
石化工廠室外管線洩漏 火災事故 之預防應用分析

南亞公司塑膠第三事業部新港工程塑膠廠

摘要

2014 年 7 月 31 日深夜近 12 時，台灣高雄市前鎮區因地下易燃氣體管線洩漏，引發強烈氣爆事故，造成 30 人死亡及 200 多人輕重傷的慘痛悲劇。依據過去國外重大事故發生頻率之統計數據顯示，事故頻率以管線約佔 34% 為最高。管線為石化工廠各設備之間內容物的輸送管道，管線的配置錯綜複雜、結構變異性大、材料多樣化、內容物組成、相態及流速各段差異大，加上管線無法進入檢查，且國內法令目前對管線並無明文規定需定期檢查等因素，致使事業單位不易達到檢測預防及預知保養的成效。

本論文藉由解析以往石化工廠管線洩漏火災案例之成因及預防改善方案等進行探討，並且比較現今室外空氣流通場所適用的火警偵測系統；以 FDS 模擬得知，室外管線可安裝線型光纖感溫探測系統及撒水系統，當火載量 50,000kW 且風速 10m/s 時，仍可快速地於 96.61sec 感知及連線啟動撒水系統防護；且於室外管線與周邊設施之間設置防火牆（或防火水幕）

時，可有效降低周邊設施接受到的熱輻射達安全標準 4.0kW/m^2 以下，以及接受到的高溫降至 100°C 以內，以杜絕重大事故之發生。

關鍵詞：管線洩漏預防、線型光纖感溫探測器、撒水系統

一、研究動機與目的

依據以往國外重大事故之經濟損失及發生頻率之數據 (John, 1996)，依設備類別作成統計圖，如圖 1-1，顯示以製程管線發生事故頻率為最高，約佔 34%。而石化製程主要由原料儲槽、計量槽、反應槽、加熱、塔槽、換熱器、分離器、製程管線、轉動機械設備及成品儲槽等相關設施組成，其中製程管線為各主要設備之間內容物的傳輸管道，形同人類的血管，一旦破損洩漏或阻塞，將危及整體工廠運作的安全及導致非計畫性停機的經濟損失。



▲圖 1-1 國外重大事故各類設備之經濟損失和發生頻率關係圖 [1]

例如，早期令人印象深刻之國外案例，莫過於 1984 年「印度 Bhopal 化學物質外洩事故」，堪稱史上石化工廠最慘重的工安環保事件；近期國內案例中，則以 2010 年 7 月~2011 年 9 月期間，台塑企業麥寮廠六輕工業區連續發生八次火警事故，其中五次與製程管線損傷洩漏有關；2014 年 7 月 31 日深夜近 12 時，台灣高雄市前鎮區地下易燃氣體管線洩漏，引發強烈氣爆事故，造成 30 人死亡及 200 多人輕重傷的慘痛悲劇。綜觀石化工廠管線洩漏引發火災爆炸之事故後果，都造成眾多人員傷亡與巨額的財務損失，也著實嚴重影響空氣品質，

造成生態環境的污染。由此可見，製程管線雖非石化製程的關鍵性設備，卻扮演舉足輕重的角色，實不容忽視。

石化工廠製程管線在管理及檢修維護上相對比較困難，主要是因為製程管線配置密集、結構變性異性大、內容物組成與相態及各管段流速變化差異大，加上管線無法進入檢查及檢查需搭設施工架與拆除保溫材等，最重要的是國內法令目前對管線並無相關規定須進行定期檢查，致使事業單位對製程管線疏於檢測與維護管理。因此，美國石油學會制定 API570 規範，明訂管線內容物依據流體之特性及洩漏時對安全及環境的影響衝擊程度，區分四級，並依據管線等級訂定檢查之最長週期，如表 1-1，藉由定期進行管線測厚，可了解管線因腐蝕造成厚度減薄情形，當管線實測厚度小於汰換厚度時，即安排更新管線，以防範管線損傷洩漏之危害。

▼表 1-1 管線危害風險等級劃分及檢測之最長週期[2]

| 管線等級 | 流體潛在危害程度 | 厚度 測量 | 目視 檢查 |
|-------|---|----------|----------|
| 第一級管線 | 具高度潛在性危險（如易燃性、爆炸性或高毒性物質），當管線內容物發生洩漏時會產生立即危急的災害。例如：氫氣、燃料氣、天然氣管線、氫氟酸。 | 5 年 | 5 年 |
| 第二級管線 | 具潛在性危險，當管線內容物發生洩漏時會產生工安或環保之危害。例如：強酸、強鹼管線。 | 10 年 | 5 年 |
| 第三級管線 | 管線內容物洩漏時具有潛在危險，或距離人員較遠或需配合停車降溫後施作之管線可歸類在本級。例如：高壓蒸汽管線。 | 10 年 | 10 年 |
| 第四級管線 | 管線內容物不會燃燒、不具腐蝕性。例如：空氣、氮氣管線。 | 任選 | 任選 |
| 注入點 | --- | 3 年 | 根據 等級 |

然而管線經年累月在高溫、高壓及高腐蝕性的環境下輸送原料，常因產生龜裂、減薄破孔及彎曲變形等異常現象而不堪使用，各國針對製程管線不論有無規範定期檢查，事業單位往往難以落實執行檢測出管線損傷減薄處；而且國內消

防法規之「各類場所消防安全設備設置標準」第 116 條明訂外氣流通無法有效探測火災之場所得免設探測器。因此，事業單位自行進行管線檢查多半局限於外觀目視檢查，無法有效徹底防範管線損傷洩漏，一旦洩漏遇高溫或火花，就容易產生火災或爆炸等重大事故，若未即時有效控制或撲滅火勢，產生之熱輻射波及鄰近儲槽、設施及人員生命等危害甚大，其後果將是不堪設想。

因此，本論文透過電腦火災數值模擬 (Fire Dynamics Simulator, FDS)，以性能化消防設計，比較現今室外空氣流通場所適用的火警偵測系統與使用限制，以及連線啟動管架管線及儲槽之自動撒水系統和防火水幕防護，建立最佳化的設計模式，提升及確保石化工廠運作的安全性，杜絕重大意外事故發生，達成企業永續經營的目標。

二、文獻回顧

(一) 管線損傷原因及非破壞性檢測分析：

依據文獻調查統計分析，石化工廠管線損傷原因，如表 2-1，以外部腐蝕之比例最高，管線材料別則以碳鋼材質外部腐蝕之比例最高；顯見管線因設置場所環境腐蝕所佔之比例相當高，此乃因石化工廠建廠初始規劃、設計時，管線材質選用主要是考量對內容物之腐蝕性，而國內、外多數石化大廠均鄰海設廠，鹽份及工廠廢氣排放造成大氣腐蝕因子較嚴重，導致管線設備損傷比例相對較高，另一原因則是管線外部腐蝕較易被目視檢查發現，不似管線內部腐蝕必須已經蝕孔或檢測後才會發現。

▼表 2-1 石化廠管線損傷原因 [3]

| 損傷原因 | 數量 | 損傷原因 | 數量 | 損傷原因 | 數量 |
|----------------|----|-----------------|----|------------------|-----|
| 外部腐蝕 | 17 | 銲道裂縫 | 5 | 穿晶應力腐蝕裂縫 (IGSCC) | 1 |
| 沖蝕 (流場改變) | 15 | 閥洩漏 | 2 | 震動銲道裂縫 | 1 |
| 內部腐蝕 | 11 | 破鋼點蝕 | 2 | 潛變 | 1 |
| 法蘭 (Flange) 洩漏 | 10 | 脹大 | 2 | 鹼脆化 | 1 |
| 沖蝕 (含固體粒子) | 7 | 管壁與支撐之磨耗 | 1 | 銲道腐蝕 | 1 |
| 包覆層下腐蝕 (CUI) | 5 | 不銹鋼點蝕 (pitting) | 1 | --- | --- |

目視檢查 (VT) 在管線檢查中是最基本的檢查方法，目視檢查人員亦必須接受適當的訓練，才能檢視出管線真正的問題所在。由於石化工廠管線各種腐蝕因子造成之損傷形態不同，目視檢查僅能檢查管線的外部腐蝕，因此必須就其特性、位置及方向性等考量適當的檢測方法。傳統的檢測方法，包括超音波測厚 (Ultrasonic Testing, UT)、超音波探傷 (Ultrasonic Flaw Detection)、射線照相 (Radiographic Testing, RT)、液滲檢測 (Penetration Testing, PT)、磁粒檢測法 (Magnetic Particle Testing, MT) 及渦電流檢測 (Eddy Current Testing, ET) 等，這些檢測方法所能檢測的腐蝕種類及其適用材質都有差異性，且具有互補作用，必要時需搭配兩種以上的檢測技術。而管線特定檢測技術的發展也是全球發展之趨勢，顯見管線檢測的需求性及重要性。這些特定檢測技術的發展，主要是為了以較快速之檢測方法，或是在不破壞管線包覆層的原則下，進行管線厚度檢測，以及在包覆層下腐蝕 (CUI) 之檢測，以更快速簡單的方法檢測出 CUI 的問題。

(二) 火場熱輻射之影響層面探討

火場強烈的熱輻射嚴重的威脅相鄰廠房產生變形或燃燒，以及極易造成鄰近儲槽內部壓力升高而爆炸。一般而言，鋼結構之溫度隨火燄的溫度和熱輻射強度而上升；鋼材之耐高溫性能如下：

1. 100℃以內時，鋼材性能基本不變。
2. 250℃左右時，鋼材出現抗拉強度提高，衝擊韌性下降的脆化現象。
3. 超過 300℃後，鋼材降伏和極限強度明顯下降。
4. 600℃時，鋼材強度很低，不能承擔外力。

而 APIRP521 彙整之熱輻射對人體所造成影響與設備損害，如表 2-2。分別取 37.5、12.5、4.0kW/m² 作為評估參考依據，並採用熱輻射值達 4.0kW/m² 以下作為安全考量範圍標準。

▼表 2-2 不同熱輻射對人體影響程度 [4]

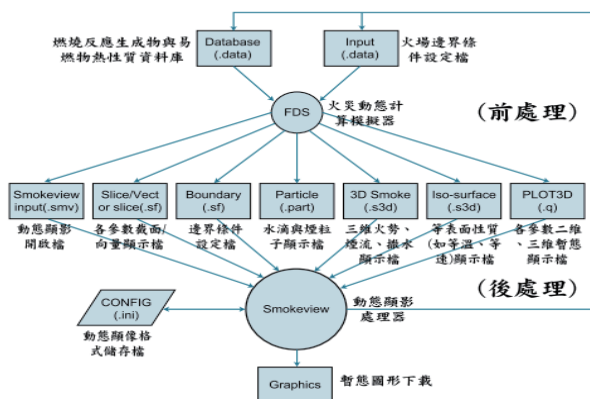
| 輻射強度 (kW/m ²) | 對設備的破壞 | 對人的傷害 |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 37.5 | 生產設備設施遭受嚴重損壞。 | 1min 內死亡率 100%；10S 內死亡率 1%。 |
| 25.0 | 無明火時木材長時間暴露而被引燃所需的最小能量；設備設施的鋼結構開始變形。 | 1min 內死亡率 100%；10S 內嚴重燒傷。 |
| 12.5 | 有明火時木材被點燃所需的最小能量；塑料管及合成材料熔化。 | 1min 內死亡率 1%；10S 內 1 度燒傷。 |
| 4.0 | 玻璃暴露 30min 後破裂。 | 超過 20s 引起疼痛，但不會起水泡。 |
| 1.6 | --- | 長時間暴露，不會有不適感。 |

(三) 電腦火災數值模擬 (FDS) 簡介

電腦火災數值模擬軟體 (Fire Dynamics Simulator, FDS)，是由美國國家標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 之建築防火研究實驗

室 (Building and Fire Research Laboratory, BFRL) 所開發之計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的火場流場模擬工具，於 2000 年 2 月公開發表第一版，並持續不斷改進與增強軟體功能，至 2010 年 5 月已推出 5.5 版。

FDS 模擬將設定空間網格分成若干細小的三維矩形單元，計算每個單元內氣體密度、速度、溫度、壓力及組成濃度等火災的增長與蔓延，再以質量、動量、能量、燃燒及熱傳守恆等流體力學方程式求解，計算完成後利用 3D 動態顯像功能之後處理軟體 Smokeview，將 FDS 所計算出來的結果，以圖形、二維或三維動畫的效果呈現，求解後可獲得相關測量點處之溫度、CO 濃度、能見度、煙層高度與熱輻射等數據。FDS 更可以將建築物內撒水與煙控系統等消防設備建入模擬，因此適用於形狀複雜或大空間建築物的火災模擬，其軟體操作流程如圖 2-1。



▲圖 2-1FDS 火災模擬軟體操作流程圖示 [5]

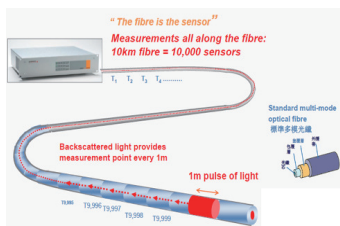
三、研究之理論與分析

(一) 線型光纖感溫探測系統 (DTS) 之工作原理分析

線型光纖感溫探測系統 (DTS) 是由光纖電纜線、分佈式光纖溫度測量主機及電腦顯示螢幕等三大構件組成，如圖 3-1，其功能強大，主要係以光纖作為探測器來進行現場空間溫度的多點量測，光纖沿線分佈所探測的溫度不僅是以“點”的探測型式，而是以“全線連續分佈”的方式由系統來探測及紀錄，不僅局限於探測不同類型的火災，而且能夠監測即時的溫度及熱源位置，精確定位小於 1M，受到風影響的因素極小，測量距離長達 28 公里，所需之測量時間僅 10 至 20 秒，光纖傳感器承受溫度高達 1000°C (取決測溫光纜) 及防護半徑為 4~6m 等優勢；且獨特的雷電絕緣性賦予光纖傳感器的抗電磁干擾能力 (EMI)，與在防爆場所的本質安全性，以及快速傳達訊息和防腐蝕等特性，光纖傳感器適用於各種惡劣的環境，尤其在石化工廠之防爆場所，光纖傳感器因其本質安全性極適合於室外易燃管線的監測及火災報警的應用，如圖 3-2，已獲得德國 VdS 和美國 UL 等國際認證。

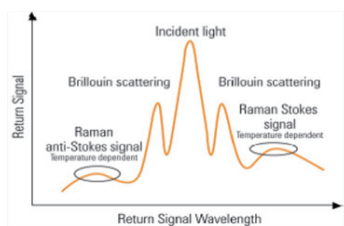


▲圖 3-1 線型光纖感溫探測系統三大構件圖 [6]

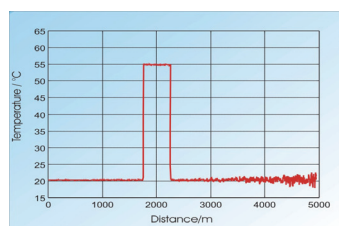


▲圖 3-2DTS 測量點示意圖 [7]

光纖為混合石英玻璃製成，周邊產生熱能會引發固體內的晶格振盪，當光束落於這個區域時，會發生光散射的現象，一般稱為拉曼散射 (Raman Scattering)，如圖 3-3。而光纖傳感器主要是利用光頻域反射 (OFDR) 技術，以及拉曼散射 (Raman Scattering) 的溫度效應來實現的，簡單而言，即是向光纖打出連續頻率不同的雷射，通過發射光的頻率判斷發熱點的資訊和位置，且空間解析度並不會隨測量距離變化而降低，光束源使用壽命長。OFDR 連續波運行，散射回的信號將通過一個複雜調製頻率的函數計算得出熱點資訊，如圖 3-4。



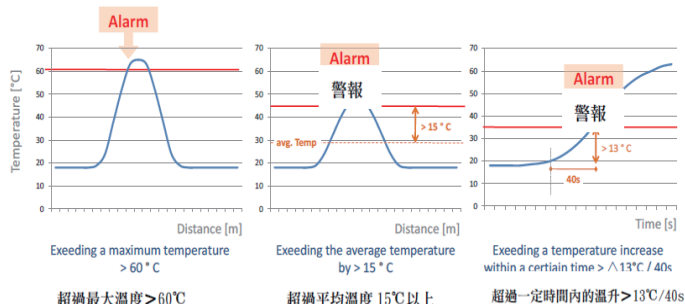
▲圖 3-3 拉曼散射光反饋信號波長圖示 [6]



▲圖 3-4 OFDR 連續波運行計算得熱點圖示 [7]

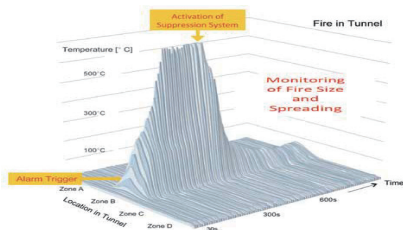
因此線型光纖感溫探測系統 (DTS) 報警方式，包括定溫報警 (分為高溫報警和低溫報警)、分區平均溫度之差 (分為低於分區平均溫度和高於分區平均溫度) 以及三組差溫報警。針對事故發生前的溫度變化率大的特點，在報警設置中可設置溫度變化率進行監測，當監測到溫度變化率大於該值時發出報警信號，並提供相應的信號輸出，差溫報警共有三組條件可以設置，能夠針對不同情況進行準確的報警，將誤報降到最低。火災監測可以採用 Vds 認證採用的設置：定溫 60°C，差溫

13℃ /40s、17℃ /120s、28℃ /360s；與分區平均溫度值之差的報警設置不受外界環境變化及氣候變化而改變，對分區內只有很小的一塊區域的溫度變化具有較好的探測效果，如圖 3-5。



▲圖 3-5 光纖分散式溫度探測系統火災監測報警設置方式 [7]

在火災發生後，油品燃燒溫度在 750℃左右，普通光纖一般所能承受的溫度上限約為 150℃，而光纖傳感器所獨有的耐高溫光纖能夠在 750℃的高溫下兩個小時內保持功能的完整性，不僅能夠實現火災的預警，還能對火災全程進行監測，能夠指導操作人員準確定位火災位置，利用滅火設備快速準確的處理火災，如圖 3-6。因此可以得出如下結論，即線型光纖感溫探測系統(DTS)是控制滅火系統、緊急通風系統等火災防護系統的啟動、執行以及幫助消防隊執行任務的理想測量工具，這是別的技术及產品所無法做到的。



▲圖 3-6 光纖傳感器對火災監測圖示 [7]

(二) 室外管線適用火警探測器比對分析

▼表 3-1 火警探測器之功能比對分析

| 探測器功能 | 線型光纖感溫探測器 | 空氣管型探測器 | 光電式分離型探測器 | 火焰式探測器 |
|--------------|---|---|---|--|
| 防風雨日照氣候變化的影響 | 是 | 否 | 否 | 否 |
| 防腐蝕 | 是 | 是 | 否 | 否 |
| 防爆 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 防污垢和灰塵 | 是 | 否 | 否 | 否 |
| 防電磁干擾 | 是 | 是 | 否 | 否 |
| 適用濕度 | 0~95% | 10%~95% | 10%~93% | 5~95% |
| 洩漏 / 火災偵測 | 是 / 是 | 是 / 是 | 否 / 是 | 否 / 是 |
| 運行溫度範圍 | -40°C ~750°C (取決測溫光纖) | -20~60°C | -30~55°C | -40~85°C |
| 動作溫度 | 可設定為超溫 60°C 報警、超過平均溫度 15°C 以上報警、差溫 13°C /40s 報警 | 0.5~20%obs/m(遮光率/公尺) 警示： 0.5~1.990%obs/m 動作： 1~1.995%obs/m 火警 1： 1.5~2%obs/m 火警 2： 2~20%obs/m | 監測距離 5~20m 之減光率為 5~45% 監測距離 20~40m 之減光率為 10~60% 監測距離 40~100m 之減光率為 20~80% | 防爆型多頻譜火焰探測器 紫外線： 185to260nanometers micrometers 近頻紅外線： 0.7to1.1microns 寬頻紅外線： 1.1to3.5microns 現場可程式化設定 20、40、60、80ft 四種靈敏度。 |
| 監測角度與距離(面積) | 距離 8~12km 精確定位 1m 半徑 6m 內 | 面積 2000m ² 採樣點間距 1~9m(通常為 4m) | 距離長 5~100m/寬 14m | 距離 20~50m 100 度視野 |

(本研究整理)

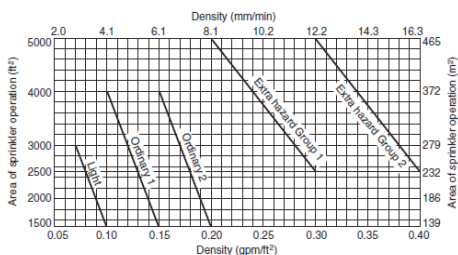
為突破條列式法規，以性能化之消防設計，確保石化工廠的室外管線損傷洩漏引發火災事故時，可於第一時間得知火災事故發生，比對分析現今感熱式探測器、偵煙式探測器(含熱煙複合式探測器)及火焰探測器等各類型火警探測器，依其設置用途、運作原理及偵測範圍之不同，適用於大空間室外場所的火警探測器，主要

為線型光纖感溫探測系統、差動分佈型(空氣管型)探測器、光電式分離型探測器及火焰式探測器等四種。

室外公共管橋管線場所為開放空間，因此空氣流通、風速、溼氣及高溫等因素，深切影響火警探測器偵測作動時間，且石化工廠公共管架管線內容物多屬易燃性、易爆性、腐蝕性及毒性的液(氣)體，場所設置火警探測器需具備防爆和防腐蝕功能。經比對分析此四種火警探測器之功能性與探測原理及使用限制，如表 3-1，則以線型光纖感溫探測系統為室外管架管線洩漏火災感知之最佳選擇。

(三) 室外管線洩漏火災之消防安全防護設計探討

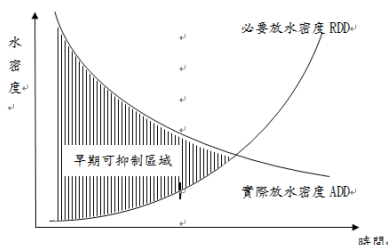
美國針對作業場所危險程度之不同，經由火災案例分析與實驗得到防護面積與撒水密度關係圖 (Area/Density Curve)，如圖 3-7。其為假想作業場所防護面積發生火災至自動撒水系統之撒水頭動作將火災撲滅，這段時間可能會延遲，因而在這假想防護面積範圍內，提供預定之撒水密度，火勢可被控制或撲滅。



▲圖 3-7 美國 NFPA13 面積密度關係圖 [8]

而依據 NFPA13 自動噴水滅火系統安裝標準可知，現行撒水系統之啟動最主要是藉由火災產生的高溫，達到撒水頭感熱元件設定之破裂溫度，因此其火勢往往已成長至較大規模。所以自動撒水系統是否能早期抑制、撲滅火災，以撒水頭的反應時間指 (Response Time

Index, RTI)、實際放水密度 (Actual Delivered Density, ADD) 及必要放水密度 (Required Delivered Density, RDD) 來評估。一般而言，火災初期滅火之 RDD 值較小，實際撒水至火場的 ADD 值較大，此時 $ADD > RDD$ ，就能達到滅火的功效；當火勢持續成長，未被有效控制時，其 RDD 就會愈大，此時撒水頭噴撒出的水，部分被火場之火羽流蒸發，造成實際撒水至火場的放水密度 ADD 變小。所以當 $RDD > ADD$ 時，火勢已無法抑制，如圖 3-8。



▲圖 3-8 RDD & ADD 及水密度的關係圖 [9]

四、電腦火災數值模擬驗證結果分析

本研究以某縣某工廠之室外公共管架管線為例，如圖 4-1，若發生公共管架管線損傷洩漏大量易燃液體累積形成防液堤池火火災，由於室外氧氣供應充足致燃燒較完全，池火火災溫度約為 1000°C ，最高達 1500°C ，產生的火焰向四周產生強烈的熱輻射，火焰高度亦隨池火直徑的增大而升高，距離火燄愈近，熱輻射愈強，火燄溫度愈高，熱輻射也愈強，將使附近人員受到傷害，並且可引燃周遭的可燃物，甚至波及鄰近儲槽及製造場所廠房造成變形、倒塌和爆炸等重大事故，其後果將是不堪設想。

(一) FDS 模型情境分析

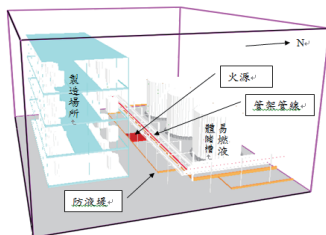
根據前述某縣某工廠之室外公共管架管線為對象，依台灣消防署制頒「公共危險物品及可燃性高壓氣體設

置標準暨安全管理辦法」之規範易燃液體儲槽與防液堤、管線及建築物的間距，建立 FDS 模型與邊界條件如下述明，如圖 4-2：

1. 易燃液體儲槽基礎墩直徑 11m× 高度 0.5m，儲槽直徑 10m× 高度 10m，儲槽高度 5m 與 9.8m 處設定環狀自動撒水系統，撒水頭間距 2m。
2. 易燃液體儲槽與儲槽之間距 5m，儲槽與防液堤之間距 5m，儲槽區防液堤高度 0.5m× 厚度 0.2m。
3. 易燃液體儲槽區防液堤外輸送泵浦區之防液矮堤長度 40m× 寬度 5m× 高度 0.2m× 厚度 0.15m。
4. 輸送泵浦區上方管架支撐鋼樑柱間距 6m，管架上 9PCS 製程管線離地面高度 4m，管線間距 0.5m，管線厚度 0.006m。
5. 石化製程之製造場所長度 40m× 寬度 15m× 高度 24m，為鋼結構建築之四樓層開放空間，二至四樓地板中間 5m 寬為混凝土及兩側各 5m 寬為格柵地板；製造場所與輸送泵浦區防液矮堤間距 6m。
6. 製造場所鋼結構、中間桶槽、管架、管線及易燃液體儲槽等材質設定為鋼材；地面、儲槽基礎墩及防液堤等材質設定為混凝土。
7. 火源位置為輸送泵浦區防液矮堤中心點處 (X 軸 25~30m，Y 軸 32.5~37.5m，Z 軸 0~0.2m)，火源大小為 50,000kW，火源中心點至易燃液體儲槽垂直距離 7.5m，火源中心點至製造場所垂直距離 8.5m。
8. 外在環境條件設定為全年平均氣溫 30℃，風速分別設定 0m/s、南風 (S)5m/s 和 10m/s 直接吹向易燃液體儲槽、北風 (N)5m/s 和 10m/s 直接吹向製造場所。



▲圖 4-1 某工廠之室外公共管架管線實景圖

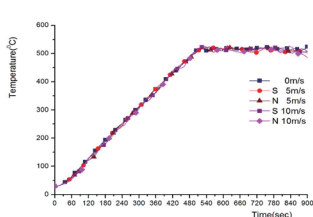


▲圖 4-2 室外管線洩漏池火火災之 FDS 模型 3D 圖示 (本研究整理)

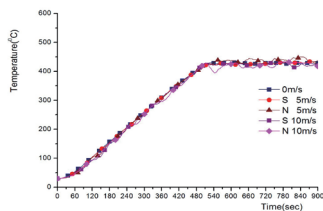
(二) FDS 火災模擬結果分析

1. 火源高溫 and 熱輻射比對分析

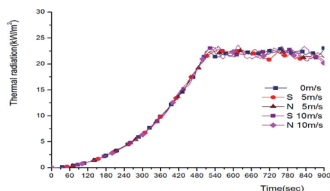
為求得不同風速時，火源產生之高溫 and 熱輻射變化對周邊設施的影響程度，模擬風向直接吹向易燃液體(汽油)儲槽(南風 S)或製造場所(北風 N)，分別以風速 0m/s、5m/s 及 10m/s 時，儲槽或製造場所接收到的高溫 and 熱輻射值進行比對分析，如圖 4-3，比對分析結果如表 4-1 及表 4-2。



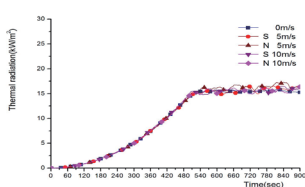
▲圖 4-3(a) 儲槽外壁高 2m 處不同風向風速時溫度關係圖



▲圖 4-3(b) 製造場所鋼樑高 2.5m 處不同風向風速時溫度關係圖



▲圖 4-3(c) 儲槽外壁高 2m 處不同風向風速時熱輻射關係圖



▲圖 4-3(d) 製造場所內桶槽高 2m 處不同風向風速時熱輻射關係圖

▼表 4-1 火源周邊設施於不同風向風速時接收到的溫度

| 周邊設施 最高溫度 | 不同風向風速時接收到的溫度 (°C) | | | | |
|--------------------|--------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | 無風 0m/s | S 南風 5m/s | N 北風 5m/s | S 南風 10m/s | N 北風 10m/s |
| 儲槽外壁高 2m 處 | 495.93 | 514.29 | 512.49 | 523.43 | 529.54 |
| 製造場所鋼樑 高 2.5m 處 | 427.55 | 423.22 | 428.9 | 445.33 | 427.15 |

由表 4-1 得知，當火載量為 50,000kW 於無風狀態時，相距火源中心點 7.5m 遠之儲槽外壁以 2m 高的位置所接收到 495.93°C 為最高溫，當風向風速 5m/s 和 10m/s 直接吹向儲槽或直接吹向製造場所時，儲槽外壁所接收到的溫度介於 512.49 至 529.54°C，以風速 10m/s 較無風狀態時所接收到的溫度增加 33.61°C 為最高溫。而相距 8.5m 遠之製造場所垂直鋼樑於無風狀態時，以 2.5m 高的位置所接收到 427.55°C 為最高溫，風速 10m/s 較無風狀態時接收到的溫度增加 17.78°C 為最高溫。

由 2.2 火場熱輻射之影響層面探討可知，溫度超過 300°C 後，鋼材降伏和極限強度明顯下降，超過 600°C 時，鋼材強度很低致不能承擔外力；且由文獻可知汽油自燃溫度是 257°C，故鄰近易燃液體（汽油）儲槽及製造場所鋼構廠房之管線洩漏引發大火，若無即時撒水降溫控制或撲滅火勢，其火源持續燃燒所產生的高溫與熱輻射，將造成鄰近鋼構廠房變形、倒塌和儲槽槽內壓力遽升爆裂等危害。

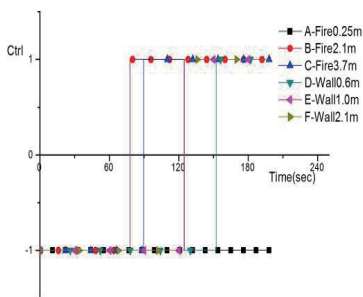
▼表 4-2 火源周邊設施於不同風向風速時接收到的熱輻射值

| 周邊設施 熱輻射最高處 | 不同風向風速時熱輻射值 (kW/m ²) | | | | |
|-------------------|----------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | 無風 0m/s | S 南風 5m/s | N 北風 5m/s | S 南風 10m/s | N 北風 10m/s |
| 儲槽外壁高 2m 處 | 19.86 | 21.81 | 21.60 | 23.07 | 23.51 |
| 製造場所內桶槽 高 2m 處 | 15.19 | 15.25 | 14.93 | 16.83 | 15.43 |

由表 4-2 得知，當火載量為 50,000kW 於無風狀態時，相距火源中心點 7.5m 遠之儲槽外壁以 2m 高的位置所接收到 19.86kW/m² 熱輻射值為最高，當風向風速 5m/s 和 10m/s 直接吹向儲槽或直接吹向製造場所時，儲槽外壁所接收到的熱輻射值介於 21.81kW/m² 至 23.51kW/m²，較無風狀態時增加 3.65kW/m²。而相距 8.5m 遠之製造場所內桶槽 2m 高的位置所接收到熱輻射值介於 15.19 至 16.83kW/m²，遠大於表 2-5 採用熱輻射值達 4.0kW/m² 以下作為人員安全考量範圍標準。

2. 線型探測器安裝位置比對分析

目前台灣消防相關法規並未明訂線型光纖感溫探測器裝置位置之條件；為求得最佳安裝位置，經 FDS 模擬線型光纖感溫探測器設定分區平均溫度值之差 15°C 以上時警報，模擬結果如圖 4-4，比對分析由表 4-3 得知，模擬六處均不影響人員動線和維護保養作業空間之裝置位置，以裝置平行於管架管線下方防液堤中心線離地高度 2.1m 時，其感知作動之靈敏度為最快速。



▲圖 4-4 線型光纖感溫探測器感知作動比較圖

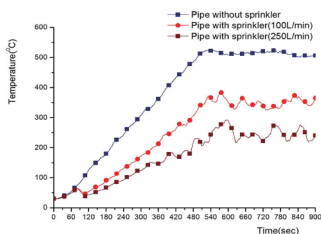
▼表 4-3 線型探測器感知作動之最佳裝置位置

| 線型探測器裝置位置 | 感知作動時間(sec) |
|------------------------|-------------|
| 管架管線下方防液堤中心線離地高度 0.25m | > 200 |
| 管架管線下方防液堤中心線離地高度 2.1m | 77.84 |
| 管架管線下方防液堤中心線離地高度 3.7m | 89.64 |
| 管架管線與儲槽間防液堤上方離地高度 0.6m | 152.43 |
| 管架管線與儲槽間防液堤上方離地高度 1.0m | 125.00 |
| 管架管線與儲槽間防液堤上方離地高度 2.0m | 124.41 |

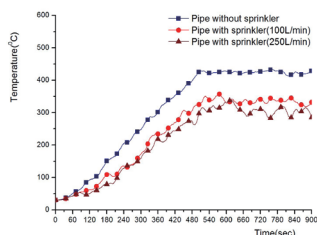
3. 公共管架管線裝設撒水系統比對分析

為突破條例式法規，有效抑制或撲滅室外管線洩漏池火火災，防止火源持續燃燒所產生的高溫與熱輻射對周邊設施造成危害，以 FDS 模擬於公共管架管線下方設置撒水系統，於年平均風速 10m/s 直接吹向儲槽（南風）時，製造場所及儲槽所接收到的溫度與熱輻射值如圖 4-5，比對分析結果如表 4-4。模擬公共管架管線下方設置撒水系統之邊界條件設定如下說明：

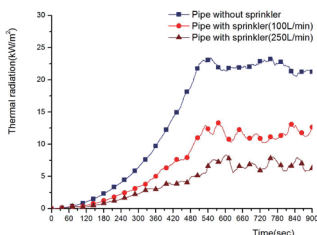
- (1) 風向風速：X 軸 10m/s。
- (2) 線型光纖感溫探測器：X 軸 27.5m，Z 軸 2.1m，Y 軸測量空間溫度解析度間距 1m，設定超過平均溫度 15°C 以上報警。
- (3) 儲槽自動撒水系統：Z 軸 9.5m 與 5m 環狀消防管路，每個撒水噴頭間距 2m，噴頭出水量分別為 100L/min 和 250L/min 進行比對分析。
- (4) 管架管線自動撒水系統：
 - a. 第一組撒水噴頭：X 軸 26m，Z 軸 3.7m，Y 軸每個撒水噴頭間距 3m，噴頭出水量分別為 100L/min 和 250L/min 進行比對分析。
 - b. 第二組撒水噴頭：X 軸 29m，Z 軸 3.7m，Y 軸每個撒水噴頭間距 3m，噴頭出水量分別為 100L/min 和 250L/min 進行比對分析。



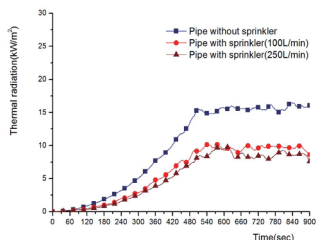
▲圖 4-5(a) 管線設置撒水系統時儲槽接收到的溫度關係圖



▲圖 4-5(b) 管線設置撒水系統時製造場所接收到的溫度關係圖



▲圖 4-5(c) 管線設置撒水系統時儲槽接收到的熱輻射關係圖



▲圖 4-5(d) 管線設置撒水系統時製造場所接收到的熱輻射關係圖

▼表 4-4(a) 管線設置撒水系統時周邊設施接收到的溫度

| 周邊設施最高溫度 | 接收到的溫度 (°C) | | |
|----------------|-------------|-----------------|--------|
| | 無撒水系統 | 撒水系統放水量 (L/min) | |
| | | 100 | 250 |
| 儲槽外壁高 2m 處 | 523.43 | 346.65 | 217.31 |
| 製造場所鋼樑高 2.5m 處 | 445.33 | 344.66 | 315.44 |

▼表 4-4(b) 管線設置撒水系統時周邊設施接收到的熱輻射值

| 周邊設施熱輻射最高處 | 接收到的熱輻射值 (kW/m²) | | |
|---------------|------------------|-----------------|------|
| | 無撒水系統 | 撒水系統放水量 (L/min) | |
| | | 100 | 250 |
| 儲槽外壁高 2m 處 | 23.07 | 11.54 | 5.33 |
| 製造場所內桶槽高 2m 處 | 16.83 | 9.19 | 9.18 |

經由 FDS 模擬結果得知，公共管架管線下方設置線型光纖感溫探測器，連線啟動管線下方設置撒水系統且放水量提高至 250L/min 時，製造場所鋼樑高 2.5m 處所接收到的溫度為 315.44°C，仍超過 300°C，鋼材降伏和極限強度潛在下降造成設施坍塌等危害。而製造場所內桶槽高 2m 處所接收到的熱輻射值為 9.18kW/m²，仍大於表 2-5 採用熱輻射值達 4.0kW/m² 以下作為人員安全考量範圍標準。

4. 防火牆及防火水幕設置比對分析

以 FDS 模擬於公共管架管線與易燃液體儲槽 / 製造場所之間設置防火牆或防火水幕，於年平均風速 10m/s 直接吹向儲槽 (南風) 時，製造場所和儲槽所接收到的溫度與熱輻射值如圖 4-6，比對分析結果如表 4-5，模擬防火水幕或防火牆之邊界條件設定如下說明：

(1) 情境 1：

- a. 管架管線與製造場所之間防火牆：X 軸 21~21.2m，Z 軸 4m，Y 軸 15~55m，厚度 20 公分之鋼筋混凝土牆。
- b. 管架管線與儲槽之間防火牆：X 軸 30~30.2m，Z 軸 4m，Y 軸 10~60m，厚度 20 公分之鋼筋混凝土牆。

(2) 情境 2：

- a. 管架管線與製造場所之間防火水幕：X 軸 21m，Z 軸 4m，Y 軸每個撒水噴頭間距 1m，噴頭出水量 200L/min。
- b. 管架管線與儲槽之間防火水幕：X 軸 30m，Z 軸 4m，Y 軸每個撒水噴頭間距 1m，噴頭出水量 200L/min。

(3) 情境 3：

- a. 管架管線與製造場所之間防火水幕：X 軸 21m，Z 軸 2m 及 4m，Y 軸每個撒水噴頭間距 1m，噴頭出水量 250L/min。
- b. 管架管線與儲槽之間防火水幕：X 軸 30m，Z 軸 2m 及 4m，Y 軸每個撒水噴頭間距 1m，噴頭出水量 250L/min。

(4) 情境 4：

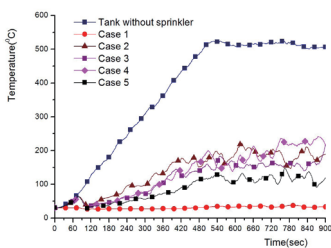
- a. 管架管線與製造場所之間防火水幕：X 軸 21m，Z

軸 2m 及 4m，Y 軸每個撒水噴頭間距 0.5m，噴頭出水量 250L/min。

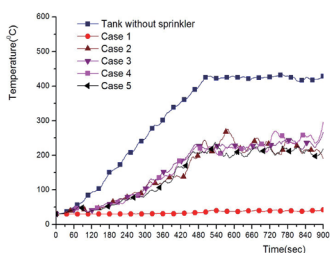
- b. 管架管線與儲槽之間防火水幕：X 軸 30m，Z 軸 2m 及 4m，Y 軸每個撒水噴頭間距 0.5m，噴頭出水量 250L/min。

(5) 情境 5：

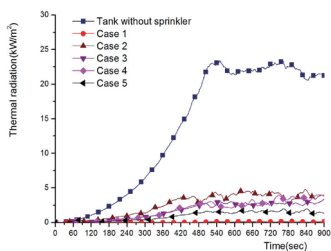
- a. 管架管線與製造場所之間防火水幕：X 軸 21m，Z 軸 2m 及 4m，Y 軸每個撒水噴頭間距 1m，噴頭出水量 400L/min。
- b. 管架管線與儲槽之間防火水幕：X 軸 30m，Z 軸 2m 及 4m，Y 軸每個撒水噴頭間距 1m，噴頭出水量 400L/min。



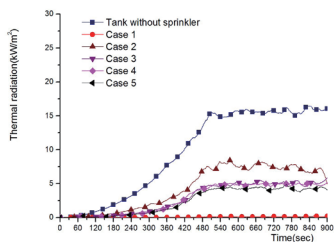
▲圖 4-6(a) 設置防火水幕或防火牆時儲槽接收到的溫度關係圖



▲圖 4-6(b) 設置防火水幕或防火牆時製造場所接收到的溫度關係圖



▲圖 4-6(c) 設置防火水幕或防火牆時儲槽接收到的熱輻射關係圖



▲圖 4-6(d) 設置防火水幕或防火牆時製造場所接收到的熱輻射關係圖

▼表 4-5(a) 設置防火水幕或防火牆時周邊設施接收到的溫度

| 周邊設施 最高溫度 | 接收到的溫度 (°C) | | | | | |
|--------------------|-------------|----------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | 無撒水系統 | 情境 1: 設置防火牆 | 設置防火水幕放水量 (L/min) | | | |
| | | | 250 | 250 | 250 | 400 |
| | | | 情境 2: 高 4m 噴頭 間距 1m | 情境 3: 高 2m 及 4m 噴頭間 距 1m | 情境 4: 高 2m 及 4m 噴頭間 距 0.5m | 情境 5: 高 2m 及 4m 噴頭間 距 1m |
| 儲槽外壁 高 2m 處 | 523.43 | 36.69 | 152.70 | 144.18 | 188.71 | 103.03 |
| 製造場所鋼樑 高 2.5m 處 | 445.33 | 37.85 | 169.07 | 156.66 | 218.46 | 177.47 |

▼表 4-5(b) 設置防火水幕或防火牆時周邊設施接收到的熱輻射值

| 周邊設施 熱輻射最高處 | 接收到的熱輻射值 (kW/m ²) | | | | | |
|-------------------|-------------------------------|----------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | 無撒水系統 | 情境 1: 設置防火牆 | 設置防火水幕放水量 (L/min) | | | |
| | | | 250 | 250 | 250 | 400 |
| | | | 情境 2: 高 4m 噴頭 間距 1m | 情境 3: 高 2m 及 4m 噴頭間 距 1m | 情境 4: 高 2m 及 4m 噴頭間 距 0.5m | 情境 5: 高 2m 及 4m 噴頭間 距 1m |
| 儲槽外壁 高 2m 處 | 23.07 | 0.12 | 2.85 | 2.19 | 3.00 | 1.36 |
| 製造場所內 桶槽高 2m 處 | 16.83 | 0.10 | 4.98 | 4.65 | 4.44 | 3.48 |

經 FDS 模擬結果比對分析得知，當石化工廠室外管架管線以性能化設計設置線型光纖感溫探測器時，可連續測量室外空間溫度變化，判定發生火災時，隨即連線啟動管架管線及儲槽自動撒水系統噴水降溫防護，進而有效撲滅或抑制火源。當公共管架管線與儲槽 / 製造場所之間設置高度 4m 防火牆時，儲槽外壁 2m 高的位置所接收到的溫度為 36.69°C，製造場所鋼樑垂直鋼樑 2.5m 高的位置所接收到溫度為 37.85°C，周邊設施接收到的溫度已降低至 100°C 以內，鋼材性能基本不變；而儲槽外壁 2m 高的位置所接收到的熱輻射值為 0.12kW/m²，製造場所內桶槽高 2m 處接收到的熱輻射值為 0.1kW/m²，已達表 2-5 採用熱輻射值達

4.0kW/m² 以下作為人員安全考量範圍標準。

而當公共管架管線與儲槽 / 製造場所之間，離地高度 2m 及 4m 處設置防火水幕，每個撒水噴頭間距 1m，噴頭出水量 400L/min 時，儲槽外壁 2m 高的位置所接收到的溫度為 103.03℃，製造場所鋼樑垂直鋼樑 2.5m 高的位置所接收到溫度為 177.47，周邊設施接收到的溫度已降低至 250℃ 以內，可避免鋼材脆化現象；而儲槽外壁 2m 高的位置所接收到的熱輻射值為 1.36kW/m²，製造場所內桶槽高 2m 處接收到的熱輻射值為 3.48kW/m²，已達表 2-5 採用熱輻射值達 4.0kW/m² 以下作為人員安全考量範圍標準。

五、結論與建議

(一) 結論

國內、外多數石化大廠均鄰海設廠，管線的更新或許可以暫時解決腐蝕洩漏的危機，惟鄰海惡劣的環境終年不變，帶有鹽分的砂塵依舊慢慢地侵蝕著管線，難保不會再發生管線洩漏引發火災事故。而且國內消防法規更明訂外氣流通無法有效探測火災之場所得免設探測器；因此事業單位於法有據，不易編列經費於室外公共管架管線處安裝火警探測器及自動撒水系統加以防護。惟線型光纖分散式溫度探測系統 (DTS) 之獨特抗電磁干擾能力、受到風影響的因素極小、防爆、防腐蝕、精確的定位、以及快速傳達訊息等強大的特性與功能，加上獲得德國 VdS 和美國 UL 等國際認證，已逐漸為國外先進大廠列為首選應用於室外管線、管道間及公路、鐵路、

地鐵長隧道等空間之溫度監測及火災報警之用途。為突破條例式法規，有效防範、抑制或撲滅室外管線損傷洩漏造成重大火災、爆炸事故，本論文經由 FDS 電腦數值模擬已印證五點，如下說明：

1. 室外管架管線外氣流通場所，可以選用功能強大之光纖分散式溫度探測系統 (DTS)，安裝於管架管線離地高 2.1m 處，不影響人員通行及地面設備維護保養作業；當發生管線洩漏火災之火載量達 50,000kW 時，即使刮起 10m/s 風速，仍可快速地於 96.61sec 時連線啟動撒水系統防護，並可警報人員做最迅速與適切的搶救處理。
2. 當儲槽垂直距離 7.5m 處發生火災之火載量達 50,000kW 時，儲槽本體離地面高 2m 處所接收到的溫度最高，達 495.93℃；而風速 10m/s 直接吹向儲槽時，儲槽本體所接收到的溫度更升高達 523.43℃，顯見風速為影響室外池火火災之重要因素。
3. 當室外管架管線下方離地高 2.1m 處設置光纖分散式溫度探測系統 (DTS)，連線啟動管線下方設置撒水系統且放水量提高至 250L/min 時，製造場所鋼樑 2.5m 處所接收到的溫度，由無撒水系統時之 445.33℃降至 315.44℃，仍超過 300℃。而製造場所內所接收到的熱輻射值則為 9.18kW/m²，未達 4.0kW/m² 以下之人員安全考量範圍標準。
4. 當室外管架管線與鄰近儲槽 / 製造場所之間，設置高度 4m 防火牆，且儲槽和管線撒水系統放水量 250L/min 時，儲槽本體所接收到的溫度，可由無撒水系統時之 523.43℃降至 36.69℃；製造場所內接收到的熱輻射值，

可由無撒水系統時之 16.83kW/m^2 降至 0.1kW/m^2 ，足以有效阻隔火源產生高溫 and 強烈的熱輻射危害。

5. 當室外管架管線與鄰近儲槽 / 製造場所之間，離地高度 2m 及 4m 處設置防火水幕，每個撒水噴頭間距 1m 和出水量 400L/min，以及儲槽和管線撒水系統放水量 400L/min 時，儲槽本體所接收到的溫度，可由無撒水系統時之 523.43°C 降至 103.03°C ；製造場所內接收到的熱輻射值，可由無撒水系統時之 16.83kW/m^2 降至 3.48kW/m^2 ，亦可有效阻隔火源產生高溫 and 強烈的熱輻射危害。

(二) 建議

現今國內消防法規已明訂外氣流通無法有效探測火災之場所得免設探測器，以及室外儲槽儲存閃火點在 70°C 以下之第四類公共危險物品之顯著滅火困難場所，才需設置冷卻撒水設備。惟今非昔比，舊時法令已不足以防範現今多元化且易燃易爆的管線設施；為突破現行條例式法規，經由 FDS 電腦數值模擬結果已得知，室外管架管線可選用、安裝線型光纖分散式溫度探測系統 (DTS) 及自動撒水系統加以防護。故根據相關文獻與本論文模擬印證結果，提供五點改善建議如下，以作為石化工廠室外管架管線良好之性能式消防設計的重要參考：

1. 石化工廠建廠初始，應將公用流體管線、儀電管線和易燃性管線區分規劃，保持安全間距，分開配置於不同的管架，且管架上設置巡檢走道，以及管線之間不可過度密集，俾利人員巡查及檢測，亦可防範易燃性管線洩漏引發火災時，避免災情瞬間擴大延燒和造成電力中斷。

-
2. 室外易燃性管線之公共管架，應安裝功能強大之光纖分散式溫度探測系統 (DTS)，並依據管線內容物之危害特性，設置適當滅火藥劑之自動泡沫撒水系統防護，可於發生火災之起火期時，即感知溫升連線撒水，達到抑制或撲滅火災之功效，防止災情擴大。
 3. 每座儲存公共危險物品之易燃液體儲槽，均應予以設置環狀自動撒水系統防護，並與鄰近管架管線設置之光纖分散式溫度探測系統 (DTS) 連線啟動，防範管線洩漏形成池火火災時，強烈之熱輻射造成儲槽變形或槽內壓力劇升爆炸危害。
 4. 室外管架管線與鄰近儲槽 / 製造場所等周邊建築物之間，應設置防火牆或防火水幕，以徹底防範管線洩漏引發池火火災時，有效地阻隔火源產生高溫 and 強烈的熱輻射對周邊設施及人員的危害。
 5. 修訂消防法令條文如下，強制要求事業單位依法設置：
 - (1) 明訂外氣流通，儲存、處理及輸送易燃易爆液 (氣) 體之室外儲槽和管架管線等設施，得設置功能適用之火警探測器警戒防護。
 - (2) 明訂公共危險物品之易燃易爆液 (氣) 體之室外儲槽，需設置自動撒水系統防護，且撒水頭放水量達 400L/min 以上。
 - (3) 室外管線與鄰近儲槽 / 製造場所等周邊建築物之間，需設置高度 4m 防火牆或離地高度 2m 和 4m 處設置防火水幕，且每個撒水噴頭間距 1m 和出水量 400L/min 以上。

六、參考文獻

- [1]蘇俊吉、陳孟宏、許峰彰，「製程管線損傷案例解析和強化方案探討」，第2頁，台灣中油股份有限公司煉製研究所技術服務組(2007)。
- [2]API570，Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair and Alteration of Piping Systems, Third Edition, U.S.A(2009)
- [3]張銘坤、翁榮洲、吳榮正，「調查石化廠管線腐蝕偵測方法與防治技術」，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告，第329-343頁(1998)。
- [4]陳源煌、王錦福、張榮興、何大成，「廠內製程危害後果分析」，工業安全衛生技術輔導成果發表會，第9~11頁(2009)。
- [5]王士承、林誠興，「數值模擬技術應用於建築物火災情境重現之探討」，工業安全科技，第46-52頁(2007)
- [6]APSensing，<http://www.apsensing.com/>，上線日期 2013/2/28(2013)。
- [7]陳依莉、劉財宏，「LIOS 線型溫度探測系統」，堡安消防股份有限公司(2013)。
- [8]NFPA13，「Standard for the Installation of Sprinkler Systems」，P118，2010Edition(2010)。
- [9]陳文龍，「消防安全設備」，第17頁，公務出國報告資訊網，公佈日期 2001/04/18，http://report.nat.gov.tw/ReportFront/report_detail.jspx?sysId=C08801500，上線日期 2013/2/28(2013)。