

# 熱媒鍋爐火災風險危害分析及細水霧滅火研究

## Analysis of Fire risk assessment and Water Mist System Suppression in hot oil boilers

邱晨瑋\*                      劉佳誠\*\*                      陳俊勳\*\*\*  
Chen-Wei Chiu              Chia-Cheng Liu              Chun-Hsun Chen

### 摘要

熱媒鍋爐是國內許多製造或加工業不可或缺的主要生產設備，經由循環泵浦在熱交換器內將熱能傳送到其他流體，發出熱量後，再回到爐內不斷循環加熱，為目前兼具安全、經濟、耐用及效率之加熱爐設備。

由於高溫使用之熱媒油只要一洩漏即為易燃物質，國內也發生多起熱媒鍋爐之火災重大事故，故本研究首先以初步危害分析（PrHA）篩選出危害源，鑑別出重大潛在危害，再利用危害與可操作性分析（Hazop）分析技術之方法來評估，找出熱媒鍋爐系統及管路面洩漏之可能原因並提出在安全上之改善建議。

透過系統性的危害分析鑑別出高風險的設備或區域，進一步設置細水霧系統，模擬細水霧設備之滅火成效，本研究利用火災動態模擬軟體（Fire Dynamic Simulator, FDS），針對細水霧噴頭於不同安裝高度、液滴粒徑、放射角度、配置密度進行設計，探討熱媒鍋爐房火災之滅火情境及效率。本研究調查結果顯示，國內大多數熱媒鍋爐房因未達 200 平方公尺未達消防法令設置之自動滅火系統的條件，一旦發生熱媒油洩漏，火勢成長及延燒非常迅速，若人員無法於第一時間處理耽誤了初期滅火的有效時間，將導致災害及損失擴大。當採取細水霧噴頭的種類為放射角度 75°、粒徑 100um，配置方式為採取 6 顆細水霧噴頭、距火源高度 3 公尺及間距為 2 公尺為最佳情境，藉由本研究能提供業界在控制熱媒油加熱系統之火災風險有所遵循，以預防事故發生；或事故發生時，透過適當的細水霧滅火系統設計，能將事故後果控制在可接受之程度內。

\* 臺灣警察專科學校消防安全科教授；eswin.wei@gmail.com。

\*\* 國立交通大學產業安全與防災學程碩士班；lcc790526@hmail.com。

\*\*\* 國立交通大學副校長；chchen@mail.nctu.edu.tw。

**關鍵字：**熱媒鍋爐、細水霧細水霧滅火系統、FDS 火災動態模擬程式、危害分析、HAZOP

## Abstract

The hot oil boiler is an indispensable main production equipment in many domestic manufacturing or processing industries. The heat energy is transferred to other fluids in the heat exchanger through the circulating pump. And after the heat is emitted, it is returned to the furnace for continuous circulation heating. The above-mentioned reheating way of a hot oil boiler is a combination of safety, economy, durability, and efficiency in the present day.

Heat transfer oil works at high temperatures, which makes it flammable once the oil leaking. Therefore, there were many major domestic cases of fire accidents triggered by heat transfer oil leakage. This study first targets hazard sources with Preliminary Hazard Analysis (PrHA) to identify high-risk potential hazards, furthermore finding out the probable leaking causes of hot oil boiler system, and make suggestions for safety improvement.

In order to identify high-risk types of equipments or areas through systematic hazard analysis and further set up a water mist system to simulate the extinguishing effect of water mist equipment. This study uses Fire Dynamic Simulator (FDS) to show how water mist sprinklers at different installation heights, droplet sizes, radiation angles, and configuration densities can affect the fire extinguishing situation and efficiency in a hot oil boiler room fire.

It is hoped that this research can provide the industry with regard to the fire risk control of the thermal oil heating system to prevent accidents; or when an accident occurs, through the design of an appropriate water mist fire extinguishing system, the consequences of the accident can be controlled to an acceptable level. Within the degree.

The research indicates that most of the domestic boiler rooms are less than 200 m<sup>2</sup>. That is, they are not big enough to meet the mandatory fire code regulations of setting off an automatic fire sprinkler system. Once the hot oil starts to leak, the fire will burn intensely, causing it to spread faster. If people concerned don't immediately respond to the fire in the very beginning, resulting damages and losses are going to enlarge.

When the type of water mist sprinkler is used with a radiation angle of 75° and a

particle size of 100um, the configuration method is to use 6 water mist sprinklers and the height from the fire source is 3 meters and the distance is 2 meters, which is the best situation.; or when an accident occurs, through the design of an appropriate water mist fire extinguishing system, the consequences of the accident can be controlled to an acceptable level.

**Key words:** hot oil boilers, FDS (Fire Dynamic Simulator), HAZOP, Water Mist System, heat transfer oil

## 壹、緒論

### 一、研究動機

鍋爐是國內許多製造或加工業不可或缺的主要生產設備，屬於法令所規範之危險性設備的一種，一旦發生事故對於周遭財物或生命，皆可能造成重大的損失與無法彌補的遺憾，對工廠最直接的影響是生產中斷，或是因洩漏引起火災、爆炸或環境汙染等工安事故。台灣對於鍋爐上的使用，政府部門在工安及消防雖有制訂相關安全管理法規，但是我們在日常生活中仍時常有聽聞有關鍋爐的危險事故發生，民國 109 年 9 月 24 日遠東化纖熱媒鍋爐幫浦軸封故障，致熱媒油外洩引發火災、99 年 10 月 3 日產珠光紙的南亞公司嘉義塑膠二廠因熱媒油管路漏油高溫熱媒油接觸外在環境起火，進而引發連鎖大火，失火廠區為珠光紙廠生產線及倉庫、民國 95 年 1 月 18 日的日月光半導體桃園內壢廠由鍋爐所引起的大火，造成損失金額超過 70 億元、民國 94 年 1 月某膠布製造廠熱媒油系統修復保養後，輪具熱媒油排氣孔未鎖上埋頭螺栓，導致洩漏霧化接觸地上鹵素燈具（表面溫度 248℃）發出火苗後引起火災；熱媒鍋爐雖然屬於低壓鍋爐，可以再較低的運行壓力下，獲得較高的工作溫度，但由於產業製程需求將熱媒油加熱或於熱交換使用時，其燃燒器透過瓦斯、柴油、煤、廢熱或重油等為做為燃料，將其內部的熱媒油溫度、輸出溫加溫至很高，而且這類液體大多都是易燃易爆的。如果出現熱媒油洩露現象，極易引起火災甚至爆炸的可能。

本研究利用危害與可操作性分析（Hazop）分析技術，以國內某使用熱媒油數量達公共危險物品管制量之工廠製程為分析對象，系統化找出潛在危害因子，分析初期可能發生的原因與機率，並針對高風險之設備或區域，設置細水霧系統，

模擬細水霧設備之滅火成效。

## 二、研究目的

目前對於工業之需求而言，熱能往往是必需的，而熱媒為產業界各種生產流程中最普遍的傳熱或動力媒質，其來源則由鍋爐經燃燒能源（重油、天然氣等）加熱熱媒油所提供，業界針對熱媒油若因不當設計、施工、生產操作及不良保養等，導致設備異常發生，易造成工安環保事故或生產損失。

目前國內相關法規雖依「各類場所消防安全設備設置標準」第 18 條有訂定鍋爐房符合大量使用火源場所之條件時需設置乾粉或二氧化碳設備，但上述兩系統都有藥劑量之限制，熱媒油洩漏後其溫度極高且易揮發成可燃性蒸氣，若放射完畢尚未滅火，後續靠人員再以移動式滅火設備進行滅火則有影響滅火時效及避難安全之風險，且法令僅針對鍋爐房進行設計，若針對熱媒系統易洩漏處（循環泵浦、法蘭接頭…等）之安全防護尚有不足。

細水霧滅火系統，主要以霧化水粒子滅火為主，這些細水霧粒子遇到火災的熱源後，蒸發為水蒸汽進而體積膨脹，稀釋排擠了燃燒區域的空氣，使得燃燒區域內的氧氣濃度大為下降，同時這些細水霧粒子也因蒸發為氣態之吸熱反應使得火場溫度急遽下降同時能吸附煙粒子或其他有毒氣體，使之隨著細水霧分子下降，可減少火場中各種有害氣氣體對生命安全或機台設備的危害，另外只要額外有充分的補充水源，就可以持續進行滅火降溫，這些都是優於乾粉及二氧化碳設備的特性。

另外常見的潔淨氣體滅火劑，主要包括惰性氣體滅火劑（IG-01、IG-100、IG-55、IG-541）、鹵代烴滅火劑（七氟丙烷、六氟丙烷、三氟甲烷）等，但其都有其限制如：FM-200（七氟丙烷）遇高溫下會裂解產生 HF 等酸性分解物並產生結露，對設備造成損害；IG-541 氣態儲存，設計滅火濃度高，滅火氣體需要量大，滅火劑儲瓶數量多，占地面積大，且其儲存和工作壓力高，儲存容器和系統管網強度要求高，工程造價高。

細水霧的滅火藥劑同樣為水，因此也具有價格低廉容易取的的優點，因其噴撒的水滴遠小於自動撒水設備的水滴，在攻擊火源時能夠迅速汽化，將水的滅火效果發揮到極限，也因此除了能夠以更少量的水更有效率的滅火外水損極小。細水霧系統比自動撒水系統適用的場合廣、並具有低水量、低水損的優點。各滅火系統如下表

滅火系統比較表

特性/作用	乾粉	二氧化碳	泡沫	細水霧
適用 B 類火災	是	是	是	是
不影響環境	是	否	否	是
不具有毒性	否	否	否	是
需要幫浦	否	否	是	是
高吸熱力	否	否	否	是
運作時間可較久 (安全係數較高)	否	否	否	是
疏散計畫	是	是	否	否
其他缺點	腐蝕	結露	水損	台灣仍無法令規範

透過電腦火災數值模擬 (Fire Dynamic Simulator, FDS) 以性能化消防設計進行滅火探討，依以細水霧滅火系統進行規劃設計，研究細水霧放射方式之滅火成效，達成下列目的：

- (一) 以製程安全評估之方式分析熱媒鍋爐房可能發生火災之原因，並提出洩漏預防與控制、點火源管制、防止延燒措施、洩漏偵測與警報、重要設備維護保養等相關措施，提升熱媒系統區域之安全性。
- (二) 提供國內消防法規以外滅火設備之參考，透過本研究，增進細水霧滅火設備對於熱媒鍋爐房燃燒滅火效能「有效性」。
- (三) 透過科學性的模擬驗證相關性能，供消防機關進而訂定實用性規範，進而達到有效滅火之更多選擇方案。
- (四) 提出適合熱媒鍋爐房環境和技術條件專用的細水霧滅火系統方案。

### 三、研究範圍及研究限制

- (一) 不考慮熱媒油劣化導致熱傳導效率降低造成過熱等潛在原因。
- (二) 不考慮熱媒鍋爐房，因熱媒油洩漏後，其蒸氣達爆炸界限發生爆炸的情形。

## 貳、重大災害回顧及相關文獻探討

### 一、熱媒鍋爐重大災害回顧

#### (一) 某人造纖維製造公司從事濾網更換作業因熱媒油管遭扯斷引起爆炸火災致 6 死 4 傷災害 (2006)

該公司進行過濾器濾網拆換工作，該工程係委由合約廠商施工，施工前一日即先由該公司將過濾器之內容物排空後，再灌入乙二醇（簡稱：EG）並保持加熱狀態作為醇解殘餘聚合物；承攬商從事過濾器濾網拆換作業，於拆除出料口法蘭螺栓時，因係由外側將螺帽拆除，卻未能由內側將螺帽卸下，以致於尚遺有 2 支螺栓無法取出卡住該法蘭，遂使用固定式起重機欲將法蘭吊高，以便取出螺栓，可能因保溫材料包覆，無法看清管線聯結全貌，致吊掛方式錯誤，直接以吊鉤勾住熱媒油管線，在強力拉扯之下，導致熱媒油管線破裂，造成熱媒油大量噴出，高溫導致熱媒油迅速汽化並形成熱媒蒸汽，濃度達於爆炸界限，同時遭遇不明火源，因而產生爆炸隨即發生大火，釀成本次災害。

#### (二) 南亞塑膠公司珠光紙廠熱媒油火災造成約 1.5 億元損失 (2010)

定肇事原因是機械傳動裝置異常，現場操作人員未及時停止運作，以致延伸輪軸歪斜，而引起熱媒油洩漏，高溫熱媒油接觸外在環境起火，進而引發連鎖大火，失火廠區為珠光紙廠生產線及倉庫，原料為 PP 塑膠，大火燃燒產生大量濃煙，刺激味，幸無人傷亡，火警控制後的當日傍晚一場陣雨降下黑色雨水。南亞位於嘉義太保的塑膠二廠主要生產珠光紙，也是台灣唯一生產珠光紙的廠商，每月產能約 2000 噸、營業額約新台幣 1-1.5 億元，而這次火災使其 2000 坪廠房付之一炬，因此預期每月營業損失至少 1.5 億元。

#### (三) 熱媒油洩漏重大災害回顧小結：

1. 鍋爐房熱媒油洩漏後可能會因設備、泵浦、管路之熱媒油大量外洩引起火災，若蒸氣遇火花產生爆炸及人員傷害。
2. 鍋爐房（未達 200 平方公尺）及現場製程設備意洩漏之部分皆未設置自動滅火系統，若發生洩漏火勢成長及延燒非常迅速，而事故發生時又因人員慌張，無法於第一時間處理，耽誤了初期滅火的有效時間造成災害

及損失擴大。

3. 依救災風險管理原則，第一線現場應變人員並非貿然進入現場救災，需先保護本身之安全（Safety），迅速評估現有資源，若可先行消弭，則可做第一時間應變，若無法則先行撤離並進行初步管制（Isolation），通報（Notification）相關主管及各支援應變單位，請求人員及器材等支援。

NFPA 1500 救災人員風險管理的原則如下：<sup>1</sup>

- (1) 除非現場有人命危害的可能性否則不要進行危險的救災行動。
- (2) 為拯救財物的救災行為，應視為是對同仁安全有潛在風險行動，必須避免或減輕此種風險。
- (3) 在沒有人命傷亡之虞的現場，冒任何救災危險都是不被接受的。

## 二、相關文獻分析

細水霧之耗水量遠小於撒水頭和水霧噴頭，災後的清理也較容易，且對於環境較友善，雖滅火劑同樣是水，最大的差別在於細水霧的水滴遠比自動撒水的水滴小。

理想的細水霧滅火模型是水滴攻擊到火源中心，並迅速汽化，大部分的水均參與滅火作用，在細水霧於開放/半開放/接近封閉空間中，對於開放油盆/遮蔽油盆/高度遮蔽油盆的眾多實驗資料顯示，細水霧基本上僅對於暴露於空間中的火源才有影響。對於遮蔽性火源，細水霧設置位置影響性不大，且空間密閉性若不足，則細水霧濃無法累積產生窒息效果，而無法達到滅火目的。因此，細水霧應用在滅火上必須考慮空間密閉程度與細水霧噴灑密度。

若細水霧在未密閉的環境中，由於水氣無法累積或者有外界新鮮空氣補入，使得火焰存在的三要素（氧氣、熱源、燃料）無法被破壞，而使得細水霧僅具降溫作用卻無法滅火。因此在細水霧滅火系統應用限制和適用場所研究上，需加以進一步研究確認。由於空間密閉性、細水霧濃度、火源大小等，對於細水霧滅火性能有決定性因素，而且這些參數間又有交互作用，因此需加以研究各參數對於細水霧滅火效能影響程度，進而提供細水霧應用限制以及適用場所，或者由空間條件反推求得適合的細水霧系統選擇方式，如此一來，對於細水霧系統的應用限

---

<sup>1</sup> 羅律典，「石化工廠消防人員搶救風險因子及策略精進之探討-以苗栗縣為例」，交通大學，碩士論文，民國 104 年 7 月。

制才能夠加以界定，讓細水霧系統可以發揮滅火的功效。<sup>2</sup>

細水霧滅火設備除了禁水性物質以外都可以用來滅火，細水霧系統之水滴粒徑甚細，比表面積大容易吸熱達到冷卻的效果，另氣化之水蒸氣可稀釋空氣中氧氣之濃度達到窒息之效果。此類設備同樣以水為主要滅火介質，細水霧滅火設備跟水霧滅火設備很類是，但細水霧滅火設備壓力比較大，而水粒子粒徑通常小於1000 $\mu\text{m}$ ，因將水高度霧化，可應用於油類火災及電氣火災，降溫效果佳。且因操作壓力高，並不會有高度產生的輸送壓力問題，同時因細水霧使用水量在傳統撒水的1/10以下，因此不會有水源取得不易的問題。依NFPA750定義細水霧管系壓力500psi（約35kg/cm<sup>2</sup>）以上為高壓細水霧，在500到175psi間為中壓、在175psi（約12.3kg/cm<sup>2</sup>）以下為低壓。

研究指出，水霧粒子粒徑若小於400 $\mu\text{m}$ ，則基本上可撲滅Class B火災。較大的粒徑的水霧粒子由於對燃燒物有較佳的濕潤效果，因此對撲滅Class A燃燒物質的火災十分有效，細水霧系統具有控制、壓抑、撲滅多種火災的功能，可以運用在易燃性與可燃性液體。在一定空間進行滅火時，細水霧的霧低較小具有較大的表面積，且可縮短完全蒸發的時間，如果霧滴在空氣中傳播的時間越長，則它們越有可能否會撞擊牆壁等固體邊界，從而減少冷卻效力。<sup>3</sup>

細水霧系統的滅火效果取決於關於空間尺寸、開口尺寸、通風、噴水噴射壓力、粒徑大小、粒徑大小分佈、放射流量和放射角度。在學者Kim及Ryou的研究中在天花板上設有五種細水霧噴頭於並於通風情況下研究滅火性能的試驗中，當細水霧噴頭動作時，空間內天花板的平均溫度最初會急劇下降，之後逐漸下降。學者Feng和Liu將Kim和Ryou的研究加以延伸探討研究細水霧粒徑大小如何影響滅火時間，當粒徑小於500 $\mu\text{m}$ 時，因為粒徑小更易蒸發的特性而縮短了滅火時間。<sup>4</sup>

（一）冷卻作用：霧狀水粒子能均勻散佈在燃燒表面，吸收大蒸發潛熱，使燃燒溫度降低。

（二）窒息作用：利用水粒子遇熱氣化（膨脹1700倍）排開空氣，降低氧濃度達

---

<sup>2</sup> 何明錦，「細水霧設備於建築物室內停車空間應用之研究」，內政部建築研究所協同研究報告，X頁，民國98年12月。

<sup>3</sup> H. Barrow, C.W. Pope, Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling, pp 406, 2006。

<sup>4</sup> Jaiho Lee, Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door

窒息目的。

(三) **乳化作用**：水霧粒子衝擊油膜面時，將油類表面形成乳化層，減少可燃油氣蒸發，使油不易繼續燃燒。

(四) **稀釋作用**：水溶性可燃物，水霧溶於其中，使液體濃度降低，造成燃燒無法持續。

學者Pepi進行細水霧滅火效果與火源大小關係研究發現，6MW噴撒火災(spray fires)滅火所需的時間為23秒到173秒，但對1MW噴撒火災而言所需的滅火時間卻反而增為5分24秒至21分10秒，可以證實細水霧能夠用來撲滅油類火災，另一方面也看出細水霧對於大火源的滅火效果較佳，對於小火的滅火效果並不顯著；細水霧的滅火藥劑同樣為水，因此也具有價格低廉容易取的優點，因其噴撒的水滴遠小於自動撒水設備的水滴，在攻擊火源時能夠迅速汽化，將水的滅火效果發揮到極限，也因此除了能夠以更少量的水更有效率的滅火外水損極小。細水霧系統比自動撒水系統適用的場合廣、並具有低水量、低水損的優點；但是同時高壓力的加壓系統與配管需求費用昂貴以及滅火效果與控制技術尚未成熟為其缺點。<sup>5</sup>

細水霧系統及自動撒水系統來進行對船艙中可燃物的滅火比較時，細水霧系統可以使用更少的水和更小直徑的配管，且從滅火測試結果得知細水霧系統更能使火場的溫度降低，有效撲滅被屏蔽住的火災，並提供同等或更好的保護。<sup>6</sup>

## 參、研究與方法與評估技術

### 一、研究方法及流程

#### (一) 熱媒油系統危害風險評估分析：

蒐集業界熱媒油鍋爐系統洩漏火災案例、學術論文、期刊文章等資料，探討分析其熱媒油洩漏引起火災爆炸的情況，先用初步危害分析(PrHA)辨識熱媒油鍋爐系統製程中設備、作業、環境及人為因素等，是否可能發生火災、爆炸或大量漏洩、中毒等，以發掘重大潛在危害之系統/單元，再

<sup>5</sup> 陳建忠，蘇鴻奇，張尚文，「細水霧系統火災控制與應用之研究」，內政部建築研究所自行研究報告，4~21頁，民國93年12月。

<sup>6</sup> Liu, Z.G., Kim, A.K., A Review of Water Mist Fire Suppression Technology: Part II – Application Studies, Journal of Fire Protection Engineering, V.11, pp 12, 2001

選用製程安全評估中的 Hazop 分析技術，以系統化方式進行評估，找出熱媒鍋爐系統及管路面洩漏之可能原因並提出在安全上之改善建議。

## (二) 使用火災模擬軟體 (FDS) 來分析提出較佳之滅火方式：

熱媒鍋爐系統之熱媒油不慎洩漏時，透過電腦火災數值模擬 (FDS) 之研究分析，於適當位置設置之火警自動警報設備，並連動啟動水霧滅火系統，降低周邊環境設備接受到的輻射熱和高溫危害，並透過水霧稀釋火源周圍之氧氣濃度，切斷氧氣對燃燒物供應，避免產生火災爆炸，止災情擴大及降低災害損失。

## 二、熱媒鍋爐房初步危害分析 (PrHA)

初步危害分析法為通過經驗判斷、技術診斷或其他方法，辨識出系統存在危害因素，對於生產目的、物料、裝置及設備、製程、操作條件以周圍以及周圍環境等進行充分調查；根據過去的經驗教訓及同行業生產中曾發生的事故或災害狀況，對系統影響、損壞程度，判斷所要分析的系統中可能出現的情況，調查能夠造成系統故障、物質損失和人員傷害的危害。

對熱媒鍋爐系統所使用之熱媒油和裝置的主要製程區域等進行分析後，製作物質危害檢核表如表 1 物質危害檢核表 (熱媒油)、表 2 物質相容性檢核表 (熱媒油)、表 3 處理方法檢核表 (熱媒油)，找出重大潛在危害，且後續必須執行 HAZOP 分析。

藉由物質危害檢核表 (A 表) 明確辨識製程中使用之化學物質危害性外，在物質相容性檢核表 (B 表) 探討化學物質間與化學物及設備材質間之相容性，確認不相容物料明確分區隔離放置及設備材質選用不會產生化學反應，最後在處理方法檢核表 (C 表) 中初步了解製程系統設計時，化學物質處理方式、條件及防護措施，本研究針對新北市某銅箔基板廠之製程做初步危害分析 (如：熱壓段、儲槽區、鍋爐房等區域)，找出重大潛在危害，包含：含浸段、配料段、熱壓段、組合段、包裝段的初步危害分析結果。

表 1 物質危害檢核表 (熱媒油)

品名	狀態	總量 (庫存量) (生產量)	火災/爆炸之危害			反應性 安定性 之危害	毒性危害			其他健康之危害			
			火災	爆炸	靜電		急性	慢性	致突 變性	窒息	腐蝕 性	放射 性	其他
熱媒油	液體	1.8 公噸	V 1	V 2	-	-	-	? 3	-	-	-	-	? 4
天然氣	氣體	0.05 公噸	V 5	V 5			V 6						
配料 樹脂	液體	43 公噸	V 7	V 7			V 8	V 9					
丙酮	液體	8 公噸	V 10	V 10	V 11		V 12	V 13					
甲苯	液體	0.6 公噸	V 14	V 14	V 15		V 16	V 17					

註 1：閃火點：204°C，爆炸界限：0.9%~7.0%；製程需求熱媒油加熱 250°C 至 300°C，依 NFPA 704 之規定，閃火點 < 60°C 或製程操作溫度大於閃火點者，皆視為重大危害

註 2：熱媒油系統高溫特性，不慎洩漏會引起火災爆炸，業界曾發生過數起熱媒油洩漏後引發火災爆炸之事故。

註 3：具慢毒性長期曝露會導致頭痛、噁心、腹瀉及身體不適，與皮膚接觸會造成濕疹及皮膚炎。

註 4：氣味：石油味。

註 5：爆炸界線：4~16%。

註 6：單純窒息性氣體，物質本身不會與人體反應，但天然氣濃度過高稀釋環境中氧氣就會有缺氧窒息等不良生理反應。

註 7：閃火點：>200°C。

註 8：急毒性：皮膚：直接接觸可能造成輕微的刺激。眼睛：接觸眼睛具刺激性。食入：刺激咽、食道及胃。

註 9：毒性或長期毒性：反覆或長期暴露可能引起過敏或皮膚炎。

註 10：閃火點：-17°C

註 11：丙酮蒸氣易因靜電放電產生的火花而被引燃。

註 12：急毒性：嚴重暴露會造嗜睡、噁心、暈眩、會抑制中樞神經系統導致死亡。

註 13：慢毒性：刺激眼睛、皮膚炎。

註 14：閃火點：4.4°C (< 60°C，依 NFPA 704 規定火災/爆炸屬 v)，爆炸界線：1.2~7.1%。

註 15：應避免之狀況：明火、熱、引火源、靜電

註 16：急毒性：大量吸入會抑制中樞神經系統、會導致腎臟衰竭、無意識和死亡。

註 17：慢毒性：慢性中樞神經系統受損、記憶力喪失、皮膚炎。

表 2 物質相容性檢核表 (熱媒油)

化學物質 反應 特性 化學物質	化學物質									結構材質 化學物質
	碳鋼	不銹鋼	天然氣	配料樹脂	丙酮	甲苯	柴油			
熱媒油	V 1	/	/	/	/	/	/	/	/	熱媒油
天然氣	V 1	/	/	/	/	/	/	/	/	天然氣
配料樹脂	/	V 2	/	/	/	/	/	/	/	配料樹脂
丙酮	/	V 2	/	/	/	/	/	/	/	丙酮
甲苯	/	V 2	/	/	/	/	/	/	/	甲苯
	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	/	/	/	/	/	/	/	/	/	

註 1：對碳鋼適用

註 2：對 SUS304 不銹鋼適用

表 3 處理方法檢核表（熱媒油）

品名	狀態	總量 庫存量 生產量	儲存	運輸	處理	製程 條件	構造 材質	除 污	氣 體 排 放	液 體 排 放	排放物 固體 廢棄物	燃燒塔 焚化爐	品質 控制	應 變 程 序	公用 設施	規範 標準
熱媒油	液體	1.8 公噸	/	/	V 1	V 2	V 3	/	/	V 4	/	/	V 5	V 6	/	V 7
配料 樹脂	液體	43 公噸	V 8	/	V 9	V 10	V 11	V 12	/	V 13	/	/	/	/	/	/
丙酮	液體	8 公噸	V 8	/	V 14	V 15	/	V 12	V 15	V 13	/	/	/	/	/	/
甲苯	液體	0.6 公噸	V 8	/	V 16	V 17	/	V 12	/	V 13	/	V 18	/	/	/	/
天然氣	氣體	0.05 公噸	V 8	/	V 19	/	/	/	V 20	/	/	/	/	/	/	/

註 1：熱媒洩漏處理，製程加熱後的熱媒油洩漏，有火災爆炸之風險，若有洩漏，人員應盡速離開作業場所，反應主管成立緊急應變組織進行處理。

註 2：製程溫度需求，把熱媒油加熱到約 250~300℃。

註 3：依據國際標準及國家法規進行設計，使用碳鋼或不銹鋼材質。

註 4：注意熱媒油加熱膨脹時，避免膨脹槽有滿液之情形，其排氣管應能導流至儲油槽。

註 5：熱媒油應定期取樣送檢，檢驗黏度、酸價（TAN）、含水量、丙酮不溶解物及高沸物、低沸物等；影響如酸價易導致管路的腐蝕，含水量會造成泵浦空蝕、熱媒油裂解會使黏度增加，熱傳導效率降低造成過熱等潛在原因。

註 6：確認並立即遮斷輸送泵浦及關閉管閥止漏，啟動鍋爐區消防系統撲滅火勢，事故現場圍籬管制及周遭噴灑消防水霧降低空氣中有害氣體濃度。

註 7：鍋爐及壓力容器安全規則、職業安全衛生管理辦法、職業安全衛生教育訓練規則、危險性機械及設備安全檢查規則、各類場所消防安全設備設置標準、公共危險物品及可燃性高壓氣體製造儲存處理場所設置標準暨安全管理辦法。

註 8：儲存在陰涼、乾燥、通風良好及陽光無法直接照射的地方，遠離熱源、發火源、不相容物及工作區範圍。

註 9：個人應注意事項：穿戴適當的個人防護裝備、清理方法：以一般清掃用具清除

註 10：依現場製成條件操作。

註 11：最好使用抗腐蝕性材質如鍍合金之儲存容器，若溫度不高（40℃以下）也可使用碳鋼或不銹鋼材。

註 12：穿著適當防護設備入洩漏區處理，使用沙、泥土或其他不與洩漏物反應且穩定不可燃之物質來圍堵處理。

- 註 13：穿著適當防護設備入洩漏區處理，使用沙、泥土或其他不與洩漏物反應且穩定不可燃之物質來圍堵處理。
- 註 14：此物質是易燃性和毒性液體，處置時工程控制應運轉及善用個人防護設備；工作人員應受適當有關物質之危險性及安全使用方法之訓練。
- 註 15：使用不會產生火花，接地之通風系統，並與其他通風系統分開；丙酮產生的製程廢氣排至回收系統再利用。
- 註 16：在污染區尚未完全清理乾淨前，限制人員接近該區，確定清理工作是由受過訓練的人員負責，對該區域進行通風換氣，撲滅或除去所有發火源。
- 註 17：單獨使用不會產生火花，接地之通風系統，大量使用此物質時，需要局部排氣或製程密閉，供給充分新鮮空氣以補初排氣系統抽出的空氣。
- 註 18：甲苯產生的蒸汽、VOC 製程廢棄經排氣系統製 RTO 系統焚燒。
- 註 19：隔離危害區域，並禁止非相關人員進入、避開高溫、火焰、火花及其他引火源。
- 註 20：減少逸散情形發生及加裝洩漏偵測裝置及警報系統。

### 初步危害分析

依實際作業特性或相關製程，可參照下列模式自行訂定評估項目，而將符合以下任一或數個條件，列為屬於重大潛在危害區域：

評估節點：熱媒鍋爐房

- $Q > 20\% TQ$ 。
- 高放熱反應：氧化、硝化、鹵化、有機金屬化、偶氮化、氫化、裂解/熱分解、聚合、磺化、縮合反應等。
- 製程中之組成在爆炸下限（LEL）以上，爆炸上限（UEL）以下，或濃度在此範圍附近者。註 1
- 具有在  $100^{\circ}\text{C}$  以下熱不安定性，或與一般物質，如空氣、水、其他可能污染物接觸後起反應之物質， $P \geq 10\text{psig}$ 。
- $T > \text{A.I.T.}$  或為易燃性氣體。註 2
- $P \geq 20\text{kg/cm}^2$  或  $P \leq 500\text{mmHg}$ 。
- 製程中有明顯之高低壓差， $\Delta P$ ；（上游壓力） $\geq 4$ （下游壓力）。

符號說明：

Q：製程區域中瞬間可能出現之危險物或有害物的最大量，概估該製程區內塔槽與管線中的總量，單位為 kg。

TQ：勞動檢查法施行細則附表一中危險物的法定限量，或附表二中有害物的法定限量。

T：製程區中的最大操作溫度。

A.I.T.：可燃性或易燃性液體的自燃溫度。

P：製程區中的最大操作壓力。

$\Delta P$ ：製程中上下游的操作壓差。

註 1：熱媒鍋爐區使用的熱媒油閃火點：204°C，爆炸界限：0.9%~7.0%；製程需求熱媒油加熱 250°C至 300°C，若發生洩漏該區濃度有可能在爆炸界限範圍，

註 2：製程區中的最大操作溫度，已大於熱媒油閃火點的溫度，會產生易燃性氣體。

### 三、熱媒鍋爐 Hazop 分析

針對熱媒鍋爐系統流程圖上的個別製程之管線、單元進行分段分析，探討各節點。並採取本研究之採用的嚴重性、可能性依風險矩陣來進行分級，並將安全評估之結果與危害控制列出。

本研究探套之熱媒鍋爐，燃料為使用天然氣配管至燃燒機器，循環泵浦則為兩座，業界在設計時都會再增加一座備用泵浦，以利泵浦維修保養時交替使用；在實施 HAZOP 分析時，關鍵性的作業為節點劃分，若節點劃分簡潔明確，系統危害分析的結果將更為完整。由於熱媒鍋爐的危害特性，涵蓋整個系統，因此系統的節點劃分是以整個系統來規劃。節點劃分原則說明如下：

- (一) 主要設備或儲槽為一節點。
- (二) 連接設備或儲槽間之管線為一節點。
- (三) 在分析管線時，除在製程上有重大的壓力、溫度轉換外，其相連的泵、熱交換器可併入同一管線作為同一節點。<sup>7</sup>

製程 HazOp-依製程流程劃分，一般以製程流程圖（PFD）輔助 P&ID，挑選提供相同目的或功能之管線設備為同一節點，其邊界則可為管線上之法蘭或閥等元件，但需避免同一管線設備重複出現於不同節點內。

要依製程流程劃分節點後，分析各類原因（如：機械設備故障、人員誤動作…等）發生後對製程造成的可能影響及相關防護方法。

節點大小劃分無絕對標準，應對該製程於設計之初，即對工廠之控制、警報、連鎖停止、安全裝置、條件傳送、設備維護保養、消防……等安全措施詳加考慮，但是在執行 Hazop 析過程中，發現某些製程有異常現象發生時，製程設計、人為的操作方法或是廠方現有的設備維護方式或頻率無法有效避免該異常的發生，因此根據 Hazop 分析建議，針對實際操作狀況、工程實務經驗，為更進一步降低危害發生之嚴重性與可能性，針對不可接受之危害等級，進行工程控制或管理控制等手段，進一步降低管線設備危害等級，使系統之可靠度更高。

熱媒鍋爐系統節點分配如圖 1 所示，節點劃分及分析結果如表 4 顯示，風險

<sup>7</sup> 王世煌，工業安全風險評估，揚智出版社，台北，民國 91 年。

等級最高者為『1』，可能後果是設備、泵浦、管路之熱媒油大量外洩引起火災，若蒸氣遇火花產生爆炸及人員傷害，其可能發生的原因是：

- (一) 膨脹槽因系統加熱異常造成滿溢。
- (二) 熱媒油受熱體積膨脹，造成管路高流量異常，可能損壞各閥件造成熱媒油大量洩漏異常。
- (三) 外力撞擊造管路、設備造成大量外洩。
- (四) 泵浦區及管路法蘭設備震動，導致螺絲鬆動造成洩漏。
- (五) 熱媒油內漏滲入泵浦線圈產生高溫電弧，破壞泵浦。

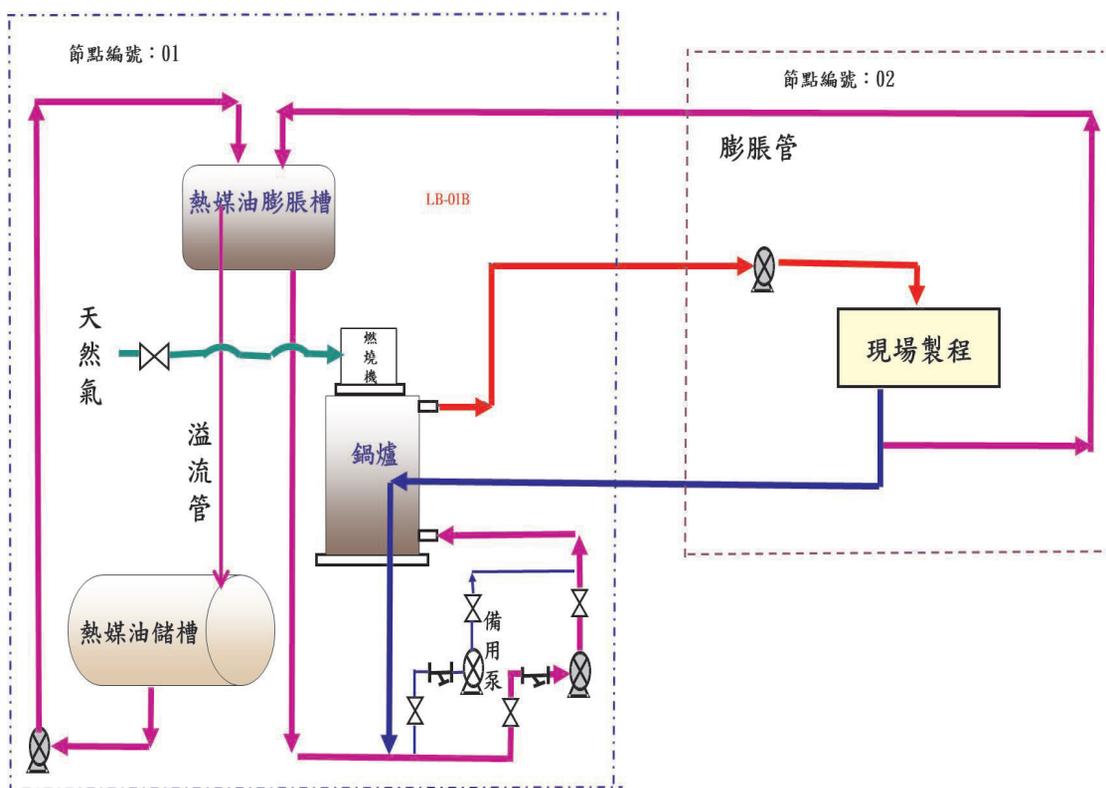


表 4 危害與可操作性分析工作（熱媒鍋爐系統）

製程操作程序名稱：熱媒鍋爐系統

研討節點描述：1-熱媒鍋爐燃燒天然氣加熱熱媒油

管線設備編號：

設計目的：將熱媒油加熱至現場製程足夠之溫度

項目	製程偏離	可能原因	潛在危害	防護措施	發生機率	嚴重性	風險等級	改善措施
1.膨脹槽 管路至 鍋爐	高流量	1.馬達異常流 量增加 2.熱媒油加熱 體積膨脹	1.因馬達異常 造成揚程增 加流量加 大，造成洩 漏。 2.熱媒油受熱 體積膨脹， 造成管路高 流量異常， 可能損壞各 閥件造成熱 媒油大量洩 漏異常	1.定期檢測確 保膨脹桶安 全閥能正常 動作	1	4	3	1.設置防液 堤，防止熱 媒油洩漏擴 散擴大影響 週遭設備
2.膨脹槽	高液位	系統加熱異 常，高溫熱媒 油由此溢流	滿液流出波及 底部製程設 備，易使火災 擴大	1.膨脹槽設置 液位傳送 器，並將訊 號即時傳至 控制室	3	3	3	1.將膨槽排氣 管導流至儲 油槽
3.泵浦區 及管路 法蘭	洩漏量 多	1.設備震動， 導致螺絲鬆 動 2.熱媒系統熄 火降溫後， 重新升溫， 熱媒系統管 路之閥法蘭	保溫材受高溫 碳化成易燃 物，熱媒油而 悶燒引燃冒 煙。	1.防液堤內增 加檢出器與 警報	1	5	3	1.定期排定紅 外線熱影像 檢測，及早 發現異常並 處理。

項目	製程偏離	可能原因	潛在危害	防護措施	發生機率	嚴重性	風險等級	改善措施
		處受到熱脹冷縮						
4.無軸封泵浦	低流量	1.泵浦軸承磨耗。 2.熱媒油內漏滲入泵浦線圈	1.泵浦本體損壞破裂導致熱媒油洩漏引起火災。 2.造成內部電線短路產生高溫電弧，破壞泵浦，導致導致熱媒油洩漏引起火災	1.定期量測無軸封泵浦電流	2	1	1	1.無熔絲開關，設置過電流異常檢出裝置，並連鎖泵浦開關，異常電流無法啟動泵浦
5.泵浦過濾器	洩漏量多	泵浦過濾器閥體未鎖緊	1.發生洩漏造成環境污染，嚴重時可能導致火災。 2.異常停機製程中止。	1.鍋爐室皆設有遠端斷電開關，緊急突發事故，切斷熱媒油鍋爐動力及控制電源	2	5	4	1.製作檢查紀錄表供查核確認。 2.防溢堤增設液位檢知器 3.鍋爐差壓控制器連鎖裝置熱媒油循環差壓低流量鍋爐自動熄火，燃燒器停止運轉並警報。
6.無軸封泵浦	無流量	泵浦二次側手閥誤關	熱媒油循環管路無熱媒油循環，同時天然氣鍋爐持續加熱，至油溫持續升高、裂	設有溫度感知器，當偵測到管路內循環油溫超過設定溫度時，聯鎖調節燃燒器火焰	2	1	1	鍋爐熱媒油出及入口管路設有電接點壓力表當管路壓力差達設定值時，聯鎖關閉

項目	製程偏離	可能原因	潛在危害	防護措施	發生機率	嚴重性	風險等級	改善措施
			解，可能出現盤管變形破裂，爐內熱媒油洩漏並迅速氣化，發生鍋爐火災爆炸	並自動遮斷燃燒機供氣閥。				燃燒機，並自動遮斷燃燒機供氣閥
7.無軸封泵浦	低流量	人員操作泵浦開關順序錯誤	開機試車，誤關閉正在使用中的手動閥，導致鍋爐熱媒油循環異常，鍋爐無法正常啟動	鍋爐流量異常警報	4	3	4	熱媒油主循環泵浦出入口手動閥，有標示使用中及備用及已標示緊急遮斷閥供確認。
8.連接泵浦之熱媒油管路	流量少	熱媒循環泵系統液位不足或管內壓力偏低。	造成循環泵運轉壓力不穩，熱媒管路晃動大而斷裂，大量熱媒外漏，引起火災爆炸。	1.液位低警報發生時，立即現場檢查。 2.液位不足立即補充，若發現管路晃動大，立即停轉熱媒循環泵。	1	2	1	1.熱媒管路全部以支撐架固定，防止管路熱媒流動產生晃動斷裂。 2.加強檢視熱媒區槽塗防火塗料，以延緩火勢延燒，爭取搶救時間。

製程操作程序名稱：熱媒鍋爐系統

研討節點描述：2-熱媒油至現場製程進行熱交換

管線設備編號：

設計目的：加熱後之熱媒油至現場系統熱交換升溫至條件溫度

項目	製程偏離	可能原因	潛在危害	防護措施	發生機率	嚴重性	風險等級	改善措施
1. 泵浦區及管路法蘭	洩漏量多	1. 製程區相關堆高機或其他移動式機具出入碰撞 2. 現場設備保養維修踩踏設備管路	管路及設備受損導致熱媒油洩漏引起火災	泵浦區旁設置防撞護欄。	5	3	4	易被踩踏之熱沒有管路上，增設跨橋防護
2. 製程區熱媒油相關設備	洩漏量多	製程設備轉動設備軸承、管路、軟管磨耗	熱媒油洩漏引起火災	熱媒油流經之製程區增設防液堤	3	4	4	1. 熱媒區電纜線及電纜線槽塗抹防火塗料。 2. 定期量測無軸封泵浦電流

#### 四、PyroSim介紹說明<sup>8</sup>

PyroSim 是一個互動式模型建立軟體作為火災動力學計算軟體 (FDS) 之前端設計。此套件模軟體提供即時的回饋並確保輸入 FDS 之文件格式正確。建模時可以任意切換公制單位模式或英制單位模式。PyroSim 提供二維和三維幾何創建功能，並可使用旋轉、複製、移動等功能簡化空間建立之程序。現代建築外觀的多樣化及量體的大型化增加了分析者建立模型之難度，為了能有效提高分析者運用 FDS 之效率，使用可視化之建模軟體創建空間之模型並設定空間之邊界條件，除了可降低建模之困難度，亦可減少分析者在空間建立及邊界條件設定發生錯誤

<sup>8</sup> 邱晨璋，「夜店電腦火場重建模擬驗證分析之研究」，中華民國消防設備師公會全國聯合會消防技術專刊，第一輯第 21 篇，民國 104 年。

之可能，或是在第一時間即可進行修正。

以下介紹建模之步驟順序及流程圖：

### (一) 建立幾何外觀 (Obstruction)

在 PyroSim 繪圖的介面中，可透過直接建立 3D 模型或是透過 2D 分別繪製各樓層空間幾何，在 2D 的建構模式中，可匯入建築平面圖做為考，可支援之檔案格式如 bmp, dxf, gif, jpg, png, tga,及 tif，複雜之建築空間以 2D 方式進行較為快速。

### (二) 表面性質設定 (Surface)

此步驟用於定義固體 (solid) 以及通風口 (vent) 之性質，在此，固體表面可定義熱傳導、或是燃燒性質；通風口則可定義風速或溫度等性質。

### (三) 消防排煙設備設置 (Devices)

建模過程中可依建築設計建立撒水設備、火警探測器以及機械排煙設備，前兩項均屬設備 (device) 之設定，而機械排煙設備則以通風口 (vent) 進行設定，其中火警探測器目前具有連動其他設備之功能，此功能亦大為提升模擬之真實度。

### (四) 量測點設置 (Devices)

運用 FDS 計算之前，分析者須先由建築模型判斷模擬空間內何處具有重要之分析結果，如 CO、溫度、能見度、熱輻射及速度場等，由事前之規劃，模型建立時即進行量測點設置，量測點對於不同之量測對象可分氣體及固體之量測點 (gas phase and solid phase device)，在量測點設置處可獲得對應時間之量化數據。

### (五) 初始條件設定

模型空間內之初始環境條件亦可在 PyroSim 平台設定，初始條件一般以設定環境溫度為主。

### (六) 邊界條件設定

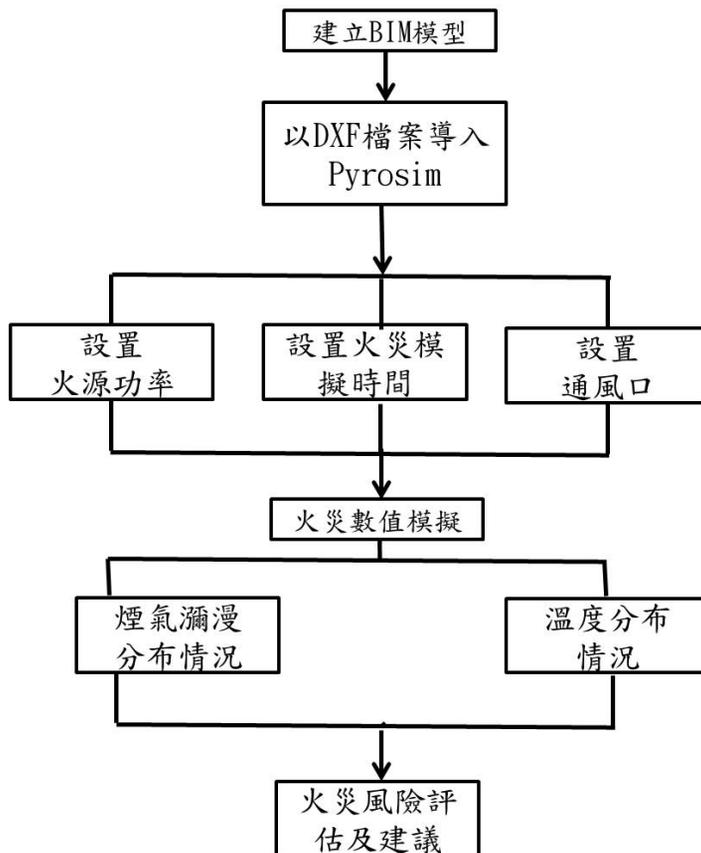
模型之邊界條件設定即為重要，在建築空間開口部以及外氣是否有速度場之存在均應詳細考慮以進行設定，對於與外氣連通或是自然風影響均可透過通風口 (vent) 進行設定。

### (七) 網格劃分 (Meshes)

透過 Meshes 可將所建之模型劃分網格，就網格大小可分為單一網格 (Uniform Meshes) 及非單一網格 (Nonuniform Meshes)，在較為龐大之模型內使用單一網格易造成網格數過多導致運算時間過長或是無法分析之情形，當網格數目過多但放大網格大小又會導致計算結果誤差過大之情況下，建議使用非單一網格，將模型切割為多個空間，在各空間以不同大小之網格進行劃分，一般以火源附近區域使用最小之網格，而向外區域則可略為放大。不論是以單一網格或是非單一網格進行網格劃分時，分析者均應進行網格測試，以找尋合理之網格大小。

### (八) 計算條件設定 (Simulation parameter)

在此可設定模型運用 FDS 計算之時間及求解方法，運算時間以秒為單位，而求解方法可選擇 Large Dddy (LDS) 或是 Direct Numerical (DNS)。



## 五、熱媒鍋爐房起火源空燒之模擬研究

整理近期有關 IMO-1165 及 IMO-1165 之相關研究共有五篇如下表，將細水霧系統應用於船艙或機械空間，細水霧系統能夠有效撲滅各種火災，包括噴霧火災、油池火災。而且他們的實驗結果很好且與使用 FDS 6.5.2 的模擬結果一致。

Choi等相關學者使用FDS 4.0 的細水霧系統進行了滅火模擬、Bellas等相關學者使用IMO-1165 的標準下進行測試如表 5，並研究船艙室溫度和滅火時間的演變，在全尺寸實驗中測量與計算的結果非常吻合FDS 6.7.0。<sup>9</sup>

表 5 IMO-1165 及 IMO-1165 之相關研究整理表

Authors	Fire test protocol	Methods	Room size (m <sup>3</sup> )	Door size (m <sup>2</sup> )	Water mist nozzle				NoN
					Type	ΔP (bar)	m(lpm)	D <sub>v,50</sub> (μm)	
Pepi et al.	IMO-668	Experiments	10 × 10 × 5	2 × 2	Aqua Mist (AM-10)	12	12	300	25
Bill et al.	IMO-668	Experiments	60 × 29 × 9		Spraying system	69–71	5.1–5.4	90–95	36,90
Back et al.	IMO-668 /ARMY /Coast Guard	Experiments CFAST 1.6	60 × 47 × 18	2 × 2	AM-10	12–15	11.9–13.4	300	36,100
					AM-10	12	12	500	28
					Kidde-Finwal	12	11.3	250–300	
					Reliable Mista Fire	70	9.1	100	
					Securiplex system	5.5	5	200	
Choi et al.	IMO-1165	Experiments FDS 4.0	20 × 15 × 10	2 × 2	Spraying system	70	6.1	100	
					Customized	80	17.6	82	9
Bellas et al.	IMO-1165	Experiments FDS 6.7.0	10 × 10 × 5	2 × 2	Full cone swirl (G1)	7	10.7	155–390	36
					Spiral (G3)	10	10.1	127–349	
					Cluster swirl (K6)	8	15.8	100	
Jeong et al.	IMO-1165	Experiments	18 × 18 × 16.5	2 × 2	Customized	10	22.5	125	22

本研究模擬一鍋爐房（尺寸：12m×6m×8m）四周牆壁皆為混凝土材質，網格格點尺寸採用 0.25m×0.25m×0.25 共 116,736 格，該模型之開口含有一 1.8 平方公尺的門（2m×0.9m）及 2 平方公尺的通風口（2m×1m），此窗口可提供火場氣流之進出及氣體交換之功能，火源設定在鍋爐房設 15m<sup>2</sup> 的熱媒油於防液堤內起火燃燒，其最大熱釋放率為 4.3mW，以熱釋放率曲線以及高度 1.5m 的溫度和氧濃度圖來做為本模擬情境之驗證基準，設置模擬如圖 2、圖 3。

ESSOTHERM 500 熱媒油送樣至高雄科技大學「產業與環境危害檢測中心」

「15 平方公尺熱媒油油池火災」熱釋放率計算：經送驗得知最大熱釋放率 Q 為 286.45 kW/m<sup>2</sup>

<sup>9</sup> Gaghyeon Ha, Numerical analysis to determine fire suppression time for multiple water mist nozzles in a large fire test compartment, Nuclear Engineering and Technology, pp2-3, 2020。

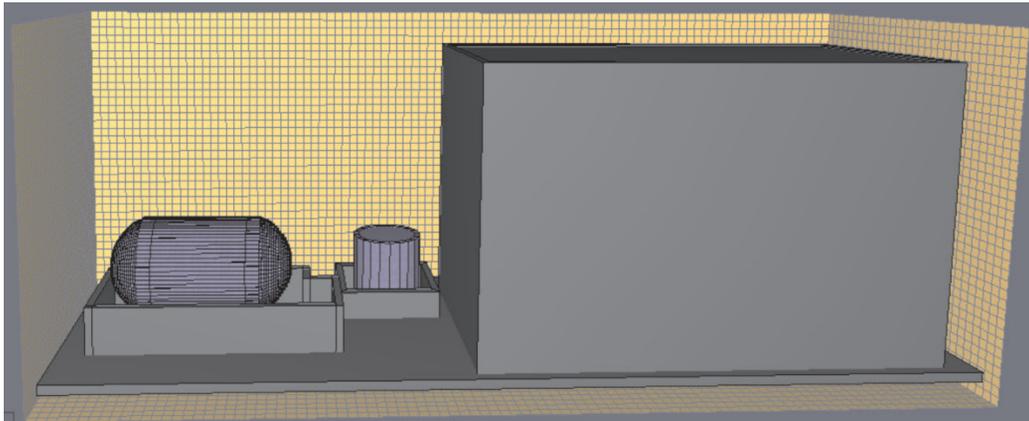


圖 2 熱媒鍋爐房正面圖

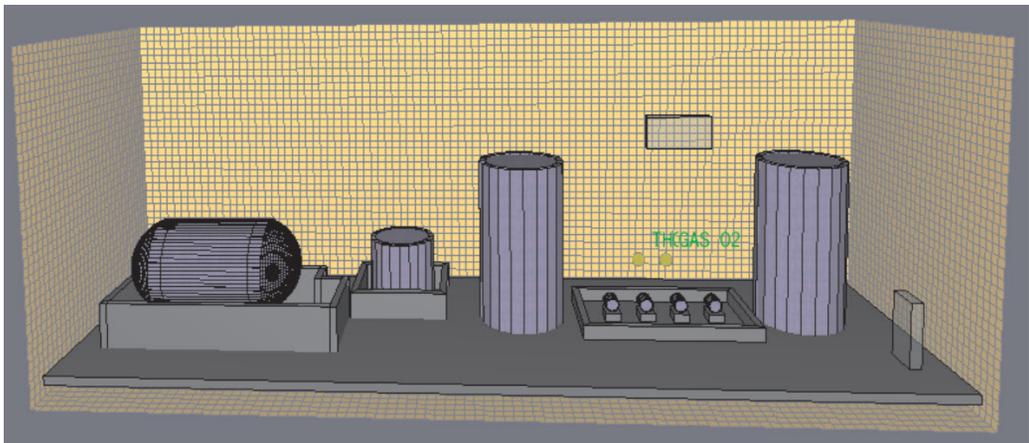


圖 3 熱媒鍋爐房正面透視圖（前方及上方牆壁已隱藏便於觀察）

## 六、熱媒鍋爐房模擬條件設計

本研究場景為某鍋爐房（基本資料如表 6、設計圖如圖 4、俯視圖如圖 5），在此空間內設置細水霧噴頭。

表 6 本研究場所基本資料說明表

項目	基本資料
用途	熱媒鍋爐房
建物資訊	1 層之獨立建築物
樓層室內高度	8 公尺
樓地板面積	72 平方公尺 (長：12m、寬：6m)
鍋爐數量	2 座
泵浦數量	4 座
開口	(1) 1.8 平方公尺的門 (2m×0.9m) (2) 距地面 5 公尺處設有 1 個 2 平方公尺的通風口 (2m×1m)
滅火設備種類	細水霧滅火設備
防液堤面積及高度	15 平方公尺 (長：5m、寬：3m)、高：0.2m
滅火設備自動啟動裝置	鍋爐房中央高度 7.4 公尺設有特種定溫探測器
細水霧噴頭防護條件	放射區域每平方公尺每分鐘放水量在二十公升以上

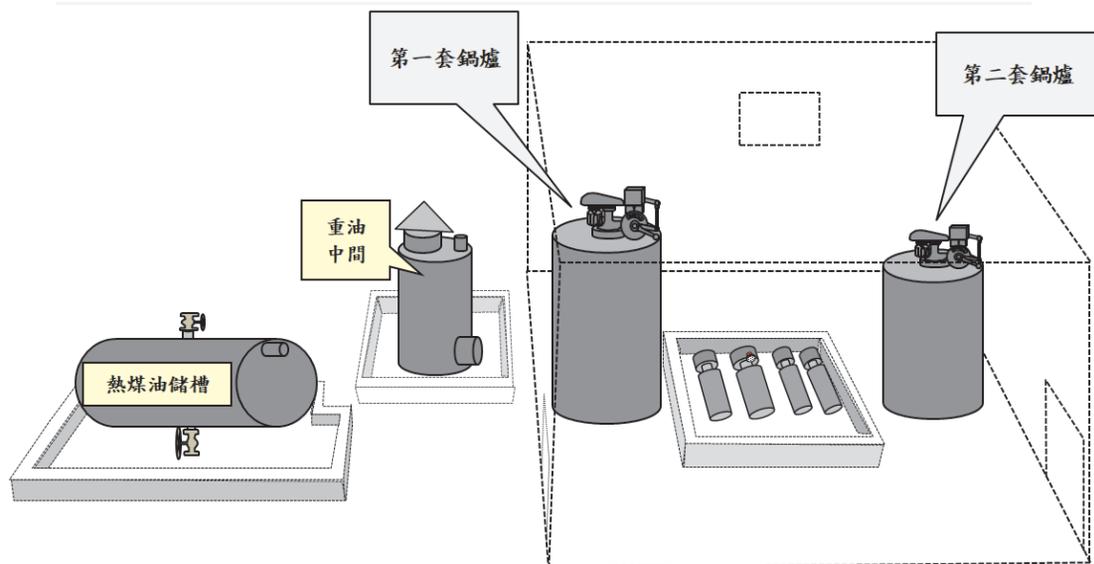


圖 4 本研究鍋爐房設計圖

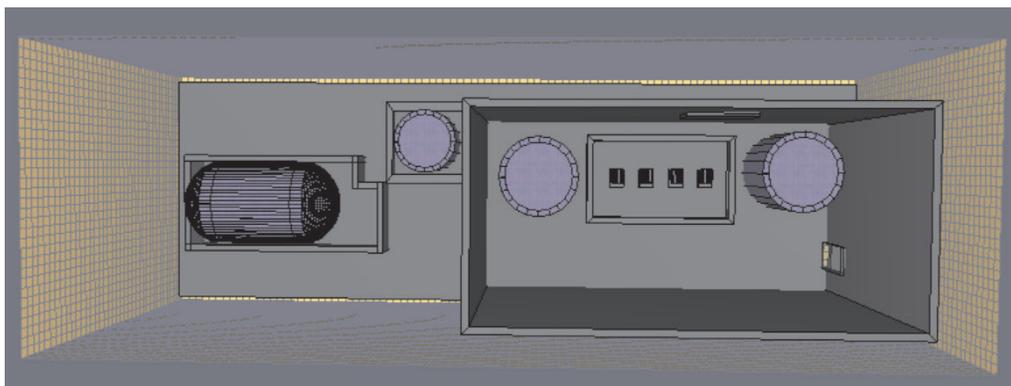


圖 5 本研究鍋爐房俯視圖

業界之熱媒鍋爐房通常至少設有兩座熱媒鍋爐，一座為平常使用另一座則為備用；經由 HAZOP 分析結果得知最容易發生洩漏之節點為（一）熱媒油循環泵浦、（二）鍋爐房內之熱媒油連結管路及閥件，後者由於相關設備皆須定期執行保養維護及故障維修，例如：燃燒器、過濾器、鍋爐本體、泵浦…等，若現場施工或拆卸後復原不慎，皆會導致熱媒油管路或閥件直接洩漏或損壞後洩漏引起火災。

熱媒系統之安全設計，會於鍋爐房內適當位置設置防液堤（dike）外，亦會針對熱媒油泵浦設置處再增設防液堤，若有熱媒油不慎發生洩漏時可以局限在一定範圍內進行滅火控制，避免熱媒油四處流竄延燒。

透過 2.1 節重大災害回顧，我們可以知道現場製程設備易洩漏之部分皆未設置自動滅火系統，若發生洩漏火勢成長及延燒非常迅速，而事故發生時又因人員慌張，無法於第一時間處理，耽誤了初期滅火的有效時間造成災害及損失擴大。

未設置自動滅火系統的主要原因為鍋爐房樓地板面積未達 200 平方公尺，未達消防法令設置之門檻，本研究透過 HAZOP 分析結果，最容易發生洩漏之節點為熱媒油循環泵浦，台灣多數公司都為中小企業，考量設置細水霧滅火系統成本及降低火災風險的最佳效益，故本研究假設熱媒鍋爐（操作條件資料說明如表 7）洩漏後針對局限在熱媒油泵浦之防液堤內以細水霧系統進行滅火。

## ESSOTHERM 500 熱媒油安全資料表所建議之滅火措施包含使用細水霧

適用滅火劑：使用消防水霧、細水霧、泡沫、乾化學制劑（乾粉）或者二氧化碳（CO <sub>2</sub> ）滅火。
滅火時可能遭遇之特殊危害：乙醛、碳的氧化物、氧化硫、濃煙、不完全燃燒產物，避免槽體爆炸碎片噴射傷及身體。
特殊滅火程序：在無危害情況下將儲存容器搬離火場或與隔離其他可燃物。以消防水冷卻容器直至火苗完全熄滅，人員遠離容器尾端方向。

表 7 熱媒鍋爐操作條件說明表

項目	基本資料
型式	熱媒鍋爐房
最高使用壓力	10kg/cm <sup>2</sup>
最大蒸發量	2326 kw
傳熱面積	100 平方公尺
使用熱媒油種類	ESSOTHERM 500 熱媒油
閃火點	204°C
公共危險品分類	第四石油類
管制量	6000 公升

## 七、模擬分析

### （一）模擬架構

本章節之研究採用鍋爐房為鋼筋混凝土構成之一層獨立建築物，其內部尺寸：長 6m×寬 12m×高 8m，透過電腦模擬熱媒油洩漏於防液堤內（長：5m、寬：3m）及鍋爐房內形成之油池火災進行滅火。

該模型室內細水霧放射方式，為採用一齊開放閥之方式對放射區域進行放射，啟動要件之動作原理則是藉由室內所設之特種定溫探測器（RTI=25m<sup>1/2</sup> s<sup>1/2</sup>，動作溫度為：70°C）<sup>10</sup>並藉由適當管線系統，將所有撒水頭連接，搭配流水檢知裝置、各類控制閥、加壓送水裝置，其作動方式即是由探測器感應而啟動加壓送水裝置，遂由細水霧噴頭放射，以防止火勢繼續蔓延。

<sup>10</sup> 周柏年，黃伯全，林元祥，吳榮平，「定溫式侷限型探測器動作時間之研」，中央警察大學警學叢刊，第 43 卷第 2 期，106 頁，民國 101 年。

先針對熱媒鍋爐房起火源空燒進行探討，無滅火設備防護狀態下，熱媒油洩漏後引燃，環境中熱釋率、溫度及氧氣濃度的變化，再增加設置之細水霧撒水頭位於火源之正上方之情境，其高度分別採用 2 種不同參數作為探討，分別為距離火源表面之 5m、3m，放射角度為 60°；於水霧粒徑方面，粒徑尺寸則採用 100 $\mu$ m、350 $\mu$ m、1000 $\mu$ m、(低壓<12.1 bar、中壓 12.1-34.5bar、高壓>34.5bar，撲滅油類火災水霧粒徑需小於 400 $\mu$ m，而低壓細水霧粒徑為 350 $\mu$ m因此能撲滅油類火災<sup>11</sup>)，鍋爐房內水霧撒水頭之配置間距 2 公尺，對於泵浦之防液堤先以 6 個細水霧噴頭標準配置(2X2 正方形配置)共六個情境進行模擬，接下來將上述實驗結果最佳之情境再分別以放射角度 75°、90°、135°來做滅火模擬。

最後再針對較佳之情境更進一步探討細水霧噴頭數量對於滅火效果之影響，於防液堤上方集中配置細水霧頭集中配置的方式(增加為 8 顆細水霧噴頭及間距縮短為 1 公尺)及縮減細水霧噴頭的配置(間距維持 2 公尺不變但數量縮減為 4 顆細水霧噴頭)進行比較，探討各情境火源能量釋放消長情形與熄滅時間，設計出最佳滅火效果的細水霧系統設置。

## (二) 熱釋放率計算：液態燃料設計<sup>12</sup>

液態燃料之設計則較固態燃料來得直觀，兩者當中之差別在於液態燃料於燃燒前不需要經過熱分解反應此步驟，其僅須受熱將原先之液體蒸發為氣體，若蒸發之氣體符合燃燒條件即可開始燃燒，而燃燒旺盛之與否小則主要牽涉其本身之導熱能力、氣化量(蒸氣通量)及燃燒反應之產物、副產物，故在 FDS 設定上僅須設定液體之熱性質、蒸氣通量、燃點等，並藉由 surface 設定此材料屬性並套用於整個物件上即可完成液態燃料之設計。

液體同環境空氣的熱傳遞包括輻射熱與對流熱，目前 FDS 只考慮輻射熱，值得注意的是不僅液體表面會吸收輻射熱，頁面下的一層薄液體燃料也會吸收輻射熱，且對燃燒速率有很大影響。

<sup>11</sup> 黃鴻勛，「細水霧系統之功能驗證與個案分析」，中華民國消防設備師公會全國聯合會消防技術專刊，第一輯第 2 篇。

<sup>12</sup> 蔡政廷，「利用 FDS 模擬不同高度與液滴粒徑之撒水噴頭對賣場建築火災滅火效率之影響」，雲林科技大學，碩士論文，民國 103 年 6 月。

### (三) 建立模擬場景及量測項目說明

火災的型式與火災成長度及火災危險度與熱釋放率（Heat Release Rate, HRR）具有相關性，一般可知火災所產生的煙霧最主要是由熱釋放率所引起，若設置細水霧滅火設備，在火災發生時動作進行滅火，使得熱釋放率受到抑制而降低，因此若能掌控整個火災過程在細水霧滅火系統作動後的熱釋放率變化，即可掌握煙產生量和逃生時間之關係，確認是否可以滅火成功。

為探討細水霧系統對於熱媒鍋爐火災之滅火成效，本研究電腦模擬結果，以細水霧設備動作前後，熱媒油火源熱釋放率-時間及熱媒鍋爐房內環境溫度-時間之變化情形為討論項目，其中記錄環境溫度變化之量測位置，設定在接近火源處（防液堤上方離地面高度 1.8 公尺），本研究將火勢之熱釋放率初次降為 0kW 之時間點作為火源之熄滅時間。

### (四) 熱媒油泵浦防液堤油池火災之設定如表 8 所示：

表 8 熱媒油泵浦防液堤油池火災條件設定表

1. 場景：泵浦洩漏熱媒油，並在泵浦防液堤內形成油池火災。			
2. 延燒引燃條件：泵浦於洩漏後開始自燃。			
3. 特種定溫探測器：動作溫度為：70°C、RTI=25m <sup>1/2</sup> s <sup>1/2</sup>			
4. FDS 其他設定：			
(1) 網格大小：0.25m×0.25m×0.25m			
(2) 鍋爐房內部尺寸：12m×6m×8m			
(3) 噴頭流量：22.4 L/min、K-factor：5.6			
標準配置（3X2 之正方形配置）、Latitude Angle = 60			
粒徑	100 μm	350 μm	1000 μm
高度			
3m	情境一	情境二	情境三
5m	情境四	情境五	情境六
上述實驗結果最佳之情境進（放射角度）行探討			
角度	atitude Angle 75°	atitude Angle 90°	atitude Angle 135°
高度			
3m	情境七	情境八	情境九
5m	情境十	情境十一	情境十二
集中配置（8 個細水霧噴頭於防液堤上方成兩集中直線）			

3m	由上述實驗結果最佳之情境進（高度、粒徑）行探討（情境十三）
5m	由上述實驗結果最佳之情境進（高度、粒徑）行探討（情境十四）
縮減細水霧噴頭數量為 4 顆（噴頭間距維持 2 公尺不變）	
3m	由上述實驗結果最佳之情境進（高度、粒徑）行探討（情境十五）
5m	由上述實驗結果最佳之情境進（高度、粒徑）行探討（情境十六）

## 肆、結果與討論

### 一、熱媒鍋爐房起火源空燒模擬情境解析

利用 FDS 模擬室內火災時，液體燃料在真正燃燒前其實是揮發，環境空氣的熱傳遞包括輻射熱和對流傳熱，目前 FDS 只考慮輻射熱。不僅液體表面會吸收輻射熱，液面下的一薄層液體燃料也會吸收輻射熱，且對燃燒速率有很大影響。

該模擬的室內空間之體積為 576 立方公尺，所設之開口含有一 1.8 平方公尺的門（2m×0.9m）及 2 平方公尺的通風口（2m×1m），在燃燒激烈的情況下，雖然火源侷限在防液堤裡，我們可以在分別在 432 秒及 524 秒發現該室內火焰會擴散至防液堤外甚至在開口之門及通風口有燃燒情況，主要是因環境溫度高，液體揮發速率極快，隨著煙流擴散至至門口及可燃性氣體受熱浮力影響以致窗口也有產生火焰的情形，如圖 6 及 7 所示，熱媒油所揮發之可燃性氣體隨著氣流流動至門口及通風口與新鮮空氣混合，又因其室內溫度也足以達到燃燒的溫度，滿足燃燒三要素後，產生燃燒現象，開口之可燃氣體消耗殆盡後，燃燒情形即消失；燃燒情形發生在泵浦防液堤外，主要是因為熱媒油的蒸氣氣體之分子量一般均較空氣為高，密度大於空氣，稱為重質氣體（heavy gas or dense gas），因比重比空氣來的重，雖然一開始熱媒油蒸氣雖著熱對流往上，接下來則會因地心引力的關係，而向地面擴散。

熱媒油燃燒實驗與模擬鍋爐房空燒熱釋放率變化如圖 8；兩者的熱釋放率成長曲線圖相似，但在鍋爐房空燒模擬中，因鍋爐房的氧氣被漸漸會逐漸被消耗使得燃燒較難以進行，熱釋放率成長速度較實測結果來的慢，模擬熱釋放率在較長的時間才達到最大單位面積熱釋放率 466.7 (kw/m<sup>2</sup>)；在熱媒油實測的部分則是由高雄科大產業危害檢測中心使用圓錐量熱法（CNS 14705 方法）並以加熱強度 20 (kw/m<sup>2</sup>) 進行加熱燃燒測試，因為沒有缺少氧氣的問題，起火燃燒後熱釋放率成長較也較快達到最大熱釋放率，且單位面積最大熱釋放率為 589.6 (kw/m<sup>2</sup>) 較模擬鍋爐房空

燒之情境高。

防液堤上方 1.8 公尺的溫度變化如圖 9，在 402 秒時溫度因燃燒現象使鍋爐房內的溫度上升，且經過 402 秒室內環境溫度最高達到 661°C 以上，若有人員進去室內滅火有可能使人員暴露於危險之中。

氧氣為燃燒反應不可或缺物質，空氣中含有重量比 23%、體積比 21% 的氧氣，為氧最主要的來源。在一燃燒反應的空間內，如果氧的體積比濃度低於 15%，則燃燒反應將很難持續進行。在鍋爐房模擬燃燒前空間中的氧氣濃度為 21%，如圖 10，隨著持續燃燒進行，空間中的氧氣濃度會逐漸降低，透過模擬我們可以發現到在 163 秒燃燒雖可繼續進行，但環境的氧氣濃度已降至約 15%~17%，已有顯著下降，如圖 11，由其實當氧氣濃度低於 16% 時，燃燒不完全就會產生一氧化碳，而一氧化碳極容易跟人體的血紅素結合，人在吸入一氧化碳後會昏迷甚至在短時間內死亡；在 362 秒時空間中的氧氣濃度分佈已降至 13%~14%，由圖片中黑色部分則為 13% 氧氣濃度的分佈情形，如圖 12；該空間中火源上方之切面圖可分析溫度的變化，在 205 秒時火源上方 1.8 公尺處達到最高溫度 525°C，如圖 13 黑色部分；而溫度也隨著燃時間的推移，480s 於鍋爐房防液堤及出入口上方約 1.8 公尺處的溫度分別為 286°C 及 106°C，如圖 14、圖 15 黑色部分，特別是鍋爐房出入口已高於人員所能暴露承受的溫度 60°C。

720 秒防液堤上方 1.8 公尺處溫度仍高達 83°C，如圖 16 黑色部分，因為熱媒鍋爐房的氧氣隨著劇烈燃燒消耗殆盡，而使燃燒困難使火焰熄滅，但雖著新鮮氣流引進產生復燃，使鍋爐房內的溫度仍維持在高溫狀態，且鍋爐房出入口的溫度仍亦約 54°C，如圖 17 黑色部分。

本研究透在探討火場情境模擬時，已先透過實際實驗取得火源的參數，並加以設定適當的火源熱釋率條件進行探討，透過研究可得知火源是否可持續燃燒，其實燃燒持續時間長短與該空間的體積、火源的大小、通風開口息息相關，熱媒油火災屬於 B 類火災，若不慎洩漏發生火災後，其火源達到最大熱釋率的時間是非常快的，在劇烈燃燒的情況下，隨著燃燒時間推移，該空間氧氣度下降至一定程度，使室內的火災會因燃燒困難導致空間溫度降低，但熱媒鍋爐房出入口（火災發生在門開啟的時候）溫度仍更高，且亦高於人員所能暴露承受的溫度 60°C，若人員沒有穿戴穿著消防衣或者穿戴消防設備不落實，就貿然進入火場進行滅火，是非常危險的事；此研究的情境模擬是鍋爐房出入口打開的情況下進行燃燒模擬，不管門開啟與否，都要特別留意「復燃」的現象，雖隨間推移火源已無繼

續燃燒，但在氧氣不足時產生的未完全燃燒的碳粒子、一氧化碳及可燃性氣體積聚，又會因突然有足夠的空氣引入火場，與濃烈的可燃氣體混合，並達燃燒界限範圍內，則在原有室內高溫瞬間引燃下，燃燒猛烈地發生，並引發出一股爆發性的火焰擴散，朝空氣入口處衝出室外。

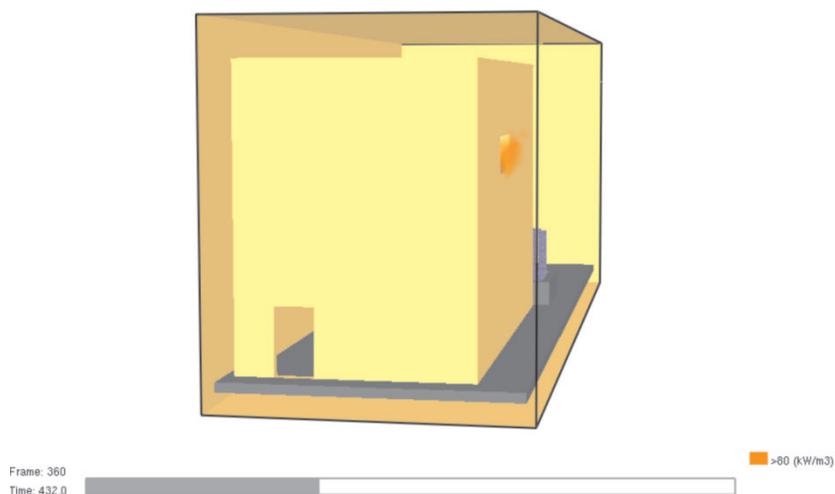


圖 6 432 秒時防液外及通風口有燃燒現象（隱藏鍋爐房牆壁）

資料來源：本研究製作

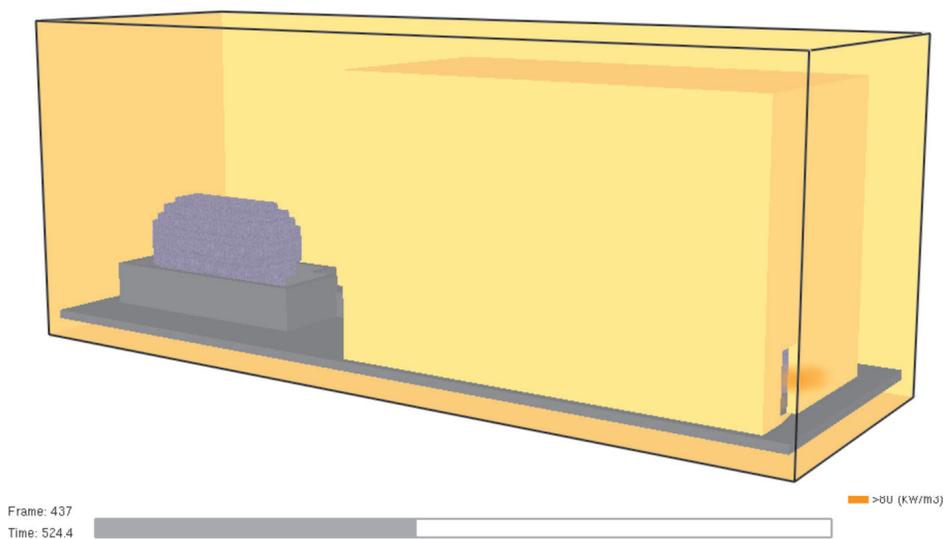


圖 7 524 秒時出現火源延燒至鍋爐房門口現象（隱藏鍋爐房牆壁）

資料來源：本研究製作

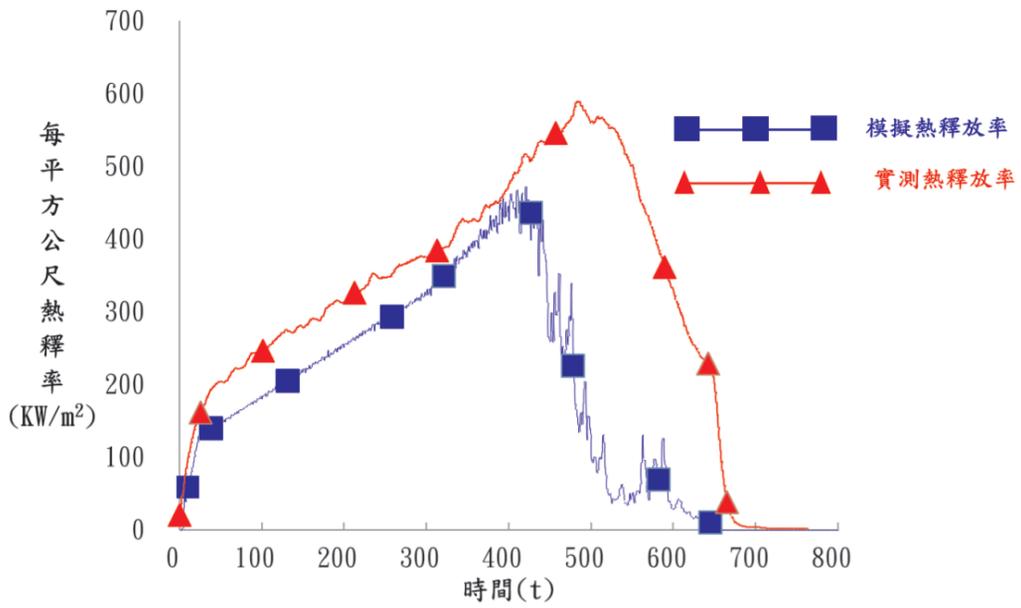


圖 8 熱媒油燃燒實驗與模擬鍋爐房空燒熱釋率變化圖

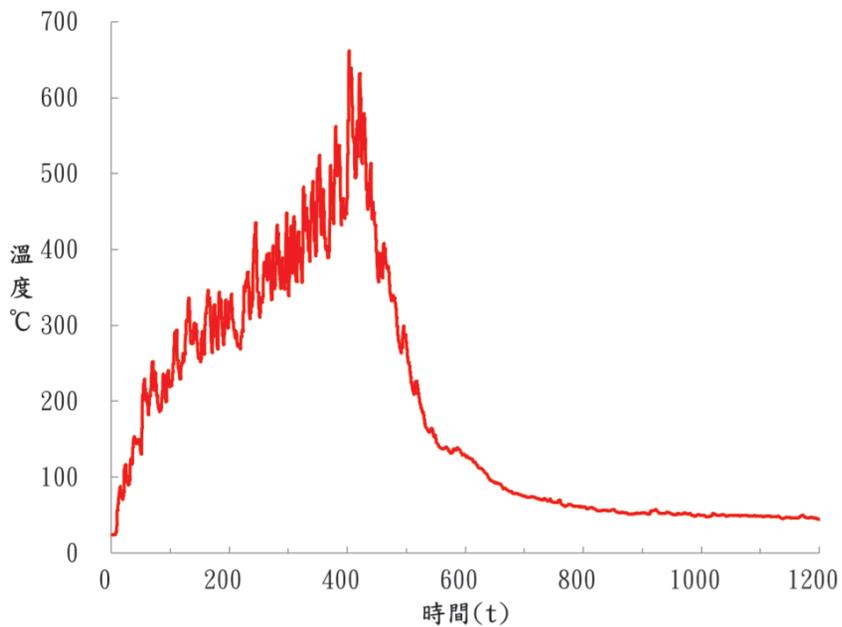


圖 9 防液堤上方 1.8 公尺溫度變化圖



圖 10 熱媒鍋爐房未燃燒時氧氣濃度切面圖

資料來源：本研究製作

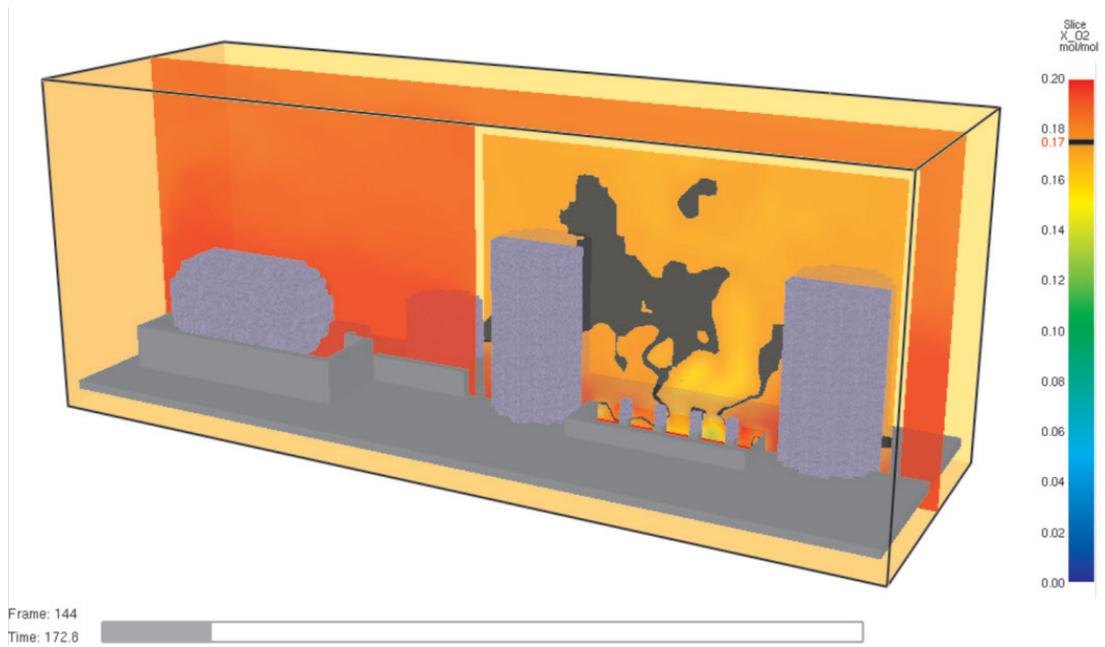


圖 11 熱媒鍋爐房 172 秒氧氣濃度切面圖

資料來源：本研究製作

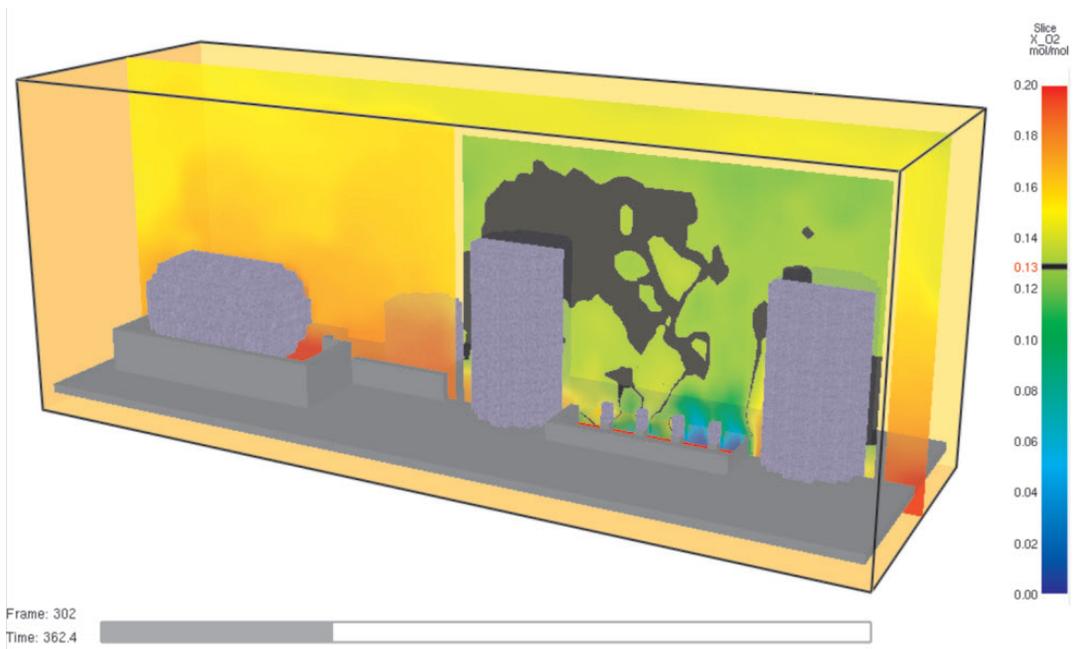


圖 12 熱媒鍋爐房 362 秒氧氣濃度切面圖

資料來源：本研究製作

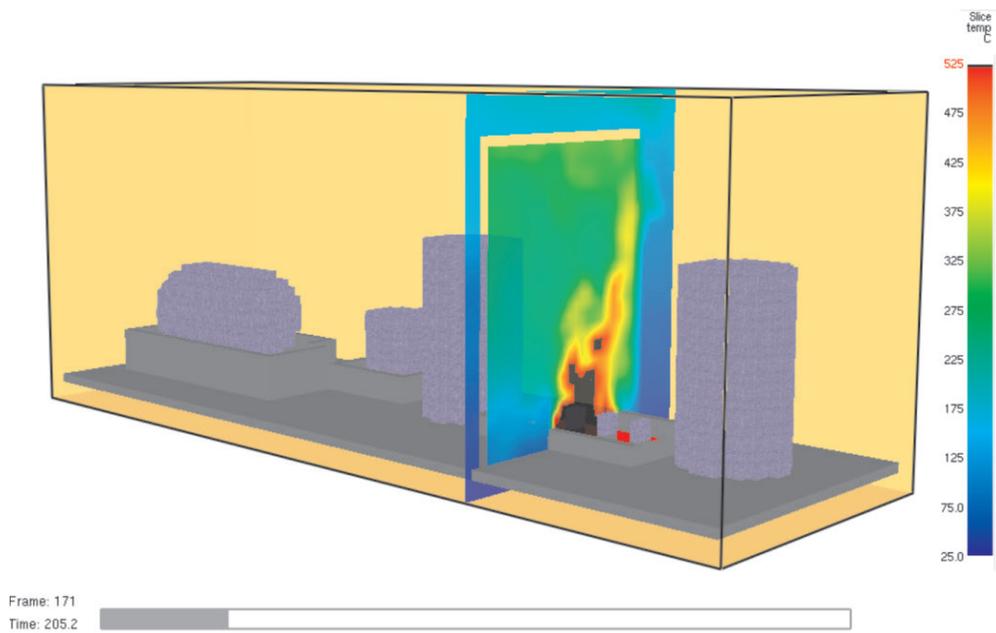


圖 13 熱媒鍋爐房防液堤上方 1.8 公尺 205 秒溫度切面圖

資料來源：本研究製作

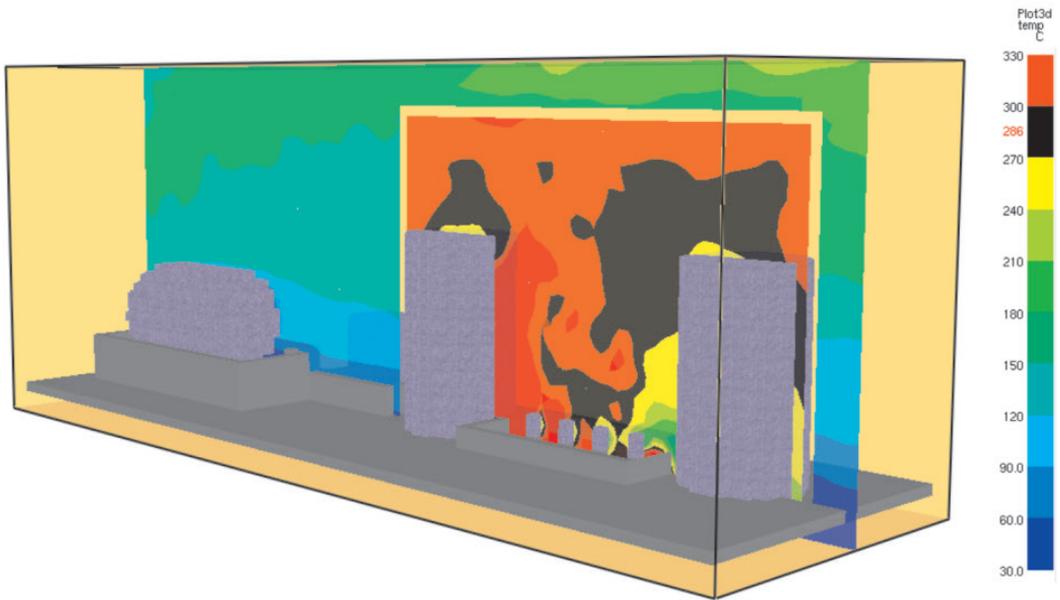


圖 14 熱媒鍋爐房防液堤上方 480 秒溫度切面圖

資料來源：本研究製作

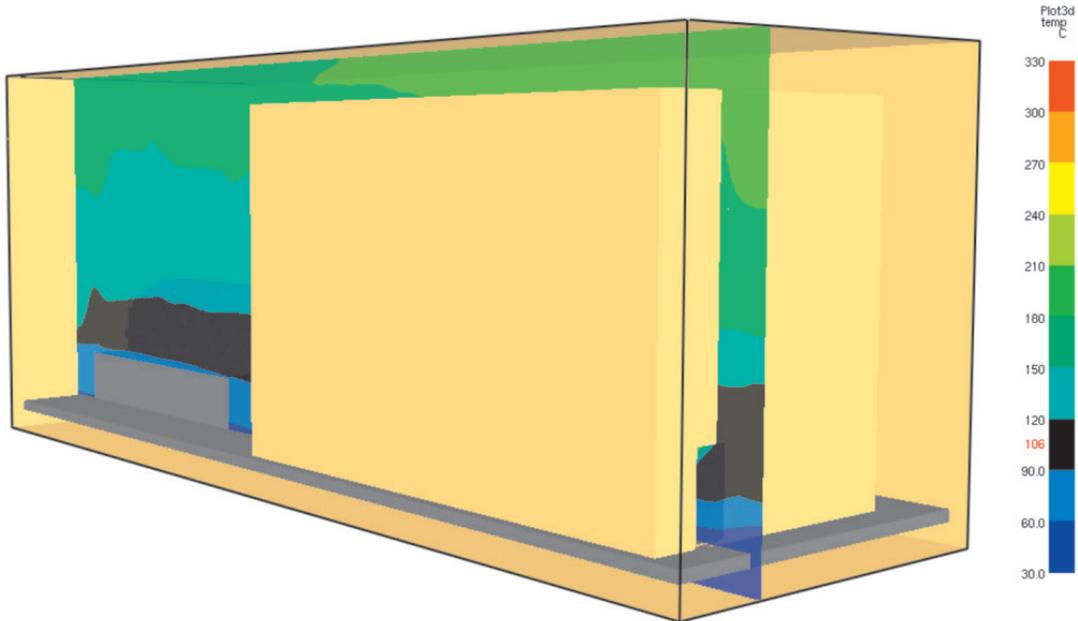


圖 15 熱媒鍋爐房出入口 480 秒溫度切面圖

資料來源：本研究製作

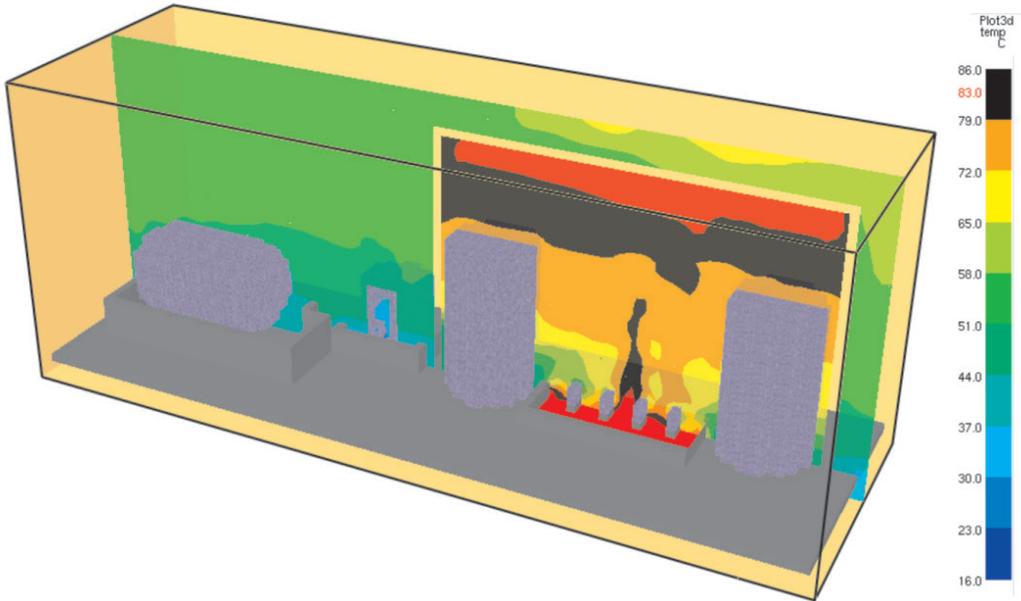


圖 16 熱媒鍋爐防液堤上方 1.8 公尺 720 秒溫度切面圖

資料來源：本研究製作

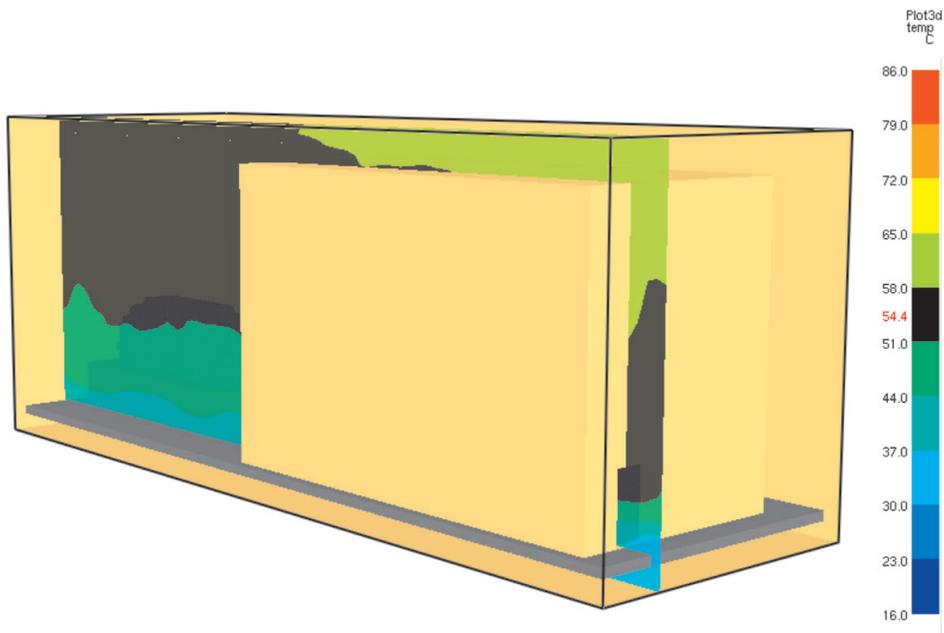


圖 17 熱媒鍋爐出入口 720 秒溫度切面圖

資料來源：本研究製作

## 二、熱媒鍋爐房設置細水霧之滅火研究

本研究以熱媒鍋爐房之模型來探討不同配置方式、高度、放射角度與粒徑之細水霧系統的滅火效果，藉由觀察該熱媒鍋爐房內之溫度、氧氣濃度、熱釋放率來判斷其所設置之滅火性能，能有效撲滅火源之關係。

本研究電腦模擬場景初步建立情形如圖 18 及圖 19，模擬火源及細水霧噴頭數量為 6 顆、高度為 3 公尺，採用防護間距 2 公尺之正方形配置，後續再隨著探討情境變更細水霧粒徑、數量、高度、間距、放射角度，起火源透過評估為管路法蘭或泵浦軸封洩漏於防液堤內，探討細水霧噴頭動作後其抑制熱媒油火源燃燒情形，就細水霧撒水頭動作、熱釋放率-時間及環境溫度-時間變化情形予以分析說明。

熱媒鍋爐房裡高度約 7.4 公尺處設有一定溫探測器，此探測器動作時連動一齊開放閥使全部細水霧噴頭同時進行放射撲滅火災，透過熱媒鍋爐房空燒模擬得知定溫式探測器動作時間為熱媒油洩漏 32.7 秒後，探測器設置位置如圖 18 及圖 19 圓圈處；細水霧系統為開放式系統，所以當定溫式探測器動作後，熱媒鍋爐房內全部的細水霧噴頭會同時進行放射。

表 9 定溫式探測器動作時間表

探測器型式	動作時間
侷限型特種定溫式探測器 (HD)	32.7 秒

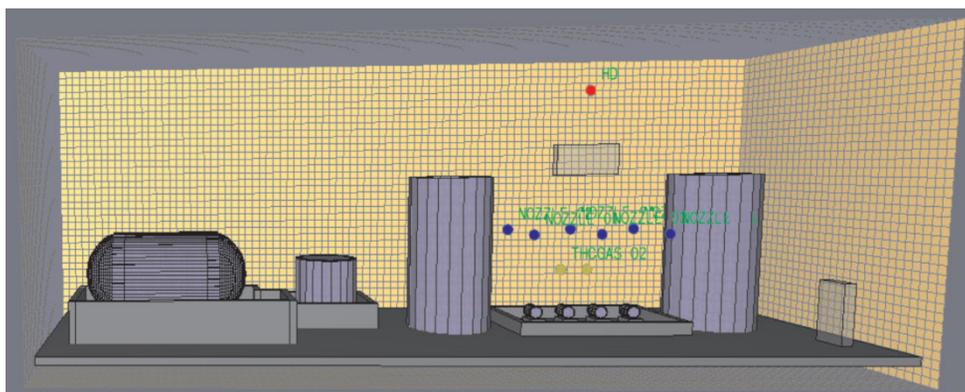


圖 18 熱媒鍋爐細水霧噴頭配置模擬圖

資料來源：本研究製作

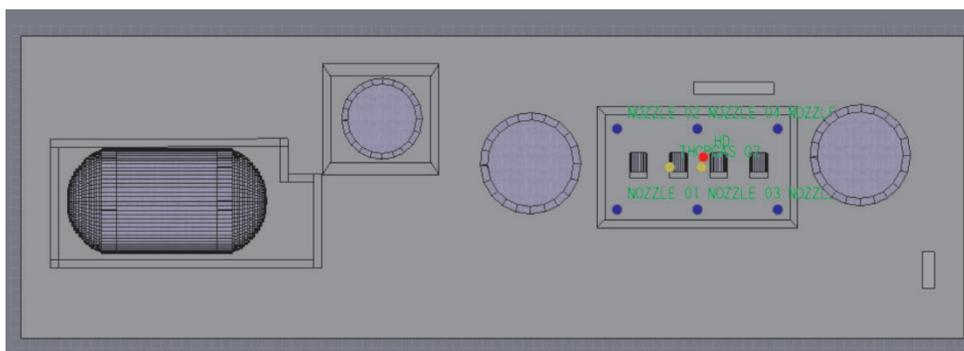


圖 19 熱媒鍋爐細水霧噴頭配置俯視圖

資料來源：本研究製作

### (一) 不同粒徑細水霧滴對滅火之影響

熱媒鍋爐房防液堤有熱媒油洩漏被點燃後，在定溫式探測器作動後，連動正方形配置之 6 顆細水霧噴頭全區域進行放射，各種不同粒徑細水霧噴頭動作後熱釋放與時間的變化歷程如圖 20，模擬結果顯示，不管哪一種粒徑形式的細水霧噴頭動作後可使熱媒鍋房內火源之熱釋放率下降，熱釋放率降至 0kw 的時間也較無設置細水霧噴頭早，且較小粒徑的水霧液滴越容易造成熱釋放率驟降之情況產生，1000um 細水霧粒徑較大，其熱釋放率下降之曲線則較平緩，最大熱釋放率仍高達  $128\text{kw/m}^2$ ，在 80 秒時熱釋放率才降為 0kw，雖有滅火的效果，但沒有比細水霧粒徑小的情境佳。

在單位面積的熱釋放率中，當細水霧的粒徑越小其滅火效果越好滅火效果越顯著，熱釋放率的衰減效果由大至小依順序為  $100\mu\text{m}$ 、 $350\mu\text{m}$ 、 $1000\mu\text{m}$ ，其中  $100\mu\text{m}$  與  $350\mu\text{m}$  在 3 公尺時滅火效果幾乎是一樣如圖 21，因為當細水霧粒子粒徑若小於  $400\mu\text{m}$ ，則對撲滅油類火災有良好的效果，兩個情境最大熱釋放率皆不超過  $140\text{kw/m}^2$ ，因比表面積大容易吸熱達到冷卻及迅速化成之水蒸氣可稀釋空氣中氧氣之濃度達到窒息之效果。

另外值得注意的是當細水霧噴頭離火源表面距離 5 公尺時，熱釋放率變化歷程可參考圖 22、圖 23，發現  $350\mu\text{m}$  粒徑的噴頭滅火效果較  $100\mu\text{m}$  粒徑的噴頭佳，比較快能使火源的熱釋放率降低為 0kw，其主要原因為火災發生時會產生熱浮力，由於燃燒作用所生成的大量熱及能量釋放，會導致鍋爐房內部的溫度及壓力變化，進而產生向上推昇的浮力作用，同時將燃燒所生的各種生成物一起混和往上擠壓的現象， $100\mu\text{m}$  的粒徑小且較輕，

不易落在火源表面影響熱釋放率降低，而 350um 粒徑的水滴相較之下則較重較容易降落至火源表面，而其粒徑亦小於 400um 亦能有效滅火，所以其滅火效果反而較 100um 粒徑的情境佳。

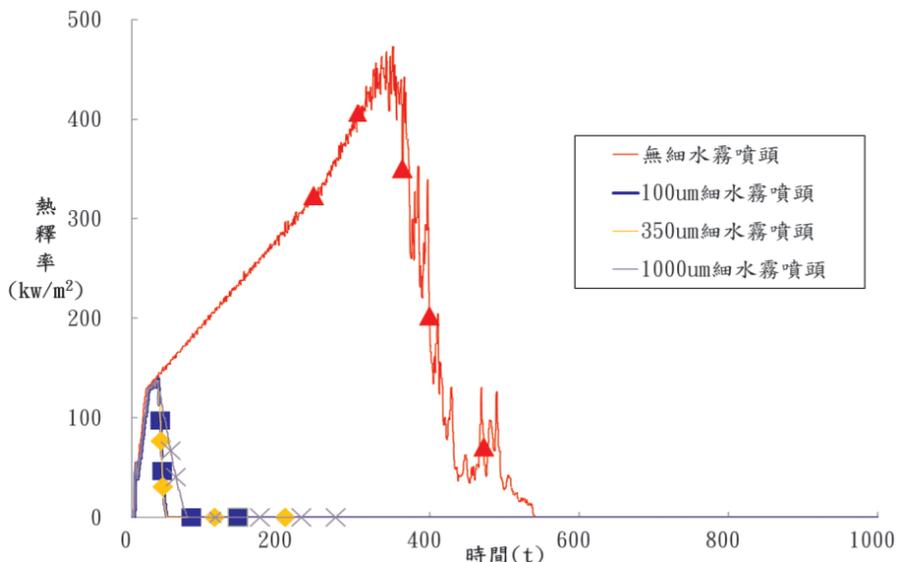


圖 20 防液堤洩漏熱媒油之熱釋放率-時間曲線 1 (3 公尺)

資料來源：本研究製作

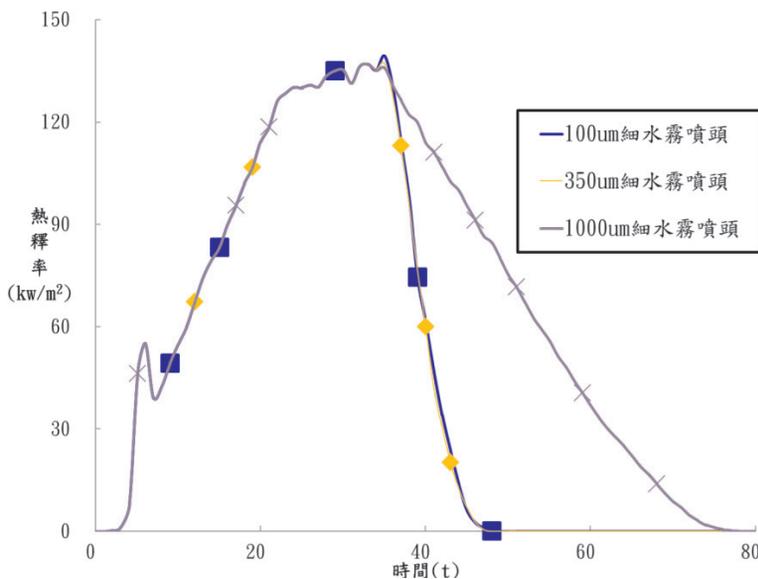


圖 21 防液堤洩漏熱媒油之熱釋放率-時間曲線 2 (3 公尺)

資料來源：本研究製作

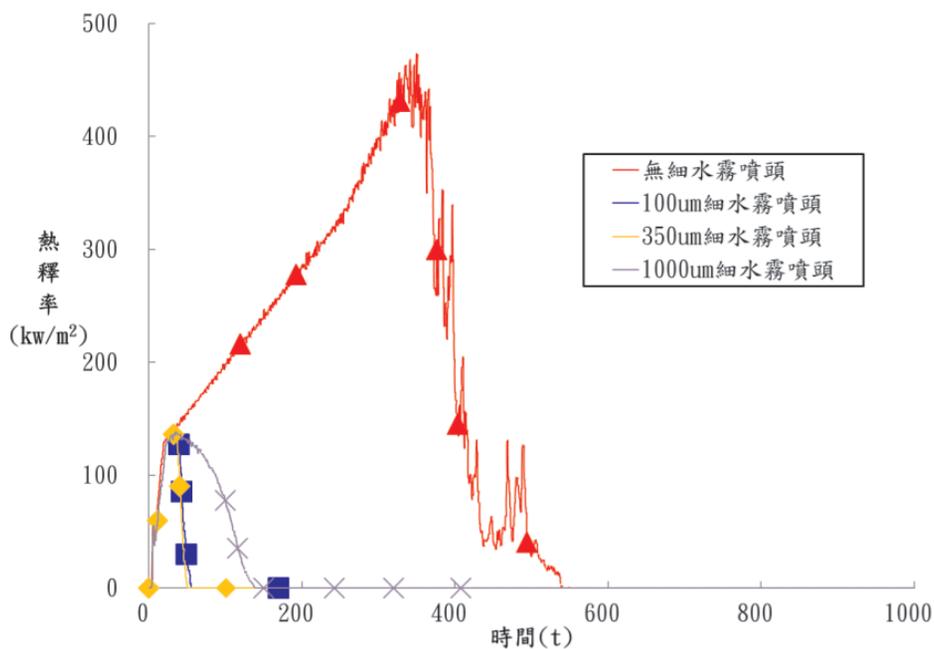


圖 22 防液堤洩漏熱媒油之熱釋放率-時間曲線 1 (5 公尺)

資料來源：本研究製作

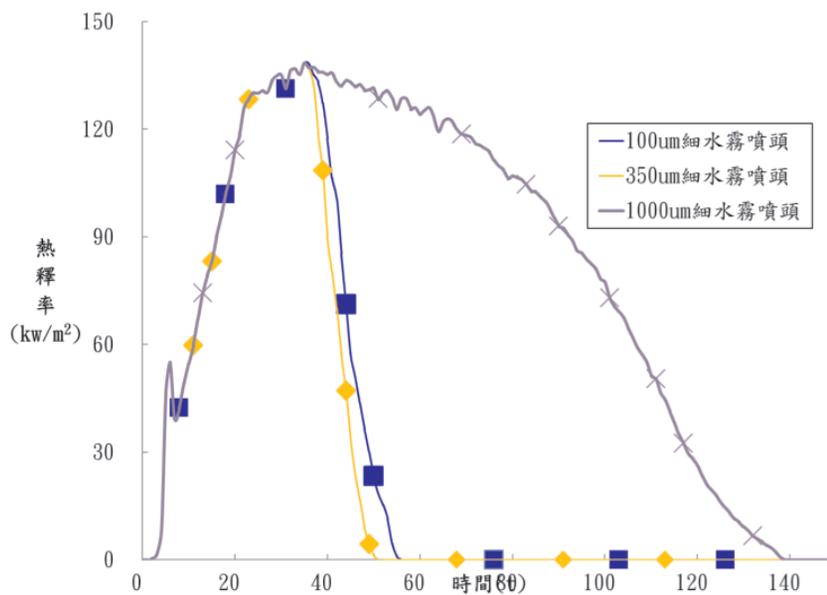


圖 23 防液堤洩漏熱媒油之熱釋放率-時間曲線 2 (5 公尺)

資料來源：本研究製作

抑制火場溫度亦是評估是否能有效滅火之重要指標之一，就發生火災時人員須從火場逃離的角度來探討，避難路徑上氣流層溫度需小於 60°C，且人員暴露不能超過 30 分鐘，不然會受到嚴重的灼傷，而粒徑較小的細水霧霧滴有較大的表面積相較於粒徑大的細水霧霧滴具有較高的蒸發和冷卻速率滴尺寸是主要因素，使高溫環境得到更好降溫速率和最終穩定溫度<sup>13</sup>

透過模擬各粒徑之水霧噴頭放射後，離火源表面 5 公尺處細水霧噴頭放射後對環境溫度之影響如圖 24，在粒徑 100um 及 350um 都使熱釋放率降低非常快，則 1000um 因水霧粒徑大而無法快速將火源撲滅，約在第 93 秒後，鍋爐房內的溫度才開始顯著降低，導致下降速率較為平緩。

若再將 100um 及 350um 曲線圖時間拉近如圖 25，其中 100um 的降溫效果會比 350um 來的好，另外可發現到在細水霧噴頭於 32.7 秒連動一齊放射後，溫度會在短時間內迅速上升後才開始下降，這是因為細水霧在鍋爐房內初步影響是轉換空氣的動量和增加火場的對流而導致水滴或水蒸氣在開始冷卻火焰之前火勢在短期間更加劇烈，隨之溫度就因為細水霧的冷卻、窒息作用的影響而開始下降。

透過圖 22 以圖我們可以知道霧滴粒徑 350um 情境的火源熱釋放率會較霧滴粒徑 100um 的情境較快降到 0kw，在與圖 25 做比較仍然是 100um 霧滴粒徑的情境會使環境溫度較快降至室溫 25°C，主要是因為 100um 粒徑的細水霧蒸發所需時間最短，冷卻效果最佳。

---

<sup>13</sup> Yi-Liang Shu, Assessment of Fire Protection Performance of Water Mist Applied in Exhaust Ducts for Semiconductor Fabrication Process, Fire Mater, Vol. 29, pp 302, 2005.

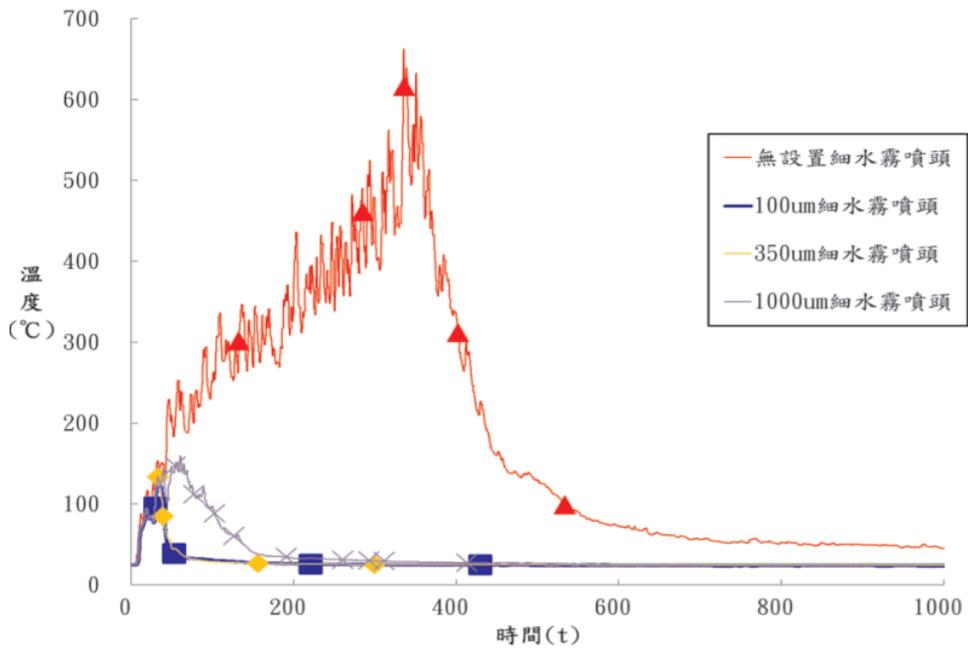


圖 24 細水霧噴頭距火源表面高度之溫度變化曲線 1 (5 公尺)

資料來源：本研究製作

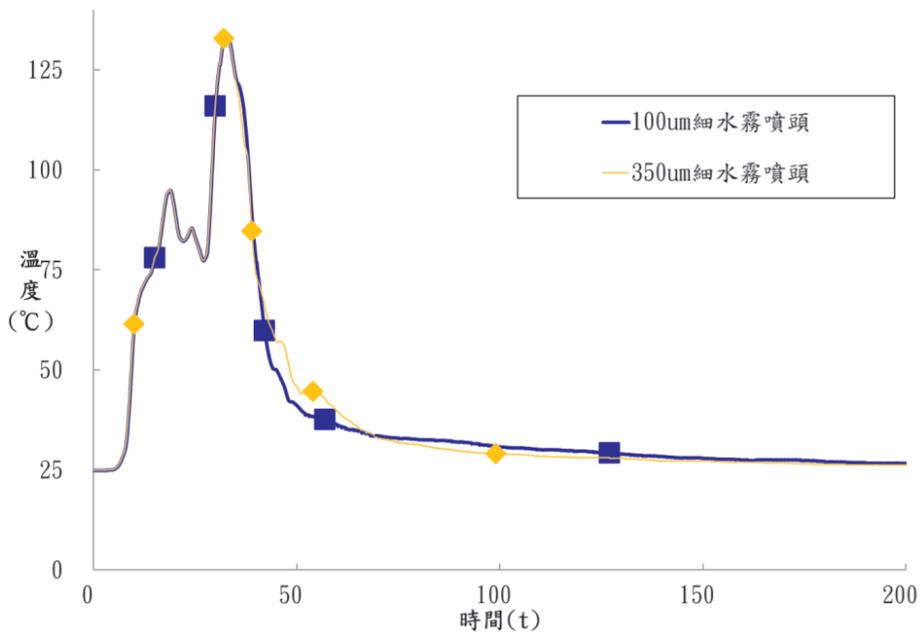


圖 25 細水霧噴頭距火源表面高度之溫度變化曲線：5 公尺 (2)

資料來源：本研究製作

## (二) 不同細水霧噴頭高度對滅火之影響

透過前一節探討各種粒徑與溫度及熱釋放率曲線間的坡度變化，佐證對火也的滅火效率是有影響的，而且以細水霧噴頭放射時水量分佈的均勻性與撒布範圍有多大與其設置高度息息相關，在熱媒鍋爐房內細水霧噴頭放射範圍於單位時間內放射一定之水量分佈要有一定均勻性，避免有造成沒有防護到的死角，若細水霧霧滴離火源的中心越近（提高覆蓋範圍），火越容易被撲滅。<sup>14</sup>

本研究依照鍋爐房常用實務設計的高度為分別離火源表面為 3 公尺及 5 公尺來進行探討，降細水霧粒徑予以固定，來模擬觀察各粒徑細水霧噴頭放射後鍋爐房內火源熱釋放率及環境溫度的變化。

火源熱釋放率的抑制情形由圖 26、圖 27、圖 28 比較之後可發現，1000um 不論在高度 3 公尺或 5 公尺其滅火效果都沒有較 100um，350um 佳，距火源表面 3 公尺的 100um 及 350um 粒徑之細水霧噴頭放射之後都可以在 50 秒內使熱釋放率降低至 0kw，而 1000um 之細水霧粒徑則需要到 80 秒時才能完成滅火；當細水霧噴頭距火源高度 5 公尺時，上述 3 種粒徑之細水霧噴頭放後，都較設置在 3 公尺的情境之滅火所需時間來的長，尤其是 1000um 粒徑的情境設置需要到 141 秒才能使火源熱釋放率完全降至 0kw。

細水霧霧氣可阻擋火源與可燃物之間的輻射傳熱，但須特別留意，阻擋輻射僅在降低強度或火勢蔓延速度方面有效，且很難僅靠此機制成功滅火。

綜觀結論不管任何粒徑之細水霧，設置在距火源表面 3 公尺位置的滅火效果都會比 5 公尺來的快達成滅火，無論高低之差異，細水霧在火場中都有阻隔輻射的效果，粒徑越大的細水霧滴提高其高度後，其吸收及阻隔熱輻射的效能反而下降，粒徑越小反而比較不易受影響。

在溫度方面，可以由圖 29、圖 30 的情境來進行比較，不論細水霧霧滴粒徑 100um 還是 350um，細水霧噴頭在高度 5 公尺時的速度皆會比 3 公尺時先降至 60°C 以下，但隨時間推移將噴頭高度在 3 公尺的曲線情境最再變陡峭，以至於鍋爐房內部溫度果欲降至室溫 25°C 仍是以 3 公尺時最快，其

---

<sup>14</sup> Wen-Yao Chang, Performance Evaluation of a Water Mist System in Semiconductor Wet Bench Fires, journal of IChemE, Part B: Process Safety and Environmental Protection, pp 217, 2007

可能原因為細水霧噴頭一開始放射前，室內空間溫度尚未降溫，而 100um 及 350um 的粒徑皆較輕，且噴頭距火源表面 3 公尺時受環境中熱浮力影響相對大，無法均勻分佈於鍋爐房內，以至於一開始溫度下降的效果沒有較 5 公尺來的好，隨著時間的推移鍋爐房內環境的溫度已經降低且稀釋空氣中氧氣的濃度，此時火源的熱釋放率已經有一定程度的減弱，此時環境的熱浮力也會跟著減落，粒徑較小的 100um 及 350um 細水霧霧滴以比較不受影響，可以均勻分佈在鍋爐房內，再使環境中的溫度降低速率提升才會出現與之前情境相反的情形。

分別距火源表面 3 公尺及 5 公尺的 1000um 細水霧粒徑的情境比較則可參考圖 31，可發現到細水霧噴頭設置在 3 公尺位置的情境降溫效果明顯比 5 公尺好，鍋爐房環境降至 60°C 及室溫 25°C 的時間點皆較快，原因為 1000um 的粒徑較大所受熱浮力影響較小，且設置在高度 3 公尺位置的細水霧噴頭放射後，細水霧液滴因行徑距離較短之緣故，相較於設置於高度 5 公尺的情境能更快的碰觸火源燃燒表面影響其燃燒進行及熱分解之速率，進而使火源變小。

整體而言，100um 粒徑細水霧噴頭設置在 3 公尺的情境是有最佳的抑制效果，體積較小之緣故，其蒸發之情況更容易產生，越小之液滴將更易形成大量的水蒸氣，而水蒸氣將會稀釋空間中的氧氣濃度下降，形成不利於持續燃燒的環境，細水霧噴頭高度較低其降溫能力也比較不易受到行徑距離的改變而有所變化，100um 粒徑小總表面積最大，所以有較高吸熱速率與蒸發的情況，且重量比較輕容易被氣流作用力並迅速擴散並佈滿整個空間而加快室內的整體降溫速度。

由模擬結果可得知噴頭裝設位置距火源高度會影響細水霧水滴貫穿火焰區之水滴數量，在相同壓力下，噴頭距火源高度越高細水霧滅火困難。

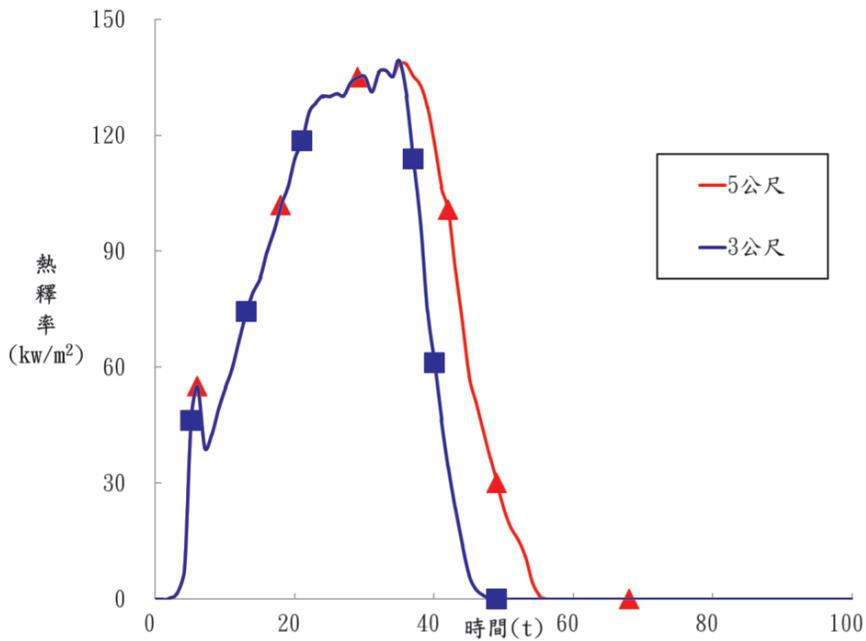


圖 26 細水霧粒徑 100um 之熱釋率變化曲線

資料來源：本研究製作

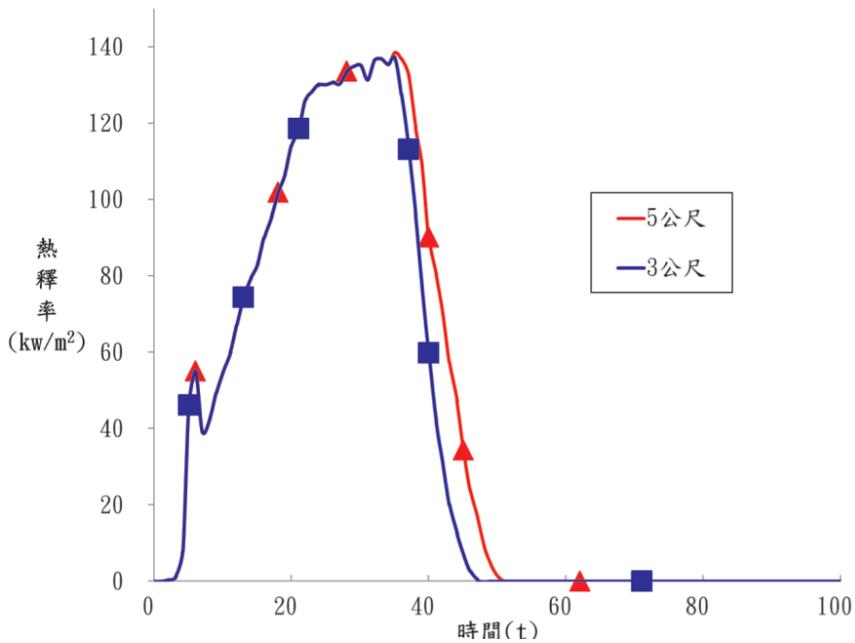


圖 27 細水霧粒徑 350um 之熱釋率變化曲線

資料來源：本研究製作

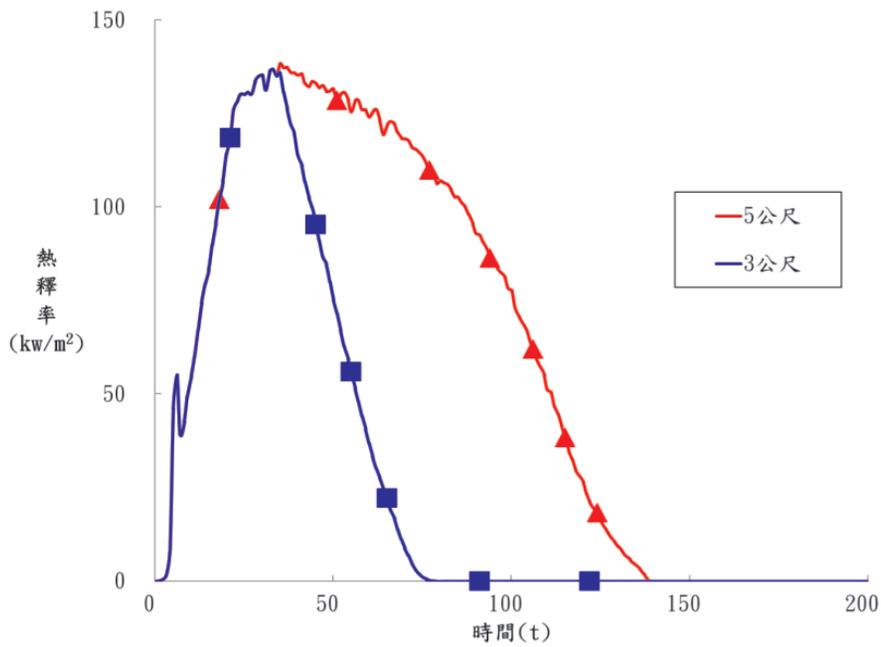


圖 28 細水霧粒徑 1000um 之熱釋率變化曲線

資料來源：本研究製作

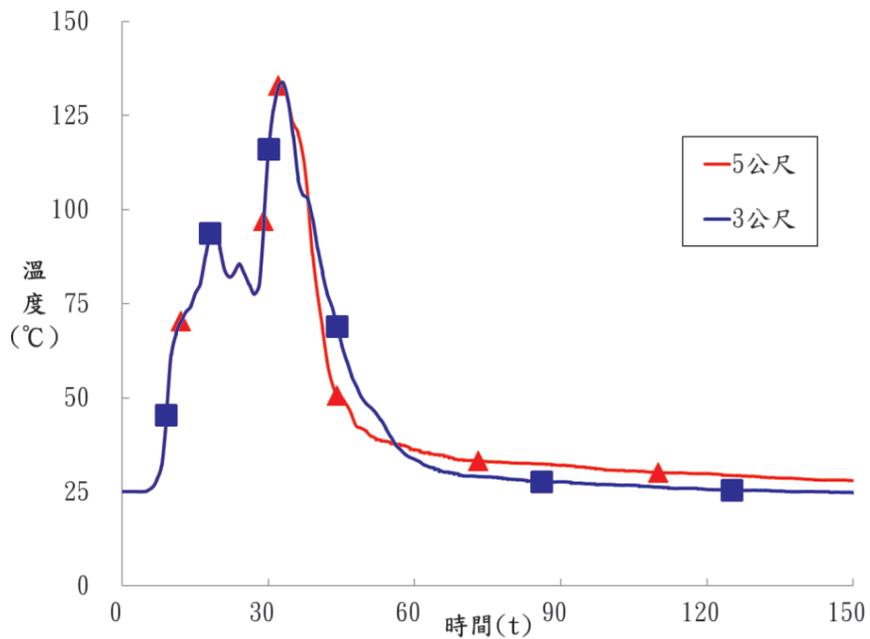


圖 29 細水霧粒徑 100um 之溫度變化曲線

資料來源：本研究製作

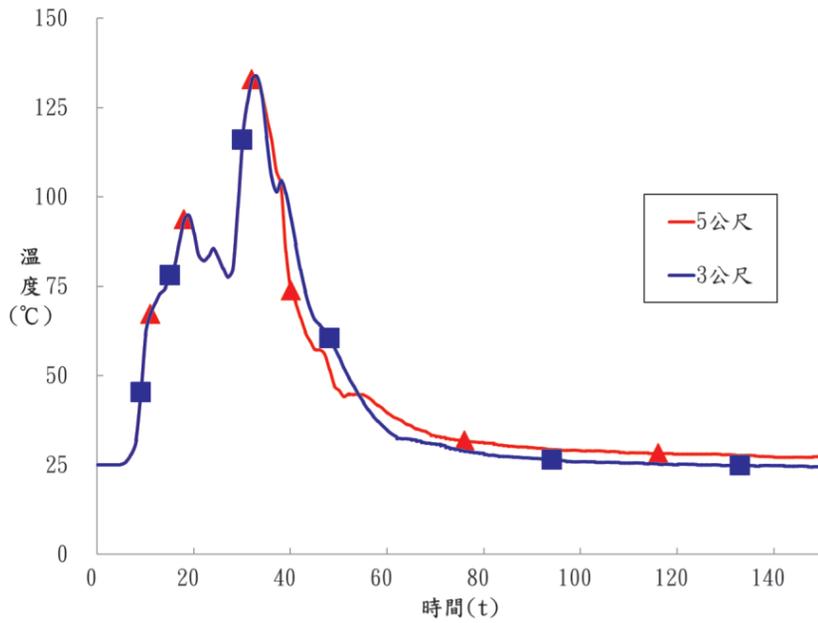


圖 30 細水霧粒徑 350um 之溫度變化曲線

資料來源：本研究製作

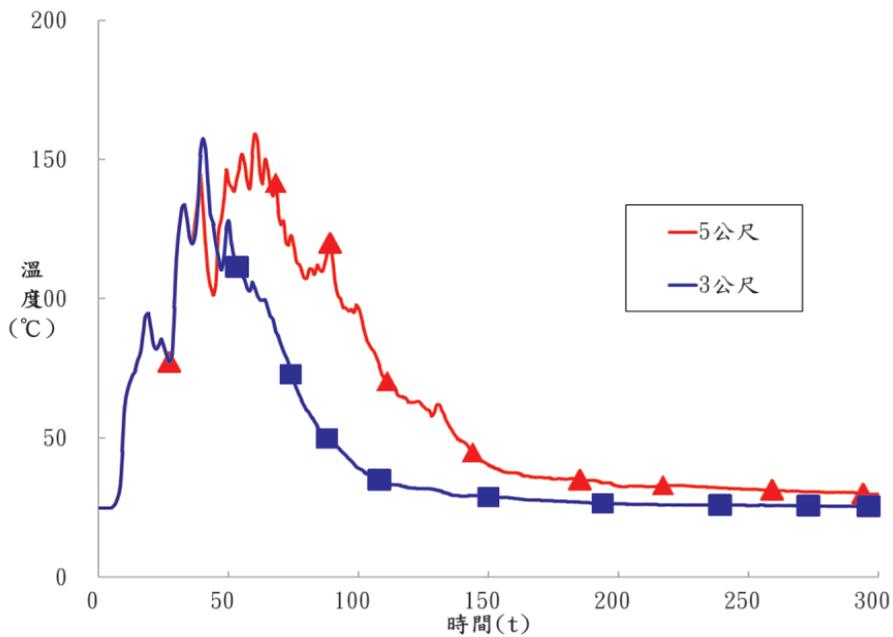


圖 31 細水霧粒徑 1000um 之溫度變化曲線

資料來源：本研究製作

### (三) 不同細水霧噴頭放射角度對滅火之影響

細水霧粒子藉由特殊設計之噴頭以某特定水壓產生出來，其噴頭放射角度與放射壓力和放射水流量是決定細水霧滅火效果的重要因素<sup>15</sup>，而理論上細水霧的放射角度會隨著壓力增加而增加，隨著壓力增加亦會增加水流量，而就實際面而言，許多專家學者歷年來持續進行細水霧滅火系統研究與開發，至今細水霧噴頭設計種類也日新月異形式眾多，即使壓力較高的細水霧噴頭放射後，其放水密度與低壓細水霧設置有可能相同，甚至各種形式的噴頭也會因放噴頭上放射噴嘴的數目有所不同而影響放射量，所以各廠牌細水霧噴頭的放射角度、放射水量、放射量還是依各廠商的實際設計為主。

透過針對不同粒徑對滅火效果的探討，可得知細水霧粒徑在 100um 時滅火效果最佳，所以本章節將放射量及放射壓力之數值予以固定且將細水霧粒徑固定為 100um，接下來細水霧噴頭之放射角度及設置高度參作為變數予以探討不同放射角度對於滅火效果之影響，利用調整噴頭高度和角度，觀測鍋爐房內部細水霧系統的滅火特性。

細水霧噴頭設置在 3 公尺的情境下，探討不同放射角度對火源單位面積的熱釋放率影響，當細水霧噴頭放射角度為 75°時其滅火效果最佳，使熱釋放率最快降低至 0kw 如圖 32，熱釋放率的衰減效果由大至小依順序為 75°、90°、135°、60°，由上述實驗結果可發現，若細水霧噴頭放射角度若能精準調整對準火源，覆蓋整個燃料表面，不但能使大量高速細水霧進入火源內部使細水霧霧滴排擠氧氣，亦能吸收燃燒熱能使燃燒中斷，當放射角度在 135°時，會使一大部分細水霧滴會因大的放射角度而位於火源外部，降低滅火效果，而放射角度太小如 60°情境的細水霧霧滴其完整涵蓋火源的範圍較小，且火源周遭的區域因細水霧霧滴的分佈較不廣泛，使環境溫度降溫效果相較差，反而導致火源熱釋放率反而是最慢降低至 0kw。

進一步探討不同角度細水霧噴頭放射後在鍋爐房溫度的變化如圖 33，進行比較之後可發現，放射角度為 75°或 90°時其放射的角度明顯較 135°及 60°降溫效果佳，而 75°與 90°鍋爐房的溫度變化曲線雖然一開始相近，但在

---

<sup>15</sup> Zhigang Liu, Extinguishment of cooking oil fires by water mist fire suppression systems, Fire Technology, pp 14, 2004.

50 秒後放射角度 75°的情境降溫效果較好，也能較快使室溫降至 25°C，其原因為能夠最快撲滅火源，且環境細水霧霧滴分佈較能使鍋爐房內溫度降低。

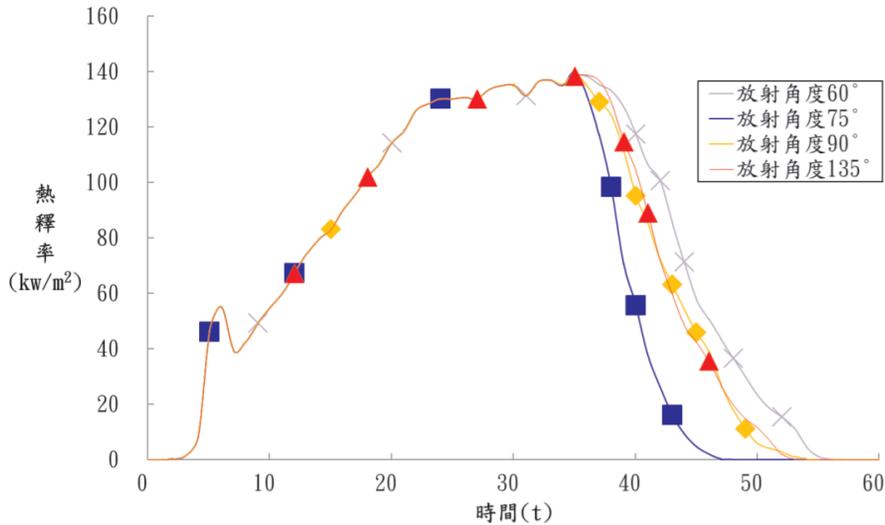


圖 32 細水霧噴頭不同放射角度之熱釋放率-時間曲線 (3 公尺)

資料來源：本研究製作

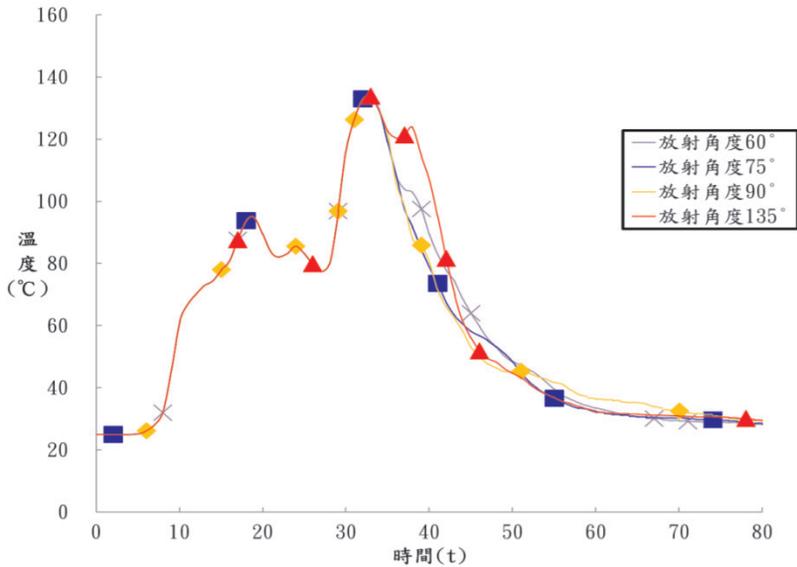


圖 33 細水霧噴頭不同放射角度之溫度-時間曲線 (3 公尺)

資料來源：本研究製作

細水霧剛放射時對火源冷卻和火源溫度非常重要，當細水霧被注入火焰中時，並不是所有形成的霧滴都能直穿透火羽流參與滅火，不過整個空間可透過霧滴蒸發產生的蒸汽稀釋了可用的氧氣及霧滴撞擊該空間的牆壁、地板並進行冷卻使火源減弱，火源變小後隨著熱浮力效應減弱，會使更多的細水霧霧滴達到火源表面，達到更好的滅火效果。<sup>16</sup>

細水霧噴頭設置在 5 公尺的情境下，不同放射角度對火源單位面積的熱釋放率影響透過圖 34 可發現當放射角度為 75°及 90°的滅火效果最佳，上述兩個角度的熱釋放率曲線幾乎一致，熱釋放率的衰減效果由大至小依順序為 75°及 90°、60°、135°，當高度從 3 公尺提升為 5 公尺時，因細水霧噴頭放射後，細水霧霧滴至火源的距離變遠了，其受熱浮力的影響也會變大，在 75°時不論高度是 3 公尺還是 5 公尺，其滅火效果仍較其他角度來的佳，而當細水霧噴頭高度為 5 公尺且放射角度為 135°時，原本噴頭在 3 公尺其一大部分細水霧霧滴就已因較大的放射角度而位於火源外部，當高度提高到 5 公尺時，因熱浮力影響細水霧霧滴更不易進入火源內部，所以在 5 公尺各放射角度比較時，135°的滅火效果反而最差。

設置在 5 公尺不同角度之細水霧噴頭放射後，在鍋爐房溫度的變化圖 35，鍋爐房內部降溫效果由大至小依順序為 75°及 90°、60°、135°，進行比較之後可發現，放射角度為 75°及 90°時鍋爐房內部的降溫效果完全相同，其原因為熱釋放率衰減一致所以降溫效果也一致，放射角度為 75°及 90°的細水霧霧滴有足夠的水量及動量穿透火羽到達燃料表面，且還能細水霧能夠覆蓋整個燃料表面達到較好的滅火效果。

設置高度為 3 公尺不論放射角度為 75°或 90°時，滅火效果較高度設置於 5 公尺來的佳，主要細水霧噴頭設置高度較低，放射後細水霧霧滴受到的熱浮力影響較小。

---

<sup>16</sup> F.A.Abd El-Salam, Experimental Study on Polymeric materials Suppressing Fires Using Low Pressure Water Mist System, Engineering Research Journal, M110, 2018

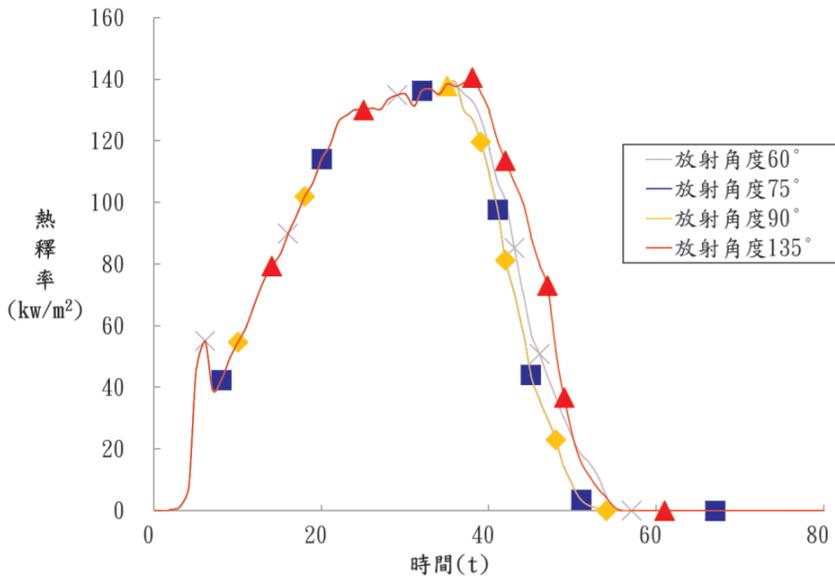


圖 34 細水霧噴頭不同放射角度之熱釋放率-時間曲線 (5 公尺)

資料來源：本研究製作

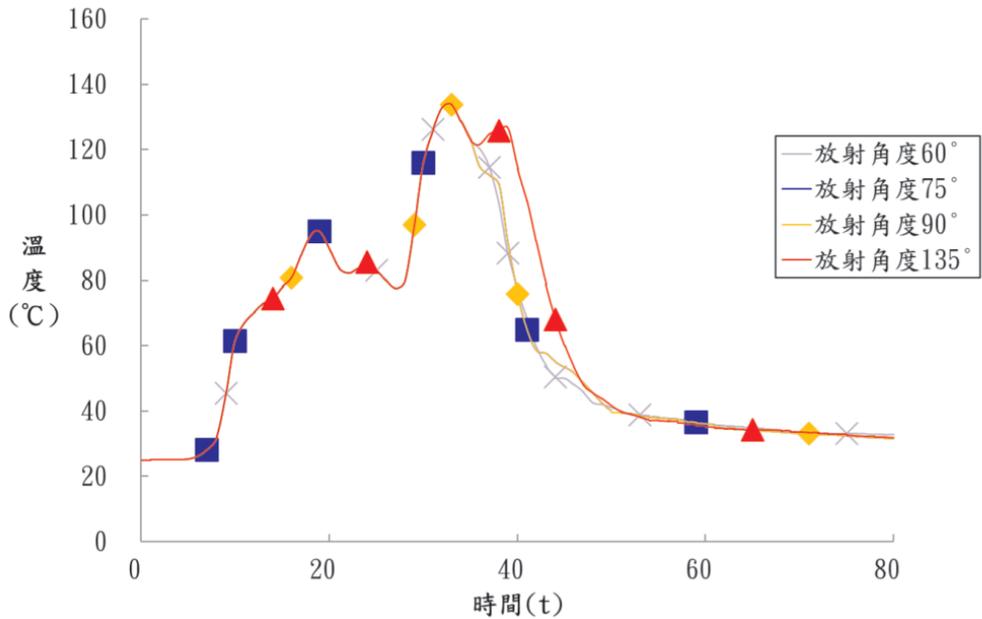


圖 35 細水霧噴頭不同放射角度之溫度-時間曲線 (5 公尺)

資料來源：本研究製作

#### (四) 不同細水霧噴頭數量對滅火之影響

透過前一小節可得知細水霧噴頭的放射角度在  $75^\circ$  滅火效果為最佳及前面幾個章節都是以 6 顆細水霧噴頭且間距為 2 公尺，高度分別為 3 公尺、5 公尺的各種情境情境下進行探討。

故本研此章節將細水霧噴頭的間距及噴頭的數量作為可調整的參數，固定噴流量的情況下探討對於火場危害抑制情況，所以在原本 6 顆細水霧噴頭，分別在 3 公尺及 5 公尺再增加 2 顆噴頭為 8 顆噴頭、間距為 1 公尺的情景配置如圖 36、圖 37 及減少為 4 顆細水霧噴頭、間距一樣為 2 公尺的情景配如圖 38、39，再比對三者之間的滅火效能，分析細水霧滅火系統的滅火性能均會隨噴頭數量改變而有所提升或下降。

細水霧噴頭設置在 3 公尺及 5 公尺的情境下，探討不同放噴頭數量及間距對火源單位面積的熱釋放率影響，當細水霧噴頭數量為 8 顆且密集時，不論設置高度 3 公尺或 5 公尺其滅火效果皆為最佳，使熱釋放率最快降低至 0kw 如圖 40、圖 42，熱釋放率的衰減效果由大至小依順序為 8 顆、6 顆、4 顆，由上述實驗結果可發現，若細水霧噴頭數量密集且間距較小，更能覆蓋整個燃料表面，且細水霧滅火系統的滅火性能均會隨噴頭數量而有所提升，更多的細水霧霧滴則隨氣流移動及時充滿整個防護區域；透過模擬情境還可觀察到高度在 5 公尺時，8 顆與 6 顆細水霧噴頭單位熱釋放率下降曲線較 3 公尺來的陡峭且明顯，8 顆噴頭的密度雖然較 6 顆噴頭的密度更密集，不過在高度 3 公尺時 6 顆噴頭及 8 顆噴所放射的細水霧以皆能有效衝擊火源進入火源內部吸收燃燒熱能使燃燒中斷，滅火效果才較相近。

進一步探討不同數量細水霧噴頭放射後在鍋爐房溫度的變化如圖 41，進行比較之後可發現，細水霧噴頭高度在 3 公尺時 8 顆細水霧噴頭滅火效果最佳，降溫效果的衰減效果由大至小依順序為 8 顆、6 顆、4 顆，雖然高度 3 公尺時，8 顆細水霧噴頭與 6 顆細水霧噴頭的熱釋放率下降曲線相近，但在火源熱釋放率 8 顆細水霧噴頭的情境會較快降至  $25^\circ\text{C}$ ，其主要原因細水霧噴頭放射的數量多越密集，整個鍋爐房會較快充滿細水霧的霧滴，吸收環境的熱量有較好的降溫效果。

不同數量細水霧噴頭高度在 5 公尺時，鍋爐房溫度的變化如圖 43，以最快降至室溫  $25^\circ\text{C}$  的情境，將溫衰減效果由大至小依順序仍為 8 顆、6 顆、4 顆，不過在細水霧噴頭於 32.7 秒放射初期至至 45 秒間，8 顆細水霧噴頭

與 6 顆細水霧噴頭的溫度下降曲線較無明顯的差異，而是在 45 秒之後 8 顆細水霧噴頭的降溫效果才會明顯優於 6 顆散水頭，其可能原因為在 8 顆細水霧噴頭時有較多細水霧霧滴直接衝擊火源導致火源周遭溫度降低，使燃燒難以繼續進行，不過整體鍋爐房的溫度因細水霧霧滴尚未完全充滿於鍋爐房降溫效果較 6 顆細水霧噴頭的情境有明顯差異，而隨著時間推移已火源熄滅，熱浮力強度減弱，而 8 顆細水霧噴頭的放射量較 6 顆細水霧噴頭來的大，更能有效達成鍋爐房內降溫。

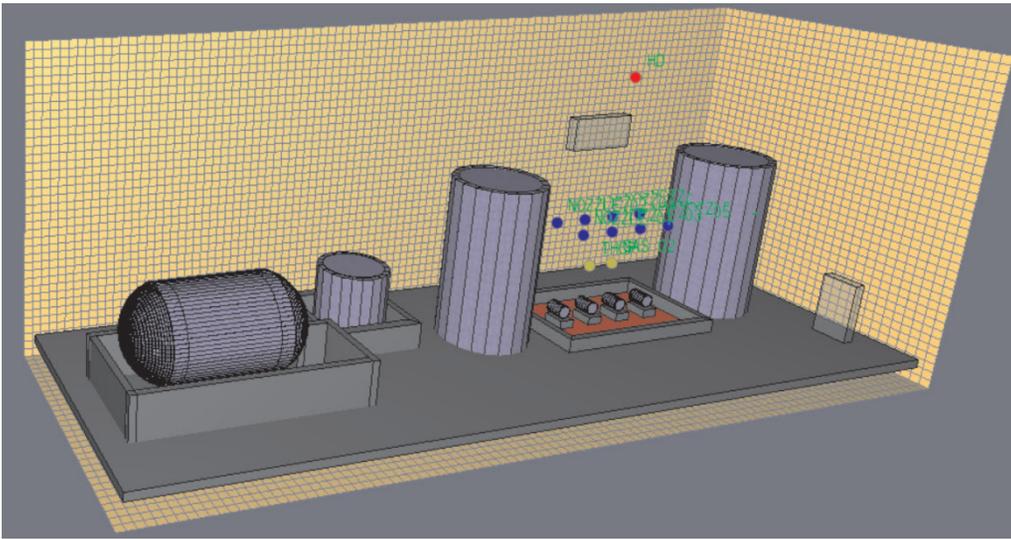


圖 36 熱媒鍋爐 8 顆細水霧噴頭配置模擬圖

資料來源：本研究製作

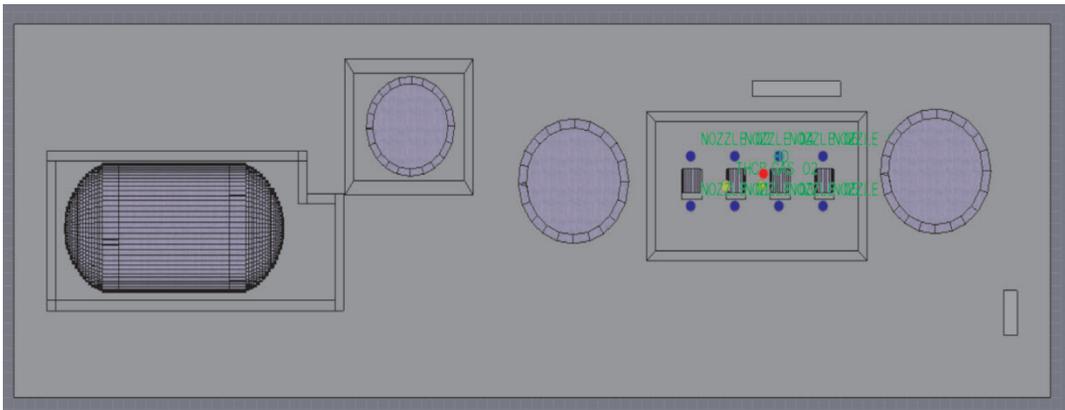


圖 37 熱媒鍋爐 8 顆細水霧噴頭配置俯視圖

資料來源：本研究製作

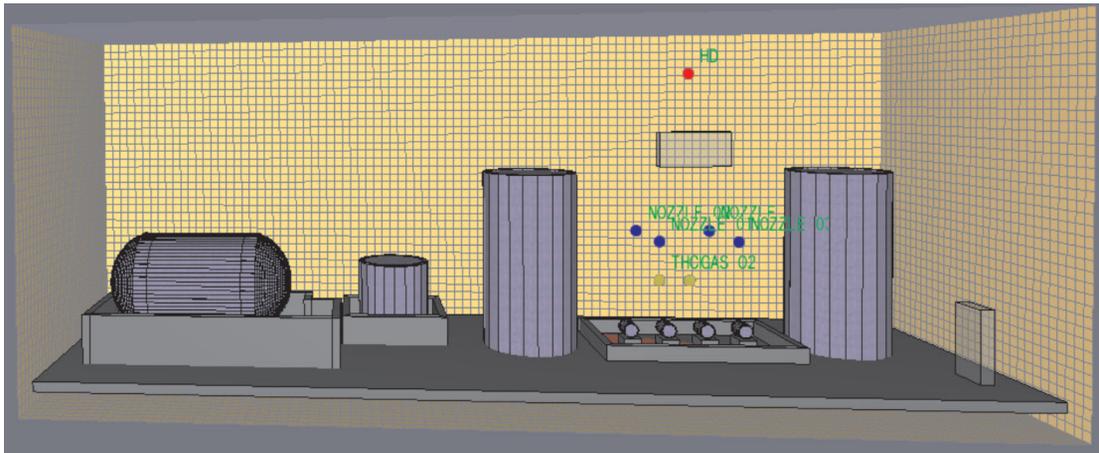


圖 38 熱媒鍋爐房 4 顆細水霧噴頭配置模擬圖

資料來源：本研究製作

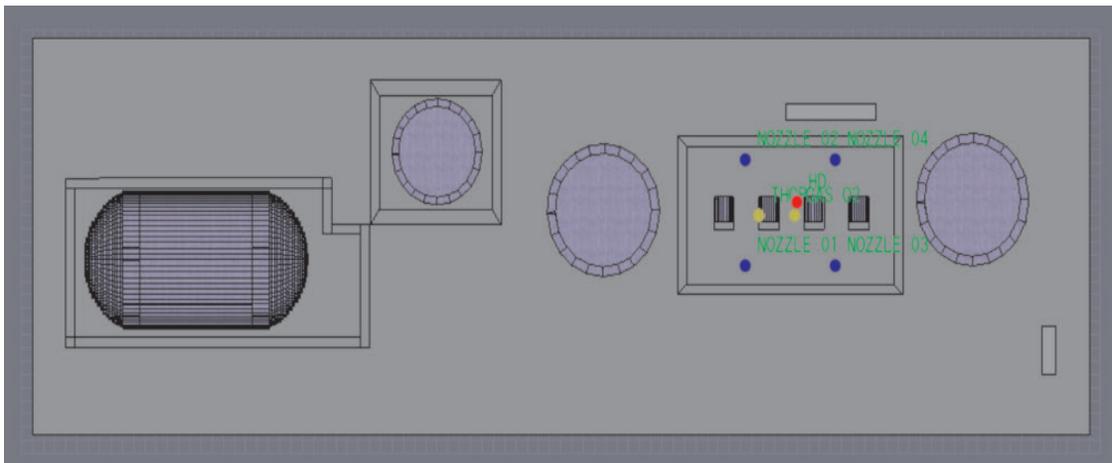


圖 39 熱媒鍋爐房 4 顆細水霧噴頭配置俯視圖

資料來源：本研究製作

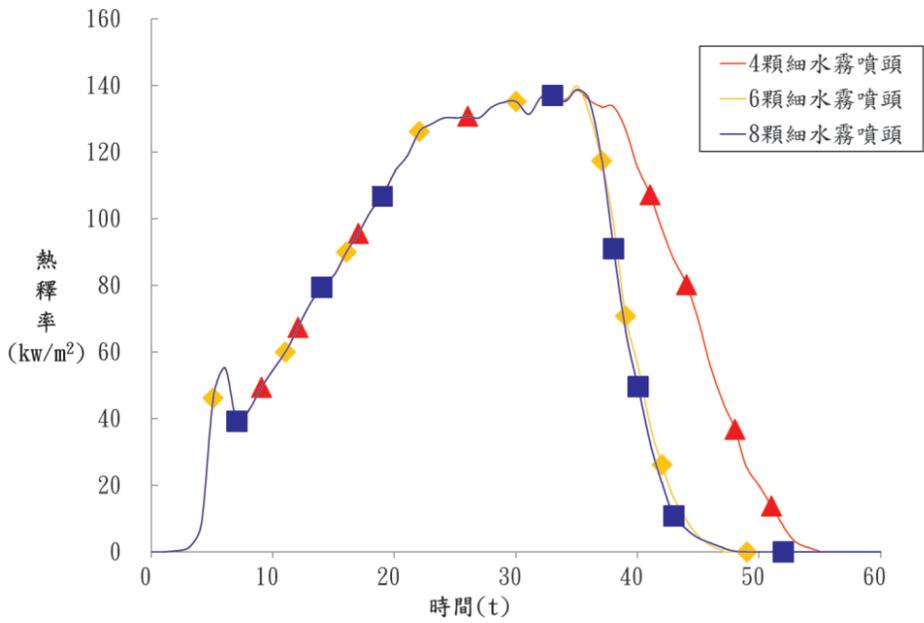


圖 40 不同數量細水霧噴頭之熱釋率曲線 (3 公尺)

資料來源：本研究製作

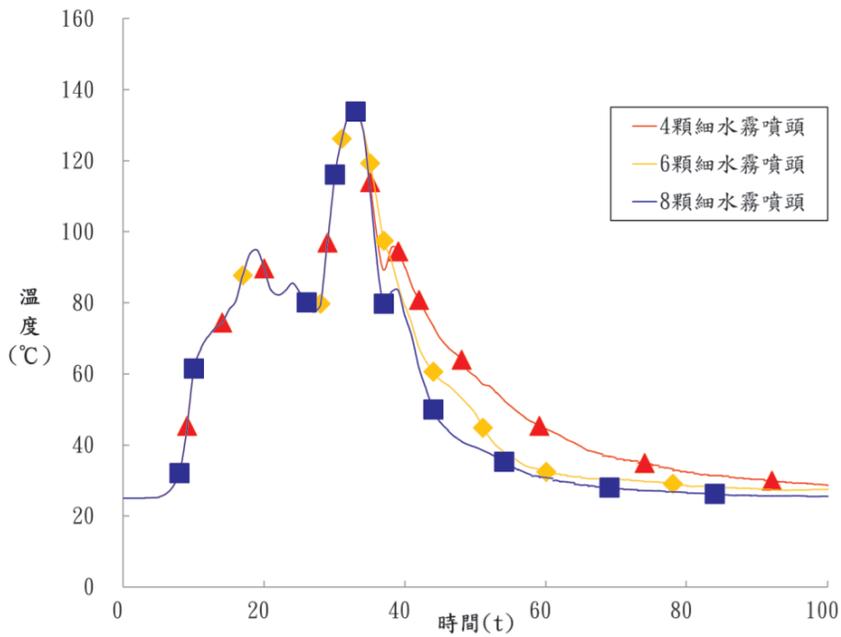


圖 41 不同數量細水霧噴頭之溫度曲線 (3 公尺)

資料來源：本研究製作

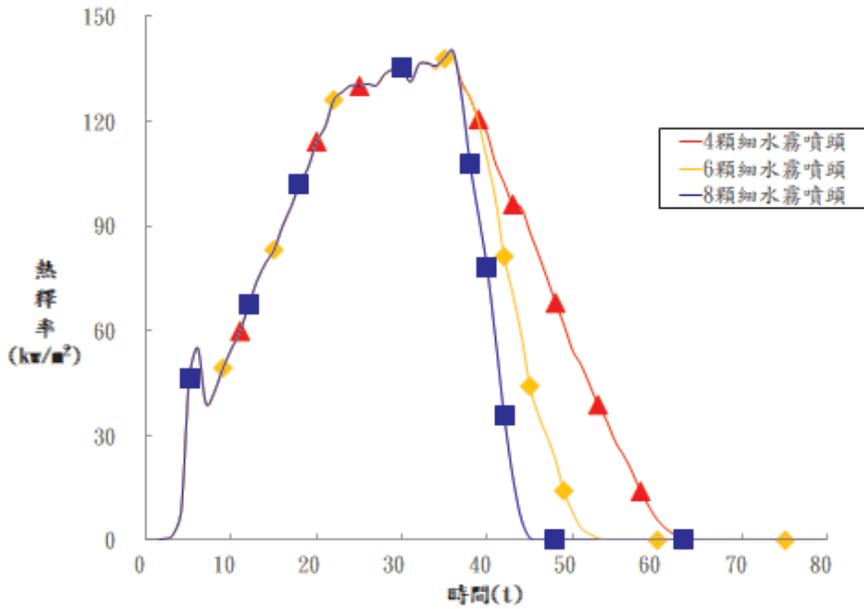


圖 42 不同數量細水霧噴頭之熱釋率曲線 (5 公尺)

資料來源：本研究製作

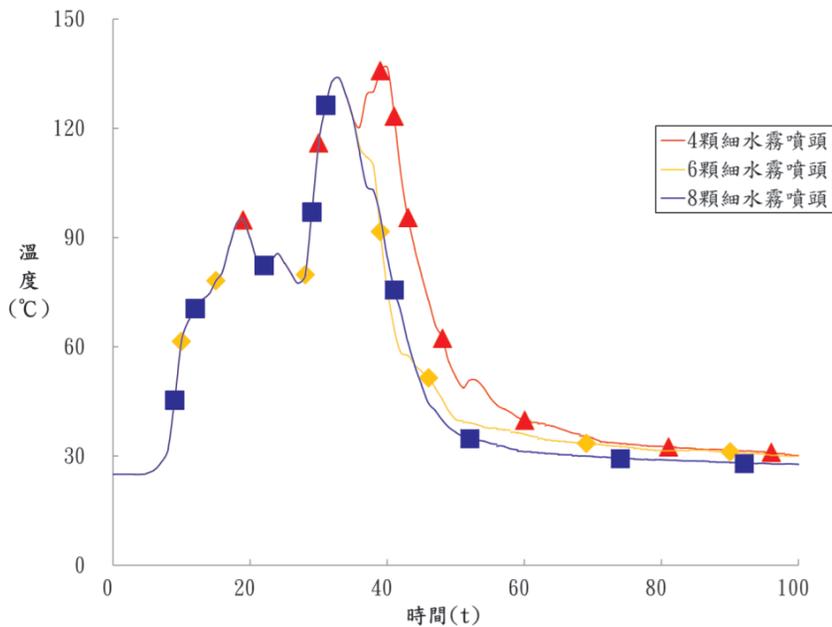


圖 43 不同數量細水霧噴頭之溫度曲線 (5 公尺)

資料來源：本研究製作

## (五) 小結

1. 依本案例評估熱媒鍋爐房設置細水霧系統最佳配置方式
  - (1) 噴頭設置高度低，距火源間距越小，越不易受熱浮力影響，越能有效滅火。
  - (2) 細水霧粒徑小，粒徑越小表面積越大而具有較高的蒸發和冷卻速度。
  - (3) 放射角度越能完整覆蓋火源表面，滅火效果越好。
  - (4) 細水霧噴頭越多，細水霧放射量越多，降溫效果越好。
2. 以實測火源熱釋率參數設定進行模擬仍有差異，「實測」曲線與「模擬」曲線相似，但模擬曲線之熱釋放率較實測曲線來的低。
3. 依本案例評估熱媒鍋爐房設置細水霧系統最佳配置方式
  - (1) 細水霧噴頭設置於高度 3 公尺位置。
  - (2) 細水霧粒徑 100um。
  - (3) 細水霧放射角度 75°。
  - (4) 細水霧噴頭 8 顆。

## 伍、結論

### 一、文獻探討結果

- (一) 透過重大災害回顧及風險評估分析結果，熱媒鍋爐雖然屬於低壓鍋爐，可以在較低的運行壓力下，獲得較高的工作溫度，但製程加熱後的熱媒油可能會因設備、泵浦、管路之熱媒油大量外洩引起火災，若蒸氣遇火花產生爆炸及人員傷害，有火災爆炸之風險，且業界已發生多起火災爆炸事故。
- (二) 在工安法令規定面探討，雖在設備管理使用面及人員操資格訂定完整的規定，包括對於鍋爐製造、定期檢查及使用上之管理…等等，工安法令僅有針對預防事故部分來進行要求，故仍需透過消防法令部分檢討滅火有效性，才可以使鍋爐房的防護更加完整。
- (三) 在消防法令方面，建置滅火系統方面雖然國內無細水霧滅火設備之標準或規定，但只要符合所替代設備之滅火性能，經中央主管機關認可後，始准使用，另外熱媒鍋爐房屬於一般處理場所，則需依相關規定辦理；且依消防法令 200 平方公尺以上之鍋爐房才需設置自動滅火系統，透過模擬測試結果即使熱媒鍋爐房面積雖不大，但因製成條件需求熱媒油之循環量大及

製程溫度高，一旦洩漏發生火災火勢成長及延燒非常迅速，如果無自動滅火系統於第一時間處理，耽誤初期滅火的有效時間造成災害及損失擴大。

## 二、危害分析結果

- (一) 以此研究所使用的熱媒油的特性（閃火點 204°C）及使用情形（製程需加熱至 250°C 以上）去進行該熱媒鍋爐房的初步害分析（PrHA），因符合 NFPA 704 之規定，製程操作溫度大於閃火點者，應視為重大潛在危害後續必須執行 HAZOP 分析。
- (二) 本研究透過 HAZOP 分析結果得知在熱媒鍋爐房最容易發生洩漏之節點為熱媒油循環泵浦、鍋爐房內之熱媒油連結管路及閥件，最容易洩漏的節點洩漏後，先會局限在熱媒油泵浦處所設置的防液堤，考量細水霧滅火系統建置成本，若能盡快在防液堤內進行滅火控制為降低火災風險的最佳效益。

## 三、細水霧火災滅火模擬結果

- (一) 熱媒油燃燒實驗與模擬鍋爐房空燒熱釋放率比較可發現，「實測」曲線與「模擬」曲線相似，但模擬曲線之熱釋放率較實測曲線來的低，是因熱媒油實測的部分則是由高雄科大產業危害檢測中心使用圓錐量熱法（CNS 14705 方法）並以加熱強度 20 (kw/m<sup>2</sup>) 進行加熱燃燒測試，因為沒有缺少氧氣的問題，而在鍋爐房空燒模擬中，因鍋爐房的氧氣被漸漸會迅速被消耗使得燃燒較難以進行，以實測數值在設定火源熱釋放率時，仍需要考慮現場實際的空間配置。
- (二) 當細水霧噴頭設置在 3 公尺時，當細水霧的粒徑越小其滅火效果越好滅火效果越顯著，且當細水霧粒子粒徑若小於 400 $\mu$ m，則對撲滅油類火災有良好的效果，不過當細水霧噴頭距離火源表面 5 公尺時，間距增加後細水霧粒子受熱浮力的影響變大，350 $\mu$ m 粒徑的噴頭滅火效果較 100 $\mu$ m 粒徑的噴頭佳，比較快能使火源的熱釋放率降低為 0kw。
- (三) 細水霧噴頭在同壓力同流量的情況下，其細水霧噴頭放射角度若能精準調整對準火源，覆蓋整個燃料表面會有最佳滅火效果，其中又以放射角度 75° 的情境降溫效果較好；當放射角度過大，如 135° 時會使一大部分細水霧滴會因大的放射角度而位於火源外部，降低滅火效果，霧又或放射角度太小

如 60° 情境的細水霧霧滴其完整涵蓋火源的範圍較小，且火源周遭的區域因細水霧霧滴的分佈較不廣泛，使環境溫度降溫效果相較差。

- (四) 當細水霧噴頭設置的數量密集且間距較小時，更能覆蓋整個燃料表面，且細水霧滅火系統的滅火性能均會隨噴頭數量而有所提升，更多的細水霧霧滴則隨氣流移動及時充滿整個防護區域，當整個鍋爐房會較快充滿細水霧的霧滴，吸收環境的熱量有較好的降溫效果。
- (五) 考量細水霧系統建置成本及綜合有效滅火及降低鍋爐房溫度的情況下，本研究建議採取細水霧噴頭的種類為放射角度 75°、粒徑 100um，配置方式為採取 6 顆細水霧噴頭、距火源高度 3 公尺及間距為 2 公尺為最佳情境。

## 陸、建議

- 一、依消防法令規定目前事業單位設置鍋爐時，是以該鍋爐房是否達到樓地板面積 200 平方公尺來決定是否設置自動滅火系統，鑒於熱媒鍋爐房發生火事件頻傳，建議可以納入工安法令風險評估的結果來規範設置自動滅火系統的必要性，作為後續修法方向。
- 二、本研究的細水霧噴頭設定將放射量及放射壓力之數值予以固定，並以細水霧噴頭之放射角度、粒徑作為變數去進行滅火模擬評估，但就實際而言細水霧的放射角度可能會隨著壓力增加而增加，又或隨著壓力增加亦會增加水流量，但上述條件都以細水霧系統廠商所提供的資訊為主，若未來研究者係以 FDS 探討熱媒鍋爐房設置係水霧滅火系統來進行滅火模擬，建議細水霧噴頭的參數可以由實際廠商提供的參數（放射水量、放水密度、放射角度）來設定進行模擬。
- 三、熱媒鍋爐房透過重大災害回顧，製程加熱後的熱媒油洩漏後，除了發生火災且其蒸氣接觸火花後亦會產生爆炸，且業界已發生多起火災爆炸事故，由於 FDS 的開發未有模擬爆炸的功能，未來研究者可再針對爆炸議題使用相關模擬軟體或實驗去進行探討，使熱媒鍋爐房設計更加完善及火災爆炸危害風險降到最低。
- 四、對於熱媒鍋爐房細水霧噴頭的設置進行防護之議題，參數設定亦可再針對噴頭的間距進行調整，找出優化防護效能之配置。
- 五、本研究是以 FDS 來模擬細水霧系統在熱媒鍋爐房的滅火情形，從許多文獻可

得知 FDS 的滅火作用大都在冷卻作用，由於細水霧滅火成效也與其排氧效果息息相關，但 FDS 在室內空間使用細水霧來進行滅火模擬是否能符合細水霧實際排氧情形仍需探討，建議後續研究可再使用其他軟體如 SMARTFIRE 或以實際實驗的方式來進行細水霧滅火原理中的排氧效果來進行研究。

## 參考文獻

- 羅律典，「石化工廠消防人員搶救風險因子及策略精進之探討——以苗栗縣為例」，交通大學，碩士論文，民國 104 年 7 月。
- 何明錦，「細水霧設備於建築物室內停車空間應用之研究」，內政部建築研究所協同研究報告，X 頁，民國 98 年 12 月。
- H. Barrow, C.W. Pope, Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling, pp 406, 2006。
- Jaiho Lee, Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door
- 陳建忠，蘇鴻奇，張尚文，「細水霧系統火災控制與應用之研究」，內政部建築研究所自行研究報告，4~21 頁，民國 93 年 12 月。
- Liu, Z.G., Kim, A.K., A Review of Water Mist Fire Suppression Technology: Part II – Application Studies, Journal of Fire Protection Engineering, V.11, pp 12, 2001
- 王世煌，工業安全風險評估，揚智出版社，台北，民國 91 年。
- 邱晨璋，「夜店電腦火場重建模擬驗證分析之研究」，中華民國消防設備師公會全國聯合會消防技術專刊，第一輯第 21 篇，民國 104 年。
- Gaghyeon Ha, Numerical analysis to determine fire suppression time for multiple water mist nozzles in a large fire test compartment, Nuclear Engineering and Technology, pp2-3, 2022
- 周柏年，黃伯全，林元祥，吳榮平，「定溫式侷限型探測器動作時間之研究」，中央警察大學警學叢刊，第 43 卷第 2 期，106 頁，民國 101 年。
- 黃鴻勛，「細水霧系統之功能驗證與個案分析」，中華民國消防設備師公會全國聯合會消防技術專刊，第一輯第 2 篇。
- 蔡政廷，「利用 FDS 模擬不同高度與液滴粒徑之撒水噴頭對賣場建築火災滅火效率之影響」，雲林科技大學，碩士論文，民國 103 年 6 月。

Yi-Liang Shu, Assessment of Fire Protection Performance of Water Mist Applied in Exhaust Ducts for Semiconductor Fabrication Process, *Fire Mater*, Vol. 29, pp 302, 2005.

Wen-Yao Chang, Performance Evaluation of a Water Mist System in Semiconductor Wet Bench Fires, *journal of IChemE, Part B: Process Safety and Environmental Protection*, pp 217, 2007.

Zhigang Liu, Extinguishment of cooking oil fires by water mist fire suppression systems, *Fire Technology*, pp 14, 2004.

F.A.Abd El-Salam, Experimental Study on Polymeric materials Suppressing Fires Using Low Pressure Water Mist System, *Engineering Research Journal*, M110, 2018.