

煤渣資源回收再利用之成本效益分析

李得元

嘉南藥理科技大學環境資源管理系

摘 要

以燃燒煤碳取得必要的熱能仍是大部份傳統產業重要的能源來源，但燃燒後之煤渣及飛灰是否能適當的處理，乃業者是否繼續使用的重要因素，而若能將此煤渣及飛灰資源化，不但可節省大筆的廢棄物委託處理費，亦可因資源化產品，如植草磚，而增加額外收入，一舉數得。本文即以燃燒煤碳所產生之煤渣回收再利用、製成植草磚銷售，評估其成本效益；評估成本則以人、機、材及回收方法四種變因，即操作的人工費用、生產設備、材料(水泥)及原料準備，為基準。首先，先確定預定生產之產品在市場是否具備競爭力，即耐壓強度足夠與否及價格是否具競爭力，前者以調整配方、後者則以新購機器及改變原料進貨方式因應。接著，配合節省能源供應成本之公司策略，以垃圾衍生燃料取代部分煤碳，減少購煤成本，重新評估含取代燃料的煤渣再資源化之成本效益；此段成本效益之評估，是以產業獲得相同熱能的條件下進行，然後再依廢棄物委託處理或回收再利用、產品銷售利用、環保、法規及企業形象等多角度考量，評估損益狀況。結果指出，只燃燒煤碳之煤渣回收再利用而製成之植草磚，具市場競爭優勢；惟，如採用替代性燃料取代部分煤碳，雖可節省能源成本，但因所產生的煤渣回收製成植草磚之強度及品質，均無法與市場現有產品競爭，回歸廢棄物委託處理之計算，總實質的效益下降。

關鍵詞：煤渣回收再用、飛灰資源化、植草磚

壹、前 言

傳統產業取得熱能仍以煤碳為主，但燃燒後所產生的煤渣及飛灰之委外處理費，乃業者的重要負擔，例如煤渣及飛灰每月分別產生 300 噸及 90 噸，若委外處理費煤渣以 5,000 元/噸、飛灰以 15,000 元/噸計，則每月就另需花費 285 萬元的支出；另外，廢棄物產生後若未即時清運，亦需考量廠內之存放空間的成本。然而，若能將此煤渣及飛灰資源化製成產品，不但可節省此筆費用及成本，亦可出售再生產品、增加營業外收入。煤渣資源再生主要方式為製成環保磚^[1]，另如煉鋁爐渣製成人造石材^[2]、電弧爐煉鋼爐渣製成地磚及透水磚^[3]，而煤

灰則可製成輕骨材資源再製成植草磚^[4]。

國內處理煤渣及煤灰之技術及方法與產生源有很大的關係，如垃圾焚化處理之飛灰和底渣經 1200-1400°C 高溫熔融後，一般均以加藥穩定化處理後，送至衛生掩埋場掩埋；又如一些國營企業早已著手研發飛灰及底渣之資源再利用，如台電加強煤碳燃燒效率，並使飛灰呈現白色粉狀做為水泥之添加劑；又如中鋼以高溫鍋爐燒結飛灰成塊，製成高爐水泥，這些廢棄物雖可應用道路之基礎級配、鋼筋混凝土或控制性低強度回填材料（control low strength materials, CLSM）。惟各飛灰來源性質不

一、品質不穩定，無法統一處理飛灰及長期搭配應用。在掩埋場不易尋找、定配額制及處理飛灰的費用高漲（由 3,600 元/噸漲到 15,000 元/噸）的限制，處理煤渣及煤灰之問題再度浮現^[5-8]。

國外如德國、法國等歐洲國家，主要將飛灰及底渣填埋在開採礦物地底所留下之礦坑，可防止土地沉陷；而美國則將飛灰、底渣以掩埋處理方式；日本之垃圾焚化之底渣與飛灰則以熔融及燒結，生產出天然骨材、結晶骨材應用於建築工程。

化石原料存量有限、原油價格飆漲下，尋找替代能源是企業降低燃料成本的考量重點；以燃煤做為能源來源是主要選擇，而燃煤所產生之煤渣及煤灰，如前文所述卻是個問題，如何將煤渣及煤灰資源化、或者減少其排放量，亦為節能減碳之重要課題；而尋找更便宜的能源來源，也是企業想降低支出的政策。

廢棄物的處理原則：原物質回收、能資源回收及土地回收。其中，能資源回收是把廢棄物（包括都市垃圾、一般、事業、農業廢棄物）利用物理或熱化學等方法，轉製為燃料的技術；所產生的燃料稱為廢棄物衍生燃料（refuse derived fuel, RDF），製成衍生燃料可避免垃圾填埋、有助於延長掩埋場的壽命。

RDF 可分為 7 類，即 RDF-1 至 RDF-7，RDF 燃料的數字愈大，代表能得到的熱能回收也越高、汙染也越低；隨著廢棄物中不可燃、不適燃的物質減少，性質固定，製成固態的燃料棒，即為 RDF-5（第五類廢棄物衍生燃料）。RDF-5 具有高熱值、容易保存和方便運輸、低污染、燃燒效率高等優點^[9]。

衍生燃料是生質能的一種，與其他再生能源比較，生質能的優勢包括技術較成熟、有商業化運轉能力、經濟效益較高、且因垃圾衍生燃料使用材料為廢棄物，故兼具廢棄物的回收處理與能源生產的雙重效益。

垃圾衍生燃料的使用，本具強烈的環保意識，但其中的成份合有很高比例的塑膠與廢紙回收料，如以其取代部分煤碳，雖然產生相同的熱值、且降低採購燃料的成本，同時煤渣的產量也下降，

而飛灰的產量卻增加，兩者對於資源化的影響仍待評估。

因此，本文即探討以燃燒煤碳及以垃圾衍生燃料取代部分煤碳燃燒所產生之煤渣回收再利用製成植草磚，評估其銷售之成本效益。

貳、試驗結果

2.1 煤渣及飛灰資源化

表 1 為煤渣及飛灰資源化鑽心試體抗壓強度，試體編號 A 為市售植草磚之鑽心試體抗壓強度，主要成份為水泥及沙之混合；而試體編號 B 及 C 則為煤碳燃燒後的煤渣取代沙之植草磚產品的鑽心試體抗壓強度，當水泥及煤渣重量比為 1：2 時，抗壓強度有超越市售植草磚、而水泥及煤渣重量比為 1：3 時，抗壓強度減半，說明以水泥及煤渣重量比為 1：2 之植草磚產品是可行的回收方式。

煤碳燃燒除煤渣的產物外，亦有飛灰的問題，飛灰無法直接應用，須先以污泥與飛灰預先充分混拌練泥、造粒擠壓成型、顆粒陰乾、再燃燒等程序，始可利用，否則不但損失飛灰初次未燃碳之熱值、且植草磚外觀特性評估，加入飛灰之植草磚在下雨過後，表面會有鹽類的結晶物產生，嚴重影響銷售以及售後客訴問題。

經飛灰本質特性改善後，由表 1 可看出，原料比例為水泥：飛灰：煤渣 = 1：0.5：2（試體編號 D）時，植草磚之強度為 206 kg/cm²，強度降低幅度不大；而當原料比例為水泥：飛灰：煤渣 = 1：1：2（試體編號 E）時，植草磚之強度降低為 113 Kg/cm²，無法與市售植草磚競爭，且因飛灰含碳、與水泥之結合度不佳，植草磚的耐磨性也大幅下降。另外的混合比例，其抗壓強度更差，無法應用。

由上述可知，將飛灰先製成輕質骨材，再與煤渣回收到製磚程序，除可提高磚品強度^[4]，亦可利用環保磚的銷售將大量的飛灰資源化，且減少水泥之用量。



表1 煤渣及飛灰資源化鑽心試體抗壓強度

試體 編號	試體說明 水泥：飛灰：煤 渣	抗壓強度 kgf/cm ²	破壞 型態
A	市售植草磚	190-216	C
B-1	1：0：2	225	C
B-2		215	D
C	1：0：3	137	D
D	1：0.5：2	206	C
E	1：1：2	113	C
F-1	1：2：1	87	D
F-2		85	C
G	1：3：0	85	C

*破壞型態：C表錐形兼剪力破壞；D表剪力破壞

2.2 垃圾衍生燃料煤渣資源化

配合節省能源供應成本之組織政策，改變能源供料，以垃圾衍生燃料取代部分煤碳，垃圾衍生燃料的成份中有很高比例的塑膠回收料，因此其燃值（4000 - 6000 kcal/kg）比煤碳（1500-2500 kcal/kg）高，價格又便宜。如將此垃圾衍生燃料（約15%wt）與煤碳燃燒，所產生的煤渣資源化，則其鑽心試體抗壓強度結果如表2所示，表2a及表2b分別為產品成磚5天及10天取樣試驗的結果。

由表2a的結果可看出，試體編號H5-0之水泥及煤渣重量比與試體編號B相同時（1：2），其抗壓強度明顯的下降，原因是含塑膠成份的垃圾衍生燃料經燃燒後的渣已是一種灰份，與水泥的結合度較弱；再以較高比例的水泥進行測試，雖然試體編號H5-1及H5-4的抗壓強度雖有超越市售植草磚，但試體編號H5-2及H5-3的抗壓強度卻是不足的；試體編號H5-1的抗壓強度比H5-2及H5-3高，主要是前者加較多的水份。此組試驗指出，水泥使用量增加，成本亦會增加。表2b雖然將產品成磚延至10天才取樣進行試樣，其抗壓強度雖有回復市售植草磚的程度，惟其增加庫存天數，亦會導致成本增加。

表2a 垃圾衍生燃料煤渣資源化鑽心試體抗壓強度

試體 編號	試體說明 水泥：煤渣, Kg	抗壓強度 Kgf/cm ²	破壞 型態
H5-0	100：200	110.5	C
H5-1	130：200	229.7	C
H5-2	160：200	180.6	C
H5-3	190：200	159.4	C
H5-4	220：200	234.2	C

*破壞型態：C表錐形兼剪力破壞

表2b 垃圾衍生燃料煤渣資源化鑽心試體抗壓強度

試體 編號	試體說明 水泥：煤渣, kg	抗壓強度 kgf/cm ²	破壞 型態
H10-1	130：200	201.9	C
H10-2	160：200	209.6	C
H10-3	190：200	215.2	C
H10-4	220：200	288.9	C

參、經濟評估

3.1 煤渣資源化成本效益評估

煤渣若不資源化，每噸委外處理費用為5,000元，若以每天燃燒120噸會產生10噸的煤渣，則每天需50,000元、每個月需150萬元的處理費。若能將之資源化，此筆開銷即可省下。

3.1.1 資源化起始階段

若每日預計處理量為10噸，以修改之製磚機壓錠最高產能計算，人力以每班三人、分三班之小型手工壓製，每月約可生產7,500塊植草磚，主要原料為水泥，經成本分析，人力與材料比率為4/1，每塊植草磚之成本為34元，雖與市售25元/塊無法競爭，但每月300噸的煤渣產量製成高壓磚之效益為節省處理費150萬減植草磚賠售67,500元（7,500塊/月 x (34 - 25)元/塊），每月仍有高達140萬元以上的收益。



表1 煤渣及飛灰資源化鑽心試體抗壓強度

試體 編號	試體說明 水泥：飛灰：煤 渣	抗壓強度 kgf/cm ²	破壞 型態
A	市售植草磚	190-216	C
B-1	1：0：2	225	C
B-2		215	D
C	1：0：3	137	D
D	1：0.5：2	206	C
E	1：1：2	113	C
F-1	1：2：1	87	D
F-2		85	C
G	1：3：0	85	C

*破壞型態：C表錐形兼剪力破壞；D表剪力破壞

2.2 垃圾衍生燃料煤渣資源化

配合節省能源供應成本之組織政策，改變能源供料，以垃圾衍生燃料取代部分煤碳，垃圾衍生燃料的成份中有很高比例的塑膠回收料，因此其燃值（4000 - 6000 kcal/kg）比煤碳（1500-2500 kcal/kg）高，價格又便宜。如將此垃圾衍生燃料（約15%wt）與煤碳燃燒，所產生的煤渣資源化，則其鑽心試體抗壓強度結果如表2所示，表2a及表2b分別為產品成磚5天及10天取樣試驗的結果。

由表2a的結果可看出，試體編號H5-0之水泥及煤渣重量比與試體編號B相同時（1：2），其抗壓強度明顯的下降，原因是含塑膠成份的垃圾衍生燃料經燃燒後的渣已是一種灰份，與水泥的結合度較弱；再以較高比例的水泥進行測試，雖然試體編號H5-1及H5-4的抗壓強度雖有超越市售植草磚，但試體編號H5-2及H5-3的抗壓強度卻是不足的；試體編號H5-1的抗壓強度比H5-2及H5-3高，主要是前者加較多的水份。此組試驗指出，水泥使用量增加，成本亦會增加。表2b雖然將產品成磚延至10天才取樣進行試樣，其抗壓強度雖有回復市售植草磚的程度，惟其增加庫存天數，亦會導致成本增加。

表2a 垃圾衍生燃料煤渣資源化鑽心試體抗壓強度

試體 編號	試體說明 水泥：煤渣, Kg	抗壓強度 Kgf/cm ²	破壞 型態
H5-0	100：200	110.5	C
H5-1	130：200	229.7	C
H5-2	160：200	180.6	C
H5-3	190：200	159.4	C
H5-4	220：200	234.2	C

*破壞型態：C表錐形兼剪力破壞

表2b 垃圾衍生燃料煤渣資源化鑽心試體抗壓強度

試體 編號	試體說明 水泥：煤渣, kg	抗壓強度 kgf/cm ²	破壞 型態
H10-1	130：200	201.9	C
H10-2	160：200	209.6	C
H10-3	190：200	215.2	C
H10-4	220：200	288.9	C

參、經濟評估

3.1 煤渣資源化成本效益評估

煤渣若不資源化，每噸委外處理費用為5,000元，若以每天燃燒120噸會產生10噸的煤渣，則每天需50,000元、每個月需150萬元的處理費。若能將之資源化，此筆開銷即可省下。

3.1.1 資源化起始階段

若每日預計處理量為10噸，以修改之製磚機壓錠最高產能計算，人力以每班三人、分三班之小型手工壓製，每月約可生產7,500塊植草磚，主要原料為水泥，經成本分析，人力與材料比率為4/1，每塊植草磚之成本為34元，雖與市售25元/塊無法競爭，但每月300噸的煤渣產量製成高壓磚之效益為節省處理費150萬減植草磚賠售67,500元（7,500塊/月 x (34 - 25)元/塊），每月仍有高達140萬元以上的收益。



3.1.2 新購大型自動生產機器

重新評估新型自動生產機器，月產30,000塊，量增加、時程縮短；此外，所購水泥如由包裝（50kg/包、3.4元/kg）改成散裝（2.2元/kg）進貨，則人力與材料比率為1/3，每塊植草磚之成本則降為17元（已含機器折舊成本），即有市場競爭力；每月高壓磚之效益為節省處理費150萬加植草磚淨利24萬元（30,000塊/月 × (25 - 17)元/塊），每月除有174萬元利潤外，產量增加及品質穩定則是無形效益。

3.2 垃圾衍生燃料後之效益估算

以垃圾衍生燃料取代煤碳的好處是，兩者的燃值相同，但前者價格只有後者的一半（煤碳4.3元/kg、垃圾衍生燃料2.2元/kg）；若以每天燃燒120噸煤碳估計，15%取代率，每天將使用18噸的垃圾衍生燃料，每天即可節省3.6萬、每月即可節省近100萬，對中小型企業而言是一筆不小經費。

3.2.1 添加垃圾衍生燃料之評估

由前文可知，使用垃圾衍生燃料取代煤碳，每月即可節省近100萬；又由表2a的結果可看出，試體編號H5-0之水泥及煤渣重量比為1：2時，其抗壓強度明顯的下降，雖然水泥及煤渣重量比增加後，抗壓強度可以提高，但其製磚成本卻提高，以水泥及煤渣重量比1.3：2與2.2：2為例，其製磚成本分別為23元/塊與28元/塊，已無市場競爭力。

3.2.2 垃圾衍生燃料煤渣資源化評估

上述成本並未加計需增長庫存時間的成本，且植草磚添加此類煤渣後，良率會下降、使用一段時間後表面會有白暫，若因此而無法再進行資源化，則將恢復廢棄物委外處理，則每天所產生8.5噸的煤渣，需42,500元、每個月則需近130萬元的處理費。

除外，因使用垃圾衍生燃料所產生的飛灰及空氣污染的問題同時出現。以每日產生3噸飛灰計算、委外處理以市價15,000元/噸計，則每日處理飛灰的處理費為4.5萬元，每月將增加135萬元處理費。

3.2.3 添加垃圾衍生燃料之總效益評估

以垃圾衍生燃料取代煤碳，雖然每月即可節省100萬元，但需再增加煤渣每個月130萬元及飛灰的處理費135萬元處理費，淨損失每個月仍達165萬元。

除了上述金錢的損失外，因廢棄物未妥善處理，另可能被環保單位開單處罰；而長時間堆積於廠區等待清運的空間成本，及公司致力於環保企業形象之折損，亦未加計其中。

又因垃圾衍生燃料的成份複雜，燃燒後的灰分容易燒結在鍋爐耐火材料內壁熱交換器管壁，造成燃燒不完全及熱傳效果不佳的現象，因此，長期使用所引起的成本損益（鍋爐燃燒的空氣污染問題），仍有待追蹤。

肆、結論

綠色生產是企業永續發展的一環，是企業在資源生產力中想保有的原則之一，因此，企業常致力於廢棄物資源再生化、推動廢棄物減半之永續生產環境。煤渣及飛灰資源化的成本效益結論如下：

1. 煤渣及飛灰資源化，製成植草磚銷售，適當的調配、機、材及回收方法，是有經濟效益的。
2. 以垃圾衍生燃料取代煤碳，雖可節省燃料成本，但煤渣及飛灰無法回收的處理費，反而讓公司產生淨損失。
3. 環保開單、空氣污染將使公司的環保企業形象折損、永續生產環境無法達成。
4. 本文撰寫過程是以企業推動綠色永續產業的思維，其中，包含廢棄物資源化及垃圾衍生燃料取代部分煤碳，減少廢棄物產生及燃煤的缺點（污染、溫室氣體等），故僅評估資源回收的成本效益，以作為產業決策參考。



伍、參考文獻

1. 楊長浩（2000），燃煤飛灰資源化之研究，碩士論文，成功大學資源工程所。
2. 張彥華、楊昇府、王多美、葉俊彥、李文成、孫金星、蔣士傑(2010)，以煉鋁爐渣為原料製作人造石材之研究，2010 清潔生產暨環保技術研討會， 317-328。
3. 黃進修、陳炳南、楊叢印(2010)，電弧爐煉鋼爐渣綠建材試製試驗及性能評估，2010 清潔生產暨環保技術研討會， 375-383。
4. 李得元、魏家美、洪同陞、陳律達(2010)，工廠廢棄物回收資源化-談工廠節能減碳之經濟效益， 2010 清潔生產暨環保技術研討會， 291-299。
5. 廖錦聰、張蕙蘭、徐文慶（1997），廢棄物資源化冷結型輕質骨材產品開發，第十二屆廢棄物處理技術研討會論文集，民國 86 年 12 月。
6. 經濟部工業局（1999），廢棄物資源化技術資料彙編，民國 88 年 6 月。
7. 謝雅敏（2005），燃油飛灰中未燃碳資源化之基礎研究，博士論文，成功大學資源工程所，民國 94 年。
8. 燃煤飛灰未燃碳資材化與實廠之可行性評估，資源與環境學術研討會論文集，民國 97 年。
9. 萬皓鵬、李宏台(2010)，廢棄物衍生燃料的使用，科學發展，450 期，34-43 頁。



Economical Estimation of Reusing of Cinder

Der Yuan Lee

Department of Environmental Resources Management
Chia-Nan University of Pharmacy and Science,
Tainan, Taiwan 71710, R.O.C.

Abstract

It is the major source of energy for the most traditional factory by burning coal. However, the important factor is whether the Cinder and ash are able to be treated well for continuing to use coal as the source of energy. If the Cinder and fly ash can be recycled and utilized, then, it will not only save the treatment fee of waste, but also can sell the product of recycled materials, like bricks for plant. In this work, the economical estimation of recycling of Cinder to produce bricks was done. The four estimating factors of labor, machine, materials, and method were used to calculate the cost. The first work was to decide the kind of product which has the competition, i.e. impact strength and reasonable price. The impact strength can be adjusted by the prescriptions. And, the reasonable price can be changed by buying new machine and changing the cement purchase. Next, the coal was replaced with the reused derived fuel (RDF) as the source of thermal energy. Because the price of RDF is cheaper than the coal under the same heat obtained. The cost structure of fuel and efficiency for RDF used was necessary to be re-estimated. There are the treatment of waste, the price and utility of reused product, the environmental and legal factors, and the image of enterprise during the estimation. The results pointed that the reuse of waste Cinder is feasible. However, the replacement of thermal energy source can save some money, but the new coal tar cannot be reused as the materials of brick again. And, the company will pay more money to treat the waste because of the environmental rule.

Key words: Recycling of Cinder, Resource-use of fly ash, Brick for plant

