



滅火系統技術研發之規劃研究 (II)

細水霧滅火系統技術研發之規劃

研究

內政部建築研究所委託研究報告

PG9302-0267

093301070000G1009

滅火系統技術研發之規劃研（II） 細水霧滅火系統技術研發之規劃 研究

受委託者：財團法人中華建築中心

研究主持人：陳俊勳 教授

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國九十三年十二月

摘要

關鍵字：機械空間，高壓細水霧，二氧化碳滅火系統，傳統撒水系統
FIREPASS，FDS

一、研究緣起

本研究主要是根據 FMRC 對於機械空間的火場測試要求來進行，一系列通風條件下機械空間的防護測試。

二、研究方法及過程

另外亦根據相關的實驗設計，以 FIREPASS 及 FDS 計算軟體來分別計算傳統撒水頭、高壓細水霧噴頭以及二氧化碳滅火系統的滅火效能，並和實驗結果作比較。

三、重要發現

本研究中設計了兩種火源：(1) 遮蔽火源實驗 (2) 無遮蔽火源實驗，在遮蔽火源實驗的結果顯示，無論是傳統撒水防護或高壓細水霧實驗中，火源均能被撲滅，但其所需的時間顯示高壓細水霧滅火系統而更有效的將火給撲滅。在 6 顆及 4 顆高壓噴頭實驗中，其所需的滅火時間分別為 44 秒及 73 秒。另外，在用水量方面，6 顆及 4 顆細水霧噴頭所需的用水量分別為 23.21 公升及 25.01 公升，結果顯示噴頭數量的增加不一定會增加用水量。而在無遮蔽火源的實驗結果中顯示，在該測試條件下，使用 4 顆高壓噴頭有遮蔽/無遮蔽火源實驗中，滅火所需的時間分別為 73 秒及 89 秒。當增加為 6 顆時，所需的時間分別為 44 秒及 40 秒。其結果顯示，遮蔽物對於該測試條件下的高壓細水霧滅火性能沒有太大的影響。至於在數值模擬結果方面，和實驗儀器擺放於各點所量測到的結果大致相符，因此可以補足因實驗儀器限制而未能量測到的數據，諸如氧、一氧化碳、煙濃度及溫度在房間

內的整體分布；模擬結果也顯示滅火效能最佳者為二氧化碳滅火系統（滅火時間為 57 秒），其次為細水霧系統（滅火時間為 114 秒），而傳統撒水系統須 170 秒來滅火。

四、主要建議事項

根據本研究之結果得知，在被遮蔽的油火災的測試中，由油盤上方的火焰溫度可以發覺，因為區劃空間限制了熱能擴散，使得該空間內氧氣濃度降低，導致燃燒效率較差，機械空間在設有細水霧滅火防護系統的情況下，其抑制效能取決於區劃空間內的通風率、火災尺寸、火災類型和噴頭安裝的位置。而本研究不論是 4 顆或 6 顆高壓細水霧防護實驗中，均證實了細水霧滅火系統比傳統的撒水系統防護能更有效的將火給滅掉。而在細水霧防護的模擬中，模擬高壓細水霧的作動，可發現細水霧對降溫有不錯的功效，由模擬的結果發現與實驗數據雖有小出入，但仍有相當的可信賴度。根據加拿大 NRCC 實驗評估，當建築物在一般密閉區劃空間使用氣體滅火系統（如 Inergen）來撲滅火災時，必須關閉區劃空間中的通風系統，否則將無法有效的抑制燃燒。故建議未來可增加在不同通風狀態下的滅火效能評估，利用不同的通風條件，如強制通風（通風口打開，並使用風扇強制對流）。分別測試單流高壓與雙流低壓的細水霧滅火系統的抑制效能。並由相關實驗結果與電腦數值模擬結果相佐證，將有助於國內建築物在機械空間通風狀態下，細水霧滅火系統之抑制效能評估與驗證。

Abstract

Key words: machinery space, high-pressure water mist system, carbon dioxide system, sprinkler system, FIREDASS, FDS.

A series of full-scale fire tests subjected to various fire protection systems under natural ventilation condition are carried out based on the test standard of machinery space by FMRC fire test protocol. In addition to the fire tests, this project uses FIREDASS and FDS to simulate the thermal and flow fields of the high-pressure water mist, traditional sprinkler and carbon dioxide systems. The computational results are compared with the corresponding fire scenarios to evaluate their respective fire extinguishment efficiencies. Two fire source scenarios, which are shielded and unshielded pool fires, respectively, are used. In the shielded pool fire tests, the results show that the pool fire can be extinguished by the conventional sprinkler and high-pressure water mist suppression systems. However, the extinguishing time for conventional sprinkler protection system is longer. For 6-nozzle and 4-nozzle tests in the water mist system, they take 44s and 73s as well as 23.21 L and 25.01 L of water quantity to extinguish the shielded pool fires, respectively. For the comparison between shielded and unshielded pool fire tests, the extinguishing times for the use of 4-nozzle are 73s and 89s, whereas they are 44s and 40s for 6-nozzle. Apparently, the obstruction seems to have no obvious influence on the fire suppression effectiveness. For the simulations, the predicted results are generally agreed well with the corresponding test measurements. Because the computational results can show the detailed distributions of oxygen, carbon dioxide and smoke concentrations as well as temperature in the space, they can supplement the limited measured data due to the instrumentation limitation. The simulated results also indicate that the carbon dioxide system has the best fire extinguishment efficiency (the extinguishment time is 57 sec.). The water mist system needs 114 sec. to put out the fire, whereas the sprinkler one takes 170 sec..

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	III
目 錄	IV
圖目錄	VIII
表目錄	XI
第一章 前 言	1
1.1 研究動機	1
1.2 文獻回顧	3
1.3 本文架構	7
第二章 實驗儀器	9
2.1 測試空間	9
2.1.1 動力引擎模擬平台	9
2.2 防護系統	10
2.2.1 傳統撒水系統防護	10
2.2.2 高壓細水霧系統	11
2.3 實驗量測儀器	11
2.3.1 氣體分析儀	11

2.3.2 溫度測量.....	12
2.3.3 煙遮蔽量測器.....	12
2.3.4 數位攝影機.....	13
2.4 實驗操作步驟	13
第三章 實驗結果和討論	25
3.1 結果討論	25
3.1.1 無任何防護系統.....	25
3.1.2 傳統撒水器系統防護.....	28
3.1.3 高壓細水霧系統.....	30
第四章 電腦數值模擬分析技術介紹	49
4.1 FIREDASS 計算軟體.....	50
4.1.1 FIREDASS 發展歷程.....	50
4.1.2 FIREDASS 使用模式介紹.....	51
4.1.3 FIREDASS 可靠度驗證	52
4.1.4 建立 FIREDASS 輸入檔	52
4.1.5 FIREDASS 模擬結果繪圖.....	52
4.1.6 執行 FIREDASS 的效益	53
4.2 FDS 計算軟體	53

4.2.1 FDS 緣起與簡介.....	53
4.2.2 FDS 的使用步驟.....	54
4.2.3 FDS 的使用方法介紹.....	55
4.2.4 FDS 的後處理—SMOKEVIEW	56
第五章 電腦數值模擬結果和討論.....	61
5.1 撒水效能模擬分析	61
5.1.1 模擬模型	61
5.1.2 火源設定	61
5.1.3 無任何防護之模擬結果	62
5.1.3.1 煙流分析.....	62
5.1.3.2 溫度分析.....	62
5.1.3.3 氧濃度分析.....	62
5.1.3.4 一氧化碳濃度分析.....	63
5.1.4 撒水防護之模擬結果	63
5.1.4.1 撒水作動時間分析.....	63
5.1.4.2 溫度分析.....	64
5.1.4.3 氧濃度分析.....	64
5.1.4.4 一氧化碳濃度分析.....	64
5.1.5 二氧化碳抑制效能模擬分析	65

5.1.5.1 二氧化碳進氣模型.....	65
5.1.5.1 滅火時間推估.....	65
5.2 細水霧效能模擬分析.....	66
5.2.1 模擬對象說明	66
5.2.2 具 6 顆高壓細水霧噴頭防護之模擬結果	66
5.2.2.1 高壓細水霧噴頭說明.....	66
5.2.2.2 溫度分析.....	66
第六章 結 論	83
參考文獻	84
附錄一 細水霧噴頭噴撒特性檢測.....	87
1 噴霧原理.....	87
2 細水霧體積通量密度及噴撒分佈檢測說明	87
3 擴散角(Θ)、細水霧濃度分佈	88
4 擴散角量測	88
5 粒徑	88
6 速度.....	89
7 高壓噴頭檢測結果	89
附錄二 審查意見回覆表	93

圖目錄

圖 1.1 本文的實驗架構.....	8
圖 2.1 FMRC 機械空間火災情境模擬測試圖 (A)正視圖和(B)俯視圖	15
圖 4.1 FIREDASS 子模式關連圖.....	57
圖 4.2 用於細水霧驗證之測試場規劃圖	58
圖 4.3 細水霧驗證實驗室空間配置圖	58
圖 4.4 FIREDASS 格點圖.....	59
圖 4.5 FIREDASS 壓力切面圖.....	59
圖 4.6 FIREDASS 速度向量圖.....	60
圖 5.1 無任何防護之電腦模擬模型	67
圖 5.2 具 6 個撒水頭防護之模擬模型	67
圖 5.3 熱釋放率設定.....	68
圖 5.4 煙粒子分佈圖—5.6 秒	68
圖 5.5 煙粒子分佈圖(9.6 秒).....	68
圖 5.6 煙粒子分佈圖(29.4 秒).....	69
圖 5.7 火場流向圖(40 秒).....	69
圖 5.8 溫度切面圖(60 秒).....	70
圖 5.9 氧濃度切面圖(35 秒).....	70
圖 5.10 氧濃度切面圖(163 秒).....	71

圖 5.11 氧濃度切面圖(180 秒).....	71
圖 5.12 一氧化碳濃度切面圖(35 秒).....	72
圖 5.13 一氧化碳濃度切面圖(163 秒).....	72
圖 5.14 一氧化碳濃度切面圖(180 秒).....	73
圖 5.15 溫度切面圖—39 秒	73
圖 5.16 溫度切面圖—93 秒	74
圖 5.17 溫度切面圖(51 秒).....	74
圖 5.18 溫度切面圖(80 秒).....	75
圖 5.19 溫度切面圖(170 秒).....	75
圖 5.20 氧濃度切面圖(163 秒).....	76
圖 5.21 氧濃度切面圖(180 秒).....	76
圖 5.22 一氧化碳濃度切面圖(163 秒).....	77
圖 5.23 一氧化碳濃度切面圖(180 秒).....	77
圖 5.24 二氧化碳進氣模型(62 秒)	78
圖 5.25 二氧化碳進氣模型(77 秒)	78
圖 5.26 火柱形態(59 秒)	79
圖 5.27 火柱形態(88 秒)	79
圖 5.28 火柱形態(117 秒)	80
圖 5.29 細水霧模擬模型	80

圖 5.30 溫度切面圖(60 秒).....	81
圖 5.31 溫度切面圖(62 秒).....	81
圖 5.32 溫度切面圖(174 秒).....	82
附錄一 圖 1 高壓微孔噴霧器之細水霧落點分佈.....	92

表目錄

表 1.1 細水霧滅火系統的滅火機制與應用範時機	2
表 2.1 每顆撒水頭的出口壓力	10
表 3.1 用不同的保護方法點燃參數.....	30
表 4.1 FIREDASS 發展計畫成員與分工說明.....	51
表 5.1 撒水頭詳細座標位置	61
表 5.2 撒水頭詳細作動時間	64

第一章 前 言

1.1 研究動機

由於 Halon 系統對各類火災有優越的抑制效果以及所需的放射劑量少,同時 Halon 在放射時不會對儀器設備造成額外的危害。因此,在早期 Halon 滅火系統被廣泛的應用在各種場所當中,但不幸的是,Halon 的組成成份中含有會有破壞臭氧層的鹵原子,而在環境保護議題日益重視的情況下,在 1987 年由美國及全球各大工業國家所署的蒙特婁公約中(Montreal Protocol),禁止了 Halon 滅火系統的生產,並規定在 2003 年 12 月時 Halon 滅火系統必須完全的停用。因此,許多專家學者便開始致力於新型滅火系統的研究與開發,例如細水霧,壓縮空氣泡沫,及氣體滅火器等,作為 Halon 滅火系統代替用品,而其中以細水霧滅火系統最具有優勢。

而什麼是“細水霧滅火系統”呢?,根據 2000 年 NFPA750 規範中對細水霧系統的說明:細水霧滅火系統為一種噴撒滅火系統,在系統中設置有一個或數個噴頭,可放射細水霧用以控制、抑制、撲滅火源,噴頭在最小設計工作壓力下,噴出水之水滴平均粒徑至少 99%的應小於 1000 微米($D, 0.99 \leq 1000 \mu m$)。其平均粒徑大小的決定方式,必須由 24 個量測點所決定。關於細水霧滅火系統的滅火性能機制的研究可以追溯到 20 世紀 50 年代中期,1955 年在 Braidech et al 研究裡提出,[2]細水霧滅火機制主要是為氧氣取代以及冷卻效果。在經過 40 餘年的研究驗證了 Braidech 的研究觀點的正確性,而在近期 Mawhinney et al 的研究中發現[3]細水霧滅火系統另有其它的滅火機制,例如降低熱輻射效應,水蒸汽將空氣稀釋與直接對未燃物品進行降溫的動作,表 1.1 為細水霧滅火系統的滅火機制及應用範圍。

表 1.1 細水霧滅火系統的滅火機制與應用範時機

細水霧系統滅火機制	應用時機
熱移除	細水霧系統的有效防護範圍、動量以及質流率，必須足以吸收燃燒時產生的熱
氧氣取代	滅火方式： 1. 蒸發的水圍住火源，形成隔絕 2. 增加細水霧粒子的動量迫使水蒸汽進入火的基部
熱輻射衰減	細水霧必須： 1. 對未燃燒的表面 2. 對燃燒表面
蒸汽/ 空氣稀釋	1. 透過水蒸汽 2. 透過產生的空氣
動力效應：	1. 對於油池液體燃料 (liquid fuel pool) 或者噴撒火災 (spray fire)，細水霧系統必須有包圍火源或者稀釋在燃料表面上方空氣分佈 2. 噴嘴設計可以影響進入火源內部空氣，因此稀釋火源周圍空氣
1。降低火焰速度	1. 適用於爆燃(deflagration)的情況，透過降低控制速度的那些火焰的前面，所造成壓力過大(overpressure)爆炸 2. 細水霧可能抑制或者鼓舞燃燒
2.加速燃燒反應	

細水霧滅火系統經過幾十年的研究，雖已經被證明其最具有做為 Halon 滅火系統取代物品的優勢，例如其優越的滅火能力，對於環境不會造成任何負面的影響以及它的無毒性等等 [4]。但是，細水霧滅火系統並不像一些全區防護的滅火系統(total flooding agent)，細水霧的滅火效能受到火勢的大小，防護空間的幾何形狀與易燃物的特性等影響。同時，在台灣對於細水霧滅火系統尚無明確的法源依據，因此，細水霧滅火系統仍必須針對不同火災情境來進行一系列的滅火性能測試。

選擇機械空間做為細水霧滅火系統的測試對象，的主要原因在於對於高層建築、購物中心和醫院等等地方，一般在地下室都設置有機械空間或動力引擎室。而當該地方發生火災的時時候，特別是火災發生在醫院時，消防人員沒有法子進行第一時間的滅火搶救，因此，該空間滅火系統的滅火性能變得非常關鍵。在機械空間裡的潛在的火災危機，主要來源是各式各樣高壓儲存槽所儲藏的 B 類易燃物品例如汽油或者柴油等燃料或都是發電機台內部用來潤滑的可燃液體。總之，機械空間內所遭遇的火災危險，大至為 NFPA 325[5]裡歸類為 1，2 類火災或者 3 類易燃的液體。

從 1990 年起，許多製造商和研究組織便開始於細水霧滅火系統在機械空間火災的保護發展。例如以全世界最著名的產物保險公司之一個結合工程和研究單位 FMRC 來說，他們多年來持續的進行關於細水霧滅火性能的相關測試，如渦輪機房，機械空間，工業油炊具以及計算機機房等等地方，使細水霧滅火系統的應用範圍更加廣泛。

1.2 文獻回顧

細水霧滅火系統的滅火性能與火場大小、火源遮蔽的情況、通風條件以及細水霧滅火系統本身的特性有關。在 Pepi [6]研究中顯示在

使用低壓細水霧滅火系統作為防護時，6MW 噴撒火災(spray fires)滅火所需的時間較 1MW 噴撒火災(spray fires)來的更快。在他的研究中所量測到的結果顯示，在使用不同數量的低壓細水霧噴頭時，6MW 噴撒火災(spray fires)滅火所需的時間為 23 秒到 173 秒，但對 1MW 噴撒火災(spray fires)而言所需的滅火時間卻增為 5 分 24 秒至 21 分 10 秒，在這可以看出在小熱釋放率的情況下，細水霧的滅火性能不是那麼的顯著，同時在不同數量的低壓細水霧噴頭的設置，深深的影響著滅火所需的時間。

Bill 等人 [7]在大空間的測試中(樓地板面積 2800m^2 天花板高度為 18m)，細水霧噴頭與細水霧噴頭之間的水平方向距離均為 1.5m ，使用的不同火源的情況下，如 1 到 6MW 的遮蔽/無遮蔽噴撒火源(spray fires)以及油盤火源等。無論是使用高壓(69 bar)或是低壓(12 to 15 bar)細水霧滅火系統作為防護方式，其實驗結果均顯示即使細水霧噴頭的數量，從 30 顆增加至 100 顆時，細水霧滅火系統仍無法有效的將火勢給撲滅。在該報告中指出增加樓地板的面積以及天花板的高度，會降低火源周圍細水霧粒子的濃度，因而也增加了滅火的困難度。

之後 Back 等人[8]在防護空間為 960m^3 全尺寸火災試驗中指出，將細水霧噴頭安裝在兩個不同高度時，在實驗所設計的火載量下，細水霧滅火系統均能在短短的 25 秒內便將火勢給撲滅，且使用的水量均不超過 100 公升。Hansen[9]關於細水霧系統在機械空間火災局部防護實驗研究中發現，細水霧噴頭若能直接對火源進行防護，其滅火所需的時間會較側向(90 度)防護所需的時間來的短。另外，他的研究中也發現，當細水霧噴頭被安置在距地較高的位置時，即使都是直接對火源進行防護的情況，兩者將火勢撲滅所需時間仍會有所不同。這是

因為噴頭在這樣的設置之下，在相同的動量下會有較多的細水霧能進入火源內部，將空氣給取代同時產生較多的水蒸汽形成類似氣罩(gas shielded)的效果。

細水霧滅火系統的滅火性能會受測試空間內通風條件造成燃燒後的熱氣與外界新鮮空氣交換現象影響。然而，在通風條件下細水霧的滅火性能仍是較其它氣體滅火器:如二氧化碳滅火器及海龍替代用品來的優越。Dundas [10]統計的結果指出 Dundas 在由於防護氣體經由通風口的洩漏情況下，Halon 或者二氧化碳滅火系統無法有效將火源給撲滅的機率高達 37%。Pepi[11]在低壓細水霧滅火系統上研究的結果顯示，在通風條件底下，細水霧滅火系統仍然可以有效的將火勢給撲滅，但是火勢撲滅的時間卻較在無通風條件下增加 30%到 70%。美國海軍 Navy [12]在的全尺寸實驗研究顯示，在小火載量的火災情況下，在通風口增設 2 到 4 顆低壓細水霧噴頭的數量，通風條件對於細水霧的滅火時間並沒有什麼影響，而在大火載量的情況底下，相同在門口增設低壓細水霧噴頭，其通風條件對於滅火時間不會有太大的影響，這是因為細水霧的濃度增加，則可以有效的降低通風條件對細水霧滅火性能所造成的影響。

Zhigang Lu [13]的報告中指出細水霧滅火系統的滅火性能與火源的位置以及細水霧滅火系統本身的特性有關。在報告中指出在使用單流高壓細水霧防護的情況下，只有在門口附近的測試火源滅火時間會受到通風條件的影響，而測試空間內其它測試點滅火時間則不受通風條件的影響。而當細水霧系統改為雙向低壓細水霧系統時，除門口附近測試點的滅火時間受通風影響外，測試空間內其餘的測試點的滅火時間也會受通風條件的影響。這是因為對雙向低壓的細水霧而言，其產生的動量較單向高壓細水霧系統來的低，因此，外界的空氣仍有足

夠的動能穿透氣幕因而造成其它測試點的滅火時間的增加。

在加拿大國家火災風險管理計畫研究所的研究委員會[14]，一項初步的研究顯示細水霧滅火系統若以一個間歇性進行防護，其結果較以持續性放射的滅火性能來的好。因為，在間歇性放射中可以避免細水霧粒子的動量受到受熱而上升的水蒸汽影響。換句話說，在間歇性放射的情況下細水霧會有較在持續放射下大的動能產生，因此會有更多的細水霧進入到火源內部將燃燒所需的新鮮空氣給取代。

Kim 等人[15]在全尺寸火災實驗中顯示，在強制通風的測試條件下，使用連續性放射的細水霧滅火系統，無法將有遮蔽情況下的圓形油盤火源給撲滅。但是，若將連續性放射方式改為間歇性放射時，在相同通風條件下，細水霧滅火系統卻能在 168 秒便將火勢給撲滅。而實驗中所測量到的最低氧濃度為 16% 而最大的二氧化碳濃度是 3.3%。另外，在 Kim 所規劃的另一火災情境中，對於噴撒火災(燃料為 Heptane)無論是連續性放射或者是間歇性放射的情況，火勢均可以有有效的受到控制，而其所需的滅火時間分別為 227 秒及 510 秒，在放射期間單位面積的水量分 4.3 公升/平方公尺及 15.6 公升/平方公尺。而在間歇性防護情況下，在天花板附近的氣體溫度比連續性放射來的高。其原因是在間歇性放射的情況下，原本被抑制的火勢迅速恢復，在天花板附近的熱氣體的濃度增加。當細水霧滅火系統再次開動，則會有更多的水蒸汽在測試空間內生產，因而提升細水霧滅火系統的滅火效力。Erdem 等人 [16,17]在防護空間為 $80m^3$ 的機械空間實驗中指出，在天花板以牆壁兩側分別安裝 6 顆以及 8 顆細水霧噴頭，20 秒放射 20 秒停止放射的防護情況底下，細水霧滅火系統能有效的將火給熄滅並且成功滿足 FMRC 對於機械空間防護的操作試驗協議要求。

1.3 本文架構

在本研究的實驗設計中，主要是依據 FMRC 對於機械空間火災模擬的測試要求，來進行一系列的細水霧滅火性能測試(見圖 1.1)。在相關實驗中，將火源分為有遮蔽火源以及無遮蔽火源。在遮蔽火源實驗部分，其防護方式分為：無任何防護實驗、傳統撒水系統防護實驗及高壓細水霧系統防護實驗。其中在高壓細水霧防護實驗中，又細分為 4 顆與 6 顆高壓細水霧噴頭兩個不同防護方式，藉由實驗過程中所量測到的油盤溫度變化，探討不同防護方式下的滅火性能。同時探討不同防護方式對於測試空間內氣體溫度變化、煙遮蔽率、氧氣濃度以及一氧化碳濃度變化的影響。另外在無遮蔽火災實驗中，主要是探討在該實驗的測試條件下高壓細水霧的滅火性能，以及其所需的滅火時間是否會受到遮遮物體的影響。同時，也將觀察在無遮蔽情況下，氧氣以及一氧化碳濃度變化是否會與遮蔽火源的情況下有所不同。本文之後半部份將以電腦模擬的方式，針對上述的實驗情境進行電腦模擬，將模擬結果與實驗結果交互比對，做更深入的探討。

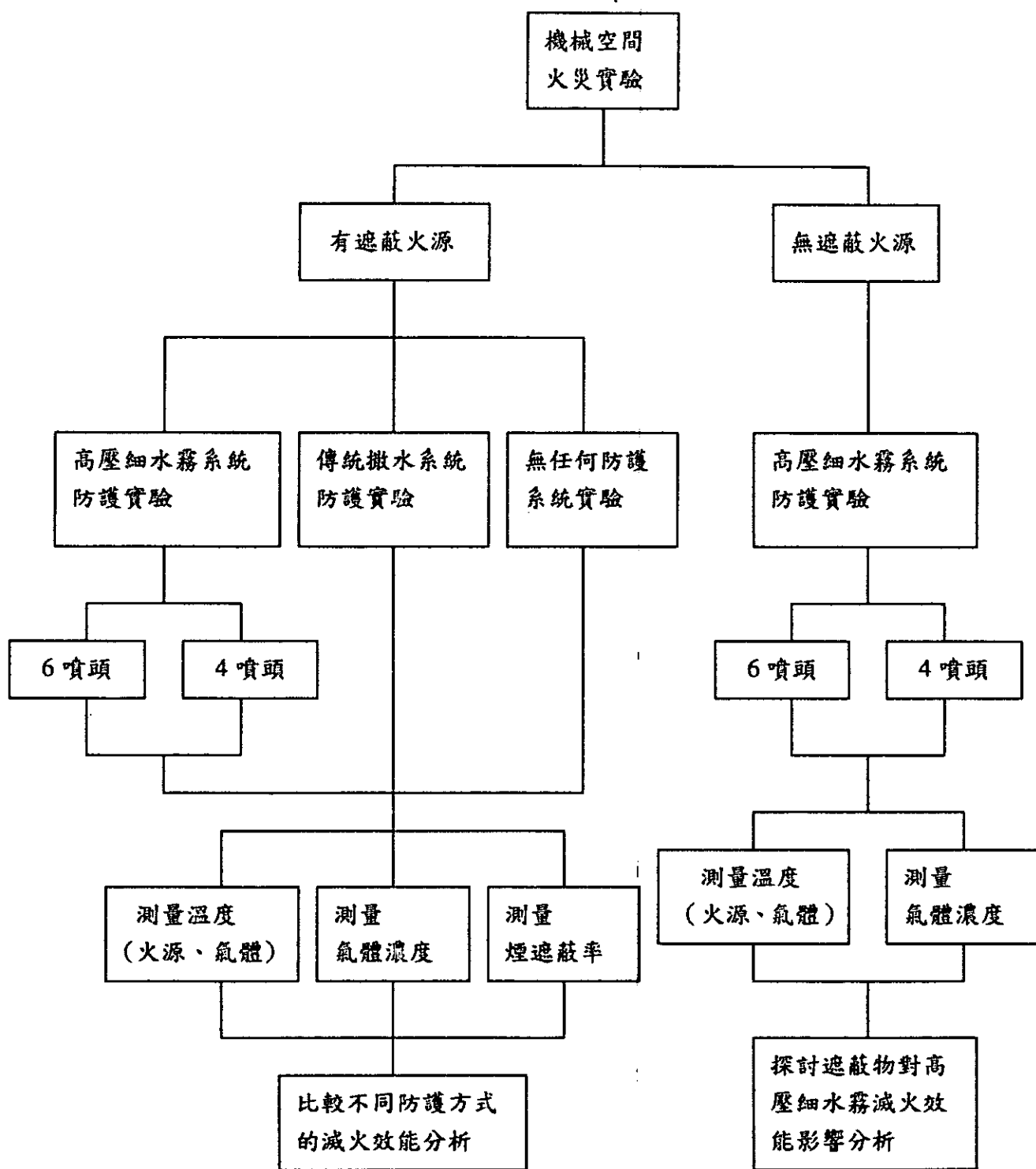


圖 1.1 本文的實驗架構

第二章 實驗儀器

在本文的實驗中，主要是依據 FMRC 對於機械空間的測試要求，所進行一系列自然通風條件下的機械空間火災實驗[18]。而在火源規劃部分，在本文將火源分為有遮蔽與無遮蔽的油類火災這兩種情況。油盤面積為 1 m^2 的方形不銹鋼容器，倒入 8 公升的高級柴油(Diesel Oil)，並在引燃前將 100ml 的 95 汽油 (95 Gasoline)，在倒入 95 汽油後 30 秒點燃火源。整個的實驗設備主要是由一個測試空間、不同的火災防護以及一些量測儀器所組成。而以上所提到的實驗設備，將會在接下來的部分作詳細的說明，其相關位置可參考圖 2.1。

2.1 測試空間

本實驗中所用的測試空間為一 $6.1\text{m} \times 3.5\text{m}$ ，高度 2.9m 的矩形空間。測試空間門口大小 $1.35\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ，在門口的對面有一 $0.75\text{m} \times 0.5\text{m}$ 方形透明玻璃窗作為觀察的途經(Viewing Window)。而本實驗用的測試空間同時裝設有兩個 $80.0\text{ cm} \times 60.0\text{ cm}$ 的排風口，其相關位置可參考圖 2.1。

2.1.1 動力引擎模擬平台

根據 FMRC 對機械空間裡細水霧滅火系統的滅火性能測試要求，在測試空間內，設置有一用來模擬動力引擎的金屬平台（參閱圖 2.2）。如圖 2.2 所示，模擬平台主要是由一片水平的以及兩片傾角為 45° 的金屬板組成，其主要用途在於模擬當機械空間火災發生時，該空間內的滅火系統，因機台將火源遮蔽所造成滅火系統滅火性能影響。在水平金屬板部分，其所在的高度為離地 1.0 m 處，面積為 $1.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 厚 3.0 mm 方形鍍鋅金屬板，在這要特別做個說明，在 FMRC 的規範中該水平金屬板的厚度為 5.0 cm ，但考慮施工上的方便性，因此，將原先的 5.0 cm 改為 3.0 mm 。接著在兩側方形金屬板部分，在 FMRC 規

範中規定斜板寬度 0.7 m 及傾斜角度為 45° 外，對其它尺寸並無明確的規定，因此在該部分依實驗場地限制以施工方便性來做規劃，其尺寸為 0.7 m×3.40 m×3.0 mm。另外，根據 FMRC 規範，在水平板較長的兩側，均設有一 0.5 m×1.0 m 的金屬檔板，其功用是用來測試半遮蔽情況下，細水霧系統的滅火性能。

2.2 防護系統

本文實驗中包含了三種火災防護系統的設計，其分別為無任何防護情況、傳統撒水系統防護以及高壓細水霧滅火系統防護。

2.2.1 傳統撒水系統防護

在傳統撒水系統防護實驗中，關於撒水頭的設置，主要是依據“各類場所安全消防設備設置”來進行安裝。在本文中在天花板共設置有 6 顆下噴型撒水頭，其作動溫度為 68 攝氏度。而根據水力計算公式以及圖 2.4 出水壓力與出水量的關係圖，可以得到在該實驗中每顆噴頭的出水口壓力以及放射的水量。（如表 2.1 所示）撒水頭在天花板的相對位置，如圖 2.5 所示，噴頭以 2.0 m×1.5 m 的方型來安置。

表 2.1 每顆撒水頭的出口壓力

位置	編號.1	編號.2	編號.3
出口壓力 kgf/cm^2	3.42	3.45	3.48
放射量 (Lpm)	144.18	145.28	145.84
位置	編號.4	編號.5	編號.6
出口壓力 kgf/cm^2	3.42	3.45	3.48
放射量 (Lpm)	144.18	145.28	145.84

2.2.2 高壓細水霧系統

高壓細水霧系統分別由兩主要是由高壓噴嘴和高壓幫浦所組成(參閱圖 2.6 和 2.7)。在高壓細水霧系統滅火測試中，我們設計了兩種不同的防護系統，其中第一種防護系統為 4 顆向下防護的高壓噴頭，另一種則是在離火源兩端，額外加上兩顆相同型號的高壓噴頭，如圖 2.8 所示。根據廠商所提供的資料，實驗中所用的高壓細水霧噴頭的 K-factors 為 $0.64 \text{ l/min/bar}^{1/2}$ ，而在標準工作壓力下所噴出的細水霧平均粒徑為 $69 \mu\text{m}$ ，其每顆噴頭每分鐘排出的水量為 5.4 公升，其詳細的噴撒特性資料可參見附錄一。至於高壓細水霧噴頭設置部分，依據廠商所提供的資料，進行噴頭的安置。在天花板的部分，是由 4 顆高壓細水霧噴頭圍成一個 $3.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 方形區域，另外，在側向高壓細水霧噴頭部份，在火源中心兩側 150cm 高度為 1.0m 的地方，設置有兩顆相同型號的高壓細水霧噴頭。在高壓幫浦部份，型號為 AEEF 的高壓幫浦，其工作電壓為 220 v 所能達到的最大工作壓力為 140 kgf/cm^2 ，同時其所能提供的最大流量為 59 l/min 。

2.3 實驗量測儀器

2.3.1 氣體分析儀

本實驗中所用的體分析儀，如顯示 2.9。該實驗儀器是由 Testo 公司自行研發的 COMFORT3 軟體，透過 PCMCIA 卡所控制。當幫浦以手工或者自動的方式開始時，燃燒所產生的氣體，會經由前端的陶磁過濾器將大部分的雜質(主要是 soot)過濾掉，而過濾後的氣體再經由探測管進去機器本體內。在進內氣體分析儀後，氣體的溫度會被冷卻到 $4-8^\circ\text{C}$ 之間，這時氣體中所含的水氣便會凝結成液態的水，以確保能得到乾燥空氣，同時降低儀器內部元件因水氣所帶來的損害。然後，乾燥的空氣會透過幫浦提供的動力到達氣體感應器。這裡，乾燥的空氣會經由孔隙極小的橫隔膜擴散進傳感器，然後產生信號。最後，氣體再透過排氣管排放至外界。

2.3.2 溫度測量

在本實驗中，一共設置有 4 條熱電偶樹(Thermocouple Tree)，如圖 2.10 中所示，其目的在於測量測試期間，機械空間不同位置溫度變化情況。在本文中，我們將所設置的熱電樹分別標號為#1，#2，#3 和 #4，每條熱電偶樹均由六支 k-型的熱電偶(K-type Thermocouple)(量測範圍約 $-200^{\circ}\text{C} \sim 1370^{\circ}\text{C}$)所組成。在熱電偶樹編號#1、#2、#4 這三條熱電偶樹，其在較接近天花板的兩支 k-型熱電偶其間距為 30 cm，而剩下部分則為 50 cm 設置一支 k-型熱電偶。編號#3 的熱電偶樹，由於位置關係，其每支熱電偶的間距均為 30 cm。另外，為了量測實驗中火源因防護系統的作動，而造成溫度的變化，因此我們在油盤上方 50cm 的地方(由油盤底部量起)，也設置了一支 k-型的熱電偶，其編號為熱 S-F。而實驗過程中所產生的訊號會經由訊號處理器 (DU-100 與 DA-100) (參閱圖 2.11)透過乙太網路傳輸方式儲存在電腦中。

2.3.3 煙遮蔽量測器

煙遮蔽量測器(CODEL Model 200t)包括一個信號處理機單位和兩台相同的雷射光源發射器(如圖 2.12 和圖 2.13 所示)。兩台雷射光源發射器分別被安裝相對牆上 1.8 米高度。信號處理機包含了電源以及控制的微處理器部份。

信號處理機/電源 可以調整雷射光源的波長，以及發射的雷射光強度，而雷射光強度衰弱量經訊號產生器(D100 以及 DA-100) 直接把一個電訊號轉變成一個電壓訊號，進而得到相對應的煙遮蔽率。

在雷射光源發射器部分包含一個感測頭(包括光源，一個檢測器和相關視覺的感應元件)； 以及一面校準鏡和可旋轉的閥門。光源由兩個波長為 637 nm (在人眼睛可視範圍內)的高功率發光二極體(LED) 組成。當一台雷射光源發射器工作情況，可由圖 2.14 說明每次雷射光線在一個補償循環期間的接收及反射。

煙遮蔽率測量的詳細的工作原理描述如下。考慮兩個獨立的雷射光源分別設置在牆壁的兩端的情況，此時，從雷射光線 1 發射至雷射光線 2 的關係可以用下列方程式來表示；

$$\pi_{21} = K_1(D_{12}/D_{22})$$

其中： K_1 = gain constant to product

$\pi = 1$ (100 % transmissivity, clean air condition)

D_{12} = the detector output at unit 1 (internal reference level)

D_{22} = the detector output at unit 2

或是從雷射光源 2 發射至雷射光源 1 的關係式，可以寫成下列式子：

$$\pi_{12} = K_2(D_{21}/D_{11}),$$

其中： K_2 = gain constant to product

$\pi = 1$ (100 % transmissivity, clean air condition)

D_{21} = the detector output at unit 1

D_{11} = the detector output at unit 2 (internal reference level)

以上所述，如圖 2.8 所示，另外從上面的兩個關係式，(π)可以以下列關係式來表示：

$$\begin{aligned}\pi &= \pi_{12} \times \pi_{21} \\ &= K_1(D_{21}/D_{11}) \times K_2(D_{12}/D_{22})\end{aligned}$$

2.3.4 數位攝影機

在試驗將數位式攝影機（類型 DCR-TRV40，新力），放置在觀景窗(Viewing Window)的地方，以幫助記錄實驗過程中火場的變化情形。而錄製的影像透過影像轉換卡(IEEE1394 的插槽)，以及 Ulead 6.0 影像處理軟體，將所錄製的影片存放在電腦中。

2.4 實驗操作步驟

- (1) 將筆記本電腦與桌上型電腦上頭所顯示的時間調成一樣
- (2) 安裝熱電偶，煙遮蔽測量儀和氣體分析器儀器。然後，在開始實驗前，在對所連接的 channel 做進一步的確認，保證他們的訊號輸出正確地連接相應 channel。
- (3) 把柴油倒入不銹鋼容器中，並且攪拌燃料使其均勻分佈於油盤中。
- (4) 在油池的火被點燃之前，先開始記錄溫度，煙遮蔽和氣體濃度同時開始錄影
- (5) 把 100 ml 的 95 汽油倒進油盤中，並且在倒入後 30 秒點燃火源。
- (6) 迅速離開測試空間並且把門給關上。
- (7) 進行機械空間火災試驗的記錄觀察。
- (8) 當試驗結束時，關閉測量儀器。同時，啟動排氣系統同時把門打開，把燃燒產物抽到外界，直到試驗環境返回原始狀態，再接著下一次試驗。

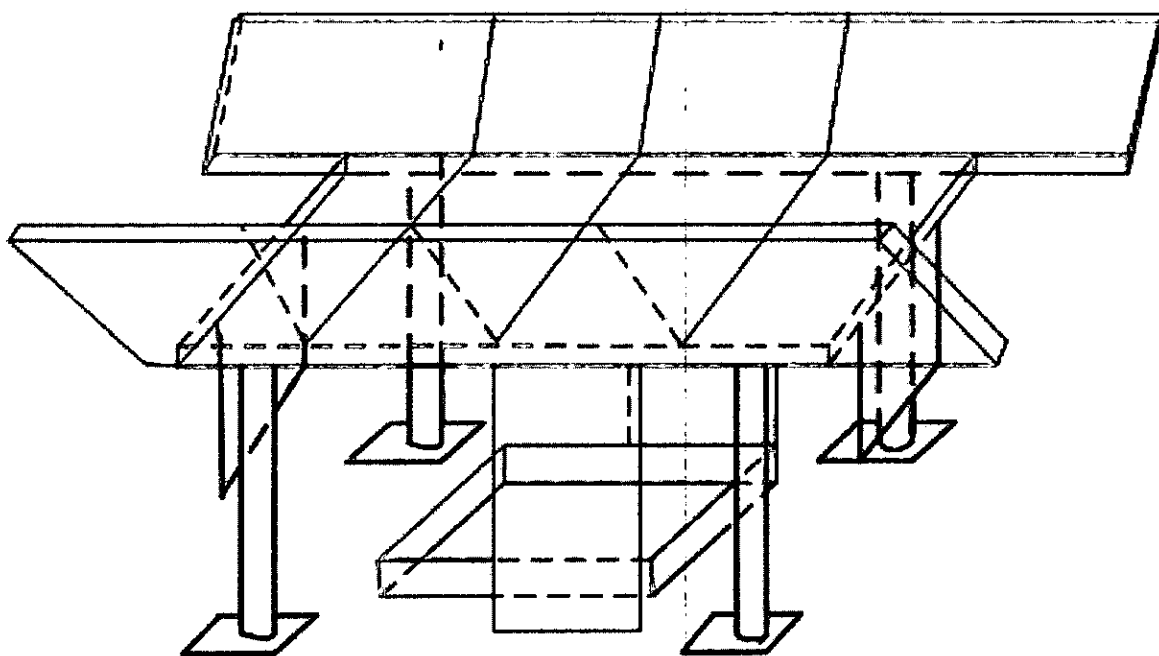


圖 2.2 動力引擎模擬平台簡圖

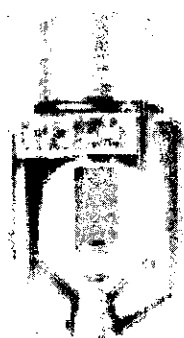


圖 2.3 向下型噴頭

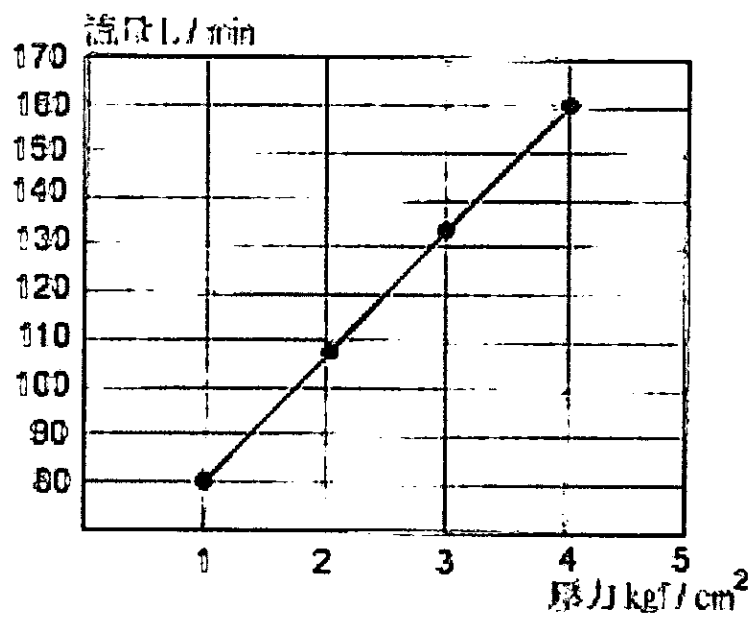


圖 2.4 出口壓力與出水量的關係圖

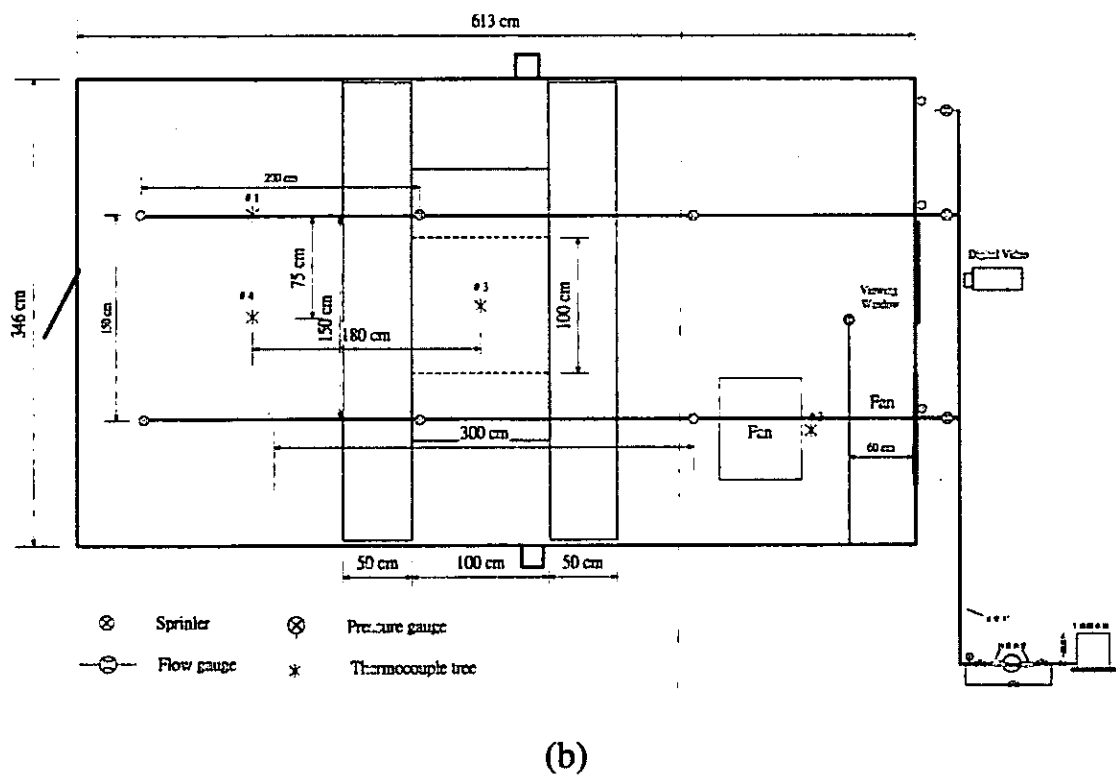
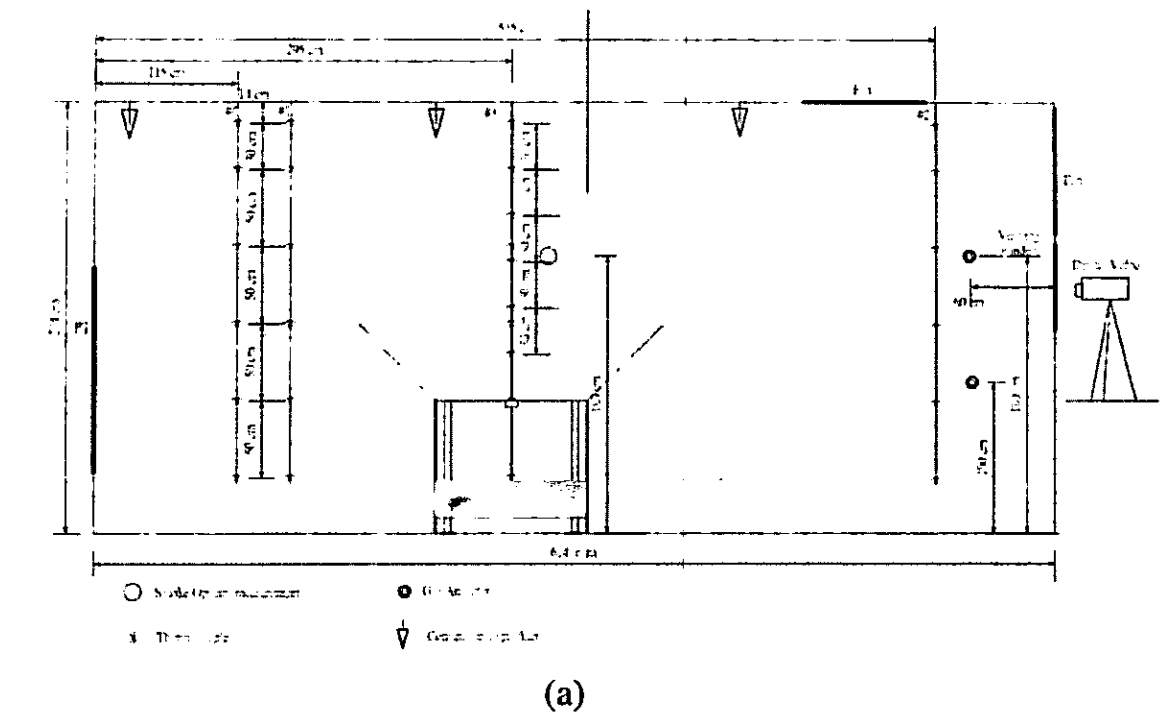


圖 2.5 傳統撒水器防護測試實驗簡圖(A)正視圖和(b)俯視圖

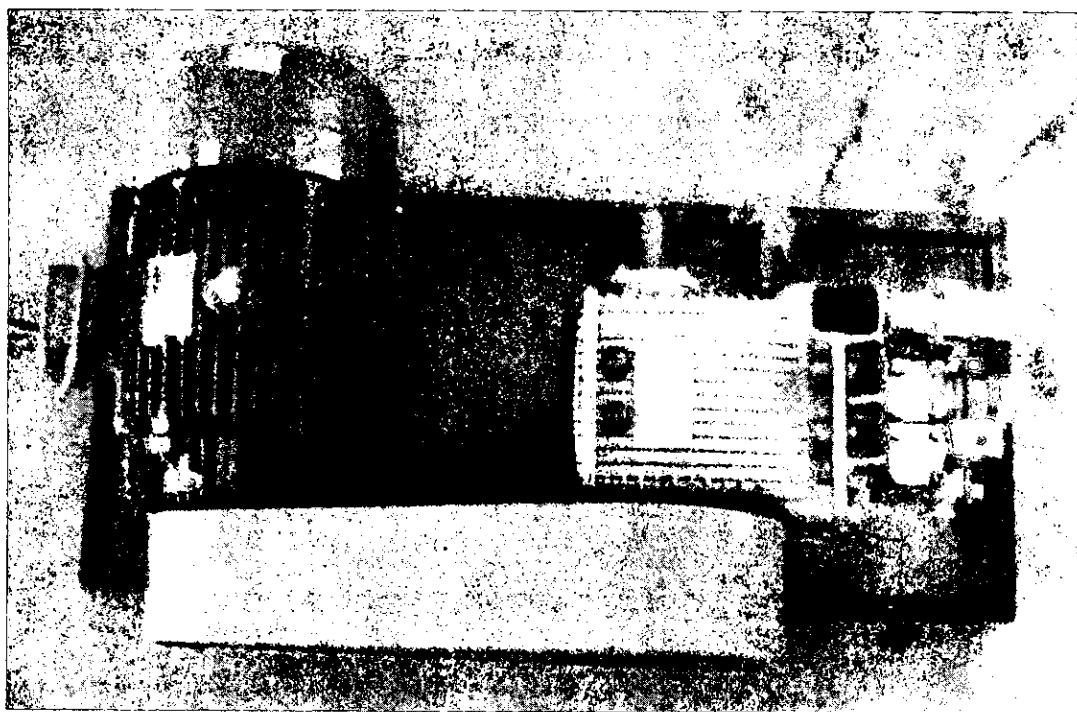
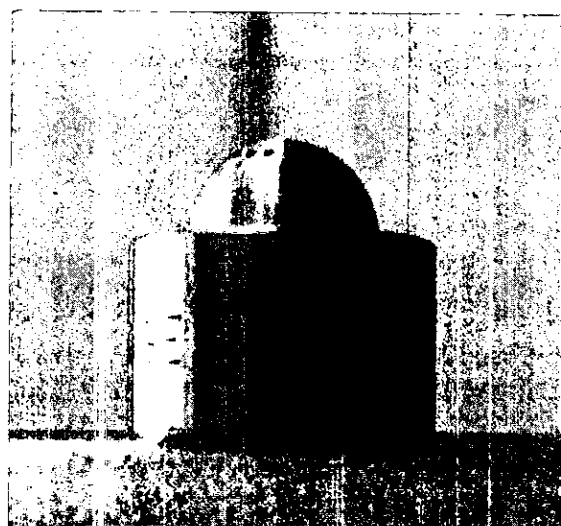


圖 2.6 高壓幫浦

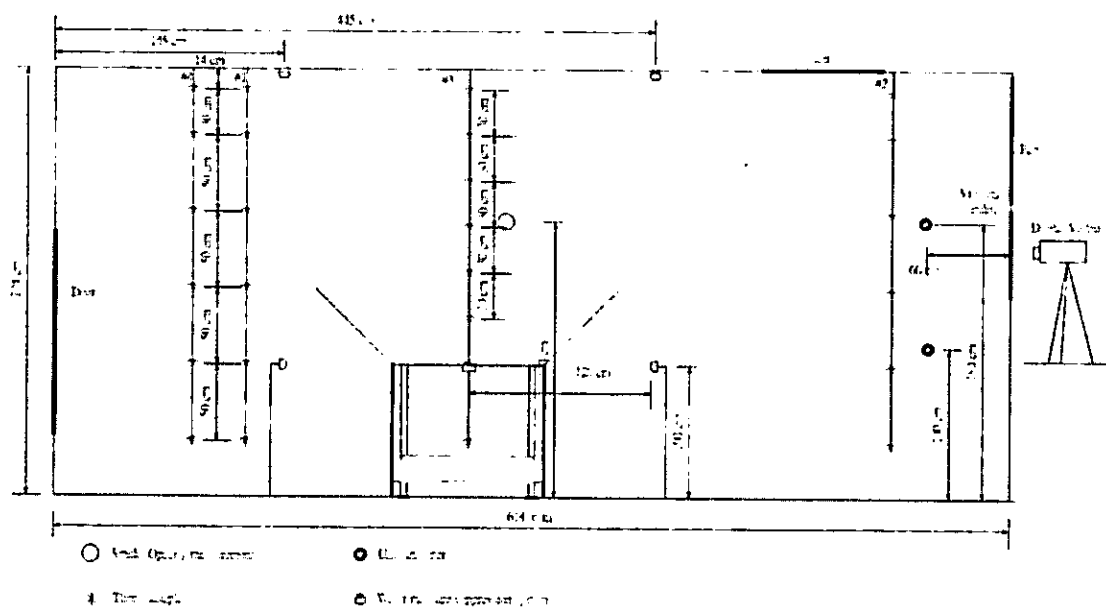


(a)

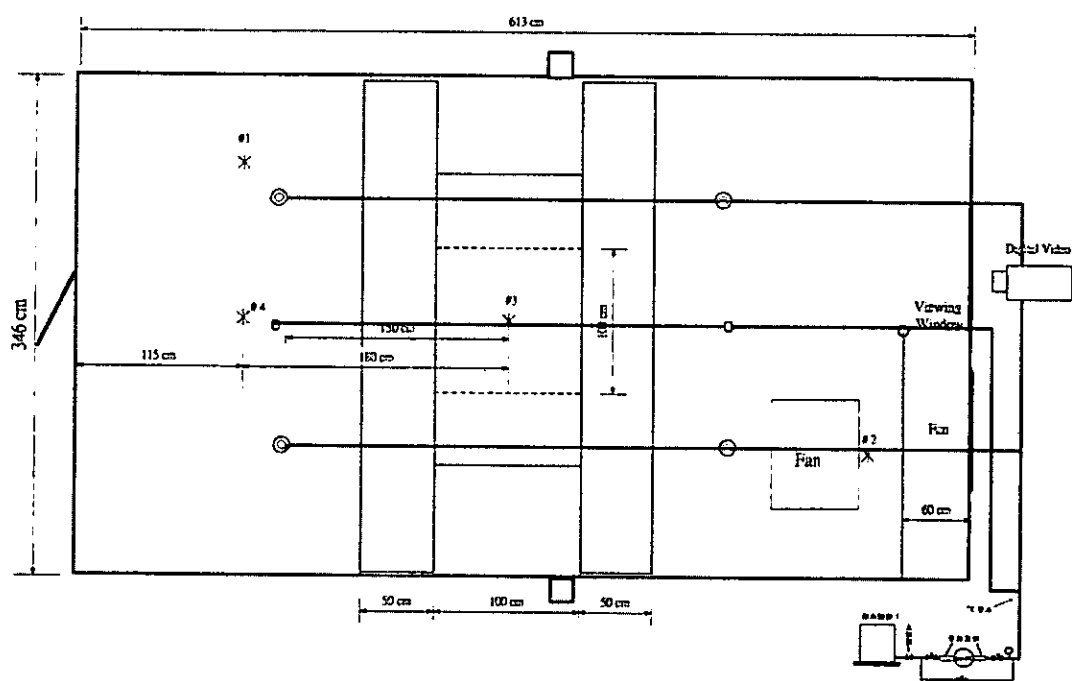


(b)

圖 2.7 高壓細水霧系統噴嘴(a)正視圖以及(b)俯視圖



(a)



(b)

圖 2.8 高壓細水霧滅火防護測試實驗簡圖(A)正視圖和(b)俯視圖

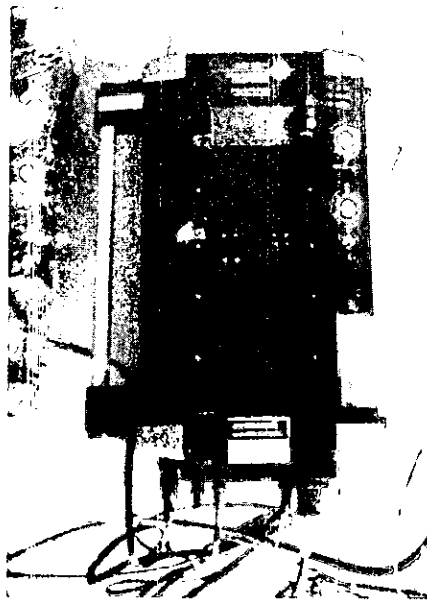


圖 2.9 氣體分析器

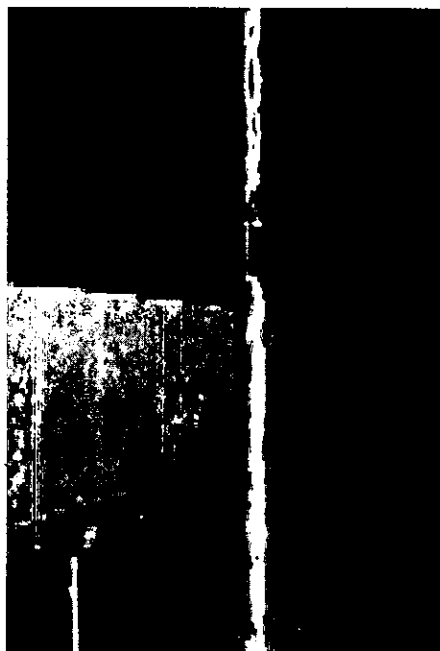
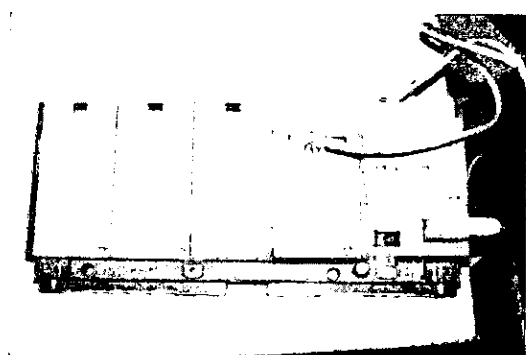
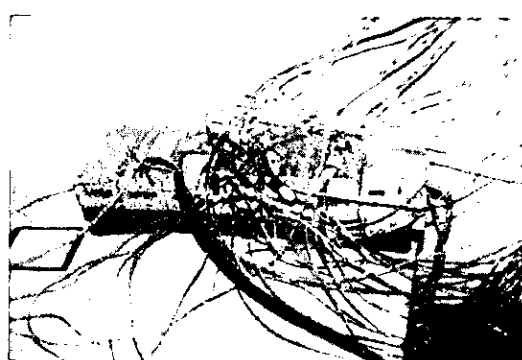


圖 2.10 熱電偶樹



(a)



(b)

圖 2.11 數據處理器(a) DA-100 (b)DU-100

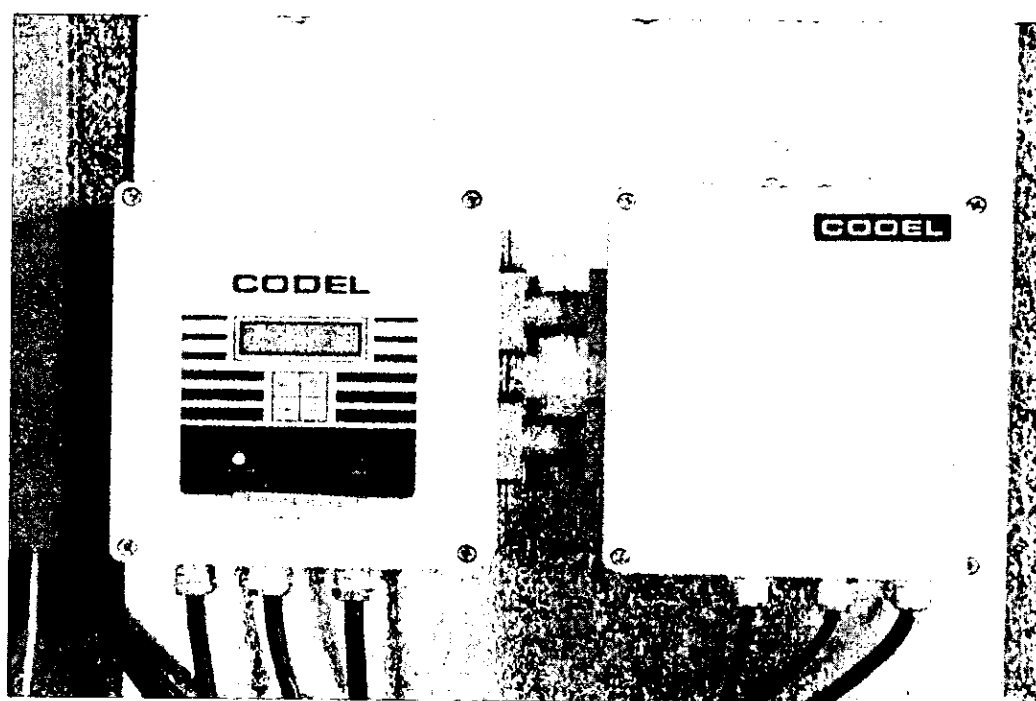


圖 2.12 煙遮蔽量測的訊號處理器

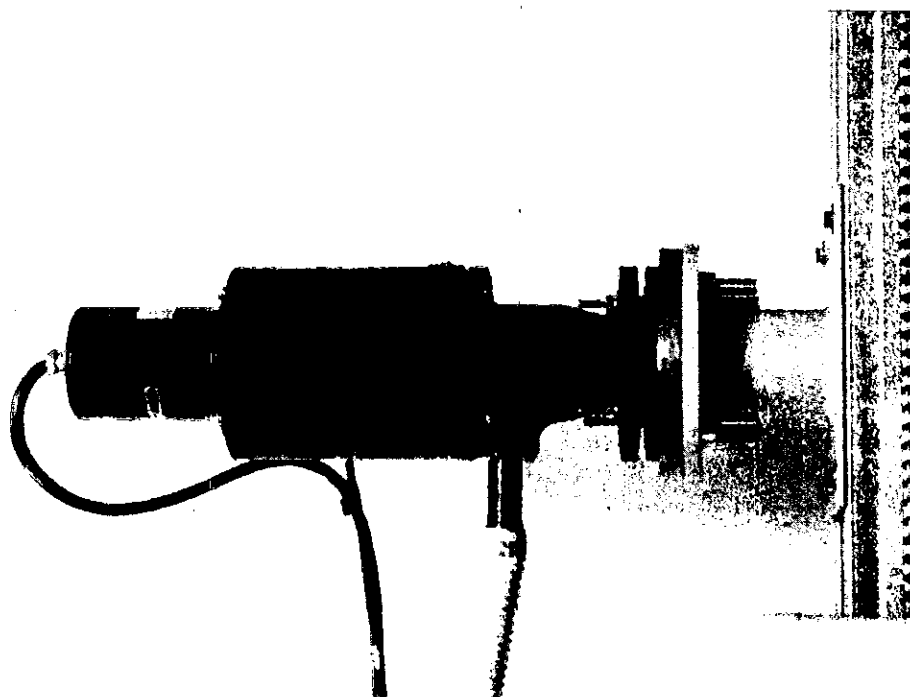


圖 2.13 雷射光源發射器

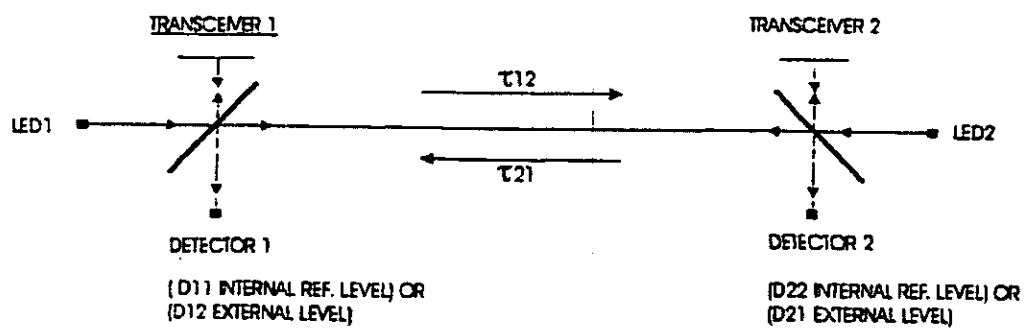


圖 2.14 煙濃度測量原理

第三章 實驗結果和討論

本實驗結果主要是依據 FMRC 對機械空間的測試要求[18]，所進行一系列實驗得到的結果。所規畫的火災情況為油池火災，其面積為 1 m^2 ，高 25cm 的正方形不銹鋼容器，並使用台糖的柴油(Diesel oil)作為實驗所需的燃料。而選擇油池火災做為本實驗的測試火源的原因的如下。首先，對於熱釋放率的計算方便性而言，計算油池火災的熱釋放率較計算噴撒火災(Spray fire)來的單純，以 1 m^2 的柴油(Diesel oil)而言，其熱釋放率約為 1.2 MW [24]。第二，對細水霧滅火系統而言，在相同的熱釋放率情況下，油池火災一般較噴撒火災(Spray fire)更難撲滅。而基於這兩個原因，因此選擇油池火災做為機械空間實驗的火源。

3.1 結果討論

本文現階段所討論的試驗結果可以分成 3 部分：(1) 無任何防護系統的情況，(2) 傳統撒水系統防護以及(3) 高壓細水霧系統防護，所得到的測試結果。藉由，油盤上方 50cm 處所設置 k-型熱電偶，在不同防護方式下所量測到的結果，比較不同防護方式下，對於油池火災滅火時間的影響。同時探討且比較不同防護方式，對於測試空間的溫度、氧氣及一氧化碳濃度的影響。

3.1.1 無任何防護系統

在無防護情況所測的氣體溫度、氧氣、一氧化碳以及煙濃度變化，主要是用來做為不同的防護方式的比較依據。

圖 3-1 中所表代的是在自然通風的情況下，機械空間在不同防護方式下，油盤上方 50 cm 處所量測到的溫度變化情形，其中不同顏色分別代表不同防護方式的結果。首先，先來探討編號 S-F 的熱電偶在無任何防護情況下，所量測到的結果。在無防護實驗中，柴油在

時間 $t=100$ 秒時被點燃，此時溫度迅速上升並且在時間 $t=160$ 秒時，達到 800°C 。在時間 $t=160$ 秒後溫度會稍微下降並且在 700°C 左右保持一個上下振蕩的趨勢。最後，在時間 $t=250$ 秒時溫度因燃料的耗盡而開始逐漸下降。因此，在無任何防護系統的條件下，本實驗所規劃的火源燃燒所需的時間總數是 150 秒。

接著我們來探討在該測試條件下，不同位置的溫度變化情形。熱電偶樹編號 #1、#2、#3 及 #4 在無任何防護系統條件下，所量測到的結果分別如圖 3-2、圖 3-3 以及圖 3-4 所示。在時間 $t=100$ 秒，柴油被點燃，由於大量熱釋放溫度迅速上升。對熱電偶樹 #1 來說，(圖 3-2 中所示)，該位置的最高溫總是在高度為 2.8m 發生，在測試期所量測到的最高溫度為 300°C (在時間 $t=250$ 秒時)。首先，來比較熱電偶樹 #1 及 #4 所量測到的結果，從先前圖 2.1 中可以知道，編號 #4 的熱電偶樹較編號 #1 的熱電偶樹更為接近火源，但由於熱電偶樹編號 #4 與油盤間尚有金屬板阻隔 (如圖 2-2 所示)，因此編號 #4 的熱電偶樹並未直接暴露於燃燒時產生的熱氣當中。而在熱電偶樹編號 #1 的位置，由於該位置距火源並不會太遠，同時直接暴露於燃燒產生的熱氣當中，因此在熱電偶樹編號 #1 的位置量測到的溫度較另三條熱電偶樹高。另外從實驗所得到的結果當中可以看出，只有編號 #1 的熱電偶樹顯示，溫度會有隨著高度增加趨勢。另外，它有最高和最低限額之間的最大的溫差。

對編號 #2 熱電偶樹來說，與火源的距離為四條熱電偶中最遠的，同時最接近通風孔。而從圖 3-3 顯示，在編號 #2 熱電偶樹這位置最高溫度，發生在高度 1.5m 和 2m 之間，歸因於在靠近火源附近的氣體受熱而膨脹，而膨脹後的熱氣會經由通風孔把一些距火源較遠的冷空氣推出房間，而當燃燒持續的情況下，天花板下的熱層厚度變得夠深而足以低於一個通風孔的頂端，此時部份的熱氣體將流出過通風孔。當火增長時，能浮的外流將透過火超過氣體膨脹。因此，測試

空間底層的壓力將低於大氣壓，而外界的冷空氣將經由通風口底部流入房間。其中在高度為 y ，內外之間的壓差 ΔP 為：

$$\begin{aligned}\Delta P &= P_1 - P_2 \\ &= \Delta P_f + \int_0^y (\rho_2 - \rho_1) g \, dy \\ &= \Delta P_f + 3461 \int_0^y \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) dy\end{aligned}\quad (3.1)$$

其中 $P_1 = P_f - \int_0^y \rho_1 g \, dy$ 測試空間內高度為 y 時的壓力。

$P_2 = P_o - \int_0^y \rho_2 g \, dy$ 測試空間外頭，在高度為 y 時的壓力。

ρ_1 = 測試空間內的氣體密度。

ρ_2 = 測試空間外頭氣體的密度。

P_f = 通風口附近，測試空間裡頭地板附近氣體壓力。

P_o = 通風口附近，測試空間地板附近氣體壓力。

T_1 = 通風口附近的溫度。

T_2 = 測試空間外頭的溫度。

在本文中， T_2 是由離地高度 2.8 m 和 2.5m 溫度的平均所得到，將計算得到的 T_2 帶入 Eq 3.1 中，得到圖 3.4。圖 3.4 為在不同防護方式實驗中，通風口內與外界的壓差關係。它表明在在通風孔附近會質量交換的現象產生。

圖 3-5 是編號#3 的熱電偶樹在無防護條件下所量測到的結果。編號#3 這條熱電偶樹相較於其它三條熱電偶樹，較為特別的地方在於每支熱電偶的間隔距離。由於所在位置的關係，編號#3 這條熱電偶樹每支熱電偶的間隔距離，無法與其它熱電偶樹一樣的設置，而將所有的熱電偶間距均改為每 30cm 設置一支 k-型熱電偶。編號#3 的熱電偶樹雖然位於油盤的正上方，但同時在熱電偶樹的下方存在著一個水平的金屬薄板，而換句話說，火源並未與編號#3 的熱電偶樹直接接觸。因此，燃燒時所產生的熱氣必須沿著兩側 45° 的金屬薄板緩緩的往上升，而當熱氣升至金屬薄板末端時，這時會尾流 (wake flow) 的產生，而尾流 (wake flow) 會增進動量與能量轉移，因

此，量測到的溫度分佈會較其它量測位置來的集中。

接著來看一下在無任何防護系統實驗過程中，機械空間內的氧氣及一氧化碳濃度變化情況。圖 3-20 和圖 3-21 分別表示在不同防護方式實驗中離地 1.8m 以及 1.0m 所量測到的氧氣及一氧化碳隨實驗變化的結果，其中虛線部份表示離地 1.8m 量測到結果，而實線部份則是在離地 1.0m 所量測到的結果。在圖 3.20，顯然氧氣幾乎不在 1.8m 的高度有所變化，但是離地高度為 1m 的氧濃度，明顯地，當火源被點燃時，該高度附近的氧氣濃度，隨著時間而逐漸降低，這是因為遮蔽用的機械擬平台限制了火焰的高度。圖 3.22 為不同的防護方式實驗量測到煙遮蔽率。顯然，在不同的防護實驗中其煙遮率成長情況幾乎相同。

3.1.2 傳統撒水器系統防護

在傳統撒水頭防護實驗中，仍使用與先前無任何防護情況下相同相同的火源。在本實驗中關於噴頭的設置部份，主要是依據“各類場所安全消防設備設置”標準，對噴頭進行安裝，而在本實驗的測試空間內一共設置了 6 顆作動溫度 68°C 的向下型噴頭。

當火源引燃後 60 秒，測試空間安裝的傳統撒水頭，因感應元件破裂而開始作動。在此，我們將先對滅火時間(Extinguishing time)作定義，在本文中定義火源引燃後到其溫度降致 328 K (55°C) 時所需的時間為滅火時間(Extinguishing time)。如表 3-1 所示，在傳統撒水頭防護實驗中，其所需的滅火時間為 172 秒，表 3.1 為各種不同防護實驗中，如無任何防護系統實驗、傳統撒水防護實驗高壓細水霧實驗，所需的滅火時間(Extinguishing time)、氧氣以及一氧化碳的極值。從實驗的結果，我們可以知道在傳統撒水頭實驗中，火源熄滅的時間較

在無防護情況底下來的短，其意謂著，火源並非因為燃料的耗盡而熄滅。其原因如下，(1) 進氣影響：在無防護實驗中，提到在通風口附近，因為測試空間內外壓差的關係，會有質量交換的情況發生，而在此我們將更進一步探討，壓差與質量交換之間的關係。

$$\text{Flow out} \quad \dot{m} = C \int_{A_n} bV\rho \, dy \quad (3.2)$$

$$\text{Flow in} \quad \dot{m} = C \int_{A_n} bV\rho \, dy, \quad (3.3)$$

其中 b = 通風孔的寬度。

C = 實驗決定的流出系數。

ρ = 通風口附近氣體密度。

$$V = \text{壓差所造成的氣體速度}, \quad v = 0.93 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \, (m/sec)。$$

由 Eq. 3.2 以及 Eq. 3.3 可以得知當測試空間與外界之間的壓差變小時，質量交換的現象也會變弱，反之，當內外壓差變大時，質量交換的情況也較為顯著。從圖 3-3 中，可以得知當撒水頭開始作動時，測試空間內外的壓差會馬上的變小，因此，這個時候會造成進氣量的不足。(2) 上下層溫差：在本文中根據四條熱電偶樹所量測得到的結果，依高度將測試空間的溫度分佈畫分為兩個區塊，地表上方 1.5m 到天花板之間稱為上層溫度，而地表到地表上方 1.5m 之間稱為下層溫度，圖 3-7 為各種防護實驗中，上下層溫度隨時間變化的結果，從圖 3-7 可以發現，在傳統撒水頭防護的實驗中，當撒水頭作動時會造成下層平均溫度比上層平均溫度來的高，而這意謂著底下部分新鮮的空氣會因浮力影響而升至天花板。基於這兩個原因，因此在傳統撒水頭防護實驗中，火源熄滅時間較在無任何防護情況下來的早。

表 3.1 用不同的保護方法點燃參數

		到 325 K(秒)所 需的時間	在高度為 1.0m 最小氧濃度 (%)	在高度為 1.0mCO 濃度 (ppm)
無任何防護		--	9.45	over
傳統的灑水器		176	18.74	772
4 個噴嘴	遮蔽火源	73	18.2	672
	無遮蔽火源	89	16.75	792
6 個噴嘴	遮蔽火源	44	17.64	834
	無遮蔽火源	40	19.42	972

接著我們來看在傳統撒水系統作動時，對於測試空間人氣體溫度的影響，由圖 3-8 到圖 3-11 的實驗結果我們可以發現，當時間 $t=60$ 秒時，撒水頭因感應元件破裂，而開始進行撒水防護，此時，測試空間內的溫度，馬上停止上升同時溫度開始往下掉，而這主要是因為，根據消防法規規定，一般的傳統撒水頭每顆每分鐘的排水量至少為 80L

3.1.3 高壓細水霧系統

在高壓細水霧實驗防護測試部份，包含了 2 種不同火源的實驗，其分別為(1) 遮蔽火源測試 (2) 無遮蔽火源測試，我們將分別對這兩種不同火源情況，進行六顆及四顆高壓細水霧噴頭滅火性能測試，在該實驗中，除了與先前的傳統撒水系統防護實驗結果做比較之外，同時我們也將探討，在加入兩顆側向防護的高壓細水霧噴頭後，對於通風條件下機械空間內氣體溫度的影響。在此，我們對平均細水霧密度 (Average Water Density) W_d 做個定義，我們定義細水霧密度(Average Water Density) 為單位時間單位面積所量測到水量，其數學式如下：

$$W_d = \frac{W_t}{W_c} (L/m^2 \cdot \min) \quad (3.4)$$

其中 W_t = 為單位時間內的總放射的水量

A_c = 為測試空間地表面積

根據傳統撒水系統實驗中撒水頭作動，在高壓細水霧防護實驗中，高

壓細水霧防護系統，在火源引燃後 60 秒開啟。

3.1.3.1 遮蔽火源實驗

從圖 3-1 可以知道，在高壓細水霧實驗中，不論是六顆高壓噴頭或是四顆高壓噴頭，其將火源熄滅所需要的時間均較一般傳統撒水系統防護較為短。根據廠商所提供的高壓細水霧噴頭資料，每顆高壓噴頭每分鐘的放射量為 5.2 升，同時由表 3-1 可知 6 顆高壓細水霧噴頭以及 4 顆高壓細水霧噴頭滅火所需時間，分別為 44 秒以乃 73 秒。因此，我們可以知道 6 顆細水霧噴頭實驗及 4 顆高壓細水霧噴頭實驗中，滅火所需的水量分別為 23.21 升及 25.01 升。結果顯示噴頭數量的增加，不一定增加滅火所需的水量。其原因為：(1) 在增加兩顆側向高壓防護的情況下，將有更多的細水霧(Fine Water mist)進入火源中，取代反應所需新鮮空氣 (2) 同時也有更多的細水霧因受熱而變成氣態，而在液態變成氣態過程中，其體積約為原來液態時的 1700 倍，也因此火源周圍會有 gas shielded 的情形發生。因此，雖然增加了細水霧噴頭的數量，但由於這兩個原因有效的減少滅火時間，所以大大的減少了所需的用水量。

另外，雖然 4 顆高壓細水霧噴頭的將火源熄滅的時間比 6 顆高壓噴頭所需的時間較長，但是仍然比為 6 顆傳統撒水頭防護短。因此，在四顆高壓細水霧噴頭防護情況下，它的性能仍然可接受。

圖 3-12 到圖 3-15 為 6 顆高壓細水霧噴頭實驗中，四條熱電偶樹所量測到的結果。而圖 3-16 到圖 3-19 為 4 顆高壓細水霧噴頭實驗中，熱電偶樹所量測到的結果。從結果可以發現，不論是 6 顆或 4 顆高壓細水霧頭實驗均顯示，當防護系統作動時，測試空間內的氣體溫度並不像傳統撒水系統實驗般馬上的往下降，而是放射後若干秒後溫度才開始往下降。

接著我們來看一下，在高壓細水霧以及傳統撒水防護情況下，氧氣以及一氧化碳濃度的變化情形。從圖中我們可以發現在高度為 1.8m

的地方不管是高壓細水霧防護或傳統撒水頭防護，其氧氣以及一氧化碳濃度均和無防護情況下一樣沒有太大的變化，但在高度 1.0m 的地方，可以發現在傳統撒水系統防護的情況下，氧濃度的變化情況為先遞減爾後遞增，最後氧濃度約會保持在 20% 的位置不再增減。但在高壓細水霧實驗中，氧濃度的變化情形均先遞減爾後再遞增，而無傳統撒水防護中氧濃度持平的一個現象。這樣的結果，似乎也意謂著高壓細水霧系統能增進內外氣體的交換。在一氧化碳濃度的量測結果中也有相同的情況發生。

圖 3-22，為無防護實驗、傳統撒水系統防護實驗以及高壓細水霧防護實驗中，量測到的煙濃度變化情況，從圖中可以發現在不同防護方式情況下，煙遮蔽率(Smoke Opacity)長成情況極為類似。在 6 顆高壓噴頭的結果中顯示，細水霧啟動後 170 秒，煙遮蔽率(Smoke Opacity)會開始降低。這由證明細水霧滅火系統有乾淨的能力。它也顯示更多的應用的水霧噴嘴，更好的清潔的影響。

3.1.3.2 無遮蔽火源實驗

在無遮蔽的(Unshielded)油池火災測試系列中，我們將用來模擬動力引擎的平台移除，使得所放射出的細水霧(Fine Water Mist)可以直接對於火源進行滅火的動作。與遮蔽火源試驗一樣，我們在火源引燃後 60 秒後，才啟動高壓細水霧防護系統。首先，我們先來看一下圖 3-1 所顯示的結果，在圖 3-1 中可以發現在相同噴頭防護的條件下，遮蔽物品對於高壓細水霧滅火時間幾乎沒有太大的影響，但滅火時間卻會隨著噴頭數量的增加而有變短。圖 3-23 到圖 3-30 分別為在無遮蔽實驗中，顆及 6 顆噴頭所量測到的氣體溫度，在個不同的實驗中，可以發現高壓細水霧滅火系統在無遮蔽火源的情況下，仍然無法馬上對氣體進行降溫。

而遮蔽物對於氧氣以及一氧化碳濃度的影響為何？從圖 3-20 以及圖 3-21 可以來比較，油池火源在遮蔽 / 無遮蔽 的情況底下，氧氣

跟一氧化碳濃度變化的情形，從結果當中，可以發現在高度為 1.0 m 的氧氣以及一氧化碳濃度變化趨勢大致相同，但火源在無遮蔽的情況下，在高度為 1.8 m 的地方，氧氣以及一氧化碳濃度有顯著的變化，其原因為在無遮蔽的油盤實驗中，因為少了遮蔽物的影響，因此，油盤能產生較高的火焰高度（由無遮蔽實驗中的熱電偶編號 #3 量測得到的溫度可得知），而在之前的討論中曾經提出，氧氣消耗以及一氧化碳增加情形在火焰所能到達的高度內最為顯著。而結果似乎也顯示說氧體濃度變化除了與火焰高度有關外，其氧體濃度的增減同時也和火焰本身的溫度也有關係。

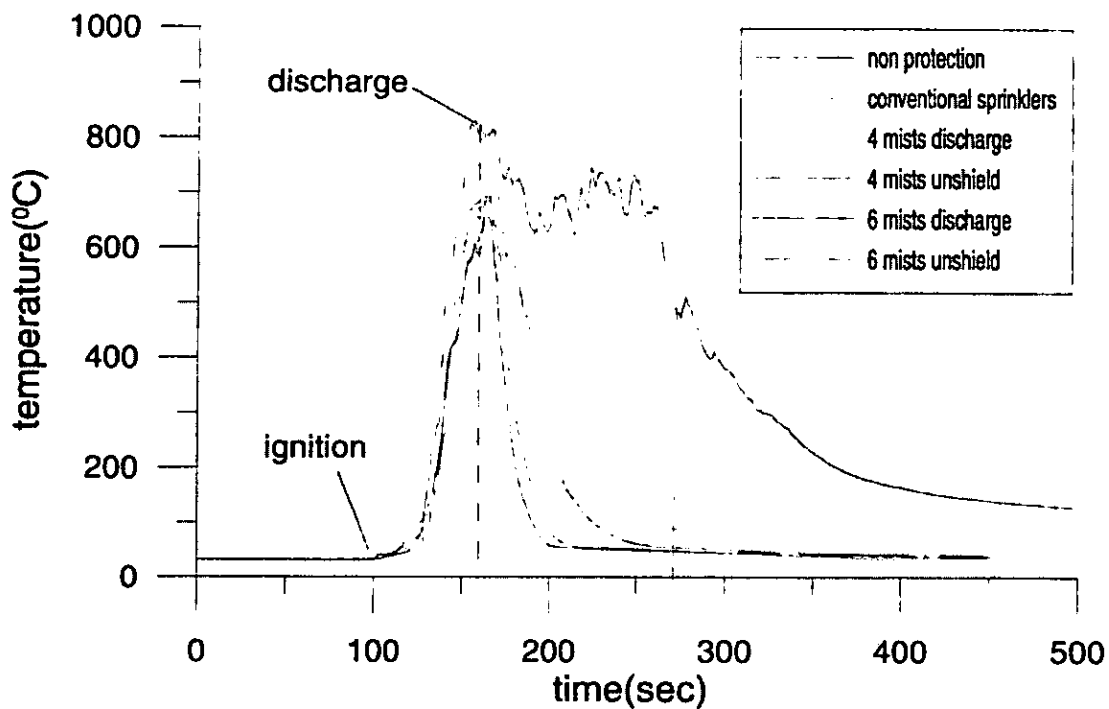


圖 3.1 在各種防護實驗下的油盤上方 50 cm 處 S-F 的溫度分佈

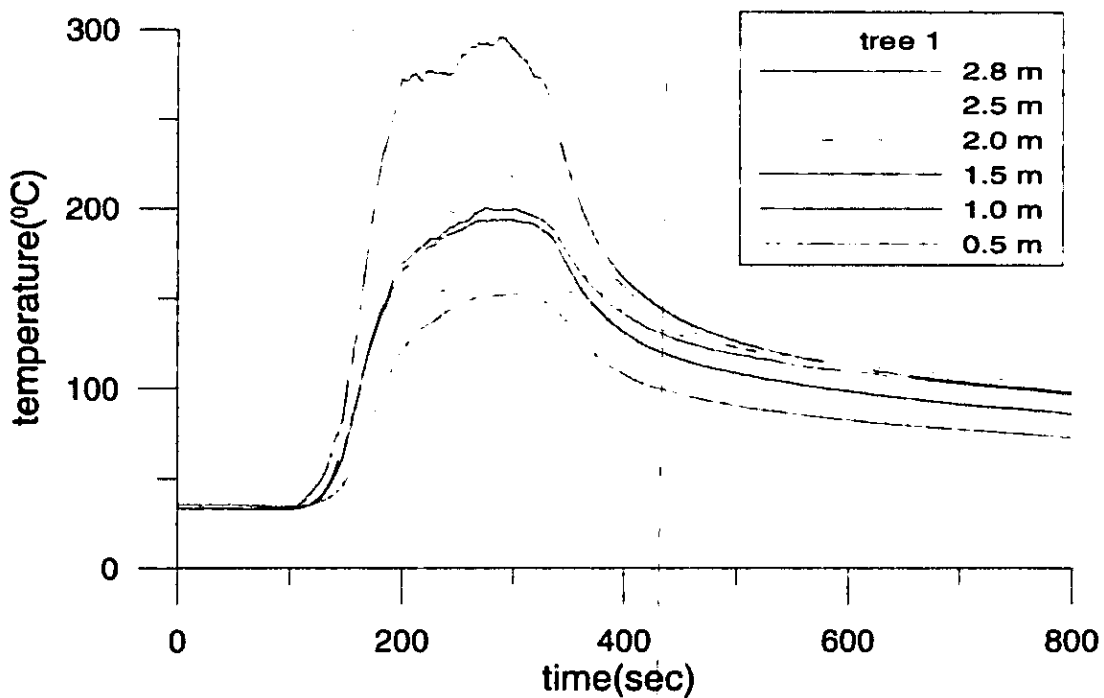


圖 3.2 在無任何防護實驗下熱電偶樹編號#1 量測到的溫度圖

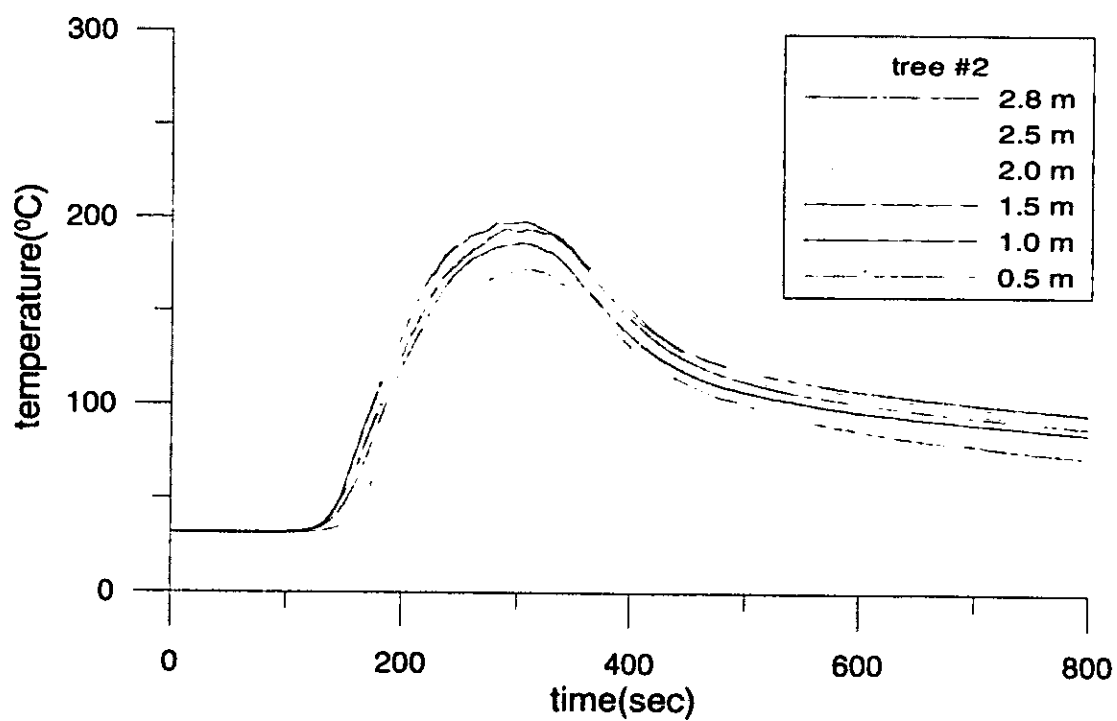


圖 3.3 在無任何防護實驗下熱電偶樹編號#2 量測到的溫度圖

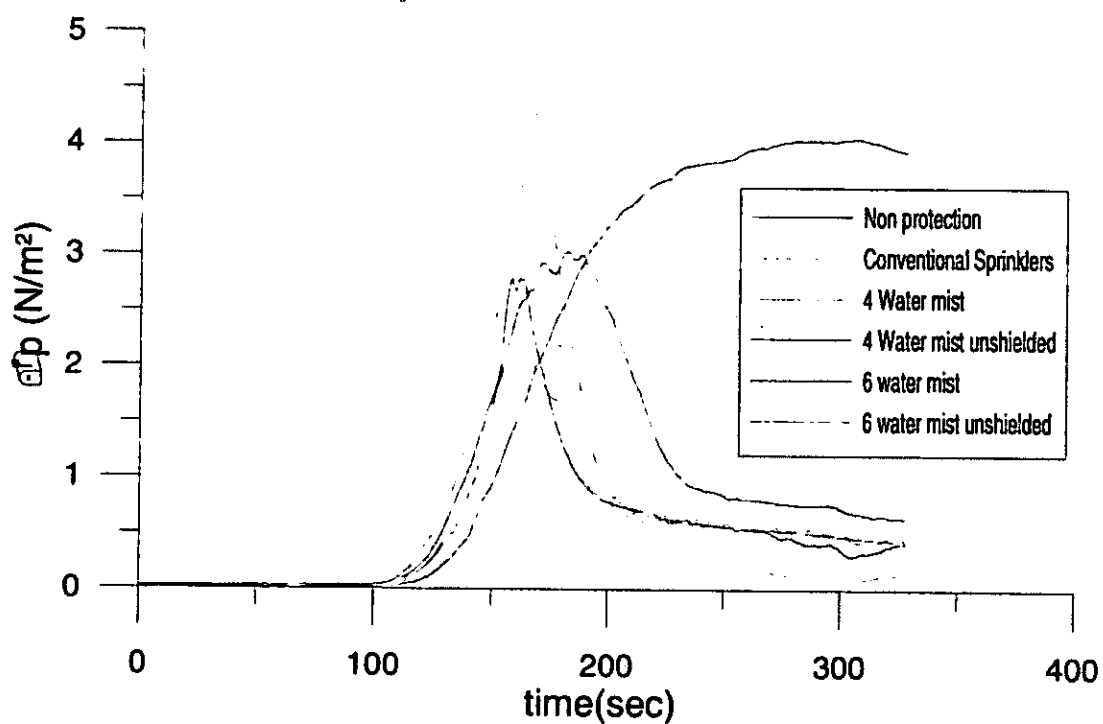


圖 3.4 不同防護實驗中測試空間通風口附近內外壓差

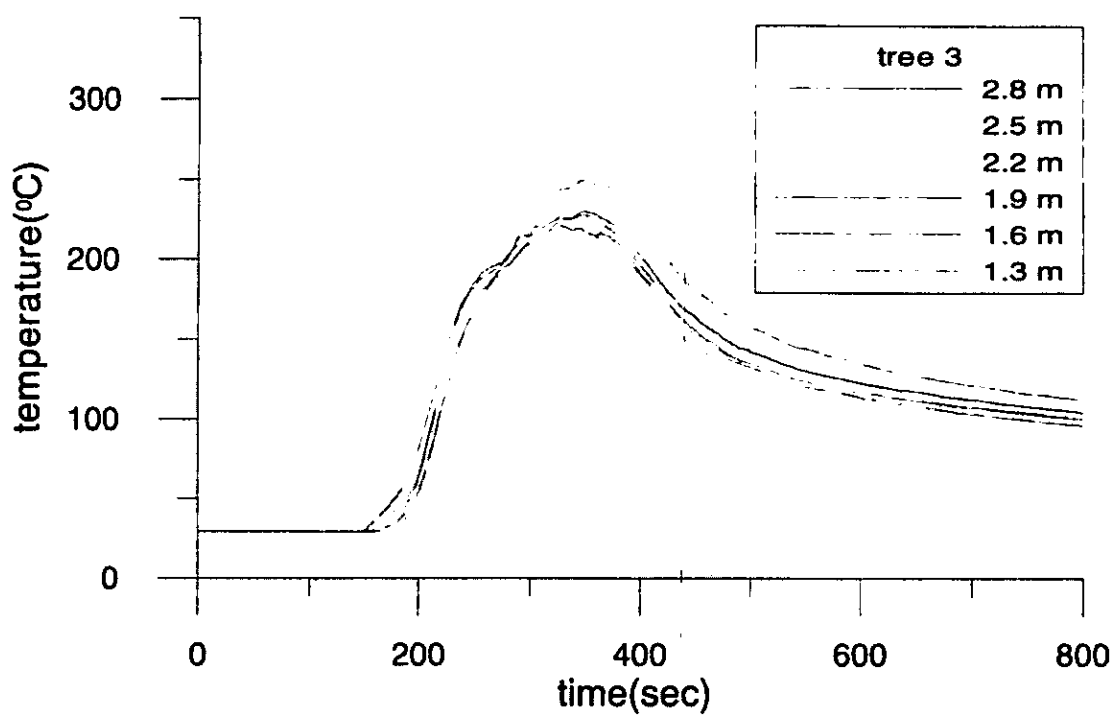


圖 3.5 在無任何防護實驗下熱電偶樹編號#3 量測到的溫度圖

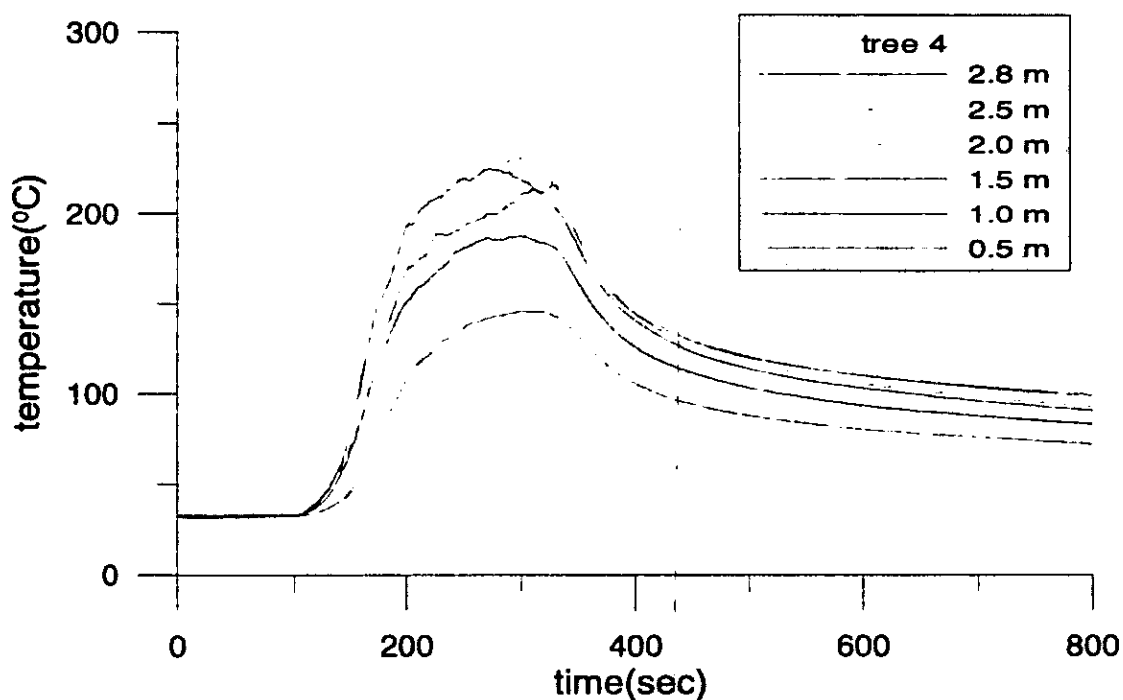


圖 3.6 在無任何防護實驗下熱電偶樹編號#4 量測到的溫度圖

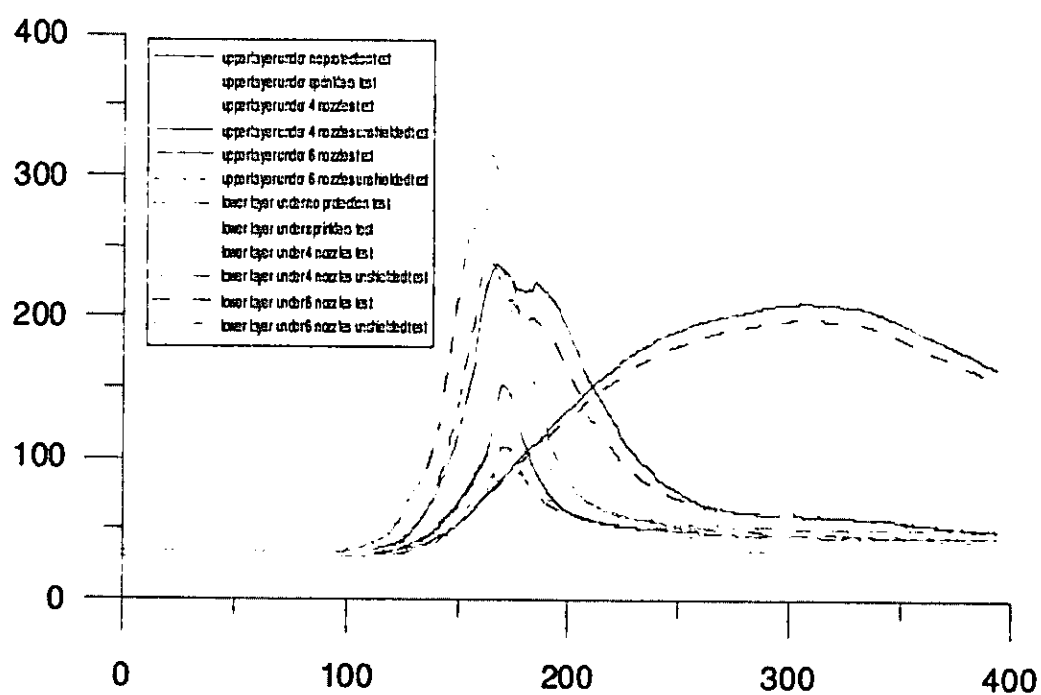


圖 3.7 高度 1.5m 上下兩層平均溫度

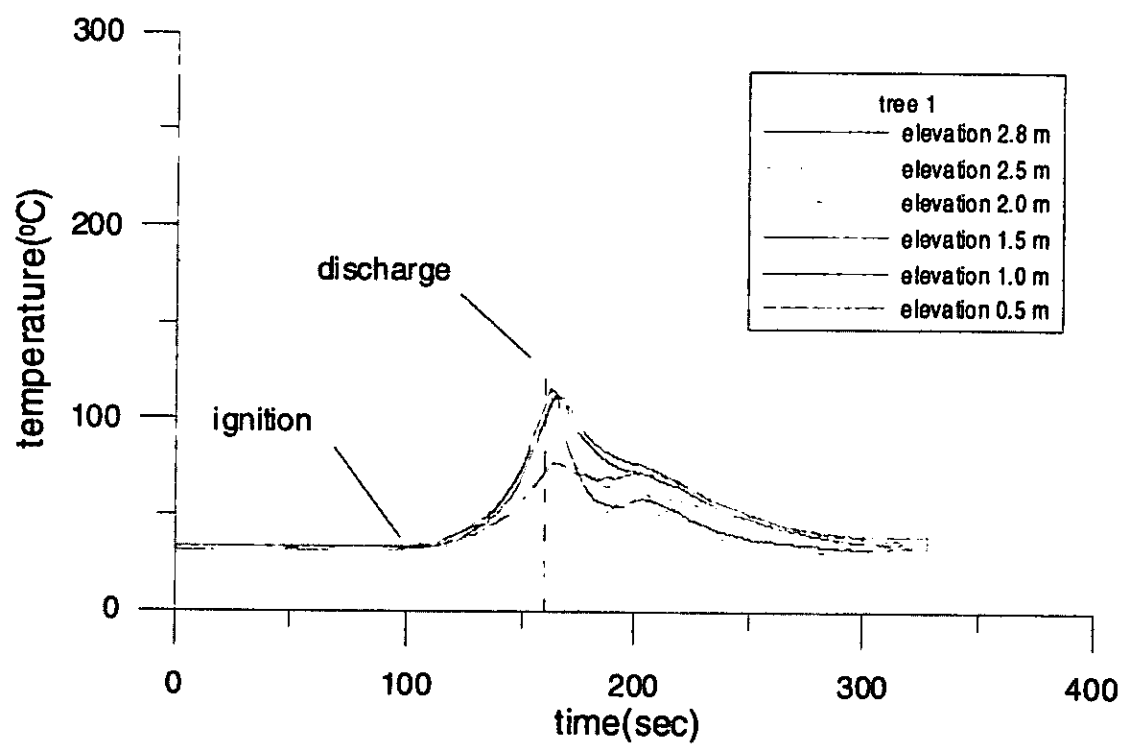


圖 3.8 傳統撒水頭防護下，熱電偶樹編號#1 量測到的溫度圖

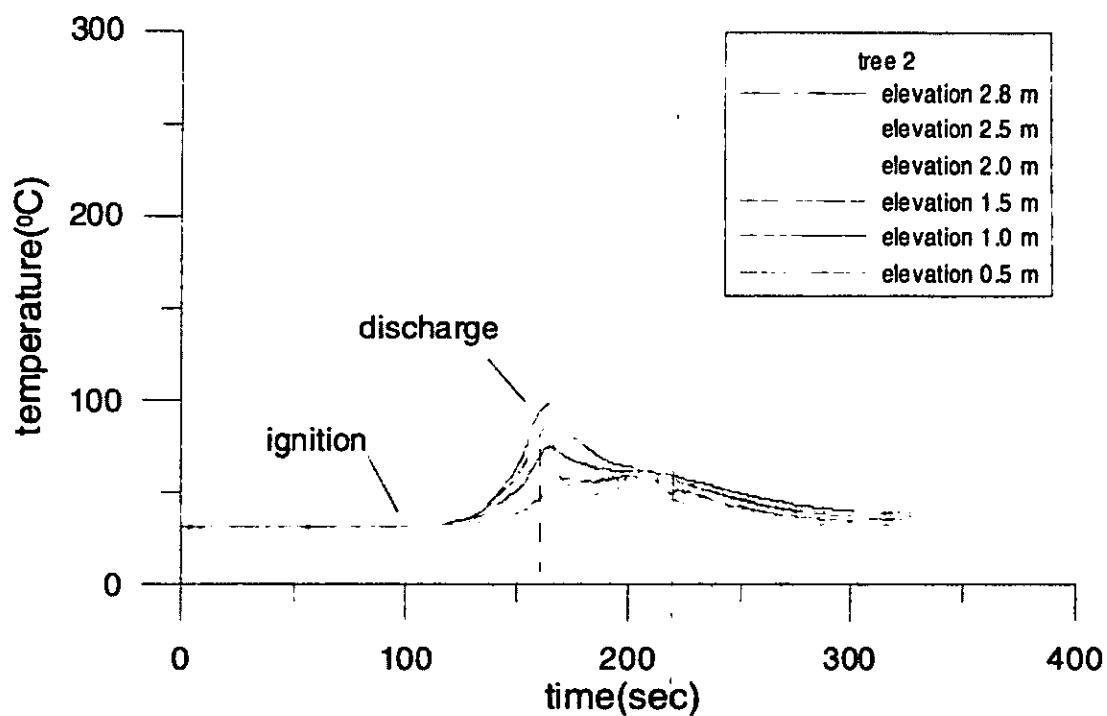


圖 3.9 傳統撒水頭防護下，熱電偶樹編號#2 量測到的溫度圖

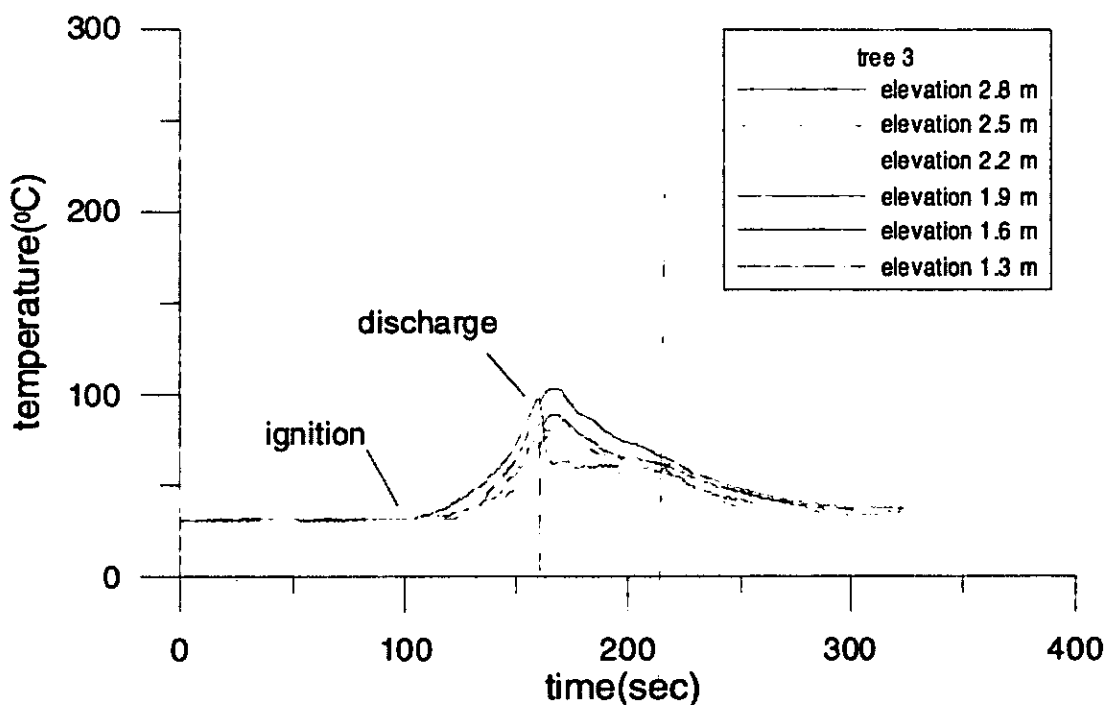


圖 3.10 傳統撒水頭防護下，熱電偶樹編號#3 量測到的溫度圖

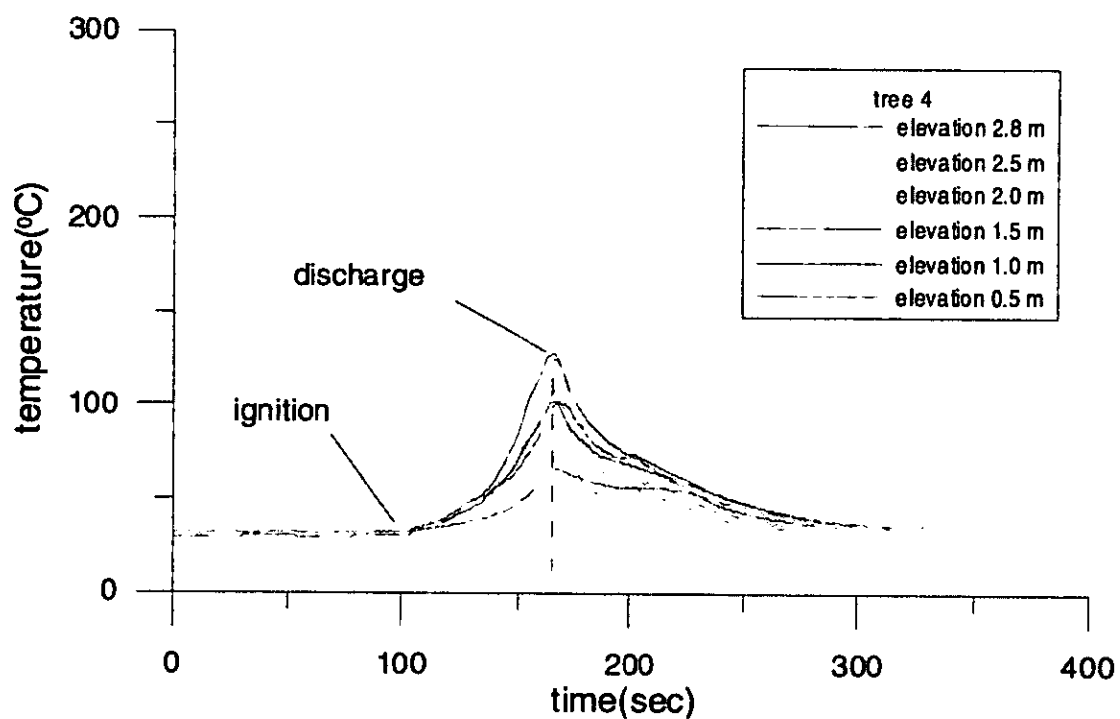


圖 3.11 傳統撒水頭防護下，熱電偶樹編號#4 量測到的溫度圖

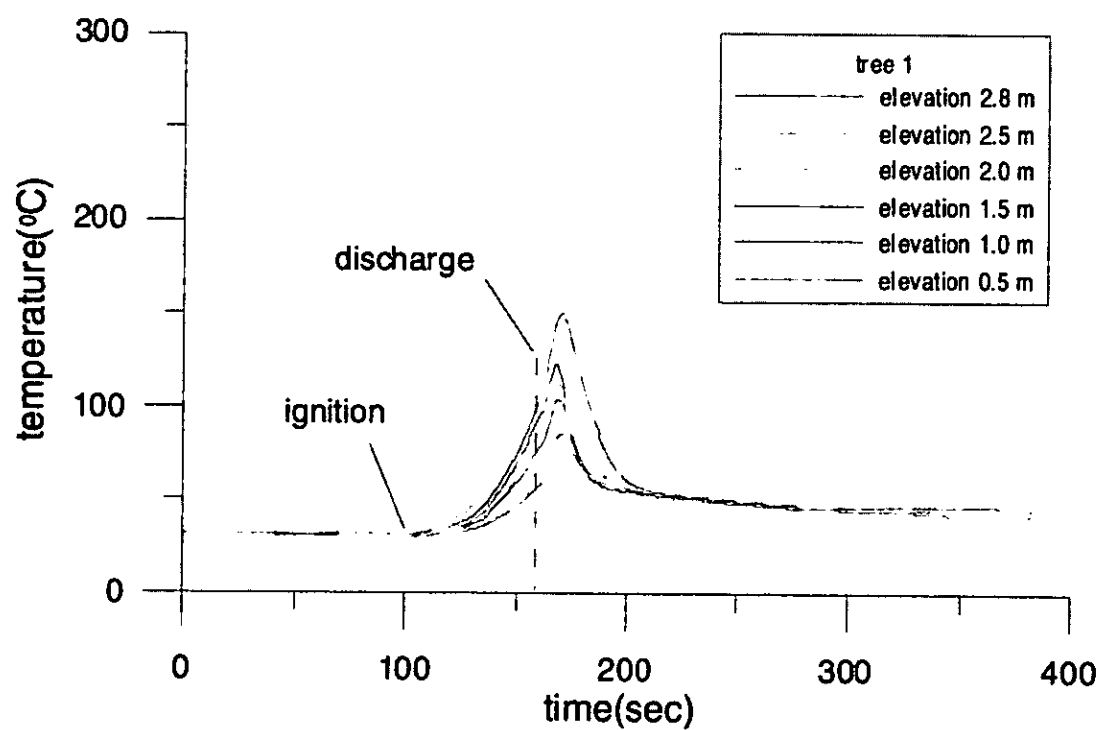


圖 3.12 6 顆高壓細水霧噴頭下，熱電偶樹編號#1 量測到的溫度圖

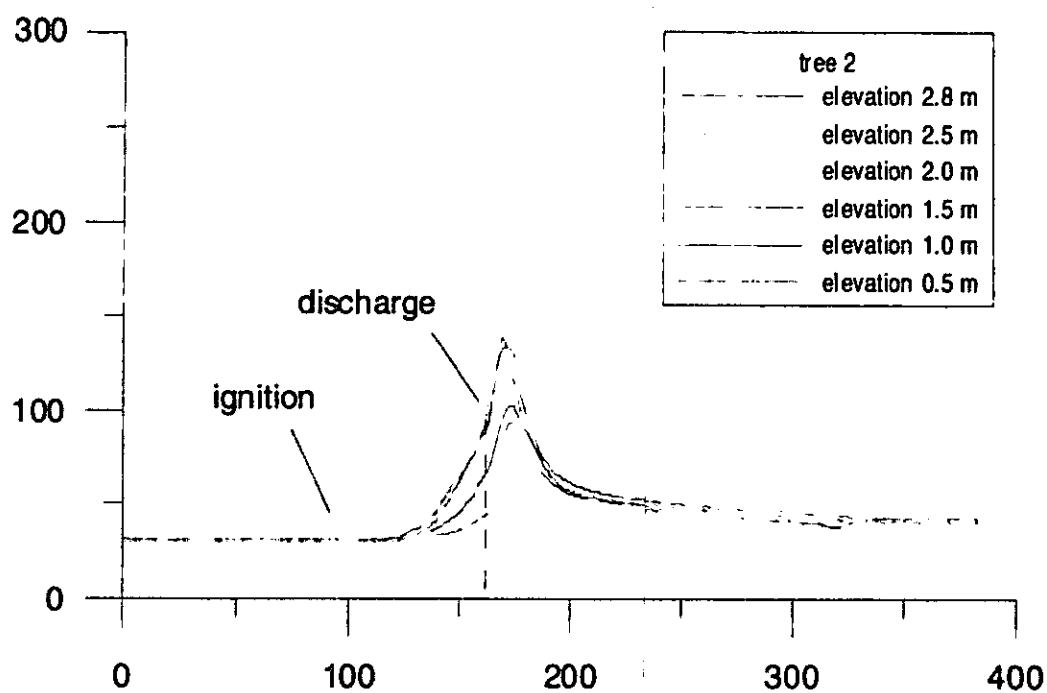


圖 3.13 6 顆高壓細水霧噴頭下,熱電偶樹編號#2 量測到的溫度圖

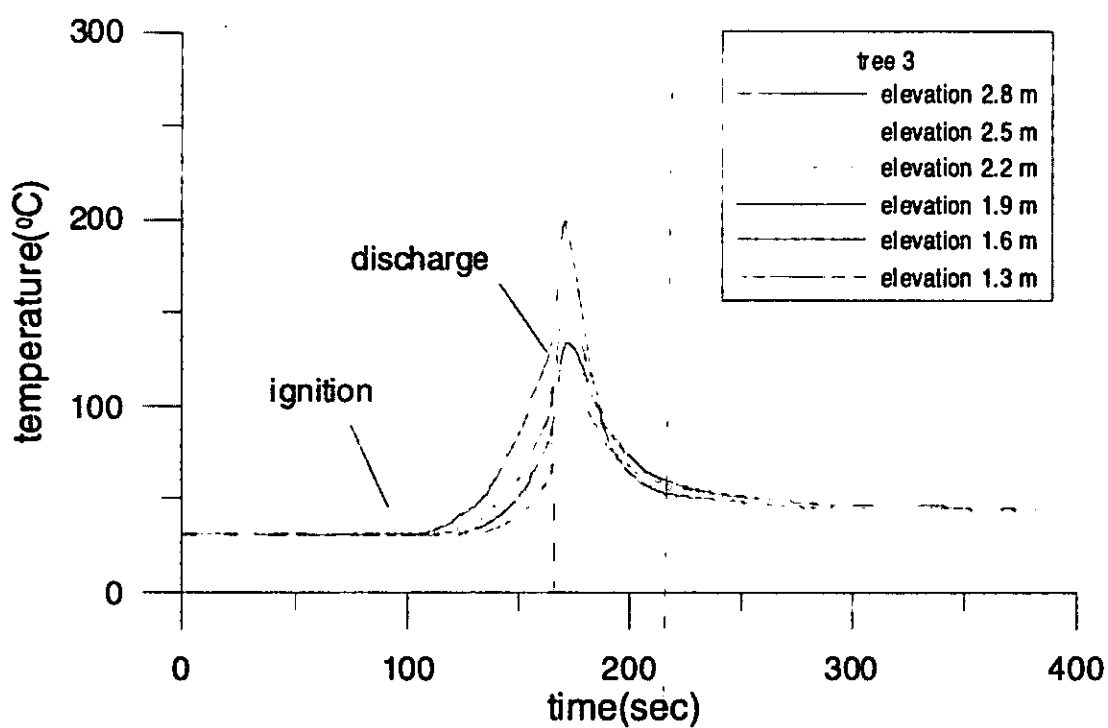


圖 3.14 6 顆高壓細水霧噴頭下,熱電偶樹編號#3 量測到的溫度圖

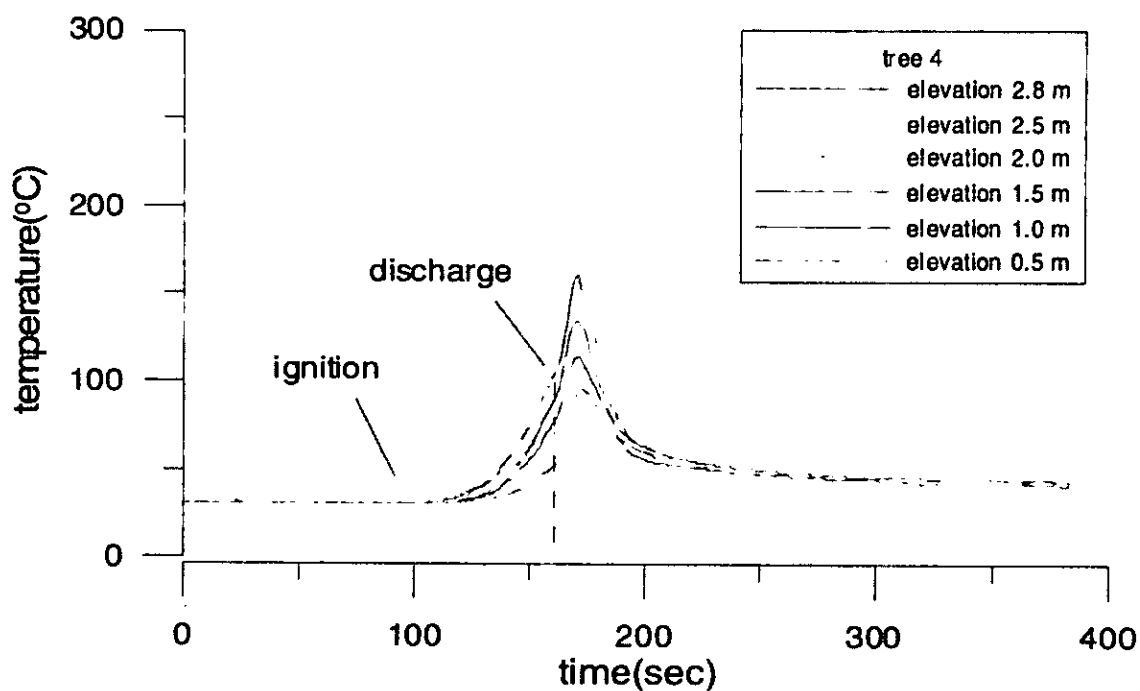


圖 3.15 6 顆高壓細水霧噴頭下,熱電偶樹編號#4 量測到的溫度圖

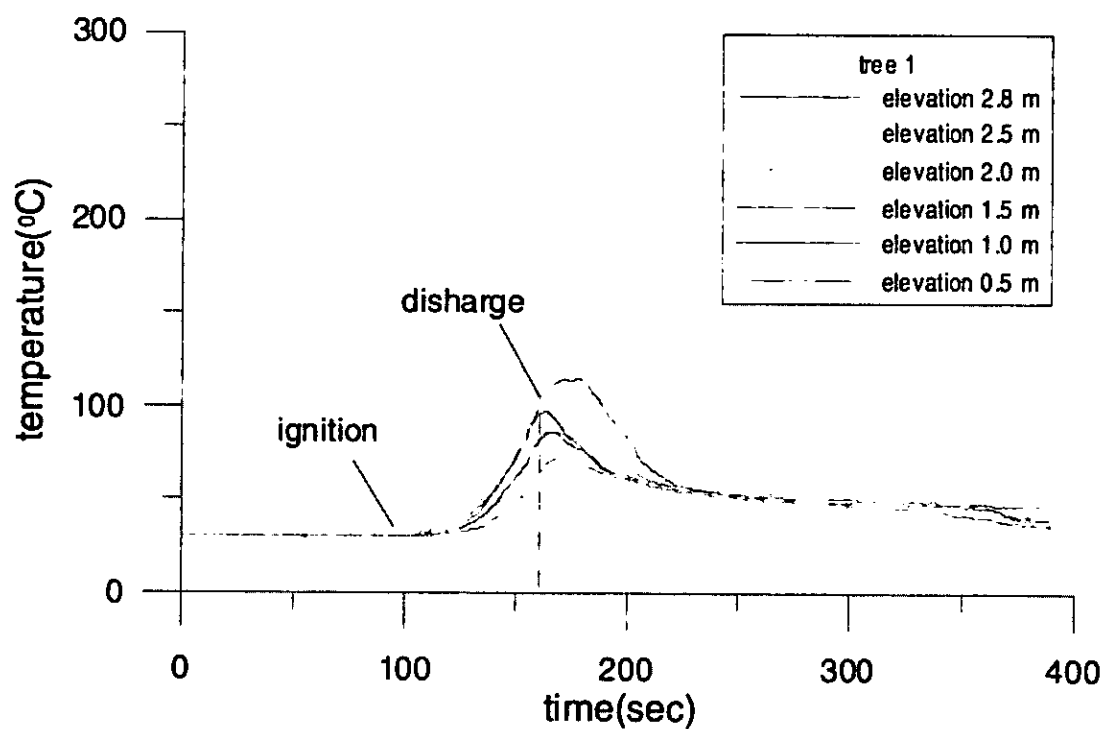


圖 3.16 4 顆高壓細水霧噴頭下,熱電偶樹編號#1 量測到的溫度

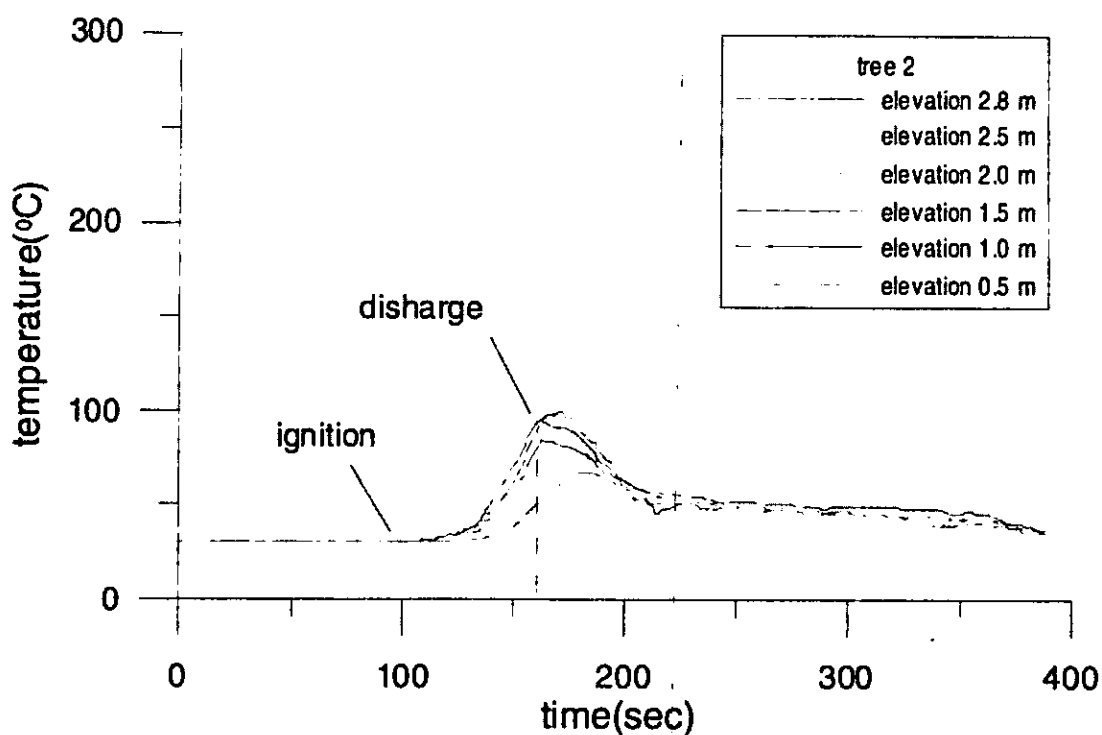


圖 3.17 4 顆高壓細水霧噴頭實下,熱電偶樹編號#2 量測到的溫度圖

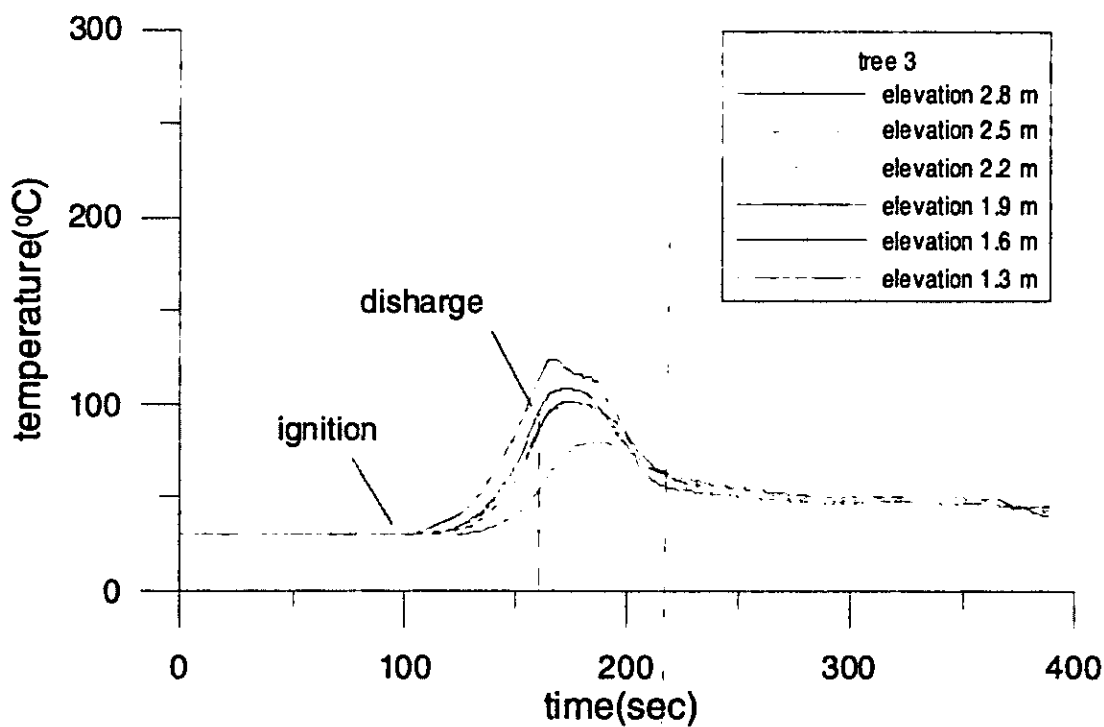


圖 3.18 4 顆高壓細水霧噴頭下,熱電偶樹編號#3 量測到的溫度圖

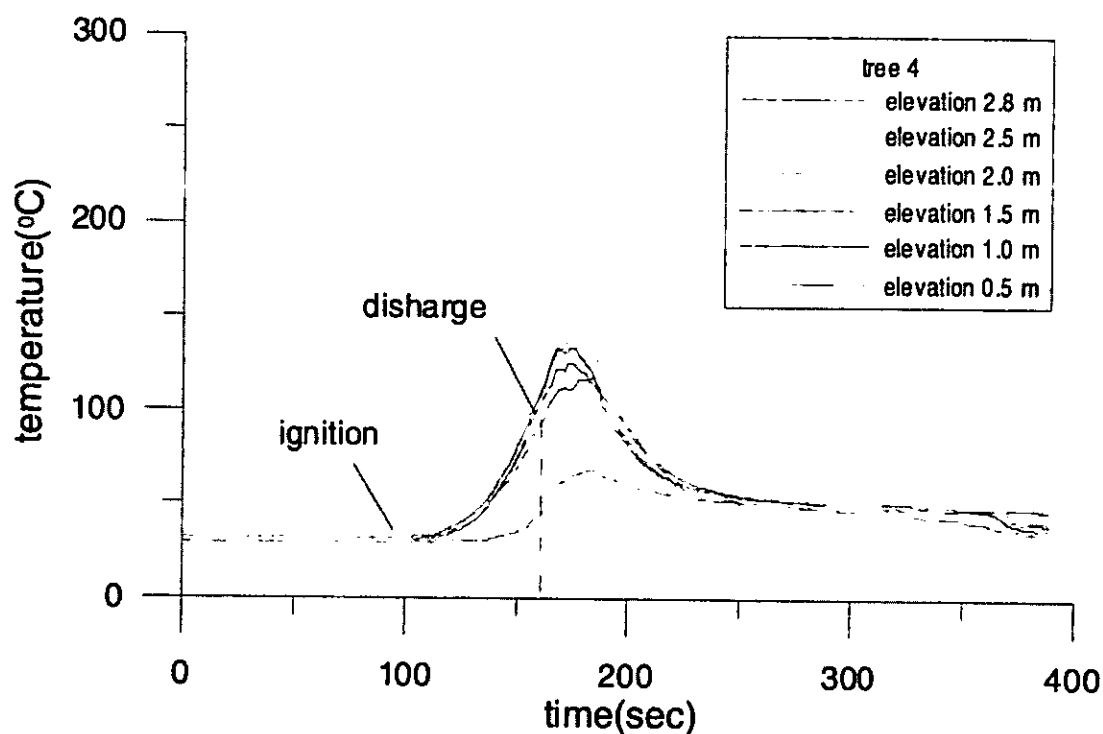


圖 3.19 4 顆高壓細水霧噴頭下,熱電偶樹編號#4 量測到的溫度圖

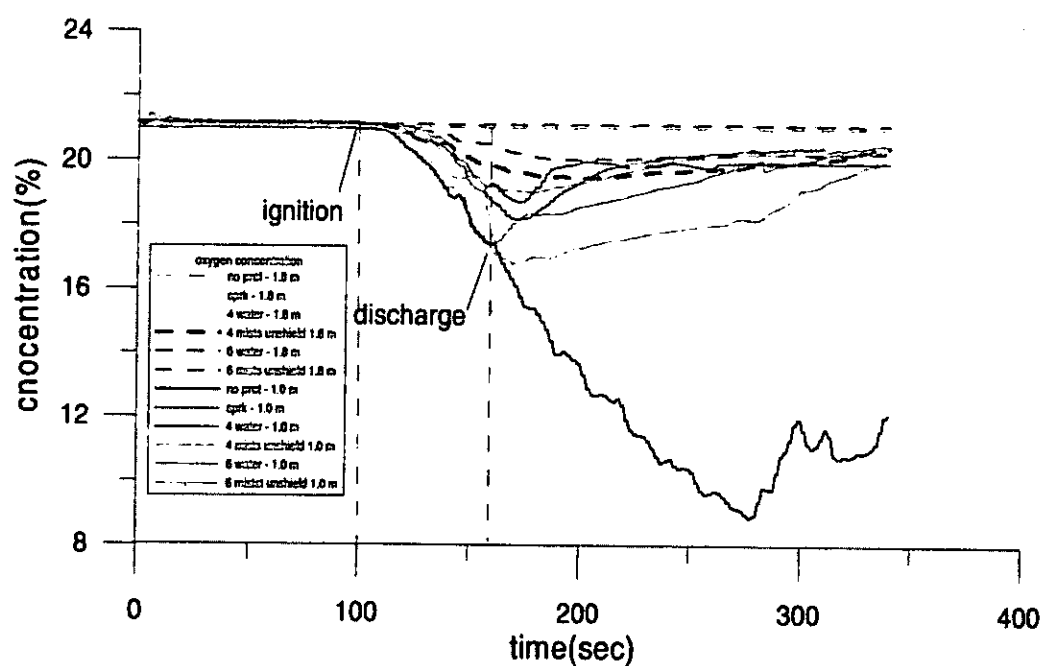


圖 3.20 在高度為 1.8m/1.0 m 處的 O_2 濃度

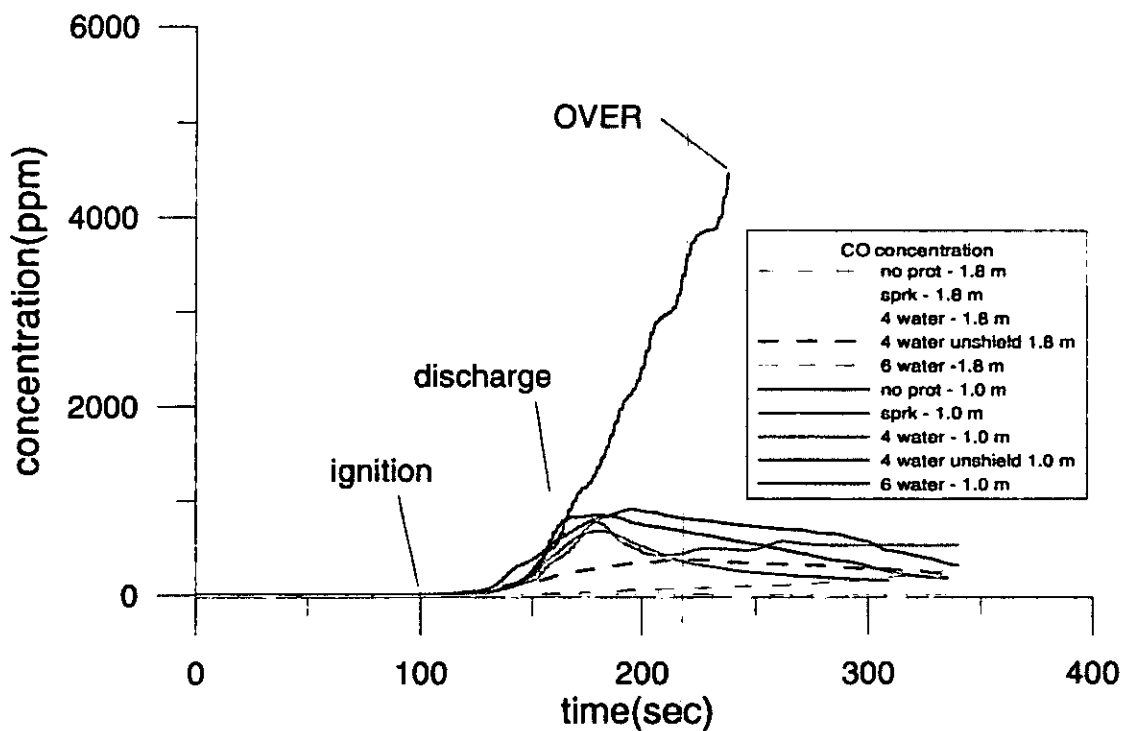


圖 3.21 在高度為 1.8m/1.0 m 處的 CO 濃度

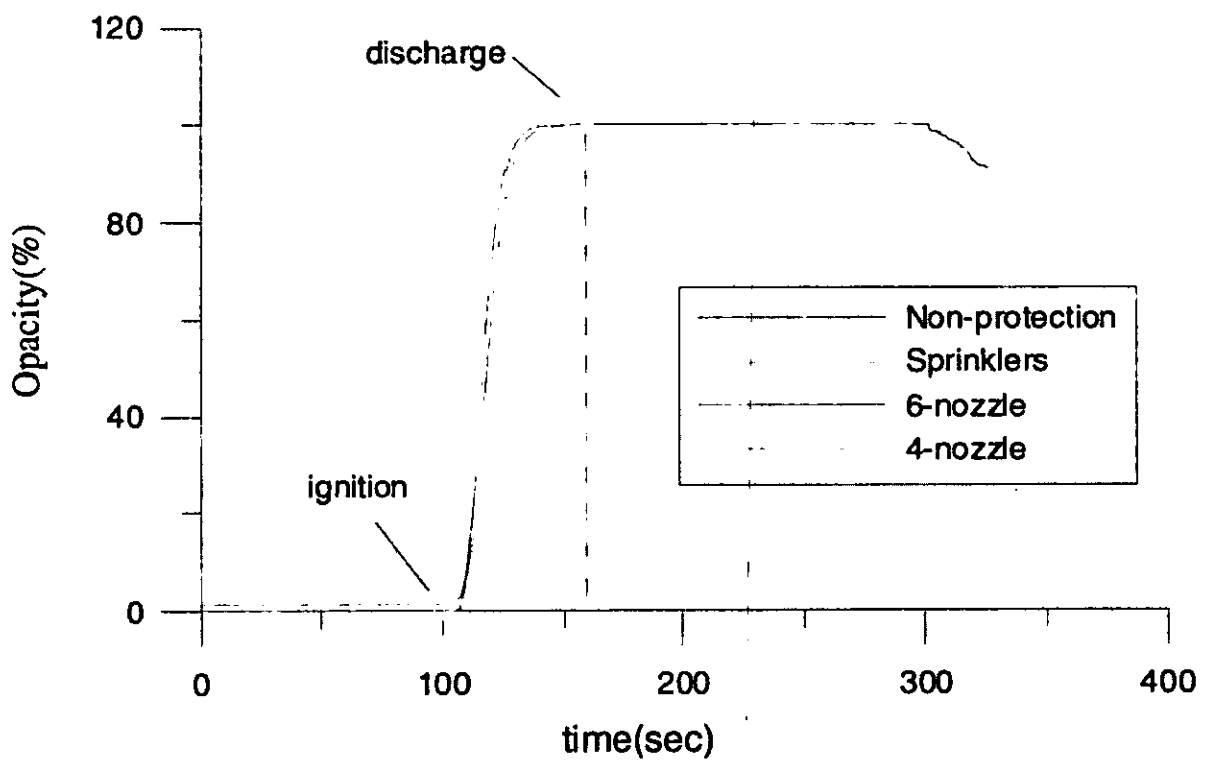


圖 3.22 遮蔽火源情況下,量測到煙遮率

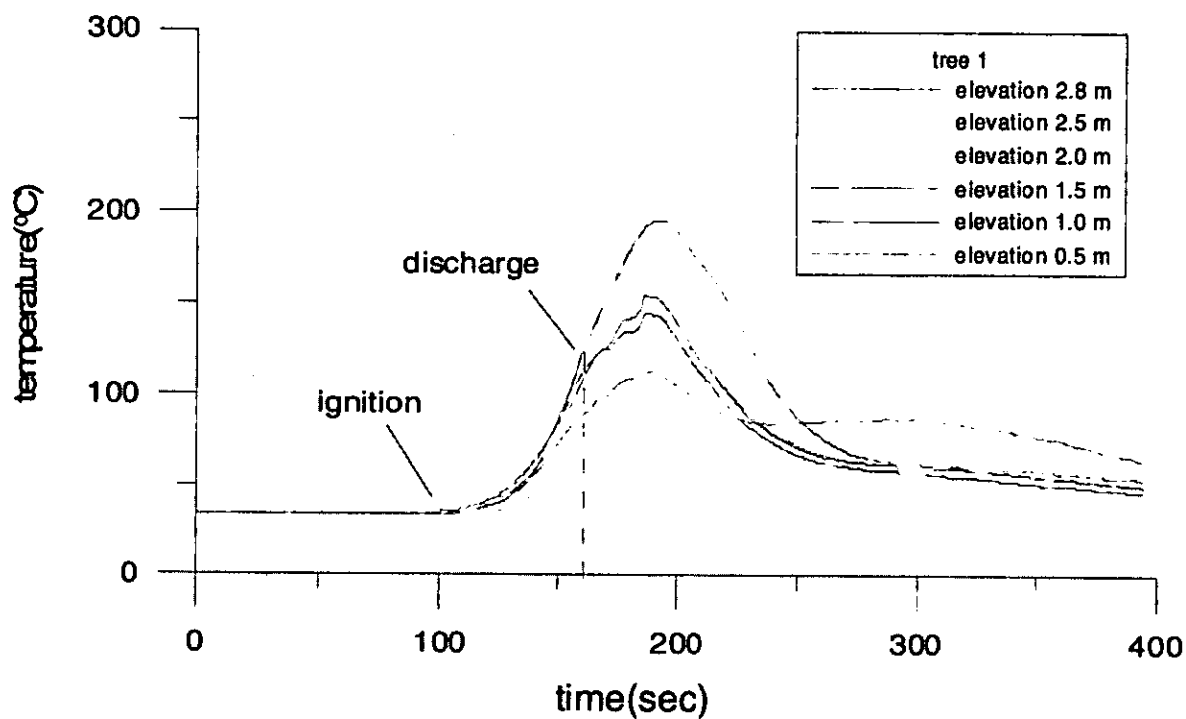


圖 3.23 在無遮蔽火源實驗中,4 顆高壓細水霧噴頭防護下,熱電偶樹編號#1 量測到的溫度圖

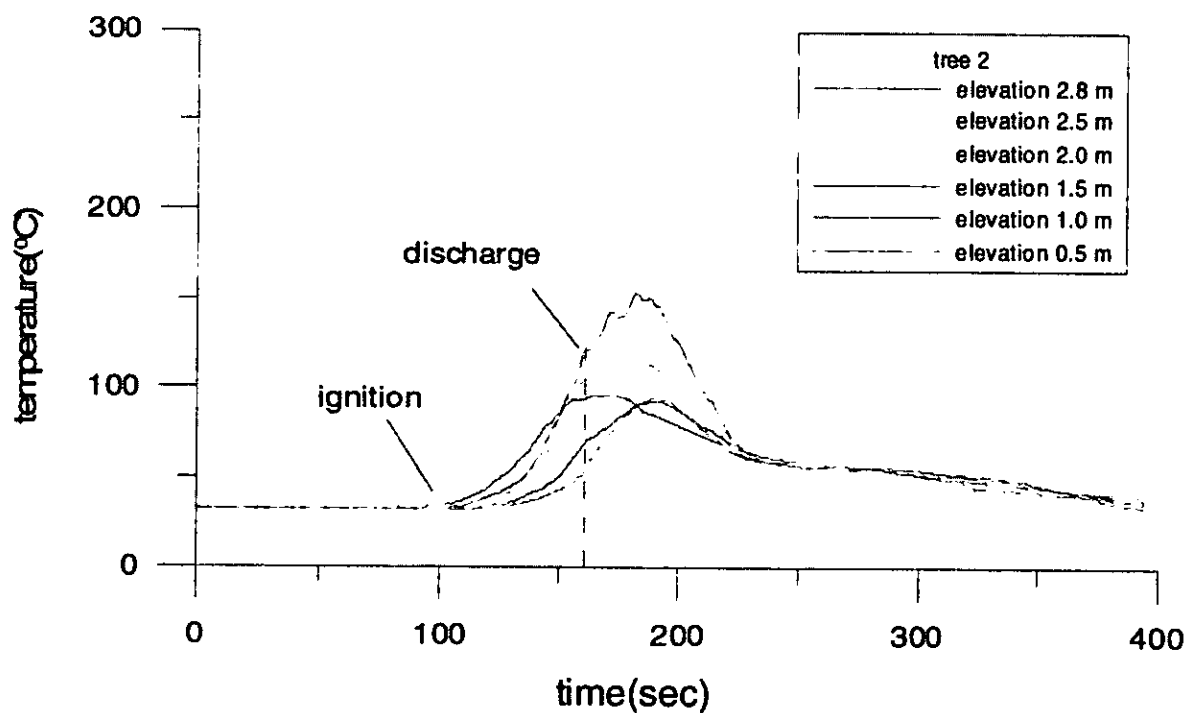


圖 3.24 在無遮蔽火源實驗中,4 顆高壓細水霧噴頭防護下,熱電偶樹編號#2 量測到的溫度

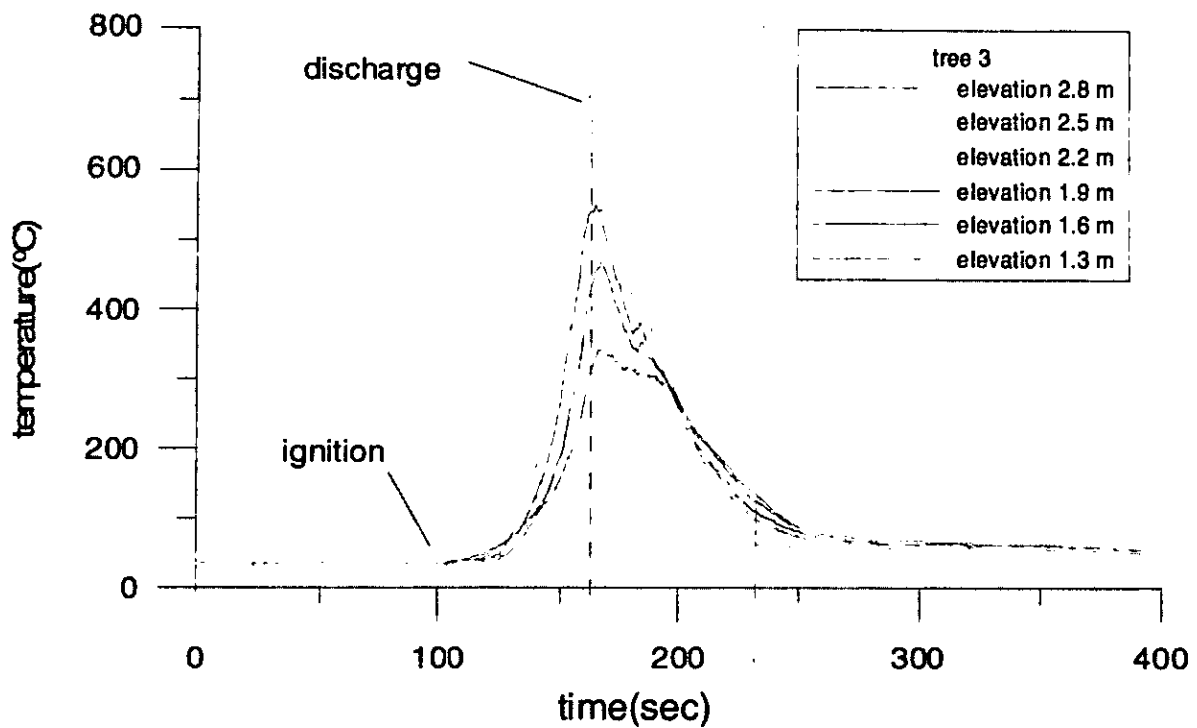


圖 3.25 在無遮蔽火源實驗中,4 顆高壓細水霧噴頭防護下,熱電偶樹編號#3 量測到的溫度

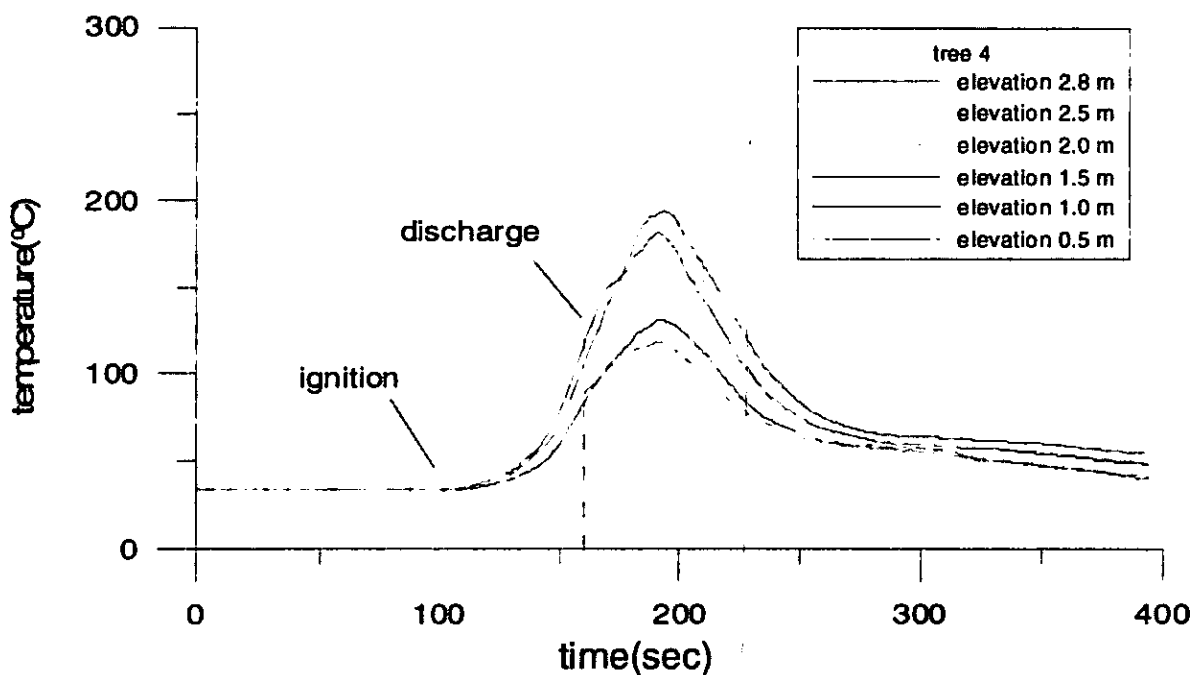


圖 3.26 在無遮蔽火源實驗中,4 顆高壓細水霧噴頭防護下,熱電偶樹編號#4 量測到的溫度

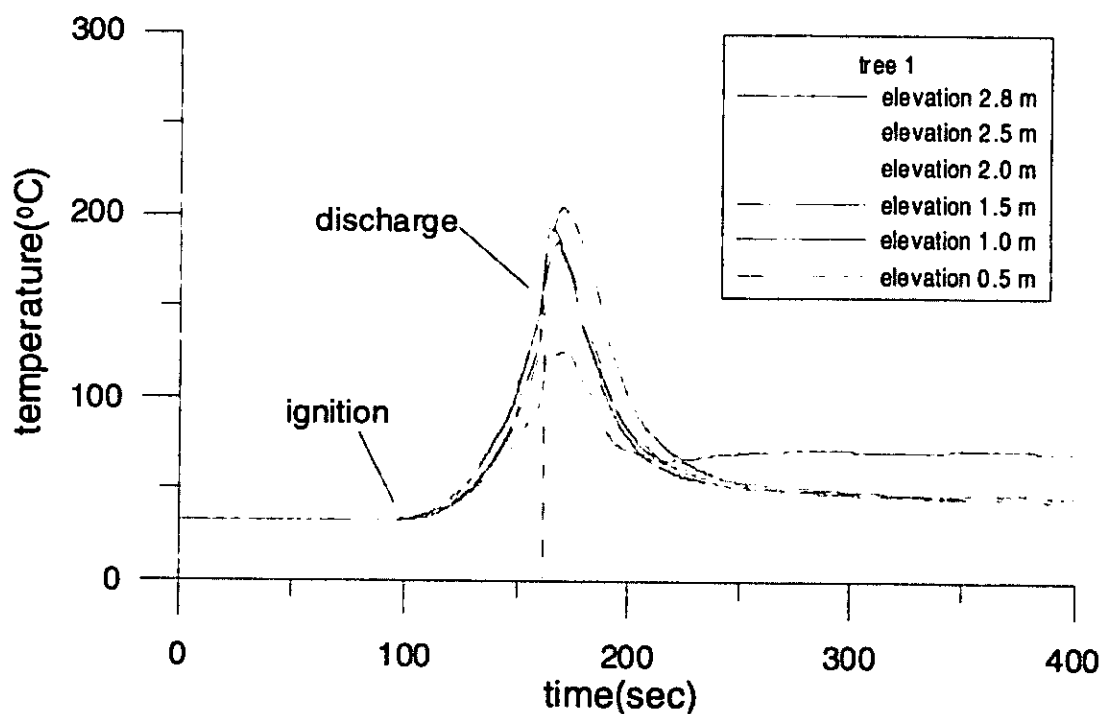


圖 3.27 在無遮蔽火源實驗中,6 顆高壓細水霧噴頭防護下,熱電偶樹編號#1 量測到的溫度

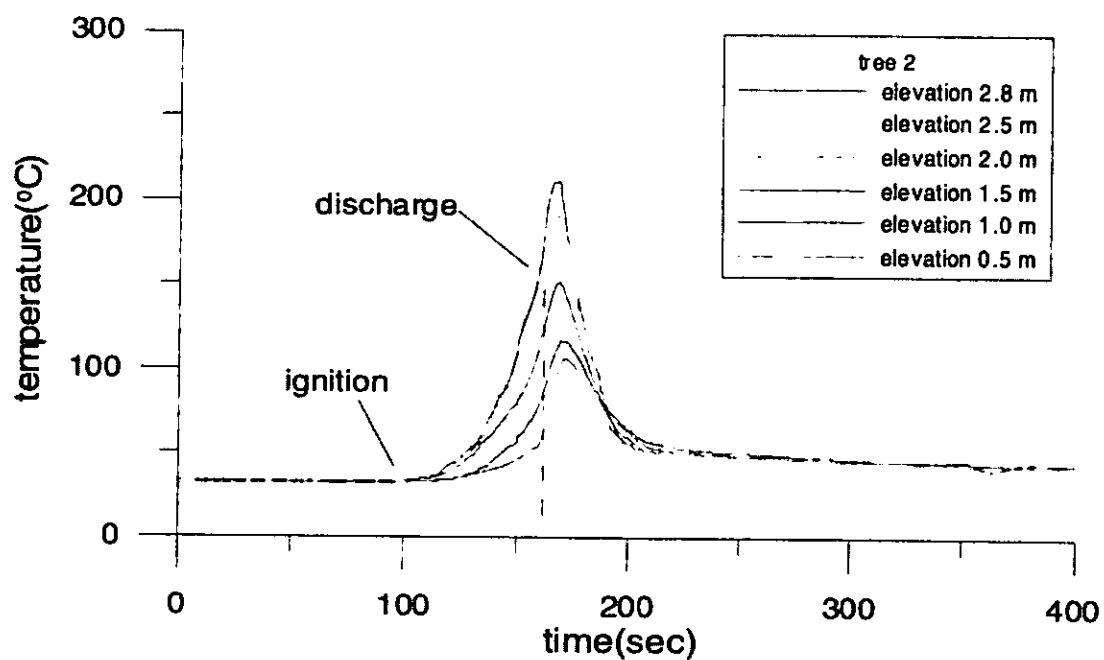


圖 3.28 在無遮蔽火源實驗中,6 顆高壓細水霧噴頭防護下,熱電偶樹編號#2 量測到的溫度

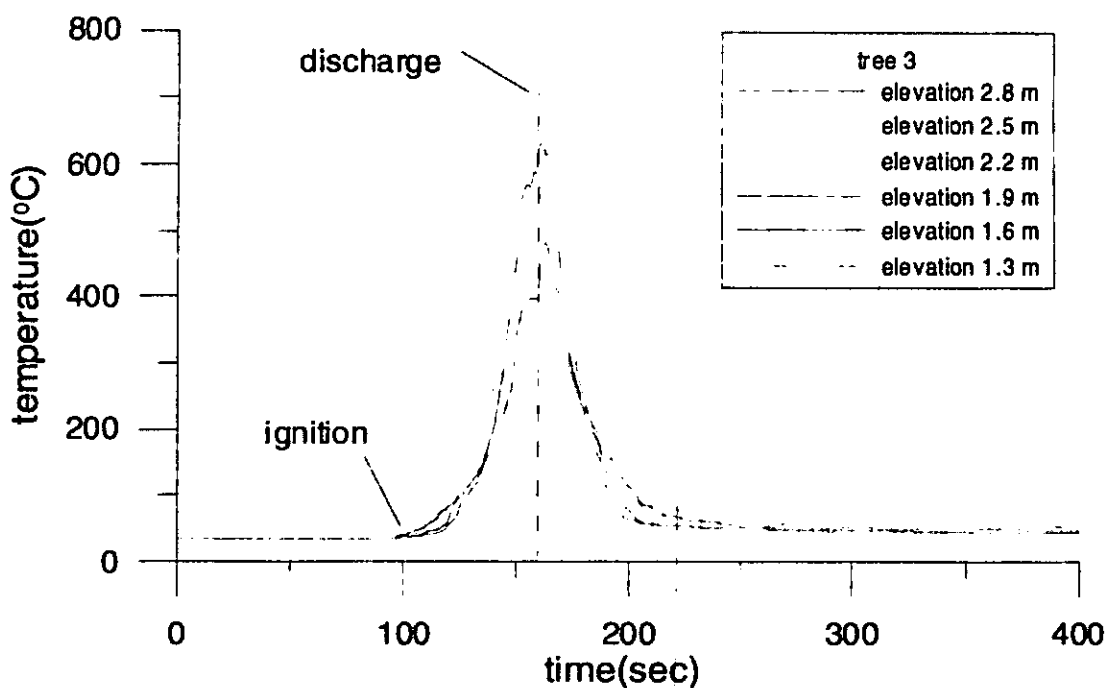


圖 3.29 在無遮蔽火源實驗中,6 顆高壓細水霧噴頭防護下,熱電偶樹編號#3 量測到的溫度

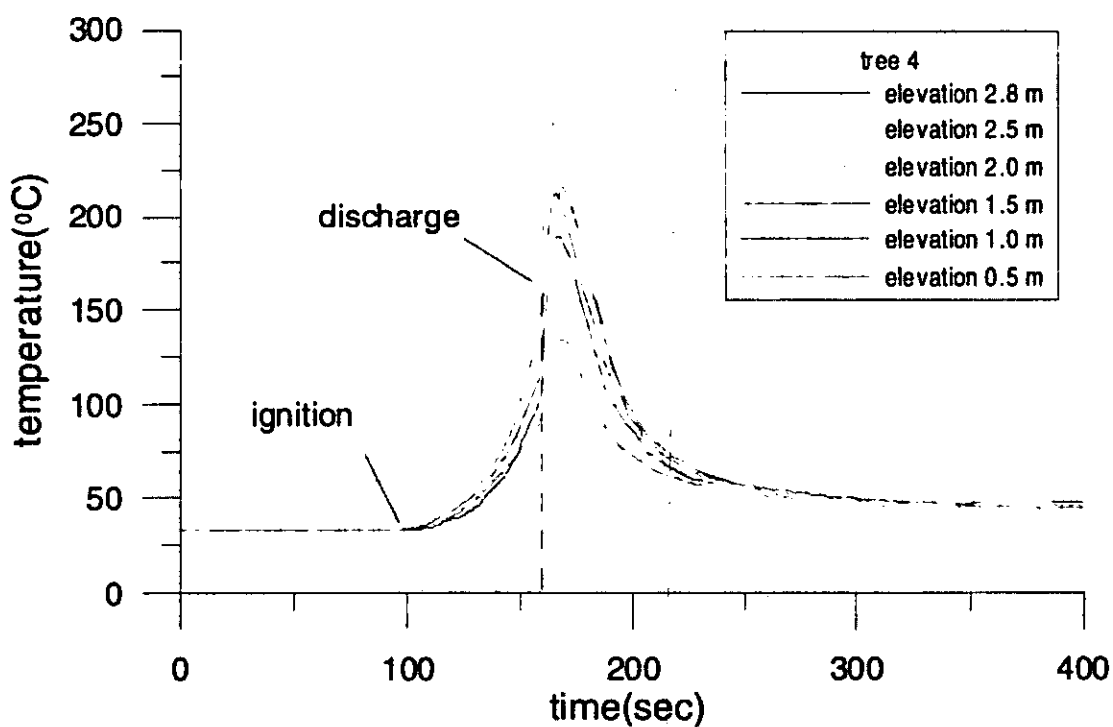


圖 3.30 在無遮蔽火源實驗中,6 顆高壓細水霧噴頭防護下,熱電偶樹編號#4 量測到的溫度

第四章 電腦數值模擬分析技術介紹

一般而言，產業界對於全尺寸燃燒實驗，動輒需花費鉅額經費之測試較無法接受，但為了協助產業界了解火災中細水霧滅火系統之抑制之效能，則必須依賴其他方法；而計算流體力學（Computational Fluid Dynamics；CFD）便是其中一種很好的選擇。因為它只要花費較少的經費，便可達到符合經濟效益及迅速獲得詳細數據之目的。電腦數值模擬乃是利用流體運動、物質燃燒等數學模式，並將其轉換成電腦語言，利用電腦執行運算，模擬火災成長、延燒、煙流擴散、熱輻射等火場情境，並從中擷取資料，依據擷取的資料評估火災可能造成的危害，如人命危害、財產損失及影響範圍....等，或者可將電腦模擬假想為由電腦去執行一個虛擬的實驗。而為了量化及驗證火災風險目標，必須能夠有確切的數值計算方法。目前國際上將火災危害分析方法區分成兩大類，即決定性分析(Deterministic Approach)與機率性分析(Probabilistic Approach)。所謂的決定性分析方法係指數值模式分析的方法，例如 Computational Fluid Dynamics Modeling、Dispersion Modeling、Egress Modeling、Explosion Modeling、Sprinkler & Detector Response Modeling...等。機率性分析則是藉由事故統計資料、危害分析工具與歷史資料...等作半定量分析。上述之決定性分析目前大多倚靠程式化之電腦模擬，藉由電腦的輔助計算火場高度複雜的現象，但是電腦輔助火場模擬軟體仍在發展階段，使用時必須深入了解軟體的使用限制及應用範圍限制，使用者也必須對火場要有豐富的經驗。所有的模擬結果一定要加以驗證、判斷是否符合真實現象，以免有不正常的物理現象發生。火場模擬預測火災成長速率目前是最有效果的，但對於火災開始及 post-flashover 較不準確。以全場模式為例，係將流體力學及熱力學導入到程式設計及火場模擬中，需要較多的使用經驗及專門人員，同時全場模式對電腦系統的等級要求比較多，需要較高的運算

速度。以本文的研究目標而言，就是以為架構，將火場可能發生的情境融入 CFD 電腦模擬中，將可能發生的危害加以模擬，可提供作為危害預防之工具。

近幾年來由於全尺寸及小尺寸燃燒實驗之進行，已經取得相當大量燃燒資料，使得我們對於火災成長過程及現象所獲得之知識快速增進；另一方面由於電腦工程技術的快速升級，使得複雜的火災數值模擬分析可以藉由電腦運算來進行，並能準確的模擬火場中火流、煙流、煙濃度、熱傳及建築結構受損之變化等。火場模擬預測火災成長速率目前是最有效果的，但對於火災開始及 post-flashover 較不準確。以全場模式(Fields models)為例，係將流體力學及熱力學導入到程式設計及火場模擬中，需要較多的使用經驗及專門人員，同時全場模式對電腦系統的等級要求比較多，需要較高的運算速度，本章將對 University of Greenwich(UK)發展之細水霧電腦效能模擬平台 FIREDASS 與 NIST 所發展之 FDS 進行介紹，包含軟體平台的發展歷程及所使用的理論，藉此說明本報告所使用細水霧效能模擬平台 FIREDASS 與 FDS 的評估功能。

4.1 FIREDASS 計算軟體

4.1.1 FIREDASS 發展歷程

1994 年 SINTEF-NBL(Norway)邀集歐洲七個從事火災相關研究團體，包括 GEC-Marconi Avionics(UK)、Cerberus Guinard(France)、DLR(Germany)、University of Greenwich(UK)、National Technical University of Athens(Greece)、CAA(UK)、Ginge Kerr(France)，向 European Commission 申請經費研發火災偵測與抑制模擬(Fire Detection and Suppression Simulation, Firedass)軟體，上述各參與團體負責單元如表 4.1 所示，此軟體係利用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)對分析對象物進行數值模擬。此軟體包含許多子模式(Sub-Model)，如 DE/AC Model、Mist Model、Radiation

Model、Fire Model、Suppression Model 等，其相互關係如圖 4.1 所示。

表 4.1 FIREDASS 發展計畫成員與分工說明

組織名稱	專長	功能
GEC-Marconi Avionics	航空電子技術	火災抑制系統之發展- 航空器運用
Cerberus Guinard	火災偵測	火災偵測系統之發展
SINTEF-NBL	研發	火災測試場
DLR	研發	火災測試場
University of Greenwich	大學	火災與細水霧模擬軟體開發
National Technical University of Athens	大學	熱輻射模擬軟體開發
CAA	法規專家	英國航空電子技術安全法規

4.1.2 FIREDASS 使用模式介紹

◆ 火災模式(Fire Model)

火災模式係設定釋放速率以求得空間中燃燒的主產物，包括熱、殘餘氧氣、一氧化碳、二氧化碳、水蒸汽與煙等。上述之釋放速率，最好以實驗方式求得。

◆ 火災抑制模式(Suppression Model)

此模式是引用 SINTEF 所發展之基準值工具組，依據前述之溫度與氧濃度值分析細水霧滅火情況。

◆ 細水霧模式(Mist Model)

此模式乃計算細水霧對於火場環境之動量、熱、質量轉換等之影響分析，亦可計算細水霧之液滴表面積對於熱輻射之影響效應。

◆ 熱輻射模式(Radiation Model)

熱輻射模式是以空間中的熱表面與火，利用六個 Flux Model 計算熱輻射。

◆ 偵測與水霧噴頭作動模式(The Detector/ Activation Model)

此可模擬環境中的煙/熱偵測器的反應與訊號的輸出，此軟體可分析水霧噴頭作動與作動時間。

4.1.3 FIREDASS 可靠度驗證

為了驗證 Firedass 的預測能力，英國 Firedass 研發團隊執行許多的實驗，並與 Firedass 的預測互相驗證。其中 SINTEF 進行了許多系列的測試，這些測試包括：Gas Burners、Cardboard Boxes 與 Kerosene Pool Fires。其測試場之測試設備圖如圖 4.2 所示、細水霧驗證實驗室空間配置圖如圖 4.3 所示。

4.1.4 建立 FIREDASS 輸入檔

為執行細水霧電腦模擬平台 Firedass，需先建立 Firedass 的輸入檔，並由輸入檔中可設定。

1. 火源大小：可為穩定火源或是隨時間變化之火源
2. 火源位置
3. 水霧噴頭數量、位置
4. 細水霧噴撒特性：出水量、粒徑、出口速度、密度分佈

4.1.5 FIREDASS 模擬結果繪圖

電腦模擬的優點之一就是模擬結果可生動的呈現，將模擬結果繪製出各種形式的圖樣，有助於了解火場的一些細微結構，抓住火場的物理特性，對於日後系統設計將會有莫大的助益。下列的圖樣即為執

行 Firedass 後，將模擬結果加以繪圖處理的圖樣，如圖 4.4~圖 4.6。

4.6 執行 Firedass 的效益

利用本細水霧電腦模擬平台 Firedass 可獲得之效益包括：

1. 可針對不同對象物進行電腦模擬，深入分析不同使用情境的現象，建立細水霧滅火技術，針對不同對象物建立適當且有效之細水霧系統。
2. 有效驗證系統效能，節省費用與時間。
3. 調整系統參數進行模擬，據此進行細水霧系統最佳化，不僅可助產業界發揮系統最佳效能，提昇競爭力；亦可做為消防產業界開發新產品之用，縮短開發時程與費用。

4.2 FDS 計算軟體

4.2.1 FDS 緣起與簡介

本報告撒水抑制效能模擬部分將引用美國 NIST 所發展的場模式火場後果模擬軟體 FDS(Fire Dynamics Simulator)，本節並介紹 FDS 的起源、可模擬的情境、使用限制、模擬原理.... 等。此技術主要利用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)進行數值模擬分析，採用美國 NIST(National Institute of standard and technology)所開發之 FDS(Fire Dynamic Simulator)火場模擬軟體，並搭配火場情境立體繪圖軟體 Somkeview 來追蹤煙流的擴散情形。FDS 是由美國 NIST(National Institute of Standards and Technology)於西元 2000 年 2 月公開發表第一版，而於 2001 年 9 月陸續發表第二版，目前至 2004 年 9 月底止已發展至第四版。本計畫選用 FDS 做為撒水抑制效能模擬研究分析軟體，有以下幾個理由：

1. NIST 建有廣泛的火場實驗資料庫，FDS 可與這些實驗進行比對，因此程式的可靠度、準確度頗佳，足供工程使用，圖 4.7 為利用

FDS 進行美國 911 雙子星大樓遭受恐怖攻擊後之火場模擬比對的結果，由 FDS 所模擬出來的現象發現與實際相片相當吻合。

2. FDS 是專門為火場模擬所撰寫的軟體，在火場的模擬設定上會比較簡單、迅速，面對複雜的火場資訊，FDS 常常可用簡單的程式即可完成描述，可節省前置作業的時間。
3. FDS 符合現今軟體的潮流，為一開放原始碼(open source) 軟體，整個程式都可為大眾所檢視，集大眾之力可加速程式碼的正確性。程式撰寫者與使用者間的溝通管道暢通，可為使用者遭遇的問題作迅速的回應，也常常接受使用者的建議進行程式修改，因此功能愈來愈齊全。

FDS 這套計算流體力學軟體的核心是由 Navier-Stokes 方程式組成，用於解析熱驅動的低速流場，著重在煙流及熱傳遞的現象。數值模型滿足之守恆方程式包括質量連續、x 方向動量、y 方向動量、z 方向動量、能量、二氧化碳濃度、擾狀流動能量 κ 及擾狀流動消散 ϵ 方程式。FDS 以解析流體方程式的方式撰寫，適用於由低速、熱驅動(Heat drive)的三度空間的流場及煙流動模擬，同時可模擬撒水作動，及計算撒水後火場的變化。

4.2.2 FDS 的使用步驟

要利用 FDS 進行火場模擬需有一定的步驟，今將利用 FDS 進行火場模擬的使用步驟說明如下：

1. 收集火場資料：火場外形尺寸、內容物位置尺寸、進出風口位置風量、消防設施、可燃物資料，供建立 FDS 輸入檔。
2. 定義起火點：可藉由火災危害評估定義出最有可能起火的地點，並計算可燃物數量及熱釋放率。
3. 定義起火源尺寸及熱釋放率：步驟 4.9.2 定義出起火點、據

此可定義出火源尺寸及熱釋放率，在 FDS 視窗介面中，使用者可由下面二種的設定方式中選擇一種來定義火源。

4. 設定單位面積的熱釋放率，單位為 kW/m^2 。
5. 設定單位體積的熱釋放率，單位為 kW/m^3 ，此類設定普通是
用在池火(pool fire)的燃燒上。
6. 建立 FDS 輸入檔。
7. 執行 FDS。
8. 利用 SMOKEVIEW 及其他軟體進行模擬結果繪圖。
9. 進行資料分析判別，確認模擬之正確性。

4.2.3 FDS 的使用方法介紹

要使用 FDS，首先需要建立一個 FDS 的輸入檔(假設檔名為 sample.fds)，這個輸入檔可說是 FDS 使用的最重要部份，當程式開始執行，FDS 由這個輸入檔讀取，可建置項目包括：

1. 模擬空間的大小、配置。
2. 模擬空間的外部、內部形狀。
3. 牆面及實體內容物(如桌、椅)的大小、位置。
4. 門、窗的大小、位置。
5. 開口、進風、排風口的大小、位置及風量。
6. 偵測(Detector)的位置、種類。
7. 撒水頭(Sprinkler)的位置、種類。
8. 火場資料(如溫度、煙濃度、一氧化碳濃度)擷取點的位置。

9. 程式執行模擬的設定。

4.2.4 FDS 的後處理—SMOKEVIEW

FDS 的後處理，可直接交由 SMOKEVIEW 進行，在 SMOKEVIEW 中可繪製火場佈置圖 FDS 藉由 SMOKEVIEW 繪製火場情景，將模擬結果圖面化、色彩化、立體化、動畫化，讓使用者快速的建立火場的圖象，如同身歷其境，因此可以快速的掌握火場資訊，進一步對火場進行分析，將危害定義出來。

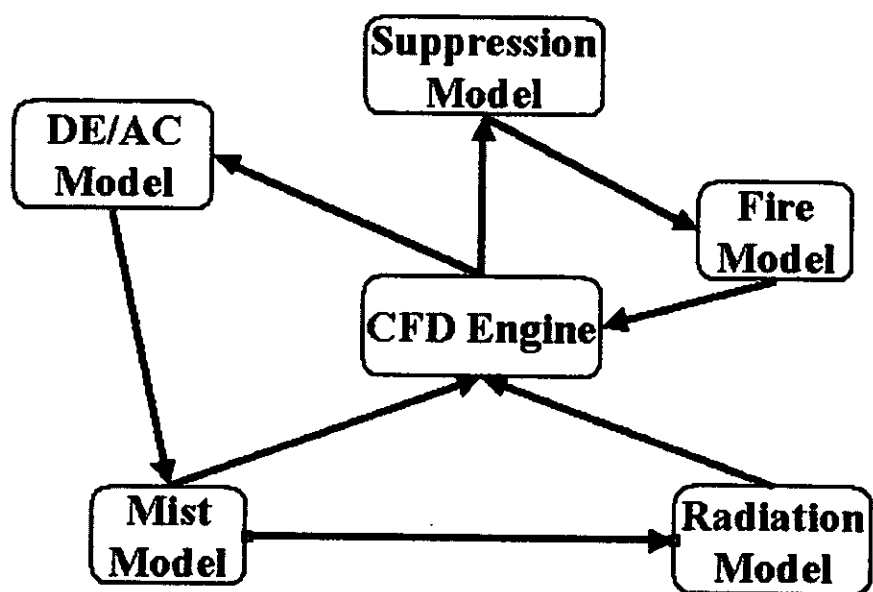


圖 4.1 FIRE DASS 子模式關連圖

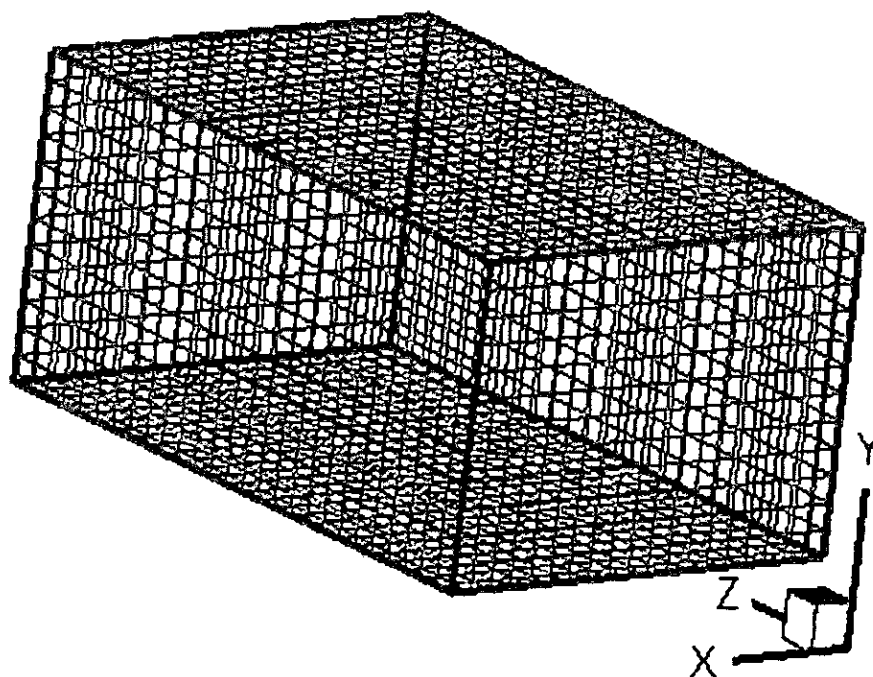


圖 4.4 FIREDASS 格點圖

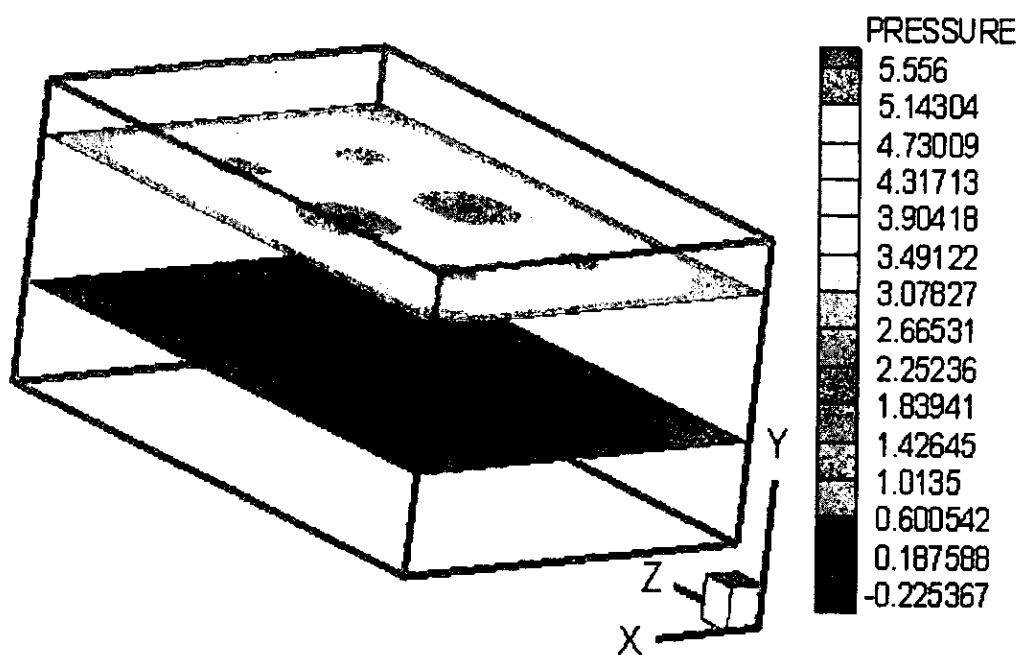


圖 4.5 FIREDASS 壓力切面圖

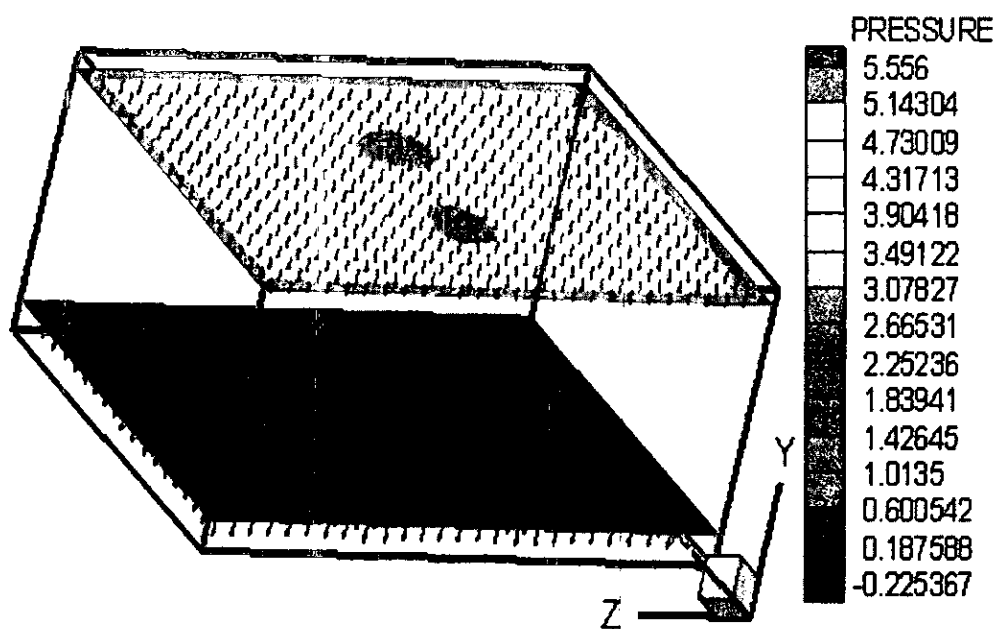


圖 4.6 FIREDASS 速度向量圖

第五章 電腦數值模擬結果與討論

5.1 撒水效能模擬分析

本節以電腦模擬進行前項實驗情境之火場模擬，分別比較無任何防護及 6 個撒水頭防護之後果比較

5.1.1 模擬模型

本次模擬之對象物模型建立完全依據實驗之場景及尺寸大小建立，長寬高分別為 6.1×3.5×2.9(公尺)，模擬模型如圖 5.1 為無任何防護之模擬模型，其中熱電偶樹之數目及位置高度與實驗之場景一致。而圖 5.2 為 6 個撒水頭防護之模擬模型，圖中紅色小方塊即為撒水頭，撒水頭之詳細位置如表 5.1，撒水頭的 K factor 為 77，RTI=148，作動溫度為 68℃，依據實驗數據之表 2.1，當操作壓力為 3.45kgf/cm² 時流量為 145Lpm。

表 5.1 撒水頭詳細座標位置

座標 編號	X(公尺)	Y(公尺)	Z(公尺)
1	0.4	1.0	2.9
2	2.4	1.0	2.9
3	4.4	1.0	2.9
4	0.4	2.5	2.9
5	2.4	2.5	2.9
6	4.4	2.5	2.9

5.1.2 火源設定

火場模擬之火源熱釋放率根據實驗數據、油料與燃燒面積進行設定，根據實驗，柴油在時間 t=100 秒時被點燃，溫度迅速上升並且在

時間 $t=160$ 秒時，達到高峰，維持高峰並保持一個上下振盪的趨勢，在時間 $t=250$ 秒時溫度因燃料的耗盡而開始逐漸下降，實驗所規劃的火源燃燒所需的時間總數是 150 秒，而面積 1 平方公尺之柴油池火的熱釋率為 1.2MW，根據以上資料火場模擬之火源設定為，在 0~60 秒，呈線性上昇至 1200kW；60~150 秒維持 1.2MW；150~180 秒呈線性下降至 0.0kW，一直維持至 200 秒，以上之熱釋放率設定如圖 5.3。

5.1.3 無任何防護之模擬結果

5.1.3.1 煙流分析

圖 5.4 至圖 5.6，分別為 5.6 秒、9.6 秒及 29.4 秒的煙粒子分佈圖，由圖 5.4 可看出煙粒子由遮蔽平台間隙竄出，而在 9.6 秒時煙粒子到達天花板且延著天花板向四方擴散，到 29.4 秒時煙粒子幾已擴散至全區。圖 5.7 則為 40 秒時的流場向量圖，由圖面的中央部份可看出油池燃燒之熱氣順著遮蔽平台往上流動，直至天花板後改為水平流動，另外值得注意的是左下部的圖面，在靠近通氣口的流向為正對通氣口，也就是由通氣口向外流動，意味著在燃燒初期由於熱膨脹，實驗空間內的氣體是往外流動的。

5.1.3.2 溫度分析

圖 5.8 為 60 秒時高 2.1 米處的溫度切面圖，在圖面中央部份的高溫區即為延著遮蔽平台上昇之燃燒熱氣，另外值得注意的是右上角的通風口為入流，補充新鮮空氣進入燃燒空間，而編號 2 的熱電偶樹正位於通氣口前方，故實驗數據中，編號 2 熱電偶樹偵測到的溫度較其他熱電偶樹低。

5.1.3.3 氧濃度分析

圖 5.9 為燃燒初期的氧濃度分佈，除了油池附近的氧被消耗外，其他區域的氧濃度仍高。圖 5.10 為燃燒全盛期的氧濃度分佈，由圖

中看出氧幾乎被消耗殆盡，但在圖面右下部可明顯看出新鮮空氣藉由通氣口進入模擬空間。圖 5.11 為燃燒衰退期的氧濃度分佈，由於通氣口持續有新鮮空氣進入，同時燃燒已接近尾聲耗氧不多，故氧濃度反而逐步上昇。

5.1.3.4 一氧化碳濃度分析

一氧化碳濃度分佈恰與氧濃度分佈相反，燃燒初期一氧化碳除了油池附近外濃度均低如圖 5.12，至燃燒全盛期，整個模擬空間充滿高濃度的一氧化碳如圖 5.13，但同樣在圖面右下部可明顯看出新鮮空氣藉由通氣口進入模擬空間。圖 5.14 為燃燒衰退期的一氧化碳濃度分佈，由於通氣口持續有新鮮空氣進入，同時燃燒已接近尾聲一氧化碳產生不多，故一氧化碳濃度反而逐步下降，恰氧濃度逐步上昇相反。

5.1.4 撒水防護之模擬結果

5.1.4.1 撒水作動時間分析

圖 5.15 為撒水前(39 秒)高 2.6 米處的溫度切面圖，由圖中可發現鄰近遮蔽平台處溫度較高，依此推論在鄰近遮蔽平台處的撒水頭應較快作動，果然如圖 5.16 所示，撒水頭的確以鄰近遮蔽平台的撒水頭較快作動，作動次序可參照圖 5.16 或表 5.2 有詳細的作動時間，在模擬中，第一個作動時間為 52.4 秒，與實驗的 60 秒接近，但在模擬中有一撒水頭始終未作動，則與實驗不同。

表 5.2 撒水頭詳細作動時間

座標 編號	X(公尺)	Y(公尺)	Z(公尺)	作動時間
1	0.4	1.0	2.9	5
2	2.4	1.0	2.9	4
3	4.4	1.0	2.9	2
4	0.4	2.5	2.9	不作動
5	2.4	2.5	2.9	3
6	4.4	2.5	2.9	1

5.1.4.2 溫度分析

圖 5.17 為作動前鄰近天花板的溫度切面，高溫佈滿整個模擬區域，圖 5.18 為第一個撒水頭作動後 28 秒的溫度，由圖 5.18 可看出撒水的降溫效果良好。在電腦模擬中很難定義滅火的條件，因此暫且以溫度場來定義，如圖 5.19 為 170 秒時的溫度場，幾無與室溫接近，故推估撒水防護的滅火時間為燃燒後 170 秒，與實驗的 172 秒相近。

5.1.4.3 氧濃度分析

圖 5.20 及圖 5.21 分別為 163 秒及 180 秒的氧濃度切面圖，將此二圖與無防護時相同時間的氧濃度切面圖比較可發現，有撒水的情形下氧濃度均低於無防護的情境，推測原因為在撒水作動的情況下，室內外溫度相近故壓差較小，由通氣口補充的新鮮空氣較少，亦可由圖 5.20 及圖 5.21 右下角判別出，通氣口補充的新鮮空氣的確較無防護的情境少，故造成有撒水的情形下氧濃度均低於無防護的情境。

5.1.4.4 一氧化碳濃度分析

圖 5.22 及圖 5.23 分別為 163 秒及 180 秒的一氧化碳濃度切面圖，若拿此二圖與無防護時相同時間的一氧化碳濃度切面圖比較可發現

情況與上一節的氧濃度分析相似，有撒水的情形下一氧化碳濃度均高於無防護的情境，推測原因同樣為在撒水作動的情況下由通氣口補充的新鮮空氣較少，造成有撒水的情形下一氧化碳濃度均高於無防護的情境。

5.1.5 二氧化碳抑制效能模擬分析

5.1.5.1 二氧化碳進氣模型

由於電腦模擬程式的限制，並無法模擬二氧化碳經由噴頭噴撒的動作，僅能以等釋放量的方式進行模擬，模擬場所非屬於電信機械室，且為全區放射，並有二開口，據此計算二氧化碳藥劑量。模擬空間體積為 $Q=6.1 \times 3.5 \times 2.9=61.915\text{m}^3$ ，二開口面積 $A=2 \times 0.6 \times 0.8=0.96\text{m}^2$ ，因此所需之藥劑量 $W=V \times K + A \times K'=60.5235\text{kg}$ （對非屬於電信機械室且面積在 50m^2 以上 150m^2 以下 $K=0.9$ ， $K'=5$ ），今以一分鐘的時間放射完畢，故每秒進入模擬空間的藥劑量為 1kg/sec ，且以 4m^2 的放射面積進行放射，放射模型如圖 5.24，二氧化碳放射口位於中央區域，圖中的紅色區塊即為進入模擬空間的二氧化碳藥劑，另外為配合其他防護方式，二氧化碳系統在點火後 60 秒才開始釋放。圖 5.25 為 77 秒時的二氧化碳濃度切面圖，由圖中可看出二氧化碳幾已佈滿整個模擬空間，也就是說二氧化碳系統作動後 17 秒二氧化碳已佈滿整個模擬空間。

5.1.5.2 滅火時間推估

利用火柱存在與否推估滅火時間，圖 5.26 為二氧化碳釋放前(59 秒)的火柱圖，火柱為位於圖面中央下方之紅色部份，圖 5.27 為 88 秒的火柱圖，圖中可看出火柱區域較釋放前小，而圖 5.28 為 117 秒之火柱圖，完全無法看到任何火柱形成，其後也一樣，故推估二氧化碳系統的滅火時間共需時 57 秒，即在 117 秒時達到滅火狀態。

5.2 細水霧效能模擬分析

5.2.1 模擬對象說明

本章之模擬對象與上一章相同，均以實驗為對象，但因細水霧模擬與撒水模擬為二套不同的模擬軟體，故需分別建立各自的模擬模型，細水霧模擬之模型如圖 5.29，可與撒水模擬模型圖 5.2 比較，二者間所有物件的大小位置都設為一樣。

5.2.2 具 6 顆高壓細水霧噴頭防護之模擬結果

5.2.2.1 高壓細水霧噴頭說明

本節使用 6 個高壓細水霧噴頭，位置如表 6.1 所示，與節 5.4 所使用之撒水頭位置相同，由點燃後 60 秒開始釋放，細水霧噴霧特性如附錄二之 7 所述之檢測特性，操作壓力 100bar，平均粒徑 $30\mu\text{m}$ ，流量為 5.2Lpm(liter per minute)。

5.2.2.2 溫度分析

圖 5.30、圖 5.31 及圖 5.32 分別為 60 秒、62 秒及 174 秒之俯視溫度切面圖，圖 5.30 為細水霧釋放前的溫度切面圖，高溫充滿整個空間，圖 5.31 為細水霧釋放後 2 秒的溫度切面圖，圖中較低溫處即為噴霧冷卻的位置，圖 5.32 為細水霧釋放後 114 秒的溫度切面圖，可明顯的看到溫度下降，但無法如撒水般下降至室溫，但比對實驗數據，撒水頭模擬的結果低於實驗的結果，撒水頭模擬溫度過低，反觀細水霧模擬，則溫度比實驗數據高，此乃因為在細水霧模擬中燃燒效率較實驗佳，故模擬的溫度場本身就較實驗高，也就導致細水霧模擬的溫度比實驗數據高。

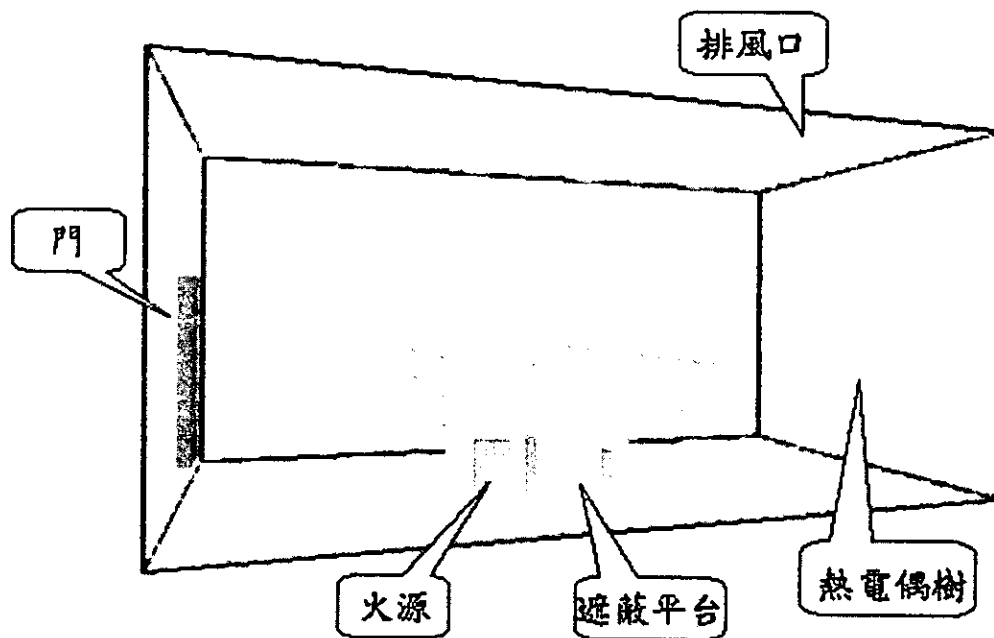


圖 5.1 無任何防護之電腦模擬模型

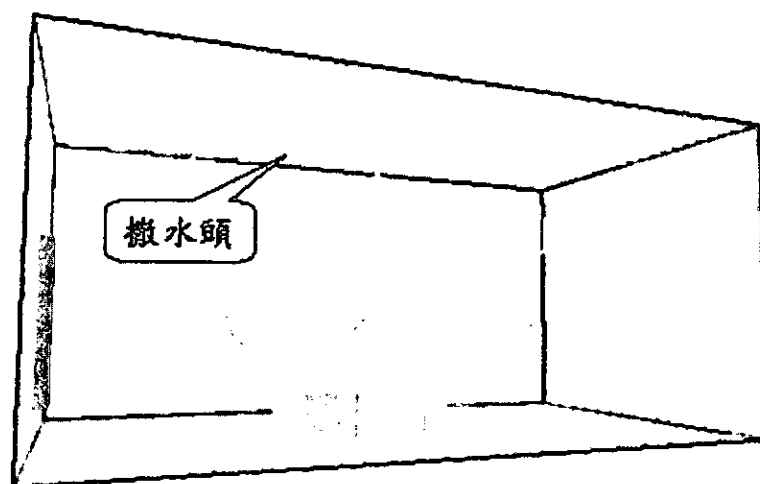


圖 5.2 具 6 個撒水頭防護之模擬模型

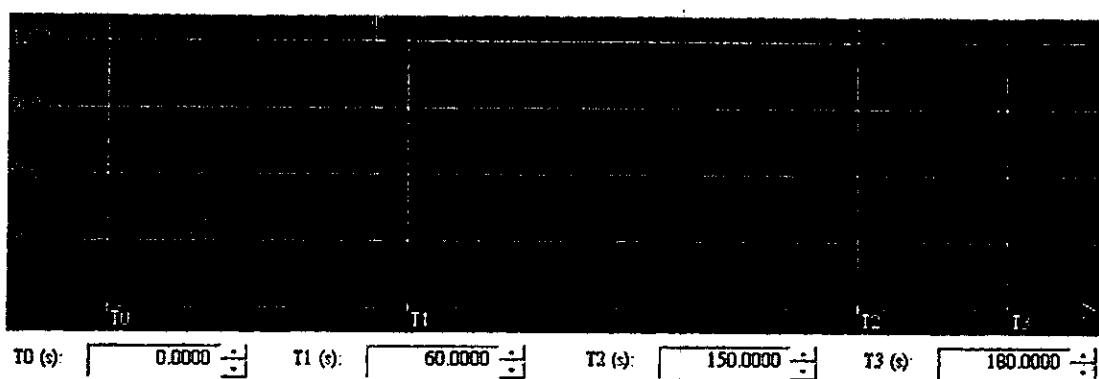


圖 5.3 熱釋放率設定

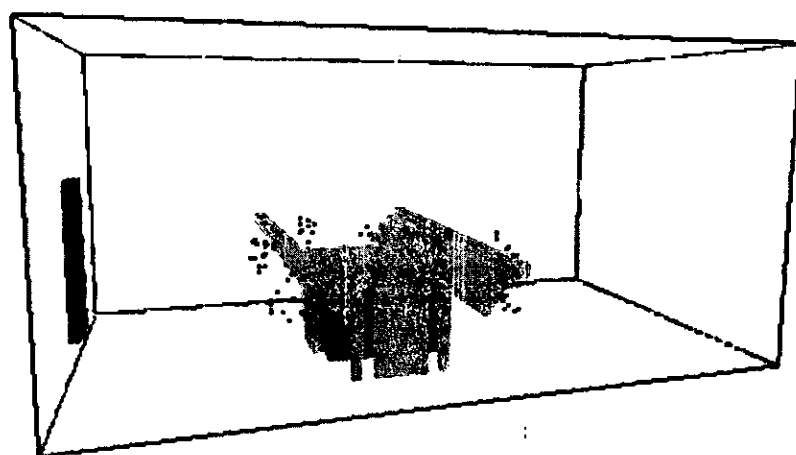


圖 5.4 煙粒子分佈圖—5.6 秒

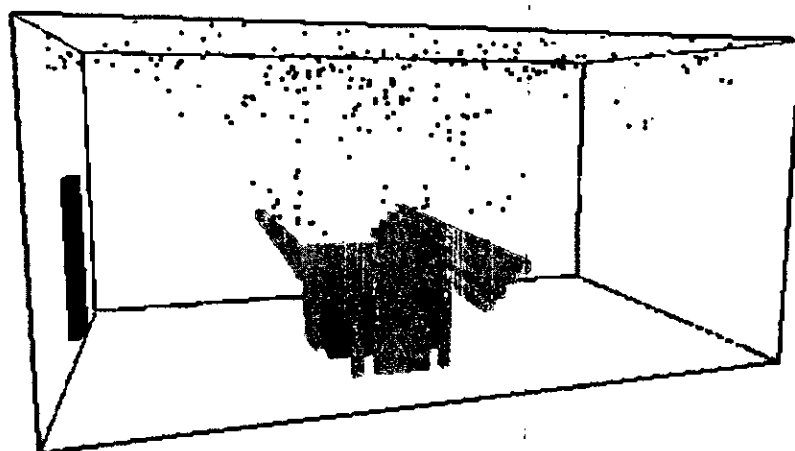


圖 5.5 煙粒子分佈圖(9.6 秒)

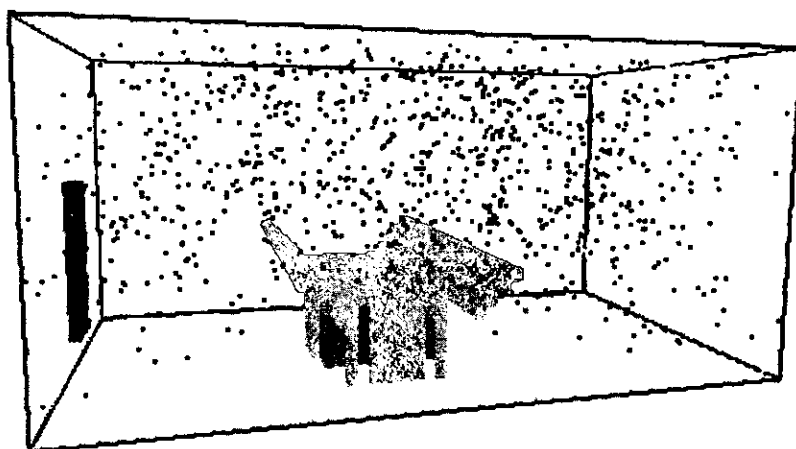


圖 5.6 煙粒子分佈圖(29.4 秒)

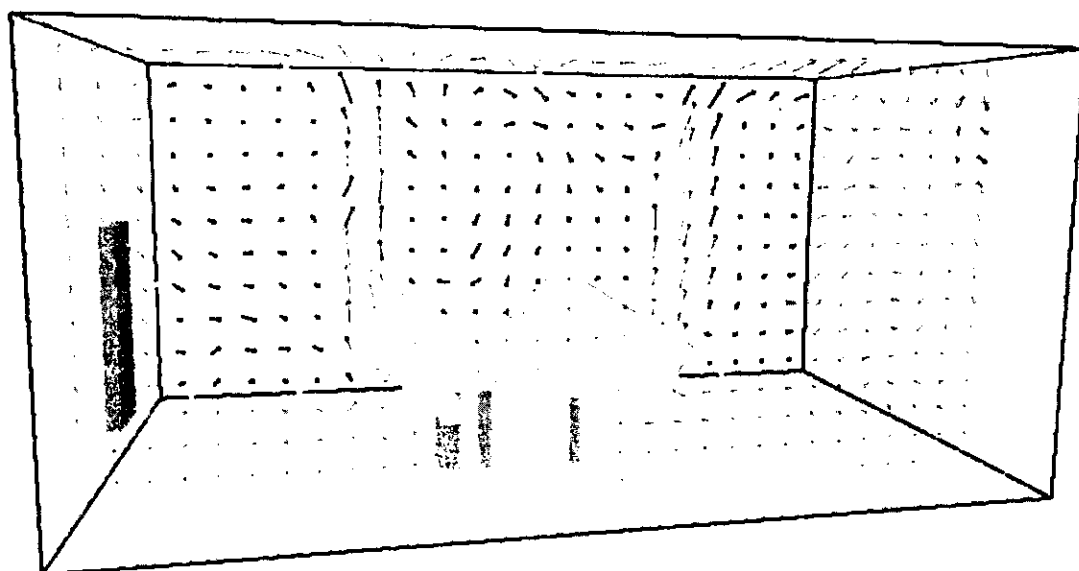


圖 5.7 火場流向圖(40 秒)

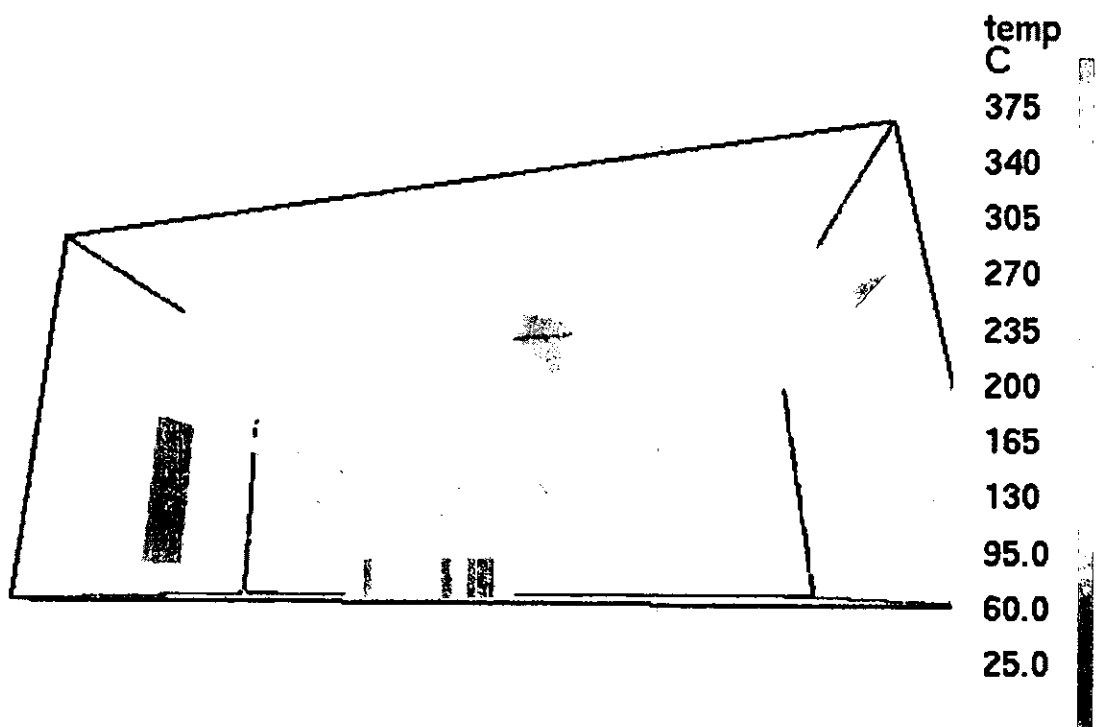


圖 5.8 溫度切面圖(60 秒)

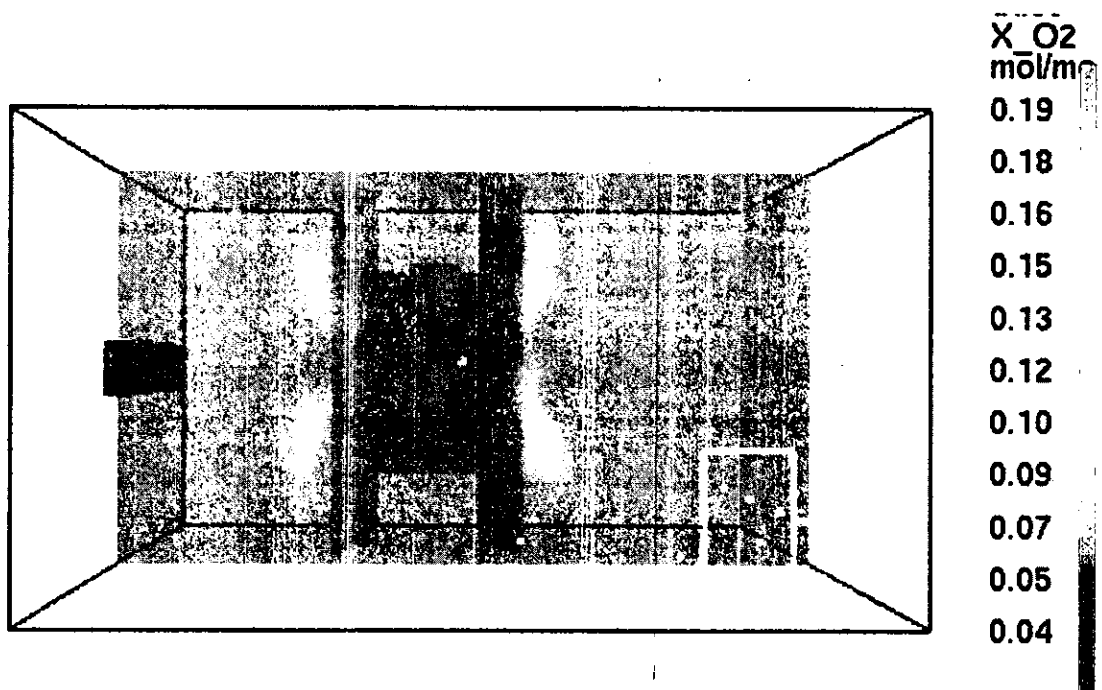


圖 5.9 氧濃度切面圖(35 秒)

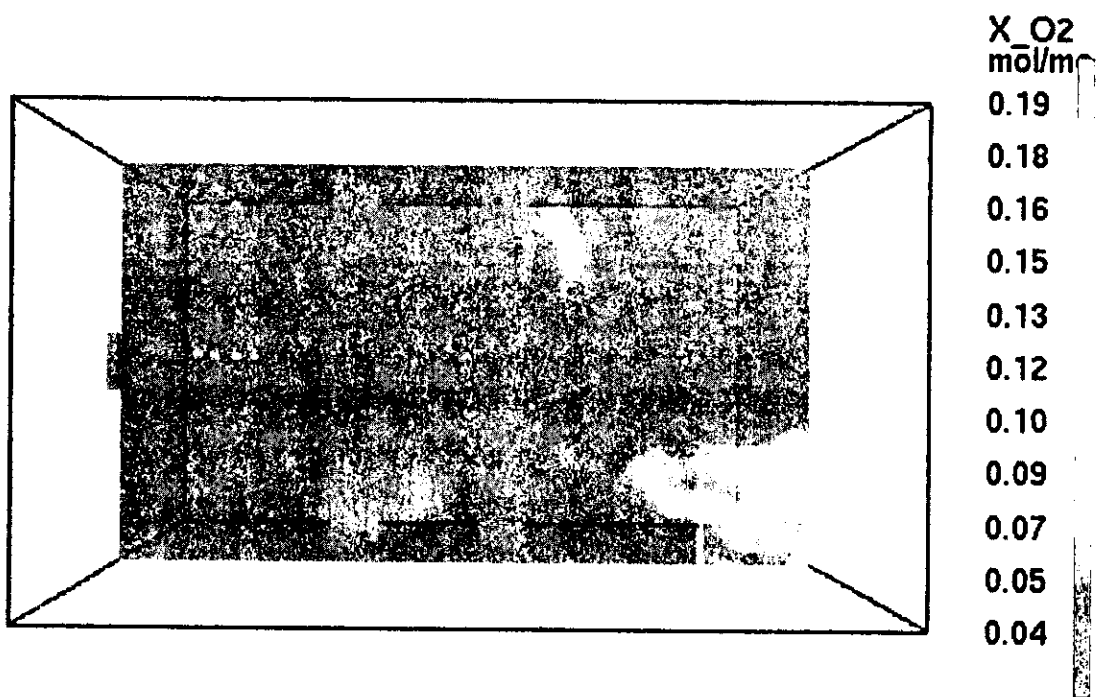


圖 5.10 氧濃度切面圖(163 秒)

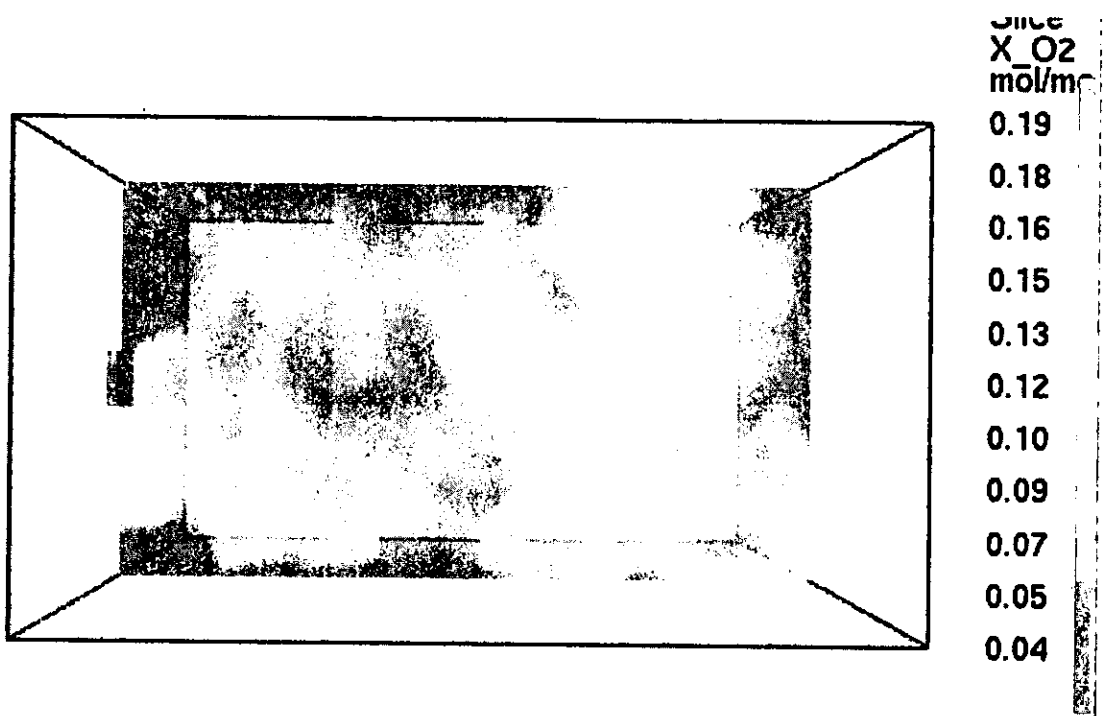


圖 5.11 氧濃度切面圖(180 秒)

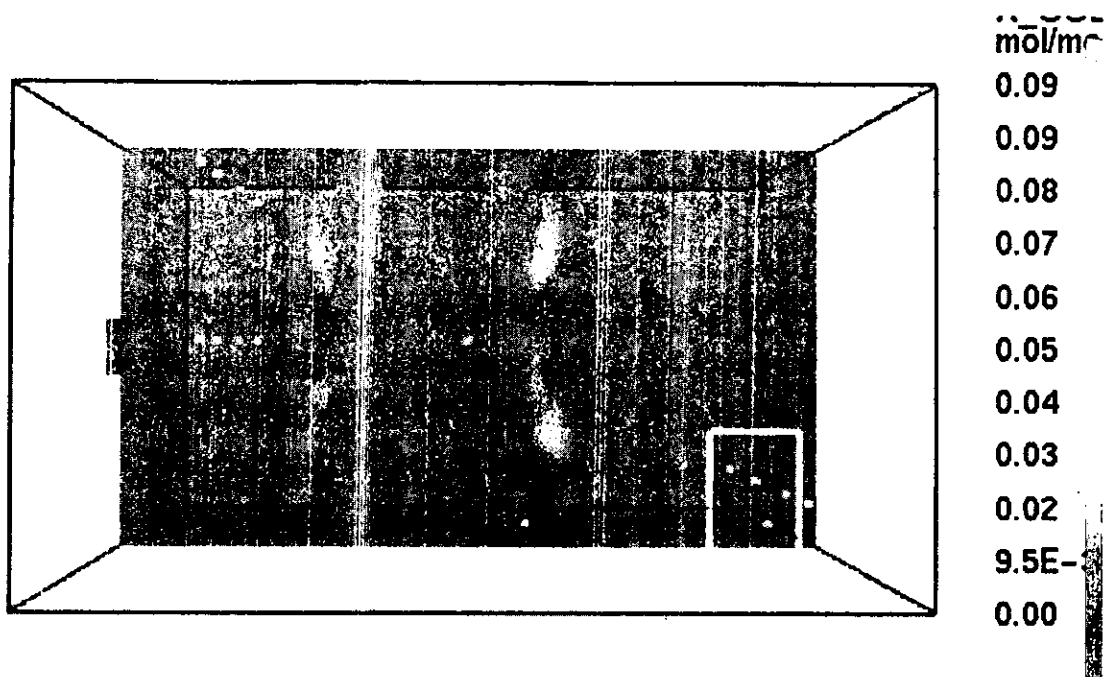


圖 5.12 一氧化碳濃度切面圖(35 秒)

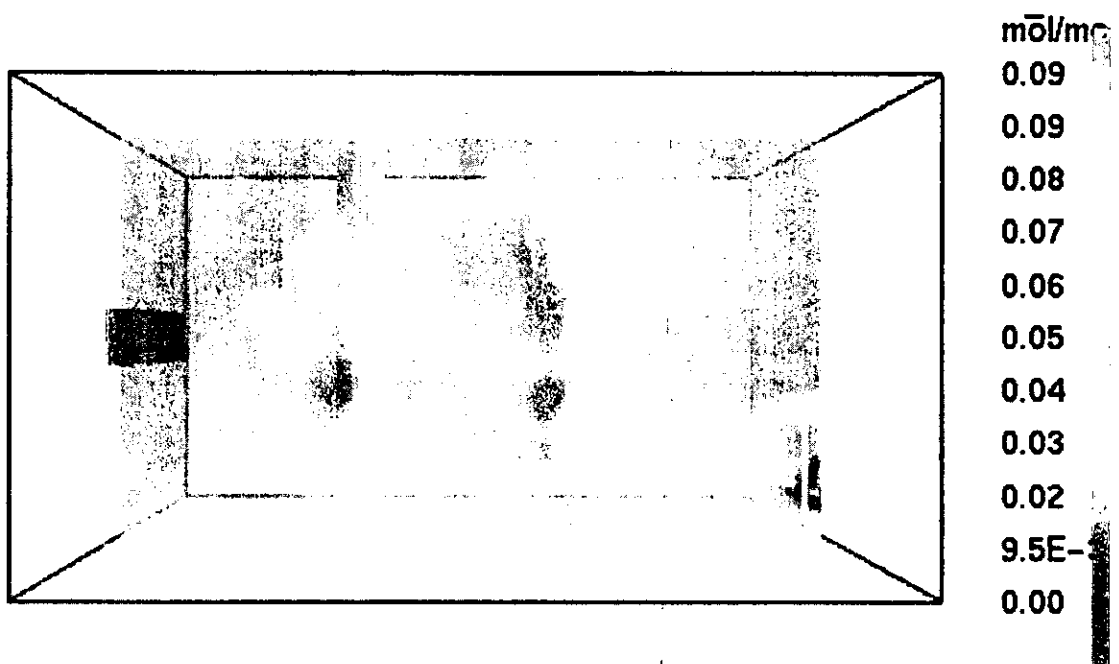


圖 5.13 一氧化碳濃度切面圖(163 秒)

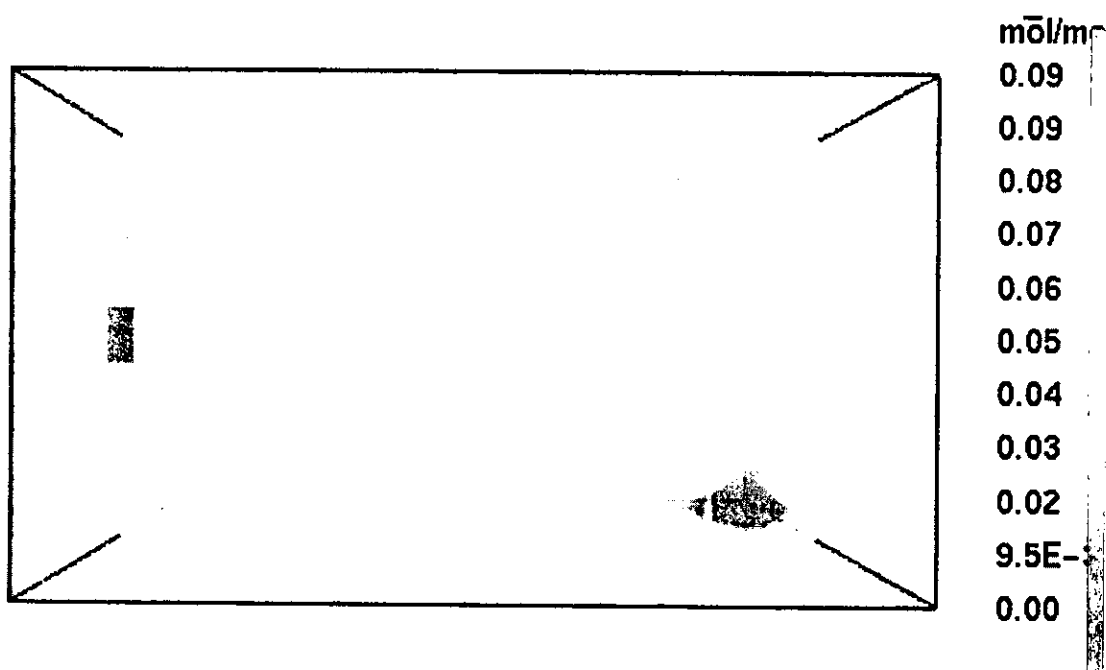


圖 5.14 一氧化碳濃度切面圖(180 秒)

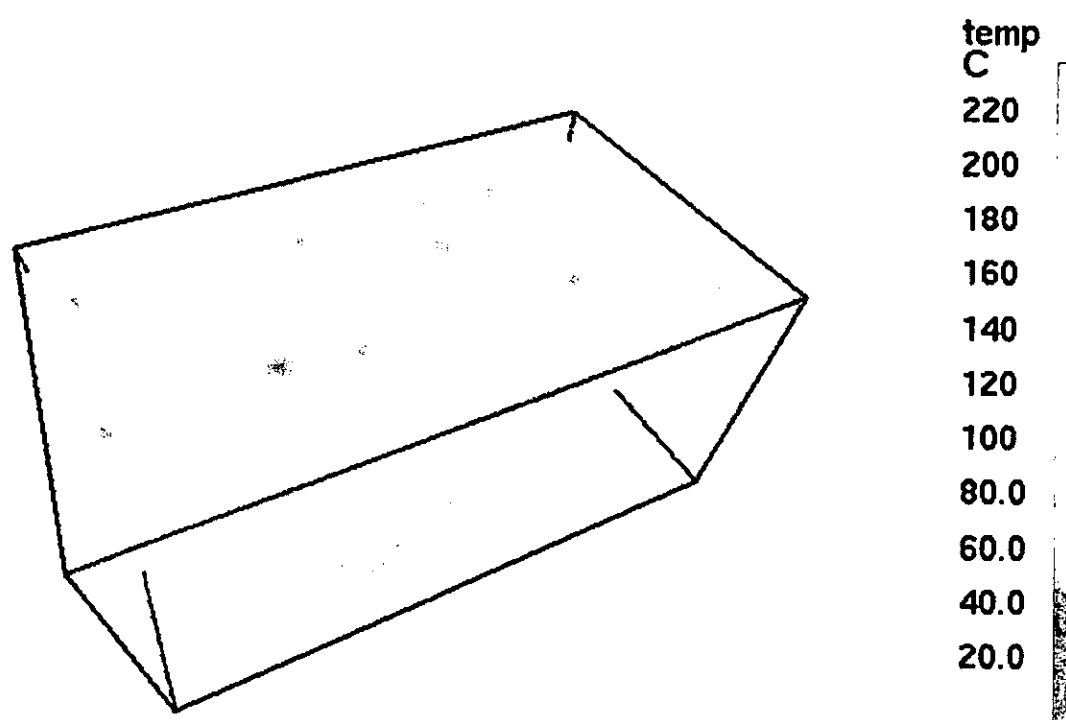


圖 5.15 溫度切面圖—39 秒

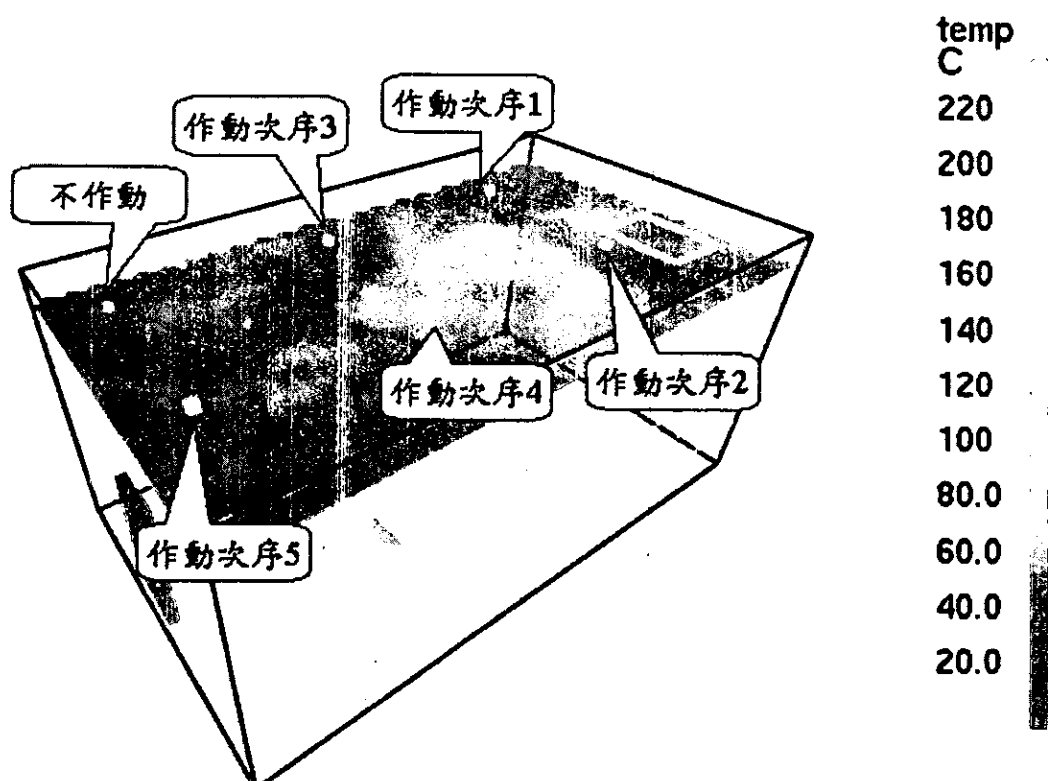


圖 5.16 溫度切面圖—93 秒

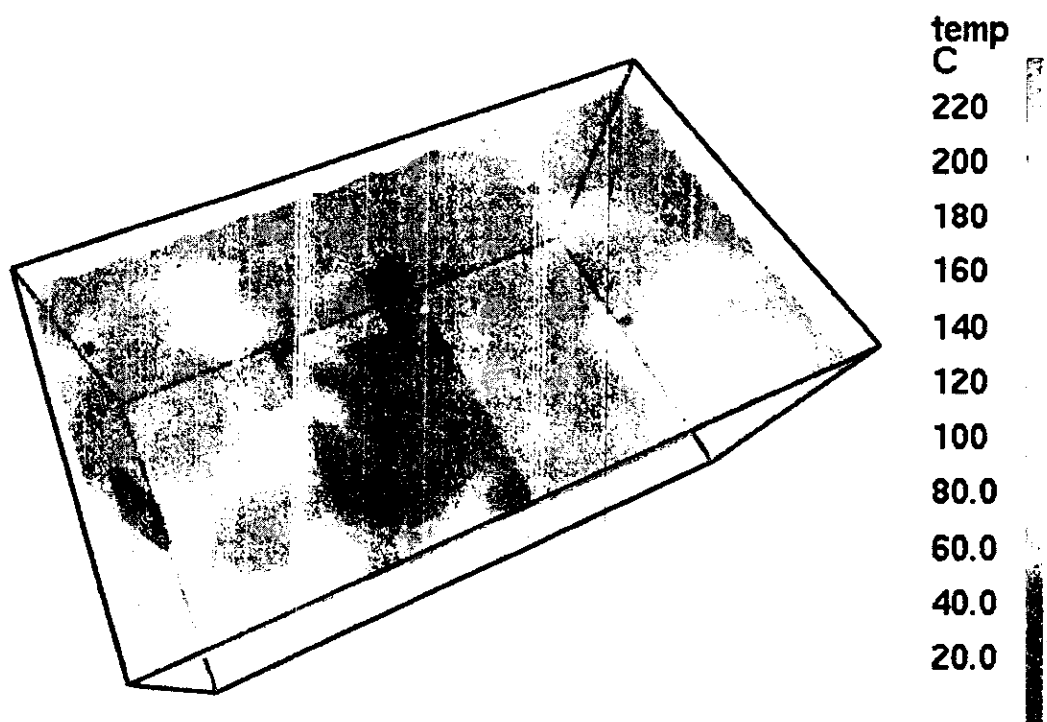


圖 5.17 溫度切面圖(51 秒)

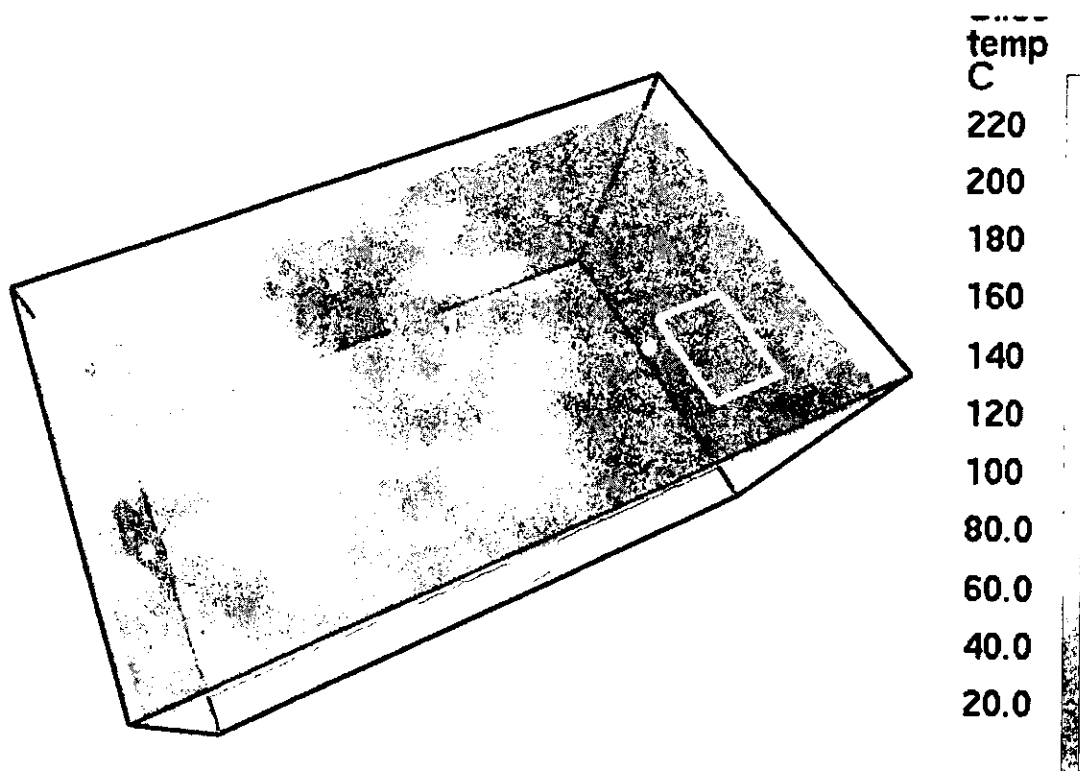
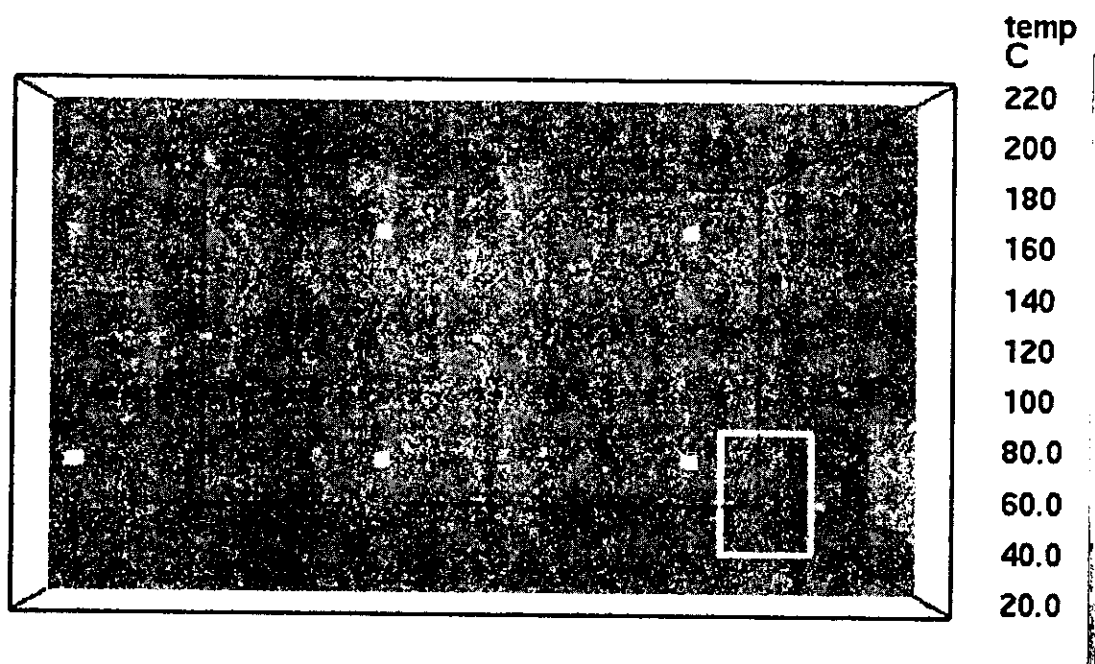


圖 5.18 溫度切面圖(80 秒)



Frame: 854
Time: 170.8

圖 5.19 溫度切面圖(170 秒)

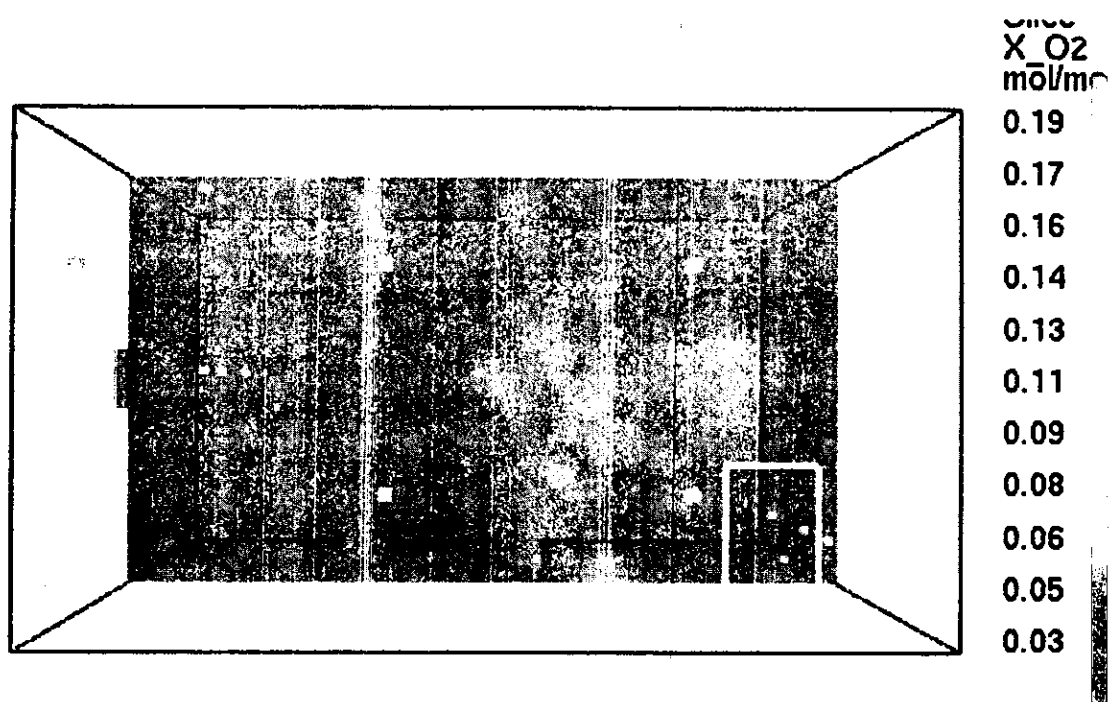


圖 5.20 氧濃度切面圖(163 秒)

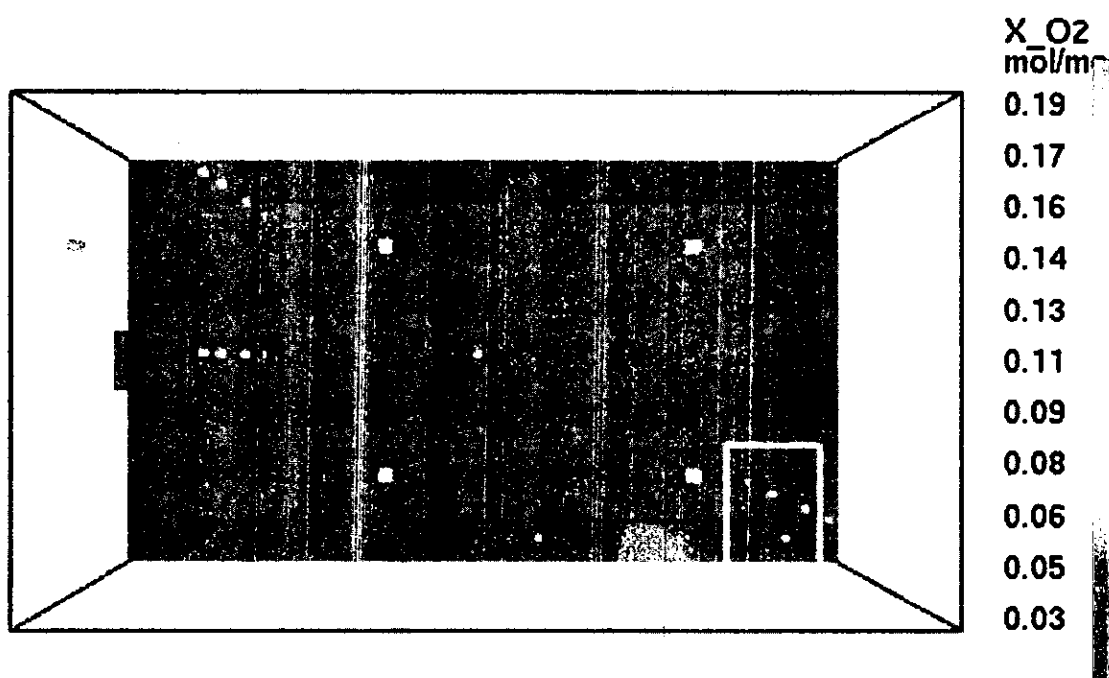


圖 5.21 氧濃度切面圖(180 秒)

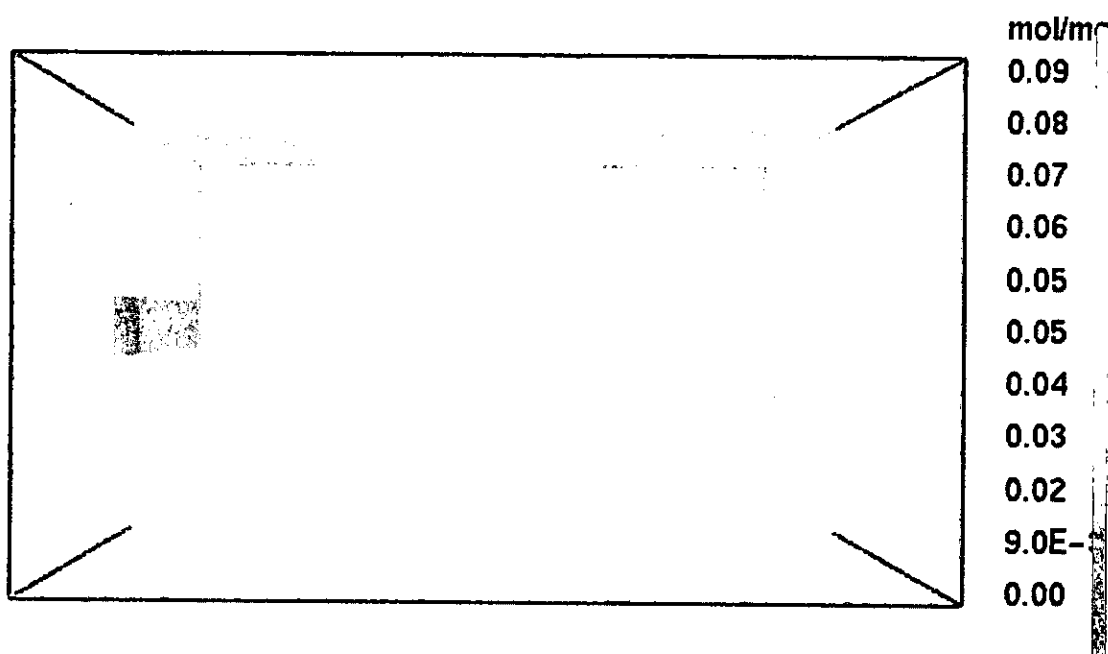


圖 5.22 一氧化碳濃度切面圖(163 秒)

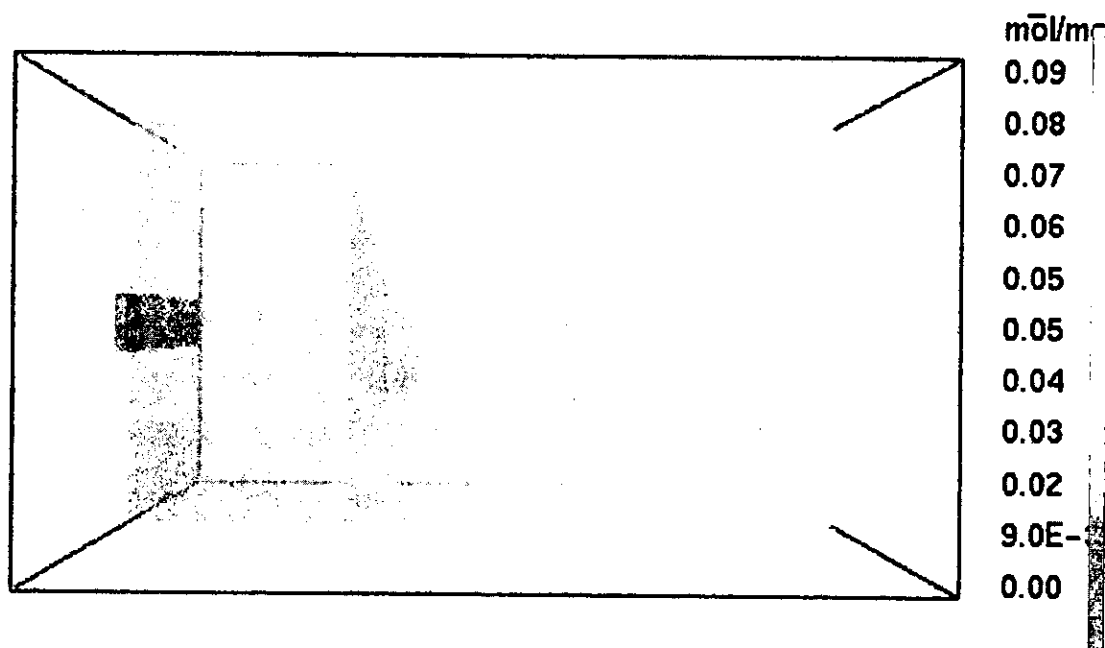


圖 5.23 一氧化碳濃度切面圖(180 秒)

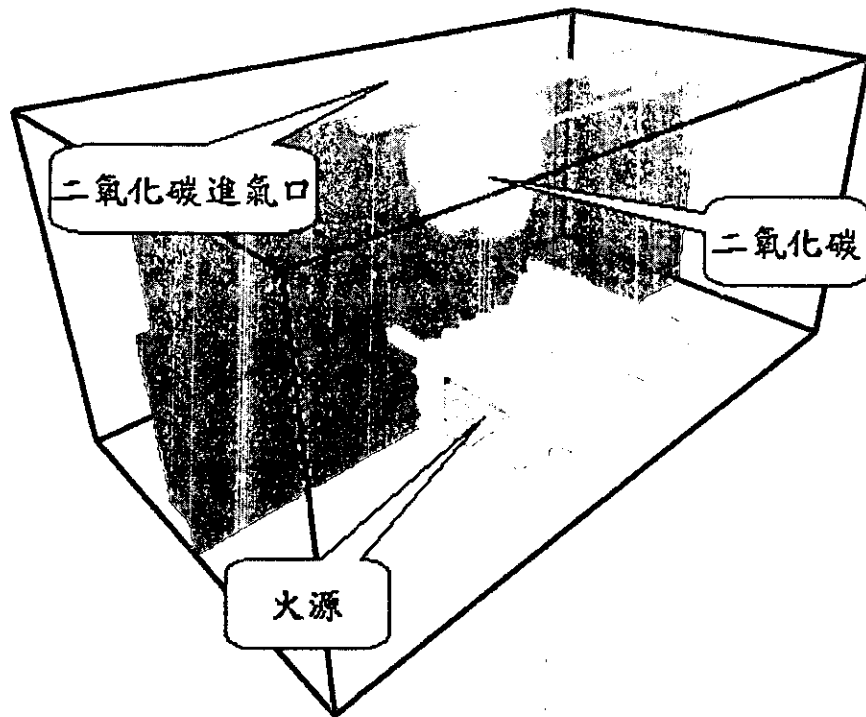


圖 5.24 二氧化碳進氣模型(62 秒)

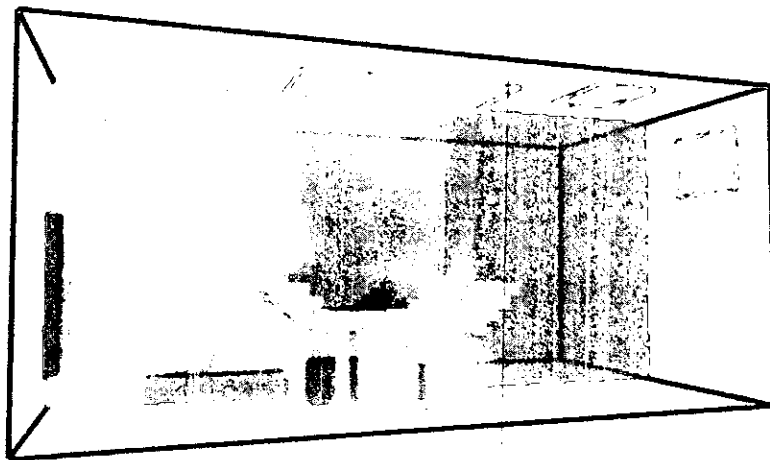


圖 5.25 二氧化碳進氣模型(77 秒)

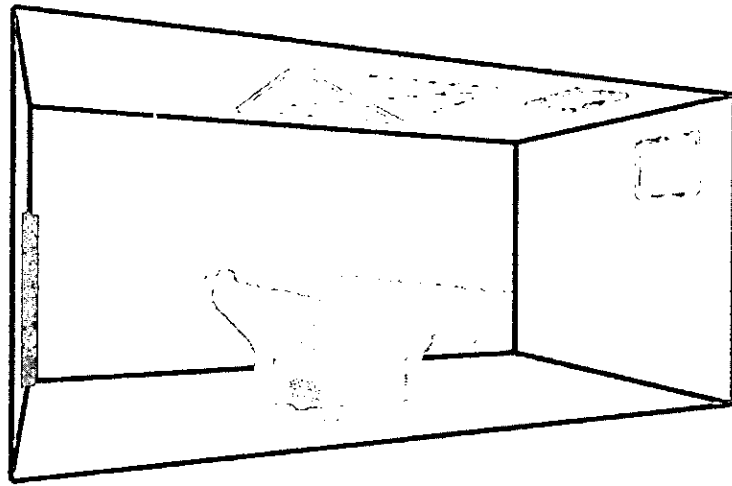


圖 5.26 火柱形態(59 秒)

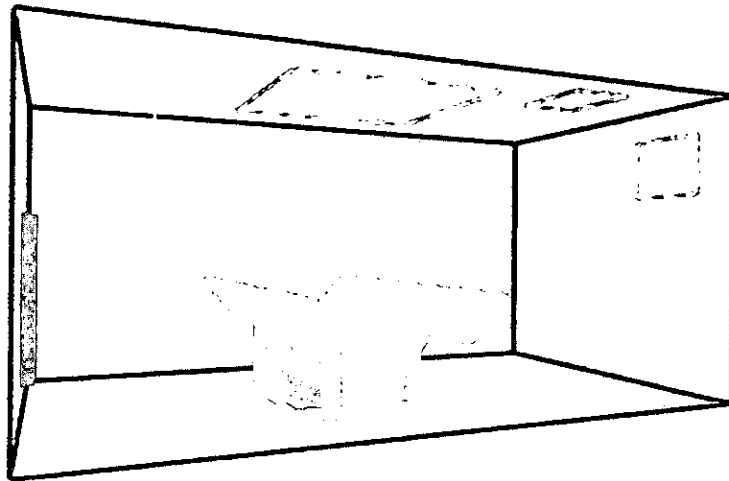


圖 5.27 火柱形態(88 秒)

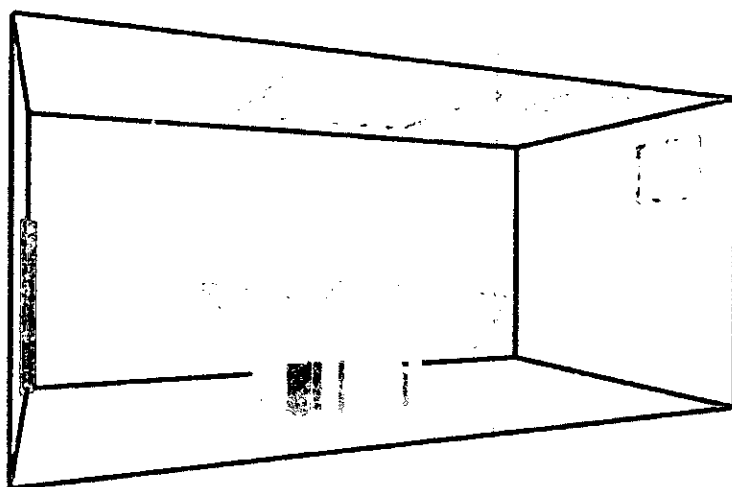


圖 5.28 火柱形態(117 秒)

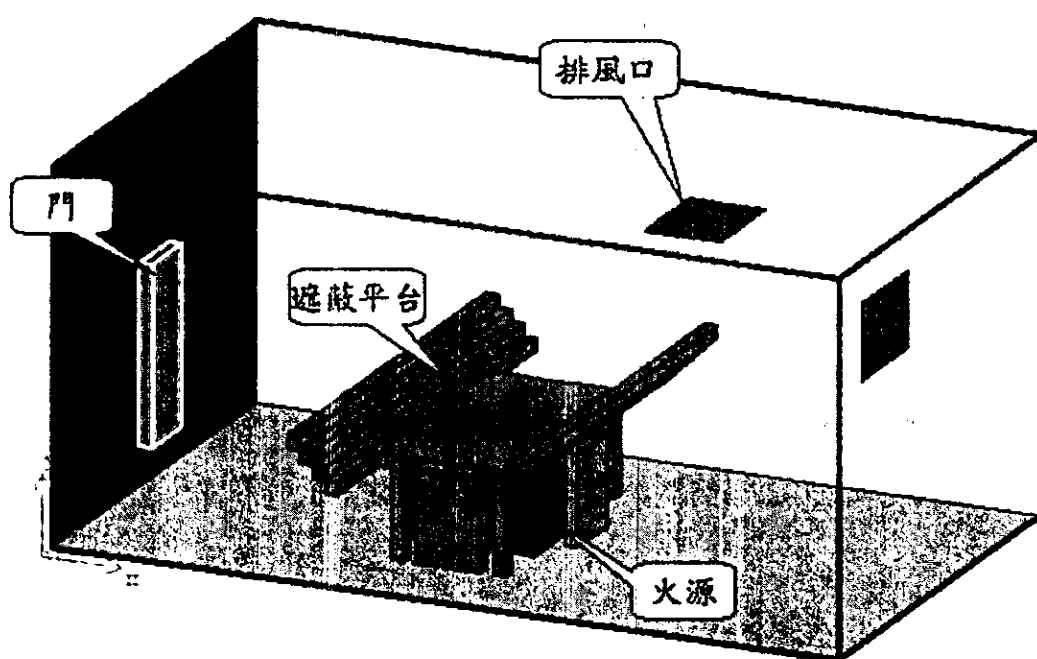


圖 5.29 細水霧模擬模型

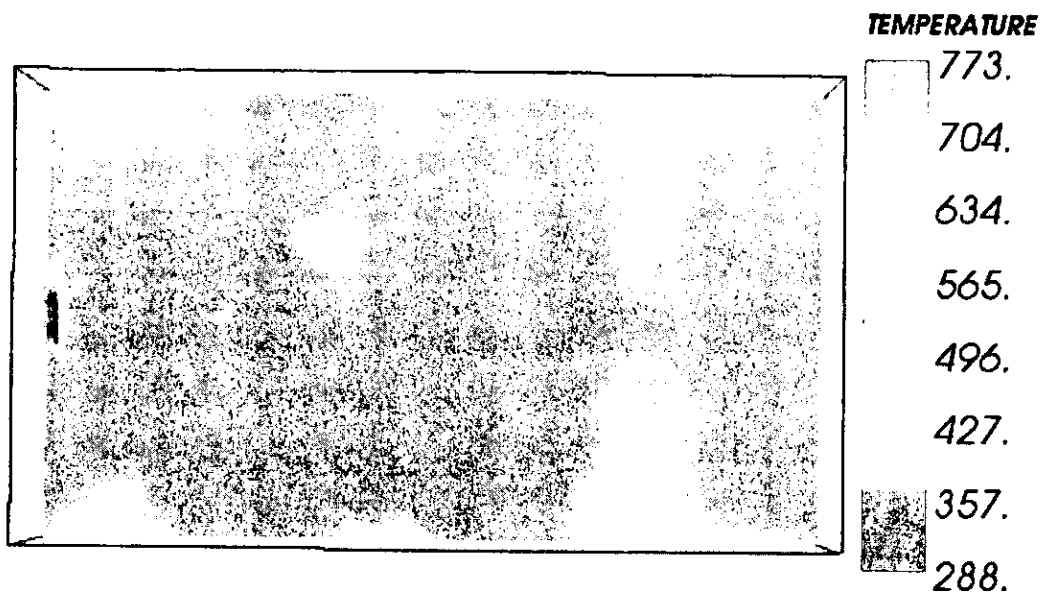


圖 5.30 溫度切面圖(60 秒)

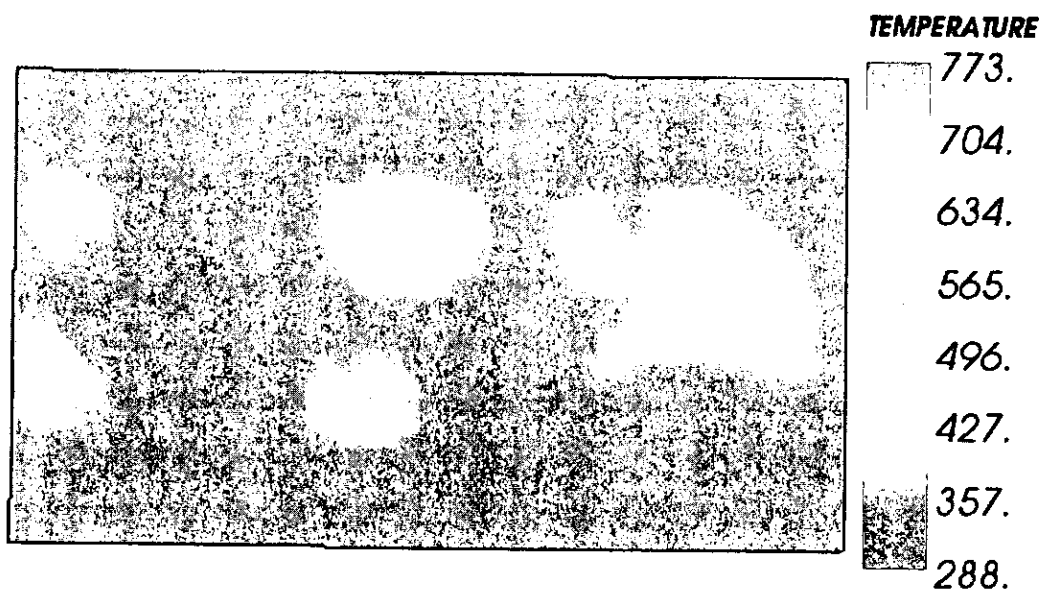


圖 5.31 溫度切面圖(62 秒)

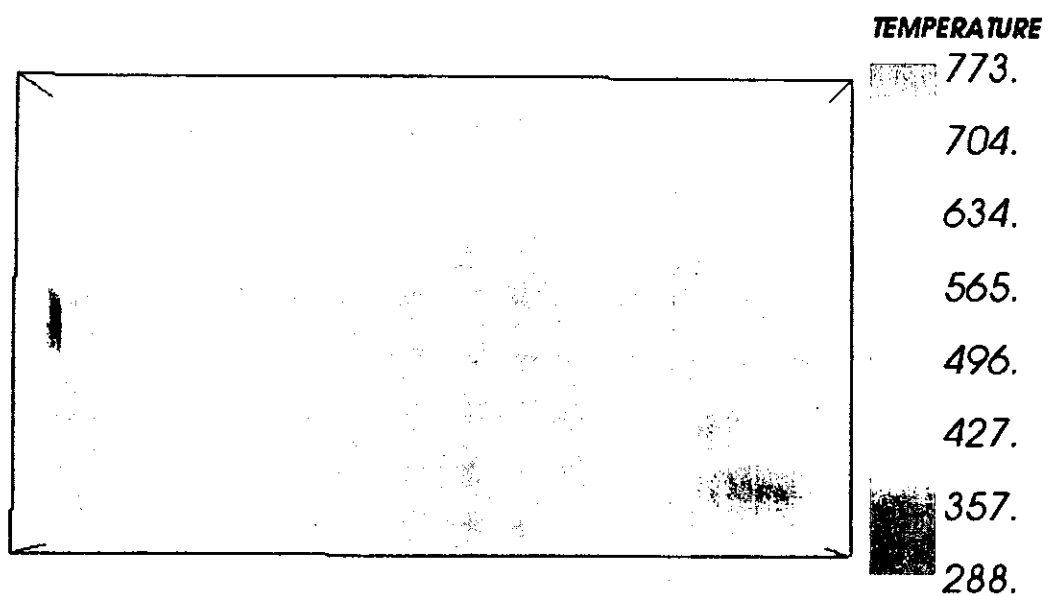


圖 5.32 溫度切面圖(174 秒)

第六章 結 論

本實驗中主要依據 FMRC 機械空間的試驗標準 [18]進行一系列的實驗。在被遮蔽的油火災的測試中，由油盤上方的火焰溫度可以發覺，機械空間在設有滅火防護系統的情況下，火源均可有效的被控制，但在效能評估方面，不論是 4 顆或 6 顆高壓細水霧防護實驗中，均證實了細水霧滅火系統比傳統的撒水系統防護能更有效的將火給滅掉。在細水霧系統的比較發現，增加高壓噴頭的數量可以有效提升細水霧的滅火性能，在實驗中同時也發現增加高壓細水霧噴頭的數量，對於總出水量不會有太大的增加。在實驗中可以發現，在細水霧噴的頭數目相同的情況下，遮蔽與未遮蔽火源對於細水霧的滅火性能並無太大的影響，然而在兩個實驗中也發現，細水霧滅火系統的滅火性能均會隨噴頭數量而有所提升，另外，遮蔽與未遮蔽火源實驗中也發現火焰高度會影響到氧體濃度的增減。

另外本文亦以電腦模擬進行探討，由三維的電腦模擬可更深入的檢視火場的詳細結構，亦可協助實驗現象的說明。在無防護的模擬，其結果與實驗數據相當吻合，亦可由模擬後果圖解釋透過通風口進出氣的現象。撒水防護模擬中，噴頭作動的時間與實驗數據相去不遠，亦比較了無防護與有撒水防護的氧濃度及一氧化碳濃度分佈狀況，但撒水的溫度模擬結果與實驗相比，有低估的現象。在細水霧防護的模擬，模擬高壓細水霧的作動，可發現細水霧對降溫有不錯的功效，但由於模擬的燃燒效率較佳，模擬的溫度較實驗為高。綜合模擬的結果，發現與實驗數據雖有小出入，但仍有相當的可信賴度，同時可發現電腦模擬是一個相當優良的工具用來進行火場細部結構、現象的探討。

參考文獻

1. NFPA 750"Standard for the Installation of Water Mist Fire Protection Systems," 2000 Edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2000.
2. Braidech, M.M., Neale, J.A., Matson, A.F. and Dufour, R.E. "The Mechanisms of Extinguishment of Fire by Finely Divided Water", Underwriters Laboratories Inc. for the National Board of Fire Underwriters, NY, 73P.
3. Mawhinney, J.R., Dlugogorski, B.Z. and Kim, A.K. "A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist", Fire Safety Science-Proceedings of Fourth International Symposium, Ottawa, ON, p.47.
4. Wighus, R., "Extinguishment of Enclosed Gas Fires with Water Spray," Proceeding of the Third International Symposium of Fire Safety Science, 1991.
5. NFAP 325, "Guide to Fire Hazard Properties of Flammable Liquids , Gases, and Volatile Solids," 1994.
6. Pepi, J.S., " Performance Elevation of a Low Pressure Water Mist System in a Marine Machinery Space with Open Doorway," Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1995, p.424
7. Bill, R.G., Hansen, R.L and Richards, K., "Fine-Spray Protection of Shipboard Engine Rooms," Fire Safety Journal, Vol.,29 1997, p.317
8. Back, G.G., DiNenno, P.J., Leonard, J.T and Darwin, R.L., "Full Scale Tests of Water Mist Fire Suppression Systems for Navy Shipboard Machinery Spaces Part II- Obstructed Spaces," Naval

Research Laboratory, NRL/MR/6180-96-7831, 1996

9. Hansen, R., "Local Application of Water Mist for Machinery Protection," Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1998, p.439.
10. Dundas, R.E, "Experience with External Fires in Gas Turbine Installations and Implications for Fire Protection," ASME Paper No:90-GT-375,1990.
11. Pepi, J.S., "Advance in the Technology of Intermediate Pressure Water Mist Systems for the Protection of Flammable Liquid Hazards" Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, 1998, p.417.
12. Hanauska, C.P., and Back, G.G "Halons: Alternative Fire Suppression Systems, An Overview of Water Mist Fire Suppression Systems Technology," Hughes Associates, Inc., Columbia, MD, 1993.
13. Liu, Z.G, Kim, A.K. Su and J.Z "Examination of Performance of Water Mist Fire Suppression System under Ventilation Conditions" Journal of Fire Protection Engineering, v.11, no.3, August 2001, pp.164-193.
14. Will Koroluk "Tests Show Effectiveness of Cycled Discharge from Water Mist Fire Protection Systems" Published in CABA home & Building Automation Quarterly, 1998, pp.28-29.
15. Kim, A "Overview of Recent Progress in Fire Suppression Technology " Invited Keynote Lecture at the 2nd FRIFD Symposium, Proceedings, Tokyo, Japan, July 17-19, 2002, pp.1-13.
16. Erdem A. Ural and Robert G. Bill, Jr. "Fire Suppression Performance Testing of Water Mist Systems for Combustion

Turbine Enclosures” Factory Mutual Research Corporation 1151 Boston-Providence Turnpike .

17. Andrew K. Kim and Zhigang Liu “Fire Suppression Performance of Water Mist under Ventilation and Cycling Discharge Conditions” 2nd International Water Mist Conference 2002, Amsterdam, Netherlands, Apr. 10-12, 2002, pp.61-76.
18. Williams, F.W., Back, G.G., DiNenno, P.J., Darwin, R.L., Hill, Havlovick, S.S., Toomey, T.A., Farley, J.P. and Hill, J.M., ”Full-Scale Machinery Space Water Mist Tests: Final Design Validation ” Naval Research Labotory , NRL/MR/6180-99-8380,1999.
19. R. W. Fox and A. T. McDonald, John Wiley and Sons, “Introduction to Fluid Mechanics” Canada, 1994
20. S. J. Kline, and F. McClintock, “Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments,” Mechanical Engineering, vol.104, pp250-260,1982.
21. R. J. Moffat, “Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis,” *Journal of Fluid Engineering*, vol. 104, pp. 250-260, 1982.
22. R. S. Figliola, and D. E. Beasley, “Theory and Design for Mechanical Measurements,” 2nd Ed., John Wiley and Sons, Canada, 1995.
23. J. P. Holman, “Experimental Methods for Engineers”, 5th Ed., McGraw-Hill, New York, 1998
24. Magnus Arvidson and Tommy HerTzberg, ”The VNNova Water Mist Research Project: A Description of 500 m³ Machinery Space Tests”, S.P. Swedish National Testing and Research Institute,2003

附錄一 細水霧噴頭噴撒特性檢測

細水霧系統的滅火特性大部份取決於噴頭的噴撒特性，因此噴頭的噴撒特性與結果對電腦數值模擬相當重要，本章將進行高壓噴頭噴撒特性測試，並以雷射儀器進行電腦數值模擬前之噴頭噴撒特性的檢測，作為數值模擬噴頭特性的輸入參數。

1 噴霧原理

適合消防用之撒水噴頭，有加壓式(pressure jet atomizer)及二流體霧化器(twin-fluids atomizer)兩種。加壓式霧化器主要是利用壓力位能轉換成動能，當液體噴出時與周圍空氣產生相對速度，而導致液體之碎裂與霧化。二流體霧化器利用空氣將液體加速，來促進液體之碎裂與霧化。與加壓式霧化器比較，二流體霧化器之霧化效果較佳、所需動力也較低，但消防安全有特殊考量，目前大都使用加壓式霧化器將水加壓，液體由小孔高速噴出，因周圍空氣之阻力及磨擦，使液體產生擾動而碎裂、霧化。這種孔口加壓式霧化器(plain orifice)，屬於較傳統之霧化器，其霧化效果隨壓力增加及液柱直徑減少而增加。但液體流量，隨壓力及液柱直徑增加而增加。單孔口加壓式霧化器，可藉渦漩來增加其霧化效果。其他影響霧化之參數，還有液體與周圍氣體之密度，液體之表面張力及黏度。

2 細水霧體積通量密度及噴撒分佈檢測說明

依據 UL2167 規範，於噴霧器下方一米處之二維細水霧噴撒分佈(flux distribution)，可藉二維流量集水器(15×60 支集水管)，在一定之時間、收集各點之累積細水霧體積。噴撒結束後，量測每一點(集水管)的體積，輸入到數值分析軟體，繪製等高線圖(2D contour)及 3D 立體模型圖。本章探討包含噴霧器之種類、工作壓力，以探討壓力對噴霧器之流量、細水霧分佈之影響，並比較各型噴霧器之細水霧分佈。

3 擴散角(θ)、細水霧濃度分佈

細水霧擴散角(θ)可用長曝光時間照相術量測，細水霧空間濃度佈(spatial distribution of droplet density)，可藉片狀雷射光(light sheet)照明細水霧、拍攝細水霧照片、藉對比增強、灰度簡化(multiple thresholding,) 技術，建立細水霧二維濃度等高線圖。細水霧空間濃度與流場周圍之風速(水平側向及垂直逆向)有關。因此本章探討包含：噴霧器之種類、工作壓力，氣漩之風速，了解高濃度細水霧區，有助於推估細水霧冷卻作用之主要區域，而低濃度細水霧區，可推估細水霧之可能防護空間。擴散角(θ)、細水霧濃度分佈量測操作程序為先將雷射光源的頻率微調至 10 赫茲左右(pulse duration)，在雷射光出口加裝一柱狀鏡，可將光束(laser beam)擴散成片狀雷射光，本研究有數個柱狀鏡、以調整其擴散之角度，徑向穿透整個細水霧，但細水霧會反射雷射光、功率不足之雷射，容易產生左右不對稱之細水霧影像。將數位相機或傳統底片式相機，擺在與雷射光成 90° 垂直之位置，可拍攝細水霧影像實驗，相機之快門若略大於雷射光之發光週期(101~110ms)，可得細水霧之瞬間濃度分佈，快門若遠大於雷射光之發光週期(1000ms 以上、光圈盡量調小)，可得細水霧之平均濃度分佈。

4 擴散角量測

細水霧照片以 ImagePro 程式，進行對比增強、四值化處理，可處理出具有不同色塊的噴霧照片，依照色塊不同可發現細水霧顆粒的濃密與稀疏區，再用邊緣偵測，可得各細水霧區塊的邊界。

5 粒徑

等體積之水滴，直徑每減少一半、其液滴數增為八倍、總表面積增加兩倍，因此多數之廠商強調壓力愈大，細水霧粒徑愈細，總表面積愈大，吸熱速率也愈大，其實細水霧之吸熱速率不僅與粒徑有關，

也與其在火羽內部停留之時間與移動路徑之溫度、相對溼度有關。WMFSS(Water Mist Fire Suppression System)噴霧器之性能測試，通常在其下方一米處實施。研究之噴霧幾何特性視覺量測系統，在黑暗的工作環境、以高亮度脈衝雷射光束(new wave Polaris II, pulse duration 8ns, 20Hz)、徑向照亮細水霧，藉望遠鏡頭、及高解析數位相機，以軸向與徑向位置為參數(z-, r-axes)、拍攝細水霧粒徑影像，接著再以影像技術影像前處理程式，修飾圓滑顆粒外型(低通濾波)，藉對比增強和二值化將粒徑太小或不明顯的顆粒去除，最後以一反相程式將照片反相為白底，物件為明顯的黑色，用 mdiapp 程式來標訂物件、以邊緣搜尋及物件補滿程式、計算各物件之面積、周長、及粒徑等特性。最後進行統計分析，以得最大粒徑(Max)、最小粒徑(Min)、SMD、 $D_{0.1}$ 、 $D_{0.5}$ 、 $D_{0.9}$ 與分佈範圍 (size distribution)。

6 速度

細水霧本身可反射雷射光，以 PIV 系統 (particle image velocimetry)，量測細水霧之速度、不必使用質點植入系統，PIV 系統以極短又夠亮之雙發脈衝雷射(3~5ns)、在很短的時間間隔(0.1~5 μ s)、照射細水霧質點，搭配同步觸發控制器、同步數位相機，連續拍攝兩張質點影像、藉 PIV 速度分析軟體，計算兩張照片中各質點之相對位移量，除以時間間隔可得該位置之速度向量。但是細水霧之濃度影響影像品質，稀疏之細水霧(sparse)、比較容易成像，只需要拍攝多組影像、即可統計該位置之速度向量的平均值與分佈範圍(除非穩態、穩流，不然各質點間一定有速度差異)。太濃之細水霧、需使用高功率之雷射，以便穿透細水霧產生對比足夠之影像。

7 高壓噴頭檢測結果

針對本報告所使用之高壓噴頭進行檢測結果如下：

高壓微細孔噴霧器，是國內目前裝設最多之細水霧噴霧器，具有 20 個左右之微細孔(0.35~0.6 mm)，呈輻射狀排列，其工作壓力約 100

kgf/cm²，向下輻射噴出高壓水柱，形成空心細水霧，且細水霧之落點非常集中，如圖 1。

而高壓細水霧噴頭之粒徑分佈如下：

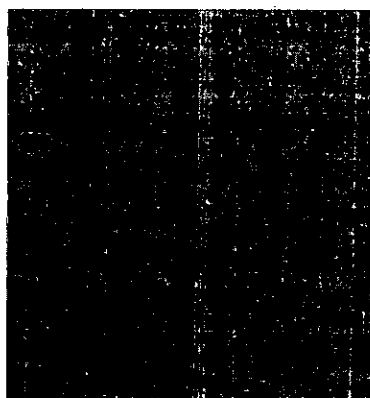
操作壓力:30kg·cm²

(粒徑統計表)

(原圖)

(二值化)

30kg/cm ²	單位:µm
最大粒徑(Max. Dia.)	91.97
最小粒徑(Min. Dia.)	27.2
平均粒徑(SMD)	36.31
液滴總數(Particle)	62866



操作壓力:70kg/cm²

(粒徑統計表)

(原圖)

(二值化)

70kg/cm ²	單位:µm
最大粒徑(Max. Dia.)	71.29
最小粒徑(Min. Dia.)	27.2
平均粒徑(SMD)	31.90
液滴總數(Particle)	55811



操作壓力:100kg/cm²

(粒徑統計表)

100kg/cm ²	單位:μm
最大粒徑(Max. Dia.)	63.58
最小粒徑(Min. Dia.)	27.2
平均粒徑(SMD)	29.81
液滴粒數(Particle)	57069

(原圖)



(二值化)

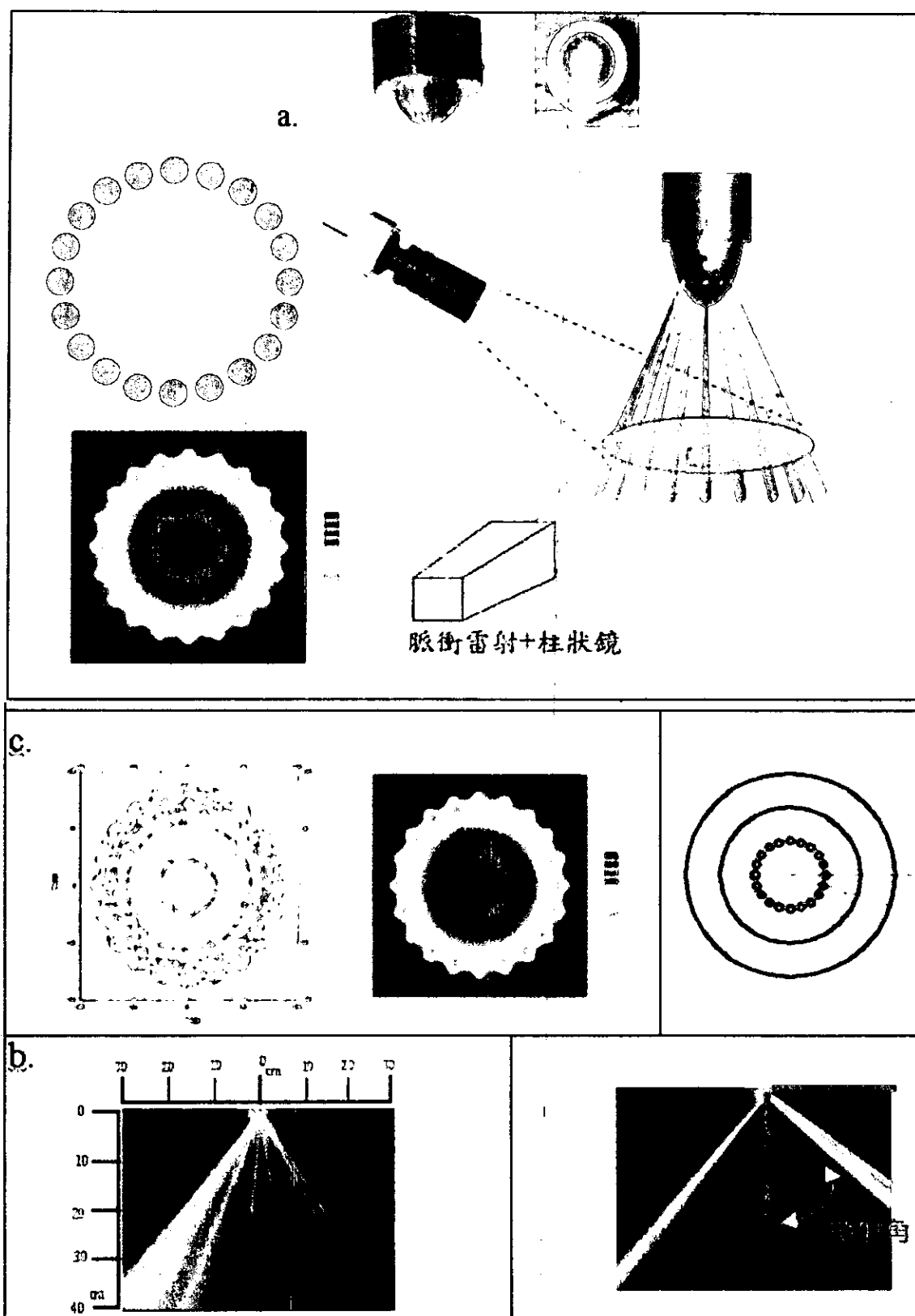


圖 1 高壓微孔噴霧器之細水霧落點分佈

附錄二 審查意見回覆表

(一) 期初審查意見回覆表

項次	審查意見	意見回覆
1	所用之各項系統元件，請於本所今年可完成之檢測設備驗證其性能。	遵照辦理。
2	使用 10MW 之 CONE 時請維持設備與操作之安全。	因安全考量，本年度暫不執行此項試驗。
3	使用探測器、撒水、排煙室三項設備，於組裝於煙控大樓後宜分段實施，架設必要的監測、記錄裝置。	已在計畫中實施（見成果報告初稿 p.11~14）。
4	請考量推測大型開擴空間下之裝置可行性，以比對小而密閉性的空間之差異性。	因安全考量，本年度暫不執行大型 Cone 之試驗。
5	綜合資料表之研究費列 384,000，而第 19 頁列 456,000 請澄清。	已修正。
6	研究成果應提出法規性建議條文。	遵照辦理（將在期末簡報中先提出初始建議再融合專家意見，於最後之成果報告提出相關法規性建議條文）。
7	在實際實驗過程中，應詳實紀錄，分析研究其可行性及提供建議，以提供相關單位參考，落實執行成果。	遵照辦理（見成果報告初稿 p.25~82）。
8	專家座談會，應廣徵產、官、學、研意見，詳實紀錄提出報告。	遵照辦理。
9	研究成果可提供標準檢驗局參考，是否制定為 CNS。	已將相關規範翻成中文，作為未來制定 CNS 標準的基礎。
10	請考慮實驗棟的結構安全（若萬一 10MW 的火源無法滅火時）。	因安全考量，本年度暫不執行大型 Cone 之試驗。
11	建立標準試驗法（草案），以為立法依據	已將相關規範翻成中文，作為未來制定 CNS 標準的基礎。
12	本計畫具有前瞻性及未來性，可提昇滅火技術，研究內容是否可以納入探討建築中裝設細水霧滅火系統的方法及可能遭遇問題的解決方式。	遵照辦理，將在期末簡報中先提出初始建議再融合專家意見，於最後之成果報告提出。

(二) 期中審查意見回覆表

項次	審查意見	意見回覆
1	建議內文對於進行細水霧實驗的各項實驗環境及噴頭特性，建議詳細說明之（例如粒徑分佈、霧化錐角等等）。	遵照辦理（見成果報告初稿 p.87 之附錄一）。
2	報告書中之實驗曲線宜標示清楚使讀者易讀（如現場報告彩色的曲線沒問題但是報告書係黑白印刷則難以辨識），也許可考慮以破折線、虛線等不同線型表示。	期末報告之初稿已遵照辦理。
3	建議針對細水霧對油盤有遮蔽及無遮蔽火災之滅火效果，應進一步探討其原因。	遵照辦理（見成果報告初稿 p.32）。
4	報告書圖 3-12 到 3-15 顯示，高壓六顆細水霧噴頭之火場溫度略高於圖 3-8 到 3-11 之火場溫度，應進一步探討其原因。	細水霧作用類似於氣體滅火劑，其主要作用在控制火勢，相較於傳統撒水系統其降溫作用沒那麼明顯。
5	細水霧效能實驗中，油料之「預熱時間」長短（會影響密閉空間的氧氣量）於滅火性能的實驗結果有極大關係，紀錄細水霧作動時間亦即與探測器之交互作用是重點。燃燒過程氧氣量變化、熱吸收汽化之水蒸氣量等是實驗結果重要影響因素。輕質柴油燃燒區域較穩定，油盤加水可避免油盤燒彎影響燃燒穩定性。以上請參考。	遵照辦理。
6	ISO5660，芬蘭 Vtt、IMO 等試驗機構進行水霧實驗均有 HRR 熱釋放率之檢測，建議本案考量納入。	遵照辦理，已在台南防火實驗室以大 Cone 量其熱釋放率，並將其當作電腦模擬之輸入值（見成果報告初稿 p.68）。
7	建議本實驗結果與 FMRC 等國外實驗結果比較分析之。	由於 FMRC 所作之實驗尺寸為本實驗的四倍，因此較難直接比較，但在最後版本期末報告完稿之前，會作相關比較。
8	細水霧高低壓噴頭有許多不同的設計，甚至放置的高度、噴灑的角度都會影響實驗結果，而環境的條件變數更多，建議如經費許可應進行更多的實驗研究。	如經費許可，可在下年度提計畫執行。
9	建議增加快速反應撒水頭防護之效	如經費許可，可在下年度提計畫執行。

	能分析。	
10	如經費允許請考量針對不同操作壓力（高、中、低壓）進行分析。	本計畫已執行中、高壓細水霧噴灑市實驗，至於低壓如經費許可，可在下年度提計畫執行。
11	國內幾家曾經取得認可的產品均有不同之性能，如僅針對特定高壓細水霧分析能否代表全部產品之特性？建議將這幾家產品一併進行研究比較。	如經費許可，可在下年度提計畫執行。
12	建議實驗分析時可與現行法規、業界各品牌常用商品、國外測試資料做比較，提供業界及建築師參考。	遵照辦理在最後版本期末報告完稿之前，會作相關工作。
13	建議改變撒水頭間距及配置方式進行研究比較其效果。	遵照辦理（見成果報告初稿 p.31）。
14	細水霧實驗實驗進行時，應具之量測項目、範圍，請提供具體之建議。	遵照辦理（見成果報告初稿 p.10~14）。
15	壓力（高、中、低壓）、噴頭、噴霧型態以及撒水分佈密度、方向等等均會影響滅火及控制，如無法及時完成實驗，亦請以文獻、理論分析之。	遵照辦理，見成果報告初稿。
16	建議分析細水霧受風校應對滅火效能之影響為何？（細水霧粒徑小，噴出後如受風能否穿透火焰）又風速多少以上，細水霧滅火效能會降低等等。	本實驗只針對室內火災，至於風之效應無法在此討論。
17	建請於文獻回顧中增列國內外細水霧目前在理論上、設計上、實務上最新的發展情形列入研究案，收集到之相關原始資料亦能提供本所參考。	已遵照辦理，相關資料已送交建研所相關人員。
18	後續實驗計畫儘速提供本所，以利安排實驗室相關配合事宜。	遵照辦理。

(三) 期末審查意見回覆表

項次	審查意見	意見回覆
1	噴嘴與火源相對位置之關係亦是一個討論火源行為的參考方向。	已在期末報告 18 頁圖 2.5 顯示。
2	滅火效果與噴頭數量、水量、噴頭配置有關，本實驗之火源上方有遮蔽，在比較一般撒水與細水霧的滅火效果時，兩者的滅火條件是否公平需先討論才能進一步比較效果。	本研究在一般撒水與細水霧的滅火效果的所有基本條件都相同的情形下作比較，所謂不同者主要在出水量，這也是細水霧系統吸引人處。
3	本實驗揭露，細水霧使用相當少的水（和一般撒水比較而言），卻可以在更短的時間滅火，但是流場溫度比較高，原因宜進一步論述。	這在 31 頁有作相關說明，主要細水霧在密閉空間的作用類似氣體滅火劑，可藉排氧作用滅火，而非冷卻效果，故滅火後溫度下降會較為緩慢。
4	根據實驗結果，是否細水霧最主要的滅火機制為降低火場溫度還是降低氧氣濃度？	同上，主要是排氧窒息滅火。
5	實驗中的滅火時間，是從點火時間起算還是從作動時起算，宜清查統一說明清楚。	以更正，所有時間以撒水頭動作時間起算。
6	電腦模擬氣流方向是否與火羽（Plume）一致？請說明分析之。	在高溫部份兩者是一致的，在 64 頁有說明。
7	本案實驗空間與 FMRC 規定是否一致？請說明之。	限於建研所防火實驗室場地，其只有 FMRC 規範之四分之一。
8	實驗的噴頭安裝與當初噴頭認證時被認可之安裝方式是否一致（例如噴頭間距）應詳查並說明之。	噴頭間距主要是配合問題 3 在與撒水頭設置相同條件作比較，故未考量原先設計要求，未來再有機會作實驗會補充。
9	細水霧水量 145 LPM 高於一般撒水頭是否有誤繕，請詳查。	應為 14.5 已修正。
10	是否需要確認粒徑之大小，其與滅火效果的關係，宜說明之。	相關粒徑說明已在附錄一補入。
11	實驗之噴頭與當時核准之狀況，加壓管線布設等應與原來一致。	噴頭間距主要是配合問題 3 在與撒水頭設置相同條件作比較，故未考量原先設計要求，未來再有機會作實驗會補充。
12	細水霧排氧大於吸熱，實驗結果顯示氧氣已經降到 16% 以下，是否比照氣體滅火器疏散人群？以及低氧燃燒產生大量一氧化碳的話，細水霧噴撒時人能否在其間？	這是在密閉空間作設計時，必須要作類似二氧化碳滅火系統的要求規範，謝謝審查委員的提醒。