

國立臺灣大學工學院環境工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



都市污水處理廠之生命週期評估

Life Cycle Assessment of a Municipal Wastewater  
Treatment Plant

許桓瑜

Huan-Yu Shiu

指導教授：闕蓓德 博士

Advisor: Pei-Te Chiueh, Ph.D.

中華民國 103 年 6 月

June, 2013

## 摘要



污水處理廠是城市水管理的重要基礎，過去多著重於處理效率、操作維護便利及周遭環境影響，相對於能源使用、藥品投入以及廢棄物的產生等其它亦可能會造成環境衝擊之面向較少分析。本研究以金門地區金城污水處理廠作為研究案例，利用生命週期評估方法，將污水廠分為水處理系統及污泥處理系統，量化污水處理廠對環境之衝擊。亦針對金門地區污水與污泥再利用方案進行評估與分析，污水處理系統包含再生水應用於農業、再生水應用於城市；污泥處理系統包含污泥應用於農業、污泥焚化後能源回收以及污泥焚化後灰渣作為建材再利用。

本研究選用生命週期評估軟體 SimaPro 7.1，盤查金城污水處理廠營運數據以及文獻報告，使用軟體內建 Ecoinvent 資料庫建立盤查清單，經由 CML 2 baseline 2000 衝擊評估方法量化污水廠之環境衝擊，最後針對研究結果進行敏感度分析及蒙地卡羅計算不確定性。

結果顯示，能源選用對污水廠有最顯著的影響，金城地區使用重油發電，占總衝擊之 79%。再生水應用於城市時，雖然需增加三級處理系統，進而增加了 55% 之環境衝擊，但應用於城市時可減少原淨水處理所產生之環境衝擊，比起無再利用具有 50% 之環境效益。污泥處理系統方面，目前以掩埋方式處置，處理程序中仍以電力消耗為最主要之衝擊；污泥應用於農業可減少甲烷、一氧化二氮及硫氧化物生成，特別是全球暖化類別，可增加 54% 之環境效益；污泥經焚化處理所產生之衝擊最高，然而焚化後能源回收再利用，反而可減少 86% 之環境衝擊；污泥作為建材再利用，也考量焚化程序產生之能源再利用時，是環境衝擊最低的。

**關鍵字：**污水處理廠、生命週期評估、污水再利用、污泥再利用

## Abstract



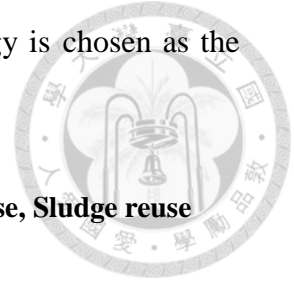
Waste water treatment plants are an important foundation for urban water management. While there has been greater emphasis on the efficiency, convenience in operation, maintenance, and overall environmental impacts, energy and chemical input, as well as waste emission also cause significant environmental effects.

Life cycle assessment is used to evaluate the environmental benefits and impacts associated with the treatment of a wastewater treatment plant in Kinmen, Taiwan. The objective of this study is to compare the current treatment process with several other proposed advanced treatment processes. The system boundary of the present LCA includes operation and maintenance phase, sludge treatment and disposal, and water reuse.

In this study, life cycle assessment software SimaPro 7.1 and CML 2 baseline 2000 methodology were applied to evaluate functional units of 1 m<sup>3</sup> treated water. The results show that energy has the most significant impact on environment, with a total impact of 79%. Recycled water used in agriculture, on the other hand, has the most significant benefits. While tertiary treatment systems will increase environmental impact by 55%, using recycled water in the city also increases environmental benefits by 50%. Similarly, in the sludge treatment system, power consumption is the most significant factor responsible for environmental impacts. Sludge used in agriculture can reduce methane, nitrous oxide and sulfur oxide formation, thereby increasing environmental benefits by 54%. Impact of sludge generated by incineration, as well as energy recycling, can reduce overall environmental impact by 86%. Sludge as a building material is the highest among impact scenarios. Finally, to further reduce the

environmental impact arising from sewage treatment plants, energy is chosen as the first priority.

**Keywords : Waste water treatment, Life cycle assessment, Water reuse, Sludge reuse**



# 目錄



摘要.....	I
Abstract.....	II
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究流程與架構.....	2
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 一般污水處理廠處理程序.....	5
2.2 污水與污泥再利用.....	6
2.2.1 污水再利用.....	6
2.2.2 污泥再利用.....	9
2.3 生命週期評估.....	12
2.3.1 生命週期評估方法簡介.....	12
2.3.2 污水處理之生命週期評估.....	14
2.3.5 生命週期評估之敏感度分析與不確定性分析.....	23
2.4 研究案例.....	25
2.4.1 金門地區水資源概況.....	25
2.4.2 金城污水處理廠簡介.....	28
第三章 研究方法.....	31
3.1 生命週期評估方法.....	31

3.1.1 目標與範疇界定.....	31
3.1.2 盤查分析.....	35
3.1.3 衝擊評估方法.....	49
3.1.4 敏感度分析.....	52
3.1.5 不確定性分析.....	52
第四章 結果與討論.....	54
4.1 生命週期評估結果.....	54
4.2 生命週期評估結果之綜合討論.....	70
4.3 敏感度分析.....	74
4.4 不確定性分析.....	80
第五章 結論與建議.....	85
參考文獻.....	88
附錄.....	95
附錄 A 中國大陸農田灌溉水質標準(旱作).....	95
附錄 B 盤查清單之統計資料.....	96



## 圖目錄



圖 1-1 研究流程圖 .....	4
圖 2-1 二級生物處理程序 .....	5
圖 2-2 生命週期評估架構 .....	13
圖 2-3 研究範疇分類 .....	16
圖 2-4 生命週期評估之不確定性 .....	24
圖 2-5 2011 年水資源利用概況 .....	27
圖 2-6 金門地區生活及工業用水供需圖(不含自行取水) .....	27
圖 2-7 2011、2012 年各月份污水處理廠進流量統計值 .....	28
圖 2-8 金城污水處理廠處理程序 .....	29
圖 3-1 金城污水處理廠系統邊界圖 .....	32
圖 3-2 水再生利用規劃設計之三級水處理流程圖 .....	33
圖 3-3 污泥處理方案 .....	44
圖 4-1 金城污水處理廠之環境衝擊 .....	58
圖 4-2 金城污水處理廠環境衝擊之相對貢獻 .....	58
圖 4-3 再生水應用於農業之環境衝擊 .....	59
圖 4-4 再生水應用於農業環境衝擊之相對貢獻 .....	59
圖 4-5 再生水應用於城市之環境衝擊 .....	60
圖 4-6 再生水應用於城市環境衝擊之相對貢獻 .....	60
圖 4-7 再生水利用之環境衝擊比較 .....	61
圖 4-8 污泥無再利用之環境衝擊 .....	66
圖 4-9 污泥無再利用環境衝擊之相對貢獻 .....	66
圖 4-10 污泥應用於農業之環境衝擊 .....	67
圖 4-11 污泥應用於農業環境衝擊之相對貢獻 .....	67

圖 4-12 污泥焚化後能源回收再利用之環境衝擊 .....	68
圖 4-13 污泥焚化後能源回收再利用環境衝擊之相對貢獻 .....	68
圖 4-14 污泥應用於建材之環境衝擊 .....	69
圖 4-15 污泥應用於建材環境衝擊之相對貢獻 .....	69
圖 4-16 污泥再利用之環境衝擊比較 .....	70
圖 4-17 金門塔山發電廠重油發電之環境衝擊 .....	73
圖 4-18 台灣電力系統、風力發電與重油發電比較 .....	73
圖 4-19 金城污水處理廠之敏感度分析 .....	75
圖 4-20 再生水應用於農業之敏感度分析 .....	76
圖 4-21 再生水應用於城市之敏感度分析 .....	77
圖 4-22 污泥無再利用之敏感度分析 .....	77
圖 4-23 污泥應用於農業之敏感度分析 .....	78
圖 4-24 污泥再焚化後能源回收之敏感度分析 .....	79
圖 4-25 污泥應用於建材之敏感度分析 .....	79
圖 4-26 金城污水處理廠之蒙地卡羅結果 .....	82
圖 4-27 再生水應用於農業之蒙地卡羅結果 .....	82
圖 4-28 再生水應用於城市之蒙地卡羅結果 .....	82
圖 4-29 污泥無再利用之蒙地卡羅結果 .....	83
圖 4-30 污泥應用於農業之蒙地卡羅結果 .....	83
圖 4-31 污泥焚化後能源回收再利用之蒙地卡羅結果 .....	83
圖 4-32 污泥應用於建材之蒙地卡羅結果 .....	84



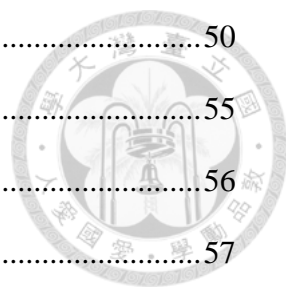


## 表目錄



表 2-1 污泥處理方法.....	6
表 2-2 國內外再利用系統類別.....	9
表 2-3 歐洲法定重金屬濃度限制值.....	10
表 2-4 國內污泥處理方案.....	11
表 2-5 數據蒐集方式.....	17
表 2-6 各衝擊評估方法之特性與優缺點.....	19
表 2-7 環境影響類別說明.....	20
表 2-8 2012 年金城污水處理廠進流及放流水質.....	29
表 3-1 原油進口情形及海運距離.....	36
表 3-2 金城污水處理廠放流水水質.....	38
表 3-3 金城污水處理廠污泥檢驗數值.....	39
表 3-4 金城污水處理廠之盤查清單.....	40
表 3-5 再生水應用於農業再利用之盤查清單.....	41
表 3-6 再生水應用於農業再利用之環境效益.....	42
表 3-7 水再利用之環境效益.....	42
表 3-8 金城污水處理廠經三級處理之盤查清單.....	43
表 3-9 污泥無任何再利用之盤查清單.....	45
表 3-10 污泥應用於農業再利用盤查清單.....	46
表 3-11 污泥應用於農業再利用可產生之效益.....	46
表 3-12 污泥焚化後再利用所需消耗之能源資源.....	47
表 3-13 污泥焚化後再利用所產生之效益.....	48
表 3-14 污泥應用於建材所需消耗之能源資源.....	48
表 3-15 污泥應用於建材所產生之效益.....	49

表 3- 16 CML2000 衝擊評估方法 .....	50
表 4- 1 金城污水處理廠之環境衝擊 .....	55
表 4- 2 再生水利用於農業之環境衝擊 .....	56
表 4- 3 再生水應用於城市之環境衝擊 .....	57
表 4- 4 污泥掩埋處理之環境衝擊 .....	62
表 4- 5 污泥應用於農業之環境衝擊 .....	63
表 4- 6 污泥焚化後能源回收之環境衝擊 .....	64
表 4- 7 污泥應用於建材之環境衝擊 .....	65
表 4- 8 台灣電力系統、風力發電與重油發電比較 .....	74
表 4- 9 金城污水處理廠之敏感度分析 .....	75
表 4- 10 再生水應用於農業之敏感度分析 .....	76
表 4- 11 再生水應用於城市之敏感度分析 .....	76
表 4- 12 污泥無再利用之敏感度分析 .....	77
表 4- 13 污泥應用於農業之敏感度分析 .....	78
表 4- 14 污泥焚化後能源回收之敏感度分析 .....	78
表 4- 15 污泥應用於建材之敏感度分析 .....	79
表 4- 16 各情境之變異係數 .....	81



# 第一章 緒論



## 1.1 研究動機

污水處理廠是城市水資源管理的重要基礎，主要功能與目的是將污水處理達到放流水標準，以降低放流水對環境的衝擊。過去污水處理廠僅著重於處理效率、操作維護便利、周遭環境影響之設計與營運準則(內政部營建署，2011)，對於能源使用、藥品投入以及廢棄物的產生等其它亦可能會造成環境衝擊之面向較少分析。

污水處理可簡單分為資源提供與環境排放兩部分，城市污水再利用可以節省大量的水，並且成為一個穩定的水資源(Sala and Serra, 2004)，也是污水處理廠最主要的資源提供項目，然而水資源增加同時，也意味著材料和能源消耗、以及廢棄物產出所帶來的環境副作用增加。污泥最終處置在污水處理系統中，對環境的影響是一個關鍵，若能有效將廢棄污泥再利用，便可減少環境衝擊轉換成環境效益。

生命週期評估(Life cycle assessment, LCA)近年來被廣泛應用在評估產品或服務對環境造成的影響，量化從原料取得、製造、使用和棄置等階段造成的環境衝擊；生命週期評估的結果不只提供最終產品的環境衝擊資訊，亦可揭露所有投入的各種資源，以及所有污染物造成的環境衝擊。

目前生命週期評估應用於污水處理系統之研究，依目標設定研究範圍，有研究討論處理程序的環境影響，亦有研究著重於城市污水再利用或污泥最終處置之替代方案選定。由於生命週期評估研究案例在各城市上都有不同的假設，不管是功能、地域、參數的差異，功能單位和影響評估方法的設定都因案例而有所變化，

進行分析時宜仔細評價(Lundin, 2003)。

本研究透過生命週期評估方法，探討金城污水處理廠整體生命週期對環境之衝擊，搭配金門地區未來水處理之規劃及污泥廢棄處置進行評估，並設計污水再利用以及廢棄污泥再利用方案，提出最具環境效益之處理方法。以敏感度分析及不確定性分析，找出最敏感的影響因子亦改善生命週期評估結果之可信度，預估其環境衝擊結果之不確定性範圍。

## 1.2 研究目的

本研究蒐集近年生命週期評估應用於都市污水處理廠之相關研究，探討各研究於生命週期評估架構中之差異，以金城污水處理廠現況做為研究案例進行分析，以了解污水處理廠之環境衝擊，評估污水處理廠所產生污水與污泥再利用方案，針對研究結果進行敏感度分析找出敏感度因子，透過蒙地卡羅模擬，探討衝擊評估結果的不確定性，最後提出最具環境效益之處理方法。

## 1.3 研究流程與架構

本研究運用生命週期評估方法探討城市污水處理廠之環境影響，以金門地區金城污水處理廠作為研究案例，設計污水再利用及污泥再利用方案後，進行資料蒐集與衝擊評估。金城污水處理廠有詳細紀錄水處理程序中能源投入、藥品投入以及放流水水質與水量，同時經濟部水利署也有相關報告針對放流污水再利用進行研究，目前已設計適合金城污水處理廠之三級處理程序。金城污水處理廠所產生的污泥，目前以掩埋作為最終處置，而金門地區衛生掩埋已逐漸飽和，未來必須提出其他的處理方式，將污泥再利用。

本研究根據金城污水處理廠污水處理所投入之資源，搭配相關報告及文獻資料，設計污水與污泥再利用情境進行生命週期評估。研究流程圖如圖 1-1，各章節名稱及內容分別說明如下：



## 第一章、緒論

本章節說明研究動機與研究目的以及研究架構。

## 第二章、文獻回顧

首先回顧污水、污泥處理方法及污水、污泥再利用方法，接著回顧生命週期評估方法應用於污水處理系統之進行方式，包含污水處理系統範疇界定、盤查分析、衝擊評估方法、結果闡釋，以及文獻的研究結果，最後是針對研究案例進行背景資料回顧，包括金門地區水資源狀況、金城污水處理廠之水處理狀況，讓研究方案設計能更貼近該處理系統。

## 第三章、研究方法

本章節介紹污水處理廠之生命週期評估方法，盤查污水處理廠營運及污水污泥再利用之相關數據，針對實際狀況適地性的修正與調整。使用衝擊評估方法進行分析後，利用敏感度分析及不確定性分析使研究結果更明確。

## 第四章、結果與討論

本章節闡述污水處理廠及其污水污泥再利用之環境衝擊結果、敏感度分析結果、不確定性分析結果，進行結果分析與研究討論。

## 第五章、結論與建議

最後將評估結果做總結，並提出相關建議。

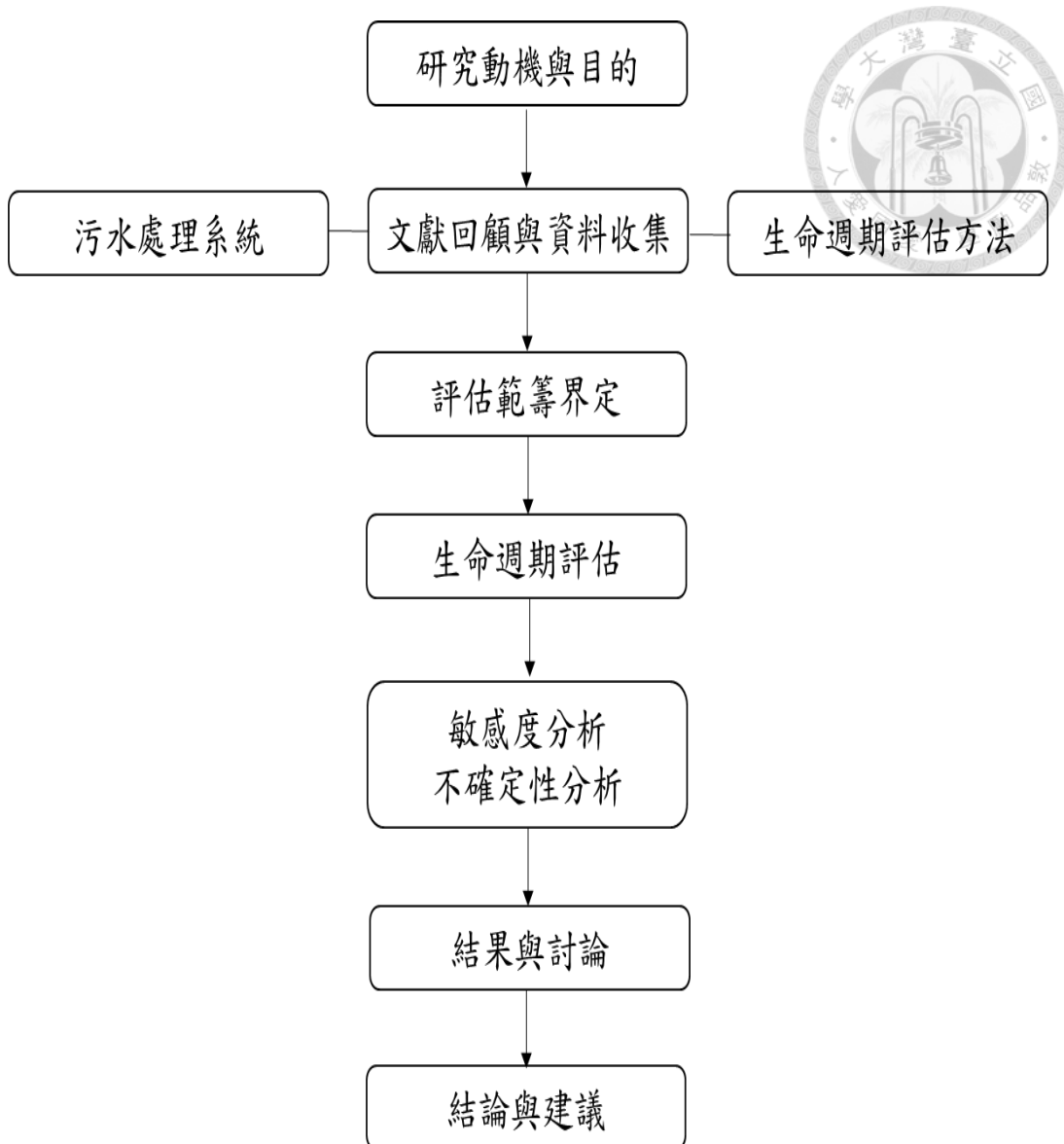


圖 1-1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧



本研究將文獻回顧分為三階段，首先簡單介紹污水處理廠處理程序，對污水再利用與污泥再利用進行回顧；第二部分回顧生命週期評估方法於污水處理系統之應用，包含生命週期評估方法簡介、應用以及過去研究成果；第三部分回顧研究案例，金門地區和金城污水處理廠的背景資料及現況。

### 2.1 一般污水處理廠處理程序

污水處理程序依不同污水來源需相對應之處理單元，一般城市污水處理廠的污水來自於污水下水道所蒐集，包括排自家庭的生活污水、事業廢水及部分工業廢水，其水質性質依各種比例有差異。污水中通常含有多量有機物質，並可能含有各種病原菌。

污水處理廠最基本在於能將污水處理至放流水標準，典型二級都市污水處理廠在一級處理中，藉由降低流速使污水中的沙土及可沉澱性的有機物分離，去除大部分顆粒物質後，進一步在二級處理中以生物處理單元去除水中有機物，反應分為好氧性生物處理、厭氧性生物處理以及特殊生物處理，圖 2-1 為常見二級生物處理程序。

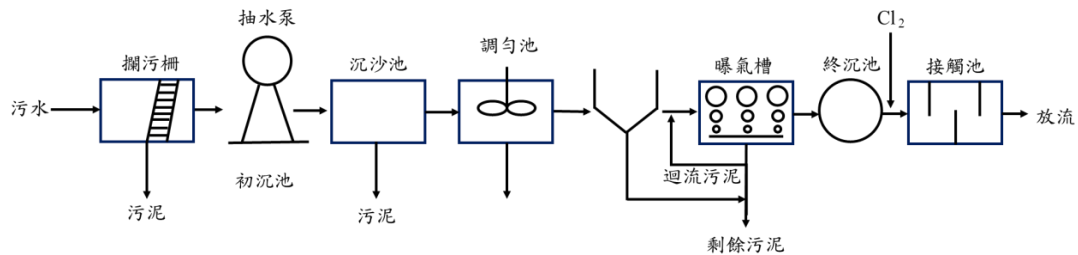


圖 2-1 二級生物處理程序

污水處理過程中所產生之污泥有初沉污泥、終沉污泥兩種，初沉污泥為污水經由污水廠內一級處理，於初級沉澱池產生；終沉污泥為二級處理所產生，含水

率約在 96~99.5%。由於含有多量有機物，放置後容易腐敗散發惡臭，污泥處理之目的就是為了減少污泥體積以及使污泥安定化，進而可以能源化及資源化。一般污泥處理方法如表 2-1，處理程序包含濃縮、消化、堆肥化、調理、脫水、加熱乾燥、焚化、處置，污水處理廠依需求選擇適合之處理程序及最終處置方式。

表 2-1 污泥處理方法

處理程序	濃縮	消化、 堆肥化	調理	脫水	加熱乾燥	焚化 及其他	最終處置
目的	減少體積	安定化	安定化	減少體積	-	減少體積	-
處理程序 之種類	重力式 浮除式 離心式 帶濾式	厭氧消化 好氧消化 堆肥化	添加藥劑 淘洗 熱處理	曬乾 離心脫水 帶壓脫水 螺旋壓濾	氣流乾燥 回轉乾燥 焚化爐	多段爐 流動層爐	農業利用 建材利用 衛生掩埋

資料來源：歐陽(2011)

## 2.2 污水與污泥再利用

污水再利用是指城市污水經過處理後，達到再生水水質標準和水量要求，並重複使用的全過程，全球已有許多國家重視污水再生，並且實際舒緩水資源缺乏之問題。污泥之處理，目前以安定化脫水後進入衛生掩埋場為主要方法程序，掩埋已趨於飽和，污泥減量及資源化是必要之趨勢。本研究於此小節回顧污水與污泥再利用之相關研究。

### 2.2.1 污水再利用

城市污水再利用可以節省大量的水，並且成為一個穩定的水資源(Sala and Serra, 2004)。再生水經常是缺水國家主要解決水資源問題的方案之一，於地中海



地區一些國家有許多相關的研究，如：義大利、西班牙、希臘等。目前再利用水多用於農業灌溉、工業、城市清潔、消防、地表水補給、地下水補給(Levine and Asano, 2004)，亦有少數地方將再生水作為直接或間接飲用水。

Mo and Zhang (2013)回顧了污水回收再利用之相關研究，整理出目前再生水之利用方式：

### 1. 農業應用

在農業應用上使用再生水，不只減輕水資源不足的負擔，再生水中含有營養素亦能減少肥料施用。經二級處理後的再生水，可用於非直接食用作物(需剝皮的果樹)，例如：果園、葡萄園；經三級處理後的再利用水可用於農作物灌溉。雖然再生水於農業再利用有許多好處，Leverenz et al. (2011)認為，廢水的來源以及水質有潛在的土壤污染、農作物污染風險，加上農業用水有季節性變化，冬季用水需求少時需要再生水儲存設備。

### 2. 城市應用

再生水應用於城市的用途廣泛，二級處理後之再生水可用於受管理的景觀用水，三級處理後之再生水用於住宅使用為最主要，其他應用包含園林灌溉(公園、遊樂場、學校)、消防、建築、裝飾噴泉、休閒蓄水、建築物沖廁等等。但是利用於城市的再生水對於人體暴露風險較高，應特別注意是否有潛在的健康風險。若使用雙管運輸作為再生水管線，則成本較高。

### 3. 間接飲用水再利用

將處理後之再生水，補注到地下水、地表水、湖泊或水庫，作為市政用水。以補注至地下水為例，此利用方式不需要儲存設施，也不會有蒸發損失、優養化、氣味等問題，亦可以減緩地層下陷及海水入侵。但補注地下水增加了地下水污染的風險，將外部污染物帶入地下水層，其監測和處理都相當不

容易。

#### 4. 工業應用

工業使用再生水有兩種方式，廠內分流回收與工業區匯流回收。前者可透過法令要求工廠推動節約用水，自行回收廠內廢污水，再生後作為工業製程或次級用水，以提升廠內製程和整廠用水回收率。此一部分已落實在科學園區設廠的電子廠商，其製程回收率基本要求至少 85%。大型廢污水廠放流水再生亦可以做為工業應用，以管線輸送至工廠，好處是水量比較大，可回收再生水水量比較多，投資費用比較低，缺點是水質比較差，另外必須就近規劃供水管路(黃，2010)。

#### 5. 直接飲用水再利用

污水處理後之再利用水直接進入分配系統，不像非飲用水再利用，直接飲用水再利用可以避免雙供水系統輸送水。直接飲用水亦不需要地下水補注，避免潛在污染風險。直接飲用水再利用有較高的水處理要求，營運成本勢必增加，以及社會大眾是否能接受使用是必須要面對的問題。

然而，城市污水再利用並沒有廣泛的應用在各個國家，甚至是反對污水再利用，擔心污染物對人類健康的影響，特別是新興污染物(醫藥、個人護理產品)的潛在風險(Pasqualino et al., 2011)。

國內基於環保署水污染防治措施及檢測申報管理辦法第四十二條規定，我國在運用回收廢污水廠放流水時，不考慮與人體有直接接觸之用途，包括再生水補注至水庫或地下水層作為飲用水水源，因此並無再生水做為飲用水水源之類別，如表 2-2。水利署歷年來已針對高雄市、新北市、台南市、台中市和金門縣等多座都市污水處理廠進行放流水再利用評估，多數污水廠因再生水成本及缺乏使用對象，其相關規劃均暫緩推動(經濟部水利署，2009a)。



表 2-2 國內外再利用系統類別

國外再利用 系統類別	國內再利用 系統類別	利用內容
1 工業用水	工業再利用	製程用水、冷卻用水、次級用水等
2 生活次級用水	生活次級利用 都市景觀利用	沖廁用水、消防用水、空調用水等 公園、校園、綠帶、住宅綠地等
3 農業用水	農業灌溉利用	農作物灌溉等
4 保育用水	環境休閒利用 含水層補注利用 河川涵容維持利用	湖泊、池塘等 地下水補注等 生態用水等
5 飲用水水源	--	補注至水庫或地下水層作為飲用水水源

資料來源：經濟部水利署(2009a)

### 2.2.2 污泥再利用

新興發展國家對於污泥處理方式有嚴格的規定，並隨著經濟考量與環境評估，適時的選擇和調整污泥處理方式。過去大多數的污泥以焚燒、衛生掩埋，甚至是更早以前以海拋處理(國際社會皆已禁止)，只有一部分被重複利用於農業(Hospido et al., 2005)。歐洲國家認為，污泥中含有重金屬及病原體，嚴格的規範是必要的，訂定出重金屬濃度限值如表 2-3，如果污泥符合標準並再利用，則是一個最簡單也最便宜的回收方式。

國內具穩定污泥量並固定對外清運之污水廠，其污泥處置大都以掩埋為主，其次則是焚化及熱處理等。污泥處理方法應依污泥最終處置方式決定，可將脫水後污泥經由堆肥、焚化、乾燥等方法安定後，作為農業肥料使用，或是經由焚化、熔融處理後，作為建設材料。污泥含豐富有機物，作為農業使用可以減少肥料施

用，但在使用上有法規的限制以及應注意的污染預防。污泥做為肥料時，依污泥成分不得有砷、鎘、汞、鉛等重金屬超過肥料標準，肥料管理法(行政院農業委員會農糧署，2008)中有詳細規定，各類別肥料之現值略有不同。污泥經適當處理後做為建設材料利用，可以直接利用或經加工程序後利用。一種是經焚化為焚化灰或融熔渣後直接利用，一般多做為柏油混和料、土壤改良材料、混凝土二次製品原料、水泥料、垃圾掩埋場覆土、路基材料、次盤材料等利用；另一種利用形態則是以焚化灰或融熔渣做為原料一部分或全部，加工處理成建設材料，加工方法主要加工成形，做成壁材、磚塊、紅瓦、陶管、輕量骨材及裝飾品等利用。

污泥是污水處理程序中無法避免的產物，將廢棄污泥再利用，可減少廢棄物產生成為可再利用資源。表 2-4 為目前國內污泥處理方案。

表 2-3 歐洲法定重金屬濃度限制值

重金屬	污泥使用於土地之重金屬濃度限制值 (mg/kg)	每年可增加之重金屬量，以十年為基礎 (kg/ha/year)
<b>Cd 鎘</b>	2	0.006
<b>Cr 鉻</b>	600	1.8
<b>Cu 銅</b>	600	1.8
<b>Hg 汞</b>	2	0.006
<b>Ni 鎳</b>	100	0.3
<b>Pb 鉛</b>	200	0.6
<b>Zn 鋅</b>	1500	4.5

資料來源：Hospido et al. (2005)

污泥含豐富有機物，作為農業使用可以減少肥料施用，但在使用上有法規的限制以及應注意的污染預防。污泥做為肥料時，依污泥成分不得有砷、鎘、汞、鉛等重金屬超過肥料標準，肥料管理法(行政院農業委員會農糧署，2008)中有詳

細規定，各類別肥料之現值略有不同。污泥經適當處理後做為建設材料利用，可以直接利用或經加工程序後利用。一種是經焚化為焚化灰或熔融渣後直接利用，一般多做為柏油混和料、土壤改良材料、混凝土二次製品原料、水泥料、垃圾掩埋場覆土、路基材料、次盤材料等利用；另一種利用形態則是以焚化灰或熔融渣做為原料一部分或全部，加工處理程建設材料，加工方法主要加工成形，做成壁材、磚塊、紅瓦、陶管、輕量骨材及裝飾品等利用。

污泥是污水處理程序中無法避免的產物，將廢棄污泥再利用，可減少廢棄物產生成為可再利用資源。

表 2-4 國內污泥處理方案

<b>生物處理技術</b>	目前國內堆肥醱酵處理之流程大致為翻堆→醱酵熟成(30~60 天)→風乾→篩分→有機質肥料，主要收受非有害事業污泥，其產品需符合肥料品目取得肥料登記證，販售予農會、合作社、農民。
<b>物理處理(乾燥)技術</b>	目前國內物理處理(乾燥)之處理方式包含堆置乾燥及旋窯乾燥，堆置乾燥流程大致為堆置→翻堆→乾燥；旋窯乾燥以平均溫度 550°C 以下乾燥 20~40 分鐘，將含水率降至 40% 以下，其產品做為工程填地、CLSM 原料使用。
<b>物理處理(固化)技術</b>	目前國內物理處理(固化)之處理方式，大致為污泥混拌水泥(15~20%)與化學藥劑→澆模→養護→固化，為混凝土塊或破碎成人工粒料，其產品需符合相關規範(包括產品規格及標準等)。
<b>熱處理(燒結)技術</b>	目前國內熱處理(燒結)之處理方式，大致為旋窯乾燥(130°C)→造粒→旋窯燒結(900~1100°C)→人工粒料輕質骨材，其產品做為 CLSM、級配料、園藝圍籬、輕隔間牆、地磚與紅磚等原料。
<b>熱處理(鍛燒)技術</b>	目前國內熱處理(鍛燒)之處理方式，大致以含 SiO <sub>2</sub> 、CaO 等成分之污泥，作為水泥替代原料使用，其製成水泥產品需符合 CNS 標準。

<b>熱處理(焙燒)技術</b>	目前國內熱處理(焙燒)之處理方式，主要為處理含銅之有害污泥，其處理流程大致為旋窯焙燒(600~700°C)，停留 40~60 分鐘→氧化銅粉，其產品氧化銅粉含銅量 20%以上，主要出口做為煉銅原料。
<b>熱處理(焙燒)技術</b>	目前國內熱處理(焙燒)之處理方式，主要為處理含銅之有害污泥，其處理流程為將含銅污泥(或含銅廢液)經酸鹼中和處理成氫氧化銅或氧化銅，其產品氫氧化銅、硫酸銅或氧化銅，主要作為化工或冶煉原料。
<b>焚化處理技術</b>	目前國內焚化處理之處理方式，大致以有機污泥與生活垃圾或事業廢棄物混燒，利用熱值產生蒸汽，節省燃料使用。

資料來源：行政院環保署(2014)

## 2.3 生命週期評估

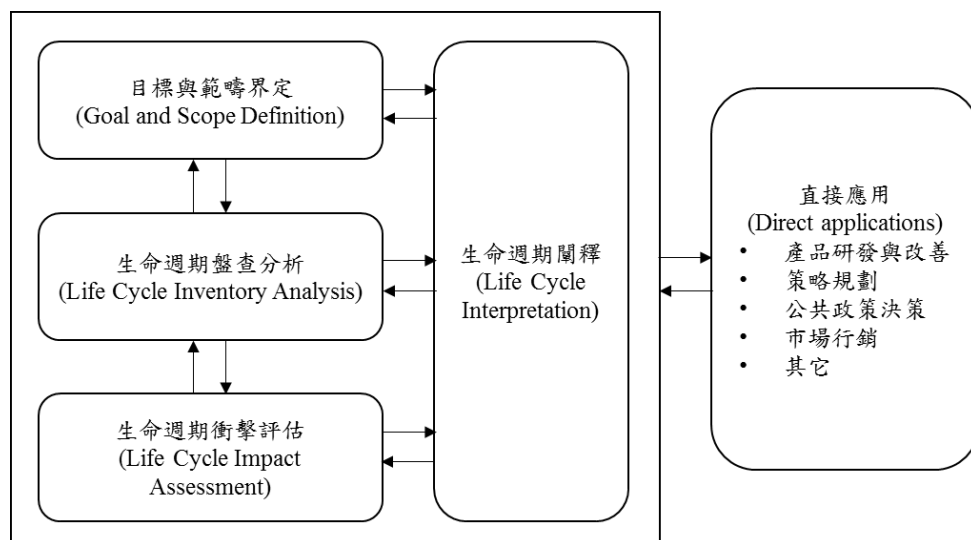
生命週期評估的觀念起源於 1960 年代末期至 1970 年代初期，當時主要應用在能源利用、資源分析及污染排放估算等。研究首例為 1969 年可口可樂公司委託 MRI 公司，對其飲料包裝是否以塑膠容器取代玻璃容器做一整體性評估。近年來永續發展的觀念使國際環保議題備受關注，污染預防的觀念轉變為落實清潔生產及綠色設計，生命週期評估方法由「由搖籃到墳墓」(Cradle-to-Grave)評估一項產品或服務，比較生命週期各階段或整體生命週期造成環境衝擊的大小，進而評估產品在環境影響考量上的優劣表現。

### 2.3.1 生命週期評估方法簡介

生命週期評估是一種系統化評估工具，將產品、服務或程序從原料取得、製造、使用和棄置等階段造成的環境影響，量化成環境衝擊。根據國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO) ISO14040 規範標準化分析方法，生命週期評估主要包含四項步驟如圖 2-2：目標及範疇界定 (Goal and Scope

Definition)、盤查分析(Life Cycle Inventory, LCI)、衝擊評估(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)、結果闡釋(Life Cycle Interpretation) (ISO, 2006)。

目標與範疇界定上，任何一個生命週期評估研究都應該有一個目標，並且於此描述方法的選擇、假設和限制，確立評估對象的系統邊界，以及決定後續盤查範疇及衝擊評估的功能單位(functional unit)；盤查分析階段可將數據分為前景數據(foreground data)和背景數據(background data)，前景數據用來描述特定產品系統或生產體系之數據，背景數據包含材料、能源、運輸、廢棄物管理系統之數據，背景數據可由文獻或數據庫中蒐集，依據範疇詳細盤查生命週期各階段物質及能源的投入(input)與產出(output)資料；衝擊評估階段將盤查資料在相同的功能單位下，量化成各種影響類別的環境衝擊；結果闡釋階段整理並分析盤查及衝擊評估的結果，利用完整性查檢、敏感度分析、一致性分析等方法二度評估，最後為生命週期結論及建議，提供環境建議給予決策者參考。



資料來源：ISO(2006)

圖 2-2 生命週期評估架構



## 2.3.2 污水處理之生命週期評估

### 一、污水處理之生命週期評估

1990 年代之後，生命週期評估已經被用於污水處理領域中，自此之後有許多將生命週期評估工具應用於污水處理為主題的研究發表於國際期刊，顯示污水處理系統在追求持續性發展上，生命週期評估是一個適宜的工具(Corominas et al., 2013)。

生命週期評估應用於污水處理系統之研究，由於針對相異之研究個案有不同的研究目標，包含處理程序之環境影響、污水再利用或污泥最終處置替代方案選擇，或是評估範疇同時包含水處理的所有階段，因此在生命週期評估中，功能單位和影響評估方法上都有不同的設定，以下就生命週期評估之四項步驟整理與分類。

#### 1. 目標與範疇界定

生命週期評估應用於污水處理系統之研究，研究目標相異所設定之研究範圍如圖 2- 3。僅以污水處理廠內單一階段之處理程序作為研究範圍：Murray et al. (2008)考慮污泥處理程序，比較污泥處理方案及最終處置方法。Muñoz et al. (2009)、Meneses et al. (2010)討論三級處理程序之生命週期評估，找出最具環境效益的處理方法，將城市污水再利用。Kalbar et al. (2013)比較污水處理廠使用人工濕地、活性污泥法、批序式反應器等工法對環境之影響。

以污水處理廠完整處理程序為系統邊界之研究：Hospido et al. (2004)比較污水處理廠乾季與濕季於環境影響上的差異，Gallego et al. (2008)比較了 13 個小型污水處理廠的環保性能，Pasqualino et al. (2009)完整評估污水處理廠各階段之環境影響，提出污泥最終處置方案最具環境影響力，Pasqualino et al. (2011)比較四



個城市污水處理廠污水回收再利用之方案，評估相應的優點與缺點，Rodriguez-Garcia et al. (2011)比較 24 個污水處理廠在富營養化及全球暖化上的衝擊。

多數學者認為污水處理廠設計可使用年限長，相較於建設、除役階段，營運階段之環境影響是比較顯著的。Renou et al. (2008)於研究指出，施工與除役階段造成之環境影響，相較於總衝擊，於毒性及富營養化僅占 1%，於酸化占 6%、暖化占 11%、資源枯竭占 13%。加上建設與除役階段之資料非常難以蒐集，因此多數研究將建造與除役階段排除於研究範圍中。僅 Zhang et al. (2010)完整蒐集建造相關數據加上估計除役階段數據，以及 Foley et al. (2010)考量建造階段，排除除役階段進行完整包含建造除役階段之生命週期評估。

亦有學者認為城市污水處理之生命週期評估包含下水道運輸系統以及各處理程序。Lundie et al. (2004)系統性分析整個城市污水處理各階段之環境影響，於情境設計中討論人口管理、能源管理及需求管理，評估水處理對環境的影響。Foley et al. (2010)設定之研究邊界包含污水運送階段，將污水處理程序的評估範圍向前延伸。Amores et al. (2013)將城市水循環分為取水、淨水、供水網、污水排放、污水處理等五大階段，以城市水循環為基礎，比較增加三級處理或是海水淡化所造成之環境影響。

大部分污水處理生命週期評估研究，使用處理  $1 \text{ m}^3/\text{d}$  的污水作為功能單位，探討每單位污水所帶來的環境影響(Amores et al., 2013, Meneses et al., 2010, Muñoz et al., 2009, Murray et al., 2008, Pasqualino et al., 2009, Pasqualino et al., 2011, Zhang et al., 2010)，此功能單位不一定總是具代表性，因為它不反映污水廠的進水水質及去除效率，若比較不同系統，可能導致誤導性的結論(Corominas et al., 2013)。也因為研究目標需求 Hospido et al. (2004)、Hospido et al. (2008)、Gallego et al. (2008)、Kalbar et al. (2013)等研究以人口當量作為功能單位；Foley et al. (2010)與 Rodriguez-Garcia et al. (2011)以每單位體積所去除之營養物質為功能單位。

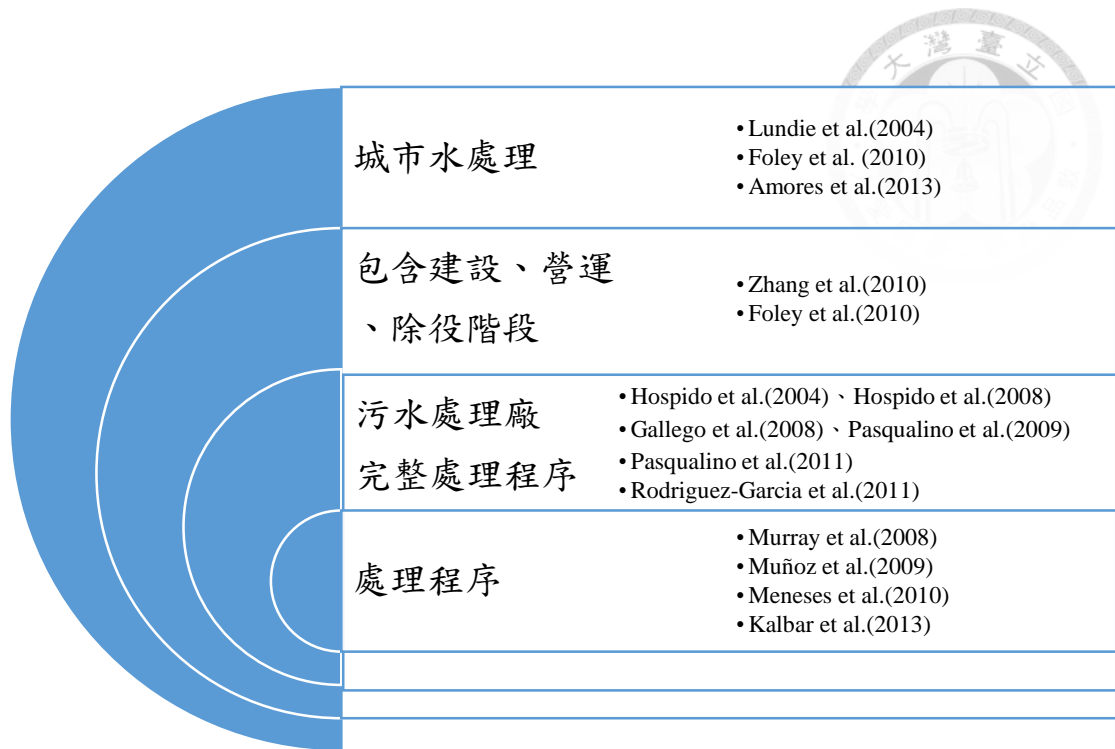


圖 2-3 研究範疇分類

## 2. 盤查分析

盤查分析階段可將數據分為前景數據 (foreground data) 和背景數據 (background data) 如表 2- 5。

前景數據用來描述特定產品系統或生產體系之數據，包含污水處理廠之水量、水質、能源消耗、耗材更換、藥品投注等等，可由污水處理廠之營運數據蒐集，或是搭配內部報告、個人訪談集結，部分缺失資料可以使用廠商提供之數據、文獻數據或是合理假設(Meneses et al., 2010, Remy et al., 2013)。完整描述污水處理廠所需之數據亦可透過模式模擬的方式，Foley et al. (2010)使用加拿大 BioWin 仿真模擬器；Remy et al. (2013)使用 UMBERTO 5.5 整合數據資料，建立污水處理系統。

表 2-5 數據蒐集方式

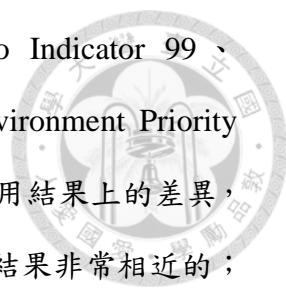
數據	文獻
<b>前景數據</b>	<p>Remy et al. (2013)：使用柏林大型污水處理廠 2009 年度的營運數據，搭配合理的假設和其他廠商提供之數據。</p> <p>Meneses et al. (2010)：數據為處理廠實際耗用、內部報告和個人訪談集結而成。</p> <p>Foley et al. (2010)：以瑞士污水處理廠數據做為基礎，由加拿大 BioWin 仿真模擬器模擬出不同情境的污水處理程序所消耗之能源、材料，同時使用模擬器中的質量平衡和質傳模型計算水質及污泥總氮總磷含量。</p>
<b>背景數據</b>	<p>Zhang et al. (2010)：使用中國統計年鑑數據庫蒐集建設資料，並以建設工作消耗之 90% 作為拆除階段消耗量。</p> <p>Remy et al. (2013)：電力、熱能、化學藥品等，使用 Ecoinvent v2.2 資料庫。</p> <p>Meneses et al. (2010)：選用 Ecoinvent v2.1 數據庫進行調整。</p>

背景數據包含材料、能源、運輸、廢棄物管理系統之數據，這些並非污水處理廠所生產出的產品，無法直接蒐集到製造這些產品時所投入的數據，故稱為背景數據，背景數據可由文獻或數據庫中蒐集。

盤查數據最重要的在於其可用性及品質，即使是廠內測量數據，也要確認機器及測量儀器是否完成校正，以得到更高品質的數據(Corominas et al., 2013)。

### 3. 衝擊評估

衝擊評估階段將盤查資料在相同的功能單位下，將環境衝擊量化成各影響類別。生命週期衝擊評估模式可概分中間點導向(midpoint-oriented)及損害導向(damage-oriented，亦稱終點導向(endpoint-oriented))，表 2- 6 整理常見各衝擊評估方法之特性與優缺點。



Renou et al. (2008) 比較 CML 2 Baseline 2000、Eco Indicator 99、EDIP(Environmental Design of Industrial Product) 96、EPS(Environment Priority Strategy)、和 Ecopoints 97 五種衝擊評估方法之衝擊類別以及應用結果上的差異，其中 CML2 Baseline 2000 與 EDIP96 在相同程序上的衝擊評估結果非常相近的；Eco Indicator99 由於重視氮，使酸化的衝擊較高；EDIP96 方法在氧化物具有最大的權重。

水處理的衝擊方法選擇上，有許多學者使用 CML 2 Baseline 2000 中間點導向之衝擊評估方法；CML 2 Baseline 2000 來自於荷蘭蘭登大學環境科學中心 (Kalbar et al., 2013)，結合 Ecoinvent 數據庫之生命週期清單，透過特徵因子轉換為衝擊類別，考慮的影響類別有酸化、全球暖化、水體富營養化、光化學氧化、非生物資源枯竭、臭氧消耗潛能、毒性，其中毒性包含淡水、海洋、人體、陸域等 (Bravo and Ferrer, 2011, Gallego et al., 2008, Hospido et al., 2004)。

諸多影響類別中，Renou et al. (2008) 研究指出，酸化、水體營養化、溫室效應、資源枯竭、毒性這五個影響類別，對污水處理廠來說是最具顯著性(表 2-7)。

亦有學者選用其他衝擊評估軟體，Barrios et al. (2008) 以荷蘭淨水廠做為研究案例，使用 Eco Indicator99 衝擊評估方法，使用該方法的概念是，每個單元和材料都可以獲得單一的分數，反映出各種衝擊。Muñoz et al. (2009) 應用生命週期評估選擇與臭氧相關之三級處理單元，並討論其毒性的影響，使用 EDIP97 評估方法，此評估方法於人類毒性這項影響類別中，對應三個暴露途徑分別為水、空氣、土，毒性化學物質建立在獨立的關鍵屬性物質上，模擬毒性物質命運和效應，EDIP97 是一個簡單的方式而非綜合的定量模型。Foley et al. (2010) 於研究中使用 Impact 2002+，除了中間點評估之外更進一步討論終點評估，將環境衝擊量化成環境損害。

表 2-6 各衝擊評估方法之特性與優缺點

衝擊評估方法	特性	優點/缺點
<b>CML 2000</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中點(衝擊)評估方法</li> <li>● 包含定性、標準化和評估、不包含權重</li> <li>● 側重於兩大類的環境影響，分別為材料能源(生物和非生物資源)和污染(全球暖化潛值、臭氧層枯竭、煙霧、影氧化)</li> </ul>	<p>不同物質在特徵化過程會有相當大的變化，所計算出的分數可能不完全可靠。</p>
<b>Eco-points 97</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 以瑞士政策的關鍵指標為基礎發展出的計算方式</li> <li>● 允許權重的比較和各種環境干擾(生態因素)，並評估排放至空氣、水、土壤之環境衝擊</li> <li>● 依目標值或實際排放量的差異，可使用不同歸一化因子</li> </ul>	<p>由於發展自瑞士政策的關鍵指標，針對特定物質，較詳細；同時也只有少數影響能進行評估。</p> <p>該系統基於政策面而非永續發展，通常是政治和環境因素間的考量。</p>
<b>Eco-indicator 99</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 這是一個終點評估方法</li> <li>● 氮氧化物為此方法的主要貢獻者</li> </ul>	<p>權重的設定有關鍵性的影響。</p>
<b>EDIP 97</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 這是一個全面性的中點評估方法</li> <li>● 以金錢或等價物品進行標準化，以政策上之減排目標作為權重考量</li> <li>● 生態毒性和人體毒性皆有簡單的模組</li> </ul>	<p>涵蓋了大部分的環境影響，包含排放、資源利用以及工作環境。</p> <p>EDIP 97 為 EDIP 93 之更新版本，涵蓋了更大範圍的環境影響，且更接近損害導向評估。</p>
<b>USES-LCA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 這是一個結合暴露和效益之模型</li> <li>● 已發展非極性物質、有機物質、化學藥品、金屬使用之風險評估</li> <li>● 包含化學物質數據庫</li> </ul>	<p>是一個簡易使用的模型，有中點和終點的計算，亦可改變場景的設計進行計算。</p>

資料來源：Chen et al. (2012)

表 2-7 環境影響類別說明

環境影響類別	說明
酸化	酸性氣體排放，造成酸雨破壞森林以及湖泊酸化。
水體富營養化	由於氮磷濃度過高，藻類過度發展使水流或土壤缺乏氧氣。
溫室效應	二氧化碳、甲烷等氣體過度排放，造成氣候變遷與溫室效應問題。
資源枯竭	礦物和化石燃料的消耗，使不可再生資源枯竭。
毒性	有毒物質對人類健康以及生態的影響。

資料來源：Renou et al. (2008)

#### 4. 結果闡釋

在闡釋階段應包含：確認生命週期盤查清單、生命週期衝擊評估結果是否有重大問題，評價此研究的完整性以及再一次確認敏感度和一致性，提出結論、限制與建議(Corominas et al., 2013)。

生命週期評估應用於污水處理廠上有一些限制，Remy et al. (2013)在研究中提到生命週期評估無法反映污水處理廠之動態變化，例如全天各時段的進水變化、降雨或是季節對當地水的影響，生命週期評估適合分析現有的平均數據，並比較不同技術方案在資源上的需求以及相關排放。

未來於污水處理對環境影響之研究，除了生命週期評估之外，仍須其他工具輔助，以解決重要的影響因子，包括土地使用、市民的接受程度以及法規的限制(Lundin, 2003)。

#### 二、污水處理之生命週期評估結果

Lundie et al. (2004)探討都市供水的生命週期評估，評估範圍包刮供水端到最終污水處理端，研究結果表示，透過有效的管理方式，可以減少 6%的用水需求以及節約 13%的能源。

Hospido et al. (2004) 考量乾季與濕季進行污水處理廠之生命週期評估，研究結果表示乾季與濕季造成的環境影響近乎相等，水排放及廢棄污泥才是環境影響主要貢獻者。

Hospido et al. (2008) 比較四座不同容量之污水處理廠，分析有無二級處理系統、有無厭氧消化系統對環境造成之影響，結果表示二級處理系統可去除有機物，但無法去除 N、P，需搭配其他處理方法方可減少水體富營養化衝擊；厭氧消化系統可減少污泥量、降低毒性以及全球暖化潛勢之衝擊。

Gallego et al. (2008) 研究 13 座小於 2000 人口當量之污水處理廠，由於各污水廠處理單元之差異，研究結果表示好氧-厭氧處理系統為環境友善之處理單元，去除效率比延時曝氣高且用電量低；而不同的污泥脫水單元(帶濾機、離心機)造成之環境影響差異不大。

Kalbar et al. (2013) 比較四個城市之污水處理系統，廢水處理之主要方法分別為：活性污泥法(activated sludge process (ASP))、序批式反應法(sequencing batch reactor (SBR))、升流式厭氧污泥床搭配兼性好氧潟湖(up-flow anaerobic sludge blanket reactors followed by facultative aerobic lagoon (UASB - FAL))和人工濕地(constructed wetlands (CWs))。研究結果表示序批式反應法為水質處理效果最佳，由於高耗能，造成溫室效應潛勢造成之環境影響最大；而人工溼地因為水生植物可以產生固定碳，對於溫室效應潛勢可產生效益。

### 三、污水、污泥再利用之生命週期評估結果

諸多影響類別中，再生水應特別注意毒性造成之影響，廢水中污染物包含重金屬、藥品、個人護理品等新興污染物，Muñoz et al. (2009) 應用臭氧、臭氧與過氧化氫進行實驗，比較三級處理有無以及海水淡化之環境影響，研究結果在毒性類別上，不同情境的差異較小，若以暖化潛勢類別，三級處理可減少 85% 溫室氣體排放量。

Zhang et al. (2010)於研究中完整盤查污水處理廠建造、營運、除役階段之數據，並評估污水回收之環境影響。研究結果指出，三級處理雖然造成環境衝擊，但同時也產生水再利用之環境效益，此環境效益不只與三級處理相抵消，更幾乎可以彌補二級處理對環境之衝擊。

Meneses et al. (2010)比較三種三級處理程序，包含加氯及紫外光、臭氧、臭氧及過氧化氫，評估結果表示加氯及紫外光為最佳方案；同時也設計了兩種水再利用方案與海水淡化相比較，研究表示再生水應用於農業再利用供水是最環保選擇，主要是避免了肥料的生產；而再生水應用於城市所造成之環境影響，與原本城市供水系統之淨水處理環境影響差異不大；相較之下，海水淡化是最耗能之供水方式。

Pasqualino et al. (2011)在研究結果中提到，二級處理在大部分指標中具有最高的環境衝擊，改善上要注意的是初級處理與二級處理後的排放水仍必須遵守法規標準，相較之下三級處理占總影響約 1.1%至 3.2%，意味著增加三級處理對整個污水處理系統的總影響是不顯著的，再生水的產出可替代非飲用水使用。

Houillon and Jolliet (2005)設計六種污泥處理方案，分別為：農業應用、焚化、濕式氧化、熱解、水泥窯焚燒與石灰膏狀掩埋，進行能源和緩化分析，在能源平衡上，農業應用為消耗能源最低的替代方案，對於暖化潛勢之影響，水泥窯焚燒為最佳選擇，垃圾掩埋和農業應用由於產生沼氣，因此為最差的選擇。

Hospido et al. (2005)考慮污泥前處理(機械脫水、熱乾燥)及污泥後處理(焚燒、熱解、掩埋、農業應用)階段，研究指出沒有一種處理方式在各影響類別中都能是環境效益，因此沒有通用的對策和解答，研界認為消化後之污泥有應用置土地之價值，污泥餅的產出也應以最低重金屬含量為目標。

Pasqualino et al. (2009)指出污泥最終處置與厭氧消化程序有決定性的影響，



做為農業與肥料使用，污泥帶來的衝擊也因此轉變為環境效益，厭氧消化程序所產出之沼氣，用以發電或汽電共生，減少能源消耗是很大的改善。

Remy et al. (2013)分析現有污泥處理與污泥最終處置，在能量需求及溫室效應上的影響，研究結果表示，污泥最終處置不同有相當大的環境影響，其中污泥在水泥窯焚燒可以減低碳足跡。

### 2.3.5 生命週期評估之敏感度分析與不確定性分析

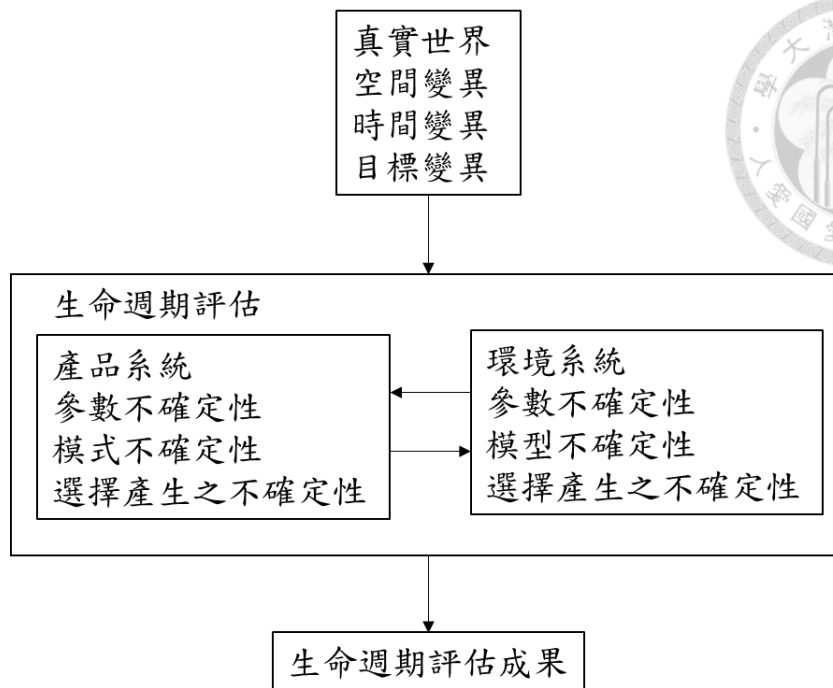
#### 一、敏感度分析

敏感度分析可以分析出生命週期評估之重要參數對環境衝擊的影響程度，主要目的是確立關鍵的數據和假設，可用來簡化數據收集與分析，且不影響結果的穩定性。進行敏感度分析有以下方法：

1. 龍捲風圖(Tronado diagram)：是最常見的表示方式之一，有助於比較具有高不確定性的變數與相對穩定的變數之間相對重要程度。
2. 單因子敏感度分析(One-way sensitivity analysis)：指分析時每次只變動一項敏感參數，而其他參數都保持不變，以求評估結果百分比差的改變。
3. 多因子敏感度分析(Multi-factor sensitivity analysis)：指假設其它不確定性因子都保持不變的條件下，計算兩種或兩種以上不確定性因素同時發生變動，對評估結果的影響程度。

#### 二、不確定性分析


不確定性會影響評估結果之可靠性如圖 2-4，使用生命週期評估時，決策者必須了解不確定性對評估結果的影響程度(羅時麒，2005)。將生命週期評估之不確定性及變異性的來源分為六類，分別敘述如下：



資料來源：Huijbregts (1998)

圖 2-4 生命週期評估之不確定性

1. 參數不確定性(Parameter uncertainty)：生命週期評估結果來自於大量資料供應，參數不確定性對於生命週期評估結果影響很大，包括因資料不完整或資料缺乏而使用替代數據，以及數據量測、取樣上的誤差等皆會使參數的代表性降低。
2. 模式不確定性(Model uncertainty)：許多環境現象存在非線性特性，生命週期評估線性化假設，無法完整呈現相關環境衝擊資訊(楊，2008)。
3. 選擇產生之不確定性(Uncertainty due to choices)：包括選擇盤查資料及分配，盤查分析簡化流程所應用的截斷規則，功能單位或權重因子的選擇等，皆會增加結果的不確定。
4. 空間變異(Spatial variability)：因各地區環保法規標準、產業技術水平及經濟發展等條件不同，導致不同區域排放量估計之差異。

- 
5. 時間變異(Temporal variability)：隨著時間變動，技術的提升與製程改善或變革等，將導致排放量估計的差異。生命週期評估結果對於未來決策仍存在時間落差結果，對於綠色設計之開發，不確定結果增加了生命週期評估決策的難度(楊，2008)。
  6. 投入產出製程的變異(Variability between sources and objects)：定性化相同功能產品之生命週期評估比較，由於製程、供應鏈及生產技術的不同，結果也因而有所差異。

綜合上述，歸納分析生命週期評估參數與計算過程不確定來源，可概分為三類：


- 一、盤查資料不確定性分析：利用不確定性方法估算盤查資料之變異性、時間相關性，或盤查清單間差異性比較。
- 二、評價系統係數及環境衝擊因子不確定：包含特徵化因子、標準化因子及權重等不確定性分析。
- 三、模擬評估過程的不確定性：總和盤查資料、程序參數、評價系統環境衝擊因子及系統範疇與分配等。

## 2.4 研究案例

金門地區自然資源缺乏，水資源不足一直是金門地區需解決的問題，本研究選用金門地區的金城污水處理廠作為研究案例。

### 2.4.1 金門地區水資源概況

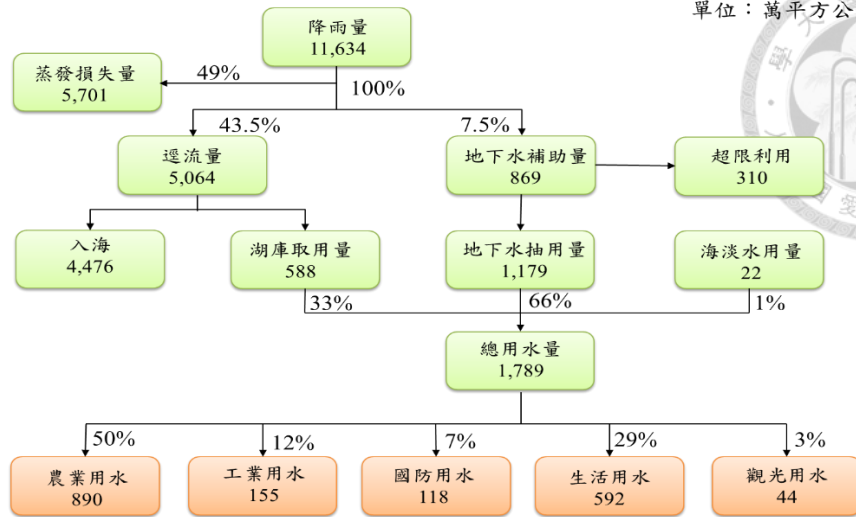
金門地區四面環海，屬於亞熱帶海洋性氣候，根據歷年統計資料，金門地區



全年平均年雨量 1,047 毫米，僅為台灣地區平均年降雨量之 40% 左右，且降雨時間與降雨分布極不平均，其中 75% 集中於 4 月至 9 月左右，為雨量少且蒸發量大之乾燥氣候。現有水庫之水源多賴梅雨及颱風暴雨，雖已開闢多座水庫蓄水，惟其降雨時間短暫，加上集水面積狹小且坡度陡，以致大部分地區地表逕流不易聚集，為水資源缺乏之地區(金門縣自來水廠，2011)。

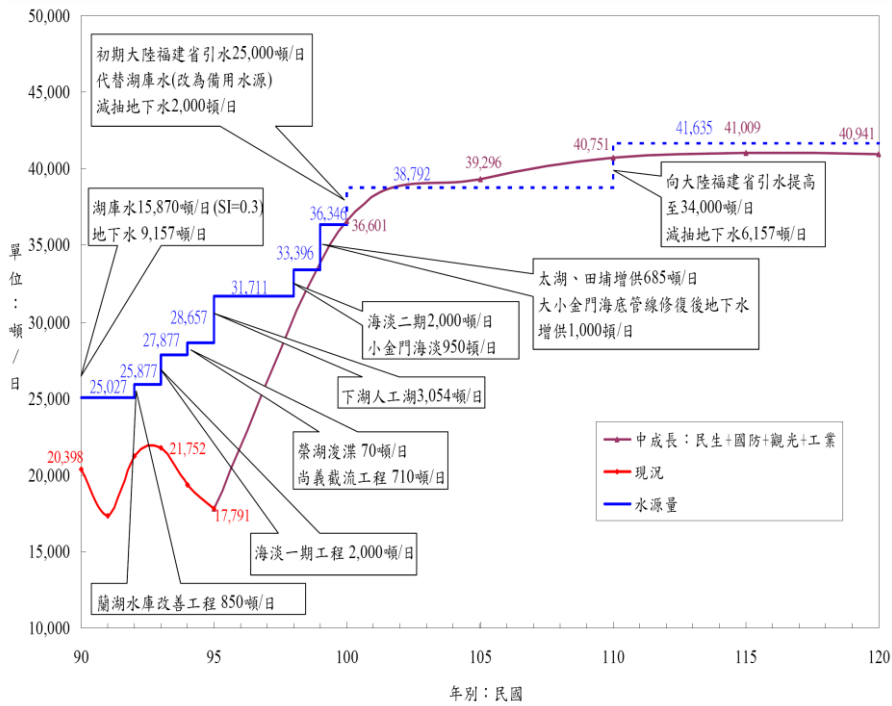
金門地區水源主要以湖庫及地下水為主，海水淡化為輔，地面水利用方式有大型湖庫，如太湖、金沙水庫等，以及散佈金門各地小型農塘；用水需求大概可分為生活用水、觀光用水、工業用水、國防用水、農業用水與保育用水等用途如圖 2-5。由於地面續水設施不足，枯水季節農業灌溉與環境澆灌用水往往需抽取地面湖庫水與地下水，增加飲用水源短缺之風險。

經濟部水利署(2009a)指出，2009 年金門地區供水能力為每日 3.17 萬立方公尺，供需尚能平衡，未來若「海淡二期」、「小金門海淡」及「大陸福建省引水工程」等計畫若皆如期完工，則供水能力將提升至每日 4.16 萬立方公尺，尚可滿足需求，若未能如期完成，至 2031 年約有每日 0.92 萬立方公尺之缺口。因此經濟部有「金門地區湖庫水質改善及清淤規劃」、「金門地區供水改善規劃」、「金門地區水再生利用規劃及試辦計畫」、「金門地區整體供水改善綱要計畫」等許多相關研究計畫，改善金門地區水資源問題。



資料來源：經濟部水利署(2013)

圖 2- 5 2011 年水資源利用概況



資料來源：經濟部水利署(2009a)

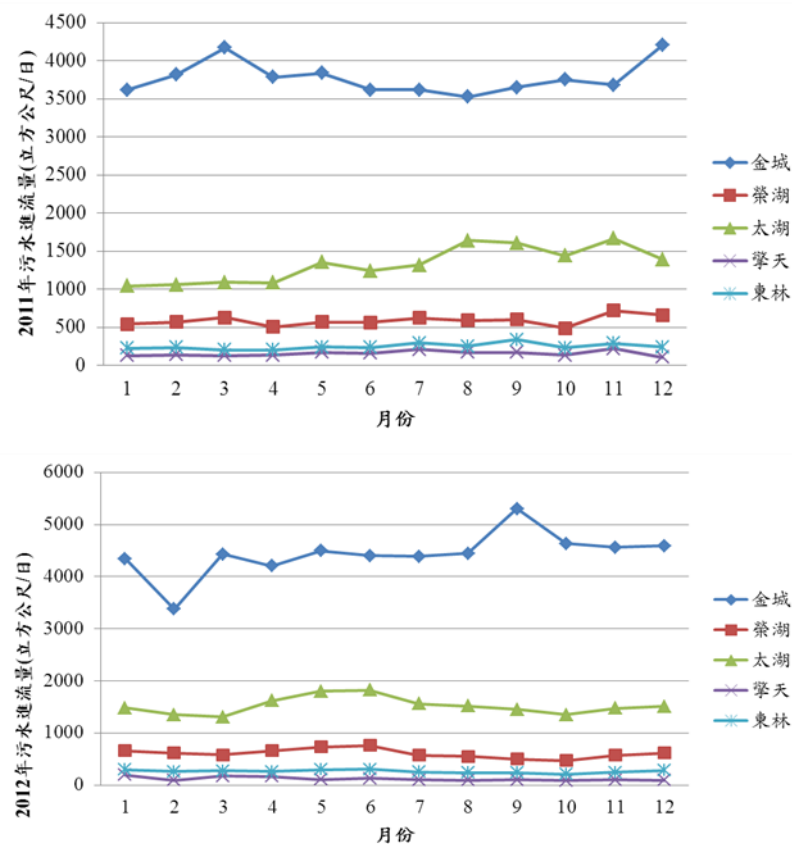
圖 2- 6 金門地區生活及工業用水供需圖(不含自行取水)



## 2.4.2 金城污水處理廠簡介

金城污水處理廠(掛牌名：金城區水資源回收中心)位於金門縣金城鎮，處理範圍包括安和社區、鳳翔社區、中正國小、金城國中、金門高中等金城都市計劃地區。

金城污水處理廠之設計容量為每日 3,000 立方公尺，而目前處理量為污水處理廠設計最大處理量，每日 4,500 立方公尺，為金門地區處理水量最多之污水處理廠(圖 2-7)。污水處理廠設計水處理方法為氧化深渠法，其處理流程經攔污柵、沉沙池、氧化渠、沉澱池及消毒槽等二級處理後排放；污泥處理經預先處理、重力濃縮、帶濾脫水後掩埋，如圖 2-8。



資料來源：金門縣自來水廠統計年報(2011、2012)，本研究整理

圖 2-7 2011、2012 年各月份污水處理廠進流量統計值

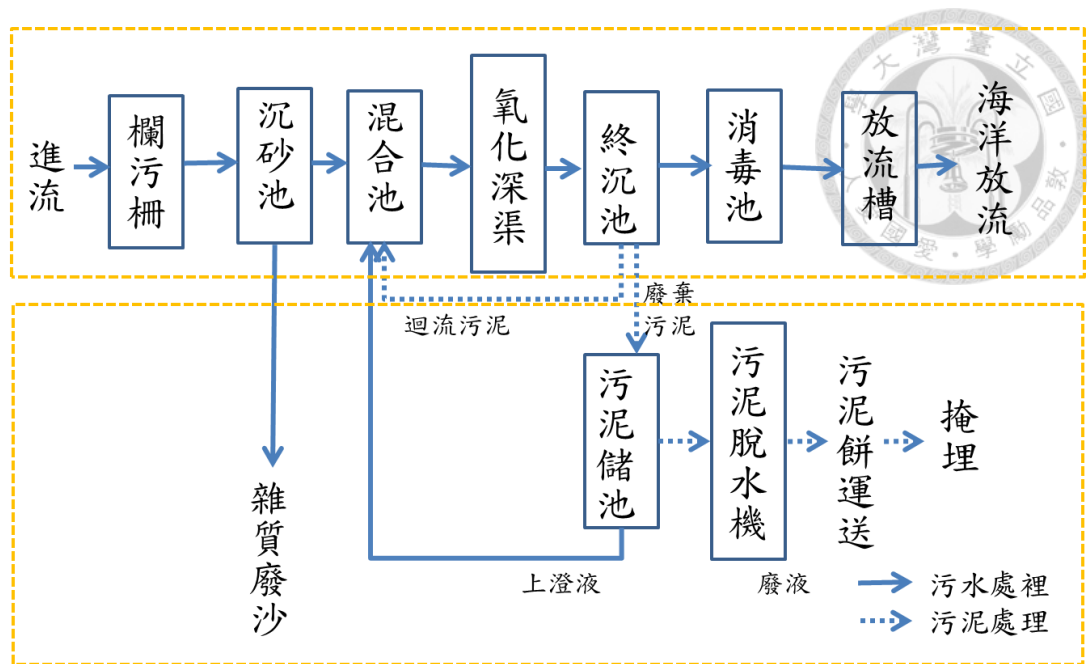


圖 2-8 金城污水處理廠處理程序

污水處理部分：

金門城污水處理廠固定按月對進流水及放流水進行檢測，檢驗項目有生化需氧量(BOD)、化學需氧量(COD)、懸浮固體物濃度(SS)等項目，其 2012 年平均數值如表 2-8 所示，以 COD 之去除率較低。

表 2-8 2012 年金城污水處理廠進流及放流水質

污水處理廠		金城污水處理廠		
水質		進流水	放流水	去除率
污水水質	BOD(mg/L)	84.43	5.33	95%
	COD(mg/L)	257.13	26.17	89%
	SS(mg/L)	93.89	3.85	96%
污泥量(噸/月)		46.17		

資料來源：金門縣自來水廠統計年報(2012)

金城污水處理廠目前已進行部分放流水再利用，除了廠內澆灌之外，有少量放流水作為附近濱海公園、莒光公園及石雕公園花木澆灌利用(經濟部水利署，

2009b)。

根據水利署金門地區水再生利用規劃及試辦計畫，未來金城污水處理廠將增加三級處理程序，放流水作為城市污水再利用，提供鄰近農業灌溉、花木澆灌、景觀等用水，待學校機關建置中水供應系統後，可提供金城國中、省政府、金門高中等機關學校沖廁用水，亦可利用管線將再生水注入鄰近之莒光湖與金山池，以及提供石雕公園，且未來莒光湖不需要再引入海水(經濟部水利署，2009b)。

依現行法令規定，埤塘(莒光湖、金山池)同等濕地，進入之水質必須符合放流水標準，然而，由於埤塘(莒光湖、金山池)為開放水體，有民眾親水之可能，且再生水注入後將提供民眾抽取灌溉或花木澆灌使用，因此放流水放流至埤塘前仍需經再生處理程序以提升水質(經濟部水利署，2009b)。

#### **污泥處理部分：**

金城污水處理廠污泥處置方式為重力濃縮、帶濾脫水、掩埋。金城衛生掩埋場已使用多年，掩埋容量有限，且目前金門本島各鄉鎮現有之掩埋場皆為租賃之土地，無法作長期性之規劃使用，雖然金城鎮赤山掩埋廠已經啟用，但是減少污泥掩埋仍相當重要。

於金門縣綜合發展計畫暨離島綜合實施方案中(金門縣政府，2006)亦提到，能源政策必須運用金門現有的資源，並於金門二期離島綜合建設實施方案中(金門縣政府，2007)，經專家評估後建議興建垃圾焚化爐，其興建地點以金寧鄉賈村為第一優先興建地點。如果污泥可以經焚化可將能源回收再利用或可成為其他可再利用資源，可減少金門地區資源缺乏的負擔。



## 第三章 研究方法



### 3.1 生命週期評估方法

生命週期評估軟體 SimaPro 7.1 為近年國際上普遍使用的生命週期評估軟體之一，係由荷蘭 Leiden 大學於 1990 年依 LCA 架構建置。除了包含 Ecoinvent 生命週期盤查資料庫外，也具有多種衝擊評估方法可供選擇，並且內建蒙地卡羅分析可用來計算環境衝擊的不確定性。本研究於 SimaPro 軟體中建立污水處理系統之盤查清單，選用 CML 2 Baseline 2000(簡稱 CML 2000)衝擊評估方法，量化產品對環境的影響。

#### 3.1.1 目標與範疇界定

目標與範疇界定為生命週期評估之首要步驟，內容包含研究目標、功能單位、範疇界定與研究假設，分別如下所述：

##### 一、研究目標

本研究使用生命週期評估軟體 SimaPro7.1 及 CML 2000 衝擊評估方法，將污水處理廠現階段盤查資料以及未來再生水、污泥再利用之盤查資料，藉由生命週期評估量化其環境衝擊，研究目標為量化污水處理廠之環境衝擊，並選出最適合該污水處理廠的再生水利用方式及污泥再利用方式。

##### 二、功能單位

污水處理廠主要目的在於去除水中污染物，減少排放廢水中的固體、有機物和營養物的排放量。於功能單位的定義中，有幾個選項可以參考：以一定時間周

期內處理後之污水或污泥生產量，或污水處理廠進流量作為功能單位(Hospido et al., 2004)。本研究選用前者，污水處理廠處理後之污水量，經計算換算為一立方公尺(1 m<sup>3</sup>)之污水為功能單位，作為生命週期評估中用以分析與比較的基礎單位。

### 三、範疇界定

雖然下水道已被證實與環境衝擊有關，但污水處理廠仍是最主要之衝擊來源(Doka, G., 2009.)。本研究考量污水處理營運階段，將污水處理系統之生命週期評估區分為污水處理階段、再生水再利用階段及污泥處理與再利用階段，考量污水處理廠自進流水之各處理單元，各操作單元營運所需投入之能源、藥品，包含放流水、再生水、污泥再利用等對整體對環境之影響，圖 3-1 為金城污水處理廠系統邊界。

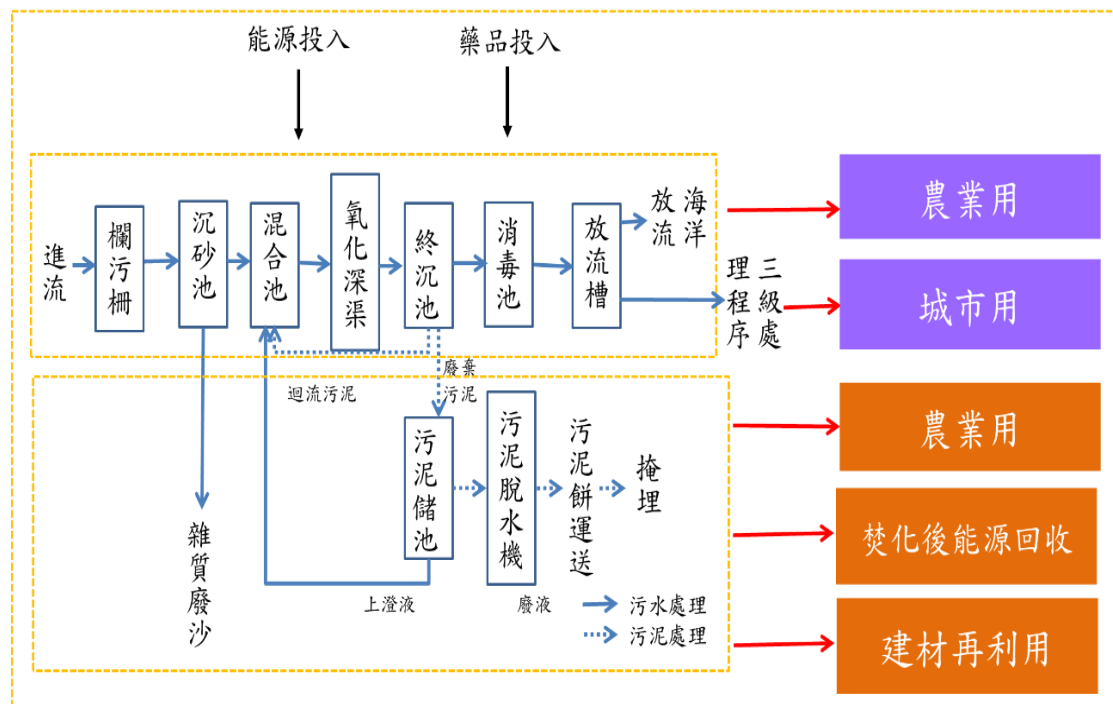
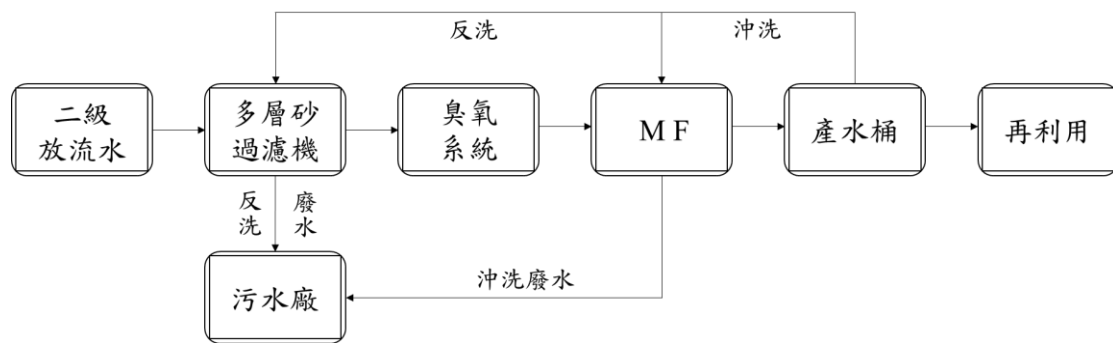


圖 3-1 金城污水處理廠系統邊界圖

污水處理階段，以金城污水處理廠現況為基礎，可分為污水處理程序及污泥處理程序，污水經下水道收集後進入污水廠，經一級處理程序包含攔污柵、沉砂

池及混合池去除漂浮物、懸浮固體、調勻流量或濃度，進入二級處理程序氧化深渠，以旋轉滾輪曝氣使污水表面接觸氧氣，使污泥不沉降，最後進入消毒池加氯錠消毒後放流海洋。污泥處理程序包含沉砂池所產生之雜質廢沙及終沉池所產生之廢棄污泥，經污泥儲池收集後脫水，脫水階段添加絮凝劑減少污泥含水率後運送至掩埋場掩埋處置。

再生水再利用階段以經濟部水利署(2009b)於金門地區水再生利用規劃及試辦計畫中，設計規劃金城污水處理廠增加三級處理程序為本研究基礎，處理程序如圖 3-2，包含砂濾、臭氧、微膜過濾。並於情境分析中假設污水再利用經二級處理後應用於農業澆灌以及經三級處理後應用於城市。



資料來源：經濟部水利署(2009b)

圖 3-2 水再生利用規劃設計之三級水處理流程圖

污泥再利用階段以污泥再利用為目標，一般污泥處理經濃縮脫水後僅掩埋處理，若經濃縮、脫水、堆肥化應用於農業再利用，若濃縮與脫水後經焚化為灰燼，其中焚化階段可提供熱值，而灰燼可成為建材再利用。於情境分析中假設污泥處理方式及污泥再利用方案，由文獻收集相關盤查數據後進行生命週期評估。

#### 四、研究假設與限制

本研究假設施工與除役階段造成之環境影響相較於營運階段、廠內設備(包含三級處理階段之薄膜系統)，所造成之環境影響不顯著，故於範疇界定將施工

與除役階段排除。

Hospido et al. (2004)考量乾季與濕季進行污水處理廠之生命週期評估，研究結果表示乾季與濕季造成的環境影響近乎相等，水排放及廢棄污泥才是環境影響主要貢獻者，故本研究假設金城污水處理廠流量穩定，乾季與濕季流量變化不大。

生命週期評估無法反映污水處理廠之動態變化，例如全天各時段的進水變化、降雨或是季節對當地水的影響，僅適合分析現有流程基礎上的平均數據，比較不同方案在資源上的需求及相關排放。

## 五、情境假設

以金城污水處理廠目前處理程序為基礎，設計兩個再生水利用方案及三個污泥再利用方案如下：

### 污水處理：


**方案 0** 無再生水且無污泥再利用：為研究案例金城污水廠現況，污水經二級處理程序後放流至海洋，污泥經濃縮、脫水後掩埋處理。

**方案 1** 再生水應用於農業：污水處理廠二級處理後，再生水應符合灌溉水水質標準，應用於農作物澆灌、花木澆灌。

**方案 2** 再生水應用於城市：經濟部水利(2009b)以金城污水處理廠設計之污水三級處理程序，選定以「砂濾、臭氧、MF 微膜過濾」程序進行規劃，將再生水應用於建築物沖廁、消防、裝飾噴泉、休閒蓄水、雜用水等等。

### 污泥處理：

**方案 0** 污泥無再利用：為研究案例金城污水廠現況，污泥經濃縮、脫水後掩埋處理。

- 
- 方案 3** 污泥應用於農業：污泥經濃縮、脫水、堆肥後應用於農業再利用。
- 方案 4** 污泥焚化後能源回收再利用：污泥經濃縮、脫水、焚化後灰燼掩埋，焚化過程中產生之熱能再利用。
- 方案 5** 污泥應用於建材：污泥經濃縮、脫水、焚化後灰燼作為黏土磚。

### 3.1.2 盤查分析

#### 一、能源使用

金門地區由塔山、夏興、麒麟等 3 座電廠供應全島軍民用電，台灣使用重油發電為協和、大林、尖山、塔山及珠山發電廠，重油發電之裝置容量合計分別為協和 200 萬瓩、大林 75 萬瓩、尖山 12.98 萬瓩、塔山 5.6 萬瓩、珠山 1.54 萬瓩共 295.12 萬瓩。金城地區使用之能源為塔山發電廠，燃油種類為重油，裝置容量合計約 5.6 萬瓩，塔山發電廠用油量占全台灣 1.8%。

#### (1) 原油開採及運輸階段

國內所消費的原油幾乎都是從國外進口，原油開採的投入產出皆是發生於其原產地，但各地的原油開採盤查資料取得不易，因此各產地原油開採的盤查均使用 Ecoinvent 資料庫內建盤查項目來代表。原油進口資料根據經濟部能源局(2011)的統計數據，其中最主要來源為沙烏地阿拉伯占 33.76%，其次是科威特占 23.06%，而海上運輸距離則依據 Sea-Rates.com 網站 (<http://www.searates.com/cn/reference/portdistance/>) 所估算之海運里程，估算基準為原油出口國的代表港口至高雄港，原油進口資料及海運距離如表 3-1。

表 3-1 原油進口情形及海運距離

國家	代表港	進口量(千桶)	進口比例(%)	海運距離 (km)
安哥拉	Cabinda	52,168.00	17.99	16440.25
剛果	Djeno	4,544.56	1.57	16512.51
伊朗	Bandar Mahshahr	11,040.08	3.81	10260.38
伊拉克	Fao	8,224.00	2.84	10245.08
科威特	Mina Al Ahmadi	66,893.96	23.06	10206.88
奈及利亞	Port Harcourt	4,836.28	1.67	17622.05
阿曼	Mina Al Fahal	4,001.56	1.38	8952.31
沙烏地阿拉伯	Ras Tanura	97,930.92	33.76	9967.76
阿拉伯聯合大公國	Das Island	17,259.81	5.95	9736.05
其他	-	23,162.35	7.99	-
總計	-	290,061.52	100.00	-

資料來源：經濟部能源局(2011)、Sea-Rates.com、謝(2013)

## (2) 重油提煉階段

重油是原油提取汽油、柴油後的剩餘重質油，其特點是分子量大、黏度高。原油進口至港口後，通常會以油罐火車，油罐汽車和油管等方式將原油運送至煉油廠，本研究假設利用油管輸送原油，而港口至煉油廠的管線距離為 20 公里。煉油廠提煉程序盤查，由於缺少國內的實廠數據，因此以 Ecoinvent 資料庫內建的歐洲煉油廠資料，調整原油來源、台灣電力系統之能源供應及運輸距離後做為代表(Heavy fuel oil, at refinery/TW U)。經煉油廠生產出之重油，由高雄港海運至金門料羅港距離為 277.5 公里，陸運 19.9 公

里至塔山發電廠使用(Heavy fuel oil, at regional storage/TW U)。

### (3) 重油發電階段

重油發電廠缺少國內實廠數據，同樣以 Ecoinvent 資料庫內建的歐洲煉油廠資料來代表，修正其重油來源及運輸距離(Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U)。本研究使用經在地化調整後之重油發電作為能源代表。

## 二、金城污水廠

### 1. 金城污水處理廠處理現況－污水處理

金城污水處理廠之設計容量為 3,000 立方公尺，而目前處理量為污水處理廠設計最大量每日 4,500 立方公尺，2013 年度平均日處理水量已超出設計最大量，進流量為 5,024 立方公尺，出流量為 4,370 立方公尺。

本研究蒐集金城污水處理廠 2013 年廠內能源、藥品投入量，將每日平均值以污水處理廠處理後之放流水水量 4,370 立方公尺作為標準，換算成每功能單位消耗量，所需要能源為每功能單位 1428.8 KJ，氯錠 1545,73 mg，絮凝劑 390 mg。

能源使用本研究建置之重油發電作為相對應盤查項目，污水處理廠所需要之藥劑包含消毒池使用氯錠(PACL)及污泥處理使用絮凝劑(Polymer)，由於 Ecoinvent 資料庫並無相對應盤查資料，在 PACL 部分以主要成分 Aluminium oxide ( $Al_2O_3$ )作為替代，絮凝劑部分同樣以主成分 Ammonium chloride 作為替代(經濟部水利署，2011)。

金城污水廠每月廠內檢驗及委外檢驗放流水水質資料(COD、BOD、SS、pH)，本研究蒐集 2013 年檢測資料，將每日平均值換算成功能單位。其中一部分資料(離子、重金屬)為 2013 年 11 月 28 日，一次性的放流水水質檢測

資料。金城污水處理廠放流水水質良好，多數項目檢測結果低於偵測極限，如表 3-2。

表 3-2 金城污水處理廠放流水水質

項目	對應盤查項目	數量	單位
排放至海洋(一、二級處理程序)			
化學需氧量	COD, Chemical Oxygen Demand	24.61	mg
生化需氧量	BOD5, Biological Oxygen Demand	6.49	mg
懸浮固體	Suspended solids, unspecified	7.51	mg
氟離子	Fluoride	1.00	mg
氯離子	Chloride	69.10	mg
硝酸鹽	Nitrate	2.53	mg
磷酸鹽	Phosphate	2.24	mg
亞硝酸鹽	-	ND	mg
硫酸鹽	Sulfate	17.97	mg
鈣	Calcium, ion	13.70	mg
鉀	Potassium, ion	25.70	mg
鈉	Sodium, ion	290.60	mg
鋁	-	ND	mg
銀	-	ND	mg
鎘	-	ND	mg
鉻	-	ND	mg
銅	-	ND	mg
鐵	-	ND	mg
錳	-	ND	mg
鎳	-	ND	mg
硒	-	ND	mg
鋅	-	ND	mg

資料來源：金城污水處理廠

## 2. 金城污水處理廠處理現況－污泥處理

金城污水處理廠處理每功能單位之廢水產生 0.43 g 之污泥，金城污水處理廠 2013 年度兩次污泥委外檢驗之平均數值，多數項目檢測結果低於偵測極限，僅總鉛、總銅、總銀有檢測數據，經換算為功能單位後數值如表 3-3。



污泥以掩埋於金城鎮赤山掩埋廠為最終處置，其卡車運輸距離約為 3.5 公里，假設卡車一次可運 16 噸污泥，將污水處理廠污泥運輸換算成功能單位，為 9.41E-8 tkm。



表 3-3 金城污水處理廠污泥檢驗數值

項目	對應盤查項目	數量	單位
投入(污泥處理程序)			
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	9.41E-8	tkm
絮凝劑	Ammonium chloride, at plant/GLO U	390.00	mg
排放至土壤(污泥處理程序)			
總汞	-	ND	mg
總鎘	-	ND	mg
總砒	-	ND	mg
六價鉻	-	ND	mg
總鉛	Lead	0.03	mg
總鉻	-	ND	mg
總砷	-	ND	mg
總銅	Copper	0.01	mg
總鋇	Barium	0.63	mg

資料來源：金城污水處理廠

### 三、情境盤查分析

污水處理：

**方案 0** 無再生水且無污泥再利用之盤查清單

綜合金城污水處理廠 2013 年廠營運之能源、藥品投入量，污水排放及污泥處理之盤查清單如表 3-4。

表 3-4 金城污水處理廠之盤查清單

項目	對應盤查項目	數量	單位
投入(一、二級處理程序)			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	1428.80	KJ
氯錠	Aluminium oxide, at plant/RER U	1545.73	mg
排放至海洋(一、二級處理程序)			
化學需氧量	COD, Chemical Oxygen Demand	24.61	mg
生化需氧量	BOD5, Biological Oxygen Demand	6.49	mg
懸浮固體	Suspended solids, unspecified	7.51	mg
氟離子	Fluoride	1.00	mg
氯離子	Chloride	69.10	mg
硝酸鹽	Nitrate	2.53	mg
磷酸鹽	Phosphate	2.24	mg
硫酸鹽	Sulfate	17.97	mg
鈣	Calcium, ion	13.70	mg
鉀	Potassium, ion	25.70	mg
鈉	Sodium, ion	290.60	mg
投入(污泥處理程序)			
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	9.41E-8	tkm
絮凝劑	Ammonium chloride, at plant/GLO U	390.00	mg
排放至土壤環境(污泥處理程序)			
總鉛	Lead	0.03	mg
總銅	Copper	0.01	mg
總鋇	Barium	0.63	mg

資料來源：金城污水處理廠

#### 方案 1 再生水應用於農業之盤查清單

污水處理廠經二級處理後放流水應用於農業再利用作為灌溉用水用途，應符合灌溉用水水質標準，由於國內之「灌溉用水水質標準」主要為水稻種植設計，而金門地區用水主要用於旱作(高粱、小麥)等灌溉，因此參考中國大陸之「農業灌溉水質標準」(附錄 A)，綜合污水處理及再生水應用於農業再利用之盤查清單為表 3-5。

再生水應用於農業過程中，水中含有的氮、磷等元素(表 3-6) 可減少肥

料施用，因此歸類為環境效益非環境衝擊。除此之外，再生水利用可減少淨水處理所產生之環境衝擊，也是再生水利用之環境效益。

目前金門地區飲用水供應主要透過太湖、榮湖、紅山及金城四個自來水淨水廠供應，每日總供水量約為 21,500 CMD；其中金城淨水廠抽取地下水經添加次氯酸鈉消毒後直接供應金西地區使用。再生水應用於農業再利用亦有減少淨水程序之環境效益如表 3-7。

表 3-5 再生水應用於農業再利用之盤查清單

項目	對應盤查項目	數量	單位
<b>投入(一、二級處理程序)</b>			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	1428.80	KJ
氯錠	Aluminium oxide, at plant/RER U	1545.73	mg
<b>排放至水體環境(一、二級處理程序)</b>			
化學需氧量	COD, Chemical Oxygen Demand	24.61	mg
生化需氧量	BOD <sub>5</sub> , Biological Oxygen Demand	6.49	mg
懸浮固體	Suspended solids, unspecified	7.51	mg
氟離子	Fluoride	1.00	mg
氯離子	Chloride	69.10	mg
硝酸鹽	Nitrate	2.53	mg
磷酸鹽	Phosphate	2.24	mg
硫酸鹽	Sulfate	17.97	mg
鈣	Calcium, ion	13.70	mg
鉀	Potassium, ion	25.70	mg
鈉	Sodium, ion	290.60	mg
<b>投入(污泥處理程序)</b>			
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	9.41E-8	tkm
絮凝劑	Ammonium chloride, at plant/GLO U	390.00	mg
<b>排放至農地土壤(污泥處理程序)</b>			
總鉛	Lead	0.03	mg
總銅	Copper	0.01	mg
總鋇	Barium	0.63	mg

資料來源：金城污水處理廠、經濟部水利署(2009b)

表 3-6 再生水應用於農業再利用之環境效益

項目	對應盤查項目	數量	單位
排放至農地土壤(農業應用)			
氮	Nitrogen	-0.57	mg
磷	Phosphorus	-0.73	mg

資料來源：金城污水處理廠

表 3-7 水再利用之環境效益

項目	對應盤查項目	數量	單位
投入(淨水處理程序)			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	-1874.81	KJ
二氧化氯	Chlorine dioxide, at plant/RER U	-2.40	mg
次氯酸鈉	Sodium hypochlorite, 15% in H <sub>2</sub> O, at plant/RER U	-5.20	mg
排放至水體環境(淨水處理程序)			
自由餘氯	Chloride	-0.68	mg
氯鹽	Chloride	-31.40	mg
氨氮	Ammonia, as N	-1.39	mg
硝酸鹽氮	Nitrate	-3.58	mg
總有機碳	TOC, Total Organic Carbon	-0.46	mg

資料來源：經濟部水利署(2012)、金門自來水統計年報

**方案 2** 再生水應用於城市之盤查清單

經濟部水利署(2009b)規劃金城污水處理廠增加三級處理程序，以處理水量每日 2,400 立方公尺設計之設備規格，其壓濾式過濾器、臭氧處理設備及微膜過濾之規格如下：

壓濾式過濾器為多層砂過濾，桶槽直徑 3,000 毫米、高度 2,000 毫米，多層濾料含礫石、石英砂、無煙煤，單套污水處理量為 1,200 立方公尺，取 3 套(其中 1 套備用)。

臭氧處理設備之臭氧機功率為 19~57 g/h，包含空壓機、氧氣生成機與臭氧生成器。微膜過濾之薄膜材質採用 PS、PES、PVDF 或其他商業化材質，孔徑應小於 0.45 微米，所需薄膜面積 1,344 平方公尺，過濾通量可達建議值

每小時每平方公尺 60 公升，可去除所有懸浮固體。選用膜管型式為外掛式微過濾膜，有中空纖維膜、卷式膜、管式膜、板框式膜可供選擇，於此選用卷式膜。

經濟部水利署(2009b)於金城水再生廠設備維護與營運分析，微膜過濾需 MF 膜 48 支，3 年更換一次，平均每年 16 支，壓濾式過濾器之濾料更換含石英砂、礫石及無煙煤，過濾砂層每經 3-4 年要全部翻騰清掃一次，重新整理集水系統鋪設新濾料(台灣省自來水公司，2008)。

金城污水處理廠增加三級處理程序之能源、資源投入量，盤查清單參考經濟部水利署(2009b)營運分析，三級處理每年所需總電功率估計為 80 KW，換算成功能單位為 65.90 KJ。多層砂過濾單元所需要之濾砂量，參考 Barrios et al. (2008)，臭氧單元參考 Muñoz et al. (2009)之盤查清單。此外，雖然經濟部水利署(2009b)規劃之三級處理程序含微膜過濾，Tangsubkul et al. (2006)於研究中表示微膜過濾系統之耗材於生命週期評估中不顯著，且盤查資料尚有許多缺失，本研究將微膜過濾系統排除於系統邊界。

綜合金城污水處理廠一、二、三級處理程序，本研究假設經微膜過濾後所產生之再生水無任何污染物質，盤查清單如表 3-8，再生水應用於城市同樣可減少淨水程序所造成之環境衝擊，表 3-7 為再生水應用於城市所產生之環境效益盤查清單。

表 3-8 金城污水處理廠經三級處理之盤查清單

項目	對應盤查項目	數量	單位
<b>投入(一、二級處理程序)</b>			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	1428.80	KJ
氫錠	Aluminium oxide, at plant/RER U	1545.73	mg
<b>投入(三級處理程序)</b>			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	65.90	KJ
砂	Sand, at mine/CH U	0.02	kg

氧氣	Oxygen, liquid, at plant/RER U	0.14	kg
投入(污泥處理)			
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	9.41E-8	tkm
絮凝劑	Ammonium chloride, at plant/GLO U	390.00	mg
排放至土壤環境(污泥處理)			
總鉛	Lead	0.03	mg
總銅	Copper	0.01	mg
總鋇	Barium	0.63	mg

資料來源：經濟部水利署(2009b)、金城污水處理廠、Barrios et al. (2008)、Muñoz et al. (2009)

### 污泥處理：

泥處理系統一般由以下步驟：濃縮、脫水、主要之處理程序至最終處置，本研究選定四種污泥處理方案進行盤查分析(圖 3-3)，污泥之盤查清單參考自 Hong et al. (2009)與 Murray et al. (2008)，文獻中使用之功能單位為污水處理廠產出 1 噸污泥，本研究將 1 噸污泥，換算為污水處理廠處理 1m<sup>3</sup> 污水時產生污泥，污泥處理所需消耗之能源與資源量；因此，污泥處理之功能單位與污水處理功能單位相同。

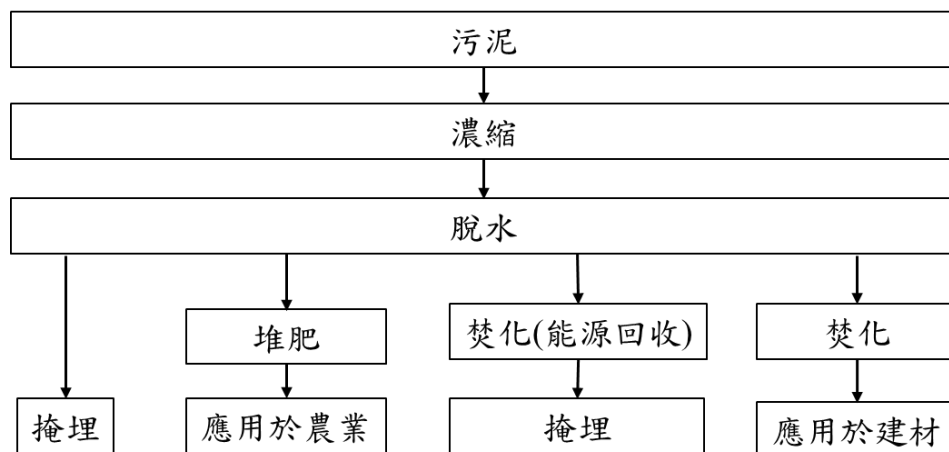


圖 3-3 污泥處理方案

**方案 0** 污泥無再利用之盤查清單

如圖 3-3 污泥處理方案，金城污水處理廠目前的污泥處理程序為濃縮、脫水，最終處理為掩埋處理，金城赤山掩埋場為運送污泥掩埋之目的地，距離約為 3.5 公里，假設卡車一次可運 16 噸污泥，將污泥運送換算為功能單位為 9.41E-8 tkm。表 3-9 為污泥無任何再利用規劃之盤查清單。

表 3-9 污泥無任何再利用之盤查清單

項目	對應盤查項目	數量	單位
<b>投入(濃縮)</b>			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	277092.00	KJ
<b>投入(脫水)</b>			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	277092.00	KJ
絮凝劑	Ammonium chloride, at plant/GLO U	3.05	kg
<b>投入(掩埋)</b>			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	11319.75	KJ
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	9.41E-8	tkm
<b>排放至空氣(掩埋)</b>			
甲烷	Methane	1.38	kg
<b>排放至土壤(掩埋)</b>			
總鉛	Lead	0.03	mg
總銅	Copper	0.01	mg
總鋇	Barium	0.63	mg

資料來源：Hong et al. (2009)

**方案 3** 污泥應用於農業之盤查清單

如圖 3-3 污泥處理方案，污泥經濃縮、脫水、堆肥後應用於農業再利用，濃縮與脫水程序主要為能源投入，堆肥程序中將有機物堆積在其中繁殖、新陳代謝後所得之殘留物，殘留物包括菌體、二次代謝及為分解轉化的資來(洪明龍，2000)，堆肥程序中可將有機物降解(Suh and Rousseaux, 2002)。表 3-10 為污泥應用於農業再利用之盤查清單，除了堆肥階段需電力抽風保持環境通風(Suh and Rousseaux, 2002)，濃縮、脫水、堆肥階段主要也是電力消耗。於污泥應用於農業

之情境中，假設污泥運送距離與污泥運送至掩埋之距離相同。

污泥應用於農業所產生之環境效益，最主要為堆肥後可避免沼氣的產生，表 3-11 為污泥應用於農業再利用可產生之效益。



表 3-10 污泥應用於農業再利用盤查清單

項目	對應盤查項目	數量	單位
投入(濃縮)			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	277092.00	KJ
投入(脫水)			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	277092.00	KJ
絮凝劑	Ammonium chloride, at plant/GLO U	3.05	kg
投入(堆肥)			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	108360.00	KJ
投入(農業應用)			
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	9.41E-8	tkm
排放至空氣(農業應用)			
氮氧化物	Nitrogen oxides	300.31	g
二氧化碳	Carbon dioxide	7.40	kg
排放至土壤(農業應用)			
總鉛	Lead	0.03	mg
總銅	Copper	0.01	mg
總鋇	Barium	0.63	mg

資料來源：Hong et al. (2009)

表 3-11 污泥應用於農業再利用可產生之效益

項目	對應盤查項目	數量	單位
排放至空氣(農業應用)			
甲烷	Methane	-9.16	kg
一氧化二氮	Nitrous oxide	-81.70	g
硫氧化物	Sulfur oxides	-363.95	g

資料來源：Hong et al. (2009)

**方案 4** 污泥焚化後能源回收再利用之盤查清單

如圖 3-3 污泥處理方案，污泥經濃縮、脫水後於焚化階段可產生熱能，污泥



焚化後殘留量約為脫水污泥量的 12.5%，最後將灰燼掩埋處理。雖然金門地區目前尚無焚化處理，由於垃圾掩埋已趨於飽和，金門縣政府於金門二期離島綜合建設實施方案中，經專家學者評估之後，建議以興建垃圾焚化爐的方式較為合乎地區整體之需求，其興建地點以金寧鄉賈村為第一優先興建地點。本研究假設未來金寧鄉賈村將興建焚化爐，則污泥焚化處理之運送距離約為 5.1 公里，假設卡車一次可運 16 噸污泥，將污泥運送換算為功能單位為 13.7E-8 tkm。焚化後灰燼運輸至赤山掩埋廠，距離為 7.8 公里，同樣假設卡車一次可運 16 噸灰燼，換算功能單位為 2.6E-8 tkm。表 3-12 為污泥焚化後再利用之盤查清單，表 3-13 為焚化後污泥所產生之環境效益。

表 3-12 污泥焚化後再利用所需消耗之能源資源

項目	對應盤查項目	數量	單位
<b>投入(濃縮)</b>			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	277092.00	KJ
<b>投入(脫水)</b>			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	277092.00	KJ
絮凝劑	Ammonium chloride, at plant/GLO U	3.05	kg
<b>投入(焚化)</b>			
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	13.7E-8	tkm
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	471830.00	KJ
天然氣	Natural gas (m <sup>3</sup> )	20.00	m <sup>3</sup>
<b>排放至空氣(焚化)</b>			
二氧化碳	Carbon dioxide	159100.00	g
鉻	Chromium	1.02	g
鉛	Lead	0.10	g
鎘	Cadmium	0.25	g
汞	Mercury	0.03	g
鋅	Zinc	0.42	g
<b>投入(灰燼掩埋)</b>			
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	2.6E-8	tkm
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	90558.00	KJ
<b>排放至空氣(灰燼掩埋)</b>			
甲烷	Methane	1.38	kg

排放至土壤(灰爐掩埋)			
總鉛	Lead	0.03	mg
總銅	Copper	0.01	mg
總鉍	Barium	0.63	mg

資料來源：Hong et al. (2009)

表 3- 13 污泥焚化後再利用所產生之效益

項目	對應盤查項目	數量	單位
投入(焚化)			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	-1437318.00	KJ

資料來源：Hong et al. (2009)

**方案 5** 污泥應用於建材之盤查清單

如圖 3- 3 污泥處理方案，污泥經濃縮、脫水、焚化後灰爐應用於建材，表 3- 14 為污泥應用於建材做為建材(黏土磚)之盤查清單，其中，污泥運送至焚化爐換算為功能單位為 13.7E-8 tkm，灰爐經由焚化廠運送至金門料羅港距離 11 公里，換算成功能單位為 3.67E-8，由料羅港海運至高雄距離 277.5 公里，換算成功能單位為 9.25E-7。表 3- 15 為污泥應用於建材做為建材(黏土磚)之之環境效益。

表 3- 14 污泥應用於建材所需消耗之能源資源

項目	對應盤查項目	數量	單位
投入(濃縮)			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	277092.00	KJ
投入(脫水)			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	277092.00	KJ
絮凝劑	Ammonium chloride, at plant/GLO U	3.05	kg
投入(焚化)			
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	13.7E-8	tkm
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	471830.00	KJ
天然氣	Natural gas (m <sup>3</sup> )	20.00	m <sup>3</sup>
排放至空氣(焚化)			
二氧化碳	Carbon dioxide	159100.00	g
鉻	Chromium	1.02	g

鉛	Lead	0.10	g
鎘	Cadmium	0.25	g
汞	Mercury	0.03	g
鋅	Zinc	0.42	g
投入(建材)			
運輸	Transport, lorry 16-32, EURO3/RER U	3.67E-8	tkm
運輸	Barge FAL	9.25E-7	tkm
排放至土壤(建材)			
總鉛	Lead	0.03	mg
總銅	Copper	0.01	mg
總鋇	Barium	0.63	mg

資料來源：Hong et al. (2009)

表 3- 15 污泥應用於建材所產生之效益

項目	對應盤查項目	數量	單位
投入(建材)			
能源	Heavy fuel oil, burned in power plant/TW U	-266.47	mj
排放至空氣(建材)			
二氧化硫	Sulfur dioxide	1.96	g
一氧化碳	Carbon monoxide	2.57	g
二氧化碳	Carbon dioxide	3.90	g
氮氧化物	Nitrogen oxides	1.98	g
揮發性有機化合物	Volatile organic compound	1.98	g

資料來源：Murray et al. (2008)

### 3.1.3 衝擊評估方法

本研究選用 CML2 baseline 2000，此衝擊評估方法來自於荷蘭萊頓大學環境研究中心 1992 年發展出之 CML1992 衝擊評估方法，CML2000 調整部分衝擊類別，取消固體廢棄物產生量(Solid Waste Production)以及一次能源資源利用(Primary Energy Resource Use)等兩項衝擊類別，將原本夏季煙霧形成(Summer Smog Formation)更改為光化學氧化(Photochemical oxidation)，並且於生物毒性類別更細分為淡水水生生態毒性(Fresh water aquatic ecotox.)、海洋水生生態毒性

(Marine aquatic ecotoxicity)、陸地生態毒性(Terrestrial ecotoxicity)，新加入非生物枯竭(Abiotic depletion)類別，將礦物和化石燃料的耗用以銻(Sb)為參考元素量化成環境衝擊；CML2000 之衝擊評估方法所包含之衝擊類別如表 3- 16(Buonocore et al., 2009)。




表 3- 16 CML2000 衝擊評估方法

衝擊類別	Impact category
非生物枯竭	Abiotic depletion
酸化	Acidification
富營養化	Eutrophication
全球暖化	Global warming
臭氧層損耗	Ozone layer depletion
人類毒性	Human toxicity
淡水水生生態毒性	Fresh water aquatic ecotox
海洋水生生態毒性	Marine aquatic ecotoxicity
陸地生態毒性	Terrestrial ecotoxicity
光化學氧化	Photochemical oxidation

資料來源：Buonocore et al. (2009)

- 非生物枯竭類別：指系統中涉及礦物、化石燃料提取，以銻(Sb)為參考元素量化成環境衝擊，kg Sb eq (kg antimony equivalents)為單位。
- 酸化類別：二氧化硫被選為參考之酸性氣體，其他排放物皆使用相對計算方法，以 kg SO<sub>2</sub> eq (kg sulfur dioxide equivalents)作為單位。在現實中，酸雨的影響高度依賴接收環境(土壤、湖泊)之鹼度，例如歐洲北部的灰壤和苔原的酸化比地中海土壤或紅壤敏感。

- 
- 富營養化類別：經化學當量計算，磷酸鹽做為參考之營養物質，以 kg PO<sub>4</sub> eq (kg phosphate equivalents) 為單位。
  - 全球暖化類別：此類別發展自政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)所選取之影響因子，並以 100 年的時間尺度表現全球暖化潛勢，已二氧化碳為參考之暖化氣體，kg CO<sub>2</sub> eq (kg carbon dioxide equivalents) 排放作為單位。
  - 臭氧層損耗類別：主要為碳氫化合物結合溴、氟、氯或氯氟烴。三氯氟甲烷做為參考物質，以 kg CFC-11 eq (kg trichlorofluoromethane equivalents) 為單位。
  - 人類毒性類別：這是最困難處理的衝擊類別，人類毒性取決於接觸之化學和生物物質，因此人類毒性又建立於生態毒理之上。使用歐盟評估物質系統 (European Union System for the Evaluation of Substances, EUSES) 計算及描述暴露時間及有毒物質之影響，以 1,4 二氯苯為參考物質，kg 1,4-DB eq (1,4-dichlorobenzene equivalents) 作為單位。
  - 淡水水生生態毒性：毒性物質排放至大氣、水和土壤後，對淡水生態系統的影響，時間範圍無限制，以 1,4 二氯苯為參考物質，kg 1,4-DB eq (1,4-dichlorobenzene equivalents) 作為單位，適用於全球、大陸、區域和地方尺度。
  - 海洋水生生態毒性：毒性物質排放至大氣、水和土壤後，對海洋生態系統的影響，時間範圍無限制，以 1,4 二氯苯為參考物質，kg 1,4-DB eq (1,4-dichlorobenzene equivalents) 作為單位，適用於全球、大陸、區域和地方尺度。
  - 陸地生態毒性：毒性物質排放至大氣、水和土壤後，對陸地生態系統的影響，時間範圍無限制，以 1,4 二氯苯為參考物質，kg 1,4-DB eq (1,4-dichlorobenzene equivalents) 作為單位，適用於全球、大陸、區域和地方尺度。

- 光化學氧化類別：使用光化學軌跡模式(Photochemical Trajectory Models, PTMs)開發計算，以乙烯為參考物，kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (kg ethylene)作為單位，光化學氧化真正的衝擊高度依賴氣候條件，包括平均輻射、光照、溫度和濕度，以及對流層中共同存在之氮氧化物。

CML 2 baseline 2000 提供三套歸一化因子，分別為荷蘭(Netherlands, 1997)、西歐(Western Europe, 1995)、世界(World, 1990&1995)，但是並沒有加入權重因子作為衝擊評估結果。

### 3.1.4 敏感度分析

敏感度分析可探討生命週期評估過程中，各參數變動對整體衝擊評估結果之影響程度。敏感度分析不需考慮不確定因素，應視研究對象的情況選取變化可能性較大的因子，並考慮假設條件、評估方法及資料中的變異對評估結果的影響。

本研究選用單因子敏感度分析，在固定其他因素的條件下，變動一項不確定因素，以求出某不確定因素對整體環境衝擊評估的影響程度。本研究敏感度分析探討之敏感參數一共三項，分別為耗電量、加藥量、排放量，並將三項敏感參數依數據品質設定其誤差幅度，高品質數據蒐集自金城污水處理廠實際檢測數據、或報告，中品質數據為金門地區相關參考資料或針對金城污水廠之假設資料，低品質數據為文獻參考數據。高品質、中品質、低品質數據分別設定其誤差幅度為10%、30%及50%，計算出數據輸入及輸出之最大值與最小值進行計算。

### 3.1.5 不確定性分析

在生命週期評估應用中，不確定因素及資料不足會影響生命週期評估結果之可性度，為了彌補分析過程的不確定性，本研究選用蒙地卡羅模擬(Monte

Carlo,MC)方法進行不確定性分析。

蒙地卡羅模擬方法的分析步驟如下(Maurice et al., 2000)：

1. 對於各參數統計機率密度函數之決定，以統計結果決定機率分佈。若無法收集到相關數據，則以主觀判斷或經驗法則選用適用之機率分析，文獻上普遍以常態分佈(Normal distribution)或對數常態分佈(Lognormal distribution)為輸入條件。
2. 本研究之盤查清單可分為投入以及排放，所投入之能源與資源等盤查清單於 Simapro7.1 中有內建之機率分佈及標準差如附錄 B。而排放階段，由於盤查資料非長期統計資料，部分為一次的檢測數據、部分為文獻數據，故無建立機率分佈及標準差。
3. 設定隨機模擬方法與抽樣次數，目前有三種準隨機序列可用來輔助生成均勻分布隨機數，分別是 Latin Hypercube、Halton、Sobol。其中 Latin Hypercube 為蒙地卡羅方法中最常使用的隨機模擬方法，模擬次數至少 500~1000 次 (Heijungs et al., 2005)，若模擬達 10,000 次將可獲得較佳模擬結果(Maurice et al., 2000)。本研究設定 1000 次為模擬次數。
4. 經由模擬結果，以統計信賴區間估計法推估目標之中位數或平均數、總變異數及信賴區間，作為不確定性估計之信賴範圍。

## 第四章 結果與討論



### 4.1 生命週期評估結果

本研究以金城污水處理廠處理  $1\text{m}^3$  污水作為功能單位，針對污水處理廠目前處理程序進行衝擊評估，將 3.1.2 節盤查分析結果輸入 SimaPro 生命週期評估軟體，利用 CML2000 衝擊評估方法進行污水處理廠環境衝擊評估，衝擊評估結果經標準化後，不同影響類別之間可互相比較，由於生命週期評估結果於權重設定的階段，通常會考量政治、意識形態、道德價值等面向，故本研究於此並不考慮權重(Hospido et al., 2005)。

污水處理：

**方案 0** 無再生水且無污泥再利用：

金城污水廠處理程序包含污水處理及污泥處理，污水處理廠所產生的環境衝擊經標準化後，各影響類別之間可互相比較，由圖 4-1 金城污水處理廠之環境衝擊所示於海洋水生生態毒性最顯著。圖 4-2 金城污水處理廠環境衝擊之相對貢獻中，藥品投入所產生的環境影響表現於人類毒性、淡水水生生態毒性、海洋水生生態毒性等三項影響類別中，其餘的影響類別皆是電力產生的環境衝擊。電力對金城污水處理廠所產生之環境衝擊占總衝擊的 79.47%，藥品投入所產生的環境衝擊占總衝擊的 19.47%，其中藥品包含氯錠及絮凝劑，氯錠的環境衝擊是絮凝劑的 40 倍。金城污水處理廠營運所產生之廢棄污泥目前皆掩埋處置，本研究考量污泥運送之環境衝擊，污泥經濃縮脫水後運輸至掩埋場掩埋，由於金門是一個小島，運輸距離僅 3.5 公里，故運輸所產生的環境影響幾乎可忽略(表 4-1)。



表 4-1 金城污水處理廠之環境衝擊

	排放	藥品	能源	污泥運輸
非生物枯竭	0.00%	2.11%	97.89%	1.48E-07
酸化	0.00%	1.34%	98.66%	9.32E-08
富營養化	3.32%	3.29%	93.40%	1.74E-07
全球暖化	0.00%	1.77%	98.23%	1.18E-07
臭氧層損耗	0.00%	1.15%	98.85%	1.05E-07
人類毒性	0.65%	7.91%	91.44%	8.94E-08
淡水水生生態毒性	1.02%	55.50%	43.49%	8.01E-08
海洋水生生態毒性	1.33%	22.67%	76.00%	6.17E-08
陸地生態毒性	1.01%	1.16%	97.83%	4.43E-08
光化學氧化	0.00%	1.66%	98.34%	9.07E-08
總衝擊	1.06%	19.47%	79.47%	7.57E-08

**方案 1** 再生水應用於農業：

方案 1 中的水處理程序與方案 0 的水處理程序相同，廢水經處理程序後再利用於農業，再生水利用於農業之環境衝擊經標準化後，各影響類別之間可互相比較，正值代表環境衝擊，負值代表應用於農業可減少的環境衝擊，也就是環境效益。由圖 4-3 所示，再生水所產生之環境衝擊與污水處理程序相同，於影響各影響類別中，海洋水生生態毒性之環境衝擊最高。圖 4-4 再生水應用於農業環境衝擊之相對貢獻，也與污水處理程序相同。

再生水應用於農業再利用有良好的效益，主要來自於再生水可減少淨水所產生之環境衝擊(占總效益的 99.97%)，除了減少淨水衝擊之外，本研究亦考量再生水中含有氮、磷等營養物質焚化後再利用可減少肥料施用，增加環境效益；實

際結果由於污水經處理後所含氮、磷等營養物質量不多，在作為農業效益時，可減少肥料施用的效益並沒有發揮出來，可減少肥料施用的效益僅占總效益的0.03%(表 4- 2)。



表 4- 2 再生水利用於農業之環境衝擊

衝擊類別	藥品	能源	農業應用	[效益] 營養物質	[效益] 淨水處理
非生物枯竭	2.11%	97.89%	0.00%	0.00%	100.00%
酸化	1.34%	98.66%	0.00%	0.00%	100.00%
富營養化	3.29%	93.40%	3.32%	2.20%	97.85%
全球暖化	1.77%	98.23%	0.00%	0.00%	100.00%
臭氧層損耗	1.15%	98.85%	0.00%	0.00%	100.00%
人類毒性	7.89%	91.10%	1.02%	0.00%	100.00%
淡水水生生態毒性	55.50%	43.49%	1.02%	0.00%	100.00%
海洋水生生態毒性	22.67%	76.00%	1.33%	0.00%	100.00%
陸地生態毒性	1.16%	97.83%	1.01%	0.00%	100.00%
光化學氧化	1.66%	98.34%	0.00%	0.00%	100.00%
總衝擊	19.47%	79.47%	1.06%	0.03%	99.97%

**方案 2** 再生水應用於城市：

再生水應用於城市，其污水處理程序除了現有處理程序之外，增加三級處理程序，包含沙濾、臭氧及薄膜過濾。由圖 4- 5 再生水應用於城市之環境衝擊及圖 4- 6 再生水應用於城市環境衝擊之相對貢獻所示，能源為最主要之環境衝擊，其次是三級處理程序中臭氧所造成的環境衝擊。能源所造成之環境衝擊占總衝擊之 54.1%，臭氧所產生之環境衝擊占總衝擊之 32.67%(表 4- 3)。

表 4-3 再生水應用於城市之環境衝擊

衝擊類別	藥品	污水處理能源	三級處理能源	三級處理過濾	三級處理臭氧	城市應用
非生物枯竭	1.32%	61.20%	2.82%	0.02%	34.64%	0.00%
酸化	0.97%	71.70%	3.31%	0.02%	24.00%	0.00%
富營養化	2.82%	80.01%	3.69%	0.04%	13.44%	0.00%
全球暖化	1.20%	66.72%	3.08%	0.02%	28.98%	0.00%
臭氧層損耗	1.00%	85.83%	3.96%	0.02%	9.19%	0.00%
人類毒性	5.73%	66.19%	3.05%	0.06%	24.50%	0.47%
淡水水生生態毒性	36.25%	28.40%	1.31%	0.04%	33.33%	0.67%
海洋水生生態毒性	14.49%	48.58%	2.24%	0.02%	33.81%	0.85%
陸地生態毒性	0.79%	66.71%	3.08%	0.02%	28.72%	0.69%
光化學氧化	1.16%	68.58%	3.16%	0.02%	27.07%	0.00%
總衝擊	12.65%	51.62%	2.38%	0.02%	32.67%	0.66%

污水處理再利用之環境效益：

全世界都有水資源不足的問題，金門地區是小型海島，在水資源維護與運用方面更有迫切的需要。不管再生水再利用於城市或是農業，對於金門地區皆有實際的效益。

污水經二級處理程序後應用於農業，相較於再生水應用於城市無額外增加環境衝擊。再利用水不僅增加水資源，亦減少淨水衝擊，可增加 104.33% 之環境效益，也就是再生水比起水庫取水淨化的環境影響更少。污水經三級處理後應用於城市，增加三級處理系統將增加 55.01 % 之環境衝擊，而應用於城市減少了淨水處理之環境衝擊，可增加 50.35 % 之環境效益(圖 4-1)。

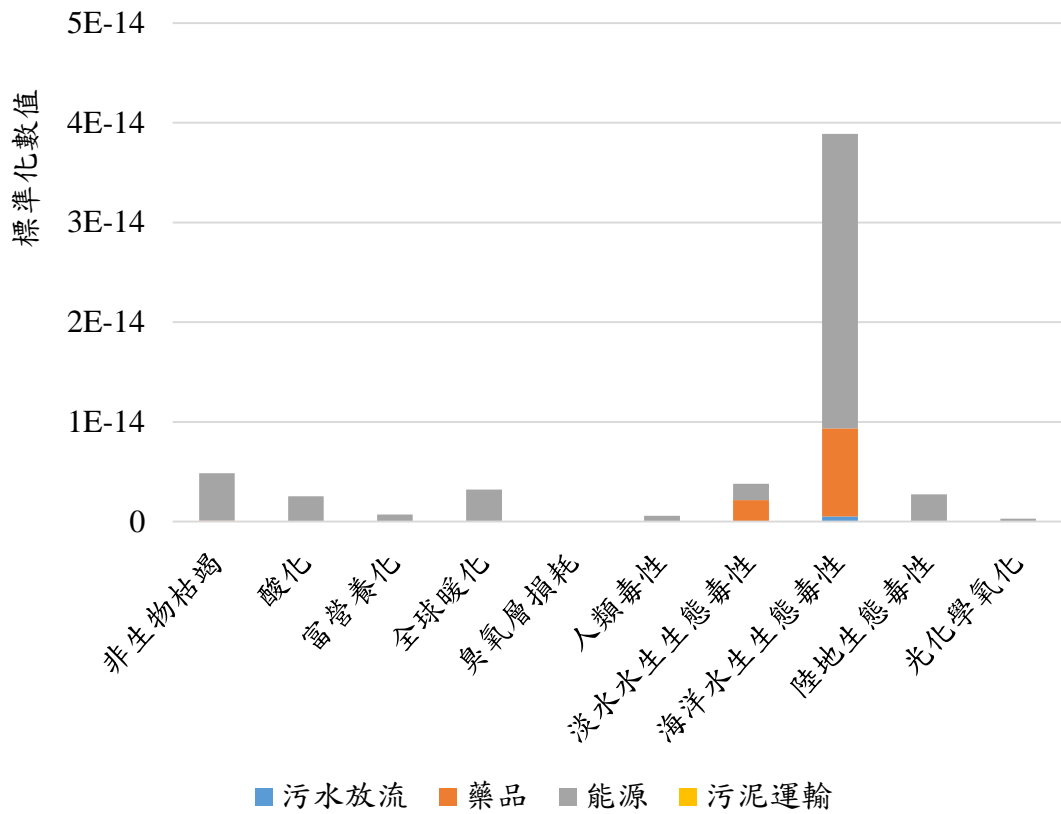


圖 4-1 金城污水處理廠之環境衝擊

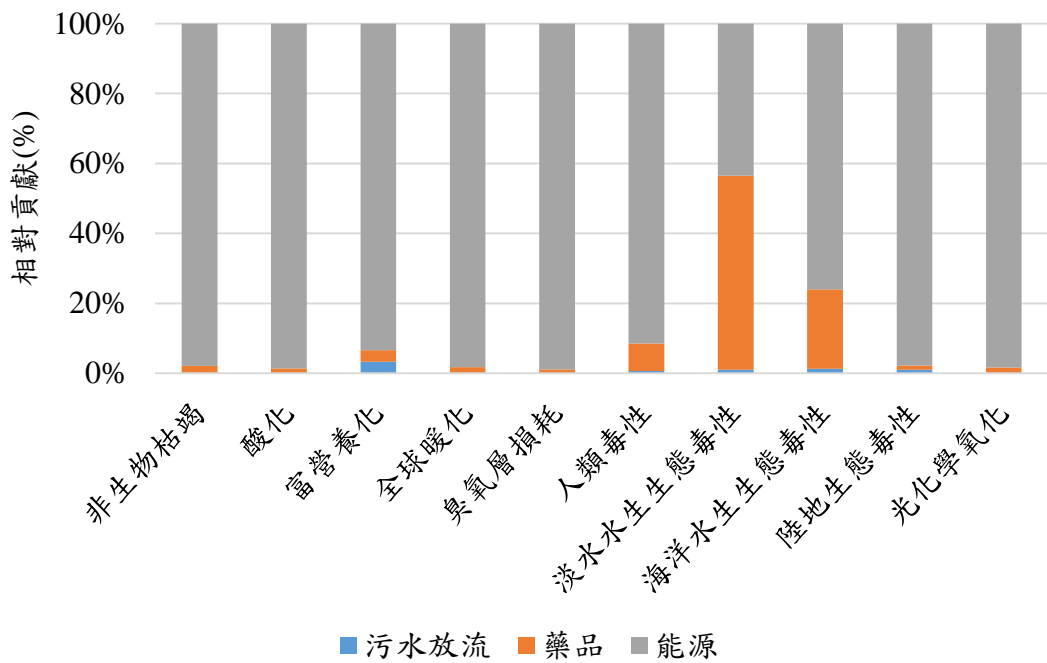


圖 4-2 金城污水處理廠環境衝擊之相對貢獻

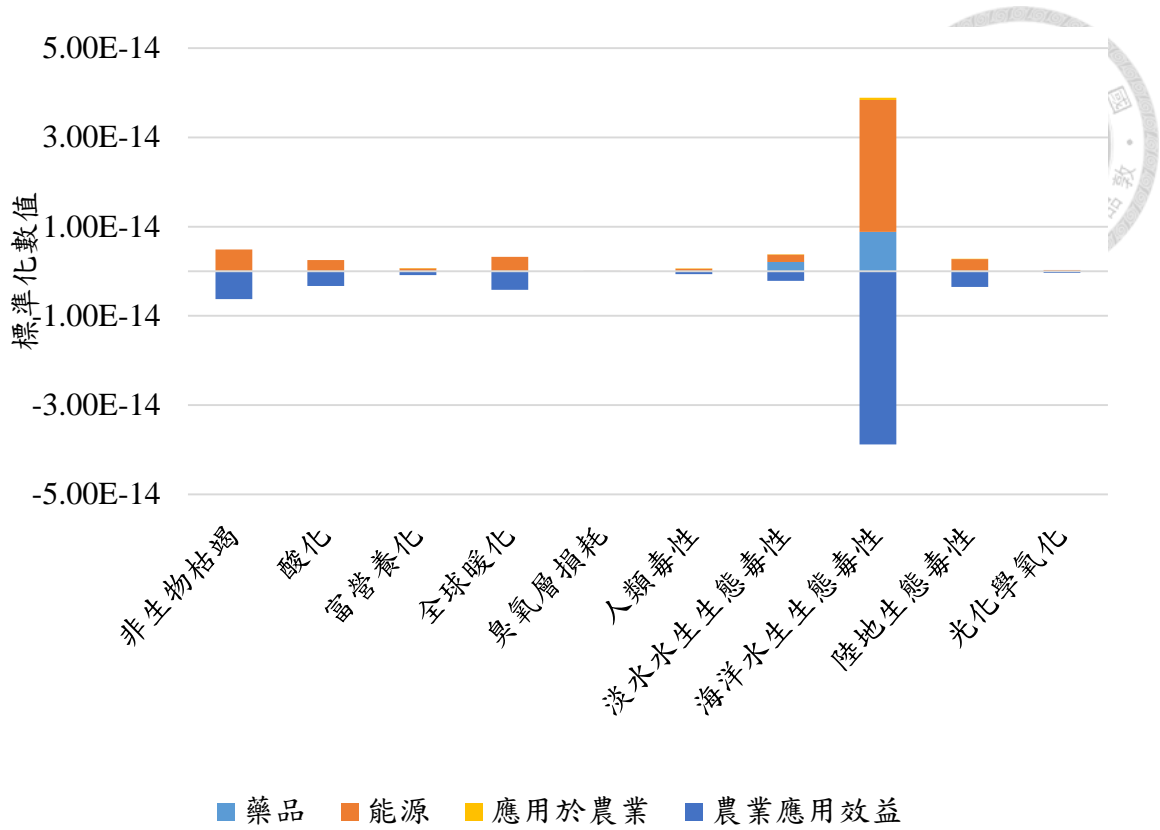


圖 4-3 再生水應用於農業之環境衝擊

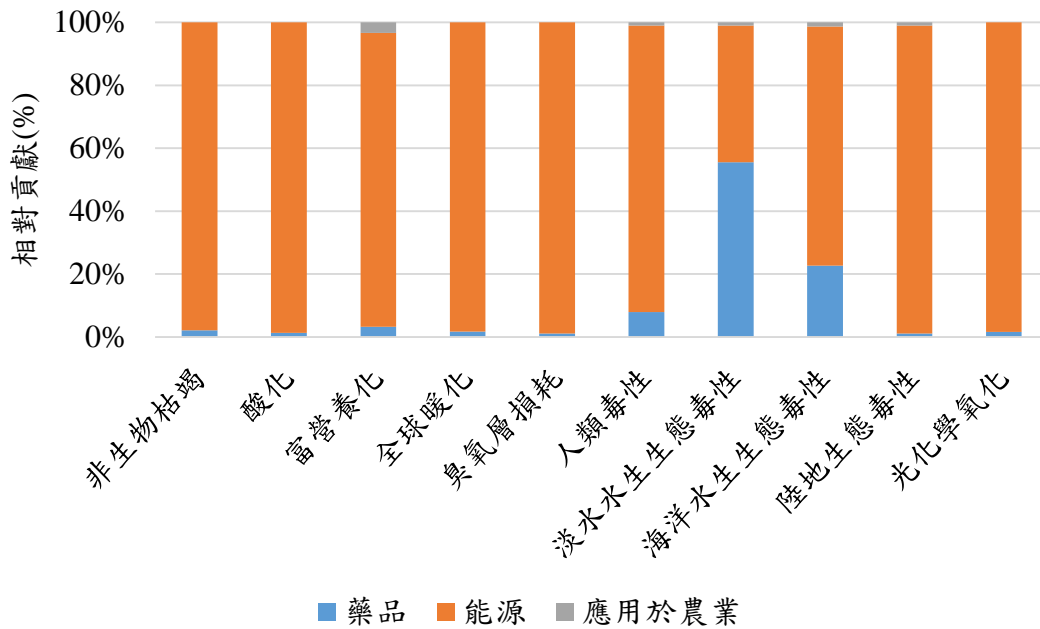


圖 4-4 再生水應用於農業環境衝擊之相對貢獻

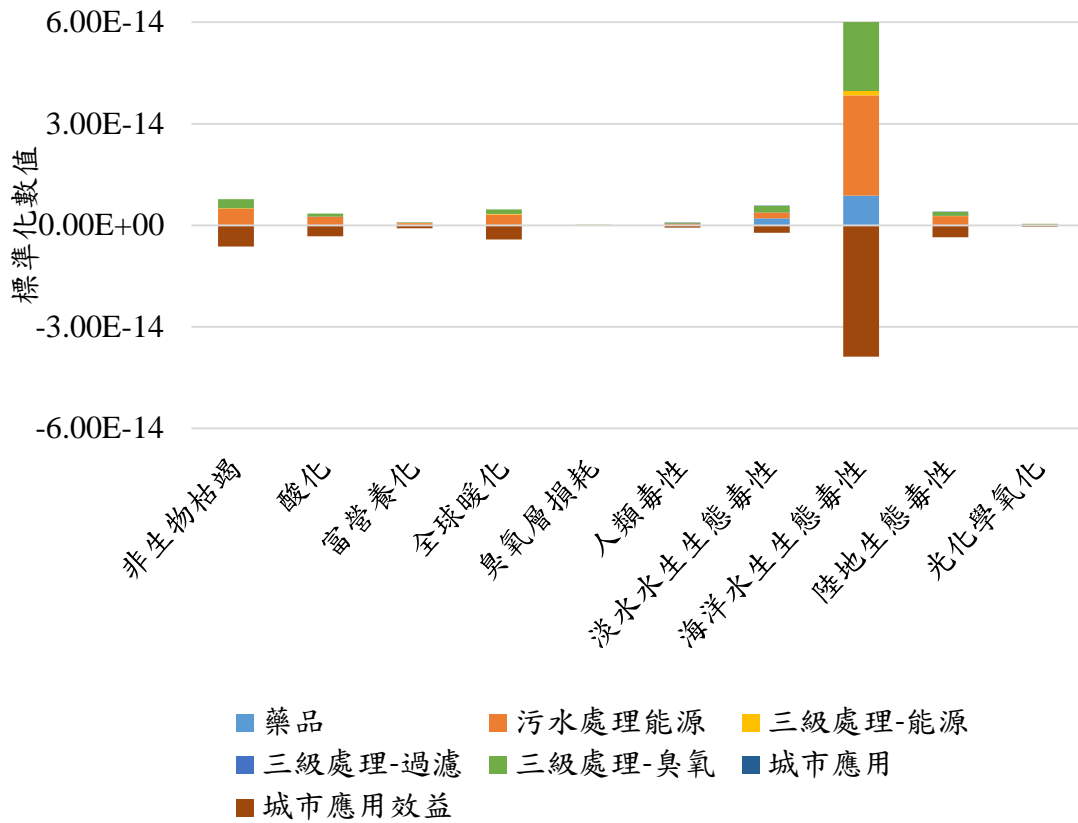


圖 4-5 再生水應用於城市之環境衝擊

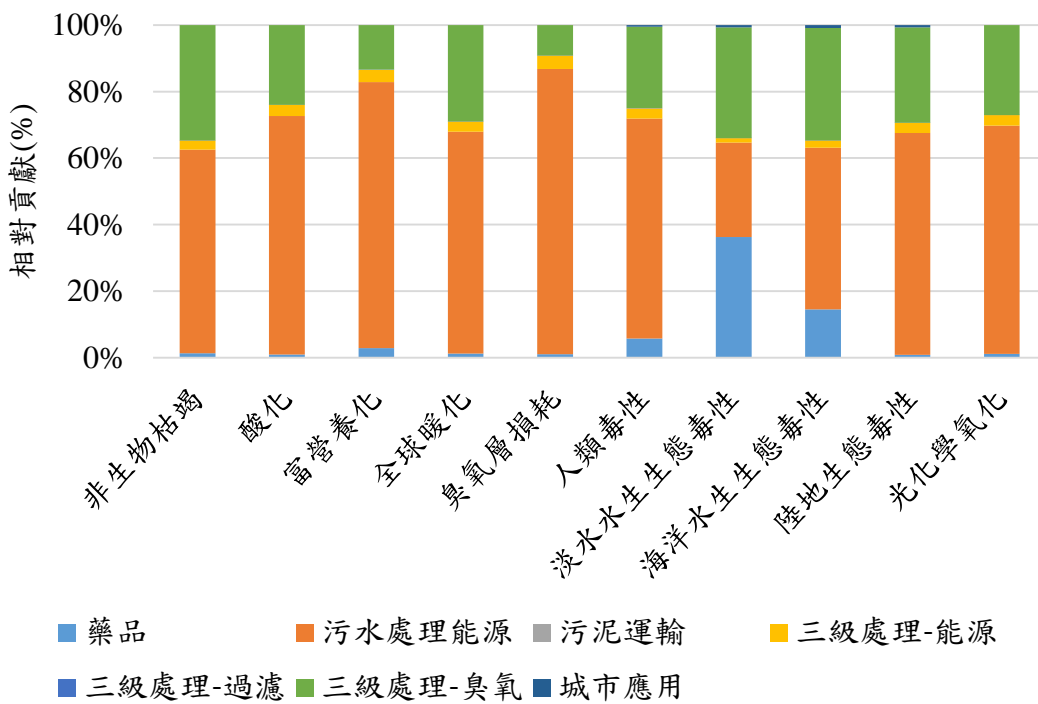


圖 4-6 再生水應用於城市環境衝擊之相對貢獻

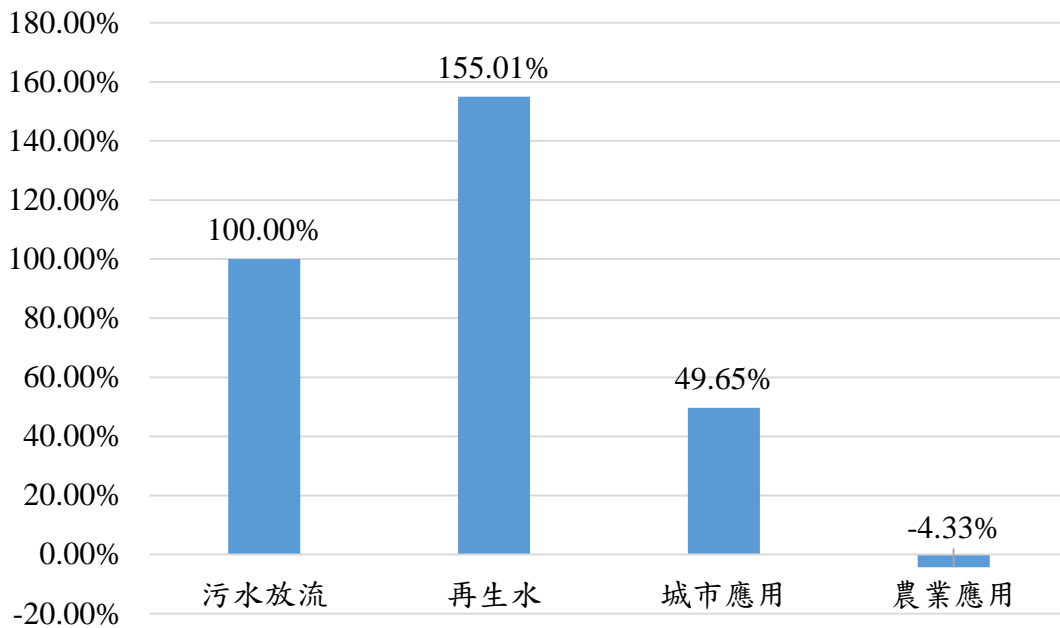


圖 4-7 再生水利用之環境衝擊比較

污泥處理：

**方案 0** 污泥無再利用：

金城污水處理廠污泥處理經濃縮、脫水後掩埋，所產生之環境衝擊如圖 4-8，為金城污水處理廠目前之污泥處置方式。一般污泥中所含之重金屬為農業應用的潛在有害物質，重金屬之外亦有病原體、有機污染物或是營養物質仍存在於污泥中，本研究考慮重金屬為農業應用唯一的影響。由圖 4-8，污泥處理程序中的濃縮、脫水程序都是以電力消耗為主，電力是造成環境衝擊的主要原因，其次是才是污泥中的重金屬於毒性相關之衝擊類別有影響。污泥於掩埋過程中會產生沼氣，由圖 4-9 也可以看出來，掩埋於全球暖化類別有 50.65 % 之環境衝擊，於總衝擊占 19.42%。由於運輸距離短，運輸所產生之環境衝擊幾乎可忽略(表 4-4)。

表 4-4 污泥掩埋處理之環境衝擊

衝擊類別	濃縮	脫水	污泥運輸	掩埋
非生物枯竭	51.55%	31.60%	0.00%	16.85%
酸化	54.11%	28.21%	0.00%	17.68%
富營養化	48.22%	36.02%	0.00%	15.76%
全球暖化	32.24%	17.10%	0.00%	50.65%
臭氧層損耗	60.27%	20.03%	0.00%	19.70%
人類毒性	44.28%	41.25%	0.00%	14.47%
淡水水生生態毒性	44.06%	41.53%	0.00%	14.41%
海洋水生生態毒性	46.47%	38.34%	0.00%	15.19%
陸地生態毒性	52.58%	30.24%	0.00%	17.19%
光化學氧化	28.71%	16.63%	0.00%	54.65%
總衝擊	45.95%	34.64%	0.00%	19.41%

**方案 3** 污泥應用於農業：

污泥經濃縮、脫水、堆肥後再利用於農業，處理程序以電力消耗為主，由圖 4-11 污泥應用於農業環境衝擊之相對貢獻所示，環境衝擊做主要來自於濃縮、脫水、堆肥階段的電力消耗，其次是污泥應用於農業產生之環境衝擊，於酸化、富營養化、全球暖化等類別中較顯著。環境效益部分，由於堆肥程序主要降解二氧化碳、水和氨，大部分的氨被氧化並轉為硝酸鹽，產生之環境效益包含減少甲烷生成及一氧化二氮、硫氧化物生成，可增加酸化、全球暖化及光化學氧化共 54.36 % 的環境效益(表 4-5、圖 4-10)。

污泥於農業再利用，其運輸距離與掩埋距離相同，運輸距離短，運輸所產生之環境衝擊幾乎可忽略。



表 4-5 污泥應用於農業之環境衝擊

衝擊類別	濃縮	脫水	堆肥	污泥運輸	農業應用
非生物枯竭	49.00%	30.04%	20.96%	0.00%	0.00%
酸化	34.21%	17.83%	15.00%	0.00%	32.97%
富營養化	22.08%	16.50%	9.40%	0.00%	52.02%
全球暖化	45.24%	24.00%	17.61%	0.00%	13.15%
臭氧層損耗	62.74%	20.85%	16.41%	0.00%	0.00%
人類毒性	40.69%	37.91%	18.82%	0.00%	2.57%
淡水水生生態毒性	42.09%	39.67%	18.24%	0.00%	0.01%
海洋水生生態毒性	41.80%	34.49%	23.70%	0.00%	0.00%
陸地生態毒性	50.84%	29.24%	19.92%	0.00%	0.00%
光化學氧化	49.28%	28.55%	22.17%	0.00%	0.00%
總衝擊	42.11%	31.75%	21.64%	0.00%	4.49%

**方案 4** 污泥焚化後能源回收再利用：

於污泥焚化後能源回收再利用情境中，各處理程序所消耗的能源，是造成環境衝擊的主要原因，除了濃縮、脫水階段使用的能源為塔山發電廠的重油發電，焚化程序的能源包含重油發電及天然氣的投入。天然氣所產生之環境衝擊與重油發電產生之環境衝擊不太相同，天然氣所產生的非生物枯竭衝擊高於重油發電之外，其餘衝擊類別仍是重油發電所產生的影響較高。由圖 4-13 可看出來，焚化階段環境衝擊之貢獻是所有處理程序中最顯著的，一般來說污泥含水率高，並不傾向以焚化作為污泥最終處理方式。由於本研究於情境假設中，設定污泥經焚化處理後可將能源回收再利用，由圖 4-12 所示，能源回收共可減少 86.32 % 環境衝擊(表 4-6)，能有效減少環境衝擊的原因，來自於能源的回收可減少重油發電。此外，污泥運送至焚化爐以及焚化灰渣運輸至掩埋，運送所產生之環境衝擊微小，可忽略。

表 4-6 污泥焚化後能源回收之環境衝擊

衝擊類別	濃縮	脫水	焚化	灰燼掩埋	污泥運輸與 灰燼運輸
非生物枯竭	15.44%	9.47%	70.05%	5.05%	0.00%
酸化	20.20%	10.53%	62.66%	6.60%	0.00%
富營養化	14.49%	10.83%	69.94%	4.74%	0.00%
全球暖化	9.94%	5.27%	81.55%	3.25%	0.00%
臭氧層損耗	29.10%	9.67%	51.72%	9.51%	0.00%
人類毒性	9.14%	8.51%	79.36%	2.99%	0.00%
淡水水生生態毒性	17.84%	16.82%	59.51%	5.83%	0.00%
海洋水生生態毒性	19.33%	15.95%	58.40%	6.32%	0.00%
陸地生態毒性	10.02%	5.76%	80.94%	3.28%	0.00%
光化學氧化	24.70%	14.31%	52.92%	8.07%	0.00%
總衝擊	16.64%	12.55%	65.37%	5.44%	0.00%

**方案 5** 污泥應用於建材：

由圖 4-14、圖 4-15 所示，污泥作為建材再利用時，仍以焚化階段所產生之環境衝擊最高，占總衝擊之 63.24 % (表 4-6)。在運輸階段，雖然焚化灰燼需透過海運運輸回台灣才能再利用，但衝擊評估結果顯示，運輸所產生之環境衝擊相較於能源使用及重金屬排放，結果相當微小，幾乎可忽略。

污泥作為建材再利用可減少 15.51 % 的環境衝擊，來自於作為建材過程中可取代原本原料所產生之環境衝擊。

表 4-7 污泥應用於建材之環境衝擊

衝擊類別	濃縮	脫水	焚化	污泥運輸 灰爐運輸
非生物枯竭	16.26%	9.97%	73.77%	0.00%
酸化	21.63%	11.28%	67.09%	0.00%
富營養化	15.21%	11.37%	73.42%	0.00%
全球暖化	10.27%	5.45%	84.28%	0.00%
臭氧層損耗	32.16%	10.69%	57.16%	0.00%
人類毒性	9.42%	8.77%	81.81%	0.00%
淡水水生生態毒性	18.95%	17.86%	63.19%	0.00%
海洋水生生態毒性	20.64%	17.03%	62.34%	0.00%
陸地生態毒性	10.36%	5.96%	83.68%	0.00%
光化學氧化	26.87%	15.56%	57.57%	0.00%
總衝擊	17.60%	13.27%	69.13%	0.00%

#### 污水處理再利用之環境效益：

於本研究中設計之污泥再利用情境之環境衝擊中，污泥再利用於農業與污泥焚化後能源回收皆分別具 28% 及 63% 的環境效益。污泥再利用於農業，其堆肥程序所消耗的電力造成較高的環境衝擊，與效益共同比較時，仍比掩埋具有環境效益；而焚化階段雖然也有能源與資源的投入，但是增加了能源的產出，在環境效益部分有很大的貢獻。若無能源產出效益、減少原本的重油發電能源，焚化則是為環境衝擊最高之處理方式，是一般最不傾向的處理方式。

污泥再利用於建材所產生之環境影響最大，原因來自於焚化階段的衝擊(本研究於此並無考慮焚化階段之能源回收)，若增加焚化階段能源回收，則污泥應用於建材是最佳的處理方式，有 121% 的環境效益(圖 4-16)。

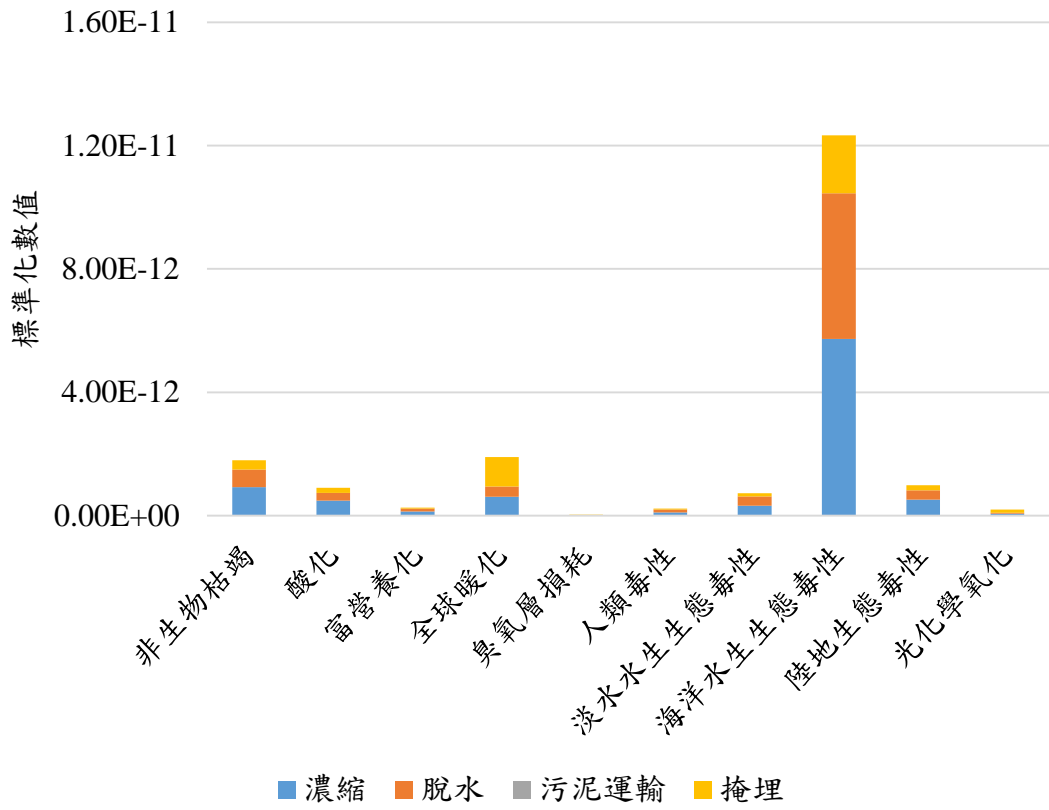


圖 4-8 污泥無再利用之環境衝擊

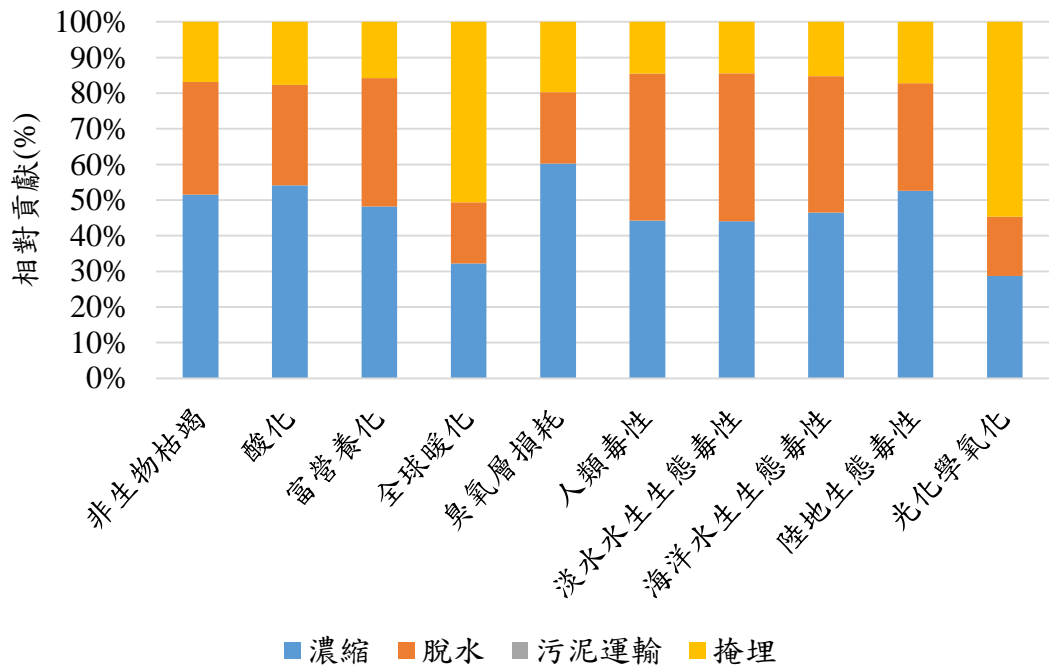


圖 4-9 污泥無再利用環境衝擊之相對貢獻

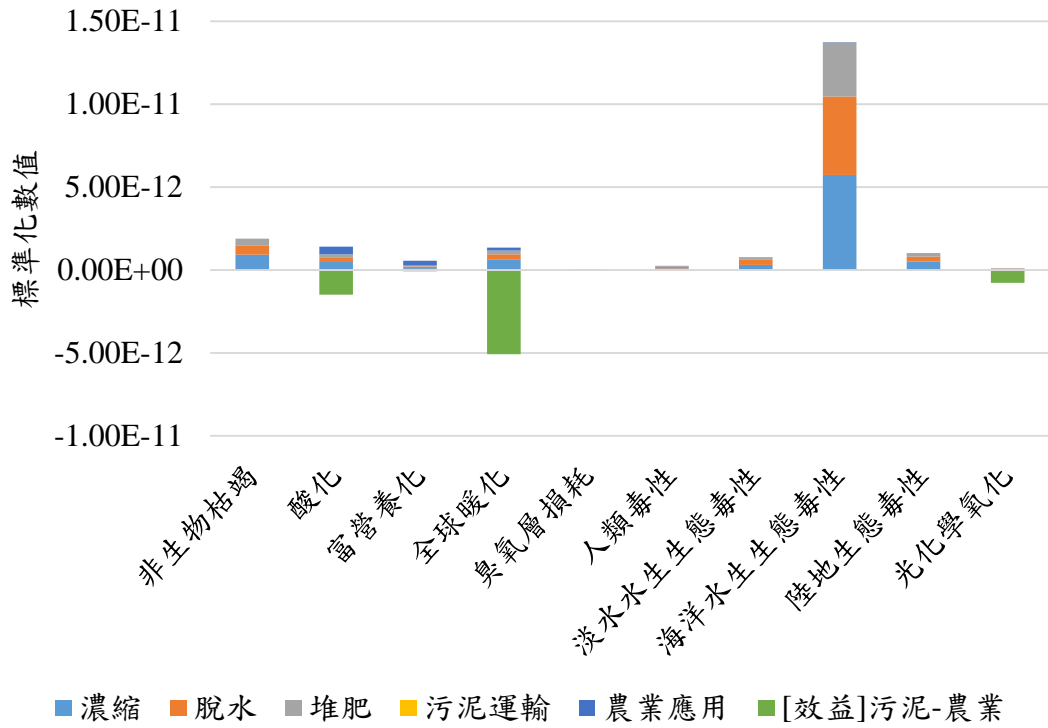


圖 4-10 污泥應用於農業之環境衝擊

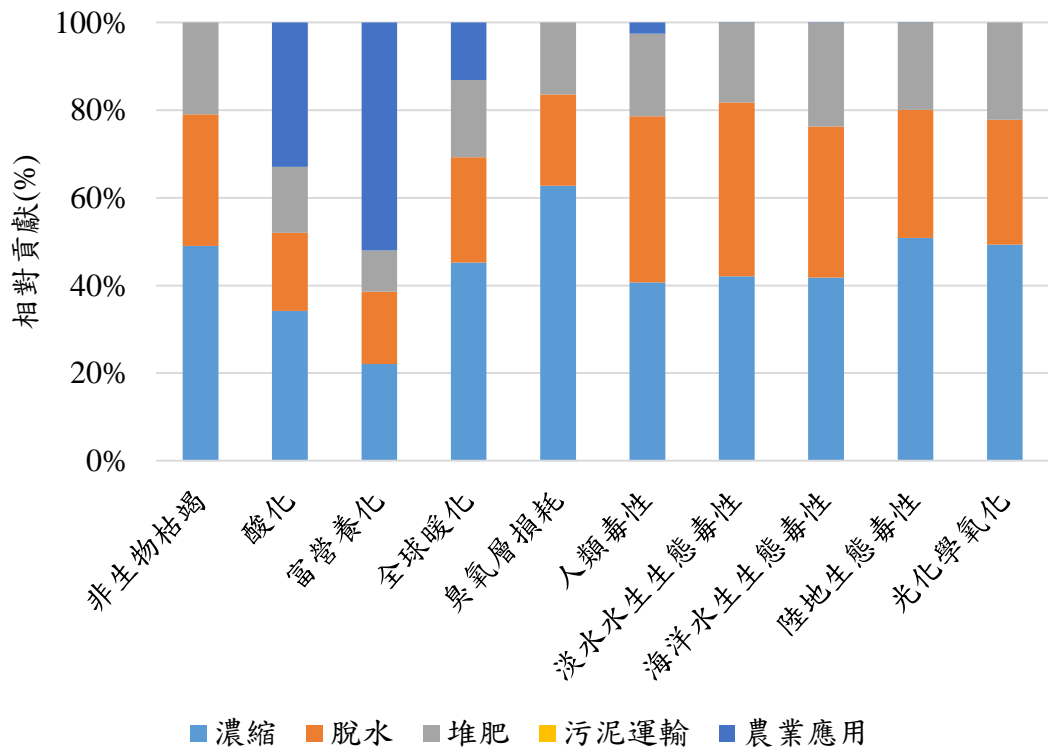


圖 4-11 污泥應用於農業環境衝擊之相對貢獻

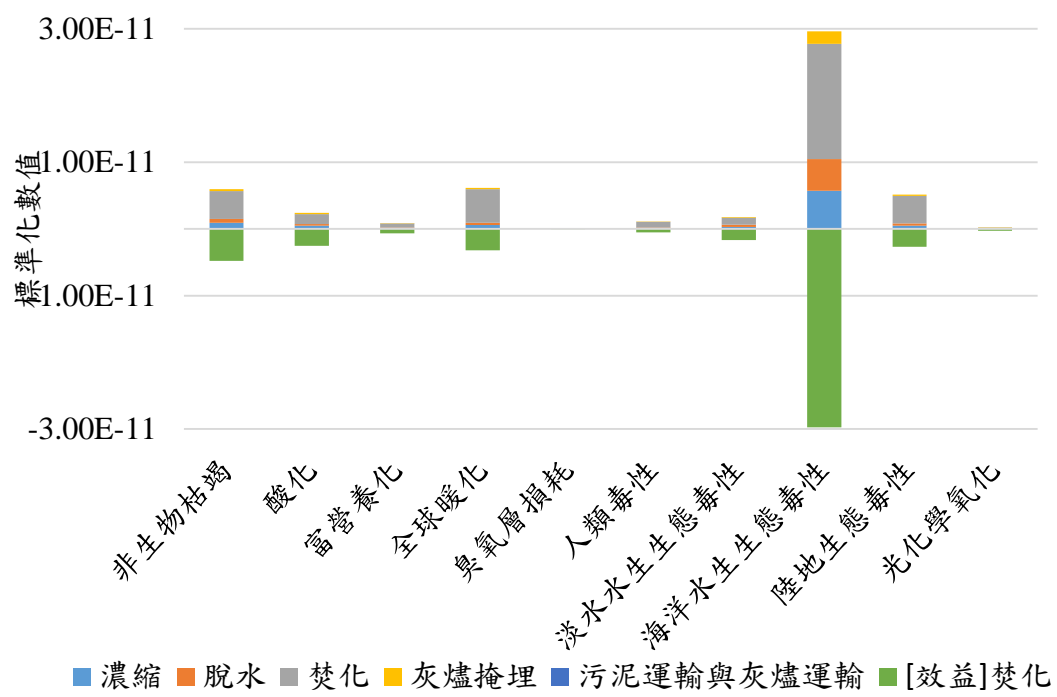


圖 4-12 污泥焚化後能源回收再利用之環境衝擊

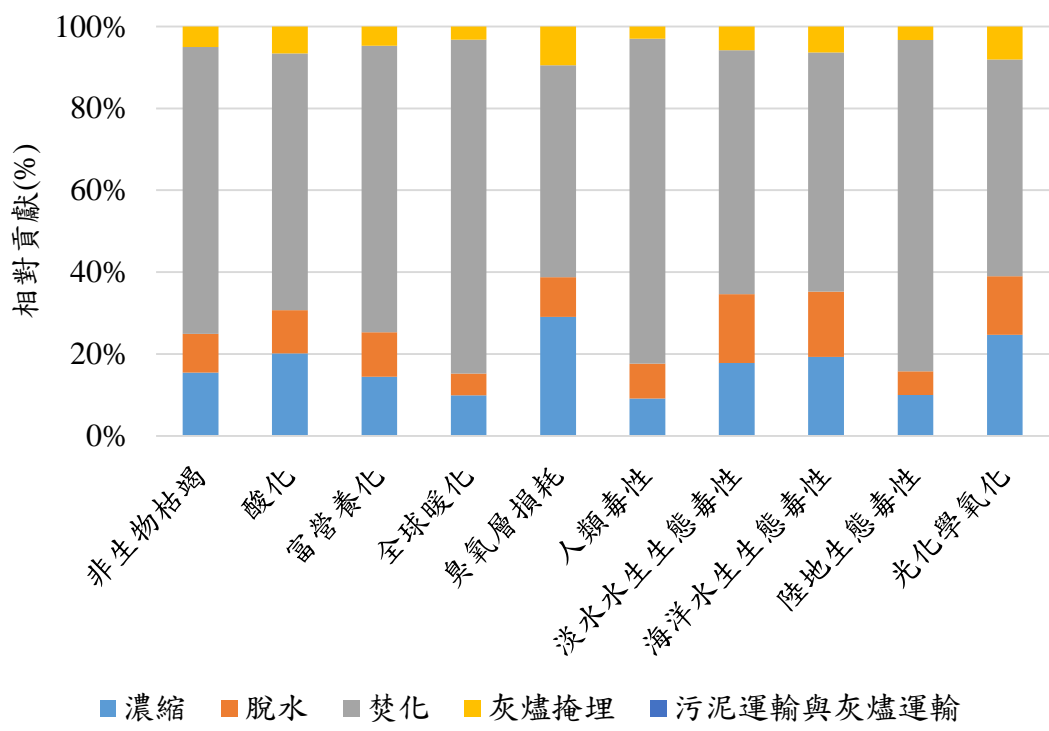


圖 4-13 污泥焚化後能源回收再利用環境衝擊之相對貢獻

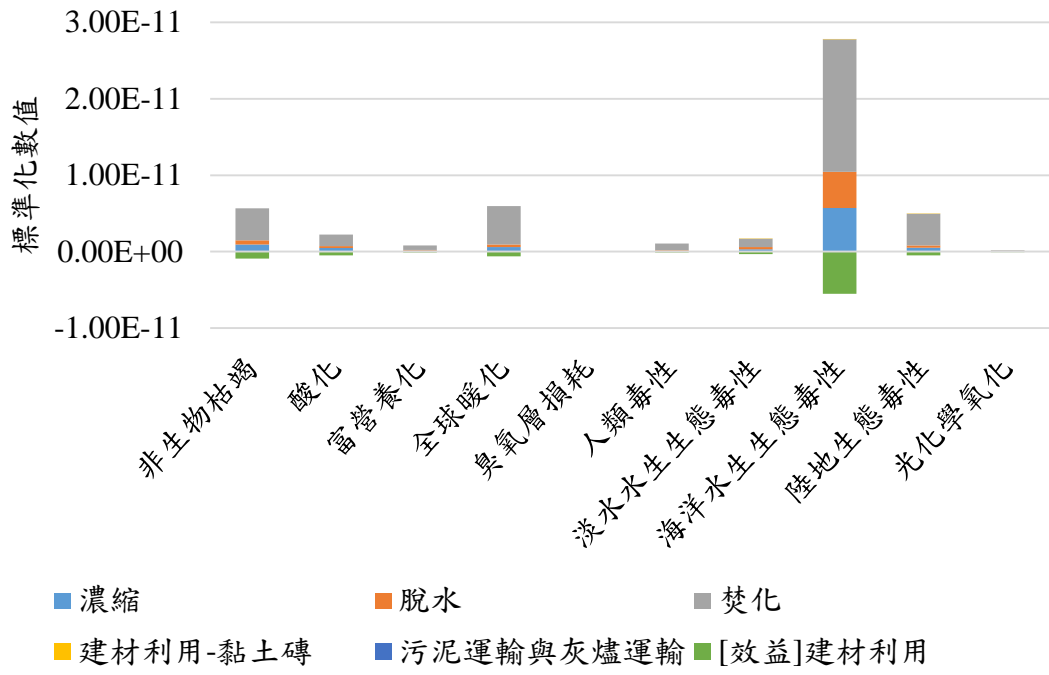


圖 4-14 污泥應用於建材之環境衝擊

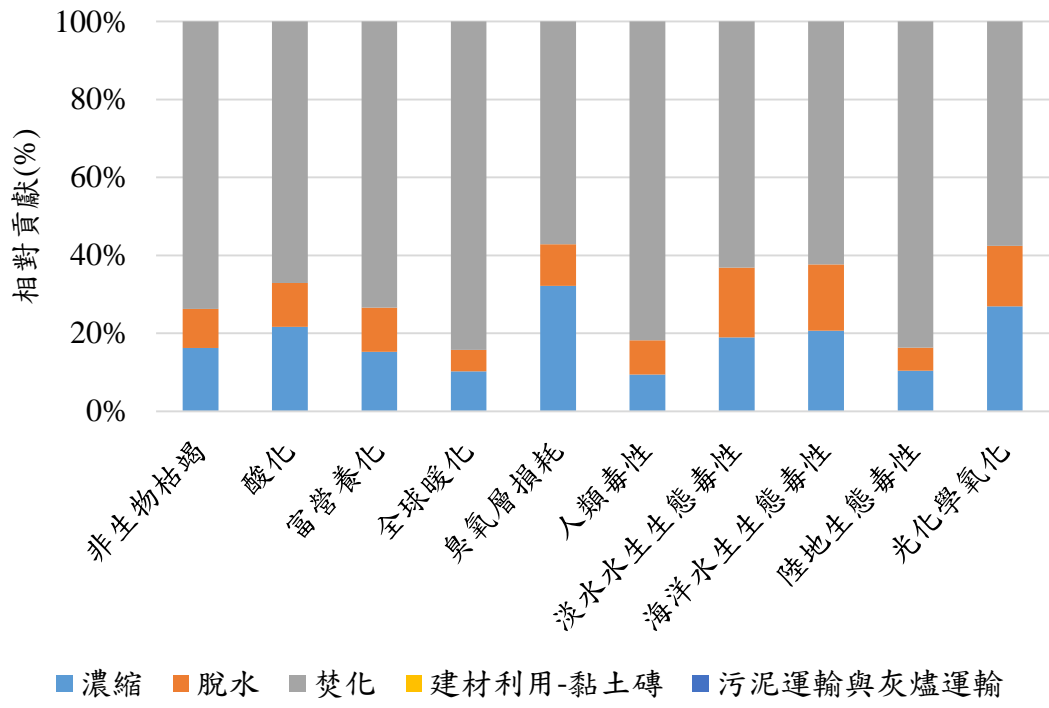


圖 4-15 污泥應用於建材環境衝擊之相對貢獻

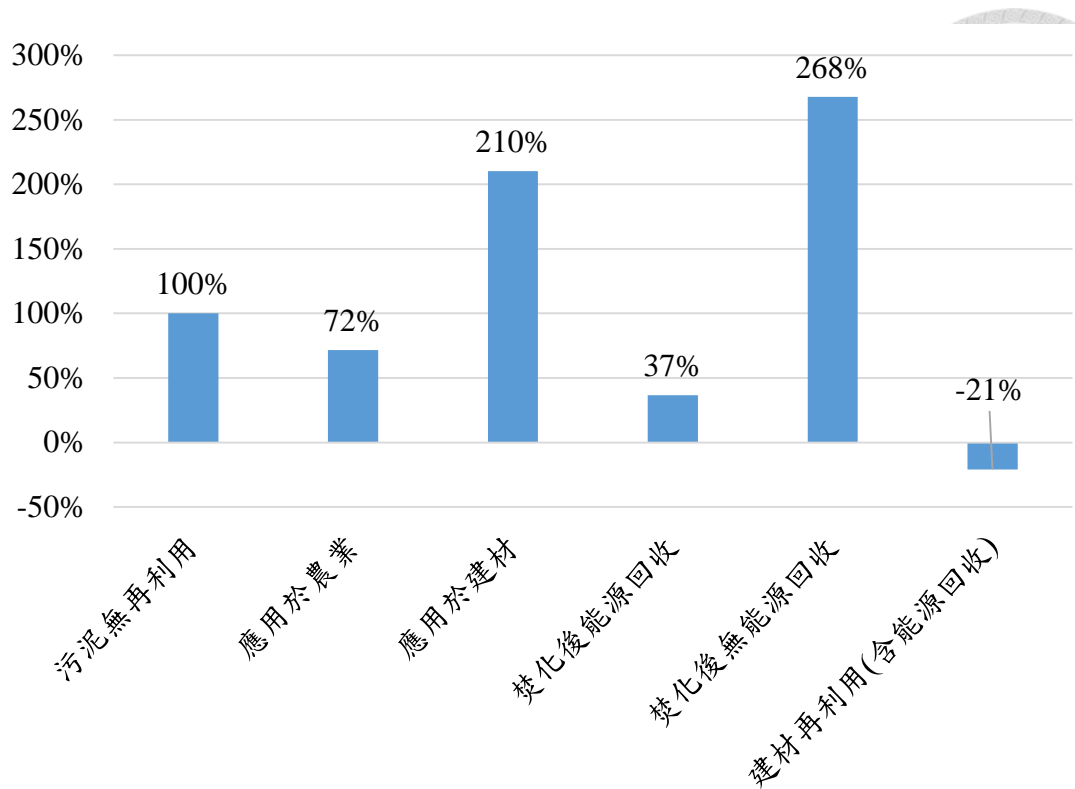


圖 4-16 污泥再利用之環境衝擊比較

## 4.2 生命週期評估結果之綜合討論

### 1. 文獻比較-污水處理廠之環境影響

本研究評估方案中，污水經三級處理後再利用於城市，一、二級處理程序所產生之環境衝擊占 68 %，增加之三級處理程序占總衝擊約 32 %，總和相較於無再利用將增加 55 %之環境衝擊，但再利用之於城市具有 50 %的環境效益；Zhang et al. (2010)研究結果指出，三級處理所產生之環境衝擊略大於一、二級處理，再生水再利用產生之環境效益可抵消處理程序產生之衝擊。本研究與該研究具有相同的結果，增加三級處理雖產生環境衝擊，水再利用之環境效益可抵消處理程序產生之環境衝擊。

Hong et al. (2009)比較堆肥、乾燥、焚燒、熔融、有無消化處理等污泥處理方案，研究指出焚燒所產生之大於堆肥、大於乾燥、大於熔融。由於本研



究考量焚化後能源回收產生之效益，故抵消焚化產生之部分環境衝擊。污泥管理是非常重要的，污泥的最終處置適當將具有相當大的環境效益。本研究將污泥再利用於農業、及建材，研究解果也指出污泥再利用可產生之環境效益，相較於污泥廢棄對環境更友善(Pasqualino et al., 2009)。

## 2. 文獻比較-能源使用之環境影響

本研究結果顯示，電力對污水處理廠有顯著的影響，於文獻中亦有相近的研究結果。污水處理廠在都市水管理中是很大的能源消費者，各國政府致力於減少都市能源需求，近幾年也力求改善污水處理過程中能源的使用效率，包括改良操作單源、流程設計上的調整以及增加厭氧消化程序增加能源回收(Remy et al., 2013)。Remy et al. (2013) 於污水處理廠對環境的影響研究中，特別討論能源需求及碳足跡，在能源需求上每能單位(功能單位為人口當量)需要 46%的電力需求以及 22%的燃料需求(用於加熱)。而碳足跡部分，能源所產生的二氧化碳占 38%、產熱所產生的二氧化碳占 16%。

Stokes and Horvath (2006)表示混和能源的配比影響污水處理廠之環境影響，能源的改變是造成污水廠環境影響的原因之一。能源結構的組成是造成污水處理廠環境衝擊的主要因素，不管是進口水資源、廢水再生或是海水淡化，能源所造成的環境影響皆大於化學藥品所造成的環境影響(Lyons et al., 2009)。

Houillon and Jolliet (2005)於研究中比較 30 萬人口規模的污水處理廠，使用不同污泥處理方式所產生之環境影響。所使用的能源結構為 50%火力發電(燃煤、燃油)、25%水力發電、23%核能、11%天然氣發電、1%其他，研究表示，雖然污泥焚燒可將熱能回收再利用，或是污泥熱解的廢熱也能回收，並將熱能應用於使污泥乾燥，電力的消耗仍是不可忽略的，污泥脫水需消耗 69 kWh/tDM，熱解、焚燒、水泥窯中烘乾需消耗天然氣 315 Nm<sup>3</sup>/tDM 和電力

166 kWh/tDM。水處理程序中對環境造成影響最大的是能源消耗量大的操作單元，占總衝擊的 70%，減少能源的消耗，提高能源利用效率，並使用更多再生能源可減少環境衝擊(Pasqualino et al., 2009)。

Mo and Zhang (2013)針對污水處理廠能源與資源回收再利用進行文獻回顧，整理了幾項能源再利用與營養物質再利用的方法。能源再利用部分，公認最常使用的方法就是污水處理廠自行發電，可透過汽電共生系統、污泥焚燒後能源回收、若大規模的污水廠甚至可利用廢水進行水力發電，污水處理廠廠內空間亦能善加利用，增加太陽能發電或是風力發電，以提高污水處理廠能源耗用中再生能源比例。

### 3. 能源結構所造成之環境影響

金城污水處理廠營運階段需要大量的能源投入，能源為主要之環境衝擊來源。金門塔山發電廠為重油發電，所產生 1KJ 的電力之環境衝擊如圖 4-17，其中海洋水生生態毒性之環境衝擊遠大於其他類別，造成環境衝擊的原因來自於重油發電過程中重金屬廢氣(鎳、鈾)排放與廢水中含有重金屬(鎳離子、鈾、鈾離子)排放。

於金門縣綜合發展計畫暨離島綜合實施方案提到，金門地區需整合廢棄物及替代能源，制定區域性能源政策。能源政策必須運用金門現有的資源，如廢棄物、海洋、風力及太陽，含廢棄物資源及能源回收、廚餘發電、生質柴油、風力發電、太陽能發電、潮水發電及海水溫差發電。尤其是生質柴油，是整合農業及高科技的環保產業，適合金門地區的產業發展(金門縣政府，2006)。

若能源使用改換成台灣之綜合型電力系統(包含火力發電 70%、核能發電 24%、水力發電 4%、風力發電 0.4%、太陽能發電 0.005%)，海洋生態毒性可減少 46%、酸化可減少 40%，但全球暖化及非生物枯竭將分別增加 215%、

49%。若使用台灣電力，總衝擊是比較小的，為重油發電的 82%(表 4- 8)

金門平均風速為 5.71 m/s，最多風向為北北風，適合開發風力發電；目前僅金沙鎮后扁濱海地區設立兩部 2,000 kw 風力發電機組。若能源使用改為風力發電，於各影響類別皆可大幅減小環境衝擊，於非生物枯竭、酸化、富營養化、全球暖化、臭氧層損耗、陸地生態毒性、光化學氧化等皆減小了 90% 以上的環境衝擊，總衝擊僅為重油發電的 22% 如表 4- 8、圖 4- 18。

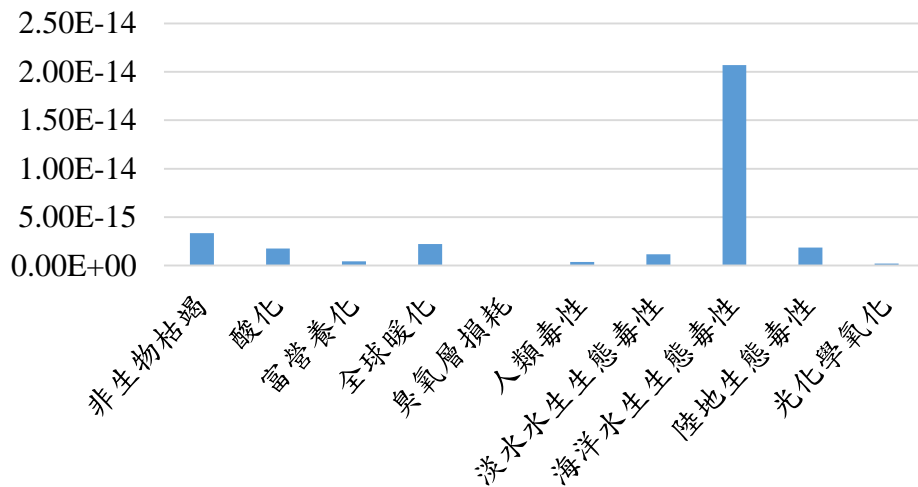


圖 4- 17 金門塔山發電廠重油發電之環境衝擊

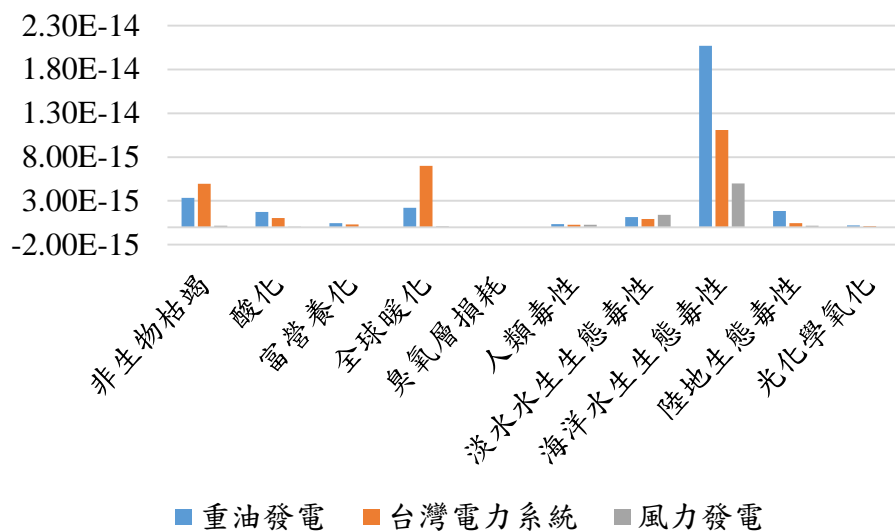


圖 4- 18 台灣電力系統、風力發電與重油發電比較

表 4-8 台灣電力系統、風力發電與重油發電比較

	重油發電	台灣 電力系統	風力發電	台灣/重油	風力/重油
非生物枯竭	3.33E-15	4.95E-15	1.54E-16	149%	5%
酸化	1.75E-15	1.04E-15	4.73E-17	60%	3%
富營養化	4.52E-16	3.10E-16	1.48E-17	69%	3%
全球暖化	2.21E-15	6.98E-15	7.85E-17	316%	4%
臭氧層損耗	3.19E-17	1.43E-17	3.43E-19	45%	1%
人類毒性	3.60E-16	2.78E-16	2.62E-16	77%	73%
淡水水生生態 毒性	1.15E-15	9.46E-16	1.41E-15	82%	123%
海洋水生生態 毒性	2.07E-14	1.11E-14	5.00E-15	54%	24%
陸地生態 毒性	1.86E-15	4.72E-16	1.65E-16	25%	9%
光化學氧化	1.97E-16	1.29E-16	1.09E-17	66%	6%
總衝擊	3.20E-14	2.62E-14	7.15E-15	0.817971	0.223128

### 4.3 敏感度分析

生命週期敏感度分析是用於評估所建立的假設、使用的評估方法及引用資料，提供個別輸入參數數據變化時，可有效評估其變異對最後結果的影響範圍，找出對評估結果影響最大的關鍵參數。本研究找出污水處理生命週期中環境衝擊顯著之因子，選取影響較大的引用資料或是研究假設作為變數，評估其變異對結果的影響程度。

本研究對各假設情境進行敏感度分析，分別以±10%、±20%及±50%的範圍，分別變動耗電量、加藥量及排放量三項敏感參數，分別計算出各個因子變動產生之變化量對於所有因子加總之總變動量的貢獻程度，並用龍捲風圖(tornado diagram)形式呈現敏感度。

各情境之變動率結果如表 4-9 至表 4-15，敏感度結果如圖 4-19 至圖 4-25，能源為各情境最敏感之因子，藥品使用量因子次之，除了污泥無再利用情境於中，污泥全部掩埋處置，故排放量為最敏感之因子，其他影響類別之排放量較不敏感，特別是污泥再利用於建材，無任何污泥掩埋或灰渣掩埋，故無任何敏感度。若欲提高衝擊評估準確性時，提高能源因子的資料品質為最優先考慮。

表 4-9 金城污水處理廠之敏感度分析

	能源	變動率	藥品	變動率	排放	變動率
-50%	8.05E-14	40%	6.32E-14	10%	5.79E-14	1%
-20%	6.67E-14	16%	5.98E-14	4%	5.77E-14	0%
-10%	6.22E-14	8%	5.87E-14	2%	5.76E-14	0%
0	5.76E-14	-	5.76E-14	-	5.76E-14	-
+10%	5.3E-14	-8%	5.65E-14	-2%	5.75E-14	0%
+20%	4.84E-14	-16%	5.53E-14	-4%	5.75E-14	0%
+50%	3.47E-14	-40%	5.2E-14	-10%	5.73E-14	-1%

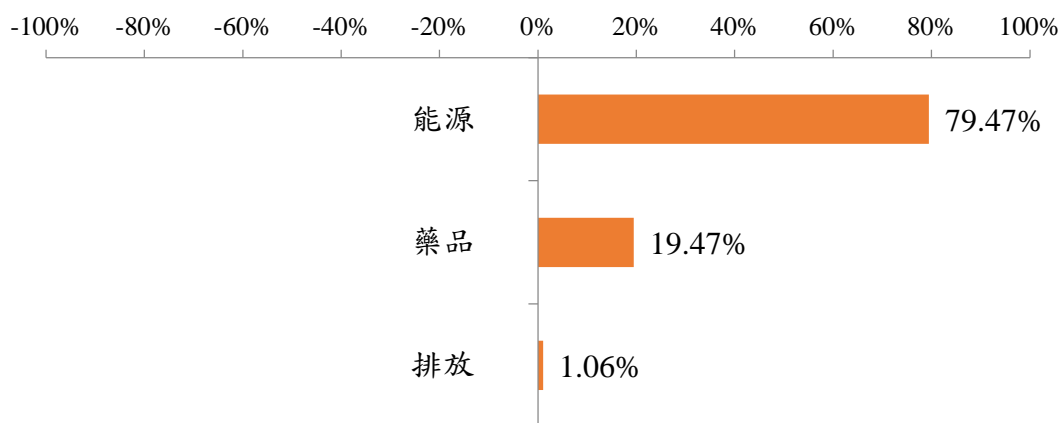


圖 4-19 金城污水處理廠之敏感度分析

表 4-10 再生水應用於農業之敏感度分析

	能源	變動率	藥品	變動率	排放	變動率
-50%	8.05E-14	40%	6.32E-14	10%	5.79E-14	1%
-20%	6.67E-14	16%	5.98E-14	4%	5.77E-14	0%
-10%	6.22E-14	8%	5.87E-14	2%	5.76E-14	0%
0	5.76E-14	-	5.76E-14	-	5.76E-14	-
+10%	5.3E-14	-8%	5.65E-14	-2%	5.75E-14	0%
+20%	4.84E-14	-16%	5.53E-14	-4%	5.75E-14	0%
+50%	3.47E-14	-40%	5.2E-14	-10%	5.73E-14	-1%

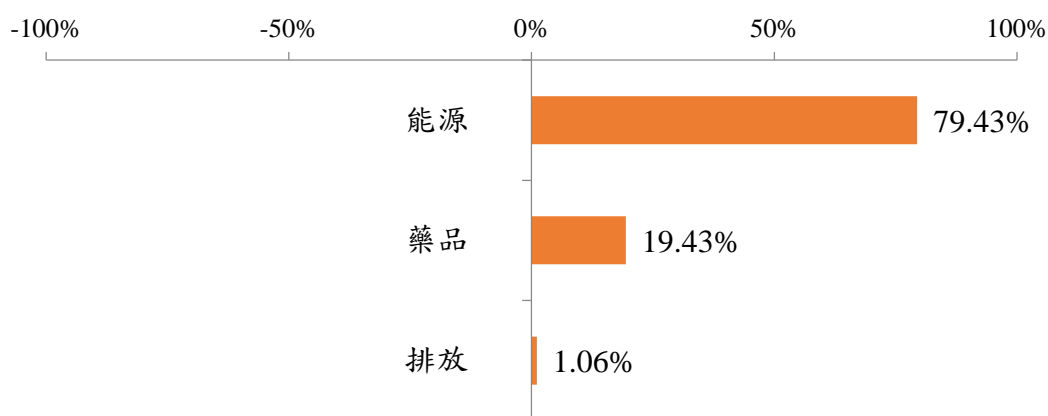


圖 4-20 再生水應用於農業之敏感度分析

表 4-11 再生水應用於城市之敏感度分析

	能源	變動率	藥品	變動率	排放	變動率
-50%	1.28E-13	23%	1.24E-13	19%	1.12E-13	8%
-20%	1.14E-13	9%	1.12E-13	8%	1.07E-13	3%
-10%	1.09E-13	5%	1.08E-13	4%	1.06E-13	2%
0	1.04E-13	-	1.04E-13	-	1.04E-13	-
+10%	9.94E-14	-5%	1E-13	-4%	1.03E-13	-2%
+20%	9.46E-14	-9%	9.61E-14	-8%	1.01E-13	-3%
+50%	8.02E-14	-23%	8.41E-14	-19%	9.61E-14	-8%

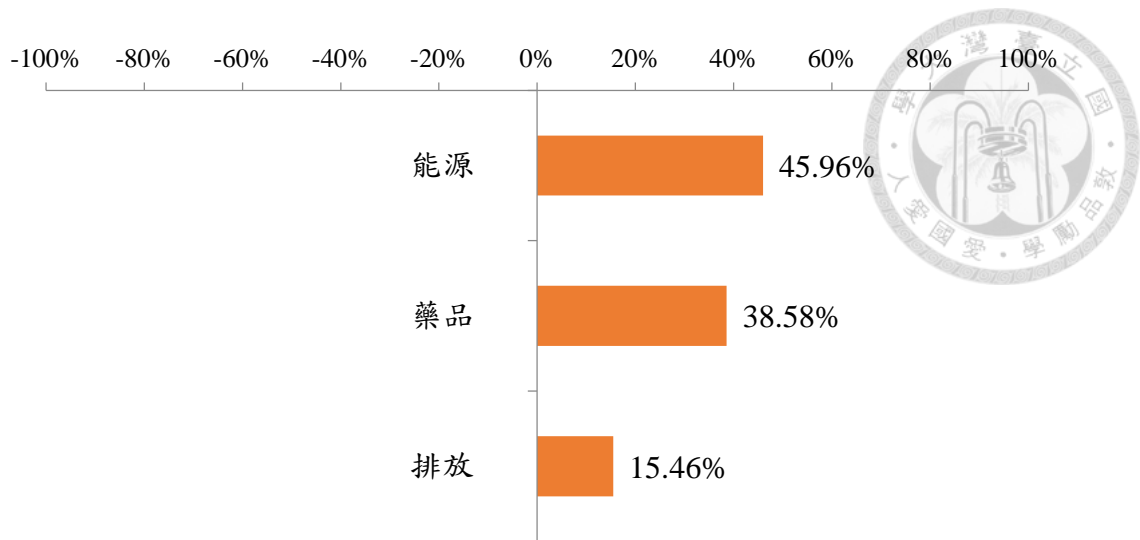


圖 4- 21 再生水應用於城市之敏感度分析

表 4- 12 污泥無再利用之敏感度分析

	能源	變動率	藥品	變動率	排放	變動率
<b>-50%</b>	1.78E-10	4%	1.72E-10	1%	2.49E-10	45%
<b>-20%</b>	1.74E-10	2%	1.72E-10	0%	2.02E-10	18%
<b>-10%</b>	1.72E-10	1%	1.71E-10	0%	1.87E-10	9%
<b>0</b>	1.71E-10	-	1.71E-10	-	1.71E-10	-
<b>+10%</b>	1.7E-10	-1%	1.71E-10	0%	1.56E-10	-9%
<b>+20%</b>	1.68E-10	-2%	1.71E-10	0%	1.4E-10	-18%
<b>+50%</b>	1.64E-10	-4%	1.7E-10	-1%	9.33E-11	-45%

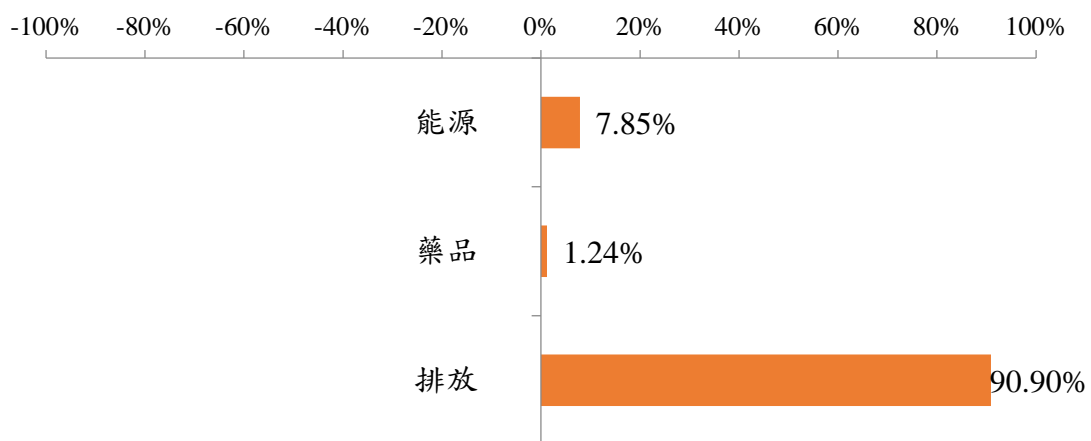


圖 4- 22 污泥無再利用之敏感度分析

表 4- 13 污泥應用於農業之敏感度分析

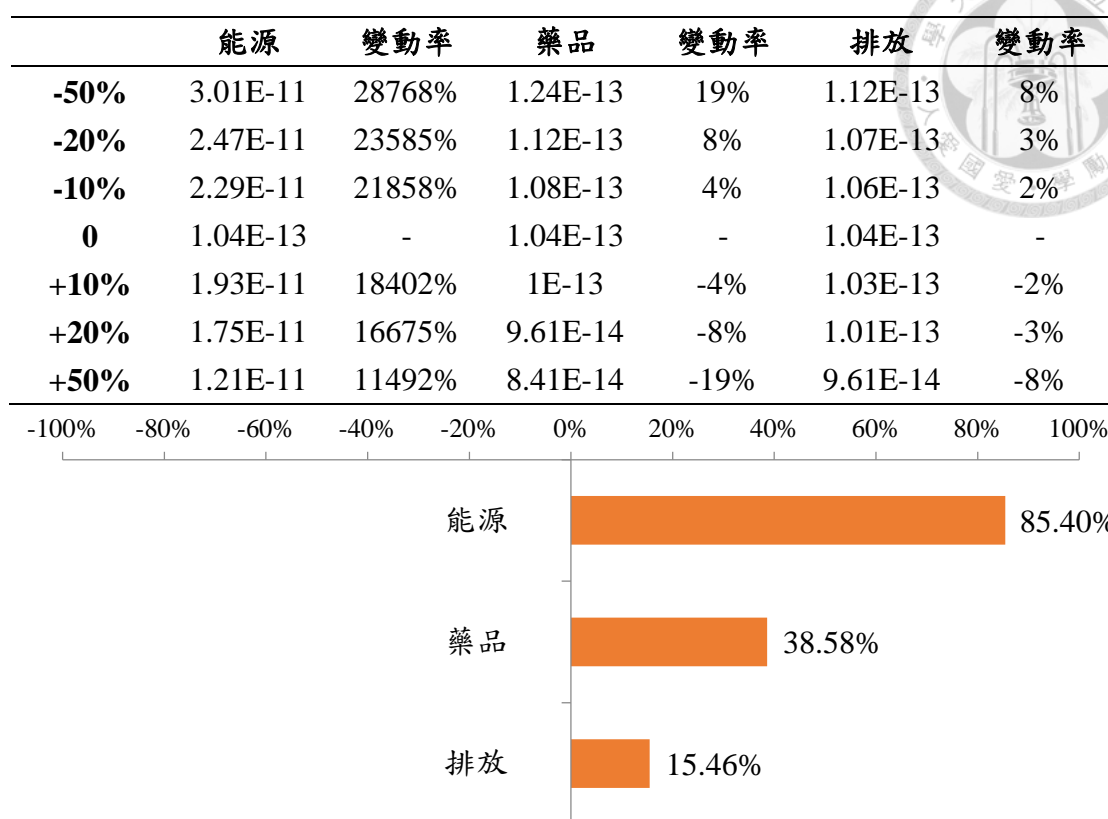


圖 4- 23 污泥應用於農業之敏感度分析

表 4- 14 污泥焚化後能源回收之敏感度分析

	能源	變動率	藥品	變動率	排放	變動率
-50%	6.91E-11	29%	5.96E-11	12%	5.8E-11	9%
-20%	5.96E-11	12%	5.58E-11	5%	5.52E-11	4%
-10%	5.65E-11	6%	5.46E-11	2%	5.43E-11	2%
0	5.33E-11	-	5.33E-11	-	5.33E-11	-
+10%	5.02E-11	-6%	5.21E-11	-2%	5.24E-11	-2%
+20%	4.7E-11	-12%	5.08E-11	-5%	5.14E-11	-4%
+50%	3.76E-11	-29%	4.71E-11	-12%	4.86E-11	-9%



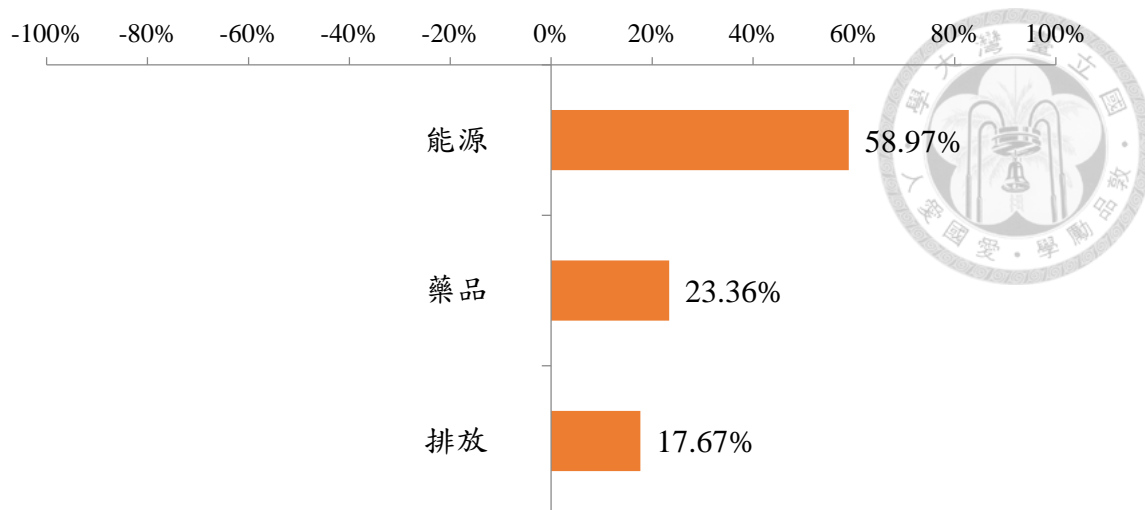


圖 4-24 污泥再焚化後能源回收之敏感度分析

表 4-15 污泥應用於建材之敏感度分析

	能源	變動率	藥品	變動率	排放	變動率
<b>-50%</b>	4.93E-11	47%	3.46E-11	3%	3.36E-11	0%
<b>-20%</b>	3.99E-11	19%	3.4E-11	1%	3.36E-11	0%
<b>-10%</b>	3.67E-11	9%	3.38E-11	1%	3.36E-11	0%
<b>0</b>	3.36E-11	-	3.36E-11	-	3.36E-11	-
<b>+10%</b>	3.04E-11	-9%	3.34E-11	-1%	3.36E-11	0%
<b>+20%</b>	2.73E-11	-19%	3.32E-11	-1%	3.36E-11	0%
<b>+50%</b>	1.79E-11	-47%	3.25E-11	-3%	3.36E-11	0%

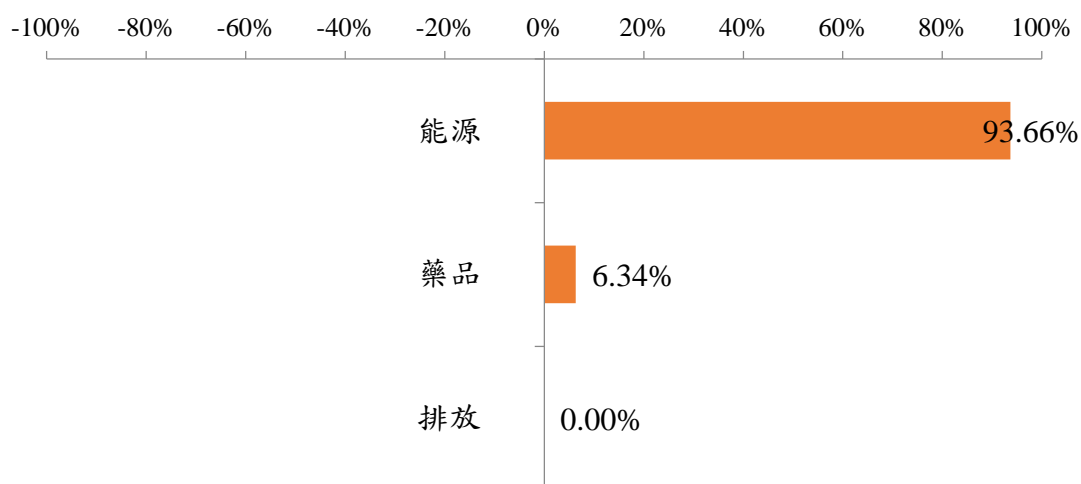


圖 4-25 污泥應用於建材之敏感度分析



#### 4.4 不確定性分析

污水處理系統之生命週期評估以營運階段為主要考量，而營運中所投入的能源、資源取得以及污水排放或污水污泥再利用等環境衝擊量化，估算結果仍有許多不確定性，例如盤查時引用資料庫之數據品質、分析過程中所造成的不確定性等，皆會降低結果的可信度。因此為改善生命週期評估結果可信度，進行不確定性分析，預估環境衝擊結果之不確定性範圍。

本研究選用 SimaPro7.1 生命週期評估軟體內建之不確定性分析，運用蒙地卡羅方法進行 1000 次隨機模擬，本研究盤查資料之機率密度函數多以對數常態分佈呈現。蒙地卡羅模擬過程的基本理論為運用統計檢定及基本假設探求各參數的機率密度函數，根據機率密度函數進行統計估算盤查資料平均值及變異數，建立生命週期環境衝擊評估結果之不確定性。

經由蒙地卡羅進行參數不確定性模擬後，可將各案例生命週期評估結果轉換成機率性模式，不確定性以 95 % 信賴區間(2.5 th % ~ 97.5 th %)、平均值(Mean)、標準差(Standard Deviation, SD)與變異係數(Coefficient of Variation, CV)表示。其中變異係數又稱離散係數，定義為標準差與平均值之比( $CV = \sigma / \mu$ )，是機率分佈離散程度的一個歸一化量度，因此以變異係數為不確定性分析的度量指標，結果如表 4-16，各案例之蒙地卡羅模擬結果如圖 4-26 至圖 4-32。

金城污水處理廠不確定性最高的影響類別為海洋水生生態毒性，變異係數為 91%，信賴區間為 8.76E-15 ~ 8.27E-14，再生水應用於農業不確定性最高的影響類別為海洋水生生態毒性，變異係數為 60200%，其信賴區間為 -1.60E-14 ~ 1.32E-14，再生水應用於城市不確定性最高為陸地生態毒性，變異係數為 245%，其信賴區間為 -2.39E-15 ~ 2.03E-15，而污泥部分，無再利用之不確定性最高的影響類別為陸地生態毒性，變異係數為 111%，信賴區間為 3.12E-13 ~ 5.07E-12，污泥應

用於農業之不確定性最高為也是陸地生態毒性，變異係數為 129%，信賴區間為 3.23E-13 ~ 5.29E-12，污泥焚化後能源再回收之不確定性最高的影響類別為海洋水生生態毒性，變異係數為 214%，信賴區間為-1.04E-11 ~ 5.16E-12，污泥應用於建材之不確定性最高的影響類別為海洋水生生態毒性，其信賴區間為 1.00E-11 ~ 6.21E-11。綜合各情境不確定性最高之影響類別多集中在海洋水生生態毒性以及陸地生態毒性兩項影響類別。

表 4-16 各情境之變異係數

	金城 污水處理廠	再生水 應用於 農業	再生水 應用於 城市	污泥 無再 利用	污泥 農業 應用	污泥焚 化後 能源再 利用	污泥 應用於 建材
非生物枯竭	6%	-6%	63%	6%	6%	4%	4%
酸化	7%	-8%	73%	7%	49%	26%	6%
富營養化	16%	-20%	-89%	15%	9%	9%	9%
全球暖化	4%	-4%	41%	3%	-2%	1%	1%
臭氧層損耗	60%	-63%	-111%	59%	58%	-72%	61%
人類毒性	50%	-74%	93%	42%	50%	11%	19%
淡水水生生態毒性	70%	125%	62%	57%	67%	73%	48%
海洋水生生態毒性	91%	60200%	68%	94%	109%	214%	80%
陸地生態毒性	130%	-143%	245%	111%	129%	22%	49%
光化學氧化	4%	-5%	49%	3%	-1%	6%	4%

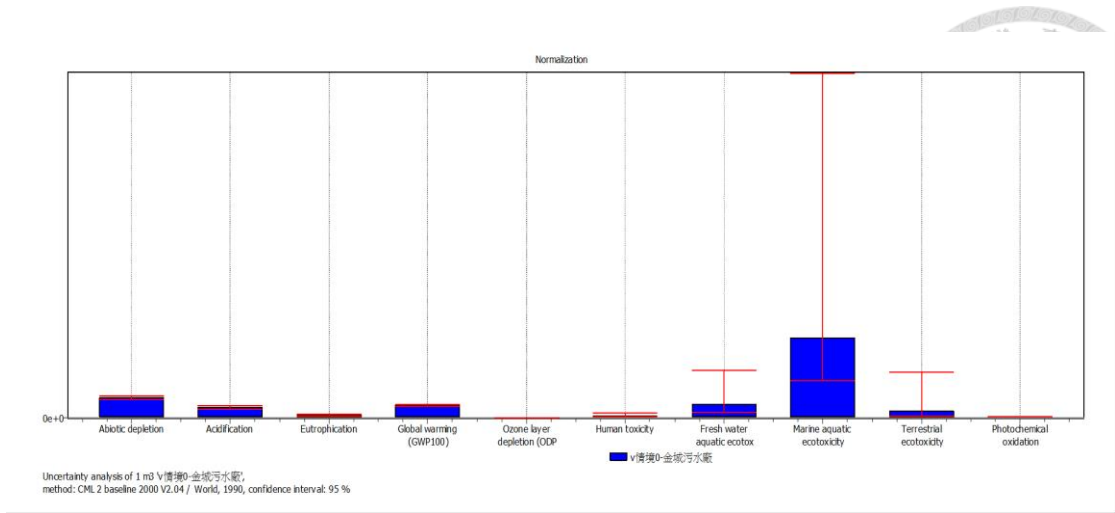


圖 4-26 金城污水處理廠之蒙地卡羅結果

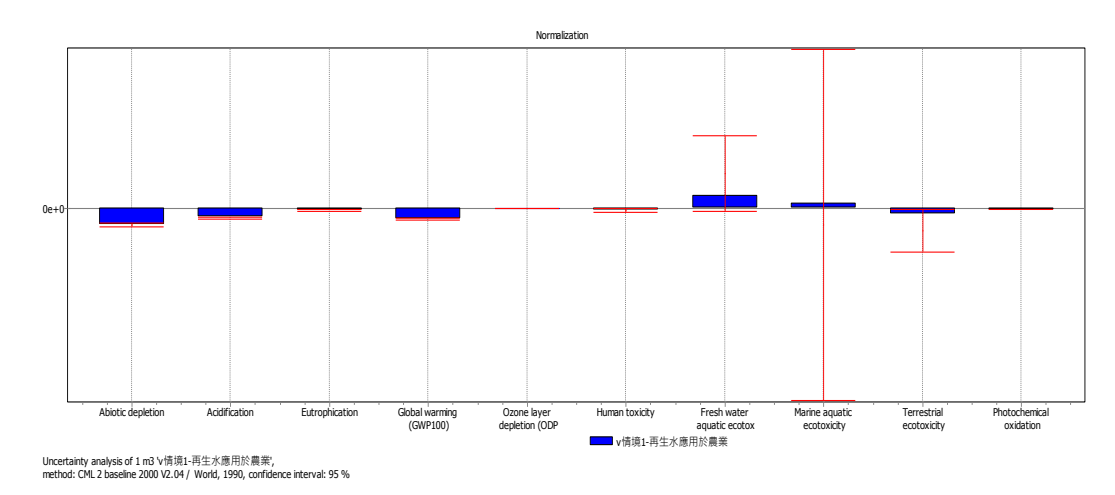


圖 4-27 再生水應用於農業之蒙地卡羅結果

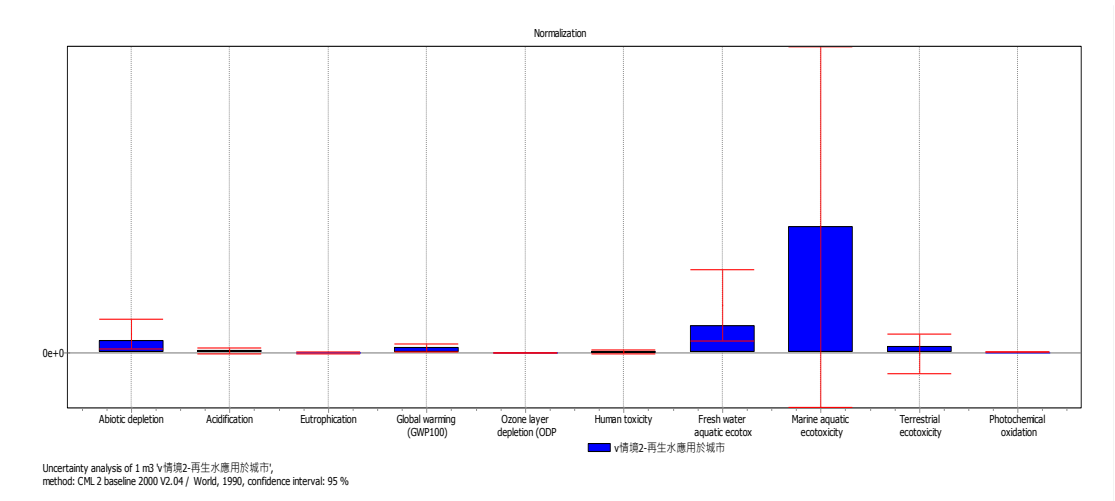


圖 4-28 再生水應用於城市之蒙地卡羅結果

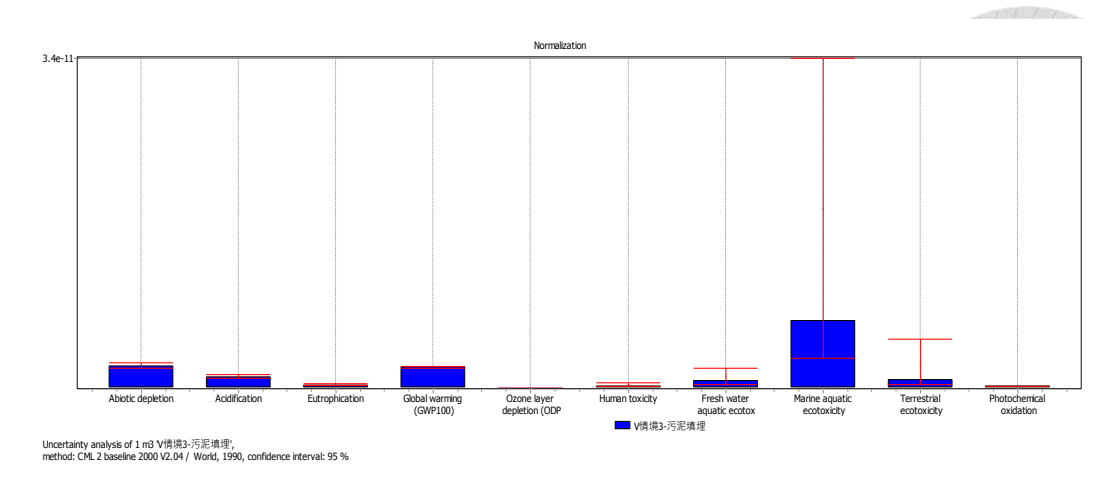


圖 4- 29 污泥無再利用之蒙地卡羅結果

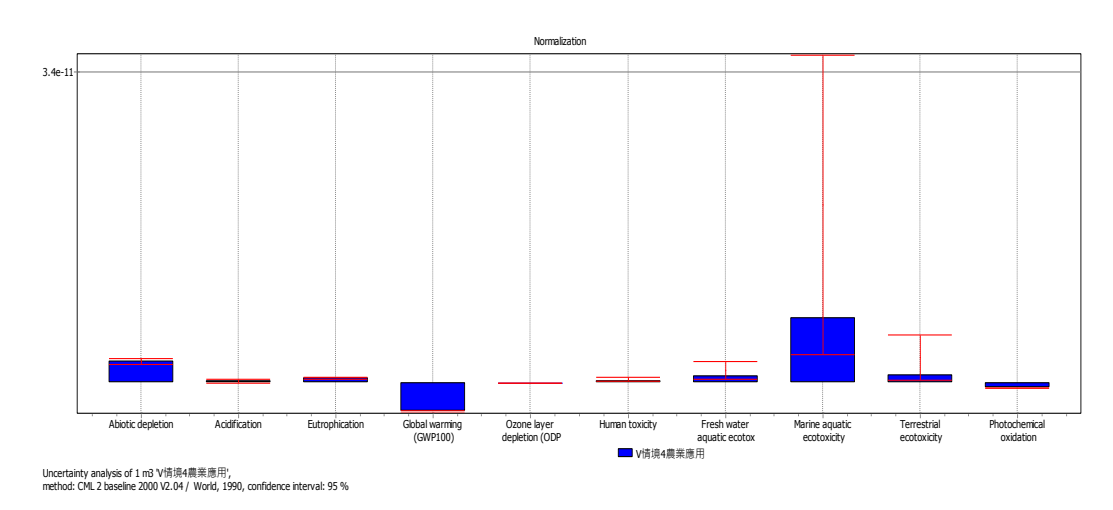


圖 4- 30 污泥應用於農業之蒙地卡羅結果

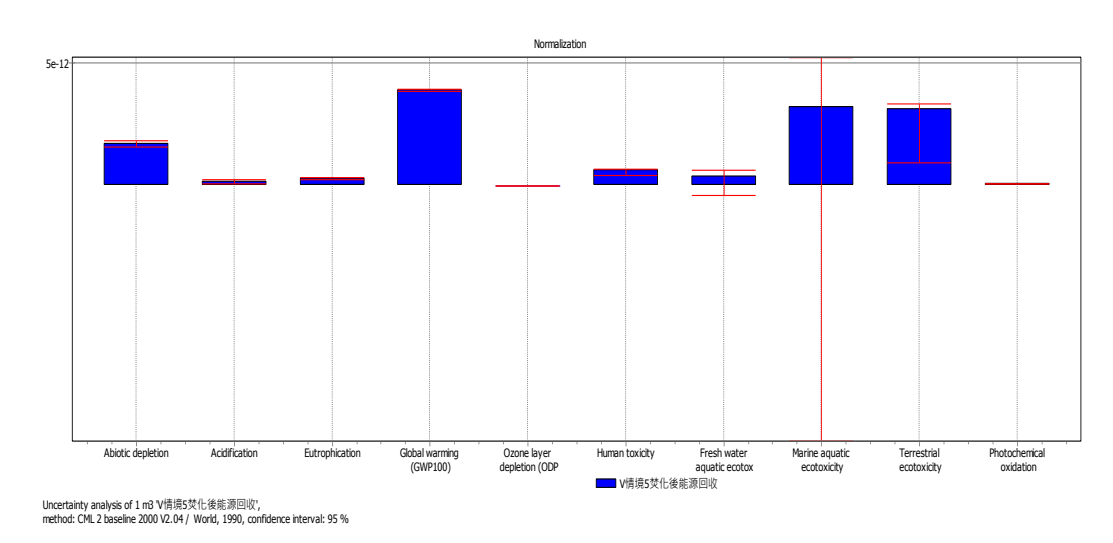


圖 4- 31 污泥焚化後能源回收再利用之蒙地卡羅結果

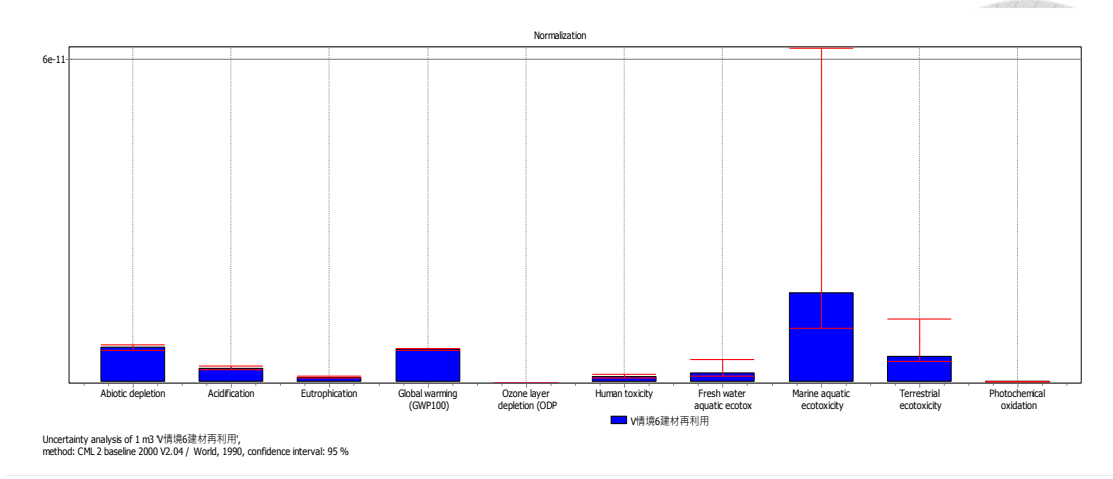


圖 4- 32 污泥應用於建材之蒙地卡羅結果

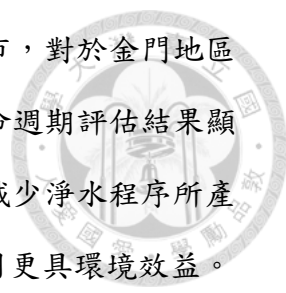
## 第五章 結論與建議



本研究使用 SimaPro7.1 及 CML 2000 衝擊評估模式，以金門地區金城污水處理廠作為研究案例，評估目前污水與污泥處理程序之環境衝擊，以及再生水應用於農業、再生水應用於城市、污泥無再利用、污泥應用於農業、污泥經焚化後能源回收及污泥作為建材再利用。了解污水處理廠放流污水再利用與廢棄污泥再利用對環境造成之影響程度，並進行敏感度分析和不確定性分析。以下總結本研究之成果，並提出污水處理廠生命週期評估之幾項建議。

### 1. 結論

- (1) 本研究盤查金城污水處理廠實際營運狀況，進行污水廠之生命週期評估，研究結果顯示，電力對於污水處理廠有最大的環境衝擊，特別是重油發電過程中鎳、釩等重金屬廢氣排放及鎳離子、鉍離子及釩離子於廢水排放，對海洋水生生態毒性類別有顯著之環境衝擊；若選用其他能源例如風力發電，可減少 78 % 之環境衝擊。
- (2) 金城污水處理廠將再生水應用於農業，可減少淨水程序所產生之環境衝擊，為再生水應用於農業最主要之效益。雖然再生水應用於農業的過程中，水中含有氮、磷等營養物質可減少肥料施用，實際結果由於污水處理廠處理後之放流水含氮、磷量少，故減少肥料施用的效益並沒有發揮出來。
- (3) 金城污水處理廠將再生水應用於城市，需增加三級處理系統，環境衝擊也增加了 55 %。再生水應用於城市，可減少淨水程序所產生之環境衝擊，比無再利用更具有 50 % 之環境效益。而再生水應用於城市，於再生水使用階段對於淡水水生生態毒性有較大的環境影響。

- 
- (4) 綜合再生水再利用，不管再利用於農業或再利用於城市，對於金門地區都有實質性的效益，可舒緩水資源不足的問題；經生命週期評估結果顯示，雖然增加三級處理系統會增加環境衝擊，但是與減少淨水程序所產生之環境衝擊可相互抵消，使再生水再利用比無再利用更具環境效益。
- (5) 目前，金城污水處理廠污泥以掩埋處置，處理程序中電力消耗仍是造成衝擊最主要的原因。由於金門是一個小島，運輸距離短，因此運輸所產生之衝擊相較於處理程序相當微小，結果顯示幾乎可忽略運輸所產生之環境衝擊。
- (6) 污泥經濃縮、脫水、堆肥後再利用於農業，經堆肥程序後污泥應用於農業可減少甲烷及一氧化二氮及硫氧化物生成，可增加 54.36 % 之環境效益，特別是全球暖化此項影響類別。
- (7) 污泥經濃縮、脫水、焚化、灰爐掩埋等處理程序，焚化程序所產生之環境衝擊為最高，占總衝擊 65.37 %，由於焚化後能源回收再利用，可減少能源使用 86.32 % 之環境衝擊。
- (8) 污泥經濃縮、脫水、焚化後灰爐作為建材再利用，雖然焚化灰爐需運輸回台灣才能再利用，研究結果顯示運輸過程所產生結果相對於處理程序並不顯著；本研究於此情境設計中並不考慮焚化所產生之能源亦回收再利用，故焚化所產生之環境衝擊占 69.13 %，亦是造成污泥作為建材再利用最主要衝擊之一。
- (9) 綜合污泥再利用情境，污泥再利用於農業過程中，堆肥階段電力使用造成較高之環境衝擊，仍然比掩埋處理具有環境效益；而焚化階段雖然需消耗大量的能源與資源投入，由於有能源回收，在環境效益上有很大的貢獻，因此於情境假設中為最具環境效益。

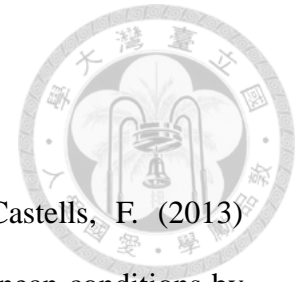


(10) 敏感度分析結果顯示，能源為各情境最敏感之因子，藥品使用量因子次之，除了污泥無再利用情境於中，排放量為最敏感之因子，其他影響類別之排放量較不敏感。若欲提高衝擊評估準確性時，提高能源因子的資料品質為最優先考慮。綜合各情境不確定性分析結果顯示，不確定性最高之影響類別多集中在海洋水生生態毒性以及陸地生態毒性兩項影響類別。

## 2. 建議

- (1) 能源選用為污水處理廠造成環境衝擊最主要之原因，搭配金門地區豐富的風力資源，若可改用風力發電作為能源提供，可有效降低整體環境衝擊。
- (2) 金城污水處理廠目前僅污水再利用僅用於廠內澆灌及部分用於鄰近公園綠地澆灌，未來增加三級處理，可將再生水應用於城市使用。污泥處理部分，考量污泥量並不多目前皆掩埋處置，若可結合其他廢棄污泥或底泥，共同處理再利用，可減少污泥廢棄掩埋。
- (3) 本研究盤查資料採用 SimaPro 7.1 內建 Ecoinvent 資料庫，此資料庫多源自歐洲國家的盤查資料，與台灣實際情形有些許差異，為研究不確定性的主因之一。若我國未來發展本土資料庫，能增加資料引用及結果的準確性。此外，本研究選用 SimaPro 生命週期軟體與 CML 2000 衝擊評估方法，不同的評估軟體與方法選用可能造成結果之差異，比較其中差別。
- (4) 本研究目前著重於污水處理廠環境面的衝擊評估，然而水資源不足所造成的水壓力，是另一個面的環境衝擊因子，未來建議可將水質與水量結合，增加水資源指標，進一步評估區域水資源脆弱性(water vulnerability)，反映水資源缺乏之水壓力情形，使評估面向更完整。

## 參考文獻



- Amores, M.J., Meneses, M., Pasqualino, J., Antón, A. and Castells, F. (2013) Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *Journal of Cleaner Production* 43(0), 84-92.
- Barrios, R., Siebel, M., van der Helm, A., Bosklopper, K. and Gijzen, H. (2008) Environmental and financial life cycle impact assessment of drinking water production at Waternet. *Journal of Cleaner Production* 16(4), 471-476.
- Bravo, L. and Ferrer, I. (2011) Life Cycle Assessment of an intensive sewage treatment plant in Barcelona (Spain) with focus on energy aspects. *Water Science & Technology* 64, 440–447.
- Buonocore, E., Franzese, P.P., Mellino, S., Ulgiati, S., Viglia, S. and Zucaro, A. (2009) Energy and LCA evaluation of the present dynamics of investigated case studies.
- Chen, Z., Ngo, H.H. and Guo, W. (2012) A critical review on sustainability assessment of recycled water schemes. *Science of The Total Environment* 426(0), 13-31.
- Corominas, L., Foley, J., Guest, J.S., Hospido, A., Larsen, H.F., Morera, S. and Shaw, A. (2013) Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. *Water Research* 47(15), 5480-5492.
- Doka, G., (2009) Wastewater Treatment. Life cycle Inventories on Waste Treatment. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dubendorf (Switzerland).
- Foley, J., de Haas, D., Hartley, K. and Lant, P. (2010) Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water Research* 44(5),

1654-1666.



Gallego, A., Hospido, A., Moreira, M.T. and Feijoo, G. (2008) Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. *Resources, Conservation and Recycling* 52(6), 931-940.

Heijungs, R., Suh, S. and Kleijn, R. (2005) Numerical Approaches to Life Cycle Interpretation - The case of the Ecoinvent'96 database (10 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 10(2), 103-112.

Hong, J., Hong, J., Otaki, M. and Jolliet, O. (2009) Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan. *Waste Management* 29(2), 696-703.

Hospido, A., Moreira, M. and Feijoo, G. (2008) A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13(1), 57-64.

Hospido, A., Moreira, M., Fernández-Couto, M. and Feijoo, G. (2004) Environmental performance of a municipal wastewater treatment plant. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 9(4), 261-271.

Hospido, A., Moreira, T., Martín, M., Rigola, M. and Feijoo, G. (2005) Environmental Evaluation of Different Treatment Processes for Sludge from Urban Wastewater Treatments: Anaerobic Digestion versus Thermal Processes (10 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 10(5), 336-345.

Houillon, G. and Jolliet, O. (2005) Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis. *Journal of Cleaner Production* 13(3), 287-299.

Huijbregts, M.J. (1998) Application of uncertainty and variability in LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment 3(5), 273-280.

ISO (2006) ISO 14040:2006 Environmental management-Life cycle assessment Principles and Framework. Standardization, I.O.f. (ed).

Kalbar, P.P., Karmakar, S. and Asolekar, S.R. (2013) Assessment of wastewater treatment technologies: life cycle approach. Water and Environment Journal 27(2), 261-268.

Leverenz, H.L., Tchobanoglous, G. and Asano, T. (2011 ) Direct potable reuse: a future imperative. Water Reuse and Desalination 10-12.

Levine, A.D. and Asano, T. (2004) Peer Reviewed: Recovering Sustainable Water from Wastewater. Environmental Science & Technology 38(11), 201A-208A.

Lundin M. (2003) Indicators for Measuring the Sustainability of Urban Water Systems - A Life Cycle Approach. Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, 2-26.

Lundie, S., Peters, G.M. and Beavis, P.C. (2004) Life Cycle Assessment for Sustainable Metropolitan Water Systems Planning. Environmental Science & Technology 38(13), 3465-3473.

Lyons, E., Zhang, P., Benn, T., Sharif, F., Li, K., Crittenden, J., Costanza, M. and Chen Y, S. (2009) Life cycle assessment of three water supply systems: importation, reclamation and desalination. Water science and technology: water supply (Print) 9(4), 439-448.

Maurice, B., Frischknecht, R., Coelho-Schwartz, V. and Hungerbühler, K. (2000) Uncertainty analysis in life cycle inventory. Application to the production of

electricity with French coal power plants. *Journal of Cleaner Production* 8(2), 95-108.

Meneses, M., Pasqualino, J.C. and Castells, F. (2010) Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications. *Chemosphere* 81(2), 266-272.

Mo, W. and Zhang, Q. (2013) Energy–nutrients–water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management* 127(0), 255-267.

Muñoz, I., Rodríguez, A., Rosal, R. and Fernández-Alba, A.R. (2009) Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment: A focus on toxicity-related impacts. *Science of The Total Environment* 407(4), 1245-1256.

Murray, A., Horvath, A. and Nelson, K.L. (2008) Hybrid Life-Cycle Environmental and Cost Inventory of Sewage Sludge Treatment and End-Use Scenarios: A Case Study from China. *Environmental Science & Technology* 42(9), 3163-3169.

Pasqualino, J.C., Meneses, M., Abella, M. and Castells, F. (2009) LCA as a Decision Support Tool for the Environmental Improvement of the Operation of a Municipal Wastewater Treatment Plant. *Environmental Science & Technology* 43(9), 3300-3307.

Pasqualino, J.C., Meneses, M. and Castells, F. (2011) Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives. *Journal of Industrial Ecology* 15(1), 49-63.

Remy, C., Lesjean, B. and Waschnewski, J. (2013) Identifying energy and carbon

footprint optimization potentials of a sludge treatment line with Life Cycle Assessment. *Water Science & Technology* 67(1), 63-73.



Renou, S., Thomas, J.S., Aoustin, E. and Pons, M.N. (2008) Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *Journal of Cleaner Production* 16(10), 1098-1105.

Rodriguez-Garcia, G., Molinos-Senante, M., Hospido, A., Hernández-Sancho, F., Moreira, M.T. and Feijoo, G. (2011) Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Research* 45(18), 5997-6010.

Sala, L. and Serra, M. (2004) Towards sustainability in water recycling. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 50(2), 1-8.

Stokes, J. and Horvath, A. (2006) Life Cycle Energy Assessment of Alternative Water Supply Systems (9 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 11(5), 335-343.

Suh, Y.-J. and Rousseaux, P. (2002) An LCA of alternative wastewater sludge treatment scenarios. *Resources, Conservation and Recycling* 35(3), 191-200.

Tangsubkul, N., Parameshwaran, K., Lundie, S., Fane, A.G. and Waite, T.D. (2006) Environmental life cycle assessment of the microfiltration process. *Journal of Membrane Science* 284(1-2), 214-226.

Zhang, Q.H., Wang, X.C., Xiong, J.Q., Chen, R. and Cao, B. (2010) Application of life cycle assessment for an evaluation of wastewater treatment and reuse project – Case study of Xi'an, China. *Bioresource Technology* 101(5), 1421-1425.

洪明龍(2000)。家庭廚餘與下水污泥共同堆肥之資源化研究。碩士論文，國立台灣大學，台北市。

羅時麒(2005)。以系統性機率模式鑑定量化與整合生命週期評估之不確定性。碩士論文，國立臺灣大學，台北市。

經濟部水利署水利規劃試驗所(2005)。金門地區供水改善規劃。

金門縣政府(2006)。金門縣綜合發展計畫暨離島綜合實施方案。

金門縣政府(2007)。金門縣第二期離島綜合建設實施方案。

行政院農業委員會農糧署(2008)。肥料管理法規彙編。

台灣省自來水公司(2008)。屏東所快濾池操作維護作業報告。

楊英賢(2008)。生命週期評估與不確定性分析應用於火力電廠與燃料選擇。博士論文，國立成功大學，台南市。

經濟部水利署水利規劃試驗所(2009a)。廢污水廠放流水再利用潛勢及推動策略。

經濟部水利署水利規劃試驗所(2009b)。金門地區水再生利用規劃及試辦計畫。

黃淑君，張振章(2010)。國內外再生水應用於產業之介紹，永續產業發展，50，69-74。

歐陽嶠暉(2011)。下水道工程學(水環境再生工程學)。長松文化興業股份有限公司。

經濟部水利署(2011)。自來水事業碳足跡評估與減碳策略之先期研究。

經濟部能源局(2011)。100年能源統計手冊。

內政部營建署(2011)。污水處理廠節能規劃手冊，光宇工程顧問股份有限公司。

金門縣自來水廠(2012)。金門縣自來水廠統計年報。

經濟部水利署水利規劃試驗所(2012)。淨水廠供水水質改善最適對策評估研究-以金門自來水廠為例。

經濟部水利署水利規劃試驗所(2013)。金門地區整體供水改善綱要計畫。經濟

謝佑昫(2013)。土地利用之生命週期衝擊評估工具開發，碩士論文，國立台灣大學，台北市。

行政院環保署(2014)。污泥處理現況檢討及因應策略。





## 附錄



### 附錄 A 中國大陸農田灌溉水質標準(旱作)

項目	數量	單位
生化需氧量(BOD5)	150	mg/L
化學需氧量(CODcr)	300	mg/L
懸浮物	200	mg/L
陰離子表面活性劑(LAS)	8.0	mg/L
凱氏氮	30	mg/L
總磷(以 P 計)	10	mg/L
水溫	35	°C
pH 值	5.5~8.5	
全鹽量	1000(非鹽鹼土地區)、 2000(鹽鹼土地區)有條 件的地區可以適當放寬	mg/L
氯化物	250	mg/L
硫化物	1.0	mg/L
總汞	-	mg/L
總鎘	-	mg/L
總砷	0.1	mg/L
鉻(六價)	0.1	mg/L
總鉛	0.1	mg/L
總銅	1.0	mg/L
總鋅	2.0	mg/L
總硒	0.02	mg/L
氟化物	2.0(高氟區)、3.0(一般地 區)	mg/L
氰化物	0.5	mg/L
石油類	10	mg/L
揮發酚	1.0	mg/L
苯	2.5	mg/L
三氯乙醛	0.5	mg/L
丙烯醛	0.5	mg/L

硼	1.0(對硼敏感作物，如： 馬鈴薯、筍瓜、韭菜、 洋蔥、柑桔等)	mg/L
	2.0(對硼耐受性較強的作物，如：小麥、玉米、 青椒、小白菜、蔥等)	mg/L
	3.0(對硼耐受性強的作物，如：水稻、蘿蔔、 油菜、甘蘭等)	mg/L

資料來源：經濟部水利署(2009b)

## 附錄 B 盤查清單之統計資料

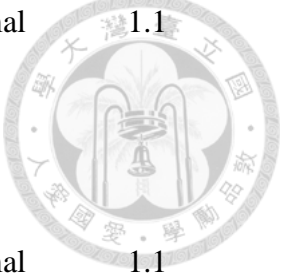
Ammonium chloride, at plant/GLO U				
Resources/ Materials/fuels/ Emissions	Amount	Unit	Probability distribution	Standard Deviation
<b><u>Resources</u></b>				
Water, cooling, unspecified natural origin/m <sup>3</sup>	0.023264	m <sup>3</sup>	Lognormal	1.3001
<b><u>Materials/fuels</u></b>				
Ammonia, liquid, at regional storehouse/RER U	0.16365	kg	Lognormal	1.3765
Sodium chloride, powder, at plant/RER U	0.27917	kg	Lognormal	1.3765
Carbon dioxide liquid, at plant/RER U	0.42356	kg	Lognormal	1.3765
Water, ultrapure, at plant/GLO U	0.082306	kg	Lognormal	1.3765

<b>Heat, natural gas, at industrial furnace &gt;100kW/RER U</b>	1.9388	MJ	Lognormal	1.3001
<b>Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE U</b>	0.3228	kWh	Lognormal	1.3001
<b>Transport, lorry &gt;16t, fleet average/RER U</b>	0.086638	tkm	Lognormal	2.095
<b>Transport, freight, rail/RER U</b>	0.51983	tkm	Lognormal	2.095
<b>Chemical plant, organics/RER/I U</b>	3.88E-10	p	Lognormal	3.0909
<b><u>Emissions to air</u></b>				
<b>Heat, waste</b>	1.1621	MJ	Lognormal	1.3001
<b>Ammonia</b>	0.000327	kg	Lognormal	1.3713
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	0.021178	kg	Lognormal	1.3001

---

**Aluminium oxide, at plant/RER U**

<b>Resources/ Materials/fuels/ Emissions</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>	<b>Probability distribution</b>	<b>Standard Deviation</b>
<b><u>Materials/fuels</u></b>				
<b>Aluminium hydroxide, at plant/RER U</b>	1.53	kg	Lognormal	1.1
<b>Aluminium oxide, plant/RER/I U</b>	2.5E-11	p	Lognormal	3.2
<b>Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE U</b>	0.0105	kWh	Lognormal	1.1
<b>Heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW/CH U</b>	1.94	MJ	Lognormal	1.1

<b>Heat, natural gas, at industrial furnace &gt;100kW/RER U</b>	0.507	MJ	Lognormal	1.1
				
<b><u>Emissions to air</u></b>				
<b>Heat, waste</b>	0.0379	MJ	Lognormal	1.1

---

**Heavy fuel oil , burned in power plant/TW U**

---

<b>Resources/ Materials/fuels/ Emissions</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>	<b>Probability distribution</b>	<b>Standard Deviation</b>
<b><u>Resources</u></b>				
<b>Water, cooling, unspecified natural origin/m<sup>3</sup></b>	0.01	m <sup>3</sup>	Lognormal	3.0194
<b><u>Materials/fuels</u></b>				
<b>Water, decarbonised, at plant/RER U</b>	0.05	kg	Lognormal	1.1267
<b>Water, completely softened, at plant/RER U</b>	0.01	kg	Lognormal	1.1267
<b>Limestone, crushed, washed/CH U</b>	0.001376	kg	Lognormal	1.2435
<b>Ammonia, liquid, at regional storehouse/RER U</b>	6.32E-05	kg	Lognormal	1.2435
<b>Heavy fuel oil, at regional storage/TW U</b>	0.024272	kg	Lognormal	1.0907
<b>Oil power plant 500MW/RER/I U</b>	1.24E-12	p	Lognormal	3.0487
<b><u>Emissions to air</u></b>				
<b>Heat, waste</b>	0.45401	MJ	Lognormal	1.0882

<b>Acetaldehyde</b>	2.61E-07	kg	Lognormal	1.8257
<b>Acetone</b>	2.61E-07	kg	Lognormal	1.8257
<b>Ammonia</b>	1E-07	kg	Lognormal	8.165
<b>Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified</b>	1.06E-06	kg	Lognormal	1.8257
<b>Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated</b>	5.32E-08	kg	Lognormal	1.8257
<b>Hydrocarbons, aromatic</b>	1.06E-08	kg	Lognormal	1.8257
<b>Arsenic</b>	4.08E-09	kg	Lognormal	8.9865
<b>Benzo(a)pyrene</b>	1.5E-11	kg	Lognormal	3.1104
<b>Benzene</b>	5.32E-08	kg	Lognormal	1.8257
<b>Beryllium</b>	5.58E-11	kg	Lognormal	5.0363
<b>Calcium</b>	3E-08	kg	Lognormal	1.6001
<b>Cadmium</b>	1.96E-09	kg	Lognormal	8.9865
<b>Methane, fossil</b>	5.32E-06	kg	Lognormal	1.8257
<b>Cobalt</b>	2.17E-08	kg	Lognormal	8.9865
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	0.00001	kg	Lognormal	2.2361
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	0.0779	kg	Lognormal	1.0907
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	0.000618	kg	Lognormal	1.2152
<b>Chromium</b>	6.93E-09	kg	Lognormal	11.174
<b>Chromium VI</b>	3.11E-10	kg	Lognormal	20.071
<b>Copper</b>	2.91E-08	kg	Lognormal	9.9013
<b>Acetic acid</b>	1.06E-06	kg	Lognormal	1.8257
<b>Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin</b>	1E-14	kg	Lognormal	3.0616

<b>Ethanol</b>	5.32E-07	kg	Lognormal	1.8257
<b>Iron</b>	7E-08	kg	Lognormal	5.0882
<b>Formaldehyde</b>	7.98E-07	kg	Lognormal	1.8257
<b>Hydrogen chloride</b>	4.51E-08	kg	Lognormal	1.5723
<b>Hydrogen fluoride</b>	3.01E-08	kg	Lognormal	1.5723
<b>Mercury</b>	1.5E-10	kg	Lognormal	12.83
<b>Methanol</b>	5.32E-07	kg	Lognormal	1.8257
<b>Manganese</b>	6.81E-09	kg	Lognormal	8.9865
<b>Molybdenum</b>	4.7E-09	kg	Lognormal	8.9865
<b>Dinitrogen monoxide</b>	0.000004	kg	Lognormal	3.2514
<b>Sodium</b>	3E-07	kg	Lognormal	1.6001
<b>Nickel</b>	1.71E-07	kg	Lognormal	8.9865
<b>Nitrogen oxides</b>	0.000363	kg	Lognormal	1.5095
<b>PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons</b>	1.8E-09	kg	Lognormal	3.0616
<b>Particulates, &lt; 2.5 um</b>	5.57E-06	kg	Lognormal	3.007
<b>Particulates, &gt; 2.5 um, and &lt; 10um</b>	3.71E-06	kg	Lognormal	2.0074
<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	3.09E-06	kg	Lognormal	1.5095
<b>Lead</b>	2.1E-08	kg	Lognormal	8.9865
<b>Propane</b>	5.32E-08	kg	Lognormal	1.8257
<b>Selenium</b>	3.09E-09	kg	Lognormal	8.9865
<b>Sulfur dioxide</b>	0.000258	kg	Lognormal	1.0907
<b>Vanadium</b>	6.19E-07	kg	Lognormal	10.559
<b>Zinc</b>	1.49E-08	kg	Lognormal	8.9865

**Emissions to water**

<b>Hypochlorite</b>	4.2E-07	kg	Lognormal	1.6115
<b>Heat, waste</b>	0.24447	MJ	Lognormal	1.1358
<b>Hypochlorite</b>	2.8E-07	kg	Lognormal	1.6115
<b>AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl</b>	4.24E-09	kg	Lognormal	1.1359
<b>Arsenic, ion</b>	1.19E-10	kg	Lognormal	1
<b>BOD5, Biological Oxygen Demand</b>	1.68E-06	kg	Lognormal	2.9649
<b>Cadmium, ion</b>	2.91E-10	kg	Lognormal	3.6515
<b>Chloride</b>	2.44E-05	kg	Lognormal	6.5938
<b>Chromium, ion</b>	3.06E-09	kg	Lognormal	4.8666
<b>Cobalt</b>	2.39E-10	kg	Lognormal	1
<b>COD, Chemical Oxygen Demand</b>	1.84E-06	kg	Lognormal	3.9929
<b>Copper, ion</b>	2.54E-09	kg	Lognormal	5.4772
<b>Fluoride</b>	2.03E-07	kg	Lognormal	5.7446
<b>Hydrocarbons, unspecified</b>	3.71E-08	kg	Lognormal	1.5218
<b>Iron, ion</b>	1.26E-07	kg	Lognormal	2.6458
<b>Lead</b>	4.99E-09	kg	Lognormal	4.1208
<b>Manganese</b>	3.58E-09	kg	Lognormal	1
<b>Mercury</b>	1.25E-10	kg	Lognormal	4.4721
<b>Nickel, ion</b>	1.77E-08	kg	Lognormal	3.2183
<b>Nitrogen</b>	8.17E-06	kg	Lognormal	1.3979
<b>Oils, unspecified</b>	5.67E-08	kg	Lognormal	1.4142
<b>Phosphorus</b>	1.85E-08	kg	Lognormal	1.0328

<b>Sulfate</b>	0.0002	kg	Lognormal	1.324
<b>Sulfide</b>	5.38E-08	kg	Lognormal	2.8284
<b>Sulfite</b>	1.8E-06	kg	Lognormal	1.4003
<b>Suspended solids, unspecified</b>	1.52E-06	kg	Lognormal	1.526
<b>Thallium</b>	3.7E-09	kg	Lognormal	1
<b>Tin, ion</b>	1.19E-10	kg	Lognormal	1
<b>TOC, Total Organic Carbon</b>	1.03E-06	kg	Lognormal	1
<b>Vanadium, ion</b>	3.61E-08	kg	Lognormal	5.164
<b>Zinc, ion</b>	6.31E-09	kg	Lognormal	2.7928
<b><u>Waste to treatment</u></b>				
<b>Disposal, bilge oil, 90% water, to hazardous waste incineration/CH U</b>	4.59E-06	kg	Lognormal	1.0907
<b>Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration/CH U</b>	2.02E-05	kg	Lognormal	1.0907
<b>Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U</b>	0.000169	kg	Lognormal	1.0907
<b>Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U</b>				
<b>Resources/ Materials/fuels/ Emissions</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>	<b>Probability distribution</b>	<b>Standard Deviation</b>
<b><u>Materials/fuels</u></b>				
<b>Operation, lorry 16-32t,</b>	0.17346	km	Lognormal	2.0131



<b>EURO3/RER U</b>				
<b>Lorry 28t/RER/I U</b>	3.21E-07	p	Lognormal	3.0125
<b>Maintenance, lorry 28t/CH/I U</b>	3.21E-07	p	Lognormal	3.0125
<b>Road/CH/I U</b>	0.001294	my	Lognormal	3.0124
<b>Operation, maintenance, road/CH/I U</b>	0.000203	my	Lognormal	3.0124
<b><u>Waste to treatment</u></b>				
<b>Disposal, lorry 28t/CH/I U</b>	3.21E-07	p	Lognormal	3.0125
<b>Disposal, road/RER/I U</b>	0.001294	my	Lognormal	3.0124

---

**Chlorine dioxide, at plant/RER U**

<b>Resources/ Materials/fuels/ Emissions</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>	<b>Probability distribution</b>	<b>Standard Deviation</b>
<b><u>Resources</u></b>				
<b>Water, cooling, unspecified natural origin/m<sup>3</sup></b>	0.024	m <sup>3</sup>	Lognormal	1.9
<b>Water, unspecified natural origin/m<sup>3</sup></b>	0.012	m <sup>3</sup>	Lognormal	1.6
<b><u>Materials/fuels</u></b>				
<b>Sodium chlorate, powder, at plant/RER U</b>	1.66	kg	Lognormal	1.6
<b>Sodium chloride, powder, at plant/RER U</b>	0.912	kg	Lognormal	1.6
<b>Sulphuric acid, liquid, at plant/RER U</b>	1.53	kg	Lognormal	1.6

<b>Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE U</b>	0.333	kWh	Lognormal	1.9
<b>Heat, natural gas, at industrial furnace &gt;100kW/RER U</b>	2	MJ	Lognormal	1.9
<b>Transport, freight, rail/RER U</b>	2.46	tkm	Lognormal	2.1
<b>Transport, lorry &gt;16t, fleet average/RER U</b>	0.41	tkm	Lognormal	2.1
<b>Chemical plant, organics/RER/I U</b>	4E-10	p	Lognormal	3.2
<b><u>Emissions to air</u></b>				
<b>Heat, waste</b>	1.2	MJ	Lognormal	1.9
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	0.0402	kg	Lognormal	1.6
<b>Sodium chlorate</b>	0.00332	kg	Lognormal	2.3
<b>Sulfate</b>	0.003	kg	Lognormal	2.3
<b><u>Emissions to water</u></b>				
<b>Cyanide</b>	0.00274	kg	Lognormal	1.9
<b>Sodium, ion</b>	0.0352	kg	Lognormal	1.9
<b>Chloride</b>	0.0277	kg	Lognormal	3.3
<b>Chlorate</b>	0.0625	kg	Lognormal	3.3
<b>Sulfate</b>	0.072	kg	Lognormal	3.3
<b>Sodium hypochlorite, 15% in H<sub>2</sub>O, at plant/RER U</b>				
<b>Resources/ Materials/fuels/ Emissions</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>	<b>Probability distribution</b>	<b>Standard Deviation</b>

<b><u>Materials/fuels</u></b>				
<b>Chemical plant, organics/RER/I U</b>	4E-10	p	Lognormal	1.32
<b>Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE U</b>	0.017	kWh	Lognormal	1.12
<b>Heat, unpecific, in chemical plant/RER U</b>	1.38	MJ	Lognormal	1.24
<b>Sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant/RER U</b>	0.56	kg	Lognormal	1.12
<b>Transport, freight, rail/RER U</b>	1.24	tkm	Lognormal	1.24
<b>Transport, lorry &gt;16t, fleet average/RER U</b>	0.21	tkm	Lognormal	1.24
<b><u>Emissions to air</u></b>				
<b>Heat, waste</b>	0.06	MJ	Lognormal	1.12
<b><u>Emissions to water</u></b>				
<b>Chloride</b>	0.48	kg	Lognormal	1.24
<b>Sand, at mine/CH U</b>				
<b>Resources/ Materials/fuels/ Emissions</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>	<b>Probability distribution</b>	<b>Standard Deviation</b>
<b><u>Resources</u></b>				
<b>Gravel, in ground</b>	1.04	kg	Lognormal	1.14
<b>Occupation, mineral extraction site</b>	0.00288	m <sup>2</sup> a	Lognormal	1.57

<b>Occupation, water bodies, artificial</b>	0.000627	m <sup>2</sup> a	Lognormal	2.05
<b>Transformation, to mineral extraction site</b>	0.000288	m <sup>2</sup>	Lognormal	2.05
<b>Transformation, to water bodies, artificial</b>	6.27E-05	m <sup>2</sup>	Lognormal	1.57
<b>Water, unspecified natural origin/m<sup>3</sup></b>	0.00138	m <sup>3</sup>	Lognormal	1.14
<b>Transformation, from unknown</b>	0.00035	m <sup>2</sup>	Lognormal	2.05
<b><u>Materials/fuels</u></b>				
<b>Building, hall, steel construction/CH/I U</b>	5.03E-07	m <sup>2</sup>	Lognormal	3.1
<b>Conveyor belt, at plant/RER/I U</b>	9.51E-08	m	Lognormal	3.28
<b>Diesel, burned in building machine/GLO U</b>	0.0147	MJ	Lognormal	1.14
<b>Electricity, medium voltage, at grid/CH U</b>	0.00272	kWh	Lognormal	1.14
<b>Heat, light fuel oil, at boiler 10kW, non-modulating/CH U</b>	0.00244	MJ	Lognormal	1.14
<b>Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U</b>	1.12E-05	kg	Lognormal	3.1
<b>Lubricating oil, at plant/RER U</b>	1.85E-06	kg	Lognormal	1.14
<b>Mine, gravel/sand/CH/I U</b>	4.75E-11	p	Lognormal	3.05

<b>Recultivation, limestone mine/CH U</b>	8.48E-05	m <sup>2</sup>	Lognormal	2.11
<b>Steel, low-alloyed, at plant/RER U</b>	0.000013	kg	Lognormal	1.14
<b>Synthetic rubber, at plant/RER U</b>	0.000002	kg	Lognormal	1.14
<b>Tap water, at user/RER U</b>	0.0101	kg	Lognormal	1.14
<b>Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U</b>	8.79E-07	tkm	Lognormal	2.03
<b>Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U</b>	1.72E-05	tkm	Lognormal	2.02
<b>Transport, van &lt;3.5t/CH U</b>	1.55E-05	tkm	Lognormal	2.02
<b><u>Emissions to air</u></b>				
<b>Heat, waste</b>	0.00977	MJ	Lognormal	1.14
<b><u>Waste to treatment</u></b>				
<b>Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration/CH U</b>	2.77E-06	kg	Lognormal	1.14
<b>Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U</b>	1.85E-06	kg	Lognormal	1.14
<b>Oxygen, liquid, at plant/RER U</b>				
<b>Resources/ Materials/fuels/ Emissions</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>	<b>Probability distribution</b>	<b>Standard Deviation</b>

---

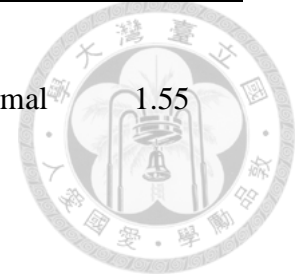
**Resources****Water, cooling,  
unspecified natural  
origin/m<sup>3</sup>**

0.002595

m<sup>3</sup>

Lognormal

1.55

**Materials/fuels****Electricity, medium  
voltage, production  
UCTE, at grid/UCTE  
U**

0.76883

kWh

Lognormal

1.19

**Air separation  
plant/RER/I U**

6.05E-10

p

Lognormal

3.36

**Transport, freight,  
rail/RER U**

0.002595

tkm

Lognormal

1.55

**Emissions to air****Heat, waste**

2.7678

MJ

Lognormal

1.19