

白煙防治系統的規劃與設計

黃進益*

摘要

煙囗排放廢氣所產生的白煙現象，逐漸吸引人們的注意，而成爲環保課題的一環。本文主要介紹白煙的生成原理和防治措施，文中並以大型都市垃圾焚化廠的規劃爲例，說明所設計的白煙防治系統，如何經由理論分析而達到抑制白煙生成的效果。

【關鍵字】

- ①白煙(white plume) ②垃圾焚化廠(refuse incineration plant)
- ③廢氣(flu gas) ④再加熱器(reheater)

一、前言

人口的成長及生活水準的提高，促使都市垃圾量的急劇增加，對於人口稠密，掩埋地難求的都市而言，垃圾焚化法漸被重視和接受，都市垃圾經焚化後具有減量和安定的效果。相對於衛生掩埋法，焚化法的優點爲減量率高（灰燼約爲原體積的10%），處理場佔地面積小，可回收熱能供蒸汽發電，分離篩選的金屬亦可回收，二次公害如廢水、廢氣集中爲點，易控制，安定的灰燼量少且不發臭，處理較易。其缺點在於設備昂貴，操作維護費高，以及灰分和殘渣需最終處置¹。

垃圾經焚化後所產生的廢氣(flu gas)於排放至大氣前需經酸氣和飛灰的清除處理，其處理流程如圖1所顯示，焚化爐內爲了促進燃燒效率和有效分解有毒物質，爐內溫度在現今大型機械床式焚化爐(mechanic-grate Incinerator)通常維持在700~1,100°C，產生的高溫廢氣在爐體內停留約1~2秒，以控制NOx的生成濃度，然後經由鍋爐(boiler)的廢熱回收系統，利用高溫廢氣所夾帶的高熱量，生產高壓蒸汽以供發電，電力除供廠內自給自足外，亦可銷售給台電，銷售所得可作爲垃圾焚化廠的營運收入。經廢熱回收之後，廢氣溫度降低到200~280°C再進入廢氣清理系統(flu gas cleaning system)，做進一步的酸氣和灰分的清除處理。

*中鼎工程股份有限公司工程師

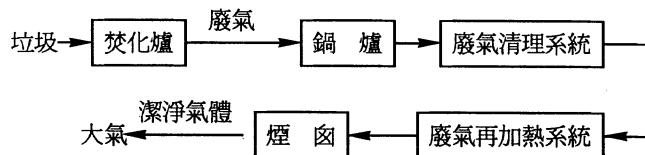


圖 1 垃圾焚化廠廢氣處理流程示意圖

焚化爐內生成的廢氣，其水汽含量依垃圾燃燒熱值的不同而變異，燃燒熱值越高，表示垃圾的水含量低，因而生成的廢氣，其水汽含量也就越低。依現今大型都市垃圾焚化廠的規劃概況，熱值介於5,000~12,000kJ/kg的垃圾，燃燒後其廢氣的水汽含量於進入廢氣清理系統前是介於9~16wt% (14~25vol%)之間。在廢氣清理系統內，反應試劑乳液（如消石灰乳液）和特殊試劑（如矽藻土、活性碳）被打入除酸設備，經由中和反應以去除廢氣內所含諸如HCl、HF和SO_x的有害酸性氣體，在除酸反應過程中，乳液內的水分同時進行冷卻作用，廢氣排出除酸設備後，溫度通常被控制在130~160°C之間。除酸氣後的廢氣，進入粉塵收集器，以去除其所含的灰分、試劑，和反應產物等的固體殘渣。此時，由於除酸氣設備內的水分因吸熱而蒸發，廢氣於流經廢氣清理系統後，水汽含量增高至12~20wt% (20~30 vol%)，潔淨的廢氣因為具有高水汽含量和低排放溫度，若於此時排放至大氣中，容易因大氣的冷凝作用而產生白煙 (white plume)。此白煙現象，仍因水汽冷凝後形成可見的煙霧，若廢氣內的酸氣濃度控制在安全範圍，縱使生成白煙，亦不易導致酸雨或酸霧的問題，因而歐美地區現今設置的垃圾焚化廠，並無白煙防治系統 (white plume prevention system)的安裝。台灣因為人稠地狹，環境品質日形惡化，使得人們的環保意識日益高漲，為了避免日後不必要的紛爭和抗議，地方政府於新設置的垃圾焚化廠均規劃有廢氣再加熱系統 (flue gas reheating system)，以防止日後運轉時，排放廢氣有任何白煙的生成。

廢氣再加熱系統的加熱方式可為直接式和間接式，直接式加熱是將廢氣導入加熱熱源，而直接進行熱交換程序，由於水汽含量未因溫度升高而降低，廢氣溫度的提昇幅度必須高到足以避免水汽的冷凝，其排放溫度需加熱到遠大於200°C。至於間接式加熱則先預熱空氣，再將熱空氣混合廢氣，以達到升溫目的，由於有周遭空氣的引入和稀釋作用，廢氣內的水汽含量亦同時降低，此項作用有助於降低廢氣的加熱容量和減少能源的消耗。廢氣於間接式加熱系統，通常加熱至170~200°C，即足以防止白煙的生成，其排放溫度的設計則需參照焚化廠所在地的大氣條件而定，由於間接式加熱系統能同時發揮升高廢氣溫度和降低水汽含量的功能，本文有關白煙防治系統的設計，亦集中於此類系統的介紹，然而在討論設計時所應考量的因素之前，有必要事先了解白煙生成的原理為何，以便提供適當的規劃和設計基準。

二、白煙生成原理

由煙囗排放的潔淨廢氣，其是否產生白煙主要決定於大氣和廢氣的狀態，其中直接有關連的因素則為大氣溫度和濕度，以及廢氣由煙囗口排放時的溫度和水汽含量。排放出來的廢氣經由大氣的混合稀釋作用，而逐漸轉化成大氣的狀態，其過程有如氣體的擴散，如同圖 2 所顯示的，位於 A 點或 B 點狀態的廢氣，於排放至大氣後，逐漸沿著直線行徑而到達 D 點的大氣狀態。在此一擴散過程中，廢氣溫度和其水汽含量，經由大氣的冷卻和稀釋作用，而逐漸降低，若廢氣的擴散行徑跨越飽和濕度曲線時（如 A 點至 D 點），廢氣內所含水汽於大氣中開始冷凝成霧滴而生成白煙現象，此現象會持續到廢氣狀態進入未飽和濕度區域才中止。反之，由 B 點擴散至 D 點的行徑正好相切於飽和濕度曲線而不致有任何白煙的生成。此一切線，對於 D 點的大氣狀態而言，可定義為白煙生成臨界線（white plume generation limit line），若廢氣的排放狀態位於此臨界線之下的區域，則白煙不致形成，反之，若位於此臨界線之上，則勢必產生白煙，此時有必要藉降低廢氣濕度或昇高其溫度，使廢氣的排放前狀態能落於白煙生成臨界線之下，如此可避免排放後的白煙出現。

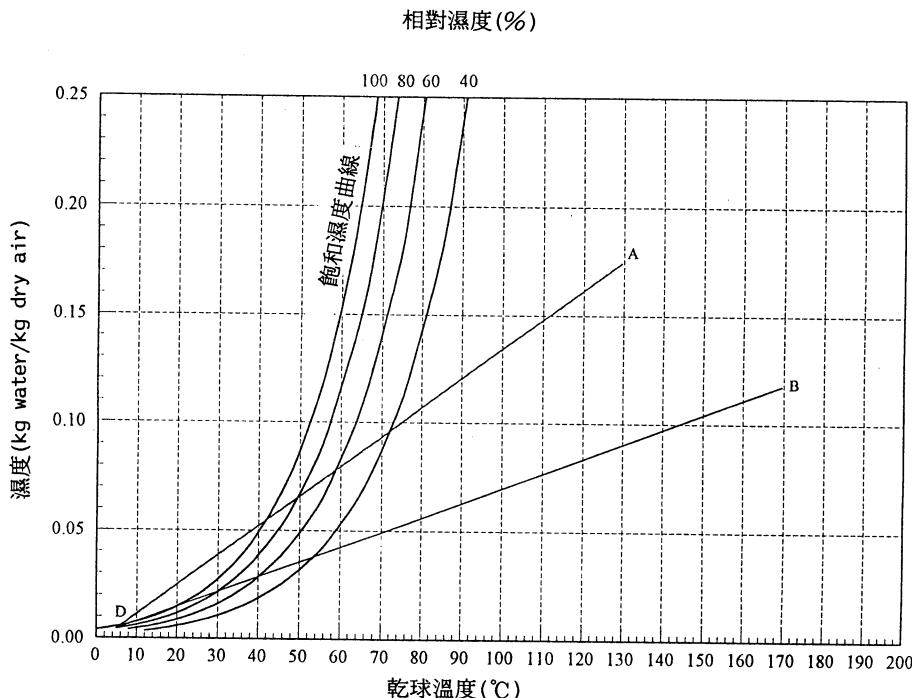


圖 2 廢氣排放於大氣中的擴散行徑示意

白煙防治系統的規劃原理，即是參考垃圾焚化廠所在地的大氣條件，以及廢氣經過處理系統後的狀況，設計一套廢氣再加熱系統，使其具有足夠的加熱能力，而確保廢氣狀態於排放時能落於白煙生成臨界線之下。因而面對白煙防治系統的規劃和設計問題，我們必須先對於其所需的再加熱系統做進一步的了解。

三、廢氣再加熱系統

垃圾焚化廠內的廢氣再加熱系統，一般採用的再加熱器有兩類：蒸汽式熱交換器 (steam heat exchanger) 和燃油燃燒器 (oil burner)，前者利用廠內高溫高壓蒸汽的潛熱為熱源，而後者則利用柴油的燃燒熱。依照熱源和廢氣間的熱交換方式，廢氣再加熱可區分為直接式和間接式，兩者的差別主要在於熱能攜帶媒介的存在與否，顧名思義，直接式加熱並不藉助於此類媒介。廢氣於熱交換器內直接和蒸汽進行熱交換，而達到再加熱目的，或與燃燒器的燃燒氣體直接混合，直接式加熱方式僅提高廢氣溫度，而較少改變廢氣的體積量，而於間接式加熱系統，空氣經常被利用為熱能傳遞介質，空氣取代廢氣首先和上述的熱源進行熱交換，之後再和廢氣直接混合，而一起排放至大氣中。由於熱空氣的加入，廢氣不但被加熱，而且氣體量也相對增加，此舉有助於降低廢氣內的水汽含量，而降低白煙形成的可能性。相對於相同的白煙生成臨界線而言，低濕度的廢氣若欲達到防止白煙生成的目的，其所需的排放溫度相較於高濕度的廢氣低很多。

比較白煙防治系統的兩個加熱方式，我們可發現間接式加熱系統具有以下的優點：

- (1) 較低的系統加熱容量，即可達到相似的白煙防治效果。
- (2) 較低的廢氣排放溫度，系統建造和維修較易。
- (3) 廢氣避免和高溫熱源直接接觸，減少廢氣組成的改變，可確保廢氣清理系統的功能。

其缺點則在於需另外安裝空氣吹送系統，此舉自然增加白煙防治系統的起始建造成本，然而此項成本通常可於運轉時，由節省的燃料或蒸汽費用而取得平衡。因而於現今垃圾焚化廠的廢氣再加熱系統的規劃，間接式加熱方式是較為普遍。

間接式的廢氣再加熱系統，主要由五個單元所構成：

- 熱空氣產生器 (hot air generator)
- 燃油燃燒器 (oil burner)
- 空氣鼓風機 (air blower)
- 熱空氣導管 (hot air duct)
- 混合室 (mixing chamber)

圖 3 顯示前三項單元於廢氣再加熱系統內的簡單配置²。假如空氣加熱媒介是熱交換器 (heat exchanger) 而非燃油燃燒器，則燃燒器的附屬配備：噴油泵和送風機，亦需由蒸汽泵 (steam pump) 取代，以便傳送熱交換用的高壓高溫蒸汽。

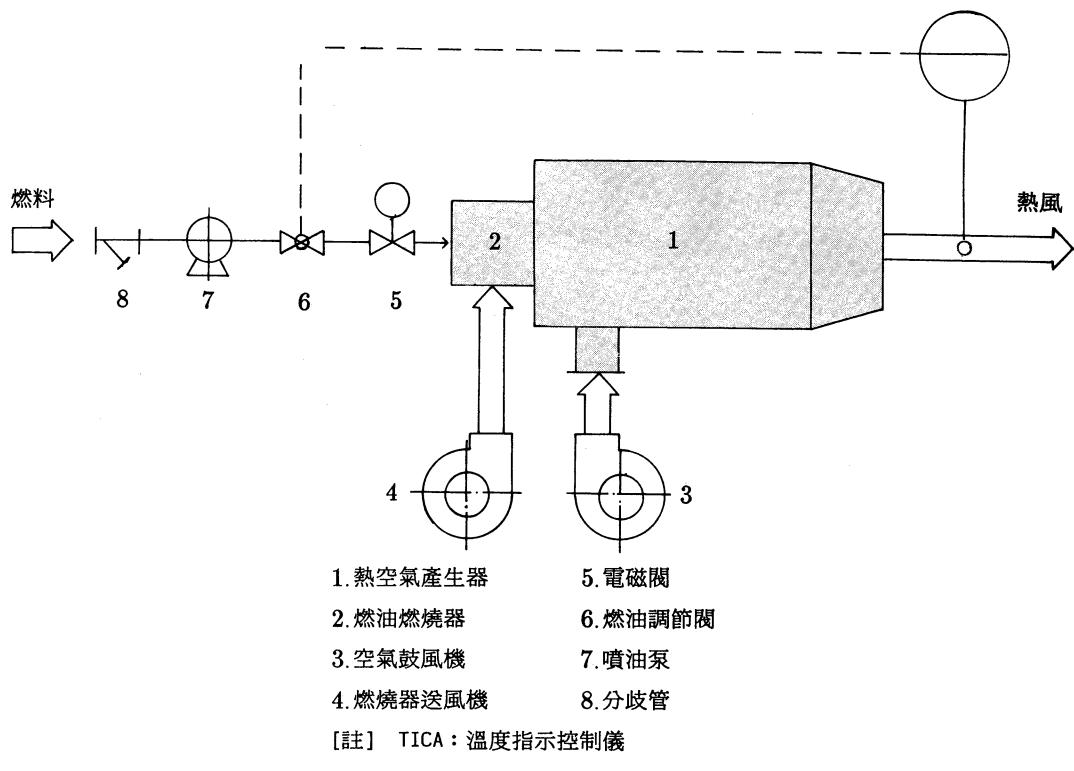


圖 3 廢氣再加熱系統的配置簡圖

熱空氣產生器用於產生熱空氣，其商業化的實體外觀如圖 4 所顯示。周遭空氣經由空氣鼓風機而送入熱空氣產生器內，再藉助燃油的燃燒熱或高壓蒸汽的潛熱，而形成熱空氣，之後再由熱空氣導管進入混合室，於此室內，熱空氣直接和潔淨的廢氣混合，之後再經由煙囪排放至大氣中。

四、系統設計參數

前節中，廢氣再加熱系統的五個主要單元，就實際設備篩選和操作性能要求兩方面而言，均有其設計參數，以下就各單元的相關參數分別列述。

1. 热空氣產生器

由於需提供足夠的熱空氣，以達到廢氣的加熱和稀釋作用，此設備的設計需考慮到：

- (1) 空氣入口 / 出口溫度。
- (2) 空氣的流動壓損。
- (3) 最大熱容量。

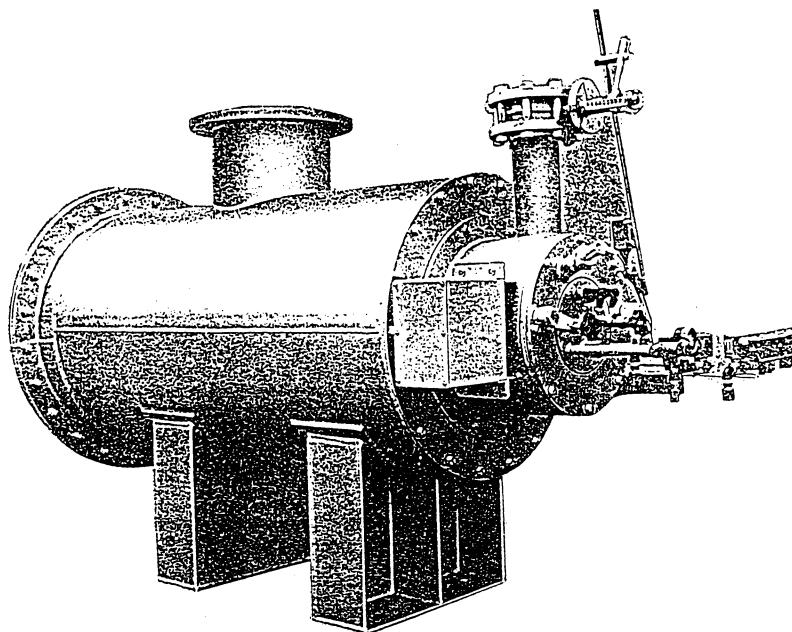


圖 4 熱空氣產生器實體外觀

(4)熱空氣量的控制範圍。

前兩者是有關於材質的選用，最大熱容量是指可用於加熱廢氣的最大熱源，此項參數會影響到燃油量或蒸汽量的設計，至於熱空氣量的控制範圍，通常介於 40~115%，而使本系統可隨廢氣量的變動而調整供氣量，並節省熱空氣的消耗。

2. 燃油燃燒器 / 热交换器

由於此設備供應加熱用熱源，因而需考慮到：

- (1)材質的耐溫性。
- (2)燃油 / 蒸汽進料量。
- (3)燃油熱值 / 蒸汽潛熱。
- (4)燃油 / 蒸汽量的控制範圍（通常介於 40~115% 之間）。

3. 空氣鼓風機

此設備主要用於供應空氣，因而需考慮到：

- (1)鼓風機最大容量。
- (2)空氣量控制範圍（通常介於 40~115% 之間）。
- (3)控制方式（可為入口擋板或變速馬達式控制）。
- (4)鼓風機效率（最低效率介於 60~75% 之間）。
- (5)馬達額定功率。

4. 热空氣導管

此設施主要用於傳送熱空氣，因而其考量有：

- (1) 導管的材質和絕緣特性。
- (2) 热空氣的溫度和壓力。
- (3) 热空氣速度（最大速度通常不超過 10m/sec）。

5. 混合室

此設施為熱空氣和廢氣的混合區域，因而需考慮下列因素：

- (1) 混合室的材質和絕緣特性。
- (2) 廢氣的入口和出口溫度。
- (3) 廢氣的進氣量。
- (4) 热空氣的進氣量。
- (5) 混合室容量。

在環保署大型都市垃圾焚化廠的規劃設計中，上述部分參數會被用於決定廢氣再加熱系統的設備大小³。下節中，我們將提供一實際設計案例，以說明如何由設計條件預估白煙防治之效果。

五、案例說明

首先讓我們考慮一座每天處理 450噸的垃圾焚化廠，其規劃設計的燃燒垃圾具有 9,650kJ/kg 的低熱值 (LHV) 在此條件下垃圾經焚化爐燃燒後，產生的廢氣量約 114,690m³/hr，此高溫廢氣經鍋爐廢熱回收系統後；其溫度最高不超過 260°C，此時，其水汽含量約為 10.66wt%，經過半乾式廢氣清理系統的處理後，廢氣溫度被降到 130°C，但由於冷卻水的加入，使其水汽含量增至 14.91wt%，現若考慮煙囪排放口的最差大氣狀態具有 5°C 的溫度和 80% 的相對濕度（圖 5 的 D 點），則上述廢氣狀態（圖 5 的 A 點），若直接排放至大氣，勢必經過過飽和區域而生成白煙（見圖 2 說明），因此需預先規劃一個廢氣再加熱系統以預防白煙形成。

於決定再加熱系統的容量前，須先分析廢氣需被加熱至何種狀況，才能避免白煙生成，因此，必須先依照第三節的說明，由位於 D 點的大氣狀態，相切於飽和濕度曲線 (saturation humidity curve)，而決定白煙生成臨界線，此一臨界線可由理論分析而獲得，藉助於 Perry 的飽和濕度數據⁴，我們可利用統計學的線性迴歸技巧，將飽和濕度與乾球溫度 (dry-bulb temperature) 表示成下列的二次方程式：

$$H_s = 3.46 \times 10^{-3} + 3.34 \times 10^{-4} T + 1.23 \times 10^{-5} T^2$$

T : -18~25°C

式中，H_s 為飽和溼度（水重／乾空氣重），而 T 為乾球溫度。

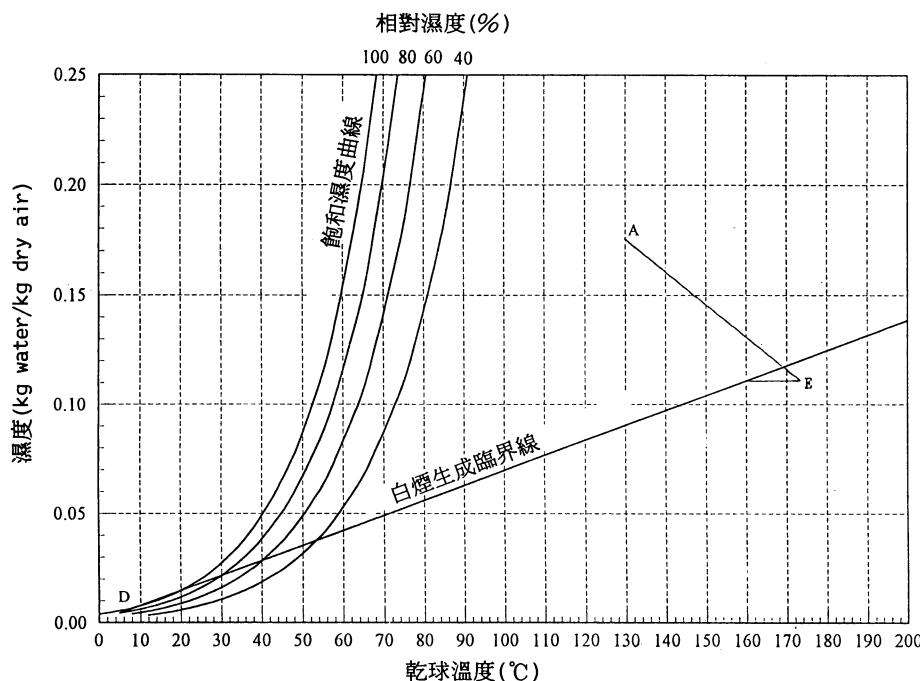


圖 5 白煙防治系統的設計說明

現在考慮 5°C ，相對濕度 80% 的大氣狀態，其 (T, H) 值為 $(5, 0.000433)$ ，則經過此點，而相切於上述飽和濕度曲線的白煙生成臨界線，藉由代數運算，可表示成下列的直線式：

$$H = 8.75 \times 10^{-4} + 6.90 \times 10^{-4} T$$

H：濕度

由於廢氣再加熱系統所生成的熱空氣具有一定的氣體組成和水汽含量，兩者性質主要受熱空氣的出口溫度和燃油成份影響，依照氣體混合理論，兩氣體混合後，其最終氣體狀態是決定於兩氣體的起始狀態，若以兩氣體的起始狀態為端點，則混合氣體的最終組成勢必落在此兩端點所形成的聯結線(tie line)上。同理，廢氣和熱空氣的混合會使廢氣狀態沿著一聯結線方向移動，由於熱空氣具有高溫度低濕度的特性，於濕度—乾球溫度之座標軸上，廢氣狀態於熱空氣的稀釋和加熱後，會因溼度變低、溫度變高而向右下方移動，其移動趨向如同圖 5 的 AE 線。

以燃油燃燒器的設計為例，我們假定正常操作下，廢氣溫度於煙囪口不得低於 160°C ，估計煙囪內的熱損失導致約 10°C 的降溫，因而設計上，廢氣於混合室出來後溫度不得低於 170°C ，若廢氣於半乾式廢氣清潔系統處理後，具有溫度 130°C 和水汽含量 $14.91\text{wt}\%$ ，於加熱後，廢氣的濕度不得高於白煙生成臨界線在 160°C 的濕度 (0.1113) ，如此，縱使排放後廢氣溫度低至 160°C ，亦不會生成白煙。

現若控制熱空氣的出口溫度（決定於燃油量和空氣量的比例）為 265°C ，則前述條件的廢氣加熱至 170°C ，約需消耗低熱值 $10,300\text{kJ/kg}$ 的燃油，每小時 440kg 。考慮燃燒垃圾量的變動和確保白煙的抑制，15%的安全係數被加入系統容量的篩選，依此，則廢氣再加熱系統每小時可燃油 505kg ，並具有一最大的熱容量 $5.2 \times 10^6 \text{ kcal/hr}$ 和最大熱空氣量 $87,580\text{kg/hr}$ ，若以此系統全載運轉，則廢氣於正常狀況下可加熱至 176°C ，水汽含量相對地降至 9.70wt\% （見圖6的聯結線4），同時煙囪內所容許的溫降亦加大至 18°C ，此舉使得廢氣排放更加安全。

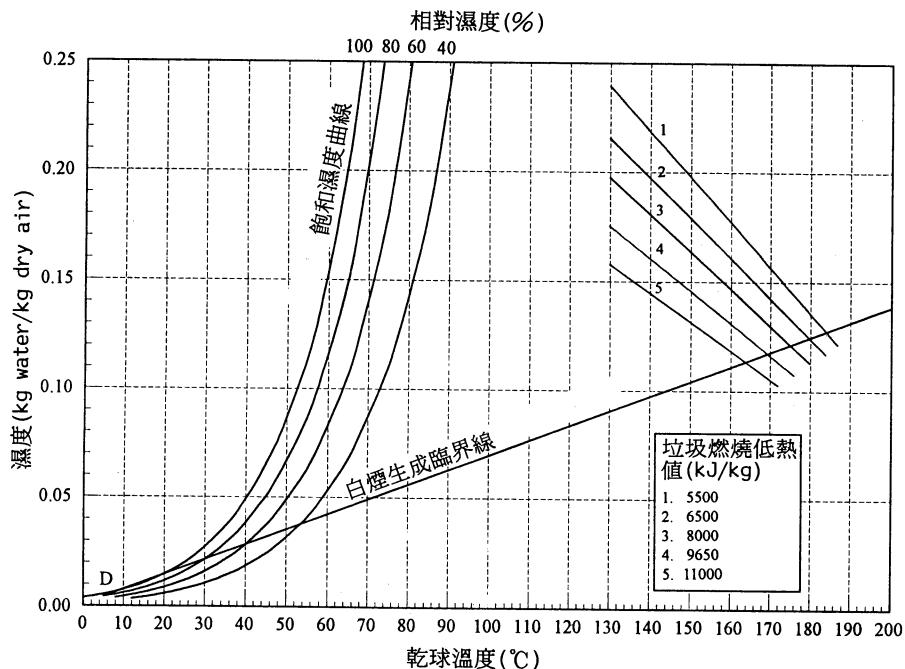


圖6 白煙防治系統於不同垃圾熱值條件下的應用

前述的廢氣再加熱系統的設計是以垃圾含低熱值 $9,650\text{kJ/kg}$ 為準，並加上安全係數15%於系統熱容量的設計，然而於真正的焚化廠運作期間，垃圾的熱值會因水含量和組成的變動而變動，因而有必要事先檢驗一個規劃的再加熱系統，是否能夠處理不同熱值垃圾燃燒所產生的廢氣。

垃圾熱值的不同，主要是因碳、氫成份和水含量的不同，因而經燃燒後，產生不同水汽含量的廢氣，由於熱值越低，表示垃圾的水含量越高，因而其廢氣的水汽含量也越高，假若不同熱值的垃圾其燃燒量和處理流程與規劃的設計點相同，則廢氣加熱前和加熱後的濕度變化，以及煙囪入口的溫度有如表1所示。

表 1 再加熱前、後的廢氣濕度

垃圾低熱值 (kJ/kg)	濕 度 (水 重／乾 廉 氣 重)			煙囪入口溫度 (°C)
	鍋爐出口	混合室入口	煙囪入口	
5500	0.1790	0.2395	0.1212	187
6500	0.1569	0.2157	0.1167	184
8000	0.1401	0.1975	0.1128	180
9650	0.1193	0.1752	0.1074	176
11000	0.1033	0.1578	0.1027	172

表 1 顯示，垃圾熱值越高，其廢氣經再加熱系統全載的稀釋和加熱後，濕度和溫度均越低，濕度低是因其加熱前濕度低，而溫度低則因熱值越高，燃燒相同垃圾量所產生的廢氣量越高，混合定量的熱空氣後，其溫度上升效果就相對減弱，最後，讓我們檢視經加熱後的廢氣狀態能否避免白煙的形成，圖 6 顯示縱使垃圾熱值不同，加熱後的廢氣狀態均位於白煙生成臨界線之下，並容許於煙囪內有 10°C 以上的溫降，也不致形成白煙。因此結果可推論，一個審慎規劃和設計的廢氣再加熱系統，是足以處理不同性質的垃圾燃燒後所形成的各類廢氣。

六、結 語

本文中，我們討論白煙的生成原理，以及防治白煙生成的廢氣再加熱系統，同時對於直接式和間接式的加熱方式提供一個比較說明。

垃圾焚化廠所採用的間接式加熱系統包含五個主要單元，熱空氣產生器、燃油燃燒器、空氣鼓風機、熱空氣導管和混合室。對於各單元相關的設計參數，我們亦簡單的列項說明，實際的應用則需以系統的功能考量為依據。

文末，我們以每天處理 450 噸的垃圾焚化廠的規劃為例說明一個以垃圾低熱值 $9,650 \text{ kJ/kg}$ 為基準，而設計的廢氣再加熱系統，加上 15% 的安全考量後，其每小時 5.2×10^6 仟卡的總熱容量，由分析結果證明該系統，可用以處理低溫熱值介於 $5,500 \sim 11,000 \text{ kJ/kg}$ 的垃圾所產生的廢氣，而達到抑制白煙生成的效果。

七、參考資料

- 黃正義，一般廢棄物及一般事業廢棄物處理，環境工程技術研習會講義，p33~74，79年 6月。

2. Sunray, Hot Air Generator Catalog, Sunray Reinetsu Co., Ltd., Hirakata City, Osaka, Japan.
3. 行政院環境保護署，彰化縣溪洲垃圾資源回收廠統包工程招標文件，第二冊技術條款，PART C. 82年7月。
4. Perry, R.H., Green, D.W., and Maloney, J.O., Perry's Chemical Engineers' Handbook, Sec. 12, 6th edition, McGraw Hill, New York, 1984.

