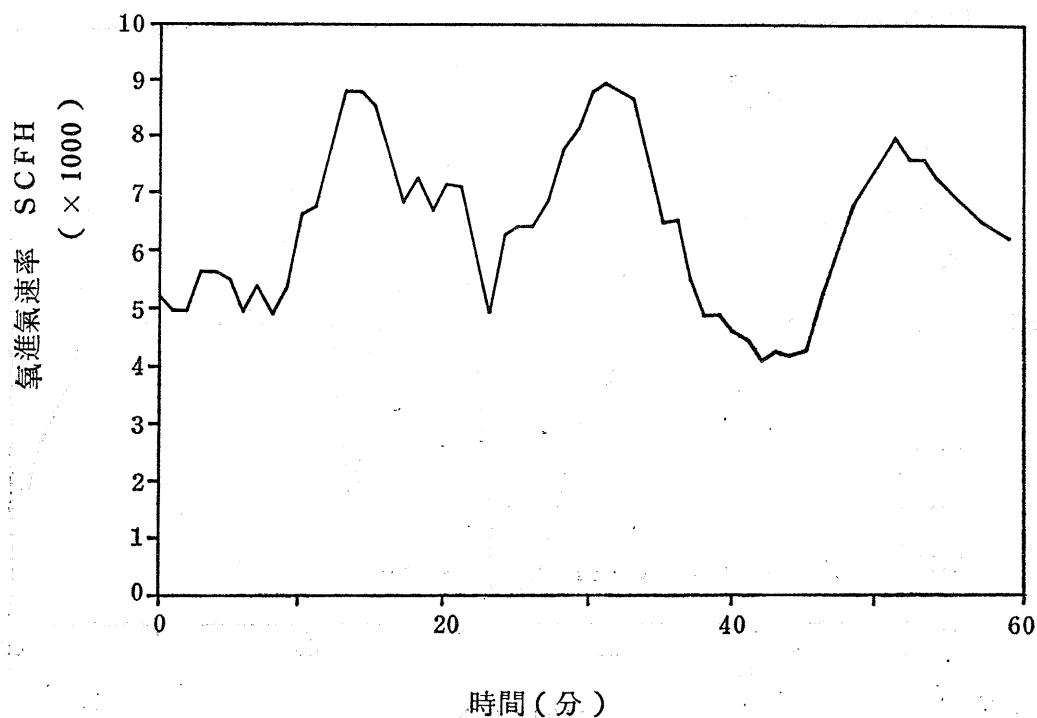


圖 2 氧氣控制的效果

廢棄物由進料口直接送入傾斜的燃燒室之上端，當廢棄物在旋轉之圓筒內轉動而往下移動時，一面被乾燥，一面進行燃燒，由底部掉落出來之灰約為進料時體積之 $\frac{1}{10}$ ，剩下之未完全燃燒之物質，則在後燃燒室繼續燃燒。

在佛羅里達州巴拿馬市之海灣郡，於1987年（參考9）建造兩個西屋公司O' Conner設備，此海灣郡之資源管理設備可焚化510噸／天之都市固體廢棄物（MSW），由廢棄物燃燒時所產生之熱產生蒸汽以驅動渦輪發電機發電，海灣郡之焚化設備流程如圖(3)，此工廠由兩個燃燒室（鍋爐）、渦輪發電機、卡車地磅、傾斜進料口、前後裝卸機、輸送帶、空氣污染防治設備、煙囪、灰處理設備、中央控制室，和所有輔助設備所組成；這些設施還包括行政辦公室、更衣室、停車場，道路與安全圍牆等。

所有運入焚化爐廠之都市垃圾，進入自動門後，在傾斜之進料口卸料，大件的物品由都市垃圾中分開，其中可燃之大件物品由剪力碎片機弄碎後再送入進料口，大而不可燃的物品則暫時儲存並送去掩埋場處理。經過分類後之都市垃圾則送入燃燒室開始焚化，稍微傾斜之圓筒形燃燒器緩慢之轉動，使廢棄物在燃燒進行時在筒內滾動並往前推動，並設一強力送風機以抽取垃圾貯坑區域之空氣以補助燃燒用，用以減低廠內之臭味與塵埃量並同時防止其釋放到建築物外面，空氣在進入圓筒底部之多重區域風箱前先預熱。圖(4)顯示旋轉燃燒器圓筒之橫截面及火上空氣（Overfire），及火下空氣（Underfire）流入燃燒器之流向，燃燒室之圓筒由直徑10英呎可抽鋼管及碳鋼洞板網銜接在一起建造而成，碳鋼洞板網寬度 $1\sim 1\frac{1}{2}$ "，上有 $\frac{3}{4}$ "直徑之孔，其作用是使燃燒用空氣由此進入。鋼管則導入冷卻水通往燃燒器圓筒的外牆，加熱時，水經過旋轉的接點而進入鍋爐，燃燒過程所產生之熱氣，流經燃燒室而到鍋爐之輻射，過熱與對流區，在對流區之熱氣，再經由熱交換器預熱燃燒用之冷空氣。廢氣在經過空氣預熱器後進入靜電集塵器（ESP）以去除粒狀污染物，此廢氣再被抽引式風車（Induced draft fan）從靜電集塵器中抽送至煙囪排放到大氣中。

燃燒過程中所產生之三種副產品，飛灰，過篩物，與底灰。在每一燃燒區域和鍋爐之傳導區，過熱區，空氣加熱區與靜電集塵區等由其漏斗所收集之飛灰，以氣動傳送至底灰傳送設備，過篩物則由在燃燒室內之傳送器輸送至底灰傳送設備，底灰則從旋轉燃燒器掉落至位於後燃室之下方之柵格子出口處。飛灰，過篩物與底灰之混合物以水冷卻、脫水後由兩套底灰傳送設備中之一套負責移至卡車，並以掩埋方式處理。

2. 個案研究結果

在巴拿馬市之設備，於1987年4月22日到6月5日測試其粒狀污染物（參考9），其結果顯示兩個設備其粒狀污染物和目測排放標準皆合乎弗羅里達州環保局之 PSD 規定，PSD (Prevention of significant Deterioration) 的規定是粒狀污染物排放小於0.03gr/dscf (校正至 CO₂12%)，不透光度不得超過10%，在設計處理容量 255噸／天之都市固體廢棄物其粒狀污染物濃度，在#1 機組其排放平均 0.0193gr/dscf 於12%之CO₂，而#2 號機組為 0.0243gr/dscf (校正至 12% 之 CO₂)，在 6 月 4、5 日兩天利用 EPA 方法五 (method 5) 去測試粒狀污染物，如表 5。而用 EPA 方法 9 作不透度 (pacity) 的測試，兩部機組，在操作測試期間，皆小於10%。

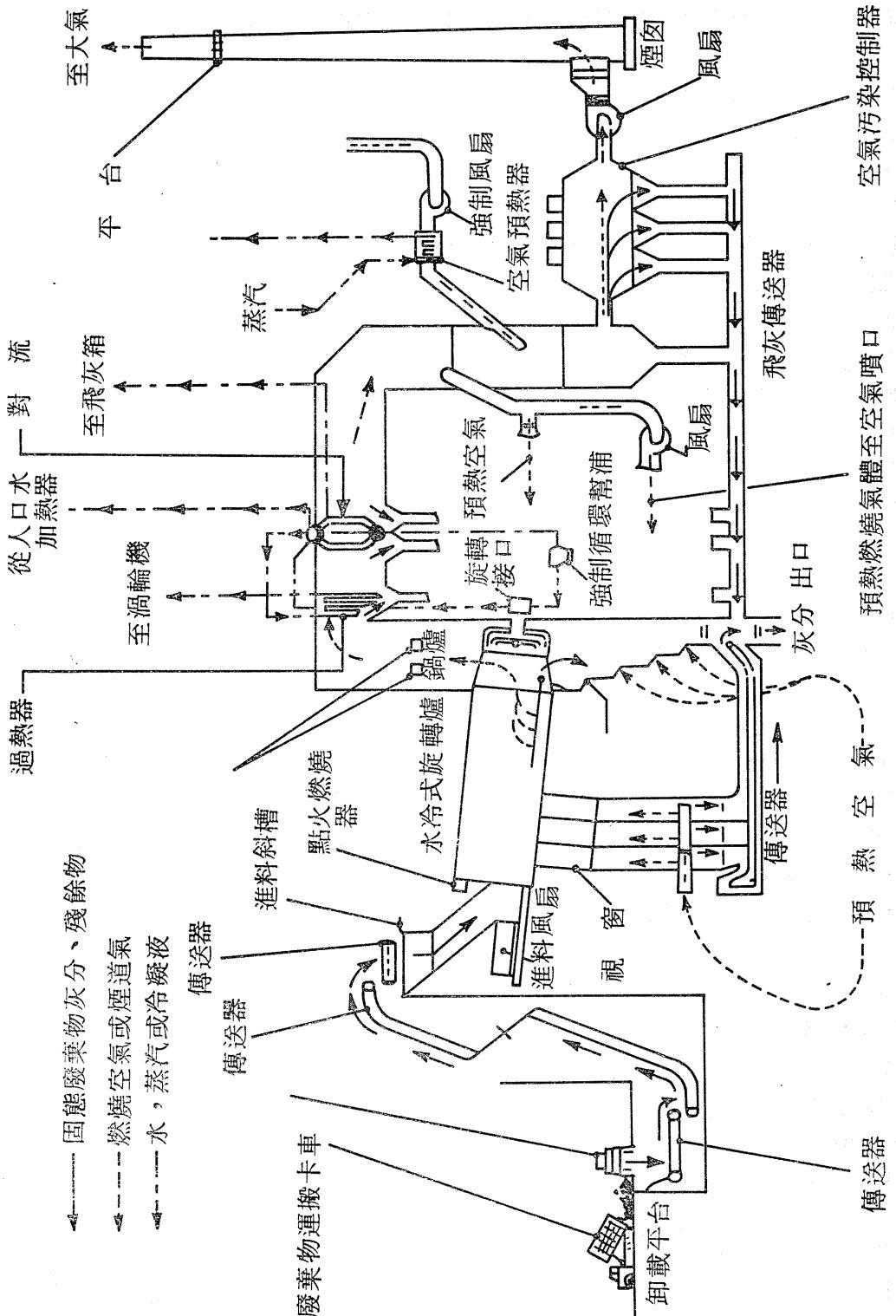
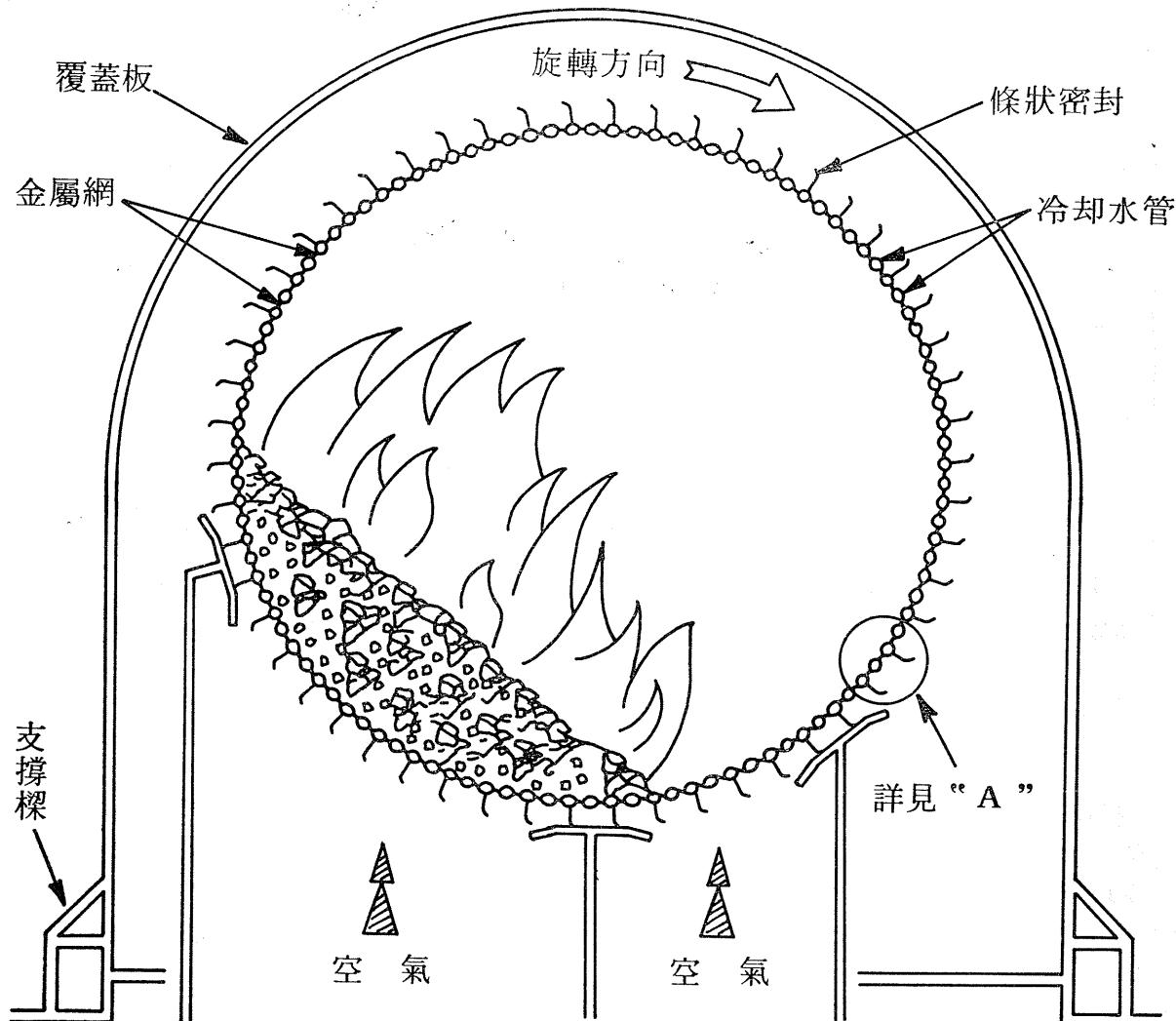


圖 3



A部位詳細圖

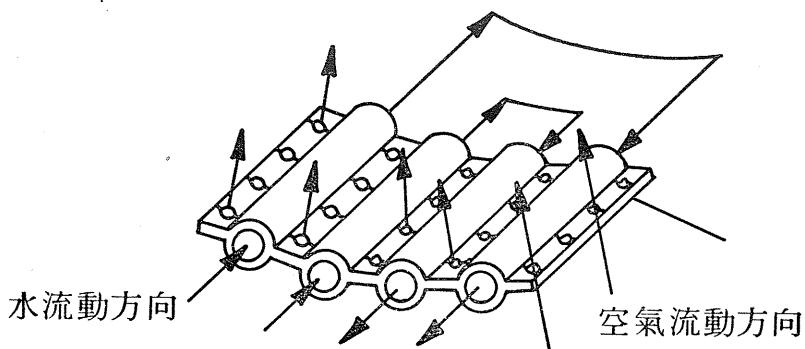


圖 4 Westinghouse/O'Connor 水冷式旋轉燃燒爐截面積

表 5 排放物測試結果

海灣市 #1 號機組測試結果							
日期	時間	排氣流量 kdscfm	排氣流量 kacfm	煙函溫度 °F	蒸汽流量 klb/hr	負載率	粒狀污染物 gr/dscf 12%CO ₂
6/5	959	25.8	52.4	425.0	71.1	104.5	0.0140
6/5	1140	27.9	55.1	429.0	66.5	97.8	0.0240
6/5	1307	25.8	52.8	427.0	65.0	95.6	0.0200
平均					67.5	99.3	0.0193
海灣市 #2 號機組測試結果							
日期	時間	排氣流量 kdscfm	排氣流量 kacfm	煙函溫度 °F	蒸汽流量 klb/hr	負載率	粒狀污染物 gr/dscf 12%CO ₂
6/4	945	27.7	52.6	429.0	69.7	102.5	0.0250
6/4	1310	28.4	58.1	449.0	62.7	92.2	0.0190
6/4	1525	29.2	59.0	451.0	62.3	91.6	0.0290
平均					64.9	95.4	0.0243

從1987年4月到6月亦進行排放氣體之測定，測定煙道氣中 SO₂、NO_x 及 HCl 的排放濃度，這些測試計劃是用來證實每年的排放速率符合 PSD 允許範圍。EPA 的方法八用來測定 SO₂ 的排放濃度，從 5 天中的 9 個試結果，SO₂ 之平均濃度為 111ppmdv (修正至 CO₂ 12%) 乾基。測 NO_x 則用連續排放監測 (Continuous emission monitor CEM) 來測試，在 9 天之測試中，用 EPA 方法七來測量，於 8 小時的連續監測結果測得 NO_x 之平均排放濃度為 180ppmdv (修正至 CO₂ 12%) 則成為 157 ppmdv。用 CEM 在 9 天期間，測得 NO_x 排放濃度範圍由 150~200ppmdv，即使在鍋爐不正常運轉時最高亦只到 300ppmdv，用 NIOSH 方法之 112B 來測定鹽酸 (HCl) 濃度，在 7 天 20 個取樣中，HCl 平均濃度修正到 CO₂ 12% 之操作條件下為 467ppmdv。

3. 目前的技術狀況

現在，於 6 組不同正在操作的設備中，有 11 個模組燃燒器。另外在建造中之三組設備，使用 7 個燃燒器。西屋公司已建造好四個以上的設備，並裝上 14 個燃燒器，每天可收集處理 9000 噸的固體廢棄物，這顯示出此種技術在未來有相當好的潛力（參考 9）。

4. 投術的優點。

- a.此種技術依據報告所述，能處理各種廢棄物，包括都市廢棄物，有害廢棄物，甚至醫院廢棄物，它能焚化液體、半固體、固體、污泥，及煉製之底泥。
- b.此技術有相當的彈性，可依模組設計的觀念來應用。單獨的機組可處理每天 500 噸的都市廢棄物，因此若用 4 個機組，則一天可處理超過 2000 噸的廢棄物，且機組可

需要而增加。

c.此技術能源回收效率高，因為在爐體之反應牆內部加裝水管回收熱能。

5. 技術的缺點

- a.由燃燒器中之過濾洞板所篩下之物質，可能含有未完全焚化之物質。
- b.此技術尚未完全地被證實適用於有害廢棄物上。

C. 流體化床燃燒爐 (Circulating Bed Combustion CBC)

1. 流程簡述 (參考10)

傳統的廢棄物熱破壞技術，通常在高溫下操作，相對地處理量就減少，且必須使用後燃器 (After burners) 和洗滌設備 (Scrubbers)。Ogden 環境服務公司 (Ogden Environmental Service, Inc. OES) 發展出流體化床燃燒設備 (CBC)，CBC 可在低溫下操作和傳統的旋轉窯 (rotary kiln) 或液體噴入焚化爐的高溫操作相比，可獲得相同的熱破壞效率，且較高的處理量，依報告還可省去後燃燒設備及洗滌設備。

CBC 是使用高速之空氣，使廢棄物在爐內形成一高擾流混合之燃燒循環的迴路，CBC 之構造圖示於圖 5 和圖 6 中，其燃燒室為高30英呎，內襯12吋厚之陶瓷耐火材料，固體廢棄物在進入密閉之燃燒迴路中時，立即熱循環成固體熱流而進入熱旋風分離器，液體廢棄物則直接噴入 CBC 的燃燒區域，在廢棄物進入 CBC 內時，有害的物質立即迅速被加熱並連續地暴露於高溫中 ($1450\sim1600^{\circ}\text{F}$)，直到完全燒盡離開 CBC 爐體。在爐內所滯留的時間，其範圍由氣體之 2 秒到較大進料物質 (小於 1.0吋) 的30分，高速燃燒之空氣流在燃燒迴路

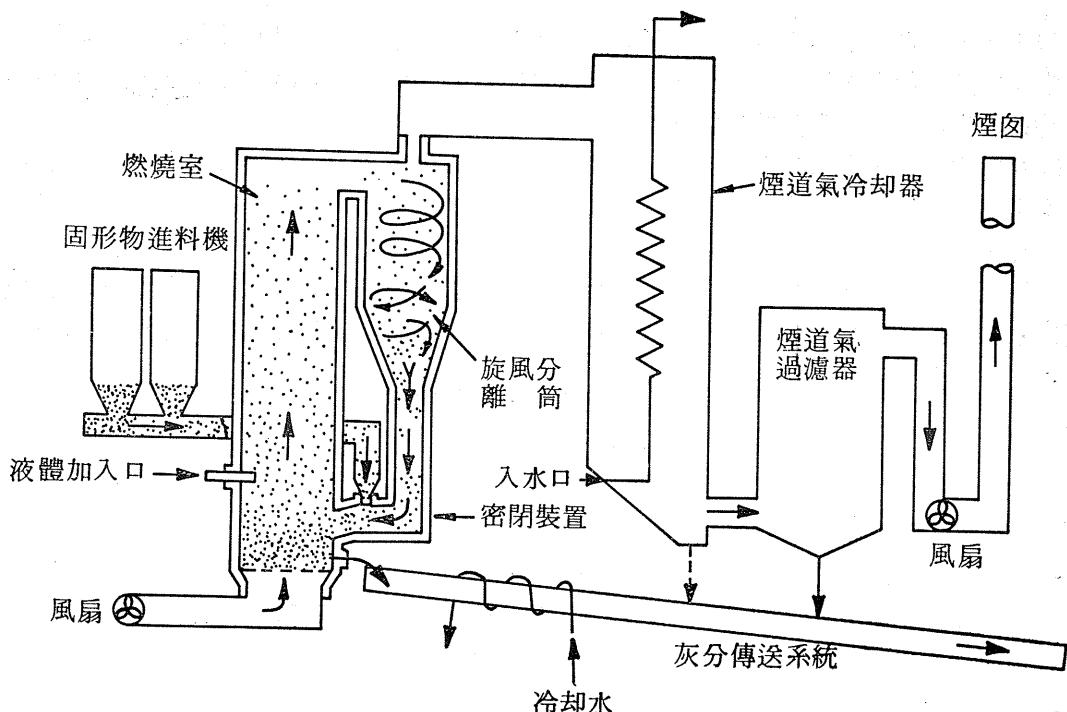


圖 5 流體化床流程示意圖

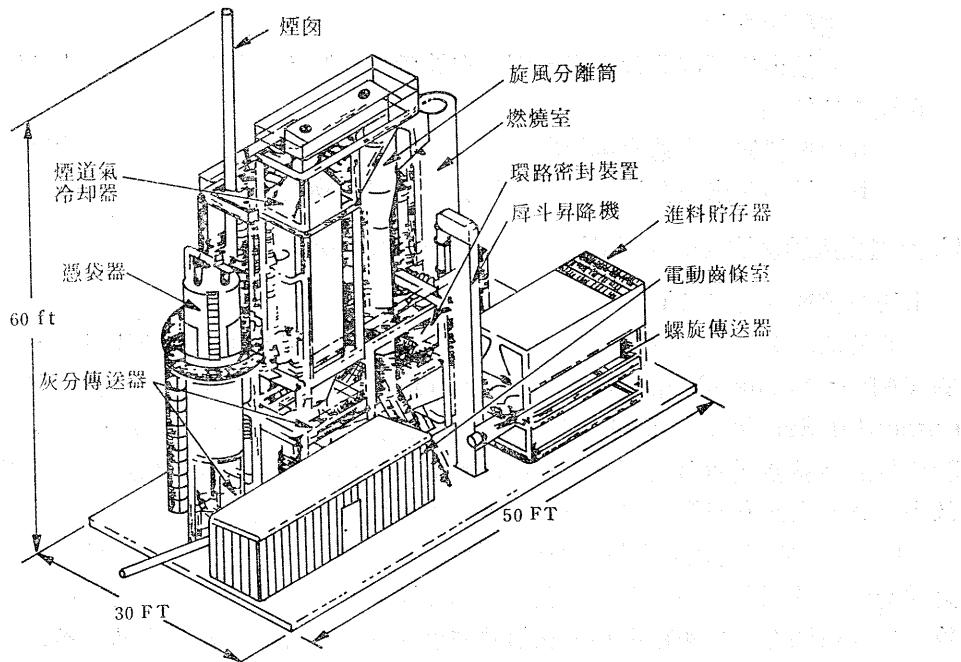


圖 6 可移動 CBC 裝置

(燃燒室、熱旋風分離器、迴旋底部)，使循環的廢棄物維持一定的溫度 ($+/-50^{\circ}\text{F}$)。依報告所述，其燃燒效率相當好，且可省去後燃器，於操作運轉期間，CBC 中之灰份可經由一水冷卻除灰設備去除。廢氣在離開熱旋風分離器後，經由廢氣冷卻器冷卻，其中之粒狀污染物則由袋濾室之過袋濾收集之。

表 6 所述，通常在 CBC 中所發生之化學反應，可將有害的酸性氣體轉化成鹽類，在燃燒設備中迅速地燃燒及中和酸性氣體，可有效地減少爐體之需要高合金材料，並省去燃燒設備之處理系統（如對於捕捉酸性氣體所需之濕或乾式洗滌器。）

燒燃反應期間、所釋放出之熱能，由冷卻系統移去，經由燃燒室區域及廢氣冷卻器可將熱能回收，在燃燒室中可藉由固體粒狀物和冷卻管的接觸而增加熱傳，更多排氣的熱可在熱

表 6 燃燒室內之化學反應

反應物	中間生成物	最後生成物
$\text{C}_x\text{H}_y + \text{O}_2$ (碳氫化合物)		$\rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
$(\text{C}_x\text{H}_y)\text{S}_z + \text{O}_2$ (硫化物)	$\rightarrow \text{SO}_2$	$\xrightarrow{1/2\% \text{O}_2} \text{Ca}_x\text{SO}_4(\text{S})$
Ca CO_3 (石灰石)	$\rightarrow \text{Ca O} + \text{CO}_2$	$\xrightarrow{\quad} \text{CaCl}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$
$(\text{C}_x\text{H}_y)\text{Cl}_z$ (氯化物)	$\rightarrow 2\text{HCl}$	(鹽)

旋風分離器及濾袋設備藉由熱交換器移去。因為燃燒時產生的酸性氣體可在燃燒室內去除，而傳統的廢棄物焚化爐，其廢棄冷卻器是不能承受高濃度的酸性氣體。

2. 個案研究結果

在加利福尼亞州、聖地牙哥，已建造一座 2 百萬 BTu/hr 的實驗工廠，由其發展和測試計劃，證實 CBC 其熱破壞技術，可處理相當大範圍的有害廢棄物（參考11）且具實效及彈性。表 7 列出各種有害廢棄物燃燒測試的主要數據，這些測試結果，顯示對於許多污泥和化學廢棄物有 99.9% 之破壞去除率 (DRE)。

表 7 流體化床化學物質進料測試之結果

廢棄物	型態	破壞去除率 (DRE)%	HCl 捕捉率 %	Ca/Cl ₂ 比
四氯化碳	液體	99.9992	99.3	2.2
二氯二氟甲烷	液體	99.9995	99.7	2.4
甲烷	液體	>99.999	—	—
二氯苯	污泥	99.999	99	1.7
芳香腈	半固體	>99.9999	—	—
三氯乙烷	液體	99.9999	99	1.7
多氯聯苯	液體	>99.9999	—	—

註：於 Ogden 環境服務公司測試之結果

3. 現在技術狀況

在1986年，環保署的計畫中，選擇 OES's 之 CBC 用來作超級基金下之廢棄物破除測試，依照 OES 最先設立之機組（直徑36吋的燃燒器）此是特別設計用來清除超級基金下之廢棄物，此設備將於1988年中設置，然而超級基金之場址迄未選定。

4. 技術之優點

- a. 由於廢棄物可與流體化床中之熱介質緊密地接觸，所以能在比傳統焚化爐較低的溫度下完全燃燒。
- b. 雖然依據報告指示在燃燒室的溫度高時對廢棄物之破壞去除率高，但若在低溫時可防止 NO_x 大量地生成。
- c. 流體化床內之床體介質可當作一種洗滌器，在整個流程中可捕捉酸性氣體，而產生無毒害的殘留物質。

5. 技術之缺點

- a. 爐床內部殘留物之處理是一個問題（如果認為欲去除之爐床殘留物是有害的，則必須置放於安全掩埋場所）。
- b. 從爐床中移去殘留物是一個潛在的問題，當廢棄物在燃燒過程中，若不可燃之灰份

一直堆積於爐床中，當灰份殘留物高過爐床容積之20%，則將致使灰份水平面過高，導致無法使流體化床流動而失去效用。

- c. 當大量的微細粒狀物進入廢氣中時，則需要有污染控制設備。
- d. 廢棄物進料顆粒的大小，必須控制到能維持一定均勻的進料速度。
- e. 需要精確地控制，才能確保爐床中的廢棄物完全燃燒及足夠的滯留時間，同時廢棄物熱值之急速增加，亦不能有效地提高爐床的溫度，反影響爐床的操作。
- f. 對於在爐床中有害殘留物質，需經由複雜的方法去分析，一般的分析方法是測定殘留物中尚有多少未燃廢棄物和有多少殘留物可釋放到環境中，有可能尚有百萬克的有害物質仍在爐床中未被測出。在處理這些物質時可能使這些有害物質再循環回到環境中，這種情況，在處理化學戰之化學藥劑是特別危險的。

D. 紅外線系統 (Infrared System)

1. 流程簡述：

通常一組紅外線系統是有下列主要的部份：

- a. 一次燃燒室 (Primary Combustion Chamber PCC.)

PCC 是使用電力，利用一組高溫合金線圈呈網狀帶，將輸送進入之廢棄物，溫度提高到 1850°F 以上；藉着置放於輸送帶上面水平排列之通電碳化矽棒產生之紅外線照射加熱。

- b. 二次燃燒室 (Secondary Combustion Chamber, SCC)

SCC 是氣體燃燒室，溫度可達到 2300°F，它提供滯留時間，擾流混合，和補助燃料，若需要時它亦能燒掉由廢棄物散發出來的揮發性氣體。

- c. 空氣污染控制設備 (Air Pollution Control Equipment, APCE)

此設備包含一組廢氣控制系統，通常以文氏洗滌器去除粒狀污染物，在填充塔洗滌器中和酸性氣體，而用誘引式抽風機將洗滌器中已處理之乾淨廢氣送入煙囪中排放。

- d. 流程管理和監測控制中心 (Process Management and Monitoring Control Center)

此中心包含所有的流程、機械控制和監測，控制盤、廢氣排放監測器、馬達控制機組和辦公室等。

2. 個案研究結果 (參考12)

於 1950年初，peak oil 公司在弗羅里達州布萊登的 Reeves Road，由石油精煉過程中所產生的各種液體和污泥廢棄物，這些廢棄物包含有毒的有機物和重金屬，而被傾倒於海灘上。

此作成灰塘的海灘中約有7000噸（大約相同數目立方碼的場所）的廢棄物，大約為 $\frac{1}{4}$ ~ $\frac{1}{2}$ 英畝的面積。

EPA在亞特蘭大第四區的辦事處，最先採取清理計畫行動，第四區的辦事處和Haztech公司訂定共同合作計畫，緊急著手清理計畫，EPA 在辛西那堤的有害廢棄物工程研究所

(Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, HWERL) 亦經由超級基金之最新現場評估計畫 (Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) program) 參與清淨海灘的工作。HWERL 先期提供紅外線現場監測及其操作性能的評估。開始的工作是將海灘的水排放，把留下的污泥和砂、泥土及石灰混合成一種廢棄物和泥土狀的固體物質以便可藉堆土機來處理。(加入石灰是為了提供與含水物質的結合，也能中和廢棄物中之酸性物質，如此處理則已接近使用紅外線系統 (並使用一組高溫後燃器設備)。此最新焚化系統的場地示範於1987年7月31日到8月5日間完成。

廢棄物與泥土之混合物由海灘挖出後，將其打碎並篩成凹凸不平之廢棄物，混合後曝露於空氣中以利以後流程中再配製，此物質再經由滾動拌攪以篩分系統配成1英吋之小塊，經由動力篩分設備，將廢棄物稱重並輸送到紅外線系統。

被置放於場地之紅外線系統是由4個個別機組所組成：(a)一組67呎長的電力加熱紅外線一次燃燒室，能將氣體溫度加熱到 1850°F 以上，(b)一組72呎長，氣體燃燒之二次燃燒室(後燃器)，能使溫度高達 2300°F ，(c)以一組60呎高的煙道氣體排放控制系統，(d)流程管理及監測控制中心。

廢棄物之計畫，是將其平鋪展開到適當的寬度及最適合流程的厚度，在每天100噸的機組中，以每小時3.6~4.0噸的進料速度進入一次燃燒室中，廢棄物暴露於輸送帶上面，用水平排列的電力碳化矽棒之紅外線照射加熱。標準上，廢棄物將停留於一次燃燒室的輸送帶上18~19分之久，然後廢棄物由輸送的末端掉入一卸料設備，由噴水急冷過程，再經螺旋輸送系統將其送到外部的接收容器中。

由主燃燒室排出之氣體，被送入二次燃燒室中。二次燃燒室可提供廢氣大約3秒的滯留時間，高度擾流和補充的燃料，可使從一次爐來之有機廢氣完全破壞分解。二次燃燒室排出之氣體，經冷卻後，其中粒狀污染物，在文氏管區域中被分離移去，酸性氣體則利用氫氧化鈉水溶液在填充式洗滌槽處予以中和。利用抽引式風車將乾淨的氣體從洗滌器中吹入煙囪，煙囪則有預留幾個測試孔，以供日後抽取氣體樣品用。

在依據EPA認可的取樣儀器及品管標準下，此三種經過一連串的測試，可以得到固體廢棄物進料速率，液體流動率，飛灰及煙道氣等樣品。其中以煙道氣的取樣程序最為複雜。取樣的方法包含為HCl及粒狀污染物的方法5，多氯聯苯(PCB)、戴奧辛、呋喃(furans)和半揮發性污染物的SASS法。依修改的方法5(method five)，可用於熔融性鉻元素。VOST(Volatile Organic Sampling Train)，則用來取揮發性污染物和多種連續排放監測的取樣(如O₂，CO₂，CO，THC，NO_x)。並在設備的上風及下風處裝置周圍空氣監測站以監測設備在運轉時各種變數對空氣污染的情況。表8顯示廢棄物和砂土，石灰混合後，其有機物和金屬污染物在廢棄物中之含量，主要的有機廢棄物是多氯聯苯(PCB)，主要的金屬污染物是鉛，其它特性如熱值和水份如下表所示。

表 8 固體廢棄物中（醫製好）之污染物特性

(除了特別用百分比外，為 $\mu\text{g/g}$ 之單位)

PCB (total)		3480 to 5850
Heptachlorobiphenyl		940 to 2200
Hexachlorobiphenyl		1100 to 1700
Pentachlorobiphenyl		200 to 490
Tetrachlorobiphenyl		400 to 830
Trichlorobiphenyl		570 to 820
Dichlorobiphenyl		120 to 190
Ethyl benzene	苯乙基	40 to 140
Methylene chloride	氯化次甲基	80 to 120
Toluene	甲苯	130 to 300
Xylene	二甲苯	280 to 480
Lead	鉛	0.44 to 0.59 percent
Antimony	鎘	2.1 to 3.6
Arsenic	砷	2.0 to 2.9
Cadmium	鈣	3.9 to 4.6
Chromium	鎔	20 to 24
Copper	銅	44 to 55
Strontium	鈦	50 to 62
Vanadium	钒	7 to 11
Zinc	鋅	950 to 1100
Moisture	水分	14.2 to 16.6 percent
Carbon	碳	7.0 to 7.8 percent
Sulfur	硫	1.8 to 2.5 percent
Chlorine	氯	less than 0.1 percent
Ash	灰分	70 to 75 percent
Btu value (HHV)	熱值	1640 to 2065 Btu/1b

以下所述為每一測試項之結果之綜合（參考12）

a. 破壞去除率 (DRE)

表 9 為使 PCB 污染物的破壞去除率 (DRE) 成功的達到 99.99% 之範例，此效率已達到 RCRA 的標準。但若用 TSCA 的標準 (DRE 99.9999%) 則不能適用，因其廢棄物之 PCB 污染含量少於 50ppm。表 9 中之操作方式為二次燃燒室的溫度為 1900°F 大於 3 秒的滯留時間，和 TSCA 的 2200°F，2 秒不同，此係基於此設備之最完善狀態下操作，殘留在灰份中的 PCB's 濃度低於 1ppm，第四區是被委託來達成這最重要測試目標之一單位。

表 9 煙囪排放資料

Date of Run	DRE for PCB (percent)	Particulates Grains/DSCF 7% O ₂	HCl in g/hr	SO ₂ in g/hr
8/1/87	99.99967	0.1590	<0.8	27.24
8/2/87	99.9988	0.0939	8.6	1070.0
8/3/87	99.99972			
8/4/87	99.99905	0.0768	2.9	22.0
8/4/87 (Duplicate)		0.0761	2.7	20.6

b. 粒狀污染物的排放

如表 9 所示，利用紅外線系統在 peak oil 場地示範問題顯示，三天中兩次的量測粒狀污染物的排放，未能符合在 7% 氧氣（體積）下 0.08g/dscf 克之標準，但在經過修改排放控制系統和維護，第二次的測試明顯顯示已降低粒狀污染物的排放量，且最後兩次測試已符合 RCRA 所訂定的標準。資料顯示，此設備的廢氣排放控制系統無法符合粒狀污染物的排放要求，可能是廢棄物中的高含鉛量和高氧化鉛導致進入排放控制系統中。

C. 酸性氣體的排放

表 9 中亦顯示 HCl 和 SO₂ 的排放量。由於廢棄物中氯的含量小於 0.1% 重的偵測極限，故排氣中 HCl 的含量很低，故實際上 HCl 之去除率無法決定。去除 SO₂ 則較困難，平均可降低至 99.1% 左右。在廢棄物之含硫量為 2% 或在每小時 150 磅的進料量下，在最大測量速率中 1070g/hr 下，SO₂ 之排放量為 2.5 磅／小時。

d. 金屬的固化和灰份的滲出

測試計畫的目的之一為決定廢棄物中的重金屬污染物如何衰減及如何減少或穩定灰份中金屬成份的含量，及在灰份中可滲出何種物質而視為有害物質。目前的廢棄物，爐灰份，洗滌器固體流出物之測試均應用毒性滲出試驗程序 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP) 和 EP 毒性滲出測試法。

廢棄物根據 TCLP 及 EP 測試結果，僅鉛含量超過規定，有一廢棄物試樣 8.8mg/l，超過 TCLP 規定的 5.0mg/l，另兩項測試樣品的含量則分別為 2.5~3.5mg/l。但是根據 EP 測試法的結果，鉛含量在 24.0~29.0mg/l 之間，而另一樣品達 57.0mg/l。超過標準值 5.0mg/l 甚多。根據 TCLP 及 EP 測試廢棄物中所含的其他金屬元素含量，均在標準值以下。表 10 所示灰份的殘留物以 TCLP 和 EP 的測試方法測試顯示用 TCLP 的測試值均在標準之下，而用 EP 測試結果，鉛元素仍超過標準，而其他的金屬元素成分則在標準值之下。

同樣地，表 10 顯示在洗滌器裏沖洗出來的固體物用 EP 測試其值，鉛元素含量仍超過標準值，其他金屬成分則在標準值之下。

表 10 滲出測試結果

Metal	Regulatory Level mg/l	Ash EP Toxicity avg. mg/l	Ash TCLP Test avg. mg/l	Scrubber Effluent Solids EP Test avg. mg/l	Scrubber Effluent Solids TCLP Test avg. mg/l
Arsenic	5.0	0.020	0.007	ND	<.22
Barium	100	1.35	0.25	<.56	<.80
Cadmium	1.0	0.98	0.008	0.5-1.9	<.22
Chromium	5.0	0.57	0.037	<.65	<.08
Lead	5.0	31	0.011	3.1-40.0	.12-.38
Mercury	0.2	0.0015	ND	ND	ND
Selenium	1.0	ND	0.031	ND	ND
Silver	5.0	0.031	0.059	<.04	<.06

ND=not detectable

e. 灰份或洗滌器流出物之有機成份

廢棄物，灰份殘留物，洗滌器流出物的樣品除 PCB 外可用 TCLP 法來測試，包括36種之有機有害混合物其測試結果 EPA 將於最近一期的年終報告發表。但是，除了表 8 所列的混合物外，所有36種化合物經發現，一般均低於 TCLP 的標準值，甚至由於含量極微而無法測試出來。

f. 從煙囪排放之金屬物質

根據量測顯示從煙囪排出最多的金屬元素為鉛，含量從第一次測試的 2000g/hr 到繼續下去幾次測試的 780~1000g/hr，此差異係由於污染控制系統運轉所致。值得一提的是，廢棄物進料速率其含鉛量為 17000~19000g/hr，因此從煙囪排出的鉛元素，在第一次測試時僅佔原有的11.2%，繼續下去的幾次則在4.2~5.5%之間。此外，鉛或鉛的混合物約佔煙囪總排放粒子重量的54~60%。煙囪排放的粒狀污染物經取樣分析，發現有30種不同的金屬成份。除了鉛以外，含量較多的是鋅 (16~17g/hr)、鈉 (31~34g/hr)、鉻 (0.51~0.53g/hr)，用鉻六號濃度分析方法分析結果發現鉻濃度低於 160mg/m³。

表11列出部份金屬的資料，列出11種含於進料的廢棄物，殘留灰份，排放的煙道氣中含金屬元素的重量。

g. 戴奧辛及呋喃 (Furans)

由於廢棄物中含有多氯聯苯 (PCB)，因此希望調查在海灘之廢棄物中是否含有戴奧辛及呋喃，且以紅外線系統的製程來處理廢棄物；取樣分析這些由廢棄物、灰份、洗滌液、洗滌固流物和煙道氣之混合物。

由上面所有的分析結果少於可偵測之化合物列於下為TCDD, TCDF, PCDD 及 PCDF (即tetra and poly-chlorinated dibenzo dioxins and furans)

表 11 金屬元素分析

Parameter	Solid Waste Feed micrograms per gram	Ash micrograms per gram	Average Stack Emission Rate grams/hr
Antimony	2.15	3.3	.13
Arsenic	2.55	2.6	.065
Cadmium	4.15	4.1	3.4
Chromium	22	27	.54
Copper	49	64	.37
Lead	4800	6400	1150
Mercury	ND	ND	ND
Sodium	5550	5600	33
Strontium	57	76	.017
Vanadium	9	13	<.036
Zinc	1030	1060	16

ND=not determined.

試樣	TCDD, PCDD, TCDF, PCDF	可偵測限制值
廢棄物	NO*	ND
經處理後灰份	ND	ND
洗滌液	ND	ND
煙道氣	ND	0.47** ND
		0.34mg/m ³

* ND=無法偵測

**從四次測試中得到比值。

3. 目前技術狀況

紅外線系統是目前在 RCRA 廢棄物破壞及超級基金中廢棄物處理等新型熱破壞技術中最常使用方法之一。

4. 技術之優缺點

目前的技術層次已經能夠較精確有效地控制一次燃燒室的溫度及滯留時間。然而廢棄物在進入燃燒室之前應先行處理到規定的大小限制。假如廢棄物為液態應先和沙土或其它固體物質混合，使其在一次燃燒室裏能有效地被破壞分解。

E. 電漿弧技術 (Plasma Arc)

1. 流程概述 (參考 2)

電漿弧技術已被廣泛地應用於美國太空計畫，例如在太空船重返地球，通過大氣層所需的熱障 (heat shields)，即需應用電漿弧的特性，以產生強力的熱源。

電漿弧可以認為是世界上存在的第四種物質，因它既不是固體、液體，也不是氣體。也許它可以被定義為一種含正負及中性粒狀物的導電性氣體。具有聚集的行為模式，其淨帶電

值趨近於零。當它被應用於處理廢棄物時，可以說是一種能量轉換及能量傳遞的機構。電能可轉換成一種在反應器中心線處具有 18000°F 高溫的電漿弧。當電漿弧中之活性物質裂解時，它的能量立即傳送至暴露於電漿弧下的廢棄物上。廢棄物便逐漸被破壞、熱解及離子化。此項技術的關鍵為廢棄物分裂為原子的情形，乃瞬間發生，且在動能重新組合的過程中，沒有高分子的中間產物產生。

2.個案研究 1：可移動式電漿弧設備

紐約州立環境保護部固體有害廢棄物組和美國環境保護署之有害廢棄物工程研究實驗室，於1982年協議了，如何建立及測試一套可移動電漿弧系統以有效地裂解有害廢棄物。

圖 7 所示為電漿弧熱裂解系統的流程圖。其中含液體廢棄物進料系統、電弧、反應器、腐蝕性洗滌器、現場分析設備及後火焰系統。系統的進料率為 4 公斤／分或 55 加侖／小時，氣體之產生率為 $5\sim6\text{m}^3/\text{min}$ ，為了順利進行此項測試計畫，特別在後火焰系統後，再建一 10 公尺高的煙囪。煙囪氣體流速為 $30\sim40\text{m}^3/\text{min}$ 。

將一套氣體色相分析儀器裝置於系統可移動的軌道上，以測定氣體的成分，在火焰燒化前分析其氣體試樣中的氫、一氧化碳、二氧化碳、水、氮、甲烷、乙炔、丙烷、丙烯和一丁烷。在裝置一套 Heidett-packard 5792A 型氣體色相分析儀也配合裝上 Hewlett-packard 5970A 型質量偵測儀，以便用來分析火焰燒化前氣體樣品，以決定廢棄物之進料量。

在加拿大所進行的示範測試中，在 1 小時的四氯化碳 (CCl_4) 的測試結果，得知氯化合物的熱裂解及洗滌器中去除 HCl 的情況，四氯化碳與 MEK (methyl ethyl ketone)、乙醇和水混合後以 1 kg/min 的速率送入，煙道的測試則由 GCA 公司執行，三項測試結果列於表 12。分析結果顯示，系統對有害物質的破壞去除效率高於 RCRA 設定的標準 99.99%。

對 PCB 作三次各 1 小時的測試，以便得知 PCB 的破壞去除效率，並藉此獲知污染物之運轉數據。利用 MEK/MeOH (methanol) 為主進料物質並混合 PCB'S, MEK, MeOH 再加入系統中測試，當反應器排氣的出口溫度為 2000°F 時，測試洗滌器排出水其中所含的 BaP、PCB、戴奧辛及呋喃的濃度低於加拿大政府所訂定的標準。

運轉數據列於表 13

煙道氣的監測包括有粒狀污染物，PCB、戴奧辛、呋喃、氮氧化物、鹽酸、流速及溫度，這些測試項目則由 IMET (Markham, Ontario) 公司來執行。此項取樣及分析計畫包含需要品質保證及品質控制之模擬訂定。整個測試程序及所用的設備均標準化。測試的結果列於表 14。

3.個案研究 2：電漿弧對未啟封電容器之破除率（參考 14）

圖 8 為本系統的概要簡介（參考 14），此研究系統是由電力研究協會 (Electric Power Research Institute EPRI) 和電弧科技公司 (Arc Technologies Company ATC) 負責，而 ATC 公司是由化學廢棄物處理公司與電熱解公司兩家所投資計畫成立的。目的是在於破壞去除未啟封之電容器，其處理量為 $3000\sim5000\text{lb/hr}$ ，目前資助者已得到 RCRA 的運轉許可，且在紐約的 Model 市建立一套裂解設備。

表12 四氯化碳測試結果

	Run 1	Run 2	Run 3
Date	2/18/85	2/26/85	2/26/85
Sample Time. min.	60	60	60
Feed Rate. L/min			
CC14	0.63	0.63	0.63
MEK mixture	2	1.6	2
Total Mass Fed. CC14, kg	60.0	60.6	60.6
Chlorine Loading, mass%	35	40	35
Reactor Operating Temperature (C)	974	1008	1025
Plasma Torch Power, kw	280	298	300
Average Stack Gas Flow Rate, dscfm	1,346.3	1,048.2	1,052.7
	dscmm	38.13	29.69
Average temperature (C)	893.3	807.1	667.3
NOX conc., ppm (v/v)	106	92	81
Emission Rate, kg/hr	0.46	0.31	0.28
CO conc., ppm (v/v)	48	57	81
Emission Rate, kg/hr	0.13	0.12	0.17
O2 percent	12.7	14.4	15.1
CO2, percent	6.0	5.7	4.9
HC1, m³/dscm	(1)	137.7	247.2
Emission Rate, kg/hr	(1)	0.25	0.44
CC14 conc., ppb	<2 (2)	<2 (2)	<2 (2)
Emission Rate, mg/hr	<29.3	<22.8	<22.9
Scrubber Effluent Flowrate, L/min	30.0	30.0	30.0
CC14 conc., ppb	1.3	5.5	3.3
Discharge Rate, mg/hr	2.3	9.9	5.9
Destruction Removal Efficiency (%)			
CC14, percent DRE	99.99995	99.99996	99.99996

(1) Invalid date.

(2) The detection limit of 2 ppb CC14 in the stack gas was used to calculate the CC14 mass emission rate for each run.

(3) The DER is based on stack emissions and excludes scrubber effluent.

表 13 PCB 之運轉資料^{#1}

Elapsed operating time:	70 min. at operating temperature
Feed rate	
Total feed-	3.09 L/min (liters/min)
	2.83 kg/min
PCB feed-	0.40 kg/min
PCB Composition (mass)	14.1% PCB 11.0% TCB* 74.9% MEK/MeOH
Reactcor Operating Temperature	1136 C
Plasma Torch Power	327 KW
*Trichlorobenzene	

表 14 對 PCB 作三次各 1 小時之測試結果

	Run 1	Run 2	Run 3
Date	12/5/85	12/17/85	1/16/86
Sample Time, min.	50	60	60
Stack Gas Parameters			
Flow rate, dscmm	37.9	45.0	38.1
Temperature (C)	836	678	962
NOx, ppm	117	N/A	139
HCl, mg/dscm	N/A	43	68
O ₂ , percent	14	14.5	16.5
CO ₂ , percent	5.5	5.0	3.0
CO, percent	0.01	0.01	0.01
Total PCB, (1) μg/dscm (2)	<0.013	0.46	3.0
Total Dioxins, ug/dscm	0.076(3)	<0.43	<0.13
Total Furans, ug/dscm	0.26	1.66	<0.30
Total Bap, ug/dscm	0.18	0.45	2.8
Scrubber Effluent Parameters			
Effluent Flowrate, L/min	41	36	33
Total PCB, ppb (1) (2)	1.56	2.15	9.4
0.06	4.7	<0.01	
Total Dioxins, ppt	5.8	<259	<1.05
Total Furans, ppt	1.5	399	<1.05
Total Bap, mg/L	0.04	0.92	2.0
Destruction Removal Efficiency			
PCB, percent DRE (1)	99.9999	99.99994	99.9999
(2)	99.99999	99.99997	99.99999

(1) These values are based upon monodecachlorobiphenyl.

(2) These values are based upon tridecachlorobiphenyl.

(3) No tetra or penta dioxins were detected at 0.05 ng on a GC column, except for Run #1 where 0.06 ng tetra dioxin was reported.

Hewlett-Packard 5880 A 型氣體

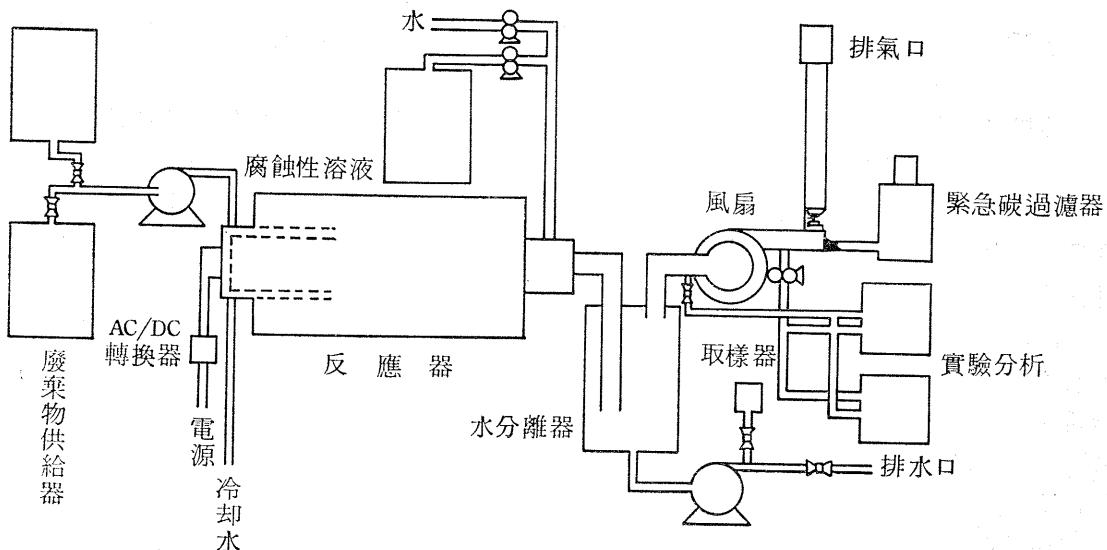


圖 7 電漿弧熱裂解系統流程示意圖

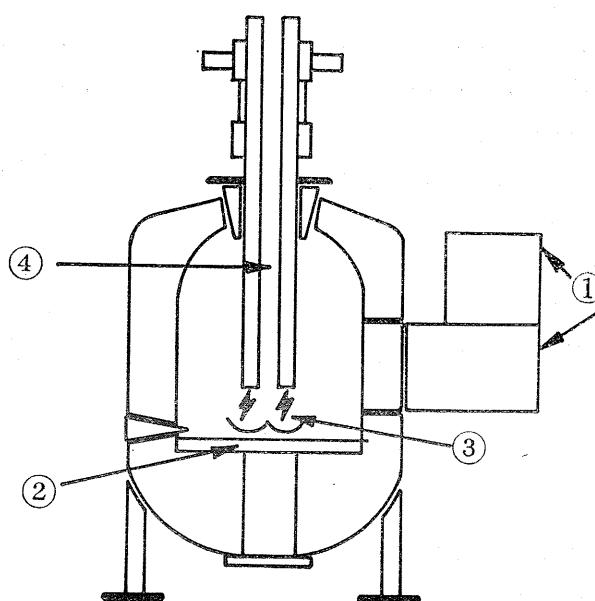


圖 8 電漿弧對未啓封電容器破壞流程概示

基本上此流程包含以下所示的四個步驟如下（參考圖 8）

步驟 1：整個未啓封的電容器，放入一融熔的金屬槽內。

步驟 2：電容器的外殼被融解，而內部的有機物質如 PCB，會受到由電漿弧傳來的高輻射及融熔的金屬高溫的作用，結果使 PCB 蒸發及分解。

步驟 3：由 PCB 分解出來的物質，再被導入一高電流的直流電弧區，以作更徹底的分解。

步驟 4：最後的產生物，則通過洗滌系統，在這裏所有電容器的無機物質會被轉換成惰性固體殘留物。若需要的話，亦可由金屬槽及灰份中回收金屬。

在加拿大測試時，美國西屋公司就已建造一座適合高溫使用之可移動式電漿弧設備，其容量為 3 加侖／分（1 噸／小時），同時西屋公司也建造一座「西屋電子熱裂解設備」為已受污染的土壤作淨化去毒的工程。

西屋公司之電子熱裂解設備，是利用電子式加熱廢棄物到大約 3000°F ，在這種溫度下，有機污染物會被破壞分解成一氧化碳和水，無機鹽類則變成玻璃狀流體而被去除。目前電漿弧熱裂解及電子熱裂解設備已被 EPA'S 計畫選用來作測試，然而尚未有在超級基金下被選用來作測試。

5. 技術之優點（參考 2）

- 電漿弧具有很強的輻射能，因為輻射熱傳遞速率與溫度的 4 次方成正比，所以用電弧之熱傳效率高於傳統的火焰燃燒。
- 從高溫之電漿弧中所產生大量的紫外線的作用下，可使有機氯化物產生除氯的作用。
- 電漿弧來處理廢棄物是一種熱裂解的過程，實際上一點也不需要氧氣。所以相形之下，傳統的焚化爐一般都需要供給 150% 的過剩空氣才能確保完全的燃燒，因此電漿弧可節省由加熱過剩空氣到燃燒的高溫所需的能量，同時可減少用氧燃燒所產生的大量副產物，並減少因處理這些廢氣等副產物所需的後續處理設備。
- 流程操作開／關時間很短。
- 因為很精簡，故電漿弧設備可裝置於可移動的拖車上，可在不同的地點使用。

6. 技術之缺點（參考 2）

- 因為所產生的溫度極高（電弧之中心溫度約 18000°F ）所以電弧之耐久性及耐火材料；都是一潛在的問題。
- 電弧對很多因素都很敏感，如突然的電壓降，所以操作這系統需要先經過高層次的專家養成訓練。

四、結論

自從美國環保署李春正博士在1983年發表美國焚化技術以來，筆者感到上述五種最新美國熱破壞技術的研究發展，具有極高的編輯價值，這些技術在所列的個案研究評估中均有明確的指示出來。同時它們又都符合美國 RCRA 及 TSCA 的熱破壞要求條件。對混合性及化學性的廢棄物亦作有效的熱破壞去除，相信它更會合乎超級基金下之場地計畫的測試標準，筆者深信這些科技的利用及將來更先進的熱破壞技術的發展是指日可待的。