

建築物構造防火性能驗證技術之火災持續時間研究

謝煒東¹ 蔡銘儒²

關鍵字：火災持續時間，建築構造防火性能，驗證

摘要

本研究係使用 ISO 9705 實驗室，以固定火源(25kW-200 秒)對固定燃載量(5kg/m²)之木堆加熱，用來模擬房間火災，主要變數為可燃物(木堆)密度及分佈面積，以田口實驗計畫法之 L9(3⁴) 直交表配置實驗因子，探討此兩因素對火災持續時間之影響，再配合統計方式探討火災持續時間之分配模式以及其標準差，並利用耐火性能檢證法計算出之火災持續時間作比對驗證。

在本研究條件下，利用檢證法計算所得之火災持續時間的信賴區間為+2σ(標準差)，經與實驗數據之統計結果比較，實驗結果仍有將近 0.4σ 的機率大於計算所得之火災持續時間值，建議取+3σ 可確保安全範圍。由木堆燃燒實驗結果顯示，於相同火載量下，木堆分散會減緩燃燒速度以及熱釋放率，於固定火載量條件下，以 t² 火災成長曲線分析木堆熱釋放率成長曲線，發現木堆密度對於火災成長影響較小，木堆火災成長主要受到木堆分佈影響。

Validations on the Fire-proof Performance of Architecture— the Study of the Fire Sustaining Time

Wei Dong Hsieh¹ Ming Ju Tsai²

KEYWORDS: Fire Sustaining Time, Woodcrib Burning, Validations

ABSTRACT

Combustible wood cribs with fixed fire load (5kg/m²) are heated by a fix fire source (25kW-200s) in ISO 9705 room is used to investigate effect of the density and the distributions of the combustible on the fire sustaining time. L9(3⁴) orthogonal table from Taguchi method is used arranging experiment parameters, i.e. wood crib packing density and the distribution. The distribution mode of fire sustaining time and its standard deviation are discussed statistically and are compared with the calculated one.

The reliability region of calculated fire sustaining time is found to be +2σ. Statistics from experimental results shows that the experimental fire sustaining time is still about 0.4σ probability longer than the calculate one. Besides, from the results of wood crib burning, we found that at a fixed fire-load the fire growth rate and maximum heat release rate are inverse proportional to the density of the combustible. By using the t² fire assumption on the growth rate of the wood crib, we found the fire growth rate is less correlated with the density of wood crib, but closely related to the distribution of wood crib.

¹內政部建築研究所國防訓儲研究員

ISRD Researcher, Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior, Taiwan

²內政部建築研究所研究員

Researcher, Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior, Taiwan

一、前言

國內產業環境隨著全球經濟體的變遷而快速轉變，高科技產業不斷興起，傳統產業則面臨空前的挑戰，在產業轉型的急遽過程中，各種重大火災爆炸事故(北誼興火災爆炸、中油氣爆、永興化工爆炸、聯瑞火災..等)層出不窮，也因此造成巨額的社會成本及嚴重的人員傷亡和財物損失。為防範大型火災事故的發生以及尋求有效的抑制措施，近年來已成為大家努力的方向與目標。

由於產業的變遷速度遠超過法規訂定與修訂的腳步，目前已有許多先進國家朝向性能式設計與評估(Performance Based Design, PBD)的方向發展。性能式設計與評估 (PBD)可彌補法規的限制並提昇損害防阻能力，以順應產業製程與設備瞬息萬變的進化過程，達到經濟效益與安全兼容並顧的目標。

大部份的國家，像美國、北歐、英國、法國、日本、紐西蘭、澳洲..等，對於特殊建築物、公共設施或高風險作業場所之安全設計，近年來已突破法規的範疇，其主因乃目前各國所訂定之標準或法規並不能完全涵蓋所有行業或作業場所(尤其是特殊作業場所或高風險作業場所)，因此依現行之規範作為設計之依據顯然無法有效保障人員安全。有鑑於此，各國在近十年已陸續將性能式設計的理念，以文件化方式逐漸建立並試著和現行法規融合，以因應變化快速的社會變遷所衍生的高風險成本。

以美國而言，目前已朝雙軌計畫(“Dual Track” Approach)努力，即朝現有法規及性能式設計雙軌(Prescriptive-Based and Performance-Based)的方向同步進行，未來將在科學與技術的基礎上以文件化方式將兩者作整合，但是此部份的整合目前尚未訂定完成時間點。美國政府雖然對於雙軌計畫並沒有明顯的時間點，但是美國部份大型技術機構如：Safety to Life、Fire Alarm、Merchant Vessels、Cultural Resources and Atomic Energy 已將 PBD 制定成規範與標準。

所謂的性能式設計包括七個主要過程：場址與計畫資料的確認(Identify Site or Project Information)、火災安全目標、機能目的與性能基準(Identify Fire Safety Goals, Functional Objectives, and Performance Criteria)、發展性能基準與設計基準(Develop Performance Criteria and Design Criteria (Design Objective))、火災歷程的發展(Develop Fire Scenarios)、火災設計的發展(Development of Design Fires)、替代設計的發展與評估(Develop and Evaluate Design Alternatives)、文件化與規格說明書(Documentation and Specification)等項目。

火災設計是對於特殊火災歷程進行工程描述，例如：熱釋放率、火災成長率、空間產物、產物生成率、或是其他能被量測或計算之參數。典型的火災成長曲線或火災設計曲線能看出熱釋放率。整個火災設計過程包括成長期(Growth Phase)、最大熱釋放率、穩定燃燒期(Steady State Phase)與衰退期(Decay Phase)。而火災歷程的考量必須考慮許多因素，包括(1)起火前的情況(Pre-fire Situation)：建築物、區劃、環境；(2)引火源(Ignition Sources)：溫度、能量、接觸潛在燃料的面積和時間；(3)起火物(Initial Fuels)：狀態、表面積與質量比、熱釋放率(Heat Release Rate)；(4)補充可燃物(Secondary Fuels)：數量、分佈；(5)擴大可能性(Extension Potential)：區劃、結構、面積；(6)人員狀態(Occupant Condition)：警戒(Alert)、熟睡、行動自由者(Self-mobile)、殘障者(Disabled)、

嬰兒(Infant)、年長者(Elderly)；(7)關鍵因素(Critical Factors)：通風(窗戶或門)、環境、作業形態。

過去的防火規定，大多是仰賴經驗及判斷所匯集的教訓而成，缺乏工學的方法理論。例如對耐火建築物的建材，依用途、防火區域及規模，訂立了一定要求的耐火時間，只能從經認可的耐火構造中選擇工法。

世界各國建築物結構耐火性能法規(丁育群，1998；丁育群及王鵬智，1999)訂定的目的為『滿足防火安全之需要，進一步防止火災時建築物延燒的擴大與倒塌，確保人命的安全、財物的保護及災後的持續使用』，至於建築物結構防火性能及評估方法則有所差異，其中日本「耐火性能檢證法之解說及計算例及其解說」(2001)，就新修正建築基準法在設計階段即將耐火性能列入考慮以減低火災外力並建立抗高溫的穩定結構，其設計原則首先從樑、柱等支撐荷重材料來進行考量，支撐荷重材料之耐力隨著受熱時間之增加而減弱，但只要耐力大於作用荷重，建築物就不會倒塌，在日本「建築物綜合防火設計法、第4卷、耐火設計法」(1986)、「防・耐火性能評估技術之開發報告書」(1997)及「耐火性能檢證法之解說及計算例及其解說」(2001)檢證法中，為了確認建築物之各項耐火要件是否能滿足所需的耐火性能，故定義在一定的作用荷重下不會崩塌的臨界點的火災保有耐火時間(t_{fr})須大於火災的持續時間(t_f)，以決定設計是否安全與適當。

美國則將結構防火安全的設計標準及規範規定於 ASCE STANDARD (1998)的 Standard Calculation Methods for Fire Protection 由 ASCE(美國土木工程師協會)以及 SFPE(防火工程師協會)共同制訂結構防火標準計算方法，總共分成五章，以結構物種類制訂不同的計算方法，將結構分成鋼筋混凝土、木造、磚造、鋼結構等四類，並依照材料種類、結構束制情形及防火時效來規定不同的厚度以及防火評估計算方法。我國因與日本國情相近，丁育群(1998)、蕭江碧、張俊哲(2001)及現行建築技術規則(2001)之訂定亦多受日本法之影響，且由於歐美各國法令之體制與我國差異甚大，國情與材料之使用習慣亦有所差異，若貿然採用其設計方法，所牽涉之層面不僅是法規的大舉翻修而已且還涉及政府組織架構的變動，如此所造成之衝擊將甚鉅。

二、研究目的與內容

本文以木堆燃燒實驗為基礎，探討木堆密度與分佈對火災持續時間之影響，並利用日本之「防・耐火性能評估技術之開發報告書」(1997)為主要架構，探討有關火災的持續時間。主要研究內容分成兩部分，一部份為利用 ISO9705 房間火災實驗，針對可燃物(木框架)之分佈以及堆疊密度對火災持續時間以及成長速度之影響進行探討，另一部份則是使用檢證法之計算公式，計算出對應火載量之下之火災持續時間變化，並與實驗結果進行比較，以瞭解檢證法之適用性及其限制。

三、ISO 9705 房間火災模擬實驗方法

實驗規劃參考 CNS14914 田口式品質工程與其應用指導綱要(2005)，採用田口式方法二因素三水準，因子 A 為木堆擺放數量，因子 B 則為木堆的堆疊狀況，如圖 1 所示。目標因子為火焰持續時間。每組實驗進行 10 次，最後再利用田口式方法，分析各因子之間的關係。實驗上主要使用木堆作為研究對象，木堆材料為柳安木條，木條總數量固定為 45 支，均先以 105°C 烘乾 24 小時以上，將木堆重量控制在 15±1.5kg 並按照實驗規劃表所述堆疊而成。使用 25kW 熱量持續燃燒 200 秒作

為 ISO9705 燃燒器之設定，並以此設定引燃木堆，觀察並記錄燃燒狀況。

實驗分析項目包含 ISO 9705 Room 內部溫度、熱釋放率以及火災持續時間。溫度紀錄點如圖 2 與圖 3 所示。熱釋放率則是透過煙罩將煙器抽出，透過氧消耗法計算出燃燒木堆所產生的熱釋放率。

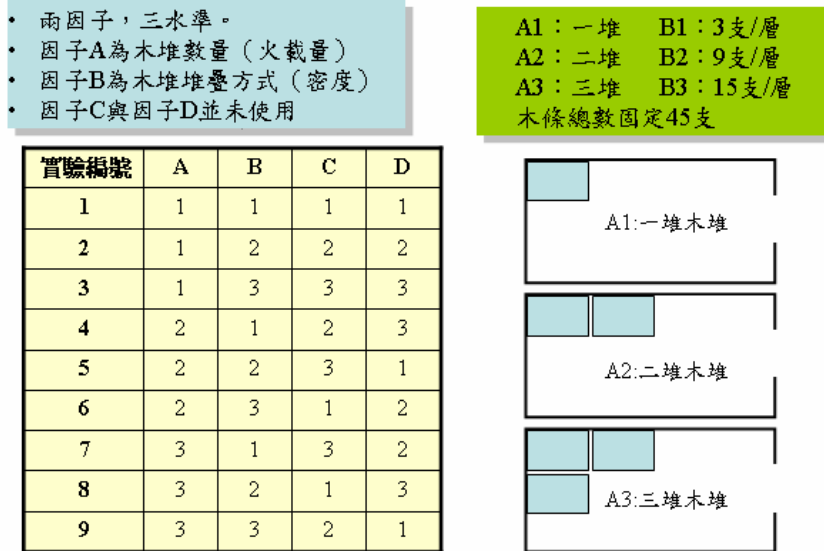


圖 1 實驗參數與配置（平面圖）

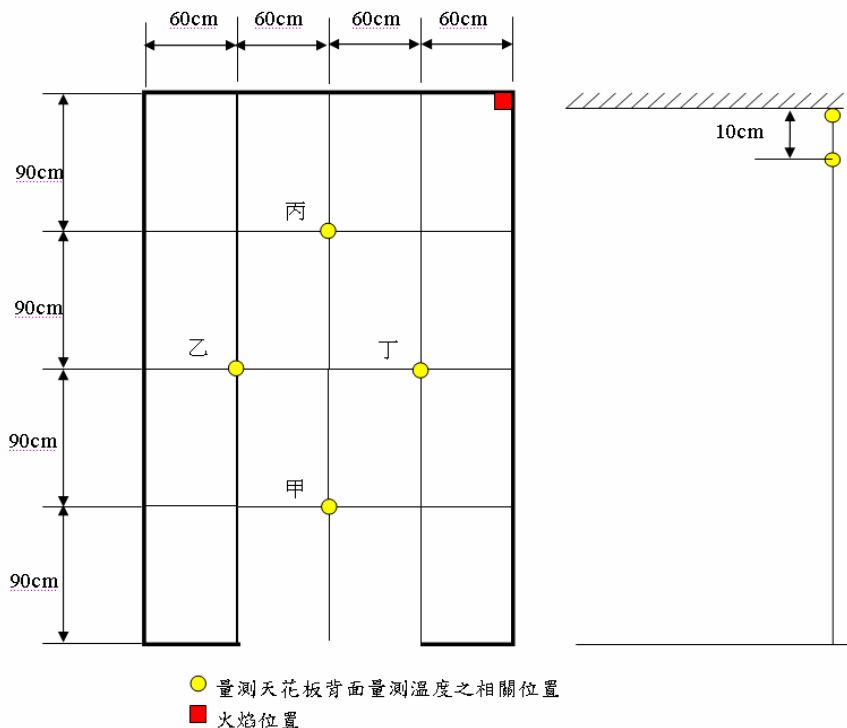


圖 2 天花板測溫點位置圖（左側為平面圖，右側為立面圖）

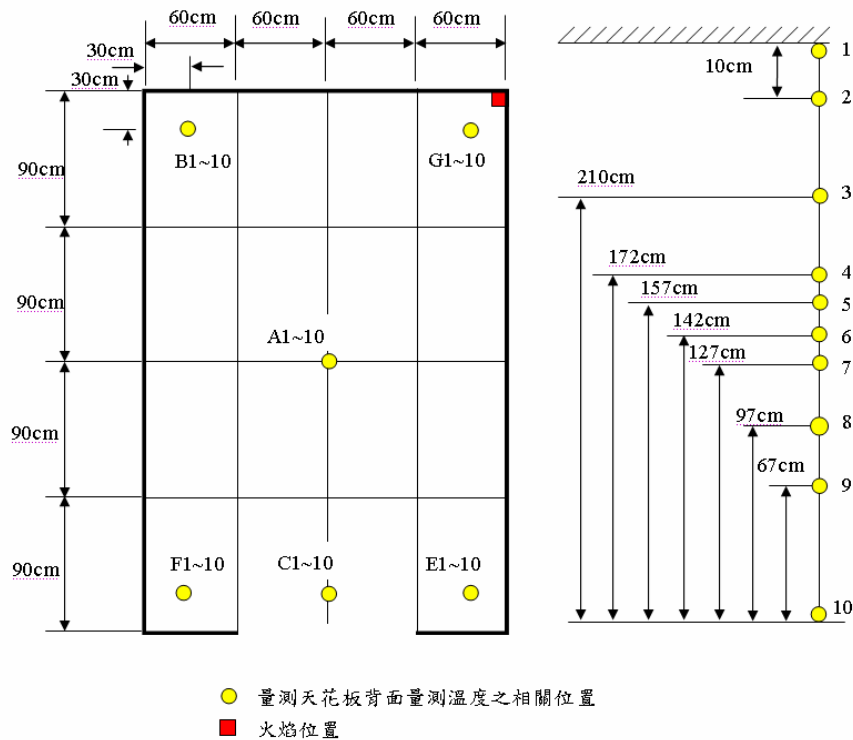


圖 3 熱電偶樹相關位置 (左側為平面圖，右側為立面圖)

四、建築物結構耐火性能檢證法及流程

4-1 建築物之檢證流程

關於主要構造部分耐火性能的檢證，可從兩方面來加以檢證：(1)該建築物的屋內被預測發生火災部分；(2)在周圍發生一般火災部分，其檢證之流程如圖 4 所示。對於屋內火災，依據建築物之室內狀態來算定『火災的繼續時間』。其次依該房間面臨之主要構造部分的狀態及預測該房間所發生之火災大小再加上發熱量的多寡，算出有主要結構的『屋內火災保有耐火時間』。最後，確認主要構造部分之『屋內火災保有耐火時間』是否大於有關主要構造部分面臨房間之『火災的繼續時間』，來決定設計是否適當。

以耐火性能檢證法來確認主要構造部份之必要性能是否能滿足的特徵，主要是以此構件之耐火時間長短來決定其是否滿足各自必要之防火性能(非損傷性、隔熱性、遮焰性)，而非直接比較構件受火後所產生之溫度、應力等物理量，因建築物之各項耐火要件彼此不同，為了評價這些要件是否能滿足所需的時間，乃以最短的時間定義為火災保有耐火時間(t_{fr})來與火災的繼續時間(t_f)相互比較，以決定設計是否安全與適當。

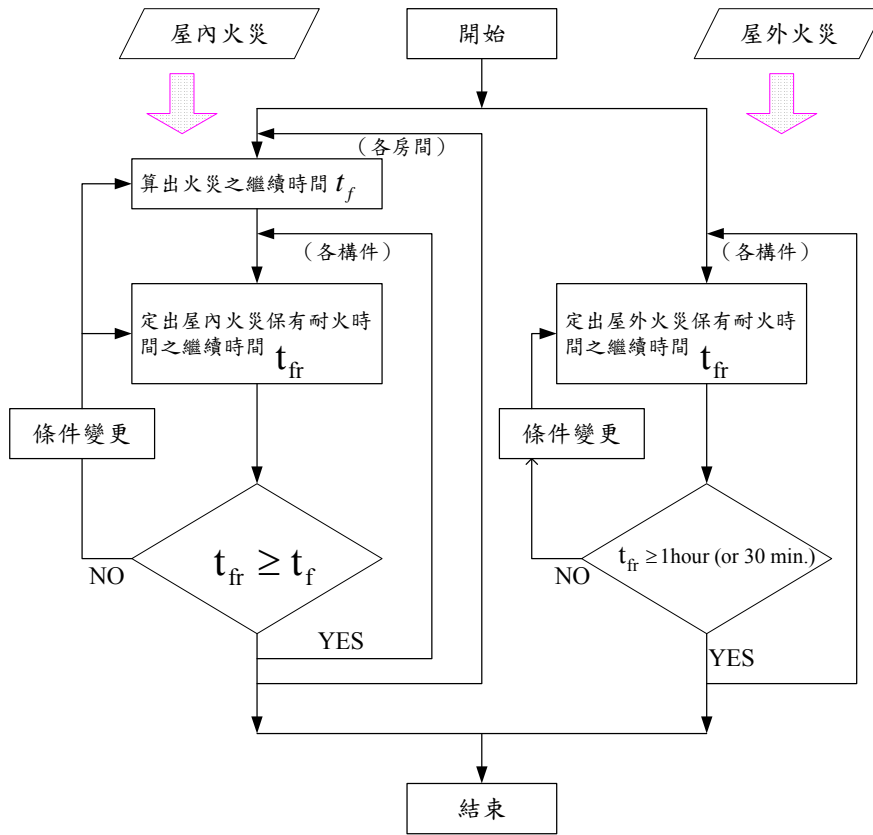


圖 4 耐火性能檢證法流程

4-2 火災繼續時間之計算流程

如圖 5 所示之流程預測屋內所發生火災的繼續時間：(1)需選定欲檢證之建築物；(2)選定欲檢驗之房間；(3)計算該室總發熱量；(4)計算該室內可燃物的每秒發熱量；(5)由開口、可燃物多寡及分佈情形、防火設備及該室高度計算出該室的火災溫度上升係數 α 以及構材附近溫度上升係數 αt ；(6)計算火災繼續時間。

由內政部建築研究所 94 年研究計畫「建築防火安全設計與驗證研究(以辦公室為例)」(2005)實驗結果，燃燒時間為 3300 秒，閃燃發生時間於 1000 秒，如以閃燃發生時室內溫度 600°C 至實驗結束時間約 2300 秒，與檢證法計算值 2054 秒比較偏差值為 -10.7%，如以燃燒時間比較偏差值為 -37.8%。

依據內政部建築研究所『建築物構造防火性能驗證技術手冊』2.3 節對於火災的持續時間定義是為室內可燃物燃燒殆盡的時間，3.1 節對構造保有防火時效定義指的是可保持耐燃性能(非損壞性、隔熱性、防盜性、承载力)之極限的加熱時間，由手冊之認定如圖 5 所示，構造保有防火時效大於等於火災的持續時間，即完成耐火性能設計與檢證。

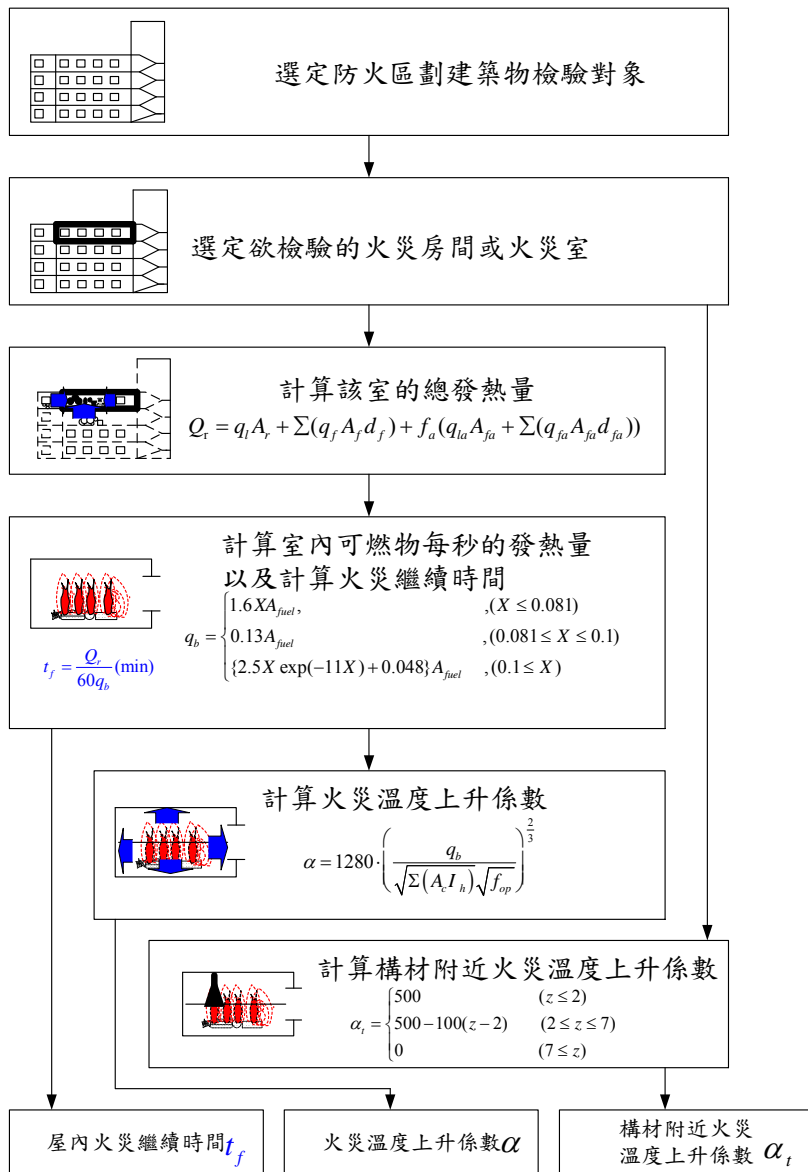


圖 5 火災持續時間之計算流程

但由量測觀點來看，以質量量測為例，每次之量測結果並非一定值，而是一常態分配，更何況火災燃燒變因非常多，由於實際的構造耐火性能可被表達成一個概率分佈，而耐火性能驗證法係以持續時間決定構造之保有耐火時間，據此假設火災持續時間亦遵循常態分配，如圖 6（姚斌等，2004）。構造之安全性以構造保有之防火時效大於等於火災的持續時間認定時，當取構造保有防火時效等於火災的持續時間，則將有 50% 機率產生失效，因此構造保有防火時效應以大於火災的持續時間加 3 個標準差，才能確保構造之安全性。

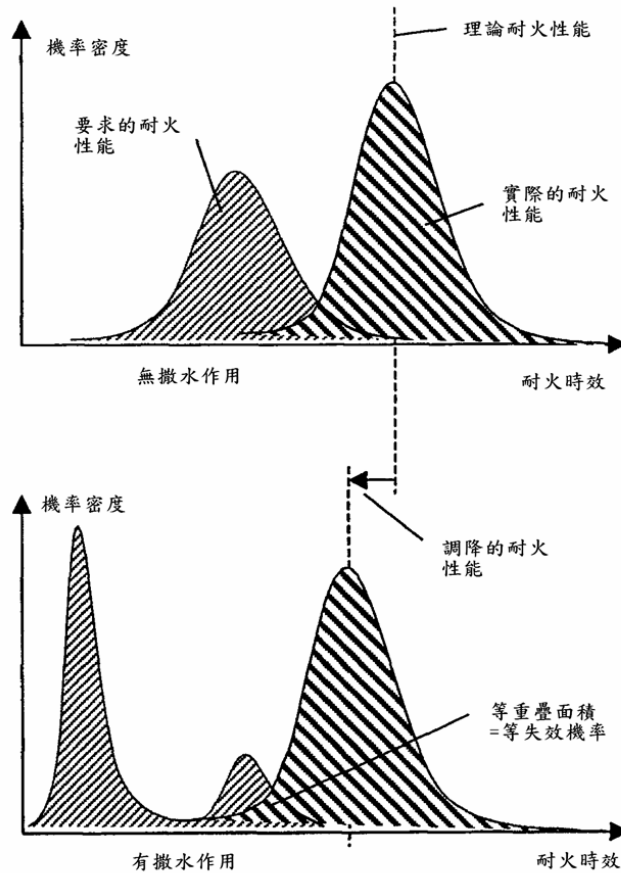


圖 6 耐火性能的等價性 (姚斌, 2004)

五、結果與討論

5-1 火災模擬實驗驗證法分析

以耐火性能檢證法計算本研究木堆於 ISO9705 標準房間內燃燒之持續時間如下：由圓錐量熱儀測得木材發熱量為 14.09MJ/kg ，每次實驗使用 45 支木條，平均單支重採耐火性能檢証法之解說及計算例及其解說(2001)第 7 章技術解說，加 2 倍標準差為 0.45kg ，計算每次實驗單位面積燃燒熱 q_l 為 33.02MJ/m^2 。標準房間開口寬 0.8m 、高 2m ，開口面積 1.6m^2 ，計算其開口因子為 2.26，由房間寬 2.4m 、長 3.6m 及高 2.4m ，房間面積 8.64m^2 ，計算開口因子為 0.19，取兩者大值得有效開口因子為 2.26，計算火災室吸納可燃物表面積得 7.21m^2 、內裝材依圖 7(b)型式計算其表面積為 4.45m^2 、可燃物表面積 11.66m^2 ，可得燃燒型支配因子(X) 0.19，燃燒熱 $q_b=1.23\text{MW}$ ，經由計算可得到火災持續時間 $t_f=15.46\text{min}=928\text{sec}$ ，若不考慮內裝材，火災持續時間 $t_f=232\text{sec}$ 。

本研究因基於實驗安全性原則，實驗燃燒熱最大以不超過 800kW 為控制條件，由實驗結果進行持續時間之判讀，本研究依「建築物構造防火性能驗證技術手冊」(2005)2.3 節對火災的持續時

間定義為室內可燃物燃燒殆盡的時間，採由引燃開始至燃燒殆盡之燃燒熱可量範圍取切線延伸所得時間值(1~4)，另外參考 NFPA92B 之有效引燃時間方式，取有效引燃時間及衰減階段之切線所之時間值(2~3)如圖 8 所示。

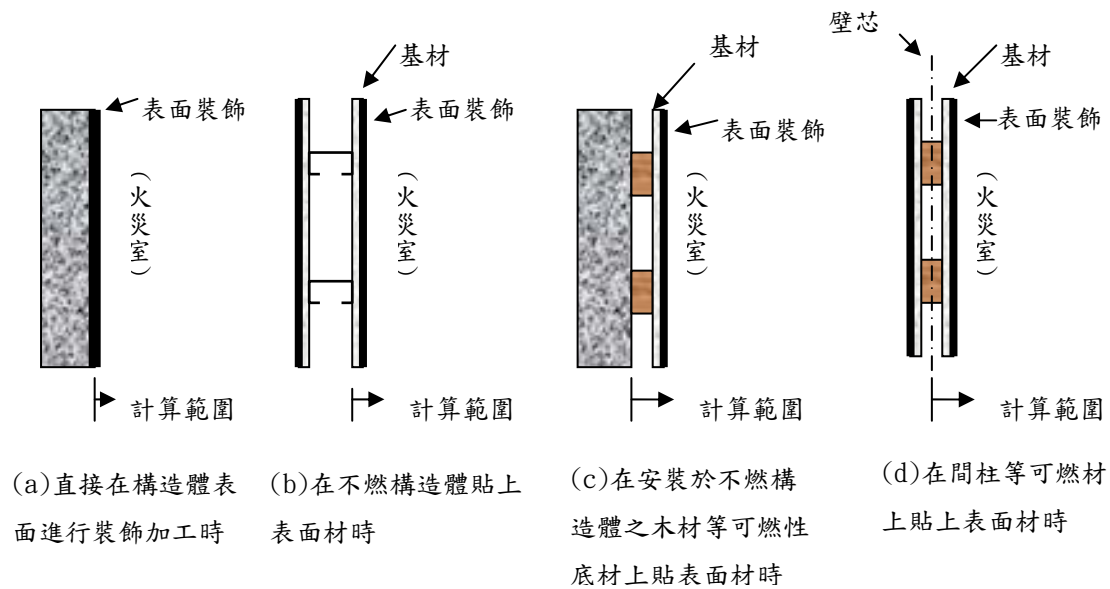


圖 7 典型的牆壁裝飾加工方法

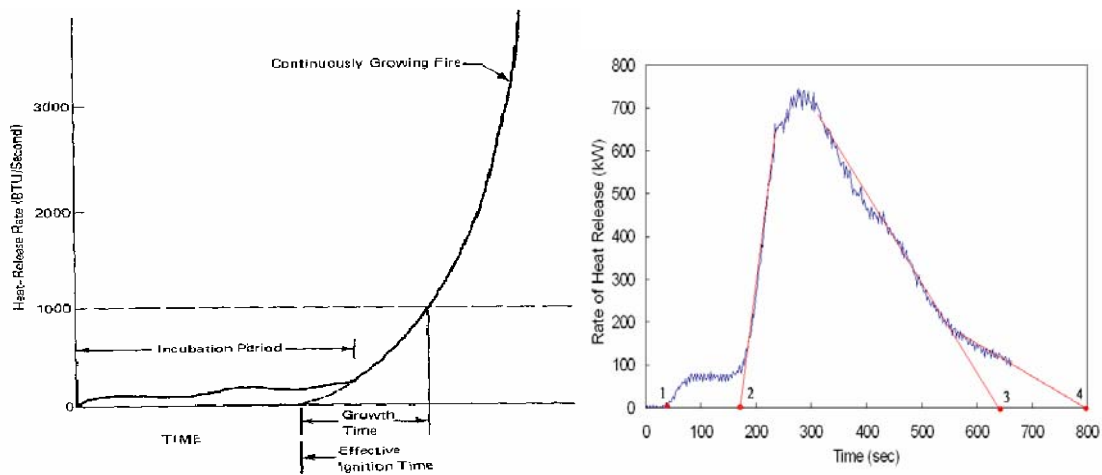


圖 8 燃燒持續時間起迄點示意圖

依統計學(2004)以右尾檢定如圖 9，假設母體為常態分配，母體標準差未知，樣本數 $n \geq 30$ 時，稱為大樣本，抽樣分配 Z 分配，樣本數 $n < 30$ 時，稱為小樣本，抽樣分配 t 分配，由耐火性能檢証法之解說及計算例及其解說(2001)第 7 章技術解說，對於室內的收納可燃物的地板面積每平方公尺總發熱量，是從以往調查結果推定平均值，用大致 1~2 個標準差估計，作為安全範圍，依據統計學(2004)，此顯著水準設為 $\alpha=0.05$ ，A1B1、A1B2、A1B3、A2B1、A2B2、A2B3、A3B1、A3B2、

A3B3 分別各進行 10 次，總計 90 次實驗，其持續時間統計於如下表 1，抽樣分配以 t 分配檢定，A1、A2、A3 合計各為 30 次，抽樣分配以 Z 分配檢定，以下為檢定結果。

$$H_0: \mu \leq 928 \quad H_1: \mu > 928 \quad \text{放棄域: } t > (0.95, 9) = 2.82$$

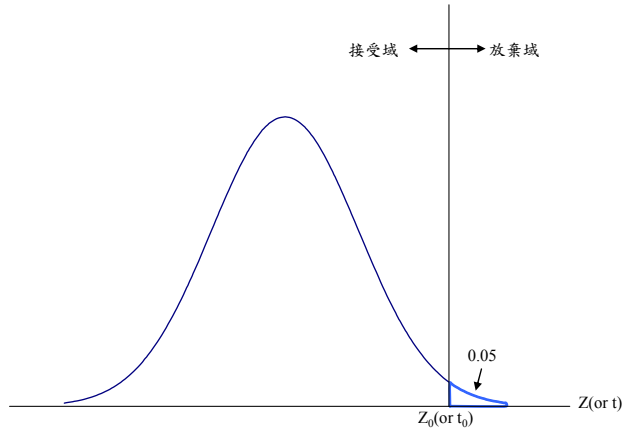


圖 9 右尾檢定示意

表 1 燃燒實驗持時間統計

	A1B1		A1B2		A1B3		A2B1		A2B2		A2B3		A3B1		A3B2		A3B3	
	1~4	2~3	1~4	2~3	1~4	2~3	1~4	2~3	1~4	2~3	1~4	2~3	1~4	2~3	1~4	2~3	1~4	2~3
T1	742	448	2087	879	1054	644	2788	1730	3704	1429	1144	585	×	x	×	×	×	×
T2	723	395	980	652	1001	679	×	1391	×	1288	1375	649	×	818	×	1277	×	×
T3	1054	614	1442	963	892	568	×	1605	×	1071	3041	910	×	1839	×	×	×	×
T4	868	506	1103	626	968	604	×	1227	×	993	1827	963	×	2549	×	×	×	×
T5	720	424	958	656	1351	1113	×	1160	×	1359	2426	815	×	2590	×	1689	×	58
T6	945	531	994	569	×	496	×	1494	2396	918	2126	935	×	1277	×	×	×	142
T7	765	533	927	495	1739	521	×	1080	×	1967	2837	752	×	1751	×	×	×	88
T8	887	548	982	657	921	437	×	2707	1891	1390	2089	1047	×	1944	×	142	×	94
T9	1863	516	836	479	1876	547	×	2658	2827	1101	×	1587	×	2220	×	×	×	102
T10	923	480	792	517	1772	479	×	1475	1861	1149	1785	978	×	1427	×	×	×	71
平均值	949	499.5	1110	649.3	1286	608.8	2788	1653	2535	1266	2072	922.1	×	1823	×	1036	×	92.5
標準差	339.6	64.59	386.5	159.4	339.6	64.6	×	578.1	765.0	301.3	626.7	277.2	×	587.2	×	801.2	×	29.04
t0	0.20	-21	1.49	-5.53	2.79	-5.25	×	3.97	6.65	3.55	5.77	-0.07	×	4.83	×	0.43	×	-91.0

A1(一堆木堆)的計算結果與木堆疏密變化燃燒實驗所得，經統計 t 分配檢定，(1~4)及(2~3)之持續時間皆 $t_0 < (0.95, 9) = 2.82$ ，落在接受域，差異不顯著，即計算結果屬實。但對於 A2(兩堆木堆)

以及 A3(三堆木堆)的狀況下，統計 t 分配檢定的結果顯示，(1~4)及(2~3)之持續時間 t_0 皆大於 2.82，因此計算結果在這種可燃物分散的狀況下，便會失效。

就 A1、A2 與 A3 條件分別進行 Z 分配檢定，結果顯示 A1 落在接受域，差異不顯著，即計算結果屬實，但 A2 與 A3 則未落在接受域內。

A1 平均值(1~4)：1109.14，標準差：389.07，Z0：1.40

平均值(2~3)：585.87，標準差：157.45，Z0：-6.52

A2 平均值(1~4)：2274.49，標準差：679.11，Z0：5.95

平均值(2~3)：1280.51，標準差：497.93，Z0：2.12

A3 平均值(1~4)：---，標準差：----，Z0：---

平均值(2~3)：1115.44，標準差：934.96，Z0：0.60

放棄域： $Z > Z_{0.95}$ ：1.64

由圖 10 為 A1 實驗組與計算持續時間常態分配圖，圖中縱軸為機率密度，代表常態分配曲線下與橫軸所求之面積，即為此連續型隨機變數出現在此區間的機率，藉由此曲線來定義連續型隨機變數之機率分配，並稱此曲線為機率密度函數。實驗結果係以 2 個標準差繪製，計算結果以時間 0 起以 2 個標準差繪製，圖中顯示出以(1~4)為持續時間，則計算結果雖已取 1~2 個標準差作完安全範圍，但結果顯然會有 50% 機率以上會大於計算結果，惟以(1~4)為持續時間認定時，會將引燃階段及最後殘焰階段皆計入，然而此兩部分在過程中有非常大的機率遠長於成長至衰減階段(2~3)；以(2~3)為持續時間認定顯然較(1~4)時間段認定方式合理，以此時間段以 2 個標準差比較，實際燃燒結果將有 0.4 個標準差機率大於計算值。

由圖 11 與圖 12 可發現以 A2 與 A3 整體統計分析，實驗值以(2~3)為持續時間，與此時間段與 2 個標準差之計算值比較，實驗值雖大於計算值，但其燃燒危害程度遠低於計算值之條件，於此情形下計算值仍符合安全範圍。

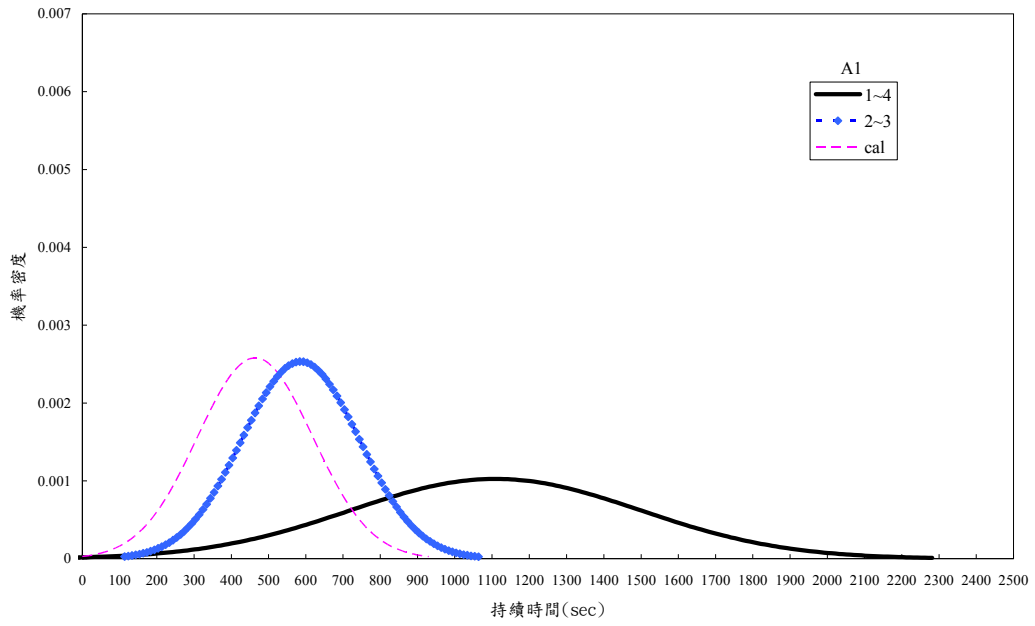


圖 10 A1 實驗與計算持續時間常態分配圖

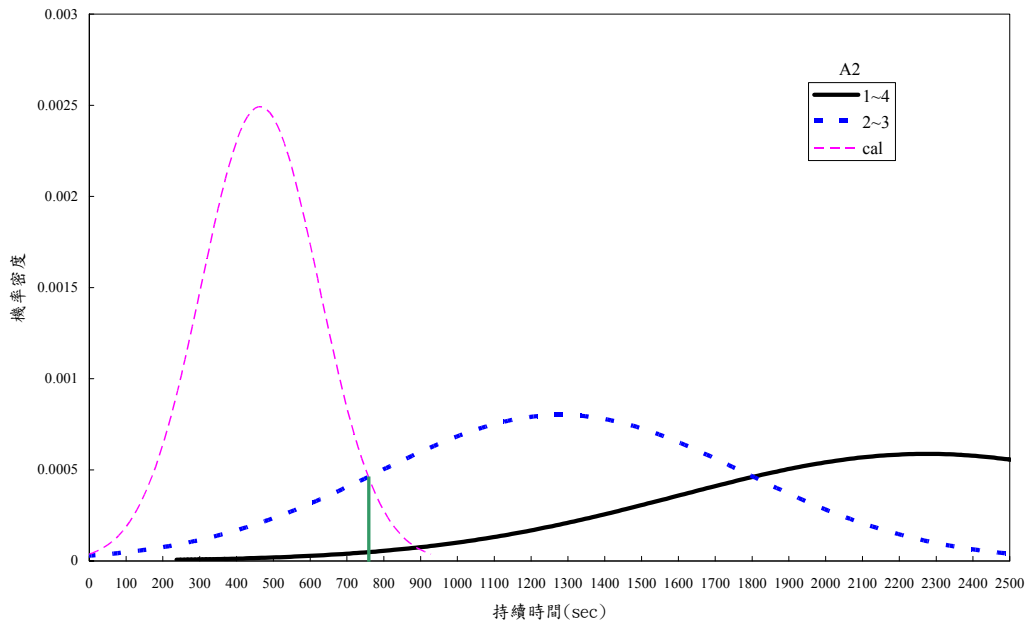


圖 11 A2 實驗與計算持續時間常態分配圖

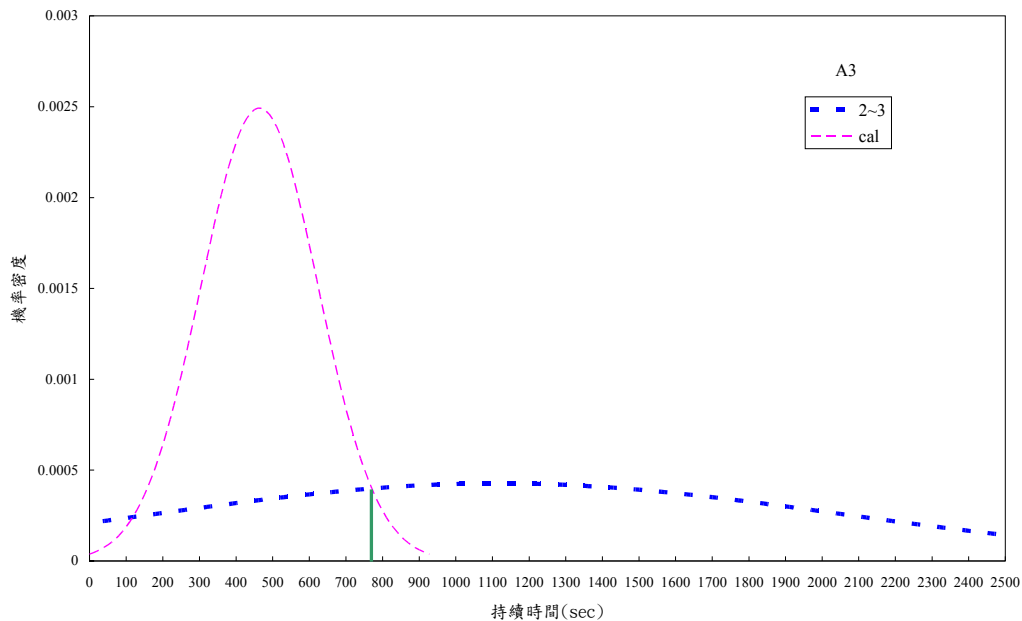


圖 12 A3 實驗與計算持續時間常態分配圖

5-2 木堆燃燒熱釋放率變化

由圖 13 熱釋放率的變化情形來看，隨著木堆單層的擺放密度的增加，燃燒熱釋放率的峰值產生時間會延後，原因是因為木堆的單層擺放密度增加時，木堆的高度會降低，而燃燒器的位置擺置於第一堆木堆的中央下方，因此當母火點燃時，會先加熱木堆中央部分，當木堆的單層擺放密度較高時，木堆可同時加熱的層數便降低，因此初期的火焰延燒速度較慢，火焰緩慢由中央火源處往外擴散，整堆木堆被引燃的時間隨之延後，因此木堆的單層擺放密度增加時，熱釋放率峰值發生時間會延後且熱釋放率的峰值會降低，原因是在一堆木堆的實驗中，木堆的總數固定，即總熱釋放固定，因此燃燒時間增長相對木堆燃燒的熱釋放率峰值會降低。

由圖 14 兩堆木堆的燃燒狀況觀察，可明顯發現木堆燃燒所產生的熱釋放率峰值明顯降低且燃燒時間變長，在不同單層擺放密度下，熱釋放率峰值的變化情形與單堆木堆並無一致性，即熱釋放率峰值的發生時間與大小與單層擺放密度並沒有絕對的關係。觀察兩堆木堆燃燒的現象，發現其熱釋放率曲線上升的趨勢較為陡峭，主要原因是直接受到火源加熱，因此燃燒較容易。

比較一堆木堆(A1)與兩堆木堆(A2)的燃燒狀況，發現兩堆木堆的熱釋放率較低，主要原因是木條總數固定(火載量固定)，因此當木條分成兩堆時，直接置於燃燒器上方的木條數量減少，直接受到燃燒器加熱同時燃燒的木條數目降低，因此熱釋放率較低，當火焰由第一堆木堆中央緩慢延燒到木堆邊緣時，第二堆木堆會受到加熱而被引燃，此時第二堆木堆的燃燒才開始，但第一堆木堆已經接近完全燃燒，因此使得整個木堆的燃燒時間拉得很長，而產生的熱釋放率峰值也隨之降低。

圖 15 將相同單層擺放密度下(3 支/層)，不同木堆數量的熱釋放率變化加以比較，可以發現單一木堆燃燒速度與熱釋放率最高，木堆燃燒速度係指由引燃開始至整理燃燒殆盡所需時間，在相同火載量下，木堆分散時，燃燒速度會減緩，且熱釋放率會降低。由於擺放三堆木堆時，直接受火源加熱之木條數量僅 15 支，因此木堆僅靠本身緩慢延燒來傳遞火焰，拉長燃燒時間。

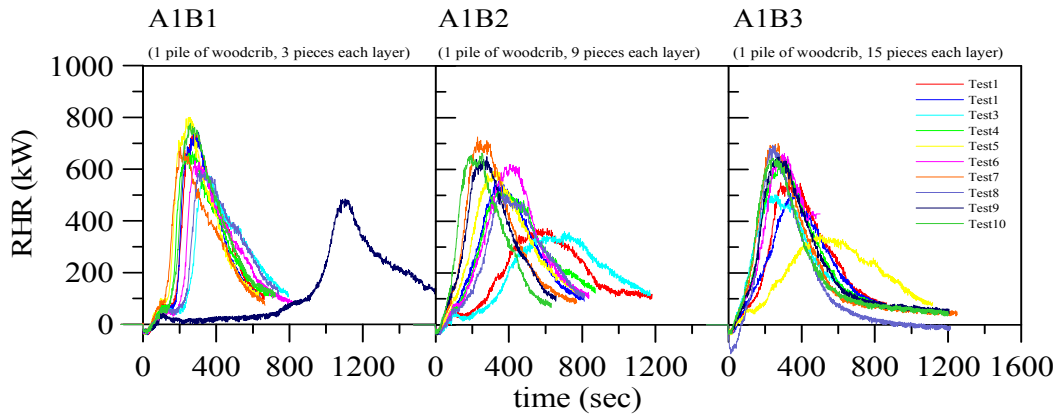


圖 13 不同單層擺放密度下，1 堆木堆燃燒熱釋放率隨時間變化圖

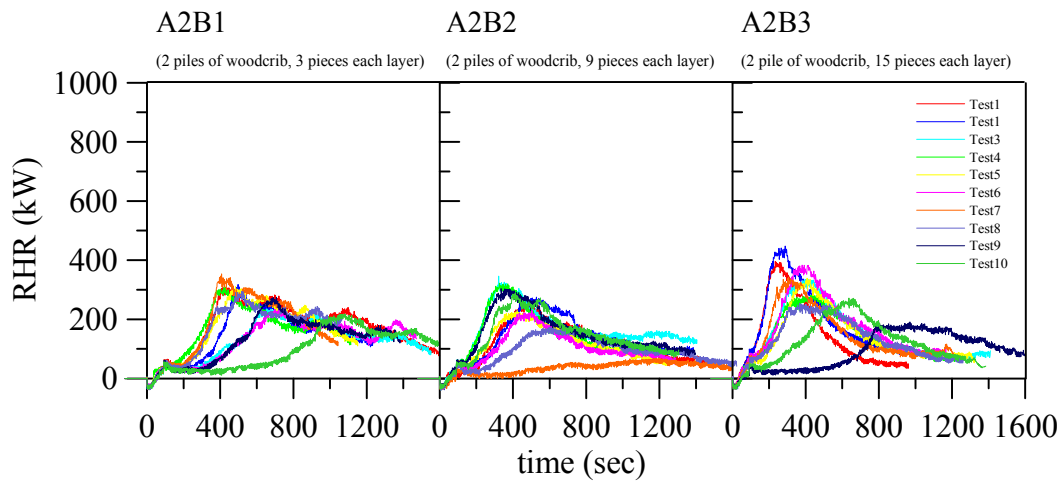


圖 14 不同單層擺放密度下，2 堆木堆燃燒熱釋放率隨時間變化圖

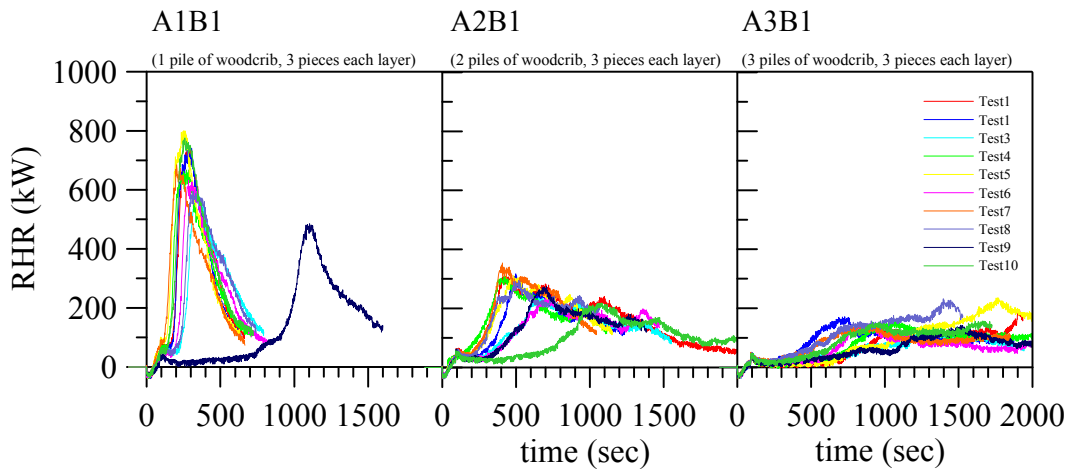


圖 15 相同擺放密度下，不同木堆數量，燃燒熱釋放率隨時間變化圖

5-3 溫度分佈

由溫度分佈圖隨時間變化的曲線(圖 16)可得知，不同木堆堆疊密度均有相同的情況，即在木堆中的熱電偶樹因受到木堆燃燒直接加熱，因此溫度最高(Tree G)，距離木堆越遠，則溫度會稍低，但是由於燃燒後的熱氣累積於房間中，因此上層的溫度(1 公尺以上)均可達 100°C 以上。

比較一堆木堆，不同的堆疊密度下不同擺放密度 3、9、15 支/層靠近火源(TreeG)與房間中央(TreeA)之溫度變化(圖 17)，木堆燃燒的時間、木堆燃燒產生熱的高峰與前述熱釋放率之變化情形具有一致性。比較相同堆疊密度(3 支/層)，不同木堆數目下靠近火源(TreeG)與房間中央(TreeA)之溫度變化(圖 18)，由 TreeG 的溫度檢視可得知，當木堆數量增加時，直接受到火源加熱燃燒的木條數量降低，因此 TreeG 上所有的溫度均較一堆木堆來得低，由 A2B1 的 TreeG 溫度變化發現，在 1500 秒左右，靠近地面的測點溫度突然上升，主要是因為木堆崩塌，為燒盡的木炭掉落所致，A3B1 的現象也是類似。木堆分散時，火勢的成長並不如集中來得大，因此整體房間溫度攀升程度也隨之降低，此點可由房間中央的測溫樹(Tree A)看出。

5-4 火災成長狀況

吾人將木堆燃燒的熱釋放率資料進一步整理，將木堆被引燃時的熱釋放率上升曲線彙整，用以對木堆燃燒所產生的火災成長特性作分析。圖 19 為一堆木堆(A1)在單層擺放密度 3 支/層下(B1)下，木堆熱釋放率成長階段的分佈圖。將此木堆火災成長階段之熱釋放率變化數據，以 α^2 (時間平方火災) 的曲線進行回歸分析後，可得到不同的木堆數量以及不同單層擺放密度下之 α 值，用來判別木堆火災成長的速率，圖中並依據 ISO 對一般設計火災的分類方式 (ultrafast、fast、medium 以及 slow)，將各種火災情境的火災成長曲線繪製出來，其對應的 α 值如表 2 所示。

將各個條件下的木堆燃燒熱釋放率成長階段所得到的參數 α 加以分析，可得圖 20 木堆燃燒

成長階段之火災成長速率係數與木堆密度關係圖，由圖中可得知，木堆於 ISO9705 房間內被引燃後，其火勢成長速率與木堆單層擺放密度（即木堆密度）無明顯關係，火災成長之速率主要是受到木堆分佈情形所影響，單堆木堆，由於可燃物集中且直接受火源加熱，因此其火災成長速度最快，反之，三堆木堆時，其火災成長速度則明顯變慢。

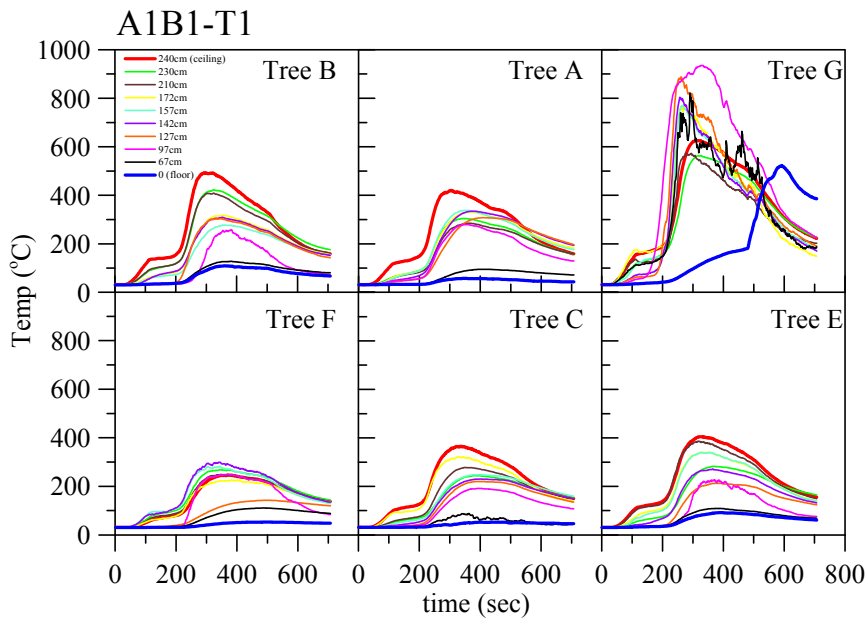


圖 16 A1B1(一堆木堆，擺放密度 3 支/層)之室內溫度隨時間變化圖

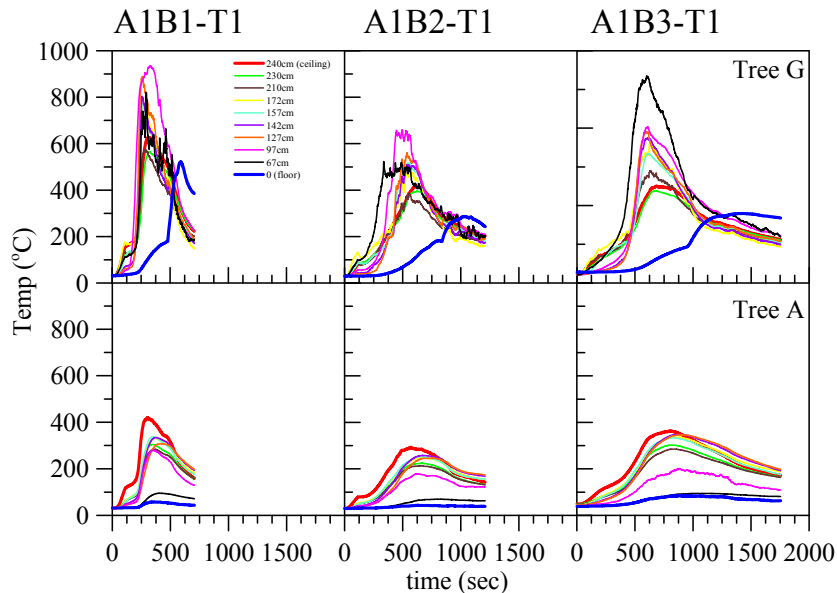


圖 17 一堆木堆，不同擺放密度 3、9、15 支/層靠近火源(G)與房間中央(A)之溫度隨時間變化圖

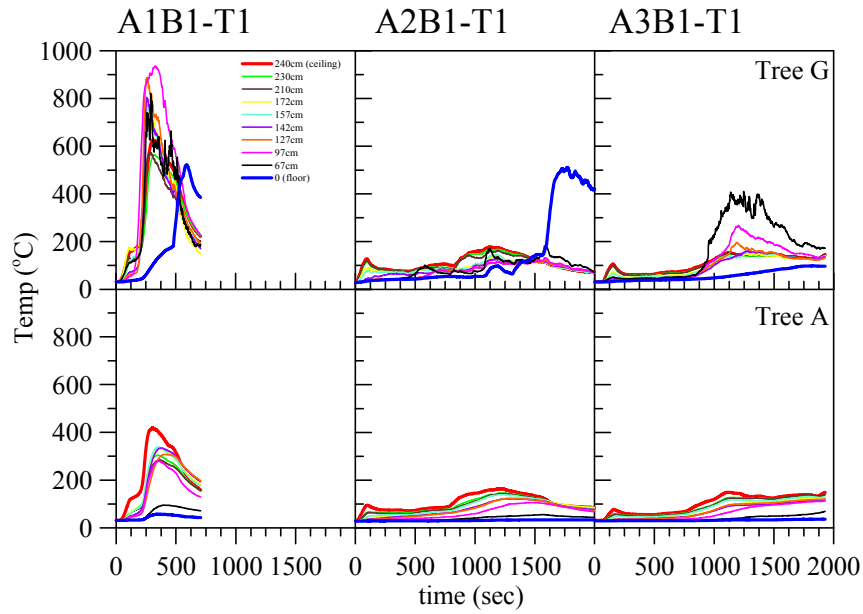


圖 18 擺放密度 3 支/層，不同木堆堆數下，靠近火源(TreeG)與房間中央(TreeA)溫度時間變化圖

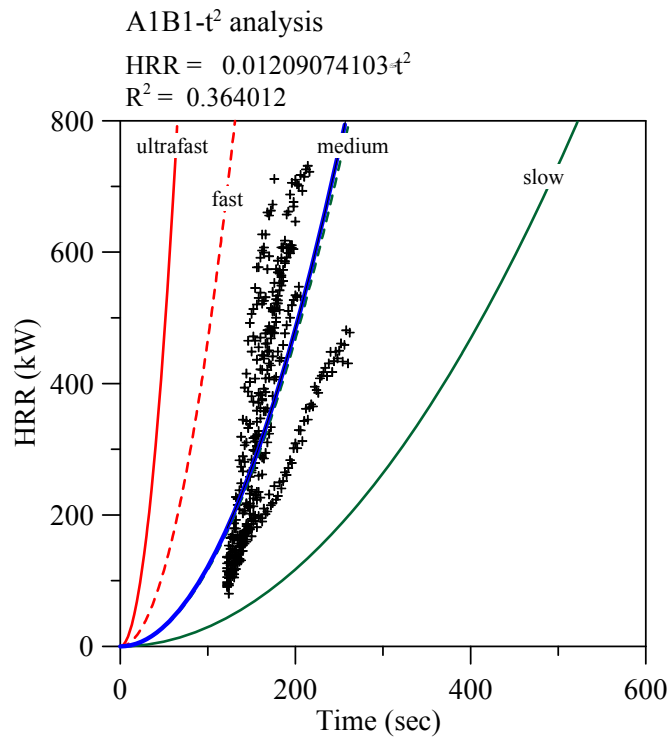


圖 19 擺放密度 3 支/層，1 堆木堆火災成長階段分析圖

表 2 t^2 火災分類表[ISO/TR 13387-2:1999(E)]

Growth Rate	Design Fire Scenario	Value of α
Slow	Floor coverings	0.00293
Medium	Shop counters, office furniture	0.0117
Fast	Bedding, displays and padded work-station partitioning	0.0466
Ultrafast	Upholstered furniture and stacked furniture near combustible linings, lightweight furnishings, packing material in rubbish pile, non-fire-retarded plastic foam storage, carboard of plastic boxes in vertical storage arrangement	0.1874

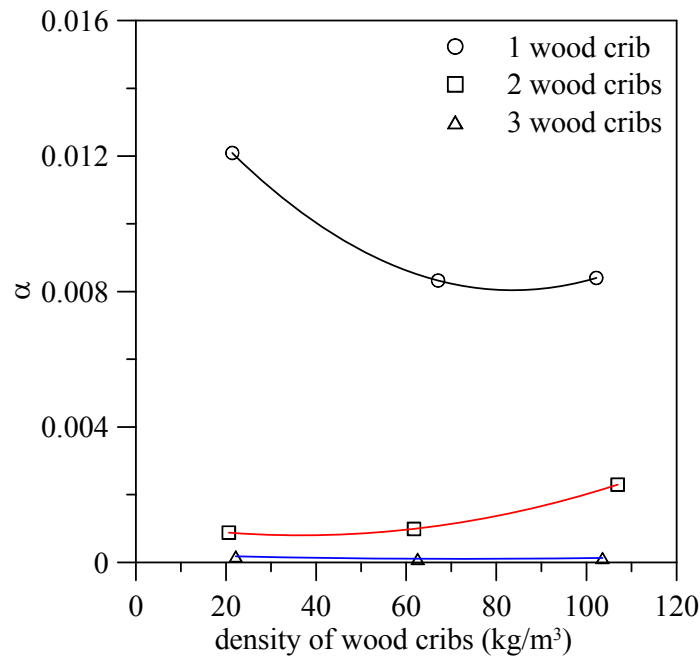


圖 20 木堆燃燒成長階段之 t^2 係數與木堆密度關係圖

六、 結論

由以上對火災持續時間計算與耐火性能檢證之研究以及一系列木堆燃燒實驗結果，可得到以下結論：

1. 在本研究條件下由計算與實驗之統計檢定結果，A1 狀況下(一堆木堆)落於接受域，差異不顯著，計算結果可信，A2 與 A3(兩、三堆木堆)由於可燃物較分散，燃燒熱量不足以延燒全部可燃物，其統計結果雖大多落於接受域外，但因 A2 與 A3 最高熱釋放率皆低於 400kW，相較於 A1 之 800kW，未及於其 1/2，因此火災持續時間的計算結果在本研究條件下仍可適用。

2. 在本研究以輕隔間條件計算牆與樓板 1/2 厚度之發熱量，並以可燃物總量+2 σ (標準差)，其計算值與實驗質統計結果比較，在 A1 條件仍有將近 0.4 σ 的機率大於計算值。
3. 由計算結果與 A1 條件實驗結果顯示，如未考慮牆與樓板內裝材型態所產生之發熱量，其計算結果將低約 4 倍差，顯示內裝材型態所提供之發熱量，為計算結果重要影響因子。
4. 單一木堆燃燒速度與熱釋放率最高，在相同火載量下，木堆分散時，燃燒速度會減緩，且熱釋放率會降低。在相同火載量下，木堆數目變多時，燃燒速度也會減緩，經分析燃燒速度基本上與木堆密度呈現正比的關係。
5. 於本研究固定火載量條件下，以 t^2 火災成長速率分析並探討木堆火災成長速率，發現木堆火災成長速率與木堆密度較無關連性，主要是受到木堆分佈情形所決定。由於一般檢證法之計算式僅以燃載量為考量，並未考量可燃物之分佈，因此，可燃物分佈對於檢證法之計算影響程度值得進一步研究。

誌謝

本研究計畫承蒙內政部建築研究所鼎力支持(095301070000G2012)，得以順利完成，特此申謝。

參考文獻

- 丁育群(1998)《建築技術規則性能防火法規轉換之研究》，內政部建築研究所。
- 丁育群，王鵬智(1999)《建築物防火安全法規替代性規定之探討》，內政部建築研究所。
- 丁育群，王鵬智(1999)《國際建築防火法規之發展趨勢》，內政部建築研究所。
- 大中國圖書公司(2001)《最新建築技術規則》。
- 井上書院(日文)(2001)《2001 年版耐火性能檢証法之解說及計算例及其解說》。
- 內政部建築研究所(2005)《建築物構造防火性能驗證技術手冊》。
- 江建良(2004)《統計學》，普林斯頓國際有限公司，第四版。
- 姚斌，李宏旭，Yang, Jiaw C.，吳克國(2004)〈水噴淋作用下建築構件耐火性能的概率分佈特性〉
《火災科學》Vol. 13, No. 4。
- 經濟部標準檢驗局(2005)《CNS14914，田口式品質工程與其應用指導綱要》。
- 蕭江碧，張俊哲(2001)《建築技術規則防火安全有關規定增修訂之研究－第三章部分條文》，內政部建築研究所。
- (財)日本建築中心(日文)(1986)《建築物綜合防火設計法、第 4 卷、耐火設計法》。
- 建設省建築研究所(日文)(1997)《建設省綜合技術開發計畫、防・耐火性能評估技術之開發報告書》。
- Ma, T.G. and Quintiere, J.G.(2003) Numerical simulation of axis-symmetric fire plumes: accuracy and limitations, *Fire Safety Journal*, Vol.38:476-492.

Moghaddam, A.Z., et. al.(2004) *Fire behavior studies of combustibile wall linings applying fire dynamics simulator*, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference.

ASCE Standard(1998) *Standard Calculation Methods for Structural Protection (ASCE/SFPE 29-99)*, *Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers.*

International Organization for Standardization (ISO)(1999) *Fire Safety Engineering – Part 2: Design Fire Scenarios and Design Fires*, ISO Technical Report, (ISO/TR 13387-2:1999(E)).