

# 半導體無塵室火災風險分析暨防火工程性能設計之研究

## Analysis of Fire Risk and Performance-Based Design of Fire Protection Engineering in a Cleanroom of a Semiconductor FAB

邱晨瑋 \*

黎俊鑒 \*\*

蔡春進 \*\*\*

Chiu, Chen-Wei

Li, Chun-Chien

Tsai, Chuen-Jinn

### 摘要

以運作中的半導體無塵室為藍本進行火災風險分析及電腦火災模擬分析，評估以細水霧取代撒水頭及配合無塵室空調煙控的效果。無塵室火災特性：產線復原期間長、關鍵生產機台難以快速復原、環境復原清理時間長、停業損失大。以實際運作中的第二類半導體廠房潔淨室為藍本，以文獻探討其它半導體公司災例回顧及案例公司潔淨室火災案例分析，確認案例場景中可能的火災風險，再以初步危害分析分析 (PHA)、Dow F & EI (道氏火災爆炸指數) 易燃性值火災爆炸危害等級區分、半導體機台相對危害等級分析，確認無塵室中溼式清洗機台使用易燃性異丙醇 (IPA) 為主要火災風險。在無塵室中二相鄰的防煙區劃範圍中，以既設的消防滅火設備搭配排煙及空調運轉模式，進行火災動態模擬，為評估最嚴重全煙損情境，模擬時，假設溼式清洗台中的消防設備皆為失效，火源達到穩態燃燒後維持最大熱釋率 10MW 直至模擬終了。

探討細水霧滅火設備做為無塵室環境防護設備，於模擬情境中將模型中天花板設置撒水頭以細水霧取代，對於火場環境的變化與影響，其影響以 FDS 模擬結果中的相關參數，如：一氧化碳濃度、火場能見度、溫度等參數因子做為比較分析的基礎，提出在各種設備 (消防、空調) 交互作用下各設備最佳配置方案，可供同類型的第二類半導體無塵室廠房做為災時消防空調運轉模式及採用細水霧滅火設備規劃參考，採用耐燃等級 HEPA 濾網可防止在撒水動作之前，FFU 的 HEPA 濾網燒穿，煙層進入上回風層的全區擴散狀況發生。採用細水霧滅火時，水量為 80LPM、粒徑

\* 臺灣警察專科學校消防安全科教授，[eswin.wei@gmail.com](mailto:eswin.wei@gmail.com)。

\*\* 國立交通大學產業安全與防災學程碩士班，[A9408030A@gmail.com](mailto:A9408030A@gmail.com)。

\*\*\* 國立交通大學環境工程研究所講座教授，[cjtsai@nycu.edu.tw](mailto:cjtsai@nycu.edu.tw)。

300  $\mu\text{m}$ 、K 值 23.3 LPM/  $(\text{kgf}/\text{cm}^2)^{1/2}$ 、放射壓力 12bar，與採用撒水時，水量 80LPM、粒徑 1200 $\mu\text{m}$ 、K 值 80LPM/  $(\text{kgf}/\text{cm}^2)^{1/2}$ 、放射壓力 1bar，採用細水霧情境較快達成滅火目的。在採用一般 HEPA 濾網時，伴隨 HEPA 濾網燒穿時，煙層將進入上回風層，此時只有設計在天花板下方的排煙口無法發揮排煙的效果，在上回風層與回風道增排煙口則可提供排煙的效果。

**關鍵字：**火災風險分析、PHA、半導體無塵室、防火工程、細水霧

## Abstract

Fire Risk Analysis and Computer Fire Simulation Analysis based on the operation of a semiconductor cleanroom are conducted to evaluate the effectiveness of using water mist fire suppression system as a replacement for sprinklers, in combination with smoke control by the cleanroom's air conditioning system. The fire characteristics of a cleanroom include long recovery periods for production lines, difficulties in rapidly recovering critical production machinery, lengthy environmental cleanup times, and significant operational losses.

Using an actual operational Class 2 semiconductor factory cleanroom as a reference, the analysis includes a literature review of disaster cases from other semiconductor companies and fire incident analyses of cleanroom fires in case study companies. This helps identify potential fire risks in the case scenarios. Preliminary Hazard Analysis (PHA), Dow F & EI (Dow Fire and Explosion Index) classification of flammability hazard, and relative hazard level analysis of semiconductor machinery are then conducted to confirm that the primary fire risk in the cleanroom is the use of flammable isopropyl alcohol (IPA) in wet cleaning machines.

Within the defined smoke partition area adjacent to the cleanroom, fire dynamic simulations are performed using the existing firefighting equipment, along with smoke exhaust and air conditioning operation modes. The simulations aim to assess the most severe scenario with complete smoke damage. During the simulation, it is assumed that all firefighting equipment in the wet cleaning area is ineffective, and the heat release rate remains at a maximum of 10 MW until the simulation concludes.

The use of a water mist fire suppression system as an environmental protection device in the cleanroom is discussed. In the simulation scenario, sprinklers in the model's

ceiling are replaced with water mist nozzles. The changes and effects on the fire scene environment are analyzed based on relevant parameters obtained from the Fire Dynamics Simulator (FDS) results, such as carbon monoxide concentration, visibility, temperature, and other factors. Optimal configuration schemes for various equipment (firefighting and air conditioning) are proposed under the interaction of these devices. This can serve as a reference for planning firefighting and air conditioning operation modes, as well as the implementation of water mist fire suppression system, in similar Class 2 semiconductor cleanroom facilities.

The use of flame-resistant grade HEPA filters prevents the smoke layer from entering the upper return air layer and spreading throughout the area before water is sprayed. When using fine water mist fire suppression, with a water flow rate of 80 LPM, particle diameter of 300  $\mu\text{m}$ , K value of 23.3 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>, and radiated pressure of 12 bar, the fire suppression objective is achieved more quickly compared to sprinkler systems with a water flow rate of 80 LPM, particle diameter of 1200  $\mu\text{m}$ , K value of 80 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>, and radiated pressure of 1 bar.

When using general HEPA filters, if the HEPA filter is burned through, the smoke layer will enter the upper return air layer. At this time, only the smoke exhaust vent located beneath the ceiling is ineffective in exhaust ventilation. However, the exhaust vents in the upper return air layer and return air duct can provide effective smoke exhaust.

**Key words:** Analysis of Fire Risk, PHA, Cleanroom of a Semiconductor FAB, Fire Protection Engineering, Water mist

## 壹、緒論

### 一、研究動機

半導體廠房之中潔淨區潔淨室為生產晶圓半導體的重要經濟命脈，潔淨區潔淨室中設置有許多昂貴設備，且因製程需求對環境的潔淨度依生產需求的要求，需達到潔淨標準等級，依據FM Global Property loss Prevention Data Sheets<sup>1</sup>說明在2007年至2017年中的損失調查統計，火災所造成的損失幅度仍為半導體製造業的

<sup>1</sup> FMGlobal. (2019). Property Loss Prevention Data Sheets.

主要損失原因之一，在過去的努力廣泛採用更高標準的規範及消防設備提昇、製程安全改善後，直接的財產損失已下降到總損失價值的 16.7%，80%以上的損失是因為關鍵的生產設備與環境在災後難以迅速修繕復原，導致長時間的生產中斷損失，當災害發生時中斷生產，經濟損失幅度大，災後潔淨室環境快速重新建立及無塵室環境的重新驗證亦有其難度，陳懋昆<sup>2</sup>指出一般半導體潔淨區若發生火災時，其恢復運作時間平均可達 18 個月。因此，若能在潔淨室生產區建立初期或使用中時，針對可能致災的火災危險因子進行分析，依實際生產廠房及環境進行模擬並檢核設計及設置之消防系統其涵蓋性與空調運轉設備火災時的搭配運轉模式，其降低災害範圍與嚴重程度之效果，最後針對消防設備設置及災時空調設備運轉搭配模式提出建議及分析，以期能有效降低災害發生時的經濟損失幅度。

探討案例以某半導體晶圓廠為例，做為模型規畫設計之藍本，評估潔淨區潔淨室所設置之排煙、潔淨室風機過濾組（Fan Filter Unit 風機過濾單元機組，簡稱 FFU）、撒水系統在火災發生時是否能達到預期的火勢控制及煙害控制效果，並比較若撒水系統改為設置使用細水霧滅火設備時，與撒水設備對同樣條件之火災模擬區域影響火場溫度及煙流之變化差異，提出設備最適配置及災時空調設備運轉搭配模式建議。

## 二、研究目的

- （一）藉由運作中的潔淨區做為藍圖，進行火災危害風險分析，確認出高風險機台及化學品後，以 FDS 火場模擬工具（Fire Dynamic Simulator 火災動態模擬軟體，簡稱 FDS）模擬觀察火災發生時火災熱釋率及煙流動狀況，並對模擬情境進行分析，進行火場中的煙流控制分析比較，提出災時空調設備運轉模式的搭配建議。
- （二）國內半導體晶圓廠潔淨區普遍採用密閉溼式自動撒水系統做為環境消防防護系統，本研究以細水霧系統取代自動撒水系統做為環境消防防護系統，比較若採用此二種不同滅火設備在排煙動作及不同運轉模式的空調設備搭配下，對火場煙流及熱釋率的影響，做為潔淨區消防設計及災時空調設備運轉模式的搭配參考。

---

<sup>2</sup> 陳懋昆（2013），濕式清洗台（Wet Bench）消防安全監控系統之風險評估——以某半導體廠為例，國立交通大學碩士論文。

### 三、研究範圍及研究限制

#### (一) 研究範圍

以下列區域作為研究模擬案例半導體晶圓廠潔淨室場景空間範圍：

1. 選定之廠房為地下一層，地上七層之建築物。
2. 地上六層潔淨室範圍內其中二相鄰防煙區劃進行火場模擬之探討。

#### (二) 研究限制

1. 以運作中半導體晶圓廠潔淨室既有設置之消防安全設備設置參數做為比較基礎。
2. 細水霧參數以市面上常用設備設置參數做為比較基礎。
3. 潔淨區中溼式清洗機台外部燃燒做為火源設定，溼式清洗機台內部消防滅火設備失效，考量最嚴重情境下模擬結果。
4. 研究工具以 Prysosim 2020.4 版本建模，其流場運算分析以 FDS6.7.4 版本做為火災模擬煙流之運算分析。

## 貳、文獻探討

### 一、潔淨室簡介

潔淨室<sup>3</sup>又常被稱為無塵室，並非真的沒有任何空氣中的微粒存在於該生產區域空間內，而是在生產區的空氣中微粒經過FFU達到生產所需要的條件，在一定的空間內對溫度、溼度、震動、噪音等環境因素做出控制並透過潔淨室專用空調過濾系統將空間中的微塵粒子過濾並排除。構成潔淨室應滿足的要件，如：能迅速去除空間中的微塵粒子、能防止生程過程中靜電的產生…等等。

根據ISO 14664-1<sup>4</sup>標準對潔淨室的定義如下：氣懸微粒濃度受到控制的房間，建造與使用避免微粒引入、產生與滯留，溫度、溼度與壓力等相關環境參數視需求予以控制。

---

<sup>3</sup> 許敏郎 (2005)，高科技潔淨室防火設計與現行法規適用性之研究，頁 5，第二章 2.1 何謂潔淨室 (clean room)。

<sup>4</sup> 國際標準化組織 ISO. (2015). ISO 14644-1:2015 潔淨室與相關的控制環境 - Part1: 空氣中微粒與其空氣潔淨度分級 (ISO 14644-1:2015 Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration)

## 二、潔淨室等級分類

最初採用做為潔淨室等級分類的美國聯邦標準 209E 於 1992 年 9 月發布，並於 2001 年 11 月停止使用，目前使用 ISO-14644-1，如下。本研究模擬區域的無潔淨室等級定義為 class 1000，級別相當於 ISO 3。

表 1 ISO 14644-1 無塵室標準

每立方米的粒子數						
級別	≥ 0.1 μm	≥ 0.2 μm	≥ 0.3 μm	≥ 0.5 μm	≥ 1 μm	≥ 5 μm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1,000	237	102	35	8	
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO 7				352,000	83,200	2,930
ISO 8				3,520,000	832,000	29,300
ISO 9				35,200,000	8,320,000	293,000

資料來源：ISO 14644-12015

## 三、砷化鎵微波積體電路製程階段介紹

化合物半導體的材料特性及製程階段說明如下圖 1 砷化鎵晶圓製程，砷化鎵（GaAs）為砷、鎵兩種元素所合成的化合物，其材料特性可做為高功率傳輸使用的半導體材料（第二類半導體）屬於 III-V 族元素的化合物，III-V 族化合物半導體由元素週期表 III-V 族之元素調配組合之化合物，如砷化鎵（GaAs）、砷化銦鎵（InGaAs）、磷化銦鎵（InGaP），常用於光電產品及微波通訊產品，如發光二極體（LED）、雷射二極體（Laser Diode）、及高速電晶體元件等。

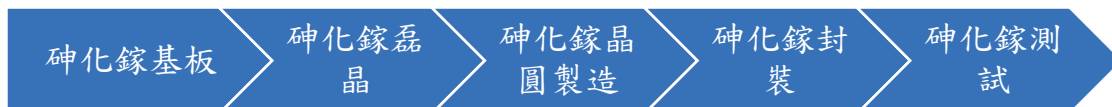


圖 1 砷化鎵晶圓製程

半導體依發展階段可分為第一類半導體到近期因無線通訊、人造衛星、電動車快速充電高壓高頻需求的第三類半導體，第一類半導體材料是「矽」(Si)、「鍺」(Ge)，第二類半導體是「砷化鎵」(GaAs)和「磷化銦」(InP)，第三類半導體主流材料為「碳化矽」(SiC)和「氮化鎵」(GaN)。

第一類半導體材料以矽(Si)及鍺(Ge)為主，發展較久在各領域使用量大且先進製程進步，目前主流的晶圓尺寸為 12 吋~18 吋晶圓為主，可以在生產同一片晶圓的過程中得到更多的晶片，隨著更大的晶圓尺寸及製程升級，裝有更大尺寸晶圓的製程晶舟盒也代表著重量亦隨之提升，為了更安全的運送效率及逐漸超過人工搬運重量限制的原因，12 吋以上晶圓廠，大部份皆有設自動化物料搬運系統之規畫設計及使用(Automatic Material Handling System, AMHS)，其中無人搬運車軌道將造成潔淨區中防煙區劃完整的不易維持。

第二類半導體為化合物半導體，材料以砷化鎵(GaAs)及磷化銦(InP)為主，主要應用在無線通訊、人造衛星、手機功率放大器……等應用，目前主流的晶圓尺寸為 6 吋晶圓為主，產品特性上量少多樣化，且化合物半導體融合兩個不同化學元素，又必須做到晶圓表面均勻一致融合，晶格不一樣都造成製造上的困難，第二類半導體晶圓薄硬且脆，生產過程中極容易造成破片，目前製程上考量材料特性易碎，及產品生產量少(與第一類矽半導體數量相比而言)所採用的潔淨室形式多以單層式潔淨室為主，在考量潔淨室建築構造上較 12 吋晶圓廠樓高較低、經濟性、材料特性等諸多原因，6 吋晶圓在重量上較輕及潔淨室樓層淨高較低，目前並未採用自動化物料搬運系統，潔淨區中的防煙區劃，較有自動化物料搬運系統之晶圓廠易維持，半導體類別特性如下表 2 半導體類別特性：

表 2 半導體類別特性

類別	第一類半導體	第二類半導體	第三類半導體
原料	矽(Si)、鍺(Ge)	砷化鎵(GaAs)、磷化銦(InP)	碳化矽(SiC)、氮化鎵(GaN)
應用	CPU GPU 記憶體	光纖到府(光纖通訊) 資料中心(資料傳輸) 3D 感測(擴增/混合實境) 5G 基礎建設 車用光電	人造衛星、電動車 快速充電 國防、航太工業、汽車、消費電子 5G 基地台、低軌衛星
晶圓價格	便宜	貴	貴

類別	第一類半導體	第二類半導體	第三類半導體
特性	成本低 用途廣 供應鍊成熟	高頻、低雜訊、高效率及低耗電	抗高電壓、高頻

資料來源：本研究整理

#### 四、半導體製造業各種損失可能性介紹

依據 FM Global Property loss Prevention Data Sheets FM Global Reported Losses, 2007-2017 說明在 2007 年至 2017 年中的損失調查統計(如表 3 FM Global Reported Losses, 2007-2017)，火災所造成的損失幅度仍為半導體製造業的主要損失原因之一，佔總損失價值的 30.1%，災害發生造成實際財產損失與生產時間中斷損失，火災在潔淨室生產環境中，因過去 25 年廣泛採用以下規範：FM 4910、FM4922、SEMI S2, SEMI S14, and FM 7701，已得到顯著的改善。

表 3 FM Global Reported Losses, 2007-2017

Reported Peril	% of Total Losses by	Average % of Loss Due to Property Damage	Average % of Loss Due to Time Element
Service Interruption	35.5%	23.2%	76.8%
Fire	30.1%	16.7%	83.3%
Escaped Liquids Damage	23.0%	22.9%	77.1%
Sprinkler Leakage	4.7%	70.2%	29.8%
Electrical Breakdown	3.0%	33.3%	66.7%
Explosion	2.7%	51.5%	48.5%
Impact	0.9%	99.7%	0.3%
Miscellaneous	0.3%	100.0%	0.0%

資料來源：FM Global 2019<sup>5</sup>

現階段火災造成鉅額損失的主因，在過去的努力及消防設備提昇、製程安全改善後，直接的財產損失已下降到總損失價值的 16.7%，更多的損失還是因為關鍵的設備在災後難以修繕復原，導致長時間的生產中斷損失。

<sup>5</sup> FM Global. (2019). Property Loss Prevention Data Sheets. 美國: Global, FM



## 五、國內科技廠火災案例分析

半導體廠房對生產線潔淨度要求高，具有高頻率的換氣過濾機組及挑高空間以安裝層流風機捕捉空氣中的微粒，潔淨度要求，在潔淨區有氣密規範，製程上大量使用化學品進行生產製造。在火災危害特性如下說明：易燃性液體快速延燒造成的災害（如：溼式清洗台造成之火災案例）、易燃性氣體快速延燒造成的災害（除了燃燒特性外，尚須考量其毒性對人體的危害）、電器設備造成的災害（多樣複雜生產設備）、一般可燃物造成的災害、煙害。製程環境上的需求，半導體廠房在空間特性上有別於一般生產作業廠房，自火災預防及應變的角度，潔淨區空間特性可歸納如下：廠房大人員密度小、防火防煙區劃設計特殊，人員管制關卡多，進入搶救不易、生產設備密集且長時間連續運轉不停、製程上採用高溫程序多、管線錯綜複雜、產線使用化學物品種類繁多且燃燒易生毒性。

在生產砷化鎵晶圓廠房與生產矽晶圓廠房相比較，因產品特性關係，則有廠房相對而言較小，人員密度相對較高，由於產品生產特性少量多樣化，實務上無建置頭頂搬運系統之必要性。

在 1990 年代中，台灣曾發生多起晶圓廠大火，經濟損失大，如：台積電、天下電子、華邦電、聯瑞... 等公司皆曾發生火災災情，上述晶圓廠因受到客戶及投資人關注，考量建廠成本高，投入大量金錢與人力在提昇工安品質，時至今日，台灣晶圓廠已成為科技業工安實施的模範，也甚少再傳出如 1990 年代的嚴重火災事故，而在傳統的印刷電路板廠，則因工廠老舊，設備未與時俱進，近期仍傳出多次火災案例，而影響營運甚鉅。雖然台灣晶圓廠事故率已隨工安意識抬頭及消防法規完備而有效降低事故之發生機率，潔淨區於火災後難以快速復原投入生產，停業損失大等特性依然未變，若能於現有基礎之上，再進一步研擬災時空調消防設備防災運轉對策，進而侷限致災範圍仍有探討之必要。國內保險公司富邦產險損害防阻暨勞工安全衛生部統計最近 20 年來商業火險理賠統計資料中，也顯示出國內科技廠火災事故中以溼式清洗台佔 30% 最多，其次是工業烤箱等加熱設備 20% 次之，其它災因則有待機中的電器設備短路等因素。本研究整理說明表 4 近二年國內外科技廠火災案例統計。

表 4 近二年國內外科科技廠火災案例統計

近二年國內工廠火災案例						
序	事故時間	事故公司	產業類別	災害類型	災害原因	地區
1	2022/1/15	致佳科技	其他半導體相關業	火災	2樓製程區起火	新竹
2	2021/3/29	強茂半導體	半導體製造業	火災	4樓電機室機械設備燃燒	高雄市岡山區
3	2020/10/28	欣興電子三鶯廠	PCB廠	火災	空調機房起火	桃園市龜山區
4	2021/2/4	欣興電子三鶯廠	PCB廠	火災	廠商切割管線時的火花，導致塑膠包材起火	桃園市龜山區
5	2020/10/11	復揚科技	軟性印刷電路板	火災	2樓電鍍室內的保溫設備起火	新竹新豐
近二年國外工廠火災案例						
序	事故時間	事故公司	產業類別	災害類型	災害原因	發生國家
1	2020/12/14	日本電氣硝子	玻璃基板廠	停電	意外停電5小時玻璃熔爐受損	日本高槻市
2	2021/1	日本旭硝子韓國龜尾廠	玻璃基板廠	爆炸	維修工程時管道上的剩餘氣體發生爆炸	韓國
3	2021/3	日本瑞薩電子	半導體製造業	火災	電鍍槽設備起火	日本
4	2020/9	昆山鼎鑫電子	PCB廠	火災	頂樓設備起火	中國大陸
5	2020/10	日本旭化成延岡製造所	半導體製造業	火災	有機溶液爆炸	日本

資料來源：本研究整理

## 六、溼式清洗台災例及案例公司火災事故分析

關於溼式化學機台<sup>6</sup>使用化學品造成起火事故，可分為以下三種情況，第一：溼式清洗台加熱裝置的保護裝置失效造成持續加熱引燃易燃性液體，第二：操作過程中產生腐蝕性氣體，長期下使電器設備因氣體侵蝕造成故障而引火，第三：化學品使用上造成互相反應起火。

對過往溼式清洗台災例<sup>7</sup>及原因進行分析，使用大量的化學品做為製程使用，使用耐腐蝕的PP及PVC做為溼式清洗機台主要製造原料，製程上使用加熱設備。相關災例如下：表 5 近年案例公司火災事故一覽表所列：

表 5 近年案例公司火災事故一覽表

發生時間	部門	設備	事故原因	改善對策
20YY/M/DD	ABC	A01	化學品起火	1.先將漏液 完成補強。 2.將管路區內訊號線檢查及整理並包覆鐵氟龍膠帶。 3.檢視其它溼蝕刻設備，是否有類似情況並立即改善。

<sup>6</sup> 張力夫、張翼（2016年11月），八吋晶圓廠溼式清洗機台安全性再探討與改善，工業安全衛生月刊，頁17-39。

<sup>7</sup> 李立成，腐蝕性物質造成科技工廠溼式化學設備電器起火案例分析，消防署月刊，p72-78，2009年8月號。

發生時間	部門	設備	事故原因	改善對策
20YY/M/DD	ABC	A02	靜電起火	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.各系列具壓力噴射溶濟之機台進行接地系統檢查</li> <li>2.修改 重新進行接地系統檢查</li> <li>3.安裝接地系統失效顯示器</li> </ol>
20YY/M/DD	ABC	A03	加熱器起火	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.檢查並重新設定加熱器過溫保護跳脫條件，確保加熱器棒過溫時，確實啟動過熱跳脫開關。</li> <li>2.降低斷路器跳脫容量，確保加熱棒電流過高時，啟動斷路器跳脫。</li> <li>3.各個加熱棒電源端加裝保險絲，避免過電流意外發生。</li> </ol>
20YY/M/DD	ABC	A04	靜電起火	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.設計清洗光罩不鏽鋼，所有治具皆改用可導電治具並接地使用。</li> <li>2.修訂製程規範，使用 清洗作業時必須在 內作業且需要有沖洗才可以執行。</li> <li>3. 修改成與其他廠區相同型式，並接上靜電接地監控。</li> <li>4.將使用中的工作桌及腳踏板接上靜電接地。</li> </ol>
20YY/M/DD	ABC	A05	化學品起火	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 將 門板更換為防爆玻璃，替換機台內可燃燒零件為不可燃，降低燃燒風險。</li> <li>2.清潔桶槽前先將桶槽內殘留製程反應物進行蒐集（以集碟桶收集）</li> <li>3.清洗槽增加防護金屬擋板，提高防護效果。</li> </ol>
20YY/M/DD	ABC	A06	化學品起火	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.管路拆除作業前拆除該機台所有特殊氣體供應並抽空管路。</li> <li>2.拆 前後需確認管路及 洩露率，確認施工過程並無毀損其它零件及管路。</li> <li>3.若發生洩露，立即按壓該機台相對應之閥箱上 開關。</li> <li>4.建立特氣管線維修拆裝管控機制：三方會驗。</li> </ol>

發生時間	部門	設備	事故原因	改善對策
20YY/M/DD	ABC	A07	化學品起火	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 槽體改為無排水口利用抽取方式，汲取到攔磷槽過濾後再排放到沉澱槽。</li> <li>2. 沉澱槽更改設計（增加濾網），外部再製做不鏽鋼隔板阻隔。</li> <li>3. 溢流槽出水口銜接廠務端，增加管路設計加強水封效果。</li> <li>4. 至廠務端排水管路，更換為不鏽鋼材質。</li> <li>5. 作業處理程序增加：執行作業完成後，加入清水稀釋沉澱槽。</li> </ol>
20YY/M/DD	ABC	A08	化學品起火	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 取消 噴洗製程。</li> <li>2. 加裝 系統。</li> <li>3. 槍座更換為金屬材質，接地並修改噴洗作業流程。</li> <li>4. 修改拉門作業區，將作業人員作業時與有機槽體隔離。</li> </ol>
20YY/M/DD	ABC	A09	化學品起火	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 全區段加熱帶包覆管路進行完整性檢查。</li> <li>2. 每個管道與加熱帶做一對一的溫度控制設計。</li> <li>3. 加熱帶電源加裝漏電保護斷路器（第二道保護），加裝第二道過溫度保護。</li> <li>4. 加熱帶保溫棉改採用不燃材料包覆，並平行展開施做與檢查。</li> </ol>

資料來源：本研究整理

## 七、潔淨區法規比較

依照國內消防法規，一般場所採用各類場所消防安全設備設置標準<sup>8</sup>作為消防設備設計之依據，而國內高科技廠房（電子工業廠房潔淨區）因生產環境條件需要及製程特殊需要而在建築構造特殊時，則可採用潔淨區消防安全設備設置要點<sup>9</sup>為消防設備設計之依據。

<sup>8</sup> 中華民國內政部消防署，各類場所消防安全設備設置標準，110年6月25日[線上]。

<sup>9</sup> 中華民國內政部消防署，潔淨區消防安全設備設置要點，105年11月7日發布，2022年[線上]。Available: <https://www.nfa.gov.tw/cht/index.php>。

本研究對象在實務上，建照於 2013 年取得，並受保險公司要求採取 NFPA、FM 做為撒水與排煙設備之檢討，在國內為符合法規要求則以各類場所消防安全設備設置標準作為法規檢討，採行國外標準檢討部份設置之設備優於各類場所消防安全設備設置標準之要求（如：設置標準中撒水為免設，案例依 FM 規範檢討設置）本研究對象為 6 吋晶圓廠採用單層型式潔淨區構造，有著類似於 12 吋晶圓廠的三層式構造設計：上回風層、潔淨室、下回風層及回風豎井等構造，因化合物半導體製程上特性採用更多樣化學品，產品特性為少量多樣化，無設置 12 吋及 8 吋晶圓廠採用的自動物料搬運系統之設置，在檢討防煙區劃時採用各類場所消防安全設備設置標準之規定。在下回風層構造上是以具有透空率的高架地板取代洞洞樓板（洞洞樓板法規名稱為格子樓板）以下依照潔淨區消防安全設備設置要點中對於九項應設置的消防安全設備與各類場所消防安全設備設置標準作比較，下表為模擬案例消防設備現況與相關國內外法規規範比較。

案例設置現況與潔淨區消防安全設備設置要點法規比較表

項次	設備名稱 (設備種類)	設置現況： 各類場所消防安全設備設置標準、NFPA、FM	國內法規： 潔淨區消防安全設備設置要點
1	二氧化碳滅火器	潔淨室、回風道	潔淨室、下回風層、管橋
2	室內消防栓設備	潔淨室	潔淨室、下回風層、管橋
3	密閉濕式自動撒水設備	潔淨室、上回風層、回風豎井	潔淨室、上回風層、下回風層及回風豎井頂部 撒水頭型式：快速反應型（第一種感度）撒水量/撒水密度 8.15L/m <sup>2</sup> /min 以上
4	風管撒水	其材質為可燃 PP 材料，且排氣導管內最大截面積在 0.048m <sup>2</sup> 以上時，導管內部有設置。	排放易燃性氣體之排氣導管，其材質非不燃材料，且排氣導管內最大截面積在 0.048m <sup>2</sup> 以上時，導管內部應設。撒水量/撒水密度 1.9L 以上/m <sup>2</sup> /min
5	手動報警設備	潔淨室	潔淨室、下回風層、管橋
6	火警自動警報設備	潔淨室、上回風層、回風豎井	潔淨室、上回風層、下回風層、管橋
7	吸氣式偵煙探測系統	回風豎井	潔淨室、上回風層、下回風層、管橋

項次	設備名稱 (設備種類)	設置現況： 各類場所消防安全設備設置標準、NFPA、FM	國內法規： 潔淨區消防安全設備設置要點
8	標示設備	依各類場所消防安全設備設置標準	潔淨室、下回風層、管橋
9	排煙設備	依各類場所消防安全設備設置標準設置，依設置標準檢討防煙區劃。	潔淨區應依各類場所消防安全設備設置標準第二十八條規定，檢討設置排煙設備。但符合下列各款規定者，免設排煙設備： 1. 防火構造建築物。 2. 避難步行距離符合建築技術規則設計施工篇第 93 條規定。 3. 設有吸氣式偵煙探測系統。 4. 設置自動撒水設備潔淨區設置排煙設備，因自動物料搬運系統作業需求，得免防煙壁區劃。

資料來源：本研究整理

## 參、研究內容與方法

### 一、研究流程及研究方法

案例將依序以初步危害分析、Dow F & EI (道氏火災爆炸指數) 易燃性值火害等級區分、半導體機台相對危害等級分析判斷出案例中的重大危害化學品及使用此化學的製程區域及機台，並以火災模擬軟體。探討案例中先以初步危害分析，檢核表 A 物質危害檢核表、檢核表 B 物質相容性檢核表、檢核表 C 處理方法檢核表，經過檢核表 ABC 分析之後，再進行系統作用危害分析以找出案例中的重大潛在危害區域。探討案例中再以 Dow F& EI (道氏火災爆炸指數) 中易燃性值做為火害等級區分，對廠區中使用量大存量、易燃性值等做排序，找出具有最大火災爆炸害風險的化學品。

最後以半導體機台相對危害等級分析法，分析案例中溼式清洗機台潛在可能的火災危害因子，半導廠災害主因常是因為製程中化學物品的洩露，而化學物品的洩露所造成的危害主要有二種：第一種危害是化學物品本身的毒性，第二種危害是化學品洩露造成的火災及爆炸，此方法在評估時，考量下面五種因子：物質

本質危害、蒸氣量、通風系統、製程危害、人員/設備財產曝露。案例探討以第二種危害化學品洩露造成的火災及爆炸為主要探討危害問題，來分析評定機台相對危險性大小，依以下五個步驟依序評估火災及爆炸危害：

- (一) 機台使用化學品中易燃性(Nf)最高之物質作為評估火災爆炸危害之物質。
- (二) 以火災爆炸危害指數中所列五項危害因子分別評比每一危害因子等級。
- (三) 將五項危害因子危害等級級數相乘，既可得到火災危害爆炸指數。
- (四) 根據火災爆炸危害等級所定範圍分級，即可得到火災爆炸危害等級。
- (五) 依據機台危害程度指數範圍對應出此機台之危害程度：高、中、低。

## 二、PyroSim 2020.4 及 FDS6.7.4 介紹說明

本研究採用 PyroSim 2020.4 版本做為模擬場景建模之工具，其使用 FDS 6.7.4 版本做為火場模擬後運算工具，FDS 是美國國家標準暨技術研究院（National Institute of Standards and Technology，簡寫為 NIST）發展之火場模擬軟體，經由 FDS 進行火場模擬情境之運算後再以 SMV 視覺化呈現模擬結果，使得可根據結果做出直觀分析。

PyroSim 火災環境模擬軟體，NIST 研發專用用於火災動態模擬的軟體。[26 在 pyrosim-results-user-manual-2020-4 版本說明中提及，在模擬參數選單之中提供四種模擬類型供模擬上選擇，共有二類，第一類為大漩渦計算模擬，大漩渦計算模擬又分三種模擬類型：Large-Eddy (LES)、Very Large-Eddy (VLES)、Simple Very Large-Eddy (SVLES)；第二類為直接計算數值模擬：Direct Numerical (DNS)。本研究模擬時採用大漩渦計算模擬中的第二種模擬類型 Very Large-Eddy (VLES)。

FDS是NIST發展的火場熱流計算模擬軟體，經由PyroSim輸入建模參數，透過即時的可視化建模，可在建模開始與進行的過程中，發現模型的缺漏，減少模型建立的錯誤與摸索的時間，模型建立後，經由FDS進行運算，並經由SMV呈現出模型的視覺化模擬成果。沈信錡<sup>10</sup>指出，FDS是NIST美國國家標準暨技術研究院（National Institute of Standards and Technology，簡寫為NIST）發展的低馬赫的火災流體力學計算程式，以場模式計算三維空間中的火災行為，FDS計算運作方式是先將整個空間分割成許多細小的格點，再以質量、動量、能量、燃燒與熱傳守恆

---

<sup>10</sup> 沈信錡，防火性能式設計法應用於音樂廳之防火安全設計，國立交通大學 機械工程學系學術論文，2010。

等統御方程式求解。計算完成後，在利用後處理軟體Smokeview將模擬情境結果以動畫方式輸出，也可依需求進行靜態剖面圖、ISO圖、特定點位結果呈現。FDS將建築物內之煙控系統，如：排煙、HVAC、MAU，依特定設計條件，計算空間火災時煙流之影響，FDS廣泛應用在學術研究及工程設計實務上。

在使用 FDS 時必須先輸入指令文字檔 (\*.data)，內容包含模擬之幾何形狀、材料特性、火源大小、排煙設備、補氣口、大氣溫度、模擬時間以及邊界條件…等，再由 FDS 軟體開始計算，由於 FDS 並沒有將流場可視化之功能，需再利用 Smokeview 程式來讀取 FDS 所計算出之數據來做進一步的分析。現階段建模時，已採用前端輸入軟體 PyroSim 做為模擬場景建模之工具，其界面接近工程上常用的 CAD 繪圖軟體使用方式，使用上較為直觀，使用者也不須背誦指令即可建模，建模場景也呈現 3D 立體可視化的界面，在未經運算之前，就可以看出整體空間的規劃是否符合需求設計的場景，使得在建模程序上大大節省使用者時間及降低出錯的機率。

### 三、模擬潔淨室區域模型建置及參數說明

模擬潔淨區域模型建置，在使用 FDS 做為火災情境模擬時，一般建立模型的步驟如下：

- (一) 網格建立。
- (二) 網格精準度分析。
- (三) 基礎物理條件及模型邊界條件設置。
- (四) 基本假設。
- (五) 定義模擬參數。
- (六) 定義模型尺寸。
- (七) 定義探測設備位置。
- (八) 定義火源參數。
- (九) 定義火場控制消防系統設備。(本研究為：排煙、撒水、細水霧)
- (十) 定義探測設備。(煙遮蔽率、煙層下降高度、火場溫度、能見度、CO 濃度)
- (十一) 定義探測點位置。

在決定模擬場景範圍之後，就要進一步決定每個網格的大小，單一網格尺寸愈小時，則理論上流場的運算將愈精準，也連帶將影響電腦的運算速度更慢，使得模擬運算時間因而加長，為了兼顧運算速度的成本效益及流場模擬時的精準



度，一般在決定網格尺寸大小時，將參考火源特徵（ $D^*$ ）直徑公式，來找出最適當的單一網格尺寸大小範圍區間。本研究採用模型網格大小：50cm (X) × 50cm (Y) × 50cm (Z)，網格數量共為 85,560 格，其中 X cells:46，Y cells:124，Z cells:15。網格劃分（Meshes），在網格設定方面以全區一致的網格基礎做為模型設定，尺寸為 23m (X) × 62m (Y) × 7.5m (Z)。本次模擬以 0.5m\*0.5m\*0.5m 格點大小尺寸進行模型設定，總網格數為 85,560 個，模擬場景如下圖 2 模擬模型場景說明：

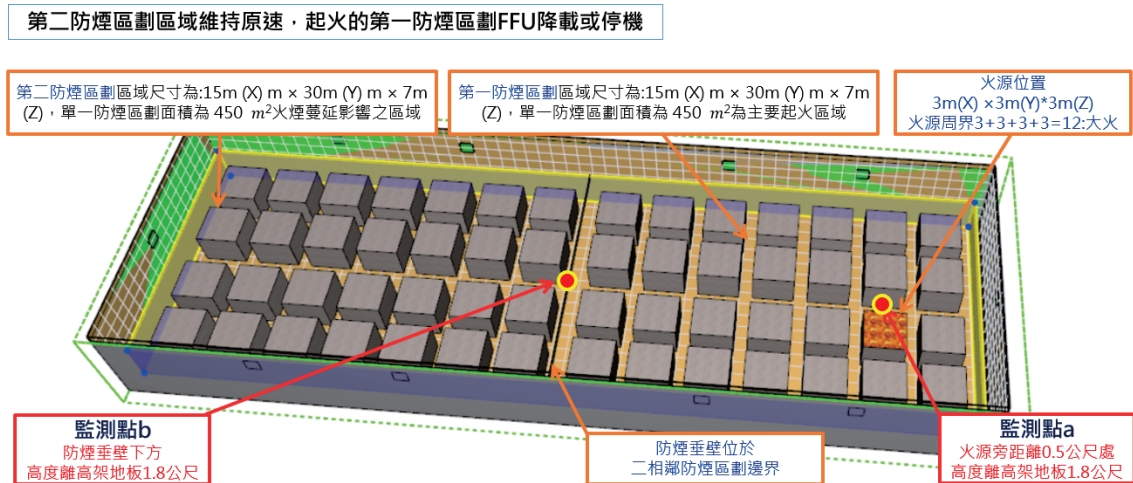


圖 2 模擬模型場景說明

在評估網格的選用時，需進行網格精準度分析，FDS 模擬時要先建立整個模型場景定義域的大小，確定模型場景大小之後，要進行格點尺寸的設計，格點尺寸的考量除了與火源大小習習相關之外，也必須考慮場景中各物件（Obstruction）及表面（Surface）的尺寸、偵測點的設置位置…等等因素，設定格點要能夠對齊物件，各物件的尺寸，在模型建立時，採用為格點的倍數，可避免模型運算時發生錯誤而造成時間的浪費及模型除錯時耗費更多心力，而又無法找出造成運算錯誤的原因。

在建築物火災模擬工具應用參考指南之研究中指出：「格點尺寸與火源有著密切關係。格點尺寸與火源尺寸有密切關係，但模擬完成前火源尺寸不一定有明確的大小，例如：居室火災將沒有明確的火源尺寸，但圓形油盤火災將有明確的火源尺寸。此外，大型空間時會採用不均勻格點設計，其中應針對最小格點尺寸進行格點分析。」

本研究中模型格點分析依建築物火災模擬工具應用參考指南之研究<sup>11</sup>採用的方法，以火災特徵直徑（D\*）來進行格點評估，公式說明如下公式 1 火災特徵直徑（D\*）：

D\*為火災特徵直徑（m）

Q 為熱釋放率（kW）

$\rho_{\infty}$  為空氣密度（kg/m<sup>3</sup>）

$C_p$  為空氣比熱（J/kg-°C）

$T_p$  為環境溫度（K）

g 為重力加速度（m/s<sup>2</sup>）

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_{\infty} C_p T_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} \text{ (公式 1)}$$

特徵直徑（D\*）及格點尺寸（ $\delta x$ ）之比率介於 5~10 時，即為 0.1~0.2 D\*，模擬時可較精準，運算上較為快速等好處。本研究中模擬的熱釋放率（HRR）為採用 FMRC 溼清台燃燒試驗為 10MW，環境溫度為 22°C 計算如下：

$$D^* = \left( \frac{10000}{1.204 \times 1.005 \times 295 \times \sqrt{9.81}} \right)^{2/5} = 2.40m$$

格點尺寸（ $\delta x$ ）之比率建議為介於 0.1~0.2 D\* 換算尺寸為 24cm~48cm，格點設計之大小最終採用相近的 50cm 做為本模型的格點尺寸大小之建立。對於監測點 a 火源旁距離 0.5 公尺處距離高架地板 1.8 公尺，進行格點尺寸為 25cm 與 50cm 的比較探討，可見下方圖 11 拼接網格 mesh=0.25 與 mesh=0.5 H=2.8M 溫度比較圖。

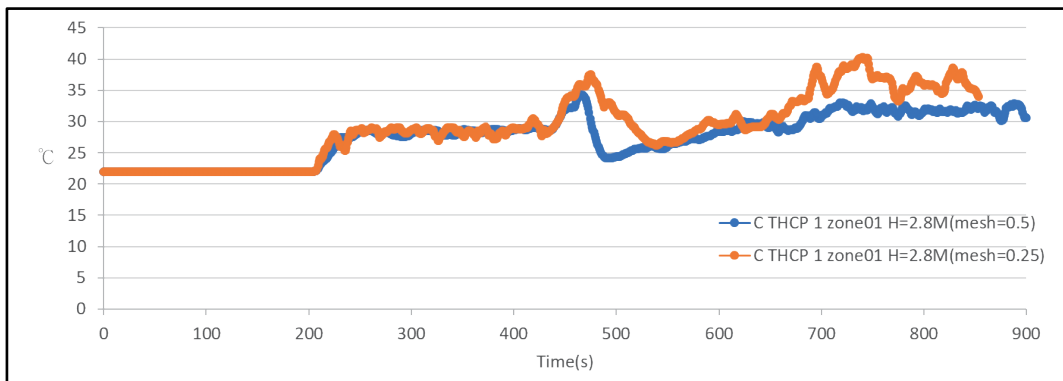


圖 3 拼接網格 mesh=0.25 與 mesh=0.5 H=2.8M 溫度比較圖

資料來源：本研究繪製

<sup>11</sup> 蔡綽芳、蔡匡忠、雷明遠、蔡銘儒、羅啟文、蘇崇輝、鐘偉庭、陳盈月，建築物火災模擬工具應用參考指南之研究，內政部建築研究所，台北市，2015。

在 HRR 的部份呈現出相同的趨勢表現並且呈現出收斂的狀況，25cm 的網格建立採用拼接網格的方式處理模型，在接近火源區域採用 25cm 的網格，在第二防煙區劃採用 50cm 的網格，採用拼接網格的方式，是因為在流場較複雜區域採用小網格讓流場計算較為準確，而在流場相對單純的區域採用較大網格可節省模型運的時間。50cm 的網格建立則採用均勻一致網格的方式處理模型，優點是總網格數目較少，在進行多種情境模擬的狀況之下，可取得時間經濟上的優勢。在網格測試過程中發現小網格在熱釋率上與大網格趨近一致，且大網格 (mesh=0.5m) 在模擬時間的 900 秒之中，可完整運行完成，而拼接的小網格 (mesh=0.25) 則在 853 秒時，發生運算數值錯誤停止運行，HRR 比較可見下方圖 4 拼接網格 mesh=0.25 與 mesh=0.5 HRR 比較圖。

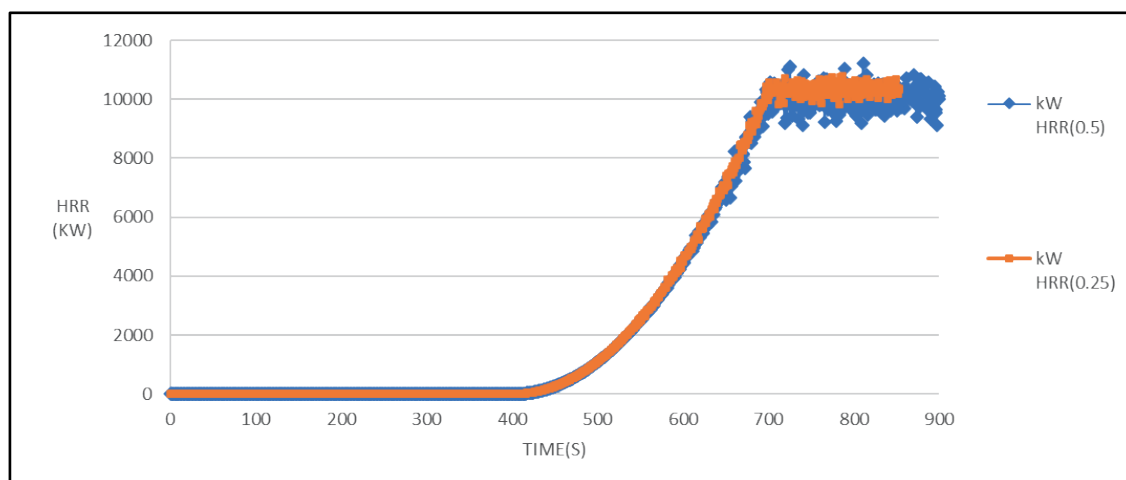


圖 4 拼接網格 mesh=0.25 與 mesh=0.5 HRR 比較圖。(資料來源：本研究繪製)

拼接的小網格 (mesh=0.25) 網格總數為 288,420 格，大網格 (mesh=0.5m) 網格總數為 85,560 格，拼接的小網格由二區網格組成 (mesh=0.25、mesh=0.5)，可見下方圖 5 拼接網格 (mesh=0.25) 設定畫面、圖 6 拼接網格 (mesh=0.5) 設定畫面。在考量二種網格結果趨近一致，且大網格可完整運算完成，符合時間效益的前題之下，研究中後續的模建網格建立皆採用 50cm 網格做為基礎 (mesh=0.5m)。

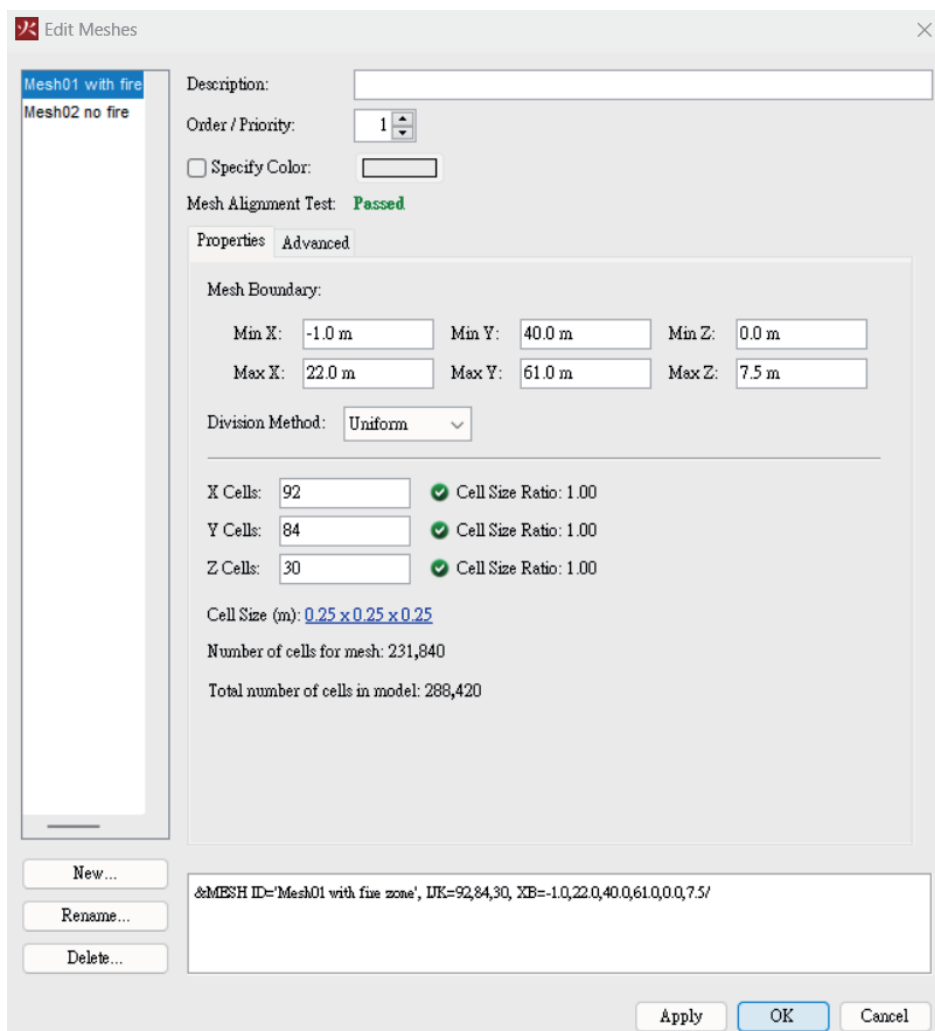


圖 5 拼接網格 (mesh=0.25) 設定畫面 (資料來源：本研究繪製)

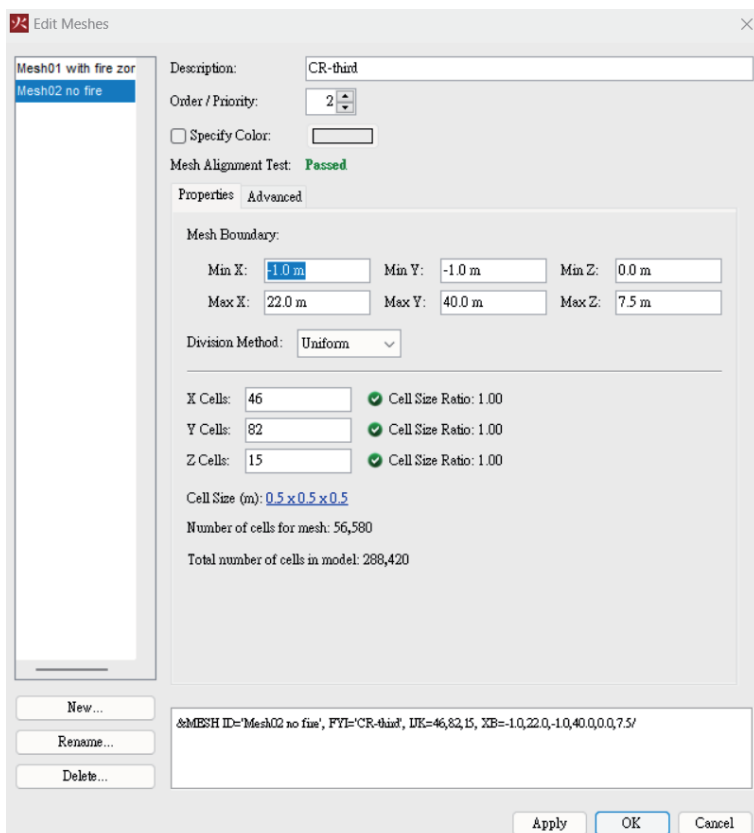


圖 6 拼接網格 (mesh=0.5) 設定畫面 (資料來源：本研究繪製)

模擬模型火源設定：火場火源設定，以晶圓製程蝕刻區溼式清洗機台使用之異丙醇 (IPA) 做為火源設定。化學品使用機台作業內容，蝕刻區溼式清洗機台使用超純水 (DIW) 沖洗晶圓與稀釋化學品及、使用異丙醇 (IPA) 做為晶圓蝕刻洗淨與乾燥使用。假定火源離地高度 3 m 的溼式清洗機台上部點燃，燃燒熱釋放率以 FMRC 溼式清洗台燃燒實驗，在燃燒 300 秒後達到最大熱釋率 10MW 做為基準，10MW 熱釋率分布在 3m (X)×3m (Y)為 9 m<sup>2</sup>的面積上，熱釋率設定為 (HRRPUA) 1,111 kW/m<sup>2</sup>，見圖 3FMRC 溼式清洗台外部熱釋放率基準-於燃燒 300 秒達到最大熱釋率 10MW (資料來源：G. FM, “Property Loss Prevention Data Sheets 7-7 17-12-SEMICONDUCTOR FABRICATION FACILITIES,” Factory Mutual Insurance Company, 2003.) 說明。

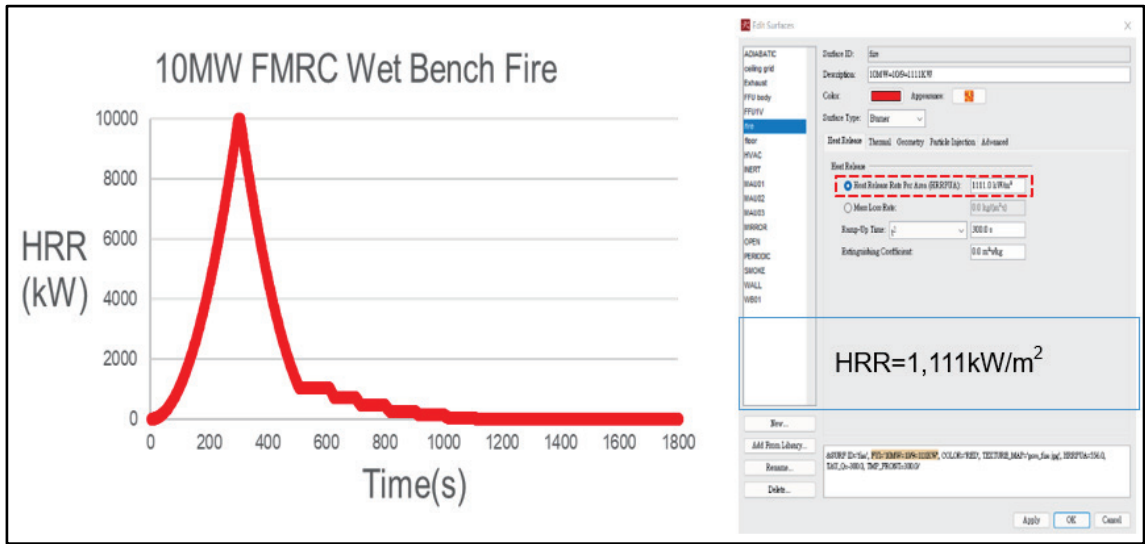


圖 7 FMRC 溼式清洗台外部熱釋放率基準—於燃燒 300 秒達到最大熱釋率 10MW

資料來源：G. FM, “Property Loss Prevention Data Sheets 7-7 17-12-SEMICONDUCTOR FABRICATION FACILITIES,” Factory Mutual Insurance Company, 2003.

定義燃燒反應：依IPA異丙醇特性選擇乙醇蒸汽燃燒 (ETHANOL VAPOR) 做為燃燒反應之設定，IPA為工業酒精其燃燒反應較接近乙醇燃燒，在滅火係數 (extinguishing coefficient, 簡稱EC) 模擬時採用  $DPS^{12}=5,000$  (每秒液滴數量 droplets per second, 簡稱DPS)、 $EC=1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s/kg}$  的設定，滅火係數設定愈大，則滅火速度愈快，採用  $EC=1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s/kg}$  的設定，在模擬時滅火速度較慢，評估上較為保守慎重。

火源採  $T^2$  火災成長，火災成長型態為快速成長，火災成長常數 K 值設定為 95，以 FMRC 溼式清洗台外部熱釋放率基準，於燃燒 300 秒後達到最大熱釋率 10MW，前 200 秒為無塵室流場穩定時間，火源自 201 秒開始燃燒，於 501 秒達穩態燃燒 10MW 直至模擬時間終了。

模擬潔淨室區域模型建置時的參數設定，探討案例實際設置條件為基礎，彙整說明如下表 6 模擬模型參數設定說明所示：

<sup>12</sup> J. Lee, “Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist” Nuclear Engineering and Technology, vol. Nuclear Engineering and Technology 51, pp. 410-423, 2019.



表 6 模擬模型參數設定說明

項目說明	詳細設定說明	
用途	潔淨室(clean room)	
場景尺寸(X*Y*Z)	20 m*60 m *7 m	
火源	最大熱釋率	10MW
	滅火相關係數	EC=1.0 m <sup>2</sup> ·s/kg(extinguishing coefficient )
	燃料	IPA(異丙醇)
	火源面積	3 m*3 m=9 m <sup>2</sup>
相關模擬參數	環境起始溫度	22°C
模擬時間		900秒
滅火設備	撒水	密閉溼式撒水頭、噴頭流量80LPM、K值=80、防護間距3m RTI(撒水頭反應動作時間指數)=28 m <sup>1/2</sup> sec <sup>1/2</sup> 、有效防護半徑2.3m、感熱元件玻璃球、第一種感度60秒內動作、動作溫度68°C，水滴粒徑1200um
滅火設備	細水霧	密閉溼式細水霧撒水頭噴頭流量20LPM、K值=5.82、防護間距3m RTI(撒水頭反應動作時間指數)=28 m <sup>1/2</sup> sec <sup>1/2</sup> 、有效防護半徑2.3m、感熱元件玻璃球、第一種感度60秒內動作、動作溫度68°C，水滴粒徑300um
消防搶救上必要設備	排煙	排煙口尺寸:1m <sup>2</sup> 、排煙口設置於防煙區劃中央、依偵煙探測器連動啟動、排煙口:風量150CMM
警報設備	偵煙式探測器	採用光電式局限型1種偵煙式探測器(散亂光型、無蓄積功能)，遮蔽閾值3.28%/m與排煙連動啟動排煙口與風機。

資料來源：本研究整理

#### 四、模擬分析架構

以溼式清洗台做為假定燃燒的火源設定，分為三階段共十七種模擬情境進行模擬：

第一階段：比較市面常用細水霧與模擬案例實設撒水差異（HEPA 採一般濾網 94°C）。

第二階段：探討消防設備調整後，達成 HEPA 濾網不燒穿的消防設備參數調整。

第三階段：探討火源位置若調整至工作檯面高度（距高架地板一公尺），火源為表面火災，觀察對人命安全基準的影響。

將三階段模擬情境彙整如下表 7 模擬情境總表，研究模擬目的，針對現有的消防設備條件下，評估以細水霧取代撒水，配合 FFU 降載或停機來達成火災時環境改善（生命安全）、限制煙層流動範圍（財產安全），降低水損的效果（財產安全），模擬潔淨室火災之生命及財產評估性能基準參數如下表 8 生命安全與財產安全性能基準參數，依監測點位置判斷是否達到預期成果及對人員、現場環境危害之評估。

表 7 模擬情境總表

序	項目	情境描敘	排煙	撒水	細水霧 (取代撒水差異)	FFU狀態
						正常運作/停機/降載
1	情境1.1	危害性最高的火災情境(全煙損)	X	X	X	正常運作
2	情境1.2	火災發生時FFU正常運作(排煙動作)	0	0	X	正常運作
3	情境1.3	火災發生時FFU正常運作(排煙動作)	0	X	0	正常運作
4	情境2.1	火災發生時FFU降載運轉(排煙動作)	0	X	X	降載至50%
5	情境2.2	火災發生時FFU降載運轉(排煙動作)	0	0	X	降載至50%
6	情境2.3	火災發生時FFU降載運轉(排煙動作)	0	X	0	降載至50%
7	情境3.1	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	X	X	停機(降載至0%)
8	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	0	X	停機(降載至0%)
9	情境3.3	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	X	0	停機(降載至0%)
上述第一階段最佳結果進行火源高度修改(3公尺調整1公尺)、天花板下撒水頭防護間距修正(3公尺調整2公尺)						
序	項目	情境描敘	排煙	撒水	細水霧 (取代撒水差異)	FFU狀態
						正常運作/停機/降載
10	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作) 天花板下撒水頭防護間距修正 (3公尺調整2公尺) 火源高度修改(3公尺調整1公尺)	0	0	X	停機(降載至0%)
11	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作) 耐燃等級HEPA濾網(250℃)	0	0	X	停機(降載至0%)
12	情境3.3	火災發生時FFU停機(排煙動作) 耐燃等級HEPA濾網(250℃)	0	X	0	停機(降載至0%)
上述3種情境最佳結果進行修改細水霧K值至23.3、天花板下撒水頭用水量降至20LPM						
13	情境3.3	火災發生時FFU停機(排煙動作) 細水霧撒水頭的K值至23.3	0	X	0	停機(降載至0%)
14	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作) 天花板下撒水頭用水量降至20LPM	0	0	X	停機(降載至0%)
以上述序10-序14情境結果為基礎，進行模型火源高度修改，由機台頂部Z=4公尺調整至機台工作檯面Z=2公尺						
序	項目	情境描敘	排煙	撒水	細水霧 (取代撒水差異)	FFU狀態
						正常運作/停機/降載
15	情境3.1	火災發生時FFU停機(排煙動作) HEPA350℃、火源高度1公尺	0	X	X	停機(降載至0%)
16	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作) HEPA350℃、火源高度1公尺、 SPRKK值80	0	0	X	停機(降載至0%)
17	情境3.3	火災發生時FFU停機(排煙動作) HEPA350℃、火源高度1公尺、 MistK值23.3	0	X	0	停機(降載至0%)
X:未動作、0:動作						

資料來源：本研究整理



表 8 生命安全與財產安全性能基準參數

目標	監測點位置	性能基準參數	安全值	性能基準 資料來源引用說明
生命安全	中央通道上高度距高架地板上方1.8公尺處(人體身高) 監測點a:起火機台火源旁 距離0.5公尺處 (X=10m, Y=52.5m, Z=2.8m) 監測點b:防煙垂壁下緣處 (X=10m, Y=30m, Z=2.8m)	溫度	<60°C (H=1.8m)	簡賢文, 2013, 台灣公路隧道安全防護研究與政策推動(公路)長隧道防火安全研討會之中提出CO濃度為800PPM; SFPE, 「SFPE Handbook of Fire Protection Engineering」4th Edition, NFPA, 2008. 之中提出為1,500PPM, 本次評估採用較保守的800PPM標準做為評估基準參數, 其餘性能基準參數採用SFPE標準做為判斷。
		輻射熱	<2.5 kW/m <sup>2</sup>	
		CO 濃度	<800 ppm (H=1.8m)	
		能見度	>10 m (H=1.8m)	
財產安全 潔淨室污染範圍	防煙垂壁AP層、FAB層、RAP層 (X=10m, Y=30m, Z=0~7m)	煙層擴散範圍	煙層是否進入上回風層	以FFU HEPA是否燒穿及模擬數值觀察比較, 在潔淨室中煙層擴散的範圍。
		煙層擴散範圍	煙層是否進入第二防煙區劃	
		降低水損	細水霧能否在相同滅火條件下取代撒水頭	

資料來源：簡賢文 2013<sup>13</sup>，NFPA130 2000<sup>14</sup>及本研究整理

## 肆、模擬結果分析與評估

### 一、模擬案例火災風險分析

以初步危害分析 (PHA) 方法，以檢核表 A 物質危害檢核表、檢核表 B 物質相容性檢核表、檢核表 C 處理方法檢核表，經過檢核表 ABC 分析之後，再進行系統作用危害分析以定義出案例中的重大潛在危害區域。接著以 Dow F & EI (道氏火災爆炸指數) 中易燃性值火害等級區分，對廠區中使用量大存量、易燃性值等做排序，找出具有較大火災爆炸害風險的化學品，最後以半導體機台相對危害等級分析法，分析案例中溼式清洗機台潛在可能的火災危害因子，以下就火災風險分析說明如下表 9 檢核表 A：物質危害檢核表、表 10 檢核表 B：物質相容性檢核表、表 11 檢核表 C：處理方法檢核表：

<sup>13</sup> 簡賢文,〈台灣公路隧道安全防護研究與政策推動〉,於(公路)長隧道防火安全研討會,2013。

<sup>14</sup> NFPA, NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, NFPA, 2000.

異丙醇（IPA）閃火點 12°C，爆炸界限：2 Vol% ~12 Vol%，環境溫度 22°C，製程需求 IPA 操作需加熱並噴出霧化做為晶圓乾燥使用，依 NFPA 704 閃火點<60°C或製程操作溫度大於閃火點皆視為有重大危害。異丙醇（IPA）應避免之物質：鐵鹽、氫－鈹、強氧化劑、光氣。強氧化劑（例硝酸鹽、過氯酸鹽、過氧化物）：增加火災爆炸危害性。光氣：生成氯甲酸異丙酯和鹽酸。鐵鹽：發生爆炸性熱分解反應。氫－鈹：在空氣中混合會著火。強酸：可能劇烈反應。鹼金屬或鹼土金屬：可能釋出易燃毒體。異丙醇（IPA）易燃性液體會累積電荷，須考慮額外之設計以增加電導性。如所有桶槽、轉裝容器和管線都要接地，接地時必須接觸到裸金屬，輸送操作中，應降低流速，增加操作時間，增加液體留在管線中之時間或低溫操作。

表 9 檢核表 A：物質危害檢核表

檢核表A：物質危害檢核表 異丙醇(IPA)																						
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	毒性之危害			其他健康之危害												
			火災	爆炸	靜電		急性	慢性	致突 變性	燙傷/ 凍傷	窒息	腐蝕性	放射性	臭味	其它							
IPA(C3H8O)異丙醇	液體	512L	V	1	V	2	V	3	V	4	V	5	V	6	-	-	V	7	-	-		
EBC-200 光阻剝離劑	液體	510L	V	8	V	9	V	10	V	11	-	10	V	13	V	14	-	-	V	15	-	-
CRC-8300 光阻	液體	381L	V	16	V	17	V	18	V	19	V	20	V	21	-	-	V	22	-	-		
99.5% 乙醇 Ethanol	液體	600L	V	23	V	24	V	25	V	26	V	27	V	28	-	-	V	29	-	-		
NANO EBR PG	液體	485L	V	30	V	31	V	32	V	33	V	34	V	35	-	-	V	36	-	-		
ACETONE 丙酮	液體	417L	V	37	V	38	V	39	V	40	V	41	V	42	-	-	V	43	-	-		
SPACE LIQUID 光阻	液體	202L	V	44	V	45	V	46	V	47	V	48	V	49	-	-	V	50	-	-		

資料來源：本研究整理

異丙醇（IPA）常壓儲槽、氮氣壓送供應槽、化學品接泊系統 CCB、化學品傳輸系統 CTU、化學品供應系統 CDU、輸送管線其材質皆採用為 SUS 316，異丙醇（IPA）適用於 SUS 316 材質。

表 10 檢核表 B：物質相容性檢核表

檢核表B：物質相容性檢核表(異丙醇)													
化學物質	化學物質反應特性	苯乙烯-丁二烯橡膠SBR	天然橡膠NR	乙烯-丙烯橡膠EPDM	氟橡膠Viton	碳鋼C.S	PVC	氧化性物質	鋅/鍍鋅	SS 316	結構材質	化學物質	
IPA(C3H8O)異丙醇	-	-	-	-	?	1	-	-	-	-	-	IPA(C3H8O)異丙醇	
EBC-200 光阻剝離劑	-	-	-	-	-	-	V	2	V	3	V	4	EBC-200 光阻剝離劑
CRC-8300 光阻	-	-	-	-	-	-	V	5	-	V	6	-	CRC-8300 光阻
99.5% 乙醇 Ethanol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.5% 乙醇 Ethanol
NANO EBR PG	-	-	-	-	-	-	-	V	7	-	-	-	NANO EBR PG
ACETONE 丙酮	-	-	-	-	-	-	V	8	-	-	-	-	ACETONE 丙酮
SPACE LIQUID 光阻	-	-	-	-	-	-	V	9	V	10	V	11	SPACE LIQUID 光阻

資料來源：本研究整理

異丙醇（IPA）物料搬運與輸送：異丙醇（IPA）經由輸送管線裝卸閃火點 < 37.8°C 易燃性物料，須設置獨立緊急排氣系統，並可並導引至 Scrubber，對於異丙醇（IPA）洩漏防止方法，儲槽置於降板區內（相當於防液堤功能）並設有集液坑防止液體外洩或擴散污染，依公共危險物品管理辦法第 33 條閃火點易燃液體室內儲槽場所應設於一層建築物（平房）之儲槽專用室。

表 11 檢核表 C：處理方法檢核表

檢核表C：處理方法檢核表(異丙醇)															
品名	狀態	總量(庫存量/生產量)	儲存	運輸	處理	製程條件	工廠配置	區域分級	氣體排放	液體排放	噪音控制	品質控制	應變程序	公用設施	法規標準
IPA(C3H8O)異丙醇	液體	512L	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6	V 7	V 8	-	V 9	V 10	-	V 11
EBC-200 光阻剝離劑	液體	510L	-	-	V 3	V 12	V 13	-	V 14	-	-	V 9	V 10	-	-
CRC-8300 光阻	液體	381L	-	-	V 3	V 12	V 15	-	V 16	-	-	V 9	V 10	-	-
99.5% 乙醇 Ethanol	液體	600L	-	V 2	-	V 17	V 8	-	-	-	-	V 9	V 10	-	-
NANO EBR PG	液體	485L	-	-	V 3	V 18	V 9	-	V 19	-	-	V 9	V 10	-	-
ACETONE 丙酮	液體	417L	-	-	V 3	V 20	V 10	-	V 21	V 8	-	V 9	V 10	-	V 11
SPACE LIQUID 光阻	液體	202L	-	-	V 3	V 22	V 11	-	V 23	-	-	V 9	V 10	-	-

資料來源：本研究整理

經過檢核表分析之後，進行系統作用危害分析，如下表 12 初步危害分析 PHA-系統作用危害分析，以定義出案例中的重大潛在危害區域，依實際作業特性及相關製程，符合以下任一或數個條件，列為屬於重大潛在危害區域（符號說明：P：製程區中的最大操作壓力），異丙醇（IPA）閃火點 12°C，爆炸界限：2 Vol% ~12 Vol%，環境溫度 22°C，製程需求異丙醇（IPA）需加熱並噴出霧化做為晶圓乾燥

使用，若洩露異丙醇（IPA）濃度將在爆炸界限區間之內，異丙醇（IPA）輸送管線系統由氣動泵加壓至  $3 \text{ kg/cm}^2$  供應 Module tool，異丙醇（IPA）於溼式清洗機中為液態且有加熱裝置，綜上所述溼式清洗台區域屬有重大潛在危害區域。

表 12 初步危害分析 PHA-系統作用危害分析

相關製程實際作業特性評估項目	
<input type="checkbox"/>	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。
<input checked="" type="checkbox"/>	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)
<input type="checkbox"/>	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
<input checked="" type="checkbox"/>	系統壓力 $P \geq 2 \text{ kg/cm}^2$ ，因有壓力的情形下溶劑揮發速度較無壓力狀況超過一倍以上，且濃度亦會提高(註2)
<input checked="" type="checkbox"/>	若物質於製程設備為液態且有加熱裝置，因其加熱裝置若失控則極可能成為引燃火源或使蒸氣快速蒸發燃燒(註3)
符號說明：P 製程區中的最大操作壓力。	
註：	
1. IPA閃火點 $12^\circ\text{C}$ ，爆炸界限：2 Vol% -12 Vol%，環境溫度 $22^\circ\text{C}$ ，製程需求IPA操作需加熱並噴出霧化做為晶圓乾燥使用，若洩露濃度將在爆炸界限區間之內。	
2. 輸送管線系統由氣動泵加壓至 $3 \text{ kg/cm}^2$ 供應 Module tool。	
3. IPA於溼式清洗機台中為液態且有加熱裝置。	

資料來源：本研究整理

以 Dow F & EI（道氏火災爆炸指數）中易燃性值作為化學品火災等級區分，對廠區中使用量大存量大、易燃性值乘積做排序，找出具有較大火災爆炸害風險的化學品，研究案例中潔淨室採用化學品主要屬性為：光阻類別、有機類別、酸類別，依不同料號常用的品項共有 33 項，找出其中存量最大的七種並依火災爆炸危害指數（存量與易燃性值乘積）排序如下表 13：

表 13 統計廠區製程常用之化學品數量（加入 Nf 值並考量存量後排序）

品名	屬性存放	Nf(易燃性)	公共危險物品閃火點	月產量40K片時 存量(L)	Nf*存量口	火災爆炸 危害指數排序
IPA 異丙醇 SE 3.2L/BTL	有機	3	閃火點 $11.7^\circ\text{C}$ · 公危第一石油類 · 沸點/沸點範圍：81-83 $^\circ\text{C}$	512	1535	1
EBC-200;光阻剝離劑	光阻(常溫)	3	(閃火點 $32^\circ\text{C}$ · 公危第二石油類) · 沸點/沸點範圍：120 $^\circ\text{C}$	510	1530	2
CRC-8300 1Kg/BTL	光阻(冷凍)	4	(閃火點 $76^\circ\text{C}$ · 公危第三石油類) · 沸點/沸點範圍：無數據	381	1524	3
99.5% 乙醇 Ethanol (2.5 L/BTL)	有機	2	閃火點 $13^\circ\text{C}$ · 酒精類 · 沸點/沸點範圍：78.4 $^\circ\text{C}$	600	1200	4
NANO EBR PG (4L/BTL)	光阻(常溫)	2	(閃火點 $-6^\circ\text{C}$ · 公危第一石油類) · 沸點/沸點範圍：75 $^\circ\text{C}$	485	969	5
生產用物料-ACETONE 丙酮 EL GRADE, 1Gallon//BTL	有機	2	閃火點 $-20^\circ\text{C}$ · 公危第一石油類 · 沸點/沸點範圍：56 $^\circ\text{C}$	417	835	6
SPACE LIQUID (4L/Btl) (Nikka Seiko)	光阻(常溫)	2	(閃火點 $1^\circ\text{C}$ · 公危第一石油類) · 沸點/沸點範圍：無數據	202	404	7

資料來源：本研究整理

依據 NFPA704「半導體機台相對危害等級分析」主要考量五種危害因子：物質本質危害（立即的健康危害/物質火災爆炸本質危害）、蒸氣量、通風系統、製程危害、人員/設備財產曝露，以上述方法中危害因子：物質本質危害中物質火災爆炸本質危害，分析物質火災爆炸本質危害並針對儲存量大的化學品進行加權後排

序。Nf (易燃性) 值數值範圍介於 0~4，數值愈大代表火害危險性愈高、蒸氣量數值範圍介於 1~4，數值愈大代表蒸氣量危險性愈高、蒸氣量數值範圍介於 1~4，數值愈大代表蒸氣量危險性愈高、通風系統數值範圍介於 1~3，數值愈大代表通風系統危險性愈高、製程危害數值範圍介於 1~4，數值愈大代表製程危害危險性愈高、人員/設備財產曝露數值範圍介於 1~3 數值愈大代表製程危害危險性愈高，依照研究案例特性使用 IPA 溼式清洗機台區域彙整如下表 14 半導體機台相對危害等級分析表格-異丙醇 (IPA)，綜上所述，因此以製程上使用 IPA (異丙醇) 且製造材質以 PVC、PP 為主、並有加熱功能設備的 Wet Bench (溼式清洗台) 作為本次火災模擬的起火火源設定對象。

表 14 半導體機台相對危害等級分析表格-異丙醇 (IPA)

廠別	ABC 廠
評估人員	黎俊鑾
區域	6F 溼製程區域
可燃性物質	異丙醇 (IPA)
設備	濕式清洗台
	火災爆炸危害因子等級
1.物質火災爆炸本質危害 (Nf=0-4)	3
2.蒸氣量 (1-4)	4
3.通風系統 (1-3)	2
4.製程危害 (1-4)	4
5.人員/設備財產曝露 (1-3)	3
火災爆炸危害指數	288
火災爆炸危害等級 (0-4)	4
機台相對危害等級 (0-5)	5
機台危害程度	高度危害

資料來源：本研究整理

## 二、各情境火災擴散模型結果分析與評估

以溼式清洗台做為假定燃燒的火源設定，分為三階段共十七種模擬情境進行

模擬：

第一階段(序 1~序 9)：比較市面常用細水霧與模擬案例實設撒水差異(HEPA 採一般濾網 94°C<sup>15</sup>)。

第二階段(序 10~序 14)：探討消防設備調整後，達成 HEPA 不燒穿的設備參數調整。

第三階段(序 15~序 17)：以 FFU 不燒穿的參數設定為基礎，HEPA 耐燃等級，探討火源位置若調整至工作檯面高度(距高架地板一公尺)，火源為表面火災，觀察對人命安全基準的影響(火源高度愈低，產生的熱、煙對人體危害愈大)。

針對現有的消防設備條件下，評估以細水霧取代撒水，配合 FFU 降載或停機來達成火災時環境改善(生命安全)、限制煙層流動範圍(財產安全)，將第一階段九種模擬結果之中，各消防控制設備動作動作時間及滅火時間彙整如下表 15 控制設備動作時間彙整表格-第一階段序 1~序 9 模擬。

表 15 控制設備動作時間彙整表格-第一階段序 1~序 9 模擬

序	項目	偵煙探測器	排煙口 (Z1/Z2)		撒水頭		細水霧撒水頭		滅火時間	FFU						
		動作反應閾值(M) > 3.28 % O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> 動作時間 (s)	動作時間 (s)	動作順序 Zone1 =Z1 Zone2 =Z2	編號	動作時間 (s)	動作數量	編號	動作時間 (s)	動作數量	撒水/細水霧動作至熱釋率為 0 kW 時間(s)	第一防煙區(起火區) 1V=0.5445 m <sup>2</sup> /s 0.5V=0.2723 m <sup>2</sup> /s 0V=0 m <sup>2</sup> /s	FFU 降載開始時間 (s)	第一區(起火區)FFU燒毀編號順序及(燒毀秒數s)	FFU 燒毀台數目標 0台	第二防煙區(受影響區) 風速1V=0.5445 m <sup>2</sup> /s
1	情境 1.1	X	X		X		X		X	正常運作	無	FFU07(457a)>FFU04(474a)>FFU10(513a)>FFU05(520a)>FFU09(525a)>FFU06(521a)>FFU12(547a)>FFU08(648a)>FFU02(655a)>FFU13(670a)>FFU01(717a)	11台	正常運作		
2	情境 1.2	450(SD Y=55m)	470	Zone1	SPRK 106	476	1顆		X	514	正常運作	無	FFU06(468a)>FFU07(473a)	2台	正常運作	
3	情境 1.3	450(SD Y=55m)	470	Zone1	SPRK 227	566	1顆	MIST 106	476	1顆	594	正常運作	無	FFU06(468a)>FFU07(473a)>FFU10(518a)>FFU04(540a)	4台	正常運作
4	情境 2.1	453(SD Y=55m)	483	Zone1		X		X	X	降載至50%	453	FFU04(463a)>FFU09(466a)>FFU07(469a)>FFU10(516a)>FFU06(544a)>FFU05(568a)>FFU08(616a)>FFU12(638a)>FFU02(663a)>FFU01(711a)>FFU13(758a)>FFU11(833a)	12台	正常運作		
5	情境 2.2	453(SD Y=55m)	483	Zone1	SPRK 106	471	1顆		X	508	降載至50%	453	FFU04(463a)>FFU09(466a)>FFU07(469a)	3台	正常運作	
6	情境 2.3	453(SD Y=55m)	483	Zone1	SPRK 226	519	1顆	MIST 106	471	1顆	568	降載至50%	453	FFU04(463a)>FFU09(466a)>FFU07(469a)	3台	正常運作
7	情境 3.1	453(SD Y=55m)	483	Zone1		X		X	X	停機(降載至0%)	453	FFU04(463a)>FFU09(466a)>FFU07(469a)>FFU10(528a)>FFU06(541a)>FFU05(563a)>FFU12(612a)>FFU02(649a)>FFU08(666a)>FFU13(755a)>FFU11(775a)>FFU01(863a)	12台	正常運作		
8	情境 3.2	453(SD Y=55m)	483	Zone1	SPRK 106	471	1顆		X	507	停機(降載至0%)	453	FFU04(463a)>FFU09(466a)>FFU07(469a)	3台	正常運作	
9	情境 3.3	453(SD Y=55m)	483	Zone1	SPRK 226	494	1顆	MIST 106	471	1顆	540	停機(降載至0%)	453	FFU04(463a)>FFU09(466a)>FFU07(469a)	3台	正常運作

資料來源：本研究整理

在序 1 至序 9 九種情境模擬中，最快速達成滅火目標的是序 8 情境 3.2。將各

<sup>15</sup> U. E. P. Agency, "Air Pollution Cocntrol Technology Fact Sheet," 2009. [線上]. Available: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/mkb/documents/fcondnse.pdf>. 存取日期: 27 1 2023]



情境造成的危害，以性能基準標準做為檢核，序 1 情境 1.1 至序 9 情境 3.3 皆未造成人員危害的狀況，見下方表 16 模擬情境危害探討及分析彙整表-第一階段序 1~序 9 模擬，財產損失方面，若是撒水頭啟動的情境之中，由於滅火即時，皆可在煙層擴散至第二防煙區劃前完成滅火，由此可見，撒水設備在無塵室中是相當重要的防護設備，只要正常動作情況下，皆可將火源抑制於起火區域之中，模擬情境由於 FFU 燒穿後，煙進入上回風層後，上回風層沒有可以阻擋煙流設施，例如：防煙垂壁，所以在判斷財產安全時，考量煙是否進入上回風層，FFU 燒毀使煙層進入上回風層視為最嚴重的財產損失狀況，造成煙層於無塵室全區擴散的狀況發生。

表 16 模擬情境危害探討及分析彙整表-第一階段序 1~序 9 模擬

火勢情境:Wet Bench 10MW(V:符合安全標準)									
序	情境編號	設備		人體危害標準				財產危害標準	
				溫度	能見度	幅射熱	CO濃度	煙霧沒有進入第二防煙區劃	煙霧沒有進入上回風層位置
		消防設備	第二防煙區 FFU(運轉%)	<60°C	>10公尺	<2.5 kw/m <sup>2</sup>	<800 ppm		
1	1.1	無	100%	V	V	V	V	X	X
2	1.2	排煙+撒水	100%	V	V	V	V	V	X
3	1.3	排煙+細水霧	100%	V	V	V	V	V	X
4	2.1	排煙	50%	V	V	V	V	X	X
5	2.2	排煙+撒水	50%	V	V	V	V	V	X
6	2.3	排煙+細水霧	50%	V	V	V	V	V	X
7	3.1	排煙	0%	V	V	V	V	X	X
8	3.2 (HRR最快降至0kW)	排煙+撒水	0%	V	V	V	V	V	X
9	3.3	排煙+細水霧	0%	V	V	V	V	V	X

資料來源：本研究整理

序 1 情境 1.1 至序 9 情境 3.3 之中，FFU 燒毀的情形皆會發生，此一情況在模擬場景中，使得煙層最終的擴散狀況皆會進入上回風層，使得煙損範圍擴大，從人員危害的性能基準而言，無塵室消防防護較易達成人員防護此一目標，在財產防護而言，煙層進入上回風層時，FFU 燒毀視為最嚴重的財產損失狀況，造成煙層全區擴散的狀況，此一目標較難以在既設消防設備下達成。

第一階段各情境 900 秒的模擬時間終了，在人員避難高度（指距離高架地板 1.8 公尺的高度）各項的性能指標皆未超過危及生命安全基準性能，見下方九種情

境性能基準綜合分析折線圖說明如下：圖 4 序 1~序 9 情境.2 與情境.3 HRR 比較分析-財產防護-HRR 降至 0kW 時間。

情境.2 撒水群組 (SPRK) 以及情境.3 細水霧群組 (Mist) 熱釋率 (HRR) 皆可降至 0kW，其中以 FFU 降載至 0%，序 8-情境 3.2 (SPRK) 最快撲滅火勢，序 1 情境 1.1~序 9 情境 3.3 在生命安全基準指標在：能見度基準>10m、幅射熱基準<2.5kW/m<sup>2</sup>、CO 濃度基準<800 ppm、於監測點 a 數值量測皆無變化；在溫度基準<60°C 皆未

超過此一溫度基準，造成此一狀況的主因是 FFU 的燒毀，使得煙層集中在上回風層，並擴散至全區（上回風高度 H=5~7m），序 1 至序 9 模擬溫度變化見下方圖 5、圖 6。

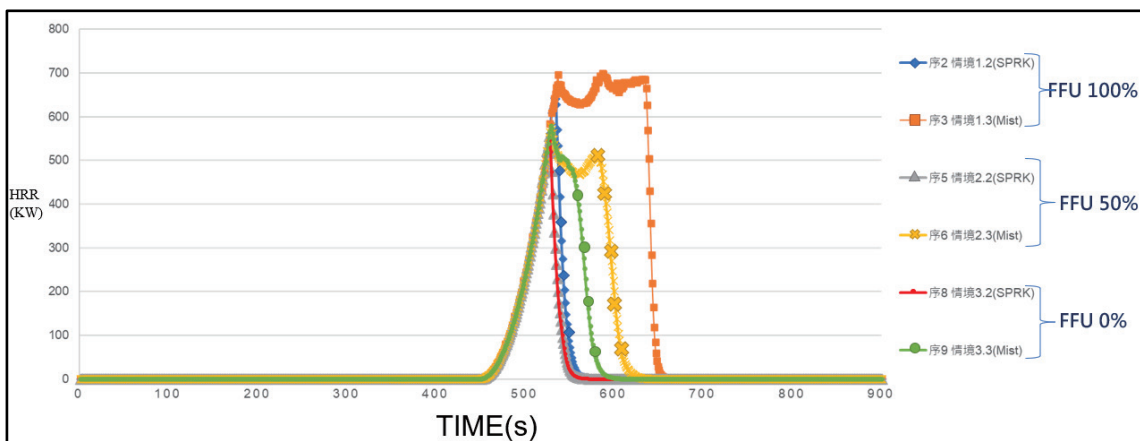


圖 8 序 1~序 9 情境.2 與情境.3 HRR 比較分析-財產防護-HRR 降至 0kW 時間



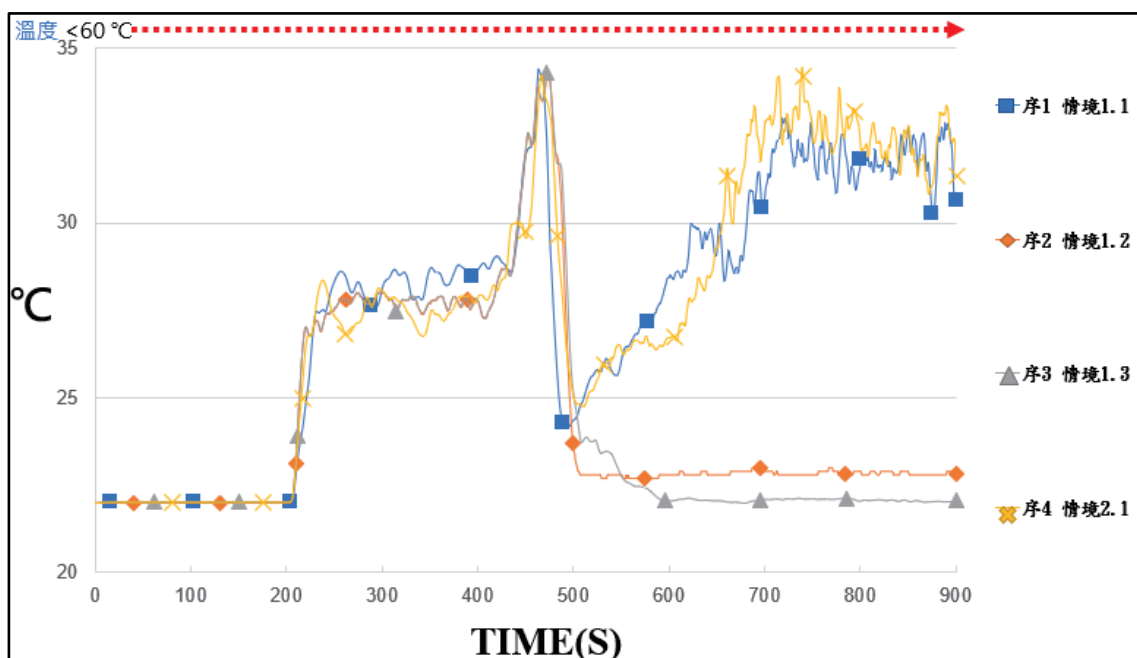


圖 9 危及生命安全基準性能分析溫度 $<60^{\circ}\text{C}$  (H=1.8 m) 序 1~序 4

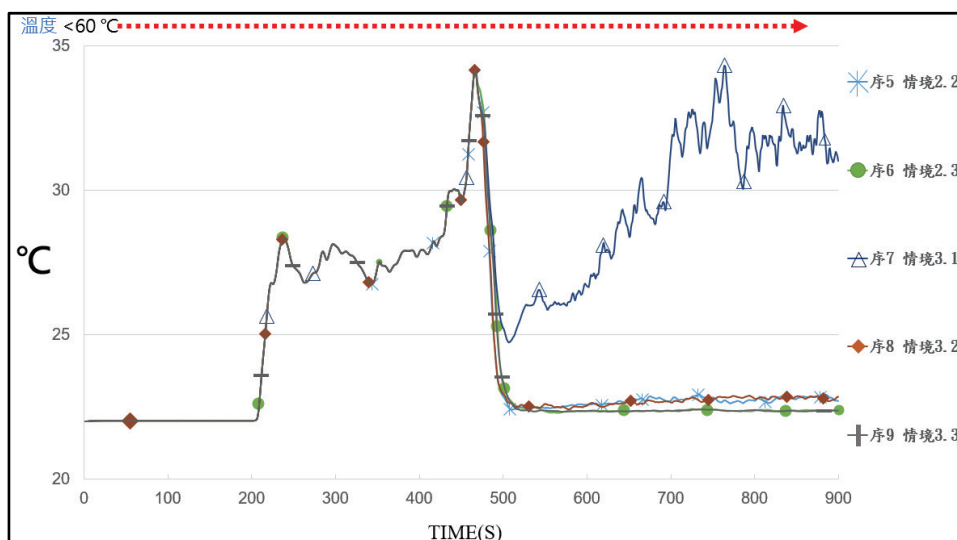


圖 10 危及生命安全基準性能分析溫度 $<60^{\circ}\text{C}$  (H=1.8 m) 序 5~序 9

第二階段模擬：序 10 至序 14，以第一階段模擬結果為基礎，提出耐燃 HEPA 濾網情境測試、細水霧流量特性係數  $K$  值提昇情境測試，第一階段模擬情境序 1 情境 1.1~序 9 情境 3.3 FFU HEPA 於模擬終了皆會發生燒毀的狀況，進行序 10 模擬，將火源位置由 Wet Bench 頂部 (H=3m) 移至 Wet Bench 工作檯面 (H=1m)，

仍會發生 FFU 燒毀的狀況，另一種嘗試，進行序 10 模擬調整撒水防護間距至 2 公尺時，由於動作的撒水頭與 3 公尺防護間距相較仍同樣為一顆撒水頭動作且火源高度在溼式清洗台頂端，在滅火前，仍會發生 FFU 燒毀煙層進入上回風層 AP 的狀況，見圖 7 序 10-天花板撒水頭間距改 2 米 FFU 燒毀情形 3D 平面圖說明。

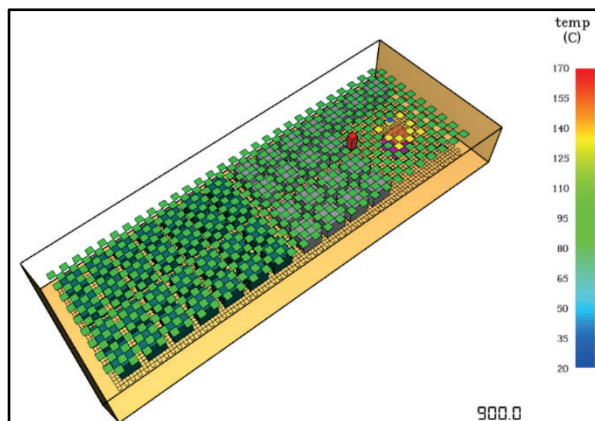


圖 11 序 10-天花板撒水頭間距改 2 米 FFU 燒毀情形 3D 平面圖

為了讓煙層能控制在 FAB 層中以侷限煙層的損害範圍，達到降低煙層擴散範圍以降低財損的目的，將 HEPA 濾網修正為耐燃等級(溫度 250°C)，來評估在 FAB 層煙控的可能性。進一步進行序 11 場景模擬，以情境 3.2 撒水動作為設定基礎，將 FFU 的 HEPA 濾網改為耐燃等級 (250°C)，市面已有多家廠商可提供經 UL900 認證耐燃等級 HEPA 濾網，在此時已可以達成在 FFU HEPA 濾網燒穿之前，撒水頭動作滅火，由於撒水及時抑制火勢，在此情境中的 900 秒模擬之中，並未出現 FFU 燒穿的情境發生，如下說明：圖 8 序 11-HEPA 濾網由 94°C 提昇至 250°C FFU 燒毀情形 3D 平面圖 (撒水情境)，火源及時撲滅，FAB 層未造成煙層擴散至第二防煙區劃的狀況發生。

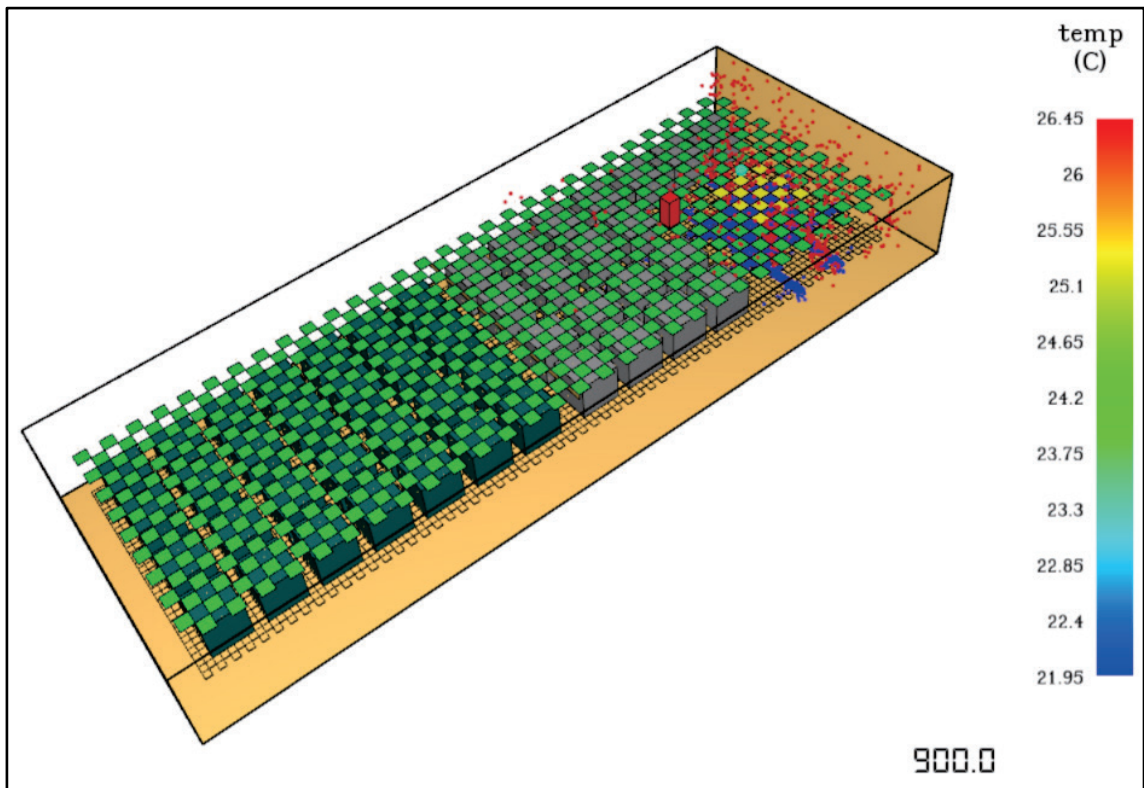


圖 12 序 11-HEPA 濾網由 94°C 提昇至 250°C FFU 燒毀情形 3D 平面圖 (撒水情境)

再以相同的 FFU HEPA 設定代入情境 3.3：HEPA 濾網由 94°C 提昇至 250°C，排煙動作、FFU 停機（降載至 0%）細水霧動作情境，進行序 12 場景情境模擬，仍會發生 FFU HEPA 濾網燒穿，煙層進入 AP 層使得樓板撒水頭動作後才達到火勢抑制的狀況，見下方圖 9 序 12-HEPA 濾網由 94°C 提昇至 250°C FFU 排煙動作、FFU 停機（降載至 0%）細水霧動作 FFU 燒毀情形 3D 平面圖

圖 9 序 12-HEPA 濾網由 94°C 提昇至 250°C FFU 排煙動作、FFU 停機（降載至 0%）細水霧動作 FFU 燒毀情形 3D 平面圖說明。

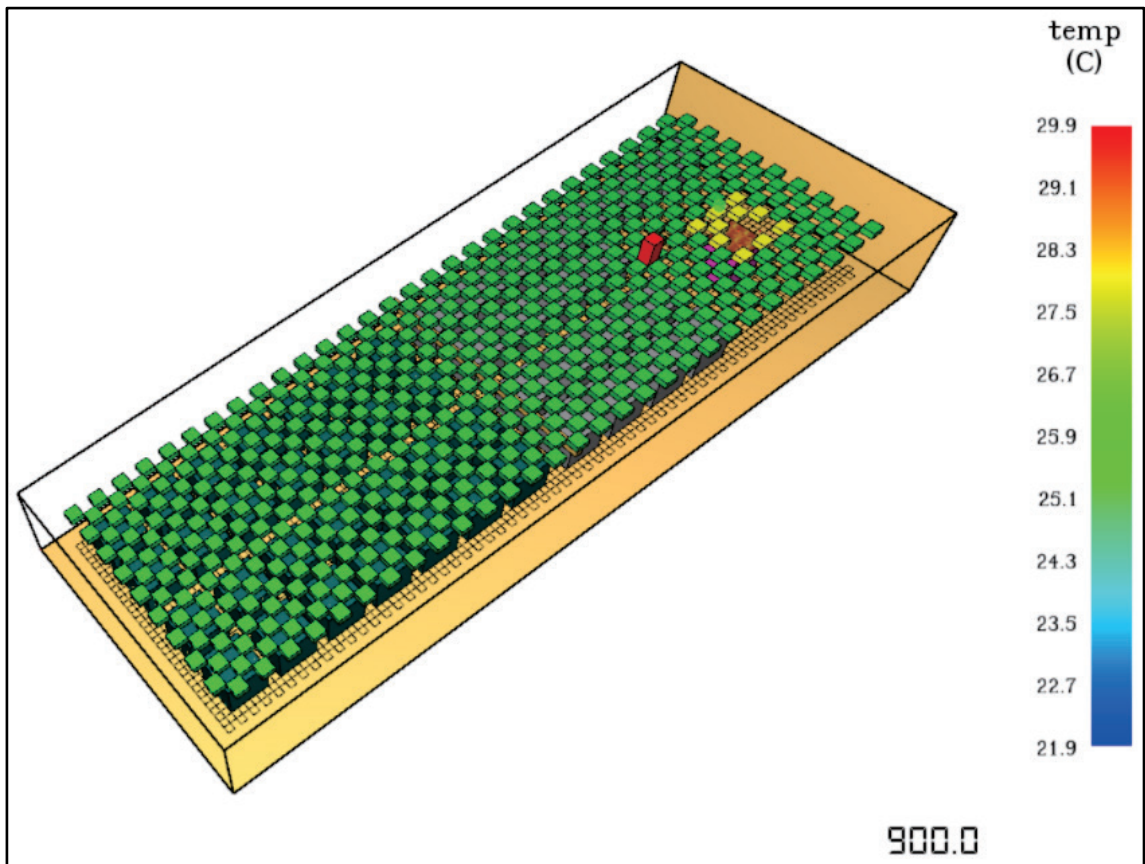


圖 13 序 12-HEPA 濾網由 94°C 提昇至 250°C FFU 排煙動作、FFU 停機 (降載至 0%) 細水霧動作 FFU 燒毀情形 3D 平面圖

依照第 12 次模擬的結果，進行第 13 次模擬，此時調整細水霧撒水頭流量特性係數 K 值至 23.3LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup> 時，在此設定下細水霧用水量與撒水頭用水量相同，每分鐘 80 公升的水量作用於火源，此時可滿足防護目標：FFU HEPA 濾網不燒毀的狀況下，即達到滅火控制，見下方圖 10 序 13-HEPA 濾網由 94°C 提昇至 250°C，細水霧 K 值由 5.6 提昇至 23.3 FFU 燒毀情形 3D 平面圖說明。

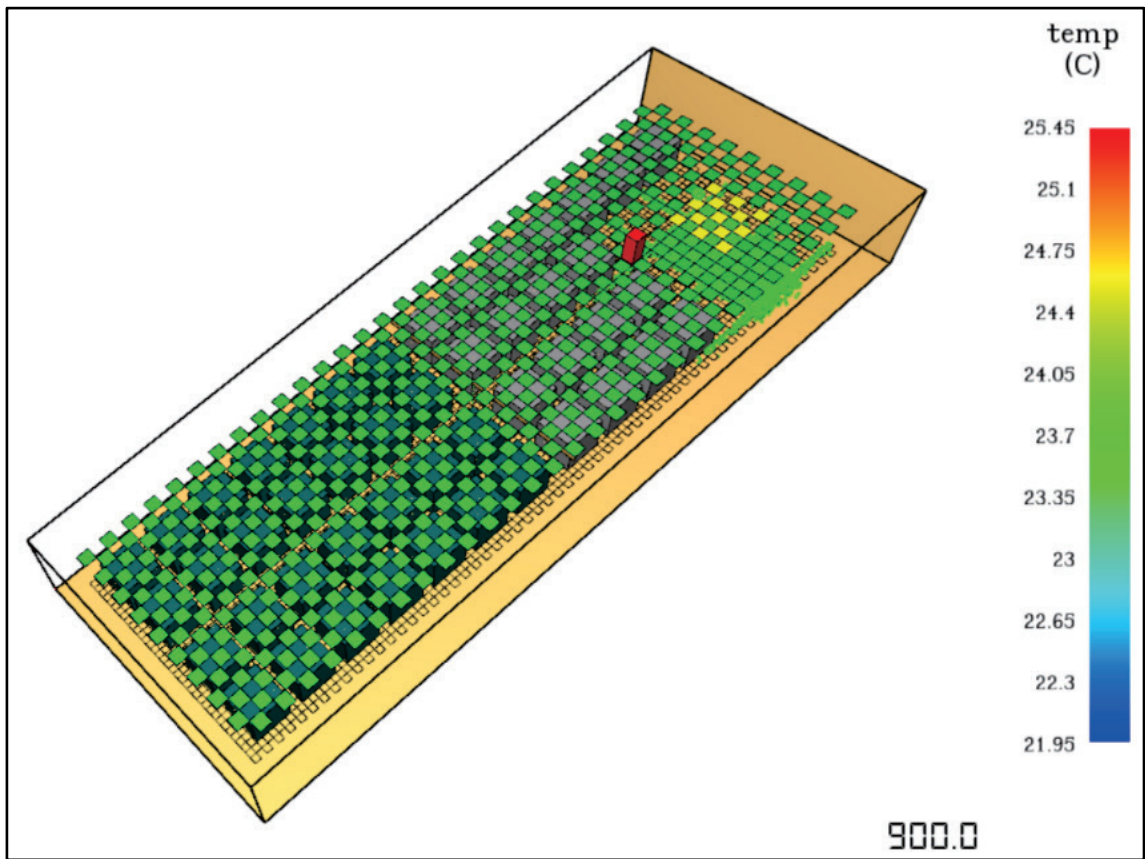


圖 14 序 13-HEPA 濾網由 94°C 提昇至 250°C，細水霧 K 值由 5.6 提昇至 23.3 FFU 燒毀情形 3D 平面圖

依照第 13 次模擬的結果，進行第 14 次模擬，此時調整撒水頭流量特性係數 K 值至  $20.2\text{LPM}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)^{1/2}$  時，在此參數設定下撒水頭用水量與未調整前的細水霧放射量相同，每分鐘 20 公升的水量作用於火源，此時亦可滿足防護目標：FFU HEPA 濾網不燒毀的狀況下，即達到滅火控制。

綜合上述幾種控制參數的調整，可以發現到，液滴的尺寸在火場中關鍵的影響因素，左右火源撲滅的關鍵變數：液滴尺寸、水量。使用  $1200\mu\text{m}$  液滴尺寸的撒水頭做為防護，或是使用  $300\mu\text{m}$  液滴尺寸的細水霧撒水頭做為防護，在 80LPM 的用水量下，都能得到在 507~514 秒之間即能夠滅火的模擬結果。在設計採用撒水頭形式時，考量液滴尺寸是相當重要的，另外做為滅火媒介的水源數量，放射水源量也要在一定數值以上，才能夠快速的壓制火場火源。

在相反的狀況之下，將撒水頭的用水量降至 20LPM 時，撒水頭情境仍可有效



滅火且不會有耐燃的 HEPA 濾網燒穿的情形發生，歸納而言，細水霧的作用方式接近氣體滅火，主要是作用在密閉空間內利用液滴霧化後的空氣排擠作用來抑制火勢，而潔淨室因有著潔淨度要求，須不斷進行補氣與 FFU 過濾風機運行，且潔淨室因為生產動線的連續性不設有隔間才不會阻隔生產動線，使得細水霧在這樣的環境條件下，無法發揮其氧氣排擠的滅火效果，在設計潔淨室撒水時，液滴粒徑是需要特別考量，避免過小的液滴尺寸隨無塵室流場飄散無法直接作用於火源而無法達到抑制火勢的目的，序 14 模擬結果見下方圖 11 說明。

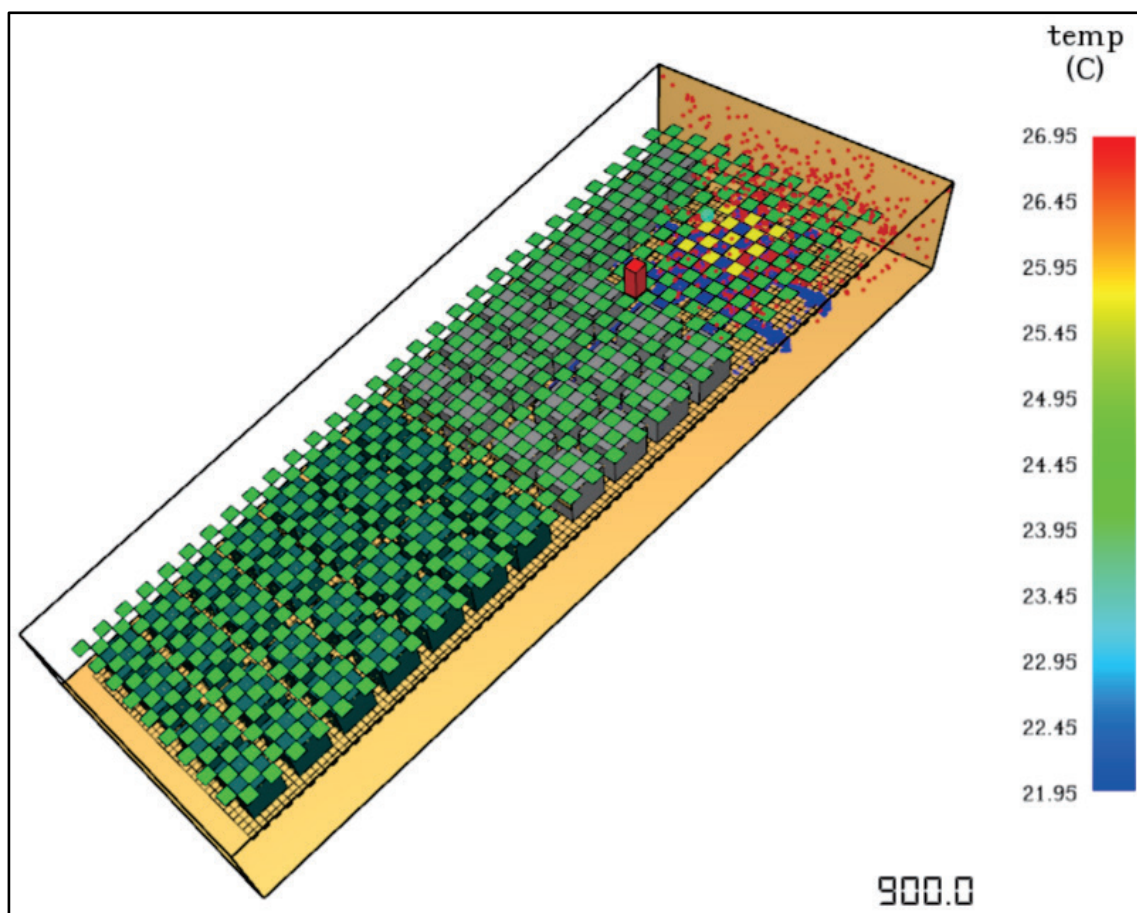


圖 15 序 14-撒水頭 K 值由 80 降低至 20.2 (LPM 同細水霧設定為 20LPM) FFU 燒毀情形 3D 平面圖

採用細水霧做為環境防護時，須考量放水量須可以比照撒水頭的水量 80LP 時，可以達成防護目標，而在採用撒水頭時，在模擬案例序 14 中，若要達到相同的滅火前題之下，其用水量可以比法規規定最小放水量還要更少，只要 20LPM。

實務上，即使無塵室撒水頭為優於設置標準要求以增加無塵室的安全性，用水量仍會參考相關國內外法規及規範對放水量的規定，將上述第 10 次至第 14 修正模擬參數結果彙整如表 17 調整模擬參數情境彙整表。

表 17 調整模擬參數情境彙整表

序	項目	情境描敘	排煙	撒水	細水霧 (取代撒水 差異)	FFU狀態		FFU 燒穿 煙層 全面 擴散
						正常運作/停機/降載	FFU是否燒毀	
1	情境1.1	危害性最高的火災情境(全煙損)	X	X	X	正常運作	是	
2	情境1.2	火災發生時FFU正常運作(排煙動作)	0	0	X	正常運作	是	
3	情境1.3	火災發生時FFU正常運作(排煙動作)	0	X	0	正常運作	是	
4	情境2.1	火災發生時FFU降載運轉(排煙動作)	0	X	X	降載至50%	是	
5	情境2.2	火災發生時FFU降載運轉(排煙動作)	0	0	X	降載至50%	是	
6	情境2.3	火災發生時FFU降載運轉(排煙動作)	0	X	0	降載至50%	是	
7	情境3.1	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	X	X	停機(降載至0%)	是	
8	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	0	X	停機(降載至0%)	是	
9	情境3.3	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	X	0	停機(降載至0%)	是	
上述第一階段最佳結果進行火源高度修改(3公尺調整1公尺)、天花板下撒水頭防護間距修正(3公尺調整2公尺)								
序	項目	情境描敘	排煙	撒水	細水霧 (取代撒水 差異)	FFU狀態	FFU狀態	調整火 源高度 撒水頭 間距
10	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	0	X	停機(降載至0%)	是	
		天花板下撒水頭防護間距修正 (3公尺調整2公尺)						
		火源高度修改(3公尺調整1公尺)						
11	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	0	X	停機(降載至0%)	否	FFU採 用 耐燃 HEPA
12	情境3.3	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	X	0	停機(降載至0%)	是	
		耐燃等級HEPA濾網(250°C)						
上述3種情境最佳結果進行修改細水霧K值至23.3、天花板下撒水頭用水量降至20LPM								
13	情境3.3	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	X	0	停機(降載至0%)	否	水霧量 提升
14	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	0	X	停機(降載至0%)	否	
天花板下撒水頭用水量降至20LPM								
以上述序10-序14情境結果為基礎，進行模型火源高度修改，由機台頂部Z=4公尺調整至機台工作檯面Z=2公尺								
序	項目	情境描敘	排煙	撒水	細水霧 (取代撒水 差異)	FFU狀態	FFU是否燒毀	火源 位置 降低
15	情境3.1	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	X	X	停機(降載至0%)	是	
		HEPA350°C、火源高度1公尺						
16	情境3.2	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	0	X	停機(降載至0%)	否	
		HEPA350°C、火源高度1公尺、 SPRKK值80						
17	情境3.3	火災發生時FFU停機(排煙動作)	0	X	0	停機(降載至0%)	否	
		HEPA350°C, 火源高度1公尺, MistK值23.3						

X:未動作、0:動作

第三階段模擬序 15 至序 17，以第二階段 HEPA 耐燃等級為基礎，火源為表面火災，調整火源高度至工作檯面（距高架地板 1 公尺處）觀察對人命安全基準的影響：

- (一) HEPA 提昇為耐燃等級(350°C)序 16-情境 3.2(FFU:0%+撒水:K 值 80 LPM/(kgf/cm2)<sup>1/2</sup>、水量 80LPM、放射壓力 1bar、粒徑 1200µm)，FFU 未發生燒穿，已完成滅火
- (二) HEPA 提昇為耐燃等級(350°C)序 17-情境 3.3 (FFU:0%+細水霧:K 值

流量特性係數  $23.3 \text{ LPM}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)^{1/2}$ 、水量 80LPM、放射壓力 12bar、粒徑  $300\mu\text{m}$ ) 細水霧放水量提昇後，FFU 未發生燒穿，已完成滅火，見下方圖 12 序 15~序 17FFU 燒毀情形 3D 平面圖說明。

第三階段模擬結果，序 17：情境 3.3 (Mist) 較序 16 更快撲滅火勢，序 17 情境 3.3 (Mist) 在 612 秒時熱釋率降至 0kW，序 16 情境 3.2 (SPRK) 則在 691 時熱釋率降至 0kW。模擬結果 FFU 燒穿的結果見下方圖 12 說明。

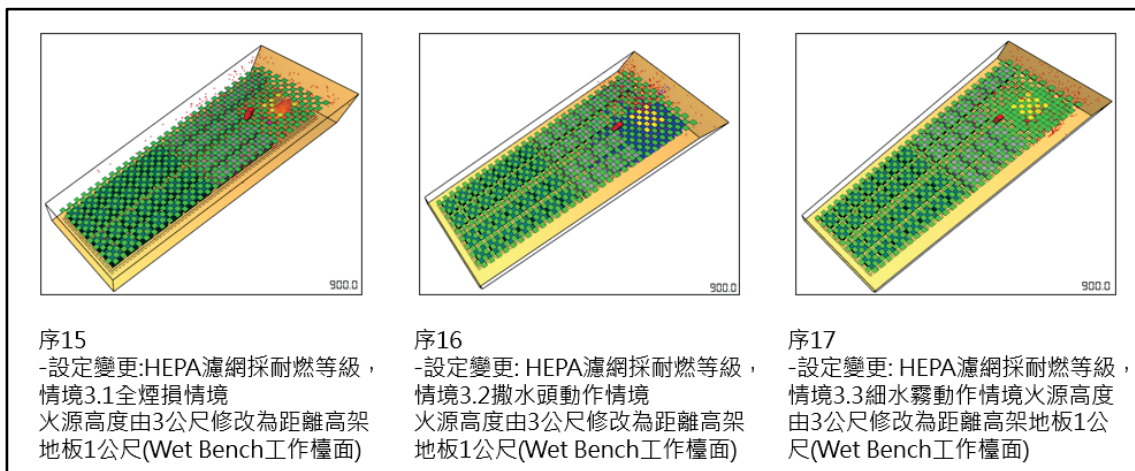


圖 16 序 15~序 17FFU 燒毀情形 3D 平面圖

序 15 至序 17 情境中，900 秒模擬時間終了，在人員避難高度（指距離高架地板 1.8 公尺的高度）部份，序 15 採用耐燃等級 HEPA 濾網無滅火設備抑制火源，在 580 秒出現超過生命安全溫度基準  $60^{\circ}\text{C}$ ，序 16 情境 3.2、序 17 情境 3.3 皆未出現超過生命安全溫度基準  $60^{\circ}\text{C}$ ，相同用水量下（80LPM），序 17 情境 3.3 細水霧溫度折線圖低於序 16 情境 3.2 撒水溫度折線圖，各項財產及生命安全基準的評估見下方圖 13 圖 14 圖 15 圖 16 圖 17 說明：



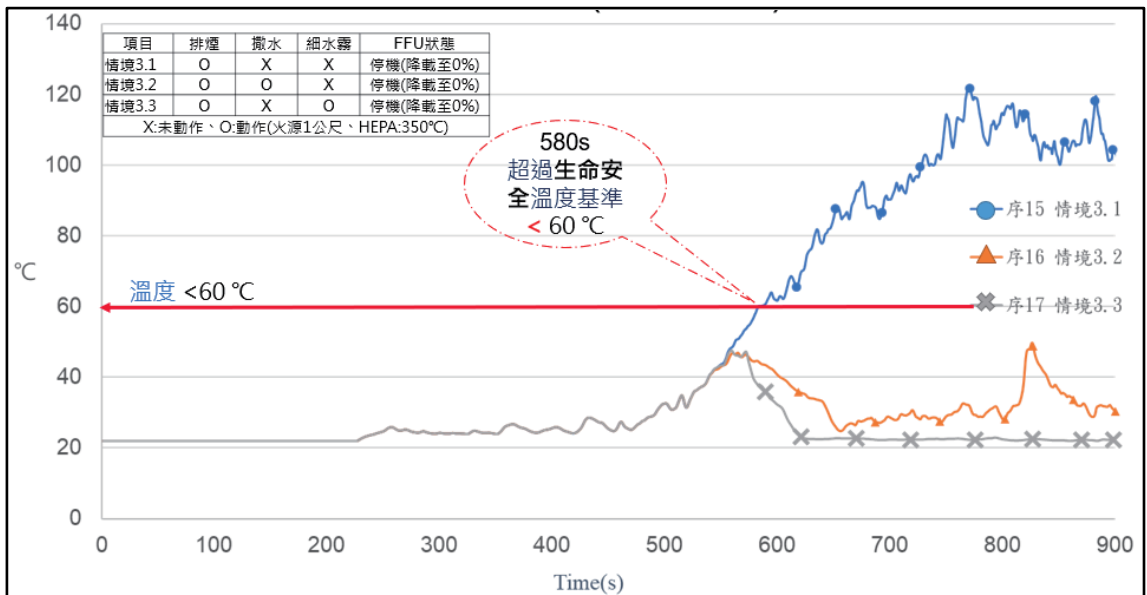


圖 17 序 15~序 17 HRR 比較分析-財產防護-HRR 降至 0kW 時間

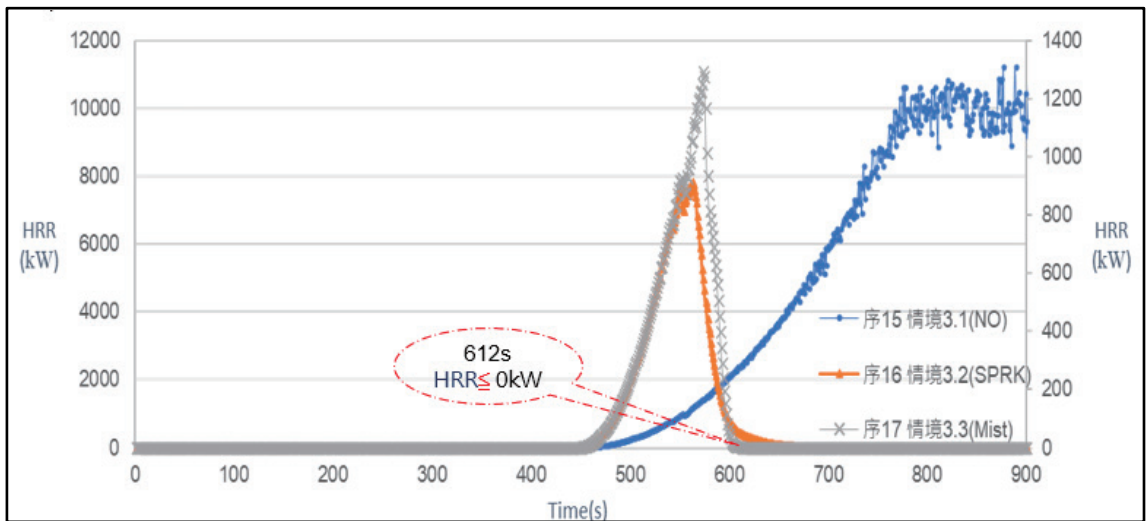


圖 18 序 15~序 17-生命安全基準性能分析溫度<60°C (H=1.8 m)

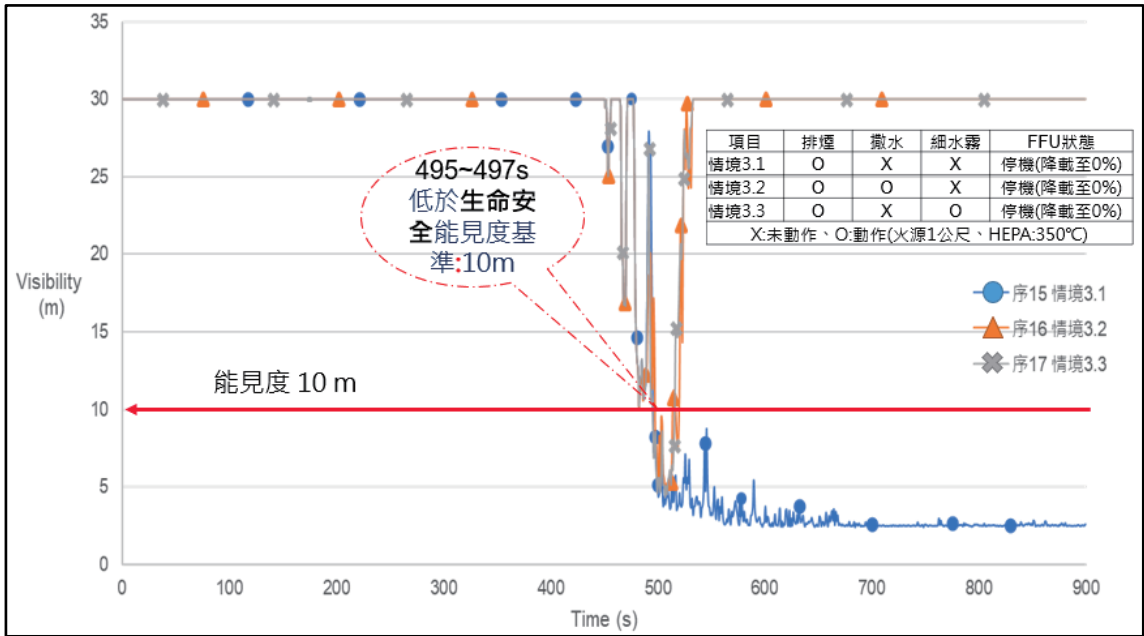


圖 19 序 15~序 17 生命安全基準性能分析：能見度>10 m (H=1.8 m)

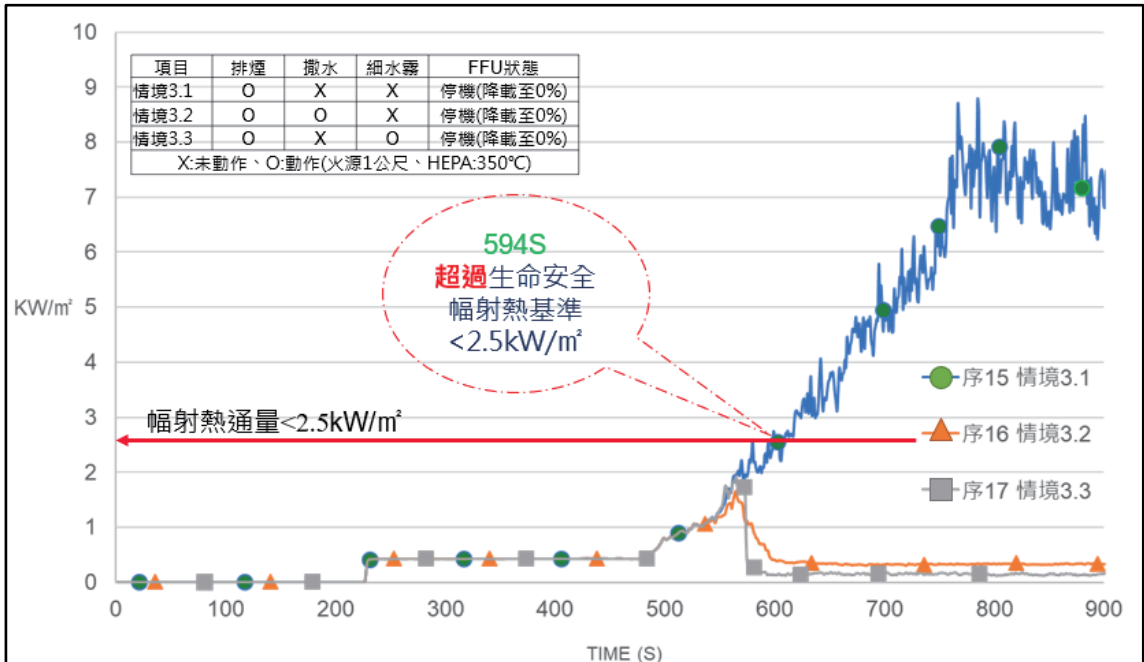


圖 20 序 15~序 17-生命安全基準性能分析輻射熱<2.5kW/m² (H=1.8m)

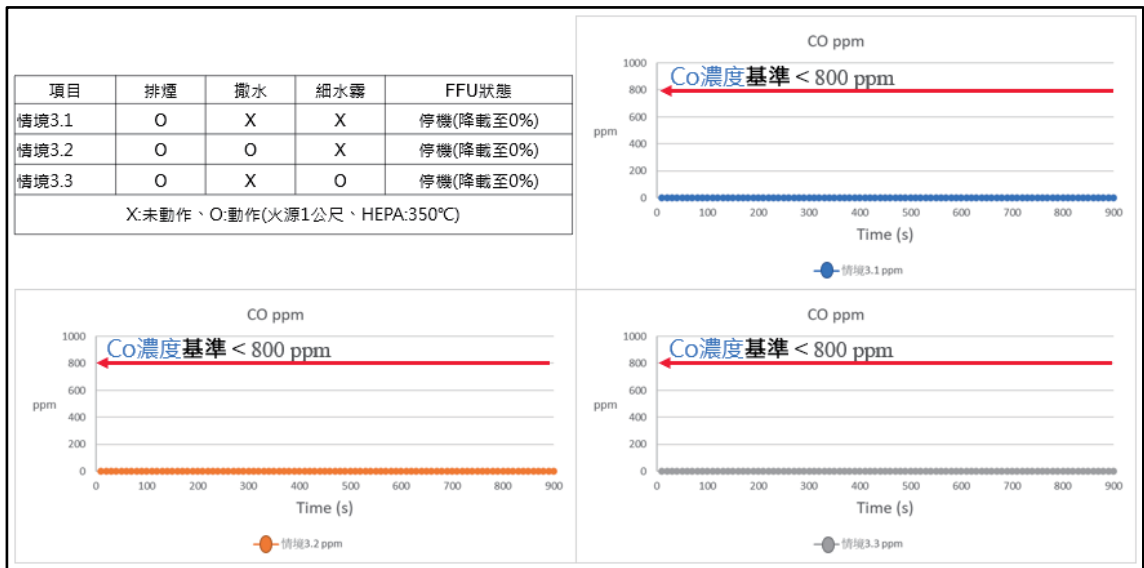


圖 21 序 15~序 17-生命安全基準性能分析 CO<800ppm (H=1.8m)

## 伍、結論與建議

### 一、結論

依據災例回顧，火災是潔淨室中造成損失最大的災害，損失由實質設備損失轉變為生產中斷損失，FM Global Report 2007~2017 統計資料指出火災所造成的經濟價值損失仍是潔淨室主要損失原因之一（佔 30.1%）。

以火災風險分析工具：初步危害分析、Dow F & EI（道氏火災爆炸指數）易燃性值火災爆炸危害等級區分、半導體機台相對危害等級分析，篩選出溼式清洗機台使用易燃性異丙醇（IPA）為主要火災風險。

進一步分析其它無塵室災例及案例公司近年災例，確認溼式清洗台以耐腐蝕 PP/PVC 製造且製程上附有加熱設備，使用多種化學品，逸散揮發時造成電器元件腐蝕短路問題，溼式清洗台為高風險機台。

以溼式清洗台做為火源進行火災模擬，分為三階段共十七種模擬情境進行模擬，第一階段：比較市面常用細水霧與模擬案例實設撒水差異（HEPA 採一般濾網 94°C）。第二階段：探討消防設備調整後，達成 HEPA 不燒穿的參數調整。

第三階段：探討火源位置若調整至工作檯面高度（距高架地板一公尺），火源為表面火災，觀察對人命安全基準的影響。歸納整理如下所述：

- (一) 第一階段，模擬中所規畫的三個類組(以起火區域 FFU 運轉狀態作為分類：100%、50%、0%)，共九種模擬情境進行模擬後，焦點主要在討論潔淨區廠房中火災模擬各消防及空調設備的動態關係等相關可控制參數，利用 FDS 來分析煙層及火勢延燒，採用：煙層下降高度、能見度、溫度等探測指標，火場控制分析部分，採用：機械排煙、細水霧、撒水頭、FFU 降載及停機等控制項。依起火區域不同 FFU 風速評估，第一類組為火災時不調整第一防煙區劃 FFU 風速(起火區)，此時煙層將受到下吹氣流擾動帶向下回風層(RAP)。第二類組為火災時調整第一防煙區劃 FFU 風速降載至 50% (起火區)，此時煙層受到下吹氣流擾動帶向下回風層(RAP)的下吹層流力道降低。第三類組為火災時調整第一防煙區劃 FFU 風速降載至 0%(起火區)，此時起火區煙將不受到下吹氣流擾動帶向 RAP 區，而停留在 FAB 層。
- (二) 第一階段模擬中，以細水霧進行火災抑制(序 3 情境 1.3、序 6 情境 2.3、序 9 情境 3.3，細水霧流量特性係數 K 值 5.82 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>、水量 20LPM、放射壓力 12bar、粒徑 300 $\mu$ m)單靠細水霧無法在第一時間中撲滅火勢，在 HEPA 濾網燒穿後，位於上回風層的樓板撒水頭動作後(流量特性係數 K 值 80 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>、水量 80LPM、放射壓力 1bar、粒徑 1200  $\mu$ m)，才能將熱釋率降至 0kW。第一階段模擬中 fastest 將 HRR 降至 0kW 為序 8 情境 3.2 (排煙動作、FFU 停機降載至 0%、撒水動作)。
- (三) 比較.2 撒水系列及.3 細水霧系列熱釋率下降差異，可看出 FFU 降載對細水霧影響較大，在 FFU 不同運轉比率(100,50,0%)，熱釋率(HRR)隨時間變化較大(細水霧滅火時)；FFU 降載對撒水頭影響較小，在 FFU 不同運轉比率(100,50,0%)，熱釋率(HRR)隨時間變化較小(撒水頭滅火時)。
- (四) 當 HEPA 無防火性能時，案例中排煙口設置於天花板，煙蓄積於上回風層、回風豎道時，無法利用排煙口排煙，若發生此一狀況時，在上回層及回風豎道增加排煙口可有效排煙，改善煙擴散。
- (五) 在 10MW 火源模擬下，序 1 情境 1.1 全煙損情境之下，在距離高架地板 1.8 公尺處，經過 900 秒(燃燒開始 700 秒)監測點 a 溫度皆未超過 60 $^{\circ}$ C，主要是因為 FFU 的燒毀使得煙層進入上回風層(AP)，相同的狀況也發生在序 2 情境 1.2~序 9 情境 3.3。而在 734 秒(燃燒開始 534 秒)時火源旁 0.5 公尺處達到最高溫度 110 $^{\circ}$ C (距高架地板 3 公尺處)，此時若無任何消防設備進行火場壓制，在無防煙垂壁阻擋煙層的上回風層、回風道，煙霧比 FAB

層更快速抵達第二防煙區劃。

- (六) 在滅火效果方面以水量較大的撒水頭設計 (80LPM、1200  $\mu\text{m}$ ) 能較細水霧 (20LPM、300  $\mu\text{m}$ ) 更快滅火，主因為細水霧液滴粒徑小易受火場熱流及無塵室空調流場的影響，無法直接作用於火源，在模擬情境之中的 10MW 大火情境熱流旺盛，通風良好流場變化快速的潔淨室環境之下。比較第一階段模擬 9 個場景中，最快達到熱釋率 (HRR) 降至 0kW 的情境為序 8 情境 3.2，在 507 秒即已達成滅火，第二階段模擬以序 8 情境 3.2 調整撒水頭間距、HEPA 修正為耐燃等級 (溫度 250°C)，來評估在 FAB 層進行煙控的可能性。
- (七) 第二階段，以序 8 情境 3.2 為基礎，HEPA 濾網改用具有耐燃認證 250°C，在序 11 模擬中，撒水頭可以達到在 FFU HEPA 燒穿前，撲滅火勢 (Fan Filter Unit 風機過濾單元機組簡稱 FFU、High-Efficiency Particulate Air 高效率空氣微粒濾網簡稱 HEPA)，侷限煙層於 FAB；相同耐燃認證 HEPA 濾網在序 12 細水霧情境下，則無法達到在 FFU HEPA 濾網燒穿前，撲滅火勢。若將細水霧水量比照撒水用水量時，序 13 細水霧情境 (細水霧流量特性係數 K 值 23.3 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>、水量 80LPM、放射壓力 12bar、粒徑 300  $\mu\text{m}$ ) 下也能撲滅火勢，反之，若撒水水量比照細水霧水量時，序 14 撒水情境之中 (撒水頭流量特性係數 K 值 20.2LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>、水量 20LPM、放射壓力 1bar、粒徑 1200  $\mu\text{m}$ ) 下亦能撲滅火勢。
- (八) 第三階段，HEPA 提昇為耐燃等級 (350°C) 進行序 16-情境 3.2 (FFU: 0%+撒水: K 值 80 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>、水量 80LPM、放射壓力 1bar、粒徑 1200  $\mu\text{m}$ )，FFU 未發生燒穿，已完成滅火。HEPA 提昇為耐燃等級 (350°C) 序 17-情境 3.3 (FFU: 0%+細水霧: K 值流量特性係數 23.3 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>、水量 80LPM、放射壓力 12bar、粒徑 300  $\mu\text{m}$ ) 細水霧放水量提昇後，FFU 未發生燒穿，已完成滅火。在相同用水量 80LPM 之下，細水霧滅火速度快於撒水。

## 二、建議

- (一) HEPA 濾網無防火性能時，模擬案例中排煙口設置於天花板，煙層蓄積於上回風道、回風豎道時，無法有效利用排煙口排煙，若發生此一狀況時，在上回層及回風豎道增加排煙口可有效排煙，改善煙層擴散。

- (二) FFU 燒毀後，煙層進入上回風層時，已無法運用 FFU 區域降載及排煙來進行煙層侷限，在火災初期降低火勢、採用耐燃 HEPA 顯得更為重要，使得 FFU 在不燒毀的狀況，進而可以進行 FAB 層煙控煙侷限調整。
- (三) 在相反的狀況之下，將撒水頭的用水量降至 20LPM 時，撒水仍可有效滅火且不會有耐燃的 HEPA 濾網燒穿的情形發生，歸納應為，細水霧的作用方式接近氣體滅火主要是作用在密閉空間內利用水霧化後的空氣排擠作用來抑制火勢，潔淨室因有潔淨度要求，須不斷進行補氣與 FFU 過濾風機運行，潔淨室因為生產動線的連續性不設有隔間阻隔生產動線，使得細水霧在這樣的環境條件下，無法發揮其氧氣排擠的滅火效果，在設計潔淨室滅火時，液滴粒徑是需要留意，避免過小的液滴尺寸隨流場飄散無法直接作用於火源而無法達到抑制火勢的目的。
- (四) 在起火區域將 FFU 降載至 0%或關機，有助於滅火設備即時動作，降低 FFU 下吹層流風對熱流影響，特別是細水霧影響更顯著
- (五) 在滅火方面，在流場較複雜的潔淨室中，以撒水頭相較於細水霧較快速達到滅火目的(撒水 K 值 80 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>、水量 80LPM、放射壓力 1bar、粒徑 1200  $\mu$ m)，細水霧易受流場影響無法直接作用於火源(細水霧 K 值 5.82 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>、水量 20LPM、放射壓力 12bar、粒徑 300 $\mu$ m)。
- (六) 若滅火方面採用細水霧時，放水量為設計重點，水量過小時無法滅火，若將水量修改為 80LPM (細水霧 K 值 23.3 LPM/ (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>、放射壓力 12bar、粒徑 300  $\mu$ m) 放水量等同撒水頭時，可達到耐燃等級 HEPA 燒穿之前，已降低熱釋率至 0kW 目標。
- (七) 模擬中火源設定皆為表面火災，第一階段及第二階段模擬火源位於機台頂端的外部燃燒，第三階段模擬火源位於機台工作檯面(距高架地板 1 公尺處)後續研究可針對深層火災進行相關模擬之研究。

## 參考文獻

- Agency Environmental Protection U.S. (2009). Air Pollution Control Technology Fact Sheet. 2023 年 1 月 27 日擷取自 U.S. Environmental Protection Agency: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/mkb/documents/fcondnse.pdf>
- Engineering Thunderhead. (2020 年 9 月 24 日). pyrosim-results-user-manual-2020-4.

- FMGlobal. (2003). Property Loss Prevention Data Sheets 7-7 17-12- SEMICONDUCTOR FABRICATION FACILITIES. Factory Mutual Insurance Company.
- FMGlobal. (2019). Property Loss Prevention Data Sheets. 美國: Global, FM.
- Lee, J. (2019). Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist. Nuclear Engineering and Technology, Nuclear Engineering and Technology 51, 410-423.
- NFPA. (2000). NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. NFPA.
- 中華民國內政部消防署, (105 年 11 月 7 日) 潔淨區消防安全設備設置要點, 擷取自中華民國內政部消防署全球資訊網。
- 中華民國內政部消防署 (110 年 6 月 25 日), 各類場所消防安全設備設置標準, 擷取自中華民國內政部消防署全球資訊網。
- 李立成 (2009 年 8 月號), 腐蝕性物質造成科技工廠濕式化學設備電器起火案例分析, 消防署月刊, 頁 72-78。
- 沈信錡 (2010), 防火性能式設計法應用於音樂廳之防火安全設計, 國立交通大學機械工程學系學術論文。
- 國際標準化組織 ISO (2015), ISO 14644-1:2015 潔淨室與相關的控制環境 - Part1 : 空氣中微粒與其空氣潔淨度分級。(ISO 14644-1:2015 Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration)
- 張力夫、張翼 (2016 年 11 月), 八吋晶圓廠濕式清洗機台安全性再探討與改善, 工業安全衛生月刊, 頁 17-39。
- 張文智 (2005), 台灣砷化鎵代工與矽晶圓代工產業差異及發展策略, 頁 20-27。
- 許敏郎 (2005), 高科技潔淨室防火設計與現行法規適用性之研究, 頁 5, 第二章 2.1 何謂潔淨室 (clean room)。
- 陳懋昆 (2013), 濕式清洗台 (Wet Bench) 消防安全監控系統之風險評估-以某半導體廠為例, 國立交通大學碩士論文。
- 簡賢文 (2013), 台灣公路隧道安全防護研究與政策推動, (公路) 長隧道防火安全研討會。
- 蔡綽芳、蔡匡忠、雷明遠、蔡銘儒、羅啟文、蘇崇輝、鐘偉庭、陳盈月 (2015)

建築物火災模擬工具應用參考指南之研究，內政部建築研究所。