

廢棄物轉能源現況與效益分析

張瓊芬^{1*} 張家驥² 郭欣怡³

摘要

早期因應「焚化為主、掩埋為輔」的垃圾處理政策，為妥善處理民眾日常生活垃圾而設置焚化廠。因民眾生活習慣的改變及資源回收政策執行成效良好，使得現今進廠廢棄物較設計熱值高，進而造成目前營運中的焚化爐處理量能下降，且在「廢棄物為錯置資源」的轉念之下，使得我國將廢棄物管理導向為資源循環，政策規劃廢棄物資源化並妥善運用，達成循環資源、零廢棄的願景。無害的高熱值廢棄物為具有熱能回收價值之物質，因此環境部推動可燃性事業廢棄物燃料化，將可燃性、高熱值廢棄物製成固體再生燃料(Solid Recovered Fuel, SRF)，並作為替代燃料或輔助燃料使用，期許能夠增加廢棄物去化管道、減少焚化處理需求，同時藉由「轉廢為能」，達到廢棄物資源化轉化潔淨能源之目的。

臺灣面臨2050淨零排放跨世代、跨領域、跨國際之轉型工程，政府將建構科技研發及氣候法制等兩大面向之基礎環境，推動能源、產業、生活、社會等四大轉型策略，逐步實現2050淨零排放之永續社會。為鼓勵產業轉型製造部門的淨零推動策略，具有製程改善、能源轉換及循環經濟，其中循環經濟包含原料替代、廢棄物衍生燃料、能資源整合及碳捕集與利用技術(Carbon Capture and Utilization, CCU)等四項措施，針對廢棄物衍生燃料措施來看，為目前政府立即可推行的減碳措施。淨零12項關鍵戰略行動計畫中的關鍵戰略3：前瞻能源中包含地熱發電/生質能/海洋能，其中提到生質能/廢棄物發電技術成熟，可進一步發展多元料源及高效電力系統，配合生質能碳捕獲封存技術(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCUS)，加速達成淨零排放目標。此外，關鍵戰略8：資源循環零廢棄中，亦提到事業廢棄物燃料化的比率將逐步提高，將可燃廢棄資源及生物質轉廢為能。

廢棄物燃料化(Waste to Fuel)為廢棄物轉製能源(Waste-to-Energy, WTE)方法之一。廢棄物燃料化可以在處理廢棄物的過程中，同時回收能源與具有價值的材料，以滿足循環經濟，此外取代化石燃料作為可再生能源(生物質部分)，達到低碳/去碳化目的以做為邁向完全可再生能源之過渡燃料使用。因此將無害適燃性的廢棄物轉製為廢棄物衍生燃料(Refuse-Derived Fuels, RDF)/固體再生燃料(Solid Recovered Fuel, SRF)，可達到資源永續使用與支持去碳化/脫碳，以符合國家2050淨零排放的戰略目標。

關鍵詞：廢棄物轉能源(Waste to Energy, WTE)、廢棄物衍生燃料(Refuse-Derived Fuels, RDF)、固體再生燃料(Solid Recovered Fuel, SRF)、2050淨零排放、經濟效益

¹東海大學環境科學與工程學系教授

²臺灣生質能技術發展協會資深研究員

³東海大學環境科學與工程學系環境保護暨永續發展中心工程師

*通訊作者，電話：04-23590121分機33622，電郵：cfchang@thu.edu.tw

收到日期: 2024年04月12日

修正日期: 2024年05月17日

接受日期: 2024年05月23日

1. 概述

由於臺灣自有能源匱乏，約有98%需仰賴進口，其中化石能源依存度高，為因應2015年通過「溫室氣體減量及管理法」及聯合國氣候變化綱要公約第21次締約方大會(COP 21)通過之巴黎協定等溫室氣體減量相關規範，我國能源政策的核心價值應兼顧「能源安全」、「綠色經濟」、「環境永續」與「社會公平」四大面向的共同治理與均衡並進，以促進能源永續發展(國家發展委員會，2022)。臺灣面臨2050淨零排放跨世代、跨領域、跨國際之轉型工程，政府將建構科技研發及氣候法制等兩大面向之基礎環境，推動能源、產業、生活、社會等四大轉型策略，逐步實現2050淨零排放之永續社會(國家發展委員會，2022)。

臺灣規劃2050淨零排放初步藍圖，總電力占比為60-70%之再生能源，並配合9-12%之氫能，加上顧及能源安全下使用搭配碳捕捉之火力發電(占比20-27%)，以達成整體電力供應的

去碳化。在非電力能源去碳化方面，除加速電氣化進程外，亦將投入創新潔淨能源之開發，如氫能與生質能以取代化石燃料，並搭配碳捕捉再利用及封存技術。而在其他難以削減之溫室氣體排放方面(如：科技產業製程含氟氣體排放、農業畜牧生產及廢棄物廢水處理衍生之甲烷、氧化亞氮排放等)，將積極規劃山林溼地保育以提升國土碳匯量能(國家發展委員會，2022)。

與現今一般焚化廠處理程序略有不同，廢棄物燃料化係利用分選技術，將非有害適燃性廢棄物分離後，製成符合後端需求之燃料，從而取代原先工業用鍋爐與其他設施之燃料，在適當的操作之下可有效提高燃燒效率。廢棄物燃料化早期的發展為將廢棄物產製為廢棄物/垃圾衍生燃料(Refuse-Derived Fuels, RDF)。依據美國材料和試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)公布的ASTM E856-83 (2004)標準(目前已撤回該分類標準)，將RDF依據篩分破碎等物理處理及外觀型態分

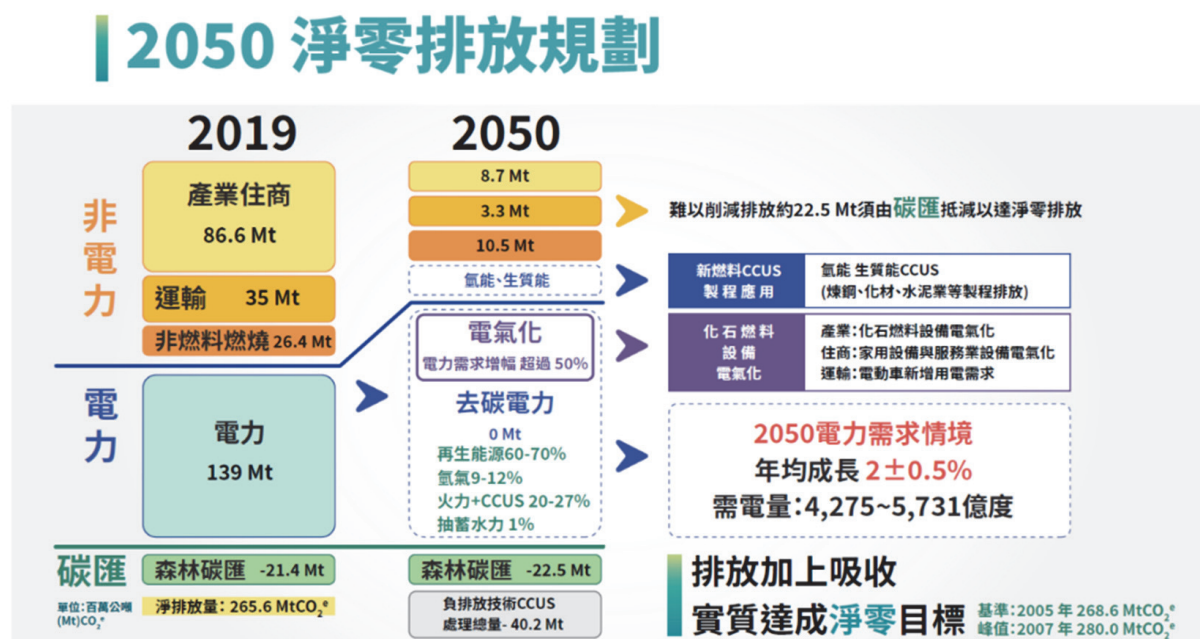


圖1 臺灣2050淨零轉型路徑規劃
 資料來源：國家發展委員會，2022

為七類，但就RDF本身的品質(如熱值、重金屬、氯含量等)並沒有特別進行定義，造成無法掌握燃燒後對環境所造成的影響，因此在使用上將對RDF的使用者帶來極高的潛在環境危害風險。依據歐洲再生/回收燃料組織(European Recovered Fuel Organization, ERFO)定義，當RDF以國際標準進行生產時，就可以定義為標準化材料之固體再生燃料(Solid Recovered Fuels, SRF)。SRF是一種將非有害適燃性固體廢棄物經分選及均質化等程序，並依鍋爐或燃燒裝置之需求所進行製造的可靠燃料產品。此外，若部分產品為生物質所製成，將有助於二氧化碳排放減少，歐盟針對SRF的品質乃以淨熱值、氯含量與重金屬汞濃度三項檢測指標作為經濟、技術與環境風險等三個面向的規範的要求。環境部目前針對SRF在環境風險指標上除了重金屬汞之外，對於鉛與鎘也訂定相關的品質規範。

生質燃料、替代燃料或是廢棄物中的生物質燃燒所產生的二氧化碳排放是被歸類為碳中和性，近年來受到極端氣候變遷的影響及溫室氣體減量刻不容緩的議題下，混合廢棄物和SRF作為替代燃料的熱利用在廢棄物管理中變得越來越重要。由於RDF或SRF通常由化石和生物質組成，因此只有一部分二氧化碳(化石碳)排放量計入溫室氣體清單或排放交易計畫。因此使用SRF作為替代燃料，與單獨使用純化石燃料相較，對於減碳具有正面經濟與環境效益，且由生命週期的研究中證實SRF具有相當高的環境效益(The role of SRF in a Circular Economy, 2016)。

推動產業轉型製造部門的淨零策略，具有製程改善、能源轉換及循環經濟三大面向，其中循環經濟包含原料替代、廢棄物衍生燃料、能資源整合及碳捕集與利用(Carbon Capture and Utilization, CCU)技術等四項措施，其中廢棄物

衍生燃料(RDF)/固體再生燃料(SRF)為目前政府立即可推行的轉廢為能措施，此外短期以原料替代、使用固體再生燃料(SRF)及能資源整合為主，長期則朝碳捕集與利用(CCU)等突破性創新技術開發應用。說明如下(國家發展委員會，2022)：

- (1) 原料替代：包括水泥業礦石原料替代、鋼鐵業增用廢鋼作為替代原料、紡織業持續導入使用循環再生材料。
- (2) 廢棄物衍生燃料：包括擴大水泥業廢棄物替代燃料占比、擴大造紙業固體再生燃料SRF燃料占比。
- (3) 能資源整合：推動循環產業園區及聚落能資源整合。
- (4) 碳捕集與利用(CCU)技術：將擴大石化業CO₂回收利用與投入CO₂回收合成化學品研發。

2022年12月28日行政院國家永續發展委員會公布淨零十二項關鍵戰略(國家發展委員會，2022)，關鍵戰略3：前瞻能源中包含地熱發電/生質能/海洋能，其中提到生質能/廢棄物發電技術成熟，可進一步發展多元料源及高效電力系統，配合生質能碳捕獲封存技術(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCUS)，加速達成淨零排放目標。此外，關鍵戰略8：資源循環零廢棄中，亦提到事業廢棄物燃料化的比率將逐步提高，將可燃廢棄資源及生物質轉廢為能。關鍵戰略3：前瞻能源的Phase 2將於2025年達成供應778 MW (廢棄物_一般及事廢≥80 MW；廢棄物_農廢≥1 MW；生質能_沼氣≥3 MW)之分散式生質電力；Phase 2將於2026年至2030年達 805~1,329 MW (燃煤機組轉型：生質能發電為500 MW；生質能_沼氣為1 MW；廢棄物_一般事廢為30 MW)，如圖2所示。由此可知在降低化石燃料所產生溫室氣體二氧化碳排放上，生質燃料與廢棄物衍生燃料

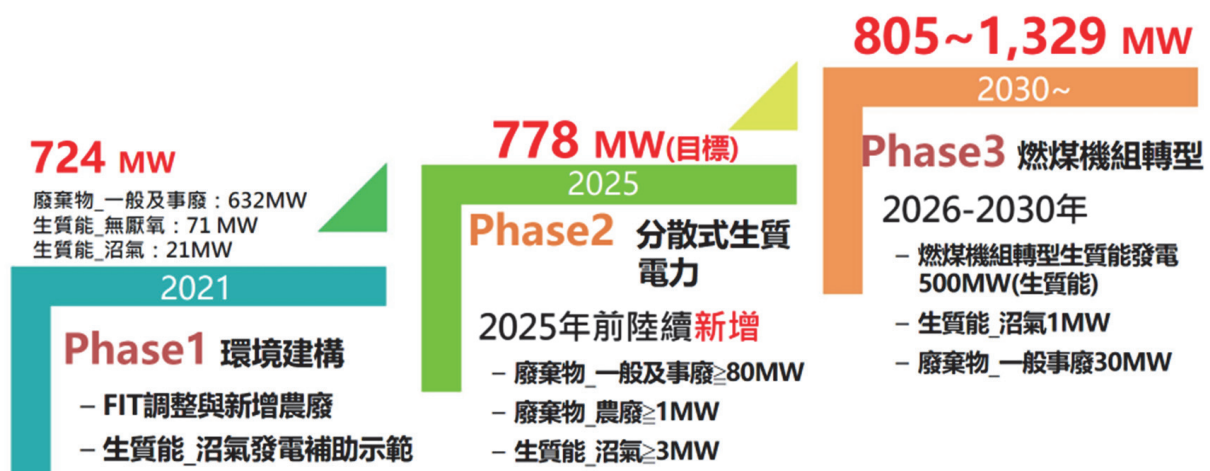


圖2 淨零十二項關鍵戰略行動計畫關鍵戰略3之生質能發展藍圖

資料來源：前瞻能源關鍵戰略行動計畫(簡報)，經濟部能源局

之廢轉能，為國家目前邁向低碳/去碳化之轉型過程中扮演著重要的角色。截至2021年統計資料顯示廢棄物總量為3,200萬公噸，其中事業廢棄物為2,195萬公噸，關鍵戰略8：資源循環零廢棄為有效的達成能資源化再利用，將推動強化原料、再生料與廢棄物分流，鼓勵升級回收再利用；針對有機廢棄物能資源化，將建立區域型共同回收與處理模式、可燃廢棄資源及生物質轉廢為能。國家政策將於2025年及2030年將事業廢棄物燃料化比率提升至60%及80%，顯見RDF/SRF的製造、管理與發展扣合國家淨零排放發展，為國家重要議題。

2. 廢棄物轉能源(Waste to Energy, WTE)現況分析

歐盟在指令2008/98/EC (廢棄物框架指令)中引入五步廢棄物管理層次結構，其中預防(即減少廢棄物產生)被視為優先選擇，其次為再利用、回收和其他形式的回收，還包括通過燃燒、堆肥和掩埋處置作為最後的管理系統，環境效能則從上到下遞減，其中WTE則是在管理層次偏中下的區域，作為能源回收使用。

不斷增長的全球人口和不斷提高的生活水平，正產生越來越多都市固體廢棄物(Municipal Solid Waste, MSW)，預計到2050年，全球每年將產生34億噸MSW，其中在低收入國家，食物和綠色垃圾的比例往往更高，而高收入國家往往有更多的可回收物(玻璃、金屬、紙張和紙板)和更多的塑料，MSW的全球平均組成(按重量計)如圖4所示(Kearns, 2019)。研究資料顯示，人均MSW量也隨著收入增加而增長(圖5)，因此，預期發展中國家的經濟增長將使得國民所得增加進而導致MSW產量大幅增加(Kearns, 2019)。

廢棄物與其他能源的不同之處在於，MSW的管理措施與生產者和消費者的行為，決定所適合的個別技術進行燃料分選與轉化的數量和特性。由於MSW包含生物質來源(植物來源)和非生物質來源(化石燃料)來源的材料，具高異質性；因此在用於鍋爐或是其他燃燒設備之前需要進行適當的分選與分類，可以單獨或是併同手動和自動化程序結合，採用機械、磁力、熱、風力和其他技術進行生物質和處理可燃物、不可燃物和有價的物質(例如金屬)的分選或分離，而通常使用散料分揀設備去除的剩



圖3 固體廢棄物管理層次結構
資料來源：European Commission

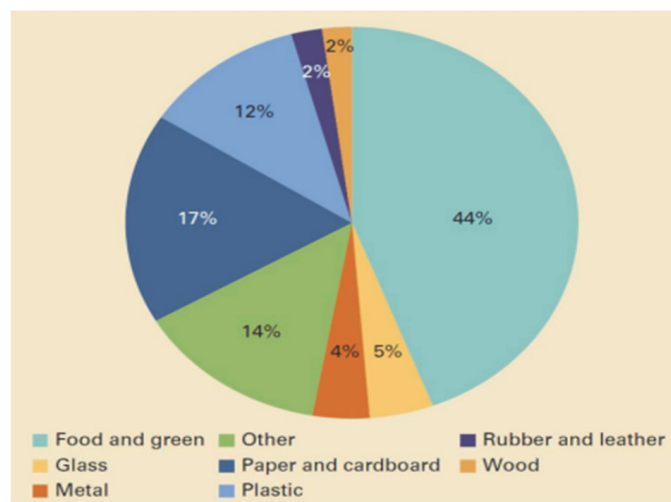


圖4 MSW全球平均重量組成百分比
資料來源：Kearns, 2019

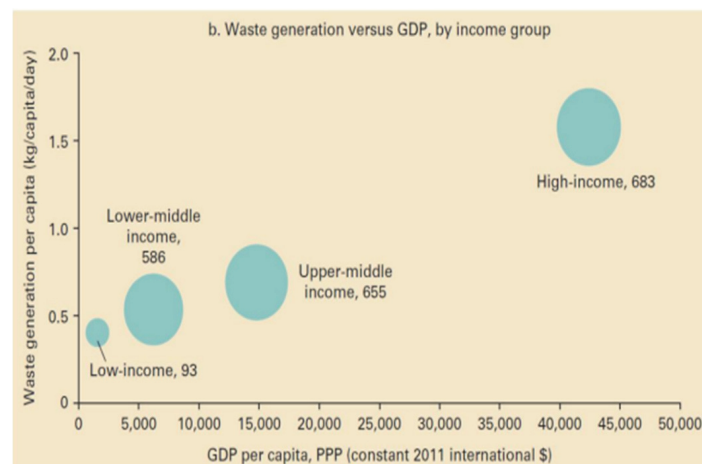


圖5 按收入分組的人均廢棄物產生量
資料來源：Kearns, 2019

餘物質主要是塑料、食物和綠色廢棄物，以及受污染的紙張和紙板。一般來說，當廢棄物含有 $<50\%$ 的水分、 $>25\%$ 的碳和 $<60\%$ 的灰分時，廢棄物可直接在無輔助燃料的情況下燃燒(Kearns, 2019)。

近年，全球氣候變遷的擔憂已經在科學界和政策制定者之間進行廣泛討論，而鼓勵使用清潔和綠色能源來減少溫室氣體排放，較顯著的做法為歐盟(European Union, EU)設定的目標，即至2020年、2030年和2050年系統性地減少二氧化碳排放量，從長遠來看，至2050年歐盟的目標與1990年的水平相比，將溫室氣體排放量減少80-95% (Javier, 2017)。化石燃料燃燒所產生的二氧化碳排放量占溫室氣體總排放量將近80%，平均占歐盟溫室氣體排放量年度變化的80%。

簽署京都協議的歐洲國家將WTE視為減少垃圾掩埋場產生甲烷逸散量，且可同時增加回收和能源生產的一種方式。典型的WTE工廠由以下部分組成，廢棄物處理過程，包括廢棄

物接收和預處理、焚化爐和鍋爐、能源回收和生產設備、空氣污染控制設備、灰渣收集與處理。在WTE的技術發展上有不同的形式，提供多種方式產能並處於不同的發展階段，但有兩個共同目標：管理廢棄物和產生能源。傳統基於燃燒程序將固體廢棄物轉化為熱量以供直接使用或進一步轉化為蒸汽和電力，而先進的轉化程序將固體轉化為氣體或液體燃料，提供更廣泛的用途。圖6顯示了廣泛的WTE技術的狀態(Kearns, 2019)。

3. 效益分析

SRF是由高熱值的廢棄物製成的固體燃料，其所帶來的能源效益是廢棄物轉能源的重要方面之一，在能源利用方面具有多重優勢：

(1) 替代化石燃料：SRF可以替代傳統的化石燃料，如煤和天然氣，用於發電、供熱等用途。透過使用SRF，可以減少對有限的化石能源的依賴，進而降低對自然資源的壓力。

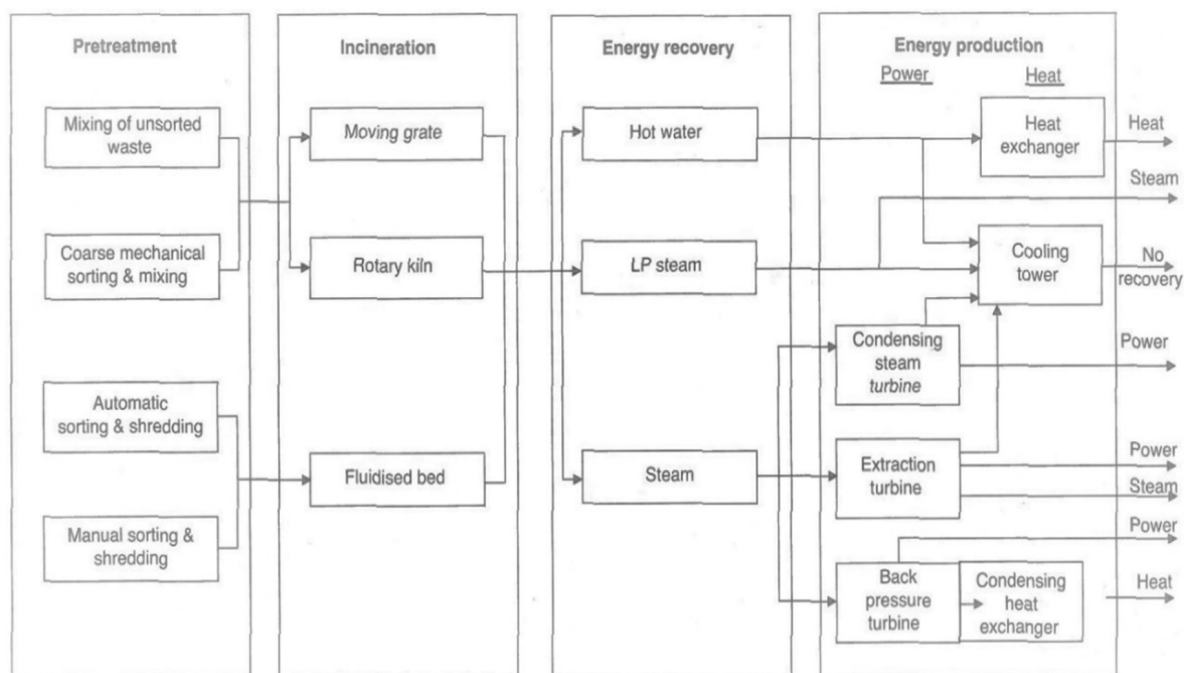


圖6 廢棄物轉化為能源技術概述

資料來源：Kearns, 2019

- (2) 減少溫室氣體排放：相對於傳統的焚化或掩埋廢棄物的處理方式，將廢棄物轉化為SRF可以大幅減少溫室氣體的排放量。由於焚化和掩埋廢棄物時釋放的二氧化碳等溫室氣體量相對較高，而SRF的燃燒過程則產生較少的排放，有助於降低碳足跡。
- (3) 提高能源效率：SRF製造過程中，通常會選擇高熱值的廢棄物作為原料，這些廢棄物通常包含有機物質，如生物質和塑料等。這些有機物質在燃燒過程中可以釋放出大量的熱能，因此使用SRF可以提高能源利用效率，產生更多的能量。
- (4) 促進循環經濟：SRF的製造過程本身就是廢棄物的再利用和循環利用的一部分。藉由將廢棄物轉化為有價值的能源資源，可以促進循環經濟的發展，實現資源的永續利用。

整體而言，製成SRF的能源效益包括替代化石燃料、減少溫室氣體排放、提高能源效率和促進循環經濟等多個方面，對於實現可持續能源發展和環境保護具有重要意義，以下將分別就環境效益與經濟效益詳細說明。

3.1 環境效益

根據研究指出燃燒每噸廢棄物排放的CO₂取決於廢棄物的成分，而依據歐盟統計局的統計數據顯示，燃燒廢棄物的過程中所增加的CO₂大部分來自都市固體廢棄物(Municipal Solid

Waste, MSWs) (Understanding the carbon impacts of Waste to Energy incineration)。燃燒每噸MSW通常會釋放0.7至1.7噸CO₂，包括化石來源CO₂ (如燃燒塑膠)和生物質來源CO₂ (如燃燒木材、紙張和廚餘)的排放，雖然生物質來源CO₂是直接釋放到大氣中，但在計算溫室氣體排放時，只會考慮化石來源的CO₂排放(Understanding the carbon impacts of Waste to Energy incineration)。根據歐盟統計局的數據，自2006至2016年燃燒廢棄物的數量增加了30%，到2017年，歐盟28個會員國由垃圾焚化爐釋放出超過4,000萬噸的化石CO₂。圖7顯示了MSW燃燒時產生的碳和二氧化碳量。

1. 正面效益：

根據英國氣候變化報告(United Nations Environment Programme, 2010)指出，廢棄物處理部門可以透過以下幾項活動來降低或減少溫室氣體排放，如透過減少廢棄物排放和資源材料回收，避免在製造過程中使用初級材料(即避免使用與能源相關的初級材料)；生產替代或取代化石燃料能源的能源(即利用廢棄物作為能源所產生的排放量通常低於化石燃料所產生的排放量)；在垃圾掩埋場中儲存碳(即在厭氧垃圾掩埋場條件下很大程度上難以抵抗的富碳材料，例如塑膠和木材)以及透過在土壤中施用堆肥來儲存碳。

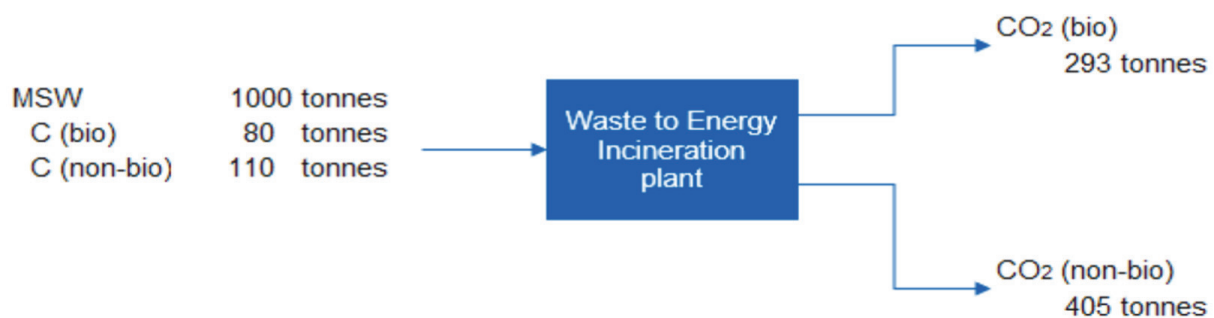


圖7 燃燒1,000噸MSW的碳平衡

資料來源：Kearns, 2019

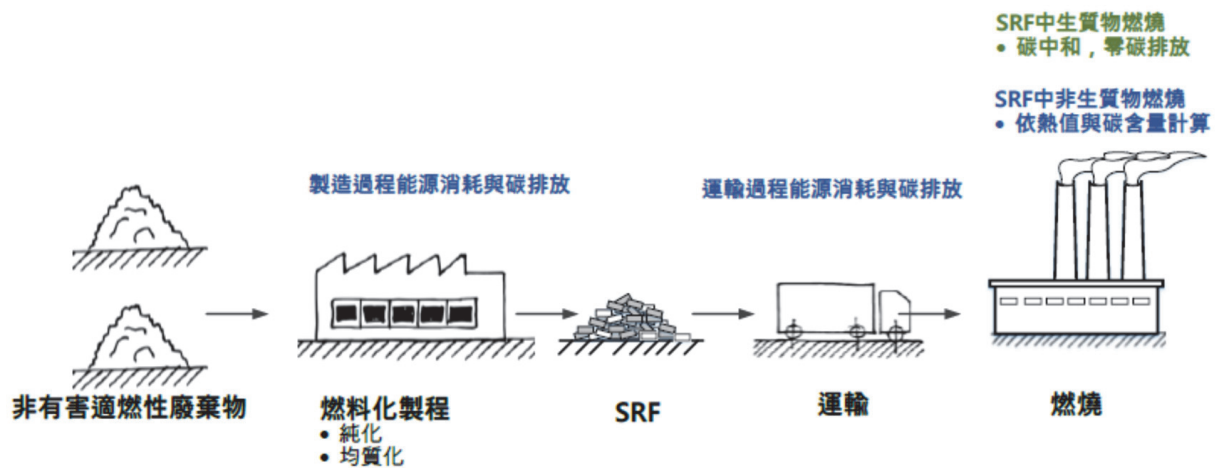


圖8 SRF燃燒產生二氧化碳排放示意圖

(以固體再生燃料(SRF)替代煤炭在鍋爐及燃燒裝置產生熱能，小規模減量方法TMS-III.007，版本01.0)

根據美國國家環境保護署(Environmental Protection Agency, EPA)統計2018年美國MSWs總產生量約為2.924億噸，廢棄物量回收6,900萬噸、堆肥量2,490萬噸、能源回收燃燒MSWs量為3,460萬噸、約1,770萬噸通過其他方式管理，其餘1.462億噸送往垃圾掩埋場。經由回收、堆肥、燃燒、能源回收和掩埋減少排放超過1.93億公噸的二氧化碳當量(CO₂e)，相當於一年內從道路上移除將近4,200萬輛汽車可減少的排放量，而紙張和紙板的回收量約為4,600萬噸，可減少超過155百萬噸CO₂e，又相當於在一年內從道路上移除超過3,300萬輛汽車的排放。燃燒使原料在高溫下完全氧化溫度(750-1,000°C)，將燃料材料轉化為熱煙氣，將不可燃材料轉化為穩定的無機物質(灰燼)。研究顯示通過燃燒的方式可減少最多75%廢棄物質量、減少90%體積和危害，還有燃燒垃圾發電來回收能源(WTE)，其發電效率大約為20%，同時也可回收礦物和化學物質(Emissions from Waste Incineration)。都市垃圾中含有40-60%的生物質碳，在燃燒過程中釋放出的二氧化碳被視為碳中性，而不是化石燃料來源，因此，由廢棄物轉化為能源的溫室氣體淨排放有可能產生負碳，進而降低大氣中的二氧化碳濃度

(Chandel *et al.*, 2012)，而具經濟效益。目前在氣候變遷的時間緊迫性背景下，值得考慮時間的相關性(即需立即採取緩解行動)，經由燃燒產生的生物質CO₂會立即釋放到大氣中，相反地，垃圾掩埋場產生的生物質CO₂則是在幾年的時間內逐漸被釋放，而燃燒產生的CO₂量關鍵取決於廢棄物成分、產生的能源(如熱和/或電)的使用、替代的能源組合以及技術的效率(Understanding the carbon impacts of Waste to Energy incineration)。

2. 負面論述：

根據英國氣候變化報告(United Nations Environment Programme, 2010)指出，通過垃圾燃燒產生的能源的“碳強度”是風能和太陽能等低碳能源的23倍以上，因此與再生能源比較WTE確實不是一個低碳強度的燃料。因為焚化塑膠(屬於化石組成)產生能源並不是一個有效的方式來產生電力，與使用煤作為燃料在生產相同的電力的條件下，將會排放更多的溫室氣體。以焚化爐進料的化石碳占比27.42%來看，燃燒每噸垃圾進料將會產生1噸二氧化碳。燃燒垃圾發電的碳強度(介於540 g CO₂/kWh-937 g CO₂/kWh之間)明顯高於利用傳統化石燃料產生

的電力[如聯合循環燃氣輪機(Combined-Cycle Gas Turbine, CCGT)的化石燃料)的碳強度約為340 g CO₂/kWh]，因此，垃圾燃燒發電產生不利氣候變化的影響明顯高於利用傳統使用化石燃料(如天然氣)產生的電力。此外，單獨收集生物質廢棄物的比例增加預計會提高含有化石碳廢棄物的比例，而減少一次性塑料的使用將增加生物質組成的廢棄物的比例；提高前處理比例，例如：將廢棄物轉化垃圾衍生燃料(RDF)，將導致從原料中去除更高比例的水，因而增加原料中含碳的比例。因此，溫室氣體排放將視廢棄物的處理方式、生物質的含量及能源效率而定。

根據美國能源資訊管理局(Energy Information Administration, EIA) 2023年2月的每月能源回顧(Monthly Energy Review, MER)報告，美國國家尺度熱含量中的生物與非生物(化石)廢棄物比例(biogenic/non-biogenic share)，係根據2007年發布的「辨別一般固體廢棄物能源屬生物質或非生物質」的方法學計算(Azapagic and Perdan, 2011)，該方法是將廢棄物焚化量乘以生物質所對應的熱含量(也就是預設值)。與本計畫研究對象相關的一般廢棄物焚化設施，2026年起也將被納入歐盟排放交易體系(EU Emissions Trading Scheme, EU ETS)中，除了將影響WTE等廠經營者的財務，也可預見需要國家尺度下的場源排放標準量測方法。了解廢棄物的成分，例如生物質含量及其熱值與相關氣候影響，是RDF或SRF製造商及使用這些燃料的行業都必須面對的課題，需要可靠且實用的衡量工具。

3.2 經濟效益

國際間常用低碳排放之固體燃料主要分為初級固體生質燃料與固體再生燃料(Solid Recovered Fuel中文亦稱為固體再利用燃料或固

體回收燃料，後簡稱SRF)兩種，其中使用非有害適燃性廢棄物製成SRF減少煤炭之碳排放為產業趨勢。近年來政府推動廢棄物燃料化，以SRF替代煤炭在鍋爐及燃燒裝置產生熱能或發電使用。圖9與圖10中顯示國內目前SRF在市場應用與製造已達穩定狀態，SRF在臺灣目前環境及經濟效益除了能夠滿足工業燃料需求，亦可去化廢棄物之目的。

因SRF為回收燃料，其價格依品質約為煤之20~75%。以109年3月份燃煤價格2,650 NTD/公噸(含水率15%、溼基低位發熱量5,000 kcal/kg)。使用SRF(含水率15%、溼基低位發熱量4,500 kcal/kg)取代燃煤產出相同熱量需以1.11公噸SRF替代1公噸燃煤，若其單位價格以1,000~1,500 NTD/公噸計算，其燃料購入成本僅為燃煤42~63%。若以111年1月煤炭現貨價5,685 NTD/公噸(200 USD/公噸)計算，燃料購入成本僅為燃煤19~30%。(張瓊芬與張家驥，2022)

此外，生質燃料與燃料或是廢棄物中生物質燃燒所產生的二氧化碳排放是被歸類為碳中性，也因為這樣，在淨零排放路徑中為能源產業在能源轉型與產業轉型中扮演著重要的角色。近年來，混合廢棄物和固體再生燃料的熱利用在歐洲廢棄物管理中變得越來越重要。由於廢棄物或固體回收燃料通常由化石和生物質組成，因此只有一部分二氧化碳(化石碳)排放量計入溫室氣體清單或排放交易計畫。由於歐洲已經建立了二氧化碳排放交易，因此區分生質燃料、燃料中生物質占比和化石燃料在整個碳交易至關重要，若是僅使用化石燃料或生質燃料之單一燃料程序在碳排的計算是相當簡單，但對於使用化石燃料、混合燃料及生質燃料之多燃料系統而言(例如SRF)，在碳排正確性的計算上變得更加困難，尤其是對於產業界使用SRF作為輔助燃料或替代燃料使用的能

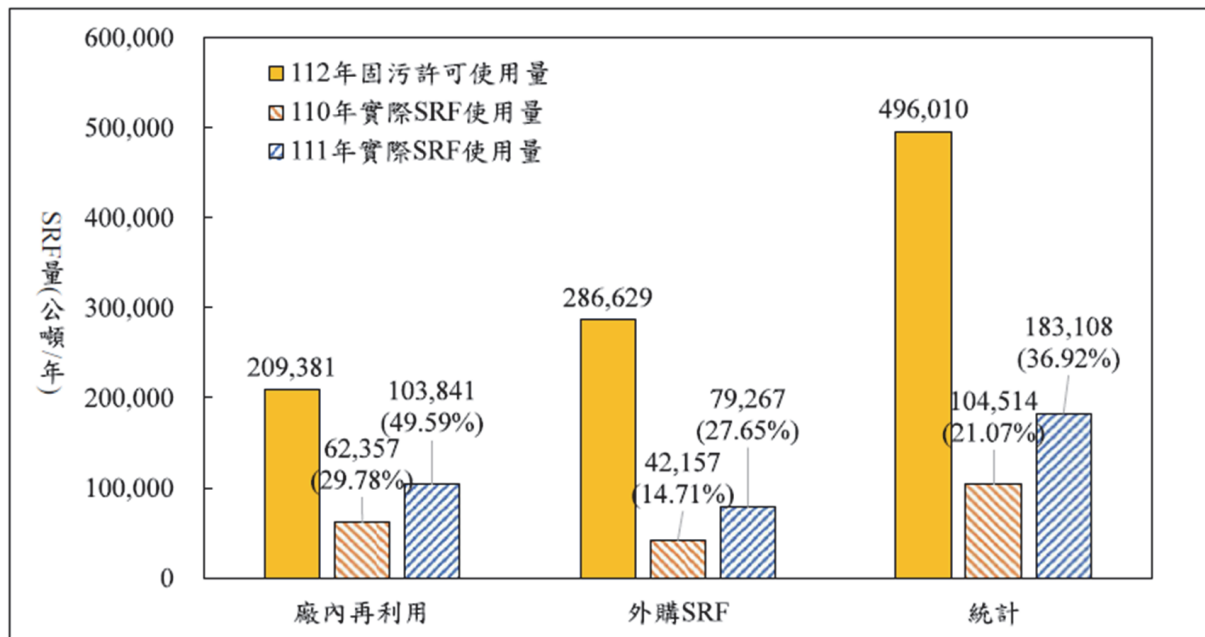


圖9 國內市場使用SRF之現況

資料來源：張家驥，2023

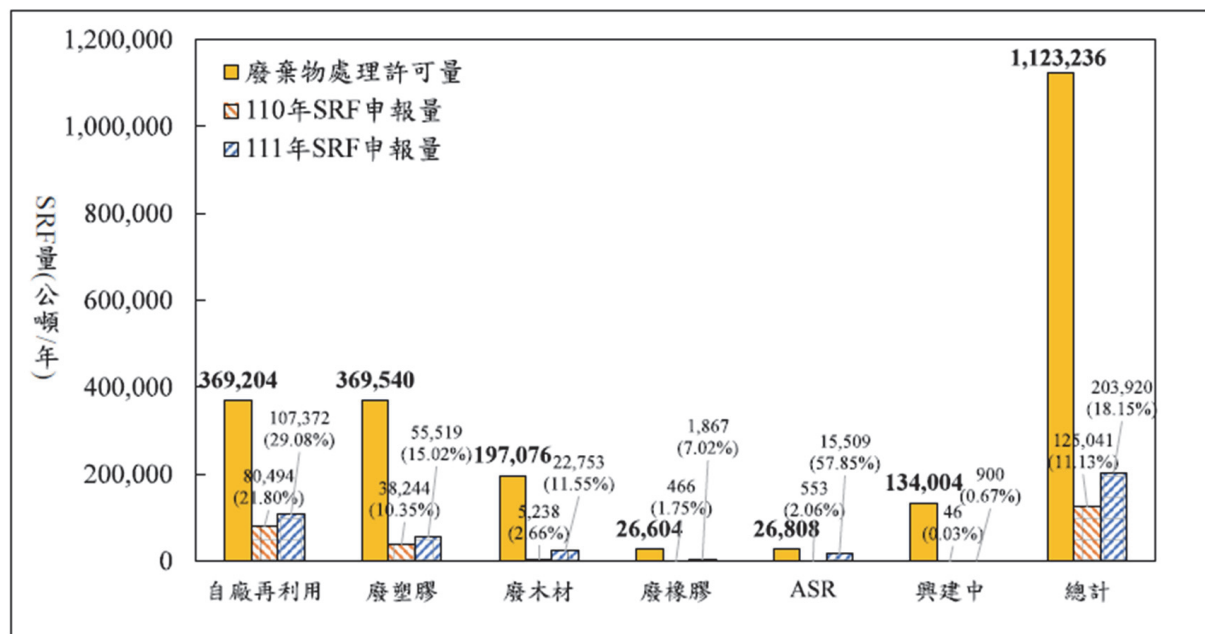


圖10 國內市場製造SRF之現況

資料來源：張家驥，2023

源產業業者。目前溫室氣體抵換專案/自願減量計畫減量方法中，國際間對於生質燃料具有清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)，計算專案計畫所預估的減量為「基線(Baseline)」的溫室氣體排放量減去專案溫室氣

體排放量，若是減量專案計畫成功，就獲得驗證的減量額度(Certified Emissions Reductions, CER)，每一單位的CER等同於減少一公噸二氧化碳當量(carbon dioxide equivalent, CO₂e)的排放。

目前於CDM的資料庫(Clean Development Mechanism)中依據項目活動分成92種大規模及100種小規模的方法，大規模方法論可應用於任何規模的項目活動，而小規模方法論只有項目活動在一定範圍內時才能應用。然而針對SRF作為替代燃料使用的減碳方法學，在國際上尚無相關的CDM可供參考。環境部參照聯合國清潔發展機制執行委員會(CDM EB)公布之15種範疇別進行歸類，截至民國109年10月，已通過並公告37項國內之本土減量方法學，其中能源工業類別只有三項，分別為「TM003電力設備現地回收SF₆排放減量方法」、「TM005區域熱能供應整合減量方法」、「TMS-II.005垃圾焚化汽電共生設備能源生產效率提昇措施」，並無針對固體廢棄物作為再生燃料應用於鍋爐及燃燒裝置之減量方法學(環境部氣候變遷署溫室氣體自願減量暨抵換資訊平台)。

為鼓勵國內業者投入廢棄物衍生燃料之溫室氣體減排，環保署(現為環境部)於111年6月13日通過第一案「以固體再生燃料(SRF)替代燃煤在鍋爐及燃燒裝置產生熱能」溫室氣體抵換專案減量方法，為一小規模減量方法學範疇為

能源工業與製造工業，編號為TMS-III.007。依環保署公告之TMS-III.007減量方法規範，SRF之碳排放分為內含之生物質與非生物質燃燒排放。生物質燃燒排放視為零，而非生物質(塑膠薄膜、纖維布料、泡棉等)則依其組成之碳含量進行計算。表1將檢測之SRF碳排放係數與煤碳比較，當選用熱值較高之SRF，雖生物質占比較低，但其單位能量之碳排放量則較低，反之則較高(111年工業廢棄物清理管理及燃料化推動專案工作計畫，環興科技股份有限公司)。由此可知，選擇SRF作為減碳措施，選擇以廢紙、廢木材等生物質含量高之原料較有效益，生物質的檢測與判定對於專案之碳排減量計算扮演著關鍵性的角色。對於所含生物質的量也將對使用SRF的業者所繳交的碳費扮演著重要的角色，將影響該業者的維運成本。

目前在廢轉能的焚化爐排放並沒有在排放交易系統當中，因此商業、能源和工業策略(Business, Energy, and Industrial Strategy, BEIS)使用非貿易(non-traded)碳進行碳價的計算。以2017年為例，在當時每噸65.11英鎊的碳價及生物質占比為0.458之下，對於整體社會來說，

表1 SRF之碳排放係數及減碳效益計算

項目	單位	A01	A03	A02	A04	A05	煤碳
熱值	kcal/kg	5,749	7,820	6,398	6,009	2,405	6,080
生質物占比	% (熱量比)	28.38	24.68	30.27	72.74	80.31	—
非生質物含碳量	% (重量比)	59.17	74.56	65.63	71.72	71.73	—
碳排放係數	kg CO ₂ e/kg	1.5538	2.0591	1.6780	0.7169	0.5179	2.4081
	kg CO ₂ e/Mkcal	0.2703	0.2633	0.2623	0.1193	0.2153	0.3961
使用每公噸SRF之減碳效益							
取代煤碳量	Ton Coal / ton SRF	0.946	1.286	1.052	0.988	0.396	—
使用實質減碳量	tCO ₂ e /ton SRF	0.7648	0.8071	0.8135	1.6828	1.0989	—

碳氧化比例以100%估算。

資料來源：111年工業廢棄物清理管理及燃料化推動專案工作計畫，環興科技股份有限公司。

未徵收焚化燃燒所排放二氧化碳的碳費高達 324,535,196 英鎊。因此使用焚化爐產生電力並不是一項低碳的技術，若能從進料中萃取適燃非有害的廢棄物作為 SRF 提供鍋爐使用，將可大幅提昇廢轉能的價值，同時也滿足焚化爐本身將廢棄物體積最小化與無害化的使命。

雖然實際效益會受到地區、技術和市場狀況的影響，但在經濟效益方面仍可以帶來一些重要的優勢，以下是一些可能的經濟效益：

- (1) SRF 的生產和使用可以減少垃圾掩埋和焚化的需求，從而降低廢棄物處理的成本。垃圾處理通常是一個昂貴的過程，將垃圾轉化為可燃燃料可以減少對傳統處理方法的依賴。此外 SRF 可以用作能源的來源，例如在發電廠中取代部分煤炭或其他傳統燃料。這樣不僅可以減少對有限燃料的依賴，還可以轉化廢棄物為可再生能源，從而降低能源進口成本。
- (2) SRF 的生產過程需要技術工人、操作人員和管理人員等多種人才。因此，這項技術的發展和應用有可能創建更多的就業機會，從而對當地經濟做出貢獻。
- (3) 藉由將廢棄物轉化為可燃燃料，可以回收其中的能源價值，進一步提高資源的回收利用率，這有助於減少對原始能源的需求，對環境和經濟都有益處。
- (4) 一些地區可能對垃圾掩埋和焚化產生的環境污染處以罰款。轉向使用垃圾衍生燃料可以減少這些罰款，同時減少空氣和土壤污染，降低環境修復成本。此外，使用 SRF 作為燃料替代煤炭於鍋爐及燃燒裝置產生熱能，在全國總能源需求條件不變下，使用 SRF 取代煤炭需求量，可減少進口/使用煤炭用量。垃圾衍生燃料的使用符合可永續發展的原則，有助於減少對有限的自然資源的需求，同時減少廢棄物對環境造成的影響，這在長

遠來看也是經濟上的一種效益。

- (5) 使原本只能進焚化裝置之適燃性廢棄物經過分選及均質化後作為 SRF 提供給工業用鍋爐或燃燒裝置作為替代燃料使用，可提高焚化裝置使用年限、燃燒效益，減少焚化爐之負擔。
- (6) SRF 主要為廢棄物中之生質(廢紙、木材與其他木質纖維廢棄物)與非生物質(塑膠薄膜、布類、泡棉)所組成，且閃火點低、揮發分高、燃燒迅速，其中的生物質排放視為零低，進而在同樣總熱量需求下，達到減碳效益。

透過式 1 計算 SRF 的碳排放係數，以估算使用 SRF 替代化石燃料之減碳效益(111 年工業廢棄物清理管理及燃料化推動專案工作計畫，環興科技股份有限公司)，其結果如表 1 所示。將 SRF 與煤炭之碳排係數比較，以塑膠為主的 SRF (A01/A03/A02)，其碳排放量為煤炭 60~80% 之間；而造紙業為主的 SRF (A04/A05)，其碳排放量為煤炭 20~50% 之間(111 年工業廢棄物清理管理及燃料化推動專案工作計畫，環興科技股份有限公司)，如圖 11 所示。由結果可見選擇以廢紙、廢木材等生質物含量高之原料較有效益(111 年工業廢棄物清理管理及燃料化推動專案工作計畫，環興科技股份有限公司)。

SRF 的 CO_2 排放係數($\text{kg CO}_2/\text{kcal}$) = 非生質物占比(%) \times 非生質物含碳量(kg C/kg) \times 碳氧化比例(%) \times CO_2/C 分子量比(44/12) (式 1)

4. 政策和挑戰

臺灣目前有 75% 的資源需要從國外進口，每年我們需要使用接近 2 億 7,000 萬公噸的原料。同時，我們每年產生約 3,000 萬公噸的廢棄物。不過，令人振奮的是在民國 110 年，我

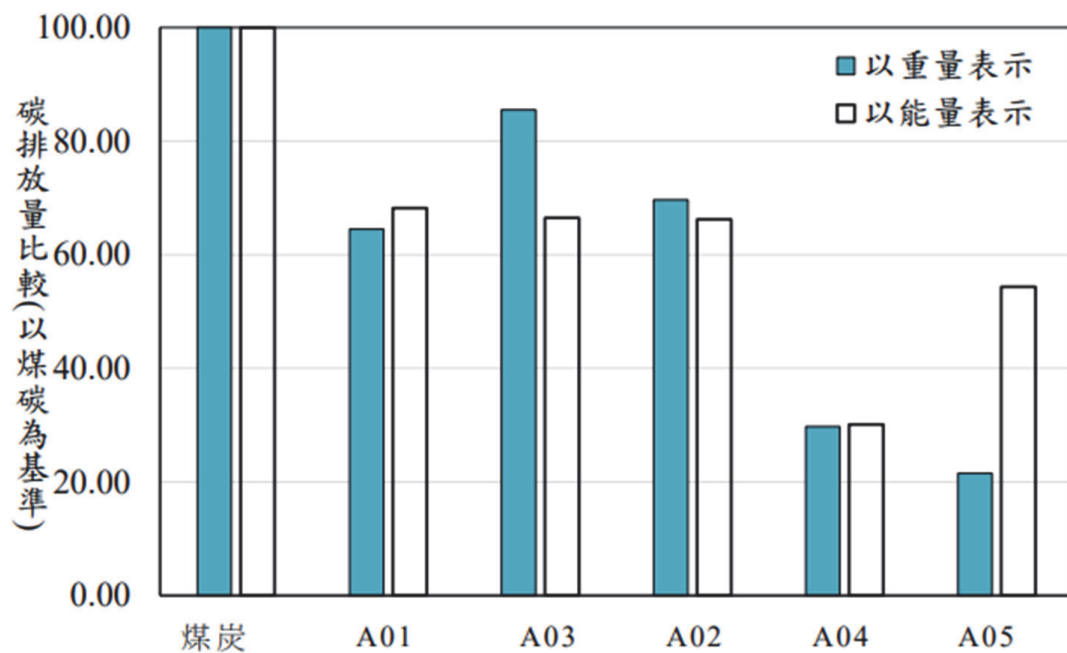


圖11 SRF與煤炭之碳排放係數比較

資料來源：111年工業廢棄物清理管理及燃料化推動專案工作計畫，環興科技股份有限公司

們在一般廢棄物減量約1,000萬公噸，回收率達62.5%。而事業廢棄物則是減量約2,000萬公噸，再利用率達85%，國內在資源循環的發展上具有相當大的正向效益。

目前全球資源永續和減少碳排的趨勢，臺灣提出「資源循環零廢棄戰略」的計畫，其核心思想是減少對原材料的需求，透過廢棄物轉化為資源，實現資源循環再利用，同時達成減碳的目標。依據環境部環境資料顯示使用SRF及其他廢棄物(主要為廠內之漿紙污泥、紡織污泥、廢紙混合物、廢塑膠混合物等)作為燃料的趨勢逐漸趨於穩定。國內在SRF檢測方法公告之前，因SRF料源主要為國內非有害適燃性固體廢棄物，很多單位誤以為廢棄物檢測方法適用於SRF，實則不然。

我國環境部參考歐盟及國際標準規範增定國內的檢測標準，依據「公私場所固定污染源燃料混燒比例及成分標準草案」，規範公私場所固定污染源使用生煤或其他中央主管機關指定公告之燃料及輔助燃料應符合之成分標準及

混燒比例，以達到源頭管制、減量之目的。目前可作為資源循環燃料包括指以農林植物、木材為燃料，或以廢棄物為原料再行利用為燃料或輔助燃料者，特性會依產源而有所不同，以廢塑膠為例，包含廢樹脂、廢塑膠混合物、廢塑膠、廢塑膠容器(PET、PE、PP、P發泡、PS未發泡、其他塑膠)、廢生質塑膠等，若是含有PVC則可能導致固體再生燃料中氯含量超標，且會影響後續底渣飛灰再利用，此外部分塑膠製程中聚合反應所使用的金屬觸媒亦會在燃燒釋出，在煙道排放氣中或是底渣飛灰中測得，亦會影響空氣污染防治設備與後續底渣飛灰再利用。其包含下列等級：

- (1) 等級一：固態生質燃料，指農林植物、木材及其殘留物未經化學處理、膠合或表面塗裝程序作為燃料使用者，且非屬廢棄物再利用燃料者。
- (2) 等級二：固體再生燃料(SRF)，指符合中央主管機關公告之事業廢棄物清理計畫書審查作業參考指引附件固體再生燃料製造技術指

表2 資源循環燃料分級與標準

成分	單位	分類品質		
		等級I	等級II	等級III
氯(Cl)	wt%, 乾基	≤ 0.1	≤ 3.0	應符合中央主管機關或中央目的事業主管機關就事業廢棄物再利用之規定所公告、核准或廠內自行再利用之規範。
鉛(Pb)	$\mu\text{g/g}$, 乾基	≤ 10	≤ 150	
鎘(Cd)	$\mu\text{g/g}$, 乾基	≤ 0.5	≤ 5.0	
汞(Hg)	$\mu\text{g/g}$, 乾基	≤ 0.1	≤ 5.0	
淨熱值(LHV) (溼基低位發熱量)	kcal/kg, 到達基	$\geq 3,465$	$\geq 2,392$	

資料來源：公私場所固定污染源燃料混燒比例及成分標準修正草案

表3 固體再生燃料(SRF)之品質規範

品質項目	單位		檢測方法	標準值
淨熱值(NCV)	kcal/kg (到達狀態)	平均值	NIEA M216.00C ISO 21654	$\geq 2,392$
氯含量(Cl)	% (乾基)	平均值	NIEA M217.00C EN 15408	≤ 3
汞含量(Hg)	mg/kg (乾基)	平均值	NIEA M360.00C EN 15411	≤ 5
鉛含量(Pb)	mg/kg (乾基)	平均值	NIEA M360.00C EN 15411	≤ 150
鎘含量(Cd)	mg/kg (乾基)	平均值	NIEA M360.00C EN 15411	≤ 5

1. 淨熱值(Net Calorific Value, NCV)：即為濕基低位發熱量(Lower Heating Value, LHV)。
2. 乾基(dry based)：乾燥狀態。
3. 到達狀態(as received)：係試樣分析所得結果換算成以收到樣品當時狀態為基準之表示法。

資料來源：事業廢棄物清理計畫書審查作業指引(第6次修訂版)，2023

引與品質規範及其他有關規定，以具適燃性之廢棄物做為燃料者。

- (3) 等級三：非等級一或等級二之廢棄物再利用燃料，指符合中央主管機關或中央目的事業主管機關就事業廢棄物再利用之規定所公告、核准或廠內自行再利用，可作為提供能源或混燒輔助提供能源之用者，包括以廢棄物再利用作為燃料或輔助燃料，其指固體或液體之廢棄物直接使用或以廢棄物為原料製造之固體燃料。

SRF在環境及經濟效益，除了能滿足工業之燃料需求，亦可去化廢棄物之目的。SRF特

性與煤不同，可於大型鍋爐專燒或於流體化床及水泥旋窯混燒做為替代燃料。因原料來源複雜，SRF料源及品質需受到妥善之管理。SRF製造廠建廠評估優先項目為使用端之需求，若無明確使用對象，不應冒然設置，避免造成衍生之廢棄物處理問題。如果缺乏明確的使用對象，可能導致SRF的生產量過剩，進而引發廢棄物處理問題。例如，若SRF的品質不符合製造廠的運作需求，可能導致大量未使用的SRF累積，增加廢棄物的處理負擔，甚至造成環境污染和資源浪費。因此，在建置SRF製造廠之前，應進行充分的市場調查和需求評估，確保

表4 各國對於固體再生燃料(SRF)使用限制與品質標準等差異性比較

國家	說明
歐盟	歐盟目前推動SRF主要供應給焚化爐、電力和水泥等相關製造行業作為替代燃料(20.EN 15359:2011 - Solid recovered fuels - Specifications and classes.)。歐洲標準 EN ISO 21640:2021 (CEN/TC 343/WG2)根據熱值、氯和汞含量等特性提出了主要品質規格，符合的 RDF 被歸類為SRF (Managing refuse-derived and solid recovered fuels-Best practice options for EU countries, 2024)。
日本	僅針對塑膠、紙類廢棄物進行回收再資源化，製成廢紙廢塑膠衍生燃料(Refuse Derived Paper and Plastics Densified Fuel, RPF)。2010年由日本產業標準調查會制定統一標準JIS Z7311，規範RPF產品熱值等級、水分、灰分和氯含量等，確立該產品做為燃料之可靠性(黃品翔與羅時芳，2023)。
韓國	2013年以前，主要使用廢棄物衍生燃料(Refuse Derived Fuels, RDF)做為替代燃料使用，並兼具廢棄物去化功能。直到2013年，南韓環境部針對固體再生燃料制定統一標準，2020年更將固體再生燃料的發展納入2050碳中和促進戰略，強化廢棄物資源回收和再利用(黃品翔與羅時芳，2023)。
英國	在英國，各行業和部門都燃燒固體回收燃料(SRF)作為傳統化石燃料的替代品，包括水泥窯、發電廠、工業鍋爐和區域性供熱系統(Solid Recovered Fuel (SRF) and the UK SRF Market)。

有足夠的使用對象存在，以免引發後續的廢棄物處理問題，並確保SRF的生產能夠有效利用，貢獻於資源循環和永續發展。

SRF的應用正逐漸擴展至全球各地，尤其在歐洲、北美和一些亞洲國家已經開始廣泛使用。這些地區對於垃圾處理、能源安全和環境保護有著顯著的關注，因此對SRF的需求逐漸增加。然而，需要注意的是，垃圾衍生燃料的經濟效益可能因地區和市場條件而異，同時也存在一些挑戰，例如可能產生空氣污染物、可能對健康和環境產生潛在風險，以及可能影響回收率等。成本效益分析、市場需求和技術成熟度等因素都會影響SRF的經濟可行性。在實施SRF項目之前，進行全面的經濟評估和風險評估是非常重要的。

5. 結論與建議

面對現今日益嚴峻的氣候變遷挑戰以及對環境永續發展的迫切需求，我們必須採取積極

的行動，尋求創新的解決方案。廢棄物燃料化提供一個有效的途徑來實現資源的永續與能源的利用。透過將無害的高熱值廢棄物轉化為固體再生燃料，我們不僅能夠減少焚化處理的需求，還可以達到資源循環利用、減少碳排放的目標，促進國家邁向2050淨零排放的戰略目標。然而在廢棄物再利用的邏輯上，應以材料化為主要手段，而對於無法材料化之物質再施以廢轉能之能源化程序為輔。因此政府應該進一步推動廢棄物燃料化技術的發展與應用，並積極支持相關產業的轉型，以建立更加永續的社會與環境。

參考文獻

- United Nations Environment Programme, 2010. Waste and Climate Change - Global Trends and Strategy Framework. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8648>
- 國家發展委員會，2022。臺灣2050淨零排放路

- 徑及策略總說明。
- The role of SRF in a Circular Economy, 2016.
- 前瞻能源關鍵戰略行動計畫(簡報)，經濟部能源局。
- European Commission, https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en
- Kearns, D. T., 2019. Waste-to-Energy with CCS: A pathway to carbon-negative power generation. Glocal CCS Institute, Melbourne VIC.
- Javier, R. A., 2017. Gasification of Biomass and Solid Recovered Fuels (SRFS) for the Synthesis of Liquid Fuels. Universitat Rovira i Virgili.
- Understanding the carbon impacts of Waste to Energy incineration, <https://zerowasteurope.eu/2020/03/understanding-the-carbon-impacts-of-waste-to-energy/>
- Emissions from Waste Incineration, https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_3_Waste_Incineration.pdf
- 以固體再生燃料(SRF)替代煤炭在鍋爐及燃燒裝置產生熱能，小規模減量方法TMS-III.007，版本01.0。
- Chandel, M. K., G. Kwok, R. B. Jackson and L. F. Pratson, 2012. The potential of waste-to-energy in reducing GHG emissions. Carbon Management, 3(2), 133-144.
- Azapagic, A. and S. Perdan, 2011. Sustainable Development in Practice : Case Studies for Engineers and Scientists. 2nded, Chichester, West Sussex, United Kingdom: WileyBlackwell.
- 張家驥，2023。鍋爐固體燃料混燒注意事項。112年度固體燃料工業鍋爐減污減碳改善技術研討會，經濟部產業發展署。
- 張瓊芬與張家驥，2022。固體再生燃料現況與展望。中華民國環境工程學會。
- Clean Development Mechanism (CDM), <https://cdm.unfccc.int/>
- 環境部氣候變遷署溫室氣體自願減量暨抵換資訊平台，<https://carbonoffset.moeenv.gov.tw/NewsView/NewsList>
- 111年工業廢棄物清理管理及燃料化推動專案工作計畫，環興科技股份有限公司。
- 公私場所固定污染源燃料混燒比例及成分標準修正草案。
- 事業廢棄物清理計畫書審查作業指引(第6次修訂版)，2023。
- EN 15359:2011-Solid recovered fuels-Specifications and classes.
- Managing refuse-derived and solid recovered fuels-Best practice options for EU countries, 2024. European Investment Bank.
- 黃品翔與羅時芳，2023。日韓固體再生燃料發展趨勢及對我國推動發展之啟示，經濟前瞻。
- Solid Recovered Fuel (SRF) and the UK SRF Market, <https://wastersblog.com/531/solid-recovered-fuel-market/>

Current Situation and Benefit Analysis of Waste to Energy

Chiung-Fen Chang^{1*} Chia-Chi Chang² Hsin-Yi Kuo³

ABSTRACT

Waste to Energy (WTE) can recover both energy and valuable materials in the process of waste treatment to satisfy the circular economy, and replace fossil fuels as renewable energy (biomass fraction of waste) to achieve low-carbon / decarbonization purposes as a transitional fuel towards full renewable energy use. Therefore, the conversion of non-hazardous and combustible waste materials into waste derived fuels (RDF) / solid recovered fuels (SRF) can achieve sustainable resource use and support decarbonization in line with the national strategic goal of 2050 net zero emissions.

Keywords: Waste to Energy, RDF, SRF, benefit, Zero Emission.

¹Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Tunghai University.

²Senior Researcher, Taiwan Bio-energy Technology Development Association.

³Engineer, Environmental Quality and Materials Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tunghai University.

*Corresponding Author, Phone: +886-04-23590121 # 33622, E-mail: cfchang@thu.edu.tw

Received Date: April 16, 2024

Revised Date: May 17, 2024

Accepted Date: May 23, 2024