

廢棄物類

## 焚化廢棄物產生能源的演變：綜述

呂錫民

### 摘 要

從 19 世紀後期簡單水冷壁焚化爐開始，焚化廢棄物產生能源概念至今已經產生巨大變化。早期，廢棄物處理沒有能源回收裝置。但是，目前業界已有許多新興技術出現，如利用汽電共生設備，回收熱量與產生電力，另外也添加許多複雜機制，如清潔煙氣、廢水再利用、高效類化各種廢棄物及一貫化流暢程序等。本文回顧焚化廢棄物產生能源的演變，旨在評估解決問題進展、過去與現在關注及產業未來前景。本文歸納出，焚化廢棄物產生能源，在全球廢棄物減少，發揮至關重要作用；在潛力應用最大化，有更多目標可以實現。然而，根本問題依然存在，特別是當今社會廢棄物量不斷增加，一直未能得到充分解決。針對這種演變回顧，有利廢棄物管理者，更加瞭解問題本質，從而制定切實可行方案，增加焚化垃圾轉化能源，應對中短期更多廢棄物量，並為遙遠未來，規劃持久方針與策略。

【關鍵字】廢棄物轉化能源(WtE)、廢棄物管理、城市固體廢棄物(MSW)、城市固體廢棄物焚化(MSWI)

---

工業技術研究院能源與環境研究所 研究員

## 一、前言

廢棄物能源(waste-to-energy, WtE)可由下列程序定義：從廢棄物初級處理中，產生電能和 / 或熱能，或將廢棄物處理成燃料源。基本上，WtE 是一種能量回收技術，大多數 WtE 直接經過燃燒過程，產生電和 / 或熱，或間接製造燃料商品，如甲烷、甲醇、乙醇或合成燃料。

由於人口增長和快速城市化，全球各地區產生的都市固體廢棄物(municipal solid waste, MSW)數量迅速增加。世界銀行估計，全球 MSW 將從目前 350 萬公噸 / 日，增加到 2025 年 610 萬公噸 / 日(World Bank, 2012)。MSW 焚化(municipal solid waste incineration, MSWI)在廢棄物量管理方面，不僅不斷擴大，發揮關鍵作用，而且就回收可利用面向，對補充傳統能源供應，亦扮演重要角色。全球初級能源有 80% 以上，來自化石燃料(BP, 2016; IEA, 2016)。MSWI 在抵消化石燃料消耗，增加再生能源份額同時，對協助廢棄物處理政策推廣，也佔有重要地位。迄今為止，全世界有約 1,179 座 MSWI 廠，總產能超過 700,000 公噸 / 日(MT/d)(Lu et al., 2017)。目前，大多數工廠位於歐盟、美國及東亞。許多非洲和拉丁美洲國家也設立焚化廠，以燒毀醫療及危險廢棄物，儘管沒有能量回收。發展 MSWI 並不是沒有本身缺點挑戰。從過去失敗中汲取經驗，有助於當今 WtE 全球視野格局塑造。基本上，WtE 產業在經濟上是有利可圖的，每年收入超過 200 億美元(WEC, 2013)。儘管有如此巨大收益，仍然會有些基本問題產生：MSWI 焚化處理量會繼續擴大嗎？全球廢棄物管理政策是否仍然有利於 WtE？造成 MSWI 誕生的根本問題是否得到充分解決？

在本文中，作者進行文獻回顧，仔細分析 MSWI 演變歷程，試圖回答這些問題，並了解圍繞 WtE 四周的不斷變化和預測未來前景。本文旨在概述 MSWI 發展歷史，特別強調燃燒技術及空氣排放控制所取得的重要成就，以揭示未解決問題以及 WtE 可能發展方向。在文章各節安排中，首先介紹 MSWI 基本定義及出現的歷史概況。接著，描述現代 MSWI 技術開發路徑，特別聚焦燃燒技術及空氣污染控制 (air pollution control, APC) 系統。最後，討論關於 MSWI 當前焦點與未來方向，點出尚未解決問題及挑戰，如何從 MSWI 獲取最佳收益，建議廢棄物管理有哪些選項。

希望本文所分享知識，能夠塑造 WtE 部門再次盛況與未來願景，俾益一般廢棄物管理者行政作業與決策程序。

## 二、廢棄物轉化能源 (WtE)

### 2.1 焚化技術的演變

焚化(incineration)一進行廢棄物(如有機物質)燃燒和能量回收一是最常見的 WtE 實施。經濟合作發展國家(OECD)所有新 WtE 工廠，在焚化廢棄物時，如 MSW、工商廢棄物及衍生廢棄物燃料(refuse derived fuel, RDF)，必須符合嚴格排放標準，包括氮氧化物(NOx)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、重金屬及戴奧辛等。因此，現代焚化廠與舊有類型有很大不同，在原始廠中，一些廢棄物既不能回收能源，也不能當作再利用材料。現代焚化爐將原始廢棄物體積減少 95~96%(Ramboll Consult, 2016)，這取決於灰分中金屬等材料回收成分和再利用程度。

焚化爐可能會排放細微顆粒、重金屬、戴奧辛及酸性氣體，即使現代焚化爐這些排放相對較低。其他問題包括妥善殘留物管理，如煤灰以及焚化爐底灰(incinerator bottom ash, IBA)，必須在危險廢棄物處理設施中正確處理。

批評者認為，焚化爐會破壞寶貴資源，減少可回收與再利用動力。然而，這是一個開放性問題，因為回收最積極的歐洲國家，目前回收率已達 70%(EU, 2012)，但仍然主張以焚化替代掩埋的廢棄物處理方式。

焚化爐發電效率約 14~28%(Blue Ridge, 2009)。為避免剩餘能量損失，廢熱可用於區域供熱，如汽電共生(cogeneration)。以廢棄物低熱值為基準，汽電共生焚化爐整體效率通常高於 80%(Wikipedia, 2018)。

焚化轉化 MSW 是一種相對古老的 WtE 生成方法。焚化通常透過廢棄物燃燒，產生蒸汽或熱水，為發電機和熱能產生器提供動力，生成能量用於家庭、企業、機構及工廠。與之相關一項問題產生，污染物可能與鍋爐煙氣一起進入大氣。這些污染物可能是酸性的，據報導，在 20 世紀 80 年代，污染空氣形成酸雨導致環境惡化。從那時

起，為了解決這個問題，廢棄物焚化業者在煙囪中使用石灰洗滌器和靜電除塵器，讓煙霧通過鹼性石灰洗滌器，以中和任何酸性物質，從而防止其進入大氣危害生態。另外，許多其他設備，如織物過濾器、反應器及催化劑等，則會化解或捕獲其他受管制污染物。據「紐約時報」報導，現代焚化廠非常清潔，「現在從家庭壁爐和後院燒烤中所釋放戴奧辛比焚化爐多好幾倍」。德國環境部宣稱，「由於嚴格規定，垃圾焚化爐在戴奧辛、灰塵及重金屬等排放已微乎其微」。

在 2001~2007 年期間，廢棄物能源容量每年增加約 400 萬公噸，日本和中國各自建立的幾個工廠，係以直接熔煉或固體廢棄物流化床燃燒為基礎。在中國，2016 年初約有 434 座垃圾焚化發電廠，而日本則擁有世界上最大 MSW 熱處理國家，總容量約有 4,000 萬公噸(Wikipedia, 2018)。若干最新 MSWI 廠採用加煤機(stoker)技術，而其他廠則使用先進富氧技術。世界上有幾家先進垃圾處理廠使用相對創新技術，如直接熔煉、Ebara 流體化技藝、Thermoselect JFE 氣化及熔化技術等。印度開發第一個能源生物科學中心，目的就在減少溫室氣體排放及化石燃料依賴。截至 2014 年 6 月，印尼垃圾發電總裝機容量約 93.5MW，不同準備階段總量則有 373MW(Carbon Trust, 2014)。

### 2.2 廢棄處理的二氧化碳的議題

在 WtE 熱能技術中，廢棄物幾乎所有碳含量係以二氧化碳(CO<sub>2</sub>)形式排放到大氣，包括熱解和氣化產物的最終燃燒，但肥料生物碳產生除外。MSW 含有與 CO<sub>2</sub> 本身大致相同碳質量分數(27%)，因此 1 公噸 MSW 處理，大約產生 1 公噸 CO<sub>2</sub>。

如果廢棄物進行掩埋，在 1 公噸 MSW 中，生物降解部分的厭氧分解，約可產生 62 立方公尺甲烷(Wikipedia, 2018)。甲烷的全球暖化潛勢(global warming potential, GWP)是二氧化碳 20 倍以上，而二氧化碳一般是經由燃燒產生。在一些國家，大量垃圾掩埋氣體被收集，但是在實際垃圾掩埋場，甲烷排放到大氣中的潛在全球變暖威脅仍然存在。1999 年美國掩埋場溫室氣體排放比燃燒排放二氧化碳量高約 32% (Themelis, 2003)。

此外，幾乎所有生物降解廢棄物都是生物質。也就是說，它具有生物學起源。這種物質是由植物在最後一個生長季節使用大氣中  $\text{CO}_2$  形成。這些植物在燃燒過程產生二氧化碳，並再次排放到大氣。

這些溫室氣體排放因素是一些國家將廢棄物生物質部分作為再生能源 WtE 管理主要考量。至於其餘大部分塑料，即含石油和天然氣衍生產品，則視為不可再生材料。

### 2.3 固體廢棄物

固體廢棄物是指從資源中獲得原料，經過加工、製造、產品使用或消費後，所產生的固態物質，如生活垃圾、工業垃圾、農產品廢棄物及醫院垃圾等，這些廢棄物若裸露堆放或簡單掩埋，不僅侵占土地，並且會污染周圍環境及地下水源。但是，固體廢棄物也是一種潛在資源，除了可以資源回收再利用外，還可以能源方式使用。固體廢棄物能源是目前無災害與資源化的最佳固體廢棄物減量方法。

生活垃圾通常包括：紙類、布料、塑膠、橡膠、廚餘、草木、磚瓦、砂土、金屬及玻璃等，但各組分的含量隨各地區生活習慣、經濟發展水平及氣候狀況等不同而異。在發達國家中，城市生活垃圾產量很大，其中又以食品廢棄物、紙張、布料及塑膠等有機物占比最大，可燃物含量很高，熱值也很高，主要國家城市垃圾組成詳見表 1。

近幾十年來，隨著工業及農業生產發展，人們生活水平提升，固體廢棄物越來越多，全球每年生產垃圾約 450 億公噸，每年平均以 8~9% 的速率增長，西方發達國家大致以每年 2~5% 速率增加，日本人均垃圾產量近 10 年增加 1 倍，中國歷年積存垃圾已超過 60 億公噸，每年並以 8~10% 速率增加，侵占土地 50 萬公頃，有 200 多個城市陷入垃圾包圍當中(呂錫民, 2017)。

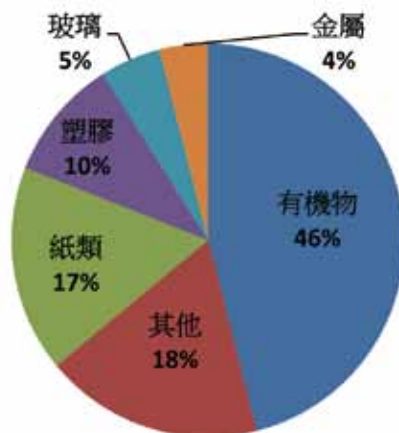
都市廢棄物處理方式，包括資源回收、廚餘回收、焚化及衛生掩埋等；其中，垃圾焚化產生廢熱可用來發電，而廚餘則可掩埋產生沼氣，燃燒之後，每公噸廚餘約可產生 3GJ 熱值(呂錫民, 2012)。

表 1 主要國家城市垃圾組成特徵

國家	組成 (%)							含水量 (%)	人均年排量 (kg)	熱值 (kJ/kg)
	灰渣	食品廢棄物	紙張	塑膠	金屬	玻璃	其他			
英國	11	27	38	2.5	9	9	3.5	25	320	9,780
法國	20	22	34	4	8	8	4	35	270	9,314
荷蘭	20	21	25	4	10	10	17	25	210	8,383
德國	28	15	23	3	9	9	10	35	350	8,383
瑞士	20	20	45	3	5	5	2	35	250	10,012
義大利	25	25	20	5	7	7	15	30	210	6,985
美國	7	12	50	5	9	9	8	25	820	11,642

資料來源：岑可法等，2016

如前所述，固體廢棄物主要成分，包括紙張、有機材料、塑料、玻璃、金屬及紡織品等。圖 1 顯示全球固體廢棄物成分。可以看出，近一半社會廢棄物是有機的。特定廢棄物產自建築、工業及商業則未顯示在圖中，但是某些案例可能代表一個地區大部分廢棄物產生。



資料來源：World Bank，2012

圖 1 全球 MSW 組成成分

一般而言，只有焚燒廢棄物流平均淨熱值至少在 7 MJ/kg 以上，即燃燒過程能夠自我維持時，才會進行 WtE 可行性評估；此外，為了工廠最佳運作與供應目的，可燃垃圾產生率應該至少維持 100,000 公噸 / 年以上，但在孤立地區工廠可能會低於 10 萬公噸 / 年(WEC, 2016)。另外，廢棄物產量的季節性變化，如國定假日或當地傳統節日，還可能併入廢棄物性質可能影響的諸多需要考慮因素之一。

## 2.4 台灣垃圾處理情況

台灣這幾年來，人口往城市集中，加上生活水平提升與天然氣普及，垃圾中有機成分逐漸增多，雖然人均垃圾重量忽高忽低，但平均熱值卻一直持續增加。

參考表 2，根據行政院環保署(2018)-中華民國環境保護統計年報，2017 台灣平均每人每日產生垃圾量為 0.915 公斤，垃圾當中紙類約占 36.74%，廚餘約 37.89%，總計可燃成分占比 97.52%，而目前垃圾焚化比率為 38.79%，垃圾掩埋占比 0.92%，廚餘回收率 7.00%，總資源回收率 60.22%。

表 2 台灣 MSWI 平均發電量採用數據比較

年份	每人每日垃圾產生量 (kg)*	可燃物比率分析			大型垃圾焚化廠發電量 (億度)
		紙類 (%)	廚餘 (%)	塑膠類 (%)	
2008	0.896	41.75	32.86	17.13	29.67
2009	0.920	44.54	30.56	17.28	29.25
2010	0.942	38.87	37.42	16.74	30.26
2011	0.892	39.57	35.68	16.57	30.76
2012	0.869	38.31	39.21	15.66	30.56
2013	0.861	38.85	38.33	15.61	31.31
2014	0.863	41.71	35.07	16.57	31.87
2015	0.844	39.42	37.64	16.56	32.17
2016	0.867	34.69	40.39	15.55	32.45
2017	0.915	36.76	37.98	16.61	31.88

\*「每人每日垃圾產生量」之垃圾定義不包含一般垃圾、巨大垃圾、資源垃圾及廚餘。

資料來源：行政院環保署，2018

值得重視的是，與 2008 年相比，2017 年處理垃圾量增加 2.12%，垃圾焚化量減少 28.05%，資源回收量增加 49.85%。另一方面，台灣 2017 年工業申報廢棄物產生量為 1,937 萬公噸，再利用量 1,564 萬公噸，利用率為 80.74%。

目前全台有 24 座中大型焚化廠營運中，其中 19 座廠齡都超過 15 年，多數使用年限即將屆滿，政府面對既老又殘焚化爐窘境(聯合新聞網，2018)。中央難以調度縣市焚化爐解決垃圾危機，除了選舉敏感期間容易招致民意反彈之外，各縣市焚化爐老化、效能衰減，實為難以調度主因。

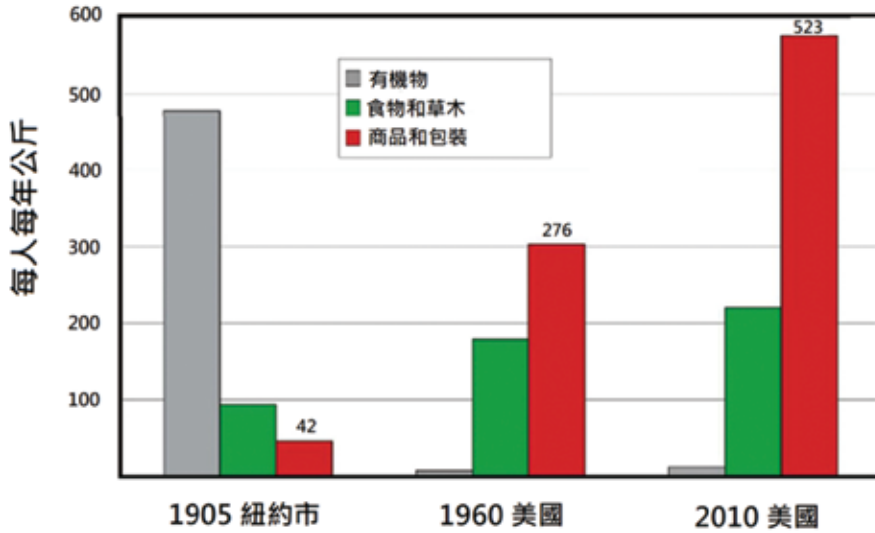
### 三、MSWI 發展背景

#### 3.1 廢棄物社會

工業革命後不久，城市生活垃圾管理系統正式誕生，主因來自都市人口持續增加。十九世紀早期，在空地及河岸傾倒垃圾情況十分猖獗。科學研究發現，疾病與細菌密切相關，如空氣、土壤及水中微生物。人們意識到髒亂環境，將導致疾病因子成長有利條件，開始督促都市和城鎮管理單位採取行動。負責當局屈服壓力，知道未解決公民問題的政治後果，於是很快提出清潔供水和污水處理網絡服務。19 世紀中葉，垃圾開始正式收集與處理。這一轉變不止於此，廢棄物產量持續增加，因應新問題，挑戰戰略從而制定。隨著時間推移，政府發現民眾意識是減少廢棄物處理問題關鍵因素，因此開始實施限制廢棄物傾倒地點法規。在美國，聯邦政府於 1929 年頒布第一部環保條例，禁止任何人在河岸傾倒廢棄物。

1955 年 8 月 1 日，一篇文章在美國雜誌「生命」上發表，首先出現「廢棄物社會」一詞。它警告消費過高與資源浪費，將製造大量垃圾社會。廢棄物量不僅隨著人口成長增加，且在形態上有更進一步轉變，如近代興起電子商品—電視、電腦、手機及螢幕等。這些高科技產品為廢棄物管理帶來新挑戰。如圖 2 所示，商品包裝比例增加，不僅廢棄塑料堆積如山。同時，大型農場中牲畜排泄物，只會因為食物需求與人口成長，而持續氾濫。此些現象在在證明，當前有為政府必須設計新的解決方案，否則無法因應一波接一波的垃圾大浪。





資料來源：Upstream，2016

圖 2 1905 年、1960 年、2010 年美國和紐約固體廢棄物產生量

### 3.2 廢棄物回收廠出現

在 19 世紀最後四分之一世紀，顯而易見的是，焚化部分廢棄物和回收廢棄物流中有用物質，使得廢棄物量增加問題從而解決。美國和歐洲第一批焚化爐是用普通耐火磚建造，19 世紀後期，水冷壁和模組化焚化爐取而代之。這些早期焚化爐重點僅在廢棄物管理，而無意產生熱量利用。人們越來越意識到，由於快速城市化壓力，垃圾掩埋場很快就會填滿，可建造新垃圾掩埋場土地很快就會耗盡，使得 MSWI 順勢崛起。英國第一座垃圾焚化爐建於 1870 年，而在美國，第一座沒有能源回收垃圾焚化爐於 1885 年紐約市建成。歐洲於 20 世紀之前就有焚化爐熱量回收。在美國，直到 20 世紀中葉，油價上漲促使焚化爐熱量產生蒸汽和電力，一時之間，熱回收成為廢棄物處理系統設計要項。最初 WtE 工廠採用簡單水冷壁和模組化焚化爐，缺乏煙氣處理機制。20 世紀末，垃圾與污水污泥的共同消化(co-digestion)以及 RDF 生產，開始回收甲烷。同時，蒸汽長期市場潛力進一步催化具熱回收功能的 MSW 熱處理成長。不久之後，新問題開始出現。MSWI 工廠存在技術上問題，導致工廠定期關閉和停工時間過長。與此同時，資源回收工廠建立，美國第一家商業工廠 1971 年投入使用。

最初目標放在黑色金屬和有色金屬材料回收，特別是鐵、鋁、玻璃及紙纖維等。政策不足難以支持資源回收，因此預期經濟收益未能實現。WtE 焚化爐造成污染問題日益受到關注，民眾反對意見開始增強。在 20 世紀 60 年代，顆粒物質是唯一受到管制的污染物，但到 1980 年，法規也需要控制酸性氣體。焚化 MSW 異質混合物以及灰燼處理不當，引發更多大眾質疑。這些早期 WtE 焚化爐造成的不良影響，開始影響輿論，連續引發抗議。不斷增加的大眾壓力，迫使新工廠遠離人口密集城鎮，但也遠離了產出熱量及蒸汽的消費者。這一發展使得以供應熱量或蒸汽為主的 MSWI 更加複雜且昂貴。一系列問題造成替代掩埋的熱處理方案減少。在美國，焚化處理從 20 世紀 60 年代占 MSW 總流量的 31%，下降到 80 年代中期的 9%，促使垃圾掩埋仍為一種選項，只是其垃圾處理量逐年減少(NRC, 2018)。

## 四、MSWI 技術不斷發展

### 4.1 燃燒技術

自 WtE 工廠問世以來，MSW 處理目標迅速演化，更多注意力轉移到熱回收上。此外，焚化爐灰燼處理以及煙氣排放法規變得更加嚴格。因此，採用 MSWI 廢棄物管理選項，三大強力技術需要開發實現：MSW 燃燒體積縮小、熱量和材料最佳化回收及煙氣徹底淨化，藉此滿足現行法規排放限制。

早期焚化爐分為：連續進料、分批進料、搗碎進料、金屬錐形和廢熱回收焚化爐。連續進料焚化爐進一步分為：移動爐排焚化爐、往復式焚化爐、迴轉窯及桶式焚化爐。它們與分批進料焚化爐不同之處在於：後者系統中，垃圾以定期間隔進料，允許先前進料批次幾乎完全燃燒。這樣，與批量焚化爐相比，連續進料焚化爐具有處理更大量廢棄物能力。搗碎進料和金屬錐形焚化爐只是批量進料焚化爐的變型。在這些早期焚化爐中，只有廢熱回收焚化爐具有熱量回收機制，其餘焚化爐設計目的在於，減少垃圾量和廢棄物惰性化。早期廢熱回收焚化爐包括：低壓鍋爐、高壓鍋爐及水冷壁爐。低壓鍋爐開發最早，大部分是位於燃燒室內，由於爐子過度冷卻，降低燃燒效率。後來高壓鍋爐開發出來，其中耐火襯裡可防止爐子過度冷卻，另外也具有大幅

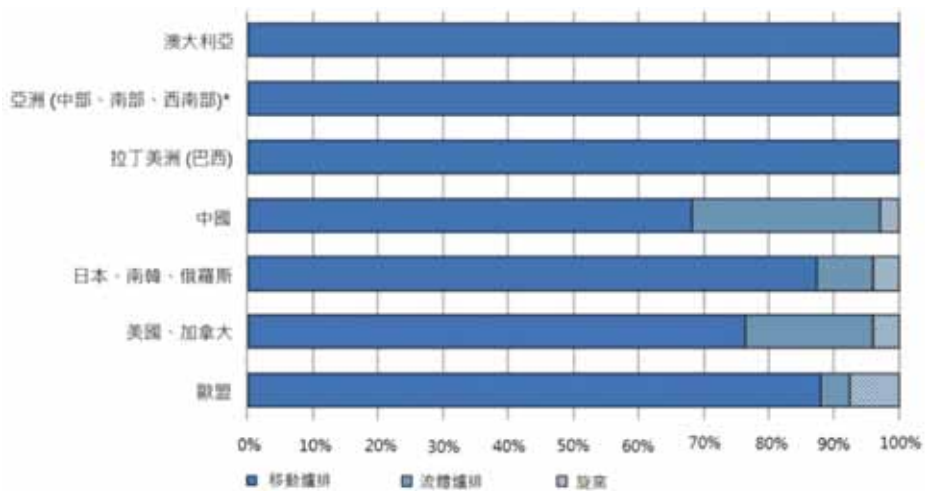
冷卻煙氣至 250~300 °C(482~572 °F)所需範圍額外能力(Makarichi et al., 2018)。水冷爐首先在歐洲應用，它們比低壓和高壓鍋爐具有更高熱回收效率。回收熱量主要用途為：家庭與工業供暖、污水污泥乾燥、海水淡化、熱水供應及沿海地區家庭飲用水。發電型熱回收應用始於 20 世紀中期，第一家工廠在法國巴黎建造。到 20 世紀末，由於需要提高燃燒效率，焚化爐設計變得更加複雜，因此開發了更先進廢氣排放控制系統及更有效物料處理系統。大規模批量進料的 MSWI 沒有進一步開發，只有連續進料焚化爐經得起時間考驗。今天，MSWI 技術分為 3 大類：移動爐排(moving grate)、迴轉窯(rotary kiln)及流化床焚化爐(fluidized bed incinerator)。儘管這 3 種技術早在 20 世紀上半葉就已經開始使用，但多年來它們已經被修改，以適應當前 MSWI 需求。

本質上，這些技術含有不同程度的 MSW 預處理，這在早期焚化爐中是不存在的。多年來，已開發出預處理技術，包括去除粗重且有害物質以及不可燃物質，從而使 MSW 具有更佳可燃性與成熟排放控制。後來，使用滾筒篩、空氣分級器、磁力分離器及渦流分離器等進行篩選，可在焚化之前減少 MSW 不均勻性。其中，Trommel 篩網利用 MSW 顆粒尺寸、滾筒篩孔徑、傾斜角度、滾筒長度及旋轉速度等相互作用分離 MSW 組分，而空氣分級器利用密度差異，從大部分 MSW 中分離出輕餾分。目前更先進系統利用光學分選設備，根據光學特性分離廢棄物。磁選機和渦流分離器專用於黑色金屬及有色金屬導電金屬去除。上述技術共同性在於，所有分離設備都是組合使用方式，原料在進入 MSWI 之前，完成所需分離程度。移動爐排焚化爐採用大規模進料方式，因此需要篩分和坑絮(pit fluffing)程序，完成最低預處理程度。另一方面，流化床焚化爐只能處理已經過粉碎和尺寸極小的廢棄物，只經基本粗略分離者不包括在內。

粉碎和減小尺寸設備，包括：高速低扭矩(high-speed low torque, HSLT)和低速高扭矩(low-speed high torque, LSHT)錘磨粉碎機。HSLT 粉碎機容量約 300 公噸 / 小時，而 LSHT 為處理約 150 公噸 / 小時大型工廠(Fitzgerald, 2013)。移動爐排焚化爐已證明優於迴轉窯或流化床焚化爐，主要原因為，它們無需預先分揀或粉碎，即可處理大量垃圾，但事先需要除去白色物品和可能損壞 MSWI 設備等大件物品，以

## 74 焚化廢棄物產生能源的演變：綜述

及危險或爆炸性材料。此外，它們能夠適應各種廢棄物成分和熱值，具有很高操作穩定性。儘管迴轉窯和流化床焚化爐自 20 世紀中葉以來就已經發明，但僅有移動爐排完成開發與測試，並滿足大規模技術性能要求。移動排爐優點為可應用在每小時燃燒 50 公噸廢棄物的大容量中。Lu 等人(2017)指出，歐盟(2012年)、德國及美國等使用 MSWI 移動爐排技術比例為 88%、94%、76%，其餘為流化床或迴轉窯焚化爐(圖 3)。與流化床或迴轉窯焚化爐相比，移動爐排主要缺點為需要較高投資和維護資金支出。流化床焚化爐所需投資和運營資金，約為移動爐排焚化爐的 70%(Fitzgerald, 2013)。然而，原料均勻要求及廢棄物熱值敏感，使得流化床操作變得困難。毫無疑問，這些缺點降低流化床在全世界範圍內與移動爐排的競爭優勢。中國目前擁有最大流化床 MSWI 產能，但比例正在下降。早期燃燒室配有輔助油燃燒器，但現在焚化爐要求沒有輔助燃料運行，除非是特意安排的共焚(co-incineration)配置。

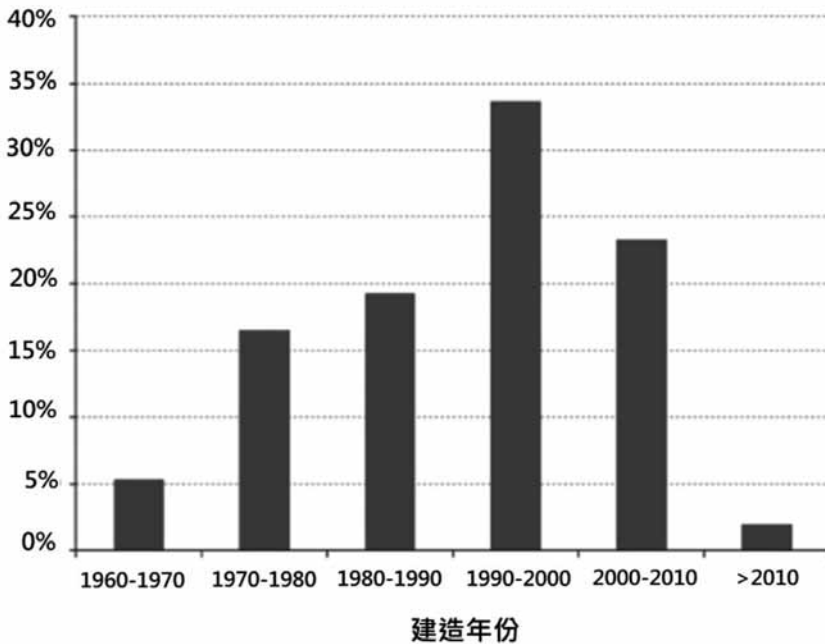


資料來源：Cheng，2014；ISWA，2015；Lu et al.，2017

圖 3 MSWI 區域分佈 (\* 不包括中國)

非洲、拉丁美洲及澳大利亞等發展 MSWI 最慢。在非洲，亞的斯亞貝巴唯一廢棄物能源處理設施仍在建造當中，預計產能 1,400 MT/d(REPIIE, 2014)。代表拉丁美洲的巴西 MSWI 產能約 600 MT/d，而澳大利亞產能只有 390 MT/d(Lu et al., 2017)。

儘管中國擁有世界最大流化床焚化爐 MSWI 產能，但大部分流化床技術仍從歐洲進口。縱使每年都有新 MSWI 工廠建造，但依據 Lombardi 等人(2015)一項調查，如以開工日分類工廠性質，全球 MSWI 工廠數量增加最快時期，發生在 1990~2010 年之間(圖 4)，但自 2010 年之後，新建工廠數量逐漸下降。文獻(Chen et al., 2013; EPA, 2018)顯示，與歐洲或亞洲比較，美國跌幅最大，導致 MSWI 新建工廠減少主因為，民眾對 MSWI 污染問題的強烈反對。另外，美國環保署承認，便宜土地也是垃圾掩埋場替代 MSWI 因素之一。



資料來源：Lombardi L, et al., 2015

圖 4 MSWI 廠齡分佈 (從施工日開始計算)

WtE 設備總熱效率取決於最終回收能量多寡。當今世界上許多能量回收系統，都以傳統朗肯循環建造，具有汽電共生(combined heat and power, CHP)或組合蒸汽和電力(combined steam and power, CSP)配置，總能效高達 60%(Brown, 2011; Di et al., 2016; Islam, 2017; Lombardi L, et al., 2015)。

## 4.2 空氣污染控制系統

與 MSW 燃燒技術本身相關，由於早期焚化爐具有空氣污染缺點，因此 APC (air pollution control) 技術，無疑更大程度影響 WtE 演變。原始焚化爐僅是大規模燃燒工廠，幾乎沒有 APC。結果，很快引發群眾撻伐聲浪，許多工廠被迫關閉。靜電除塵器在 20 世紀 70 年代左右開發，而更先進 APC 系統則在 20 世紀 80 年代後期出現。裝有 ESP(electrostatic precipitator) 和粉塵噴霧廠房可以降低煙氣中顆粒物濃度，藉此滿足現行排放法規與限制。20 世紀 70 年代 MSWI 廠房，大部分設有緊急旁通通道，這是一種煙氣及時排放設備，唯有在 APC 系統故障時才啟動。這一特徵在現代 MSWI 工廠中並不常見。由於民眾對 MSWI 排放擔憂日益增加，排放限制變得更加嚴格。在 APC 系統開發早期階段，有不少更為詳細文獻發表，關注焦點放在 MSWI 污染物分析，如顆粒物質(特別是灰塵)、氮氧化物、硫氧化物及重金屬等，同時煙氣評估也需標示氯化氫(HCl)和氟化氫(HF)濃度。因此，APC 系統主要使用水噴霧，或少量添加(或無)化學品及催化劑進行濕式洗滌。在 20 世紀末，當人們發現 MSWI 排放戴奧辛會影響健康時，專家建議必須對 APC 機制進行改善，尤其是煙氣中戴奧辛消除。早期 APC 系統開發中，濕式及乾式洗滌方法被使用，化學品有碳酸鈣、碳酸氫鈉及氫氧化鈣等若干種。先進 APC 系統結合 ESP、多級洗滌、袋式過濾以及選擇性和非選擇性催化還原(SCR/SNCR)等設備，以處理氮氧化物、硫、HCl、HF 和大多數重金屬。就煙氣處理而言，相關實驗證明，多級系統比傳統單級系統更具成本效益。在洗滌之前，石灰中添加活性碳，可增強汞和戴奧辛的去除。一般而言，APC 技術分為濕式、乾式及半乾式等類別。其中 ESP、旋風分離器及袋式除塵器等設備，皆是去除煙氣中顆粒物的高效系統。簡單濕式與半乾式系統能中和大部分 HCl，同時降低固體含量。然而，這些系統營運者必須應對淬火和洗滌設備的表面高腐蝕風險，並付出濕式過程中廢水處理的額外成本。此外，除非在通過煙囪排放之前對煙氣進行再加熱，否則從現在 MSWI 煙囪中仍可看到白色煙流。儘管 APC 系統能夠清潔煙氣，滿足嚴格排放要求，但這種白色煙流讓民眾懷疑 WtE 廠房正在排放污染物。

多年來，處理 MSWI 煙氣排放控制技術，必須配合顆粒物質負荷波動及氣體流速變化，此乃燃燒室中進料不均勻所致。因此，當今 APC 系統使用燃燒中控制和燃

燒後控制，限制常規和微量污染物形成，目的在於改善離開煙囪煙道氣質量。燃燒控制措施包括在爐內熱能感測器使用與系統化調節空氣供應，以確保最佳燃燒狀態及煙氣完全燃盡。另一項技術是煙氣再循環，熱容量可增加約 1~3%，NO<sub>x</sub> 則大幅減少 20~40%，並且能抑制戴奧辛產生，讓煙氣後燃處理更為容易(Shi et al., 2018; World Bank, 1999a)。現代煙道氣處理技術還包括，在燃燒中和燃燒後程序中，抑制戴奧辛形成的催化劑使用。如 NH<sub>3</sub>-SCR(氨基催化劑)和 SCO(選擇性催化氧化)等，可將戴奧辛排放濃度有效降到 0.1 ng I-TEQ/m<sup>3</sup> 以下。最新實驗和試點研究顯示，在正常焚化條件下，硫脲(thiourea)的連續注入，可減少戴奧辛形成率達 95%(Mukherjee et al., 2018; Zhan et al., 2016)。在尋找最具成本效益處理技術過程中，工程師們已經盡到最大努力，特別是當在處理酸性氣體和戴奧辛上面。

在 MSWI 煙氣處理方面，世界各國具有不同程度成果。截至目前為止，歐盟所監測到的污燃物排放因子最低。見表 3。

表 3 若干地區 / 國家主要 MSWI 污染物排放因子

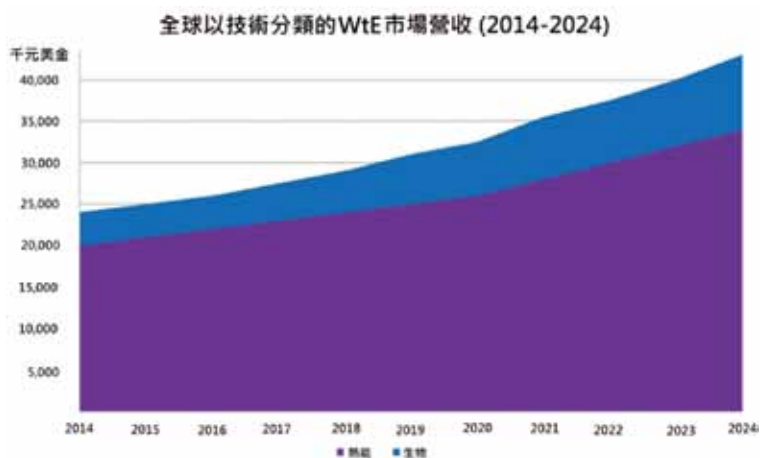
區域 / 國家	平均每日排放因子 (mg/Nm <sup>3</sup> )				
	懸浮顆粒	CO	SO <sub>2</sub>	HCl	NO <sub>x</sub>
歐盟	10	50	50	10	200
美國	19	89	60	32.5	270
日本	44	38.2	-	77.7	522.6
南韓	20	57.3	78.5	29.9	131.7
中國	20	80	80	50	250
平均	22.6	62.9	67.13	40.02	274.86

從表 3 可以看出，中國和日本大多數排放參數高於全球平均值。Lu 等人(2017)表示，儘管中國 MSWI 能力迅速增加，但與發達國家相比，仍缺乏實際營運經驗，同時回收 MSW 能源含量太低，也是中國實現更高 APC 效率主要障礙。

歐盟和美國，由於多年開發經驗，MSWI 戴奧辛排放減少技術，已取得重大進展。經由文獻分析顯示，美國戴奧辛環境濃度，在 1980~2000 年期間，已減少 90%(Dioxin Facts, 2017; EPA, 2006)，這證實地區政策和技術使用，可有效解決 MSWI 排放問題。

## 五、垃圾發電系統的商業案例

最近在美國和歐洲，特別是在亞洲，雖然大部分限制已克服，但因為垃圾掩埋空間減少，及持續依賴化石燃料，能源回收廢棄物熱處理，已成替代掩埋最佳方案。為實現國家 / 地區環境保護目的，發展 MSWI 已成重要戰略。過去 WtE 計畫僅針對環境保護設計，但現在擴展到經濟與社會整個層面。今天，WtE(包括其他熱能和生化技術)是一個充滿活力的行業，2013 年產值約 240 億美元(WEC, 2013)，預計到 2020 年可達 376 億美元(圖 5)(Grandview Consultancy, 2016)。截至 2014 年，至少有 80 座 WtE 焚化爐在美國運轉(Michaels, 2014; WEC, 2013)。每天處理超過 96,000 公噸 MSW，產生併網電力 2,769 MWh，回收再利用 73 萬公噸黑色金屬和有色金屬(Michaels, 2014)。



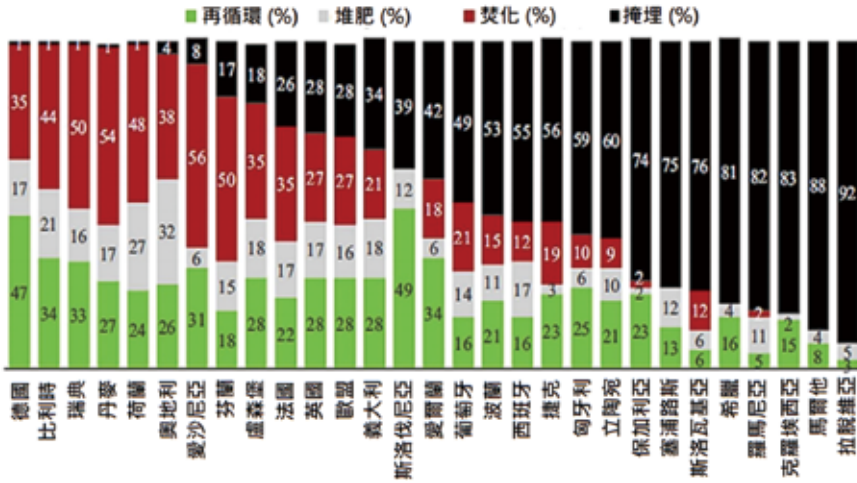
資料來源：Grandview Consultancy，2016

圖 5 2014~2024 年全球 WtE 市場技術產值

丹麥、瑞典、愛沙尼亞及芬蘭等是全球 WtE 領先者，焚化 MSW 比例至少有 50%(圖 6)，因此垃圾掩埋量減少到 MSW 總量 10% 以下(芬蘭除外，其掩埋率仍有 17%)。在東亞，日本也同樣具有 WtE 競爭力，該國每年產生 6,500 萬公噸 MSW，其中有 67% 是採用熱處理形式(Liobikienė et al., 2017; Lu et al., 2017)。在 2013 年，日本裝有 1,172 座 MSW 熱處理廠，每天處理 182,683 公噸 MSW，其中，778 家工廠回收餘熱，而 328 家工廠設有 CHP 系統，發電量約 1.8 GW(Lu et al., 2017; Yolin,

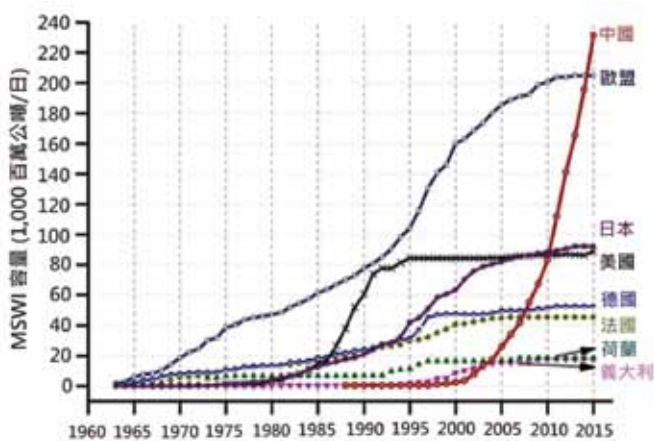


2015)。在 2010 年，歐洲有超過 452 座 MSWI 廠營運，每年處理城市生活垃圾和危險廢棄物，估計達 7,340 萬公噸。僅在 2014 年，英國 MSWI 占比就有 35%(672 萬公噸)，發電量 3.94 TWh，供應英國整體能源 1.1%(UK, 2018)。中國 WtE 焚化起步時間比歐洲和美國約晚一世紀(圖 7)。迄今為止，中國擁有最大 MSWI 產能(Lu et al., 2017)。



資料來源：Cucchiella et al. , 2017

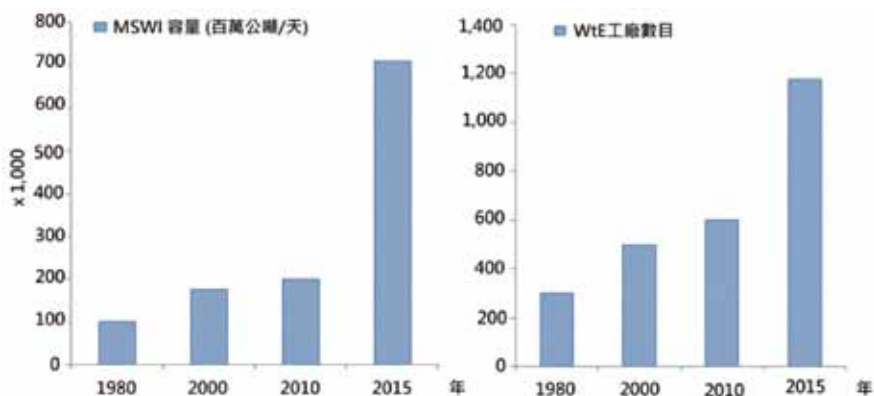
圖 6 歐盟 MSW 處置方案



資料來源：Lu et al. , 2017

圖 7 1960~2015 年各國 MSWI 容量

截至 2015 年，全球至少已有 1,179 座焚化爐，總容量超過 70 MT/d(圖 8)。但是，在未來 10 年內，空污相關法規趨嚴，可能進一步影響全球 MSWI 成長。



資料來源：Lu et al.，2017；Michaels，2014；UNEP，2010；US EIS，1980

圖 8 1980~2015 年 MSWI 增長

## 六、當前隱憂和未來前景

### 6.1 全球 MSW 發電量迅速增加

城市人口密度不斷增加，現代社會相關消費模式變化，促使全球廢棄物量迅速增加。例如，在 1980 年美國，必須掩埋廢棄物量就超過 1 億公噸(Roberts, 2015)。現在，據估計，全球每天產生城市生活垃圾已增到 350 萬公噸，到 2025 年將上達 610 萬公噸(ISWA, 2015; World Bank, 2012)(表 4)。全球固體廢棄物管理聯盟最關心的問題是，這種 MSW 增加趨勢是否可逆轉。由分析結果顯示，固體廢棄物管理當初並不那麼引人關心此問題，因為當時廢棄物產生量太低，不能證明對健康有實質影響。但這種觀念正在迅速改變。如今，固體廢棄物管理已成政府施政要項之一。如表 4 所示，到 2025 年，城市廢棄物可能增加 1 倍。政府單位必須為日益嚴重廢棄物管理挑戰，尋求有效解決策略，擴大所需資源能力，尤其是一些發展中國家，能夠安全處置 MSW 基本衛生掩埋土地嚴重稀缺(Scarlat et al., 2015)。因應垃圾激增，政府制定更嚴格廢棄物處理法規，以強化公共衛生系統有其必要性。很顯然，除非對廢棄物管理積

極投入，否則主管單位的廢棄物處理速度，可能趕不上廢棄物增加速度。跡象顯示，決策單位要有共同體認，MSWI 絕對不能像垃圾掩埋場一般，因為未能因應不斷增加廢棄物量，最後以飽和狀態收場。因此，面對根本問題，長期解決方案應是各國政府真正努力目標。目前措施旨在實現人均廢棄物產生零增長。也就是說，要實現這一目標，最終目標是無限期降低人均廢棄物產生。關於這點，歐盟已在循環經濟(circular economy)轉型策略中奠定基調。在全球人均固體廢棄物持續下降之前，「隨意產生垃圾」惡果仍將持續困擾社會。

表 4 按地區劃分的當前和預計城市廢棄物產生量

地區	目前可用數據			2025 年展望			
	都市人口總計 (億)	都市廢棄物產生量		預計人口		預計廢棄物產生量	
		平均值 (公斤/ 人日)	總計 (公噸/日)	都市總 人口(億)	總計產生 廢棄物 (公噸/日)	平均值 (公斤/ 人日)	總計 (公噸/日)
非洲	2.60	0.65	169,119	11.52	518	0.85	441,80
歐洲、亞太	7.77	0.95	738,958	21.24	1,229	1.5	1,865,379
歐洲、中亞	2.27	1.1	254,389	3.39	239	1.5	354,810
拉丁美洲、 加勒比海	3.99	1.1	437,545	6.81	466	1.6	728,392
中東、北非	1.62	1.1	173,545	3.79	257	1.43	369,320
OECD	7.29	2.2	1,566,286	10.31	842	2.1	1,742,417
特別行政區	4.26	0.45	192,410	19.38	734	0.77	567,545
總計	29.60	1.2	3,532,252	76.44	4,285	1.4	6,069,703

資料來源：World Bank，2012

## 6.2 難以排除的戴奧辛公眾恐懼症

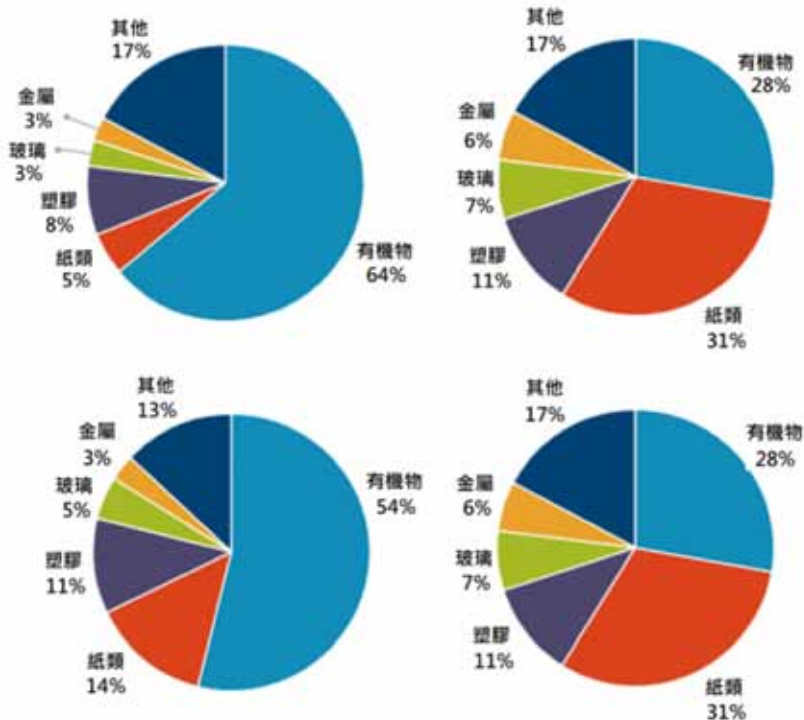
一直到 2004 年，人們仍普遍認為 MSWI 是戴奧辛來源(Martinez-Guijarro, 2017)。儘管如前幾節所述，MSWI 現在業者在減少戴奧辛排放上已有顯著進展，但民眾心中陰影仍然存在，所以熱處理 MSW 回收能量，依然是一項廣泛爭論議題。主要問題出在，自 20 世紀 80 年代後期以來，MSWI 已被證明是戴奧辛(泛指 75 種氯化

二苯並對戴奧辛)、多氯二苯並呋喃(polychlorinated dibenzofurans, PCDFs)及多溴化合物(如多溴二乙醚)等重要來源,這些物質是有毒的、致癌的及已知的內分泌干擾物。此外,戴奧辛具有疏水性、親脂性、穩定性及耐代謝性,難以從體內排出,傾向在生物體內長期累積。MSW 中戴奧辛,即使經過高溫燃燒破壞,也能在後煙氣中重整。戴奧辛半衰期長達數年至數十年,在環境中具高度持久性,因此稱為持久性有機污染物。防治之道首在燃燒室中維持最佳破壞條件,讓這些化合物無法在煙氣中生存,如前節所述,在煙道管中,防止污染物在燃燒後氣體中重新形成條件也是必要措施。然而,煙氣處理非常昂貴,整套設備初始成本往往超過預算。尤其是,嚴格排放標準只會讓焚化比掩埋更貴,這就是為什麼自 20 世紀末以來,美國停止垃圾焚化廠擴張主因。在許多國家,WtE 挑戰排放控制成敗,往往主導民意歸向與 MSWI 興衰。因此,環境績效是傳給 MSWI 的重要訊息,尤其是 APC 是消除公眾恐懼,從爭議轉為接納的一項關鍵性技術。另外,廢棄物回收應該受到合理政策支持,並獲得二級產品市場認可。同樣,正確資訊分享與透明化,亦是提升 MSWI 社會接受度的手段。

### 6.3 MSW 作為能源發電廠原料的不可預測性

廢棄物產量及成分,與國家總產值密不可分,但此兩變量也非一成不變。如圖 9 所示,較不發達國家有關生物降解有機廢棄物比例,往往高於經濟發達國家。通常,MSW 成分極其多樣化,這影響其在 MSWI 爐中的可燃性。在圖 10 中,Tanner 三角形以水分、灰分及可燃等成分近似值,決定 MSW 是否值得燃燒。其中,三角形陰影區域表示,在沒有燃料補充情況下,可讓廢棄物原料燃燒的三種成分近似值。圖 10 除了顯示成分重疊區域之外,三角形中也標示選取國家相關數據。由圖 10 可看出,MSW 可燃性在不同區域之間有顯著不同。在中國地區,廢棄物可用能量最低,與他種燃料共焚是最經濟有效選項。由於消費模式快速前進,要確切預測 MSWI 原料特徵仍是一項挑戰。焚化廢棄物成分和能量巨大變化,導致加熱特性波動、鍋爐燃燒不均、煙氣管理複雜及頻繁停機等操作困難。其中,水分(moisture content, MC)是 MSWI 系統中最不需要成分,因為水分增加廢棄物重量,但不增加廢棄物熱處理可獲淨能量。有效焚化要求 MC 低於 30%(Staley, 2015)。MC 未保持適當水平,將對焚化

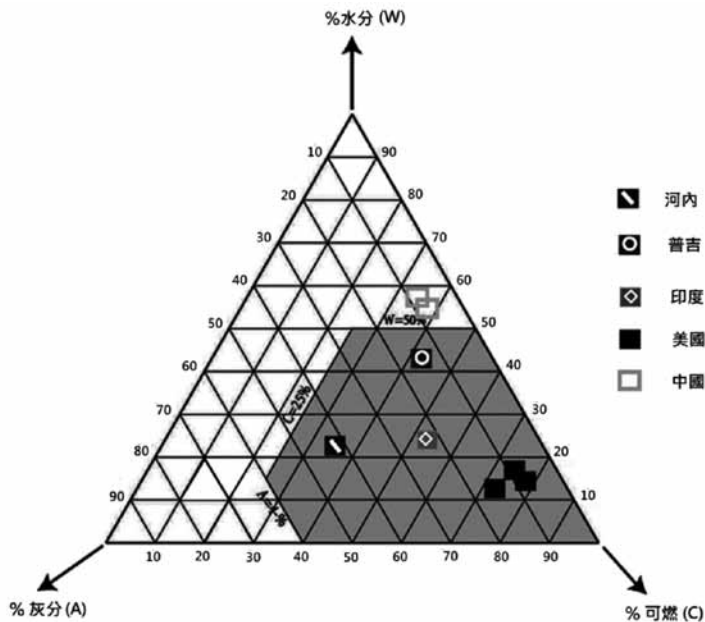
過程產生負面影響，降低總體熱量生產，並使整個系統經濟效率下降。文獻與數據顯示，最新廢棄物預處理可顯著改善 MSWI 缺點。廢棄物預處理主要發展障礙在於，當系統設計中添加這些功能時，總體處理成本往往增加，使得初始投資成本超出許多城市地方政府預算。“世界銀行 MSWI 指引”中建議，WtE 焚化要具有成本效益，MSW 平均低熱值應在 7 MJ/kg 之上，任何情況下都不應低於 6 MJ/kg(Tozlu et al., 2015; World Bank, 1999b)。MSW 低熱值迫使許多運營商不得不採取與煤炭共焚，以使 WtE 業務保持平穩。由此產生的問題是，系統可能會遭遇技術問題，由此產生排放可能更難控制，尤其是當初垃圾處理系統是為單目標設計。組件腐蝕—特別是酸性氣體引發的煙氣道及洗滌器表面腐蝕，仍然是許多 MSWI 業者所面臨的營運挑戰。



資料來源：World Bank，2012

圖 9 MSW 在不同區域的組成變化

塑料具有非常高熱值，可能超過 40 MJ/kg，遠超過 MSW 全年平均所需門檻 7 MJ/kg(Gug et al., 2015; Zhou et al., 2015)。MSW 特徵資料顯示，塑料占全球垃圾比例 10%，中高收入國家可能更高(World Bank, 2012; Zhou et al., 2015)。有效收集塑料廢棄物，確保形成焚化設備原料重要部分，可改善 MSW 可燃性。不幸的是，有很大比例塑料垃圾並沒有用在 MSWI。ISWA(2015)報告宣稱，在 2015 年，約有 700 萬公噸塑料廢棄物流入海中，如果 Zhou 等(2015)觀察到平均值正確，則損失能量將有 280 TJ。



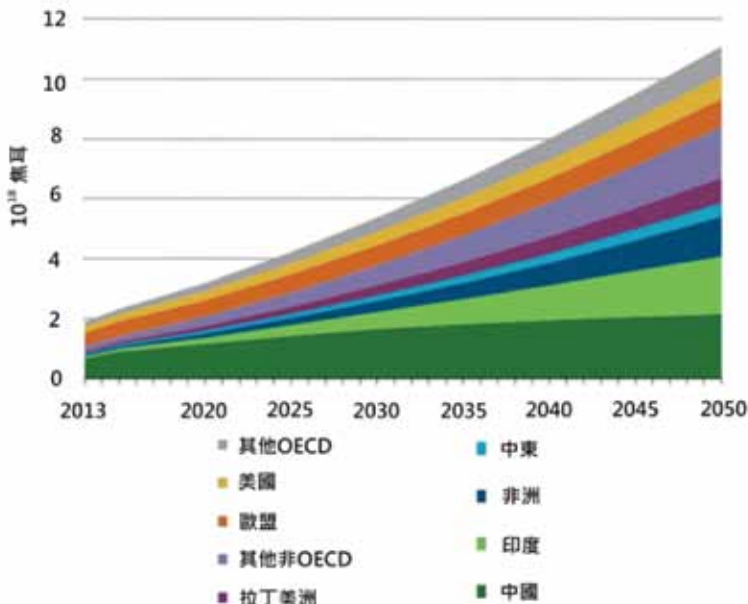
資料來源：Di et al., 2017；Lu et al., 2017；Suthapanich, 2014

圖 10 MSW 在不同地區焚化特徵

#### 6.4 政策演化有利廢棄物回收、再利用及減少

MSW 預處理策略及立法無疑是 MSWI 增長最重要驅動因素，尤其是歐盟廢棄物架構指令(2008/98/EC)下，WtE 受到強烈推動。除了空氣污染引發關注外，關於 MSWI 爭論也集中在下列觀點，如焚化(及相關熱基礎技術)造成浪費、阻礙廢棄物最小化、間接不利回收與廢棄物預防目標。世界銀行預計，到 2050 年，WtE 在世界各

地供應 Exajoules(EJ)等級的一次能源將有 11 種(圖 11)。全球各地區廢棄物管理政策方向，將決定未來 WtE 實際貢獻。歐盟已制定「2012-2020 環境行動計劃」，其基本理念為「在地球極限範圍內生活」。根據修訂政策，歐盟規劃到 2020 年期限內，將廢棄物視為一種資源來管理，人均廢棄物產生量絕對要下降，要點另外包括，開發廣泛回收系統和二級功能市場，能讓再利用與再循環具有經濟吸引力。此外，該政策目標預計在 2020 年達到零掩埋，而能源回收僅限於不可回收材料。最新發展顯示，歐盟已採用該計畫中的循環經濟概念，防止更多廢棄物產生，並採取再利用和再循環機制。可預期的是，該項政策將對 MSWI 未來前景產生重大影響。Lu 等(2017)強調，隨著各國減少垃圾掩埋場管理目標的實現，焚化減速可能會進一步擴大，最終停止。這為 MSWI 未來，產生複雜性與不確定性。例如，德國已經禁止掩埋未經處理 MSW，該措施早在 2009 年就已存在。其他國家如瑞典、丹麥、法國、挪威、比利時及美國等其他國家也實施類似禁令，所述現象含括喜憂參半不確定因素。雖然這些禁令影響無法準確預測，但如此政策轉型勢必衝擊 MSWI 長期經濟可行性。



資料來源：World Bank，2012

圖 11 WtE 對各地區未來一次能源貢獻預測

例如，台灣 24 座 MSWI 廠利用率約 49%，僅為歐盟、美國及中國等一半 (Lu et al., 2017; Suthapanich, 2014)。台灣實施更多廢棄物回收政策，可能是 MSWI 廠低迷利用率的背後主因。

儘管這些爭論存在，但值得注意的是，全球有超過 75% 的 MSW 仍以掩埋方式處理，在全球溫室氣體減量趨勢下，目前仍不能放棄 MSWI(UNEP, 2010)。如前所述，歷史證明，在不斷擴大 MSW 數量管理上，僅靠回收策略是不夠的。在遠離「廢棄物社會」之前，MSWI 仍具正面相關性，並應當作綜合固體廢棄物管理系統一部分。另外一項重點是，我們必須意識這種相關性不會無限期延伸，就像垃圾掩埋一樣，未來 WtE 對廢棄物最小化的吸引力可能較小，因為政策轉型已悄然來臨。

## 七、結論

從全球 MSW 產生趨勢來看，焚化處理廢棄物量一直在增加，因為 MSWI 除了能夠減少掩埋殘餘廢棄物之外，更是一種補充傳統化石燃料供應的再生能源。在都會區興建新垃圾掩埋場土地稀缺，為了進一步因應城市生活垃圾數量增加，MSWI 廠數量可能會在未來幾年內擴增，藉此滿足日益增長廢棄物轉移所需與能源回收。本綜述文章顯示，自 19 世紀後期以來，MSWI 取得重大進展，特別是在燃燒系統效率及煙氣處理改進。考慮今天世界至少有 1,179 座 MSWI 廠，總產能超過 70 萬公噸 / 天，MSWI 有利相關性仍然很明顯(Lu et al., 2017)。但是，關鍵基本問題仍需獲得解決。首先，城市生活垃圾量持續增加，這表示地球仍然是一個巨大“廢棄物場所”，在扭轉城市生活垃圾減量方面，成就顯然不夠，縱使 MSWI 對減廢棄物減量貢獻卓著，但確保人均廢棄物產生量持續下降的循環經濟，應是解決全球廢棄物問題唯一永續方案。值得一提的是，在塑膠廢棄物氾濫的今天，廢棄物焚化技術無疑是一項未來看好的救星。其次，儘管 MSWI 的 APC 系統開發具有重大成就，但針對污染物尤其是戴奧辛的公眾恐懼症仍未減少。目前態勢分析顯示，MSWI 仍是一個相關 MSW 管理選項，因此，台灣能環部門現在需要更加努力消除負面形象，藉由釐清公眾錯誤認知，讓 WtE 焚化成為一項更可接受技術。目前，MSWI 已發展成充滿活力產業，市場競爭優勢能與傳統固體燃料相抗衡，政府相關單位可利用目前狀態進一步推廣 MSWI，



甚至響應政府南向政策，往東南亞及印度等新興國家推廣焚化廢棄物產生能源技術，並且協助當地建廠。這些國家經濟快速成長當中，並且人口密集，伴隨著不少廢棄物處理問題，台灣的經驗與技術值得這些國家借鏡。對先進國家來講，尤其是邁入已開發國家的台灣，未來將朝循環經濟政策轉型，MSWI 相關性並非無限期。雖然增加 MSWI 技術是轉型期間不可或缺的行動方案，但業界和政府皆應培養在廢棄物管理層級內接受其他選項的心理準備。

## 參考文獻

行政院環保署(2018)，中華民國環境保護統計年報。

<https://www.epa.gov.tw/lp.asp?ctNode=34805&CtUnit=2609&BaseDSD=7&mp=epa>

呂錫民(2012)，台北市的綠能發展潛力，科學發展，第 479 期，p64-67。

呂錫民(2017)，循環經濟的基石：資源再利用與廢棄物能源，臺灣銀行季刊，第六十八卷，第二期，p151-169。

岑可法等(2016)，可燃固體廢棄物能源化利用技術，化學工業出版社，中國。

聯合新聞網(2018)，面對焚化爐老化「環署該盤點了」。 [https://udn.com/news/story/7989/3400027?from=udn-relatednews\\_ch2](https://udn.com/news/story/7989/3400027?from=udn-relatednews_ch2)

BP (2016), BP statistical review of world energy june 2016, Technical report, 65th ed. <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energyeconomics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-fullreport.pdf>

Brown, R.C. (2011) Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power, Chichester, West Sussex, p1-330.

Carbon Trust (2014), Waste to energy in Indonesia. <https://www.carbontrust.com/resources/reports/technology/waste-to-energy-in-indonesia/>

Chen C.-C., Chen, Y.-T. (2013), Energy recovery or material recovery for MSW

treatments? Resour Conserv Recycl, 74: p37–44.

Cheng, H. (2014), Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: current and future practices in China, Bioresour Technol, 101(11): p3816–3824.

Cucchiella, F. et al. (2017), Sustainable waste management: waste to energy plant as an alternative to landfill, Energy Convers Manag, 131: p18–31.

Di M.F., et al. (2016), Energetic efficiency of an existing waste to energy power plant, Energy Procedia, 101: p1175–1182.

Di, M.F., Lasagni, M. (2017), On line measurement of the lower heating value of waste and energetic efficiency of an existing waste to energy plant: identification of uncertainty associated to probes and their influence on the results, Energy Procedia, 126: p613–20.

Dioxin Facts (2017), Questions and answers - dioxins, furans, TCDD, PCBs.

[http:// www.dioxinfacts.org/questions\\_answers/#9](http://www.dioxinfacts.org/questions_answers/#9)

EPA (2018), Energy recovery from the combustion of municipal solid waste (MSW).  
<https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw>

EPA (2006), An inventory of sources and environmental releases of dioxin-like compounds in the United States for the years 1987, 1995, and 2000, National Centre for Environmental Assessment, Washington, DC.

Blue Ridge (2009), Waste gasification: impacts on the environment and public health, The Blue Ridge Environmental Defense League. <http://www.bredl.org/pdf/wastegasification.pdf>

EU (2012), Environment in the EU27 Landfill still accounted for nearly 40% of municipal waste treated in the EU27 in 2010. [http://europa.eu/rapid/press-release\\_STAT-12-48\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_STAT-12-48_en.htm)

- Fitzgerald, G.C. (2013), Pre- processing and treatment of municipal solid waste (MSW) prior to incineration, *Waste Energy Convers Technol*, p55-77.
- Grandview Consultancy (2016), Waste to energy market analysis by technology (thermal incineration, gasification, pyrolysis and biological) and segment forecasts 2014-2024. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/waste-to-energy-technology-industry>
- Gug, J. et al. (2015), Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics, *Waste Manag*, 35: p283–292.
- IEA (2016), World energy outlook report 2016, International Energy Agency. <https://www.iea.org/media/publications/weo/WEO2016Chapter1.pdf>
- Islam, K.M.N. (2017), Municipal solid waste to energy generation: an approach for enhancing climate co-benefits in the urban areas of Bangladesh, *Renew Sustain Energy Rev*, 21(2):p 2472-2486.
- ISWA (2015), International solid waste association (ISWA) report 2015. [https://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Publications/ISWA\\_Reports/ISWAreport2015\\_webred.pdf](https://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Publications/ISWA_Reports/ISWAreport2015_webred.pdf)
- Liobikien , G., Butkus, M. (2017), The European Union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy, *Renew Energy*, 106: p298–309.
- Lombardi L, et al. (2015), A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste, *Waste Manag*, 37: p26–44.
- Lu, J.-W., et al. (2017), Status and perspectives of municipal solid waste incineration in China: a comparison with developed regions, *Waste Manag*, 69: p170-186.
- Makarichi, L., Jutidamrongphan, W., Techato, K.-A. (2018), The evolution of waste-to-energy incineration: A review, *Renew Sustain Energy Rev*, 91: p812-821.
- Martínez-Guijarro, K. et al. (2017), Atmospheric concentration of polychlorinated

dibenzop-dioxins, polychlorinated dibenzofurans (PCDD/Fs) and dioxin-like polychlorinated biphenyls (dl-PCBs) at Umm-Al-Aish oil field-Kuwait, *Chemosphere*, 168: p147–154.

Michaels, T. (2014), ERC Directory of Waste-to-energy facilities in the United States. URL <http://www.wte.org>

NRC (2018), Waste incineration overview, The Academic Press, Washington DC, p17-33.

Ramboll Consult (2016), Waste to energy in Denmark, Wayback Machine.

REPPIE (2014), Africa's First Waste-to-Energy Facility, Addis Ababa, Ethiopia: Cambridge Industries Energy.

<https://static1.squarespace.com/static/57c7f80620099eafefefe77a/t/57d6c6401b631b0c62c6d886/1473693259763/Reppie+Brochure+Final.pdf>

Roberts J. (2015), A brief history of waste regulations in the United State and Oklahoma, Office of the Oklahoma Secretary of Energy and Environment.

Scarlat, N. et al. (2015), Evaluation of energy potential of municipal solid waste from African urban areas, *Renew Sustain Energy Rev*, 50: p1269–1286.

Shi, B., et al. (2018), Effects of internal flue gas recirculation rate on the NO<sub>x</sub> emission in a methane/air premixed flame, *Combust Flame*, 188: p199–211.

Staley, B. (2015), Waste-to-Energy, Environmental research and education foundation (EREF).

Suthapanich, W. (2014), Characterization and assessment of municipal solid waste for energy recovery options in Phetchaburi, Asian Institute of Technology, Thailand.

Tester, J.W. et al. (2012), Sustainable energy: choosing among options. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

- Themelis, N.J. (2003), An overview of the global waste-to-energy industry, Waste Management World.
- Tozlu, A. et al. (2015), Waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep, Renew Sustain Energy Rev, 54: p809-815.
- UK (2018), UK statistics on waste report, Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK.
- UNEP (2010), Trends in solid waste management: management: issues, issues, challenges and opportunities.
- US EIS (1980), A status report on energy recovery from municipal solid waste: technologies, lessons and issues, Public Technology Inc, Energy Information Service Office of Intergovernmental Affairs, US Department of Energy to the Urban Consortium for Technology Initiatives.
- WEC (2013), Waste-to-Energy 2013, Report.pdf: World Energy Council.
- WEC (2016), Waste-to-Energy 2016, World Energy Council. [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources\\_Waste\\_to\\_Energy\\_2016.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Waste_to_Energy_2016.pdf)
- WEC (2013), Waste to Energy 2013 (Forum News), World Energy Council. <http://www.worldenergy.org>
- Wikipedia (2018), Waste-to-energy. [https://en.wikipedia.org/wiki/Waste-to-energy#cite\\_note-bredl.org-10](https://en.wikipedia.org/wiki/Waste-to-energy#cite_note-bredl.org-10).
- World Bank (1999a), Municipal Solid Waste Incineration Technical Report.
- World Bank (1999b), Decision Makers' Guide to Municipal Solid Waste Incineration. World Bank, Washington DC. <http://siteresources.worldbank.org/INTUSWM/Resources/463617-1202332338898/incineration-dmg.pdf>
- World Bank (2012), What a waste: a global review of solid waste management

<http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/Chap3.pdf>

Yolin, C. (2015), Waste management and recycling in Japan, EU Jpn Cent Ind Coop 2015.

Zhan, M. et al. (2016), Suppression of dioxins after the post-combustion zone of MSWIs, Waste Manag, 16(54): p153–61.

Zhou, H. et al. (2015), Classification of municipal solid waste components for thermal conversion in waste-to-energy research, Fuel, 145: p151–157.