

福德坑垃圾掩埋場沼氣回收利用之評估

Study the Use of Methane Generated from Futenkeng Landfill

國立台灣大學農業工程學研究所博士班研究生

陳世楷

Shin-Kai Chen

國立台灣大學農業工程學系講師

陳增壽

Tzeng-Shou Chen

國立台灣大學農業工程學研究所教授

劉振宇

Chen-Wuing Liu

摘要

本文以福德坑衛生掩埋場為對象，探討垃圾掩埋場在關閉後，沼氣之產生量，利用方式及其經濟效益。經由現地採樣及量測分析，福德坑掩埋場產生之沼氣中，甲烷平均濃度高達60%左右。由於甲烷所含熱值極高，具有經濟價值，值得開發。本文接續回顧國內外沼氣之利用方式，並以理論模式推估甲烷逐年之產量及熱值，將推估結果配合現地發電之利用型態，進行經濟效益分析，評估結果顯示在20年計畫年期中，發電所得之淨效益在甲烷回收率四成及一成之情況下，分別可達新臺幣18.37億及2.94億元，遠高於發電所需成本。因此將衛生掩埋場產生之沼氣做進一步之回收運用，可兼具環境保護並獲得實質之經濟效益。

關鍵詞：沼氣，甲烷，熱值。

ABSTRACT

The purpose of this paper is to estimate the quantity, utilizations and economical benefit of the gas generated from the closed Futenkeng sanitary landfill. Field sampling and measurement results showed that the average concentration of methane in the biogas is near 60% high. The amount of high heating-value methane annually generated are estimated by different theoretical methods. Based on the calculation and economical analyses of using the biogas in an on-site electric power generation plant, it indicates the net profits can reach to 1.837 billion and 0.294 billion NT\$ in 20-years basis for assuming the recovery rates of methane 40

% and 10 % respectively. This suggests that the use of the biogas in closed landfills not only agrees with the goal of environmental protection but also yield the high economical profits.

Keywords : Biogas, Methane, Heating-value.

一、前言

由於掩埋場關閉之後，垃圾層之生物分解及各種物化作用仍持續進行，因而衍生出許多公害問題，其中以垃圾掩埋場所產生的廢氣，因其成份中含有大量甲烷、二氧化碳及其他多種可能對人體健康具有嚴重危害的微量氣體，而危及場址安全與復育工程之進行。

目前國內衛生掩埋場在廢氣控制上之對策，主要是以排氣井及相關設施將廢氣收集後予以燃燒排放，不僅形成資源浪費，且易造成場區周遭空氣之污染。事實上，國內沼氣開發生產及利用技術，多年來已經由經濟部能源委員會及省農林廳等政府單位配合學術研究單位進行研發及推廣，目前許多畜殖場已成功地將動物糞尿產生的沼氣應用於家庭燃料及發電等用途。在政府及民間大力倡導資源回收之今日，若能將掩埋場廢氣熱能予以回收利用，以其經濟效益回饋場區週邊居民，將能更有效地建立垃圾即資源之觀念於民眾之中，並化解爾後垃圾掩埋場用地取得之阻力。

本文以福德坑衛生掩埋場之沼氣回收利用為研究對象，除就國內外對沼氣之應用方式予以評估比較外，並以理論模式推估甲烷逐年之產量及熱值，利用推估結果配合沼氣熱值利用方案，進行經濟效益分析，研究結果可以提供掩埋場沼氣開發利用之參考。

二、掩埋場復育之廢氣控制與回收利用

(一) 廢氣產生對掩埋場復育之影響：

掩埋場之垃圾經不同階段之生物分解後所產生之廢氣成份，在好氧性分解階段主要為氮、氧和二氧化碳；厭氧性分解階段則以甲烷及二氧化碳為主，此外，尚含有少量的硫化氫及各種直鏈

及環狀之揮發性有機化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 等⁽¹⁾。

掩埋場產生之廢氣易循埋層內的裂隙進入大氣，其成份中之甲烷及二氧化碳為國際公約管制之溫室效應氣體，而 VOCs 則因具有毒性、光分解穩定性及衍生空氣污染物等三種特性，已成為目前空氣污染管制法規制定之重點。此外，因甲烷之可燃性，使其遇到火源後易釀火災；其與空氣混合濃度在 5 % ~ 15 % 之間時，也易導致爆炸。廢氣中含硫之氣體化合物則具有惡臭，其他揮發性有機化合物不僅會散發出強烈之氣味，部份成份如芳香族化合物等，已證實具有致癌及致突變之危險性。此外，雖然甲烷對植物不具毒性，但當其大量產生並積聚於植物根層時，會減少土壤中氧氣的濃度，影響植物正常生長，高濃度的硫化氫及二氧化碳亦會對植物造成相同的影響。而廢氣產生過程中所釋出之能量會使地溫升高，亦會影響植物根群發育。

(二) 廢氣控制

為落實公害防治工作及確保植生綠化工程之順利進行，衛生掩埋場內產生之廢氣應以適當的集排設施加以收集處理，除掩埋完成面應施以最終覆土阻絕廢氣外溢外，掩埋場底部及側面應鋪設不透水布或黏土層阻斷氣體進出之途徑。埋層內因生物分解不斷產生之廢氣應配置橫向之集氣盲溝及縱向往上續接連通外界之排氣井，收集之廢氣可藉設於掩埋完成面上與排氣井銜接之廢氣燃燒設備予以燃燒處理，或外接管線及抽氣裝置回收具高熱值之甲烷；根據 Houshang⁽²⁾ 之研究，在掩埋場內以 60 公尺間距設置抽氣井，並以 0.15 立方公尺/秒的抽氣率抽氣可有效控制廢氣不致飄散到掩埋場附近的環境中。

(三) 沼氣之回收利用

國內對於非掩埋場產生沼氣之回收利用，多

年來已經由經濟部能源委員會及省農林廳等政府單位配合學術研究單位進行研發及推廣，目前許多畜殖場已成功地將動物糞尿厭氣發酵槽所產生的沼氣應用於家庭燃料及發電等用途⁽³⁾。相關研究尚包括了以沼氣作為引擎燃料之腐蝕情形及沼氣純化技術發展⁽⁴⁾。在歐美先進國家，除了畜殖場之沼氣應用已著有成效外，對於掩埋場沼氣之收集及應用研究亦不遺餘力，根據亞洲週刊報導⁽⁵⁾，至1990年止，掩埋場沼氣之應用方式，55%用於發電，23%為鍋爐供熱，13%供燒窯或冶鍊，只有9%直接用於燃燒，從發展趨勢看，發電是主要的應用方向，發電量亦逐年增加。美國、西德及英國等56處衛生掩埋場在1989年之發電總量即已達240兆瓦。

由於衛生掩埋場經厭氧性分解所產生的廢氣，在未經處理的情況下，係屬於低熱值(< 550 BTU / ft³)之瓦斯，約為天然瓦斯熱值之半。欲進一步提昇其熱值，需經過十分複雜之純化處理程序，去除甲烷以外的其他成份，然後以管線輸送供應一般工廠和家庭燃料使用，目前技術上雖已可行，但所需設備之投資成本仍嫌過高，故較不適用於一般掩埋場。利用沼氣發電並不需要繁瑣之處理過程，因此在處理成本較低的情況下，未純化沼氣常被提供作為掩埋場現地發電之能源，沼氣經由燃燒產生熱能後，以各種方式推動發電機產生電力供應發電廠及掩埋場之設備使用，多餘電力則可轉售電力公司。此外，回收之沼氣亦可為化學原料，用於製造氨及甲醇等，或利用廢氣成份中之二氧化碳製成乾冰。

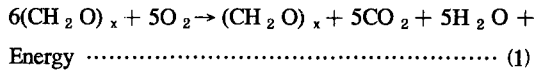
三、沼氣產生之機制及數量

(一)生物分解作用

垃圾在進入掩埋場掩埋之後，微生物的分解代謝作用即開始進行，依其發生之順序可概括分為兩個階段四個時程，各階段中皆分別有其對應之環境條件限制以及最終產物。

1.好氧階段：

初期之生物分解作用係由好氧菌利用埋堆中夾雜之氧氣分解垃圾中一部份有機物產生二氧化碳、水及能量，同時合成細胞質，其過程可以下列化學反應式⁽⁶⁾代表之：



2.厭氧階段：

一旦埋堆中之氧氣被耗用殆盡，垃圾層內即開始進行一連串複雜之厭氧性分解，典型的甲烷產生過程，可分為酸生成階段及甲烷生成階段，其流程可以圖1表示之⁽⁷⁾。為便利甲烷產量的計算，整體厭氧分解之代表性反應通式可以如下之化學計量方程式表之⁽⁸⁾：

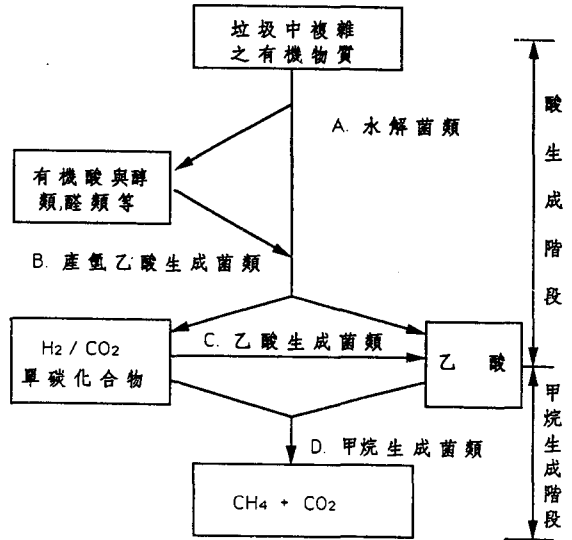
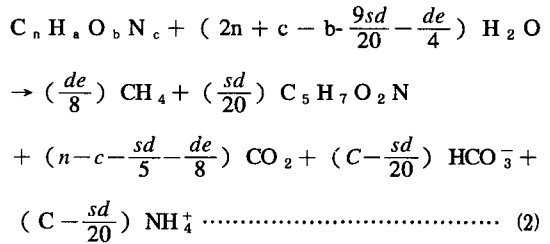


圖 1. 有機物質之厭氧分解流程



其中：C_nH_aO_bN_c 為廢棄物有機質之經驗式

C₅H₇O₂N 為微生物菌體之經驗式

$$d = 4n + a - 2b - 3c$$

s 為 COD 合成微生物菌體之比例

e 為 COD 合成甲烷之比例

$$s + e = 1$$

上述好氧及厭氧型態又可分成四個時程演化分解，典型的氣體變化趨勢可以圖2加以描述⁽⁹⁾：

(1)好氧分解期：

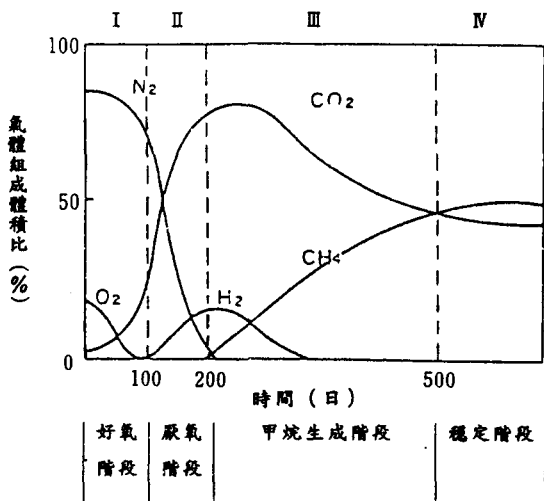


圖 2. 垃圾掩埋場中有機物質之分解階段

垃圾在掩埋之初，好氧菌利用埋堆中之氧氣分解有機物，產生二氧化碳及水，釋出之熱能使埋堆溫度迅速提高到 35°C 至 40°C 之間，部份溶於水之二氧化碳則造成 pH 值降低，歷時約數天至數週。

(2) 酸性醱酵期：

在無氧的環境下，酸生成菌 (Acid-forming bacteria) 開始分解長鏈有機物生成短鏈的有機酸，並產生大量二氧化碳及少量氫氣，二氧化碳及有機酸則導致 pH 值降的更低，歷時約 1 至 2 個月。

(3) 甲烷初生期：

此時掩埋體內之溫度逐漸上升，由烷生成菌 (Methane-forming bacteria) 開始緩慢分解有機酸成爲甲烷及二氧化碳，此時期之二氧化碳生成量要較前期少，pH 值回復至中性範圍，歷時約 1 至 2 年。

(4) 甲烷穩定期：

此階段甲烷與二氧化碳的生成達穩定狀態，甲烷約佔氣體總體積之 55%，二氧化碳則佔 45%，二氧化碳則佔 45%，此時期可持續數十年之久。

(二) 影響生物分解之因素

受環境條件及操作管理等因素影響，垃圾經生物分解產生最終產物之穩定化過程充滿變數。

較重要之影響因子有下列數點⁽⁸⁾：

1. 垃圾成分及前處理程序：垃圾中含高比例之可分解有機物質並加以磨碎處理時，會提高甲烷的最終產量及產氣速率。

2. 含水率：當垃圾層之含水率介於 60% 至 80% (濕重) 之範圍時，最利於提高甲烷產量及產氣速率。

3. 溫度：溫暖環境有助於甲烷產生，根據 Kenneth et al.⁽¹⁰⁾ 研究指出，垃圾掩埋層之溫度在 41°C 時爲最佳產氣狀況。但當溫度提高至 48 ~ 55°C 則有停止產氣之情形發生。

4. pH 值：pH 值介於 6.5 ~ 8.0 之間有助於甲烷的產生，降至 6.0 以下則對甲烷生成菌具抑制性。

5. 有毒物質之影響：對厭氧處理程序具有毒性之物質計有重金屬、鹼土金屬、氨及氧氣等，引起危害之濃度則隨 pH 值、溫度、微生物之馴養等變數而異。

(三) 沼氣量之推估^(8,11)

目前已有多種預測沼氣產量的理論方法及經驗公式，後者有其區域性限制，故不列入本文討論；在各種理論方法中，以垃圾中有機碳含量推求沼氣之潛在總量，因簡單易求而廣爲歐美眾多垃圾掩埋場採用爲工程設計基準。在每莫耳之甲烷及二氧化碳混合氣體係由 1 莫耳之有機碳轉化所之基本假設下，其計算過程可以下式表之：

$$C_t = 1000 \times C' \div 12 \times C'' \times M \times 24.5 \dots\dots (3)$$

- 其中：C_t 爲單位重量垃圾之沼氣產量
- C' 爲垃圾中有機碳含量 (%)
- C'' 爲有機碳轉化爲氣體終端產物之比例，通常設定爲 100 %
- M 爲混合氣體中，沼氣所佔之比例 (%)

在具有較完整之垃圾理化分析資料時，亦可應用平衡之化學計量方程式 (Balanced Stoichiometric Equation) (如(2)式)，利用垃圾有機成份經驗式推求甲烷理論濃度及潛在產量；或由物質生物分解度 (Biodegradability of Materials) 之觀點對沼氣潛在產量做較精密之推估，其計算過程可以下列之數學式表之：

$$C_t = k \times k' \times W_t \times P_i \times (1 - M_i) \times V_i \times E_i \dots\dots (4)$$

其中：W_t 爲垃圾總重

- P_i 為垃圾組成 i 所佔之重量比例
- M_i 為垃圾組成 i 之水份含量
- V_i 為垃圾組成 i 含揮發性固體之比例 (乾基)
- E_i 為垃圾組成 i 之揮發性固體可被生物分解之比例
- C_i 為垃圾組成 i 之沼氣產量
- $k = 351 \text{ L} / \text{CH}_4 / \text{Kg}$ 生物可分解 COD
- $k' = 1.5 \text{ Kg COD} / \text{Kg}$ 揮發性固體

則由 n 種垃圾組成所產生之總沼氣量為

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_i \dots\dots\dots (5)$$

四由烷產量隨時間變化之模擬^(8,11)

垃圾掩埋場關閉後，氣體產生量並非一成不變，甲烷產量隨時間消長情形可以一階 (first-order) 反應加以描述，此即 Scholl Canyon 動力模式 (Kinetic model)⁽⁸⁾，模式假設在任一時間，甲烷剩餘產生量之下降率與甲烷剩餘產生量成正比，即

$$-\frac{dL}{dt} = kL \dots\dots\dots (6)$$

其中： t 為時間

L 為在時間 t 後之甲烷剩餘產生量

k 為氣體產生率常數，其值約介於 0.1 至 0.02 之間 (1/年)

將上式積分可得

$$L = L_0 \cdot e^{-kt}$$

$$G = L_0 - L = L_0 (1 - e^{-kt}) \dots\dots\dots (7)$$

其中： L_0 為定量垃圾所產生之甲烷總量 (m^3)

G 為定量垃圾至 t 時間為止所產生之總沼氣量，(m^3)

將 (7) 式代入 (6) 式可得甲烷產生率

$$\frac{dG}{dt} = -\frac{dL}{dt} = KL = K L_0 e^{-kt} \dots\dots\dots (8)$$

若將垃圾掩埋場每一年度之垃圾處理量視為子單元，則上式可改寫為

$$KL = \sum_{i=1}^n r_i k_i L_{0i} e^{-k_i t_i} \dots\dots\dots (9)$$

其中： n 為子單元數目

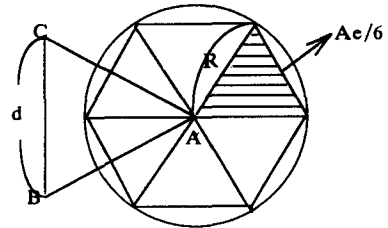
r_i 為各子單元佔總垃圾處理量之比例

t_i 各子單元之產氣時間 (年)

k_i 為各子單元之氣體產生率常數 (1/年)

(五) 沼氣收集井配置

完整的沼氣收集系統包括收集井、收集管及轉接井等，其中，由於收集井之配置方式及數量對沼氣回收利用效益影響較大，故需針對井位配置加以分析，一般而言，主要係根據井之集氣半徑作為配置考量。根據國外眾多掩埋場之實際經驗，有效集氣半徑約為 40~50 公尺，並可依常態配置方式 (連接任三點成等邊三角形，如圖 3 所示) 決定井數：



1. A、B、C 為集氣井位
2. d 為井位間距
3. R 為集氣有效半徑

圖 3. 沼氣收集井常態配置圖

$$N = 0.83 \times At / Ae \dots\dots\dots (10)$$

其中： N 為井數

At 為掩埋面積

Ae 為單井有效集氣面積

根據圖 3 可求得常態配置下，單井之有效集氣面積為

$$Ae = 3R^2 \cos 30^\circ \dots\dots\dots (11)$$

四、研究場址介紹與沼氣量測結果分析

(一) 福德坑垃圾掩埋場簡介

臺北市福德坑垃圾掩埋場為我國首座衛生掩埋場，場址位於台北市東南方，右鄰台北縣深坑鄉，總面積為 98 公頃，其中掩埋面積約 37 公頃。自民國七十四年八月二十九日先行開放供木柵、景美區家戶垃圾進場處理，而後於同年十二月二十六日全面開放處理臺北市之家戶垃圾及無害廢

棄物，目前該掩埋場已於民國八十三年封閉停用。有關福德坑垃圾衛生掩埋場之工程規劃與設計資料如表1所示⁽¹²⁾。

表 1. 福德坑垃圾衛生掩埋場規劃設計資料及廢氣處理方式

掩埋主體工程	垃圾處理量 2700--3400 噸/日 掩埋容積 8000000 立方公尺 阻水設施 HDPE 不透水布 掩埋方法 單體式掩埋
廢氣	設計基本要求 1. 構築方便 2. 不影響垃圾掩埋之正常作業 3. 豎向排氣井必須上通掩埋完成面，下與滲出水收集系統連接，以利沼氣排出。
處理方式	主要工程項目 1. 排氣井：以卵石石籠垃圾掩埋面上噴接。其斷面約為1公尺×1公尺，設置間距為30--50公尺。 2. 水平集氣盲溝：以卵石石籠成，上方覆以不透水布，其斷面約為0.6公尺×0.6公尺，設置方式為由排氣井向各方向伸張並銜接其他排氣井以擴大集氣範圍。 3. 廢氣燃燒設備：設於掩埋完成面排氣井頂部，其設備包括鋼管、火災防護罩壁等。

(二) 甲烷濃度量測結果分析



圖 4. 現場量測位置略圖

根據劉宇等⁽¹³⁾於八十二年九至十一月計四次之現地量測結果（現場量測位置及踏勘量測結果分別如圖4及表2所示），由於該場垃圾在處理過程中，除利用各種機械將垃圾勻鋪且逐層壓實外，並實施每日覆土，故覆蓋在下層之垃圾極易因不通風而形成厭氧環境。由此可預測在大量廢

氣產生的情況下，掩埋層內之壓力甚大且隨深度增加而增加，此點經由未燃燒之排氣井口亦可測出高濃度甲烷，而場中每隔30至50公尺所設立之排氣井多數處於熾烈燃燒狀態而證實。至於未燃燒井多處於場區邊緣地帶，經研判可能係其所處位置垃圾層腹地較小，排氣影響半徑亦相對較小，致其排氣狀況較不穩定而無法長時間持續燃燒。而少數排氣井由燃燒狀態轉變為低甲烷濃度，則可能係該處位置之覆土較薄且因不均勻沈陷產生裂隙，使得空氣得以侵入，造成好氧性之堆肥發酵效果，使甲烷濃度亦隨之減少。踏勘量測結果可證實該場垃圾掩埋層多處於厭氧分解狀態且除部份持續進場掩埋生鮮垃圾之區域外，大多已達甲烷生成穩定階段。

表 2. 甲烷濃度現地量測結果

日期 量測項目 位置	82/9/7	82/9/21	82/10/5	82/11/8	
	甲烷(%)	甲烷(%)	甲烷(%)	甲烷(%)	溫度(℃)
1 號排氣井	55.0	58.0	50.0	45.0	40.0
2 號排氣井	55.0	58.0	35.0	•	-
3 號排氣井	•	•	40.0	40.0	41.0
4 號排氣井	•	•	•	•	-
5 號排氣井	•	•	•	•	-
6 號排氣井	•	•	-	-	-
7 號排氣井	•	•	-	-	-
8 號排氣井	•	•	-	-	-
9 號排氣井	•	•	-	-	-
10 管理處前	1.0	1.5	1.0	1.0	-
11 號排氣井	•	•	•	•	-
12 號排氣井	•	•	60.0	65.0	43.0
13 號排氣井	•	•	•	•	-

註：1. •代表燃燒。

2. 6, 7, 8, 9 號排氣井於82年10月初因新進場垃圾堆積而被推平，故10月份以後無量測資料。

3. 甲烷濃度係以礦物局R7型甲烷量測儀現場唧氣量測，燃燒中之排氣井無法進行量測。

五、甲烷產量預測及其經濟效益評估

(一) 甲烷潛在產量預測

根據前述介紹之理論公式配合臺北市垃圾成份分析及福德坑掩埋場垃圾處理量可推估甲烷可

能產生之潛在總量。在垃圾理化成份分析方面，本研究參考楊萬發等⁽¹⁴⁾對臺北市垃圾之取樣分析結果作為計算單位重量垃圾甲烷潛在產量之依據。另根據行政院環境保護署“八十一年度台灣地區市鄉鎮垃圾水肥清理狀況調查資料彙編”⁽¹⁵⁾可得七十四至八十一年度台北市垃圾清運處理情形之詳細資料，其中掩埋部份即為福德坑掩埋場之處理量，八十二年度至原先預計封閉期限（即八十三年四月）時之處理量，因考慮內湖焚化廠之處理能量增加，故以八十一年度之處理量為估計量。

1. 由垃圾之總有機碳含量推求

根據臺北市垃圾取樣分析結果⁽¹⁴⁾，化學組成中有機碳之含量佔 21.58%，另依據實地量測結果假設廢氣中甲烷濃度為 60%，代入（4）式中可計算出單位重量垃圾在有機碳轉化為氣體終端產物之比例為 90% 的情況下，甲烷潛在產量為：

$$(1000 \times 21.58\% / 12) \times 90\% \times 60\% \times 24.5 = 237.92 \text{ (公升/公斤濕基垃圾)}$$

在求得每公斤溼基垃圾之甲烷產量後，乘以歷年來福德坑掩埋場之處理量，即可求得沼氣之潛在總產量約 1.91×10^9 立方公尺。

2. 由化學平衡方程式估算

代表垃圾組成之經驗式可由垃圾成份分析依原子數比求得，其中，考慮硫、氯之含量極少，對甲烷及二氧化碳生成影響較小而予以略去，則由原子數比可得

$$C : H : O : N = 21.58 / 12 : 3.38 / 1 : 15.25 / 16 : 0.85 / 14 = 30 : 56 : 16 : 1$$

故代表垃圾之化學經驗式可表為： $C_{30}H_{56}O_{16}N$ 分子量為 686，代入（2）式並假設垃圾 COD 轉化為甲烷之比例為 96%，則每莫耳垃圾可分別產生甲烷 16.92 莫耳及二氧化碳 10.95 莫耳，甲烷佔產生氣體總量比例為：

$$16.92 / (16.92 + 10.95) = 0.607 = 60.7\%$$

與實際量測結果極為接近。據此可推估每公斤濕基垃圾（C、H、O、N 所佔重量比為 41.06%）在常溫常壓下所產生之甲烷體積為：

$$[(1000 \times 41.06\%) / 686] \times 16.92 \times 24.5 = 248.12 \text{ (公升/公斤濕基垃圾)}$$

則福德坑掩埋場之甲烷潛在總產量可達約 1.99×10^9 立方公尺。

3. 以物質生物分解度推求

依據垃圾物理組成，將垃圾有機成份區分為廚餘等六類（如表 3 所示），在國內缺乏完整相關資料的情況下，本研究參考 Emcon Associates⁽¹⁰⁾對垃圾成份中揮發性固體含量及揮發性固體可被生物分解比例所作之假設（見表 3 第 3、4 兩欄），則可利用（5）式求得每單項垃圾成份之沼氣產量（列於表 3 第 5 欄），將各單項相加後可得每公斤濕基垃圾之甲烷產量為 47.58 公升，另可估算出福德坑掩埋場之甲烷潛在總產量約為 4.31×10^8 立方公尺。

比較前述兩種方法所求得之結果，此法所求得之甲烷潛在產量明顯短少，推究其原因，應為揮發性固體可被生物分解度之假設值較保守，造成甲烷產量較低。以纖維素為例，根據國內李郁宜⁽¹⁶⁾之實驗研究指出，在利於甲烷生成菌作用的理想環境下，其分解率可達有機質之 94% 以上，明顯高於 Emcon Associates⁽⁸⁾之假設值。雖然如此，此法在較具有理論基礎下，仍可作為一較保守之產氣估算方式。

表 3. 垃圾成份以物質生物分解度推求甲烷產量計算表

垃圾成分 (有機部份)	物理組成 (乾基) (%)	揮發性固 體含量 (%)	揮發性固體可 被生物分解之 比例(%)	甲烷產量 (L/kg濕基垃圾)
厨餘類	16.38	60	50	25.87
稻草、落葉類	2.975	70	35	3.84
紙類	16.38	85	20	14.66
纖維、布類	3.32	94	5	0.82
皮革、塑膠/橡膠類	18.44	95	2	1.84
木竹類	2.975	70	5	0.55

合計 47.58L/CH₄/Kg 濕基垃圾

(二) 沼氣回收利用經濟效益評估

1. 甲烷可回收數量分析

鑑於一般掩埋場垃圾埋層無法達到理論上理

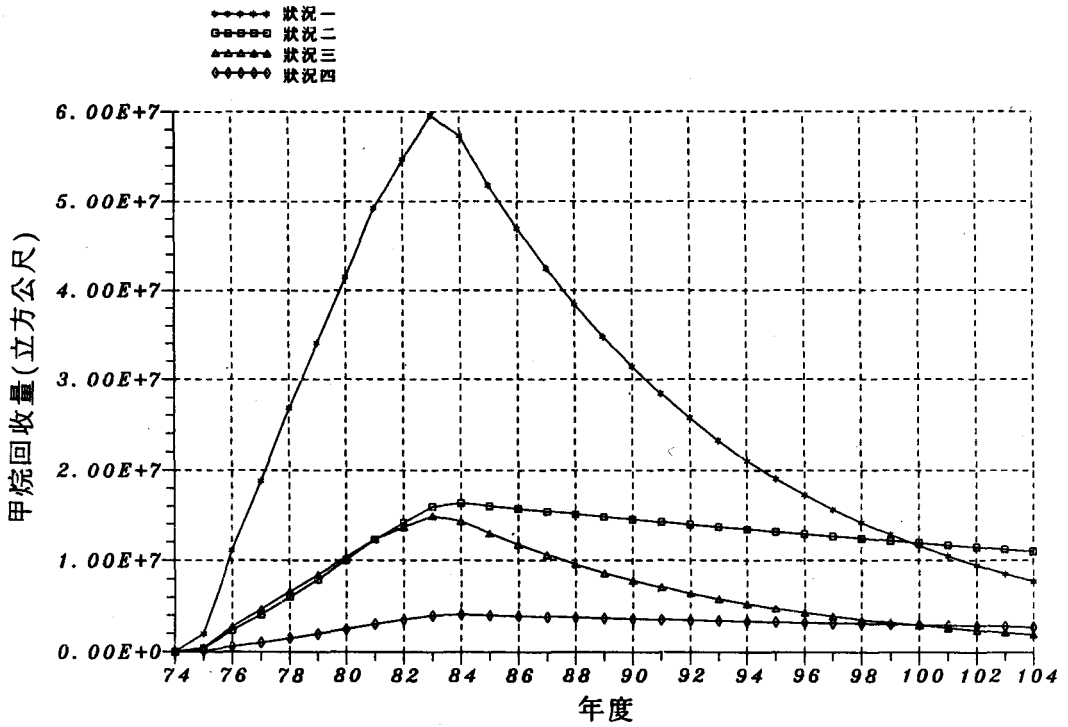


圖 5. 福德坑掩埋場甲烷回收量隨時間變化模擬情形

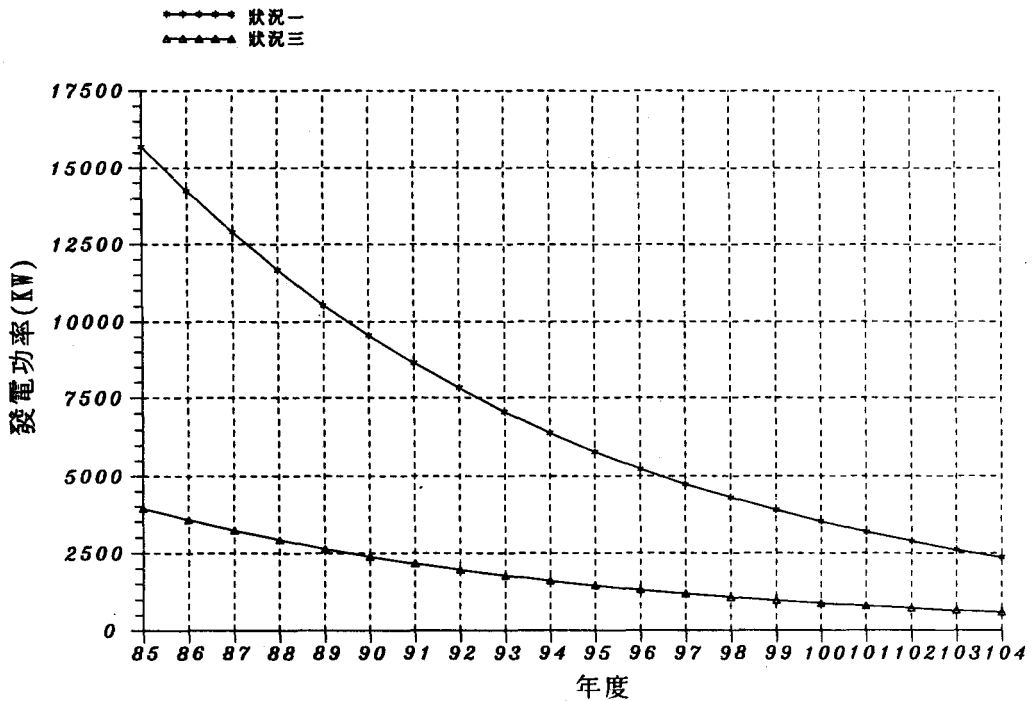


圖 6. 福德坑掩埋場甲烷熱值發電輸出功率逐年變化情形

表 4. 甲烷收回量隨時間變化模擬計算結果

年 代	垃圾處 理量(噸)	甲烷收回量(立方公尺/年)			
		狀況一	狀況二	狀況三	狀況四
74	212500.0	0.0	0.0	0.0	0.0
75	981850.0	2007038.0	417622.3	501709.0	104395.1
76	933670.0	11089510.0	2338965.0	2772097.0	584682.3
77	1035048.0	18852610.0	4127575.0	4712677.0	1031790.0
78	1129675.0	26834460.0	6080004.0	6707938.0	1519848.0
79	1239175.0	34033460.0	7988933.0	8507510.0	1997032.0
80	1074210.0	41464400.0	10050870.0	10365060.0	2512465.0
81	1071275.0	49222410.0	12287180.0	12304360.0	3071485.0
82	352200.0	54684070.0	14155000.0	13669640.0	3538394.0
83		59598260.0	15980070.0	14898070.0	3994615.0
84		57253230.0	16355820.0	14311860.0	4088542.0
85		51804870.0	16031950.0	12949910.0	4007584.0
86		46874980.0	15714500.0	11717560.0	3928228.0
87		42414240.0	15403330.0	10602490.0	3850444.0
88		38377990.0	15098320.0	9593530.0	3774200.0
89		34725840.0	14799350.0	8680585.0	3699466.0
90		31421240.0	14506310.0	7854518.0	3626211.0
91		28431110.0	14219060.0	7107063.0	3554408.0
92		25725530.0	13937510.0	6430736.0	3484026.0
93		23277430.0	13661530.0	5818771.0	3415038.0
94		21062290.0	13391010.0	5265041.0	3347415.0
95		19057940.0	13125850.0	4764006.0	3281132.0
96		17244340.0	12865940.0	4310651.0	3216161.0
97		15603330.0	12611180.0	3900438.0	3152477.0
98		14118470.0	12361460.0	3529263.0	3090054.0
99		12774920.0	12116690.0	3193409.0	3028867.0
100		11559230.0	11876760.0	2889516.0	2968891.0
101		10459220.0	11641580.0	2614542.0	2910103.0
102		9463895.0	11411070.0	2365736.0	2852479.0
103		8563286.0	11185110.0	2140606.0	2795996.0
104		7748383.0	10963630.0	1936900.0	2740632.0

想的厭氧分解狀態，加以實際收集時受到各種工程技術限制，無法將所有掩埋場產生之沼氣完全回收。因此，若以理論方法所得之潛在產量直接作為計算甲烷產值之依據將有高估之嫌，以美國許多掩埋場的操作經驗顯示在 60 ± 30 （公升/公斤濕基垃圾）的範圍內為合理的甲烷可回收數量⁽⁸⁾；而德國的經驗則指出，實際收集之氣體量（含甲烷及二氧化碳等）約為實驗室氣體產量（溫度 40°C ）時，理想厭氧分解狀態約可產生 300 （立方公尺/噸垃圾）之氣體之 $11 \sim 39\%$ ⁽¹⁷⁾。據此可推算甲烷可回收量約在 $19.8 \sim 70.2$ 公升/公斤濕基垃圾之間。根據上述經驗觀點，物質生物分解度推求法所得之甲烷潛在產量（ 47.58 公升/公斤濕基垃圾）雖然較低，似乎頗符合實際之甲烷可回收數量。但若將其乘以可回收數量百分比範圍（假設為 $10 \sim 40\%$ ），則可回收之甲烷數量約在 $4.76 \sim 19.03$ 公升/公斤濕基垃圾之間，以臺灣地區高溫多雨之氣候環境及垃圾含大量廚餘水份之條件下，此範圍值明顯較歐美溫帶國家偏低，此與該法將有機質可被分解成氣體之比例假設過低有關，因此以該法所推得之潛在產量當作可回收量較為適當。而將化學計量方程式所估算求得之甲烷潛在產量乘以可回收數量的百分比範圍，則其可回收之甲烷量範圍為 $24.81 \sim 99.25$ 公升/公斤濕基垃圾，與前述歐美國家許多掩埋場的操作經驗值極為接近。在缺乏掩埋場實際產氣量測資料之情況下，本文擬就化學計量方程式所求得之可回收甲烷產氣範圍，模擬甲烷實際回收量隨時間變化之關係，配合沼氣回收發電所需之各項成本支出，包括沼氣收集系統成本及發電成本，可對沼氣回收利用經濟效益加以分析評估。

2. 甲烷產量隨時間變化之模擬

根據化學平衡方程式估算之甲烷可回收數量範圍配合福德坑掩埋場之垃圾處理量，代入（8）式中即可模擬掩埋場逐年之甲烷回收量變化情形。以回收量之可能上下限配合氣體產生率常數之極限（即 $k = 0.1$ 與 $k = 0.02$ ），組合成四種狀況加以模擬（狀況一、二為上限回收量對應 $k = 0.1$ 與 $K = 0.02$ ；狀況三、四為下限回收量對應 $k = 0.1$ 與 $K = 0.02$ ），而考慮產氣能持續達數十年之

久，故將模擬期限定為 30 年。

根據模擬計算結果（見表 4），可以圖形表示狀況一至狀況四之年度產氣模擬情形（見圖 5），由各圖中可看出產氣量均於八十四年度達到高峰，其中，較高的 K 值代表生物分解之衰減率較大，短時期內有較多的垃圾有機質被分解產生氣體（狀況一、三）；在 k 值相同的條件下則有相同的變化趨勢。若從垃圾性質分析⁽¹⁴⁾來看，福德坑掩埋場所處理的垃圾不僅含水量高，且含大量廚餘，加以地處亞熱帶氣候區，全年高溫多雨，經實測結果得知，排氣井內溫度在地表面處達 40°C 以上，則埋層之溫度應高於此值。垃圾層中之有機物質在含量豐富且溫度、濕度皆高的條件下，不僅潛在產量大，其分解速率亦十分迅速（代表氣體產生率常數亦將偏高），故甲烷可回收量隨時間變化之模擬，應以狀況一之變化趨勢較符合實際情形，唯為保守估計經濟效益起見，狀況三亦列入以下之計算分析。

3. 發電成本及經濟效益分析

由於國內尚無掩埋場大規模現地發電之實例，而國外資料引用並不客觀準確之情況下，可就以往國內學界⁽³⁾及工程顧問股份有限公司⁽¹⁸⁾對沼氣收集系統成本及發電成本分析之資料加以修正應用：

(1) 沼氣收集系統成本分析：

利用式 10 及式 11，將福德坑掩埋面積 $370,000$ 平方公尺代入可得收集井數為 71 集，假設平均井深 20 公尺，則各項成本項目大致如下：

① 鑽井及回填材料（設每公尺成本 2500 元）

$$71 \times 20 \times 2500 = 3,550,000 \text{ 元}$$

② 抽氣井襯套（設每公尺成本 500 元）

$$71 \times 20 \times 500 = 710,000 \text{ 元}$$

③ 地面配管及井頭 = 5,000,000 元

④ 監測用壓力儀表（每個井位 5000 元）

$$71 \times 5000 = 355,000 \text{ 元}$$

⑤ 其他

包括勞工、整地、器材租賃等支出設為以上成本之 15%

$$= 1,442,250 \text{ 元}$$

各項臨時費用及保險費用設為前項之 15%

$$= 216,340 \text{ 元}$$

表 5. 福德坑掩埋場甲烷熱值逐年發電輸出功率計算表

計算 依據 年 度	狀 況 一		狀 況 三	
	甲烷產量 (m ³ /hr)	甲烷熱值發 電輸出功率 (kw)	甲烷產量 (m ³ /hr)	甲烷熱值發 電輸出功率 (kw)
85	5555.0	15696.4	1388.6	3923.7
86	5040.1	14241.6	1259.9	3560.1
87	4560.5	12886.4	1140.0	3221.3
88	4126.5	11660.1	1031.5	2914.7
89	3723.6	10521.6	930.8	2630.1
90	3378.5	9546.5	844.5	2386.4
91	3057.0	8638.0	764.2	2159.3
92	2766.1	7816.0	691.4	1953.8
93	2496.0	7052.9	623.9	1763.0
94	2264.7	6399.2	566.1	1599.6
95	2049.2	5790.2	512.2	1447.4
96	1854.2	5239.2	463.5	1309.7
97	1673.1	4727.7	418.2	1181.8
98	1518.1	4289.5	379.5	1072.3
99	1373.6	3881.3	343.4	970.2
100	1242.9	3511.9	310.7	877.9
101	1121.5	3169.1	280.4	792.2
102	1017.6	2875.3	254.4	718.8
103	920.7	2601.7	230.2	650.4
104	833.1	2354.1	208.3	588.5

將產生的廢氣回收利用，在公害防治及能源回收能同時兼顧的情況下，將可減輕民眾對掩埋場設置之疑慮，加以近年來電力供應持續吃緊，導致工商業各界常面臨限電危機，若能於各都市週邊之衛生掩埋場構建現地發電系統，不僅該類系統已普及於先進國家，可減少技術上之風險，且可紓解國內部份電力需求。

七、謝 誌

本研究承蒙臺北市七星農田水利研究發展基金會經費補助，使得本研究得以順利完成，謹在此表示最深之謝意。

八、參考文獻

1. Foppe, B.D., S.K. Edward, Chain M. ASCE and Edward Hammerberg "Gas Production From Solid Waste in Landfills", Journal of the Environmental Engineering Division ASCE, pp415-433, 1978.
2. Houshand, E., "Control of Gas Flow From Sanitary Landfills", Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 1975.
3. 羅煌木, "臺中市垃圾衛生掩埋場沼氣含量估算及其回收利用可行性研究", 私立逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文, 民國八十一年。
4. 工研院能源與資源研究所, "垃圾滲出水處理及水肥處理廠之再利用及建立沼氣監測系統之研究", 行政院環境保護署, 民國八十年。
5. 亞洲週刊新知專欄, 第四卷, 第三十四期, 第48頁, 1990.
6. 王繼國, "垃圾衛生掩埋之方法", 垃圾衛生掩埋技術研討會專輯, 高雄市, 民國七十二二年。
7. Zeikus, J.G., "Microbial Intermediary Metabolism in Anaerobic Digestion", in Anaerobic Digestion(Eds), D. E. Hughes, et al., Elsevier Biochem. Process, 1982.
8. Emcon Associates, "Methane Generation and Recovery from Landfills", Ann Arbor Science Publishers Inc., Ann Arbor, Michigan, 1980.
9. Tchobanoglous G., H. Theisen and R. Eliassen, "Gases in Landfills", Solid Waste, McGraw-Hill, pp. 32 7-330, 1977.
10. Kenneth, E.H., P.E. Klink and R.K. Ham, "Temperature Effects: Methane Generation From Landfill Samples", Journal of the Environmental Engineering Division ASCE, 1982.
11. Crawford, J.F. and P.G. Smith, "Landfill Technology", Butter-worths, 1985.
12. "福德坑垃圾衛生掩埋場簡介", 臺北市政府環境保護局, 民國七十九年。
13. 劉振宇等, "垃圾掩埋場安全復育之先期研究", 財團法人臺北市七星農業發展基金會, 民國八十二年。
14. 楊萬發等, "臺北市垃圾焚化廠工程計畫第七

表 6. 福德坑掩埋場甲烷熱值發電回收金額計算表

計算 依據	狀 況 一			狀 況 三		
	甲烷熱值發 電量 (kwh/year)	甲烷熱值發 電回收金額 (元/年)	發電逐年 累積金額 (元)	甲烷熱值發 電量 (kwh/year)	甲烷熱值發 電回收金額 (元/年)	發電逐年 累積金額 (元)
85	146382622	292765243	292765243	36591967	73183935	73183935
86	132452473	264904946	557670190	33109781	66219563	139403497
87	119847954	239695907	797366097	29958969	59917938	199321435
88	108442913	216885826	1014251923	27107996	54215992	253537427
89	98123205	196246410	1210498333	24528329	49056658	302594086
90	88785547	177571095	1388069428	22194150	44388300	346982385
91	80336485	160672971	1548742398	20082097	40164195	387146580
92	72691458	145382916	1694125314	18171033	36342066	423488646
93	65773951	131547902	1825673216	16441831	32883661	456372307
94	59514732	119029464	1944702680	14877184	29754367	486126674
95	53851156	107702312	2052404992	13461432	26922865	513049539
96	48726541	97453082	2149858074	12180408	24360815	537410354
97	44089598	88179195	2238037269	11021289	22042577	559452932
98	39893918	79787835	2317825104	9972474	19944949	579397880
99	36097509	72195019	2390020123	9023468	18046936	597444816
100	32662377	65324754	2455344877	8164771	16329543	613774359
101	29554141	59108282	2514453159	7387791	14775581	628549940
102	26741692	53483385	2567936544	6684749	13369499	641919439
103	24196884	48393768	2616330312	6048611	12097223	654016661
104	21894246	43788492	2660118804	5473010	10946020	664962681

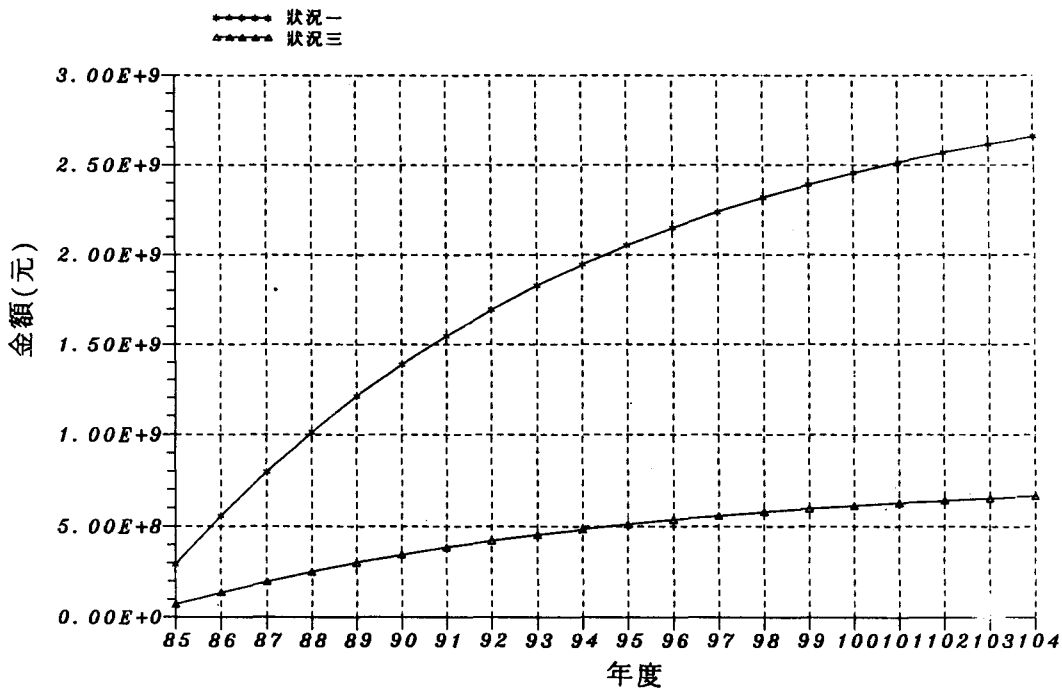


圖 7. 福德坑掩埋場甲烷熱值發電累計回收金額逐年變化情形

- 年垃圾取樣分析”，國立臺灣大學環境工程學研究所，民國七十五年。
15. “八十一年度臺灣地區市鄉鎮垃圾水肥清理狀況調查資料彙編”，行政院環境保護署。
16. 李郁宜，“提高掩埋垃圾穩定速率之基礎研究”，國立成功大學環境工程學研究所碩士論文，民國七十五年。
17. Ham, R.K., "Variables Affecting Methane Generation in Land-fill Samples", Proceedings of Symposium, Gas and Wasser-haushalt von Muldeponierung. University of Braunschweig, West Germany, 1982.
18. 蕭文起，潘一誠，“垃圾衛生掩埋場廢氣收集與利用”，環境工程會刊，第三卷第四期，19至40頁，民國八十一年。
19. 經濟部工業局，“產業汙染及能源消耗量之調查與評估—粗紙業”，民國八十一年。

收稿日期：民國 83 年 12 月 20 日

修正日期：民國 84 年 5 月 24 日

接受日期：民國 84 年 5 月 27 日