

台南市政府工務局工程查核講習

循環經濟材料再利用

2023-08-25

陳純森 技師

國立成功大學建築研究所 教授級專家

國立高雄大學土木環工系 副教授專技

前言

經濟建設與產業的發展造成了許多的事業廢棄物，民生社會的生活亦造成了許多不勘使用的垃圾，人類賴以維生的能源開發與醫療體系也有不少的醫療與公害的廢棄物。諸如此類的廢棄物與垃圾都不是人類生存所必要的，且或多或少都有毒性或污染，不利人類的生存。產出的企業與人們有義務負責處理與善後，或設法再利用，以免造成社會的公害，方能營造既乾淨又安全的生存環境。究竟工程上常遇到的廢棄物有哪些，那些廢棄物可以再利用，要如何利用，有無後遺症等等問題，常常困擾著工程界。筆者就個人經驗將各種再利用之廢棄物的產出、特性、處理與用途等略作整理，作為業界參考。

工程上常利用的廢棄物包括鐵爐渣(iron slag)、鋼爐渣(steel slag)、飛灰(fly ash)、矽灰(silica fume)與焚化爐底渣(bottom ash)等，有的可以直接利用，有的須經過處理才能利用，有的根本不能用，只能以固化處理再作掩埋。依序討論如下。

主題一：鐵爐渣

1-1 鐵爐渣之產出

鐵爐渣是煉鐵廠以鐵礦(iron ore)熔製生鐵(pig iron)所產生的廢棄物。煉鐵廠因為爐體很高，俗稱高爐，因此鐵爐渣又稱「高爐爐渣」(blast furnace slag)。圖 1-1 為高爐煉鐵過程之示意圖，高爐所熔解之生鐵鐵水可鑄造生鐵管、生鐵鍋與鑄鐵人孔蓋等，浮在鐵水表面之浮渣則稱為鐵爐渣，經水冷卻後研磨成粉俗稱「爐石粉」。在台灣只有中鋼集團之中鋼小港廠與中龍台中廠才有此種高爐之爐渣。

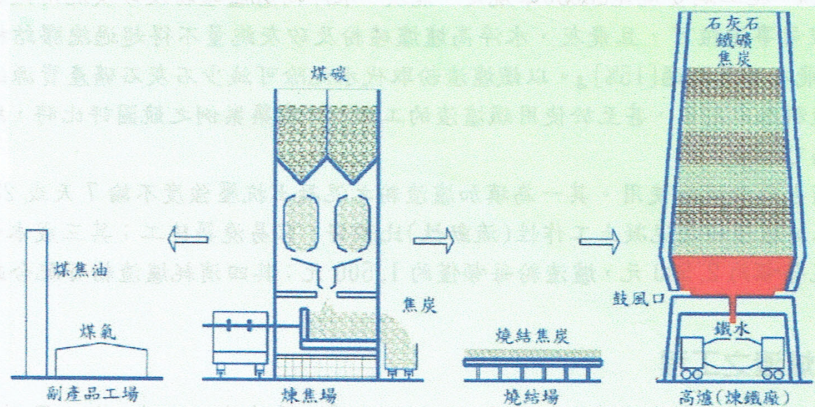


圖 1-1 高爐煉鐵過程示意圖

1-2 爐渣之正名

國內有關文獻與報導常常將「爐渣」誤用為「爐碴」，使用爐「碴」是一種錯誤的國學宣導。依照字典的定義，「渣」為物質之水分除去或流失後所剩下之乾質滓渣。人們咀嚼檳榔時，有人嚥下檳榔汁，有人則吐出檳榔汁，嘴巴還不停地嚼咬剩餘的滓渣，稱為檳榔「渣」，因為液態的檳榔汁已經消失了。鄉村放牛時所牽放的牛隻一邊啃草一邊拉屎，牛屎若未即時清理，棄置於馬路邊任憑太陽曝曬，數日後曬乾之牛屎稱為糞「渣」。據說中國古代名醫「華陀」曾經用人類糞渣治病，令現代人難以想像，惟前不久國內媒體曾報導，榮民總醫院會同陽明交大共同發表以糞便所萃取的優良成分，居然可以治療肝癌，足見糞渣也有其可用之妙處。窮苦人家過世後，無錢料理後事，如將屍體棄置荒郊野外，屍首曝曬成為乾屍，即為所謂的「人渣」。鋼鐵公司的煉鐵爐，將鐵礦經由冗長之熔融冶煉，成為鐵水被運走之後，剩餘之滓渣，即稱為爐「渣」，外文之 slag 亦均翻譯為「爐渣」，不應該誤植為「爐碴」。

至於「碴」的中文意義，依照字典的定義，實為陶瓷或玻璃質破碎後的碎片，其意義與「渣」完全不同。用餐的人們若不小心摔破瓷碗，還在破碎的碗碴中挑選美味佳餚，類似雞蛋中挑骨頭，所以慣稱「找碴」。足見「渣」與「碴」之語意相去甚遠，實不宜混用以免誤導。

1-3 鐵爐渣之性質

鐵爐渣之主要成分為 CaO 、 SiO_2 與 Al_2O_3 ，與水泥之成份雷同，樣本如表 1-1。

表 1-1 鐵爐渣成分表(%)

編號	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	MnO	TiO_2
No. 1	40.0	36.0	15.0	6.0	0.4	0.4	0.5

因為鐵爐渣之成分與水泥接近，且鐵爐渣沒有汙染問題，所以美國墾務局(Bureau of reclamation)曾率先採用鐵爐渣粉替代部分水泥建造水庫，節省不少工程造價。後續也有些工程單位跟進使用。

1-4 鐵爐渣之再利用

以鐵爐渣粉取代水泥製成混凝土逐漸成為政府的政策，使用量也一直在增加，早期國內爐渣粉與飛灰使用量約佔膠結材之30%；後來增加到40%，目前之政策鼓勵填加量可高達50%，即純水泥只用50%。施工綱要規範03050章規定『飛灰、水淬高爐爐渣粉及矽灰混用做為膠結材料時，應經工程司事先核可，且飛灰、水淬高爐爐渣粉及矽灰總量不得超過總膠結材料重量之[50%]，其中飛灰不得超過[15%]』。以鐵爐渣粉取代水泥除可減少石灰石礦產資源的開採外，尚可回收爐渣料加以利用，甚至於使用鐵爐渣的工程，於建築案例之競圖評比時，綠建築之指標有的標案尚可加分。

施工廠商也樂於填加使用。其一為填加爐渣粉之混凝土抗壓強度不論7天或28天均不會折減；其二填加爐渣粉之混凝土工作性(流動性)比較好，容易澆築施工；其三成本低廉，目前散裝之純水泥每噸約2,500元，爐渣粉每噸僅約1,500元；其四消耗爐渣粉可配合政府循環經濟之政策。

1-5 適用鐵爐渣之工程

鐵爐渣的正確用途為非結構性之混凝土，例如海邊之消波塊、河川工程之異型塊(照片1-1)、河床之坡面工(照片1-2)、鋪面之透水磚(照片1-3)、地磚(照片1-4)、石籠保護工替代卵

台南市政府工務局講習 2023-08-25

石(照片 1-5)、路邊緣石(照片 1-6)、護欄(照片 1-7)、地下基樁(照片 1-8)等。此外，鐵爐渣也是大地回收雨水系統的好材料(照片 1-9)，鐵爐渣磨成細粉後也可作為地質改良(照片 1-10)的水泥替代物，目前國內之地質改良多採用純水泥(照片 1-11)確實很浪費。甚至於鐵爐渣也可用以填海造陸延伸國土。



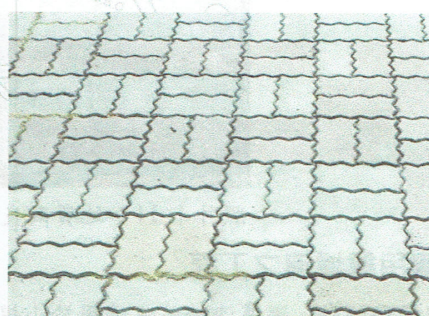
照片 1-1 河川工程之異型塊



照片 1-2 河床之坡面工



照片 1-3 鋪面之透水磚



照片 1-4 地磚



照片 1-5 石籠保護工替代卵石



照片 1-6 路邊緣石



照片 1-7 護欄



照片 1-8 地下基樁



照片 1-9 大地雨水回收系統



照片 1-10 地質改良

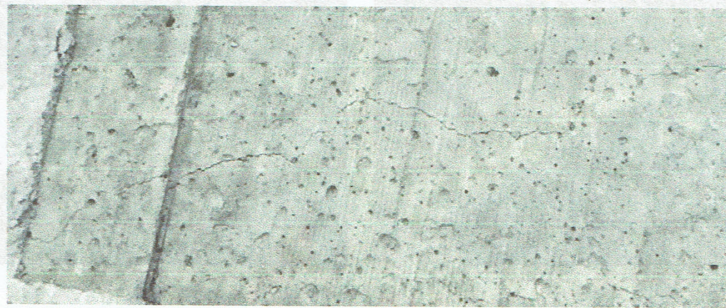


照片 1-11 地質改良常用之純水泥

1-6 不適用鐵爐渣之工程

工程實務經驗，鐵爐渣粉並不適用於小規模斷面之結構性混凝土。特別是建築結構工程，因為常常出現嚴重裂損。填加愈多裂損愈厲害，而且是樓板全面性的貫穿裂縫，並非表面之乾縮或冷縮裂縫，有的橋面板工程雖然採用 PE 板作潤濕養護，仍然難免裂損(照片 1-12)。其主要的原因為鐵爐渣之氧化鈣含量偏低，依照前述，鐵爐渣粉之氧化鈣含量僅約 40%，但卜特蘭水泥之氧化鈣含量高達 65%，兩者之膠結性落差頗大，澆築後初凝時容易因冷縮與乾縮而裂開。

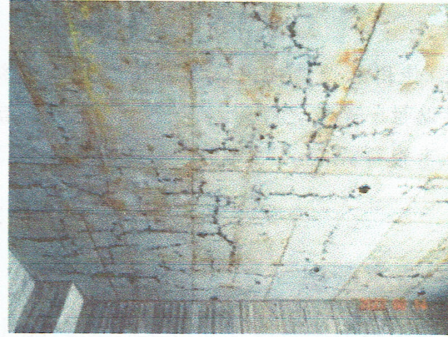
鐵爐渣粉所造成之裂損案例不勝枚舉，照片 1-13、照片 1-14 與 1-15 都是公有建築樓板貫穿裂縫；照片 1-16 為鋼筋混凝土結構地坪之全面裂損。雖然工程會之施工網要規範允許混凝土所填加之爐石粉與飛灰合計可高達 50%，但有許多機關與團體的構造工程均已嚴格限制使用。爐渣粉與飛灰合計之用量，有的單位規定結構(鋼筋)混凝土使用 0%，非結構混凝土使用 30%；有的單位規定建築結構混凝土爐石粉使用 5%，飛灰使用 5%；有的單位規定建築結構混凝土爐石粉使用 10%，飛灰使用 5%。遠低於施工網要規範所建議之最高限 50%。



照片 1-12 橋面板出現裂損



照片 1-13 公有建築樓板貫穿裂縫



照片 1-14 公有建築樓板貫穿裂縫



照片 1-15 公有建築樓板貫穿裂縫



照片 1-16 鋼筋混凝土結構地坪之全面裂損

1-7 規範之探討

工程會之施工綱要規範雖然僅為參考用之規範，但絕大部分之工程主辦單位均將該綱要規範訂入契約，儼然成為甲乙雙方必須遵守之契約規範。混凝土預拌廠送出配比若使用 50% 的鐵爐渣粉與飛灰亦有所本，加上甲方或監造單位不熟諳使用之細節，幾乎都照單全收，無以退回，一旦施工後發生問題才要求減少用量，徒生履約爭議，造成困擾。這是主辦單位與監造單位必須注意的，應在設計圖說明確註明是否填加爐渣粉與其用量，並編足相關預算發包。

施工綱要規範所規定之 50% 上限，係源自 ACI 318 規範之混凝土配合設計所規範之 F3 環境等級之限制。ACI 318 將混凝土構造之暴露環境分為四大類，即 F(Freezing)類、S(Sulfate)類、W(Water contact)類與 C(Corrosion protection)類。其中 F 類又細分為 F0-F3，共 4 個等級；S 類細分為 S0-S3，共 4 個等級；W 類細分為 W0-W2，共 3 個等級；C 類細分為 C0-C2，共 3 個等級。而 F3 等級係指暴露於經常結冰與解凍之臨水構造且化性防凍之環境。F3 環境之混凝土膠結材料限制如表 2。ACI 318 並規定專業的設計者須指定環境等級。

表 2 暴露 F3 環境之混凝土膠結材限制

膠 結 材	最大重量百分比(%)
飛灰或其他卜作嵐材料	25
爐渣水泥	50
矽灰	10
飛灰或其他卜作嵐與矽灰之合計	35
飛灰或其他卜作嵐、爐渣水泥與矽灰	50

結語

總之，使用鐵爐渣尚需探討的技術問題甚多。包括水淬後的硬化、混凝土攪拌時間的調整、浮水之黏貼性、適量之膠結材配比等等，且混凝土原料之適用與否不是僅憑抗壓強度就可單方面決定。未獲得完整的結論前，使用單位仍須謹慎評估選用。

主題二：鋼爐渣

2-1 鋼爐渣之產出

國內常遇到的鋼爐渣可分為碳鋼爐渣(carbon steel slag)與不銹鋼爐渣(stainless steel slag)兩種。

2-1-1 碳鋼爐渣

碳鋼俗稱「黑鐵」，包括低碳鋼、中碳鋼與高碳鋼。國內冶煉碳鋼之方法有中鋼系統之轉爐煉鋼(converter steel making)與其他系統之電爐煉鋼(electric furnace steel making)兩種。中鋼公司之小港煉鋼廠與中龍公司之台中煉鋼廠均採用轉爐煉鋼，係以鐵水作為煉鋼之主要原料，經吹氧冶煉之後將鐵水轉換為鋼水，故稱為「轉爐」；其他系統的鋼鐵公司包括東和、威致、海光、豐興、致一、漢泰與協勝發等，則採用電爐煉鋼，係以廢鋼作為煉鋼之主要原料，用電極棒高溫冶煉。兩種煉鋼系統之流程如圖 2-1。

煉鋼爐之鋼水被取走之後會殘留鋼爐渣，轉爐煉鋼時會填加生石灰與廢鋼，煉鋼完成後每噸粗鋼(crude steel)產出約 110 公斤之轉爐鋼渣(converter steel slag)。電爐煉鋼時會加入生石灰與合金鋼，並須加入氧氣將雜質氧化，於煉鋼完成後每噸粗鋼會產出約 70 公斤之氧化渣(oxidizing slag)；如果鋼水在精煉爐內加入大量碳粉與石灰石等去氧脫硫材料，於煉鋼完成後每噸粗鋼則會產出約 40 公斤之還原渣(reducing slag)。

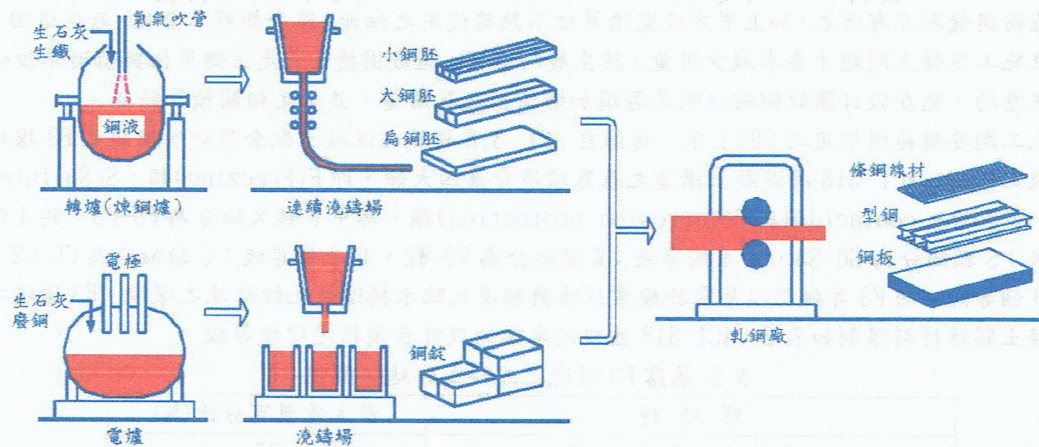


圖 2-1 碳鋼之煉鋼過程

2-1-2 不銹鋼渣

不銹鋼因為外觀呈現銀白，俗稱「白鐵」，其煉製過程如圖 2-2。首先將廢鋼原料與特殊合金(如鉻鎳 Ni、Cr 等)放入電爐熔融，再經轉爐冶煉成不銹鋼，然後倒入真空精煉爐灌入

氧氣、氬氣(或氮氣)予以脫碳，學理稱為氬-氧脫碳精煉(argon-oxygen decarburization-AOD)，將碳元素燒成一氧化碳(CO)逸出，其化學反應方程式如下。

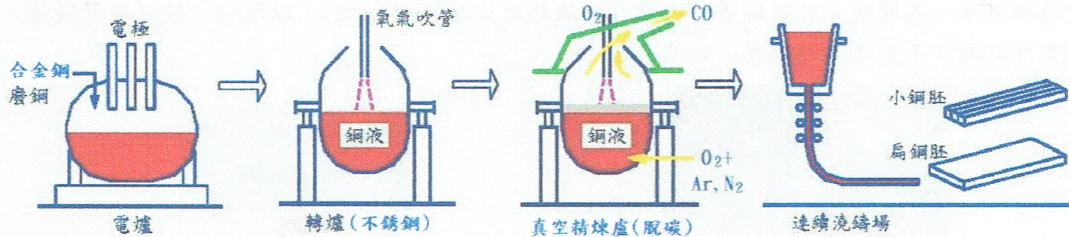
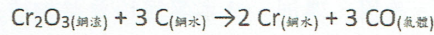
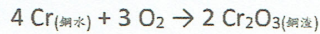


圖 2-2 不銹鋼之煉鋼過程

不銹鋼冶煉時，有時會使用氬氣取代氬氣協助脫碳。工程上常用的 304 不銹鋼含有 26% 的鎳+鉻耐蝕成分，而 316 不銹鋼則含有 32% 的鎳+鉻成分，所以耐腐蝕性極強，泛稱為不銹鋼。從圖 2 得知不銹鋼渣有三種，即電爐渣、轉爐渣與 AOD 爐渣，有的不銹鋼廠會多一道精煉程序，將不銹鋼水放入盛桶爐(ladle furnace)以電極棒再精煉(ladle refining)，則會產生盛桶爐渣(ladle furnace slag)。

2-2 鋼爐渣之成分

根據日本鉄鋼爐渣協會^[2-1]之資料，煉製碳鋼時之轉爐渣與電爐渣之成分如表 2-1 所示。但由於煉鋼時均須加入量體不等的廢鋼，視廢鋼之來源與性質的差異，會有不同程度之污染成分。此外，由於煉鋼過程中，煉鋼爐必須填加入石灰石(limestone-CaCO₃)與白雲石(dolomite-MgCO₃)等之還原劑，過量之還原劑熔解後，CO₂飛走了，鋼渣會殘留剩餘之游離氧化鈣(CaO)與游離氧化鎂(MgO)。

表 2-1 碳鋼爐渣之化學成分

成分(%)	轉爐渣	電爐渣	
		氧化渣	還原渣
CaO	45.8	22.8	55.1
SiO ₂	11.0	12.1	18.8
T-Fe	17.4	29.5	0.3
MgO	6.5	4.8	7.3
Al ₂ O ₃	1.9	6.8	16.5
S	0.06	0.2	0.4
P ₂ O ₅	1.7	0.3	0.1
MnO	5.3	7.9	1.0
合計	89.7	84.4	99.5

至於不銹鋼渣之成分，由於不銹鋼之鎳、鉻之含量偏高，其污染性質更甚於碳鋼之鋼爐渣。表 2-2 為不銹鋼渣之成分樣本(wt%)^[2-2]。

表 2-2 不銹鋼爐渣之化學成分

Cr	Ni	Si	Ca	Fe	其他	合計
11.15	7.8	5.03	10.35	35.34	30.33	100

2-3 鋼爐渣之再利用

2-3-1 碳鋼鋼渣

碳鋼鋼渣之主要用途為基礎或路基之回填材料。美國、澳洲、日本等國均曾將鋼爐渣用於道路工程，美國甚至於將鋼爐渣大量作為鐵路之道床(ballast)，以取代一般之石材道渣，確實可以減少不少之工程經費，如照片 2-1。



照片 2-1 鐵行道床^{〔2-3〕}



轉爐スラグを用いた肥料

照片 2-2 轉爐渣處理後之肥料^{〔2-1〕}

日本爐渣協會推薦鋼爐渣作為地工用之水泥原料，與道路工程之路基或地質改良材料。其中轉爐渣如果特殊處理尚可作為農林業之肥料使用，如照片 2-2。氧化渣可作為瀝青混合物之粒料、地工混凝土用粒料與其他地工材料。至於還原渣則直接做為地工材料、水泥原料與地質改良原料。

2-3-2 不銹鋼渣

不銹鋼渣之處理可分為二種方式，其一將爐渣打碎或磨粉，篩選鎳、鉻成分作為後續煉製不銹鋼之填充料；其二將爐渣固化處理為塊磚再利用或掩埋。

2-4 品質管控

2-4-1 鋼爐渣之膨脹性

由於煉鋼過程中，鋼渣殘留過量之游離氧化鈣(CaO^+)與游離氧化鎂(MgO^+)，此兩種游離物與水或濕氣發生水化作用時，就會形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，容易導致體積膨脹甚至渣料主體開裂或崩解。所以 CNS 1240 規定，對於有膨脹顧慮之鋼爐渣，使用前必須確實完成其「安定化」之處理程序，否則不能隨便使用。一般安定化之處理可採用天然風化法、高溫蒸氣處理法或吹氧加熱並填加玻璃細粉等改良劑處理。安定化處理後如果作為路基或路床使用，須按照 CNS 15311 之試驗方法，驗證是否符合 CNS 15358 或 ASTM D2940 所規定之膨脹性限制，7 天之膨脹比應小於 0.5%。國內許多道路工程的路基或路床，採用了未安定化處理之鋼爐渣回填，於下過大雨後路面浮凸不平，甚至路面崩裂，造成不可收拾之交通事故，有的造成頗具爭議之訴訟案件，如台○大道事件、西○○事件等。照片 2-3 為台○大道鄰近相關水利工程的土質善後處理；照片 2-4 為西○○事件之路面隆起爆裂之情況，爭訟數年仍未解決。



照片 2-3 台○大道鄰近工程之土質善後



照片 2-4 西○○道路路面隆起爆裂

安定化之鋼爐渣如未受汙染作為混凝土使用時，另須控制其鹼骨材膨脹性反應，應符合 CNS 13619 之規定，於三個月小於 0.05%或六個月小於 0.1%。

2-4-2 鋼爐渣之汙染性

由於煉鋼過程須填加廢鋼(scrap)容易夾雜其他之重金屬與雜質，因此鋼爐渣使用前應該檢測重金屬含量有無超標，如 Cd、Pb、Cr⁶⁺、As、T-Hg、Se、Ni、F 及 B 等成分，以防止使用後之重金屬環境汙染。且廢鋼等材料亦容易夾帶油(烤)漆、塑膠、橡膠、藥品等化學物品，以及放射性物質，故化學汙染或輻射汙染亦當檢測。

至於不銹鋼渣除了要檢測安定性外，更必須嚴格檢驗其汙染成分，否則只有固化處理，且其固化處理與溶出檢驗要比一般嚴謹，因為固化之後面臨酸雨之環境也有汙染物滲出之顧慮。任何回填或與土壤共用之處理方式，必須控制使汙染成分少於土壤汙染整治法之限制，但此種處理過程必須極其嚴格管制，並登錄管理、定期監測以釐清責任。土壤汙染整治法所規定土壤汙染監測標準如表 2-3。

表 2-3 重金屬全量分析每一公斤土壤中（乾基）所含汙染物之毫克數表

監測項目	監測標準值
砷(As)	30
鎘(Cd)	10 (食用作物農地之監測基準值為 2.5)
鉻(Cr)	175
銅(Cu)	220 (食用作物農地之監測基準值為 120)
汞(Hg)	10 (食用作物農地之監測基準值為 2)
鎳(Ni)	130
鉛(Pb)	1,000 (食用作物農地之監測基準值為 300)
鋅(Zn)	1,000 (食用作物農地之監測基準值為 260)

2-4-3 鋼爐渣之鐵質成分

煉鋼爐容易夾雜鐵質成分(T-Fe)，當其與水發生化學反應時，會發生爆出(pop-out)與銹水現象，部分建築工程誤用混有氧化渣之水泥或混凝土後，混凝土表面會散佈開花之麻點，酷似「青春痘」、「出麻疹」，被諷刺為「痘痘屋」。有些道路鋪面之 AC 採用鋼爐渣粒料者，則呈現散佈不均之銹斑現象，使用前必須驗證其含鐵成分。

結語

總之，使用鋼爐渣做為工程材料時，必須事先驗證其污染性、安定性與鐵質含量，才能避免使用後的環境污染、膨脹鼓起與銹斑等缺失。不銹鋼渣更需要嚴謹控管環境污染問題。

參考文獻

- 【2-1】環境資材鐵鋼スラグ，日本鐵鋼スラグ協會。
- 【2-2】不銹鋼渣中鎳鐵金屬回收之研究，董志嘉、鄭大偉，台北科技大學資源工程研究所，民國 104 年 12 月。
- 【2-3】Steel furnace slag, 173-3, National Slag Association, USA。

主題三：飛灰

飛灰(fly ash)是發電廠燃燒煤炭後的廢棄物。國內的飛灰主要來自台灣電力公司與台灣塑膠公司的火力發電廠。

3-1 煤炭的介紹

世界上煤炭(coal)量產的國家依序為中國、美國、印度、澳洲與歐盟。美國地質探測局(US Geological Survey)將煤炭之含碳量與熱能分為四種等級：

1. 褐煤(lignite)：單位熱能最低，在 8,300btu 以下，發電效益較差。
2. 次煙煤(sub-bituminous)：單位熱能在 8,300~12,000btu 之間，發電效益中等。
3. 煙煤(bituminous)：單位熱能最高，在 12,000~16,000btu 之間，為發電效益最好之原料。一貫作業煉鋼廠所用之焦炭(coke)也是取自一種低灰低硫之煙煤(coking coal)。
4. 無煙煤(anthracite)：單位熱能與煙煤相當，惟無煙煤之含碳量偏高，如果用以燃燒發電，會產出大量之二氧化碳(CO₂)，不利於環境保護，故比較不適合燃燒發電。

台電公司之火力發電廠係採用煙煤與次煙煤為主要發電燃料，煙煤之熱值高，次煙煤之灰分低，兩者配合使用，並未使用褐煤或泥煤，台電稱之為「乾淨之煤碳」。

3-2 飛灰的產出

燃煤發電廠先將煤炭碎化成細小之顆粒或粉狀，堆置於煤倉(silo)內，再送進鍋爐(boiler)燃燒。燃燒後之粉狀灰渣隨著熱氣流飛飄，故名「飛灰」，其量體約佔 70~90%，最後用靜電集塵器(electrostatic precipitator)收集至集灰槽。鍋爐內之少部分熔滓或未完全燃燒之煤粒掉落在爐底，稱為底灰(bottom ash)，約佔 10~20%。燃燒後之 CO₂ 等廢氣則由煙囪排放。飛灰之產出過程參見圖 3-1。飛灰為球狀之微細粉末，直徑約 0.5 μm ~300 μm 。

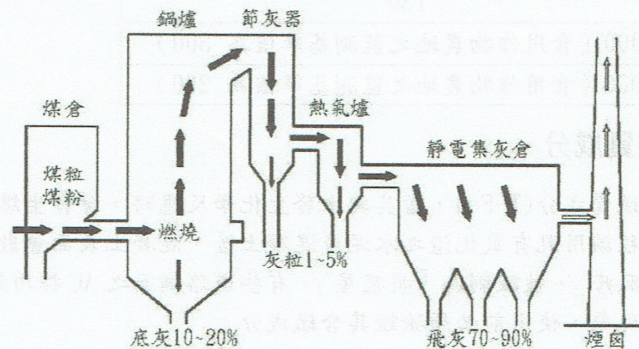


圖 3-1 燃煤發電產出飛灰

3-3 飛灰之種類與成分

不同煤炭所燒成之飛灰，其成分亦有所不同。CNS 3036 將飛灰分為三類：

1. N 類：天然火山灰之煅燒卜作嵐材料
2. F 類：燃燒無煙煤或煙煤所產生之飛灰，具有卜作嵐特性。
3. C 類：燃燒次煙煤或褐煤所產生之飛灰，除具有卜作嵐特性外，亦具有若干膠結性。」

由上述 CNS 之說明顯見 C 類之膠結性較 F 類為佳，CNS 3036 分別規定飛灰之化學成分如表 3-1。但 CNS 並未規定 CaO 之成分，從表 3-2 之國內研究報告^[3-1]，與表 3 之 ASTM C618^[3-2]附錄資料，可以看出 C 類飛灰之 CaO 成分比 F 類高出甚多，顯然 C 類之膠結性較 F 類為佳。

表 3-1 CNS 3036 飛灰之化學成分

試驗項目	N 類	F 類	C 類
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ ，%(最小值)	70	70	50
SO ₃ ，%(最大值)	4	5	5
含水量，%(最大值)	3	3	3
燒失量，%(最大值)	10	6	6

表 3-2 不同煤礦所燃燒之飛灰成分^[3-1]

化學成分	C 類飛灰		F 類飛灰
	褐煤灰	次煙煤灰	煙煤灰
SiO ₂	45	39	49
Al ₂ O ₃	18	19	24
Fe ₂ O ₃	6	5	15
CaO	18	24	1
SO ₃	2	2	1
MgO	4	4	1

表 3-3 F 類飛灰成分(%)^[3-2]

化學成分	F 類飛灰
SiO ₂	61
Al ₂ O ₃	18
Fe ₂ O ₃	5.2
CaO	6
SO ₃	2.3
MgO	1

3-4 飛灰之再利用

3-4-1 作為卜作嵐材料

飛灰因其成分含有矽氧材料 (SiO₂)與鋁氧材料 (Al₂O₃)，在常溫下，SiO₂與 Al₂O₃會與氫氧化鈣 Ca(OH)₂起化學反應，而形成具有膠結性質之化合物-水泥漿，為一種優良之卜作嵐材料。填加飛灰於混凝土中有緩凝之效果，延長潤濕期間，頗適合預拌場遠離施工工地較遠之

台南市政府工務局講習 2023-08-25

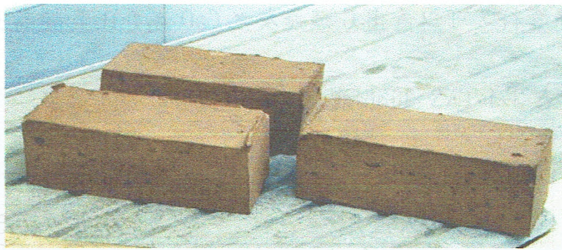
工程使用。且由於潤濕期間較長會略為提升混凝土之強度。

3-4-2 作為磚塊

澳大利亞是盛產煤炭的國家，該國所生產之煤炭，煙煤與褐煤各占一半。煙煤多半外銷，僅約 15% 留做國內發電與冶煉鋼鐵之用，褐煤則全數留在國內使用。所燃燒後之飛灰，學術界成功研發製成「飛灰磚」(Flash Brick)^[3-3]。即將飛灰與水充分化合，並加入少許必要之摻料，經過約 1,000°C 煅燒後成為有用之磚塊。照片 2 為製模後煅燒前之樣品磚，照片 3-3 則為煅燒完成後之成品磚。



照片 3-2 飛灰煅燒前之樣品磚^[3-3]



照片 3-3 飛灰煅燒後之成品磚^[3-3]

飛灰磚之抗壓強度可高達 40MPa (400kgf/cm²)，高於一般黏土所煅燒之紅磚強度，抗拉強度(modulus of rupture)約為紅磚之 3 倍，且比重比紅磚減少約 28%，可降低建築構造物之重量，而其與水泥砂漿之握裹力比紅磚高出約 44%。飛灰磚之煅燒僅需數小時，比紅磚煅燒之時間 1~7 天短少許多，可節省大量之能量消耗。飛灰磚之顏色亦可於材料混合攪拌時，填加相關之氧化染色劑做適當調色。

3-4-3 燒結為輕質骨材

飛灰亦可經由燒結過程(sintering process)製造輕質骨材，做為輕質混凝土之用。照片 4 為印度學者研製之粒徑 4mm~12mm 燒結飛灰粒料(sintered fly ash aggregates - SFA)^[3-4]。其成分包含 61% 氧化矽、14% 氧化鋁、9% 氧化鈣、8% 氧化鐵與其他少量鹼質材料，其比重平均為 1.55，破碎強度平均為 9.38MPa。如取 684 公斤之 SFA 粗粒料配合相同重量之天然細砂粒料、370 公斤水泥及 166 公斤之拌合水(w/c=0.45)，所製成之混凝土原狀密度(fresh density)平均 2,025kg/m³，28 天之抗壓強度平均可達 30MPa，抗拉強度 3.1MPa，撓曲強度 7.9MPa，為良好之輕質建材。



照片 3-4 飛灰燒結為輕質骨材^[3-4]

澳大利亞學者甚至於採用燒結飛灰做粗粒料，研發超高強度之輕質混凝土，其 28 天之抗壓強度高達 66.75MPa(9,679psi)^[3-5]。

3-5 品質管控

工程會之施工綱要規範 03050V100 規定「飛灰做為膠結材料時，應符合 CNS 3036 之 F 類規定，使用時應經工程司事先核可。如礦物摻料僅使用飛灰時，飛灰用量不得超過總膠結材料重量之[25%]」。工程會之標準顯然僅允許使用 F 類之飛灰，而排除 C 類飛灰之使用，此與國外常用之 C 類飛灰有很大之落差。國內所推廣之 F 類飛灰，雖然為良好之卜作嵐材料，但因為 CaO 含量偏低，填加於混凝土時不易產生膠結性，故使用量不宜太多。反而是 C 類之 CaO 含量較多，膠結性比較好。該 25% 之上限亦源自 ACI 318 之建議。

此外，飛灰於燒炭的過程中是否煤焦油完全燃燒，也是工程人員必須查證的要項。由於煤炭的燃燒必須借重起火油，且煤炭本身含有多量的煤焦油，如果此等油份未能完全燃燒耗盡，而殘留油質於飛灰內部，勢將影響水泥之膠結效果，因為水泥是水性，而煤焦油則是油性，兩者互不相容。簡易的檢查方法可將飛灰揮洒於盛水盤，若飛灰含有油脂，盛水盤之水面勢必呈現七彩之顏色，不利於工程使用。特別是老舊發電廠所燒成的飛灰，經常無法完全燃燒。

由於飛灰是一種緩凝劑，填加飛灰的混凝土其拆模時間必須額外延長。目前政府的規定，卜特蘭水泥的混凝土於澆築後，如果 7 天內發生四級以上之地震，所澆築之混凝土，必須由專業單位鑑定其施工品質，特別是混凝土與鋼筋之握裹行為。如果填加飛灰之混凝土，則其鑑定期勢必還要延長，應該不只 7 天。

此外，混凝土填加飛灰尚有下列課題必須考量或評估：

- 一、飛灰成分的 Fe_2O_3 亦應有所限制。於混凝土中如有過量之 Fe_2O_3 會滲出銹斑痘點，俗稱痘屋。此種現象極可能是用到含有鐵質之飛灰。
- 二、飛灰成分中常有 Na_2O 與 K_2O 等之含量，如果不加以控制，容易產生鹼骨材(Alkalis)反應，施工時會造成膨脹與網狀裂縫。
- 三、由於膠結性稍差之混凝土對抗壓強度沒什麼影響，而一般實務均僅試驗混凝土之抗壓強度，所以都認為 F 類飛灰可以使用。如果只探討抗壓強度，則飛灰混凝土用於地下工程，如基樁、擋土連續壁、消波塊、CLSM、蛇籠、重力式擋土牆、水壩、護欄、緣石等基礎或地工應是合宜的。至於有撓曲行為之結構混凝土或小規模之斷面，或巨積之板、牆構造，則應作必要之限制。飛灰之填加量無法一體適用。

結語

總之，工程單位再利用廢棄物時，必須深入了解廢棄物之相關產製過程，並探討其成分與性質對工程品質之影響，不宜盲目跟從附和，以免造成不可收拾之後果。

參考文獻

- 【3-1】高摻量飛灰混凝土配比設計與力學行為探討，陳駿，台大碩士論文，2009。
- 【3-2】Report of Pozzolan Analysis, ASTM C618-2017。
- 【3-3】High performance Bricks from Fly Ash, Obada Kayali, Word of Coal Ash, April 2005。
- 【3-4】Experimental investigation of light weight concrete using sintered fly ash aggregates, Pankaj Dhemla, B L Swami, Prakash Somani, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021。

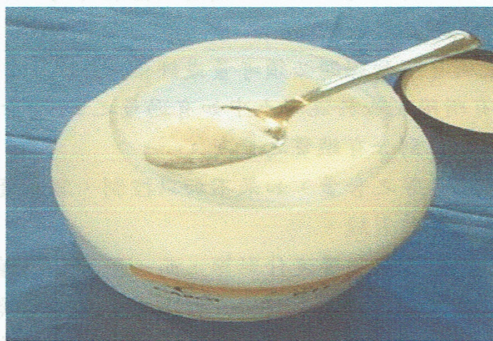
【3-5】Flashag - New lightweight aggregate for high strength and durable concrete, Obada Kayali, School of Aerospace, Civil and Mechanical Engineering, University of New South Wales, Australian Defence Force Academy, Canberra。

主題四：矽灰

4-1 矽灰之產出

矽灰(silica fume)為超細粉之二氧化矽，為灰色或灰白色粉末，是電爐冶煉矽鐵合金或提煉工業矽材時的副產品，如照片 4-1。其實二氧化矽本身是沒有顏色的材質，其顏色是來自其他的成分，例如碳元素與氧化物。冶煉矽鐵時，參見圖 4-1，Si 氣體與空氣中的氧氣會迅速氧化，而冷凝成超細矽質的粉體材料 SiO_2 。ASTM C1240(ACI 116R)將矽灰定義為非常細小的非結晶型二氧化矽，可做為高反應性之卜作嵐材料。台灣煉製矽鐵之工廠不多，故矽灰之產量也較少。

矽鐵是矽與鐵組成的鐵合金，冶煉矽鐵是以焦炭、鐵屑、石英(或矽石)為原料，用電爐冶煉製成的鐵矽合金，由於矽和氧很容易結合成二氧化矽，所以矽鐵常於煉鋼時作為脫氧劑。矽鐵之成分與 SiO_2 之含量分別如表 4-1 與表 4-2。



照片 4-1 矽灰樣品^{【4-1】}

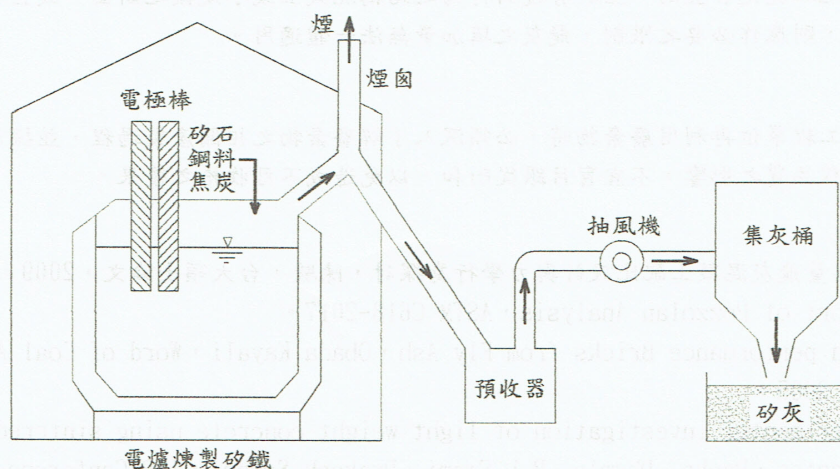


圖 4-1 冶煉矽鐵產出矽灰

表 4-1 矽鐵成分^[4-3]

規格	Si	P	C	S	Al	尺度
矽鐵#72	≥72%	≤0.04%	≤0.2%	≤0.02%	≤2%	10~100mm
矽鐵#75	≥75%	≤0.04%	≤0.2%	≤0.02%	≤2%	

表 4-2 矽合金之 SiO₂ 含量^[4-4]

矽合金種類	矽灰之 SiO ₂ 含量(%)
矽鐵 50%	61~84
矽鐵 75%	84~91
矽合金(98%)	87~98

4-2 矽灰之成分與性質

矽灰之顆粒甚小，粒徑約為 0.1~0.2 μm，為奈米級(Nanometer)尺寸，比重約為 2.2，一般水泥之比重為 3.1。矽灰鬆方之單位重為 200~300kg/m³。ASTM C1240 規定矽灰之二氧化矽含量必須超過 85%，實際之成分樣本如表 4-3。矽灰之比表面積(13,000~30,000m²/kg)平均為 21,500m²/kg，約為水泥(300~400m²/kg)的 30~100 倍；飛灰(400~700m²/kg)的 20~75 倍；高爐爐渣粉(350~600m²/kg)的 20~85 倍。其耐火溫度高達 1,600℃。ASTM C1240 規定矽灰之比表面積至少 15,000 m²/kg，且與水泥作用 7 天之加速卜作嵐強度活性指數最少須控制 105%。矽灰屬於中性物質，一般矽灰之酸鹼度 pH=6~7。

表 4-3 矽灰之成分樣本(%)

文獻	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
【4-1】	96.0	0.1	0.6	0.1	0.2	2.86	0.1	0.4
【4-2】	92.3	0.9	2.0	0.5	1.0	0.3	0.4	1.3
【4-4】	93.2	0.31	1.12	0.44	1.08	-	0.1	1.37

4-3 矽灰之利用

矽灰可改善混凝土的機械性質、水密性與耐久性，西元 1952 年，最早探討矽灰的國家為位於斯堪地那維亞半島的北歐國家，如冰島、瑞典與挪威等國。後來南非的學者發現矽灰可以有效控制鹼骨材反應。美國工兵局(Corps of Engineers)在 1983 年才正式使用於公有工程。

由於矽灰之顆粒極細小，可以填充混凝土內部之空隙。且矽灰之比表面積超大，水化時大量加速卜作嵐反應，除了可以去除水化過程的有害鹼性物質、生成 C-S-H 膠體用以膠結粒料外，尚可提高混凝土之抗壓強度與潤滑的作用，是一種優質的卜作嵐材料。圖 4-2 為混凝土填加矽灰前、後之強度比較曲線，混凝土之強度顯然提昇許多，但對水泥漿之強度沒什影響，矽灰填加前後之試體均維持相同之水灰比。

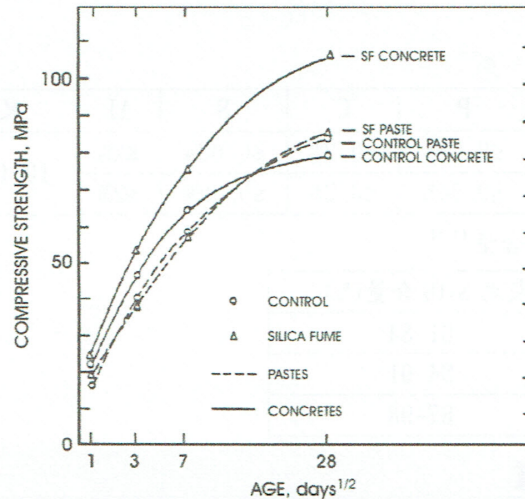


圖 4-2 混凝土填加矽灰前、後之強度比較【4-4】

矽灰之抵抗硫酸鹽侵蝕、氯鹽污染侵蝕或潮濕性之能力甚強，可以延長混凝土之使用年限。填加矽灰之混凝土尚可耐高溫、且降低混凝土施工成本。矽灰若摻入混合水泥(blended cement)6~8%亦可降低鹼骨材之反應。

4-4 品質管控

ASTM C1240 規定矽灰與水泥之鹼骨材反應，於 14 天之砂漿膨脹必須減少 80%以上；抗硫酸鹽之膨脹性，於一般之阻抗 6 個月時應小於 0.1%，於高阻抗 6 個月時應小於 0.05%，於超高阻抗 1 年時應小於 0.05%。

工程會施工網要規範第 3373 章矽灰混凝土規定，矽灰混凝土之水泥必須使用 II 型水泥，且矽灰用量不得超過水泥之 10%。工程實務建議矽灰之填加量為 5~8%，過量矽灰之混凝土其粘度較稠、坍度較小、工作度差，且泵送較難，須填加減水劑改善，或增加用水量。若用於高強度混凝土則應填加高效減水劑，水膠比約 0.25 時，抗壓強度可高達 12,000psi，其強度遠超過高雄東帝士 85 大樓之混凝土強度 8,000psi，甚至於超過台北 101 金融大樓之混凝土強度 10,000psi。填加矽灰時，混凝土之攪拌時間需延長約 30 秒，且矽灰混凝土容易結團，最好不停攪拌以保證混合均勻，運送使用之時間必須縮短以防止坍度降低。由於矽灰之氧化鈣成分偏低，如果填加量過高會降低混凝土氫氧化鈣之膠結性，故矽灰混凝土雖可發揮超高之抗壓強度，但早期塑性裂損較敏感，使用之構造或部位必須謹慎評估，且養護期間最好維持 14 天，提高效果。

由於矽灰之顆粒極細小，包裝與運輸均極其不便，部分廠商將矽灰噴灑水氣使矽灰結成矽顆粒。但此種作法為不可逆之反應，矽灰顆粒不容易打碎也不易水化，故不能填加於混凝土作為卜作嵐材料，只能做為回填材料。

由於超細的矽灰是一種活潑未定形(amorphous)之非結晶物質，美國職業安全衛生管理局(Occupational Safety and Health Administration-OSHA)將其定位為危害物質，作業人員操作時必須格外小心。

結語

使用矽灰之混凝土固然有諸多好處，雖然後期之抗壓強度很強，但早期之膠結抗拉強度卻很差。許多配套措施均必須嚴謹管控，方能奏效。

文獻

【4-1】Effect of Silica Fume in Concrete, Vikas Srivastava, Alvin Harison, P.K. Mehta, Atul, Rakesh Kumar, National Conference on Recent Advances in Civil Engineering, IJIRSET, Nov. 2013。

【4-2】亞東混凝土網頁資料

【4-3】勁連企業公司網頁資料

【4-4】Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, ACI 234R-06

主題五：焚化爐底渣

5-1 焚化爐底渣之產出

焚化爐之灰渣包含垃圾燃燒後之「爐灰」與「底渣」。焚化爐將垃圾燃燒後，不易燃燒完全之固體顆粒稱為底渣，而較細之粉塵經冷卻集塵者稱為爐灰(或稱焚化飛灰)。平均每100噸之垃圾會產出底渣約15噸與爐灰約5噸。此等灰渣經篩分處理及穩定化、特殊處理後，所生成的級配粒料則稱為焚化再生粒料。灰渣之產出如圖5-1。

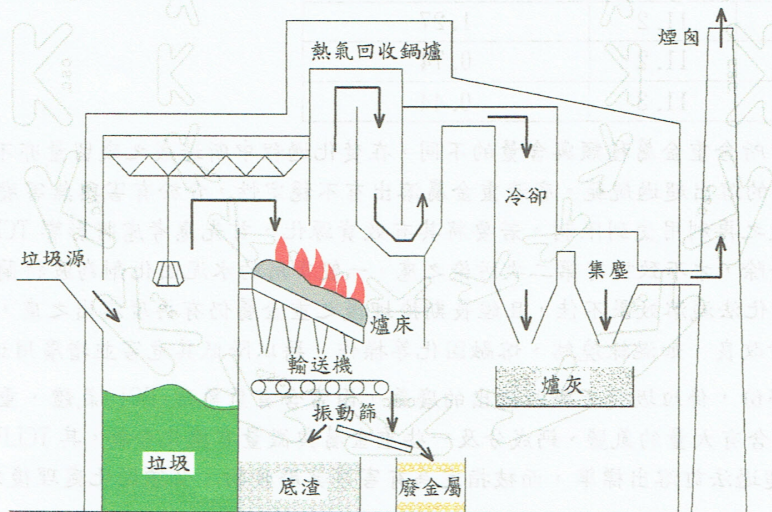


圖 5-1 垃圾焚化爐產出底渣與爐灰

5-2 底渣之成分與性質

工業局廢棄物清理與資源化資訊網曾經報導^[5-1]：「焚化爐之底渣外觀成熔渣狀，含水率平均約為16.8~20.5%，粒徑分佈以25.4~4.7mm範圍最多，含量在33~56%，其次為60~25.4mm佔11.5~22%。表5-1為國內外的底渣化學成分組成之比較，其中國內底渣所含CaO、Fe₂O₃的比例較高，而SiO₂含量比較低，其TCLP溶出試驗卻介於通過與不通過之灰色地帶。此外，底渣所含之水溶性氯離子偏高(如表5-2所示)，加入混凝土中會造成鋼筋結構物之腐蝕，因此須

再處理才能成為砂石替代物。

表5-1 底渣中化學成分之比較^[5-2]

項目%	台灣	美國	日本	新加坡
SiO ₂	31.81	44.73	34.7	32.2
CaO	20.05	10.52	18.2	4.8
Fe ₂ O ₃	15.70	9.26	8.6	28.1
Al ₂ O ₃	14.70	17.44	12.3	25.5
Na ₂ O	2.92	8.14	1.8	1.9
MgO	1.61	2.10	2.2	1.3

表5-2 不同粒徑底渣酸鹼值與水溶性氯離子含量^[5-3]

底渣粒徑	酸鹼值	水溶性氯離子含量%
#8	9.6	0.49
#16	10.3	0.52
#30	11.1	0.59
#50	11.2	0.81
#100	11.4	0.71
#200	11.3	1.30
底盤	11.2	1.27
原始底渣	11.2	0.74
再燒底渣	11.3	0.44

由於底渣中所含重金屬種類與含量的不同，在焚化過程中所造成之殘留量亦不同，部分樣品的鉛、鎘及鉻的溶出超過規範。底渣重金屬溶出有不穩定性，介於有害與無害廢棄物之灰色地帶。因此底渣之再利用受到限制。若要將其有效資源化，首先應考慮將影響 TCLP 溶出結果之重金屬確實去除，才不致於有第二次污染之虞。一般常用的水泥固化劑為波特蘭(Portland)水泥，惟水泥固化法減溶效果不佳，且經長期掩埋後之重金屬仍有再度溶出之虞，有必要進一步對其性質進行改良，如混練燒結、熔融固化等操作，藉以降低其危害並增廣用途。

至於爐灰部份，係垃圾焚化廠所排出的廢氣，因常含有氫氯酸(HCl)氣體、重金屬及微量有機化合物，且含有大量的氯鹽、鈣成分及一些重金屬與微量有機化合物。其 TCLP 溶出試驗，Pb 及 Zn 也都超過法訂溶出標準，而被指定為有害事業廢棄物，必須固化處理後外運掩埋。

5-3 底渣之再利用

各縣市垃圾焚化爐之焚化流程之底渣處理方式，幾乎都是掩埋處理。早期焚化廠產出的底渣也都是採用衛生掩埋處理，但是由於用地難尋及民眾抗爭因素，衛生掩埋場之興建越趨困難，乃有再利用之議。環保署曾委託學術單位研究「廢棄物焚化灰渣材料化之技術」結果顯示，底渣經過適當處理後，採適當的比例可再利用於道路基層、瀝青混凝土骨材替代材料及管溝的回填材料。實際上根據環保署公布之檢測資料，底渣之重金屬污染溶出值皆低於法規標準值，尚無發現異常。列舉北、中、南焚化爐 111 年之檢測結果如表 5-3、表 5-4 與表 5-5。

表 5-3 內湖廠底渣檢測紀錄^[5-6]

中華民國 111 年 01 月至 111 年 12 月

檢測日期	汞 mg/L	鉛 mg/L	鎘 mg/L	鉻 mg/L	砷 mg/L	六價鉻 mg/L	銅 mg/L	硒 mg/L	鎳 mg/L	戴奧辛 ng I-TEQ/g
規定	≤0.2	≤5.0	≤1.0	≤5.0	≤5.0	≤2.5	≤15	≤1.0	≤100	≤1.0
01/11	ND	ND	ND	0.108	ND	0.1	0.3	ND	1	NA
03/01	ND	0.172	0.111	ND	ND	ND	1.54	ND	1.07	NA
08/01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.338	ND	1.31	NA
12/01	ND	ND	ND	NA	ND	0.06	0.17	ND	1.1	NA

表 5-4 烏日廠底渣檢測紀錄^[5-6]

中華民國 111 年 01 月至 111 年 12 月

檢測日期	汞 mg/L	鉛 mg/L	鎘 mg/L	鉻 mg/L	砷 mg/L	六價鉻 mg/L	銅 mg/L	硒 mg/L	鎳 mg/L	戴奧辛 ng I-TEQ/g
規定	≤0.2	≤5.0	≤1.0	≤5.0	≤5.0	≤2.5	≤15	≤1.0	≤100	≤1.0
02/07	ND	ND	NA	NA	ND	0.02	0.647	ND	0.954	0.0058
05/09	ND	ND	NA	NA	ND	NA	0.732	ND	0.742	0.0053
08/01	NA	ND	NA	NA	ND	NA	0.388	ND	0.906	0.0045
11/07	ND	ND	NA	NA	ND	ND	0.208	ND	0.695	0.0046

表 5-5 仁武廠底渣檢測紀錄^[5-6]

中華民國 111 年 01 月至 111 年 12 月

檢測日期	汞 mg/L	鉛 mg/L	鎘 mg/L	鉻 mg/L	砷 mg/L	六價鉻 mg/L	銅 mg/L	硒 mg/L	鎳 mg/L	戴奧辛 ng I-TEQ/g
規定	≤0.2	≤5.0	≤1.0	≤5.0	≤5.0	≤2.5	≤15	≤1.0	≤100	≤1.0
01/04	0.0012	0.177	0.087	0.446	NA	NA	2.62	NA	0.803	0.0054
04/06	NA	0.172	NA	0.02	NA	NA	0.994	NA	1.35	0.0099
07/12	NA	NA	0.034	0.005	NA	NA	0.909	NA	1.1	0.005
11/01	NA	0.009	0.036	0.008	NA	NA	1.02	NA	0.697	0.0069

為了消化大量之灰渣，目前行政院環保署以行政命令通令相關部會與各地方政府，全力消化焚化爐之底渣，將底渣用於土方回填之相關工程，特別是用在 CLSM，且均訂定相關之配額列管。由於底渣必須處理之後才能使用，大約有 90% 之底渣經過處理後可再利用，有的地方政府自設底渣處理廠，如高雄市，台南市，有的地方政府委託環保署認可之專業廠商處理，如台中市，使用單位再向處理廠商價購底渣使用。接受委託處理的廠商有永盛、潤隆、博瑞、旭遠、全精英、榮寶和映誠公司等。高雄市政府採用一條龍處理的方式，將底渣處理後直接交付認證之 CLSM 廠商，使用單位直接向 CLSM 廠商價購 CLSM 使用。底渣處理前之重金屬含量規定如表 5-6。處理後之再生粒料於使用前，應每五百公噸至少檢測一次，其標準如表 5-7。

表 5-6 環保署規定底渣交付處理前之標準

檢測項目	標準
戴奧辛總毒性當量濃度	≤1 ng I-TEQ/g

表 5-8 土壤汙染之管制標準 ^{【5-4】} ^{【5-5】}

重金屬(單位：毫克/公斤-土壤)		
項目	監測標準值	管制標準值
砷(As)	30	60
鎘(Cd)	10(食用作物農地為 2.5)	20(食用作物農地為 5)
鉻(Cr)	175	250
銅(Cu)	220 (食用作物農地為 120)	400 (食用作物農地為 200)
汞(Hg)	10 (食用作物農地為 2)	20 (食用作物農地為 5)
鎳(Ni)	130	200
鉛(Pb)	1000 (食用作物農地為 300)	2000 (食用作物農地為 500)
鋅(Zn)	1000 (食用作物農地為 260)	2000 (食用作物農地為 600)

表 5-9 有機化合物之管制標準 ^{【5-4】}

有機化合物(單位：毫克/公斤-土壤)	
項 目	管制標準值
苯 (Benzene)	5
四氯化碳 (Carbon tetrachloride)	5
氯仿 (Chloroform)	100
1,2-二氯乙烷 (1,2-Dichloroethane)	8
順-1,2-二氯乙烯 (cis-1,2-Dichloroethylene)	7
反-1,2-二氯乙烯 (trans-1,2-Dichloroethylene)	50
1,2-二氯丙烷(1,2-Dichloropropane)	0.5
1,2-二氯苯 (1,2-Dichlorobenzene)	100
1,3-二氯苯 (1,3-Dichlorobenzene)	100
3,3'-二氯聯苯胺 (3,3'-Dichlorobenzidine)	2
乙苯 (Ethylbenzene)	250
六氯苯 (Hexachlorobenzene)	500
五氯酚 (Pentachlorophenol)	200
四氯乙烯 (Tetrachloroethylene)	10
甲苯 (Toluene)	500
總石油碳氫化合物(TPH), (Total petroleum hydrocarbons)	1,000
三氯乙烯 (Trichloroethylene)	60
2,4,5-三氯酚(2,4,5-Trichlorophenol)	350
2,4,6-三氯酚(2,4,6-Trichlorophenol)	40
氯乙烯 (Vinyl chloride)	10

重金屬毒性溶出程序 (毫克/公升)	總鉛 ≤ 5.0
	總鎘 ≤ 1.0
	總鉻 ≤ 5.0
	總硒 ≤ 1.0
	總銅 ≤ 15.0
	總鋇 ≤ 100.0
	六價鉻 ≤ 2.5
	總砷 ≤ 5.0
	總汞 ≤ 0.2

表 5-7 焚化再生粒料使用前之標準

檢測項目	標準
粒徑大小(mm)	≤ 19
戴奧辛總毒性當量濃度	$\leq 0.1 \text{ ng I-TEQ/g}$
重金屬毒性溶出程序 (毫克/公升)	總鉛 ≤ 4.0
	總鎘 ≤ 0.8
	總鉻 ≤ 4.0
	總硒 ≤ 0.8
	總銅 ≤ 12.0
	總鋇 ≤ 10.0
	六價鉻 ≤ 0.2
	總砷 ≤ 0.4
	總汞 ≤ 0.016

[註：雜質不得含有大小任二尺度(長度、寬度、深度)超過 20mm 之可燃物、鐵金屬、非鐵金屬，以及電池與可辨識之市售產品。]

至於爐灰，因為污染比較嚴重，僅約有 2%經過處理後才可利用，接受委託處理的廠商有信大水泥公司南聖湖廠和台灣鋼聯公司等。其餘不能再利用的底渣與爐灰則進入掩埋場。政府的政策擬將全部底渣與爐灰全數再利用不再掩埋。除了用於 CLSM 之外，未受污染之灰渣亦可比照飛灰作成輕質骨材使用。

5-4 品質與法規

環保機關在推廣焚化底渣之使用，僅著重是否造成重金屬之污染，但是國人飲食習慣嗜嗜重鹹，垃圾焚燒後之底渣，其氯離子含量一向都是超高標。CNS 規定砂石粒料之氯離子含量須小於 0.012%，從表 5-2 不難看出底渣之氯離子含量超過 CNS 規定值之 35~100 倍，此項污染限制並未在環保機關規範之內。一般言之，金屬管線的回填、混凝土基礎的回填，與農作物附近的回填或水源地鄰近的工程是不得使用氯離子含量超標的材料的。此外，從事底渣處理的廠商、污染檢測公司的品質管制十分重要，政府主管機關的監督必須十分嚴謹。

使用單位使用底渣時除應請供料單位提出底渣再生粒料之無污染證明外，並應抽驗污染物溶出量。若與土壤混合時，必須調配稀釋使污染量符合土壤污染防治法規，並做混合物之全量試驗。土壤污染之其他管制標準如表 5-8、表 5-9、表 5-10 與表 5-11。

二甲苯 (Xylenes)	500
---------------	-----

表 5-10 農藥管制標準【5-4】

農藥(單位：毫克/公斤-土壤)	
項 目	管制標準值
阿特靈 (Aldrin)	0.04
可氣丹 (Chlordane)	0.5
二氯二苯基三氯乙烷(DDT)及其衍生物(4,4'-Dichlorodiphenyl-trichloroethane)	3
地特靈 (Dieldrin)	0.04
安特靈 (Endrin)	20
飛佈達 (Heptachlor)	0.2
毒殺芬 (Toxaphene)	0.6
安殺番 (Endosulfan)	60

表 5-11 其他有機化合物之管制標準【5-4】

其他有機化合物(單位：毫克/公斤-土壤)	
項 目	管制標準值
戴奧辛 (Dioxins)	1000 奈克-毒性當量/kg-土壤
多氯聯苯 (Polychlorinated biphenyls)	0.09

結語

總之，垃圾焚化爐所燃燒的廢棄物種類很多，有食品、藥品、有機無機物品、化學製品、金屬製品及醫療廢棄物等，燃燒完成後之灰渣可能產出多種污染源，再利用者不可不慎。

參考文獻

- 【5-1】廢棄物清理與資源化資訊網技術報導，工業局。
- 【5-2】垃圾焚化灰渣燒結資源化之研究，徐文慶、陳淑萍、張蕙蘭、許順珠、廖錦聰，第九屆廢棄物處理技術研討會，pp505~518，1994。
- 【5-3】垃圾焚化灰渣做為混凝土細骨材之可行性研究，李釗、江少鋒、郭文田，中國環境工程學刊，Vol 7，No. 3，pp289~296，1997。
- 【5-4】土壤污染管制標準
- 【5-5】土壤污染監測標準
- 【5-6】底渣原始檢測統計表，環保署環境資料庫網頁