

生物污泥之資源回收技術

賴俊吉*

摘要

由於全球環境保護意識高漲，處置生物污泥時，除了需要兼顧處理與資源回收問題之外，尚須考慮二次全球環境污染問題，譬如溫室效應氣體中甲烷與二氧化碳的排放。藉由高效率的污泥消化技術與活用污泥處理程序中消化氣體，不僅可解決污泥處置問題亦可大幅提升生物污泥資源回收之價值。高溫高濃度污泥消化技術有縮小消化槽體積與加強消化氣體產生等優點，進而提高消化氣體的利用價值與避免大量石化能源的消耗，以削減甲烷與二氧化碳的排放，符合永續發展的目標。

【關鍵字】

1. 低環境負荷(low environmental load)
2. 高效率厭氧污泥消化(high rate anaerobic sludge digestion)
3. 氢發酵(hydrogen fermentation)
4. 溫室效應氣體(greenhouse gases)
5. 資源回收(resource recovery)

*日本科學技術振興事業團戰略基礎研究推進事業研究員／日本東北大學土木工學

一、前　　言

由於下水道的普及與廢污排放標準的提升，來自工業廢水及都市污水處理廠的污泥已逐年成長中。因此，都市或者是工業污泥的處理與處置已成為一個複雜的環境管理問題。生物污泥不僅具有被生物分解的特性而且是一種優良的甲烷發酵材料，厭氧消化(anaerobic digestion)技術也因此長久被用來安定生物污泥與生產甲烷。鑑此，厭氧消化技術不僅是一種處理程序亦是一種產生能源的方法。近年來生物污泥除了熱利用外，亦廣泛被用於綠農地的改善與生產建設資材。此外，由於地球的工業化，甲烷與二氧化碳等的溫室效應氣體已大量地排入大氣層，地球溫暖化已成為一個重大的地球環境問題。在傳統廢水處理與生物污泥安定的過程中，因有大量的甲烷與二氧化碳產生；即使熱利用亦有大量的二氧化碳產生，所以在國際地球環境意識高漲的今天，當設計廢污處理程序時不僅需要兼顧處理與資源回收問題，尚須考慮二次地球環境污染問題，尤其是地球溫暖化的問題。因此，本文將針對生物污泥之資源回收技術進行說明，主要著重在生物污泥分解的熱利用技術。再就地球環境的觀點說明生物污泥資源回收與地球溫暖化之間的關係與重要性。

二、生物污泥厭氧消化

2.1 污泥消化與發電

目前生物污泥處置非常重視省資源與省能源處理程序的開發，尤其是能源化與資源化的處理程序。其中，厭氧消化是唯一能生產能源的生物污泥處理方法且具有：(1)污泥減量；(2)惡臭削減；(3)抑制病原菌與病毒活性；(4)改善污泥脫水性；(5)農地利用等優點。厭氧消化是藉由無氧環境培養厭氧細菌將高分子有機物階段地轉換成低分子有機物，最後再分解至甲烷(60~70%)、二氧化碳(25~35%)與少量的氫氣、氮氣與硫化氫。產生的消化氣體，如表1所示，具有 $5,400\sim6,000\text{kcal/m}^3$ 的熱能，較都市瓦斯更有燃料價值。對於台灣或是日本等一人能源擁有量極少的國家，從長遠的能源政策角度視之，生物污泥的能源化或資源化具有重要的意義。許多先進國家，如歐美與日本生物污泥處理多採用厭氧消化，在消化氣體有效利用的政策前提之下，消化氣體大多被用於能源的開發與應用方面；且已有許多消化氣體

發電供應污泥處理廠內所需的實績。如圖1所示，為了有效利用消化氣體，消化氣體先驅動氣體引擎發電，然後再作為加溫鍋爐的燃料，剩餘的氣體經由燃燒設備後排入大氣之中且引擎的廢熱亦被用於鍋爐的加熱。同時，引擎的冷卻水也充分地用於消化槽的加溫。因此，此程序中的消化氣體約有30%轉換成電力；40%的熱能回收來自廢熱及冷卻水。就日本橫濱污泥處理廠為例，廠內所需的電力中有約72%左右來自消化氣體發電⁽⁵⁾。

表1 消化氣體與其他各種燃料發熱量的比較

燃料種類	發熱量 (kcal/m ³)
消化氣體	5,400~6,000
純甲烷氣	8,550
石化都市瓦斯	9,100
重油	10,500
石炭混合瓦斯	3,000~3,500

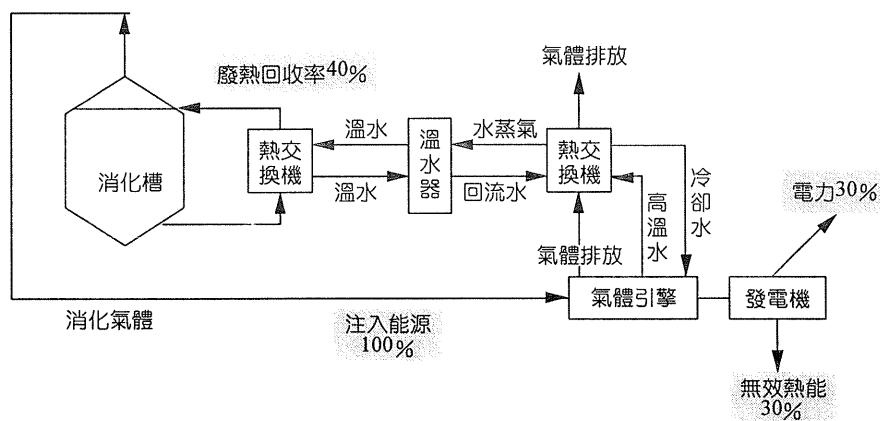


圖1 消化氣體發電的概要

2.2 高效率污泥消化程序

近年日本厚生省提出有機固體廢棄物再資源化的環境政策，許多大型環境工程顧問及工程公司已致力於改進有機廢棄物篩選與破碎技術、改善污泥脫水機械效率、改良高濃度有機廢棄物輸送與消化槽攪拌技術，促使有機固體廢棄物的厭氧消

化槽朝向小體積且高效率的方向發展。其次，以“活用污泥處理程序中未利用的能源”的概念，應用於改善現有厭氧污泥消化的缺點，如有機物分解效率低、消化時間長等，來避免大量石化能源的消耗。因此，近年盛行高溫濃度污泥消化程序的開發，以提高消化氣體的產生與提高消化氣體的利用價值。就“活性污泥處理程序中消化氣體”的例子而言，日本大阪市中濱污水處理廠的消化氣體發電系統，每日約可產生15,000千瓦的電力，佔全廠用電量的四分之一。目前開發的消化氣體發電系統中，消化氣體除了提供氣體引擎發電所需的動力，消化氣體中的甲烷再經觸媒轉換成氫直接供燃料電池發電(圖2)。燃料電池在高效率發電的同時且具有低噪音、低振動與低大氣污染等優點，可提高消化氣體的活用與削減資源回收過程中對環境的二次污染⁽⁴⁾。

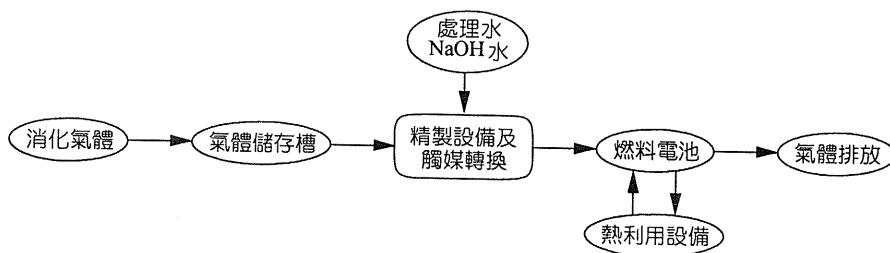


圖2 消化氣體燃料電池系統概要

三、生物污泥資源回收與溫室效應

3.1 廢水排放與溫室效應氣體的生成

都市污水及工業廢水之中常含有大量有機或無機成分，這些成分皆能經由生物處理程序或者是自然水系中微生物的作用轉換成二氧化碳、甲烷與一氧化二氮等溫室效應氣體，其發生源歸納如表2所示⁽²⁾。事實上，廢污處理程序所排放的二氧化碳對地球溫室效應的貢獻實是有限，因為自然界中的動植物能藉由光合作用將二氧化碳固定。但在人口集中且排放水負荷大的都市，由污水處理程序所釋放的局部高濃度二氧化碳是否對溫室效應造成影響就不得而知了。近年來大氣層中的二氧化碳與甲烷濃度逐年的成長；從1958年至1990年，二氧化碳與甲烷分別從315ppm上升至

350ppm與1.2ppm上升至1.7ppm⁽³⁾。雖然甲烷濃度遠較二氧化碳低，但一分子甲烷的溫室效應約為二氧化碳的20倍⁽¹⁾；而且絕大數的甲烷產生皆來自厭氧微生物分解有機物，其中以稻田、濕地、湖泊與垃圾掩埋廠為最主要的發生源⁽³⁾。但由於工業的發展、都市的開發以及人口的集中，致使廢污的產生逐年地成長，從厭氧生物污泥處理程序中所大量產生的甲烷，已經以快速的脚步登上地球溫暖化的舞台。

如圖3所示，廢水經由厭氧處理程序將有機物質，如蛋白質、脂肪與碳水化合物分解為甲烷與二氧化碳。但由於一般的廢污成分複雜，甲烷的生成量無法藉由上述有機物質直接估算，必須藉由廢污的化學需氧量(COD)來換算甲烷的生成量。

表2 自然循環與人為活動中溫室效應氣體的發生源

溫室效應氣體	自然循環	人為活動
二氧化碳	動植物的分解與呼吸	石化燃料的燃燒
甲烷	土壤中分解與腸內發酵	農業活動、掩埋場、排放水處理、水污染與燃燒
一氧化二氮	土壤中分解	施肥、排放水處理、水污染、燃燒與麻醉劑

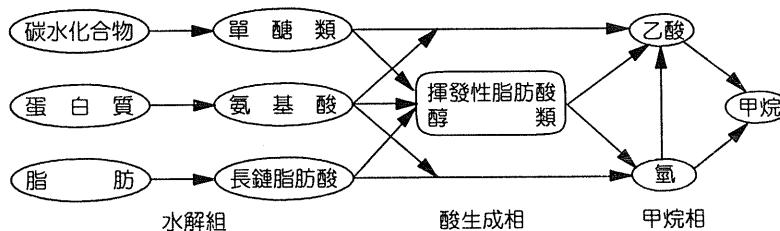


圖3 有機物厭氧分解過程

$$P_m = f_d \cdot f_m \cdot COD / 2860 \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

其中， P_m 是單位體積的廢水或污泥甲烷生成量(L/L)； f_d 是COD去除率； f_m 是COD對甲烷的轉化率；COD是廢水或污泥化學需氧量(mg/L)。若以COD負荷量(g)表示， P_m 的單位則為 m^3 。 f_d 因廢水的分解難易而定，一般的生物污泥約為0.5左右；易分解有機物的 f_d 約為0.9。 f_m 與廢水或污泥特性沒有很大的關係，大約為0.8左右。

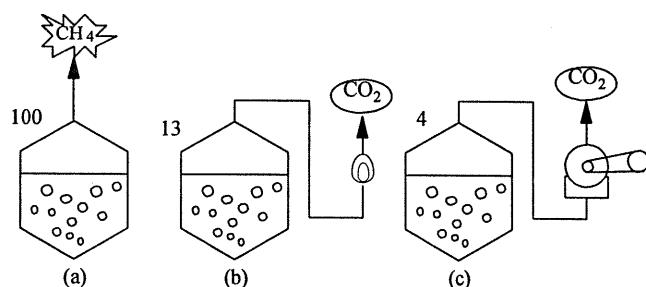
根據公式(3)可估算地球污水排放所產生的甲烷量。目前全球的人口約50億且人類活動包含農業與工業活動每人每天COD負荷量約為40g。但在人類活動所生成的COD中多少比率轉換成甲烷實是很難估算。一般廢水好氧處理後所產生的污泥與流

入自然水系中的排放水仍會被厭氧分解；最後難分解部份進入土壤之後亦進行厭氧分解。據此，以第一近似值推算約有40%的COD被厭氧分解。當 $f_d = 0.8$ 與 $f_m = 0.8$ 時，全球一年之中約有 4.7×10^{12} g的甲烷產生自人類活動；此量約佔全球甲烷產生量的1.6%⁽⁶⁾。以溫室效應的觀點比較甲烷回收發電與甲烷直接排入大氣顯示，甲烷回收發電有以下的優點：

1. 甲烷燃燒後可以溫室效應影響較弱的二氧化碳氣體排入大氣。
2. 甲烷回收發電可減少火力發電廠的依賴度，間接減少石化燃料的使用，進而削減二氧化碳氣體排入大氣中。

3.2 生物污泥資源回收與溫室效應氣體的關係

廢污處理技術如上節所提，必須考慮資源回收問題以減少電力與石化燃料的使用以削減甲烷與二氧化碳排放。污泥厭氧消化與溫室效應的關係如圖4所示⁽⁶⁾。其中，程序(a)、(b)、(c)採用了不同的操作管理方式來處理污泥厭氧消化後的氣體。若以100年的衰減計算，1kg甲烷的溫室效應約等於21kg的二氧化碳。1kg甲烷的燃燒發電為例，1kg甲烷可得2.8kg二氧化碳。以甲烷燃燒熱為56kJ/g與30%的發電效率計算，有 17×10^3 kJ電力產生。在日本， $400\text{tonCO}_2 \cdot 10^{-9}\text{Wh} = 110\text{gCO}_2 \cdot 10^{-3}\text{kJ}$ ，所以當甲烷燃燒發電則有1.9kg的二氧化碳被削減。假設以100做為程序(a)對大氣的溫室效應，程序(b)與(c)則分別為13與4。很明顯地，三程序中以程序(c)對於溫室效應的貢獻最低；換句話說，若將生物污泥資源回收的觀念應用於厭氧消化的操作與管理，不僅降低了能源的需求，亦可大幅降低廢污處理後對溫室效應的貢獻。



- (a) 甲烷直接排入大氣中
- (b) 甲烷燃燒後二氧化碳直接排入大氣中
- (c) 甲烷燃燒發電後二氧化碳排入大氣中

註：圖中數字以100做為程序(a)的溫室效應

圖4 厭氧污泥消化與溫室效應的關係

3.3 低環境負荷的生物污泥資源回收技術

由於都市的快速成長與擴張，已使得廢污處理設施逐漸鄰近一般的住宅區。另外，經濟能力的提升與環境保護意識的抬頭，人們對於高品質的居家環境的需求殷切。當設計廢污處理程序時，如前面所提不僅需考慮處理、回收外，更需兼顧到環境負荷的問題，譬如地球溫暖化甚至居家舒適等環境問題。因此近年來日本國內大力進行所謂的“低負荷”的處理技術。就圖4(c)為例，利用消化氣體發電可大幅地降低厭氧發酵對溫室效應的貢獻。但甲烷發電仍有多項對環境品質形成負面影響的缺點，譬如：

- 1.發電系統噪音大。
- 2.發電系統所需面積大。
- 3.熱量損失。

鑑此，日本的污泥處理廠近年來已積極將消化氣體導入燃料電池發電的應用與開發。如圖2所示，消化氣體經由精製設備除去二氧化碳及硫化氫，再通過觸媒轉換器將甲烷轉換為氫做為燃料電池發電用。如此即可降低發電系統的噪音、減小發電系統所需面積與避免發電過程大量熱量的損失，以減少生物污泥資源回收時對環境品質的影響，使處理回收技術符合低環境負荷的要求。

四、結語

生物污泥資源除可熱回收外，就地球生態環境保護與食糧的角度考量而言，堆肥是一個值得推廣的技術，因為堆肥能夠改善土壤構造、供給腐植質、維護土壤生態系、抑制病蟲害、增大土壤緩衝能力與提供有效肥分等優點。尤其目前化學有機肥料大量使用，土壤生態系已發生失調的病狀，如土壤中碳／氮／磷比與食物鏈的失調，堆肥技術的發展與應用，不僅能有效利用生物污泥更能以生物修補失衡的土壤生態環境。另外，就溫室效應的觀點而言，氫是一種清潔且在化學工業與航太工業被廣泛使用的能源，其單位發熱量(287,000kcal/kg)是石油(10,000kcal/kg)的三倍，因此氫已成為二十一世紀科學家所注目的新能源之一。尤其在燃料電池與氫汽車等新製品開發成功後，使得氫氣的開發與利用更受其他研究領域的注目。但是氫氣並不自然存在地球上，必需藉由人工製造。目前水的電解與熱分解等實用化技術已能生產氫氣；或是利用生物化學反應結合微生物與水生產氫。利用高氫氣生化產

能的微生物從有機廢污中回收氫氣，即所謂的氫發酵，不僅具有環境淨化的功能，更具有回收價值且清潔能源意義；因此氫氣產生程序之研究已成為目前生物污泥資源回收的新課題⁽⁷⁾。

參考文獻

- 1.Davidson, J.A., Cantrell, C.A., Tyler, S.C., Shetter, R.E., Cicerone, R.J. and Calverly, J.G., Carbon kinetics isotope effect in the reaction of CH₄ with HO, J. Geophys. Res., 92, D2, pp.2195~2199. 1987.
- 2.Joel, S.L., Global climate change, In Firth, P. and Fisher, S.G. (eds), pp.1~25, 1991.
- 3.Tyler, S.C., The global methane budget, In Rogers, J.E. and Whitman, W.B. (eds)., Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen, and halomethanes, American Society for Microbiology, Washington D.C., pp.7~38 1991.
- 4.北垣宏，下水道の未利用エネルギー—高濃度消化法と消化ガス利用—，パネルディスカッション(1)—下水道の未利用エネルギー—，日本第34回下水道研究発表會，pp.11~13，1997。
- 5.北村友一，污泥處理(4)—污泥消化—，日本下水道協會誌，34(408)，pp.100~106，1997。
- 6.花木啓祐，地球環境時代の排水管理，水質汚濁研究，14(9)，pp.593~598，1991。
- 7.野池達也，地球環境時代における嫌氣性消化法の役割，パネルディスカッション(1)—下水道の未利用エネルギー—，日本第34回下水道研究発表會，pp.16~19，1997。