

有害廢棄物處理技術之經濟評估

阮 國 棟* 呂 明 和**

一、前 言

關於有害廢棄物管理及處理技術的一般性介紹，我們已經為文作了十分詳盡的報導⁽¹⁾，文中討論與管理有關之法規制度，在處理技術方面，更分別說明了傳統方法及新穎技術，期能使讀者對所謂有害廢棄物管理及處理之現況，有一全盤性的認識。本文則更進一步在衆多技術中，根據一些特定的選擇標準（詳第三節技術背景說明），選定其中數種技術，以實際之有害廢棄物為處理對象，進行經濟評估，期能對各種技術有更實用的研判及更深入的探討。本文大部分資料取自作者在美國史丹福國際研究中心 (SRI international) 實際參與一項有關有害廢棄物處理技術的專題研究⁽²⁾，費用之估算雖係根據 SRI 的建檔資料及美國的經濟指數，但此項經濟評估對國內讀者仍然具有很高的參考價值。全文共分六個案例介紹，每一案例包括設計基礎及基本假設，程序說明，設備及操作費用估算等，均為實用之技術資料，提供各界人士參考。

二、技術背景說明

(一) 焚化為有害廢棄物處理最具潛力的方法

液體注射式焚化爐 (liquid injection incinerator) 僅適用於氣體及液體廢棄物，傾斜式轉窯焚化爐 (inclined rotary incinerator) 則適用於固體、粘稠液、氣體或液體廢棄物，以上二種為最常用於化學廢棄物焚化的型式。另一種為接近商業化的新穎型式，稱為迴流床焚化爐 (circulating bed combustor) 體積小，可以從一個地方移到另一地方。上述三種型式的焚化爐，均具有代表性，因此就投資及操作費用加以分析。有害廢棄物焚化處理，常用到的關鍵字眼有：

1. 有機性有害主成分 (POHCs, principal organic hazardous constituents)：指美國 EPA 在頒發許可的過程中，某特定廢棄物中被指定的最重要成分。這些成分可以自聯邦法規規範 (Code of Federal Regulation, CFR) 附錄八之第261部分中所列的有害化合物一覽表中選出，選擇標準係根據化合物的濃度以及焚化的困難度。其中濃度最大而且最難被焚化的化合物，即為有機性有害主成分。

工業技術研究院化學研究所 *正工程師 **副工程師

2. 破壞及去除效率 (DRE, destruction and removal efficiency) :

$$DRE = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}} \times 100\%$$

W_{in} 為：加入焚化爐中的 POHCs 的質量流率。

W_{out} 為：自焚化爐排放之 POHCs 的質量流率。

3. 熱氧化穩定度 (TOS, thermal oxidation stability) :

熱氧化穩定度為 EPA 所提出的一種焚化指數，依據 POHCs 的燃燒熱，以量度焚化之難易度。最難焚化的成分有最高的 TOS 值。根據 EPA 的模式，TOS 與燃燒熱成反比，某些學者則認為這種指數方法不正確。國家標準局 (NBS, National Bureau of Standards) 則依據化學平衡、反應動力學、鍵的破壞能量發展出另一模式，將多氯環狀化合物排列為最難焚化破壞者，其次才是高分子的氧化合物、氮化合物及其他。表 1 為國家標準局自 EPA 有害物質表格中選出的 38 種化合物予以排名，依結合鍵能量的高低而定，越高的鍵能則越難熱分解為小分子的化合物，依此原則之排名與 EPA 之排名有相當的出入，二種方法對 14 種化合物的排名結果，同時列在表 1 。

表 1 、美國環境保護局及國家標準局對某些有害化合物難焚化程度的排名表
(Incinerability Rankings of Selected Hazardous Compounds)

NBS Rank*	Compound	EPA Rank	NBS Rank*	Compound
1	Hexachlorobenzene	9	20	Dinitrobenzene
2	Pentachlorobenzene	7	21	Trinitrobenzene
3	Chlorobenzene	26	22	Tribromomethane
4	Benzene	38	23	Hexachloropropene
5	Naphthalene	37	24	Hexachloropentadiene
6	Vinyl chloride	20	25	Bromoacetone
7	Chloromethane	13	26	Hydrazine
8	Ethylenediamine	33	27	Methylhydrazine
9	Dichlorophenol	16	28	1, 2-Dichloroethane
10	Resorcinol	24	29	1, 2-Dichloropropane
11	Chlorotoluene	29	30	Hexachlorocyclohexane
12	Formaldehyde	21	31	Di-n-butyl phthalate
13	Acetaldehyde	25	32	Ethyl carbamate
14	Acrolein	30	33	1, 2-Dibromo-2-chloropropane
15	Dimethyl phthalate		34	Methyl iodide
16	Methyl ethyl ketone		35	1, 2-Diphenyl hydrazine
17	Allyl alcohol		36	Nitroglycerin
18	Chloroform		37	N-nitrosodiethylamine
19	Bromomethane		38	2-Butanone peroxide

* The higher the NBS ranking the more difficult the compound is to incinerate.

(二) 焚化爐性能標準

EPA 制定的焚化爐性能標準 (40 CFR, 264、343) 如下：

1. 對每一項 POHC 而言，DRE 至少須達到 99.99%，對 PCBs 而言，DRE 則須達到 99.999%。
2. HCl 的排放量，不得超過 41b/hr 或進入空氣污染防治設備 HCl 量的 1%，以上述二者較小值者為限值。
3. 粒狀物排放量，不得超出 180mg/dry NM³(9.08grain/dry scf)，根據下列公式修正煙道氣中 O₂ 的含量：

$$P_c = P_m \times \frac{14}{21 - Y}$$

式中 P_c =修正後之粒狀物濃度

P_m =測定之粒狀物濃度

Y =用 Osat 分析煙道氣中 O₂ 的含量 (乾基)。

(三) 焚化爐的操作許可

在資源保育及回收法案 (RCRA) 之下，任何有害廢棄物的處理、貯存、處置 (TSD) 均需得到EPA的許可證。申請許可證分為二部分，(40 CFR, 270.13 及 270.14) A 部分包括下列前 5 項數據，B 部分包括後 7 項數據，分別為：

1. 有關處理、貯存、處置 (TSD) 設施的所有者、操作者的資料，以及公司的性質。
2. 說明 TSD 設施係新設或舊有，對舊有者必須提供設施的比例圖及照片。
3. 說明處理流程及容量。
4. 詳列要處理的有害廢棄物清單。
5. 詳列所有許可證或建造證明，不管是從不同的聯邦或州政府法規中獲得或提出申請的清單。
6. 說明 TSD 設施，對要處理的有害廢棄物進行物理及化學分析。
7. 說明當不幸事件發生後的緊急應變措施、設備以及安全步驟。
8. 詳細說明設施的位置、地形、地震情形、洪水及防洪計畫，以及其他地理資料。
9. 試燒計畫以及試燒的結果。
10. 分析每一種或混合的廢棄物，分析項目包括熱值、粘度、有害成分，以及其他物理、化學性質。
11. 詳細說明焚化爐的工程，包括製造者、型式、型號、尺寸、控制、監測儀器等。
12. 取樣及分析方法；排放氣體的分析，項目包括 CO、HCl、粒狀物及其他重要的污染物。
 - 焚化爐的操作必須在特定的範圍內，包括廢棄物的處理速率、排氣 CO 的濃度、燃燒溫度以及燃燒空氣的注入速率。任何一項限定範圍超出，則系統必須自動關閉。監測這些變數，通常須要複雜的儀器。

(四)低濃度的有害廢棄物不宜直接焚化，生物處理是可能方法之一。

間歇批式反應系統 (Sequencing Batch Reactor, SBR)，係由美國印地安那州 Notre Dame 大學之 R. L. Irvine 教授所開發，為一「半連續」批式活性污泥生物處理⁽³⁾。與連續流系統 (CFS) 比較，SBR 系統對於程序的控制有較大的彈性。SBR 尤其被應用於 EPA 所訂優先管制污染物及化學廢水中之氮、磷之去除⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

Occidental 化學公司 (OCC) 已在其尼加拉瀑布附近設置一 SBR 系統以處理廢棄物掩埋場滲出液及化學工廠廢水⁽⁶⁾。(在紐約州亦已在市鎮污水處理廠設置許多 SBR 系統) OCC 除了採用此新 SBR 技術外，並已從掩埋場篩選一新系列菌種，對含氮有害廢棄物具特殊處理效果。依 OCC 之估計，此新系統及新菌種的結合，可使該掩埋場於1987年可省下 1.8 百萬美元/yr，主要節省為活性碳的費用。

該公司主要係利用以下之因子，而達到處理廢棄物目的：

1.微生物

生物處理係應用微生物將廢棄物分解成低害或無害性產品。適宜或較適宜的微生物包括下列幾種：

- 細菌 (Bacteria)
- 光營菌 (Phototrophic microorganisms)
- 真菌 (Fungi)
- 放射菌 (Actinomy cetes)
- 厭氧菌 (Anaerobic bacteria)
- 貧養菌 (Oligotrophic bacteria)

上述微生物可單一或混合應用於廢液之處理。例如，某工業廢水處理含有異營菌 (heterotrophic bacteria)，光合成菌 (photosynthetic bacteria) 及藻類 (algae) 等類微生物。

OCC 之 SBR 系統所用的菌種是在 Niagara Falls 的 Hyde Park 掩埋場中發現的，被稱為 “SS3” 屬枯草桿菌 (Pseudomonas) 種。此系菌種對含氯芳香族具有特殊之分解能力，而且不會產生大量之絲狀污泥。

2.專利 (如表 2 所示)

表 2、SBR 處理有害廢棄物滲出液，OCC 之專利摘要

專利號碼	說明
U.S. 4,477,570 Oct. 16, 1984	從 Niagara Falls 地區之有害廢棄物掩埋場，篩選出 Pseudomonas 類新系菌種。這種菌種及其突變種能將含鹵素有機廢棄物分解成無害物質。本文透露這些菌種之確認、生產及利用情形。
U.S. 4,511,657 Apr. 16, 1985	將這些篩選並培養出來的菌種應用於 SBR 活性污泥系統以進行化學工廠廢水及有害廢棄物掩埋場滲出液之去毒反應。
U.S. 4,493,895 Jan. 15, 1985	與 U.S. 4,477,570 專利相近，然特別說明其程序專利。

OCC 對於以 SBR 處理有害廢棄物已獲得三項美國專利，其中最主要的有兩點：

- (1) 純化菌系可能經基因轉換而成其他非原廢棄物存在但能代謝不同化學物質的菌系。
- (2) 這些菌系可被應用於 CFS 或 SBR 活性污泥系統。OCC 較喜歡 SBR 系統。

微生物對有些頑強化學物質無法產生足夠酵素以轉換原組成至可分解的階段。這些組成包括 amines、Sulfonates 及 chlorinated aromatics 等項。

3.SBR 步驟

SBR 生物處理包括五個程序步驟：進料、反應、沉降、移除及停置等。廢水在進料階段進入反應槽，此時反應槽中，存有啟動時加入或上批次所留下已馴養之活性污泥。曝氣及機械攪拌可在進料階段開始，或延至反應階段，此時為快速之喜氣生物分解反應。廢水經生物穩定後，停止曝氣並於沉降階段分離反應生產物。在移除階段，排放上層澄清液。移除後再經停置階段期，就完成整個作業循環圈。SBR 這些步驟經常有重疊或一、二個階段被省略。若需要則另加營養化學物質。

(五)有害廢棄物濃度介乎適宜焚化及生物處理之間者，濕式氧化法為可能的方法之一。

濕式氧化法 (Wet Air Oxidation, WAO) 是在高壓 (150~200atm) 及高溫 (450~680°F) 條件下處理有機廢水。在此條件下，水中的溶氧為一大氣壓時溶氧的 10 倍。而且水中氧的擴散性與溫度呈指數的增加關係。由於高溶氧因素，致使溶氧擴散至有機組成的速度能與化學反應動力速率一樣快。此程序能將有害化學物質轉換成 CO₂ 及 H₂O；而硫及鹵素分子通常氧化成酸，被水所吸收。

WAO 技術是在1940年代，瑞典 F. J. Zimmerman 所開發，起初是用於紙漿工業將黑液中之木質素 (lignin) 氧化成香草精 (Vanillin)。後來被廣泛的應用於市鎮污水、水肥、廢棄活性碳、冶金焦炭廢水及其他廢棄物之處理。近幾年已被直接引用於石油化工業有害廢棄物的處理，共約有 200 個 WAO 系統為技術主要許可者 Zimpro, Inc. 所完成。約有 110 個此類單元應用於市鎮污水處理；其餘的，則用於不同的工業，如在丙烯腈工廠處理含氯廢水及在乙烯工廠處理鹼洗液。特定案例⁽⁷⁾ 有：Northern 石化用於處理鹼洗液，Tokyo Gas 處理煉焦爐之氣洗液，加州的 Casmalia Resources 用以處理含有氯、硫酸鹽、酚及殺蟲劑的廢棄物。

1.專利

表 3 為 WAO 程序之一些專利摘要。其中兩項主要係有關纖維漿中之木質素及樹脂的去除。這些 WAO 的程序較前面所述對有害廢棄物的氧化具較低之溫度 (125°~175°C) 及壓力 (80~800psi O₂ 分壓)。

Sterling Drug 是 Zimpro 的上一代公司，在所述的專利中，其中之一是紙漿廢液可循環使用的處理程序，另一專利是採用銅或銀同相觸媒以增進氧化。專例亦說明觸媒的回收循環使用。下列係以銅觸媒處理丙烯腈工廠廢水的結果

1 小時 COD 去除率 (%)		
溫度 (°C)	無觸媒	銅觸媒
230	46.0	89.7

260	64.5	95.9
300	82.3	97.8

表 3 濕式氧化法專利摘要

讓 最 受 人 及 日 期	內 容
Hercules Powder 10/4/50	以 WAO 程序去除木纖維的木質素及樹脂殘渣。此程序係在 125°~175°C，pH7~9 及 800+ psi 氧分壓的鹼溶液中完成。
Sterling Drug 4/2/70	在 200°~375°C，pH7~9 及水蒸氣壓力下將紙漿廢液予以氧化、已被氧化的液體可在造紙漿程序中再循環使用，而發熱能回收產生水蒸氣。
Kimberly-Clark 8/12/57	低壓 (40~250 psi O ₂ 分壓) 鹼性木漿程序在 120~160°C 及 pH7~9 條件下氫化，並回收有機酸。
Sterling Drug 3/18/74	在 WAO 程序中，添加銅或銀之同相觸媒。在程序中觸媒可再沉澱，再生及再利用。

上述資料顯示，對 COD 去除率而言，低溫添加觸媒較高溫不加觸媒的效果要好。

2.化 學

事實上，WAO 是一種在水中的燃燒程序。在 WAO 所放出的熱量與同樣的有機物值在乾燥狀況下予以焚化是一致的。廢水中每一 g/l 的 COD，對大部分的有機物質的氧化（或燃燒）熱，約為 45~50BTU(HHV)/gal 廢水。因此，釋熱率的相當值為 5,400~6,000BTU(HHV)/lb COD 廢水。

WAO 所需之壓力在 150~200atm，且僅需極少的過量空氣。一般每磅有機廢棄物需 16 磅之空氣。在 390°~435°F 及壓力控制下，空氣開始與有機物質反應。溫度低於 390°F 時之反應速度很慢。例如碳可在 390°F 時，快速氧化，然而硫成份則需在 500°F 以上才能氧化。大部份的頑強組成物質能在溫度 635°F 以下被破壞。而觸媒的添加增進轉換或降低反應溫度。但是觸媒程序較為複雜，而且此種程序仍在實驗階段尚未商業化應用。

WAO 將 HC 完全轉換成 CO₂ 及 H₂O。有機氮被轉換成 NH₃ 且在水中被吸收。硫被氧化成硫酸鹽，同樣能在水中被吸收。鹵仍然停留在液態中。設有 SO_x 或 NO_x 之形成。因此 WAO 之排氣中主要含有 N₂，CO₂，及殘留 O₂。

3.功 能

本文主要是引用 Zimpro 的模型廠研究的功能數據。其中代表性的結果如表 12 所述。值得注意的是，在處理 PCB 時，雖氧化溫度高達 320°C，但是其破壞效率僅 63%。以下係商業化 WAO 單元處理煉油廠鹼洗液的破壞率 (%) 文獻數據。

污染物	破壞率 (%)
酚	99.77 (%)
有機硫	94.00 (%)
氯	99.98 (%)
COD	89.30 (%)

4. 設計考慮因素

WAO 系統之設計，主要考慮因素為：

- (1) 廢棄物的型態及特性。
- (2) 廢棄物濃度及熱值。
- (3) 溫度、壓力及反應速率。

當廢棄物含高熱值時，需利用部分處理水回流稀釋。廢棄物之COD超過 50,000mg/l 而且體積大於 30gpm 時，廢熱回收鍋爐所產生之低、中壓蒸氣具有經濟效益。反應器之高壓廢氣的能量也可回收以補充空氣壓縮機的動力。

WAO 系統氧化周圍環境的金屬材料，亦即腐蝕可能很嚴重，因此反應器通常使用 316L 型的不鏽鋼材料。若進料中含鹵素成份，則需使用鈦或鈦裏襯鋼材。

三、案例一：液體噴注式焚化爐處理 VCM 廢棄物

(一) 設計基準及假設

對象：年產 500 million lb 之 VCM 廉。

製程：ethylene as a feedstock in an energy-balance process

廢棄物來源：(1) vent gases from a degassing column

(2) purge gas from an absorber

(3) still residue from a heavy ends column

廢棄物的量：3386 lb/hr 或 27 million lb/hr (0.9 stream factor)

廢棄物平均熱質：7370 Btu/lb(HHV)

廢棄物總熱質：25 million Btu/hr

廢棄物組成：(略)

POHCs : C₁-C₄ hydrocarbons, ethylene dichloride 等等。

焚化爐溫度：2600°F

停留時間：2秒

超量空氣：15%

操作壓力：大氣壓

破壞率：POHCs 達 99.99% (min)

副產品：100million lb/hr 20 wt% HCl

(二)處理程序說明：如圖 1 所示

1. 進料由二條廢氣及一條廢液管線排入，混合進料平均熱值已達7,370Btu/lb(HHV)，所以除了啓動以外，不須補助燃料，預熱時使用天然氣。
2. 在水平式焚化爐以15%超量空氣，2,600°F，停留時間二秒下操作。
3. 焚化的廢熱用水管式鍋爐回收，產生 12,000lb/hr，150psig 的飽和蒸汽。
4. 鍋爐排氣溫度為 700°F，可以避免酸在鍋爐及管中的凝結。
5. 排氣經水吸收塔，回收20%的鹽酸副產品。
6. 排氣再經鹼吸收塔。
7. 排氣再加熱到 300°F，以利排放。

(三)處理程序討論

1. 液體噴注式焚化爐操作條件係根據 Trane Thermal Company 資料，該公司指出氯化碳氫化合物焚化至少須超過 2500°F 及 1.5 秒以上。
2. 採用2,600°F 及 2 秒，對內襯防火磚的爐心材料無問題，但在某些情況，則須注入蒸汽，以降低爐心溫度。
3. 廢熱鍋爐的材料，可以用碳鋼（溫度小於 500°F 時或低於露點 250°~300°F）；但是 HCl 吸收塔等潮濕接觸部分。則須用合金。
4. 儘量減少超量空氣以降低游離氯的含量，減少腐蝕性。

(四)費用預估：如表 4 所列。

表 4 液體噴注爐焚化 VCM 廢有害廢棄物之費用預估

廢棄物處理容量 百萬lb/yr	釋熱率 百萬 Btu/hr. HHV	操作負載化	總處理費 \$/lb	總固定主要投資 百萬美元
13	12.5	0.5	25.8	
		0.7	17.2	3.8
		1.0	10.8	
27	25	0.5	16.1	
		0.7	10.3	5.5
		1.0	6.0	
53	50	0.5	10.6	
		0.7	6.4	8.0
		1.0	3.2	

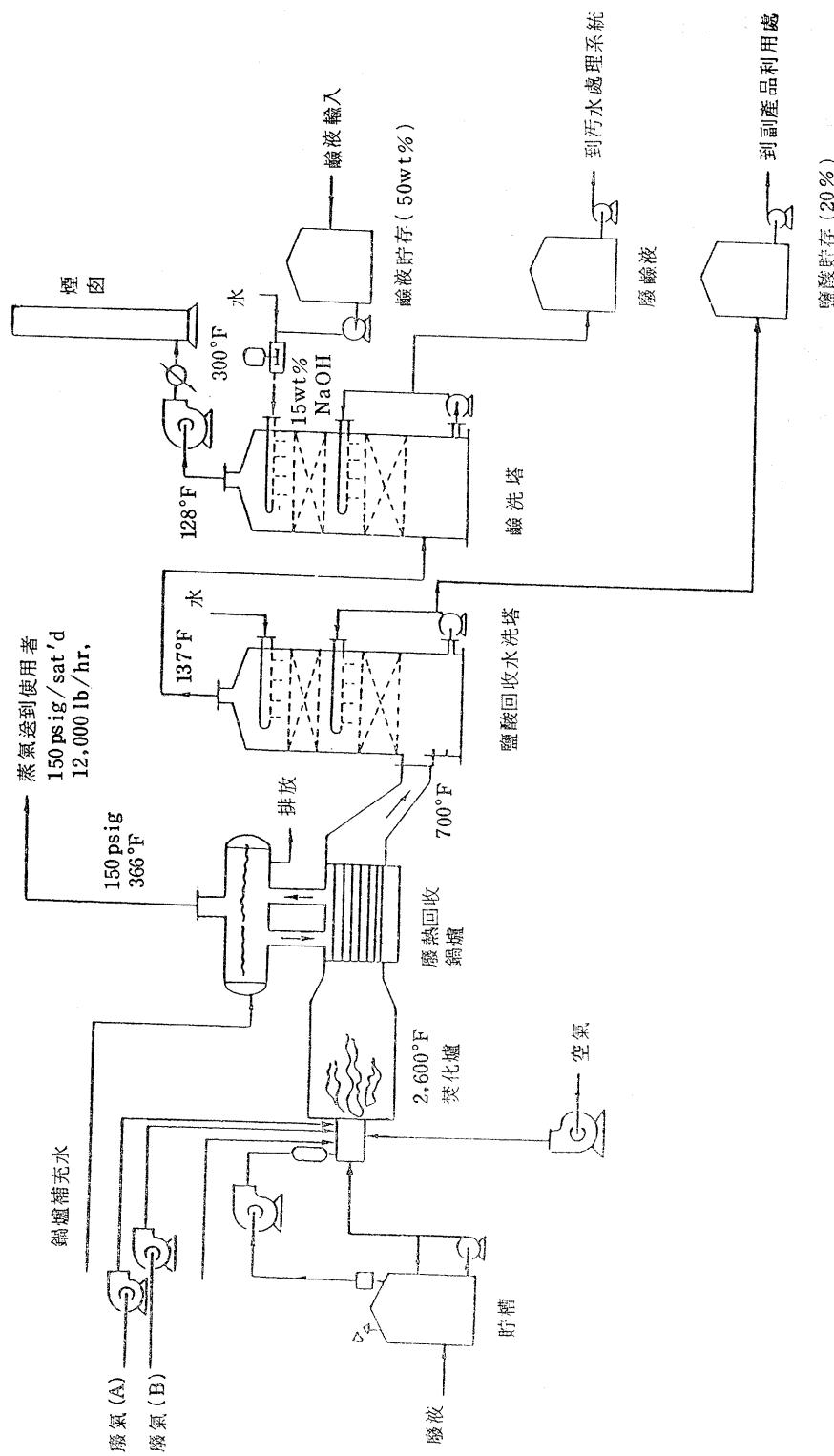


圖 1 液體噴注式焚化爐處理 VCM 廢廢棄物流程

四、案例二：傾斜式轉窯焚化爐處理化工廠有害廢棄物

(一) 設計基準及假設

旋轉爐之設計基準及假設如表 5 說明，傾斜式旋轉爐能燃燒許多種型態如氣體、液體、糊狀、污泥或固體等廣範圍之廢棄物。由於此型焚化爐允許較大的彈性，因此特別受大量廢棄物產生者、集中廢棄物管理場及商業化廢棄物處置場等業者的歡迎，此項經濟評估係以場內處理為準，所焚化的廢棄物係部份為 VCM 廠的廢液可以液體噴注焚化程序焚化之，另外部份混合多產品化工廠所產生之固體及糊狀典型廢棄物。固體及糊狀混合廢棄物含有 40wt% 水份及 60wt% 之固體物。固體物之分析組成如下（重量百分比%）：

C	23.7%
H ₂	3.1%
S	0.8%
O ₂	7.8%
N ₂	36.9%
Ash	27.7%
總	100.0

由於含水率相當高，以致此廢棄物之平均熱值僅達 3,145.1Btu/lb HHV。此類廢棄物與熱值 4,994.2Btu/lb HHV 之 VCM 廢棄物混合時，若要提高旋轉爐 50 百萬 Btu/hr 容量所需之總熱值，則還須 11.24 百萬 Btu/hr 之輔助燃料（天然氣或燃料油）。

表 5 傾斜式轉窯焚化爐焚化有害廢棄物設計基準及假設

廢棄物來源：VCM 廠廢棄物加上固體及糊狀廢棄物

廢棄物量：VCM 廠廢棄物 = 26.7 百萬 lb/yr

固體及糊狀廢棄物 = 34.5 百萬 lb/yr

總廢棄物 = 61.2 (取整數 61) 百萬 lb/yr

廢棄物平均熱值：4,994.2BTU/lb HHV

廢棄物釋熱率：38.76 百萬 BTU/hr

輔助天然瓦斯：11.24 百萬 BTU/hr

總釋熱率：50 百萬 BTU/hr HHV

焚燒溫度：1,800°F

停留時間：

氣體 3sec

固體 137min

過量空氣：50%

操作壓力：大氣壓

破壞率：99.99% min 對所有 POHCs

(二) 程序說明

圖 2 所示，為旋轉爐焚化有害廢棄物之流程說明，廢氣以鼓風機，廢液以泵，固體及糊狀廢棄物以抓斗輸送，固體物燃燒需要較高之過量空氣，此處選擇 50%，由於廢棄物平均熱值 (4,994.2 BTU/lb HHV)，不足以提供焚化區之燃燒，所以需要備用之輔助燃料，為避免爐窯中灰熔現象，焚化區之溫度應維持在 1,500°F，而後燃燒室之溫度應高達 1,800°F，以確保可燃燒物之完全破壞。後燃燒器亦可以加入天然氣或燃料油。

後燃燒器之廢棄通過輻射廢熱鍋爐以產生蒸氣。廢氣中含較高灰份時，以使用輻射鍋爐為宜。鍋爐亦設有灰份收集槽，殘餘之灰份則先經旋風機去除，再通過文式管 (Venturi) 及鹼性濾塵器以中和 SO₂ 及 HCl。有一些 Cl₂ 也與鹼液反應形成 NaCl。由於廢氣中之 SO₂ 及高量灰份存在，所以鹽酸副產品無回收之價值。

鹼性濾塵器底部的出流水送至污泥濃縮槽，加入少許之多電解質 (polyelectrolyte) 以加速沉降效率，濃縮之污泥所含未燃燒碳微粒，被送返旋轉爐，而溢流液則送往廠內放流水處理系統。

經鹼性濾塵器後的廢氣被抽送至再熱系統，使廢氣溫度由 120°F 升至 300°F，以增加其在煙囪中之浮力。

(三) 程序討論

傾斜旋轉爐燃燒室通常以耐火材料襯裡、水平傾斜坡度為 2~3%，旋轉速度為 0.25~1.5 rpm，釋熱值 50 百萬 BTU/hr HHV 窯爐之內徑約為 9ft，長約 29ft，在爐窯中固體物停留時間可由下列公式計算之：

$$t = \frac{3.82L}{RDS}$$

其中

L = 爐窯長，ft

D = 爐窯內徑，ft

R = 旋轉速度，rpm

S = 傾斜度，in/ft 爐窯長

t = 平均停留時間，min

本文設計參數如下：

L = 29ft

D = 9ft

R = 0.75 rpm

S = 0.12 in/ft

以上述基準，計算固體物停留時間為 137 min，氣體的停留時間為爐內自由體積除以氣體流量，經計算氣體停留時間為 3 sec。

旋轉爐對於排放灰份的設計，有乾灰或熔灰兩種。由於熔灰程序需在灰份熔點溫度以上操作且常導致耐火材料超負荷，所以本文採投資及操作費用較低之乾灰程序予以估價。

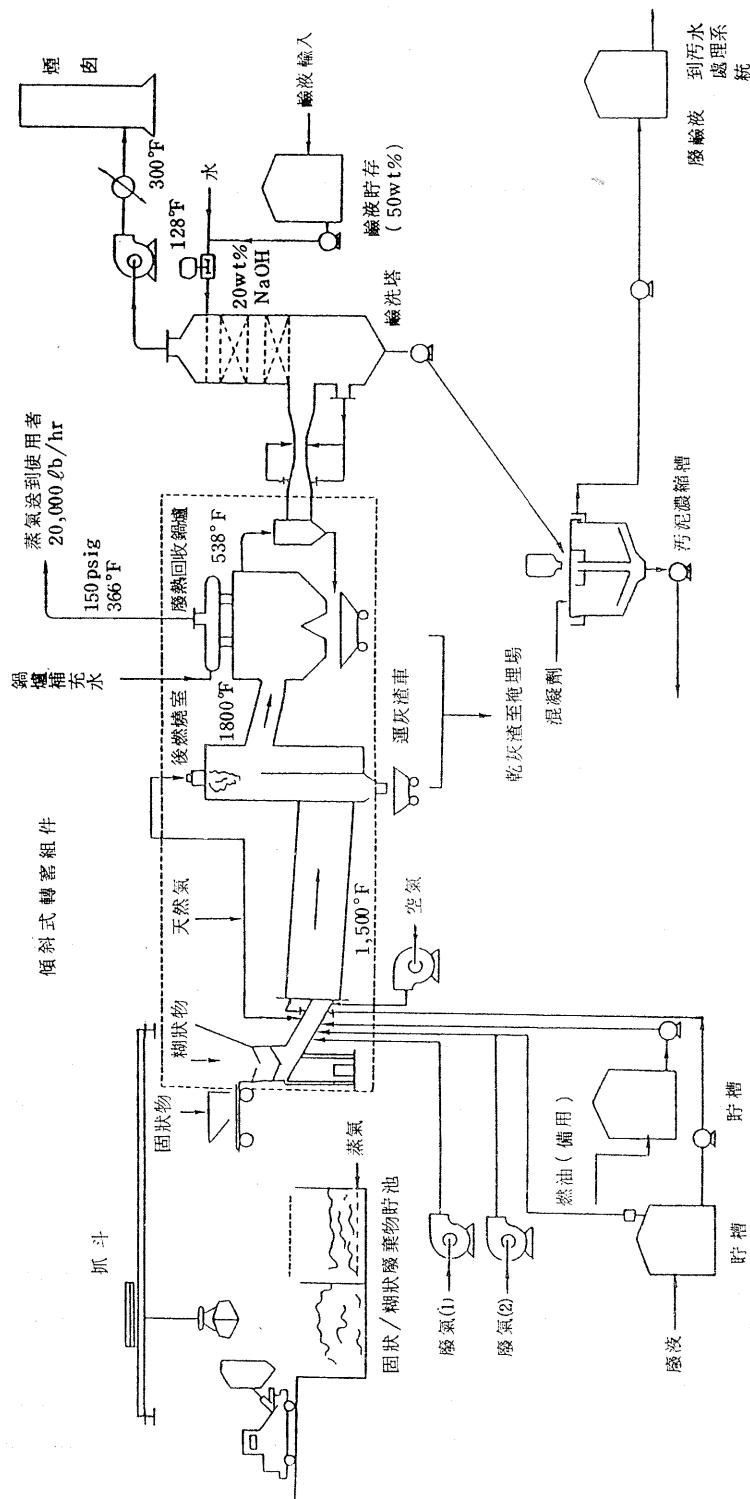


圖 2 旋轉式焚化爐處理化工廠有害廢棄物程序

雖然熔渣系統具有減少灰份進入廢熱回收鍋爐系統的好處，但是其操作費用較乾灰型程序為高。

(四)價格估算，如表 6。

表 6 旋轉窑爐焚燒有害廢棄物

廢棄物處理容量 百萬lb/yr	釋 熱 率 百萬BTU/hr HHV	操 作 負 載 比	總 處 理 費 ¢/lb	總 固 定 主要投資 百萬美元
31	25	0.5	23.2	6.3
		0.7	16.3	
		1.0	11.1	
61	50	0.5	17.6	10.5
		0.7	12.7	
		1.0	9.1	
122	100	0.5	13.8	16.5
		0.7	10.0	
		1.0	7.2	

五、案例三：循環式燃燒爐處理化工廠有害廢棄物

循環式燃燒爐 (circulating bed combustor, CBC) 係一種較新的流體床焚化系統，按開發商 GA Technologies, Inc 指出 CBC 的燃燒區具高速度 (12-20ft/sec) 及高攪動，可使整個燃燒迴路比傳統流體化床系統的溫度更均勻 ($\pm 50^{\circ}\text{F}$)。總之，CBC 能提供較高之燃燒效率。

此程序最初係由芬蘭 Ahlstrom Co 所開發，主要應用於燃燒煤、油、泥煤、廢木料及都市垃圾以產生蒸氣。此型燃燒中硫份煤及石油焦之50百萬 BTU/hr 鍋爐，於1983年設置於加州 Bakerfield 之 Pyropoueer Co，係由 Ahlstrom 及 GA Technologies 所聯合研發而成的。系統中，Ahlstrom 負責蒸氣鍋爐，而 GA Technologies 則負責有害廢棄物焚化爐體。

至目前為止，最大的移動型單元之釋熱率為 5 百萬 BTU/hr，移動型之最大限值約為 10 百萬 BTU/hr，可能固定型 CBCs 的釋熱率可高達 60 百萬 BTU/hr，然而尚無此型之設置。

(一) 設計基準及假設

表 7 所示，係 5 百萬 BTU/hr HHV 移動型 CBC 焚燒有害廢棄物之設計基準及假設，進料廢棄物含 52wt% 之 VCM 廠之廢液及 48wt% 之多產品工廠之固體廢棄物。為符合目前 CBC 之最大釋熱率 5 百萬 BTU/hr HHV，故將廢棄物量減至 8.5 百萬 lb/yr，則所得廢棄物釋熱率為 4.54 百萬 BTU/hr，不足者以天然瓦斯補充之。

表 7 循環式爐焚燒有害廢棄物設計基準及假設

廢棄物來源：VCM 廠廢液及化學廠固體廢棄物

廢棄物量：固體廢棄物 = 4.1 百萬 lb/yr

廢液 = 4.4 百萬 lb/yr

廢棄物平均熱值：4,105BTU/lb HHV

輔助燃料油：0.46 百萬 BTU/hr

總釋熱率：5 百萬 BTU/hr HHV

燃燒溫度：1,800°F

過量空氣：90%

停留時間：<1sec

操作壓力：原大氣壓

尺寸：

燃燒室直徑 30吋

總燃燒模組 19×33×50呎

破壞率：99.99% min，對所有 POHCs

(二) 程序說明

圖 3 為 CBC 之流程圖，系統之主要組成為燃燒室迴路，固體物螺旋進料機、廢熱回收鍋爐，袋式過濾除塵及灰份控制輸送機，在現場仍需設置抓斗、儲存槽及其他各種項目。燃燒迴路的設置包含耐火材料襯裡燃燒室、熱旋風機及密閉迴路等。而流動途徑之組成則為廢棄物進料燃燒室，廢氣灰份分離，流體化固體物之迴流。較低層組成，係初級及二級燃燒氣體、廢液進料、輔助燃料、啟動燃燒器及灰份移除等部份設施。空氣分散器緊設於燃燒室爐壁。廢棄物及中和廢酸氣之粉狀石灰石投置於流體床惰性固體物（矽或鋁）之上方，含少許固體物之廢棄通過熱旋風機，顆粒大於 10μ 之固體則被去除，較細顆粒則以濾袋去除，廢熱經蒸氣鍋爐回收，產生 150psig 之飽和蒸氣，灰份經冷卻後，運送至處置場，廢氣則經煙囪排出。

(三) 程序討論

廢氣須冷卻至 500°F，以保護下游濾袋之纖維，通常係由蒸氣鍋爐完成冷卻作用，所產生之蒸氣亦可用於廠內其他操作。

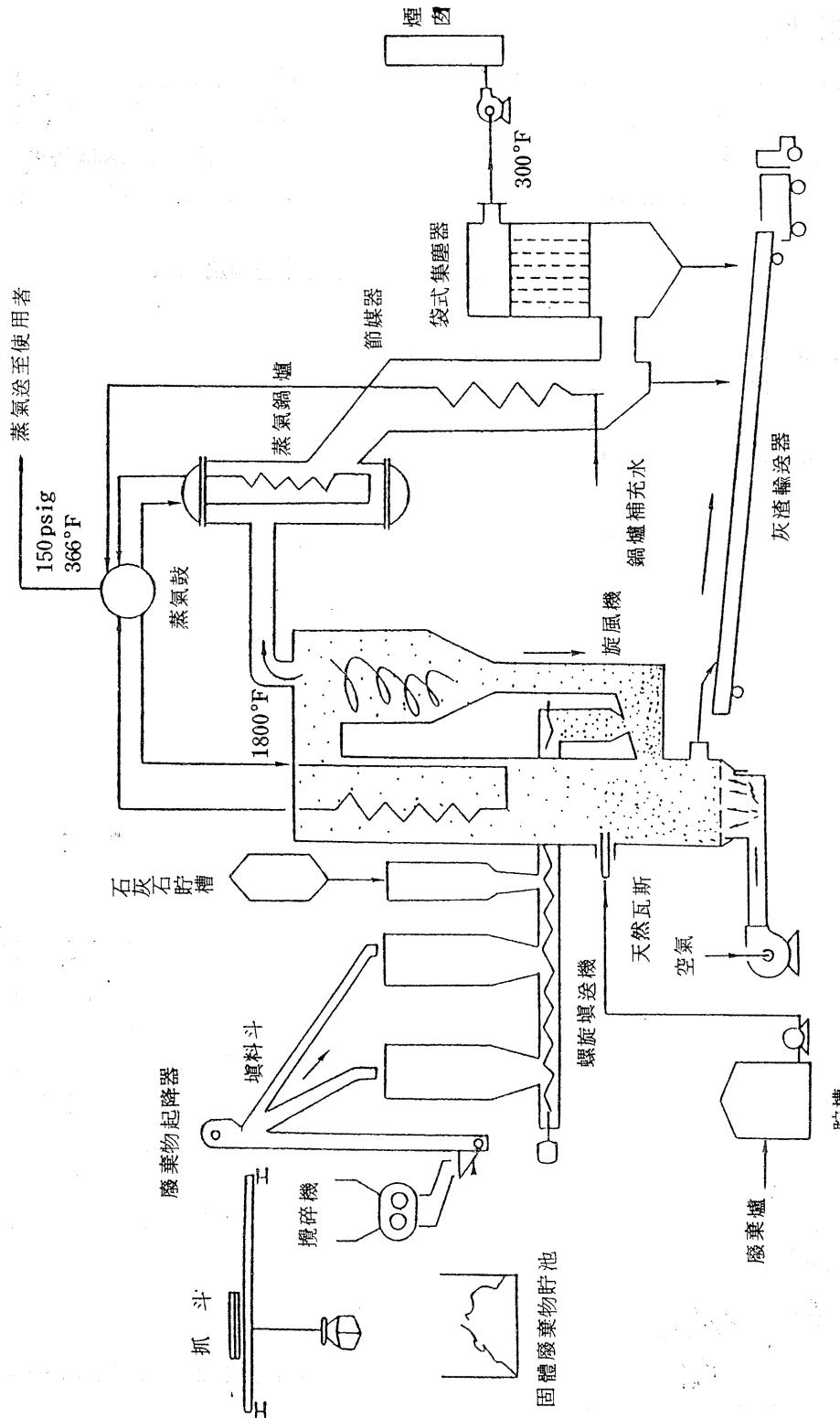


圖 3 循環式燃燒系統處理化工廠有害廢棄物

根據 GA Technologies 所述，CBC 已完成廣範圍有害廢棄物之焚燒測試。部份廢棄物之破壞情形，POHC 破壞率（%），如下說明：

四氯化碳	99.9992
Freon	99.9995
馬拉松	99.9999 ⁺
化工廠廢棄物	99.9 ⁺
含氯有機污泥	99.999 ⁺
PCB污染土壤 (10,000ppmPCB)	99.9999 ⁺

對於含 PCB 土壤之破壞率能符合毒性物質管制法 (TSCA) 的規定。此測試說明 PCBs 能在1,800°F 及表面速度18.7ft/sec 下被有效破壞。

(四)價格估算，如表 8 所示。

表 8 循環燃燒爐焚燒有害廢棄物

廢棄物處理容量 百萬lb/yr	釋熱率 百萬BTU/hr HHV	操作負載比	總處理費 \$/lb	總固定主要投資 百萬美元
4	2.5	0.5	87	3.4
		0.7	62	
		1.0	44	
9	5	0.5	66	5.6
		0.7	47	
		1.0	33	
17	10	0.5	56	9.5
		0.7	40	
		1.0	28	

六、案例四：批式操作反應槽配合生物菌種處理掩埋場滲出液及 化工廠廢水

(一)設計基準及假設

SBR系統處理有害廢棄物之設計基準及假設如表 9 所述。所處理之有害廢棄物包含兩部份：9,000gpd 之有害廢棄物掩埋場滲出液及 11,000gpd 之化學工廠廢水。依據 OCC

表 9 SBR 活性污泥系統處理有害廢棄物設計基準及假設

廢棄物來源：廢棄物掩埋場滲出液9,000gpd.

化學工廠廢水 11,000gpd.

處理廠相當容量：55百萬lb/yr，設計係數0.9

停留時間：

均勻槽 2.5天

中和／曝氣槽 2小時

沉澱池 3.6小時

SBR週期時開：

進料 12小時

反應 4

沈降 2

移除 2

停置 4

計 24小時

SBR操作參數：

污泥濃度MLSS 10,000mg/ℓ

食微比 F/M 0.1

反應槽體積 (V_T) 35,000gal/batch

污泥產率 1.02g/g TOC

傳氧效率 20%

去除率：

TOC 99.96

TOX 99.78

COD 99.62

BOD 99.98

SS 100.00

P-PO₄ 97.23*

N-NH₄ 99.44*

Phenol 100.00

Benzoic Acid 99.99

o-chlorobenzoic acid. 99.35

m-chlorobenzoic acid. 100.00

p-chlorobenzoic acid. 100.00

* 指包括原廢水及添加營養劑總量之去除率。

的報告，這兩種廢水水質和水量均很相近，若以重量為計算基準，則處理廠設計係數為0.9時之容量應為55百萬lb/yr。並依 OCC 報告所述，在相同之SBR操作週期及參數下，各組成之去除率約為97.23~100%。

(二)程序說明

圖4所示，為SBR系統處理有害廢棄物之流程圖。其中T-101槽為均勻儲存槽，停留時間為2.5天，系統使用兩組並列SBR反應器，每一組操作週期為24小時，其中進料期為12小時。所以當一組在進料時，另一組則進行另一階段，因此，其他的設備可以14gpm的平均流量連續操作。廢水在T-102加苛性鹼並曝氣，使廢水從pH=5.5調至pH=7.5，同時加入磷鹽及銨鹽為營養劑。廢水在T-102之停留時間為2小時。T-103為沉澱池，用以去除中和後廢水中之懸浮固體物。經沉降後之污泥與SBR槽之廢棄污泥合併送至旋轉過濾機予以脫水，過濾水再送回均勻槽，而污泥餅則予以焚化處理，再掩埋之。簡言之，均勻調整，中和／曝氣及沉澱均屬前處理程序。

沉澱池出流水被交替泵送至SBR反應槽。在啟動時，新鮮菌種被加入反應槽。此後在曝氣的條件下，細菌不斷繁殖並分解有機物。除非反應槽已長期停置或為分解新型有機廢棄物所需新系菌種，否則極少需要再補充菌種。反應器經反應沉降後，上層澄清液被泵送至沙濾池，再經兩個串聯活性碳吸附塔後，才排放至下水道系統。第三個活性碳吸附塔係用於蒸氣再生時之備用。各反應槽及處理系統之廢氣，均先經活性碳淨化後才予以排放。

(三)程序討論

表9指出廢水BOD之去除率為99.98%，COD之去除率約為99.62%，含氯組成大部份被分解(99.78%)，但仍有少部份之無機氮及磷基營養劑殘留，部份殘留營養劑，係為維持細菌生長所添加。

(四)價格估算，如表10所示。

表10 SBR 處理有害廢棄物

廢棄物處理容量 百萬lb/yr	廢水流量 1,000 gal/day	操作負載比	總處理費 \$/lb	總固定主要投資 百萬美元
27	10	0.5	10.6	2.4
		0.7	7.6	
		1.0	5.4	
55	20	0.5	6.1	2.9
		0.7	4.4	
		1.0	3.1	
109	40	0.9	4.5	3.6
		0.7	3.2	
		1.0	2.3	

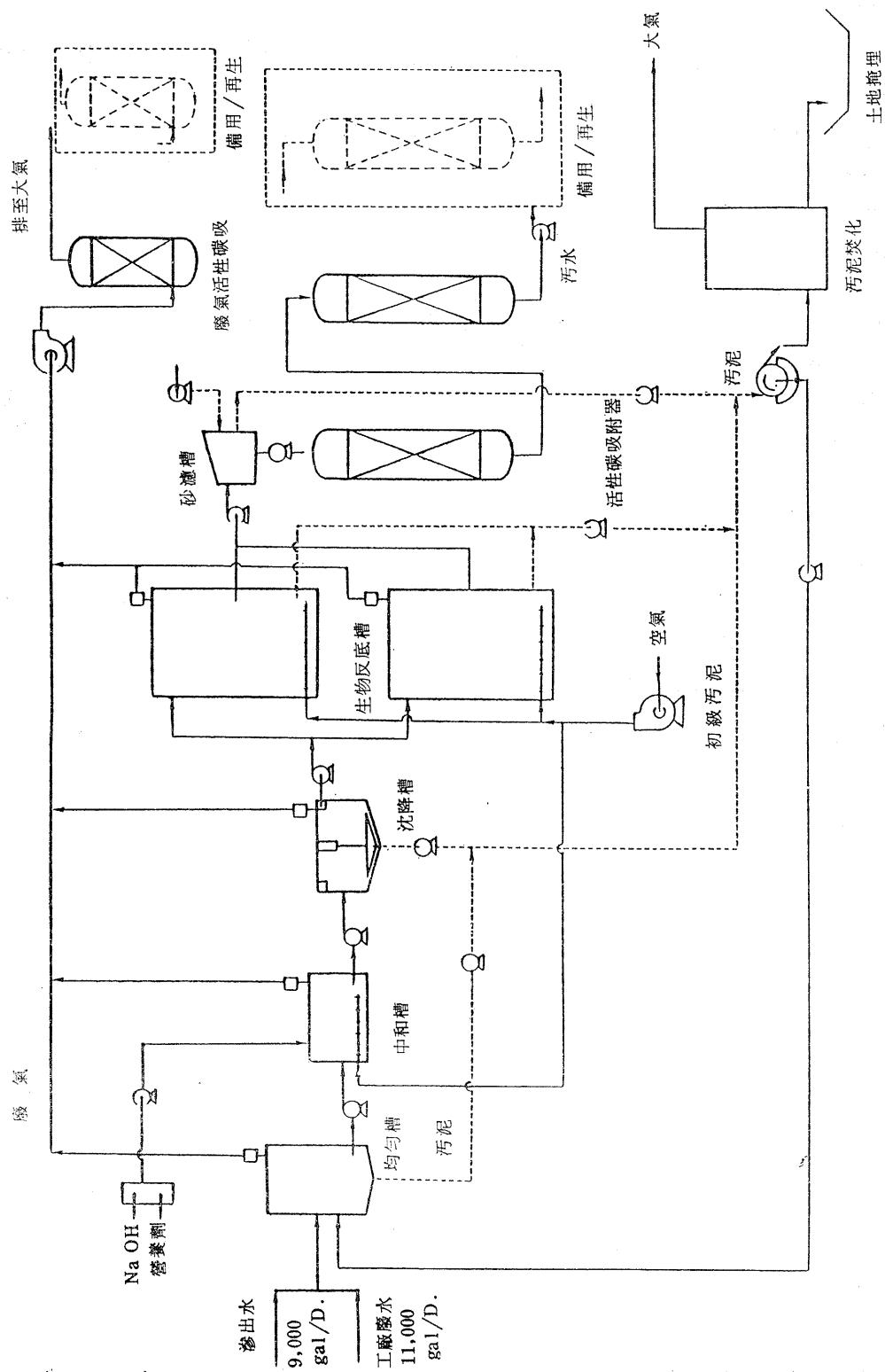


圖 4 SBR 生物處理系統處理有害廢棄物

七、案例五：濕式氧化法處理化工廠有害廢棄物

(一) 設計基準及假設

表11是估計 WAO 系統之投資及操作費時之設計基準及假設的摘要。進流水含有碳氫化合物，含氯碳氫化合物、乙醇、丙酮，屬典型大量化學混合物質。廢水的組成、氧化狀況及去除率與 Zimpro 所發表資料一致。

WAO 系統的廢水量為 20,000 gpd，COD 的濃度為 77,500mg/l 較 SBR 系統處理廢水濃度高達八倍左右。COD 之去除率可達 85.9%。

表11 WAO 程序處理有害廢棄物設計基準及假設

廢水容積：55百萬lb/yr(20,000gpd進流水)

廢水有機物質及去除率：

	進流水 (mg/l)	出流水 (mg/l)	去除率 (%)
1, 2-Dichlorobenzene	2,213	55	97.5
Methylene chloride	60	0.01	99.9+
Perchloroethylene	4,000	0.9	99.9+
Freon II	3,000	2.0	99.9+
o-Xylene	8,385	20.0	99.8
Toluene	30	0.5	98.3
Phenol	1,556	2.1	99.9
Iaopropyl alcohol	1,700	400.0	76.5
Methyl ethyl ketone	6,000	1.0	99.9+
COD	77,500	10,900	85.9

WAO 狀況：

溫度 572°F(300°C)

壓力 1,958 psia(133.2atm)

停留時間 1 小時

過量空氣 15%

(二) 程序說明

圖 5 所述，以 WAO 系統處理 20,000gpd (55百萬lb/yr) 之石化混合廢水。氧化作用所需之空氣經往復式壓縮機五段壓縮成 2,000psia 的壓力後，直接與連續進流之廢水混合。再經出流水／進流水熱交換器 (E-105) 預熱至 434°F，才進入 WAO 反應器 (R-101)。在啟動時，氣液混合物在直接點火啟動加熱器先預熱。在反應槽中，壓力在 1,958psia 下，氧化熱使溫度提高至 572°F。而廢水在反應槽中的停留時間為 1 小時。

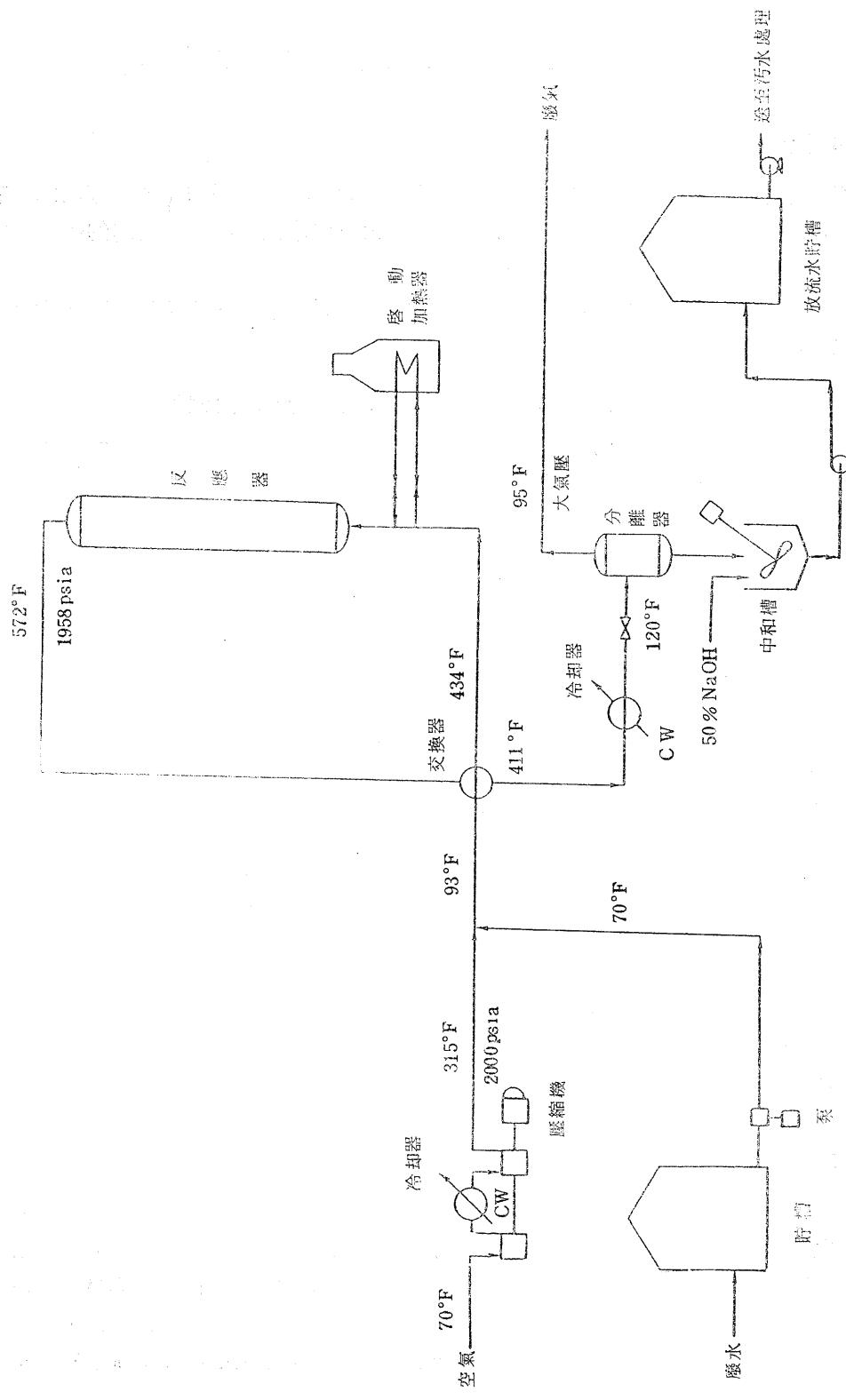


圖 5 濕式氧化法處理化工廠有害廢棄物

出流水經 E-105 熱交換器冷卻至 120°F。經減壓後，氣體及處理液在 V-101 中予以分離。WAO 系統之出流水含有少量之 HCl 及 HF，在送至生物處理系統處理殘餘之 COD 前，需加鹼液予以中和。

(三)程序討論

為了控制反應槽之溫度在 572°F，而限制進流水溫度預熱至 434°F，因此也必須限制出流水／進流水熱交換器之熱回收值僅能達 2.53 百萬 BTU/hr。事實上，出流水以 411°F 溫度流出 E-105 時，出流水仍有 2.35 百萬 BTU/hr 的附加廢熱可利用。然而在本文設計中，此附加熱是在水冷卻器 (E-106) 耗廢掉。V-101 中之附加能亦可回收利用，由於不具經濟效益而未考慮。

由於本文設計狀況 COD 之去除不完全 (85.9%)，所以必須再以生物處理之。若再加生物處理系統，則需在原估價中再額外投資 5%。

反應器的氧化壓力條件具高腐蝕性，根據 Zimpro 經驗，必須採用鈦或鈦裏襯材料才可。

表12 WAO 程序之代表性毒性化學物之破壞率 (模型廠實驗數據)

	氧化溫度 (°C)	時間 (小時)	破壞率 (%)
Acenaphthene	275	1	99.99
Acrolein	275	1	99.96 ⁺
Acrylonitrile	275	1	99.0
2, 4-Dimethylphenol	275	1	99.99
2, 4-Dinitrotoluene	275	1	99.74
1, 2-Diphenyhydrazine	275	1	99.88
Nitrophenol	275	1	99.6
phenol	275	1	99.8
Formic acid	300	1	99.3
Chloroform	275	1	99.9
Carbon tetrachloride	275	1	99.7
1, 2-Dichloroethane	275	1	99.8
n-Nitrosodimethylamine	275	1	99.6
Hexachlorocyclopentadiene	300	1	99.9 ⁺
Toluene	275	1	99.7
Dibutylphthalate	275	1	99.5
Isophorone	275	1	99.4
Pyrene	275	1	99.95
Malathion	250	1	99.85
PCB (Aroclor® 1254)	320	2	63.0

(四)價格估算，如表13所示。

表13 濕式氧化法處理有害廢棄物

廢棄物處理容量 百萬lb/yr	廢水流量 1,000 gal/day	操作負載比	總處理費 \$/lb	總固定主要投資 百萬美元
27	10	0.5	9.8	2.2
		0.7	7.1	
		1.0	5.0	
55	20	0.5	6.5	3.2
		0.7	4.7	
		1.0	3.4	
109	40	0.5	4.8	5.2
		0.7	3.5	
		1.0	2.5	

八、案例六：廠外商業性之處理、貯存及處置設施 (TSDF) (Treatment and Disposal at off-site Commercial facilities)

本案例討論有害廢棄物經由發生源經運輸到工廠外之商業性處理及處置設施所須之費用。根據調查，此等商業性代處理設施僅處理美國國內有害廢棄物年產量的 5%。在未來幾年，因小量產生者 (small hazardous waste generators) 或因某些特殊廢棄物，或即使大量的產生者做單獨廠內處理也不經濟等因素，上述處理量的比率可能會上升到 10% 左右。以 1983 年調查的資料，顯示 722 化學工廠中，約有 16% 的有害固體廢棄物係由廠外商業性設施代為處理。這些代處理設施中，土地掩埋佔業務的 69%。

(一)全美規模最大的全程服務公司 (full range of services) 有七家，另外 ETI 的業務遍及美國及歐洲。

這七家公司是：Cat Tech Environmental Services; Chemical Waste Management (CWM); CSX (Boston); International Technology (IT); Mill Service; Resource Recovery of America; Rollins Environmental Services; 全程服務的項目包括：testing & engineering; decontamination; transportation; recovery/recycling; incineration; detoxification; landfill; biological treatment;

remedial services to spills.

除了上述大公司外，尚有許多做部分服務的小公司。

(二) 運輸、處理及處置費用

以 CWM 公司為例，運輸方面有二種收費算法，第一種為距離小於 750 公里、單程、每小時（車的容量約 10~20M³）收 65~72.5 美元，第二種為距離大於 750 公里、單程、每公里收 2.15~2.35 美元，若運送 PCBs 等尚須另外收費。

表14為 CWM 公司的處理及處置收費標準，係依據廢棄物特性及處理方法分為六類

表14 有害廢棄物處理及處置的費用（加州某一大代理公司的例子）

PEP Cost Index=445 (Mid-1986)

廢棄物分類		單位	美元／單位
1. 固體適於土地掩埋			
a. Bulk			
Hazardous	Cu yd		110.00
Extremely hazardous*	Cu yd		130.00
b. Drummed			
30-50 gal size	Drum		35.00
5 gal size lab pack†	Drum		35.00
30 gal lab pack	Drum		75.00
55 gal lab pack	Drum		110.00
85 gal lab pack	Drum		140.00
Empty metal drum	Drum		15.00
Plastic drum	Drum		25.00
2. 液體利用太陽能蒸發 (pH=4.0min)			
Bulk hazardous	Gal		0.55
Bulk extremely hazardous	Gal		0.70
Drummed (hazardous or extremely hazardous)	Drum		65.00
30-55 gal size			
3. 液體利用化學穩定及固化			
Bulk stabilization	Gal		1.60
Bulk solidification in containers	Gal		2.10
Drummed shipments	Drum		115.00
30-55 gal size			
4. 液體適宜於用做燃料			
Bulk	Gal		0.95
Drummed	Drum		75.00
30-55 gal size			

* SRI 的建檔資料

，表中所列費用並不包括運輸及聯邦、州的稅等費用。稅率大約如下

superfund 稅 : \$2.13/ton
州 稅 : \$0.56~22.5/ton
地 方 稅 : 處理處置費用的 6 %

(三)多氯聯苯的運輸及處理處置費用

加州規定 PCBs 污染的固體或液體中含量小於 25ppm，可以在加州的 Kettleman Hills (CWM 公司擁有) 做土地掩埋，液體中含量大於 25ppm 時，必須運到芝加哥或紐約焚化或用其他方法破壞之，其費用如下：

Landfill solids at the Kettleman Hills facility	
Bulk	\$160~\$300/cu yd
Drummed	\$65~\$150/drum
Liquid incineration at the Chicago Facility	
Transportation cost from Kettleman Hills to Chicago	\$130~\$200/drum
Incineration at Chicago	\$350~drum

(四)容器裝運之廢棄物運輸、處理及處置費用

依廢棄物種類及每批運送的桶 (container) 數而異，如表 15，每一桶約24~600美金。桶數 1 至 10 時，費用下降最明顯，10 個以上時則下降率緩慢下來。焚化爐是表上所列最貴的方法，也是受數量影響而降低費用最少的一種方法。含有 Cr、Cd、Hg 等的氰化物處理費用比不含這些金屬的氰化物廢棄物要貴 50~70%。每次運送 11 個以上的桶時，塑膠桶較金屬桶便宜。液體廢棄物以 55 加侖桶運送，每次 10~96 桶時各種不同處理方法的費用大約如下：

處理方式	費用 (\$/gal Liquid Waste)
太陽能蒸發(Solar evaporation)	1.34~1.75
化學穩定(Chemical stabilization)	2.25~2.65
燃料回收(Fuels recovery)	1.53~1.93
焚化(Incineration)	8.80~9.20
酸及含金屬離子廢液 (Acids and metal contaminated liquids)	1.62~2.02
氰化物氧化 (無金屬 Cr) (Cyanide oxidation without restricted metals)	1.71~2.11
氰化物氧化 (有金屬 Cr) (Cyanide oxidation with restricted metals)	2.90~3.29

每桶固體重約 450 磅，即處置費用每噸約為 215~323 美元，或每磅有害固體為 0.10~0.15 美元。實驗室容器 (lab packs) 的處理費用變異更大，已另文敍述。

表15 廠外商業性代處理公司對有害廢棄物處理、處置、運輸的費用 (美元/桶*)

PEP Cost Index-445 (Hid-1986)

Number of Containers	Solids	Lab Packs	Uncrushed		Liquide that May Be Received on A Space Available Basis**						
			Empty	Drums	1	2	3	4	5	6	7
1	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
2	300	300	300	300	300	300	300	553	300	300	300
3	200	200	200	200	200	200	200	532	200	200	227
5	150	170	150	150	150	175	150	528	150	150	210
5	120	161	120	120	116	166	126	526	131	136	201
6	100	154	100	100	109	159	119	519	124	129	194
7	86	149	86	86	104	154	114	514	119	124	189
8	75	146	75	75	101	151	111	511	116	121	186
9	68	143	67	67	98	148	108	508	113	118	183
10	66	141	60	60	96	146	106	506	111	116	181
11	64	139	55	55	94	144	104	504	109	114	179
12	63	138	50	53	93	143	103	503	108	113	178
13	62	137	47	52	92	142	102	502	107	112	177
14	61	136	43	51	91	141	101	501	106	111	176
15	60	135	40	50	90	140	100	500	105	110	175
16	59	134	39	49	89	139	99	499	104	109	174
17	58	133	38	48	88	138	98	498	103	108	173
18~19	57	132	37	47	87	137	97	497	102	107	172
20~21	56	131	36	46	86	136	96	496	101	106	171
25~27	54	129	34	44	84	134	94	494	99	104	169
28~32	53	128	33	43	83	133	93	493	98	103	168
33~39	52	127	32	42	82	132	92	492	97	102	167
40~51	51	126	31	41	81	131	91	491	96	101	166
52~55	50	125	30	40	80	130	90	490	95	100	165
56~59	49	124	29	39	79	129	89	489	94	99	164
60~64	48	123	28	38	78	128	88	488	93	98	163
65~69	47	122	27	37	77	127	87	487	92	97	162
70~77	46	121	26	36	76	126	86	486	91	96	161
78~85	45	120	25	35	75	125	85	485	90	95	160
86~96	44	119	24	34	74	124	84	484	89	94	159

* 一桶約為30~50加侖。

**處理方法分類：1.表太陽能蒸發

2.表化學穩定

3.燃料回收

4.焚化

5.酸及含金屬離子廢液

6.氰化物氧化 (無金屬Cr)

7.氰化物氧化 (有金屬Cr)

九、結論

- 1.有害廢棄物的處理技術，包括各種傳統方法及新穎技術，各有其適用的對象及範圍。本文引介適宜於高濃度有害廢棄物的三種焚化技術，適宜於中濃度的濕式氧化物理方法，以及適宜於低濃度有害廢棄物處理的生物方法，並分別利用美國史丹福研究中心的經濟指標做費用評估。
- 2.委託廠外代處理公司處理有害廢棄物，在某些情況下，比廠內自行處理要經濟可行。本文亦使用同樣的經濟指標，列出美國國內實際代處理公司的收費標準，包括各種不同的運輸情況、處理方法、稅率及數量多少，均影響收費標準。
- 3.各種方法經濟評估的結果，比較如下：（詳見文中相關各表）

處理程序	處理容量 百萬lb/yr	釋熱率 (百萬Btu/hr) 或處理流量 (1,000gal/day)	處理費用 (\$/lb)	固定投資 (百萬美元)
1.液體噴注式焚化爐	13~53	12.5~50百萬Btu/hr	3.2~25.8	3.8~8.0
2.轉窯式焚化爐	31~122	25~100百萬Btu/hr	7.2~23.2	6.3~16.5
3.循環式焚化爐	4~17	2.5~10百萬Btu/hr	28~87	3.4~9.5
4.SBR 生物處理	27~109	10~40 1,000gal/day	2.3~10.6	2.4~3.6
5.WAO 氧化處理	27~109	10~40 1,000gal/day	2.5~9.8	2.2~5.2
6.廠外代處理 (詳表14、15)				

- a.在表中第1~5項處理技術經濟評估時，均以三種處理容量分別估算其固定投資費用，並在不同之操作負載時估算其處理費用，其相關性呈指數關係。（詳見文中各相關各表說明）
- b.以釋熱率25百萬 BTU/hr. HHV 為例，三種焚化爐之固定投資費及處理費高低比較，依序分別為：循環式焚化爐1,700萬美元、25\$/lb（目前此型焚化爐仍未有此種大容量），傾斜式轉窯焚化爐630萬美元，11.1\$/lb，液體噴注式焚化爐550萬美元、5.5\$/lb。
- c.在相同處理容量時，SBR 及 WAO 所需之處理費用相近，而所需之固定投資於低處理容量時相似，高處理容量時，則以 WAO 較高，其主要原因係 WAO 需用耐高溫、高壓之材料所致。

十、參考資料

- (1)阮國棟、楊致行、呂明和、廖育英、洪文龍，「有害廢棄物之管理及處理技術」化學工業資訊月刊第16期pp6~34，1986。
- (2)James J. L. Ma, Advances in Hazardous Waste Treatment, Chemical Technology Center, SRI International, 1986.
- (3)呂明和，「自動程序控制操作之分批式活性污泥法處理製革廢水之研究」，成大碩士論文，1982。
- (4)R. L. Irvine, Technology Assessment of Sequencing Batch Reactors, EPA/600 /2-85/007, 1985.

- (5) Philip A Herzbrun, et. al., Biological treatment of hazardous waste in sequencing batch reactors, Journal WPCF, Vol. 57. No. 12. pp. 1163~1167, 1985.
- (6) R. L. Irvine, et. al., "Treating Landfill Leachates by Pure Strain Inoculation of SBRs" pp. 96-107. Impact of Applied Genetics in Pollution Control, Symposium held at the University of Notre Dame, May 24-26, 1982.
- (7) D. J. DeAngelo., A. R. Wilhelm, "Wet Air Oxidation of Speat Caustic Liquors" CEP, March, 1983, pp. 68-73.
- (8) 阮國棟、吳漢松、鄒文源, 「醫院及實驗室有害廢棄物之管理及處理」, 工業污染防治第六卷, 第二期; 1987.4。