

固體再生燃料現況與展望

The state-of-the-art in Progress for Solid Recovered Fuels

張瓊芬教授

東海大學環境科學與工程學系

張家驥博士

臺灣生質能技術發展協會資深研究員

一、前言

國內的都市廢棄物處理政策早期為以解決問題為主要考量的衛生掩埋，但隨著國民水準的提升與經濟發展，受民眾對環境品質要求與地狹人稠等因素的影響，轉為以焚化為主與掩埋為輔的策略。發展至今，隨著對廢棄物本質的深入瞭解，認知上已由過去無用嫌惡的廢棄物轉變視為錯置的資源，並邁向於能資源妥善利用與循環經濟零廢棄目標。為追求永續發展的目標，我國致力於推動「資源循環零廢棄」政策，提倡減量(Reduction)、再利用(Reuse)、循環(Recycling)、能源回收(Energy Recovery)、國土再造(Land Reclamation)及重新設計(Redesign)等 6R 等概念導入能資源材管理，可有效提昇國內資源循環再利用比例，並減少國內對於原物料的依賴。將靜脈資源廢棄物朝向零廢棄的目標邁進的途徑，國內主要發展為材料化、能源化與肥料化等三大面向，使具有再利用價值之廢棄物回收做為原料與肥料使用，而將具有適燃性之廢棄物轉製燃料，使此靜脈資源能充分被有效利用。

自 1987 年興建第一座垃圾焚化廠且於 1991 年運轉以來，目前營運中的焚化爐共有 24 座且平均營運期多已達 20 年以上，有賴於零廢棄政策的有效推動，國內在資源回收的成效斐然，亦為各國取經之對象，因此在有價無機物質回收再利用率及垃圾分類提升之下，也連動提升了都市垃圾熱值，110 年的統計資料顯示 24 座焚化廠平均的濕基低位發熱量為 2,867 仟卡/公斤（範圍為：2,234 至 3,775 仟卡/公斤），雖每人的垃圾處理量下降，但因人口數遽增，整體來看，處理負荷是與日俱增；此外，都市焚化爐混燒具有高熱值之一般事業廢棄物，在處理能力為「總處理量×熱值」之估算下，使得原先針對早期垃圾熱值特性所設計焚化廠的總處理量下降，且處理高熱值

一般事業廢棄物亦排擠原有的垃圾處理容量，使得國內焚化廠在面臨垃圾總處理量提升的急迫需求與焚化爐升級整備雙重壓力之下，如何尋求有效且可行的方案，為當前在廢棄物處理推動政策上之一大重點。

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。與焚化處理不同，廢棄物燃料化為利用分選技術將適於工業用鍋爐與燃燒設施使用之非有害適燃性廢棄物分離出製成符合後端需求之燃料。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)。RDF 使用最早記錄在 19 世紀末英格蘭使用都市生活垃圾物作為燃料產生蒸汽，其後美國、德國和日本皆有相關案例(Harvey Alter, 1987)。1890 年代紐約市以人工分選出固體廢物中有用的物質，殘留物作為 RDF 燃燒後發電為廢棄物分選技術之濫觴。

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 依據型態(固體、液體、氣體及其尺寸)分為七類，如下表 1 所示。由表 1 之定義來看，許多廢棄物皆可產製為 RDF，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。

表 1、廢棄物/垃圾衍生燃料分類 (ASTM E856-83 標準)

類別	定義	備註
RDF-1 (MSW)	經由最少程序將巨大廢棄物去除之都市廢棄物/垃圾(Municipal Solid Waste, MSW)	生垃圾
RDF-2 (c-RDF)	廢棄物破碎成粗顆粒，在不經由或經由磁選回收金屬後，95%重量通過 6-inch 的方形篩網之粗 RDF(coarse RDF, c-RDF)	固體衍生燃料
RDF-3 (f-RDF)	廢棄物經過進一步破碎，並去除金屬、玻璃及其他無機物後，95%重量可通過 2-inch 的方形篩網之輕質/蓬鬆 RDF(fluff RDF, f-RDF)。	
RDF-4 (p-RDF)	可燃性固體廢棄物處理成粉狀，95%重量可通過 10 mesh(0.035-inch)篩網之粉狀 RDF(powder RDF, p-RDF)	

RDF-5 (d-RDF)	可燃性固體廢棄物壓密/壓縮成顆粒、塊狀、立方體、磚塊狀或其他形狀之壓密 RDF(densified RDF, d-RDF)	
RDF-6	可燃性固體廢棄物加工成液狀(RDF slurry)	液體衍生燃料
RDF-7	可燃性固體廢棄物加工成氣狀(RDF syngas)	氣體衍生燃料

廢棄物衍生燃料應用最為廣泛是「固態燃料」的使用。歐盟為廢棄物燃料化發展最為健全之區域，於 2002 年起陸續訂定固態衍生燃料相關品質標準(EN-15359)、管理方式、採樣及分析方法，以完善其管理利於推廣使用，並已成為 SRF 使用量與交易量最大之區域。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 是一種以非有害適燃性固體廢棄物經分選及均質化後，依鍋爐或燃燒裝置之需求所進行製造的可靠燃料產品。且若部分產品為生質物所製成，將有助於二氧化碳排放減少。SRF 可用於水泥窯、氣電共生廠、發電廠以及任何需要熱量的地方，以全燃燒 SRF 的方式或與燃煤混燒進行使用。

二、 固體再生燃料品質規範

基於完整規範與管理制度，使得 SRF 做為燃料使用已為先進國家目前之趨勢。有鑑於 SRF 之跨國交易已成為常態，國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)自 2015 年執行 ISO/TC 300 「非有害廢棄物固體回收材料-包括固體再生燃料(solid recovered materials, including solid recovered fuels (SRF))」標準化專案，以便後續進行再利用(回收和再循環)。針對 SRF 規範及方法參照歐盟 EN 15357、EN 15359 及相關分析方法加以制定。ISO 於 2021 年公告 BS EN ISO 21637、EN ISO 21640 等與歐盟及英國共用編號之 SRF 規範與成份分析方法。ISO 對於 SRF 之規範範疇涵蓋可做為 SRF 之固體廢棄物種類、SRF 製造、交易、貯存及產品規格。可作為 SRF 之非有害固體廢棄物在符合接收端的同意條款(商訂驗收標準)之後，依循 ISO 21640 的品質規範將製造的 SRF 產品進行分類，再依客戶特定要求運送至交貨地點後使用，如圖 1 所示。品質規範的考量主要涵蓋三大面向，包含經濟(Economics)、技術(Technical consideration/harmful for the equipment)與環境風險 (Environmental consideration) 等進行訂定，相對應的品質項目即為淨熱值(net

calorific value, NCV)、氯含量及重金屬汞，也以此三項作為分級之依據，分述如下：

1. 淨熱值：即為濕基低位發熱量(lower heating value, LHV)。主要為經濟面向考量，客戶需要用多少燃料，由客戶端自行決定。因此，產品中必須要說明其熱值為多少作為計價用。
2. 氯含量：主要為技術面考量，對於廠商來說燃燒後空氣中的氯含量對於鍋爐具有腐蝕性，若是鍋爐設備具抗腐蝕性的，就可以用氯含量高一些的 SRF。
3. 重金屬汞：排放到環境中的重金屬會對生態與環境具有潛在危害風險，所以必須要考量產品中的重金屬汞含量。

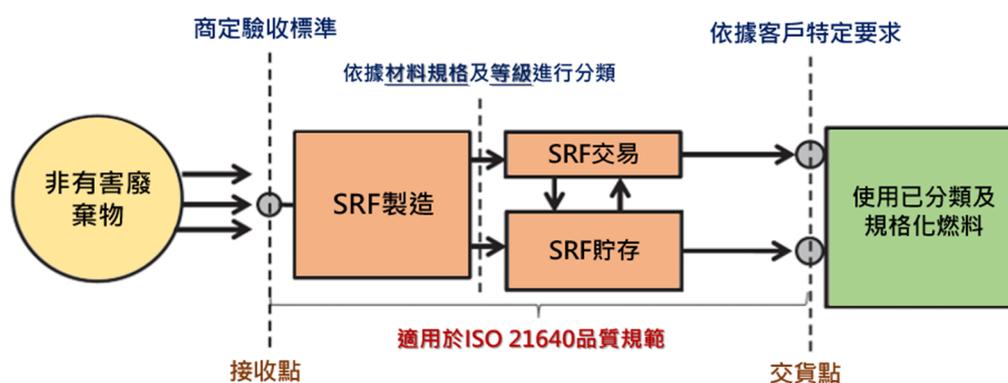


圖 1、SRF 製造與供應產業鏈(ISO 21640)

基於以上考量，ISO 21640 將 SRF 產品分成五個等級，如表 2 所示。市場上主要交易型態如表 3 所示，相對應於表 1 RDF 的規範，就型態而言，涵蓋的範圍包含 RDF-2 至 RDF-5。

表 2、ISO21640 中 SRF 產品品質標準

分類特性	統計值	單位	分級				
			1	2	3	4	5
淨熱值	平均值	MJ/kg (ar)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
氯含量	平均值	Wt.% (d)	≤ 0.2	≤ 0.6	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 3
汞含量	中位數	mg/MJ (ar)	≤ 0.02	≤ 0.03	≤ 0.05	≤ 0.10	≤ 0.15
	80 百分位數	mg/MJ (ar)	≤ 0.04	≤ 0.06	≤ 0.10	≤ 0.20	≤ 0.30

ar：到達狀態(as received)
d：乾基(dry based)：乾燥狀態
80 百分位數：第百分之 80 之位數

表 3、ISO 21640 中 SRF 主要貿易型態

型態名稱	敘述
片狀	以鋒利工具進行切割，粒徑通常介於 5-100 mm
粉碎(蓬鬆狀)	經粉碎或切碎製成
緊實化燃料(如顆粒狀、球狀)	經機械壓造粒製成
捆包狀(如方形捆包、圓形捆包、圓柱捆包)	壓縮材料或鬆散的捆包成為正方形或圓柱形，尺寸介於 1-3 粒風公尺。抹些會以塑膠包膜減少氣味逸散並提高運輸與貯存過程中之安全性
纖維餅狀	纖維廢料通過脫水製成
粒狀	尺寸通床介於 1-10 mm，經粉末團聚或將材料研磨至適當尺寸進行製造

國內針對固體再生燃料訂有「固體再生燃料製造技術指引與品質規範」，明確定義本規範所稱固體再生燃料，係指以具適燃性之廢棄物，並須符合燃料品質標準(如表 4 所示)，稱為 SRF，中文亦可稱為固體回收燃料、固體再利用燃料或固體再生燃料。國內所訂定的 SRF 品質標準，除了參考 ISO 21640(原為參考 EN 15359)品質標準分級採淨熱值第 4 級、氯含量第 5 級及汞含量第 5 級訂定標準值，並參考韓國環境部 SRF 品質標準訂定鉛含量及鎘含量標準值。比較國內與 ISO 21640 品質規範，國內在等級上，採單一級簡化分類並增加鉛與鎘的含量標準。此外，在固體再生燃料產品填報資料上，除品質標準所規範的項目外，亦考量灰份、銻(Sb)、砷(As)、鎘(Cd)、鉻(Cr)、鈷(Co)、銅(Cu)、鉛(Pb)、錳(Mn)、鎳(Ni)、鉍(Tl)、釩(V)等化學特性含量，有助掌握使用端對於料源之接受度及對於飛灰與底渣再利用與處置之規劃。

表 4、固體再生燃料品質標準 (行政院環境保護署)

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	BS EN 15400	≥ 2,392
氯含量(Cl)	% (乾基)	平均值	BS EN 15408	≤ 3
汞含量(Hg)	mg/kg (乾基)	平均值	BS EN 15411	≤ 5
鉛含量(Pb)	mg/kg (乾基)	平均值	BS EN 15411	≤ 150
鎘含量(Cd)	mg/kg (乾基)	平均值	BS EN 15411	≤ 5

- 淨熱值(net calorific value, NCV)：即為濕基低位發熱量(lower heating value, LHV)。
- 乾基(dry based)：乾燥狀態。
- 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。

三、 固體再生燃料之料源與製造

非有害適燃性之固體廢棄物皆可作為 SRF 原料之潛在對象，依 ISO 21640 規範料源大概可分為非有害工業廢棄物（包含來自農業、養殖漁業、園藝業、林業、捕獵及漁業之廢棄物）、非有害建造及拆除之廢棄物、廢棄物管理設施產生之非有害廢棄物、來自材料回收設施之非有害廢棄物、非有害都市固體廢棄物和類似非有害商業廢棄物、及清單中未說明之非有害廢棄物等六大類。這六類是以歐盟廢棄物分類為基礎進一步簡化與修正後所發展的分類，此外部分以生質物為料源可直接製作固體生質燃料的則受 ISO 17225-1 固體生質燃料規範，不受 ISO 21640 規範。

依「固體再生燃料製造技術指引與品質規範」，可作為 SRF 原料之廢棄物涵蓋非有害適燃性之事業廢棄物與一般垃圾或是事業員工垃圾兩類，其中事業廢棄物包含廢塑膠、廢橡膠、廢紙、廢木材、廢纖維、有機污泥、漿紙污泥、紡織污泥等；一般垃圾或是事業員工垃圾則通常需經由機械分選處理程序(Mechanical Treatment, MT)或機械生物處理程序(Mechanical Biological Treatment, MBT)分選後之適燃性廢棄物，方可作為 SRF 原料。總整可作為 SRF 料源之廢棄物與其對接收料源之 SRF 製造者須將料源經妥善純化或均質化處理程序，以製造符合固體再生燃料品質標準的 SRF，且依循指引規範，SRF 所含不可避免自然夾雜不可燃廢棄物重量比不得超過百分之一。因此在符合品質規範與不可燃廢棄物重量比兩項要求之下，依目標功能使用廢棄物純化、均質化、乾燥之程序與相關設備，使產品能符合品質規範。

SRF 產品主要是依據依使用端（客戶）的特定需求進行產品製造程序的設計規劃，而使用端對產品的要求最主要是由鍋爐的形式決定可以使用的產品樣態與品質，一般常見的處理程序有：生物處理（可採用好氧與厭氧程序，主要目的為醱酵、乾化或除臭，只要能符合便於後端分選即可）、純化設備（主要目的在去除不適燃物與資源回收物，包含金屬分選設備、尺寸篩選設備、針對含氯塑膠或有色塑膠之光學分選設備等）、均質化設備（主要目的在將不同原料之尺寸、性質進行均一化調整，包含破碎設備、混拌設備、乾燥設備、壓縮設備等），整體製造概念如圖 2 與表 5 所示。

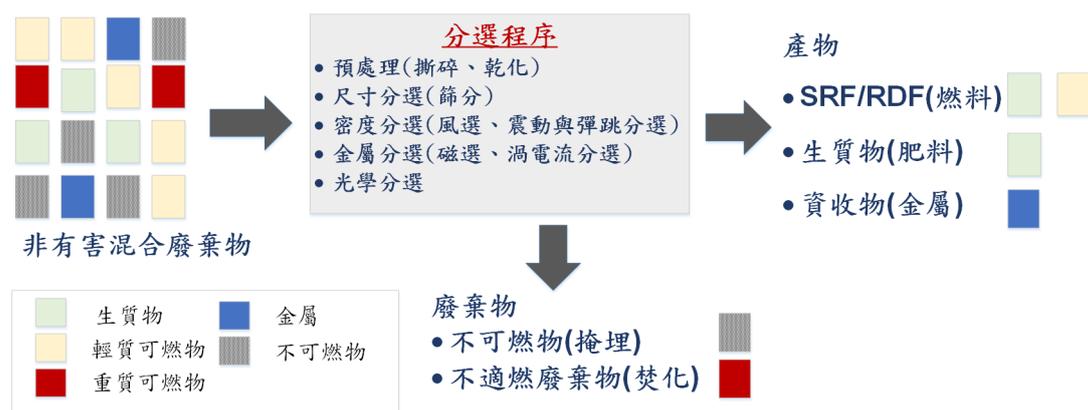


圖 2、廢棄物燃料化分選規劃示意圖 (達清, 2019)

表 5、廢棄物燃料化分選規劃依據

要求項目	規劃方向
熱值	選擇高熱值廢棄物或增設分選/乾燥設備
水份	選擇低含水率廢棄物或增設分選/乾燥設備
灰分	選擇低含灰分廢棄物或增設分選設備
氯含量	選擇低氯含量廢棄物或增設光學分選設備
生質物組成	選擇生質廢棄物(廢紙、木材等)
形狀與尺寸	選用破碎設備或增設造粒設備
金屬含量	選用金屬分選設備(鐵金屬/磁選、非鐵金屬/渦電流)

常見的 SRF 形態，如圖 3 所示。依目前國內既有設施 (既有鍋爐原始設計，含進料、貯料及鍋爐等)，目前以造粒壓錠後的 SRF 為市場交易的主要形態。



圖 3、常見 SRF 形態樣貌(環保署, 2019)

四、 固體再生燃料特性檢測與法規

目前國際固體再生燃料品質項目之檢測方法，都以國際標準化組織(ISO)與歐盟(EN)的方法為主，採直接引用或是部分本土化修正，日本與韓國也依據 ISO 與 EN 的方法，進行國內適用檢測標準的修正，方法一致化可直接與國際相關規範接軌，將有利於跨國交易及相關產業發展。國內環檢所的檢測方法在 110 年公布，整合檢

測方法如表 6 所示。

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。SRF 是一種產品而非廢棄物，因此在檢測方法的設計概念乃模擬 SRF 在使用時的燃燒特性進行檢驗方法的訂定，此外因 SRF 的來源大多為混合的廢棄物，因此所採樣品的數量、混合及均質，將顯著的影響所獲得數據的代表性，在檢測上更需注重樣品的代表性及使用適當經認證的參考材料(Certified Reference Materials, CRM)加以驗證實驗的有效性與不確定度。

表 6、國際上慣用與我國 SRF 檢測方法

方法名稱	國際現行標準編號	環保署環境檢驗所編號
固體再生燃料-熱值測定	EN ISO 21654:2021	NIEA M216.00C 固體再生燃料熱值檢測方法 —彈卡計法
固體再生燃料-揮發分測定	BS EN ISO 22167:2021	
固體再生燃料-灰份測定	BS EN ISO 21656:2021	NIEA M215.00C 固體再生燃料中灰分及可燃 分檢測方法
固體再生燃料-元素分析: 碳(C)、氫(H)、氮(N)	BS EN ISO 21663:2020	
固體再生燃料-元素分析: 硫(S)、氯(Cl)、氟(F)、溴(Br)	EN 15408	NIEA M217.00C 固體再生燃料中硫、氯、氟 及溴含量檢測方法
固體再生燃料-元素分析: 鋁(Al)、鈣(Ca)、鐵(Fe)、鉀 (K)、鎂(Mg)、鈉(Na)、磷(P)、 矽(Si)、鈦(Ti)	EN 15410	
固體再生燃料-元素分析: 砷(As)、鋇(Ba)、鈹(Be)、鎘 (Cd)、鈷(Co)、鉻(Cr)、銅 (Cu)、汞(Hg)、鉬(Mo)、錳 (Mn)、鎳(Ni)、鉛(Pb)、銻 (Sb)、硒(Se)、鉍(Tl)、釩(V)、 鋅(Zn)	EN 15411	NIEA M360.00C 固體再生燃料中金屬及微量 元素檢測方法
固體再生燃料-以烘箱乾燥 法測定水分: 第三部分-一 般樣品分析	BS EN ISO 21660- 3:2021	NIEA M214.00C 固體再生燃料中水分檢測方 法
固體再生燃料-生質物測定	BS EN ISO 21644:2021	

SRF 中之生質物為為碳中和材料，對於 SRF 中所含有的生質物含量檢測為計算 SRF 之碳排係數之重要依據。

ISO 21644:2021 公告目前有三種 SRF 中生質物含量檢測方法，分別為 ^{14}C 同位素、選擇性溶解法和人工撿拾法。每種方法都有其限制，但其中以 ^{14}C 同位素、選擇性溶解法較常用且具可靠性。國內目前尚無單位可進行 ^{14}C 同位素分析，樣品必須要送至國外進行檢驗。而以選擇性溶解法分析來看，該方法受限於樣品本身的特性，若是含有天然或是人工橡膠含量超或 10 %或是含有以下成分總量超過 5%，則不適用選擇性溶解法分析生質物含量：(1)固體化石燃料，如硬煤、焦炭、褐煤、褐煤和泥碳；(2)木碳；(3)化石來源的可生物降解塑料；(4)生物來源的不可生物降解塑料；(5)作為生物質成分存在的油或脂肪；(6)天然或合成橡膠殘留物；(7)羊毛；(8)粘膠；(9)尼龍、聚氨酯或其他含有分子氨基的聚合物；(10)矽橡膠。

因 SRF 料源成分通常複雜且難以辨識，選用選擇性溶解法測定生質物含量時，生質量的測定數據將有可能導致嚴重的誤差，因此必須要充分掌握樣品的化學特性與組成，才能有效判斷數據的代表性。

非有害適燃性廢棄物之燃料化管理除廢棄物料源及 SRF 製造端（SRF 原料製造、設備與技術）之外，針對使用端的所產生的空氣物染物排放及衍生灰渣管理皆須進行考量，才能全面性的研析整個 SRF 產業鏈，目前已有之 SRF 相關管理規範整理如表 7 所示。

表 7、SRF 相關管理規範

	種類	管理機關	規範名稱	規範內容	狀態
產源	一般性廢棄物	督察總隊	「機械處理技術設置指引」、「掩埋場活化採機械處理技術設置指引」	機械處理技術介紹及作業設備指引，產製 SRF 標準驗證及管理辦法	環署督字第 1090006448 號
	事業廢棄物	廢管處/工業局	事業廢棄物清理計畫書審查作業參考指引	新增事業產出廢棄物可作為 SRF 之用途。	環署廢字第 1090025615 號
收集與清運	一般性廢棄物	環保署廢管處	一般廢棄物回收清除處理辦法	-	環署廢字第 1101011706 號
			一般廢棄物清除處理方式	公告一般廢棄物(廢塑膠、廢天然或人造纖維布、一般垃圾及事業員工生活產生之廢棄物)其再利用種類及管理方式	環署廢字第 1101012065 號
	事業廢棄物		事業廢棄物清理計畫書審查管理辦法	指定公告對象廢清書需填報事項及辦理變更、異動、展延之規定	環署廢字第 1060090088 號
SRF 製造	事業及一般性	環保署廢管處	廢棄書填報及審查作業參考手冊-固體再生燃料製造	規範 SRF 製造廠之廢棄物種類、鍋爐類型、適用對象、技術選用	環署廢字第 1090025615 號

廢棄物			技術指引與品質規範	指引及品質管理	
	廢管處/工業局		共通性事業廢棄物再利用管理辦法	再利用機構運作管理規定(公告廢塑膠再利用管理方式)	環署廢字第1091216459號
	環保署廢管處		從事業廢棄物廠(場)內自行再利用及自行處理認定原則	敘明廠(場)內自行再利用相關認定標準	環署廢字第1091215011號
	環保署廢管處		以網路傳輸方式申報廢棄物之產出、貯存、清除、處理、再利用、輸出及輸入情形之申報格式、項目、內容及頻率	產源(含SRF使用者)原物料使用及事業廢棄物產出貯存清理申報規定、清除/再利用/處理機構(SRF製造者)營運紀錄申報規定	環署廢字第1080069918號
	環保署廢管處		固體再生燃料(SRF)相關管理方式	協助產源、製造與使用業者及主管機關瞭解 SRF 製造或使用者之管理規則	環署廢字第1101071543號
	工業局		有關 SRF 再利用許可申請審查原則	產源(含 SRF 使用者)原物料使用及事業廢棄物產出貯存清理申報規定、清除/再利用/處理機構(SRF 製造者)營運紀錄申報規定	研擬中
SRF 產品	事業及一般性廢棄物	工業局/協會	固體再生燃料(SRF)品質標準與管理規範	依經濟特徵(熱值)、技術特徵(氯含量)與環境特徵(汞含量)訂定非有害適燃性廢棄物製造 SRF 之品質標準，以符合產業使用需求	增修中
		標準檢驗局	固體再生燃料(SRF)品質國家標準(CNS)	訂定非有害適燃性廢棄物製造 SRF 之國家標準，以符合產業使用需求	提案中
SRF 使用	事業及一般性廢棄物	環保署空保處	公私場所固定污染源燃料混燒比例及成分標準	公告「廢棄物再利用燃料」作為鍋爐許可燃料	環署空字第1090020262號
		環保署環管處	小規模減量方法-以固體再生燃料(SRF)替代煤碳在鍋爐及燃燒裝置產生熱能	以 SRF 在鍋爐及燃燒裝置取代煤炭之本土化減量法學	審查中
混燒灰渣再利用	事業及一般性廢棄物	標準檢驗局	混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物標準修正	混凝土用飛灰作為混凝土之礦物摻料之標準	經授標字第11020050420號(尚須修正)
		經濟部工業局	經濟部事業廢棄物再利用管理辦法	再利用機構運作管理規定(公告灰渣再利用管理方式)	經工字第10904603140號

五、 固體再生燃料之使用

使用 SRF 作為固態替代燃料使用，可具有多重的效益，包含減少化石燃料的使用、較低的碳足跡(可由燃料的生命週期進行評估)、降低溫室氣體的排放(可由能源效率提升與生質物含量減碳兩方面來看)、及降低空氣污染物的排放等，但不當的操作所造成的不完全燃燒，也可能造成更大的環境問題。SRF 燃料特性為具有高揮發份、低硫含量、高含氧量、較低氮氧化物生成潛勢，但因其可能具有較高的氯含量，進而具有高溫腐蝕、毒化觸媒、低熔點結渣、高戴奧辛排放潛勢等缺點，因此在使用上，鍋爐須具備有高燃燒效率，且燃燒溫度須高於 850°C 和尾氣停留時間需在兩秒以上。

依據環保署「固體再生燃料(SRF)相關管理方式」(環署廢字第1101071543號), SRF可應用工業用鍋爐(流體化床式鍋爐、大型移動床式鍋爐且鍋爐蒸汽量13公噸/小時以上)、水泥旋窯、金屬冶煉業熔爐、旋轉窯高溫冶煉設施(窯溫達1,300°C以上且長度大於40米)、專用燃燒發電設備。長期的規劃是以新建專用燃燒設備為考量,但就現有的鍋爐及燃燒設施來看,可使用SRF者以流體化床鍋爐及水泥旋窯為主,且使用方式大多與燃煤混燒,主要作為替代燃煤使用。現有鍊條床式/機械混床式塊煤鍋爐因鍋爐燃燒室高溫停留時間及煙道與熱交換皆無抗積灰腐蝕設計,不適用以SRF作為燃料使用。以既有燃煤鍋爐而言,使用SRF品質建議如表8所示,然實際適用之SRF品質及混燒比例依照原鍋爐設計、鍋爐材料、操作條件與蒸氣溫度與壓力而定。

因SRF的氯含量較燃煤高,因此在鍋爐中容易形成低熔點沈積物而有積垢現象存在,此外高溫完全氧化所形成的鹽酸會具有蒸汽管道和鍋爐壁快速腐蝕之高潛勢,此外細小的灰爐氣膠的形成也可能造成粒狀物排放。針對燃燒後的灰渣組成,也會影響其再利用形式,因此在使用SRF做為燃料相對於國內已熟悉的燃煤來說,具較高技術門檻及投入成本。設備規劃設計與操作上應進行專業與全面考量才能達到正面的環境效益。

表8、既有燃煤設施使用SRF品質建議

設施型式	類別	應用方式	SRF品質要求	發電鍋爐發電效率
流體化床式 燃煤鍋爐	高溫高壓	電力/蒸汽	高 (Cl < 0.1%、LHV > 5,000)	> 25%
	中溫中壓	電力/蒸汽	中 (Cl < 1.0%、LHV > 4,500)	20~25%
	低溫低壓	電力/蒸汽	低 (Cl < 1.5%、LHV > 4,000)	< 20%

六、廢棄物燃料化效益

1. 能源效益

一般來說,SRF應用於工業用鍋爐及燃燒裝置之總體能源效率高於垃圾焚化爐中焚燒時的能源效率,且具更高彈性的應用於

高能源效率的鍋爐與燃燒裝置。以發電為例，若製造成 SRF 並於專燒爐燃燒發電，其發電效率可達 25~35 %；若應用於汽電共生鍋爐總能源利用率可以高於 52 % 以上；若應用於蒸氣鍋爐產蒸氣，總能源利用率更可達 75 % 以上。

我國歷年廢棄物於焚化爐燃燒處理後發電效率僅為 18~20 %。依據環保署 SWIMS 網站資料統計 110 年度全台 24 座焚化爐數據，全年焚化處理總量為 6,353,164.80 公噸（約 635 萬公噸），其中事業廢棄物平均約佔總量之 25 %；焚化處理量約為設計量之七成，實際熱值為 2,406 仟卡/公斤，總發電量為 3,404,233 千度，平均每噸廢棄物的發電量為 0.52 千度，若是以垃圾熱值與發電量來進行估算，則發電效率約為 18 %。

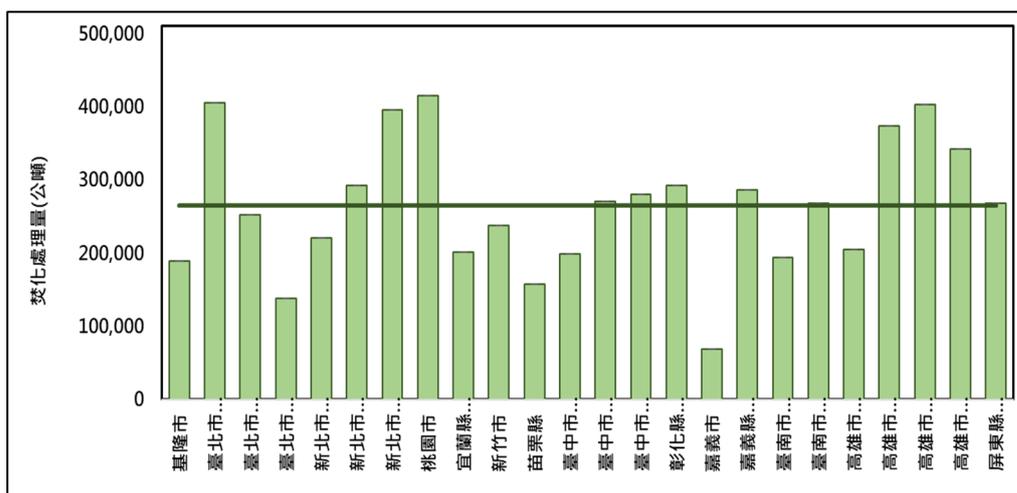


圖 3、110 年度全台 24 座焚化爐之焚化處理量

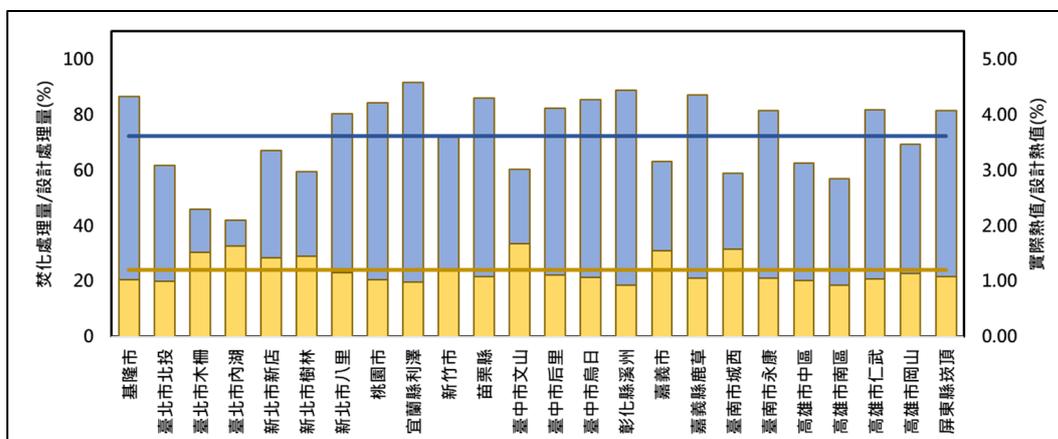


圖 4、110 年度全台 24 座焚化爐之焚化處理量/設計處理量與實際熱值/設計熱值比

若將一般性廢棄物以 MBT 進行處理轉製 SRF 應用於電力鍋爐發電，可大幅提升發電量。將都市垃圾燃料化製成 SRF 與垃圾焚化比較其能源效益，產出的發電量可提升為原來的兩倍以上，如圖 5 所示。

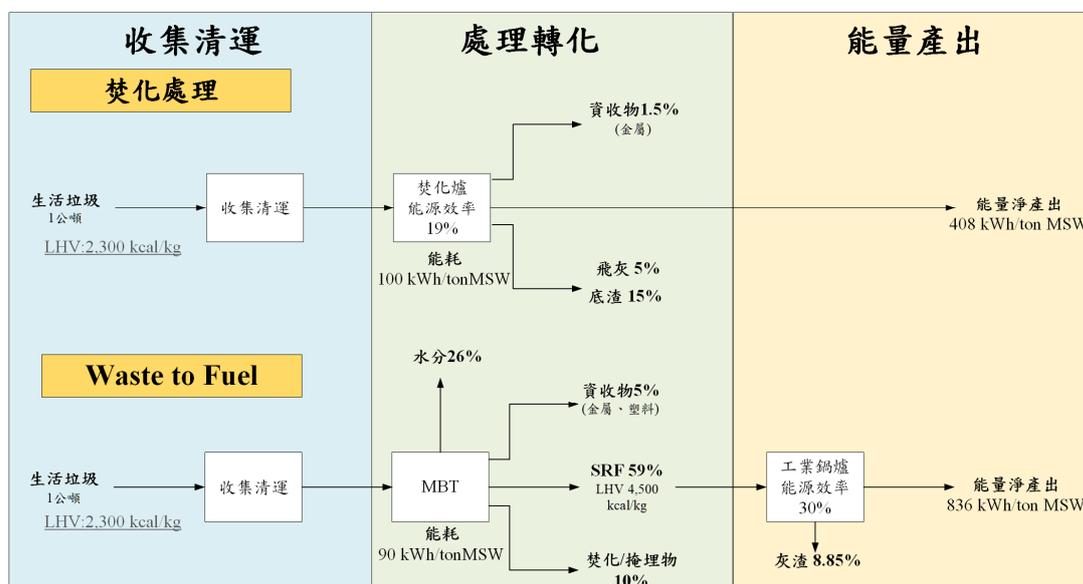


圖 5、都市垃圾燃料化製成 SRF 與垃圾焚化之能源效益比較

2. 環境效益

(1) 低環境衝擊

依據中華經濟研究院針對國內紙廠使用 SRF 作為替代燃料進行生命週期分析，在產出相同熱能條件下，使用 SRF 對環境所造成的總衝擊僅為燃煤的五分之一，其效益包括減少原有廢棄物處理成本（降低焚化爐或掩埋場的廢棄物處理量）、減少化石原料之開採與使用、降低二氧化碳排放等（經濟工業局，2018）。

(2) 減少溫室氣體排放

二氧化碳排放量可以從被焚化的廢棄物總量、水和碳含量、氧化係數以及化石碳和生物碳的比例中估算出來。二氧化碳是來自於化石碳或生物碳，與二氧化碳排放額度和排放交易高度相關，瑞士針對三個垃圾焚化廠調查研究結果指出，廢棄中生質碳所造成的二氧化碳排放約略高於總量的 50% (Mohn et al.,

2008);愛沙尼亞的調查報告也指出生物質部分在燃燒的都市垃圾中的比例約為 52% (以乾基計算) (Moora et al., 2017), 因此對於垃圾焚化發電大致上有一半是來自於生質物的燃燒貢獻。

現有鍋爐基於燃燒裝置在技術可行下改採用 SRF 與燃煤混燒被視為一種符合技術可行、具經濟效益且能減少碳排放量之技術, 相較於其他再生能源發電方式(風能、太陽能), 只需投入較低之設置成本, 即可顯著減少二氧化碳之排放。SRF 經妥善分選、破碎等程序去除不可燃或不適燃物質, 且均質化後, 其熱值與煤炭較為接近, 故鍋爐或燃燒裝置可使用 SRF 替代煤炭, 減少煤炭之使用。SRF 可替代煤炭用量與 SRF 熱值和鍋爐或燃燒裝置之設計所使用燃料的種類相關, 替代比例約 30~100%。煤炭、石油焦、燃料油及 SRF 之熱值相近, 但 SRF 二氧化碳排放係數約為其他化石燃料之 1/3~2/3。

3. 經濟效益

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 年一月煤炭現貨價 5,685 NTD/公噸(200 USD/公噸) 計算, 燃料購入成本僅為燃煤 19~30%。

七、 國內使用現況與展望

我國則自 1999 年起在經濟部能源局的支持下, 工業技術研究院能環所積極投入研發開始研發 RDF-5 技術, 並於 2001 年建立先導型實驗工廠, 完成多項廢棄物製成 RDF-5 可行性試驗。並於 2004 年 6 月 24 日配合與花蓮縣政府豐濱鄉建造完成國內第一座的都市廢棄物固態衍生燃料製造示範廠, 進行示範運轉, 其處理量為 1,000 kg/hr, 最大處理量可達每日 24 公噸, 為我國廢棄物燃料化之濫觴。

造紙業為我國最早導入廢棄物燃料化之產業。永豐餘新屋廠、廣源造紙、正隆紙業后里廠及大園廠等廠已採用回收廢紙製程產出之廢紙排渣製作 RDF-5 應用於流體化床鍋爐與燃煤進行混燒以減

少燃煤使用並同時達成廠內廢棄物之燃料化再利用。

然早期因國內無法令、品質標準與配套措施，廢棄物燃料化僅限於大型紙廠廠內自行再利用做為鍋爐替代燃料使用。近年來將非有害適燃性固體廢棄物製成替代燃料，並替代化石燃料應用於工業鍋爐與燃燒設施以減少燃煤使用並增加物質再利用率為當前國際趨勢。經濟部工業局與環保署目前亦正推動「廢棄物燃料化」政策，藉由廢棄物燃料化與現有焚化爐搭配建立完整之廢棄物能資源化體系，並增修前述表 7 相關規範與品質標準。目前如造紙業、水泥製造業、能源供應業、化工製造業、清除處理業等皆積極投入廢棄物燃料化與使用 SRF 作為替代燃料。

全國廢棄物具高熱值事業廢棄物種類包括廢塑膠混合物、廢橡膠混合物、廢紙混合物、廢木材類及廢纖維類，按近年來網路申報資料顯示，每年約可產出 77 萬公噸。燃料化以產率 80%推估可產製 61.6 萬公噸 SRF (環保署，2020)。然目前仍屬於發展初期，SRF 供給數量低於使用端需求量。目前運作中之 SRF 製造廠含廠內自行處理業者共計 15 家，許可處理量達 32.47 萬公噸。預計至 112 年中許可處理量將達 49.97 萬公噸。

按 109 年申報資料，我國共有 14 家既設流體化床鍋爐使用 SRF 與其他廢棄物作為燃料，109 年使用量為 35.37 萬公噸 (環保署，2020)。110 度起新增水泥製造業一座水泥窯、造紙業一座汽電共生鍋爐四座蒸汽鍋爐及能源製造業 1 座汽共生鍋爐需求量已超過每年 40 萬公噸。隨使用量增加 SRF 之原料來源將擴及一般性廢棄物(生活垃圾)，分選設備與技術及品質控管為未來之挑戰。

八、 結論

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。

參考文獻

- ASTM E856-83:2004 - Standard Definitions of Terms and Abbreviations Relating to Physical and Chemical Characteristics of Refuse Derived Fuel
- BS EN 15400:2011 - Solid recovered fuels — Determination of calorific value
- BS EN 15408:2011 -Solid recovered fuels — Methods for the determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content
- BS EN ISO 21637:2020 - Solid recovered fuels. Vocabulary
- BS EN ISO 21644:2021 - Solid recovered fuels. Methods for the determination of biomass content
- BS EN ISO 21660-3:2021 - Solid recovered fuels. Determination of moisture content using the oven dry method
- EN 15357:2011 - Solid recovered fuels - Terminology, definitions and descriptions
- EN 15359:2011 - Solid recovered fuels - Specifications and classes
- EN 15410:2011 - Solid recovered fuels - Methods for the determination of the content of major elements (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti)
- EN 15411:2011 - Solid recovered fuels — Methods for the determination of the content of trace elements (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V and Zn)
- EN ISO 17225-1:2021 -Solid biofuels — Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements
- EN ISO 21640:2021 - Solid recovered fuels, Specifications and classes
- EN ISO 21654:2021 -Solid recovered fuels — Determination of calorific value
- EN ISO 21663:2020 - Solid recovered fuels - Methods for the determination of carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N) and sulphur (S) by the instrumental method.
- H. Alter, The history of refuse-derived fuels, Resources and Conservation, Vol 15, Issue 4, Nov 1987, P.251-275.
- H. Moora, I. Roos, U. Kask, L. Kask, K. Ounapuu, Determination of biomass content in combusted municipal waste and associated CO₂ emissions in Estonia, Energy Procedia, Vol 128, Sep 2017, P.222-229.

ISO 22167:2021 - Solid recovered fuels — Determination of content of volatile matter

ISO 21656:2021 - Solid recovered fuels — Determination of ash content

J. Mohn, S. Szidat, J. Fellner, H. Rechberger, R. Quartier, B. Buchmann, L. Emmenegger, Determination of biogenic and fossil CO₂ emitted by waste incineration based on ¹⁴C and mass balances, Bioresource Technology, Vol 99, Issue 14, Sep 2008, P.6471-6479.

NIEA M214.00C - 固體再生燃料中水分檢測方法

NIEA M215.00C - 固體再生燃料中灰分及可燃分檢測方法

NIEA M216.00C - 固體再生燃料熱值檢測方法－彈卡計法

NIEA M217.00C - 固體再生燃料中硫、氯、氟及溴含量檢測方法

NIEA M360.00C - 固體再生燃料中金屬及微量元素檢測方法

生質能暨環保產業推動計畫，經濟部工業局，2018

固體再生燃料(SRF)相關管理方式，環保署，2021

固體再生燃料製造技術指引與品質規範，環保署，2019

固體燃料產品質量標準：資源節約和循環利用促進法實施細則附表 7，韓國環境部，2020

事業廢棄物燃料化推動及處理策略專案工作計畫，環保署，2020

事業廢棄物燃料化推動及處理策略專案工作計畫，環保署，2019

焚化廠營運年報，環保署-環境資料開放平臺，2022

焚化廠基本資料，環保署-環境資料開放平臺，2022

達清觀音 SRF 廠簡介，達清環保企業股份有限公司，黃俊哲，2019