

垃圾焚化飛灰特性、處理再利用技術、法規與未來展望

張坤森、邱孔濱、陳麗萍

國立聯合大學環境與安全衛生工程學系副教授、碩士畢業生、碩士生

潘志明

苗栗縣政府環境保護局秘書

鍾日熙

臺北市環保局木柵垃圾焚化廠副組長

摘 要

垃圾焚化 (MSWI) 具大量處理、減容、成本合理、回收熱能轉化電能等優點，已係多數先進國家垃圾處理之潮流，惟亦衍生棘手之 MSWI 飛灰問題。我國 96% 垃圾採焚化處理，全台 24 座焚化廠每年產生約 20 萬公噸有害 MSWI 飛灰 (TCLP-Pb、-Cd 常逾管制標準)，目前除木柵廠採水洗後作為水泥窯燒摻配料外，其餘採水泥固化/穩定化後獨立掩埋處置，惟亦已面臨固化物掩埋空間漸不足之困境。緣此，本文先進行 MSWI 飛灰性質與特性分析，並對國內焚化廠內飛灰匯集方式、添加物及數量進行探討。其後就飛灰處理機制、國內外飛灰主要處理/再利用技術及其應用狀況加以概述，並彙整國內 MSWI 飛灰處理/再利用之專利技術，以全面探討 MSWI 飛灰可資應用技術。另在法規/政策方面，本文提出我國 MSWI 飛灰相關之法規與推動計畫較重要處，並進行分析與檢討。最後歸納上述探討成果，針對我國 MSWI 飛灰處理/再利用之技術與作法、模型廠/實廠設置、法規/推動計畫等，提出具體建議方案；期能拋磚引玉，引發我國產官學研共同努力，以突破目前 MSWI 飛灰再利用困境並開創未來新局！



一、前言

台灣地窄人稠，故於 1990 年起陸續興建大型都市垃圾焚化（MSWI）廠，目前營運中垃圾焚化廠共計 24 座（21 座公有焚化廠及 3 座 BOO/BOT 焚化廠），另有雲林縣及台東縣 2 座 BOO 焚化廠因履約糾紛而未營運。2011 年全國垃圾焚化處理占 96%（其餘為掩埋），焚化已係我國垃圾處理之主流⁽¹⁾。垃圾焚化雖可達「減量化、安定化」及「資源化（熱能回收發電）」，然而焚化後產生約焚化處理量 15–20% 之灰渣（底渣及飛灰）。底渣經毒性特性溶出程序（TCLP）及戴奧辛（DXN）檢測，絕大多數低於管制標準而被認定為一般廢棄物，故可作掩埋或依環保署「一般廢棄物-垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」，經篩分、破碎或篩選等前處理，再依再利用產品分類（區分三大類型），採穩定化、熟化或水洗等後續前處理，符合 TCLP 及 DXN 檢測要求後，即可進行該類型產品之再利用，例如作為級配粒料、基地及路堤填築、控制性低強度回填材料（CLSM）、瀝青或混凝土或磚品添加料等。2011 年國內焚化廠共產生 107.9 萬公噸底渣，再利用 74.3 萬公噸，約佔 69%⁽²⁾，顯見我國焚化底渣再利用已有穩定績效。

另在 MSWI 飛灰方面，歷年環保署進行各焚化廠飛灰之 DXN 檢測均低於管制標準（DXN 原為 TCLP 之溶出濃度值 0.001 mg/L，2006 年改為有機溶劑萃取 17 種化合物之總量值 1.0 ng I-TEQ/g），惟 TCLP 檢測結果，Cd、Pb、Zn（2001 年已取消 Zn）等重金屬常逾管制標準，故為有害事業廢棄物。除 2010 年 5 月木柵焚化廠開始將飛灰水洗後添加於水泥作再利用外，國內焚化廠飛灰均採添加穩定劑之水泥固化中間處理，再作最終之獨立掩埋處置。2003–2011 年我國垃圾焚化產生之底渣、生飛灰、飛灰固化物等統計分析見表 1⁽²⁾。由表可知，我國垃圾焚化灰渣量約焚化處理量 17.7–20.1%，生飛灰量約焚化處理量 2.83–3.47%，值得注意的是近年焚化廠生飛灰量有漸增之趨勢（見圖 1），且飛灰固化物量已約生飛灰量 1.39–1.56 之比例，即固化增加 39–56% 重量，實不符合減量原則！此外，固化掩埋大量占用掩埋空間，更有溶出危害水土環境之風險，目前桃園縣、台中市、彰化縣、嘉義市已苦無飛灰固化物公有掩埋場，且僅有木柵廠作飛灰再利用，故本文將進一步探討 MSWI 飛灰之特性、國內外處理/再利用技術與現況、國內法規/政策，並提出未來展望，期能由產官學研多方共同努力，開拓我國 MSWI 飛灰再利用新頁。

表 1 2003–2011 年我國大型垃圾焚化廠之 MSWI 灰渣統計分析

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010c	2011d
焚化處理量 (kT/Y)	5,471	5,612	5,615	5,683	5,949	6,184	6,093	6,235	6,355
底渣量 (kT/Y)	862	856	861	858	870	940	951	993	1,079
生飛灰量 a (kT/Y)	190	169	159	168	180	179	180	193	200
飛灰固化物量 (kT/Y)	211	220	213	253	263	265	271	302	278
灰渣量 b (kT/Y)	1,052	1,025	1,020	1,026	1,050	1,119	1,131	1,186	1,279
灰渣量/焚化處理量 (%)	19.2	18.3	18.2	18.1	17.7	18.1	18.6	19.0	20.1
生飛灰量/灰渣量 (%)	18.1	16.5	15.6	16.4	17.1	16.0	15.9	16.3	15.6
生飛灰量/焚化處理量 (%)	3.5	3.0	2.8	3.0	3.0	2.9	3.0	3.1	3.1
飛灰固化物量/生飛灰量	1.11	1.30	1.34	1.51	1.46	1.48	1.51	1.56	1.39

a. 生飛灰 = (原始) 飛灰 + 反應飛灰；b. 灰渣量 = 底渣量 + 生飛灰量；c. 2010 年 5 月木柵廠開始水洗灰添加於水泥再利用；d. 2011 年無北投廠及內湖廠飛灰固化物量。彙整資料來源：(2)。

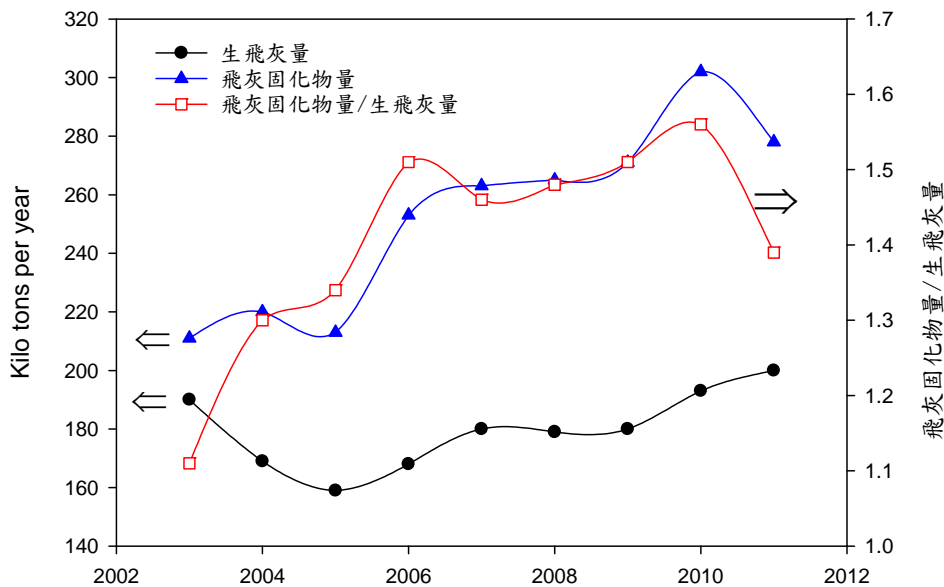


圖 1 2003–2011 年我國垃圾焚化產生之生飛灰量、飛灰固化物量及其比例

二、垃圾焚化飛灰性質

(一) MSWI 飛灰性質與特性

垃圾焚化溫度約介於 850–1,050 °C，有機物多已燃燒殆盡，廢氣及沸點低於焚化溫度之氣化重金屬隨以純灰份為主之飛灰進入空污防治設備 (APCDs)，其後多凝附於飛灰上⁽³⁾。MSWI 飛灰組成為 CaO、Cl、Na₂O、



K_2O 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、Zn、Pb、Cd 等無機物、少量未燃物、微量 DXN 及 PAHs 等，另亦含為去除酸性氣體 (SO_x 、 NO_x 、HCl 等)、DXN 而噴入之鹼性物質 (常為消石灰) 及粉狀活性碳 (PAC)。飛灰粒徑相當細小，大多數介於 1–200 μm ，PAC 粒徑範圍亦與飛灰重疊。由於飛灰含大量 Ca、Na、K、Mg 等鹼金屬及鹼土金屬氯化物/氧化物，故為高鹼性物質 (pH 約 10.5–12.3) ⁽³⁻⁶⁾。

在飛灰重金屬方面：(1) Hg、As：雖此兩種元素及其化合物沸點均低 ($< 620\text{ }^\circ C$)，惟垃圾中 Hg、As 含量極低，故 TCLP-Hg、-As 檢測均低於管制標準。(2) Cd、Cr：國內 MSWI 飛灰 Cd、Cr 含量多約介於 60–150 mg/kg，TCLP-Cd、-Cr 管制值分別為 1.0、5.0 mg/L，常見 Cd 偶逾管制值，Cr 則均低於管制值。(3) Cu：國內多介於 400–800 mg/kg，TCLP-Cu 管制值為 15.0 mg/L，惟檢測均遠低於管制值。(4) Pb、Zn：國內 MSWI 飛灰 Pb、Zn 含量常分別高居有害重金屬第二、一名 (多介於 1,500–3,500、3,500–9,000 mg/kg)，因 Pb、Zn 均係兩性金屬 (Amphoteric metal) 且飛灰為高鹼性物質，故 TCLP-Pb、-Zn 常逾管制值 (5.0、25.0 mg/L)，惟環保署已於 2001 年取消 Zn 管制項目。

環保署多年定期檢測國內各焚化廠飛灰之結果，亦顯示大多數逾 TCLP 重金屬管制值為 Pb、其餘為 Cd。另在飛灰 DXN 方面，由於 DXN 為脂溶性物質，2006 年底環保署將廢棄物之 DXN 檢測由使用冰醋酸之 TCLP 管制值 (0.001 mg/L) 改為以有機溶劑萃取 17 種 DXN 總毒性當量之總量標準 (1.0 ng I-TEQ/g)；惟環保署多年定期檢測國內各焚化廠飛灰 DXN 結果，不論 TCLP 或總量皆未逾管制值。

(二) 焚化廠內飛灰匯集、添加物及數量

國內 23 座垃圾焚化廠 (除木柵廠) APCDs 採旋風集塵器 + 半乾式洗滌塔 + 袋式集塵器之設計 (圖 2) ⁽⁷⁾，木柵廠則採靜電集塵器 (ESP) + 濕式洗滌塔 (WS) + 選擇性觸媒反應器 (SCR) 之設計 (圖 3) ⁽⁸⁾，因此廠內飛灰匯集及添加物因 APCDs 而略有不同，惟可概分：(1) 原始飛灰 (OFA，或簡稱飛灰)：於廢熱回收鍋爐、節熱器、旋風集塵器所收集未添加外來物質且主要係重力及衝擊沉降之飛灰，顏色偏淺土黃色、粒徑較大且呈類砂粒狀。(2) 反應飛灰 (RFA，或稱反應生成物)：可概分二類，一為 23 座焚化廠於半乾式洗滌塔、袋式集塵器所收集經消石灰及 PAC 噴注後因洗滌、過濾而攔截之細小飛灰，顏色偏灰白色、粒徑較小且呈粉狀；

另一為木柵廠於 ESP 收集之飛灰，顏色介於淺土黃與灰白間、粒徑較原始飛灰略小且外型介於類砂粒至粉粒間。此外，因氣化重金屬之沸點不同且凝附於飛灰之 APCDs 位置不同，故原始飛灰之重金屬以 Cd、Zn 為主，反應飛灰則以 Pb 為主。

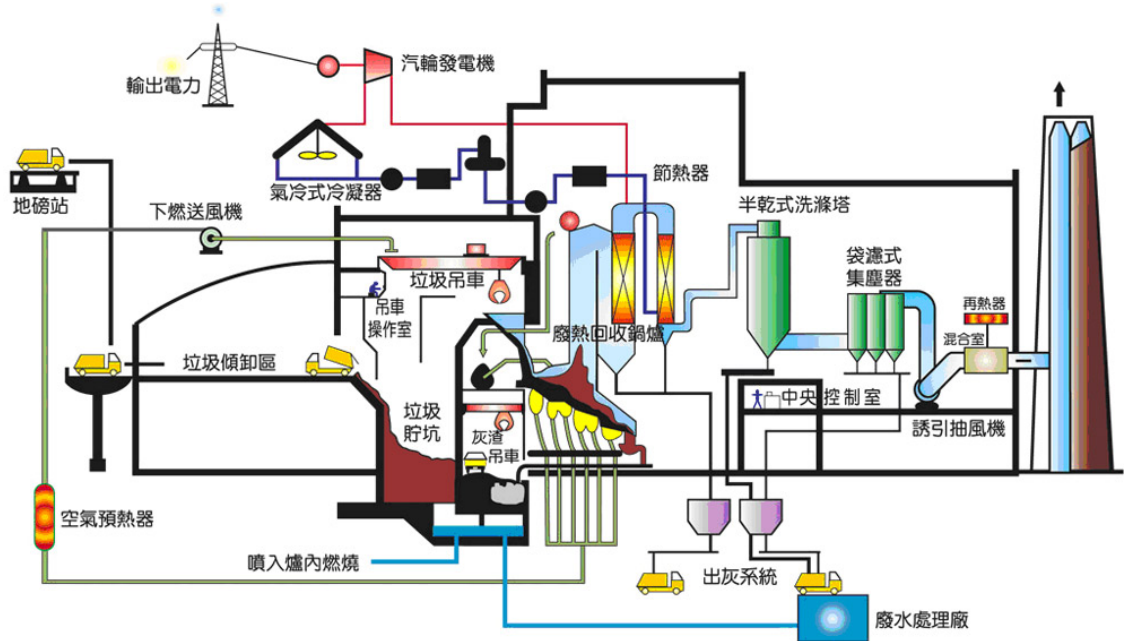


圖 2 具半乾式洗滌塔及袋式集塵器之焚化廠⁽⁷⁾

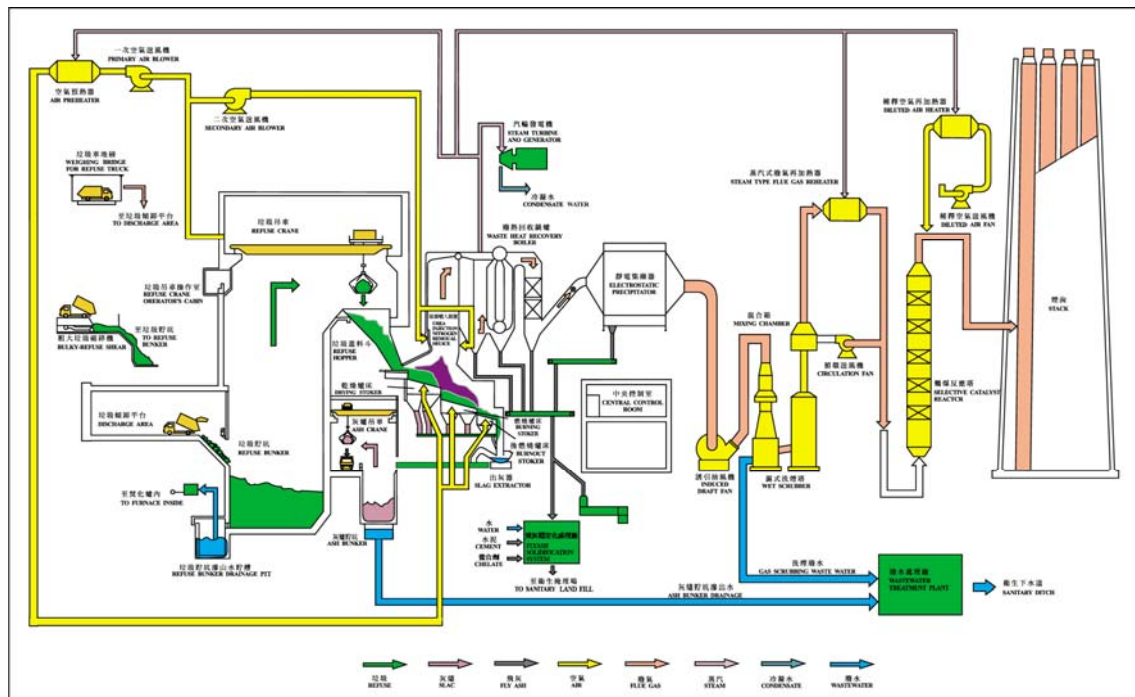


圖 3 具靜電集塵器及溼式洗滌塔之焚化廠⁽⁸⁾



在飛灰匯集方面，國內少數焚化廠（如八里、新竹市、基隆市、高雄市中區等）採原始飛灰、反應飛灰分別匯集（如圖 2），其餘多數焚化廠則採原始飛灰、反應飛灰經由廠內飛灰輸送系統共同匯集（如圖 3）。就數量而言，在添加消石灰及 PAC 狀況下，飛灰、添加物之數量約略如下：(1) 原始飛灰：含添加物（消石灰+PAC）之反應飛灰 $\approx 1:3$ 。(2) 無添加物之生反應飛灰：消石灰：PAC $\approx 1.0:0.5-0.6:0.03$ 。(3) 無添加物之生飛灰（原始飛灰+無添加物之生反應飛灰）：消石灰：PAC $\approx 1.0:0.34-0.37:0.02$ 。由上述可知，含添加物之反應飛灰數量約原始飛灰數量之 3 倍，且消石灰添加於生反應飛灰之比例已高達約 50–60%。相較下，木柵廠 ESP 飛灰並無添加消石灰及 PAC，故原始飛灰：ESP 飛灰 $\approx 1:2$ ，此亦係木柵廠飛灰與其他 23 座焚化廠飛灰性質較不同之處，亦即木柵廠飛灰 CaO 含量較低（約 14–20%，他廠約 20–28%），另因 ESP 設置位於濕式洗滌塔前，故 Cl 含量亦較低（約 10–16%，他廠約 20–30%）、TCLP 有害重金屬以 Cd 為主（其他廠以 Pb 為主）、飛灰顆粒較大且呈類砂土狀及顏色偏土黃色。

三、垃圾焚化飛灰處理/再利用之技術應用面

（一）MSWI 飛灰處理機制與主要應用技術

國內外 MSWI 飛灰之處理機制可概分為二大類：(1) 移除（Removal）：包括萃取（Extraction）、分離（Separation）、高溫氣化（Gasification）等技術，即利用物理/化學方法移出及降低飛灰中有害/不適再利用物質。(2) 固定化（Immobilization）：包括固化（Solidification）、穩定化（Stabilization）、玻璃化（Vitrification）、熔融（Melting）、燒結（Sintering）、匣限（Encapsulation）等技術，即利用物理/化學方法將飛灰中有害物質固定/穩定/產生化學鍵結等，使處理後飛灰不易溶出有害物質，其中玻璃化、熔融、燒結等亦具高溫氣化作用⁽³⁻⁶⁾。分述主要應用之 MSWI 飛灰處理/再利用技術如後：

1. 化學穩定法及酸萃取法

加入化學穩定劑或酸液，使 MSWI 飛灰重金屬穩定或溶出後穩定（酸萃取法須進一步處理廢液），處理後飛灰通過相關檢測後即可視為無害之廢棄物，成本約 1,000–3,000 元/公噸。此法雖簡單、成

本較低，然而須考量穩定化後飛灰固體物之後續處理/再利用；若以掩埋處置，則有害物質再溶出風險相當高；若欲進行再利用，則仍須視再利用產品用途之原料法規規範。惟如何藉成本較低之本法達到處理後飛灰可作為高副加價值之再利用產品，則係本法技術之考驗。

2. 水泥固化法

MSWI 飛灰添加水泥、水、少量穩定劑拌合成固化物，成本約 2,000–3,000 元/公噸，我國（除木柵廠外）及多數國家多採本法（如法國、荷蘭、日本、比利時、瑞典、芬蘭、瑞士、中國大陸等）^(3,4,9)。優點為操作簡便、成本較低，但若計固化後之清運、掩埋、滲出水處理、長期環境監測等費用，則整體成本約 5,000(公有掩埋場)–8,000 元/公噸（私有掩埋場）；缺點為處理後未減量（重量約增 50%）、固化物無法再利用、固化後仍須獨立掩埋、增加處置及環境監測成本，且台灣掩埋空間已漸不足、長期亦有溶出之風險，故固化實非 MSWI 飛灰之適宜處理方法。

3. 高溫熔融/玻璃化法

以逾 1,350 °C 高溫（玻璃化須添加助熔劑）使 MSWI 飛灰熔融形成類玻璃物質，成本約 10,000 元/公噸，我國曾規劃於台南市興建首座飛灰熔融廠，並已通過環評，後因成本過高於 2005 年宣告終止，目前飛灰高溫熔融實績以日本為主^(3,4,9)。本法優點為可將飛灰較低沸點之重金屬氣化，並摧毀 DXN、PAHs 等有機物，處理後熔融物穩定、難再滲出；缺點為成本過高、固化物難以再利用、熔融過程重金屬及多種物質氣化，逸散於 APCDs。

4. 水洗後高溫窯燒/水泥再利用法

先將 MSWI 飛灰以水洗方式降低飛灰水溶性氯離子含量，其後再進行高溫窯燒或以低摻配率併同水泥窯石灰石煅燒（約 1,450 °C），將飛灰中重金屬、DXN、PAHs 等氣化移除，本法目前實績以日本為主^(3,4,9)，另我國木柵廠亦於 2010 年開始水洗灰摻配為水泥煅燒原料之再利用。水洗成本約 1,500–2,000 元/公噸，水泥煅燒成本約 2,000–3,000 元/公噸。如前所述，因木柵廠 MSWI 飛灰氯含量較低且性質偏向類砂質之原始飛灰，故水洗後水溶性氯離子含量可明顯降低（一次水洗 < 1%，二次水洗 < 0.1%），在摻配率僅 0.3–1.0% 下，利於作為水泥煅燒原料，此即國內其他焚化廠難以完全引用木



柵廠模式之主因。此外，國內可資配合水洗灰煅燒之水泥廠十分有限，且對水洗灰氯離子含量之要求愈趨嚴格，亦係本法應用時另一隱憂。

(二) 其他 MSWI 飛灰處理/再利用方式

除上述主要應用之 MSWI 飛灰處理/再利用技術外，因世界各國國情與法規不同，部分國家/地區（如美國多數州、新加坡）允許將焚化底渣與飛灰混合，通過溶出試驗等標準後即可逕行採掩埋處置^(9,10)。部分國家（如德國、澳州、英國）允許將 MSWI 飛灰以太空包置入不易受洪水影響之廢礦坑內^(3,5,9)。部分國家（如德國、荷蘭）允許 MSWI 飛灰作為瀝青添加料^(9,11)。此外，荷蘭原允許未處理 MSWI 飛灰以太空包置入獨立衛生掩埋場處置，惟 2009 年已禁止⁽¹¹⁾。由上述可見，MSWI 飛灰處理/再利用方式不僅多元，且各國對 MSWI 飛灰處理/再利用亦因環境與國情不同，寬鬆程度亦有所差異。

(三) 我國 MSWI 飛灰處理/再利用專利技術

1990 年代國內專家學者即開始對 MSWI 飛灰處理/再利用之研究，迄今發表甚多 MSWI 飛灰處理/再利用及其性質探討之相關研究，部分亦申請國內外專利。彙整已獲得及已公開之中華民國 MSWI 飛灰處理/再利用專利技術如表 2⁽¹²⁾。分析表中專利技術可知：(1) 處理機制與技術：處理機制不外乎移除及/或固定化；至於處理技術，亦係利用物理/化學方法移出及降低飛灰中有害/不適再利用物質，或將飛灰中有害物質固定/穩定/產生化學鍵結等。(2) 飛灰前處理：不一定進行飛灰前處理，惟不論是否前處理，專利技術均係使飛灰成為符合法規規範之無害物質。(3) 飛灰再利用：大部分國內專利技術僅至飛灰無害化，少數似已至再利用產品，惟若無國內外再利用實績，未來再利用時仍須由試驗計畫開始，再邁入個案再利用。(4) 可行性：專利技術欲成為可商轉之可行技術，必須亦具備成本/財務、法規/政策、環境/民意、市場/需求等之可行性，故亦非易事。

表 2 已獲得及已公開之我國 MSWI 飛灰處理/再利用之專利技術⁽¹²⁾

專利/公開 編號	專利名稱	發明人	方法概述
523550a	以電弧爐將垃圾焚化飛灰回收再利用之煉鋼方法	李忠和、謝生財	約 1/4-1/3 爐已熔成鋼液之電弧爐中投入約半爐量飛灰，以鋼液高溫處理飛灰，熔後再投廢鐵料。
542754 a	受污染土壤及泥渣廢棄物中有 害重金屬去除之方法及其設備	王鴻博、蕭明謙	含有機廢棄物（土壤及混渣）於超臨界濕式氧化中部分產生醋酸，可去除其有害重金屬。
593684 a	利用煉鋼業電弧爐高溫處理粉 狀有害物質之方法	楊金鐘、周業裕、謝 生財、李忠和	焦炭置電弧爐底層，上置 1/4-1/3 廢鐵/廢鋼，熔成鋼液加入石灰，多次分批置入廢鐵/廢鋼及噴入粉狀有害物質，以鋼液高溫破壞去除有害物質。
I-311494 a	廢棄物焚化衍生飛灰重金屬去 除之方法	張坤森	得知原始飛灰、反應飛灰之有害重金屬濃度，依提出之計算方法混合，其後以水萃取處理混合飛灰。
I-349656 a	都市垃圾焚化灰渣中的重金屬 穩定方法及灰渣再資源化之方 法	高思懷、孫常榮、李 明國、何志軒、莊家 榮、黃彥為	水萃取灰渣除去可溶性鹽類，再以濕式研磨灰渣，最後藉高溫燒結製成再生材料。
200734281b	一種新穎營建用骨材及其製備 方法	高思懷、孫常榮、劉 瓊玲	水洗去除飛灰可溶性物質後，以磷酸穩定重金屬，加入黏土與污泥後，高溫燒結製成骨材。
200904995b	廢棄物衍生 Thermite 熔融劑	王鯤生、簡長清、周 俊志、李清華	將煉鋼集塵灰與鋁渣/鋁屑純化、經計量分析與粒徑調整，即可備製熔融劑用於飛灰等高溫熔融處理，亦可回收熔渣與金屬。
200906460 b	用於安定飛灰、底渣及土壤中 重金屬的方法	陳鴻亮	噴灑或直接添加矽酸鹽類物質，安定飛灰、底渣及土壤重金屬。
200906762 b	垃圾焚化飛灰再生利用為水泥 材料之方法	高思懷、孫常榮、何 志軒、李明國、莊家 榮、陳佑倫	水萃取飛灰移除其鹽類，進而濕式研磨飛灰，其後飛灰固體即可摻配為水泥材料。
200909376 b	垃圾焚化飛灰資源再製輕質骨 材方法	王佑靖、陳豪吉、王 順元	飛灰添加矽鋁酸鹽等，經混合、造粒、窯燒後製成輕質骨材。
200944303 b	無機有害廢棄物資源化處理方 法	毛玉麟	以熱塑性或熱固性物質固化無機之有害廢棄物。
201013123 b	含重金屬焚化飛灰無害化之處 理方法	張坤森	第一階段以清水或弱鹼液萃取飛灰，第二階段以中等濃度酸液萃取飛灰。
201014808 b	焚化飛灰經微波燒結的處理方 法	駱尚廉、周孫有	將飛灰以微波燒結處理。
201016342 b	受重金屬或戴奧辛污染之廢棄 物或土壤的處理方法	柯瀚盛	以微波輔助酸消化法或酸消化法處理含重金屬或 DXN 之廢棄物或土壤。
201038503 b	水泥砂漿強化摻料及其方法	李增欽、金重勳	飛灰熔融後磨粉，與化學機械研磨之廢棄污泥混合，製備成水泥砂漿之強化摻料。
201105429 b	以微波燒結技術對於焚化飛灰 的處理方法	駱尚廉、周孫有	飛灰先行壓錠，減少體積，再以微波燒結處理。

a、b：分別為已獲得（審核通過）、已公開（尚未審核通過）之我國專利。



四、垃圾焚化飛灰處理/再利用之法規政策面

(一) MSWI 飛灰之認定與相關法規

目前國內 24 座垃圾焚化廠中，除新店、樹林、嘉義市、高雄市區 4 廠外，其餘均已收受一般事業廢棄物，惟環保署對垃圾焚化灰渣之認定，係以公有或民有焚化廠為依據，亦即：(1) 公有焚化廠產出之灰渣：視為一般廢棄物，依《一般廢棄物回收清除處理辦法》及相關法規進行處理/再利用。(2) 民有焚化廠 (BOO/BOT 廠) 產出之灰渣：視為事業廢棄物，依《事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準》及相關法規進行處理/再利用。此一「從產源機構之公/私屬性認定」，在執行初期的確有其管理之方便性，惟其認定似與《廢棄物清理法》(簡稱廢清法) 認定之原則與精神有矛盾之處：(1) 廢清法將我國廢棄物區分為一般廢棄物與事業廢棄物，係「從產源是否屬事業機構認定」，焚化廠均係事業機構，故依廢清法之認定原則與精神，焚化廠產出之灰渣理應屬事業廢棄物。(2) MSWI 底渣常為無害、飛灰常為有害，故依廢清法之認定原則與精神，底渣理應屬一般事業廢棄物，飛灰則應屬有害事業廢棄物。

若進一步考量貯存、清除、處理之執行實務面，則應「從廢棄物性質認定」。底渣絕大多數以「焚化爐底渣 (D-1103)」申報，因常為無害，因此即或認定 MSWI 底渣為一般廢棄物，對貯存/清除/處理/再利用之實質作法影響不大。反之，MSWI 飛灰常為 TCLP 溶出有害，故須以其有害成分申報，例如鉛及其化合物(總鉛)(C-0102)、鎘及其化合物(總鎘)(C-0103)等，其 C 類代碼即屬於有害特性認定之有害事業廢棄物；此外，就公有及私有焚化廠 MSWI 飛灰而言，其性質幾乎相近，惟其貯存/清除/處理所依循之法規卻不同(如《一般廢棄物回收清除處理辦法》與《事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準》)。未來 MSWI 飛灰處理/再利用若漸趨活絡，上述因認定衍生之問題及執法之差異將益形凸顯，故宜由法規認定正本清源，以避免滋生困擾。

(二) MSWI 飛灰之處理/再利用法規與計畫方案

1. MSWI 飛灰與底渣之收集貯存

《一般廢棄物回收清除處理辦法》第 24 條第 1 項第 4 款：「焚化灰渣之飛灰應分開貯存收集，不得與底渣混合。」另《事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準》第 5 條：「有害事業廢棄物應與一般事業廢棄物分開貯存。」相較美國多數州及新加坡(註：新加坡係將

4 座焚化廠灰渣併同工業、營建業不可燃廢棄物運至實馬高 (Semakau) 島掩埋⁽¹⁰⁾，允許 MSWI 飛灰與底渣混合，通過溶出標準後即可掩埋處理，我國上述規範較嚴格，且與世界多數先進國家相同。今 (2012) 年初環保署推出「推動廢棄資源物填海造島方案 (草案)」，擬仿效新加坡實馬高、日本大阪灣 (註：大阪灣填海造地之鳳凰計畫包括「安定型」掩埋 (以營建廢棄物、廢土、金屬、玻璃等無污染海水風險之廢棄物為主)、「控管型」掩埋 (以 MSWI 灰渣、爐渣、下水道污泥等可能污染海水之廢棄物為主⁽¹³⁾)，將較安定之不適燃廢棄物、爐渣、營建廢棄物等填海造島，以解決最終處置用地與空間匱乏問題。此一方案目前仍在廣徵意見及研議中，惟就我國目前對 MSWI 飛灰與底渣不得混合之規範、國情及台灣位處多颱風/地震帶而言，MSWI 飛灰似難以此一填海造島方案解決。

2. MSWI 飛灰處理/再利用法規與推動計畫

為利於我國 MSWI 飛灰朝再利用發展，《一般廢棄物回收清除處理辦法》第 27 條：「飛灰除再利用外，應採穩定化法、熔融法或其他經中央主管機關許可之處理方法處理至低於有害事業廢棄物認定標準...，始得進行最終處置。」另《事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準》第 20 條：「下列有害事業廢棄物除再利用或中央主管機關另有規定外，應先經中間處理...」其中，第 9 款「含有毒重金屬廢棄物：以固化法、穩定法、電解法、薄膜分離法、蒸發法、熔融法、化學處理法或熔煉法處理...」。由上述可知：(1) MSWI 飛灰宜再利用；(2) 即或欲作最終處置，仍應採固化法、穩定化法、熔融法等進行中間處理，並符合有害事業廢棄物認定標準 (DXN 及 TCLP)。

就 MSWI 飛灰再利用法規與計畫方案而言，《廢棄物清理法》第 39 條第 1 項：「事業廢棄物之再利用，應依中央目的事業主管機關規定辦理...」。故經濟部於 2002 年訂定《經濟部事業廢棄物再利用管理辦法》，並開始推動廠內再利用、公告再利用、許可再利用 (個案、通案)，歷經多年成果斐然，惟迄今無 MSWI 飛灰之再利用 (註：因無民有焚化廠之飛灰再利用申請)。今 (2012) 年 1 月 19 日環保署亦訂定《行政院環境保護署事業廢棄物再利用管理辦法》，作為環保署為中央目的事業主管機關所轄事業產生廢棄物之再利用管理辦法，其內容大致與經濟部再利用管理辦法相近。在環保署事業廢棄物再利用管理辦法未訂定前，因公有焚化廠主管機關為地方縣 (市) 環保局、



環保署為中央目的事業主管機關，且因 MSWI 飛灰為有害之廢棄物，故少數公有焚化廠之 MSWI 飛灰再利用之試驗計畫及個案再利用，亦已經由各縣（市）環保局向環保署提出申請。例如 2007 年 8 月台北市環保局向環保署提出木柵廠（440 公噸）、北投廠（30 公噸）、內湖廠（30 公噸）MSWI 飛灰水洗穩定後作為亞泥新竹廠水泥原料（摻配比 0.3%）之再利用示範驗證計畫（註：該計畫於 2008 年 1 月獲環保署同意並開始我國首次 MSWI 飛灰再利用，後因北投廠、內湖廠水洗灰氯離子含量無法 $< 1\%$ ，故僅木柵廠進行後續之個案再利用，目前木柵廠已達全部水洗灰再利用 6,400–6,900 公噸/年之規模）。

另在政府推動 MSWI 飛灰再利用計畫方面，行政院經建會於 2009 年 12 月通過環保署所提之「垃圾焚化灰渣再利用推動計畫」，計畫期程為 2010–2012 年，總經費為 22.585 億元⁽¹⁴⁾。其後環保署於 2010 年 6 月發布「垃圾焚化灰渣再利用推動計畫作業要點」與「垃圾焚化灰渣再利用推動計畫獎補助款執行要點」，以推動 MSWI 灰渣再利用。惟迄今該計畫僅有底渣再利用之申請與獎補助，並無飛灰再利用之申請。究其因，應係底渣再利用技術已成熟且自 2002 年起已執行多年；然而國內 MSWI 飛灰再利用除木柵廠外，卻仍面臨技術困難面，且該獎補助執行要點第 7 點：「由主辦機關依據政府採購法，辦理委託飛灰（含反應灰）再利用廠進行飛灰（含反應灰）再利用之實廠示範驗證，當年度垃圾焚化飛灰（含反應灰）之再利用率達該縣市垃圾焚化飛灰（含反應灰）產生量之 20%（含）以上者，由本署補助主辦機關飛灰（含反應灰）再利用之獎勵示範驗證費用，並以合約單價為準，但每公噸獎勵金額 6,000 元為上限。」惟就上述法規及推動計畫之實際面而言，實有難以執行之處，概述如下：

- (1)除國際上已成熟且商轉之 MSWI 飛灰再利用技術外，其餘技術均有待試驗計畫 Pilot plant 驗證之，且初步評估可發展至 Pilot plant 技術實十分有限。
- (2)試驗計畫除技術外，亦需有資金/設備/人員及相關之配合與許可（包括行政、設置場所、空污、水污、廢棄物等），始可能提出試驗計畫，此部分若無法備齊，實難以提出申請。
- (3)飛灰再利用率須 \geq 焚化廠飛灰量 20%始有補助。國內 24 座焚化廠處理量 ≥ 900 公噸/日即有 20 座，以 900 公噸/日估算飛灰產生量（約焚

化處理量 3%) 且再利用率 20%，Pilot plant 處理量須 ≥ 5.4 公噸/日，若每日操作 8 小時（Pilot plant 非實廠，難為全連續式系統），每小時處理量須 ≥ 675 公斤/小時，故 Pilot plant 設置費用即逾千萬元，此對主辦機關（縣市政府，主要為環保局）或與主辦機關合作之民間企業而言，都係大筆資金，困難度高。

- (4) 飛灰再由於目前我國尚無 MSWI 飛灰再利用管理辦法（方式）及明確之飛灰再利用政策，故在諸多不確定性因素下，影響有意投入飛灰再利用之地方主管機關及民間業者，尤其民間業者擔心：i) 目前飛灰固化雖係由焚化廠操作業者負責，然而固化成本僅約 2,000–3,000 元/公噸，固化後最終處置則均由政府負責（BOO/BOT 焚化廠亦不例外），故飛灰再利用之誘因明顯不足。ii) 飛灰均係各縣市政府環保局主管，若無主管機關同意或委託，即使民間業者設置 Pilot plant 或實廠，亦無法取得飛灰進行處理/再利用。iii) 預期環保署未來將仿照底渣再利用，將經前處理飛灰依其性質分類，並限定再利用產品項目與用途，故在 MSWI 飛灰再利用管理辦法（方式）尚未訂定前，民間業者多採觀望態度。

五、MSWI 飛灰處理/再利用展望

（一）MSWI 飛灰之特殊性及處理/再利用之考量

MSWI 飛灰具有甚多特殊性，包括數量龐大、粒徑小、高鹼性、高氯含量、含多種類及多型態之重金屬、含少量有機物（微量 DXN、PAHs 等及噴入之 PAC）、部分物質易溶於水（主要為鹼金屬/鹼土金屬氧化物/氯化物）、具高電解質等特性。另就 MSWI 飛灰在 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 三相圖之位置而言，約介於黏土與水泥間⁽³⁾。故瞭解上述特性後，MSWI 飛灰處理/再利用宜考量如下：(1) 再利用產品亦應朝數量大、性質接近骨材/礦物之方向發展。(2) 為擔心飛灰有害物質再溶出（通過 TCLP、DXN 檢測，僅係法規認定之無害，並不代表長期不再溶出），採用常溫或高溫處理/再利用之考量重點：i) 常溫處理/再利用：有效包覆或穩定係防止再溶出之重要機制，故在包覆/穩定前應盡可能將影響再利用產品之物質移出；ii) 高溫處理/再利用：因高溫成本高，故在應用前宜就成本及成效考量「為達飛灰無害而使用高溫」（即前高溫）或「產製高溫製程之再利用產品」（即後高溫）？唯有合併處理及再利用之成本，才能真正顯示完整之成本。(3) MSWI 飛灰氯離子含量著實影響再利用產品及其用途，為提升飛



灰再利用之可行性及市場競爭力，應盡速謀求降低飛灰氯含量之道。(4) 依我國底渣再利用前必須符合無害規範之法規精神，未來亦應不容許逕將 MSWI 飛灰直接處理成再利用產品，或將 MSWI 飛灰加入大量非有害物質進行處理/再利用。(5) 除非我國法規愈趨嚴格，否則成本過高之處理/再利用技術，難以成為實際可行技術。

(二) 我國 MSWI 飛灰處理/再利用之技術展望

展望我國 MSWI 飛灰處理/再利用之技術，可歸納二方向：(1) 自由發展：國內外 MSWI 飛灰處理/再利用技術仍在不斷研究及進步中，故俟技術及時機成熟後，引進或引用。惟自由發展因時間未確定，故空窗期可能會面臨國內飛灰固化物掩埋場不足之危機。(2) 主動發展：由環保署及/或國科會召集國內（甚至含國外）學者專家，共同針對 MSWI 飛灰處理/再利用進行約 3-5 年大型計畫之研究（以實用技術為導向），期間並由官方、顧問業、產業界等參予討論建議，以落實該技術之可行性。該技術成果及專利權歸環保署/國科會所有，故可用於全國，甚至可以技轉國外，或申請國外專利、進行專利授權/移轉。此一作法應較前述自由發展為佳，且政府挹注此大型計畫經費至多數億元，後續實質效益應遠高於此，唯一擔心之處僅係該大型計畫是否能如期研發出實用且可行之技術。

(三) 我國 MSWI 飛灰處理/再利用之模型廠/實廠展望

展望我國 MSWI 飛灰處理/再利用之模型廠/實廠，可能有三種模式：(1) 公有設置：由政府出資設置模型廠/實廠，再委託民間代操作，如木柵水洗廠之模式。(2) 政府獎補助民間設置：政府出資獎補助民間設置模型廠/實廠，其後政府委託飛灰處理/再利用。(3) 民間設置：民間自行設置模型廠/實廠，其後政府委託飛灰處理/再利用。至於是否各焚化廠各自設置飛灰處理/再利用實廠，則視各焚化廠空間及市場機制而定；惟為節省經費、避免非法棄置及假申報之情事發生，飛灰處理廠設置於焚化廠內，完成無害化且符合檢測規定後，再運至再利用廠（不論設於焚化廠內外）較為妥適，此一作法亦可同時兼顧行政管理、實廠營運及國土保護。

(四) 我國 MSWI 飛灰處理/再利用之法規與推動計畫展望

展望我國 MSWI 飛灰處理/再利用之法規與推動計畫，建議如下：(1) 宜盡速修正「從產源機構之公/私屬性認定」MSWI 飛灰，建議回歸廢清法之精神，認定 MSWI 飛灰為有害事業廢棄物，除可正本清源，亦可避免衍生諸多執行之困擾與執法之差異。(2) 為利於推動 MSWI 飛灰處理/

再利用，宜修正「垃圾焚化灰渣再利用推動計畫」，將 MSWI 飛灰處理/再利用移出，成為獨立之計畫，並將模型廠/實廠之處理與再利用納入該計畫，由獎補助之經濟誘因，加速及提升 MSWI 飛灰再利用之可行性。(3) 應盡速訂定 MSWI 飛灰再利用管理辦法（方式），作為處理/再利用之依據，以利推動及落實 MSWI 飛灰再利用。(4) 為引導 MSWI 飛灰朝再利用發展，環保署宜逐步取消補助飛灰固化物掩埋經費，並增加飛灰再利用獎補助經費，由一消一長引導飛灰邁向再利用。(5) 除上述有利之行政作為外，為防範 MSWI 飛灰處理/再利用期間發生不法行為（如非法棄置/排放、假申報、再利用產品不正常流向等），各級主管機關應加強查緝作為，以竟全功。

六、結論與建議

1. MSWI 飛灰具數量龐大、成分複雜、含部分有害及不適再利用物質等之特殊性，故其處理/再利用須同時考量技術、成本/財務、法規/政策、產品用途/市場、環境影響、社會接受度等，因此 MSWI 飛灰仍是世界多數國家棘手之問題。雖係如此，目前國際間已有多種 MSWI 飛灰處理/再利用之實質作法，惟各國國情、法規、環境等不同，難以輕易複製。
2. 評估世界主要之 MSWI 飛灰處理/再利用實質作法，在兼顧成本、產品用途/品質/數量、國情下，似以水洗後供水泥高溫煅燒之再利用方式，較具可行性。惟就我國除木柵廠外，其餘 23 座焚化廠飛灰均因高氯離子含量，且國內可資配合水洗灰煅燒之水泥廠十分有限，故無法全循此一模式。
3. 粗估台灣目前可供飛灰固化物掩埋之餘裕空間已不及 10 年，故政府宜針對 MSWI 飛灰處理/再利用之政策/法規面、實用技術面積極規劃因應之。(1) 在政策/法規方面，建議：認定 MSWI 飛灰為有害事業廢棄物、逐步取消補助飛灰固化物掩埋經費、單獨訂定《垃圾焚化飛灰再利用推動計畫》、新訂《垃圾焚化飛灰再利用管理方式》等。(2) 在實用技術方面，建議：由環保署/國科會召集國內外學者專家籌組團隊，在 3-5 年大型計畫下研發出可行實用技術，應用於國內，並可技轉國外及作專利授權/移轉等。(3) 在模型廠/實廠設置方面，建議：模型廠可採公有設置、政府獎補助民間設置或民間設置；至於實廠，則宜將處理廠設置於焚化廠內，飛灰無害化後再運至焚化廠內或廠外之再利用廠。
4. 零廢棄、資源回收再利用、綠色科技等均已蔚為 21 世紀之主流，台灣



在環保、科技、經濟及人才方面，均已具備可自行研發 MSWI 飛灰處理/再利用之技術實力，故應透過團結合作將危機化為轉機，除可解決我國 MSWI 飛灰問題，並可帶給世界新穎可行技術，興利除患、淑世濟民、意義非凡！

參考資料

1. 環保署，「環保統計資料庫」，2012。
2. 環保署，「灰渣掩埋與再利用資訊」，2012。
3. Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hartlén, J., Hjelm, O., Kosson, D.S., Sawell, S.E., van der Sloot, H.A., and Vehlow, J., *Municipal Solid Waste Incinerator Residues (Studies in Environmental Science 67)*, Elsevier Science, 1997.
4. Lam, H.K., Ip, W.M., Barford, P., and McKay, G., Use of incineration MSW ash: a review, *Sustainability*, Vol. 2, No. 7, pp. 1943–1968, 2010.
5. Quina, M.J., Bordado, J.C., and Quinta-Ferreira, R.M., Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: an overview, *Waste Management*, Vol. 28, No. 11, pp. 2097–2121, 2008.
6. Samaras, P., Karagiannidis, A., Kalogirou, E., Themelis, N., Kontrogianni, St., and Perkoulidis, G., A Systemic approach on characteristics and treatment processes for hazardous wastes: the case of fly-ash from waste-to-energy facilities for municipal solid wastes, *The 18th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei*, Dubna, Russia, May 26–29, 2010.
7. 新竹市垃圾資源回收廠，「焚化廠垃圾處理流程圖」，2012。
8. 木柵垃圾焚化廠，「垃圾處理流程圖」，2012。
9. Vavva, C., Voutsas, E., Samaras, P., Tassios, D., Environmental management of APC residues produced from the incineration of municipal waste with energy recovery, *CEMEPE 09 & SECOTOX Conference*, Mykonos, Greece, June 21–26, 2009.
10. 張子敬，「赴新加坡參訪填海造島設施」出國報告，2011。
11. Scharff, H., Bottom ash and fly ash disposal, *Workshop Implementation of the Landfill Directive*, Tallinn, Estonia, May 15, 2009.
12. 經濟部智慧財產局，「中華民國專利資訊檢索系統」，2012。
13. 張子敬，「赴日出席日本廢棄物填海造島研商會議及參訪大阪灣廢棄物填海造島設施」出國報告，2011。
14. 經建會，「經建會第 1378 次委員會議討論通過垃圾焚化灰渣再利用推動計畫」，2009。