

垃圾衛生掩埋場沼氣處理發電

吳瑞威*、張詔斌**

摘要

我們為一缺乏天然能源之國家，而垃圾掩埋場沼氣卻任其飄逸至大氣，除造成空氣污染外，亦為一資源之浪費；在台灣地區，最主要之甲烷排放源為垃圾衛生掩埋場，這些掩埋場分屬各地方主管機關所管轄，因此政府機關應以主動積極負責的作為，進行垃圾衛生掩埋場沼氣資源化再利用的開發－執行沼氣處理發電計畫；因為，藉由處理再利用掩埋場沼氣中之甲烷並將其資源化應用發電，不僅減少了溫室效應氣體的排放並可爭取更多的緩衝時間，以及早因應與縝密的規劃調整能源結構與產業政策，降低了經濟的衝擊，提昇國際競爭力，更可進一步紓解國際環保貿易制裁的壓力；同時亦能有效率地完成沼氣污染防治工作並將其資源化再利用，更進一步產生符合環保之綠色能源（Green Energy）。

【關鍵字】

- 1.綠色能源(green energy)
- 2.綠色能源費率(green pricing programs)

*再生能源開發業者總經理

**再生能源開發業者經理

根據氣候變遷跨國委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 研究報告指出甲烷之溫室效應為二氧化碳之 24.5 倍，如以 20 年時間直接影響評估甲烷之溫室效應為二氧化碳之 56 倍。而垃圾衛生掩埋場沼氣處理再利用－附屬應用發電不僅為新能源開發的表率，更是廢棄物資源化再利用的典型代表。溫室效應為全球關注之環境問題，有關管制溫室氣體排放之京都議定書已於八十六年十二月十一日獲聯合國氣候變化綱要公約第三屆締約國大會決議通過，表示全世界應採具體之限制行動來限制二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氟碳化合物、全氟碳化合物、六氟化硫等六種溫室氣體的排放，並須將所有溫室氣體排放量轉換成總二氧化碳相當排放量。

而英、美、澳暨歐洲共同體等國家，為因應聯合國氣候變化綱要公約制定關於溫室效應氣體排放減量的管制措施，皆全力輔導發展：太陽能、水力、風力、地熱、潮汐、溫差及生質能(如垃圾衛生掩埋場沼氣)等發電之再生能源工業；以達到能源來源多樣化、降低對石化燃料的依賴，並減少溫室效應氣體排放。一般垃圾掩埋場的沼氣污染防治工作執行方式為設置沼氣抽取系統，將沼氣收集燃燒處理，雖然投注了相關工程設備費用，卻未規劃將沼氣資源化再利用，殊屬可惜；因此歐美等國以經濟誘因的循導下，將沼氣污染防治與廢棄物資源化再利用的觀念及技術結合應用，使垃圾衛生掩埋場沼氣處理發電兼具高可行性、污染防治控制、環境品質改善、提供新能源、降低社會投資成本、提高回收經濟效益等多重優點。換言之，執行垃圾衛生掩埋場沼氣處理發電乃一廢棄物資源化再利用典型成功模式。

一、前　　言

基於法令限制及相關優惠鼓勵措施之經濟誘因循導下，全美迄 1999 為止有 270 個垃圾掩埋場進行沼氣資源化再利用之計畫，預估未來將超過 1,300 個計畫執行，其沼氣處理發電迄 1999 年為止，發電容量已超過 200MW，而其未來沼氣處理發電潛力將高達 6,000MW。

英國電業法 (Electricity Act, 1989) 於 1989 年已經規定 12 家民營電力公司須使用部份非石化燃料的電力，而由政府秘書室訂定 Non-Fossil Fuel Obligation (非

石化燃料義務，簡稱 NFFO)規範上述民營電力公司須購買一定量之再生能源電力，西元 2000 年再生能源電力為 1,500MW，可提供全英國 3% 的用電，預估至西元 2010 年可提供全國 10% 用電，至西元 2020 年可提供全英國 20% 用電。英國目前已實施至第 5 階段 NFFO - 5，至 1998 年為止，垃圾衛生掩埋場沼氣處理發電量為 170MW，預估未來可達 840MW。

澳洲目前有 14 處垃圾衛生掩埋場正進行沼氣處理發電計畫，迄 1998 年為止，發電容量為 80MW，而未來規劃沼氣處理發電容量將達 200MW。

德國目前的沼氣發電容量亦高達 210MW。

再生能源所提供的能源效益，1995 年於歐洲國家約為 2% 的石化燃料替代品，至西元 2005 年則可提供相當於 75 百萬噸石化燃料，歐美國家為充分發揮再生能源的經濟效益，並因應聯合國氣候變化綱要公約所訂定相關公約的要求，歐美國家皆有再生能源的獎勵補助方式；其獎勵補助的方式為法令規範需向再生能源業者購買電力、租稅減免優惠、合理利潤之購電費率、硬體投資設備補助、發電量津貼補助、長期購電售電合約、低利融資貸款、專案計畫之推廣及隨物價指數調整之綠色能源費率(Green Pricing Programs)等。尤其歐洲共同體會員國，將藉由上述經濟誘因的輔助而大幅提昇再生能源的應用，預估至西元 2010 年再生能源將可提供 OECD 各國 12% 的能源需求。

二、垃圾衛生掩埋場沼氣處理發電對社會之貢獻

在台灣地區，最主要之甲烷排放源為垃圾衛生掩埋場，這些掩埋場分屬各地方主管機關所管轄，因此政府機關應以主動積極負責的作為，進行垃圾衛生掩埋場沼氣資源化再利用的開發－執行沼氣處理發電計畫；因為，藉由處理再利用掩埋場沼氣中之甲烷並將其資源化應用發電，不僅減少了溫室效應氣體的排放並可爭取更多的緩衝時間，以及早因應與縝密的規劃調整能源結構與產業政策，降低了經濟的衝擊，提昇國際競爭力，更可進一步紓解國際環保貿易制裁的壓力；同時亦能有效率地完成沼氣污染防治工作並將其資源化再利用，更進一步產生符合環保之綠色能源 (Green Energy)。

國外成功經驗的介紹，提供一個極佳的思考方向，而藉由垃圾衛生掩埋場沼氣資源化再利用發電，它對社會經濟及環保的貢獻如下：

- 具體執行溫室效應氣體甲烷排放減量－垃圾衛生掩埋場沼氣處理發電計畫，將可節省政府投資鉅額的社會經濟成本，進行甲烷污染排放減量控制工作，這是一個高效益的環保建設計畫；
- 配合國家能源政策的執行，使能源來源多樣化並減少對石化燃料的依賴性，落實能源技術的開發應用；
- 減少臭味困擾、提高住家生活品質；
- 降低 VOCs 的危害，維護居民健康；
- 防止掩埋場沼氣悶燒、空氣品質改善；
- 國際地位提昇、紓解國際環保壓力；
- 縮短掩埋場復育時程、增加居民可活動空間、提高土地利用價值；
- 技術移轉中華民國；
- 加強環保教育之推廣，提昇環保局之形象；
- 沼氣回收再利用發電，提供電力紓解電力公司電力不足的問題，更進一步可產生符合環保之綠色能源（Green Energy）。

歐、美、日、澳等環保先進國家近十餘年以來，不僅積極獎勵民間投資掩埋場沼氣處理發電事業，更修法規定新設立之垃圾衛生掩埋場，必須將日後處理沼氣所需之管線先行設置，供沼氣處理業者於掩埋場封閉後進場使用，如此做法不僅節省完成沼氣處理工作期程，同時亦降低沼氣業者之初設費用，更具鼓勵民間投資業者參與意願，相對地，掩埋場之最終土地使用規劃亦隨積極處理沼氣而提前完成。

三、沼氣之處理技術

垃圾衛生掩埋場沼氣處理再利用之先決條件為需設置高效率沼氣收集系統，故系統應採用機械抽氣方式，以提高沼氣收集效果。掩埋場沼氣收集設備通常包括：掩埋層內橫向及垂直沼氣收集管線、水份阻絕設施，真空抽氣泵浦裝置及沼氣處理再利用設備等。一般沼氣收集系統設置成本甚高，操作及維護成本也較高，因此適

用於沼氣產量豐沛之大型掩埋場。成功的沼氣收集處理計劃須依掩埋場場址條件、沼氣產量、甲烷含量、市場需求性、技術及經濟可行性、相關法規限制等因素通盤考量。而一般沼氣收集再利用方式可分成下列數種：

1. 轉換成一般性瓦斯燃料

需經較嚴格之處理程序，包括除水份、除臭、除雜質、濃縮甲烷含量、氣體壓縮等程序，以達一般使用瓦斯規定標準。其供應對象為一般工廠及家庭，處理費用與市場需求性為此種沼氣利用之重要考慮因素。

2. 沼氣引擎發電系統（Reciprocating Internal Combustion Engine）

沼氣引擎發電，基本上將沼氣處理過後經由內燃機燃燒所生之動力推動發電機而產生電力。且可提供部份熱能使用。引擎所用之沼氣一定需根據引擎種類及特性作用前處理後方可使用，因氯氣及硫化物會對大部份引擎造成損害，沼氣引擎發電通常用於沼氣產量穩定的掩埋場，近來由於不斷的研發及技術的改良，再配合應用特殊引擎潤滑油，在國外它已成為最普遍應用可行的發電引擎系統，不僅投資金額較低，且經實際操作經驗證明，於沼氣產量低的掩埋場，它亦有極高使用可靠率；它的另一優點為可應用於大、小型垃圾衛生掩埋場沼氣處理發電。

3. 產生蒸氣及發電

高溫沼氣可點火燃燒後，利用其發熱量使水產生高溫、高壓蒸氣，此蒸氣可供鄰近住戶或工廠使用。高壓蒸氣亦可利用汽電共生方式生產電力供場區使用或售給電力公司。此類設備較適用於大型的掩埋場，利用蒸氣發電的汽電共生系統有兩種方式：

- (1) 以高壓蒸氣推動渦輪發電 (Steam Turbine)，但較少運用於掩埋場沼氣利用。因台灣地區垃圾衛生掩埋場是屬於較小規模，而高壓蒸氣渦輪發電需較高的投資金額，因此對台灣地區沼氣處理發電應用而言並不適當。
- (2) 以高壓蒸氣推動蒸氣引擎 (Steam Engine) 再轉接發電，其效率較低，噪音稍高，為一傳統性技術。蒸汽引擎適用於沼氣產量不甚穩定或廠內需要用到蒸氣等情況下的掩埋場，而相較於沼氣引擎發電系統，它的可靠性較低。

四、垃圾衛生掩埋場沼氣處理發電系統簡介

垃圾衛生掩埋場中沼氣生成之相關因素牽涉甚廣，包括生活垃圾成份空氣濕度、溫度、掩埋場深度、最終覆土……等，其過程為一系列極複雜之化學反應。綜言之這些反應均由垃圾中之微生物、細菌與垃圾之有機物質發生化學反應後產生甲烷與二氧化碳之混合氣體－沼氣。

掩埋場所生成之沼氣主要的成份為甲烷、二氧化碳及少量其他物質（如水蒸氣、一氧化碳、硫化氫、氮……等）。其產生並非垃圾掩埋後一開始就有沼氣產生，而是經過喜氣、厭氣、沼氣生成、穩定等四個階段的極複雜分解過程。

由於沼氣中約含有 50%的甲烷及 50%的二氧化碳，其熱值約在 5,000Kcal/M³ 以上，屬中熱值 (Medium Heat Value) 的氣體。依據國內現行使用沼氣處理再利用的情況，限於沼氣產量的規模，一般沼氣合乎經濟效益的處理方式乃將其資源化後應用於發電之用途，而掩埋場中沼氣生成可持續達 15~30 年之久，其沼氣產量須視垃圾組成成份、可分解的有機物含量、時間、天候狀況……等因素而定。

而沼氣處理再利用系統的規劃設計須考量到以下幾點因素：

- 最終覆土狀況。
- 掩埋場沼氣之產量。
- 掩埋場內部之沼氣壓力分佈情形。
- 減少空氣的吸入以增加沼氣（甲烷）之濃度。
- 各系統設備可長期使用及可移動裝卸式的。
- 各系統之操作單元可活動裝卸。
- 在掩埋作業運作期亦可執行，以達沼氣處理及資源化再利用之功效。
- 沼氣抽取系統要配合沼氣產量設計。
- 設置緊急應變之沼氣處理設施，如燃燒裝置等。
- 考量安全因素，皆採用防爆設施，並在適當距離設爆炸氣體濃度偵測器。
- 多功能型之安全偵側系統及全程電腦監控系統。

基於收集系統需能迅速有效地收集沼氣，以利植生綠化及資源回收再利用之原則，所設計之沼氣收集方式採取主動集氣方式，即使用鼓風機主動抽氣，使沼氣井

內產生低壓真空區，沼氣自沼氣井之多孔管流入，在有效控制之下，排入沼氣井中，而由幾個沼氣井匯成一個沼氣收集站，再由此沼氣收集站將沼氣輸往沼氣處理系統進行處理再利用。

沼氣處理發電系統，包括了沼氣井、沼氣收集站、濃縮分離槽、鼓風機組、過濾純化處理及沼氣引擎發電機組等，整個沼氣自抽取區至引擎燃燒室，皆由高密度聚乙烯管（HDPE）輸送，無滲漏之慮。有關各部份的功能分別說明如下：

1.收集及濃縮分離系統

沼氣收集站設有一定數量之抽氣井，每口抽氣井均有控制閥可調控其流量，並在適當地點匯集數口沼氣井形成一個網路。同時在地形較低處亦可匯集冷凝水排至掩埋場內。

2.過濾純化系統

沼氣抽氣站設置鼓風機，在鼓風機吸入口與輸出口管路處均設有逆止閥以隔離鼓風機抽引時之迴流現象。於沼氣處理設施中，裝置有過濾設備以除去 $0.4\mu\text{m}$ 以上的粒狀污染物，進一步的達到純化沼氣的目的。

3.沼氣引擎發電機組與控制系統

每一組容量為 1 千瓩～1.4 千瓩（1MW～1.4MW）之發電機模組均以沼氣為燃料帶動引擎發電，每一模組皆裝置於一個隔音的箱體內，箱體內附有電力系統所需要之各種設備，其最大之特性乃是每一模組均能獨立運轉，當沼氣量增大時，發電系統可以彈性增加模組。相對的，當沼氣量遞減時，也可以彈性拆遷模組。整個發電系統之開機啟動、停機、負荷控制以及警報……等皆可由邏輯程式控制單元來控制。

4.電力輸出

沼氣處理發電系統中，電力是由沼氣發電引擎來產生的，經過模組內變壓系統的升壓將電壓提昇至 11.4KV（或合適的電壓）與電力公司的配電系統併聯，將此綠色能源輸出提供民眾使用。

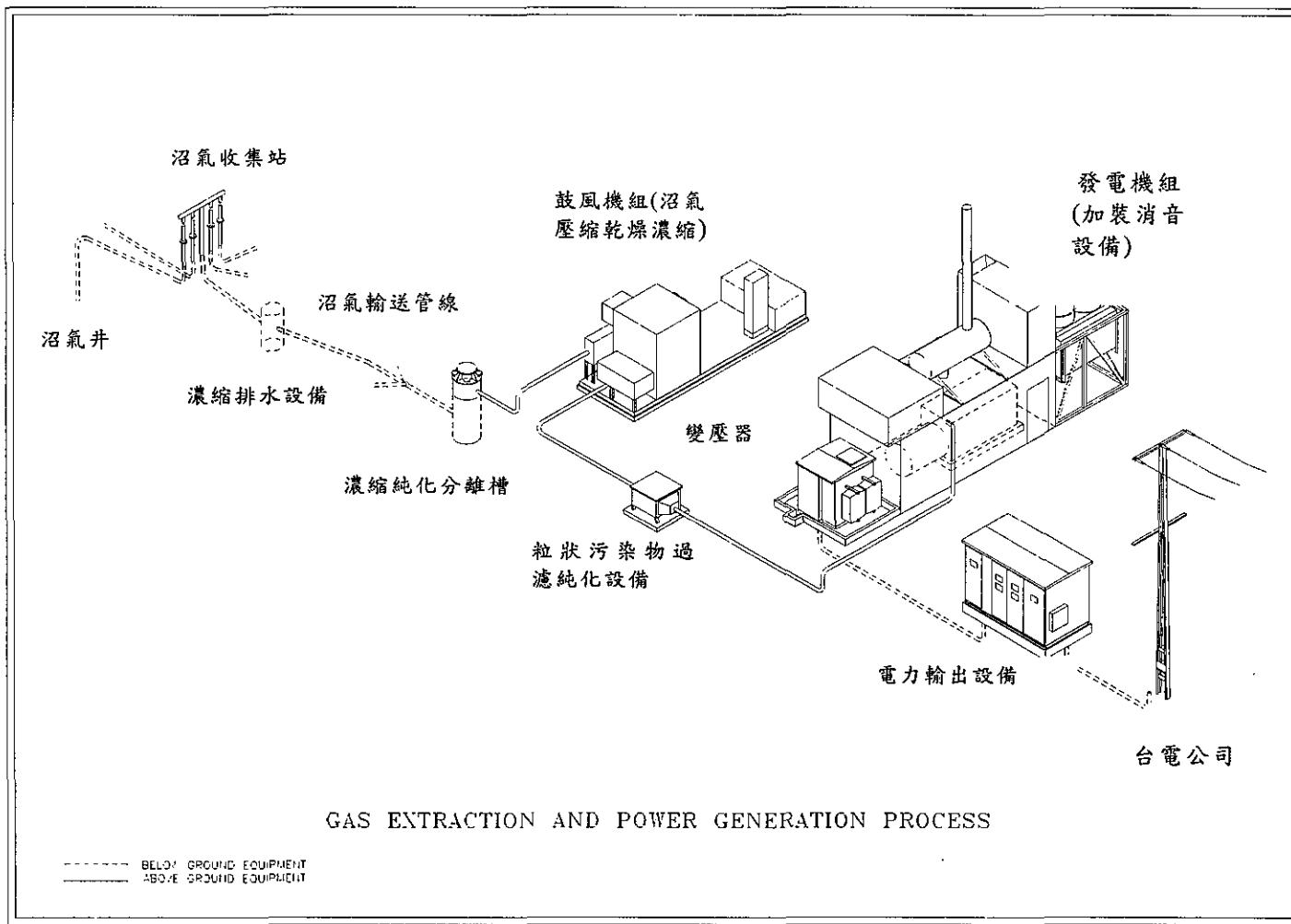


圖 1 沼氣處理再利用相關設備配置圖

五、沼氣處理發電成功要素

沼氣處理附屬發電系統成敗要素分析

項目	成功因素	失敗因素
獎勵補助措施之制度	仿歐美國家制定明確而長期穩定的獎勵補助措施	政策未明，無法提供合理的經濟誘因予業者投資再生能源事業
掩埋場特性	掩埋家庭、一般廢棄物，至少有兩百萬噸之垃圾量方足以產生符合經濟效益之沼氣量。	混雜過多之建築廢棄物、掩埋量過低、掩埋場關閉已久、沼氣已耗盡。
沼氣收集系統及其維修狀況	沼氣井之規劃、設計、施工及維修，須有豐富的實際操作經驗。	掩埋場水位過高無法以豎井抽氣，改以橫溝方式，抽氣效果不彰，且操作維修經驗不足。
沼氣之應用	成功有經驗之沼氣處理業者採用成熟之技術及使用傳統之設備。	經驗不足之業者作不當系統設計，或是誤估系統之容量等。
經濟效益	合理之利潤與合理之回收年限。	收購之電價過低，誤導沼氣發電之高利潤，要求過高之回饋金。
相關單位之配合	地方政府、環保單位、電力公司...等單位相互配合克服困難才得以成功。	各單位固守舊習，本位主義沒有整體觀念。

六、未來新趨勢—廢棄物氣化再生能源發電

大多數的垃圾衛生掩埋場目前並未執行沼氣污染防治控制，僅有少數的垃圾衛生掩埋場設置沼氣收集燃燒處理系統，以降低沼氣中甲烷及非甲烷有機物的排放；此間或因操作管理、或因維修……等問題，常致集氣燃燒處理系統只能維持短暫的操作狀態，而無法進行長期有效的甲烷排放減量控制；而為確實改善此等狀況，唯有訂立獎勵補助措施，鼓勵業者再利用掩埋場中的沼氣，以沼氣處理發電量來評估甲烷排放減量效益，才是根本解決之道。此措施已被英美澳及其它歐洲國家證實為非常成功的甲烷排放減量控制的方式。

目前，大部份民眾反對興建焚化爐及掩埋場，因而造成一般家戶垃圾處理無法適時適地，為解決此等環境危害的問題，如可引進國外廢棄物氣化再生能源發電的環保技術，將可解決一般家戶垃圾亟需處理的問題。

氣化 (Gasification) 是以一個高溫的操作過程 (溫度有時高達 2,000°C 以上)，使廢棄物轉化成我們所需的“氣體燃料”，且它同時具有了最低液體及固體含量的特性，氣化已被證實為比熱裂解更為有效的廢棄物資源化再利用方式，氣化處理過程可依廢棄物之特性來決定是否添加水份或是否補充氧氣。氣化所產生的主要氣體為氫氣 (H_2)，及一氧化碳 (CO)；次要的氣體成份則為水份，甲烷 (Methane, CH_4) 及二氧化碳 (CO_2)。

於 1970 年代開始已應用氣化/熱裂解的技術，將生垃圾資源化再利用，雖然於此過程中遭遇不少瓶頸，但其仍有不可或缺的發展潛力；例如於鄰近工業區附近它可成為一項有效的熱能來源。與生垃圾焚化處理比較而言，氣化/熱裂解可降低粒狀污染物逸散及減少金屬物質揮發污染等優點，而配合高效率的複循環發電機組，將使得氣化/熱裂解的廢棄物資源化再生能源發電工作計畫的應用性更加提高。高溫氣化處理，可將大部份的生垃圾轉化成“氣體燃料”而低溫厭氧性的消化處理過程（低溫厭氧化）其可轉化成“氣體燃料”的成份比例，則遠不及高溫氣化處理的效率。一般性的低溫氣化消化處理方式僅能將生垃圾中 40%~55% 可分解的有機物質轉化成我們所需的再生能源；而典型的高溫氣化處理可達到 75% 以上的再生能源效率，因其可將塑膠類等的物質轉化成我們所需的“氣體燃料”。

氣化是一項具有百年歷史的技術，在第二次世界大戰期間及之前，它曾經蓬勃發展，但由於二次大戰後，液態燃料容易取得，使得這項技術很快就消失了。氣化技術的利益在本世紀歷經多次起伏不定的變化，今天，因為燃料價格提供以及環保意識的抬頭，使得這項百年歷史的舊事技術重新受到重視，氣化已經變成更現代化且十分精密的技術。

理論上，幾乎所有含水量 5~30% 的生質能可以被氣化，但並非每種生質能燃料皆能成功氣化，大部分氣化多是由煤、炭和木材等一般性燃料來實行運作。一般認為燃料物的表面、大小、形狀、份含水量、揮發物、炭含量都會影響氣化。

氣化要設計成功，關鍵在於要了解燃料的性質及熱能反應，就當作燃料是用來餵養氣化設備一般。氣化系統操作者，必須擁有豐富的知識和與純熟的技術。對此項技術有興趣的人必須記得要努力的工作與容忍的精神。和一般傳統的系統比較，液態燃料、發動機、生質能，氣化技術較不那麼便利，但在許多方面，它不僅是經濟的，而且在能源危機的關鍵時刻中，它可以自給自足。