

化垃圾為能源：

垃圾衍生燃料 (RDF) 之製造及應用

楊 義 崇*

一、前 言

自從六〇年代能源危機後，從都市固體廢棄物 (Municipal solid waste, MSW) 向收石油替代燃料，廣受非產油之工業先進國家之重視，而目前較受注目項目之一為垃圾衍生燃料 (Refuse-derived fuel, RDF) 的產製技術。RDF 除能作為傳統燃料替代品外，亦可與其他型式之燃料合併使用於各類工廠、發電廠，以減輕生產成本。

目前，此種科技領域趨勢已經包括「從廢棄物產製燃料之工廠」，事實上此類工廠已算是處理固體廢棄物工廠（場）之一部分，而其產品為具有約略固定大小及適合燃燒之特性。

燃燒特性包括

- 潤濕態下之低位熱值 (Lower heating value, LHV)：通常以 3500 kcal/kg (14650 KJ/kg) 為標準來定義 RDF 之熱值高低。
- 灰份 (Ash content)：不得多於 25% (wt)。
- 空密度 (Bulk density)：不得少於 200kg/m³ 為佳。
- 含水率 (Moisture content)：不高於 25% (wt)。

近年來在此方面有兩系列重要研究：

- (1)尋找製造 RDF 生產技術操作之最適性，國際上通用者為採用乾式流程，免除添加任何化學藥劑之轉化過程。
- (2)在使用 RDF 於工業化規模工廠前，先作模擬試驗廠實驗 (Pilot scale)。

第一系列著重在設計 RDF 之生產技術，但也牽涉到垃圾處理廠（場）向收 RDF 為副產品之可行性及工廠使用 RDF 之關聯性，故事實上很難在兩個系列間作明顯的劃分，一般而言，可由 RDF 之種類及使用工廠之特性而定。

本文主要介紹國外對 RDF 之製造全般流程及應用 RDF 向收能源之研究及實際經驗。鑑於國內工廠及發電廠，每年所消耗之燃料，不論是燃油、粉煤、核能燃料、其他燃料，其數量極為龐大，而「垃圾」這個人人產生，人人討厭的廢物，正隨著生活水準的提高，國民所得的增加，人口的遽增，不斷地增加，已普遍在地狹人稠的臺灣造成嚴重的環境問題，頗

*經濟部工業局第七組技正

令主管當局頭痛。

再從資源有效利用的觀點來看，廢棄物為一種可再利用或尚未發現其用途之「原料」，吾人假如能從它提煉燃料，多少能解除「能源短缺」與「環境污染」這個結，故建立「垃圾是另一種能源資源，而如何將其有效回收，而不僅解決垃圾本身的問題，且能將二次公害問題減低至最微小程度」之觀念是很重要的，也是本文之主旨。

二、美國與義大利RDF生產之比較

RDF 第一個實驗，係於1972年使用於美國聖路易市 (St. Louis) 傳統火力發電廠。固體廢棄物經乾燥、粉碎與粉煤一起吹入鍋爐燃燒室燃燒。

經過多次實驗，有關應用技術方面由觀察結果得到以下結論：

(1) 主要廢棄物燃料類型，依 MSW 收集、運送過程中的分離及壓縮操作多寡而分類：

- 粗 RDF ——含大塊物質，通常含大量惰性物，減少燃燒效率。
- 膨鬆 RDF ——廢棄物經進一步破碎、篩分，直至平均粒子大小減至20-25mm。
- 細密 RDF ——經過最後擠壓作業，形成不同大小粒狀、塊狀物。

由於膨鬆 RDF 經久會發臭，且被儲放壓縮易結塊，不適於長時間貯存，故通常作成細密 RDF，雖然解決了儲存問題，但花費的能源成本較高，此乃由於擠壓造塊機生產量小 (3-10t/h)，而在一大城市之此類工廠，每天需處理 1000-3000t 之垃圾，故光造塊作業即須消耗很多由 RDF 燃燒所產生之動力。

(2) 主要使用 RDF 的傳統火力發電廠，係採用與粉煤共燃之方式，燃燒器 (Burner) 正確設計（與兩燃料熱值變動有關）之最大混合比例為 80%:20%。

如使用 100% RDF 於前述共燃系統之燃燒器，應從以下考慮：

- 在不大幅度改變既有火力發電廠之設計燃燒變數條件下作小局部修改之可行性。
- RDF 物性之變動性不影響蒸氣鍋爐熱效率之穩定。
- 需有足夠 RDF 供應量，以確保維持連續發電之操作。
- 在 RDF 突然斷絕生產時，仍能使用其他燃料，保持電廠操作。

(3) RDF 除了上述三種論及之類型外，尚有作成「粉狀 RDF」，此為採用複合製造技術，添加化學藥劑。這項技術現在已不再使用了，主要理由是成本太高，且最後產品品質的改進無法彌補所消耗的能源。

另方面，假如所設計的製程能簡單化，且大量減少投資及操作維護成本，其產品有高熱值、低灰份，則此種 RDF 與傳統燃料是有相當競爭力的。

(4) 使用 RDF 之趨勢逐漸普及，目前在美國已有 20 座 RDF 生產工廠，而且訂有組成及物理、化學特性的標準。

美國的都市固體廢棄物組成與義大利者不同（如表一），特別是此種互異性影響採用 RDF 之生產程序設計之選擇。

美國生產線上，先除去 MSW 中無法進料之大型垃圾後，直接進入破碎、篩分、壓縮等作業，而在義大利則不行，理由為：

表一 美國與義大利MSW之組成及物性

組 成／物 性	羅 馬	休 士 頓
紙／紙板	25.0	60.0
塑膠袋類	3.5	2.5
硬 塑 膠	3.0	2.5
金 屬 類	2.5	7.2
纖維／皮革／木材	3.0	2.0
有機物 (厨餘)	53.0	15.0
玻璃／惰性物	10.0	10.8
	100.0	100.0
水份 (%wt)	47.0	19.0
LHV kcal/kg	1700.0	2800.0
LHV KJ/kg	7100.0	11700.0

1) 鋸碎機需要大量能源（每台動力約750KW以上），已消耗多量由 RDF 同收之能源，但因美國由 MSW 同收 RDF 之比例為65%，義大利不超過35%。

2) 義大利 MSW 含大量廚餘超過美國甚多（分別為53%、15%），廢棄物破碎後，有機物質與可燃物相混，造成 RDF 含水率偏高現象。

因為美國 RDF 生產工廠，大多也使用它，同時同收金屬，而在義大利同收部份有機物成堆肥，及同收紙、塑膠有其經濟性。所以前者設計製造流程為單純，後者因需考慮市場對 RDF 需求之可能變動性而需作足夠彈性之修正。

三、RDF 之製造

(一) 破碎、選取

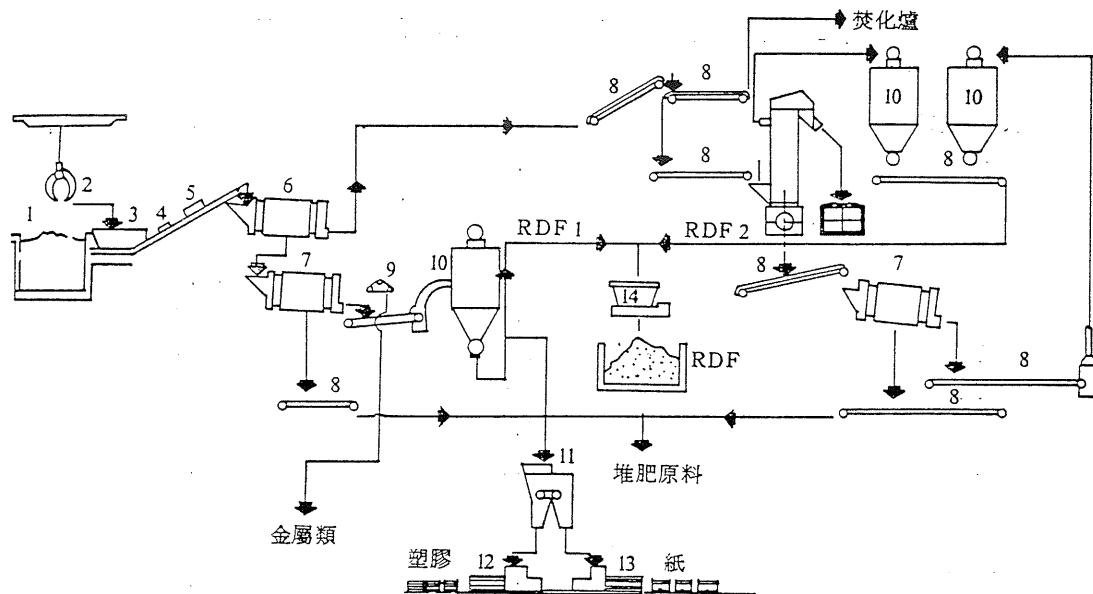
在城市垃圾收集過程中，如要求市民配合，將可燃物與不可燃物分開，使 RDF 之製造單純化，而 RDF 即可在可燃物垃圾中選取，當然為了回收金屬，亦可允許其投入可燃物垃圾中。分離作業採用自動機械選取機，除了作成 RDF 外，亦同收有用的紙、塑膠、鐵、有機物，在經濟上值得特別考慮。由於自動選取機之設計，使得廢棄物分離作業得以商業化。

多項研究及試驗結果，發現最佳的分離程序，因最終對 RDF 物料分離方法的不同，而有兩種工業化之生產型式，因應由住戶到工廠所收集之 MSW 成份的變化，所採用之不同流程及機械之兩個選取系統，主要相異點在 PE 袋所裝垃圾打開，且紙箱被打碎後，不會造成 MSW 特性變化步驟之不同。第一種型式工廠採用往復式開袋機及一次旋筒，產生高比率可供燃燒之物料（約為原量之50%）。第二種型式工廠為設計一低速旋轉器，可自動排除硬物

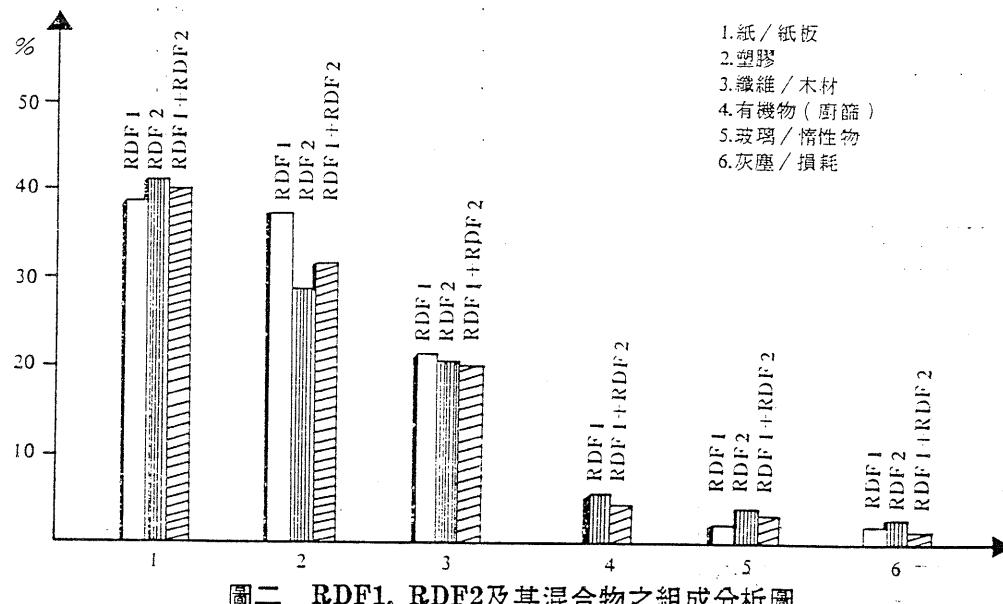
(金屬、玻璃、石塊等) 進入承受槽，可減少約10%之不燃物。

1. 第一種選取廠

圖一為此廠之機械自動分類流程，MSW 由貯坑(1)，用吊車抓斗(2)，送入輸送帶進料斗(3)，經分級粗碎機(4)，往復式開袋機(5)，落入初級旋篩機(6)，細物進入分離機(7)，分出有機物，經橡皮帶(8)，送往堆肥廠。非有機物經磁選機(9)，分離出金屬物後，送入空氣分類器(10)，輕物送入紙—塑膠分離機(11)，落入紙、塑膠打包機(12)、(13)，重物 (RDF1) 送入均質機(14)與 RDF 2 混合。



圖一 第一種選取廠流程



圖二 RDF1, RDF2及其混合物之組成分析圖

從(6)分出之粗物，依熱值高低，或直接送往燃燒，或輸送至氣體分類器(10分出 RD F 2 與重質有機物，後者經分離器分出堆肥原料及輕質物，後者再送入(10)。

除了 RDF 外，尚可回收紙、塑膠及堆肥原料。RDF 物料為均質化過程混合物，包含兩股來源，其一來自主選取線，另一為其他線分離出之過剩可燃物。兩股物料及其混合物組成分析如圖二。

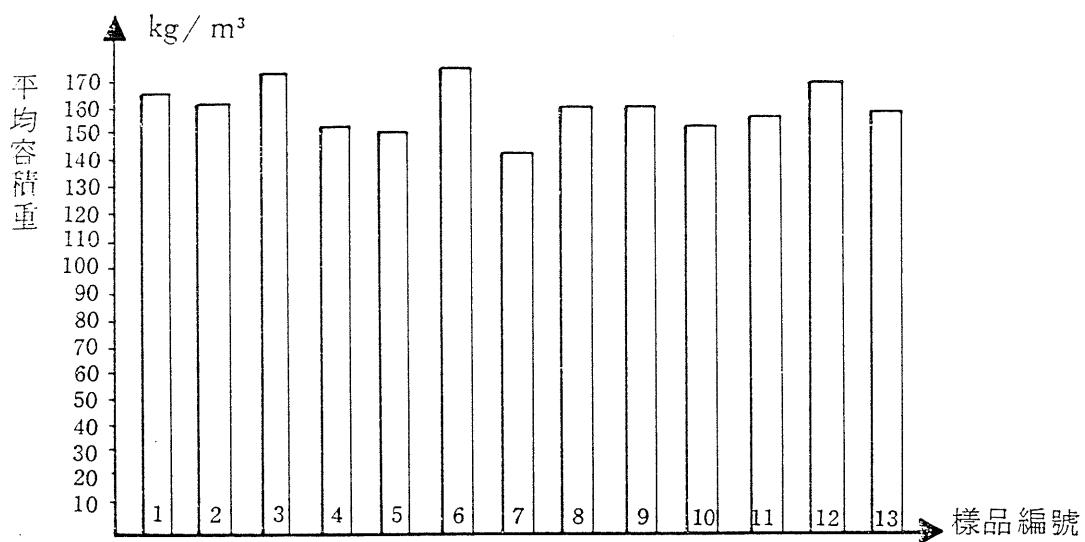
主要之物理、化學特性如表二。

表二 由第一種垃圾選取分出之 RDF1, 2 物化特性

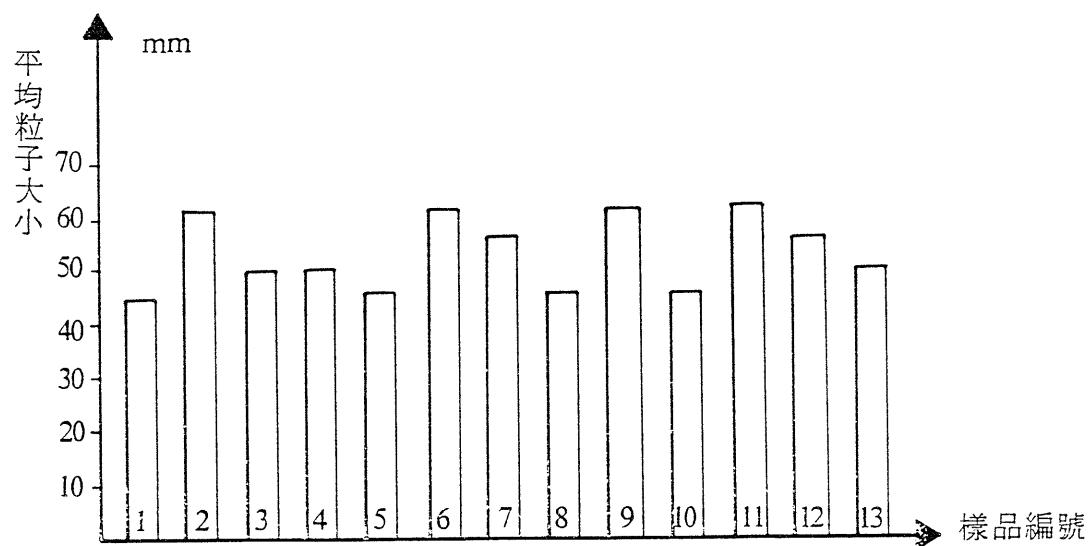
	RDF1 (%)	RDF2 (%)
含水率 (105°C)	8.0	12.0
灼燒減量 (600°C)	92.0	84.0
<u>元素分析</u>		
C	56.0	63.0
H	8.0	1.3
F	0.01	—
C1	0.8	0.6
N	1.0	—
S	0.2	0.2
<u>高溫下灼燒減量</u>		
200°C	12.0	8.0
400°C	89.0	81.0
600°C	92.0	84.0
800°C	92.1	84.0
1000°C	92.2	84.0
灰份(乾基)	8.0	16.0
其中 SiO ₂ 占	37.0	33.0
LHV (Kcal/Kg)	5500.0	4500.0
LHV (KJ/Kg)	23000.0	18800.0

RDF1 所含塑膠、有機物比率與 MSW 所含者明顯地減少，此乃由於回收塑膠、有機物等有價物質所致。當然如此會降低 RDF 熱值，然而各項回收產品之收入可彌補此種損失。

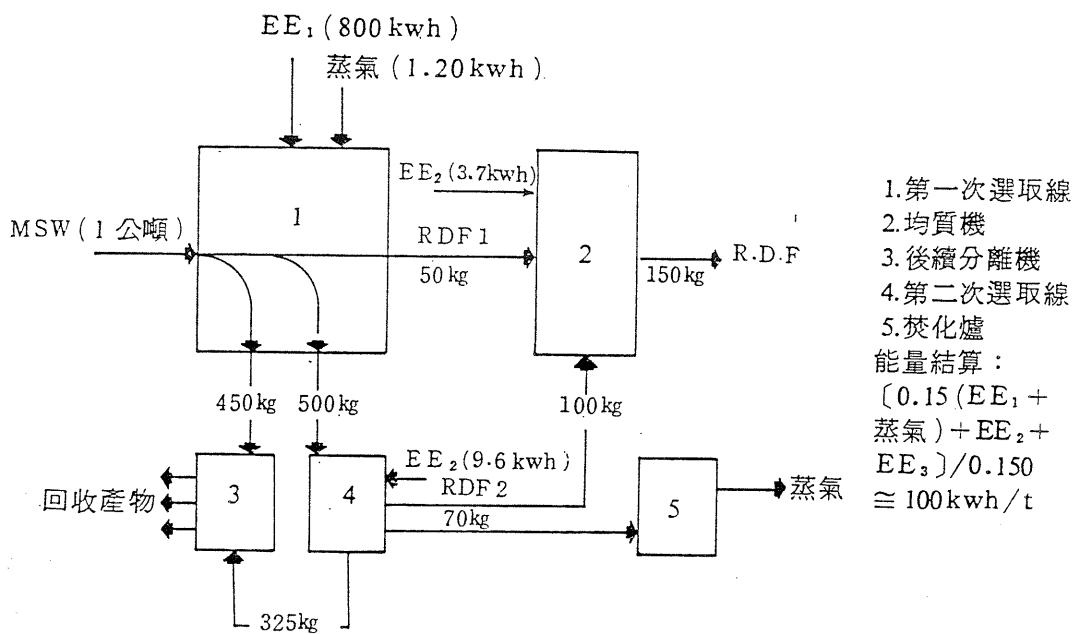
RDF2 樣品之密度及平均粒子大小之物理分析如圖三、四。由圖看出其容積重約在 160 kg/m³，而平均粒子大小在約 50mm，產製過程之質能平衡分析如圖五，可看出此廠每製造 1 公噸 RDF，耗電 100kwh。



圖三 RDF 2 平均容積重

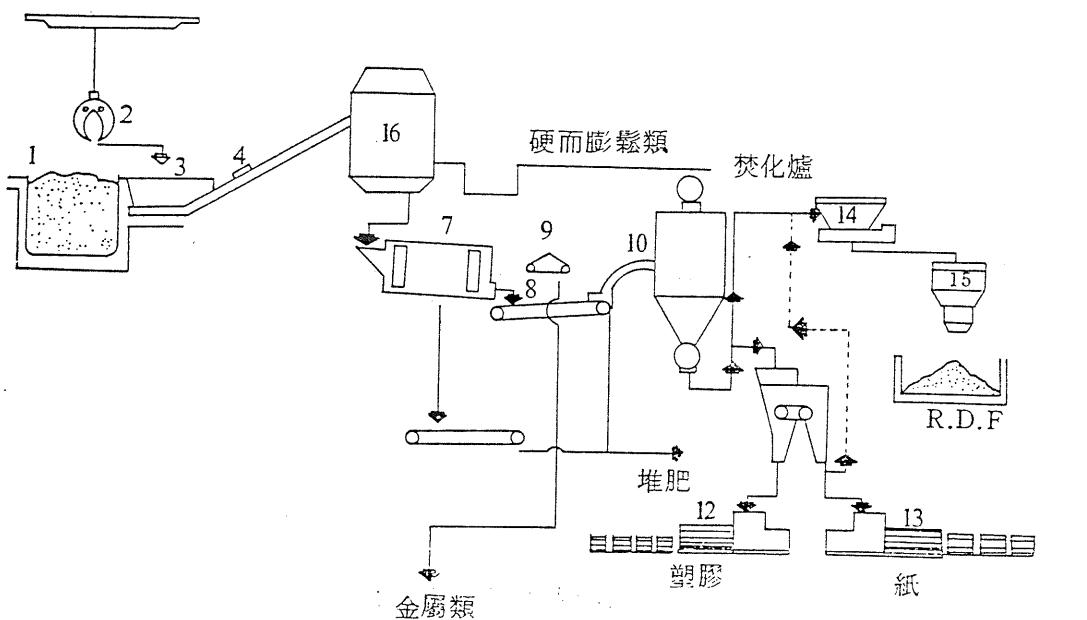


圖四 RDF 2 平均粒子大小



圖五 第一種選取廠質能平衡分析

2.第二種選取廠



圖六 第二種選取廠機械自動分離流程

由廢棄物分離成各物料輸送線之流程如圖六。MSW 由貯坑(1)用吊車抓斗(2)送入輸送帶進料斗(3)，經分級粗碎機(4)、旋轉式開袋機(6)，將廢棄物分為重而緻密及硬而膨鬆兩類，前者經分離機(7)篩選出堆肥原料；粗物再經磁選機(9)回收金屬類後，輸入空氣分類機(10)按比重分出 RDF 及塑膠、紙類。前者經均質機(14)、擠壓造塊機(15)製成 RDF。後者經分離機(11)將塑膠及紙分開，再進行打包(12)(13)。

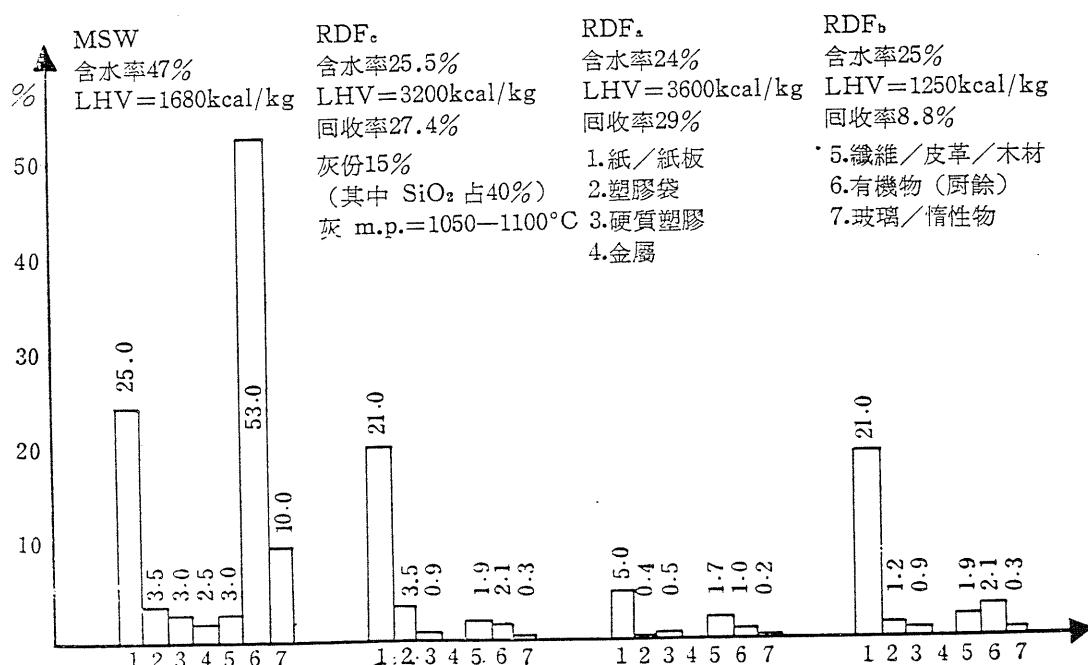
比較此種選取廠與第一種者有以下差別：

- PE 袋拆包採用慢速旋轉機(6)。
- 送往焚化之過剩物大量減少。
- 由選取線上回收較多有價物質。
- 最終產物係先經均質化機(14)、擠壓造塊機(15)製成，呈半壓縮狀態，改良儲存及運輸特性，且有利燃燒室進料方便。

此種廠可改變生產線使回收產品種類及數量多樣化，而分成三種作業方式：

- a) 有機物、金屬及 RDF 之回收。
- b) 有機物、金屬、紙、塑膠及 RDF 之回收。
- c) 有機物、金屬、塑膠及 RDF 之回收。

三種回收類型所得 RDF 與原固體廢棄物組成之比較如圖七。對熱值影響最大者為塑膠類，但因其比率一般均不超過10%，因此影響 RDF 特性不大。



圖七 三種 RDF 物性與 MSW 比較圖

對以上三類型 RDF 之製造，其動力消耗如下：

	kwh/t(MSW)	kwh/t(RDF)
RDF a	23.0	80.0
RDF b	32.0	—
RDF c	30.0	110.0

明顯地，大多數機器在 b) 及 c) 消耗較多動力；與其他含在廢棄物中之其他物料之回收比較，每公噸 RDF b 的能量消耗無參考值，係因回收之燃料比率甚少而忽略。

下表為具代表性此種 RDF 粒子大小與密度，這些數據對設計燃燒室之進料系統與燃燒的型態甚為重要。

粒子大小 (mm)	百分比 (%)	空密度 (kg/m³)
0~ 5	10.0	80.0
5~10	24.0	100.0
10~20	32.0	120.0
20~30	34.0	150.0

(二)包裝、輸送及貯存

RDF 最終產品之包裝與其輸送、儲存的方式及燃燒器種類、燃燒室進料系統的選擇有密切關係。最適當的包裝特性通常經廣泛的模型廠及半工業規模廠 (Semi-industrial scale) 試驗。以下介紹三種 RDF 之包裝：

1) 疏鬆狀 RDF

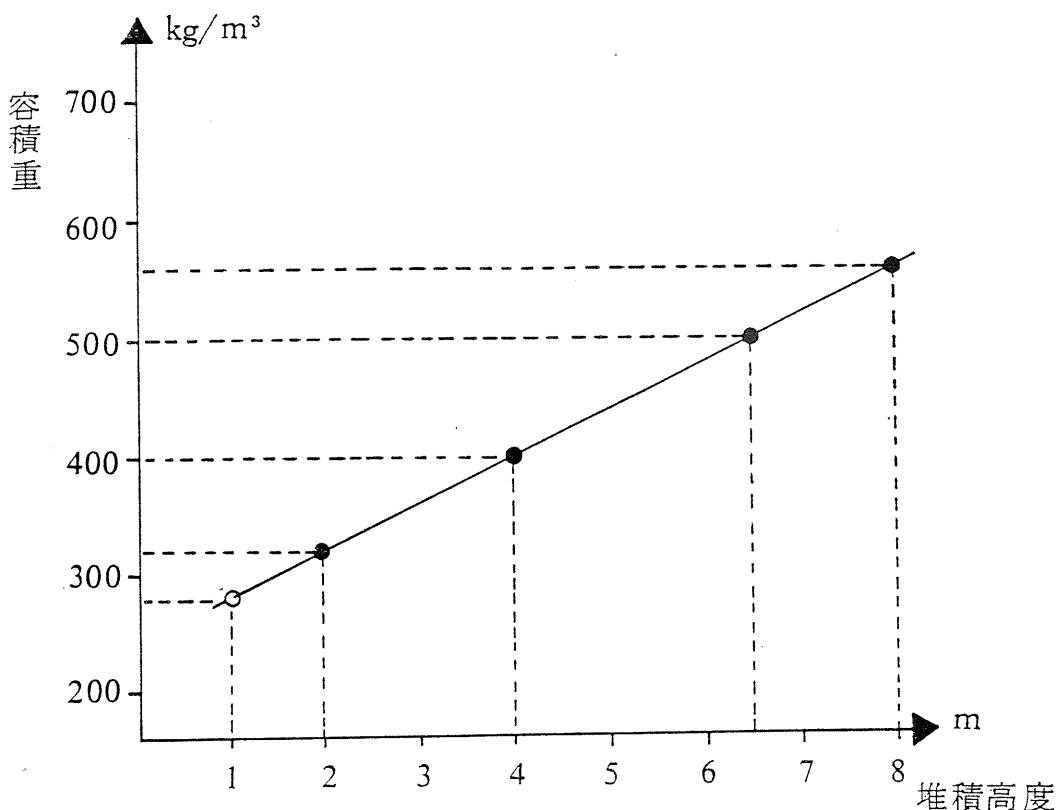
此類 RDF 產品係於第一種選取廠作業中。分出燃料須經均質化而成。雖然其粒子不大，通常為 50~70mm，有時低於 10~20mm，適於氣流輸送之倉儲作業，但由於產品的層疊結構有利於架橋及硬化作用，影響燃燒器之連續進料之吸引。由於粒子不大，密度低 (約 50 kg/m³) 之特性，此種 RDF 適於全浮動燃燒法使用。

2) 捆包狀 RDF

此種設計特別是針對水泥旋窯及與傳統燃料共燃之鍋爐。以 PE 袋將疏鬆 RDF 打包成約 $0.6 \times 0.6 \times 0.3 m^3$ (視旋窯、鍋爐進料斗之大小而定)，便於貯存及運輸。如 RDF 之低位熱值在約 3500~4000 kcal/kg 以下時，將使此種 RDF 因成本上昇而甚不經濟，故考量發熱量及生產力，比較技術及經濟性是必須的。

3) 顆粒或塊狀 RDF

此種 RDF 係在圖六流程第15號擠壓造塊機所造者，其所堆積成堆之容積重如圖八。此種半壓縮狀 (Semi-densified) 之顆粒 RDF。當堆積於儲倉中較不會形成架橋現象，而形成燃燒器管路的阻塞，且因空隙小較無惡臭問題。



圖八 顆粒 RDF 堆積時之容積重

四、應用

RDF 最普遍應用於兩種用途：

(1)RDF 燃燒爐設置在垃圾回收工廠中，所獲得之熱能轉換為電力，供本身使用，多餘之電力及蒸氣外售。

(2)修改既有之鍋爐或更新之，使用 RDF 取代原先之傳統性燃料或與之併用，產生之熱能或電力外售予其他工廠，如紙廠、水泥廠、染織廠、煉油業……等。

以下介紹兩個應用實例：

(a)燃燒發電

本節僅簡單介紹一個使用 100% RDF 之流動床式燃燒室，產生之熱能經一鍋爐交換成蒸汽，轉動後壓式渦輪機，經交流發電機發電之試驗工廠之概略情形。

RDF 藉氣流輸送及給料系統(2)，由儲倉(1)經分解器(3)，而置入流動床式燃燒室(4)完全焚化，廢氣高熱經鍋爐(5)及節熱器(6)回收熱能成高壓蒸氣，轉動渦輪機(9)，廢氣經靜電集塵器(7)處理後，經煙囪(8)排放。其流程如圖九。

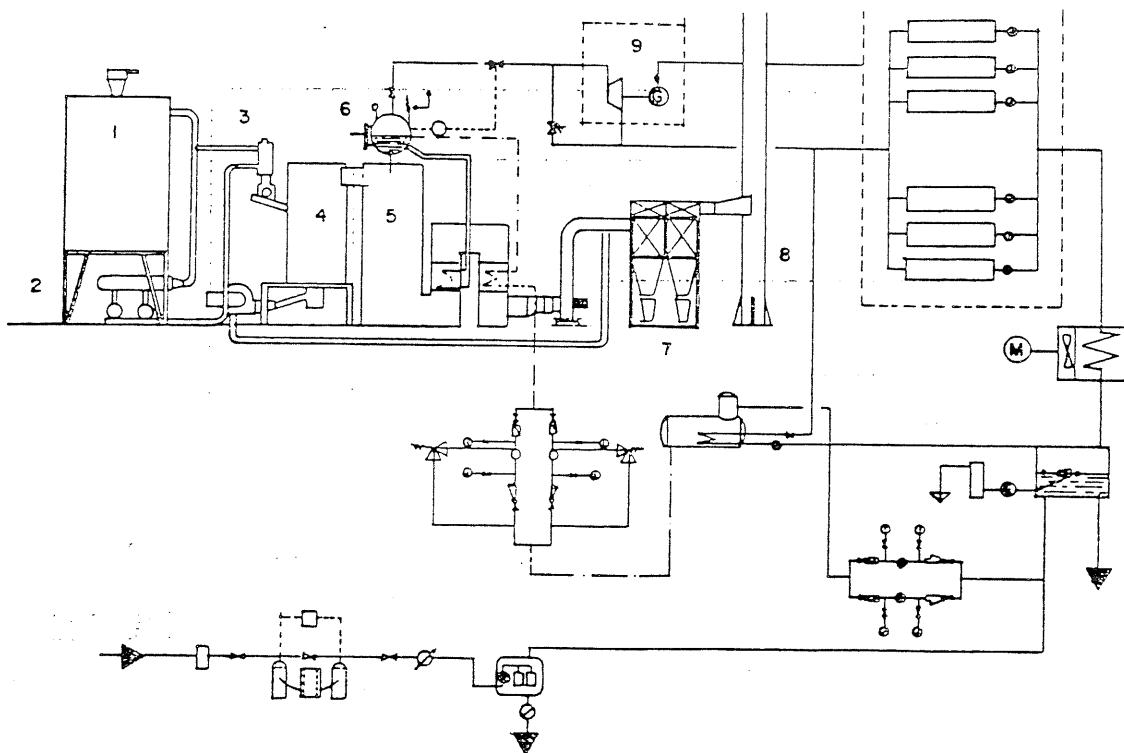
這個發電廠主要設備設計數據如下：

燃燒室 $2.52 \times 10^8 \text{ KJ/h}$ ($6 \times 10^6 \text{ Kcal/h}$)

蒸氣鍋爐 30bar 10t/h 飽和蒸氣

流放壓 3.5bar 之後壓式渦輪機

發電機電力 400KVA



圖九 100% RDF 燃燒及發電流程圖

雖然起初使用疏鬆狀 RDF，但後來還是改用顆粒狀者，乃因前者倉儲中易發臭結塊，致發生抽取困難。起燃係以燃油加熱燃燒室至 600°C 後，送 RDF 入爐床焚化，內部操作溫度達 $850\sim900^\circ\text{C}$ ，RDF 係以離爐床 2 米切線方向送入燃燒室。

(b) 水泥旋窯之燃燒

水泥廠最耗費能源之設備當屬乾燥、煅燒水泥原料成熔塊之旋窯，以下係義大利一家水泥廠以不同種類之 RDF 取代部份傳統燃料之試驗概況。目前該廠每天約使用 100 公噸 RDF 以節省燃料之成本。

第一次試驗採用壓縮空氣輸送疏鬆 RDF，與傳統燃料送入旋窯中，其流動方向與水泥原料相反。但決定改採捆包狀 RDF，係因該廠離 RDF 製造工廠三十多公里，為運輸及儲存需要而變更，使用方式與疏鬆 RDF 約略相同，只是稍為改變進料方法。最後該廠因經濟問題改用顆粒狀者，其大小約 40mm，可解決儲存及運輸問題，且可完全燃燒，當熔塊離窯時不會增加污染問題，此可能係氣狀空氣污染物大部份與水泥原料在高溫下化合。

該廠使用 RDF 組成之平均分析值，如表三：

表三 RDF 組成之平均分析值

紙／紙板	40.8
塑 膠	31.5
破 布	20.1
有機物 (廚餘)	3.6
惰 性 物	2.6
灰 廉	1.6
	100.0
灰 份	17.0%
含 水 率	11.0%
容 積 重	160.0Kg/m ³
平均粒子大小	50.0mm

五、以國內垃圾製造 RDF 之可行性

臺灣近三十年來，由於政府的正確施政方針，全國人民的勤儉努力，工商企業界的力爭上游，使經濟快速成長，人民生活水準提高，加以工商業急遽凌駕農業的發展，人口大量往都市集中，都市與鄉村兩極化現象極為明顯。當人口大量集中，龐大數量的垃圾清運及處理的問題，隨即發生。

依據行政院衛生署環保局統計資料顯示，民國69年垃圾清運量為8,740公噸，至73年增加為12,650公噸，並預估79年將增加為19,200公噸，每年增加率約為7~9%；而每人每日垃圾量於69年為0.6公斤，73年為0.71公斤，79年推估為0.93公斤，可見垃圾量增加頗為快速。如以73年垃圾產量比較日本、歐美兩地區分別1.0、1.5~2.0公斤，證實影響垃圾之產量與性質最重要的因素為生活水準與生活方式，而國內生活水準正逐漸提高，垃圾清理正面臨日本十多年前一樣的問題。

臺灣地區目前垃圾之處理，除四座中小型焚化爐，每日處理量僅245公噸，占73年每日垃圾量2%，另有二座堆肥廠，每日處理僅53公噸，只占每日垃圾量0.5%，其餘均採掩埋法或露天堆棄。以資源有效利用的觀點來看，垃圾中仍不乏相當數量之可用資源，將此資源棄置或埋於「土壤三明治」內，實有暴殄天物之憾。

國內垃圾之物理成份，根據72年調查結果，可燃性物質約占78~82%，與十多年前約50~65%相比，增加不少，尤其紙、塑膠有大量增加之趨勢，但紙類與歐美39%比較，仍屬偏低。

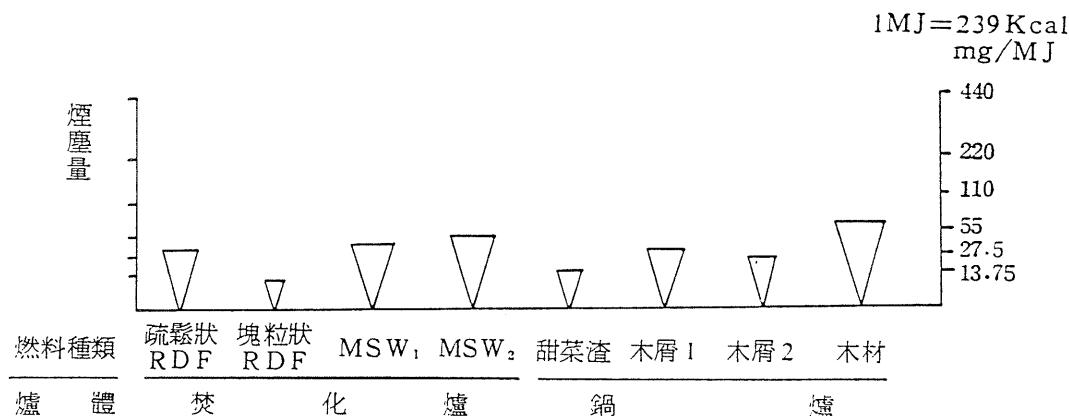
在化學成份方面，水份約占55%，較日本48%，歐美25%，仍屬偏高，惟低位熱值大致已達自燃界限值(700kcal/kg)以上，雖可以焚化法處理，但為求達於穩定之操作溫度，添加額外燃料是不可避免的，且設備維護費用亦高，故其處理成本亦不在少數。垃圾性質比較如表四。

垃圾固然可以焚化爐獲取熱能發電，但在日本地方上產生之垃圾大部份以焚化爐加以燃燒處理，產生之熱能很大，但實際利用餘熱於發電或一定規模之熱水供應，僅占燃燒所生熱

表四 垃圾性質分析比較表

項 目	地 點	日 期	1968年	1983年	1968年	1983年	1981年	1976年
			臺北市	臺北市	高雄市	高雄市	日本京都	歐 美
單位容積重 (kg/m³)				257		398		
物理組成	紙類 (%)		7.6	22.4	9.1	13.44	23.4	39
	可燃纖維布類 (%)		3.2	12.3	8.2	4.29	2.8	4
	木竹、稻草、落葉類 (%)		3.9	3.5	8.4	10.94	5.7	
	廚餘類 (%)		27.8	24.3	39.3	25.16	43.4	18
	塑膠類 (%)		3.2	12.5		15.7	12.6	4
	皮革、橡膠類 (%)		2.9	1.1		1.63	0.4	
	其 他 (%)			2.4		11.65		13
合 計 (%)			48.6	78.4	65.0	82.81	88.3	78
(乾基)	不燃金屬類 (%)		2.3	5.0	2.3	3.51	4.9	11
	玻璃類 (%)		3.0	14.5	6.8	7.12	6.8	11
	陶瓷類 (%)							
	石頭類及5mm以上之土砂 (%)		46.1	2.1	25.9	6.56	6.8	11
分 合 計 (%)			51.4	21.6	35.0	17.19	11.7	22
化學分析(濕基)	水 分 (%)			56.3		55.89	48.0	25
	灰 分 (%)			16.6		18.22	17.6	20
	可燃分 (%)			27.1		25.89	16.4	55
	碳 (%)			13.29		11.76	2.20	
	氫 (%)			1.78		2.34	14.90	
	氧 (%)			10.96		11.05	0.20	
	氮 (%)			0.56		0.45	0.80	
	硫 (%)			0.23		0.14		
	有機氯 (%)			0.27		0.12		
	碳氮比 (C/N)			23.7		24.5		
高位熱值kcal/kg				1,573		1,320		
低位熱值kcal/kg				1,144			1,372	2,340

能約10%而已，且其利用更侷限於大規模24小時連續運轉的焚化爐。又垃圾組成複雜，焚化所造成之二次污染物較使用 RDF 者，質、量上顯然為多且複雜，此乃因 RDF 為垃圾經由選取作業，除其熱值高外，組成較固定，燃燒條件較易控制，焚化設備設計較為單純，且不易完全燃燒排放之空氣污染物較少。以煙塵排放量為例，圖十即為焚化爐與其他燃料鍋爐使用 RDF 及其他燃料之比較情形。



圖十 RDF 與其他燃料燃燒時煙塵排放量比較

臺灣地區垃圾具高潮濕性，多廚餘、塑膠類、其性質與義大利者較為類似，故以之製成 RDF，以現今之生產技術，其 LHV 應可達 3000kcal/kg 以上，如在垃圾收集區實施垃圾可燃——不可燃物分類，則 RDF 之熱值將更高。加以若將 RDF 之生產工廠，與堆肥廠、掩埋場、發電廠聯結成一體系，各盡所能，各取所需，各廠互蒙其利，由此垃圾資源回收系統，殆可消除人見人惡之垃圾處理問題。

六、結語

由於近年來能源的短缺，導致世界各國積極從事從 MSW 回收可燃物質，而 RDF 為發展重點之一，茲再綜合歸納下列幾點，以作為國內研究 RDF 之參考，並為本文之結束：

- 在垃圾回收廠中，從 MSW 生產 RDF，達到低動力消耗及營運成本，在技術上是可行的。
- RDF 可依用途調整使用方式，譬如因其價廉，可以其他燃料合併使用，以降低成本。
- RDF 之用途視邊際條件及產量而定，例如 RDF 外售（如售予水泥廠、紙廠、染織廠……）由於運輸及貯存，適合中小量。而如發電廠，則以附設自產 RDF 之大型工廠為宜。
- 垃圾回收廠，除回收 RDF、金屬類外，尚產生有機物及雜質（玻璃、砂石等惰性物），故宜有堆肥廠、掩埋場之設置，或在業務上聯結。
- 由於 RDF 化學成份上尚含有約 0.6~0.8%Cl, 0.2%S, 0.01%F 等雜質，故使用於

無妥善廢氣處理設備工廠為燃料，應注意二次污染問題。

七、參考文獻

- 1) Baruchello, Fiscon : RDF produced in the Rome MSW plants.
- 2) Kumpf, Maas, Strauss : Müll-und Abfallbeseitigung handbuch.
- 3) 郭枝南、詹偉宗：臺灣地區廢棄物處理委託民營機構代辦可行性之探討。74. 8. 臺灣環境保護第二期。
- 4) 林鴻祺：垃圾處理對生活環境之影響及展望。74. 8.
- 5) DMB 垃圾資源回收系統介紹，大穎企業公司。74. 10.
- 6) 莊進源：固體廢棄物與處理，工業污染防治第15期。