

廢棄物衍生燃料的使用

■ 萬皓鵬 · 李宏台

在倡議節能減碳的今天，採用高效率的氣泡式流體化床鍋爐，並以廢棄物為燃料，是可同時達到節能、環保、經濟等多重目標的重要做法之一。

廢棄物與能源利用

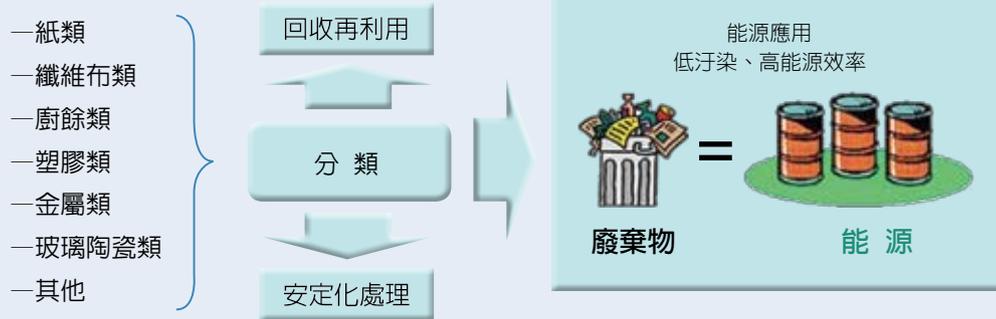
現代人每天生活中或多或少都會產生廢棄物，廢棄物的資源回收就成為相當重要的工作。環保署的資料顯示，由民國92年至97年的垃圾清運量和垃圾組成特性分析結果，發現垃圾中可回收再利用物質的數量有大幅減少的趨勢，如紙類減少22.7%、廚餘類減少46.9%、塑膠類減少29.9%。全國垃圾回收率也由民國92年的19.7%，提升至97年的43.2%。可見我國垃圾強制分類和資源回收工作，已獲得民眾普遍配合且成效卓著。

然而，垃圾中有很多不適合回收但又具有熱能應用價值的物質，如不適合回收的紙製衛生用品、非公告回收的塑膠項目、行道樹樹枝，甚至農業廢棄物（如稻稈、果樹殘枝）、工業廢棄物（如紙廠散漿廢棄物、廢泡棉），必須以能源和環保角度思考最佳的加值化技術和處理方法，以達到廢棄物穩定化和高效率能源應用的目的。

廢棄物能源利用兼具替代化石能源和廢棄物處理的雙重優點。廢棄物若沒有良好的應用或處理，會對環境產生相當大的危害和影響，例如露天燃燒產生空氣汙染、生質垃圾掩埋和森林廢木腐壞逐漸產生沼氣，進而造成火災或溫室效應加劇等。因此，廢棄物能源是所有再生能源中，唯一若不積極使用會造成環境直接衝擊的能源。

廢棄物應以資源回收再利用為主要處理方向，不可回收再利用的廢棄物，則應以積極態度進行高效率熱能回收應用。

一般廢棄物（都市垃圾）



都市垃圾資源回收與能源應用概念

RDF = Refuse Derived Fuel 廢棄物衍生燃料

等級	燃料特性或主要產物	主要應用
RDF-7	氯化反應：缺氧反應，產物以合成燃氣為主（H ₂ , CO, CH ₄ 等）。	氯化複循環發電（IGCC）、氯化觸媒合成汽、柴油或化學品。
RDF-6	裂解反應：無氧加熱，產物以合成燃油等液態燃料為主。	燃油鍋爐、柴油發電機燃料。裂解油品改質後具進入化石煉油廠煉製汽、柴油潛力。
RDF-5	物理製程：粉碎、乾燥、篩選、摻配、造粒等，產物是固態棒狀或錠狀燃料。	用於固體燃料鍋爐取代煤炭，或與煤炭混燒。
RDF-4	垃圾去除金屬、玻璃及其他無機物後製成的燃料，95%重量通過2英寸角篩。	焚化爐廢熱鍋爐、鍋爐中與煤炭混燒。
RDF-3	前處理成薄片狀或木屑狀的可燃廢棄物（95%重量能通過10號篩）。	焚化爐廢熱鍋爐、鍋爐中與煤炭混燒。
RDF-2	粗破碎前處理成一定粒徑範圍的廢棄物。	焚化爐焚化，廢熱發電或熱利用。
RDF-1	一般都市垃圾、一般事業廢棄物、農工廢棄物等。	焚化爐焚化，廢熱發電或熱利用。

RDF-1 < 10~20% 廢棄物衍生燃料發電效率 RDF-7 (IGCC) > 35%

廢棄物衍生燃料分類、發電效率及主要應用。

廢棄物衍生燃料（refuse derived fuel, RDF）技術是把廢棄物，包括都市垃圾、一般事業廢棄物、農業廢棄物等，利用物理或熱化學等方法，轉製為性質均一燃料的技術。依據處理程序的不同，RDF可分為7類，即RDF-1至RDF-7。隨著處理程序的提升，所產生的RDF燃料等級越高，代表能得到的熱能回收也越高、汙染也越低。

一般而言，把廢棄物送入焚化爐焚化並做熱能回收，是屬於RDF-1的應用，以發電效率而言，約10~20%。隨著分選、破碎、乾燥等物理程序的增加，廢棄物中不可燃或不適燃的物質逐漸減少，性質逐漸均一，最後壓製為固態的燃料棒，廢棄物就由RDF-1提升品質至RDF-5（稱為「第五類廢棄物衍生燃料」）。

廢棄物衍生燃料技術，是採用物理或化學程序，把廢棄物轉製為低汙染、高能源效率燃料的技術。

透過無氧中溫（約攝氏300~500度）的加熱裂解技術，把廢棄物轉製為油品，稱為RDF-6。透過高溫（約攝氏800~900度）部分氧化的氣化技術，把廢棄物轉製為合成燃氣（如氫氣、一氧化碳、甲烷等），則稱為RDF-7。

簡言之，如果把一般家戶所收集到的垃圾不經分類（RDF-1）直接送入焚化爐中燃燒，可以回收的電效率會小於20%。反之，若經過衍生燃料技術的轉換，垃圾廢棄物提供的可用能源，能使發電效率達到30%以上。

第五類廢棄物衍生燃料

「第五類廢棄物衍生燃料」（RDF-5），是藉由破碎、分選、乾燥、摻配、造粒等程序，把廢棄物轉化成性質均一且容易儲運的固體燃料。一般垃圾經過轉化變為RDF-5後，在使用上較一般生垃圾具有：燃料尺寸、大小、形狀和性質較為均一，含水率低，熱值高（約為煤炭的2/3以上）、容易儲存和運輸、燃燒產生的汙染低、燃燒效率高等優點。

我國RDF-5技術的發展，主要是由工業技術研究院（工研院）主導，自1999年起，在經濟部能源局委

託下，發展以都市垃圾和一般事業廢棄物為原料的製造和應用技術。RDF-5製造技術的發展重點，在於以處理成本低、能源投入少和燃燒二次汙染排放少的方式，開發把各種廢棄物製成高品質RDF-5的製程。

2001年，經濟部能源局和工研院完成200 kg / hr處理量的RDF-5先導實驗廠，並在花蓮縣豐濱鄉建造一座以都市廢棄物為原料，處理量1,000 kg / hr的RDF-5製造示範工廠，2004年6月正式運轉。至2009年為止，工研院RDF-5技術已成功進行6家次的專利和一般技術授權，協助廠商設置了4座RDF-5製造廠。目前台灣地區總RDF-5產能一年近18萬公噸，所產生的燃料提供汽電共生鍋爐、蒸氣鍋爐做為替代煤炭使用。

目前RDF-5雖然已屬於一般燃料，但它的組成畢竟是由廢棄物而來，因此RDF-5燃料的應用技術是廢棄物衍生燃料應用是否成功的關鍵。在RDF-5應用技術方面，主要考量包括廢棄物經過篩選、重組之後，燃燒效率是否提升，汙染物生成和排放是否降低，對於原有燃燒系統是否造成不穩定等。

工研院已分別在不同形式的多座鍋爐進行RDF-5與煤炭混燒和全燃燒的測試，也成功開發了一座RDF-5中小型氣泡式流



以紙廠廢紙排渣所製作的第五類廢棄物衍生燃料



工業技術研究院由不同廢棄物所製作的RDF-5

體化床鍋爐。綜合測試結果顯示，既設鍋爐若不經修改，約可採用30%以下的RDF-5和煤炭混燒；若針對RDF-5設計的鍋爐，則可達到100%的燃燒，同時可達到系統穩定、各項汙染物排放都符合環保法規所訂的標準。

RDF-5的特性

RDF-5主要由農林、工業或都市廢棄物，經過適當的處理後所製成。換言之，一般生質物或廢棄物的基本化學性質仍然存在，但可藉由不同的分離程序，使RDF-5成分中不適燃或不可燃的物質減少。

一般而言，RDF-5具有以下特性，而這些特性會影響應用系統（如氣泡式流體化床鍋爐）和周邊設施的設計。

外觀與物性 廢棄物經分離、壓縮、乾燥後製造成為RDF-5，較原料源形狀更均一、更緊密，可節省運送成本，且較容易進料和運輸。RDF-5成品一般是以卡車運輸，運輸過程須避免雨水淋溼使其受潮變質。



花蓮縣豐濱鄉都市垃圾RDF-5再生燃料示範廠

在RDF-5製造量少的情況下，可用太空包裝袋，並以堆高機堆成數層保管。但在RDF-5生產量大的情形下，儲存於儲藏槽中會比較適宜。若RDF-5製造廠位於使用廠附近，也可直接由製造廠輸送至使用廠。

對製造業而言，使用本身所產生的廢棄物製作第五類廢棄物衍生燃料，可節省廢棄物處理費及化石燃料的使用，達到廢棄物「零排出」的目標。



以太空包包裝RDF-5



工廠生產RDF-5後輸送至儲存槽，再透過輸送系統送至汽電共生鍋爐使用。圖片上方輸送帶是把製造廠製造的RDF-5運送至儲槽。下方則由儲槽透過輸送帶，把RDF-5直接運送至氣泡式流體化床汽電共生鍋爐做為燃料使用。

分解腐敗性 RDF-5是經乾燥處理的廢棄物，依據日本TR規範，含水率要求在10%以下。此外，為了避免RDF-5受到微生物的作用而腐敗（尤其是含有廚餘的都市垃圾製成的RDF-5），除需注意儲存處須乾燥外，一般會在製程中添加石灰石或消石灰。石灰石或消石灰的添加主要是防腐敗，在燃燒過程中也

可做為脫硫或脫氯的反應物。

燃料熱值與特性 RDF-5具有較原料源更均一、安定的燃燒特性，可單獨或和煤炭、木屑等混合燃燒。一般家庭垃圾製成的RDF-5的熱值約4,000~5,000 kcal / kg，一般事業廢棄物所製造的RDF-5的熱值可高達6,500 kcal / kg，相當於褐煤的熱值。RDF-5的形狀和發熱

近年來生質能源和廢棄物能源利用逐漸受到重視，開發適用於新燃料且能達到高效率、低污染的燃燒系統，就成為積極研發的目標。

量與煤炭、木屑類似，又都是固體燃料，因此比較容易混合燃燒。惟因RDF-5的組成中，揮發物的比率遠比煤炭高，因此燃燒速率較煤炭快，會左右RDF-5在鍋爐中燃燒的機制和溫度分布。

燃燒污染物的控制 製作加工RDF-5燃料時，可添加消石灰等做為脫氯劑，在燃燒時會抑制硫、氯系氣體產生，因此所產生的廢氣安定，容易控制。然而，石灰添加量過多會降低發熱量和增加灰渣。此外，RDF-5畢竟是用在燃燒程序中，因此燃燒機組後端適當的空氣污染防治設備，仍是不可或缺的組件。

燃燒應用特性 RDF-5和石油、天然氣等比較，在搬運、保管、供給等處理上較複雜，但和煤炭等燃料比較，又較為簡單。使用RDF-5必須有固體燃料燃燒用的鍋爐，如爐格式燃燒爐、流體化床式燃燒爐等。此外，適當的空氣污染防治設備和灰渣的妥善處理，是非常重要的要求。

氣泡式流體化床鍋爐

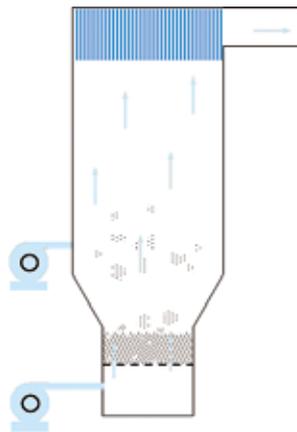
傳統的鍋爐多採用化石燃料，如煤炭、重油、柴油、天然氣、液化石油氣等。一般而言，傳統鍋爐的燃料性質均一，燃燒效率高，且應用技術成熟。近年來生質能源和廢棄物能源利用逐漸受到重視，開發適用於新燃料且能達到高效率、低污染的燃燒系統，就成為積極研發的目標。

氣泡式流體化床鍋爐（bubbling fluidized bed boiler, BFBB），主要是以氣泡式流體化床燃燒爐結合水管鍋爐結構所組成。氣泡式流體化床水管鍋爐，主要結構及目的為：1.風箱：用以蓄積流體化/燃燒用空氣的壓力，以達成使砂床流體化的目的。2.氣體分布器：商業化系統多布設數十、甚至數百個噴嘴，使風箱氣體均勻分布於砂床中，以使其流體化。3.流體化床：一般以矽砂做為床



工研院所開發的RDF-5氣泡式流體化床蒸氣鍋爐，最大蒸氣產量是6公噸/時。

質，其主要優點在於低成本、耐磨等。固定碳及部分揮發分，在此處透過氣體分布器所產生的氣泡與氣體混合進行燃燒。為達控溫目的，這一區常裝設噴水裝置或熱傳管。4.乾舷區：位於流體化床上方，揮發性物質主要在這裡燃燒，大部分燃料在離開乾舷區前燃盡，因此常在乾舷區供應分段燃燒的空氣，這一區並含有部分被淘失（elutriation）的砂子。一般氣泡式流體化床水管鍋爐於乾舷區末端區域，常會設置水管牆，以吸收流體化床及乾舷區的輻射熱。5.燃盡氣體出口：位於乾舷區末端，主要目的是排出燃燒後產生的煙道氣，其設計需兼顧防止粒子淘失。6.對流熱傳區：這裡布設一定熱傳面積的水管，主要目的在以對流及傳導方式吸收煙道氣中的熱量。7.其他部分：包括



氣泡式流體化床水管鍋爐示意圖

循環鍋爐水的水鼓、氣鼓；燃燒系統、公用設備（風機、泵浦）、自動控制設備等。

針對RDF-5燃料的物理和化學特性，在設計和操作氣泡式流體化床鍋爐時，必須有以下的考量：

燃燒機制的改變和調整

依據燃料成分分析的結果，

RDF-5的揮發分遠高於煤炭，因此

當燃燒RDF-5時，主要以揮發分燃燒為主。根據試驗結果，燃燒RDF-5時，揮發分受熱後會在進料點附近大量釋出。這時若氧氣含量充足，會使得燃燒的火焰大部分集中在進料進入爐室區，燃料的燃燒快速，因此高溫區集中在進料附近，若空氣分配不佳，容易形成局部高溫。

反之，當煤炭燃燒時，因環境溫度的上升，會先開始乾燥（水分脫除），然後進行裂

固態衍生燃料成分分析的一例（事業廢棄物製造的RDF-5）

燃料種類	水分 (%)	灰分 (%)	固定碳 (%)	揮發分 (%)	熱值 (kcal/kg)
RDF-5	4.18	7.7	13.03	75.09	5,910
煤炭	17.80	4.8	64.30	13.10	6,200



煤炭和RDF-5燃料在移動式機械爐床中燃燒時的火焰。左：煤炭，右：RDF-5。當燃燒煤炭時，因爐格下方空氣分布均勻，且固定碳緩慢在移動爐格上完全燃燒，火焰顏色顯得很均勻，代表燃燒十分完全。反之，在沒有空氣配比調整下，在相同操作條件下燃燒RDF-5，可以明顯發現因大量的揮發分由爐格下方快速釋出，爐格上方空氣供應不足，造成火焰顏色分布不均勻，燃燒也較不完全，產生大量的黑煙。



氣泡式流體化床砂床高溫結渣的情形



使用RDF-5的氣泡式流體化床鍋爐砂床內，水平多層布設的傳熱管。



使用RDF-5的氣泡式流體化床鍋爐砂床內，具防磨片的垂直傳熱管。



使用RDF-5的氣泡式流體化床砂床內的水平盤管式傳熱管

解（揮發分揮發）和燃燒。當揮發分燃燒後，固定碳再緩慢燃燒，因此底部空氣的分布是左右燃燒是否完全的關鍵因素。

在既有的固體燃料鍋爐中，如要改用RDF-5，就必須針對燃燒控制做適當的調整，包括空氣的調整、燃燒速率的調整、進料模式等，如此才能有效率地使用RDF-5燃料。

溫度的控制 一般而言，當含高揮發分的燃料進入流體化床的砂床內時，會迅速釋放揮發物，且和氧氣反應，進而燃燒放熱。因此，氣泡式流體

化床的空氣配比（一次空氣 / 二次空氣 / 三次空氣等）就變得相當重要。

以氣泡式流體化床燃燒來說，在特定砂床粒徑和比重下，為達到良好的流體化，空床氣速必須達到一定的大小。但過多的一次空量會提供燃料充足的燃燒氧，進而使大部分的燃料在床內燃燒而釋放熱量，這時極有可能使砂床溫度過高（>攝氏950度）。若燃料以生質物或廢棄物為主，往往含有較多的低熔點的鹼金屬或鹼土金屬，砂床溫度過高容易造成砂床結渣，進而使得系統停機。



氣泡式流體化床鍋爐砂床流體化的情形



使用RDF-5的氣泡式流體化床鍋爐的鼓風口式氣體分布器



氣泡式流體化床蒸氣鍋爐耐火材內壁黏結積灰的情形

為避免氣泡式流體化床在燃燒RDF-5等高揮發分含量的生質物時，可能造成床砂溫度過高的危險，一般可採用床內設置熱傳管以移除過多的熱量。熱傳管的形式包括盤管型、水平管型及垂直管型，另外又可分為固定式、移動式等，可依不同設計者的理念而定。

床內熱傳管設計所需考量的因素，有熱傳面積、結合鍋爐汽水鼓的水／汽輸送設計、砂床內磨蝕、溫度結構等。傳熱管的面積多寡須視操作範圍、燃料特性等多項因素決定，以工研院所開發的RDF-5氣泡式流體化床鍋爐為例，燃燒以廢紙排渣所製作的RDF-5時，床內釋熱量約占總釋熱量的55%。在了解床內釋熱量後，便可計算所需的傳熱面積，進而設計傳熱管。

氣體分布器的設計 氣體分布器是流體化床設計的關鍵，主要功能是使床砂混合均勻。專業書籍對於氣體分布器雖有原則性的設計準則，但必須經過實際測試和驗證後，才能達到最佳化的設計。

氣體分布器由數根鼓風口所組成，其設計的主要考慮參數包括壓損（氣體分布器、砂床重量等）、流體化行為（氣泡性質、行為）、氣體速度（流體化行為）、床內熱傳（溫度）、材料和使用壽命等。而氣體分布器每支鼓風口的孔口大小和角度，是依所需要的氣速設計的，主要考量因素包括單一鼓風口流體化範圍、磨蝕、漏砂、經濟成本等。鼓風口的數量和布設方式，則依據布氣經驗、排砂、流體化行為、熱傳行為、砂床周界行為等因素設定。

腐蝕與積灰 以廢棄物或RDF-5為燃料燃燒時，由於RDF-5中氯、硫或一些金屬類含量較一般傳統化石燃料高，燃燒後有可能生成氣態污染物（如氯化氫、硫氧化物等），而對原有系統（尤其是鍋爐的爐管）造成潛在的危機。



流體化床汽電共生鍋爐的對流區積灰情形

氣泡式流體化床鍋爐的燃料燃燒後的氣體溫度在攝氏850~1,000度左右，流經鍋爐內各階段的熱交換裝置（如過熱器、節熱器、空氣預熱器等），至煙囪排出大氣前的溫度約為攝氏150~170度，因此會對各項裝置產生不同的熱衝擊。

在攝氏320~800度高溫時，會對鍋爐爐管產生高溫腐蝕。高溫腐蝕主要包括金屬管材的硫化和氯化現象，發生原因是廢氣中的硫氧化物和金屬作用形成硫化鐵，或廢氣中的氯化氫和金屬作用形成氯化鐵，使金屬材料失去氧化保護層而腐蝕。此外，一些鹽類也是促成高溫腐蝕的重要因素。

一般工業用鍋爐火側的金屬設備，常由於進氣吸入鹽分和燃油中含有腐蝕性元素，經高溫燃燒後氧化生成低熔點產物，並以熔融顆粒形式黏附在管材表面上，促進金屬基材的高溫腐蝕，造成機件異常損壞。因此，在現有鍋爐中使用RDF-5時，須特別針對腐蝕防治做相關的調整與改善。

此外，因為RDF-5燃料的複雜性和灰分特性，燃燒後的灰分常易黏結在鍋爐耐火材料內壁上，或黏結在傳熱管管壁上。前者會造成氣流通道狹隘，使氣體流速加快，造成燃燒不完全或磨蝕現象；後者會造成傳熱效果不佳、腐蝕、氣體流道狹隘等問題。因此，適當的吹灰裝置的設置和使用時機，在燃燒RDF-5燃料時較使用煤炭時要求更高。

流體化床是高效率的反應器，廣泛應用於不同領域。在燃燒領域方面，因高熱傳和質傳效率而廣被固體燃料燃燒的鍋爐系統所採用。廢棄物衍生燃料可把廢棄物轉製為低汙染、高效率的再生燃料，結合氣泡式流體化床鍋爐的高效率燃燒，為廢棄物和生質能源的應用開創嶄新的一頁。

萬皓鵬·李宏台

工業技術研究院能源與環境研究所