

圓錐量熱儀之發展與應用

陳建忠¹、蔡銘儒²

吳展維³、蕭宜峯⁴、蒲仁勇⁵、林大惠⁶

¹ 內政部建築研究所安全防災組 組長

² 內政部建築研究所安全防災組 研究員

³ 國立成功大學機械系 博士班研究生

⁴ 國立成功大學機械系 碩士班研究生

⁵ 國立成功大學機械系 研究員

⁶ 國立成功大學機械系 教授

中華民國力學學會，105 期會訊，專題報導，民國 92 年 12 月

一、前言

建築防火性能及建築材料耐火特性相關研究之實驗目的，在於了解火災發生的原因及發展經過，並找尋出最佳滅火方式。同時依據相關之實驗結果，更可以研訂基準規範與消防法規以達到預防的目標。一般來說一個典型火災之發展情形可概分為三個時期：火焰傳播期、閃燃期與完全發展期。火災發生時之溫度隨時間的變化情形如圖 1 所示。當火場溫度及熱釋放率達到一定程度時，即會造成閃燃 (flashover)，此時火焰會快速傳播，溫度瞬間提高以致於無法控制。因此最佳的逃生與滅火時機是在閃燃發生之前。所以針對如何在初期階段滅火或降低環境溫度之研究是相當重要的。

相關文獻中指出[Babrauskas, 1992]，在判定建築材料與室內陳設物品之耐燃等級的研究中，熱釋放率是重要的指標，主要可以從兩個觀點加以解釋之。(1) 可燃物燃燒後的質量損失率直接反應於熱釋放率增加上，兩者間的關係若以完全燃燒的觀點來看係維持一當量比。(2) 熱釋放率高的材料，其熱釋放直接造成物質表面溫度的提升，加速材料分子的熱解，材料暴露於高熱通量造成高質量損失率又加速熱量釋放。以上兩點足以解釋熱釋放率為何是判別材料耐燃程度的重要參數。

為了評估燃燒後廢氣之組成並完善應用其間關連，有必要建立多種材料的熱釋放率資料，以期正確掌握關鍵因素，並藉此增進裝置及測試方法的精確性。20 世紀初期，就有實驗室開始針對熱釋放率進行研究，Thornton [1917]發現大部分的有機液體與氣體在完全燃燒後，消耗每單位氧氣的熱釋放率趨近一個定值，顯示可以利用量測氧氣的消耗，來計算一燃燒系統所產生的淨熱釋放率。Parker [1977]則是第一個應用氧氣消耗原理，來從事建材表面燃燒特性之研究。之後 Huggett [1980]發現此方式也可適用於有機固體，且其熱量釋放趨近於常數 $E = 13.1 \text{ MJ/kg-O}_2$ 。氧氣消耗法的基本計算必須測定進入與離開燃燒區域的質量流率及氧氣質量分率。廢氣中含有的水蒸氣在進入分析儀前必須先吸收清除後才能正確量測氧氣濃度，而燃燒反應後引起的氣體膨脹效應也必須在方程式中修正。因此 Parker [1982]及 Janssens [1991]的研究中也針對了這幾項變數建立了修正方程式。

針對實際火災燃燒情況的掌握，有兩種方式去觀察評估：一為仿照實際尺寸模擬火災起始及結束狀態實際燃燒，藉由分析燃燒過程找尋恰當滅火方式；另一為在小尺度量熱計中建立材料的熱釋放率及相關資料，將相關參數連結於實際尺度模擬計算。後者相對於前者不僅在時間與成本上較有效率，亦具有較大的變化性與彈性，但對於模型建立和計算精確度的提升必須更多的研究歸納。

關於利用燃燒產物成分來計算熱釋放率的研究 [Smith, 1971]，並使用小型熱釋放率量熱儀的構想，最初是由美國俄亥俄州州立大學(OSU) Smith 教授所提出 [Smith, 1972]，並且發展許多步驟劃分燃燒產物來應用於小尺度量熱儀，其計算假設由簡單理論運用 [Smith, 1974]發展至加入相關修正的複雜方法[Smith and Satija, 1983]，基本上運用顯焓差計算。本方法利用控制體積中氣體能量平衡的概念計算熱釋放率，將控制體積設定於火焰燃燒區附近，除了實際的燃料發熱量外，另考慮熱散失（包括傳導、對流、輻射）及其他環境因素造成的影響，藉由能量平衡即可計算熱釋放率。

早期的儀器由於設計過於簡單，導致實驗結果有極大的誤差；若要提高精度卻又因量測儀器的複雜導致成本的耗損。1982 年間 NBC (National Bureau of Standard, 為現今之 NIST)研發出一套量測熱釋放率的小尺度 (bench-scale) 設備，即所謂的圓錐量熱儀 (cone calorimeter)，其計算熱釋放率是採用較準確之氧氣消耗法。圓錐量熱儀的出現克服了先前的缺失，自此成為測量材料熱釋放率的主流。以下就其作用原理、細部系統構造、研究發展歷史及實際應用作介紹。

二、圓錐量熱儀之構造與應用

圓錐量熱儀之實驗目的，是了解建材燃燒時之熱釋放率、燃燒狀況、質量損耗、濃煙生成物如有毒物、腐蝕物的變化情形，在燃燒熱釋放率計算方面採用較準確的氧氣消耗法。

2-1 圓錐量熱儀之發展

在 70 年代末期，氧氣消耗法開始被利用於計算材料燃燒熱釋放率，這在當時是一個全新的構想。氧氣消耗法擁有較高精確度且不需要複雜龐大的處理軟體，但前提是需要一個靈敏精確的氧氣濃度分析儀。因此 NBS 便著手開發實驗室級小尺寸機台，並於 1982 年建立了一套新型設備，利用氧氣消耗法計算熱釋放率，並可同時紀錄燃燒狀況、質量損耗及濃煙的變化情形。由於其加熱單元呈現圓錐狀，故被稱為圓錐量熱儀（Cone Calorimeter），最早應用於塑膠工業。

圓錐量熱儀原型機由美國 CSI 公司生產行銷，並被稱為 Cone1 前後大約售出 100 台，隨後將專利售予 Atolas 公司經改進後而開發出 Cone2（如圖 2 所示），台灣目前有數台，近年來由日本東洋精機（TOYOSEIKI）有限公司製造者稱為 Cone3。

2-2 圓錐量熱儀之細部構造

圖 3 為圓錐量熱儀構造示意圖，大體上可分為樣品燃燒室、排氣裝置、氣體分析裝置及校正系統，關於各部原理功能以下將一一說明。

2-2-1 樣品燃燒室

樣品燃燒室位於煙罩下方，其構件包括（1）圓錐輻射電熱器，如圖 4 所示：實驗上加熱目的為給予一穩定熱源以分析試體引燃情況，而加熱形式有嵌板氣體火焰、電熱式、火焰直接加熱及高溫燈泡加熱，選擇加熱器必須考慮穩定熱輻射源且對於實驗材料發熱過程特性也需要注意，相關研究指出試體燃燒產生的生成物中，soot 會導致燃燒區狀態類似灰體輻射特性 [Hagglund, 1976]，故有關於利用光子波長加熱形式（高溫燈泡）以及會受燃燒區狀態（嵌板氣體火焰、火焰直接加熱）影響的方式皆可能影響實驗的精確度。而電熱器之加熱模式具有灰體輻射特性，對試體加熱足以符合所求，故選擇電熱方式加熱。（2）輻射照度控制器：電熱器外側應以雙層不銹鋼內充耐火纖維包封，內側為加熱元件並設置控溫用熱電偶，經由輻射照度控制器控制熱通量於某一穩定值。（3）輻射熱遮蔽板：

為不燃材料，其功用為使試體於試驗開始之前免於暴露於熱通量下。(4) 電子點火器：火種為燃燒要件之一，儘管有些材料不需要外在能量即能引燃，但對於可燃材料的判定需將外在能量考慮進去。(5) 載重裝置：目的為測量試體於試驗中質量變化，需具足夠的靈敏度及量測精度。(6) 試體承盤：擺放試體用，高度可以調整，試體尺寸 50mm×50mm，於承盤底部並鋪上耐火棉。

2-2-2 排氣系統

排氣系統之細部構造如圖 5 所示，在其前端為一四角錐形煙罩，離心式抽氣風扇為排氣系統的主動力來源。煙氣流經一整流作用之孔口板及排煙管路，下游處設置一熱電偶以量測廢氣溫度。後方之限流孔口板功用為控制空氣流量，並於其兩側設置一壓差流速計用以測定空氣流速，利用測得之流速乘上排煙管路截面積後求得總體積流率，藉此換算其他氣體流量。根據研究所得經驗，整個封閉系統內抽風量可以設定於 $0.012 (m^3/s)$ 以下，而操作流量降至 $0.009 (m^3/s)$ 左右更可提高準確度。某些特定情況可降至更低。所以盡可能依情況調整排煙流量，盡量降至最低以提高儀器量測靈敏度。

2-2-3 氣體分析系統

系統中備有一幫浦，為抽取廢氣之用，當氣體由空氣取樣孔進入後，先經過一過濾器濾除廢氣中較大之顆粒，再經由冷凝器進行燃燒廢氣中水分之凝結，進入二氧化碳吸收器後再經由氧氣分析儀測量。此儀器為順磁式，故若水分濾除不淨將影響氧氣濃度檢測，而排氣管在經過空氣取樣段後，另設置一煙霧光度感測器，利用光學透光原理測量當時煙霧遮蔽率，有關其操作可參考文獻 [Geake, 1988] 中說明。

量測的訊號傳遞進入分析系統中，數據收集包括廢氣分析儀濃度分析、限流孔口板兩端壓力差、熱電偶溫度值、載重裝置及光遮蔽率輸出之即時訊號，在現今數據處理能力上，該系統應能每隔一段時間記錄一次資料，並持續一個小時以上，且能即時運算輸出計算數據。輸出物理量包括點燃時間、熱釋放率、質量損失率、燃燒時間及各項毒氣濃度值，並可同時繪於圖中即時顯示於螢幕上。

2-2-4 校正系統

每當試驗開始前，必須依照程序逐一校正系統各項儀器，確保正常運作並修正系統計算之偏差值，此步驟在試驗中頗為重要。

校正項目共計有 (1) 載重裝置校正：以質量介於 50~200g 之砝碼先後加置於載重裝置上，待其穩定後量測讀數，並校正歸零。(2) 氧氣分析儀校正：在固

定流量下，以純氮氣之氣瓶通入裝置中進行歸零動作，而後將標準氣瓶中之氣體通入分析儀內進行校正工作。(3) 電熱器校正：當實驗前或加熱器熱輻射量改變時，由圖 6 中右下角之 Schmidt-Boelter-type 熱通量計深入試體放置加熱區所在，進行熱量釋放穩定度測試並校正。(4) 熱釋放率校正：校正裝備為一甲烷燃燒器（蜂巢式噴嘴），其外型如圖 6 所示。打開排煙系統於一穩定流量下，利用穩定發熱量的甲烷火焰（ 50MJ/kg-CH_4 ）之熱釋放率來得到氧濃度分析係數，此係數為熱釋放率計算誤差修正用。近年來也有相關研究指出 [Brian, 1996]，*PMMA*（poly methyl methacrylate）黑色塑膠聚合物，由於材料的分子排列結構及其顏色所致，在燃燒試驗中，其質量耗損率與時間的關係呈現平穩關係如圖 7 所示，其火焰產生的熱通量趨近一穩定值，對於測試器材的準確度方面可以依此取得標準，同時與石膏板（幾乎不可燃）可以互相配合作為校正誤差值用。(5) 煙霧光度感測器校正：在對側偵測器放置一已知透光率之透鏡進行誤差修正。

2-3 圓錐量熱儀之應用

很多舊式用來偵測易燃性之儀器並不是以實際火災條件作為基準，而且也無法測得實際火災之定量結果。因此這些設備只能根據某些控制需求，判斷試件是否合格。而圓錐量熱儀之設計以及量測數值是以實際火災工程作為基準，如圖 8 所示，將試驗所得資料繪成圖形便於進行分析，因此它具有比較廣泛的應用。

圓錐量熱儀主要之應用如下：(1) 提供最新火災模式資料 (2) 可利用簡單方程式或修正係數提供資料來預測實際火災之行為 (3) 根據各種材料之特性加以分級 (4) 訂定相關法規。

過去美國一些製造商會以 LOI [ASTM] (Limmiting Oxygen Index) 或 UL94 [UL94] 的方法進行材料測試。UL94 是以一簡單之本生燈燃燒器來檢測材料是否合格，無法達到實際量化之測試。

而 LOI 雖然可以得到量化結果，但很多研究上指出，這些測試並無法根據真實火災行為將材料予以分級，因此必須使用圓錐量熱儀進行測試。除了針對材料分級進行實驗外，利用圓錐量熱儀之熱釋放率資料，還可以詳細預測房間內可燃之牆或天花板、家具、電纜或電線以及建築材料燃燒狀況。

三、量熱裝置之發展與應用

3-1 量熱裝置的發展

一般圓錐量熱儀只能評估小的樣品，對於較大尺寸的產品或組件，就需要使用中型量熱儀 (ICAL) 甚或大型燃燒分析裝置，兩者量測原理及形式相近，以下分別加以說明。

3-1-1 中尺度量熱裝置 (Intermediate Scale Calorimeter, ICAL)

前述圓錐量熱儀的限制是它只能評估相當小的樣品，因此有接頭的產品或厚度超過 50mm 的材料，通常無法使用圓錐量熱儀來測試。對於這些種類的產品或組件，就需要使用中型量熱裝置 (ICAL)。因此 ICAL 成為 ASTM E1623[1999] 標準的使用儀器，如圖 9 所示。此儀器包含若干氣體加熱器，配置於高約 1.33m、寬約 1.54m 的垂直輻射板。測試樣品 1m×1m，與輻射板平行放置。樣品的熱通量可以經由調整與輻射板的距離來變化，也可以控制此板的氣流來改變輻射板的溫度與樣品的熱通量，預設最大的熱通量為 60kW/m²。樣品的熱解產物是以靠近樣品的頂部與底部的熱金屬絲點燃。樣品置於測重平台(load cell)上，以測量質量損失。所有的燃燒產物會集中在收集罩中，並持續從排氣管抽出。管道中有儀器設備可以量測氧氣消耗率及煙霧遮蔽率。

Sundström 等人 [1988] 依照 ISO 9705 所規範之標準室/角落測試 (room-corner test) 如圖 10、11 所示，配合 NT FIRE 025 [1987] 定義之點火源(前十分鐘使用 100kW 固定功率，之後使用 300kW 加以點燃)，來測試物體燃燒情況。結果在經過大尺度燃燒後，加以分類為以下五種情況。A 級屬於限度內燃燒，無閃燃發生，材料以無機羊毛(mineral wool)和石膏板為主；B 級為在燃燒測試時間 20 分鐘內不會有閃燃(flash over)發生，主要以少量壁紙(light wall-paper)為主；C 級為當點火源增至 300kW 兩分鐘後，則有閃燃發生，以木頭之防火被覆材料為主；D 級為點火源增至 300kW 時，馬上發生閃燃現象，以厚壁紙(heavy wall-paper)為主；E 級為在受到初期點火源 100kW 兩分鐘後即發生閃燃，以固態木頭物品為主。文中並提到當熱釋放率 (Rate of Heat release, RHR) 達到 1000kW 時，就會引起閃燃現象。

Janssen 等人 [1996] 研究的初步結論是，圓錐量熱儀與中型量熱儀具有較高的品質，這兩個儀器的熱釋放率數據可互相印證。不過，仍需要更多的測試比較才能歸納此結論。

3-1-2 大尺度燃燒分析裝置

為瞭解燃料燃燒之熱釋放率變化過程，尤其是複雜的固態燃料組列燃燒過程，Tewarson [1977]建立一小尺度火焰燃燒產物收集器(laboratory-scale fire products collector)，其火焰尺度(fire size)，亦即最大總熱釋放率(total heat release rate)約為 10kW。研究中使用不同燃料置於空氣中燃燒，包括甲烷、乙烷、聚苯乙烯以及甲基丙烷聚合物等。由收集煙氣後端量測得到的燃燒產物溫度、流速、以及一氧化碳和二氧化碳的產生率，可以計算得到對流熱釋放率(convective heat release rate)及總熱釋放率；其特點為燃料的燃燒過程不與燃燒產物收集器相互作用，不須經過繁複的修正程序即能直接量測得到數據。由於一般災變現場的火焰尺度相當大，Heskestad [1981]進而擴大發展建立一大尺度燃燒產物收集器，其火焰尺度可至 MW 以上，其測試燃料為甲醇與木板架。現今國際已建立了多套火焰尺度可達 10MW 的大尺度燃燒產物收集器，如：英國 BRE 的 FRS 部門，美國 UL 公司，和美國 FM 公司等。

3-2 量熱裝置的應用

量熱儀的應用主要在建立消防法規，近年法規針對材料可燃性判別的測定中，已逐漸重視材料熱釋放率的量測，由其發展歷程可知圓錐量熱儀在將來法規的建立將扮演重要角色。熱釋放率的測量在近幾年研究中逐漸展露出重要性，關於其演化過程必須從過去對於評估材料的可燃性談起。而近年來在北美所進行多次的圓錐量熱儀連續測試，針對這些測試達成的結論為，圓錐量熱儀確實適用於測量低熱含量材料的熱釋放率。

3-2-1 早期法規發展

建築法規通常允許無限使用在失火時不會產生熱量的材料，這些材料稱為不易燃物。所謂的不易燃物是以小型爐子測試，或基材實驗測試為基準。ASTM E176 標準 [1999]定義易燃及不易燃兩個名詞。ISO 13943 標準 [1999]則以在特定情況下無法被燃燒的材料，來說明不易燃物。ISO 1182 標準 [1990]敘述此一測試方式（即基材試驗，設備如圖 12），實驗時將試體放入高溫爐中加熱，並以點燃時間為主要判別依據。此標準在北美地區以外的大部分國家使用較多，美國則使用 ASTM E136 標準 [1999]來判定材料的不可燃性。由於使用 ASTM E136 及 ISO 1182 之方法來判斷可燃與不可燃之測試有許多限制，使用其所測得之結果應極為保守。許多試體處於可燃與不可燃之灰色地帶，其判定關鍵在於材料熱釋放率。1980 年代早期在芬蘭進行的研究上也有相同的結論，研究結果明白指出，ISO 1182 基材試驗爐子的測量溫度上升，與以消耗氧氣為基準測量的熱釋放

率之間毫無關聯[1999]。

3-2-2 現行法規發展趨勢

早期法規遇到的問題在於判定不燃物的重要變數不合理，發展至今認定熱釋放率可作為重要判定指標，因此牽引法規修正往熱釋放率方面著手，現今國際上普遍肯定圓錐量熱儀具有足夠公信力。其測試方法以及熱釋放率之計算主要是依照 ASTM E1354 [1999]與 ISO 5660-1 [1993]規範標準所設立。利用此設備適切地了解建材燃燒時之熱釋放率變化情形，並模擬不同物品在火災發生時，可能產生之生成物，如黑煙、有毒物、腐蝕物等。而目前國內檢驗標準是以 CNS 6532 [1993]中規定之基材試驗及表面試驗判定耐燃等級為求法規周延確實，內政部建研所已購入 cone3 圓錐量熱儀並籌備相關試驗，其目的為利用此套設備建立現代化法規。

四、國內發展狀況

國內對於火災及建築材料耐燃性研究，並修訂相關法規，由內政部建研所台南防火實驗室執行，目前在防火實驗室中已陸續完成各項試驗裝備的組裝，期望能藉由各項現代化的儀器，發揮預期之功能，並建立健全試驗體系及完善法規。以下對國內燃燒分析裝置的發展過程作介紹。

為了研究自動撒水系統對於火災預防的效應，必須探討熱釋放率變化過程、和抑制火焰之臨界噴水率(required delivered density, RDD)。成大機械系經由國科會經費補助[1986]，並借助於美國 FM 公司孔祥徵先生的技術協助，建立 1MW 大尺度燃燒分析裝置，主要配合模擬 Bill 等人[1992]沙發椅燃燒火焰尺度，以木框架為試驗對象。火焰實驗於開放空間進行，以不同的噴水率，在不同質量預焚百分比下，直接噴水在不同層數的木框架上，用以分析其火焰抑制現象。在噴水狀況下，木框架燃燒所產生的熱釋放率，由噴水率、質量預焚百分比和木框架層數來修正。此研究所建立者，為國內早期大尺寸燃燒分析裝置。

目前防火實驗室中建立了大、中、小尺度量熱儀各一座，圖 2 是圓錐量熱儀 Cone2 實體圖，即為取代現行基材試驗及表面試驗判定耐燃等級之設備，且可建立多種材料熱釋放率資料。中尺度量熱儀（如圖 10 所示）則是針對無法置於圓錐量熱儀之較大試體，進行熱釋放率及其他毒氣分析測試，同時未來將所測得之資料與圓錐量熱儀建立關連性。

圖 13 (a) (b) 為大尺寸燃燒分析裝置相關尺寸、配置及實體圖，此設備為一火載量可達 10MW 之大尺度燃燒分析裝置，搭配遮煙罩、大型抽風機及量測儀器使用，遮煙罩類型有圓錐及方錐兩種，圓錐下緣內徑 7.62m (25ft)；方錐下緣為一 7.62m×7.62m 之正方形，兩者皆可上接一內徑 1.524m 之排煙管，廢氣經由彎管進入氣體量測段，量測段內有量測流速用皮托管、偵測氣體濃度之分析裝置、煙霧光度計及熱電偶等裝置，抽氣動力則由大型抽風機提供最大可達 30m³/s 抽氣量。其基本功能在於量測分析大型物件或結構體於開放空間燃燒過程之引燃特性、熱釋放率、質量損失率、有效發熱量、發煙特性、及毒氣分析等。未來將直接以實體燃燒模擬火災發生情形，藉分析採集所得之廢氣資料瞭解各物體燃燒特性。並由試驗中研究最佳滅火方式，以降低火災造成之財產與生命傷害。同時推動建築產業新材料、新技術、新工法之研究開發，以促進建築產業升級。

五、參考文獻

- [1] “SFPF Handbook of Fire Protection Engineering,” 2nd Edition, National Fire Protection Association, Section 3, pp. 16-52(1995).
- [2] V. Babrauskas and R. Peacock, “Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard,” *Fire Safety J.*, Vol. 18, pp. 255-272(1992).
- [3] W. Thornton, “The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds,” *Philosophical Magazine and J. of Science*, Vol. 33, No. 196, (1917).
- [4] W. Parker, “An Investigation of the Fire Environment in the ASTM E-84 Tunnel Test,” NBS Technical Note 945, (1977).
- [5] C. Huggett, “Estimation of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurement,” *J. of Fire and Materials*, Vol. 12, pp. 61-65, (1980).
- [6] W. Parker, “Calculation of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications,” NBSIR 81-2427, (1982).
- [7] M. Janssens, “Measuring Rate of Heat Release by Oxygen Consumption,” *Fire Technology*, Vol. 27, pp.234-249 (1991).
- [8] E. Smith, “An Experimental Determination of Combustibility,” *Fire Technology*, Vol. 7, pp.109-119 (1971).
- [9] E. Smith, “Heat Release Rate of Building Materials,” in *Ignition, Heat Release and Noncombustibility of Materials*, ASTM, STP 502, pp. 119-134 (1972).
- [10] E. Smith, “Application of Release Rate Data to Hazard Load Calculations,” *Fire Technology*, Vol. 10, pp.181-186 (1974).
- [11] E. Smith and S. Satija, “Release Rate Model for Developing Fires,” *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, pp.282-287 (1983).
- [12] B. Hagglund and L-E. Persson, FOA Rapport C 20126-D6(A3) “The Heat Radiation from Petroleum Fires,” Forsvarets Forskningsanstalt, Stockholm (1976).
- [13] P.J. Geake, “Smoke Characterisation by Laser Diffraction,” Ph.D.dissertation,

- Polytechnic of the South Bank, London (1988).
- [14] Brian T. Rhodes and James G. Quintiere, " Burning Rate and Flame Heat Flux for PMMA in Cone Calorimeter," *Fire Safety Journal*, Vol. 26 pp.221-240 (1996).
- [15] Standard Method of Test for Flammability of Plastics using the Oxygen Index Method (ASTM D 2863). American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [16] Test for Flammability of Plastics Materials for Parts in Devices and Appliances(UL94). Underwriters Laboratories, Northbrook.
- [17] ASTM E1623: Standard Test Method for Determination of Fire and Thermal Parameters of Materials, Products, and Systems Using An Intermediate Scale Calorimeter (ICAL), ASTM Annual Book of Standards, Vol. 4.07, ASTM, West Conshohocken, PA, (1999).
- [18] ISO 9705: Fire Tests — Reaction to Fire-Full-Scale Room Test for Surface Products, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (1993).
- [19] M. Janssens and J. Urbas, "Comparison of Small and Intermediate Scale Heat Release Data," pp.285-294 in *INTERFLAM '96:Seventh Intl.Fire Conf. Proc.*, Interscience Communications, Ltd., London (1996).
- [20] A. Tewarson, "Heat Release Rates from Burning Plastics," *Journal of Fire and Flammability*, Vol.8, p.115, (1977).
- [21] G. Heskestad, "A Fire Product Collector for Calorimeter into MW Range", FMRE technical Report, June (1981).
- [22] ASTM E176: "Standard Terminology of Fire Standards", ASTM Annual Book of Standards, Vol. 4.07, ASTM, West Conshohocken, PA, (1999)
- [23] ISO 13943: "Fire Safety-Vocabulary, International Organization for Standardization", Geneva, Switzerland, (1999).
- [24] ISO 1182: Reaction to Fire Tests for Building Products— Non-Combustibility Test, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1990.

- [25] ASTM E136: "Standard Test Method for Behavior of Materials in a Vertical Tube Furnace at 750°C" , ASTM Annual Book of Standards, Vol. 4.07, ASTM, West Conshohocken, PA, (1999).
- [26] A. Ahonen, H. Weckman, and M. Yli-Penttila, "Application of Oxygen-Consumption Calorimeter to Non-Combustibility Testing," Journal of Fire and Materials, Vol. 9, pp.135-144, (1985).
- [27] ASTM E1354: "Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates For Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter", ASTM Annual Book of Standards, Vol. 4.07, ASTM, West Conshohocken, PA, (1999).
- [28] ISO 5660-1 "Fire Tests-Reaction to Fire-Rate of Heat Release from Building Products (Cone Calorimeter)", International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (1993).
- [29] CNS 6532/A3113 "建築物室內裝飾材料之耐燃性檢驗法" 1993年12月1日修訂。
- [30] "水對固態燃料組列的火焰抑制研究," 國科會專題研究報告, NSC78-0401-E-006-08, (1990).
- [31] R.G., Jr., Brown Bill, W.R., Hill, E.E., Jr., and Stavrianidis, P., "Sprinkler Research, Task 1: Fire Growth and Plume Measurements," FMRC Technical Report OQ5NO. RA070 (A), July, (1989).
- [32] B. Sundström, U. Göransson, "Possible Fire Classification Criteria and their Implications for Surface Materials Tested in Full Scale According to ISO DP 9705/or NT FIRE 025," SP Report 1988:19, Statens provningsanstalt, Borås 1988.
- [33] B. Sundström, "The New ISO Full Scale Fire Test Procedure for Surface Linings," The First Yugoslav Scientific Meeting with International Participation-On Behavior of Materials and Constructions in Fire, 1987.

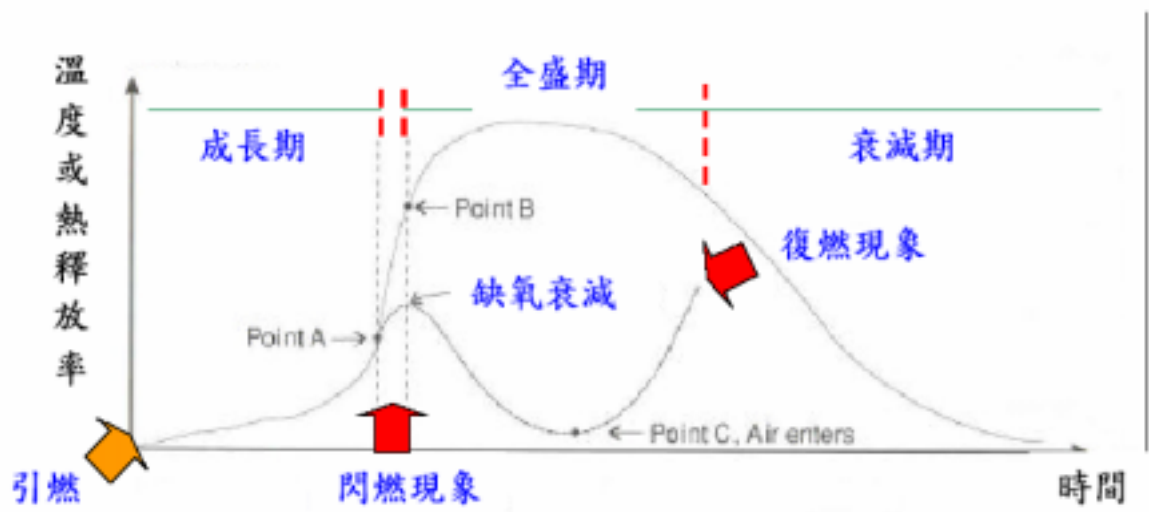


圖 1. 火災發生溫度-時間關係



圖 2. 圓錐量熱儀 (cone2) 裝置實體圖

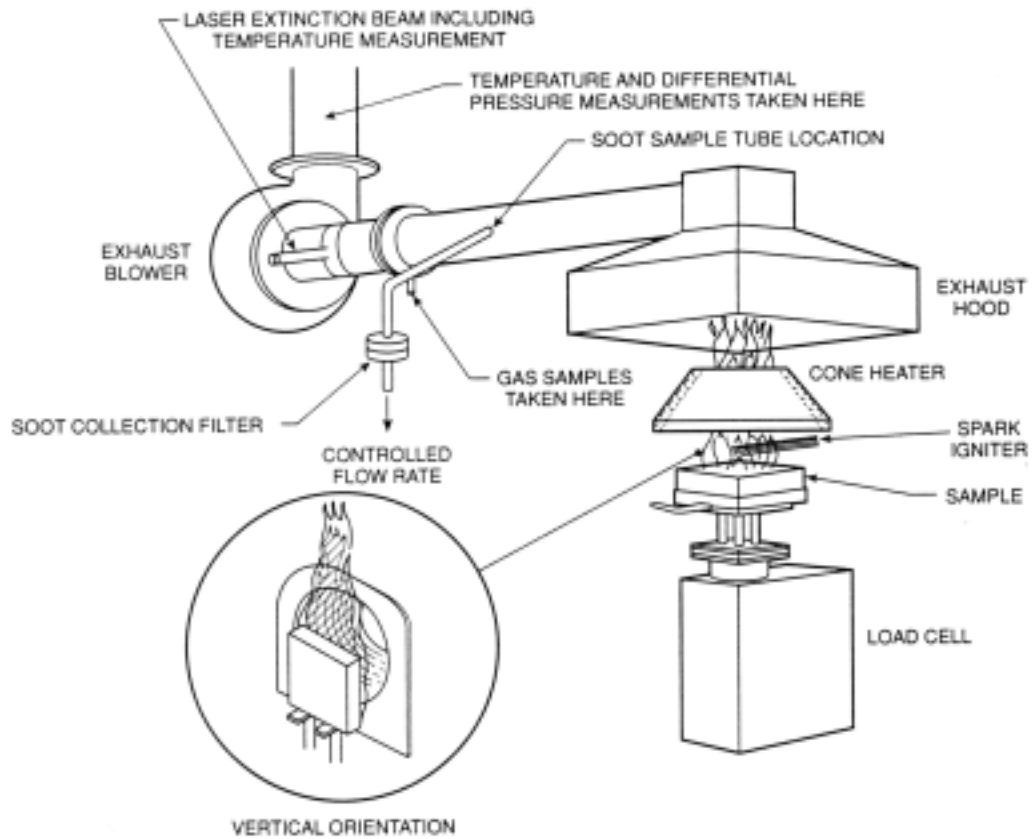


圖 3. 圓錐量熱儀示意圖(節錄自文獻[1]中插圖)

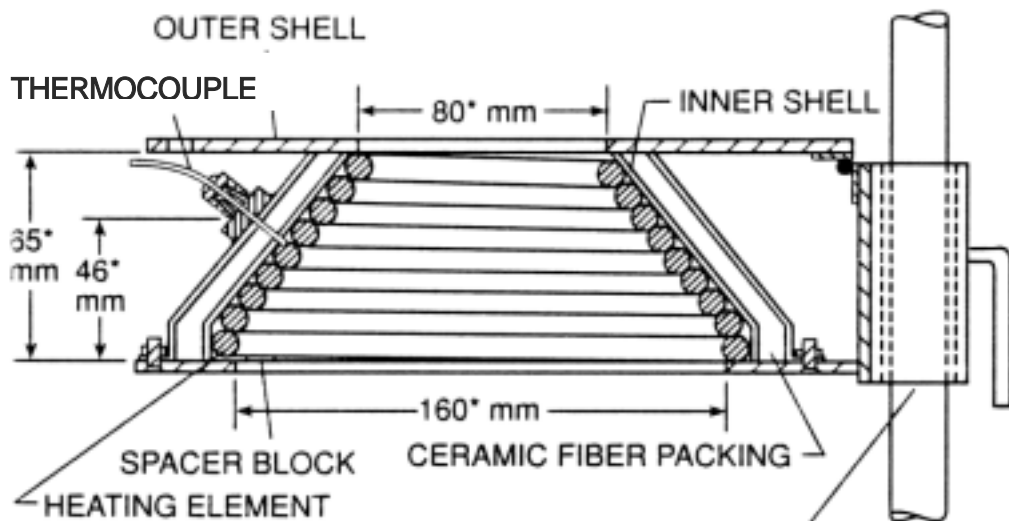


圖 4. 圓錐輻射電熱器構造 (節錄自文獻[1]中插圖)

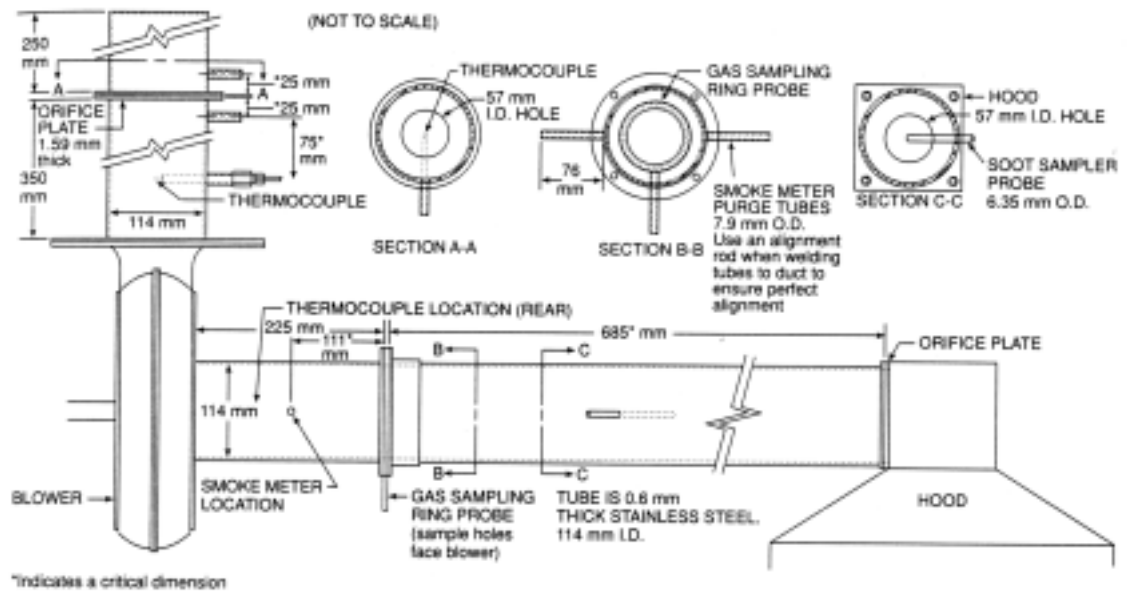


圖 5. 排煙系統細部構造 (節錄自文獻[1]中插圖)

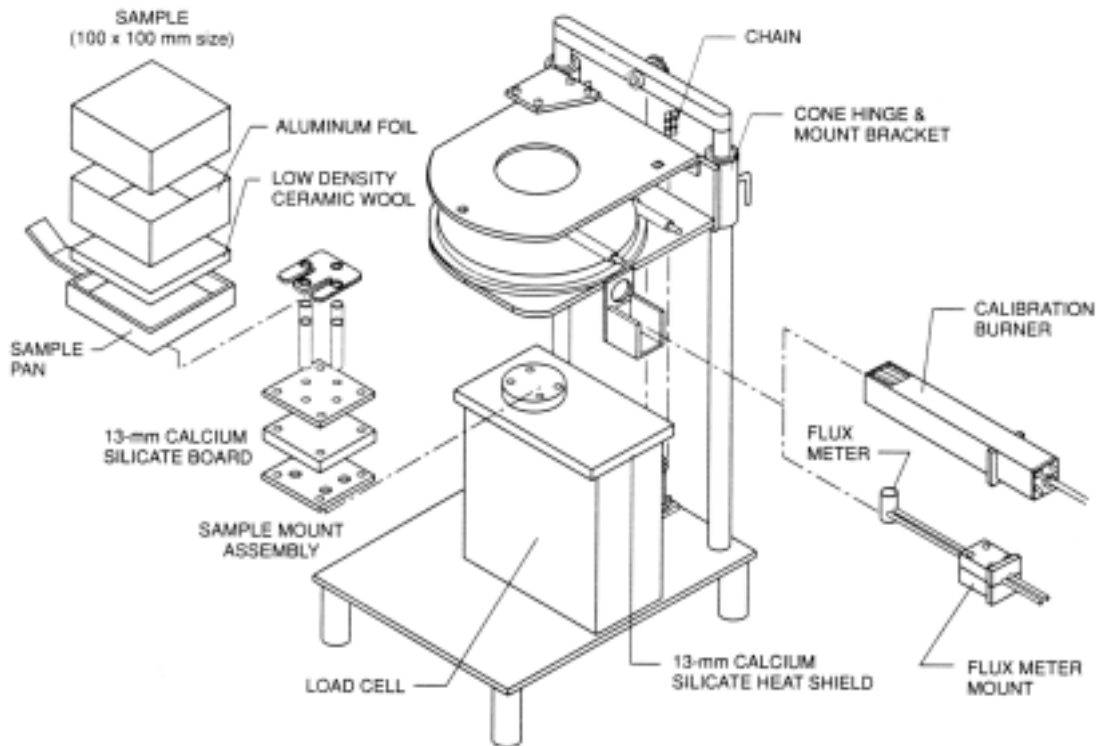


圖 6. Schmidt-Boelter-type 熱通量計及甲烷燃燒器 (節錄自文獻[1]中插圖)

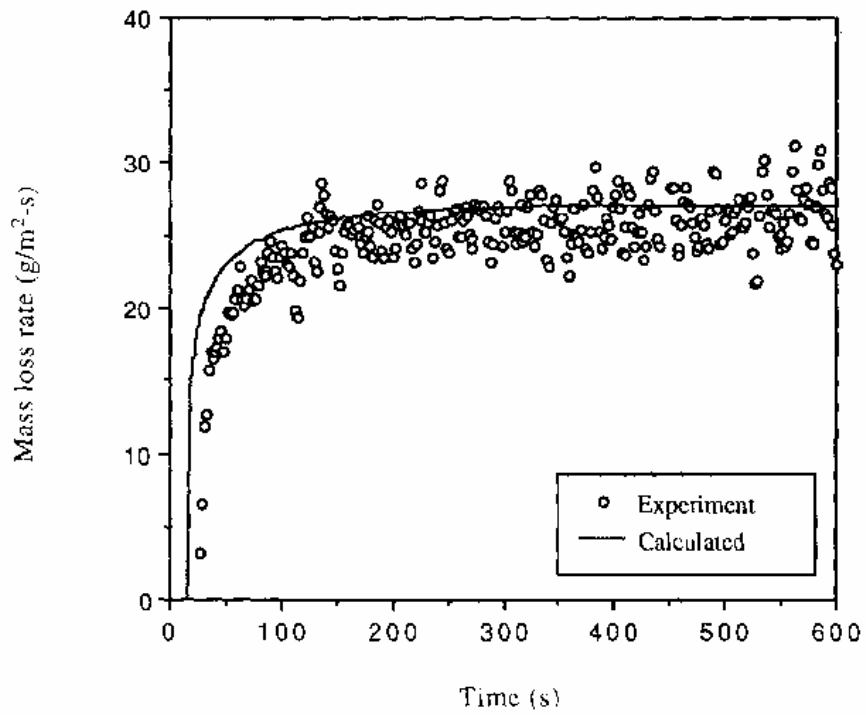


圖 7. PMMA 於 50kW/m^2 熱通量下質量損失與時間關係(節錄自文獻[14] 中插圖)

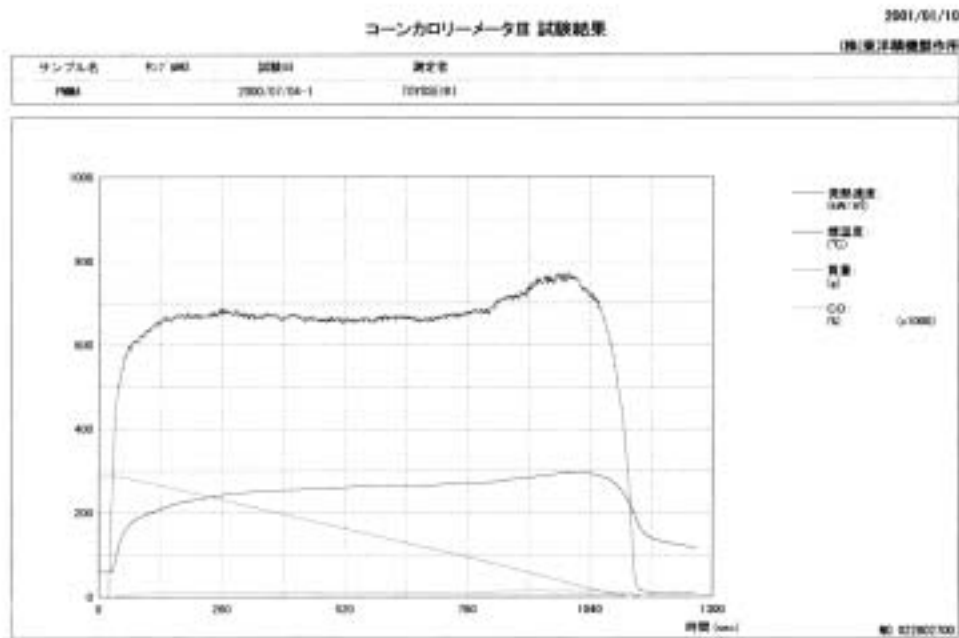


圖 8. 圓錐量熱儀試驗結果 (節錄自東洋精機公司 Cone3 型錄)

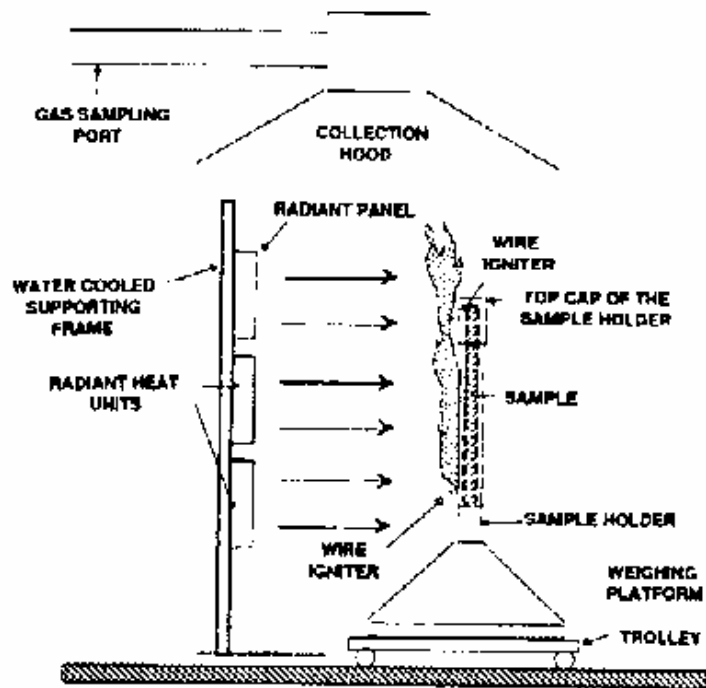
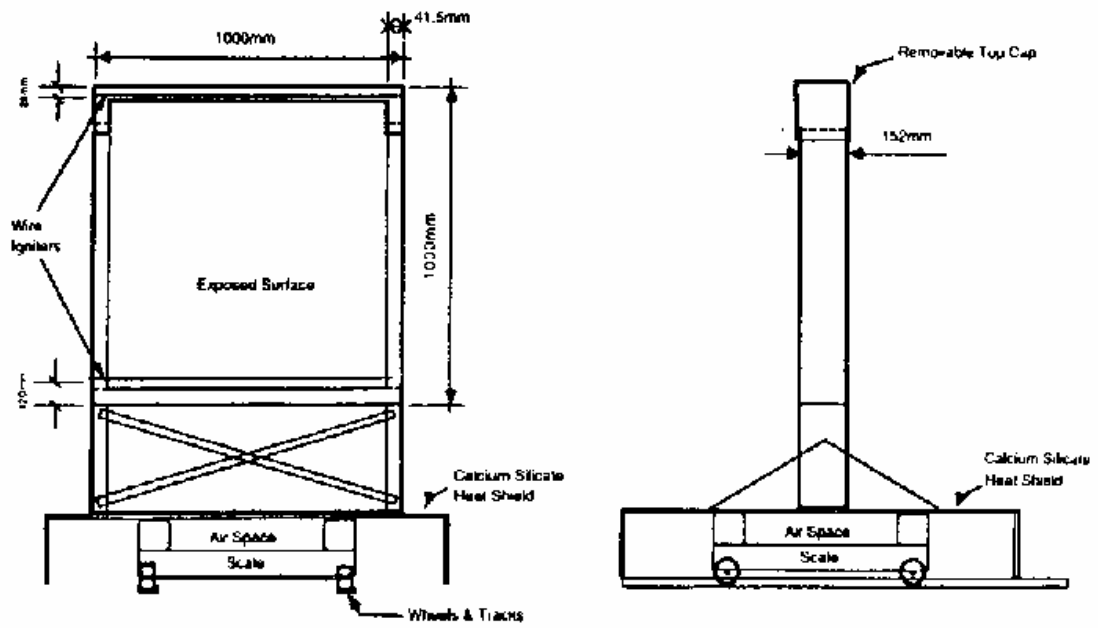


圖 9. ICAL 配備示意圖 (節錄自 ASTM E1623 插圖)



圖 10. ICAL 裝置實體圖

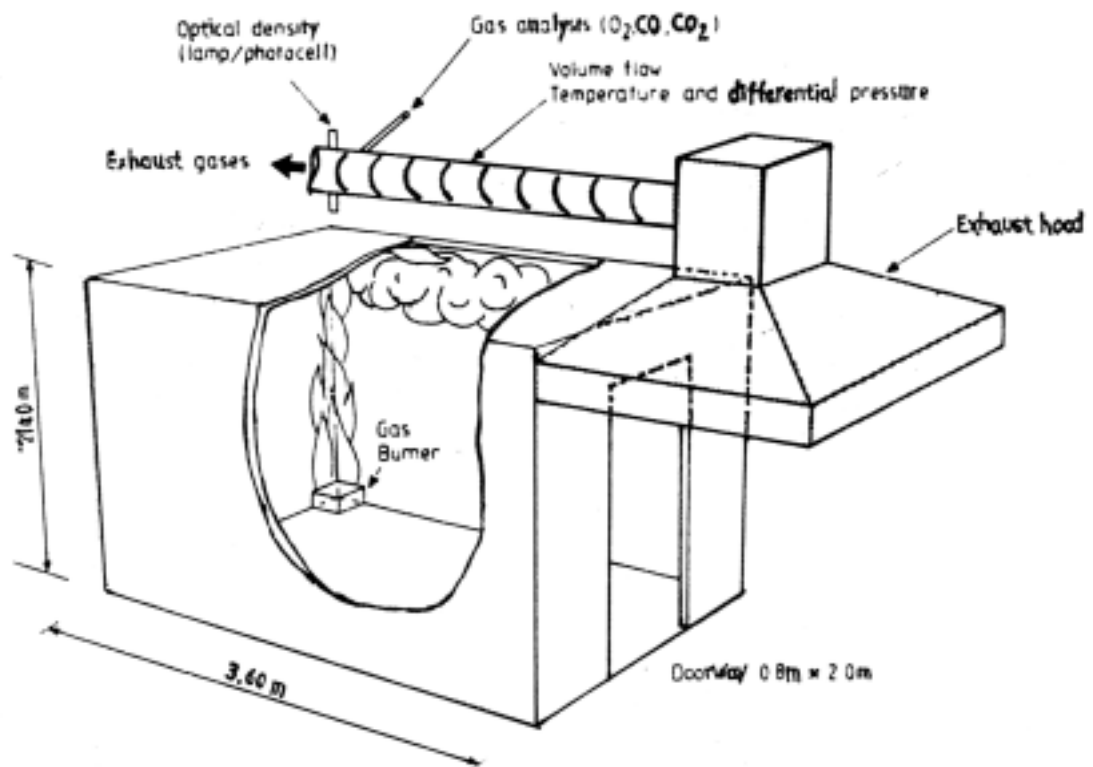


圖 11. NT FIRE 025 之實驗設備圖 (節錄自 ISO 9705 插圖)

Dimensions in millimetres

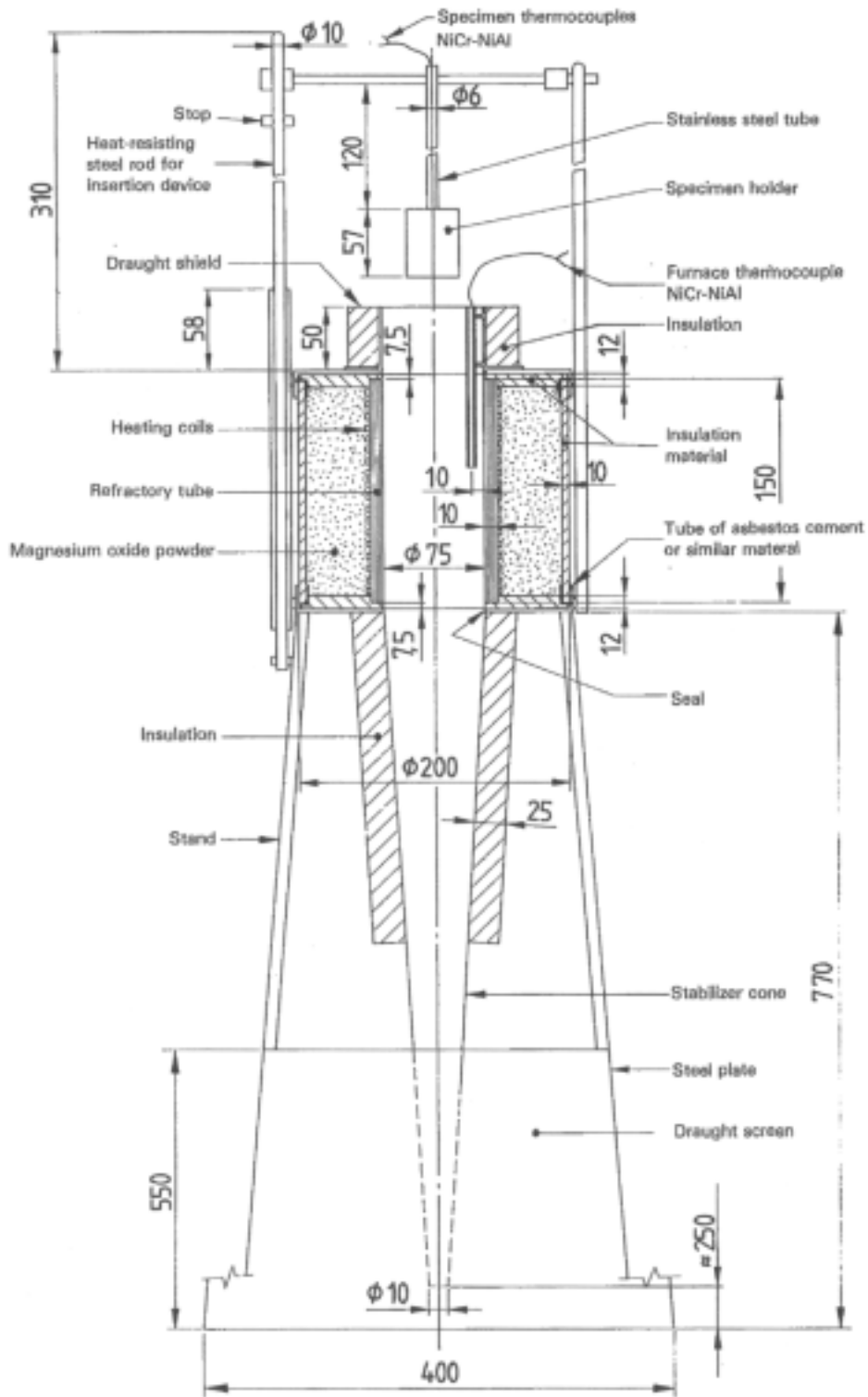


圖 12. 基材試驗設備 (節錄自 ISO 1182 插圖)



(a) 集煙罩與排煙管路



(b) 廢氣處理系統

圖 13. 大尺寸燃燒裝置配備尺寸及實體圖