

工程實務

典型都市污水處理廠質量及能量平衡之研究

張添晉* 歐陽崎暉**

摘要

質量及能量平衡 (Mass and Energy Balance) 之概念，很早就被應用在工程原料、產品及維持管理等方面之分析，尤其在化工程程上「質能平衡」幾乎是不可或缺之工具。本文嘗試將質量平衡及能量平衡同時應用在典型都市污水處理廠，分析各處理單元能量收支情形，以便明瞭各單元設備在能量獲得及消耗方面所佔之比例，作為設計或操作都市污水處理廠省能源、省資源之參考。

1. 前言

在廢水處理系統設計及最適化之研究時，可用質量及能量平衡 (Mass and Energy Balance) 作為系統評估之依據。1970年代能量最主要的來源——石油，其價格由1962~1970年間之100單位陡升至1974年的650單位，短短4年間，石油價格上升了6.5倍，於是人們開始警覺能源及資源的可貴。在環境保護方面，由於污染防治與能量消耗之關係密不可分，加上污染物質之量隨人口之增加而直線上升，故目前許多國家已將省能源、省資源技術之開發列為當務之急。本文即分析都市污水廠各單元設備消耗能量之情形，並研究在處理廠內以厭氧消化所產生之消化瓦斯進行發電，探討回收電能供給廠內其他設備使用時之潛力。

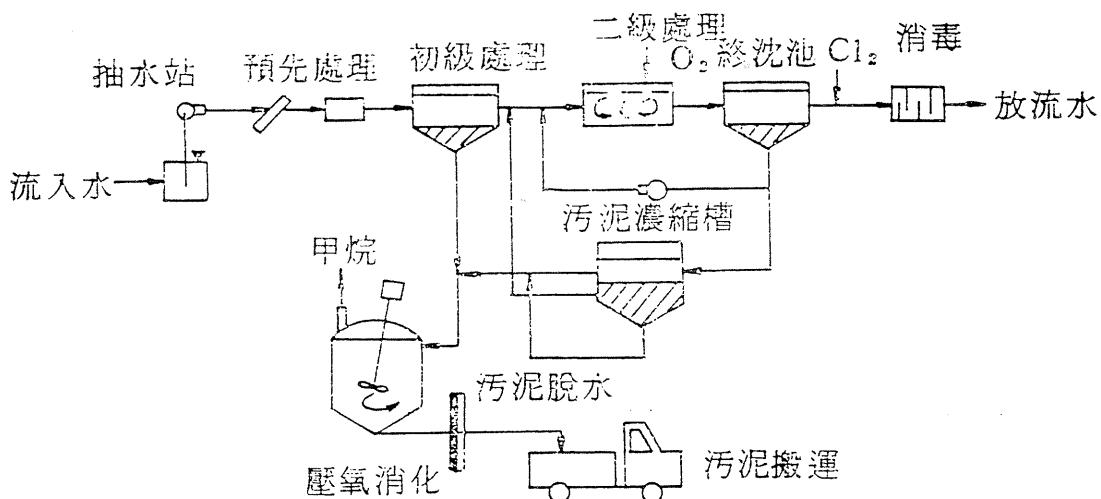
2. 都市污水處理廠生物處理程序之代謝反應

典型之都市污水處理廠，其處理路序如圖一所示。

圖一中，最主要的單元包括：抽水站，初級沈澱池，活性污泥曝氣槽及厭氧消化槽等，其中活性污泥曝氣槽及厭氧消化槽是能量收支上最重要的單元，前者將有機物在好氧條件下代謝成為水及二氧化碳，後者即利用厭氧微生物將污泥等有機固體物代謝成為甲烷及二氧化碳，由於好氧及厭氧程序在有機物代謝和能量分佈上有極大的不同，以下先就此二單元詳加介紹。

* 國立中央大學土木工程學研究所博士班研究生

** 國立中央大學土木工程學研究所教授兼所長



圖一 典型都市污水處理廠之污水及污泥處理流程

2.1 好氧程序及其代謝能量分佈

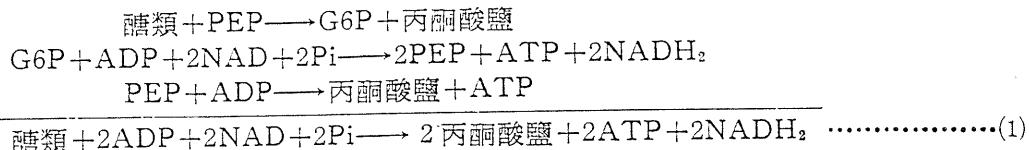
在廢水處理中，很多微生物可以在有氧存在的條件下，將有機物經過微生物體內之生化轉換 (Biochemical Transformation)，而氧化成爲 CO_2 及 H_2O ，對大多數之好氧微生物而言，這種生化轉換之過程一共可分爲下列四個步驟：

第 1 步驟：微生物將溶解性有機物運輸至體內

廢水中之有機物很多是複雜的高分子，如此複雜高分子有機物無法通過微生物之細胞膜，故微生物會分泌酵素（大都爲水解酵素），或誘導出有用之酵素來降解高分子，使其成爲可以吸收之小分子或溶解性之有機物，長鏈脂肪酸則需先經特殊之 β -氧化作用 (β -oxidation) 而降解成爲短鏈之有機酸，才可以通過細胞膜，這種由外界經細胞膜進入細胞質之方式，包括被動擴散 (passive diffusion)，便利擴散 (facilitated diffusion)，主動運輸 (Active transport) 與集體輸送 (group translocation) 等四種，其中以集體輸送之效率最高，此類型之輸送作用係在細胞膜外表面生成攜帶者——基質之混合物，藉著微生物體內之化學能，將此混合物逆濃度差而進入細胞質內，此過程中，基質常常經過化學改變 (Chemical modification)，許多微生物都利用此種方式輸送醣類，在輸送過程中將醣類轉變成磷脂再釋入細胞質中。

第 2 步驟：溶解性有機物經 EMP 路徑而降解成爲丙酮酸鹽

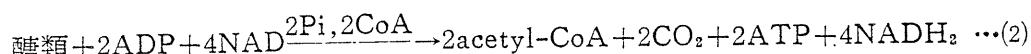
前述中，廢水所含之有機物，以碳水化合物爲例，經水解再藉化學轉變成磷脂（一般稱爲G6P），此時有機物即開始被氧化，依序爲 $\text{G}6\text{P} \rightarrow \text{F}6\text{P} \rightarrow \text{FDP} \rightarrow \text{G}3\text{P} \rightarrow 3\text{PG} \rightarrow 2\text{PG} \rightarrow \text{PEP}$ ，最後才由 PEP 轉變成丙酮酸鹽，由於過程太複雜，以下僅列其反應之總和：



由(1)式之醣類氧化方程式中，醣類最後轉變成最重要之產物——丙酮酸鹽，並產生 2 莫耳之 ATP (化學能) 供微生物利用。

第 3 步驟：丙酮酸經氧化去羧反應而成爲乙醯基輔酶 A (Acetyl CoA)

由醣類所轉變成之丙酮酸，必須先氧化，並失去一分子 CO_2 ，再加入輔酶 A 之乙醯衍生物，作為進一步完全氧化之預備階段，即 EMP 酶素羣與丙酮酸脫氫酶複合物共同作用下，醣類即降解爲 CO_2 與 acetyl-CoA，其方程式如下：

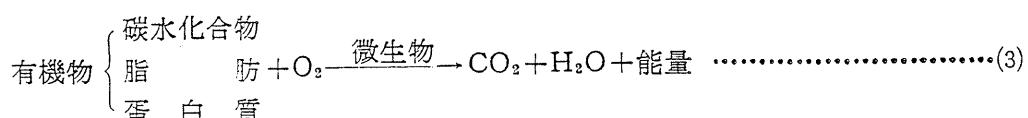


第 4 步驟：acetyl CoA 經 TCA 循環而氧化成 CO_2 及 H_2O

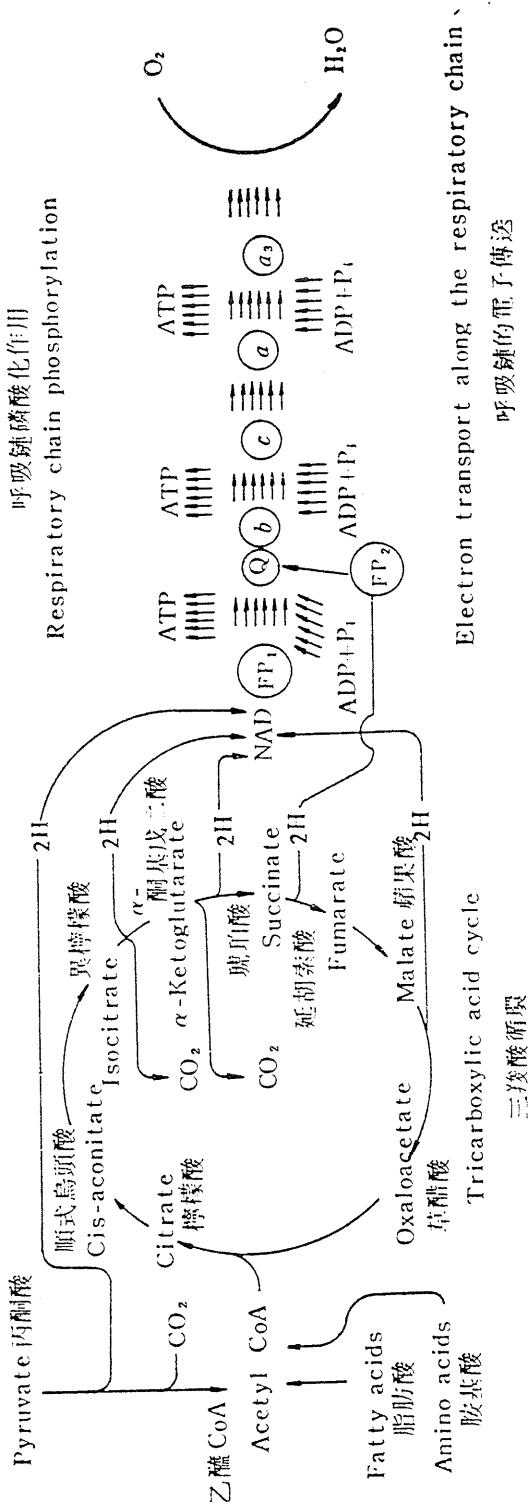
TCA 循環 (Tricarboxylic Acid Cycle) 又稱 Krebs 循環，是 1937 年英國生化學家 Krebs 發現，此一循環可以將 acetyl-CoA 中之 acetyl 部份氧化成 CO_2 ，其反應過程示如圖二。

在 TCA 循環中，各種不同之脫氫酵素將有機物氧化，氧化過程中產生氫（攜帶高能量之氫）及 CO_2 ，其中氫再被兩種重要的輔酶 (coenzyme) NAD 及 FAD 携帶至電子傳遞系統，由圖二中可知，每一莫耳 NADH_2 經電子傳遞系統可產生 3 莫耳之 ATP，而 FADH_2 亦產生 2 莫耳 ATP，這種產生高能量之化學能是好氧微生物最重要之特性。

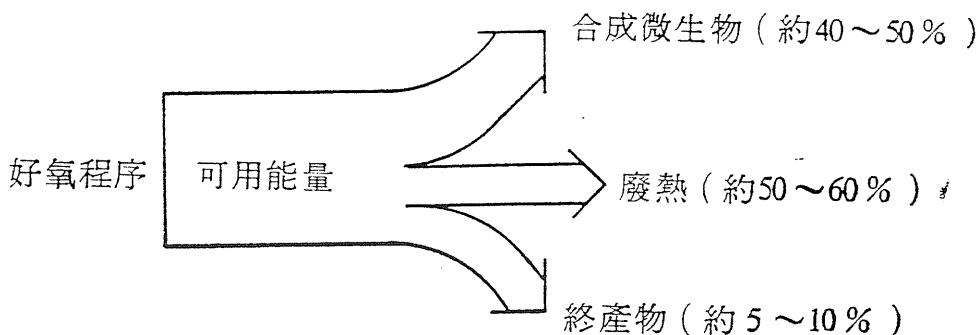
當 NADH (或 FADH) 將其中之氫在電子傳遞鏈氧化成 $\text{NAD}^+ + \text{H}^+$ 時， NAD^+ 又回到 NAD^+/NADH 平衡系統中，以便維持輔酶之濃度，繼續 TCA 循環，脫離之氫經電子傳遞系統時放出大量能量，此能量被 ATP 合成酶合成 ATP，氫再與電子接受者氧結合而成 H_2O ，上述之反應過程可以用方程式表示，即



由好氧微生物所產生之化學能，若與有機物之總能量相比，大約只佔 40~50%，這些以 ATP 型式存在之化學能，大多數用於合成新細胞，分解有機物及供微生物運動之所需，其他 50~60% 之能量則以熱及功之型式隨 CO_2 散失於環境之中，用以維持生物之體溫，其代謝能量分佈如下圖所示。



圖二 好氧狀態下將有機物徹底氧化之三羧酸循環
三羧酸循環



圖三 好氧程序代謝能量分佈圖

當廢水中之有機物濃度逐漸提高時，由於 ATP 不斷產生，因此微生物系統內之能荷 (Energy Charge) 太高，而發生 ATP 回饋抑制 (ATP Feed Back Repression) 之現象，一旦能荷太高而發生抑制作用時，有機物就開始累積而無法被分解，這一點就是何以好氧程序難以處理高濃度有機廢水之重要原因之一。

2.2 厭氧程序其及代謝能量分佈

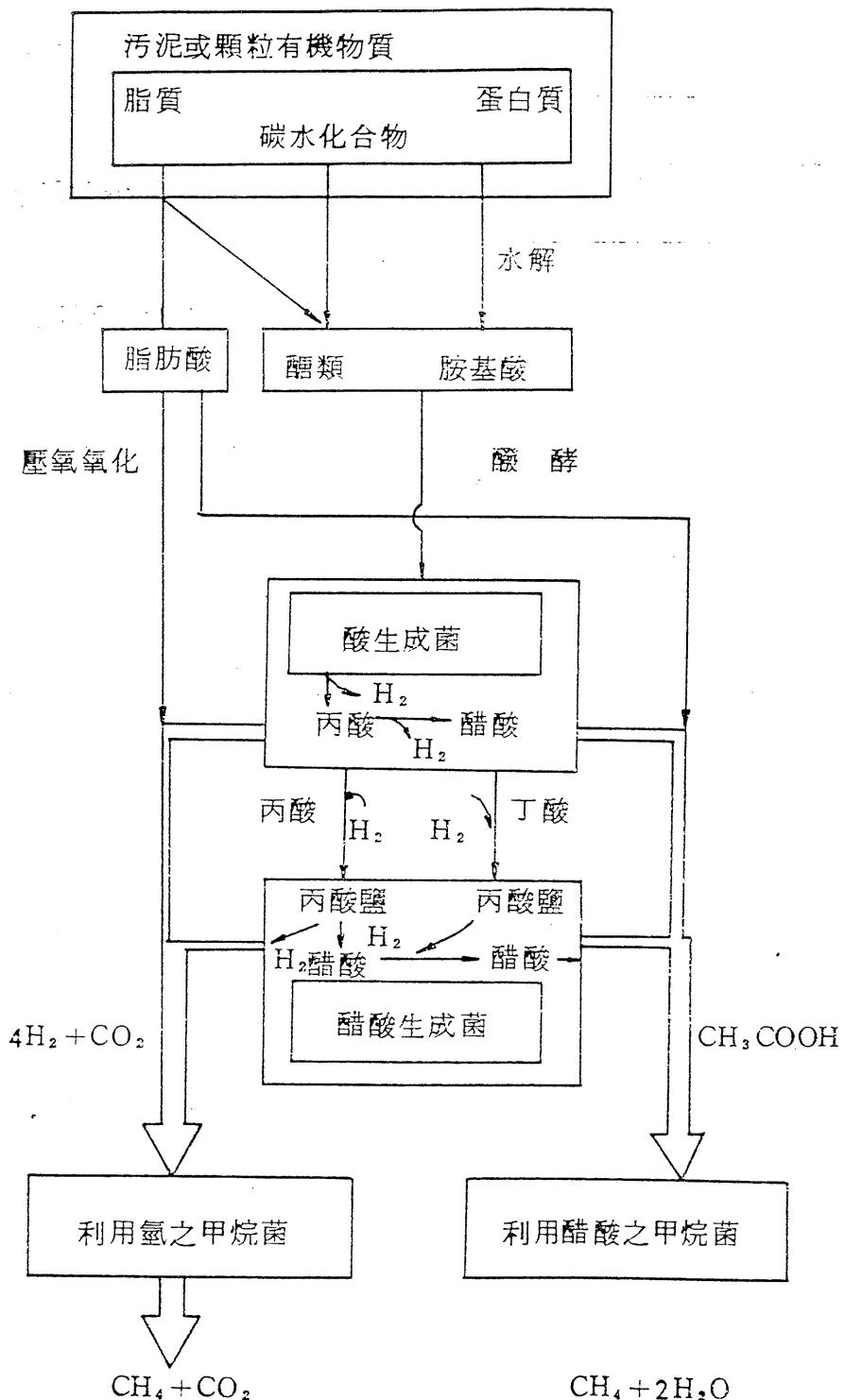
在都市污水處理廠中，厭氧程序大多用於初沈及終沈污泥之穩定化，一般而言，初沈污泥含有較高之有機成分，而終沈污泥（廢棄之微生物）則較難被分解，這種複雜的有機物基本上是分兩個階段被兩種性質完全不同之微生物所利用，首先有機物被兼性厭氧菌水解轉化成揮發酸及 CO_2 ，緊接著揮發酸及其他中間產物再被絕對厭氧菌轉化成爲 CH_4 及 CO_2 ，其複雜關係示如圖四。

由圖四之代謝流程圖，可將一般污泥厭氧消化細分成下列 6 個步驟：

1. 有機固體物之水解，此等固體物包括蛋白質、碳水化合物及脂質。
2. 氨基酸及醣類之醣酵。
3. 長鏈脂肪酸及乙醇之厭氧分解。
4. 中間代謝產物（丙酸鹽及丁酸鹽）經厭氧氧化成爲醋酸鹽及氫氣。
5. 醋酸鹽被轉化成爲甲烷。
6. 氢氣被轉化成爲甲烷。

上述之第 1 個步驟稱爲水解階段，第 2 ~ 4 步驟稱爲酸生成相 (acidogenic phase) 或是非甲烷生成相 (non-methanogenic phase)，第 5 ~ 6 步驟則稱爲甲烷生成相 (methanogenic phase)。雖然厭氧程序被區分成 6 個步驟，實際上，其間之關係甚爲密切且相互影響。

厭氧微生物將有機物穩定之過程，獲得了許多的能量，此能量一部份轉變成熱及功而損失於系統中，一部份則用於合成新細胞之能量，剩下大部份的能量則以甲烷之型式加以貯存，1974年 McCarty 提出下列方程式作爲評估厭氧消化系統能量分佈的依據。



圖四 厥氧消化程序之代謝調節

式中 s : 能量轉換至細胞中之比例。

e : 能量釋出於熱及功之比例。

σ ：能量貯存於甲烷氣體之比例。

SRT：固體物停留時間（天）。

a_0 ：細胞增殖係數（和廢棄物之種類有關）見表一。

表一 不同種類廢棄物之細胞增殖係數

基 質 種 類	a_e
苯 碳 水 化 合 物	0.11
都 市 污 水 廣 污 泥	0.28
乙 脂 甲 蛋 肪 白 質	0.11
	0.11
	0.06
	0.15
	0.08

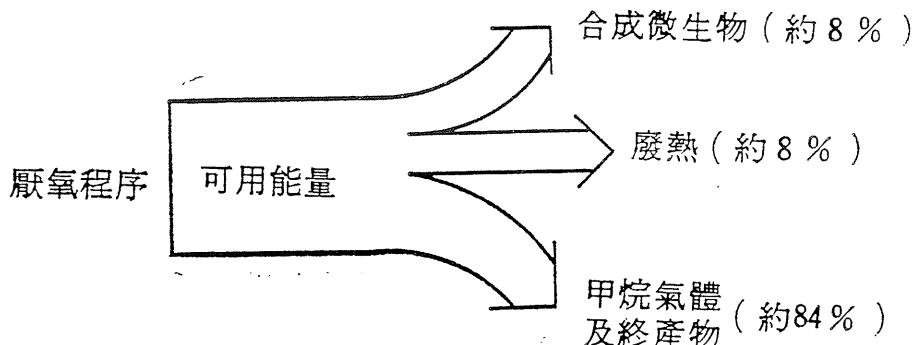
由方程式(5)得知，轉換至細胞之能量隨細胞增殖係數 (a_0) 及固體物停留時間 (SRT) 而變化，對固定基質而言，細胞增殖係數為定值，即轉換至細胞之能量，僅與固體物停留時間有關，依據 McCarty 之研究，其關係如表二所示。

表二 都市污水廠污泥厭氧消化後能量之分布*

SRT (天)	能	量	分	佈	比	例
	合成細胞 (s)		熱 及 功 (e)		甲烷氣體 (g)	
5	0.099		0.074		0.827	
10	0.090		0.075		0.835	
15	0.083		0.076		0.841	
25	0.072		0.076		0.851	
50	0.057		0.077		0.866	
100	0.044		0.078		0.878	
200	0.035		0.079		0.887	

* 以都市污水廠污泥為基質之細胞增殖係數 $a_e = 0.11$

由表二所列出相對能量之分佈，當 SRT=15 天時，約有 8 % 的能量轉化成細菌細胞，8 % 之能量以熱及功之型式釋放於液體中，另外 84 % 則貯存在甲烷氣體內，圖五為厭氧程序能量分佈之示意圖。



圖五 厌氧程序之代謝能量分佈圖

厭氧微生物利用上述代謝過程產生之能量及中間產物（如有機酸、維生素、硝酸鹽、硫酸鹽及磷酸鹽等）合成新的細胞物質，如圖六所示。

3. 污水處理廠能量消耗及回收之指標

都市污水處理廠，其能源之消耗乃處理程序中污染物之質、量及處理程度之函數，處理廠內之質量平衡常考慮主要污染物質之質通量 (mass flux) (如BOD, COD, SS等)，而能量平衡則考慮廠內各單元設備之能量消耗及回收（如電能、蒸氣、消化氣體等），由於質量及能量平衡之關係密切，且會互相影響，在處理廠內能量供需之計算時，需同時考慮能量及質量之平衡。

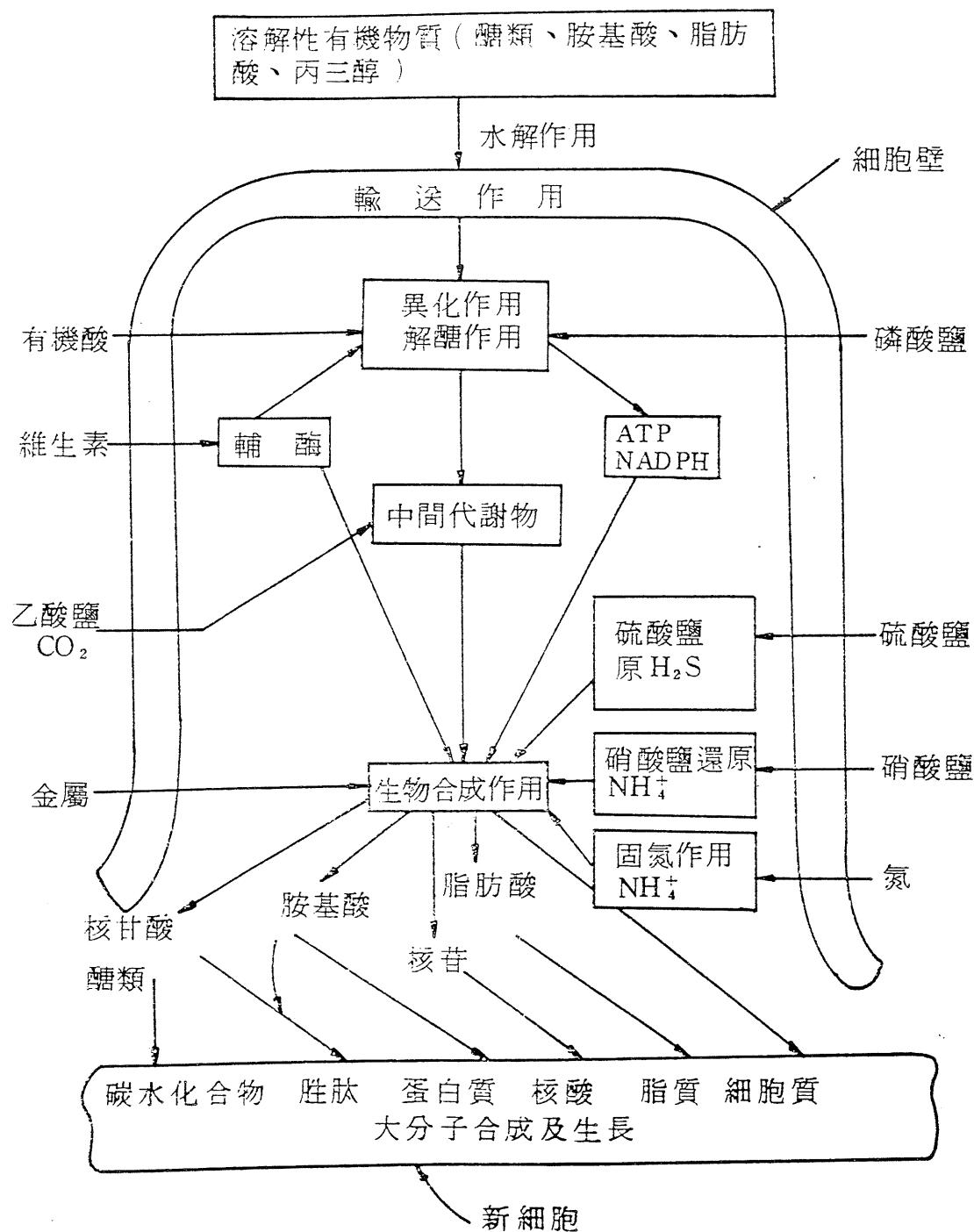
目前最常被用來評估處理廠內能量消耗及來源的指標可以歸納成下列三種：

(1)比能量 (specific energy) : SE

比能量之定義為處理單位污水量所消耗之能量，或去除單位污染物時之能量消耗 (kcal/kg BOD)，如此即可比較各單元設備之能量消耗及需求，整個處理廠之比能量乃各單元比能量之總和，比能量可能為正，亦可能為負，正代表消耗能量（如活性污泥曝氣槽），負值代表能量回收（如厭氧消化槽）

(2)化學潛能 (Chemical Energy Potential) : CEP

容易分解之有機物質一般可經由生化程序或熱解程序加以穩定，為了穩定有機物質常需花費許多的化學能（以氧之型式表示），而氧化有機物所消耗之氧量可以由質能平衡加以計算，為便利能量分析，常將廢水中之有機成分以①COD（燃燒時理論需氧量）以及②CEP（化學潛能）加以表示，即以化學氧化之方式將有機物質完全氧化為 CO_2 及 H_2O 時所釋放



圖六 廢氣程序中新細胞之生物合成作用

出來的能量。

在①中，COD可直接由化學滴定之方法量測，或以化學組成依下列方程式估算而得，

上式中，C、H 及 O 分別代表有機物中 C、H 及 O 之係數，VS 代表揮發性固體物質，當去除干擾物質後，以上述方式測出之 COD 約為理論值之 95%。

在②項中，化學潛能 (CEP) 可直接由熱卡計，配合 Dulong's 公式求出：

上式中，C、H、O及S分別代表有機物中C、H、O及S之重量比例。表三為廢水中常見之有機物質，其理論 COD 及熱值。

表三 工業廢水及市鎮污水常見有機物質之熱含量

有機物組	化學潛能 (kcal/kg)				理論 COD (kg COD/kgvss)
	量	測	值	計	
			算	值	
廢水有機物	C ₁₀ H ₁₈ O ₃ N	7715		6882	2.08
細菌細胞	C ₅ H ₇ NO ₂	4995		5217	1.42
碳水化合物	C ₆ H ₁₀ O ₅	4185		3608	1.19
脂 質	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	10545		10156	2.93
醋 酸	C ₂ H ₄ O ₂	3479		3219	1.07
苯	C ₆ H ₆	9990		10100	3.07
苯 甲 酸	C ₇ H ₆ O ₂	6882		6660	2.14
丁 酸	C ₄ H ₈ O ₂	5939		5994	1.82
二 氧 化 碳	CO ₂	0		0	0
乙 醇	C ₂ H ₆ O	7104		7215	2.08
乳 酸	C ₃ H ₆ O ₃	3608		3219	1.07
甲 烷	CH ₄	13265		14650	4.00
甲 醇	CH ₄ O	5439		5162	1.50
酚	C ₆ H ₅ O	7770		7659	2.38
丙 酸	C ₃ H ₆ O	4940		4885	1.51

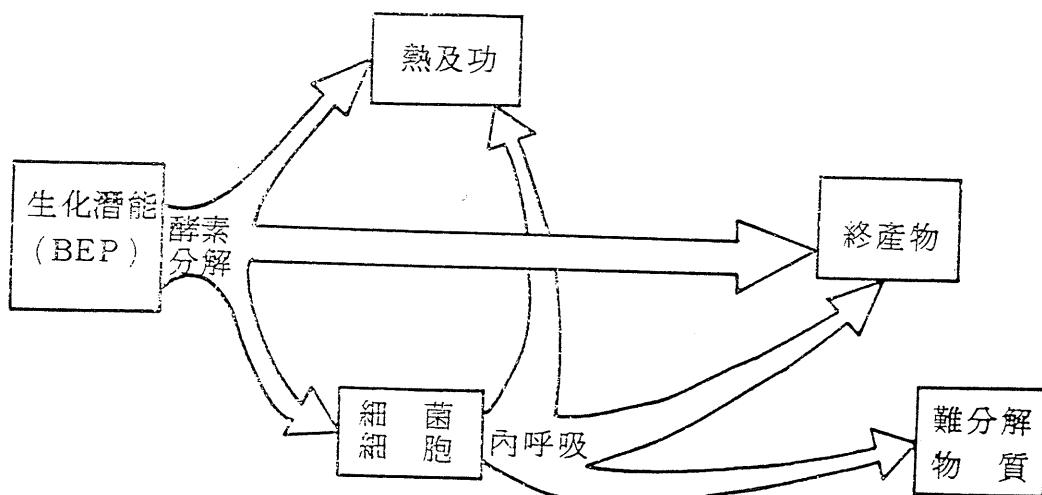
由表三計算之熱值與實際量測之熱值，其誤差皆在 10% 以內，且由表三得知，理論 COD 與熱值 (CEP) 之間有密切關係存在，即

由於 COD 之量測快速，故可以利用 COD 之含量估計有機物之熱值，上述 CEP 與 COD 之關係，在處理廠內污染物之能量分析甚為重要，因為分析時可以估計每 kg COD 其值熱 (CEP) 約為 3366kcal，借此關係來做處理廠內質量及能量轉換之依據。

(3)生化潛能 (Biochemical Energy Potential) BEP

生化潛能之定義為：可以被生物氧化之有機物質在完全氧化至 CO_2 及 H_2O 時，放出之能量。因 BEP 僅為 CEP 中生物可分解之部份，即 BOD_L 約等於 COD，故其熱值亦可估計如下：

上述之關係可同時用於好氧及厭氧程序能量流之計算，圖七列出有機物被分解時，BEP與量流之關係。



圖七：有機物分解時，能量流之分佈圖

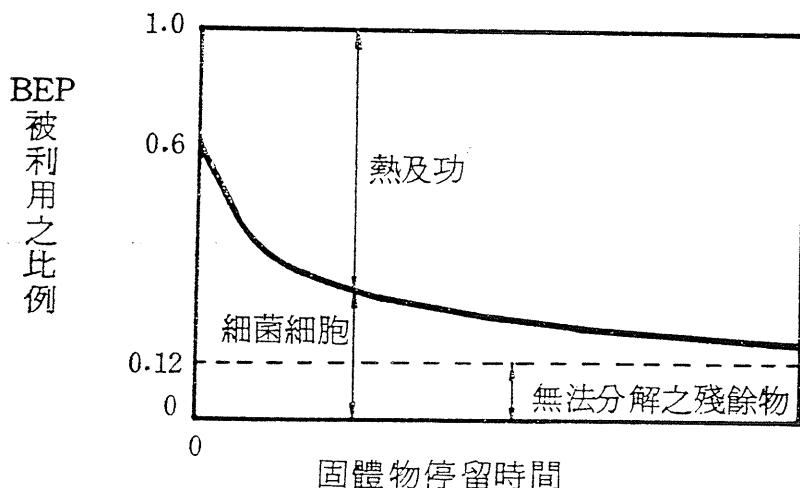
根據圖七得知，有機物之生化潛能可表示如下

其中：**BEP** 有機物為有機物之生化潛能

CEP 細胞為細胞之化學潛能

CEP 終產物為終產物之化學潛能（如 CH_4 , H_2O 及 CO_2 等）

由於 CO_2 及 H_2O 為很穩定之化合物，故無 CEP 存在。對好氧性微生物分解有機物而言，其 BEP 一部份轉化於細菌細胞中（即廢棄之污泥），另一部份以熱及功之型式散失在環境中，或用於運動及輸送物質。在廢水處理系統中，生化潛能受系統污泥齡及有機物負荷之影響甚大，當固體物停留時間增長或有機物負荷減少，則因內呼吸作用，使大部能量以熱及功之型式散失，故 BEP 存在於細胞中之比例減少，其關係如圖八。



圖八：固體物停留時間與 BEP 之關係

在一廢水處理系統中，能量釋放於熱及功的比例，可由系統中之 CEP 計算而得，即

其中 COD_{in} : 派入系統內有機物之總COD量 (Kg)

COD_{out} : 流出系統之有機物總COD量,

CEP 熱及功：以熱及功之型式損失之化學潛能

厭氧前進性好率進行，有機物之 7% 則以熱及功之型式散失於環境之中，一般厭氧程序主要之代謝產物為 CH_4 及 CO_2 並無化學潛能存在，只有甲烷可供利用。對一操作正常的厭氧消化槽而言，可以利用 COD 或 BOD 之平衡來估計甲烷產生量，並以每 m^3 甲烷之熱含量為 5,500 Kcal 來計算其熱值，這種轉換在計算消化瓦斯回收利用時非常重要。

4. 都市污水處理廠之能量流分析

根據上述，每公斤 BOD 或 COD，其熱值相當於 3,360 Kcal，故流入污水處理廠之總能量通量即等於流入之總 BOD_L 量乘以 3,360 Kcal，以下僅就一般典型之都市污水處理廠進行廠內之質量能量流分析，分析所需之基本整據或轉化係數如下：

(1) 處理廠之污水及污泥處置流程如圖一。

(2) 分析用之基本數據：

假設處理之流入污水量為 274,000 CMD

設計水質如下：

	流入	流出
流量 (CMD)	274,000	274,000
BOD (mg/l)	200	20
SS (mg/l)	200	20

轉化係數：

BOD 衰減係數	: $K_1=0.1/day$
生化潛能 (BEP)	: $1\text{ kgBOD}_L = 3,360 \text{ kcal}$
電能	: $1\text{ kWh} = \text{kcal}$

(3) 廠內能量消耗及回收流程

根據圖一之處理流程及設計容量，可將污水處理廠之設備單元分成抽水站、預先處理、初級處理、活性污泥曝氣槽、加氯、濃縮槽、厭氧消化槽及污泥脫水搬運設施等 8 個重要單元，分別做各單元之質量及能量平衡計算，計算結果列如表四，表中廠內能量消耗之估算依據國內迪化污水處理廠操作之用電記錄並參考文獻加以計算而得，另厭氧污泥消化單元消化瓦斯回收發電計算流程詳附錄。

5. 污水處理廠各單元設備能量消耗及回收比例之分佈

由表四之計算流程得知，對每日流入污水量為 274,000m³ 之處理廠而言，每日流入污水廠之 BOD_L 將達 $274 \times 10^6 \text{ Kcal}$ ，經過處理後，部份的生化潛能貯存在污泥中，初沉污泥及

表四：典型都市污水處理廠各單元設備能量消耗及回收計算流程

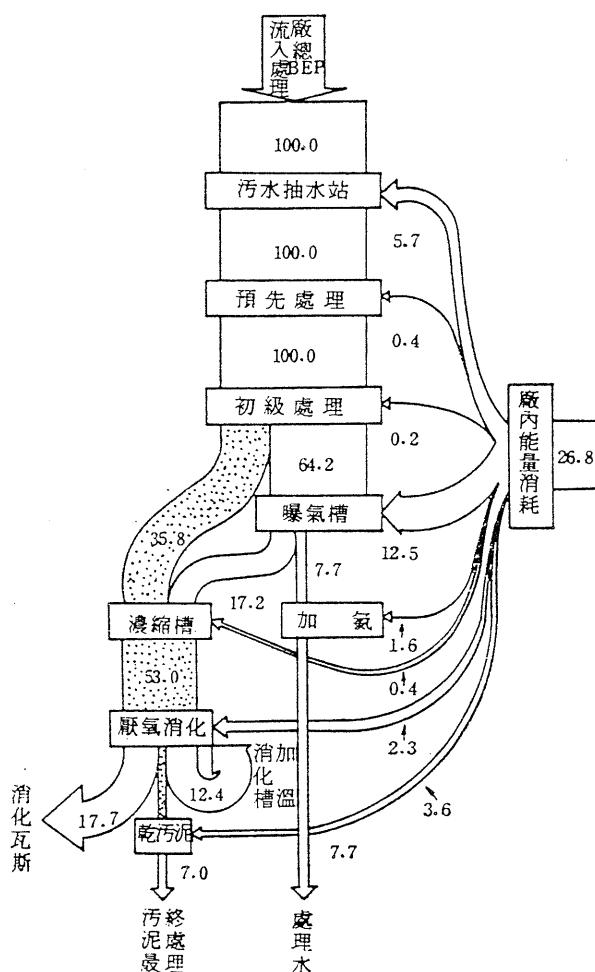
處處單元	能 流	液 體 入 流	質 量 及 體 流 出	污 泥 流 入 出		廠內能量消耗 10^6 Kcal/day	能量回收 10^6 Kcal/day	淨能源 10^6 Kcal/day
				污 流 入	污 泥 流 出			
1.抽水站	$Q=274,000 \text{ CMD}$ $T_{ss}=54,800 \text{ kg/day}$ $BOD_s=54,800 \text{ kg/day}$ $BOD_L=81,400 \text{ kg/day}$ $BEP=274*10^6 \text{ kcal/d}$	與流入相同	無	無	無	15.6	無	15.6
2.預先處理	同第1項	同第1項	同第1項	同第1項	同第1項	1.03	無	1.03
3.初級處理	$Q=274,000 \text{ CMD}$ $T_{ss}=54,800 \text{ Kg/d}$ $BOD_s=54,800 \text{ Kg/d}$ $BOD_L=81,400 \text{ Kg/d}$ $BEP=274*10^6 \text{ Kcal/d}$	$Q=274,000$ $T_{ss}=21,920$ $BOD_s=35,620$ $BOD_L=52,380$ $BFP=176*10^6$	無	無	$Q=1,500$ $T_{ss}=32,00$ $BOD_s=22,560$ $BOD_L=29,000$ $BEP=93*10^6$	0.66	無	0.66
4.活性污泥	$Q=274,000 \text{ CMD}$ $T_{ss}=21,920 \text{ Kg/d}$ $BOD_s=35,620 \text{ Kg/d}$ $BOD_L=52,380 \text{ Kg/d}$ $BEP=176*10^6 \text{ Kcal/d}$	$Q=274,000$ $T_{ss}=5,480$ $BOD_s=5,480$ $BOD_L=6,248$ $BEP=21*10^6$	無	無	$Q=2,200$ $T_{ss}=22,000$ $BOD_s=14,000$ $BEP=47*10^6$	34.25	無	34.25
5.加氣	同第4項	同第4項	同第4項	同第4項	同第4項	4.50	無	4.50
6.濃縮	$Q=2,200 \text{ CMD}$	$Q=1,650 \text{ CMD}$	無	$Q=550 \text{ CMD}$	1.20	無	無	1.20
7.厭氣消化	無	無	無	$Q=1,600$ $T_{ss}=64,000$ $BOD_s=47,500$ $BEP=160*10^6$	$Q=1,600$ $T_{ss}=32,000$ $BOD_s=5,500$ $BEP=20*10^6$	6.40	消費電能：34.43 生污泥加熱：30.4 迴流污泥加熱：3.65 其其回熱：14.1 **	(42.13)
8.脫水脫氣	無	無	無	$32,000 \text{ Kg/d}$	無	$3.5+6.5=10$	無	10,0
總 值 量					73.64	(48.53)	25.11	

() : 代表能量回收

** : 詳附錄

終沉汙泥在厭氧消化之前，其總BEP為 160×10^6 Kcal/day，經過消化後，消化汙泥之BEP僅乘 20×10^6 Kcal/day，大部份的BEP皆貯存於消化瓦斯中，每日高達 125×10^6 Kcal/day，此等消化瓦斯加以發電利用後，可以回收電能及迴流汙泥加熱等（其計算流程見附錄）。

另外，由表四亦得知，污水抽水站、活性汙泥曝氣槽及汙泥脫水搬運等是汙泥脫水搬運等單元是污水廠消耗能量最大的地方，尤其是活性汙泥曝氣單元，其消耗動力佔了整個廠內用電之46%，其次為抽水站，用電量佔廠內用電之21%，汙泥脫水及搬運佔14%，其他單元佔19%，如圖九所示。



圖九：典型都市污水廠各單元設備能量消耗及回收之分佈圖

由表四及圖九顯示，處理廠內每日消耗能量 73.6×10^6 Kcal，若將消化瓦斯發電，每日回收電能可以平衡活性汙泥曝氣單元之用電量，故廠內每日淨能量僅為 25×10^6 Kcal，即處理單位污水量所需之電能為 $\frac{25.11 \times 10^6}{864 \times 274,000} = 0.11$ KWH/m³ 污水，若不考慮消化瓦斯發電回

收電能，則處理單位污水量所需之電能為 $\frac{73.6 \times 10^6}{864 \times 174,000} = 0.31 \text{ KWH/m}^3$ 污水，即消化瓦斯發電回收電能，處理單位污水量所需之比能量降低至未利用消化瓦斯發電之%，顯示其經濟效益甚大，在污水量隨人口日益增加的大都市內，利用消化瓦斯發電回收其電能補充廠內之用電量，可以有效降低處理單位污水量所消耗之電力。

6. 結論

在目前各種可利用的能源中，以電能最為昂貴，由表四顯示，在典型都市污水處理廠中，若以消化瓦斯發電回收電能，可以補充曝水槽所消耗之動力，在能源日益減少的未來，不失為省能源省資源的方法之一，由本文分析結果，獲致下列結論：

(1) 在都市污水處理廠的質量及能量平衡分析中，可利用比能量 (SE)、化學潛能 (C.E) 或生化潛能 (BEP) 作為能量來源及消耗的指標，且每公斤的有機物 (以 COD 或 BOD₅) 表示) 其熱值約等於 3,360 Kcal。

(2) 生物處理單元中，好氧程序約有 50% 之 BEP 以熱及功之型式散失於環境中，另外 50% 之 BEP 轉化成污泥或存在於放流水中，厭氧程序則有 84% 之 BEP 以甲烷型式存在，8% 之 BEP 轉化成污泥，另外 8% 之 BEP 以熱及功之型式散失於環境中。

(3) 在都市污水處理廠廠內能量消耗方面，以活性污泥曝氣槽消耗能量最大，佔廠內全部用電量之 47%，其次為抽水站，佔 21% 污泥脫水及搬運佔 14%，其他單元共佔 19%。

(4) 對一典型之都市污水處理而言，若不考慮消化瓦斯發電能，則處理單位污水量之動力消耗為 0.31 KWH/m³ 污水，若以消化瓦斯發電回收電能補充廠內之消耗電力，則處理每單位污水量動力消耗降為 0.11 KWH/m³ 污水。

7. 參考文獻

1. 曾義雄，「細菌代謝」藝軒圖書出版社印行，(1984)。
2. James E. Balley, David F. Ollis, "Biochemical Engineering Fundamentals" McGraw-Hill Book Company, (1979).
3. William F. Owen, "Energy in Wastewater Treatment" by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. 07632. (1982).
4. 歐陽嶠暉、「污泥厭氧消化操作影響因子及消化沼氣利用之研究」，國立中央大學土木工程學研究報告，(1985)。
5. 沖繩縣中部流域下水處理に付ける消化ガス發電に関する技術調査」日本下水道事業團，試験部報告 56~013，昭和 57 年 3 月。
6. 小林忠博，「嫌氣性消化と發生ガラの利用」月刊下水道 Vol. 7 No. 5, pp 71~77. (1982).
7. "Energy Conservation in Municipal Wastewater Treatment" U. S. EPA Construction Grants program, EPA 430/9-77-001, Wash. D. C. (1977).

8. Black, Crow and Eidness, "Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal" EPA Technolgy Transfer Series, (1974).
9. 「西町處理廠汚泥消化ガス發電に於ける技術調査」日本下水道事業團，昭和五十七年二月。
10. 照屋林三，「那霸下水處理廠に於ける消化ガス發電」下水道協會誌，Vol. 20. Nov. (1983).
11. 迪化污水處理廠用電月報資料，(1984)(1985).

附錄 消化瓦斯回收發電之計算流程

(一)下列基本資料用於估計污泥及消化瓦斯：

- (1)投入消化槽污泥量=64,000Kg/d 乾重，投入 TS 中有75%為揮發性物質，投入污泥 TS=4%
- (2)在消化過程中有 45% 之揮發性固體物 (TVS) 被穩定。
- (3)假定生污泥溫度為 16°C
- (4)去除每公斤 TVS 產生消化氣體量為 1.05Nm³
- (5)氣體組成中如下：

CH₄ : 66%

CO₂ : 30%

H₂O : 4%

另外其它氣體如 H₂, H₂S 及 N₂，因量很少不會影響熱平衡。

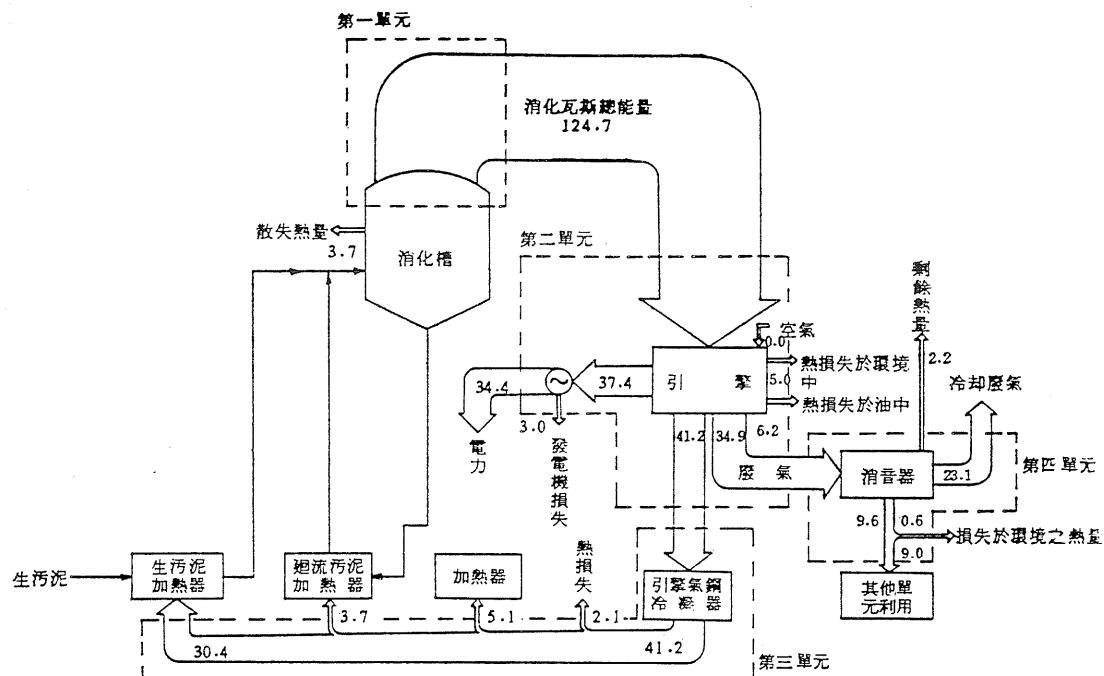
- (6)消化氣體燃燒時，其熱值為 5,500 Kcal/m³
 - (7)消化瓦斯回收發電之設備單元詳圖十。
- (二)根據一般污水處理廠操作用電資料，每日處理 274,000m³ 之汙水量，其廠內各單元用電情形大致如下：

- (1)污水進流抽水設備為 18,150 KWH/d=15.6×10⁶ Kcal/d
- (2)預先處理設備為 1,200 KWH/d=1.03×10⁶ Kcal/d
- (3)初級處理設備 310 Kcal/d=310 KWH/d=0.66×10⁶ Kcal
- (4)活污泥曝氣槽為 30,360 KWH/d=34.3×10⁶ Kcal/d
- (5)加氯設備為 3,870 KWH/d=4.5×10⁶ Kcal/d
- (6)濃縮槽設備為 1,030 KWH/d=1.2×10⁶ Kcal/d
- (7)厭氧消化槽為 11,520 KWH/d=6.4×10⁶ Kcal
- (8)污泥脫水搬運為 10,320 KWH/d=10.0×10⁶ Kcal/d

合 計 73.69×10⁶ Kcal/d

(三)欲評估能量利用時，須計算下列四項：

- (1)決定消化瓦斯之熱值。
- (2)決定燃燒瓦斯回收之熱量是否能滿足上述所列諸項。



圖十：消化瓦斯發電回收系統之能量分佈（單位： (10^6Kcal/day) ）

(3)劃出能量流程圖。

(4)決定整體熱回收效率。

第一單元：首先決定消化瓦斯之熱值

(1)消化瓦斯產量

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{64,000 \text{ Kg 固體物}}{\text{day}} \right) \left(\frac{0.75 \text{ Kg VS}}{\text{Kg 固體物}} \right) \left(\frac{0.45 \text{ Kg VS 被分解}}{\text{Kg VS 投入}} \right) \\
 &\times \left(\frac{1.05 \text{ Nm}^3}{\text{Kg VS 被分解}} \right) = 22,680 \text{ m}^3/\text{day}
 \end{aligned}$$

(2)消化瓦斯能量

$$=(22,680 \text{ m}^3/\text{d}) (5,500 \text{ Kcal/m}^3)=124.74 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

第二單元：計算引擎及發電機之熱平衡

(1)假設30%消化瓦斯之能量轉化為「功」

則產生之功

$$\begin{aligned}
 &= 0.30(124.74 \times 10^6 \text{ Kcal/d}) \\
 &= 37.42 \text{ Kcal/d}
 \end{aligned}$$

假設92%之功可以轉變成動力

則電力

$$= 0.92 \times (37.42 \text{ Kcal/d}) = 34.43 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

(2) 假設33%之消化瓦斯能量可由引擎汽缸水中回收，則由汽缸水中回收之能源
 $=0.33 \times (124.74 \text{ Kcal/d}) = 41.16 \text{ Kcal/d}$

(3) 假設引擎之輻射熱損失為消化瓦斯之 4%
 則輻射熱損失

$$= 0.04 \times (124.74 \text{ Kcal/d}) = 4.99 \text{ Kcal/d}$$

(4) 假設有 5% 消化瓦斯之能量損失於潤滑油中，
 則損失之能量

$$\begin{aligned} &= 0.05(124.74 \text{ Kcal/d}) \\ &= 6.24 \text{ Kcal/d} \end{aligned}$$

(5) 廢氣中之能量為消化瓦斯之能量與前面 4 項總和之差值即廢氣中之熱量
 $= 124.74 - (37.42 + 41.16 + 4.99 + 6.24) \times 10^6 \text{ Kcal/d}$
 $= 34.93 \text{ Kcal/d}$

第三單元：計算由汽缸冷卻水所回收之能量是否能滿足消化槽加溫。

(1) 投入污泥加測之熱量，設污泥濃度 4%，比熱為

$$\begin{aligned} &1 \cdot \frac{1.0 \text{ Kcal}}{\text{Kg 污泥}/^\circ\text{C}} \\ &= \left(\frac{64,000 \text{ Kg 固體物量/day}}{0.04 \text{ Kg 固體物/Kg 污泥}} \right) \left(\frac{1.0 \text{ Kcal}}{\text{Kg 污泥}/^\circ\text{C}} \right) (35^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C}) \\ &= 30.4 \times 10^6 \text{ Kcal/day} \end{aligned}$$

(2) 迴流污泥加測之能量

迴流污泥加溫之目的為補充因消化槽構造所損失之能量，假設此一加溫之能量為生
污泥之 12%，即迴流污泥加溫能量

$$= 0.12(30.4 \times 10^6) \text{ Kcal/d} = 3.65 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

(3) 計算熱水迴路中能量之損失

因為構造物屬密閉系統，故熱量之損失少，一般假設為引擎汽缸之 5%，即
迴路中能量損失

$$= 0.05(41.16 \times 10^6) \text{ Kcal/d} = 2.06 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

(4) 消化槽所需之加熱量

$$= (30.4 + 3.65 + 2.06) \times 10^6 = 36.11 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

(5) 由冷卻水中回收之能量減去消化槽加溫之能量

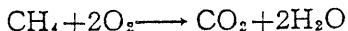
$$= (41.16 - 36.11) \times 10^6 = 5.05 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

由於冷卻水中回收之能量足以提供消化槽加溫之用，為保護燃燒引擎有足夠之冷卻程
度，此剩餘之能量 $5.1 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$ ，必須加以利用或排掉。

第四單元：計算排出引擎之熱燃燒氣體之熱量，是否足夠滿足其它單元熱量需要。

由前面計算知，在熱燃燒氣體中，可用之熱量為 $37.42 \times 10^6 \text{ Kcal/day}$ ，但並非此能量
皆可回收利用，保護內部防止腐蝕，一般將熱燃燒氣體之溫度，降低至 177°C

(1) 首先計算廢氣體積，氣體產生可依化學計量方式計算：



(a) CO₂ 含量：為消化瓦斯中 CO₂ 含量加上 CH₄ 燃燒時所產生之 CO₂ 量

①由前面計算消化瓦斯含量為 22,680 m³/d；

②消化瓦斯中 CO₂ 所佔體積比為 30%

故消化瓦斯中 CO₂ 含量為

$$= 0.3(22,680) = 6,804 \text{ m}^3/\text{d}$$

③由上述方程式知每 m³ 之 CH₄ 燃燒會形成 1m³ 之 CO₂，消化瓦斯中，CH₄ 之成份佔 66%，故燃燒甲烷產生之 CO₂ 量

$$= 0.66(22,680) = 14,969 \text{ m}^3/\text{d}$$

④CO₂ 之總體積

$$= 6,804 + 14,969 = 21,773 \text{ m}^3/\text{d}$$

(b) CH₄ 體積：全部燃燒掉，故不存在。

(c) O₂ 體積：假設過剩空氣量為理論空氣量之 10%，且此過剩空氣未被 O₂ 利用，則由上式計算得燃燒 1m³ CH₄ 需氧 2m³，故 O₂ 之體積

$$= (2)(0.1) \left(\frac{0.66 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{m}^3 \text{ 消化氣體}} \right) (22,680 \text{ m}^3/\text{d}) = 2,994 \text{ m}^3/\text{d}$$

(d) N₂ 體積：N₂ 和空氣一起通過燃燒系統而無任何變化，故 N₂ 之體積

$$= (22,680 \text{ m}^3/\text{d}) (0.66) \left(\frac{(1.1 \times 2) \text{ m}^3 \text{ O}_2}{\text{m}^3 \text{ CH}_4} \right) \left(\frac{0.79 \text{ m}^3 \text{ N}_2}{0.21 \text{ m}^3 \text{ O}_2} \right)$$

$$= 123,885 \text{ m}^3/\text{d}$$

(e) H₂O 體積：H₂O 之體積為消化瓦斯中 H₂O 含量加上 CH₄ 燃燒時產生之體積

①消化瓦斯中所含之 H₂O 體積 = 0.04(22,680)

$$= 908.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

②由式 (4.1) 計算，每 m³ CH₄ 燃燒產生 2m³ H₂O 故 H₂O 體積

$$= 22,680(0.66) \left(\frac{2 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} \right)$$

$$= 29,938 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$③ \text{H}_2\text{O} \text{ 總體積} = (908.2 + 29,938) = 308,448 \text{ m}^3/\text{d}$$

(f) 總氣體體積 = a + b + c + d + e

$$= 21,773 + 0 + 2,994 + 123,885 + 29,938$$

$$= 178,590 \text{ m}^3/\text{d}$$

(2) 計算廢氣中各氣體之熱含量

以 25°C 為基準，根據熱力學原理計算得成分在 177°C 時之熱含量總熱含量為

$$\Delta H = \Delta H_{\text{CO}_2} + \Delta H_{\text{O}_2} + \Delta H_{\text{N}_2} + \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$$

故在 177°C 時廢氣中之熱含量

$$\Delta H = (1.39 + 0.14 + 5.67 + 15.94) \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

$$= 23.14 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

$$=23.14 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

(3)廢氣中之熱量=34.93 Kcal

$$\text{廢氣中各成分帶走之熱含量}=23.14 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

$$\text{故淨能量}=(34.93-23.14) \times 10^6 \text{ Kcal/d}=11.79 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

可以滿足各單元所需能量

(4)計算蒸氣熱損失及冷凝迴路中熱損失

因屬於密閉系統，故熱損失很少，假設損失為剩餘氣之5%，則熱損失

$$=0.05(11.79-0.59) \times 10^6=11.20 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$$

剩餘熱量可以足夠滿足其它單元所需，如圖六所示。

計算能量回收系統之效率

有許多種方法可以評估能量回收之效率，其中之一就是由輸入能量中回收可用之熱及功。

(1)可用之熱及功

(a)產生電能： $34.43 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$

(b)生污泥加熱： $30.4 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$

(c)迴流汚泥加熱： $3.65 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$

(d)其它單元熱量 $9.0 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$ (e)空間加熱： $5.10 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$

(2)由消化瓦斯輸出之能量= $124.74 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$

(3)能源回收效率 $\left(\frac{34.43+30.4+3.65+9.0+5.1}{124.74} \right) 100 = 66\%$

根據以上之計算可知，在典型都市污水處理廠中，若以消化瓦斯發電，其能源回收效率可高達66%，其中產生電力 $34.4 \times 10^6 \text{ Kcal/d}$ (40,000KWH) 可以平衡活性污泥曝氣單元之用電量，在能源日益珍貴的今日，利用消化瓦斯發電，確實可以收到省能源之效果。