

無塵室性能式煙控系統設計與應用分析

楊冠雄

國立中山大學機電系榮譽教授

吳鳳科技大學消防研究所教授

Fellow ASHRAE, Distinguished Lecturer

jerry2709@gmail.com

摘要

大型電子廠之無塵室，為全面自動化生產廠房，經常於廠區內設置頭頂搬運（Overhead Transport）系統來替代人工搬運，無法符合「各類場所消防安全設備設置標準」第 188 條第 1 項第 1 款防煙區劃面積規定之限制。且其防煙區劃打破後，機械排煙系統之排煙量，無法達到在大區域防煙區劃面積每平方公尺每分鐘一立方公尺以上之規定，因此必須進行性能式煙控系統設計，並進行電腦模擬與性能驗證，以確認其於發生火災時可確保人員之避難安全。此即為本文之主旨所在。

關鍵字：無塵室、性能式煙控系統設計、電腦模擬分析。

1. 前言

目前台灣晶圓製造廠無塵室之創新型煙控系統設計理念，為本研究團隊於 1997 年所建立；主要肇因於當時發生之半導體廠火災，導致 120 億元台幣之損失後所研發而成，後經普遍應用於大型 8 吋與 12 吋晶圓廠之實際建廠計畫中；當時，本煙控系統之設計理念為世界上首度提出，並一舉突破 INTEL 原廠設計只提供下排煙系統之弱點。

INTEL 之排煙系統設計，可適用於如悶燒（Smoldering）等 70 W 至 3kW 以下之小火災，因為 FFU 之向下氣流只達 0.35 m/s 至 0.45 m/s 之間；當火災規模大於此，則火災產生之濃煙向上熱浮力速度已遠大於 FFU 向下之氣流速度，於壓制上有極大困難，可能導致濃煙快速之水平擴散，而整個無塵室陷入嚴重之煙損中。

為此，本研究團隊提出針對小火、中火、及大火（自 70 W 至 5 MW）之情境，進行性能式煙控系統設計，並進行電腦模擬與性能驗證，落實於建

廠計畫中。其火災情境流程圖，如下圖 1 所示。

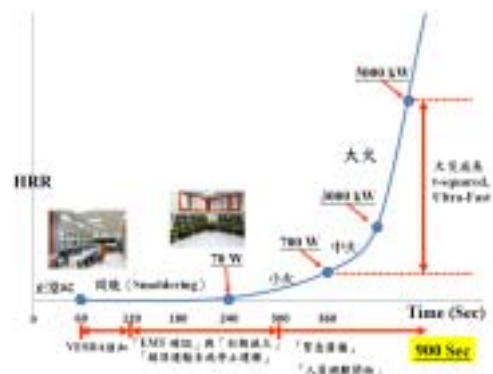


圖 1 無塵室火災情境流程圖

2. TRUSS 區蓄煙空間之形成

本創新設計之關鍵因素，在於火災於悶燒階段為 VESDA 偵測到後煙控系統仍維持 INTEL 原廠設計之下排煙模式；於火災成長至明火階段，煙塵自多孔地板上竄至 FAB 區內部，則起動其上排煙系統，為小火及中火之情境火勢依 NFPA 92 B 所規範之 t-squared Ultra Fast Fire 曲線成長而起動撒水系統；於萬一仍無法壓制火勢時，FFU 將於 200 °C 時被 5 MW 之火源所燒毀，濃煙順勢向上，而形成 TRUSS 區蓄煙之有利條件。因此，整體煙控系統形成多重防線之良好性能。

由於無塵室內之 TRUSS 區具備有大空間蓄煙區之特性，亦即當於晶圓廠無塵室發生火災時，若 FFU 被燒毀墜落後，將於 FFU 上方形成空窗缺口，濃煙將因熱浮力而上竄至 TRUSS 區；此時，廣大的 TRUSS 區可形成蓄煙區，以減緩煙層之下降，以利人員安全避難。

為印證此設計理念，本研究團隊於 2011 年 9 月 7 日及 8 日在內政部建築研究所台南防火試驗中心進行了 FFU 燃燒之全尺度實驗，獲得相當之成

功。此次實驗不但為我國首次進行，且亦為世界上首度進行，深具意義。



圖 2 大型無塵室 FFU 燃燒之全尺度實驗

全尺度試驗結果顯示，所有測試之 FFU 在 5 MW 之火源下，皆於 5 分 30 秒左右燒毀墜落。燒毀溫度經量測介於 200 °C 至 250 °C 之間。測試結果不但充分應證了 FFU 會燒毀，且墜落後果然形成 TRUSS 蓄煙之機制；且實際試驗結果 FFU 燒毀之時機（200 °C 至 250 °C），與原設計階段之預估值（200 °C）相當接近。

於此實驗獲得成功後，本研究團隊即依據此全尺度試驗結果，採取 FFU 實際燒毀之時間，作為電腦模擬分析之輸入值，以獲得較為準確之結果。

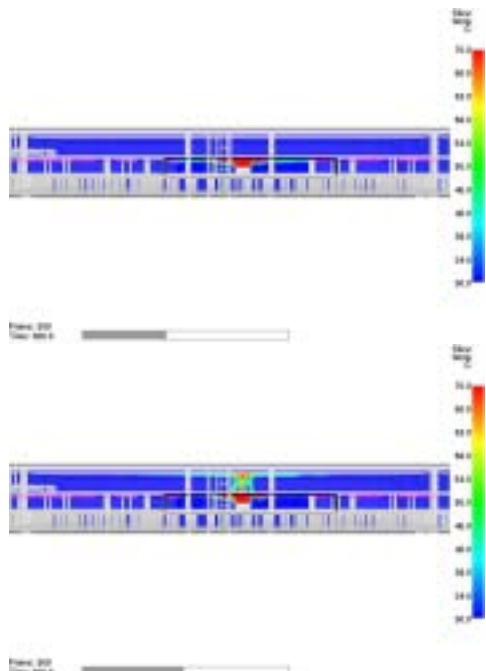


圖 3 無塵室火災之電腦模擬分析結果

3. FFU 防止延燒對策

為確保 FFU 焚燬墜落後，於無塵室內部無進一步延燒之虞，其防止延燒之對策，可分為「主動

式」(Active) 與「被動式」(Passive)兩方面。

「主動式」防止延燒對策，為利用自動撒水設備來進行。目前各大型電子廠之 FAB 廠區中，皆依照「各類場所消防安全設備設置標準」設置自動撒水設備。

為印證自動撒水系統實際之放射撒水量與設計之撒水量相符，必須進行全尺度實驗分析。此次實驗亦為我國首次進行實驗。管路的末端裝置三個 FAB 區所實際使用之撒水頭；管路之另一端，並裝置浮球型流量計與超音波流量計，以量測實際撒水量。

接著，將上述實驗所量測自動撒水系統實際之撒水量，作為 FDS 之輸入值，進行電腦模擬以分析自動撒水系統於 FFU 焚燬墜落時，可否有效防止火災延燒，進行印證。

模擬結果顯示，當 FFU 焚燬墜落且自動撒水系統尚未啟動，火勢未受到控制時，如圖 4 所示。而當自動撒水系統啟動後，FFU 焚燬墜落之火勢即受到有效控制，如圖 5 所示。充分印證當 FFU 焚燬墜落時，目前依照「各類場所消防安全設備設置標準」設置自動撒水設備，來進行「主動式」防止延燒策略為成功的。

另外可觀察，FFU 焚燬墜落鄰近區域之熱輻射強度亦隨著自動撒水設備之起動而大幅衰減，亦可明證於開啟自動撒水系統後，可有效防止火災繼續延燒，如圖 6 中所示。

於「被動式」防止延燒對策方面，為 FFU 採用耐燃性材質。如此，當 FFU 焚燬墜落時，可大幅減少繼續延燒之虞。所使用 FFU 之耐燃性，皆需通過包含 FM 與 UL 兩個機構之認證。

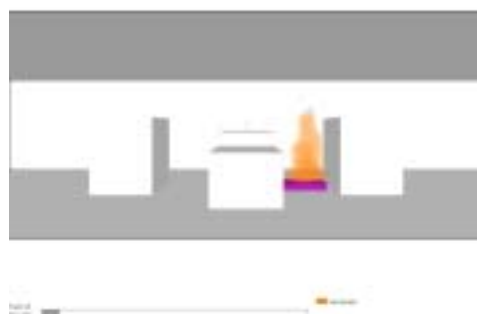


圖 4 FFU 焚燬墜落且自動撒水系統尚未啟動，火勢未受到控制



圖 5 FFU 焚燬墜落且自動撒水系統啟動，火勢即受到控制

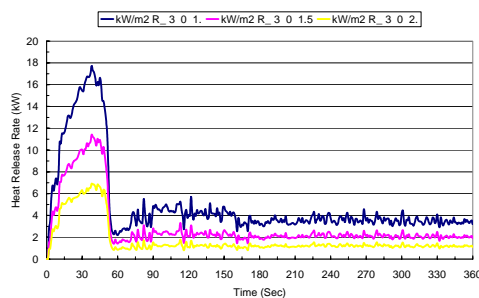


圖 6 FFU 焚燬墜落鄰近區域熱輻射強度之模擬結果顯示,在撒水系統正常運作下,熱輻射強度亦隨著大幅衰減,

4. 完整之大型無塵室性能式煙控避難與撒水系統之建立

依上述程序所建立完整之大型無塵室性能式煙控避難與撒水系統，其火災情境之發展如下所述。

首先於火災發生初期為「悶燒」(Smoldering)階段，火災規模尚小，熱釋效率約介於 700 W~800 W 至 1 kW 之間。此時雖未見火光，但濃煙已起。藉由向下氣流之帶動，VESDA 系統偵煙成功啟動，經 ERT 人員確認後，同時啟動緊急運轉程序。

此段其間可能持續 3 至 5 分鐘(下圖中之 AB 段)，下排煙系統持續動作，直到緊急應變小組將火勢撲滅，而完成悶燒階段之處理程序。

反之，若於 B 點 ERT 未能控制及撲滅火災，則火勢將循 BC 曲線以 t^2 -ultra fast 之勢成長。直到達到 C 點，撒水系統被啟動，曲線之後續發展形成 3 種可能性：

(1) 為 CF 曲線 (A Reduction in HRR)

顯示撒水系統成功的抑制了火災之成長，火勢

將以負指數之方式衰減，亦即：

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 e^{-k(t-t_0)}$$

。此趨勢亦為 NFPA 及 FMRC 所建議，在撒水系統正常運作下之情境。

(2) 為 CE 曲線 (A Constant HRR Maintained)

為一假設之曲線，亦即撒水系統已被啟動，雖未能「撲滅」火勢，但仍可控制於一定之範圍內。此曲線於國際間被廣為應用，做為 CFD 電腦模擬之 HRR 主要輸入條件。其主因為，據日本火災災例統計，撒水系統於火災時真正發揮性能約佔 98%，而澳洲及紐西蘭之數據則顯示成功率為 99%。反觀此數據，亦顯示出撒水系統仍有 1%~2% 之失敗可能。因此一般，以之做為設計「不保證率」。反之，可進一步選取 CE 曲線，做為更保守之設計。

(3) 為 CD 曲線 (Sprinklers Overpowered by Fire)

許多建築空間中，經常由於變更用途，甚或人為縱火等因素，導致實際發生之火載量遠大於當初設計時之估算值。此時，撒水系統之啟動只能達到部份之降溫效果，使原來 t^2 之成長曲線略為下移，但仍維持向上成長之趨勢。此時火勢之撲滅或控制唯有寄望於外界之消防隊救援之加入，方足以克盡全功了。

上述的三種火災成長曲線中，本研究係採取第二種，亦即 ABCE 曲線，做為煙控系統設計之依據，遠比一般使用之「2% 不保證率」亦即 CF 曲線) 更為保守安全，可說是已有較萬全之準備。然而，任何系統設計皆有其功能之極限，於此亦然。當火勢因其他原因，而超越了 CE 線時，此處所設計之煙控系統只能發揮既有功能，亦即提供人員逃生所須之時間，確保人員之安全無慮。而火災之進一步成長，也有靠外界助力才能進一步控制了。

於火勢自 ABCE 向上成長之整個過程中，於 AB 之小火悶燒階段，將由下排煙系統提供第一道防線。於此段 3 至 5 分鐘期間，若 ERT 有效的將火勢控制、撲滅，則全廠回復正常運作，由於其氣流組織仍維持向下，下排煙系統因此成功的發揮其功能，並於最短時間內使整廠回復正常。

若火災進一步成長，濃煙已進入 FAB 區域且由強大的熱浮力導引向上，此時上排煙系統於 ERT 之人為確認下進一步啟動，而 FFU 則停止運轉。

所有工作人員開始進行避難。據研究模擬結果，總共避難所須時間約為 4 分鐘。此時上排煙系統充份發揮功能，維持煙層淨高於 2 m 以上。煙控模擬與避難模擬之結果充份印證了人員可在此充裕之時間內安全的避難完成。

故當火勢進一步成長，到達 C 點之時，撒水系統被啟動，則開始發展 CD、CE、CF 三種可能性。本研究由於係依 CE 線進行設計，因此達到了考量煙控性能與建造成本平衡之最佳化設計。

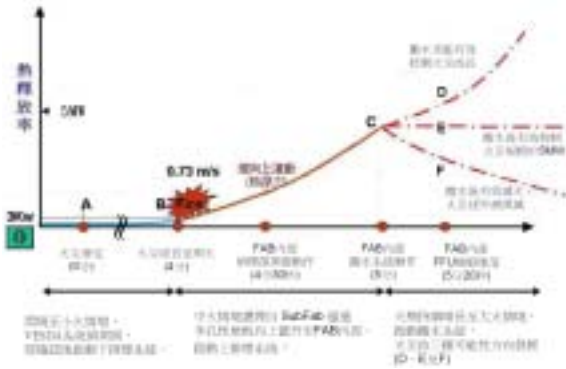


圖 7

5. 結論

高科技廠房無塵室由於面積廣大，因此，若依據「各類場所消防安全設備設置標準」第 188 條之方式設置機械排煙系統，則會面臨下列之困難點：

- (1) 由於頂部搬運系統穿越製程區上方空間，使得依據條例式法規設置之防煙區劃遭到破壞，值得探討。
- (2) 在 5MW, t^2 極快速火災成長情況下，無塵室之 FFU 是否會燒毀，而形成 TRUSS 可蓄煙之有利情境？值得進一步探討。
- (3) 由於依據 188 條法規設置之機械排煙量為符合最大防煙區劃兩區同時排放情形下；因此，當防煙區劃被上方搬運系統打破後，此設置之排煙量是否仍足夠？值得進一步探討。

上述之問題，解決方法之關鍵在於建立完整之小,中,大火煙控情境，結合自動撒水系統之設置運動與緊急運轉模式之建立，方足以竟全功。本文之城成果，經由電腦模擬與全尺度實驗，充分印證了此論點。

FFU 是否會燒毀及燒毀之時機為何，為一項影響無塵室防火煙控系統性能之重要關鍵因素卻極

少被論及。為此，本團隊進行了 FFU 燃燒之全尺度實驗，獲得相當之成功。此次實驗不但為我國首次進行，且亦為世界上首度進行，深具意義。

經全尺度試驗結果顯示，所有測試之 FFU 在 5 MW 之火源下，皆於 5 分 30 秒左右燒毀墜落。燒毀溫度經量測介於 200 °C 至 250 °C 之間。測試結果不但充分應證了 FFU 燒毀之時機，且墜落後果然形成 TRUSS 蓄煙之機制。此時，廣大的 TRUSS 區可形成蓄煙區，以減緩煙層之下降。因此可提供人員一條安全之逃生避難路徑，而不致遭受濃煙危害。可印證本研究團隊所擬定之性能式煙控系統情境，而獲得良好之設計結果。

為確保 FFU 焚燬墜落後，於無塵室內部無進一步延燒之虞，其防止延燒之對策，「主動式」與「被動式」對策亦於本設計研究中充份獲得印證

首先是國內首度進行之自動撒水系統實際之放射撒水量與設計之撒水量全尺度實驗分析。經印證成功後，此實際之撒水量作為進一步 3D CFD 電腦模擬之輸入值，使電腦模擬之精確度得以確保。

於未來，更進一步進行此種大型高科技廠房無塵室超大型火災之性能式煙控與撒水系統研究，仍有極大之發展空間。高科技產業為我國經濟命脈之所繫，其防火煙控與避難安全之重要性不言而喻，值得傾注更多之研發能量加以發展，可大幅提升我國於此方面之競爭力，值得深思！

6. 謝誌

本研究承蒙 tsmc 與 umc 之全力支持，方得以順利完成。謹在此敬致最誠摯之謝忱！

參考文獻

1. NFPA 92B, 2005, "Guide for Smoke Management Systems in Mall, Atria, and Large Areas".
2. J.H. Klote & J.A. Milke, 2000, "Design of smoke management systems", ASHRAE Inc., Atlanta.
3. 楊冠雄，2009，「大空間建築性能式火災煙控系統設計與應用分析手冊」，內政部建築研究所。

作者簡歷

楊冠雄教授所領導之研究團隊，自 1994 年以

來，所完成之性能式火災煙控設計與避難分析及實驗印證計畫已超過 50 個，約佔我國歷年來完成之性能式火災煙控設計與避難分析總執行計畫之 95 % 以上。為創造我國此學門工程與應用領域 20 年來發展沿革之重要研究團隊。

APPLICATION AND INNOVATIVE DESIGN ANALYSIS OF CLEANROOM SMOKE MANAGEMENT SYSTEMS

Dr K.H. Yang

Fellow ASHRAE, Distinguished Lecturer

Professor Emeritus of National Sun Yat-Sen University, and

Wufeng Univeristy

ABSTRACT

Please provide the English abstract in 50 words and keywords.

Keywords: 3-5 keywords

In high-tech industry, clean rooms were

normally designed and covered with a large area, at the size of 150 m x 150 m approximately. To facilitate an effective smoke management and egress system for such a FAB presents great technical challenges, not to mention the difficulty in coupling with the local fire protection codes and standards.

In this study, an innovative design concept has been developed, simulated, and experimentally investigated to compose a performance-based fire protection system for large cleanrooms.

The experimental and simulation results indicated successfully that the technology developed in this study can be applied in facilitating higher safety level in existing and newly-built cleanrooms.