

子計畫一：生命週期評估擾動分析應用於包裝材料之生態化設計研究期末報告

子計畫主持人 嘉南藥理科技大學環境工程與科學系李孫榮 教授

協同主持人 嘉南藥理科技大學環境資源管理系 陳意銘副教授 楊英賢副教授

葉仲超助理教授

專任助理 嘉南藥理科技大學綠色產業發展中心 謝宇恩組長

兼任碩士生研究助理: 黃依婷 大學生:林志信

計畫說明：近幾年隨著技術的改進、科技的進步，商品的包裝也越來越受重視。包裝材料為一般都市廢棄物的主要來源，其解決的方向，主要包括回收方式，或增加法規的相關限制，或強化產品導向綠色包裝設計，以減少資源浪費及降低環境衝擊，以邁向永續發展方向。本研究係以包裝材料之生命週期評估為基礎，以 LCA 擾動分析方法，探討相關技術、回收策略、及材料改善，以降低廢棄物問題，並基於源頭減廢及回收的概念，研擬包裝材料生命週期各階段環境問題之改善策略，特別是溫室氣體排放及能源的議題，探討減少環境衝擊影響的可能方向，並進一步提出改善策略與效益分析。

計畫成果摘要

本研究以生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)與不確定分析方法，以台灣地區 24 座垃圾焚化爐為研究個案，分別以一度電及一公噸廢棄物為功能單位，探討台灣地區廢棄物焚化處理階段之環境衝擊，資料年代 2007~2010 年，並焦點於有機性廢棄物紙類與塑膠類為主，探討溫室氣體排放與酸雨潛勢及不確定分析，並以回收率 0%~30%之擾動分析，探討紙類及塑膠類回收率對於廢棄物焚化處理之環境衝擊影響。結果顯示，廢棄物焚化處理之溫室效應不確定分析結果，1 度電之溫室效應平均值為 1.88 kgCO₂-eq./KWh，焚化處理 1 公噸廢棄物之溫室效應平均值為 803 kgCO₂-eq./ton waste；紙類與塑膠類廢棄物焚化處理之溫室效應不確定分析，紙類 1 度電及 1 公噸功能單位之溫室效應不確定分析平均值分別為 2.24 kgCO₂-eq./KWh 與 718 kgCO₂-eq./ton waste；塑膠 1 度電及 1 公噸功能單位之溫室效應不確定分析平均值為 1.71 kgCO₂-eq./KWh 及 1135 kgCO₂-eq./ton waste；當紙類及塑膠類回收率增加 30%，紙類及塑膠類回收在焚化發電之溫室氣體減量效益上不具正面效益；紙類廢棄物回收率增加對於溫室氣體減量無正面效益，而塑膠類廢棄物回收率增加對焚化階段之溫室氣體減量效益亦不明顯。

關鍵詞：生命週期評估、不確定分析、溫室效應、包裝材料、碳足跡、焚化處理

一、前言

台灣地區隨著工商業發達、經濟快速發展與人口的不斷增加，使得垃圾產出量相對成長，造成垃圾處理上的重大負荷。過去政府為了解決各縣市垃圾之迫切問題，對於垃圾處理政策，乃以「焚化為主，



掩埋為輔」。因此，在1992年建立了第一座焚化廠—內湖焚化廠，以便處理都市固體廢棄物。依據環保署2010年統計資料，目前全國正在運作的24座焚化廠，每天可處理的垃圾量約為2萬公噸。但以現今全球資源有限的角度，以焚化處理並不是真正解決都市固體廢棄物的最佳處理方式，透過廢棄物資源回收再利用之模式，並朝向零排放的概念邁進，將廢棄物減少並增加資源利用效率，減少各種環境問題。

近年來，國際間對於環境問題的解決已由過去管末處理導向源頭減量及綠色設計的概念，並強調生命週期思考(Life Cycle Thinking)，對於廢棄物之定義也有不同的詮釋，廢棄物乃是錯置的資源，並強調資源回收的重要性，因此零廢棄與零排放，此類觀點也逐漸應用於現今的廢棄物管理政策。行政院環保署於1997年起實施「資源回收四合一」政策，結合社區民眾、回收商、地方政府與回收基金等四者，全面實施資源回收與垃圾減量之工作(行政院環保署，1997)，現今台灣之廢棄物清理政策以「源頭減量、資源回收」為主要方向，2006年起行政院環保署全國各縣市全面實施「垃圾強制分類」政策(行政院環保署，2006)，到了2008年環保署提出2020年達到「垃圾零廢棄」之目標，強調源頭減量與資源回收，並促進民間參與，配合垃圾區域聯合清理、垃圾收費與焚化灰渣資源化等(行政院環保署，2008)。

以生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)作為廢棄物管理之應用工具，在國際已為相當重要之課題，由於廢棄物大部分都具有資源回收再生利用之價值，相關研究包含廢棄物回收對環境衝擊影響等研究，如Laurijssen等人(2010)以生命週期方法探討紙類回收對CO₂排放之影響；Lazarevic等人(2010)以LCA方法探討塑料廢棄物回收、焚化和掩埋等不同廢棄物處理方式，探討何種處理方式對環境衝擊為最佳；Merrild等人(2008)以LCA方法探討廢紙管理，並針對全球暖化議題，比較回收與焚化處理方式之環境衝擊；回收合併其他廢棄物處理方式或比較之相關研究有Valerio等人(2010)以LCA方式評估並比較焚化與回收對於機械生物處理(Mechanical Biological Treatments, MBT)何者對環境衝擊上是較有利的；Shen等人(2010)以LCA方法探討開環式回收法對PET寶特瓶進行回收，並以機械式和半機械式回收法來比較何種處理方法對溫室氣體減量效果較佳；Salem等人(2009)以LCA方法比較焚化、回收與厭氧消化三種方法探討何者對於環境衝擊為最小。經由以上文獻之分析討論，不論是回收或回收合併其他廢棄物處理方式探討廢棄處理之環境衝擊，均以回收為對環境衝擊最小之廢棄物處理方式。

執行生命週期評估過程需要大量的盤查資料，然而，由於盤查資料取得困難、盤查資料缺少、資料本身的不確定性、技術的不確定、模式的不確定及資料庫引用過程，資料年代及盤查區域等不確定因素，將影響整個生命週期評估結果，在生命週期評估對於環境衝擊之不確定分析相關文獻包含Lo等人(2005)將蒙地卡羅方法對於一般廢棄物處理來探討生命週期評估之不確定分析，運用貝氏定理結合蒙地卡羅方法比較掩埋與焚化兩種不同廢棄物處理方案之溫室氣體排放推估；Scipioni等人(2009)利用蒙地卡羅分析來探討義大利垃圾焚化處理對於人類健康損害、生態系統和資源消耗之環境影響；李明燕(2002)利用蒙地卡羅和敏感度分析方法探討台灣九座垃圾焚化廠所排放之戴奧辛風險；盧凱駿(2005)利用蒙地卡羅方法來探討亂數取樣來模擬解決數學解析問題。經由上述討論，顯示利用蒙地卡羅方法來探討環境衝擊，可以增加資料之完整性，並增加模擬結果之價值。因此，基於源頭減廢的概念，本研究探討廢棄物焚化處理之環境衝擊分析，並進一步探討紙類與塑膠類廢棄物回收率擾動對於溫室氣體排放之影響及不確定分析。

二、研究方法

2.1 生命週期評估

生命週期評估方法主要依據國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO)之評估作



業流程：(1)生命週期原理及架構(Principle and Framework)，(2)生命週期目標與範疇界定(Goal and Scope Definition)，(3)生命週期評估，包括資料歸類(Classification)、特徵化(Characterization)、標準化(Normalization)及權重(Weighting)等各個階段之環境衝擊分析與(4)生命週期評估闡釋，以上生命週期評估原理與架構作為本文研究方法之基礎，分析廢棄物焚化處理之生命週期評估。

2.2 不確定分析

蒙地卡羅(Monte Carlo Simulation)為估計生命週期不確定分析方法之一，蒙地卡羅主要是建立於隨機過程獨立變數(Independent Random Variables)的產生，並根據模式之機率密度函數，進行統計估算排放清單之平均值與變異數，而蒙地卡羅之隨機方法主要包含原始蒙地卡羅(Crude Monte Carlo)(Hammersleys et al., 1992)、分層抽樣(Stratified Sampling)、權重抽樣(Importance Sampling; Weighting Sampling)及條件蒙地卡羅(Conditional Monte Carlo)等(Helton and Davis, 2003; 楊英賢，2008)。

2.3 擾動分析

擾動分析是一種鑑別敏感度參數的方法，在生命週期評估的應用方面，包含 Heijungs 等人(1992)提出應用於邊際分析(Marginal Analysis)的方法發展成為擾動分析，其方法之基本原理，主要架構於生命週期評估過程，各參數的變動率與環境衝擊變動率之相關關聯比值，可以引用乘數的概念(即為擾動係數)，藉由乘數的大小來區別參數所表現的敏感度(Heijungs, 2005)。

2.4 個案背景說明

本研究目的旨在探討廢棄物焚化處理之生命週期評估之不確定性及回收率 0%~30%情境模擬之擾動分析。研究個案選定台灣地區 24 座焚化廠，其研究個案之生命週期系統範疇如圖 1 所示，包含廢棄物清運階段、廢棄物焚化階段、焚化發電階段。本文以生命週期評估方法探討廢棄物焚化處理之環境衝擊部分主要為溫室效應與酸雨效應，並分別以一公噸廢棄物與一度電作為功能單位(Function Unit, UF)，作為相關情境模擬的比較單位。

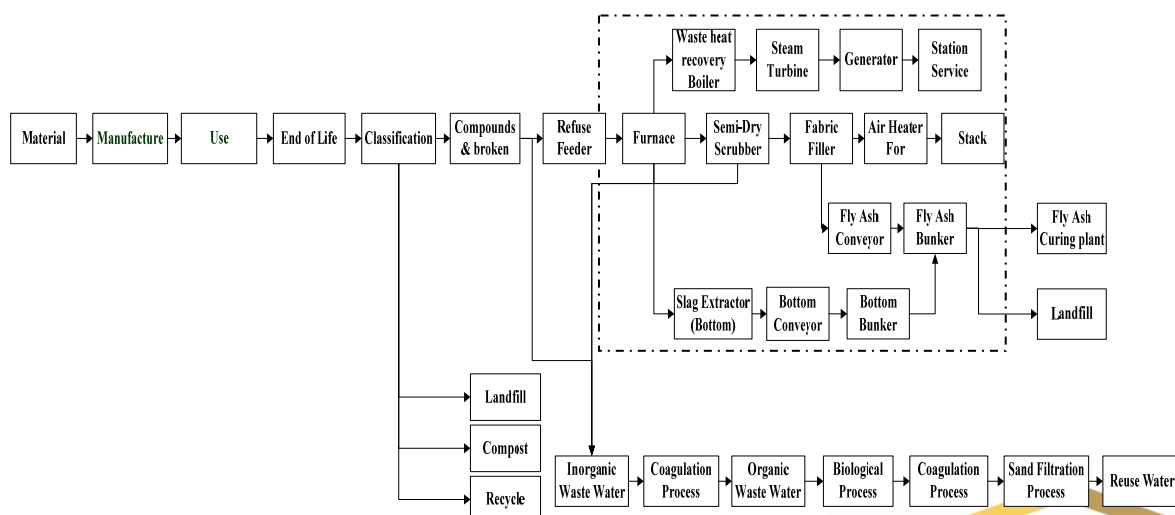


圖 1 台灣地區焚化處理生命週期系統範疇

2.5 資料來源與處理

本研究個案之資料來源，以 2007~2010 年台灣地區一般廢棄物焚化處理為對象，以 24 座焚化處理廠之操作營運資料作為個案之 LCA 分析資料庫，而焚化處理廠之生命週期評估所需清單包含能源、環境衝



擊參數等清單，其相關清單主要來自行政院環保署和各縣市環保局，其中包含各年度焚化處理廠之營運資料、年度空氣污染之排放量及年度廢棄物焚化處理量等，資料蒐集年代為 2007~2010 年，環境排放清單來自於各縣市焚化廠及環保署各焚化處理廠之統計年報；環境衝擊相關方面參數則參考 SimaPro 7.0 之相關環境衝擊因數與環境衝擊評價方法，以及 IPCC 公布之相關環境衝擊評估係數。

本研究對於廢棄物焚化處理階段之溫室氣體排放計算，包含二氧化碳、甲烷及氧化亞氮，其計算方法主要根據 IPCC 之方法(2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5, 2007)進行溫室氣體排放量推估，其中 CO₂ 排放量推估之含碳比例，引用各焚化廠垃圾性質分析之含碳量，焚化階段之固定碳比例假設為 5%，接著根據質量平衡法推估二氧化碳排放量，其計算公式如下：

$$\text{CO}_2 \text{ 排放量(公噸)} = \text{垃圾焚化量(公噸)} \times \text{垃圾含碳比例(\%)} \times \text{燃燒程度(95\%)} \times \text{CO}_2 \text{ 重量轉換係(44/12)} \quad (1)$$

另外，CH₄ 及 N₂O 之溫室氣體排放推估計算公式說明如下：

$$\text{CH}_4 \text{ 排放量(公噸)} = (\text{垃圾焚化量(公噸)} \times \text{排放係數(g/ton)}) \times 10^{-6} \text{(g to ton)} \quad (2)$$

N₂O 排放量之推估公式和 CH₄ 相同，兩者主要差異為其排放係數值，依據 IPCC 之推估原理，台灣地區一般廢棄物焚化處理廠均屬於連續性機械式焚化爐床，因此選定 CH₄ 之排放係數為 0.2g/ton、N₂O 為 50g/ton，如表 1 和表 2，再依據 IPCC 之方法(Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007)之溫室效應潛勢(Global warming potential, GWP)換算為 CO₂ 當量。

表 1 焚化爐操作特性及甲烷排放係數

Type of incineration/technology		CH ₄ Emission Factor (kg/Gg waste incinerated on a wet weight basis)
Continuous incineration	Stoker	0.2
	fluidized bed	~0
Semi-continuous incineration	Stoker	6
	fluidized bed	188
Batch type incineration	Stoker	60
	fluidized bed	237

資料來源：IPCC, Volume 5, 2006

表 2 焚化爐化爐操作特性及氧化亞氮排放係數

Type of waste	Technology/Management practice	Emission factor (g N ₂ O/ton waste)	weight basis
MSW	continuous and semi-continuous incineration	50	wet basis
MSW	batch-type incineration	60	wet basis
MSW	open burning	150	dry basis
Industrial waste	all types of incineration	100	wet basis
Sludge(except sewage sludge)	all types of incineration	450	wet basis
Sewage sludge	incineration	990	dry basis
		900	wet basis

資料來源：IPCC, Volume 5, 2006

三、結果與討論

3.1 台灣地區廢棄物焚化處理生命週期評估



3.1.1. 台灣地區焚化廠現況分析

台灣地區 2007~2010 年廢棄物物理組成如表 3 所示，其中台灣地區之平均濕基低位發熱值為 2,009 Kcal/kg；平均濕基高位發熱值為 2,520 Kcal/kg，而廢棄物物理組成中以紙類、廚餘及塑膠所占比例為前三大，其平均分別為紙類 30.42%、廚餘 30.73%及塑膠 13.24%，由此顯示紙類、廚餘及塑膠所佔組成較高之原因，可能來自包裝材料或飲食殘留物。

表 3 台灣地區焚化廠廢氣物特性分析(2007~2010)

Characteristics and composition	Average content
Year	2007~2010
Moisture (%)	40.87
Combustibles (%)	38.05
High heating value (kcal/kg)	2520
Low heating value (kcal/kg)	2009
Components (%)	
Paper	30.42
Food waste	30.73
Plastics	13.24
Glass	1.06
Metals	0.34
Cloth	2.60
Rubber/leather	0.48
Others	1.22

3.2 廢棄物焚化處理生命週期評估

台灣地區廢棄物焚化處理之生命週期評估特徵化結果如圖 2 所示，以 1 度電為功能單位表示，在溫室氣體、酸雨效應、重金屬、致癌性及固體廢棄物五項衝擊評估項目中，以溫室效應衝擊為每度電之溫室效應當量為 1.88kg CO₂-eq./KWh(1.64~2.11 CO₂-eq./KWh)、其他環境衝擊項目分別為酸雨效應 2.47E-03 kgSO₂-eq./KWh(2.22E-03~2.73E-03kgSO₂-eq./KWh)、重金屬 7.99E-06 kgPb-eq./KWh(4.77 E-06~1.12E-05 kgPb-eq./KWh)、致癌性 1.09E-07 kgB(a)P-eq./KWh(3.42E-08~1.84E-07kgB(a)P-eq./KWh)及固體廢棄物衝擊 5.99E-04kg/KWh(0~1.23 E-03kg/KWh)。

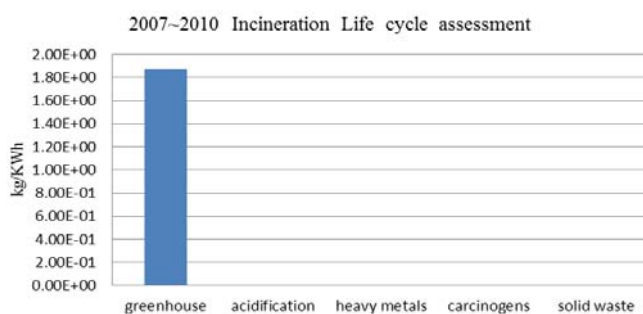


圖 2 台灣地區廢棄物焚化處理每度電之 LCA 特徵化結果(2007~2010 年)

以每 1 公噸廢棄物為功能單位之廢棄物焚化處理生命週期評估特徵化結果如圖 3 所示，溫室效應衝擊為 781 kg CO₂-eq./ton waste(642~919 kg CO₂-eq./ton waste)，其他環境衝擊項目分別為酸雨效應 1.07 kgSO₂-eq./ton waste(0.90~1.23 kgSO₂-eq./ton waste)、重金屬 3.38E-03 kgPb-eq./ton waste(2.59E-03~4.17E-03



kgPb-eq./ton waste)、致癌性 1.27 E-04 kgB(a)P-eq./ton waste(0~2.62E-04 kgB(a)P-eq./ton waste)，及固體廢棄物衝擊 0.08kg/ton waste(0.04~0.12 kg/ton waste)。

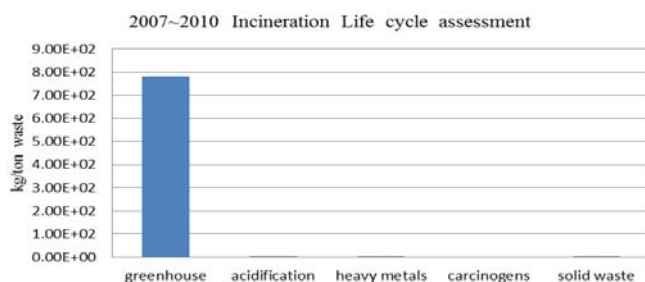


圖 3 台灣地區廢棄物焚化處理每公噸廢棄物之 LCA 特徵化結果(2007~2010 年)

本研究之生命週期評估之標準化引用 Eco-indicator 95 之標準化係數，而台灣地區廢棄物焚化處理生命週期評估之標準化結果如圖 4 所示，經由標準化之後，以 1 度電為功能單位之廢棄物焚化發電環境衝擊，以重金屬 1.42E-04 Pt(無因次)為最大，溫室效應潛勢 1.39E-04 Pt 次之，其他依序為酸雨潛勢 2.19E-05 Pt、致癌性 1.16E-05 Pt 及固體廢棄物 0 Pt。

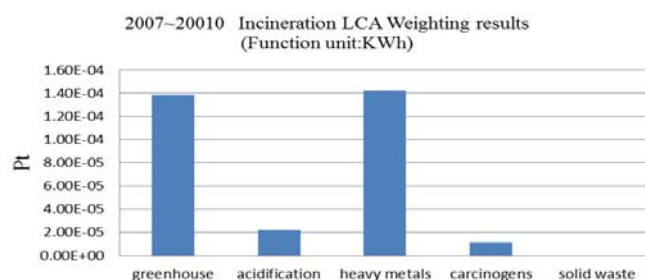


圖 4 台灣地區廢棄物焚化處理 LCA 標準化結果(2007~2010 年)

若以 1 公噸廢棄物為功能單位進行各項環境衝擊之比較(如圖 5)，仍以重金屬 0.060Pt 為最大，溫室效應潛勢 0.058 Pt 次之，其他環境衝擊項目依序為致癌性 0.010 Pt、酸雨潛勢 0.010 Pt 及固體廢棄物 0 Pt，顯示台灣地區廢棄物焚化處理造成之環境衝擊以重金屬及溫室效應為主，而造成特徵化與標準化在各項環境衝擊指數之差異原因，主要是受到標準化係數之影響，例如溫室效應之特徵化主要為 100 年之溫室效應風險評估，而標準化則是乘上標準化因子，將其轉換為每人每年所引起之溫室效應潛勢值，故而造成兩者數值之差異。

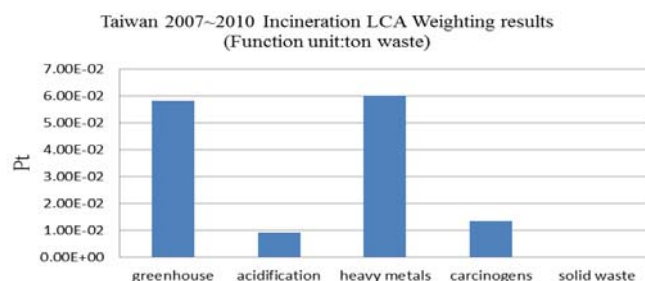


圖 5 台灣地區廢棄物焚化處理 LCA 標準化結果(2007~2010 年)

台灣地區廢棄物焚化處理之生命週期評估權重之結果，以 1 度電為功能單位權重之結果如圖 6 所示，



同樣採用 Eco-indicator 95 評價方法權重之係數，經由權重後之環境衝擊評估結果，各項環境衝擊以重金屬 7.11E-04 Pt 為最大、溫室效應為 3.47E-04 Pt 次之，其他環境衝擊項目依序為酸雨潛勢 2.19E-04 Pt、致癌性 1.16E-04 Pt 與固體廢棄物 0 Pt。

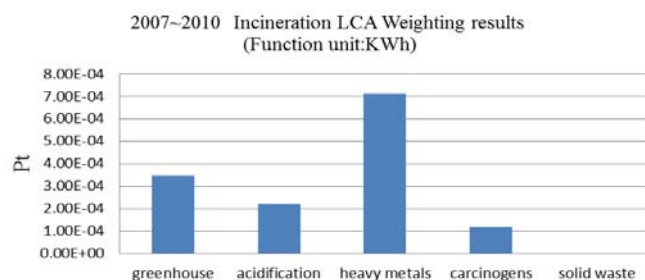


圖 6 台灣地區廢棄物焚化處理 LCA 權重結果(2007~2010 年)

當以焚化處理 1 公噸廢棄物為功能單位，台灣地區廢棄物焚化處理之生命週期評估權重結果如圖 7 所示，經由乘上權重指數過後，各項環境衝擊項目依序為重金屬 0.30 Pt 為最大、溫室效應 0.14 Pt 次之、致癌性衝擊 0.13 Pt、酸雨潛勢 0.09 Pt 與固體廢棄物 0 Pt。

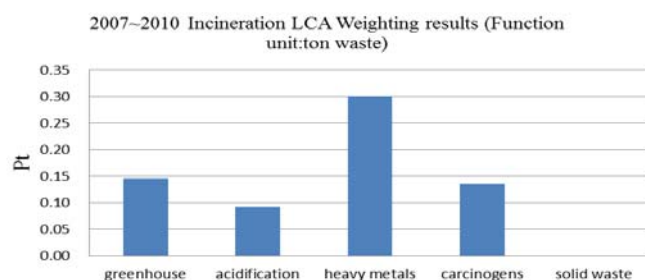


圖 7 台灣地區廢棄物焚化處理 LCA 權重結果(2007~2010 年)

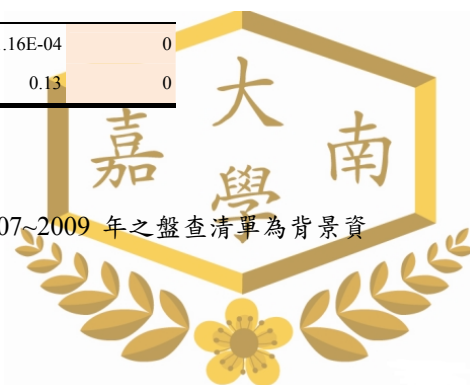
台灣地區廢棄物焚化處理之生命週期評估，經由特徵化、標準化與權重，分別以焚化發電 1 度電及焚化處理 1 公噸廢棄物為功能單位之評估結果整理如表 4。

表 4 台灣地區廢棄物焚化處理之生命週期評估

Category	Unit	greenhouse	acidification	heavy metals	carcinogens	solid waste
Characterization						
KWh	Kg	1.88	2.47E-03	7.99E-06	1.09E-07	5.99E-04
Ton waste	Kg	781	1.07	3.38E-03	1.27E-04	0.08
Normalization						
KWh	Pt	1.39E-04	2.19E-05	1.42E-04	1.16E-05	0
Ton waste	Pt	0.058	0.01	0.060	0.01	0
Weighting						
KWh	Pt	3.47E-04	2.19E-04	7.11E-04	1.16E-04	0
Ton waste	Pt	0.14	0.09	0.30	0.13	0

3.3 各類廢棄物之溫室氣體探討

紙類廢棄物焚化處理之溫室氣體排放，本研究以台灣地區焚化廠 2007~2009 年之盤查清單為背景資



料，探討廢棄物中紙類在台灣地區焚化處理之溫室效應，其功能單位分別為焚化發電 1 度電及焚化處理 1 公噸紙類，其相關研究結果如下：

3.3.1. 紙類廢棄物焚化處理之溫室效應探討

在各年度溫室氣體排放方面，本研究以 IPCC 方法為推估原理，並參考台灣地區紙類廢棄物之物理組成，紙類物理組成比例平均值為 39.61%，此外，紙類平均含碳量為 22.86%，紙類之生物碳所佔比為 100%。台灣地區紙類廢棄物焚化處理之溫室效應，以 1 度電為功能單位之紙類焚化處理之溫室氣體排放係數，如圖 8 所示，2007 年之溫室效應約為 1.16~4.39 kgCO₂-eq./KWh，而各焚化處理廠溫室氣體排放以台北市-內湖廠 4.39 kgCO₂-eq./KWh 為最高，其次為台北市-木柵廠 3.27 kgCO₂-eq./KWh，以嘉義縣-鹿草廠 1.16 kgCO₂-eq./KWh 為最低；2008 年之溫室效應則為 1.49~4.76 kgCO₂-eq./KWh，而各焚化處理廠溫室氣體排放係數以台北市-內湖廠 4.96 kgCO₂-eq./KWh 為最高，其次為台北市-木柵廠 3.96 kgCO₂-eq./KWh，最低者為基隆市廠 1.49 kgCO₂-eq./KWh；2009 年紙類廢棄物焚化處理之溫室氣體排放為 1.20~4.96 kgCO₂-eq./KWh，各焚化廠同樣以台北市-內湖廠 4.96 kgCO₂-eq./KWh 為最高，嘉義市廠 4.04 kgCO₂-eq./KWh 其次，以新北市-八里廠 1.20 kgCO₂-eq./KWh 為最低。

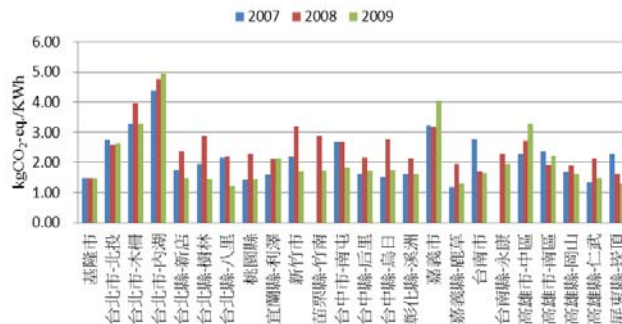


圖 8 台灣地區 2007~2009 年焚化廠之紙類溫室氣體排放(以 1 度電為功能單位)

台灣地區焚化廠焚化處理 1 公噸廢棄物之排放量，如圖 9 所示，2007 年焚化處理每 1 公噸紙類廢棄物之溫室氣體排放量為 587~803 kgCO₂-eq./ton waste，而各焚化處理廠紙類溫室氣體排放量以屏東縣-崁頂廠 803 kgCO₂-eq./ton waste 為最高，其次為台北市-內湖廠 791 kgCO₂-eq./ton waste，以嘉義市廠 587 kgCO₂-eq./ton waste 為最低；2008 年之溫室效應則為 657~851 kgCO₂-eq./ton waste，而各焚化處理廠溫室氣體排放最高為高雄市-中區廠 851 kgCO₂-eq./ton waste，其次為台北市-內湖廠 845 kgCO₂-eq./ton waste，以嘉義縣-鹿草廠之溫室氣體排放 657 kgCO₂-eq./ton waste 最低；2009 年之溫室效應約為 610~865 kgCO₂-eq./ton waste，各焚化處理廠溫室氣體排放部分，以台北市-內湖廠 865 kgCO₂-eq./ton waste 最高，其次為高雄市-南區廠 784 kgCO₂-eq./ton waste，以新北市-新店廠 610 kgCO₂-eq./ton waste 為最低。

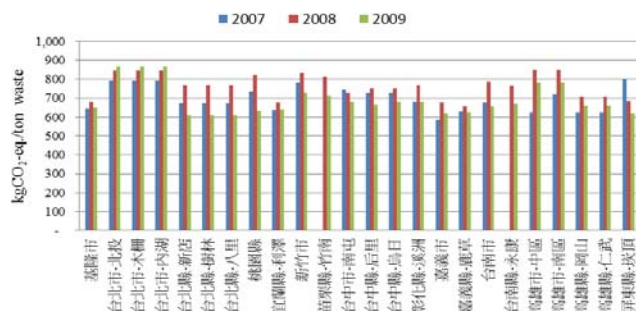


圖 9 台灣地區 2007~2009 年焚化廠之紙類溫室氣體排放(以 1 公噸紙類廢棄物為功能單位)

3.3.2. 塑膠類廢棄物焚化處理之溫室效應探討

至於塑膠類廢棄物焚化處理之溫室效應方面，以台灣地區 2007~2009 年廢棄物資料為基礎，塑膠類廢棄物之物理組成平均值約為 17.50%，平均含碳量為 44.88%，分別以焚化發電 1 度電及焚化處理 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位進行溫室效應之探討。

以 1 度電為功能單位之塑膠類焚化處理之溫室效應部分如圖 10 所示，2007 年之溫室氣體排放約為 0.86~3.24 kgCO₂-eq./KWh，各焚化處理廠中以台北市-內湖廠溫室氣體排放 3.24 kgCO₂-eq./KWh 為最高，台北市-木柵廠 3.14 kgCO₂-eq./KWh 其次，以宜蘭縣-利澤廠 0.86 kgCO₂-eq./KWh 最低；2008 年之溫室氣體排放為 0.96~3.60 kgCO₂-eq./KWh，各焚化處理廠部分以台北市-內湖廠 3.60 kgCO₂-eq./KWh 為最高，其次為台北市-木柵廠 3.16 kgCO₂-eq./KWh，高雄市-仁武廠 0.96 kgCO₂-eq./KWh 為最低；2009 年之溫室效應則為 0.68~3.86 kgCO₂-eq./KWh，各焚化處理廠中以台北市-內湖廠 3.86 kgCO₂-eq./KWh 為最高，其次為台北市-木柵廠 3.03 kgCO₂-eq./KWh，以新北市-八里廠 0.68 kgCO₂-eq./KWh 為最低。

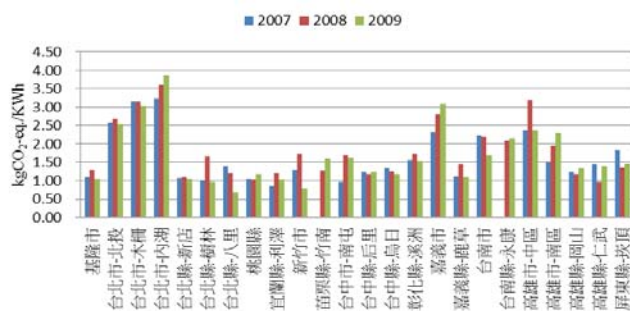


圖 10 台灣地區 2007~2009 年焚化廠之塑膠類溫室氣體排放(以 1 度電為功能單位)

至於以焚化處理 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位，其結果如圖 11 所示，2007 年之溫室氣體排放約為 943~1292 kgCO₂-eq./ton waste，各焚化處理廠中以屏東縣-崁頂廠 1292 kgCO₂-eq./ton waste 為最高，其次為台北市-內湖廠 1274 kgCO₂-eq./ton waste，最低為嘉義市廠其溫室氣體排放為 943 kgCO₂-eq./ton waste；2008 年之溫室氣體排放則為 1008~1307 kgCO₂-eq./ton waste，各焚化處理廠部分以高雄市-南區廠 1307 kgCO₂-eq./ton waste 為最高，其次為台北市-內湖廠 1298 kgCO₂-eq./ton waste，最低為嘉義縣-鹿草廠其溫室氣體排放為 1008 kgCO₂-eq./ton waste；2009 年之溫室氣體排放為 983~1399 kgCO₂-eq./ton waste，各焚化處理廠中以台北市-內湖廠之溫室氣體排放 1399 kgCO₂-eq./ton waste 為最高，其次為高雄市-南區廠 1267 kgCO₂-eq./ton waste，以新北市-八里廠 983 kgCO₂-eq./ton waste 為最低。



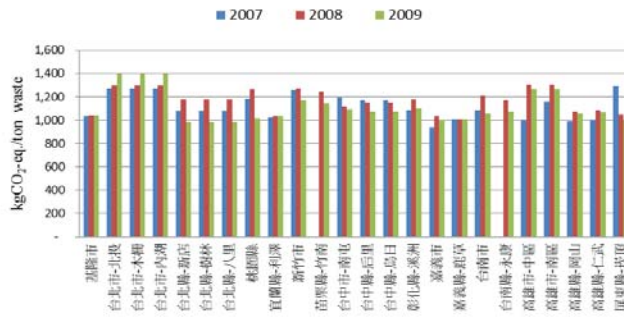


圖 11 台灣地區 2007~2009 年焚化廠之塑膠溫室氣體排放(以 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位)

3.4 各類廢棄物之酸雨效應探討

3.4.1. 紙類廢棄物焚化處理之酸雨效應探討

對於紙類廢棄物焚化處理之酸雨效應探討部分，本研究以台灣地區 2007~2009 年之廢棄物資料為基礎，分別以焚化發電 1 度電及焚化處理 1 公噸紙類廢棄物為功能單位，針對焚化處理廠之酸雨效應進行探討。

以 1 度電為功能單位之紙類焚化處理酸雨效應之排放係數如圖 12 所示，2007 年之酸雨效應約為 $1.30E-03 \sim 7.17E-03$ kgSO₂-eq./KWh，各焚化處理廠酸雨效應以高雄市-中區廠 $7.17E-03$ kgSO₂-eq./KWh 最高，台北市-內湖廠 $5.28E-03$ kgSO₂-eq./KWh 次之，以台中市-烏日廠 $1.30E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最低；2008 年之酸雨效應則在 $1.24E-03 \sim 4.88E-03$ kgSO₂-eq./KWh 之間，而各焚化處理廠酸雨效應以台北市-內湖廠 $4.88E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最高，其次為新竹廠 $3.88E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為其次，以台南市廠其酸雨效應 $1.24E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最低；2009 年之酸雨效應則為 $1.24E-03 \sim 4.58E-03$ kgSO₂-eq./KWh，而各焚化處理廠酸雨效應以台北市-內湖廠 $5.48E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最高，嘉義市廠 $4.32E-03$ kgSO₂-eq./KWh 其次，以彰化縣-溪州廠 $1.24E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最低；影響各焚化處理廠酸雨效應之主要原因與各廠之脫硫設備效率有相當的關係。

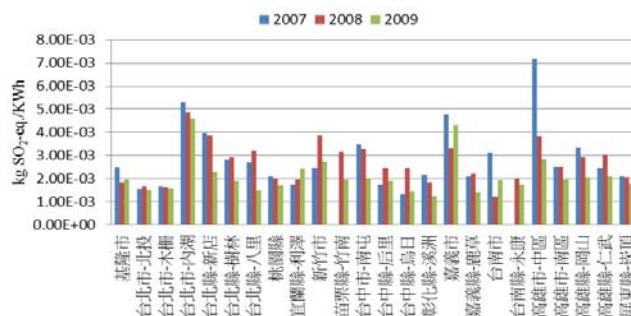


圖 12 台灣地區 2007~2009 年焚化廠之紙類酸雨效應排放量(以 1 度電為功能單位)

以 1 公噸紙類廢棄物為功能單位之酸雨效應排放量，如圖 13 所示，2007 年之酸雨效應約為 $4.00E-04 \sim 1.53E-03$ kgSO₂-eq./ton waste，各焚化處理廠部分，以新北市-新店廠 $1.53E-03$ kgSO₂-eq./ton waste



為最高，高雄市-中區廠 $1.51E-03$ kgSO₂-eq./ton waste 次之，以基隆市廠 $4.00E-04$ kgSO₂-eq./ton waste 為最低；2008 年之酸雨效應為 $3.31E-04$ ~ $1.25E-03$ kgSO₂-eq./ ton waste，在各個焚化處理廠部分，以新北市-新店廠 $1.25E-03$ kgSO₂-eq./ ton waste 為最高，高雄市-中區廠 $1.13E-03$ kgSO₂-eq./ ton waste 次之，以基隆市廠 $3.31E-04$ kgSO₂-eq./ ton waste 為最低；2009 年之酸雨效應為 $3.74E-04$ ~ $1.18E-03$ kgSO₂-eq./ ton waste，各焚化處理廠酸雨效應部分，以新竹市廠 $1.18E-03$ kgSO₂-eq./ ton waste 為最高，新北市-新店廠 $9.41E-03$ kgSO₂-eq./ ton waste 此之，以基隆市廠 $3.74E-04$ kgSO₂-eq./ ton waste 為最低。

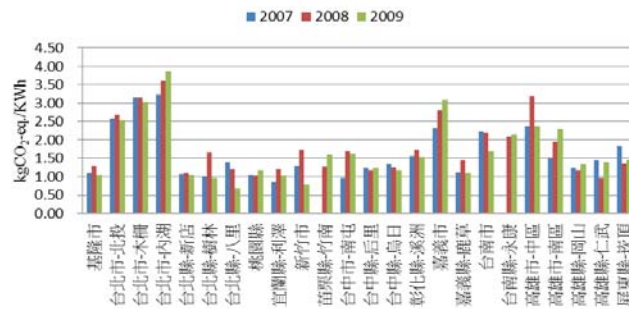


圖 13 台灣地區 2007~2009 年焚化廠之紙類酸雨效應排放量(以 1 公噸紙類廢棄物為功能單位)

3.4.2. 塑膠類廢棄物焚化處理之酸雨效應探討

塑膠類廢棄物焚化處理之酸雨效應部分，同樣以焚化發電 1 度電與焚化處理 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位，以 1 度電為功能單位之塑膠類焚化處理酸雨效應結果如圖 14 所示，2007 年之酸雨效應約為 $1.29E-03$ ~ $8.04E-03$ kgSO₂-eq./KWh，而各焚化處理廠部分以高雄市-中區廠 $8.04E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最高，台北市-內湖廠 $4.98E-03$ kgSO₂-eq./KWh 其次，台北市-北投廠 $1.29E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最低；2008 年之酸雨效應約為 $9.96E-04$ ~ $4.65E-03$ kgSO₂-eq./KWh，而各焚化廠中以高雄市-中區廠 $4.65E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最高，台北市-內湖廠 $3.91E-03$ kgSO₂-eq./KWh 其次，以台北市-木柵廠 $9.96E-04$ kgSO₂-eq./KWh 為最低；2009 年之酸雨效應則為 $1.05E-03$ ~ $4.01E-03$ kgSO₂-eq./KWh，各焚化處理廠方面以嘉義市廠 $4.01E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最高，台北市-內湖廠 $3.87E-03$ kgSO₂-eq./KWh 其次，新北市-八里廠 $1.05E-03$ kgSO₂-eq./KWh 為最低。

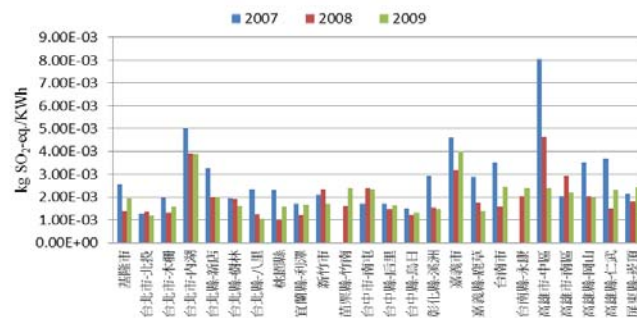
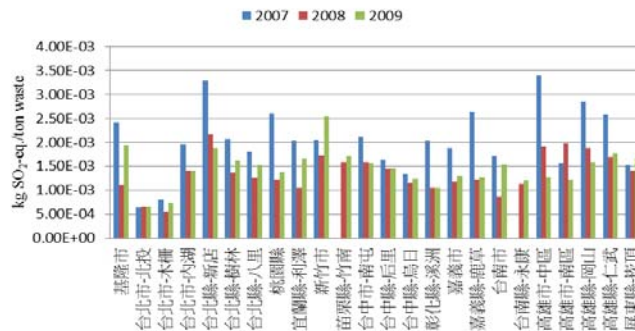


圖 14 台灣地區 2007~2009 年焚化廠之塑膠類酸雨效應排放量(以 1 度電為功能單位)



以焚化處理 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位之酸雨效應結果圖如 15 所示，2007 年之酸雨效應約為 $6.38E-04 \sim 3.41E-03$ kgSO₂-eq./ton waste，各焚化處理廠方面以高雄市-中區廠 $3.41E-03$ kgSO₂-eq./ton waste 為最高，其次為新北市-新店廠 $3.29E-03$ kgSO₂-eq./ton waste，以台北市-北投廠 $6.38E-04$ kgSO₂-eq./ton waste 為最低；2008 年之酸雨效應則為 $5.47E-04 \sim 2.17E-03$ kgSO₂-eq./ton waste，各焚化處理廠中以新北市-新店廠 $2.17E-03$ kgSO₂-eq./ton waste，高雄市-南區廠 $1.98E-03$ kgSO₂-eq./ton waste 其次，以台北市-木柵廠 $5.47E-04$ kgSO₂-eq./ton waste 為最低；2009 年之酸雨效應則為 $6.54E-04 \sim 2.55E-03$ kgSO₂-eq./ton waste，而各焚化處理廠方面以新竹市廠 $2.55E-03$ kgSO₂-eq./ton waste 為最高，其次為基隆市廠 $1.95E-03$ kgSO₂-eq./ton waste，以台北市-北投廠 $6.54E-04$ kgSO₂-eq./ton waste 為最低。

圖 15 台灣地區 2007~2009 年焚化廠之塑膠類酸雨效應(以 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位)



3.5 焚化處理生命週期評估與不確定分析

台灣地區焚化處理廠環境衝擊之不確定分析，本研究主要以蒙地卡羅模擬進行溫室效應與酸雨效應之不確定分析，將台灣各焚化處理廠之排放係數與年度所建立的資料庫，進行機率密度函數適合度檢定，再經假設機率密度函數、平均值及標準偏差等參數，並設定推估模擬次數為 20,000 次，以進行相關環境衝擊預估與不確定分析。

3.5.1. 一般廢棄物之溫室效應不確定分析

針對台灣地區焚化廠之溫室氣體排放係數進行不確定分析，並針對不同功能單位(分別為焚化發電 1 度電及焚化處理 1 公噸廢棄物)，焚化廠共計有 24 廠，資料統計年度為 2007~2009 年共計有 70 筆(因 2007 年竹南廠與永康廠尚未設廠，因此 2007 年度資料只有 22 筆)。以 1 度電及 1 公噸廢棄物為功能單位之溫室氣體盤查機率密度函數適合度檢定分別為表 5 及表 6，結果顯示焚化爐之溫室氣體盤查之機率密度函數皆非為常態分配。

表 5 焚化處理溫室氣體盤查之機率密度函數適合度檢定
(以 1 度電為功能單位)

Unit	CO ₂ kg/KWh	CH ₄ kg/KWh	N ₂ O kg/KWh	Critical
P.D.F	Lognormal	Lognormal	Lognormal	
A-D	0.59	0.55	0.50	1.5
Chi-Square	9.14	8.29	8.29	90
K-S	0.11	0.08	0.08	<0.224
Average	1.84	4.63E-07	1.16E-04	-



表 6 焚化處理溫室氣體盤查之機率密度函數適合度檢定

(以 1 公噸廢棄物為功能單位)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Unit	kg/ton waste	kg/ton waste	kg/ton waste
P.D.F	Beta	Exponential	Exponential
A-D	0.23	32.11	32.11
Chi-Square	4.29	630	630
K-S	0.06	0.63	0.63
Average	789	2.00E-04	5.00E-02
S.D	93	2.00E-04	5.00E-02

在溫室效應方面，根據 2007~2009 年資料進行蒙地卡羅模擬之結果如圖 16 所示，以 1 度電為功能單位之不確定分析，經由蒙地卡羅模擬，預估之溫室效應不確定分析平均值為 1.88 kgCO₂-eq./KWh，其 95% 信賴區間為 1.16~3.87 kgCO₂-eq./KWh(見表 7)，以 1 公噸廢棄物為功能單位之溫室效應不確定模擬，其平均值為 803 kgCO₂-eq./ton waste，95%信賴區間為 647~1008 kgCO₂-eq./ton waste。

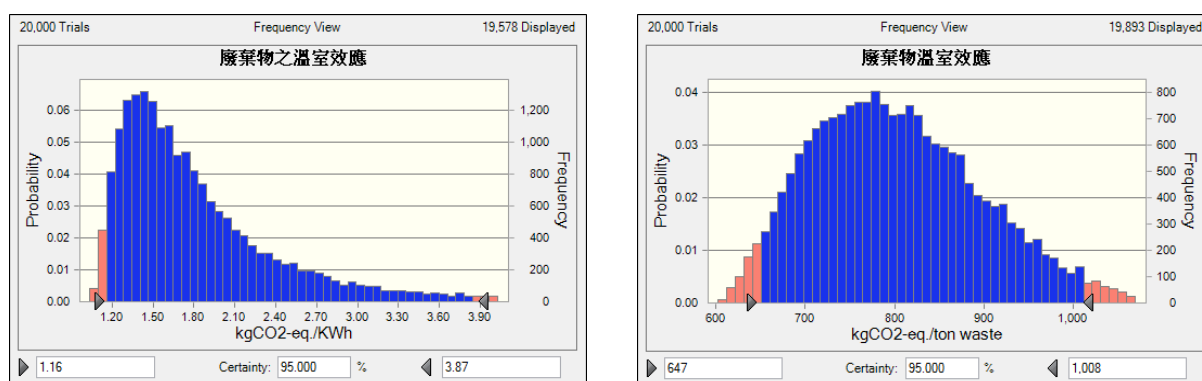


圖 16 台灣地區 2007~2009 年焚化廠溫室氣體排放之不確定分析

表 7 廢棄物焚化處理溫室氣體排放之不確定分析

Scenarios	Unit	Uncertainty simulation results			S.D	C.V
		5%	mean	95%		
Functional unit	kgCO ₂ -eq./KWh	1.16	1.88	3.87	0.77	0.41
Functional unit	kgCO ₂ -eq./ton waste	647	803	1008	95	0.12

3.5.2. 紙類廢棄物溫室效益不確定分析

紙類廢棄物以蒙地卡羅模擬溫室氣體盤查之機率密度函數及相關適合度檢定，以 1 度電及 1 公噸紙類廢棄物為功能單位之適合度檢定分別如表 8 及表 9 所示，其中以 1 度電為功能單位之機率密度函數適合度檢定部分，CO₂ 之平均值為 2.19 kg/KWh、CH₄ 為 6.18E-07 kg/KWh 與 N₂O 為 1.55E-04 kg/KWh；以 1 公噸廢棄物為功能單位之機率函數適合度檢定 CO₂ 平均值為 703 kg/ton waste、CH₄ 為 2.00E-04 kg/ton waste 與 N₂O 為 5.00E-02 Kg/ton waste。

表 8 紙類廢棄物溫室氣體盤查之機率密度函數適合度檢定



(以 1 度電為功能單位)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Unit	kg/KWh	kg/KWh	kg/KWh
P.D.F	Gamma	Lognormal	Lognormal
A-D	0.23	0.12	0.12
Chi-Square	1.43	1.43	1.43
K-S	0.06	0.04	0.04
Average	2.19	6.18E-07	1.55E-04
S.D	0.83	2.16E-07	5.40E-05

表 9 紙類廢棄物溫室氣體盤查之機率密度函數適合度檢定

(以 1 公噸紙類廢棄物為功能單位)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Unit	kg/ton waste	kg/ton waste	kg/ton waste
P.D.F	Beta	Exponential	Exponential
A-D	0.73	32.11	32.11
Chi-Square	11.14	630.00	630.00
K-S	0.08	0.63	0.63
Average	703.00	2.00E-04	5.00E-02
S.D	78.00	2.00E-04	5.00E-02

至於焚化處理紙類廢棄物產生 1 度電之溫室氣體排放平均為 2.24 kgCO₂-eq./KWh(表 10)，其 95%信賴區間為 1.25~4.38 kgCO₂-eq./KWh；焚化處理 1 公噸紙類廢棄物為功能單位之不確定分析結果如圖 17 所示，焚化 1 公噸紙類廢棄物會產生 718 kgCO₂-eq./ton waste，95 信賴區間為 603~869 kgCO₂-eq./ton waste。

表 10 紙類廢棄物焚化處理溫室氣體排放不確定分析

Scenarios	Unit	Uncertainty simulation results			S.D	C.V
		5%	mean	95%		
Functional unit	kg CO ₂ -eq./KWh	1.25	2.24	4.38	0.84	0.84
Functional unit	kg CO ₂ -eq./ton waste	603	718	869	79	0.11



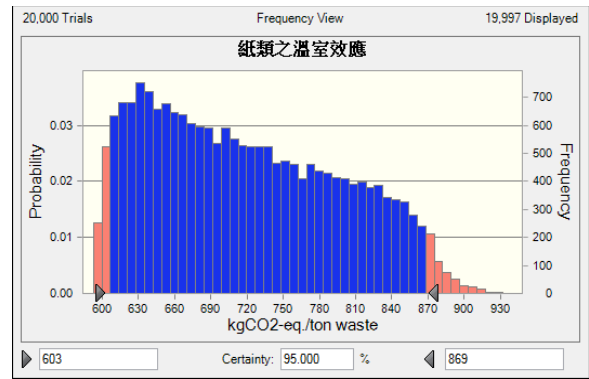
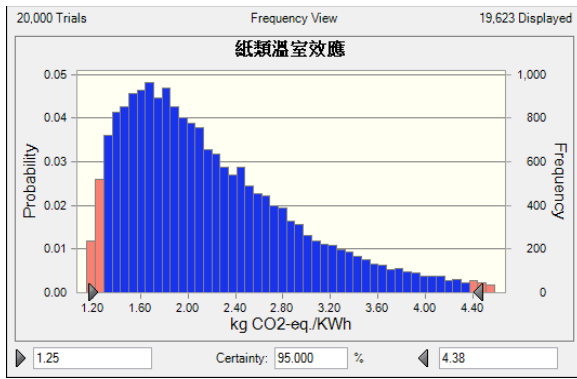


圖 17 台灣地區 2007~2009 年紙類廢棄物焚化處理溫室氣體排放不確定分析

3.5.3. 塑膠類廢棄物溫室效應不確定分析

至於塑膠類廢棄物之溫室氣體盤查機率密度函數適合度檢定部分，以 1 度電及 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位之結果分別如表 11 和表 12 所示，根據表 11，以 1 度電為功能單位之塑膠溫室效應不確定分析結果，其中 CO₂ 的平均值為 1.69 kg/KWh、CH₄ 平均值為 2.96E-07 kg/KWh 與 N₂O 平均值為 7.42E-05 kg/KWh；而以 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位之溫室效應不確定分析結果，CO₂ 的平均值為 1119 kg/ton wsate、CH₄ 平均值為 2.07E-04 kg/ton wsate 而 N₂O 平均值為 5.18E-02 kg/ton wsate。

表 11 塑膠類廢棄物焚化處理溫室氣體盤查之機率密度函數適合度檢定
(以 1 度電為功能單位)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Unit	kg/KWh	kg/KWh	kg/KWh
P.D.F	Lognormal	Lognormal	Lognormal
A-D	0.66	0.49	0.47
Chi-Square	4.57	11.14	11.14
K-S	0.07	0.07	0.07
Average	1.69	2.96E-07	7.42E-05
S.D	0.82	1.26E-07	3.17E-05

表 12 塑膠類廢棄物焚化處理溫室氣體盤查之機率密度函數適合度檢定

(以 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Unit	kg/ton waste	kg/ton waste	kg/ton waste
P.D.F	Triangular	Maximum	Maximum
A-D	0.51	24.07	24.08
Chi-Square	18.29	468.00	553.71
K-S	0.07	0.48	0.48
Average	1119.00	2.07E-04	5.18E-02
S.D	114.00	9.37E-05	2.34E-02

至於以 1 度電為功能單位之蒙地卡羅模擬不確定分析結果如圖 18 及表 13 所示，當焚化處理塑膠類



廢棄物產生 1 度電之溫室氣體排放平均值為 1.71 kgCO₂-eq./KWh，其 95%信賴區間為 0.81~3.81 kgCO₂-eq./KWh，而焚化處理 1 公噸塑膠類廢棄物時會產生 1135 kgCO₂-eq./ton waste，其 95%信賴區間為 957~1377 kgCO₂-eq./ton waste。

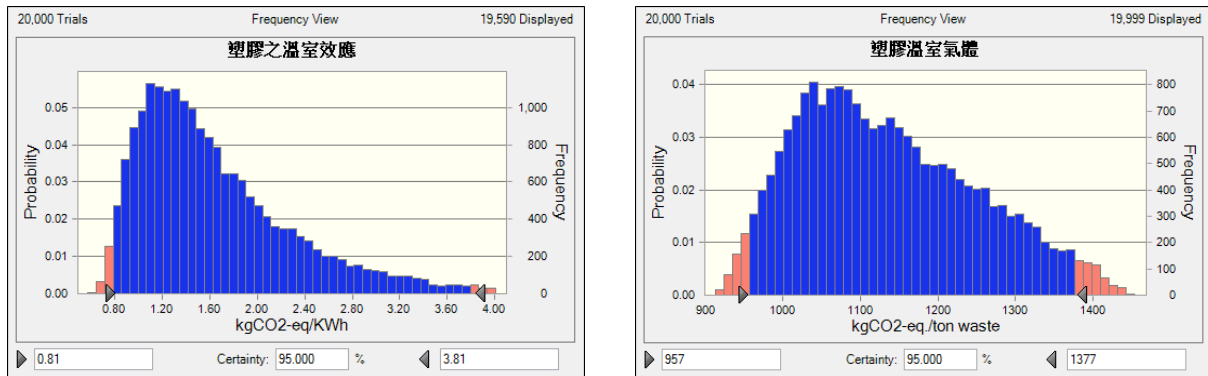


圖 18 台灣地區 2007~2009 年塑膠類廢棄物焚化處理溫室氣體排放不確定分析

表 13 塑膠類廢棄物焚化處理溫室氣體排放不確定分析

Scenarios	Unit	Uncertainty simulation results			S.D	C.V
		5%	mean	95%		
Functional unit	kgCO ₂ -eq./KWh	0.81	1.71	3.81	0.82	0.48
Functional unit	kgCO ₂ -eq./tonwaste	957	1135	1377	114	0.10

3.5.4. 一般廢棄物酸雨潛勢不確定分析

在一般廢棄物焚化處理之酸雨潛勢不確定分析方面，與溫室效應不確定分析相同共計有 70 筆資料 (2007~2009 年)，酸雨潛勢相關排放係數之機率密度函數(Probability Density Function, PDF)及相關適合度檢定結果如表 14，分別以 1 度電及 1 公噸廢棄物為功能單位之 SO_x 與 NO_x 之平均值分別為 2.42E-04 kg/KWh、2.69E-03 kg/KWh、0.11 kg/ton waste 與 1.16 kg/ton waste。

表 14 廢棄物焚化處理酸雨氣體盤查之機率密度函數適合度檢定

Unit	SO _x		NO _x		Critical
	kg/KWh	kg/ton waste	kg/KWh	kg/ton waste	
P.D.F	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	
A-D	1.13	0.26	0.19	0.29	1.5
Chi-Square	7.71	4.29	5.43	6.00	90
K-S	0.10	0.07	0.06	0.06	<0.224
Average	2.42E-04	0.11	2.69E-03	1.16	-
S.D	1.51E-04	0.05	1.31E-03	0.25	-

而在酸雨效應方面，依據 2007~2009 年資料進行統計模擬，蒙地卡羅模擬結果如圖 19 所示，焚化處理廢棄物產生 1 度電會造成 2.13E-03 kgSO₂-eq./KWh 之排放，其 95%信賴區間為 1.28E-03~4.58E-03 kgSO₂-eq./KWh；焚化處理 1 公噸廢棄物會產生 0.91 kgSO₂-eq./ton waste，而其 95%信賴區間為 0.64~1.82 kgSO₂-eq./ton waste(表 15)。

表 15 廢棄物焚化處理酸雨效應不確定分析



Scenarios	Unit	Uncertainty simulation results			S.D	C.V
		5%	mean	95%		
Functional unit	kgSO ₂ -eq./KWh	1.28E-03	2.13E-03	4.58E-03	9.42E-04	0.44
Functional unit	kgSO ₂ -eq./ton waste	0.64	0.91	1.82	0.18	0.20

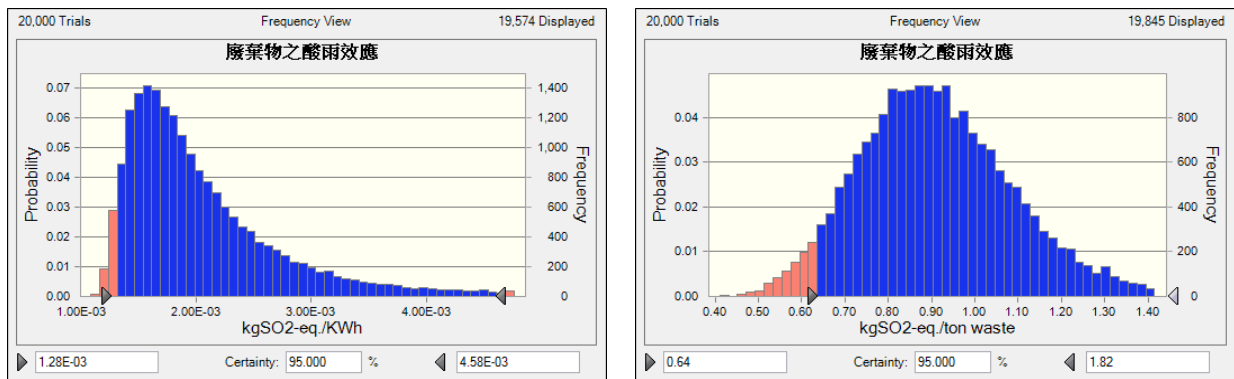


圖 19 台灣地區 2007~2009 年焚化廠酸雨效應之不確定分析

3.5.5. 紙類廢棄物酸雨潛勢不確定分析

以蒙地卡羅模擬紙類廢棄物焚化處理之酸雨氣體盤查，其機率密度函數及相關適合度檢定如表 16 所示，分別以 1 度電及 1 公噸紙類廢棄物為功能單位，其 SO_x 及 NO_x 之平均值分別為 1.12E-04 kg/KWh、3.48E-03 kg/KWh、3.28E-05 kg/ton waste 及 1.12E-03 kg/ton waste。

表 16 紙類廢棄物酸雨氣體盤查之機率密度函數適合度檢定

Unit	SO _x		NO _x	
	kg/KWh	kg/ton waste	kg/KWh	kg/ton waste
P.D.F	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Logistic
A-D	1.29	1.10	0.23	0.47
Chi-Square	13.71	12.86	4.00	6.29
K-S	0.11	0.12	0.06	0.08
Average	1.12E-04	3.28E-05	3.48E-03	1.12E-03
S.D	2.21E-04	4.82E-05	1.55E-03	3.15E-04

至於紙類廢棄物焚化處理之蒙地卡羅模擬不確定分析結果，如圖 20 及表 17 所示，焚化處理紙類廢棄物產生 1 度電之酸雨效應平均值為 2.54E-03 kgSO₂-eq./KWh，95%信賴區間為 1.34 E-03~5.31E-03 kgSO₂-eq./KWh，以焚化處理 1 公噸紙類廢棄物為功能單位之結果，焚化處理 1 公噸紙類廢棄物會造成 8.15E-04 kgSO₂-eq./ton waste 之酸雨效應，其 95%之信賴區間為 3.62E-04~1.27E-03 kgSO₂-eq./ton waste。



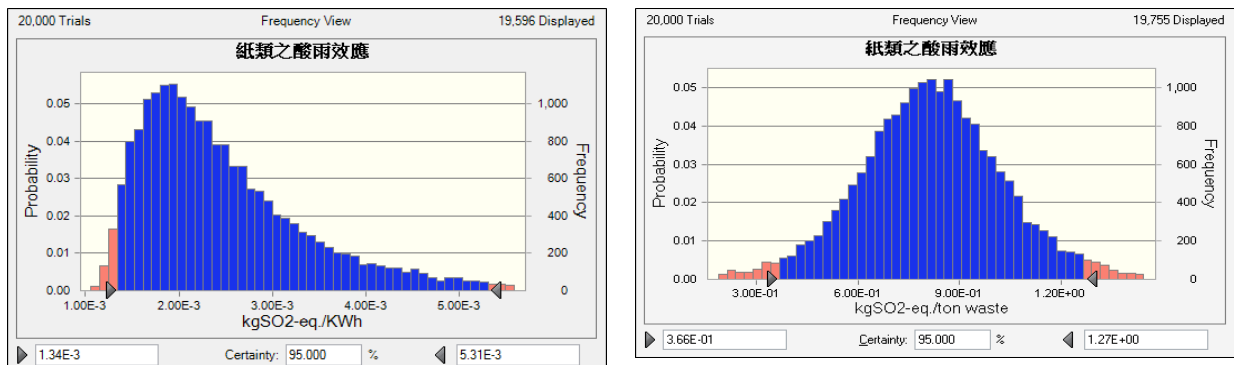


圖 20 台灣地區 2007~2009 年紙類廢棄物焚化處理酸雨效應不確定分析

表 17 紙類廢棄物焚化處理之酸雨效應不確定分析

Scenarios	unit	Uncertainty simulation resultss			S.D	C.V
		5%	mean	95%		
Functional unit	kgSO ₂ -eq./KWh	1.34E-03	2.54E-03	5.31E-03	1.09E-03	0.43
Functional unit	kgSO ₂ -eq./ton waste	3.62E-04	8.15E-04	1.27E-03	2.25E-04	0.28

3.5.6. 塑膠類廢棄物酸雨潛勢不確定分析

在塑膠類廢棄物之酸雨潛勢不確定分析方面，以蒙地卡羅模擬塑膠類廢棄物焚化處理之酸雨氣體盤查之機率密度函數及相關適合度檢定，分別以 1 度電及 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位之結果如表 18 所示，其中 SO_x 及 NO_x 平均值分別為 1.30E-04 kg/KWh、3.05E-03 kg/KWh、7.65E-05 kg/ton waste 及 2.19E-03 kg/ton waste。

表 18 塑膠類廢棄物酸雨氣體盤查之機率密度函數適合度檢定

	SO _x		NO _x	
	kg/KWh	kg/ton waste	kg/KWh	kg/ton waste
Unit	kg/KWh	kg/ton waste	kg/KWh	kg/ton waste
P.D.F	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal
A-D	0.54	0.52	0.20	0.52
Chi-Square	15.43	6.00	3.43	10.86
K-S	0.09	0.08	0.05	0.09
Average	1.30E-04	7.67E-05	3.05E-03	2.19E-03
S.D	2.92E-04	1.25E-04	1.46E-03	8.27E-04

至於塑膠類廢棄物焚化處理之酸雨效應的蒙地卡羅模擬不確定分析結果如圖 21 和表 19 所示，焚化處理塑膠類廢棄物產生 1 度電會造成 2.27E-03 kgSO₂-eq./KWh 之酸雨效應，95%之信賴區間為 1.13E-03~4.97E-03 kgSO₂-eq./KWh，而焚化處理 1 公噸塑膠類廢棄物則會產生 1.61E-03 kgSO₂/ton waste 之酸雨效應，其 95%之信賴區間為 6.62E-04~2.97E-03 kgSO₂/ton waste。



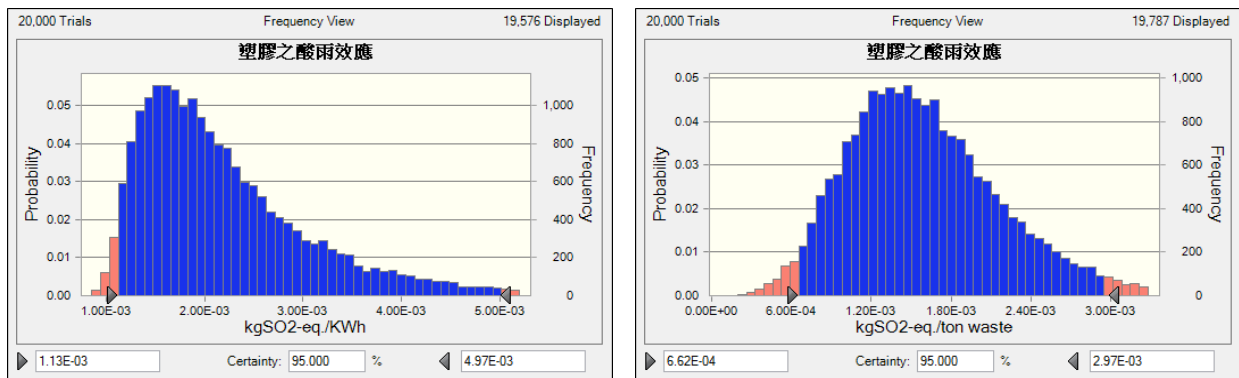


圖 21 台灣地區 2007~2009 年塑膠類廢棄物焚化處理酸雨效應不確定分析

表 19 塑膠類廢棄物焚化處理之酸雨效應不確定分析

Scenarios	Unit	Uncertainty simulation results			S.D	C.V
		5%	mean	95%		
Functional unit	kgSO ₂ -eq./KWh	1.13E-03	2.27E-03	4.97E-03	1.04E-3	0.46
Functional unit	kgSO ₂ -eq./tonwaste	6.62E-04	1.61E-03	2.97E-03	5.95E-04	0.37

3.6 回收率情境模擬改善

台灣地區廢棄物物理組成中，根據 2009 年行政院環保署之統計年報顯示，主要以紙類、廚餘類及塑膠類所占比例為前三高，因此，本研究探討紙類及塑膠類之回收率變動，針對廢棄物熱值、焚化發電及溫室氣體排放之影響，依據回收之潛力假設回收率 0~30%(與基本情境相比較，而基本情境已隱含各總廢棄物回收現況)，而其他類廢棄物物理組成不變，情境模擬分配的原則主要依據質量、發熱量及含碳量等原則，進行相關數值分配。

3.6.1. 紙類回收率擾動之溫室氣體排放探討

以台灣地區 2007~2009 年廢棄物之資料為基礎，探討紙類回收率 0~30%對廢棄物熱值、焚化發電及溫室氣體排放之影響，紙類回收率對於廢棄物濕基低位發熱值、焚化發電與溫室氣體排放分別以 1 度電及 1 公噸廢棄物為功能單位之影響結果如表 20 所示，當紙類回收率增加 30%時，濕基低位發熱值、焚化發電量及總溫室氣體排放量均隨之下降，而各功能單位之溫室氣體排放則隨之增加，其中，紙類回收率對於焚化發電量之影響最大，以 2009 年廢棄物焚化處理為例，紙類回收率增加對於焚化發電量之影響為濕基低位發熱值之 3.2 倍、為總溫室氣體排放量之 1.44 倍，而在不同功能單位比較部分，紙類回收率增加 30%時對於每 1 度電之溫室氣體排放之影響為每 1 公噸廢棄物溫室氣體排放之 17 倍，由表 20 之擾動係數得知，紙類回收率對於廢棄物焚化處理之發電影響最大，因此進而影響每 1 度電之功能單位溫室氣體排放。

表 20 紙類廢棄物回收率擾動分析結果

year	value	Unit	0%	30%	variation	multiplier
2007	Wet low heat vaule	kcal/kg	1946	1922	-1.23%	-0.04
	Power	KWh	2,312,979	2,044,261	-11.62%	-0.39
	GHG	ton	4,429,056	3,971,349	-10.33%	-0.34
		kgCO ₂ -eq./KWh	1.91	1.94	1.45%	0.05



		tonCO ₂ -eq./ton waste	0.74	0.75	0.19%	0.01
	Wet low heat vaule	kcal/kg	1930	1900	-1.57%	-0.05
	Power	KWh	2,420,539	2,104,598	-13.05%	-0.44
2008		ton	5,486,642	4,854,665	-11.52%	-0.38
	GHG	kgCO ₂ -eq./KWh	2.27	2.31	1.76%	0.06
		tonCO ₂ -eq./ton waste	0.87	0.88	0.15%	0.01
	Wet low heat vaule	kcal/kg	1630	1554	-4.63%	-0.15
	Power	KWh	1,984,281	1,708,650	-13.89%	-0.46
2009		ton CO ₂ -eq.	4,894,275	4,430,221	-9.48%	-0.32
	GHG	kgCO ₂ -eq./KWh	2.47	2.59	5.12%	0.17
		tonCO ₂ -eq./ton waste	0.80	0.81	0.24%	0.01

3.6.2. 塑膠類回收率擾動之溫室氣體排放

至於塑膠類廢棄物回收率對於廢棄物濕基低位發熱值、焚化發電量及溫室氣體排放之影響結果如表 21 所示。

表 21 塑膠類廢棄物回收率擾動分析結果

year	value	Unit	0%	30%	variation	multiplier
	Wet low heat vaule	kcal/kg	1946	1807	-7.14%	-0.24
	Power	KWh	2,312,979	2,070,362	-10.49%	-0.35
2007		ton	5,421,106	5,234,352	-3.44%	-0.11
	GHG	kgCO ₂ -eq./KWh	2.34	2.53	7.87%	0.26
		tonCO ₂ -eq./ton waste	0.91	0.91	0.16%	0.01
	Wet low heat vaule	kcal/kg	1930	1798	-6.86%	-0.23
	Power	KWh	2,420,539	2,161,871	-10.69%	-0.36
2008		ton	4,957,077	4,776,913	-3.63%	-0.12
	GHG	kgCO ₂ -eq./KWh	2.05	2.21	7.90%	0.26
		tonCO ₂ -eq./ton waste	0.79	0.79	0.49%	0.02
	Wet low heat vaule	kcal/kg	1630	1476	-9.45%	-0.32
	Power	KWh	1,984,281	1,734,234	-12.60%	-0.42
2009		tonCO ₂ -eq.	4,223,00	4,103,444	-2.83%	-0.09
	GHG	kgCO ₂ -eq./KWh	2.13	2.37	11.18%	0.37
		tonCO ₂ -eq./ton waste	0.69	0.70	0.65%	0.02

由表 21 得知，當塑膠類廢棄物回收率上升 30%時，整體廢棄物的濕基低位發熱值、焚化發電量、總溫室氣體排放量及每 1 公噸廢棄物之溫室氣體排放量均呈降低趨勢，從擾動係數得知，塑膠類廢棄物回收率擾動，對於廢棄物焚化發電之影響最大，以 2009 年塑膠類廢棄物回收擾動分析結果而言，塑膠回收率擾動對於廢棄物焚化發電之係數為 0.42，為濕基低位發熱值之 1.31 倍、為總溫室氣體排放之 4.67 倍而每 1 度電之溫室氣體排放隨塑膠廢棄物回收率上升反增之原因，可由表中得知，由於塑膠廢棄物回收率增加導致焚化發電量下降之速率較總溫室氣體排放下降速率快，因此，以 1 度電為功能單位表示時，



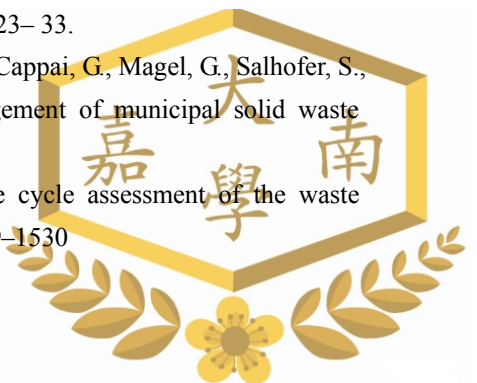
塑膠類廢棄物回收率增加對於溫室氣體減量較不具正面效益。

四、結論與建議

1. 台灣地區 2007~2010 年之廢棄物焚化處理生命週期評估結果，經由單一得點權重分析，1 度電及 1 公噸廢棄物為功能單位之環境衝擊，皆以重金屬議題最高，其次為溫室效應。
2. 紙類廢棄物焚化處理之溫室效應，以 1 度電為功能單位之溫室效應介於 1.16~4.96 kgCO₂-eq./KWh，以 1 公噸紙類廢棄物為功能單位之溫室效應則介於 587~865 kgCO₂-eq./ton waste。
3. 塑膠類廢棄物之溫室效應，以 1 度電為功能單位之溫室效應介於 0.68~3.86 kgCO₂-eq./KWh，以 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位之溫室效應則介於 943~1399 kgCO₂-eq./ton waste。
4. 紙類廢棄物之酸雨效應，以 1 度電為功能單位之酸雨潛勢介於 1.24E-03~7.17E-03 kgSO₂-eq./KWh，以 1 公噸紙類廢棄物為功能單位之酸雨潛勢介於 3.31E-04~1.53E-03 kgSO₂-eq./ton waste。
5. 塑膠類廢棄物之酸雨效應，以 1 度電為功能單位之酸雨潛勢介於 9.96E-04~8.04E-03 kgSO₂-eq./KWh，而以 1 公噸塑膠類廢棄物為功能單位之酸雨潛勢則介於 5.47E-04~3.41E-03 kgSO₂-eq./ton waste。
6. 紙類與塑膠類廢棄物回收率擾動之溫室效應排放，當紙類回收率上升 30%時，1 度電之溫室氣體排放從 2.47 kgCO₂-eq./KWh 上升至 2.59 kgCO₂-eq./KWh；塑膠類回收率上升 30%時，則 1 度電之溫室氣體排放則從 2.13 kgCO₂-eq./KWh 上升至 2.37 kgCO₂-eq./KWh，當紙類回收率增加，在焚化發電議題上之溫室氣體減量較不具正面效益。
7. 以 1 公噸廢棄物為功能單位，紙類和塑膠類回收率上升 30%時，溫室氣體排放分別由 0.80 kgCO₂-eq./ton waste 上升至 0.81 kgCO₂-eq./ton waste 及 0.69 kgCO₂-eq./ton waste 上升至 0.70 kgCO₂-eq./ton waste。
8. 廢棄物焚化處理之生命週期評估，本研究僅針對溫室氣體、酸雨效應、重金屬、致癌性及固體廢棄物之環境衝擊進行評估，其他相關盤查資料之完整性與資料不足限制，因此在此方面之環境衝擊評估仍具有高度不確定性，可於未來在此方面繼續研究。

五、參考文獻

1. A comparison of municipal solid waste management in Berlin and Singapore
2. Helton, J. C. and Davis, F.J., (2003), Latin hypercube sampling and propagation of uncertainty in analyses of complex systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 81, 23-69.
3. IPCC, "2006 IPCC Guidelines for National Gas Inventories-Volume 5 Waste", 2006.
4. Larsen, A. W., Astrup, T., (2011), CO₂ emission factors for waste incineration: Influence from source separation of recyclable materials, *Waste Management*, 31, 1597-1605.
5. Laurijssen, J., Marsidi, M., Westenbroek, A., Worrell, E., Faaij, A., (2010), Paper and biomass for energy? The impact of paper recycling on energy and CO₂ emissions, *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1208-1218.
6. Lo, S. C., Ma, H. W., Lo, S. L., (2005), Quantifying and reducing uncertainty in life cycle assessment using the Bayesian Monte Carlo method, *Science of the Total Environment* 340, 23-33.
7. Sabbas, T., Poletini, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelm, O., Mostbauer, P., Cappai, G., Magel, G., Salhofer, S., Speiser, C., Assbichler, S. H., Kleinh, R., Lechner, P., (2003), Management of municipal solid waste incineration residues, *Waste Management* 23, 61-88.
8. Schmidt, J. H., Holm H., (2007), Anne Merrild, Per Christensen, Life cycle assessment of the waste hierarchy - A Danish case study on waste paper, *Waste Management*, 1519-1530



9. Scipioni, A., Mazzi, M., Niero, Boatto, T., (2009), LCA to choose among alternative design solutions: The case study of a new Italian incineration line, *Waste Management*, 29, 2462–2474.
10. Scipioni, A., Mazzi, M., Niero, Boatto, T., (2009), LCA to choose among alternative design solutions: The case study of a new Italian incineration line, *Waste Management*, 29, 2462–2474.
11. Shen, Li., Worrell, E., Patela, M. E., (2010), Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling, *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 34–52.
12. Stichnothe, H., Azapagic, A., (2009) Bioethanol from waste: Life cycle estimation of the greenhouse gas saving potential, *Resources, Conservation and Recycling*, 53, 624–630
13. Valerio, F., (2010), Environmental impacts of post-consumer material managements: Recycling, biological treatments, incineration, *Waste Management*, 30, 2354–2361.
14. Villanueva, A., Wenzel, H., (2007), Paper waste – Recycling, incineration or landfilling? A review of existing life cycle assessments, *Waste Management* 27, S29–S46.
15. 江玄政, 黃國恭, 黃雪娟, 張啓達(2001), ISO 14000 系列-生命週期評估技術與應用手冊, 經濟部工業局。
16. 行政院環保署(1997), 資源回收四合一計畫。
17. 行政院環保署(2009), 環境統計年報。
18. 行政院環保署, 環境品質資料倉儲系統, (2010), <http://edw.epa.gov.tw/topicWaste.aspx>。
19. 行政院環境保護署環境督察總隊台北辦公室(2010), <http://ivy4.epa.gov.tw/swims/>。
20. 呂哲璋(2010), 垃圾回收率對焚化發電之生命週期評估與不確定分析, 碩士論文, 嘉南藥理科技大學環境工程與科學系。
21. 李明燕(2002), 區域風險評估與不確定性分析—以台灣九座焚化爐為例, 碩士論文, 臺灣大學環境工程學研究所。
22. 汪青慧(2008), 垃圾焚化廠經營績效評估, 碩士論文, 國立成功大學建築研究所。
23. 林健三(2006), 廢棄物處理, 文笙書局。
24. 林崑穎(2005), 垃圾焚化廠監控系統效能診斷程序之研究, 碩士論文, 輔英科技大學環境工程與科學系。
25. 空氣品質模式支援中心(2010), <http://aqmc.epa.gov.tw/dispPageBox/aqmcHp.aspx?ddsPageID=aqmcHp>
26. 張乃仁(2008), 台灣地區公有民營垃圾焚化廠操作營運成本探討, 碩士論文, 國立臺灣大學環境工程研究所。
27. 張乃斌(1999), 垃圾焚化廠：系統工程規劃與設, 張乃斌出版。
28. 張銘哲(2004), 公有民營垃圾焚化廠運作績效之研究—以嘉義鹿草焚化廠為例, 碩士論文, 國立中山大學環境工程研究所。
29. 許文正(2011), 綠色紡織品發展現況, 經濟部推動綠色貿易推廣學程。
30. 許忠正(2010), 工程科技資料-垃圾焚化廠興建與營運方式之比較, 2010.6, P24-27。
31. 華振明、高忠愛、吳天寶、祁夢蘭(2001), 廢棄物處理技術, 科技圖書股份有限公司。
32. 楊英賢(2008), 生命週期評估與不確定分析應用於火力電廠與燃選擇, 博士論文, 國立成功大學環境工程學系。
33. 經濟部工業局(2001), ISO14000 系列-生命週期評估技術與應用手冊。
34. 蔡淑如(2007), 台灣地區大型垃圾焚化廠績效評估, 碩士論文, 朝陽科技大學環境工程與管理系。
35. 謝錦松, 黃正義(2003), 固體廢棄物處理, 淑馨出版社。

