

# 水霧式隔煙系統之 技術與應用研究 (2/3)

內政部建築研究所協辦案研究報告

中華民國 95 年 12 月

水霧式隔煙系統之技術與應用研究 (2/3)

內政部建築研究所協辦案研究報告

(95年度)

# 水霧式隔煙系統之 技術與應用研究 (2/3)

受委託者：中華民國建築學會

研究主持人：蔡榮鋒

研究員：周奕廷

研究助理：陳宥全

內政部建築研究所研究計畫期中報告

中華民國九十五年十二月

## 目次

目次	I
表次	III
圖次	V
摘要	VII
第一章 緒論	1
第一節 研究背景與目的	1
第二節 目的	3
第二章 文獻回顧	7
第一節 撒水頭	7
第二節 細水霧消防系統(WMFSS)	10
第三節 細水霧消防系統(WMFSS)	11
第三章 研究流程、儀器設備及實驗	13
第一節 子噴頭及組合噴頭	13
第二節 實驗場景	13
A. 水霧系統	13
B. 排煙系統	13
C. 隔間&幾何尺寸修改	13
第三節 冷流場實驗	14
第四節 熱流場實驗	15
第四章 研究發現	31
第一節 結果與討論	31
第二節 成果及效益	32
第五章 結論與建議	33
附錄	35
參考文獻	37



表次

表 1.1	水消防系統設備比較表	4
表 1.2	撒水頭設備系統之優缺點	5
表 2.1	細水霧滅火系統與其他滅火系統的特性分析	12
表 3.1	數款子噴霧器的噴霧特性測試結果	17
表 3.2	冷流場實驗數據	17
表 3.3	熱流場實驗條件 A H、B H	18



## 圖次

圖 3.1a 型號 9007 子噴頭擴散角測試	19
圖 3.1b 型號 P010 子噴頭擴散角測試	19
圖 3.2 噴頭母座設計	19
圖 3.3 場地施工示意圖	20
圖 3.4 實驗場景模型	21
圖 3.5a 噴霧器支架	22
圖 3.5b 高壓供水系統	22
圖 3.6a 排煙系統	23
圖 3.6b 3HP 鼓風機馬達	23
圖 3.7a 碳酸鈣板隔間外側	24
圖 3.7b 碳酸鈣板隔間內側	24
圖 3.8 主要量測儀器與觀察人員之配置	25
圖 3.10 AH1 溫度時間變化圖&油盆重量變化圖	26
圖 3.11 AH4 溫度時間變化圖&油盆重量變化圖	26
圖 3.12 AH 實驗結果	27
圖 3.14 BH1 溫度時間變化圖&油盆重量變化圖	28
圖 3.15 BH4 溫度時間變化圖&油盆重量變化圖	28
圖 3.16 BH 實驗結果	29





## 摘要

細水霧滅火系統，是目前用水量最低、滅火效率最高之水系統消防設備，目前已工業、船舶、古蹟、隧道及易受水損之電子機房。水霧粒徑小可長期懸浮空中、或隨氣流漂移，不僅可滅火；亦可吸熱降溫、吸附煙塵。本研究之成果證實，組合數款垂直、水平斜向下噴射之扇形水霧，即可作為隔煙、隔熱、滌煙，抑制閃燃、滅火及防止竄燒等多功能之水霧式消防設備。本研究證實，強制通風下（3HP 排煙機、轉速 10~80Hz），壓力 100bar 流量 25~ 30 l/min 之扇形水霧雲，仍可撲滅四個油盆共 2000 cc 之汽油火災，並使火焰區之溫度迅速降至 100°C 已下；水霧後方之避難區溫度長期維持在 50°C 以下，氧氣與 CO 濃度為持在 18% 以上、500ppm 以下。本系統，若能持續研發，應可成為倍避難、救人、滅火之重要消防設備。



## 第一章 緒論

### 第一節 研究背景與目的

近年來台灣經濟快速成長，人民的生活水平也大幅的提升，加上都市人口的急遽膨脹，都市建築或公共娛樂場所所有朝向規模大型化、樓層立體化、設備複雜化及結構特殊化等等；另外對於公共場所的使用也更朝向多元化的使用，這樣複雜的建築結構雖然在土地的使用上獲得充分地利用，一旦火災，往往造成嚴重人員傷亡及財產損失。根據英美案例顯示，逃生途徑上約有 70~80% 之人員因吸入有毒氣體，中毒死亡；濃煙可說是火災時最重大之殺手。排煙系統可將有毒煙霧抽離火場，是目前最常用之逃生設備；使用隔煙設備，可防止濃煙擴散，減少人命安全與財務上的損失。

現有之水系統消防設備，有撒水頭( Sprinkler )，撒水幕系統(Water screen, Water curtain, Drencher)及細水霧消防系統(WMFSS)。這些水系統消防設備各有其功能及特點。撒水頭 (sprinkler)是最常用之滅火設備，但與排煙系統合併使用，卻常發生互相抵銷之現象；撒水幕系統較少見，主要是形成防火水幕，用於阻隔火勢或阻熱，以利於逃生，單獨使用失效之風險高[11]；細水霧則在密閉空間滅火效率高、且具有一定之滌煙效果，但需針對個別空間設計、尚無標準設計規範。

水是很好的滅火劑，其實不論撒水頭、細水霧 (Sprinkler, Water droplet) 都是噴霧(Spray)的一種，只要這些水滴能順利地飄入火焰根部 (底部)、或鄰近區域，就可降低燃燒反應速率、潤濕燃燒半成品。水滴吸熱化成蒸氣發揮排氧作用，一定可控制、抑制火勢、甚至滅火。

噴霧塔是化工業常用之滌煙設備【A1~10】，藉水滴吸附大多數之有毒煙氣。細水霧消防系統(WMFSS)是海龍滅火系統之最佳替代品，其主要優點為用水量少、滅火時間短，在密閉空間滅火效率高、且具有一定之滌煙效果。芬蘭 Marioff Inc. Tuomissari 【B1】亦曾發表電腦房之水霧式隔煙/滌煙系統。

- 
1. 蔡春進，半導體工業的廢氣及微粒之聯合去除系統，交通大學 環工所，國科會研究報告，民國 91 年。
  2. 林啟文，以噴霧塔去除揮發性有機廢氣之數學模式建立及影響因子之研究，民國 87 年。

3. 李岩錡，以雙噴霧塔系統進行煙道氣中脫硝效能及反應動力之探討，國立成功大學環境工程學系碩士論文，民國 89 年。
4. 雷明遠，鄭紹材，林欲昌，黃建榮，「撒水幕應用於區劃構建之研究」，中華民國建築學會第十六屆第二次建築研究成果，台北市：建築學會，民國 93 年。
5. 鍾基強，董賢聲，薛朝鴻，廖健成，水系統火災控制技術之研究-水系統效應對性能試煙控之模式技術與實驗驗證，台北市：內政部建築研究所，民國 92 年。
6. 陳俊勳，滅火系統技術研發之規劃研究-細水霧滅火系統技術研發之規劃研究(II)，台北市：內政部建築研究所，民國 93 年。
7. 陳俊勳，陳浩然，水系統火災控制技術之研究(II)-細水霧滅火系統技術研發之規劃研究，台北市：內政部建築研究所，民國 93 年。
8. 蔡榮鋒，水氣霧噴頭開發及噴撒特性檢測委託案結案報告，新竹：工研院環安中心，民國 93 年。
9. 蔡榮鋒，李正國，李廣齊，「量測液滴幾何特性的視覺方法」，中華民國第二十六屆全國力學會議，雲林，民國 91 年。
10. 林建勳，排煙設備與撒水設備交互影響特性之研究，國立雲林科技大學機械工程系碩士論文，民國 92 年。
11. Tuomissari ,M.“Smoke scrubbing in a computer room,” Halon options technical working conference, Albuquerque : BFRL, 1999

## 第二節 目的

本計畫 94 年度之主要成果，為水霧式滌煙、隔煙、隔熱及水霧特性量測技術及隔煙隔熱效率測試系統（已申請發明專利[12]）。本研究證實組合泛用之一般圓錐及扇型噴霧器，在流量 17~20 公升/分、壓力 50~70 bar，SMD 160~360 $\mu$ m，即可建構具滌煙、隔煙、隔熱，迅速將煙塵降溫（滌煙）、限制其擴散範圍與速度等多重功用之噴霧系統(Spaying system)；本系統用水量僅為撒水頭 20~25 % (Sprinkler)，可於 20~40 秒內，將水霧後方降溫至 50 $^{\circ}$ C 以下；O<sub>2</sub> 濃度可長時間維持在 19.5~20.4 % 以上、CO<sub>2</sub> 濃度則緩慢升至 1.27%、CO 緩慢升至 5~7 ppm。請注意，本計畫並未使用昂貴之細水霧噴霧器 (Water mist)。

鑒於水系統消防設備與排煙系統合併使用，常發生互相抵銷之現象，排煙系統可能引入大量氧氣 (entrainment)、導致火勢擴大，而撒水頭可能將煙層冷卻下降，增加排煙難度。

本計劃為第二年研究；擬建構以水霧式滌煙/隔煙系統，並探討排煙設備的啟動(強制通風)對水霧系統隔煙效果的影響，透過實驗尋求最佳之排煙及滅火組合；評估最小煙層沉降速度（濃度分佈、擴散速度），最快滅火時間、火場最快降溫速度，以研發具滅火與隔煙、隔熱多重功用之水霧消防系統，並整合排煙設備，以提高避難與消防之功能，保障社會安全。

本報告分為四章，本章為第一章；第二章為文獻回顧；第三章研究流程、儀器設備及實驗，包括量測項目與實驗參數，第四章研究發現，最後一章，為第五章結論與建議。

表 1.1 水消防系統設備比較表

比較內容	細水霧 (Water mist)	撒水頭 (Sprinkler)	撒水幕系統
成份	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
系統壓力(Bar) 1kg/cm <sup>2</sup> 1.02 Bar	高壓 ≥35 中壓 12-35 低壓 ≤12	2~7	6~13
用水量低、不佔空間	是	否	否
火災類型適用性	A, B, C	A	A
滅火方式	快速降溫及阻絕氧氣	降溫	無法滅火,用於阻隔火勢或阻熱
對火場高層(近天花板)的急速冷卻降溫能力	具極佳的降溫能力	無能力	無能力
降低火焰場溫度	是	否	否
可快速啟動抑制火勢	是	是	否(阻隔火勢)
減低高溫對人員的危害、並增加逃生時間	優良	良	良
是否需疏散計劃	否	否	是
專設排氣裝置	否	否	否
對人的安全性	無害	無害	無害
具有腐蝕性	否	否	否
減少煙霧及降低腐蝕性氣體之濃度	優良	良	差
溫室效應影響(GWP2)	0	0	0
所需泵浦	中高壓低流量	低壓高流量	低壓高流量
需要填充	否	否	否

資料來源：International Water Mist Association、工研院環安中心。

表 1.2 撒水頭設備系統之優缺點

優點	一. 使用簡易好用，須與排煙設備合用
	二. 搭配排煙設備系統可改善能見度
	三. 搭配排煙設備系統可以降低火場溫度與有毒氣體濃度
	四. 搭配排煙設備系統可以降低火災造成的損失
	五. 搭配排煙設備系統，假如撒水設備沒有作動，則排煙設備可以提供保護
	六. 搭配排煙設備系統可以避免過多的灑水頭作動
缺點	一. 搭配排煙設備系統，排煙會增加燃燒速率
	二. 搭配排煙設備系統，排煙設備會延遲撒水頭的作動。
	三. 搭配排煙設備系統，排煙會增加作動的撒水頭數目。
	四. 搭配排煙設備系統，撒水會降低排煙效率
	五. 用水量大

表三 細水霧設備系統之優缺點

優點	一. 用水量低、滅火時間短
	二. 密閉空間滅火效率高、且具有一定之滌煙效果
	三. 俱吸熱、滅火、隔煙之能力
	四. 價格低廉且易於取得資源
	五. 能延長人員之逃生時間
缺點	一. 較不適宜用於非密閉空間
	二. 國內尚無 WMFSS 之噴霧特性檢測規範
	三. 水霧式隔煙/滌煙系統需針對空間另外設計、重新制定安全規範

資料來源：本研究整理





## 第二章 文獻回顧

現有之水系統消防設備，有撒水頭及細水霧消防系統(WMFSS)。本章將簡要說明這些水系統消防設備之特點及其對火場排煙之影響。

水之所以能有效的滅火主要是因為水具有相當高的蒸發潛熱。一公升的水由 0°C 加熱到 100°C，需吸收 418KJ 的熱能：將水蒸發(溫度不變)則需吸收 2257kJ 的熱能。水的沸點遠低於固態易燃物的分解溫度(250°C 到 450°C)，故可藉由發水滴，有效地降低溫度。

水系統消防設備滅火之有效性，取決於：水的冷卻效應，水滴的尺寸必須相當微小，而且水量需要足夠使用於整個的火場中，因此水滴是否到達火源位置、水滴尺寸大小、噴撒角度等，都是影響滅火有效性的重要參數。理論上，水滴的尺寸越小，增加單位體積之水的表面積，可加速其吸熱效率。但在實際情況，太小之水滴動能不足，無法穿過火焰到達燃燒物的表面，反而無法有效滅火。

根據上述，最有效的水系統消防設備，必須產生粒徑夠小、動能夠大之水滴，且可迅速充滿整個火場，到火焰之根部，減緩燃燒效應。細水霧消防系統(WMFSS)是目前最合乎這些要求之水系統消防設備，將詳述於第三章。

### 第一節 撒水頭

撒水頭(C1~6, 鍾基強等)是最常用之滅火設備，可有效抑制火勢或撲滅火災。根據世界各國的統計數字中，作動很快的撒水系統可於初期撲滅 95% 的火災，並顯著降低熱、火燄與煙，及一半的火災死亡率。撒水系統藉著水的冷卻效果，以減低火場溫度、燃燒速度，並可大大地降低火焰上方的溫度(Hankins、F.M.)。因此消防相關法令，強制要求，一般公共建築物需加裝撒水設備。(如表 2-1)

撒水設備之滅火機制包含下列四項：

- a. 直接冷卻燃燒物體的表面。大量之水滴，若能夠到達燃燒的地方，降低燃燒物體表面之熱分解速率降低；
- b. 將火源周圍之物體預先弄濕，可以阻止火勢繼續向外擴大。
- c. 降低火場內之溫度；
- d. 當水滴被蒸發後，水蒸氣會使得空氣中的氧氣變稀薄。

因為撒水頭動作後，燃燒過程中受到干涉，水滴不僅冷卻火焰及火場內之溫度，煙層中的熱氣受到水滴冷卻作用、浮力降低，造成：

- (1)燃料消耗率迅速下降、或不完全燃燒型態，導致 CO 濃度增加 (FM, Factory Mutual)。
- (2)原本穩態的煙層，因水滴之冷卻作用，煙層的溫度降低，煙層的厚度增加，加速煙層下降速度(B13, 鍾基強、董賢聲)，最後煙會擴散、充滿整個房間。
- (3)降低煙霧通過排煙孔的流動速度，有可能阻礙排煙系統的功能，反而阻礙人員的逃生。

撒水設備與排煙設備雖各有優點。美國 NFPA[5]對於在已經裝設撒水器的建築物中再裝上排煙口仍感矛盾。現有之文獻，對於在建築物中，同時裝設排煙設備與撒水設備，亦有正反兩極不同的看法。

### 正面看法

- (1) 排煙設備可以改善能見度

排煙設備最基本的功能就是將濃煙排出外，增加建築物內的能見度，有利於人員逃生，更可讓消防隊員確認火源的位置並將其完全撲滅。

- (2) 排煙設備可以降低火場溫度與有毒氣體濃度

排煙設備將高溫有毒的濃煙排出建築物外，並將室外溫度低之乾淨空氣，由進氣口送入，可降低火場內的溫度與有毒氣體的濃度，方便人員的逃生。

- (3) 排煙設備可以降低火災造成的損失

排煙設備與防煙垂壁的共同使用，可將濃煙限制在防煙區劃內，避免濃煙擴散到建築物的其它區域，對建築物內部造成更大的損害

- (4) 假如撒水設備沒有作動，則排煙設備可以提供保護

雖然撒水設備在發生火災時，高達 90%皆能有效的作動並撲滅火勢，然而假如撒水設備無法作動或者迅速的撲滅火勢，則此時排煙設備就可發揮其功用，將濃煙排出，幫助人員避難逃生。

- (5) 排煙設備可以避免過多的灑水頭作動

當限制煙與熱擴散到防煙區劃以外的區域時，可以避免遠離火源的撒水頭住動，亦可減少過多撒水頭作動而造成的水害。

### 負面看法

- (1) 排煙會增加燃燒速率

在密閉空間中，排煙設備一面將濃煙連續排出，另一面吸入乾淨的冷空氣。可能促進燃燒速率，保持在 FREE BURN 的情況。相對的，假如沒有設置排煙設備，空間內的氧氣會被持續的消耗，燃燒速率也因此降低。

- (2) 排煙設備會延遲撒水頭的作動。

由於排煙設備將煙與熱排出，因此天花板下方之熱煙層的溫度會降低，連帶使得撒水頭的作動會有所延遲。導致在撒水頭作動前，火勢不斷的擴大，甚至導致火勢無法控制住。

(3) 排煙會增加作動的撒水頭數目。

由於撒水頭的作動受到延遲，因此在第一個撒水頭作動時，火勢以更加猛烈，造成需要更多的撒水頭作動來控制住火勢。假如有設置防煙垂壁，則熱煙氣會蓄積在區劃內；造成區劃內的溫度迅速增高，就算撒水頭遠離火源，但還是會因為高溫而作動，造成作動的撒水頭數目增加。

(4) 撒水會降低排煙效率。

當撒水頭作動後可以有效降低濃煙溫度，但同樣會使其浮力降低，造成濃煙無法順利排出。

根據上述，撒水頭可能與煙層交互作用、互相抵銷，反而不利排煙或滅火。

- 
1. 鍾基強，董賢聲，薛朝鴻，廖健成，水系統火災控制技術之研究-水系統效應對性能試煙控之模式技術與實驗驗證，台北市：內政部建築研究所，民國 92 年。

## 第二節 細水霧消防系統(WMFSS)

細水霧消防系統(WMFSS)之主要優點為，用水量少、滅火時間短，在密閉空間滅火效率高、且具有一定之滌煙效果，如表 2.1、2.2。蒙特婁公約限制氟氯碳化物的製造及銷售後。WMFSS 具有「乾淨無環保公害 (Clean)、對人體的健康及安全，無不良性影響 (Health & Safety)、價錢要低廉又易於取得 (Readily Available)」等優點，是海龍滅火系統之最佳替代品。台電已改用 WMFSS，保護變電站。國內研究 WMFSS 系統之學者，有陳俊勳【E1~2】、及蔡榮鋒等【E5】等。

細水霧系統與一般灑水頭系統主要不同之處，簡述如下，細水霧系統所產生水滴的 VMD 直徑約在 30 至 300 $\mu\text{m}$  (VMD: volumetric mean diameter; 體積平均直徑)，其用水量大約為，撒水頭之 10 % (an order of magnitude, 少一個級數)。

水霧可吸附大多數之有毒煙氣，化工業或焚化爐常用噴霧塔作為滌煙設備；芬蘭 Marioff Inc. Tuomissari 亦曾發表電腦房之水霧式隔煙/滌煙系統。美國 Hughs 公司之消防專家 Mawhinney，則建議現有之 WMFSS 適用於滅火，雖具滌煙效果，但將水霧用於隔煙/滌煙，僅能延長逃生時間、火場內之煙氣仍具毒性、對生命仍有威脅，火場人員不應長期停留。Mawhinney 強調，水霧式隔煙/滌煙，應另外設計、重新制定安全規範。

研發水霧式隔煙系統，需建立噴霧特性量測性統【F1~3】。其實細水霧、水霧都是噴霧，考量細水霧系統在國內應用案例逐年增加，我國有必要制定 WMFSS 之噴霧特性檢測程序及規範，以因應未來之需求。

- 
1. 陳俊勳，滅火系統技術研發之規劃研究-細水霧滅火系統技術研發之規劃研究(II)，台北市：內政部建築研究所，民國 93 年。
  2. 陳俊勳，陳浩然，水系統火災控制技術之研究(II)-細水霧滅火系統技術研發之規劃研究，台北市：內政部建築研究所，民國 93 年。
  3. 蔡榮鋒，水氣霧噴頭開發及噴撒特性檢測委託案結案報告，新竹：工研院環安中心，民國 93 年。

### 第三節 細水霧消防系統(WMFSS)

本計畫 94 年度之主要成果，組合泛用之一般圓錐及扇型噴霧器（請注意，不必使用昂貴之細水霧噴霧器（Water mist）），在流量 17~20 公升/分、壓力 50~70 bar，SMD 160~360 $\mu$ m，即可建構具滌煙、隔煙、隔熱，迅速將煙塵降溫（滌煙）、限制其擴散範圍與速度等多重功用之噴霧系統(Spaying system)；本系統用水量僅為撒水頭 20~25 % (Sprinkler)，可於 20~40 秒內，將水霧後方降溫至 50 $^{\circ}$ C 以下；O<sub>2</sub> 濃度可長時間維持在 19.5~20.4 % 以上、CO<sub>2</sub> 濃度則緩慢升至 1.27%、CO 緩慢升至 5~7 ppm。

建築物火災之消防設備，主要目的是人員逃生安全。煙是火災中最大殺手，依照實驗結果，水平噴霧的確，可冷卻及潤濕，蓄積在天花板下之熱煙；垂直噴霧，可隔絕或大幅降低熱煙向外擴散之速率；整合水平&垂直噴霧，具滅火與滌煙、隔煙、隔熱多重功用之水霧式消防設備。

高層建築物及科技廠房之大型排煙管、隧道（車禍）、或地鐵，等火災有其相似性。如能在火災初期，在火源之鄰近區域及上游，噴灑水霧，藉隧道內部本身之通風設備，送入冷濕之空氣；儘管隧道火災（車禍），屬 B 類遮蔽性火災，只要將閃然時間延後，不管是人員逃生、抑制火勢、煙霧擴散，災後處理等，應可獲得良好之滅火效果。

表 2.1 細水霧滅火系統與其他滅火系統的特性分析

比較內容	細水霧 (Water mist)	撒水系統 (Sprinkler)	海龍 (Halon)FM-200	二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )
成分	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
系統壓力(Bar) 1kg/cm <sup>2</sup> 1.02 Bar	高壓 ≥35 中壓 12-35 低壓 ≤12	2~7	110	53
火災類型適用性	A, B, C	A	B, C	B, C
滅火方式	快速降溫及 阻絕氧氣	降溫	切斷燃燒的 連鎖反應	氧氣濃度下 降稀釋
對火場高層(近天花 板)的急速冷卻降溫 能力	具極佳的降溫 能力	無能力	無能力	無能力
降低火焰場溫度	是	否	否	否
高吸熱能力	是	是	否	否
可快速啟動抑制火勢	是	是	否	否
減低高溫對人員的危 害、並增加逃生時間	優良	良	否	否
釋放(人員撤離)時間	無限制	無限制	10 秒	60 秒
是否需疏散計劃	否	否	是	是
非封閉型空間	適用	適用	不適用	不適用
專設排氣裝置	不需要	不需要	需要	需要
啟動後火場氧濃度(%)	22(不變)	22(不變)	約 18	約 15
對人的安全性	無害	無害	生成物有毒	吸入 CO <sub>2</sub> 有毒
具有腐蝕性	否	否	是	是
減少煙霧及降低腐蝕 性氣體之濃度	優良	良	否	否
溫室效應影響(GWP2)	0	0	2050	1
大氣中存活期 (ATM. LIFE)	N/A	N/A	31 年	120 年
需要泵浦	是	是	否	否
需要填充	否	否	是	是
耗水量低、不佔空間	是	否	N/A	N/A

資料來源：本表資料總合各網路上資料庫查知，部分資料由工研院環安中心提供。

## 第三章 研究流程、儀器設備及實驗

本章分為四節，第一節敘述子噴頭及組合噴頭之設計與測試；第二節實驗場景之建構；第三與第四節敘述冷流場與熱流場(燃燒&滅火)之實驗架構及結果。

### 第一節 子噴頭及組合噴頭

本計劃基於取得容易、替換方便之原則，採用商用量產之扇形及實圓錐子噴霧器(如表 3.1)，圖 3.1a&b 顯示，子噴頭之噴霧在風速 6~10m/s，依然可保持其既定軌跡及擴散角；在 50~70bar 的壓力下，流量介於 2~6L/min 之間。圖 3.2 為本計劃之噴霧器母座，可結合數個扇形與實圓錐噴霧器，配置各個噴霧器不同的水霧噴射方向，以找出適合於實驗空間的噴霧器組合。水霧系統的實驗參數，包含組合噴頭的水霧噴射方向、壓力、流量、數量、液體通量分布(Liquid flux)等，以及配置位置與火源的距離。

### 第二節 實驗場景

本研究沿用 94 年建置之水霧隔煙實驗室，針對本年度規劃之實驗內容，修改實驗室之水霧系統、排煙系統、及隔間(3×3×11m<sup>3</sup> 圖 3.3)。圖 3.4 為實驗場景模型(1:20 之上視、正視、側視及立體圖)。

**水霧系統** 實驗室本已設有一組噴霧器支架，為在火源兩側形成水霧包圍區，再設置一組噴霧器支架(圖 3.5a)，自高壓供水系統(圖 3.5b)以高壓管連接兩個支架。

**排煙系統** 原有之排煙系統僅可自通道末端抽取煙氣，因應實驗需要，需延伸排煙系統風管至水霧包圍區上方，增設數個可開關之吸風口(gate)，改用 3HP 鼓風機馬達及 80Hz 變頻器以調節風量、風速，經測試可模擬必要之強制排煙或過度排煙之流場條件(圖 3.6a&b)。

**隔間&幾何尺寸修改** 因實驗需要，延長逃生通道，並增設觀測窗，以便 DV 拍攝實驗流程及結果。天花板上方碳酸鈣板亦妥善填補，以防止有毒氣體從天花板中冒出擴散至觀測區內(圖 3.7a&b)。



### 第三節 冷流場實驗

滅火排煙實驗前，先進行冷流場實驗，以了解氣流與水霧流場之可能變化，以確保熱流場實驗時人員與儀器的安全。進行測試噴頭基本特性後，利用模擬器流及排風系統(圖 3.7)，模擬實際火源與排風系統可能造成的氣流場變化，觀察水霧在通道空間內飄動的方向及分布的空間密度，並觀察水霧之液體通量分布(Liquid flux)，依據 DV 紀錄採用 6 顆子噴霧器，在壓力 30~100bar、流量介於 10~18L/min 之水霧可於 30 秒內充滿整個防護空間(如表 3.2)。

## 第四節 熱流場實驗

熱流場實驗，主要在探討排煙設備之吸風口（位置、數量）及吸風量；水霧噴頭配置方式、流量、噴頭與火源距離等，對隔熱、隔煙、滌煙及滅火之影響。本節先探討 a 單邊水霧與排煙風量對熱釋放率、及隔熱、隔煙、滌煙之影響；b 再探討水霧噴頭配置方式對隔熱及滅火等之影響。

在通道空間普遍設置熱電耦與定點式偵煙感測器，於噴霧器支架設置氣體分析儀之量測點、及數個簡易型煙氣濃度分析儀，並以數據收集系統(DAQ) 同步紀錄上述儀器之量測值；以 DV 記錄通道及避難空間內水霧、火焰與黑煙之影像，以電子秤量測實驗過程中的油盆載重變化（負值表示蒸發之汽油重量）。觀測區右側設有 1.5 米寬逃生口與滅火器，足以確保實驗人員之安全，主要量測儀器與觀察人員的配置，如圖 3.8 所示。

### a.單邊水霧

本項實驗之流場條件，如表 3.3 Flow AH1~AH5，主要變數為排煙機之轉速（0~80 Hz），單邊噴射水霧壓力 100bar、流量介於 12~18L/min、四盆 92 汽油共 2000 cc。

圖 3.10a & b 顯示，Flow AH1 火源區、避難區(水霧後方)之溫度時間變化圖。圖 3.10 顯示排煙機轉速 10 Hz，在 100 秒內，可將火源區溫度 ( $T_{\text{flame}}$ ) 由 30°C 升至 127°C；130 秒起動水霧、20 秒 ( $t=150$ ) 後降為 95°C、避難區溫度由 ( $T_{\text{safe}}$ ) 由 90°C 降至 75°C。電子秤之重量顯示， $t=150$  秒時，油盆重量由 -1200 克、於  $t=200$  秒增加至 -600 克。本實驗滅火及降溫效果不佳，於  $t=200$  秒中止，以保護人員安全。

圖 3.11 顯示排煙機轉速 80 Hz (Flow AH4)，在 70 秒內，可將火源區溫度 ( $T_{\text{flame}}$ ) 由 30°C 升至 228°C；100 秒起動水霧、20 秒 ( $t=120$ ) 後降為 125°C、避難區溫度由 ( $T_{\text{safe}}$ ) 由 140°C 降至 90°C。電子秤顯示， $t=120$  秒時，油盆重量由 -1800 克、開使緩慢上升，於  $t=200$  秒增加至 -1500 克。

圖 3.12 整合 Flow AH 之實驗結果，顯示提高風扇轉速，引入大量空氣、增加熱釋放率，導致溫度急速上升、降低水霧之滅火及隔熱效率。請注意，94 年之結果（表 3.4 Flow 1a,b&c）顯示，在自然通風下，使用單邊水霧、即可發揮隔熱、隔煙、滌煙及滅火之效果。

比較本研究與 94 年之結果，顯示，排煙機雖可排出濃煙、卻也引入等量空氣、使火勢變大、造成更多量之濃煙，這種現象在富油火災(Fuel Rich)或易燃物火災相當明顯。本結果顯示不當使用排煙機，比不用排煙機還要糟糕，因為引入大量空氣，反而擴大火勢與災損；其所產生之濃煙量很可能大於所排出濃煙量，反而不利逃生、更易造成大量人員死亡，使用時應謹慎。

### b. 雙邊水霧

本實驗之流場條件，如表 3.3 Flow BH1~BH6，主要變數為排煙機之轉速 (0~80 Hz)，次要參數為風門位置與火源與水霧噴頭之相對距離，壓力 100bar、流量介於 18~26L/min、四盆 92 汽油共 3000~4000 cc。

圖 3.14a & b (Flow BH1) 顯示，排煙機轉速 10 Hz，在 80 秒內，將火源區溫度 ( $T_{\text{flame}}$ ) 由 30°C 升至 128°C；110 秒起動水霧、20 秒後 ( $t=130$ ) 降為 80°C、避難區溫度由 ( $T_{\text{safe}}$ ) 由 90°C 降至 70°C；40 秒後 ( $t=160$ ) 滅火；滅火及降溫效果相當快速。電子秤顯示 (圖 3.14c)，汽油起初因燃燒及揮發，逐步降至 -1100 克 ( $t=110$  秒)，其後油盆重量逐漸增加至 -750 克 ( $t=150$  秒)、-250 克 ( $t=250$  秒)，可能是水霧隨氣流漂入油盆或汽油冷卻落回油盆。

噴射水霧時，排煙通道之溫度約 80°C、黑黃色濃煙帶有汽油味，顯示部份已揮發之油滴；可燃物、或燃燒半成品(中間產物)隨氣流移動；水霧噴射後溫度迅速降為 45°C、煙氣變成白色、帶有溼氣，看不到黑色煙塵，顯示水霧具有抑制煙霧產生或滌煙之效果。圖 3.14d 顯示，氧氣濃度大部分時間高於 18.5%、CO 濃度一直小於 200ppm。

本實驗顯示，避難區溫度，可迅速降低至 40°C、氧氣濃度高於 18.5%、CO 濃度小於 200ppm，証實水霧不僅可作消防設備、其避難逃生功能相當顯著，應繼續研發成為全功能之消防設備。

圖 3.15a & b (Flow BH4) 顯示，排煙機轉速 60 Hz，在 70 秒內，將火源區溫度 ( $T_{\text{flame}}$ ) 由 30°C 升至 249°C、避難區溫度 ( $T_{\text{safe}}$ ) 升至 150°C；隨即起動水霧、20 秒後  $T_{\text{flame}}$  &  $T_{\text{safe}}$  幾乎不變；50 秒後 ( $t=120$ )  $T_{\text{flame}}$  降為 170°C、 $T_{\text{safe}}$  降至 120°C；80 秒後  $T_{\text{safe}}$  降至 50°C；200 秒後 ( $t=270$ ) 滅火。

電子秤顯示 (圖 3.15c)，汽油起初因燃燒及揮發，迅速降至 -1400 克 ( $t=70$  秒)，此時噴射水霧、但火勢及溫度相當大，直至  $t=115$  秒，才減慢下降速度； $t=150$  到 200 秒油盆重量一直小幅上下震盪，顯示汽油揮發與冷卻效果相當；200 秒後油盆重量開始緩慢增加。圖 3.15d 顯示，氧氣濃度大部分時間高於 18%、CO 濃度一直小於 200ppm (致命濃度 1000ppm 與致命時間 1.5~3 小時)。

圖 3.16 整合 Flow BH 之實驗結果，顯示提高風扇轉速，雖然可排出大量濃煙、但也在火場內部產生更多大量濃煙，其利弊及使用時機值得專案研究探討。很明顯，提高風扇轉速是引入大量空氣、增加熱釋放率，導致火源區 & 避難區溫度急速上升極速上升之主因。本結果，證實不當使用排煙機過量排煙，很容易擴大火勢，反而不力逃生或救災。

綜合上述，雙邊噴射水霧，特別是空氣入口噴射水霧，可強化水霧進入火源或冷卻熱與煙之效果；排煙機不僅排出濃煙、亦協助水霧進入火源、將部分水霧抽入排風管冷卻高熱濃煙、可抑制火勢竄燒。

表 3.1、數款子噴霧器的結噴霧特性測試果

型號	流量	擴散角	強弱	滌煙效果	充滿速度
5004	1.9	60°	中	不佳	慢
9007	2.9	130°	強	佳	快
9004	1.9	110°	弱	不佳	慢
P010	5.0	30°	強	不佳	慢

資料來源：本研究整理

表 3.2 冷流場實驗數據 單位時間：秒(s)

1.噴頭組合-3A 2.模擬火源位置-C 3.排風位置-C 4.排風機頻率 80HZ						
模擬火源	排風	水壓 (bar)	水霧充滿時間	視線遮蔽時間	水霧抽光時間	能見度恢復時間
有	無	30	<b>71s</b>	<b>27s</b>	<b>53s</b>	<b>17s</b>
有	無	100	<b>22s</b>	<b>08s</b>	<b>48s</b>	<b>30s</b>
有	水霧前啓動	100	<b>15s</b>	<b>07s</b>	<b>39s</b>	<b>20s</b>
1.噴頭組合-5A 2.模擬火源位置-C 3.排風位置-C 4.排風機頻率 80HZ						
模擬火源	排風	入風口	水壓 (bar)	水霧充滿時間	視線遮蔽時間	水霧抽光時間
有	無	全開	100	<b>65s</b>	<b>06s</b>	<b>87s</b>
有	水霧前啓動	全開	100	<b>30s</b>	<b>05s</b>	<b>56s</b>
1.噴頭組合-3A 2.模擬火源位置-C 3.排風位置-C 4.排風機頻率 80HZ						
模擬火源	排風	入風口	水壓 (bar)	水霧充滿時間	視線遮蔽時間	水霧抽光時間
有	水霧前啓動	全開	100	<b>17s</b>	<b>05s</b>	<b>49s</b>

資料來源：本研究整理

表 3.3 熱流場實驗條件 AH、BH

Exp		Pressure (bar) Flow rate	Fuel (cc) x N = Total (cc)	$\omega$ Hz	Gate	Fire location
<b>AH</b> <b>(6)</b>	<b>1</b>	<b>100</b> <b>(17.4)</b>	<b>500x4=2000</b>	<b>10</b>	<b>C</b>	<b>Under Gate C</b>
	<b>2</b>			<b>20</b>		
	<b>3</b>			<b>40</b>		
	<b>4</b>			<b>80</b>		
	<b>5</b>			<b>80</b>		
<b>BH</b> <b>(6+3)</b>	<b>1</b>	<b>100</b> <b>(26.1)</b>	<b>500x2=1000</b>	<b>10</b>	<b>C</b>	<b>Under Gate C</b>
	<b>2</b>			<b>20</b>		
	<b>3</b>		<b>750x4=3000</b>	<b>40</b>		
	<b>4</b>			<b>60</b>		
	<b>5</b>		<b>1000x4=4000</b>	<b>80</b>		<b>50cm Off Gate C</b>
	<b>6</b>			<b>60</b>	<b>B</b>	<b>50cm Off Gate C</b>

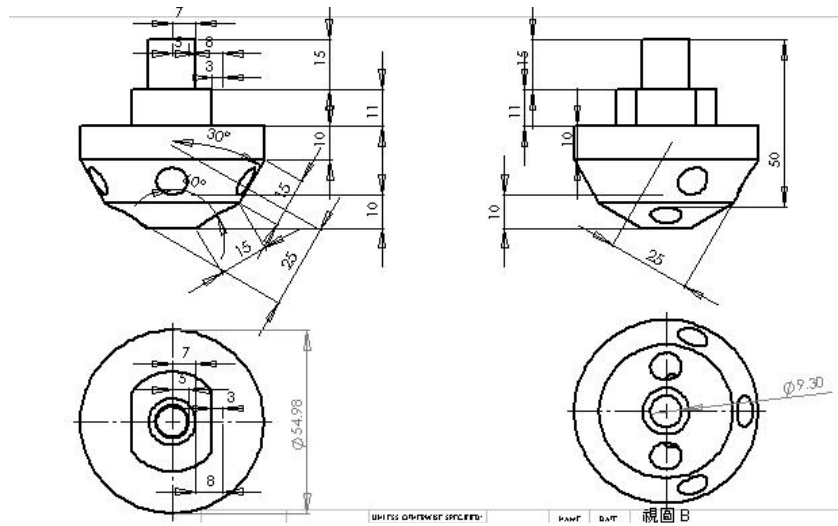
資料來源：本研究整理



資料來源：本研究整理 圖 3.1a 型號 9007 子噴頭擴散角測試

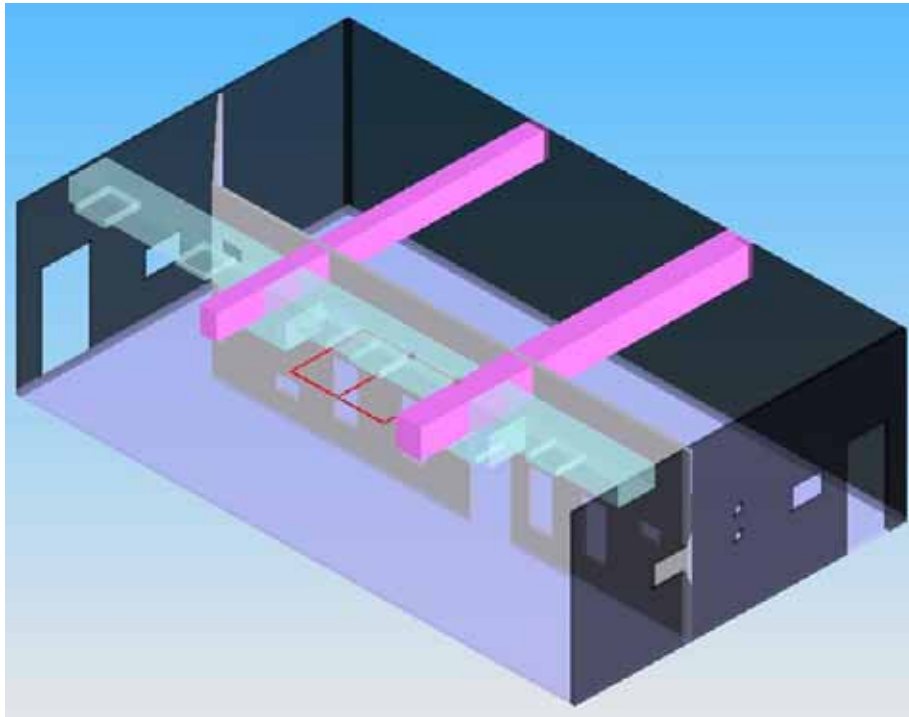


資料來源：本研究整理 圖 3.1b 型號 P010 子噴頭擴散角測試



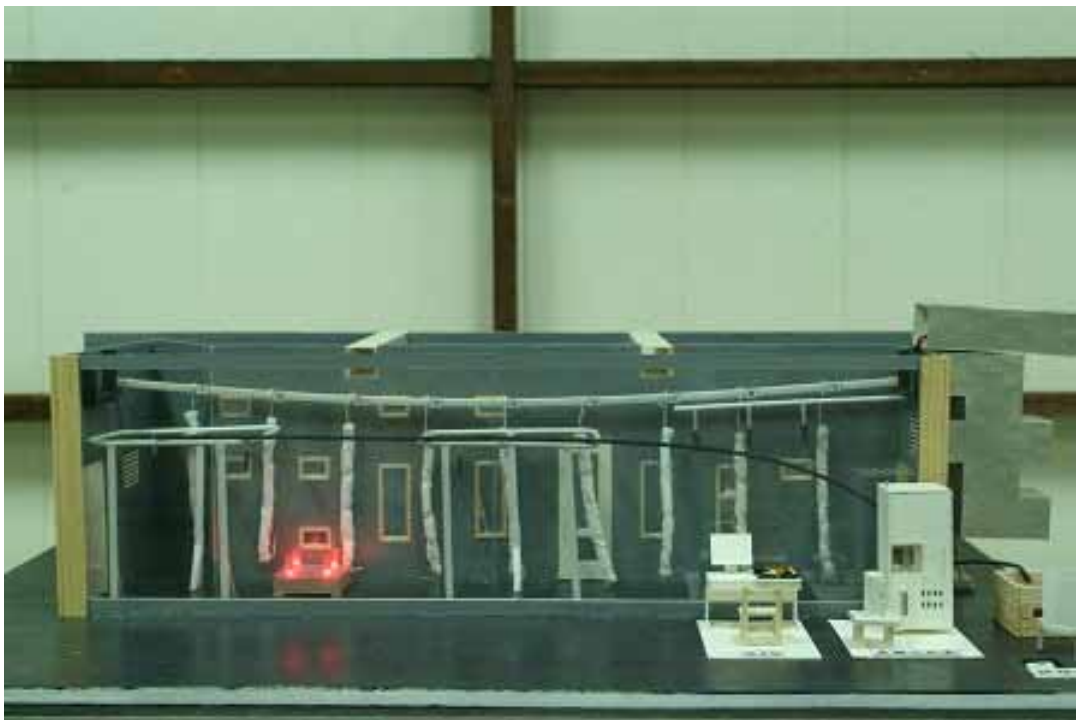
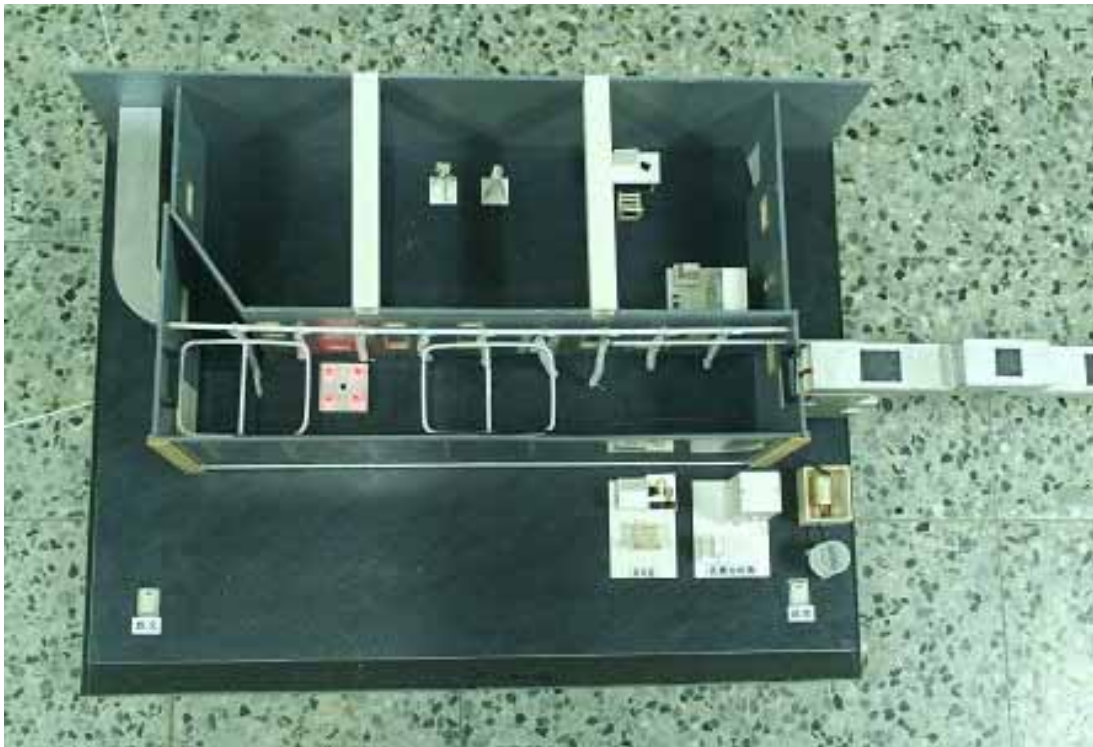
資料來源：本研究整理

圖 3.2 噴頭母座設計



資料來源：本研究整理

圖 3.3 場地施工示意圖







資料來源：本研究整理

圖 3.4 實驗場景模型(1:20 之上視、正視、側視、立體圖)



資料來源：本研究整理

圖 3.5a 噴霧器支架



資料來源：本研究整理

圖 3.5b 高壓供水系統



資料來源：本研究整理

圖 3.6a 排煙系統(風管、風口)



資料來源：本研究整理

圖 3.6b 3HP 鼓風機馬達



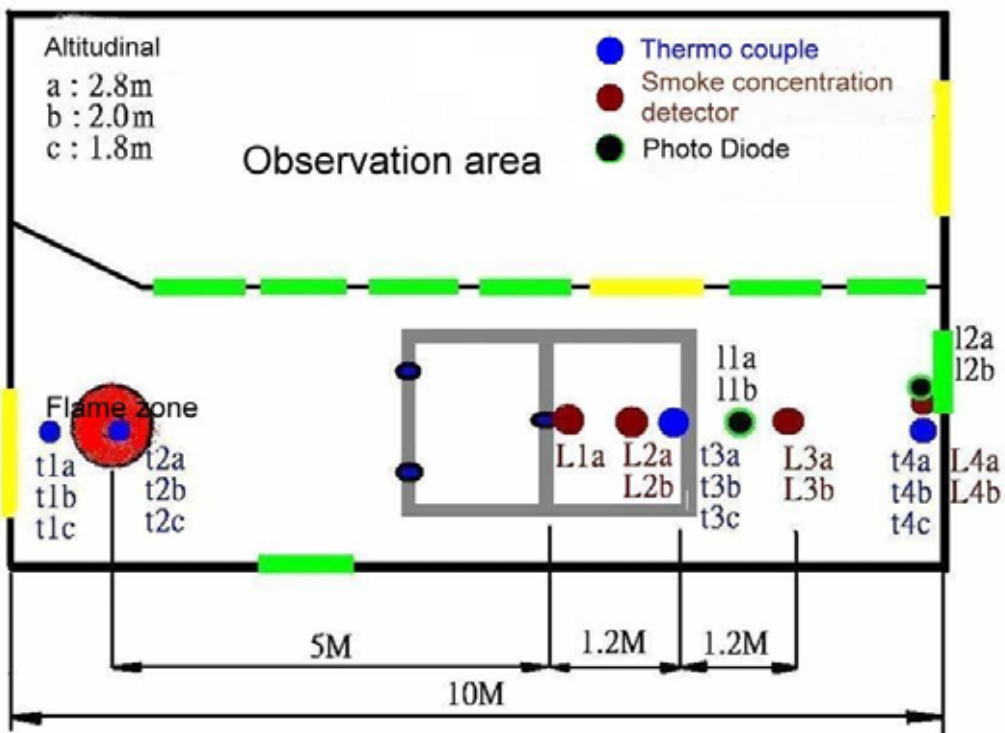
資料來源：本研究整理

圖 3.7a 碳酸鈣板隔間外側(增設觀景窗)

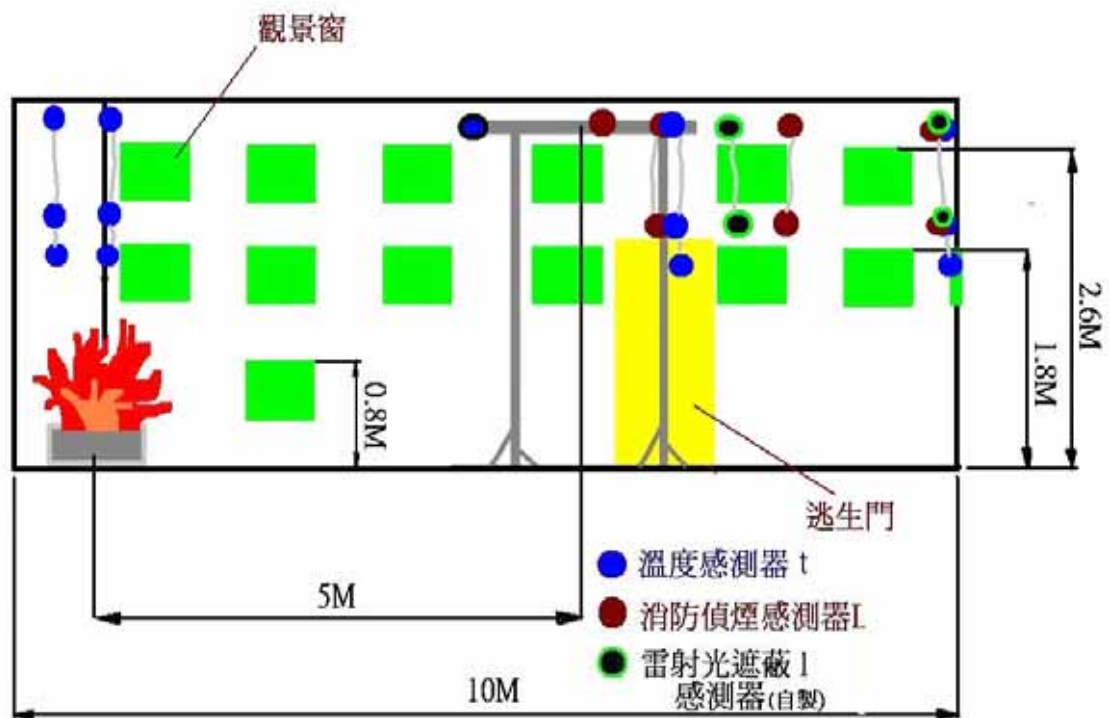


資料來源：本研究整理

圖 3.7b 碳酸鈣板隔間內側



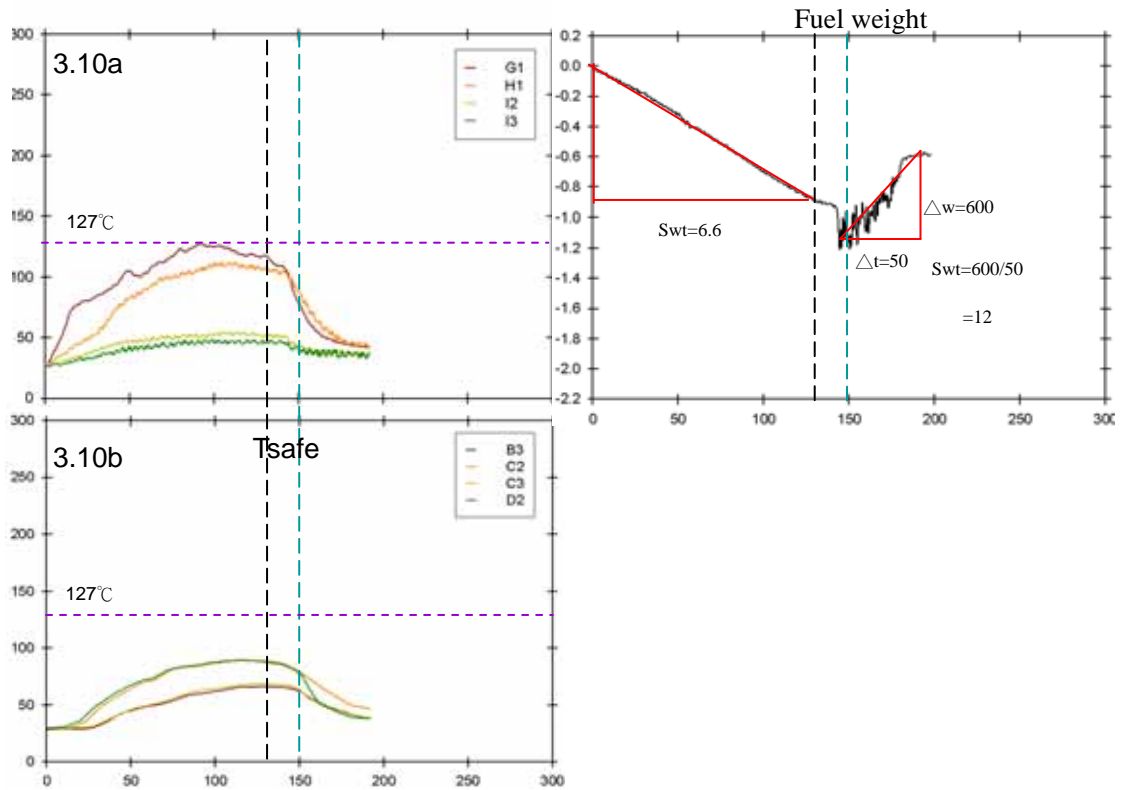




資料來源：本研究整理

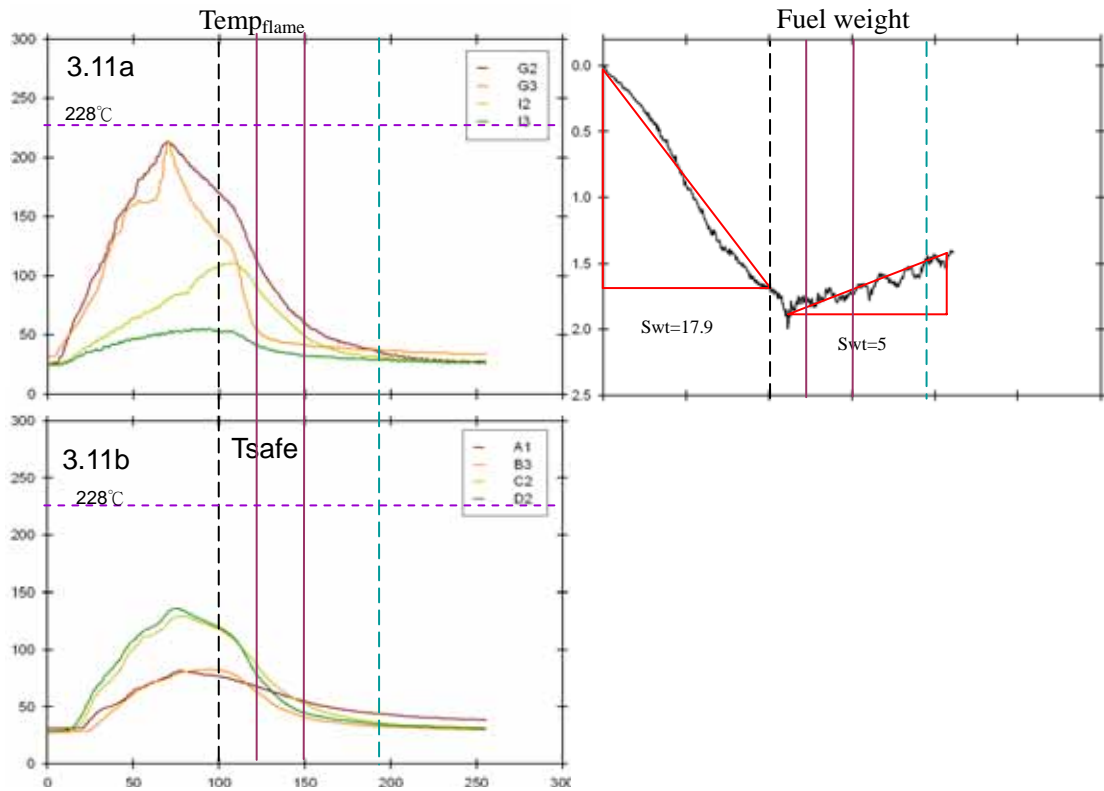
圖 3.8 主要量測儀器與觀察人員之配置

Temp<sub>flame</sub>



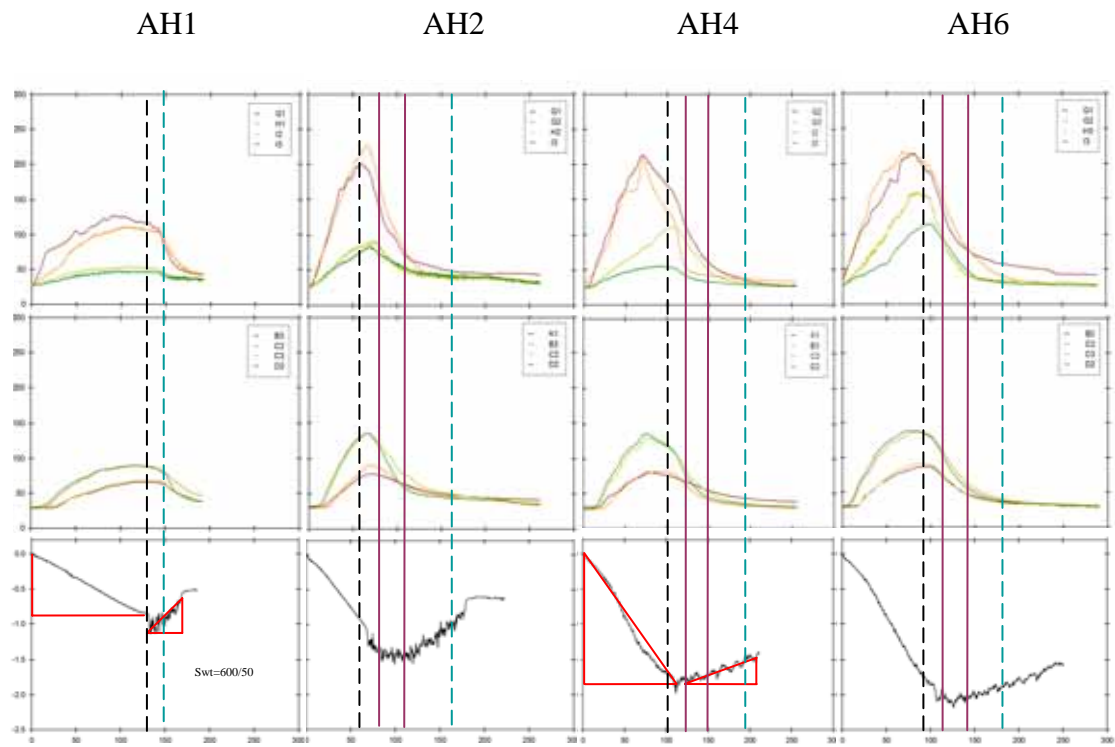
資料來源：本研究整理

圖 3.10 AH1 溫度時間變化圖&油盆重量變化圖



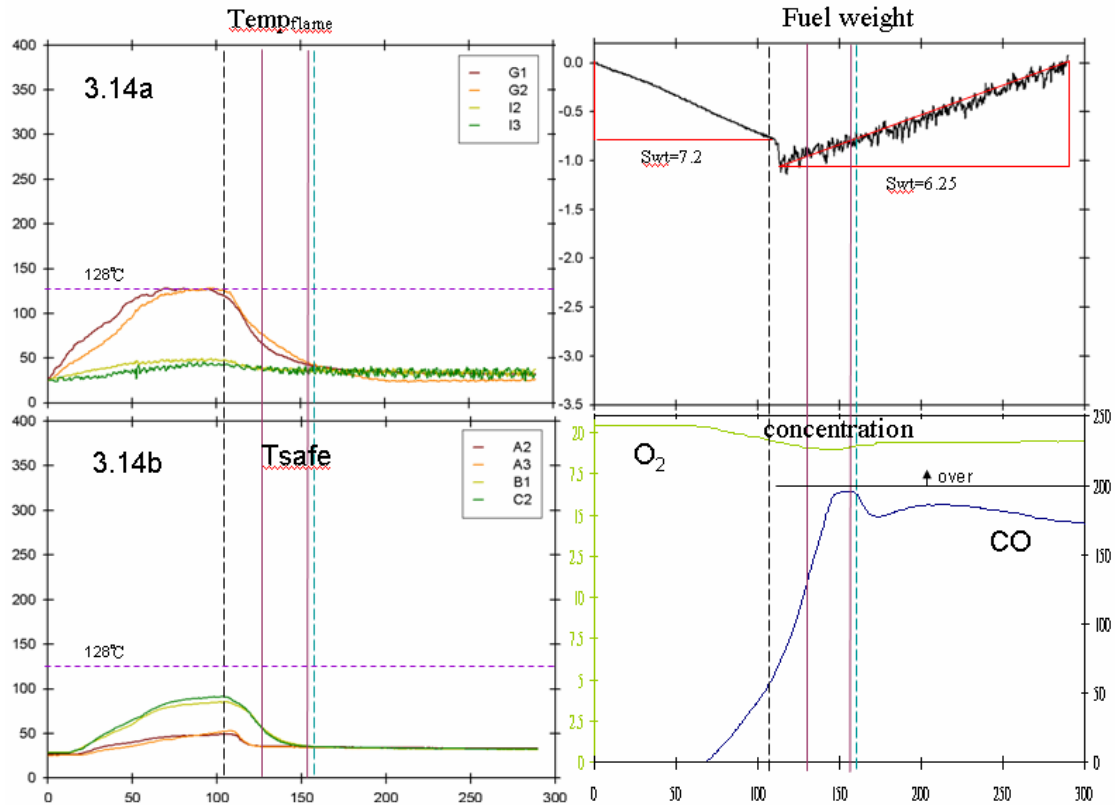
資料來源：本研究整理

圖 3.11 AH4 溫度時間變化圖&油盆重量變化圖



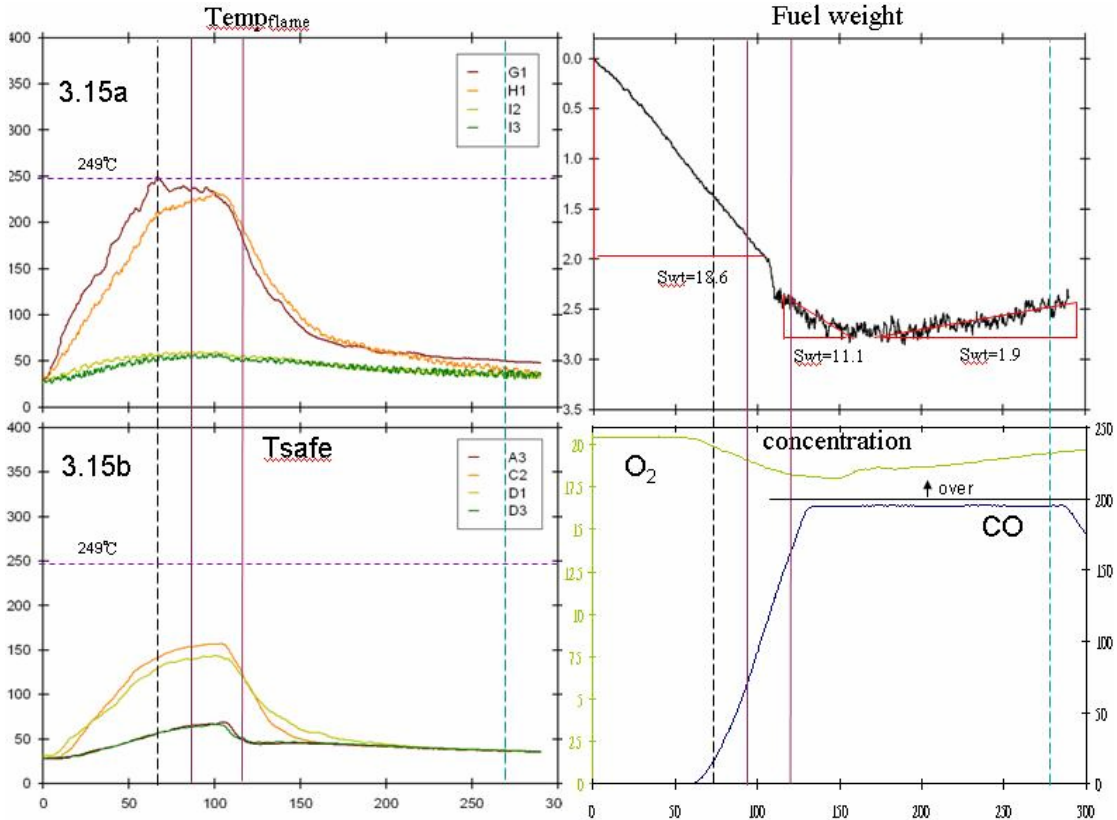
資料來源：本研究整理

圖 3.12 AH 實驗結果



資料來源：本研究整理

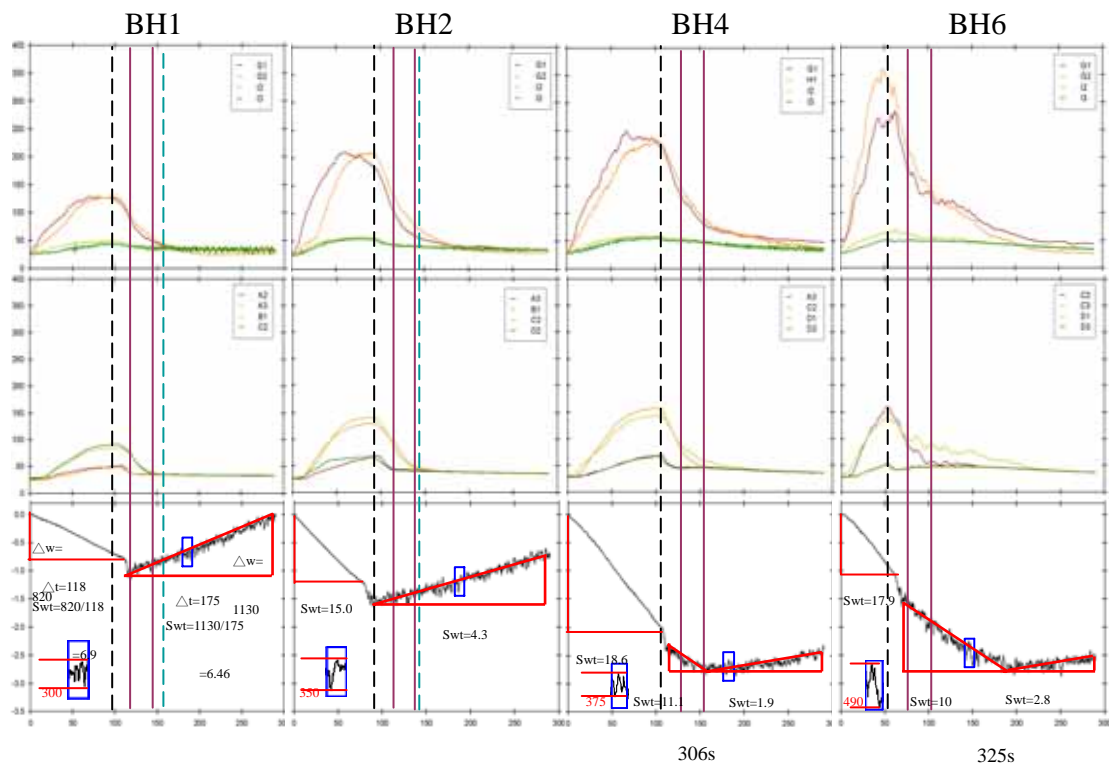
圖 3.14 BH1 溫度時間變化圖&油盆重量變化圖



資料來源：本研究整理

圖 3.15 BH4 溫度時間變化圖&油盆重量變化圖





資料來源：本研究整理

圖 3.15 BH 實驗結果



## 第四章 研究發現

本研究為 94 年之延續計畫，主要差異為強制排煙與自然通風。94 年之結果，顯示雖然是汽油火災，在自然通風下，火勢不會迅速變大，只要在避難區與火源區、設置水平與垂直噴霧（距離火源 5 米），即可達到隔熱、隔煙、滌煙及滅火之目的；若能在火災延燒方向、預先噴射水霧、甚至可限制火災範圍或延燒速度。

強制排煙設備，主要用於火災初期，將濃煙抽離火場、方便火場人員逃生之用；實務上，火場若有開口或破洞，容易引入空氣（適當）、經常造成火勢擴大；或降低煙霧濃度導致灑水頭延遲啟動等問題。實務上，強制排煙及灑水頭經發生功能互相抵制之現象。

水霧是泛稱；其實，灑水頭之水滴也是一種水霧、一種粒徑大（2~3 mm 以上）不易隨氣流漂移之水霧；滅火專用之細水霧，也是一種水霧、一種粒徑小（ $D_{v90}$  0.9mm 以下）速度高之水霧；本研究之水霧是泛指可隨氣流（0~5m/s）漂移之水霧（通常 1mm 以下、稍大亦可）。

扇形水霧則是水霧體機通量成扇形之水霧；本研究組合數個扇形水霧子噴頭、構成隔煙、隔熱用之水霧（垂直斜向下）、滌煙用（水平斜向下）、及滅火用之水霧（垂直斜向下）設置於空氣入口。

本研究探討排煙量對火勢及水霧系統之隔熱、隔煙、滌煙及滅火之效果之影響。第一節將討論今年與 94 年之研究成果，第二節說明今年之成果與效益

### 第一節 結果與討論

**排煙設備：**很明顯，過度排煙或不當排煙，火勢變大之主要原因；即使是汽油（高揮發性）火災，引入大量空氣，並不會使燃燒完全、而是造成更多量之濃煙；這種現象在富油火災（Fuel Rich）或易燃物火災相當明顯。本結果顯示，不當使用排煙機，比不用排煙機還要糟糕，因為引入大量空氣，反而擴大火勢與災損；其所產生之濃煙量很可能大於所排出濃煙量，反而不利逃生、更易造成大量人員死亡，使用時應謹慎。

**單邊水霧：**組合數個扇形水霧子噴頭、構成隔煙、隔熱用之水霧（垂直斜向下）、滌煙用（水平斜向下），雖可將水霧後方（避難區）之溫度降低，但強制排煙所引入之空氣，增加滅火困難度，因為汽油燃點甚低；水霧雖可壓制火勢、但火勢很容易復燃；雖然滅火效果不佳，但隔煙隔熱效果明顯、只是時間一久、煙霧人可緩慢滲透至避難區。

**雙邊水霧：**即單邊水霧再加滅火用水霧（垂直斜向下），隔煙、隔熱、滌煙及滅火效果相當明顯。因為，排煙設備會造成火場內之強制對流；設置於空氣入口之滅火用水霧、會隨空氣進入燃燒反應區、潤濕燃燒半成品，減緩或終止燃燒反應。請注意，一滴水霧可阻止或延緩 20~30 滴油燃燒；但一滴油燃燒卻可蒸發 30 滴水；以水霧撲打油類火災、可以中斷燃燒反應為第一優先。

**滌煙用水霧：**在天花板下，噴射水平略微向下傾斜之水霧，可增加水霧與熱煙氣之混和時間，潤濕燃燒半成品、減少熱釋放率、降低火場溫度。這些水霧亦隨氣流漂入排煙風管，降低風管溫度、潤濕風管內之熱煙塵，可防止濃煙竄燒火風管結構過熱倒塌(collapse)。

## 第二節 成果及效益

雖然過度排煙或不當排煙，容易造成擴大汽油(高揮發性)火災之規模。但只要適當安排水霧，藉氣流將水霧帶入火焰反應區，即可達到滅火效果。本研究證實：

1. 組合數個垂直斜向下噴射之扇形水霧噴霧器，可構成具有隔煙、隔熱功能之水霧牆、以冷卻煙塵，降低氣體擴散速度；
2. 水平斜向下噴射之扇形水霧噴霧器，可構成具有滌煙功能之之水霧雲；這些水霧不僅滌煙（吸附煙塵）、亦降低火場溫度，具有延遲閃燃之功能；水霧若隨氣流進入排煙風管，亦可繼續冷卻煙塵、降低溫度，可防止濃煙竄燒；
3. 在空氣入口端（進氣口），設置垂直斜向下噴射之扇形水霧，可藉強制對流，提高水霧進入火焰反應區，加速滅火效果；
4. 整合前三項，可構成隔煙、隔熱、滌煙、滅火，抑制閃燃及防止竄燒等多功能之水霧是消防設備，未來將朝此方向繼續研究。
5. 水霧系統若與排煙設備結合，可減低過度排煙、導致火勢擴大或濃煙竄燒之危險；
6. 本計畫雖然經費有限，但參與學生超過 10 人，單單燃燒實驗即超過 100 人天，可為我國培養水霧消防系統之研究工程師；本技術深受荷蘭 TNO 防火部門肯定，目前正洽談合作計畫，將本技術應用於隧道火災安全。

## 第五章 結論與建議

### 第一節 結論

細水霧滅火系統，已實際應用於工業及船舶，全世界通過認證之細水霧廠商超過 30 家。細水霧滅火系統，目前已拓及古蹟保護、隧道及易受水損之電子機房及受保護標的。目前細水霧研究，偏重於全尺寸測試及產品開發、或與現有消防設備比較，透過功能性法規成為合法之消防設備。

### 第二節 建議

細水霧滅火系統之用水量遠低於撒水幕、撒水頭，但滅火效率高，是值得推廣之消防系統。研發隔煙、隔熱、滌煙、滅火，抑制閃燃及防止竄燒等多功能之水霧式消防設備，可整合避難與救火設備之優點，提高社會大眾之生命安全；避免排煙設備與撒水頭相互牽制之現象。

本研究擬將本技術與防火門結合，一則降低人員逃生時，濃煙之擴散速度，二則冷卻濃煙及火場內之溫度，可增加防火門之時效。避難通道與排煙管、工業用大型排風管、隧道、捷運、地下商店街等建築物，有幾何相似性。本研究若能獲得支持，將繼續研發這類建築物之水霧式全功能消防系統。

### 立即可行之建議

#### 主辦機關

1. 水就是很好之滅火劑，水霧粒徑小可長期懸浮空中、或隨氣流漂移，比大粒徑水滴較容易進入火焰根部(seat)，可降低燃燒反應速率、潤濕熱煙塵或燃燒中間產物，不僅可控制、抑制火勢、滅火；亦可吸熱降溫、吸附煙塵，僅用於滅火、相當狹隘保守。本研究之成果證實組合數款扇形水霧，即可作為隔煙、隔熱、滌煙，抑制閃燃、滅火及防止竄燒等多功能之水霧式消防設備。
2. 撒水頭已經使用超過百年，主要缺點就是用水量大、水損嚴重。消防科技一直持續進步，相關單位可考慮仿效歐盟，成立專案小組，研究水霧系統成為制式消防設備之法規、設計規範，及測試認證程序。大型挑高建築物，有日漸增加之趨勢，這類建築常因高度及交通狀況+，造成救火困難，建議有關單為，成立團隊，研發大範圍之水霧系統、探討水霧、濃煙與排煙設備之交互影響。



附錄一 空氣中之 CO 濃度與中毒症狀

空氣中 CO %	CO 吸入時間(小時)	CO-Hb %	症 狀
0.01<	不 定	0~10	無症狀
0.01~0.02	不 定	10~20	輕度頭痛(頭痛がします)
0.02~0.03	5~6	20~30	頭痛(頭痛がします)
0.04~0.06	4~5	30~40	激烈頭痛、嘔吐、視力減退 (めまい、嘔吐が始まります)
0.07~0.10	3~4	40~50	同上、並有脈搏、呼吸故増加(仮死状態となります)
0.11~0.15	1.5~3	50~60	脈搏吸急速、昏睡、抽筋
0.16~0.30	1~1.5	60~70	心臟衰竭(20~30分で死に至ります)
0.50~1.00	1~2(分鐘)	70~80	脈搏、呼吸微弱而致死 (わずか2~3分で死に至ります)





## 參考文獻(如重要法規、會議紀錄、出國訪問報告、參考書目)

### 中文部份

1. 蔡春進，半導體工業的廢氣及微粒之聯合去除系統，交通大學環工所，國科會研究報告，民國 91 年。
2. 林啟文，以噴霧塔去除揮發性有機廢氣之數學模式建立及影響因子之研究，民國 87 年。
3. 李岩錡，以雙噴霧塔系統進行煙道氣中脫硝效能及反應動力之探討，國立成功大學環境工程學系碩士論文，民國 89 年。
4. 雷明遠，鄭紹材，林欲昌，黃建榮，「撒水幕應用於區劃構建之研究」，中華民國建築學會第十六屆第二次建築研究成果，台北市：建築學會，民國 93 年。
5. 鍾基強，董賢聲，薛朝鴻，廖健成，水系統火災控制技術之研究-水系統對應性能試煙控之模式技術與實驗驗證，台北市：內政部建築研究所，民國 92 年。
6. 陳俊勳，滅火系統技術研發之規劃研究-細水霧滅火系統技術研發之規劃研究(II)，台北市：內政部建築研究所，民國 93 年。
7. 陳俊勳，陳浩然，水系統火災控制技術之研究(II)-細水霧滅火系統技術研發之規劃研究，台北市：內政部建築研究所，民國 93 年。
8. 蔡榮鋒，水氣霧噴頭開發及噴撒特性檢測委託案結案報告，新竹：工研院環安中心，民國 93 年。
9. 蔡榮鋒，李正國，李廣齊，「量測液滴幾何特性的視覺方法」，中華民國第二十六屆全國力學會議，雲林，民國 91 年。
10. 林建勳，排煙設備與撒水設備交互影響特性之研究，國立雲林科技大學機械工程系碩士論文，民國 92 年。

## 水霧式隔煙系統之技術與應用研究

11. 雷明遠，鄭紹材，林欲昌，黃建榮，「撒水幕防火設備評定基準之研究」，中華民國建築學會第十六屆第二次建築研究成果，台北市：建築學會，民國93年。
12. 蔡榮鋒，丁育群，何明錦，李正國，陳建忠，張哲綱，張尚文，陳亮廷，「水霧式隔煙系統」，內政部建築研究所台灣發明申請案，申請案號 094144156。

## 英文部份

1. Tuomissari ,M.“Smoke scrubbing in a computer room,” Halon options technical working conference, Albuquerque : BFRL, 1999
2. Mawhinney, J.R., “A Critique of Claims of Smoke Scrubbing by Water Mist,”Research and Practice: Bridging the Gap, Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Tampa, FL : National Fire Protection Research Foundation, 2002.

