

# 有機污泥資源化技術之發展與應用

朱敬平 [cpchu@sinotech.org.tw](mailto:cpchu@sinotech.org.tw)

中興工程顧問社環境工程研究中心



# 簡報大綱

---

- I. 污泥的產生與特性
- II. 化學處理資源化技術
- III. 生物處理資源化技術
- IV. 熱處理資源化技術
- V. 結論

# 一、污泥的產生與特性



# 污泥的產生與特性

## 其 來源

- 廢水處理設施（物化處理與生物處理程序）自水中移除污染物所產生之廢棄物。

## 其 特性（脫水前）

- 固含量約0.5~1%，粒徑約數十到數百微米
- 高孔隙度，比表面積大，易破碎
- 帶負電與吸附水份，不易脫水

## 其 特性（脫水後）

- 固含量約10~40%
- 含濃縮之重金屬、污染物與致病菌

# 污泥的分類

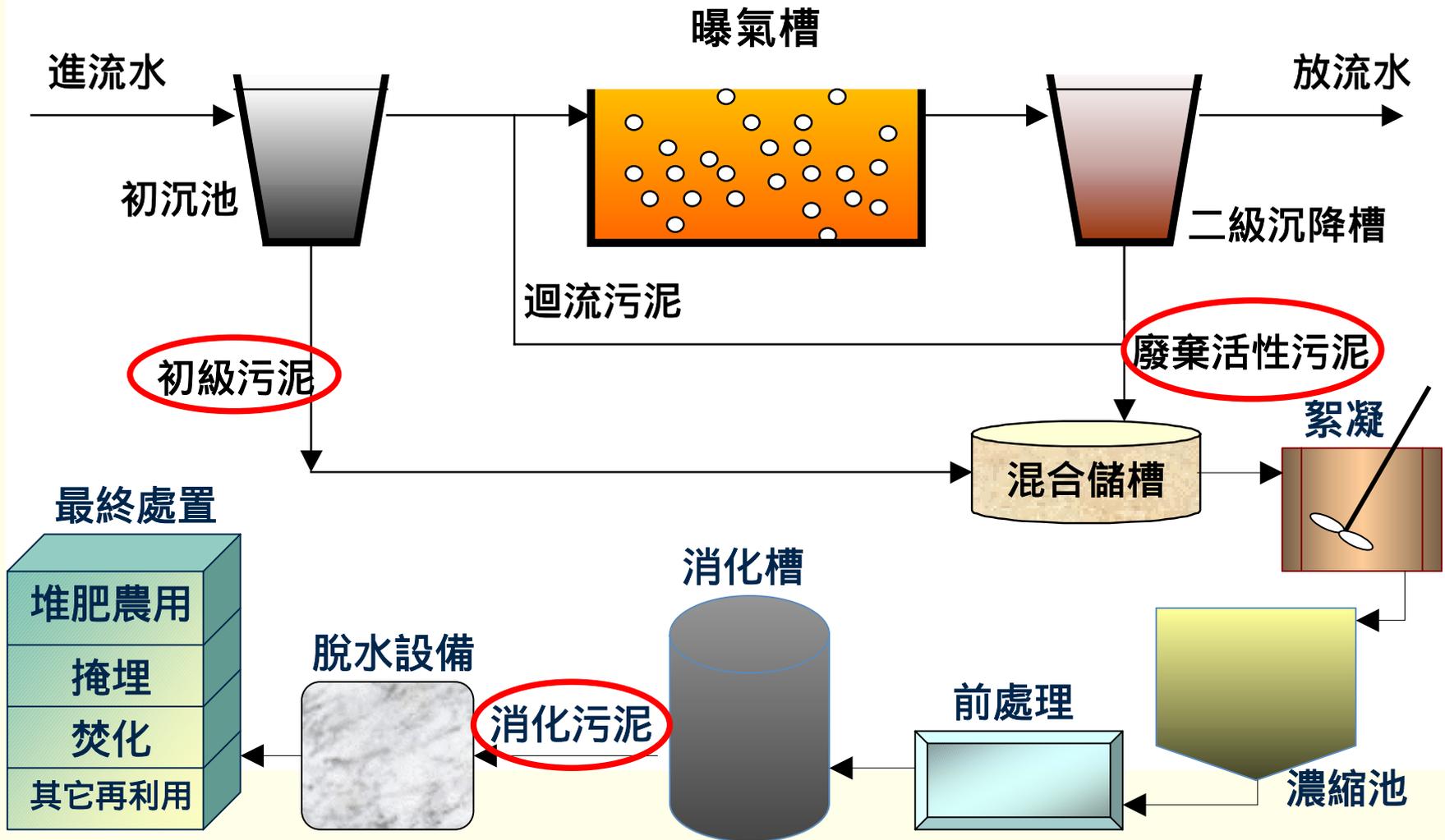
## ≡ 依處理程序

- 初級污泥 (*Primary sludge*)
- 生物污泥 (*Biological sludge*)
- 消化污泥 (*Digested sludge*)

## ≡ 依產業類別

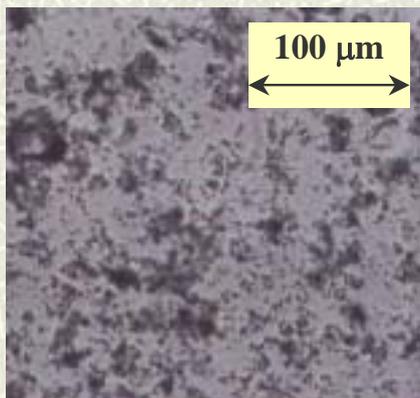
- 生活污水 (*Sewage sludge*)
- 工業污泥 (*Industrial sludge*)

# 典型廢污水處理程序

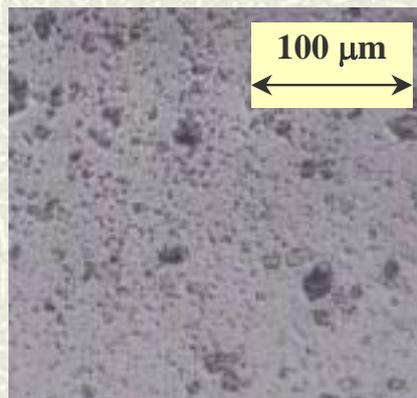




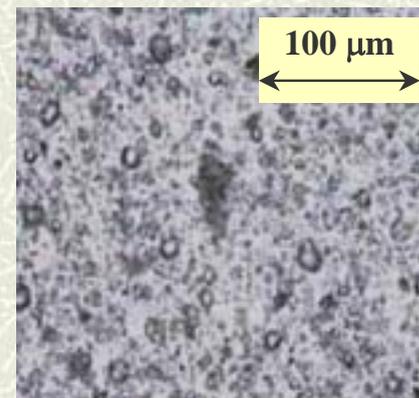
# 初級污泥膠羽



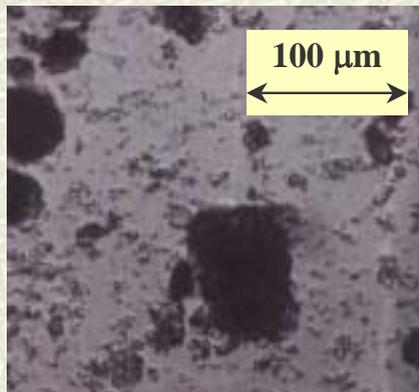
造紙廠 (初沉池)



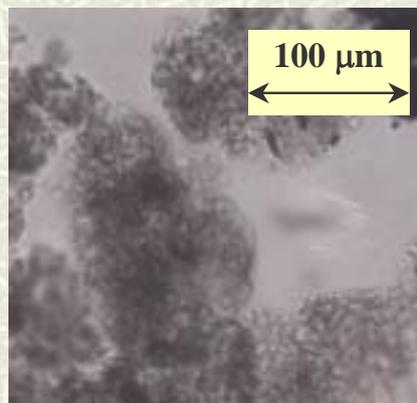
都市污水廠 (初沉池)



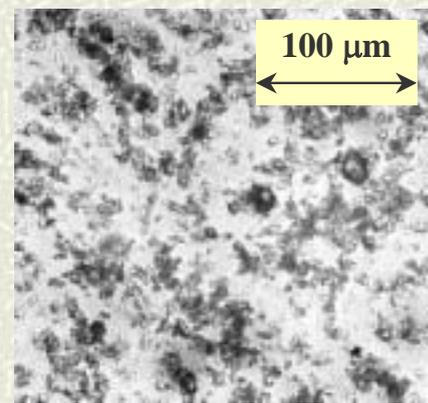
煉油廠 (浮除槽)



化纖廠 (浮除槽)

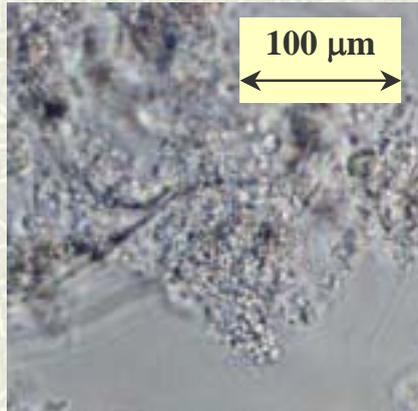


電鍍廠 (初沉池)

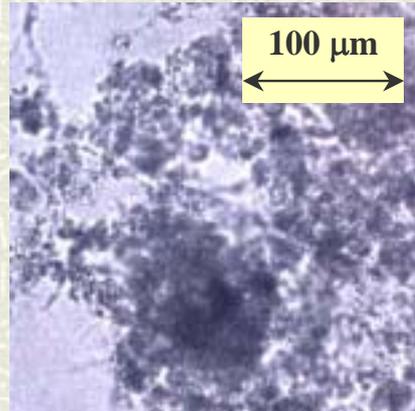


淨水廠 (初沉池)

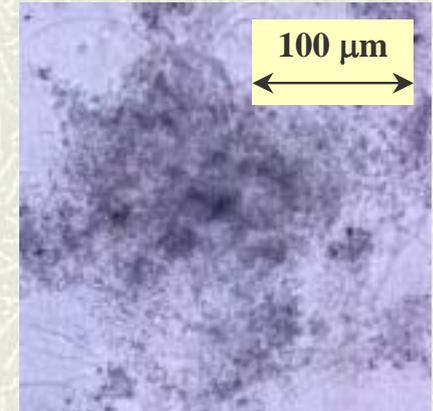
# 二級 (生物) 污泥膠羽



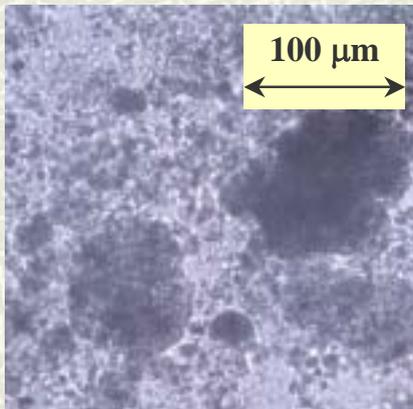
食品廠 (活性污泥)



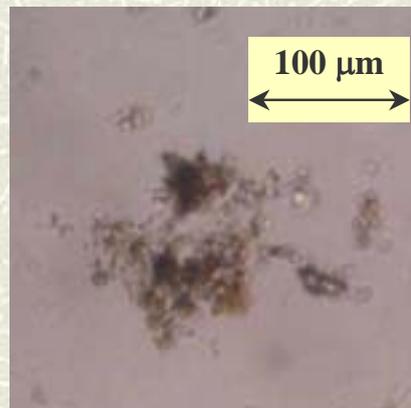
都市污水廠 (活性污泥)



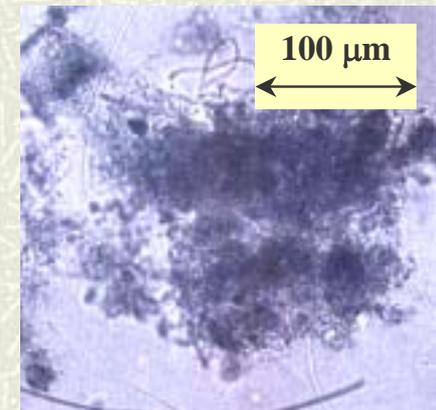
造紙廠 (活性污泥)



染整廠 (活性污泥)

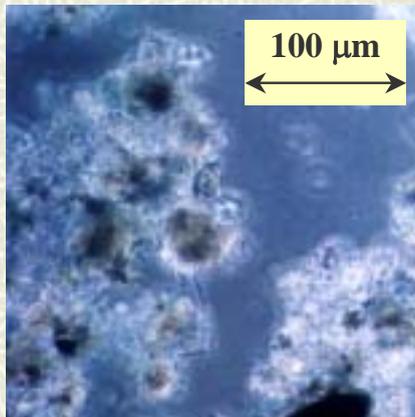


化纖廠 (活性污泥)

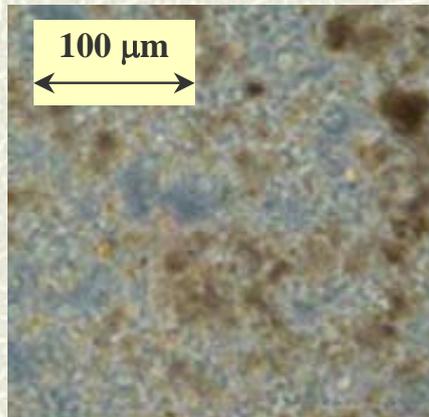


都市污水廠 (活性污泥)

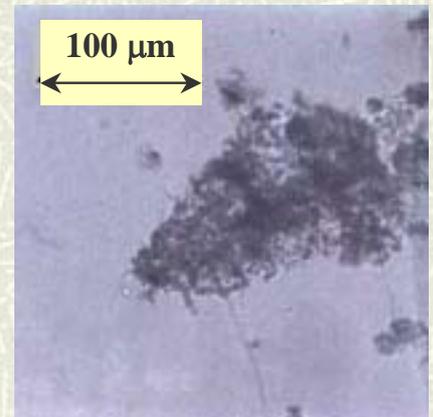
# 厭氧消化污泥膠羽



食品廠污泥  
(血清瓶試驗)



都市污水廠污泥  
(血清瓶試驗)



都市污水廠  
(活性污泥 + 初級污泥)  
厭氧消化槽

# 依產業別

## ■ 民生污泥

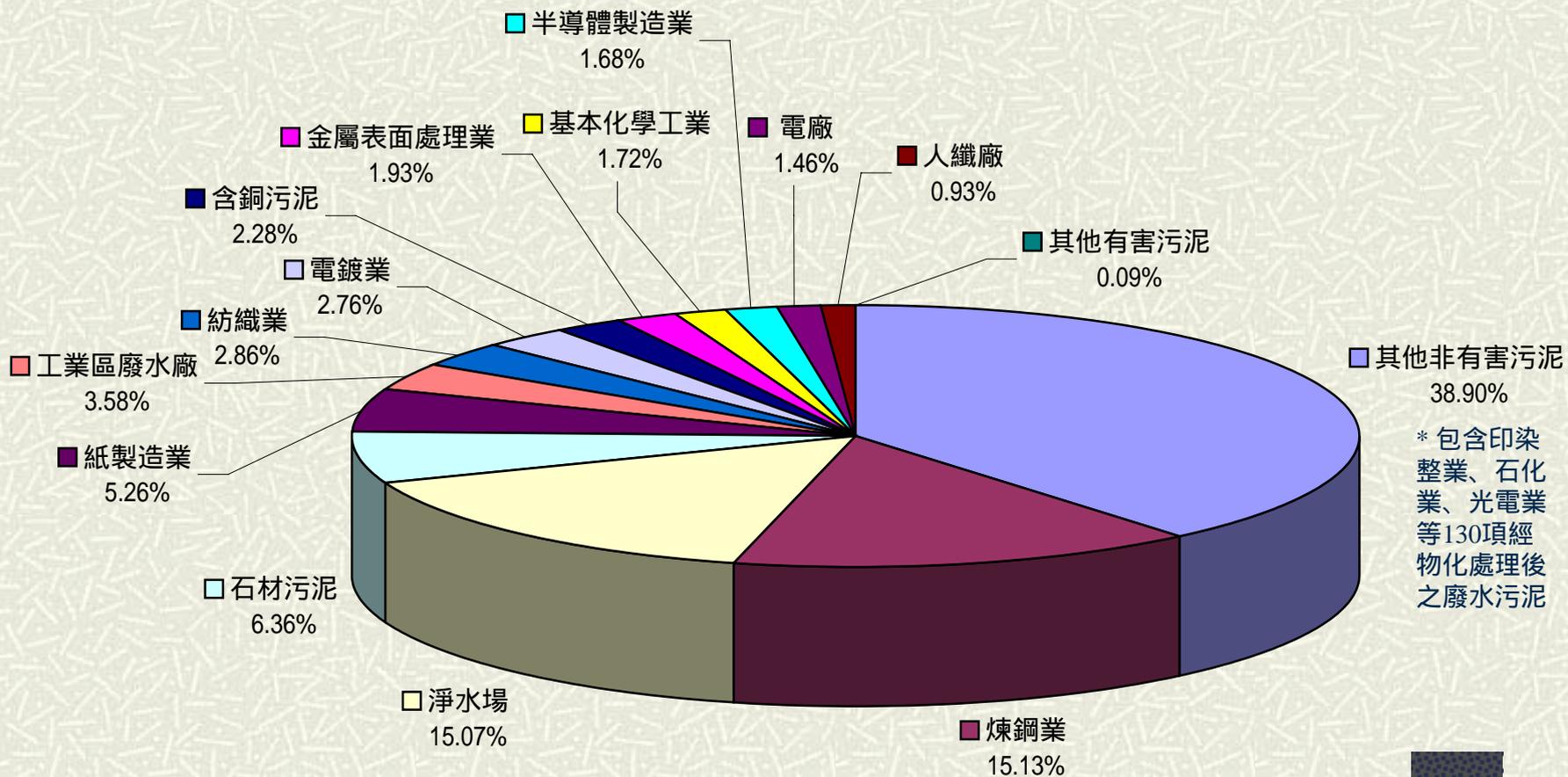
- 產生總量：每年約50萬噸 (92年資料，固含量20%)
- 特性：
  - \* 有機物比例高
  - \* 含大量致病菌

## ■ 工業污泥

- 申報產生總量：約200萬噸/年 (93年資料)
- 特性：
  - \* 性質依產業別差異甚大
  - \* 35%為有機污泥，65%無機污泥

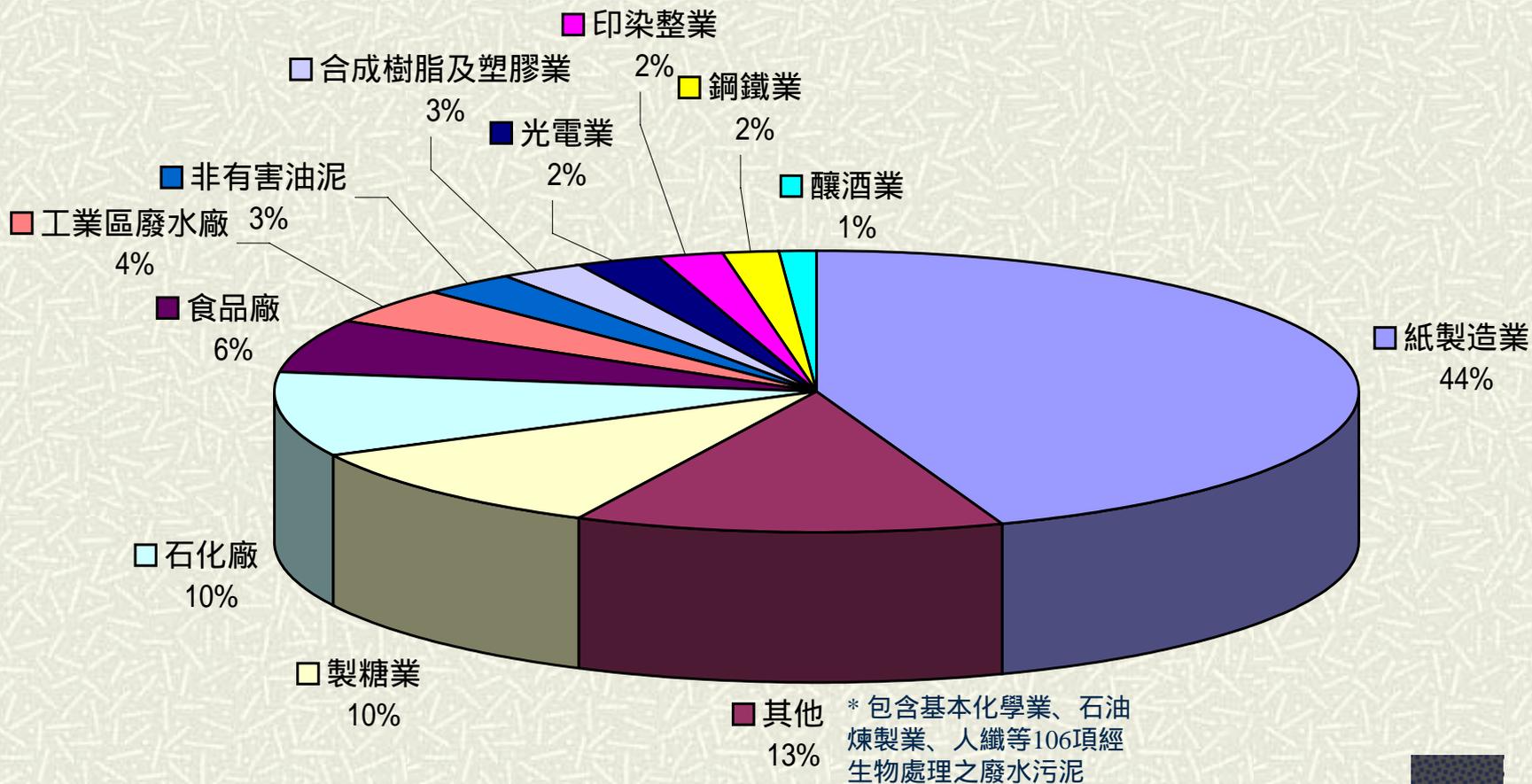
## ■ 每年約產生120萬噸的有機污泥

# 無機類工業污泥



\* 包含印染整業、石化業、光電業等130項經物化處理後之廢水污泥

# 有機類工業污泥



# 廢棄污泥減量

## ■ 污泥處置費用

- 一般佔廢污水廠操作維護總費用30%~40%

## ■ 調理與脫水

- 每噸廢水折合約1~2元

## ■ 污泥委託清運價格

- 一般污泥：每噸泥餅約1,400 ~ 2,000元
- 有害污泥：每噸泥餅約5,000 ~ 10,000元

# 廢棄污泥減量 (續)

- 其 製程改善
  - 反應效率提升、原料減量、廢水回收...
- 其 調整初級或二級處理操作
  - 污泥迴流、菌相控制、薄膜生物反應器...
- 其 前處理
  - 加強水解、好厭氧消化...
- 其 固液分離
  - 調理藥劑選用、選用適當脫水設備
- 其 再利用與資源回收

## 二、污泥再利用現況



# 再利用法規

## ■ 污泥再利用相關規定：

### ■ 民生污泥 (一般廢棄物)

- 「廢棄物清理法」(93.06.02) 第14條
- 「一般廢棄物回收清除處理辦法」(93.12.29) 第34條
- 依個案由執行機關 (環保局) 向環保署提出申請審查

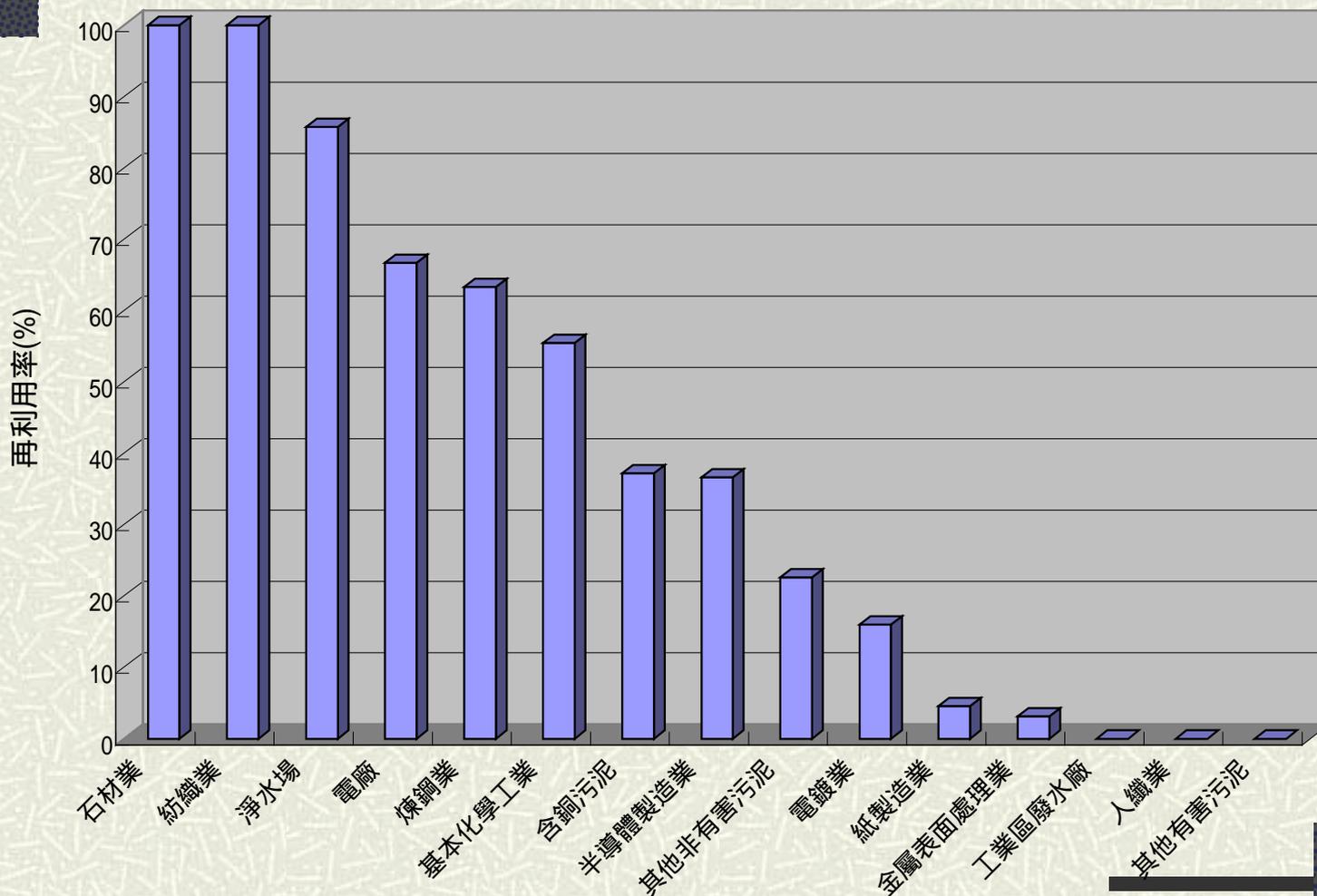
### ■ 工業污泥 (事業廢棄物)

- 「廢棄物清理法」(93.06.02) 第39條
- 部份類別已公告直接可再利用項目 (屬公告再利用)，其它類需以個案或通案向目的事業主管機關提出再利用計畫書申請與審查

## ■ 再利用用途之產品應符合國家標準或該產品之相關使用規定。

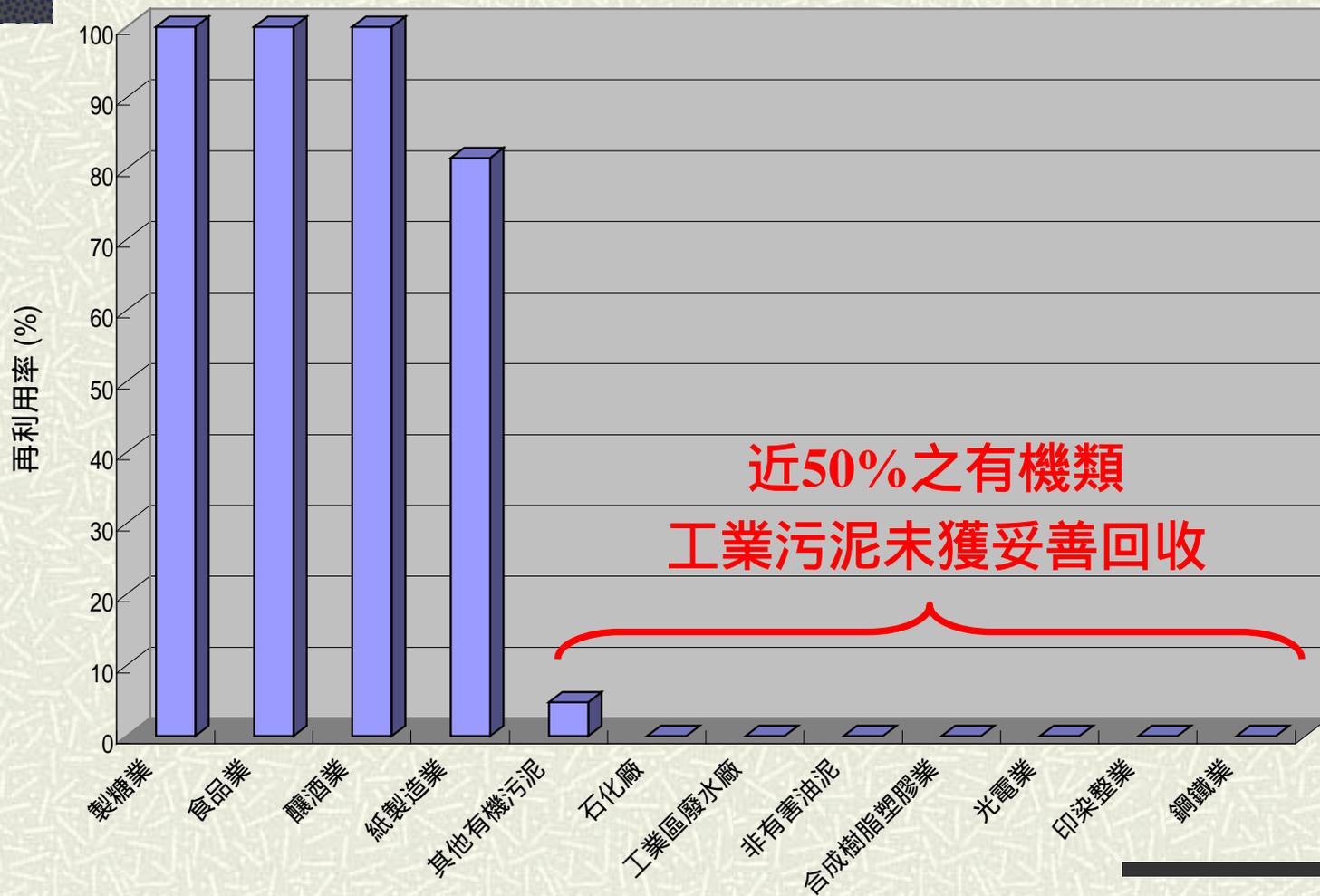


# 無機類工業污泥申報再利用率





# 有機類工業污泥申報再利用率



# 常見再利用方式

## ■ 經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式（污泥部份）

種類	再利用方式
石材污泥	水泥原料、固化製品原料、化工原料、廢氣吸附原料、海堤固化養灘工程基材、工程填地材料、輕質粒料原料、肥料原料、土壤改良
製糖濾泥	有機質肥料原料、培養土原料或土壤改良
食品加工污泥	有機質肥料原料或土壤改良
釀酒污泥	有機質肥料原料、培養土原料或土壤改良
漿紙污泥	有機質肥料原料、保溫材料原料、防火建材原料、人工粒料原料、土壤改良、鍋爐燃料或水泥窯輔助燃料
紡織污泥	有機質肥料原料、保溫材料原料、防火建材原料、人工粒料原料、磚瓦窯或水泥窯或鍋爐輔助燃料
自來水淨水污泥	水泥原料。
氟化鈣污泥	水泥原料

# 再利用產品的加值？



# 生質能

- ✦ 定義：利用生質物經轉換所獲得的電與熱等可用的能源。
- ✦ 生質物：由生物產生的有機物質
  - 木材與林業廢棄物 (木屑等)
  - 農作物與農業廢棄物 (玉米穗軸、稻殼、蔗渣等)
  - 畜牧業廢棄物 (動物屍體、家禽畜糞便)
  - 都市垃圾
  - 各類有機污泥
  - 其它工業有機廢棄物

# 生質能 (續)

## ■ 生質燃料

- 甲醇 (煤炭、殘油、木材與林業廢棄物之氣化)
- 乙醇 (糖蜜、玉米、高粱、甜菜、水解污泥)
- 生質柴油 (植物油、動物性廢油脂)
- 生質氫氣 (微生物利用基質)
- 生質甲烷 (沼氣)
- 廢棄物熱解燃油
- 廢棄物衍生燃料

# 廢棄物產生生質能 (續)

## 其 優點：

- 併同處理廢棄物，減少掩埋量
- 減少對石化燃料的倚賴
- 產品單價可能較高

## 其 缺點：

- 製程多半耗能而成本偏高
- 產品品質不全然適用現行設備
- 製造與使用時可能造成二次污染
- 供需產業鏈尚待健全

# 有機污泥資源化技術

## 其 化學處理

- 回收有用物質或作為原物料

## 其 生物處理

- 堆肥與農業利用
- 厭氧消化產氣
- 發酵產生酒精

## 其 熱處理

- 焚化廢熱回收
- 熔融燒結製造建材
- 固態廢棄物衍生燃料
- 熱裂解液化與氣化

## 三、化學處理資源化技術



# 轉製動物飼料

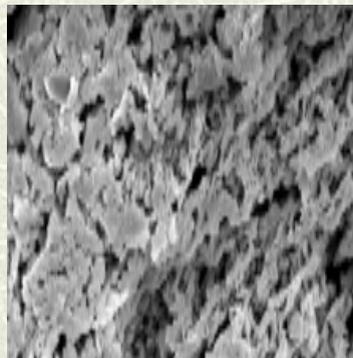
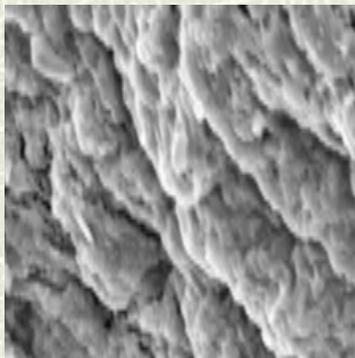
- 其 有機污泥由微生物組成，含大量蛋白質與醣類，可轉作飼料蛋白補充物
- 其 適用類別：低重金屬含量活性污泥或油脂污泥
- 其 製程一：  
提高污泥固含率至20~25%以上，經高壓 (200 atm) 與加熱 (110°C)，蒸煮乾燥後再與一般飼料混合
- 其 製程二：  
以氫氧化鈉溶解液態污泥蛋白質後，與硫酸反應生成胺基酸沉澱物，分離後加工製成飼料蛋白

# 轉製活性碳

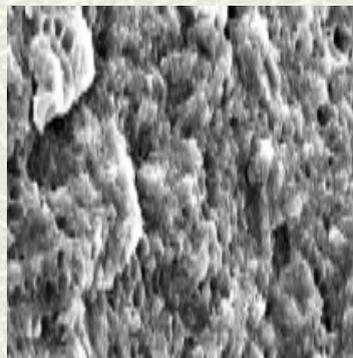
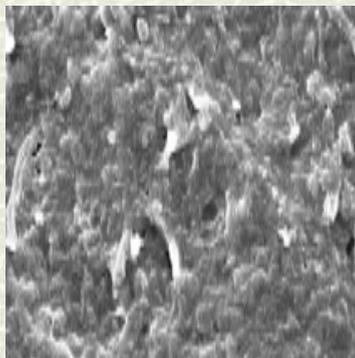
- ✦ 有機污泥含高濃度碳元素，經炭化與活化後可形成高比表積之活性碳，可吸附重金屬、總磷、乳化油脂、色度物質與其它有機物
- ✦ 適用類別：各類生物污泥
- ✦ 製程：
  1. 將污泥予以乾燥固含率至50%以上
  2. 控制在低氧環境，於300~350°C發生炭化
  3. 化學活化法：浸泡於活化劑中，如硫酸亞鐵、磷酸等
  4. 或採用物理活化法：通入水蒸氣、二氧化碳等
  5. 以酸洗降低灰份，提高吸附能力 ( $> 300 \text{ m}^2/\text{g}$ )

# 轉製活性炭 (續)

溫度



\* 未經活化之污泥加熱表面



絮凝劑量

# 回收鹽類

- ✦ 當污泥中含有大量之金屬鹽，如鋁鐵等混凝劑，或銅鉻等重金屬，應予以回收，以減積去毒
- ✦ 適用類別：一般多用於淨水污泥或重金屬污泥，有機污泥較少用
- ✦ 回收鋁鹽凝聚劑：
  1. 濃縮污泥至固含量20%以上
  2. 加入硫酸溶解氫氧化鋁，形成硫酸鋁溶液
  3. 初步固液分離
  4. 以離子交換法吸附鋁離子，再以酸洗沖出
  5. 得到高純度鋁鹽，回收率達80%

# 化學處理回收品所面臨問題

- ✦ 產品製造成本比同類一般量產產品偏高
- ✦ 產品品質較差，用途受限，售價難以反應直接製造成本
- ✦ 常搭配同類工業化產品輔助使用，產品市場規模因而受侷限
- ✦ 製程可能產生二次污染，例如產生大量酸鹼廢液

## 四、生物處理資源化技術



# 土壤調節劑 (直接施用)

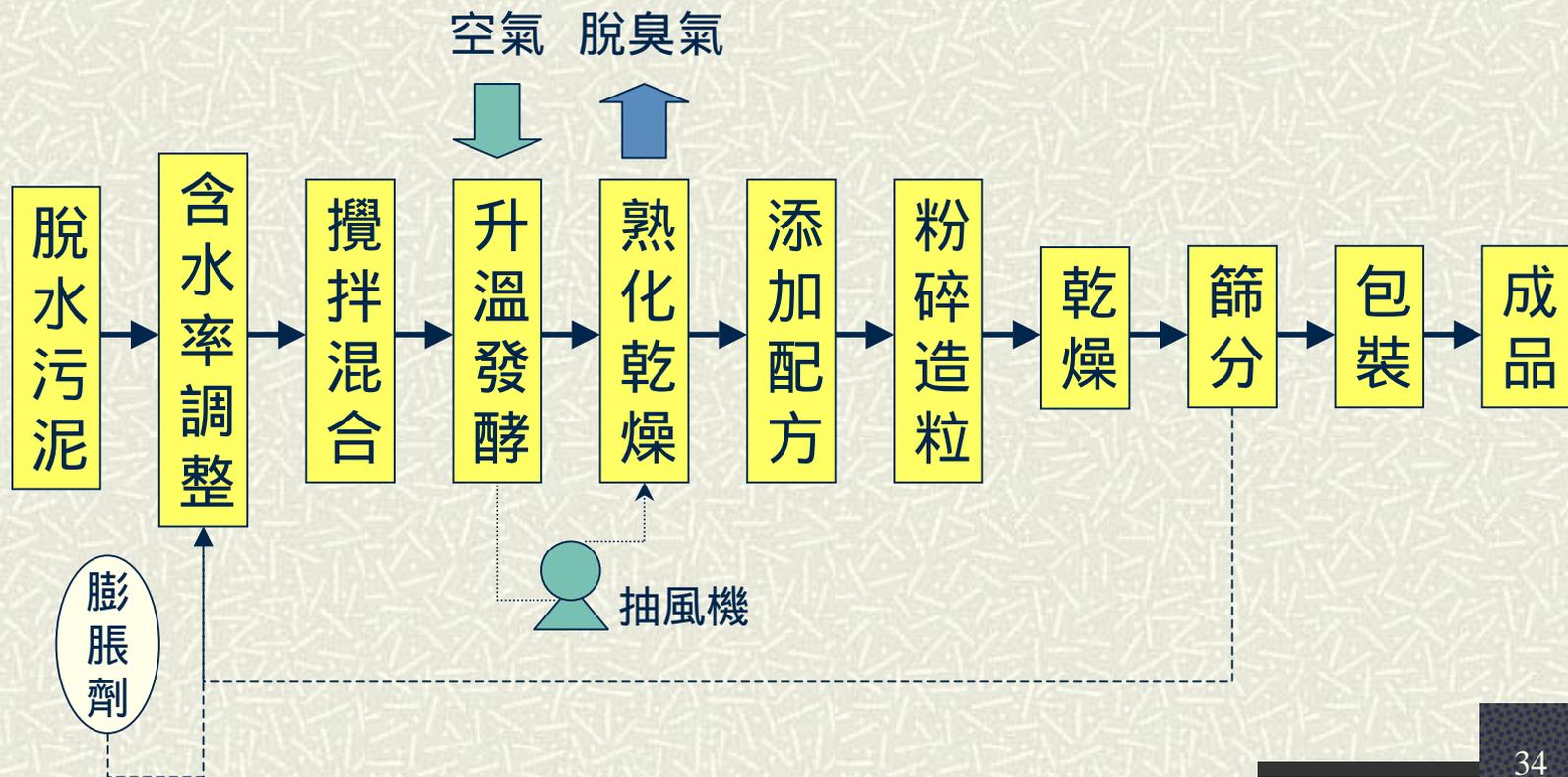
- ✦ 有機污泥含有揮發性固體物、氮、磷、鉀及鹼度等多種與肥料相同之成分，可直接施用於土壤，改良土地肥力，調整土壤物理性質。
- ✦ 適用類別：含低重金屬且經消化減菌後的生物污泥
- ✦ 施用：
  1. 進行消化或殺菌
  2. 濃縮污泥至固含量10%以上
  3. 必要時予以乾燥造粒，利於翻堆加工
  4. 依化學成份 (主要為重金屬)，一般年施用量控制在1 ton/ha左右

## 堆肥 (間接施用)

- ✚ 以好氧通氣方式，利用微生物來分解、轉化有機污泥所含的易腐敗之揮發性有機質，使其安定化。
- ✚ 在堆肥的過程中，藉由微生物之酵素合成作用下，可促進有機物質聚合為腐植質（腐植酸、黃酸或腐植膠等）
- ✚ 適用：各類生物污泥與食品油脂類污泥

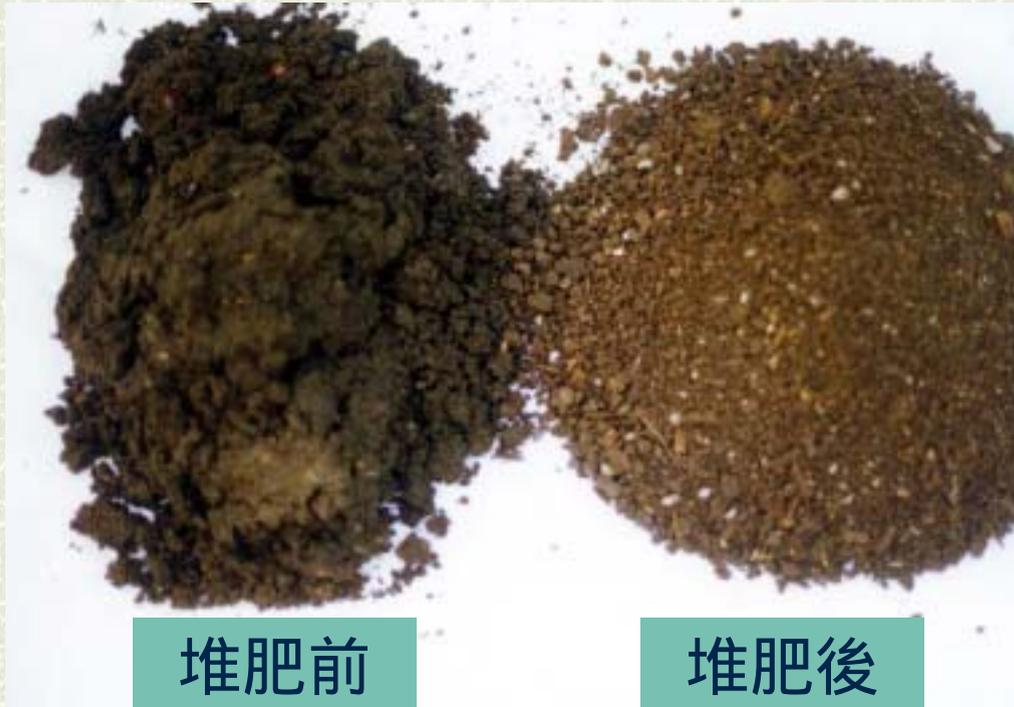
# 堆肥 (間接施用) (續)

## 堆肥製程



# 堆肥 (間接施用) (續)

## ≡ 堆肥前後之污泥



堆肥前

堆肥後

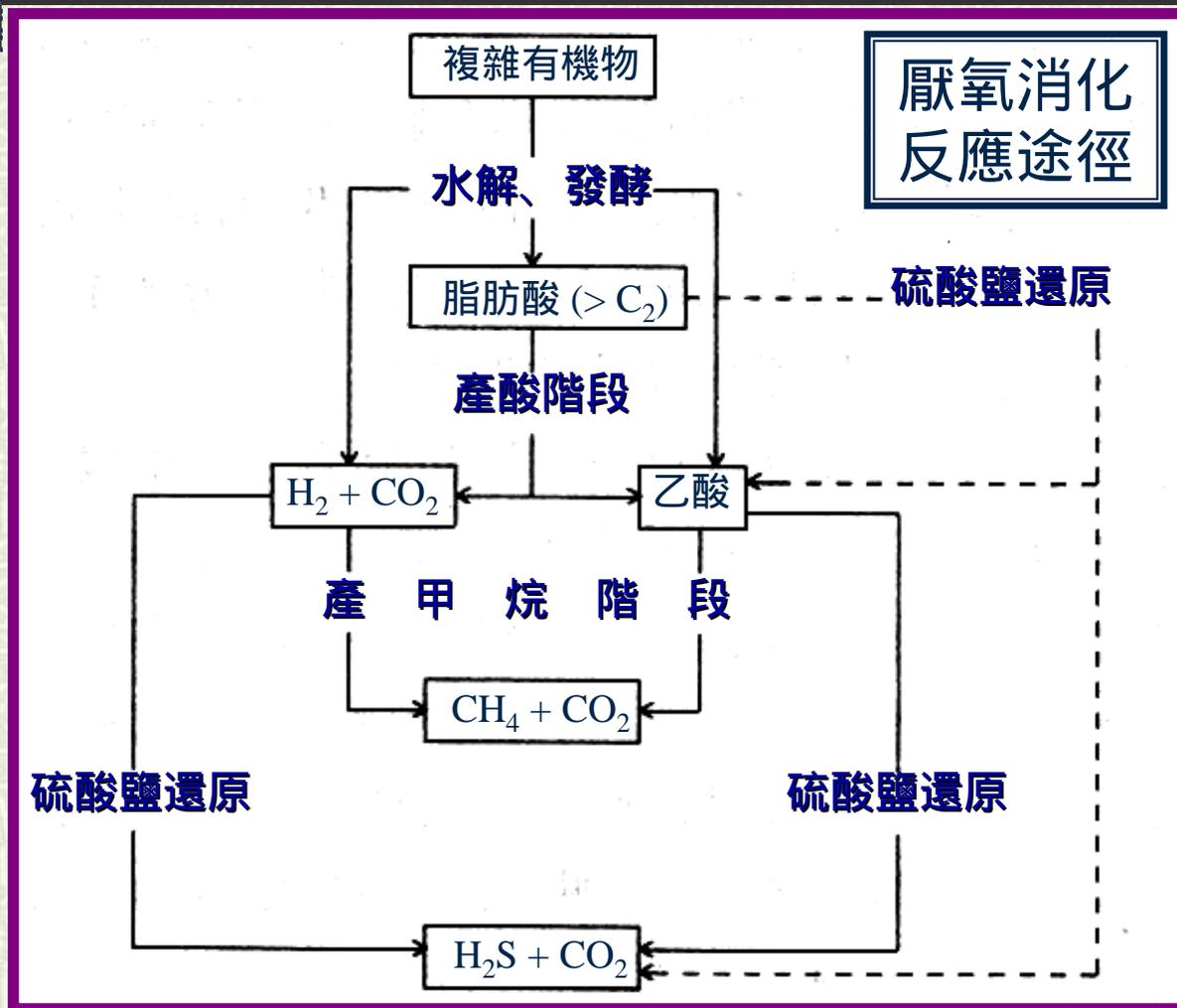
# 作為農業用途面臨之問題

- ✦ 目前污泥直接作為土壤肥力改良資材仍為我國法令所禁（「有機農產品生產規範 - 作物」，92.9.15）
- ✦ 污泥既有氮磷鉀比例未必穩定且合適作為肥料，需機動添加配方
- ✦ 工業有機污泥因重金屬含量偏高，較不適用於堆肥
- ✦ 因有機農業市場規模尚在成長，同時化學肥料價格偏低，污泥堆肥產品推廣較有困難

# 厭氧消化產氣利用

- 其 經由厭氧與兼性微生物分解去除有機污泥中過多之揮發態有機質及病原菌，而使其安定化、無害化、減量化，及進一步資源化。
- 其 適用類別：各類有機污泥
- 其 程序：
  1. 在密閉的消化槽內，約30~35°C停留30天
  2. 經水解、發酵、產酸、產甲烷等多段反應
  3. 有機物被分解而礦化，並形成以甲烷為主的消化氣體

# 厭氧消化產氣利用 (續)



# 厭氧消化產氣利用 (續)

- ✦ 每公斤揮發性有機質約可產生1 m<sup>3</sup>之厭氧消化氣體，其中約含50~65%之甲烷，理論上每公斤COD可產生0.35m<sup>3</sup>甲烷。
- ✦ 混合性氣體中其它成份：
  - 二氧化碳，約30 40%
  - 硫化氫，約0.4 1.8 %
  - 其它微量氣體
- ✦ 消化產氣熱值約5,000 6,000 kcal/m<sup>3</sup>，具能源利用之價值，除可作為厭氧消化槽之加熱，尚可供作發電或其他能源應用。

# 厭氧消化產氣利用 (續)

## 其 消化產氣之利用

- 用於鍋爐燃燒，1 m<sup>3</sup>沼氣相當於1 kg煤
- 用於發電，1 m<sup>3</sup>沼氣最大可發電1.25 kW.h

## 其 實際與理論產量之差距

- 端視於固形物是否充份水解成較小分子

## 其 消化產氣利用面臨問題

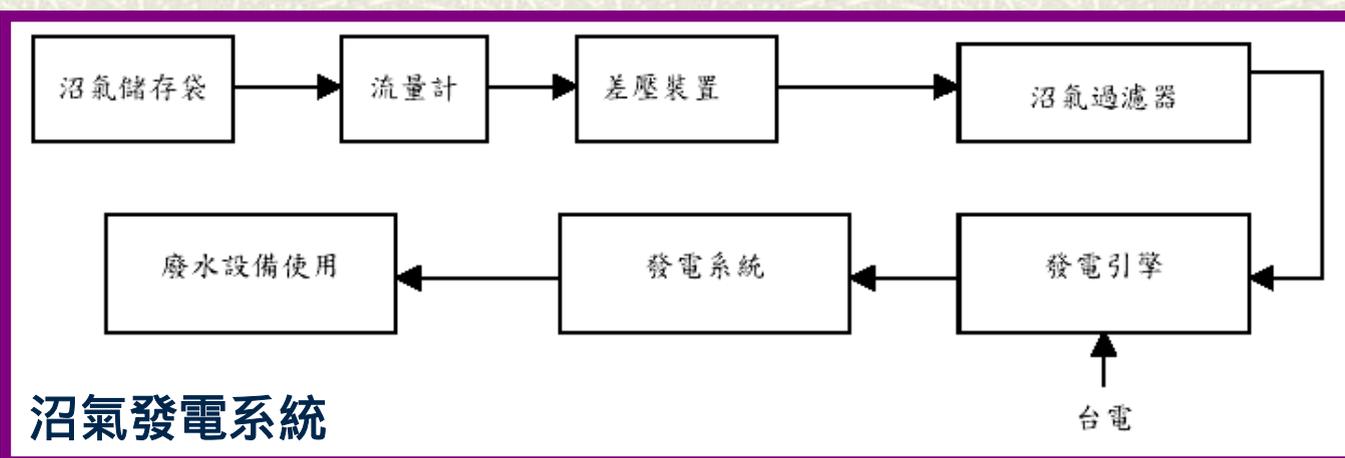
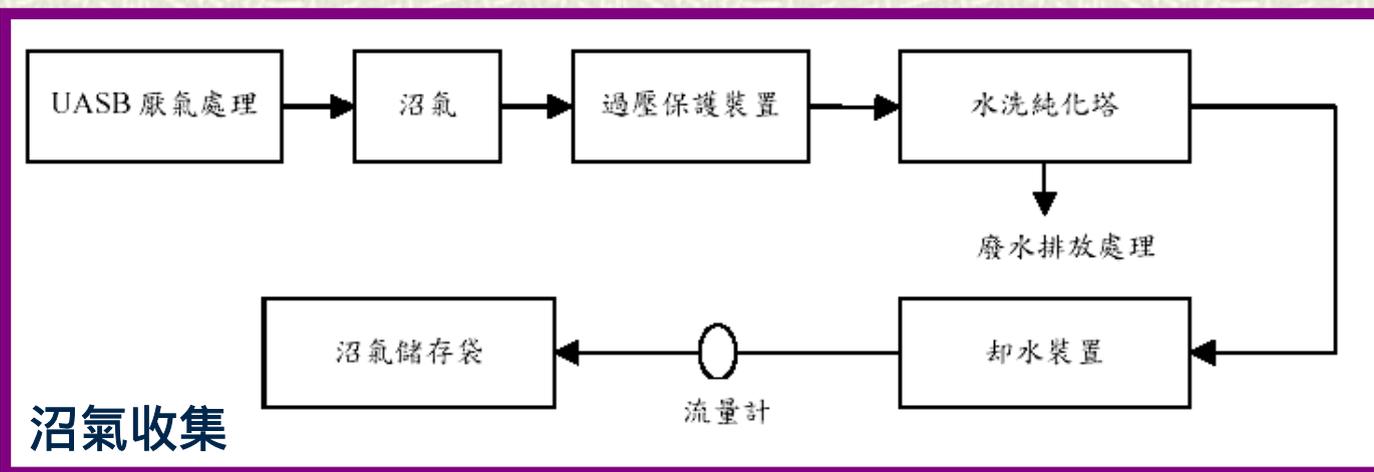
- 只有約50%~60%之有機物可被消化
- 硫化氫造成的腐蝕
- 臭味的產生
- 甲烷純度不足，不易轉作燃料外之利用

# 厭氧消化產氣利用 (續)

## ■ 統一企業新市總廠廢水處理

- 採用上流式厭氧污泥床 (UASB) 技術
- 第一期與第二期污水總處理量共6,000 CMD
- 整個廢水處理廠厭氧產氣量約2,500 m<sup>3</sup>/day , 發電量可達1,500 ~ 2,000 kWh/day之間 , 約提供全廠用電量之30%

# 厭氧消化產氣利用 (續)



# 厭氧消化產氣利用 (續)

## ■ 德國Saarbruecken-Burbach污水處理廠

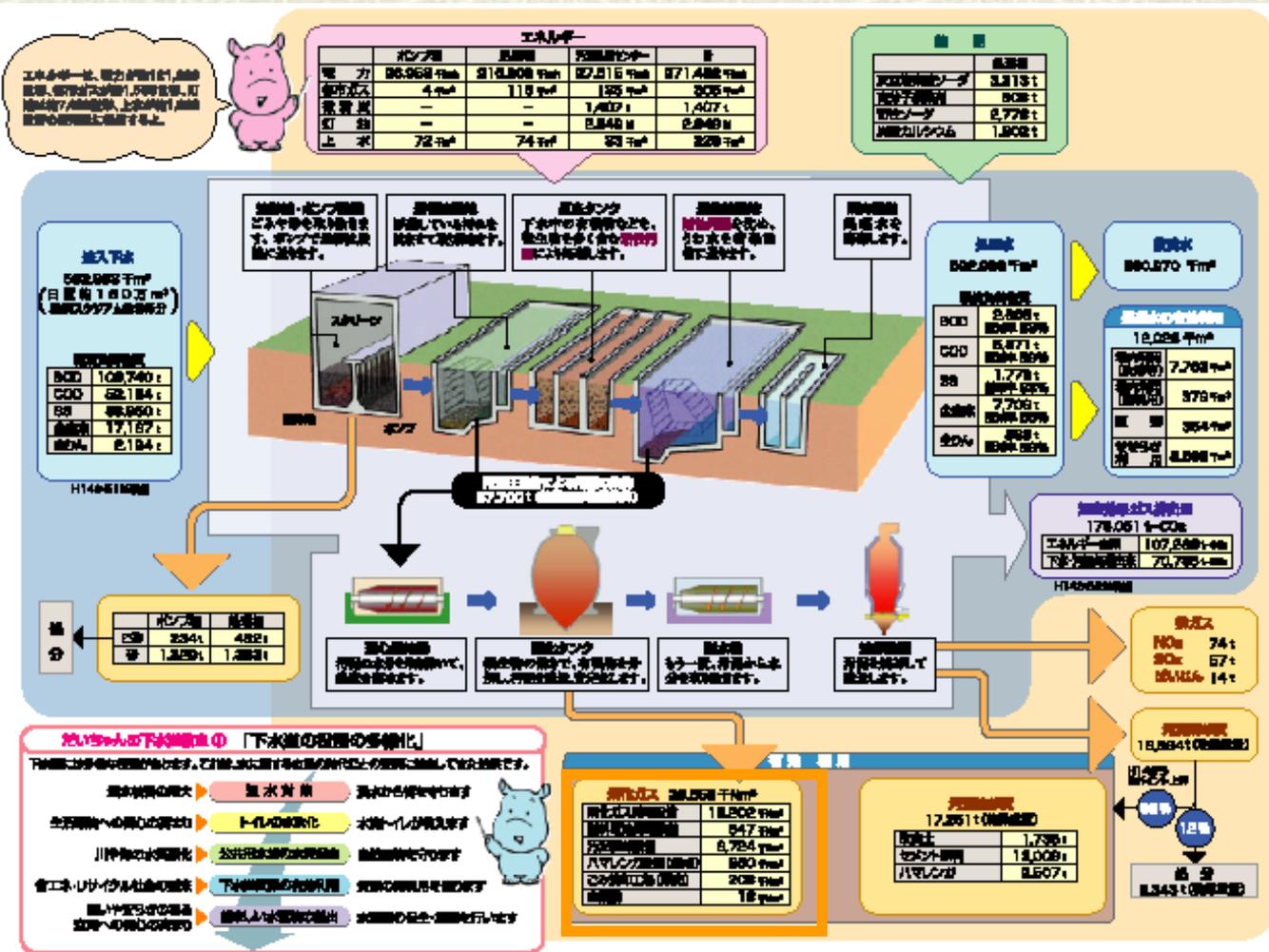
- 日處理污水量：54,000 CMD
- 污泥厭氧消化產氣利用設施
  - 污泥處理量919 m<sup>3</sup>/day
  - 氣體脫硫設備：設計氣體處理量3,000 m<sup>3</sup>/day，藉泥炭及鐵礦砂除硫。
  - 沼氣純化儲槽：容積1,500 m<sup>3</sup>，以薄膜低壓純化。
  - 沼氣發電設備：含2套水冷式發電機，混合厭氧消化產氣及天然氣發電，每日可產生約3,000 kWh，供應廠區35%的用電。
  - 另作為燃料供給廠區暖氣與污泥乾燥等需求。

# 厭氧消化產氣利用 (續)

## ■ 日本橫濱污水處理廠

- 日處理污水量：1,600,000 CMD
- 利用下水污泥厭氧消化產氣進行發電。
- 每日產生產氣量約80,000 m<sup>3</sup>，日發電量約400,00 kWh，平均每處理一噸乾污泥可產生410 kWh電力。
- 廠內用電量有72%來自於消化氣體的發電。
- 部份厭氧產氣並用於污泥焚化爐、污泥燒結設備、以及燃料電池，以整合流程回收能源。

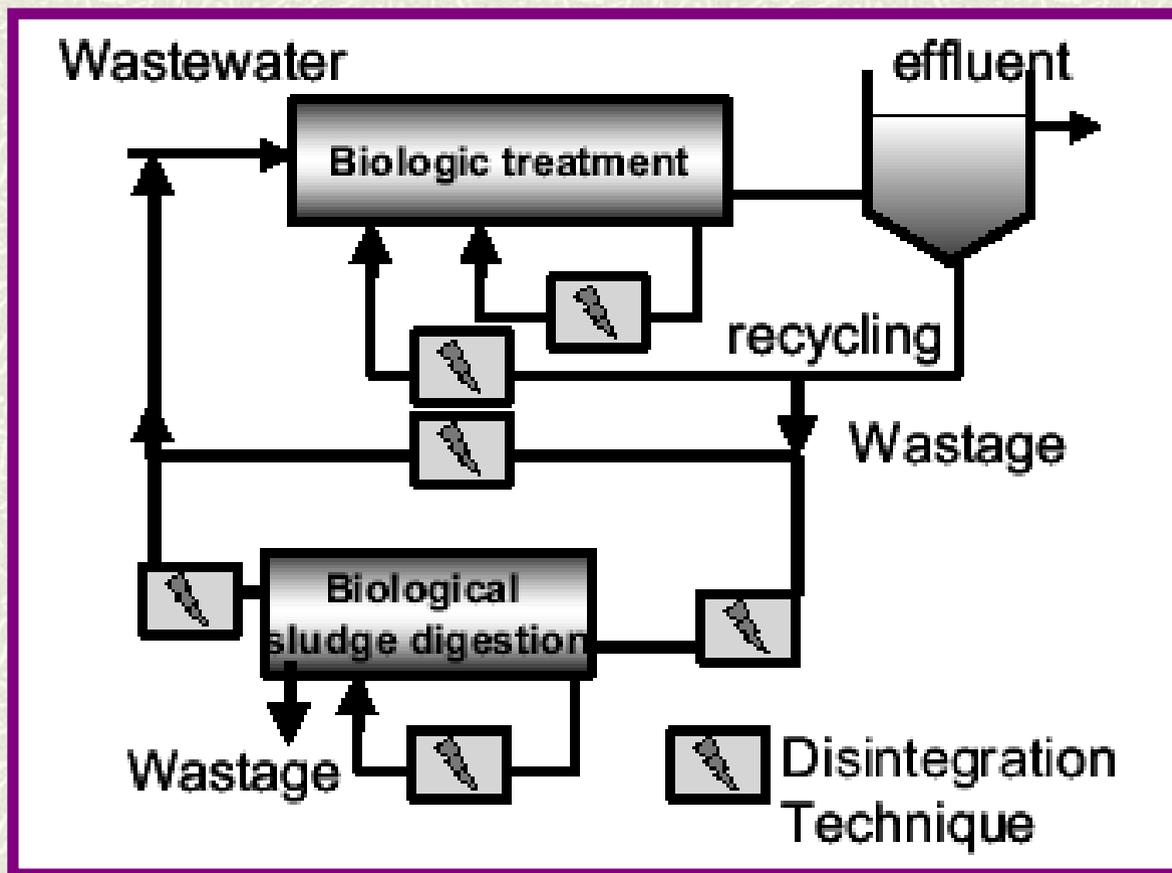
# 厭氧消化産氣利用 (續)



# 厭氧消化產氣利用 (續)

- ⌘ 厭氧消化效果受水解階段所影響
- ⌘ 加強水解可提升消化效率
  - 物理處理：如攪拌球磨、高壓勻化器、超音波、熱處理等。
  - 化學處理：酸化法、鹼處理、臭氧、過氧化氫等。
  - 生物處理：酵素分解。

# 厭氧消化產氣利用 (續)



# 厭氧消化產氣利用 (續)

## 其 優點

- 甲烷產氣可提升達30% 60%

## 其 缺點

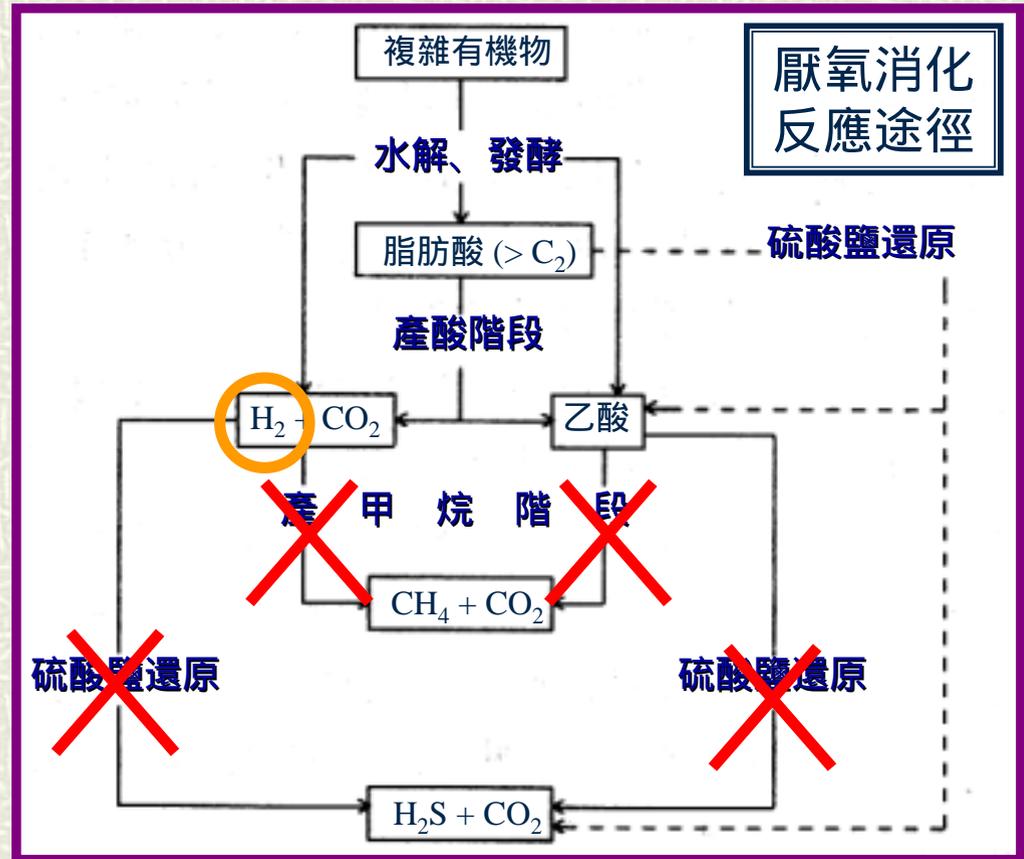
- 球磨、超音波等物理處理法需要甚大的動能支出
- 以熱處理法處理污泥會產生臭味
- 殘留之酸鹼會腐蝕設備元件
- 酵素之泛用性不佳

其 目前較成功應用於實際程序者只有臭氧處理，但對於臭氧之添加劑量與頻率，仍有改善之空間

# 厭氧消化產氣利用 (續)

## 污泥厭氧產氫

- 降低甲烷菌活性，或抑制產甲烷菌之代謝途徑，應可提高氫氣產量



# 厭氧消化產氣利用 (續)

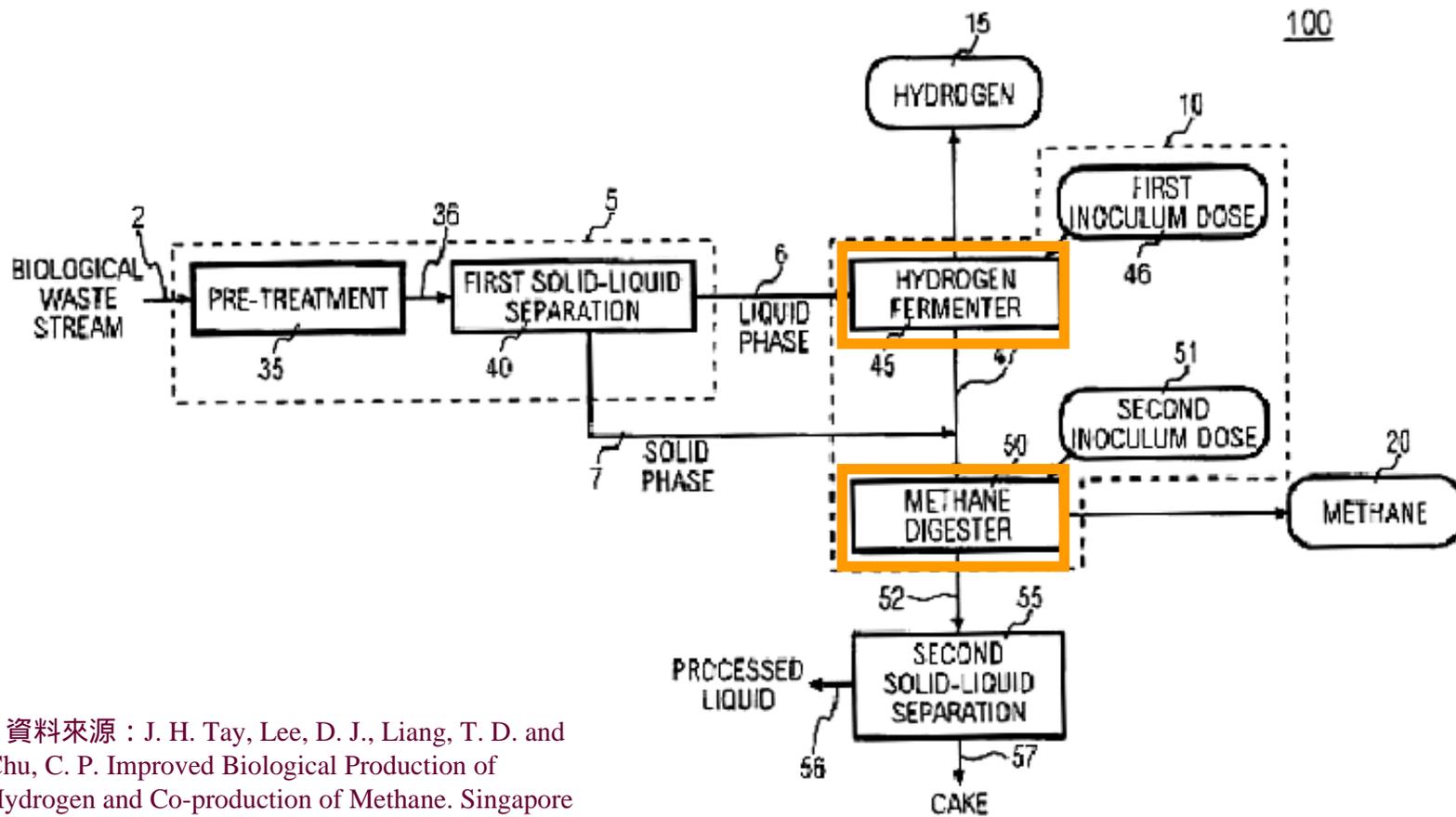
## 提高產氫率之方法

- 加熱消滅產甲烷菌，保留較耐熱之產氫菌群
- 添加抑制劑 (methanogenic inhibitor)
- 氣提法 (air stripping)
- 分相反應

## 實際問題

- 產率偏低，雜質過多
- 效果不如使用其它性質較單純廢棄物

# 厭氧消化產氣利用 (續)



\* 資料來源：J. H. Tay, Lee, D. J., Liang, T. D. and Chu, C. P. Improved Biological Production of Hydrogen and Co-production of Methane. Singapore Patent approved, PAT/ ITTO/ 120/ 02F/ ETI02iESE

# 厭氧消化產氣利用 (續)

## # 未來方向

- 配合其它再生能源，共同驅動廢水處理設備
- 與燃料電池之結合 (可運用較低濃度之甲烷)
- 連結觸媒反應器，產生其它烴類化合物

## 五、熱處理資源化技術



# 焚化

## ≡ 廢熱回收

- 焚化有機污泥時，因水份含量較一般都市垃圾高，每焚化一噸脫水後之污泥餅（水份80~85%），約需添加40到100公升之燃油助燃，回收其廢熱作為發電並不合算。

## ≡ 焚化灰再利用

- 污泥焚化灰可轉作為製磚、輕量細粒材、混凝土添加物、樹脂改質添加物、磷肥等

# 熔融與建材製作

- 其 熔融處理之溫度介於1,200 ~ 1,600°C，使：
  - 有機質成分完全氧化
  - 無機質成分則會形成玻璃質之熔渣
  - 重金屬因受到玻璃結晶之形成，穩定地拘限於結晶格中，而降低其溶出之可能性。
- 其 依不同的控制條件，將產出不同物化特性之熔渣成品：
  - 水淬熔渣— 路床材、路盤材、透水性平板
  - 結晶化熔渣— 混凝土用骨材、連鎖磚、透水性平板、路盤材
  - 燒結產物— 輕質骨材、紅磚或透水磚

# 熔融與建材製作 (續)



\* 資料來源：簡昭莢 (2001) 工業污泥燒結製作骨材之研究

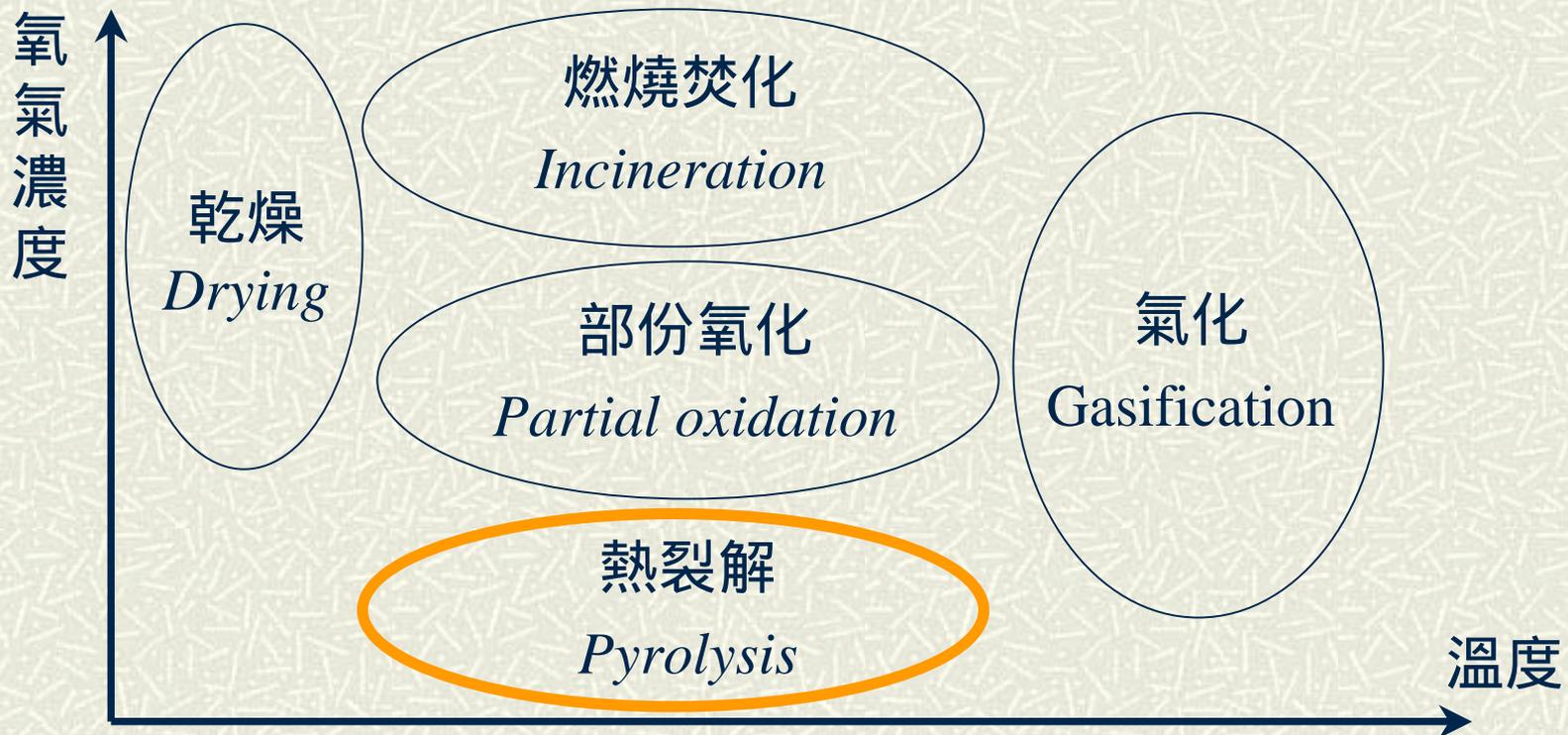
# 廢棄物衍生燃料

## ≡ 廢棄物衍生燃料 (Refused-derived fuels)

- RDF-5：壓縮成固態 (塊狀、棒狀等) 之可燃物
- RDF-6：加工成液態 (油狀或泥狀) 燃料之可燃物
- RDF-7：加工成氣體燃料之可燃物



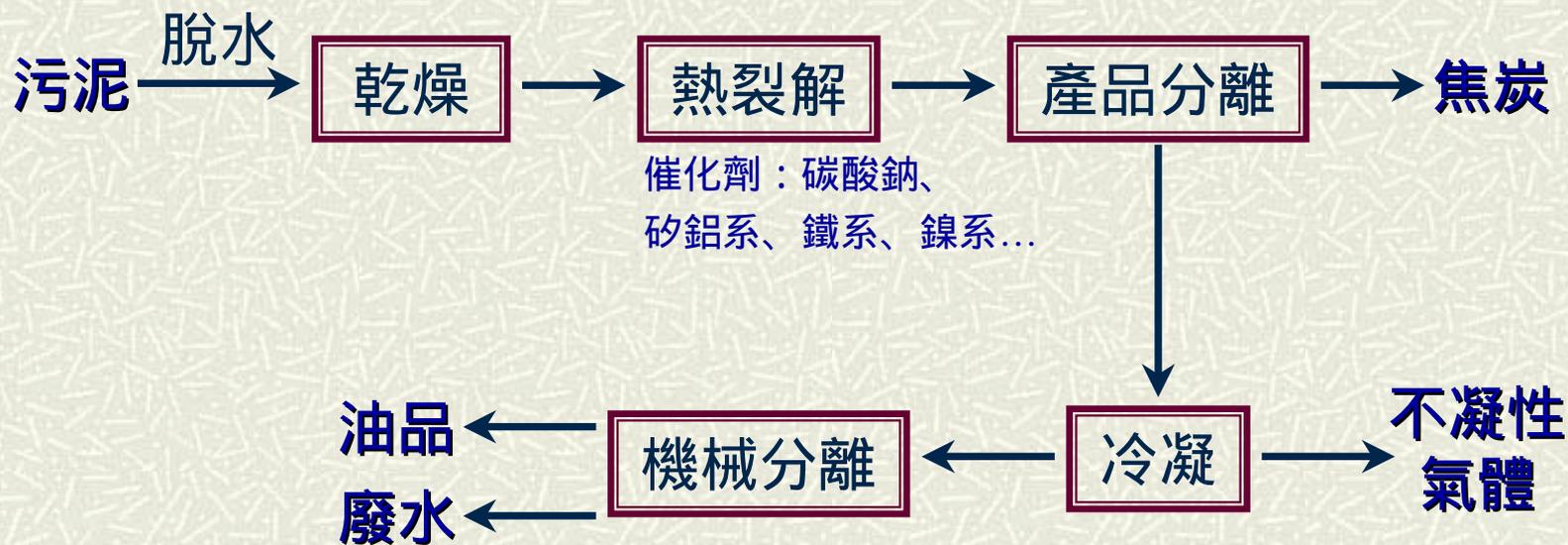
# 廢棄物衍生燃料 (續)



# 熱裂解

- ✦ 將污泥在缺氧環境下予以加熱，使有機物之化學鍵結斷裂，產生斷鍵反應後，分子鏈會在適當環境進行重組，形成新的有機物質。包括氣相之碳氫化合物、水蒸汽、以及含固定碳之焦炭與灰分之固體殘留物。
- ✦ 再經適當冷凝程序，氣相部分產品會以液態之油與水的形態出現，係接近重柴油等級之暗棕色油品。
- ✦ 為維持液態油品的產率，裂解溫度不能太高，一般控制在300 500°C。

# 熱裂解 (續)



# 熱裂解 (續)

## ■ 適用類別：各類有機污泥以及廢油泥

- 經消化之有機污泥，因有機成分已被分解，以致於熱裂解油產量較少
- 未消化之污泥進行熱裂解時，則可得到較多之油品。

		未消化污泥	消化污泥
液態油	產生量 (%)	24 ~ 46	13 ~ 29
	動態黏度 (centistokes)	23 ~ 62	9 ~ 87
	熱值 (MJ/kg)	33 ~ 38	32 ~ 42
焦炭	產生量 (%)	40 ~ 66	41 ~ 73
	熱值 (MJ/kg)	7 ~ 23	6 ~ 17
不能冷凝氣體	產生量 (%)	3 ~ 10	4 ~ 12
	熱值 (MJ/kg)	2 ~ 6	4 ~ 6
廢水	產生量 (%)	3 ~ 10	7 ~ 16

# 熱裂解 (續)

## 其 優點

- 產品易於儲存運輸且系統容量不大
- 低溫操作，耗能較焚化低
- 產品具一定經濟性

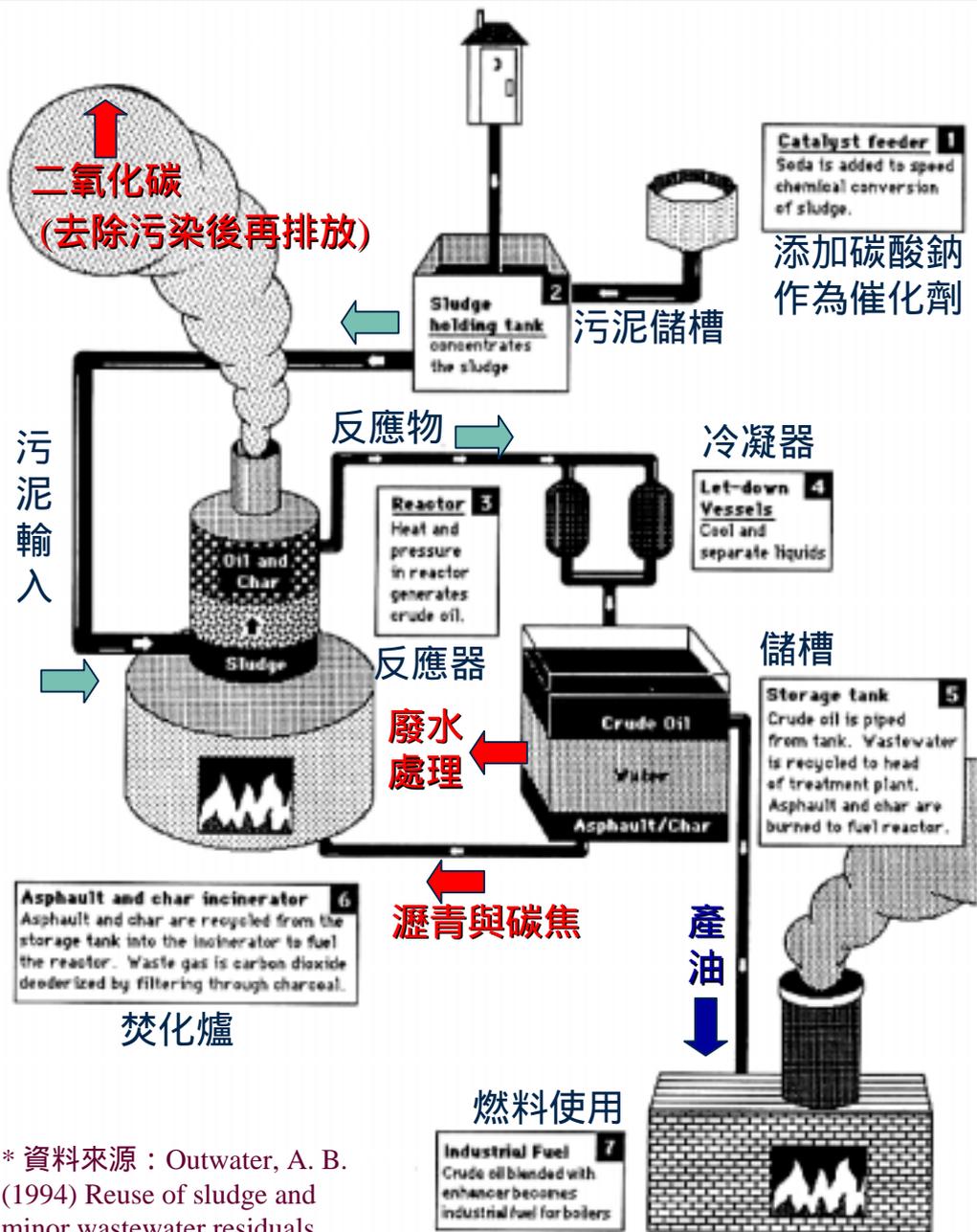
## 其 缺點

- 硬體投資較焚化多（冷凝器、油水分離設備）
- 污泥若有機碳濃度不夠高或含過多雜質（重金屬、硫、氯），將造成產品性質不穩定。
- 熱裂解油中含氮量則亦較高，若用作燃料時，將有可能產生NOX。

# 熱裂解 (續)

## ■ STORS (*Sludge-to-oil Reactor System*)

- 原料：污泥泥餅 (含水率20%) + 5% 碳酸鈉
- 反應槽溫度：275 ~ 300°C
- 壓力：約110 ~ 150大氣壓
- 停留時間：60~260分
- 減積：500噸污泥 → 30噸灰
- 處理成本：平均每噸乾污泥餅1,000元台幣



\* 資料來源：Outwater, A. B. (1994) Reuse of sludge and minor wastewater residuals

# 熱裂解 (續)

## ■ STORS (*Sludge-to-oil Reactor System*)

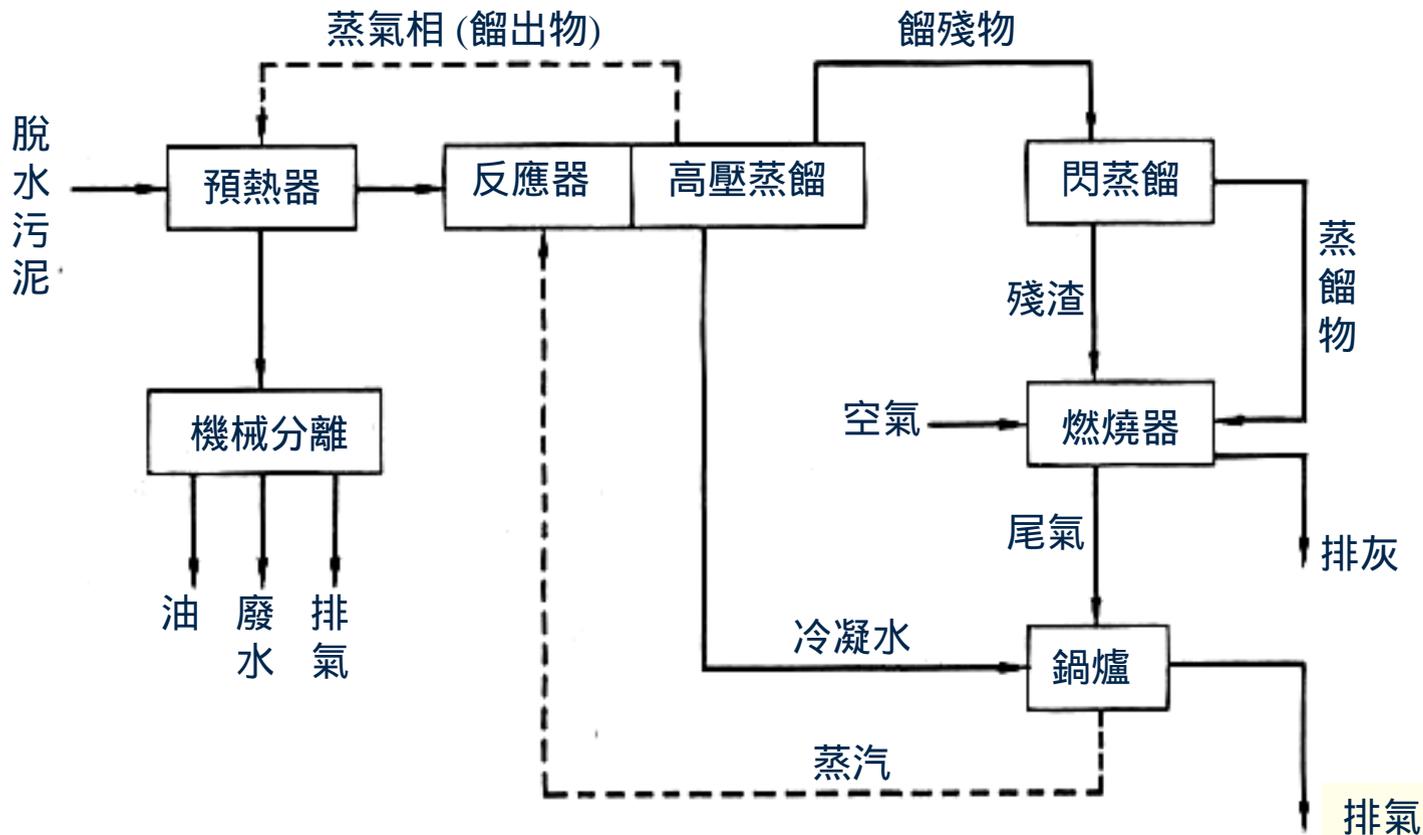
- 產生焦炭可轉作現場焚化加熱發電，熱值約 10~20 MJ/kg。
- 產油品質
  - 重金屬等雜質含量低
  - 熱值約為柴油的80%~90%
  - 缺點為黏稠而難以泵送且須再除臭
  - 可直接適用於一般工業與船隻燃爐
- 廢水因含高濃度氮，需再處理。

# 熱裂解 (續)

## ⌘ Itoh Process

- 處理量：500 kg/day (脫水污泥)
- 溫度：275 ~ 300°C
- 壓力：6 ~ 12 Mpa
- 停留時間：0 ~ 60分鐘
- 產油率：40~53%

# 熱裂解 (續)



\* 資料來源：Itoh, S., Suzuki, A., Nakamura, T. and Yokoyama, S. (1992) Direct thermochemical liquefaction of sewage sludge by a continuous plant. Wat. Sci. Tech., 26, 1175.

# 熱裂解 (續)

## ⌘ 快速裂解 (Flash pyrolysis)

- 操作溫度略高於傳統方法，快速升溫至450~600°C之間，升溫速率 $10^3$  K/s，停滯時間小於一分鐘。
- 氣體產品經由快速冷凝可避免二次裂解，而能使液體產量約達70~80%，產氣量為15%，其餘10%為焦炭。

# 熱裂解 (續)

## ■ 運用熱裂解產物作為燃料所面臨問題

- 污泥性質不穩定，熱值亦非定值，可能影響設備負載穩定度
- 可能造成結渣堵塞噴嘴或爐管腐蝕等問題
- 需再提煉方能作為一般引擎之用，然而缺乏配合產業鏈
- 初設成本偏高，需要處理大量污泥較符效益

# 六、結論



# 結論

## ## 資源化技術操作成本估計

### ■ 堆肥法：

- 每噸脫水污泥為700 ~ 1000元
- 有機肥售價為8 ~ 12元/公斤

### ■ 厭氧消化：

- 每噸廢污水處理成本10~12元
- 每噸廢污水約可回收電力0.3 ~ 0.6 kWh (視廢水性質與污泥消化量而定)

# 結論 (續)

## ■ 資源化技術操作成本估計

### ■ 熔融：

- 每噸乾污泥為2,000 ~ 3,000元
- 一般磚材每塊售價為10 ~ 20元

### ■ 熱裂解：

- 每噸脫水污泥成本4,000~5000元
- 柴油每公升約10元

## 結論 (續)

- ✦ 因應有機污泥產量持續增加，掩埋用地逐漸匱乏，資源化仍必須持續進行
- ✦ 污泥前處理與脫水效率，攸關資源化產品品質能否提升
- ✦ 短期間內多數污泥資源化產品仍不具自償性，需要政策性之支持與補助
- ✦ 相關產業鏈仍待健全

# 結論 (續)



A scenic view of a rocky coastline. In the foreground, a large, light-colored rock sits on a grassy slope. Below it, a building with a brown roof and a blue awning is built on a rocky outcrop. The ocean is a deep blue, and in the distance, a range of mountains is visible under a clear sky. The text "敬請指正!" is overlaid in the center-right of the image.

**敬請指正！**