

國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩士論文

電腦數值模擬在細水霧滅火效能之
應用與探討

**Efficiency of Computer Numerical Simulations
for Water Mist Fire Suppression Application
and Discussion**



研究生：劉維義

指導教授：陳俊勳 教授

中華民國九十四年一月

電腦數值模擬在細水霧滅火效能之應用與探討

Efficiency of Computer Numerical Simulations for Water Mist
Fire Suppression Application and Discussion

研究生：劉維義 Student：Wei-Yi Liu

指導教授：陳俊勳 Advisor：Chiun-Hsun Chen

國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩 士 論 文



Submitted to Degree Program of Industrial Safety and
Risk Management

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
of Master of Science in Industrial Safety and Risk
Management

January 2005

Hsinchu, Taiwan, R.O.C

中華民國九十四年一月

電腦數值模擬在細水霧滅火效能之應用與探討

學生：劉維義

指導教授：陳俊勳 教授

國立交通大學工學院產業安全與防災學程碩士班

摘 要

因蒙特婁公約 (Montreal Protocol) 導致海龍 (Halon) 滅火系統中止使用，也因此展開替代滅火設備的積極研發。透過廣泛的研究和測試，細水霧系統已經獲得全世界一致認同，可作為在許多應用層面一種有效的取代方案；例如涉及易燃液體的使用、電氣設備、半導體備及戶外的變壓器等。根據 NFPA 750 標準定義細水霧為透過噴頭的洩放，其 99% 總噴出水之水滴直徑尺寸應小於 1000 微米 (microns)。細水霧系統具備了許多關鍵的抑制機制，包括：熱移除、氧氣取代(置換)、熱輻射阻隔、抑制及滅火。此外，細水霧系統亦有許多方面優於其它滅火系統：如較好的火災抑制能力、煙霧吸附力、較低的水損、無毒、安全及環保。目前在市場上普遍缺乏一個細水霧系統驗證工具，造成細水霧系統在推廣上的困難，而電腦模擬是驗證細水霧系統功能及有效性非常適合的工具。在本論文裡，使用電腦腦模平台來驗證細水霧系統在建築區劃空間及機械空間之應用，由模擬的結果得知，細水霧滅火系統的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。在模擬期間，細水霧滅火系統在自然通風的狀態下均有效的抑制了火災。然而在強制通風狀態下，由於區劃空間和周圍環境間強大的質傳現象，而導致細水霧滅火系統降低了抑制效能。而透過電腦模擬平台，可以找到細水霧系統在這些區域運用的最佳化的方式。

Efficiency of Computer Numerical Simulations for Water Mist Fire Suppression Application and Discussion

Student: Wei-Yi Liu

Advisor: Dr. Chiun-Hsun Chen

Degree Program of Industrial Safety and Risk Management

National Chiao Tung University

ABSTRACT

The phase out of Halon production under the Montreal Protocol has led to constructive research to find a replacement agent for fire protection. Through extensively research and testing, water mist systems have gained worldwide acceptance as an effective solution in many applications, such as those that involve flammable liquids, electrical equipment, semiconductor facilities, and outdoor transformers. The NFPA 750 standard defines “water mist” as a water spray discharged through a nozzle in which 99% of the water spray’s volume comprises water particles less than 1,000 microns in diameter. A water mist system combines the key suppression mechanisms of heat extraction, oxygen displacement and radiant heat blocking, suppress and extinguish fires. In addition, water mist systems provide the following advantages over other suppression systems: superior fire suppression, smoke absorption capability, minimal water damage, non-toxicity, non-asphyxiating, and environmentally friendly. The absence of water mist system verification tool presents a major obstacle to promoting water mist technology in the market. Computer modeling is a suitable tool to verify the effectiveness and performance of water mist systems. The simulations results show that

water mist suppression effectiveness is dependent on the ventilation rates, fire size and type, location in the compartment and characteristics of the water mist system used. During simulations, the water mist system effectively extinguishes fires under natural ventilation. Under forced ventilation, however, water mist fire suppression effectiveness is substantially reduced due to the strong mass exchange between the compartment space and its surroundings. Also using computer modeling platform verifies the water mist system used in compartment space and machinery space that can be also found the way to optimize water mist system in these application areas.



誌 謝

這篇論文能夠順利完成，首先要感謝恩師 陳俊勳教授在我碩士班學習生涯中細心指導與教誨，才能使我突破瓶頸通達究理，使得論文內容更加完善及充實，在此獻上無比之敬意與感謝。

特別感謝工研院環安中心主任 于樹偉博士，同意讓我在工作之餘能夠在職進修，是一種福份，也是一種難得可貴的機會。讓我沒有辜負您在第一天面試我時，對我的期許；也讓我圓了一個還能夠繼續唸書的夢想，在此真心由衷的感謝您。

同時感謝工研院環安中心的同仁 徐博、成陽師兄、木榮學長，在各方面的幫忙與協助，在工作上給予我最大的方便，並提供我在論文撰寫其間電腦數值模擬及計算流體力學等多方面的指正，讓我能夠順利的完成這篇論文；在此，再次的感謝三位。亦感謝內政部建築研究所安全防災組組長 陳建忠博士、中科院化學所組長 嚴定萍博士及泰興工程顧問公司 林佩勳博士，在論文口試期間對論文內容的協助與指正，使這篇論文研究能夠順利完成，特此一並致謝。

真心感謝一直支持與鼓勵我的內人 紫鈺，也因內人在我求學期間肩負起照顧二名稚子與生活起居的重責，使我能無後顧之憂，全心致力於唸書，得以順利完成學業。此心此情，讓我永遠銘記在心終身難忘。

最後，僅將這篇論文獻給我自幼喪父時，一路含辛茹苦、篳路藍縷扶養我長大成人之家慈 羅穗蓉女士。感謝您在我五歲那年起，母兼父職獨立將我與妹妹扶養長大，直到成家立業。您對我的養育之恩及支持與鼓勵，在此僅將「畢業」這份喜悅與榮耀獻給您及我的二個可愛的雙胞胎稚子-承軒、承恩，願你們永遠「平安」、「喜樂」。

劉維義 謹誌于新竹

中華民國九十四年一月二日

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii~iii
誌 謝.....	iv
目 錄.....	iv~vii
圖 目 錄	viii~xiii
表 目 錄	xi
第一章、緒 論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻探討.....	5
第二章、研究目的及方法.....	10
2.1 研究範疇及目的.....	10
2.2 研究方法與流程.....	10
第三章、細水霧滅火原理、測試規範及模擬平台介紹.....	13
3.1 細水霧滅火原理介紹.....	13
3.1.1 熱移除.....	13
3.1.2 排擠氧氣供應.....	14
3.1.3 阻擋熱輻射.....	14
3.1.4 水蒸汽/空氣稀釋.....	14
3.1.5 動態效應.....	15
3.1.6 區劃效果.....	15
3.2 細水霧噴撒特性說明.....	16
3.2.1 粒徑尺寸分佈.....	16

3.2.2 水霧噴撒密度.....	18
3.2.3 噴撒動量.....	18
3.2.4 添加劑.....	19
3.2.5 水滴蒸發效應.....	19
3.3 細水霧滅火系統國際相關測試規範.....	20
3.3.1 細水霧滅火系統國際相關測試之測試空間需求.....	21
3.3.2 細水霧滅火系統相關測試規範之測試對象及項目說明.....	26
3.4 細水霧電腦效能模擬平台介紹.....	31
3.4.1 Firedass 發展歷程.....	33
3.4.2 Firedass 使用模式介紹.....	35
3.4.3 Firedass 可靠度驗證.....	35
3.4.4 建立 Firedass 輸入檔.....	36
3.4.5 Firedass 模擬結果繪圖.....	36
3.4.6 執行 Firedass 的效益.....	38
第四章 細水霧滅火效能模擬評估.....	39
4.1 區劃空間細水霧滅火效能評估.....	39
4.1.1 執行緣由與目的.....	39
4.1.2 模擬對象說明.....	40
4.1.3 火源大小設定.....	42
4.1.4 測試步驟說明.....	42
4.1.5 實驗結果探討.....	43
4.1.6 模擬結果討論.....	48
4.1.7 區劃空間細水霧滅火效能評估結論.....	64
4.2 機械空間內細水霧滅火效能評估.....	66

4.2.1 執行緣由與目的.....	66
4.2.2 模擬對象說明.....	67
4.2.3 動力引擎模擬平台說明.....	67
4.2.4 機械空間細水霧滅火測試說明.....	68
4.2.5 實驗結果探討.....	69
4.2.6 模擬結果討論.....	76
4.2.7 機械空間細水霧滅火效能評估結論.....	96
第五章 結論與建議.....	98
參考文獻.....	100



圖目錄

圖 2.1 論文研究流程圖.....	12
圖 3.1 量測細水霧粒徑尺寸分佈圖.....	16
圖 3.2 細水霧粒度分佈直方圖.....	18
圖 3.3 FIREDASS 子模式關連圖.....	34
圖 3.4 用於細水霧驗證之測試場規劃圖.....	35
圖 3.5 細水霧驗證實驗室空間配置圖.....	36
圖 3.6 Firedass 格點圖.....	37
圖 3.7 Firedass 壓力切面圖.....	37
圖 3.8 Firedass 速度向量圖.....	37
圖 3.9 Firedass 水密度等位面圖.....	38
圖 4.1 細水霧滅火系統測試區劃平面圖.....	41
圖 4.2 細水霧滅火系統測試區劃說明圖.....	42
圖 4.3 模擬區劃測試空間之俯視圖及側視圖.....	49
圖 4.4 區劃測試空間電腦模擬條件設定說明圖.....	50
圖 4.5 在門開啟狀態下強制通風(40 sec)環狀噴頭作動之抑制模擬.....	50
圖 4.6 門開啟強制通風 40 sec 時， Y=0.4 流場速度向量圖.....	51
圖 4.7 門開啟強制通風 40 sec 時， Y=1.8 流場速度向量圖.....	51
圖 4.8 門開啟強制通風 40 sec 時， Y=2.45 流場速度向量圖.....	51
圖 4.9 門開啟強制通風 40 sec 時， Y=1.0063 溫度切面圖.....	52
圖 4.10 門開啟強制通風 40 sec 時， Y=1.9337 溫度切面圖.....	52
圖 4.11 門開啟強制通風 40 sec 時， Y=2.875 溫度切面圖.....	52
圖 4.12 門開啟強制通風 40 sec 時， Z=0.9555 溫度切面圖.....	53
圖 4.13 門開啟強制通風 40 sec 時， Z=1.4500 溫度切面圖.....	53

圖 4.14	門開啟強制通風 40 sec 時， Z=1.9500 溫度切面圖.....	53
圖 4.15	門開啟強制通風 40 sec 時， Z=3.0475 溫度切面圖.....	53
圖 4.16	門開啟強制通風 40 sec 時， Z=4.0150 溫度切面圖.....	53
圖 4.17	在門關閉狀態下強制通風(40 sec)環狀噴頭作動之抑制模擬.	54
圖 4.18	門關閉強制通風 40 sec 時， Y=0.4 流場速度向量圖.....	54
圖 4.19	門關閉強制通風 40 sec 時， Y=1.8 流場速度向量圖.....	54
圖 4.20	門關閉強制通風 40 sec 時， Y=2.45 流場速度向量圖.....	55
圖 4.21	門關閉強制通風 40 sec 時， Y=1.0063 溫度切面圖.....	55
圖 4.22	門關閉強制通風 40 sec 時， Y=1.9337 溫度切面圖.....	55
圖 4.23	門關閉強制通風 40 sec 時， Y=2.875 溫度切面圖.....	56
圖 4.24	門關閉強制通風 40 sec 時， Z=0.9585 溫度切面圖.....	56
圖 4.25	門關閉強制通風 40 sec 時， Z=1.4500 溫度切面圖.....	56
圖 4.26	門關閉強制通風 40 sec 時， Z=1.9500 溫度切面圖.....	56
圖 4.27	門關閉強制通風 40 sec 時， Z=3.0475 溫度切面圖.....	57
圖 4.28	門關閉強制通風 40 sec 時， Z=4.0150 溫度切面圖.....	57
圖 4.29	在門開啟狀態下強制通風(60 sec)環狀噴頭作動之抑制模擬.	57
圖 4.30	門開啟強制通風 60 sec 時， Y=0.4 流場速度向量圖.....	58
圖 4.31	門開啟強制通風 60 sec 時， Y=1.8 流場速度向量圖.....	58
圖 4.32	門開啟強制通風 60 sec 時， Y=2.45 流場速度向量圖.....	58
圖 4.33	門開啟強制通風 60 sec 時， Y=1.0063 溫度切面圖.....	59
圖 4.34	門開啟強制通風 60 sec 時， Y=1.9337 溫度切面圖.....	59
圖 4.35	門開啟強制通風 60 sec 時， Y=2.875 溫度切面圖.....	59
圖 4.36	門開啟強制通風 60 sec 時， Z=0.9625 溫度切面圖.....	60
圖 4.37	門開啟強制通風 60 sec 時， Z=1.4500 溫度切面圖.....	60

圖 4.38 門開啟強制通風 60 sec 時, $Z=1.9500$ 溫度切面圖.....	60
圖 4.39 門開啟強制通風 60 sec 時, $Z=3.0475$ 溫度切面圖.....	60
圖 4.40 門開啟強制通風 60 sec 時, $Z=4.0150$ 溫度切面圖.....	60
圖 4.41 在門關閉狀態下強制通風(60 sec)環狀噴頭作動之抑制模擬.	61
圖 4.42 門關閉強制通風 60 sec 時, $Y=0.4$ 流場速度向量圖.....	61
圖 4.43 門關閉強制通風 60 sec 時, $Y=1.8$ 流場速度向量圖.....	61
圖 4.44 門關閉強制通風 60 sec 時, $Y=2.45$ 流場速度向量圖.....	62
圖 4.45 門關閉強制通風 60 sec 時, $Y=1.0063$ 溫度切面圖.....	62
圖 4.46 門關閉強制通風 60 sec 時, $Y=1.9337$ 溫度切面圖.....	62
圖 4.47 門關閉強制通風 60 sec 時, $Y=2.875$ 溫度切面圖.....	63
圖 4.48 門關閉強制通風 60 sec 時, $Z=0.9575$ 溫度切面圖.....	63
圖 4.49 門關閉強制通風 60 sec 時, $Z=1.4500$ 溫度切面圖.....	63
圖 4.50 門關閉強制通風 60 sec 時, $Z=1.9500$ 溫度切面圖.....	63
圖 4.51 門關閉強制通風 60 sec 時, $Z=3.0475$ 溫度切面圖.....	64
圖 4.52 門關閉強制通風 60 sec 時, $Z=4.0150$ 溫度切面圖.....	64
圖 4.53 機械空間火災情境模擬測試圖.....	66
圖 4.54 機械空間細水霧滅火系統測試區劃說明圖.....	67
圖 4.55 動力引擎模擬平台簡圖.....	68
圖 4.56 高壓細水霧滅火防護測試實驗噴頭位置簡圖.....	69
圖 4.57 在有遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#1 量測到的溫度圖.....	71
圖 4.58 在有遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#2 量測到的溫度圖.....	72
圖 4.59 在有遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#3 量測到的溫度圖.....	72
圖 4.60 在有遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#4 量測到的溫度圖.....	73
圖 4.61 在無遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#1 量測到的溫度圖.....	74

圖 4.62	在無遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#2 量測到的溫度圖.....	74
圖 4.63	在無遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#3 量測到的溫度圖.....	75
圖 4.64	在無遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#4 量測到的溫度圖.....	75
圖 4.65	模擬機械空間細水霧滅火試驗之俯視圖及側視圖.....	77
圖 4.66	四顆噴頭有擋板 0.8m 溫度切面圖(60 秒)	77
圖 4.67	四顆噴頭有擋板 0.8m 溫度切面圖(62 秒)	78
圖 4.68	四顆噴頭有擋板 0.8m 溫度切面圖(174 秒)	78
圖 4.69	四顆噴頭有擋板 1.0m 溫度切面圖(60 秒)	79
圖 4.70	四顆噴頭有擋板 1.0m 溫度切面圖(62 秒)	79
圖 4.71	四顆噴頭有擋板 1.0m 溫度切面圖(174 秒)	80
圖 4.72	四顆噴頭有擋板 2.0m 溫度切面圖(60 秒)	80
圖 4.73	四顆噴頭有擋板 2.0m 溫度切面圖(62 秒)	81
圖 4.74	四顆噴頭有擋板 2.0m 溫度切面圖(174 秒)	81
圖 4.75	四顆噴頭有擋板 $x=2.1m$ 溫度切面圖(60 秒)	82
圖 4.76	四顆噴頭有擋板 $x=2.1m$ 溫度切面圖(62 秒)	82
圖 4.77	四顆噴頭有擋板 $x=2.1m$ 溫度切面圖(174 秒)	83
圖 4.78	四顆噴頭有擋板 $z=1.7m$ 溫度切面圖(60 秒)	83
圖 4.79	四顆噴頭有擋板 $z=1.7m$ 溫度切面圖(62 秒)	84
圖 4.80	四顆噴頭有擋板 $z=1.7m$ 溫度切面圖(174 秒)	84
圖 4.81	四顆噴頭有擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(60 秒)	85
圖 4.82	四顆噴頭有擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(62 秒)	85
圖 4.83	四顆噴頭有擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(174 秒)	85
圖 4.84	四顆細水霧噴頭有擋板 $Y=2.1m$ 流場速度向量圖(60 秒) ...	86
圖 4.85	四顆細水霧噴頭有擋板 $Y=2.1m$ 流場速度向量圖(62 秒) ...	86

圖 4.86 四顆細水霧噴頭有擋板 Y=2.1m 流場速度向量圖(174 秒)..	86
圖 4.87 四顆噴頭無擋板 0.8m 溫度切面圖(60 秒)	87
圖 4.88 四顆噴頭無擋板 0.8m 溫度切面圖(62 秒)	87
圖 4.89 四顆噴頭無擋板 0.8m 溫度切面圖(174 秒)	88
圖 4.90 四顆噴頭無擋板 1.0m 溫度切面圖(60 秒)	88
圖 4.91 四顆噴頭無擋板 1.0m 溫度切面圖(62 秒)	89
圖 4.92 四顆噴頭無擋板 1.0m 溫度切面圖(174 秒)	89
圖 4.93 四顆噴頭無擋板 2.0m 溫度切面圖(60 秒)	90
圖 4.94 四顆噴頭無擋板 2.0m 溫度切面圖(62 秒)	90
圖 4.95 四顆噴頭無擋板 2.0m 溫度切面圖(174 秒)	91
圖 4.96 四顆噴頭無擋板 x=2.1m 溫度切面圖(60 秒)	91
圖 4.97 四顆噴頭無擋板 x=2.1m 溫度切面圖(62 秒)	92
圖 4.98 四顆噴頭無擋板 x=2.1m 溫度切面圖(174 秒)	92
圖 4.99 四顆噴頭無擋板 z=1.7m 溫度切面圖(60 秒)	93
圖 4.100 四顆噴頭無擋板 z=1.7m 溫度切面圖(62 秒)	93
圖 4.101 四顆噴頭無擋板 z=1.7m 溫度切面圖(174 秒)	94
圖 4.102 四顆噴頭無擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(60 秒)	94
圖 4.103 四顆噴頭無擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(62 秒)	95
圖 4.104 四顆噴頭無擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(174 秒)	95
圖 4.105 四顆細水霧噴頭無擋板 Y=2.1m 流場速度向量圖(60 秒) ...	95
圖 4.106 四顆細水霧噴頭無擋板 Y=2.1m 流場速度向量圖(62 秒) ...	96
圖 4.107 四顆細水霧噴頭無擋板 Y=2.1m 流場速度向量圖(174 秒)..	96

表目錄

表 1.1 各類消防滅火系統設置場所比較表.....	4
表 3.1 細水霧滅火系統測試協定及空間分類表.....	21
表 3.2 FM 之測試規範空間需求列表.....	22
表 3.3 UL2167 之測試規範空間需求列表.....	23
表 3.4 IMO MSC/Circ 668/728 A 類引擎室之測試規範空間需求表....	24
表 3.5 船上 A 類引擎室的火災測試情境分類表.....	25
表 3.6 油料噴灑測試參數.....	26
表 3.7 FM 細水霧滅火系統測試規範測試對象及項目整理.....	27
表 3.8 UL2167 細水霧滅火系統測試規範測試對象及項目整理.....	29
表 3.9 FIREDASS 發展計畫成員與分工說明.....	35
表 4.1 單流與雙流細水霧滅火系統之特性比較.....	41
表 4.2 細水霧滅火系統在沒有通風狀態下全尺寸試驗結果一覽表...44	44
表 4.3 細水霧滅火系統在自然通風狀態下全尺寸試驗結果一覽表...46	46
表 4.4 細水霧滅火系統在強制通風狀態下全尺寸試驗結果一覽表...48	48

第一章 緒 論

1.1 研究動機

人類長久以來就利用水做為滅火之用，自動撒水系統是在二十世紀所研發的，於火災案例中，提供住宅防火安全的自動撒水系統，就被廣泛地作為固定式滅火系統使用。然而，水對於所有火災種類並非是一體適用地滅火媒介，例如撒水頭以粗顆粒之水滴噴撒，無法有效撲滅液體油類火災，在某些例子因為自動撒水啟動，而使用大量的水，使得水損的問題備受各界關切。隨著科技的日新月異及對環境保護議題的日益重視，消防滅火設備也跟上了全球這一波"綠色"的潮流。研究証實，氟氯化合物及其他化合物會加速臭氧轉化成氧氣的速度。換言之，大氣中的臭氧層厚度正逐漸的降低。臭氧的功用不只有過濾掉破壞地球動、植物生命的太陽輻射熱，並可調節地球溫度。細水霧系統發展至今已近五十餘年，最近十年來在環保意識高漲及對生命財產安全保護日益重視的全球趨勢下，細水霧系統的市場正以驚人幅度成長。

在 1987 年，蒙特婁公約(Montreal Protocol)【1】限制氟氯碳化物的製造、銷售及使用，海龍滅火系統在環保議題的考量下，現已進入替代及中止使用(phase out)的階段，一些新研發之滅火系統，包括：鹵化碳 (Halocarbon)、惰性氣體藥劑 (Inert gaseous agents)、細水霧滅火系統 (Water mist systems)、壓縮空氣泡沫系統 (Compressed-air-foam systems)、煙霧 (Aerosol) 與氣體產生器 (gas generators) 等。鹵化烷 (Halocarbon) 藥劑與海龍相似，除了降低或移除會造成臭氧破壞的氯或溴原子之分子結構外，以設計濃度滅火，然而產生之氟化氫 (HF) 遠較海龍為高。惰性氣體藥劑 (Inert gaseous agents) 以消耗氧氣滅火，當使用在滅火時不會造成熱分解。然而其需配備佔用空間及相當重量之高壓儲存容器。為了滿足這項需求，已研擬幾種新的滅火系統，或重新關注舊方法。大部分的焦點均放在惰

性與鹵化碳氣體系統 (Inert and haloncarbon gaseous systems)、細水霧系統(water mist systems)、壓縮空氣泡沫系統 (Compressed-air-foam systems) 與固體氣體 (solid gas) 及噴霧放射器 (aerosol generators) ... 等。海龍替代品(Halon replacements)具有相似的物理特性，與海龍相同滅火機制的氣體藥劑。大部分對於海龍替代品研發之努力，是直接減低或移除海龍分子結構中造成臭氧破壞之氯與溴原子。類似海龍之鹵化碳的種類包括：PFCs 或 FCs、HCFCs、HBFCs 及 FICs。可行的海龍替代方案(Halon alternatives)，包括長時間建立的技術與新概念，或最近出現的藥劑。在特定的應用下，傳統的火災防護系統表現良好，然而，在某些應用並不能有效替代海龍。NFPA 2001【2】潔淨氣體標準是關於替代海龍之氣體滅火系統，包含鹵化碳氣體及惰性氣體滅火系統。NFPA 2001 是建立替代海龍 1301 系統之潔淨氣體之需求，以滿足設計、安裝、維修及操作系統。1991 年，成立選擇海龍替代品技術委員會並且開始起草 NFPA 2001 標準，它不是僅僅針對某一類滅火系統的而單獨制定的標準，而是針對一系列性能各異的滅火藥劑構成的滅火系統而制定的標準。因此，一般認為 NFPA2001 標準實際上就是鹵代烷滅火系統替代產品的標準。也因此海龍替代品的解決方案正是各國廠商迫在眉睫的任務，亦提供了消防業界及系統商發展細水霧系統的誘因。

根據 NFPA 750 (1996 版)【3】中有明文要所有細水霧滅火系統的噴頭，具有特別的噴灑特性及流量，應用在一個特別的火災情境下，能夠符合某種程度的性能目標，且設計需經過一個公信的認證機關登錄。而在 NFPA 750 (2000 版)【4】中則明確澄清登錄的過程須包括在一個正式的測試協定規範下進行全尺寸火災測試。而根據 NFPA750 設計規範中說明：「細水霧滅火系統係一種噴灑滅火系統，含供應水及霧化用氣體的管路，在系統中配有一個或數個噴頭，可放射細水霧以控制及撲滅火源。噴頭在最小設計工作壓力下，99%總噴出水之水滴直徑尺寸應小於 1000 microns ($D_{v0.99} \leq 1000\mu\text{m}$)其性

能符合其所列要求及 NFPA750 之標準規範」。NFPA750 標準之目的是透過細水霧滅火系統設計、安裝、維修保養及測試需求之標準化，以提供防護之功能。標準包含細水霧滅火系統設計、安裝、維修保養及測試之最低需求，不過，不提供滅火性能標準之定義或提供滅火系統設計之特別指導。NFPA750 之現行版本於 2000 年公布，其包含細水霧之新定義、設計準則及火災測試基準，細水霧特性之量測指導包含水滴分布，另附錄說明很多現行、提議中的測試基準及細水霧滅火系統之可靠度。故細水霧滅火效能目前可被全世界最主要的火災測試及研究機構所認可，如：瑞典的 SP，芬蘭的 VTT，美國的 FM，及挪威的 SINTEF... 等。而國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)【5】強制規範在所有搭載超過 36 名乘員的船艙，於 1992 年後須裝置撒水系統以保障乘員的生命安全。由於船艙的容量十分有限，安裝龐大體積儲水庫的一般撒水系統根本不符合船公司要求，故能提供相當的滅火功能又只需少量儲水量的細水霧系統便十分符合航運界的需求，也大大激勵細水霧系統的研究發展風氣及廠商投入的動力。而在陸地上的裝設應用目前則有 UL2167、VDS2498、FM Class5570... 等相關規範；而美國海岸巡防對亦針對細水霧滅火系統之測試建立最新的測試程序及標準。

依照前述細水霧系統相關技術報告及國外期刊論文而言，細水霧滅火系統幾乎可全面適用於國內『設置標準』第十八條所列之場所，其具體內容如表 1.1：

表 1.1 各類消防滅火系統設置場所比較表

應 設 場 所		水 霧	泡 沫	二 氧 化 碳	乾 粉	海龍 替代 品	自 動 撒 水	細 水 霧
一	屋頂直昇機停機場（坪）		○		○			○
二	飛機修理廠、飛機庫樓地板面積在二百平方公尺以上者		○		○			○
三	汽車修理廠、室內停車空間在第一層樓地板面積五百平方公尺以上者；在地下層或第二層以上樓地板面積在二百平方公尺以上者；在屋頂設有停車場樓地板面積在三百平方公尺以上者	○	○	○	○	○	○	○
四	升降機械式停車場可容納十輛以上者	○	○	○	○	○	○	○
五	發電機室、變壓器室及其他類似之電器設備場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者			○	○	○		○
六	鍋爐房、廚房等大量使用火源之場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者			○	○	○		○
七	電信機械室、電腦室或總機室及其他類似場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者			○	○	○		○
八	引擎試驗室、石油試驗室、印刷機房及其他類似危險工作場所，樓地板面積在二百平方公尺以上者。	○	○	○	○	○		○
<p>註：</p> <p>一、大量使用火源場所係指最大消費熱量合計在每小時三十萬千卡以上者。</p> <p>二、廚房如設有自動撒水設備，且排油煙管及煙罩設簡易自動滅火裝置時，得不受本表限制。</p> <p>三、停車空間內車輛採一列停放，並能同時通往室外者，得不受本表限制。</p> <p>四、本表第七項所列應設場所得使用預動式自動撒水設備。</p>								

細水霧系統在系統廠商及研究機構積極投入進行開發測試後，已逐漸克服技術的限制及掌握細水霧滅火的機制，在科技不斷的創新發

展與細水霧相關規範標準陸續出版實施的刺激下，其系統優異的滅火能力及廣泛的應用場所等特性引起了各界廣泛的興趣，細水霧系統經實場測試後，可應用於重度危害、中度危害、輕度危害等場所，更是拓展了它的應用場所及潛在商機。細水霧是以水滴粒子之 99% 體積分布粒徑小於 1000 μm 作為使用依據，而以細水霧作為撲滅液體油類與固體燃油火災的基礎理論研究與論述，可回溯到 1950 年代中期，在 1960 與 1970 年代大學、工業界與政府研究機構持續進行研究，這些早期的研究著重在細水霧的滅火機制及有效撲滅火勢的最佳水滴參數；細水霧滅火系統與一般撒水系統雖然都是以水為主的方式來撲滅火災，但兩種模式間有著極大的差異。當火災發生時，細小的細水霧粒子總體表面積極大，可迅速吸收大量熱源，並發揮冷卻之作用，而細水霧粒子在火災表面上形成一水層薄膜，可阻止氧氣進入火源。當細水霧粒子氣化後體積膨脹後，會迅速置換火源周圍的氧氣，使燃燒難以持續進行而達到滅火的效能。由於在實際火場中，各項危害因數間互動關係相當複雜，故在全尺寸實驗獲得結果後往往需藉由電腦數值模擬來進行驗證比對，才能使細水霧滅火效能評估過程中更為嚴謹及準確。本論文希望藉此能協助國內產業界解決火災危害之問題，進而提升國際市場的競爭力，及企業永續發展之最終目標。

1.2 文獻探討

1947 年普度研究基金會(Purdue Research Foundation)【6】針對 60 多種海龍抑制劑進行系統性的評估研究，以選出下一代的海龍滅火抑制劑。同一時間，美國陸軍工程署(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)【7】亦針對這些新型抑制劑進行毒理研究，研究成果確定了三種海龍抑制劑的應用可行性。其中美國陸軍主要使用海龍 1301 手提滅火劑作為運轉車輛及裝甲車防護，美國空軍以海龍 1202 作為軍機引擎防護專用抑制劑；美國聯邦航空署以海龍 1301 作為商用飛機引擎防護，也因此開展海龍 1301 往後二十餘年的廣泛應用於電腦機房、儀電設備室、船艙機械空間、幫浦室及博物館等場所火災防護。

由於海龍 1301 產品的成功應用於各類場所的火災防護，不但具有滅火抑制效果好、抑制劑使用量少、復原快及災損小等特點，使得其他滅火系統的發展受到很大的限制，尤其是細水霧滅火系統的研究另受限於科技的限制，侷限了細水霧系統在六十年代的發展。儘管多年來多次測試，很明顯地，細水霧滅火系統迄今仍無可行的設計準則。此亦闡明，例如：事實上此系統來自不同的製造商使用完全不同單位面積不同流量，必須通過同樣的測試協定。很明顯地，細水霧滅火系統，除了流量，還有細水霧的特性(水滴尺寸及分佈動量)，對於滅火性能而言，這些都是重要的。美國海岸防衛隊的大量關於小型封閉區域的可行性研究 (100m³)的系統及較大區域(500 m³及 1000 m³)的一般細水霧滅火系統，為這些議題提供數據，使用兩個電腦數值模擬分析模型進行細水霧滅火系統全區放射之模擬及確認。這樣的模型可以使用當作工具，建立性能要求，歐洲細水霧滅火系統全區放射測試草案即為此法的其中一例。在蒙特婁公約限制氟氯碳化物的製造、銷售及使用後，開啟了各界對細水霧系統的高度興趣，由於欠缺一套細水霧系統標準來提供完整的設計安裝及系統資訊，影響了細水霧系統的推廣與研究發展的不確定性。1993 年系統廠商、研究機構、工程顧問公司、保險公司、相關主管機關與使用者達成共識，決定組成委員會來制定細水霧標準，以規範設計、安裝、維修保養及測試細水霧系統的最低要求。美國國家防火學會(NFPA)於 1996 年公告第一版的細水霧標準，第二版已於 2000 年公佈。在NFPA公告細水霧標準後，其他單位如UL、FM、VDS等保險公司也陸續制定及公佈其細水霧測試標準，目前歐盟(EN)及國際標準組織(ISO)等組織亦正積極研擬細水霧系統標準中。

細水霧主要是以物理機制撲滅火災，而非由重要的化學效應參與。較早的研究確認冷卻火焰與氧氣置換是細水霧滅火系統主要的滅火機制；然而最近研究提出細水霧滅火系統有其他的機制，一項是細水霧阻止火焰擴散至未點燃的燃油表面以阻絕熱輻射，並且降低燃油

液面的蒸發與裂解。例如已經考慮作為船舶機械空間的滅火系統，加拿大國家研究院（National Research Council Canada，NRCC）【8】與其他機構已經進行許多的全尺寸試驗來評估在這樣的空間細水霧系統的滅火效能，這些測試顯示細水霧系統使用少量的水能有效的撲滅在無通風狀況下機械空間的大型火災。這項性能可和其他氣體海龍替代品相提並論。細水霧系統在自然通風下，例如：門開啟及允許天花板開口時，能夠撲滅廣泛不同的火災；值得注意的是氣體藥劑在此狀況下是無效的。細水霧系統亦可快速地降低區劃空間的溫度並明顯的改善能見度，這將使人員在滅火過程中仍能夠進入區劃中。對於測試區劃空間牆壁的輻射熱通量，由於細水霧而降低了超過 70%，其他滅火機制則為次要的項目，包括：可燃氣體的稀釋、直接的濕潤衝擊與可燃物的冷卻等。細水霧的參數，例如：粒子尺寸分布、流通量、噴撒動量等對於滅火效能有直接的影響。為了有效地撲滅火災，細水霧系統必須運作與傳送適當濃度之最佳尺寸水滴到火源上。撲滅火災之水滴最佳尺寸的選擇有賴於火災潛在的尺寸、燃燒物的特性、遮蔽度與區劃空間的通風...等。

細水霧滅火系統動作理論須考慮小尺寸及大尺寸(或全尺寸)，前項測試之火災尺寸在數公分內者，其效能主要取決於水蒸氣及水滴尺寸，在這樣的尺寸，不同的燃燒設計及精密的儀器可詳述流域特性、溫度分佈及火焰化學作用研究，如：改變燃料種類、抑制性及等比例。最早敘述細水霧滅火機制的論述是由 Braidech【9】在 1955 年提出的，後經 Rasbash【10】等人証實其觀點，Braidech 提出細水霧滅火機制主要為空氣稀釋及冷卻效果，這些細水霧遇到火災的熱源後，蒸發為水蒸汽排擠了新鮮且源源不斷供應的氧氣，使得燃燒區域內的氧氣大為減少，同時這些水霧粒子也提供了降低火場溫度的冷卻效果。在經過四十年的研究驗證了上述觀點的正確性，但最近的研究果顯示還有其他滅火機制會影響細水霧滅火設備的有效性，Mawhinney【11】等人提出細水霧的滅火機制可分為主要及次要兩類，主要滅火機制包括

熱移除(Heat Extraction)、氧氣排擠效應(Oxygen Displacement)與降低熱輻射效應(Blocking of Radiant Heat)；次要滅火機制包括因水蒸汽將空氣稀釋與流場的動態效應。Mawhimney 與 Richardson 在 1996 年的觀察，指出全世界大約 50 家機構正在研究與發展細水霧滅火系統，範圍從理論的探求到滅火機制及電腦模擬、取得細水霧生成設備之專利與製造。最近這些研究顯示細水霧技術已經有潛力去取代現有不被環境接受的火災防護技術，或者對傳統技術無法滿足需求的效率問題提供新的答案。

Alpert(1985)等人【12】用數值方法分析過水霧和火燄之間的影響，而穿過火燄的水流量和水霧的冷卻效果則用一個簡單著火(fire)模式計算。他們的模擬過程中，著火是藉著熱浮力噴出或藉著熱能量的分散式容積釋放的方式來模擬。A.Jones 和 P.F.Nolan(1995)等人【13】整理以往的實驗結果對於各種不同火場使用的噴霧水量和時間以及壓力等作一個整理和探討，並指出一般水壓產生的液滴在 90-100 μm ，所使用的操作壓力為 5-6bar。要產生更小的液滴，就要使用雙流體噴嘴(twin-fluid nozzle)，它可產生 30 μm 小的液滴，並且介紹了兩種滅火裝置，分別為 BP twin-fluid nozzle 與 Marioff Hi-fog system。

而 Kim 等人【14】則探討垂直向下噴霧對油盆之火苗燃燒率的影響，探討壓力對不同角度噴霧之有效水流量、水滴顆粒大小、火苗燃燒率的效應，並提出幾個觀點：1.水霧和其所攜帶的空氣會呈放射狀地擴展火焰，相對應於自由燃燒而言，水霧反而增加了氧和燃油的混合。2.水霧比自由燃燒更能增加燃油的燃燒比率。3.然而，呈放射狀的延展火焰卻使水滴更容易到達油的表面。4.在開放環境的滅火機制中，對於按比例的汽油盆火焰，藉水霧使表面冷卻將導致油的蒸發受到壓制，這比冷卻火焰本身其滅火效果更顯著。前述 A.Jones 和 P.F.Nolan(1995)等人更指出；就目前而言，產生細微水霧的技術仍未成熟，儘管 twin-fluid nozzle 能產生 30 μm 小的液滴，但是水壓噴嘴

想要產生 70-90 μm 粒徑之水滴，在經驗上仍有困難，理想的噴嘴產生噴霧大小應在 10-50 μm 直徑範圍，且要容易安裝和使用，而且要相對的便宜。水霧藉著直接噴灑燃燒區域可達到最大的效應，小且相互接近排列的噴嘴能增進產生的噴霧效應。此外，對於水霧系統，在系統中 1-2bar(15-30psi)之間的穩定壓力下算是有用的，並且可用膠管來輸送水。

Knott(1992)【16】曾提出：BP twin-fluid nozzle 之液滴要達到火源中心部份以及吸熱並產生相變化到蒸氣狀態，其液滴的範圍為 80-200 μm 。隔年 Kim 提出了噴霧對火的熄滅或火的延伸更為深入的觀點如下：對於真實的應用方面，有效水量是一個好的參數，而且，對燃油表面的冷卻勝於對火燄表面的冷卻，而有效流量在這種狀況下就有實際的意義。另外燃燒比率一般隨著噴霧推力增加而增加，在同樣的情況下，超過臨界推力時火將被熄滅，這是因為汽油氣化將會有效地被噴霧壓制。Kondo 等人在水霧滅火實驗中驗證液滴大小、速度及空氣對滅火的影響，其提出 Blow off 的滅火形式，主要就是發散的小水滴將火壓制且夾帶的空氣對火焰的擾動，造成火焰較不穩定，滅火時間較短；Fade out 的滅火形式，主要是火焰慢且穩定的變小，水滴到達火焰時將其表面冷卻及覆蓋，滅火時間較長，惟滅火時間會隨流量的增加而減少。火災防護的效能雖已被廣泛的應用與大量的實驗計劃來證明，然而細水霧在滅火行為上不像是“真正”的氣體藥劑，並且實際上受到區劃空間中火災尺寸、遮蔽度、天花板高度及通風狀況等影響。

第二章 研究目的及方法

2.1 研究範疇及目的

就目前國內整體環境而言，火災危害事故一直是政府、產業界、消防單位及保險公司在安全工作上的主要議題，雖然災害造成的損失可藉由保險理賠加以彌補，然而殘存風險猶存，倘若產業因火災危害事故與國際競爭市場脫節，終將為市場所淘汰。因此藉由電腦數值模擬分析與評估，針對不同性質的火災情境下，評估出適用於產業界之細水霧滅火消滅技術；將可有效提升產業災害應變之有效性，並將災害損失降至最低情況。而近幾年來，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。由於數值模擬分析需要大量合理化假設，因此在細水霧滅火效能評估上仍屬初試階段；故將其相關分析與評估模式在本論文中作探討與研究。

有鑑於此，為協助產業建立的自主性及系統的有效性確保生命安全，本論文以細水霧電腦效能模擬平台，進行危害性場所細水霧系統的有效性評估，評估對象包含區劃空間與機械空間等場所，藉由系統有效性評估，進行細水霧滅火機制的研究，並藉由電腦模擬迅速完整的評估，可提出細水霧設置的最佳化建議，提供業者做為參考，以期建立本土細水霧技術及確保系統設置的有效性，將技術生根，強化國內產業競爭力及確保生命財產安全。

2.2 研究方法與流程

本論文主要研究及執行方法如下說明：

2.2.1 文獻探討比較

收集國內外有關細水霧滅火效能分析之論文、報告，研究及比較其理論、學說及方法論並將其歸納整理。同時探討國外細水霧滅火模式之發展沿革、理論基礎、應用實例及優缺點，並將國際上相關研究

機構如 Factory Mutual Research Corporation、Underwriters Laboratories、International Maritime Organization 及 Verband der Schadenversichen e.V.所訂定之規範進行比較分析，以建立系統化之研究邏輯。

2.2.2 系統化歸納分析

針對本論文探討之模擬對象之潛在火災危害、測試空間、佈點位置、液滴尺寸、通風條件（自然通風、強制通風）、火源大小、火災種類（油池火災測試、噴濺火災與木製疊架火災測試）、噴灑方式（全區放射、分區放射與局部放射）、噴灑壓力（高壓、中壓與低壓）、單流或雙流....等，建立不同測試需求之比較及差異性，並歸納整理相關資料進行抑制效能分析；以系統化分析建立電腦數值模擬所需之資料。

2.2.3 電腦數值模擬

比對分析細水霧滅火系統性能測試基準，據以規劃區劃空間內（無風、自然通風及強制通風狀態下）及機械空間內（有遮蔽防護及無遮蔽防護）之研究方案，並徵詢指導教授之初步意見，俾確立研究方法與執行步驟。經由系統化資料分析後，就設定對象之火災情境開始建立執行，並透過電腦模擬進行多種火災情境之交互驗證模擬。從所得各項數據進而評估細水霧滅火效能、壓力大小、用水量、噴灑角度、佈點距離等參數，以獲得細水霧滅火最佳化設計與防範對策。

本論文相關執行流程如圖 2.1 所示，包括：

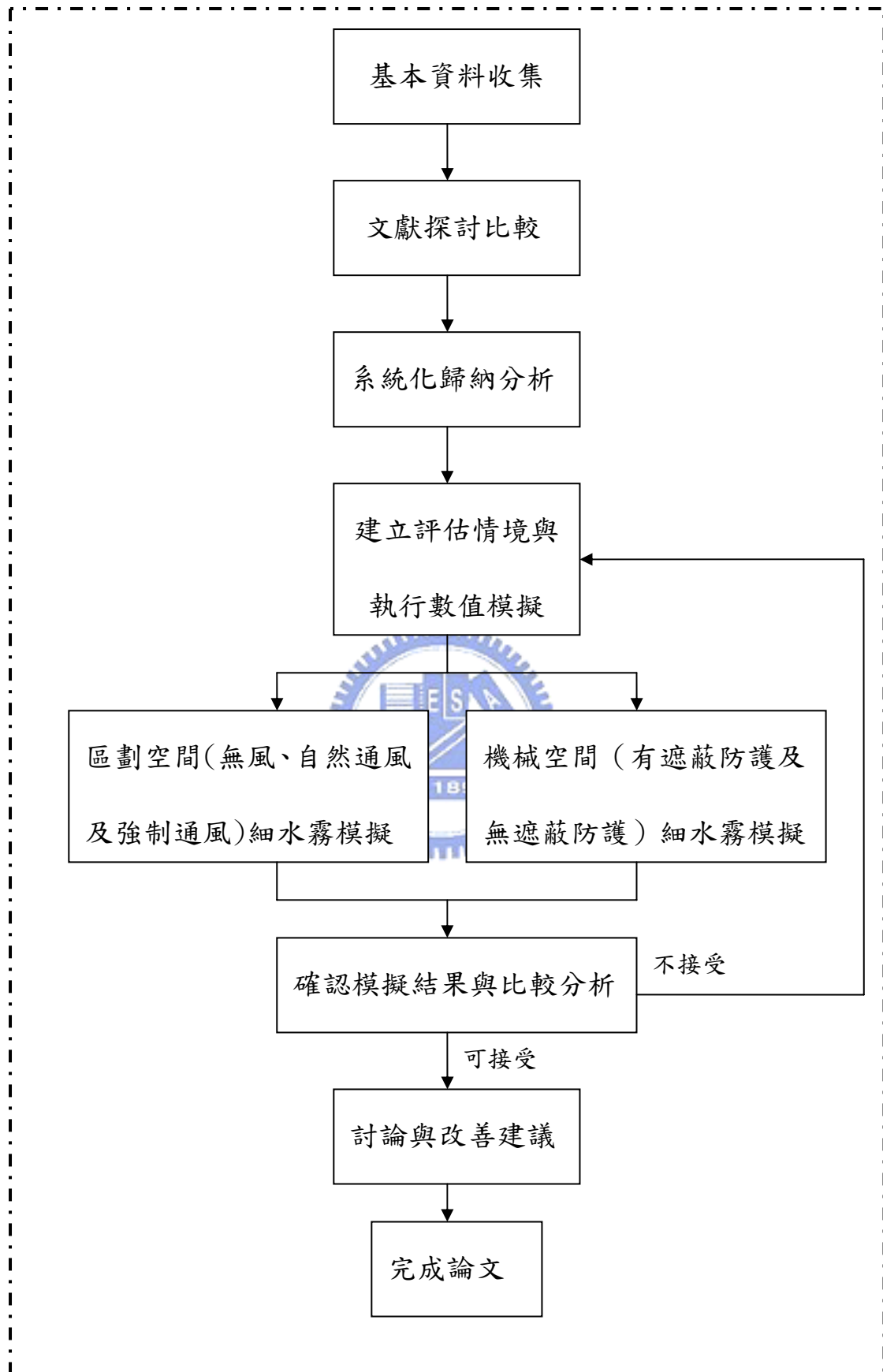


圖 2.1 論文研究流程圖

第三章 細水霧滅火原理、測試規範 及模擬平台介紹

3.1 細水霧滅火原理介紹

細水霧滅火系統之滅火原理為：(1)直接冷卻火源(2)以蒸發的水蒸氣包圍火源四週以隔絕氧氣供應(3)降低火源周圍的幅射熱。當系統將水氣化為顆粒極小之水霧粒子時，即增加了吸熱的總表面積，由於水霧粒子的質量極輕；故很容易隨著火場內之熱渦流將水霧粒子帶入火源中心，達到更高的利用效率，故其吸熱效率遠高於一般撒水系統並且可達到瞬間冷卻的效果。故只要細水霧粒子將吸收足夠的熱量能使火源溫度被降至燃料的著火溫度（Fire point）之下，火勢即可被撲滅。另一方面，由於細水霧粒子顆粒極小，極易因吸熱而氣化，氣化後的體積將膨脹約為原來的 1680 倍，會滯於火源的周圍形成水蒸氣層，而阻絕氧氣進入火源中心，一旦火源中心缺乏氧氣的供應後，火勢即可被控制；進而達到細水霧快速滅火之目的。影響細水霧滅火效能的因素，本論文將於下幾節一一將以解釋。

3.1.1 熱移除(Heat Extraction, Cooling)

當使用水來滅火，可迅速將熱氣體及火焰的熱能吸收，而降低水分子粒徑尺寸可以增加水分子的表面積質量體積比，增加熱能移轉的速度，水分子蒸發為水蒸汽時又吸收了熱能，在吸收一定的熱能後火焰的氣相溫度會低於維持燃燒過程所需的溫度，理論上來說 Diffusion flame 在其火焰溫度低於 1327°C 時，燃燒過程將會停止。就液體燃料火災而言，細水霧蒸發後可冷卻火焰，因而降低熱輻射通量到達燃料表面的能量，導致可燃性蒸汽的減少，在某些案例中結合降低火焰溫度及減少燃料揮發這兩項要素可大幅減少燃料燃燒速度，甚至可以完全撲滅火災。就固體燃料火災而言，降低固態燃料的火焰溫度也會減少熱輻射通量傳送到燃料表面的能量及降低燃料分解速度，但要完全撲滅固態燃料火災則和燃料形狀及其碳化層深度這兩項因素息息相

關。

3.1.2 排擠氧氣供應(Oxygen Displacement)

水分子蒸發後體積會擴大 1900 倍（在一大氣壓 95°C 下）如果蒸發速度快速，水蒸汽會排擠原先空氣所佔據的空間，如在一高溫區劃中細水霧系統作動，水蒸氣將劇烈蒸發、膨脹並取代區劃中的空氣，使得維持燃燒所需之氧氣大為減少至一臨界濃度後，使得火場燃燒效率不佳，將可輕易的撲滅火場。排擠氧氣可解釋了為何區劃內大火較小火容易被撲滅，耗氧多的大型火場在火災初期遠較耗氧少的小型火場釋放更多熱能，也因此提供較多熱能可為細水霧蒸發成為水霧蒸氣，故周遭氧氣濃度會降低；此外，在細水霧系統作動後在燃燒效率也降低的情況下，大型火場的燃燒效率與氧氣供應不足，因此較容易撲滅。一般來說閃火點高的液體燃料較易撲滅，如柴油的閃火點為 60°C。相較之下，小型火場有持續正常氧氣濃度供應燃燒所需之空氣，其排擠氧氣的效果不明顯，是故小型火場不易被撲滅。

3.1.3 阻擋熱輻射(Blocking Radiant Heat)

阻擋熱輻射可降低燃料表面的分解及揮發速度對阻絕火場漫延至未引燃燃料表面具有很重要的關鍵因素。細水霧藉由阻擋熱輻射來防護人員及物體免於輻射熱傷害，理論上細水霧粒徑及分佈密度是影響熱輻射的兩大因素，隨著粒徑小於 50 μm 的細水霧密度增加，其降低熱輻射的能力也隨之增加，這也是為何具有粒徑非常小而高密度的細水霧滅火系統，對降低熱輻射非常有效，因為隨著水霧汽化成蒸氣進入火焰及燃料表面，可以降低到物體表面的輻射熱通量。以油盤火災為例，降低熱輻射可以降低油料揮發速度及減少燃燒熱釋放率，因此熱輻射也是進行火災電腦模擬相當關鍵的參數之一。

3.1.4 水蒸汽/空氣稀釋 (Dilution of Vapor/Air Mixture)

細水霧作動時，水蒸汽及空氣會被帶入燃燒區域，稀釋原有可燃性蒸氣與空氣的混合至燃燒下限，以柴油為例（閃火點 60°C），火焰

被冷卻後，導致傳達到可燃性物表面的熱能減少，亦降低了柴油揮發的速度，加上被帶入燃燒區域的空氣稀釋了可燃性蒸氣，使得可燃性柴油蒸氣濃度降至燃燒下限，進而達成滅火之動作。但具有低閃火點的易燃性液體如庚烷（閃火點-4°C），因其閃火點溫度較低且庚烷的蒸氣壓高，故非常難以將庚烷蒸氣與空氣混合濃度降低至燃燒下限。通常在燃料表面的可燃性蒸氣與空氣混合的狀態通常為亂流場且分佈不均勻，所以總有某些區域的可燃性蒸氣與空氣混合比例位於燃燒區間內，導致滅火的困難度增加。

3.1.5 動態效應 (Kinetic Effects of Mist on Flames)

在液體油池火災噴撒水時，有時反而會有增加火災規模的現象產生，在細水霧接觸到液面時會有所謂的“爆發(Flare-up)”現象產生，這個瞬間的激化作用可歸因於水滴撞擊燃料表面造成潑濺現象，因而增加蒸發速度，Kokkala 將撒水設備作動噴撒時，水滴撞擊高溫且具有高沸點液體時的激烈蒸發現象稱之為火焰球(Flame ball)。Jones 也指出使用細水霧系統進行氣體爆炸抑制時有時也有激化燃燒的現象產生，因而無法立刻判定使用細水霧進行抑制爆炸會有正面或負面的效果。

3.1.6 區劃效果(Enclosure Effects)

區劃效果可以提昇細水霧系統的效能，因為其限制了通風及熱能擴散，使得該空間內氧氣濃度降低，導致燃燒效率變差，固較易撲滅。下列為區劃效果對細水霧滅火的影響：

3.1.6.1 熱能被侷限於區劃中。將水霧汽化，膨脹的水霧蒸汽將空氣擠出區劃。

3.1.6.2 位於區劃內天花板的熱氣體，受到細水霧冷卻效果影響而被擠至地板，並和水霧蒸汽、水滴混合於火場中。

3.1.6.3 通常降低燃燒效率及冷卻火焰這雙重效果可以撲滅火場火災。

即使在低動量及有障礙阻礙滅火的情境下，一旦有區劃效果，

仍有可能撲滅火場的火災。許多細水霧滅火實驗都曾指出細水霧系統較易撲滅大型火災，但對小型火災則有實際困難，因為小型火災對區劃內平均氧氣濃度影響有限，而且產生的小量水蒸汽被帶離燃料－火焰互動區域；若火災位於通風良好或未侷限空間時，細水霧必須有很強的動能使得水霧能夠分佈於火焰區域周圍，以產生水霧蒸汽來加強滅火抑制效能。此外，噴頭及水霧必須設計來補償無法侷限熱能及水霧蒸汽散失的影響。

3.2 細水霧噴撒特性說明(Spray Characteristics)

由字面上看細水霧的涵意，可解釋為非常細微水滴，經噴撒後可於空氣中懸浮一定的時間。影響細水霧噴撒特性的因素包括：粒徑尺寸分佈、分佈密度、噴撒動量、添加劑，將一一加以說明。

3.2.1 粒徑尺寸分佈 (Drop Size Distribution)：

粒徑大小的分佈和噴撒的區域及時間有關，在一代表性區域內的粒徑大小分佈狀況對每一單位細水霧的吸熱表面積是非常重要的系統效能指標。

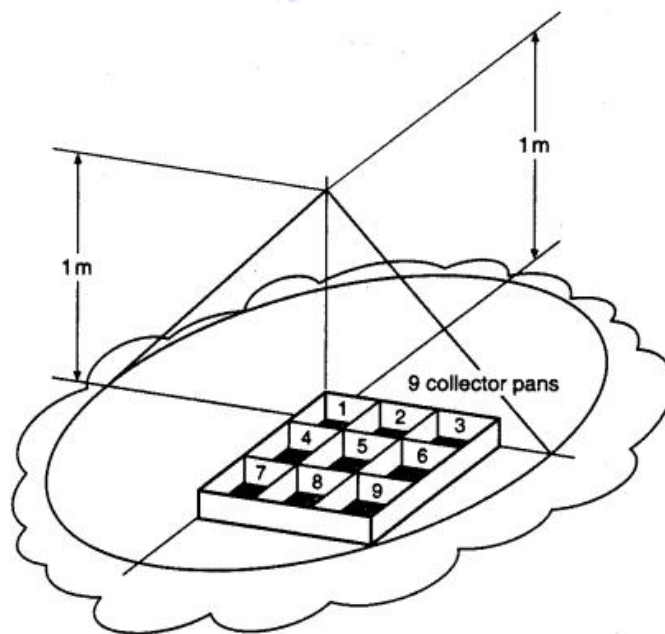


圖 3.1 量測細水霧粒徑尺寸分佈圖

NFPA 750 建議於離噴頭 1 公尺處噴撒範圍(Spray cone)內的數個地點量測細水霧粒徑尺寸分佈，如圖 3.1 量測細水霧粒徑尺寸分佈所示，因為在這個距離時外界帶進氣流的速度將與大粒徑與小粒徑的細水霧下降速度相同，外界干擾因素將最少故其量測所獲得之數據正確性高。實際噴霧液滴的粒度分佈通常由實驗直接測得。整理液滴群粒度分佈的方法甚多，經Aihara等人【17】及Hishida等人【18】實驗證實，由噴嘴噴出之液滴群的粒度分佈具有以重量為基準之

$$R_{w(dp)} = 100 \exp \left[- \left(\frac{d_p}{d_c} \right)^{N_c} \right]$$

Rosin-Rammler 粒度分佈（以下簡稱為R-R分佈）的性質。此種分佈由兩個參數，粒度特性數（absolute size constant） d_c 及均等數（distribution size） N_c 決定分佈情形，粒度特性數主要是表現出整體液滴群粒徑大小的特性，而均等數則表現出液滴粒徑分佈的特性，R-R分佈性質定義為

$R_{w(dp)}$ 為累積殘留重量（Cumulative Residue），表示全體液滴群中較滴徑 d_p 為大液滴群所佔比例。

一般實際計算時採用粒度特性數 d_c 為 360， N_c 為 3，每 $5\mu\text{m}$ 為一區間。計算結果如圖 3.2 為整體粒度分佈的直方圖，在某一粒徑 d_p 下該粒徑 d_p 佔全部粒徑數的百分比。細水霧一般由粒度分佈可得到以整體液滴重量平均之平均有效粒徑（mean drop size） d_m 為 $320\mu\text{m}$ 。

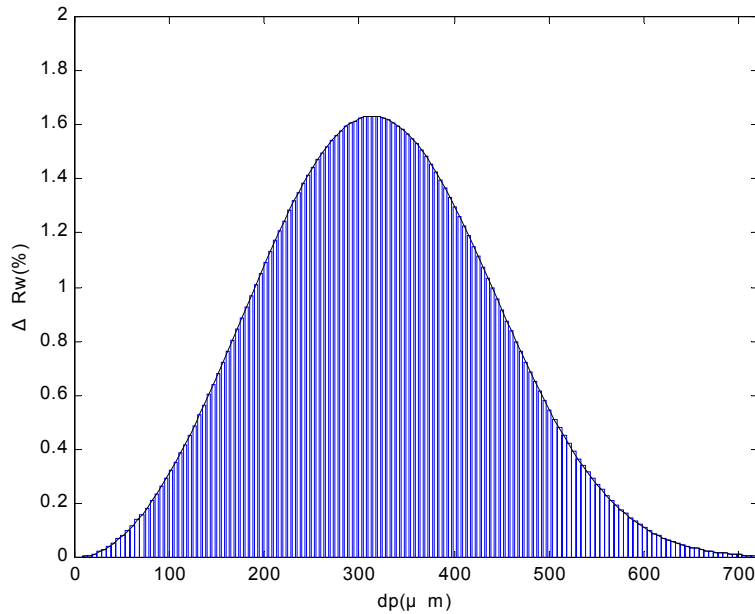


圖 3.2 細水霧粒度分佈直方圖

3.2.2 水霧噴撒密度 (Flux Density)

細水霧的質量必須超過一定值才具有吸收火場熱能的能力，因此噴撒通量密度為細水霧另一重要特性，通量密度為一單位時間內，流過單位面積的流量。Dougogorski【19】指出火場地點對細水霧系統效能有關鍵性影響，若火場直接位於噴頭下方且細水霧的通量密度及噴撒方向皆足以克服火場層流影響，所有火場都可被撲滅；若火場直接位於兩個噴頭中間處下方，在兩個細水霧噴頭噴撒範圍重疊的區域會產生亂流，以致於噴撒方向無法集中，細水霧的通量密度及噴撒動量將大幅減少，進而降低細水霧系統的效能。

3.2.3 噴撒動量(Spray Momentum)

細水霧噴撒之速度、噴撒方向與火場層流之方向性、細水霧傳送到火焰或燃料表面的質量等都會影響細水霧的噴撒動量。產生細水霧最有效率的方法是將最大量的細水霧引導至火災層流進行滅火，而控制引導細水霧的方向又和產生細水霧的方法最息息相關。美國國家標準局 (National Institute of Standards and Technology, NIST)【20】曾進行一系列的實場火災測試，証實如果噴頭佈點策略正確，噴撒角度

小的噴頭將最能控制引導細水霧噴撒至火源處。噴頭特性與佈點位置都是控制噴撒動量不可或缺的兩大因素，若能妥善控制噴撒動量，將愈能控制所需水量、滅火時間、水損與系統整體可靠度。

3.2.4 添加劑(Additives)

細水霧系統中水的本質會影響其效能，數個火場實驗室証實在系統中添加化學品可增加細水霧系統的滅火效能，NRCC 以氯化鈉 (Sodium Chloride)作為添加劑進行實地火場測試，不僅其滅火時間減少 40%至 50%，也可以在低通量密度撲滅柴油油盤火場，對於在障礙物時的表現更是比一般的水佳。目前可作為細水霧系統添加劑的包括防凍劑、A類及B類泡沫、表面劑、防火塗料等；添加化學品雖可增加細水霧系統的滅火效能但亦帶來了二大潛在負面影響：腐蝕性及毒性。故在任何細水霧系統加入添加劑前，都須進行完整的腐蝕性及毒性評估，以確保人員安全與設備使用正常。

3.2.5 水滴蒸發效應(Effect of waterdrop evaporates)

雖然少量的水蒸氣是碳氫化合物燃燒生成物，但主要水蒸氣來源是細水霧水滴。它通常是來自所釋放大量非常小的水滴有效的蒸發作用（及區劃空間內氣體有效的冷卻作用），取決於水的每單位質量之表面積。單一水滴的蒸發率(kg/s)之計算如下式[Lefebvre, 1989]【21】：

$$\dot{m}_d = \frac{2\pi dk_g}{C_g} \ln(1+B)(1+0.3\text{Re}_d^{1/2}\text{Pr}_g^{1/3})$$

上式中蒸發之傳動力包含轉換數 B，評估對流之雷諾數 Re。發現降低水滴尺寸則單一水滴之蒸發率也隨之降低。因此，方程式除以水滴之質量，發現單位質量水蒸發率與水滴直徑的二次方成反比。因此，如果兩套細水霧系統有相同的流量，釋放較小水滴的系統會有較大的蒸發量。水滴釋放速度、對流條件及水滴尺寸分佈之差異都將對蒸發量產生影響。

3.3 細水霧滅火系統國際相關測試規範介紹

目前國際上許多機構都在發展細水霧滅火系統測試協定，目的在進行細水霧滅火系統效能驗證，確保系統有效性。因此 NFPA750 也針對測試機構進行調查列表，如表 3.1，包含 UL(Underwriters Laboratories, Inc.)、FM(Factory Mutual Research Corporation)、IMO(International Maritime Organization) 及 VDS(Verband der Schadenversichen e.V.)等測試機構及測試規範名稱，其中 IMO 只制定規範而非測試機構，UL 及 FM 的測試規範大都延自 IMO 的規範，但加上 UL 及 FM 的一些自定測試項目，目前 UL 及 FM 可說是美國在細水霧滅火系統測試的主要廠家，要進入美國市場一定要通過 UL 或 FM 的測試認證。目前國內尚未建立相關符合國外細水霧滅火系統之測試規範，故本論文收集整理國際測試規範及測試空間需求，依此規劃一個符合性能式理念的標準測試場所與進行效能評估模式，以提供國內業者、研究機構在細水霧滅火系統實場測試或電腦數值模擬應用方面的參考工具。



表 3.1 細水霧滅火系統測試協定及空間分類表

機構名稱	規範名稱	測試項目	空間需求
FMRC	CLASS 5570	室內燃氣渦輪機之細水霧系統要求 C類燃燒機房與特別危險機械空間之細水霧系統性能要求 輕度危險場所之細水霧系統性能要求 濕式清洗台之細水霧系統性能測試(1997)	測試場所大小： 7.3 m×7.3 m×4.9m (260 m ³)
UL	UL2167	消防用細水霧噴頭標準(1998) 機械空間之細水霧系統性能測試 客艙之細水霧系統性能測試 大於 12m ² 之客艙之滅火性能測試 公共空間之細水霧系統性能測試 住宿設施之細水霧系統性能測試 輕度危險場所之細水霧系統性能測試 普通危險場所之 I 及 II 類火災測試 噴頭結構設計、標註及性能要求	A類機械空間與泵浦機房火災中： Class I 為 500m ³ Class II 為 3000m ³
IMO	MSC/Circular 668	機械空間與泵浦機房之海龍滅火系統替代方案.包括：同等性能水系統滅火系統之組件製造標準與 A類機械空間與泵浦機房之同等性能水系統滅火火災測試方法	
	MSC/Circular 728	修正 MSC/Circ668 A類機械空間與泵浦機房之同等性能水系統滅火設備火災測試方法 (1994)	
	Res.A.800 (19)	由 IMO Res.A.800(19)，設置撒水系統認可準則，包括：細水霧噴頭組件製造標準，客船住宿區、公共區及服務區之撒水系統同等性能火災測試	
VDS	VDS2498	纜線管溝細水霧噴頭要求	

附註：

FMRC：Factory Mutual Research Corporation

UL：Underwriters Laboratories, Inc.

IMO：International Maritime Organization

VDS：Verband der Schadenversichen e.V.

3.3.1 細水霧滅火系統國際相關測試之測試空間需求

本節針對上節所述之測試規範進行整理，將各測試規範之測試項

目及其空間需求進行列表整理。表 3.2 為針對 FM 的測試規範所整理出的空間需求，表 3.3 為針對 UL 的測試規範所整理出的空間需求，而表 3.4 則為針對 IMO 的測試規範所整理出的空間需求

表 3.2 FM 之測試規範空間需求列表

測試規範	防護對象	測試空間需求	備註
FM	燃氣渦輪機房	5.6 x 3.6 x 3.9(m)	防護空間小於 80m ³
		7.31 x 7.31 x 4.7(m)	防護空間小於 260m ³
	機械空間	7.31 x 7.31 x 4.7(m)	防護空間小於 260m ³
	濕式清洗台	5.5x3.7x 5(m)	直徑 12in(0.3m)油池 火災
	輕度危害空間	天花板面積 80m ² ，高度 不低於 2.5m	3 x 4 x 2.4(火源)
	工商業用油鍋	2.6x2.6x0.5(m)	
	局部放射	3x3 (m) 油池	

表 3.3 UL2167 之測試規範空間需求列表

測試規範	防護對象	測試空間需求	備註
UL2167	船舶機械空間	Class 1: 10x10x5(m)	
		Class 2: 地板面積 100m ² , 高 5~7.5 m	
		Class 3: 地板面積 300m ² , 高 10m	
	船舶乘客客艙空間	3x4x2.4(m)	
	船舶公共區域	3.66x7.32x2.4(m)	
	輕度危害空間	可容納 4 個撒水頭的空間	
	中度危害群組 1 (開放空間)	天花板面積 232m ² 高度不低於 2.5m	
	中度危害群組 2 (開放空間)	天花板面積 232m ² 高度不低於 2.5m	

表 3.4 IMO MSC/Circ 668/728 A 類引擎室之測試規範空間需求表

分類	引擎形式	測試空間	燃油和潤滑系統中的油路和壓力	空間體積
Class1	輔機室，小型主機或淨化室	測試應在100 m ² 房間進行，具有開啟的 2 m × 2 m的門作為通風之用及5 m高天花板。	燃油： 低壓 0.15-0.20 kg/s 於 3-6 bar 高壓 0.02 kg/s 於 200-300 bar 潤滑油：3-5 bar 液壓油：150 bar	500 m ³
Class2	如渡輪般的中型船的柴油主機	測試應在地板面積超過100 m ² 的房間進行，具有開啟的 2 m × 2 m的門作為通風之用；天花板5-7.5 m高使房間總體積達到3,000 m ³ 。	燃油： 低壓0.4-0.6 kg/s於3-8 bar 高壓0.030 kg/s於250 bar 潤滑油：3-5 bar 液壓油：150 bar	3,000 m ³
Class3	如油輪和貨櫃輪等大船的柴油主機	測試應在地板面積超過300 m ² 的房間進行，天花板高度需超過10m，且沒有任何影響空氣補給的限制。	燃油： 低壓0.7-1.0 kg/s於3-8 bar 高壓0.20 kg/s 潤滑油：3-5 bar 液壓油：150 bar	>3,000 m ³

UL 2167船上機械空間火災測試

在火災測試盤，其燃油的深度至少為水面再加上50 mm (2 inches)，油面至盤頂有150及10 mm

表 3.5 船上 A 類引擎室的火災測試情境分類表

測試編號	火災情境	測試用油
1	在四個噴嘴正下方模擬引擎的頂上低壓水平噴灑	商用燃油或柴油
2	在四個噴嘴正下方模擬引擎的頂上低壓水平噴灑噴油嘴向上45°可衝擊到1 m (39.4吋)外12 – 15 mm (0.5 – 0.6吋)的桿子	商用燃油或柴油
3	低壓水平噴灑，火源在模擬引擎側面，噴油嘴由模擬引擎末端0.1 m位置噴入	商用燃油或柴油
4	綜合測試編號1 – 3最難的噴射火災，並在模擬引擎上有4 m ² (43 ft ²)的油盤，下有3 m ² (32.4 ft ²)的油盤	商用燃油或柴油
5	在四個噴嘴正下方模擬引擎的頂上高壓水平噴灑	商用燃油或柴油
6	在模擬引擎側方低壓低流水平噴灑火災，在引擎的側面，油料噴出離引擎末端0.1 m (4吋)及一個0.1 m ² (1 ft ²)位於引擎1.4 m (4.6 ft)及底板的內側	商用燃油或柴油
7	在引擎模型的正下方0.5 m ² (5.4 ft ²)的油盤	庚烷
8	在引擎模型的正下方0.5 m ² (5.4 ft ²)的油盤	SAE 10W30 礦物基潤滑油
9	在排氣板下底板上0.5 m ² (5.4 ft ²)的油盤	庚烷
10	由引擎模型上竄出之持續火源(0.25 kg/s)	庚烷
11	2 m ² (21.52 ft ²) A級(class A)木板疊架，庚烷測試油盤30秒預燒，測試油盤離地面0.75 mT	UL 1626木板疊架 (wood crib)及庚烷
12	鐵板30 x 60 x 5 cm (12 x 24 x 2吋)偏移噴灑嘴20° 加熱至350°C (662°F)，低壓低流噴嘴在鐵板端 0.5 m (19.2吋) 處，當板到達 350°C (662°F)時系統作動。一旦系統停止，油盤不得在引燃。	庚烷
13	在引擎模型下2 x 2 m (6.6 x 6.6 ft)的油盤	商用燃油或柴油

表 3.6 油料噴灑測試參數

測試參數	分類 A 引擎室		
火災型式	低壓	低壓,低流	高壓
Spray nozzle	廣角(120 – 125°) 全錐形	廣角(80°) 全錐形	標準角 [在 6 Bar (87 psi)] 全錐形
公稱燃油壓力	8 Bar (116 psi)	8.5 Bar (123 psi)	150 Bar (2125 psi)
燃油流量	0.16 0.01 kg/s	0.03 0.005 kg/s	0.050 0.002 kg/s
燃油溫度	20.5°C (68.9°F)	20.5°C (68.9°F)	20.5°C (68.9°F)
公稱熱釋放率	5.8 0.6 MW	1.1 0.1 MW	1.8 0.2 MW
燃油	商用燃油或柴油	商用燃油或柴油供 火災測試6次及庚烷 供火災測試12次	商用燃油或柴油

3.3.2 細水霧滅火系統相關測試規範之測試對象及項目說明

3.3.2.1 FM 測試對象及項目整理

本節將 FM 細水霧滅火系統測試規範中的測試對象及項目整理如下表：

表 3.7 FM 細水霧滅火系統測試規範測試對象及項目整理

項目編號	測試對象	測試項目
1	燃氣渦輪機房 (小於 80m ²)	1MW 未遮蔽柴油噴撒火災 1MW 遮蔽柴油噴撒火災 遮蔽 1m ² 柴油油池火災 復燃測試(1MW 遮蔽柴油噴撒火災) 有限制的自然通風測試 噴撒冷卻測試(無火源)
2	燃氣渦輪機房 (小於 260m ²)	1MW 未遮蔽柴油噴撒火災 1MW 遮蔽柴油噴撒火災 遮蔽 1m ² 柴油油池火災 復燃測試(1MW 遮蔽柴油噴撒火災) 有限制的自然通風測試 較小防護體積測試 噴撒冷卻測試(無火源)
3	機械空間 (小於 260m ²)	1MW 未遮蔽柴油噴撒火災 1MW 遮蔽柴油噴撒火災 遮蔽 1m ² 柴油油池火災 有限制的自然通風測試
4	燃氣渦輪機房或 機械空間 (大於 260m ²)	低壓未遮蔽柴油噴撒火災 低壓具角度未遮蔽柴油噴撒火災 低壓遮蔽柴油噴撒火災 高壓柴油噴撒火災 低壓遮蔽柴油噴撒及油池火災 遮蔽正庚烷油池火災 流動火源 疊架火源 噴撒冷卻測試(針對燃氣渦輪機房)
5	濕式清洗台	一、通風狀態測試 直徑 4in 聚丙烯油池火災 直徑 6in 聚丙烯油池火災 直徑 8in 聚丙烯油池火災 直徑 10in 聚丙烯油池火災 直徑 12in 聚丙烯油池火災 易燃性液體(丙酮、IPA、正庚烷)油池火災 通風狀態聚丙烯油池火災 通風狀態易燃性液體油池火災 二、工作表面測試 直徑 4in 聚丙烯油池火災 直徑 6in 聚丙烯油池火災 直徑 8in 聚丙烯油池火災 直徑 10in 聚丙烯油池火災 直徑 12in 聚丙烯油池火災

		易燃性液體油池火災 飛濺測試 其他表面測試 三、無通風空間測試 聚丙烯油池火災 易燃性液體油池火災 其他無通風空間測試
6	輕度危險工作場所	小防護區域 10ft x 13ft x 8ft 大防護區域面積不大於 400ft ² ，高度不超過 8ft 天花板面積至少 860 ft ² 之開放空間
7	工業用油鍋	具有 5in 深的自燃溫度火源(mock-up A，Hood up) 具有 5in 深的自燃溫度火源(mock-up A，Hood down) 具有 5in 深的自燃溫度火源(mock-up B，Hood up) 具有 5in 深的自燃溫度火源(mock-up B，Hood down)
8	局部放射	正方形柴油油池火災 管道柴油油池火災 庚烷噴撒火源 正方形柴油油池火災結合 6MW 柴油噴撒火源 有遮蔽的正方形柴油油池火災 Offset 正方形柴油油池火災 具有外部點火源的 6MW 柴油噴撒火源

3.3.2.2 UL2167 測試對象及項目整理

本節將 UL2167 細水霧滅火系統測試規範中的測試對象及項目整理如下表說明：

表 3.8 UL2167 細水霧滅火系統測試規範測試對象及項目整理

項目編號	測試對象	測試項目
1	船上機械空間 Class 1 : 500m ³ Class 2 : 3000m ³ Class 3 : >3000m ³	10 x 10 x 5m 的密閉空間進行測試。 樓地板面積大於 100m ² 密閉空間，天花板高度介於 5~7.5m，最大體積 3000m ³ 。 樓地板面積大於 300m ² 開放空間，天花板高度

		超過 10m。
2	小於 12m ² 船上客艙	3 x 4 x 2.4m(10x13x8ft)的天花板中心進行連接到一個 1.5 x 12m(5x39.4ft)長, 2.4m 高的走廊。
3	大於 12m ² 船上客艙	邊長相等, 高 2.4m(8ft)、以及樓地板面積最少 24m ² (260ft ²)且不超過 80m ² (860ft ²)的室內進行。
4	船上公共區域 輕度危險公共區域 中度危險公共區域	最少 80m ² 的測試空間中進行。公共空間火災測試在測試第一階段進行時天花板高度為 2.5m, 第二階段進行時天花板高度為 5m, 在兩面 4.8m(15.7ft)寬的牆構成的轉角進行。
5	住宅區火災測試	3.7 x 7.4 x 2.4m(12x24x8ft)的測試空間進行。
6	輕度危險區域	符合 43.2 所述的船上輕度危險區域火災測試, 相當於 4 個噴頭的最大間距及最大的天花板高度。
7	中度危險區域 群組 1	開放空間測試: 在一個尺寸不小於 15m(50ft)的區域中, 安裝一個面積最少 232m ² (2500ft ²)天花板。轉角火災測試: 在一個雙面的密閉空間進行, 密閉空間具有最大的高度與最小的天花板區域, 相當於 4 個噴頭以 2x2 噴頭配置所提供的覆蓋區域;或 9 個噴頭以 3x3 噴頭配置所提供的覆蓋區域。
8	中度危險區域 群組 2	開放空間測試: 在一個尺寸不小於 15m(50ft)的區域中, 安裝一個面積最少 232m ² (2500ft ²)天花板。轉角火災測試: 在一個雙面的密閉空間進行, 密閉空間具有最大的高度與最小的天花板區域, 相當於 4 個噴頭以 2x2 噴頭配置所

		提供的覆蓋區域;或 9 個噴頭以 3x3 噴頭配置所提供的覆蓋區域。
--	--	------------------------------------



3.4 細水霧電腦效能模擬平台介紹

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。

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，本章將對細水霧電腦效能模擬平台 Firedass 進行介紹，包含軟體平台的發展歷程及所使用的理論，藉此說明本論文所使用細水霧效能模擬平台 Firedass 的評估功能。以下就全場模式的原理說明如下：

- 流體力學方程式(質量、動量、能量守恆)。
- 燃燒學方程式(質能平衡)。

- 特殊模式(幅射、撒水)。
- 將方程式離散化並寫成程式語言進行疊代。

- $$y' = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

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。Firedass 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，同時可模擬細水霧作動，計算細水霧系統撒水後火場的變化。本論文火災後果模擬分析之其運用之 Navier-Stokes 之計算方程式包括：

Conservati on of mass

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \bar{u}$$

Conservati on of species

$$\frac{\partial \rho Y_l}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \rho Y_l = -\rho Y_l \nabla \cdot \bar{u} + \nabla \cdot \rho D \nabla Y_l + \dot{W}_l'''$$

Conservati on of momentum

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \times \omega + \nabla H = \frac{1}{\rho} ((\rho - \rho_\infty) \bar{g}) + \bar{f} + \nabla \cdot \tau$$

Conservati on of energy

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \bar{u} - \frac{Dp}{Dt} = \dot{q}''' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l h_l (\rho D)_l \nabla Y_l$$

Conservati on of state

$$p_0(t) = \rho TR \sum_l Y_l / M_l$$

一般而言，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。

3.4.1 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 3.9 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 3.3 所示。

表 3.9 FIREDASS 發展計畫成員與分工說明

組織名稱	組織屬性	組織專長
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	法規建立	航空電子技術安全法規建置

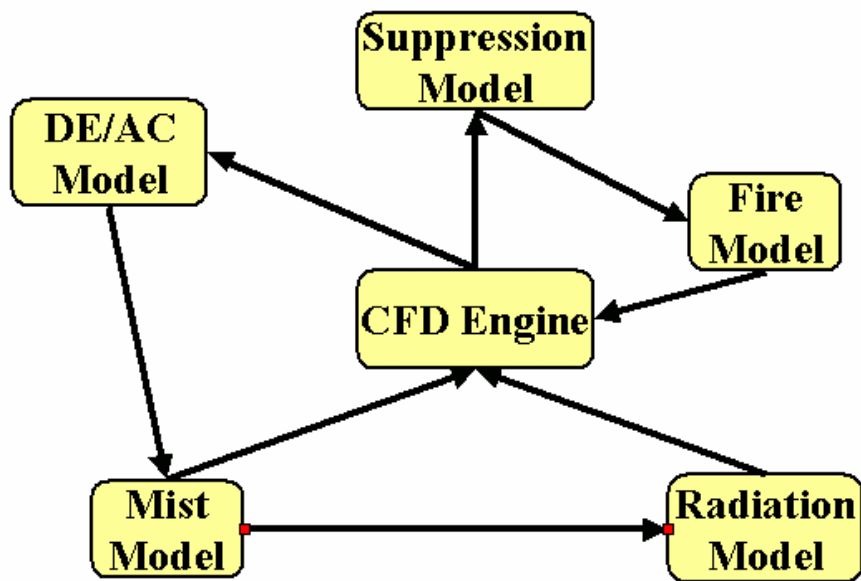


圖 3.3 FIREDASS 子模式關連圖

3.4.2 Firedass 使用模式介紹

3.4.2.1 火災模式(Fire Model)

火災模式係設定熱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。

3.4.2.3 細水霧模式(Mist Model)

此模式在建立水離開噴嘴之後的噴霧特性，並依此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。

3.4.2.4 熱輻射模式(Radiation Model)

熱輻射模式用以計算空間中的熱表面與火所散發及吸收的熱輻射，並利用六個方向的熱輻射模式(Flux Model)計算火場中各點所接受的熱輻射。

3.4.3 Firedass 可靠度驗證

為了驗證 Firedass 的預測能力，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 3.4 所示、細水霧驗證實驗室空間配置圖如圖 3.5 所示。

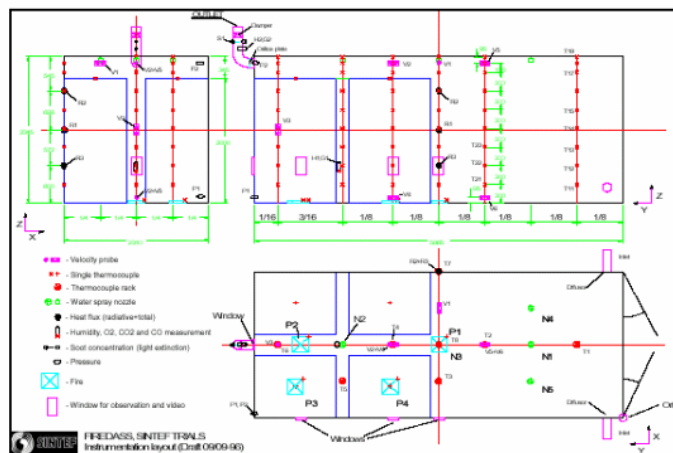


圖 3.4 用於細水霧驗證之測試場規劃圖

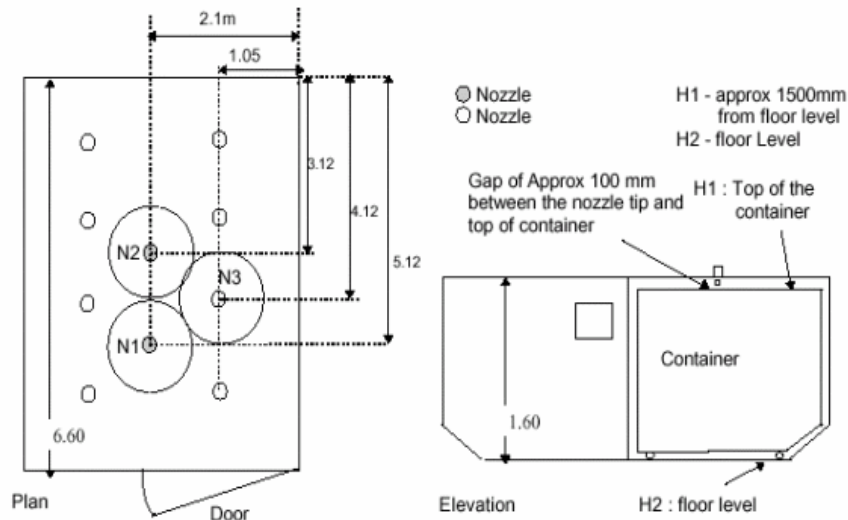


圖 3.5 細水霧驗證實驗室空間配置圖

3.4.4 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，由輸入檔中可設定包括：

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

3.4.5 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 3.6~圖 3.9。

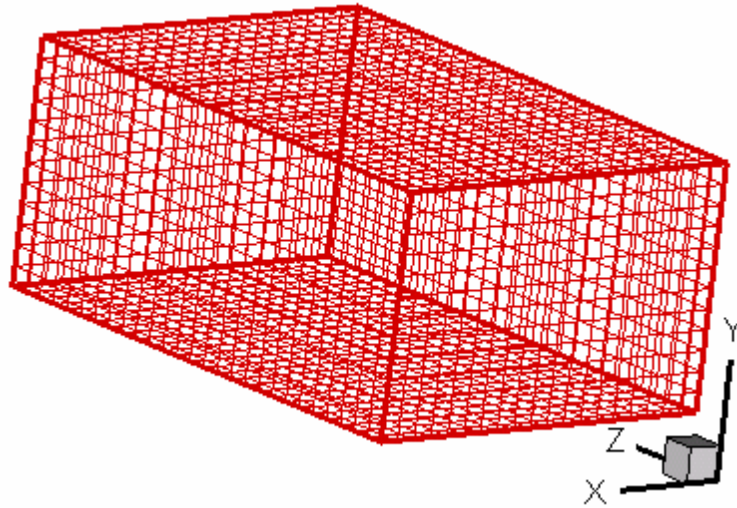


圖 3.6 Firedass 格點圖

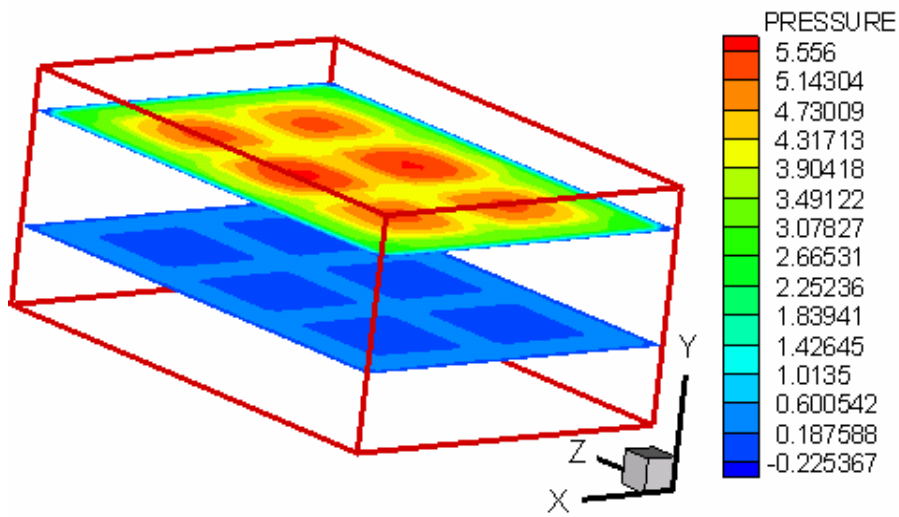


圖 3.7 Firedass 壓力切面圖

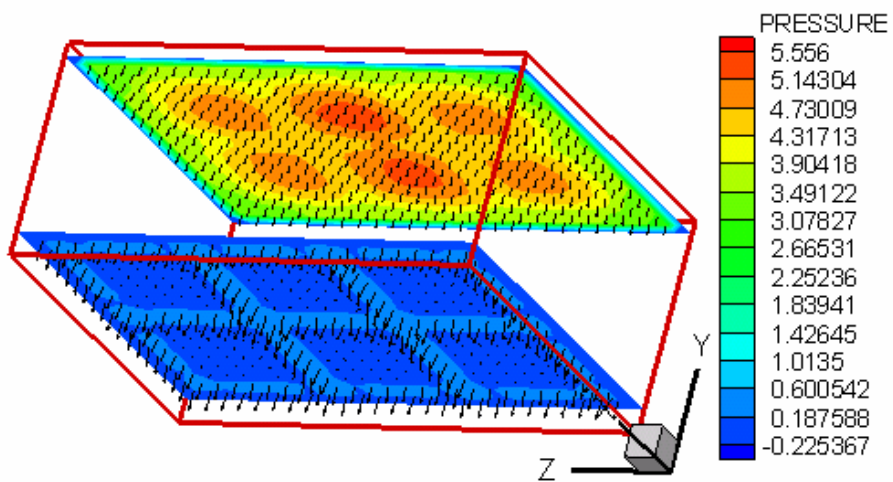


圖 3.8 Firedass 速度向量圖

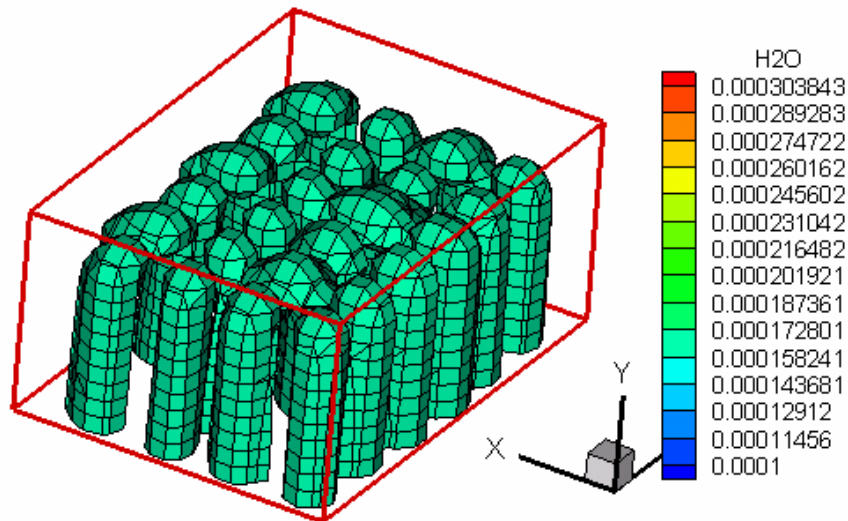


圖 3.9 Firedass 水密度等位面圖

3.4.6 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。

第四章 細水霧滅火效能模擬評估

4.1 區劃空間細水霧滅火效能評估

本章將以建築物區劃空間為評估對象，以電腦模擬平台 Firedass 進行在不同通風狀態下的滅火效能評估。這些全尺寸的火場測試是在一個密閉的區劃空間內進行，火災的測試情境包括在區劃空間內不同位置所進行小型及大型的油池火災測試、噴濺火災與木製疊架火災測試。利用不同的通風條件從未通風、自然通風到強制通風，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。由實驗的結果得知，細水霧滅火系統的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。在測試期間，單流高壓與雙流低壓的細水霧滅火系統在自然通風的狀態下均有效的抑制了火災。然而在強制通風狀態下，由於區劃空間和周圍環境間強大的質傳現象，而導致細水霧滅火系統降低了抑制效能。故在一般建築物區劃空間中使用更可以提昇細水霧系統的抑制效能，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，導致燃燒效率變差，火勢更易撲滅。雖然細水霧在火災防護的效能雖已被廣泛的應用與大量的實驗來證明有效性，然而細水霧實際在滅火上，卻是受到區劃空間中火災尺寸、遮蔽度、天花板高度及通風狀況...等因素之影響。

4.1.1 執行緣由與目的

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。而在一份國際海事組織（International Maritime Organization, IMO)模擬在船艦燃氣渦輪機房（gas turbine）內，所進行通風狀態下海龍替代物全區放射（total flooding）滅火測試實驗報告中發現，海龍替代物在通風狀態下有高達 37%的失敗率。為了研究細水霧滅火系統在通風條件下之抑制效能是否有別於其它抑制系統，加拿大國家研究委員會（National Research Council of Canada，

NRCC)在 2001 年起，便開始進行了一系列在通風狀態下全尺寸的細水霧滅火試驗。火災的測試情境包括在區劃空間內不同位置所進行小型及大型的油池火災測試、噴濺火災與木製疊架火災測試。區劃空間的通風條件包括了未通風(通風口關閉)，自然通風(通風口打開) 和強制通風(通風口打開，並使用風扇強制對流)。並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。故此，區劃空間實場試驗的主要目的是在於探討空間內使用細水霧滅火系統對火災燃燒所產生的熱以及火災氣體消滅之影響。而影響上述狀態的主要量測參數為：空氣溫度、火燄溫度、熱輻射及總熱通量、區劃壓力、一氧化碳、二氧化碳及氧氣之濃度等。本章將主要探討在自然和強制通風狀態下，單流高壓與雙流低壓的細水霧滅火系統的抑制效能，並由國外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區劃空間通風狀態下，細水霧滅火系統之抑制效能評估與驗證。

4.1.2 模擬對象說明

本節中細水霧滅火系統為全尺寸的實場測試，而這些測試之目標會因區劃結構之不同而有所改變，測試項目包括模擬在不同尺寸之區劃空間改變通風條件來進行實驗。實場測試是在一個 $9.7\text{m} \times 4.9\text{m} \times 2.9\text{m}$ 的矩形區劃空間中進行測試(參考圖 4.1 說明)，區劃空間中有一個 $2.0\text{m} \times 0.9\text{m}$ 的門及三個 0.57m^2 的視窗，在靠近南方區劃牆的地面處有一個 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的釋壓開口，並裝有風扇。把每個在區劃空間內測試的實驗，都使用單流高壓與雙流低壓的細水霧滅火系統去進行比對分析(參考表 4.1 說明)。細水霧滅火系統在天花板安裝了 13 個噴頭 (Nozzles)，這些噴頭的間距是 $1.83\text{m} \times 1.83\text{m}$ ，佈置在最旁邊的噴頭距離南面與北面的區劃牆的間距是 0.94m ，而距離東面與西面區劃牆的間距則是 0.92m ，而系統的水量 (water discharge rate) 為 70Lpm 。水滴尺寸分佈的有限寬度是限制區劃空間內水滴濃度的係數。氣體中含有恰當數量的水滴濃度，進入火災動作區域。水滴隨著氣流浮動的能力是有限的，減小水滴尺寸得增加這個能力。因此，

對細水霧滅火系統而言，遮蔽火災比開放性火災更難被撲滅。另外，遮蔽物常可能聯接火源，並且使火災複燃，增加滅火難度。

表4.1、單流與雙流細水霧滅火系統之特性比較

噴頭形式	流量 (Lpm)	壓力 (bar)	噴撒角度 (degree)	液滴尺寸 (Dv0.9 microns)
單流	6	70	90	200~400
雙流	5	5.78/5.67	90	200~400

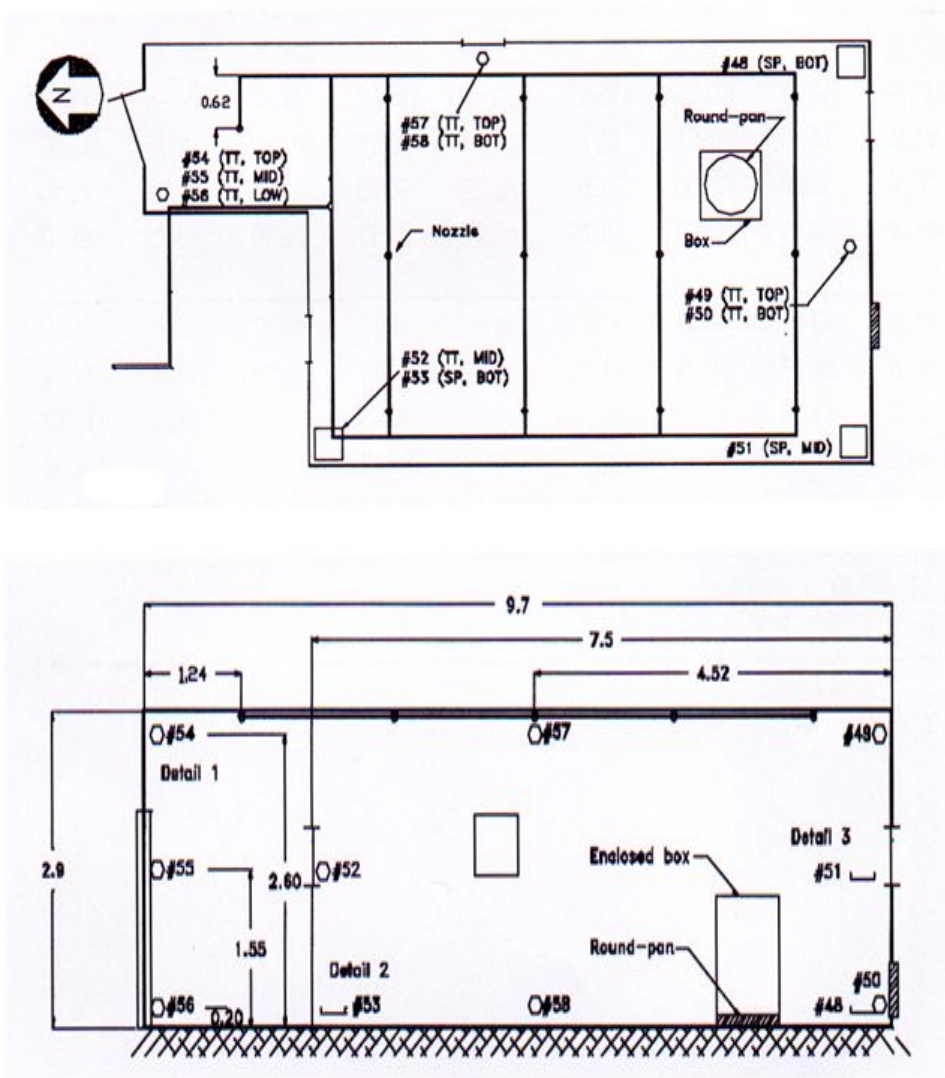


圖4.1、細水霧滅火系統測試區劃平面圖

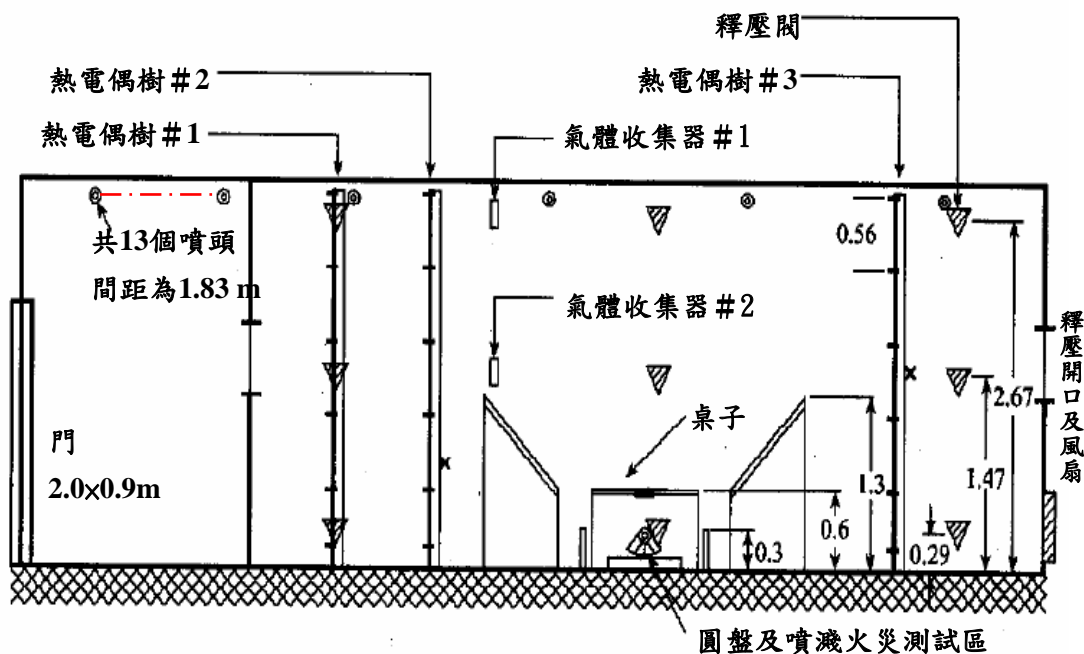


圖4.2、細水霧滅火系統測試區劃說明圖

4.1.3 火源大小設定

相關測試的火災情境包括一個直徑 75 mm 的油罐火災、另一個 0.3 m × 0.3 m 的油盤火災、噴濺火災與木製疊架火災等情境。其中庚烷噴濺火災操作壓力為 5.8 bar，以及用各 0.6 m × 0.6 m × 0.25 m 松木堆積成 6 層的木製疊架。並且由實際測試熱釋放速率 (Heat Release Rate, HRR) 來決定每一個形式的火災尺寸，這些火災的尺寸會在細水霧滅火抑制期間，隨周圍環境而改變。

4.1.4 測試步驟說明

在測驗期間通風條件包括了未通風(通風口關閉)，自然通風(通風口打開) 和強制通風(通風口打開，並使用風扇強制對流，通風速率為 0.737 m³/s)。在燃燒的初期，可允許讓門保持開著，使新鮮空氣能夠持續的進入區劃空間內。而在細水霧開始噴撒時，門的開關與否則視測試的通風條件而定。對於強制通風的測試，在細水霧開始噴撒時，便同時啟動風扇進行對流。實驗中可透過三扇視窗直接觀察細水霧滅火系統在通風條件下，抑制火源的過程，並在每一個測試位置放

置了熱電偶監控。在尚未確認細水霧系統是否能撲滅這個情境的火源以前，實驗允許讓火源由開始持續 7 到 16 分鐘的燃燒，以觀察在不同通風狀態時區劃空間中含氧量變化。

4.1.5 實驗結果探討

區劃空間在沒有通風的狀態下使用單流/高壓細水霧滅火系統在油池火災和木製疊架火災情境進行測試，其被撲滅的時間分別是 30 秒和 90 秒。當細水霧從天花板之噴頭撒下時，火場周圍的高溫環境迅速的吸附液滴，在 10 到 15 秒的時間便迅速將液滴蒸發成水蒸汽。並且由水蒸汽取代或減少了燃燒的氧氣和燃料的可燃蒸汽，使得火勢迅速被撲滅（參考表 4.2 說明）。



表4.2、細水霧滅火系統在沒有通風狀態下全尺寸試驗結果一覽表

測試編號	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
噴頭形式	單流	單流	單流	雙流	雙流	雙流
火災形式	油池火災	木製疊架火災	噴濺火災	油池火災	木製疊架火災	噴濺火災
熱釋放率	700kW	600 kW	570 kW	700 kW	500 kW	500 kW
No.49	73(s)	55(s)	80(s)	100(s)	-	-
No.50	46(s)	40(s)	65(s)	57(s)	-	-
No.52	48(s)	25(s)	22(s)	74(s)	-	-
No.57	200(s)	205(s)	225(s)	157(s)	-	-
No.55	82(s)	57(s)	65(s)	35(s)	-	-
No.57	160(s)	133(s)	165(s)	175(s)	-	-
No.57	88(s)	20(s)	115(s)	95(s)	-	-
No.58	22(s)	30(s)	37(s)	65(s)	-	-
No.64	-	195(s)	-	-	-	-
No.48	210(s)	不會熄滅	-	225(s)	114(s)	-
No.51	40(s)	-	-	105(s)	-	-
No.57	177(s)	不會熄滅	-	163(s)	-	113(s)

在區劃空間未通風狀態下，細水霧的滅火能力是取決於區劃空間中火源的尺寸和它所在的位置。而區劃空間在自然通風狀態時（區劃內有一個開口時，參考表 4.3 說明），區劃空間內和它的外部環境間的溫度差別，會導致氣流在開口端產生壓差。空間內開口的質量流率

可以藉由從下列 Bernoulli 方程式計算獲得：

$$\dot{m}_{out} = W\rho_a T_a C \int_N^H \left[\left(\frac{2g}{T_r} \right) \int_N^z \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_r} \right) dZ' \right]^{0.5} dZ$$

上式中 W 代表開口之廣度。

H 代表開口之高度。

C 是表示開口的流動係數。

G 是表示重力加速度。

ρ_a 表示開口周遭範圍的氣體的密度。



表4.3、細水霧滅火系統在自然通風狀態下全尺寸試驗結果一覽表

測試編號	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
噴頭形式	單流	單流	單流	雙流	雙流
火災形式	油池火災	木製疊架火災	噴濺火災	油池火災	噴濺火災
熱釋放率	700kW	600 kW	570 kW	500 kW	520 kW
No.49	50(s)	55(s)	115(s)	-	-
No.50	55(s)	40(s)	65(s)	-	-
No.52	30(s)	35(s)	22(s)	-	-
No.57	不會熄滅	不會熄滅	不會熄滅	-	113(s)
No.55	75(s)	57(s)	70(s)	-	-
No.57	不會熄滅	133(s)	120(s)	-	-
No.57	50(s)	20(s)	110(s)	-	-
No.58	20(s)	30(s)	65(s)	-	-
N0.64	-	不會熄滅	-	-	-
No.48	128(s)	-	-	420(s)	-
No.51	40(s)	120(s)	-	-	-
No.57	230(s)	-	140(s)	-	145(s)

在燃燒實驗開始後，區劃外部新鮮空氣仍以固定的流動速率進入區劃空間內底部的的位置，持續供給氧氣。當細水霧滅火系統開始放射後，細水霧的液滴便限制了新鮮空氣在區劃開口和它的外部環境進行質量交換，並阻斷了外部氧氣的供給。但仍然會有少量的新鮮空氣透

過開口門的底部流入了區劃空間內，因微量氧氣供給所造成復燃的小火源，亦很快被細水霧抑制撲滅了。對於區劃內自然通風的狀態下，使用單流/高壓細水霧滅火系統進行測試，結果並無法如同在未通風狀態那樣可以快速的撲滅油池火災和木製疊架火災。撲滅時間分別從 30 秒和 90 秒延遲到 95 秒與 120 秒。另外把雙流/低壓細水霧滅火系統架設在同樣的火災情境下進行測試，發現撲滅時間分別為 113 秒與 145 秒。另外在噴濺火災的測試情境下，使用雙流/低壓細水霧滅火系統來進行測試，發現撲滅時間更分別延後到 114 秒與 420 秒。由上述這些測驗結果證明在自然通風中（區劃內有一個開口時）細水霧滅火系統需花費較長的時間，才能有效地撲滅區劃空間內的火災。

另外，區劃空間在使用強制通風(通風口打開，並使用風扇強制對流，通風量為 $0.737 \text{ m}^3/\text{s}$ ，參考表 4.4 說明)的狀況下，來進行雙流/低壓的細水霧滅火實驗。當強制使用風扇使外部空氣進入區劃空間時，新鮮空氣由區劃開口和它的外部環境產生質量交換的現象，透過風扇流入區劃空間的空氣流率與排出區劃空間外的空氣流率是相同的。然而，細水霧滅火系統的液滴在接近開口門和風扇處的位置，其細水霧滅火抑制效能及噴撒狀況發生了變化。當在區劃空間中強制增加空氣對流時，在噴濺火災的測試情境下，使用單流/低壓細水霧進行噴濺火災滅火實驗，發現撲滅時間由原來的 420 秒往後延遲至 510 秒，而且系統相對的增加了用水量。此外雙流/低壓的細水霧滅火系統在強制通風的狀態下，並無法有效的抑制油池火災。由實驗證明雙流/低壓的細水霧液滴在每秒 0.737 m^3 強制通風狀態下，無法達到抑制火源的效果。而在實驗中使用細水霧系統之滅火效能證明比海龍替代品好，使用海龍氣體替代品的時間會比細水霧系統滅火多延滯 18 秒到 42 秒。此時，若在區劃開口多增設 2 至 4 顆水霧噴頭，則細水霧滅火系統對通風控制火災的防範效能將會因此增加。

表4.4、細水霧滅火系統在強制通風狀態下全尺寸試驗結果一覽表

測試編號	3-1	3-2	3-3	3-4
噴頭形式	雙流	雙流	雙流	雙流
火災形式	油池火災	油池火災	噴濺火災	噴濺火災
熱釋放率	500 kW	500 kW	520 kW	520 kW
撲滅時間	不會熄滅	168(s)	510(s)	227(s)
用水量 (L/m ²)	>18.4	3.0	15.6	4.3

在區劃空間內細水霧系統位於火災上方比位於火災旁邊有較好的滅火效能，於上方撲滅其氧氣會因此大量消耗及稀釋，區劃內之氧氣會降低氧濃度到燃燒界限以下，火勢將因此被撲滅。而在區劃空間內使用高壓單流系統與低壓雙流系統進行試驗比較，高壓單流細水霧系統在面對大部分的火災時有較快的滅火能力表現，這是由於許多微小及高動量的粒子產生，因此能快速撲滅火源。大的火災較小的火災在區劃中容易撲滅，這是由於在大火災中氧氣較快消耗，以及在火場中細水霧產生大量的水蒸氣取代氧氣。然而低壓雙流細水霧系統則具有較慢的水流量及較大的粒徑，經實驗證明撲滅遮蔽之油盤火災與木製疊架火災時需較長的時間才會撲滅火災。

4.1.6 模擬結果討論

4.1.6.1 模擬對象說明

本節的模擬對象取材於區劃空間內細水霧滅火效能分析，故針對前述區劃測試空間以Firedass軟體進行細水霧滅火效能分析與驗證。在一個 9.7m × 4.9 m × 2.9 m 的矩形區劃空間中進行測試(參考圖 4.3 說明)，區劃空間中有一個 2.0 m × 0.9 m 的門及三個 0.57 m² 的視窗，在靠近南方區劃牆的地面處有一個 0.5 m × 0.5 m 的釋壓開口。

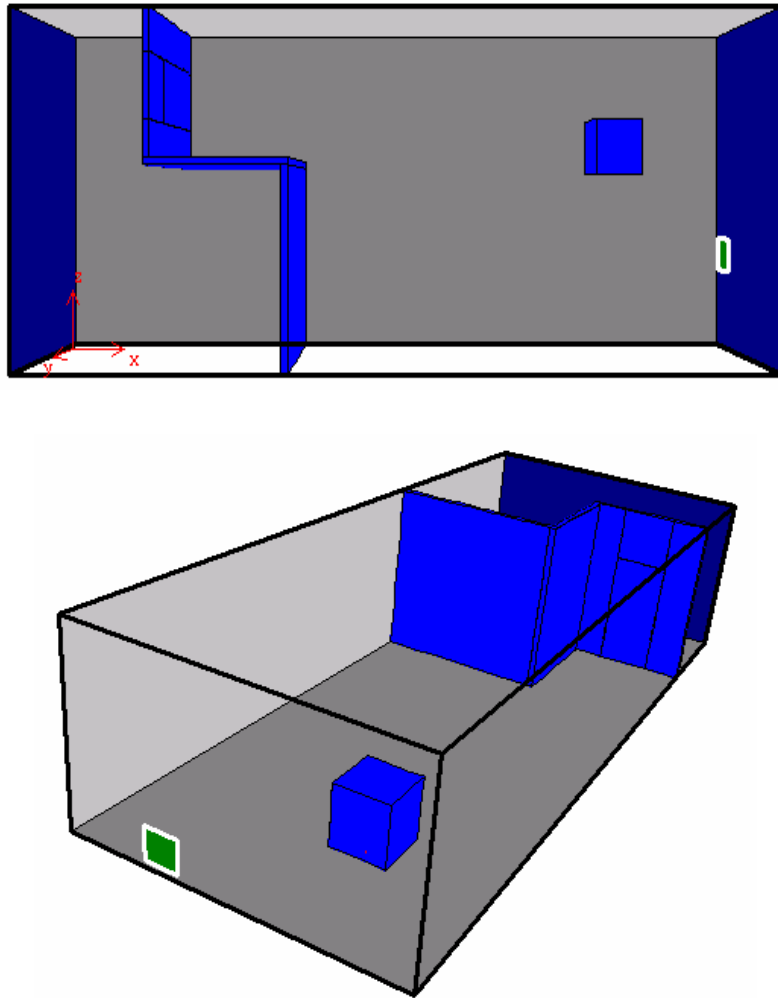


圖 4.3、模擬區劃測試空間之俯視圖及側視圖

4.1.6.2 火災情境設定

火災情境包括一個直徑 75 mm 的油罐火災、另一個 0.3 m × 0.3 m 的油盤火災、噴濺火災與木製疊架火災等情境，熱釋放速率 (Heat Release Rate, HRR) 為 1MW。

4.1.6.3 電腦模擬起始條件

依據實場測試資料進行模擬，並選定強制通風狀態(通風口打開，並使用風扇強制對流，通風速率為 0.737 m³/s)進行後果模擬分析。在天花板安裝了 13 個單流高壓系統噴頭 (Nozzles)，這些噴頭的間距是 1.83 m × 1.83 m，佈置在最旁邊的噴頭距離南面與北面的區

劃牆的間距是 0.94 m，而距離東面與西面區劃牆的間距則是 0.92 m，而系統的水量 (water discharge rate) 為 70 Lpm，請參閱圖 4.4 說明。

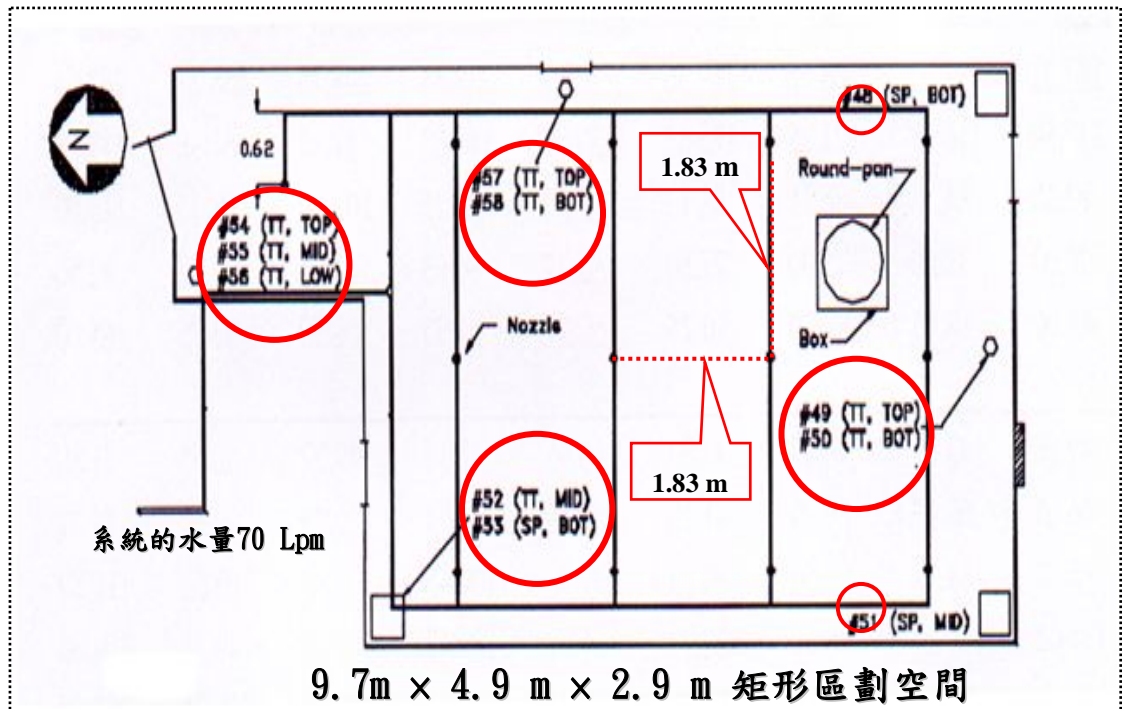


圖 4.4 區劃測試空間電腦模擬條件設定說明圖

4.1.6.4 模擬結果說明

本次電腦模擬針對強制通風狀態 (通風速率為 $0.737 \text{ m}^3/\text{s}$) 探討區劃空間內將門開啟及關閉，對細水霧在流場速度及溫度向量之影響分析，並將模擬結果說明如下：

4.1.6.4(a) 強制通風狀態下門開啟之數值模擬分析結果(40 sec)

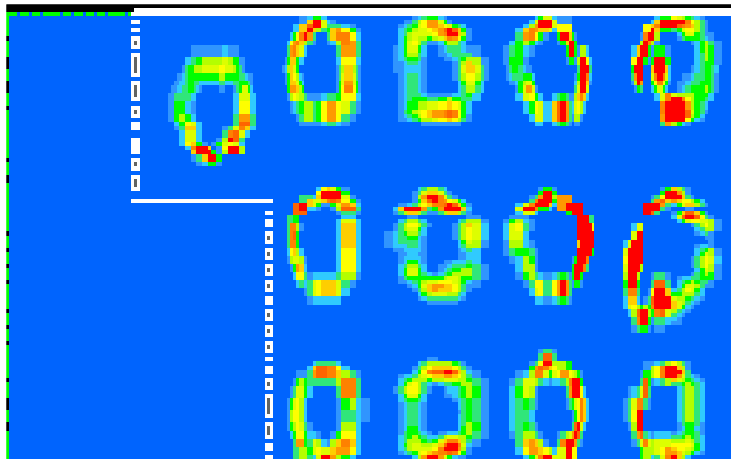


圖 4.5 在門開啟狀態下強制通風(40 sec)環狀噴頭作動之抑制模擬

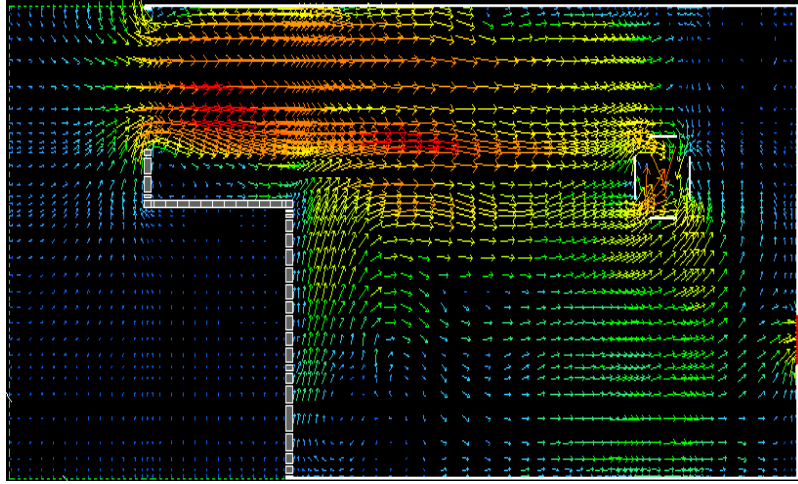


圖 4.6 門開啟強制通風 40 sec 時， $Y=0.4$ 流場速度向量圖

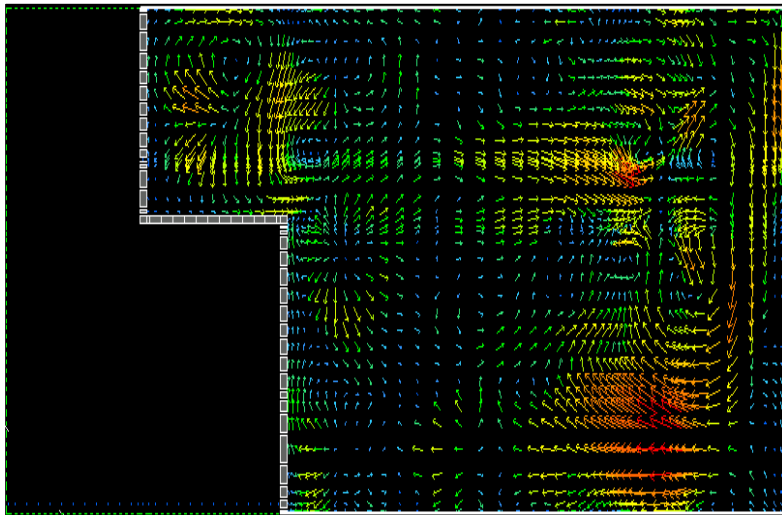


圖 4.7 門開啟強制通風 40 sec 時， $Y=1.8$ 流場速度向量圖

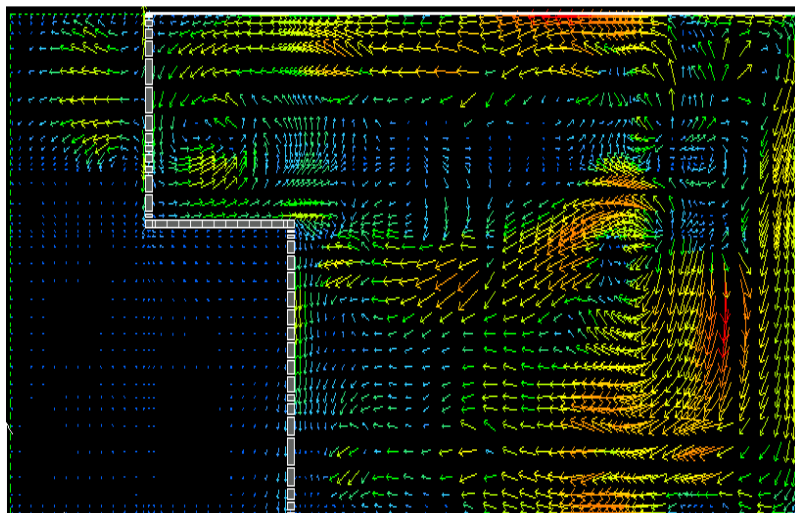


圖 4.8 門開啟強制通風 40 sec 時， $Y=2.45$ 流場速度向量圖

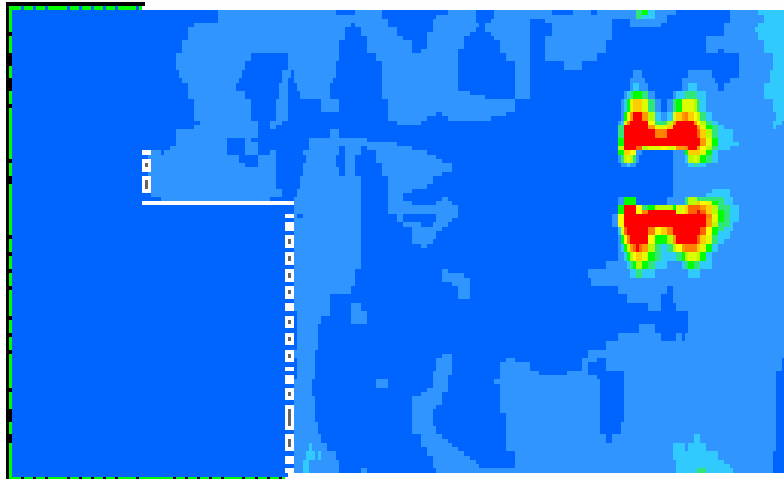


圖 4.9 門開啟強制通風 40 sec 時，Y=1.0063 溫度切面圖

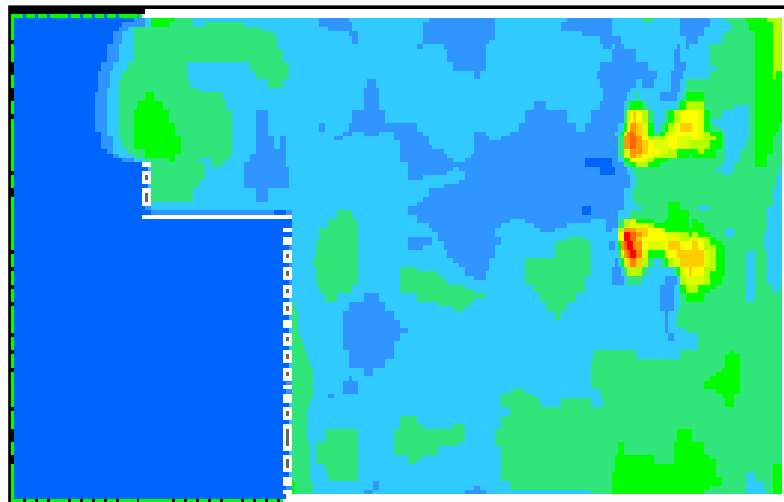


圖 4.10 門開啟強制通風 40 sec 時，Y=1.9373 溫度切面圖

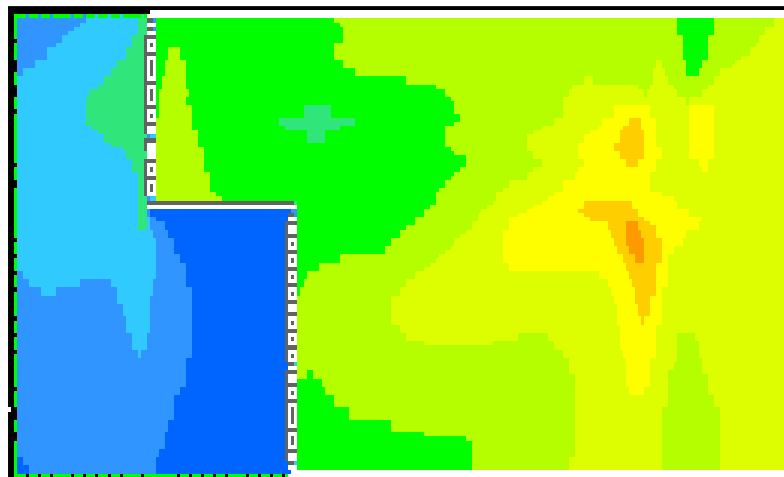


圖 4.11 門開啟強制通風 40 sec 時，Y=3.875 溫度切面圖

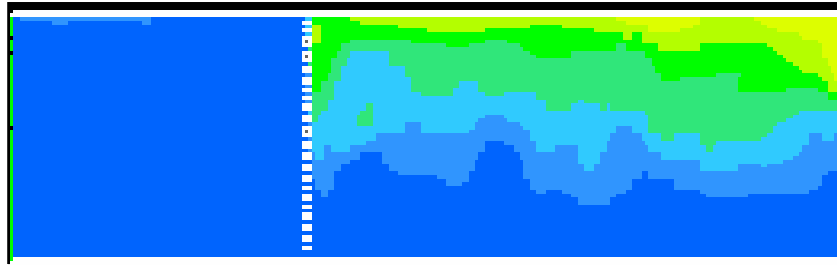


圖 4.12 門開啟強制通風 40 sec 時， $Z=0.9575$ 溫度切面圖

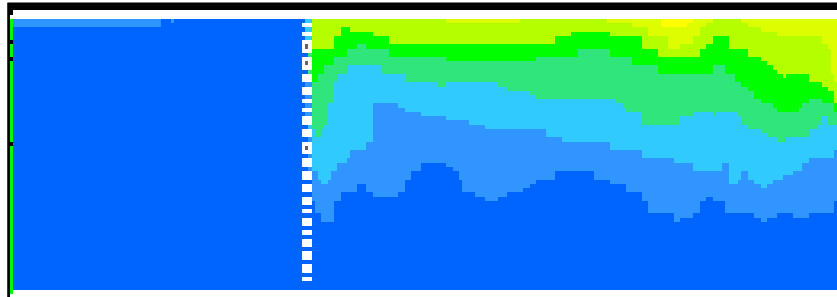


圖 4.13 門開啟強制通風 40 sec 時， $Z=1.4500$ 溫度切面圖

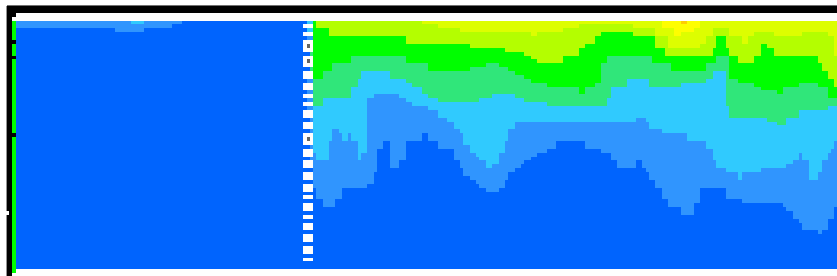


圖 4.14 門開啟強制通風 40 sec 時， $Z=1.9500$ 溫度切面圖

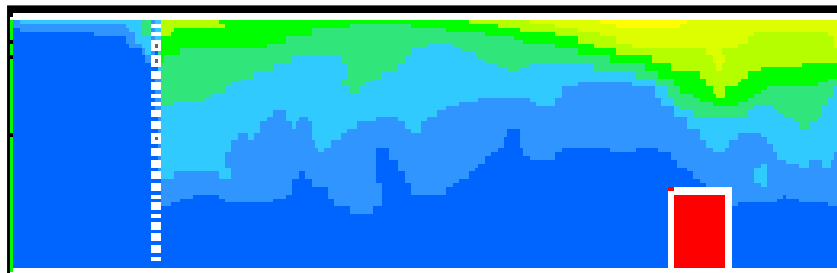


圖 4.15 門開啟強制通風 40 sec 時， $Z=3.0475$ 溫度切面圖

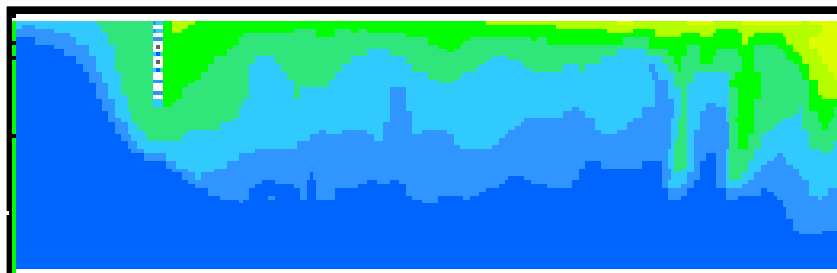


圖 4.16 門開啟強制通風 40 sec 時， $Z=4.0150$ 溫度切面圖

4.1.6.4(b) 強制通風狀態下門關閉之數值模擬分析結果(40 sec)

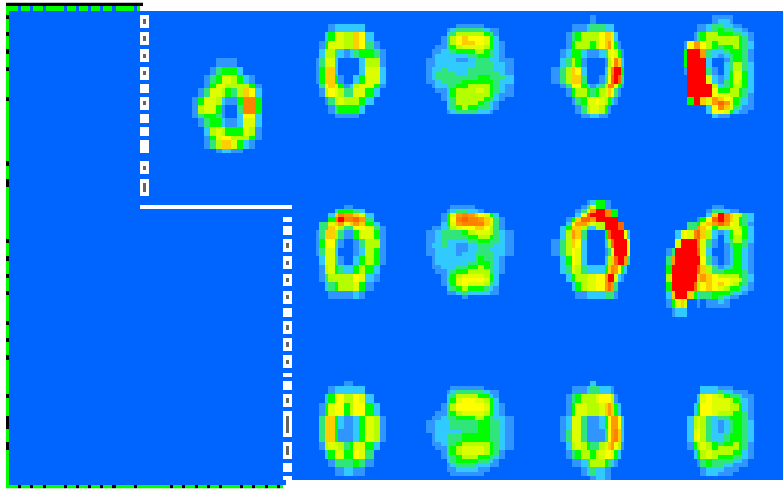


圖 4.17 在門關閉狀態下強制通風(40 sec)環狀噴頭作動之抑制模擬

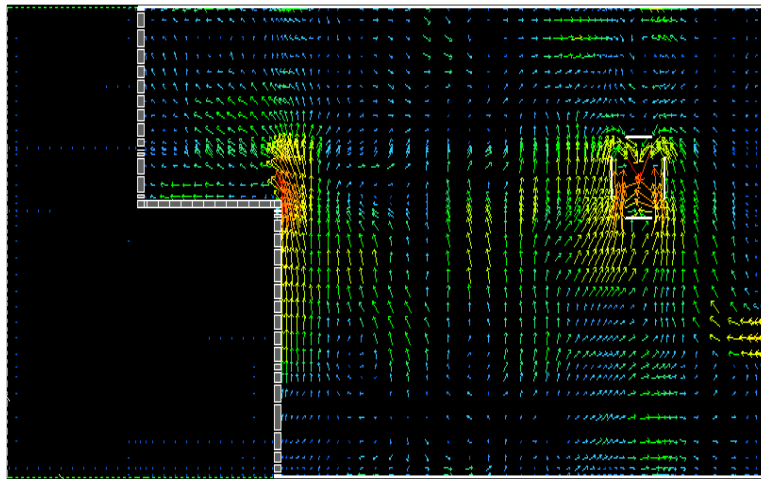


圖 4.18 門關閉強制通風 40 sec 時，Y=0.4 流場速度向量圖

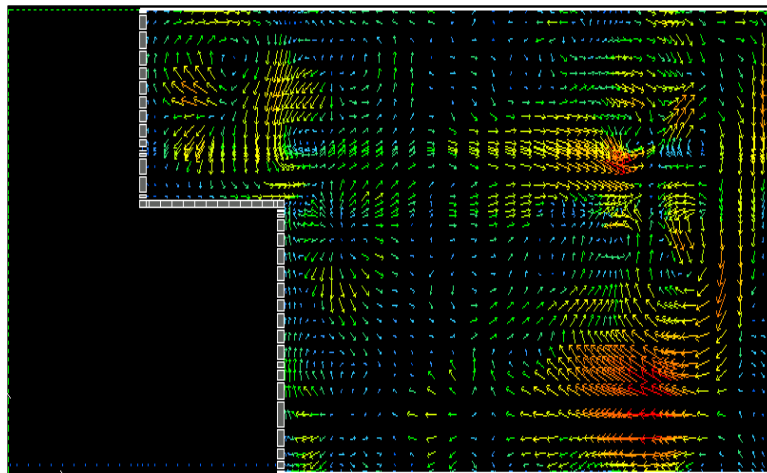


圖 4.19 門關閉強制通風 40 sec 時，Y=1.8 流場速度向量圖

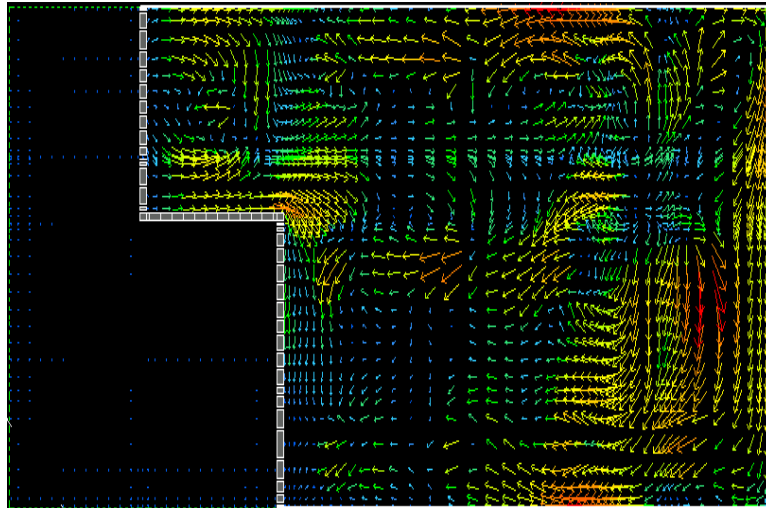


圖 4.20 門關閉強制通風 40 sec 時，Y=2.45 流場速度向量圖

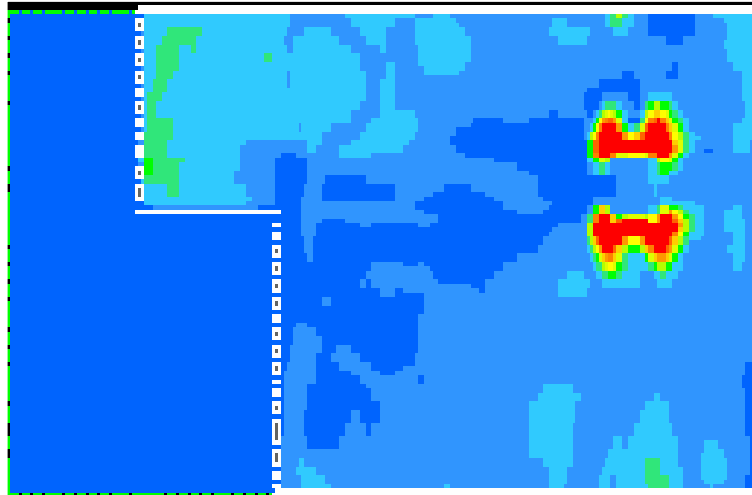


圖 4.21 門關閉強制通風 40 sec 時，Y=1.0063 溫度切面圖

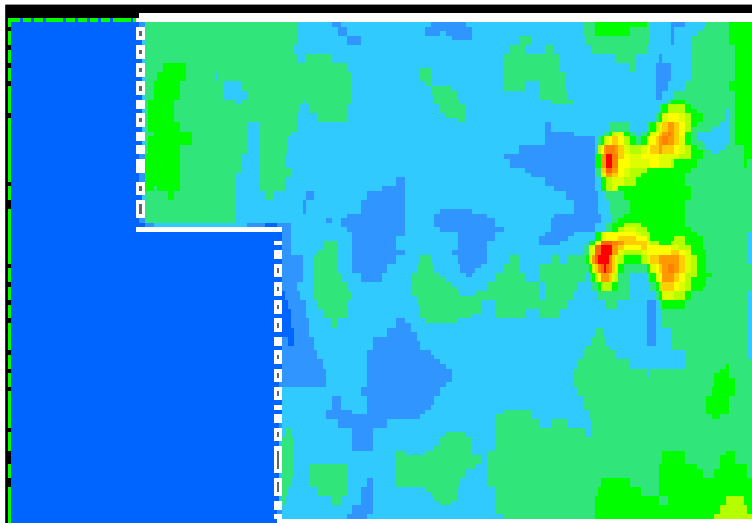


圖 4.22 門關閉強制通風 40 sec 時，Y=1.9373 溫度切面圖

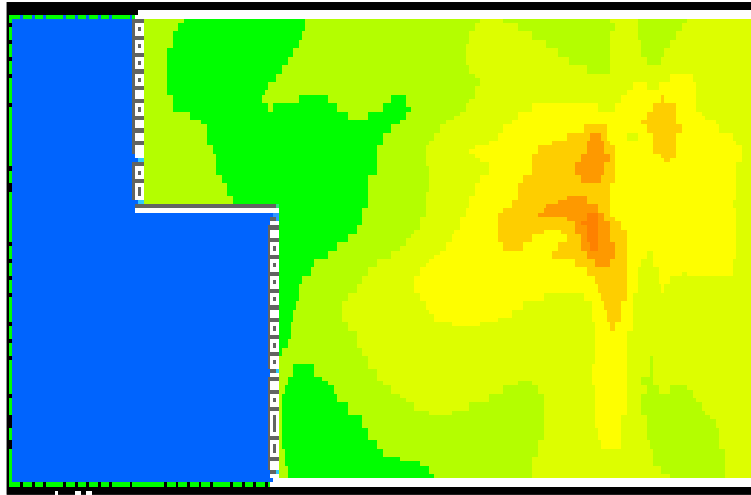


圖 4.23 門關閉強制通風 40 sec 時， $Y=2.875$ 溫度切面圖

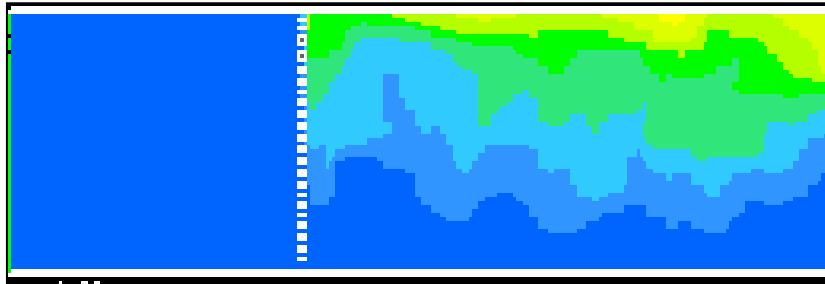


圖 4.24 門關閉強制通風 40 sec 時， $Z=0.9575$ 溫度切面圖

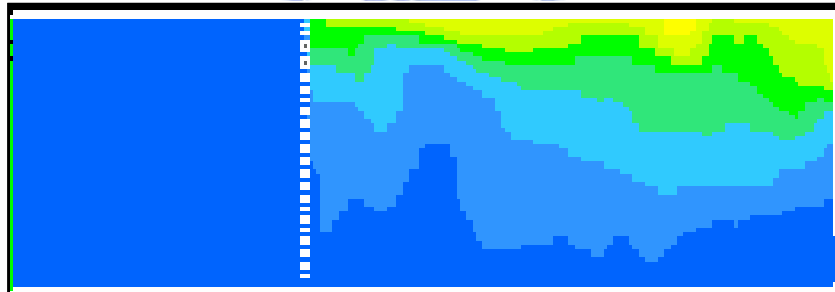


圖 4.25 門關閉強制通風 40 sec 時， $Z=1.4500$ 溫度切面圖

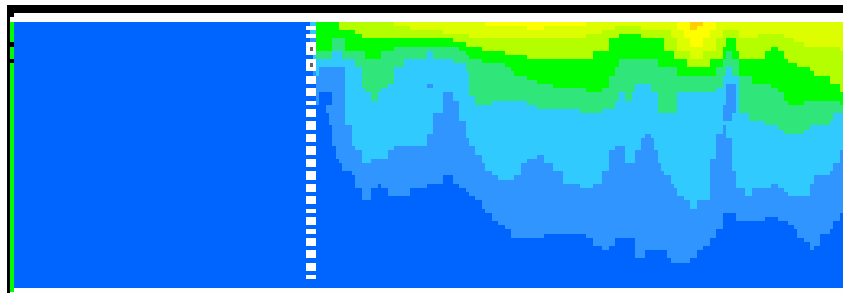


圖 4.26 門關閉強制通風 40 sec 時， $Z=1.9500$ 溫度切面圖

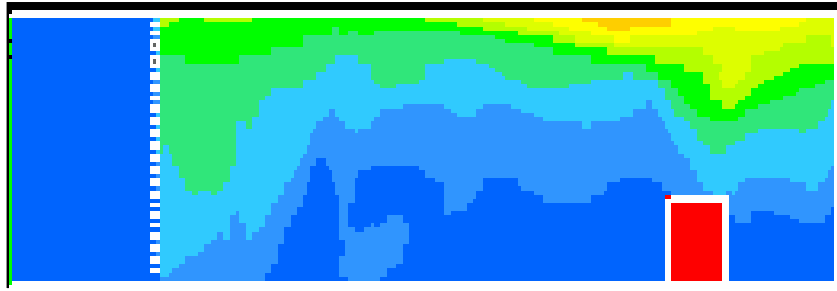


圖 4.27 門關閉強制通風 40 sec 時， $Z=3.0475$ 溫度切面圖

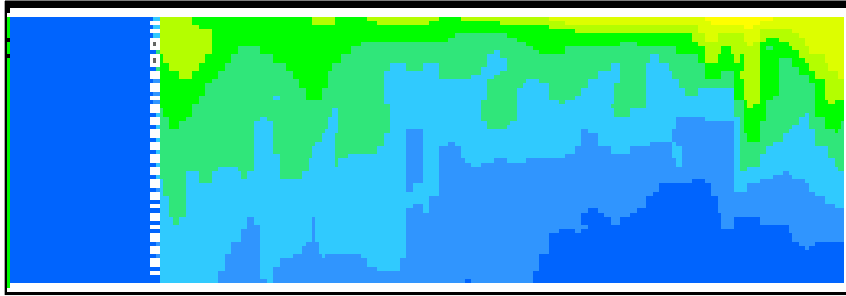


圖 4.28 門關閉強制通風 40 sec 時， $Z=4.0150$ 溫度切面圖

4.1.6.5 (a) 強制通風狀態下門開啟之數值模擬分析結果(60 sec)

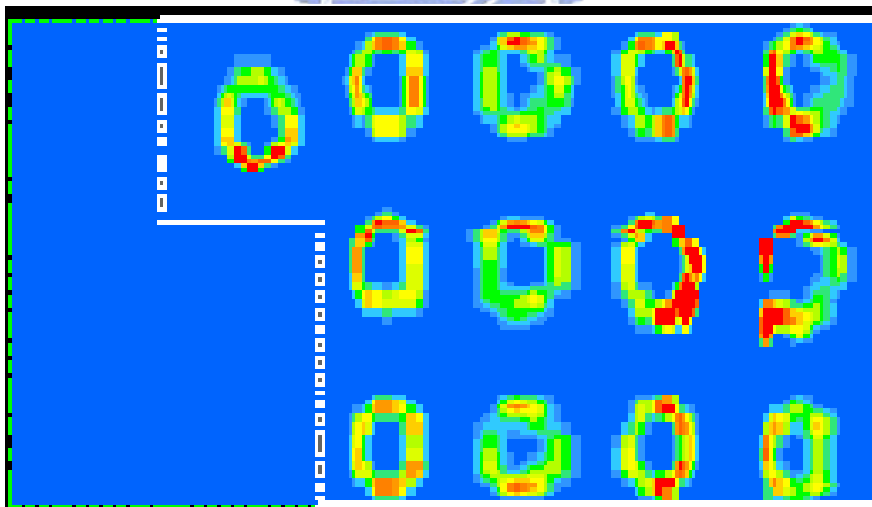


圖 4.29 在門開啟狀態下強制通風(60 sec)環狀噴頭作動之抑制模擬

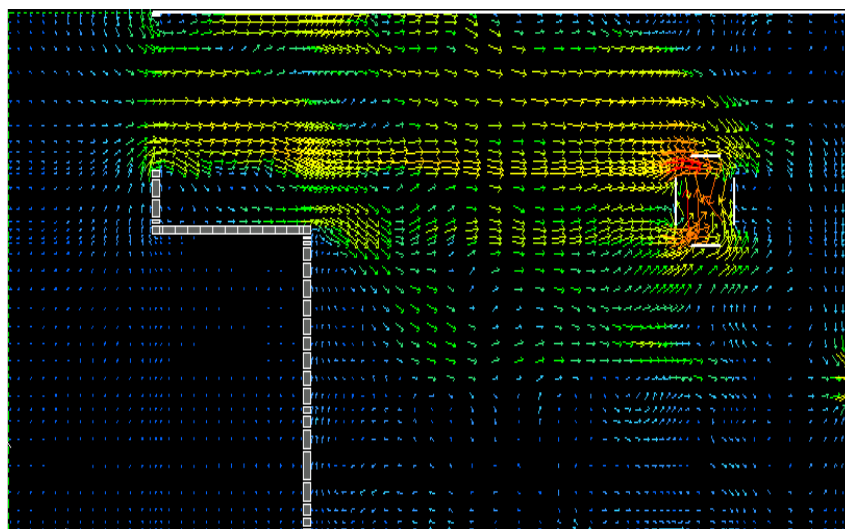


圖 4.30 門開啟強制通風 60 sec 時， $Y=0.4$ 流場速度向量圖

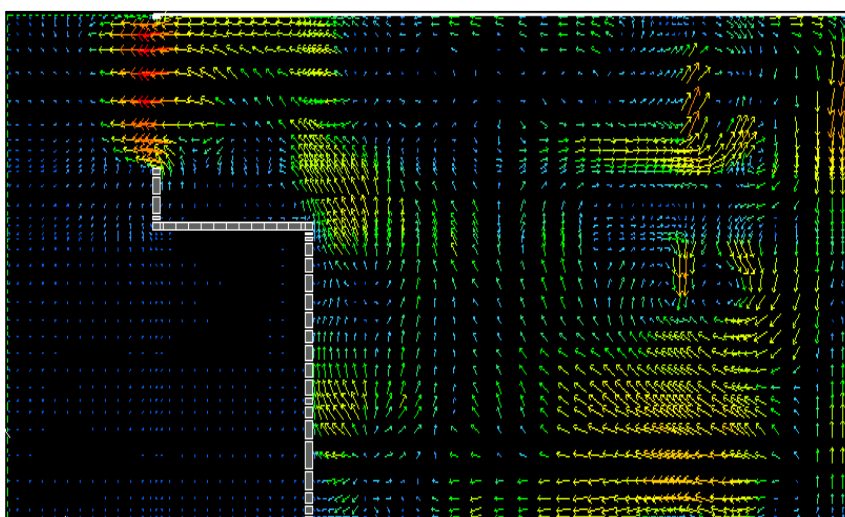


圖 4.31 門開啟強制通風 60 sec 時， $Y=1.8$ 流場速度向量圖

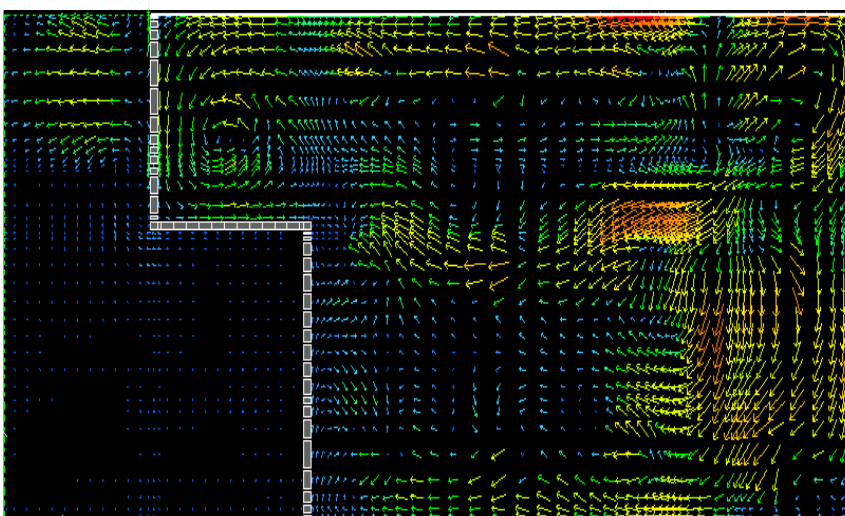


圖 4.32 門開啟強制通風 60 sec 時， $Y=2.45$ 流場速度向量圖

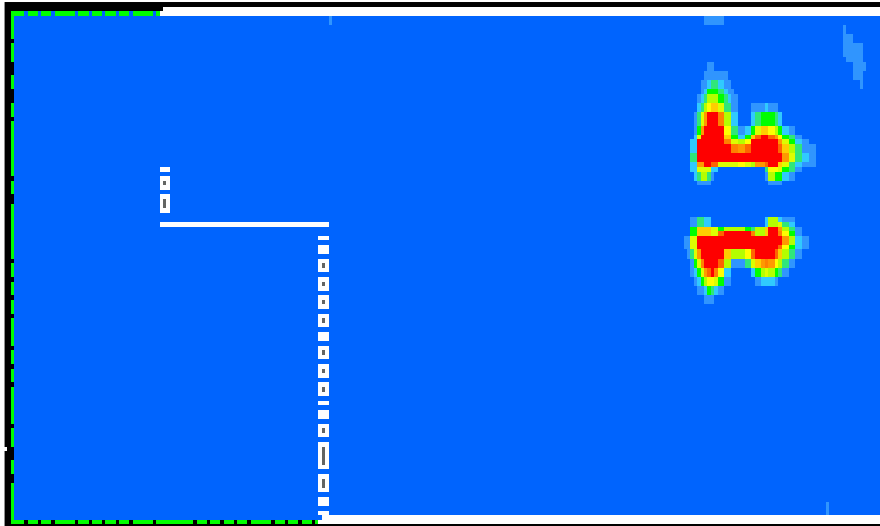


圖 4.33 門開啟強制通風 60 sec 時，Y=1.0063 溫度切面圖

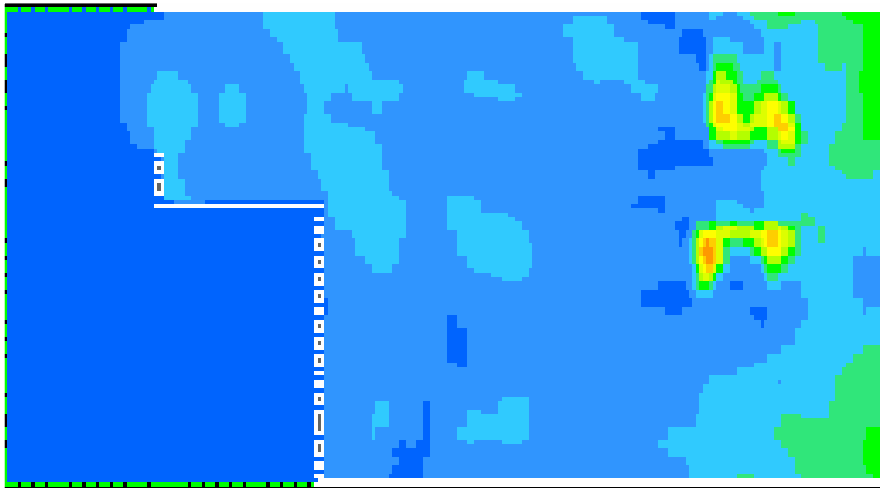


圖 4.34 門開啟強制通風 60 sec 時，Y=1.9373 溫度切面圖

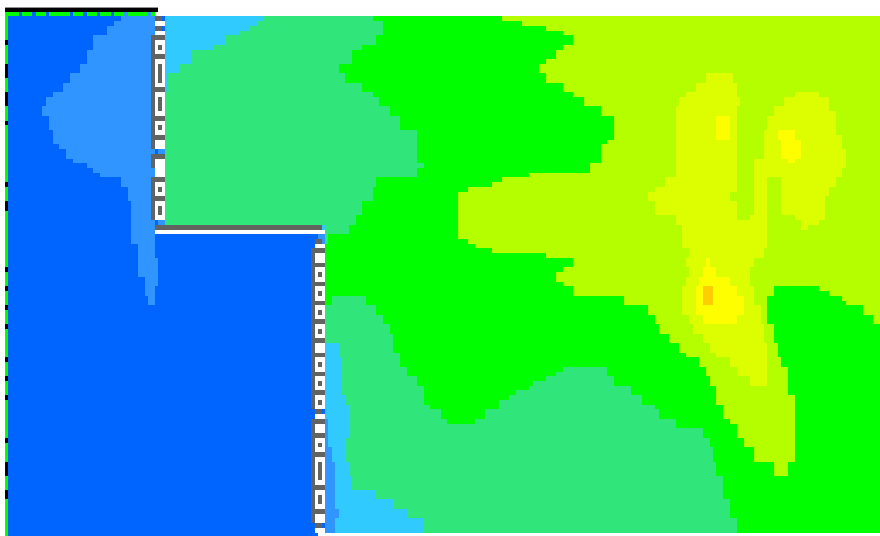


圖 4.35 門開啟強制通風 60 sec 時，Y=2.875 溫度切面圖

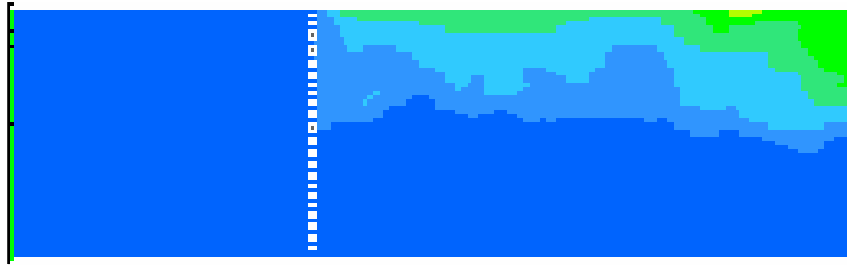


圖 4.36 門開啟強制通風 60 sec 時， $Z=0.9575$ 溫度切面圖

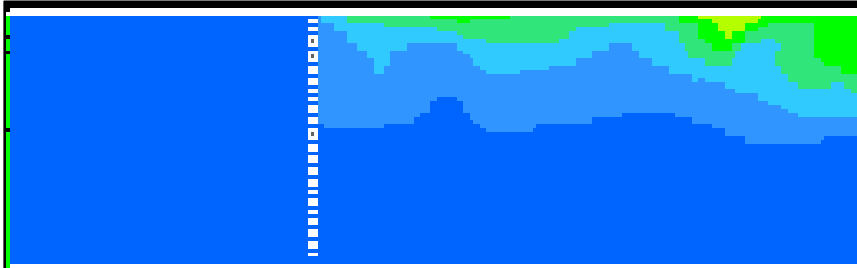


圖 4.37 門開啟強制通風 60 sec 時， $Z=1.4500$ 溫度切面圖

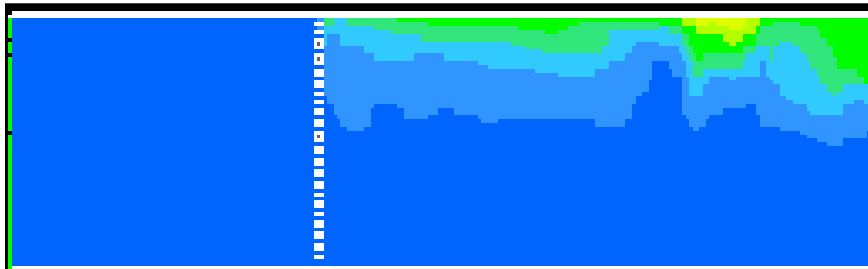


圖 4.38 門開啟強制通風 60 sec 時， $Z=1.9500$ 溫度切面圖

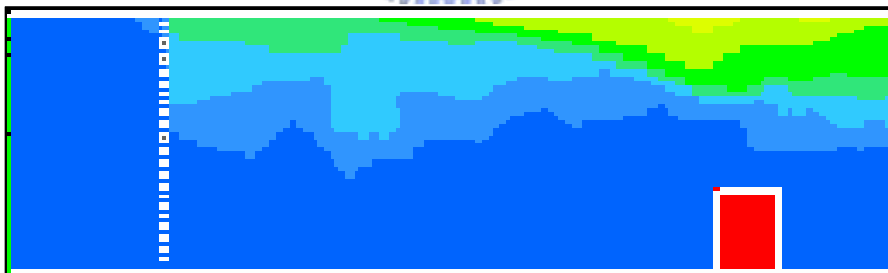


圖 4.39 門開啟強制通風 60 sec 時， $Z=3.0475$ 溫度切面圖

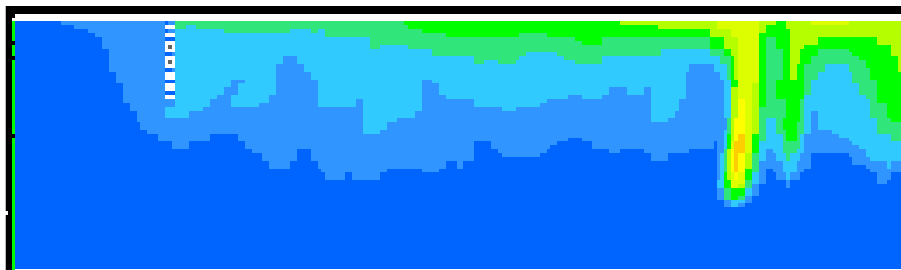


圖 4.40 門開啟強制通風 60 sec 時， $Z=4.0150$ 溫度切面圖

4.1.6.5 (b)強制通風狀態下門關閉之數值模擬分析結果(60 sec)

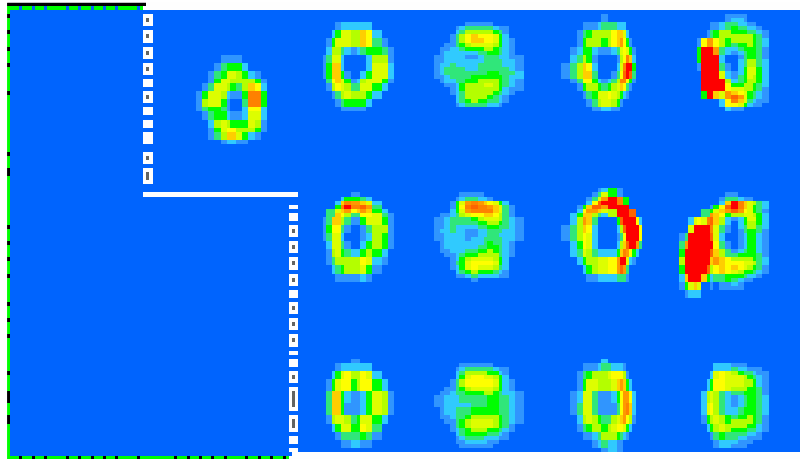


圖 4.41 在門關閉狀態下強制通風(60 sec)環狀噴頭作動之抑制模擬

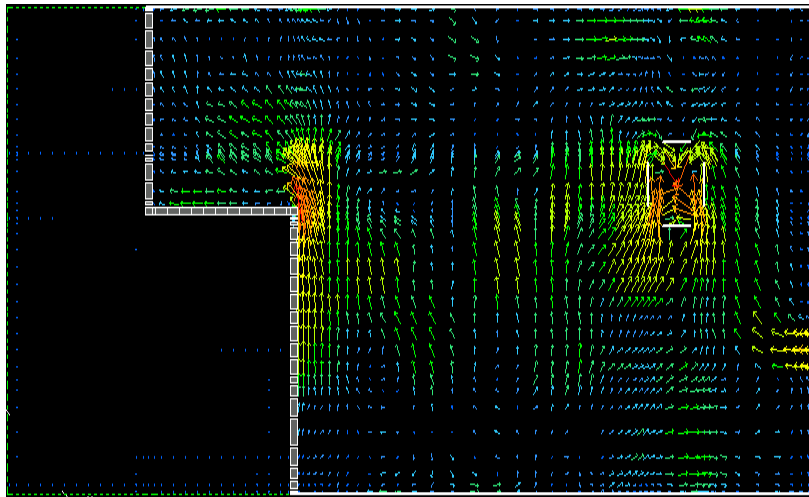


圖 4.42 門關閉強制通風 60 sec 時，Y=0.4 流場速度向量圖

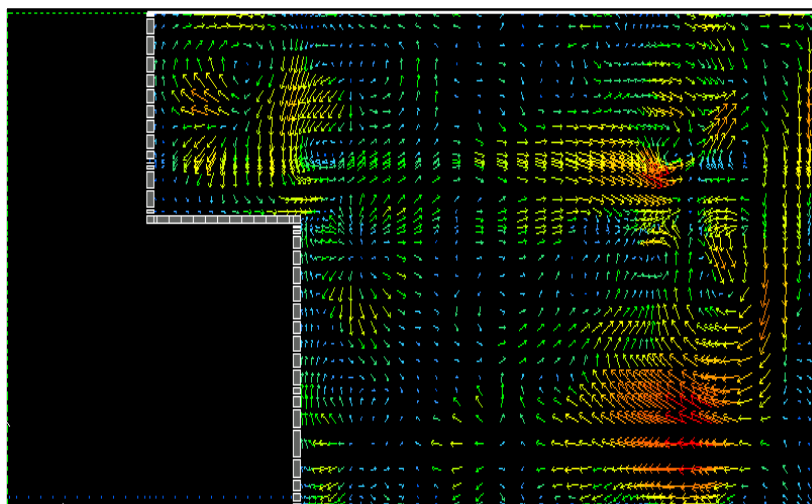


圖 4.43 門關閉強制通風 60 sec 時，Y=1.8 流場速度向量圖

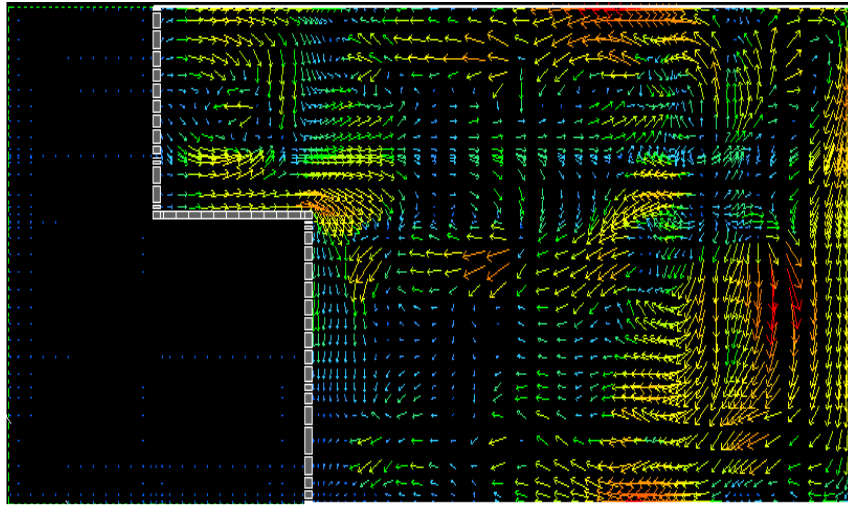


圖 4.44 門關閉強制通風 60 sec 時， $Y=2.45$ 流場速度向量圖

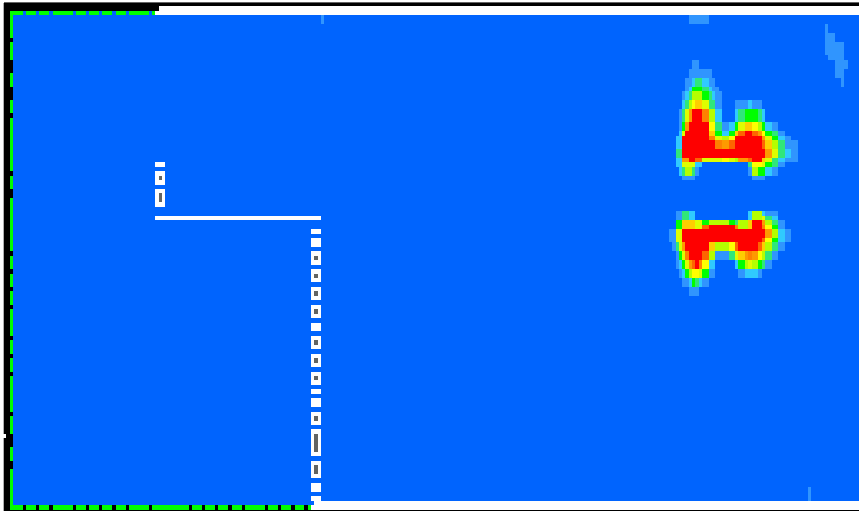


圖 4.45 門關閉強制通風 60 sec 時， $Y=1.0063$ 溫度切面圖

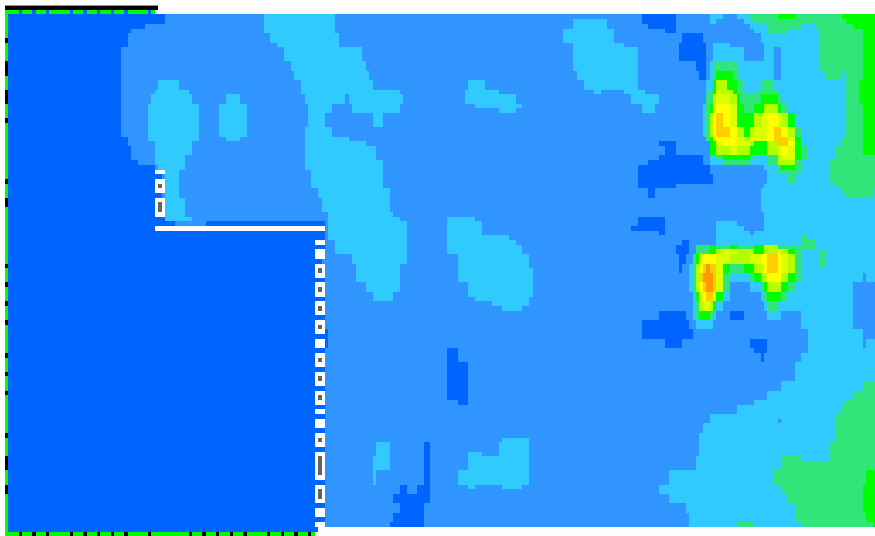


圖 4.46 門關閉強制通風 60 sec 時， $Y=1.9373$ 溫度切面圖

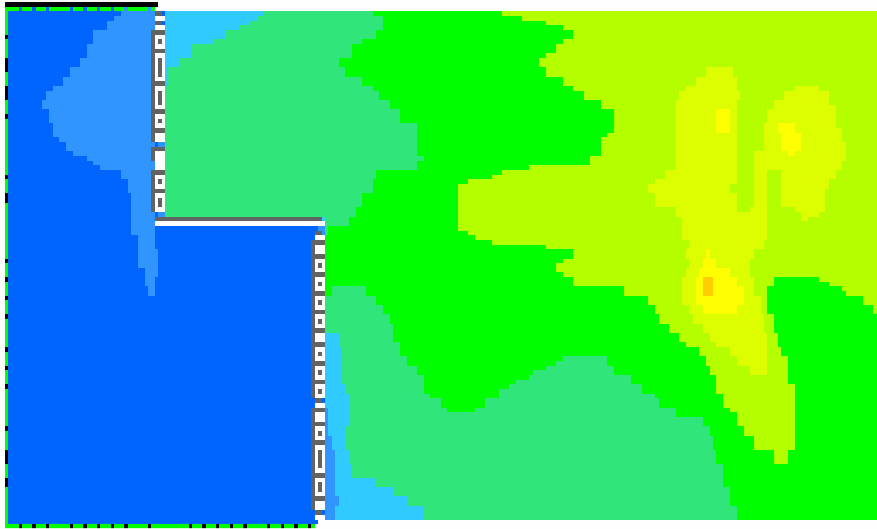


圖 4.47 門關閉強制通風 60 sec 時，Y=2.875 溫度切面圖

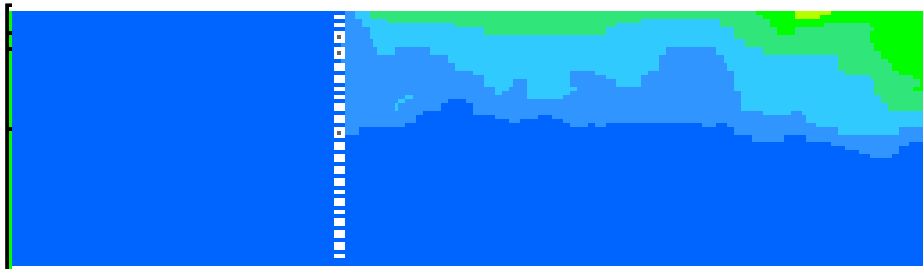


圖 4.48 門關閉強制通風 60 sec 時，Z=0.9575 溫度切面圖

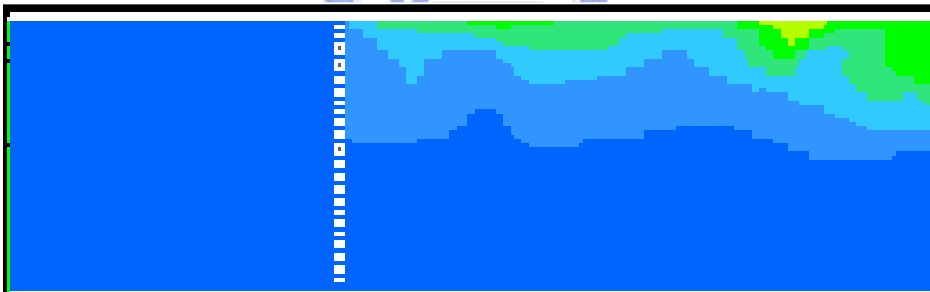


圖 4.49 門關閉強制通風 60 sec 時，Z= 1.4500 溫度切面圖

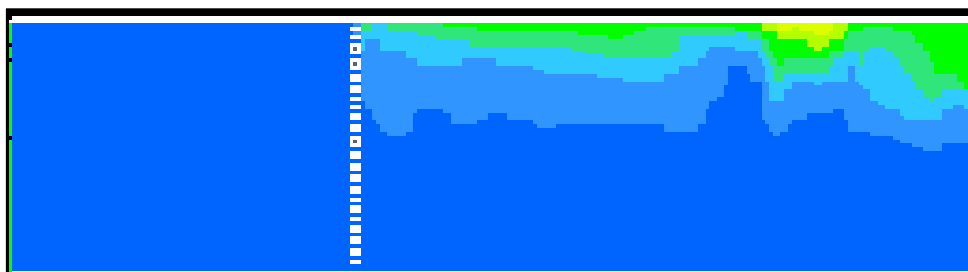


圖 4.50 門關閉強制通風 60 sec 時，Z=1.9500 溫度切面圖

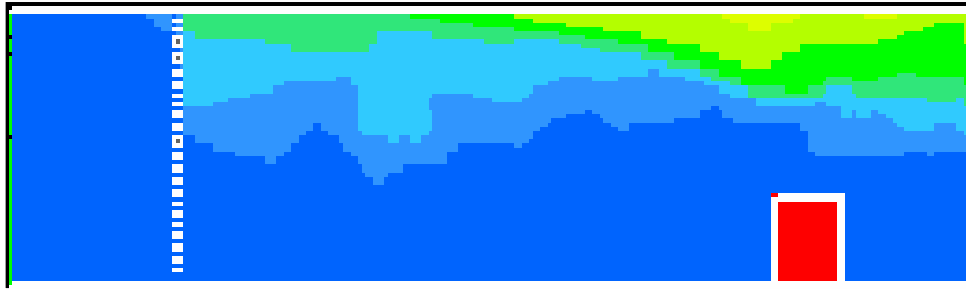


圖 4.51 門關閉強制通風 60 sec 時， $Z=3.0475$ 溫度切面圖

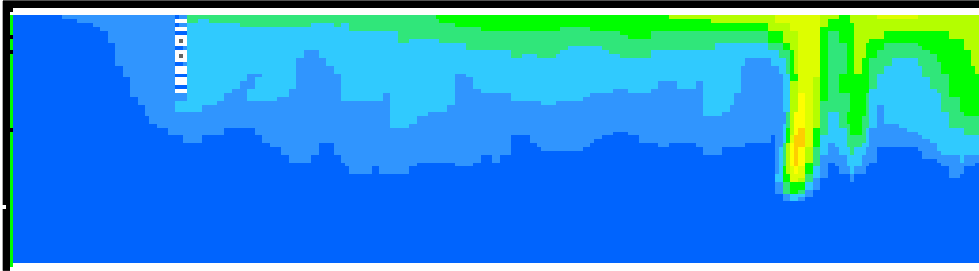


圖 4.52 門關閉強制通風 60 sec 時， $Z=4.0150$ 溫度切面圖

4.1.7 區劃空間細水霧滅火效能評估結論

1. 細水霧系統在沒有通風的狀態下，能在幾分鐘之內就能快速撲滅火災，其效能遠優於海龍氣體替代物。
2. 若在區劃空間內使用全區放射系統，一但偵測啟動，細水霧滅火系統均能同時作動並在瞬間大幅降低區劃內之溫度，並撲滅火災。
3. 在區劃空間沒有通風狀態下使用細水霧系統而言，對於大型火災滅火遠比小型火災較快撲滅。
4. 在有自然通風狀態下區劃空間使用閃火點較低之易燃性液態燃料，因有新鮮空氣流入導致復燃及再閃燃可能性極高，故不易撲滅。
5. 在本論文探討情境中，安裝在區劃空間內小型且具有高動量之細水霧系統對處理受阻礙或無阻礙的 B 類火災，具有非常優異的滅火效能。
6. 區劃空間中大型通風開口會大幅的降低細水霧系統之滅火效

能，探討其發生原因有三，分別為通風造成大量的氣霧隨流場移動無法到達火源、水蒸氣的產生、氧氣持續的供應等。

7. 在有強制增加空氣對流的區劃空間使用時，若能提高細水霧氣霧釋放速率，將會更有效的撲滅火災。而在區劃空間中有阻礙的火勢中，提高氣霧釋放速率對增加滅火效能的影響則非常有限。
8. 細水霧系統在區劃空間有強制對流環境且相同的熱釋放速率條件下，油盤火災遠比外洩噴濺型火災難以抑制。
9. 細水霧系統撲滅在區劃空間有阻礙火災所須之抑制時間長短和火勢大小有關，其主因為火場氧氣濃度低於臨界值之關係。
10. 當區劃空間有強制對流的狀態時，細水霧液滴會沿著對流流場軌跡運動；此時，水霧液滴會從火燄中吸收熱量並在流場中產生水蒸氣，而降低煙層的浮力；妨礙區劃空間內排煙及人員避難逃生，此一作用值得我們再進一步研究討論。



4.2 機械空間內細水霧滅火效能評估

4.2.1 執行緣由與目的

在論文本章的探討中，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。而在火源規劃部分，在本章的探討中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 4.53。

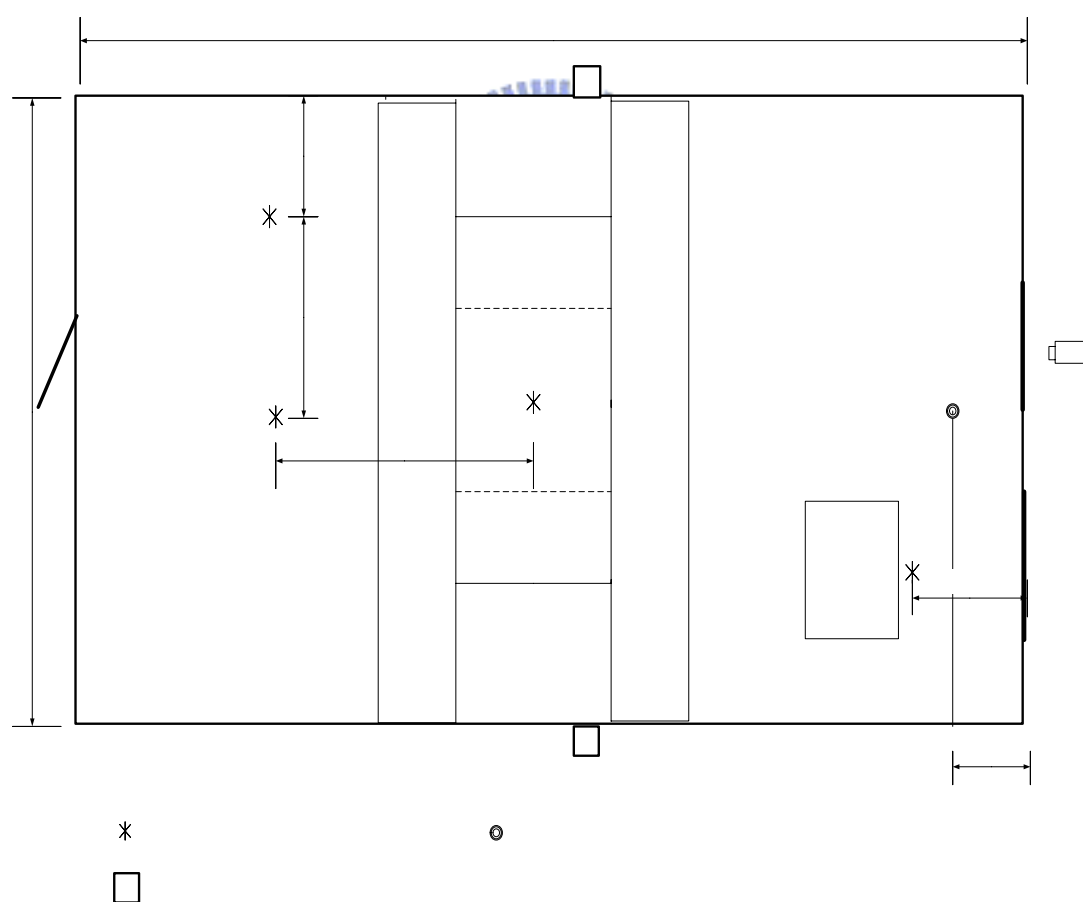


圖 4.53 機械空間火災情境模擬測試圖

4.2.2 模擬對象說明

本節的實驗中將火源分為有遮蔽火源以及無遮蔽兩種火源。在遮蔽火源實驗部分，將防護方式分為：無任何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，使用 4 顆高壓細水霧噴頭之防護方式進行測試，另外在無遮蔽火災實驗中，我們目前主要是探討高壓細水霧的滅火性能在該實驗的測試條件下，所需的滅火時間是否會受到遮遮物體的影響。在本章中所用的測試空間為一 6.1m x 3.5m，高度 2.9m 的矩形空間。測試空間門口大小 1.35 m x 0.5 m，在門口的對面有一 0.75m x 0.5m 方形透明玻璃窗作為觀察的途徑 (Viewing Window)。而本實驗用的測試空間同時裝設有兩個 80.0 cm x 60.0 cm 的排風口，其相關位置可參考圖 4.54。

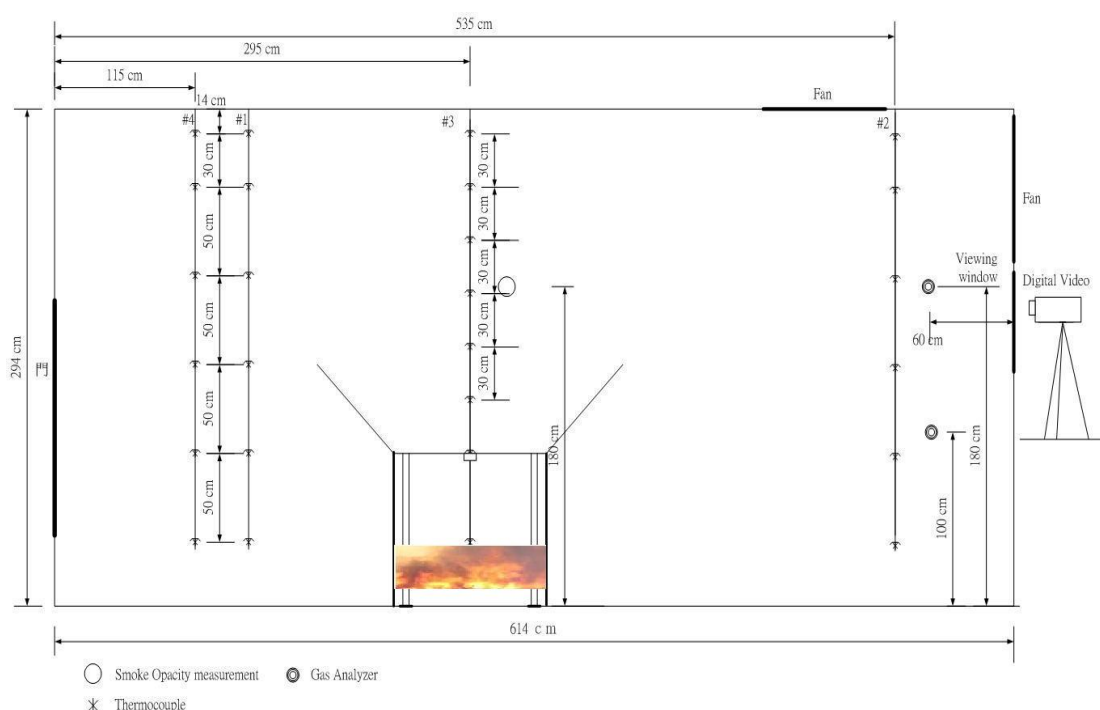


圖 4.54、機械空間細水霧滅火系統測試區劃說明圖

4.2.3 動力引擎模擬平台說明

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 4.55)

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，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 $0.7\text{ m}\times 3.40\text{ m}\times 3.0\text{ mm}$ 。另外，根據 FMRC 規範，在水平板較長的兩側，均設有一 $0.5\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 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。

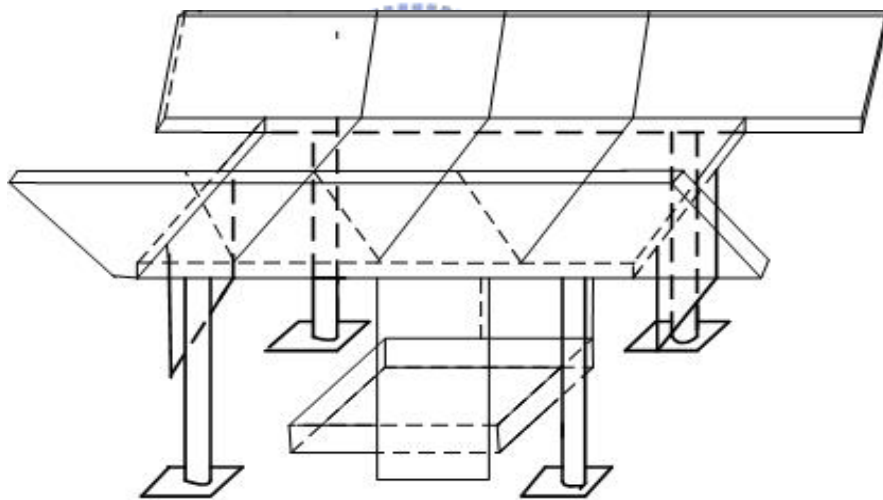


圖 4.55、動力引擎模擬平台簡圖

4.2.4 機械空間細水霧滅火測試說明

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在高壓細水霧系統滅火測試中，防護系統為 4 顆向下防護的高壓噴頭，如圖 4.56 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。關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 。

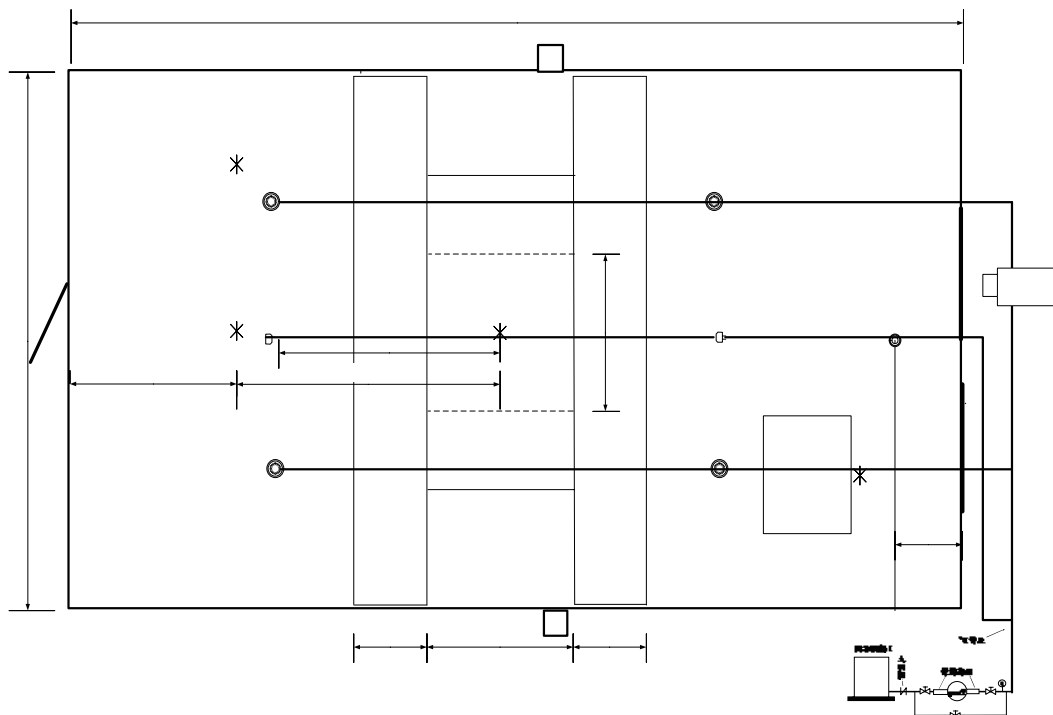


圖 4.56、高壓細水霧滅火防護測試實驗噴頭位置簡圖

4.2.5 實驗結果討論

本實驗結果主要是依據 FMRC 對機械空間的測試要求，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 。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。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，進行四顆高壓細水霧噴頭滅火性能測試，在此，先對平均細水霧密度（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：

$$W_d = \frac{W_t}{A_c} (L/m^2 \cdot \text{min})$$

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。

4.2.5(a)有遮蔽火源實驗

在高壓細水霧實驗中，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，4 顆高壓細水霧噴頭滅火所需時間為 73 秒。因此，我們可以知道 4 顆高壓細水霧噴頭實驗中，滅火所需的水量為 25.01 升。結果顯示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。故此，如果在實驗時若增加了細水霧噴頭的數量，便可大大的減少了所需的用水量。因此，在四顆高壓細水霧噴頭防護情況下，它的性能仍然可以被機械空間內

滅火所接受。

圖 4.57 到圖 4.60 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，由 4 顆高壓細水霧頭實驗顯示，當防護系統作動時，測試空間內的氣體溫度並不會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。

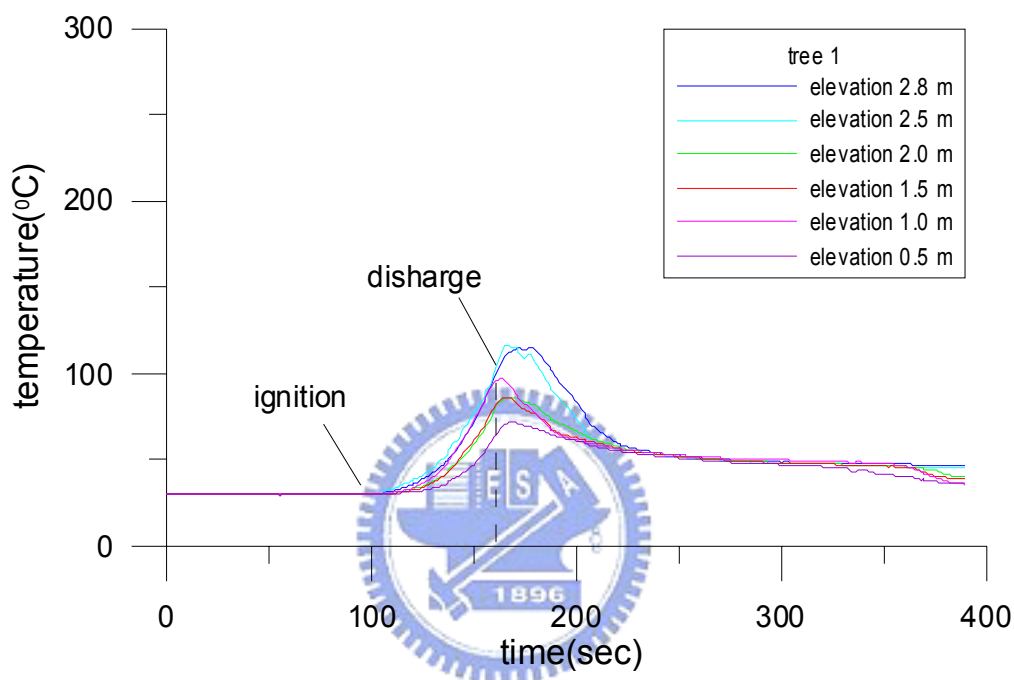


圖 4.57、四顆高壓細水霧噴頭下,熱電偶樹編號#1 量測到的溫度圖

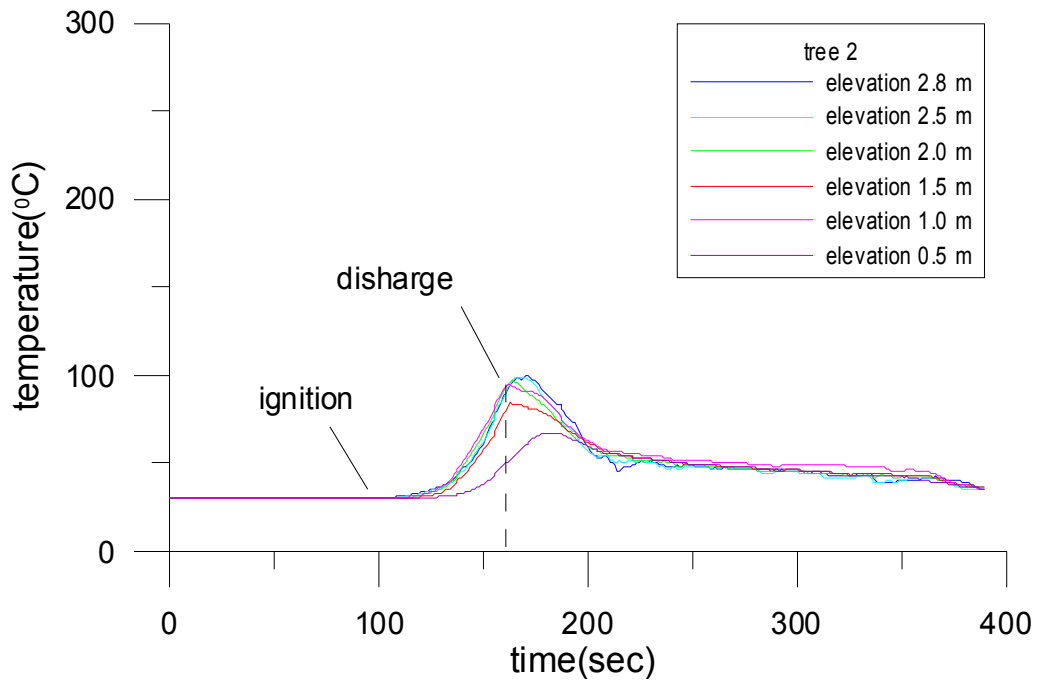


圖 4.58、四顆高壓細水霧噴頭實下,熱電偶樹編號#2 量測到的溫度圖

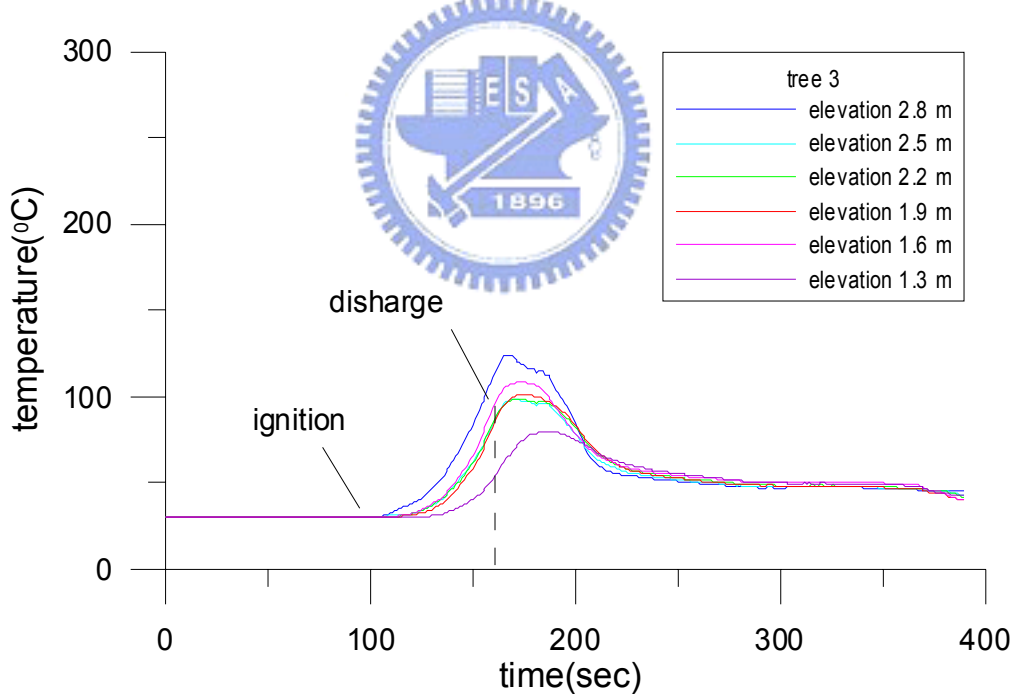


圖 4.59、四顆高壓細水霧噴頭下,熱電偶樹編號#3 量測到的溫度圖

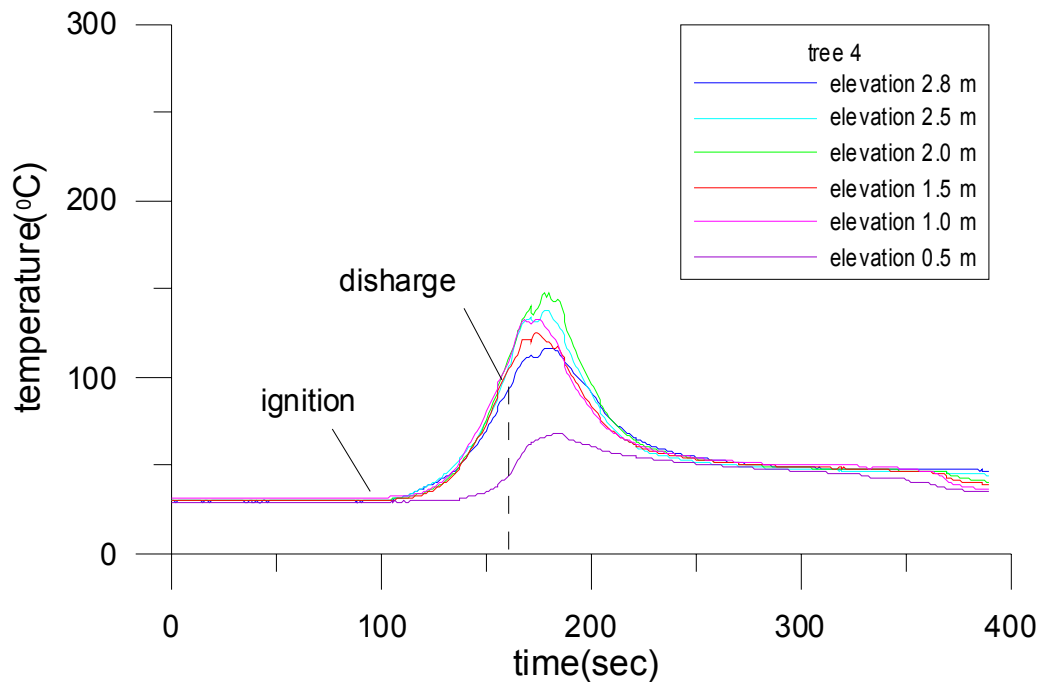


圖 4.60、四顆高壓細水霧噴頭下,熱電偶樹編號#4 量測到的溫度圖

4.2.5(b)無遮蔽火源實驗

在無遮蔽的(Unshielded)油池火災測試系列中,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。圖 4.61 到圖 4.64 分別為在無遮蔽實驗中,4 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。

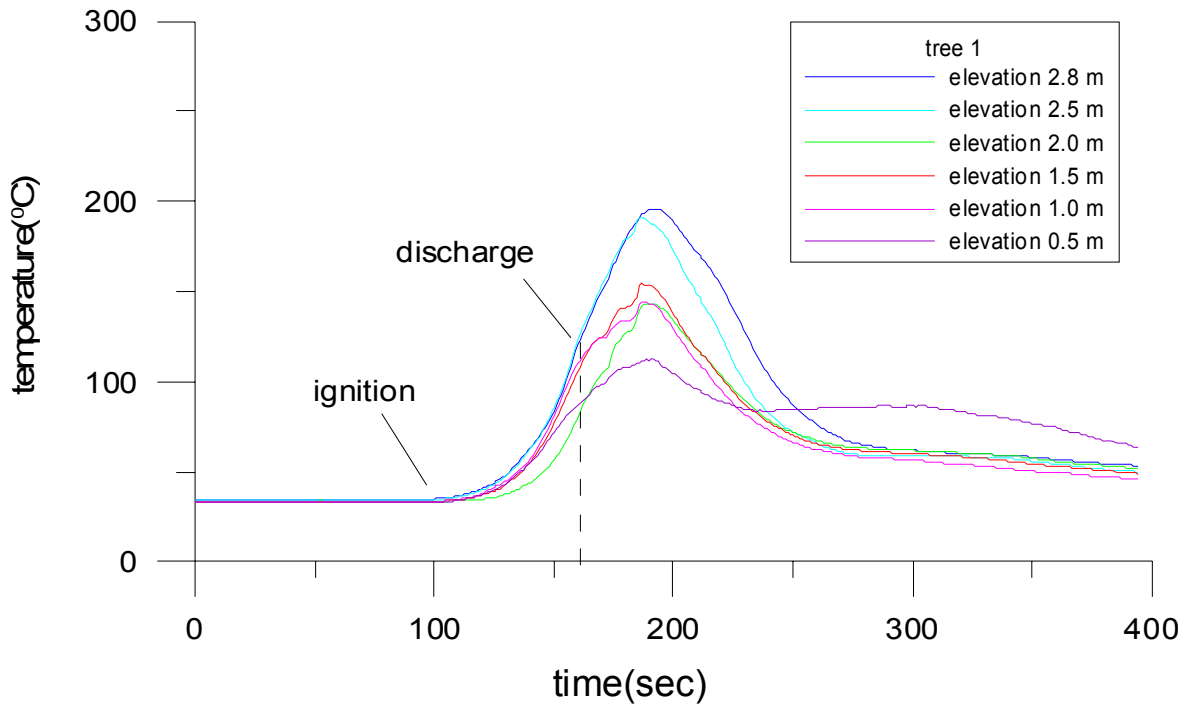


圖 4.61、在無遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#1 量測到的溫度圖

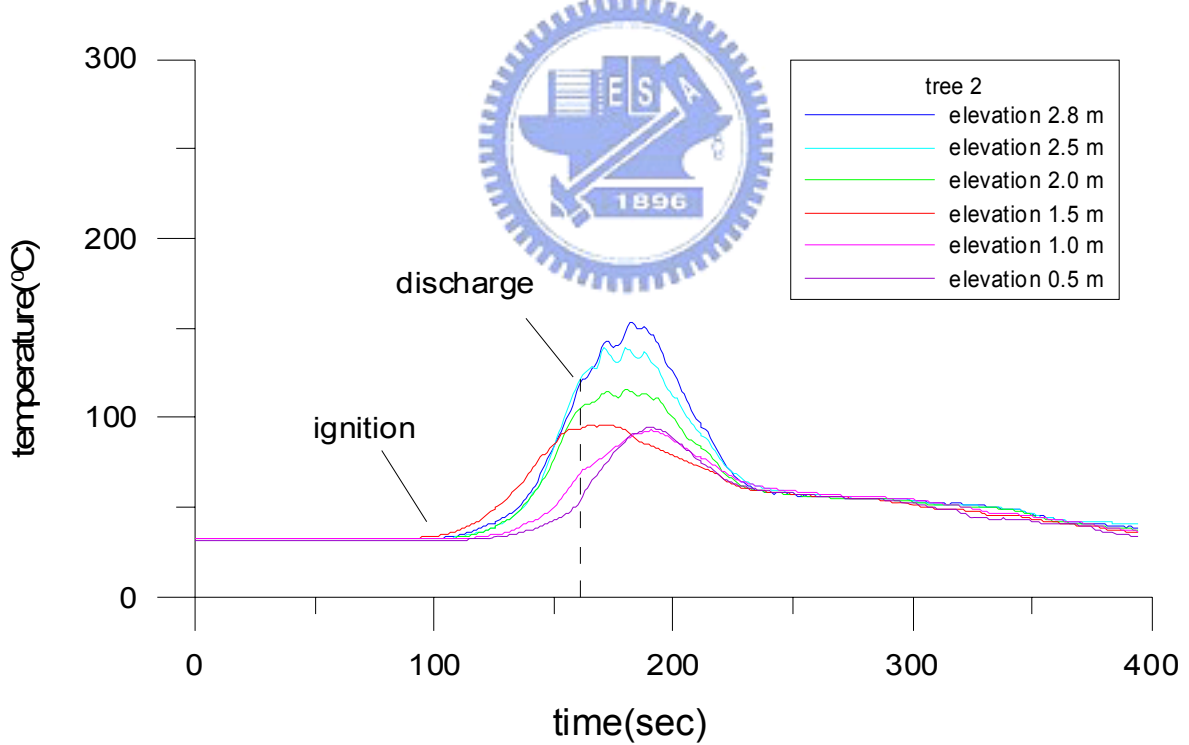


圖 4.62、在無遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#2 量測到的溫度

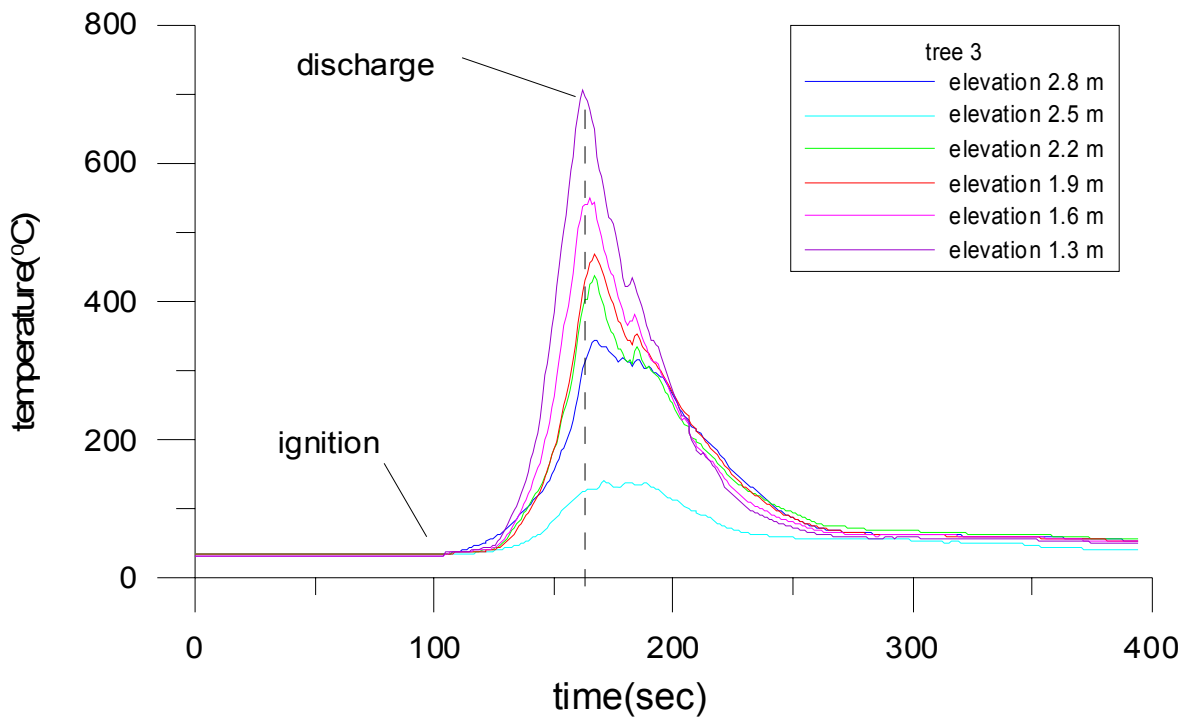


圖 4.63、在無遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#3 量測到的溫度

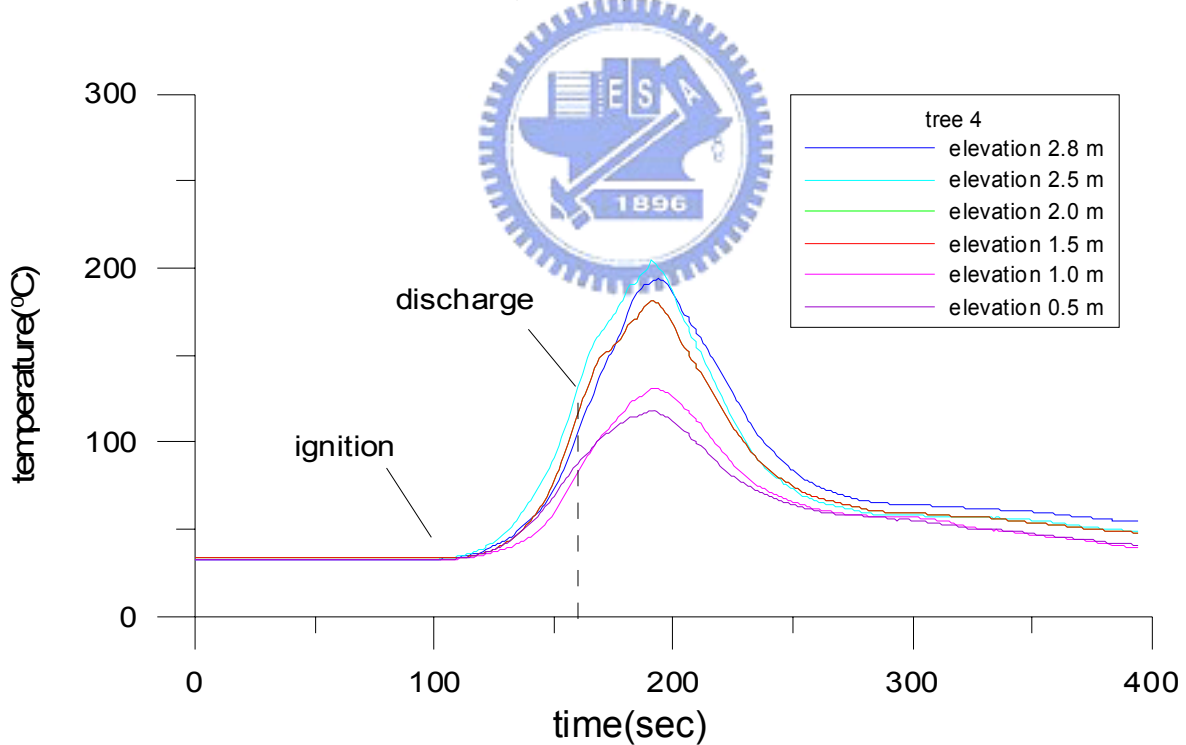


圖 4.64、在無遮蔽火源實驗中,熱電偶樹編號#4 量測到的溫度

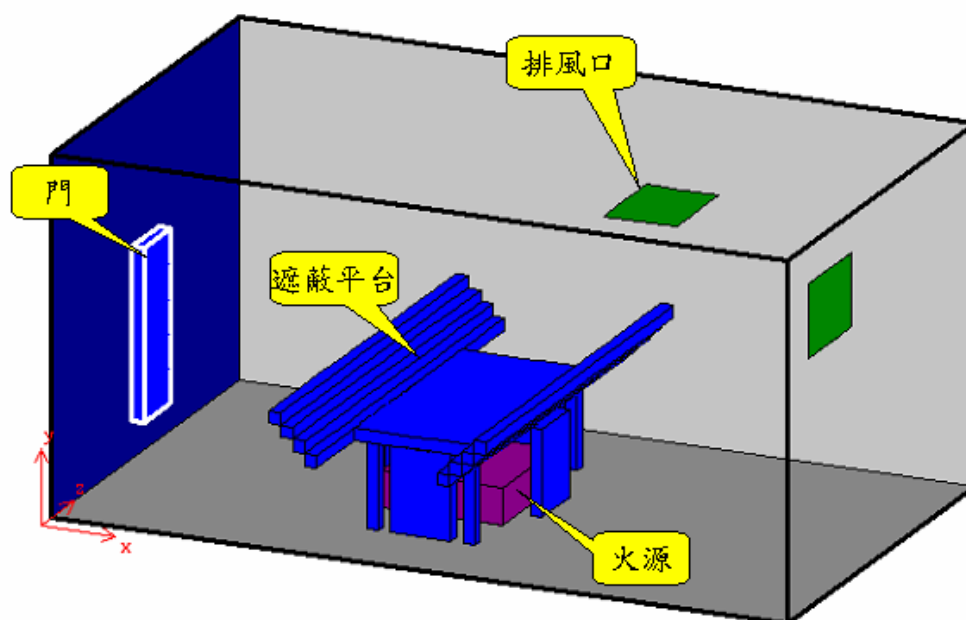
在無遮蔽的油盤實驗中，因為少了遮蔽物的影響，因此，油盤能產生較高的火焰高度（由無遮蔽實驗中的熱電偶編號 #3 量測得到的

溫度可得知)，而在本論文之前的討論中,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。而結果似乎也顯示氣體濃度變化除了與火焰高度有關外，其氣體濃度的增減同時也和火焰本身的溫度也有關係。

4.2.6 模擬結果討論

4.2.6.1 模擬對象說明

本節的模擬對象取材於 FMRC 機械空間裡細水霧滅火系統的滅火效能分析，在測試空間內，設置有一用來模擬動力引擎的金屬平台，故針對前述區劃測試空間以 Firedass 軟體進行細水霧滅火效能分析與驗證。模擬空間為一 6.1m x 3.5m，高度 2.9m 的矩形空間（如圖 4.65 說明）。測試空間門口大小 1.35 m x 0.5 m，在門口的對面有一 0.75m x 0.5m 方形透明玻璃窗作為觀察的途經(Viewing Window)，同時模擬空間同時裝設有兩個 80.0 cm x 60.0 cm 的排風口。



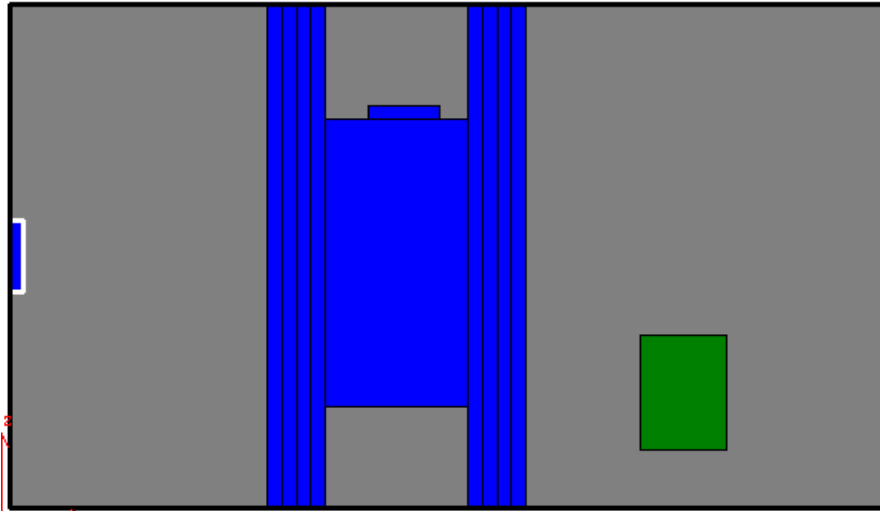


圖 4.65、模擬機械空間細水霧滅火試驗之俯視圖及側視圖

4.2.6.2 模擬結果說明

本次電腦模擬針對探討 4 顆高壓細水霧噴頭在有遮蔽火源實驗與無遮蔽火源實驗下，對於細水霧在流場速度及溫度向量之影響分析，並將模擬結果說明如下：

4.2.6.2(a) 有遮蔽火源實驗模擬

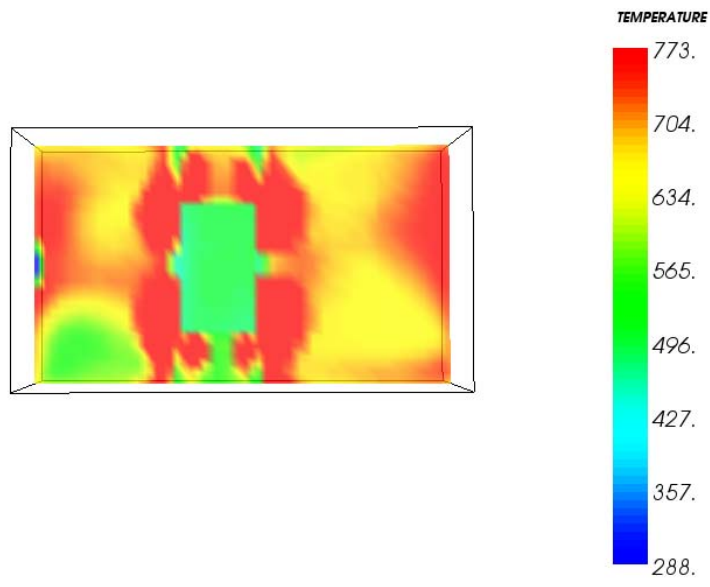


圖 4.66、四顆噴頭有擋板 0.8m 溫度切面圖(60 秒)

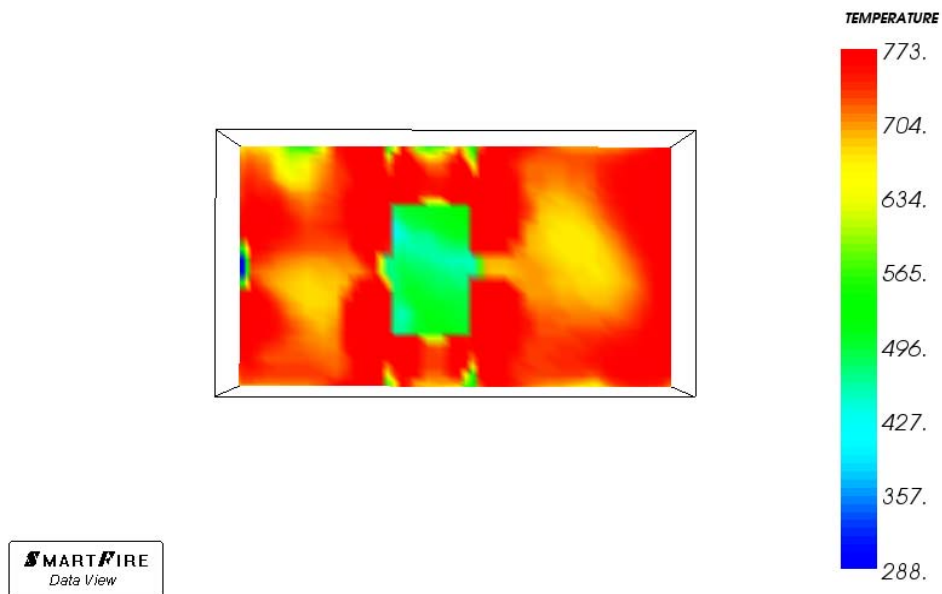


圖 4.67、四顆噴頭有擋板 0.8m 溫度切面圖(62 秒)

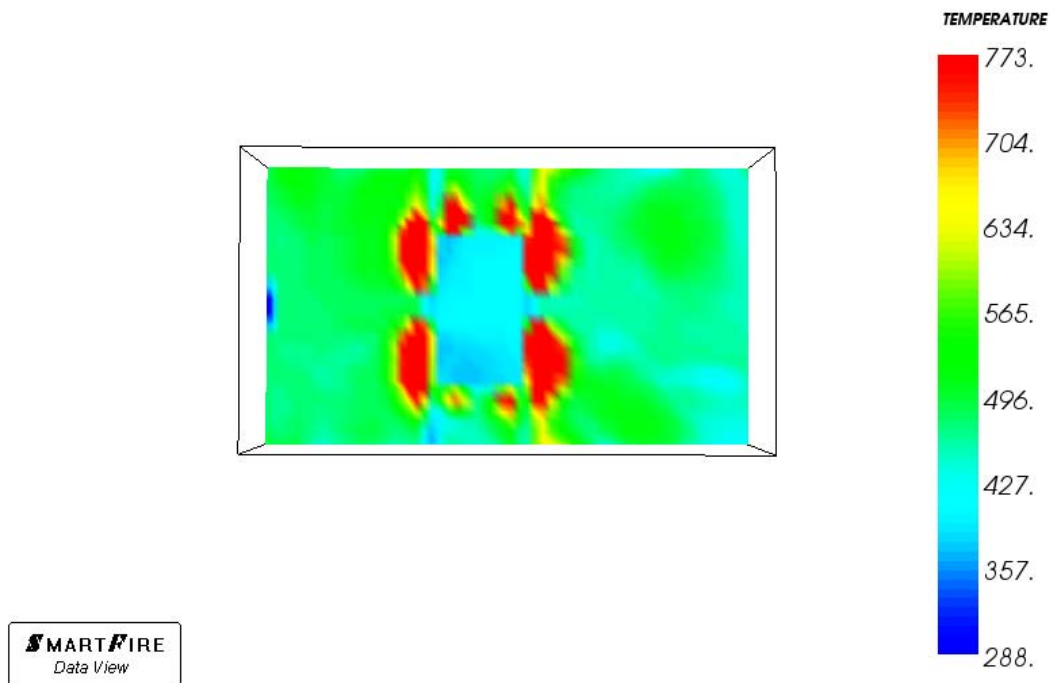


圖 4.68、四顆噴頭有擋板 0.8m 溫度切面圖(174 秒)

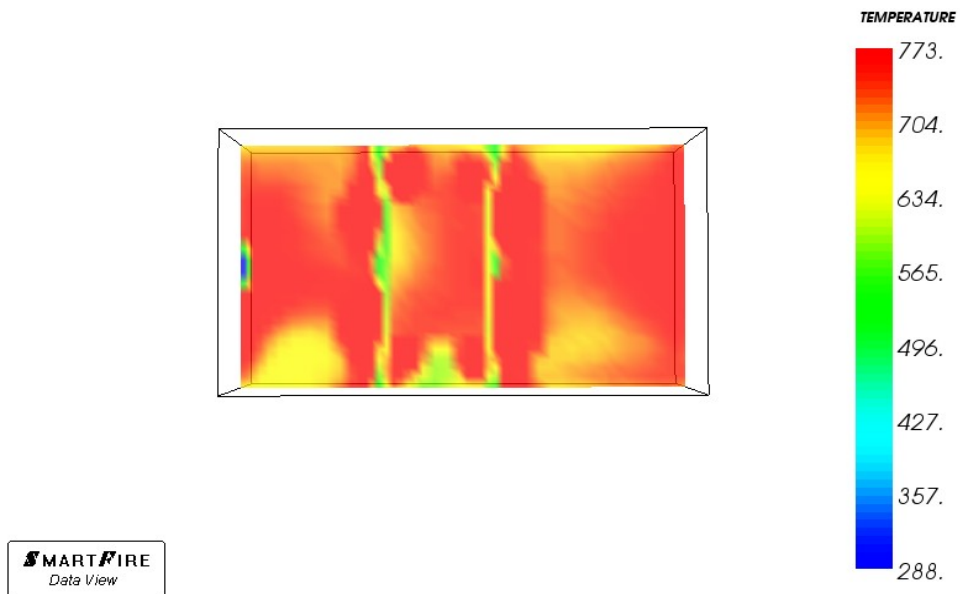


圖 4.69、四顆噴頭有擋板 1.0m 溫度切面圖(60 秒)

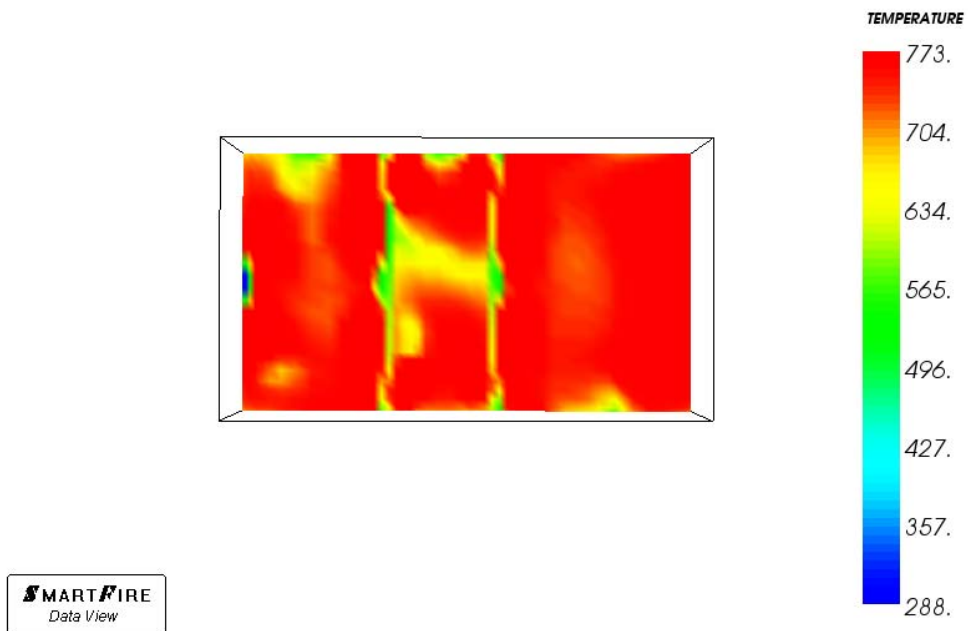


圖 4.70、四顆噴頭有擋板 1.0m 溫度切面圖(62 秒)

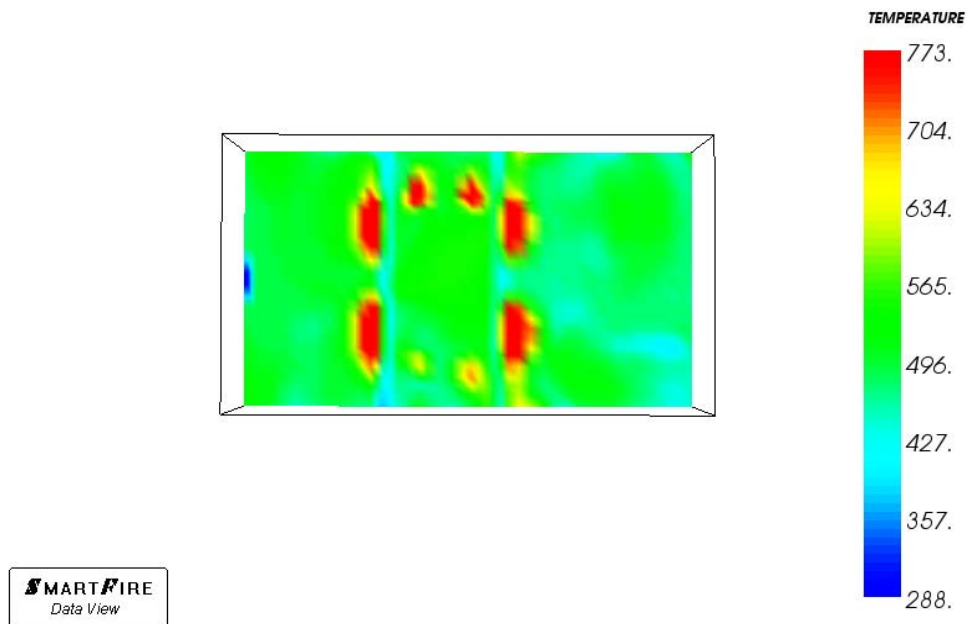


圖 4.71、四顆噴頭有擋板 1.0m 溫度切面圖(174 秒)

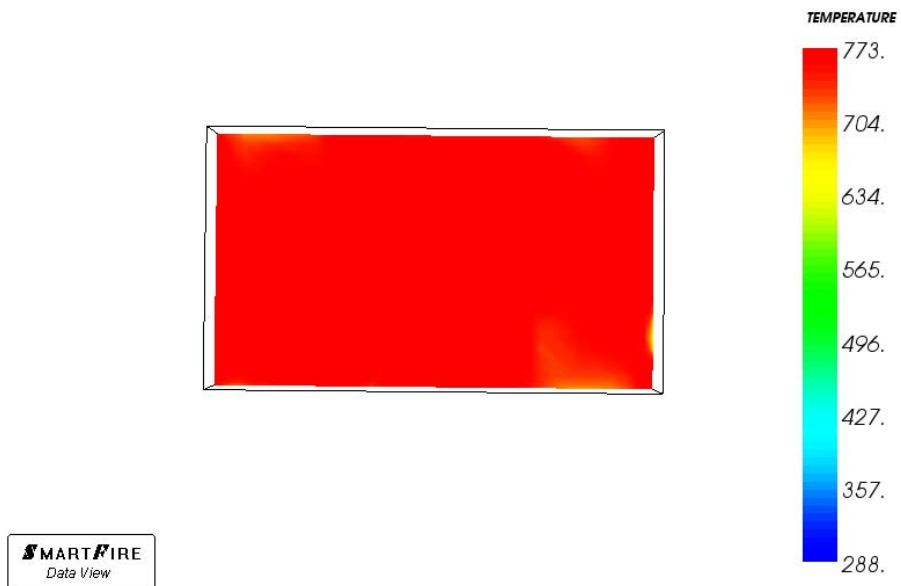


圖 4.72、四顆噴頭有擋板 2.0m 溫度切面圖(60 秒)

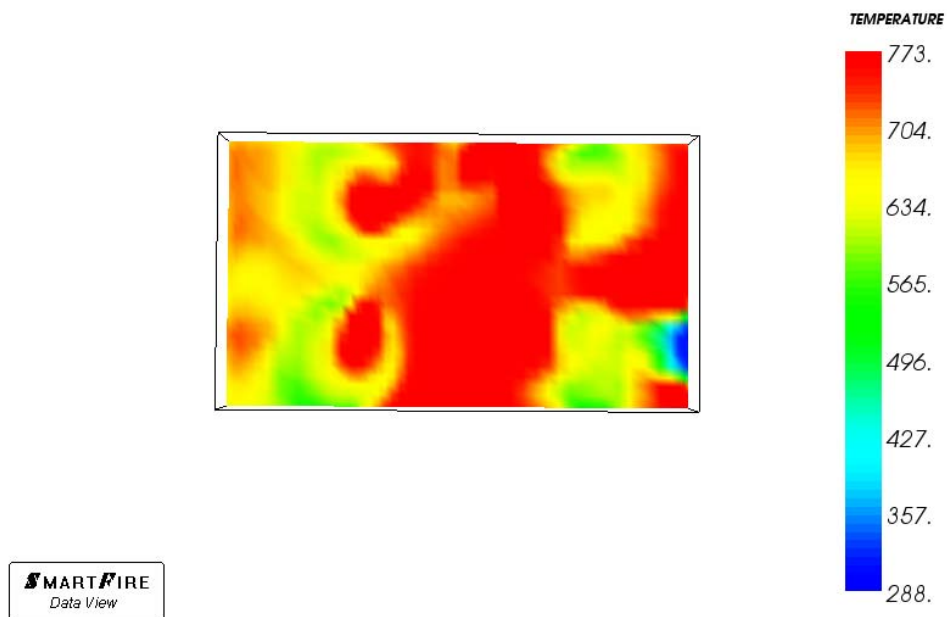


圖 4.73、四顆噴頭有擋板 2.0m 溫度切面圖(62 秒)

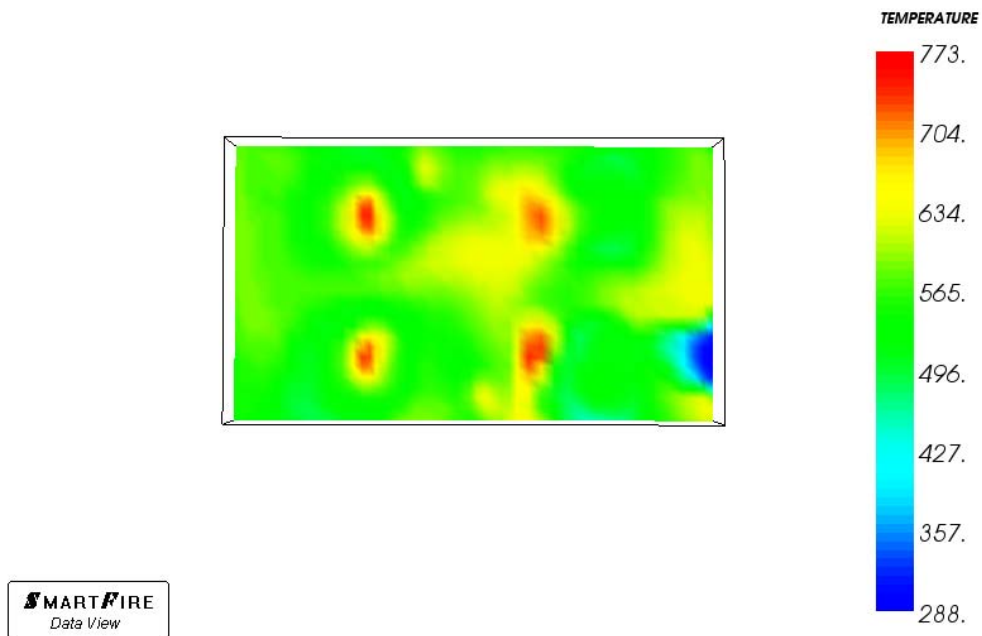


圖 4.74、四顆噴頭有擋板 2.0m 溫度切面圖(174 秒)

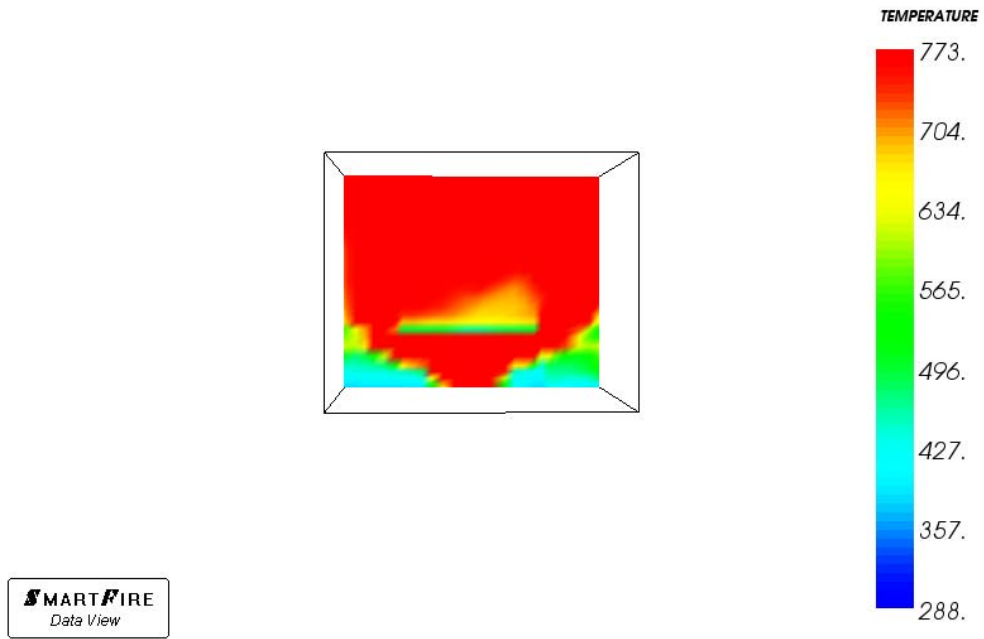


圖 4.75、四顆噴頭有擋板 $x=2.1m$ 溫度切面圖(60 秒)

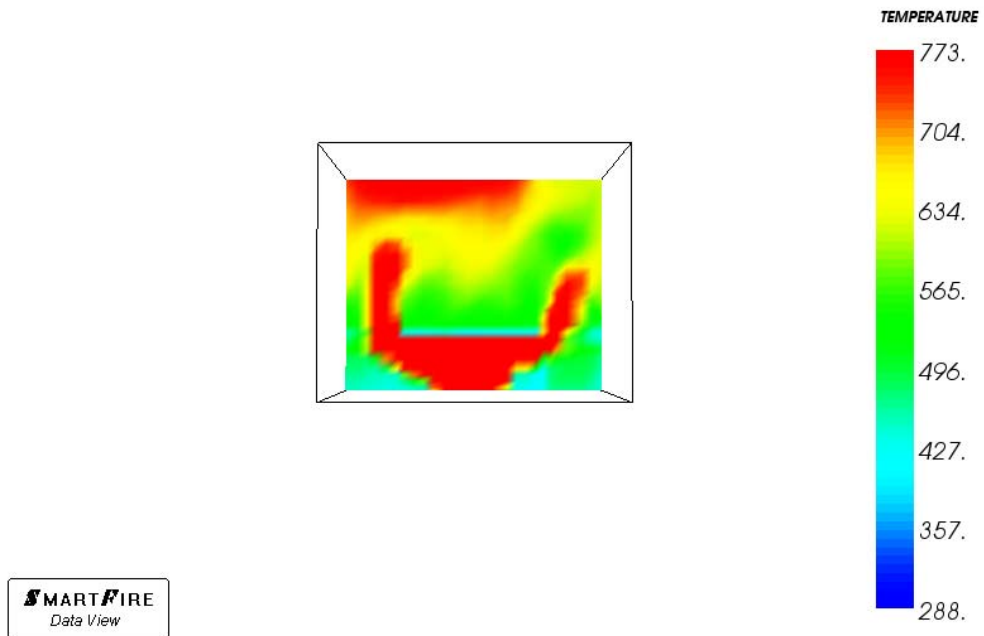


圖 4.76、四顆噴頭有擋板 $x=2.1m$ 溫度切面圖(62 秒)

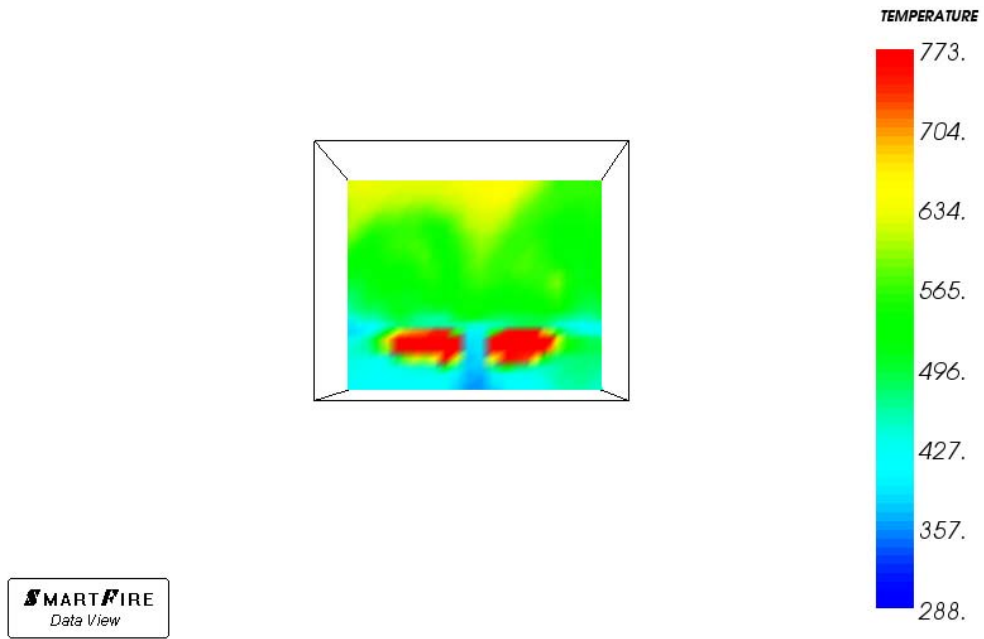


圖 4.77、四顆噴頭有擋板 $x=2.1m$ 溫度切面圖(174 秒)

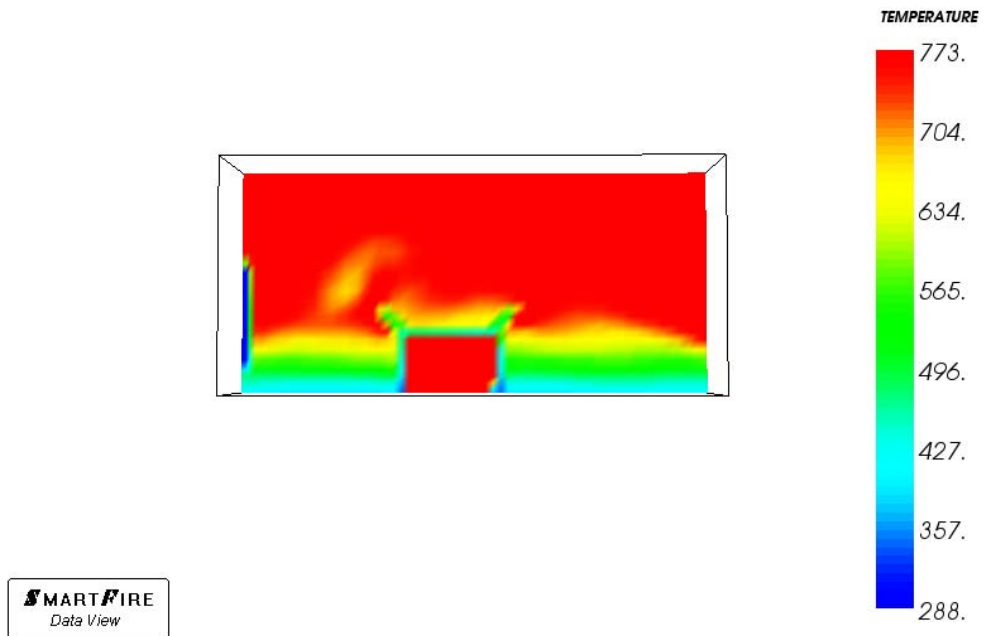


圖 4.78、四顆噴頭有擋板 $z=1.7m$ 溫度切面圖(60 秒)

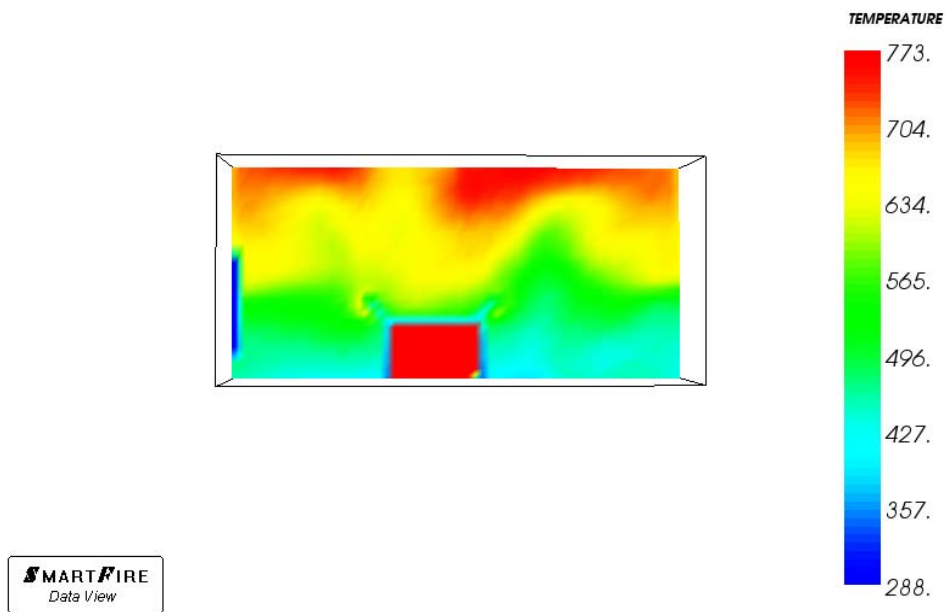


圖 4.79、四顆噴頭有擋板 $z=1.7m$ 溫度切面圖(62 秒)

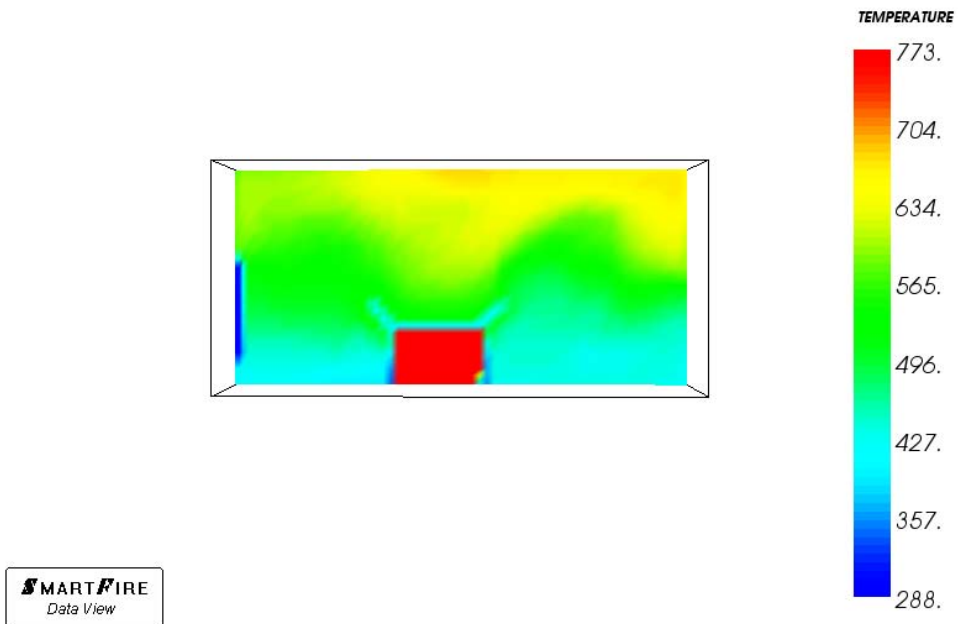


圖 4.80、四顆噴頭有擋板 $z=1.7m$ 溫度切面圖(174 秒)

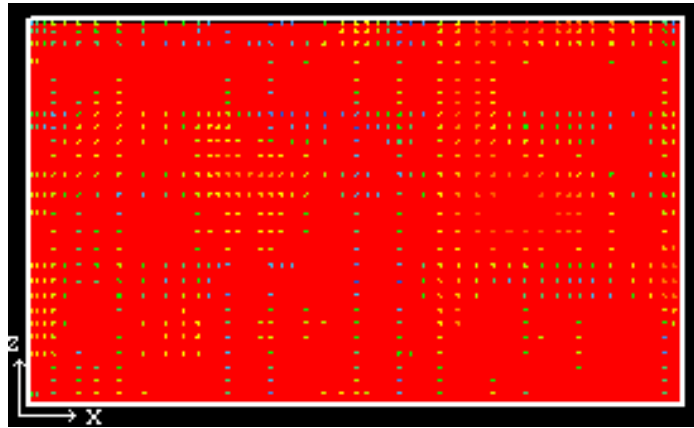


圖 4.81、四顆噴頭有擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(60 秒)

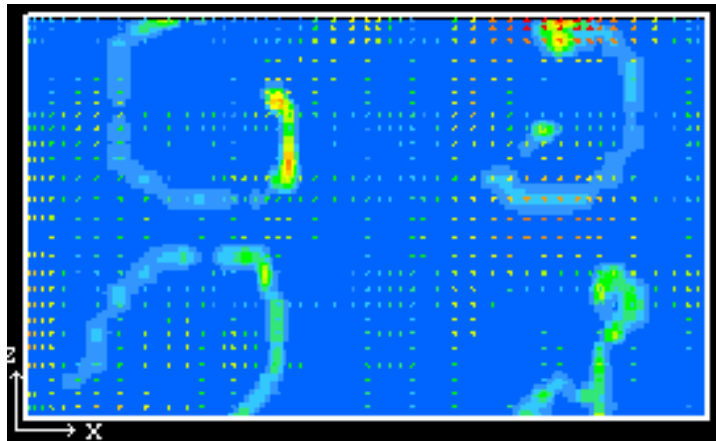


圖 4.82、四顆噴頭有擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(62 秒)

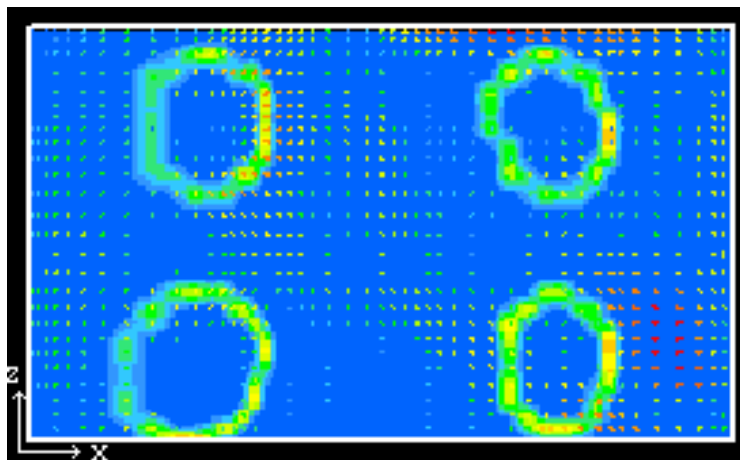


圖 4.83、四顆噴頭有擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(174 秒)

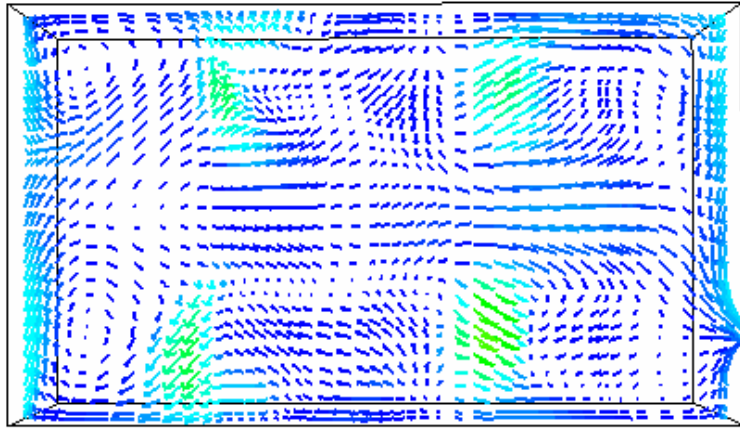


圖 4.84、四顆細水霧噴頭有擋板 $Y=2.1m$ 流場速度向量圖(60 秒)

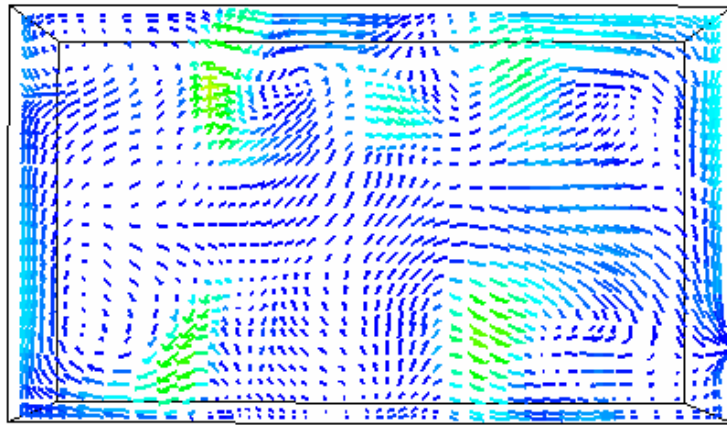


圖 4.85、四顆細水霧噴頭有擋板 $Y=2.1m$ 流場速度向量圖(62 秒)

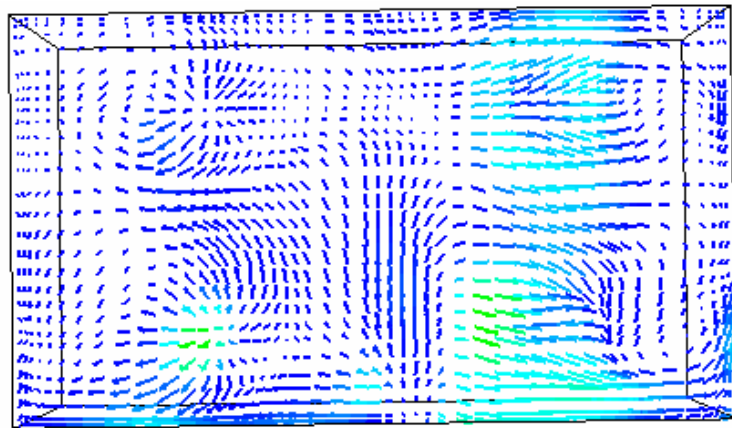


圖 4.86、四顆細水霧噴頭有擋板 $Y=2.1m$ 流場速度向量圖(174 秒)

4.2.6.2(b) 無遮蔽火源實驗模擬

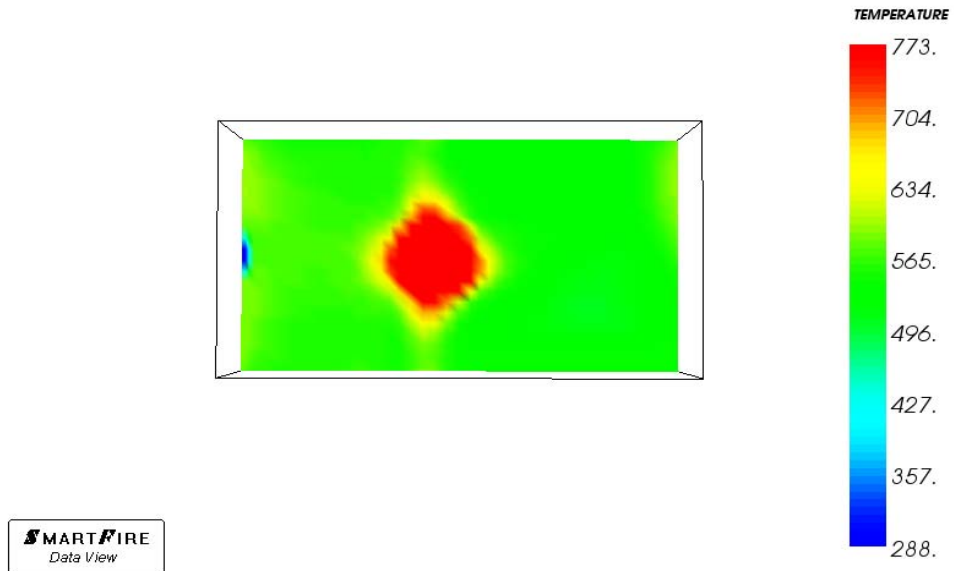


圖 4.87、四顆噴頭無擋板 0.8m 溫度切面圖(60 秒)

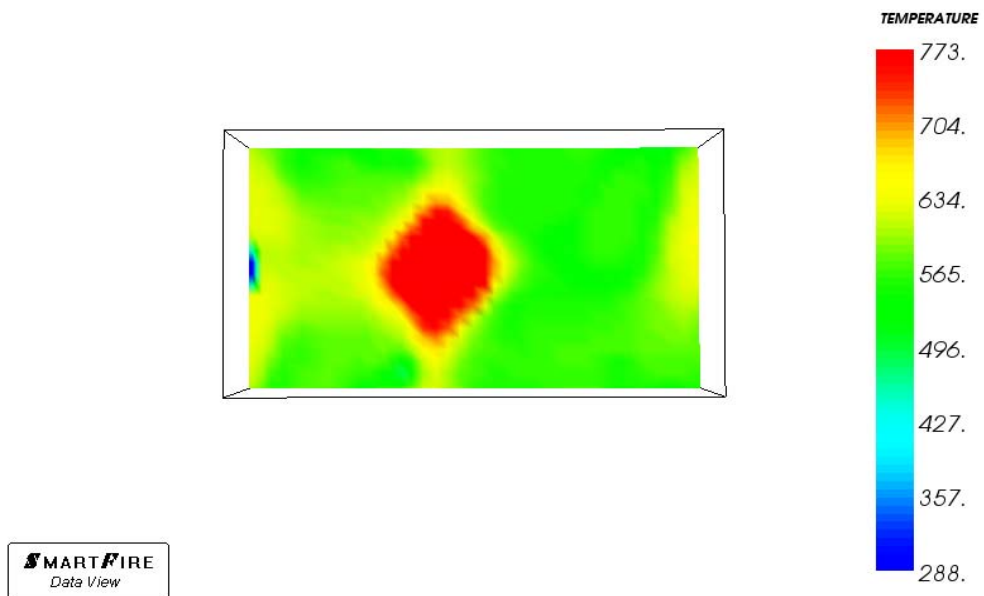


圖 4.88、四顆噴頭無擋板 0.8m 溫度切面圖(62 秒)

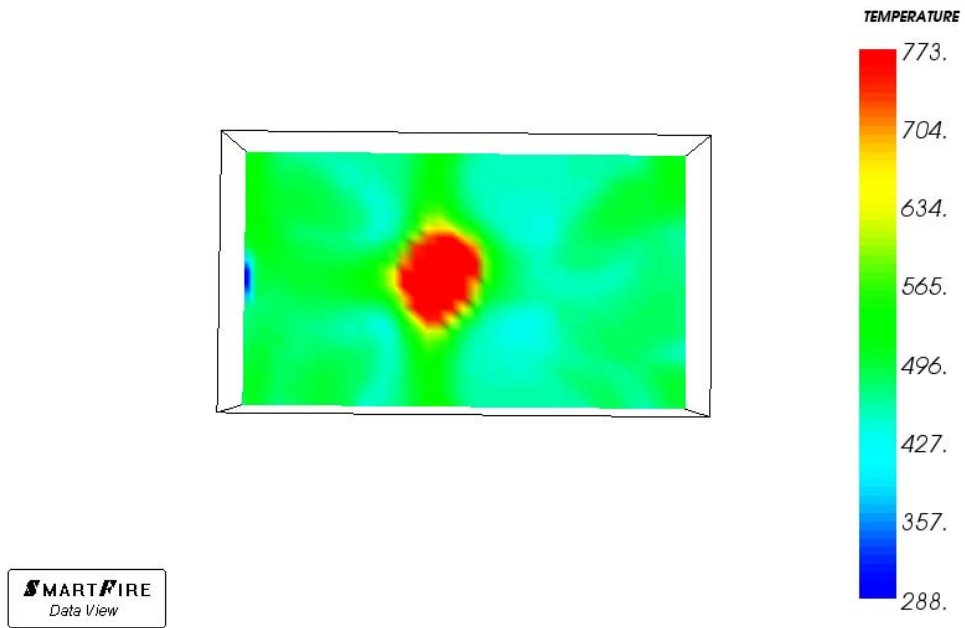


圖 4.89、四顆噴頭無擋板 0.8m 溫度切面圖(174 秒)

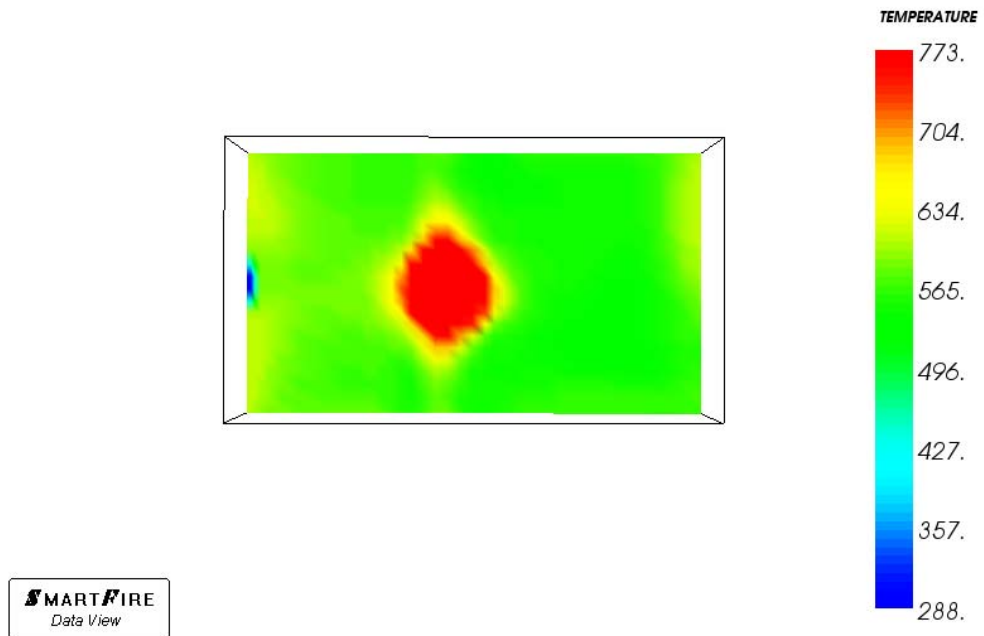


圖 4.90、四顆噴頭無擋板 1.0m 溫度切面圖(60 秒)

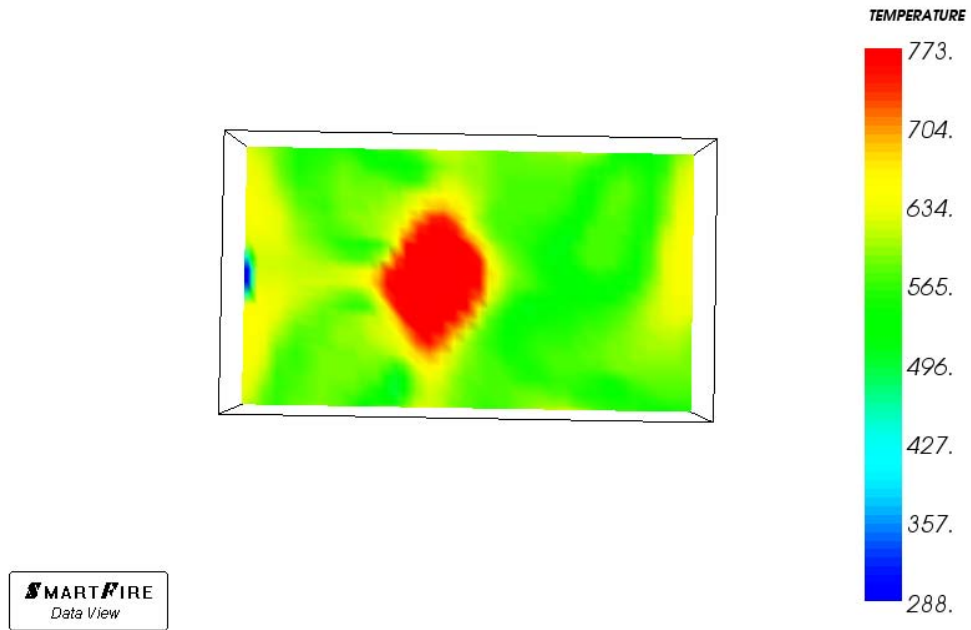


圖 4.91、四顆噴頭無擋板 1.0m 溫度切面圖(62 秒)

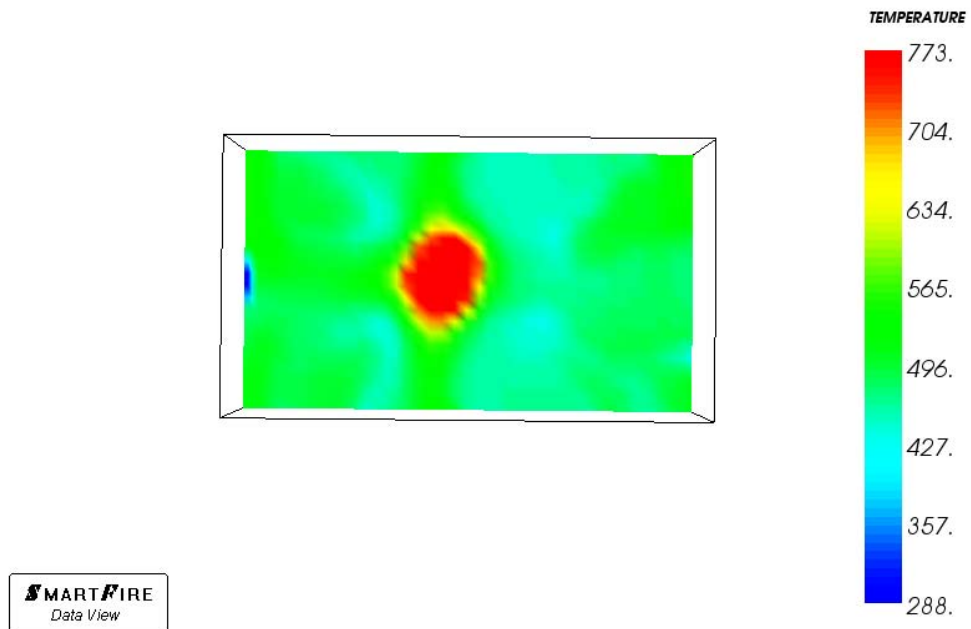


圖 4.92、四顆噴頭無擋板 1.0m 溫度切面圖(174 秒)

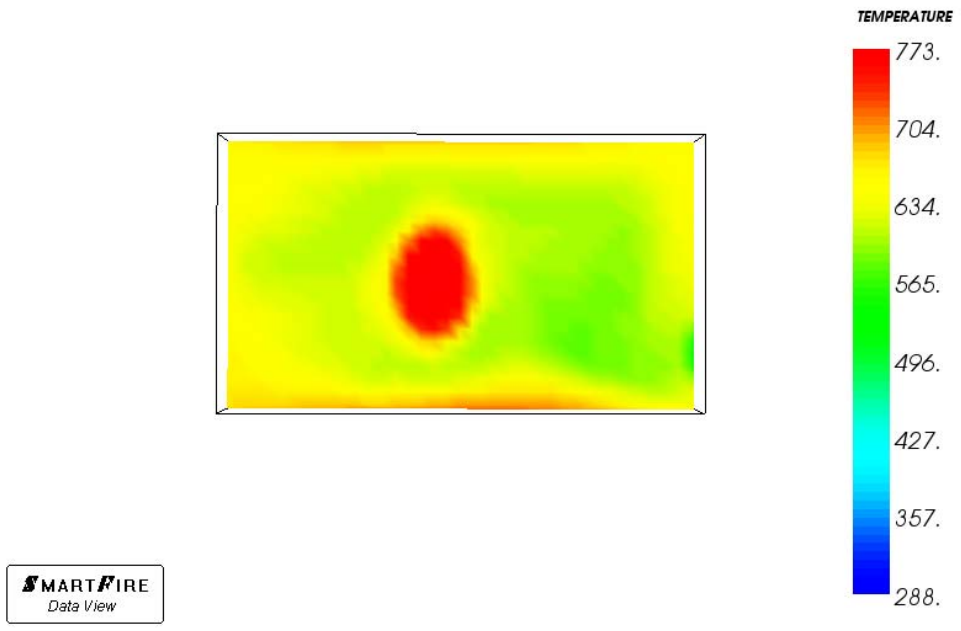


圖 4.93、四顆噴頭無擋板 2.0m 溫度切面圖(60 秒)

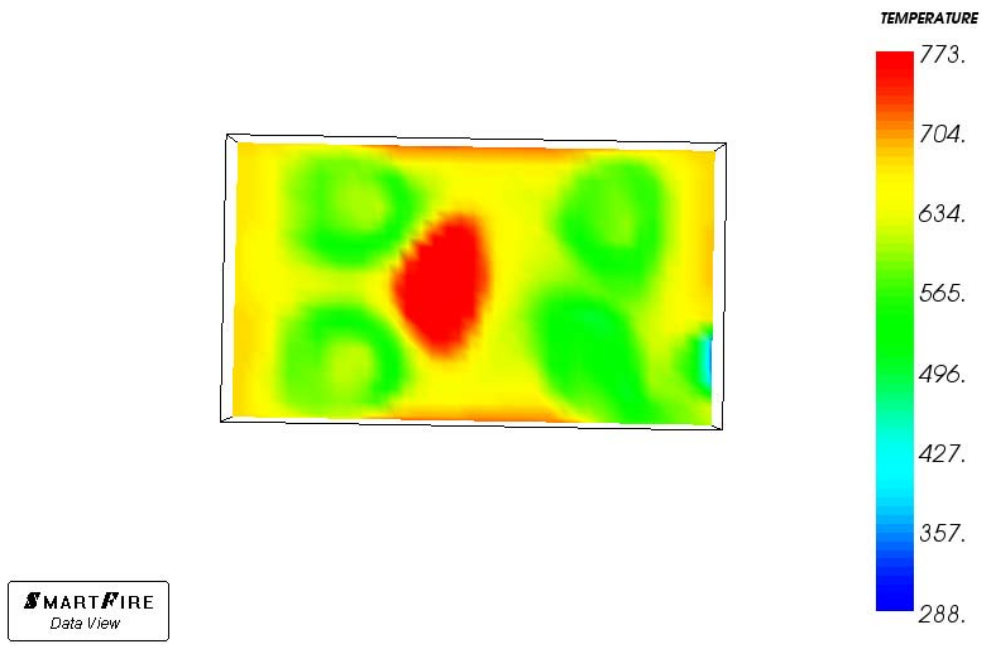


圖 4.94、四顆噴頭無擋板 2.0m 溫度切面圖(62 秒)

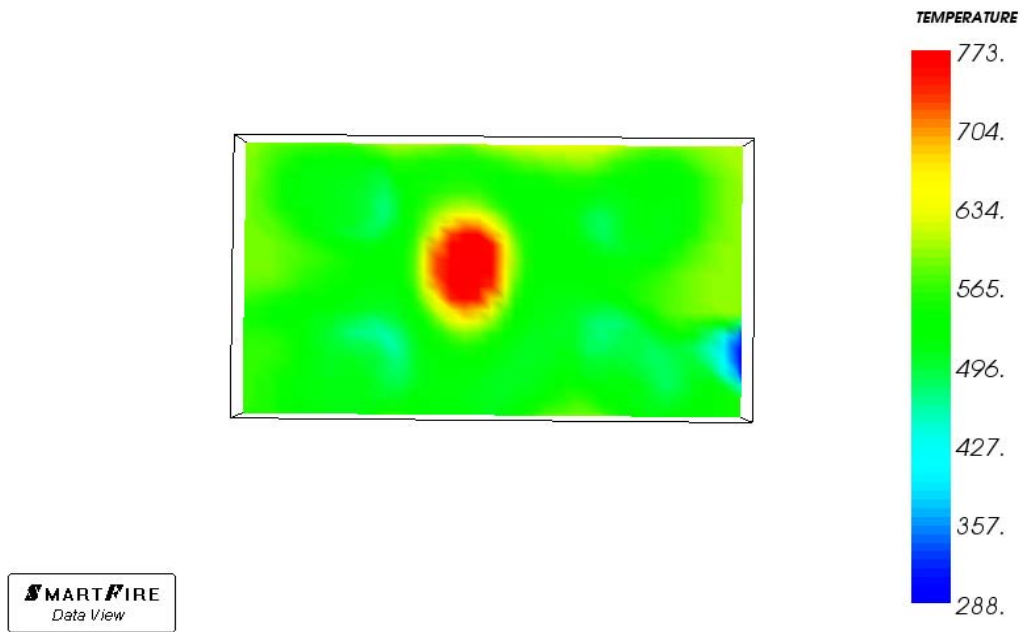


圖 4.95、四顆噴頭無擋板 2.0m 溫度切面圖(174 秒)

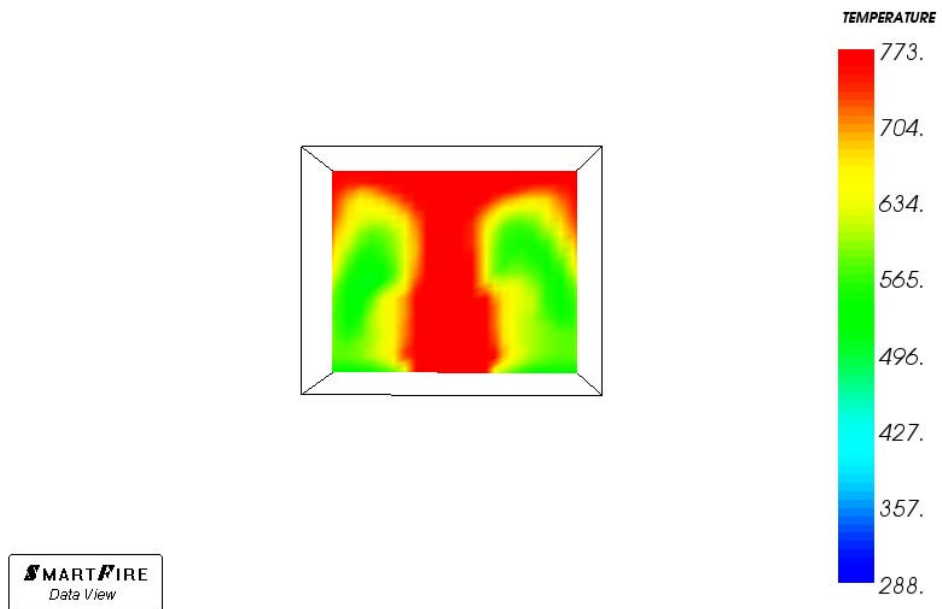


圖 4.96、四顆噴頭無擋板 x=2.1m 溫度切面圖(60 秒)

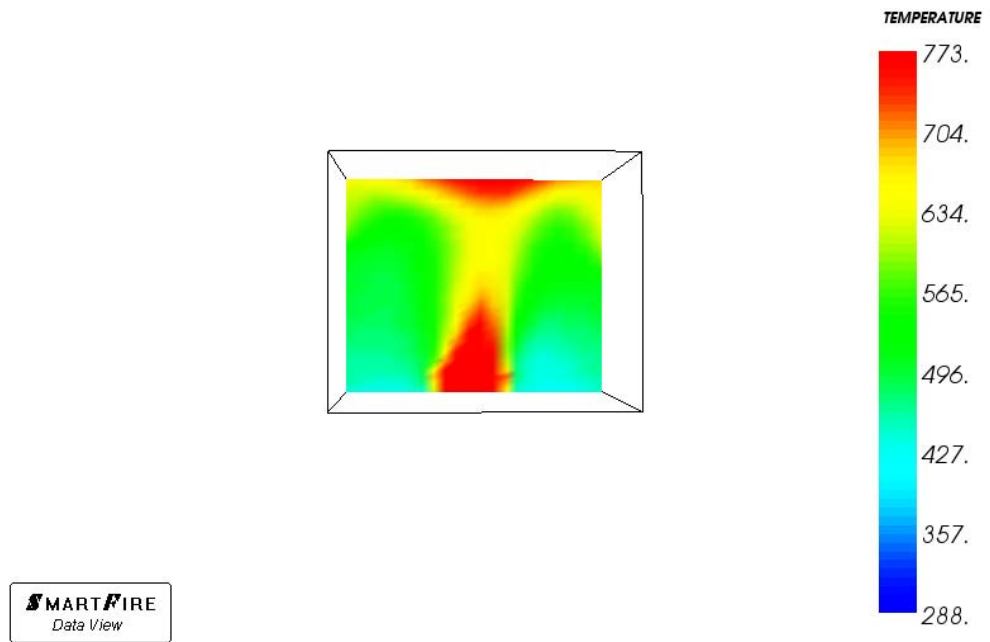


圖 4.97、四顆噴頭無擋板 $x=2.1m$ 溫度切面圖(62 秒)

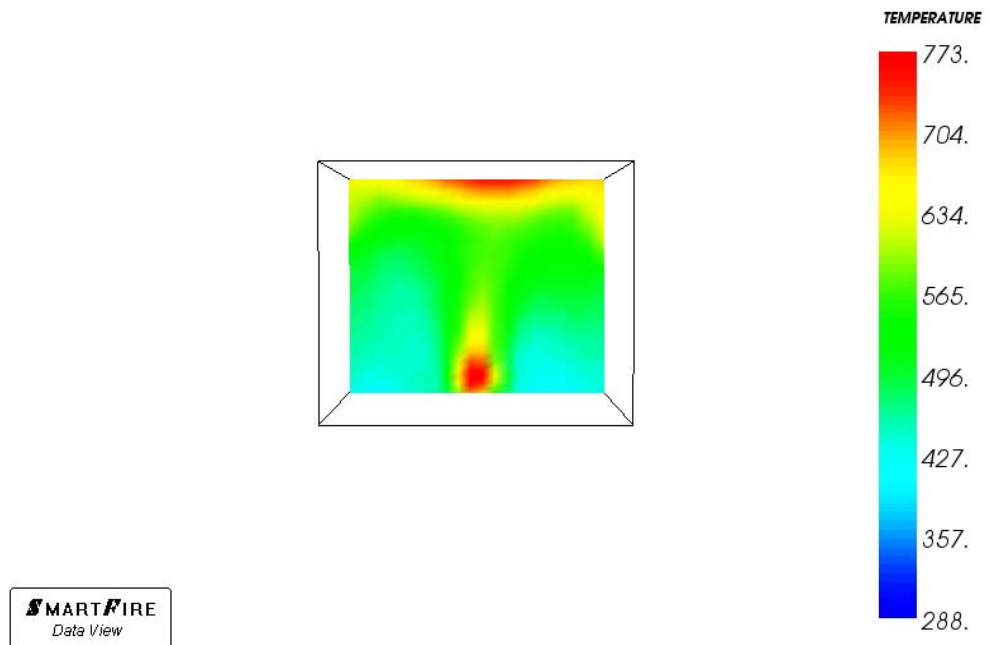


圖 4.98、四顆噴頭無擋板 $x=2.1m$ 溫度切面圖(174 秒)

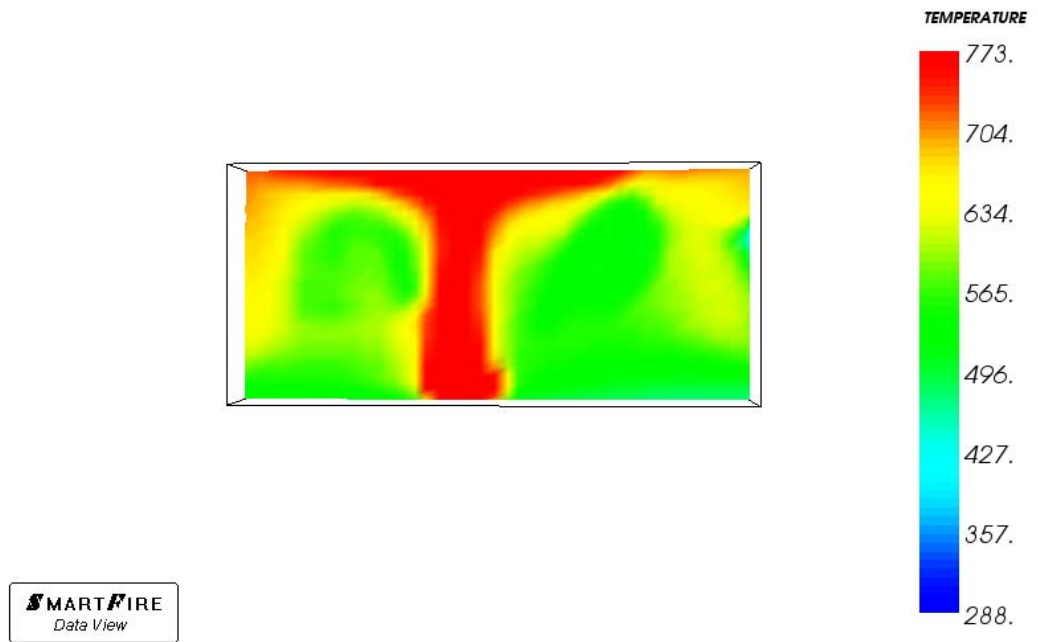


圖 4.99、四顆噴頭無擋板 $z=1.7\text{m}$ 溫度切面圖(60 秒)

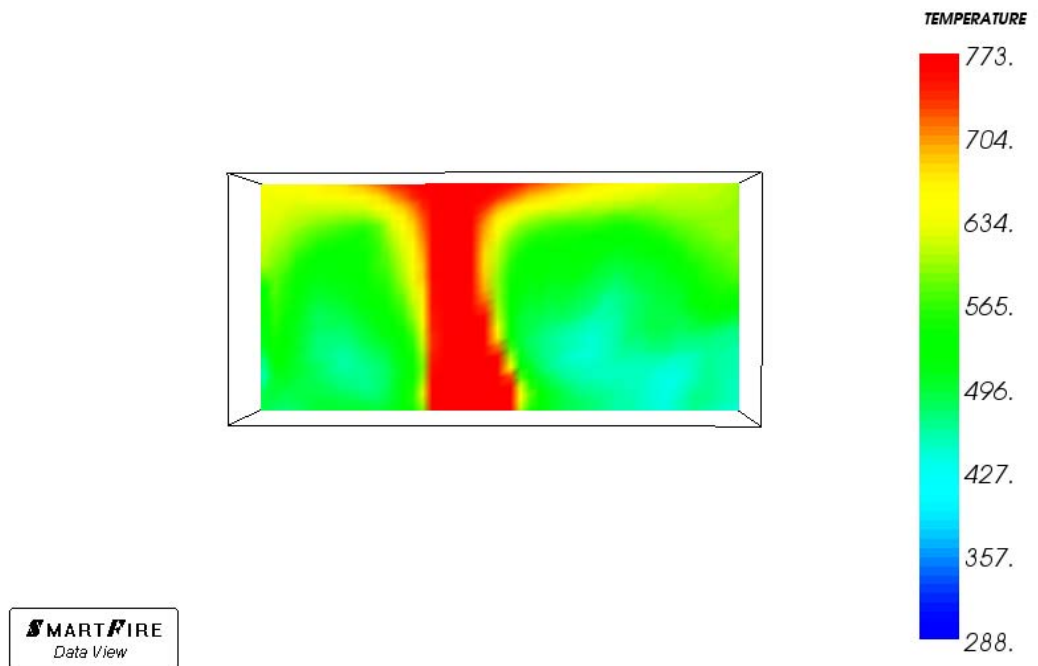


圖 4.100、四顆噴頭無擋板 $z=1.7\text{m}$ 溫度切面圖(62 秒)

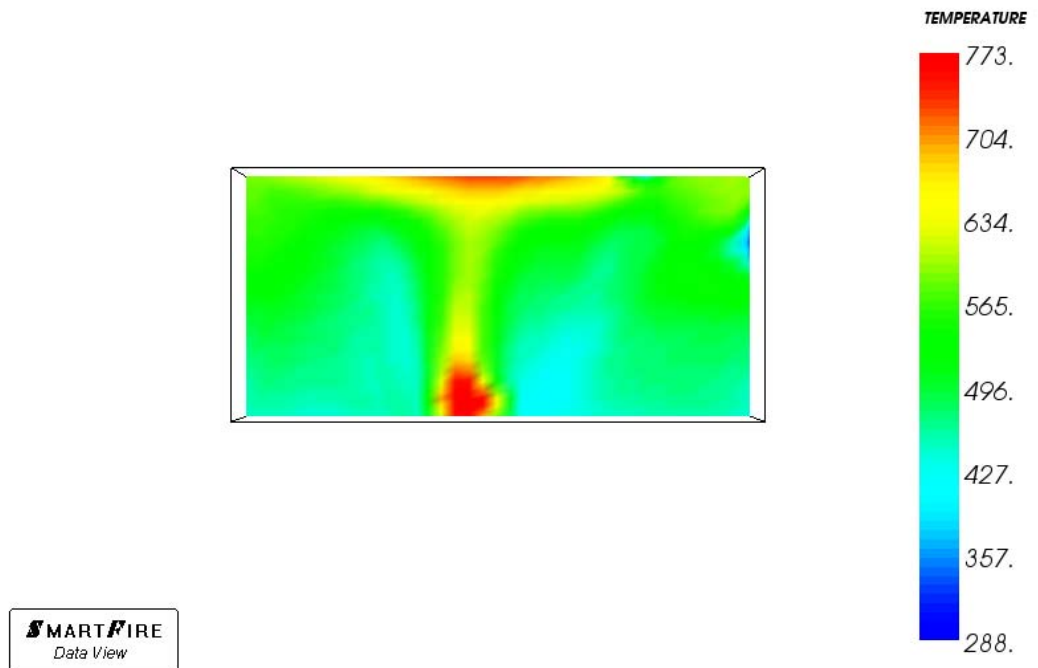


圖 4.101、四顆噴頭無擋板 $z=1.7\text{m}$ 溫度切面圖(174 秒)

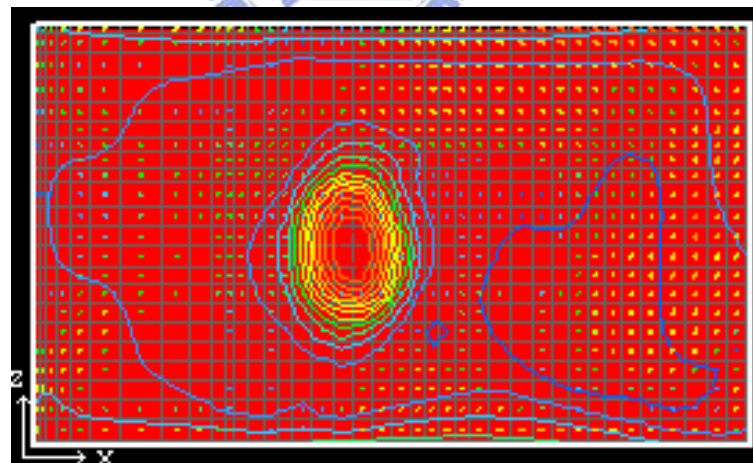


圖 4.102、四顆噴頭無擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(60 秒)

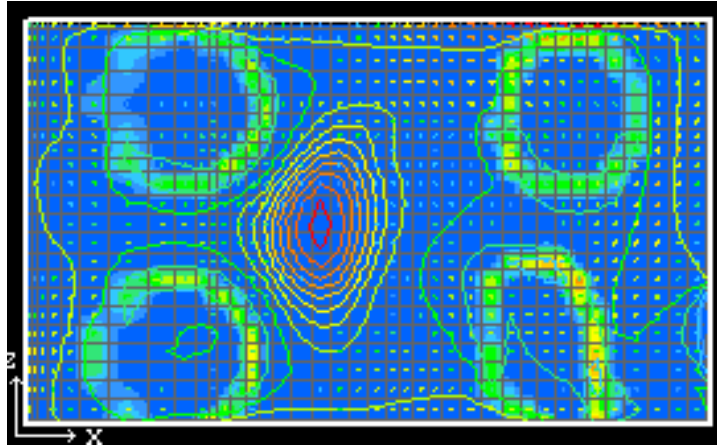


圖 4.103、四顆噴頭無擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(62 秒)

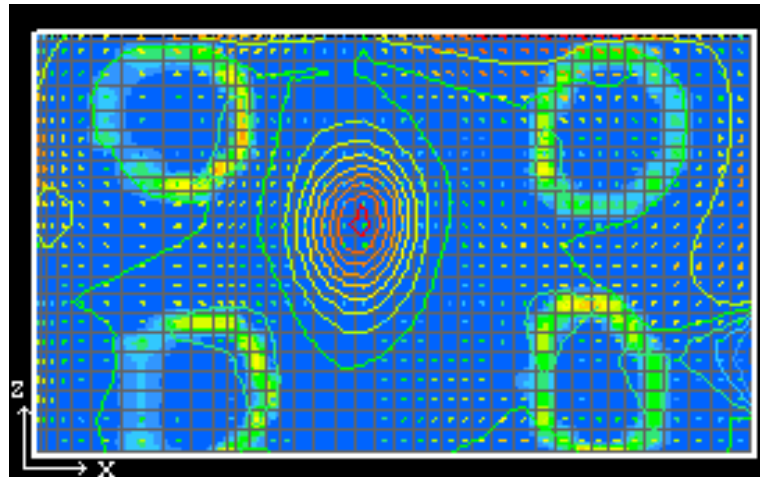


圖 4.104、四顆噴頭無擋板細水霧噴頭作動之抑制模擬(174 秒)

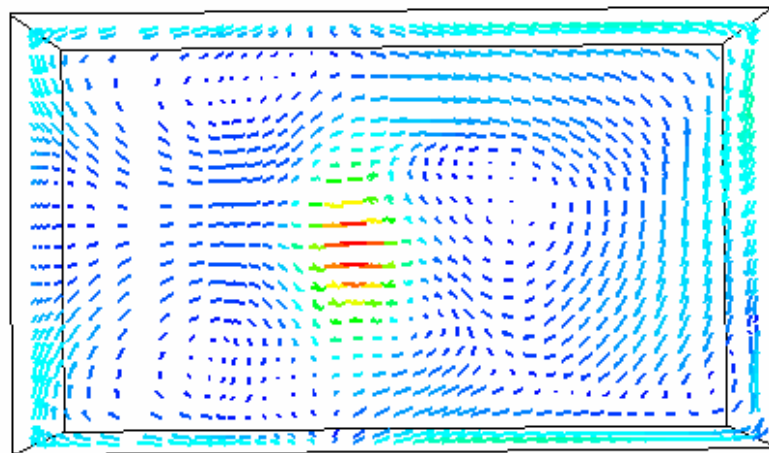


圖 4.105、四顆細水霧噴頭無擋板 Y=2.1m 流場速度向量圖(60 秒)

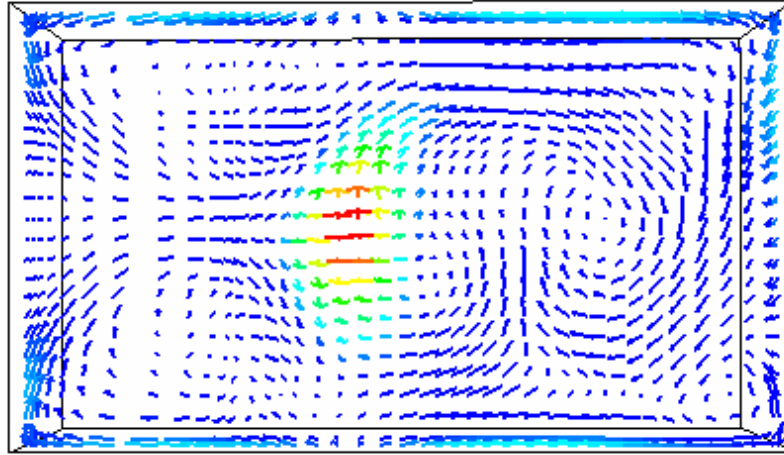


圖 4.106、四顆細水霧噴頭無擋板 Y=2.1m 流場速度向量圖(62 秒)

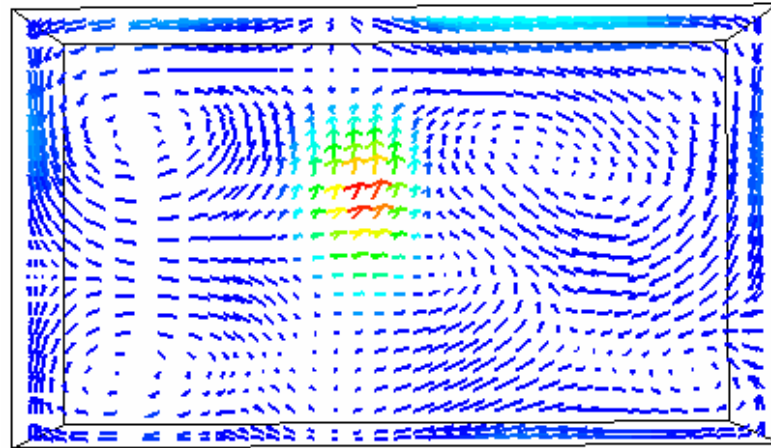


圖 4.107、四顆細水霧噴頭無擋板 Y=2.1m 流場速度向量圖(174 秒)

4.2.7 機械空間細水霧滅火效能評估結論

1. 從實驗中熱電偶溫度圖可以發現，在四顆細水霧噴頭滅火的情況下，有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，但對於降溫速率則有明顯之差異。
2. 由有遮蔽與未遮蔽火源實驗中也發現火焰高度會影響到氣體濃度的增減，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，區劃內之氧氣會降低

濃度到 Limiting Oxygen Index(LOI)以下，導致燃燒效率變差，火勢更容易被撲滅。

3. 由細水霧滅火實驗中得之，細水霧滅火實際是受到機械空間中細水霧噴頭位置、火源遮蔽度、天花板高度...等因素之影響，此一結果與模擬狀況相吻合。
4. 由試驗與模擬結果證明在有遮蔽火源時，細水霧滅火系統需花費較長的時間，才能有效地降低機械空間內的火場溫度。
5. 由模擬流場速度向量圖得知，在機械空間中細水霧液滴會沿著對流流場軌跡運動；因水滴延著氣流浮動的能力是有限的，釋放較小的水滴會產生較大的蒸發量，故調整降低水滴尺寸則單一水滴之蒸發率也隨之降低。故細水霧在進入機械空間滅火時，降低水滴釋放尺寸可使細水霧增加滅火及降溫能力。
6. 在細水霧滅火的模擬中，觀察細水霧的溫度切面圖，發現細水霧對降溫有非常良好的抑制功效，雖然模擬的結果與實驗數據有部分小出入，但仍有相當高的可信賴度。

第五章 結論與建議

細水霧系統與傳統撒水系統相比，使用較少的水量，滅火效能常優於傳統撒水系統；而細水霧系統與其它海龍替代品(如 CO₂、Inergen、FM200)相比，也有其優勢，一般來說細水霧系統在人員安全上優於海龍替代品；細水霧系統可將火場降溫，較能防止火場復燃；針對釋放時間，細水霧系統可做長時間的釋放，更能確保火場安全；針對開放空間或大空間，海龍替代品很難做防護，但細水霧系統仍適合使用於開放空間，達到一定的防護功能。由此觀之，細水霧系統確實有機會成為強勢的火場抑制系統。細水霧系統雖有成為強勢的火場抑制系統的可能，但長久以來一直存在系統效能無法驗證的問題，致使細水霧系統的應用推廣受到阻礙，殊為可惜。一般為解決驗證的問題，均訴諸於實場測試，但實場測試費用昂貴且耗時，緩不濟急，唯有藉助電腦模擬方能解決系統效能驗證的問題。

本論文經由細水霧電腦模擬平台 Firedass 模擬案例中發現，電腦模擬平台不僅可有效解決系統效能驗證的問題，節省系統驗證的時間，同時亦能經由各種細水霧系統參數的調整，深切了解各參系統的影響，並據此提出系統最佳化的參數，提供作為產業界在設置細水霧系統之參考。

本論文研究達成如下的成果：

1. 彙整國內外相關細水霧研究文獻與發展趨勢，有助特定產業設計規範之依據。
2. 使用細水霧電腦模擬平台 Firedass，有效驗證系統效能，節省費用與時間。
3. 利用細水霧電腦模擬平台 Firedass，可有效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；亦可做為消防界開發新產品之用，縮短開發時程與費用。
4. 建立細水霧系統應用於建築物在區劃空間及機械空間之設置依

據及最佳設置方案。

經由電腦數值的模擬結果發現 CFD 電腦模擬可考慮不同的情境，並建立與現況相符的模型，可對火場細節做詳細的描述，相當適用在細水霧佈點安全間距計算，雖然會花費較多的時間，但可以獲得豐富且符合現場的資料，對於安全間距的計算也更確實，將更能符合土地利用及安全的需求。細水霧滅火抑制效能分析應考慮通風的效應，由細水霧效能模擬發現 CFD 電腦模擬可將細水霧抑制效能做細部的呈現，不僅可由溫度-時間歷程圖去確認抑制對象物的溫度上昇是否可被控制，亦可由溫度分佈圖去分析是否會有局部高溫現象存在。

本論文以區劃空間內強制通風狀態、機械空間內有遮蔽及無遮蔽防護做為模擬對象，由模擬結果發現，細水霧滅火系統應用在這二種形式的火災其抑制效能是有相當限制條件的，因為在火場中，細水霧液滴會沿著對流流場軌跡運動；且水霧液滴會從火燄中吸收熱量並在流場中產生水蒸氣，導致通風造成大量的氣霧隨流場移動無法到達火源，並使水蒸氣的產生及外部氧氣持續的供應等因素所致。另外亦可借助電腦模擬的方式評估一旦發生連續延燒後危害範圍會多大、細水霧滅火之最大效能及有效性，據此擬定緊急應變、人員疏散的程序與時間。電腦數值模擬是一項可以告訴使用者火場詳情的優良工具，若能善加利用，必定能增進企業的安全，及永續經營的最終目標。

參考文獻

1. Montreal Protocol Meeting Concludes, Media Note, Office of the Spokesman, Washington, DC, March , 1947.
2. NFPA 2001 (2000), "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems," National Fire Protection Association , Quincy, MA, U.S.A., 2000 Edition, pp. 1-104.
3. "NFPA 750 1996 edition: Standard on Water Mist Fire Protection Systems" , National Fire Protection Association , Quincy , MA , 1996.
4. "NFPA 750 2000 edition: Standard on Water Mist Fire Protection Systems" , National Fire Protection Association , Quincy , MA , 2000.
5. IMO RES.A.800: "Revised Guidelines For Approval of Sprinkler Systems Equivalent in that Referred to in SOLAS Regulation ", II -2/12, International Maritime Organization, 1992.
6. Purdue University (1950), Purdue Research Foundation and Department of Chemistry, "Final Report on Fire Extinguishing Agents for the Period I September 1947 to 30 June 1950," West Lafayette, IN, U.S.A.
7. Joseph Santillo , "Remove five Halon 1301 systems and furnish and install five HFC 227ea systems at Tobyhanna Army Depot, Tobyhanna,PA".DAAB17-02-B-0004, U.S. Army Materiel Command, U.S. Army Communications-Electronics Command, Tobyhanna Depot Contracting Office. 2002.
8. Liu, Z.G.; Kim, A.K.; Su, J.Z. "Examination of performance of water mist fire suppression systems under ventilation conditions".

- NRCC-44676, National Research Council Canada , 1997.
9. Braidech , M. M. , J. A. Neale , A. F. Matson , and R. E. Dufour ,
“The mechanism of Extinguishment of Fire By Finely Divided
Water ,” Underwriter Laboratories Inc. for the national Board of Fire
Underwriter , New York , 1955.
 10. Rasbash , D. J. , Z. W. Rogowski , and G. W. V. Stark ,
“Mechanisms of Extinction of Liquid Fuel Fires with Water Sprays ,”
Combustion and Flame , 4 , 1960 , pp 223~224.
 11. Mawhinney , J. r. , B. Z. Dlugogorski and A. K. Kim , “A closer
Look at the Extinguishing Properties of Water Mist ,” in Proceedings:
International Assocation for Fire Safety Science (IAFSS)
Conference , Ottawa , Canada , June 13-17 , 1994.
 12. Alpert, R L., Numerical modeling of the interaction between
automatic sprinkler sprays and fire plumes. Fire Safety J., 9(1985)
157-163.
 13. A. Jones and P.F. Nolan” Discussions on the use of fine water spray
or mists for fire supression” J.Loss Prev Ind., 1995, Volume
8,Number 1.
 14. Myung Bae Kim, Yong Jae Jang &Jin KooK Kim “Extinction Limint
of a pool Fire with a Water Mist” Fire Safety Journal
28(1997)295-306.
 15. Kokkala , M. A. K. , “Extinction of Liquid Pool Fires with
Sprinklers and Water Sprays ,” Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus ,
Statens Teniska Forskningscentral (Technical Research Centere of
Finland) , Espoo , Finland , 1989.
 16. Kondo, T., Mori, N., Noguchi, Y., and Tokuoka, N., "Fire Extinction
by Water Spray", Proceedings of ILASS-Asia,2001,pp.34-38

17. Aihara, T., Taga, M. and Haraguchi, T., "Heat Transfer from a Uniform Heat Flux Wedge in Air-Water Mist Flow.", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, 1979, pp.51-60.
18. Hishida, K., Maeda, M. and Ikai, S., "Study on Heat Transfer in a Binary Mist Flow" *Trans. Of The Japan Society of Mech. Eng.*, Vol.47, 1981, pp.1279-1286.
19. Dlugogorski, B. Z., J. R. Mawhinney, A. K. Kim, and G Crampton, unpublished laboratory data, National Fire Laboratory, National Research Council Canada, Ottawa, 1994.
20. Notarianni, K. A. "Water Mist Fire Suppression Workshop Summary" Gaithersburg, MD, 1-2 March, NIST, 1993.
21. Lefebvre, A. H., *Atomisation and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
22. "Water Mist Fire Suppression Systems," *NFPA Fire Protection Handbook*, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1997.
23. Aihara, T., Taga, M. and Haraguchi, T., "Heat Transfer from a Uniform Heat Flux Wedge in Air-Water Mist Flow.", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, 1979, pp.51-60.
24. C. Goodchild, *Firedass — A Fire Detection and Suppression Simulation Research Project*, Air and Space Europe (ISSN 1290-0958), 2:1, pp. 96-100, 2000.
25. McGrattan, K.B., G. P. Forney, J. E. Floyd and S. Hostikka, "Fire Dynamics Simulator (Version 2), User's Guide," NISTIR 6784, NIST, 2001.
26. McGrattan, K.B., H.R. Baum, R.G. Rehm, G.P. Forney and S. Hostikka, "Fire Dynamics Simulator (Version 2), Technical

Reference Guide , ” NISTIR 6783 , NIST , 2001.

27. Benichou, N Kashef , A.”A Fire Risk Assessment Model for Building Fire Safety Evaluation”, NRC.CNRC , 1995.
28. W.D., Barry, T.F., “Fire Protection Engineering Quantitative Risk Assessment”, Holmes, Fire Risk and Hazard Assessment Symposium, 1996.
29. John M. Watts, Jr., “Fire Risk Ranking”. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.2nd edition, SFPE. Boston, MA, USA, 1995.
30. W. G. B. Phillips, “Simulation Models for Risk Assessment”, Fire Safety Journal, Vol 23, 1994.
31. Anderson DA, Tannehill JC, Pletcher RH. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Taylor and Francis, Bristol, PA 19007, 1984.
32. Ferziger JH, Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, 1997.
33. W. G. B. Phillips, “Computer Simulation for Fire Protection Engineering”, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, MA, USA, 1995.
34. “Case Study Building Specifications ,3rd International conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Method, Anew Zealand Approach” ,Fire Safety Report, Lund Sweden, June 2000
35. NISTIR6467, “Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide”, BFRL NIST, January 2000.
36. J.R. Chen, T. C. Ho, W.K. Chou, and C.C. Duh, “Thermal Radiation Hazard of Storage Tank Fires and Its Relation to Tank-to Tank Spacing,” the 2nd Intl. Conf. And Exhib. Loss Prev. in Oil, Chem. Process Ind., 1995.

37. Rasbash, D. J., Z. W. Rogowski, and G. W. V. Stark, "Mechanisms of Extinction of Liquid Fuel Fires with Water Sprays," *Combustion and Flame*, 4, 1960, pp 223~224.
38. Dlugogorski, B. Z., J. R. Mawhinney, A. K. Kim, and G. Crampton, Unpublished Laboratory Data, National Fire Laboratory, National Research Council Canada, Ottawa, 1994.
39. 陳俊勳，"建築物火災危險評估電腦模式驗證研究" 內政部建築研究所專題研究計畫成果報告（計畫編號 MOIS 881006），民國 89 年 6 月。
40. 陳俊勳，"建築物火災模式應用及架構評估研究" 內政部建築研究所專題研究計畫成果報告（計畫編號 MOIS 871002），民國 88 年 6 月。
41. 陳俊勳，"水系統火災控制技術之研究/細水霧滅火系統技術研發之規劃研究"，內政部建築研究所專題研究計畫期中報告，民國 92 年 6 月。
42. 陳俊勳，"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"，內政部建築研究所專題研究計畫期末報告，民國 93 年 12 月。
43. 熊光華，"建築物火災危險與成本評估電腦化應用之研究" 內政部建築研究所專題研究計畫成果報告（計畫編號 MOIS 871012），民國 88 年 6 月。
44. 簡賢文、熊光華，"細水霧火災防護性能及適用範圍研究"財團法人消防教育學術研究基金會期末報告，民國 91 年 12 月。
45. 簡賢文，"細水霧滅火系統審查作業制度與認可基準之研究"財團法人消防設備中心基金會，民國 92 年 4 月。
46. 簡賢文"水氣霧滅火系統適用與測試分析"中央警察大學消防科學研究所教材，民國 88 年 9 月。

47. 簡賢文、熊光華、陳俊青、劉瑞華、黃曉揚，"細水霧滅火系統測試基準草案之研議"，消防與防災科技，民國 91 年 7 月。
48. 吳政達，"氣流對水霧系統滅火性能的影響評估"，國立雲林科技大學機械工程研究所碩士論文，民國 92 年 4 月。
49. 張枝成、于連浩 "噴霧滅火之實驗研究"，"中華民國航太學術聯合會議論文集"，P.619，桃園大溪，民國 88 年 6 月。
50. 張枝成、于連浩 "液滴衝擊煤油火苗之實驗研究"，"中國航空太空學會學刊" P.47-52，民國 90 年 4 月。
51. 張枝成、林志明"高速水霧滅火之實驗研究"2002 中華民國「民航學會/航太學會/燃燒學會」學術聯合會議論文，民國 91 年 4 月。
52. 劉維義、葉仁德、林木榮"水氣霧滅火系統在區劃空間之應用與驗證"2002 中華民國「民航學會/航太學會/燃燒學會」學術聯合會議論文，民國 91 年 4 月。
53. 劉恩廷，"以水霧作為海龍替代物滅火劑性能評估之數值模擬" 國立交通大學機械工程研究所碩士論文，民國 88 年 6 月。
54. 劉維義、徐一量、林木榮"細水霧滅火系統在區劃空間內之通風影響分析"，現代防災與防火科技展望與應用國際研討會，民國 92 年 12 月。
55. 林木榮、徐一量、葉仁德、李全、呂信忠，"水氣霧系統火災消滅分析暨效能分析技術結案報告"，工研院環安中心，民國 91 年 11 月。
56. 劉維義、徐一量、林木榮、陳俊勳，"細水霧滅火系統在船舶火災之消滅與應用"消防與防災科技，民國 92 年 7 月。
57. 劉維義，"火災防護系統有效性與可靠性分析"消防與防災科技，民國 92 年 1 月。
58. 陳建志、林元祥、唐雲明，"火災後區劃空間結構抗火性能失效模

- 式之建立”，災害防救學報第 2 期，中央警察大學，民國 90 年 6 月。
59. 徐一量，"火場模擬技術手冊"，工研院環安中心，民國 90 年 12 月。
 60. 林木榮、藍成陽、徐一量、李全、劉維義、葉仁德，"廠房火災後果模擬分析與緊急應變系統建立結案報告"，工研院環安中心，民國 90 年 12 月。
 61. 劉維義、林木榮、湯志昌，"火災風險分析技術在防火工程之應用與探討"，2002 工業安全衛生技術研討會論文，民國 91 年 12 月。
 62. 劉維義，"細水霧全區洩放滅火系統在機械空間抑制效能之驗證"，國立交通大學產業安全與防災研究所，高科技廠房與建築防火期末報告，民國 90 年 1 月。
 63. 刘洪令、徐长岚、王宗华，"水喷雾灭火系统及其发展"，山东省建筑设计研究院，2001。
 64. 陈乃霖，"自动喷水灭火系统喷水不均匀性的定量研究"，成都市建筑设计研究院，2000。
 65. 陈 芬，"水喷雾设计、消火栓设计探讨"，福州市建筑设计院，2001。
 66. 石磊等，"民用建筑以水喷雾灭火的可行性探讨"，北京给水排水增刊，1999。
 67. 黄晓家，"燃油燃气锅炉房和柴油发电机房水喷雾灭火系统设计"，北京给水排水增刊，1999。